


การวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยว และเสาเข็มกลุ่ม
ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ



นาย พงศวิทย์ รุ่งบรรณพันธ์

ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3421-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

AN ANALYSIS OF SINGLE PILE AND PILE GROUP BEHAVIOR BY
THREE DIMENSIONAL FINITE ELEMENT METHOD

Mr. Pongwit Rungbanaphan

ศูนย์วิทยทรัพยากร

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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-3421-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยว และเสาเข็มกลุ่มด้วยระเบียบวิธี
ไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ

โดย

นาย พงศวิทย์ รุ่งบรรณพันธ์


สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา


อาจารย์ที่ปรึกษา

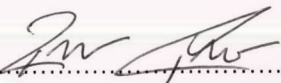
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย อุกฤษฏ์ชน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวี ธีระเจริญกิจ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย อุกฤษฏ์ชน)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. สุวิตร นุญญะฐี)

ศูนย์วิทยานิพนธ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พงศวิทย์ รุ่งบรรณพันธุ์ : การวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยว และเสาเข็มกลุ่มด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ. (AN ANALYSIS OF SINGLE PILE AND PILE GROUP BEHAVIOR BY THREE DIMENSIONAL FINITE ELEMENT METHOD) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. บุญชัย อุกฤษฏ์ชน 162 หน้า. ISBN : 974-17-3421-2 .

วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนองานวิจัยในหัวข้อการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยว และเสาเข็มกลุ่มด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบการวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มเดี่ยว และเสาเข็มกลุ่ม และศึกษาพฤติกรรมในสภาวะพลาสติกของเสาเข็มเดี่ยว

การทำงาน ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นจากโปรแกรมวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติพื้นฐาน ซึ่งเสนอโดย Smith และ Griffiths (1999) การพัฒนาโปรแกรมสามารถสรุปได้เป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย 1) ส่วนพีโพรเซสซิ่ง 2) ส่วนการวิเคราะห์ และ 3) ส่วนโพลโพรเซสซิ่ง ในส่วนพีโพรเซสซิ่ง ได้เพิ่มความสะดวกในการป้อนข้อมูลของผู้ใช้งาน และปรับใช้โปรแกรมสร้างโครงข่ายสำเร็จรูปในโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ในส่วนการวิเคราะห์ เพิ่มความสามารถในการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองอิลาสโตพลาสติก การกำหนดหน่วยแรงเริ่มต้น และเพิ่มความเร็วในการวิเคราะห์ และในส่วนโพลโพรเซสซิ่ง ได้เพิ่มการแสดงผลข้อมูลในรูปแบบกราฟฟิกส์ การคำนวณค่าหน่วยแรงที่จุดต่อด้วยวิธีซูเปอร์คอนเวอเจนท์ เท็ทซ์ เรคคัฟเวอร์ และการประมาณความคลาดเคลื่อนของผลการวิเคราะห์

การตรวจสอบความถูกต้องของระบบการวิเคราะห์ โดยการวิเคราะห์ปัญหา 3 มิติพื้นฐาน ประกอบด้วยฐานรากแผ่แบบสตริป และวงกลม ได้ผลใกล้เคียงกับผลเฉลยจากวิธีเชิงวิเคราะห์อย่างมาก และในการวิเคราะห์ตัวอย่างปัญหาเสาเข็มเดี่ยว และเสาเข็มกลุ่ม ในกรณีแบบจำลองอิลาสติกได้ผลใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์เช่นเดียวกัน สำหรับกรณีแบบจำลองอิลาสโตพลาสติกความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ และการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยว มีแนวโน้มเดียวกับผลการวิเคราะห์ซึ่งเสนอโดยงานวิจัยที่ผ่านมา ขณะที่กำลังรับน้ำหนักที่ภาวะสุดขีดของเสาเข็ม มีความแตกต่างจากผลการทดสอบในสนามอย่างชัดเจน เนื่องจากระบบไม่สามารถจำลองพฤติกรรมการเคลื่อนตัวที่ผิวรอยต่อของเสาเข็มและดิน ซึ่งได้ทดลองแก้ปัญหาโดยการแทรกชั้นบางที่บริเวณผิวรอยต่อ และทำการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการใช้ชิ้นส่วนพิเศษบริเวณผิวรอยต่อจำลองพฤติกรรมใน 3 มิติ

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต นางธอรัถย์ รุ่งบรรณพันธุ์
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2546

4370400221 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: SINGLE PILE / PILE GROUP / FOUNDATION / 3D / FINITE ELEMENT METHOD

PONGWIT RUNGBANAPHAN : AN ANALYSIS OF SINGLE PILE AND PILE GROUP BEHAVIOR BY THREE DIMENSIONAL FINITE ELEMENT METHOD. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. BOONCHAI UKRITCHON, Sc.D., 162 pp. ISBN : 974-17-3421-2 .

This thesis presents a research entitled as an analysis of single pile and pile group behavior by three dimensional finite element method. The thesis's objective is to develop the system for analyzing three dimensional problems of single pile and pile group and studying plastic behavior of single pile.

A computer program was developed based on the basic program of Three Dimensional Finite Element Method proposed by Smith and Griffiths (1999). The major developments can be summarized into 3 parts: 1) pre-processing; 2) solving; and 3) post-processing. The pre-processing phase improvements include the graphical user interface for inputting pile problem geometry processed by the mesh generation program. The solving phase improvements include additional capabilities to analyze elasto-plastic soil model, initial stress calculation, and high efficient fast solver algorithm. The post-processing phase improvements include generation of graphical data output, nodal stress recovery based on the Superconvergent Patch Recovery method, and calculation of error stress estimation.

The developed system was verified by analyzing various 3D problems of strip and circular footings, where computed results correspond very well with analytical solutions. Similarly, the results of single pile and pile group for elastic model also match very well with analytical solutions. For the case of elasto-plastic model, the analyses showed only qualitative matching of load-settlement curve with recent research but there was significant difference at the ultimate pile capacity from static pile load test results due to inability of the system to model pile-soil slippage at interface. Technique of thin element insertion at pile-soil interface was implemented in order to solve that problem. Lastly, the thesis also presented an introductory study of 3D special interface element for modeling slippage problems.

Department Civil Engineering Student's Signature Pongwit Rungbanaphan
 Field of Study Civil Engineering Advisor's Signature [Signature]
 Academic year 2003

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏาชน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งสละเวลาอันมีค่า ให้คำแนะนำ ตรวจสอบผลงาน ตลอดจนดูแลให้กำลังใจผู้เขียน ตลอดระยะเวลาการทำงาน และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาให้ความสนใจในการร่วมเป็นคณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ให้การดูแล อบรม สั่งสอน ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ต่าง ๆ ให้ผู้เขียนตลอดมาจนกระทั่งปัจจุบัน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ	ฏ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 ผลงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 ความสำคัญของปัญหา	3
1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	5

บทที่ 2 แนวคิด และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็ม

2.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มต้นเดียว	6
2.1.1 วิธี "Load-transfer"	6
2.1.2 การวิเคราะห์บนพื้นฐานของทฤษฎีอิลาสติก (Elastic Theory)	7
2.1.3 การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method)	7
2.2 การวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มกลุ่ม	7
2.2.1 การวิเคราะห์โดยใช้วิธีอย่างง่าย (simplified approach).....	7
2.2.2 การวิเคราะห์บนพื้นฐานของทฤษฎีอิลาสติก (Elastic Theory)	8
2.2.3 การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method)	8
2.3 การใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็ม	8

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3	ขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
3.1	ทฤษฎีที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรม	10
3.1.1	สมการไฟไนต์เอลิเมนต์พื้นฐาน	10
3.1.2	ระบบพิกัด (coordinate system)	13
3.1.3	ฟังก์ชันรูปร่าง (Shape Function)	16
3.1.4	การวิเคราะห์ค่าเมตริกความเครียด-การเคลื่อนตัว (Strain-Displacement Matrix)	18
3.1.5	อินทิเกรตเชิงตัวเลข (Numerical Integration)	21
3.1.6	การวิเคราะห์หาค่าหน่วยแรงที่จุดต่อ (Nodal stress analysis)	22
3.1.7	การประมาณความคลาดเคลื่อน (Error Estimation)	23
3.1.8	แบบจำลองพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นของวัสดุ (Material Nonlinearity Model)	26
3.1.8.1	สมการพื้นฐานที่ใช้ในวิธีสตีเฟนสคงที่	27
3.1.8.2	การหาค่าบอดี้ลอคด้วยวิธีวิสโคพลาสติกซิตี (visco-plasticity)	29
3.2	โปรแกรมพื้นฐานที่ใช้ในการพัฒนา	31
3.2.1	โปรแกรมวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์พื้นฐาน	31
3.2.2	โปรแกรมที่ใช้ในการสร้างโครงข่าย (Mesh generation program)	31
3.2.3	โปรแกรมที่ใช้ในการแสดงผลทางกราฟิกส์	35
3.3	การพัฒนาโปรแกรม	35
3.3.1	ส่วนพรีโพรเซสซิง (Preprocessing)	35
3.3.2	ส่วนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM Analysis)	41
3.3.3	ส่วนโพลโพรเซสซิง (Post-processing)	43
3.3.4	การพัฒนา Graphic User Interface (GUI)	47
บทที่ 4	การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมในการวิเคราะห์ปัญหา 3 มิติพื้นฐาน	
4.1	รูปทรงสี่เหลี่ยมพื้นฐาน	48
4.2	ฐานรากแผ่นแบบสตริป (Strip footing)	51
4.3	ฐานรากแผ่นวงกลม (Circular footing)	55

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมในการวิเคราะห์พฤติกรรมเสาเข็ม	
5.1 การวิเคราะห์เสาเข็มต้นเดียว (Single Pile Analysis)	60
5.1.1 โครงข่าย (mesh)	60
5.1.2 ชนิดของชิ้นส่วน (Element types)	62
5.1.3 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition)	62
5.1.4 แบบจำลองพฤติกรรมของวัสดุ	63
5.1.5 แรงกระทำภายนอก (External Loading)	63
5.1.6 ตัวอย่างกรณีศึกษาที่ใช้ในงานวิจัย	64
5.1.6.1 เสาเข็มภายใต้แรงกระทำในสภาวะใช้งาน.....	64
5.1.6.2 เสาเข็มภายใต้แรงกระทำในสภาวะสุดขีด	73
5.2 การวิเคราะห์เสาเข็มกลุ่ม (Pile Group Analysis)	81
5.2.1 โครงข่าย (mesh)	81
5.2.2 ชนิดของชิ้นส่วน (Element types)	83
5.2.3 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition)	83
5.2.4 แบบจำลองพฤติกรรมของวัสดุ	83
5.2.5 แรงกระทำภายนอก (External Loading)	84
5.2.6 ตัวอย่างกรณีศึกษาที่ใช้ในงานวิจัย	84
5.2.6.1 การวิเคราะห์เสาเข็ม 2 ต้น	84
5.2.6.2 การวิเคราะห์เสาเข็ม 4 ต้น	90
5.2.6.3 การวิเคราะห์เสาเข็ม 9 ต้น	90
5.2.7 สรุปผลการศึกษา	90
บทที่ 6 การศึกษาพฤติกรรมบริเวณผิวรอยต่อเบื้องต้น	
6.1 การเพิ่มชั้นบาง (Thin layer) ที่บริเวณผิวรอยต่อ	95
6.1.1 ตัวอย่างปัญหา	95
6.1.2 ผลการวิเคราะห์	100
6.1.3 ปัญหา และข้อจำกัด	100

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.2 การเพิ่มขึ้นส่วนพิเศษที่มีความหนาเป็นศูนย์ที่บริเวณผิวรอยต่อ	101
6.2.1 ทฤษฎีพื้นฐาน	101
6.2.2 การประยุกต์ใช้ทฤษฎี ในระบบที่พัฒนาขึ้น	102
6.2.2.1 การวิเคราะห์ปัญหารูปทรงสี่เหลี่ยมพื้นฐาน	102
6.2.2.2 การวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มเดี่ยว	108
6.2.3 ปัญหา และข้อจำกัด	111
 บทที่ 7 สรุปผลงานวิจัย	 112
 รายการอ้างอิง	 114
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณการทรุดตัวของเสาเข็ม	117
ภาคผนวก ข วิธีการใช้งานโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น	134
ภาคผนวก ค การคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม	153
ภาคผนวก ง ภาพประกอบเพิ่มเติม	159
ประวัติผู้เขียน	162

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1	พิกัดของจุดต่อของชั้นส่วนเดตระฮีดรอน ในระบบพิกัดเฉพาะที่ 15
ตารางที่ 3.2	พิกัดของจุดต่อของชั้นส่วนเฮกซะฮีดรอน ในระบบพิกัดเฉพาะที่ 16
ตารางที่ 3.3	จุดเกาส์ที่ใช้ในการอินทิเกรตเชิงตัวเลข 21
ตารางที่ 3.4	เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา ระหว่างโปรแกรมพื้นฐาน และ โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น 43
ตารางที่ 5.1	สรุปผลการวิเคราะห์ตัวอย่างกรณีศึกษาเสาเข็มกลุ่มในงานวิจัย 94
ตารางที่ 6.1	พิกัดของจุดต่อของชั้นส่วนปริซึมสามเหลี่ยม 6 จุดต่อ ในระบบพิกัดเฉพาะที่ 103
ตารางที่ ก.1	ค่าอัตราส่วนการทรุดตัว (Settlement Ratio) RS สำหรับเสาเข็มกลุ่ม ในดินสม้าเสมอที่มี ความลึกมาก และแคบหัวเข็มแบบแข็ง (rigid cap) 132
ตารางที่ ข.1	รายละเอียดของแฟ้มข้อมูลที่เป็นผลการวิเคราะห์ของโปรแกรม 150

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของสมการพื้นฐานในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	12
รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงระบบพิกัด และการจัดเรียงจุดต่อของชิ้นส่วนย่อยชนิด เตตระฮีดรอน	14
รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงระบบพิกัด และการจัดเรียงจุดต่อของชิ้นส่วนย่อยชนิด เฮกซะฮีดรอน	14
รูปที่ 3.4 การเลือกบริเวณแพทช์ของจุดต่อที่อยู่ภายในขอบเขต สำหรับชิ้นส่วนสี่เหลี่ยม (quadrilateral) และสามเหลี่ยม (Triangle)	24
รูปที่ 3.5 การเลือกบริเวณแพทช์ของจุดต่อที่อยู่บนขอบเขตสำหรับชิ้นส่วนสี่เหลี่ยม (quadrilateral)	24
รูปที่ 3.6 พื้นผิววิบัติในกรณีกฎการวิบัติแบบมอร์-คูลอมป์	28
รูปที่ 3.7 แผนภาพแสดงการคำนวณด้วยวิธีสตีเฟนสคองท์	28
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างการใช้ 'characteristic length' ปรับขนาดโครงข่ายด้วยโปรแกรม GMSH.....	34
รูปที่ 3.9 การจัดเรียงของจุดต่อของชิ้นส่วนเตตระฮีดรอน จากโปรแกรม GEOMPACK และ GMSH	34
รูปที่ 3.10 ข้อมูลที่จำเป็นในการสร้างข้อมูลโครงข่ายด้วยโปรแกรมย่อยเดิม	37
รูปที่ 3.11 การปรับขนาดชิ้นส่วน ด้วยโปรแกรมย่อยที่พัฒนาขึ้น	37
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างโครงข่ายที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์ปัญหารูปทรงสี่เหลี่ยมพื้นฐาน	50
รูปที่ 4.2 การเคลื่อนตัวของโครงข่ายในตัวอย่างการวิเคราะห์ปัญหารูปทรงสี่เหลี่ยมพื้นฐาน	50
รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างปัญหารูปทรงสี่เหลี่ยมพื้นฐาน ในกรณีพฤติกรรมวัสดุเป็นอิลาสโตพลาสติก	52
รูปที่ 4.4 ขนาดโครงสร้าง และหน้าตัดที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างฐานรากแผ่แบบสตริป	52
รูปที่ 4.5 โครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างฐานรากแผ่แบบสตริป	53
รูปที่ 4.6 โครงข่ายภายหลังจากเคลื่อนตัวในการวิเคราะห์ตัวอย่างฐานรากแผ่แบบสตริป	53
รูปที่ 4.7 หน่วยแรงในแนวตั้งที่หน้าตัดต่าง ๆ (จากรูปที่ 4.4) ของตัวอย่างฐานรากแผ่แบบสตริป เปรียบเทียบ ระหว่างผลจากโปรแกรมที่พัฒนา (3D FEM) และผลเฉลยจากวิธีอิลาสติก (Exact Solution)	54
รูปที่ 4.8 ขนาดโครงสร้างที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างฐานรากแผ่วงกลม	56
รูปที่ 4.9 โครงข่ายที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างฐานรากแผ่วงกลม	56
รูปที่ 4.10 โครงข่ายภายหลังจากเคลื่อนตัว(ขวา) เปรียบเทียบกับโครงข่ายเริ่มต้น(ซ้าย) ในการวิเคราะห์ตัวอย่างฐานรากแผ่วงกลม	58

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.11 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งตามแนวแกนกลางของตัวอย่างฐานรากแผ่วงกลม เปรียบเทียบระหว่างผลจากโปรแกรมที่พัฒนา และผลเฉลยจากวิธีอิลาสติก	58
รูปที่ 4.12 หน่วยแรงในแนวแกนต่าง ๆ ของตัวอย่างฐานรากแผ่วงกลม เปรียบเทียบ ระหว่างผลจากโปรแกรมที่พัฒนา (3D FEM) และผลเฉลยจากวิธีอิลาสติก (Exact Solution)	59
รูปที่ 5.1 โครงสร้างของโครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มต้นเดียว	61
รูปที่ 5.2 สภาวะขอบเขตที่กำหนดในการวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มต้นเดียว	61
รูปที่ 5.3 ขนาดโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มต้นเดียวแบบลอย	65
รูปที่ 5.4 โครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มต้นเดียวแบบลอย (single floating pile)	65
รูปที่ 5.5 โครงข่ายเริ่มต้น และภายหลังการเคลื่อนตัวของเสาเข็มต้นเดียวแบบลอย	66
รูปที่ 5.6 ค่าอินฟลูเอนซ์แฟกเตอร์ของการเคลื่อนตัวของเสาเข็มต้นเดียวแบบลอย ที่ระยะ r/L ใด ๆ เปรียบเทียบกับผลเฉลยจากวิธีอิลาสติก	66
รูปที่ 5.7 การกระจายของค่าหน่วยแรงเฉือนตามผิวของเสาเข็ม ในการวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มต้นเดียวแบบลอย เปรียบเทียบกับผลเฉลยจากวิธีอิลาสติก	67
รูปที่ 5.8 ขนาดโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มเดี่ยว กรณีปลายเสาเข็มอยู่บนชั้นดินที่แข็งกว่า	71
รูปที่ 5.9 โครงข่ายที่ใช้วิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มเดี่ยว กรณีปลายเสาเข็มอยู่บนชั้นดินที่แข็งกว่า	71
รูปที่ 5.10 โครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัว (deformed mesh) ของการวิเคราะห์เสาเข็มเดี่ยว กรณีปลายเสาเข็มอยู่บนชั้นดินที่แข็งกว่า	72
รูปที่ 5.11 แรงแยกในเสาเข็มที่ระดับต่างๆ ของตัวอย่างปัญหาเสาเข็มเดี่ยวกรณีปลายเสาเข็มอยู่บนชั้นดินที่แข็งกว่า เปรียบเทียบกับผลเฉลยของวิธีอิลาสติก.....	72
รูปที่ 5.12 ขนาดโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มภายใต้แรงกระทำในสภาวะสุดขีด	74
รูปที่ 5.13 โครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มภายใต้แรงกระทำในสภาวะสุดขีด	74
รูปที่ 5.14 โครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัว (deformed mesh) เปรียบเทียบกับโครงข่ายเริ่มต้นในตัวอย่างการวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มภายใต้แรงกระทำในสภาวะสุดขีด	75
รูปที่ 5.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ และการหลุดตัว ในตัวอย่างการวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มภายใต้แรงกระทำในสภาวะสุดขีด	77
รูปที่ 5.16 โครงข่ายที่ใช้วิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มเดี่ยว กรณีเปรียบเทียบกับผลผลทดสอบเสาเข็มในสนาม	77

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.17	โครงข่ายเริ่มต้น และภายหลังการเคลื่อนตัว ของการวิเคราะห์เสาค้ำเดี่ยวยกรณี เปรียบเทียบกับผลผลทดสอบเสาค้ำในสนาม	80
รูปที่ 5.18	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ และการทรุดตัว ในกรณีการวิเคราะห์เปรียบ เทียบกับผลผลทดสอบเสาค้ำในสนาม	80
รูปที่ 5.19	รูปแบบโครงสร้าง และสภาวะขอบเขตที่กำหนดในการวิเคราะห์ปัญหาเสาค้ำกลุ่ม แสดงตัวอย่างกรณีเสาค้ำ 9 ต้น	82
รูปที่ 5.20	การแบ่งส่วนตามโครงสร้างผิวเสาค้ำหน้าตัดกลม ในการวิเคราะห์ปัญหาเสาค้ำกลุ่ม ...	82
รูปที่ 5.21	ปัญหา และโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาค้ำกลุ่ม 2 ต้น ชนิดเสาค้ำลอย (floating pile)	85
รูปที่ 5.22	โครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาค้ำกลุ่ม 2 ต้น ชนิดเสาค้ำลอย	85
รูปที่ 5.23	โครงข่ายที่ใช้ภายหลังการเคลื่อนตัวของตัวอย่างเสาค้ำกลุ่ม 2 ต้น ชนิดเสาค้ำลอย เปรียบเทียบกับโครงข่ายเริ่มต้น	86
รูปที่ 5.24	ปัญหา และโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาค้ำกลุ่ม 2 ต้น ในกรณีที่ปลายเสาค้ำ จมอยู่บนชั้นดินที่แข็งกว่า	86
รูปที่ 5.25	โครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาค้ำกลุ่ม 2 ต้น กรณีปลายเสาค้ำจมอยู่บนชั้นดิน ที่แข็งกว่า	88
รูปที่ 5.26	โครงข่ายที่ใช้ภายหลังการเคลื่อนตัวของตัวอย่างเสาค้ำกลุ่ม 2 ต้น กรณีปลายเสาค้ำจม อยู่บนชั้นดินที่แข็งกว่า เปรียบเทียบกับโครงข่ายเริ่มต้น	88
รูปที่ 5.27	ปัญหา และโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาค้ำกลุ่ม 2 ต้น ในกรณีที่ปลาย เสาค้ำจมอยู่บนฐานแข็ง	89
รูปที่ 5.28	โครงข่ายที่ใช้ภายหลังการเคลื่อนตัวของตัวอย่างเสาค้ำกลุ่ม 2 ต้น กรณีที่ปลายเสาค้ำจม อยู่บนฐานแข็ง เปรียบเทียบกับโครงข่ายเริ่มต้น	89
รูปที่ 5.29	ปัญหา และโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาค้ำกลุ่ม 4 ต้น ในกรณีเสาค้ำแบบ ลอย	91
รูปที่ 5.30	โครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาค้ำกลุ่ม 4 ต้น ในกรณีเสาค้ำแบบลอย	91
รูปที่ 5.31	โครงข่ายที่ใช้ภายหลังการเคลื่อนตัวของตัวอย่างเสาค้ำกลุ่ม 4 ต้น ในกรณีเสาค้ำ แบบลอย เปรียบเทียบกับโครงข่ายเริ่มต้น	92
รูปที่ 5.32	ปัญหา และโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาค้ำกลุ่ม 9 ต้น ในกรณีเสาค้ำ แบบลอย	92

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.33	โครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างเสาเข็มกลุ่ม 9 ต้น ในกรณีเสาเข็มแบบลอย	93
รูปที่ 5.34	โครงข่ายที่ใช้ภายหลังการเคลื่อนตัวของตัวอย่างเสาเข็มกลุ่ม 9 ต้น ในกรณีเสาเข็มแบบลอย เปรียบเทียบกับโครงข่ายเริ่มต้น	93
รูปที่ 6.1	แผนภาพแสดงการเพิ่มชั้นบาง (Thin layer) ที่บริเวณผิวรอยต่อในปัญหาเสาเข็มเดี่ยว	96
รูปที่ 6.2	ตัวอย่างปัญหาที่ใช้ในการศึกษาและพัฒนา การเพิ่มชั้นบาง (Thin layer) ที่บริเวณผิวรอยต่อ	96
รูปที่ 6.3	โครงข่ายที่ใช้ในตัวอย่างปัญหา กรณีศึกษาการเพิ่มชั้นบาง (thin layer) ที่บริเวณผิวรอยต่อ	97
รูปที่ 6.4	โครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัว ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ตัวอย่างปัญหา กรณีศึกษาการเพิ่มชั้นบาง (Thin layer) ที่บริเวณผิวเสาเข็ม	98
รูปที่ 6.5	กราฟแรงกระทำ-การเคลื่อนตัว (Load-settlement curve) ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ตัวอย่างปัญหา กรณีศึกษาการเพิ่มชั้นบาง (thin layer) ที่บริเวณผิวเสาเข็ม	98
รูปที่ 6.6	หน่วยแรงเฉือนตามผิวเสาเข็ม จากตัวอย่างกรณีศึกษาการเพิ่มชั้นบาง (thin layer) ที่บริเวณผิวเสาเข็ม	99
รูปที่ 6.7	ความสัมพันธ์ของหน่วยแรง-ความเครียดในแนวตั้งที่ปลายเสาเข็ม จากตัวอย่างกรณีศึกษาการเพิ่มชั้นบาง (thin layer) ที่บริเวณผิวเสาเข็ม	99
รูปที่ 6.8	โครงข่ายเริ่มต้น ในตัวอย่างการวิเคราะห์รูปทรงสี่เหลี่ยมพื้นฐาน (แสดงผิวรอยต่อ)	107
รูปที่ 6.9	โครงข่ายเริ่มต้น และโครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัว ในตัวอย่างการวิเคราะห์รูปทรงสี่เหลี่ยมพื้นฐานรับแรงในแนวตั้ง (มุมมองด้านข้าง)	107
รูปที่ 6.10	โครงข่ายเริ่มต้น และโครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัว ในตัวอย่างการวิเคราะห์รูปทรงสี่เหลี่ยมพื้นฐานรับแรงในเขื่อนสมบูรณ์ (มุมมองด้านข้าง)	109
รูปที่ 6.11	โครงข่ายเริ่มต้น และโครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัว ในตัวอย่างการวิเคราะห์รูปทรงสี่เหลี่ยมพื้นฐานรับแรงในเขื่อนสมบูรณ์ (มุมมอง 3 มิติ)	109
รูปที่ 6.12	โครงข่ายเริ่มต้น และโครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัว ในตัวอย่างการวิเคราะห์รูปทรงสี่เหลี่ยมพื้นฐานรับแรงในเขื่อนสมบูรณ์ (มุมมองด้านข้าง)	110
รูปที่ 6.13	โครงข่ายเริ่มต้น และโครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัว ในตัวอย่างการวิเคราะห์เสาเข็มเดี่ยว หน้าตัดสี่เหลี่ยม (มุมมอง 3 มิติ)	110
รูปที่ ก.1	ค่าอินฟลูเอนซ์แฟกเตอร์ของการทรุดตัว (Displacement-influence Factor) I_0	121
รูปที่ ก.2	ค่าปรับแก้ค่าความอัดตัวของเสาเข็ม (Compressibility correction factor) R_k	121

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ ก.3	ค่าปรับแก้ค่าระดับของฐานแข็ง (Depth correction factor) R_n	122
รูปที่ ก.4	ค่าปรับแก้ค่าอัตราส่วนปัวซองส์ (Poisson 's ratio correction factor) R_v	122
รูปที่ ก.5	ค่าปรับแก้ผลของชั้นดินที่แข็งกว่า (Stiffer stratum correction factor) R_b	125
รูปที่ ก.6	อินเตอร์แอกชันแฟกเตอร์สำหรับเสาเข็ม 2 ต้นชนิดเสาเข็มลอย เมื่อ $L/d = 25$	125
รูปที่ ก.7	อินเตอร์แอกชันแฟกเตอร์สำหรับเสาเข็ม 2 ต้น กรณีปลายเข็มอยู่บนฐานแข็ง เมื่อ $L/d = 25$	126
รูปที่ ก.8	แฟกเตอร์ลดค่า (F_e) สำหรับอิลาสติกโมดูลัสของชั้นดินชั้นล่าง สำหรับเสาเข็ม 2 ต้น กรณีปลายเข็มอยู่บนชั้นดินที่แข็งกว่า เมื่อ $L/d = 25$	126
รูปที่ ก.9	ค่าปรับแก้ผลของระดับความลึกของฐานแข็ง สำหรับอินเตอร์แอกชันแฟกเตอร์ (N_n) สำหรับเสาเข็ม 2 ต้นกรณีปลายเข็มอยู่บนชั้นดินที่แข็งกว่าเมื่อ $L/d = 25$	127
รูปที่ ก.10	ค่าปรับแก้อัตราส่วนปัวซองส์ (Poisson 's ratio) สำหรับอินเตอร์แอกชันแฟกเตอร์ (N_v) สำหรับเสาเข็ม 2 ต้นกรณีปลายเข็มอยู่บนฐานแข็ง เมื่อ $L/d = 25$	127
รูปที่ ก.11	สัมประสิทธิ์ลดค่าจากผลของระดับความลึกของฐานแข็ง สำหรับค่าอัตราส่วนการทรุดตัว (ξ_n) สำหรับเสาเข็มกลุ่ม	133
รูปที่ ก.12	สัมประสิทธิ์ลดค่าจากผลของอัตราส่วนปัวซองส์ สำหรับค่าอัตราส่วนการทรุดตัว (ξ_v) สำหรับเสาเข็มกลุ่ม	133
รูปที่ ง.1	แผนภาพแสดงโครงสร้างปัญหา จากหัวข้อ 5.1.6.2 (2) โดยแสดงจุดที่พิจารณาในรูปที่ ง.2 และ ง.3	160
รูปที่ ง.2	กราฟหน่วยแรงเฉือน ต่อความเค้นเฉือนที่ผิวเสาเข็ม (จุด A ในรูปที่ ง.1) ที่ระดับแรงต่าง ๆ	160
รูปที่ ง.3	พิจารณากราฟ p-q (p-q diagram) ที่จุดปลายเสาเข็มตามแนวแกนกลาง (จุด B ในรูปที่ ง.1)	161

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย