



**แบบจำลองแบบการขุดเจาะความลาดเอียง  
และฐานรากของงานก่อสร้าง**

**โดย  
สง่า ตั้งชวาล**

**โครงการวิจัยเลขที่ 47G-MN-2539  
ทุนงบประมาณแผ่นดิน ปี 2539**

**สถาบันวิจัยและพัฒนาคณะวิศวกรรมศาสตร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
กรุงเทพฯ**

**พฤศจิกายน 2541**

สถาบันวิจัยและพัฒนาของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ไม่รับผิดชอบ  
ต่อผลเสียใด ๆ อันอาจเกิดจากการนำความคิดเห็นในเอกสาร  
ฉบับนี้ไปใช้ ความคิดเห็นที่ปรากฏในเอกสารเป็นความคิดเห็น  
ของผู้เขียนซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นความคิดเห็นของสถาบัน ฯ

การจำลองแบบการขุดเจาะความลาดเอียง  
และฐานรากของงานก่อสร้าง

โดย



รองศาสตราจารย์ ดร. สง่า ตั้งชवाल  
วุฒิ Ph.D. (Mining Engineering)

โครงการวิจัยเลขที่ 47G-MN-2539  
ทุนส่งเสริมงานวิจัยด้วยงบประมาณแผ่นดิน

สถาบันวิจัยและพัฒนาคณะวิศวกรรมศาสตร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
กรุงเทพฯ ฯ

พฤศจิกายน 2541

±18203140 ๑ ๔ ก.ค. 2542



กองส่งเสริมและประสานงานภาครัฐ  
ศูนย์ส่งเสริมและพัฒนาอาชีพ  
มอบให้หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
๒ / ๓.๗. / ๕๒



**การจำลองแบบการขุดเจาะความลาดเอียง  
และฐานรากของงานก่อสร้าง**

**EXCAVATION SIMULATION FOR  
SLOPE AND CONSTRUCTION FOUNDATION**

624. 15/36

नं 1520

ชื่อโครงการ การจำลองแบบการชดเชยความลาดเอียง  
และฐานรากของงานก่อสร้าง  
ชื่อผู้ดำเนินงาน รองศาสตราจารย์ ดร. สง่า ตั้งชวาล  
วันเดือนปี ที่ทำการวิจัย พฤศจิกายน 2541

## บทคัดย่อ

การจำลองแบบการชดเชยที่นำเสนอสำหรับการวิจัยโครงการนี้ เป็นการวิเคราะห์หาความเป็นไปได้ของการพังทลายสำหรับมวลสารของความลาดเอียงบนพื้นผิวดิน หรือของมวลสารได้ฐานรากระดับดิน วิธีการสำหรับการหาเสถียรภาพจะใช้การสมดุลเชิงจลจกจำกัดเป็นหลัก จากนั้นก็ใช้สูตรเชิงประสมการณที่มีนักวิจัยเด่นหลายท่านได้เสนอแนะ ทั้งนี้เพื่อหาค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยสำหรับรูปแบบสำหรับการพังทลายของการชดเชยชนิดหนึ่งหรือเพื่อหาค่าระยะการทรุดตัวของมวลสารภายใต้ฐานรากรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง ผู้วิจัยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนขึ้นมาเพื่อจำลองรูปแบบของการพังทลาย เพื่อหาค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพของงานก่อสร้าง โปรแกรมสำเร็จรูปที่เขียนนี้ใช้ภาษาแคลฟี มีการใช้งานผ่าน Windows ของเครื่องคอมพิวเตอร์ การใช้งานเป็นแบบที่ให้ผู้ใช้เลือกเมนูผลลัพธ์ของค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพหรือค่านัยสำคัญอื่นได้ระบุไว้ในตาราง บางโปรแกรมย่อยมีการเปรียบเทียบกราฟของค่าความสัมพันธ์ต่าง ๆ หรือแสดงรูปกราฟิกเชิงเรขาคณิตของหน้างานชดเชยภาคสนาม

Project Title: Excavation Simulation for Slope  
and Construction Foundation

Name of Investigator: Associate Professor Dr. Sanga Tangchawal

Month and Year: November 1998

### ABSTRACT

The simulation of excavation proposed in this report for this research project is to find the probability of failure occurred in the surface slope, or in the material underneath a shallow foundation. Methods for stability evaluation are based on the limit equilibrium after that the empirical formulas suggested by distinguished researchers are used. This application is to find the numerical number for factor of safety for a typical failure pattern of excavation, or to find the settlement distance of mass underneath a typical foundation. The researcher uses the written computer program for simulating the failure pattern and to find the stability number of construction site. The package program has been written by Delphi language and can be used through the Windows of computer. Its usage application is by selecting the menu. The results of stability number or other significant numerical numbers have been indicated in the listed table. Some sub-programs can compare various graphs of relationships or they can demonstrate a graphic picture of the geometrical form for the field excavation.



## คำนำ

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการ "การจำลองแบบการขุดเจาะความลาดเอียงและฐานรากของงานก่อสร้าง" ที่นำเสนอนี้ เป็นรายงานที่รวบรวมมาจากรายงานความก้าวหน้าฉบับแรกและรายงานความก้าวหน้าฉบับที่สอง และเพิ่มเติมเนื้อหาบางส่วนนอกเหนือจากที่ได้ระบุไว้ในรายงานความก้าวหน้า เพื่อให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น การวิจัยของโครงการนี้เป็นการวิเคราะห์หาผลลัพธ์การพังทลายสำหรับมวลสารที่อยู่บนพื้นผิวดิน เมื่อถูกเปลี่ยนแปลงสภาวะไป เนื่องจากมีการขุดเจาะ และยังเป็น การหาผลลัพธ์ของการพังทลายหรือการทรุดตัวได้ฐานรากระดับค้ำของฟุตคิงแบมพ์

หลักการในการหาความเป็นไปได้ของเสถียรภาพหน้างานก่อสร้างที่มีการขุดเจาะ จะทำการคำนวณด้วยวิธีการหาสมดุลแรงเชิงจืดจำกัด จากนั้นก็ใช้สูตรเชิงประสมการณ์ที่มีนักวิจัยเด่นหลายท่านที่ได้เสนอแนะในการหาค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย สำหรับรูปแบบของการขุดเจาะชนิดหนึ่ง ๆ หรือเพื่อหาค่าระยะการทรุดตัวของมวลสารภายใต้ฐานราก รูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง

การจำลองแบบของงานก่อสร้างนั้น ผู้วิจัยใช้วิธีเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับหาค่าปัจจัยความปลอดภัย โปรแกรมที่เขียนด้วยภาษา Delphi มีการทำงานผ่าน Windows ของเครื่องคอมพิวเตอร์ เมื่อต้องการใช้งาน ผู้ใช้เป็นผู้ใช้เลือกเมนูเพื่อป้อนข้อมูลเข้าไปในโปรแกรม เช่น ค่าตัวเลขคุณสมบัติมวลสาร หรือค่าระยะขนาดมิติของมวลสารที่ถูกปรับแต่งเป็นความลาดเอียง เป็นต้น เมื่อโปรแกรมได้รับค่าตัวเลขข้อมูลเข้าครบตามความต้องการแล้ว โปรแกรมก็จะทำการคำนวณหาค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพ หรือในบางกรณีมีการแสดงรูปภาพของหน้างานประกอบค่าผลลัพธ์ด้วย นอกจากนี้ในบางโปรแกรมย่อยได้มีการเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์หลายชนิด เป็นกราฟ เส้นโค้งหลายเส้นขนานรูปเดียวกันเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของงานก่อสร้างนั้น

๒ สว่าง

รองศาสตราจารย์ ดร. สว่าง ตั้งชวาล

พฤศจิกายน 2541

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความสนับสนุนทางการเงินและการติดต่อประสานงานวิจัยสำหรับโครงการ "การจำลองแบบการซุกเจาะความลาดเอียงและฐานรากของงานก่อสร้าง" ที่นำเสนอในรายงานฉบับสมบูรณ์นี้

ในงานการเก็บข้อมูลดินภาคสนาม ผู้วิจัยขอขอบคุณต่อวิศวกรและเจ้าหน้าที่ของเหมืองหินและเหมืองแร่หลายแห่งที่อำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย ในการวิจัยเพื่อจำลองแบบการซุกเจาะนี้ยังมีผู้ช่วยงานวิจัยหลายฝ่าย ทั้งในส่วนของ การตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลยและจัดลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์ผลเชิงกลศาสตร์ กับทั้งในส่วนของ การเขียนโปรแกรมสำเร็จรูป ซึ่งมีบุคลากรหลายท่าน ทั้งที่เป็นอาจารย์ประจำของคณะวิศวกรรมศาสตร์ กับอดีตนิสิตที่เคยศึกษาในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โปรแกรมแบบจำลองของการประเมินเสถียรภาพของการซุกเจาะ ได้เคยเขียนไว้แล้วบ้างแต่เป็นโปรแกรมที่ใช้การทำงานผ่าน DOS ของเครื่องคอมพิวเตอร์ ในส่วนที่นำเสนอในรายงานฉบับสมบูรณ์นี้ เป็นโปรแกรมภาษา Delphi มีการทำงานผ่าน Windows ที่เขียนโดย นายสุรชัย ลีพิทาเกียรติ วิศวกรโยธา ซึ่งเป็นผู้ช่วยวิจัยหลักในการสร้างโปรแกรมแบบจำลองขึ้นมาใหม่รวมทั้งดัดแปลงโปรแกรมแบบจำลองเก่าให้ดียิ่งขึ้น



## สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		II
คำนำ		III
กิตติกรรมประกาศ		IV
สารบัญ		V
รายการตาราง		X
รายการรูป		XIV
รายการสัญลักษณ์		XX
บทที่ 1	บทนำ	1
	1.1 หลักการและจุดประสงค์ของงานวิจัย	1
	1.2 ขอบเขตของงานการวิจัย	1
	1.3 รูปแบบของการเสนอผลงานวิจัย	2
บทที่ 2	การพังทลายแบบระนาบ	3
	2.1 เงื่อนไขการพังทลายแบบระนาบ	3
	2.1.1 เงื่อนไขหลัก	3
	2.1.2 เงื่อนไขประกอบ	4
	2.2 การพังทลายสำหรับความลาดเอียงที่ยาวมาก	4
	2.2.1 เสถียรภาพของความลาดเอียงที่ยาวมากและแห้ง	4
	2.2.2 เสถียรภาพความลาดเอียงที่ยาวมากและเปียก	7
	2.3 การพังทลายแบบระนาบของความลาดเอียงทั่วไป	8
	2.3.1 การพังทลายเนื่องจากน้ำหนักของมวลสารอย่างเดียว	8
	2.3.2 การพังทลายของมวลสารที่มีแรงค้ำน้ำอยู่ในระนาบ	10
	2.3.3 การหาค่าความสูงวิกฤตตามวิธีของ Culmann	10
	2.3.4 การพังทลายของมวลสารกรณีที่มีรอยแตกจากแรงค้ำเกิดขึ้น	12

2.4	การเสริมเสถียรภาพของความลาดเอียง	15
2.5	การพังทลายของมวลสารบนระนาบที่มีพื้นผิวขรุขระ	16
2.6	เสถียรภาพของความลาดเอียงกรณีที่เกิดแผ่นดินไหว	17
2.7	แนวทางใหม่ของอิทธิพลของระดับน้ำใต้ดินในความลาดเอียง	18
2.7.1	รูปแบบเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียงที่จมน้ำบางส่วน	18
2.7.2	ความสัมพันธ์ของการไหลของน้ำบาดาลแบบไฮเพอร์โบล่า	20
2.8	โปรแกรมแบบจำลองการพังทลายแบบวงกลม	21
2.8.1	แบบจำลองที่ใช้การวิเคราะห์ผลโดยตรง	21
2.8.2	แบบจำลองที่ใช้การวิเคราะห์ผลเชิงการเปรียบเทียบ	22
บทที่ 3	การพังทลายแบบวงกลม	38
3.1	หลักการวิเคราะห์การพังทลายแบบวงกลม	38
3.2	ชนิดของโหมดการพังทลายแบบวงกลม	40
3.3	วิธีการวิเคราะห์เชิงกลศาสตร์ของการพังทลายแบบวงกลม	42
3.3.1	การวิเคราะห์แบบวงกลมความเสถียรของ Fellenius	42
3.3.2	การวิเคราะห์ด้วยวิธีแบ่งส่วนมวลสารแบบธรรมดา	54
3.3.3	การวิเคราะห์ด้วยวิธีแบ่งส่วนมวลสารแบบของ Bishop	57
3.3.4	การวิเคราะห์ด้วยวิธีแบ่งส่วนมวลสารแบบของ Janbu	61
3.3.5	การวิเคราะห์แบบ non-linear criterion	64

3.4	โปรแกรมแบบจำลองการพังทลายแบบวงกลม	69
3.4.1	ตัวอย่างแบบจำลองตามวิธีการวิเคราะห์ผล ตามวิธีการของ Fellenius	70
3.4.2	ตัวอย่างแบบจำลองตามวิธีการวิเคราะห์ผล ตามวิธีการของ Bishop	70
3.4.3	ตัวอย่างแบบจำลองตามวิธีการวิเคราะห์ผล ตามวิธีการของ Janbu	70
3.4.4	ตัวอย่างแบบจำลองตามวิธีการวิเคราะห์ผล ตามหลักการของ Non-Linear	70
<b>บทที่ 4</b>	<b>การพังทลายแบบลิ่ม</b>	<b>76</b>
4.1	การวิเคราะห์การพังทลายรูปหลายเหลี่ยม	76
4.1.1	การหาเสถียรภาพของมวลรูปลิ่ม 2 บล็อก	76
4.1.2	การหาเสถียรภาพของมวลรูปหลายบล็อก ด้วยวิธีของ Sarma	79
4.1.3	การหาเสถียรภาพมวลสารรูปลิ่มบนพื้นผิว ด้วยวิธีของ Hoek et al.	87
4.2	โปรแกรมแบบจำลองการวิเคราะห์การพังทลายแบบลิ่ม	103
4.2.1	ชนิดของโปรแกรมการวิเคราะห์เสถียรภาพรูปลิ่ม	103
4.2.2	ตัวอย่างของการวิเคราะห์การพังทลายแบบลิ่ม	103
<b>บทที่ 5</b>	<b>การพังทลายแบบทอปเปิล</b>	<b>113</b>
5.1	รูปแบบการพังทลายแบบทอปเปิล	113
5.2	หลักการและเงื่อนไขของการวิเคราะห์การพังทลาย แบบทอปเปิล	114
5.3	ผลเฉลยเชิงประสมของการพังทลายแบบทอปเปิล	116
5.3.1	การกำหนดค่าคงที่และการหาค่าความสูงที่เกี่ยวข้อง แท่งบล็อกหิน	116
5.3.2	สมการที่เกี่ยวข้องกับระยะมิติของแท่งบล็อกหิน	118
5.4	กระบวนการคำนวณของการสมดุลแรงที่จำกัด	121
5.4.1	การหาค่ามุมเสียดทานภายในที่จุดสมดุลเชิงจำกัด	121
5.4.2	การหาค่าแรงภายนอกที่จะมาเสริมเสถียรภาพ	123

	หน้า
5.5 โปรแกรมแบบจำลองการวิเคราะห์การพังทลายแบบทอปเปิล	124
5.5.1 หลักการของโปรแกรมแบบจำลองการพังทลายแบบทอปเปิล	124
5.5.2 ตัวอย่างของการวิเคราะห์การพังทลายแบบทอปเปิล	124
<b>บทที่ 6 เสถียรภาพฐานรากระดับดิน</b>	<b>130</b>
6.1 หลักการทั่วไปในกรณีพิจารณาเรื่องฐานราก	130
6.2 การรับน้ำหนักของมวลสารต่อไหลคที่กระทำผ่านฐานราก	130
6.3 สมการเชิงประสมการณ์ของการคาดคะเนเพื่อหาค่ากำลังการรับน้ำหนัก	132
6.4 การแบกรับน้ำหนักของมวลดินเมื่อมีน้ำได้ดินเข้ามาเกี่ยวข้องกับ	139
6.5 สมการทั่วไปของการหาค่าความสามารถในการแบกรับน้ำหนัก	141
6.5.1 ตัวประกอบของความสามารถในการรับน้ำหนัก	142
6.5.2 ตัวประกอบอื่นที่มีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนัก	144
6.5.3 ค่าความสามารถในการรับน้ำหนักสุทธิ	144
6.6 ค่าปัจจัยความปลอดภัย	145
6.7 ผลเฉลยที่ไหลคเบื้องศูนย์กลางของฐานราก	146
6.8 ผลเฉลยที่ไหลคสองแนวเบื้องศูนย์กลางของฐานราก	149
6.9 การหาค่าการแบกรับน้ำหนักบรรทุกจากเครื่องมือทดสอบภาคสนาม	155
6.10 กรณีเฉพาะของการหาค่าความสามารถในการแบกรับน้ำหนักสูงสุด	157
6.10.1 ฐานรากบนชั้นดินเหนียว	157
6.10.2 ฐานรากบนชั้นดินทราย	160
6.11 การทรุดตัวของฐานรากแบบแผ่	162
6.11.1 การทรุดตัวของแบบทันทีทันใด	162
6.11.2 การทรุดตัวของฐานรากแบบทันทีทันใดเมื่อวางตัวบนดินเหนียวที่อิ่มตัว	164
6.12 การทรุดตัวอย่างทันทีทันใด เนื่องจากหลุมที่เบื้องศูนย์กลาง	168
6.13 การทรุดตัว เนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ	169
6.14 ระยะการทรุดตัวของอาคารที่ยอมให้ได้	172

	หน้า
6.15 โปรแกรมแบบจำลองการวิเคราะห์ฐานรากระดับดิน	175
6.15.1 โปรแกรมการหาค่าการแบกรับน้ำหนักสูงสุด ของมวลสาร	176
6.15.2 โปรแกรมการหาค่าระยะการทรุดตัวของมวลสาร ได้ฐานราก	181
บทที่ 7 บทสรุปของแบบจำลองการหาเสถียรภาพ	188
7.1 หลักการทั่วไปของโปรแกรมการวิเคราะห์เสถียรภาพ	188
7.1.1 แนวทางการเขียนโปรแกรม	188
7.1.2 วิธีการใช้โปรแกรมแบบจำลอง	189
7.1.3 แนวทางการใช้โปรแกรมย่อยที่คำนวณ หาเสถียรภาพ	189
7.2 ข้อจำกัดของการใช้โปรแกรมแบบจำลอง	189
บรรณานุกรม	191
ภาคผนวก ตาราง Conversion Factor ระหว่าง ระบบ Imperial กับ ระบบ S.I.	196

## รายการตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	ข้อมูล เข้าสำหรับตัวอย่างการแก้ปัญหาค่าการพังทลายแบบระนาบที่มีความลาดเอียงที่มีระยะมิติน้ำยาวมาก	23
ตารางที่ 2.2	ข้อมูล เข้าสำหรับตัวอย่างการแก้ปัญหาค่าการพังทลายแบบระนาบที่มีความลาดเอียงที่มีระยะมิติน้ำจำกัด	23
ตารางที่ 2.3	ข้อมูล เข้าและค่าผลลัพธ์ สำหรับตัวอย่างการแก้ปัญหาค่าการพังทลายแบบระนาบที่หาค่าไหลลดการเพิ่มเสถียรภาพโดยตรง	25
ตารางที่ 2.4	ข้อมูล เข้าและค่าผลลัพธ์ สำหรับตัวอย่างการแก้ปัญหาค่าการพังทลายแบบระนาบที่หาค่าการตัดแนวเอียง เทของ ความลาดที่ค่าปัจจัยความปลอดภัยค่าหนึ่ง (สมมุติให้เท่ากับ 1.3)	26
ตารางที่ 2.5	ข้อมูล เข้าสำหรับตัวอย่างการแก้ปัญหาค่าการพังทลายแบบระนาบที่มีการเปิดหน้าดินหรือเหมืองหินเป็นแบบขั้นบันได โดยที่มวลความลาดมีรอยแตกจากแรงดึงที่เกิดบนพื้นผิวส่วนบนของตะพัก	27
ตารางที่ 2.6	ข้อมูล เข้าของค่าคุณสมบัติวัสดุกับค่าระยะมิติน้ำของความลาดเอียง ในกรณีที่มีการตัดหน้างานการขุดเจาะแบบขั้นบันไดมีหลายตะพัก	30
ตารางที่ 2.7	ข้อมูลคืบของระยะมิติน้ำความลาดเอียง และคุณสมบัติของมวลดิน	31
ตารางที่ 2.8	ข้อมูลคืบของระยะมิติน้ำความลาดเอียง และคุณสมบัติของมวลดินที่มีการเสริมเสถียรภาพหลายวิธีการที่มีผลต่อค่าปัจจัยความปลอดภัย	34
ตารางที่ 3.1	ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางวงกลม สำหรับการพังทลายแบบ toe circle ที่มุมเอียงเทน้อยกว่า 53 องศา	49
ตารางที่ 3.2	ค่าคงที่เชิงประสมการณ์ของคุณสมบัติวัสดุที่มีพฤติกรรม การแตกหักไม่ใช่มอดูลัสคิกเชิงเส้นโดยตรง (non-linear)	66-67
ตารางที่ 3.3	คุณสมบัติมวลสาร ค่ามิติน้ำต่าง ๆ ของความลาดเอียง และผลการวิเคราะห์ด้วยการแบ่งส่วนแบบธรรมดา และใช้หลักการของ Fellenius	71
ตารางที่ 3.4	คุณสมบัติมวลสาร ค่ามิติน้ำต่าง ๆ ของความลาดเอียง และผลการวิเคราะห์ด้วยการแบ่งส่วน ตามแนวทางที่เสนอแนะโดย Bishop	71



		หน้า
ตารางที่ 3.5	คุณสมบัติมวลสาร ค่ามิติต่าง ๆ ของความลาดเอียง และผล การวิเคราะห์ด้วยการแบ่งส่วน ตามแนวทางที่เสนอแนะ โดย Janbu	73
ตารางที่ 3.6	คุณสมบัติมวลสาร ค่ามิติต่าง ๆ ของความลาดเอียง และผล การวิเคราะห์ตามการตั้งสมมุติฐานให้มวลสารมีพฤติกรรม แบบไม่ใช่อีลาสติก	73
ตารางที่ 4.1	แรงต่าง ๆ มุมเอียงและแนวทิศทางที่แรงกระทำบน มวลสารรูปสี่เหลี่ยม	99
ตารางที่ 4.2	ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้สำหรับการแตกแรง	100
ตารางที่ 4.3	ข้อมูลที่ป้อน เข้าไปในโปรแกรม และค่าแรงเสริมเสถียรภาพ ที่คำนวณได้จากโปรแกรม	103
ตารางที่ 4.4	ค่าคุณสมบัติมวลสารที่ใช้เป็นตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วย วิธี Sarma	104
ตารางที่ 4.5	ข้อมูลเข้าที่ป้อน เข้าไปในโปรแกรม (ตารางใหญ่ 2 ชุด) เพื่อคำนวณเสถียรภาพตามวิธีของ Sarma ผลการคำนวณ ได้แสดงไว้ในตารางเล็กล่างสุด	106
ตารางที่ 4.6	ข้อมูลชุดแรกที่ป้อน เข้าไปในโปรแกรมการคำนวณเสถียรภาพ ของมวลสารที่มีการพังทลายแบบรูปสี่เหลี่ยม โดยที่ไม่มีค่าแรงภายนอก ผลลัพธ์ของการคำนวณค่าตัวเลขเสถียรภาพอยู่ในตารางเล็ก	111
ตารางที่ 4.7	ข้อมูลชุดแรกที่ป้อน เข้าไปในโปรแกรมการคำนวณเสถียรภาพ ของมวลสารที่มีการพังทลายแบบรูปสี่เหลี่ยม โดยใช้แรงภายนอก เพื่อเพิ่มค่าตัวเลขเสถียรภาพให้เท่ากับ 2.00 ผลลัพธ์ของ แนวทิศทางและขนาดของแรงเสริมอยู่ในตารางเล็ก	112
ตารางที่ 5.1	ข้อมูลเข้าของการคำนวณเสถียรภาพความลาดเอียงที่ประกอบด้วย แท่งบล็อกหินที่มีการพังทลายแบบทอปเบิล (ตามโจทย์ตัวอย่าง)	127
ตารางที่ 5.2	ผลลัพธ์ของการคำนวณเสถียรภาพความลาดเอียงที่ประกอบด้วย แท่งบล็อกหินที่มีการพังทลายแบบทอปเบิล (ตามโจทย์ตัวอย่าง)	128
ตารางที่ 6.1	ค่าของตัวประกอบเชิงการแบกรับน้ำหนัก เมื่อรับโหลดนอกที่พ ใช้กับกรณีของการพังทลายแบบเฉือนทั่วไป	136
ตารางที่ 6.2	ค่าของตัวประกอบเชิงการแบกรับน้ำหนักที่ปรับปรุงใหม่ ใช้กับกรณีของการพังทลายแบบเฉือนเฉพาะแห่ง	137

	หน้า
ตารางที่ 6.3 ค่าของตัวประกอบเชิงการแมกรับน้ำหนักที่ปรับปรุงใหม่สำหรับสมการของ Meyerhof (สมการที่ 6.18)	141
ตารางที่ 6.4 ผลเฉลยของค่าตัวประกอบเชิงรูปร่าง ความลึก และแนวเอียงเท่ากับไหลค	143
ตารางที่ 6.5 ค่าตัวเลขเชิงอิลาสติกของดินที่หยาบ	167
ตารางที่ 6.6 ค่ามุมของการบิดเบี้ยว ( $\eta$ ) ที่มีศักยภาพต่อการเกิดความเสียหายต่อโครงสร้าง เมื่อการทรุดตัวมีการเอียง	173
ตารางที่ 6.7 เกณฑ์ที่ยอมให้ ได้สำหรับโครงสร้างที่ขึ้นอยู่กับมุมของการบิดเบี้ยว (ตารางที่ 6.7 a) กับเกณฑ์ที่ยอมให้ ได้สำหรับอาคารโครงสร้าง เมื่อเทียบกับอัตราส่วนระยะโค้งโครงสร้าง (ตาราง 6.7b)	174
ตารางที่ 6.8 เกณฑ์ที่ยอมให้ ได้สำหรับอาคารโครงสร้างหลายรูปแบบ เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของระยะการทรุดตัว	174
ตารางที่ 6.9 ตัวอย่างของข้อมูลที่ป้อนเข้าและผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมการคำนวณ ในกรณีนี้เป็นการสมมุติว่าไหลคกระทำผ่านศูนย์กลางของฐานราก ซึ่งแนวของไหลคจะอยู่ในแนวตั้งหรืออยู่ในแนวทำมุมเอียงกับแนวตั้งก็ได้	176
ตารางที่ 6.10 ตัวอย่างของข้อมูลที่ป้อนเข้าและผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมการคำนวณ ในกรณีนี้เป็นเรื่องไหลคกระทำผ่านเยื้องศูนย์กลางของฐานราก 2 แนว โดยใช้พื้นที่ประสิทธิผลช่วยคำนวณค่ากำลังการแมกรับน้ำหนักสูงสุด	176
ตารางที่ 6.11 ข้อมูลพิเศษชุดแรกที่ป้อนเข้า ไปในโปรแกรมการคำนวณ กำหนดให้ฐานรากเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนชั้นดินเหนียว 2 ชั้น ดินเหนียวชั้นบนเป็นดินเหนียวอ่อน ดินเหนียวชั้นล่างเป็นดินเหนียวแข็ง	179
ตารางที่ 6.12 ข้อมูลพิเศษชุดสองที่ป้อนเข้า ไปในโปรแกรมการคำนวณ กำหนดให้ฐานรากเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางบนชั้นดินทราย ชั้นดินชุดบนเป็นดินทราย ส่วนชั้นดินชุดล่างเป็นดินเหนียวอ่อน	180
ตารางที่ 6.13 ข้อมูลที่ป้อนเข้า ไปในโปรแกรมและผลลัพธ์ที่ได้จากการการคำนวณ สำหรับฐานรากที่วางควมมวลดิน แล้วเกิดการทรุดตัวอย่างทันทีทันใด	182

ตารางที่ 6.14	ข้อมูลที่ป้อนเข้าไปในโปรแกรมและผลลัพธ์ที่ได้จากการ การคำนวณ สำหรับฐานรากที่วางด้วยมวลดินเหนียวที่ อึดตัว แล้วเกิดการทรุดตัวอย่างทันทีทันใด	182
ตารางที่ 6.15	ข้อมูลที่ป้อนเข้าไปในโปรแกรมและผลลัพธ์ที่ได้จากการ การคำนวณ สำหรับฐานรากที่วางด้วยมวลดินทราย กำหนดให้มีระยะการทรุดตัวเป็นเวลา 5 ปี ประกอบ กับค่าของการตรวจสอบการทะลุวงด้วยเครื่องมือภาคสนาม	182
ตารางที่ 6.16	ข้อมูลที่ป้อนเข้าไปในโปรแกรมและผลลัพธ์จากการคำนวณค่าระยะ การทรุดตัวอย่างทันทีทันใด สำหรับฐานรากที่วางด้วยมวลดิน กำหนดให้มีไหลคกระทำเบื้องต้นกับฐานราก	186
ตารางภาคผนวก	ตาราง Conversion Factor ระหว่าง ระบบ Imperial กับระบบ S.I.	196

## รายการรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	ความลาดเอียงที่ยาวมากและแห้ง มวลความลาดเอียงวางตัวบนชั้นหิน	5
รูปที่ 2.2	ความลาดเอียงที่ยาวมากและเปียก ระดับน้ำบาดาลอยู่ตรงพื้นผิวของความลาดเอียง และมวลของความลาดเอียงวางตัวบนชั้นหิน/ชั้นดิน	7
รูปที่ 2.3	การพังทลายแบบระนาบที่ไม่ผ่านส่วนที่เป็นจุดล่างสุด (toe) ของความลาดเอียง	9
รูปที่ 2.4	การพังทลายแบบระนาบที่ผ่านส่วนที่เป็นจุดล่างสุดของความลาดเอียง	9
รูปที่ 2.5	รูปแบบเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียงที่มีรอยแตกจากแรงดึงอยู่ในพื้นผิวตะกักด้านบนของความลาด	13
รูปที่ 2.6	รูปแบบเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียงที่มีรอยแตกจากแรงดึงอยู่ในหน้าระนาบเอียงเทของความลาด	13
รูปที่ 2.7	โคอะแกรมของแรงและมิติต่าง ๆ ของความลาดเอียงที่แสดงรูปแบบไว้ในรูปที่ 2.5	14
รูปที่ 2.8	โคอะแกรมของแรงและมิติต่าง ๆ ของความลาดเอียงที่แสดงรูปแบบไว้ในรูปที่ 2.6	14
รูปที่ 2.9	รูปแบบเชิงเรขาคณิตของการเสริมเสถียรภาพของความลาดเอียง โดยการใช้ไหลภายนอก	15
รูปที่ 2.10	การไหลของน้ำบาดาลแบบไม่ปิดกั้น (unconfined) ในระนาบราบ	19
รูปที่ 2.11	การไหลของน้ำบาดาลแบบไม่ปิดกั้น (unconfined) ในความลาดเอียง	19
รูปที่ 2.12	กราฟแสดงรูปแบบเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียงที่มีระยะมิติยาวมาก และมวลสารที่อยู่บนระนาบเป็นดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ	23
รูปที่ 2.13	กราฟแสดงรูปแบบเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียงที่มีระยะมิติจำกัด และมีแรงดันน้ำในรอยแตกจากแรงดึงของมวลสารด้วย	24
รูปที่ 2.14	ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะที่แตกต่างกันของมวลที่แห้งกับเปียก เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามุมเอียงเทของความลาดที่แปรเปลี่ยนไป จะได้ค่าปัจจัยความปลอดภัยที่แตกต่างกันไป กำหนดให้ความลาดเอียงวิกฤต (critical slope) ที่ค่า $F = 1$	27

	หน้า	
รูปที่ 2.15	ภาพตัดขวางสำหรับการพัฒนาหน้างานการขุดเจาะ โดยตัดเนินเขา ออกเป็นตะพักแบบขั้นบันไดหลายชั้น และค่าเฉลี่ยของมุมเอียงเท ความลาดวัดจากจุดล่างสุด (toe) ของตะพักใหญ่ ถึงจุดลึกสุดของ รอยแตกจากแรงดึงในพื้นที่ผิวส่วนบนของตะพักใหญ่	28
รูปที่ 2.16	ความสัมพันธ์ของค่าความสูงของความลาดเอียง กับค่าเฉลี่ยของมุม เอียงเทความลาด ที่มีผลต่อเสถียรภาพของหน้างานแบบขั้นบันได	29
รูปที่ 2.17	บล็อกของมวลดินที่วางตัวที่บนชั้นดินเหนียวชั้นเล็ก ๆ หลายชั้น ในรูป แสดงรูปแบบเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียงที่มีรอยแตกจากแรงดึง บนผิวด้านบนของความลาด และการกระจายแรงค้ำน้ำตามระนาบ ที่เปราะบาง	30
รูปที่ 2.18	แสดงผลของความไว (sensitivity) ที่มีผลต่อเสถียรภาพของ ความลาดเอียง เมื่ออัตราส่วนของ B/H เปลี่ยนไป ที่ระดับความลึก ต่าง ๆ ของน้ำในรอยแตกจากแรงดึง	31
รูปที่ 2.19	แบบจำลองชนิดแรก (Model I) ที่กำหนดให้ เกิดรอยแตกจากแรงดึง บนตะพักส่วนบนของความลาดเอียง และตั้งสมมุติฐานให้การกระจายตัว ของเวกเตอร์แรงค้ำน้ำ เป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉากบนระนาบเปราะบาง และบนระนาบรอยแตกจากแรงดึงตามระดับความลึกในรอยแตก	32
รูปที่ 2.20	แบบจำลองชนิดสอง (Model II) ที่ไม่เกิดรอยแตกจากแรงดึง ระดับน้ำใต้ดินเป็นเส้นโค้งไฮเพอร์โบล่า และลักษณะของการ กระจายตัวแรงค้ำน้ำ เป็นสามเหลี่ยมมุมฉากที่มีด้านประกอบมุมฉาก ด้านหนึ่งใช้ร่วมกัน	33
รูปที่ 2.21	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยความปลอดภัยที่มีผลมาจากเปอร์เซ็นต์ ค้ำน้ำหนักของไหลภายนอกโดยแสดงผลสำหรับแบบจำลองทั้งสองแบบ	34
รูปที่ 2.22	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยความปลอดภัย กับเปอร์เซ็นต์ของการ ค้ำระยะความสูงในแนวตั้งของความลาดเอียง ซึ่งมีผลต่อเสถียรภาพ ของมวลดิน ตามรูปแบบที่กำหนดไว้ในแบบจำลองทั้งสอง	35
รูปที่ 2.23	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยความปลอดภัย กับเปอร์เซ็นต์ของการ ลดค่าระดับความสูงของน้ำใต้ดินในความลาดเอียง โดยการระบายน้ำ ตามรูปแบบที่กำหนดไว้ในแบบจำลองทั้งสอง	35
รูปที่ 2.24	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยความปลอดภัย กับเปอร์เซ็นต์ของการ ปรับมุมเอียงเทของความลาดเอียงให้มีความชันน้อยลง ซึ่งมีผลต่อ เสถียรภาพ ตามรูปแบบที่กำหนดไว้ในแบบจำลองทั้งสอง	35

	หน้า
รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ของการเสริมเสถียรภาพ รูปทางซ้ายมือเป็นการแสดง ค่ามุมเอียงเทของแนวเวกเตอร์แรงภายนอกเพื่อเสริมเสถียรภาพ รูปทางขวามือเป็นอิทธิพลของการเอียงเทต่อการเสริมเสถียรภาพ	37
รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ของการเสริมเสถียรภาพ ระหว่างค่าไหลคแรงภายนอก ที่ต้องใช้ในการเสริมเสถียรภาพ กับค่ามุมเสียดทานที่แปรเปลี่ยนไป ค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยที่ 1.5 สำหรับแบบจำลองทั้งสอง	37
รูปที่ 3.1 การวิเคราะห์ เรื่องการพังทลายรูปอาร์กวงกลมของมวลดิน	39
รูปที่ 3.2 ชนิดของรูปแบบเชิงเรขาคณิตของการพังทลายแบบวงกลม	40-41
รูปที่ 3.3 การวิเคราะห์ เสถียรภาพของความลาดเอียงอิสระ (free slope) สำหรับดิน เนื้อเอกพันธ์โดยใช้วงกลมเสียดทานหาค่า เชิงเสถียรภาพ	43
รูปที่ 3.4 การวิเคราะห์การพังทลายแบบวงกลม ที่กำหนดให้มวลดินมีค่า มุมเสียดทานภายในเท่ากับศูนย์	45
รูปที่ 3.5 กราฟการหาค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพของมวลดินที่มีการพังทลาย แบบวงกลม มวลดินประเภทนี้ไม่มีค่าความเสียดทาน	47
รูปที่ 3.6 กราฟการหาค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพของมวลดินที่มีการพังทลาย แบบวงกลม มวลดินประเภทนี้ไม่มีค่าไคฮ์ชันและค่าความเสียดทาน	47
รูปที่ 3.7 การหาค่าตำแหน่งที่เป็นจุดศูนย์กลางของวงกลมวิกฤต กราฟรูปนี้ใช้กับ กรณีที่มีมวลดินมีความลาดชันสูง และค่ามุมเอียงเทของความลาด มากกว่า 53 องศา	48
รูปที่ 3.8 ตำแหน่งที่เป็นจุดศูนย์กลางของวงกลมวิกฤต ในกรณีที่ความลาดเอียง มีค่าความลาดชันต่ำ และค่ามุมเอียงเทน้อยกว่า 53 องศา	50
รูปที่ 3.9 ตำแหน่งของ midpoint circle ที่แปรผันตามค่าของระยะ n	50
รูปที่ 3.10 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของมวลดินเนื้อเอกพันธ์ ที่มีแรงจากแผ่นดินไหว มากระทำ ในสภาวะที่ปราศจากความเสียดทาน	51
รูปที่ 3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า stability factor, slope angle, earthquake force ใช้ได้ในกรณีที่ความลาดชันของ มวลสารต่ำ	52
รูปที่ 3.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า stability factor, slope angle, earthquake force ใช้ได้ในกรณีที่ความลาดชันของ มวลสารสูง	52



	หน้า
รูปที่ 3.13 การวิเคราะห์เสถียรภาพมวลความลาดเอียงด้วยวิธีการแบ่งพื้นที่หน้าตัดออกเป็นหลายส่วนในแนวตั้ง	55
รูปที่ 3.14 วิธีการของ Bishop ที่หาเสถียรภาพโดยการใช้วิธีการแบ่งส่วนของความลาดเอียง แต่กำหนดให้แรงที่กระทำตั้งฉากกับแรงที่กระทำขนานกับด้านข้าง มีค่าไม่เท่ากันกับอีกด้านของส่วนที่แบ่ง	58
รูปที่ 3.15 แผนภูมิของค่า $M_{\alpha(n)}$ สำหรับสมการของ Bishop ที่ใช้วิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเอียงโดยการแบ่งส่วน	60
รูปที่ 3.16 การแก้ปัญหาแบบแบ่งส่วนด้วยวิธีการของ Janbu	63
รูปที่ 3.17 การหาเสถียรภาพของมวลสารที่มีพฤติกรรมแบบ non-linear การวิเคราะห์ใช้การแบ่งส่วนตามวิธี simplified Bishop	65
รูปที่ 3.18 รูปกราฟิกแสดงพิกัดที่สำคัญของความลาดเอียงที่ใช้หลักการคำนวณตามวิธีการของ Fellenius	71
รูปที่ 3.19 รูปกราฟิกแสดงพิกัดที่สำคัญของความลาดเอียงที่ใช้หลักการคำนวณตามวิธีการของ Bishop	72
รูปที่ 3.20 รูปกราฟิกแสดงพิกัดที่สำคัญของความลาดเอียงที่ใช้หลักการคำนวณตามวิธีการของ Janbu	73
รูปที่ 3.21 รูปกราฟิกแสดงพิกัดที่สำคัญของความลาดเอียงที่ใช้การวิเคราะห์ของ Bishop และมวลไม่ใช่ฮิลาสติก	74
รูปที่ 4.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพของมวลสารรูปสี่เหลี่ยม 2 บล็อก และการแสดงไดอะแกรมของแรงที่สำคัญต่าง ๆ ที่กระทำบนบล็อกทั้งสอง	77
รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์หาค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยที่เหมาะสมที่สุด สำหรับกรณีที่เป็นรูปสี่เหลี่ยม 2 บล็อกติดกัน	77
รูปที่ 4.3 การเพิ่มเสถียรภาพของบล็อกรูปสี่เหลี่ยม 2 บล็อกติดกัน	79
รูปที่ 4.4 ไดอะแกรมของส่วนแบ่งของ $i^b$ slice ที่ไม่ได้อยู่ในแนวตั้ง และแรงต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาเสถียรภาพตามวิธี Sarma	81
รูปที่ 4.5 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของการพังทลายรูปสี่เหลี่ยม ที่แสดงเป็นภาพตัดขวางและรูปแบบ 3 มิติ	88
รูปที่ 4.6 บล็อกรูปสี่เหลี่ยมที่แสดงแนวระนาบ เส้นตัด และหมายเลขที่ใช้สำหรับระนาบที่อ้างอิงในสูตรการคำนวณ	89
รูปที่ 4.7 ภาพตัดขวางแสดงเส้นที่เกิดจากระนาบ 2 ระนาบตัดกัน แสดงความสูงของลิ้ม และกระจายตัวของความดันน้ำ	89
รูปที่ 4.8 ไดอะแกรมแสดงวิธีการแตกแรงที่อยู่บนระนาบ 2 ระนาบที่ตัดกัน	91

	หน้า	
รูปที่ 4.9	วิธีการหาค่ามุมเอียงเทและแนวเอียงเทของเส้นที่เกิดจาก ระนาบ 2 ระนาบคั่นกัน	93
รูปที่ 4.10	ภาพสเก็ทซ์มวลรูปสี่เหลี่ยมที่มีรอยแตกจากแรงดึงตัดผ่าน	95
รูปที่ 4.11	รูปไดอะแกรมแสดงความดันน้ำที่มีผลต่อการพังทลายรูปสี่เหลี่ยม	97
รูปที่ 4.12	ไดอะแกรมที่แสดงถึงแรงดันน้ำและแรงอื่น ๆ ที่กระทำบน บล็อกรูปสี่เหลี่ยม	98
รูปที่ 4.13	ภาพสเก็ทซ์ของรูปแบบเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียงที่มี มวลส่วนใหญ่ เป็นหินชีสต์ที่แน่นกับหินชีสต์ที่แตกแยก	105
รูปที่ 4.14	ภาพกราฟิกที่ปรากฏบนจอคอมพิวเตอร์ สำหรับโจทย์ตัวอย่าง ที่ใช้ข้อมูลเข้าตามที่ระบุไว้ในตารางที่ 4.5 หน้า 106	107
รูปที่ 4.15	ภาพสเก็ทซ์เชิง 3 มิติ ตามโจทย์ที่สมมุติให้มวลหินทรายบนความ ลาดเอียง เกิดการพังทลายได้รูปสี่เหลี่ยม และยังมีรอยแตกจากแรงดึง ในแนวตั้งผ่าน	108
รูปที่ 5.1	สมมุติฐาน 2 สภาวะสำหรับการเกิดความไม่เสถียรของแท่งบล็อกหิน	113
รูปที่ 5.2	เสถียรภาพของแท่งบล็อกหิน แสดงโอกาสที่แต่ละบล็อกอาจเกิดการ หมุนคว้างแบบทอปเปิล หรือเคลื่อนที่ตามแนวระนาบแบบเลื่อนไถล	115
รูปที่ 5.3	แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์แรงบนมวลสารแบบสมดุลเชิงจืดจำกัด	117
รูปที่ 5.4	แรงที่กระทำบนบล็อกที่ $n$	117
รูปที่ 5.5	การเกิดทอปเปิลของบล็อกที่ $n$ เมื่อ ไม่มีแรงดันน้ำมาเกี่ยวข้อง	120
รูปที่ 5.6	การเกิดการเลื่อนไถลของบล็อกที่ $n$ เมื่อ ไม่มีแรงดันน้ำมาเกี่ยวข้อง	120
รูปที่ 5.7	รูปแบบเชิงเรขาคณิตของการพังทลายแบบทอปเปิลสำหรับ ตัวอย่างโจทย์	125
รูปที่ 6.1	การหาค่าความสัมพันธ์การรับน้ำหนักของมวลดินต่อฐานราก	131
รูปที่ 6.2	การเกิดการพังทลายของมวลดินเหนียวโดยไหลคจาก strip footing	133
รูปที่ 6.3	การพังทลายในมวลดิน เนื่องจากการแบกรับน้ำหนักจุดค้ำ เกินความสามารถ	135
รูปที่ 6.4	การแปรเปลี่ยนของระดับน้ำบาดาลเมื่อเทียบกับระดับ ความลึกของฐานราก	139
รูปที่ 6.5	ไหลคที่กระทำเยื้องศูนย์กลางฐานราก	147
รูปที่ 6.6	การวิเคราะห์แรงที่กระทำเยื้องศูนย์กลาง ฐานราก 2 แนว	149

	หน้า
รูปที่ 6.7 การหาพื้นที่ประสิทธิผลของกรณีที่ 1	150
รูปที่ 6.8 การหาค่าผลเฉลยจากพื้นที่ประสิทธิผลและค่าอัตราส่วนของกรณีที่ 2	152
รูปที่ 6.9 การหาค่าผลเฉลยจากพื้นที่ประสิทธิผลและค่าอัตราส่วนของกรณีที่ 3	153
รูปที่ 6.10 การหาค่าผลเฉลยจากพื้นที่ประสิทธิผลและค่าอัตราส่วนของกรณีที่ 4	154
รูปที่ 6.11 สมมุติฐานของมวลดินเหนียวที่มี 2 ชั้น	157
รูปที่ 6.12 สมมุติฐานของการรับไหลคบรรทุกของชั้นดินเหนียวที่มีชั้นที่แข็งแรงอยู่ด้านบนชั้นที่เปราะบาง	158
รูปที่ 6.13 การแปรผันอัตราส่วน $c_a/c_{u(1)}$ กับ $c_{u(2)}/c_{u(1)}$	159
รูปที่ 6.14 สมมุติฐานการวางค้ำของฐานรากบนชั้นดินทรายและรองรับด้วยชั้นดินเหนียวที่เปราะบาง	161
รูปที่ 6.15 การแปรผันระหว่างค่าของ $K_r$ กับค่ามุม $\phi$	161
รูปที่ 6.16 การทรุดค้ำของมวลดินเนื่องจากฐานรากที่ค้ำงอได้และแข็งเกร็ง	162
รูปที่ 6.17 กราฟของการหาค่าพจน์ $\alpha$ , $\alpha_{av}$ , $\alpha_r$ ที่แปรผันกับค่าอัตราส่วน $L/B$	163
รูปที่ 6.18 กราฟของการหาค่าพจน์ $A_1$ และ $A_2$ สำหรับการหาค่าการทรุดค้ำแบบทันทีทันใด	165
รูปที่ 6.19 แนวทางของการคำนวณที่ใช้ค้ำประกอบเชิงอิทธิพลความเครียด	166
รูปที่ 6.20 กราฟความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าค้ำประกอบของ $\beta_1$ และ $\beta_2$ เมื่อเทียบกับอัตราส่วน $L/B$	169
รูปที่ 6.21 แนวทางการคำนวณค่าการทรุดค้ำเนื่องจากการอัดค้ำค้ำน้ำ	171
รูปที่ 6.22 กราฟการหาค่าอัตราส่วนของ การทรุดค้ำสำหรับฐานรากแบบวงกลมกับแบบค่อเนื่อง	172

## รายการสัญลักษณ์

การอธิบายสัญลักษณ์ได้ เรียงลำดับอักษรตามการออกเสียงในภาษาอังกฤษ

$A$	=	พารามิเตอร์สำหรับความคืบหน้าในโพรงของมวลสาร
	=	ค่าคงที่สำหรับรูปร่างวงกลมสิ่งทู่ของ Mohr สำหรับหินที่มีพฤติกรรมไม่ใช่อีลาสติคเชิงเส้น
$A_1$	=	พจน์ตัวแปรใน เรื่องการทรุดตัวของฐานรากที่เป็นฟังก์ชันกับอัตราส่วน $H/B$ และ $L/B$
$A_2$	=	พจน์ตัวแปรใน เรื่องการทรุดตัวของฐานรากที่เป็นฟังก์ชันกับอัตราส่วน $D_c/B$
$A_1, A_2, A_3$	=	พื้นที่ของระนาบ 1, 2, 3 ของลิ่มใต้พื้นผิวดิน
$A_A$	=	พื้นที่ของระนาบ A ของลิ่มบนพื้นผิวดิน
$A_B$	=	พื้นที่ของระนาบ B ของลิ่มบนพื้นผิวดิน
$A_R$	=	พื้นที่ของระนาบการพังทลายที่มีผิวขรุขระ
$A_T$	=	พื้นที่ของระนาบรอยแตกจากแรงดึงของลิ่มบนพื้นผิวดิน
$A'$	=	พื้นที่ประสิทธิผล
$AE$	=	ผลรวมสำหรับพจน์ตัวแปรของค่าความเร่งบนมวลสารตามวิธี Sarma
$a$	=	ระยะในแนวตั้งจากจุดศูนย์กลางของการหมุนไปยังระดับความสูง ที่แรงคืบหน้าในระนาบของรอยแตกจากแรงดึงกระทำ ตามวิธีวิเคราะห์ของ Bishop
$a, b, d$	=	เวกเตอร์ของแรงที่กระทำบนด้านประกอบของมวลรูปลิ่มใต้พื้นผิวดิน ที่ใช้ในการคำนวณตามวิธีของ Hoek and Bray
$a_1, a_2$	=	ค่าคงที่สำหรับความสูงส่วนหนึ่งของแท่งบล็อกหินที่ใช้คำนวณตามวิธีของ Goodman and Bray
$a_i$	=	ความเร่งที่เกิดบนส่วนแบ่งที่ "i" จากการคำนวณตามวิธี Sarma

$\alpha$	=	ค่ามุมเอียงเทของระนาบ หรือของแรง
	=	ค่ามุมเอียงเทของฐานแท่งบล็อกหินเมื่อเทียบกับแนวราบ
	=	พจน์ตัวแปรที่มีค่าแปรผันไปตามอัตราส่วน $L/B$ ของฐานราก และใช้กับฐานรากที่ยึดหย่อนหรือฐานรากวงกลม
	=	มุมของด้านประกอบสามเหลี่ยมที่พุดคิงที่อยู่ในโซน I
	=	ค่ามุมระหว่างแนวราบกับด้านประกอบของรูปสามเหลี่ยมได้ในแนวตัดขวาง
$\alpha_1$	=	มุมเอียงเทของผิวหน้าความลาดเอียงกับแนวตั้งของการพังทลายแบบวงกลม
$\alpha_2$	=	มุมเอียงเทของผิวบนตะพักความลาดเอียงกับแนวราบของการพังทลายแบบวงกลม
$\alpha_5$	=	แนวทิศทางของแรงเฉือนที่ก่อให้เกิดการเลื่อนไถลของลิบบนพื้นผิวดิน
$\alpha_T$	=	แนวทิศทางของแรงภายนอกที่ป้องกันไม่ให้เกิดการเลื่อนไถลของลิบบนพื้นผิวดิน
$\alpha_a$	=	แนวทิศทางของแรงปฏิกิริยาค้างจากประสิทธิผลบนระนาบ A
$\alpha_b$	=	แนวทิศทางของแรงปฏิกิริยาค้างจากประสิทธิผลบนระนาบ B
$\alpha_i$	=	แนวเวกเตอร์แรงอยู่ในระนาบตั้งที่ผ่านเส้นที่เกิดจากระนาบ 2 ระนาบตัดกัน ในการวิเคราะห์ตามวิธี Hoek et al.
	=	ค่ามุมเอียงเทของส่วนแบ่งที่ "i" (มุมเงยเป็นบวก)
$\alpha_n$	=	ค่ามุมเอียงเทของส่วนแบ่งที่ "n"
$\alpha_r$	=	พจน์ตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับ $L/B$ สำหรับฐานรากที่แข็งแรง
$\alpha_c$	=	แนวทิศทางของแรงค้ำน้ำในระนาบของรอยแตกจากแรงตั้ง
$\alpha_{av}$	=	ค่าเฉลี่ยพจน์ตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับ $L/B$ สำหรับฐานรากที่ยึดหย่อน
B	=	ความกว้างของพุดคิงแบบแถบ (strip footing) หรือเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางพุดคิงแบบวงกลม (circular footing)
	=	ค่าคงที่สำหรับรูปร่างวงกลมสี่เหลี่ยมของ Mohr สำหรับหินที่มีพฤติกรรมไม่ใช่ฮิสลาสติกเชิงเส้น
$B_1$	=	ความกว้างของด้านประกอบสำหรับพื้นที่ประสิทธิผลของพุดคิง
$B_2$	=	ความกว้างอีกมิติของด้านประกอบสำหรับพื้นที่ประสิทธิผลของพุดคิง
$B'$	=	ความกว้างประสิทธิผล

$b$	=	ระยะครึ่งหนึ่งของความกว้างฟุตคิงแบบแถบ
	=	ระยะในแนวราบจากรอยแตกจากแรงคึงถึงจุดยอดของความลาดเอียง
	=	ระยะในแนวราบระหว่างส่วนแบ่งที่ "i" กับ "(i + 1)"
	=	ค่าคงที่ของความกว้างบล็อกที่เกิดทอปปลิงที่ใช้คำนวณตามวิธีของ Goodman and Bray
$b_i$	=	ความกว้างของส่วนแบ่งที่ "i"
$b_n$	=	ระยะความกว้างของส่วนแบ่งที่ "n"
$\beta$	=	มุมเอียงเทโดยรวมของแท่งบล็อกหิน
$\beta_1, \beta_2$	=	ตัวประกอบที่แปรผันกับ L/B ใช้ในการคำนวณมุมของการหมุน เนื่องจากไหลคกระทำเบื้องต้นศูนย์กลางฐานราก
$C$	=	แรงไคฮ์ชั้นที่กระทำบนผิวหน้าของมวลสาร
$C_1$	=	ตัวประกอบที่ใช้แก้ไขสูตรเชิงประสมการณ์ สำหรับค่าความลึกของระยะที่ฝังฐานราก
$C_2$	=	ตัวประกอบที่ใช้แก้ไขสูตรเชิงประสมการณ์ สำหรับค่าความคืบในมวลดินเมื่อฝังฐานรากแล้ว
$C_c$	=	ดัชนีการอัด (compression index) ของมวลสาร
$C_d$	=	ความยาวของคอร์คของมวลที่มีพื้นผิวการพังทลายแบบวงกลม
	=	แรงผลลัพธ์ของไคฮ์ชั้นที่มีค่าเท่ากับแรงบนหน่วยของคอร์คที่เกิดขึ้นในขณะนั้นบนพื้นผิวของการพังทลายรูปอาร์ก
$C_s$	=	ดัชนีการพองบวม (swelling index) ของมวลสาร
$C$	=	ค่ากำลังวัสดุเชิงไคฮ์ชั้นของมวลสารหรือระนาบการพังทลาย
$C_A, C_B$	=	ค่ากำลังวัสดุเชิงไคฮ์ชั้นของระนาบ A, B ตามลำดับ
$C_{B1}$	=	ไคฮ์ชั้นบนด้านฐานของส่วนแบ่งที่ "i"
$C_{S1}, C_{S1+1}$	=	ไคฮ์ชั้นบนด้านข้างของส่วนแบ่งที่ "i" ตามพิทักคาร์ที่เขียน
$C_a$	=	การยึดเกาะตามแนวรอยต่อประสานของชั้นดินใต้ฟุตคิง
$C_d$	=	หน่วยของไคฮ์ชั้นที่เกิดขึ้นขณะนั้นบนพื้นผิวระนาบการพังทลาย
$C_i$	=	ไคฮ์ชั้นของระนาบที่ "i"
$c'_i$	=	ค่าไคฮ์ชั้นบนระนาบในขณะนั้น
$C_{u(1)}$	=	ไคฮ์ชั้นที่ไม่มีการระบายน้ำออกจากมวลของดินชั้นบน
$C_{u(2)}$	=	ไคฮ์ชั้นที่ไม่มีการระบายน้ำออกจากมวลของดินชั้นล่าง



$c'$	=	โคอีชันเชิงประสิทธิผล
$\theta$	=	มุมที่แรงภายนอกกระทำกับมวลสาร เมื่อเทียบกับ แนวตั้งฉากของระนาบการเลื่อนไถล (มุมก็เป็นค่าบวก)
	=	มุมที่แรงเสริมเสถียรภาพกระทำกับส่วนแบ่ง คามวิธีของ Sarma เมื่อเทียบกับแนวราบ
	=	มุมของพิทักเชิงจั่ว
	=	มุมของการหมุนของฐานราก
$\theta_{ab}$	=	มุมระหว่างแรงกระทำขนานบนระนาบตั้งของ ระนาบ A และ B ตามวิธีของ Hoek et al.
$\theta_{13}, \theta_{15}$	=	มุมระหว่างแรงกระทำขนานบนระนาบตั้งของ ระนาบ 1 กับ 3 และระนาบ 1 กับ 5 ตามลำดับ
$D$	=	ตัวประกอบค่าความลึกของความลาดเอียง สำหรับ การวิเคราะห์ของ Taylor
$D_1$	=	ความลึกจากระดับผิวดินถึงระดับน้ำบาดาล ในการคำนวณ เรื่องฐานราก
$D_2$	=	ความลึกจากระดับน้ำบาดาล ถึงระดับพื้นของฐานราก
$D_f$	=	ระดับลึกของฟุตคิง จากผิวพื้นดินถึงระดับพื้นของฐานราก
$d$	=	ระยะที่แรงเฉือนกระทำบนผิวระนาบของอาร์กวงกลม = ความลึกของมวลสารบนระนาบที่เกิดการพังทลาย ตามวิธีของ Janbu = ระดับลึกเมื่อวัดจากพื้นของฐานรากมาถึงระดับน้ำบาดาล ที่อยู่ต่ำกว่าระดับฐานราก
$d_i, d_{i+1}$	=	ค่าระยะในแนวตั้งบนส่วนแบ่งตามพิทักคาร์ทีเซียน สำหรับการ การคำนวณตามวิธีของ Sarma
$\delta$	=	มุมระหว่างโหนดพาสซีฟแนวตั้งกระทำด้านประกอบของลิ้ม
$\delta_i, \delta_{i+1}$	=	มุมของส่วนแบ่งที่ "i" เทียบกับแนวตั้งตามพิทักคาร์ทีเซียน ที่วิเคราะห์ตามวิธีของ Sarma (ตามเข็มนาฬิกาเป็นบวก)
$\Delta$	=	ระยะการโก่งตัวสัมพัทธ์ของโครงสร้างแบบคาน
$\Delta / L$	=	อัตราส่วนการโก่งงอ ( $L$ = ระยะคานยาวของคาน)
$\eta$	=	มุมของการบิดเบี้ยว เมื่อเกิดการทรุดตัวของอาคาร โครงสร้างที่มีการเอียง
$E$	=	โหนดของแรงภายนอก = ส่วนประกอบของแรงด้านข้าง

$E_i, E_{i+1}$	=	แรงอัดจากภายนอกที่กระทำบนด้านข้างของส่วนแบ่งที่ $i$ ตามทิศทางที่เขียน
$E_s$	=	มอดูลัสของความยืดหยุ่น (อีลาสติค) หรือมอดูลัสของยัง
$e$	=	ความเบี่ยงศูนย์กลาง
$e_0$	=	อัตราส่วนโพรงช่องว่างมวลสารก่อนมีไหลดกระทำ
$e_B$	=	พิกัดของจุดเบี่ยงศูนย์กลางตามแนวแกนความกว้างพุดติง
$e_L$	=	พิกัดของจุดเบี่ยงศูนย์กลางตามแนวแกนความยาวพุดติง
$e_i$	=	อัตราส่วนที่ไร้มิติของค่ามุมที่เป็นตัวคูณกับตัวแปรอื่น สำหรับส่วนแบ่งที่ "i" ซึ่งอยู่ในแนวที่ความดันหรือความเร่งกระทำ
$\Delta e$	=	ค่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนโพรงช่องว่างในมวลสาร
$\xi$	=	มุมแหลมที่เกิดจากระนาบ 2 ระนาบที่ประกอบเป็นลิ้ม เมื่อมองตามแนวเส้นที่เกิดจากระนาบตัดกัน
$F_0$	=	ค่าประมาณของตัวประกอบสำหรับใช้คูณเข้า ไป เพื่อแก้ไขค่าปัจจัยความปลอดภัย ตามวิธีของ Janbu
$F, F_s$	=	ค่าตัวเลขของปัจจัยความปลอดภัย เมื่อเทียบกับค่ากำลังวัสดุทั้งหมด ปกติคำนวณนิเวระนาบที่เกิดการพังทลาย
	=	ค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย เมื่อหาจากแนวการเลื่อนไหลตามเส้นที่เกิดจากระนาบตัดกัน ตามวิธีของ Hoek et al.
$F_1, F_2$	=	ค่าปัจจัยความปลอดภัยที่คำนวณด้วยวิธีทำซ้ำ (iterative)
$F_c$	=	ค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยต่ำสุด หรือจัดเป็นค่าวิกฤต
$F_H$	=	ค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย เมื่อเทียบกับความสูงในแนวตั้งของความลาดเอียง
$F_\phi$	=	ค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย เมื่อเทียบกับความเสียดทานภายในของมวลสารบนพื้นนิเวระนาบการพังทลาย
$F_{cd}, F_{qd}, F_{\gamma d}$	=	ตัวประกอบเชิงความลึกของพุดติง
$F_{ci}, F_{qi}, F_{\gamma i}$	=	ตัวประกอบเชิงความลาดเอียงของไหลดที่กระทำบนพุดติง
$F_{cs}, F_{qs}, F_{\gamma s}$	=	ตัวประกอบเชิงรูปร่างของพุดติง
$F_{shear}$	=	ปัจจัยความปลอดภัยสำหรับโอกาสที่เกิดการพังทลายเนื่องจากการเฉือน
$\gamma_1, \gamma_2$	=	หน่วยน้ำหนักของมวลดินชั้นบนและชั้นล่างตามลำดับ
$\gamma, \gamma_r$	=	หน่วยน้ำหนักของมวลสาร หรือหน่วยน้ำหนักของส่วนแบ่ง
$\gamma_w$	=	หน่วยน้ำหนักของน้ำ
$\gamma_{wn}$	=	หน่วยน้ำหนักในแง่บล็อกหินที่ "n"

$\gamma_{sat}$	=	หน่วยน้ำหนักมวลสารที่อิ่มตัว
$\gamma'$	=	หน่วยน้ำหนักของมวลสารเชิงประสิทธิผล
$\bar{\gamma}$	=	ค่าเฉลี่ยของหน่วยน้ำหนักดิน เมื่อคำนวณแรงดันน้ำร่วมด้วย
$H$	=	ความสูงในแนวตั้งของหน้าเหมืองหรือความลาดเอียง
	=	ความสูงในแนวตั้งของชั้นประกอบที่เป็นส่วนแบ่งมวลสาร
	=	ความลึกหรือความสูงในแนวตั้งจากพื้นฐานรากถึงระดับฐาน (หรือของระดับฐานชั้นดินรุดบาง กรณีมีดิน 2 ชุด)
	=	มิติความสูงของโครงสร้างแบบคาน
$H_c$	=	ความหนาของชั้นดินเหนียวใต้ฐานราก
$H_{c_x}$	=	ความสูงวิกฤตในแนวตั้งของหน้าเหมืองหรือความลาดเอียง
$H_f$	=	ความลึกหรือความสูงในแนวตั้งจากพื้นฐานรากถึงระดับฐานของชั้นดินรุดหนา
$H_r$	=	ความสูงในแนวตั้งของรอยแตกจากแรงดึง เมื่อวัดเทียบกับระนาบ A ของลิ่มบนพื้นผิวดิน
$H_v$	=	ความสูงในแนวตั้งของรอยแตกจากแรงดึง เมื่อวัดเทียบกับระนาบ B ของลิ่มบนพื้นผิวดิน
$h$	=	ความลึกในแนวตั้งของชั้นมวลสารข้างบน
	=	ความลึกของระดับน้ำรูปไฮเพอร์โบล่าในแนวที่ทำการวิเคราะห์ผล
$h_1, h_2$	=	ความสูงตรงแนวขอบเขตระดับน้ำบาดาลรูปไฮเพอร์โบล่า
$h_n$	=	ความสูงเฉลี่ยในแนวตั้งของส่วนแบ่งที่ "n"
$h_p$	=	ความสูงที่ระดับน้ำบาดาลตัดกับผิวระนาบของการพังทลาย
$h_s$	=	ความสูงที่ระดับน้ำบาดาลตัดกับผิวหน้าของความลาดเอียง
$h_{wn}$	=	ความสูงเฉลี่ยของระดับน้ำที่กระทำบนส่วนแบ่งที่ "n"
$I_z$	=	ตัวประกอบเชิงอิทธิพลเนื่องจากความเครียด (strain)
$i$	=	จำนวนส่วนแบ่งของมวลสารที่วิเคราะห์ผล
JRC	=	ค่าตัวเลขสัมประสิทธิ์ของระนาบที่มีผิวขรุขระ
$K$	=	ค่าคงที่สำหรับตัวประกอบของปัจจัยความปลอดภัยที่ได้แก้ไขให้ถูกต้อง ตามวิธีของ Janbu
	=	พจน์ความเร่งในการวิเคราะห์แบบ Sarma
	=	ค่าคงที่ในการหาน้ำหนักของมวลรูปลิ่มบนพื้นผิวดิน
$K_c$	=	ความเร่งวิกฤต = AE / PE
$K_c, K_Y, K_G$	=	สัมประสิทธิ์ความดันของมวลสาร

$k_h$	=	ค่าคงที่ของอัตราส่วนของค่าแรงในแนวราบ เนื่องจากแผ่นดินไหวที่เทียบกับค่าความเร่ง เนื่องจากความโน้มถ่วง
$K_n$	=	ระยะห่างบนฐานแท่งบล็อก วัดจากจุดสัมผัสของแท่งบล็อกที่ "n" กับแนวที่แรงปฏิกิริยากระทำบนฐาน
$K_{py}$	=	สัมประสิทธิ์ความดันแบบพาราซิป
$K_s$	=	สัมประสิทธิ์ของความต้านทานมวลสารต่อการทะลวง
$L$	=	ระยะห่างระหว่างจุดยอดของความลาดจนถึงระนาบรอยแตกจากแรงดึง และทำการวัดตามรอยของระนาบหมายเลข 1 ของมวลลึบบนพื้นผิวดิน
	=	ความยาวของฐานราก
	=	ความยาวของมวลสารบนระนาบที่เกิดการพังทลายตามวิธีของ Janbu
	=	ระยะความกว้างในแนวราบของระดับน้ำใต้ดินรูปไฮเพอร์โบล่าที่วิเคราะห์ตามวิธีการพังทลายแบบระนาบ
$L_1$	=	ความยาวของด้านประกอบสำหรับพื้นที่ประสิทธิผลของฟุตคิง
	=	แขนของไมเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณการพังทลายแบบวงกลม
$L_2$	=	ความยาวอีกมิติของด้านประกอบสำหรับพื้นที่ประสิทธิผลของฟุตคิง
	=	แขนอีกข้างของไมเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณการพังทลายแบบวงกลม
$L_n$	=	ระยะห่างบนด้านข้างของบล็อก วัดจากจุดสัมผัสของแท่งบล็อกที่ "n" กับแนวแรงที่ตั้งฉากเพื่อป้องกันการเลื่อนไถล
$\Delta L_n$	=	ความยาวที่ขนานกับฐานของส่วนแบ่งที่ "n"
$L'$	=	ความยาวประสิทธิผล
$l_i$	=	แขนไมเมนต์เมื่อหาค่าเทียบกับส่วนแบ่ง "i" ตามวิธี Sarma
$M$	=	ไมเมนต์ที่กระทำบนฐานราก
	=	ค่าคงที่เชิงเสถียรภาพของการพังทลายแบบวงกลมที่มีแรงจากแผ่นดินไหวมาเกี่ยวข้อง
$M_c$	=	ไมเมนต์ที่ด้านการพังทลาย
$M_d$	=	ไมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการพังทลาย
$M_n$	=	ระยะห่างบนด้านข้างบล็อก วัดจากจุดสัมผัสของแท่งบล็อกที่ "n" กับแนวที่แรงตั้งฉากที่ก่อให้เกิดการเลื่อนไถล
$M_{\alpha(n)}$	=	พจน์ตัวแปรที่ใช้คูณเพื่อหาค่าปัจจัยความปลอดภัย ตามวิธี Bishop

- $M_x$  = โมเมนต์รอบแกน  $x$  ที่กระทำบนฐานราก  
 $M_y$  = โมเมนต์รอบแกน  $y$  ที่กระทำบนฐานราก  
 $m$  = ค่าคงที่สำหรับรูปร่างและระดับชั้นของการเชื่อมแน่นของ  
 อนุภาคแร่ในหินของวงกลมสิ่งหุ้มของ Mohr สำหรับหินที่มี  
 พฤติกรรมไม่ใช่ฮิสเทรีติกเชิงเส้น  
 $m_{a,b}$  = สัมประสิทธิ์ของการแตกแรง ที่แตกแนวแรง  $P_a$  ไปบน  
 แนวแรง  $P_b$   
 $m_{n a . i}$  = สัมประสิทธิ์ของการแตกแรงจาก  $N_a$  ไปยังแนวเส้นที่  
 ที่เกิดจากระนาบ  $A$  และ  $B$  ตัดกัน  
 $m_{n b . i}$  = สัมประสิทธิ์ของการแตกแรงจาก  $N_b$  ไปยังแนวเส้นที่  
 ที่เกิดจากระนาบ  $A$  และ  $B$  ตัดกัน  
 $m_{n a . n b}$  = สัมประสิทธิ์ของการแตกแรงจาก  $N_a$  ไปยังแนว  
 แรงจาก  $N_b$   
 $m_{w . n a} , m_{w . n b}$  = สัมประสิทธิ์ของการแตกแรงน้ำหนักลิ้ม  $W$  ไปยังแนว  
 แรงจาก  $N_a$  และ  $N_b$  ตามลำดับ  
 $m_{v . n a} , m_{v . n b}$  = สัมประสิทธิ์ของการแตกแรงดันน้ำในรอยแตกจากแรงดึง  $V$   
 ไปยังแนวแรงจาก  $N_a$  และ  $N_b$  ตามลำดับ  
 $m_{T . n a} , m_{T . n b}$  = สัมประสิทธิ์ของการแตกแรงภายนอกเพื่อเสริมเสถียรภาพ  $T$   
 ไปยังแนวแรงจาก  $N_a$  และ  $N_b$  ตามลำดับ  
 $m_{w . 5} , m_{v . 5} , m_{T . 5}$  = สัมประสิทธิ์ของการแตกแรง  $W, V, T$  ตามลำดับ ไปยัง  
 แนวแรงเฉือนบนเส้นที่เกิดจากระนาบ  $A$  และ  $B$  ตัดกัน  
 $\mu_s$  = อัตราส่วนโพรง  
 $N$  = แรงปฏิริยาอัดจากบนระนาบหรือบนปริมาตรสัมผัส  
 = ค่าตัวเลขจากการทดสอบภาคสนามของความสามารถ  
 รับน้ำหนักบรรทุกทุกของมวลสาร  
 $N_1$  = แรงปฏิริยาอัดจากทั้งหมดบนระนาบ 1 ของลิ้มใต้พื้นผิวดิน  
 $N_2$  = แรงปฏิริยาอัดจากทั้งหมดบนระนาบ 2 ของลิ้มใต้พื้นผิวดิน  
 $N_3$  = แรงปฏิริยาอัดจากทั้งหมดบนระนาบ 3 ของลิ้มใต้พื้นผิวดิน  
 $N_a$  = แรงที่กระทำตั้งฉากกับระนาบของการพังทลาย  
 $N_c , N_y , N_q$  = ค่าประกอบของความสามารถในการแบกรับโหลด และเป็น  
 ฟังก์ชันกับมุมเสียดทานภายในเท่านั้น  
 $N'_c , N'_y , N'_q$  = ค่าประกอบของความสามารถในการแบกรับโหลดที่  
 ปรับปรุงใหม่ตามข้อเสนอของ Terzaghi

$N_f$	=	ค่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของมวลสารที่ระดับความลึกหนึ่ง
$N_i$	=	แรงอัดฉากบนส่วนแบ่งที่ "i"
$N_r$	=	แรงอัดฉากบนด้านฐานของส่วนแบ่งที่ "n"
$N_s$	=	ตัวเลขความต้านทานการเฉือนของมวลสารต่อการทะลวงที่เป็นฟังก์ชันที่แปรผันกับมุมเสียดทานภายใน
	=	ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเสถียรภาพของการพังทลายแบบวงกลม
$N_{ae}$	=	แรงปฏิกริยาประสิทธิผลบนระนาบ A ของลิ่มบนพื้นผิวดิน
$N_{be}$	=	แรงปฏิกริยาประสิทธิผลบนระนาบ B ของลิ่มบนพื้นผิวดิน
$N_{r1}$	=	แรงอัดฉากบนฐานของแท่งบล็อกหินที่ "1"
$N_{rn}$	=	แรงอัดฉากบนฐานของแท่งบล็อกหินที่ "n"
$N'$	=	แรงอัดฉากประสิทธิผลบนพื้นผิวระนาบของการพังทลาย
$n$	=	จำนวนส่วนแบ่งของมวลสารที่ทำการวิเคราะห์ผล
	=	สัมประสิทธิ์ของค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพสำหรับการพังทลายแบบวงกลม
$n_d$	=	ระยะในแนวตั้งของค่าองค์ประกอบความลึก
$n_dH$	=	ระยะในแนวตั้งจากฐานของชั้นดินส่วนบนถึงระดับของยอดความลาดเอียง
$n'$	=	ระยะหนึ่งในแนวราบที่แปรค่าของความลาดเอียงเมื่อกำหนดให้ค่าระยะความสูงในแนวตั้งคงที่
$O$	=	จุดศูนย์กลางวงกลมที่ใช้ในการวิเคราะห์เรื่องวงกลมเสียดทาน
$P$	=	อัตราส่วนไร้มิติของระยะมิติในเรื่องการพังทลายแบบระนาบ
	=	แรงค้ำน้ำหนักส่วนแบ่ง ตามวิธีของ Sarma
	=	แรงอัดฉากบนส่วนแบ่งของมวลสารหรือบนแท่งบล็อกหิน
$P_0$	=	แรงอัดฉากบนด้านข้างของแท่งบล็อกหินที่ "1" ที่เพิ่มความมีเสถียรภาพ
$P_a$	=	แรงกระทำขนาดนระนาบตั้งของระนาบ A ตามวิธีของ Hoek et al.
$P_{ab}$	=	การไหลเจกส่วนประกอบแรงแนวราบ $P_{ah}$ มาอยู่บนระนาบ B
$P_{ah}, P_{bh}$	=	แรงที่แตกมาในแนวราบของแรง $P_a, P_b$ ตามลำดับ
$P_{av}, P_{bv}$	=	แรงที่แตกมาในแนวตั้งของแรง $P_a, P_b$ ตามลำดับ

- $P_b$  = แรงกระทำขนานบนระนาบตั้งของระนาบ B ตามวิธี  
ของ Hoek et al.
- $P_n$  = แรงอัดฉากบนด้านข้างของแท่งบล็อกหินที่ "n" ที่ก่อให้เกิด  
เกิดความไร้เสถียรภาพ  
= แรงอัดฉากบนส่วนแบ่งที่ "n"
- $P_{(n+1)}$  = แรงอัดฉากของส่วนแบ่งที่ "n" บนด้านที่อยู่ในแนวตรงข้าม  
กับแรง  $P_n$
- $P_{(n-1)}$  = แรงอัดฉากบนด้านข้างของแท่งบล็อกหินที่ "n" เมื่อต้องการ  
เพิ่มความมีเสถียรภาพ
- $P_{(n, s)}$  = แรงอัดฉากบนด้านข้างของแท่งบล็อกหินที่ "n" เมื่อต้องการ  
ให้เกิดการเลื่อนไถล
- $P_{(n, t)}$  = แรงอัดฉากบนด้านข้างของแท่งบล็อกหินที่ "n" เมื่อต้องการ  
ให้เกิดการทอปลิง
- $P_{(n-1), s}$  = แรงอัดฉากบนด้านข้างของแท่งบล็อกหินที่ "n" เมื่อต้องการ  
ป้องกันให้เกิดการเลื่อนไถล
- $P_{(n-1), t}$  = แรงอัดฉากบนด้านข้างของแท่งบล็อกหินที่ "n" เมื่อต้องการ  
ป้องกันให้เกิดการทอปลิง
- $P_p$  = ความดันพาสซีฟต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่
- $PW_i, PW_{i+1}$  = แรงดันน้ำด้านข้างที่กระทำบนส่วนแบ่งที่ "i"
- $PE$  = ผลรวมสำหรับพจน์ตัวแปรของแรงอัดฉากบนมวลสาร  
ตามวิธี Sarma
- $\Delta P$  = ผลต่างของแรงอัดฉากที่อยู่ตรงข้ามกันบนส่วนแบ่งที่ "n"
- $p$  = ความดันน้ำสูงสุดที่ เกิดบนจุดที่ตัดกันของระนาบที่มีน้ำข้าง  
ของลิ่มบนพื้นผิวดิน  
= สัมประสิทธิ์ของตัวแปรไม่ทราบในการวิเคราะห์  
เวกเตอร์แรงของการพังทลายรูปลิ่มบนพื้นผิวดิน
- $p_0$  = ค่าเฉลี่ยความดันประสิทธิผลบนชั้นดินก่อนก่อสร้าง
- $p_c$  = ความดันในมวลสารก่อนเกิดการอัดตัวคายน้ำ
- $p_i$  = แรงอัดฉากบนส่วนแบ่งที่ "i"
- $\Delta p_{av}$  = ค่าเฉลี่ยความดันที่เพิ่มขึ้นบนชั้นดิน เมื่อมีการก่อสร้าง
- $\Delta p_t, \Delta p_m, \Delta p_b$  = พจน์ตัวแปรในการหาค่า  $\Delta p_{av}$  เป็นการประมาณ  
ความดันของชั้นดินเหนียวได้ฐานรากที่ระดับบนชั้นดิน,  
ระดับตรงกลางชั้นดิน และระดับล่างสุดของชั้นดิน ตามลำดับ

- $\phi$  = มุมเสียดทานภายในบนระนาบการพังทลายหรือบนพื้นผิวที่สัมผัส
- $\phi$  = มุมเสียดทานภายในของมวลสารรูปลิ่มได้พอดี
- $\phi_1, \phi_2, \phi_3$  = มุมเสียดทานภายในบนพื้นผิวที่สัมผัสของระนาบที่ 1, 2, 3 ตามลำดับ
- $\phi_{bi}$  = มุมเสียดทานบนด้านฐานของส่วนแบ่งที่ "i"
- $\phi_b$  = มุมเสียดทานภายในบนฐานที่สัมผัสของแท่งบล็อกหิน
- $\phi_{bn}$  = มุมเสียดทานภายในบนฐานสัมผัสของแท่งบล็อกหินที่ "n"
- $\phi_d$  = มุมเสียดทานภายในกรณีที่ยินยอมให้นำซึมผ่านระนาบสัมผัส
- $\phi_d$  = มุมเสียดทานภายในบนระนาบสัมผัสที่เกิดขึ้น
- $\phi_f$  = มุมเสียดทานภายในบนระนาบสัมผัสที่เกิดการพังทลายขณะนั้น
- $\phi_{fi}$  = มุมเอียงเทของผิวหน้าความลาดสำหรับการพังทลายรูปลิ่มบนพื้นผิวดิน
- $\phi_i$  = มุมเสียดทานภายในบนระนาบส่วนแบ่งที่ "i"
- $\phi_u$  = มุมเสียดทานภายในกรณีที่ไม่ยินยอมให้นำซึมผ่านระนาบสัมผัส
- $\phi'$  = มุมเสียดทานภายในประสิทธิภาพ
- $\phi_i$  = มุมเสียดทานภายในบนระนาบสัมผัสที่เกิดขึ้น =  $\phi_d$
- $\phi_i$  = มุมเสียดทานภายในของมวลสารรูปลิ่มได้พอดีที่ปรับปรุงใหม่ตามข้อเสนอแนะของ Terzaghi
- $\phi_{si}, \phi_{si+1}$  = มุมเสียดทานบนด้านข้างของส่วนแบ่งที่ "i" ตามพิทาคาร์ที่เขียน
- $\phi_{sn}$  = มุมเสียดทานภายในบนด้านข้างของแท่งบล็อกหินที่ "n"
- $\psi$  = มุมเอียงเทของระนาบ หรือมุมเอียงเทของแนวแรง
- $\psi_s$  = มุมเอียงเทของแรงเฉือนที่ก่อให้เกิดการเลื่อนไถล
- $\psi_T$  = มุมเอียงเทของแรงจากภายนอกที่เสริมเสถียรภาพนลิม
- $\psi_a$  = มุมเอียงเทของแรงตั้งฉากประสิทธิผลบนระนาบ A ของลิ่มบนพื้นผิวดิน
- $\psi_b$  = มุมเอียงเทของแรงตั้งฉากประสิทธิผลบนระนาบ B ของลิ่มบนพื้นผิวดิน
- $\psi_f$  = มุมเอียงเทสำหรับพื้นผิวระนาบของหน้าความลาดเอียง
- $\psi_i$  = มุมเอียงเทของเส้นที่เกิดจากระนาบ 2 ระนาบตัดกัน
- $\psi_p$  = มุมเอียงเทของระนาบที่ก่อให้เกิดการพังทลาย
- $(\psi_p)_{cr}$  = มุมเอียงเทของระนาบที่วิกฤต



$\Psi_u$	=	มุมเอียงเทโดยรวมของความลาดของส่วนบนแห่งบล็อกหิน
$\Psi_c$	=	มุมเอียงเทของแรงค้ำน้ำที่ขัง ในระนาบของรอยแตก จากแรงค้ำ
$Q$	=	โหลคในแนวค้ำ
	=	อัตราส่วนไร้มิติของค่าความสูงของการพังทลายแบบระนาบ
	=	แรงเฉือนทั้งหมดบนระนาบสัมผัส
	=	พจน์ตัวแปรของค่าแรงค้ำน้ำ ตามวิธี Janbu
$Q_i$	=	อัตราส่วนไร้มิติของความเสียดทานภายใน สำหรับส่วนแบ่ง ที่ "i"
$Q_n$	=	แรงเสียดทานด้านข้างของแห่งบล็อกหินที่ "n" ที่ก่อให้เกิด การเลื่อนไถล
$Q_{(n-1)}$	=	แรงเสียดทานด้านข้างของแห่งบล็อกหินที่ "n" ที่ด้าน การเลื่อนไถล
$Q_u(e)$	=	โหลคสูงสุดที่เอียงศูนย์กลางต่อพื้นที่ประสิทธิผลของฐานราก
$Q_u(e=0)$	=	โหลคสูงสุดที่ไม่มีการเอียงศูนย์กลางของฐานราก
$q$	=	สัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่ไม่ทราบ ตามวิธีของ Hoek et al. โหลคหรือการแบกรับน้ำหนักที่กระจายต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ น้ำหนักบรรทุกทุกสทบบนผิวดินเชิงประสิทธิผล ความเค้นอัดเชิงประสิทธิผลที่ระดับล่างสุดของฐานราก การแผ่กระจายความดันระบุ
$q_0$	=	แรงสุทธิต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่กระทำบนฐานราก
$q_b$	=	พจน์ตัวแปรหนึ่งในการหาค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของมวลสาร
$q_c$	=	พจน์ตัวแปรหนึ่งในการหาค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของมวลสาร
$q_u$	=	ความสามารถในการแบกรับน้ำหนักบรรทุก (หรือการรับแรงแบกทาน) สูงสุดของมวลสาร
$\bar{q}$	=	ความเค้นที่ระดับที่วางฐานราก
$q_{allowable}$	=	ความสามารถรับโหลคที่ยอมให้ได้ทั้งหมด
$q_{allowable (net)}$	=	ความสามารถรับโหลคที่ยอมให้ได้สุทธิ
$q_{max}$	=	การแผ่กระจายความดันระบุสูงสุด
$q_{min}$	=	การแผ่กระจายความดันระบุต่ำสุด
$q_{net(u)}$	=	ความสามารถในการรับน้ำหนักสุทธิ
$q'_u$	=	ความสามารถในการแบกรับน้ำหนักสูงสุดเชิงประสิทธิผล

- $R$  = เวกเตอร์แรงปฏิกิริยาของน้ำหนักมวลสาร  
 = อัตราส่วนไร้มิติของผลคูณหน่วยน้ำหนักกับระยะความสูง  
 ในเรื่องการพังทลายแบบระนาบ  
 = รัศมีของวงกลมที่เกิดการพังทลาย หรือรัศมีของการหมุน  
 ตามวิธี Bishop  
 = เวกเตอร์ผลลัพธ์ของแรงต้านต่อการเลื่อนไถลบนระนาบ
- $R_p$  = ผลลัพธ์ของแรงเสียดทานตามวิธีวิเคราะห์ด้วย  
 วงกลมความเสียดทานของ Taylor
- $R_i$  = แรงปฏิกิริยาของน้ำหนักบนส่วนแบ่งที่ "i"
- $r$  = สัมประสิทธิ์ของคัวแปร ไม่ทราบในการวิเคราะห์  
 เวกเตอร์แรงของการพังทลายรูปลิ่มบนพื้นผิวคิน  
 = เส้นอาร์กของการพังทลาย มีรูปแบบลอการิทึมของเส้นโค้ง
- $r_0$  = ระยะเริ่มต้นของอาร์กการพังทลายที่มีรูปแบบลอการิทึมของ  
 เส้นโค้งที่เวียนแบบก้นหอย
- $S$  = กำลังวัสดุเฉือนของมวลสาร  
 = อัตราส่วนไร้มิติของค่าความสูงของการพังทลายแบบระนาบ  
 = แรงเฉือนที่กระทำบนระนาบที่สัมผัส บนระนาบการ  
 เลื่อนไถล บนด้านข้างส่วนแบ่ง หรือบนแท่งบล็อกหิน
- $S_c$  = ระยะการทรุดตัว เนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ เมื่อมวลสาร  
 ถูกไหลคกระทำในแนวมิติเดียว
- $S_{c(oed)}$  = ระยะการทรุดตัว เนื่องจากการอัดตัวคายน้ำในมวลสาร  
 เมื่อทำการทดสอบด้วยเครื่อง Oedometer
- $S_a$  = ระยะการทรุดตัวอย่างทันทีทันใด
- $S_i, S_{i+1}$  = แรงเฉือนบนด้านข้างส่วนแบ่งที่ "i" ที่ก่อให้เกิดการ  
 เลื่อนไถล ตามการวิเคราะห์ของ Sarma
- $S_{zn}$  = แรงเฉือนขนานกับฐานแท่งบล็อกที่ "n" ตามวิธี Goodman  
 and Bray
- $s$  = ค่าคงที่เชิงประสมการของหินที่มีพฤติกรรมแบบไม่ใช่ฮิลาสติก  
 = สัมประสิทธิ์ของคัวแปร ไม่ทราบในการวิเคราะห์  
 เวกเตอร์แรงของการพังทลายรูปลิ่มบนพื้นผิวคิน  
 = ค่าคงที่สำหรับรูปร่างและระดับชั้นของการเชื่อมแน่นของ  
 อนุภาคแร่ในหินของวงกลมสิ่งทู่ของ Mohr สำหรับหินที่มี  
 พฤติกรรม ไม่ใช่ฮิลาสติกเชิงเส้น

$\sigma$	=	ความเค้นอัดฉากกับระนาบของการพังทลาย
$\sigma_1$	=	ความเค้นอัดฉากกับแนวขนานแกนแท่งหินตัวอย่าง
$\sigma_3$	=	ความเค้นอัดฉากกับด้านข้างแกนแท่งหินตัวอย่าง
$\sigma_j$	=	กำลังวัสดุอัดฉากในรอยแตกแยกของมวลหิน
$\sigma_{Bi}$	=	ความเค้นอัดฉากประสิทธิผลบนด้านฐานของส่วนแบ่งที่ "i"
$\sigma_R$	=	ความเค้นอัดฉากประสิทธิผลบนระนาบที่ขรุขระ
$\sigma_{si}, \sigma_{si+1}$	=	ความเค้นอัดฉากประสิทธิผลบนด้านข้างของส่วนแบ่งที่ "i"
$\sigma'$	=	ความเค้นอัดฉากประสิทธิผล
$T$	=	แรงภายนอกที่เสริมเสถียรภาพ
	=	ค่าคงที่สำหรับวงกลมสิ่งหุ้มของ Mohr สำหรับหินที่มีพฤติกรรมไม่ใช่ฮิสเทติกเชิงเส้น
$T_n$	=	แรงเฉือนที่กระทำนานกับระนาบ
$TH_i$	=	แรงภายนอกในแนวราบที่เสริมเสถียรภาพบนส่วนแบ่งที่ "i"
$T_i$	=	แรงภายนอกที่เสริมเสถียรภาพบนส่วนแบ่งที่ "i" ตามวิธี Sarma
$T_n$	=	แรงเฉือนที่ขนานด้านข้างบนส่วนแบ่งที่ "n"
$T_{n+1}$	=	แรงเฉือนที่ขนานด้านข้างบนส่วนแบ่งที่ "n" และอยู่ในแนวตรงข้ามกับ $T_{n+1}$
$T_r$	=	แรงเฉือนที่ด้านการเลื่อนไถล
$T_{rn}$	=	แรงต้านแรงเฉือนในแนวขนานกับฐานของส่วนแบ่งที่ "n"
$TS_i$	=	แรงภายนอกในแนวขนานกับฐานเพื่อเสริมเสถียรภาพของส่วนแบ่งที่ "i"
$T_s$	=	แรงภายนอกที่ป้องกันการเลื่อนไถลของบล็อกแท่งหิน
$T_t$	=	แรงภายนอกที่ป้องกันการทอปลิงของบล็อกแท่งหิน
$TV_i$	=	แรงภายนอกในแนวตั้งที่เสริมเสถียรภาพส่วนแบ่งที่ "i" ตามวิธี Sarma
$\Delta T$	=	ผลต่างของแรงเฉือนที่อยู่ด้านตรงข้ามกันบนส่วนแบ่งที่ "n"
$\tau$	=	ความเค้นเฉือนบนระนาบ
$\tau_d$	=	ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นขณะนั้น
$\tau_f$	=	ความเค้นเฉือนที่ก่อให้เกิดการพังทลาย
$\tau_R$	=	ความเค้นเฉือนบนระนาบที่มีผิวขรุขระ
$U$	=	แรงค้ำน้ำหนักบนระนาบของการพังทลาย

$U_1$	=	แรงผลักดันอิสระที่เกิดจากความดันน้ำในโพรงช่องว่าง
$u, u_1$	=	ความดันน้ำบนระนาบ
$U_A$	=	แรงดันน้ำบนระนาบ A ที่เป็นแรงยกตัวขึ้น
$U_B$	=	แรงดันน้ำบนระนาบ B ที่เป็นแรงยกตัวขึ้น
$U_i$	=	แรงดันน้ำที่เป็นแรงยกตัวขึ้นบนส่วนแบ่งที่ "i"
$V$	=	แรงผลักดันของน้ำที่เกิดในระนาบรอยแตกจากแรงดึง
$W$	=	น้ำหนักอิสระของมวลสาร
	=	น้ำหนักของมวลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า
$W_i$	=	น้ำหนักของส่วนแบ่งที่ "i"
$X$	=	พจน์ตัวแปรในการวิเคราะห์เสถียรภาพมวลสารตามวิธี Janbu
$X_i, Y_i$	=	จุดพิกัดที่แรงภายนอกเพื่อเสริมเสถียรภาพกระทำ
$X_i, X_{i+1}$	=	แรงเฉือนบนด้านข้างของส่วนแบ่งที่ "i" ที่ด้านการเลื่อนไถล
$XB_i, XB_{i+1}$	=	พิกัดตามแกนคาร์ทีเซียน x ตรงด้านส่วนล่างของชั้นประกอบที่ "i" ในการวิเคราะห์แบบ Sarma
$XG_i, YG_i$	=	พิกัดของจุดศูนย์กลางถ่วงของส่วนแบ่งที่ "i" บนระนาบ xy ตามวิธี Sarma
$XT_i, XT_{i+1}$	=	พิกัดตามแกนคาร์ทีเซียน x ตรงด้านส่วนบนของชั้นประกอบที่ "i" ในการวิเคราะห์แบบ Sarma
$x$	=	แกนหนึ่งของระบบคาร์ทีเซียน
	=	ระยะในแนวราบของระดับน้ำบาดาลจากแนวที่วิเคราะห์ผลถึงขอบเขตของระดับน้ำบนแกนคาร์ทีเซียน
	=	สัมประสิทธิ์ของตัวแปรไม่ทราบในการวิเคราะห์
	=	เวกเตอร์แรงของการพังทลายรูปสี่เหลี่ยมบนพื้นผิวดิน
$\Delta x$	=	ความกว้างของแท่งบล็อกหิน
$y$	=	พจน์ตัวแปรในการวิเคราะห์เวกเตอร์แรงบนมวลสี่เหลี่ยมผืนผ้า
	=	พจน์ตัวแปรในการวิเคราะห์เสถียรภาพมวลสารตามวิธี Janbu
$YB_i, YB_{i+1}$	=	พิกัดตามแกนคาร์ทีเซียน y ตรงด้านส่วนล่างของชั้นประกอบที่ "i" ในการวิเคราะห์แบบ Sarma
$YT_i, YT_{i+1}$	=	พิกัดตามแกนคาร์ทีเซียน y ตรงด้านส่วนบนของชั้นประกอบที่ "i" ในการวิเคราะห์แบบ Sarma

- $y$  = แกนหนึ่งของระบบคาร์ทีเซียน  
 = สัมประสิทธิ์ของตัวแปรไม่ทราบในการวิเคราะห์  
 เวกเตอร์แรงของการหักเหหลายรูปสี่เหลี่ยมบนพื้นผิวคิน  
 = ความสูงในแนวตั้งของส่วนแบ่งหรือแท่งบล็อกหินที่กำหนด  
 $y_n$  = ความสูงเฉลี่ยในแนวตั้งของส่วนแบ่งที่กำหนด  
 $Z$  = นิพจน์ตัวแปรในการวิเคราะห์ เวกเตอร์แรงบนมวลสี่  
 มบนพื้นผิวคิน  
 = ความสูงในแนวตั้ง (ความลึก) ของรอยแตกจากแรงดึง  
 พจน์ตัวแปรในการวิเคราะห์ เสถียรภาพมวลสารตาม  
 วิธี Janbu  
 $Z_i, Z_{i+1}$  = ระยะที่แรงจากภายนอกกระทำบนด้านข้างของส่วนแบ่ง  
 ที่ "i" ในการวิเคราะห์แบบ Sarma  
 $Z_w$  = ระยะความลึกในแนวตั้งของน้ำที่ขังในรอยแตกจากแรงดึง  
 $ZW_i, ZW_{i+1}$  = ระดับความสูงของน้ำในแนวตั้งตรงด้านข้างของ  
 ส่วนแบ่งที่ "i" ในการวิเคราะห์แบบ Sarma  
 $Z_{wn}$  = ความสูงในแนวตั้งของแท่งบล็อกหินที่ "n"  
 $z$  = แกนหนึ่งของระบบคาร์ทีเซียน  
 = สัมประสิทธิ์ของตัวแปรไม่ทราบในการวิเคราะห์  
 เวกเตอร์แรงของการหักเหหลายรูปสี่เหลี่ยมบนพื้นผิวคิน  
 = ระยะลึกในแนวตั้งใต้ระดับฐานราก  
 $z_1$  = ระยะลึกใต้ฐานรากมีค่า = 0.5 B (ฐานรากจัตุรัส  
 หรือฐานรากวงกลม) และมีค่า = B (ฐานราก  
 แบบแถบที่มี  $L/B > 10$ )  
 $z_2$  = ระยะลึกใต้ฐานรากมีค่า = 2 B (ฐานรากจัตุรัส  
 หรือฐานรากวงกลม) และมีค่า = 4 B (ฐานราก  
 แบบแถบที่มี  $L/B > 10$ )



## บทที่ 1 บทนำ

งานวิจัย เพื่อออกแบบจำลองการขุดเจาะสำหรับงานก่อสร้างหรือเปิดหน้าเหมืองภาคสนาม จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์เพื่อหาเสถียรภาพของงานก่อนที่จะเริ่มทำการตัดความลาดเอียงในการปรับระดับหรือการตัดไหล่เขา นอกจากนี้ในการหาเสถียรภาพของสิ่งก่อสร้างที่มีไหลค้ำหน้าหน้าฐานรากที่วางอยู่บนมวลสารที่เป็นดิน/หิน ก็เป็นสิ่งจำเป็นเพื่อป้องกันการพังทลายหรือการทรุดตัวของมวลสาร

วิศวกรหรือผู้ปฏิบัติงานภาคสนาม ควรทำการออกแบบจำลอง (model) ก่อนที่จะเริ่มงานก่อสร้างหรือก่อนที่จะเปิดหน้าดิน/หิน ทั้งนี้เพื่อวิเคราะห์ถึงโอกาสที่มวลสาร (ดินหรือหิน) อาจมีการไถลเลื่อนหรือทรุดตัวเนื่องจากผลของไหลค้ำหน้าของแรงที่ก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวมีสูงกว่าแรงต้านทานต่อการเลื่อนไถล หรืออาจเป็นเพราะว่ามวลสารได้ฐานรากไม่สามารถรับไหลค้ำที่กระทำได้

### 1.1 หลักการและจุดประสงค์ของงานวิจัย

งานการศึกษาวิจัยที่น่าเสนอในรายงานฉบับสมบูรณ์นี้ มีจุดประสงค์ที่จะครอบคลุมหลักการและแนวทางของการประเมินเสถียรภาพของการขุดเจาะความลาดเอียง หรือการขุดเจาะของงานฐานรากระดับดิน โดยอาศัยการประยุกต์ปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นกับการใช้สมการเชิงประสมการณ์ (empirical formula) ที่มีนักวิจัยเด่นหลายท่านได้เสนอแนะแล้วใช้เป็นพื้นฐานของแบบจำลอง เพื่อหาเสถียรภาพของหน้างานก่อสร้างหรือหน้างานเหมืองเปิด

### 1.2 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยในโครงการนี้ แบ่งแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์ชนิดรูปแบบของการพังทลายทั้งที่เกิดในมวลสารที่เป็นดินและมวลสารที่เป็นหิน ในส่วนที่เป็นแบบจำลองของงานฐานรากก็จะใช้วิเคราะห์กับฐานรากแบบแผ่ (spread footing) และวางอยู่ที่ระดับดิน

### 1.3 รูปแบบของการเสนอผลงานวิจัย

รูปแบบของการนำเสนอในรายงานฉบับสมบูรณ์นี้ ได้เลือกวิเคราะห์การพังทลายแบบระนาบ (plane failure) การพังทลายแบบวงกลม (circular failure) การพังทลายแบบรูปสามเหลี่ยม (wedge failure) และการพังทลายแบบทอปเปิล (toppling failure)

ในอีกส่วนรายงาน เป็นแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์หาเสถียรภาพของฐานรากที่วางตัวอยู่ระดับตื้น (shallow foundation) กำหนดให้มวลสารที่รองรับน้ำหนักของสิ่งก่อสร้างในเรื่องฐานรากนี้กำหนดให้เป็นชั้นดิน ในบางกรณีอาจเป็นชั้นดินเหนียว ชั้นดินทราย หรือชั้นดินเหนียวสลับกับชั้นดินทราย นอกจากการหาเสถียรภาพแบบปกติที่เป็นการศึกษาตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย (factor of safety) ยังมีการหาค่าระยะการทรุดตัว (settlement) ของมวลสารเมื่อรับโหลดที่กระทำผ่านฐานรากอีกด้วย

แนวทางของการประเมิน จะเริ่มต้นอธิบายความเป็นมาเชิงทฤษฎีของการวิเคราะห์เสถียรภาพตามรูปแบบเชิงเรขาคณิตอย่างง่ายที่ไม่มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องมาก ไปจนถึงรูปแบบอื่นที่มีอิทธิพลของตัวแปรอื่นเข้ามาเกี่ยวข้อง (เช่น ระดับน้ำใต้ดิน) และเพื่อให้สะดวกรวดเร็ว จึงได้นำเสนอการวิเคราะห์แบบจำลองเป็นโปรแกรมสำเร็จรูป (package program) ซึ่งได้บรรจุไว้ในจานบันทึก (diskette) ที่เก็บไว้ด้านหลังของปกรายงาน โปรแกรมนี้สามารถใช้ได้กับ เครื่องคอมพิวเตอร์บุคคลที่ไม่จำเป็นต้องมีหน่วยความจำสูงมาก

## บทที่ 2 กิ่งตึก การพังทลายแบบระนาบ

การวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาดเอียงหรือพื้นลาดเอียง (slope) ในบทนี้จะเริ่มการวิเคราะห์ที่ตั้งสมมุติฐานว่า มวลสารมีแนวโน้มจะเกิดการเลื่อนไถล (sliding) ได้ ตามแนวระนาบที่ราบเรียบที่เป็นแบบระนาบ (plane) การวิเคราะห์แบบนี้จัดเป็นงานการวิเคราะห์เบื้องต้นของการพังทลายที่มีรูปแบบเรขาคณิตอย่างง่าย ปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดการไถลเลื่อนตามแนวระนาบ ได้แก่ น้ำหนักของมวลสารบนระนาบที่อยู่ในสภาวะเกินสมดุลที่แรงต้านทานจะรับไว้ได้ และแรงดันน้ำที่ขังอยู่ในรอยแตกหรือในช่องว่างของระนาบ

### 2.1 เงื่อนไขของการพังทลายแบบระนาบ

เงื่อนไขต่างๆ ที่เป็นสิ่งกำหนดว่า มวลสารจะเลื่อนไถลตามระนาบที่เปราะบางหรือไม่ มีดังนี้

#### 2.1.1 เงื่อนไขหลัก

เงื่อนไขหลักที่จำเป็นในกรณีที่เกิดการพังทลายทุกครั้ง ได้แก่

#### 1. การสมดุลเชิงสถิตยศาสตร์

ในกรณีที่มวลสารที่อยู่บนระนาบที่อาจก่อให้เกิดการเลื่อนไถล ตามหลักการจำกัดของการสมดุล (limit equilibrium) จะกำหนดให้ค่าปัจจัยความปลอดภัย (Factor of Safety, F) ที่จุดสมดุลพอดีมีค่าเท่ากับ 1 (หนึ่ง) นั่นคือ

$$F = \frac{\text{แรงเฉือนต้านทานทั้งหมดต่อการเลื่อนไถล}}{\text{แรงทั้งหมดที่ก่อให้เกิดการเลื่อนไถล}} = 1 \quad (2.1)$$

#### 2. คุณสมบัติเฉพาะของมวลสารและการวางตัวของระนาบ

ระนาบที่จะเกิดการเลื่อนไถล ควรจะมีแนวการวางตัวของระนาบ ที่มักเรียกว่า แนวสันระนาบหรือแนวสันหิน (strike) ขนานหรือเกือบขนานกับหน้าความ (พื้น) ลาดเอียง นอกจากนี้ค่ามุมเอียงเท (dip angle) ของระนาบที่ก่อให้เกิดการพังทลาย (failure plane) มีค่ามุมเอียงเทน้อยกว่าค่ามุมเอียงเทของหน้าความลาดเอียง (slope face)



แต่ค่ามุมเอียงเทของระนาบ ต้องมีค่ามากกว่าค่ามุมเสียดทานภายในของระนาบที่อาจก่อให้เกิดการไถลเลื่อน นั่นคือ

$$\psi_f > \psi_p > \phi \quad (2.2)$$

ค่าของตัวแปรในสมการที่ 2.2 ได้แก่

$\psi_f$  = มุมเอียงเทของความลาดของมวลสาร

$\psi_p$  = มุมเอียงเทของระนาบที่เปราะบางที่มวลสารวางตัวอยู่

$\phi$  = มุมเสียดทานของพื้นผิวระนาบที่ก่อให้เกิดการพังทลาย

### 2.1.2 เงื่อนไขประกอบ

เงื่อนไขที่ควรนำมาพิจารณาประกอบกับ การเกิดสภาวะของการพังทลายแบบระนาบ ได้แก่

1. สมมติว่าความหนาของมวลบางมาก ดังนั้นพื้นผิวที่หลุดออก (release surfaces) ของมวลสารที่เลื่อนไถลจะ ไม่ก่อให้เกิดแรงต้านทานด้านข้าง (หรือถ้าจะมีก็เล็กน้อยมาก)
2. พื้นระนาบของการพังทลายจะสมมติให้เป็นระนาบราบเรียบ (smooth plane)
3. สมมุติฐานของการพังทลายแบบระนาบนี้ มวลสารมีการเลื่อนไถลตามแนวเส้น (translational sliding) ดังนั้นจึงไม่มีค่าโมเมนต์ของแรงที่เกิดจากการหมุนตัว (rotation) ของมวลสารเข้ามาเกี่ยวข้อง

## 2.2 การพังทลายแบบระนาบสำหรับความลาดเอียงที่ยาวมาก

วิธีการเบื้องต้น กำหนดให้ความลาดเอียงมีความยาวมาก (infinite slope) มีการพังทลายแบบระนาบ (plane failure) โดยไม่มีการค้ำยันเพื่อเสริมเสถียรภาพ เงื่อนไขในการพังทลายแบบมี 2 แบบ คือ มวลสารแห้งและมวลสารเปียก

### 2.2.1 เสถียรภาพของความลาดเอียงที่ยาวมากและแห้ง

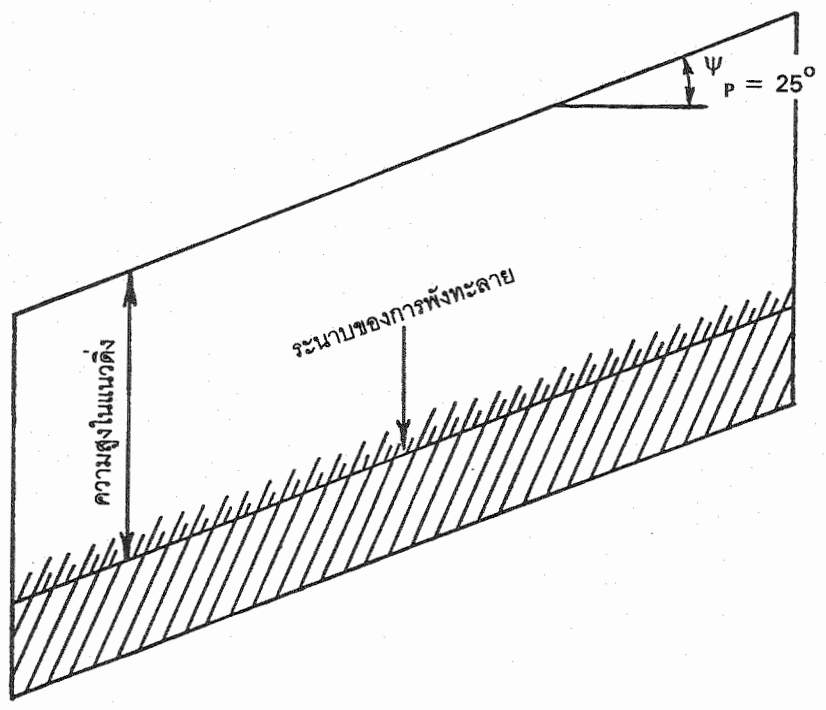
รูปที่ 2.1 เป็นรูปหน้าตัดความลาดเอียงที่ยาวมาก เนื่องจากมวลแห้ง จึงได้ค่าความเค้นเฉือนของมวลสาร  $\tau$  หรือ  $\tau_f$  ได้แก่

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2.3)$$

โดยที่

- $\tau$  = ค่าเฉลี่ยของกำลังวัสดุเฉือน (shear strength) ในมวลสาร
- $c$  = ค่าโคฮีชัน (cohesion) หรือแรงเชื่อมแน่นยึดติดในมวลสาร
- $\sigma$  = ความเค้นอัดฉากกับระนาบการพังทลาย (normal stress)
- $\phi$  = มุมเสียดทานภายใน (angle of internal friction)

\*\*หมายเหตุ คำอธิบายสัญลักษณ์และเครื่องหมาย ได้แสดงไว้ในหน้าพิเศษ



รูปที่ 2.1 ความลาดเอียงที่ยาวมากและแห้ง มวลความลาดเอียงวางตัวบนชั้นหิน

กรณีปกติของมวลดิน ที่เป็นดินทราย (sand) หรือ กรวด (gravel) ค่าโคฮีชันเท่ากับศูนย์ แต่ถ้าเป็นดินประเภทอื่นหรือเป็นมวลหินก็จะมีค่าโคฮีชัน

จากรูปที่ 2.1 กำหนดให้มีหน่วยเล็ก ๆ (element) ในความลาดเอียงเป็น abcd จะหาค่าน้ำหนักของมวลสาร (W) คือ

$$\begin{aligned}
 W &= (\text{หน่วยน้ำหนักของมวลสาร}) \times (\text{ปริมาตรของมวลสาร}) \quad (2.4) \\
 &= \gamma LH
 \end{aligned}$$

เมื่อกำหนดให้  $\gamma$  เท่ากับ หน่วยน้ำหนักของมวลสาร,  $L$  เป็นความยาวของหน่วยเล็ก ๆ และ  $H$  เป็น ความสูงของความลาดเอียงในแนวดิ่ง

การวิเคราะห์น้ำหนักของมวลสาร สามารถแยกหน่วยแรงได้ 2 ทิศทาง ได้แก่ หน่วยแรงจากกับระนาบการพังทลาย กับหน่วยแรงที่ขนานกับระนาบการพังทลาย ทำให้ได้ค่าความเค้นอัดฉาก ( $\sigma$ ) และความเค้นเฉือน ( $\tau$ ) ในแนวระนาบ ออกได้เป็น

$$\sigma = \frac{N_a}{\text{พื้นที่ของระนาบ}} = \gamma H \cos^2 \psi_p \quad (2.5)$$

$N_a$  = แรงกระทำที่ตั้งฉากระนาบ

$\psi_p$  = มุมเอียงเทของความลาดที่ทำการวิเคราะห์

และจะ ได้ค่า

$$\tau = \frac{T_a}{\text{พื้นที่ของระนาบ}} = \gamma H \cos \psi_p \sin \psi_p \quad (2.6)$$

กำหนดให้  $T_a$  = แรงเฉือนที่กระทำขนานกับแนวระนาบ

เมื่อเกิดโอกาสที่จะเลื่อนไถล (sliding) ค่าเฉลี่ยของความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นตามพื้นผิวระนาบของการเลื่อนไถล ( $\tau_d$ ) มีค่าเท่ากับ

$$\tau_d = c_d + \sigma \tan \phi_d \quad (2.7)$$

เมื่อกำหนดให้

$c_d$  = ค่าโคฮีชันหรือแรงเชื่อมแน่นยึดติดที่เกิดขึ้นตามระนาบของการพังทลาย บางที่เรียกว่า developed cohesion

$\phi_d$  = ค่ามุมเสียดทานภายในที่เกิดขึ้นตามแนวระนาบของการพังทลาย บางที่เรียกว่า developed friction angle

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของการพังทลาย นิยมใช้ค่าดัชนีที่เป็นค่าปัจจัยความปลอดภัยเมื่อเทียบกับกำลังวัสดุ (ใช้สัญลักษณ์  $F$  หรือ  $F_s$ ) จะ ได้

$$F = \frac{\tau_f}{\tau_d} = \frac{c + \sigma \tan \phi_d}{c_d + \sigma \tan \phi_d} \quad (2.8)$$

เมื่อทำการแทนค่าต่าง ๆ จากสมการที่ (2.3) ถึง (2.7) และจัดเทอมใหม่จะได้

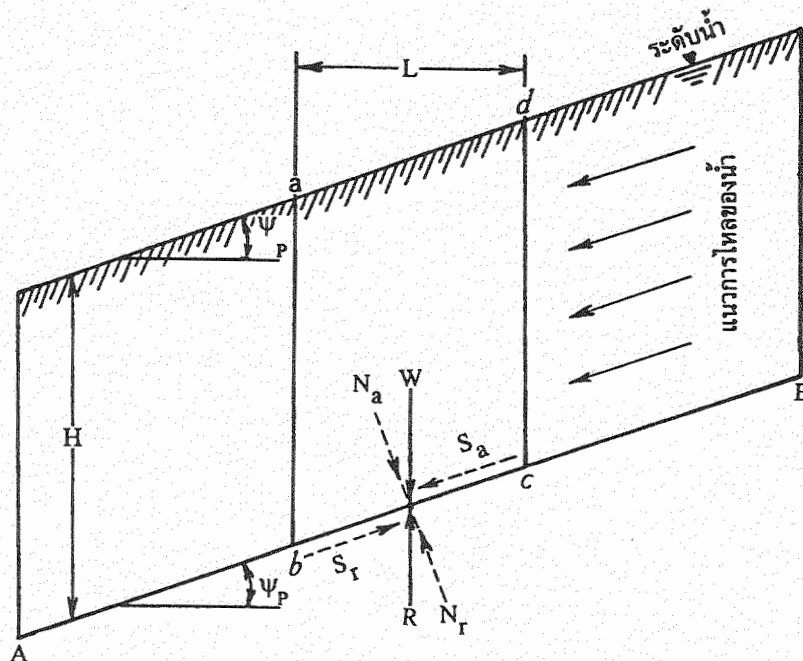
$$F = \frac{c}{\gamma H \cos^2 \psi_p \tan \psi_p} + \frac{\tan \phi}{\tan \psi_p} \quad (2.9)$$

เสถียรภาพของความลาดเอียงจะถึงจุดสมดุลพอดีที่ค่า  $F = 1$  หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งที่ว่าค่าตัวเลขตัวนี้ ความสูงของความลาดเอียงเป็นความสูงที่จุดวิกฤต ( $H_{c_x}$ ) ซึ่งแทนค่า  $H = H_{c_x}$  จะได้

$$H_{c_x} = \frac{c}{\gamma \cos^2 \psi_p (\tan \psi_p - \tan \phi)} \quad (2.10)$$

### 2.2.2 เสถียรภาพความลาดเอียงที่ยาวมากและเปียก

ในกรณีของความลาดเอียงที่ยาวมากและมีน้ำซึมผ่านช่องว่าง (seepage) วิธีการเบื้องต้นจะสมมุติว่า ทิศทางของระดับน้ำบาดาลมีแนวทางการไหลขนานกับมุมเอียงของมวลสารและระดับน้ำบาดาลอยู่สูงถึงพื้นผิวหน้าความลาดเอียงพอดี ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความลาดเอียงที่ยาวมากและเปียก ระดับน้ำบาดาลอยู่ตรงพื้นผิวของความลาดเอียง และมวลของความลาดเอียงวางตัวบนชั้นหิน/ชั้นดิน

ค่าความเค้นอัดฉากที่เกิดขึ้นในมวลสารสภาวะเปียกนี้ จะเป็นค่าความเค้นอัดฉากประสิทธิภาพ (effective stress,  $\sigma'$ )

$$\tau = c + \sigma' \tan \phi \quad (2.11)$$

ผลของความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นตรงฐานของหน่วยเล็ก ๆ (ในรูปที่ 2.2) มีค่า

$$\begin{aligned} \tau_d &= c_d + \sigma' \tan \phi_d \\ &= c_d (\sigma - U) \tan \phi_d \end{aligned} \quad (2.12)$$

เมื่อกำหนดให้ค่า  $U$  เป็นค่าความเค้นอัดที่เกิดจากความดันน้ำในโพรงช่องว่าง (pore water pressure) จากความรู้พื้นฐานเชิงกลศาสตร์ของไหล

$$\begin{aligned} \tau_d &= c_d + \{ \gamma_{sat} H \cos^2 \psi_p - \gamma_w H \cos^2 \psi_p \} \tan \phi_d \\ &= c_d + \gamma' H \cos^2 \psi_p \tan \phi_d \end{aligned} \quad (2.13)$$

หน่วยน้ำหนักประสิทธิภาพ ( $\gamma'$ ) มีค่าเท่ากับ หน่วยน้ำหนักอิ่มตัว ( $\gamma_{sat}$ ) ลบด้วย หน่วยน้ำหนักของน้ำ ( $\gamma_w$ ) ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

จัดเทอมใหม่และแทนค่าต่าง ๆ ลงไป จะได้ค่าปัจจัยความปลอดภัยของกรณีนี้เป็น

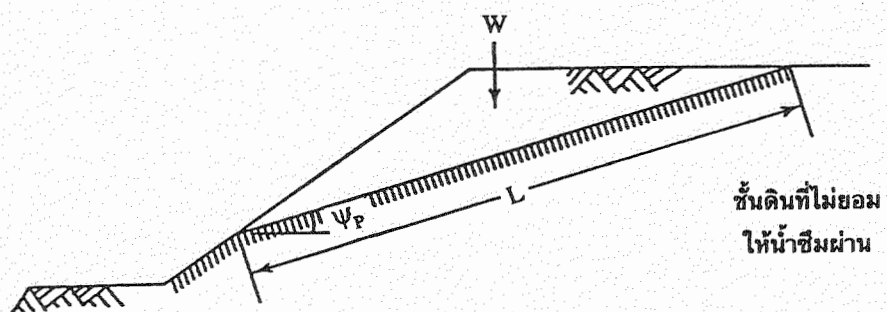
$$F = \frac{c}{\gamma_{sat} H \cos^2 \psi_p \tan \psi_p} + \frac{\gamma' \tan \phi}{\gamma_{sat} \tan \psi_p} \quad (2.14)$$

### 2.3 การพังทลายแบบระนาบของความลาดเอียงทั่วไป

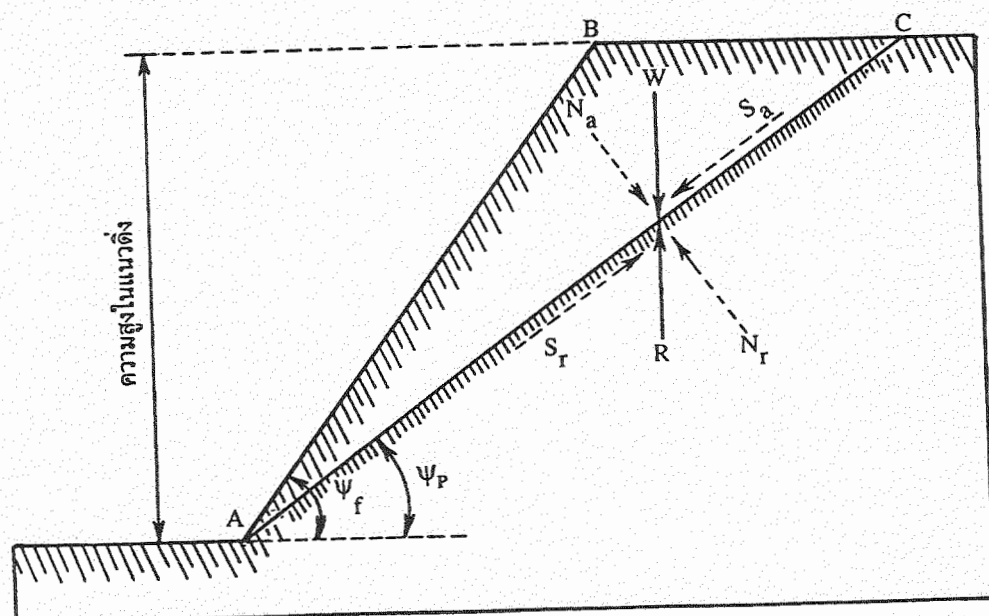
ความลาดเอียงที่มีความยาวจำกัดสามารถวัดได้ (finite slope) จัดเป็นความลาดเอียงที่มีความยาวปกติ การพังทลายแบบระนาบของความลาดเอียงชนิดนี้มีโอกาสที่จะเกิดได้หลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขและสภาวะที่เหมาะสม ดังนี้

#### 2.3.1 การพังทลายเนื่องจากน้ำหนักของมวลสารเพียงอย่างเดียว

การพังทลายในลักษณะนี้จะสมมุติว่า น้ำหนักของมวลสารที่อยู่บนระนาบมีส่วนสำคัญที่สุดที่ก่อให้เกิดการไหลเลื่อน โดยแบ่งตามรูปแบบเชิงเรขาคณิตของลักษณะการเกิดออกเป็น



รูปที่ 2.3 การพังทลายแบบระนาบที่ไม่ผ่านส่วนที่เป็นจุดล่างสุด (toe) ของความลาดเอียง



รูปที่ 2.4 การพังทลายแบบระนาบที่ผ่านส่วนที่เป็นจุดล่างสุด ของความลาดเอียง

1. การพังทลายแบบแรก เป็นการพังทลายเนื่องจากมวลสารที่วางตัวบนระนาบเปราะบางที่ตัดผ่านส่วนหน้าของความ (พื้น) ลาดเอียง แต่ไม่ผ่านจุดล่างสุด (toe) ของความลาดนั้น (ดูรูปที่ 2.3 ประกอบ) แรงที่ก่อให้เกิดการเลื่อนไถลเป็นแรงเฉือนตามแนวไม้เฝ้ถ่วงของโลภบนระนาบ ส่วนแรงที่ต้านไม่ให้เกิดการเลื่อนไถลเป็นแรงเฉือนที่เกิดเนื่องจากคุณสมบัติของมวลสาร ที่เกี่ยวข้องกับการยึดติดเนื่องจากค่าไคฮีชันหรือความเชื่อมแน่น (cohesion) และความเสียดทาน (friction) ที่เกิดขึ้นระหว่างมวลกับระนาบ

2. การพังทลายแบบที่สอง เป็นการพังทลายของมวลบนระนาบเอียง ที่แนวระนาบของการพังทลายตัดผ่านจุดล่างสุด (toe) ของความลาดเอียง (หรือดินถม) วิธีการแบบนี้บางที่เรียกว่า วิธีของ Culmann (ดูรูปที่ 2.4 ประกอบ) รูปแบบของการพังทลายแบบนี้มักใช้วิเคราะห์กับมวลบนความลาดเอียงที่มีเนื้อดินแบบเดียวกัน (homogeneous soil) ในขณะที่การพังทลายแบบแรก ใช้วิเคราะห์กับมวลบนความลาดเอียงที่มีเนื้อดินต่างประเภทกันปะปนกันใมเวล (heterogeneous soil)

สมการทั่วไปที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์การพังทลายแบบระนาบที่ไม่มีแรงดันน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยในการคำนวณ ได้แก่

$$F = \frac{cA + (W \cos \psi_p) \tan \phi}{W \sin \psi_p} \quad (2.15)$$

กำหนดให้  $c$  = ค่าไคฮีชันของมวลสาร

$A$  = พื้นที่ฐานของบล็อกมวลสารบนระนาบของการพังทลาย

$W$  = น้ำหนักในแนวตั้งทั้งหมดของมวลสาร

ถ้าหากมวลสารมีค่าไคฮีชันเท่ากับศูนย์ จะได้

$$F = \frac{\tan \phi}{\tan \psi_p} \quad (2.16)$$

### 2.3.2 การพังทลายของมวลสารที่มีแรงดันน้ำอยู่ในระนาบ

ถ้าหากในรอยแตกเปราะบางของระนาบการพังทลายมีน้ำเข้าไปแทรก จำเป็นต้องคำนวณค่าแรงยกตัว (uplift force,  $U$ ) ที่เกิดบนระนาบของการพังทลายด้วย

$$F = \frac{cA + (W \cos \psi_p - U) \tan \phi}{W \sin \psi_p} \quad (2.17)$$

### 2.3.3 การหาค่าความสูงวิกฤตตามวิธีของ Culmann

Culmann ได้เสนอแนะหลักการวิเคราะห์การพังทลายแบบระนาบ อย่างง่าย ๆ ว่า ค่าเฉลี่ยของกำลังวัสดุเฉือนตามแนวระนาบที่ก่อให้เกิดการเลื่อนไถลจะมีค่ามากกว่า

ค่าเฉลี่ยกำลังวัสดุเฉือนของมวลสาร จากรูปที่ 2.4 ของหัวข้อ 2.3.1 ที่แสดงรูปหน้าตัดของความลาดเอียงมีค่ามุมเอียงเท เท่ากับ  $\psi_f$  และมีโซนเปราะบางในมวลสารเกิดเป็นระนาบของการพังทลายทามุม เท่ากับ  $\psi_p$  กรณีที่สมมุติให้ความลาดเอียงมีความยาวที่จำกัด (finite slope) และมีค่าความสูงเท่ากับ H

ถ้าหากกำหนดให้  $\gamma$  เป็น หน่วยน้ำหนักของมวลสารที่เป็นดิน (หรือหิน) จะหาค่าน้ำหนักของมวลสาร (W) ที่จะเกิดการเลื่อนไถล (sliding) มีค่าเป็น

$$W = \frac{1/2\gamma H^2 [\sin(\psi_f - \psi_p)]}{\sin \psi_f \sin \psi_p} \quad (2.18)$$

วิเคราะห์แรงตามแนวต่าง ๆ จะได้

$$N_u = \text{แรงอัดตั้งฉากกับระนาบ} = W \cos \psi_p \quad (2.19)$$

$$T_u = \text{แรงเฉือนตามแนวขนานกับระนาบ} = W \sin \psi_p \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} \sigma &= \text{ค่าเฉลี่ยความเค้นอัดที่ตั้งฉากกับระนาบ} \\ &= \frac{1/2\gamma H [\sin(\psi_f - \psi_p)]}{\sin \psi_f \sin \psi_p} \cdot (\cos \psi_p)(\sin \psi_p) \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} \tau &= \text{ค่าเฉลี่ยความเค้นเฉือนตามแนวขนานกับระนาบ} \\ &= \frac{1/2\gamma H [\sin(\psi_f - \psi_p)]}{\sin \psi_f \sin \psi_p} \cdot (\sin^2 \psi_p) \end{aligned} \quad (2.22)$$

จากสมการที่ 2.7 ความเค้นเฉือนที่เกิดตามพื้นผิวขนานกับระนาบ มีค่าเท่ากับ

$$\tau_d = c_d + \sigma \tan \phi_d$$

ดังนั้น เมื่อแทนค่า  $\sigma$  จากสมการที่ 2.21 ลงไปจะได้ผลลัพธ์ของ  $c_d$  เป็น

$$c_d = \frac{1/2\gamma H [\sin(\psi_f - \psi_p)(\sin \psi_p - \cos \psi_p \tan \phi_d)]}{\sin \psi_f} \quad (2.23)$$

ในกรณีที่ต้องการหาค่าโคอีชันที่วิกฤต ก็ทำการหาค่าอนุพันธ์ตัวแรกของ  $c_d$  ที่เทียบกับ  $\psi_p$  ให้เท่ากับ 0 (ศูนย์) จากนั้นตั้งสมมติฐานของค่ามุมเอียงเทของระนาบที่วิกฤตให้ มีค่าเป็น

$$(\psi_p)_c = \frac{\psi_f + \phi_d}{2} \quad (2.24)$$



ต่อมาแทนค่าของ  $\psi_f = (\psi_p)_{cr}$  ลงไปในสมการที่ 2.23 จะได้

$$c_d = \frac{\gamma H}{4} \frac{[1 - \cos(\psi_f - \phi_d)]}{\sin \psi_f \cos \phi_d} \quad (2.25)$$

เมื่อกำหนดเงื่อนไขให้ ค่าความสูงสุดของความลาดเอียงสูงจนเกิดความสมดุลวิกฤต (critical equilibrium) ก็แทนค่า  $c_d = c$  และ  $\phi_d = \phi$  เข้าไปในสมการที่ 2.25 ข้างบน

$$H_{cr} = \frac{4c}{\gamma} \frac{[\sin \psi_f \cos \phi]}{[1 - \cos(\psi_f - \phi)]} \quad (2.26)$$

#### 2.3.4 การพังทลายของมวลสารกรณีที่มีรอยแตกจากแรงดึงเกิดขึ้น

ในกรณีที่มีรอยแตกจากแรงดึง (tension crack) เกิดขึ้น รูปแบบเชิงเรขาคณิตมีได้ 2 แบบ โดยได้แสดงลักษณะการเกิดไว้ในรูปที่ 2.5 และ 2.6

การวิเคราะห์เสถียรภาพในหัวข้อนี้ จำเป็นต้องเพิ่มค่าแรงเฉือนที่เกิดจากแรงดันน้ำที่ขังในรอยแตก (water thrust force, V) เข้าไปในการคำนวณด้วย และรอยแตกนี้เป็นผลเนื่องจากแรงดึง (tensile force) สูงกว่ากำลังวัสดุดึงของมวลสาร

$$F = \frac{cA + (W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p) \tan \phi}{W \sin \psi_p + V \cos \psi_p} \quad (2.27)$$

เมื่อทำการตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิต จากไดอะแกรมของแรงกับมิติต่างๆ ของความลาดเอียงที่แสดงในรูปที่ 2.7 และ 2.8 ได้ความสัมพันธ์เป็น

$$A = (H - Z) \operatorname{cosec} \psi_p \quad (2.28)$$

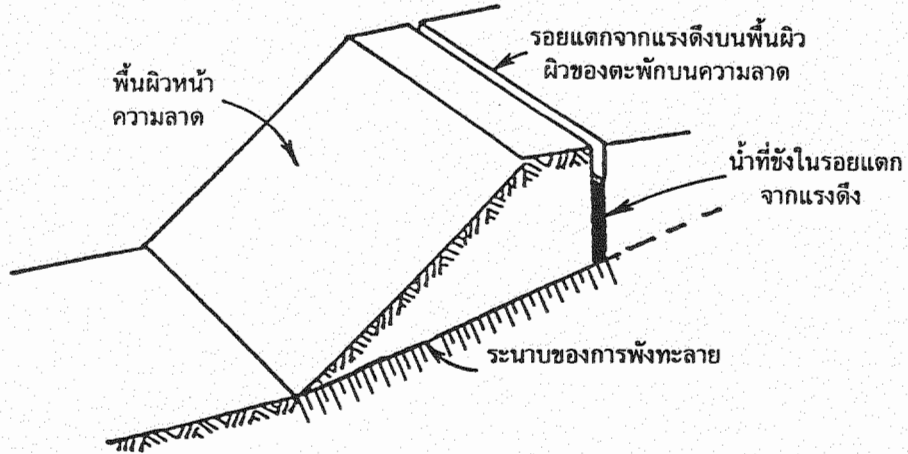
$$U = 1/2 \gamma_w Z_w (H - Z) \operatorname{cosec} \psi_p \quad (2.29)$$

$$V = 1/2 \gamma_w (z_w)^2 \quad (2.30)$$

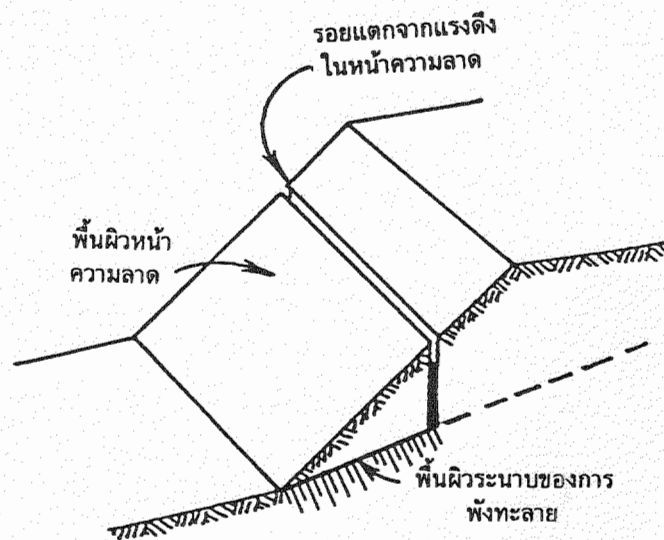
ค่าของน้ำหนักของบล็อกมวลสารที่อยู่บนระนาบ จะมีค่าแตกต่างกัน ในกรณีที่รอยแตกจากแรงดึง (tension crack) เกิดขึ้นที่พื้นผิวที่เป็นตะพักส่วนบนของความลาดเอียง (รูปที่ 2.5 และ 2.7)

$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[ \left\{ 1 - \frac{Z^2}{H^2} \right\} \cot \psi_p - \cot \psi_f \right] \quad (2.31)$$

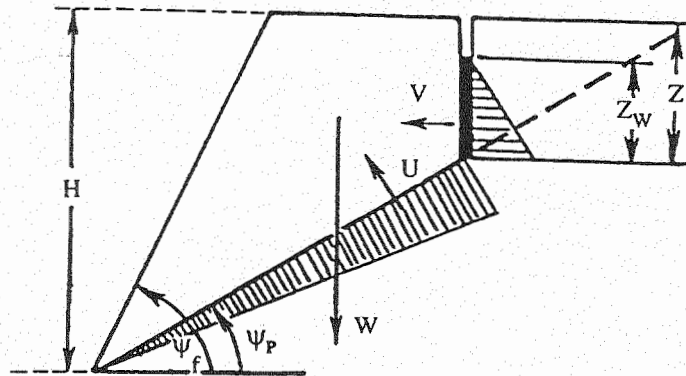
$$b = H \{ (\cot \psi_f \cot \psi_p)^{1/2} - \cot \psi_f \} \quad (2.32)$$



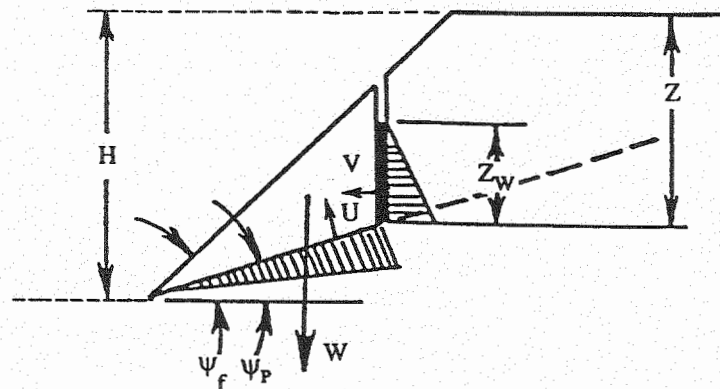
รูปที่ 2.5 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียงที่มีรอยแตกจากแรงดึงอยู่ในพื้นผิวตะพักด้านบนของความลาด



รูปที่ 2.6 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียงที่มีรอยแตกจากแรงดึง อยู่ในหน้าระนาบเอียงเทของความลาด



รูปที่ 2.7 โคอะแกรมของแรงและโมเมนต์ต่างๆ ของความลาดเอียง  
ที่แสดงรูปแบบไว้ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.8 โคอะแกรมของแรงและโมเมนต์ต่างๆ ของความลาดเอียง  
ที่แสดงรูปแบบไว้ในรูปที่ 2.6

กรณีที่รอยแตกจากแรงดึงเกิดขึ้นในผิวหน้าระนาบเอียงเทของความลาด (รูปที่ 2.6 และ 2.8)

$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[ \left\{ 1 - \frac{Z}{H} \right\}^2 \left\{ \cot \psi_p \cdot \tan \psi_f - 1 \right\} \right] \quad (2.33)$$

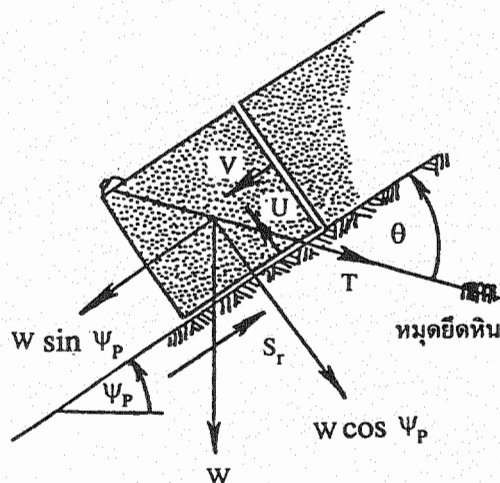
$$Z = H \{ 1 - \cot \psi_f \tan \psi_p \} \quad (2.34)$$

สัญลักษณ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในสมการที่ 2.31 ถึง 2.34 มีความหมาย ดังนี้

- H = ความสูงในแนวตั้งของมวลความลาดเอียง
- Z = ความสูงของรอยแตกที่เกิดจากแรงดึง
- $\gamma_w$  = หน่วยน้ำหนักของน้ำ (หรือของเหลว)
- $Z_w$  = ความสูงของน้ำที่ขังในรอยแตกจากแรงดึง
- b = ระยะห่างในแนวราบของรอยแตกจากแรงดึงกับจุดสูงสุด (crest) ของความลาดเอียง

#### 2.4 การเสริมเสถียรภาพของความลาดเอียง

เมื่อความลาดเอียงที่มีผลการเคราะห์คาดคะเนล่วงหน้าว่าจะมีความไม่เสถียรภาพ (instability) เกิดขึ้น ดังนั้นจึงควรแก้ไขโดยทำการระบายน้ำออกจากมวล (drainage) หรือทำการประยุกต์ใช้โหลภายนอก (external load) มาเพื่อทำให้มวลมีแรงยึดติดและความเสียดทานสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ข้างล่างนี้



รูปที่ 2.9 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของการเสริมเสถียรภาพของความลาดเอียง โดยการใช้โหลภายนอก

ตัวอย่างของการเพิ่มโหลคภายนอก ได้แก่ การติดตั้งใส่หมุดยึดหิน (rock bolt) หรือลวดยึดคิ (cable bolt) เป็นการเพิ่มน้ำหนักของโหลคของแรงอัดจากกับระนาบ ทำให้มวลสารที่ไม่เสถียรภาพ เกิดมีการยึดคิเชื่อมแน่นกับระนาบสูงขึ้น

ค่าปัจจัยความปลอดภัย เมื่อมีโหลคภายนอกขนาด  $T$  กระทำกับความลาด (พื้น) ลาดเอียง ที่แนวของโหลคทำมุมกับแนวเส้นตั้งฉากของระนาบ เท่ากับ  $\theta$  จะได้ค่า

$$F = \frac{cA + (W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p + T \cos \theta) \tan \phi}{W \sin \psi_p + V \cos \psi_p - T \sin \theta} \quad (2.35)$$

## 2.5 การพังทลายของมวลสารบนระนาบที่มีพื้นผิวขรุขระ

เมื่อพิจารณาแบบเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียงที่แสดงในรูปที่ 2.5 และ 2.6 ค่าความเค้นอัดจากประสิทธิผล (effective normal stress,  $\sigma_R'$ ) มีค่าเท่ากับ

$$\sigma_R' = \frac{W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p}{A_R} \quad (2.36)$$

ในกรณีของค่ากำลังวัสดุเฉือนบนระนาบที่มีพื้นผิวขรุขระ Barton (1973) ได้เสนอแนวทางที่จะหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติต่างๆของมวลสารบนพื้นผิวที่ขรุขระ ดังนี้

$$\tau_R = \sigma_R' \tan [\phi + JRC \log_{10} \sigma_j / \sigma_R'] \quad (2.37)$$

$\tau_R$  = กำลังวัสดุเฉือนบนระนาบที่ขรุขระ

$\sigma_R'$  = ความเค้นอัดจากประสิทธิผลบนระนาบที่ขรุขระ

$\sigma_j$  = กำลังวัสดุอัดของระนาบรอยแตกแยกในมวลหิน

$\phi$  = มุมเสียดทานภายในของพื้นผิวระนาบ

JRC = ค่าตัวเลขสัมประสิทธิ์ของระนาบที่มีพื้นผิวขรุขระ (Joint Roughness Coefficient)

- มีค่า = 20 เมื่อเป็นระนาบรอยแตกแยกจากแรงดึง (tension joint)

- มีค่า = 10 เมื่อเป็นรอยแตกแยกชั้นหินที่ไม่เป็นแนวเส้นตรง (non-planar bedding)

- มีค่า = 5 เมื่อเป็นรอยแตกแยกชั้นหินที่เป็นแนวเส้นตรง (planar bedding)

เมื่อทราบค่าความเค้นอัดฉากประสิทธิผล ( $\sigma_R'$ ) จากสมการที่ 2.36 และค่าความเค้นเฉือนของพื้นผิวที่ขรุขระ ( $\tau_R$ ) จากสมการที่ 2.37 ได้ค่าปัจจัยความปลอดภัยบนระนาบที่มีพื้นผิวขรุขระ ดังนี้

$$F = \frac{\tau_R A_R}{W \sin \psi_p + V \cos \psi_p} \quad (2.38)$$

## 2.6 เสถียรภาพของความลาดเอียงกรณีที่เกิดแผ่นดินไหว

ในการหาค่าปัจจัยความปลอดภัยของความลาดเอียง ที่มวลสารมีการถูกตัดความชันของการเอียงที่ลาดน้อยลง หรือทำการถมดินเป็นชั้นลาดชัน และบริเวณนี้มีโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดแผ่นดินไหว จึงจำเป็นต้องนำค่าแรงที่มีผลจากการไหวสะเทือนของแผ่นดินไหว (earthquake force) เข้ามาคำนวณร่วมด้วย

ถ้าหากสมมุติให้มีแรงจากแผ่นดินไหวเกิดขึ้น มีขนาดเท่ากับ  $\alpha$  และแนวของแรงจากแผ่นดินไหวนี้ กระทำในทิศทางเดียวกับแนวของแรงค้ำน้ำในรอยแตกของแรงดึง ( $V$ ) ทำให้ได้ ค่าตัวเลขเสถียรภาพของความลาดเอียงที่ขึ้นกับรูปแบบเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียง ดังนี้

### กรณีทีหนึ่ง

ความลาดเอียงที่มีรอยแตกจากแรงดึงอยู่ในแนวของความลาดเอียง จะได้ค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพเป็น

$$F = \frac{cA + \{W(\cos \psi_p - \alpha \sin \psi_p) - U - V \sin \psi_p\} \cdot \tan \phi}{W(\sin \psi_p + \alpha \cos \psi_p) + V \cos \psi_p} \quad (2.39)$$

### กรณีที่สอง

ความลาดเอียงที่ไม่มีรอยแตกจากแรงดึงอยู่ในแนวของความลาดเอียง แต่มีน้ำไหลซึมออกมาตามระนาบของการพังทลาย จะได้ค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพเป็น

$$F = \frac{cA + \{W(\cos \psi_p - \alpha \sin \psi_p) - U\} \cdot \tan \phi}{W(\sin \psi_p + \alpha \cos \psi_p)} \quad (2.40)$$

## 2.7 แนวทางใหม่ของอิทธิพลของระดับน้ำใต้ดินในความลาดเอียง

การไหลของน้ำบาดาลใต้พื้นผิว (groundwater flow) ในมวลดินหรือในมวลหินที่เป็นความลาดเอียง ถ้าหากการไหลอยู่ในสภาวะที่ไม่มีการปิดกั้น (unconfined state) จะพบว่าลักษณะ 2 มิติ ของการไหล (Harr, 1962) เป็นแบบไฮเพอร์โบล่า (hyperbola) ดังนั้นการจำลองแบบสภาวะของน้ำที่ขังอยู่ในผิวหน้าความลาดเอียง โดยสมมุติให้เป็นการไหลมีแนวเส้นตรงและหาค่าการกระจายความดันน้ำ (water pressure distribution) เป็นโคอะแกรมการกระจายความดันรูปสามเหลี่ยม ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 และ 2.8 หัวข้อ 2.3.4 จึงนับว่ายังไม่ถูกต้องนัก

ผู้วิจัยได้หาแนวทางประยุกต์ใช้ระดับน้ำบาดาลในมวลสารของความลาดเอียง โดยกำหนดให้แนวระดับน้ำเป็นรูปไฮเพอร์โบล่า แล้วหาค่าตัวเลขของปัจจัยความปลอดภัยมาเปรียบเทียบกับแนวทางของการใช้โคอะแกรมรูปสามเหลี่ยม ปรากฏว่าโปรแกรมการคำนวณค่าปัจจัยที่ใช้ระดับน้ำบาดาล (groundwater table) ในรูปแบบไฮเพอร์โบล่า ได้ผลลัพธ์ของการประเมินเสถียรภาพความลาดเอียงใกล้เคียงความเป็นจริงมากกว่า จึงได้ใช้รูปแบบเชิงเรขาคณิตของระดับน้ำบาดาลแบบนี้ มาประยุกต์ในส่วนของโปรแกรมการวิเคราะห์การพังทลายแบบระนาบ โดยขออธิบายแนวทางใหม่ของอิทธิพลของน้ำบาดาลดังต่อไปนี้

### 2.7.1 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียงที่จมน้ำบางส่วน

ลักษณะเชิง 2 มิติ ของปรากฏการณ์ที่น้ำบาดาลไหลผ่านมวลความลาดเอียง ได้แก่

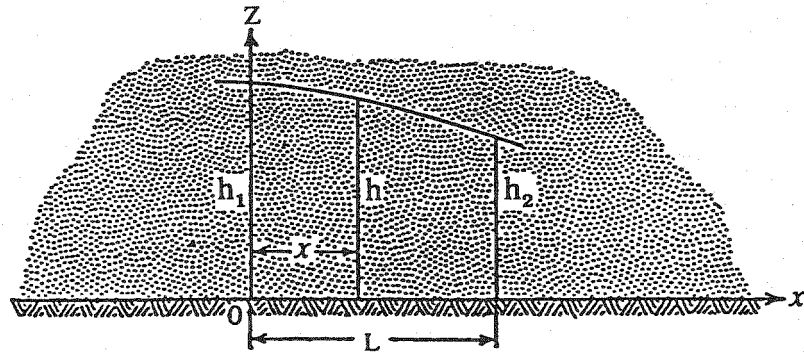
#### 1. การไหลของน้ำระนาบราบ

จากโคอะแกรมของรูปที่ 2.10 ถ้าหากน้ำบาดาลไหลในระนาบที่ราบ ให้ระนาบ XZ ระยะความสูงของระดับน้ำบาดาลรูปไฮเพอร์โบล่าที่จุดความสูง  $h_1$  และ  $h_2$  เมื่อต้องการหาค่าความสูง  $h$  (ซึ่งเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า) ตรงจุดใด ๆ ที่อยู่ระหว่างจุด  $h_1$  และ  $h_2$  โดยมีระยะห่างในแนวราบจาก  $h_1$  เท่ากับ  $x$  กำหนดให้ระยะทางในแนวราบระหว่างจุด  $h_1$  กับ  $h_2$  เท่ากับ  $L$  ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

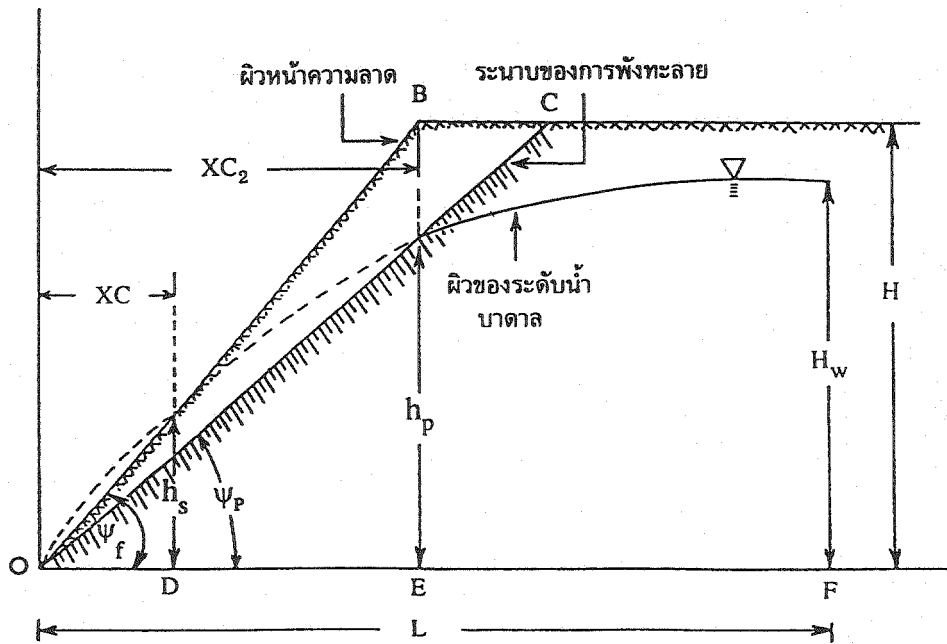
$$h = \sqrt{h_1^2 - (h_1^2 - h_2^2) \frac{x}{L}} \quad (2.41)$$

#### 2. การไหลของน้ำบาดาลในความลาดเอียง

ถ้าหากกำหนดให้ระดับน้ำบาดาลที่ระยะ (จุด) คำสุด เริ่มต้นที่จุด O และจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในรูปเส้นโค้งไฮเพอร์โบล่าในความลาดเอียง ดังแสดงรูปแบบเรขาคณิตของความลาดเอียงไว้ในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 การไหลของน้ำบาดาลแบบไม่ปิดกั้น (unconfined) ในระนาบราบ



รูปที่ 2.11 การไหลของน้ำบาดาลแบบไม่ปิดกั้น (unconfined) ในความลาดเอียง



สภาวะที่พบบ่อยในภาคสนาม เมื่อมวลความลาดเอียงที่จมน้ำบางส่วน (partially submerged) มีผลทำให้มวลของดิน/หิน ไม่แห้งสนิท หรือ อิ่มตัวด้วยน้ำ ทั้งนี้เพราะว่ามีน้ำใต้ดินแทรกอยู่ในความลาดเอียง บางครั้งระดับน้ำบาดาลก็เพิ่มขึ้นเนื่องจากฝนตก บางครั้งระดับน้ำบาดาลก็ลดต่ำลงเนื่องจากอากาศแห้งแล้งเป็นเวลานาน

### 2.7.2 ความสัมพันธ์ของการไหลของน้ำบาดาลแบบไฮเพอร์โบล่า

จากรูปที่ 2.11 กำหนดให้  $H$  เป็นค่า slope height, มุม  $\psi_f$  เป็นมุมเอียงของ slope face, มุม  $\psi_p$  เป็นมุมเอียงของ failure plane, ระยะ BC เป็นระยะในแนวราบจาก slope crest ถึงจุดที่เกิด tension crack บนพื้นผิวด้านบนของความลาดเอียง, ระยะ XC เป็นระยะในแนวราบที่ groundwater surface ตัดกับ slope face, ค่าระยะ  $h_s$  เป็นความลึก (สูง) ที่ระดับน้ำบาดาลตัดกับ slope face, ค่าระยะ  $h_p$  เป็นความลึก (สูง) ที่ระดับน้ำบาดาลตัดกับ failure plane, ค่าระยะ  $H_w$  เป็นระยะความลึก (สูง) ที่ระดับน้ำบาดาลตัดกับจุดสุดท้ายของ surface boundary ที่ระยะในแนวราบ  $L$ , ส่วน  $L$  เป็นระยะในแนวราบ (OF) ที่ตั้งต้นจากจุด  $O$  ถึงจุดสุดท้ายของ surface boundary (จุด F)

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างไดอะแกรมของภาพในรูปที่ 2.10 กับรูปที่ 2.11 จะได้ความสัมพันธ์คล้ายคลึงกับสมการที่ 2.41 เมื่อกำหนดให้  $h_1 = 0$  ทำให้ได้ค่าความลึก (สูง) ที่ระดับน้ำบาดาลตัดกับ slope face เป็น

$$h_s = H_w \sqrt{\frac{XC}{L}} \quad (2.42)$$

จากนั้นหาความสัมพันธ์ทางตรีโกณมิติของรูปที่ 2.11

$$h_s = XC \tan \psi_f \quad (2.43)$$

จากสมการที่ 2.42 และ 2.43 หากความสัมพันธ์ของระยะในแนวราบที่จุดตัดของ groundwater table ตัดกับ slope face ได้เป็น

$$XC = \frac{H_w^2}{L \tan^2 \psi_f} \quad (2.44)$$

ในทำนองเดียวกันกับสมการที่ 2.42 จะได้ค่าความลึก (สูง) ที่ระดับน้ำบาดาลตัดกับ failure plane เป็น

$$h_p = H_w \sqrt{\frac{XC_2}{L}} \quad (2.45)$$

ความสัมพันธ์เชิงตรีโกณมิติของรูปที่ 2.11 จะได้

$$h_p = XC_2 \tan \psi_p \quad (2.46)$$

จากสมการที่ 2.45 และสมการที่ 2.46 ทำให้สามารถหาค่าระยะในแนวราบที่ groundwater table ตัดกับ failure plane เป็น

$$XC_2 = \frac{H_w^2}{L \tan^2 \psi_p} \quad (2.47)$$

### 2.8 โปรแกรมแบบจำลองการพังทลายแบบระนาบ

รูปแบบของโปรแกรม ได้มีการตั้งสมมุติฐานของตัวอย่างโจทย์อิงตามทฤษฎีของการวิเคราะห์เชิงกลศาสตร์ของการพังทลายแบบระนาบ และมีความสะดวกและรวดเร็วกว่าการแสดงผลเฉลยที่ใช้เครื่องคิดเลขธรรมดาช่วย

ตัวอย่างของโจทย์ที่สมมุติขึ้น ได้ระบุไว้บ้างแล้วในรายงานฉบับแรก ดังนั้นจึงจะนำเสนอเฉพาะผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมตามชนิดรูปแบบการพังทลายแบบระนาบ ซึ่งแบ่งชนิดของรูปแบบออกเป็น แบบจำลองที่ใช้การวิเคราะห์ผลโดยตรง กับแบบจำลองที่ใช้การวิเคราะห์ผลเชิงเปรียบเทียบ

#### 2.8.1 แบบจำลองที่ใช้การวิเคราะห์ผลโดยตรง

โปรแกรมที่เขียนตามสมการแบบจำลองของกลุ่มนี้ จะรับค่าตัวเลขบนเมนูหลักแล้วทำการคำนวณโดยอาศัยสมการหลักและสมการเฉพาะที่ได้ระบุมาแล้ว ผู้ใช้โปรแกรมจำเป็นต้องเลือกชนิดย่อยหรือเงื่อนไขย่อยของการพังทลายแบบระนาบ ที่แสดงไว้ให้บนหน้าจอว่าโอกาสของการพังทลายน่าที่จะเป็นแบบไหน

ในช่วงของการรับข้อมูลเข้า โปรแกรมจะถามค่าข้อมูลดิบที่เป็นค่ามิติเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียงหรือถามค่าตัวเลขคุณสมบัติของมวลดิน/มวลหิน นอกจากนี้ผู้ใช้โปรแกรมอาจจะต้องกรอกข้อมูลเข้าที่เป็นรายละเอียดเฉพาะกรณีที่เกิดการพังทลายชนิดย่อยนั้น ๆ

เมื่อได้ข้อมูลเข้าครบตามความต้องการ โปรแกรมจะเริ่มทำการประเมินผลโดยทำการคำนวณค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพของความลาดเอียง และแสดงภาพกราฟิกของรูปแบบการพังทลายเชิงระนาบ กับแสดงค่าขนาดมิติที่สำคัญในการเกิดการพังทลาย ลักษณะของตัวอย่างการแก้ปัญหาที่ใช้การวิเคราะห์ผลโดยตรง สามารถนำไปใช้กับโจทย์ในหลายรูปแบบ ได้แก่

1. การแก้ปัญหา เรื่องระนาบความลาดเอียงที่ยาวมาก
2. การแก้ปัญหา เรื่องระนาบความลาดเอียงที่มีระยะมิติจำกัด
3. การหาค่าไหลคของการเสริมเสถียรภาพโดยตรง

ตัวอย่างของโจทย์ทั้ง 3 รูปแบบข้างบนพร้อมทั้งตารางค่าตัวเลข (ตารางที่ 2.1 ถึง 2.3) ตามที่ได้แสดงไว้ในหน้าที่ 23-25 ซึ่งการแก้ปัญหาโจทย์บางข้อนอกจากมีตารางที่ประกอบด้วยข้อมูลเข้าและผลลัพธ์แล้วยังมีรูปภาพที่เขียนจากโปรแกรมอีกด้วย

### 2.8.2 แบบจำลองที่ใช้การวิเคราะห์ผลเชิงการเปรียบเทียบ

โปรแกรมแบบจำลองการวิเคราะห์ผลในกลุ่มที่สองนี้ มีหลักการคล้ายคลึงกับโปรแกรมแบบจำลองในกลุ่มแรก โดยมีการรับค่าตัวเลขมิติต่างๆ และค่าตัวเลขคุณสมบัติของมวลสาร จากนั้นก็มีการคำนวณผลลัพธ์ของตัวเลขเชิงเสถียรภาพ

อย่างไรก็ตาม การแสดงผลบนหน้าจอก็จะเป็นรูปภาพหรือเป็นค่าตัวเลขเชิงการเปรียบเทียบ โดยมักจะนำค่าปัจจัยความปลอดภัยที่มีหลายค่า (เนื่องจากกำหนดให้มีเงื่อนไขการพังหลาย ได้หลายรูปแบบตามโอกาสของความน่าจะเป็นไปได้) หัวข้อหลักที่แสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการพังหลาย ที่แตกต่างตามสภาวะเชิงกลศาสตร์ที่น่าจะเป็นไปได้ ได้แก่

#### 1. การหาค่ามุมเอียงเทของความลาดตามรูปแบบเชิงเรขาคณิตหน้างาน

การหาค่ามุมเอียงเทความลาดที่เหมาะสมที่สุด ตามการสมมุติค่าตัวเลขรูปแบบเชิงเรขาคณิตที่สมมุติขึ้น เมื่อกำหนดค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพคงที่ ทำให้ได้ค่ามุมเอียงเทของการตัดความชันของหน้าชั้นดินเชิงไหล่เขา หรือมุมเอียงเทของการตัดความชันของความลาดหน้าเหมือง ตัวอย่างนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.4 หน้า 26

#### 2. การหาค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพระหว่างสภาวะของมวลสารที่แห้งกับเปียก

ลักษณะของการวิเคราะห์เมื่อต้องการตัดความลาดชันได้มีการเงื่อนไขเพิ่มเติม คือ ก. กำหนดให้มีการตัดหน้าดินหรือเปิดหน้าเหมืองหิน เป็นแบบตะพัก (bench) ข. ระนาบของการพังทลายตัดผ่านจุดล่างสุด (toe) กับมีรอยแตกจากรอยดึงเกิดบนตะพักส่วนบน ตามรูปแบบเชิงเรขาคณิตที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.7

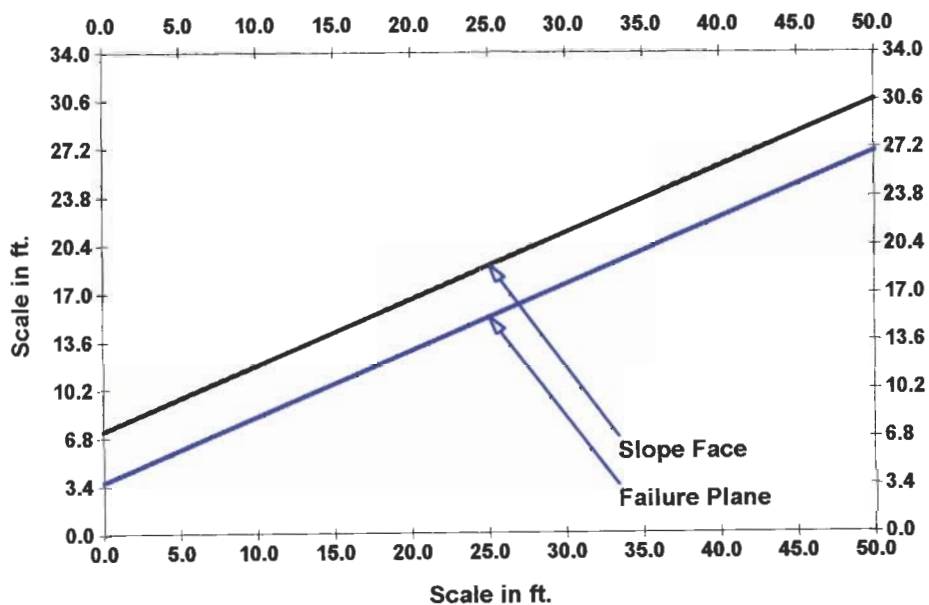
ค. ข้อมูลเข้าที่สำคัญที่มีการแปรเปลี่ยน ได้แก่ ค่าของมุมเอียงเทของความลาด (slope angle) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือมีการตัดหน้าความลาดชันหรือหน้าเหมืองที่มีความลาดแตกต่างกัน สามารถจะใช้โปรแกรม STABIL.EXE คำนวณหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะที่มวลความลาดมีการระบายน้ำออกหมด (fully drained) กับสภาวะที่มวลความลาดอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated) ได้ดังรูปที่ 2.14 หน้า 27

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลเข้าสำหรับตัวอย่างการแก้ปัญหาการพังทลาย  
แบบระนาบที่มีความลาดเอียงที่มีระยะมิติน้ำยาวมาก

Slope Property			
Material Property and Measurement			
Cohesion, lb/ft <sup>2</sup>	200.00	Saturated Unit Weight, lb/ft <sup>3</sup>	118.00
Angle of Internal Friction, Degrees	15.00	Dip Angle of Slope Face, Degrees	25.00
Soil Unit Weight, lb/ft <sup>3</sup>	100.00	Slope Height, ft.	3.66
Water Unit Weight, lb/ft <sup>3</sup>	62.40		

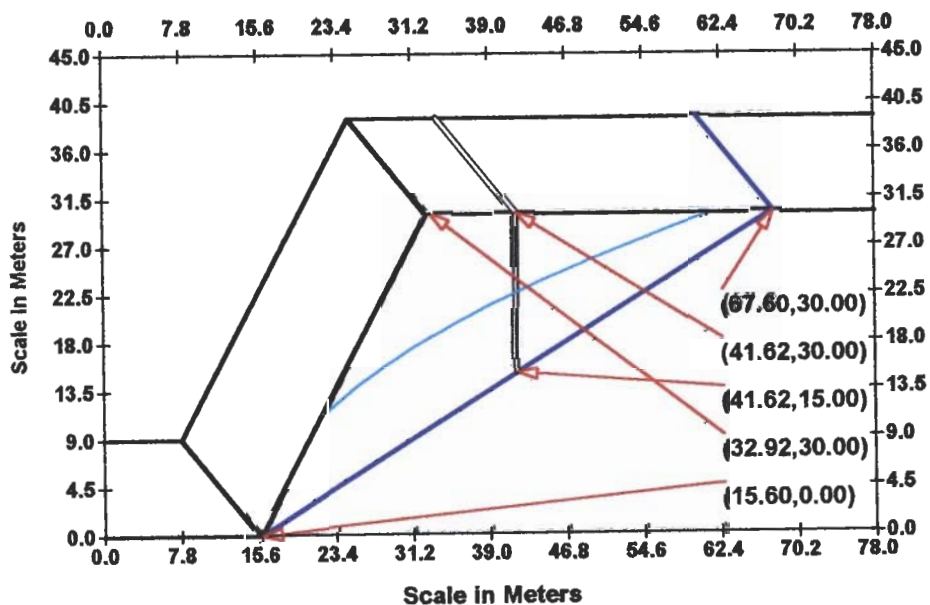
Analysis Result	
Factor of Safety = 1.48	



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงรูปแบบเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียงที่มีระยะมิติน้ำยาวมาก และมวลสารที่อยู่บนระนาบเป็นดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลเข้าสำหรับตัวอย่างการแก้ปัญหาการพังทลาย  
แบบระนาบที่มีความลาดเอียงที่มีระยะมิติจำกัด

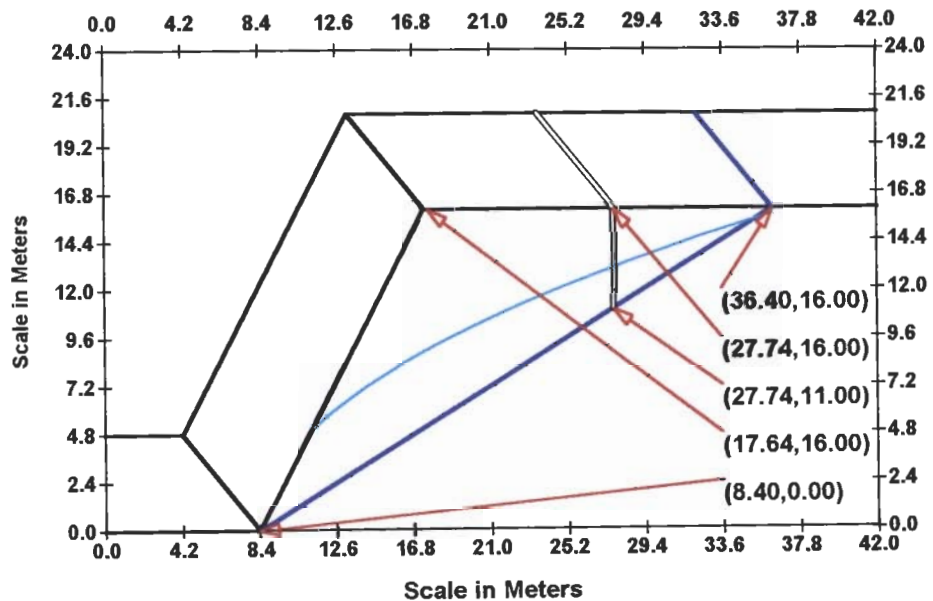
Slope Property			
Material Property and Measurement			
Cohesion, kPa	48.00	Dip Angle of Slope Face, Degrees	60.00
Angle of Internal Friction, Degrees	30.00	Dip Angle of Failure Plane, Degrees	30.00
Soil Unit Weight, kN/m <sup>3</sup>	25.00	Slope Height, meters	30.00
Water Unit Weight, kN/m <sup>3</sup>	9.81		
Conditions			
1. Tension Crack		3. Analysis of Failure on Earthquake	
On Upper Slope Face		Earthquake Force, m/sec <sup>2</sup>	-
Height of Tension Crack, meters	15.00	4. Analysis with Water Pressure	
Height of Water Level, meters	7.50	Hight of Water Pressure, meters	-
2. Analysis of Failure on Rough Plane		5. Analysis with Reinforcing Force	
JRC	-	Reinforcing Force, kN.	-
Joint Compressive Strength, kN/m <sup>2</sup>	-	Dip Angle, Degrees	-
Analysis Result			
Factor of Safety = 1.261			



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงรูปแบบเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียงที่มีระยะมิติจำกัด และมีแรงค้ำน้ำในรอยแตกจากแรงค้ำของมวลสารด้วย

ตารางที่ 2.3 ข้อมูลเข้าและค่าผลลัพธ์ สำหรับตัวอย่างการแก้ปัญหาการพังทลายแบบระนาบที่หาค่าโหนดการเพิ่มเสถียรภาพโดยตรงที่มีค่ามุมที่เหมาะสมที่สุด (เมื่อวิเคราะห์ในระนาบ 2 มิติ)

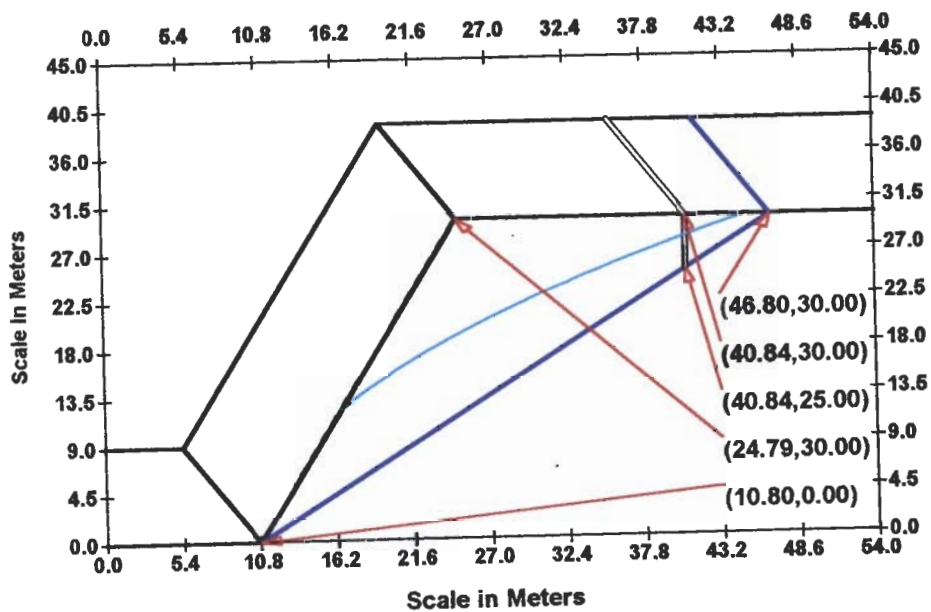
Slope Property			
Material Property and Measurement			
Cohesion,kPa	48.00	Dip Angle of Slope Face,Degrees	60.00
Angle of Internal Friction,Degrees	30.00	Dip Angle of Failure Plane,Degrees	30.00
Soil Unit Weight,kN/m <sup>3</sup>	25.00	Slope Height,meters	16.00
Water Unit Weight,kN/m <sup>3</sup>	9.81		
Conditions			
1.Tension Crack		3.Analysis of Failure on Earthquake	
On Upper Slope Face		Earthquake Force,m/sec <sup>2</sup>	-
Height of Tension Crack,meters	5.00	4.Analysis with Water Pressure	
Height of Water Level,meters	2.00	Hight of Water Pressure,meters	-
2.Analysis of Failure on Rough Plane		5.Analysis with Reinforcing Force	
JRC	-	Required Factor of Safety	2.00
Joint Compressive Strength,kN/m <sup>2</sup>	-		
Analysis Result			
Minimum Reinforcing Force = 269.27kN. At Angle = 73.90 Degrees			





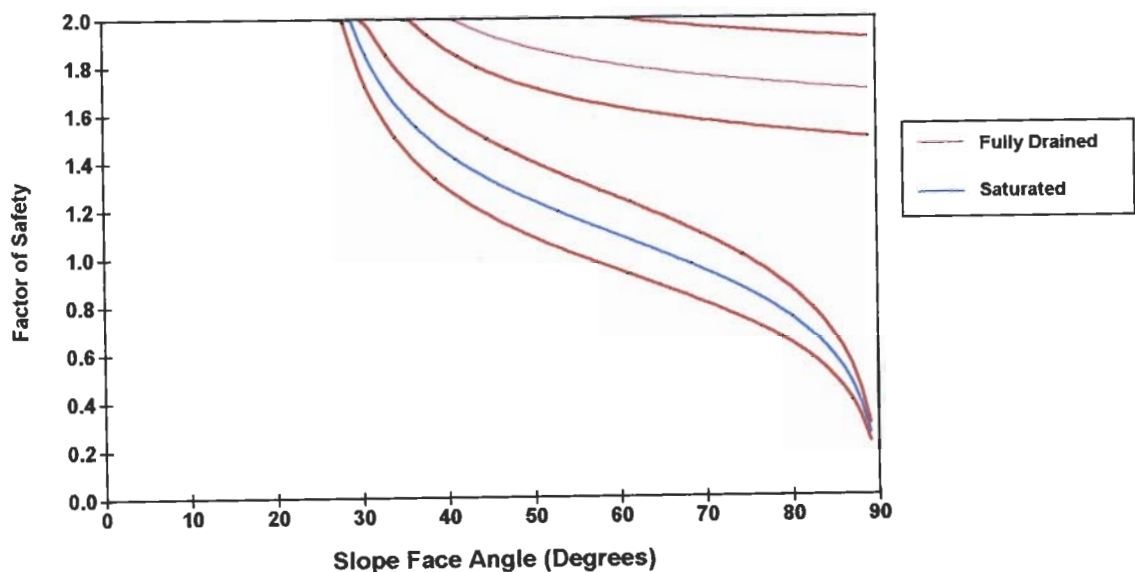
ตารางที่ 2.4 ข้อมูลเข้าและค่าผลลัพธ์ สำหรับตัวอย่างการแก้ปัญหาการพังทลายแบบระนาบที่ค่าหาค่าการตัดแนวเอียงเทของความลาดที่ค่าปัจจัยความปลอดภัยค่าหนึ่ง (สมมุติให้เท่ากับ 1.3)

Slope Property			
Material Property and Measurement			
Cohesion, kPa	48.00	Dip Angle of Slope Face, Degrees	65.00
Angle of Internal Friction, Degrees	30.00	Dip Angle of Failure Plane, Degrees	40.00
Soil Unit Weight, kN/m <sup>3</sup>	25.00	Slope Height, meters	30.00
Water Unit Weight, kN/m <sup>3</sup>	9.81		
Conditions			
1. Tension Crack		3. Analysis of Failure on Earthquake	
On Upper Slope Face		Earthquake Force, m/sec <sup>2</sup>	-
Height of Tension Crack, meters	5.00	4. Analysis with Water Pressure	
Height of Water Level, meters	3.00	Height of Water Pressure, meters	-
2. Analysis of Failure on Rough Plane		5. Analysis with Reinforcing Force	
JRC	-	Required Factor of Safety	1.30
Joint Compressive Strength, kN/m <sup>2</sup>	-		
Analysis Result			
Slope for Factor of Safe = 1.30 = 53.12 Degrees			



ตารางที่ 2.5 ข้อมูลเข้าสำหรับตัวอย่างการแก้ปัญหาการพังทลายแบบระนาบที่มีการเปิดน้ำคืนหรือหน้าเหมืองหินเป็นแบบจั่นคันไค โดยที่มวลความลาดมีรอยแตกจากแรงดึงที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวส่วนบนของตะพัก

Slope Property			
Material Property and Measurement			
Cohesion, lb/ft <sup>2</sup>	2240.00	Dip Angle of Slope Face, Degrees	60.00
Angle of Internal Friction, Degrees	25.00±5.00	Dip Angle of Failure Plane, Degrees	20.00
Soil Unit Weight, lb/ft <sup>3</sup>	160.00	Slope Height, ft.	210.00
Water Unit Weight, lb/ft <sup>3</sup>	62.40		



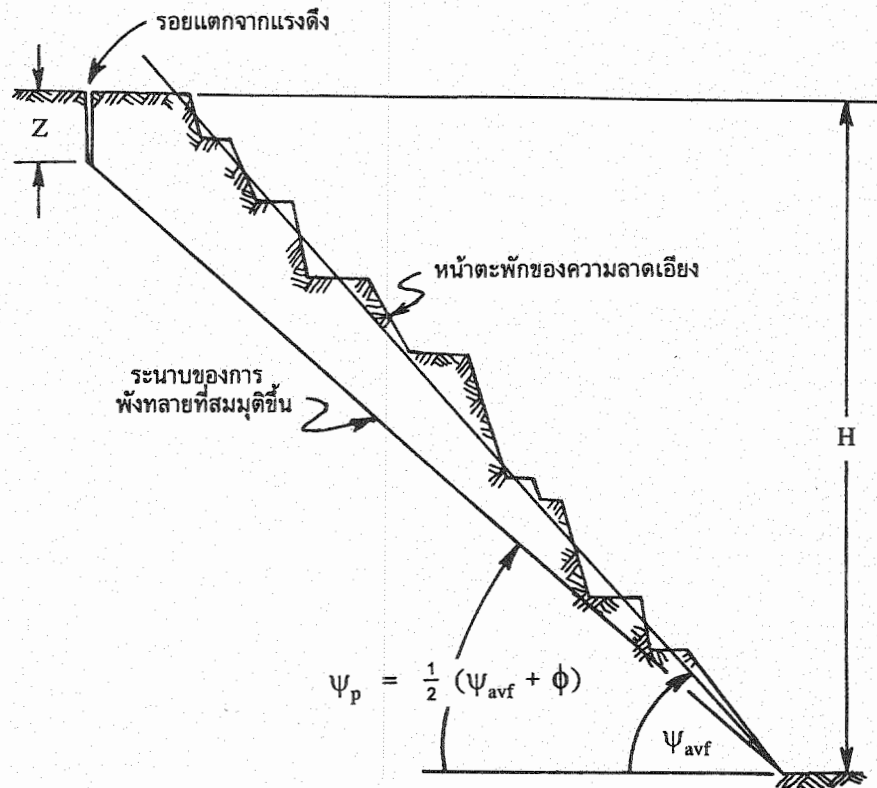
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะที่แตกต่างกันของมวลที่แห้งกับเปียก เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามุมเอียงเทของมวลที่แปรเปลี่ยนไป จะได้ค่าปัจจัยความปลอดภัยที่แตกต่างกันไป กำหนดให้มวลความลาดเอียงวิกฤต (critical slope) ที่ค่า  $F = 1$



### 3. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงกับค่ามุมเอียงของความลาด

ความสัมพันธ์เชิงกลศาสตร์โดยคำนึงถึงผลกระทบของการพังทลาย มีการแสดงเชิงเปรียบเทียบ สำหรับค่าอัตราส่วนของระดับน้ำในรอยแตกจากแรงดึง ต่อค่าความสูงในแนวตั้งของความลาด

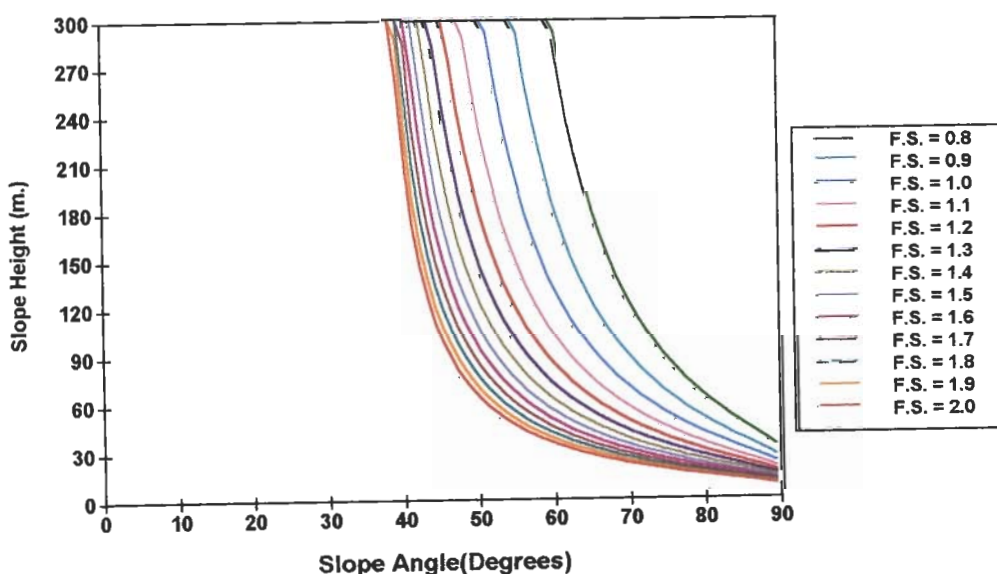
ในการคั่นหน้าดินหรือหน้าเหมืองหินแบบขั้นบันได ทำให้เนินเขาชันข้างเปลี่ยนเป็นลักษณะแบบตะพักหลายส่วน (ดูรูปที่ 2.15 ด้านล่าง) ถ้าหากทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของมุมเอียงของความลาดชั้นของตะพัก (average slope angle) ได้ค่าเท่ากับ  $\psi_{avf}$



รูปที่ 2.15 ภาพตัดขวางสำหรับการพัฒนาหน้างานการขุดเจาะ โดยคั่นเนินเขาออกเป็นตะพักแบบขั้นบันไดหลายชั้น และค่าเฉลี่ยของมุมเอียงของความลาดวัดจากจุดล่างสุด (toe) ของตะพักใหญ่ ถึงจุดลึกสุดของรอยแตกจากแรงดึงในพื้นที่ผิวบนของตะพักใหญ่

กรณีต่อมา สมมุติให้เกิดปรากฏการณ์ของรอยแตกจากแรงดึงในส่วนที่เป็นตะพักส่วนบนสุด (top bench) มีค่าความสูงในแนวตั้ง เท่ากับ  $Z$  และกำหนดให้เกิดระนาบของการพังทลายตัดผ่านจุดลึกที่สุดของรอยแตก (bottom of tension crack) และผ่านจุดล่างสุดของตะพักใหญ่ (toe of overall bench) ได้ค่ามุมเอียงเทของระนาบที่เกิดการพังทลาย เท่ากับ  $\psi_p$  ทำให้สามารถคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ของ ค่ามุมเอียงเทของความลาดกับค่าความสูงในแนวตั้งของความลาด ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยค่าหนึ่งที่สามารถแทนได้ด้วยเส้นโค้งเส้นหนึ่ง

ตัวอย่างความสัมพันธ์ดังกล่าว ได้แสดงไว้เป็นกราฟของรูปที่ 2.16 ข้างล่าง ส่วนค่าขนาดระยะมิติของความลาดเอียง กับคุณสมบัติของวัสดุได้ระบุไว้ในตารางที่ 2.6 หน้าถัดไป



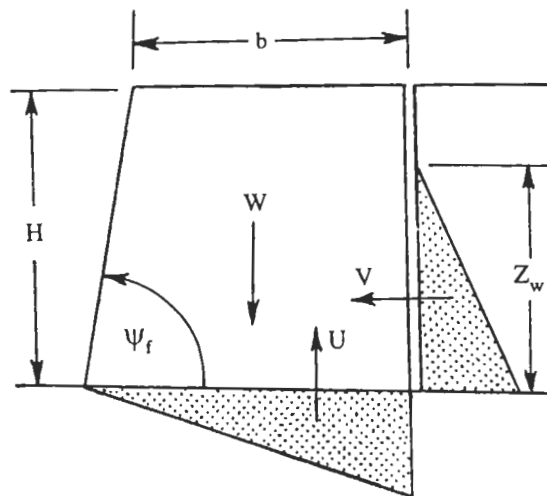
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ของค่าความสูงของความลาดเอียง กับค่าเฉลี่ยของมุมเอียงเทความลาด ที่มีผลต่อเสถียรภาพของหน้างานแบบขั้นบันได

ตารางที่ 2.6 ข้อมูลเข้าของค่าคุณสมบัติวัสดุกับค่าระยะมิติของความลาดเอียง  
ในกรณีที่มีการค้ำหน้างานการขุดเจาะแบบชั้นดินโคลนหลายค้ำพัก

Slope Property			
Material Property and Measurement			
Cohesion, kPa	137.36	Soil Unit Weight, kN/m <sup>3</sup>	28.94
Angle of Internal Friction, Degrees	35.00	Maximum Slope Height, meters	300

#### 4. การเลื่อนไถลของบล็อกบนชั้นดินเหนียว

โจทย์ตัวอย่างข้อนี้ ได้จากการเก็บข้อมูลดินภาคสนามจริง ที่มีมวลดินวางตัวเป็น  
บล็อกทับชั้นดินเหนียว (ที่วางตัวเป็นแนวราบ) ชั้นเล็ก ๆ หลายชั้นซ้อนกัน รูปแบบเชิง  
เรขาคณิตของความลาดเอียงแบบนี้ ได้สเก็ทช์ไว้ดังรูปที่ 2.17 ข้างล่าง

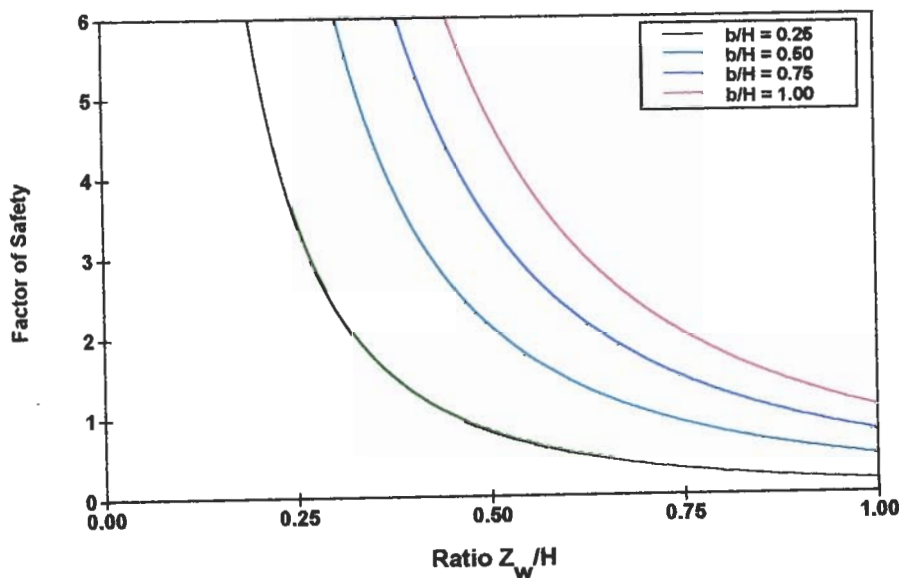


รูปที่ 2.17 บล็อกของมวลดินที่วางทับบนชั้นดินเหนียวชั้นเล็ก ๆ หลายชั้น ในรูป  
แสดงรูปแบบเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียงที่มีรอยแตกจากแรงดึง  
บนผิวค้ำหน้าของความลาด และการกระจายแรงค้ำหน้าตามระนาบ  
ที่เปราะบาง (ตัวอย่างของรูปสเก็ทช์ได้มาจาก Hoek and  
Bray, 1981, หน้า 196)

ตารางที่ 2.7 ข้างล่างนี้ เป็นตัวเลขข้อมูลคิขของความลาดเอียงของรูปเสกัศรค์ หน้า 30 ส่วนรูปแบบการวิเคราะห์ที่ค่าปัจจัยความปลอดภัยมีการแปรเปลี่ยนไปตามค่าของอัตราส่วน  $b/H$  [(ระยะในแนวราบจาก crest ถึง tension crack) / ความสูงของความลาดเอียง)] ได้แสดงผลเป็นกราฟเส้นโค้งหลายเส้น ในรูปที่ 2.18

ตารางที่ 2.7 ข้อมูลคิขของระยะมิตความลาดเอียง และคุณสมบัติของมวลดิน

Slope Property			
Material Property and Measurement			
Cohesion, kPa	0.00	Water Unit Weight, kN/m <sup>3</sup>	9.81
Angle of Internal Friction, Degrees	10.00	Dip Angle of Slope Face, Degrees	80.00
Soil Unit Weight, kN/m <sup>3</sup>	39.24	Slope Height, meters	50.00



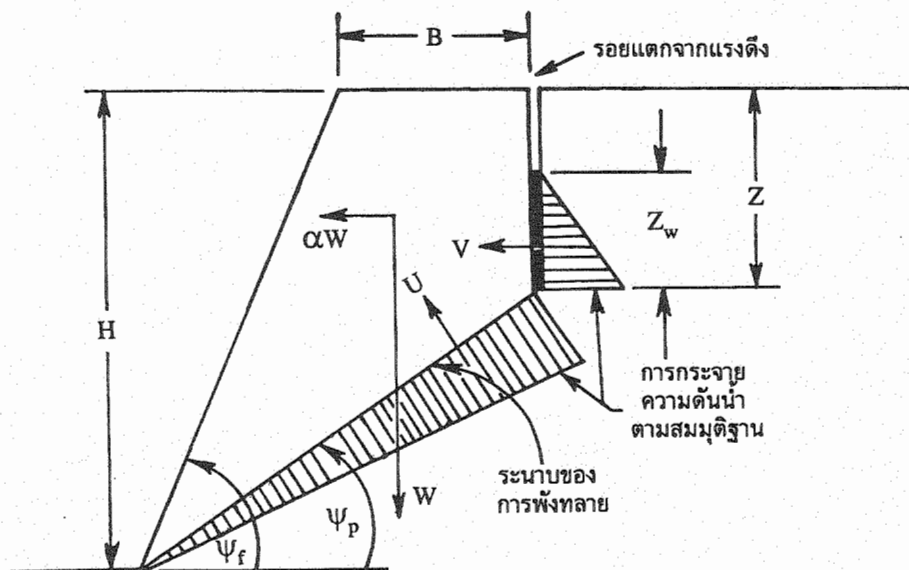
รูปที่ 2.18 แสดงผลของความไว (sensitivity) ที่มีต่อเสถียรภาพของความลาดเอียง เมื่อค่าอัตราส่วนของ  $b/H$  เปลี่ยนไป ที่ระดับความลึกต่าง ๆ ของน้ำในรอยแตกจากแรงดึง

### 5. การเพิ่มเสถียรภาพของความลาดเอียงตามรูปแบบจำลองเฉพาะอย่าง

ในหลายกรณี เมื่อมวลสารวางตัวอยู่บนระนาบจะมีโอกาสสูงที่จะเกิดการไถลเลื่อนเนื่องจากน้ำหนักของมวลและแรงดันน้ำที่มีอยู่ในรอยแตกแยกจากแรงดึงของความลาดเอียง การเพิ่มเสถียรภาพโดยใช้ไหลคภายนอกกระทำนั้น มีจุดประสงค์เพื่อทำให้เกิดการยึดติดระหว่างมวลสารกับระนาบเปราะบาง โดยเป็นการเพิ่มความเสียดทานระหว่างพื้นผิวกับระนาบที่อาจก่อให้เกิดการพังทลาย

แบบจำลองที่กำหนดไว้เป็นต้นแบบสำหรับการเพิ่มเสถียรภาพของความลาดเอียง มีรูปแบบเชิงเรขาคณิตอยู่ 2 ชนิด แบบจำลองชนิดแรกได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.19 ข้างล่างนี้เป็นภาพตัดขวางของความลาดเอียง ที่มีรอยแตกจากแรงดึงอยู่บนพื้นผิวของตะพักบนความลาด และมีน้ำแทรกเข้ามาตามรอยแตกแยกของมวลหิน ความดันน้ำในรอยแตกมีลักษณะการกระจายเป็นรูปสามเหลี่ยมบนระนาบของเปราะบาง และบนระนาบรอยแตกจากแรงดึง นอกจากนี้ยังกำหนดให้มีความเร่งเนื่องจากการเกิดแผ่นดินไหว (earthquake acceleration) กระทำกับมวลสารบนระนาบเปราะบางในแนวราบ ความเร่งนี้ใช้สัญลักษณ์เป็น  $\alpha$

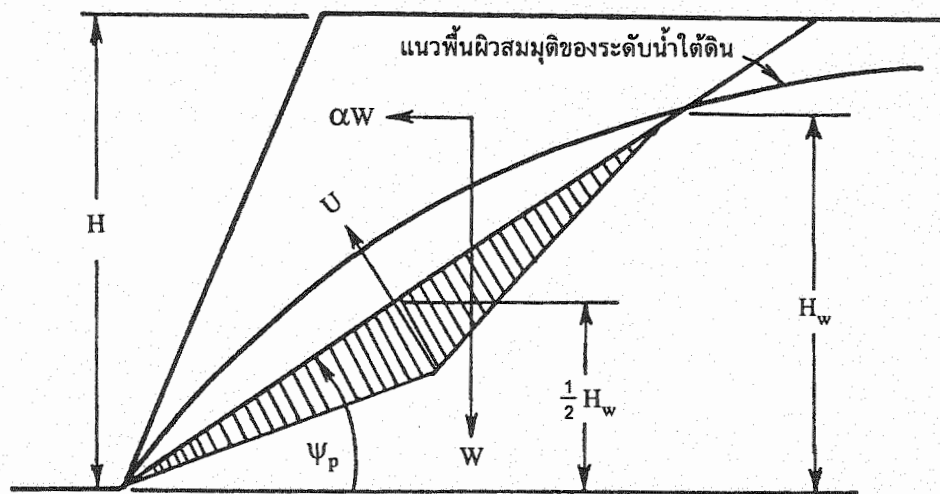
แบบจำลองแบบแรกตามที่ตั้งสมมติฐานไว้ข้างบนนี้ เรียกว่า "Model I"



รูปที่ 2.19 แบบจำลองชนิดแรก (Model I) ที่กำหนดให้เกิดรอยแตกจากแรงดึงบนตะพักส่วนบนของความลาดเอียง และตั้งสมมติฐานให้การกระจายตัวของเวกเตอร์แรงดันน้ำ เป็นรูปสามเหลี่ยมจากบนระนาบเปราะบาง และบนระนาบรอยแตกจากแรงดึงตามระดับความลึกในรอยแตก

แบบจำลองชนิดที่สอง แสดงไว้ในรูปที่ 2.20 เป็นภาพตัดขวางของความลาดเอียงที่ไม่เกิดรอยแตกจากแรงดึงบนพื้นผิวใด ๆ นอกจากนี้ กำหนดให้ระดับพื้นผิวของน้ำใต้ดิน (phreatic surface) เป็นเส้นโค้งไฮเพอร์โบล่า (ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 2.7) แต่การคำนวณค่าการกระจายตัวแรงดันน้ำจะเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉากประกบติดกัน แนวเวกเตอร์แรงดันน้ำ ( $U$ ) จะผ่านตรงด้านประกอบมุม และยังคงกำหนดให้มีความเร่งจากแผ่นดินไหวกระทำอยู่ในแนวราบ ( $\alpha$ )

แบบจำลองชนิดที่ 2 นี้ มีชื่อเรียกว่า "Model II"



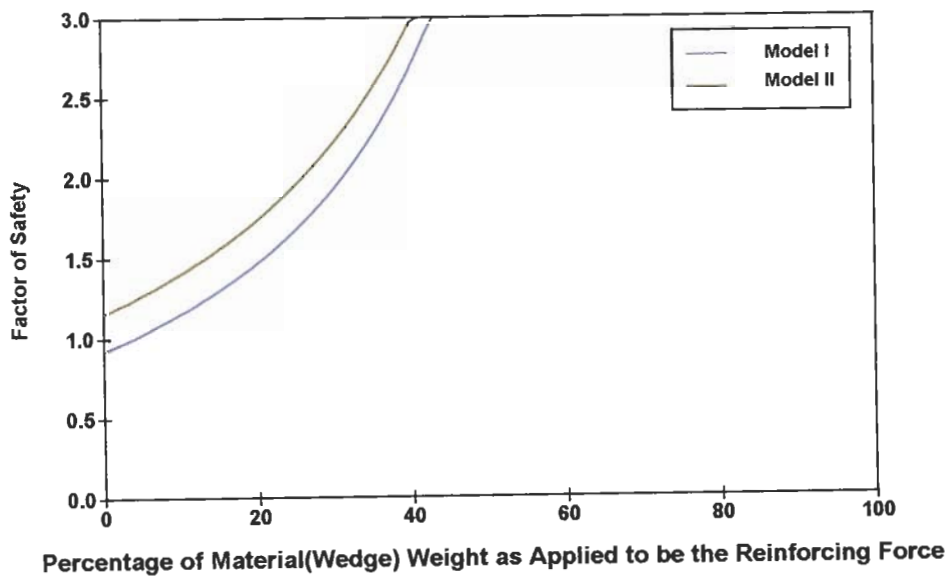
รูปที่ 2.20 แบบจำลองชนิดสอง (Model II) ที่สมมุติให้ไม่เกิดรอยแตกจากแรงดึง ระดับน้ำใต้ดินเป็นเส้นโค้งไฮเพอร์โบล่า และลักษณะของการกระจายตัวแรงดันน้ำเป็นสามเหลี่ยมมุมฉากที่มีด้านประกอบมุมฉากด้านหนึ่งใช้ร่วมกัน

ตารางที่ 2.8 หน้าถัดไป เป็นรายละเอียดของข้อมูลเข้าสำหรับค่าคุณสมบัติและค่าระยะมิติต่าง ๆ ของความลาดเอียง ประกอบกับตัวเลขสมมุติฐานปลีกย่อย (เช่นค่าความเร่งจากแผ่นดินไหว)

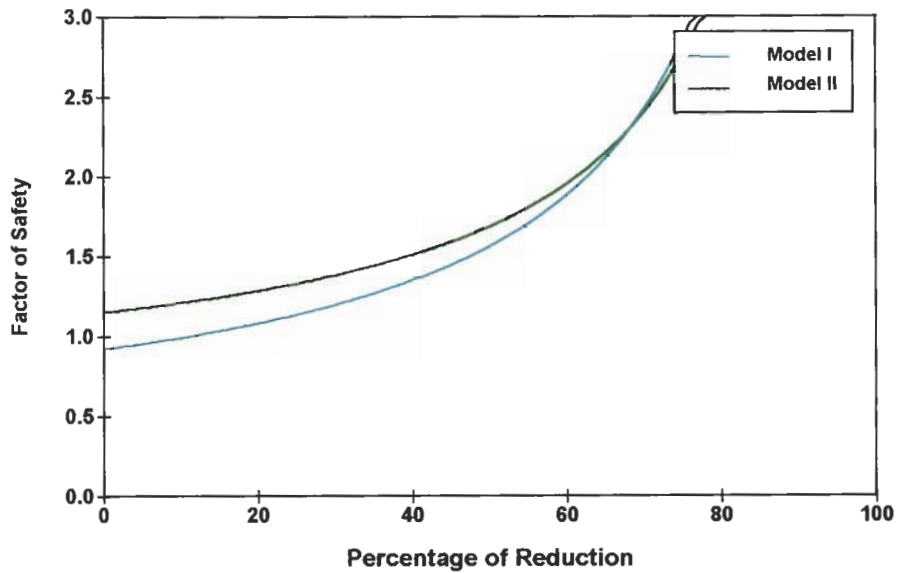
ตัวอย่างของการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ สำหรับการเสริมเสถียรภาพของแบบจำลองทั้ง 2 แบบ ได้แสดงไว้ 4 แนวทาง ได้แก่ การเพิ่มแรงดันด้วยไหลคจากภายนอกโดยใช้ลวดบิดหรือหมุดยึดติดกับระนาบเปราะบาง (รูปที่ 2.21 หน้า 34) เป็นผลของอิทธิพลจากน้ำหนักภายนอกที่กระทำต่อมวลสารบนระนาบ การลดระดับความสูงของความลาดเอียงโดยการตัดชั้นดินหรือหน้าเหมืองหินให้มีตะพักถี่ขึ้น (ดูรูปที่ 2.22 หน้า 35) การลดระดับน้ำใต้ดินลงโดยทำการระบายน้ำ (ดูรูปที่ 2.23 หน้า 35) และการปรับค่าของมุมเอียงเทของความลาดชันให้มีค่ามุมเอียงเทน้อยลง (ดูรูปที่ 2.24 หน้า 36)

ตารางที่ 2.8 ข้อมูลคิขของระบะมิตีความลาดเอียง และคุดสมบัติขงมวลดิน ทีมี การเสริมเสถียรภาพหลายวิธีการที่มีผลต่อค่าปัจจัยความปลอดภัย

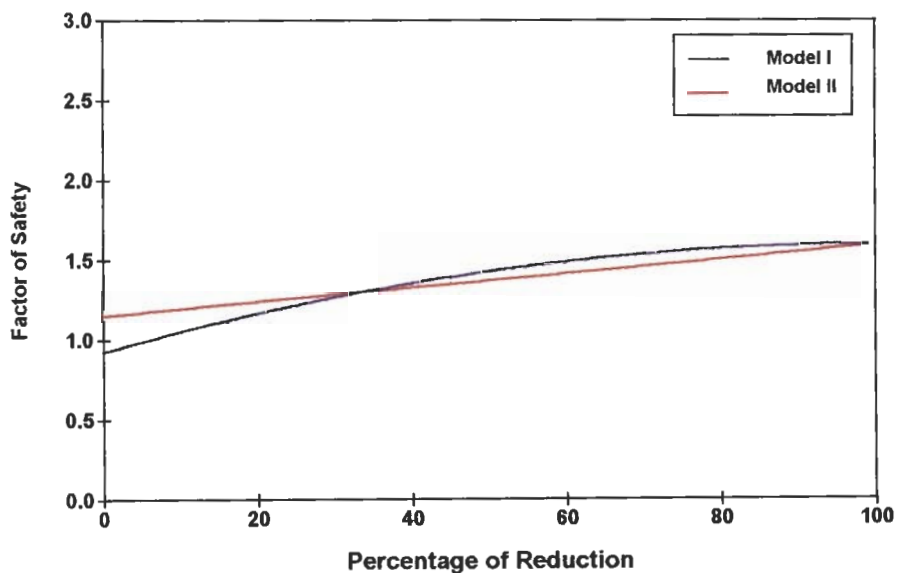
Slope Property			
Material Property and Measurement			
Cohesion, kPa	98.10	Dip Angle of Slope Face, Degrees	50.00
Angle of Internal Friction, Degrees	35.00	Dip Angle of Failure Plane, Degrees	35.00
Soil Unit Weight, kN/m <sup>3</sup>	25.50	Slope Height, meters	60.00
Water Unit Weight, kN/m <sup>3</sup>	9.81	Earthquake Acceleration, m/sec <sup>2</sup>	0.02



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยความปลอดภัยที่มีผลมาจากเปอร์เซ็นต์ค่าน้ำหนักขงไหลคภายนอก โดยแสดงผลสำหรับแบบจำลองทั้งสองแบบ

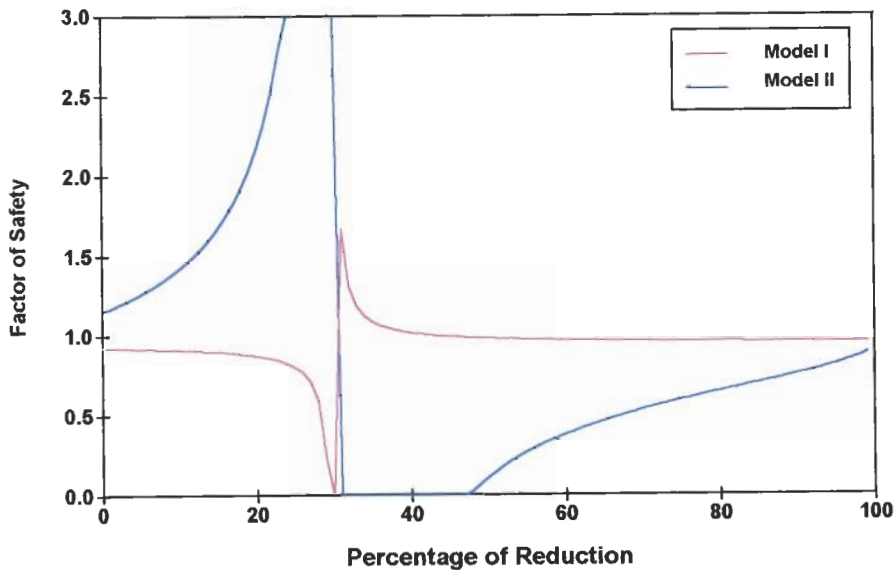


รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยความปลอดภัย กับเปอร์เซ็นต์ของการลดค่าระยะความสูงในแนวตั้งของความลาดเอียง ซึ่งมีผลต่อเสถียรภาพของมวลหิน ตามรูปแบบที่กำหนดในแบบจำลองทั้งสอง



รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยความปลอดภัย กับเปอร์เซ็นต์ของการลดค่าระดับความสูงของน้ำใต้ดินในความลาดเอียง โดยการระบายน้ำ ตามรูปแบบที่กำหนดในแบบจำลองทั้งสอง



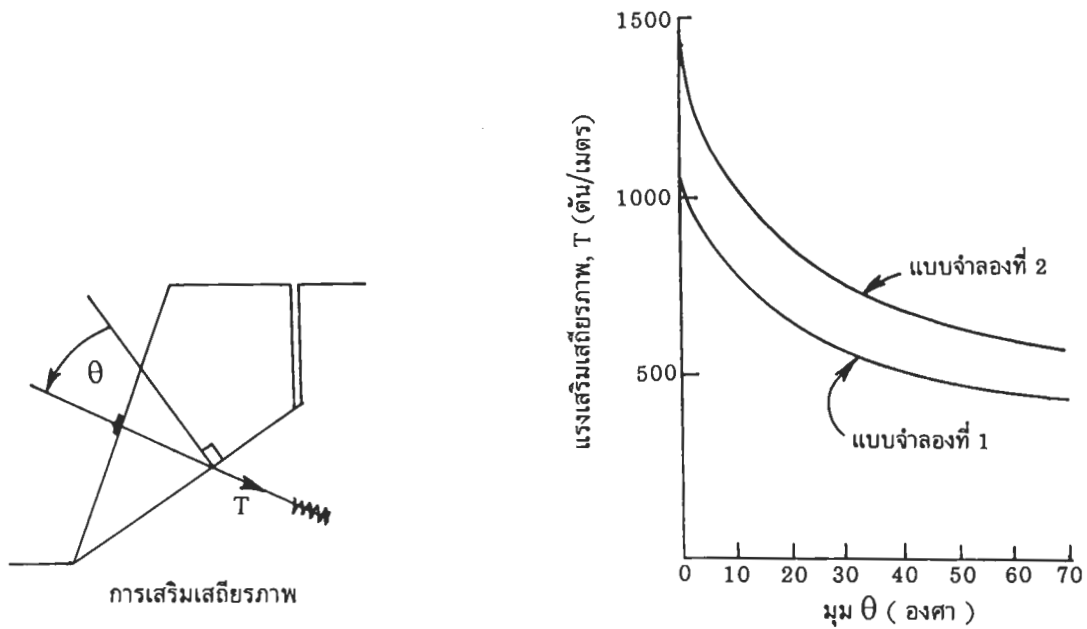


รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยความปลอดภัยกับเปอร์เซ็นต์ของการปรับค่ามุมเอียงเทของความลาดเอียงให้มีความชันน้อยลง ซึ่งมีผลต่อเสถียรภาพตามรูปแบบที่กำหนดในแบบจำลองทั้งสอง

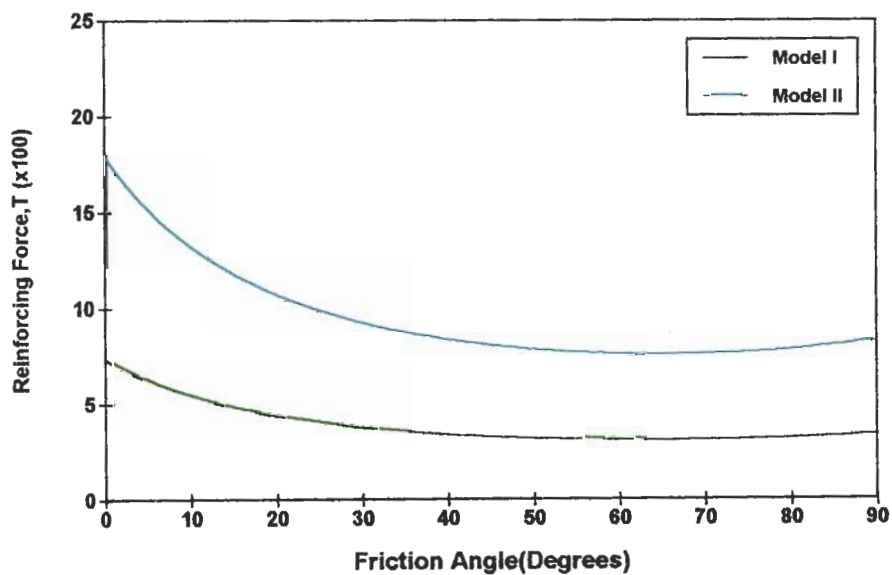
#### 6. ความสัมพันธ์ของการกำหนดค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพกับการเพิ่มไหลภายนอก

ในการหาค่าความปลอดภัยก่อนที่จะมีการเพิ่มไหลภายนอก จะได้ค่าปัจจัยความปลอดภัยค่าหนึ่ง แต่ถ้าหากผู้ปฏิบัติงานต้องการให้เสถียรภาพของหน้างานสูงขึ้น ก็ใช้ ลวดยึดหรือหมุดยึดให้ติดกับระนาบการพังทลาย โดยที่สามารถหาค่าแรงภายนอกที่จะมาเสริมเสถียรภาพที่ต้องการได้ เมื่อได้กำหนดค่าปัจจัยความปลอดภัยขึ้นมาใหม่ (ดูรูปที่ 2.25)

รูปที่ 2.26 เป็นการแสดงกราฟเส้นโค้ง 2 เส้น ที่เป็นผลลัพธ์โดยการใช้โปรแกรม STABIL.EXE วิเคราะห์หาค่าแรงของยึดติดที่ต้องใช้ลวดยึดหรือหมุดยึด เมื่อสมมุติเหตุการณ์ว่า ถ้าหากต้องการให้ค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยสูงขึ้นจากเดิมมาอยู่ที่ค่า 1.5 ค่านี้จะเป็นค่าตัวเลขเสถียรภาพที่เหมาะสมที่สุด นั่นคือ เสถียรภาพของมวลสารสามารถจะยึดติดกับระนาบได้โดยไม่มีการเลื่อนไถล และค่าใช้จ่ายในการเสริมเสถียรภาพของมวลความลาดเอียงก็ไม่สูงจนเกินไป



รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ของการเสริมเสถียรภาพ รูปทางซ้ายมือเป็นการแสดงค่ามุมเอียงของแนวแกนแรงภายนอกเพื่อเสริมเสถียรภาพ รูปทางขวามือเป็นอิทธิพลของการเอียงเทต่อการเสริมเสถียรภาพ



รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ของการเสริมเสถียรภาพ ระหว่างค่าโหดแรงภายนอกที่ต้องใช้ในการเสริมเสถียรภาพ กับค่ามุมเสียดทานที่แปรเปลี่ยนไป ค่าตัวเลขจับความปลอดภัยที่ 1.5 สำหรับแบบจำลองทั้งสอง

## บทที่ 3 การพังทลายแบบวงกลม

การพังทลายแบบวงกลมนี้จะมีโอกาสเกิดขึ้นได้ง่ายขึ้น ถ้าหากมีรอยแตกแยกและมีน้ำซึมผ่านได้ในมวลดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินเหนียวอ่อน โดยมักพบว่า ระนาบของการพังทลายมักเป็นแบบอาร์กวงกลม (circular arc)

### 3.1 หลักการวิเคราะห์การพังทลายแบบวงกลม

การพังทลายรูปอาร์กวงกลม มีชื่อเฉพาะที่เรียกหลายอย่าง ได้แก่ circular arc failure, rotational failure และ slip failure ในการวิเคราะห์การพังทลายมีหลักการเบื้องต้นของการวิเคราะห์ โดยสมมุติให้มวลอยู่ในสถานะภาพสมดุลแบบจำกัด (limit equilibrium) และมีขั้นตอนในการหาเสถียรภาพของการเลื่อนไถลดังต่อไปนี้

1. สมมุติให้ค่ารัศมีของพื้นผิวการพังทลาย เท่ากับ R โดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ O (ดูรูปที่ 3.1 ประกอบ)
2. ใช้สมการเชิงสถิติศาสตร์ในการคำนวณแรงอัดฉาก (normal force,  $N_s$ ) ที่ตรงระนาบของพื้นผิวรอยแตก (failure or rupture surface) ในมวลสาร
3. คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของกำลังวัสดุเฉือน ได้แก่ ค่าคุณสมบัติเชิงไคฮ์ชัน ( $c$ ) และมุมเสียดทานภายใน ( $\phi$ ) ค่าผลของการทดสอบคุณสมบัติดินภาคสนามของไคฮ์ชัน และมุมเสียดทานภายใน อาจใช้เป็นค่า total stress parameters,  $c_t, \phi_t$  หรือใช้ค่า effective stress parameters,  $c', \phi'$
4. สมมุติว่าต่อมกำลังวัสดุเฉือนของมวลดินถูกทำให้ลดลง จนเกิดการพังทลายตามพื้นผิวของอาร์ก แรงเฉือน (shear force) ที่กระทำบนพื้นผิวที่ระยะความยาว  $d$  เป็น

$$\tau = \frac{c_t d + N \tan \phi_t}{F} \quad \text{or} \quad \frac{c' d + N' \tan \phi'}{F} \quad (3.1)$$

5. หาค่าโมเมนต์ของแรง รอบจุด O (รูปที่ 3.1) และได้ค่าโมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการพังทลาย (disturbing or demand moment,  $M_d$ ) บนพื้นผิวเป็น  $WL_1$  สมมุติให้เท่ากับโมเมนต์ที่ต้านการพังทลาย (stabilizing or capacity moment,  $M_c$ )

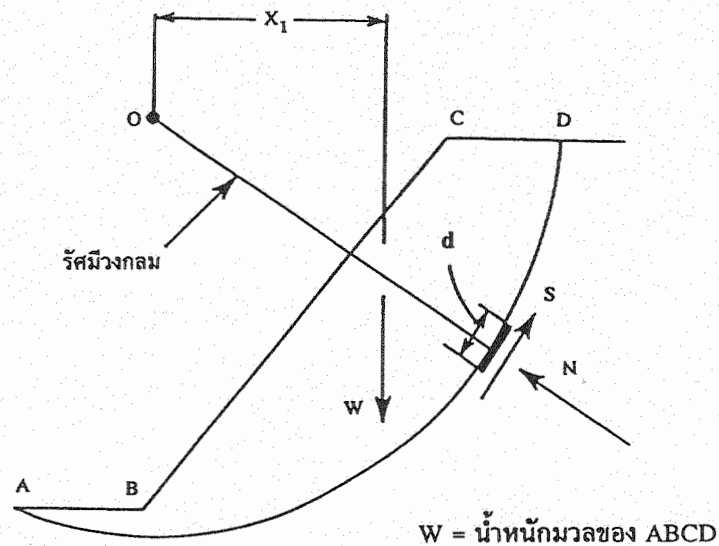
ในการวิเคราะห์เชิงความเค้นทั้งหมด (total stress analysis) ได้ค่าโมเมนต์ของการพังทลาย

$$WL_1 = \frac{R \sum c_t d + N \tan \phi_t}{F} \quad (3.2)$$

ในการวิเคราะห์เชิงความเค้นประสิทธิผล (effective stress analysis) ได้ค่าโมเมนต์ของการพังทลาย

$$WL_1 = \frac{R \sum c'd + N' \tan \phi'}{F} \quad (3.3)$$

6. จากการที่ทราบค่าทั้งสองในหัวข้อที่ 5 สามารถหาค่าปัจจัยความปลอดภัย ( $F$ ) ได้ ค่า  $F$  ที่ได้นี้เป็นค่าปัจจัยความปลอดภัยเมื่อเทียบกับกำลังวัสดุ (factor of safety with respect to strength,  $F_s$ ) เนื่องจากค่าคุณสมบัติ  $c$  และ  $\tan \phi$  ถูกลดลงด้วยองค์ประกอบเดียวกัน



รูปที่ 3.1 การวิเคราะห์เรื่องการพังทลายรูปอาร์กวางกลมของมวลดิน (circular arc or rotational failure)

### 3.2 ชนิดของโหมดการพังทลายแบบวงกลม

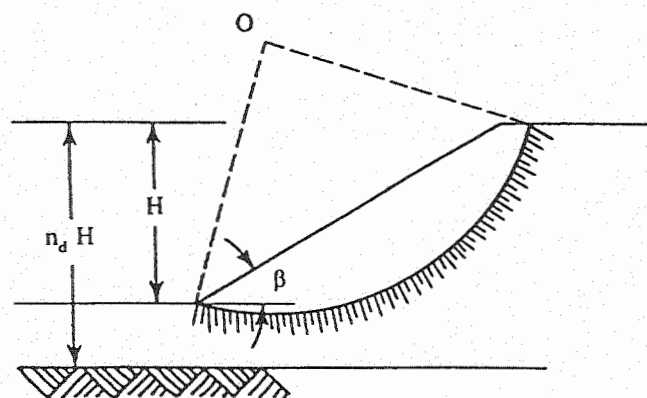
ตามธรรมชาติมวลสารที่เป็นดิน เมื่อมีการพังทลายที่มีพื้นผิวของการพังทลายแบบวงกลมจะมีรูปแบบของการพังทลายที่พบในภาคสนาม แบ่งออกได้ 3 ชนิด

1. Slope Failure เป็นการพังทลายแบบวงกลมที่พบมากที่สุด แต่อาจจะมีรูปแบบเฉพาะที่แตกต่างกันเล็กน้อยขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่พื้นผิววงกลมตัดความลาด โดยอาจแบ่งย่อยออกไปได้อีกเป็น toe circle failure และ slope circle failure

2. Shallow Slope Failure เป็นการพังทลายแบบวงกลม ที่ไม่มีอันตรายนรุนแรง พื้นผิวของการพังทลายตัดแค่บางส่วนตรงหน้าความลาด

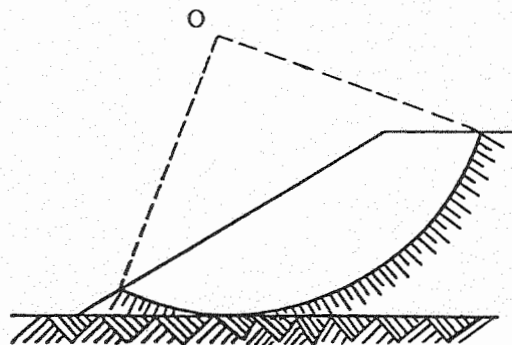
3. Base Failure เป็นการพังทลายที่มีโอกาสเกิดได้ยาก พื้นผิววงกลมที่เปราะและเสี่ยงต่อการเลื่อนไถล จะตัดไปยังส่วนฐานที่เป็นมวลดินอัดคึกกันแน่น และยังตัดบางส่วนที่บริเวณตะพัก (bench) ส่วนล่างของความลาด

รูปที่ 3.2 เป็นรูปหน้าตัดการพังทลายแบบวงกลม ที่มีชื่อเรียกเฉพาะแบบ รูปแบบที่สำคัญทั้ง 3 แบบ คือ toe circle, slope circle และ midpoint circle

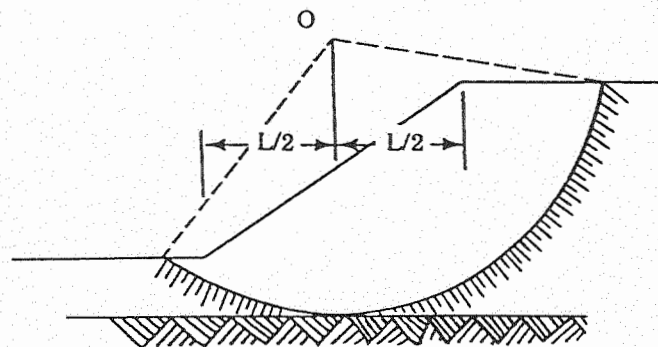


a. toe circle

รูปที่ 3.2 ชนิดของรูปแบบเชิงเรขาคณิตของการพังทลายแบบวงกลม



b. slope circle



c. midpoint circle

รูปที่ 3.2 (ต่อ) ชนิดของรูปแบบเชิงเรขาคณิตของการพังทลายแบบวงกลม

ในกรณีของ toe circle พื้นผิวของวงกลมการพังทลายจะผ่านจุดล่างสุด (toe) ของความลาด ส่วนการพังทลายแบบ slope circle แนวนวงกลมจะตัดหน้าความลาดเหนือจุดล่างสุด และถ้ามีการพังทลายแบบ midpoint circle เมื่อทำการลากเส้นจากจุดศูนย์กลางของวงกลมการพังทลายลงมาในแนวตั้ง เส้นที่ลากในแนวตั้งนี้จะผ่านจุดกึ่งกลาง (midpoint) ของระยะแนวเอียงเทบนหน้าความลาด

### 3.3 วิธีการวิเคราะห์เชิงกลศาสตร์ของการพังทลายแบบวงกลม

แนวทางของการวิเคราะห์การพังทลายแบบวงกลมมีหลายแบบ ในครั้งแรกจะสนใจเกี่ยวกับการหาค่าเสถียรภาพของมวลสาร โดยเปรียบเทียบกับค่าความเสียดทานภายใน ต่อมาก็ใช้การแบ่งส่วนของมวลที่มีโอกาสเกิดการพังทลายเป็นชิ้นส่วนเล็ก ๆ หลายส่วน จนกระทั่งใช้วิธีการสมมุติให้มวลมีพฤติกรรมแบบไม่ใช่อีลาสติค

#### 3.3.1 การวิเคราะห์แบบวงกลมความเสียดทานของ Fellenius

Fellenius ได้พัฒนาการวิเคราะห์เชิงสถิตยศาสตร์เพื่อหาค่าความเค้นเฉือนบนพื้นผิวรอยแตกแบบอาร์กวงกลมของมวลดินที่มีเนื้อดินประเภทเดียวกัน หรือเรียกว่าดินเนื้อเอกพันธ์ (homogeneous soil)

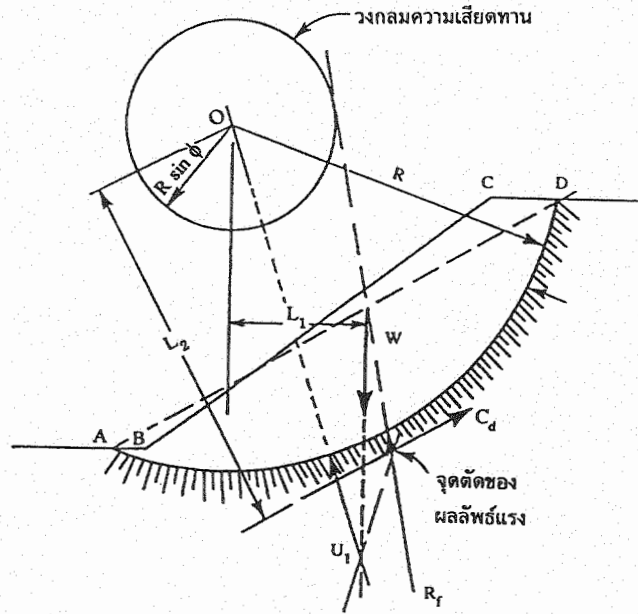
##### 1. การวิเคราะห์สำหรับดินเนื้อเอกพันธ์ที่มีค่าความเสียดทาน

การที่จะแก้ปัญหาในการหาค่าความเค้น จะกำหนดให้มีการกระจายความเค้นตามผิวของรอยแตก ดังแสดงในรูปที่ 3.3 a ซึ่งแนวทางนี้ได้แนะนำวิธีการของการวิเคราะห์ โดยกำหนดวงกลมเสียดทาน (friction circle) ขึ้นมา และให้วงกลมที่กำหนดขึ้นมานี้มีค่า  $R \sin \phi$  ที่จุดศูนย์กลาง O ค่า R คือรัศมีของพื้นผิวการพังทลาย

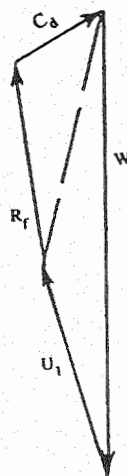
ค่า  $\phi$  เป็นค่ามุมความลาดชันของ strength envelope ค่าของ  $\phi$  จะเท่ากับ 0 (ศูนย์) เมื่อทำการวิเคราะห์เสถียรภาพในช่วงสั้น ๆ (short term) ของมวลดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำ และค่าของ  $\phi$  จะมากกว่าศูนย์ ถ้าทำการวิเคราะห์เสถียรภาพในช่วงระยะนาน (long term)

แรงต่าง ๆ ที่กระทำต่อมวลการพังทลายรูปสามเหลี่ยม (wedge), ABCD หาได้ดังนี้

1. น้ำหนักของมวลเอง (W) มีค่าเท่ากับ (ปริมาตรของส่วน ABCD)  $\times$  (bulk unit weight)
2. แรงดันน้ำอิสระในโพรงช่องว่าง (independent pore water thrust,  $U_1$ )



a. รูปแบบเชิงเรขาคณิตของวงกลมเสียดทาน



b. โคออร์เนตเวกเตอร์ของแรงที่กระทำต่อมวลสาร

รูปที่ 3.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาดเอียงอิสระ (free slope) สำหรับดินเนื้อเอกพันธ์โดยใช้วงกลมเสียดทานหาค่าเชิงเสถียรภาพ



3. ผลลัพธ์แรงเชิงการเชื่อมแน่นยึดติด (resultant cohesive force,  $C_d$ )
4. ผลลัพธ์แรงเชิงการเสียดทาน (resultant frictional force,  $R_f$ )

จากรูปที่ 3.3 a สังเกตว่า ค่าผลลัพธ์แรงค้ำน้ำ,  $U_1$  จะต้องผ่านจุด O ทำให้ผลรวมของแรง  $W$  และ  $U_1$  สามารถหาได้จากการนำแรงทั้ง 3 แรงมาเขียนในโคจรแกรมเดียวกัน (รูปที่ 3.3 b) ทิศทางของ  $R_f$  เป็นผลรวมของแรงทั้งหมด ซึ่งเป็นแนวสัมผัสกับวงกลมเสียดทาน เมื่อกำหนดให้ค่า  $c_d$  = ค่าเฉลี่ยของโคจรชั้นที่เกิดบนพื้นผิวของการพังทลาย ส่วนใหญ่เป็นค่าของ drained cohesive value

$$C_d = c \times (\text{chord AD}) \quad (3.4)$$

$$L_2 = R \times (\text{arc AD} / \text{chord AD}) \quad (3.5)$$

สมการหลังเป็นโมเมนต์  $C_d$  รอบจุด O มีค่าเท่ากับโมเมนต์  $c_d$  ตามแนวอาร์ก AD

## 2. การวิเคราะห์สำหรับดินเนื้อเอกพันธ์ที่ไม่มีควมเสียดทาน

เมื่อกำหนดให้ดินมีเนื้อเดียวกันตลอดและเป็นดินที่ไม่มีค่าความเสียดทาน ในสถานะที่ไม่ให้น้ำไหลเข้าออกจากมวลดิน (undrained condition) และสมมุติให้กำลังวัตุมีค่าคงที่ตลอดความลึกของมวล จะได้  $\tau_f = c_u$  (ให้ค่า  $c_u$  = undrained cohesive value)

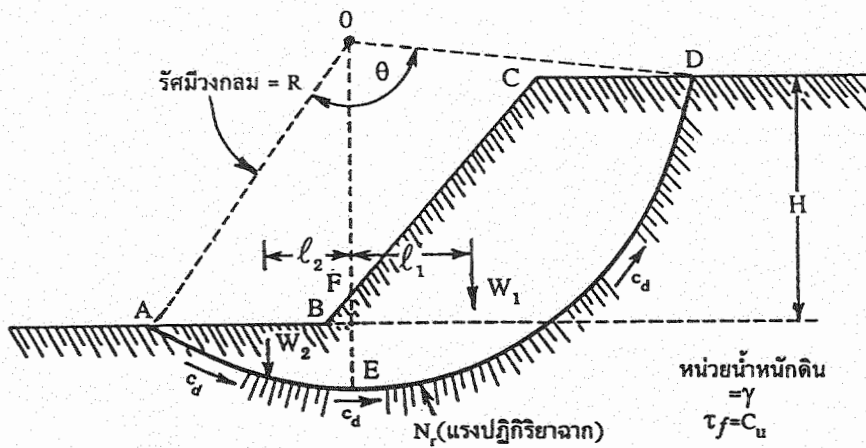
หลักการวิเคราะห์พื้นฐานสำหรับมวลที่ไม่มีควมเสียดทาน เริ่มต้นทำการวิเคราะห์หาเสถียรภาพ สมมุติให้เกิดแนวการเลื่อนไถลเป็นแนวเส้นอาร์ก AED (ดูรูปที่ 3.4) ที่มีรัศมี R และจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุด O

ถ้าหากแบ่งความยาวที่ตั้งฉากกับภาพตัดขวางของความลาดเอียง ที่แสดงในรูปที่ 3.4 ออกเป็น 2 ส่วน จะได้ค่าโมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการเลื่อนไถล (disturbing moment) เป็น

$$M_d = W_1 L_1 - W_2 L_2 \quad (3.6)$$

ในทำนองเดียวกันทำการหาโมเมนต์ที่เสริมเสถียรภาพ (stabilizing moment)

$$M_c = c_d R^2 \theta \quad (3.7)$$



รูปที่ 3.4 การวิเคราะห์การพังทลายแบบวงกลม ที่กำหนดให้มวลดินมีค่ามุมเสียดทานภายในเท่ากับศูนย์

จากสมการที่ 3.6 และ 3.7 จะได้ความสัมพันธ์

$$c_d = \frac{W_1 L_1 - W_2 L_2}{R^2 \theta} \tag{3.8}$$

ทำให้ได้ค่าปัจจัยความปลอดภัยที่ดำเนินการเลื่อนไหล เป็น

$$F = \tau_f / c_d = c_u / c_d \tag{3.9}$$

ความยากของการวิเคราะห์ในเรื่องนี้ก็คือ แนวเส้นโค้งของการเลื่อนไถล (AED) ถูกเลือกขึ้นมาอย่างสุ่ม (trial) แต่การที่จะได้ค่าพื้นผิววิกฤตที่แท้จริงก็คือ การที่อัตราส่วนของ  $c_u/c_d$  มีค่าต่ำสุด (ค่า  $F$  มีค่าน้อยสุด) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง ค่า  $c_d$  มีค่าสูงสุด

### 3. การหาวงกลมวิกฤตเชิงกราฟิก เมื่อมวลสารไม่มีความเสียดทาน

วิธีการหาวงกลมวิกฤต (critical circle) ด้วยการใช้รูปกราฟิกช่วยนั้น ได้มีผลงานของนักวิจัยหลายท่านที่สร้างกราฟความสัมพันธ์ขึ้นในรูปแบบคล้ายคลึงกับ Nomogram ขึ้นมา ผลงานที่เด่นนี้ ได้แก่ งานของ Fellenius (1927) และ Taylor (1937)

ความสัมพันธ์พื้นฐานในการหาค่าโคฮิซันที่เกิดขึ้นในวงกลมวิกฤต ได้แก่

$$c_d = \gamma H(N_s)$$

หรือ

$$N_s = \text{stability number} = c_d / \gamma H \quad (3.10)$$

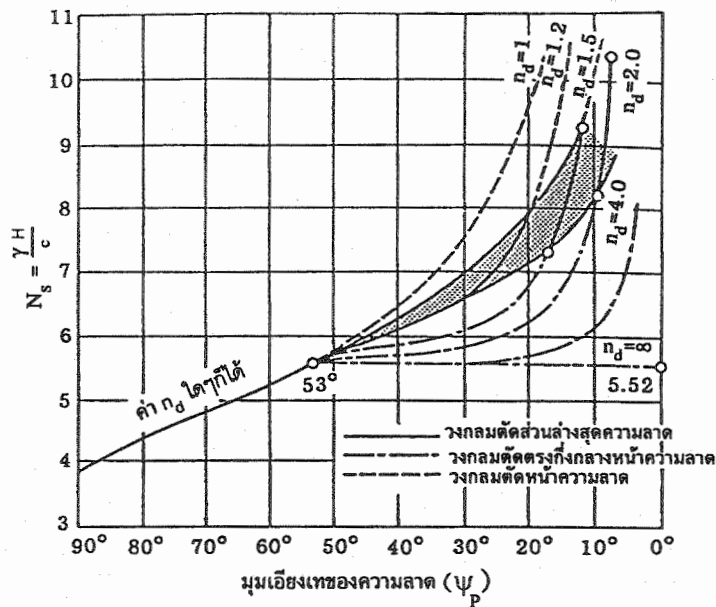
จากสมการที่ 3.10 ข้างบน ค่าของ  $N_s$  ไม่มีหน่วยคือเป็นค่าตัวเลขที่ไร้มิติ (non-dimensional) ค่าตัวเลขนี้บ่งถึงเสถียรภาพของความลาดเอียงนั้น จึงมีชื่อเรียกว่า Stability Number

เมื่อค่าปัจจัยความปลอดภัยของความลาดเอียง,  $F$  มีค่าเท่ากับหนึ่ง ความสูงของความลาดนั้นจะเป็นความสูงวิกฤต นั่นคือ  $H = H_{cr}$  และ  $c_d = c_u$  โดยที่ค่า  $c_u$  เป็นกำลังวัสดุเฉือนของมวลที่อยู่ในสภาวะ undrained ทำให้ได้ความสัมพันธ์เป็น

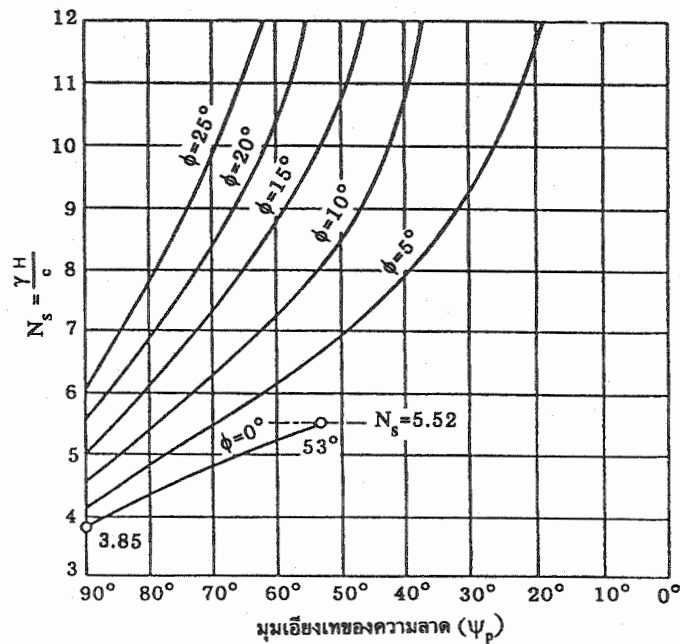
$$H_{cr} = c_u / \gamma N_s \quad (3.11)$$

การวิเคราะห์ตัวเลขเชิงเสถียรภาพตามลักษณะของพื้นผิวของการพังทลาย สำหรับมวลสารปราศจากความต้านทาน ( $\phi = 0$ ) จากสมการที่ 3.10 เมื่อกำหนดให้ ระยะ  $n_d$  เป็นระยะในแนวตั้งของค้ำรองรับของความลึก (depth factor)

$$n_d = \frac{\text{ระยะในแนวตั้งจากส่วนบนของความลาดถึงมวลฐานล่างที่อัดแน่น}}{\text{ความสูงในแนวตั้งของความลาด}} \quad (3.12)$$



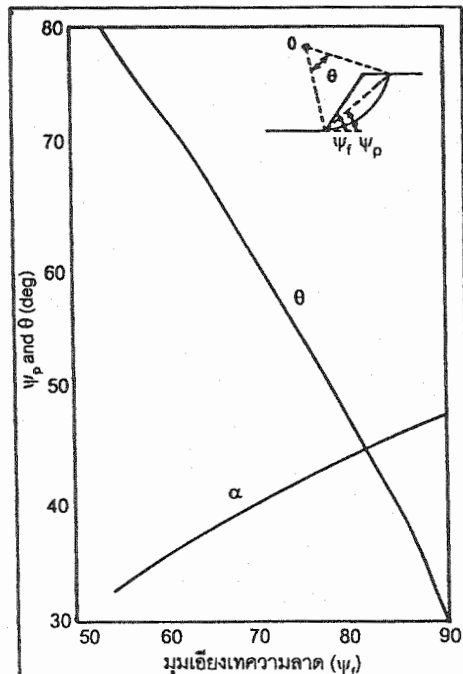
รูปที่ 3.5 กราฟการหาค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพของมวลคินที่มีการพังทลายแบบวงกลม มวลคินประเภทนี้ไม่มีค่าความเสียดทาน



รูปที่ 3.6 กราฟการหาค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพของมวลคินที่มีการพังทลายแบบวงกลม มวลคินประเภทนี้มีค่าโคฮิซันและค่าความเสียดทาน

พัฒนาการต่อมาในเรื่องการหาค่าเสถียรภาพ จากงานของ Taylor (1937), Terzaghi and Peck (1967) ได้เสนอวิธีการหาค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพจากมวลดินที่มีคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์แตกต่างกันเป็น 2 แบบ แบบแรก (รูปที่ 3.5) เป็นมวลดินที่ไม่มีค่าความเสียดทาน แบบที่สอง (รูปที่ 3.6) เป็นมวลดินที่มีค่าไคฮ์ชันและค่าความเสียดทาน

วิธีการที่จะใช้กราฟของการวิเคราะห์หาค่าในแนวแกนนอน แล้วทำการฉาย (project) ไปยังจุดที่เป็นรูปแบบของการพังทลาย ก่อนที่จะอ่านค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพในแนวแกนตั้ง ข้อสังเกตในรูปที่ 3.5 ถ้าหากค่า  $m_u$  มากกว่า 4 การพังทลายแบบวงกลมจะเป็น midpoint circle เสมอ ส่วนข้อสังเกตของรูปที่ 3.6 จะพบว่า ถ้าหากค่า  $\phi$  มากกว่า  $3^\circ$  การพังทลายแบบวงกลมจะเป็น toe circle เสมอ



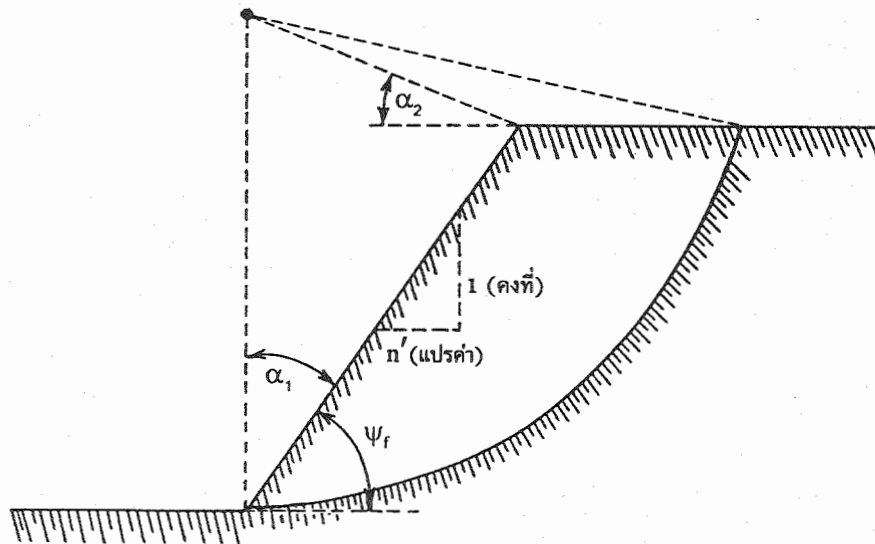
รูปที่ 3.7 การหาค่าแห่งที่เป็นจุดศูนย์กลางของวงกลมวิกฤต กราฟรูปนี้ใช้กับกรณีที่มีมวลดินมีความลาดชันสูง และค่ามุมเอียงเทของความลาดมากกว่า 53 องศา

ในกรณีของความลาดที่มีมุมเอียงที่สูง และมีค่า  $\psi_f$  มากกว่า  $53^\circ$  ตำแหน่งที่เป็นจุดศูนย์กลางของวงกลมวิกฤตของการพังทลายแบบ toe circle สามารถหาได้จากกราฟหน้าที่ 47 (รูปที่ 3.7)

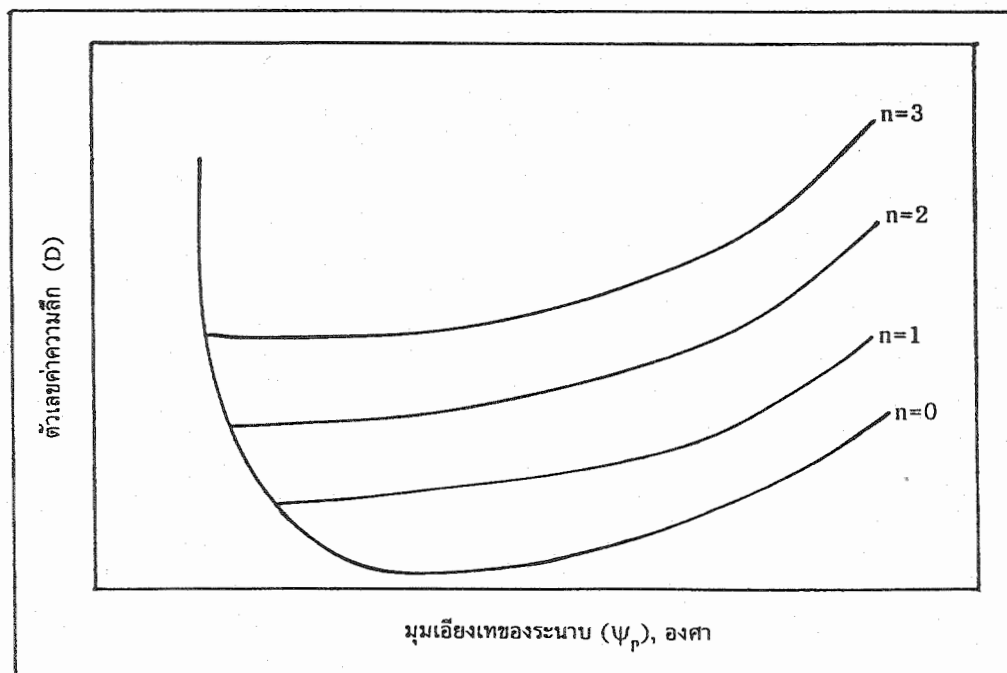
ในกรณีที่การพังทลายแบบวงกลมเป็นแบบ toe circle และมวลดินมีค่ามุมเอียงเท ( $\psi_f$ ) น้อยกว่า  $53^\circ$  ก็สามารถใช้กราฟในรูปที่ 3.8 ประกอบกับค่าตัวเลขในตารางที่ 3.1 ช่วยในการหาค่าตำแหน่งของจุดศูนย์กลางวงกลมวิกฤตได้

ตารางที่ 3.1 ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางวงกลม สำหรับการพังทลายแบบ toe circle ที่มีมุมเอียงเทน้อยกว่า 53 องศา (สัญลักษณ์ที่แสดงในตาราง ดูรูปที่ 3.8 ประกอบ)

$n$	$\psi_f$ (องศา)	$\alpha_1$ (องศา)	$\alpha_2$ (องศา)
1.0	45	28	37
1.5	33.68	26	35
2.0	26.57	25	35
3.0	18.43	25	35
5.0	11.32	25	37



รูปที่ 3.8 ตำแหน่งที่เป็นจุดศูนย์กลางของวงกลมวิกฤต ในกรณีที่มีความลาดเอียง มีค่าความลาดชันค่า และค่ามุมเอียงไม่น้อยกว่า 53 องศา



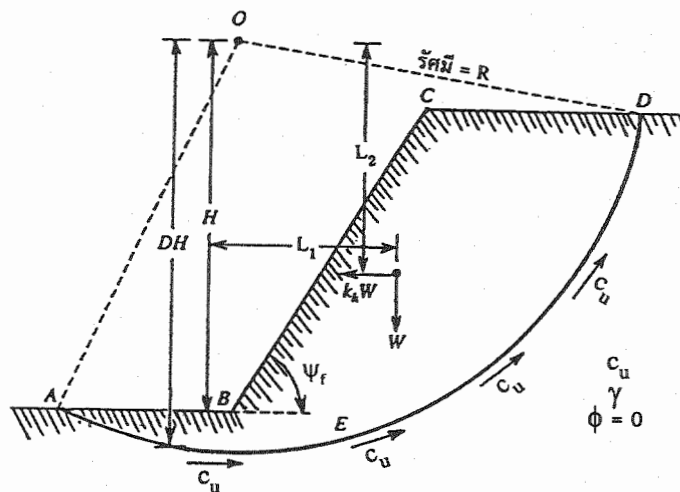
รูปที่ 3.9 ตำแหน่งของ midpoint circle ที่แปรผันตามค่าของระยะ  $n$  (ดูรูปที่ 3.8 ประกอบ)

Terzaghi and Peck (1967) ยังได้เสนอแนะการหาค่าแห่งของ midpoint circle จากกราฟในรูปที่ 3.8 โดยได้กำหนดค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพที่น่าจะเป็นค่าสูงสุด คือ  $N_s = 0.181$

#### 4. การพังทลายแบบวงกลม เมื่อมีแรงจากแผ่นดินไหว

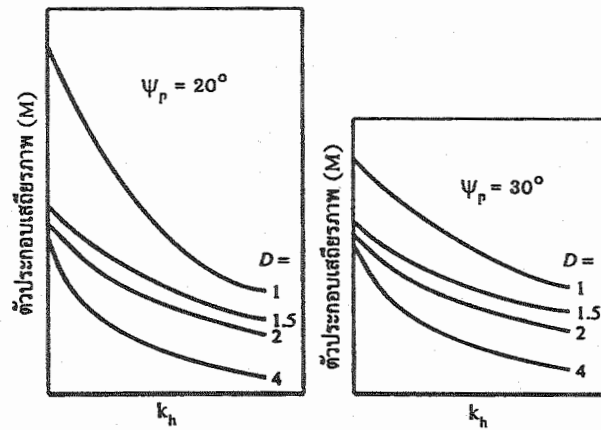
ความลาดเอียงของมวลสารที่อยู่ในสภาวะอิมิตัวด้วยน้ำ จนความเสียดทานภายในเท่ากับศูนย์ ( $\phi = 0$ ) Koppula (1984) ได้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบของแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว โดยตั้งสมมุติฐานให้ความลาดเอียงของมวลสารอยู่ในสภาวะกึ่งจำลองเชิงสถิตยศาสตร์ (pseudo-static state)

จากรูปที่ 3.10 ข้างล่างนี้เป็นภาพแสดงรูปหน้าตัดของความลาดเอียงของดินเหนียวที่มีแนวการเลื่อนไกล ในลักษณะเส้นโค้งแนว AED ซึ่งเส้นโค้งนี้เป็นอาร์กของวงกลมที่มีรัศมี R กำหนดให้จุดศูนย์กลางของวงกลมอยู่ที่จุด O ดังแสดงตำแหน่งในรูป

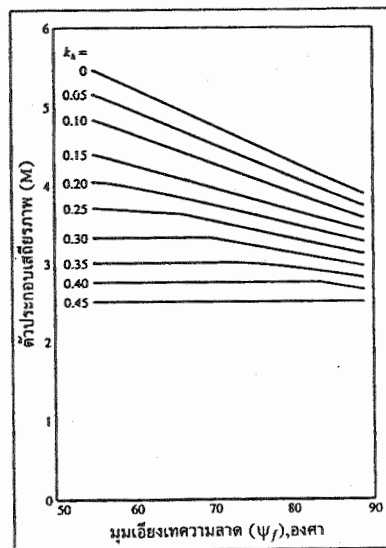


รูปที่ 3.10 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของมวลดินเนื้อเอกพันธ์ ที่มีแรงจากแผ่นดินไหวมากระทำ ในสภาวะที่ปราศจากความเสียดทาน





รูปที่ 3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า stability factor, slope angle, earthquake force ใช้ได้ในกรณีที่มีความลาดชันของมวลสารต่ำ



รูปที่ 3.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า stability factor, slope angle, earthquake force ใช้ได้ในกรณีที่มีความลาดชันของมวลสารสูง

เมื่อทำการวิเคราะห์หาค่าเลขเชิงเสถียรภาพของมวลดินต่อหน่วยความกว้าง สามารถจำแนกแรงที่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพ ดังนี้

a. น้ำหนักของมวลดินรูปสี่เหลี่ยม,  $W$

$$W = (\text{พื้นที่ของ } A B C D E A) \times (\text{หน่วยน้ำหนักของมวลดิน})$$

b. แรงเฉื่อยในแนวราบ,  $k_h(W)$

$$k_h = \frac{\text{component ของความเร่งเนื่องจากแผ่นดินไหว}}{\text{component ของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง}}$$

c. แรงโคฮิชั่นที่เกิดความตึงผิวของการเลื่อนไถล ที่มีขนาดแมกนิจูด เท่ากับ  $(\text{arc } A E D) \times (c_u)$  ค่า  $c_u$  นี้เป็น undrained cohesion ถ้าหากทำการหาโมเมนต์ของแรงที่ทำให้เกิดการเลื่อนไถล (driving force) รอบจุด O จะ ได้

$$M_d = WL_1 + k_h(WL_2) \quad (3.13)$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อทำการหาโมเมนต์ของแรงที่ต้านการเลื่อนไถลรอบจุด O

$$M_c = (\text{arc } A E D) \times (c_u) R \quad (3.14)$$

ถ้าหากให้  $M = \text{Stability Factor}$  จะ ได้ค่าปัจจัยความปลอดภัยที่ต้านต่อการเลื่อนไถล เป็น

$$F = F_s = \frac{M_c}{M_d} = \frac{(\text{arc } A E D)(c_u)(R)}{WL_1 + k_h(WL_2)} \quad (3.15)$$

$$= \frac{c_u(M)}{\gamma H}$$

Koppula ยังเสนอแนะกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง Stability Factor from earthquake,  $M$ , กับค่ามุมเอียงของความลาด,  $\psi_f$  ที่แปรเปลี่ยนตามค่าแรงจากแผ่นดินไหว,  $k_h$  รูปที่ 3.11 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวที่ใช้ได้กับกรณีที่มีมุมเอียงของความลาด เท่ากับ  $50^\circ$  หรือน้อยกว่า ส่วนรูปที่ 3.12 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความลาดที่มีมุมเอียงสูงกว่า  $55^\circ$

### 3.3.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีแบ่งส่วนมวลสารแบบธรรมดา

ถ้าหากทำการแบ่งพื้นที่หน้าตัดของมวลดิน (ที่อาจจะไม่จำเป็นต้องมีองค์ประกอบของเนื้อดินชนิดเดียวกันตลอด) จากนั้นกำหนดให้มวลสารบนระนาบการพังทลายรูปอาร์กวงกลม ถูกแบ่งออกเป็นส่วนเล็ก ๆ ในแนวตั้งออกเป็นหลายส่วน (vertical slices) แต่ละส่วนหรือที่เรียกว่า slice ได้ถูกแบ่งออกในแนวตั้งที่ไม่จำเป็นต้องมีความกว้างเท่ากันเสมอไป (ดูรูปที่ 3.11) การแบ่งส่วนเพื่อนำมาคำนวณด้วยเครื่องคิดเลขธรรมดา มักนิยมแบ่งออกเป็น 9-15 ส่วน

#### 1. หลักการคำนวณโดยไม่คิดแรงค้ำน้ำในมวลสาร

Fellenius (1936) ได้เสนอแนวทางการวิเคราะห์เพื่อหาเสถียรภาพของความลาดเอียง จากการคำนวณแรงที่เกิดขึ้นบนพื้นที่หน้าตัดในแต่ละส่วนของมวลดินที่ได้ทำการแบ่งแล้ว จากรูปที่ 3.13 ในสภาวะสมดุล

$$N_r = W_n \cos \alpha_n \quad (3.16)$$

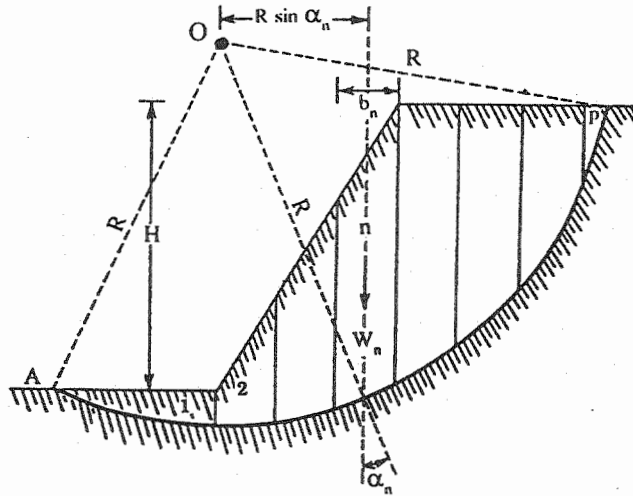
เมื่อ  $N_r$  เป็นแนวแรงปฏิกิริยาที่กระทำตั้งฉากกับระนาบพื้นผิวอาร์กของการพังทลาย (สมมุติให้แนวของอาร์กส่วนเล็ก ๆ ใกล้เคียงกับเส้นตรง) และค่า  $W_n$  เป็นน้ำหนักของส่วนที่ "n" และค่ามุม  $\alpha_n$  เป็นมุมเอียงเทของแนวระนาบเล็ก ๆ ที่เป็นฐานเปลือกที่ถูกแบ่งส่วน และกำหนดให้  $\Delta L_n$  เป็นค่าระยะความยาวของฐานตามแนวระนาบพื้นผิวการพังทลายรูปอาร์ก

ค่าแรงเฉือนที่ด้านการเลื่อนไถล มีค่าเป็น

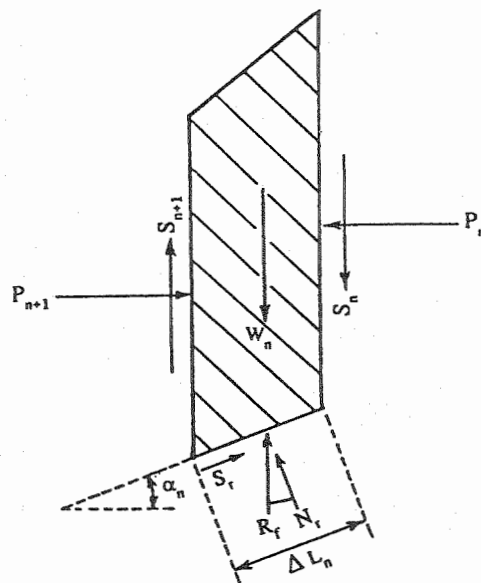
$$\begin{aligned} S_r &= \tau_d (\Delta L_n) \\ &= \frac{\tau_f (\Delta L_n)}{F} \end{aligned} \quad (3.17)$$

ค่าความเค้นอัดตั้งฉาก ( $\sigma$ ) ในสมการ 3.17 มีค่าเท่ากับ

$$\frac{N_r}{\Delta L_n} = \frac{W_n \cos \alpha_n}{\Delta L_n} \quad (3.18)$$



a. รูปแบบเชิงเรขาคณิตของมวลความลาดเอียงที่ถูกแบ่งส่วนออกตามวิธีแบบธรรมดา



b. ไดอะแกรมของแรงที่กระทำบนส่วนแบ่งที่ "n" ( $n^{\text{th}}$  slice)

รูปที่ 3.13 การวิเคราะห์เสถียรภาพมวลความลาดเอียงด้วยวิธีการแบ่งพื้นที่หน้าตัดออกเป็นหลายส่วนในแนวตั้ง

ในกรณีที่จะหาค่าปัจจัยความปลอดภัยของรูปลิ่มที่ทำการสไลด์ กำหนดให้เป็นลิ่ม ABC ทำการหาโมเมนต์รอบจุด O ของแรงที่ก่อให้เกิดการเลื่อนไถล และให้มีค่าเท่ากับโมเมนต์ของแรงที่ต้านการเลื่อนไถล นั่นคือ

$$F = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} [c\Delta L_n + W_n \cos\alpha_n \tan\phi]}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin\alpha_n} \quad (3.19)$$

เนื่องจากการตั้งสมมุติฐานของแนวอาร์กเล็ก ๆ ให้มีระยะเท่ากับคอร์ดที่เป็นเส้นตรง ดังนั้นค่า  $\Delta L_n$  ประมาณใกล้เคียงกับ  $b_n/\cos(\alpha_n)$  เมื่อค่า  $b_n =$  ระยะความกว้างของส่วนที่ "n"

ข้อสังเกตเพิ่มเติมได้แก่

a. ค่า  $\alpha_n$  อาจจะเป็นค่าบวกหรือค่าลบ ค่า  $\alpha_n$  มีค่าบวก เมื่อแนวลาดเอียงของอาร์กการพังทลายอยู่ในควอดแรนต์เดียวกับพื้นเอียงของความลาด

b. ถ้าหากต้องการหาค่าปัจจัยความปลอดภัยต่ำสุด ก็ต้องทำการทดลองวงกลมวิกฤตหลายครั้ง ซึ่งทำได้โดยการเปลี่ยนตำแหน่งจุดศูนย์กลางวงกลม วิธีการแบบนี้มักนิยมเรียกว่า "ordinary method of slices"

c. หลักการพื้นฐานของวิธีการแบ่งส่วน (method of slices) เป็นการคำนวณที่ใช้สำหรับมวลดินเนื้อเอกพันธ์ (homogeneous soil) แต่อาจประยุกต์ใช้กับมวลดินที่มีเนื้อดินแตกต่างกันเป็นชั้นหลายชั้น (layered soil) แต่ละชั้นมีค่าของ  $\gamma$ ,  $\phi$ , และ  $c$  ไม่เท่ากันก็ได้ การคำนวณต้องพิจารณาตามความเป็นจริงว่าแต่ละส่วน (slice) ประกอบด้วยค่าคุณสมบัติของตัวแปรเชิงกำลังวัสดุเท่าไร ถ้าหากต้องการให้การคำนวณถูกต้องแม่นยำมากขึ้นก็อาจแบ่งแต่ละส่วนออกเป็นส่วนย่อยเล็กลงไปอีก

## 2. หลักการคำนวณโดยคิดแรงดันน้ำในมวลสาร

ถ้าหากความลาดเอียงมีสภาพที่เปียกชื้นบางส่วน เนื่องจากมีการไหลซึมของน้ำบาดาลอยู่ตลอดเวลา (steady seepage) การไหลของน้ำบาดาลในความลาดเอียงที่ใกล้เคียงกับสภาพธรรมชาติที่แท้จริง จะเป็นรูปไฮเพอร์โบล่า

สมมุติฐานในการคำนวณโดยมีค่าแรงดันน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง ได้แก่

a. ค่ากำลังวัสดุเฉือนในสภาวะที่ความลาดเอียงจมน้ำบางส่วน จัดเป็นค่ากำลังวัสดุเฉือนประสิทธิผล (effective shear strength)

b. แรงดันน้ำในช่องว่าง ( $u$ ) ของมวลสารสำหรับส่วนแบ่งที่ "n" มีค่า

$$u_n = h_n (\gamma_w) \quad (3.20)$$

กำหนดให้  $h_n$  เป็นค่าระดับความสูงของน้ำ ที่วัดจากระดับเหนือพื้นผิวของการพังทลาย กับจุดบนสุดของเส้นความดันน้ำที่ผิวน้ำ (line of phreatic surface) และค่า  $\gamma_w$  เป็นหน่วยน้ำหนักของน้ำ

แต่จากรูปที่ 3.13 b เมื่อกำหนดให้  $\Delta L_n$  เป็นระยะความยาวของฐานสำหรับส่วนที่ถูกแบ่ง จึงได้ค่าแรงดันน้ำในโพรงช่องว่าง (pore water force) เป็น  $u_n (\Delta L_n)$

ดังนั้นจึงสามารถปรับปรุงสมการที่ 3.19 ที่ตั้งสมมุติฐานเป็นมวลความลาดเอียงที่แห้ง (dry slope mass) ให้มีสภาวะที่มีน้ำไหลซึมผ่านตลอดเวลา โดยเปลี่ยนให้เป็นสภาวะที่มวลจมน้ำบางส่วน (partially submerged slope mass)

สมการที่ปรับปรุงใหม่สำหรับสภาวะที่มวลจมน้ำบางส่วน ได้แก่

$$F = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} \left[ c' \Delta L_n + \left\{ W_n \cos \alpha_n - u_n \Delta L_n \right\} \right] \tan \phi'}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n} \quad (3.21)$$

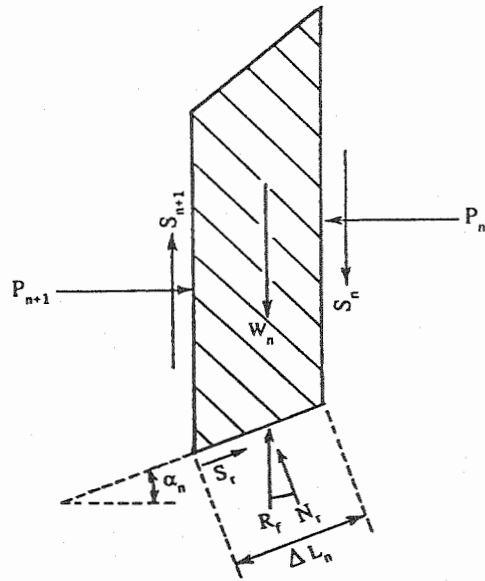
### 3.3.3 การวิเคราะห์ด้วยวิธีแบ่งส่วนมวลสารแบบของ Bishop

Bishop (1955) ได้เสนอแนวทางใหม่เพื่อที่จะให้ได้ผลเฉลยที่ถูกต้องเหมาะสมมากกว่าวิธีการแบ่งส่วนแบบธรรมดา (ordinary method of slices) ตามแนวทางของ Bishop นี้ จะนำผลของแรงกระทำต่อต้านทั้งหลายของส่วนที่แบ่ง (slice) ซึ่งมีการตั้งสมมุติฐานให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงในภาคสนาม

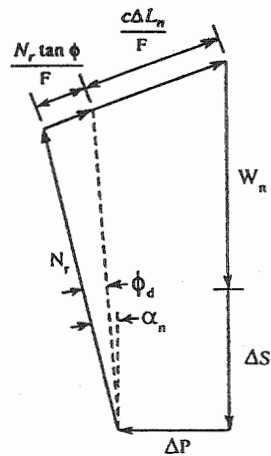
ปัจจุบันวิธีการของ Bishop มีการใช้กันอย่างกว้างขวาง สาเหตุเพราะว่าวิธีการนี้มักได้ค่าปัจจัยความปลอดภัย ที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่าวิธีการแบ่งส่วนแบบธรรมดา จากรูปที่ 3.14 จะได้ผลของแรงที่กระทำตรงด้านข้างของส่วนที่แบ่ง คือ

$$P_n - P_{(n+1)} = \Delta P \quad (3.22)$$

$$S_n - S_{(n+1)} = \Delta S \quad (3.23)$$



a. แรงที่กระทำที่  $n^{th}$  slice



b. รูปหลายเหลี่ยมของแรง ณ จุดสมดุล

รูปที่ 3.14 วิธีการของ Bishop ที่หาเสถียรภาพโดยการใช่วิธีแบ่งส่วนของความลาดเอียง แต่กำหนดให้แรงที่กระทำตั้งฉากกับแรงที่กระทำขนานกับด้านข้าง มีค่าไม่เท่ากันกับอีกด้านของส่วนที่แบ่ง

$$\begin{aligned}
S_x &= (\text{แรงที่ต้านการเคลื่อนที่เนื่องจากความเสียดทาน}) \\
&\quad + (\text{แรงที่ต้านการเคลื่อนที่เนื่องจากโคฮีชัน}) \\
&= N_r (\tan \phi_d) + c_d (\Delta L_n) \\
&= \frac{N_r (\tan \phi)}{F} + \frac{c (\Delta L_n)}{F} \tag{3.24}
\end{aligned}$$

จากรูปที่ 3.14 b เมื่อทำการเขียนรูปหลายเหลี่ยมของแรงที่จะมีผลต่อความสมดุลของส่วนที่ "n" แล้วทำการรวมแรงที่อยู่ในแนวตั้ง จากนั้นจัดเทอมใหม่จะได้ค่า

$$N_r = \frac{W_n + \Delta S - c(\Delta L_n / F) \sin \alpha_n}{\cos \alpha_n + (\tan \phi \sin \alpha_n / F)} \tag{3.25}$$

จากการวิเคราะห์แบบการแบ่งส่วนของความลาดเอียงแบบธรรมดา และทำการคำนวณได้ค่าแรงเฉือนที่ต้านการเลื่อนไถล ดังสมการที่ 3.17 ในสภาวะสมดุลของรูปสามเหลี่ยม ABC (ดังแสดงในรูปที่ 3.13 หน้า 55) เมื่อทำการหาโมเมนต์รอบจุด O จะได้ค่า

โมเมนต์ของการก่อให้เกิดการเลื่อนไถล = โมเมนต์ที่ต้านการเลื่อนไถล

$$\sum_{n=1}^{n=p} \{ (W_n)(R)(\sin \alpha_n) \} = \sum_{n=1}^{n=p} \{ (S_r)(R) \} \tag{3.26}$$

แทนค่าของสมการที่ 3.24 และ 3.25 ลงในสมการข้างบนนี้ แล้วจัดพจน์ใหม่ จะได้ค่าปัจจัยความปลอดภัยที่เป็น สมการทั่วไปของ Bishop ดังนี้

$$F = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} \{ c b_n + W_n \tan \phi + \Delta S \tan \phi \} \cdot \left\{ \frac{1}{M_{\alpha(n)}} \right\}}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n} \tag{3.27}$$

โดยค่าสัญลักษณ์ที่เป็นตัวแปรของ  $M_{\alpha(n)}$  มีค่าเป็น

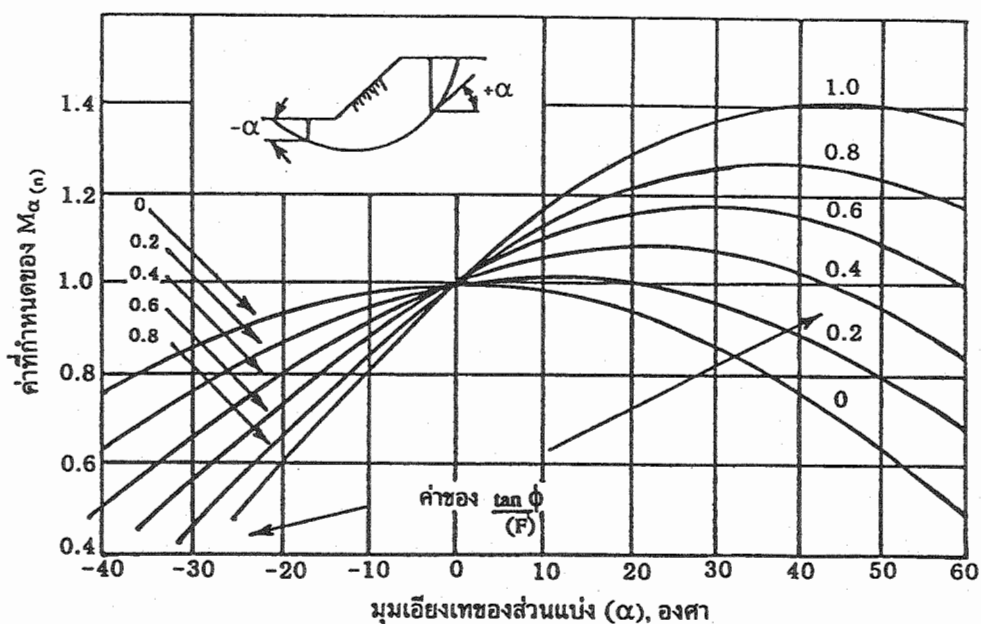
$$M_{\alpha(n)} = \cos \alpha_n + \{ \tan \phi \sin \alpha_n \} / F \tag{3.28}$$



สมการที่ 3.27 หน้า 59 สามารถทำให้ง่ายขึ้น โดยการทำให้พจน์ของ  $\Delta s = 0$

$$F = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} \{cb_n + W_n \tan \phi\} - \left\{ \frac{1}{M_{\alpha(n)}} \right\}}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n} \quad (3.29)$$

สังเกตุดูว่า สมการที่ 3.29 นี้ ถ้าแทนค่าของ  $M_{\alpha(n)}$  ลงไปจะมีค่าของตัวแปรที่ไม่ทราบค่า คือ  $F$  อยู่ทั้งสองข้างของสมการ จึงต้องมีวิธีการที่ทดลองค่าหลายครั้ง จนกว่าจะได้ค่าปัจจัยความปลอดภัยที่น้อยที่สุด



รูปที่ 3.15 แผนภูมิของค่า  $M_{\alpha(n)}$  สำหรับสมการของ Bishop ที่ใช้วิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเอียงโดยการแบ่งส่วน

อย่างไรก็ตาม เพื่อเป็นการสะดวกในการแก้ปัญหา สมการของ simplified Bishop (สมการที่ 3.29) ค่าตัวแปร  $M_{\alpha(n)}$  หาได้จากแผนภูมิ (chart) ที่แสดงในรูปที่ 3.15 หน้า 60 จากแผนภูมินี้ถ้าผู้ใช้ทราบค่ามุมเอียงของแต่ละส่วน แล้วกำหนดค่า  $F$  ขึ้นมา และรู้ค่าของ  $\phi$  ก็จะสามารถหาค่า  $M_{\alpha(n)}$  ได้

### 3.3.4 การวิเคราะห์ด้วยวิธีแบ่งส่วนมวลสารแบบของ Janbu

วิธีการของ Bishop นั้นจะสมมุติว่า การพังทลายเป็นแบบวงกลม ที่มีแนวของ circular failure path ผ่านจุด toe ของความลาดเอียง แต่วิธีการของ Janbu จะสมมุติว่าลักษณะการพังทลายเป็นรูปแบบใดก็ได้ เช่นเป็น non-circular failure จากผลการศึกษาในภาคสนาม วิธีการของ Janbu มีความน่าเชื่อถือในแง่ของค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย (factor of safety) ถ้าหากนำวิธีการของ Janbu มาใช้กับการคำนวณพื้นผิวการเลื่อนไถล (slip surface) ที่ไม่ลึก แต่วิธีการของ Janbu จะมีข้อผิดพลาดอย่างมากเมื่อนำไปใช้กับ พื้นผิวการเลื่อนไถลที่อยู่ในระดับลึก และมวลมีค่ามุมความเสียดทานต่ำ (น้อยกว่า  $30^\circ$ )

หลักการในการคำนวณตามวิธีการของ Janbu มีความคล้ายคลึงกับวิธีการของ Bishop ผลสรุปสำหรับการวิเคราะห์หาค่าปัจจัยความปลอดภัยตามวิธีนี้ มีดังนี้

1. กำหนดให้พื้นผิวการพังทลายของมวลความลาดเอียงที่ทำการวิเคราะห์ มีค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยต่ำสุด ซึ่งในสภาพความเป็นจริง การคำนวณครั้งแรกอาจไม่ได้ค่าปัจจัยความปลอดภัยต่ำสุด จึงต้องทำการคำนวณซ้ำ ๆ กันหลายครั้ง

2. จากนั้นทำการแบ่งส่วนตามแนวตั้ง (vertical slice) สำหรับมวลสารที่เกิดการเลื่อนไถล ปกติควรมีจำนวนส่วนที่แบ่งอย่างน้อย 5 ส่วน

3. คำนวณค่ากำลังวัสดุเฉือน (shear strength) ที่กระทำบนฐานของแต่ละส่วนที่ถูกแบ่ง เนื่องจากมวลสารที่เกิดการพังทลายอาจมีพฤติกรรมแบบ non-linear จึงควรหาค่าคุณสมบัติที่เป็นค่าโคฮีชันและค่าความเสียดทานเฉพาะ

คุณสมบัติที่เกิดในวัสดุที่มีพฤติกรรมไม่ใช่ฮิสเทติกโดยตรงได้แก่ค่า instantaneous cohesion,  $c_i'$  และค่า instantaneous friction angle,  $\phi_i'$

4. เมื่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของ slice และ shear strength สามารถที่จะหาค่าได้แล้ว จึงทำการคำนวณหาค่าของ expressions ที่สมมุติขึ้นเป็น X, Y และ Z จากนั้นจึงคำนวณแรงดันน้ำ  $Q$  รวมกับ  $\sum Z_w$

$$X = [c' + (\gamma h_n - \gamma_{nw} h_{nw}) \tan \phi'] (1 + \tan^2 \alpha_n) b_n \quad (3.30)$$

$$Y = \tan \alpha_n \tan \phi' \quad (3.31)$$

$$Z = \gamma h_n b_n (\tan \alpha_n) \quad (3.32)$$

$$Q = 1/2 \gamma_w (Z_w)^2 \quad (3.33)$$

5. การประมาณค่าปัจจัยความปลอดภัยครั้งแรก จะกำหนดให้ค่า  $F$  เท่ากับ 1.00 โดยที่

$$F = \frac{F_0 \sum X / (1 + Y/F)}{\sum Z + Q} \quad (3.34)$$

สำหรับสมการข้างบน ค่า  $F_0$  คือค่าประมาณของค่าปัจจัยความปลอดภัยที่แก้ไขให้ถูกต้อง (approximate correction factor) โดยกำหนดให้

$$F_0 = 1 + K \{d/L - 1.4 (d/L)^2\} \quad (3.35)$$

ค่า  $d$  เป็นความลึกของ slice ที่วัดระยะค่าจากเส้นที่มีความยาว ระยะ  $L$  เส้นนี้ลากเชื่อมระหว่างจุด toe กับจุดล่างสุดของ tension crack (ดูรูปที่ 3.16 หน้า 63 ประกอบ)

สมการที่ 3.35 ที่ใช้สำหรับหาค่า  $F_0$  นี้มีเงื่อนไขเป็น 2 กรณี คือ

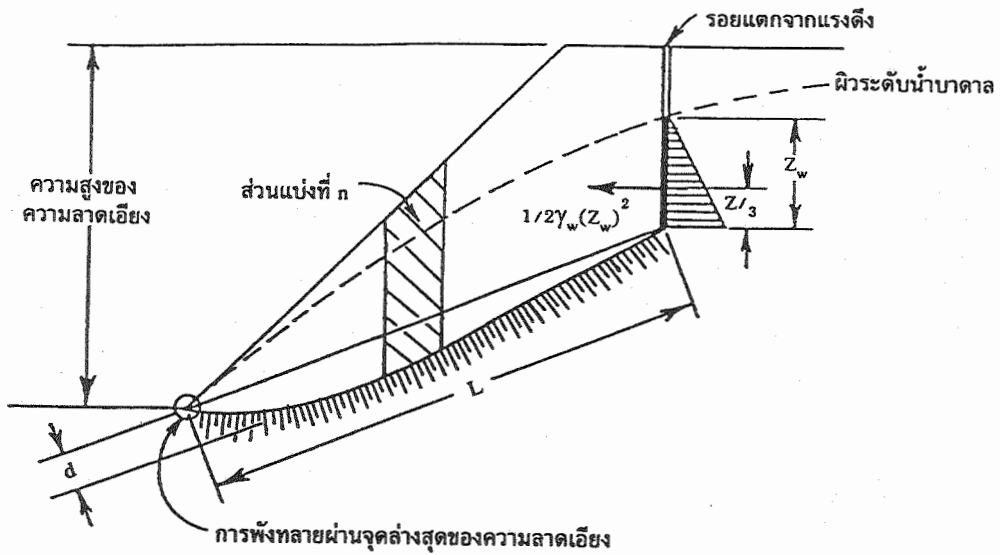
1. กรณีแรก

$$\text{ถ้า } c' = 0; \text{ ค่า } K = 0.31 \quad (3.36)$$

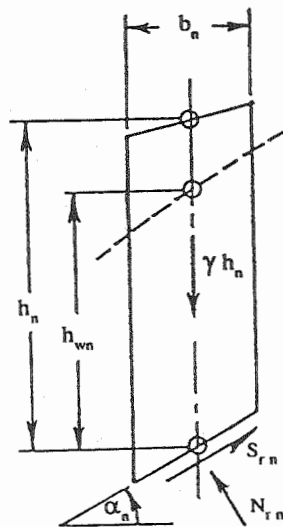
2. กรณีที่สอง

$$\text{ถ้า } c' > 0 \text{ และ ค่า } \phi > 0 \text{ จะได้ค่า } K = 0.50 \quad (3.37)$$

ถ้าหากผลต่างระหว่าง calculated  $F$  กับ assumed  $F$  มีค่ามากกว่า 0.01 ต้องทำการคำนวณซ้ำ โดยกำหนดให้ค่า calculated  $F$  ที่คำนวณได้ครั้งแรกเป็น



a. รูปแบบเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียงที่จมน้ำบางส่วน (partially submerged)



b. ไดอะแกรมของแรงที่กระทำบน slice ที่ n

รูปที่ 3.16 การแก้ปัญหามันแบ่งส่วนมวลสารด้วยวิธีการของ Janbu

ค่า second estimate สำหรับค่า  $F$  ที่ได้จากการคำนวณซ้ำใหม่ครั้งที่สอง จากนั้นก็ทำการคำนวณซ้ำกันเรื่อยๆ จนได้ค่าผลต่างของค่า  $F$  ที่ต่อเนื่อง (successive factor of safety) มีค่าน้อยกว่า 0.01 จึงเป็นค่าตอบสุดท้าย

### 3.3.5 การวิเคราะห์แบบ non-linear criterion

ในกรณีที่มีมวลสาร มีพฤติกรรมในช่วงที่เกิดการพังทลายแตกหักไม่เป็นไปตามทฤษฎีอิลาสติก โดยที่เกิดการ rupture เป็นแบบ non-linear ค่ากำลังวัสดุเฉือนของมวลสารที่ส่วนใหญ่เป็นหิน Hoek and Bray (1981) ได้เสนอสมการของความสัมพันธ์ในการหาค่ากำลังวัสดุเฉือนจากเครื่องมือวัดแรงอัดทั้งสามแกน (triaxial test)

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \{m\sigma_c\sigma_3 + s(\sigma_c)^2\}^{1/2} \quad (3.38)$$

$$\tau = A\sigma_c [\{\sigma'/\sigma_c\} - T]^B \quad (3.39)$$

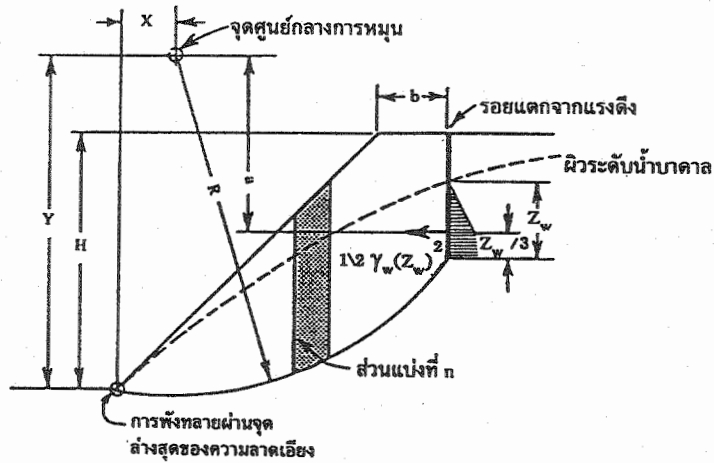
ในสมการที่ 3.38 ค่าของ  $\sigma_1$  เป็นค่าความเค้นอัดในแนวตั้ง (เมื่อทดสอบด้วยวิธีกำลังวัสดุอัดสามแกน) และค่า  $\sigma_3$  เป็นค่าความเค้นอัดในแนวราบ ที่เพิ่มแรงเข้าไปในเครื่องมือทดสอบ  $\sigma'$  เป็นค่าความเค้นอัดจากเชิงประสิทธิผล ส่วนค่าของ  $\sigma_c$  เป็นค่ากำลังวัสดุแกนเดียวของแต่ละแท่งมวลสาร นอกจากนี้ยังมีค่าคงที่  $A$  และ  $B$  เป็นค่าที่ระบุรูปร่าง (shape) ของ Mohr failure envelope, ส่วนค่า  $m$  และ  $s$  เป็นค่าคงที่ไร้มิติที่เกี่ยวข้องกับขนาด รูปร่าง และการเชื่อมแน่นของผลึกในมวลเนื้อหินแต่ละชนิด

กำหนดให้ค่าคงที่  $T$  ของสมการข้างบน (3.39) มีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ตัวอื่น

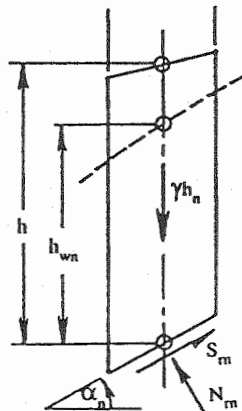
$$T = 1/2 [m - \{m^2 + 4s\}^{1/2}] \quad (3.40)$$

Hoek and Bray (1981) ได้กำหนดค่า  $T$ ,  $m$  และ  $s$  ที่เป็นค่าคงที่เชิงประจักษ์ (empirical constants) ไว้ในหน้าที่ 108 ของตำรา Rock Slope Engineering: Third Edition และได้คัดลอกไว้ในตารางที่ 3.2 หน้า 66-67

กระบวนการคำนวณมวลสารที่มีพฤติกรรม non-linear และมีการพังทลายแบบวงกลม จะมีวิธีการที่คล้ายคลึงกับการคำนวณตามวิธีของ simplified Bishop และของ Janbu



a. รูปแบบเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียงที่มีพื้นผิวการเลื่อนไถลเป็นแบบวงกลม



b. ไดอะแกรมของแรงที่กระทำบนส่วนที่แบ่งของ  $n^{th}$  slice

รูปที่ 3.17 การหาเสถียรภาพของมวลสารที่มีพฤติกรรมแบบ non-linear การวิเคราะห์ใช้การแบ่งส่วนตามวิธี simplified Bishop

ตารางที่ 3.2 ค่าคงที่เชิงประสพการณ์ของคุณสมบัติของวัสดุที่มีพฤติกรรมการแตกหักไม่ใช่แบบอิลาสติกเชิงเส้นโดยตรง (non-linear)

สมการที่ 3.38, 3.39, 3.40 หัวข้อที่ 3.3.5	หินที่มีแร่คาร์บอเนต เช่น หินปูน หินอ่อน หินโคลีไมต์	หินที่แร่เม็ดละเอียดเกาะยึดติดแน่น เช่น หินโคลน หินซิลต์ หินชนวน	หินที่มีแร่ซิลิกาสูง ผลึกยึดติดแน่น ไม่มีรอยแตก หินทราย หินควอร์ตไซต์	หินที่ผลึกแร่เม็ดละเอียด แร่ในเนื้อหินประสานแน่น หินแอนดิไซต์ หินโรโอไลต์	หินที่ผลึกแร่เม็ดหยาบเกาะยึดติดแน่น เช่น หินแกรนิต แกรนิต หินไนส์
แท่งตัวอย่างหินที่ปราศจากรอยแตกแยก	m = 7.000 s = 1.000 A = 0.816 B = 0.685 T = -0.140	m = 10.000 s = 1.000 A = 0.918 B = 0.677 T = -0.099	m = 15.000 s = 1.000 A = 1.044 B = 0.692 T = -0.067	m = 17.000 s = 1.000 A = 1.086 B = 0.696 T = -0.059	m = 25.000 s = 1.000 A = 1.220 B = 0.705 T = -0.040
มวลหินคุณภาพดีมาก ไม่มีการรื้อฟื้น ช่วงระหว่างของรอยแตก แยก ประมาณ 3 เมตร	m = 3.500 s = 0.100 A = 0.651 B = 0.679 T = -0.028	m = 5.00 s = 0.100 A = 0.739 B = 0.692 T = -0.020	m = 7.500 s = 0.100 A = 0.848 B = 0.702 T = -0.013	m = 8.500 s = 0.100 A = 0.883 B = 0.705 T = -0.012	m = 12.500 s = 0.100 A = 0.998 B = 0.712 T = -0.008
มวลหินคุณภาพดี มีการรื้อฟื้นเล็กน้อย ช่วงระหว่างของรอยแตกแยก 1-3 เมตร	m = 0.700 s = 0.004 A = 0.369 B = 0.669 T = -0.006	m = 1.000 s = 0.004 A = 0.427 B = 0.683 T = -0.004	m = 1.500 s = 0.004 A = 0.501 B = 0.695 T = -0.003	m = 1.700 s = 0.004 A = 0.525 B = 0.698 T = -0.002	m = 2.5000 s = 0.004 A = 0.603 B = 0.707 T = -0.002
มวลหินคุณภาพปานกลาง มีการรื้อฟื้นตามรอยแตกแยก และช่วงระหว่าง 0.3-1.0 เมตร	m = 0.140 s = 0.0001 A = 0.198 B = 0.662 T = -0.0007	m = 0.200 s = 0.0001 A = 0.234 B = 0.675 T = -0.0005	m = 0.300 s = 0.0001 A = 0.280 B = 0.688 T = -0.0003	m = 0.3400 s = 0.0001 A = 0.295 B = 0.691 T = -0.0003	m = 0.500 s = 0.0001 A = 0.346 B = 0.700 T = -0.0002

ตารางที่ 3.2 (ต่อ) ค่าคงที่เชิงประสการณของคุณสมบัติของวัสดุที่มีพฤติกรรม  
การแตกหักไม่ใช่แบบอีลาสติกเชิงเส้นโดยตรง (non-linear)

สมการที่ 3.38, 3.39, 3.40 หัวข้อ ที่ 3.3.5	หินที่มีแร่ คาร์บอเนต เช่น หินปูน หินอ่อน หิน โดโลไมต์	หินที่แร่เม็ด ละเอียดเกาะยึด ติดแน่น เช่น หินโคลน หินซิลต์ หินชนวน	หินที่มีแร่ซิลิกา สูง ผลึกยึดติด แน่น ไม่มีรอย แตก หินทราย หินควอร์ตไซต์	หินที่ผลึกแร่เม็ด ละเอียด แร่ใน เนื้อหินประสาน แน่น หินแอนดี- ไซต์ หินโรโอไลต์	หินที่ผลึกแร่เม็ด หยาบเกาะยึดติด แน่น เช่น หินแกรโบร แกรนิต หินไนส์
มวลหินคุณภาพเลว มีรอยแตกแยกที่ ช่องว่างรอยแตกมี ดินปูนอยู่บ้าง บาง ที่เป็นช่องว่างเปล่า	m = 0.040 s = 0.00001 A = 0.115 B = 0.646 T = -0.0002	m = 0.050 s = 0.00001 A = 0.129 B = 0.655 T = -0.0005	m = 0.080 s = 0.00001 A = 0.162 B = 0.672 T = -0.0001	m = 0.090 s = 0.00001 A = 0.172 B = 0.676 T = -0.0001	m = 0.130 s = 0.00001 A = 0.203 B = 0.686 T = -0.0001
มวลหินคุณภาพเลว มาก มีรอยแตกแยก ถี่มาก ปกติมีดินฟู สะสมอยู่ในรอยแตก เสมอ ไม่ค่อยพบ ช่องว่างเปล่า	m = 0.007 s = 0.000 A = 0.042 B = 0.534 T = 0.000	m = 0.010 s = 0.000 A = 0.050 B = 0.539 T = 0.000	m = 0.015 s = 0.000 A = 0.061 B = 0.546 T = 0.000	m = 0.017 s = 0.000 A = 0.065 B = 0.548 T = 0.000	m = 0.025 s = 0.000 A = 0.078 B = 0.556 T = 0.000



รูปที่ 3.17 เป็นรูปแบบเชิงเรขาคณิตของการพังทลายแบบวงกลม และเนื่องจากมวลสารพื้นผิวของ slip เป็นวงกลม จึงใช้วิธีการของ Bishop ลำดับขั้นที่สำคัญในการคำนวณ มีดังนี้

1. หาค่าปัจจัยความปลอดภัย (F) ของส่วนที่แบ่ง

$$F = \frac{\sum (c'_i + \sigma' \tan \phi'_i) \cdot (b_n / \cos \alpha_n)}{\sum \gamma h (b_n) \sin \alpha_n + 1/2 \gamma_w Z_w^2 (a/R)} \quad (3.41)$$

2. คำนวณหาค่าความเค้นอัดตั้งฉากเชิงประสิทธิผล (effective normal stress) ที่กระทำบนฐานของแต่ละ slice ทั้งนี้โดยอาศัย Fellenius' solution

$$\sigma' = \gamma h \cos^2 \alpha_n - \gamma_w h_w \quad (3.42)$$

3. ใช้ค่า  $\sigma'$  นี้ มาคำนวณหาค่าของ  $\tan \phi'_i$  และ  $c'_i$  จากสมการที่ 3.43 และ 3.44 ต่อไปนี้ โดยมีเงื่อนไขที่ระบุข้างล่างเป็น 2 กรณี

$$\tan \phi'_i = AB \left[ \left( \frac{\sigma'}{\sigma_c} \right) - T \right]^{B-1} \quad (3.43)$$

$$c'_i = A \sigma_c \left[ \left( \frac{\sigma'}{\sigma_c} \right) - T \right]^B - \sigma' \tan \phi'_i \quad (3.44)$$

เงื่อนไขที่จำเป็นของแต่ละ slice นั้นคือ

#### กรณีแรก

$c' > 0$  โดยที่  $\sigma'$  คำนวณได้จากสมการที่ 3.45 ข้างล่างที่หามาจาก Bishop's solution

$$\sigma' = \frac{\gamma_h - \gamma_w h_w - \{c'_i \tan \alpha_n / F\}}{1 + \{\tan \phi'_i \tan \alpha_n / F\}} \quad (3.45)$$

#### กรณีที่สอง

$$\cos \alpha_n [1 + \{(\tan \alpha_n \tan \phi'_i) / F\}] > 0.2 \quad (3.46)$$

4. นำค่าตัวแปรจากสมการที่ (3.42) ถึงสมการที่ (3.45) มาคำนวณหาค่าปัจจัยความปลอดภัย ( $F$ ) ซึ่งเป็นค่าประมาณ  $F$  ในครั้งแรก (first estimate) โดยแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ลงในสมการที่ 3.40

5. ใช้ค่า  $F$  ที่ได้จากหัวข้อ 4 ไปคำนวณหาค่า ความเค้นอัดประสิทธิผล ( $\sigma'$ ) ใหม่อีกครั้ง โดยใช้สมการที่ (3.45)

6. นำค่า  $\sigma'$  ที่ได้ใหม่นี้ ไปคำนวณหาค่า  $\tan \phi_1'$  และ  $c_1'$  อีกครั้ง

7. ตรวจสอบเงื่อนไขในหัวข้อที่ 3 ทั้ง 2 กรณี ว่าเป็นที่ยอมรับได้หรือไม่สำหรับแต่ละส่วนที่ถูกแบ่ง (slice)

8. คำนวณหาค่าปัจจัยความปลอดภัย ( $F$ ) ใหม่ ซึ่งเป็นการประมาณค่าครั้งที่ 2 (second estimate)

9. หากการประมาณค่า  $F$  ทั้งสองครั้ง ได้ค่าความแตกต่างระหว่างค่าปัจจัยความปลอดภัยที่ต่อเนื่อง ระหว่างค่าประมาณครั้งแรกกับค่าประมาณครั้งที่สอง มีค่าความแตกต่างมากกว่า 0.01 ให้กลับไปทำข้อ 5 และคำนวณค่าความเค้นอัดประสิทธิผลซ้ำ โดยใช้ค่า  $F$  ของการประมาณครั้งที่ 2 เป็นค่าเริ่มต้นของข้อมูลเข้า (input) การคำนวณแบบนี้จะมีการทำซ้ำเรื่อยไป จนกว่าผลต่างของค่า  $F$  ที่ต่อเนื่อง มีค่าความแตกต่างน้อยกว่า 0.01 ตามปกติควรทำซ้ำแบบนี้ประมาณ 10 ครั้ง

#### 3.4 โปรแกรมแบบจำลองการพังทลายแบบวงกลม

แนวทางของการเขียนโปรแกรมแบบจำลองการพังทลายแบบวงกลม ได้กำหนดรูปแบบของการพังทลายไว้ตามวิธีการของนักวิจัยที่มีผลงานเด่น ๆ และหลักการเหล่านั้นเป็นที่ยอมรับกันทั่วโลก ซึ่งแบ่งออกเป็น วิธีการของ Fellenius วิธีการของ Bishop วิธีการของ Janbu และวิธีวิเคราะห์เชิง Non-Linear Criterion

การเขียนโปรแกรมการวิเคราะห์เสถียรภาพ ปกติถ้าใช้การแบ่งส่วนเป็นส่วนเล็ก ๆ (slice) ก็จะกำหนดไว้ทั้งหมด 100 ส่วน การวิเคราะห์ตามโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้เขียนตามสมการแบบจำลองของแต่ละวิธีการ (เช่น ตามแบบของ Bishop หรือของ Janbu เป็นต้น) โปรแกรมจะรับค่าตัวเลขบนเมนูหลักแล้วทำการคำนวณโดยอาศัยสมการหลักหรือสมการเฉพาะที่ได้ระบุมาแล้ว

จากนั้นโปรแกรมจะถามค่าข้อมูลดิบ ซึ่งเป็นค่ามิติเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียงหรือถามค่าตัวเลขคุณสมบัติของมวลดิน/มวลหิน เมื่อได้ข้อมูลครบตามความต้องการ โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพของความลาดเอียง และแสดงภาพกราฟิกที่แสดงพิกัดกับมิติของรูปแบบการพังทลายเฉพาะจุดวิกฤตกับจุดที่เสถียรภาพ

### 3.4.1 ตัวอย่างแบบจำลองตามวิธีการวิเคราะห์ผลตามวิธีการของ Fellenius

โปรแกรมแบบจำลองการวิเคราะห์ผลอิงตามหลักการ เรืองวงกลมความเสียดทานของ Fellenius ที่ประยุกต์ใช้กับการแบ่งส่วนของมวลสารตามหลักการในหัวข้อที่ 3.3.2 เรื่องวิธีการแบ่งส่วน (method of slices)

ตัวอย่างในหน้าถัดไปเป็นตารางค่าคุณสมบัติมวลสาร (ตารางที่ 3.3) กับผลลัพธ์ค่าตัวเลขเสถียรภาพ และรูปกราฟของการพังทลาย (รูปที่ 3.18)

### 3.4.2 ตัวอย่างแบบจำลองการวิเคราะห์ผลตามวิธีการของ Bishop

แนวทางของการวิเคราะห์ผลตามแบบของ Bishop ได้อธิบายรายละเอียดไว้แล้วในหัวข้อ 3.3.3 วิธีการวิเคราะห์แบบนี้ใช้กว้างขวางมากกว่าการแบ่งส่วนแบบธรรมดา (ordinary method of slices) ทั้งนี้เพราะได้ค่าตัวเลขเสถียรภาพที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากกว่า ตารางที่ 3.4 และรูปที่ 3.19 หน้าที่ 72 เป็นการแสดงผลของการวิเคราะห์ตามวิธีการของ Bishop

### 3.4.3 ตัวอย่างแบบจำลองการวิเคราะห์ผลตามวิธีการของ Janbu

แนวทางการวิเคราะห์ผลตามแบบของ Janbu จะกำหนดให้รูปหน้าตัดของพื้นผิวการพังทลายไม่เป็นวงกลม จึงได้ลักษณะคล้ายกับรูปหลายเหลี่ยมต่อเชื่อมกัน เป็นมวลสารที่ก่อให้เกิดการพังทลายบนระนาบที่ไม่เป็นวงกลม ตารางที่ 3.5 และรูปที่ 3.20 หน้าที่ 73 เป็นการแสดงผลของการวิเคราะห์ตามวิธีการของ Janbu

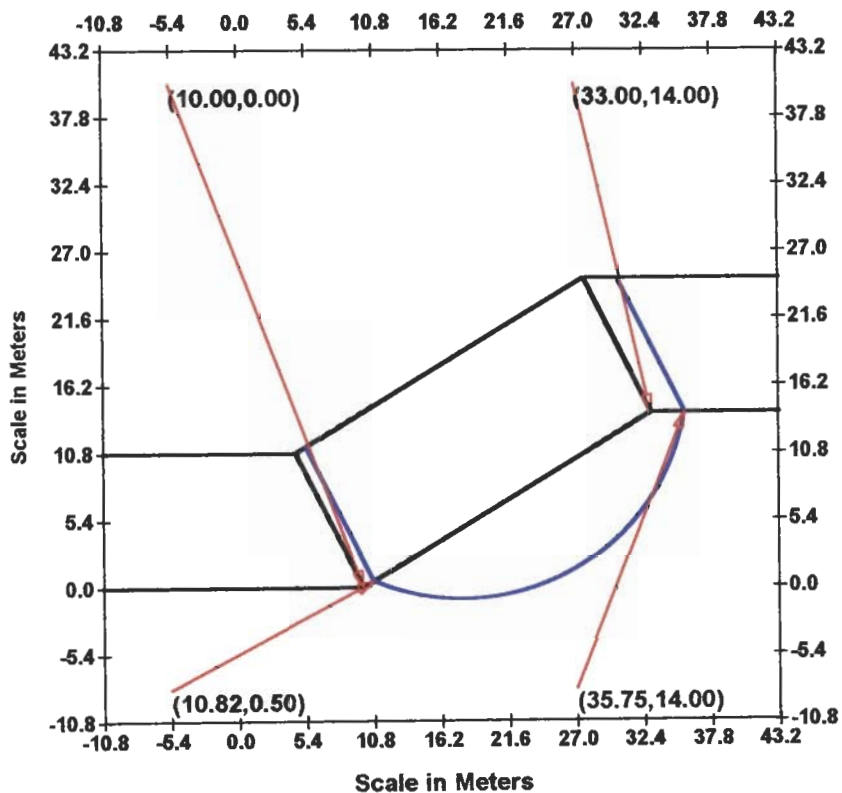
### 3.4.4 ตัวอย่างแบบจำลองการวิเคราะห์ผลตามหลักการของ Non-Linear

เมื่อกำหนดให้วัสดุที่เป็นมวลสารของความลาดเอียง มีพฤติกรรมที่ตอบสนองต่อแรงหรือความเค้นที่มากกระทำต่อวัสดุแบบไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) ตามลักษณะแบบอลาสติกโดยตรง ซึ่งได้ระบุค่าคงที่สำหรับมวลสารที่มีพฤติกรรมแบบนี้ไว้ในตารางที่ 3.2 หน้าที่ 66-67 สำหรับตัวอย่างการวิเคราะห์ผลวัสดุที่เป็น non-linear ได้ใช้หลักการของ Bishop ที่กำหนดให้พื้นผิวการพังทลายเป็นรูปวงกลม ตารางที่ 3.6 และรูปที่ 3.21 หน้าที่ 74 เป็นผลการวิเคราะห์มวลความลาดเอียงมีพฤติกรรมแบบไม่ใช้อลาสติกโดยตรง แบบจำลองวิธีการวิเคราะห์แบบต่าง ๆ ที่ได้เขียนเป็นโปรแกรมการคำนวณผลลัพธ์ และแสดงรูปแบบเชิงเรขาคณิตของการพังทลาย สามารถที่จะสรุปข้อดีข้อเสียในการนำไปประยุกต์ใช้ต่างกัน ได้ดังนี้

1. การวิเคราะห์ตามวิธีของ Fellenius จะได้ค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยต่ำกว่าของวิธีของ Bishop

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติมวลสาร ค่ามิติต่าง ๆ ของความลาดเอียง และผลการวิเคราะห์ด้วยการแบ่งส่วนแบบธรรมดา และใช้หลักการของ Fellenius

Slope Property					
Material Property and Measurement					
Cohesion, kPa		10.00		Center of Rotation, meters	
Angle of Internal Friction, Degrees		10.00		X Coordinate	18.00
Soil Unit Weight, kN/m <sup>3</sup>		20.00		Y Coordinate	17.00
				Radius	18.00
Slope Coordinate, meters					
No.	X Coordinate	Y Coordinate	No.	X Coordinate	Y Coordinate
1.	0.00	0.00	3.	33.00	14.00
2.	10.00	0.00	4.	50.00	14.00
Analysis Result					
Factor of Safety = 0.88					



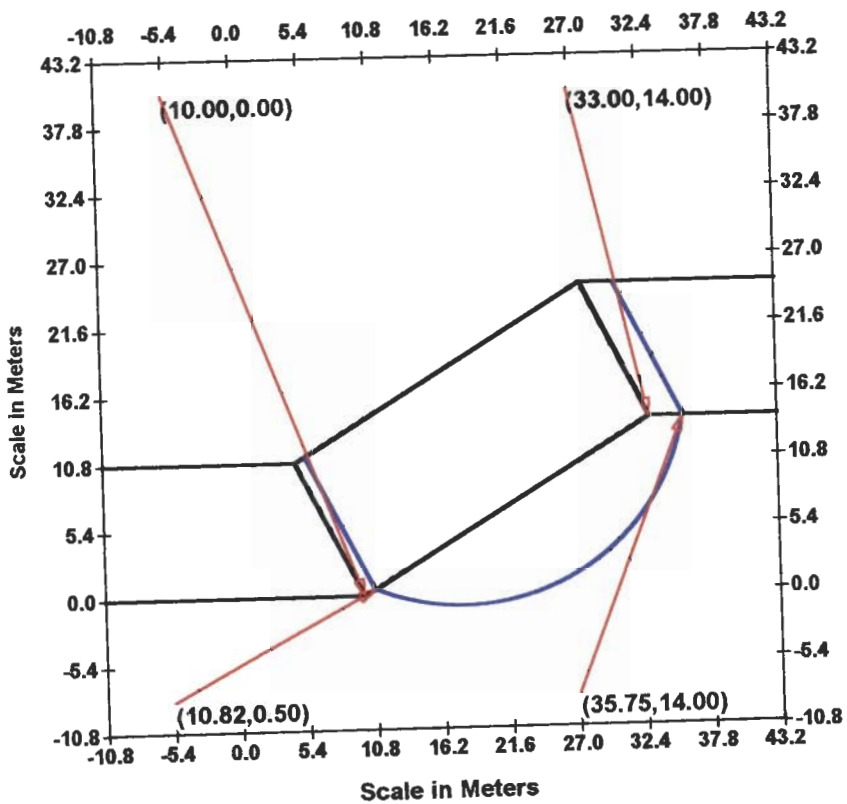
รูปที่ 3.18 รูปกราฟิกแสดงพิกัดที่สำคัญของความลาดเอียงที่ใช้หลักการคำนวณตามวิธีการของ Fellenius

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติมวลสาร ค่ามิติต่าง ๆ ของความลาดเอียง และผลการวิเคราะห์มวลสารด้วยการแบ่งส่วน ตามแนวทางที่เสนอแนะโดย Bishop

Slope Property					
Material Property and Measurement					
Cohesion, kPa		10.00		Center of Rotation, meters	
Angle of Internal Friction, Degrees		10.00		X Coordinate	18.00
Soil Unit Weight, kN/m <sup>3</sup>		20.00		Y Coordinate	17.00
				Radius	18.00
Slope Coordinate, meters					
No.	X Coordinate	Y Coordinate	No.	X Coordinate	Y Coordinate
1.	0.00	0.00	3.	33.00	14.00
2.	10.00	0.00	4.	50.00	14.00

Analysis Result	
Factor of Safety = 0.92	



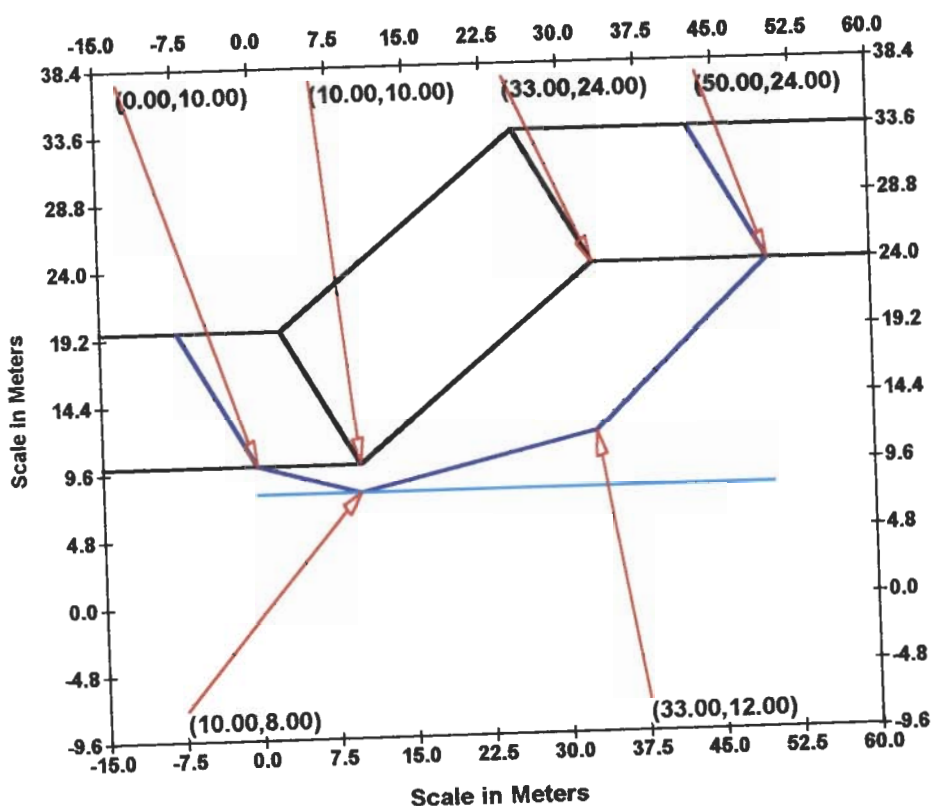
รูปที่ 3.19 รูปกราฟิกแสดงพิกัดที่สำคัญของความลาดเอียงที่ใช้หลักการคำนวณตามวิธีการของ Bishop

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติมวลสาร ค่ามิติต่าง ๆ ของความลาดเอียง และผลการวิเคราะห์มวลสารด้วยการแบ่งส่วน ตามแนวทางที่เสนอแนะโดย Janbu

Slope Property						
Material Property and Measurement						
Cohesion, kPa	10.00		Soil Unit Weight, kN/m <sup>3</sup>	20.00		
Angle of Internal Friction, Degrees	10.00		Water Unit Weight, kN/m <sup>3</sup>	10.00		
Coordinate, meters						
No.	Slope		Water Level		Slip Surface	
	X	Y	X	Y	X	Y
1.	0.00	10.00	0.00	8.00	10.00	8.00
2.	10.00	10.00	10.00	8.00	33.00	12.00
3.	33.00	24.00	33.00	8.00		
4.	50.00	24.00	50.00	8.00		

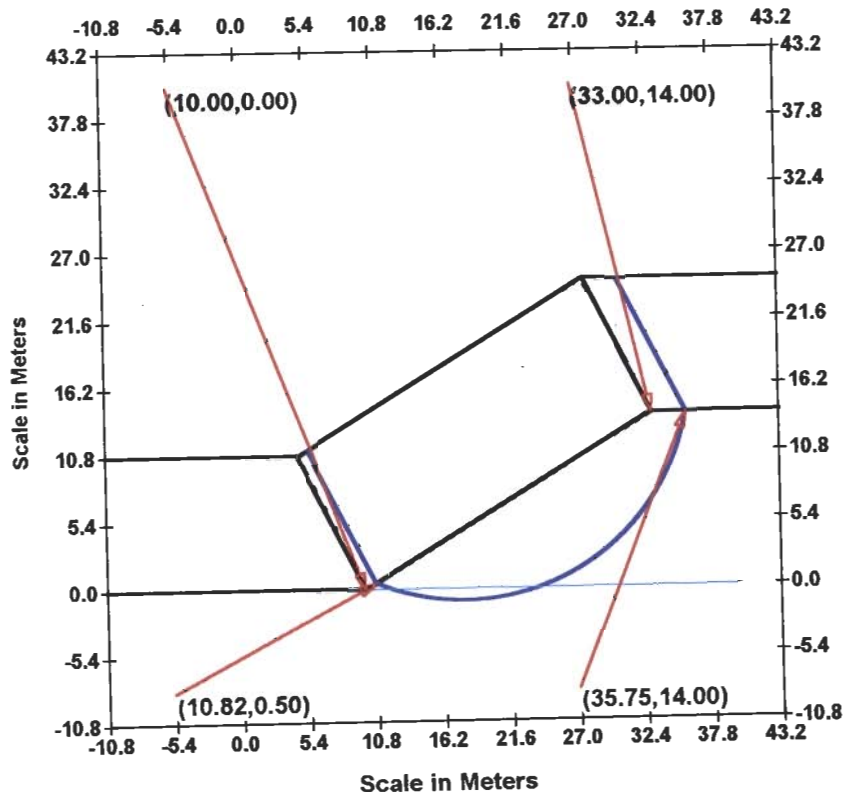
Analysis Result	
Factor of Safety = 0.88	



รูปที่ 3.20 รูปกราฟิกแสดงพิกัดที่สำคัญของความลาดเอียงที่ใช้หลักการคำนวณตามวิธีการของ Janbu

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติมวลสาร ค่ามิติต่าง ๆ ของความลาดเอียง และผลการวิเคราะห์  
 ความการตั้งสมมุติฐานให้มวลสารมีพฤติกรรมแบบไม่ใช่อีลาสติคเชิงเส้น

Slope Property					
Material Property and Measurement					
Uniaxial Strength,kN/m <sup>2</sup>		10.00		Center of Rotation,meters	
Soil Unit Weight,kN/m <sup>3</sup>		20.00		X Coordinate	
Water Unit Weight,kN/m <sup>3</sup>		10.00		Y Coordinate	
				Radius	
				18.00	
Slope Coordinate,meters					
No.	X Coordinate	Y Coordinate	No.	X Coordinate	Y Coordinate
1.	0.00	0.00	3.	33.00	14.00
2.	10.00	0.00	4.	50.00	14.00
Water Level Coordinate,meters					
No.	X Coordinate	Y Coordinate	No.	X Coordinate	Y Coordinate
1.	0.00	0.00	3.	33.00	0.00
2.	10.00	0.00	4.	40.00	0.00
Constant Values					
A = 0.04		B = 0.53		T = 0.00	
Analysis Result					
Factor of Safety = 1.58					



รูปที่ 3.21 รูปกราฟิกแสดงพิกัดที่สำคัญของความลาดเอียงที่ใช้  
 การวิเคราะห์ Bishop มวลไม่ใช่อีลาสติคเชิงเส้น

2. สาเหตุหนึ่งที่ค่าตัวเลขบ่งชี้ความปลอดภัยที่ได้จากการวิเคราะห์ของ Bishop แตกต่างจากการวิเคราะห์แบบแบ่งส่วนมวลสารปกติ เพราะว่ามีผลการนำผลของแรงที่กระทำตั้งฉากและที่กระทำด้านข้างของแต่ละ slice มาใช้ในการคำนวณโดยกำหนดให้แรงที่อยู่ตรงข้ามกันมีค่าไม่เท่ากัน

3. วิธีการของ Janbu ประยุกต์ใช้กับพื้นผิวของการพังทลายได้มากกว่าของ Bishop เพราะไม่ได้มีข้อจำกัดที่จะต้องเป็นพื้นผิววงกลม แต่ก็ยังมีข้อเสียที่ค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพไม่ค่อยถูกต้อง ถ้าหากมวลสารมีความไม่เสถียรด้านต่ำ

4. หลักเกณฑ์ของ non-linear ใช้ได้กับมวลสารส่วนใหญ่ทั้งที่มวลดินหรือมวลหิน



## บทที่ 4 การพังทลายแบบลิ่ม

ในการพังทลายของมวลสาร ในหลายกรณีระนาบของการพังทลายไม่ได้เป็นรูปวงกลมหรือเป็นรูปกึ่งอาร์ก แต่มีรูปหน้าตัดเป็นรูปหลายเหลี่ยม หรือมีระนาบตั้งแต่ 2 ระนาบขึ้นไปคั่นกัน มีโอกาสที่ระนาบการพังทลายมีรูปคล้ายลิ่ม (wedge) แนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพของมวลสารรูปลิ่มนี้ใช้ได้ทั้งการขุดเจาะบนพื้นผิว ได้แยกออกเป็น การพังทลายรูปลิ่ม 2 บล็อก การพังทลายแบบลิ่มของมวลดินด้วยวิธีการวิเคราะห์ของ Sarma การพังทลายแบบลิ่มของมวลหินด้วยวิธีการวิเคราะห์ของ Hoek et al.

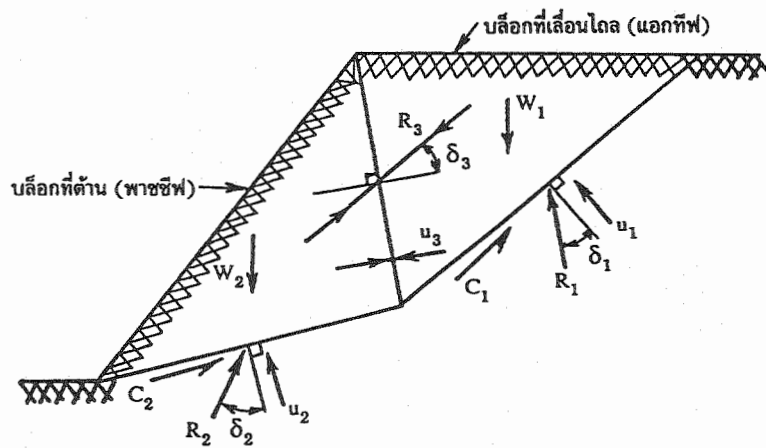
### 4.1 การวิเคราะห์ระนาบการพังทลายรูปหลายเหลี่ยม

รูปแบบของพื้นผิวการพังทลายแบบนี้ จะไม่เป็นระนาบ (non-planar) หรือไม่เป็นวงกลม (non-circular) แต่มีรูปแบบรูปหลายเหลี่ยม (polygon) มวลสารที่มีโอกาสเกิดการพังทลายมีการเลื่อนไถลตามระนาบ ดังนั้นโดยทั่วไปจะได้มวลเป็นแบบรูปลิ่ม 2 บล็อกคั่นกัน แต่ก็มีบางกรณีมวลก็มีโอกาสเกิดการพังทลายเป็นรูปลิ่มมากกว่า 2 บล็อกก็จะใช้การวิเคราะห์อีกแบบ (ใช้วิธีของ Sarma)

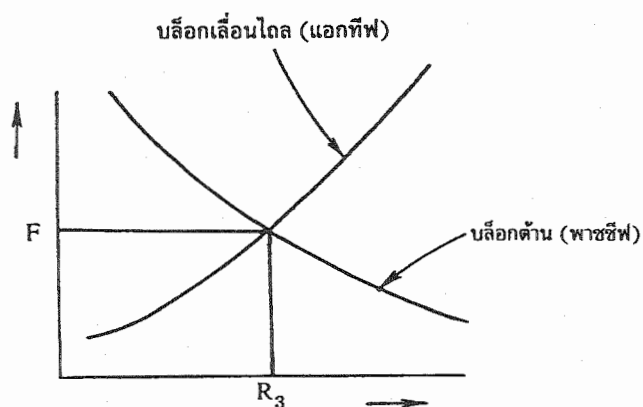
#### 4.1.1 การหาเสถียรภาพของมวลรูปลิ่ม 2 บล็อก

การวิเคราะห์เสถียรภาพมวลสารรูปลิ่มคั่นกัน (ดูรูปที่ 4.1 หน้าถัดไป) หลักการก็คือ ต้องแบ่งออกเป็น 2 ไชน (ถ้ามีลิ่ม 2 บล็อก) จากนั้นการคำนวณก็ใช้วิธีของแรงหลายเหลี่ยม (force polygon)

ตามปกติลิ่มที่เป็นบล็อกที่อยู่ทางด้านบน จะกระทำเป็นบล็อกที่ก่อให้เกิดการเลื่อนไถลหรือเรียกว่า บล็อกแอคทีฟ (active block) ค่ามุมเอียงเทพื้นฐานของบล็อกด้านบน ( $\delta_1$ ) มีค่ามากกว่าค่ามุมเสียดทานภายใน ( $\phi_1$ ) ของบล็อกด้านบน ส่วนบล็อกทางด้านล่างหรือบล็อกที่ผ่านจุดล่างสุด (toe) ของความลาดเอียง ปกติจะกระทำเป็นบล็อกต้านการเลื่อนไถล หรือเรียกว่า บล็อกพาสซีฟ (passive block) เพราะค่ามุมเอียงเทของระนาบบล็อกลิ่มด้านล่าง ( $\delta_2$ ) มักน้อยกว่าค่ามุมความเสียดทานภายใน ( $\phi_2$ ) ของบล็อกด้านล่าง ค่าของความเสียดทานภายในที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวสัมผัสที่อยู่ในแนวตั้งระหว่างลิ่มที่คั่นกัน ( $\phi_3$ ) ก็ต้องนำมาคำนวณด้วยในการหาเสถียรภาพของมวลสาร ถ้าหากมีแรงดันน้ำเกิดขึ้น ก็ต้องคำนวณค่าของแรงต่าง ๆ บนฐานระนาบที่เลื่อนไถล



รูปที่ 4.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพของมวลสารรูปสี่เหลี่ยม 2 บล็อก และการแสดงไดอะแกรมของแรงที่สำคัญต่าง ๆ ที่กระทำบนบล็อกทั้งสอง



รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์หาค่าตัวเลขบังคับความปลอดภัยที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกรณีที่เป็นรูปสี่เหลี่ยม 2 บล็อกติดกัน

ค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย (F) ของบล็อกรูปสี่เหลี่ยม ก็หาได้ความปกติเช่นเดียวกับในเรื่องการพังทลายตามแนวระนาบของความลาดเอียงที่มีขนาดมิติจำกัด นั่นคือ

$$F_{\text{block}} = \frac{\tan \phi_{\text{available}}}{\tan \phi_{\text{required}}} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} F_{\text{block}} &= \text{ค่าปัจจัยความปลอดภัยของบล็อกรูปสี่เหลี่ยม} \\ \phi_{\text{available}} &= \text{ค่ามุมเสียดทานภายในบนผิวระนาบการพังทลาย} \\ &\quad \text{ของบล็อกรูปสี่เหลี่ยม ที่กำหนดในการออกแบบ} \\ \phi_{\text{required}} &= \text{ค่ามุมเสียดทานที่วงกลมเสียดทานผ่านเวกเตอร์ผลลัพธ์} \\ &\quad \text{ของแรงปฏิกิริยาที่กระทำบนพื้นผิวระนาบการพังทลาย} \end{aligned}$$

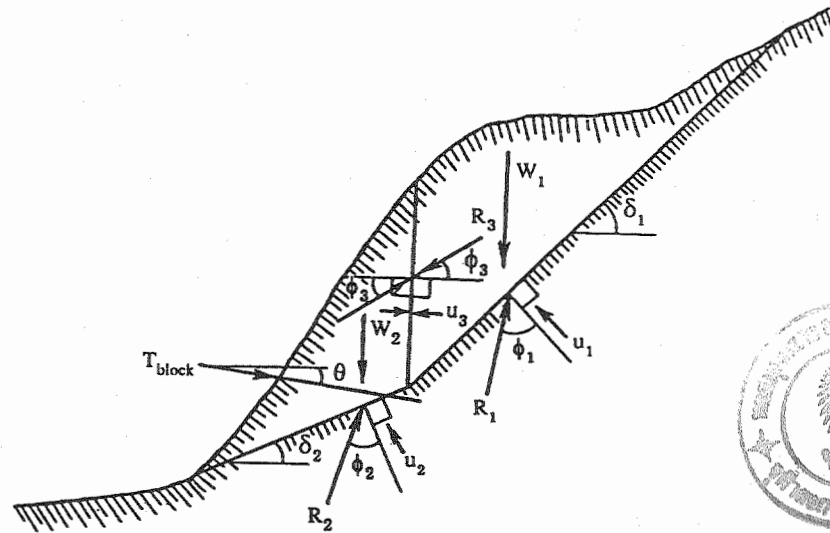
ค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยที่หาได้จากสมการที่ 4.1 ทั้งของบล็อกแยกทีพ (F<sub>active</sub>) กับของบล็อกพาสซีฟ (F<sub>passive</sub>) เมื่อนำมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบกับค่าผลลัพธ์ของแรงปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัสร่วมของบล็อกทั้งสอง (R<sub>3</sub>) ก็จะเป็นค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยสุดท้ายที่เหมาะสมที่สุด (ดูรูปที่ 4.2)

ในการที่จะเพิ่มเสถียรภาพของบล็อกรูปสี่เหลี่ยม Goodman (1980) ได้เสนอแนะสูตรเชิงประสมการณ์ที่สมมุติให้ระนาบการพังทลายของบล็อกด้านบน (บล็อกแยกทีพ) มีความชันมากกว่าบล็อกด้านล่าง (บล็อกพาสซีฟ) และสมมุติให้ระนาบที่สัมผัสร่วมระหว่าง 2 บล็อกอยู่ในแนวตั้ง เมื่อทำการเสริมเสถียรภาพโดยใช้หมุดยึดหิน (rock bolt) หรือลวดยึดคึด (anchor bolt) ที่บริเวณบล็อกด้านล่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.3 สามารถหาค่าแรงภายนอกต่อหน่วยความกว้าง เมื่อต้องการเพื่อทำให้เกิดความสมดุลของ 2 บล็อก หรือกำหนดให้ค่าปัจจัยความปลอดภัย เท่ากับ 1 (หนึ่ง) และค่าโคฮิชั่นระหว่างพื้นผิวน้อยมาก

$$T_{\text{block}} = \frac{W_1 \sin(\delta_1 - \phi_1) \cos(\delta_2 - \phi_2 - \phi_3) + W_2 \sin(\delta_2 - \phi_2) \cos(\delta_1 - \phi_1 - \phi_3)}{\cos(\delta_2 - \phi_2 + \theta) \cos(\delta_1 - \phi_1 - \phi_3)} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} T_{\text{block}} &= \text{แรงภายนอกที่กระทำเพื่อเสริมเสถียรภาพของ} \\ &\quad \text{บล็อกรูปสี่เหลี่ยมที่ติดกันและทำมุม } \theta \text{ กับแนวราบ} \\ \phi_1, \phi_2, \phi_3 &= \text{มุมเสียดทานภายในที่เกิดบนพื้นผิวสัมผัสของบล็อก} \\ &\quad \text{ด้านบน บล็อกด้านล่าง และบล็อกที่ติดกัน ตามลำดับ} \\ \delta_1, \delta_2 &= \text{มุมเอียงเทของฐานบล็อกด้านบน และบล็อกด้านล่าง} \\ &\quad \text{ตามลำดับ} \end{aligned}$$

- $W_1, W_2$  = น้ำหนักของบล็อกแรกทีพและบล็อกพาซีพต่อหน่วย  
 ความกว้างของพื้นผิวการเลื่อนไถล  
 $u_1, u_2, u_3$  = แรงดันน้ำที่กระทำบนบล็อกด้านบน บล็อกด้านล่าง  
 และบนระนาบที่สัมผัสระหว่าง 2 บล็อกตามลำดับ  
 $R_1, R_2, R_3$  = แรงปฏิกิริยาที่กระทำบนบล็อกด้านบน บล็อกด้านล่าง  
 และบนระนาบที่สัมผัสระหว่าง 2 บล็อกตามลำดับ



รูปที่ 4.3 การเพิ่มเสถียรภาพของบล็อกรูปสี่เหลี่ยม 2 บล็อกติดกัน

#### 4.1.2 การหาเสถียรภาพมวลรูปหลายบล็อกด้วยวิธีของ Sarma

ในกรณีความลาดเอียงมีมวลสารที่เป็นรูปหลายบล็อก วิธีการวิเคราะห์ที่นำเสนอโดย Sarma (1979) สามารถใช้โคพลาคีสำหรับมวลดิน และถูกนำดัดแปลงให้ง่ายขึ้นโดย Hoek (1987) ซึ่งต่อมาวิธีของ Sarma ก็นำมาใช้กับมวลที่เป็นหิน

วิธีการของ Sarma นี้ สามารถประเมินหาเสถียรภาพการพังทลายเนื่องจากการหมุนเนื่องจากเกิดโมเมนต์ที่ก่อให้เกิดการพังทลาย และระนาบของพื้นผิวไม่เป็นวงกลม หรือใช้ได้กับกรณีที่มีมวลสารมีลักษณะ เป็นรูปหลายเหลี่ยมแบบสี่เหลี่ยม

### 1. แนวทางเพิ่มเติมของการหาเสถียรภาพของ Sarma

การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีนี้ มีจุดเด่นตรงที่สามารถใช้ได้กับความลาดเอียงที่มีพื้นผิวการพังทลายทุกรูปแบบ โดยที่วิธีของ Sarma นี้สามารถใช้ได้กับการพังทลายแบบระนาบ เป็นรูปวงกลม หรือไม่ใช่รูปวงกลม และยังใช้ได้กับรูปลิ่ม

อนึ่งถ้าทำการแบ่งส่วนของมวลสารก่อนการวิเคราะห์ วิธีของ Sarma นี้ก็ยังยอมให้มีการเอียงตัวของส่วนแบ่งด้านข้าง (slice sides) ที่ไม่จำเป็นต้องอยู่ในแนวตั้งหรือขนานกันแบบการแบ่งส่วนในเรื่องการพังทลายแบบวงกลมที่ระบุไว้ในเมทที่ 3

หลักการวิเคราะห์ของ Sarma เหมาะสำหรับการหาเสถียรภาพความลาดเอียงที่การพังทลายมีผลเกิดจาก คุณสมบัติของมวลสารมากกว่าการที่จะหาเสถียรภาพความลาดเอียงที่การพังทลายเป็นผลเนื่องจากแนวเปราะบางหรือความไม่ต่อเนื่องในมวลหิน แต่ถ้าหากใช้วิธี Sarma วิเคราะห์สำหรับมวลหินที่มีการผุพังสูงรอยแตกแยกในหินผาก ก็อาจจะสมมุติว่าระนาบของการพังทลายเป็นรูปวงกลม และน่าจะเป็นวิธีที่ดีที่สุด ในขณะที่จะหาเสถียรภาพของมวลสารที่มีรอยแตกแยกมากและมวลมีการผุพังสูง เพราะว่าพฤติกรรมของกำลังวัสดุในมวลสารดังกล่าว จะเป็นแบบที่ได้รับความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียด ไม่เป็นเส้นตรง ข้อคืออีกอย่างสำหรับวิธีของ Sarma คือ สามารถใช้ได้กับมวลความลาดเอียงที่มีระดับน้ำใต้ดินมากระทำในบางส่วนหรือมวลความลาดเอียงทั้งหมดจนน้ำ

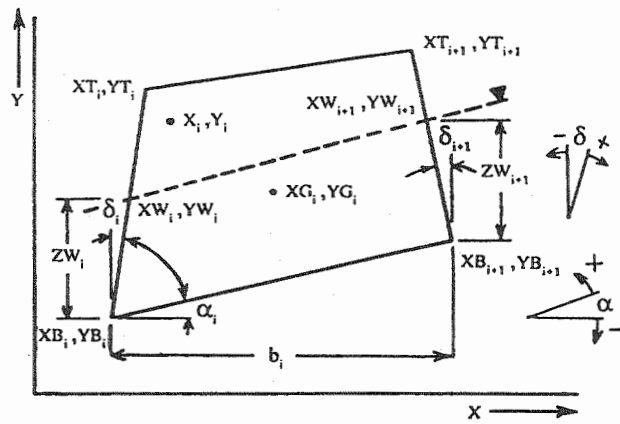
### 2. รายละเอียดของการวิเคราะห์แบบ Sarma

แนวทางที่น่าเสนอนี้ ได้มีการดัดแปลงแก้ไขบ้างเล็กน้อย เพื่อให้ผู้อ่านได้เข้าใจได้ง่ายยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามก็ยังนับว่ามีรายละเอียดค่อนข้างมาก

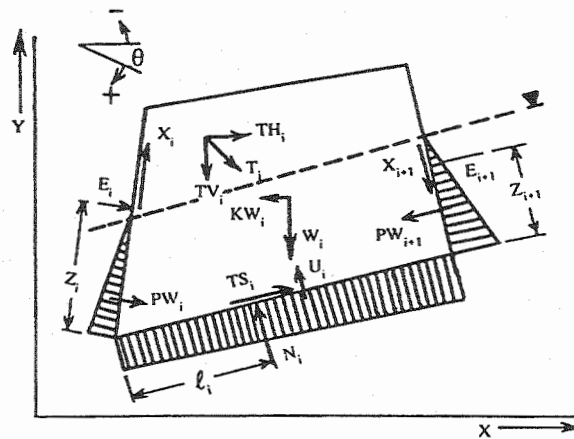
Sarma ได้กำหนดหลักการที่สำคัญในการวิเคราะห์เสถียรภาพไว้คือ การนำค่าความเร่งในแนวนอน (horizontal acceleration) มาใช้เป็นดัชนีที่บ่งชี้ว่าความลาดเอียง (slope) หรือคันทางดินถม (embankment) มีเสถียรภาพหรือไม่ ? การคำนวณเสถียรภาพทำได้โดยการกำหนดค่าตัวแปรของกำลังวัสดุต่าง ๆ ที่ค่าความเร่งในแนวนอน = 0 (ศูนย์) ก็จะเป็นจุดตั้งต้นของการพังทลาย

#### a. การประยุกต์รูปแบบเชิงเรขาคณิตของมวลสารที่เลื่อนไถล

การแบ่งส่วนมวลสารของความลาดเอียง คันดินถม กองดิน หรือรูปแบบอื่น แต่ละส่วนแบ่งที่เรียกว่าเป็นอิลิเมนต์ (element) ของมวลที่เลื่อนไถล สามารถกำหนดจุดพิกัดเป็น  $X_{T_i}$ ,  $Y_{T_i}$ ,  $X_{B_i}$ ,  $Y_{B_i}$ ,  $X_{T_{i+1}}$ ,  $Y_{T_{i+1}}$  และ  $X_{B_{i+1}}$ ,  $Y_{B_{i+1}}$  ตามจำนวนของอิลิเมนต์ที่มี 3 หรือ 4 ด้าน (ดูรูปที่ 4.4 หน้าถัดไป) โดยที่แต่ละส่วนที่ถูกแบ่งออกไปยังสามารถกำหนดจุดพิกัด  $X_{W_i}$ ,  $Y_{W_i}$  และ  $X_{W_{i+1}}$ ,  $Y_{W_{i+1}}$  ของจุดบนด้านข้างของส่วนแบ่ง (slice sides)



a. รูปแบบเชิงเรขาคณิตที่ไม่ได้แสดงแรงค้ำน้ำ



b. รูปแบบเชิงเรขาคณิตที่แสดงแรงค้ำน้ำ

รูปที่ 4.4 โคordinate ของส่วนแบ่งของ  $i^{th}$  slice ที่ไม่ได้อยู่ในแนวตั้ง และแรงต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาเสถียรภาพตามวิธี Sarma

การคำนวณหาค่าผลเฉลยในรูปแบบปิด (closed form solution) สำหรับค่าความเร่งวิกฤตแนวระนาบ (critical horizontal acceleration,  $K_c$ ) ที่มีผลต่อการนำไปสู่สภาวะสมดุลเชิงขีดจำกัด (limit equilibrium) ของมวลสารที่กำลังเกิดการเลื่อนไถลที่มีค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยเชิงสถิตยศาสตร์ (static factor of safety:  $F$ ) ที่ค่าคงที่ค่าใดค่าหนึ่ง ทำได้โดยการลดค่าตัวแปรของกำลังวัสดุเฉือน (shear strength) ซึ่งได้แก่ ค่าความเสียดทานภายใน ( $\tan \phi$  , เมื่อกำหนดให้  $\phi$  เป็นค่ามุมเสียดทานภายใน) กับค่าโคฮีชัน ( $c$ ) ของมวลสาร จนถึงค่าอัตราส่วนของ  $\tan \phi / F$  และค่า  $c/F$  จนกระทั่งได้ผลลัพธ์สุดท้ายที่ค่าความเร่งวิกฤต,  $K_c$  ลดลงจนมีค่าเป็น 0 (ศูนย์)

ในการคำนวณจนได้ค่าที่ยอมรับได้ สามารถทำได้โดยการตรวจสอบหาค่าความเค้นอัดประสิทธิผล (effective compressive stress) ที่กระทำตั้งจากบนด้านบนและบนด้านข้างของส่วนแบ่ง จนได้ค่าความเค้นเป็นบวก (+) แต่ถ้าค่าความเค้นเป็นลบ (-) ก็ต้องทำการเปลี่ยนรูปแบบเชิงเรขาคณิตของส่วนแบ่ง หรือเปลี่ยนแปลงสภาวะของระดับน้ำบาดาลจนกระทั่งความเค้นที่คำนวณได้เป็นค่าบวก แต่เพื่อให้แน่ใจมากขึ้นอาจตรวจสอบต่อในเรื่องความสมดุลของโมเมนต์ก็ได้

#### b. ความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิตของส่วนแบ่งและแรงที่เกี่ยวข้อง

จากรูปแบบเชิงเรขาคณิตของส่วนแบ่งของ  $i^{th}$  slice ที่กำหนดคั่งรูปที่ 4.4 หน้า 81 จะสังเกตว่า ค่าพิกัดของ  $x$  และ  $y$  เพิ่มขึ้นจากจุดกลางสุดของความลาดเอียง ความสัมพันธ์ของมิติของส่วนแบ่ง และพจน์ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง มีดังนี้

$$d_{i+1} = [(XT_{i+1} - XB_{i+1})^2 + (YT_{i+1} - YB_{i+1})^2]^{1/2} \quad (4.3)$$

$$\delta_{i+1} = \arcsin [(XT_{i+1} - XB_{i+1}) / d_{i+1}] \quad (4.4)$$

$$b_i = XB_{i+1} - XB_i \quad (4.5)$$

$$\alpha_i = \arctan [(YB_{i+1} - YB_i) / b_i] \quad (4.6)$$

$$W_i = \frac{1}{2} \gamma_{\pi} [(YB_i - YT_{i+1})(XT_i - XB_{i+1}) + (YT_i - YB_{i+1})(XT_{i+1} - XB_i)] \quad (4.7)$$

$$ZW_{i+1} = (YW_{i+1} - YB_{i+1}) \quad (4.8)$$

สัญลักษณ์  $\gamma_{ti}$  เป็น หน่วยน้ำหนักของส่วนแบ่งมวลสารที่  $i^{th}$  slice และ  $W_i$  เป็น ค่าน้ำหนักของส่วนแบ่งมวลสารที่  $i^{th}$  slice

c. สูตรการคำนวณหาค่าแรงดันน้ำที่เกี่ยวข้อง

จากรูปแบบเชิงเรขาคณิตของส่วนแบ่งของ  $i^{th}$  slice ที่กำหนดคั่งรูปที่ 4.4 b ค่าแรงดันน้ำที่เกี่ยวข้อง มีดังนี้

$$U_i = \gamma_w |(ZW_i + ZW_{i+1}) b_i \sec \alpha_i| \quad (4.9)$$

$$PW_i = \gamma_w |(ZW_i)^2 \sec \delta_i| \quad (4.10)$$

$$PW_{i+1} = \frac{1}{2} \gamma_w |(ZW_{i+1})^2 \sec \delta_{i+1}| \quad (4.11)$$

โดยที่  $\gamma_w$  เป็น ค่าหน่วยน้ำหนักของน้ำ

d. สูตรการคำนวณหาค่าความเร่งวิกฤต

วิธีการของ Sarma ได้ใช้ค่าความเร่งวิกฤตในแนวราบเป็นดัชนีที่จะหาค่าตัวเลขเสถียรภาพของมวลสาร

$$K_c = AE / PE \quad (4.12)$$

ส่วนค่าความสัมพันธ์อื่น ๆ มีดังนี้

$$AE = a_n + a_{n-1} e_n + a_{n-2} e_n e_{n-1} + \dots + a_1 e_n e_{n-1} \dots e_3 e_2 \quad (4.13)$$

$$PE = p_n + p_{n-1} e_n + p_{n-2} e_n e_{n-1} + \dots + p_1 e_n e_{n-1} \dots e_3 e_2 \quad (4.14)$$

$$a_i = Q_i [W_i \sin(\phi_{Bi} - \alpha_i) + R_i \cos \phi_{Bi}] \\ + S_{i+1} \sin(\phi_{Bi} - \alpha_i - \delta_{i+1}) - S_i \sin(\phi_{Bi} - \alpha_i - \delta_i) \quad (4.15)$$

$$p_i = Q_i W_i \cos(\phi_{Bi} - \alpha_i) \quad (4.16)$$



$$e_i = Q_i \cos(\phi_{Bi} - \alpha_i + \phi_{Si} - \delta_i) \sec \phi_{Si} \quad (4.17)$$

$$Q_i = \sec(\phi_{Bi} - \alpha_i + \phi_{Si+1} - \delta_{i+1}) \cos \phi_{Si+1} \quad (4.18)$$

$$S_i = (c_{Si} d_i - PW_i \tan \phi_{Si}) \quad (4.19)$$

$$S_{i+1} = (c_{Si+1} d_{i+1} - PW_{i+1} \tan \phi_{Si+1}) \quad (4.20)$$

$$R_i = (c_{Bi} b_i \sec \alpha_i - U_i \tan \phi_{Bi}) \quad (4.21)$$

#### e. การคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัย

เมื่อค่าคงที่ความเร่งวิกฤต (critical acceleration,  $K_c$ ) ที่เป็นค่าอัตราส่วนของความเร่งในแนวราบต่อความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของมวลสาร มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ จะคำนวณค่าตัวเลขความเสถียรภาพเชิงสถิติศาสตร์ (ค่า  $F$ ) ก็ต้องทำการลดค่ากำลังวัสดุเฉือนทุกด้านของบริเวณพื้นผิวของการเลื่อนไถลอย่างทันทีทันใด จนได้ค่า  $K_c$  ในสมการที่ 4.12 จนมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจะหาค่า  $K_c$  ก็ทำได้โดยการแทนค่าตัวแปรเชิงกำลังวัสดุเฉือน ในสมการที่ 4.13 ถึง 4.21 ตัวแปรเหล่านี้ได้แก่

$$c_{Bi} / F, \tan \phi_{Bi} / F, c_{Si} / F, \tan \phi_{Si} / F, c_{Si+1} / F \text{ และ } \tan \phi_{Si+1} / F$$

#### f. การทดสอบการยอมรับค่าที่ได้จากผลเฉลย

เมื่อทำการคำนวณค่าคงที่ของอัตราส่วนความเร่งในแนวราบ (ค่า  $K$ ) สำหรับค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยค่าใดค่าหนึ่งที่กำหนดมา เมื่อต้องการหาค่าแรงที่กระทำที่ด้านข้างกับด้านฐานของส่วนแบ่งคังแสดงในรูปที่ 4.4 b สามารถหาค่าแรงต่าง ๆ ได้ จากความสัมพันธ์ตามสมการข้างล่างนี้ ซึ่งเป็นผลเฉลยก้าวหน้า (progressive solution) การเริ่มต้นแก้ปัญหาจะเริ่มจากสภาวะที่รู้ค่าเริ่มต้นที่ แรงกระทำตั้งฉากด้านข้างของส่วนแบ่งแรก ( $E_1$ ) มีค่าเท่ากับศูนย์

$$E_{i+1} = a_i - p_i K + E_i e_i \quad (4.22)$$

$$X_i = (E_i - PW_i) \tan \phi_{Si} + c_{Si} d_i \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned}
 N_i &= (W_i + X_{i+1} \cos \delta_{i+1} - X_i \cos \delta_i) \\
 &\quad - E_{i+1} \sin \delta_{i+1} + E_i \sin \delta_i + U_i \tan \phi_{Bi} \sin \alpha_i \\
 &\quad - c_{Bi} b_i \tan \alpha_i (\cos \phi_{Bi}) \sec (\phi_{Bi} - \alpha_i)
 \end{aligned} \tag{4.24}$$

$$T_i = (N_i - U_i) \tan \phi_{Bi} + c_{Bi} b_i \sec \alpha_i \tag{4.25}$$

เมื่อแรงดันน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องสามารถหาค่าความเค้นอัดประสิทธิผล (effective compression stress) ที่กระทำตั้งฉากกับด้านข้างและด้านฐานของส่วนแบ่งหนึ่ง มีค่า

$$\sigma'_{Bi} = (N_i - U_i) / b_i \sec \alpha_i \tag{4.26}$$

$$\sigma'_{Si} = (E_i - PW_i) / d_i \tag{4.27}$$

$$\sigma'_{Si+1} = (E_{i+1} - PW_{i+1}) / d_{i+1} \tag{4.28}$$

การที่ผลเฉลยจะมีค่าเป็นที่ยอมรับได้ และตรงกับสภาวะความเป็นจริงในเรื่องของความเค้นที่กระทำตั้งฉาก ค่าความเค้นประสิทธิผลทั้งหมดต้องมีค่าเป็นบวก (+)

#### g. การตรวจสอบขั้นสุดท้าย

เมื่อหาค่าสมมูลของแรงที่กระทำแล้ว Sarma ได้เสนอแนะการตรวจสอบขั้นสุดท้าย เพื่อให้เกิดความแน่ใจ ได้แก่การตรวจสอบเพิ่มเติมเพื่อหาสภาวะสมดุลเชิงโมเมนต์ (moment equilibrium condition) ที่น่าพอใจในแต่ละส่วนแบ่งมวลสารที่ทำการหาค่าเสถียรภาพ

จากรูปที่ 4.4 a และ 4.4 b เมื่อทำการหาโมเมนต์โดยกำหนดจุดหมุนที่มุมล่างด้านซ้ายส่วนแบ่ง  $i^{\text{th}}$  slice (รูปที่ 4.4 b) ได้ค่าความสัมพันธ์ที่จุดสมดุลของโมเมนต์

$$\left. \begin{aligned}
 &N_i l_i - X_{i+1} b_i \sec \alpha_i \cos (\alpha_i + \delta_{i+1}) \\
 &- E_i Z_i + E_{i+1} [Z_{i+1} + b_i \sec \alpha_i \sin (\alpha_i + \delta_{i+1})] \\
 &- W_i (X_{Gi} - X_{Bi}) + K_c W_i (Y_{Gi} - Y_{Bi}) = 0
 \end{aligned} \right\} \tag{4.29}$$

ในสมการที่ 4.29 จุดพิกัดของจุดศูนย์กลางความถ่วง (center of gravity) ได้แก่  $XG_i$ ,  $YG_i$  และแนวฉากเตอร์ผลลัพธ์ของแรงเฉือน ( $T_i$ ) ในรูปที่ 4.4 a, จะผ่านจุดพิกัด  $X_i$ ,  $Y_i$

การคำนวณเริ่มต้นจากส่วนแบ่งชิ้นแรก (เริ่มนับจากส่วนล่างสุด: toe) เมื่อมีสถานะของ  $Z_1 = 0$  ต่อมาสมมุติค่าระยะขนโมเมนต์ของส่วนแบ่ง,  $l_i$  ทำให้สามารถหาค่าขนโมเมนต์ของ  $Z_{i+1}$  กรณีนี้ค่าของ  $Z$  เป็นแรงค้ำน้ำ จุดที่แรงกระทำบนบริเวณด้านของส่วนแบ่งตรงที่ระยะความยาว  $1/3$  ของ  $Z_1$  และ  $Z_{i+1}$  ตามลำดับ

#### h. ข้อสรุปแนวทางและขีดจำกัดของการวิเคราะห์แบบ Sarma

มวลสารที่มีรูปแบบและคุณสมบัติที่เหมาะสมในการหาเสถียรภาพด้วยวิธีนี้ มีขีดจำกัดในการประยุกต์วิธีของ Sarma ดังนี้

ก. พื้นผิวของมวลสาร ไม่ว่าจะมามีรูปร่างแบบไหน สามารถทำให้ง่าย โดยการกำหนดเป็นเส้นตรงหลายแนว

ข. รูปหน้าตัดพื้นผิวระนาบของการพังทลาย จะเป็นรูปใดก็ได้ เช่น วงกลม ไม่ใช่ วงกลม รูปหลายเหลี่ยม รูปสี่เหลี่ยม เป็นต้น

ค. การแบ่งขอบเขตของระนาบการพังทลาย จะไม่ได้กำหนดแน่นอนว่าขอบเขตของระนาบเกิดจากระนาบของชั้นหินตะกอน ดังนั้น ความไม่ต่อเนื่องใด ๆ ก็ได้ ที่เกิดในมวลสารจะจัดเป็นพื้นผิวของระนาบที่อาจเกิดการพังทลาย เช่น รอยแตกแยกเล็ก ๆ (fracture) รอยแตกแยกทั่วไป (joint) รอยเลื่อน (fault) การคำนวณค่าตัวเลขความเสถียรภาพของมวลสารจึงหาได้จากขอบเขตพื้นผิว ใด ๆ จนกว่าจะได้ตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยที่ต่ำสุด

ง. การแบ่งมวลออกเป็นหลายส่วน พื้นผิวระนาบที่แบ่ง ไม่จำเป็นต้องอยู่ในแนวตั้งหรือเป็นรูปสี่เหลี่ยม (มีสี่เหลี่ยมประกอบ 4 ด้าน) แต่สามารถเป็นรูปสามเหลี่ยมก็ได้ (มีสี่เหลี่ยมประกอบ 3 ด้าน)

จ. คุณสมบัติเชิงกำลังวัสดุของดิน/หิน เช่น ค่าความเสียดทานหรือค่าโคฮีชันสามารถกำหนดที่ฐานหรือด้านข้างของส่วนแบ่ง จึงทำให้แบ่งมวลสารตามความแตกต่างเชิงธรณีวิทยา การคำนวณจึงได้ค่าเชิงกำลังวัสดุที่ใกล้เคียงและเหมาะสม

ฉ. ในกรณีที่มวลสารมีพฤติกรรมที่ไม่ใช่ฮิสเทรีซิส ค่าตัวเลขเชิงกำลังวัสดุในตารางที่ 3.2 บทที่ 3 (หน้าที่ 66-67) ซึ่งตัวเลขที่ระบุรวมทั้งค่ามุมความเสียดทานกับค่าโคฮีชันในขณะนั้นสามารถนำมาใช้ในวิธีนี้ได้

ช. ผลกระทบของความค้ำน้ำต่อความเสถียรภาพของมวลสาร สามารถนำมาคำนวณได้ด้วยวิธีเดียวกัน

ซ. การเสริมเสถียรภาพด้วยแรงภายนอก ไทลด์ที่นำมาใส่เพื่อเสริมเสถียรภาพจะอยู่ในแนว ไทลด์หรือทิศทาง ไทลด์ก็ได้

ฅ. ความเร่งจากแผ่นดินไหว (earthquake acceleration) สามารถจำลองแบบ (simulation) โดยใส่ไทลด์ภายนอกบนส่วนแบ่งแต่ละส่วน ยกตัวอย่าง ถ้าหากความเร่งจากแผ่นดินไหวเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ ของแรงความโน้มถ่วง จะก่อให้เกิดแรงในแนวราบ เท่ากับ  $0.05 \times$  น้ำหนักของส่วนแบ่ง ( $W_i$ ) ซึ่งเป็นแรงภายนอกที่กระทำบนมวลสารต่อหนึ่งหน่วยแรงโน้มถ่วง ( $g$ )

#### 4.1.3 การหาเสถียรภาพมวลสารรูปลิ่มบนพื้นผิวด้วยวิธีของ Hoek et al.

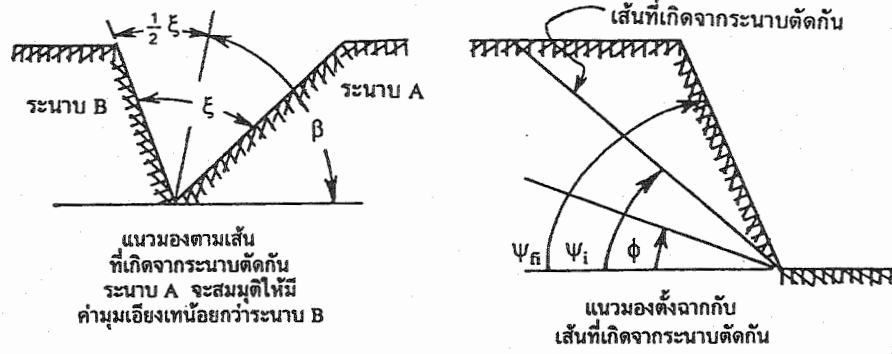
มวลสารบนพื้นผิวดิน เมื่อถูกระนาบเปราะตัดผ่านเป็นมวลรูปลิ่ม อาจเกิดการเลื่อนไถลได้ตามแนวเส้นที่เกิดจากรนาบเปราะบางเด่น 2 ชุดตัดกัน ลักษณะของการเลื่อนไถลจะเป็นแบบแนวเชิงเส้นตรง (translation slide) โดยไม่มีการหมุนของมวลสารรูปลิ่ม เข้ามาเกี่ยวข้อง

หลักการวิเคราะห์หาเสถียรภาพของมวลหินที่มีการพังทลายเป็นรูปลิ่มแบบทรงพีระมิดที่เรียกว่า ลิ่มเตตระฮีดรอล (tetrahedral wedge) โดยใช้การแก้ปัญหาเชิงเวกเตอร์ของแรงนั้น Hoek et al. (1973) ได้นำเสนอในวารสาร Quarterly of Engineering Geology แต่บทความนั้นไม่ได้มีผลเฉลยเชิงประสม (comprehensive solution) ซึ่งต่อมา Hoek and Bray (1977) ได้เสนอผลเฉลยเชิงประสมสำหรับเพื่อหาเสถียรภาพของมวลหินรูปลิ่มบนพื้นผิวดินไว้ในตำรา Rock Slope Engineering: Second Edition ซึ่งมีสมการมากมาย มีการคำนวณหลายขั้นตอนและค่อนข้างยืดเยื้อมากในส่วนวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพที่นำเสนอในหัวข้อนี้ เป็นหลักการสำคัญที่ใช้ในการหาเสถียรภาพของการพังทลายแบบวิธีวิเคราะห์ผล (analytical method) เชิงกลแบบใช้เวกเตอร์ของแรง รายละเอียดของการอธิบายความเป็นมาของการวิเคราะห์มีหลายหัวข้อและหลายขั้นตอน ดังต่อไปนี้

##### 1. ขอบเขตและเงื่อนไขของการเกิดการพังทลาย

เงื่อนไขของการพังทลายบนพื้นผิวดินของมวลสารรูปลิ่มเตตระฮีดรอล มีข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- a. มวลสารรูปลิ่มมีรูปทรงแบบพีระมิด คล้ายกับโครงสร้างซิลิกเกตของเตตระฮีดรอล
- b. ระนาบของรอยแตกรอยแยกในมวล เช่น รอยแตกแยกชั้นหิน รอยแตกแยกทั่วไป รอยเลื่อนระหว่างบล็อกแท่งหิน เป็นต้น เมื่อระนาบเหล่านี้ตัดกันต้องเป็นมุมแหลม

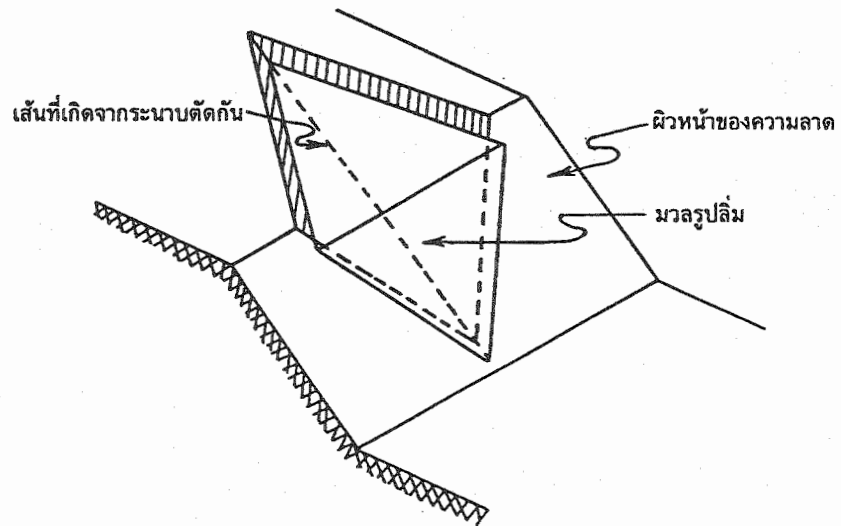


แนวมองตามเส้น  
ที่เกิดจากระนาบตัดกัน  
ระนาบ A จะสมมุติให้มี  
ค่ามุมเอียงน้อยกว่าระนาบ B

แนวมองตั้งฉากกับ  
เส้นที่เกิดจากระนาบตัดกัน

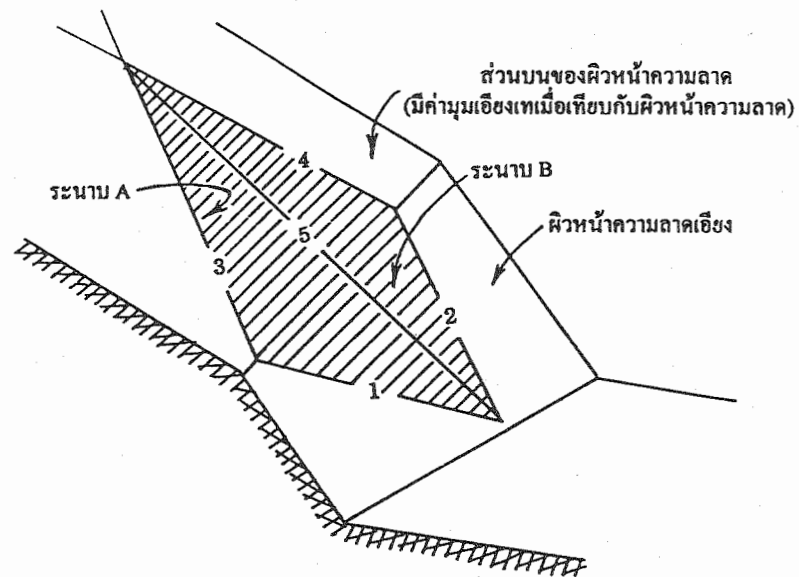
a.

b.

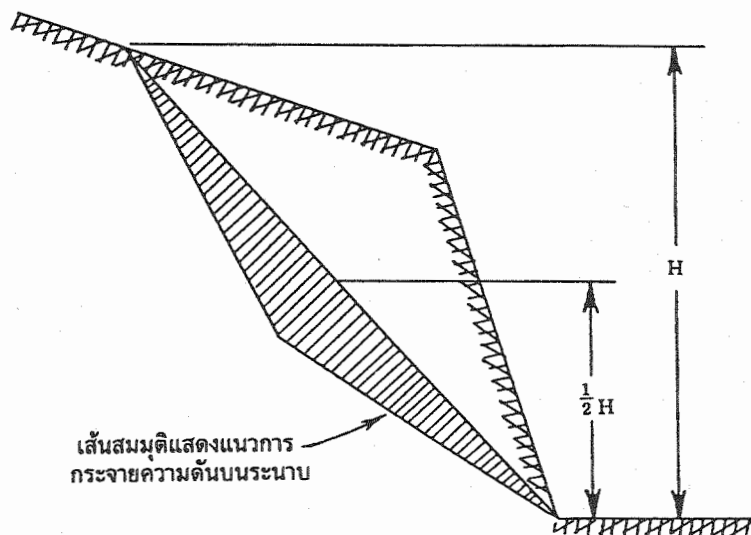


c.

รูปที่ 4.5 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของการหักทลายรูปลิ้ม  
ที่แสดงเป็นภาพตัดขวาง และรูปแบบ 3 มิติ  
(คู่ค่าอธิบายสัญลักษณ์ในหน้ารายการสัญลักษณ์)



รูปที่ 4.6 บล็อกรูปสี่เหลี่ยมที่แสดงแนวระนาบ เส้นตัด และหมายเลขที่ใช้สำหรับระนาบที่อ้างอิงในสูตรการคำนวณ



รูปที่ 4.7 ภาพตัดขวางแสดงเส้นที่เกิดจากระนาบ 2 ระนาบตัดกัน แสดงความสูงของลิ้ม และการกระจายตัวของความดันน้ำ

c. มุมเอียงเทของผิวน้ำความลาดเอียง (slope face) ต้องมีค่าการเอียงเทมากกว่าค่ามุมเอียงเทของเส้นตัดกันของระนาบสองระนาบ (line of intersection) และค่ามุมเอียงเททั้ง 2 นี้ต้องมากกว่าค่าของมุมเสียดทานภายใน ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.5 หน้า 88 นั่นคือ

$$\psi_n > \psi_i > \phi \quad (4.30)$$

โดยที่  $\psi_{fi}$  = มุมเอียงเทของผิวน้ำความลาดเอียง  
 $\psi_i$  = มุมเอียงเทของเส้นตัดกันของระนาบ 2 ระนาบ  
 $\phi$  = มุมเสียดทานภายในของมวลสาร

d. ค่าตัวแปรเสริมของคุณสมบัติระนาบที่สัมผัสกับมวลรูปสี่เหลี่ยม ไม่จำเป็นต้องมีค่าเท่ากันทั้ง 2 ระนาบ (ทำนองเดียวกับค่ากำลังวัสดุ และความดันน้ำทั้ง 2 ระนาบ)

e. ลักษณะของการเลื่อนไถลที่อยู่ในแนวของเส้นตัดกันของระนาบ 2 ระนาบ มวลที่เลื่อนไถลจะต้องสัมผัสกับพื้นผิวของระนาบความไม่ต่อเนื่อง ทำให้เกิดการเลื่อนไถลตามแนวระนาบ (translation slip) เท่านั้น

f. ระนาบส่วนบนของมวลรูปสี่เหลี่ยมที่สมมุติไม่จำเป็นต้องอยู่ในแนวระดับ อาจมีการเอียงเทกับแนวราบได้

g. อิทธิพลของแรงภายนอกที่จะเพิ่มหรือลดเสถียรภาพของมวลรูปสี่เหลี่ยม ถ้าทราบขนาดและทิศทางก็สามารถนำมาคำนวณร่วมด้วยได้

h. ระนาบของรอยแตกจากแรงดึง (tension crack plane) อาจเกิดขึ้นได้และตัดหรือแบ่งส่วนของมวลรูปสี่เหลี่ยมออก มีผลทำให้เสถียรภาพของความลาดเอียงลดลง

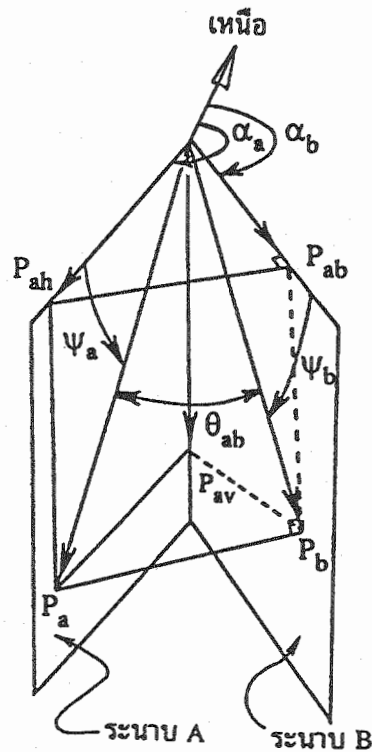
## 2. กลศาสตร์สำหรับวิธีการแตกเวกเตอร์ของแรง

เนื่องจากการพังทลายแบบลื่นได้ใช้การแก้ปัญหาค่าผลลัพท์ด้วยผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ (analytical solution) ดังนั้นปัญหาเชิงกลศาสตร์ของมวลที่ถูกวิเคราะห์หาค่าผลลัพท์ควรใช้วิธีแตกเวกเตอร์ของแรงหรือหน่วยความยาวของมิติ แล้วหาค่ามุมระหว่างเวกเตอร์ของแรงหรือหน่วยความยาวดังกล่าว

ตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 4.8 หน้าถัดไป เป็นระนาบที่สมมุติขึ้น 2 ระนาบ กำหนดให้ระนาบ A และระนาบ B ตัดกันเป็นมุมแหลม มีแรง  $P_a$  และแรง  $P_b$  กระทำบนระนาบทั้งสอง ตามลำดับ

แรง  $P_a$  มีค่ามุมเอียงเท (dip angle) เท่ากับ  $\psi_a$  ในแนวมุมเอียงเท (dip direction) เท่ากับ  $\alpha_a$

แรง  $P_b$  มีค่ามุมเอียงเท เท่ากับ  $\psi_b$  ในแนวมุมเอียงเท เท่ากับ  $\alpha_b$   
 แรง  $P_a$  และ  $P_b$  ทำมุมระหว่างแนวเวกเตอร์แรง เท่ากับ  $\theta_{ab}$



รูปที่ 4.8 โคออร์ดิเนตแสดงวิธีการแตกแรงที่อยู่บนระนาบ 2 ระนาบที่ตัดกัน

เมื่อแตกแรง  $P_a$  ให้อยู่ในส่วนประกอบแนวนอน (horizontal component) และส่วนประกอบแนวตั้ง (vertical component) ที่อยู่ในระนาบ A จะได้

$$P_{ah} = P_a \cdot \cos \psi_a \quad \text{และ} \quad P_{av} = P_a \cdot \sin \psi_a \quad (4.31)$$



ต่อมาโปรเจก (project) เวกเตอร์  $P_{ah}$  ไปอยู่บนระนาบ B

$$P_{ab} = P_{ah} \cdot \cos(\alpha_a - \alpha_b) = P_a \cdot \cos\psi_a \cdot \cos(\alpha_a - \alpha_b) \quad (4.32)$$

ส่วนค่า  $P_b$  ในระนาบ B หาได้เพราะว่า

$$\begin{aligned} P_b &= \text{force component } P_{ab} + \text{force component } P_{av} \\ &= P_{ab} \cdot \cos\psi_b + P_{av} \cdot \sin\psi_b \end{aligned} \quad (4.33)$$

หรือแทนค่าพจน์ทางด้านขวา ให้อยู่ในรูปของ  $P_a$

$$P_b = P_a \cdot \cos\psi_a \cdot \cos(\alpha_a - \alpha_b) + P_a \cdot \sin\psi_a \quad (4.34)$$

ถ้ากำหนดให้สัมประสิทธิ์  $m_a$  ในระนาบ B มีค่าเท่ากับ  $m_{ab}$  และ

$$m_{ab} = \cos\psi_a \cdot \cos\psi_b \cdot \cos(\alpha_a - \alpha_b) + \sin\psi_a \cdot \sin\psi_b = m_{ba} \quad (4.35)$$

ดังนั้นจากสมการที่ 4.34 จะได้

$$P_b = m_{ab} \cdot P_a \quad (4.36)$$

เนื่องจากว่า

$$P_b = P_a \cdot \cos\theta_{ab} \quad (4.37)$$

จากสมการ 4.36 และสมการ 4.37

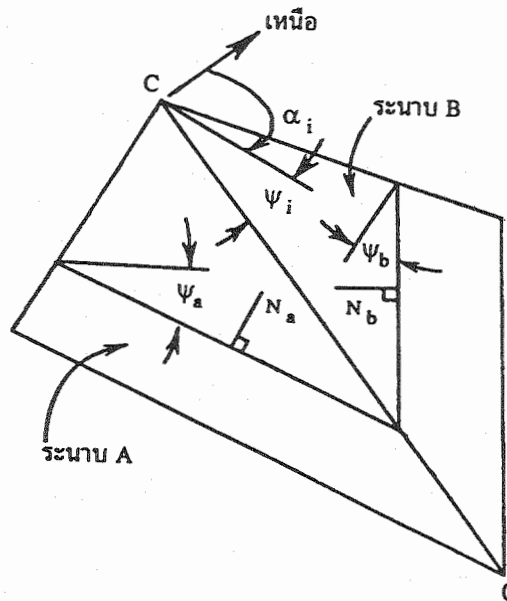
$$\cos\theta_{ab} = \cos\psi_a \cdot \cos\psi_b \cdot \cos(\alpha_a - \alpha_b) + \sin\psi_a \cdot \sin\psi_b \quad (4.38)$$

กล่าวอีกนัยหนึ่ง ในการหาค่ามุมระหว่างแรง  $P_a$  และ  $P_b$  คือ  $\theta_{ab}$  มีค่า

$$\theta_{ab} = \arccos\left\{\cos\psi_a \cdot \cos\psi_b \cdot \cos(\alpha_a - \alpha_b) + \sin\psi_a \cdot \sin\psi_b\right\} \quad (4.39)$$

3. การหาของมุมแนวทิศทางสำหรับเส้นที่เกิดจากระนาบตัดกัน

เมื่อกำหนดให้มีระนาบสองระนาบตัดกันเป็นมุมแหลม เช่นระนาบ A ตัดกับระนาบ B เกิดเป็นเส้นตรงขึ้น (line of intersection) ได้แก่ เส้น OC ในรูปที่ 4.9 ซึ่งมีค่ามุมเอียงของเวกเตอร์แรง เท่ากับ  $\psi_i$



รูปที่ 4.9 วิธีการหาค่ามุมเอียงเทและแนวเอียงเทของเส้นที่เกิดจากระนาบ 2 ระนาบตัดกัน

สมมติว่ามีแนวฉาก (normal) บนระนาบ A และระนาบ B มีค่า  $N_a$  และ  $N_b$  ตามลำดับ

เมื่อพิจารณารูปสามเหลี่ยมมุมฉากที่เกิดขึ้นจากแนวระนาบ A และระนาบ B จะหาค่ามุมเอียงเทของแนวฉากได้ดังนี้

$$\psi_{na} = (\psi_a - 90^\circ) \quad \text{และ} \quad \psi_{nb} = (\psi_b - 90^\circ) \quad (4.40)$$

ค่าสัมประสิทธิ์  $m_{na}$  ที่อยู่ในระนาบในแนวตั้งและผ่านเส้นที่เกิดจากระนาบตัดกัน กำหนดให้มีแนวมุมเอียงเท  $\alpha_i$  เขียนเป็น  $m_{na.i}$  สามารถหาได้ทำนองเดียวกับสมการที่ 4.35 ได้ดังนี้

$$m_{na.i} = \cos\psi_{na} \cdot \cos\psi_i \cdot \cos(\alpha_a - \alpha_i) + \sin\psi_{na} \cdot \sin\psi_i \quad (4.41)$$

เมื่อเปลี่ยนมุม  $\psi_a$  ให้อยู่ในรูปของ  $\psi_i$  จากสมการ 4.41 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของแรง  $P_a$  ที่อยู่ในระนาบแนวตั้งที่ผ่านเส้นที่เกิดจากระนาบตัดกัน

$$m_{na.i} = \sin\psi_a \cdot \cos\psi_i \cdot \cos(\alpha_a - \alpha_i) + \cos\psi_a \cdot \sin\psi_i \quad (4.42)$$

ทำนองเดียวกัน เมื่อต้องการหาค่าสัมประสิทธิ์ของแรง  $P_b$  ที่อยู่ในระนาบแนวตั้งที่ผ่านเส้นที่เกิดจากระนาบตัดกัน จะได้

$$m_{nb.i} = \sin\psi_b \cdot \cos\psi_i \cdot \cos(\alpha_b - \alpha_i) + \cos\psi_b \cdot \sin\psi_i \quad (4.43)$$

จากหลักความเป็นจริง แนวฉากของระนาบนี้ตั้งฉากกับเส้นทุกเส้นที่อยู่ในระนาบ ดังนั้นแนวฉาก  $N_a$  และ  $N_b$  ก็ต้องตั้งฉากกับเส้นแนวร่วมของทั้ง 2 แนวฉาก (คือเส้น OC) อย่างไรก็ตามในเชิงทฤษฎีของเส้น จะไม่มีส่วนประกอบใด ๆ ที่ตั้งฉากกับตัวเส้นเอง (เพราะว่าแตกออกเป็นแนวแรงมากกว่าหนึ่งเส้นไม่ได้) นั่นคือ

$$m_{na.i} = m_{nb.i} = 0 \quad (4.44)$$

จากสมการที่ 2.43 และ 2.44 เมื่อกำหนดพจน์ต่าง ๆ ทางด้านซ้าย มีค่าเท่ากับศูนย์ ก็สามารถหาค่า  $\tan\psi_i$  ได้เป็น

$$\begin{aligned} \tan\psi_i &= \tan\psi_a \cdot \cos(\alpha_a - \alpha_i) \\ &= \tan\psi_b \cdot \cos(\alpha_b - \alpha_i) \end{aligned} \quad (4.45)$$

นั่นคือค่ามุมเอียงเทที่อยู่ในระนาบแนวตั้ง และระนาบนี้ผ่านเส้นที่เกิดจากระนาบ A และระนาบ B ตัดกัน มีค่า

$$\begin{aligned} \psi_i &= \arctan \{ \tan\psi_a \cdot \cos(\alpha_a - \alpha_i) \} \\ &= \arctan \{ \tan\psi_b \cdot \cos(\alpha_b - \alpha_i) \} \end{aligned} \quad (4.46)$$

จากสมการที่ 4.45 ทำการแตกพจน์  $\cos(\alpha_a - \alpha_i)$  แล้วหารตลอดทั้งสองข้าง แยกพจน์  $\tan\alpha_i$  ออก จะได้

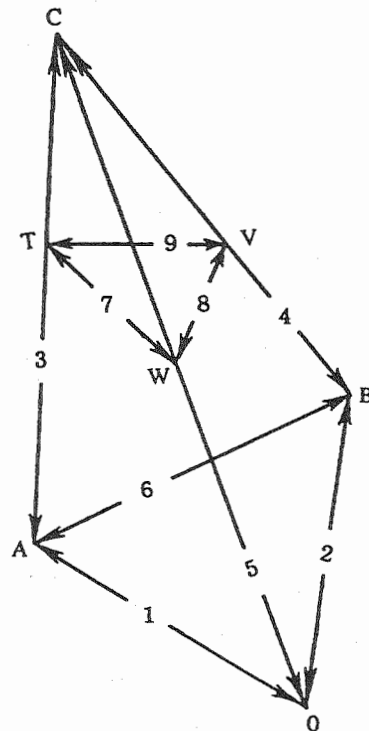
$$\tan \alpha_1 = \frac{\tan \psi_a \cdot \cos \alpha_a - \tan \psi_b \cdot \cos \alpha_b}{\tan \psi_b \cdot \sin \alpha_b - \tan \psi_a \cdot \sin \alpha_a} \quad (4.47)$$

นั่นคือ แนวเอียงของเวกเตอร์แรง ที่อยู่ในระนาบแนวตั้งที่ผ่านเส้นที่เกิดจากระนาบ A และระนาบ B ตัดกัน

$$\alpha_1 = \arctan \left\{ \frac{\tan \psi_a \cdot \cos \alpha_a - \tan \psi_b \cdot \cos \alpha_b}{\tan \psi_b \cdot \sin \alpha_b - \tan \psi_a \cdot \sin \alpha_a} \right\} \quad (4.48)$$

#### 4. การหาพื้นที่และน้ำหนักของมวลรูปสี่เหลี่ยม

การตรวจสอบเพื่อหาพื้นที่และน้ำหนักของมวลรูปสี่เหลี่ยม มีวิธีการคำนวณโดยอาศัยมิติที่แสดงเป็นความยาวของเส้นต่าง ๆ ที่ประกอบกันเป็นรูปสี่เหลี่ยม ดังแสดงเป็นภาพสเก็ทซ์ไว้ในรูปที่ 4.10 ข้างล่าง และเพื่อให้สามารถแทนตำแหน่งหรือระยะความยาวของเส้นเหล่านี้ได้ง่าย ในสูตรการคำนวณจึงสมมติหมายเลข สำหรับเป็นเลขตัวแทนแต่ละเส้นที่ประกอบกันเป็นเพย์ล็อกรูปสี่เหลี่ยมดังกล่าว



รูปที่ 4.10 ภาพสเก็ทซ์มวลรูปสี่เหลี่ยมที่มีรอยแตกจากแรงดึงตัดผ่าน

ความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิตของการหาพื้นที่และปริมาตรของลิ้ม เมื่อเทียบกับรูป  
ที่ 4.10 หน้า 95 มีดังนี้

พื้นที่ ATWO บนระนาบ A

$$A_A = 1/2 \cdot \left\{ AC^2 \cdot \frac{\sin \theta_{13}}{\sin \theta_{15}} - TC^2 \cdot \frac{\sin \theta_{37}}{\sin \theta_{57}} \right\} \cdot \sin \theta_{35} \quad (4.49)$$

พื้นที่ BVWO บนระนาบ B

$$A_B = 1/2 \cdot \left\{ AC^2 \cdot \frac{\sin^2 \theta_{13} \cdot \sin \theta_{25}}{\sin^2 \theta_{15} \cdot \sin \theta_{24}} - TC^2 \cdot \frac{\sin^2 \theta_{37} \cdot \sin \theta_{58}}{\sin^2 \theta_{57} \cdot \sin \theta_{48}} \right\} \cdot \sin \theta_{45} \quad (4.50)$$

พื้นที่ TVW ของรอยแตกแนวตั้ง

$$A_T = \frac{1/2 \cdot TC^2 \sin \theta_{34} \cdot \sin \theta_{35} \cdot \sin \theta_{79}}{\sin \theta_{49} \cdot \sin \theta_{57}} \quad (4.51)$$

น้ำหนักของลิ้ม ได้แก่ ผลคูณของหน่วยน้ำหนักมวลสารกับปริมาตร AOBVTW

$$W = 1/6 \gamma K \cdot \left\{ AC^3 \cdot \frac{\sin^2 \theta_{13} \cdot \sin \theta_{25}}{\sin^2 \theta_{15} \cdot \sin \theta_{24}} - TC^3 \cdot \frac{\sin^2 \theta_{37} \cdot \sin \theta_{58}}{\sin^2 \theta_{57} \cdot \sin \theta_{48}} \right\} \quad (4.52)$$

ซึ่งค่าของ K ในสมการที่ 2.52 มีความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิต

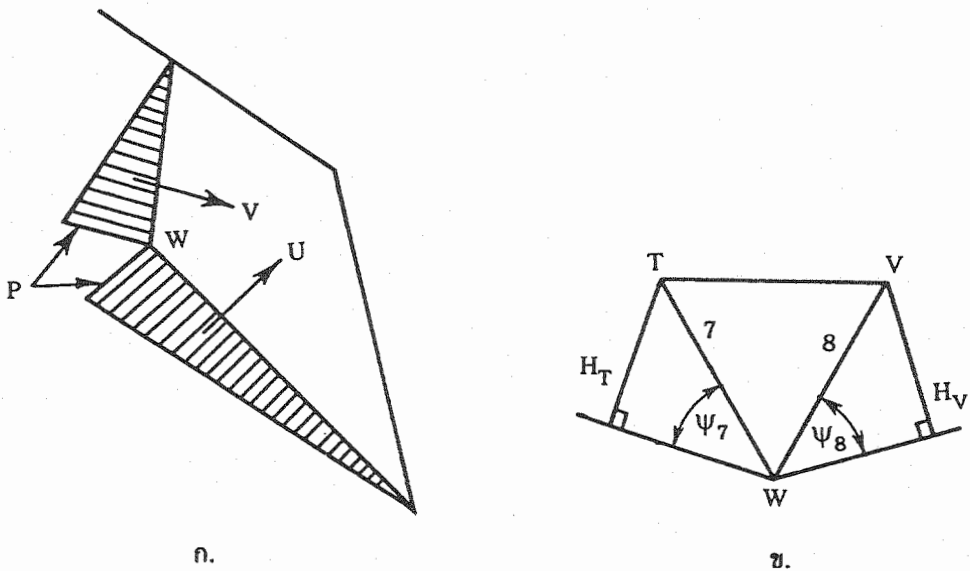
$$K = \left( 1 - \cos^2 \theta_{34} - \cos^2 \theta_{35} - \cos^2 \theta_{45} + 2 \cos \theta_{34} \cdot \cos \theta_{35} \cdot \cos \theta_{45} \right)^{0.5} \quad (4.53)$$

### 5. แรงที่เกิดจากความดันน้ำ

ในรูปที่ 4.11 หน้าถัดไป เป็นรูปสเก็ทซ์ค่าของความดันน้ำที่เกิดจากระนาบที่เกิดจากการเลื่อนไถล (เส้นที่ตัดกันของระนาบ 2 ระนาบ) และจากความดันน้ำที่ขังในรอยแตก

จากแรงดึง เมื่อกำหนดให้ความดันน้ำเพิ่มเป็นสัดส่วนกับเส้นระยะความลึกของระดับน้ำจนกระทั่งได้ค่าความดันน้ำสูงสุดที่จุด W (ในรูปที่ 4.11) ซึ่งจุด W เป็นจุดค้ำของเส้นที่เป็นแนวรอยแตกจากแรงดึงกับเส้นที่เป็นแนวระนาบการเลื่อนไถล ดังนั้นถ้าให้  $p$  แทนค่าของความดันน้ำสูงสุดที่เกิดที่จุด W จะได้ว่า

$$p = \gamma_w \cdot \frac{TC}{2} \cdot \frac{\sin \theta_{35}}{\sin \theta_{57}} \left\{ \sin \psi_7 + \frac{\sin \theta_{79}}{\sin \theta_{89}} \cdot \sin \psi_8 \right\} \quad (4.54)$$



รูปที่ 4.11 รูปไดอะแกรมแสดงความดันน้ำที่มีผลต่อการพังทลายรูปลิ้ม

การเพิ่มค่าความดันน้ำและความดันอื่น ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นมีผลให้ได้ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F) มีค่าเปลี่ยนแปลงไป

ในรูปที่ 4.11 แรง V เป็นแรงที่เกิดเนื่องจากความดันน้ำในรอยแตกจากแรงดึง โดยสามารถหาจากปริมาตรของทรงพีระมิด ซึ่งพีระมิดนี้เกิดเนื่องจากความดัน  $p$  มากระทำที่จุด W (แต่ความดันน้ำมีค่าศูนย์ที่จุด T และจุด V) บนพื้นที่  $A_T$  สำหรับพื้นผิวหน้ารอยแตกจากแรงดึง ดังนั้น

$$V = \frac{1}{3} \cdot p \cdot A_T \quad (4.55)$$

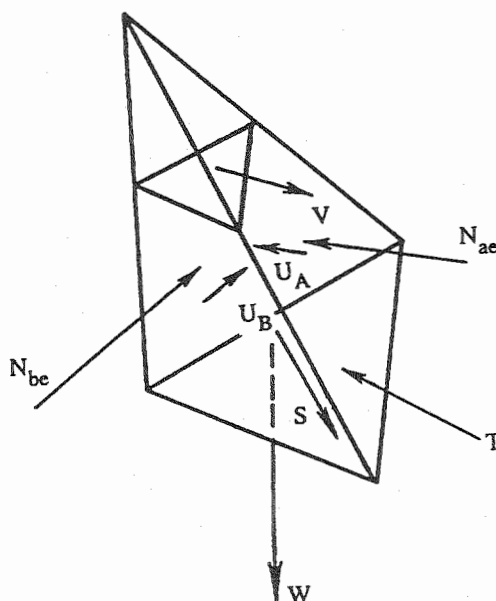
ถ้าหากสมมุติว่าน้ำได้ขังและกระจายในทุกระนาบ นั่นคือความดันน้ำได้กระทำเต็มที่บนระนาบของรอยแตกจากแรงดึง และบนระนาบ A กับระนาบ B ที่ประกบติดกับมวลรูปลิ้ม ดังนั้น จึงเกิดแรงยกตัวบนระนาบทั้งสอง

$$U_A = \frac{1}{3} \cdot p \cdot A_A \quad (4.56)$$

$$U_B = \frac{1}{3} \cdot p \cdot A_B \quad (4.57)$$

## 6. การแก้ไขปัญหาของแรงต่าง ๆ

แรงต่างๆที่กระทำบนมวลสารรูปสี่เหลี่ยมสามารถทำการแตกแรง (resolution of forces) ได้ตามการสเก็ทซ์ของรูปที่ 4.12 เมื่อพิจารณารูปแบบเรขาคณิตของสี่เหลี่ยม แล้วหาขนาดของแรงต่างๆ มุมเอียงของแรง แนวทิศทางของแรง สามารถลำดับความสัมพันธ์ได้ในตารางที่ 4.1 หน้าถัดไป



รูปที่ 4.12 ไคอะแกรมที่แสดงแรงค้ำหน้าและแรงอื่น ๆ กระทำบนมวลสี่เหลี่ยม

ตาราง 4.1 แรงต่างๆ มุมเอียงและแนวทิศทางที่แรงกระทำ  
บนมวลสารรูปสี่เหลี่ยม ( ดูรูปที่ 4.12 ประกอบ )

แรงต่าง ๆ	มุมเอียงเท	แนวเอียงเท
1. น้ำหนักของลิ่ม, W	90°	หาไม่ได้
2. ปฏิกริยาของแรงตั้งฉากประสิทธิผล (effective normal reaction) บนระนาบ A, N <sub>ae</sub>	(ψ <sub>a</sub> - 90°)	α <sub>a</sub>
3. ปฏิกริยาของแรงตั้งฉากประสิทธิผลบนระนาบ B, N <sub>be</sub>	(ψ <sub>b</sub> - 90°)	α <sub>b</sub>
4. แรงเนื่องจากน้ำแทรกในรอยแตกจากแรงตั้ง, V	(ψ <sub>t</sub> - 90°)	α <sub>t</sub>
5. แรงภายนอกเนื่องจาก cable anchor หรือ rock bolt, T	ψ <sub>T</sub>	α <sub>T</sub>
6. แรงที่กระทำในแนวเส้นของการเลื่อนไถล, S	ψ <sub>S</sub>	α <sub>S</sub>

ในกรณีที่ต้องการคำนวณแรงต่าง ๆ ที่ด้านการเลื่อนไถลของมวลสารรูปสี่เหลี่ยม ปฏิกริยาของแรงตั้งฉากประสิทธิผล N<sub>ae</sub> และ N<sub>be</sub> ต้องสามารถหาค่าได้ แนวทางที่คำนวณหาแรงตั้งฉากประสิทธิผล เริ่มที่

$$(N_{ae} + U_A) + m_{na \cdot nb} (N_{be} + U_B) + m_w \cdot na \cdot W + m_v \cdot na \cdot V + m_T \cdot na \cdot T = 0 \quad (4.58)$$

และ

$$(N_{be} + U_B) + m_{na \cdot nb} (N_{ae} + U_A) + m_w \cdot nb \cdot W + m_v \cdot nb \cdot V + m_T \cdot nb \cdot T = 0 \quad (4.59)$$

จึงสามารถหาค่า N<sub>ae</sub> และ N<sub>be</sub> ได้

$$N_{ae} = q \cdot W + r \cdot V + s \cdot T - U_A \quad (4.60)$$

$$N_{be} = x \cdot W + y \cdot V + z \cdot T - U_B \quad (4.61)$$



ซึ่งสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่ไม่ทราบค่า ในสมการที่ 4.60 และ 4.61 สามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์ ดังต่อไปนี้

$$q = (m_{na.nb} \cdot m_{W.nb} - m_{W.na}) / (1 - m_{na.nb}^2) \quad (4.62)$$

$$r = (m_{na.nb} \cdot m_{V.nb} - m_{V.na}) / (1 - m_{na.nb}^2) \quad (4.63)$$

$$s = (m_{na.nb} \cdot m_{T.nb} - m_{T.na}) / (1 - m_{na.nb}^2) \quad (4.64)$$

$$x = (m_{na.nb} \cdot m_{W.na} - m_{W.nb}) / (1 - m_{na.nb}^2) \quad (4.65)$$

$$y = (m_{na.nb} \cdot m_{V.na} - m_{V.nb}) / (1 - m_{na.nb}^2) \quad (4.66)$$

$$z = (m_{na.nb} \cdot m_{T.na} - m_{T.nb}) / (1 - m_{na.nb}^2) \quad (4.67)$$

#### ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้สำหรับการแตกแรง

$$m_{na.nb} = \sin\psi_a \cdot \sin\psi_b \cdot \cos(\alpha_a - \alpha_b) + \cos\psi_a \cdot \cos\psi_b$$

$$m_{W.na} = -\cos\psi_a$$

$$m_{W.nb} = -\cos\psi_b$$

$$m_{V.na} = \sin\psi_a \cdot \sin\psi_t \cdot \cos(\alpha_a - \alpha_t) + \cos\psi_a \cdot \cos\psi_t$$

$$m_{V.nb} = \sin\psi_b \cdot \sin\psi_t \cdot \cos(\alpha_b - \alpha_t) + \cos\psi_b \cdot \cos\psi_t$$

$$m_{T.na} = \cos\psi_T \cdot \sin\psi_a \cdot \cos(\alpha_T - \alpha_a) - \sin\psi_T \cdot \cos\psi_a$$

$$m_{T.nb} = \cos\psi_T \cdot \sin\psi_b \cdot \cos(\alpha_T - \alpha_b) - \sin\psi_T \cdot \cos\psi_b$$

$$m_{W.5} = \sin\psi_5$$

$$m_{V.5} = \cos\psi_5 \cdot \sin\psi_t \cdot \cos(\alpha_5 - \alpha_t) - \sin\psi_5 \cdot \cos\psi_t$$

$$m_{T.5} = \cos\psi_5 \cdot \cos\psi_T \cdot \cos(\alpha_5 - \alpha_T) + \sin\psi_5 \cdot \sin\psi_T$$

แรง  $S$  ที่ก่อให้เกิดการเลื่อนไถลตามแนวเส้น  $OC$  (ที่เกิดจากระนาบ 2 ระนาบตัดกัน) สามารถหาค่าได้โดยแตกเวกเตอร์แรงไปตามแนว  $OC$  (เส้นหมายเลข 5 ของรูปที่ 4.12 หน้า 98)

$$S = m_{W.5} \cdot W + m_{V.5} \cdot V + m_{T.5} \cdot T \quad (4.68)$$

สัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ที่จำเป็นสำหรับการแก้ปัญหของสมการที่ 4.62 ถึงสมการที่ 4.67 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 หน้า 100 ซึ่งสัมประสิทธิ์เหล่านี้ได้มาจากการแทนค่ามุมเอียงเทและแนวมุมเอียงเท (ของตารางที่ 4.1) ลงในสมการที่ 4.35

### 7. การหาค่าตัวเลขเสถียรภาพของมวลสารรูปสี่เหลี่ยม

ความมีเสถียรภาพของมวลสารรูปสี่เหลี่ยม ก็หาได้จากค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย ที่เป็นอัตราส่วนของแรงต้านต่อการเลื่อนไถลต่อแรงที่ก่อให้เกิดการเลื่อนไถล นั่นคือ

$$F = \frac{c_A A_A + c_B A_B + (qW + rV + sT - U_A) \cdot \tan \phi_A + (xW + yV + zT - U_B) \cdot \tan \phi_B}{m_{W.5} \cdot W + m_{V.5} \cdot V + m_{T.5} \cdot T} \quad (4.69)$$

### 8. การหาค่าแรงภายนอกที่มาเสริมเสถียรภาพ

เมื่อต้องการหาไหลคค่าสุดที่เป็นแรงภายนอกมาเพิ่มเสถียรภาพของมวลรูปสี่เหลี่ยม เช่น การใช้ลวดหรือหมุดยึดคึดมวลที่จะพังทลายไว้ ค่าของแรงภายนอกที่มีค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยติดอยู่ในทางด้านขวาของสมการ (ต้องสมมุติค่า  $F$  เอง) ได้แก่

$$T = \frac{c_A A_A + c_B A_B + (qW + rV - U_A) \cdot \tan \phi_A + (xW + yV - U_B) \cdot \tan \phi_B - F(W \cdot m_{W.5} + m_{V.5} \cdot V)}{F \cdot m_{T.5} - (s \tan \phi_A + Z \tan \phi_B)} \quad (4.70)$$

สมมุติให้  $\psi_T$  เป็นมุมเอียงเทที่ลวดยึดคึดเพื่อเพิ่มเสถียรภาพทำกับแนวราบ ถ้าจะหาค่าของ  $\psi_T$  จากสมการที่ 4.70 ก็ทำการหาปริพันธ์ (differentiation) สำหรับค่า  $T$  ในพจน์ของ  $\psi_T$  จะได้ค่า

$$\tan \psi_T = \frac{X \cdot \tan \psi_5 - Y \cdot \cot \psi_a - Z \cdot \cot \psi_b}{X \cdot \cos(\alpha_5 - \alpha_T) + Y \cdot \cos(\alpha_T - \alpha_a) + Z \cdot \cos(\alpha_T - \alpha_b)} \quad (4.71)$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อต้องการหาค่าแนวทิศทางที่ลวดบิดคดกระทำบนแนวรูปสี่เหลี่ยม ก็ทำการหาปริพันธ์ของสมการที่ 4.71 เมื่อเทียบกับ  $\alpha_T$  ทำให้ได้ค่าแนวทางที่ใส่ลวดหมุดบิดที่เหมาะสมที่สุดคือ

$$\tan \alpha_T = \frac{X \cdot \sin \alpha_5 + Y \cdot \sin \alpha_a + Z \cdot \sin \alpha_b}{X \cdot \cos \alpha_5 + Y \cdot \cos \alpha_a + Z \cdot \cos \alpha_b} \quad (4.72)$$

พจน์ตัวแปรในสมการข้างบน มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$X = (1 - m_{na \cdot nb}^2) F \cdot \cos \psi_5 \quad (4.73)$$

$$Y = (\tan \phi_A - m_{na \cdot nb} \cdot \tan \phi_B) \sin \psi_a \quad (4.74)$$

$$Z = (\tan \phi_B - m_{na \cdot nb} \cdot \tan \phi_A) \sin \psi_b \quad (4.75)$$

### ข้อสังเกต

ถ้าหากต้องการจะแก้สมการ ที่ 4.71 และ 4.72 อาจได้ค่าตัวเลขของ  $\psi_T$  และ  $\alpha_T$  มีค่าหลายค่า จึงต้องทำการเลือกค่าที่เหมาะสมตามเงื่อนไขดังนี้

$$\psi_T = \left\{ \psi_5 + 180^\circ - \frac{1}{2}(\phi_A + \phi_B) \right\} \quad (4.76)$$

และ

$$\alpha_T \approx \alpha_5 \pm 180^\circ \quad (4.77)$$

#### 4.2 โปรแกรมแบบจำลองการวิเคราะห์การพังทลายแบบลิ่ม

การวิเคราะห์ผลลัพธ์ของโปรแกรมแบบจำลอง ผู้ใช้จะเลือกป้อนข้อมูลเองหรือใช้ตัวอย่างที่มีในโปรแกรมก็ได้ โปรแกรม WEDGE.EXE จะใช้กับการหาเสถียรภาพของมวลสารรูปลิ่ม ซึ่งโปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมย่อยของโปรแกรม STABIL.EXE แต่ได้แยกออกจากโปรแกรม STABIL.EXE เป็นโปรแกรม WEDGE.EXE ค่างหาก เพื่อให้สะดวกในการป้อนข้อมูล และง่ายต่อการวิเคราะห์เมื่อต้องการหาการพังทลายแบบลิ่ม

##### 4.2.1 ชนิดของโปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพรูปลิ่ม

การพังทลายรูปลิ่มแบ่งวิธีการวิเคราะห์ออกเป็นแบบ 3 แบบ ได้แก่ การพังทลายลิ่ม 2 บล็อก (two wedge method) การพังทลายแบบของซาร์มา (Sarma's method) และการพังทลายลิ่มบนพื้นผิวดิน (surface wedge method)

##### 4.2.2 ตัวอย่างของการวิเคราะห์การพังทลายแบบลิ่ม

โปรแกรมวิเคราะห์ได้แสดงตามชนิดของรูปแบบการพังทลายแบบลิ่ม ดังนี้

##### 1. โปรแกรมการวิเคราะห์แบบลิ่ม 2 บล็อก

รูปแบบของรูปลิ่ม 2 บล็อก ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.3 หน้าที่ 79 ตัวอย่างของข้อมูลที่ป้อนเข้าไปในโปรแกรมได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 ข้างล่าง

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลที่ป้อนเข้าไปในโปรแกรม และค่าแรงเสริมเสถียรภาพ ที่คำนวณได้จากโปรแกรม

##### Two Wedge Method

Input Data			
	1	2	3
Friction Angle	22.00	22.00	22.00
Wedge Slope	50.00	15.00	
Weight of Wedge	400000.0	250000.0	
Water Pressure	0.00	0.00	0.00
Force Inclination	10.00		

Calculated Result	
External Force Required	134865.83

ข้อมูลเข้าของมวลลิ่มแอกที่กำหนดให้เป็นหมายเลข 1 ข้อมูลเข้ามวลลิ่มพาซีฟ หมายเลข 2 กรณีที่มีปฏิกริยาร่วมกันระหว่างมวลบล็อกรูปลิ่มทั้งสอง กำหนดให้เป็นข้อมูลเข้าหมายเลข 3

ตัวอย่างของตารางที่ 4.3 หน้า 103 สมมุติให้มวลแห้งจึงไม่มีความคั่นน้ำมาเกี่ยวข้อง ในการหาค่าแรงภายนอกที่ท่ามุม  $10^\circ$  กับแนวราบ ต้องการแรงภายนอกเสริมเสถียรภาพ เท่ากับ 134.87 กิโลนิวตัน/เมตร

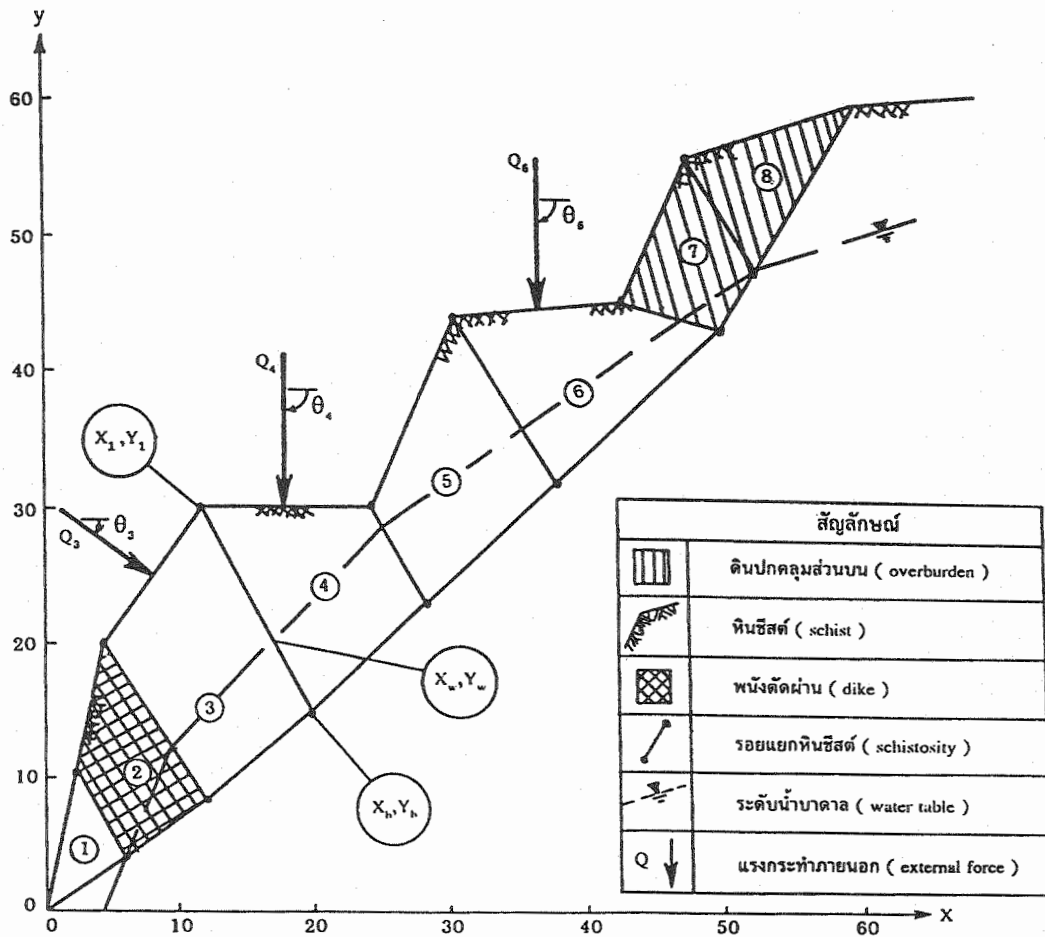
## 2. โปรแกรมการวิเคราะห์แบบ Sarma

หลักการวิเคราะห์ของ Sarma นี้ ไม่จำเป็นต้องใช้กับมวลสารรูปลิ่มเสมอไป โจทย์ตัวอย่างกำหนดตามรูปภาพสเก็ทซ์ของรูปที่ 4.13 หน้า 105 โดยการแสดงภาพความลาดเอียงของมวลหินชีสต์ที่มีดินปกคลุมทับ มี dike คัดผ่านความลาดเอียงและยังมีระดับน้ำใต้ดินที่แปรเปลี่ยนไปตามความลาดชัน นอกจากนี้ยังมีไหลคที่กระทำผ่านฐานรากบนมวลน้ำหนักไหลคผ่านแนวมวลสารของความลาด และยังมีไหลคภายนอกจากลวดยึดคึดคึดมาเสริมเสถียรภาพ ตารางที่ 4.4 เป็นค่าคุณสมบัติของมวลสารที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์

ตารางที่ 4.4 ค่าคุณสมบัติมวลสารที่ใช้เป็นตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยวิธี Sarma

มวลสาร	ค่าโคฮีชัน, $c$ (กก.นิวตัน/ตร.ม.)	มุมเสียดทาน, $\phi$ (องศา)	หน่วยน้ำหนัก, $\gamma$ (กก.นิวตัน/ลบ.ม.)
ดินที่ปกคลุมส่วนบน (overburden)	50	30	21
หินชีสต์ (schist)	200	35	26
ผนังตัดขวาง (dike)	100	25	24
รอยแยกในหินชีสต์ (schistosity)	0	15	—

เมื่อใช้โปรแกรมหาเสถียรภาพ ข้อมูลที่ป้อนเข้าและผลลัพธ์ที่ได้ ก็แสดงไว้อีกครั้งในตารางที่ 4.5 หน้า 106 ซึ่งจากการที่มวลความลาดเอียงถูกแบ่งออกเป็น 8 ส่วน และมีองค์ประกอบอื่นในเรื่องหินอัคนีแทรก เกิดรอยแยก และอิทธิพลของดินและน้ำใต้ดิน จะได้ผลลัพธ์ของการคำนวณได้ค่า ปัจจัยความปลอดภัย (ค่า  $F$ ) ที่ 1.49 และค่าความเร่งวิกฤต (ค่า  $K_c$ ) เท่ากับ 0.54 เมตรต่อวินาที<sup>2</sup>



รูปที่ 4.13 ภาพสเก็ทซ์ของรูปแบบเชิงเรขาคณิตของความลาดเอียงที่มีมวลส่วนใหญ่เป็นหินชีสต์ที่แน่นกับหินชีสต์ที่แตกแยก ระดับน้ำใต้ดินแปรเปลี่ยนไปตามความลาดชัน มีชั้นดินปกคลุมทับส่วนบนความลาด มีพนังตัดขวางของหินอัคนีตัดผ่าน และยังมีไหลคที่กระทำผ่านฐานรากสิ่งก่อสร้างอีกสองจุด ประกอบกับการเพิ่มเสถียรภาพด้วยลวดยึดคติดอีกจุดหนึ่งด้วย

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลเข้าที่ป้อนเข้าในโปรแกรม (ตารางใหญ่ 2 ชุด)  
 เพื่อคำนวณหาเสถียรภาพตามวิธีของ Sarma ผลการ  
 คำนวณได้แสดงไว้ในตารางเล็กข้างล่างสุด

Sarma's Method

Input Data

Number of Slide 8.00

Unit Weight of Water 9.81

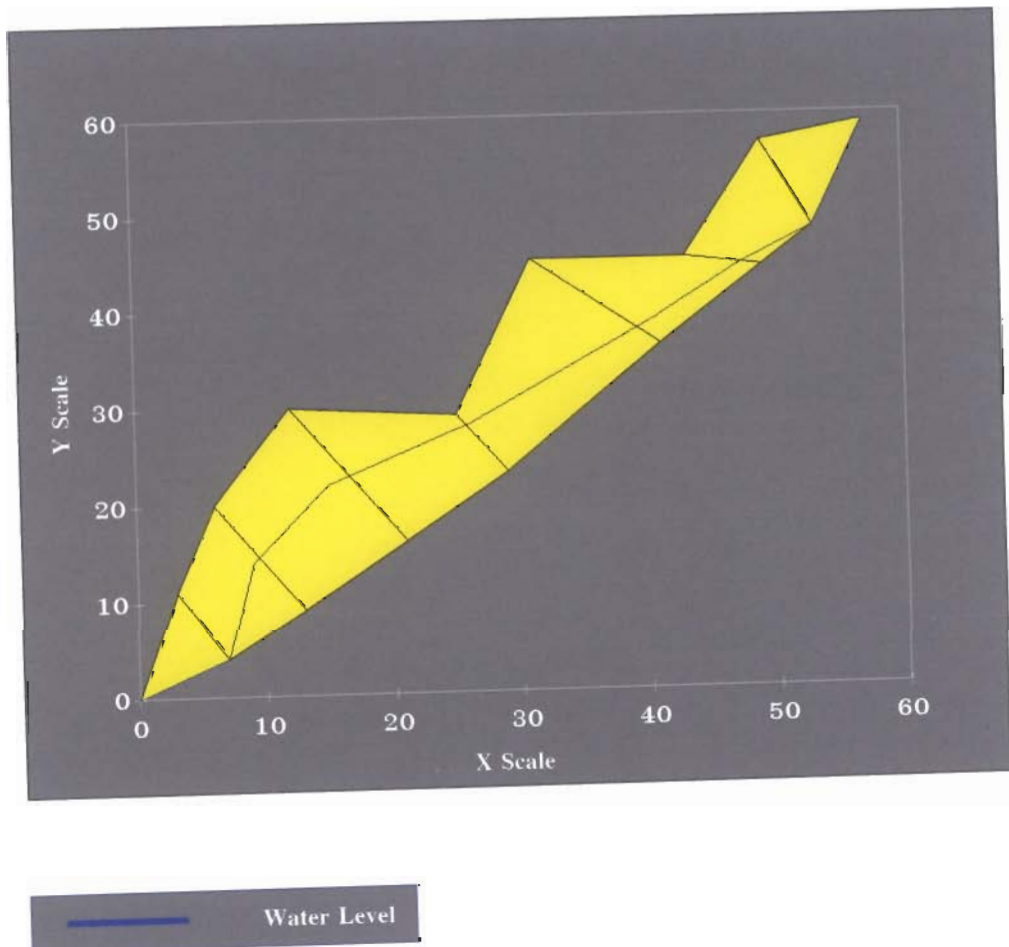
Side No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Coordinate $X_1$	2.30	10.00	18.00	24.20	31.00	35.50	39.00	40.00	40.40
Coordinate $Y_1$	2.00	6.60	11.30	15.00	19.00	19.00	17.00	17.00	17.00
Coordinate $X_w$	2.30	10.00	18.00	24.20	31.00	35.50	39.00	40.00	40.40
Coordinate $Y_w$	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	16.20	17.00
Coordinate $X_b$	2.30	10.00	18.00	24.20	31.00	35.50	39.00	40.00	40.40
Coordinate $Y_b$	2.00	0.50	1.00	3.20	6.70	10.50	15.00	16.20	17.00
Friction Angle	0.00	35.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	33.00	0.00
Cohesion	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Slide No.	1	2	3	4	5	6	7	8
Unit Weight	19.70	19.70	19.70	19.70	19.70	19.70	19.70	19.70
Friction Angle	33.00	33.00	33.00	40.00	40.00	40.00	40.00	33.00
Cohesion	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Force Q	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Force Angle	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Effective Normal Stress								
Base	40.96	91.97	96.99	110.22	91.68	41.96	14.67	3.51
Side	0.00	27.62	36.13	30.73	24.83	16.23	6.75	2.91

Calculated Result

Factor of Safety	1.49
Kc	0.54

อนึ่งในการเขียนโปรแกรมแบบจำลองด้วยวิธี Sarma นี้ ได้แสดงภาพกราฟิกของ  
 ใจท์ตัวอย่างด้วย ดังรูปที่ 4.14 ข้างล่าง ซึ่งมีภาพมวลสารถูกแบ่งออกเป็น 8 ส่วน และ  
 ระดับน้ำใต้ดินก็แสดงไว้ในภาพด้วย ผู้ใช้โปรแกรมสามารถจะเลือกเมนูภาพของใจท์  
 ตัวอย่างบนจอสีของคอมพิวเตอร์ได้

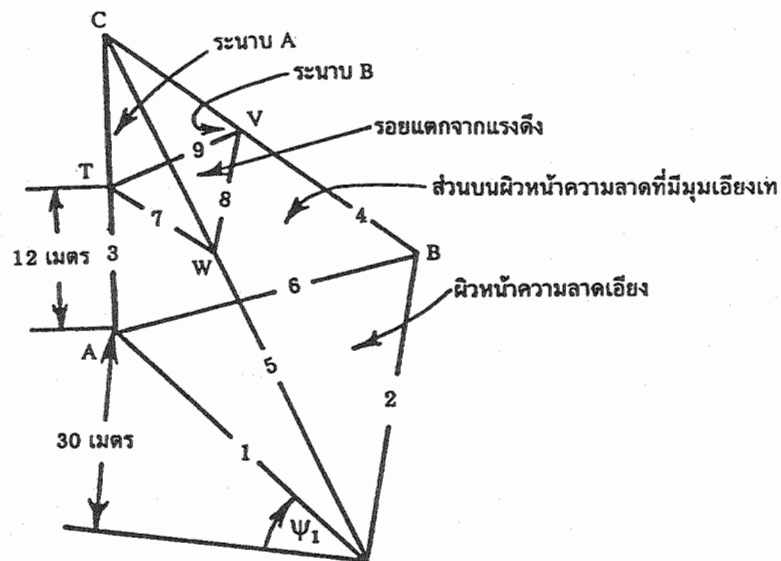


รูปที่ 4.14 ภาพกราฟิกที่ปรากฏบนจอคอมพิวเตอร์ สำหรับใจท์ตัวอย่าง  
 ที่ใช้ข้อมูลเข้าตามที่ระบุไว้ในตารางที่ 4.5 หน้า 106



3. โปรแกรมการวิเคราะห์แบบ Hoek et al.

โปรแกรมการวิเคราะห์การพังทลายของมวลสารที่มีรูปลักษณะเป็นลิ้มบนพื้นผิวคิน ที่เกิดจากระนาบค้ำกันและได้แนวของการเลื่อนไกลคามเส้นที่เกิดจากระนาบค้ำกัน ตัวอย่างที่ใช้ได้แสดงเป็นรูปสเก็ชดังภาพข้างล่าง



รูปที่ 4.15 ภาพสเก็ชเชิง 3 มิติ ตามใจหย้ที่สมมุติให้มวลหินทรายบนความลาดเอียงเกิดการพังทลายได้รูปลิ้ม และยังมีรอยแตกจากแรงดึงในแนวตั้งผ่าน

จากภาพสเก็ชในรูปที่ 4.15 ได้แสดงภาพมวลหินทรายรูปลิ้มที่มีรอยแตกจากแรงดึงค้ำผ่าน โดยแสดงค่าของการวางตัวของระนาบต่าง ๆ ที่ประกอบกันเป็นเปลือกรูปลิ้ม และระยะห่างหรือระยะความสูงที่สำคัญ เพื่อใช้แทนค่าในการคำนวณหาเสถียรภาพ

ถ้าหากกำหนดค่าหน่วยน้ำหนักน้ำ เท่ากับ 9.81 กิโลนิวตัน/ลบ.ม. และค่าคุณสมบัติของมวลสารรูปลิ้ม ดังนี้

หน่วยน้ำหนักของหินทรายรูปสี่เหลี่ยม เท่ากับ 25 กิโลนิวตัน/ลบ.ม.

โคอีชันของระนาบ A เท่ากับ 24 กิโลนิวตัน/ตร.ม.

มุมเสียดทานภายในของระนาบ A เท่ากับ 20 องศา

โคอีชันของระนาบ B เท่ากับ 48 กิโลนิวตัน/ตร.ม.

มุมเสียดทานภายในของระนาบ B เท่ากับ 30 องศา

เมื่อทำการตรวจวัดภาคสนามเพื่อหาค่าการวางตัวของระนาบ และระยะมิติที่สำคัญที่ใช้ในการคำนวณหาเสถียรภาพ ได้ข้อมูลคิภาคสนามดังนี้

มุมเอียงเท (dip angle) ของระนาบ A,  $\psi_a$  มีค่าเท่ากับ 45 องศา

แนวเอียงเท (dip direction) ของระนาบ A,  $\alpha_a$  มีค่าเท่ากับ 105 องศา

มุมเอียงเทของระนาบ B,  $\psi_b$  มีค่าเท่ากับ 70 องศา

แนวเอียงเทของระนาบ B,  $\alpha_b$  มีค่าเท่ากับ 235 องศา

มุมลาดชัน (slope angle) ของผิวหน้าความลาดเอียง,  $\psi_s$

มีค่าเท่ากับ 65 องศา

แนวมุมลาด (slope direction) ของผิวหน้าความลาดเอียง,  $\alpha_s$

มีค่าเท่ากับ 185 องศา

มุมลาดชันของตะกักส่วนบนความลาดเอียง,  $\psi_u$

มีค่าเท่ากับ 12 องศา

แนวมุมลาดของตะกักส่วนบนความลาดเอียง,  $\alpha_u$

มีค่าเท่ากับ 195 องศา

มุมเอียงเทของระนาบรอยแตกจากแรงดึงเมื่อเทียบกับแนวราบ,  $\psi_c$

มีค่าเท่ากับ 70 องศา

แนวเอียงเทของระนาบรอยแตกจากแรงดึง,  $\alpha_c$  มีค่าเท่ากับ 165 องศา

ระยะของจุด A ไปถึงจุด T (ดูตำแหน่งทั้งสองในรูปที่ 4.15) มีค่า

เท่ากับ 12 เมตร

ความสูงในแนวตั้งของจุด A ที่อยู่บนผิวหน้าอิสระ เท่ากับ 30 เมตร

จากค่าคุณสมบัติและมิติต่าง ๆ ที่ระบุข้างต้น จงคำนวณหาค่าดังต่อไปนี้

ก. ค่าปัจจัยความปลอดภัย ถ้าหากกำหนดให้มวลความลาดเอียงรูปสี่เหลี่ยมแห้งและไม่มีระนาบของรอยแตกจากแรงดึงตัดผ่าน

ข. ค่าปัจจัยความปลอดภัย ถ้าหากกำหนดให้มวลความลาดเอียงแห้งและมีระนาบของรอยแตกจากแรงดึงตัดผ่าน

ค. ค่าปัจจัยความปลอดภัย ถ้าหากมีน้ำขังเต็มทั้งในระนาบของการเลื่อนไถลและในระนาบของรอยแตกจากแรงดึง

ง. ถ้าหากต้องการเพิ่มเสถียรภาพของกรณีในข้อ ค ให้ได้ค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย เท่ากับ 1.5 จำเป็นต้องเพิ่มไหลคภายนอกโดยใช้ลวดยึดคึดมีค่าเท่าไร ? กำหนดให้แนวทิศทางที่ไหลคภายนอกกระทำ เท่ากับ 355 องศา กับมุมเอียงเทของไหลคภายนอก เท่ากับ 30 องศา กับแนวราบ

การคำนวณหาเสถียรภาพด้วยเครื่องคิดเลขธรรมดาสามารถทำเป็นขั้นคอนได้ แต่จะเสียเวลาและอาจผิดพลาดได้ง่าย เนื่องจากมีการคำนวณหลายขั้นตอน และมีสมการที่ต้องใช้หลายสมการมาก เมื่อทดลองใช้ค่าคุณสมบัติและค่ามิติต่าง ๆ ที่ระบุในโจทย์เป็นข้อมูลเข้า (input) ของโปรแกรมแบบจำลอง ดังที่ระบุไว้ในตารางที่ 4.6 หน้า 111 โดยกำหนดให้มวลหินแห้ง ไม่มีแรงเสริมเสถียรภาพจากภายนอก และผลลัพธ์ที่ระบุไว้ในตารางเดียวกัน จะได้ค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย เท่ากับ 1.86

จากข้อมูลของโจทย์เดียวกัน เมื่อต้องการเสริมเสถียรภาพให้ได้ค่าปัจจัยความปลอดภัยสูงขึ้น เท่ากับ 2.00 โดยที่ทราบแนวทิศทางและค่ามุมเอียงเทของแรงภายนอกตรงจุดตำแหน่งที่ต้องการเสริมเสถียรภาพ ผลลัพธ์ในการที่จะต้องเพิ่มแรงภายนอกนี้ โปรแกรมคำนวณมาได้ เท่ากับ 7.01 กิโลนิวตันต่อเมตร (ดูตารางที่ 4.7 หน้า 112)

ตารางที่ 4.7 ข้อมูลแรกที่ป้อนเข้าไปในโปรแกรมการคำนวณเสถียรภาพของมวลสารที่มีการพังทลายแบบรูปลิ้ม โดยใช้แรงภายนอกเพื่อเพิ่มค่าตัวเลขเสถียรภาพให้เท่ากับ 2.00 ผลลัพธ์ของแนวทิศทางของแรงและขนาดของแรงเสริมอยู่ในตารางเล็ก

**Surface Wedge Method**

**Input Data**

Calculated Type	Analytical Method
Slope	Dry Slope
With Tension Crack	No

	Dip	Dip Direction
Failure Surface Plan A	45.00	105.00
Failure Surface Plan B	70.00	235.00
Slope Face	65.00	185.00
Upper Ground Surface	12.00	195.00
Tension Crack	70.00	165.00

Elevation (A)	30.00
Tension Crack Distance (A)	12.00
Cohesion Strength (A)	24.00
Cohesion Strength (B)	48.00
Friction Angle (A)	20.00
Friction Angle (B)	30.00
Rock Unit Weight	25.00
Water Unit Weight	9.81
Saturated Rock Unit Weight	0.00

**Calculated Result**

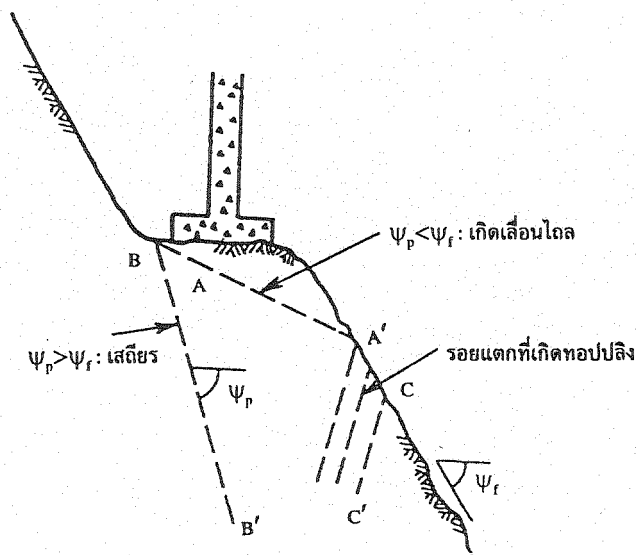
	Force	Plunge	Trend
External Force for FS. = 2.00	7014.39	192.52	347.05

## บทที่ 5 การพังทลายแบบทอปเปิล

ในการพังทลายของมวลสารที่มีความชันสูง และมวลหินที่ประกอบเป็นความลาดเอียงมีแนวเปราะบางตัดผ่านมวลหินแข็ง เกิดเป็นแท่งบล็อกหรือคอลัมน์ ทำให้มีโอกาสที่เกิดการพังทลายแบบทอปเปิล (toppling failure) สภาวะที่เกิดการพังทลายแบบนี้ได้ลักษณะของการพังทลายเกิดแบบคามแนวระนาบ ร่วมกับเกิดการหมุนของคอลัมน์แท่งหินในเวลาเดียวกัน

### 5.1 รูปแบบของการพังทลายแบบทอปเปิล

รูปแบบของพื้นผิวการพังทลายแบบทอปเปิลนี้ มักเกิดในในแนวมุมเทของรอยแตกแยก (หรือระนาบเปราะบาง) ที่มีมุมเอียงเท (dip angle) เข้าหาหน้าความลาดเอียงที่มีความชันสูง ค่าการเอียงเทเข้าหาหน้าความลาดควรมีค่ามุมอยู่ประมาณ 20 องศา และมวลหินที่จะเกิดการพังทลายมักมีลักษณะเป็นแผ่นพื้นราบ (slab) ซึ่งแต่ละแผ่นพื้นราบนี้มีค่ามุมเอียงเทสูง และเกิดในลักษณะเกือบขนานกับผิวด้านหน้าของความลาดเอียง



รูปที่ 5.1 สมมติฐาน 2 สภาวะสำหรับการเกิดความไม่เสถียรของแท่งบล็อกหิน

รูปที่ 5.1 หน้า 114 แสดงภาพสเก็ชการพังทลายแบบทอเปิลของความลาดเอียงที่มีน้ำหนักของฐานรากมาไหลคอบนตะพักค้ำยัน ถ้าหากสมมติให้แต่ละแผ่นพื้นราบของแท่งบล็อกหินมีค่ามุมเสียดทานเป็น  $\phi_j$  การไหลเลื่อน (slip) จะเกิดขึ้นได้ถ้าหากมีความเค้นอัดจากที่เป็นไหลคอบนนอกที่กระทำกับชั้นแท่งหิน มีค่ามุมมากกว่าค่ามุม  $\phi_j$

เมื่อกำหนดให้มีแนวเปราะบางท่ามุมเอียงเท เท่ากับ  $\psi_p$  โดยที่แนวเปราะบางนี้ตัดผ่านผิวหน้าความลาดชันที่มีค่ามุมเอียงเท เท่ากับ  $\psi_f$  โอกาสที่จะเกิดการพังทลายแบบทอเปิลของความลาดเอียงนี้ จะเกิดการไหลเลื่อนระหว่างระนาบของแท่งหินคือ

$$\psi_f > \psi_p > \phi_j \quad (5.1)$$

แต่ถ้าหากค่ามุมเอียงเทของระนาบเปราะบางมากกว่าค่ามุมเอียงเทความลาดเอียง จะไม่มีการเลื่อนไถล (sliding) ของมวลสารเกิดขึ้น

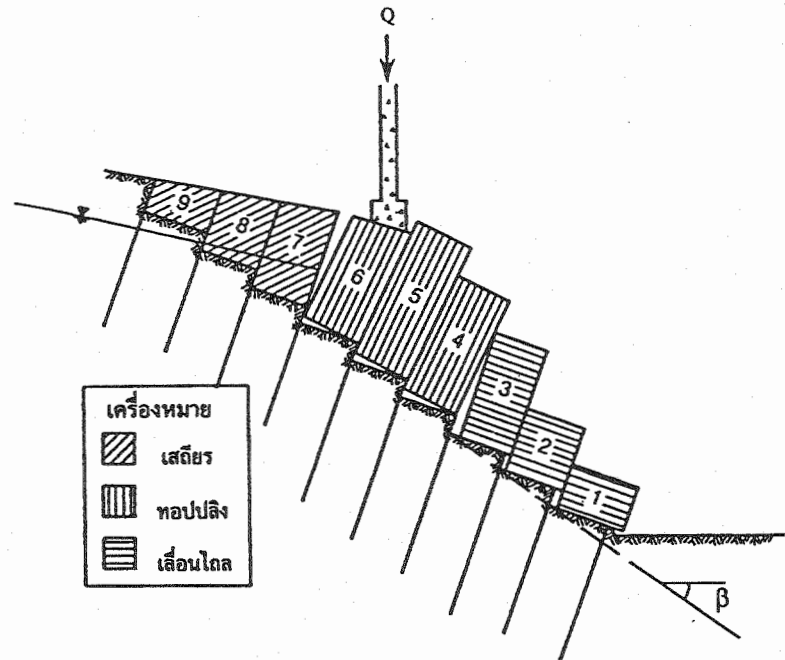
## 5.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของมวลแท่งบล็อกหินที่เกิดทอเปิล

Goodman and Bray (1976) ได้เสนอข้อกำหนดที่สำคัญว่า การพังทลายแบบทอเปิลเกิดขึ้นได้มุมเอียงเทของบล็อกแท่งหิน ต้องมีรอยแตกขนานกับผิวหน้าความลาดเอียงและมีค่ามุมเอียงเทสูง จากผลการตรวจสอบการพังทลายแบบนี้ในภาคสนามอาจมีการเคลื่อนที่ของบล็อกแท่งหินในแนวราบหรือในแนวอื่นที่ไม่ชันมากได้ แต่เมื่อวิเคราะห์ในภาพรวมการเกิดการพังทลายของความลาดเอียง เป็นผลมาจากแรงเฉือนระหว่างแท่งบล็อกล่างสุด (toe) ที่เกิดการเคลื่อนที่

### 5.2.1 หลักการและเงื่อนไขของการวิเคราะห์การพังทลายแบบทอเปิล

การที่มวลแท่งบล็อกหินอยู่ในสภาวะขีดสมดุลจำกัด (limit equilibrium) อาจเกิดการเคลื่อนที่ในเชิงทอเปิล (toppling movement) มีหลักการและเงื่อนไขดังนี้

1. การวิเคราะห์เสถียรภาพ เริ่มที่แท่งบล็อกชั้นบนสุด เพราะการเคลื่อนที่จะเริ่มเกิดที่ด้านบนของความลาดเอียงก่อน
2. แต่ละแท่งบล็อกหิน มีโอกาสที่จะเกิดสภาวะหรือโหมด (mode) ได้ 3 แบบ (ดูรูปที่ 5.2 ประกอบ) ได้แก่ เสถียร (stable), ทอเปิล (toppling), เลื่อนไถล (sliding) การที่บล็อกจะมีโหมดแบบไหนขึ้นอยู่กับขนาดมิติของบล็อกนั้น กำลังวัสดุเฉือนที่บริเวณพื้นผิวสัมผัส และไหลคอบนนอกที่มากกระทำ



รูปที่ 5.2 เสถียรภาพของแท่งบล็อกหิน แสดง โอกาสที่แต่ละบล็อกอาจเกิดการหมุนตัวแบบทอปปเปล หรือเคลื่อนที่ตามแนวระนาบแบบเลื่อนไถล ค่ามุม  $\beta$  ในรูป เป็นมุมเงยของความเอียงเทเฉลี่ยของแนวเปราะบาง ที่วัดเทียบกับฐานบล็อกที่เคลื่อนตัวแบบขยับเป็นขั้น ๆ

จากรูปที่ 5.2 บล็อกที่สูง (ความสูงน้อย) ที่อยู่บริเวณสัน (crest) ของความลาดเอียง ได้แก่ บล็อกหมายเลข 7, 8, 9 จุดศูนย์ถ่วงอยู่ภายในฐานของมวลหิน ดังนั้นแท่งบล็อกหินทั้ง 3 ที่อยู่บนสันจะมีความเสถียร ถ้าหากค่ามุมเสียดทานภายในที่ฐานมีค่ามากกว่าค่ามุมเอียงเทของด้านฐานที่บล็อกหินสัมผัส

ในทางตรงข้ามบล็อกที่มียาว (รูปแท่งหินใกล้เคียงกับคานในงานก่อสร้าง) ได้แก่ บล็อกหมายเลข 4, 5, 6 จุดศูนย์ถ่วงอยู่นอกฐานของมวลหิน จึงอาจเกิดการหมุนตัวล้มลง (เหมือนคานเปิด) แบบทอปปเปล สภาวะนี้ขึ้นอยู่กับค่าแรงเฉือนที่เกิดบนด้านข้างทั้งสองข้างของแท่งบล็อกหิน ถ้าแท่งบล็อกหินมีการทอปปเปลจะก่อให้เกิดแรงผลักดัน (thrust force) ส่งต่อไปยังบล็อกด้านล่างของความลาดเอียง ถ้าหากว่าบล็อกที่อยู่ถัดไปทาง

ด้านล่างมีลักษณะเป็นทรงแท่งสูง ก็อาจเกิดการหมุนตัวและล้มลงได้ถึงแม้ว่าจุดศูนย์ถ่วงจะอยู่ภายในฐานของมวลหินอันเป็นผลมาจากแรงผลักดัน

แท่งบล็อกหินที่อยู่ทางจุดด้านล่าง ได้แก่ บล็อกหมายเลข 1, 2, 3 ที่เป็นแท่งบล็อกหินที่สั้นจะ ไม่เกิดการทอปลิง แต่ถ้าแรงผลักดันจากด้านที่อยู่บนบล็อกเหล่านี้มากพอ ก็อาจก่อให้เกิดการเลื่อนไถลเชิงเส้นตามแนวระนาบได้

3. ในกรณีที่ความลาดเอียงมีลักษณะจะเกิดความไม่มีเสถียรภาพขึ้น แต่ถ้าหากบล็อกที่อยู่จุดล่างสุดมีความเสถียร (นั่นคือ ไม่เกิดการเคลื่อนที่) โดยภาพรวมความลาดเอียงอาจเกิดการเคลื่อนที่หรืออนุภาคของมวลหินมีการเปลี่ยนตำแหน่งไปได้บ้าง แต่ก็ ไม่เกิดการพังทลายของความลาดเอียงไปทั้งหมด

4. ถ้ามีฐานรากสิ่งก่อสร้าง (footing) ที่วางตัวอยู่บนตะพักความลาด ไหลดที่มีผลต่อเสถียรภาพจะยิ่งเพิ่มโอกาสให้เกิดการเคลื่อนที่ของแท่งบล็อกที่อยู่ด้านล่าง ถ้าหากฟุตคิงมีความสูงมากขึ้นในแนวตั้งจะเพิ่มแรงผลักดันให้มีมากกว่าเดิมในขณะที่ไม่มีฟุตคิง

### 5.3 ผลเฉลยเชิงประสมของการพังทลายแบบทอปลิง

ถ้าหากวิเคราะห์บล็อกหินหลายบล็อกที่วางตัวบนระนาบ และมีการพังทลายเป็นหลายรูปแบบทั้งเป็นแบบการเลื่อนไถล การหมุนตัวแบบคาบคิก (ทอปลิง) แนวทางที่ใช้เพื่อวิเคราะห์เป็นแบบวิธีการของแรงสมดุลที่ขีดจำกัด (limit equilibrium) ซึ่งผลเฉลยนี้ผู้เขียนได้คัดลอกจากหนังสือ Rock Slope Engineering: Third Edition หน้า 262-267

#### 5.3.1 การกำหนดค่าคงที่และการหาค่าความสูงที่เกี่ยวข้องกับแท่งบล็อกหิน

จากรูปแบบของการพังทลายแบบทอปลิง ที่มีทั้งการหมุนตัวและการไหลเลื่อนของแท่งบล็อกหินหลายบล็อก ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.3 ส่วนรูปที่ 5.4 เป็นบล็อกเดี่ยวที่  $n$  แสดงมิติของระยะและตำแหน่งที่เกี่ยวข้องในการใช้คำนวณแรงสมดุล

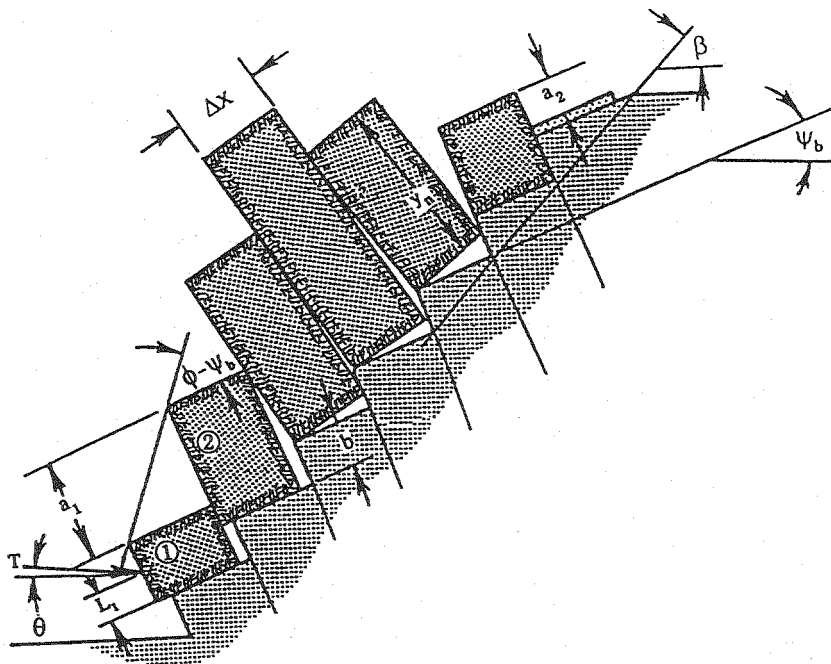
ความสัมพันธ์ของค่าคงที่ 3 ค่า ได้แก่  $a_1$ ,  $a_2$  และ  $b$  ที่แสดงในรูปที่ 5.3 ได้แก่

$$a_1 = \Delta x \tan (\psi_f - \psi_b) \quad (5.3)$$

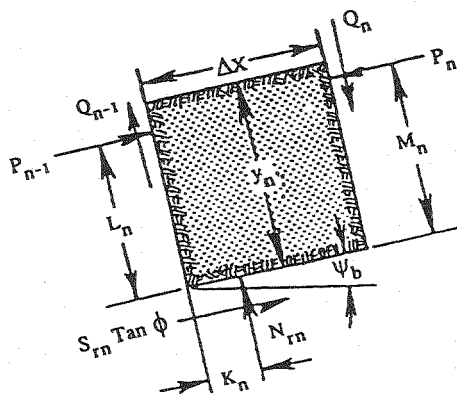
$$a_2 = \Delta x \tan (\psi_b - \psi_s) \quad (5.4)$$

$$b = \Delta x \tan (\beta - \psi_b) \quad (5.5)$$





รูปที่ 5.3 แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์แรงบนมวลสารแบบจุดสมมูลเชิงจิกจำกัด



รูปที่ 5.4 แรงที่กระทำบนมวลที่ n

จากสมการทั้ง 3 หน้า 116  $\Delta x$  เป็นค่าความกว้างของแท่งบล็อกหินที่คำนวณปกติจะกำหนดให้ความกว้างของทุกแท่งบล็อกหินมีค่าเท่ากัน,  $\psi_x$  เป็นค่ามุมเอียงเทของหน้าความลาดเอียง (ที่วัดเทียบกับขอบชั้นบนของแท่งบล็อกหิน),  $\psi_b$  เป็นค่ามุมเอียงเทที่ฐานของบล็อกบนระนาบเอระบาง  $\psi_s$  เป็นค่ามุมเงยที่เกิดจากความลาดของตะพักคำนวณความลาดเอียง (วัดเทียบกับขอบบนของแท่งบล็อกหิน)  $\beta$  เป็นค่ามุมเงยของแนวความเอียงเทของระนาบเอระบางที่เกิดจากฐานบล็อกที่ขยับเขยื้อนแบบขยับไค (วัดเป็นค่าเฉลี่ยของทุกฐานบล็อกที่ระดับแท่งบล็อกค่าลงเมื่อเคลื่อนที่ตามระนาบเอระบางที่ฐาน)

ในกรณีที่ต้องการหาค่าความสูงของบล็อก  $n$  ที่อยู่ต่ำกว่าสันของความลาดเอียง

$$y_n = n(a_1 - b) \quad (5.6)$$

แต่ถ้าหากต้องการหาค่าของบล็อก  $n$  ที่อยู่สูงกว่าสันของความลาดเอียง

$$y_n = y_{(n-1)} - a_2 - b \quad (5.7)$$

### 5.3.2 สมการที่เกี่ยวข้องกับระยะมิติของแท่งบล็อกหิน

ค่าคงที่อื่นที่เกี่ยวข้องกับระยะมิติต่าง ๆ ของแท่งบล็อกหิน จากรูปที่ 5.4 ที่แสดงแรงต่าง ๆ ที่กระทำบนบล็อกที่  $n$  ถ้าหากบล็อกนี้อยู่ในเซตบล็อกหินที่เกิดทอปปลิงพิจารณาตำแหน่งของบล็อกนี้ว่าอยู่ตรงไหนก่อนหาความสัมพันธ์ โดยกำหนดให้ค่า  $K_n$  เท่ากับ 0 (ศูนย์) ดังนี้

1. ถ้าหากบล็อกที่  $n$  อยู่ที่ระดับต่ำกว่าสันของความลาดเอียง

$$M_n = y_n \quad (5.7)$$

$$L_n = y_n - a_1 \quad (5.8)$$

2. ถ้าบล็อกที่  $n$  อยู่ระดับตรงสันพอดี

$$M_n = y_n - a_2 \quad (5.9)$$

$$L_n = y_n - a_1 \quad (5.10)$$

3. ถ้ามวลที่  $n$  อยู่ที่ระดับสูงกว่าเส้นของความลาดเอียง

$$M_n = y_n - a_2 \quad (5.11)$$

$$L_n = y_n \quad (5.12)$$

### 5.3.3 สมการที่เกี่ยวข้องกับแรงที่กระทำบนมวล

การหาค่าแรงต่าง ๆ ที่กระทำบนมวลที่  $n$  ของรูปที่ 5.4 ที่จุดสมดุล หาค่าแรงเสียดทานบนด้านข้างทั้งสองของมวล ได้ดังนี้

$$Q_n = P_n \tan \phi_n \quad (5.13)$$

$$Q_{(n-1)} = P_{(n-1)} \tan \phi_n \quad (5.14)$$

สำหรับแรงอัดฉากและแรงเฉือนบนด้านฐานของมวลที่  $n$  มีค่าเป็น

$$N_{r,n} = W_n \cos \psi_b + \{P_n - P_{(n-1)}\} \tan \phi_{bn} \quad (5.15)$$

$$S_{r,n} = W_n \sin \psi_b + \{P_n - P_{(n-1)}\} \quad (5.16)$$

ถ้าหากพิจารณาภาวะของมวลที่  $n$  ที่จะเริ่มเกิดการทอปลิง หรือเริ่มเกิดการเลื่อนไถล (รูปที่ 5.5 หน้าถัดไป) รูปแบบการคำนวณได้ทำให้ง่ายเพราะสมมติให้ไม่มีแรงดันน้ำมาเกี่ยวข้อง อนึ่งการแสดงแรงที่ทำให้เกิดการเลื่อนไถลของมวลที่  $n$  ได้แยกไว้ต่างหากเป็นรูปที่ 5.6 โดยสมมติให้ไม่มีแรงดันน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่นเดียวกัน

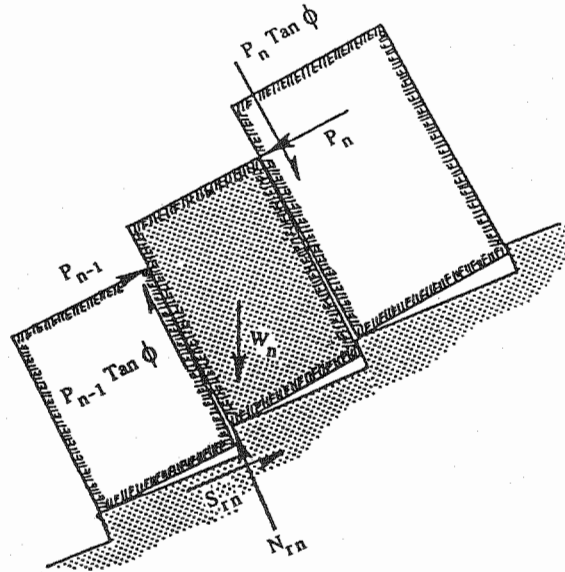
จากรูปที่ 5.5 เมื่อมวลที่  $n$  เริ่มมีการหมุนตัวก่อนเกิดทอปลิง ที่จุดสมดุลหาค่าแรงที่ป้องกันไม่ให้เกิดการทอปลิง,  $P_{(n-1),t}$  คือ

$$P_{(n-1),t} = \frac{P_n (M_n - \Delta x_n \tan \phi_{bn}) + (W_n/2) (y_n \sin \psi_{bn} - \Delta x_n \cos \psi_{bn})}{L_n} \quad (5.17)$$

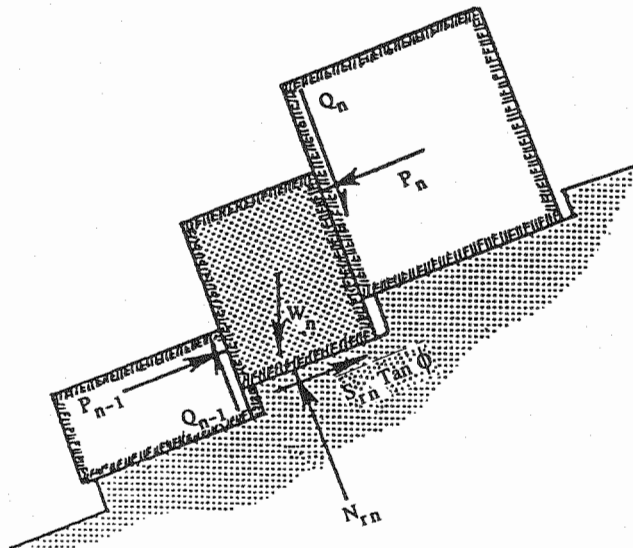
จากรูปที่ 5.6 เมื่อมวลที่  $n$  กำลังจะเกิดการเลื่อนไถล ค่าแรงเฉือนเป็น

$$S_{r,n} = N_{r,n} \tan \phi_{bn} \quad (5.18)$$

ในสภาพความเป็นจริง ขนาดแมกนิจูดและจุดที่แรงกระทำตรงด้านข้างมวลและตรงด้านฐานมวลเป็นตัวไม่รู้ค่า (unknown) จึงต้องสมมติว่าเกิดจุดสมดุลเชิงจำกัดบนด้าน



รูปที่ 5.5 การเกิดทอปลิงของบล็อกที่  $n$  เมื่อไม่มีค่าแรงค้ำหน้ามาเกี่ยวข้อง



รูปที่ 5.6 การเกิดการเลื่อนไถลของบล็อกที่  $n$  เมื่อไม่มีแรงค้ำหน้ามาเกี่ยวข้อง

ข้างของบล็อกทั้งสองข้าง ทำให้สามารถประยุกต์ใช้สมการของแรงอัดฉาก (สมการที่ 5.15) และใช้สมการของแรงเฉือน (สมการที่ 5.16) ได้

จากความสัมพันธ์ของการสมดุลแรงทั้ง 3 สมการ (สมการ 5.15, 5.16, 5.18) หาค่าแรงที่ทำให้บล็อกที่  $n$  เริ่มเกิดการเลื่อนไถล,  $P_{(n-1),s}$  คือ

$$P_{(n-1),s} = P_n - \frac{W_n (\tan \phi_{bn} \cos \psi_{bn} - \sin \psi_{bn})}{1 - \tan^2 \phi_{bn}} \quad (5.19)$$

#### 5.4 กระบวนการคำนวณของการสมดุลแรงที่ขีดจำกัด

กระบวนการคำนวณแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือการหาความสมดุลเชิงขีดจำกัด กับการหาแรงภายนอก เพื่อเสริมเสถียรภาพของความลาดเอียงทั้งหมด โดยสมมุติให้ใช้แบบจำลองของรูปที่ 5.3 หน้า 117 และกำหนดให้มีแท่งบล็อกหินมีเกิดทอปปลิงและเกิดการไถลเลื่อนโดยที่

- $n_1$  = หมายเลขของบล็อกที่อยู่ส่วนบนสุดของกลุ่มเซตที่เกิดทอปปลิง
- $n_2$  = หมายเลขของบล็อกที่อยู่ส่วนบนสุดของกลุ่มเซตที่เกิดไถลเลื่อน

##### 5.4.1 การหาค่ามุมเสียดทานภายในที่จุดสมดุลเชิงจำกัด

ในการที่จะหาความสมดุลของมวลบล็อกหินที่อยู่บนระนาบของความลาดเอียง มีขั้นตอนหลายขั้นตอนที่ต้องพิจารณาเกี่ยวกับการคำนวณที่กระทำโดยอาศัยความเสียดทาน

1. สมมุติค่ามุมเสียดทานภายในที่ฐาน ( $\psi_b$ ) ให้เหมาะสม เช่น  $\psi_b > \phi_b$
2. กำหนดค่า  $n_1$  ของทั้งเซต โดยกำหนดให้ความสัมพันธ์ของบล็อกที่จะเกิดทอปปลิงมีค่าเป็น

$$y_n / \Delta x_n > \cot \psi_{bn}$$

3. จากกลุ่มบล็อกของเซตทอปปลิงในข้อ 2 คำนวณหาแรงดันข้างที่เป็นค่าของแรงป้องกันการเกิดทอปปลิง,  $P_{(n-1),t}$  โดยใช้สมการที่ 5.17 และในทำนองเดียวกันคำนวณหาค่าของแรงป้องกันการเกิดไถลเลื่อน  $P_{(n-1),s}$  โดยใช้สมการที่ 5.19

สถานะของเสถียรภาพของบล็อกที่  $n$  มีเงื่อนไขดังนี้

- a. ถ้าค่า  $P_{(n-1),t} > P_{(n-1),s}$  บล็อกนี้จะอยู่ในสภาวะพอดีที่จะเกิดทอปปลิง หรือกำหนดให้ค่า  $P_{(n-1)} = P_{(n-1),t}$

b. ถ้าค่า  $P_{(n-1),s} > P_{(n-1),t}$  บล็อกนี้จะอยู่ในสภาวะพอดีที่จะ  
เกิดเลื่อนตัวตามระนาบ หรือกำหนดให้ค่า  $P_{(n-1)} = P_{(n-1),s}$

อนึ่งบล็อกจะ ไม่เกิดการไถลเลื่อน ถ้าหาก

$$\text{แรงปฏิกริยา } N_{rn} > 0 \text{ และค่าแรงเฉือน } S_{rn} > N_{rn} \tan \phi_{bn}$$

4. ในกรณีของบล็อกที่อยู่ทางด้านล่างของความลาดเอียง ถึงแม้ว่าบล็อกจะสั้นทำให้  
ไม่มีโอกาสเกิดทอปลิงได้ แต่แรงผลักดันของบล็อกด้านบนที่มีการเคลื่อนตัว อาจมีผลทำให้  
บล็อกด้านล่างที่สั้นเกิดการเลื่อนไถลได้

วิธีการพิจารณาบล็อกที่อยู่จุดล่างสุด (toe) ที่เป็นบล็อกที่เริ่มต้นนับเป็นบล็อก  
ที่ 1 มีเงื่อนไขของการพิจารณาดังนี้

a. ถ้าค่า  $P_{(n-1),s} > P_{(n-1),t}$  บล็อกนี้จะอยู่ในสภาวะพอดีที่จะ  
เกิดการเลื่อนไถลตามแนวระนาบ หรือกำหนดให้ค่า  $P_{(n-1)} = P_{(n-1),s}$

เกิดเลื่อนตัวตามระนาบ หรือกำหนดให้ค่า  $P_{(n-1)} = P_{(n-1),s}$

b. อนึ่งบล็อกจะ ไม่เกิดการไถลเลื่อน ถ้าหาก  $S_{rn} > N_{rn} \tan \phi_{bn}$

c. อนึ่งบล็อกจะเกิดการไถลเลื่อน ถ้าหาก  $S_{rn} < N_{rn} \tan \phi_{bn}$

5. ถ้าหากบล็อกทางด้านล่างของความลาดเอียงเกิดการไถลเลื่อน ความไม่มี  
เสถียรภาพจะเกิดในทุกส่วนของมวลบล็อกหิน แต่ถ้ามวลบล็อกหินด้านล่างไม่เกิดการเคลื่อนตัว  
จะ ไม่มีการพังทลายเกิดขึ้น ถึงแม้ว่าการขยับเขยื้อนของบล็อกหินด้านบนอาจมีขึ้นได้

วิธีการพิจารณาบล็อกที่อยู่จุดล่างสุด (toe) หรือนับเป็นบล็อกที่ 1 มีเงื่อนไขดังนี้

- ถ้าค่า  $P_0 > 0$  บล็อกบนความลาดเอียงทั้งหมดจะ ไม่เสถียร สำหรับค่ามุม  
ความเสียดทาน  $\phi_b$  ที่สมมุติขึ้นมา จำเป็นต้องมีการคำนวณซ้ำ และช่วงที่มีการคำนวณใหม่  
นี้ต้องเพิ่มค่า  $\phi_b$  ให้สูงขึ้น

- ถ้าค่า  $P_0 < 0$  แสดงว่ามีเสถียรภาพเพียงพอ เมื่อต้องการหาจุดสมดุล  
เชิงจำกัด ก็ทำการลดค่า  $\phi_b$  ลง

- ถ้าหากค่า  $P_0$  มีค่าน้อย (เล็ก) มาก ก็ให้ยอมรับว่า ค่ามุมเสียดทานภายใน  
ฐานที่มีค่าน้อยมากนี้ เป็นค่าของมุมเสียดทานที่เหมาะสมสำหรับการหาจุดสมดุลเชิงจำกัด  
ของแรงที่กระทำบนบล็อก

6. การคำนวณตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย ให้ใช้วิธีการของกระบวนการทำคำนวณ  
ซ้ำ (iterative process) เริ่มต้นจากการที่ค่ามุมเสียดทานถูกเปลี่ยนแปลงก้าวหน้า  
(progressively changed) จนกระทั่งมวลบล็อกหินทั้งหมดเกิดสภาวะสมดุลจำกัด  
(limit equilibrium) นั่นคือ

$$F = \frac{\tan \phi_{\text{available}}}{\tan \phi_{\text{required}}} \quad (5.20)$$

โดยที่  $\phi_{\text{available}} =$  มุมเสียดทานภายในของบล็อกหินที่ฐาน  
 $\phi_{\text{required}} =$  มุมเสียดทานภายในของบล็อกหินที่ฐาน

#### 5.4.2 การหาค่าแรงภายนอกที่จะมาเสริมเสถียรภาพ

ถ้าหากมวลแห่งบล็อกมีการเคลื่อนตัว และเมื่อต้องการให้มวลแห่งบล็อกหยุดการเคลื่อนตัว ก็ต้องใช้แรงภายนอกมากพอค้ำให้ฐานบล็อกมีความต้านทานต่อการไถลเลื่อนสูงขึ้น อีกกรณีหนึ่งคือค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยของมวลบล็อกบนความลาดเอียง มีค่าใกล้หนึ่ง ถึงแม้จะ ไม่มีการเคลื่อนตัว แต่ก็มีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดการพังทลายภายหลัง จึงต้องทำการเสริมเสถียรภาพเพื่อป้องกันการทอปปลิง แบ่งวิธีการเสริมเสถียรภาพในภาคสนามออกเป็น 2 แนว ได้แก่ การปรับเปลี่ยนรูปร่างแห่งบล็อกหิน กับการค้ำยันด้วยลวดบิดคดหรือ หมุดบิดคด

แนวทางของการวิเคราะห์หาแรงภายนอกเสริมเสถียรภาพต่อไปนี้ จะกำหนดให้ระยะความยาวค้ำจุนจากกับฐานของบล็อกที่ 1 มีค่าเท่ากับ  $L_1$  ต้องการติดตั้งลวดบิดคดบนแห่งบล็อกล่างสุดที่ผิวด้านข้าง ซึ่งที่จุดระยะ  $L_1$  นี้ก็เป็นตำแหน่งที่ติดตั้งลวดบิดคดบนฐานของแห่งบล็อกที่ 1 และแนวการติดตั้งทำมุม  $\theta$  เมื่อเทียบกับแนวราบ ถ้าให้ความสูงของบล็อกเป็น  $y_1$ , ความกว้างของฐานบล็อกเป็น  $\Delta x_1$  ฐานบล็อกเอียงทำมุม  $\phi_{b1}$  มุมเสียดทานที่ฐานเป็น  $\phi_{b1}$  และน้ำหนักของแห่งบล็อกเท่ากับ  $W_1$  ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ในการป้องกันการเกิดทอปปลิงและไถลเลื่อน ดังนี้

ค่าแรงดึงในลวดบิดคด ที่ป้องกันการเกิดทอปปลิงของบล็อกที่ 1,  $T_c$  คือ

$$T_c = \frac{(W_1/2)(y_1 \sin \psi_{b1} - \Delta x_1 \cos \psi_{b1}) + P_1(y_1 - \Delta x_1 \tan \phi_{b1})}{L_1 \cos(\psi_{b1} + \theta)} \quad (5.21)$$

ค่าแรงดึงในลวดบิดคด ที่ป้องกันการเลื่อนไถลของบล็อกที่ 1,  $T_s$  คือ

$$T_s = \frac{P_1(1 - \tan^2 \phi_{b1}) - W_n(\tan \phi_{b1} \cos \psi_{b1} - \sin \psi_{b1})}{\tan \phi_{b1} \sin(\psi_{b1} + \theta) + \cos(\psi_{b1} + \theta)} \quad (5.22)$$

แรงอัดฉากที่กระทำบนฐานของบล็อกที่ 1,  $N_{r1}$  มีค่าเท่ากับ

$$N_{r1} = P_1 \tan \phi_{b1} + T \sin(\psi_{b1} + \theta) + W_1 \cos \psi_{b1} \quad (5.23)$$

แรงเฉือนที่กระทำบนฐานของบล็อกที่ 1,  $S_{r1}$  มีค่าเท่ากับ

$$S_{r1} = P_1 - T \cos(\psi_{b1} + \theta) + W_1 \sin \psi_{b1} \quad (5.24)$$

### 5.5 โปรแกรมแบบจำลองการวิเคราะห์การพังทลายแบบทอปเปิล

การวิเคราะห์ผลลัพธ์ของการพังทลายแบบทอปเปิล โดยการใช้โปรแกรม TOPP.EXE ซึ่งเป็นโปรแกรมย่อยส่วนหนึ่งที่แยกออกจากโปรแกรม STABIL.EXE ทั้งนี้ เพื่อให้เกิดความสะดวกในการป้อนข้อมูลเข้าและหาผลลัพธ์ค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพของการพังทลายรูปแบบนี้

#### 5.5.1 หลักการของโปรแกรมแบบจำลองการพังทลายแบบทอปเปิล

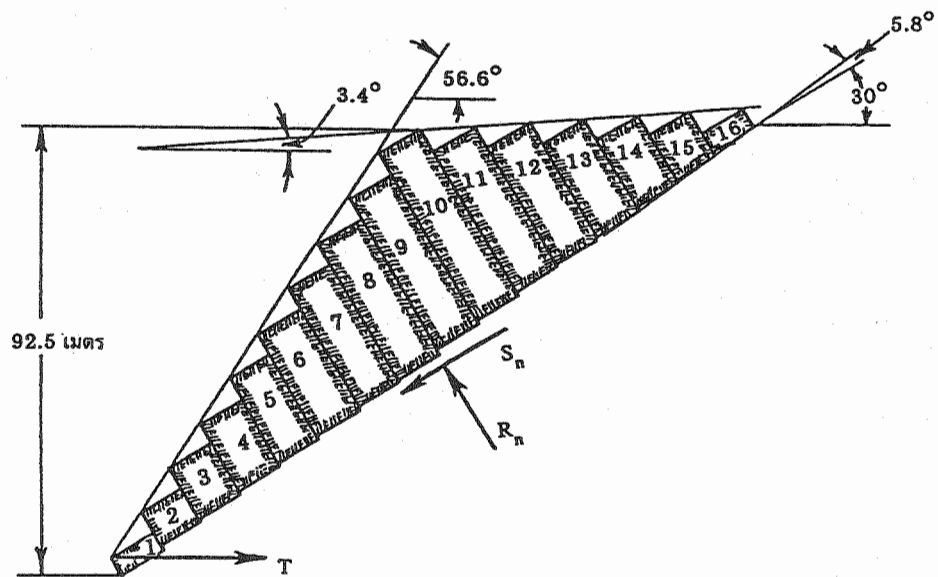
แนวทางที่ใช้เขียนโปรแกรม TOPP.EXE เพื่อวิเคราะห์หาเสถียรภาพของบล็อกแห้งหิน มีแนวทางแบบเดียวกับที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 5.4 โดยใช้ในการหาความสมดุลเชิงจำกัดที่หาค่ามุมเสียดทานที่จะเริ่มสภาวะเกิดสภาวะการเคลื่อนตัวของมวลแห้งบล็อกหิน ซึ่งจำเป็นต้องใช้สมการที่เกี่ยวข้องกับขนาดและระยะมิติของแห้งบล็อกหิน เพื่อนำค่าอัตราส่วนของขนาดมิติ ความสูงต่อความกว้าง มาเปรียบเทียบกับความเสียดทานที่ขีดจำกัด จนได้ผลลัพธ์ของความไม่เสถียร (เกิดการเลื่อนไถลหรือเกิดทอปเปิล) ของแห้งบล็อกหิน

#### 5.5.2 ตัวอย่างของการวิเคราะห์การพังทลายแบบทอปเปิล

การวิเคราะห์ในตัวอย่างโจทย์ของหัวข้อนี้ เป็นการหาความเป็นไปได้ที่แห้งบล็อกหินจะมีโอกาสที่จะไม่เสถียรอยู่บนความลาดเอียง และแนวทางการวิเคราะห์จะทำการหาจุดสมดุลเชิงจำกัดของแต่ละบล็อกว่ามีโอกาสจะเกิดทอปเปิล, ไถลเลื่อนตามแนวระนาบ หรือมวลบล็อกเสถียรอยู่บนระนาบเอียง

จากรูปสเก็ทซ์ในหน้าถัดไป (รูปที่ 5.7) เป็นแห้งบล็อกหินปูนจำนวน 16 บล็อกที่วางควมระนาบเอียงของความลาดเอียง กำหนดให้ค่าเฉลี่ยความเอียงเทของความลาดชันที่เทียบกับแนวราบบล็อกหิน เป็นค่ามุม  $\beta$  เท่ากับ  $30^\circ$





รูปที่ 5.7 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของการพังทลายแบบทอปเปิลสำหรับตัวอย่างโจทท์

กำหนดให้ค่าความสูงในแนวตั้งของความลาดเอียง เท่ากับ 92.5 เมตร ค่ามุมเอียงของหน้าความลาดเอียง,  $\psi_x$  เท่ากับ  $56.6^\circ$  (วัดเทียบกับแนวขอบบนแห่งบล็อกหิน) แห่งบล็อกหินทั้งหมดวางตัวขนานกัน บล็อกมีค่ามุมเอียงเทเข้าไปในมวลหินของเนินเขา เท่ากับ  $60^\circ$

จากการตรวจสอบในภาคสนาม พบว่า แห่งบล็อกหินมีลักษณะการขยับเขยื้อนแบบเป็นขั้น ๆ ที่ค้ำฐาน ทุกระยะ 9.84 เมตรที่ขนานกับฐานบล็อก มีการขยับแห่งบล็อกหินลงไปเท่ากับ 1 เมตร หรือได้ค่าของมุม ( $\beta - \psi_b$ ) เท่ากับ  $5.8^\circ$

ค่าคงที่ (ดูรูปที่ 5.3 หน้า 117 ประกอบ) ของขนาดมิติของแห่งบล็อกหิน มีค่าคงที่  $a_1 = 5.0$  เมตร,  $a_2 = 5.0$  เมตร,  $b = 1.0$  เมตร,  $\Delta x = 10.0$  เมตร (ความกว้างของทุกแห่งบล็อกเท่ากัน) และให้หน่วยน้ำหนักแห่งบล็อกหิน ( $\gamma$ ) มีค่าเท่ากับ 25 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร

ผลการตรวจวัดภาคสนามเพิ่มเติม พบว่า บล็อกหมายเลข 10 ของรูปที่ 5.7 ที่อยู่ตรงสันของความลาดเอียง มีค่ามุมเงยเท่ากับ  $3.4^\circ$

กำหนดให้ค่ามุมเสียดทานภายในของฐานบล็อก  $\tan \phi_b = 0.7855$

เมื่อต้องการหาเสถียรภาพจึงคำนวณหาเซตบล็อกที่จะเสถียร เซตบล็อกที่เกิดการทอปปลิง และเซตบล็อกที่จะเกิดการเลื่อนไถล

ผู้ใช้โปรแกรมแบบจำลองที่ใช้ค่าระยะมิติและค่าคุณสมบัติมวลสาร ที่ระบุในโจทย์ข้างบนเป็นข้อมูลเข้าของโปรแกรมแบบจำลอง ซึ่งขั้นตอนของการคำนวณในโปรแกรมก็จะมีหลายรูปแบบพอจะสรุปได้ดังนี้

1. ขั้นตอนที่ 1 เป็นการหาค่าระยะความสูงของแต่ละบล็อก จากรูปแบบเชิงเรขาคณิต และค่าคงที่ที่กำหนดให้
2. ขั้นตอนที่ 2 เป็นการหาโอกาสความเป็นไปได้ที่จะของเซตบล็อกที่เสถียร และเซตบล็อกที่เกิดการทอปปลิง โดยหาจากค่าอัตราส่วน ความกว้างบล็อกต่อความสูงบล็อก เทียบกับค่าความเสียดทานที่ฐานบล็อก
3. ขั้นตอนที่ 3 หาค่ามิติระยะที่แรงจากกระทำบนด้านข้างของบล็อกทั้ง 2 ด้าน
4. ขั้นตอนที่ 4 หาค่าแรงจาก และค่าอัตราส่วน  $S_{rx} / N_{rx}$  ของเซต  $n_1$  ที่เกิดการทอปปลิง
5. ขั้นตอนที่ 5 ทำการตรวจสอบเซตของบล็อกที่เกิดการเลื่อนไถล
6. ขั้นตอนที่ 6 หาค่าแรงจาก และค่าอัตราส่วน  $S_{rx} / N_{rx}$  ของเซต  $n_2$  ที่เกิดไถลเลื่อน

คำตอบสุดท้าย บล็อกที่ 14-15 เป็นเซตบล็อกที่เสถียร ไม่มีการพังทลาย สำหรับบล็อกที่ 4-13 เป็นเซตบล็อกที่เกิดการทอปปลิง และส่วนของบล็อกที่ 1-3 เป็นเซตบล็อกที่เกิดการเลื่อนไถล

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลเข้าและผลลัพธ์ของการคำนวณเสถียรภาพความลาดเอียง  
ที่ประกอบด้วยแท่งบล็อกหินที่แห้ง มีการพังทลายแบบทอปเปิล  
(ตามโจทย์ตัวอย่าง)

Total Number of Block	16	Number of Block at Crest	10
Slope Angle, Degrees	56.60	Unit Weight of Rock, kN/cu.m.	25.00
Dip of Layer Plane, Degrees	60.00	Available Friction Angle, Degrees	40.00
Over All Inclination of Failure, Degrees	35.80	External Load, kN	0.00
Dip of Upper Face, Degrees	-3.40	Dip Angle of External Load, Degrees	0.00
Estimated Friction Angle, Degrees	38.10	Unit Weight of Water, kN/cu.m.	0.00
Thickness of Block, m.	10.00	Dip Angle of Tension Force, Degrees	45.00

Calculated Result

No.	y	M <sub>n</sub>	L <sub>n</sub>	P <sub>(n,t)</sub>	P <sub>(n,s)</sub>	P <sub>n</sub>	N <sub>r n</sub>	S <sub>r n</sub>	Mode
16	3.78	-1.23	3.78	0.00	0.00	0.00	818.03	472.29	Stable
15	9.80	4.79	9.80	0.00	0.00	0.00	2122.13	1225.21	Stable
14	15.83	10.82	15.83	0.00	0.00	0.00	3426.23	1978.14	Stable
13	21.85	16.84	21.85	0.00	0.00	0.00	4508.16	2448.06	Toppling
12	27.87	22.86	27.87	283.00	-2561.05	283.00	5619.21	2955.08	Toppling
11	33.90	28.89	33.90	811.90	-2984.10	811.90	6767.07	3508.98	Toppling
10	39.92	34.91	34.91	1539.82	-3161.25	1539.82	7646.62	3721.13	Toppling
9	35.93	35.93	30.92	2808.53	-3139.39	2808.53	6920.31	3397.86	Toppling
8	31.93	31.93	26.93	3901.51	-1402.76	3901.51	6387.07	3320.53	Toppling
7	27.94	27.94	22.94	4572.84	158.14	4572.84	5859.85	3250.87	Toppling
6	23.95	23.95	18.94	4814.85	1297.39	4814.85	5341.54	3192.55	Toppling
5	19.96	19.96	14.95	4616.20	2007.33	4616.20	4837.59	3152.53	Toppling
4	15.97	15.97	10.96	3958.59	2276.60	3958.59	4359.96	3146.03	Toppling
3	11.98	11.98	6.97	2808.49	2086.91	2808.49	3694.84	2900.71	Sliding
2	7.98	7.98	2.98	1088.44	1404.73	1404.73	2463.23	1933.81	Sliding
1	3.99	3.99	-1.02	-1502.65	468.89	468.89	1231.61	966.90	Sliding

Factor of Safety	1.0701
Friction Angle for Limiting Equilibrium	38.1344
External Force Required	13.09

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลเข้าและผลลัพธ์ของการคำนวณเสถียรภาพความลาดเอียง  
ที่ประกอบด้วยแท่งบล็อกหินที่เปียกมีการพังทลายแบบทอปเปิล  
(ตามโจทย์ตัวอย่างแต่เพิ่มข้อมูลระดับของน้ำที่ขังไว้ในตาราง)

Total Number of Block	16	Number of Block at Crest	10
Slope Angle, Degrees	56.60	Unit Weight of Rock, kN/cu.m.	25.00
Dip of Layer Plane, Degrees	60.00	Available Friction Angle, Degrees	40.00
Over All Inclination of Failure, Degrees	35.80	External Load, kN	0.00
Dip of Upper Face, Degrees	-3.40	Dip Angle of External Load, Degrees	0.00
Estimated Friction Angle, Degrees	38.10	Unit Weight of Water, kN/cu.m.	9.81
Thickness of Block, m.	10.00	Dip Angle of Tension Force, Degrees	50.00

Block No.	$Y_w$	$Z_w$	Side Friction Angle
1	1.00	2.00	30.00
2	2.00	3.00	30.00
3	3.00	4.00	30.00
4	4.00	5.00	30.00
5	5.00	5.00	30.00
6	5.00	6.00	30.00
7	6.00	6.00	30.00
8	6.00	5.00	30.00

Block No.	$Y_w$	$Z_w$	Side Friction Angle
9	5.00	5.00	30.00
10	5.00	4.00	30.00
11	4.00	4.00	30.00
12	4.00	3.00	30.00
13	3.00	3.00	30.00
14	3.00	1.00	30.00
15	1.00	0.00	30.00
16	0.00	0.00	30.00

Calculated Result

No.	y	$M_n$	$L_n$	$P_{(n,t)}$	$P_{(n,s)}$	$P_n$	$N_{r,n}$	$S_{r,n}$	Mode
16	3.78	-1.23	3.78	0.00	0.00	0.00	818.03	472.29	Stable
15	9.80	4.79	9.80	0.00	0.00	0.00	2073.08	1230.12	Stable
14	15.83	10.82	15.83	0.00	0.00	0.00	3230.03	2017.38	Stable
13	21.85	16.84	21.85	0.00	0.00	0.00	4240.24	2391.94	Toppling
12	27.87	22.86	27.87	339.12	-7858.45	339.12	5354.35	2935.07	Toppling
11	33.90	28.89	33.90	922.37	-9492.06	922.37	6489.58	3446.13	Toppling
10	39.92	34.91	34.91	1713.15	-11071.97	1713.15	7399.61	3645.60	Toppling
9	35.93	35.93	30.92	3101.52	-12226.72	3101.52	6513.93	3150.34	Toppling
8	31.93	31.93	26.93	4442.03	-9840.77	4442.03	5769.81	2998.36	Toppling
7	27.94	27.94	22.94	5489.48	-7230.64	5489.48	5038.35	2760.40	Toppling
6	23.95	23.95	18.94	6221.97	-5212.82	6221.97	4426.02	2558.86	Toppling
5	19.96	19.96	14.95	6603.05	-3208.67	6603.05	3820.07	2476.29	Toppling
4	15.97	15.97	10.96	6621.67	-1256.67	6621.67	3264.40	2382.72	Toppling
3	11.98	11.98	6.97	6190.74	60.83	6190.74	2863.63	2526.43	Toppling
2	7.98	7.98	2.98	5126.93	1229.05	5126.93	3424.65	4335.99	Sliding
1	3.99	3.99	-1.02	2561.31	1764.38	1764.38	1735.78	2248.65	Sliding

Factor of Safety	1.0701
Friction Angle for Limiting Equilibrium	47.9198
External Force Required	1280.21

ตารางที่ 5.1 หน้า 127 ได้แสดงข้อมูลเข้าของกรณีที่แท่งบล็อกหินแห้ง ผู้ใช้ต้องป้อนเข้าไปในโปรแกรม ซึ่งได้แก่ข้อมูลของขนาด ระยะมิติ และพิทักของแท่งบล็อกหิน กำหนดให้แท่งบล็อกหินที่อยู่ล่างสุดมีหมายเลข 1 แท่งบล็อกหินที่มีหมายเลขสูงก็จะอยู่ที่ระดับพิทักสูงกว่าแท่งบล็อกหินที่มีหมายเลขต่ำ ในอีกส่วนหนึ่งของข้อมูลเข้าก็จะเป็นค่าคุณสมบัติของมวลบล็อกหินกับมิติที่สำคัญของความลาดเอียงหรือของแต่ละแท่งบล็อกหิน

ตารางที่ 5.2 หน้า 128 ได้แสดงข้อมูลเข้าของกรณีที่แท่งบล็อกหินมีน้ำจิ่งระหว่างรอยต่อของบล็อก ระดับความสูงของน้ำที่จิ่งได้ระบุไว้ในตารางเล็ก ข้อมูลเข้าอื่นก็คล้ายคลึงกับตารางที่ 5.1

#### ค่าคอบของกรณีแท่งบล็อกหินแห้ง

แท่งบล็อกหินที่ 14-16 เป็นเซตบล็อกที่เสถียร ไม่มีการพังทลาย สำหรับบล็อกที่ 4-13 เป็นเซตบล็อกที่เกิดการทอปปลิง และส่วนของบล็อกที่ 1-3 เป็นเซตบล็อกที่เกิดการเลื่อนไถล

#### ค่าคอบของกรณีแท่งบล็อกหินเปียกมีน้ำจิ่งระหว่างช่องว่างบล็อกหิน

แท่งบล็อกหินที่ 14-16 เป็นเซตบล็อกที่เสถียร ไม่มีการพังทลาย สำหรับบล็อกที่ 3-13 เป็นเซตบล็อกที่เกิดการทอปปลิง และส่วนของบล็อกที่ 1-2 เป็นเซตบล็อกที่เกิดการเลื่อนไถล ซึ่งจะเห็นได้ว่า กรณีที่แท่งบล็อกหินมีน้ำจิ่ง การเกิดทอปปลิงจะมีมากกว่า

## บทที่ 6 เสถียรภาพฐานรากระดับตื้น

งานการขุดเจาะ (excavation) นอกจากจะมีการวิเคราะห์เพื่อหาเสถียรภาพของมวลสารว่า จะไม่มีการพังทลายเนื่องจากน้ำหนักของมวลที่อยู่บนระนาบของโซนเปราะบางแล้ว ยังต้องมีการวิเคราะห์หาเสถียรภาพในกรณีที่สิ่งก่อสร้างที่เป็นฐานรากผ่านไหลคมากระทำบนมวลสาร ข้อจำกัดของแนวทางการศึกษาการแบกรับน้ำหนักของมวลนี้จะใช้เฉพาะในกรณีที่ฐานรากอยู่ในระดับตื้น (shallow foundation)

### 6.1 หลักการทั่วไปในกรณีพิจารณาเรื่องฐานราก

การกำหนดหรือเรียกชื่อชนิดของฐานรากนั้นมีหลายแบบ ที่นิยมจะใช้วิธีเรียกตามโครงสร้างฐานรากที่ส่งไหลคมากระทำบนมวลดิน ฐานรากแบบแรกเรียกว่า ฐานแผ่ (spread footing) ซึ่งเป็นฐานรากที่กระจายน้ำหนักสู่มวลสารบนเนื้อที่กว้างขวางมาก จึงไม่นิยมใช้ เมื่อมีเนื้อที่จำกัดในเชิงปฏิบัติการจริงภาคสนาม จะใช้การถ่ายเทน้ำหนักของสิ่งก่อสร้างมาสู่โครงสร้างของแท่งหรือคอลัมน์คอนกรีต ซึ่งเรียกฐานรากชนิดนี้ว่า ฐานรากแมต (mat foundation) ฐานรากทั้งสองแบบนี้ เป็นฐานรากที่ฝังอยู่ในมวลดินที่ระดับตื้น ส่วนฐานรากที่ฝังดินอยู่ในระดับลึก เป็นฐานรากที่รับน้ำหนักสิ่งก่อสร้างได้สูงมาก ได้แก่ ฐานรากแบบเสาเข็ม (pile foundation) และฐานรากแบบคริลชาฟ (drilled shaft foundation) ฐานรากที่ทำการศึกษาหาเสถียรภาพในโครงการวิจัยนี้ เป็นแบบฐานรากแผ่ที่วางตัวในมวลดินระดับตื้น

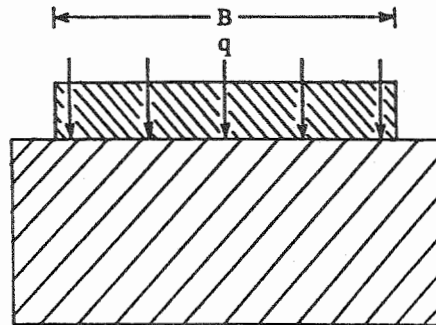
### 6.2 การรับน้ำหนักของมวลสารต่อไหลคที่กระทำผ่านฐานราก

เมื่อมวลสารต้องรับน้ำหนักที่เกิดจากฐานรากของสิ่งก่อสร้างมาวางทับ ถ้าหากสมมุติให้มีมวลดินถูกฐานรากที่เป็นฟุตคิงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าแนวยาวมีความกว้าง เท่ากับ  $B$  มากระทำ กำหนดให้มีความของไหลคกระจาย (distributed load) ต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย มีค่าเท่ากับ  $q$  (ดูรูปที่ 6.1 a) ต่อมาเพิ่มค่าไหลคไปเรื่อย ๆ ในขณะที่เดียวกับมวลสารเกิดการทรุดตัว (settlement) อย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งมีการพังทลาย

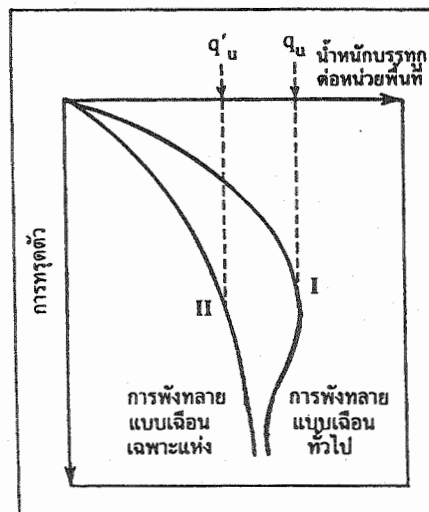
เมื่อไหลคมีค่าเพิ่มขึ้น ณ ระดับที่มีค่าเท่ากับการแบกรับน้ำหนักสูงสุด ( $q_u$ ) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.2 b นั้นคือจุดที่

$$q = q_u \quad (6.1)$$

การพังทลายของมวลดินในกรณีที่ไม่สามารถรับไหลคบรรทุกเกินขนาดได้ ส่วนใหญ่จะเป็นแบบที่เรียกว่า การพังทลายแบบเฉือน (shear failure) และค่า  $q_u$  ในสมการที่ 6.1 จัดเป็นค่าความสามารถการแบกรับน้ำหนักบรรทุก (หรือการรับแรงแทรกทาน) สูงสุดของมวลดิน (ultimate soil bearing capacity) ซึ่งจะเท่ากับน้ำหนักบรรทุกสมทบบนผิวดิน (surcharge,  $q$ ) ที่เป็นน้ำหนักมวลดินที่อยู่เหนือฐานของฟุตคิง เมื่อกำหนดให้มีการกระจายไหลคคงที่



a. แบบจำลองการรับน้ำหนักของมวลต่อฐานรากระดับดิน



b. กราฟที่พล็อตแสดงความสัมพันธ์ระหว่างไหลคและการทรุดตัวของมวลสาร

รูปที่ 6.1 การหาค่าความสัมพันธ์การรับน้ำหนักของมวลดินต่อฐานราก

### 6.3 สมการเชิงประสมการณ์ของการคาดคะเนเพื่อหาค่ากำลังการรับน้ำหนัก

ในช่วงการศึกษาแรก ๆ การหาค่ากำลังรับน้ำหนักของมวลดินใช้โลหะที่มึนเข้าไปในมวลสารที่อ่อนกว่า แล้วคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างความเสียดทาน (friction) กับค่ากำลังการรับน้ำหนักบรรทุกหรือการรับแรงแบกทาน (bearing capacity) ของมวลสาร แต่ต่อมาก็ค่อยเปลี่ยนเป็นการหาการรับน้ำหนักของฐานรากที่อยู่ในระดับดิน ที่มีชื่อเฉพาะว่า "ฟุตคิงแบบแถบ หรือ strip footing" ซึ่งเป็นฟุตคิงที่มีค่าอัตราส่วน ความยาวต่อความกว้างมากกว่า 5

สูตรเชิงประสมการณ์ที่นำมาใช้ครั้งแรก ๆ เป็นของ Terzaghi (1943) ที่กำหนดให้การพังทลายแบบเฉือนของมวลดินที่รับโหลดน้ำหนักของฐานรากแบบแถบ (strip footing) ลักษณะของการพังทลายได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.2 ซึ่งมีทฤษฎีมวลดินเหนียวที่มีการพังทลายแบบเปลี่ยนรูปและปริมาตรเชิงพลาสติก (plastic deformation) ปนกับการไถลเลื่อน (sliding) มวลดินเหนียวที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมตรงสามเหลี่ยมและอยู่ใต้ฐานรากโดยตรง ใช้สัญลักษณ์เป็นโซนแรกหรือโซน I มวลดินโซนนี้จะพลิกและดันมวลดินเหนียวด้านล่างออกไปทางด้านข้างเป็นโซนที่สองหรือโซน II และมวลดินโซน II ก็พลิกและดันมวลดินที่อยู่ติดกันให้โป่งพองขึ้นมา ซึ่งเป็นมวลดินโซนที่สามหรือโซน III

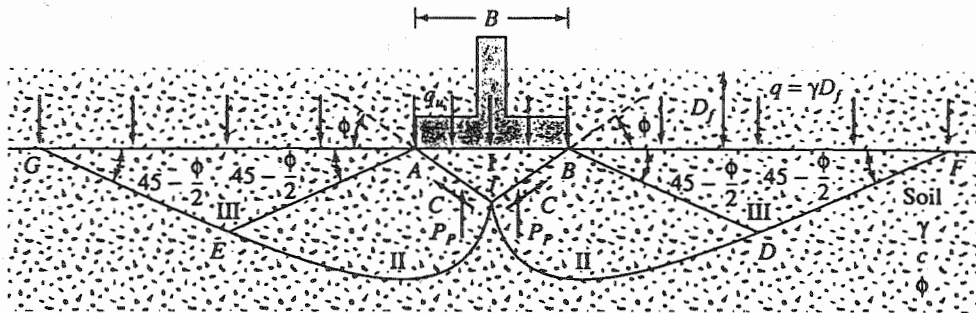
การพังทลายของมวลดินตามแบบรูปที่ 6.2 ที่เสนอแนะโดย Terzaghi เป็นการพังทลายที่มีชื่อเรียกว่า การพังทลายแบบเฉือนทั่วไป (general shear failure) จากรูปที่ 6.2 a กำหนดให้ฟุตคิงอยู่ที่ระดับลึก  $D_f$  มวลดินโซน I ที่แสดงเป็นรูปสี่เหลี่ยมตรงสามเหลี่ยม ABJ จัดอยู่ในสภาวะอิลาสติก เส้นประกอบด้านสามเหลี่ยม AJ และ BJ ทำมุม  $\phi$  (เท่ากับค่ามุมเสียดทานภายใน) กับแนวราบ โซนที่สองหรือโซน II (AJE และ BJD) เป็นโซนที่เกิดการเฉือนในแนวรัศมี ทั้งโซน I และ โซน II เป็นส่วนของโซนที่ก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวของมวลสารจัดเป็นโซนแอกทีฟ (active zones) ส่วนโซนสุดท้ายหรือโซน III (AEG และ BFD) เป็นโซนที่ต้านการเคลื่อนตัว จัดเป็นโซนพาสซีฟ (passive zones) หรือบางทีก็เรียกว่า Rankine passive zones

แนวของเส้นที่เกิดการแตกหัก (rupture line) ได้แก่ เส้น JD และ JE เป็นเส้นอาร์กของ logarithmic spiral และเส้น DF และ EG เป็นเส้นตรง เส้นตรง 4 เส้น ได้แก่ AE, BD, EG และ DF ทำมุมเท่ากับ  $(45^\circ - \phi/2)$  กับ แนวราบ

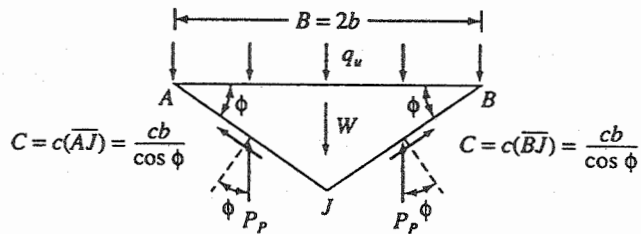
สมการของเส้นอาร์กแบบ logarithmic spiral ของเส้น JD กับ JE และค่า  $\theta$  เป็นมุมของพิกัดเชิงขั้ว (polar coordinates) มีค่าความสัมพันธ์ เป็น

$$r = r_0 e^{\theta \tan \phi} \quad (6.2)$$





a. รูปแบบจำลองการเกิดการพังทลายโดยฐานรากระดับดินแบบ "strip footing"



b. โค้ดแกรมของแรงที่วิเคราะห์ผลจากแบบจำลองรูปบน

รูปที่ 6.2 การเกิดการพังทลายของมวลดินเหนียวโดยไหลคจาก strip footing

ถ้าหากมีค่าไหลคต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ และเป็นค่าการแบกรับไหลคหรือน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (ultimate bearing capacity,  $q_u$ ) มากกระทำต่อผุดึงแล้วเกิดการพังทลายแบบเฉือนทั่วไป แรงพารซีฟ (กำหนดให้มีค่า  $P_p$ ) มากกระทำต่อผิวด้านหน้าของมวลดินรูปสี่เหลี่ยม ABJ มีผลทำให้ผนังด้านข้างทั้งสองที่อยู่บนเส้น AJ และ BJ ผลักมวลดินรูปสี่เหลี่ยมใหญ่ที่เป็นส่วนของโซน II และโซน III (สี่เหลี่ยม AJEG กับสี่เหลี่ยม BJDF) จนเกิดการพังทลาย

แนวที่ไหลค  $P_p$  กระทำควรมีค่ามุมเอียงเท่ากับ มุม  $\delta$  (ซึ่งเป็นมุมความเสียดทานของผนัง) ตั้งฉากกับผิวด้านหน้าของสี่เหลี่ยม ได้แก่ แนวเส้น AJ และ BJ นั่นคือ ค่ามุม  $\delta$  เท่ากับค่ามุมเสียดทานภายในของมวลดิน ( $\phi$ )

ในสภาวะที่สมดุล จากรูปที่ 3.2 b. ได้ความสัมพันธ์ของแรงที่กำหนดต่อค่าหนึ่ง หน่วยความยาวของฟุตคิง

$$(q_u)(2b)(1) = -W + 2c \sin \phi + 2P_p \quad (6.3)$$

กำหนดให้

$$b = B/2$$

$$W = \text{น้ำหนักของมวลดินรูปสี่เหลี่ยม } ABJ = \gamma b^2 \tan \phi$$

(ค่า  $\gamma$  เป็นค่าหน่วยน้ำหนักของมวลดิน)

$$C = \text{แรงไคฮ์ชันที่กระทำบนแต่ละผิวหน้าของ } AJ \text{ และ } BJ$$

$$= \text{หน่วยไคฮ์ชัน} \times \text{ความยาวของผิวหน้าสี่เหลี่ยม} = cb / (\cos \phi)$$

เมื่อกำหนดให้ค่าของความดันพาสซีฟ ( $P_p$ ) ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เป็นค่าผลรวมของ น้ำหนักมวลดิน โดยกำหนดให้ค่า  $c$  เป็นค่าไคฮ์ชัน และค่า  $q$  เป็นค่าน้ำหนักบรรทุกทุกสมทบ บนผิวดิน (surcharge) แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการที่ 6.3 จะได้

$$2b q_u = 2P_p + 2bc \tan \phi - \gamma b^2 \tan \phi \quad (6.4)$$

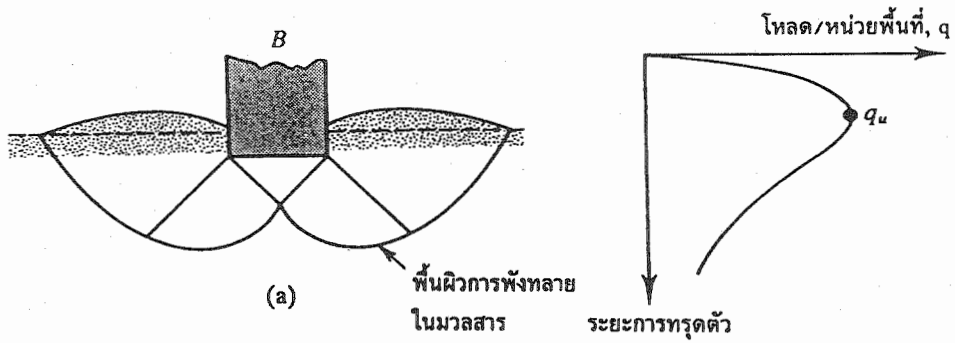
Das (1994) ได้อธิบายไคอะแกรม การกระจายค่าแรงพาสซีฟแต่ละส่วนประกอบ (component) ซึ่งเป็นผลเนื่องจากน้ำหนักของมวล เนื่องจากค่าไคฮ์ชัน และเนื่องจาก น้ำหนักบรรทุกทุกสมทบ ไว้ในหน้าที่ 471 ทำให้หาค่าของแรงพาสซีฟบนผิวดินสี่เหลี่ยมด้านใด ด้านหนึ่งเป็น

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma (b \tan \phi)^2 k_\gamma + c (b \tan \phi) k_c \quad (6.5)$$

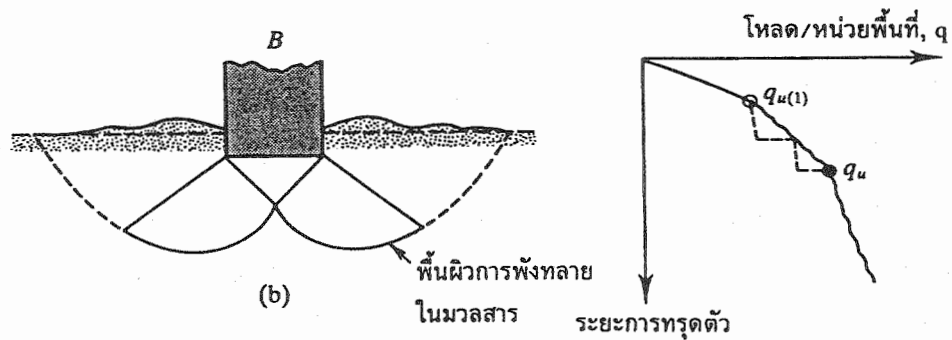
ค่าคงที่  $K_\gamma$ ,  $K_c$  และ  $K_q$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความดันดิน (earth pressure) ที่เป็นฟังก์ชันกับค่ามุมเสียดทานภายใน และการพังทลายเป็นแบบเฉือนทั่วไป (general shear failure) ที่มักเกิดในมวลดินเหนียว (ดูรูปที่ 6.3 a)

เมื่อต้องการหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกสมทบบนผิวดินที่มีค่าสูงสุด ( $q_u$ ) ทำการรวมสมการ ที่ 6.4 กับ 6.5 เข้าด้วยกัน จะได้สมการที่ใช้หาค่าของ  $q_u$  เป็น

$$q_u = c N_c + q N_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma \quad (6.6)$$



a. การพังทลายแบบ general shear failure



b. การพังทลายแบบ local shear failure

รูปที่ 6.3 การพังทลายในมวลดิน เนื่องจากแบกรับน้ำหนักผู้คดิ่งเกินความสามารถ

- a. การพังทลายมวลดินเหนียวแบบเฉือนทั่วไป
- b. การพังทลายมวลดินทรายแบบเฉือนเฉพาะแห่ง

สมการที่ 6.6 นี้ ใช้กับการพังทลายที่เป็นผลจากการกระทำของชุดคิงแบบแถบ (strip footing) ค่าตัวแปรในสมการ 6.6 ที่เป็นค่าตัวประกอบของความสามารถในการแบกรับโหลด (หรือน้ำหนักบรรทุก) ได้แก่  $N_c$ ,  $N_q$  และ  $N_\gamma$  มีความสัมพันธ์เป็น

$$N_c = \cot \phi \left[ \frac{e^{2(3\pi/4 - \phi/2)\tan \phi}}{2 \cos^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)} - 1 \right] \quad (6.7)$$

$$N_q = \frac{e^{2(3\pi/4 - \phi/2)\tan \phi}}{2 \cos^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right)} \quad (6.8)$$

ตารางที่ 6.1 ค่าของตัวประกอบเชิงการแบกรับน้ำหนัก เมื่อรับโหลดแอกทีฟ ใช้กับกรณีของการพังทลายแบบเฉือนทั่วไป

$\phi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$	$\phi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$
0	5.70	1.00	0.00	26	27.09	14.21	9.84
1	6.00	1.10	0.01	27	29.24	15.90	11.60
2	6.30	1.22	0.04	28	31.61	17.81	13.70
3	6.62	1.35	0.06	29	34.24	19.98	16.18
4	6.97	1.49	0.10	30	37.16	22.46	19.13
5	7.34	1.64	0.14	31	40.41	25.28	22.65
6	7.73	1.81	0.20	32	44.04	28.52	26.87
7	8.15	2.00	0.27	33	48.09	32.23	31.94
8	8.60	2.21	0.35	34	52.64	36.50	38.04
9	9.09	2.44	0.44	35	57.75	41.44	45.41
10	9.61	2.69	0.56	36	63.53	47.16	54.36
11	10.16	2.98	0.69	37	70.01	53.80	65.27
12	10.76	3.29	0.85	38	77.50	61.55	78.61
13	11.41	3.63	1.04	39	85.97	70.61	95.03
14	12.11	4.02	1.26	40	95.66	81.27	115.31
15	12.86	4.45	1.52	41	106.81	93.85	140.51
16	13.68	4.92	1.82	42	119.67	108.75	171.99
17	14.60	5.45	2.18	43	134.58	126.50	211.56
18	15.12	6.04	2.59	44	151.95	147.74	261.60
19	16.56	6.70	3.07	45	172.28	173.28	325.34
20	17.69	7.44	3.64	46	196.22	204.19	407.11
21	18.92	8.26	4.31	47	224.55	241.80	512.84
22	20.27	9.19	5.09	48	258.28	287.85	650.67
23	21.75	10.23	6.00	49	297.71	344.63	831.99
24	23.36	11.40	7.08	50	347.50	415.14	1072.80
25	25.13	12.72	8.34				

ตารางที่ 6.2 ค่าของตัวประกอบเชิงการแมกรับน้ำหนักที่ปรับปรุงใหม่  
ใช้กับกรณีของการพังหลายแบบเฉือนเฉพาะแห่ง

$\phi$	$N'_c$	$N'_q$	$N'_\gamma$	$\phi$	$N'_c$	$N'_q$	$N'_\gamma$
0	5.70	1.00	0.000	26	15.53	6.05	2.590
1	5.90	1.07	0.005	27	16.30	6.54	2.880
2	6.10	1.14	0.020	28	17.13	7.07	3.290
3	6.30	1.22	0.040	29	18.03	7.66	3.760
4	6.51	1.30	0.055	30	18.99	8.31	4.390
5	6.74	1.39	0.074	31	20.03	9.03	4.830
6	6.97	1.49	0.100	32	21.16	9.82	5.510
7	7.22	1.59	0.128	33	22.39	10.69	6.320
8	7.47	1.70	0.160	34	23.72	11.67	7.220
9	7.74	1.82	0.200	35	25.18	12.75	8.350
10	8.02	1.94	0.240	36	26.77	13.97	9.410
11	8.32	2.08	0.300	37	28.51	15.32	10.900
12	8.63	2.22	0.350	38	30.43	16.85	12.750
13	8.96	2.38	0.420	39	32.53	18.56	14.710
14	9.31	2.55	0.480	40	34.87	20.50	17.220
15	9.67	2.73	0.570	41	37.45	22.70	19.750
16	10.06	2.92	0.670	42	40.33	25.21	22.500
17	10.47	3.13	0.760	43	43.54	28.06	26.250
18	10.90	3.36	0.880	44	47.13	31.34	30.400
19	11.36	3.61	1.030	45	51.17	35.11	36.000
20	11.85	3.88	1.120	46	55.73	39.48	41.700
21	12.37	4.17	1.350	47	60.91	44.54	49.300
22	12.92	4.48	1.550	48	66.80	50.46	59.250
23	13.51	4.82	1.740	49	73.55	57.41	71.450
24	14.14	5.20	1.970	50	81.31	65.60	85.750
25	14.80	5.60	2.250				

ถ้าหากกำหนดให้  $K_{p\gamma}$  เท่ากับ ค่าสัมประสิทธิ์ความดันแบบพาสซีฟ (passive pressure coefficient) จะได้

$$N_\gamma = \frac{1}{2} \left[ \frac{K_{p\gamma}}{\cos^2 \phi} - 1 \right] \tan \phi \quad (6.9)$$

สมการที่ 6.7, 6.8, 6.9 เป็นผลเนื่องจากโคฮีชัน, น้ำหนักบรรทุกสมทบ, หน่วยน้ำหนักของดิน ตามลำดับ Kumbhojkar (1993) ได้วิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อแสดงค่าของตัวประกอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก เมื่อมุมเสียดทานภายในเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละช่วงเท่ากับ 1 องศา (ดูตารางที่ 6.1 ประกอบ) ทำให้การคำนวณรวดเร็วขึ้น

ในการที่จะประยุกต์ใช้สมการที่ 6.6 กับฟุตคิงที่เป็นแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส (square footing) กับฟุตคิงที่เป็นแบบวงกลม (circular footing) จะหาค่าประมาณของไหลดการแบกรับน้ำหนักสูงสุดตามแต่ละกรณีเป็น

กรณีของฟุตคิงแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส

$$q_u = 1.3 c N_c + q N_q + 0.4 \gamma B N_\gamma \quad (6.10)$$

ค่าของ B เท่ากับมิติแต่ละด้านของฟุตคิงทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

กรณีของฟุตคิงแบบวงกลม

$$q_u = 1.3 c N_c + q N_q + 0.3 \gamma B N_\gamma \quad (6.11)$$

ค่าของ B เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของฟุตคิงวงกลม

สมการที่ 6.6, 6.10, 6.11 เป็นสมการที่ใช้กับการพังทลายแบบเฉือนทั่วไป (general shear failure) ถ้าหากต้องการให้ประยุกต์ใช้กับการพังทลายแบบเฉือนเฉพาะแห่ง (local shear failure) Terzaghi เสนอสมการเชิงประสพการณ์เป็น

กรณีของฟุตคิงแบบแถบ

$$q_u = \frac{2}{3} c N'_c + q N'_q + \frac{1}{2} \gamma B N'_\gamma \quad (6.12)$$

กรณีของฟุตคิงแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส

$$q_u = 0.867 c N'_c + q N'_q + 0.4 \gamma B N'_\gamma \quad (6.13)$$

กรณีของฟุตคิงแบบวงกลม

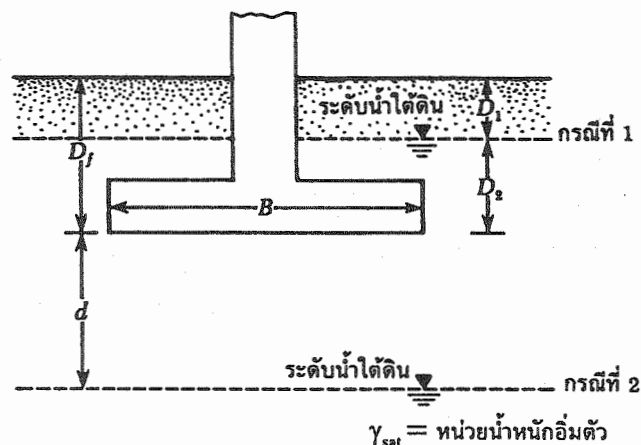
$$q_u = 0.867 c N'_c + q N'_q + 0.3 \gamma B N'_\gamma \quad (6.14)$$

สัญลักษณ์ที่ใช้แทนค่าประกอบของความสามารถในการแบกรับน้ำหนักบรรทุกจะเปลี่ยนไปจากเดิม เป็น  $N'_c$ ,  $N'_q$ ,  $N'_\gamma$  ตามลำดับ ซึ่งหมายถึง ตัวประกอบเชิงความสามารถในการแบกรับน้ำหนักบรรทุกที่ได้ปรับปรุงใหม่ (modified bearing capacity factors) ซึ่งหามาได้จากการทำการคำนวณค่าเดิมของ  $N_c$ ,  $N_q$ ,  $N_\gamma$  โดยใช้การแทนค่าของ  $\phi$  ด้วย  $\phi'$  โดยที่  $\phi' = \arctan\left(\frac{2}{3} \tan \phi\right)$

ในกรณีที่ต้องการความสะดวกในการทำการคำนวณ ค่าของตัวประกอบเหล่านี้ได้ระบุไว้ในตารางที่ 3.2 ในกรณีที่ค่ามุมเสียดทานภายในแปรเปลี่ยนไปครั้งละ 1 องศา

#### 6.4 การแบกรับน้ำหนักของมวลดินเมื่อมีน้ำใต้ดินเข้ามาเกี่ยวข้อง

สมการเชิงประสมการณ์ของการพังทลายแบบเฉือนทั่วไปที่เสนอแนะโดย Terzaghi และได้ระบุไว้ในหัวข้อ 6.2 (สมการที่ 6.6, 6.10, 6.11) มีสมมุติฐานมาจากการที่ระดับน้ำบาดาลอยู่ต่ำกว่าจุดที่ตั้งของฐานรากมาก ในเชิงการปฏิบัติงานจริง ความเกี่ยวข้องของระดับน้ำบาดาลกับจุดที่ตั้งฐานรากอาจเป็นไปได้หลายแบบ (ดูรูปที่ 6.4 ข้างล่าง)



รูปที่ 6.4 การแปรเปลี่ยนของระดับน้ำบาดาลเมื่อเทียบกับระดับความลึกของฐานราก

การแปรเปลี่ยนของระดับน้ำบาดาล ที่มีผลกระทบต่อค่าความสามารถในการแบกรับ น้ำหนักของมวลดิน มีโอกาสเป็นไปได้ 3 กรณี

#### กรณีที่หนึ่ง

เมื่อสมมุติให้  $D_1$  เป็นความลึกของระดับน้ำบาดาล (เมื่อเทียบกับผิวดิน) ค่า  $D_2$  เป็นความลึกของฐานราก (เมื่อเทียบกับเส้นระดับน้ำบาดาล) ดังนั้นค่า  $D_f$  เป็นผลรวมของค่า ( $D_1 + D_2$ )

ถ้าค่า  $0 \leq D_1 \leq D_f$  จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อค่าตัวประกอบ  $q$  ที่สมมุติให้เป็น ค่าการรับน้ำหนักบรรทุกทุกสมทบเชิงประสิทธิผล (effective surcharge) เนื่องจากมี น้ำใต้ดิน เข้ามาเกี่ยวข้อง ได้ความสัมพันธ์เป็น

$$q = D_1 \gamma + D_2 (\gamma_{sat} - \gamma_w) \quad (6.15)$$

เมื่อกำหนดให้  $\gamma_{sat}$  เป็นค่าหน่วยน้ำหนักอิ่มตัวของดิน และ  $\gamma_w$  เป็นค่าหน่วย น้ำหนักของน้ำ และค่าหน่วยน้ำหนักของดินต้องมีสัญลักษณ์ใหม่ เป็น  $\gamma'$  แสดงถึงหน่วย น้ำหนักดินเชิงประสิทธิผล ( $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ )

#### กรณีที่สอง

ถ้าหากค่า  $0 \leq d \leq B$  [ค่า  $d$  เป็นค่าระดับความลึกจากจุดที่ตั้งฐานรากเหนือ ระดับน้ำใต้ดินมายังระดับน้ำบาดาล ส่วนค่า  $B$  เป็นมิติความกว้างของฐานราก] จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อค่าตัวประกอบ  $q$  ที่สมมุติให้เป็นค่าการรับน้ำหนักบรรทุกทุกสมทบเชิง ประสิทธิภาพ ได้ความสัมพันธ์เป็น

$$q = \bar{\gamma} D_f \quad (6.16)$$

ค่าตัวประกอบ  $\bar{\gamma}$  ในสมการที่ 6.16 เป็นค่าเฉลี่ยของหน่วยน้ำหนักดิน โดยหาได้จากสมการข้างล่างที่ไม่มีแรงการไหลซึมของน้ำใต้ดิน (seepage force) มาเกี่ยวข้อง

$$\bar{\gamma} = \gamma' + \frac{d}{B} (\gamma - \gamma') \quad (6.17)$$

#### กรณีที่สาม

ถ้าหากค่า  $d \geq B$  แสดงว่าค่าระดับความลึกอยู่สูงมากจนกระทั่งระดับน้ำใต้ดิน ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อค่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของมวลดิน



### 6.5 สมการทั่วไปของการหาค่าความสามารถในการแบกรับน้ำหนัก

สมการที่ 6.6, 6.10, 6.11 เป็นสมการที่ใช้กับฐานรากเฉพาะอย่าง ได้แก่ ใช้ได้กับกรณีของ strip or continuous foundation, square foundation, circular foundation แต่ไม่ได้ใช้กับกรณีของ ฐานรากแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular foundation) ที่มีค่า  $0 < B/L < 1$  [ค่า B เป็นค่าความกว้างของ ฐานราก ส่วนค่า L เป็นความยาวของฐานราก] และยังมีข้อกำหนดอื่นที่ยังขาดไปอีก

ตารางที่ 6.3 ค่าของตัวประกอบเชิงการแบกรับน้ำหนักที่ปรับปรุงใหม่ สำหรับสมการของ Meyerhof (สมการที่ 6.18)

$\phi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$	$N_q/N_c$	$\tan \phi$	$\phi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$	$N_q/N_c$	$\tan \phi$
0	5.14	1.00	0.00	0.19	0.00	26	22.25	11.85	12.54	0.53	0.49
1	5.38	1.09	0.07	0.20	0.02	27	23.94	13.20	14.47	0.55	0.51
2	5.63	1.20	0.15	0.21	0.03	28	25.80	14.72	16.72	0.57	0.53
3	5.90	1.31	0.24	0.22	0.05	29	27.86	16.44	19.34	0.59	0.55
4	6.19	1.43	0.34	0.23	0.07	30	30.14	18.40	22.40	0.61	0.58
5	6.49	1.57	0.45	0.24	0.09	31	32.67	20.63	25.99	0.63	0.60
6	6.81	1.72	0.57	0.25	0.11	32	35.49	23.18	30.22	0.65	0.62
7	7.16	1.88	0.71	0.26	0.12	33	38.64	26.09	35.19	0.68	0.65
8	7.53	2.06	0.86	0.27	0.14	34	42.16	29.44	41.06	0.70	0.67
9	7.92	2.25	1.03	0.28	0.16	35	46.12	33.30	48.03	0.72	0.70
10	8.35	2.47	1.22	0.30	0.18	36	50.59	37.75	56.31	0.75	0.73
11	8.80	2.71	1.44	0.31	0.19	37	55.63	42.92	66.19	0.77	0.75
12	9.28	2.97	1.69	0.32	0.21	38	61.35	48.93	78.03	0.80	0.78
13	9.81	3.26	1.97	0.33	0.23	39	67.87	55.96	92.25	0.82	0.81
14	10.37	3.59	2.29	0.35	0.25	40	75.31	64.20	109.41	0.85	0.84
15	10.98	3.94	2.65	0.36	0.27	41	83.86	73.90	130.22	0.88	0.87
16	11.63	4.34	3.06	0.37	0.29	42	93.71	85.38	155.55	0.91	0.90
17	12.34	4.77	3.53	0.39	0.31	43	105.11	99.02	186.54	0.94	0.93
18	13.10	5.26	4.07	0.40	0.32	44	118.37	115.31	224.64	0.97	0.97
19	13.93	5.80	4.68	0.42	0.34	45	133.88	134.88	271.76	1.01	1.00
20	14.83	6.40	5.39	0.43	0.36	46	152.10	158.51	330.35	1.04	1.04
21	15.82	7.07	6.20	0.45	0.38	47	173.64	187.21	403.67	1.08	1.07
22	16.88	7.82	7.13	0.46	0.40	48	199.26	222.31	496.01	1.12	1.11
23	18.05	8.66	8.20	0.48	0.42	49	229.93	265.51	613.16	1.15	1.15
24	19.32	9.60	9.44	0.50	0.45	50	266.89	319.07	762.89	1.20	1.19
25	20.72	10.66	10.88	0.51	0.47						

Meyerhof (1963) ได้เสนอแนะสมการเชิงประสมการณที่ใช้ได้ทั่วไปสำหรับการหาค่าความสามารถในการแบกรับน้ำหนักสูงสุดของมวลดิน ดังนี้

$$q_u = c N_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + q N_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i} \quad (6.18)$$

กำหนดให้

- $c$  = ค่าโคฮีชัน
- $q_u$  = ความเค้นเชิงประสิทธิผลที่ระดับล่างสุดของฐานราก
- $\gamma$  = หน่วยน้ำหนักของมวลดิน
- $B$  = ความกว้าง (หรือเส้นผ่านศูนย์กลาง) ของฐานราก
- $F_{cs}, F_{qs}, F_{\gamma s}$  = ตัวประกอบเชิงรูปร่าง (shape factors)
- $F_{cd}, F_{qd}, F_{\gamma d}$  = ตัวประกอบเชิงความลึก (depth factors)
- $F_{ci}, F_{qi}, F_{\gamma i}$  = ตัวประกอบเชิงความลาดเอียงของไหล (load inclination factors)
- $N_c, N_q, N_\gamma$  = ตัวประกอบเชิงความสามารถรับไหล (bearing capacity factors)

สมการที่ 6.18 เป็นสมการที่ต้องใช้ค่าตัวเลขจากการทดสอบในสนาม และค่าตัวแปรสมมุติอื่นประกอบ ได้แก่

#### 6.5.1 ตัวประกอบของความสามารถในการรับน้ำหนัก

Vesic (1973) ได้เสนอแนะการปรับปรุงสมการเชิงประสมการณดั้งเดิมของ Terzaghi โดยเปลี่ยนค่ามุมของรูปกลมในรูปที่ 3.2 b จากค่ามุม  $\phi$  ในไดอะแกรมเป็นมุม  $(45^\circ + \phi/2)$  จึงทำให้ได้ค่าของตัวประกอบเชิงความสามารถในการรับไหล (น้ำหนักบรรทุก) ของค่าใหม่เป็น

$$N_q = \tan^2 \left[ 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right] e^{\pi \tan \phi} \quad (6.19)$$

$$N_c = [N_q - 1] \cot \phi \quad (6.20)$$

$$N_\gamma = 2 [N_q + 1] \tan \phi \quad (6.21)$$

ตารางที่ 6.4 ผลเฉลยของค่าตัวประกอบเชิงรูปร่าง ความลึก และแนวเอียงเท่ากับโหลด

Factor	Relationship
Shape <sup>a</sup>	$F_{cs} = 1 + \frac{B N_q}{L N_c}$ $F_{qs} = 1 + \frac{B}{L} \tan \phi$ $F_{\gamma s} = 1 - 0.4 \frac{B}{L}$ <p>where L = length of the foundation (L &gt; B)</p>
Depth <sup>b</sup>	<p>Condition (a) : <math>D_f / B \leq 1</math></p> $F_{cd} = 1 + 0.4 \frac{D_f}{B}$ $F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \frac{D_f}{B}$ $F_{\gamma d} = 1$ <p>Condition (b) : <math>D_f / B &gt; 1</math></p> $F_{cd} = 1 + (0.4) \tan^{-1} \left( \frac{D_f}{B} \right)$ $F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \tan^{-1} \left( \frac{D_f}{B} \right)$ $F_{\gamma d} = 1$
Inclination	$F_{\alpha} = F_{\alpha'} = \left( 1 - \frac{\beta^\circ}{90^\circ} \right)^2$ $F_{\gamma i} = \left( 1 - \frac{\beta}{\phi} \right)^2$ <p>where <math>\beta</math> = inclination of the load on the foundation with respect to the vertical</p>
<sup>a</sup>	These shape factors are empirical relations based on extensive laboratory
<sup>b</sup>	The factor $\tan^{-1}(D_f/B)$ is in radians

ถ้าหากกำหนดค่าเชิงตัวเลขของตัวประกอบความสามารถในเชิงการแบกรับน้ำหนักนี้ ตามค่าของมุมเสียดทานภายในที่แปรเปลี่ยนไปแต่ละ 1 องศา ได้ระบุไว้ในตารางที่ 6.3 หน้า 141

### 6.5.2 ตัวประกอบอื่นที่มีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนัก

ตัวประกอบอื่นที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการแบกรับน้ำหนัก ได้แก่ ตัวประกอบในเรื่องรูปร่าง ความลึก และแนวมุมเอียงของไหลต Das (1995) ได้รวบรวมจากค่าที่เสนอแนะโดยนักวิจัยหลายท่านให้ใช้หาค่าตัวแปรของสมการที่ 6.18 ดังได้ระบุไว้ในตารางที่ 6.4 ของหน้า 143

### 6.5.3 ค่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสุทธิ

นิยามของค่าความสามารถในการรับไหลคหรือน้ำหนักบรรทุกสุทธิ (net ultimate bearing capacity) คือค่ากำลังความสามารถของมวลดินสูงสุด ในการรองรับค่าความดันต่อหน่วยพื้นที่ ณ ที่ระดับฐานรากวางตัว ถ้าหากตั้งสมมุติฐานว่า ความแตกต่างระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตที่ใช้ทำฐานราก กับค่าหน่วยน้ำหนักของมวลดินรอบฐานราก มีค่าที่ละได้ (negligible) ถ้าหากกำหนดให้  $q_{net(u)}$  = ค่าความสามารถในการแบกรับน้ำหนักบรรทุกสุทธิ จะ ได้ความสัมพันธ์

$$q_{net(u)} = q_u - q \quad (6.22)$$

เมื่อจะประยุกต์ใช้กับสภาพสนาม ในกรณีที่ระดับน้ำบาดาลอยู่ที่ระดับของตำแหน่งที่วางฐานราก หรือในกรณีที่ระดับน้ำบาดาลอยู่ใกล้กับฐานรากมาก สมการทั่วไปในการหาค่าความสามารถในการแบกรับน้ำหนักบรรทุก (สมการที่ 6.18) ต้องมีการปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับสภาพในสนาม

ถ้าหากกำหนดให้ มวลดินอยู่ในสภาวะไม่มีการคายน้ำ (undrained condition) นั่นคือค่าความเสียดทานภายในเป็นศูนย์ เช่นมวลดินเหนียว และไหลคกระทำในแนวตั้ง ค่าความสามารถในการแบกรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดก็จะแปรเปลี่ยนไปเป็น

$$q_u = c(N_c F_{cs} F_{cd}) + q \quad (6.23)$$

ดังนั้นจึงหาค่าของความสามารถในการแบกรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดสุทธิ เป็น

$$q_{net(u)} = q_u - q = c(N_c F_{cs} F_{cd}) \quad (6.24)$$

### 6.6 ค่าปัจจัยความปลอดภัย

จากการคำนวณค่าความสามารถรับโหลดที่ยอมให้ได้ทั้งหมด (gross allowable load bearing capacity) เทียบกับค่าความสามารถรับโหลดสูงสุดทั้งหมด (gross ultimate bearing capacity) จะทำให้ได้ค่าปัจจัยความปลอดภัย เป็น

$$F = \frac{q_u}{q_{\text{allowable}}} \quad (6.25)$$

ในเชิงปฏิบัติ วิศวกรนิยมใช้ค่าความเค้นสุทธิที่เพิ่มขึ้นในมวลดิน (net stress increase on soil) เป็นสิ่งเปรียบเทียบกับค่าความสามารถแบกรับน้ำหนักสูงสุดสุทธิ (net ultimate bearing capacity) นั่นคือ

$$F = \frac{q_{\text{net}(u)}}{q_{\text{allowable}}(\text{net})} \quad (6.26)$$

ค่าของปัจจัยความปลอดภัย (F) ค่าสุด ควรมีค่าเท่ากับ 3

การหาค่า F อีกแนวทางหนึ่ง ได้มาจากการหาโอกาสของการพังทลายเนื่องจากการเฉือน (shear failure) หรือใช้สัญลักษณ์  $F_{\text{shear}}$  ในเชิงปฏิบัติใช้ค่าระหว่าง 1.4 - 1.6

Das (1995) ได้เสนอแนวทางที่จะหาค่าความสามารถในการรับโหลดสูงสุดสุทธิจากค่ากำลังเฉือนของมวลดิน โดยมีลำดับขั้นตอนต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ถ้าหากสมมติให้  $c$  เป็นค่าโคฮีชัน  $\phi$  เป็นค่ามุมเสียดทานภายในของมวลดิน และค่า  $F_{\text{shear}}$  เป็นตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยซึ่งเป็นผลมาจากการพังทลายแบบเฉือน ทำให้ได้ค่าโคฮีชันขณะนั้น (developed cohesion,  $c_d$ ) กับค่ามุมเสียดทานภายในขณะนั้น (developed friction angle,  $\phi_d$ ) มีค่าเป็น

$$c_d = \frac{c}{F_{\text{shear}}} \quad (6.27)$$

$$\phi_d = \arctan \left[ \frac{\tan \phi}{F_{\text{shear}}} \right] \quad (6.28)$$

ขั้นตอนที่ 2 ค่าของความสามารถในการรับโหลดที่ยอมได้ จะหาได้จากสมการที่ 6.6, 6.10, 6.11 หรือจากสมการที่ 6.18 แต่ค่าของคุณสมบัติดินที่เกี่ยวข้องกับกำลังเฉือนควรใช้ค่า  $c_d$ ,  $\phi_d$ .

นั่นคือกรณีของ strip or continuous foundation สมการที่ใช้คำนวณหาค่าความสามารถการแบกรับน้ำหนักบรรทุก คือ

$$q_{\text{allowable}} = c_d N_c + q N_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma \quad (6.29)$$

$$\begin{aligned} q_{\text{allowable (net)}} &= q_{\text{allowable}} - q \\ &= c_d N_c + q(N_q - 1) + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma \end{aligned} \quad (6.30)$$

### 6.7 ผลเฉลยที่ไหลคเฉียงศูนย์กลางของฐานราก

ในหลายกรณี นอกจากไหลคที่กระทำต่อฐานรากในแนวคิ่ง ฐานรากยังถูกแรงที่เกิดจากผลของโมเมนต์มากกระทำ ทำให้การแผ่กระจายความคั้นที่เกิดจากฐานราก ไม่เท่ากัน

ค่าการแผ่กระจายความคั้นระบุ (nominal pressure,  $q$ ) มีค่าเป็น

$$q_{\text{max}} = \left( \frac{Q}{BL} \right) + \left( \frac{6M}{B^2 L} \right) \quad (6.31)$$

$$q_{\text{min}} = \left( \frac{Q}{BL} \right) - \left( \frac{6M}{B^2 L} \right) \quad (6.32)$$

ค่าของ  $Q$  เป็นค่าไหลคในแนวคิ่ง ส่วนค่า  $M$  เป็นค่าโมเมนต์ที่กระทำบนฐานราก

การที่จะหาค่าปัจจัยความปลอดภัยจากกรณีที่ไหลคมีค่าแนวเฉียงศูนย์กลาง ต้องหาจากวิธีหาพื้นที่ประสิทธิผล (effective area) ที่เสนอแนะโดย Meyerhof (1953) มีขั้นตอนของการคำนวณ (ที่อาศัยรูปที่ 6.5 หน้า 147 ประกอบ) หลายขั้นตอน คังต่อไปนี้

#### ขั้นตอนที่ 1

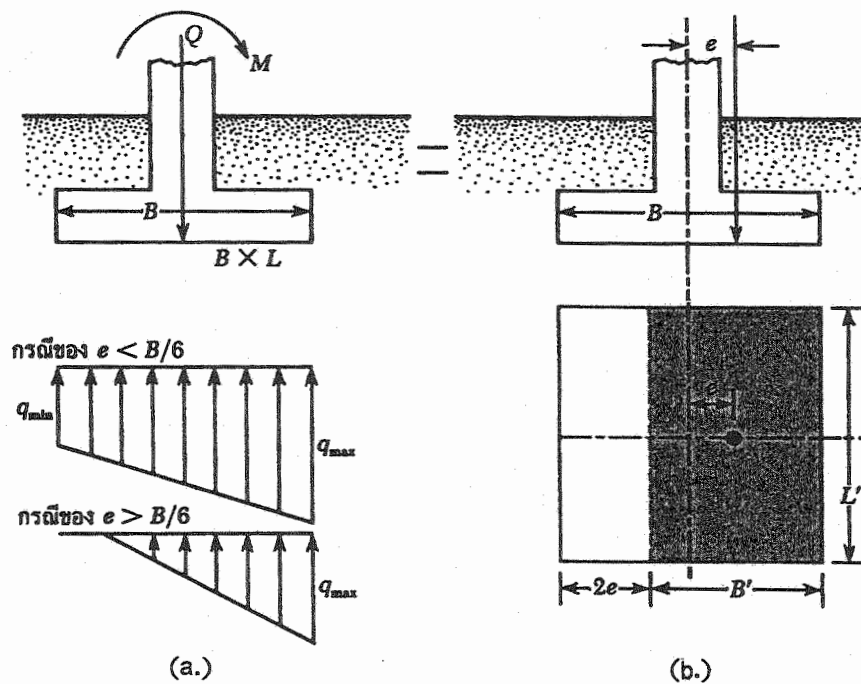
จากรูปที่ 6.5 a แสดงระบบแรงที่สมมูล (equivalent) กับระบบแรงที่แสดงในรูปที่ 6.5 a กำหนดให้ ค่า  $e$  ในรูปที่ 6.5 เท่ากับ ค่าความเฉียงศูนย์กลาง โดยที่

$$e = \frac{M}{Q} \quad (6.33)$$

ทำให้ได้ค่าการแผ่กระจายความดันใหม่เป็น

$$q_{\max} = \left( \frac{Q}{BL} \right) \left[ 1 + \left\{ \frac{6E}{B} \right\} \right] \quad (6.34)$$

$$q_{\min} = \left( \frac{Q}{BL} \right) \left[ 1 - \left\{ \frac{6E}{B} \right\} \right] \quad (6.35)$$



รูปที่ 6.5 โหลดที่กระทำเชิงศูนย์กลางฐานราก

ในสมการที่ 6.34 กับ 6.35 นี้ ถ้าหากค่า  $e$  เป็น  $B/6$  มีผลทำให้ค่า  $q_{min}$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ในทางกลับกัน ถ้าค่า  $e > B/6$  ค่าของ  $q_{min}$  มีค่าเป็นลบ นั่นคือ เกิดแรงดึง (tension) ขึ้น อย่างไรก็ตาม มวลดินไม่รับแรงดึงจึงมีผลทำให้ฐานราก แยกออกจากมวลดิน

ผลของความดันกระจายในดินที่แสดงในรูป 3.5 ก. ทำให้หาค่า  $q_{max}$  ออกได้เป็น

$$q_{max} = \frac{(4Q)}{3L(B - 2e)} \quad (6.36)$$

### ขั้นตอนที่ 2

ทำการกำหนดค่าใหม่เพื่อหาปริมาตรผลของฐานราก ได้แก่

$$B' = \text{ความกว้างประสิทธิภาพ} = B - 2e$$

$$L' = \text{ความยาวประสิทธิภาพ} = L$$

ถ้าความเยื้องศูนย์กลางอยู่ในทิศทางของความยาวฐานราก ค่าของ  $L'$  ก็จะมีค่าเท่ากับ  $(L - 2e)$  และค่าของ  $B'$  จะมีค่าเท่ากับ  $B$  ตัวเลขมิติที่น้อยกว่าระหว่าง  $L'$  กับค่า  $B'$  ถูกเลือกให้เป็น ความกว้างประสิทธิภาพ (effective width) ของ ฐานราก

### ขั้นตอนที่ 3

จากสมการ 3.18 ที่ใช้หาค่าความสามารถในการแบกรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด จะได้ ค่าความสามารถแบกรับน้ำหนักสูงสุดเชิงประสิทธิภาพ เป็น

$$q'_u = c N_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + q N_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B' N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i} \quad (6.37)$$

### ขั้นตอนที่ 4

เมื่อต้องการหาค่าไหลคสูงสุดทั้งหมด (total ultimate load,  $Q_u$ ) สามารถ คำนวณหาได้ เมื่อกำหนดให้  $A'$  เป็นค่าของพื้นที่ประสิทธิภาพ =  $(B')(L')$

$$Q_u = q'_u \overbrace{(B')(L')}^{A'} \quad (6.38)$$



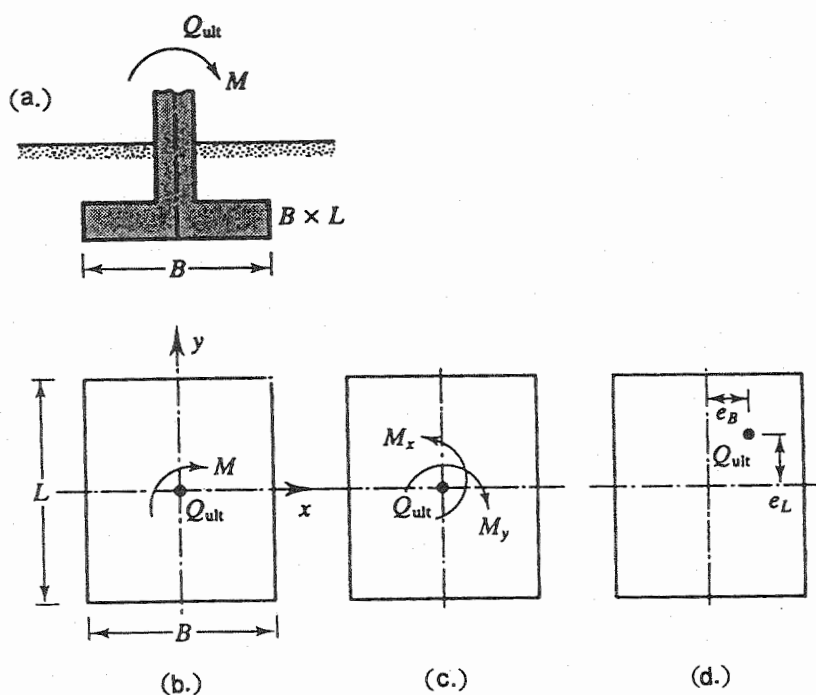
### ขั้นตอนที่ 5

ดังนั้นจึงหาค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยได้จาก

$$F = \frac{Q_u}{Q} \quad (6.39)$$

### 6.8 ผลเฉลยที่ไหลคสองแนวเยื้องศูนย์กลางของฐานราก

ในกรณีที่ฐานรากมีไหลคมากจะทำให้เกิดการเยื้องศูนย์กลาง และมีแนวไหลคนี้มากกว่า 1 แนว การวิเคราะห์ปัญหาจะยุ่งยากซับซ้อนมากขึ้น



รูปที่ 6.6 การวิเคราะห์แรงที่กระทำเยื้องศูนย์กลางฐานราก 2 แนว

เริ่มต้นของการวิเคราะห์ สมมติให้ฐานรากถูกกระทำด้วยค่าโหดสูงสุดในแนวตั้ง และเกิดโมเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 6.6 กำหนดให้ส่วนประกอบของโมเมนต์รอบแกน  $x$  และแกน  $y$  มีค่าเท่ากับ  $M_x$  กับ  $M_y$  ตามลำดับ เมื่อมีโหดของ  $Q_u$  กระทำกับฐานราก ตรงส่วนของ  $x = e_B$  และ  $y = e_L$  (ดูรูปที่ 6.6 d) นั่นคือ

$$e_B = \frac{M_y}{Q_u} \quad (6.40)$$

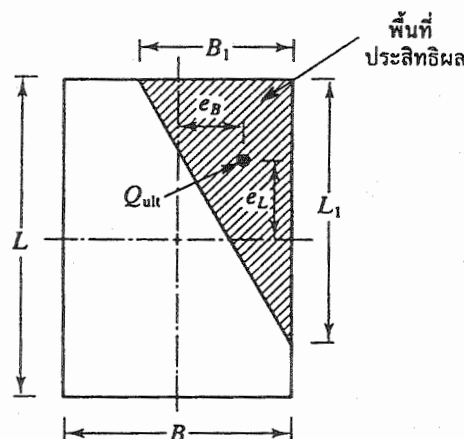
$$e_L = \frac{M_x}{Q_u} \quad (6.41)$$

การที่จะหาค่าของ  $F_{cs}$ ,  $F_{qs}$  และ  $F_{\gamma s}$  จากที่ระบุไว้ในตารางที่ 6.4 ควรใช้ค่า มิติของความยาวประสิทธิภาพ ( $L'$ ) และความกว้างประสิทธิภาพ ( $B'$ ) แทนที่จะใช้ค่ามิติ ของ  $L$  กับ  $B$  แต่เมื่อจะหาค่าตัวแปร  $F_{cs}$ ,  $F_{qs}$  และ  $F_{\gamma s}$  อย่างแทนค่า  $B$  ด้วย  $B'$

ค่าของตัวแปรอื่นอีกสามค่า ได้แก่ พื้นที่ประสิทธิภาพ ( $A'$ ) ความกว้างประสิทธิภาพ ( $B'$ ) และความยาวประสิทธิภาพ ( $L'$ ) จำเป็นต้องแยกพิจารณาออกเป็น 4 กรณี

#### กรณีที่ 1

ถ้าหากค่าอัตราส่วนของ  $\frac{e_L}{L} \geq \frac{1}{6}$  และ  $\frac{e_B}{B} \geq \frac{1}{6}$  จะสามารถ หาค่าของพื้นที่ประสิทธิภาพในรูปที่ 6.7 ข้างล่างได้



รูปที่ 6.7 การหาพื้นที่ประสิทธิภาพของกรณีที่ 1

ความสัมพันธ์จากโคะแกรมของรูปที่ 6.7 คือ

$$A' = \frac{1}{2} B_1 L_1 \quad (6.42)$$

ค่าตัวแปรของ  $B_1$  และ  $L_1$  หาได้จาก

$$B_1 = B \left[ 1.5 - \left\{ \frac{3e_B}{B} \right\} \right] \quad (6.43)$$

$$L_1 = B \left[ 1.5 - \left\{ \frac{3e_L}{L} \right\} \right] \quad (6.44)$$

ตามปกติค่าของความยาวประสิทธิผล  $L'$  จะกำหนดมาจากค่าที่มากกว่าระหว่างค่าของ  $B_1$  หรือ  $L_1$  ดังนั้นจะหาค่าของความกว้างประสิทธิผลเป็น

$$B' = \frac{A'}{L'} \quad (6.45)$$

### กรณีที่ 2

ถ้าหากค่าอัตราส่วนของ  $e_L/L < 0.5$  และค่า  $0 < e_B/B < 1/6$  จะหาค่าพื้นที่ประสิทธิผลจากรูปที่ 6.8 a ได้ความสัมพันธ์คือ

$$A' = \frac{1}{2} [L_1 + L_2] B \quad (6.46)$$

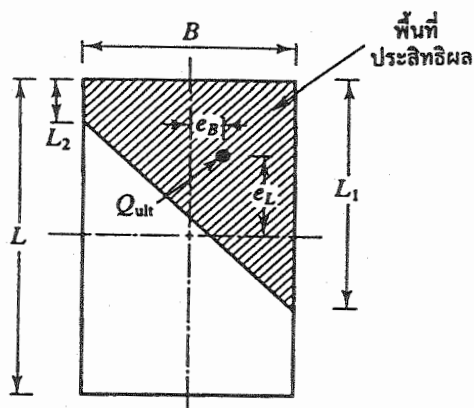
แต่เมื่อต้องการหาขนาดหรือแมกนิจูดของ  $L_1$  และ  $L_2$  ก็ต้องใช้รูปที่ 6.8 b ประกอบ ทำให้ได้ความสัมพันธ์ที่เป็นแบบเงื่อนไข ดังนี้

ค่าของความกว้างประสิทธิผล

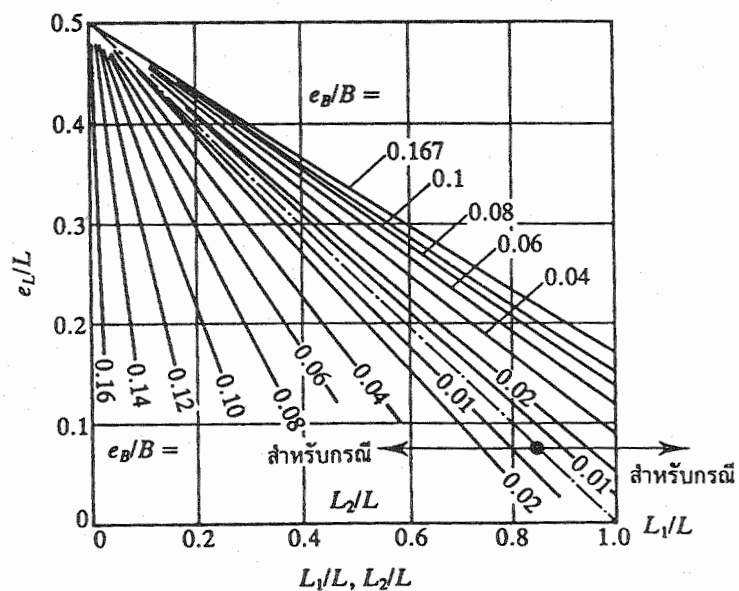
$$B' = \frac{A'}{L_1 \text{ หรือ } L_2 \text{ (เลือกมิติที่ใหญ่กว่า)}} \quad (6.47)$$

ค่าของความยาวประสิทธิผล

$$L' = L_1 \text{ หรือ } L_2 \text{ (เลือกมิติที่ใหญ่กว่า)} \quad (6.48)$$

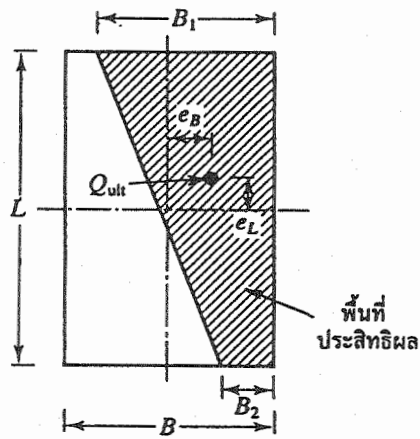


a. พื้นที่ประสิทธิภาพของกรณีที่ 2

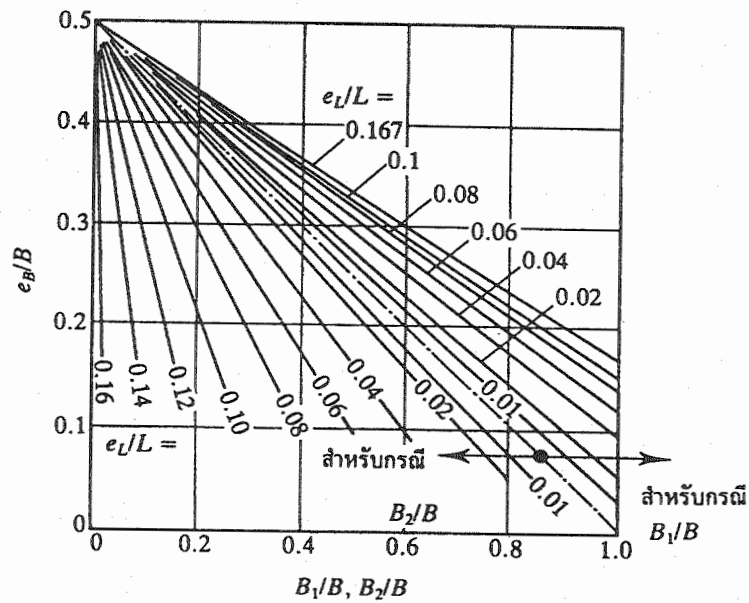


b. กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนที่เกี่ยวกับการเอียงศูนย์กลางของกรณีที่ 2

รูปที่ 6.8 การหาค่าผลเฉลยจากพื้นที่ประสิทธิภาพและค่าอัตราส่วนของกรณีที่ 2

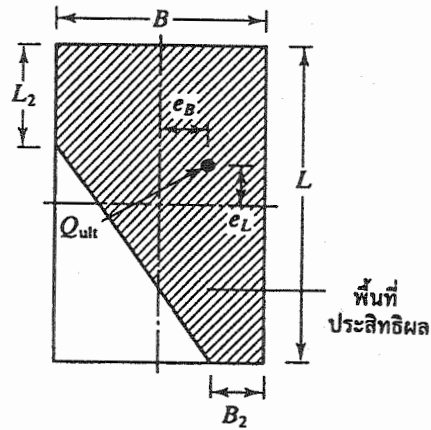


๑. พื้นที่ประสิทธิผลของกรณีที่ 3

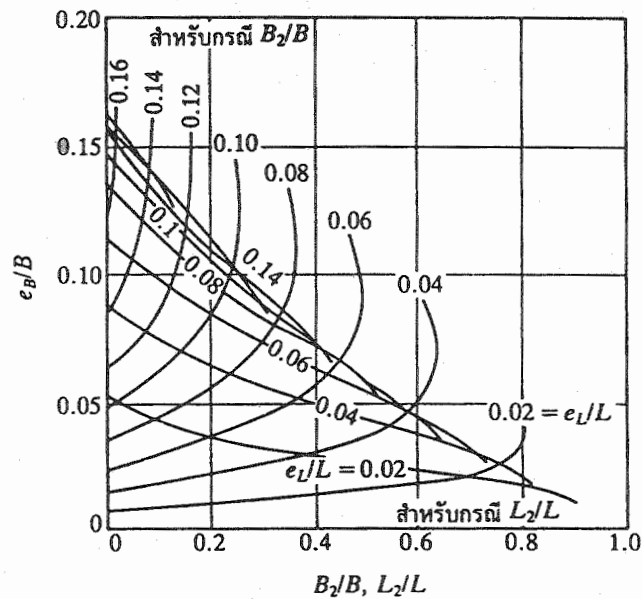


๒. กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนที่เกี่ยวข้องกับการเอียงศูนย์กลางของกรณีที่ 3

รูปที่ 6.9 การหาค่าผลเฉลยจากพื้นที่ประสิทธิผลและค่าอัตราส่วนของกรณีที่ 3



๑. พื้นที่ประสิทธิผลของกรณีที่ ๔



๒. กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนที่เกี่ยวกับการเอียงศูนย์กลางของกรณีที่ ๔

รูปที่ 6.10 การหาค่าผลเฉลยจากพื้นที่ประสิทธิผลและค่าอัตราส่วนของกรณีที่ ๔

**กรณีที่ 3**

ถ้าหากค่าอัตราส่วนของ  $e_L/L < 1/6$  และค่า  $0 < e_B/B < 0.5$  จะหาค่าพื้นที่ประสิทธิผลจากรูปที่ 6.9 a ได้ความสัมพันธ์คือ

$$A' = \frac{1}{2} [B_1 + B_2] L \quad (6.49)$$

ทำให้ได้ค่าความกว้างประสิทธิผลและพื้นที่ประสิทธิผล (ดูรูปที่ 6.9 b ประกอบ) เป็น

$$B' = \frac{A'}{L} \quad (6.50)$$

$$L' = L \quad (6.51)$$

**กรณีที่ 4**

ถ้าหากค่าอัตราส่วนของ  $e_L/L < 1/6$  และค่า  $0 < e_B/B < 1/6$  จะหาค่าพื้นที่ประสิทธิผลจากรูปที่ 6.10 a ได้ความสัมพันธ์คือ

$$A' = L_2 B + \frac{1}{2} [B_1 + B_2] [L - L_2] \quad (6.52)$$

ส่วนค่าความกว้างประสิทธิผลและพื้นที่ประสิทธิผล ซึ่งหาอัตราส่วนของ  $B_2/B$  จากเส้นกราฟที่โค้งขึ้น (ดูรูปที่ 6.10 b ประกอบ) และหาอัตราส่วนของ  $e_L/L$  จากเส้นกราฟที่โค้งลง

$$B' = \frac{A'}{L} \quad (6.53)$$

$$L' = L \quad (6.54)$$

**6.9 การหาค่าการแทรกซึมหน้าหนักบรรทุกจากเครื่องมือทดสอบภาคสนาม**

เมื่อใช้เครื่องมือที่ชื่อ SIP (standard penetration test) หรือใช้ CPT (cone penetration test) ทำการทดสอบหาค่าประมาณของความสามารถในการแทรกซึมหน้าหนักบรรทุกของฐานรากขนาดคั่นที่วางค้ำบนดินทราย

Parry (1977) ได้เสนอแนะสูตรเชิงประสมการณ์ เมื่อใช้เครื่องมือทะลวงผ่าน เพื่อหาความต้านทานของชั้นดิน คือ

$$q_u \text{ (MN/m}^2\text{)} = 0.24 N_f \left[ \frac{(D_f + 0.73B)}{(D_f + 0.75B)} \right] \quad (6.55)$$

กำหนดให้ค่า  $N_f$  เป็นค่า  $N$  ที่ได้จากภาคสนาม (ของ SPT) ที่ระดับความลึก  $0.75 B$  ได้พื้นต้านฐานของฐานราก ส่วนค่า  $D_f$  และ  $B$  เป็นค่าความกว้างและความลึกของฐานราก (หน่วยเป็นเมตร)

ในกรณีที่มีค่าอัตราส่วนของ  $D_f/B < 1$  สมการที่ 6.55 อาจหาได้ค่าประมาณ

$$q_u \text{ (MN/m}^2\text{)} = 0.24 N_f \quad (6.56)$$

Schmertmann (1978) ได้เสนอแนะวิธีหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการแบกรับน้ำหนักสูงสุดของฐานรากดิน กับค่าความต้านทาน ( $q_c$ ) ที่เกิดจากมวลกรวยถูกกดจมลงในดิน (ของ CPT) เมื่อกำหนดให้  $D_f/B < 1.5$

#### ฐานรากแบบ Strip Foundation บนทราย

$$q_u \text{ (kg/cm}^2 \text{ or ton/ft}^2\text{)} = 28 - 0.0052 (300 - q_c)^{1.5} \quad (6.57)$$

#### ฐานรากแบบ Square Foundation บนทราย

$$q_u \text{ (kg/cm}^2 \text{ or ton/ft}^2\text{)} = 48 - 0.009 (300 - q_c)^{1.5} \quad (6.58)$$

#### ฐานรากแบบ Strip Foundation บนดินเหนียว

$$q_u \text{ (kg/cm}^2 \text{ or ton/ft}^2\text{)} = 2 + 0.28 q_c \quad (6.59)$$

#### ฐานรากแบบ Square Foundation บนดินเหนียว

$$q_u \text{ (kg/cm}^2 \text{ or ton/ft}^2\text{)} = 5 + 0.34 q_c \quad (6.60)$$



### 6.10 กรณีเฉพาะของการหาค่าความสามารถในการแบกรับน้ำหนักสูงสุด

ธรรมชาติของมวลดิน มีการเกิดเป็นแนวหรือชั้นจำนวนหลายชั้นในแหล่งหนึ่ง จึงควรศึกษากรณีเฉพาะที่ชั้นดินแต่ละชนิดมีชั้นดินมากกว่า 1 ชั้น แบ่งลักษณะของชั้นดินได้ดังนี้

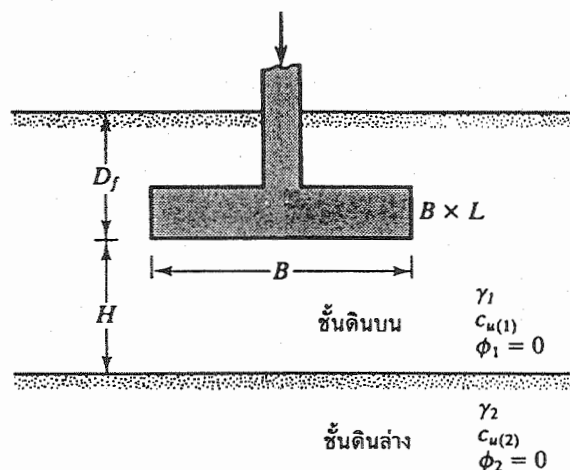
#### 6.10.1 ฐานรากบนชั้นดินเหนียว

ถ้าหากสมมติให้มวลประกอบด้วยดินเหนียว 2 ชั้น ชั้นดินเหนียวมีคุณสมบัติคงที่ค่าของ  $\phi = 0$  (ดูรูปที่ 6.11) ชั้นบนใช้สัญลักษณ์ I ชั้นล่างใช้สัญลักษณ์ II

กำหนดให้ชั้น I มีระดับลึกลงไป เท่ากับ  $H$  เมื่อวัดลึกลงไปเทียบกับระดับฐานของฐานราก ชั้น II มีระดับลึกค่าลงไปแต่ไม่ทราบความหนาที่แน่นอน หน่วยน้ำหนักของมวลดินเหนียวทั้งสองชั้น มีค่าเท่ากับ  $\gamma_1$  กับ  $\gamma_2$  ตามลำดับ ซึ่งปกติค่าตัวเลขของหน่วยน้ำหนักจะไม่ต่างกันมากนัก ทำให้เกิดกรณีของความเป็นไปได้ 2 กรณี นั่นคือ

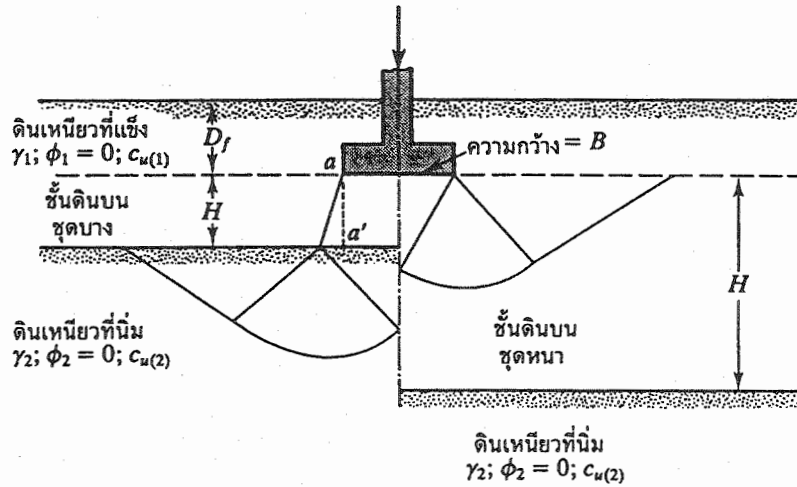
กรณีที่ 1 ถ้าค่าอัตราส่วน  $c_{u(1)}/c_{u(2)} > 1$  ฐานรากก็จะวางตัวบนชั้นดินเหนียวที่แข็งแรง และรองรับด้วยชั้นดินเหนียวที่เปราะบาง

กรณีที่ 2 ถ้าค่าอัตราส่วน  $c_{u(1)}/c_{u(2)} < 1$  ฐานรากก็จะวางตัวบนชั้นดินเหนียวที่เปราะบาง และรองรับด้วยชั้นดินเหนียวที่แข็งแรง



รูปที่ 6.11 สมมุติฐานของมวลดินเหนียวที่มี 2 ชั้น

ผลเฉลยของกรณีที่ 1 จากมวลดินเหนียวชั้นบนตามด้วยการพังทลายแบบ general shear failure ไปยังมวลดินเหนียวชั้นล่าง ดังรูปที่ 6.12 ครบบริเวณข้างล่าง ด้านซ้าย แต่ถ้ามหาอัตราส่วนของ  $H/B$  มีค่ามากขึ้น การพังทลายของมวลดินจะเกิดขึ้น ถ้าหากมีค่ามากจนถึงค่าไหลครบทุกสูงสุด (ultimate load) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.12 ครบบริเวณข้างล่างด้านขวา



รูปที่ 6.12 สมมุติฐานของการรับไหลครบทุกของชั้นดินเหนียวที่มีชั้นที่แข็งแรงอยู่ด้านบนชั้นที่เปราะบาง

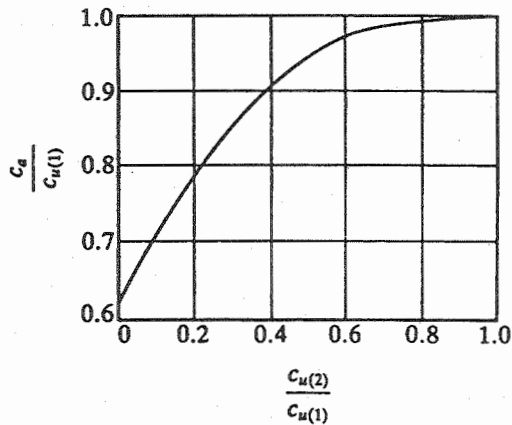
Meyerhof และ Hanna (1978) ได้เสนอสูตรเชิงประสมการณ์ของการค่าการแบกรับน้ำหนักสูงสุดไว้ คือ

$$\begin{aligned}
 q_u &= \underbrace{\left[ 1 + 0.2 \left( \frac{B}{L} \right) \right] c_{u(2)} N_c}_{\text{From general shear failure of bottom soil layer}} + \underbrace{\left( 1 + \frac{B}{L} \right) \left( \frac{2 c_a H}{B} \right) + \gamma_1 D_f}_{\text{From punching failure of top soil layer}} \quad (6.61) \\
 &\leq \underbrace{\left[ 1 + 0.2 \left( \frac{B}{L} \right) \right] c_{u(1)} N_c + \gamma_1 D_f}_{\text{From general shear failure of top soil layer}}
 \end{aligned}$$

พจน์ตัวแปรของสมการที่ 6.61 ได้แก่

- B = ความกว้างของฐานราก
- L = ความยาวของฐานราก
- $N_c = 5.14$  (มาจากตารางที่ 6.3)
- $c_a$  = การยึดเกาะ (adhesion) ตามแนวต่อประสาน aa'

รูปที่ 6.13 ข้างล่าง แสดงกราฟการแปรผันระหว่างอัตราส่วนพารามิเตอร์ของกำลังเฉือนที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 6.13 การแปรผันของอัตราส่วน  $c_a/c_{u(1)}$  กับ  $c_{u(2)}/c_{u(1)}$

ผลเฉลยของกรณีที่ 2 ค่าอัตราส่วน  $c_{u(1)}/c_{u(2)} < 1$  การแบกรับน้ำหนัก  
 บรรทุกสูงสุดหาได้จากสมการเชิงประสพการณ์ ดังนี้

$$q_u = q_t + (q_b + q_t) \left( 1 - \frac{H}{H_f} \right)^2 \geq q_t \quad (6.62)$$

พจน์ตัวแปรในสมการที่ 6.62 ของ  $N_c = 5.14$  (ตาราง 6.3) ส่วนพจน์อื่นคือ

$$q_t = \left[ 1 + 0.2 \left( \frac{B}{L} \right) \right] c_{u(1)} N_c + \gamma_1 D_f \quad (6.63)$$

$$q_b = \left[ 1 + 0.2 \left( \frac{B}{L} \right) \right] c_{u(2)} N_c + \gamma_2 D_f \quad (6.64)$$

$$H_f \approx B \quad (6.65)$$

### 6.10.2 ฐานรากบนชั้นดินทราย

สมมุติฐานอีกกรณีหนึ่ง ได้แก่ ฐานรากที่วางค้ำบนดินชั้นบนที่เป็นชั้นดินทรายที่อัดแน่น ส่วนดินชั้นล่างเป็นชั้นดินเหนียวที่เปราะบาง ถ้าหากความหนาของชั้นทรายมีค่าน้อย พื้นผิวของการพังทลายมีโอกาสที่จะทะลุผ่านชั้นดินเหนียว ดังแสดงในรูปที่ 6.14 ด้านซ้าย (หน้า 161) แต่ถ้าหากชั้นทรายมีความหนามาก พื้นผิวของการพังทลายก็จะจำกัดอยู่ในชั้นทราย ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ด้านขวา

Meyerhof (1974) ได้เสนอสูตรเชิงประสมการณ์ของการหาค่าความสามารถในการแบกรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของ continuous foundation เป็น

$$q_u = cN_c + \gamma H^2 \left( 1 + \frac{2D_f}{H} \right) K_s \frac{\tan \phi}{B} + \gamma D_f \quad (6.66)$$

สมการที่ 6.66 หาค่าสูงสุดของ  $q_u$  จะได้ค่าเป็น

$$q_u = \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma + \gamma D_f N_q \quad (6.67)$$

กำหนดให้

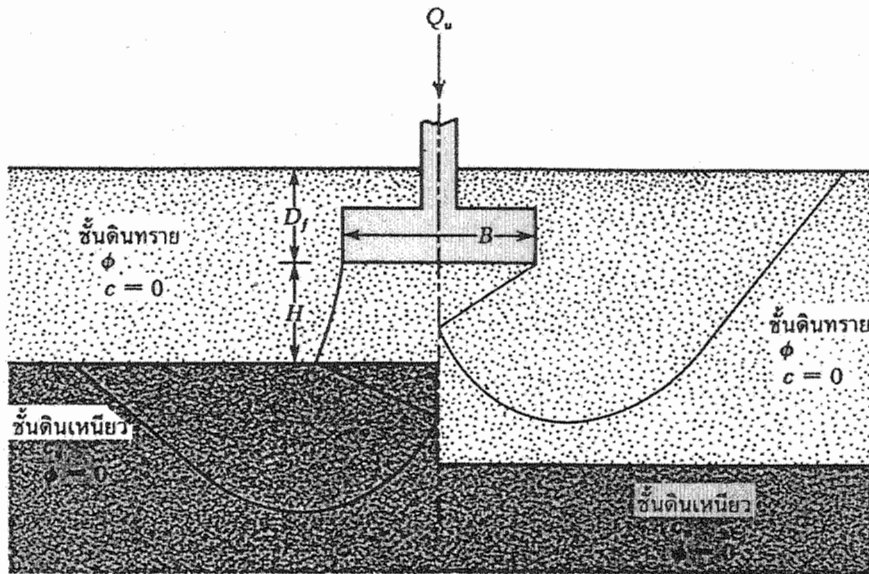
- $\phi$  = มุมเสียดทานภายในของชั้นดินทรายส่วนบน
- $\gamma$  = หน่วยน้ำหนักของมวลดินทราย
- $K_s$  = สัมประสิทธิ์ความต้านทานมวลสารต่อการทะลุวง (punching) ส่วนค่า  $N_\gamma$  กับค่า  $N_q$  ขึ้นอยู่กับค่ามุมเสียดทานภายใน

สมการของการแบกรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของ rectangular foundation เป็น

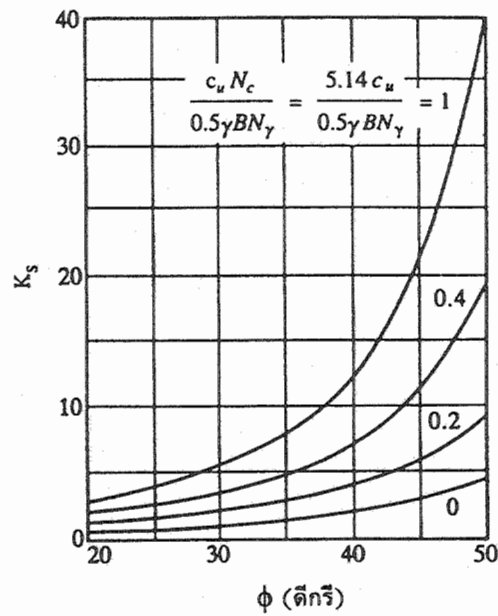
$$q_u = \left( 1 + 0.2 \frac{B}{L} \right) c_u N_c + \left( 1 + \frac{B}{L} \right) \gamma H^2 \left( 1 + \frac{2D_f}{H} \right) K_s \frac{\tan \phi}{B} + \gamma D_f \quad (6.68)$$

สมการที่ 6.68 หาค่าสูงสุดของ  $q_u$  จะได้ค่าเป็น

$$q_u = \frac{1}{2} \left( 1 - 0.4 \frac{B}{L} \right) \gamma B N_\gamma + \gamma D_f N_q \quad (6.69)$$



รูปที่ 6.14 สมมุติฐานการวางตัวของฐานรากบนชั้นดินทราย และรองรับด้วยชั้นดินเหนียวที่เปราะบาง



รูปที่ 6.15 การแปรผันระหว่างค่าของ  $K_s$  กับค่ามุม  $\phi$

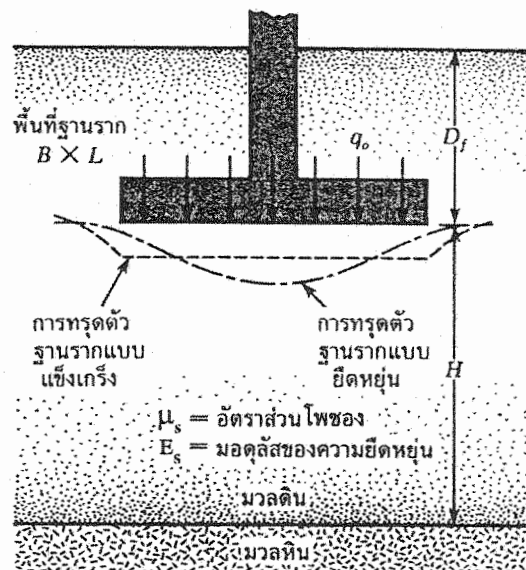
ค่า  $K_p$  หาได้จากกราฟของรูปที่ 6.15 ซึ่งเป็นค่าของการแปรผันองค์ประกอบของความต้านทานเฉือนของการทะลวง (punching) ที่มีการแปรผันเนื่องจากค่ามุมเสียดทานภายในที่เปลี่ยนไป

### 6.11 การทรุดตัวของฐานรากแบบแผ่

มวลดินที่เกิดการทรุดตัวภายใต้สภาวะไหลของฐานราก แบ่งออกเป็น 2 แบบหลักได้แก่ การที่มวลดินเกิดการทรุดตัวทันทีทันใด (immediate settlement) ที่มีการทรุดตัวเกิดขึ้นในช่วงระหว่างที่มีงานก่อสร้างหรือภายหลังจากก่อสร้างเสร็จแล้วไม่นาน การทรุดตัวอีกแบบเป็นการที่มวลดินเกิดการทรุดตัวแบบเกิดจากการอัดตัวคายตัว (consolidation settlement) ปกติจะเกิดการทรุดตัวภายหลังจากก่อสร้างเสร็จสิ้นไปเป็นระยะเวลา

#### 6.11.1 การทรุดตัวแบบทันทีทันใด

รูปที่ 6.16 แสดงลักษณะของการทรุดตัวของมวลดินเชิงอิลาสติกที่เกิดจากฐานรากที่แข็งเกร็ง มวลดินถูกกระทำด้วยแรงสุทธิต่อหน่วยพื้นที่ เท่ากับ  $q_0$  สมมุติให้ค่าอัตราส่วนโพรงกับมอดูลัสความยืดหยุ่น มีค่าเป็น  $\mu_s$  กับ  $E_s$  ตามลำดับ



รูปที่ 6.16 การทรุดตัวของมวลดินเนื่องจากฐานรากที่ค้ำองได้และแข็งเกร็ง

ในเชิงทฤษฎี ถ้าหาก  $D_e = 0$  และค่า  $H = \infty$  แสดงว่า ฐานรากมีการค้ำองได้ (flexibility) อย่างสมบูรณ์แบบ Harr (1966) ได้คำนวณหาค่าการทรุดตัวอย่างทันทีทันใด ( $S_e$ ) ได้เป็น

ที่มุมของฐานรากที่ค้ำองได้

$$S_e = \frac{Bq_0(1-\mu_s^2)\alpha}{E_s} \quad (6.70)$$

ที่จุดศูนย์กลางของฐานรากที่ค้ำองได้

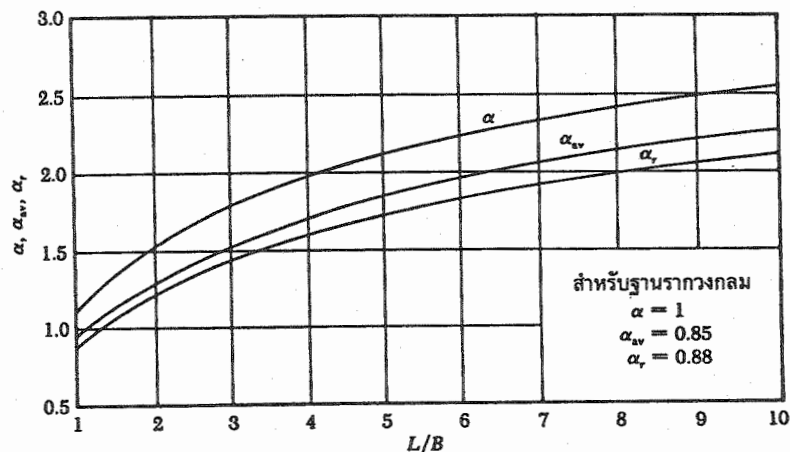
$$S_e = \frac{Bq_0(1-\mu_s^2)\alpha}{E_s} \quad (6.71)$$

พจน์  $\alpha$  มีค่าเป็น

$$\alpha = \frac{1}{\pi} \left[ \ln \left( \frac{\sqrt{1+m^2}+m}{\sqrt{1+m^2}-m} \right) + m \ln \left( \frac{\sqrt{1+m^2}+1}{\sqrt{1+m^2}-1} \right) \right] \quad (6.72)$$

โดยที่  $m = L/B$  ค่าของ  $B$  เป็นค่าความกว้างของฐานราก ค่าของ  $L$  เป็นค่าความยาวของฐานราก

เมื่อต้องการหาค่า  $\alpha$  ที่ค่าหลายค่าของอัตราส่วน  $L/B$  ก็ทำการหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 6.17 ข้างล่าง



รูปที่ 6.17 กราฟของการหาค่าพจน์  $\alpha$ ,  $\alpha_{av}$  และ  $\alpha_r$  ที่แปรผันกับค่าอัตราส่วน  $L/B$

ผลเฉลยของค่าเฉลี่ยสำหรับฐานรากที่ค้ำงอได้

$$s_e = \frac{Bq_0(1-\mu_s^2)}{E_s} \alpha_{av} \quad (6.73)$$

ค่า  $\alpha_{av}$  หาจากกราฟในรูปที่ 6.17

ผลเฉลยของค่าเฉลี่ยสำหรับฐานรากที่แข็งเกร็ง

$$s_e = \frac{Bq_0(1-\mu_s^2)}{E_s} \alpha_r \quad (6.74)$$

ค่า  $\alpha_r$  หาจากกราฟในรูปที่ 6.17

6.11.2 การทรุดตัวของฐานรากแบบตันที่ทันใดเมื่อวางตัวบนดินเหนียวที่อึดตัว

Janbu et al. (1956) ได้เสนอสมการที่จะประเมินหาค่าเฉลี่ยของการทรุดตัวเมื่อฐานรากวางตัวบนดินเหนียวที่อึดตัวด้วยน้ำ โดยกำหนดให้ค่าอัตราส่วนโพรงสำหรับมวลดินอึดตัว เท่ากับ 0.5

$$s_e = A_1 A_2 \frac{q_0 B}{E_s} \quad (6.75)$$

ค่า  $A_1$  เป็นฟังก์ชันของอัตราส่วน  $H/B$  กับ  $L/B$  และค่า  $A_2$  เป็นฟังก์ชันของอัตราส่วน  $D_f / B$

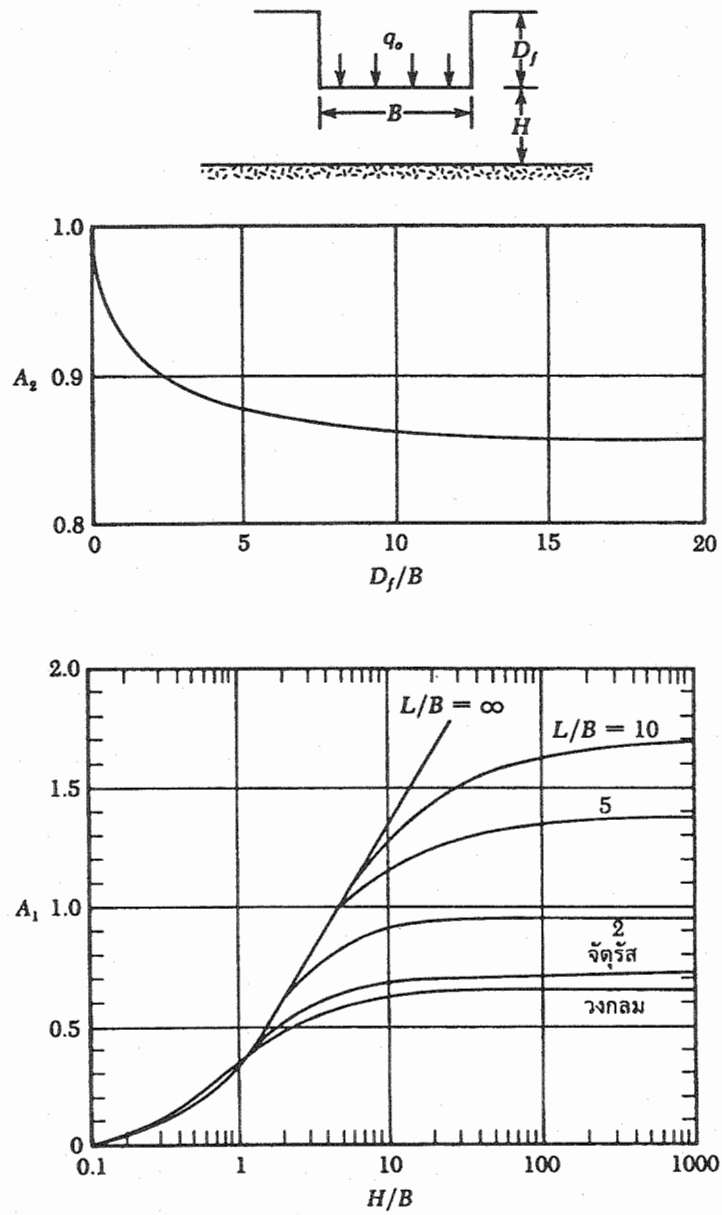
ต่อมา Christian และ Carrier (1978) ได้ปรับปรุงวิธีการหาค่า  $A_1$  กับ  $A_2$  ใหม่ ดังแสดงในกราฟของรูปที่ 6.18 หน้า 165

6.11.3 การทรุดตัวของฐานรากแบบตันที่ทันใดเมื่อวางตัวบนดินทราย

เมื่อต้องการหาค่าระยะการทรุดตัวของดินทราย ที่เป็นมวลเมล็ดรูปทรงใกล้ทรงกลม ควรใช้วิธีที่ประมาณการแบบตัวประกอบเชิงอิทธิพลความเครียด (strain influence factor) ที่เสนอแนะโดย Schmertmann และ Hartman (1978) ดังแสดงในรูปที่ 6.19 หน้า 166 ได้ค่าการทรุดตัวแบบตันที่ทันใด ( $s_e$ ) เป็น

$$s_e = c_1 c_2 (\bar{q} - q) \sum_0^{z^2} \frac{I_z}{E_s} \Delta z \quad (6.76)$$

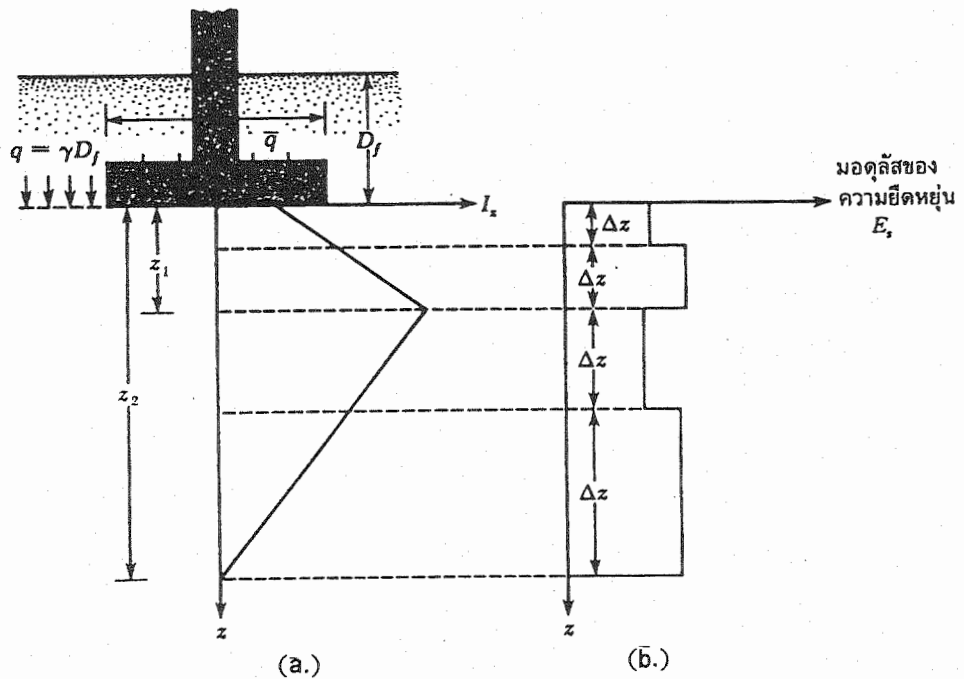




รูปที่ 6.18 กราฟของการหาค่าพจน์  $A_1$  และ  $A_2$  สำหรับการหาค่าการทรุดตัวของแบบตันที่ทันใด

กำหนดให้

- $I_x$  = ตัวประกอบเชิงอิทธิพลความเครียด
- $C_1$  = ตัวประกอบที่ไข้แก้ไข (correction factor)  
สำหรับค่าความลึกระยะฝัง (embedment depth)  
ของฐานราก =  $1 - 0.5[q / (\bar{q} - q)]$
- $C_2$  = ตัวประกอบที่ไข้แก้ไข (correction factor)  
สำหรับค่าการคืบในมวลดิน (creep in soil)  
ของฐานราก =  $1 + 0.2 \log [\text{time in years} / 0.1]$
- $\bar{q}$  = ความเค้นที่ระดับของฐานราก
- $q = \gamma D_f$



รูปที่ 6.19 แนวทางของการคำนวณที่ใช้ตัวประกอบเชิงอิทธิพลความเครียด

การแปรผันระหว่างค่าตัวประกอบเชิงอิทธิพลความเค้น กับค่าระดับความลึกที่ต่ำกว่าฐาน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.19 a

ค่าตัวเลขของตัวประกอบเชิงอิทธิพลความเครียด สำหรับฐานรากที่เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสกับฐานรากที่เป็นวงกลม ได้แก่

$$I_z = 0.1 \quad \text{ที่ค่า } z = 0$$

$$I_z = 0.5 \quad \text{ที่ค่า } z = z_1 = 0.5 B$$

$$I_z = 0 \quad \text{ที่ค่า } z = z_2 = 2 B$$

ในทำนองเดียวกัน ฐานรากที่มีอัตราส่วน ความยาว/ความกว้าง ( $L/B$ )  $> 10$

$$I_z = 0.2 \quad \text{ที่ค่า } z = 0$$

$$I_z = 0.5 \quad \text{ที่ค่า } z = z_1 = B$$

$$I_z = 0 \quad \text{ที่ค่า } z = z_2 = 4 B$$

วิธีการนี้ เมื่อต้องการประยุกต์ใช้เมื่ออัตราส่วน  $L/B$  อยู่ระหว่าง 1 ถึง 10 ก็ใช้วิธีการประมาณค่า ส่วนกรณีที่ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นแปรผันกับความลึก (รูปที่ 6.19 b) ก็ใช้ตัวเลขความต้านทานต่อการทะลุผ่านที่อ่านจากเครื่อง SIP หรือ CPT ในบางกรณีก็ใช้ผลลัพธ์จากการรวมตัวเลขการทรุดตัวแต่ละระยะของค่าการทรุดตัว

การประเมินค่าการทรุดตัวต้องอาศัยค่าคุณสมบัติของดินตามทฤษฎีอีลาสติค ตารางที่ 6.5 ได้ระบุค่าตัวเลขคุณสมบัติของดินที่พบบ่อย เพื่อเป็นแนวทางเริ่มต้นของการสมมุติค่า

ตารางที่ 6.5 ค่าตัวเลขคุณสมบัติเชิงอีลาสติคของดินที่พบบ่อย

Type of Soil	Modulus of elasticity, $E_s$		Poisson's ratio, $\mu_s$
	lb/in. <sup>2</sup>	MN/m <sup>2</sup>	
Loose sand	1,500 – 3,500	10.35 – 24.15	0.20 – 0.40
Median dense sand	2,500 – 4,000	17.25 – 27.60	0.25 – 0.40
dense sand	5000 – 8000	34.50 – 55.20	0.30 – 0.45
Silty sand	1500 – 2500	10.35 – 17.25	0.20 – 0.40
Sand and gravel	10000 – 25000	69.00 – 172.50	0.15 – 0.35
Soft clay	600 – 3000	4.1 – 20.7	
Median clay	3000 – 6000	20.7 – 41.4	0.20 – 0.50
Stiff clay	6000 – 14000	41.4 – 96.6	

### 6.12 การทรุดตัวอย่างทันทีทันใด เนื่องจากการไหลล้นที่เบี่ยงศูนย์กลาง

การทรุดตัวอย่างทันทีทันใดของไหลล้นที่เบี่ยงศูนย์กลาง จะมีการทรุดตัวแบบเกิดการหมุนของฐานราก การคำนวณหาค่าการทรุดตัว (Georgiadis and Butterfield, 1988) ได้เสนอแนะไว้ดังนี้

1. กำหนดให้มีไหลล้นที่กระทำต่อฐานรากทั้งหมด เท่ากับ  $Q$  และมีค่าไหลล้นเบี่ยงศูนย์กลาง เท่ากับ  $e$  (ดูรูปที่ 6.20) ดังนั้นสิ่งที่ไม่ทราบค่า ได้แก่ ระยะการทรุดตัว ( $S_e$ ) กับมุมของการหมุน ( $\theta$ )

2. ค่าไหลล้นสูงสุด กำหนดให้เป็น  $Q_{u(e)}$  ค่านี้เป็นค่าที่ฐานรากสามารถจะรับไหลล้นสูงสุดที่เบี่ยงศูนย์กลางต่อพื้นที่ประสิทธิผล (ดูสมการที่ 6.38 ประกอบ)

3. คำนวณค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย ในกรณีที่มีไหลล้นเบี่ยงศูนย์กลาง

$$F = \frac{Q_{u(e)}}{Q} = F_1 \quad (6.77)$$

4. คำนวณหาค่าไหลล้นสูงสุด ในกรณีที่ไม่มีการเบี่ยงศูนย์กลาง ( $e = 0$ ) โดยใช้สมการที่ 6.18

5. คำนวณหาค่าไหลล้นในกรณีที่มี  $e = 0$  ซึ่งเป็นค่าไหลล้นที่ยอมรับให้ได้

$$\frac{Q_{u(e=0)}}{F_1} = Q_{(e=0)} \quad (6.78)$$

6. สำหรับไหลล้นที่มีค่า  $Q_{(e=0)}$  ที่กระทำบนฐานราก ก็ใช้หลักการของการประเมินค่าทำนองเดียวกับในหัวข้อที่ 6.10 ค่าระยะการทรุดตัวที่หาได้จากกรณีนี้ สมมติให้มีค่าเป็น  $S_{e(e=0)}$

7. ค่ามุมของการหมุนสำหรับฐานราก ( $\theta$ ) หาได้จากสมการข้างล่าง

$$\theta = \arctan \left[ CS_e \left\{ \left( \frac{e}{B} \right) / (B \times L)^{0.5} \right\} \right] \quad (6.79)$$

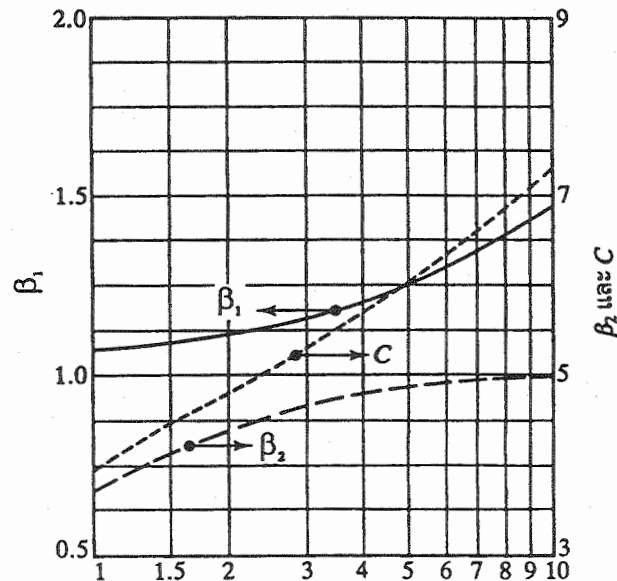
8. สมการที่ 6.79 มีพจน์ตัวแปรคือ  $C$  และพจน์นี้กำหนดให้เป็น

$$C = \beta_1 \beta_2 \quad (6.80)$$

Lee (1963) กับ Whitman and Richart (1967) ได้เสนอแนะการหาค่าพจน์  $\beta_1$  และ พจน์  $\beta_2$  ที่แปรผันกับค่า  $L/B$  ไว้ในกราฟของรูปที่ 6.20 ในหน้าถัดไป

9. เมื่อต้องการคำนวณหาค่าของระยะการทรุดตัวเมื่อไหลล้นเบี่ยงศูนย์กลาง จะได้

$$S_e = S_{e(e=0)} \left[ 1 - 2 \left( \frac{e}{B} \right) \right]^2 \quad (6.81)$$



รูปที่ 6.20 กราฟความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าตัวประกอบของ  $\beta_1$  และ  $\beta_2$  เมื่อเทียบกับอัตราส่วน  $L/B$

### 6.13 การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ

มวลสารที่เป็นดินเหนียวเมื่อได้รับโหลดเป็นระยะเวลาาน ก็อาจเกิดการทรุดตัว เนื่องจากการคายน้ำออกจากมวลสาร ค่าระยะการทรุดตัวที่เกิดเนื่องจากโหลดอัดกระทำบนมวลสารในแนวมิติเดียว ได้แก่

$$s_c = \int \epsilon_v dz \quad \epsilon_v = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (6.82)$$

กำหนดให้  $s_c$  เป็นค่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนโพรงช่องว่าง

สมการเชิงประสมการณ์ของค่าระยะการทรุดตัวของมวลดินเหนียว เนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ แบ่งตามสภาวะของช่วงเวลาการกดอัดด้วยโหลดน้ำหนัก ดังต่อไปนี้

การอัดตัวค้ำน้ำในสภาวะไหลค้ำน้ำหนักปกติ (normal consolidated)

$$S_c = \frac{C_c H_c}{1 + e_0} \log \frac{p_0 + \Delta p_{av}}{p_0} \quad (6.83)$$

การอัดตัวค้ำน้ำในสภาวะไหลค้ำน้ำหนักสูงกว่าปกติ (overconsolidated)

$$S_c = \frac{C_s H_c}{1 + e_0} \log \frac{p_0 + \Delta p_{av}}{p_0} \quad (6.84)$$

สมการที่ 6.84 มีเงื่อนไขว่า  $p_0 + \Delta p_{av} < p_c$

$$S_c = \frac{C_s H_c}{1 + e_0} \log \frac{p_c}{p_0} + \frac{C_c H_c}{1 + e_0} \log \frac{p_0 + \Delta p_{av}}{p_c} \quad (6.85)$$

สมการที่ 6.85 มีเงื่อนไขว่า  $p_0 < p_c < p_0 + \Delta p_{av}$

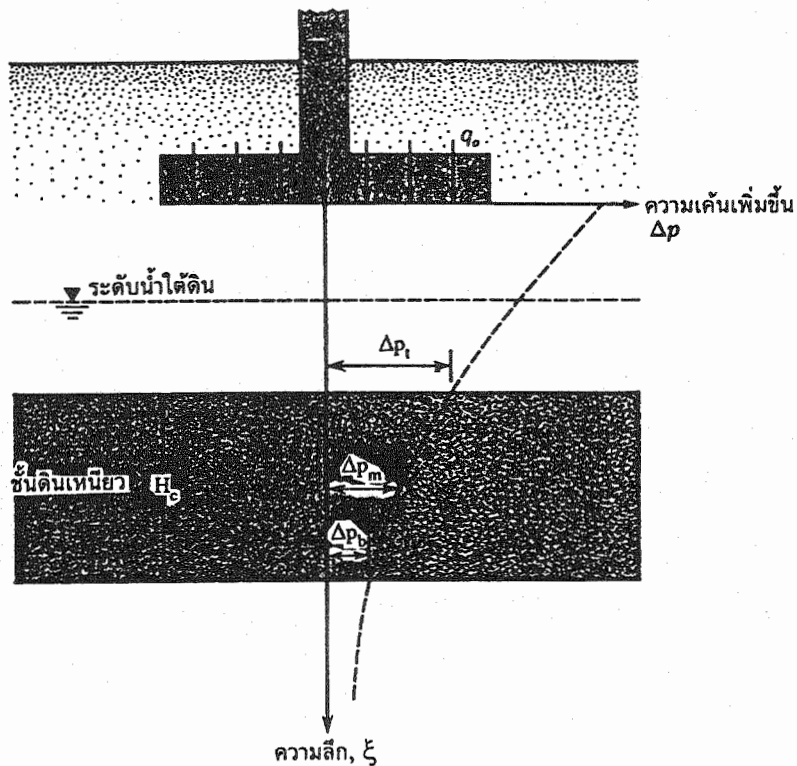
นิยามของพจน์ตัวแปรในสมการที่ 6.83 ถึง 6.85 ได้แก่

- $p_0$  = ค่าเฉลี่ยของความดันประสิทธิผลบนชั้นดินเหนียวก่อนเริ่มงานก่อสร้างฐานราก
- $\Delta p_{av}$  = ค่าเฉลี่ยของความดันที่เพิ่มขึ้นบนชั้นดินเหนียวเนื่องจากงานก่อสร้างฐานราก
- $p_c$  = ความดันที่ปรากฏก่อนเริ่มการอัดตัวค้ำน้ำ
- $e_0$  = อัตราส่วนโพรงช่องว่างตั้งต้นของชั้นดินเหนียว
- $C_c$  = ค้ำน้ำการอัด (compression index)
- $C_s$  = ค้ำน้ำการพองบวม (swelling index)
- $H_c$  = ความหนาของชั้นดินเหนียว

การประมาณค่าเฉลี่ยของความดันที่เพิ่มขึ้นต้องคำนึงขนาดแมกนิจูดของความดันที่ลดลง เมื่อระยะความลึกห่างจากฐานรากมากขึ้น สูตรเชิงประสภการณ์ที่ควรใช้คือ

$$\Delta p_{av} = \frac{1}{6} [\Delta p_t + 4 \Delta p_m + \Delta p_b] \quad (6.86)$$

พจน์ของ  $\Delta p_t$ ,  $\Delta p_m$  และ  $\Delta p_b$  ได้แก่ ความดันที่ระดับบน ระดับกลาง และระดับล่างของชั้นดินเหนียวที่เกิดจากการก่อสร้างฐานราก



รูปที่ 6.21 แนวทางการคำนวณค่าการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ

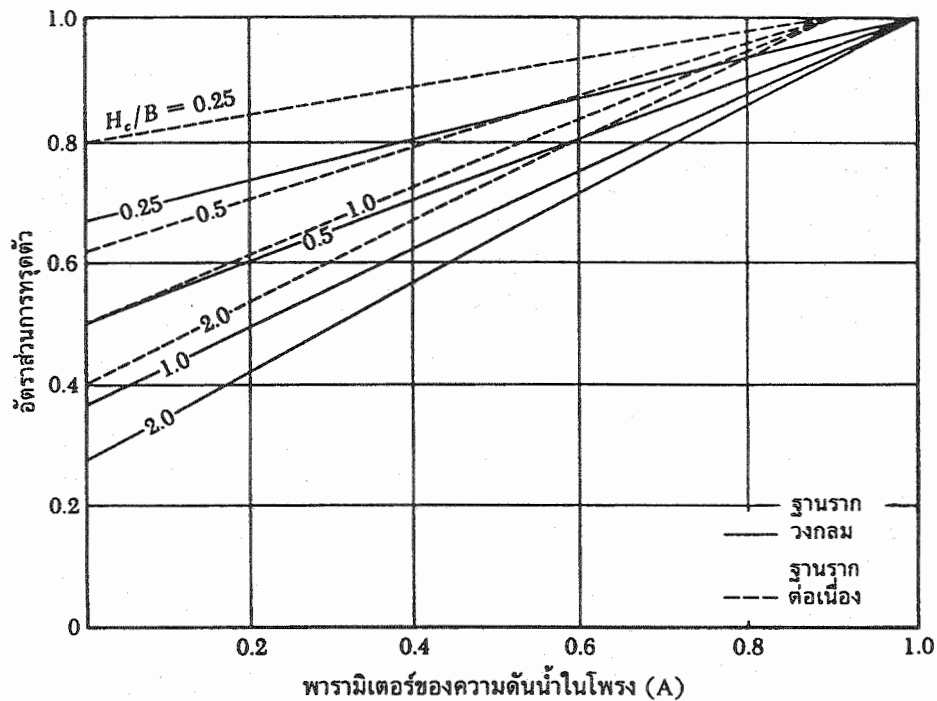
Skempton และ Bjerrum (1957) ได้ปรับปรุงวิธีการที่จะหาค่าการทรุดตัวของมวลสารเนื่องจากฐานรากวงกลม (circular foundation) กับฐานรากต่อเนื่อง (continuous foundation) โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. คำนวณหาค่าระยะการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำที่วัดจากเครื่องมือทดสอบการทรุดตัวของดิน (oedometer) กำหนดให้มีสัญลักษณ์  $S_{c(oed)}$
2. คำนวณหาค่าของความดันน้ำในโพรง (A)
3. หาค่าอัตราส่วนของ  $H_c / B$
4. จากรูปที่ 6.22 ในหน้าถัดไป จะสามารถหาค่าอัตราส่วนการทรุดตัว เมื่อเทียบกับค่าตัวเลขความดันน้ำในโพรง

5. คำนวณหาค่าอัตราส่วนของการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ

$$S_c = \{S_{c(o.e.d)}\} \times \{\text{settlement ratio}\} \quad (6.87)$$

กลวิธีแบบนี้มีชื่อเรียกเฉพาะว่า "วิธี Skempton-Bjerrum Modification" นิยมใช้คำนวณหาค่าระยะการทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำ



รูปที่ 6.22 กราฟการหาค่าอัตราส่วนของการทรุดตัว สำหรับ ฐานรากแบบวงกลมกับแบบค่อเนื่อง

#### 6.14 ระยะการทรุดตัวของอาคารที่ยอมให้ได้

งานการออกแบบก่อสร้างอาคาร การวิเคราะห์หาค่าระยะการทรุดตัวเป็นสิ่งที่สำคัญมากของงานออกแบบนี้ ส่วนประกอบในหลายส่วนของอาคารโครงสร้างเมื่อมีการทรุดตัวเกิดขึ้นอาจจะเกิดการเสียหาย หรืออาจมีฟังก์ชันที่ไม่เหมาะสมกับงาน



Das (1995) ได้รวบรวมผลและสรุปเกณฑ์สำคัญของระยะการทรุดตัวที่มีศักยภาพต่อการเกิดความเสียหายต่ออาคารโครงสร้าง และขีดจำกัดความปลอดภัยต่อโครงสร้างนั้น ๆ เมื่อเกิดการทรุดตัวโครงสร้างไม่เอียงและแบบเอียง ผลสรุประบุไว้จำนวน 3 ตาราง

ตารางที่ 6.6 ข้างล่างนี้ เป็นตารางที่แสดงถึงอิทธิพลของการบิดเบี้ยวที่มีต่อการทรุดตัวของอาคารโครงสร้าง ส่วนตารางที่ 6.7 หน้า 174 เป็นตารางที่แสดงถึงเกณฑ์ที่ยอมรับได้เมื่อโครงสร้างอาคารเกิดการบิดเบี้ยว ทั้งที่เกี่ยวข้องกับมุมของการบิดเบี้ยว และที่เกี่ยวข้องกับระยะโก่งของอาคารโครงสร้าง และตารางที่ 6.8 หน้า 174 เป็นการระบุเกณฑ์ที่ยอมรับได้เมื่อเกิดการทรุดตัวของอาคารโครงสร้างที่มีรูปแบบแตกต่างกัน

ตารางที่ 6.6 ค่ามุมของการบิดเบี้ยว ( $\eta$ ) ที่มีศักยภาพต่อการเกิดความเสียหายต่อโครงสร้าง เมื่อการทรุดตัวมีการเอียง

Category of potential damage	$\eta$
Danger to machinery sensitive to settlement	1/750
Danger to frames with diagonals	1/600
Safe limit for no cracking of buildings	1/500
First cracking of panel walls	1/300
Difficulties with over head cranes	1/300
Tilting of high rigid buildings becomes visible	1/250
Considerable cracking of panel and brick walls	1/150
Danger of structural damage to general buildings	1/150
Safe limit for flexible brick walls, $L/H > 4$	1/150

ตารางที่ 6.7 เกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับโครงสร้างที่ขึ้นอยู่กับมุมของการบิดเบี้ยว (ตาราง 6.7 a) กับเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับอาคารโครงสร้างเมื่อเทียบกับค่าอัตราส่วนระยะโค้งโครงสร้าง (ตาราง 6.7 b)

Type of Structure	(a) $\eta$	Sand and hard clay	Plastic clay
Civil- and industrial-building column foundations :			
For steel and reinforced concrete structures		0.002	0.002
For end crows of columns with brick cladding		0.007	0.001
For structures where auxiliary strain does not arise during nonuniform settlement of foundations		0.005	0.005
Tilt of smokestacks, towers, silos, and so on		0.004	0.004
Craneways		0.003	0.003
(b) $\Delta/L$			
Plain brick walls :			
For multistory dwellings and civil buildings			
at $L/H \leq 3$		0.0003	0.0004
at $L/H \geq 5$		0.0005	0.0007
For one-story mills		0.0010	0.0010

ตารางที่ 6.8 เกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับอาคารโครงสร้างหลายรูปแบบเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของระยะการทรุดตัว

Type of building	Allowable average settlement, in. (mm)
Building with plain brick walls	
$L/H \geq 2.5$	3 (80)
$L/H \leq 1.5$	4 (100)
Building with brick walls, reinforced with reinforced concrete or reinforced brick	6 (150)
Framed building	4 (100)
Solid reinforced concrete foundations of smokestacks, silo, and so on	12 (300)

## 6.15 โปรแกรมแบบจำลองการวิเคราะห์ฐานรากระดับดิน

โปรแกรมคำนวณเสถียรภาพมวลสารใต้ฐานรากระดับดิน ที่เป็นฟุตคิงแบบแผ่ (spread footing) เป็นโปรแกรมแยกออกมาโดยเฉพาะ โดยใช้ชื่อโปรแกรมว่า FDT.EXE ซึ่งใช้หาเสถียรภาพออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกของการวิเคราะห์เสถียรภาพฐานรากระดับดิน ได้แก่ การหาค่าการแบกรับน้ำหนักสูงสุดของมวลสารต่อฐานราก (ultimate bearing capacity) และส่วนที่สองของการวิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อหาค่าระยะการทรุดตัวของมวลสารเมื่อถูกไหลลกระทำให้ (settlement due to load)

### 6.15.1 โปรแกรมหาค่าการแบกรับน้ำหนักสูงสุดของมวลสาร

ตัวอย่างของโปรแกรมการคำนวณค่าในหัวข้อนี้ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.9 ถึง 6.12 โดยมีหลักการคำนวณที่แตกต่างกันดังนี้

#### 1. การหาค่าการแบกรับน้ำหนักสูงสุดที่ไหลลกระทำผ่านศูนย์กลางฐาน

โจทย์ตัวอย่างเรื่องนี้ได้ระบุไว้ในตาราง 6.9 หน้า 176 กำหนดให้ฐานรากเป็นแบบจัตุรัส (square footing) ขนาดมิติของความกว้างและความยาว เท่ากับ 5 ฟุต และค่าความลึก เท่ากับ 3.00 ฟุต ค่าคุณสมบัติของดิน มีหน่วยน้ำหนัก เท่ากับ 115 ปอนด์ต่อลบ.ฟ. ค่าแรงยึดติดหรือโคฮีชัน เท่ากับ 320 ปอนด์ต่อตร.ฟ. โดยมวลดินมีค่ามุมความเสียดทานภายใน เท่ากับ 20 องศา

ผลลัพธ์ของค่าที่คำนวณได้ เมื่อกำหนดให้ไหลลกระทำในแนวตั้งแบ่งออก 2 รูปแบบ

a. รูปแบบที่ 1 ถ้าหากใช้สมการที่ 6.7 และ 6.10 ในหัวข้อที่ 6.3 หาค่ากำลังแบกรับน้ำหนักสูงสุด ได้ผลลัพธ์ของค่า การพังทลายแบบเฉือนทั่วไป (general shear failure) มีค่าเป็น 10,763 ปอนด์ต่อตร.ฟ. กับได้ผลลัพธ์ของค่า การพังทลายแบบเฉือนเฉพาะแห่ง (local shear failure) มีค่าเป็น 4,884 ปอนด์ต่อตร.ฟ.

b. รูปแบบที่ 2 ถ้าหากใช้สมการที่ 6.18 และ 6.22 ในหัวข้อที่ 6.5 ซึ่งเป็นสมการทั่วไป (general equation) เพื่อหาค่า กำลังแบกรับน้ำหนักสูงสุด ได้ผลลัพธ์เป็น 12,936 ปอนด์ต่อตร.ฟ. กับได้ผลลัพธ์ค่า กำลังการแบกรับน้ำหนักสุทธิ มีค่าเป็น 12,591 ปอนด์ต่อตร.ฟ.

#### 2. การหาค่าการแบกรับน้ำหนักสูงสุดเมื่อไหลลเฉียงศูนย์กลาง

ในตัวอย่างนี้ ได้ระบุค่าข้อมูลเข้าไว้ในตารางที่ 6.10 หน้า 177 ขนาดมิติของฐานรากที่เป็นแบบจัตุรัส ความยาวและความกว้าง เท่ากับ 1.50 เมตร ต้องการฝัง

ตารางที่ 6.9 ตัวอย่างของข้อมูลที่ป้อนเข้าและผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมการคำนวณ  
ในกรณีนี้เป็นการสมมุติว่าไหลคกระทำผ่านศูนย์กลางของฐานราก ซึ่ง  
แนวของไหลจะอยู่ในแนวตั้งหรืออยู่ในแนวทแยงมุมเอียงกับแนวตั้งก็ได้

### Ultimate Bearing Capacity

#### Input Data

Foundation Properties		Soil Properties	
Foundation Type	Square	Soil Unit Weight	115.00
Width of Foundation	5.00	Cohesion	320.00
Length of Foundation	5.00	Friction Angle	20.00
Depth of Foundation	3.00	Saturated Unit Weight	0.00
Load Inclination	0.00		

Factor of Safety	N/A
Factor of Safety With Respect to Shear Failure	N/A

#### Calculated Results

##### Use Ultimate Bearing Capacity Equation

	Ultimate Bearing Capacity
General Shear Failure	10763.04
Local Shear Failure	4883.86

##### Use General Equation

Ultimate Bearing Capacity	12935.62
Net Ultimate Bearing Capacity	12590.62
Gross Allowable Bearing Capacity	N/A
Net Allowable Bearing Capacity	N/A

ตารางที่ 6.10 ตัวอย่างของข้อมูลที่ป้อนเข้าและผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมการคำนวณ  
ในกรณีนี้เป็นเรื่องไหลคกระทำเชิงศูนย์กลางของฐานราก 2 แนว  
โดยใช้ค่าพื้นที่ประสิทธิผลช่วยคำนวณค่ากำลังการแบกรับน้ำหนักสูงสุด

**Ultimate Bearing Capacity With Eccentric Load**

**Input Data**

Foundation Properties	
Foundation Type	Square
Width of Foundation	1.50
Length of Foundation	1.50
Depth of Foundation	0.70
Load Inclination	0.00

Soil Properties	
Soil Unit Weight	18000.00
Cohesion	0.00
Friction Angle	30.00
Saturated Unit Weight	0.00

Factor of Safety	N/A
Factor of Safety With Respect to Shear Failure	N/A

**Eccentricity Properties**

Eccentricity on Width Side	0.15
Eccentricity on Length Side	0.30

**Calculated Result**

Ultimate Bearing Capacity	528113.62
Total Ultimate Load	858184.63

ฐานรากลึกลงไประดับ 0.70 เมตร จากพื้นผิวดิน กำหนดให้ไหลคเบี่ยงศูนย์กลางที่ระยะด้านกว้าง, B (แกน x) เท่ากับ 0.15 เมตร เบี่ยงศูนย์กลางที่ระยะด้านยาว, L (แกน y) เท่ากับ 0.30 เมตร

คุณสมบัติของมวลดิน กำหนดให้มีค่าหน่วยน้ำหนัก เป็น 18 กิโลนิวตันต่อลบ.ม. มวลดินไม่มีค่าไคฮ์ชัน และมุมเสียดทานภายใน เท่ากับ 30 องศา

หลักการคำนวณของโปรแกรม เริ่มที่คำนวณค่าการแบกรับน้ำหนักสูงสุดจากสมการที่ 6.37 หัวข้อที่ 6.7 แล้วทำการประมาณค่าในช่วง (interpolation) สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ตัวประกอบต่าง ๆ ที่เป็นค่าตัวประกอบเชิงรูปร่าง ความลึก ความลาดเอียงของไหลค และความสามารถในการรับไหลค เพื่อมาแทนค่าพจน์ตัวแปรของตัวประกอบในสมการที่ 6.37 หาค่าผลลัพธ์ที่ต้องการ

ผลของการคำนวณได้ค่า การแบกรับน้ำหนักสูงสุดเท่ากับ 528 กิโลนิวตันต่อตร.ม. และต่อมาทำการคำนวณค่าการแบกรับน้ำหนักสูงสุดทั้งหมด จากสมการที่ 6.38 ซึ่งต้องใช้พื้นที่ประสิทธิภาพช่วยในการคำนวณ ได้ค่า การแบกรับน้ำหนักสูงสุดทั้งหมดของไหลค เท่ากับ 858 กิโลนิวตันต่อตร.ม.

### 3. กรณีพิเศษของการหาค่าการแบกรับน้ำหนักสูงสุด

ตัวอย่างสำหรับกรณีพิเศษนี้ ได้ระบุค่าข้อมูลเข้ากรณีแรกไว้ในตารางที่ 6.11 หน้า 179 และข้อมูลเข้ากรณีที่สองไว้ในตารางที่ 6.12 หน้า 180 ข้อแตกต่างของสองกรณีคือ กรณีแรกมวลสารรองรับฐานรากเป็นชั้นดินเหนียว (อาจเป็นได้ทั้งดินเหนียวแข็งและดินเหนียวอ่อน) กรณีที่สองมวลสารที่รองรับฐานรากเป็นชั้นดินทรายสลับกับชั้นดินเหนียวอ่อน

โจทย์สมมุติของตัวอย่างกรณีที่มีมวลสารเป็นดินเหนียวอย่างเดียวนั้น จากข้อมูลเข้าที่ระบุในตารางที่ 6.11 กำหนดให้ฐานรากเป็นแบบ strip footing ขนาดความกว้าง 1.50 เมตร และมีความยาว 1.00 เมตร ระดับของพื้นฐานอยู่ที่ 1.00 เมตรจากผิวดิน และวางอยู่บนชั้นดินรุดแรก และมีระยะห่างจากผิวดินรุดล่าง เท่ากับ 1 เมตรด้วย

คุณสมบัติของชั้นดินรุดบนเป็นดินเหนียวอ่อน มีค่าหน่วยน้ำหนักของดิน เท่ากับ 16.80 กิโลนิวตันต่อลบ.ม. ค่าของ undrained shear strength หรือค่า undrained cohesion เท่ากับ 120.00 กิโลนิวตันต่อตร.ม. ดินเหนียวไม่มีค่าความเสียดทาน

คุณสมบัติของดินชั้นล่างเป็นดินเหนียวแข็ง มีค่าหน่วยน้ำหนักของดิน เท่ากับ 16.20 กิโลนิวตันต่อลบ.ม. ค่าของ undrained shear strength หรือค่า undrained cohesion เท่ากับ 48.00 กิโลนิวตันต่อตร.ม. ดินเหนียวไม่มีค่าความเสียดทาน

ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม โดยใช้สมการการแบกรับน้ำหนักสูงสุดของฐานรากแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (สมการ 6.62 ถึงสมการที่ 6.65) ร่วมกับการประมาณค่าต่าง ๆ ทำให้ได้ผลลัพธ์ของค่าไหลคบรรทุกสูงสุด เท่ากับ 698 กิโลนิวตันต่อตร.ม.

ตารางที่ 6.11 ข้อมูลกรณีพิเศษชุดแรก ที่ป้อนเข้าไปในโปรแกรมการคำนวณ กำหนดให้ฐานรากเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า วางบนชั้นดินเหนียว 2 ชั้น ดินเหนียวชั้นบนเป็นดินเหนียวอ่อน ดินเหนียวชั้นล่างเป็น ดินเหนียวแข็ง ขนาดมิติและค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ระบุในตาราง

**Ultimate Bearing Capacity for Some Special Case**

**Foundation on Layered Clay**

**Input Data**

Foundation Properties		Soil Properties	
Foundation Type	Strip	Soil Unit Weight	16.80
Width of Foundation	1.50	Undrained Cohesion	120.00
Length of Foundation	1.00	Friction Angle	0.00
Depth of Foundation	1.00	Saturated Unit Weight	0.00
Load Inclination	0.00		

Factor of Safety	N/A
Factor of Safety With Respect to Shear Failure	N/A

**Properties for First and Second Layer of Soil**

First Layer		Second Layer	
Unit Weight	16.80	Unit Weight	16.20
Undrained Cohesion	120.00	Undrained Cohesion	48.00
Friction Angle	0.00	Friction Angle	0.00
H Depth	1.00		

**Calculated Result**

Ultimate Bearing Capacity	697.54
---------------------------	--------

ตารางที่ 6.12 ข้อมูลกรณีพิเศษชุดสอง ที่มีอน เข้าไปในโปรแกรมการคำนวณ กำหนดให้ฐานรากเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า วางบนชั้นดินทราย ชั้นดินเหนียวเป็นดินทราย ส่วนชั้นดินชุดล่างเป็นดินเหนียวอ่อน ขนาดมิติและค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ระบุไว้ในตาราง

**Ultimate Bearing Capacity for Some Special Case**

**Foundation on Dense or Compacted Sand Overlying Soft Clay**

**Input Data**

Foundation Properties		Soil Properties	
Foundation Type	Strip	Soil Unit Weight	117.00
Width of Foundation	3.00	Cohesion	0.00
Length of Foundation	4.50	Friction Angle	40.00
Depth of Foundation	3.00	Saturated Unit Weight	0.00
Load Inclination	0.00		

Factor of Safety	N/A
Factor of Safety With Respect to Shear Failure	N/A

**Properties for First and Second Layer of Soil**

First Layer		Second Layer	
Unit Weight	117.00	Unit Weight	16.20
Cohesion	0.00	Undrained Cohesion	400.00
Friction Angle	40.00	Friction Angle	0.00
H Depth	4.00		

**Calculated Result**

Ultimate Bearing Capacity	9911.77
---------------------------	---------



ตัวอย่างของโจทยสำหรับชั้นดินที่เป็นดินทรายสลับกับดินเหนียวอ่อน กำหนดให้ขนาดของฐานรากแบบ strip footing มีค่าความกว้าง 3.00 เมตร และความยาว 4.50 เมตร ฐานวางบนชั้นดินทรายที่ระดับลึก 3.00 เมตรจากผิวดิน และระยะห่างในแนวดิ่งจากผิวดินชั้นล่าง เท่ากับ 4.00 เมตร

คุณสมบัติของดินรุดบนที่เป็นดินทราย มีค่าหน่วยน้ำหนัก 117.00 กิโลนิวตันต่อลบ.ม. มุมความเสียดทานภายใน เท่ากับ 40 องศา แต่ไม่มีค่าไคฮ์ชันหรือการยึดเกาะติด คุณสมบัติของดินรุดล่างเป็นดินเหนียวอ่อน มีค่าหน่วยน้ำหนัก เท่ากับ 16.20 กิโลนิวตันต่อลบ.ม. ค่าของ undrained shear strength หรือ undrained cohesion เท่ากับ 400.00 กิโลนิวตันต่อคร.ม. ดินเหนียวอ่อนไม่มีความเสียดทาน

ผลลัพธ์ของการคำนวณโดยใช้โปรแกรม ได้ค่า ไหลคบรรจุสูงสุด เท่ากับ 9,912 กิโลนิวตันต่อคร.ม. หลักการที่ใช้ในการคำนวณจากโปรแกรมจะใช้สมการที่ 6.68 กับฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า ร่วมกับสมการที่ 6.69 ในการไหลคบรรจุสูงสุด โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการแทนค่า เป็นการประมาณค่าจากกราฟความสัมพันธ์

#### 6.15.2 โปรแกรมการหาค่าระยะการทรุดตัวของมวลสารใต้ฐานราก

นอกจากเรื่องความสามารถในการแบกรับน้ำหนักของไหลค ที่ฐานรากกระทำต่อมวลสารแล้ว การทรุดตัวของมวลสารเมื่อมีไหลคมากกระทำก็เป็นประเด็นสำคัญอีกเรื่องหนึ่ง ที่ควรมีการศึกษาไว้ ตัวอย่างสำหรับกรณีนี้ก็จะใช้ได้เฉพาะฐานรากระดับดินแบบ spread footing เท่านั้น

โปรแกรมแบบจำลองสำหรับการหาระยะการทรุดตัว แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การทรุดตัวทั่วไป การทรุดตัวมวลสารที่เป็นชั้นดิน และการทรุดตัวเมื่อไหลคที่กระทำเบื้องต้นกลางฐานราก

##### 1. ระยะการทรุดตัวอย่างทันทีที่ทันใดแบบทั่วไป

เมื่อมีฐานรากระดับดินวางอยู่บนมวลดิน มีผลทำให้เกิดการทรุดตัวเกิดขึ้นได้ ตัวอย่างของการคำนวณระยะการทรุดตัวอย่างทันทีที่ทันใด ได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.13 หน้า 182 ข้อมูลเข้าที่ระบุไว้ในตาราง ให้ฐานรากจัตุรัสขนาด 1.50 x 1.50 คร.ม. วางตัวบนชั้นดินเหนียวที่ไม่มีค่าความเสียดทาน และค่า undrained shear strength หรือ undrained cohesion เท่ากับ 120 กิโลนิวตันต่อคร.ม. ค่าคุณสมบัติทางด้าน การเปลี่ยนรูปและปริมาตร ดินเหนียวชั้นนี้ มี Poisson's ratio เท่ากับ 0.30 และค่ามอดุลัสเชิงอีลาสติก เท่ากับ 18 เมกะนิวตันต่อลบ.ม.

กำหนดไหลคจากฐานราก มีค่า 180 กิโลนิวตันต่อคร.ม. จะได้ผลลัพธ์ของค่าระยะการทรุดตัว เท่ากับ 12.1 มิลลิเมตร สมการที่ใช้ในการคำนวณเกี่ยวกับโปรแกรมนี้ใช้สมการที่ 6.74 และการประมาณค่าจากกราฟของรูปที่ 6.17

ตารางที่ 6.13 ข้อมูลที่ป้อนเข้าโปรแกรม และผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ สำหรับฐานรากที่วางตัวบนมวลดินแล้วเกิดการทรุดตัวอย่างทันทีทันใด

### Immediate Settlement

#### Input Data

Foundation Properties		Soil Properties	
Foundation Type	Square	Soil Unit Weight	16.80
Width of Foundation	1.50	Cohesion	30.00
Length of Foundation	1.50	Friction Angle	0.00
Depth of Foundation	2.00	Saturated Unit Weight	0.00
Load Inclination	0.00		

#### Settlement Properties

Foundation	Rigid
Total Applied Load	180.00
Soil Poisson Ratio	0.30
Modulus of Elasticity	18000.00

#### Calculated Result

Settlement	0.0121
------------	--------

## 2. ระยะการทรุดตัวของชั้นดินใต้ฐานราก

ถ้าหากทราบชนิดของมวลที่เป็นชั้นดิน ได้มีผู้เสนอแนะการหาค่าระยะการทรุดตัวไว้ เป็นสูตรเชิงประสบการณ์หลายแนวทาง ดังที่ได้ระบุไว้ในหัวข้อ 6.11.2 สำหรับฐานรากที่วางตัวบนชั้นดินเหนียวอิมตัว กับหัวข้อ 6.11.3 สำหรับฐานรากที่วางตัวบนชั้นดินทราย

ตัวอย่างของฐานรากที่วางตัวบนชั้นดินเหนียวอิมตัว ได้ระบุค่าตัวเลขไว้ในตารางที่ 6.14 หน้า 184 โดยกำหนดให้ฐานรากเป็นแบบจตุรัส ขนาด  $1.50 \times 1.50$  ตร.ม. ระยะลึกจากผิวดินถึงพื้นฐาน เท่ากับ 2.00 เมตร และระยะลึกจากฐานถึงผิวดินชั้นล่าง เท่ากับ 1.00 เมตร

คุณสมบัติของมวลดินเหนียวอิมตัว มีค่าหน่วยน้ำหนัก เท่ากับ 22.00 กิโลนิวตันต่อตร.ม. ดินไม่มีค่าความเสียดทาน และมีค่า undrained cohesion เท่ากับ 120.00 กิโลนิวตันต่อตร.ม. ค่าของ Poisson's ratio เท่ากับ 0.50 มอดุลัสของอีลาสติค มีค่าเท่ากับ 18 กิโลนิวตันต่อตร.ม. ถ้าหากมีไหลคจากฐานรากมากจะทำให้เกิดการทรุดตัวเท่ากับ 3.9 มิลลิเมตร

ตัวอย่างของการทรุดตัวบนชั้นทราย (ตารางที่ 6.15 หน้า 185) กำหนดให้มีฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดความกว้าง 2.6 เมตร และความยาว 23.00 เมตร เนื่องจากระยะความยาวมีค่ามากกว่าระยะความกว้างมาก ดังนั้นอิทธิพลของความเครียดจะมีส่วนเกี่ยวข้องกับค้ำย กำหนดให้ระยะลึกของฐานราก เท่ากับ 2.00 เมตร โดยที่ค่าไหลคของฐานรากที่กระทำต่อมวลสารเท่ากับ 10.68 เมกะนิวตันต่อตร.ม. ระยะเวลาของการทรุดตัว เท่ากับ 5 ปี

คุณสมบัติของมวลดินทราย มีค่าหน่วยน้ำหนัก เท่ากับ 15.70 กิโลนิวตันต่อตร.ม. ดินทรายไม่มีค่าไคฮ์ชั้น มุมเสียดทานภายใน เท่ากับ 30 องศา ผลของการตรวจวัดไหลคที่กระทำชั้นดินย่อยทั้ง 10 ชั้น ได้ค่าความต้านทานจากการทะลวงด้วยเครื่องมือตรวจสอบ ซึ่งระบุไว้ในตารางที่ 6.15 เป็นค่า  $q_c$  ผลลัพธ์ที่คำนวณจากสมการที่ 6.76 และจากการประมาณค่าอิทธิพลของความเครียด ( $I_r$ ) กับค่าความต้านทานจากการทะลวง ( $q_c$ ) จะได้ผลลัพธ์ค่า ระยะการทรุดตัวในเวลาห้าปี เป็น 31 มิลลิเมตร

## 3. ระยะการทรุดตัวเมื่อไหลคเบื้องศูนย์กลาง

ตัวอย่างในกรณีนี้ระบุเป็นข้อมูลเข้าในตารางที่ 6.16 หน้า 186 โดยที่ฐานรากของโจทย์ตัวอย่างเป็นแบบสี่เหลี่ยมจตุรัส ขนาด  $1.50 \times 1.50$  ตร.ม. ความลึกจากผิวดินถึงระดับพื้นฐานรากเท่ากับ 0.70 เมตร

คุณสมบัติของมวลดิน เท่ากับ 18 กิโลนิวตันต่อตร.ม. ดินไม่มีค่าไคฮ์ชั้น และมุมเสียดทานภายใน เท่ากับ 30 องศา ค่า Poisson's ratio เท่ากับ 0.30 และมอดุลัสของอีลาสติค เท่ากับ 15 เมกะนิวตันต่อตร.ม.

ตารางที่ 6.14 ข้อมูลที่ป้อนเข้าโปรแกรม และผลลัพธ์จากการคำนวณ  
สำหรับฐานราก ที่วางตัวบนมวลดินเหนียวที่อิ่มตัว  
แล้วเกิดการทรุดตัวอย่างทันทีทันใด

**Immediate Settlement on Saturated Clay**

**Input Data**

Foundation Properties		Soil Properties	
Foundation Type	Square	Soil Unit Weight	0.00
Width of Foundation	1.50	Undrained Cohesion	120.00
Length of Foundation	1.50	Friction Angle	0.00
Depth of Foundation	2.00	Saturated Unit Weight	22.00
Load Inclination	0.00		

**Settlement Properties**

Total Applied Load	180.00
Soil Poisson Ratio	0.50
Modulus of Elasticity	18000.00
H Depth	1.00

**Calculated Result**

Settlement	0.0039
------------	--------

ตารางที่ 6.15 ข้อมูลที่ป้อนเข้าโปรแกรม และผลลัพธ์จากการคำนวณ สำหรับฐานรากที่วางค้ำบนมวลดินทราย กำหนดให้มีระยะเวลาทรุดตัว เป็นเวลา 5 ปี ประกอบกับค่าของการตรวจสอบการทะลวงด้วยเครื่องมือภาคสนาม

**Immediate Settlement of Sandy Soil**

**Input Data**

Foundation Properties		Soil Properties	
Foundation Type	Strip	Soil Unit Weight	15.70
Width of Foundation	2.60	Cohesion	0.00
Length of Foundation	23.00	Friction Angle	30.00
Depth of Foundation	2.00	Saturated Unit Weight	0.00
Load Inclination	0.00		

**Settlement Properties**

Total Applied Load	10676.69
Time Use for Correction Factor (year)	5.00

Layer	Thickness	$q_c$
1	1.00	2450.00
2	0.30	3430.00
3	1.70	3430.00
4	0.50	6870.00
5	1.00	2950.00
6	0.50	8340.00
7	1.50	14000.00
8	1.00	6000.00
9	1.00	10000.00
10	1.90	4000.00

**Calculated Result**

Settlement	0.0311
------------	--------

ตารางที่ 6.16 ข้อมูลที่ป้อนเข้าโปรแกรม และผลลัพธ์จากการคำนวณค่าระยะการทรุดค้ำอย่างทันทีทันใด สำหรับฐานรากที่วางค้ำบนมวลดินกำหนดให้มีไหลคกระทำเชิงศูนย์กับฐานราก

**Immediate Settlement by Eccentric Load**

**Input Data**

Foundation Properties		Soil Properties	
Foundation Type	Square	Soil Unit Weight	18.00
Width of Foundation	1.50	Cohesion	0.00
Length of Foundation	1.50	Friction Angle	30.00
Depth of Foundation	0.70	Saturated Unit Weight	0.00
Load Inclination	0.00		

**Settlement Properties**

Total Applied Load	180.00
Soil Poisson Ratio	0.30
Modulus of Elasticity	15000.00
Eccentricity	0.15

**Calculated Result**

Settlement	0.0056
Rotation Angle	0.0844

ไหลคที่กระทำมีค่า 180 กิโลนิวตันต่อคร.ม. และเบี่ยงศูนย์แนวเด็วที่ระยะตามความกว้าง (B) ของฐานตามแกน x เท่ากับ 0.15 เมตร

ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ ได้ค่า ระยะการทรุดตัว เท่ากับ 5.6 มิลลิเมตร และได้ มุมของการหมุน เท่ากับ 0.084 องศา การคำนวณของโปรแกรมเพื่อหาค่าระยะการทรุดตัวเนื่องจากไหลคเบี่ยงศูนย์ ใช้สมการที่ 6.77 ถึงสมการที่ 6.81 ร่วมกับการใช้แนวทางของการประมาณค่าตัวประกอบที่เทียบกับอัตราส่วนของ L/B

## บทที่ 7

### บทสรุปของแบบจำลองการหาเสถียรภาพ

การประเมินเสถียรภาพของการขุดเจาะ นอกจากจะสามารถทำการคำนวณด้วยเครื่องคิดเลขธรรมดาแล้ว ยังสามารถใช้โปรแกรมแบบจำลองที่เขียนขึ้นมาประกอบกับเอกสารเล่มนี้ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาผลลัพธ์เสถียรภาพของการขุดเจาะ เพื่อช่วยให้การคำนวณรวดเร็ว แม่นยำ และเป็นการออกแบบปฏิบัติงานภาคสนามได้ล่วงหน้า

#### 7.1 หลักการทั่วไปของโปรแกรมการวิเคราะห์เสถียรภาพ

จุดมุ่งหมายของโปรแกรมประเมินเสถียรภาพการขุดเจาะ ก็เพื่อให้เกิดการวางแผนล่วงหน้าเป็นไปอย่างสะดวก รวดเร็ว และยังช่วยปรับแก้สถานการณ์การขุดเจาะที่ได้ดำเนินการไปแล้วอีกด้วย หลักการทั่วไปของโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้เป็นแบบจำลองในการประเมินผลลัพธ์ของค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพ มีดังนี้

##### 7.1.1 แนวทางการเขียนโปรแกรม

โปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่เขียนด้วยภาษาเคลพี โปรแกรมมีการทำงานผ่าน Windows 95 แบ่งแนวทางการวิเคราะห์ออกเป็น 2 แนวทางหลัก ส่วนแรกเป็นแนวทางที่หาเสถียรภาพของความลาดเอียงหรือเหมืองเปิด ส่วนที่สองเป็นแนวทางที่ใช้วิเคราะห์หาเสถียรภาพของฐานรากระดับดิน

การคำนวณเสถียรภาพของความลาดเอียงหรือเหมืองเปิดมีหลายวิธีการด้วยกัน สำหรับโปรแกรมหลักของการวิเคราะห์เสถียรภาพ คือ โปรแกรม STABIL.EXE ที่จะทำการรวมแนวทางการวิเคราะห์การพังทลายทั้งแบบระนาบ กับการพังทลายแบบวงกลม ไปด้วยกัน

โปรแกรม WEDGE.EXE เป็นโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์การพังทลายแบบรูปสามเหลี่ยม ซึ่งจะรวมทั้งการวิเคราะห์ของ Sarma เข้าไว้ด้วย สำหรับโปรแกรมวิเคราะห์การพังทลายแบบทอปเปิลนี่มีชื่อเรียกว่า TOPP.EXE

การหาเสถียรภาพของฐานรากระดับดิน ใช้โปรแกรม FDT.EXE ซึ่งจะคำนวณหาค่าตัวเลขนี้สำคัญของทุกดิ่งแบบแม่ เพื่อหาค่าการแบกรับน้ำหนักสูงสุด และระยะการทรุดตัวของมวลสาร



### 7.1.2 วิธีการใช้โปรแกรมแบบจำลอง

ผู้ใช้เป็นผู้เลือกวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพการขุดเจาะแบบการเลือกเมนู ซึ่งผู้ใช้งานต้องการวิเคราะห์เสถียรภาพตามรูปแบบของการพังทลายที่เกิดขึ้น หรือคาดว่าจะเกิดผลกระทบของไหลคจากฐานรากขึ้น ต่อมาโปรแกรมจะมีคำถามให้ผู้ใช้งานเลือกระบบหน่วยของมิติ เช่น หน่วยในระบบ S.I. หรือหน่วยในระบบ Imperial เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อป้องกันความผิดพลาดขั้นต้น เกี่ยวกับการแปลงหน่วยของมิติที่ตรวจวัดในภาคสนาม หรือจากการสมมุติค่าคุณสมบัติมวลสารขึ้นเอง

ข้อมูลดิบที่ต้องการจะมีการจัดลำดับเมนู ให้ผู้ใช้งานเป็นผู้ป้อนค่าที่โปรแกรมต้องการลงบนหน้าจอ โดยใช้ปุ่มลูกศรเลื่อนแถบแสงมายังตำแหน่งที่ต้องการจะป้อนข้อมูลดิบ เมื่อทำการป้อนข้อมูลครบหนึ่งหน้าจอ และโปรแกรมยังต้องการค่าอื่นอีก โปรแกรมจะมีคำสั่งให้กดปุ่มใดปุ่มหนึ่งเพื่อเลื่อนหน้าจอถัดมา เมื่อได้ข้อมูลครบ โปรแกรมจะเริ่มทำการคำนวณ ปกติโปรแกรมจะระบุค่าผลลัพธ์สุดท้ายเป็นค่าตัวเลขบ่งชี้ความปลอดภัยหรือตัวเลขเชิงการแบกรับน้ำหนักหรือการทรุดตัว

### 7.1.3 แนวทางการใช้งานโปรแกรมย่อยที่คำนวณหาเสถียรภาพ

เสถียรภาพของมวลสารทั้งที่เป็นมวลดินหรือมวลหิน นอกจากจะเกี่ยวข้องโดยตรงต่อค่าคุณสมบัติของมวลสารนั้น เสถียรภาพยังขึ้นอยู่กับรูปแบบเชิงเรขาคณิตของมวลสารที่ถูกขุดเจาะ หรือสภาวะที่มวลสารในขณะนั้น เช่น มวลเปียกอิ่มตัวด้วยน้ำหรือมวลแห้ง เป็นต้น การที่จะเพิ่มเสถียรภาพของงานการขุดเจาะก็สามารถทำได้หลายแนวทาง เช่น การแก้ไขระดับความลาดชันของแนวถนนที่ตัดผ่านไหล่เขา การเพิ่มแรงเสียดทานระหว่างมวลสารกับระนาบของการพังทลาย เป็นต้น

## 7.2 ข้อจำกัดของการใช้โปรแกรมแบบจำลอง

เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ใช้ได้กับโปรแกรมแบบจำลอง เพื่อคำนวณหาตัวเลขเชิงเสถียรภาพของมวลสาร ควรมีหน่วย CPU เป็น PC 80486 หรือเทียบเท่า และมีระบบการปฏิบัติการของ Windows 95 ขึ้นไป ขนาดของช่องดิสก์ที่อ่านข้อมูลต้อง เท่ากับ 3.5 นิ้ว และจอภาพของเครื่องควรเป็นจอสี เพื่อที่จะดูภาพกราฟิกในบางโปรแกรม

โปรแกรมสำเร็จรูปบรรจุในแผ่นจานบันทึกมีการวิเคราะห์ผลตามแนวทางที่ได้อธิบายไว้ในหลายบทของรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ผลเชิงเสถียรภาพก็ยังมีอยู่บ้าง ถ้าหากปัญหาในภาคสนามแตกต่างไปจากสมมุติฐานที่ได้กำหนดไว้ก่อนทำการวิเคราะห์ ในบางกรณีผู้ใช้งานก็ต้องสมมุติค่าคุณสมบัติของมวลสารขึ้นเอง

ข้อจำกัดอีกอย่างหนึ่งของการจำลองแบบงานการชุดเจาะก็คือ ในการเลือกตัวเลข ค่าปัจจัยความปลอดภัย ค่าตัวเลขที่ค่าสุดที่หาจากโปรแกรมแบบจำลองอาจไม่ใช่ค่าตัวเลขที่เหมาะสมที่สุด จำเป็นต้องตรวจสอบกับสภาพของหน้างานภาคสนาม เพื่อให้สามารถตัดสินใจได้ถูกต้องและปลอดภัยต่อการปฏิบัติงาน

ข้อผิดพลาดของการใช้งานโปรแกรมแบบจำลองอีกอย่างหนึ่งก็คือ ในภาคสนามอาจจะมีการพังทลายของมวลสาร เกิดได้หลายรูปแบบในความลาดเอียงเดียวกัน โปรแกรมแบบจำลองนี้ยังไม่สามารถจำลองสถานการณ์ให้เหมือนจริงได้ จำเป็นต้องทำให้ง่าย โดยการเลือกใช้แบบใดแบบหนึ่ง แล้วผู้ใช้นำค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยที่ได้ของแต่ละแบบมาเปรียบเทียบกับก่อนการตัดสินใจค่าเนินงานภาคสนามต่อไป

## บรรณานุกรม

1. สง่า ตั้งชวาล (2538)  
 "การประเมินเสถียรภาพของเหมืองเปิดและอุโมงค์ใต้ดิน" รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ มิถุนายน 2538 ทุนอุดหนุนโครงการสิ่งประดิษฐ์ ฝ่ายวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 244 หน้า
2. Bell, F.G. (1992)  
 "Engineering in Rock Masses," Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, 580 pp.
3. Bishop, A.W. (1955)  
 "The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Earth Slope," Geotechnique, London, Vol. 5, pp. 7-17.
4. Das, B.M. (1994)  
 "Principles of Geotechnical Engineering: Third Edition," PWS Publishing Company, Boston, 672 pp.
5. Das, B.M. (1995)  
 "Principles of Foundation Engineering: Third Edition," PWS Publishing Company, Boston, 828 pp.
6. Fellenius, W. (1936)  
 "Calculation of the Stability of Earth Dams," Transactions 2<sup>nd</sup> Congress on Large Dams, Washington, D.C., Vol. 4, pp. 445-465.
7. Giani, Gian Paolo (1992)  
 "Rock Slope Stability Analysis," A.A. Balkema, Rotterdam, 361 pp.

8. Goodman, R.E. and Gen-hua Shi (1985)  
"Block Theory and Its Application to Rock Engineering,"  
Prentice-Hall, Inc., Eaglewood Cliffs, New Jersey, 338 pp.
9. Harr, M.E. (1962)  
"Groundwater and Seepage," McGraw-Hill Book Company, New  
York, 314 pp.
10. Harr, M.E. (1966)  
"Fundamentals of Theoretical Soil Mechanics," McGraw-Hill,  
New York.
11. Hoek, E., J.W. Bray and J.M. Boyd (1973)  
"The Stability of a Rock Containing a Wedge Resting on Two  
Intersecting Discontinuities," Quarterly Journal of Engineering  
Geology, London, Vol. 6, No. 1, pp. 1-55.
12. Hoek, E. and J.W. Bray (1977)  
"Rock Slope Engineering: Revised Second Edition," The  
Institution of Mining and Metallurgy, London, 402 pp.
13. Hoek, E. and J.W. Bray (1981)  
"Rock Slope Engineering: Revised Third Edition," The  
Institution of Mining and Metallurgy, London, 358 pp.
14. Hoek, E. (1987)  
"General Two-Dimensional Slope Stability Analysis," A  
Chapter in Analytical and Computational Methods in Engineering  
Rock Mechanics, Editor E.T. Brown, pp. 95-128.
15. Janbu, N. (1954)  
"Application of Composite Slip Circles for Stability  
Analysis," Proceedings European Conference on Stability of Earth  
Slopes, Stockholm, Sweden, Vol. 3, pp. 43-49.

16. Koppula, S.D. (1984)  
"Pseudo-Static Analysis of Clay Slopes Subjected to Earthquakes," Geotechnique, London, Vol. 34, No. 1, pp. 71-79.
17. Lee, I.K., W. White and O.G. Ingles (1983)  
"Geotechnical Engineering," Pitman Publishing Inc., Boston, 508 pp.
18. Meyerhof, G.G. (1974)  
"Ultimate Bearing Capacity of Footings on Sand Layer Overlying Clay," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 11, No. 2, pp. 224-229.
19. Meyerhof, G.G. and A.M. Hanna (1978)  
"Ultimate Bearing Capacity of Foundations on Layered Soil Under Inclined Load," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 15, No. 4, pp. 565-572.
20. Parry, R.H.G. (1977)  
"Estimating Bearing Capacity in Sand from SIP Values," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. GT9, pp. 1014-1019.
21. Sarma, S.K. (1979)  
"Stability Analysis of Embankments and Slopes," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 105, No. GT12, pp. 1511-1524.
22. Sarma, S.K. and M.V. Bhave (1974)  
"Critical Acceleration versus Static Factor of Safety in Stability Analysis of Earth Dams and Embankments," Geotechnique, London, Vol. 24, No. 4, pp. 661-665.

23. Schmertmann, J.H. (1978)  
"Guidelines for Cone Penetrations: Performance and Design,"  
Report No. FHWA-TS-78-209, U.S. Department of Transportation,  
Washington, D.C.
24. Schmertmann, J.H. and J.P. Hartman (1978)  
"Improved Strain Influence Factor Diagrams," Journal of the  
Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 104, No. GT8,  
pp. 1131-1135.
25. Skempton, A.W. and L. Bjerrum (1957)  
"A Contribution to Settlement Analysis of Foundations in  
Clay," Geotechnique, London, Vol. 7, p. 178.
26. Tangchawal, S., S. Phuvichit, V. Pisutha-Arnond (1993)  
"Stability Study and Mineralogical Evaluation of Clays for  
Lignite Mine," Proceedings of the Australian Conference on  
Geotechnical Instrumentation and Monitoring in Open Pit and  
Underground Mining, Editor T. Szwedzicki, Kalgoorlie, Western  
Australia, A.A. Balkema, pp. 455-462.
27. Taylor, D.W. (1937)  
"Stability of Earth Slopes," Journal of the Boston Society  
of Civil Engineers, Vol. 24, No. 3, pp. 197-246.
28. Terzaghi, K. (1943)  
"Theoretical Soil Mechanics," John Wiley & Sons, New York.
29. Terzaghi, K. and R.B. Peck (1967)  
"Soil Mechanics in Engineering Practice: 2<sup>nd</sup> Edition,"  
John Wiley & Sons, New York, 729 pp.

30. Vesic, A.S. (1973)  
"Analysis of Ultimate Loads of Shallow Foundations,"  
Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE,  
Vol. 99, No. SM1, pp. 45-73.
  
31. Wyllie, D.C. (1992)  
"Foundations on Rock," E & FN Spon, An Imprint of Chapman  
& Hall, London, 333 pp.
  
32. Xanthakos, P.P., L.W. Abramson, D.A. Bruce (1994)  
"Ground Control and Improvement," A Wiley-Interscience  
Publication, John Wiley & Sons, New York, 910 pp.



**ตาราง CONVERSION FACTOR**  
**ระหว่างระบบ IMPERIAL กับระบบ S.I.**

	SI	Equal to Imperial	Imperial	Equal to SI
Length	1 km	0.6215 mile	1 mile	1.609 km
	1 m	3.2808 ft	1 ft	0.3048 m
	1 mm	0.0394 in	1 in	25.4 mm
Area	1 km <sup>2</sup>	0.3861 mile <sup>2</sup>	1 mile <sup>2</sup>	2.59 km <sup>2</sup>
	1 m <sup>2</sup>	0.0002 acre	1 acre	4046.9 m <sup>2</sup>
	1 m <sup>2</sup>	10.7643 ft <sup>2</sup>	1 ft <sup>2</sup>	0.0929 m <sup>2</sup>
	1 mm <sup>2</sup>	15.50 in <sup>2</sup>	1 in <sup>2</sup>	0.0645 mm <sup>2</sup>
Volume	1 m <sup>3</sup>	1.3079 yd <sup>3</sup>	1 yd <sup>3</sup>	0.7646 m <sup>3</sup>
	1 m <sup>3</sup>	35.3357 ft <sup>3</sup>	1 ft <sup>3</sup>	0.0283 m <sup>3</sup>
	1 mm <sup>3</sup>	2.2 × 10 <sup>-7</sup> Imperial gallon	1 Imperial gallon	4.546 × 10 <sup>6</sup> mm <sup>3</sup>
	1 mm <sup>3</sup>	2.6 × 10 <sup>-7</sup> US gallon	1 US gallon	3.785 × 10 <sup>6</sup> mm <sup>3</sup>
	1 mm <sup>3</sup>	6.10 × 10 <sup>-5</sup> in <sup>3</sup>	1 in <sup>3</sup>	1.639 × 10 <sup>4</sup> mm <sup>3</sup>
Mass	1 Mg	0.9843 ton	1 ton	1.016 Mg
	1 kg	2.2046 lb	1 lb	0.4536 kg
	1 gm	0.0353 oz	1 oz	28.352 gm
Density	1 kg/m <sup>3</sup>	0.0624 bl/ft <sup>3</sup>	1 bl/ft <sup>3</sup>	16.019 kg/m <sup>3</sup>
Unit Weight	1 kN/m <sup>3</sup>	6.3654 bl/ft <sup>3</sup>	1 bl/ft <sup>3</sup>	0.1571 kN/m <sup>3</sup>
Force	1 kN	0.1004 ton f	1 ton f	9.964 kN
	1 N	0.2248 lb f	1 lb f	4.448 N
Pressure or Stress	1 Mpa	0.0648 ton f/in <sup>2</sup>	1 ton f/in <sup>2</sup>	15.44 MPa
	1 kPa	0.0093 ton f/ft <sup>2</sup>	1 ton f/ft <sup>2</sup>	107.3 kPa
	1 kPa	0.1450 lb f/in <sup>2</sup>	1 lb f/in <sup>2</sup>	6.895 kPa
	1 kPa	20.8855 lb f/ft <sup>2</sup>	1 lb f/ft <sup>2</sup>	0.04788 kPa
	1 kPa	0.0099 standard atmosphere	1 standard atmosphere	101.325 kPa
	1 bar (0.987 atm.)	14.495 lb f/in <sup>2</sup>	1 lb f/in <sup>2</sup>	0.06899 bar
	1 kPa	0.3346 ft water	1 ft water	2.989 kPa
	1 kPa	0.2953 in. mercury	1 in. mercury	3.386 kPa
Permeability	1 m/s	1.04 × 10 <sup>-3</sup> ft/year	1 ft/year	9.66 × 10 <sup>-9</sup> m/s
Flow rate	1 m <sup>3</sup> /s	35.3107 ft <sup>3</sup> /s	1 ft <sup>3</sup> /s	0.02832 m <sup>3</sup> /s
Moment	1 Nm	0.7376 lbf ft	1 lbf ft	1.3558 Nm
Energy	1 J	0.7376 ft lbf	1 ft lbf	1.3558 J
Frequency	1 Hz	1 c/s	1 c/s	1 Hz