

การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน เสริมกำลังด้วยวัสดุสังเคราะห์



น.ต. ปกรณ์ มหารักษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF COMPUTER PROGRAM FOR GEOSYNTHETICS REINFORCED SLOPE STABILITY  
ANALYSIS

Sqn.Ldr. Pakorn Maharak

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

501398

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของ  
ลาดดิน เสริมกำลังด้วยวัสดุสังเคราะห์

โดย

น.ต. ปกรณ์ มหารักษ์

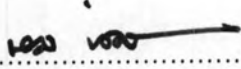
สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

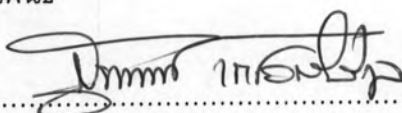
อาจารย์ที่ปรึกษา

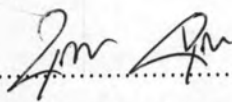
รองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย อุกฤษฏาชน

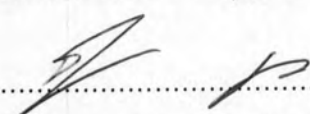
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

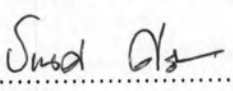
  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย อุกฤษฏาชน)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุวิตร บุญบงะฐี)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธเนศ ศรีศิริโรจนากร)

ปกรณัม มหาทักษ์ : การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน เสริมกำลังด้วยวัสดุสังเคราะห์.(DEVELOPMENT OF COMPUTER PROGRAM FOR GEOSYNTHETICS REINFORCED SLOPE STABILITY ANALYSIS) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร. บุญชัย อุกฤษฏาชน, 100 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาข้อมูลทางวิศวกรรมของวัสดุสังเคราะห์เสริมกำลัง และพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินเสริมกำลังด้วยวัสดุสังเคราะห์ วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพใช้หลักการของวิธี สมดุลสุดขีดร่วมกับวิธีแบ่งชั้นดิน ได้แก่วิธี Fellenius, Bishop, Spencer และ Morgenstern-Price แรงดึงของวัสดุเสริมกำลังถูกนำไปในการคำนวณในวิธีแบ่งชั้นดินแบบทั่วไป โดยพิจารณาการกระจายแรงดึงของวัสดุเสริมกำลัง 2 แบบคือ 1)แบบคงที่ 2)แบบลดลงเชิงเส้น นอกจากนี้การคำนวณทิศทางแรงดึงของวัสดุเสริมกำลังภายในโปรแกรมมี 2 ทิศทางคือ ทิศทางขนานกับทิศทางการวางของวัสดุเสริมกำลัง และ ทิศทางสัมผัสกับพื้นผิววิบัติ การคำนวณแรงลัพทในแต่ละชั้นดิน ซึ่งเกิดจาก น้ำหนักดิน, แรงกระทำภายนอก, แรงเสมือนแผ่นดินไหวในแนวราบ และแรงดึงของวัสดุเสริมกำลัง ทำให้การคำนวณวิธีแบ่งชั้นดินที่มีวัสดุเสริมกำลัง เหมือนกับ การคำนวณวิธีแบ่งชั้นดินที่ไม่มีวัสดุเสริมกำลัง โปรแกรมสามารถค้นหาพื้นผิววิบัติวิกฤตอย่างอัตโนมัติ ทั้งพื้นผิวแบบส่วนโค้งวงกลม และพื้นผิวทั่วไป นอกจากนี้โปรแกรมยังสามารถวิเคราะห์รูปแบบการวิบัติแบบไถลไปบนแผ่นของวัสดุเสริมกำลังสำหรับกรณีพื้นผิวทั่วไป

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นถูกนำไปประยุกต์ในการวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพจำนวนมาก ทั้งลาดดินไม่มีวัสดุเสริมกำลังและลาดดินมีวัสดุเสริมกำลัง เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือและความถูกต้องของส่วนการคำนวณ ผลการคำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของทุกปัญหา สอดคล้องอย่างมากกับค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจากเอกสารอ้างอิง ผลลัพธ์สำคัญจากการวิเคราะห์ลาดดินมีวัสดุเสริมกำลัง คือ กรณีการกระจายแรงดึงเป็นแบบลดลงเชิงเส้นและดินที่ฐานชั้นดินเป็นชนิดมีค่ามุมเสียดทานประสิทธิผล ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของแรงดึงมีทิศทางขนานกับทิศทางการวางของวัสดุ มีค่ามากกว่ากรณีของแรงดึงมีทิศทางสัมผัสกับพื้นผิววิบัติ ซึ่งเป็นผลตรงกันข้ามกับ กรณีการกระจายแรงดึงเป็นแบบคงที่และใช้วิธีสมดุลโมเมนต์ทั้งหมดเพียงอย่างเดียวในการคำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัย คือ แรงดึงมีทิศทางขนาน จะได้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยกว่ากรณี แรงดึงมีทิศทางสัมผัส

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
 ปีการศึกษา ...2550.....

# # 4870363121 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: SLOPE STABILITY / REINFORCED SLOPE / METHOD OF SLICES / COMPUTER PROGRAM.

PAKORN MAHARAK : DEVELOPMENT OF COMPUTER PROGRAM FOR GEOSYNTHETICS REINFORCED SLOPE STABILITY ANALYSIS. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. BOONCHAI UKRITCHON, Ph.D., 100 pp.

This thesis studied engineering aspects of geosynthetics materials and developed a computer program for analyzing geosynthetics-reinforced slope stability. The slope stability analysis used the concept of the limit equilibrium method with the methods of slice, namely the methods of Fellenius, Bishop, Spencer and Morgenstern-Price. Tensile forces of reinforcement were incorporated into those general methods of slices by considering two distributions of tensile force of reinforcement: 1) constant type; and 2) linear decrease type. In addition, two calculations of tensile force orientation were implemented into the program, where the direction of tensile force is parallel with the reinforcement alignment and is tangent to failure surface. Calculations of resultant forces of each slice arising from soil weight, external forces, pseudo seismic horizontal forces and reinforcement forces enabled calculations of method of slice with reinforcement to follow those of general method of slice without reinforcement. The program automatically searched the critical circular arc failure surface as well as general failure surface. In addition, the program could analyze failure mechanism of direct sliding along reinforcement for the case of general failure surface.

The developed program was applied to analyze various examples of non-reinforced and reinforced slope stability in order to check the validity and correctness of calculated modules. All results of computed factor of safety corresponded very well with those published in the literature. Major finding from analyzing examples reinforced slope was that for the case of linear decrease of tensile force distribution and soil at slice base has effective friction angle value, the factor of safety of the tensile force parallel with alignment is higher than that tangent to the failure surface. Such result is contrast to the constant tensile force distribution and calculating FS. by overall moment equilibrium equation only, where the parallel case is lower than the tangent case.

Department.....Civil.Engineering..... Student's signature.....*M. Pakorn*.....  
Field of study.....Civil.Engineering..... Advisor's signature.....*[Signature]*.....  
Academic year .....2007.....

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้า ขอระลึกถึงพระคุณอันยิ่งใหญ่ของบิดา และมารดาผู้ให้กำเนิด ,เลี้ยงดู และอบรมสั่งสอนมาตั้งแต่เยาว์วัย รวมถึง พระคุณของครูบาอาจารย์ตั้งแต่ อดีตจนถึงปัจจุบัน

พระคุณของกองทัพอากาศ ซึ่งเป็นสถาบัน ที่ให้ทั้งความรู้ และฝึกอบรมระเบียบ วินัย-สั่งสอนแนวทางการดำรงชีวิตแก่ข้าพเจ้าในระดับอุดมศึกษา และ เป็นสถานที่ ที่ให้ ประสบการณ์ในการทำงาน รวมถึงอนุมัติให้ข้าพเจ้าสามารถลาศึกษาต่อ ณ.จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ได้ในครั้งนี้

พระคุณของ คณาจารย์ และ บุคลากรทุกท่าน ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้ซึ่ง ร่วมกันตั้งใจทำงาน เพื่อผลแห่งการประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่บัณฑิตทั้งหลาย

และขอขอบพระคุณ ท่านอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. บุญชัย อุกฤษฏาชน ผู้กรุณาสั่ง สอนวิชาการ และหลักการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และมอบแนวทางทั้งหมดในการทำ วิทยานิพนธ์ในครั้งนี้แก่ข้าพเจ้า รวมถึง ช่วยชี้แนะ ,ให้ข้อคิด ต่างๆ ในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ และ รศ.ดร. จิรวัดร บุญญะฐิติ ผู้ให้คำสั่งสอนในด้านภาษาคอมพิวเตอร์

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล และผศ.ดร. ธเนศ ศรีศิริโรจนากร ที่กรุณา ร่วม เป็นคณะกรรมการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ และ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ นาย ชินินทร์ มหารักษ์ ผู้เป็นน้องชายของข้าพเจ้า ซึ่งเป็นผู้ช่วยเหลือ ข้าพเจ้าในการศึกษาโครงสร้างของโปรแกรม AutoSlope และให้คำแนะนำในการเขียนโปรแกรม ในช่วงเริ่มต้นของการทำวิทยานิพนธ์

ท้ายสุดนี้ ขอขอบคุณ ผู้เขียนหนังสือทุกท่าน ที่ข้าพเจ้านำมาใช้ประกอบ ในการ เขียนวิทยานิพนธ์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. ทฤษฎี Limit Equilibrium.....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 คำจำกัดความของค่าอัตราส่วนความปลอดภัย.....	4
2.3 สมมุติฐานของทฤษฎี Limit Equilibrium.....	4
2.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินด้วยวิธี Limit Equilibrium : Method of Slices	5
2.5 Generalized Method of Slices.....	6
2.6 Ordinary Method of Slices (OMS. or Fellenius's Method).....	9
2.7 Simplified Bishop's Method of slices.....	10
2.8 Spencer's Method.....	10
2.9 Morgenstern-Price' Method.....	11
2.10 Method of Slices สำหรับพื้นผิววิบัติแบบส่วนโค้งวงกลม.....	12
3. การเสริมกำลังของลาดดินด้วยวัสดุสังเคราะห์.....	15
3.1 กล่าวนำ.....	15
3.2 ชนิดของวัสดุเสริมกำลัง.....	16
3.3 คุณสมบัติของวัสดุเสริมกำลัง.....	16
3.4 แรงดึงปลอดภัยตลอดอายุการใช้งานของวัสดุเสริมกำลัง.....	17
3.5 สมมุติฐานของทิศทางแรงดึงของวัสดุเสริมกำลัง.....	21

บทที่	หน้า
3.6 สมมุติฐานของการกระจายแรงดึงของวัสดุเสริมกำลังตามความยาว.....	22
3.7 การออกแบบและวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินเสริมกำลังด้วย Conventional Method.....	24
4. โปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินเสริมกำลังด้วยวิธีกำลังวิเคราะห์.....	32
4.1 ส่วนการคำนวณหลัก.....	32
4.2 ส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน (GUI.).....	33
4.3 ความสามารถของโปรแกรม.....	34
4.4 ส่วนควบคุมโปรแกรมบนหน้าต่างหลัก (Main Form).....	36
5. ผลการคำนวณโดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น.....	41
5.1 กรณีศึกษาที่ 1.....	41
5.2 กรณีศึกษาที่ 2.....	42
5.3 กรณีศึกษาที่ 3.....	44
5.4 กรณีศึกษาที่ 4.....	49
5.5 กรณีศึกษาที่ 5.....	52
5.6 กรณีศึกษาที่ 6.....	56
5.7 กรณีศึกษาที่ 7.....	61
5.8 ผลการคำนวณ FS. พื้นผิววิบัติแบบส่วนโค้งวงกลม 1 พื้นผิววิบัติ .....	68
6. สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	72
6.1 สรุปผลการวิจัย : กรณีลาดดินทั่วไปที่ไม่เสริมกำลัง.....	73
6.2 สรุปผลการวิจัย : กรณีลาดดินเสริมกำลัง.....	73
6.3 อภิปรายผลการวิจัย.....	75
6.4 ข้อเสนอแนะ.....	75
รายการอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก สูตรการคำนวณต่างๆในโปรแกรม.....	78
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	100



## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 Reduction Factors โดย Leshchinsky ,2002.....	18
3.2 Reduction Factors โดย FHWA ,2000.....	18
3.3 แสดงค่า $\alpha_p$ โดย FHWA ,2000.....	19
3.4 แสดงค่า $\epsilon_{tol}$ โดย Duncan & Wright ,2005.....	20
5.1 สัญลักษณ์ของพื้นผิววิบัติ, การกระจายแรงดึง และทิศทางของแรงดึงของวัสดุเสริมกำลัง .....	41
5.2 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 1 .....	42
5.3 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 2 .....	43
5.4 คุณสมบัติดินในกรณีศึกษาที่ 3 .....	44
5.5 ผลการคำนวณ กรณีศึกษาที่ 3 .....	45
5.6 คุณสมบัติดินในกรณีศึกษาที่ 4 .....	50
5.7 ผลการคำนวณ กรณีศึกษาที่ 4 .....	50
5.8 คุณสมบัติดินในกรณีศึกษาที่ 5 .....	52
5.9 ผลการคำนวณ กรณีศึกษาที่ 5 .....	53
5.10 คุณสมบัติดินในกรณีศึกษาที่ 6 .....	57
5.11 ผลการคำนวณ กรณีศึกษาที่ 6 .....	57
5.12 คุณสมบัติดินในกรณีศึกษาที่ 7 .....	62
5.13 คุณสมบัติวัสดุเสริมกำลังในกรณีศึกษาที่ 7 .....	62
5.14 ผลการคำนวณ กรณีศึกษาที่ 7 .....	63
5.15 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 3 กรณี 1 พื้นผิววิบัติ .....	68
5.16 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 5 กรณี 1 พื้นผิววิบัติ .....	69
5.17 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 6 กรณี 1 พื้นผิววิบัติ .....	70
5.18 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 7 กรณี 1 พื้นผิววิบัติ .....	71
6.1 ตารางเปรียบเทียบค่า FS. และ FS <sub>REF</sub> .....	72
6.2 ตารางเปรียบเทียบค่า FS <sub>MIN</sub> และ FS <sub>REF</sub> ของลาดดินเสริมกำลัง .....	72

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 แรง $N'$ และ $T_m$ ที่กระทำที่ฐาน slice .....	5
2.2 แรงที่กระทำต่อ slice , พื้นผิววิบัติเป็นเส้นตรงหรือส่วนโค้ง.....	6
2.3 Free Body Diagram ของ Slice, .....	7
2.4 Free Body Diagram ของ Slice เมื่อรวมแรงที่กระทำต่อ slice .....	8
2.5 OMS. slice .....	9
2.6 Bishop's slice .....	10
2.7 Spencer's slice .....	11
2.8 Morgenstern-Price' slice .....	12
2.9 แรงที่กระทำต่อ slice , พื้นผิววิบัติเป็นส่วนโค้งวงกลม .....	13
2.10 Free Body Diagram ของ Slice, กรณีพื้นผิววิบัติเป็นส่วนโค้งวงกลม .....	14
3.1 ลาดดินเสริมกำลังรูปแบบต่างๆ .....	15
3.2 รูปแบบต่างๆของวัสดุเสริมกำลัง .....	16
3.3 รูปแสดงแรงดึงเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างมวลดินและวัสดุเสริมกำลัง (Pullout Resistance) .....	19
3.4 Geosynthetics Load – strain curve .....	20
3.5 Short Term stress-strain characteristics chart .....	20
3.6 slice ที่ต้องพิจารณาสมมุติฐานของทิศทางแรงดึงของวัสดุเสริมกำลัง .....	21
3.7 ทิศทางแรงดึง 2 รูปแบบ ของวัสดุเสริมกำลังใน slice ที่ reinforcement ผ่านฐาน slice .....	22
3.8 รูปแสดงการกระจายแรงดึงตามความยาวของวัสดุเสริมกำลัง (V.Tanjiria et al,2002) .....	23
3.9 รูปแสดงการกระจายแรงดึงตามความยาวแบบคงที่ของวัสดุเสริมกำลัง .....	23
3.10 ลาดดินเสริมกำลัง กรณีคำนวณ $FS_m$ แบบ Conventional .....	24
3.11 การกระจายหน่วยแรงดึงที่ต้องการ (Required Tensile Resistance)ในลาดดิน .....	25
3.12 Required Tensile Resistance Design Chart (K) เสนอโดย Leshchinsky & Boederker (1989) .....	26
3.13 แสดง Embedment Length ( $L_{EM}$ ) และ Effective Length ( $L_E$ ) .....	27
3.14 Required Embedment Length Design Chart ทิศทางของแรงดึงในแนวราบ เสนอโดย Leshchinsky & Boederker (1989) .....	27
3.15 แสดงการวิบัติแบบมวลดินไถลไปบนแผ่นวัสดุเสริมกำลัง (Direct Sliding) .....	28

ภาพประกอบ	หน้า
3.16 Required Length to resist Direct Sliding Design Chart เสนอโดย Leshchinsky & Boederker (1989) .....	28
3.17 Design Chart สำหรับ Steep reinforced slope กรณี $r_u = 0.00$ เสนอโดย Jewell	29
3.18 Design Chart สำหรับ Steep reinforced slope กรณี $r_u = 0.25$ เสนอโดย Jewell	30
3.19 Design Chart สำหรับ Steep reinforced slope กรณี $r_u = 0.50$ เสนอโดย Jewell	31
4.1 รูปแสดงหน้าตาหลักของโปรแกรม .....	36
4.2 รูปแสดงหน้าต่างย่อย (Edit Form) Tab ที่ 1 .....	37
4.3 รูปแสดงหน้าต่างย่อย (Edit Form) Tab ที่ 2 .....	37
4.4 รูปแสดงหน้าต่างย่อย (Edit Form) Tab ที่ 3 .....	38
4.5 รูปแสดงหน้าต่างย่อย (Edit Form) Tab ที่ 4 .....	38
4.6 รูปแสดงหน้าต่างย่อย (Edit Form) Tab ที่ 5 .....	39
4.7 รูปแสดงหน้าต่างย่อย (Edit Form) Tab ที่ 6 .....	39
4.8 รูปแสดงหน้าต่างย่อย (Edit Form) Tab ที่ 7 .....	40
5.1 ลาดดินเหนียวกรณีศึกษาที่ 1 .....	41
5.2 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 1 .....	42
5.3 ลาดดินกรณีศึกษาที่ 2 .....	42
5.4 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 2 .....	43
5.5 ลาดดินกรณีศึกษาที่ 3 .....	44
5.6 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 3 : C-L-P .....	45
5.7 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 3 : C-L-T .....	46
5.8 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 3 : C-C-P .....	46
5.9 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 3 : C-C-T .....	46
5.10 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 3 : G-L-P .....	47
5.11 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 3 : G-L-T .....	47
5.12 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 3 : G-C-P .....	47
5.13 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 3 : G-C-T .....	48
5.14 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 3 : S-L-P .....	48
5.15 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 3 : S-L-T .....	48
5.16 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 3 : S-C-P .....	49

ภาพประกอบ	หน้า
5.17 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 3 : S - C - T .....	49
5.18 ลาดตินกรณีศึกษาที่ 4 .....	50
5.19 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 4 : C - L - P .....	51
5.20 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 4 : C - L - T และ C - C - T .....	51
5.21 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 4 : C - C - P .....	51
5.22 ลาดตินกรณีศึกษาที่ 5 .....	52
5.23 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 5 : C - L - P .....	53
5.24 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 5 : C - L - T .....	54
5.25 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 5 : C - C - P .....	54
5.26 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 5 : C - C - T .....	54
5.27 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 5 : G - L - P .....	55
5.28 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 5 : G - L - T .....	55
5.29 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 5 : G - C - P .....	55
5.30 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 5 : G - C - T .....	56
5.31 ลาดตินกรณีศึกษาที่ 6 .....	56
5.32 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 6 : C - L - P .....	58
5.33 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 6 : C - L - T .....	58
5.34 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 6 : C - C - P .....	58
5.35 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 6 : C - C - T .....	59
5.36 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 6 : G - L - P .....	59
5.37 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 6 : G - L - T .....	59
5.38 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 6 : G - C - P .....	60
5.39 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 6 : S - L - P .....	60
5.40 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 6 : S - L - T .....	60
5.41 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 6 : S - C - P .....	61
5.42 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 6 : S - C - T .....	61
5.43 ลาดตินกรณีศึกษาที่ 7 .....	62
5.44 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 7 : C - L - P .....	63
5.45 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 7 : C - L - T .....	64
5.46 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 7 : C - C - P .....	64

ภาพประกอบ	หน้า
5.47 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 7 : C - C - T .....	64
5.48 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 7 : G - L - P .....	65
5.49 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 7 : G - L - T .....	65
5.50 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 7 : G - C - P .....	65
5.51 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 7 : G - C - T .....	66
5.52 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 7 : S - L - P .....	66
5.53 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 7 : S - L - T .....	66
5.54 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 7 : S - C - P .....	67
5.55 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 7 : S - C - T .....	67
5.56 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 3 กรณี 1 พื้นผิวขรุขระ .....	68
5.57 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 5 กรณี 1 พื้นผิวขรุขระ .....	69
5.58 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 6 กรณี 1 พื้นผิวขรุขระ .....	70
5.59 ผลการคำนวณกรณีศึกษาที่ 7 กรณี 1 พื้นผิวขรุขระ .....	71
6.1 เปรียบเทียบโมเมนต์การหมุน กรณีการกระจายแรงดึงแบบคงที่ .....	74
ผ.1 $R_{MAX0}$ และ $R_{MIN0}$ .....	79
ผ.2 $R_{MAX0}$ และ $R_{MIN0}$ กรณีจุดศูนย์กลาง มีค่าระดับต่ำกว่า TopLine .....	80
ผ.3 การคำนวณ $FS_{MIN1}$ รอบที่ 1 .....	80
ผ.4 การคำนวณ $FS_{MIN2}$ รอบที่ 2 .....	81
ผ.5 ลำดับการคำนวณการค้นหาแบบ Grid .....	81
ผ.6 การคำนวณค่าเริ่มต้นก่อนการคำนวณแบบ Automatic Search .....	82
ผ.7 การสร้าง Grid ที่ 1 สำหรับ Automatic Search .....	82
ผ.8 การสร้าง Grid ครั้งที่ n ของ Automatic Search .....	83
ผ.9 การคำนวณจุดตัดที่สูงที่สุดสำหรับคำนวณ $FS_{TRACK}$ .....	85
ผ.10 Planar Plane ที่สามารถคำนวณค่า FS. ได้ .....	86
ผ.11 Planar Plane ที่ไม่สามารถคำนวณค่า FS. ได้ เนื่องจาก $M_{i+1} < M_i$ .....	86
ผ.12 Planar Plane ที่ไม่สามารถคำนวณค่า FS. ได้ เนื่องจาก $\omega_i < 100^\circ$ .....	87
ผ.13 จุด SegmentPoint ที่ 2 และระยะควบคุมการเปลี่ยนตำแหน่ง .....	87
ผ.14 ทิศทางการเปลี่ยนตำแหน่งของ SegmentPoint .....	88
ผ.15 การแทรกจุด smpt-dummy ก่อนการคำนวณ MainLoop รอบที่ i กรณี	
$FS_{MIN} - FS_{i-1} < 0.001$ .....	89

ภาพประกอบ	หน้า
ผ.16 Continuous Calculation Selection .....	90
ผ.17 จุดเริ่มต้นของการคำนวณแบบ Continuous Calculation .....	90
ผ.18 แรงภายนอกที่กระทำต่อผิวบนของ slice .....	91
ผ.19 แรงลัพท์ที่กระทำต่อผิวบนของ slice .....	92
ผ.20 การแบ่ง slice บน RFM. 1 เส้น .....	93
ผ.21 แสดงแรงที่กระทำต่อ slice i .....	94
ผ.22 แสดง $T_{Poa_i}$ ของแต่ละ slice .....	94
ผ.23 แสดงส่วนประกอบของ $T_{Poa}$ .....	95
ผ.24 แสดงการกระจาย $T_a$ กรณี Failure Surface ตัดกับ RFM. 1 จุด .....	95
ผ.25 แสดงการกระจาย $T_a$ กรณี Failure Surface ตัดกับ RFM. 2 จุด .....	96
ผ.26 แสดง $T_{a_i}$ ใน RFM. แต่ละเส้น .....	96
ผ.27 แสดง ลักษณะการวิบัติแบบไถลบนแผ่นวัสดุเสริมกำลัง .....	97
ผ.28 ตัวอย่างพื้นผิววิบัติเริ่มต้นสำหรับวัสดุเสริมกำลังชั้นล่างสุด .....	98
ผ.29 พื้นผิววิบัติเริ่มต้นสำหรับลักษณะการวิบัติแบบไถลบนแผ่นวัสดุเสริมกำลัง .....	98
ผ.30 slice ที่ถูกกดกำลังต้านทานแรงเฉือนที่ฐาน .....	99