

# การพัฒนาโปรแกรมออกแบบฐานราก

นายจิระยุทธ สืบสุข

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-533-543-6

**DEVELOPMENT OF FOUNDATION DESIGN  
PROGRAM**

**Jirayoot Suebsook**

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

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2005**

**ISBN 974-533-543-6**

## การพัฒนาโปรแกรมออกแบบฐานราก

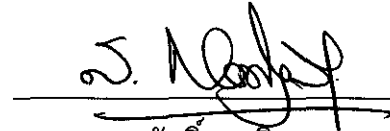
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.อำนาจ อภิชาติवलลภ)

ประธานกรรมการ



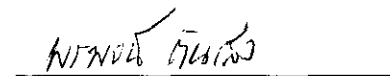
(ผศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อ. ดร.ทองศักดิ์ พิศาลสิน)

กรรมการ




(อ. ดร.พรพจน์ ดันเส็ง)

กรรมการ



(อ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

กรรมการ



(รศ. ดร.เสาวณีย์ รัตนพานิ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ



(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ จำพิศ)

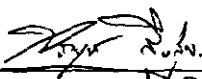
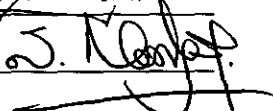
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

จิระยุทธ สืบสุข : การพัฒนาโปรแกรมออกแบบฐานราก (DEVELOPMENT OF FOUNDATION DESIGN PROGRAM) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 110 หน้า. ISBN 974-533-543-6

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีวิเคราะห์แรงภายในและการเสียรูปของฐานรากเสาเข็มที่ไม่ซับซ้อน สำหรับใช้ในขั้นตอนการลองผิดลองถูกของการออกแบบฐานราก แบบจำลอง Simplified Frame-Pile (SFP) จะแทนแผ่นฐานรากด้วย Grid และแทนดินด้วยสปริงแนวราบและแนวตั้ง สำหรับการเปลี่ยนตำแหน่งน้อยในช่วงนำหน้าบรรทุกใช้งาน พฤติกรรมของวัสดุทั้งหมดจะอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเท่านั้น ซึ่งสามารถแทนด้วยสถิติเอนสมตริกซ์ใช้คำนวณการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและแรงภายในแบบจำลอง SFP ได้รับการเทียบปรับได้ด้วยคูณปรับแก้แรงบิด ( $\Omega = 0.55L_e / B_e$  และ  $\Omega = 0.85L_e / B_e$ ) และตรวจสอบความน่าเชื่อถือโดยเปรียบเทียบค่าตอบแม่นยำตรงตามทฤษฎียืดหยุ่น วิธีเชิงตัวเลขอื่นๆ ที่ได้รับการยอมรับ และผลทดสอบกายภาพด้วยแบบจำลองแรงเหวี่ยง

นอกจากนี้งานวิจัยยังได้สร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์และออกแบบฐานรากชื่อ SUTFoundation โปรแกรมนี้รวมการวิเคราะห์โครงสร้างฐานรากและการออกแบบฐานรากตามหลักปฐพีกลศาสตร์อยู่ในโปรแกรมเดียว โปรแกรมสามารถคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกยอมให้ของเสาเข็มจากข้อมูลชั้นดินที่ป้อนเข้าไปและคำนวณลองผิดลองถูกหาขนาดของฐานรากได้โดยอัตโนมัติ นอกจากฐานรากเสาเข็มแล้วผู้วิจัยยังรวมการออกแบบฐานรากตื้น (ฐานรากเดี่ยว, ฐานรากร่วม, ฐานรากแพ) ไว้ในโปรแกรมนี้ด้วย สำหรับฐานรากตื้นคำนวณแรงโดยวิธีไฟไนต์กริด (Bowles, 1988) โปรแกรมนี้ทำงานในรูปแบบกราฟิกบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ การป้อนข้อมูลเข้าโปรแกรมทำโดยผ่านแป้นพิมพ์และเมาส์ โปรแกรมได้รับการตรวจสอบความน่าเชื่อถือโดยเปรียบเทียบผลการคำนวณกับทั้งโปรแกรมอื่นๆ และการคำนวณด้วยมือ

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
ปีการศึกษา 2548

ลายมือชื่อนักศึกษา   
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

JIRAYOOT SUEBSOOK : DEVELOPMENT OF FOUNDATION DESIGN  
PROGRAM. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SUKSUN  
HORPIBULSUK, Ph.D. 110 PP. ISBN 974-533-543-6

STIFFNESS MATRIX METHOD/FINITE GRID METHOD/SIMPLIFIED FRAME-  
PILE MODEL/SUTFOUNDATION/FOUNDATION DESIGN

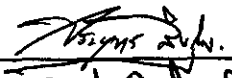
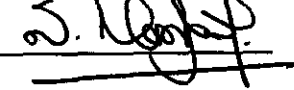
The research developed a relatively simple method to solve the internal forces and settlement of pile foundation. The method can be used for the trial step in foundation design. The method, called simplified frame-pile (SFP) model, replaced the footing by equivalent grid and the supporting soil by a series of horizontal and vertical spring. Displacements and internal forces can be calculated by stiffness matrix method. The SFP model was calibrated (the value of the torsional constant correction factor,  $\Omega$ , was found to be  $0.55L_e / B_e$  or  $0.85L_e / B_e$ ) with exact solution and verified by comparing with exact solution and other reliable numerical method as well as with the result of centrifugal model.

In addition, the research developed a computer program for analysis and design pile foundation, named SUTFoundation. The program combines bearing design and structural design. It is capable of calculating the allowable load and iterating for the proper foundation dimensions. The program also includes shallow foundations (isolated, combined and mat). For shallow foundations, internal forces are calculated using Finite Grid Method (Bowles, 1988). The program is in graphic format using Window. Input is entered interactively through keyboard and mouse.

The program was verified by comparing results with those obtained from hand calculation and from other reliable programs.

School of Civil Engineering

Academic Year 2005

Student's Signature   
 Advisor's Signature 

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์อย่างสูงที่ได้สละเวลาดูแลให้คำปรึกษาจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงลงได้ และขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.อำนาจ อภิชาติวัลลภ ประธานคณะกรรมการและคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน (อาจารย์ ดร. ทนงศักดิ์ พิศาลสิน, อาจารย์ ดร.พรพจน์ ต้นเส็ง และอาจารย์ ดร. อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์) ที่สละเวลาแก้ไขตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์

วิทยานิพนธ์นี้จะสำเร็จลุล่วงไม่ได้เลยถ้าข้าพเจ้าไม่ได้รับความรู้ทางวิชาการและแนวคิดของการทำงานที่ดีจากคณาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่าน และทุนสนับสนุนในการทำวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณทุกท่านไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ กำลังใจ คำติชม พร้อมกับข้อคิดดีๆ จากเพื่อนร่วมเรียนระดับบัณฑิตศึกษาทุกท่านที่ช่วยให้ข้าพเจ้ามีแรงกำลังมุ่งทำงานจนสำเร็จลงได้

ท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะเลี้ยงดู อบรมส่งเสริมการศึกษา และเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดเสมอมา

จิระยุทธ สืบสุข

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญรูป .....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ฐ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b> .....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย .....	3
<b>2 ทัศนั้วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	4
2.1 บทนำ .....	4
2.2 การวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็ม .....	4
2.2.1 วิธีดั้งเดิมสำหรับวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็ม .....	4
2.2.2 วิธีเชิงตัวเลขสำหรับวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็ม .....	11
2.3 การพัฒนาโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์และออกแบบฐานราก .....	16
<b>3 วิธีดำเนินงานวิจัย</b> .....	22
3.1 บทนำ .....	22
3.2 วิธีวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็ม .....	23
3.2.1 แนวคิดการพัฒนาวิธีวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มที่ไม่ซับซ้อน .....	23
3.2.2 แบบจำลอง Simplified Frame-Pile (SFP) .....	26
3.3 การเทียบปรับแบบจำลอง SFP .....	36



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.1 การหาตัวคูณปรับแก้แรงบิดสำหรับโครงสร้างแผ่น .....	36
3.3.2 การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนท์กริด.....	37
3.3.3 การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง SFP .....	38
3.4 การสร้างโปรแกรมเชื่อมโยงการวิเคราะห์และออกแบบฐานรากเสาเข็ม เข้าด้วยกัน.....	41
3.5 การพัฒนาโปรแกรมให้ครอบคลุมการออกแบบพื้นฐานอื่นๆ .....	42
3.6 การตรวจสอบความถูกต้องในการคำนวณของโปรแกรม SUTFoundation .....	43
<b>4 ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล.....</b>	<b>44</b>
4.1 บทนำ.....	44
4.2 ผลการเทียบปรับและตรวจสอบแบบจำลอง SFP .....	44
4.2.1 การวิเคราะห์แผ่นฐานรากโดยวิธีไฟไนท์กริด.....	44
4.2.2 การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนท์กริด.....	46
4.2.3 ผลการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง SFP .....	51
4.3 การสร้างโปรแกรม SUTFoundation ที่ออกแบบให้เชื่อมโยงการวิเคราะห์และ ออกแบบฐานรากเข้าด้วยกัน.....	57
4.4 โปรแกรมสำหรับการออกแบบสำหรับฐานรากอื่นๆ.....	60
4.5 ผลการตรวจสอบความถูกต้องในการคำนวณของโปรแกรม SUTFoundation .....	66
<b>5 บทสรุป .....</b>	<b>68</b>
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	68
5.1.1 แบบจำลอง SFP .....	68
5.1.2 โปรแกรมวิเคราะห์และออกแบบฐานรากเสาเข็ม .....	68
5.1.3 โปรแกรมวิเคราะห์และออกแบบฐานรากอื่นๆ.....	69
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	69
5.1.1 ข้อเสนอแนะเพื่อใช้ผลการวิจัย .....	69
5.1.2 ข้อเสนอแนะเพื่อวิจัยเพิ่ม .....	69
รายการอ้างอิง.....	71

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

### ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. หลักการ วิธีและสมการที่ใช้ในโปรแกรม SUTFoundation.....	76
ภาคผนวก ข. คู่มือการใช้งานโปรแกรม SUTFoundation.....	108
ภาคผนวก ค. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	109
ประวัติผู้เขียน .....	110

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สมการ Closed-form สำหรับฐานรากที่มีความยาวมาก (infinite beam) ซึ่งรองรับโดยที่รองรับแบบยึดหยุ่น (Winkler, 1876)..... 8
2.2	ความสามารถของวิธีการวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มแบบต่างๆ (Poulos, 2000)..... 12
3.1	จำนวนดีกรีความอิสระของโครงสร้าง ..... 37
3.2	พารามิเตอร์พื้นฐานในการวิเคราะห์แผ่นฐานรากบนเสาเข็ม (Small and Zhang, 2000)..... 39
3.3	พารามิเตอร์ของวัสดุในการทดสอบฐานรากเสาเข็มโดยแบบจำลองแรงเหวี่ยง..... 40
3.4	ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการออกแบบฐานรากค้ำในโปรแกรม SUTFoundation ..... 96
3.5	ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการออกแบบฐานรากเสาเข็มในโปรแกรม SUTFoundation ..101
4.1	การคำนวณและวิธีหรือสมการที่ใช้สำหรับการออกแบบฐานรากเสาเข็ม ..... 58
4.2	การคำนวณและวิธีหรือสมการที่ใช้สำหรับการออกแบบฐานรากค้ำ ..... 60
5.1	สรุปความสามารถของโปรแกรม SUTFoundation.....127
ก.1	ขอบเขตของค่าหน่วยแรงที่ผิวและปลายเสาเข็มที่อยู่ในชั้นทราย (API, 1984)..... 81
ก.2	มุมเสียดทานระหว่างเสาเข็มและทราย (Stas and Kulhawy, 1984) ..... 84
ก.3	สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง (Stas and Kulhawy, 1984)..... 84
ก.4	ความสัมพันธ์ของค่า $\beta$ กับชนิดของดินสำหรับคำนวณแรงเฉือนของเสาเข็ม ..... 85
ก.5	ค่าสัมประสิทธิ์ความยึดหยุ่น ( $k$ ) สำหรับดินที่มีแรงเหนียวนำ (cohesive soils)..... 93
ก.6	ค่าของ $n_h$ สำหรับดินเม็ดหยาบ ..... 99
ก.7	ค่าประสิทธิภาพกลุ่มเข็มในชั้นดินเหนียวเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุกแนวราบ .....100
ก.8	ค่าประสิทธิภาพกลุ่มเข็มในชั้นทรายเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุกแนวราบ .....101
ก.9	น้ำหนักประลัยหรือน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งานที่เพิ่มค่า.....105

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แบบจำลองสำหรับวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็ม ..... 5
2.2	ขั้นตอนการวิเคราะห์เสาเข็มโดยวิธีดั้งเดิม ..... 5
2.3	แบบจำลองสำหรับฐานรากที่ยาวมากๆ (Winkler, 1876) ..... 7
2.4	แบบจำลองสำหรับฐานรากที่มีความยาวจำกัด (Hetenyi, 1946)..... 9
2.5	แบบจำลองฐานรากค้ำบนสปริงสำหรับการวิเคราะห์โดยวิธีสตีฟเนสมेटริกซ์..... 11
2.6	(a) การกระจายของหน่วยแรงรอบเสาเข็มเมื่อรับแรงแนวตั้ง..... 13
2.6	(b) การกระจายของหน่วยแรงรอบเสาเข็มเมื่อรับแรงแนวราบ ..... 13
2.6	(c) แบบจำลองสำหรับวิเคราะห์โดยวิธี $p$ - $y$ curve ..... 13
2.7	แบบจำลองการวิบัติแบบลิ่มของดินเหนียวเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกแนวราบ (Reese, 1958) ..... 14
2.8	ลักษณะรูปร่างของ $p$ - $y$ curves ในชั้นดินเหนียวอ่อนสำหรับน้ำหนักบรรทุกแนวราบ แบบสถิต (Matlock, 1970)..... 14
2.9	ลักษณะรูปร่างของ $p$ - $y$ curves ในชั้นดินเหนียวแข็งสำหรับน้ำหนักบรรทุกแนวราบ แบบสถิต (Reese, 1975) ..... 15
2.10	ลักษณะรูปร่างของ $p$ - $y$ curves ในชั้นทราย (Reese et al., 1974) ..... 16
2.11	ขั้นตอนการคำนวณลองผิดลองถูกเพื่อหาขนาดฐานรากแผ่หรือความยาวเสาเข็ม..... 17
2.12	แผนผังแสดงการออกแบบฐานรากเสาเข็มโดยใช้หลายโปรแกรมร่วมกัน ..... 18
3.1	แผนดำเนินการวิจัย..... 22
3.2	การจำลองฐานรากโดยวิธีการต่างๆ..... 23
3.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็ม..... 24
3.4	การจำลองฐานรากเสาเข็มเป็นโครงข้อแข็งกับเสาเข็ม (SFP) ..... 25
3.5	แบบจำลอง Simplified Frame-Pile สำหรับวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็ม..... 26
3.6	แรงภายในและการเปลี่ยนตำแหน่งของจุดต่อในระบบแกนเฉพาะแห่ง ของชิ้นส่วนโครงข้อแข็ง (12-DOF) ..... 26
3.7	การคำนวณคุณสมบัติพื้นฐานสำหรับชิ้นส่วน โครงข้อแข็งของแบบจำลอง SFP ..... 28

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 การหมุนแกนในแนวตั้งโดยแกน $z'$ ยั้ขนานกับแกน $Z$ .....	31
3.9 การจำลองการตอบสนองของชั้นดินต่อเสาเข็ม.....	33
3.10 การกำหนดหมายเลขจุดต่อของชั้นส่วน .....	34
3.11 โครงสร้างแผ่นตัวอย่าง .....	36
3.12 ฐานรากตัวอย่างเสาเข็มกลุ่ม (Small and Zhang, 2000) .....	38
3.13 ฐานรากเสาเข็มตัวอย่างโดยแบบจำลองแรงเหวี่ยง (Horikoshi et al, 2003) .....	39
3.14 การติดตั้งฐานรากในการทดสอบด้วยแบบจำลองแรงเหวี่ยง.....	40
3.15 ตำแหน่งกาติดตั้ง Strain gage บนเสาเข็ม.....	41
3.16 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรม SUTFoundation.....	42
4.15 แผนผังขั้นตอนการลองผิดลองถูกเพื่อหาขนาดฐานรากตื้นฐานเดี่ยว ที่เหมาะสม .....	61
4.16 ขนาดเริ่มต้นของฐานรากตื้นฐานร่วม .....	62
4.17 แผนผังขั้นตอนการลองผิดลองถูกเพื่อหาขนาดฐานรากตื้นฐานร่วม ที่เหมาะสม .....	63
4.18 ขนาดเริ่มต้นของฐานรากตื้นฐานแพ .....	64
4.19 แผนผังขั้นตอนการลองผิดลองถูกเพื่อหาความลึกของฐานรากตื้นฐานแพ ที่เหมาะสม .....	65
4.14 แผนผังขั้นตอนการลองผิดลองถูกเพื่อหาความลึกของฐานรากเสาเข็มที่เหมาะสม....	59
4.1 ค่า Normalized vertical displacement ( $u_z D / PB^2$ ) ของโครงสร้างแผ่นแต่ละขนาดที่ คำนวณโดยวิธีไฟไนท์กริด .....	45
4.2 ค่า Normalized vertical displacement ( $u_z D / PB^2$ ) ของโครงสร้างแผ่นแต่ละขนาด คำนวณโดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์.....	46
4.3 การเปรียบเทียบค่า Normalized vertical displacement ( $u_z D / PB^2$ ) ของโครงสร้าง แผ่นแต่ละขนาดของวิธีไฟไนท์กริดกับวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์.....	47

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4	การเข้าใกล้ค่าตอบแม่นยำตรงของค่า Normalized vertical displacement ( $u_z D / PB^2$ ) และค่า Normalized bending moment ( $M / P$ ) ของการคำนวณโดยวิธีไฟไนต์กริด กับวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ สำหรับแบบจำลองโครงสร้างที่มี $L / B = 1.0$ ..... 48
4.5	การเข้าใกล้ค่าตอบแม่นยำตรงของค่า Normalized vertical displacement ( $u_z D / PB^2$ ) และค่า Normalized bending moment ( $M / P$ ) ของการคำนวณโดยวิธีไฟไนต์กริด กับวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ สำหรับแบบจำลองโครงสร้างที่มี $L / B = 1.2$ ..... 49
4.6	การเข้าใกล้ค่าตอบแม่นยำตรงของค่า Normalized vertical displacement ( $u_z D / PB^2$ ) และค่า Normalized bending moment ( $M / P$ ) ของการคำนวณโดยวิธีไฟไนต์กริด กับวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ สำหรับแบบจำลองโครงสร้างที่มี $L / B = 1.4$ ..... 50
4.7	ฐานรากเสาเข็มกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ตรวจสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกแนวตั้ง ..... 52
4.8	การประมาณค่าสติฟเนสของสปริงแนวตั้งตามวิธีของ Whitaker (1976) ..... 52
4.9	ผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized vertical displacement กับ Normalized distance ของฐานรากเสาเข็มกลุ่มตามแนว A-A' ..... 53
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกแนวราบ ( $H$ ) กับการเคลื่อนตำแหน่งแนวราบที่ ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $\Delta$ ) ของเสาเข็มเดี่ยว..... 54
4.11	ค่าโมเมนต์ดัดในเสาเข็มเดี่ยว ( $L_p = 170$ mm) ที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อรับน้ำหนักบรรทุก แนวราบ ..... 55
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกแนวราบ ( $H$ ) กับการเคลื่อนตำแหน่งแนวราบที่ ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $\Delta$ ) ของเสาเข็มกลุ่มที่มีการยึดรั้งหัวเสาเข็มแบบยึดแน่น..... 56
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกแนวราบ ( $H$ ) กับการเคลื่อนตำแหน่งแนวราบที่ ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $\Delta$ ) ของเสาเข็มกลุ่มที่มีการยึดรั้งหัวเสาเข็มแบบหมุน ..... 56
4.14	แผนผังขั้นตอนการลองผิดลองถูกเพื่อหาความลึกของฐานรากเสาเข็มที่เหมาะสม.... 59
4.15	แผนผังขั้นตอนการลองผิดลองถูกเพื่อหาขนาดฐานรากตื้นฐานเดี่ยว ที่เหมาะสม ..... 61
4.16	ขนาดเริ่มต้นของฐานรากตื้นฐานร่วม ..... 62
4.17	แผนผังขั้นตอนการลองผิดลองถูกเพื่อหาขนาดฐานรากตื้นฐานร่วม ที่เหมาะสม ..... 63

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ขนาดเริ่มต้นของฐานรากค้ำฐานแพ.....	64
4.19 แผนผังขั้นตอนการลองผิดลองถูกเพื่อหาความลึกของฐานรากค้ำฐานแพ ที่เหมาะสม .....	65
ก.1 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็ม ของเสาเข็มเสียดทาน .....	77
ก.1 (b) ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็ม ของเสาเข็มคาล .....	77
ก.2 กลไกการวิบัติของดินรอบเสาเข็ม .....	79
ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง $N_c$ กับอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ของเสาเข็ม (Skempton, 1951) .....	80
ก.4 การเปลี่ยนแปลงของ $N_c$ กับมุมเสียดทานภายใน (after Berezantzev et al., 1961)..	81
ก.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $S_u$ กับ $\alpha$ (Tomlinson, 1957; Holmberg, 1970) .....	83
ก.6 ค่า $\alpha$ ที่ได้จากการทดสอบกำลังเสาเข็มในสนาม (after Vesic, 1977) .....	83
ก.7 การเกิดการจุกตัวของดิน (soil plug) ในเสาเข็มหน้าตัดเปิด .....	86
ก.8 (a) แบบจำลองการวิบัติของเสาเข็มที่ปราศจากการยึดรั้งในดินเหนียว ของเสาเข็มสั้น .....	87
ก.8 (b) แบบจำลองการวิบัติของเสาเข็มที่ปราศจากการยึดรั้งในดินเหนียว ของเสาเข็มยาว.....	87
ก.9 (a) กลไกการวิบัติของเสาเข็มที่มีการยึดรั้งที่หัวเสาเข็มในชั้นดินเหนียว ของเสาเข็มสั้น (Broms, 1965).....	89
ก.9 (b) กลไกการวิบัติของเสาเข็มที่มีการยึดรั้งที่หัวเสาเข็มในชั้นดินเหนียว ของเสาเข็มยาวปานกลาง (Broms, 1965).....	89
ก.9 (c) กลไกการวิบัติของเสาเข็มที่มีการยึดรั้งที่หัวเสาเข็มในชั้นดินเหนียว ของเสาเข็มยาว (Broms, 1965).....	89
ก.10 น้ำหนักบรรทุกประลัยแนวราบของเสาเข็มสั้นในชั้นดินเหนียว (Brom, 1965).....	91

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.11	91
น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยแนวราบของเสาเข็มยาวในชั้นดินเหนียว (Brom, 1965).....	
ก.12	92
การเสียรูปแนวราบของเสาเข็มที่ระดับผิวดินสำหรับดินที่มีแรงเหนียว (Broms, 1965).....	
ก.13 (a)	93
แบบจำลองการวิบัติของเสาเข็มที่ปราศจากการยึดรั้งที่หัวเสาเข็มในชั้นทราย ของเสาเข็มสั้น (Broms, 1965).....	
ก.13 (b)	93
แบบจำลองการวิบัติของเสาเข็มที่ปราศจากการยึดรั้งที่หัวเสาเข็มในชั้นทราย ของเสาเข็มยาว (Broms, 1965).....	
ก.14 (a)	96
กลไกการวิบัติของเสาเข็มที่มีการยึดรั้งที่หัวเสาเข็มในชั้นทราย ของเสาเข็มสั้น (Broms, 1965).....	
ก.14 (b)	96
กลไกการวิบัติของเสาเข็มที่มีการยึดรั้งที่หัวเสาเข็มในชั้นทราย ของเสาเข็มยาวปานกลาง (Broms, 1965).....	
ก.14 (c)	96
กลไกการวิบัติของเสาเข็มที่มีการยึดรั้งที่หัวเสาเข็มในชั้นทราย ของเสาเข็มยาว (Broms, 1965).....	
ก.15	97
น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยแนวราบของเสาเข็มสั้นในชั้นทราย (Brom, 1965) .....	
ก.16	98
น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยแนวราบของเสาเข็มยาวในชั้นทราย (Brom, 1965).....	
ก.17	98
การเสียรูปแนวราบของเสาเข็มที่ระดับผิวดินสำหรับดินเม็ดหยาบ (Broms, 1965)....	
ก.18	103
หน้าตัดวิกฤตสำหรับโมเมนต์ดัดและระยะฝังยึดเหล็กเสริม .....	
ก.19	103
แรงปฏิกิริยาของหัวเสาเข็ม.....	
ก.20	104
หน้าตัดวิกฤตของการเอนทะลุเมื่อตอกเสาเข็มชิดกัน .....	
ก.21	107
การกระจายเหล็กเสริมในฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า .....	



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ว.ศ.ท.	=	วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย
$A$	=	พื้นที่
$A_b, A_s$	=	พื้นที่ส่วนปลายและพื้นที่รอบผิวของเสาเข็ม
$b_c, b_q, b_\gamma$	=	ตัวแปรความเอียงของฐานราก
$B$	=	ความกว้างของฐานรากหรือเสาเข็ม
$B_g$	=	ความกว้างของพื้นที่หน้าตัดรอบกลุ่มเข็ม
$B'$	=	ความกว้างประสิทธิภาพ
$c$	=	ค่าหน่วยแรงเหนียว (cohesion) ของดิน
$c_d$	=	ค่าหน่วยแรงเหนียวใช้งาน
$c_s$	=	หน่วยแรงยึดเกาะเฉลี่ยระหว่างผิวเสาเข็มกับดิน
$c'$	=	ค่าหน่วยแรงเหนียวประสิทธิภาพ (effective cohesion) ของดิน
$c_L$	=	ค่าหน่วยแรงเหนียว (cohesion) ของดินที่ใช้คำนวณกำลังรับแรงแบก ทานในกรณีการวิบัติแบบ Local shear failure และ Punching shear failure
$d_c, d_q, d_\gamma$	=	ตัวแปรความลึกฐานรากสำหรับสมการกำลังรับแรงแบกทาน
$D$	=	ความลึกของระดับน้ำใต้ดิน
$D_f$	=	ระยะฝังของฐานรากแผ่นดิน
$e$	=	ระยะเอียงศูนย์
$e_b, e_l$	=	ระยะเอียงศูนย์ทางด้านกว้างและยาวตามลำดับ
$E$	=	โมดูลัสยืดหยุ่น
$E_p \cdot I_p$	=	ความแข็งแรง (stiffness) ของหน้าตัดเสาเข็ม
$E_u$	=	ค่าโมดูลัสในสภาวะไม่ระบายน้ำ
$E'$	=	ค่าโมดูลัสในสภาวะระบายน้ำ
$FS_s, FS_b, FS$	=	อัตราส่วนปลอดภัยของแรงแบกทานที่ปลายเข็ม อัตราส่วนปลอดภัยของ แรงเสียดทานระหว่างดินกับเข็ม และอัตราส่วนปลอดภัยรวม ตามลำดับ
$g_c, g_q, g_\gamma$	=	ตัวแปรความเอียงของดินเหนือฐานราก
$i_c, i_q, i_\gamma$	=	ตัวแปรความเอียงของน้ำหนักบรรทุกทุกสำหรับสมการกำลังรับแรงแบกทาน
$k_h$	=	สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นแนวราบ

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$k_s$	=	สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นแนวตั้ง
$K$	=	สัมประสิทธิ์ความดันดินด้านข้าง
$L$	=	ความยาวของฐานรากหรือเสาเข็ม
$L_g$	=	ด้านแคบของพื้นที่หน้าตัดรอบกลุ่มเสาเข็ม
$L'$	=	ความยาวประสิทธิผล
$M$	=	โมเมนต์ที่กระทำต่อฐานราก
$N_c, N_q, N_\gamma$	=	ตัวแปรกำลังรับแรงแบกทาน
$N'$	=	ค่าตัวเลขการทะลุทะลวงมาตรฐานที่ปรับแก้แล้ว
$P$	=	น้ำหนักบรรทุก
$P_a$	=	น้ำหนักบรรทุกที่ยอมรับ
$P_u$	=	น้ำหนักบรรทุกประลัย
$P_{u(tension)}$	=	กำลังรับแรงดึงประลัยของเสาเข็ม
$q$	=	น้ำหนักดินกดทับเหนือฐานราก
$q_{all}$	=	กำลังรับแรงแบกทานที่ยอมรับ
$q_{all(net)}$	=	กำลังรับแรงแบกทานที่ยอมรับสุทธิ
$q_{net}$	=	ความดันสุทธิที่กระจายใต้ฐานราก
$q_u$	=	กำลังรับแรงแบกทานประลัย
$q_{u(b)}$	=	กำลังรับแรงแบกทานของดินชั้นล่าง
$q_{u(t)}$	=	กำลังรับแรงแบกทานของดินชั้นบน
$Q_b$	=	แรงแบกทานที่ปลายเสาเข็ม
$Q_s$	=	แรงเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดิน
$Q_u$	=	น้ำหนักแบกทานประลัย
$s_c, s_q, s_\gamma$	=	ตัวแปรรูปร่างฐานรากสำหรับสมการกำลังรับแรงแบกทาน
$S_t$	=	การทรุดตัวทั้งหมด (total settlement)
$S_u$	=	กำลังต้านทานแรงเฉือนในสภาวะไม่ระบายน้ำ (undrained shear strength)
$\overline{S_u}$	=	กำลังต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ยตลอดความยาวของเสาเข็ม
$W$	=	น้ำหนักของเสาเข็ม

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$\alpha$	=	แฟกเตอร์ยึดเกาะ (adhesion factor)
$\beta$	=	มุมเอียงของดินเหนือฐานราก มีหน่วยเป็นเรเดียน
$\delta'$	=	มุมเสียดทานระหว่างเสาเข็มและทราย
$\gamma$	=	ค่าหน่วยน้ำหนักของดิน
$\gamma'$	=	ค่าหน่วยน้ำหนักประสิทธิภาพผลของดิน
$\rho$	=	เส้นรอบรูปเสาเข็ม (perimeter of pile)
$\eta$	=	มุมเอียงของฐานราก มีหน่วยเป็นเรเดียน
$\mu$	=	อัตราส่วนพัวซอง
$\phi$	=	ค่ามุมเสียดทานภายใน (internal friction) ของดิน
$\phi_d$	=	ค่ามุมเสียดทานภายในใช้งาน
$\phi_L$	=	ค่ามุมเสียดทานภายใน (internal friction) ของดินที่ใช้คำนวณกำลังรับ แรงแบกทานในกรณีการวิบัติแบบ Local shear failure และ Punching shear failure
$\phi'$	=	ค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิภาพ (effective internal friction) ของดิน
$\sigma_{v0}$	=	น้ำหนักดินกดทับที่ตำแหน่งซึ่งวัดค่าความดันที่ปลายกรวย
$\sigma'_v$	=	ความเค้นประสิทธิภาพเฉลี่ย เนื่องจากผลของน้ำหนักชั้นดิน (overburden) และดินถม (fill)
$\sigma'_{vb}$	=	ความเค้นประสิทธิภาพในแนวตั้งที่ปลายเสาเข็ม
$\sigma'_{vs}$	=	ความเค้นประสิทธิภาพในแนวตั้งเฉลี่ยตลอดความยาวเสาเข็ม
$\Delta\sigma'_v$	=	ความเค้นในแนวตั้งที่เพิ่มขึ้น
$\varepsilon_1$	=	ความเครียดในแนวตั้ง
$\varepsilon_v$	=	ความเครียดเชิงปริมาตร
$\tau$	=	ความเค้นเฉือน (shear stress)
$w$	=	ตัวเลขปรับลดกำลัง

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

การวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มโดยทั่วไปจะใช้สมมติฐานว่าแผ่นฐานรากแข็งแรงแรง (rigid footing) การคำนวณหาหน้าหนักบรรทุกที่ถ่ายลงเสาเข็มแต่ละต้นสามารถคำนวณได้ง่ายถ้ากำหนดให้การยึดรั้งของแผ่นฐานรากกับเสาเข็มเป็นหมุด (hinge connection) โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจากหน้าหนักบรรทุกไม่ถ่ายลงสู่เสาเข็ม การออกแบบเช่นนี้แผ่นฐานรากจึงรับโมเมนต์ทั้งหมดที่เกิดขึ้น การออกแบบฐานรากเสาเข็มเป็นฐานรากแบบแข็งแรงแรงนี้สามารถใช้ได้ดีกับฐานรากที่มีขนาดเล็ก แต่เมื่อฐานรากมีขนาดใหญ่พฤติกรรมของฐานรากจะมีแนวโน้มเป็นฐานรากคัดตัวได้ (flexible footing) มากกว่า การวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มแบบคัดตัวได้เป็นที่ทราบกันดีว่าต้องอาศัยการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้แบบจำลองสามมิติจึงจะได้ผลคำตอบไปใช้ประกอบการออกแบบโครงสร้างฐานรากได้ วิธีวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงตัวเลขแบบสามมิติยังสามารถเลือกใช้ได้หลายวิธี เช่น วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์, วิธีคานสปริง (beam spring method) เป็นต้น ตัวอย่างโปรแกรมที่สามารถวิเคราะห์เป็นแบบสามมิติ ได้แก่ ANSYS, FLAC3D, ABAQUS เป็นต้น การวิเคราะห์โดยวิธีเชิงตัวเลขแบบสามมิติมีแบบจำลองที่เสมือนจริงมากที่สุด อีกทั้งยังสามารถใช้แบบจำลองพฤติกรรมของวัสดุแบบไม่เป็นเส้นตรง (non-linear) ได้เมื่อต้องการผลคำตอบที่ตรงกับสภาพจริงยิ่งขึ้น แต่วิธีการคำนวณจะยุ่งยาก ซับซ้อน การคำนวณแต่ละครั้งต้องใช้เวลามาก ต้องการหน่วยประมวลผล (CPU) ที่มีประสิทธิภาพ การวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงตัวเลขแบบสามมิติจึงไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในการออกแบบฐานราก

โปรแกรมช่วยการออกแบบฐานรากในปัจจุบันแบ่งออกได้ 3 ประเภท ได้แก่ 1. โปรแกรมวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของดิน ตัวอย่างเช่น โปรแกรม CBEAR (U.S. Department of Transportation, 1991) สามารถวิเคราะห์กำลังรับแรงเบกทานยอมให้ของชั้นดินโดยสมการตามวิธี Limit analysis, โปรแกรม DRIVEN (U.S. Department of Transportation, 2001) สามารถวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกยอมให้ของเสาเข็มโดยใช้สมการตามวิธีสถิตศาสตร์ เป็นต้น 2. โปรแกรมวิเคราะห์หาแรงภายในของโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น โปรแกรม STAAD Pro 2004 (REI Software Co., Ltd) สามารถใช้วิเคราะห์โมเมนต์ดัด แรงเฉือนและการทรุดตัวในแผ่นฐานรากโดยจำลองฐานรากเป็นชิ้นส่วนแบบแผ่น (plate element) ร่วมกับการจำลองชั้นดินเป็นสปริงยึดหยุ่นคิดได้แผ่น

ฐานราก, โปรแกรม FLAC3D (Itasca Consulting Group, Inc.) สามารถวิเคราะห์โดยจำลองชั้นดิน และโครงสร้างรวมอยู่ในแบบจำลองเดียวกันและวิเคราะห์ร่วมกันในการคำนวณเพียงครั้งเดียวได้ เป็นต้น 3. โปรแกรมออกแบบจำนวนเหล็กเสริมในโครงสร้างฐานราก โปรแกรมประเภทนี้มักมีลักษณะเป็นตารางคำนวณ (spread sheet) การแยกการทำงานของโปรแกรมดังกล่าวข้างต้นทำให้การออกแบบขนาดฐานรากที่เหมาะสมยังคงต้องใช้การลองผิดลองถูกโดยผู้ออกแบบเอง โดยเฉพาะในฐานรากเสาเข็มต้องใช้เวลามากในการลองผิดลองถูก อีกทั้งยังต้องเสียเวลาในการตีความและถ่ายโอนคำตอบจากการวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักของดินไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างฐานราก โดยยังไม่มีวิธีที่เหมาะสมสำหรับใช้วิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มในขั้นตอนลองผิดลองถูกของการออกแบบขนาดฐานราก

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้จะพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มที่รองรับน้ำหนักบรรทุกทุกทั้งแนวตั้ง น้ำหนักบรรทุกแนวราบ และโมเมนต์คด วิธีที่จะพัฒนาขึ้นนี้จะช่วยลดหรือแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้นของการวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มด้วยวิธีเชิงตัวเลขแบบเดิม และจะพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์และออกแบบฐานรากที่รวมการวิเคราะห์และออกแบบอยู่ในโปรแกรมเดียว โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้จะนำวิธีการวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มซึ่งพัฒนาขึ้นในส่วนแรกมาใช้ วัตถุประสงค์เฉพาะมีดังนี้

- 1.2.1) เพื่อพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มที่ง่ายกว่าวิธีเชิงตัวเลขแบบเดิมที่มีใช้กันอยู่ พร้อมทั้งนำมาสร้างเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 1.2.2) เพื่อสร้างโปรแกรมออกแบบฐานรากที่สามารถลองผิดลองถูกหาขนาดฐานราก วิเคราะห์หาแรงภายใน (โมเมนต์คดและแรงเฉือน) ในแผ่นฐานราก และคำนวณเหล็กเสริมโดยอัตโนมัติในโปรแกรมเดียว
- 1.2.3) เพื่อสร้างโปรแกรมออกแบบฐานรากที่ผู้ใช้เลือกวิธีการคำนวณ สมการ และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณได้เอง

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

วิธีวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มที่ง่ายกว่าวิธีเชิงตัวเลขแบบเดิมที่จะพัฒนาขึ้นนี้จะสมมติให้แผ่นฐานรากและเสาเข็มไม่เกิดการแตกร้าวในขณะที่รับน้ำหนักบรรทุกทุกในช่วงใช้งาน, แผ่นฐานรากและเสาเข็มเป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน (homogeneous) พร้อมกับมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง (isotropic), ชั้นดินที่รองรับฐานรากมีพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกทุกแนวตั้งและแนวราบอยู่ในช่วงยืดหยุ่น และการถ่ายแรงระหว่างเสาเข็มกับฐานรากเกิดอย่างสมบูรณ์ การพัฒนาวิธีวิเคราะห์

ฐานรากเสาเข็มนี้ตัวแปรไม่ทราบค่าที่ได้อาจจากการวิเคราะห์ คือ โมเมนต์คัต แรงเฉือน การเคลื่อนตำแหน่งของแผ่นฐานรากและเสาเข็ม รวมไปถึงแรงปฏิกิริยาของชั้นดินที่ตอบสนองต่อน้ำหนักบรรทุกทุกแนวราบที่กระทำต่อเสาเข็ม

โปรแกรมวิเคราะห์และออกแบบฐานรากที่พัฒนาขึ้นจะรวมความสามารถในการวิเคราะห์โครงสร้างและการวิเคราะห์ดินไว้ในโปรแกรมเดียว การวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มใช้วิธีที่พัฒนาขึ้นใหม่ในงานวิจัยนี้ในส่วนแรก การวิเคราะห์ฐานรากค้ำ (ฐานรากเดี่ยว, ฐานรากคู่ และฐานรากแพ) จะใช้วิธีไฟไนต์กริด (Bowles, 1988) ซึ่งจะถูกรับปรุงเพิ่มความถูกต้องในการคำนวณในงานวิจัยนี้ด้วย การวิเคราะห์กำลังรับแรงแบกทานของฐานรากค้ำใช้สมการตามวิธี Limit analysis การวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักแนวตั้งของเสาเข็มเดี่ยวใช้สมการตามวิธีสถิตศาสตร์ ส่วนการวิเคราะห์เสาเข็มที่รับน้ำหนักบรรทุกทุกแนวราบหรือโมเมนต์คัตนั้นจะใช้วิธี  $p$ - $y$  curves โดยโปรแกรม COM624P (public domain) หน่วยการคำนวณที่ใช้เป็นหน่วยพื้นฐานของโปรแกรม คือ หน่วย SI โปรแกรมสามารถออกแบบโครงสร้างแผ่นฐานรากทั้งสำหรับฐานรากเสาเข็มและฐานรากค้ำ (ฐานรากเดี่ยว, ฐานรากร่วม, ฐานรากแพ) ตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-40 และ ACI 318-02

#### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

วิธีวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มที่ได้พัฒนาขึ้นจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับใช้วิเคราะห์หาโมเมนต์คัต แรงเฉือนและการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็ม เพื่อประกอบการออกแบบโครงสร้างของแผ่นฐานราก วิธีนี้ช่วยลดการคำนวณที่ซับซ้อนลงได้มากสำหรับฐานรากเสาเข็ม และสามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็ว วิธีไฟไนต์กริดสำหรับวิเคราะห์ฐานรากค้ำที่ได้รับการปรับปรุงใหม่จะมีความถูกต้องในการวิเคราะห์โมเมนต์คัต แรงเฉือนและการทรุดตัวที่ถูกต้องมากขึ้นกว่าเดิม โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถช่วยผู้ออกแบบในการคำนวณออกแบบฐานรากเสาเข็ม (piled footing) ฐานรากค้ำฐานเดี่ยว (isolated footing), ฐานรากร่วม (combined footing) และฐานรากค้ำฐานแพ (mat footing) ให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง พร้อมกับแสดงรายการคำนวณและภาพประกอบที่สวยงามในเวลาที่รวดเร็ว โปรแกรมนี้มีส่วนโต้ตอบกับผู้ใช้โปรแกรม (user interface) ที่เข้าใจง่าย อีกทั้งยังแสดงข้อมูลวิธีการออกแบบ สมการและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้อย่างครบถ้วนเป็นประโยชน์แก่นักศึกษานำมาใช้เสริมการเรียนการสอนวิชาวิศวกรรมฐานราก และโปรแกรมนี้ยังอนุญาตให้นักวิจัยอื่นๆ สามารถนำรหัสต้นฉบับ (source code) ไปพัฒนาต่อให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นได้

## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

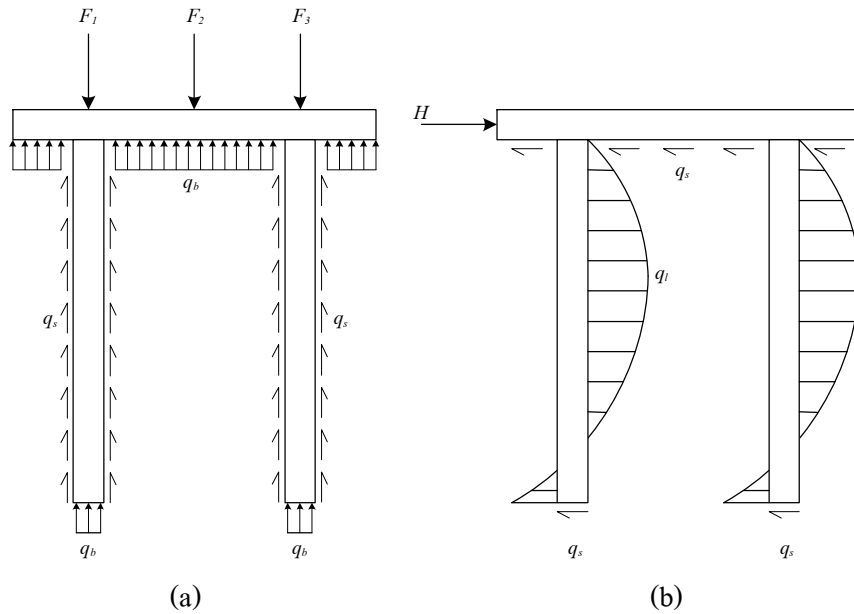
#### 2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มแบบต่างๆ ทบทวนการศึกษาพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มที่ง่ายขึ้น ประวัติการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับคำนวณออกแบบฐานราก และท้ายสุดจะกล่าวถึงความสามารถของโปรแกรมคอมพิวเตอร์อื่นๆ ที่จะนำมาเป็นต้นแบบในการพัฒนาต่อ

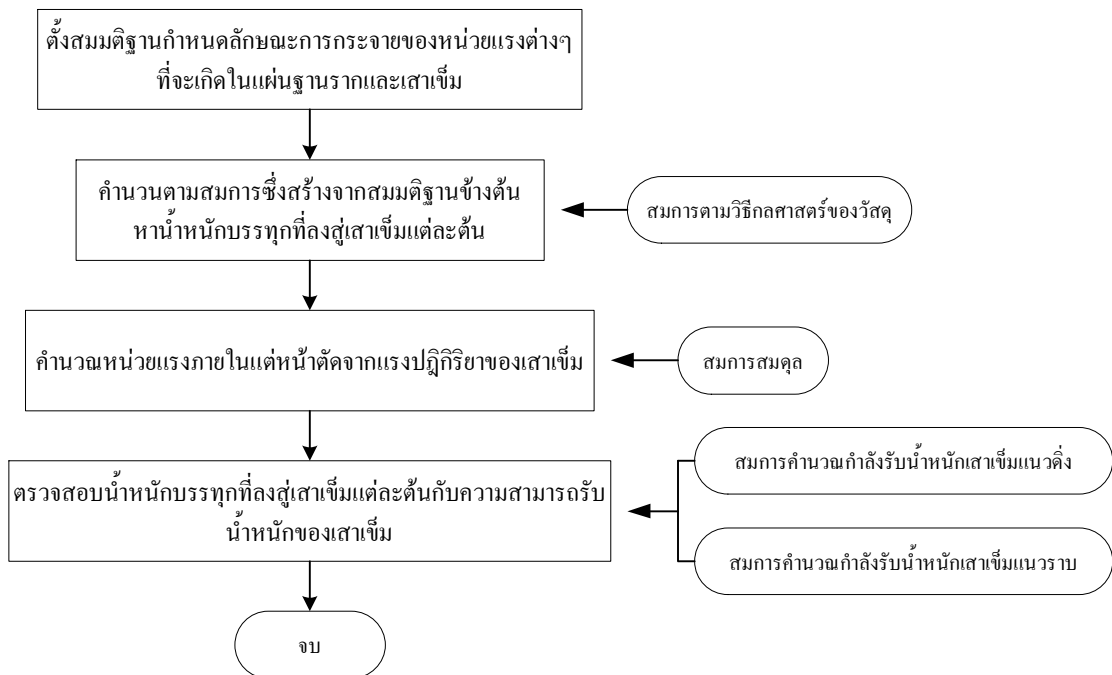
#### 2.2 การวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็ม

##### 2.2.1 วิธีดั้งเดิมสำหรับวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็ม

พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของฐานรากเสาเข็มในสภาพจริงอาจจำลองอย่างง่ายได้โดยแบบจำลองทั่วไปดังรูปที่ 2.1 ซึ่งสมมติให้เสาเข็มยึดติดกับแผ่นฐานรากแบบหมุน เพื่อความง่ายในการวิเคราะห์จะแบ่งการพิจารณาน้ำหนักบรรทุกทุกแนวตั้งและน้ำหนักบรรทุกทุกแนวราบออกจากกัน น้ำหนักบรรทุกทุกแนวตั้งจะถูกรองรับโดยหน่วยแรงอัดใต้แผ่นฐานรากและแรงกดอัดลงเสาเข็มแต่ละต้น แรงกดอัดที่ลงสู่เสาเข็มทำให้เกิดหน่วยแรงเฉือนรอบเสาเข็มและหน่วยแรงอัดที่ปลายเสาเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (a) น้ำหนักบรรทุกทุกแนวราบจะถูกรองรับโดยหน่วยแรงเฉือนใต้แผ่นฐานรากและแรงเฉือนที่ถ่ายลงเสาเข็มแต่ละต้น แรงเฉือนที่ลงสู่เสาเข็มทำให้เกิดหน่วยแรงอัดด้านข้าง ดินรอบเสาเข็มและหน่วยแรงเฉือนที่ปลายเสาเข็ม พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกแนวตั้งแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 (b) การกระจายของน้ำหนักบรรทุกของฐานรากทั้งในแนวตั้งและแนวราบขึ้นกับความแข็งแกร่งของแผ่นฐานราก ความแข็งแกร่งของเสาเข็ม ความแข็งแกร่งของชั้นดินที่รองรับ รวมทั้งตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกและโมเมนต์คดที่กระทำด้วย ผู้วิเคราะห์จะต้องกำหนดการกระจายของหน่วยแรงเหล่านี้ เมื่อทราบลักษณะการกระจายของหน่วยแรงจึงจะเริ่มวิเคราะห์หาแรงภายใน (โมเมนต์คดและแรงเฉือน) แรงที่กระจายลงสู่เสาเข็มแต่ละต้น และการทรุดตัวของฐานราก ขั้นตอนการวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มโดยวิธีดั้งเดิมสามารถสรุปเป็นแผนผังได้ตามรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 แบบจำลองสำหรับวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็ม (a) ฐานรากเสาเข็มรับน้ำหนักแนวตั้ง (b) ฐานรากเสาเข็มรับน้ำหนักแนวราบ



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็ม โดยวิธีดั้งเดิม



วิธีดั้งเดิมสำหรับคำนวณ โมเมนต์ดัด แรงเฉือนและการทรุดตัวแบบยึดหยุ่นของฐานรากทำได้โดยใช้สมมติฐานว่าฐานรากเป็นฐานรากคงรูป ฐานรากมีความแข็งแรงแรงมากเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นดิน น้ำหนักที่กระจายลงสู่เสาเข็มแต่ละต้น ( $P$ ) จะสามารถคำนวณได้โดยวิธีกลศาสตร์ของวัสดุตามสมการดังนี้

$$P = \frac{V}{n} \pm \frac{V e_x x}{\sum (\bar{x})^2} \pm \frac{V e_y y}{\sum (\bar{y})^2} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $V$  คือ แรงกระทำในแนวดิ่งรวมทั้งหมดยบนฐานราก,  $n$  คือ จำนวนเสาเข็ม,  $e_x$  คือ ระยะเยื้องศูนย์กลางตามแนวแกน  $x$ ,  $e_y$  คือ ระยะเยื้องศูนย์กลางตามแนวแกน  $y$ ,  $x$  คือ ระยะที่วัดจากจุดสะเทินของกลุ่มเสาเข็มถึงจุดกึ่งกลางเสาเข็มตามแกน  $x$ ,  $y$  คือ ระยะที่วัดจากจุดสะเทินของกลุ่มเสาเข็มถึงจุดกึ่งกลางเสาเข็มตามแกน  $y$ ,  $\bar{x}$  คือ ผลรวมของระยะจากจุดกึ่งกลางเสาเข็มจนถึงแกนสะเทินของกลุ่มเสาเข็มตามแนวแกน  $x$  และ  $\bar{y}$  คือ ผลรวมของระยะจากจุดกึ่งกลางเสาเข็มจนถึงแกนสะเทินของกลุ่มเสาเข็มตามแนวแกน  $y$

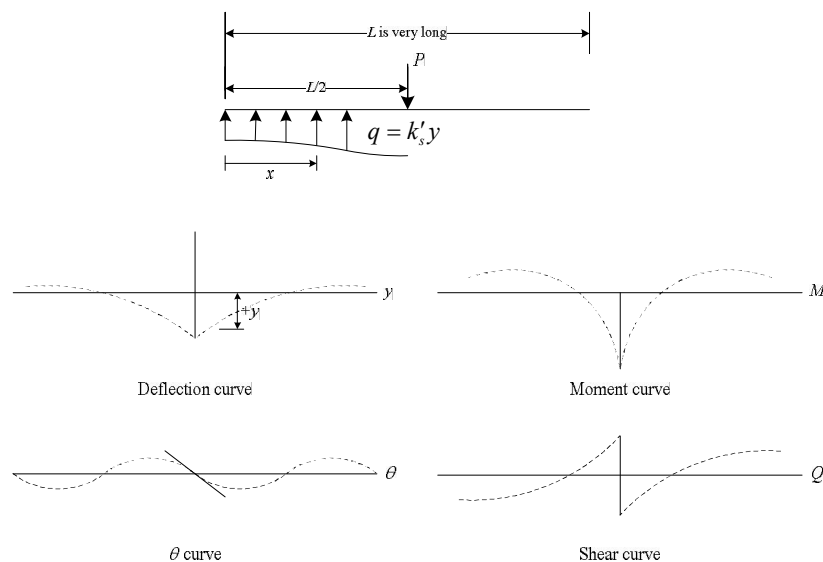
สมการนี้สามารถประยุกต์ใช้กับฐานรากที่รองรับน้ำหนักบรรทุกทุกหลายจุดโดยใช้หลักการซ้อนทับ (superposition) ในการคำนวณหาน้ำหนักบรรทุกรวมของเสาเข็มแต่ละต้น เมื่อทราบแรงปฏิกิริยาของเสาเข็มแต่ละต้นจะสามารถคำนวณ โมเมนต์ดัด และแรงเฉือน ในแต่ละหน้าตัดของแผ่นฐานรากได้โดยแทนแรงปฏิกิริยาของเสาเข็มที่รองรับลงในสมการสมดุล ข้อจำกัดของวิธีนี้คือใช้ได้เฉพาะการวิเคราะห์ฐานรากแบบคงรูปและฐานรากที่มีการยึดรั้งของเสาเข็มเป็นแบบหมุด (hinge connection) เท่านั้น วิธีนี้โมเมนต์ดัดทั้งหมดที่กระทำต่อฐานรากจะถูกรับโดยแผ่นฐานรากทั้งหมดไม่กระจายลงสู่เสาเข็ม การออกแบบโครงสร้างฐานรากต้องใส่เหล็กเสริมในแผ่นฐานรากให้เพียงพอที่จะต้านทาน โมเมนต์ดัด และต้องกำหนดให้ความหนาของแผ่นฐานรากมีค่ามากพอที่ฐานรากแสดงพฤติกรรมเป็นฐานรากคงรูปได้ตามสมมติฐาน อีกทั้งวิธีนี้ไม่สามารถคำนวณค่าการทรุดตัวแบบยึดหยุ่นของแผ่นฐานรากและเสาเข็มได้จึงไม่สามารถตรวจสอบการทรุดตัวแบบยึดหยุ่นว่าเกินมาตรฐานหรือไม่ ดังนั้น ถ้าใช้วิธีนี้ในการออกแบบฐานรากต้องออกแบบให้ฐานรากมีความหนาและใส่เหล็กเสริมให้เพียงพอที่ฐานรากนี้จะมีพฤติกรรมตรงตามสมมติฐาน และยังคงใช้อัตราส่วนปลอดภัยที่สูงเพียงพอเพื่อให้มั่นใจได้ว่าค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจะไม่เกินกว่าค่ามาตรฐาน การนำวิธีนี้มาใช้ออกแบบฐานรากที่มีความกว้างมากๆ เช่น ฐานรากเสาเข็มกลุ่มขนาดใหญ่ (pile raft footing) เป็นต้น จะไม่เป็นการประหยัด

วิธีการออกแบบฐานรากแบบค้ำตัวได้นั้นถูกเสนอโดย Winkler (1876) ในตอนแรกเริ่มวิธีนี้มีข้อกีดในการใช้งานเฉพาะฐานรากที่ยาวมากๆ เท่านั้น และยังไม่สามารถวิเคราะห์ฐานราก

เสาเข็มได้ แต่ต่อมาวิธีนี้ได้แก้ไขข้อจำกัดต่างๆ จนสามารถนำมาใช้เป็นหลักการพื้นฐานในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับฐานรากเสาเข็มด้วย ผู้วิจัยจึงขอทบทวนวิธี Winkler (1876) ได้เสนอแบบจำลองฐานรากแบบค้ำค้ำได้เป็นคานาวางอยู่บนฐานรากยืดหยุ่น (beam on elastic foundation) โดยมีสมมติฐานหลักในการวิเคราะห์ว่า ปฏิกริยาของดินใต้ฐานรากแต่ละจุดต่อน้ำหนักบรรทุกที่กระทำเป็นอิสระต่อกัน และไม่คิดการถ่ายแรงเฉือนลงสู่ชั้นดิน การวิเคราะห์ฐานรากค้ำค้ำตามแบบจำลองของ Winkler (1876) ใช้ทฤษฎียืดหยุ่น (theory of elasticity) ในการแก้ปัญหา สมการพื้นฐานในการวิเคราะห์แผ่นฐานรากค้ำค้ำแบบจำลองในรูปที่ 2.3 เป็นสมการอนุพันธ์อันดับ 4

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = q = -k'_s y \quad (2.2)$$

เมื่อ  $E$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่น และ  $I$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของแผ่นฐานราก,  $y$  คือ ค่าการทรุดตัวของฐานราก,  $x$  คือ ระยะจากจุดเริ่มต้น,  $q$  คือ หน่วยแรงดันดินใต้ฐานราก และ  $k'_s$  คือ ผลคูณของโมดูลัสของแรงปฏิกริยาของดินใต้ฐานรากในแนวดิ่ง ( $k_s$ ) กับความกว้างของแผ่นฐานราก ( $B$ ) สมการที่ (2.2) นี้สามารถแก้หาคำตอบในรูป Closed-form สำหรับลักษณะน้ำหนักบรรทุกทุกแบบต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.3 แบบจำลองฐานรากที่ยาวมาก ๆ (Winkler, 1876)

ตารางที่ 2.1 ค่าตอบแบบ Closed-form สำหรับฐานรากที่มีความยาวมากซึ่งรับรองโดยที่รองรับแบบยืดหยุ่น (Winkler, 1876)

Concentrated load at end	Moment at end
$y = \frac{2V_1\lambda}{k'_s} D_{\lambda x}$	$y = \frac{-2M_1\lambda^2}{k'_s} C_{\lambda x}$
$\theta = \frac{-2V_1\lambda}{k'_s} A_{\lambda x}$	$\theta = \frac{4M_1\lambda^3}{k'_s} D_{\lambda x}$
$M = \frac{-V_1}{\lambda} B_{\lambda x}$	$M = M_1 A_{\lambda x}$
$Q = -V_1 C_{\lambda x}$	$Q = -2M_1\lambda B_{\lambda x}$
Concentrated load at center	Moment at center
$y = \frac{P\lambda}{2k'_s} A_{\lambda x}$	$y = \frac{M_0\lambda^2}{k'_s} B_{\lambda x}$
$\theta = \frac{-P\lambda^2}{k'_s} B_{\lambda x}$	$\theta = \frac{M_0\lambda^3}{k'_s} C_{\lambda x}$
$M = \frac{P}{4\lambda} C_{\lambda x}$	$M = \frac{M_0}{2} D_{\lambda x}$
$Q = \frac{-P}{2} D_{\lambda x}$	$Q = \frac{-M_0}{2} A_{\lambda x}$

เมื่อ  $y$  คือ ค่าการทรุดตัวของฐานราก,  $\theta$  คือ ความชันเนื่องจากการหมุน,  $M$  คือ โมเมนต์คัต และ  $Q$  คือ แรงเฉือน สัมประสิทธิ์สำหรับคำนวณค่า  $y$ ,  $\theta$ ,  $M$  และ  $Q$  แสดงตามสมการที่ (2.3) ถึง (2.7)

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k'_s}{4EI}} \quad (2.3)$$

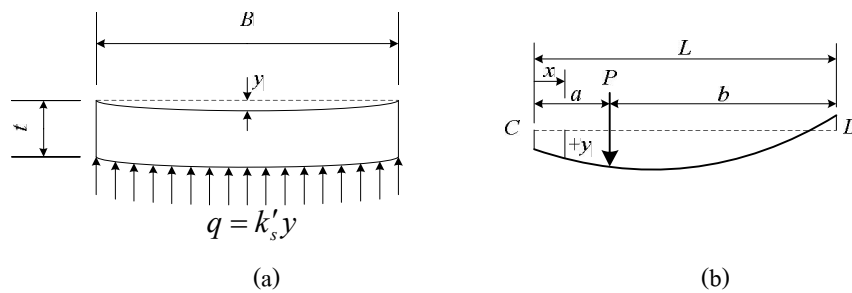
$$A_{\lambda x} = e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x) \quad (2.4)$$

$$B_{\lambda x} = e^{-\lambda x} \sin \lambda x \quad (2.5)$$

$$C_{\lambda x} = e^{-\lambda x} (\cos \lambda x - \sin \lambda x) \quad (2.6)$$

$$D_{\lambda x} = e^{-\lambda x} \cos \lambda x \quad (2.7)$$

คำตอบแบบ Closed-form ในตารางที่ 2.1 มีข้อจำกัดในการใช้วิเคราะห์ฐานรากอื่นๆ (เช่น ฐานรากตื้นฐานเดี่ยว, ฐานรากเสาเข็ม เป็นต้น)ค่อนข้างมาก เพราะใช้ได้เฉพาะกรณีน้ำหนักบรรทุกกระทำที่กึ่งกลางหรือที่ปลายฐานรากเท่านั้น อีกทั้งฐานรากยังต้องเป็นฐานรากแถบ (strip footing) เท่านั้น Hetenyi (1946) ได้แก้ไขข้อจำกัดเหล่านี้โดยเสนอคำตอบใหม่สำหรับคานวางบนฐานรากยืดหยุ่นดังแสดงในรูปที่ 2.4 น้ำหนักบรรทุกสามารถกระทำที่จุดใด ๆ ก็ได้บนฐานราก และฐานรากมีความยาวเท่าใดก็ได้ วิธีของ Hetenyi (1946) ใช้สมมติฐานเดียวกันกับ Winkler (1876) ค่าการทรุดตัวของฐานรากคำนวณได้ตามสมการที่ (2.8) โมเมนต์คัดในแผ่นฐานรากคำนวณได้ตามสมการที่ (2.9) และแรงเฉือนในแผ่นฐานรากคำนวณได้ตามสมการที่ (2.10)



รูปที่ 2.4 แบบจำลองฐานรากที่มีความยาวจำกัด (Hetenyi, 1946)

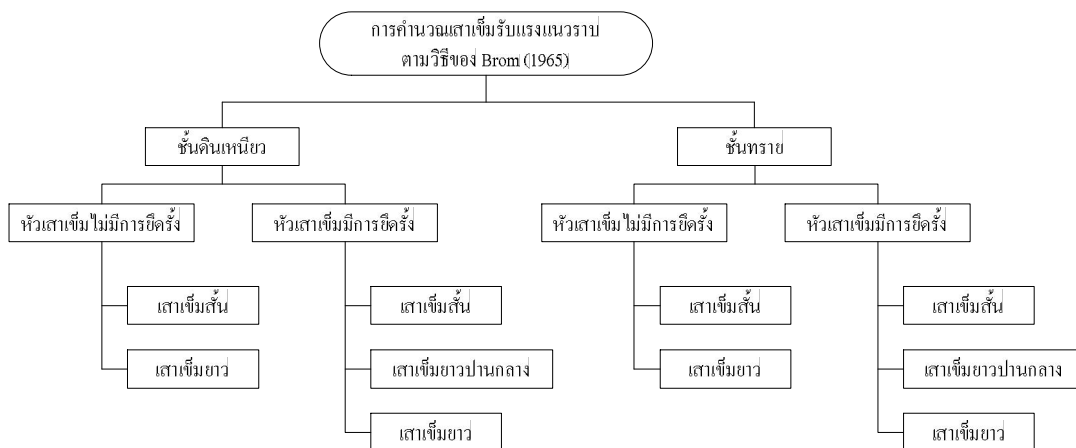
$$y = \frac{PL}{k'_s (\sinh^2 \lambda L - \sin^2 \lambda L)} \left\{ 2 \cosh \lambda x \cos \lambda x (\sinh \lambda L \cos \lambda a \cosh \lambda b - \sin \lambda L \cosh \lambda a \cos \lambda b) + (\cosh \lambda x \sin \lambda x + \sinh \lambda x \cos \lambda x) [\sinh \lambda L (\sin \lambda a \cosh \lambda b - \cos \lambda a \sinh \lambda b) + \sin \lambda L (\sinh \lambda a \cos \lambda b - \cosh \lambda a \sin \lambda b)] \right\} \quad (2.8)$$

$$M = \frac{P}{2\lambda(\sinh^2 \lambda L - \sin^2 \lambda L)} \left\{ 2 \sin \lambda x \sin \lambda x (\sinh \lambda L \cos \lambda a \cosh \lambda b - \sin \lambda L \cosh \lambda a \cos \lambda b) + (\cosh \lambda x \sin \lambda x - \sinh \lambda x \cos \lambda x) \right. \\ \left. \times [\sinh \lambda L (\sin \lambda a \cosh \lambda b - \cos \lambda a \sinh \lambda b) + \sin \lambda L (\sinh \lambda a \cos \lambda b - \cosh \lambda a \sin \lambda b)] \right\} \quad (2.9)$$

$$Q = \frac{P}{\sinh^2 \lambda L - \sin^2 \lambda L} \left\{ (\cosh \lambda L \sin \lambda x + \sinh \lambda x \cos \lambda x) \right. \\ \left. \times (\sinh \lambda L \cos \lambda a \cosh \lambda b - \sin \lambda L \cosh \lambda a \cos \lambda b) + \sinh \lambda x \sin \lambda x [\sinh \lambda L (\sin \lambda a \cosh \lambda b - \cos \lambda a \sinh \lambda b) \right. \\ \left. + \sin \lambda L (\sinh \lambda a \cos \lambda b - \cosh \lambda a \sin \lambda b)] \right\} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $x$  คือ ระยะจากปลายฐานรากถึงจุดที่พิจารณาดังแสดงในรูปที่ 2.4 (b) Hetenyi (1946) ได้เสนอจุดแบ่งระหว่างฐานรากคงรูปและฐานรากแบบคัตตัวได้ โดยพิจารณาค่า  $\lambda$  ตามสมการที่ (2.3) เมื่อค่า  $\lambda L < \pi/4$  โมเมนต์คัตในแผ่นฐานรากประเภทนี้จะไม่ขึ้นกับค่าโมดูลัสแรงปฏิกิริยาของชั้นดินใต้ฐานรากให้พิจารณาเป็นฐานรากแบบแข็งแรงแรง และเมื่อค่า  $\lambda L > \pi$  ให้พิจารณาเป็นฐานรากคัตตัวได้

เมื่อทราบน้ำหนักบรรทุกที่กระจายลงสู่เสาเข็มแต่ละต้นตามสมการที่ (2.1) แล้ว สามารถคำนวณแรงภายในของฐานรากเสาเข็มแต่ละหน้าตัดได้ด้วยวิธีสถิตศาสตร์จากนั้นจะเป็นการตรวจสอบความสามารถรับน้ำหนักของเสาเข็ม การรับน้ำหนักในแนวตั้งตรวจสอบได้โดยเปรียบเทียบแรงอัดที่ลงสู่เสาเข็มแต่ละต้นกับค่าน้ำหนักบรรทุกยอมให้ของเสาเข็ม น้ำหนักบรรทุกยอมให้นี้สามารถหาได้หลายวิธี อาทิเช่น คำนวณจากสมการวิธีสถิตศาสตร์, คำนวณจากสมการเชิงประสพการณ์โดยใช้ค่า SPT หรือ CPT, คำนวณจากน้ำหนักบรรทุกประลัยจากการทดสอบในสนาม เป็นต้น วิธีการคำนวณน้ำหนักบรรทุกประลัยที่นิยมใช้ในการออกแบบ ได้แก่ วิธีสถิตศาสตร์ (ดูภาคผนวก ก) การรับน้ำหนักแนวราบตรวจสอบได้โดยเปรียบเทียบแรงเฉือนที่ถ่ายสู่เสาเข็มแต่ละต้นกับค่าน้ำหนักบรรทุกยอมให้แนวราบของเสาเข็ม น้ำหนักบรรทุกยอมให้แนวราบที่นิยมใช้วิธีของ Broms (1965) (ดูภาคผนวก ก) การคำนวณต้องการเพียงข้อมูลชั้นดิน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม ความยาวของเสาเข็มเท่านั้น การคำนวณแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การคำนวณน้ำหนักบรรทุกแนวราบประลัยและระยะเคลื่อนที่ของหัวเสาเข็ม Broms (1965) ได้แบ่งวิธีคำนวณตามชนิดของชั้นดิน ลักษณะการยึดรั้งและความยาวเสาเข็ม ตามรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วิธีคำนวณการรับน้ำหนักบรรทุกทุกแนวราบของเสาเข็ม (Broms, 1965)

วิธีของ Broms (1965) สามารถใช้ได้กับเสาเข็มที่อยู่ในชั้นดินเพียงชั้นเดียว และเสาเข็มนี้รองรับน้ำหนักบรรทุกทุกแนวราบเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่เสาเข็มในสนามจริงนั้นอยู่ในชั้นดินหลายชั้นและมีน้ำหนักบรรทุกทั้งในแนวดิ่งและแนวราบ ข้อจำกัดนี้ทำให้วิธีเชิงตัวเลขซึ่งมีความยืดหยุ่นในการคำนวณสูงกว่าเข้ามามีบทบาทในการวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มแทนวิธีดั้งเดิม

การวิเคราะห์ฐานรากเข็มโดยวิธีดั้งเดิมยังมีข้อจำกัดอีกหลายข้อ การนำมาใช้งานจึงต้องใช้อัตราส่วนปลอดภัยในการออกแบบที่สูงทำให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างจึงสูงตามไปด้วย การคำนวณของวิธีวิเคราะห์แบบดั้งเดิมแม้จะไม่ซับซ้อนมากแต่ก็ทำได้ช้าและไม่มีความยืดหยุ่น จึงไม่ค่อยนำวิธีนี้มาใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

**2.2.2 วิธีเชิงตัวเลขสำหรับวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็ม**

Poulos (2000) ได้แบ่งวิธีวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มออกเป็น 3 วิธี ได้แก่ 1. วิธีการคำนวณอย่างง่าย (simplified calculation method) วิธีนี้คำนวณโดยรวมสถิติพื้นฐานของแผ่นฐานรากเสาเข็ม และชั้นดินเข้าด้วยกัน วิธีนี้คำนวณได้เฉพาะค่าการทรุดตัวของฐานรากเท่านั้น นักวิจัยในอดีตที่เสนอการคำนวณโดยวิธีนี้ได้แก่ Poulos and Davis (1980) Randolph (1983) และ Van Impe & Clerq (1995) เป็นต้น 2. การคำนวณแบบประมาณโดยคอมพิวเตอร์ (approximate computer-based method) วิธีนี้จำลองแผ่นฐานรากวางอยู่บนสปริงโดยที่สปริงถูกสมมติแทนชั้นดิน การคำนวณใช้วิธีเมตริกซ์ นักวิจัยในอดีตที่เสนอการคำนวณโดยวิธีนี้ได้แก่ Clancy and Randolph (1993) และ Poulos (1994) เป็นต้น 3. การคำนวณแบบซับซ้อนโดยคอมพิวเตอร์ (more rigorous computer-based method) วิธีนี้ใช้การคำนวณโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ หรือวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ จะจำลองดินให้มีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น วิธีนี้จำลองปัญหาได้เสมือนจริงมากที่สุดแต่ก็มีความซับซ้อนในการคำนวณมากที่สุดด้วย นักวิจัยที่เสนอการคำนวณโดยวิธีนี้ได้แก่ Kuwabara

(1989), Sinha (1996) และ Katzenbach et al. (1998) เป็นต้น Poulos (2000) ได้รวบรวมความสามารถของวิธีวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มแต่ละวิธีแสดงไว้ตามตารางที่ 2.2 เนื่องจากคำตอบที่ต้องการสำหรับการออกแบบฐานรากเสาเข็ม คือ โมเมนต์ค้ด แรงเฉือนและค่าการทรุดตัวในช่วงยึดหยุ่นของทั้งในแผ่นฐานรากและเสาเข็ม จะเห็นว่าไม่มีวิธีไหนที่ให้ผลคำตอบที่ตรงกับความต้องการสำหรับการออกแบบ บางวิธีให้แต่การทรุดตัวซึ่งไม่เพียงพอสำหรับการออกแบบ วิธีที่ให้คำตอบครบถ้วนก็ต้องจำลองปัญหาด้วยความละเอียดมากขึ้น (เช่น พิจารณาแผ่นฐานรากแบบค้ดตัวได้, พิจารณาพฤติกรรมของดินแบบไม่เชิงเส้น เป็นต้น) เวลาที่ใช้ประมวลผลจึงมากขึ้นตามไปด้วย

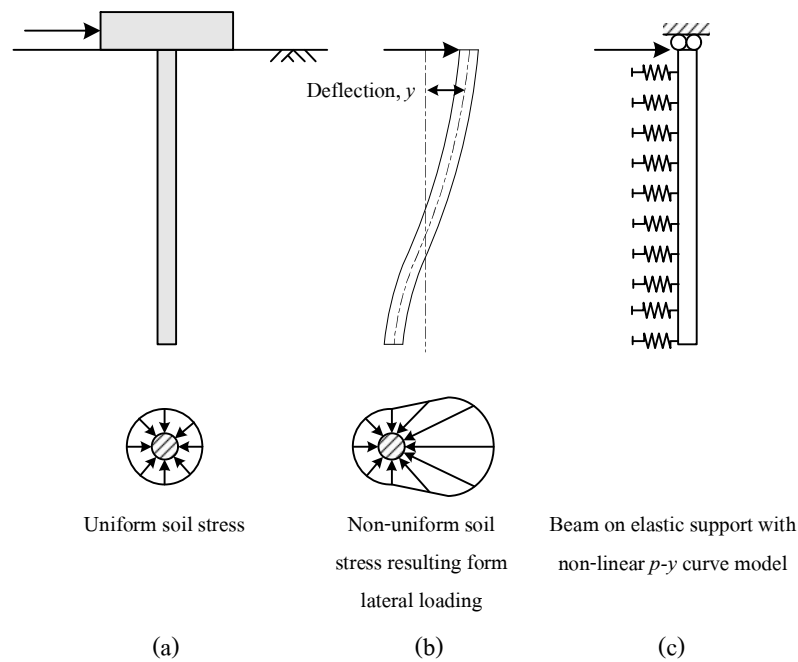
ตารางที่ 2.2 ความสามารถของวิธีการวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มแบบต่างๆ (Poulos, 2000)

Method	Response characteristics			Problem modeling					
	Settle-ment	Diff. Settle-ment	Pile loads	Raft BM	Tor-sional shear	Non-linear Pile	Non-linear pile	Non-uni-form soil	Raft flexi-bility
Poulos & Davis (1980)	/						/		
Randolph (1983)	/	/							
Van Impe & Clerq (1995)	/	/							
Clancy & Randolph (1993)	/	/	/	/	/			/	/
Poulos (1994)	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Sinha (1996)	/	/	/	/	/	/	/		/
Katzenbach et al. (1998)	/	/	/	/	/	/	/	/	/

นอกจากการวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มยังสามารถพิจารณาเฉพาะเสาเข็มแต่ละต้นรับน้ำหนักแนวราบและแนวค้ด วิธีที่นิยมใช้ คือ วิธี  $p$ - $y$  curves โดยที่  $p$  คือ หน่วยแรงของดินรอบเสาเข็ม,  $y$  คือ การเคลื่อนตัวด้านข้างของชั้นดิน ลักษณะการกระจายหน่วยแรงค้ดดินรอบเสาเข็มสำหรับเสาเข็มรับแรงแนวค้ดและแนวราบแสดงดังรูปที่ 2.6 (a) และ 2.6 (b) ตามลำดับ วิธีนี้พัฒนาจากแบบจำลองของ Winkler's foundation โดยพิจารณาเสาเข็มเสมือนชิ้นส่วนคานซึ่งมีพฤติกรรม

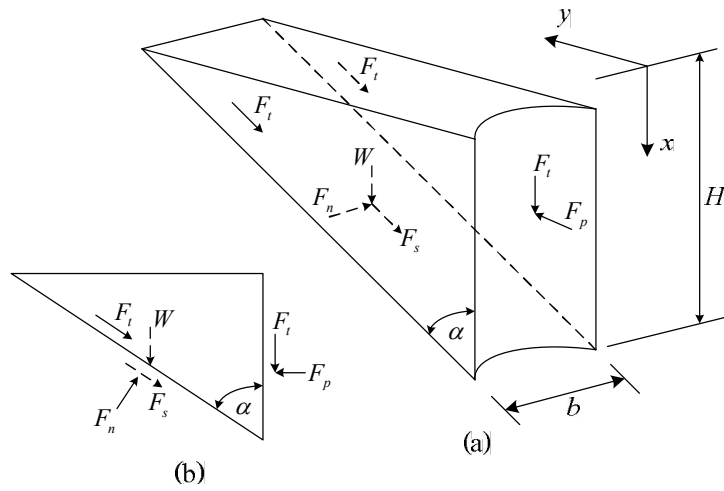
ตามกับสมการที่ (2.2) ชั้นดินด้านข้างแทนด้วยสปริงรองรับดังแสดงในรูปที่ 2.6 (c) สปริงแต่ละตัวเป็นได้ทั้งสปริงยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear spring) และสปริงไม่เชิงเส้น (non-linear spring) วิธีนี้ถูกนำมาใช้ครั้งแรกกับการวิเคราะห์เสาเข็มรับน้ำหนักด้านข้าง โดย McClelland and Focht (1958) พวกเขาได้นำเสนอวิธีการหาค่า pile load-deflection จากข้อมูลการทดสอบกำลังอัดแบบสามแกน (triaxial compression test) สำหรับแต่ละชั้นความลึกของเสาเข็ม และการประมาณ โมดูลัสของแรงปฏิกิริยาของชั้นดิน ( $k_s$ ) แต่ละชั้น

Reese (1958) ได้เสนอแบบจำลองการวิบัติแบบลิ่มของดินเหนียวเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกด้านข้างดังแสดงในรูปที่ 2.7 จากแบบจำลองนี้ เขาได้เสนอกำลังต้านทานน้ำหนักบรรทุกประลัยด้านข้างแบบไม่ระบายน้ำเท่ากับ  $12S_u$



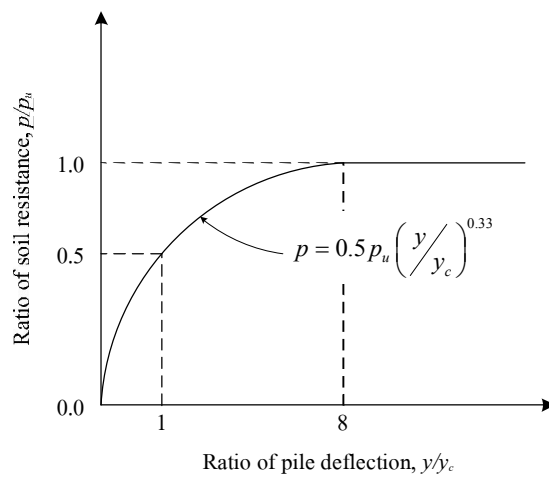
รูปที่ 2.6 (a), (b) การกระจายหน่วยแรงรอบเสาเข็ม และ (c) แบบจำลองสำหรับวิธี  $p-y$  curves





รูปที่ 2.7 แบบจำลองการวิบัติแบบลิ่มของดินเหนียวเมื่อเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกแนวราบ (Reese, 1958)

Matlock (1970) ได้เสนอความสัมพันธ์  $p$ - $y$  curves สำหรับน้ำหนักบรรทุกทุกสภาวะ (static load) แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์  $p$ - $y$  curves สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนเมื่อเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกแนวราบแบบสถิต (Matlock, 1970)

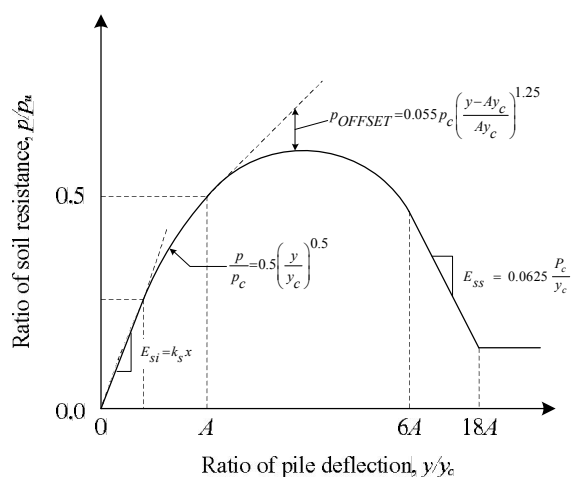
การตอบสนองของแรงดันดินแนวราบ ( $p$ ) ของชั้นดินแต่ละชั้นความลึกถูกแทนโดยสมการที่ (2.11)

$$p = 0.5 p_u \left( \frac{y}{y_c} \right)^{0.33} \quad (2.11)$$

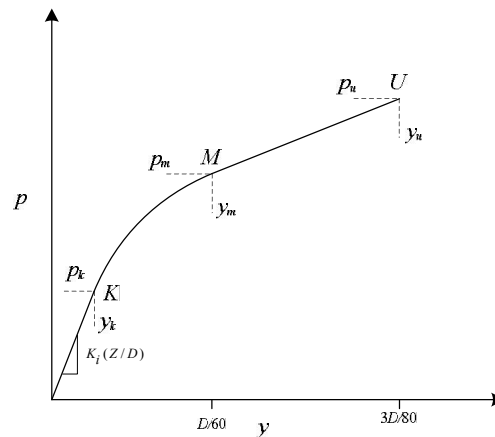
เมื่อ  $p_u$  คือ กำลังต้านทานน้ำหนักรรทุกประลัยด้านข้างแบบไม่ระบายน้ำ,  $y$  คือ ระยะเคลื่อนของเสาเข็ม,  $y_c$  คือ ระยะเคลื่อนวิกฤตของเสาเข็ม มีค่าประมาณ  $2.5\varepsilon_c D$ ,  $\varepsilon_c$  คือ ความเครียดที่ครึ่งหนึ่งของหน่วยแรงเบี่ยงเบนจากผลการทดสอบกำลังอัดสามแกน ไม่มีการอัดตัวคายน้ำและไม่ระบายน้ำขณะเฉือน,  $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของเสาเข็ม

Reese (1975) ได้เสนอโค้งของ  $p$ - $y$  curves สำหรับชั้นดินเหนียว (stiff clay) จากผลการทดสอบการรับน้ำหนักแนวราบของเสาเข็มในชั้นดินเหนียวแข็งอัดตัวมากกว่าปกติ (overconsolidated stiff clay) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 สำหรับน้ำหนักรรทุกสถิต กราฟในรูปที่ 2.9 แบ่งออกเป็น 4 ช่วง คือ ช่วงแรกช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น, ช่วงที่สองเริ่มจากจุดสิ้นสุดช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นจนถึงจุดที่  $y/y_c = A$ , ช่วงที่สามเริ่มจากจุดที่  $y/y_c = A$  จนถึง  $y/y_c = 6A$  และช่วงสุดท้ายเป็นสมการเชิงเส้น เริ่มจากจุดที่  $y/y_c = 6A$  จนถึง  $y/y_c = 18A$

Reese et al. (1974) ได้เสนอโค้ง  $p$ - $y$  curves ในชั้นทรายดังแสดงตามรูปที่ 2.10 กราฟประกอบด้วยเส้นตรงสองช่วงซึ่งถูกเชื่อมโดยโค้งพาราโบลา (parabolic curve) วิธี  $p$ - $y$  curves ได้ถูกรวมไว้ในคำแนะนำสำหรับออกแบบของ API (1993) กราฟเหล่านี้ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการวิเคราะห์เสาเข็มรับน้ำหนักแนวราบในรูปแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ชื่อ “COM624P” ซึ่งพัฒนาโดย Reese et al. (1984) โปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมสาธารณะ และได้รับการพัฒนาต่อโดย Reese and Wang (1989) เป็น โปรแกรมชื่อ LPILE



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของ  $p$ - $y$  curves สำหรับชั้นดินเหนียวแข็งสำหรับน้ำหนักรรทุกแบบสถิต (Reese, 1975)

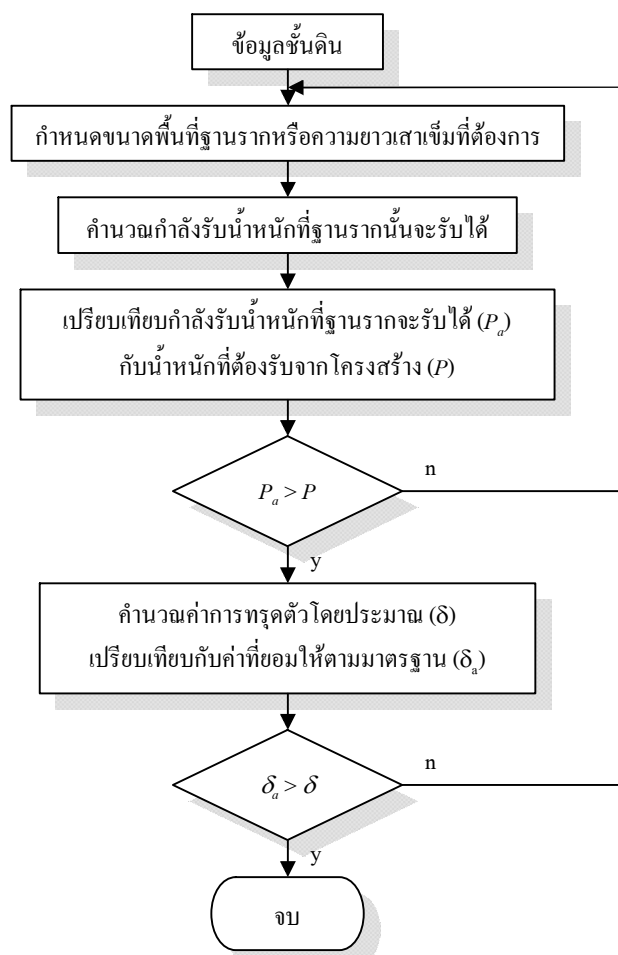


รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์  $p$ - $y$  curves ในชั้นทราย (Reese et al., 1974)

### 2.3 การพัฒนาโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์และออกแบบฐานราก

ขั้นตอนการออกแบบทั้งฐานรากแผ่และฐานรากเสาเข็มเริ่มจากการลองผิดลองถูกเพื่อเลือกขนาดฐานรากหรือความยาวของเสาเข็ม เมื่อกำหนดขนาดได้แล้วจึงตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักและค่าการทรุดตัวของฐานราก ตัวอย่างเช่น การออกแบบฐานรากตื้น เมื่อทราบน้ำหนักบรรทุกจากโครงสร้างและกำลังรับแรงแบกทานของชั้นดินแล้วจะกำหนดขนาดฐานรากที่ต้องการแล้วคำนวณหาน้ำหนักบรรทุกประสิทธิที่ยอมรับให้ ( $P_{a(net)}$ ) จากนั้นทำการเปรียบเทียบน้ำหนักที่ต้องรับจากโครงสร้าง ( $P$ ) ถ้าเพียงพอที่จะรับน้ำหนักจากโครงสร้างได้ ( $P_{a(net)} > P$ ) ก็คำนวณค่าการทรุดตัว โดยการทรุดตัวในการออกแบบฐานรากนี้มีความหมายรวมทั้งการทรุดตัวทันทีทันใดและการทรุดตัวแบบอัตราคายน้ำ ถ้าการทรุดตัวของฐานรากที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐานที่ยอมรับให้ ( $\delta < \delta_u$ ) ขนาดฐานรากนั้นจึงจะนำไปใช้งานได้ แต่ถ้าน้ำหนักบรรทุกประสิทธิที่ยอมรับให้ที่คำนวณได้มีค่าไม่เพียงพอที่จะรับน้ำหนักจากโครงสร้างหรือค่าการทรุดตัวที่คำนวณได้เกินกว่าค่ามาตรฐานก็ต้องย้อนกลับไปเปลี่ยนขนาดฐานรากแล้วคำนวณตามขั้นตอนเดิมใหม่ ขั้นตอนการลองผิดลองถูกดังตัวอย่างนี้สามารถเขียนเป็นแผนผังทั่วไปได้ดังรูปที่ 2.11 ขั้นตอนการลองผิดลองถูกด้วยมือที่นักศึกษาวิศวกรรมฐานรากทั่วไปใช้นั้นอาจช่วยนักศึกษาที่ยังไม่เก่งแต่พอเข้าใจในหลักการบ้าง ให้เข้าใจภาพรวมของการออกแบบได้บ้าง แต่การคำนวณซ้ำด้วยมือมันต้องเสียเวลามากทำให้นักศึกษาเกิดความเบื่อหน่ายในการทำแบบฝึกหัด ปัญหานี้แก้ไขได้โดยสร้างโปรแกรมแบบมินิพจน์เงื่อนไขมาช่วยในการคำนวณลองผิดลองถูก โปรแกรมช่วยออกแบบที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันสามารถแบ่งตามจุดประสงค์ของการพัฒนาได้ 2 แบบ ได้แก่

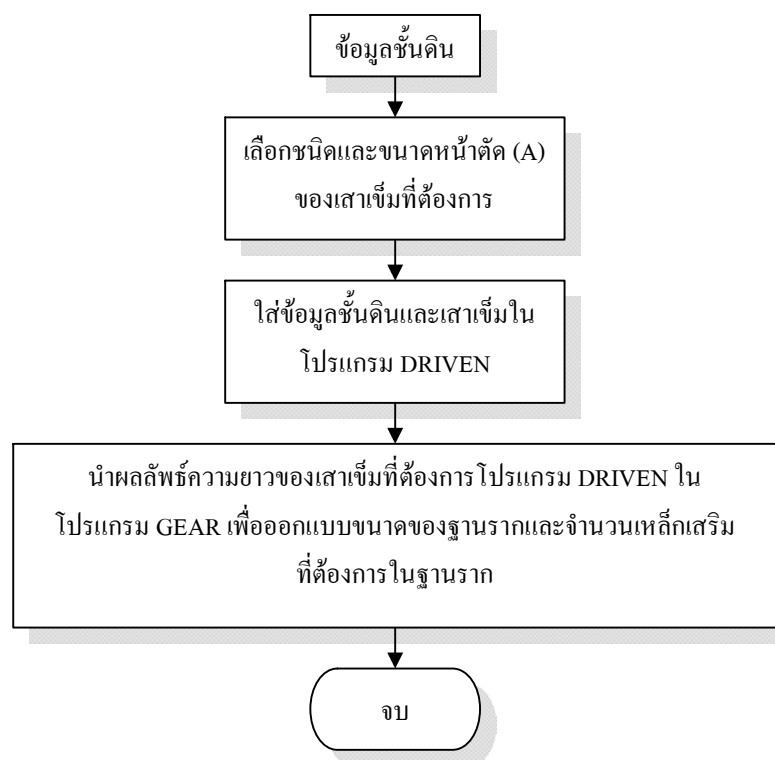
1) โปรแกรมที่พัฒนาเพื่อจำหน่ายเชิงธุรกิจ โปรแกรมประเภทนี้พัฒนาโดยบริษัทเอกชนที่มีทีมงานพร้อม โปรแกรมประเภทนี้จะเน้นที่การทำงานของโปรแกรมที่ซับซ้อนเพื่อความน่าเชื่อถือ ส่วนมากนิยมใช้วิธีไฟไนท์อิเลเมนต์ ในการคำนวณ แต่ผู้ใช้ส่วนใหญ่และนักศึกษามักต้องการใช้โปรแกรมเพื่อเรียนรู้เพียงขั้นตอนการออกแบบ และการตรวจสอบคำตอบแต่ละขั้นตอนเท่านั้น ความซับซ้อนในโปรแกรมเหล่านั้นไม่จำเป็นเลย อีกทั้งราคาของโปรแกรมประเภทนี้ค่อนข้างสูงสำหรับนักศึกษา ตัวอย่างของโปรแกรมประเภทนี้ที่ผู้วิจัยจะนำมาอ้างอิงเป็นต้นแบบเพื่อพัฒนาต่อไปได้แก่ โปรแกรม CE.CA.P (Geo & Soft International) โปรแกรม Allpile (Civiltech Software, Inc.) และโปรแกรม STAAD.foundation (REI Software Co., Ltd)



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการคำนวณลองคิดลองถูกเพื่อหาขนาดฐานรากแผ่หรือความยาวเสาเข็ม

2) โปรแกรมที่พัฒนาโดยผู้พัฒนาอิสระ ซึ่งอาจเป็นสถาบันหรือสถานศึกษาต่างๆ หรือวิศวกรอิสระที่ต้องการโปรแกรมช่วยคำนวณแทนการคำนวณด้วยมือเท่านั้น โปรแกรมประเภทนี้

มักจะแจกจ่ายให้ใช้ฟรีหรืออาจขายในราคาถูกลง โปรแกรมมักมีขั้นตอนการคำนวณที่ตายตัว แม้จะใช้งานได้ง่ายแต่ขาดความยืดหยุ่น โปรแกรมประเภทนี้สามารถใช้ช่วยงานออกแบบได้ขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งเท่านั้น เช่น คำนวณกำลังรับแรงแบกทานของดิน คำนวณการทรุดตัว เป็นต้น ทำให้ต้องนำผลการคำนวณจากโปรแกรมหนึ่งไปป้อนใส่อีกโปรแกรมหนึ่งเพื่อคำนวณต่อ เช่น การออกแบบเสาเข็มอาจใช้โปรแกรมร่วมกันดังรูปที่ 2.12 ทำให้ต้องเสียเวลาออกแบบค่อนข้างมาก ตัวอย่างของโปรแกรมประเภทนี้ที่ผู้วิจัยได้นำมาพัฒนาต่อ ได้แก่ โปรแกรม CBEAR (U.S. Department of Transportation, 1991) โปรแกรม DRIVEN (U.S. Department of Transportation, 2001) และ โปรแกรม GEAR (ACECOMS)



รูปที่ 2.12 ขั้นตอนการออกแบบฐานรากเสาเข็มโดยใช้หลายโปรแกรมร่วมกัน

สำหรับปัญหาเช่นเดียวกันนี้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง 2 มิติ ก็มีปัญหาค้างกัน คือ อลงกรณ์ (2544) ได้เสนอโปรแกรม SUTStructor ซึ่งสามารถวิเคราะห์โครงสร้าง 2 มิติ ทั้งโครงข้อแข็ง และโครงข้อหมุน สามารถแสดงผลและเขียนแผนภาพของแรงปฏิกิริยาที่จุดรองรับ แรงตามแนวแกน แรงเฉือน แรงดัด และการแอ่นตัวของโครงสร้าง การใช้งานโปรแกรมเพียงแค่วาดภาพโครงสร้างที่ต้องการแล้วให้นำนักบรรทุกเข้าไปเท่านั้น นักศึกษาที่ได้เรียนรู้พื้นฐานวิชา

สถิตศาสตร์มาบ้างแล้วแต่ยังมองไม่เห็นภาพของแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างสามารถใช้โปรแกรมนี้ช่วยให้เห็นภาพรวมของแรงในโครงสร้างได้ดีขึ้นโดยที่นักศึกษาไม่จำเป็นต้องเข้าใจวิธีที่โปรแกรมใช้วิเคราะห์ สำหรับนักศึกษาที่ต้องการเรียนรู้การวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีสติฟเนสตรง (direct stiffness) โปรแกรมนี้ก็สามารถแสดงเมตริกผลลัพท์ระหว่างการคำนวณได้ นักศึกษาสามารถนำไปตรวจคำตอบเทียบกับการคำนวณด้วยมือได้ การแก้ปัญหาของโปรแกรมห่วงทำให้ให้นักศึกษาเรียนรู้ด้วยตนเองได้ง่ายขึ้น การออกแบบฐานรากยังไม่มีโปรแกรมในลักษณะเดียวกันกับโปรแกรม SUTStructor (อลงกรณ์, 2544) เลย ดังนั้นในงานวิจัยนี้นอกจากจะสร้างวิธีวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มที่ใช้คำนวณที่ง่ายขึ้นกว่าวิธีเชิงตัวเลขแบบเดิมแล้ว งานวิจัยนี้ยังจะแก้ปัญหาของโปรแกรมออกแบบฐานรากในปัจจุบันโดยใช้หลักการเช่นเดียวกับโปรแกรม SUTStructor (อลงกรณ์, 2544) โปรแกรมที่ผู้วิจัยได้อ้างถึงข้างต้นมีลักษณะการทำงาน ข้อดีข้อเสียสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

โปรแกรม CE.CA.P (Geo & Soft International) พัฒนาโดยบริษัท จีโอ แอนด์ ซอฟท์ อินเตอร์เนชั่นแนล ประเทศอิตาลี เป็นโปรแกรมสำหรับออกแบบฐานรากแผ่และฐานรากเสาเข็มอยู่ในโปรแกรมเดียว ทำงานบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ การคำนวณกำลังรับแรงแบกทานใช้สมการของ Terzaghi (1943), Meyerhof (1953; 1963), Hansen (1970) และ Vesic (1973; 1975) ผู้ใช้สามารถเลือกน้ำหนักบรรทุกได้ทั้งแบบมีและแบบไม่มีโมเมนต์ อีกทั้งโปรแกรมยังสามารถคำนวณค่าการทรุดตัวของฐานรากได้อีกด้วย ส่วนการคำนวณสำหรับฐานรากเสาเข็มผู้ใช้ต้องเลือกชนิดและขนาดของเสาเข็มที่ต้องการ แล้วโปรแกรมจะคำนวณแสดงผลเป็นกราฟระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็ม ( $Q_u$ ) กับความยาวของเสาเข็มให้ผู้ใช้เป็นผู้เลือกความยาวของเสาเข็มที่ต้องการเอง แต่โปรแกรมนี้ไม่สามารถออกแบบโครงสร้างของฐานรากได้จึงต้องนำข้อมูลผลลัพท์จากโปรแกรมนี้ไปใส่อีกโปรแกรมหนึ่งหรือต้องคำนวณออกแบบด้วยมือ โปรแกรมนี้ยังไม่สามารถออกแบบเสาเข็มรับแรงด้านข้างได้

โปรแกรม Allpile (CivilTech Software, Inc.) พัฒนาโดยบริษัท ซีวิลเทค ซอฟต์แวร์ ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นโปรแกรมสำหรับออกแบบฐานรากเสาเข็มโดยเฉพาะสามารถพิจารณาได้ทั้งน้ำหนักในแนวตั้ง (แรงกดและแรงดึง) รวมถึงแรงทางด้านข้างด้วย โปรแกรมทำงานบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ การออกแบบเริ่มตั้งแต่เลือกใส่ข้อมูลเสาเข็มที่ต้องการและใส่ข้อมูลดินของพื้นที่ที่จะก่อสร้าง จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณและแสดงผลการคำนวณทั้งในรูปแบบกราฟ และรายการคำนวณในรูปแบบตัวอักษร (text file) ผู้ออกแบบสามารถนำกราฟที่ได้ไปพิจารณาเลือกความยาวของเสาเข็มที่ต้องการได้ การใส่ข้อมูลและการแสดงผลของโปรแกรมเข้าใจง่ายสวยงาม และสามารถเรียกดูผลการลองผิดลองถูกแต่ละรอบเพื่อใช้ตรวจคำตอบได้ แต่ข้อด้อยของโปรแกรมก็คือคำนวณได้เฉพาะกำลังรับน้ำหนักและการทรุดตัวของเสาเข็มเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

โปรแกรม STAAD.foundation (REI Software Co., Ltd) พัฒนาโดยบริษัท รีเสริช เอ็นจิเนียริ์ อินเทอร์เน็ตเนชั่นนอล ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นโปรแกรมสำหรับออกแบบฐานรากแพ (Mats footing) ฐานรากแผ่และฐานรากเสาเข็ม ตั้งแต่ขั้นตอนวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในฐานรากและในดินดังรูปที่ 2.13 กำลังรับน้ำหนักของดิน รวมไปถึงการออกแบบโครงสร้างและสามารถส่งข้อมูลเป็นไฟล์แบบ \*.DXF ซึ่งสามารถใช้งานกับโปรแกรมประเภท CAD ได้ทันที การวิเคราะห์โครงสร้างใช้วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ในการคำนวณทำให้โปรแกรมมีความน่าเชื่อถือแต่ก็มีราคาที่สูงเน้นการทำตลาดกับบริษัทออกแบบมืออาชีพมากกว่านักออกแบบอิสระและนักศึกษา

โปรแกรม CBEAR (U.S. Department of Transportation, 1991) เป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดยกรมทางหลวงของสหรัฐอเมริกา สำหรับคำนวณกำลังรับแรงแบกทานของฐานรากแผ่เพียงอย่างเดียว รูปร่างฐานรากที่โปรแกรมสามารถคำนวณได้ ได้แก่ ฐานรากแถบ ฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส ฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า และฐานรากวงกลม สามารถใช้บนชั้นดินหนึ่งหรือสองชั้น โดยการคำนวณกำลังรับแรงแบกทานใช้สมการของ Meyerhof (1963) และ Vesic (1975) แต่ไม่สามารถใช้คำนวณกับกรณีฐานรากเอียงหรือดินเหนียวฐานรากเอียงได้ การใส่ข้อมูลขนาดของฐานรากและความลึกชั้นดินใส่ในรูปแบบของ Coordinates โปรแกรมทำงานบนระบบปฏิบัติการดอสทำให้การใส่ข้อมูลและการแสดงผลจึงไม่ค่อยสวยงามนัก แต่จะเป็นระบบระเบียบที่เข้าใจง่าย

โปรแกรมออกแบบฐานรากทั้ง 2 ประเภทข้างต้นแม้จะช่วยลดความยุ่งยากของการคำนวณลองผิดลองถูกด้วยมือได้ แต่ยังไม่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ที่เป็นนักศึกษาให้ใช้ประกอบการเรียนการสอนได้ดีนัก เนื่องจากไม่สามารถแสดงพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ระหว่างขั้นตอนการออกแบบให้นักศึกษาใช้อ้างอิงเปรียบเทียบกับการคำนวณด้วยมือได้ เช่น การคำนวณกำลังรับแรงแบกทานของดิน เมื่อผู้ใช้ใส่ข้อมูลชั้นดินและกำหนดขนาดฐานรากในโปรแกรมแล้วผู้ใช้จะไม่สามารถทราบค่าตัวคูณกำลังรับแรงแบกทาน (bearing capacity factor) ที่โปรแกรมใช้ในการคำนวณได้เลย โปรแกรมส่วนมากจะแสดงผลเฉพาะผลลัพธ์กำลังรับแรงแบกทานของดินเท่านั้น

โปรแกรม DRIVEN (U.S. Department of Transportation, 2001) เป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดยกรมทางหลวงของสหรัฐอเมริกา สำหรับคำนวณน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม โปรแกรมนี้พัฒนามาจากโปรแกรม SPILE (U.S. Department of Transportation, 1993) ซึ่งทำงานอยู่บนดอสให้ทำงานบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ โปรแกรม DRIVEN ใช้วิธีของ Nordlund (1963, 1979), Thurman (1964), Meyerhof (1976), Cheney and Chassie (1982), Tomlinson (1980, 1985) และ Hannigan et al., (1997) การใส่ข้อมูลดิน ข้อมูลเสาเข็ม และการแสดงผลการคำนวณใช้รูปแบบกราฟิก แต่โปรแกรมนี้สามารถวิเคราะห์ได้แต่เสาเข็มที่รับแรงในแนวตั้งเท่านั้น

โปรแกรม GEAR (ACECOMS) เป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดยสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ประเทศไทย สำหรับเป็นเครื่องมือและที่ปรึกษาของวิศวกรในการให้ข้อมูลค่าคงที่ต่างๆ การแปลงหน่วยการวัด การคำนวณคุณสมบัติต่างๆ เช่น พื้นที่ เส้นรอบรูป โมเมนต์อินเนอร์เซีย เป็นต้น ของรูปทรงและหน้าตัดต่างๆ การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กของคาน พื้น และรวมไปถึงแท่นหัวเสาเข็ม (pile cap) การออกแบบแท่นหัวเสาเข็มเป็นการลองผิดลองถูกโดยผู้ใช้เป็นผู้ใช้ ข้อมูลให้โปรแกรมคำนวณออกแบบตามมาตรฐาน โปรแกรมสามารถออกแบบได้ทั้งวิธีหน่วยแรงใช้งานและวิธีกำลัง ตามมาตรฐานของ ACI-318-95 หรือ BS-8110 หรือ AASHTO-1992 การใช้งานโปรแกรมเข้าใจง่ายเป็นขั้นตอนตายตัวเพียงแค่ผู้ใช้ใส่ข้อมูลตามที่หน้าจอโปรแกรมแสดงเท่านั้น แต่โปรแกรมไม่สามารถส่งผลการออกแบบไปยังโปรแกรมประเภท CAD ได้

โปรแกรมออกแบบฐานรากทั้ง 2 ประเภทข้างต้นแม้จะช่วยลดความยุ่งยากของการคำนวณลองผิดลองถูกด้วยมือได้ แต่ยังไม่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ที่เป็นนักศึกษาให้ใช้ประกอบการเรียนการสอนได้ดีนัก เนื่องจากไม่สามารถแสดงพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ระหว่างขั้นตอนการออกแบบให้นักศึกษาใช้อ้างอิงเปรียบเทียบกับการคำนวณด้วยมือได้ เช่น การคำนวณกำลังรับแรงแบกทานของดิน เมื่อผู้ใช้ใส่ข้อมูลชั้นดินและกำหนดขนาดฐานรากในโปรแกรมแล้ว ผู้ใช้จะไม่สามารถทราบค่าตัวคูณกำลังรับแรงแบกทาน (bearing capacity factor) ที่โปรแกรมใช้ในการคำนวณได้เลย โปรแกรมส่วนมากจะแสดงเฉพาะผลลัพธ์กำลังรับแรงแบกทานของดินเท่านั้น

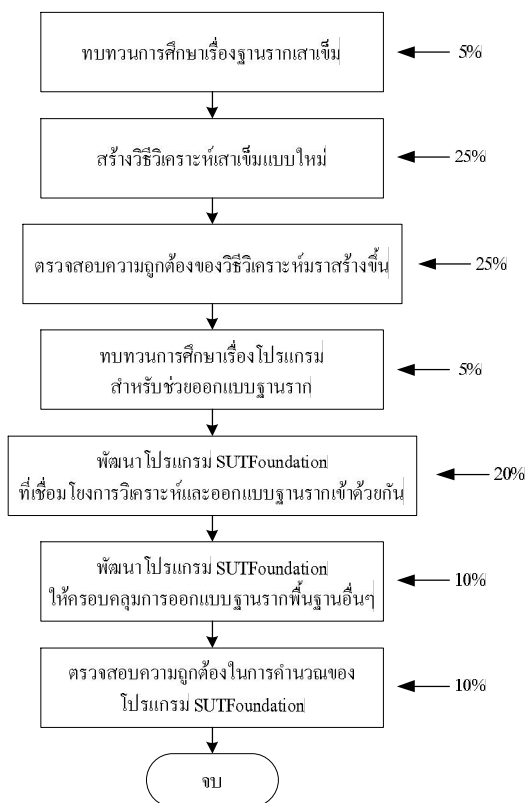


# บทที่ 3

## วิธีดำเนินงานวิจัย

### 3.1 บทนำ

เมื่อได้เห็นข้อจำกัดของวิธีวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็ม และ โปรแกรมช่วยวิเคราะห์และ ออกแบบฐานรากที่มีอยู่ บทนี้ผู้วิจัยจะเสนอวิธีวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองเสาเข็มที่ไม่ซับซ้อน และ การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถเชื่อมโยงการวิเคราะห์และออกแบบเข้าด้วยกัน สำหรับ ฐานรากเสาเข็ม ฐานรากตื้นฐานเดี่ยว ฐานรากตื้นฐานร่วม และฐานรากตื้นฐานแพด้วย และสุดท้าย จะทำการเทียบปรับ (calibration) แบบจำลองดังกล่าว ทำการตรวจสอบความถูกต้อง (verification) ในการคำนวณของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น แผนการดำเนินงานสามารถเสนอเป็นขั้นตอนการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.1



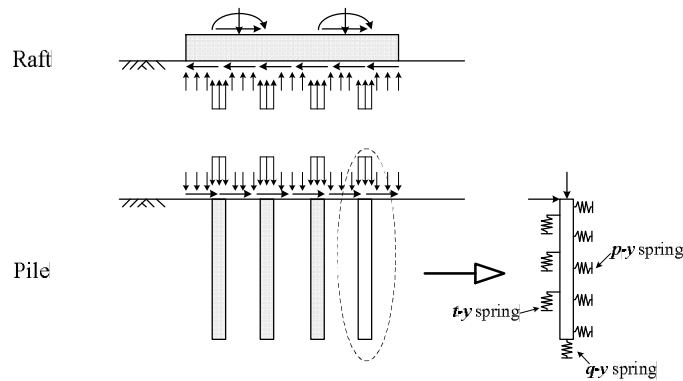
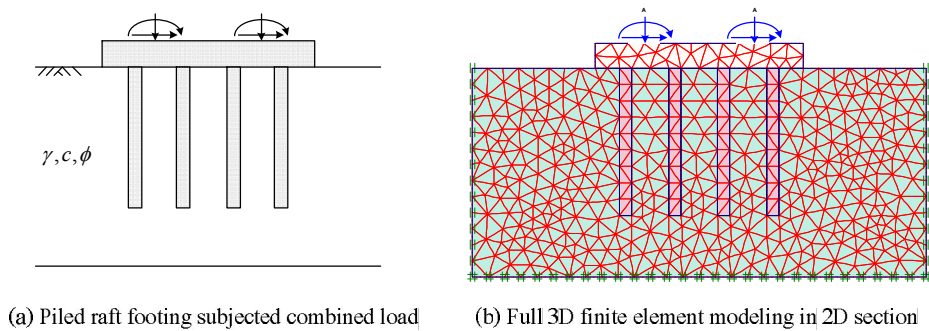
รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

### 3.2 วิธีวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็ม

#### 3.2.1 แนวคิดการพัฒนาวิธีวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มที่ไม่ซับซ้อน

การวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มโดยวิธีเชิงตัวเลขดังได้กล่าวถึงแล้วในบทที่ 2 นั้นมีหลายวิธีที่มีความยืดหยุ่นและสามารถแก้ปัญหาได้อย่างครบถ้วน [เช่น Poulos (1994), Sinha (1996), Katzenbach et al. (1998)] แต่เมื่อนำวิธีเหล่านี้มาใช้คำนวณเหล็กเสริมในแผ่นฐานรากแล้วจะมีความยุ่งยากและเสียเวลาคำนวณค่อนข้างมาก

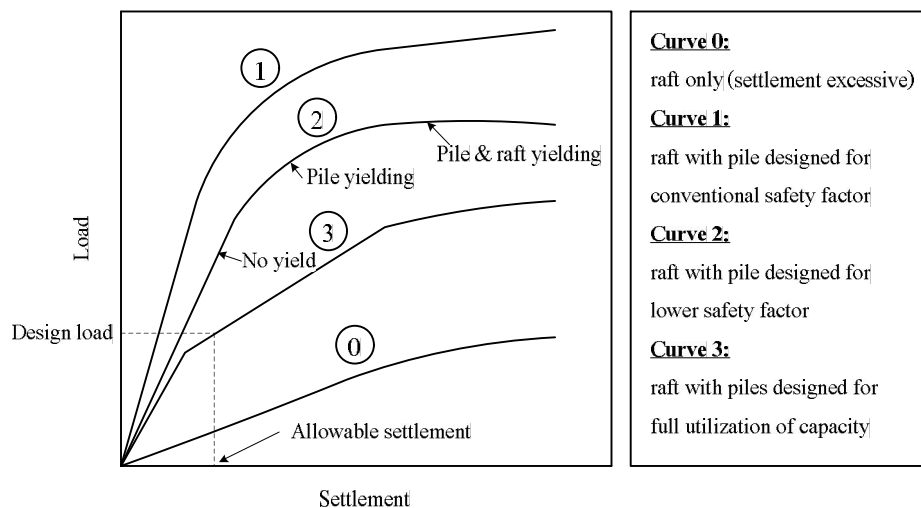
พิจารณาฐานรากเสาเข็มซึ่งประกอบด้วยแผ่นฐานรากและเสาเข็มนั่งรูปที่ 3.2 (a) น้ำหนักบรรทุกทั้งหมดจะถ่ายลงสู่ชั้นดินและเสาเข็มที่รองรับ ฐานรากเสาเข็มนั่งดังกล่าวสามารถแยกพิจารณาเฉพาะแผ่นฐานราก และเฉพาะเสาเข็มนั่งแสดงในรูปที่ 3.2 (b)



รูปที่ 3.2 การจำลองฐานรากโดยวิธีการต่างๆ

$p-y$  แทนความสัมพันธ์ของแรงดันด้านข้างกับระยะการเคลื่อนที่ของเสาเข็ม  $q-y$  แทนความสัมพันธ์ของแรงดันดินที่ปลายเสาเข็มกับระยะการเคลื่อนที่ของเสาเข็ม  $t-y$  แทนความสัมพันธ์ของแรงเฉือนรอบเสาเข็มกับระยะการเคลื่อนที่ของเสาเข็ม

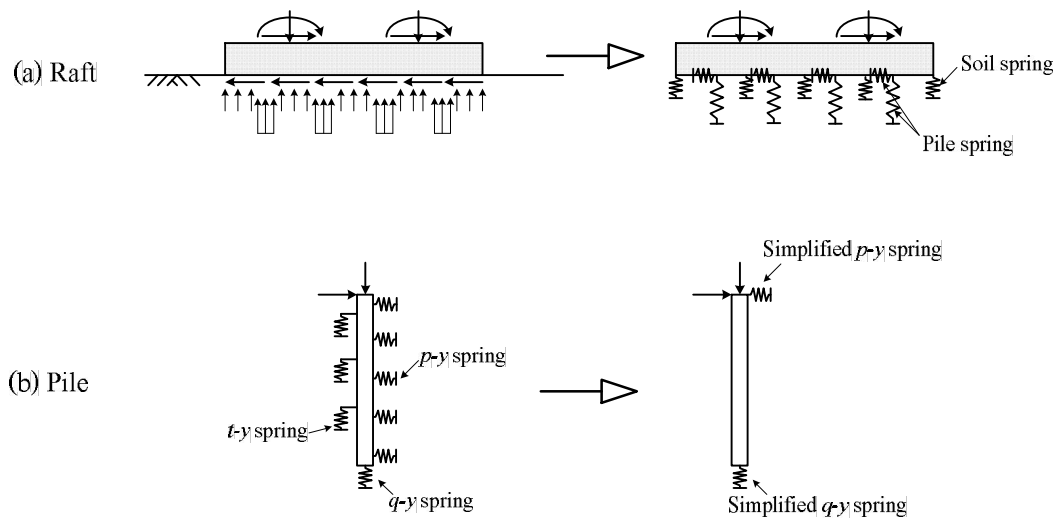
การแยกพิจารณาเฉพาะแผ่นฐานรากและเฉพาะเสาเข็มสามารถทำได้เพราะน้ำหนักบรรทุกยังอยู่ในช่วงใช้งาน เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มสำหรับกรณีต่างๆ ในรูปที่ 3.3 กราฟ 0 แสดงพฤติกรรมของแผ่นฐานรากกรณีไม่มีเสาเข็มรองรับ การทรุดตัวเกินกว่าค่าที่ยอมให้ กราฟ 1 แสดงพฤติกรรมของฐานรากที่ออกแบบโดยใช้อัตราส่วนปลอดภัยของทั้งแผ่นฐานรากและเสาเข็มที่สูงมาก การทรุดตัวเกิดขึ้นน้อยมาก กราฟ 2 แสดงพฤติกรรมของฐานรากที่ออกแบบโดยใช้อัตราส่วนปลอดภัยของทั้งแผ่นฐานรากและเสาเข็มต่ำ กราฟแบ่งเป็น 3 ช่วง ได้แก่ 1. ช่วงยังไม่เกิดการคราก, 2. ช่วงเสาเข็มเกิดการคราก และ 3. ช่วงแผ่นฐานรากและเสาเข็มเกิดการคราก กราฟ 3 แสดงพฤติกรรมของฐานรากที่ออกแบบโดยใช้กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มอย่างเต็มที่ จะเห็นได้ว่าแบบจำลองตามรูปที่ 3.2 (c) สามารถใช้ได้เฉพาะในช่วงน้ำหนักบรรทุกใช้งานเท่านั้น ถ้าเกินช่วงนี้ไปแล้ว กราฟ 1, 2 และ 3 จะเริ่มมีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น และการแยกคำนวณระหว่างแผ่นฐานรากและเสาเข็มจะมีความยุ่งยากและไม่ตรงตามสภาพจริงนัก



รูปที่ 3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มของการออกแบบแต่ละแบบ (Randolph, 1994)

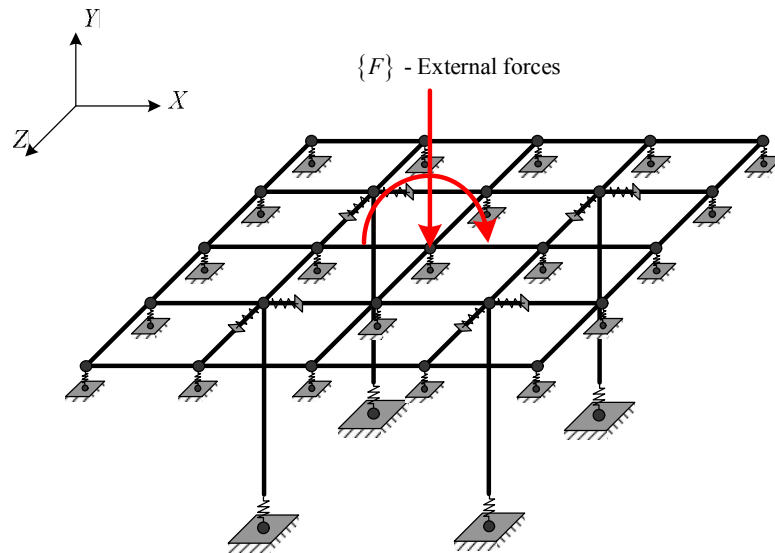
ในการวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็ม ผู้วิจัยสมมติว่า แผ่นฐานรากและเสาเข็มไม่เกิดการแตกร้าวในขณะรับน้ำหนักบรรทุกในช่วงใช้งาน แผ่นฐานรากและเสาเข็มเป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน (homogeneous) และมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง (isotropic) ชั้นดินที่รองรับฐานรากมีพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกแนวตั้งและแนวราบอยู่ในช่วงยืดหยุ่น และการถ่ายแรงระหว่าง

เสาเข็มกับฐานรากเกิดอย่างสมบูรณ์ ฐานรากใหม่นี้อาจพิจารณาเป็นโครงข้อแข็งกับเสาเข็ม (Simplified Frame-Pile, SFP) แผ่นฐานรากจะถูกจำลองเป็นชิ้นส่วนโครงข้อแข็ง (frame) หรือคานสองแนวตัดกัน (grid) การจำลองแผ่นฐานรากเป็น Grid คล้ายกับวิธีไฟไนท์กริด (Bowles, 1988) ชั้นดินใต้แผ่นฐานรากถูกจำลองเป็นสปริงยึดหยุ่นรับน้ำหนักเฉพาะแรงอัด เสาเข็มจะถูกจำลองเป็นสปริงแนวตั้งและสปริงแนวราบ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (a) คุณสมบัติรับแรงของแผ่นฐานรากจะแทนด้วยเมตริกซ์ของแผ่นฐานรากและสปริงยึดหยุ่นเท่านั้น



รูปที่ 3.4 การจำลองฐานรากเสาเข็มเป็นโครงข้อแข็งกับเสาเข็ม (Simplified Frame-Pile, SFP)

เมื่อพิจารณาแผ่นฐานรากและเสาเข็มที่แยกกันในรูปที่ 3.4 เป็นแบบจำลองเดียวกันก็เสมือนว่าได้แบบจำลองสำหรับวิเคราะห์ฐานรากที่สมบูรณ์ สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในแนวราบและในแนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.5



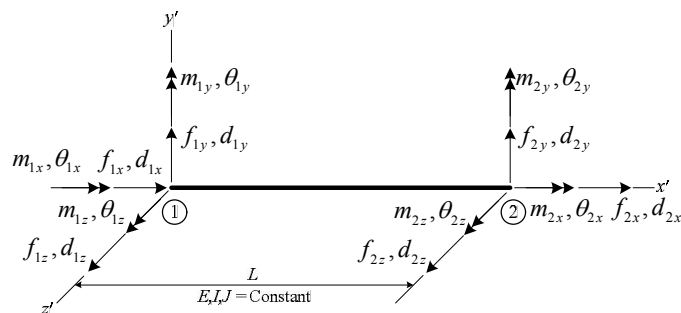
รูปที่ 3.5 แบบจำลอง Simplified Frame-Pile สำหรับวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็ม

**3.2.2 แบบจำลอง Simplified Frame-Pile (SFP)**

ขั้นตอนการวิเคราะห์ฐานรากตามแบบจำลอง Simplified Frame-Pile ประยุกต์จากวิธี Kassimali (1999) และ Logan (2001) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

**3.2.2.1 เมทริกซ์สติฟเนสของชิ้นส่วนโครงข้อแข็ง (12 – DOF)**

พิจารณาชิ้นส่วน โครงข้อแข็งในระบบแกนเฉพาะแห่ง (local coordinate) มีแรงภายในองค์อาคารและการเปลี่ยนตำแหน่งที่จุดต่อ (node displacement) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยที่พื้นที่หน้าตัด โมเมนต์ความเฉื่อยและ โมดูลัสยืดหยุ่นของชิ้นส่วนมีค่าคงที่



รูปที่ 3.6 แรงภายในและการเปลี่ยนตำแหน่งของจุดต่อในระบบแกนเฉพาะแห่งของชิ้นส่วน โครงข้อแข็ง (12-DOF)

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงภายในชิ้นส่วน โครงข้อแข็งกับการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของจุดต่อของชิ้นส่วนดังรูปที่ 3.6 แสดงได้ตามสมการที่ (3.1)

$$\{f\} = [k]\{d\} \quad (3.1)$$

โดยที่  $\{f\}$  คือ เวกเตอร์แรงภายในชิ้นส่วน  
 $\{d\}$  คือ เวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่งที่จุดต่อของชิ้นส่วน  
 $[k]$  คือ เมตริกซ์สติเฟนของชิ้นส่วนในระบบแกนรวม

เวกเตอร์แรงภายในของชิ้นส่วน โครงข้อแข็ง (12 DOF) แสดงได้ตามสมการที่ (3.2)

$$\{f\} = \left[ f_{1x} \quad f_{1y} \quad f_{1z} \quad m_{1x} \quad m_{1y} \quad m_{1z} \quad f_{2x} \quad f_{2y} \quad f_{2z} \quad m_{2x} \quad m_{2y} \quad m_{2z} \right] \quad (3.2)$$

เวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่งที่จุดต่อของชิ้นส่วน โครงข้อแข็ง (12 DOF) แสดงได้ตามสมการที่ (3.3)

$$\{d\} = \left[ d_{1x} \quad d_{1y} \quad d_{1z} \quad \theta_{1x} \quad \theta_{1y} \quad \theta_{1z} \quad d_{2x} \quad d_{2y} \quad d_{2z} \quad \theta_{2x} \quad \theta_{2y} \quad \theta_{2z} \right] \quad (3.3)$$

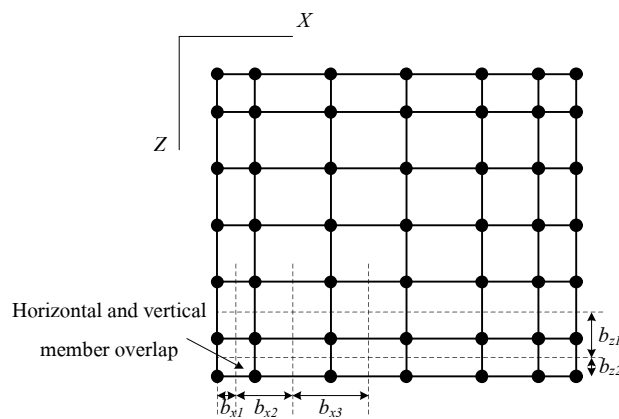
เมตริกซ์สติเฟนของชิ้นส่วน โครงข้อแข็งในระบบแกนเฉพาะแห่งแสดงได้ตามสมการที่ (3.4)

$$[k^{**}] = \begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\Omega GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\Omega GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} \\ -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\Omega GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\Omega GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

โดยที่	$A$	คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วน
	$E$	คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของชิ้นส่วน
	$L$	คือ ความยาวของชิ้นส่วน
	$I_y$	คือ โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกน $y'$
	$I_z$	คือ โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกน $z'$
	$G$	คือ โมดูลัสแรงเฉือน (shear modulus)
	$J$	คือ ค่าคงที่แรงบิด (torsional constant)
	$\Omega$	คือ ตัวคูณปรับแก้แรงบิด

พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วน โครงข้อแข็งแต่ละชิ้นคำนวณได้จากความกว้าง ( $b$ ) ของ Grid ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และความหนาของแผ่นฐานราก ( $t_f$ ) ตามสมการที่ (3.5)

$$A = bt_f \quad (3.5)$$



รูปที่ 3.7 การคำนวณคุณสมบัติพื้นฐานสำหรับชิ้นส่วน โครงข้อแข็ง  
ของวิธีไฟไนท์กริด

โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกน  $y'$  และแกน  $z'$  สำหรับชิ้นส่วนหน้าตัดสี่เหลี่ยมคำนวณได้จากความกว้างของชิ้นส่วนที่แบ่งตามรูปที่ 3.7 และความหนาของแผ่นฐานราก ตามสมการที่ (3.6) และสมการที่ (3.7) ตามลำดับ

$$I_y = \frac{t_f b^3}{12} \quad (3.6)$$

$$I_z = \frac{b t_f^3}{12} \quad (3.7)$$

โมดูลัสแรงเฉือนของชิ้นส่วนโครงข้อแข็งหาได้โดยสมมติให้ชิ้นส่วนเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง (isotropic material) ค่าโมดูลัสแรงเฉือนขึ้นอยู่กับโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E$ ) และอัตราส่วนพัวซอง ( $\mu$ ) ตามสมการที่ (3.6)

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (3.8)$$

ค่าคงที่แรงบิดของชิ้นส่วนโครงข้อแข็งที่ใช้คำนวณเป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมตามสมการที่ (3.9)

$$J = \frac{b t_f^3}{3} \quad (3.9)$$

ค่าปรับแก้แรงบิดของชิ้นส่วนโครงข้อแข็งถูกเสนอในรูปความสัมพันธ์ของความกว้างและความยาวของชิ้นส่วนที่เป็น Grid แล้ว Bowles (1988) เสนอค่าปรับแก้ไว้ดังแสดงตามสมการที่ (3.10)

$$\Omega = 0.75 L_e / B_e \leq 1.1 \quad (3.10)$$

การแปลงระบบพิกัดจากระบบแกนเฉพาะแห่งไปสู่ระบบแกนรวม (global coordinate) ของชิ้นส่วนโครงข้อแข็งซึ่งมีพิกัดอยู่บนระนาบ  $X-Z$  ใช้เมตริกซ์แปลงดังแสดงในสมการที่ (3.11)



$$[T] = \begin{bmatrix} d_{1x} & d_{1y} & d_{1z} & \theta_{1x} & \theta_{1y} & \theta_{1z} & d_{2x} & d_{2y} & d_{2z} & \theta_{2x} & \theta_{2y} & \theta_{2z} & d_{1x} \\ r_{xX} & r_{xY} & r_{xZ} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{1y} \\ r_{yX} & r_{yY} & r_{yZ} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{1z} \\ r_{zX} & r_{zY} & r_{zZ} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_{1x} \\ 0 & 0 & 0 & r_{xX} & r_{xY} & r_{xZ} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_{1y} \\ 0 & 0 & 0 & r_{yX} & r_{yY} & r_{yZ} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_{1z} \\ 0 & 0 & 0 & r_{zX} & r_{zY} & r_{zZ} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_{2x} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{xX} & r_{xY} & r_{xZ} & 0 & 0 & 0 & d_{2x} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{yX} & r_{yY} & r_{yZ} & 0 & 0 & 0 & d_{2y} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{zX} & r_{zY} & r_{zZ} & 0 & 0 & 0 & d_{2z} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{xX} & r_{xY} & r_{xZ} & \theta_{2x} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{yX} & r_{yY} & r_{yZ} & \theta_{2y} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{zX} & r_{zY} & r_{zZ} & \theta_{2z} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

โดยที่

$$r_{xX} = \frac{X_2 - X_1}{L}$$

$$r_{xY} = \frac{Y_2 - Y_1}{L}$$

$$r_{xZ} = \frac{Z_2 - Z_1}{L}$$

$$r_{yX} = \frac{-r_{xX}r_{xY}}{\sqrt{r_{xX}^2 + r_{xZ}^2}}, r_{yY} = \sqrt{r_{xX}^2 + r_{xZ}^2}, r_{yZ} = \frac{-r_{xY}r_{xZ}}{\sqrt{r_{xX}^2 + r_{xZ}^2}}$$

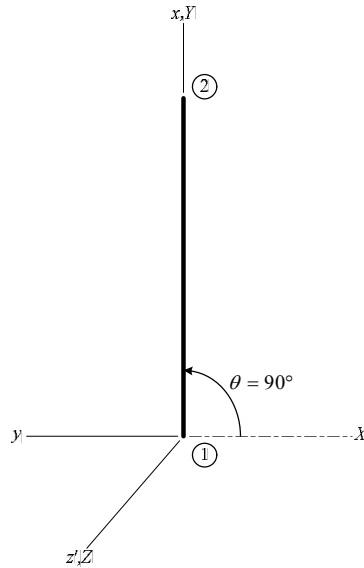
$$r_{zX} = \frac{-r_{xZ}}{\sqrt{r_{xX}^2 + r_{xZ}^2}}, r_{zY} = 0, r_{zZ} = \frac{r_{xX}}{\sqrt{r_{xX}^2 + r_{xZ}^2}}$$

$X_1, Y_1, Z_1$  คือ พิกัดของจุดเริ่มต้นของชิ้นส่วนในระบบแกนรวม

$X_2, Y_2, Z_2$  คือ พิกัดของจุดปลายของชิ้นส่วนในระบบแกนรวม

### 3.2.2.2) เมตริกซ์สติเฟเนสของชิ้นส่วนเสา (column element)

ชิ้นส่วนเสาซึ่งมีคิกริความอิสระเท่ากับ 12 เมตริกซ์ สติเฟเนสของชิ้นส่วนแสดงในสมการที่ (3.4) โดยไม่ต้องใช้ตัวคูณปรับแก้แรงบิด การแปลงระบบพิกัดจากระบบแกนเฉพาะแห่งไปสู่ระบบแกนรวมของชิ้นส่วนเสาดังรูปที่ 3.8 ใช้เมตริกซ์แปลงดังแสดงในสมการที่ (3.12)



รูปที่ 3.8 การหมุนแกนในแนวตั้งโดยแกน  $z'$  ยัขนานกับแกน  $Z$

$$[T] = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} d_{1x} & d_{1y} & d_{1z} & \theta_{1x} & \theta_{1y} & \theta_{1z} \end{array} \\ \begin{array}{cccccc} r_{xX} & r_{xY} & r_{xZ} & 0 & 0 & 0 \\ r_{yX} & r_{yY} & r_{yZ} & 0 & 0 & 0 \\ r_{zX} & r_{zY} & r_{zZ} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{xX} & r_{xY} & r_{xZ} \\ 0 & 0 & 0 & r_{yX} & r_{yY} & r_{yZ} \\ 0 & 0 & 0 & r_{zX} & r_{zY} & r_{zZ} \end{array} \\ \hline \begin{array}{cccccc} d_{2x} & d_{2y} & d_{2z} & \theta_{2x} & \theta_{2y} & \theta_{2z} \end{array} \\ \begin{array}{cccccc} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ r_{xX} & r_{xY} & r_{xZ} & 0 & 0 & 0 \\ r_{yX} & r_{yY} & r_{yZ} & 0 & 0 & 0 \\ r_{zX} & r_{zY} & r_{zZ} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{xX} & r_{xY} & r_{xZ} \\ 0 & 0 & 0 & r_{yX} & r_{yY} & r_{yZ} \\ 0 & 0 & 0 & r_{zX} & r_{zY} & r_{zZ} \end{array} \\ \begin{array}{c} d_{1x} \\ d_{1y} \\ d_{1z} \\ \theta_{1x} \\ \theta_{1y} \\ \theta_{1z} \\ d_{2x} \\ d_{2y} \\ d_{2z} \\ \theta_{2x} \\ \theta_{2y} \\ \theta_{2z} \end{array} \end{array} \quad (3.12)$$

โดยที่  $r_{xX} = 0, r_{xY} = \frac{Y_2 - Y_1}{L}, r_{xZ} = 0$

$$r_{yX} = -r_{xY}, r_{yY} = 0, r_{yZ} = 0$$

$$r_{zX} = 0, r_{zY} = 0, r_{zZ} = 1$$

$Y_1$  คือ พิกัดของจุดเริ่มต้นของชิ้นส่วนบนแกน  $Y$  ในระบบแกนรวม

$Y_2$  คือ พิกัดของจุดปลายของชิ้นส่วนบนแกน  $Y$  ในระบบแกนรวม

### 3.2.2.3) เมตริกซ์สติฟเนสของสปริงแนวตั้งที่ปลายเสาเข็ม

การรับน้ำหนักบรรทุกทุกแนวตั้งของเสาเข็ม ซึ่งรวมการรับแรงแบกทานของดินที่ปลายเสาเข็มและแรงเสียดทานรอบเสาเข็มสามารถแทนด้วยสติฟเนสของสปริงแนวตั้งที่ปลายเสาเข็ม ค่าสติฟเนสนี้หาได้โดยตรงจากความชันช่วงยืดหยุ่นของกราฟระหว่างน้ำหนักบรรทุกแนวตั้งกับระยะการทรุดตัวของเสาเข็มในสนาม หรือคำนวณโดยทางอ้อมได้จากโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์ 2 มิติ โดยใช้แบบจำลองดินแบบยืดหยุ่นหรืออาจประมาณได้จากกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม โดยพิจารณาให้แรงเสียดทานเกิดขึ้นที่เมื่อการเคลื่อนที่ของเสาเข็มเกิดประมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์ของเส้นผ่านศูนย์กลางและแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มเกิดขึ้นที่เมื่อการเคลื่อนที่ของเสาเข็มเกิดประมาณ 10 - 20 เปอร์เซ็นต์ของเส้นผ่านศูนย์กลาง (Whitaker, 1967)

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงภายในของสปริงที่ปลายเสาเข็มกับการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของจุดต่อแสดงตามสมการที่ (3.13)

$$\{f_{sp,v}\} = [k_{sp,v}] \{x\} \quad (3.13)$$

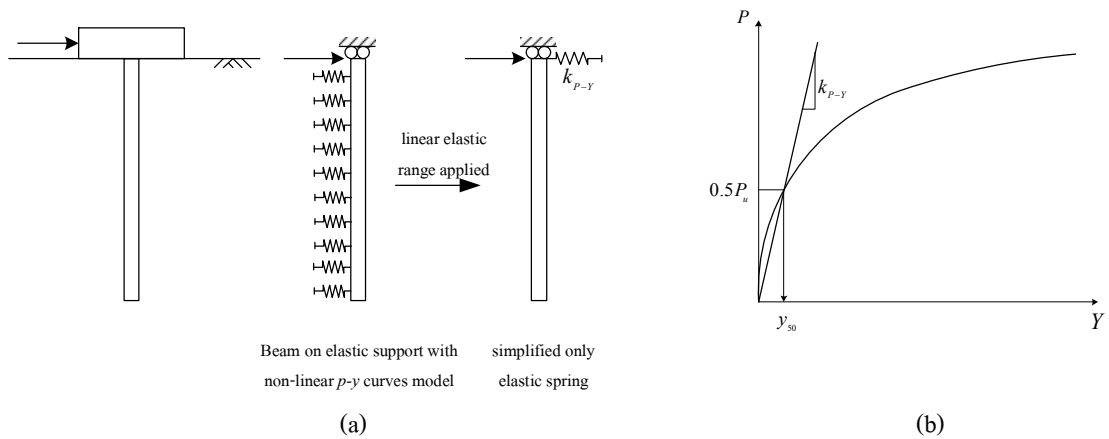
โดยที่  $\{f_{sp}\}$  คือ เวกเตอร์ของแรงภายในของสปริงยืดหยุ่นแนวตั้ง

$[k_{sp}]$  คือ เมตริกซ์สติฟเนสของสปริงยืดหยุ่นแนวตั้งที่ปลายเสาเข็ม

$\{x\}$  คือ เวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่งของจุดต่อที่เชื่อมกับสปริง

### 3.2.2.4) เมตริกซ์สติฟเนสของสปริงแนวราบที่หัวเสาเข็ม

แรงปฏิกิริยาด้านข้างของดินรอบเสาเข็มสามารถแทนด้วยสติฟเนสของสปริงแนวราบหากวิธี  $p-y$  curves สติฟเนสของสปริงหาได้จากความชันของกราฟระหว่างแรงกระทำที่หัวเสาเข็มกับการเสยรูปของเสาเข็ม ( $p-y$  curves) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (a) ซึ่งมีเงื่อนไขการยึดรั้งของหัวเข็มเป็นแบบยึดแน่น (fixed head) การหาความชันเลือกใช้ความชันที่ 50% ของแรงกระทำประลัยดังรูปที่ 3.9 (b)



รูปที่ 3.9 การจำลองแรงปฏิกิริยาของชั้นดินต่อเสาเข็ม

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงภายในของสปริงที่หัวเสาเข็มกับการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของจุดต่อแสดงตามสมการที่ (3.15)

$$\{f_{sp,h}\} = [k_{sp,h}] \{x\} \tag{3.15}$$

โดยที่  $\{f_{sp,h}\}$  คือ เวกเตอร์ของแรงภายในของสปริงยึดหุ่นแนวราบ  
 $[k_{sp,h}]$  คือ เมตริกซ์สติฟเนสของสปริงยึดหุ่นแนวราบที่หัวเสาเข็ม  
 $\{x\}$  คือ เวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่งของจุดต่อที่เชื่อมกับสปริง

**3.2.2.5) เมตริกซ์สติฟเนสของโครงสร้างรวม (global stiffness matrix)**

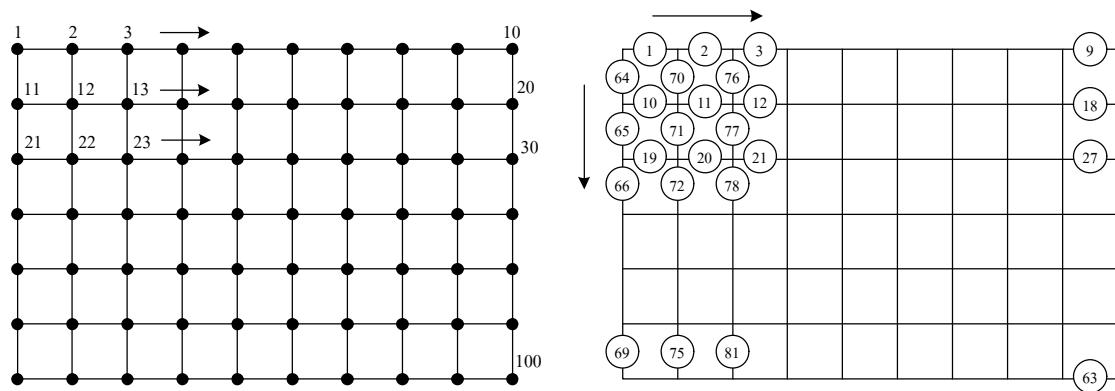
เมตริกซ์สติฟเนสของโครงสร้างรวมสามารถหาได้จากการรวมเมตริกซ์สติฟเนสของแต่ละชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน โดยอาศัยหลักการซ้อนทับ (principle of superposition) หรือเรียกว่าวิธีสติฟเนสตรง (direct stiffness method) วิธีการนี้สอดคล้องกับหลักการของสมดุลของแรงที่จุดต่อของชิ้นส่วน และความต่อเนื่อง (compatibility) ของโครงสร้าง สมการรวมของระบบโครงสร้างเขียนอยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ตามสมการที่ (3.14)

$$\{F\} = [K] \{D\} \tag{3.14}$$

- โดยที่  $\{F\}$  คือ เวกเตอร์ของแรงภายนอก
- $[K]$  คือ เมตริกซ์สติฟเนสรวมของระบบโครงสร้าง
- $\{D\}$  คือ เวกเตอร์ของการเปลี่ยนตำแหน่งที่จุดต่อ

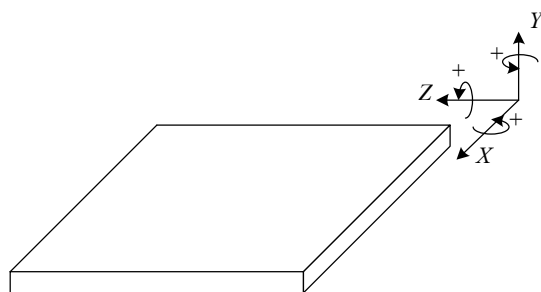
3.2.2.6) ขั้นตอนการวิเคราะห์

ก) เตรียมแบบจำลองฐานรากเสาเข็มสำหรับการวิเคราะห์ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.10 กำหนดเลขหับจุดต่อ โดยเริ่มที่จุดต่อด้านซ้ายสุดก่อนแล้วเรียงมาด้านขวาตามลำดับ ทำเช่นเดียวกันนี้สำหรับชิ้นส่วน โดยกำหนดให้ระนาบซึ่งขนานตารางวางอยู่บนระนาบ  $X-Z$  เสมอ ทิศทางตามเข็มนาฬิกา (กฏมือขวา) มีค่าเป็นบวกทั้งในแนวแกน  $X, Y, Z$  คีกรีความอิสระของโครงสร้างเท่ากับ  $6 \times$  จำนวนจุดต่อของโครงสร้าง และจำนวนสปริงยึดหุ่นจะเท่ากับจำนวนจุดต่อของโครงสร้าง



(a) Node numbering

(b) Element numbering



(c) Sign convention

รูปที่ 3.10 การกำหนดหมายเลขของจุดต่อและชิ้นส่วน

ข) หาเมตริกซ์สติฟเนสของโครงสร้าง,  $[K]$  และเวกเตอร์แรงภายนอก,  $\{F\}$  ตามขั้นตอนต่อไปนี้

- คำนวณเมตริกซ์สติฟเนสของชิ้นส่วน โครงข้อแข็งซึ่งตัดแปลงสำหรับวิธีการแบ่งฐานรากเป็นตาราง,  $[k' *]$  ตามสมการที่ (3.4) ในระบบแกนเฉพาะแห่ง
- แปลงค่าเมตริกซ์สติฟเนสของชิ้นส่วน โครงข้อแข็งจากระบบแกนเฉพาะแห่งไปสู่ระบบแกนรวมตามสมการที่ (3.11)
- ประกอบเมตริกซ์สติฟเนสของชิ้นส่วน โครงข้อแข็งที่คำนวณได้เข้าเป็นเมตริกซ์สติฟเนสของโครงสร้างโดยวิธีซ้อนทับ
- ประกอบเวกเตอร์แรงภายนอกจากแรงภายนอกที่กระทำที่จุดต่อตามลำดับของดีกรีความอิสระ

ค) หาสติฟเนสของสปริงยึดหยุ่น  $[k_{sp}]$  จากพารามิเตอร์สติฟเนสของชั้นดินที่รองรับแผ่นฐานราก และซ้อนทับสติฟเนสของสปริงลงในเมตริกซ์สติฟเนสของโครงสร้างในตำแหน่งของจุดต่อตามเลขจุดต่อที่กำหนดไว้

ง) คำนวณค่าการเปลี่ยนตำแหน่งของจุดต่อของโครงสร้างจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงภายนอกกับการเปลี่ยนตำแหน่งของจุดต่อตามสมการที่ (3.15) โดยการแก้สมการเชิงซ้อน

จ) คำนวณการเปลี่ยนตำแหน่ง แรงภายในของแต่ละชิ้นส่วน และค่าแรงต้านทานของสปริงแต่ละตัวโดยทำตามขั้นตอนต่อไปนี้

- หาการเปลี่ยนตำแหน่งของแต่ละชิ้นส่วน,  $\{d\}$  จากการเปลี่ยนตำแหน่งของจุดต่อของโครงสร้าง,  $\{D\}$  โดยใช้หมายเลขลำดับของชิ้นส่วน โครงสร้างและจุดต่อ
- คำนวณแรงภายในของแต่ละชิ้นส่วนตามลำดับ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงภายในและการเปลี่ยนตำแหน่งของชิ้นส่วนตามสมการที่ (3.1)
- คำนวณแรงปฏิกิริยาของสปริงแต่ละตัวจากการเปลี่ยนตำแหน่งของแต่ละจุดต่อตามสมการที่ (3.13) และสมการที่ (3.14)

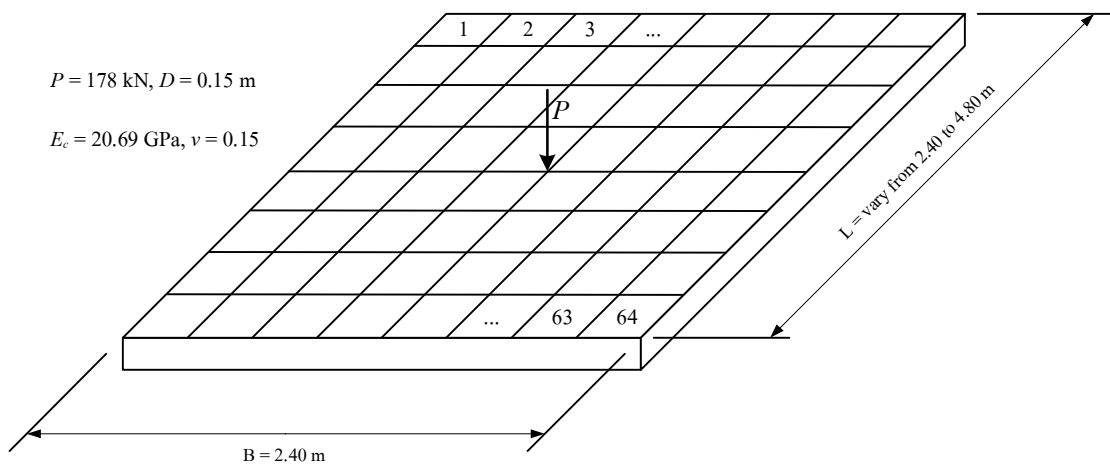
ฉ) ตรวจสอบการคำนวณได้โดยใช้แรงภายในของแต่ละชิ้นส่วน โครงข้อแข็งแต่ละชิ้นต้องสอดคล้องกับสมการสมดุลของแรงและโมเมนต์

### 3.3 การเทียบปรับแบบจำลอง Simplified Frame-Pile (SFP)

#### 3.3.1 การหาตัวคูณปรับแก้แรงบิดสำหรับโครงสร้างแบบแผ่น

ผู้วิจัยจะวิเคราะห์โครงสร้างแผ่นฐานรากโดยวิธีไฟไนต์กริด ซึ่งแบ่งแผ่นฐานรากเป็น Grid ชิ้นส่วน โครงข้อแข็งจะมีสติเฟเนตแรงบิดที่ต้องปรับแก้โดยเทียบปรับตัวคูณปรับแก้ ( $\Omega$ )

ผู้วิจัยจะวิเคราะห์ตัวอย่างแผ่นฐานรากด้วยวิธีไฟไนต์กริด โดยแปรผันตัวคูณปรับแก้แรงบิด ( $\Omega$ ) กับคำตอบแม่นยำตรง (exact solution) ตามทฤษฎียืดหยุ่น (Timoshenko and Woinowsky-Krieger, 1959) การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์กริดจะใช้วิธีเมตริกซ์สติเฟเนตในการคำนวณค่าการทรุดตัวและหน่วยแรงภายในแผ่นฐานราก การแปรผันตัวคูณปรับแก้แรงบิดเพื่อเสนอค่าที่เหมาะสมสำหรับฐานรากแต่ละแบบจะอ้างอิงสมการปรับแก้พื้นฐานของ Bowles (1988) ตามสมการที่ (3.10) จะแปรผันอยู่ตั้งแต่  $L_e/B_e$ ,  $0.95L_e/B_e$ ,  $0.85L_e/B_e$ ,  $0.75L_e/B_e$ ,  $0.65L_e/B_e$ ,  $0.55L_e/B_e$  และ  $0.45L_e/B_e$  ฐานรากตัวอย่างคอนกรีตมีความกว้าง 2.4 เมตร แปรผันความยาวตั้งแต่ 2.4, 2.88, 3.36, 4.08 และ 4.8 เมตร ความหนาเท่ากับ 0.15 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ฐานรากตัวอย่างถูกรองรับโดยการยึดรั้งที่ขอบเท่านั้น โดยไม่มีสปริงแทนชั้นดินรองรับ การยึดรั้งที่ขอบของแผ่นฐานราก แบ่งเป็น 2 กรณี คือ ยึดรั้งแบบบานพับและยึดรั้งแบบแน่น



รูปที่ 3.11 โครงสร้างแผ่นตัวอย่าง

### 3.3.2 การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนท์กริด

เมื่อตรวจสอบความถูกต้องของคำตอบจากวิธีการแบ่งฐานรากเป็นตารางกับคำตอบแม่นยำแล้วจะทำการเปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของคำตอบระหว่างวิธีแบ่งเป็นตารางกับวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์เมื่อเปลี่ยนจำนวนดีกรีความอิสระของฐานรากตัวอย่าง เพื่อดูประสิทธิภาพของการคำนวณ การวิเคราะห์จะปรับเปลี่ยนดีกรีความอิสระของฐานรากตัวอย่างจากจำนวนน้อย (แบ่งแผ่นฐานรากออกเป็นน้อยชิ้น) แล้วจึงเพิ่มจำนวนดีกรีความอิสระขึ้นเรื่อยๆ ผู้วิจัยจะหาการทรุดตัวสูงสุดและโมเมนต์ค้ดสูงสุดที่จุดกึ่งกลางของแผ่น โดยแบ่งจำนวนชิ้นส่วนเป็นตาราง จำนวนช่องในด้านกว้าง และด้านยาวแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 จำนวนดีกรีความอิสระของโครงสร้าง

Grid ( $NB \times NL$ )	Degrees of freedom
2 x 2	54
4 x 4	150
6 x 6	294
8 x 8	496
10 x 10	726
12 x 12	1014
16 x 16	1735
18 x 18	2166
20 x 20	2646

หมายเหตุ  $NB$  คือ จำนวนตารางในด้านกว้าง ( $B$ ) และ  $NL$  คือ จำนวนตารางในด้านยาว ( $L$ )

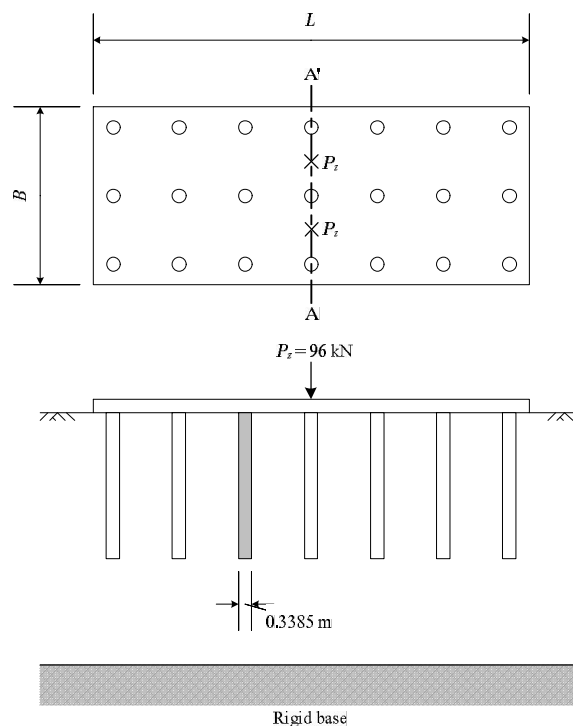
การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ที่ใช้เปรียบเทียบกับวิธีการแบ่งฐานรากเป็นตารางใช้โปรแกรม STAAD Pro 2004 เป็นเครื่องมือในการคำนวณ การคำนวณของโปรแกรม STAAD Pro 2004 ใช้โหมด Sturdyne option โดยทำการวิเคราะห์โดยใช้ทั้งชิ้นส่วนแบบแผ่นหนา (thick plate element) ซึ่งคำนึงผลกระทบของ Shear deformation และชิ้นแบบแผ่นบาง (thin plate element) ซึ่งละทิ้งผลกระทบของ Shear deformation



### 3.3.3 การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง SFP

จะตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง SFP โดยเปรียบเทียบกับผลการคำนวณโดยแบบจำลองนี้กับวิธีเชิงตัวเลขอื่นๆ และผลการทดสอบ โดยแบบจำลองกายภาพแรงเหวี่ยง (centrifuge model) โดยฐานรากตัวอย่างรับน้ำหนักบรรทุกทุก 2 กรณี ได้แก่ น้ำหนักบรรทุกแนวตั้งและน้ำหนักบรรทุกแนวราบ

น้ำหนักบรรทุกแนวตั้งจะกระทำต่อตัวอย่างฐานรากเสาเข็มดังแสดงในรูปที่ 3.12 จะเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (โปรแกรม APRAF) และวิธีไฟไนท์ดิฟเฟอเรนซ์ (โดยโปรแกรมเชิงการค่า FLAC3D ซึ่งนำเสนอโดย Small and Zhang, 2000) แบบจำลองฐานรากเสาเข็มดังกล่าวรับน้ำหนักบรรทุกแบบจุด (concentrate load) ที่ 2 ตำแหน่ง และมีอัตราส่วนระยะห่างระหว่างเสาเข็มแต่ละต้นต่อความกว้างของเสาเข็ม ( $S/D$ ) เท่ากับ 4.43 พารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังตารางที่ 3.2 การตรวจสอบจะเปรียบค่าการทรุดตัวของแผ่นฐานรากที่หน้าตัด A-A' (เนื่องจากเป็นหน้าตัดเดียวที่มีผลการคำนวณจากวิธีอื่น)

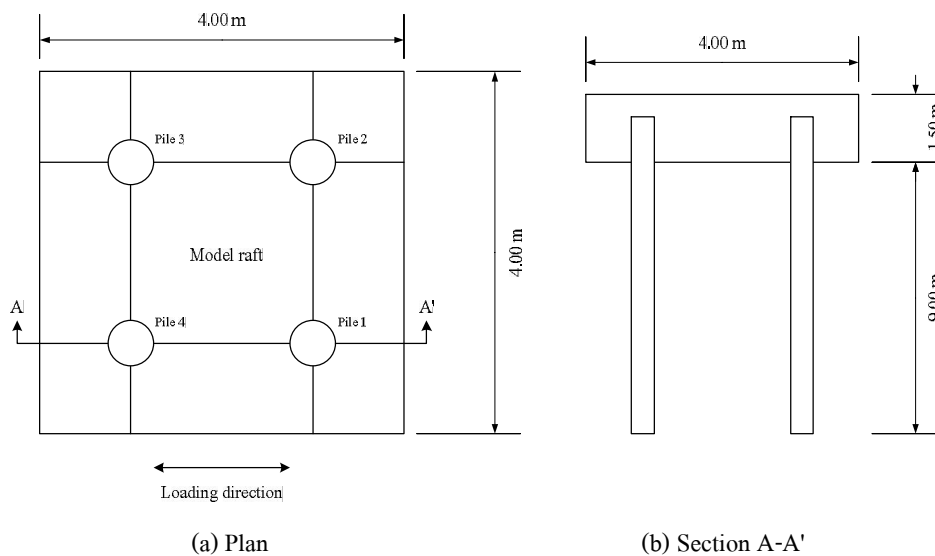


รูปที่ 3.12 ฐานรากตัวอย่างเสาเข็มกลุ่ม (Small and Zhang, 2000)

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์พื้นฐานในการวิเคราะห์แผ่นฐานรากบนเสาเข็ม (Small and Zhang, 2000)

Parameters	Value
Soil : Soil modulus, $E_s$	8.4 MPa
Poisson's ratio of soil, $\nu_s$	0.3
Depth of the soil layer	65 m
Raft : Raft modulus, $E_r$	84 MPa
Poisson's ratio of raft, $\nu_r$	0.3
Raft width, $B$	3.9 m
Raft length, $L$	9.9 m
Pile : Pile length, $L_p$	15 m
Pile diameter, $D_p$	0.3385 m
Pile modulus, $E_p$	840 MPa
Poisson's ratio of pile, $\nu_p$	0.15

การรับน้ำหนักบรรทุกทุกแนวราบจะสามารถตรวจสอบกับผลการทดลองการรับน้ำหนักบรรทุกของฐานรากเสาเข็มกลุ่มในชั้นทรายโดยแบบจำลองกายภาพแรงเหวี่ยงของ Horikoshi et al. (2003) ฐานรากตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 3.13 พารามิเตอร์พื้นฐานของวัสดุแสดงดังตารางที่ 3.3

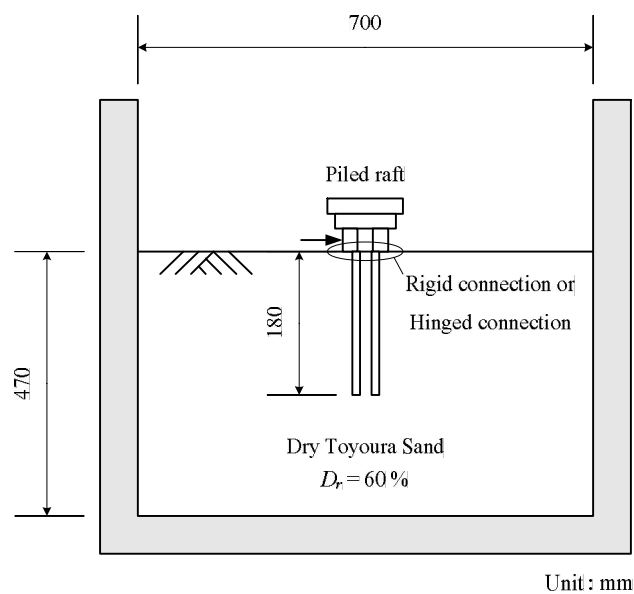


รูปที่ 3.13 ฐานรากเสาเข็มตัวอย่างโดยแบบจำลองแรงเหวี่ยง (Horikoshi et al., 2003)

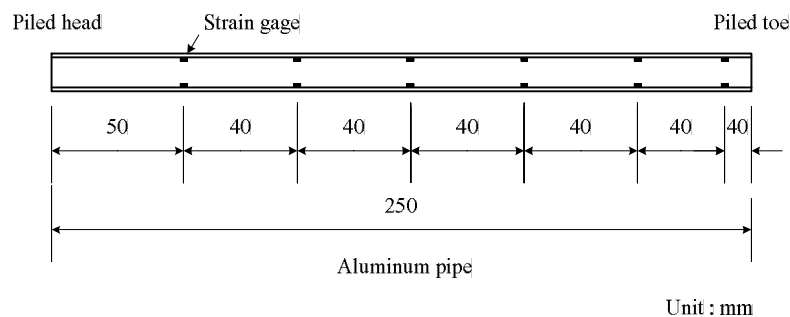
ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ของวัสดุในฐานรากเสาเข็มกลุ่ม โดยแบบจำลองการภาพแรงเหวี่ยง

Parameter	Value
Soil : Friction angle, $\phi'$	31°
Unit weight, $\gamma$	16.22 kN/m <sup>3</sup>
Relative density, $D_r$	60%
Raft : Elastic modulus of raft, $E_r$	21 GPa
Thickness	1.25 m
Pile : Elastic modulus of pile, $E_p$	41.7 GN/m <sup>2</sup>
Depth of pile	9 m
Diameter of pile	0.5 m

ฐานรากเสาเข็มตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง ความยาว 9 เมตร ย่อ 50 เท่า เหลือความยาวเท่ากับ 180 มิลลิเมตร จะหมุนตัวอย่างด้วยความเร่ง 50 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก ฐานรากตัวอย่างวางอยู่บนชั้นทราย Toyoura ซึ่งมีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 16.22 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ลักษณะการติดตั้งฐานรากตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 3.14 บนเสาเข็มจะติดตั้ง Strain gage ที่ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.14 การติดตั้งฐานรากในการทดสอบด้วยแบบจำลองแรงเหวี่ยง



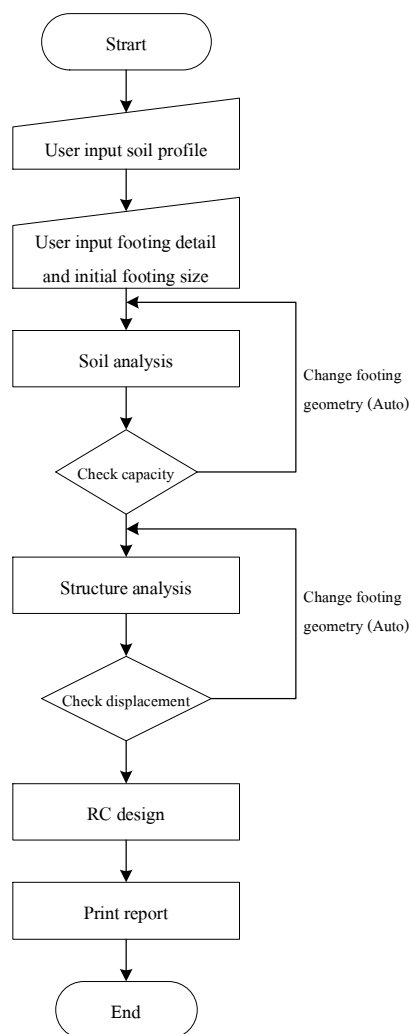
รูปที่ 3.15 ตำแหน่งการติดตั้ง Strain gage บนเสาเข็ม

### 3.4 การสร้างโปรแกรมเชื่อมโยงการวิเคราะห์และออกแบบฐานรากเสาเข็มเข้าด้วยกัน

ผู้วิจัยจะนำแบบจำลอง SFP และมาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กมาพัฒนาเป็นโปรแกรมวิเคราะห์และออกแบบฐานรากชื่อว่า “SUTFoundation” โปรแกรมนี้ทำงานบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ โปรแกรมนี้จะสามารถใช้วิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มเพื่อหาแรงภายในและการเปลี่ยนตำแหน่ง ใช้ออกแบบคำนวณหาขนาด ความหนา และเหล็กเสริมในฐานรากคอนกรีต โปรแกรมเขียนด้วยไมโครซอฟท์ฟิวลเบสิก เวอร์ชัน 6 (Microsoft Visual Basic 6) และโปรแกรมไมโครซอฟท์ฟิวลสตูดิโออินสตอลเลอร์ เวอร์ชัน 1.1 (Microsoft Visual Studio Installer 1.1) การวิเคราะห์โดยวิธี  $p$ - $y$  curve ใช้โปรแกรม COM624P (public domain)

การวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มจะต้องแบ่งฐานรากเป็น Grid กำหนดเลขจุดต่อและชิ้นส่วนตามวิธีในหัวข้อ 3.2.2.6 จากนั้นป้อนข้อมูลจุดต่อ ข้อมูลชิ้นส่วน ข้อมูลน้ำหนักบรรทุก และข้อมูลการยึดรั้ง จากนั้น โปรแกรมจะคำนวณแรงภายในและการทรุดตัวตามวิธีที่กล่าวแล้วในหัวข้อ 3.2.2.6

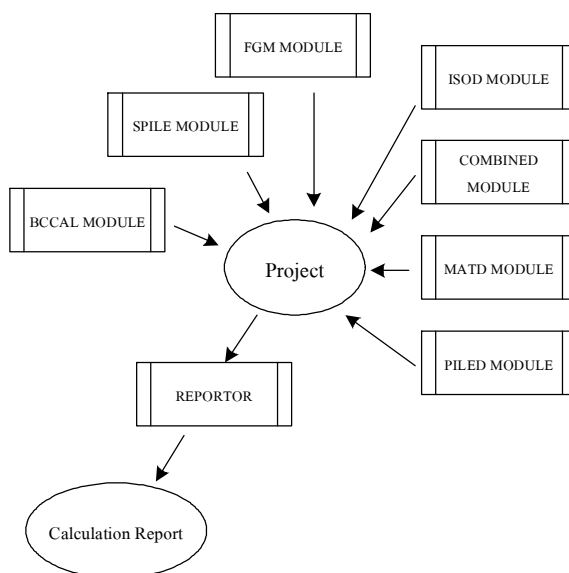
สำหรับการออกแบบ โปรแกรมเชื่อมโยงการวิเคราะห์และออกแบบต่างๆ เป็นขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.16 ข้อมูลแต่ละขั้นตอนจะถูกส่งผ่านและนำไปใช้ในขั้นตอนออกแบบแต่ละขั้น ตั้งแต่ป้อนข้อมูลชั้นดิน ป้อนข้อมูลฐานรากและขนาดเริ่มต้น วิเคราะห์ตรวจสอบกำลังชั้นดิน วิเคราะห์โครงสร้างฐานราก ตรวจสอบการทรุดตัว ออกแบบเหล็กเสริม จนถึงพิมพ์รายการคำนวณประกอบทางเครื่องพิมพ์



รูปที่ 3.16 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรม SUTFoundation

### 3.5 การพัฒนาโปรแกรม SUTFoundation ให้ครอบคลุมการออกแบบฐานรากพื้นฐานอื่นๆ

ผู้วิจัยได้รวมฐานรากค้ำยันเข้าในโปรแกรม SUTFoundation ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ 1) ฐานรากค้ำยันเดี่ยว คือ ฐานรากค้ำยันที่รับน้ำหนักบรรทุกจากเสาเพียงต้นเดียว 2) ฐานรากค้ำยันร่วม คือ ฐานรากค้ำยันซึ่งรับน้ำหนักจากเสาสองต้นในฐานเดียว และ 3) ฐานรากค้ำยันแนว คือ ฐานรากค้ำยันขนาดใหญ่ที่รองรับน้ำหนักบรรทุกจากเสามากกว่าสองต้น ขั้นตอนการออกแบบฐานรากค้ำยันรูปร่างที่พบเห็นและใช้งานบ่อยจะถูกสร้างเป็น Pattern สำหรับรองรับการออกแบบได้ครบถ้วน ส่วนประกอบของโปรแกรม SUTFoundation แสดงดังแผนผังในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ส่วนประกอบของโปรแกรม SUTFoundation

### 3.6 การตรวจสอบความถูกต้องในการคำนวณของโปรแกรม SUTFoundation

ผู้วิจัยจะตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม โดยเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์และออกแบบโดยใช้โปรแกรม SUTFoundation กับผลการคำนวณด้วยมือ (hand calculation) และผลจากโปรแกรมวิเคราะห์และออกแบบฐานรากที่ได้รับการยอมรับทั่วไป ทั้งนี้จะใช้ฐานรากตัวอย่างอย่างง่าย

ผู้วิจัยจะตรวจสอบการคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มกับโปรแกรม Driven 1.2 และจะตรวจสอบค่าโมเมนต์คัต แรงเฉือน และหน่วยแรงใต้ฐานรากกับวิธีดั้งเดิม (วิธีกลศาสตร์ของวัสดุ) ส่วนฐานรากดินจะตรวจสอบผลการคำนวณกำลังรับแรงแบกทานกับโปรแกรม CBEAR และตรวจสอบค่าโมเมนต์คัต แรงเฉือน หน่วยแรงใต้ฐานรากกับวิธีดั้งเดิม (วิธีกลศาสตร์ของวัสดุ)

## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล

#### 4.1 บทนำ

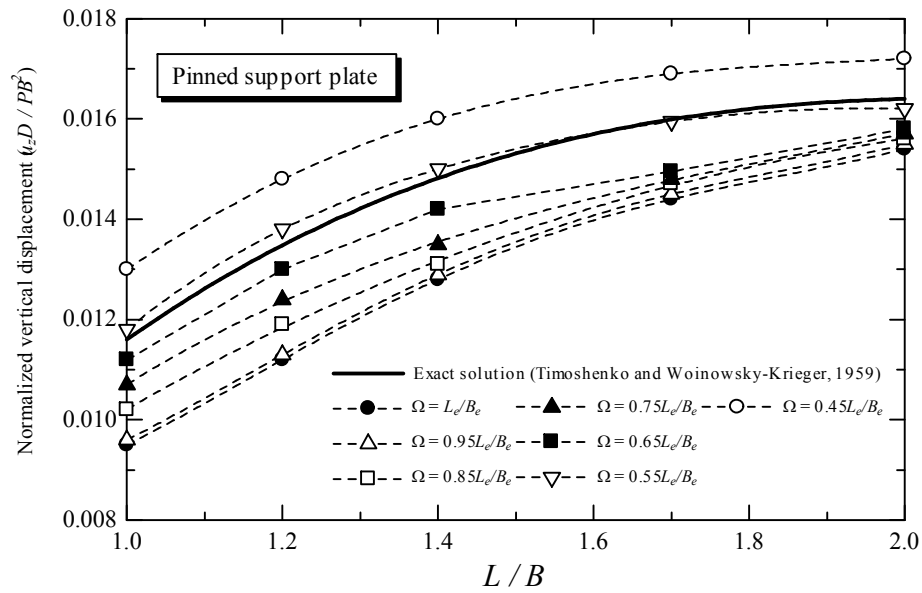
บทนี้จะเสนอผลการเทียบปรับและวิธีวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็ม (แบบจำลอง Simplified Frame-Pile) ที่ได้พัฒนาขึ้นซึ่งประกอบด้วย การตรวจสอบการวิเคราะห์แผ่นฐานรากที่ไม่มีเสาเข็ม โดยวิธีไฟไนท์กริด ตรวจสอบการวิเคราะห์แผ่นฐานรากที่มีเสาเข็ม และจะเสนอผลการสร้างโปรแกรมที่เชื่อมโยงการวิเคราะห์และออกแบบฐานรากเข้าด้วยกัน รวมทั้งผลการตรวจสอบความถูกต้องในการคำนวณของโปรแกรมด้วย

#### 4.2 ผลการเทียบปรับและตรวจสอบแบบจำลอง Simplified Frame-Pile

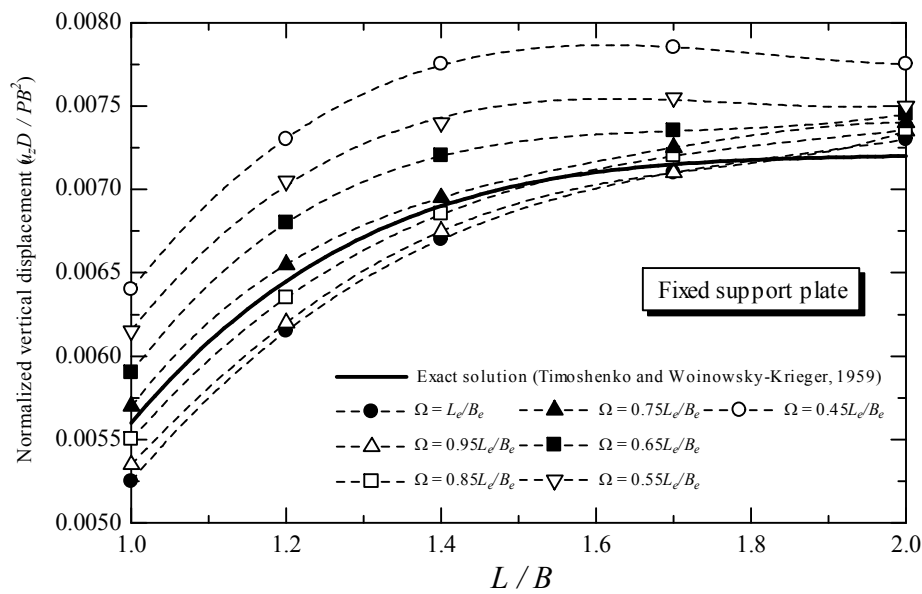
##### 4.2.1 การวิเคราะห์แผ่นฐานรากโดยวิธีไฟไนท์กริด

เมื่อวิเคราะห์ฐานรากตัวอย่างด้วยแบบจำลอง SFP โดยแปรผันตัวคูณปรับแก้แรงบิด ( $\Omega$ ) ตามหัวข้อ 3.3.1 แล้วได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.1 (a) สำหรับโครงสร้างแผ่นที่มีการยึดรับแบบบานพับ และรูปที่ 4.1 (b) สำหรับโครงสร้างแผ่นที่มีการยึดรับแบบยึดแน่น ค่าตัวคูณปรับแก้การบิดที่ให้ค่า Normalized vertical displacement ใกล้เคียงกับค่าตอบแม่นยำตรงตามทฤษฎียึดหยุ่น คือ  $0.55L_e / B_e$  สำหรับการยึดรับแบบหมุน และ  $0.85L_e / B_e$  สำหรับการยึดรับแบบยึดแน่น

เมื่อใช้  $0.55L_e / B_e$  กับโครงสร้างแผ่นที่ยึดรับแบบหมุน วิธีไฟไนท์กริดจะให้ค่า Normalized vertical displacement ต่ำกว่าค่าตอบแม่นยำตรง ที่ขนาดโครงสร้างแผ่น  $L/B$  มีค่าตั้งแต่ 1.0 จนถึง 1.7 โดยถ้า  $L/B$  มีค่าสูงขึ้น วิธีไฟไนท์กริดจะให้ค่า Normalized vertical displacement สูงกว่าค่าตอบแม่นยำตรงในด้านที่ปลอดภัย และเมื่อใช้  $0.85L_e / B_e$  กับโครงสร้างแผ่นที่ยึดรับแบบยึดแน่น วิธีไฟไนท์กริดจะให้ค่า Normalized vertical displacement ต่ำกว่าค่าตอบแม่นยำตรง ที่ขนาดโครงสร้างแผ่น  $L/B$  มีค่าตั้งแต่ 1.0 จนถึง 1.5 โดยถ้า  $L/B$  มีค่าสูงขึ้น วิธีไฟไนท์กริดจะให้ค่า Normalized vertical displacement สูงกว่าค่าตอบแม่นยำตรงในด้านที่ปลอดภัย เช่นเดียวกับการยึดรับแบบหมุน ดังนั้น การนำวิธีไฟไนท์กริดมาใช้ในแบบจำลอง SFP จะใช้ค่าปรับแก้แรงบิดทั้งสองค่า ดังเสนอข้างต้น โดยจะใช้  $\Omega = 0.55L_e / B_e$  เมื่อการยึดรับระหว่างเสาเข็มกับแผ่นฐานรากเป็นแบบหมุนและใช้  $\Omega = 0.85L_e / B_e$  เมื่อการยึดรับระหว่างเสาเข็มกับแผ่นฐานรากเป็นแบบยึดแน่น



(a) โครงสร้างแผ่นที่มีการยึดแบบบานพับ



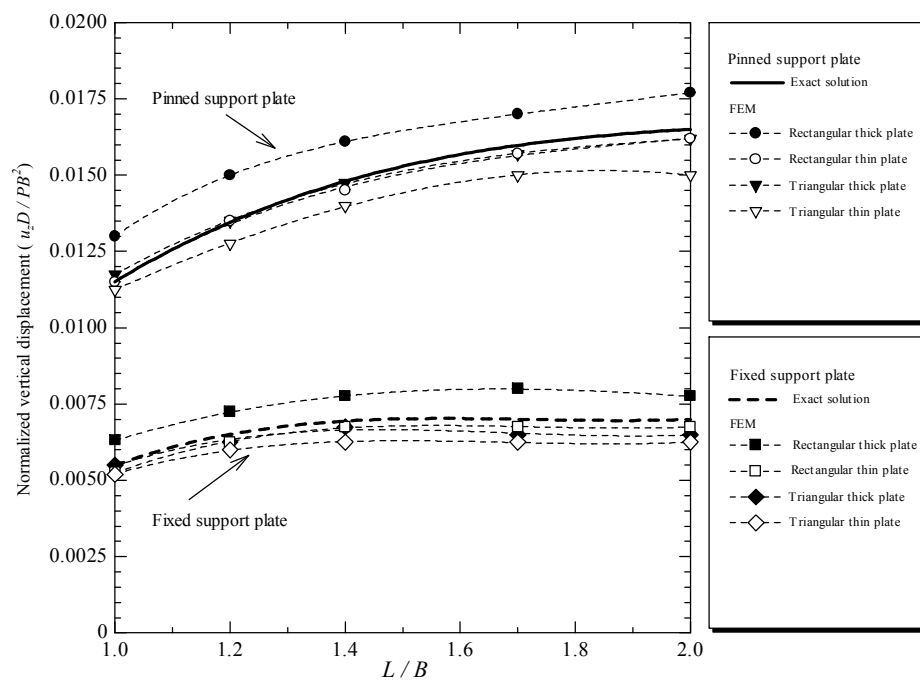
(b) โครงสร้างแผ่นที่มีการยึดแบบยึดแน่น

รูปที่ 4.1 ค่า Normalized vertical displacement ( $u_z D / PB^2$ ) ของโครงสร้างแผ่นแต่ละขนาด  
ที่คำนวณ โดยวิธีไฟไนท์กริด



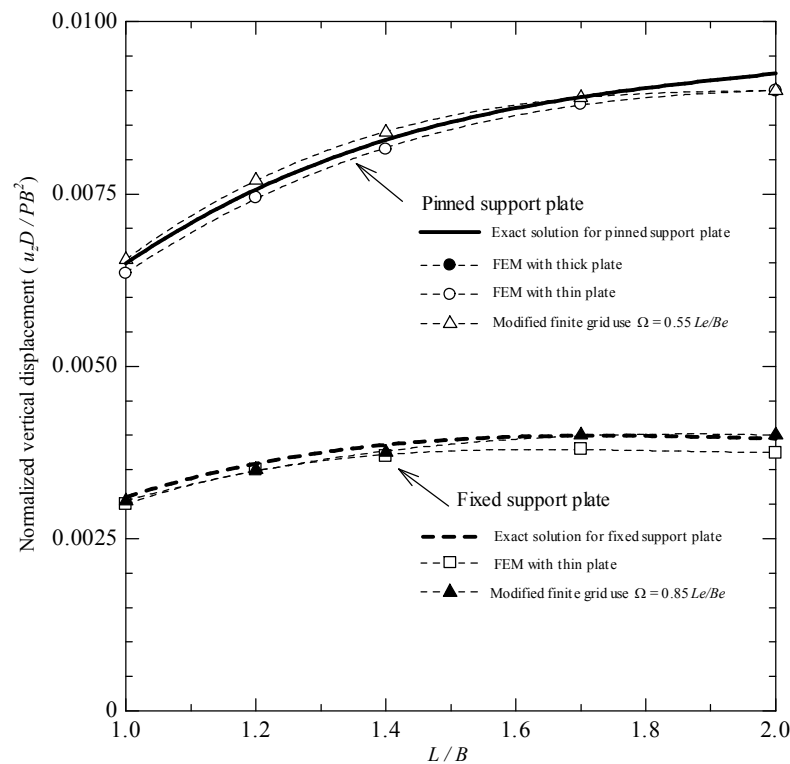
#### 4.2.2 ผลการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์กริด

นอกจากนี้ได้เสนอผลจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับคำตอบแม่นยำ เพื่อใช้ผลคำนวณของแบบจำลอง SFP เปรียบเทียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในภายหลัง (4.2.2) ค่า Normalized vertical displacement ที่ได้จากการผลคำนวณโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างตามแบบจำลองในรูปที่ 3.1 ซึ่งมีอัตราความกว้างต่อความหนา ( $B/D$ ) เท่ากับ 16 ( $B/D > 10$  มีแนวโน้มที่จะเป็นโครงสร้างแบบแผ่นพื้นบาง) ที่มีการยึดรั้งแบบหมุนให้ค่าสูงกว่าโครงสร้างที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่น ค่า Normalized vertical displacement จะเริ่มมีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของโครงสร้าง และมีแนวโน้มที่จะคงที่เมื่ออัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของโครงสร้างมากกว่า 1.6 สำหรับโครงสร้างที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่น แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่า Normalized vertical displacement ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเช่นเดียวกับคำตอบแม่นยำจากทฤษฎียึดหยุ่นและวิธีไฟไนต์กริด ชิ้นส่วนแบบแผ่นสี่เหลี่ยมบาง (rectangular thin plate) จะให้ค่า Normalized vertical displacement ใกล้เคียงกับคำตอบแม่นยำตามทฤษฎียึดหยุ่นมากที่สุดทั้งการคำนวณในโครงสร้างที่มีการยึดรั้งแบบหมุน และโครงสร้างที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่น ดังจะเห็นได้จากกราฟในรูปที่ 4.2 ดังนั้นในการเปรียบเทียบวิธีไฟไนต์กริดจะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้ชิ้นส่วนแบบแผ่นสี่เหลี่ยมบาง



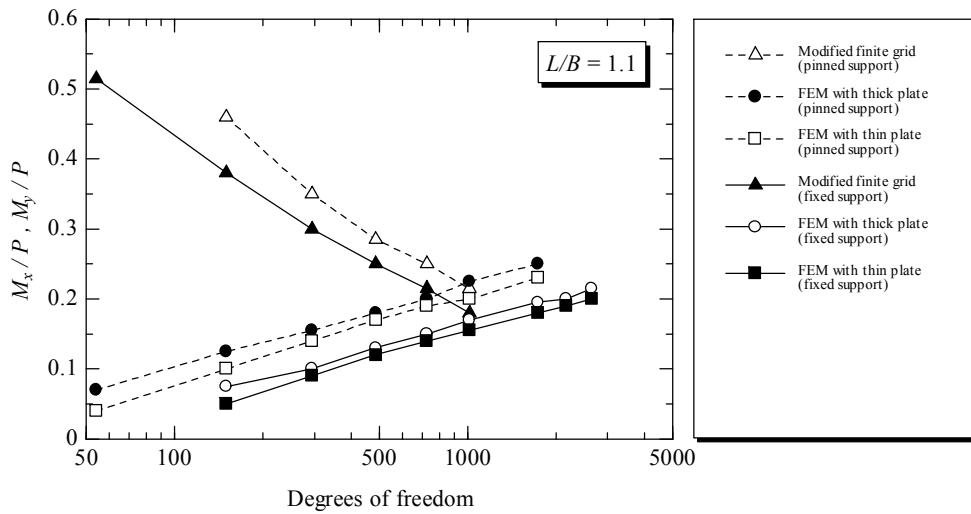
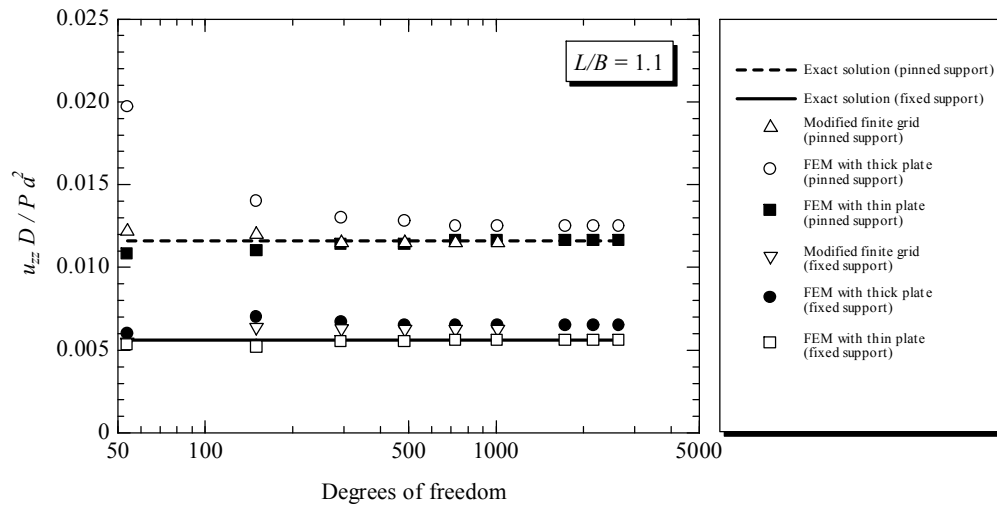
รูปที่ 4.2 ค่า Normalized vertical displacement ( $u_z D / PB^2$ ) ของโครงสร้างแผ่นแต่ละขนาด คำนวณโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เมื่อวิเคราะห์ฐานรากตัวอย่างด้วยแบบจำลอง SFP ตามหัวข้อ 3.3.2 โดยใช้ตัวคูณปรับแก้ค่าคงที่แรงบิดเท่ากับ  $0.55L_e/B_e$  สำหรับการยึดแบบบานพับและ  $0.85L_e/B_e$  สำหรับการยึดแบบยึดแน่นแล้วเปรียบเทียบกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ชิ้นส่วนแบบแผ่นสี่เหลี่ยมบาง ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าวิธีไฟไนต์กริดให้ค่า Normalized vertical displacement ใกล้เคียงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ชิ้นส่วนแบบบาง อีกทั้งยังใกล้เคียงกับคำตอบแม่นยำตามทฤษฎียึดหยุ่น

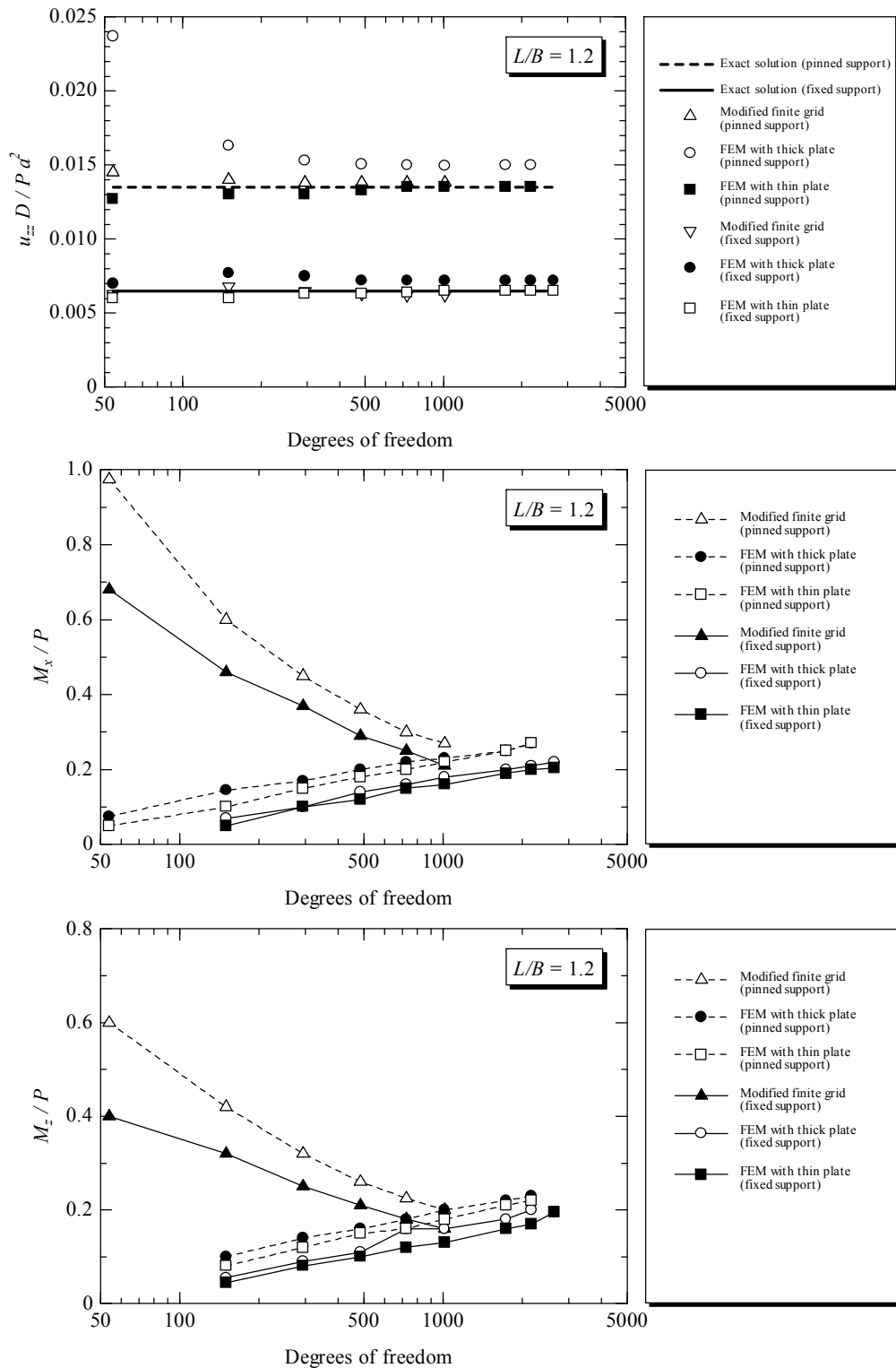


รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่า Normalized vertical displacement ( $u_z D / PB^2$ ) ของโครงสร้างแผ่นแต่ละขนาดของวิธีไฟไนต์กริดและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

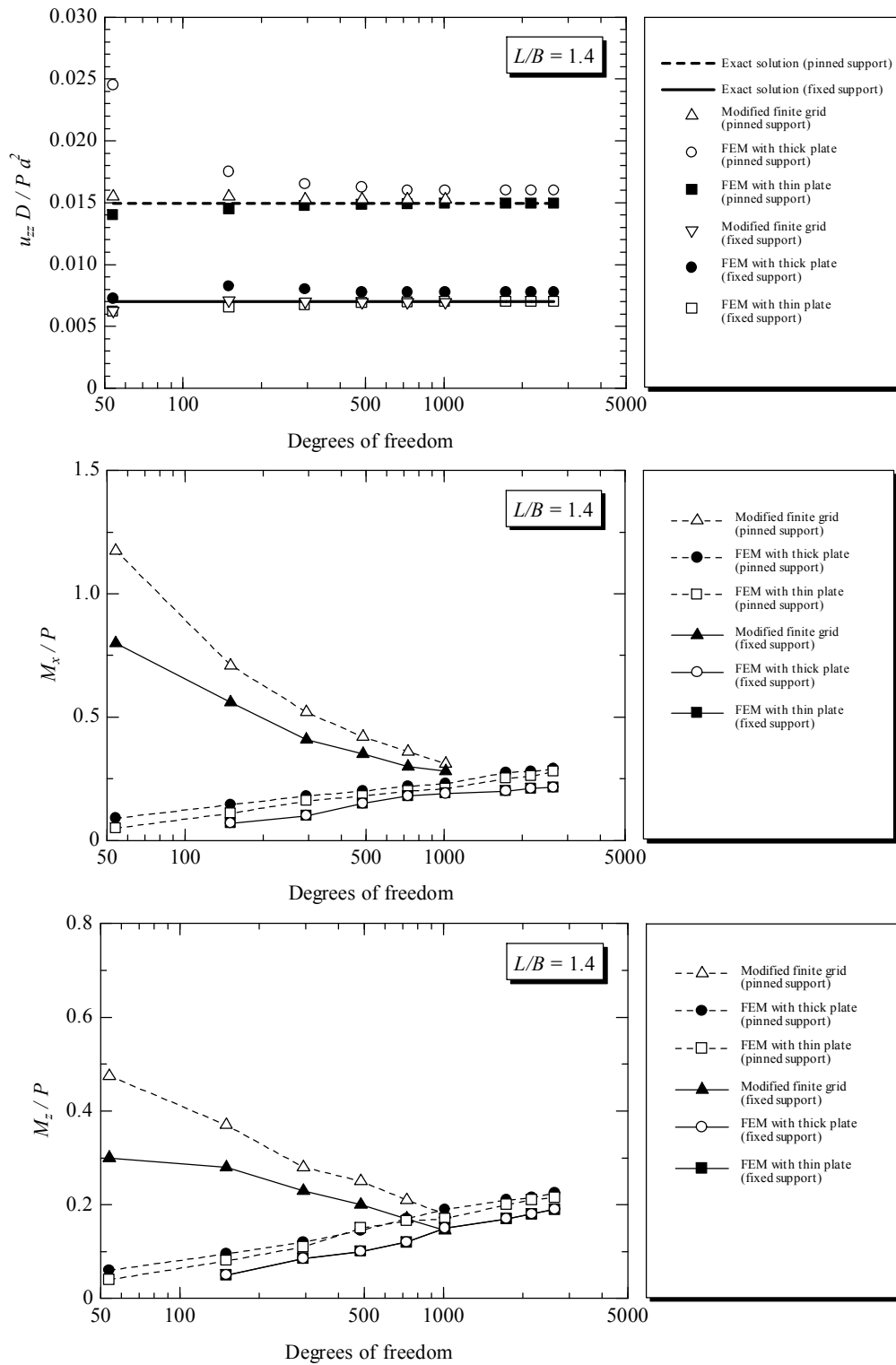
ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนดีกรีความอิสระของโครงสร้างกับค่า Normalized vertical displacement ( $u_z D / PB^2$ ) และ Normalized bending moment ( $M / P$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 ถึง 4.6 สำหรับอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของโครงสร้างเท่ากับ 1.0, 1.2 และ 1.4 ตามลำดับ จะเห็นว่าแบบจำลอง SFP ให้ค่า Normalized vertical displacement เข้าใกล้คำตอบแม่นยำที่จำนวนดีกรีความอิสระ (ทั้งโครงสร้าง) น้อยกว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ชิ้นส่วนแบบแผ่นบาง



รูปที่ 4.4 การเข้าใกล้คำตอบแม่นยำของค่า Normalized vertical displacement ( $u_z D / P B^2$ ) และค่า Normalized bending moment ( $M / P$ ) ของวิธีไฟไนต์กริดและวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับแบบจำลองโครงสร้างที่มี  $L / B = 1.0$



รูปที่ 4.5 การเข้าใกล้ค่าตอบแม่นยำของค่า Normalized vertical displacement ( $u_z D / P B^2$ ) และค่า Normalized bending moment ( $M / P$ ) ของวิธีไฟไนต์กริดและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับแบบจำลองโครงสร้างที่มี  $L / B = 1.2$



รูปที่ 4.6 การเข้าใกล้คำตอบแม่นยำตรงของค่า Normalized vertical displacement ( $u_z D / P B^2$ ) และค่า Normalized bending moment ( $M / P$ ) ของวิธีไฟไนต์กริดและวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์สำหรับแบบจำลองโครงสร้างที่มี  $L / B = 1.4$

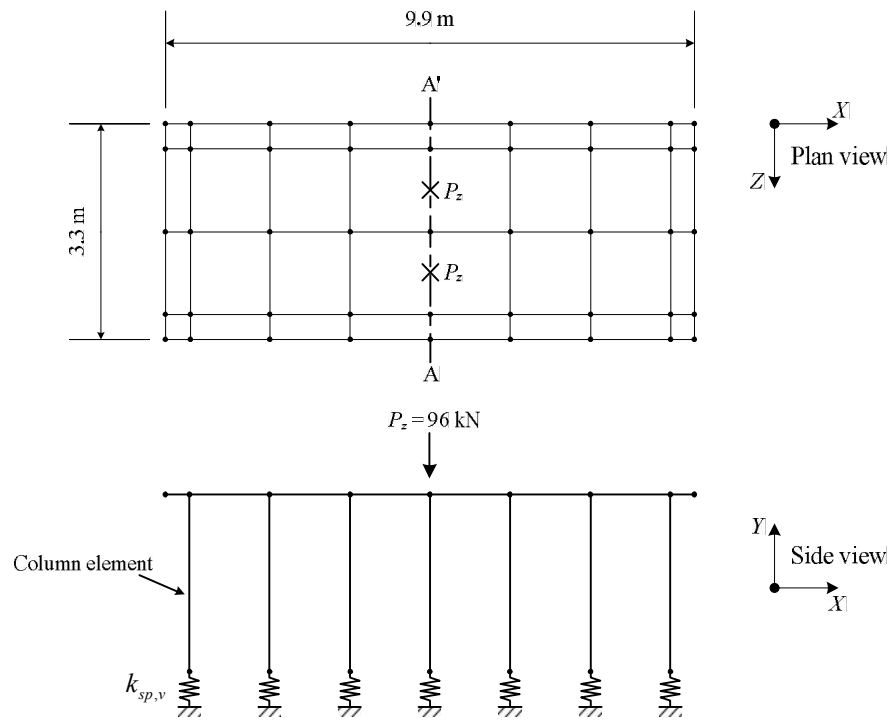
โมเมนต์คัตที่จุดกึ่งกลางรอบแกน  $X$  และรอบแกน  $Y$  ที่คำนวณโดยวิธีไฟไนท์กริดจะมีค่าลดลงตามจำนวนดีกรีความอิสระและมีแนวโน้มที่จะคงที่เมื่อจำนวนดีกรีความอิสระมากขึ้น ในขณะที่ค่าที่คำนวณโดยโมเมนต์คัตจากวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์จะมีค่ามากขึ้น และมีแนวโน้มที่จะคงที่เมื่อจำนวนดีกรีความอิสระของแบบจำลองโครงสร้างมากขึ้น แต่เมื่อใช้จำนวนดีกรีความอิสระของโครงสร้างที่มีจำนวนเท่ากัน ค่าโมเมนต์คัตโดยวิธีไฟไนท์กริดจะให้ค่าที่สูงกว่าวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ซึ่งอยู่ในด้านปลอดภัย

จากผลการคำนวณข้างต้นแสดงให้เห็นว่าวิธีไฟไนท์กริดสามารถใช้คำนวณการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง (displacement) ซึ่งให้ผลคำตอบเทียบเท่ากับคำตอบแม่นยำตรงตามทฤษฎียืดหยุ่น และคำตอบจากวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ นอกจากนี้ดีกรีความอิสระที่ต้องการสำหรับวิธีไฟไนท์กริดมีจำนวนน้อยกว่าทำให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณน้อยกว่าวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ จากผลการตรวจสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่าวิธีไฟไนท์กริดสามารถนำมาใช้ในแบบจำลอง SFP ได้อย่างเหมาะสมและปลอดภัย

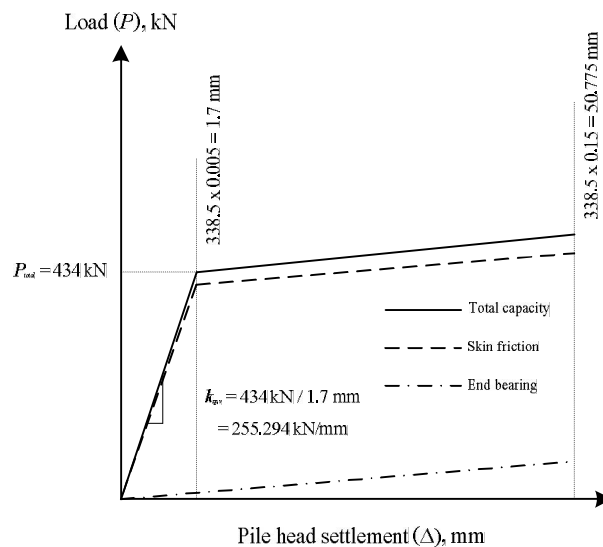
#### 4.2.3 ผลการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง SFP

##### 4.2.3.1 การวิเคราะห์การรับน้ำหนักบรรทุกทุกแนวตั้ง

ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มกลุ่มตัวอย่างด้วยแบบจำลอง SFP ตามหัวข้อ 3.3.3 การคำนวณค่าสติเฟนสของสปริงแนวตั้งที่ปลายเสาเข็มประมาณตามวิธีของ Whitaker (1976) โดยค่านี้ได้จากการเลือกแรงเสียดทานประลัษรอบเสาเข็มเกิดเต็มที่ที่การทรุดตัวของเสาเข็มเท่ากับ 0.5 เปอร์เซ็นต์ของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม และแรงแบกทานประลัษที่ปลายเสาเข็มเกิดเต็มที่ที่การทรุดตัวของเสาเข็มเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์ของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ค่าแรงเสียดทานประลัษคำนวณได้จากสมการสถิติศาสตร์มีค่าเท่ากับ 401 kN ส่วนค่าแรงแบกทานประลัษที่ปลายเสาเข็มคำนวณจากสมการสถิติศาสตร์มีค่าเท่ากับ 33 kN ดังนั้นที่การทรุดตัว 0.5 เปอร์เซ็นต์ของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม (1.7 มิลลิเมตร) เสาเข็มจะมีกำลังรวมเท่ากับ 434 kN ค่าสติเฟนสของสปริงแนวตั้งที่ปลายเข็มที่คำนวณตามรูปที่ 4.8 มีค่าเท่ากับ 255.294 kN/mm



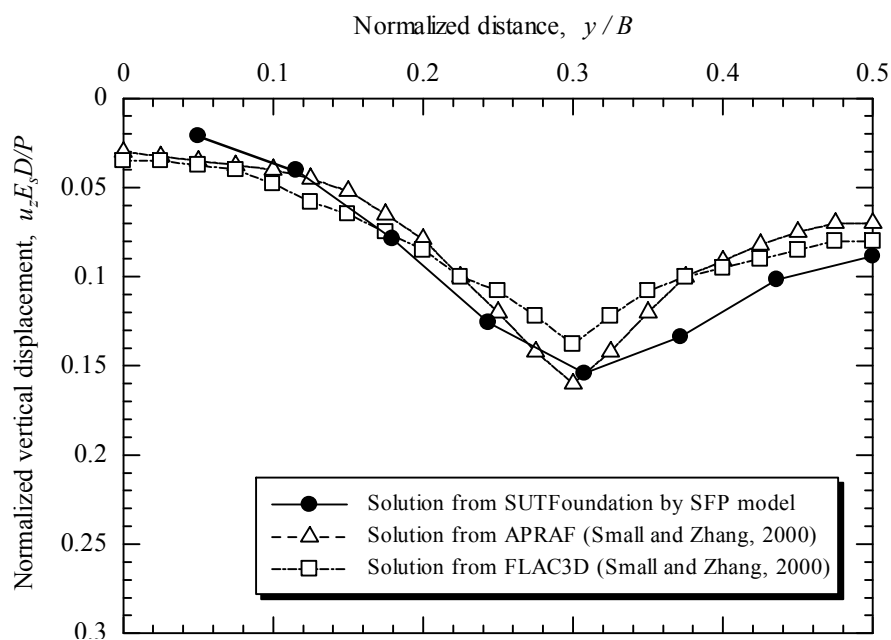
รูปที่ 4.7 ฐานรากเสาเข็มกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ตรวจสอบการรับน้ำหนักบรรทุกแนวตั้ง



รูปที่ 4.8 การประมาณค่าสติเฟนสของสปริงแนวตั้งตามวิธีของ Whitaker (1976)

ผลการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวของแผ่นฐานราก (ตามแนวแกน  $Y$ ) ของหน้าตัด A-A' แสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่า Normalized vertical displacement ( $u_z E_s D / P$ ) กับค่า

Normalized distance ( $y/B$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (เป็นกราฟสมมาตร) จะเห็นได้ว่าผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของแผ่นฐานรากบนเสาเข็มจากทั้ง 3 วิธี [แบบจำลอง SFP โดยโปรแกรม SUTFoundation, โปรแกรม APRAF (Small and Zhang, 2000), โปรแกรม FLAC3D (Small and Zhang, 2000)] ให้ค่า Normalized vertical displacement ใกล้เคียงกันในช่วง Normalized distance 0 – 0.3 Normalized vertical displacement เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากที่ตำแหน่งขอบฐานราก ( $y/B = 0$ ) จนมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง  $y/B = 0.3$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.154 สำหรับแบบจำลอง SFP (โปรแกรม SUTFoundation), 0.154 สำหรับโปรแกรม APRAF (Small and Zhang, 2000) และ 0.127 สำหรับโปรแกรม FLAC3D (Small and Zhang, 2000) ส่วนในช่วง Normalized distance 0.3 – 0.5 แบบจำลอง Simplified Frame-Pile ให้ค่าการทรุดตัวมากที่สุด ใน 3 วิธี ดังนั้นถ้าการเปลี่ยนตำแหน่งจากแบบจำลอง SFP จะได้ค่าแรงภายในที่สูงกว่า (ปลอดภัยกว่า)



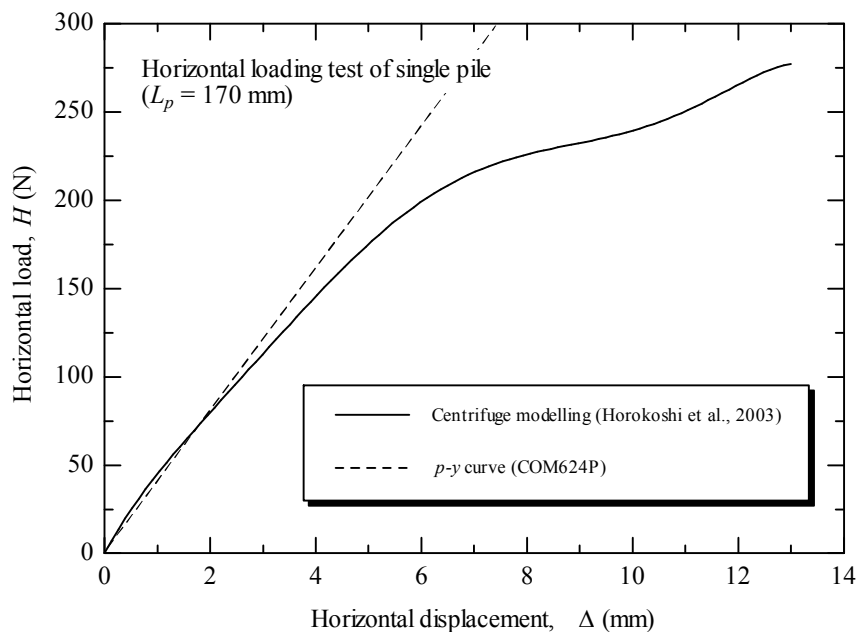
รูปที่ 4.9 ผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized vertical displacement กับ Normalized distance ของฐานรากเสาเข็มกลุ่มตามแนว A-A'

#### 4.2.3.2) การวิเคราะห์การรับน้ำหนักบรรทุกทุกแนวราบ

ผู้วิจัยได้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง SFP ในการวิเคราะห์การรับน้ำหนักบรรทุกทุกแนวราบสำหรับฐานรากเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่ม เสาเข็มและดิน คือ เสาเข็มและดินในหัวข้อ 3.3.3 เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบเสาเข็มเดี่ยวด้วยแบบจำลองกายภาพแรง



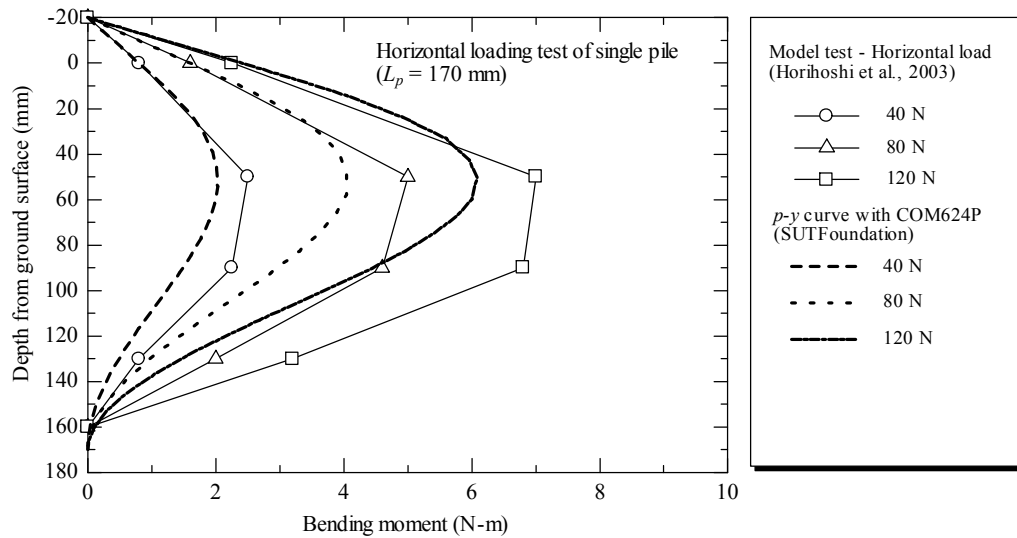
เหวี่ยง (ย่อ 50 เท่า) แสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกแนวราบ (horizontal load) กับการเคลื่อนตำแหน่งที่หัวเสาเข็ม (horizontal displacement) ในมาตราส่วนของแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าสติฟเนส (ความชัน) ของเสาเข็มแนวราบคำนวณโดยวิธี  $p$ - $y$  curve (COM624P) มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบโดยแบบจำลองแรงเหวี่ยง คือมีค่า 46 kN/mm ในช่วงที่หัวเสาเข็มเริ่มเคลื่อนตำแหน่ง ( $\Delta = 0$ ) จนหัวเสาเข็มมีการเคลื่อนตำแหน่งเท่ากับ 2 มิลลิเมตร (0.4 เปอร์เซ็นต์ของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม) ค่าสติฟเนสของเสาเข็มจากการคำนวณโดยโปรแกรมจากการคำนวณดังกล่าว แบบจำลอง SFP จึงนำไปใช้งานได้ดีในช่วงที่เสาเข็มมีการเคลื่อนที่น้อย (รูปที่ 4.1 ช่วง  $\Delta = 0 - 2$  m) ซึ่งฐานรากเสาเข็มทั่วไปการเคลื่อนที่ของหัวเข็มจะถูกจำกัดโดยมาตรฐานอยู่แล้ว ดังนั้น แบบจำลอง SFP จึงสามารถนำมาใช้งานได้



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกแนวราบ ( $H$ ) กับการเคลื่อนตำแหน่งแนวราบที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $\Delta$ ) ของเสาเข็มเดี่ยว

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้เปรียบเทียบค่าโมเมนต์คัตในเสาเข็มดังแสดงในรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าแนวโน้มของค่าโมเมนต์คัตจากการทดสอบมีค่าสูงกว่าค่าจากการคำนวณโดยโปรแกรม โดยโมเมนต์คัตสูงสุดจากการทดสอบโดยแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 2.52, 5.03 และ 7.01 นิวตันเมตรสำหรับน้ำหนักบรรทุกแนวราบขนาด 40, 80 และ 120 นิวตัน ตามลำดับ โดยค่าโมเมนต์คัตทั้งจาก

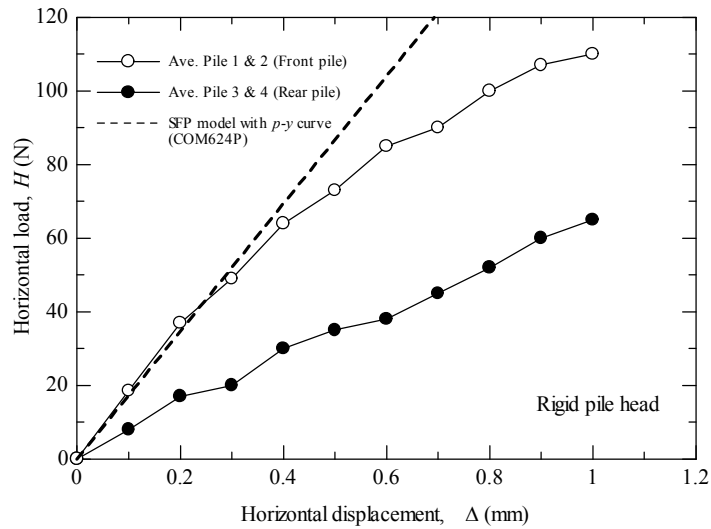
การคำนวณและผลการทดสอบโดยแบบจำลองมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งจากระดับผิวดินที่ใกล้เคียงกัน คือ 50 – 60 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.11 ค่าโมเมนต์ดัดในเสาเข็มเดี่ยว ( $L_p = 170$  mm) ที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกแนวราบ

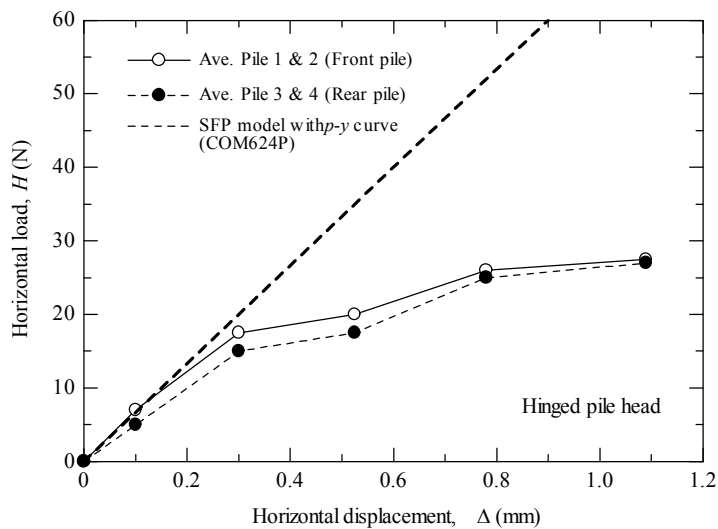
สำหรับการตรวจสอบการรับน้ำหนักบรรทุกแนวราบของเสาเข็มกลุ่มตัวอย่าง เมื่อวิเคราะห์การรับน้ำหนักบรรทุกแนวราบโดยใช้แบบจำลอง SFP กับฐานรากตัวอย่างตามหัวข้อ 3.3.3 แล้วได้ผลดังนี้

รูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกแนวราบกับการเคลื่อนตำแหน่งแนวราบของหัวเสาเข็มจากการคำนวณโดยแบบจำลอง SFP เทียบกับผลการทดสอบโดยแบบจำลองกายภาพ กรณีใช้หัวเสาเข็มแบบยึดแน่น (รูปที่ 4.12) แบบจำลอง SFP ให้ค่าสลิปเนตงที่ 173 นิวตันต่อมิลลิเมตร เท่ากันทั้งเสาเข็มต้นหน้าและเสาเข็มต้นหลังเทียบกับแบบจำลองแรงเหวี่ยงซึ่งให้ค่า 185 นิวตันต่อมิลลิเมตร (ค่าเฉลี่ย) สำหรับเสาเข็มต้นหน้าและ 85 นิวตันต่อมิลลิเมตร (ค่าเฉลี่ย) สำหรับเสาเข็มต้นหลัง



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกแนวราบ ( $H$ ) กับการเคลื่อนตำแหน่งแนวราบที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $\Delta$ ) ของเสาเข็มกลุ่มที่มีการยึดรั้งหัวเสาเข็มแบบยึดแน่น

ส่วนกรณียึดรั้งเสาเข็มแบบหมุน (รูปที่ 4.13) แบบจำลอง SFP ให้ค่าสดัดพเนสคงที่ที่ 67 นิวตันต่อมิลลิเมตร เท่ากันทั้งเสาเข็มหน้าและเสาเข็มด้านหลัง เทียบกับแบบจำลองกายภาพแรงเหวี่ยงซึ่งให้ค่า 70 นิวตันต่อมิลลิเมตร (ค่าเฉลี่ย) สำหรับเสาเข็มด้านหน้าและ 50 นิวตันต่อมิลลิเมตร (ค่าเฉลี่ย) สำหรับเสาเข็มด้านหลัง



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกแนวราบ ( $H$ ) กับการเคลื่อนตำแหน่งแนวราบที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม ( $\Delta$ ) ของเสาเข็มกลุ่มที่มีการยึดรั้งหัวเสาเข็มแบบหมุน

ค่าสถิติเนสของเสาเข็มกลุ่มตัวอย่างต้นหน้า ทั้งการยึดรั้งแบบหมุดและแบบยึดแน่น จากแบบจำลอง SFP ให้ค่าใกล้เคียงผลการทดสอบโดยแบบจำลองกายภาพแรงเหวี่ยง ส่วนค่าสถิติเนสของเสาเข็มกลุ่มตัวอย่างต้นหลัง ทั้งการยึดรั้งแบบหมุดและแบบยึดแน่น จากแบบจำลอง SFP ให้ค่าต่ำกว่าผลการทดสอบโดยแบบจำลองกายภาพแรงเหวี่ยง ดังนั้น การนำแบบจำลอง SFP มาใช้จึงสามารถนำมาใช้ได้อย่างปลอดภัยเมื่อเสาเข็มมีการเคลื่อนที่น้อย

#### 4.3 ผลการสร้างโปรแกรม SUTFoundation ที่ออกแบบให้เชื่อมโยงการวิเคราะห์และออกแบบฐานรากเข้าด้วยกัน

โปรแกรม SUTFoundation แบ่งการทำงานออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนรับข้อมูลเริ่มต้น, ส่วนประมวลผล และส่วนแสดงผลจัดพิมพ์รายงานการคำนวณ

ข้อมูลสำหรับการออกแบบ ได้แก่ ชั้นดิน (soil profile), ขนาดฐานรากเริ่มต้น (สำหรับลองผิดลองถูก), หน้าตัดเสาเข็ม, ขนาดเหล็กเสริมเริ่มต้น (สำหรับลองผิดลองถูก) เป็นต้น ข้อมูลเหล่านี้ได้รับจากผู้ใช้งานส่งผ่านหน้าจอรับข้อมูลของโปรแกรมแล้วเก็บไว้ในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์

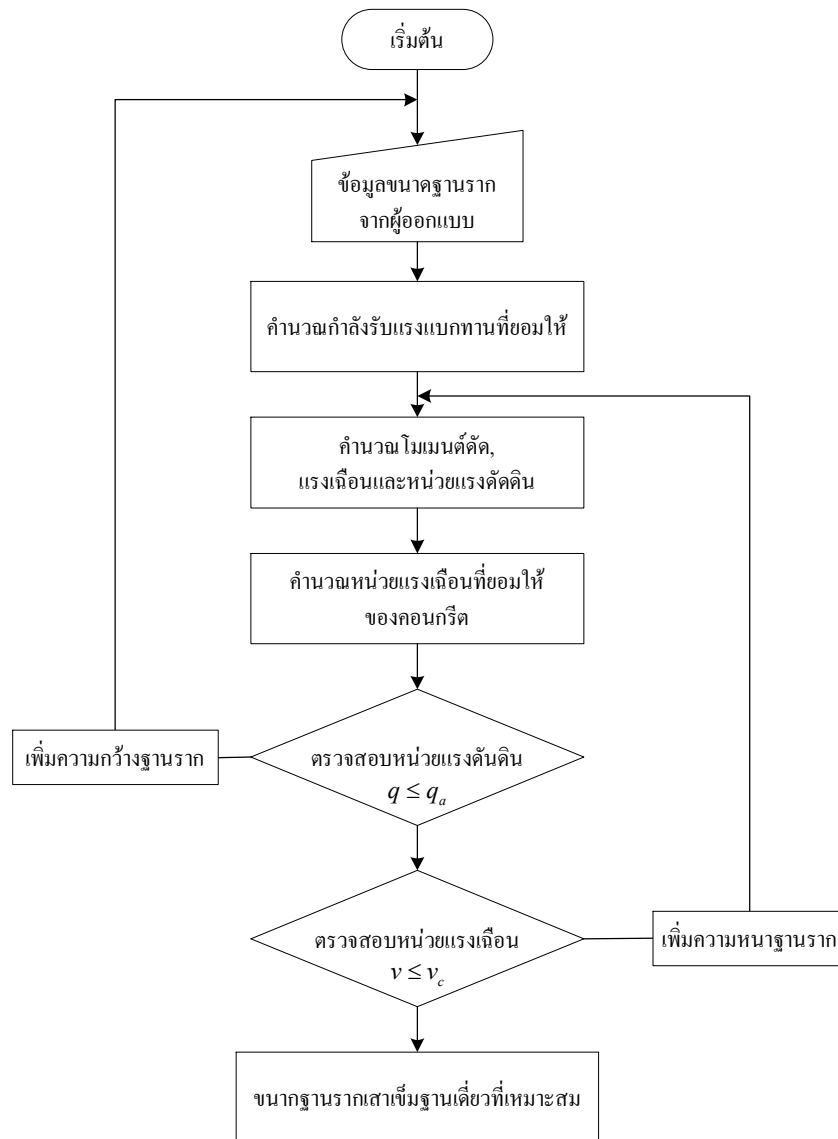
โปรแกรมเริ่มต้นด้วยการคำนวณหาค่ากำลังรับน้ำหนักของชั้นดินหรือเสาเข็มจากข้อมูลชั้นดินที่ป้อนเข้าไปตามลักษณะการวิบัติของฐานรากที่ต้องการออกแบบ ตัวอย่างเช่น การออกแบบฐานรากต้น โปรแกรมคำนวณกำลังรับแรงแบกทานที่ยอมรับให้ของดินใต้ฐานราก วิเคราะห์หาหน่วยแรงใต้ฐานรากจากน้ำหนักบรรทุกโดยใช้วิธีแบ่งแผ่นฐานรากเป็น Grid แล้วคำนวณด้วยวิธีเมตริกซ์สถิติเนส หลังจากนั้น โปรแกรมจะลองผิดลองถูกพร้อมทั้งตรวจสอบหน่วยแรงใต้ฐานรากว่าต้องไม่เกินค่าที่ยอมรับเพื่อหาขนาดฐานรากที่เหมาะสม หาความลึกของแผ่นฐานราก จำนวนเหล็กเสริม และระยะเรียงให้โดยอัตโนมัติ หลังจากนั้น โปรแกรมลองผิดลองถูกหาความหนาที่สามารถต้านทานแรงเฉือนจากน้ำหนักบรรทุกได้อย่างเพียงพอ แล้วจึงคำนวณจำนวนเหล็กเสริม และระยะจัดเรียงในแต่ละหน้าตัด เมื่อการประมวลผลเสร็จสิ้น (ทราบขนาดฐานราก ความยาวเสาเข็ม จำนวนและระยะจัดเรียงเหล็กเสริม) โปรแกรมจึงจะจัดพิมพ์รายงานการคำนวณ และแสดงผลต่อผู้ใช้

ฐานรากเสาเข็มในโปรแกรม SUTFoundation แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ 1) ฐานรากเสาเข็ม (piled footing) คือ ฐานรากซึ่งใช้เสาเข็ม (หนึ่งต้นหรือมากกว่า) แต่รองรับน้ำหนักบรรทุกจากเสาเพียงต้นเดียว 2) ฐานรากแพเสาเข็ม (piled raft footing) คือ ฐานรากซึ่งใช้เสาเข็ม (หนึ่งต้นหรือมากกว่า) และรองรับน้ำหนักบรรทุกจากเสามากกว่าหนึ่งต้นทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการออกแบบฐานรากเสาเข็มทั้ง 2 ประเภท แสดงตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การคำนวณและวิธีหรือสมการที่ใช้สำหรับการออกแบบฐานรากเสาเข็ม

ขั้นตอนการออกแบบ	วิธีหรือสมการที่ใช้
1. กำลังรับแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มในดินเหนียว, $q_{b(clay)}$	1. วิธีสถิติศาสตร์โดยใช้ค่า $N_c$ ของ Skempton (1951)
2. กำลังรับแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มในดินเหนียว, $q_{b(clay,bored)}$	2. สมการของ Skempton (1966)
3. กำลังรับแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มในชั้นทราย, $q_{b(sand)}$	3. สมการของ Berezantzev et al. (1961)
4. แรงเสียดทานรอบเสาเข็มในดินเหนียว, $c_{s(clay)}$	4. API (1974) หรือ Tomlison (1957) หรือ Holmberg (1970)
5. แรงเสียดทานรอบเสาเข็มในชั้นทราย, $c_{s(sand)}$	5. วิธี $\beta$ -method ตามสมการของ Stas and Kulhawy (1984)
6. แรงจูงคดของเสาเข็ม ( $NF$ )	6. สมการของ Burland (1973)
7. โมเมนต์คด และแรงเฉือนในแผ่นฐานราก	7. แบบจำลอง SFP
8. หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้, ระยะฝังพื้นฐานของเหล็กเสริม และจำนวนเหล็กเสริมในแผ่นฐานรากคอนกรีต	8. มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-40 และ ACI 318-02

การออกแบบฐานรากเสาเข็มเสาเดี่ยวต้องป้อนขนาดฐานราก ความหนาเริ่มต้น และตำแหน่งของน้ำหนักรรทุก โปรแกรมจะคำนวณความหนาที่เหมาะสมสำหรับน้ำหนักรรทุก ออกแบบ และข้อมูลชั้นดิน ขั้นตอนการลองผิดลองถูกเพื่อหาความลึกของฐานรากเสาเข็มเสาเดี่ยวที่เหมาะสมแสดงตามรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แผนผังขั้นตอนการลองผิดลองถูกเพื่อหาความลึกของฐานรากเสาเข็มที่เหมาะสม

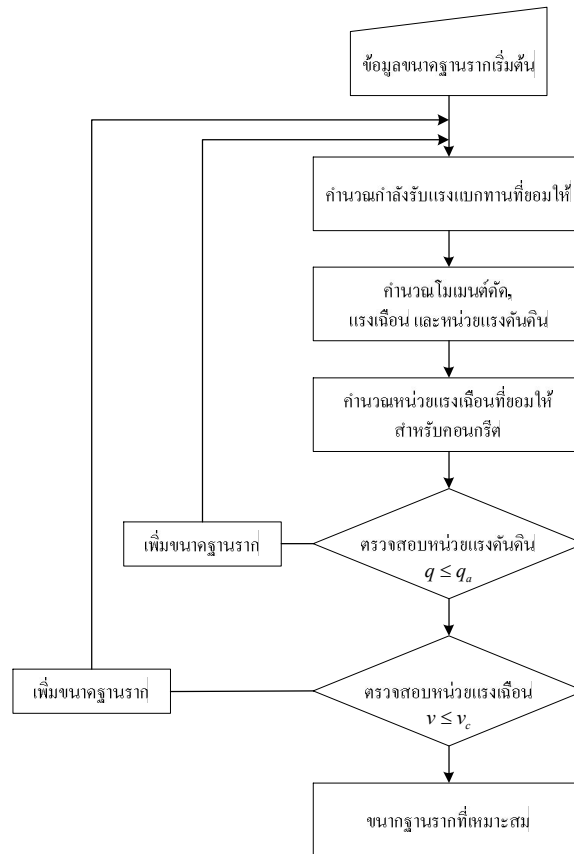
โปรแกรม SUTFoundation ไม่สามารถออกแบบฐานรากเสาเข็มฐานแพได้โดยอัตโนมัติ การออกแบบต้องอาศัยการลองผิดลองถูก และตรวจสอบแรงเฉือนเพื่อหาความหนาของแผ่นฐานรากโดยอาศัยโมดูลสำหรับการคำนวณ โดยแบบจำลอง SFP โดยป้อนข้อมูลเองในโปรแกรม SUTFoundation

#### 4.4 โปรแกรมสำหรับการออกแบบฐานรากแบบอื่นๆ

การคำนวณและสมการที่ใช้ออกแบบฐานรากตื้นทั้ง 3 ประเภทแสดงตามตารางที่ 4.2 การออกแบบฐานรากตื้นฐานเดี่ยวจะต้องป้อนขนาดฐานราก (กว้าง  $\times$  ยาว  $\times$  ลึก) น้อยที่สุด และมากที่สุดที่ยอมรับได้โดยผู้ออกแบบก่อน โปรแกรมจะคำนวณขนาดซึ่งเหมาะสมสำหรับน้ำหนักบรรทุกออกแบบ และข้อมูลชั้นดินที่ต้องการ ขั้นตอนการลองผิดลองถูกเพื่อหาขนาดฐานรากตื้นเดี่ยวที่เหมาะสมแสดงตามรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.2 การคำนวณและวิธีหรือสมการที่ใช้สำหรับการออกแบบฐานรากตื้น

การคำนวณ	วิธีหรือสมการที่ใช้
1. กำลังรับแรงแบกทานประลัย ( $q_u$ ) ใต้ฐานราก	1. สมการของ Terzaghi (1943), Meyerhof (1963), Hansen (1970) และ Vesic (1973; 1975)
2. กำลังรับแรงแบกทานของฐานรากรับน้ำหนักเชิงศูนย์	2. วิธีความกว้างประสิทธิผลของ Meyerhof (1953)
3. กำลังรับแรงแบกทานที่ยอมให้ ( $q_a$ )	3. สมการตามวิธี Limit analysis
4. โมเมนต์ค้ด และแรงเฉือนในแผ่นฐานราก	4. วิธีไฟไนท์กริด (Bowles, 1988)
5. หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้, ระยะฝังพื้นฐานของเหล็กเสริม และจำนวนเหล็กเสริมในแผ่นฐานรากคอนกรีต	5. มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-40 และ ACI 318-02

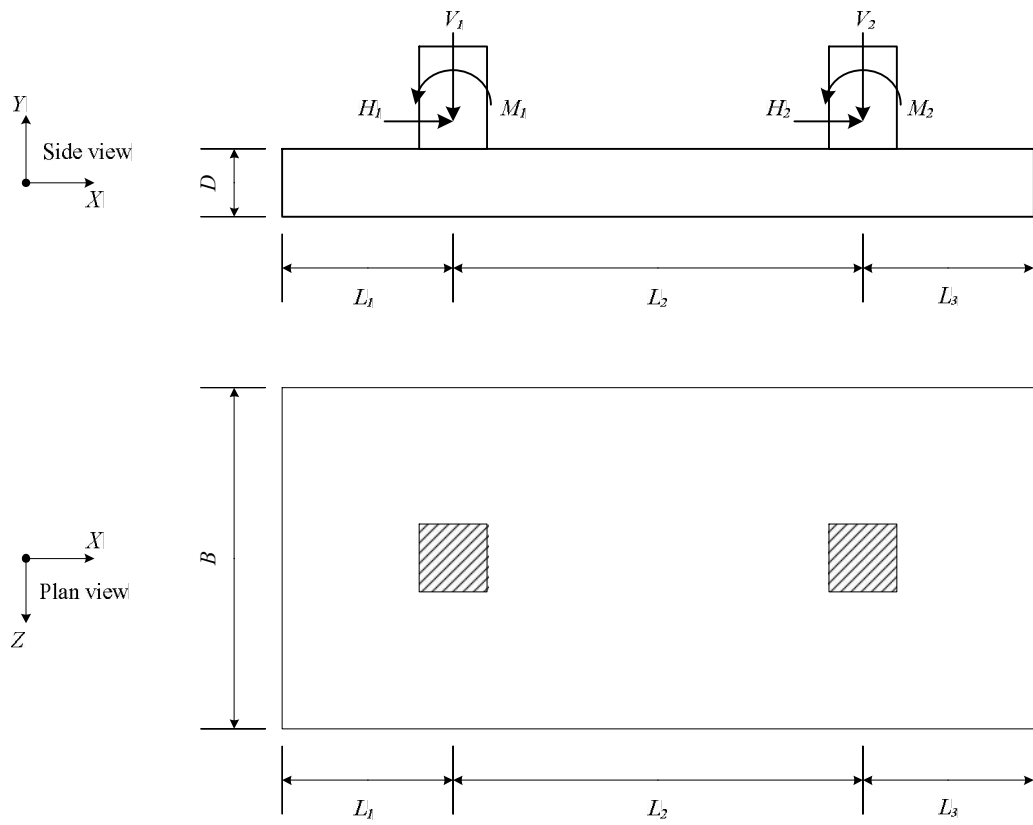


รูปที่ 4.15 แผนภูมิการคำนวณขนาดฐานรากตื้นฐานเดี่ยวที่เหมาะสม

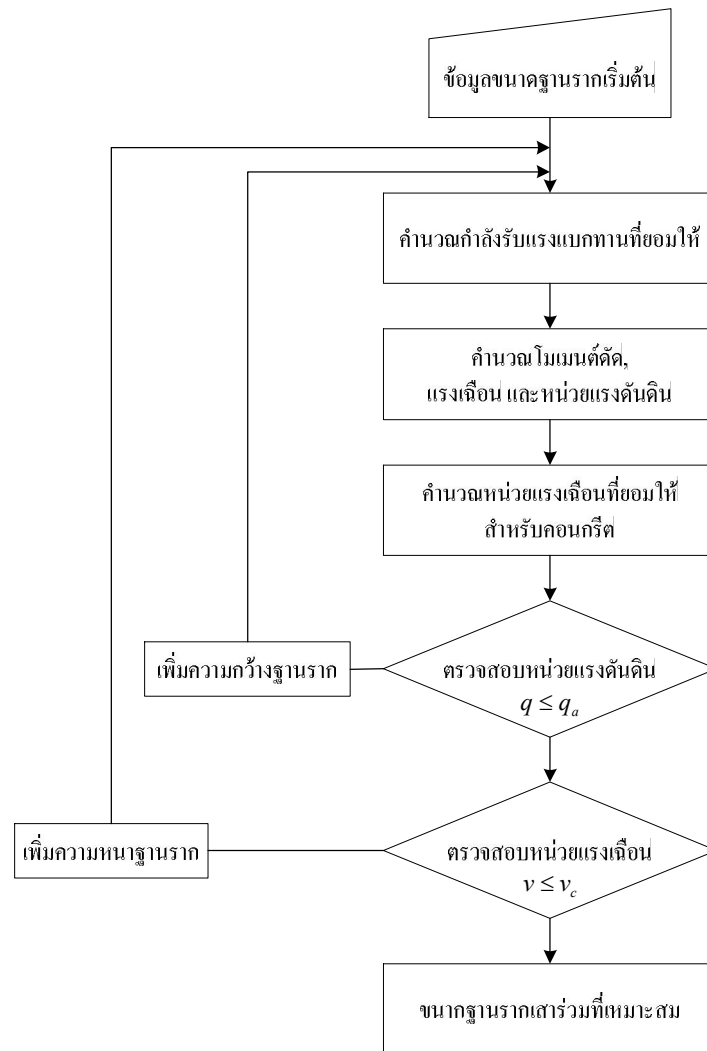
การออกแบบฐานรากตื้นฐานร่วมต้องป้อนระยะห่างระหว่างเสาทั้งสองต้น และขนาดความยาวฐานราก ( $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ ) และน้ำหนักบรรทุก ( $V$ ,  $H$ ,  $M$ ) ตามรูปที่ 4.16 โปรแกรมจะคำนวณความกว้าง ( $B$ ) และความหนา ( $D$ ) ซึ่งเหมาะสมสำหรับน้ำหนักบรรทุกออกแบบ และข้อมูลชั้นดินใต้ฐานราก ขั้นตอนการลองผิดลองถูกเพื่อหาขนาดฐานรากร่วมที่เหมาะสมแสดงในรูปที่

4.17



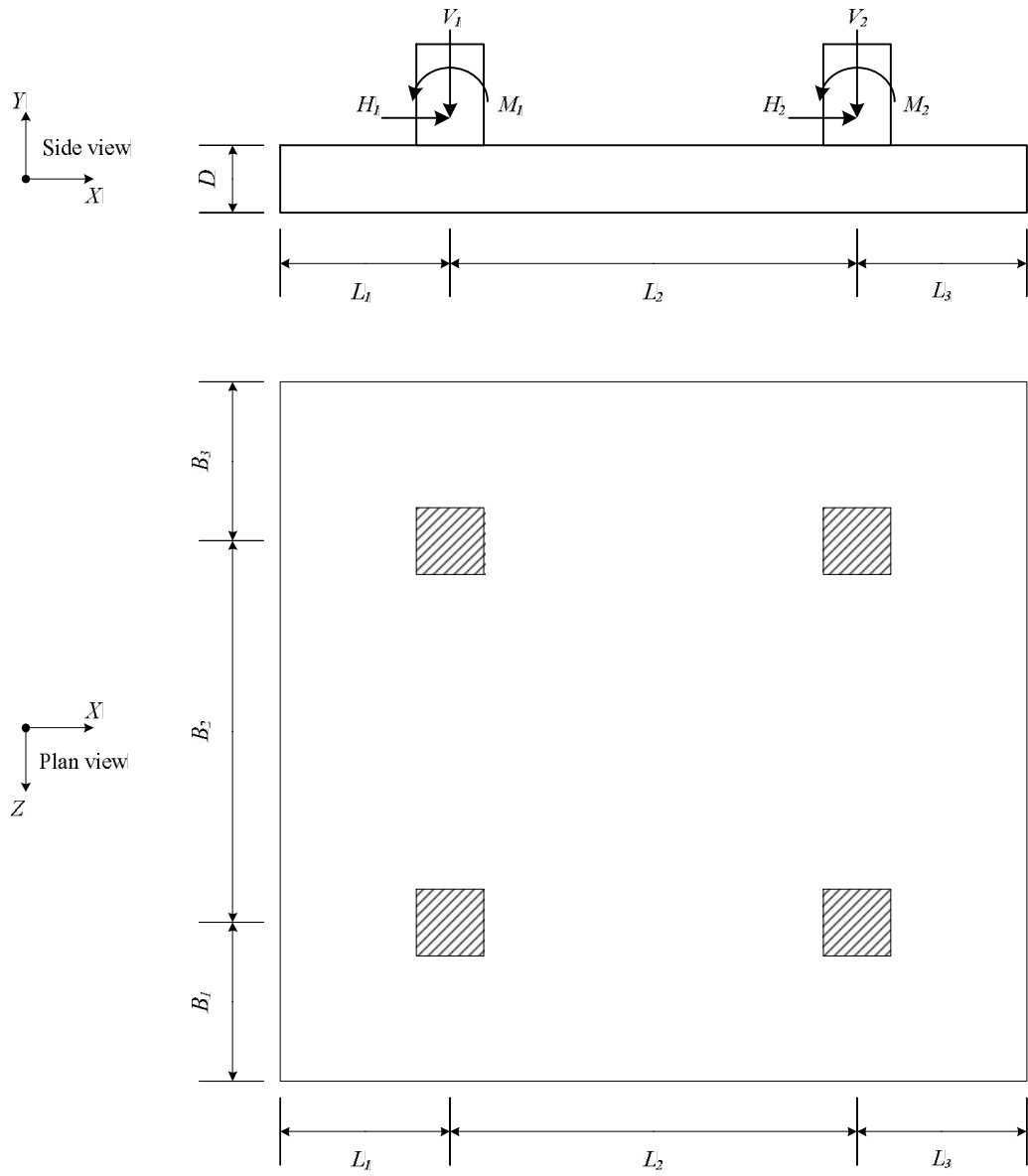


รูปที่ 4.16 ขนาดเริ่มต้นของฐานรากติดฐานร่วม

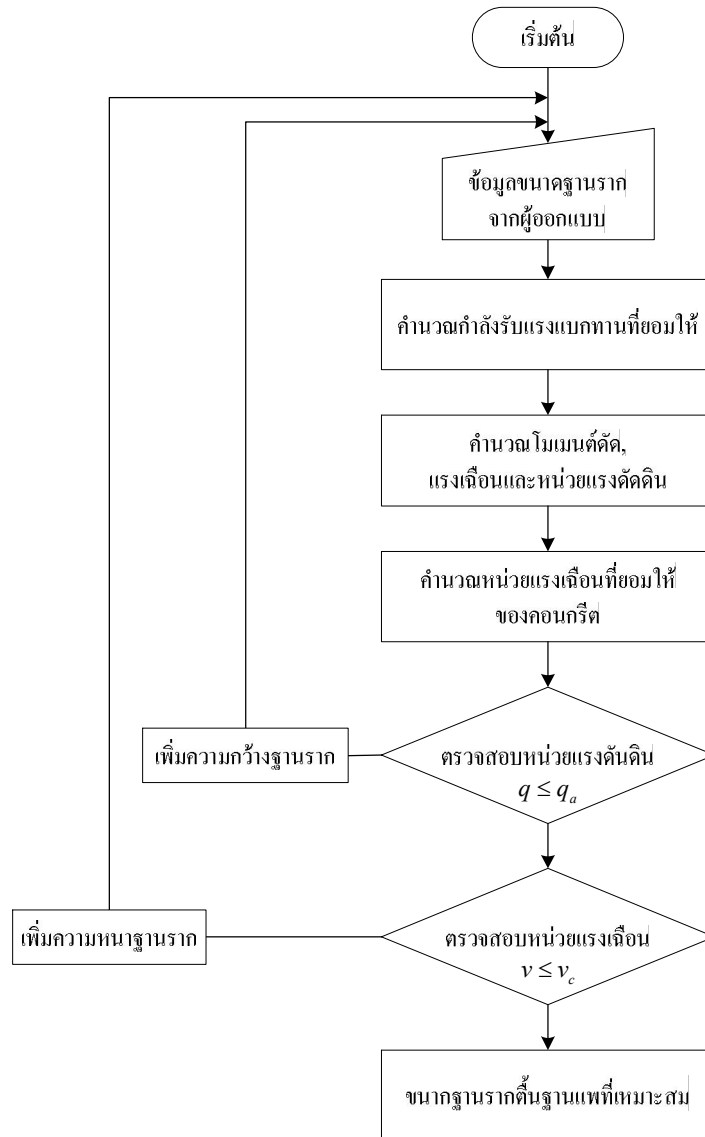


รูปที่ 4.17 แผนผังขั้นตอนการลองผิดลองถูกเพื่อหาขนาดฐานรากฐานร่วมที่เหมาะสม

การออกแบบฐานรากตื้นฐานแพต้องป้อนขนาดของฐานราก และตำแหน่งน้ำหนักรบรรทุกตามรูปที่ 4.18 โปรแกรมจะคำนวณความหนาที่เหมาะสมสำหรับน้ำหนักรบรรทุกออกแบบและข้อมูลชั้นดิน ขั้นตอนการลองผิดลองถูกเพื่อหาความลึกของฐานรากตื้นฐานรากแพที่เหมาะสมแสดงตามรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.18 ขนาดเริ่มต้นของฐานรากค้ำฐานแพ



รูปที่ 4.19 แผนผังขั้นตอนการลองผิดลองถูกเพื่อหาความลึกของฐานรากค้ดฐานแพท้ที่เหมาะสม

#### 4.5 ผลการตรวจสอบความถูกต้องในการคำนวณของโปรแกรม SUTFoundation

ผลการตรวจสอบความถูกต้องในการคำนวณกับโจทย์พื้นฐาน (ดู ภาคผนวก ค) โดยเปรียบเทียบกับโปรแกรมอื่นๆ ดังได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 3.6 แสดงให้เห็นว่าโปรแกรม SUTFoundation ให้ผลการคำนวณที่ถูกต้อง (คำตอบอยู่ในช่วงคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ทางวิศวกรรม) และเมื่อเปรียบเทียบเวลาที่ต้องใช้เพื่อคำนวณตั้งแต่เริ่มต้นจนได้ขนาดและเหล็กเสริมของแผ่นฐานรากนั้น โปรแกรม SUTFoundation ใช้เวลาคำนวณออกเบบน้อยกว่าโปรแกรมอื่นๆ และการคำนวณด้วยมือมาก

โปรแกรม SUTFoundation จึงมีความน่าเชื่อถือและมีประสิทธิภาพสูงในการนำมาใช้วิเคราะห์และออกแบบฐานราก

## บทที่ 5

### บทสรุป

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้พัฒนาแบบจำลอง Simplified Frame-Pile ที่สามารถวิเคราะห์หาโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนในฐานรากเสาเข็มแล้วนำมาสร้างเป็นโปรแกรมช่วยวิเคราะห์และออกแบบฐานรากเสาเข็ม รวมทั้งพัฒนาโปรแกรมให้สามารถวิเคราะห์ออกแบบฐานรากซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

##### 5.1.1 แบบจำลอง Simplified Frame-Pile

ฐานรากเสาเข็มสามารถจำลองแผ่นฐานรากให้เป็น Grid และดินแทนด้วยสปริง สติฟเนสของ Grid ต้องปรับแก้ด้วยตัวคูณปรับแก้แรงบิด ( $\Omega = 0.55L_e / B_e$  สำหรับการยึดรั้งหัวเข็มแบบหมุนและ  $\Omega = 0.55L_e / B_e$  สำหรับการยึดรั้งหัวเข็มแบบยึดแน่น) แล้วสามารถนำไปใช้คำนวณการเปลี่ยนตำแหน่งและแรงภายในได้ค่าการทรุดตัวของแผ่นฐานรากใกล้เคียงกับคำตอบแม่นยำตรงตามทฤษฎียึดหยุ่น และเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แล้วแบบจำลอง SFP สามารถให้คำตอบเข้าใกล้คำตอบแม่นยำตรงได้รวดเร็วกว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังนั้นแบบจำลอง SFP จึงเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ในขั้นตอนการลองผิดลองถูกของโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์และออกแบบฐานรากเสาเข็ม

##### 5.1.2 โปรแกรมวิเคราะห์และออกแบบฐานรากเสาเข็ม

เมื่อนำแบบจำลอง Simplified Frame-Pile (SFP) ที่ได้นำเสนอและตรวจสอบความสามารถในงานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการคำนวณที่ถูกต้องทั้งฐานรากเสาเข็มที่รับน้ำหนักแฉกและรับน้ำหนักบรรทุกทุกแนวราบดังที่ได้นำเสนอการตรวจสอบแล้ว อีกทั้งผลคำตอบที่ได้ยังพอเพียงต่อการนำไปใช้ออกแบบขนาดและเหล็กเสริมในแผ่นฐานรากด้วย จากผลการศึกษาหาตัวคูณปรับแก้แรงบิดสำหรับการสร้างเมตริกซ์สติฟเนสของแบบจำลอง SFP ที่ให้คำตอบใกล้เคียงกับคำตอบแม่นยำตรงตามทฤษฎียึดหยุ่นมากที่สุด มีค่าตามสมการ  $\Omega = 0.85L_e / B_e$  โดยการทรุดตัวของแผ่นฐานรากเสาเข็มและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในฐานรากที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงการคำนวณโดยวิธีเชิงตัวเลขอื่นๆ ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มโดยแบบจำลองที่ได้นำเสนอนี้จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในขั้นตอนการลองผิดลองถูกของการวิเคราะห์และออกแบบฐานรากเสาเข็ม

### 5.1.3 โปรแกรมวิเคราะห์และออกแบบฐานรากแบบอื่นๆ

โปรแกรม SUTFoundation ที่ได้พัฒนาขึ้นได้รับการตรวจสอบการคำนวณให้เห็นแล้วว่ามีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือเพียงพอที่จะนำไปใช้ออกแบบได้จริง ซึ่งโปรแกรมนี้สามารถวิเคราะห์และออกแบบฐานรากโดยลองผิดลองถูกหาขนาดที่เหมาะสมได้โดยอัตโนมัติ เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการคำนวณของโปรแกรม SUTFoundation กับโปรแกรมด้านวิศวกรรมปฐพีอื่นๆ ดังแสดงดังตารางที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าโปรแกรม SUTFoundation ได้รวมความสามารถของโปรแกรมวิเคราะห์และออกแบบฐานรากทั่วไปไว้ในโปรแกรมเดียว

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

### 5.2.1 ข้อเสนอแนะเพื่อใช้ผลวิจัย

แบบจำลอง SFP ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้อยู่ภายใต้สมมติฐานของน้ำหนักบรรทุกในช่วงใช้งาน และสมมติฐานของการวิเคราะห์เบื้องต้นดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.2.1 การนำไปใช้ แบบจำลอง SFP จะให้คำตอบที่ดีในช่วงการเคลื่อนของเสาเข็มอยู่ในขอบเขตมาตรฐาน (การเคลื่อนที่น้อยในช่วงยึดหย่อน) โปรแกรม SUTFoundation

### 5.2.2 ข้อเสนอแนะเพื่อวิจัยเพิ่ม

วิธีไฟไนต์คริตที่ได้ปรับปรุงขึ้นจากการวิจัยนี้สามารถนำมาพัฒนาสร้างเป็น Pattern สำหรับรองรับการออกแบบฐานรากได้นอกเหนือจาก Pattern ของฐานรากต้นที่มีใน SUTFoundation เพื่อใช้ออกแบบฐานรากต้นพิเศษอื่นๆ ส่วนวิธีการวิเคราะห์ฐานรากเสาเข็มก็สามารถนำมาพัฒนาสร้าง pattern สำหรับฐานรากเสาเข็มรูปร่างพิเศษอื่นได้

ตารางที่ 5.1 ความสามารถของโปรแกรม SUT-Foundation เปรียบเทียบกับโปรแกรมอื่นๆ

	SUT-Foundation	Allpile v.3	LPILE	COM624P	DRIVEN	STAAD.foundation	CE.CA.P	GROUP	SHAFT	CBEAR	GEAR
<b>ออกแบบฐานรากแผ่</b>	<b>O</b>	X	X	X	X	n/a	<b>O</b>	X	X	<b>O</b>	X
- ฐานรากสี่เหลี่ยมและฐานราก แถบ	<b>O</b>	-	-	-	-	-	<b>O</b>	-	-	<b>O</b>	-
- ฐานรากวงกลม	<b>O</b>	-	-	-	-	-	<b>O</b>	-	-	X	-
- ฐานรากเอียง	<b>O</b>	-	-	-	-	-	<b>O</b>	-	-	<b>O</b>	-
- น้ำหนักเบื้องต้น	<b>O</b>	-	-	-	-	-	<b>O</b>	-	-	<b>O</b>	-
- น้ำหนักเอียง	<b>O</b>	-	-	-	-	-	<b>O</b>	-	-	<b>O</b>	-
- คำนวณเหนือฐานรากเอียง	<b>O</b>	-	-	-	-	-	<b>O</b>	-	-	<b>O</b>	-
- ชั้นดินหลายชั้น	<b>O</b>	-	-	-	-	-	<b>O</b>	-	-	<b>O</b>	-
- ค้นหา FS ของฐานราก	<b>O</b>	-	-	-	-	-	X	-	-	X	-
- ออกแบบโครงสร้างฐานราก	<b>O</b>	-	-	-	-	-	X	-	-	X	-
<b>ออกแบบฐานรากเสาเข็ม</b>	<b>O</b>	<b>O</b>	<b>O</b>	<b>O</b>	<b>O</b>	n/a	<b>O</b>	<b>O</b>	<b>O</b>	X	<b>O</b>
- น้ำหนักแฉัด	<b>O</b>	<b>O</b>	X	X	<b>O</b>	-	<b>O</b>	<b>O</b>	<b>O</b>	-	X
- น้ำหนักค้ำข้าง	<b>O</b>	<b>O</b>	<b>O</b>	<b>O</b>	X	-	X	<b>O</b>	X	-	X
- เสาเข็มเดี่ยว	<b>O</b>	<b>O</b>	<b>O</b>	<b>O</b>	<b>O</b>	-	<b>O</b>	X	<b>O</b>	-	X
- เสาเข็มกลุ่ม	<b>O</b>	<b>O</b>	X	X	X	-	X	<b>O</b>	X	-	X
- ค่าจากผล Pile load test	<b>O</b>	X	X	X	X	-	X	X	X	-	X
- ออกแบบโครงสร้างฐานราก	<b>O</b>	X	X	X	X	-	X	X	X	-	<b>O</b>
ระบบปฏิบัติการ	W	W	W	D	W	W	W	W	W	D	W
ราคา (S.U.S.)	Free	750	850	Free	Free	2,000	n/a	1,450	750	Free	n/a

หมายเหตุ O หมายถึง โปรแกรมสามารถทำได้

X หมายถึง โปรแกรมไม่สามารถทำได้

W หมายถึง โปรแกรมที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์

D หมายถึง โปรแกรมทำงานบนระบบปฏิบัติการดอส

ราคาในท้องตลาดอ้างอิงจาก <http://www.civiltech.com/software/all-pile>



## รายการอ้างอิง

- ประสงค์ ธาราไชย และคณะ. (2546). **รายละเอียดเหล็กเสริมงานคอนกรีต**. พิมพ์ครั้งที่ 13. กรุงเทพฯ: ส.เอเชียเพรส.
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (2543). **มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง**. พิมพ์ครั้งที่ 3.
- วินิต ช่อวิเชียร. (2542a). **การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีกำลัง**. พิมพ์ครั้งที่ 2.
- อลงกรณ์ ละม่อม. (2544). **การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีสติฟเนสตรง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- American Concrete Institute (2002). **Build Code Requirements for Structure Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02)**.
- Alpan, I. (1964). Estimating the settlement of foundations on sand. **Civil Engineering and Public Works Review**. 59: 1415 – 1418.
- API. (1984). **Recommended Practice for planning, Design and Constructing Fixed offshore Platforms**. (14<sup>th</sup> ed). Dallas: American Petroleum Institute.
- Berezantzev, V.G., Khistoforov, V., and Golubkov, V. (1961). Load bearing capacity and deformation of pile foundation. **Proc.5<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering 2**: 11 - 15.
- Bjerrum, L. (1974). Problem of soil mechanics and construction on soft clays. **Norwegian Geotechnical Institute Publications**. 110. Oslo
- Bowles, J.W. (1979). **Physical and Geotechnical Properties of Soils**. New York: McGraw Hill.
- Bowles, J.W. (1988). **Foundation Analysis and Design**. New York: McGraw Hill.
- Broms, B.B. (1965). Design of laterally loaded piles. **Journal of the soil mechanics and foundations division**. 91: 79 – 99.
- Brown, J.D., and Meyerhof, G.G. (1969). Experimental study of bearing capacity in layered clays. **Proceeding of the 7<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering 2**: 45 – 51.

- Budha, M. (2000). **Soil Mechanics and Foundations**. John Wiley & Sons.
- Burland, J.B. (1973). Shaft friction of pile in clays – a simple fundamental approach. **Ground Engineering**. 6 (3): 30 - 42.
- Butler, H.D., and Hoy, H.E. (1977). User manual for the texas quick-load method for foundation load testing. **Report No. FHWA RD-IR 77 – 8**.
- Christian, J.T., and Carrier III. (1978). Janbu, Bjerrum and Kjaernsli's chart reinterpreted. **Canadian Geotechnical Journal**.
- Canadian Geotechnical Society. (1985). **Canadian foundation engineering manual**. (2<sup>nd</sup> ed.).
- Clayton, C.R.I. (1990). SPT energy transmission: theory, measurement and significance. **Ground Engineering**. 23 (10): 35 – 43.
- Das, B.M. (2004). **Principals of foundation engineering**. (5<sup>th</sup> ed.). CA: Thomson Learning.
- DeBeer, E.E. (1970). Experimental determination of shape factor and bearing capacity factor of sand. **Geotechnique**. 20 (4): 387 - 411.
- DeBeer, E.E., and Vesic, A.S. (1958). Etude experimentale de la capacite portante du sable sous des foundations directes etablies en surface. **Ann. Trav. Publics Belg**. 59 (3).
- Decourt, L. (1982). Prediction of bearing capacity of piles based on exclusively on N value of the SPT. **Proc. ESOPT II** 1: 29 - 34.
- Decourt, L. (1995). Prediction of load-settlement relationship for foundation on the basis of the SPT-N. **Ciclo de Conferencias Internationale** (85 – 104).
- Fox, E.N. (1948). The mean elastic settlement of a uniformly loaded area at a depth below the ground surface. **Proceedings of 2<sup>rd</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**. 1: 129 – 132.
- Giround, J.P. (1968). Settlement of a linearly-loaded rectangular area. **Proceeding**, ASCE. 94 (SM4).
- Hansen, J.B. (1963). Hyperbolic stress – strain response: cohesive soils. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**. 89 (SM4): 241 – 242.
- Hansen, J.B. (1970). A revised and extended formula for bearing capacity. **Danish Geotechnical Institute Bulletin**. 28. Copenhagen.
- Hetyenyi. (1946). **Beams on Elastic Foundations**. University of Michigan Press.

- Holmberg, S. (1970). Load testing in bangkok region of piles embedded in clay”, **Geotechnical Engineering Journal**. Southeast Asian Society of Soil Engineering. 1: 61 – 78.
- Hough, B.K. (1957). **Basic Soil Engineering**. New York: Ronald Publication.
- Janbu, N., Bjerrum, L., and Kjaernsli, B. (1956). Veiledring ved losning av fundamentering soppgever. **Norwegian Geotechnical Institute Publication**. 6. Osalo.
- Koppula, S.D. (1981). Statistical estimation of compression index. **Geotechnical Testing Journal**, ASTM. 4 (2): 68 – 73.
- Lunne, T., and Eide, O. (1976). Correlations between cone resistance and vane shear strength in some Scandinavian soft to medium stiff clays. **Canadian Geotechnical Journal**. 13 (4): 430 - 441.
- Liao, S., and Whitman, R.V. (1986). Overburden correction factor for SPT in sand”, **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE. 112 (3): 373 - 377.
- Meyerhof, G.G. (1953). The bearing capacity of foundation under eccentric and inclined load. **Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**. 1: 440 - 445.
- Meyerhof, G.G. (1956). Penetration test and bearing capacity of Cohesionless soils. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division**, ASCE. 82 (1): 1 - 19.
- Meyerhof, G.G. (1963). Some recent research on the bearing capacity of foundation on layered soil under inclined load. **Canadian Geotechnical Journal**. 15 (4): 565 - 572.
- Meyerhof, G.G., and Hanna, A.M. (1978). Ultimate bearing capacity of foundation on layered soil under inclined load. **Canadian Geotechnical Journal**. 15(4): 565 – 572.
- Miller, D.A., and Lutenegeger, A.J. (1997). Influence of pile plugging on skin friction in overconsolidated clay. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE. 123: 525 - 533.
- Nagaraj, T.S., and Srinivasa Murthy, B.R. (1986). A critical reappraisal of compression index equations. **Geotechnique**. 36 (1): 27 - 32.
- Paikowsky, S.G., and Whitman, R.V. (1990). The effect of plugging on pile performance and design. **Canadian Geotechnical Journal**. 27: 429 - 440.

- Pan, J.L., Goh, A.T.C., Wong, K.S., and Teh, C.I. (2002). Ultimate Soil Pressures for piles subjected to lateral soil movements. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE. 128 (6): 530 - 535.
- Peck, R.B., Hanson, W.E., and Thornburn, T.H. (1974). **Foundation Engineering**. New York: John Wiley.
- Poulos, H.G. (2000). Pile Raft Foundation – Design and Application. **1<sup>st</sup> Athenian Geotechnical Lecture. Athen**. Hellenic Geotechnical Society.
- Poulos, H.G. (2001). Chapter 10: Pile foundation. **Geotechnical and Geoenvironment Handbook**. Kluwer Academic Publisher.
- Prandtl, L. (1921). Über die Eindringungsfestigkeit (Harte) plastischer baustoffe und die festigkeit von schneiden. **Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik**. 1 (1): 15 – 20.
- Randolph, M. F. (1994). Design Methods for Pile Group and Piled Rafts, **Proceeding of 13th ICSMFE**, Vol. 5, 61-82.
- Reese, L.C. (1986). Behavior of piles and pile groups under lateral load. **FHWA-RD-85-106**.
- Robertson, P.K., and Campanella, R.G. (1983). Interpretation of cone penetration tests: Part 1 and 2. **Canadian Geotechnical Journal**. 20: 718 - 745.
- Schultze, E., and Horn, A. (1967). The base friction for horizontally loaded footing in sand and gravel. **Geotechnique**. 17 (4): 329 - 347.
- Schultze, E., and Sherif, G. (1973). Prediction of the settlements from evaluated settlement observations for sand. **Proceedings Eighth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering** 1: 225 – 230.
- Schmertmann, J.H., Hartman, J.P., and Brown, P.R. (1978). Improved strain influence factor diagrams. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**. 104: 1131 – 1135.
- Skempton, A.W. (1944). Notes on compressibility of clays. **Qly, J. Geo Soc**. 119 – 135.
- Skempton, A.W. (1951). The bearing capacity of clays. **Proc. Building Research Congress** 1: 180 - 189. London.
- Skempton, A.W. (1966). Summing-up proceeding symposium on large bored piles. **I.C.E.** 155 - 157. London.

- Stas, C.V., and Kulhawy, F.H. (1984). Critical evaluation of design method for foundations under axial uplift and compression loading. **EPRI Report EL-3771**. Cornell University.
- Steinbrenner, W. (1934). Tafeln zur setzungsberechnung. **Die Strasse**. 1: 121 – 124.
- Terzaghi, K. (1925). **Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer**. Vienna: Deutichke.
- Terzaghi, K. (1943). **Theoretical Soil Mechanics**. New York: John Wiley.
- Terzaghi, K., and Peck, R.B. (1967). **Soil Mechanics in Engineering Practice**. (2<sup>nd</sup> Ed.). New York :John Wiley.
- Tomlinson, M.J. (1957). The adhesion factor of pile driven in clay soils. **Proc. 4<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering** 2: 66 - 71.
- Trofimekov, J.G. (1974). General report: Eastern Europe. **Proceedings of European Symposium of Penetration Testing** 2.1: 24 – 39. Stockholm, Sweden.
- U.S. Navy (1982). Soil mechanics. **NAVAC DM-7.1** .
- U.S. Army Corps of Engineering (1990). Engineering and design settlement analysis. **Engineering manual 1110-1-1904**.
- U.S. Army Corps of Engineering (1992). Engineering and design bearing capacity of soil. **Engineering manual 1110-1-1905**.
- Vesic, A.S. (1963). Bearing capacity of deep foundations in sand. **Highway Research Record 39**: 112 – 153. Washington, DC: Highway Research Board, National Academy of Sciences.
- Vesic, A.S. (1973). Analysis of ultimate loads on shallow foundation. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE**. 99 (SM1): 45 - 73.
- Vesic, A.S. (1975). Bearing capacity of shallow foundations. **Foundation Engineering Handbook**. 121 – 147.
- Vesic, A.S. (1977). Design of Pile Foundations. **National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice** 42. Washington, DC: Transportation Research Board, National Research Council.
- Winkler, E. (1876). **Die Lehre von der Elastizitat und Festigkeit**. Verlag. 182.

**ภาคผนวก ก.**

**หลักการ วิธีและสมการที่ใช้ในโปรแกรม SUTFoundation**

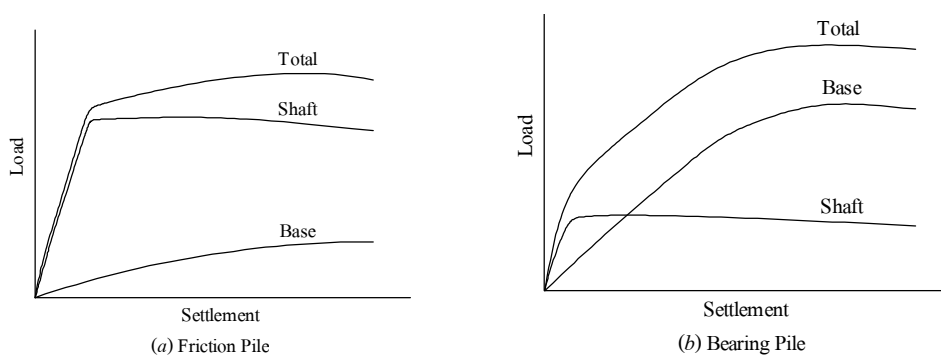
## ก.1 มาตรฐานและสมการสำหรับออกแบบฐานรากเสาเข็ม

### ก.1.1 มาตรฐานการประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็ม

กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็ม ประกอบด้วย แรงเสียดทานประลัยระหว่างดินกับเสาเข็ม (skin friction) และแรงแบกทานประลัยที่ปลายเสาเข็ม (end bearing) โดยอาศัยวิธีสถิติศาสตร์ (U.S. Army, 1992) กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มคำนวณได้ตามสมการที่ (ก.1)

$$P_u = P_{su} + P_{bu} \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ  $P_u$  คือ น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยสุทธิของเสาเข็ม,  $P_{su}$  คือ แรงเสียดทานประลัยระหว่างดินกับเสาเข็ม และ  $P_{bu}$  คือ น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยที่ปลายเสาเข็ม เนื่องจากดินเป็นวัสดุที่มีสติฟเนสต่ำ ดังนั้นจำเป็นต้องใช้อัตราส่วนปลอดภัยที่สูงมากในการออกแบบเพื่อป้องกันการทรุดตัวที่มากเกินไป อัตราส่วนปลอดภัยที่ใช้มีค่าแตกต่างกันระหว่าง  $P_{su}$  และ  $P_{bu}$  เนื่องจากแรงเสียดทานประลัยของเสาเข็ม และดินสามารถเกิดได้อย่างเต็มที่เมื่อเกิดการเคลื่อนตัวเพียงแค่ประมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ขณะที่กำลังรับน้ำหนักประลัยที่ปลายเสาเข็มจะเกิดขึ้นได้อย่างเต็มที่เมื่อเกิดการเคลื่อนตัวประมาณ 15 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ ของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม (Whitaker and Cooke, 1966) ดังแสดงในรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและค่าทรุดตัวของเสาเข็ม

ดังนั้น การออกแบบน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ของเสาเข็มเดี่ยวจึงมักใช้อัตราส่วนปลอดภัยเท่ากับ 1.5 และ 3.0 สำหรับ  $P_{su}$  และ  $P_{bu}$  ตามลำดับ (Burland, 1973) ตามสมการที่ (ก.2)

$$P_{all} = \frac{P_{su}}{1.5} + \frac{P_{bu}}{3} \quad (\text{ก.2})$$

เมื่อ  $P_{all}$  คือ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ของเสาเข็มเดี่ยว นอกจากนี้ น้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ของเสาเข็มควรมีค่าไม่เกินกว่าครึ่งหนึ่งของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยสุทธิของเสาเข็มในกรณีที่มีผลทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในสนาม (Burland, 1973) ตามสมการที่ (ก.3)

$$P_{all} = \frac{P_u}{2} \quad (\text{ก.3})$$

การออกแบบเสาเข็มรับแรงกด (compression pile) กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ของเสาเข็มจะเป็นค่าน้อยที่สุดที่หาได้จากสมการ (ก.2) หรือ (ก.3) แต่การออกแบบเสาเข็มรับแรงดึงจะพิจารณาเฉพาะค่าแรงเสียดทานรอบเสาเข็มกับน้ำหนักของเสาเข็มเท่านั้น ดังนั้น กำลังรับแรงดึงประลัยของเสาเข็ม (U.S. Army Corps of Engineers, 1992) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (ก.4)

$$P_{u(tension)} = P_{su} + W_p \quad (\text{ก.4})$$

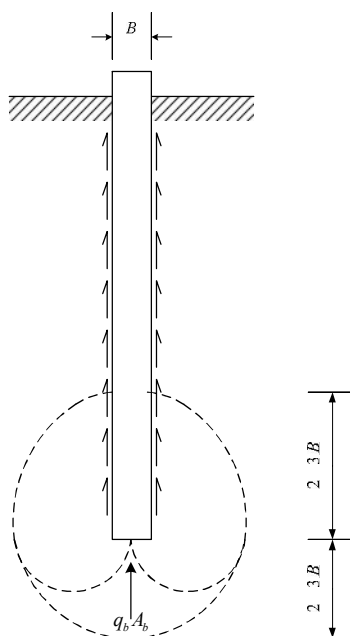
เมื่อ  $P_{u(tension)}$  คือ กำลังรับแรงดึงประลัยของเสาเข็ม,  $P_{su}$  คือ กำลังรับแรงดึงเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างเสาเข็มกับดิน และ  $W_p$  คือ น้ำหนักของเสาเข็ม ส่วนการคำนวณกำลังรับแรงดึงที่ยอมให้คำนวณได้ตามสมการที่ (ก.5) โดยอาจใช้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดของเสาเข็มได้ (U.S. Army Corps of Engineers, 1992) หรือใช้ค่าประมาณ 1.8 – 2.0

$$P_{all(tension)} = \frac{P_{su}}{FS_s} + W_p \quad (\text{ก.5})$$

### ก.1.2 การประมาณแรงแบกทานประลัยที่ปลายเสาเข็ม

เนื่องจากกลไกการวิบัติของดินรอบเสาเข็มมีลักษณะต่างจากฐานรากตื้นดังแสดงในรูปที่ ก.2 ตัวคูณกำลังรับแรงแบกทานประลัยสำหรับเสาเข็มจึงต่างจากฐานรากตื้น





รูปที่ ก.2 กลไกการวิบัติของดินรอบเสาเข็ม

แรงแบกทานประลัยที่ปลายเสาเข็มคำนวณได้จากผลคูณของกำลังรับแรงแบกทานประลัยที่ปลายเสาเข็ม ( $q_b$ ) กับพื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม ( $A_b$ ) ตามสมการที่ (ก.6)

$$P_{ub} = q_b A_b \quad (\text{ก.6})$$

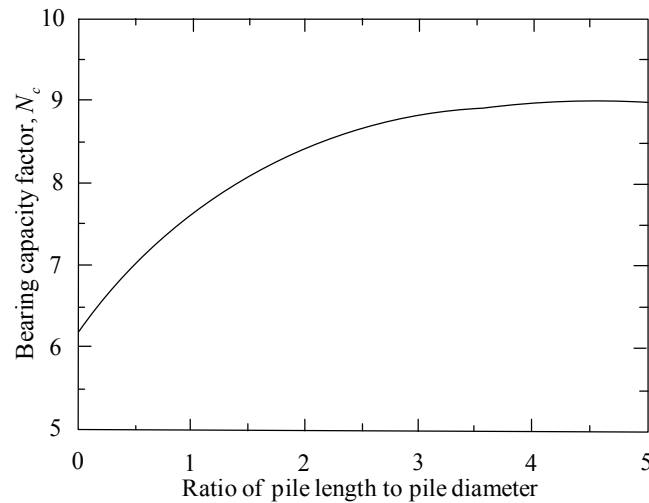
เสาเข็มที่มีปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวจะคำนวณแบบหน่วยแรงรวม ค่าหน่วยแรงเหนียว ( $c$ ) มีค่าเท่ากับกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $S_u$ ) โดยที่มุมเสียดทานภายในมีค่าเท่ากับศูนย์ ( $\phi = 0$ ) กำลังรับแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มคำนวณได้ตามสมการที่ (ก.7)

$$q_{b(\text{clay})} = S_u N_c \quad (\text{ก.7})$$

เมื่อ  $S_u$  คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ปลายเสาเข็ม และ  $N_c$  คือ ตัวคูณกำลังรับแรงแบกทานสำหรับเสาเข็ม

Skempton (1951) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง  $N_c$  กับอัตราส่วนความยาวต่อขนาดของเสาเข็มไว้ดังรูปที่ ก.3 โดยค่า  $N_c$  จะมีค่าเท่ากับ 9 สำหรับเสาเข็มที่มีความยาวมากเมื่อ

เปรียบเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม ค่า  $N_c$  จะมีค่าลดลงตามลำดับเมื่อค่าอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มลดลง



รูปที่ ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $N_c$  กับอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (Skempton, 1951)

เสาเข็มเจาะระบบเปียกซึ่งใช้เบนโตไนต์ในขั้นตอนการติดตั้ง เบนโตไนต์ที่ใช้อาจตกค้างอยู่ที่ก้นหลุมเจาะทำให้กำลังรับแรงแบกทานประลัยของเสาเข็มเจาะลดลง Skempton (1966) แนะนำสมการคำนวณกำลังรับแรงแบกทานประลัยของเสาเข็มเจาะไว้ตามสมการที่ (ก.8)

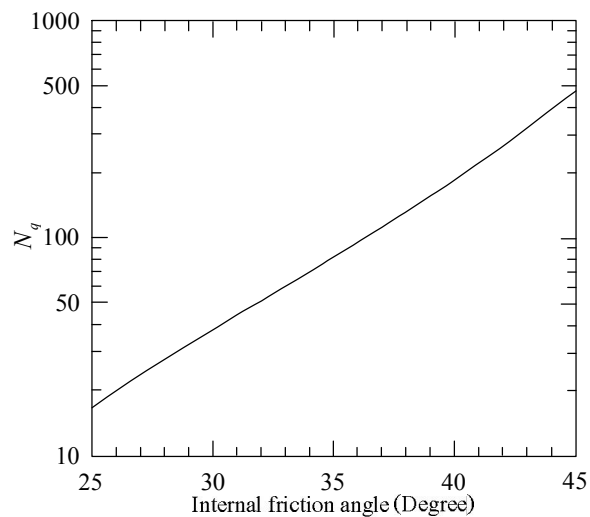
$$q_{b(\text{clay})} = 9wS_u \quad (\text{ก.8})$$

เมื่อ  $S_u$  คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินที่ปลายเสาเข็ม,  $w$  คือ ตัวเลขปรับลดกำลัง มีค่าเท่ากับ 0.8 และ 0.75 สำหรับเสาเข็มที่มีขนาดเล็กกว่า และใหญ่กว่า 1.0 เมตร ตามลำดับ เสาเข็มที่ปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายสามารถคำนวณกำลังรับแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มได้ตามสมการที่ (ก.9)

$$q_{b(\text{sand})} = \sigma'_{vb} N_q \quad (\text{ก.9})$$

เมื่อ  $N_q$  คือ ตัวคูณกำลังรับแรงแบกทานสำหรับเสาเข็มในชั้นทราย (Berezantzev et al., 1961) แสดงดังรูปที่ ก.4 และ  $\sigma'_{vb}$  คือ หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งที่ปลายเสาเข็ม

Poulos (2001) ได้แนะนำการใช้รูปที่ ก.4 ว่าค่า  $\phi'$  สำหรับเสาเข็มตอกควรมีค่าเท่ากับ  $(\phi'_0 + 40^\circ)/2$  องศา ขณะที่สำหรับเข็มเจาะ ควรมีค่าเท่ากับ  $\phi'_0 - 3^\circ$  เมื่อ  $\phi'$  คือ มุมเสียดทานภายในของทรายที่ระดับฐานรากก่อนที่จะมีการติดตั้งเสาเข็ม



รูปที่ ก.4 การเปลี่ยนแปลงของ  $N_q$  กับมุมเสียดทานภายใน (after Berezantzev et al., 1961)

กำลังรับแรงแบกทานประลัยในชั้นทรายที่คำนวณได้มักมีค่าสูงเกินความเป็นจริง จึงจำเป็นต้องจำกัดขอบเขตของค่ากำลังรับแรงแบกทานและหน่วยแรงฝัง ตามค่าจำกัดในตารางที่ ก.1 ซึ่งขอบเขตนี้ขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชั้นทราย

ตารางที่ ก.1 ขอบเขตของค่าหน่วยแรงที่ผิวและปลายเสาเข็มที่อยู่ในชั้นทราย (API, 1984)

ชนิดของดิน	$f_{sl}$ (ton/m <sup>2</sup> )	$q_{bl}$ (ton/m <sup>2</sup> )
ทรายหลวมถึงหลวมมาก และดินตะกอนหลวม	4.8	190
ดินตะกอนแน่น ทรายหลวม ทราย/ดินตะกอนแน่นปานกลาง	6.7	290
ดินตะกอนแน่น ทรายแน่นปานกลาง ทราย/ดินตะกอนแน่น	8.0	480
ทรายแน่น ทราย/ดินตะกอนแน่นมาก	9.6	960
กรวดแน่น ทรายแน่นมาก	11.5	1200

### ก.1.3 การประมาณแรงเสียดทานประลัครอบเสาเข็ม

แรงเสียดทานประลัครอบเสาเข็มคำนวณได้จากผลคูณของแรงเสียดทานระหว่างชั้นดินกับผิวเสาเข็ม ( $c_s$ ) และพื้นที่ผิวรอบเสาเข็ม ( $A_p$ ) ตามสมการที่ (ก.10)

$$P_{us} = c_s A_p \quad (\text{ก.10})$$

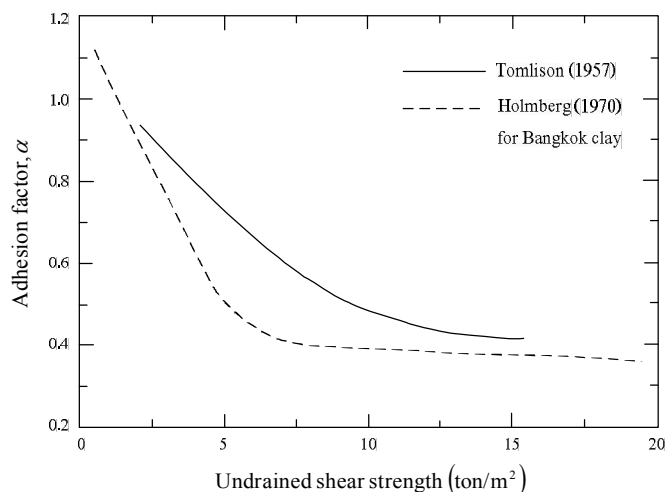
สมการทั่วไปสำหรับคำนวณแรงเสียดทานสำหรับดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำแสดงตามสมการที่ (ก.11)

$$c_{s(\text{clay})} = \alpha S_u \quad (\text{ก.11})$$

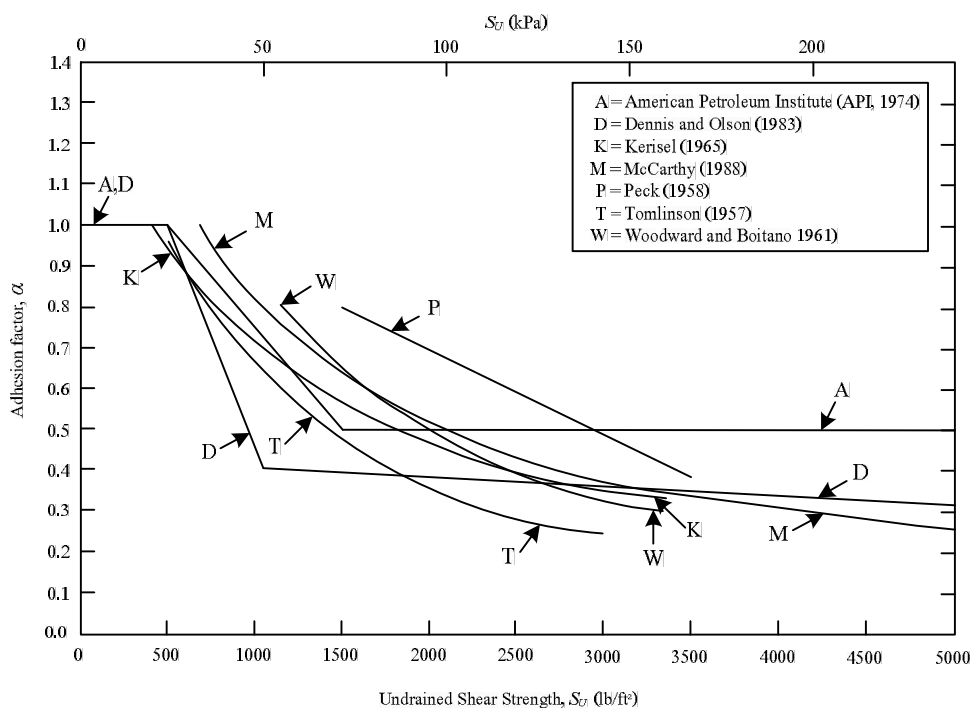
เมื่อ  $S_u$  คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินรอบเสาเข็มและ  $\alpha$  คือ แฟกเตอร์ยึดเกาะ (adhesion factor)

การตอกเสาเข็มลงในชั้นดินเหนียวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของกำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน ซึ่งมีผลอย่างมากต่อแรงยึดเกาะระหว่างเสาเข็ม และดิน Tomlinson (1957) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของแฟกเตอร์ยึดเกาะกับกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินแสดงดังรูปที่ ก.5 และรูปนี้ยังแสดงความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Holmberg (1970) สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯไว้ด้วย นอกจากนี้ Vesic (1977) ได้รวบรวมค่าของแฟกเตอร์ยึดเกาะที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มในสนามแบบน้ำหนักบรรทุกสถิต (static pile load test) ของนักวิจัยหลายท่านไว้แสดงดังรูปที่ ก.6

การตอกเสาเข็มลงในชั้นดินเหนียวแข็งถึงแข็งมาก (stiff to very stiff clay) จะก่อให้เกิดช่องว่างที่ส่วนบนเสาเข็มโดยรอบ ดังนั้น จึงไม่สามารถสมมติให้แรงเสียดทานเกิดตลอดความยาวของเสาเข็มได้ การออกแบบอาจใช้แฟกเตอร์แรงยึดเกาะเท่ากับ 0.4 สำหรับเสาเข็มที่มีความยาวระหว่าง 8 ถึง 20 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง ส่วนเสาเข็มที่ยาวกว่า 20 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางใช้แฟกเตอร์ดังแสดงในรูปที่ ก.5 และ ก.6 สำหรับเสาเข็มเจาะ Skempton (1966) แนะนำให้ใช้ค่าแฟกเตอร์แรงยึดเกาะเท่ากับ 0.45 โดยไม่แปรผันตามค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ



รูปที่ ก.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $S_u$  กับ  $\alpha$  (Tomlinson, 1957; Holmberg, 1970)



รูปที่ ก.6 ค่า  $\alpha$  ที่ได้จากการทดสอบกำลังเสาเข็ม (after Vesic, 1977)

การคำนวณแรงเสียดทานในชั้นทรายต้องคำนวณในรูปแบบหน่วยแรงประสิทธิผล  
ตามวิธี  $\beta$ -method โดยสมการทั่วไปเป็นดังนี้

$$c_{s(sand)} = K\sigma'_{vs} \tan \delta' \quad (\text{ก.12})$$

เมื่อ  $\sigma'_{vs}$  คือ หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งเฉลี่ยตลอดความยาวเสาเข็ม,  $\delta'$  คือ มุมเสียดทานระหว่างเสาเข็ม และทราย หาได้ตามตารางที่ ก.2 ในพจน์ของ  $\phi'$  และ  $K$  คือ สัมประสิทธิ์ความดันดินด้านข้าง หาได้ตามตารางที่ ก.3 ในพจน์ของ  $K_0$

ตารางที่ ก.2 มุมเสียดทานระหว่างเสาเข็มและทราย (Stas and Kulhawy, 1984)

ผิวสัมผัส	$\delta' / \phi'$
ทราย/คอนกรีตผิวหยาบ	1.0
ทราย/คอนกรีตผิวเรียบ	0.8-1.0
ทราย/เหล็กผิวหยาบ	0.7-0.9
ทราย/เหล็กผิวเรียบ	0.5-0.7
ทราย/ไม้	0.8-0.9

ตารางที่ ก.3 สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง (Stas and Kulhawy, 1984)

ชนิดของเสาเข็ม และวิธีการติดตั้ง	$K / K_0$
เสาเข็มฉีดน้ำ (jetted pile)	0.5-0.7
เสาเข็มหล่อในที่ (cast-in-situ)	0.67-1.0
เสาเข็มตอกชนิดเคลื่อนตัวน้อย	0.75-1.25
เสาเข็มตอกชนิดเคลื่อนตัวมาก	1.0-2.0

#### ก.1.4 การวิเคราะห์แรงดูดลงของเสาเข็ม

Burland (1973) ได้เสนอการวิเคราะห์แรงดูดลงของเสาเข็ม (negative skin friction) ในชั้นดินอ่อนสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์หน่วยแรงประสิทธิผลตามสมการที่ (ก.13)

$$NF = \beta\sigma'_v\rho\Delta L \quad (\text{ก.13})$$

เมื่อ  $\beta$  คือ ตัวคูณประกอบ มีค่าตามตารางที่ ก.4,  $\sigma'_v$  คือ หน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ยเนื่องจากผลของน้ำหนักชั้นดิน (overburden) และดินถม,  $\rho$  คือ เส้นรอบรูปเสาเข็ม (perimeter of pile) และ  $\Delta L$  คือ ความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน

ตารางที่ ก.4 ความสัมพันธ์ของค่า  $\beta$  กับชนิดของดินสำหรับคำนวณแรงจุดของเสาเข็ม

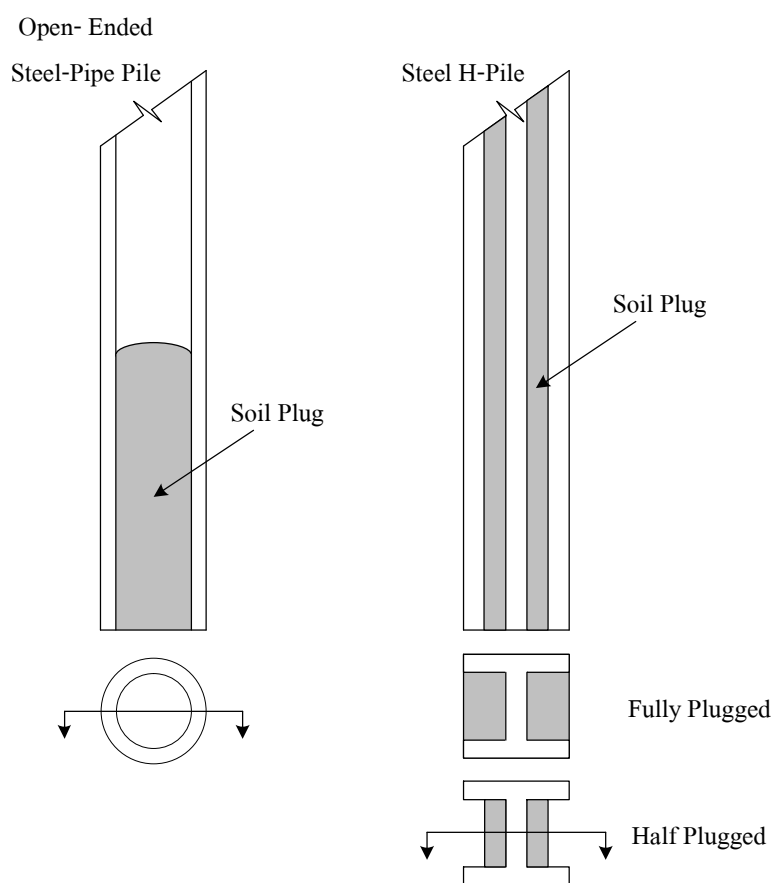
ชนิดของดิน	$\beta$
ดินเหนียวปนดินตะกอน	0.25
ดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ	0.20
ดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกปานกลาง	0.15
ดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง	0.10

### ก.1.5 การคำนวณพื้นที่หน้าตัด และพื้นที่รอบเสาเข็ม

การคำนวณน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มจำเป็นต้องประมาณแรงแบกทานประลัยที่ปลายเสาเข็ม และความฝืดประลัยระหว่างเสาเข็มกับดินจากค่าพื้นที่หน้าตัด ( $A_b$ ) และพื้นที่รอบเสาเข็ม ( $A_s$ ) วิธีการประมาณพื้นที่หน้าตัด และพื้นที่รอบเสาเข็มจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับรูปร่างของเสาเข็ม เสาเข็มหน้าตัดปิด (close - section pile) หรือเสาเข็มซึ่งผิวสัมผัสระหว่างดิน และเสาเข็มที่เกิดขึ้นตามแนวเส้นรอบรูปของเสาเข็มได้อย่างสมบูรณ์ เสาเข็มประเภทนี้ ได้แก่ เสาเข็มทุกชนิดยกเว้นเสาเข็มรูปตัวเอช (H-pile) และเสาเข็มกลวง (open - end pipe pile) การคำนวณพื้นที่หน้าตัด และพื้นที่ผิวของเสาเข็มหน้าตัดปิดหาได้จากขนาดของเสาเข็มจริงโดยตรง ส่วนเสาเข็มหน้าตัดเปิด (open-section pile) หรือเสาเข็มที่มีผิวสัมผัสระหว่างดิน และเสาไม่สมบูรณ์ เสาเข็มประเภทนี้ ได้แก่ เสาเข็มกลวง และเสาเข็มรูปตัวเอช เสาเข็มประเภทนี้เมื่อถูกตอกลงในดินช่วงแรกเสาเข็มจะตัดดินออกดังรูปร่างของเสาเข็ม และพื้นที่หน้าตัดที่ปลายเข็มมีค่าเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม ดินจะถูกอัดเข้าไปในตัวเสาเข็มขณะที่เสาเข็มเคลื่อนตัวลงจนกระทั่งถึงสภาวะหนึ่งซึ่งดินในเสาเข็มอัดตัวกันแน่น และเริ่มเคลื่อนที่ลงไปพร้อมกับการเคลื่อนที่ของเสาเข็ม การอัดตัวแน่นของดินในเสาเข็มหน้าตัดเปิดก่อให้เกิดการจุกตัวของดิน (soil plug) ดังแสดงดังรูปที่ ก.7 ดังนั้น พื้นที่ปลายเข็มกลายเป็นพื้นที่รวมของพื้นที่เสาเข็ม และดินที่จุกตัวอยู่ หรืออาจกล่าวได้ว่าเสาเข็มกลายเป็นเสาเข็มหน้าตัดปิด

การศึกษาของนักวิจัยหลายท่านพบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการจุกตัวของดินมีด้วยกันหลายประการ ได้แก่ ชนิดของดิน หน่วยแรงในสนาม เส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของเสาเข็ม วิธีการตอก อัตราการตอก และอื่นๆ นักวิจัยหลายท่าน (Paikowsky and Whitman, 1990; Miller and Lutenegeger, 1997) สรุปว่า การจุกตัวของดินจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่างความยาวเสาเข็มต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มมากกว่า 10 ถึง 20 และ 25 ถึง 35 สำหรับดินเหนียว และทรายตามลำดับ

เสาเข็มรูปตัวเอชมีช่องว่างระหว่างปีกของเสาเข็มน้อยกว่าช่องว่างภายในเสาเข็มมาก ดังนั้น ระยะเวลาเพียงเล็กน้อยก็ก่อให้เกิดการจุกตัวของดิน ด้วยเหตุนี้เรามักคำนวณ  $A_b$  และ  $A_s$  โดยสมมติว่าการจุกตัวของดินอย่างสมบูรณ์ ดังแสดงดังรูปที่ ก.7 แต่สำหรับเสาเข็มหน้าตัดเปิดที่ตอกลงในชั้นหินควรคำนวณ  $A_b$  และ  $A_s$  จากพื้นที่หน้าตัด และพื้นที่ผิวจริงของเสาเข็มโดยไม่ต้องพิจารณาการจุกตัวของดิน



รูปที่ ก.7 การเกิดการจุกตัวของดิน (soil plug) ในเสาเข็มหน้าตัดเปิด

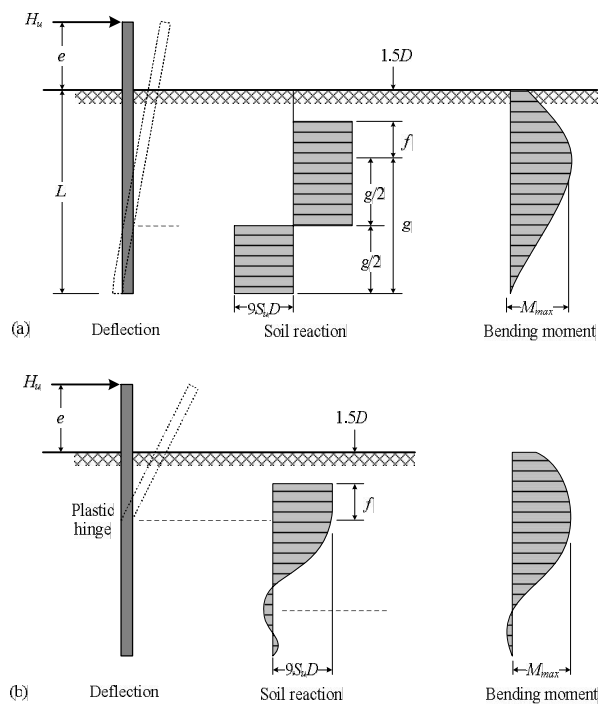
#### ก.1.6 การประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยแนวราบของเสาเข็ม

หลักการออกแบบเสาเข็มเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยแนวราบ คือ เสาเข็มต้องสามารถรับ โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในเสาเข็มเองได้ ดินรอบเสาเข็มต้องต้านทานน้ำหนักบรรทุกทุกแนวราบได้ และการเสีรูปแนวราบ (lateral deflection) ที่เกิดขึ้นต้องอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ นักวิจัยหลายท่าน (Matlock and Reese, 1960; Broms, 1965; Meyerhof, 1995) ได้เสนอแนวทางการคำนวณ



กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกแนวราบของเสาเข็มเดี่ยว โดยวิธีที่เป็นที่นิยม และง่ายต่อการคำนวณ ได้แก่ วิธีของ Broms (1965)

Broms (1965) เสนอแบบจำลองสำหรับเสาเข็มปลายอิสระ (unrestrained) ในดินเหนียวซึ่งมีการกระจายของแรงต้านของดินรอบเข็มเท่ากับศูนย์จากผิวดินจนถึงความลึก 1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม และที่ความลึกต่ำลงไปมีค่าคงที่เท่ากับ 9 เท่าของกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำดังแสดงดังรูปที่ ก.8 การวิบัติของเสาเข็มปลายอิสระในชั้นดินเหนียวแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การวิบัติของดินรอบเสาเข็มเมื่อพิจารณาเป็นเข็มสั้น และการวิบัติเสาเข็มเองเมื่อพิจารณาเป็นแบบเสาเข็มยาว



รูปที่ ก.8 แบบจำลองการวิบัติของเสาเข็มที่ปราศจากการยึดรั้งในดินเหนียว

(a) เสาเข็มสั้น (b) เสาเข็มยาว (Broms, 1965)

การคำนวณสำหรับเสาเข็มที่มีการยึดปลายแบบอิสระในดินเหนียวจะพิจารณาเป็นเสาเข็มสั้นเมื่อค่าโมเมนต์มากที่สุดที่เกิดในเสาเข็ม ( $M_{max}$ ) เนื่องจากแรงกระทำด้านข้างที่คำนวณได้ตามสมการที่ (ก.14) ร่วมกับสมการที่ (ก.16) มีค่าน้อยกว่าโมเมนต์ครากของหน้าตัดเสาเข็ม ( $M_y$ )

$$M_{\max} = H_u (e + 1.5B + 0.5f) \quad (\text{ก.14})$$

$$f = \frac{H_u}{9S_u B} \quad (\text{ก.15})$$

เมื่อ  $H_u$  คือ แรงประลัยที่กระทำด้านข้าง,  $S_u$  คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ยของดินรอบเสาเข็ม  $e$  คือ ระดับจากพื้นดินถึงจุดที่แรงด้านข้างกระทำ และ  $B$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของเสาเข็ม เมื่อทราบค่าน้ำหนักบรรทุกทุกแนวราบจะสามารถหาความยาวของเสาเข็มที่ต้องการ ( $L$ ) สำหรับเข็มสั้นได้ตามสมการที่ (ก.16)

$$H_u = 18S_u B \left[ (e^2 + 1.5Be + eL + 0.5L^2 + 1.125B^2)^{0.5} - (e + 0.75B + 0.5L) \right] \quad (\text{ก.16})$$

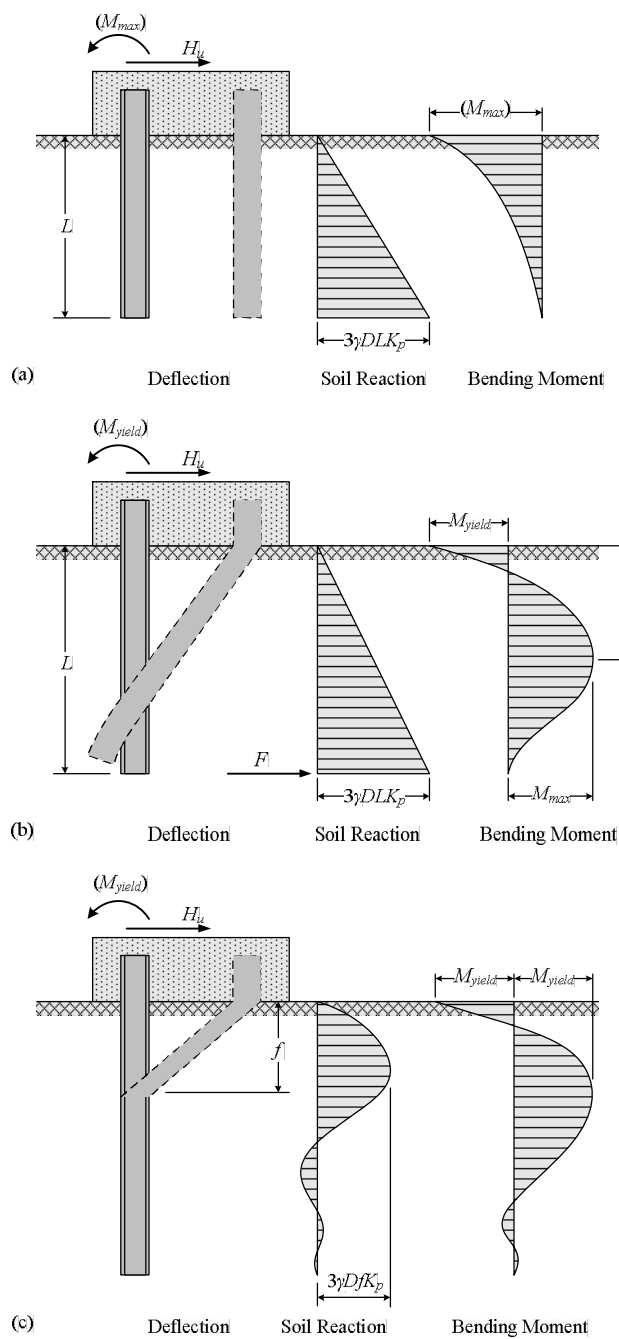
แต่เมื่อพิจารณาเป็นเข็มยาว ( $M_{\max} > M_y$ ) สมการคำนวณหาน้ำหนักบรรทุกทุกแนวราบ หรือโมเมนต์ครากของหน้าตัดเสาเข็มที่ต้องการได้ตามสมการที่ (ก.17)

$$H_u = 9S_u B \left( \left[ (e + 1.5B)^{0.5} + \frac{2M_y}{9S_u B} \right]^{0.5} - e - 1.5B \right) \quad (\text{ก.17})$$

Broms (1965) เสนอแบบจำลองสำหรับเสาเข็มที่มีปลายยึดรั้ง (restrained) ในดินเหนียวดังแสดงดังรูปที่ ก.9 ซึ่งเสาเข็มแบบนี้แบ่งการวิบัติออกเป็น 3 แบบ คือ การวิบัติแบบเสาเข็มสั้น การวิบัติแบบเสาเข็มยาวปานกลาง และการวิบัติแบบเสาเข็มยาว การคำนวณทำได้โดยการสมมติว่าโมเมนต์มากที่สุด ในเสาเข็มมีค่าเท่ากับโมเมนต์ที่เกิดขึ้นได้ฐานราก ดังนั้น น้ำหนักบรรทุกประลัยในแนวนอน และโมเมนต์คดสูงสุด ในเสาเข็ม สำหรับเสาเข็มสั้นสามารถคำนวณได้ตามสมการ (ก.18) และ (ก.19) ตามลำดับ

$$H_u = 9S_u D(L - 1.5D) \quad (\text{ก.18})$$

$$M_{\max} = H_u (1.5L + 0.75D) \quad (\text{ก.19})$$



รูปที่ ก.9 กลไกการวิบัติของเสาเข็มที่มีการยึดรั้งที่หัวเสาในชั้นดินเหนียว (Broms, 1965)

(a) เสาเข็มสั้น (b) เสาเข็มยาวปานกลาง (c) เสาเข็มยาว

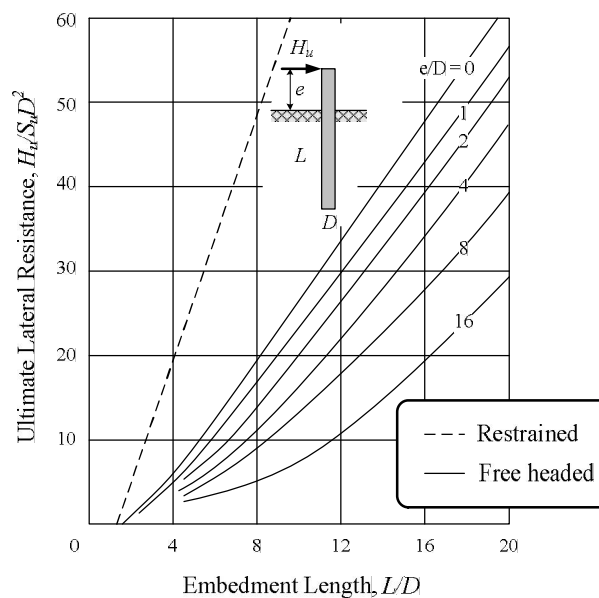
เสาเข็มยาวปานกลาง (จุดครากเกิดที่หัวเสาเข็ม) ดังแสดงดังรูปที่ ก.9 (b) โมเมนต์ครากของเสาเข็มคำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$M_{yield} = 2.25S_u Dg^2 - 9S_u Df(1.5D + 0.5f) \quad (ก.20)$$

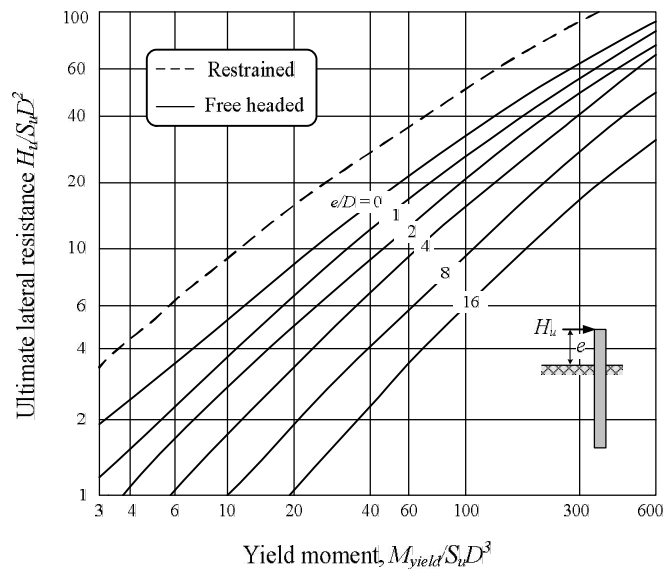
น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยแนวราบคำนวณได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ของความยาวเสาเข็มที่ว่า  $L = 1.5D + f + g$  แต่จำเป็นต้องตรวจสอบโมเมนต์คดที่ตำแหน่ง  $f + 1.5D$  ว่ามีค่ามากกว่าโมเมนต์ครากหรือไม่ ถ้าพบว่ามีค่ามากกว่าลักษณะการวิบัติจะเป็นแบบเสาเข็มยาว ในกรณีเช่นนี้ น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยแนวราบต้องคำนวณตามสมการที่ (ก.21)

$$H_u = \frac{2M_{yield}}{(1.5D + 0.5f)} \quad (ก.21)$$

นอกจากการคำนวณน้ำหนักประลัยแนวราบ และโมเมนต์สูงสุดในเสาเข็มโดยสมการข้างต้นแล้ว Broms (1965) ยังได้เสนอกฎช่วยคำนวณน้ำหนักประลัยแนวราบของทั้งเสาเข็มแบบปลายอิสระ และเสาเข็มแบบปลายยึดรั้งสำหรับเสาเข็มสั้นในชั้นดินเหนียวดังรูปที่ ก.10 และกราฟช่วยคำนวณน้ำหนักประลัยแนวราบของทั้งเสาเข็มปลายอิสระและเสาเข็มปลายยึดรั้งในชั้นดินเหนียวดังรูปที่ ก.11

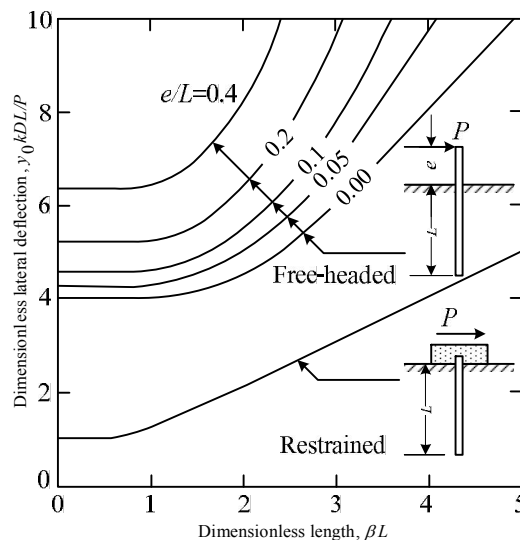


รูปที่ ก.10 น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยแนวราบของเสาเข็มสั้นในชั้นดินเหนียว (Broms, 1965)



รูปที่ ก.11 นำหนักบรรทุกทุกประลัษณ์แนวราบของเสาเข็มยาวในชั้นดินเหนียว (Broms, 1965)

Broms (1965) ได้เสนอกกราฟช่วยคำนวณสำหรับหาระยะการเสี้ยวรูปแนวราบของเสาเข็มที่ระดับผิวดินสำหรับดินที่มีแรงเหนียวนำ ดังแสดงดังรูปที่ ก.12 การใช้งานกราฟนี้จำเป็นต้องมีข้อมูลของเสาเข็ม ข้อมูลของดินรอบเสาเข็ม ขนาดแรงที่กระทำต่อเสาเข็มในแนวราบ และลักษณะการยึดปลายเสาเข็ม



รูปที่ ก.12 การเสี้ยวรูปแนวราบของเสาเข็มที่ระดับผิวดินสำหรับดินที่มีแรงเหนียวนำ (Broms, 1965)

ระยะการเสยรูปด้านข้าง ( $y_0$ ) สำหรับการคำนวณการเสยรูปแนวราบของเสาเข็มในดินเหนียวโดยใช้รูปที่ ก.12 ขึ้นกับค่าตัวแปรไร้หน่วย ( $\beta L$ ) ซึ่งคำนวณได้ตามสมการที่ (ก.22)

$$\beta = \left( \frac{k_h \cdot B}{E_p \cdot I_p} \right)^{1/4} \quad (\text{ก.22})$$

เมื่อ  $E_p \cdot I_p$  คือ ค่าสติเฟนซ์ของหน้าตัดเสาเข็ม,  $B$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของเสาเข็ม และ  $k_h$  คือ สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นแนวราบ คำนวณได้ตามสมการที่ (ก.23) สำหรับเสาเข็มยาว ( $\beta L > 2.25$ ) และคำนวณได้ตามสมการที่ (ก.24) สำหรับเสาเข็มสั้น ( $\beta L < 2.25$ )

$$k_h = 0.4 \cdot \frac{k}{h} \quad (\text{ก.23})$$

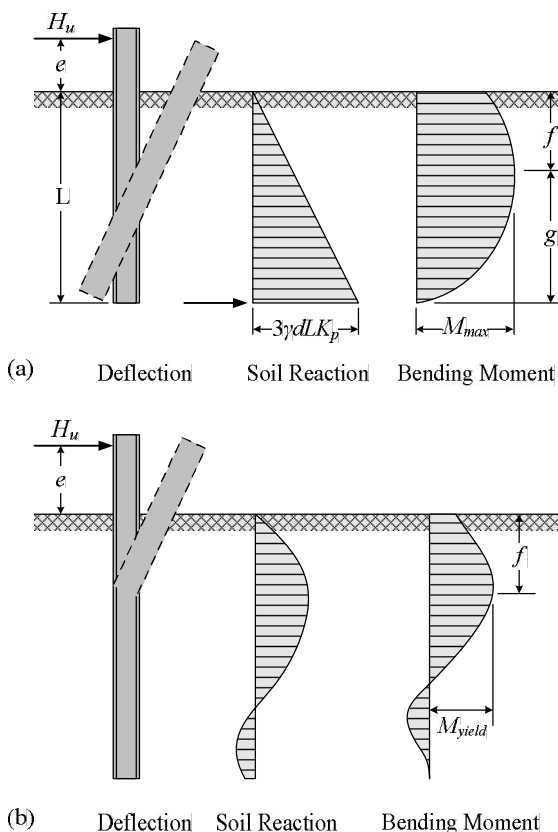
$$k_h = \left( \frac{2L + 3B}{5L} \right) \cdot \frac{k}{B} \quad (\text{ก.24})$$

เมื่อ  $k$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบ Plate load test ในสนามหรืออาจจะใช้ค่าโดยประมาณตามตารางที่ ก.5 แต่จะเป็นการดีกว่าถ้าหาก  $k_h$  ที่ใช้ได้จากการทดสอบการรับน้ำหนักทางด้านข้างของเสาเข็มในสนาม (lateral load tests on pile) โดยตรง

ตารางที่ ก.5 ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ( $k$ ) สำหรับดินที่มีแรงเหนียวน้ำ (cohesive soils)

กำลังต้านทานแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ (kPa)	50 - 100	100 - 200	200 - 400
$k$ (kN / m <sup>3</sup> )	8000	16000	32000

Broms (1965) เสนอแบบจำลองการวิบัติของเสาเข็มปลายอิสระชั้นในทราย ดังแสดงดังรูปที่ ก.13 (สำหรับกรณีที่หน่วยน้ำหนักจมน้ำมีค่าคงที่ตลอดความลึก) ดังได้กล่าวแล้วข้างต้นว่าเสาเข็มจะถูกพิจารณาว่าเป็นเสาเข็มสั้นเมื่อโมเมนต์สูงสุดที่เกิดขึ้นในเสาเข็มมีค่าน้อยกว่าโมเมนต์ครากของหน้าตัด จากหลักการสมดุลของการหมุนรอบจุดปลายเสาเข็ม น้ำหนักบรรทุกประลัยแนวราบสำหรับเสาเข็มสั้นสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (ก.25)



รูปที่ ก.13 แบบจำลองการวิบัติของเสาเข็มที่ปราศจากการยึดรั้งที่หัวเสาในชั้นทราย  
 (a) เสาเข็มสั้น (b) เสาเข็มยาว (Broms, 1965)

$$H_u = \frac{0.5\gamma'DL^3K_p}{e+L} \tag{ก.25}$$

เมื่อ  $\gamma'$  คือ หน่วยน้ำหนักประสิทธิผล,  $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของเสาเข็ม,  $K_p$  มีค่าเท่ากับ  $\tan^2(45^\circ + \phi'/2)$  และ  $e$  คือ ระยะยื่นของเสาเข็มเหนือผิวดิน สำหรับเสาเข็มยาว โมเมนต์สูงสุดจะเกิดขึ้นที่ระยะ  $f$  จากผิวดิน ดังนั้น สามารถคำนวณน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย แนวราบได้ตามสมการที่ (ก.26) โดยค่า  $f$  คำนวณได้ตามสมการที่ (ก.27) ส่วนค่าโมเมนต์สูงสุดที่เกิดในเสาเข็มมีค่าตามสมการที่ (ก.28)

$$H_u = \frac{3}{2}\gamma'DK_p f^2 \tag{ก.26}$$

$$f = 0.82 \sqrt{\left( \frac{H_u}{DK_p \gamma'} \right)} \quad (\text{ก.27})$$

$$M_{\max} = H_u \left( e + \frac{2}{3} f \right) \quad (\text{ก.28})$$

เมื่อคำนวณน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยแนวราบได้จากสมการของเสาเข็มสั้น (สมการที่ ก.25) ถ้าพบว่าโมเมนต์สูงสุดที่เกิดในเสาเข็มมีค่าสูงกว่าโมเมนต์ครากของหน้าตัดเสาเข็มแสดงว่าเสาเข็มนี้มีการวิบัติแบบเสาเข็มยาว ดังนั้น น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยแนวราบของเสาเข็มจะต้องทำการคำนวณใหม่โดยใช้สมการที่ (ก.27) และ (ก.28) โดยการแทนค่าโมเมนต์สูงสุดที่เกิดขึ้นในเสาเข็มด้วยค่าโมเมนต์ครากของหน้าตัดเสาเข็ม

การคำนวณสำหรับเสาเข็มที่ยึดรั้งในทราย ลักษณะการวิบัติจะแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ การวิบัติแบบเสาเข็มสั้น, การวิบัติแบบเสาเข็มยาวปานกลาง และการวิบัติแบบเสาเข็มยาว ดังแสดงดังรูปที่ ก.14 เมื่ออาศัยหลักการสมดุลแล้ว น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยแนวราบของเสาเข็มสั้นสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (ก.29) และ โมเมนต์คัดสูงสุดในเสาเข็มที่ระดับผิวดินสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (ก.30)

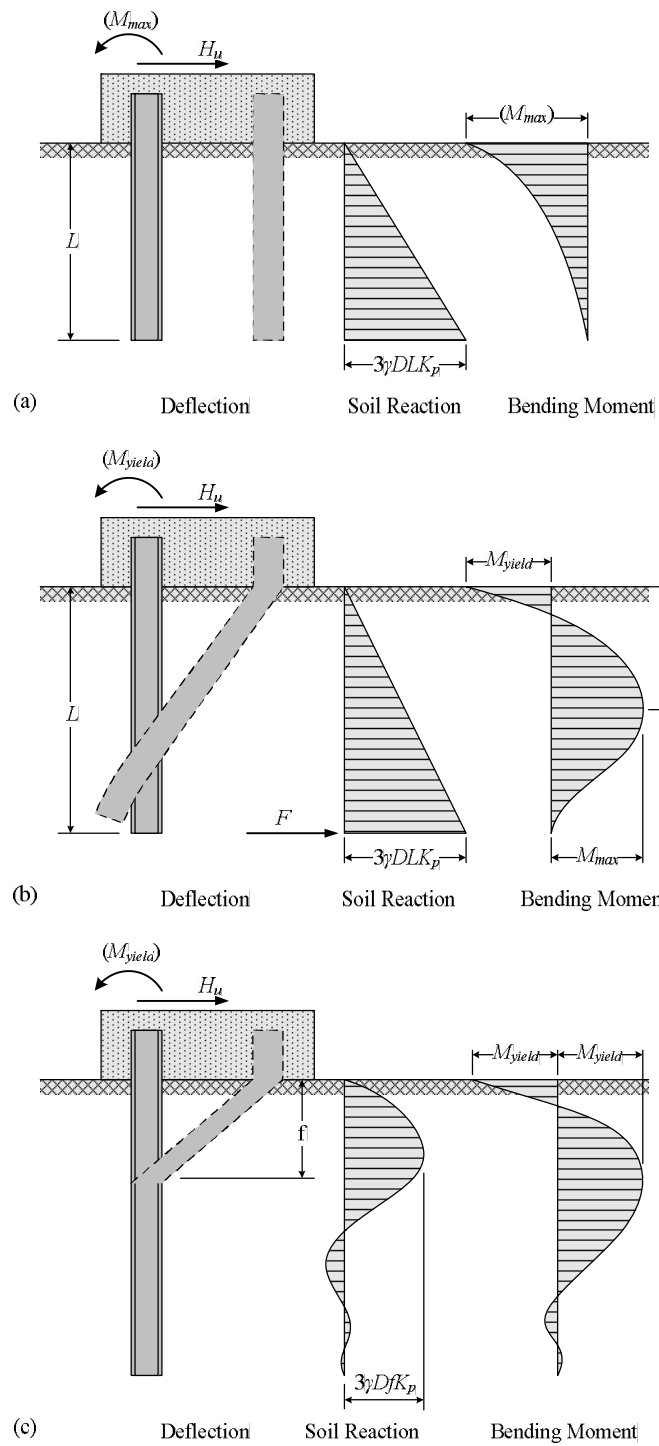
$$H_u = 1.5 \gamma' L^2 DK_p \quad (\text{ก.29})$$

$$M_{\max} = \frac{2}{3} H_u L \quad (\text{ก.30})$$

เมื่อคำนวณโมเมนต์คัดสูงสุดในเสาเข็มที่ระดับผิวดินตามสมการที่ (ก.30) แล้วมีค่ามากกว่าโมเมนต์คัดครากของหน้าตัดเสาเข็ม แสดงว่าลักษณะการวิบัติเป็นแบบเสาเข็มยาวปานกลาง โดยน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยแนวราบสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (ก.31)

$$H_u = \frac{(0.5 \gamma' DL^3 K_p) - M_{\text{yield}}}{L} \quad (\text{ก.31})$$



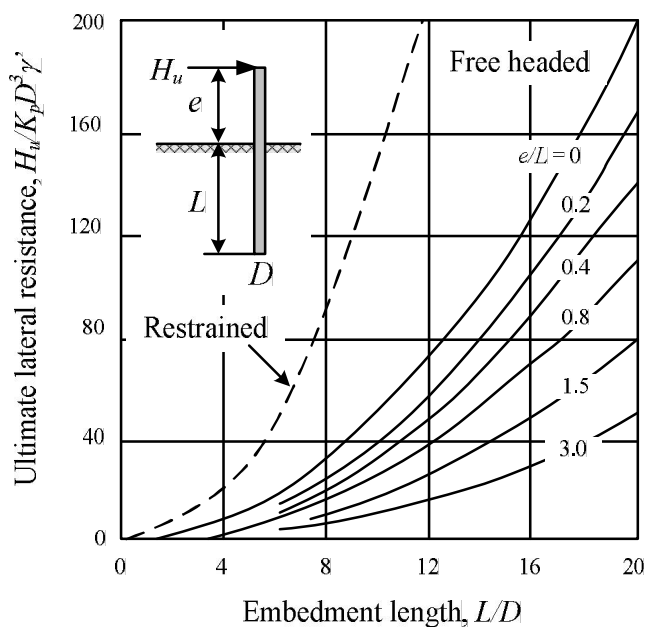


รูปที่ ก.14 กลไกการวิบัติของเสาเข็มที่มีการยึดรั้งที่หัวเสาในชั้นทราย (a) เสาเข็มสั้น (b) เสาเข็มยาวปานกลาง (c) เสาเข็มยาว (Broms, 1965)

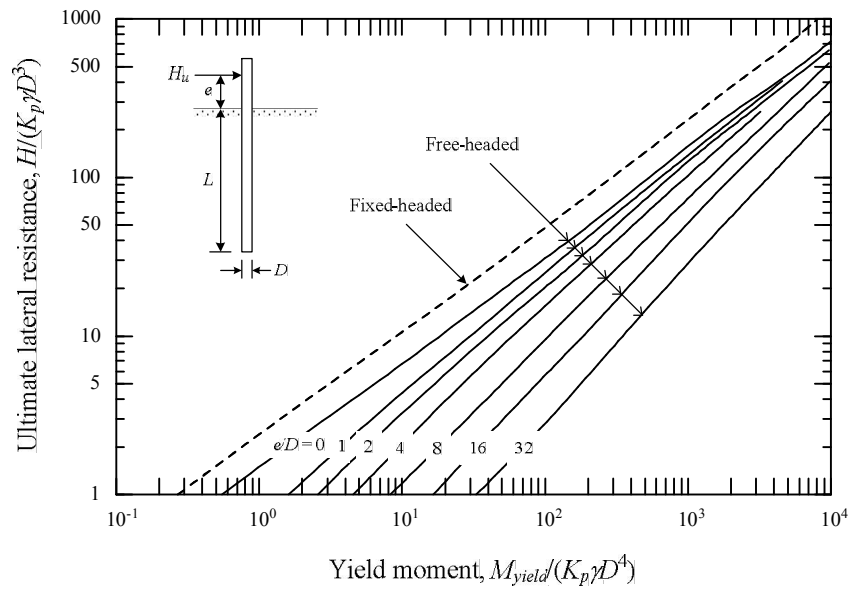
สมการที่ (ก.31) จะสามารถใช้ได้ก็ต่อเมื่อโมเมนต์ค้ดสูงสุดที่ระยะ  $f$  จากผิวดินมีค่าน้อยกว่าโมเมนต์ค้ดครากของหน้าตัดเสาเข็ม มิเช่นนั้นการวิบัติของเสาเข็มจะเป็นแบบเสาเข็มยาวซึ่งสามารถคำนวณน้ำหนักบรรทุกประลัยแนวราบได้ตามสมการ (ก.32)

$$H_u = \frac{2M_{yield}}{\left(e + \frac{2}{3}f\right)} \tag{ก.32}$$

และเช่นเดียวกับเสาเข็มในชั้นดินเหนียว Broms (1965) ได้เสนอกกราฟช่วยคำนวณหาน้ำหนักบรรทุกประลัยแนวราบ และ โมเมนต์ค้ดสูงสุดในเสาเข็มของเสาเข็มสั้นและเสาเข็มยาวในชั้นทรายแสดงดังรูปที่ ก.15 และรูปที่ ก.16 ตามลำดับ

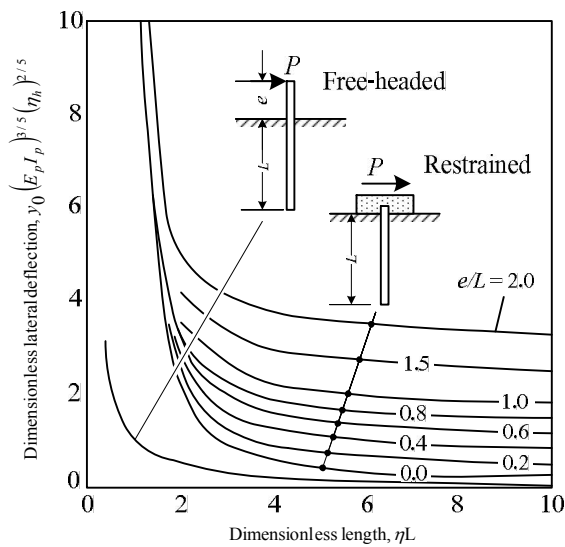


รูปที่ ก.15 น้ำหนักบรรทุกประลัยแนวราบของเสาเข็มสั้นในชั้นทราย (Broms, 1965)



รูปที่ ก.16 นำหนักบรรทุกทุกประลัยแนวราบของเสาเข็มยาวในชั้นทราย (Broms, 1965)

Broms (1965) ได้เสนอกราฟช่วยคำนวณสำหรับหาระยะการเสี้ยวรูปแนวราบที่ระดับผิวดินสำหรับดินเม็ดทรายดังรูปที่ ก.17 ซึ่งการใช้กราฟนี้จำเป็นต้องทราบข้อมูลของเสาเข็ม ข้อมูลของดินรอบเสาเข็ม ขนาดแรงที่กระทำต่อเสาเข็มในแนวราบ และลักษณะการยึดปลายเสาเข็ม



รูปที่ ก.17 การเสี้ยวรูปแนวราบของเสาเข็มที่ระดับผิวดินสำหรับดินเม็ดทราย (Broms, 1965)

การคำนวณการเสียรูปแนวราบของเสาเข็มในชั้นทรายโดยใช้รูปที่ ก.17 ขึ้นกับค่าตัวแปรไร้หน่วย ( $\eta$ ) ซึ่งคำนวณหาได้จากสมการที่ (ก.33) เมื่อค่า  $n_h$  สามารถหาได้จากตารางที่ ก.6

$$\eta = \left( \frac{n_h}{E_p \cdot I_p} \right)^{1/5} \quad (\text{ก.33})$$

ตารางที่ ก.6 ค่าของ  $n_h$  สำหรับดินเม็ดหยาบ

ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของทราย ( $\text{kN/m}^3$ )	หลวม	ปานกลาง	แน่น
$n_h$ (แห้ง หรือ ชื้น) ( $\text{kN/m}^3$ )	750	2250	6000
$n_h$ (อิ่มตัวด้วยน้ำ) ( $\text{kN/m}^3$ )	400	1500	3600

### ก.1.7 การวิเคราะห์เสาเข็มกลุ่ม

เสาเข็มปกติมักถูกจัดวางเป็นกลุ่มที่มีระยะห่างระหว่างเสาเข็มประมาณ 2 ถึง 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของกลุ่มเสาเข็มทั้งแนวตั้ง และแนวราบ มักจะมีค่าต่ำกว่าการออกแบบเป็นเสาเข็มเดี่ยว เนื่องจากดินรอบเสาเข็มถูกรบกวนขณะก่อสร้าง เสาเข็มต้นข้างๆ น้ำหนักประลัยในแนวตั้ง และแนวราบของกลุ่มเสาเข็มสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (ก.34) โดยอาศัยค่าประสิทธิภาพกลุ่มเข็ม (Efficiency,  $\zeta$ ) ลดค่าน้ำหนักประลัยของกลุ่มเข็มลง

$$P_{(group)} = \zeta \cdot n \cdot P_{(individual)} \quad (\text{ก.34})$$

เมื่อ  $P_{(group)}$  คือ น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของกลุ่มเข็มในแนวตั้งหรือแนวราบ,  $P_{(individual)}$  คือ น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเข็มเดี่ยวในแนวตั้งหรือแนวราบ และ  $n$  คือ จำนวนเข็มในกลุ่มเข็ม

ประสิทธิภาพกลุ่มเข็มในชั้นทรายจะขึ้นกับวิธีการก่อสร้างโดยเสาเข็มกลุ่มที่ตอกในชั้นทรายมักมีค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของกลุ่มเข็มมากกว่าผลรวมของน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มเดี่ยว การออกแบบเสาเข็มตอกในชั้นทรายอาจสมมติให้ค่าประสิทธิภาพกลุ่มเข็มมีค่าเท่ากับ 1.0 และการออกแบบเสาเข็มเจาะค่าประสิทธิภาพกลุ่มเข็มให้ใช้ประมาณ 0.6

ประสิทธิภาพกลุ่มเสาเข็มในดินเหนียวขึ้นกับระยะห่างระหว่างเสาเข็ม ถ้าระยะห่างของเสาเข็มมีค่าประมาณ 2 ถึง 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง ประสิทธิภาพเข็มกลุ่มจะมีค่าประมาณ 0.7 ถึง 1.0 ลักษณะการวิบัติของเสาเข็มในชั้นดินเหนียวมีแนวโน้มเป็นแบบ Block ซึ่งเสาเข็ม และ

ดินรอบข้างถูกพิจารณารวมกันเป็นเสาเข็มขนาดใหญ่ ดังนั้น น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยสำหรับการวิบัติแบบ Block สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (ก.35)

$$P_{(group)} = N_c \bar{S}_u B_g L_g + 2S_u H_g (B_g + L_g) \quad (ก.35)$$

เมื่อ  $N_c$  คือ ตัวแปรกำลังรับแรงแบกทานหาได้จากรูปที่ ก.3,  $S_u$  คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนปลายเสาเข็มกลุ่ม,  $B_g$  คือ ด้านกว้างของพื้นที่หน้าตัดรอบกลุ่มเสาเข็ม,  $L_g$  คือ ความยาวของพื้นที่หน้าตัดรอบกลุ่มเสาเข็ม,  $H_g$  คือ ความลึกของกลุ่มเสาเข็ม และ  $\bar{S}_u$  คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ยระหว่างความลึก 0 ถึง  $H$  ในการออกแบบฐานรากเสาเข็มที่มีแท่นหัวเข็ม (pile cap) อยู่บนดิน น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยควรเป็นค่าน้อยที่สุดที่หาได้ระหว่าง  $P_{(group)}$  และผลรวมของน้ำหนักประลัยของเสาเข็มแต่ละต้น ( $P \times n$ ) สำหรับฐานรากที่ไม่มีแท่นหัวเข็มอยู่บนดิน (free-standing) น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยไม่ควรเกิน  $\frac{2}{3} P_u n$

ประสิทธิภาพกลุ่มเสาเข็มรับน้ำหนักแนวราบขึ้นอยู่กับชนิดดิน, ลักษณะการยึดปลายเสาเข็ม และลักษณะการจัดเรียง ค่าประสิทธิภาพกลุ่มเข็มสำหรับชั้นดินเหนียว และชั้นทรายได้ถูกรวบรวมไว้ตามตารางที่ ก.7 และ ก.8 ตามลำดับ

ตารางที่ ก.7 ค่าประสิทธิภาพกลุ่มเข็มในชั้นดินเหนียวเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกแนวราบ

Pile alignment	Head boundary condition	Pile spacing	Factor value
Row	Fixed (Pan et al., 2002)	3D	0.67
		5D	0.81
	Free (Pan et al., 2002)	3D	1.2
		4D	1.1
		8D	1.0
Line	Fixed (Chen and Poulos, 1997)	3D	N: 0.77, F: 0.41
		5D	N: 0.67, F: 0.76
	Free	-	-

หมายเหตุ  $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม, N คือ เสาเข็มต้น ใกล้ และ F คือ เสาเข็มต้น ไกล

ตารางที่ ก.8 ค่าประสิทธิภาพกลุ่มเข็มในชั้นทรายเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุกแนวราบ

Pile alignment	Head boundary condition	Pile spacing	Factor value
Row	Fixed (Chen, 2002)	2.5D	0.81
		5.0D	0.88
		7.5D	0.98
	Free (Pan et al., 2002)	2.5D	0.72
		5.0D	0.78
		7.5D	0.84
Line	Fixed (Chen, 1994)	2.5D	N: 1.31, F: 1.01
		5.0D	N: 1.59, F: 1.10
		7.5D	N: 1.20, F: 0.69
	Free (Chen, 1994)	2.5D	N: 0.93, F: 0.92
		5.0D	N: 1.25, F: 1.36
		7.5D	N: 0.64, F: 0.67

หมายเหตุ  $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม, N คือ เสาเข็มต้นใกล้ และ F คือ เสาเข็มต้นไกล

## ก.2 การออกแบบโครงสร้างฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก

### ก.2.1 พฤติกรรมและลักษณะการวิบัติของฐานราก

เมื่อฐานรากรับน้ำหนักบรรทุกจาก โครงสร้าง ฐานรากต้องรับทั้งโมเมนต์ดัด และแรงเฉือน ทำให้เกิดหน่วยแรงขึ้นในโครงสร้างฐานรากโดยหน่วยแรงดังกล่าวนี้อาจทำให้ฐานรากเกิดการวิบัติได้ ถ้าพิจารณาแผ่นฐานรากซึ่งวางบนพื้นดินซึ่งรับน้ำหนักบรรทุกจากเสาตอม่อหากพลิกฐานรากนี้ให้หงายขึ้น โดยให้เสาตอม่ออยู่ด้านล่าง จะเห็นว่าแผ่นฐานรากนั้นเปรียบเสมือนเป็นแผ่นพื้นไร้คานที่รองรับด้วยเสาตอม่อ โดยมีแรงดันสุทธิของดินหรือแรงดันขึ้นที่เสาเข็มเปรียบเสมือนเป็นน้ำหนักบรรทุกกระทำบนแผ่นพื้นนั่นเอง ดังนั้น พฤติกรรมการรับน้ำหนัก และลักษณะการวิบัติของฐานรากจึงเหมือนกับที่เกิดขึ้นในแผ่นพื้นไร้คาน โดยการวิบัติของแผ่นฐานรากแบ่งออกเป็น 4 แบบ ได้แก่ การวิบัติจากโมเมนต์ดัด, การวิบัติของแรงยึดหน่วยระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม, การวิบัติจากแรงเฉือนแบบคาน (beam shear) และการวิบัติจากการเฉือนทะลุ (punching shear) โดยตำแหน่งหน้าตัดวิกฤตสำหรับพิจารณาการวิบัติแบบต่าง ๆ เป็นดังต่อไปนี้

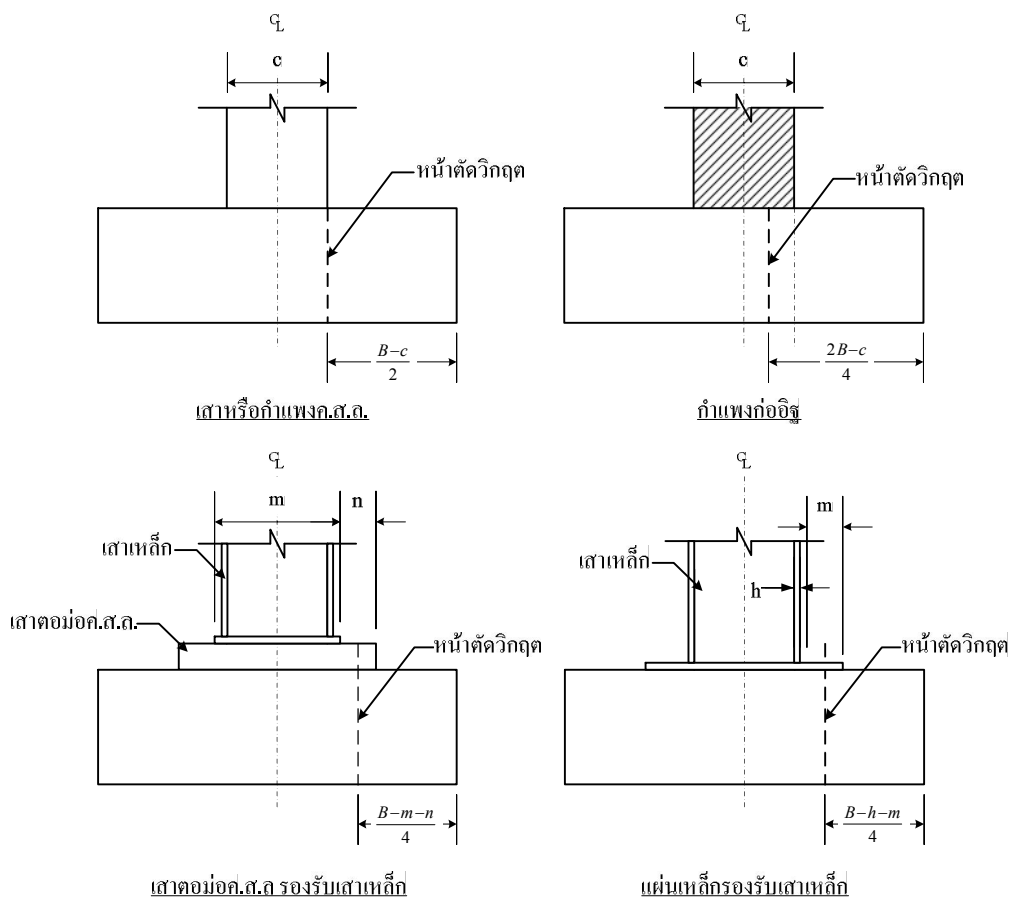
ก) หน้าตัดวิกฤตสำหรับโมเมนต์ดัด และแรงยึดเหนี่ยว คือ หน้าตัดที่อยู่ข้างใดข้างหนึ่งของหน้าตัดฐานราก ซึ่งได้จากการใช้ระนาบในแนวตั้งตัดผ่านตลอด ดังแสดงดังรูปที่ ก.18

ข) หน้าตัดวิกฤตสำหรับแรงเฉือนแบบคาน สำหรับฐานรากที่รองรับเสาตอม่อหรือกำแพง ให้พิจารณาที่ตำแหน่งซึ่งห่างจากขอบเสาตอม่อหรือกำแพงเป็นระยะเท่ากับความลึกประสิทธิผล ( $d$ ) แต่สำหรับฐานรากที่มีแผ่นเหล็กรองรับเสาตอม่อหรือกำแพง ให้พิจารณาจากกึ่งกลางระหว่างขอบเสาตอม่อ กับขอบแผ่นรองรับออกไปเป็นระยะเท่ากับความลึกประสิทธิผล ( $d$ ) สำหรับฐานรากรองรับด้วยเสาเข็ม ถ้าศูนย์กลางเสาเข็มอยู่ห่างจากหน้าตัดวิกฤตออกไปเป็นระยะมากกว่าหรือเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม ให้คิดแรงดันขึ้นของเสาเข็มเท่ากับแรงปฏิกิริยาที่เสาเข็มต้องรับ แต่ถ้าศูนย์กลางเสาเข็มอยู่ห่างจากหน้าตัดวิกฤตเข้ามาเป็นระยะมากกว่าหรือเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ให้คิดแรงดันขึ้นของเสาเข็มเท่ากับศูนย์ ส่วนเสาเข็มที่อยู่ระหว่างช่วง  $\pm d_p$  เซนติเมตร จากหน้าตัดวิกฤตให้คิดแรงดันขึ้นลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงตามสมการที่ (ก.37)

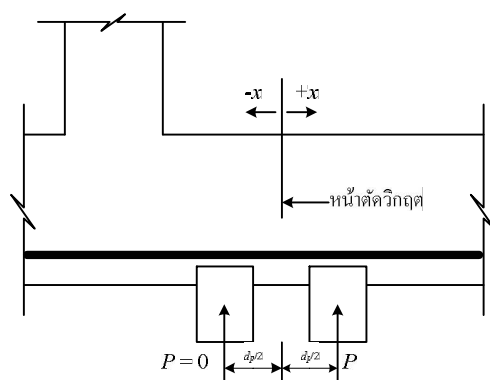
$$P' = P \left[ (1/2) + (x / d_p) \right] \quad (\text{ก.37})$$

เมื่อ  $P'$  คือ แรงดันขึ้นของเสาเข็มที่อยู่ระหว่างช่วง  $\pm d_p$  เซนติเมตร จากหน้าตัดวิกฤต,  $P$  คือ แรงปฏิกิริยาที่เสาเข็มต้องรับ และ  $x$  คือ ระยะห่างระหว่างหน้าตัดวิกฤตถึงศูนย์กลางเสาเข็ม มีค่าเป็นลบเมื่อศูนย์กลางเสาเข็มอยู่ภายในหน้าตัดวิกฤตเข้ามา และมีค่าเป็นบวกเมื่อศูนย์กลางเสาเข็มอยู่นอกหน้าตัดวิกฤตออกไป ดังแสดงในรูปที่ ก.19

ค) หน้าตัดวิกฤตสำหรับแรงเฉือนแบบทะลุ คือ ตำแหน่งหน้าตัดวิกฤตจะอยู่ห่างจากขอบโดยรอบของน้ำหนักที่กระทำเป็นจุดหรือพื้นที่ของแผ่นเหล็กรองรับเป็นระยะออกไปกับครึ่งหนึ่งของความลึกประสิทธิผล สำหรับฐานรากที่รองรับด้วยเสาเข็มให้พิจารณาการเฉือนทะลุรอบหัวเสาเข็มด้วย โดยหน้าตัดวิกฤตสำหรับเสาเข็มที่เส้นรอบรูปของหน้าตัดวิกฤตซ้อนเหลื่อมกัน ให้พิจารณาหาเส้นรอบรูปสำหรับการเฉือนทะลุดังรูปที่ ก.20 ส่วนในกรณีที่เสาตอม่อมีหน้าตัดกลมหรือหน้าตัดหลายเหลี่ยมให้พิจารณาแปลงหน้าตัดของเสาตอม่อนั้นให้เป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีพื้นที่เทียบเท่าแล้วจึงหาตำแหน่งหน้าตัดวิกฤต

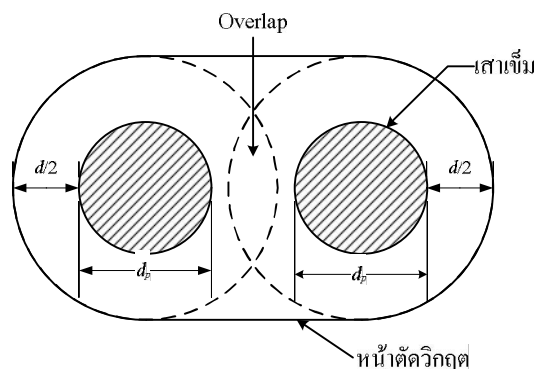


รูปที่ ก.18 หน้าตัดวิกฤตสำหรับโมเมนต์ดัด และระยะฝังยึดเหล็กเสริม



รูปที่ ก.19 แรงปฏิกิริยาของเสาเข็ม





รูปที่ ก.20 หน้าตัดวงกตของการเชื่อมทะลุเมื่อตอกเสาเข็มชิดกัน

### ก.2.2 การออกแบบเหล็กเสริมฐานรากคอนกรีตโดยวิธีกำลัง (ACI 318-02, ว.ส.ท. 1003-38)

การออกแบบวิธีนี้เป็นการพิจารณาหาขนาดส่วนของโครงสร้างคอนกรีต และปริมาณของเหล็กเสริมที่สภาวะก่อนที่ส่วน โครงสร้างนั้นจะวิบัติจากน้ำหนักบรรทุกเกินกว่าที่คาดไว้ (น้ำหนักประลัยหรือน้ำหนักใช้งานที่เพิ่มค่า) การวิเคราะห์แรงภายในต่างๆ ของโครงสร้างจะใช้ทฤษฎียึดหยุ่น หลักเกณฑ์ในการคำนวณออกแบบโดยวิธีกำลัง คือ เมื่อโครงสร้างจะเกิดการวิบัติเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งานที่เพิ่มค่าแล้ว (factored load) ต้องมีค่าไม่เกินกว่ากำลังต้านทานที่ใช้ออกแบบ (design strength) ซึ่งเป็นกำลังต้านทานสูงสุดของส่วนของโครงสร้างนั้นที่ถูกลดค่าด้วยตัวคูณลดกำลังต้านทาน และค่าการโก่งตัวหรือความกว้างของรอยแตกร้าวต้องไม่เกินกว่าข้อกำหนดตามมาตรฐานในขณะที่โครงสร้างรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน น้ำหนักประลัยหรือน้ำหนักบรรทุกใช้งานที่เพิ่มค่าคำนวณได้ตามสมการดังแสดงในตารางที่ ก.9

อัตราส่วนของเหล็กเสริม ( $\rho$ ) ที่ต้องการ คำนวณได้ตามสมการที่ (ก.38)

$$\rho = \frac{0.85 f'_c}{f_y} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2R_u}{0.85 f'_c}} \right) > \rho_{\min} \quad (\text{ก.38})$$

เมื่อ  $R_u$  มีค่าเท่ากับ  $M_u / \phi b d^2$  กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร,  $M_u$  คือ โมเมนต์ดัดที่หน้าตัดวงกตสำหรับโมเมนต์ดัดตามทฤษฎียึดหยุ่นเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกใช้งานที่เพิ่มค่าแล้วมากกว่า,  $\phi$  คือ ตัวคูณลดกำลังสำหรับแรงดัด มีค่าเท่ากับ 0.9,  $\rho_{\min} \geq 14 / f_y$  หรือ 1.34 เท่าของค่าที่คำนวณได้ ส่วนปริมาณเหล็กเสริมฐานรากที่ต้องการคำนวณได้จากสมการที่ (ก.39)

$$A_s = \rho b d \quad (\text{ตารางเซนติเมตร}) \quad (\text{ก.39})$$

ตารางที่ ก.9 น้ำหนักประลัยหรือน้ำหนักบรรทุกใช้งานที่เพิ่มค่า

ลักษณะของการใช้งาน โครงสร้างที่พิจารณา	น้ำหนักประลัยหรือน้ำหนักใช้งานเพิ่มค่า
- สำหรับอาคารที่ไม่ได้รับแรงลมหรือแรงจากแผ่นดินไหว	$U = 1.4D + 1.7L$
- สำหรับอาคารที่คิดให้รับแรงลมด้วย	$U = 0.75(1.4D + 1.7L + 1.7W)$ หรือ $U = 0.9D + 1.3W$ ให้ใช้ค่าสูงสุดแต่ต้องไม่น้อยกว่า $U = 1.4D + 1.7L$
- สำหรับอาคารที่คิดแรงจากแผ่นดินไหว	$U = 0.75(1.4D + 1.7L + 1.1E)$ หรือ $U = 0.9D + 1.43E$
- สำหรับอาคารที่รับแรงดันทางด้านข้างของดินและน้ำใต้ดิน	$U = 1.4D + 1.7L + 1.7H$ หรือ $U = 0.9D + 1.7L + 1.7H$ (เมื่อ $D$ มีส่วนไปลดผลของ $H$ ) หรือ $U = 1.4D + 1.7L$ (เมื่อ $L$ มีส่วนไปลดผลของ $H$ ) หรือ $U = 0.9D + 1.7H$ (เมื่อ $D$ และ $L$ มีส่วนไปลดผลของ $H$ ) ให้ใช้ค่าสูงสุดแต่ต้องไม่น้อยกว่า $U = 1.4D + 1.7L$

หมายเหตุ  $U$  คือ น้ำหนักประลัยหรือน้ำหนักบรรทุกใช้งานที่เพิ่มค่า,  $D$  คือ น้ำหนักบรรทุกตายตัว,  $L$  คือ น้ำหนักบรรทุกจรและ  $H$  คือ น้ำหนักบรรทุกด้านข้าง

ระยะฝังพื้นฐานที่ต้องการในแต่ละด้านของหน้าตัดวิกฤตสำหรับเหล็กเสริมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 36 เซนติเมตรคำนวณได้ตามสมการที่ (ก.40)

$$l_{db} = \frac{0.06 A_b f_y}{\sqrt{f'_c}} \geq 30 \quad (\text{เซนติเมตร}) \quad (\text{ก.40})$$

และสำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 43 เซนติเมตร และ 57 เซนติเมตร ให้ลดค่าที่คำนวณได้ตามสมการที่ (ก.40) ลงอีก 6% และ 22% ตามลำดับ และระยะฝั่งต้องไม่น้อยกว่า 30 เซนติเมตร

ความต้านทานแรงเฉือนปลอดภัยโดยคอนกรีตในฐานรากสำหรับการวิบัติจากแรงเฉือนแบบคานคำนวณได้จากสมการที่ ก.41 และสำหรับการวิบัติแบบทะลุให้ใช้ค่าน้อยของสมการที่ (ก.42) ถึง (ก.44) ตามลำดับ เมื่อ  $b_w$  คือ ความกว้างของฐานราก

$$V_c = 0.53\sqrt{f'_c}b_w d \quad (\text{กิโลกรัม}) \quad (\text{ก.41})$$

$$V_c = 0.27\left(2 + \frac{4}{\beta_c}\right)\sqrt{f'_c}b_0 d \quad (\text{กิโลกรัม}) \quad (\text{ก.42})$$

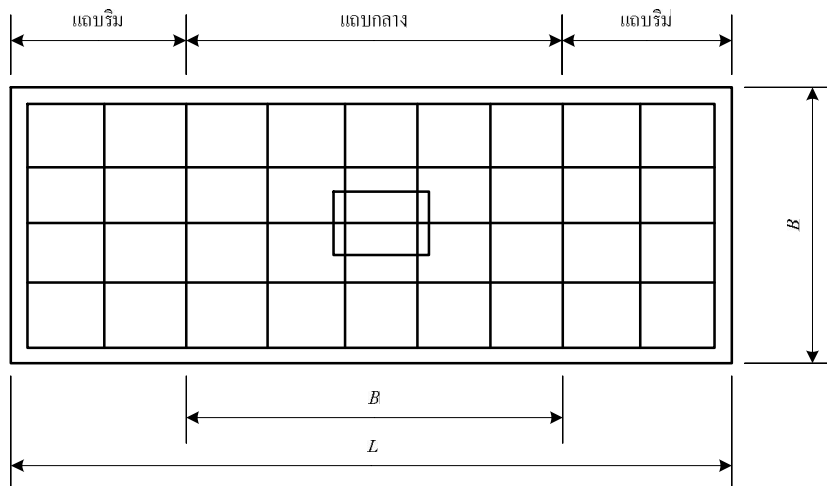
$$V_c = 0.27\left(\frac{\alpha_s d}{b_0} + 2\right)\sqrt{f'_c}b_0 d \quad (\text{กิโลกรัม}) \quad (\text{ก.43})$$

$$V_c = 1.06\sqrt{f'_c}b_0 d \quad (\text{กิโลกรัม}) \quad (\text{ก.44})$$

เมื่อ  $\beta_c$  คือ อัตราส่วนของด้านยาวต่อด้านสั้นของเสาหรือของแรงที่กระทำต่อฐานราก,  $b_0$  คือ เส้นรอบรูปของหน้าตัดวิกฤต และ  $\alpha_s$  คือ ค่าคงที่สำหรับเสาภายใน เสาริมและเสามุม มีค่าเท่ากับ 40, 30 และ 20 ตามลำดับ

### ก.2.3 การจัดเรียงเหล็กเสริม

เหล็กเสริมรับแรงดึงในฐานรากที่คำนวณได้ต้องกระจายเหล็กเสริมให้สม่ำเสมอตลอดความกว้างของหน้าตัดนั้นๆ โดยสำหรับฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้ารับแรงสองทางต้องกระจายเหล็กเสริมในแต่ละทิศทางให้สม่ำเสมอตลอดความกว้างของฐานราก และสำหรับฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เสริมเหล็กรับแรงดึงสองทางต้องกระจายเหล็กเสริมในทิศทางขนานด้านยาวให้สม่ำเสมอตลอดความกว้างของฐานราก ส่วนเหล็กเสริมในทิศทางขนานด้านสั้นให้กระจายออกไปอย่างสม่ำเสมอทั้งในแถบกลาง และแถบริมดังแสดงในรูปที่ ก.21 โดยมีปริมาณของเหล็กเสริมในแถบกลางตามสมการที่ (ก.21) ส่วนปริมาณเหล็กเสริมที่เหลือจากแถบกลางให้กระจายสม่ำเสมอออกไปในแถบริมของฐานรากเท่าๆ กันทั้งสองข้าง



รูปที่ ก.21 การกระจายเหล็กเสริมในฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$A_{SC} = \frac{2}{\beta + 1} A_{SB} \quad (\text{ก.45})$$

เมื่อ  $A_{SC}$  คือ ปริมาณเหล็กเสริมที่เรียงขนานกับด้านสั้นในแถบกลางซึ่งกว้างเท่ากับ  $B$ ,  $A_{SB}$  คือ ปริมาณเหล็กเสริมทั้งหมดในทิศทางสั้น และ  $\beta$  คือ อัตราส่วนระหว่างด้านยาวต่อด้านสั้นของฐานราก

#### ก.2.4 ความหนาของฐานราก

แผ่นฐานรากต้องมีคอนกรีตอยู่เหนือเหล็กเสริมล่างไม่น้อยกว่า 15 เซนติเมตร สำหรับฐานรากแผ่ และฐานรากเสาเข็มสั้นบนดินอ่อน หรือไม่น้อยกว่า 30 เซนติเมตร สำหรับฐานรากเสาเข็มอื่นๆ

#### ก.2.5 การถ่ายแรงจากเสาตอม่อหรือผนังกำแพงสู่ฐานราก

รถ่ายแรง และโมเมนต์ตัดต่างๆ จากเสาตอม่อหรือผนังกำแพงสู่ฐานรากที่รองรับต้องอาศัยกำลังต้านทานจากคอนกรีต และเหล็กยื่นที่เสริมในเสาหรือเหล็กเดือย (dowels bar) การออกแบบโดยวิธีกำลัง ให้พิจารณาออกแบบกำลังต้านทานแรงกดอัดโดยคอนกรีตต้องมีค่าไม่เกินกว่า  $0.85\phi f'_c$  กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยที่ตัวคูณลดค่า  $\phi$  มีค่าเท่ากับ 0.7 หรือเท่ากับ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หากแรงอัดทั้งหมดมีค่าเกินกว่ากำลังต้านทานแรงกดอัดปลอดภัยของคอนกรีตหรือกรณีแรงดึงที่เกิดจากโมเมนต์ตัดอาจถ่ายแรงโดยใช้เหล็กเดือยหรืออาจยื่นเหล็กเสาเข้าไปในฐานรากโดยตรงโดยให้ความยาวที่วัดจากขอบบนของฐานรากไม่น้อยกว่าความยาวของระยะ

ฝั่ง ( $l_d$ ) ของเหล็กเสริมนั้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.075 f_y d_y / \sqrt{f'_c} d_b$  แต่ไม่น้อยกว่า 20 เซนติเมตร การใช้เหล็กเคียวต้องมีจำนวนไม่น้อยกว่าสี่เส้น และต้องมีเนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดไม่น้อยกว่า 0.005 เท่าของเนื้อที่หน้าตัดเสา แต่ต้องมีขนาดโตกว่าขนาดของเหล็กยื่นในเสาไม่เกินกว่า 3 มิลลิเมตร และมีระยะทาบระหว่างเหล็กเคียวกับเหล็กยื่นไม่น้อยกว่าความยาวระยะฝั่งยึด ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.007 f_y d_b \geq 30$  (เมื่อ  $f_y = 4000$  กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ  $f'_c$  กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) ที่คิดจากเหล็กเสริมที่มีขนาดใหญ่กว่า

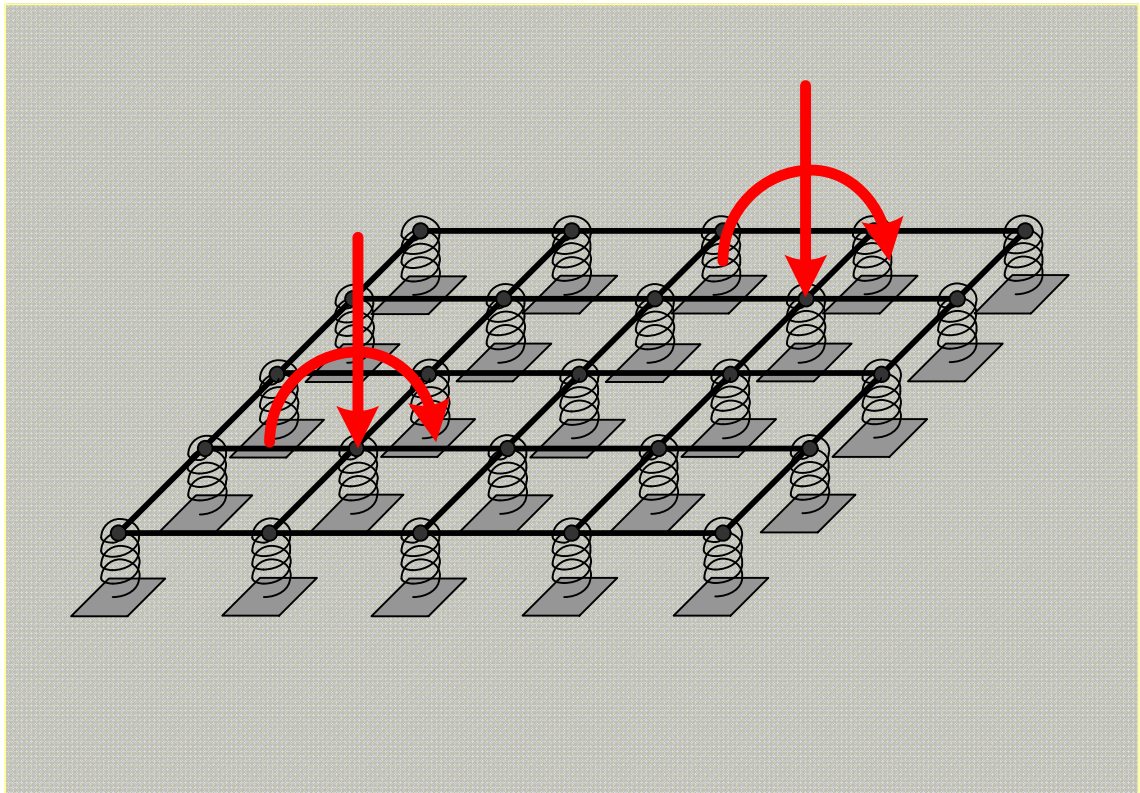
ภาคผนวก ข.

คู่มือการใช้งานโปรแกรม SUTFoundation

# คู่มือการใช้งานโปรแกรม

## SUTFoundation v.1.0

---



---

พัฒนาโดย

นายจิระยุทธ สืบสุข

ผศ. ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข

## คำนำ

คู่มือการใช้งานโปรแกรมเล่มนี้จัดทำเพื่อเป็นคู่มือสำหรับช่วยผู้ใช้โปรแกรมในการเริ่มต้นใช้งานโปรแกรม SUTFoundation ประกอบด้วย 5 บท ได้แก่ บทที่ 1 แนะนำความสามารถของโปรแกรมโดยทั่วไป, บทที่ 2 แนะนำรูปร่างหน้าตาโปรแกรม ปุ่มการใช้งานต่างๆ พื้นการใช้งานเบื้องต้น, บทที่ 3 แนะนำการสร้าง/แก้ไข/บันทึก ข้อมูลชั้นดิน บทที่ 4 และ 5 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์และออกแบบที่ละขั้นตอนอย่างละเอียด

โปรแกรม SUTFoundation ขณะเขียนคู่มือฉบับนี้ คือ รุ่น Build 1.0.21 ผู้เขียนหวังว่าคู่มือการใช้งานโปรแกรมฉบับนี้จะช่วยให้ผู้อ่านสามารถใช้งานโปรแกรม SUTFoundation ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ หากมีข้อเสนอแนะติชมเพื่อการพัฒนาโปรแกรมต่อไปสามารถติดต่อผู้เขียนได้โดยตรงตามที่แสดงไว้ในคู่มือฉบับนี้

จิระยุทธ สืบสุข

สุขสันต์ หอพิบูลสุข

13 เมษายน 2549



## เกี่ยวกับโปรแกรม

SUTFoundation เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์และออกแบบฐานรากซึ่งได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อการวิเคราะห์กำลังรับแรงแบกทานของดินสำหรับฐานรากตื้นและการวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มทั้งแนวตั้งและแนวราบ และการออกแบบฐานรากทั้งฐานรากแผ่ ฐานรากร่วม ฐานรากแพ และฐานรากเสาเข็ม ซึ่งมีคุณลักษณะเด่นดังนี้

### สำหรับฐานรากตื้น (ฐานรากเดี่ยว, ฐานรากร่วม, ฐานรากแพ)

- คำนวณกำลังรับแรงแบกทานของดินสำหรับฐานรากตื้น ที่รับน้ำหนักบรรทุกแบบเยื้องศูนย์กลาง และโมเมนต์คด ของฐานรากรูปสี่เหลี่ยม, ฐานรากวงกลม และฐานรากแถบ
- สามารถคำนวณแบบลระดับน้ำใต้ดินเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของกำลังรับน้ำหนักประลัย
- สามารถคำนวณแบบเพิ่มระดับฝังฐานรากเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของกำลังรับน้ำหนักประลัย
- แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักประลัย และขนาดพื้นที่ของฐานราก (Area) หรือระดับน้ำใต้ดิน ( $GWL$ ) หรือระดับฝังฐานราก ( $D_f$ )
- ออกแบบหาขนาดของฐานรากเดี่ยวเพื่อรับน้ำหนักที่ต้องการโดยอัตโนมัติ
- ออกแบบหาความกว้าง ( $B$ ) ของฐานรากร่วมเพื่อรับน้ำหนักที่ต้องการโดยอัตโนมัติ
- คำนวณหน่วยแรงดันดินใต้ฐานราก, แรงเฉือนและโมเมนต์ของหน้าตัดที่ต้องการเมื่อฐานรากรับน้ำหนักบรรทุกเยื้องศูนย์กลางและโมเมนต์คดหลายๆ ทางพร้อมกัน
- คำนวณปริมาณและจำนวนเหล็กเสริมที่ต้องการในโครงสร้างฐานรากทั้งฐานรากเดี่ยว ฐานรากร่วมและฐานรากแพ

### สำหรับฐานรากเสาเข็ม

- กำหนดกำลังรับน้ำหนักประลัยแนวตั้งของเสาเข็ม ในชั้นดินหลายชั้น สามารถเลือกใช้พารามิเตอร์ได้
- กำหนดวิเคราะห์การเสียรูปของเสาเข็ม โมเมนต์คัตและแรงเฉือนในเสาเข็ม และแรงดันดินรอบเสาเข็มที่เกิดขึ้นเมื่อเสาเข็มรับแรงในแนวราบ
- กำหนดกำลังรับน้ำหนักประลัยแนวราบของเสาเข็ม
- ออกแบบหาขนาดและความยาวเสาเข็มที่ต้องการ
- กำหนดการกระจายลงในเสาเข็มกลุ่มเมื่อรับทั้งน้ำหนักบรรทุกแนวตั้งและโมเมนต์พร้อมกัน
- กำหนดแรงเฉือนและโมเมนต์ของหน้าตัดที่ต้องการ เมื่อฐานรากรับน้ำหนักบรรทุกเยื้องศูนย์และโมเมนต์พร้อมกัน
- กำหนดปริมาณและจำนวนเหล็กเสริมที่ต้องการในโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม

## บทที่ 1

### แนะนำโปรแกรม (Introduction)

โปรแกรม SUTFoundation เป็นเครื่องมือที่จะช่วยผู้ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบงานฐานรากทั้งฐานรากตื้นและฐานรากเสาเข็มได้อย่างรวดเร็วขึ้น ทั้งเพื่อการเรียนการสอนวิชาวิศวกรรมฐานราก (foundation engineering) โดยใช้การป้อนข้อมูลชั้นดินจาก Boring log เข้าสู่โปรแกรมด้วย Interface ที่ใช้งานได้ง่าย และสามารถเก็บข้อมูลชั้นดินเป็นฐานรากข้อมูลไว้ใช้งานได้อีกด้วย

SUTFoundation ช่วยในการแก้ปัญหาต่างๆ

- การคำนวณหาหน่วยแรงดันดินใต้ฐานรากตื้นเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกที่ซับซ้อน (รับน้ำหนักบรรทุกแนวตั้ง น้ำหนักบรรทุกแนวราบและโมเมนต์พร้อมๆ กัน)
- การคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัษย์เปรียบเทียบกันหลายสมการ และการคำนวณแบบเปลี่ยนแปลง ระดับน้ำใต้ดินหรือระดับฝังฐานราก
- การวิเคราะห์เสาเข็มรับน้ำหนักแนวนอน
- การออกแบบหาขนาดที่เหมาะสมของฐานรากตื้น
- การวิเคราะห์หาโมเมนต์และแรงเฉือนในแผ่นฐานรากเมื่อฐานรากรับน้ำหนักบรรทุกที่ซับซ้อน

#### 1.1 ระบบที่ต้องการ (System Requirements)

- Pentium 100 MHz หรือสูงกว่า, Ram 32 MB หรือสูงกว่า, Hard disk Space 50 MB หรือสูงกว่า (แนะนำ Pentium III- MHz, Ram 128 MB, Hard disk Space 500 MB )
- ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 98 หรือสูงกว่า (แนะนำ Windows XP)
- ไดรฟ์ซีดีรอม (สำหรับติดตั้งโปรแกรม)
- การ์ดแสดงผลที่สามารถแสดงผลที่ความละเอียดตั้งแต่ 800x600 ขึ้นไป (แนะนำ 1024x768)
- เมาส์และคีย์บอร์ด

## 1.2 ขั้นตอนการติดตั้งโปรแกรม

- ตรวจสอบระบบที่ต้องการ
- เปิดไฟล์ SUTFoundation.msi ใน โฟลเดอร์ที่เก็บไฟล์ไว้ จะมีหน้าต่างดังรูปที่ m1.1



รูปที่ m1.1 หน้าต่างการติดตั้งโปรแกรม

- ทำตามขั้นตอนที่แสดงในตัวติดตั้งโปรแกรม ทีละขั้นตามลำดับ
- เมื่อติดตั้งเสร็จจะมีกรอบโต้ตอบให้เลือกที่จะเริ่มระบบปฏิบัติการใหม่ ให้เลือกที่ Yes
- เมื่อเข้าสู่ระบบปฏิบัติการใหม่ จะมี Shortcut ของโปรแกรม SUTFoundation เป็น ไอคอนวางอยู่บน Desktop คลิกที่ Shortcut นี้เพื่อเข้าสู่โปรแกรม SUTFoundation
- หรืออาจเข้าสู่โปรแกรมได้อีกทางหนึ่ง โดยคลิกปุ่ม Windows Start menu > Programs option > SUTFoundation program group > SUTFoundation ไอคอน

เนื้อหาในกลุ่มมือการใช้งาน ประกอบด้วย


- บทที่ 1 แนะนำโปรแกรม (introduction)
- บทที่ 2 ภาพรวมของโปรแกรมและการใช้งานครั้งแรก
- บทที่ 3 พื้นฐานการใช้ของโปรแกรม
- บทที่ 4 การคำนวณความสามารถรับน้ำหนักของดินและเสาเข็ม
- บทที่ 5 การวิเคราะห์โครงสร้างแผ่นฐานราก
- บทที่ 6 การออกแบบฐานรากโดย SUTFoundation

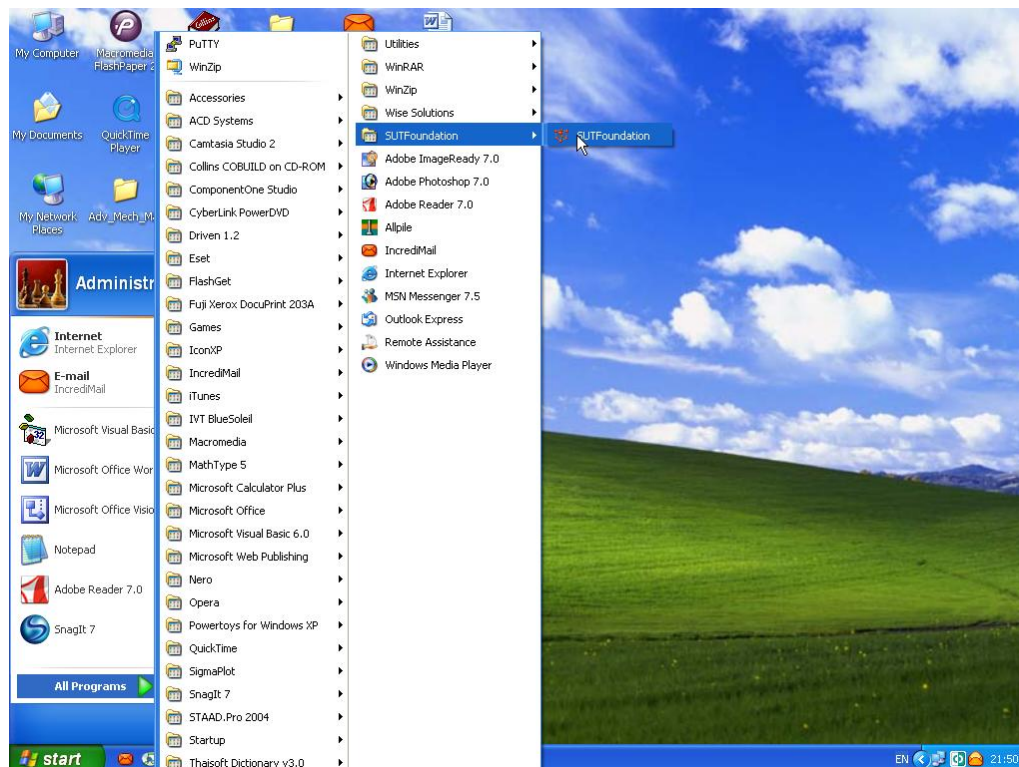
### 1.3 Getting Started

โปรแกรม SUTFoundation v.1.0 ประกอบด้วยโมดูลซึ่งจัดทำมาเพื่อช่วยผู้ใช้ในการสร้าง Project ด้านวิศวกรรมฐานราก ดังนี้

- **SPILE** - โมดูลสำหรับคำนวณกำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็มแนวตั้งและคำนวณหาการเสียวรูป, แรงเฉือน, โมเมนต์ และหน่วยแรงดันดินเมื่อเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกทุกแนวราบ
- **FGM** - โมดูลสำหรับวิเคราะห์แผ่นฐานรากโดยวิธีไฟไนต์กริดซึ่งมีตัวช่วยสำหรับสร้าง Model สำหรับฐานรากตื้นและฐานรากเสาเข็ม
- **BCCAL** - โมดูลสำหรับคำนวณกำลังรับแรงแบกทาน (Bearing capacity) ของชั้นดินใต้ฐานรากตื้น ซึ่งสามารถคำนวณแบบปรับเปลี่ยนระดับฐานราก ( $D_r$ ) และระดับน้ำใต้ดิน ( $GWL$ ) ได้ อีกทั้งยังสามารถปรับเปลี่ยนสมการที่ใช้คำนวณและพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ตามต้องการ
- โมดูลสำหรับการออกแบบ - โปรแกรม SUTFoundation ได้สร้างโมดูลสำหรับการออกแบบฐานราก สำหรับ ฐานรากเดี่ยว (ISOD), ฐานรากร่วม (COMBD), ฐานรากแพ (MATD) และ ฐานรากเสาเข็ม (PILED) โดยได้รวบรวมขั้นตอนการออกแบบลองผิดลองถูกเพื่อหาขนาดฐานราก และออกแบบเหล็กเสริมคอนกรีต

#### 1.3.1 การเริ่มโปรแกรม (Starting the program)

การเริ่มโปรแกรม SUTFoundation สามารถทำได้โดยไปที่ Window Start menu > Program option > SUTFoundation program group > SUTFoundation ไอคอน ดังรูปที่ m1.2 หรือคลิกที่ SUTFoundation ไอคอน  บน Desktop

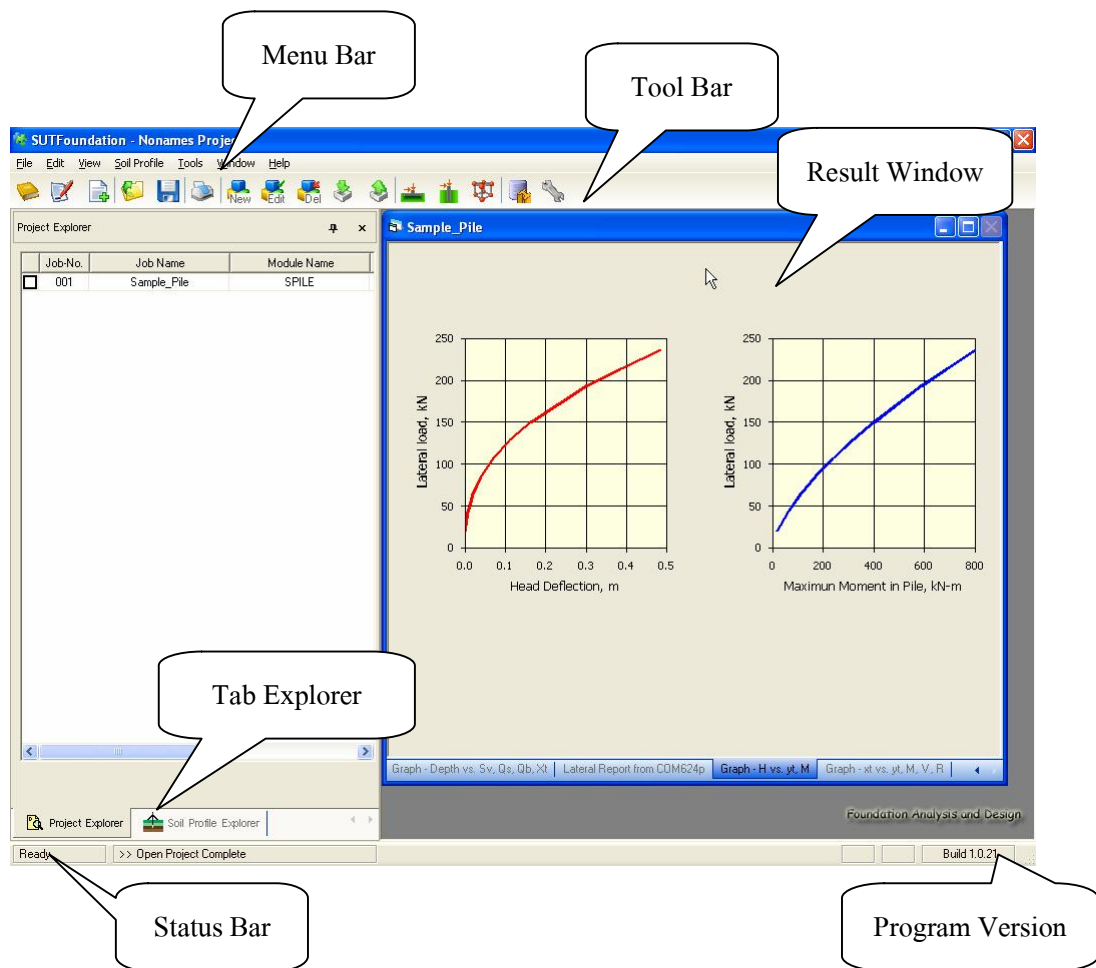


รูปที่ m1.2 การเข้าสู่โปรแกรม SUTFoundation

### 1.3.2 รายละเอียดส่วนประกอบของหน้าจอโปรแกรม

เมื่อเข้าสู่โปรแกรม SUTFoundation จะมีหน้าจอตั้งรูปที่ m1.3 ซึ่งมีส่วนประกอบของโปรแกรมหลักดังต่อไปนี้

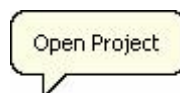
- แถบเมนู (Menu bar )
- แถบเครื่องมือ (Toolbar)
- Tab Explorer
- Job Explorer
- Soil Profile Explorer
- แถบสถานะ (Status bar)
- หน้าต่างแสดงผลลัพธ์ (Result windows)



รูปที่ m1.3 ตำแหน่งของส่วนประกอบโปรแกรม SUTFoundation

**ข้อความช่วยเหลือ (Tool tip help)**

ข้อความช่วยเหลือผู้ใช้ขณะใช้งานโปรแกรม ซึ่งจะแสดงเมื่อผู้ใช้งานเมาส์ชี้ที่ปุ่ม แถบ หรือช่องป้อนข้อมูลต่างๆ มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ m1.4



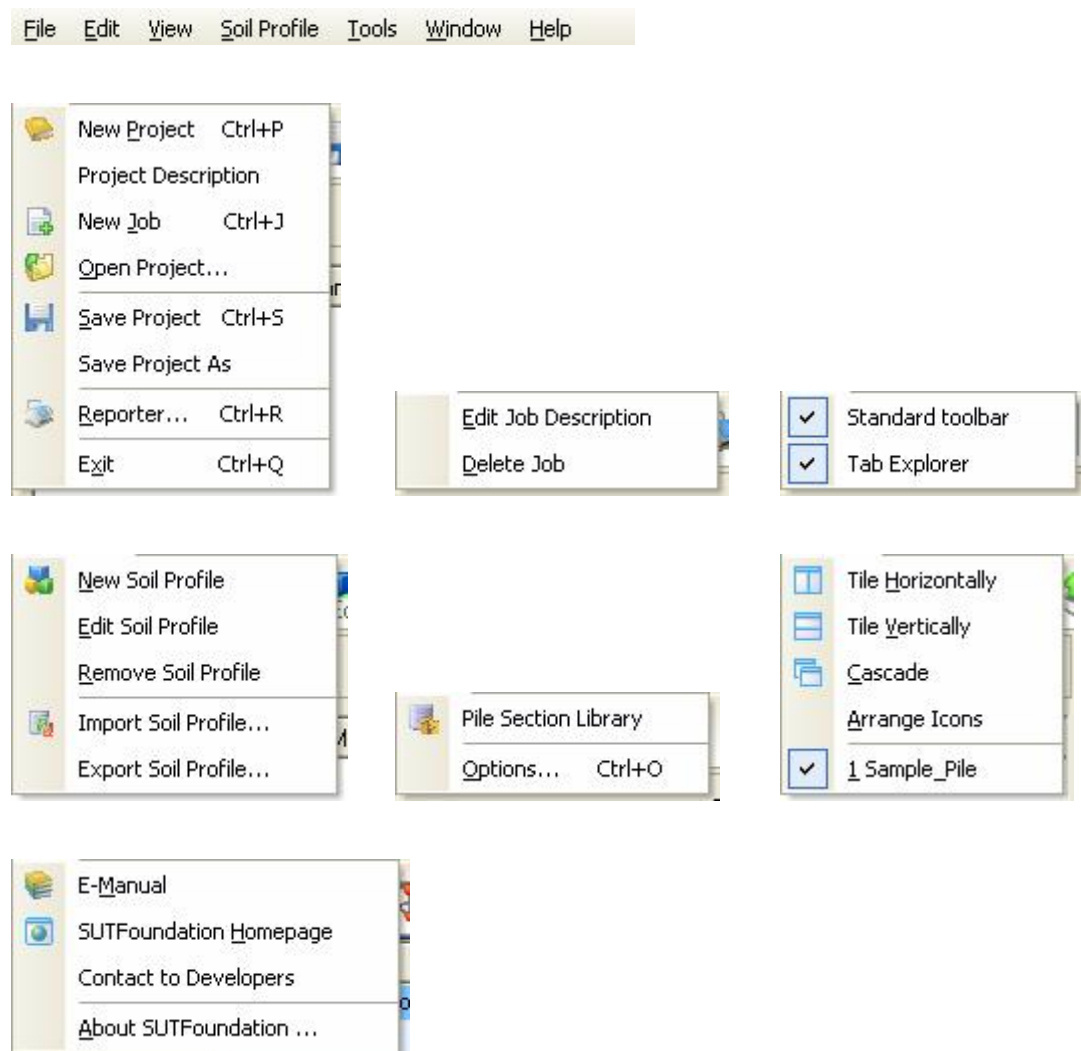
รูปที่ m1.4 ข้อความช่วยเหลือผู้ใช้ (tool tip help)



## แถบเมนู (Menu bar)

แถบเมนูเป็นเส้นทางเข้าสู่คำสั่งในการใช้งานต่างๆ ซึ่งมีส่วนประกอบดังแสดงในรูปที่

m1.5



รูปที่ m1.5 ส่วนประกอบแถบเมนู

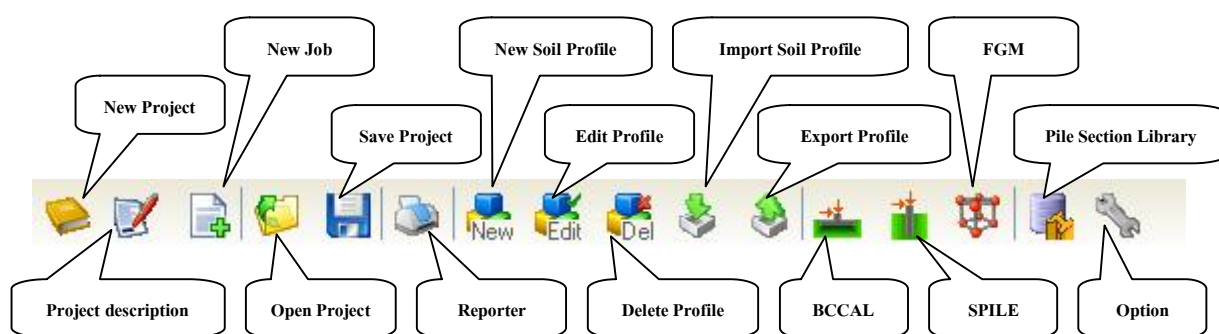
## คำอธิบายเพิ่มเติมสำหรับแถบเมนู

New Project	- สร้างโครงการใหม่
Project Description	- แก้ไขข้อมูลพื้นฐานของโครงการ
New Job	- เพิ่มเพิ่มงานใหม่ในโครงการ
Open Project	- เปิดโครงการเก่า
Save Project	- บันทึกโครงการ
Save Project As	- บันทึกโครงการในชื่อใหม่
Reporter	- เรียกโมดูลสำหรับสร้างและพิมพ์รายงาน
Exit	- ออกจากโปรแกรม
Edit Job Description	- แก้ไขข้อมูลของแผ่นงาน
Delete Job	- ลบแผ่นงานออกจากโครงการ
Standard toolbar	- เลือกที่จะแสดงแถบเครื่องมือหรือไม่
Tab Explorer	- เลือกที่จะแสดง Tab Explorer หรือไม่
New Soil Profile	- สร้างข้อมูลหลุมเจาะ
Edit Soil Profile	- แก้ไขข้อมูลหลุมเจาะ
Delete Soil Profile	- ลบข้อมูลหลุมเจาะ
Import Soil Profile	- นำข้อมูลหลุมเจาะจากฐานข้อมูลเข้าสู่โครงการ
Export Soil Profile	- บันทึกข้อมูลหลุมเจาะเป็นฐานข้อมูล
Pile Section Library	- เรียกใช้โมดูลแก้ไขข้อมูลหน้าตัดเสาเข็ม
Option	- เรียกใช้โมดูลเพื่อตั้งค่าต่างๆ ของโปรแกรม
Tile Horizontally	- จัดเรียงหน้าต่างในแนวตั้ง
Tile Vertically	- จัดเรียงหน้าต่างในแนวนอน
Cascade	- จัดเรียงหน้าต่างแบบวางลดหลั่นกัน
Arrange Icons	- จัดเรียงไอคอน

- |                        |                                   |
|------------------------|-----------------------------------|
| E-Manual               | - คู่มือการใช้งานผ่านอินเทอร์เน็ต |
| SUTFoundation Homepage | - เยี่ยมชมเว็บไซต์ของโปรแกรม      |
| Contact to Developers  | - ส่ง Email ติดต่อผู้พัฒนา        |
| About SUTFoundation    | - ข้อมูลเกี่ยวกับการพัฒนาโปรแกรม  |

### แถบเครื่องมือ (Toolbar)

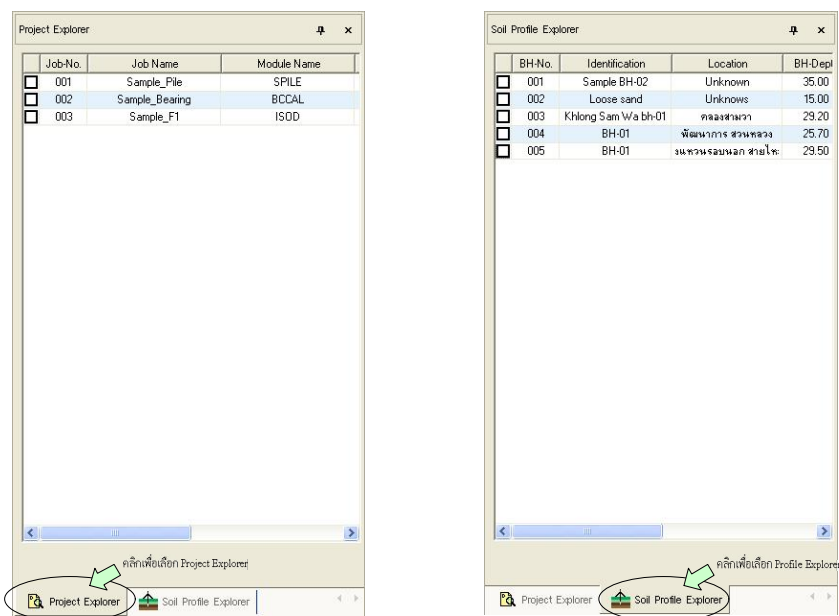
แถบเครื่องมือเป็นแถบรวมไอคอนสำหรับเป็นเส้นทางลัดสู่คำสั่งพื้นฐานที่ใช้งานบ่อยๆ คำอธิบายแสดงดังรูปที่ m1.6



รูปที่ m1.6 ตำแหน่งและรายละเอียดของแถบเครื่องมือ

### Tab Explorer

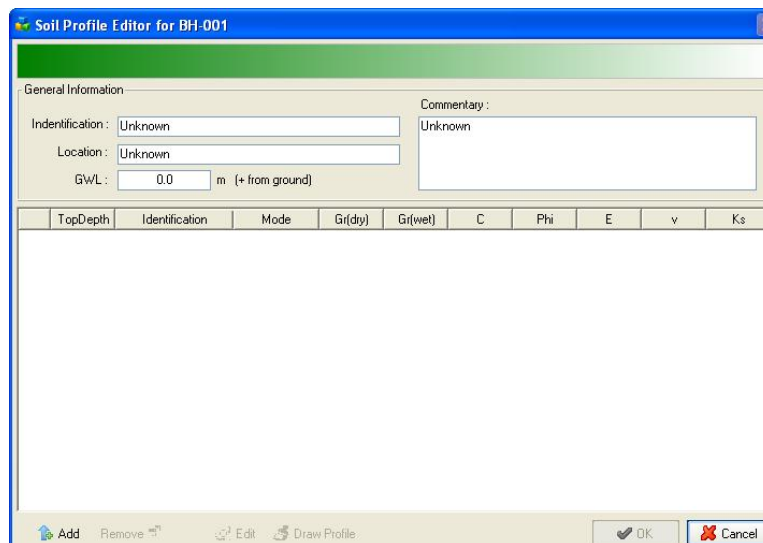
เป็นแถบสำหรับแสดงข้อมูลรายละเอียดของแผ่นงาน (Job) ภายในโครงการ (Project) ดังรูปที่ m1.7 และแสดงข้อมูลชั้นดิน (Soil profile) ดังรูปที่ m1.8



รูปที่ m1.7 หน้าจอ Project Explorer      รูปที่ m1.8 หน้าจอ Soil Profile Explorer

**หน้าจอสร้าง/แก้ไขข้อมูลชั้นดิน (Soil profile editor)**

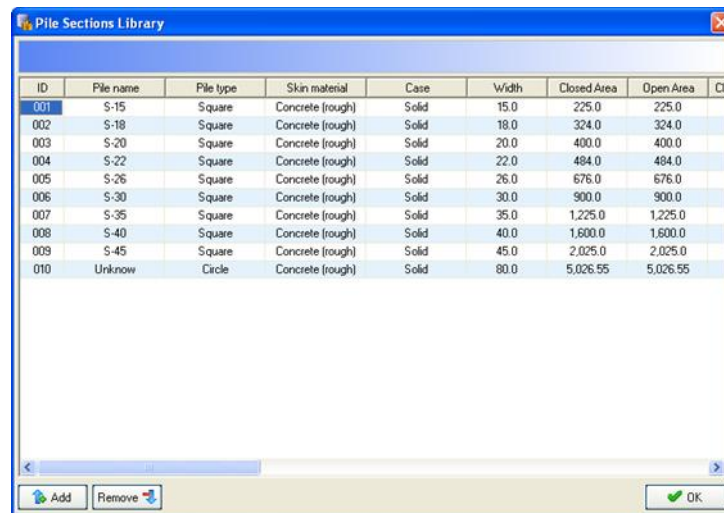
แสดงดังรูปที่ m1.9



รูปที่ m1.9 หน้าจอ Soil profile editor

## หน้าก่อสร้าง/แก้ไขข้อมูลหน้าตัดเสาเข็ม (pile section library)

แสดงดังรูปที่ m1.10

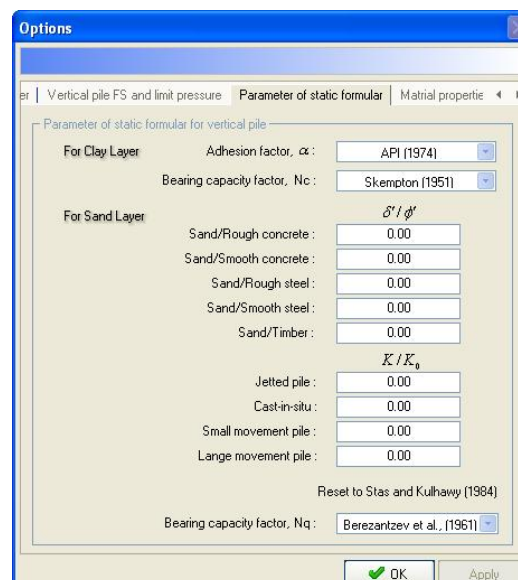


ID	Pile name	Pile type	Skin material	Case	Width	Closed Area	Open Area	CI
001	S-15	Square	Concrete (rough)	Solid	15.0	225.0	225.0	
002	S-18	Square	Concrete (rough)	Solid	18.0	324.0	324.0	
003	S-20	Square	Concrete (rough)	Solid	20.0	400.0	400.0	
004	S-22	Square	Concrete (rough)	Solid	22.0	484.0	484.0	
005	S-26	Square	Concrete (rough)	Solid	26.0	676.0	676.0	
006	S-30	Square	Concrete (rough)	Solid	30.0	900.0	900.0	
007	S-35	Square	Concrete (rough)	Solid	35.0	1,225.0	1,225.0	
008	S-40	Square	Concrete (rough)	Solid	40.0	1,600.0	1,600.0	
009	S-45	Square	Concrete (rough)	Solid	45.0	2,025.0	2,025.0	
010	Unknow	Circle	Concrete (rough)	Solid	80.0	5,026.55	5,026.55	

รูปที่ m1.10 หน้าจอ Pile Sections Library

## หน้าจอสำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในโปรแกรม (option)

แสดงดังรูปที่ m1.11



Options

Vertical pile FS and limit pressure | Parameter of static formulae | Material properties

Parameter of static formulae for vertical pile

For Clay Layer

Adhesion factor,  $\alpha$ : API (1974)

Bearing capacity factor,  $N_c$ : Skempton (1951)

For Sand Layer

$\delta' / \delta'$

Sand/Rough concrete: 0.00

Sand/Smooth concrete: 0.00

Sand/Rough steel: 0.00

Sand/Smooth steel: 0.00

Sand/Timber: 0.00

$K / K_0$

Jettied pile: 0.00

Cast-in-situ: 0.00

Small movement pile: 0.00

Large movement pile: 0.00

Reset to Stas and Kulhawy (1984)

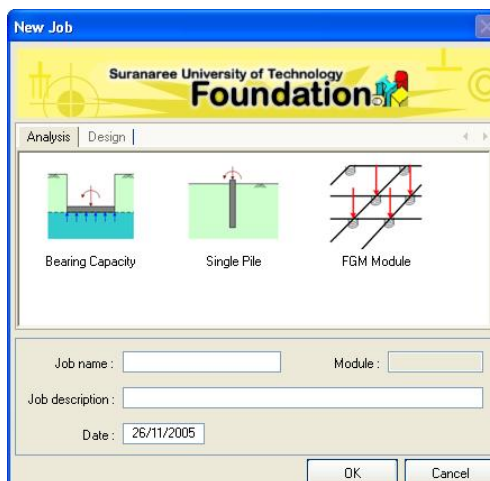
Bearing capacity factor,  $N_q$ : Berezantzev et al., (1961)

OK Apply

รูปที่ m1.11 หน้าจอ Option

หน้าต่างสำหรับเริ่มสร้างแผ่นงาน (New job)

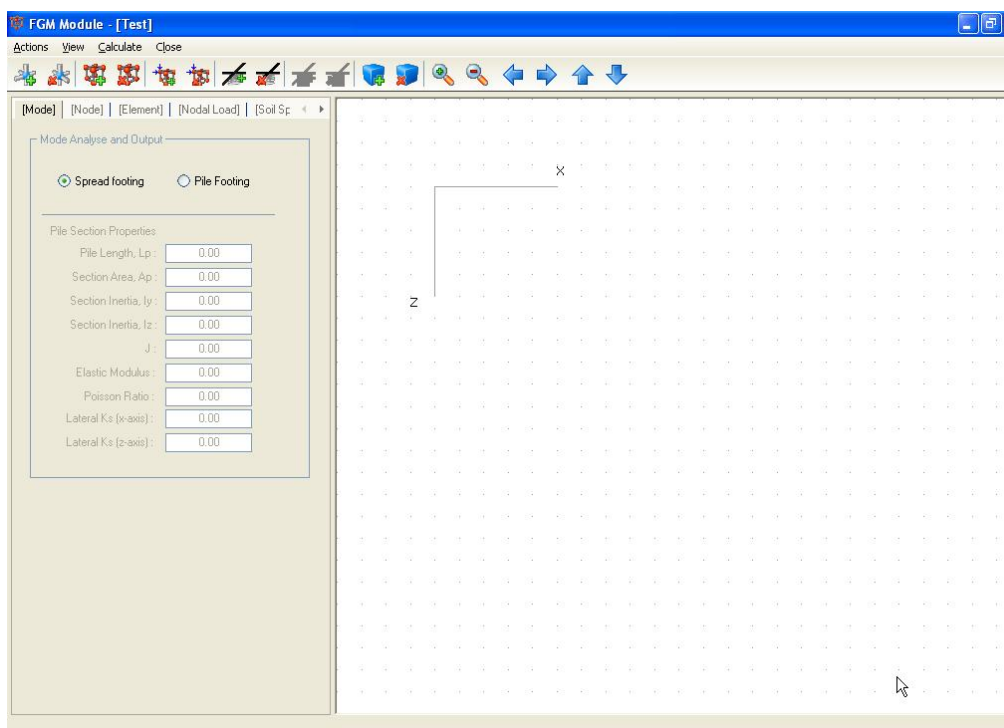
แสดงดังรูปที่ m1.12



รูปที่ m1.12 หน้าต่าง New Job

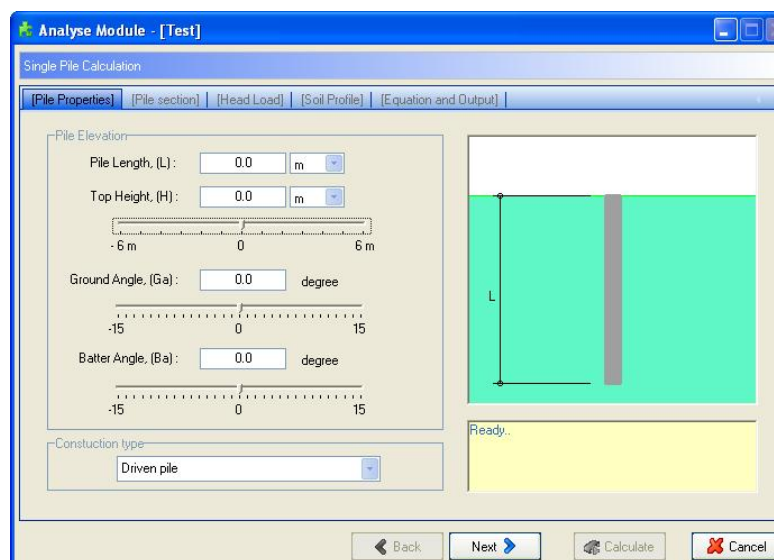
หน้าต่างของโมดูลการวิเคราะห์โดยไฟไนต์กริด (FGM – finite grid method analysis)

แสดงดังรูปที่ m1.13



รูปที่ m1.13 หน้าต่างของโมดูล FGM

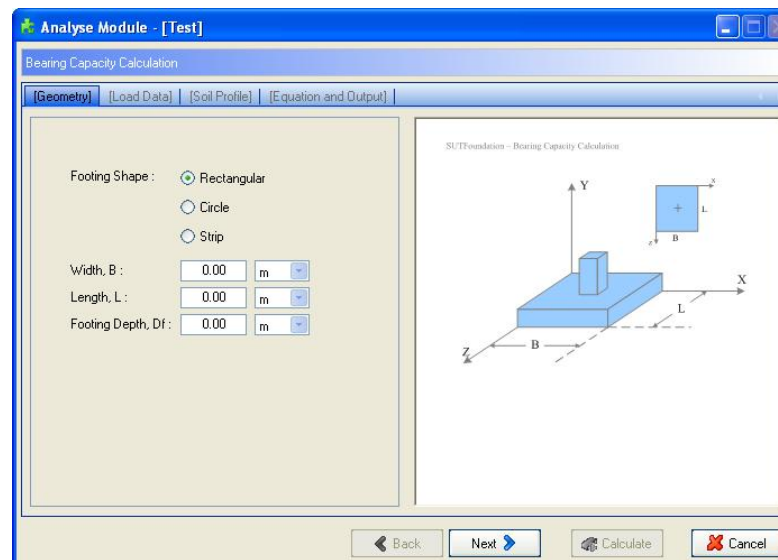
หน้าตัดของโมดูลการวิเคราะห์เสาเข็ม (SPILE – single pile analysis)  
แสดงดังรูปที่ ก1.14



รูปที่ m1.14 หน้าจอของโมดูล SPILE

หน้าต่างของโมดูลสำหรับคำนวณกำลังรับแรงแบกทาน (BCCAL – bearing capacity analysis)

แสดงดังรูปที่ m1.15

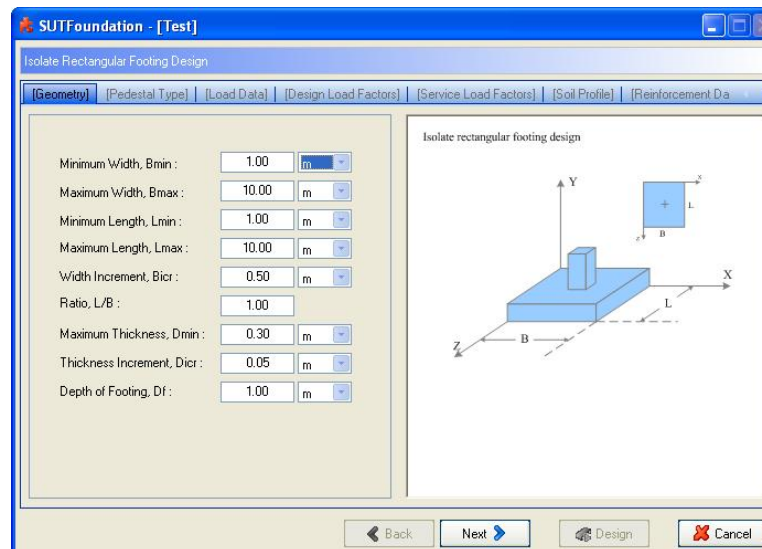


รูปที่ m1.15 หน้าต่างของโมดูล BCCAL

หน้าของโมดูลสำหรับออกแบบฐานรากเดี่ยว (ISOD – isolate footing design)

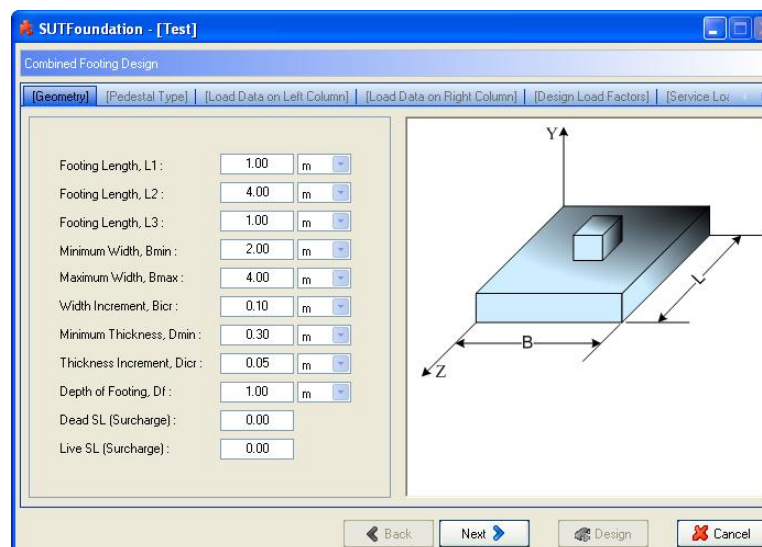
แสดงดังรูปที่ m1.16





รูปที่ m1.16 หน้าจอของโมดูล ISOD

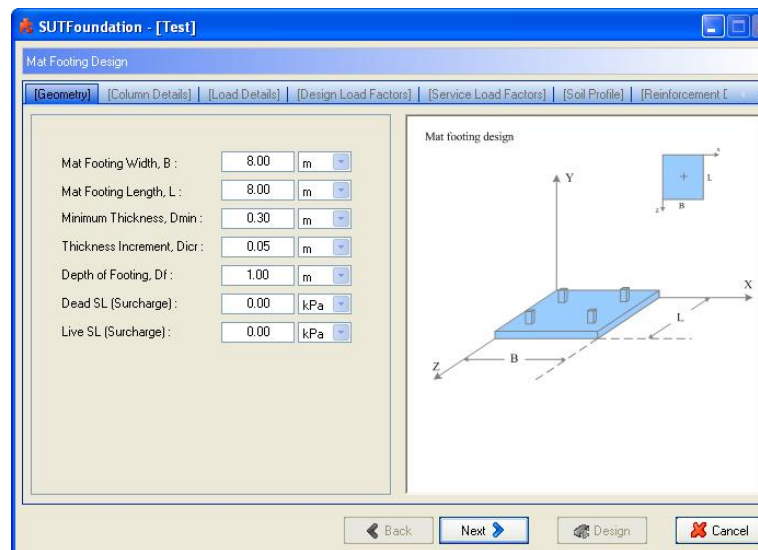
หน้าจอของโมดูลสำหรับออกแบบฐานรากร่วม (COMBD – Combined footing design)  
แสดงดังรูปที่ m1.17



รูปที่ m1.17 หน้าจอของโมดูล COMBD

หน้าของโมดูลสำหรับออกแบบฐานรากแพ (MATD – mat or raft footing design)

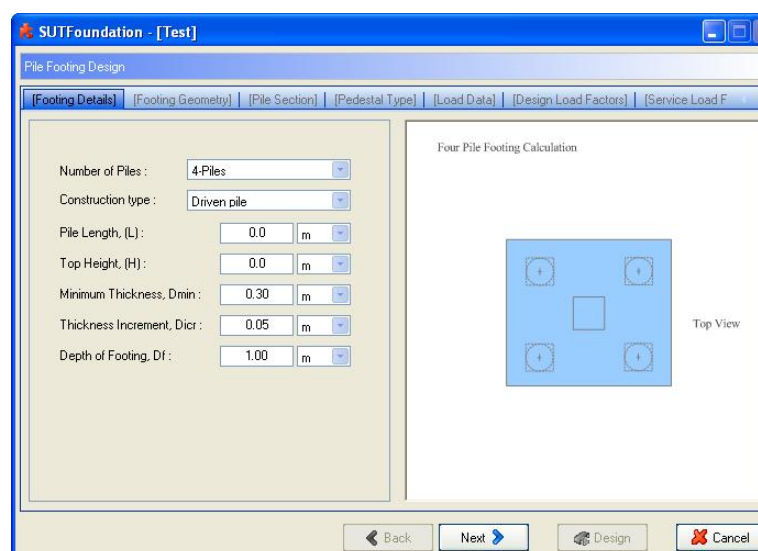
แสดงดังรูปที่ m1.18



รูปที่ m1.18 หน้าจอของโมดูล MATD

หน้าของโมดูลสำหรับออกแบบฐานรากเสาเข็ม (PILED – pile footing design)

แสดงดังรูปที่ m1.19



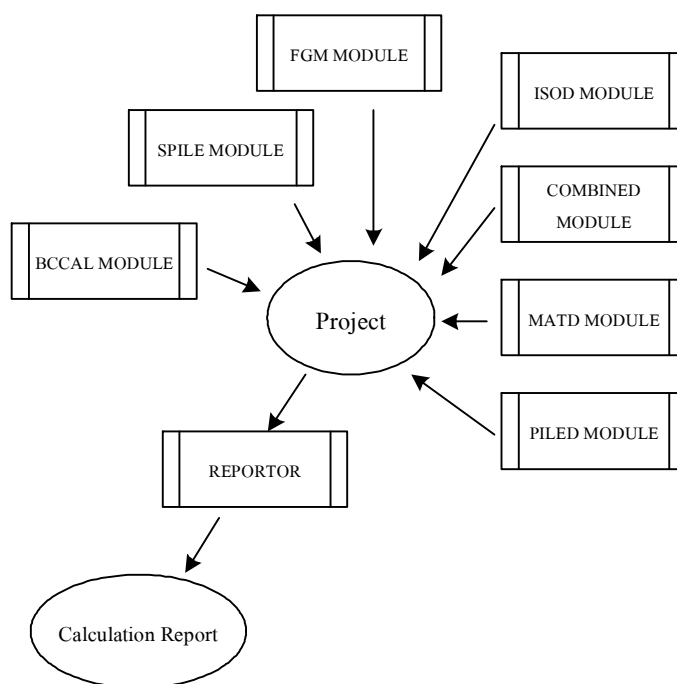
รูปที่ m1.19 หน้าจอของโมดูล PILED

## บทที่ 2

### ภาพรวมของโปรแกรมและการทำงานครั้งแรก

ในบทนี้จะแนะนำผู้ใช้ให้เห็นภาพรวมของโปรแกรมและการทำงานครั้งแรก (project) ครั้งแรกแบบเป็นขั้นตอนอย่างละเอียด

โปรแกรม SUTFoundation จะเป็นเสมือนเครื่องมือที่ช่วยผู้ใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์และออกแบบงานฐานรากแบบเป็นโครงการ (project) ซึ่งผู้ใช้สามารถเพิ่มหัวข้องานย่อยในการออกแบบเข้าสู่โครงการได้อย่างอิสระ โดยอาศัยโมดูลที่จัดเตรียมไว้ให้ในโปรแกรมดังรูปที่ ค2.1




รูปที่ ค2.1 ผังการทำงานของโปรแกรม SUTFoundation

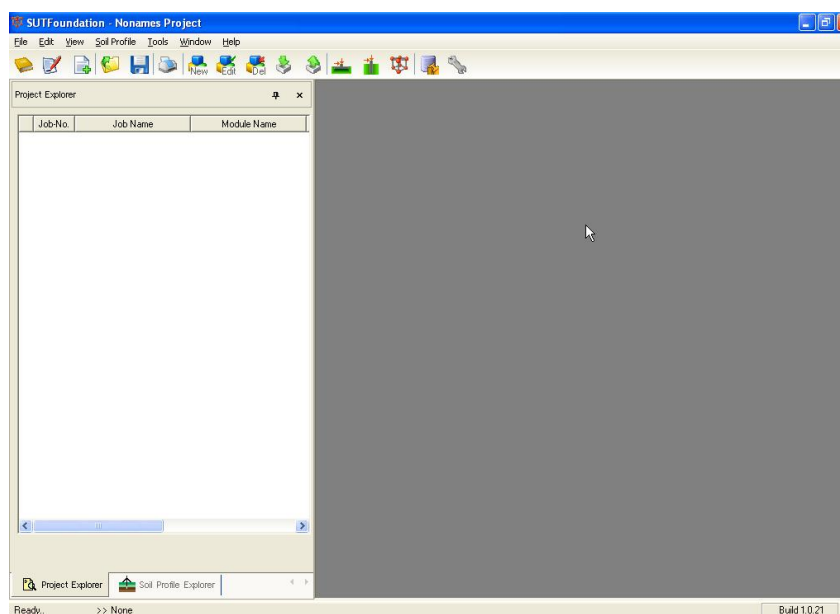
โดยขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ คือ เริ่มที่ > สร้างข้อมูลชั้นดินด้วย Soil profile editor > สร้างข้อมูล Input ของโดยโมดูลต่างๆ ที่โปรแกรมได้จัดเตรียมไว้ให้ > โปรแกรมทำการคำนวณ > แสดงข้อมูลผลลัพธ์เป็นกราฟ ตาราง และรูป > จบ

การสร้างรายงานจากผลลัพธ์ที่คำนวณได้สามารถทำได้โดยอาศัยโมดูล Reportor โมดูลนี้จะเป็นตัวสร้างรายงานที่ผู้ใช้ต้องการจะพิมพ์และปรับตั้งค่าต่างๆ ของพรินเตอร์

## 2.1 เริ่มต้นงานแรกกับโปรแกรม SUTFoundation

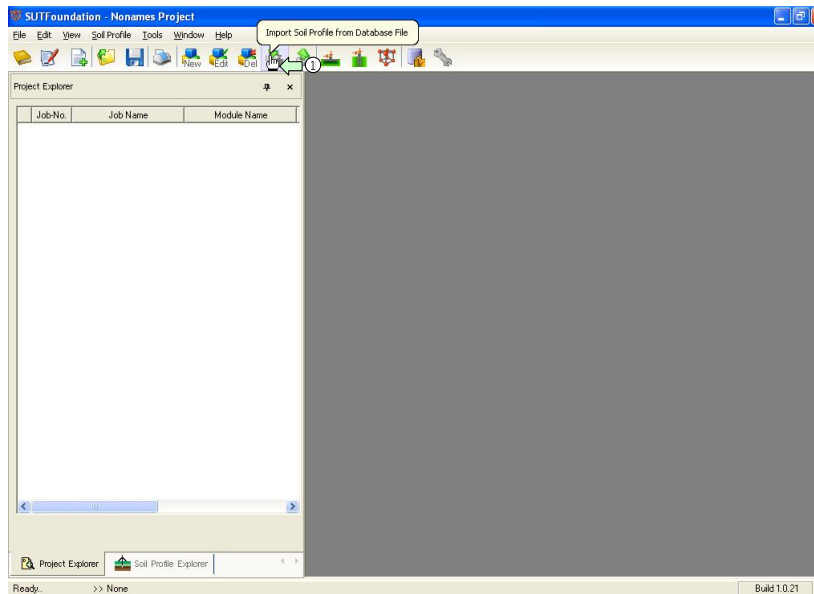
ผู้ใช้เริ่มสามารถเริ่มใช้โปรแกรม SUTFoundation ได้ดังขั้นตอนต่อไปนี้

- ขั้นตอนที่ 1 - เข้าสู่โปรแกรมโดย Window Start menu > Program option > SUTFoundation program group > SUTFoundation ไอคอน หรือคลิกที่ SUTFoundation ไอคอน  บน Desktop จะปรากฏหน้าจอดังรูปที่ m2.2



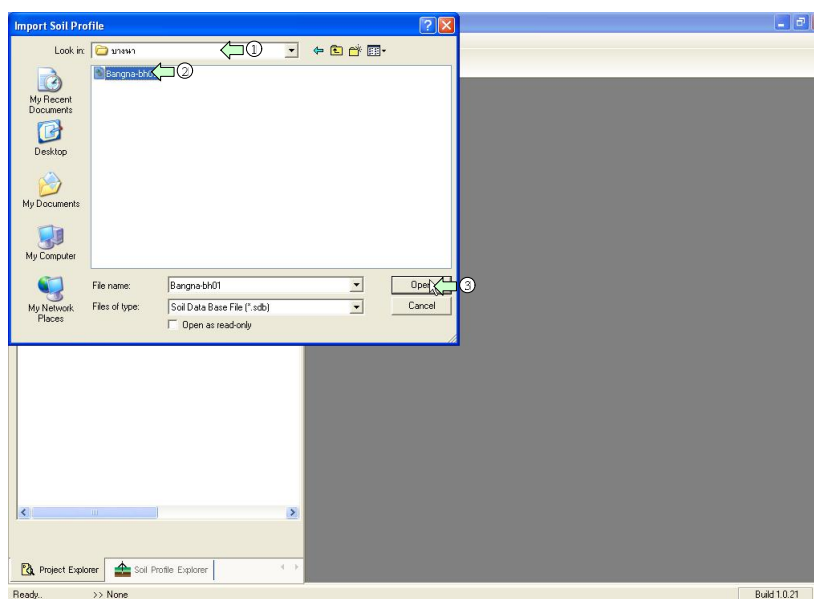
รูปที่ m2.2 ขั้นตอนการเข้าสู่โปรแกรม

- ขั้นตอนที่ 2 – เรียกข้อมูลหลุมเจาะจากฐานข้อมูลมาใช้



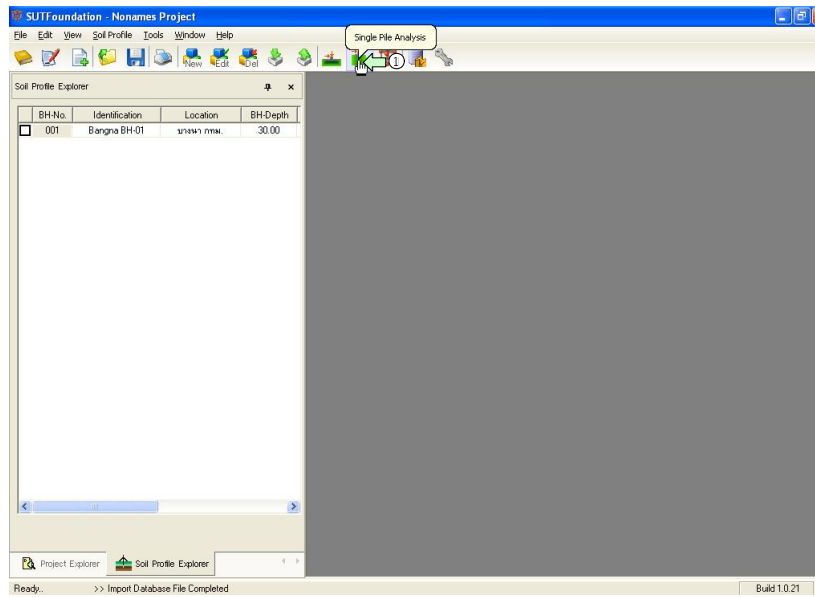
รูปที่ m2.3 ขั้นตอนการเรียกข้อมูลชั้นดินจากฐานข้อมูล

- ขั้นตอนที่ 3 – เลือกข้อมูลชั้นดินจากฐานข้อมูลของ โปรแกรม



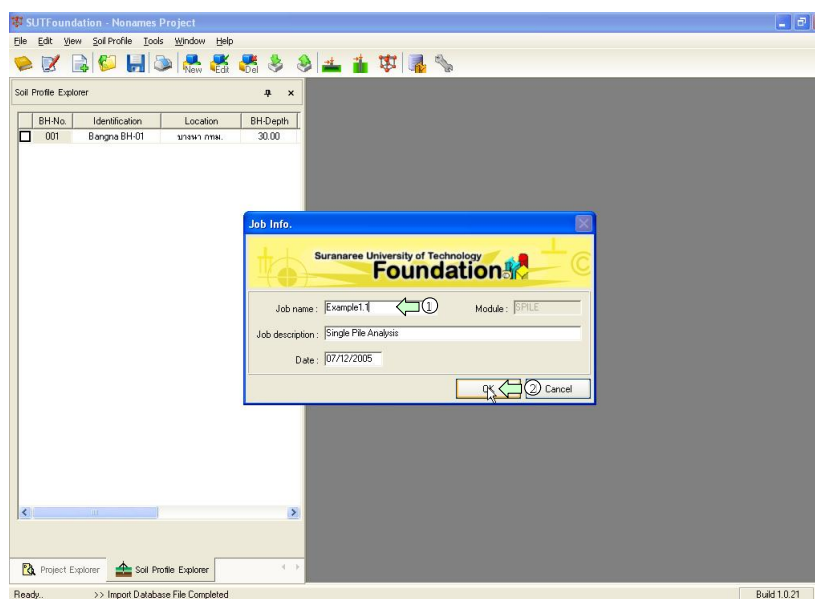
รูปที่ m2.4 การเลือกข้อมูลชั้นดิน

- ขั้นตอนที่ 4 – เรียกใช้โมดูลการออกแบบเสาเข็ม



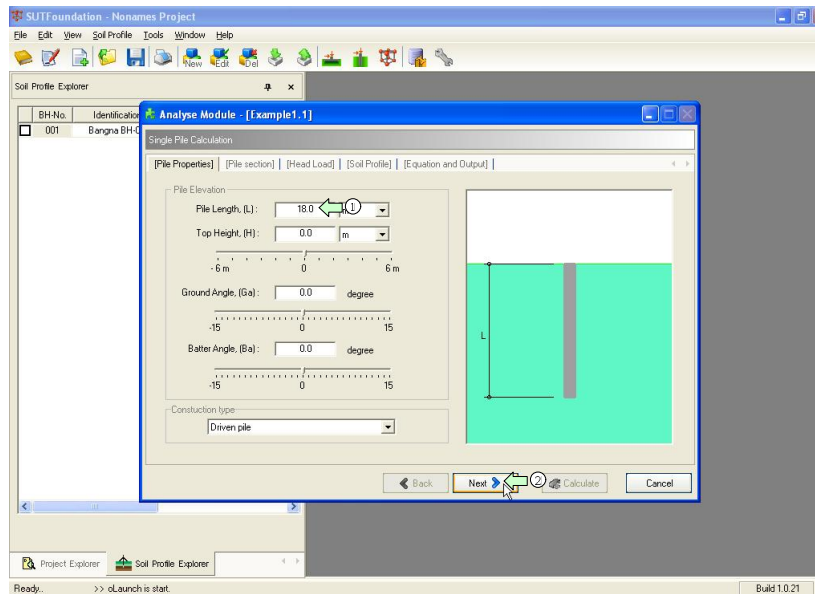
รูปที่ m2.5 การเรียกใช้โมดูลเสาเข็ม

- ขั้นตอนที่ 5 – ป้อนข้อมูลของแผ่นงานใหม่ตามต้องการ



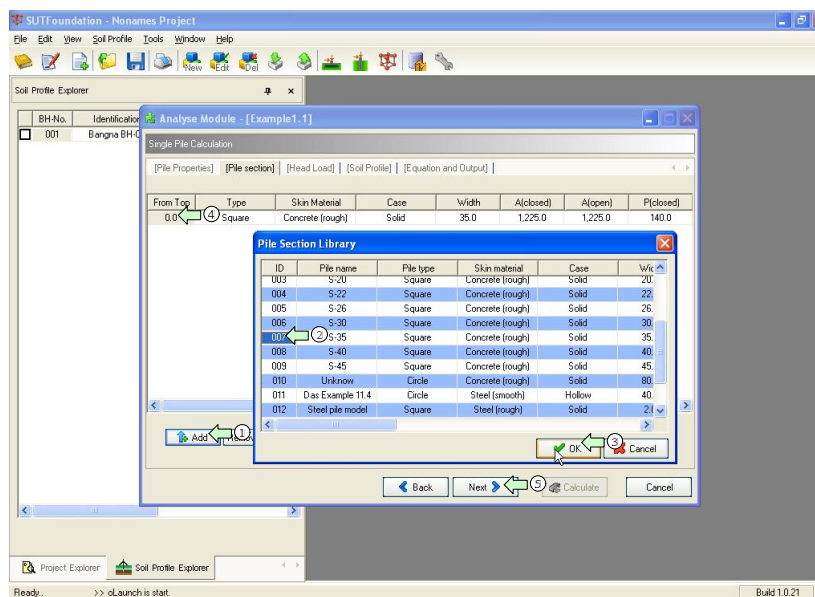
รูปที่ m2.6 การเรียกใช้โมดูลเสาเข็ม

- ขั้นตอนที่ 6 – ป้อนความยาวเสาเข็มที่ต้องการ



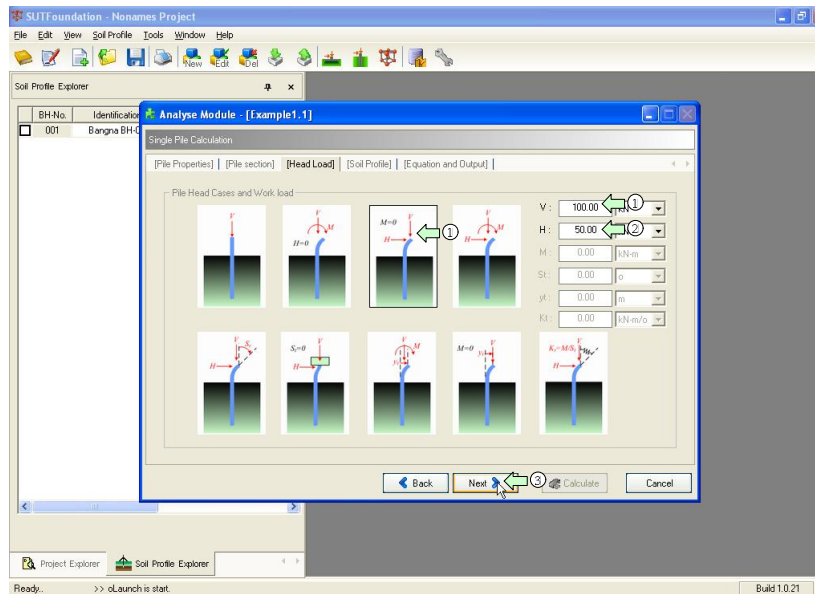
รูปที่ m2.7 การเรียกใช้โมดูลเสาเข็ม

- ขั้นตอนที่ 7 – การเลือกหน้าตัดเสาเข็มที่ต้องการ



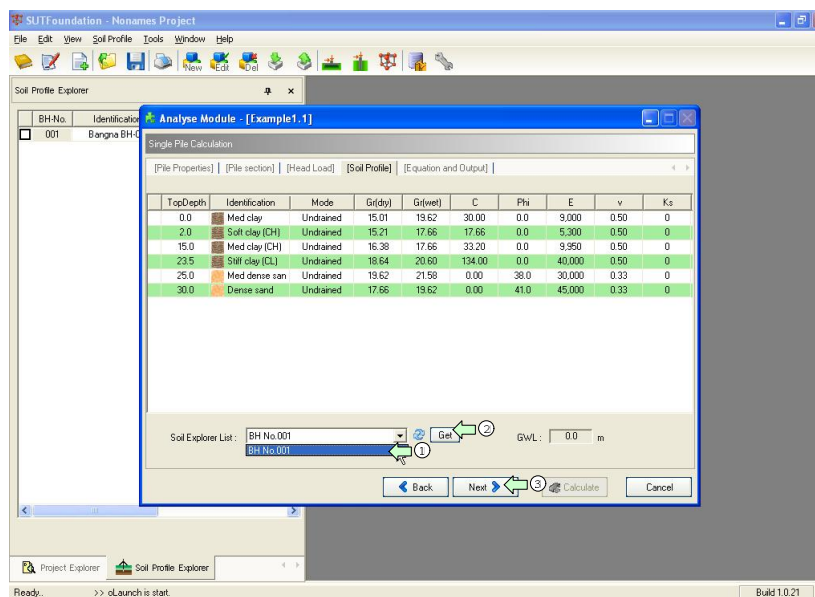
รูปที่ m2.8 การเรียกใช้โมดูลเสาเข็ม

- ขั้นตอนที่ 8 – เลือกเงื่อนไขการยึดรั้งของหัวเข็มและน้ำหนักบรรทุก



รูปที่ m2.9 การเรียกใช้โมดูลเสาเข็ม

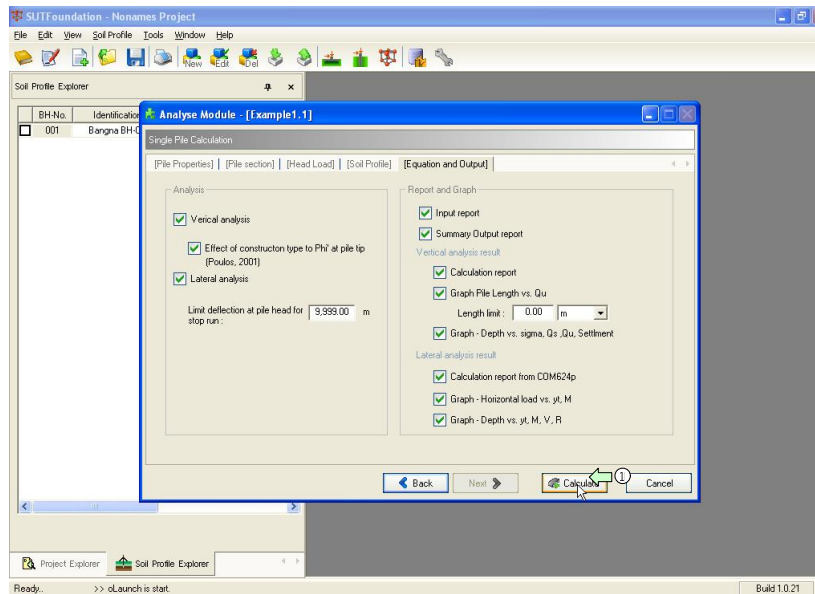
- ขั้นตอนที่ 9 – เลือกข้อมูลชั้นดินที่ได้เรียกมาจากฐานข้อมูล



รูปที่ m2.10 การเรียกใช้โมดูลเสาเข็ม

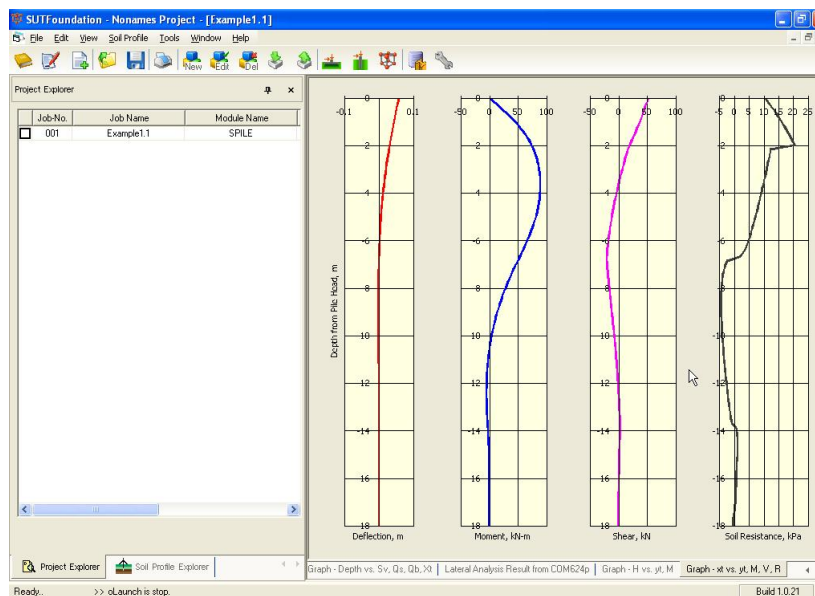


- ขั้นตอนที่ 10 – เริ่มการวิเคราะห์



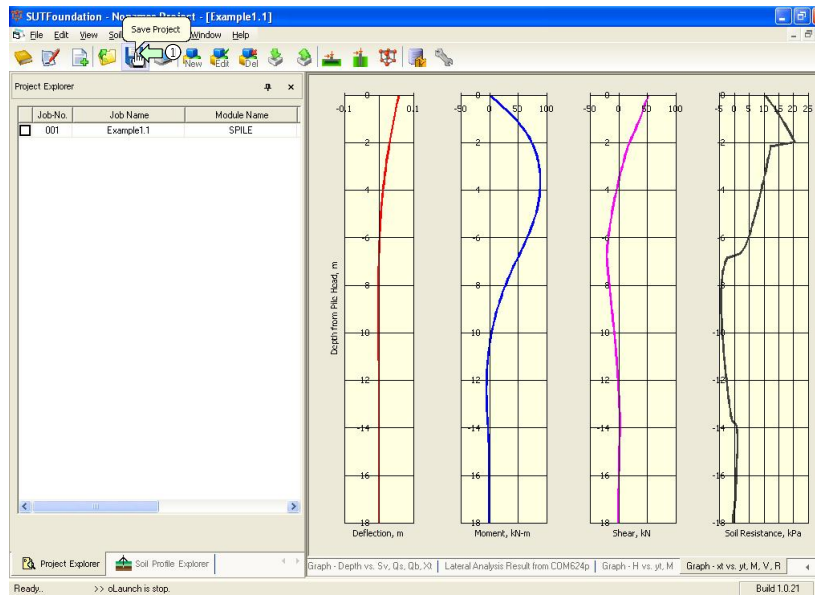
รูปที่ m2.11 การเรียกใช้โมดูลเสาเข็ม

- ขั้นตอนที่ 11 – ผลการวิเคราะห์



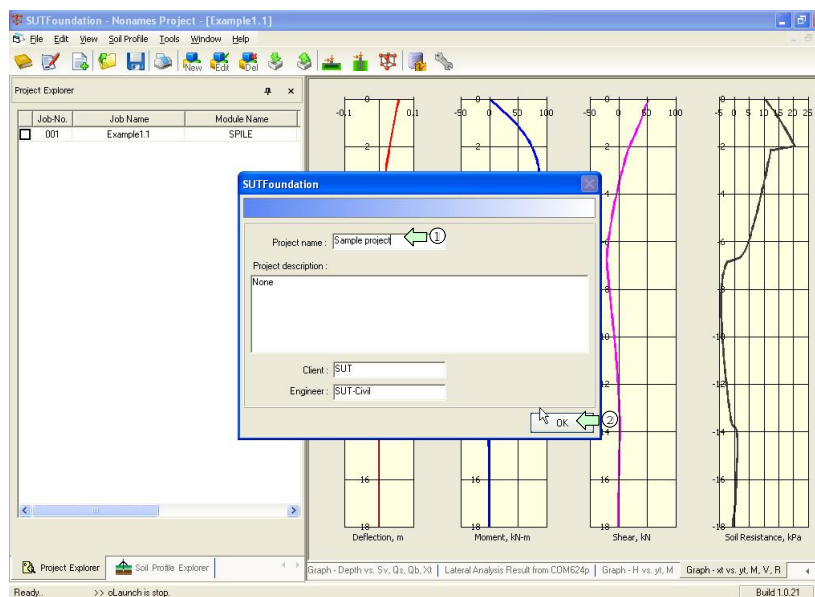
รูปที่ m2.12 การเรียกใช้โมดูลเสาเข็ม

- ขั้นตอนที่ 12 – การบันทึกโครงการทั้งหมด



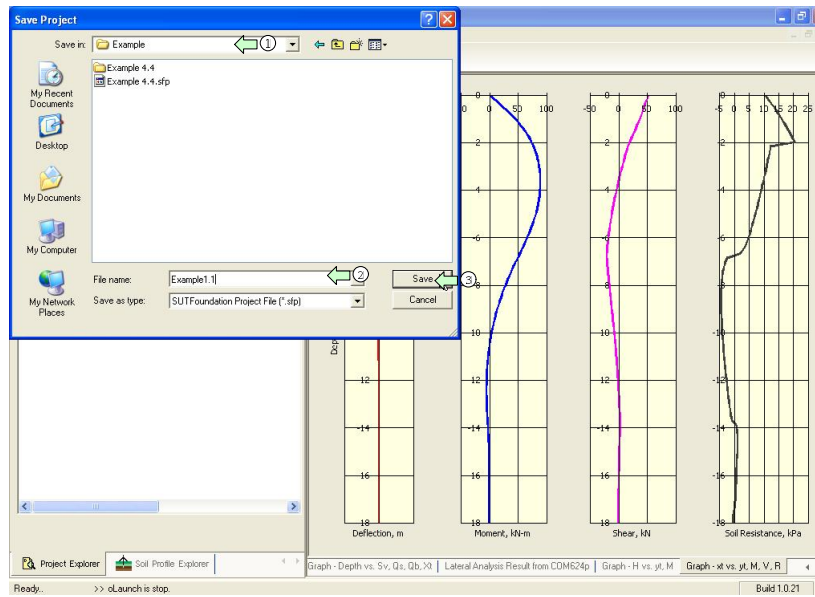
รูปที่ m2.13 การเรียกใช้โมดูลเสาเข็ม

- ขั้นตอนที่ 13 – ป้อนข้อมูลของโครงการที่ต้องการ



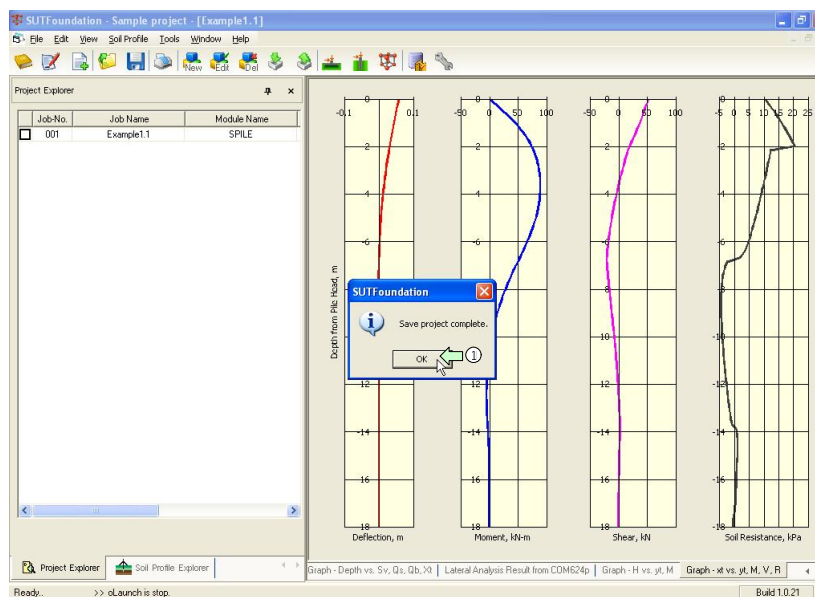
รูปที่ m2.14 การเรียกใช้โมดูลเสาเข็ม

- ขั้นตอนที่ 14 – ป้อนชื่อไฟล์ที่ต้องการบันทึก



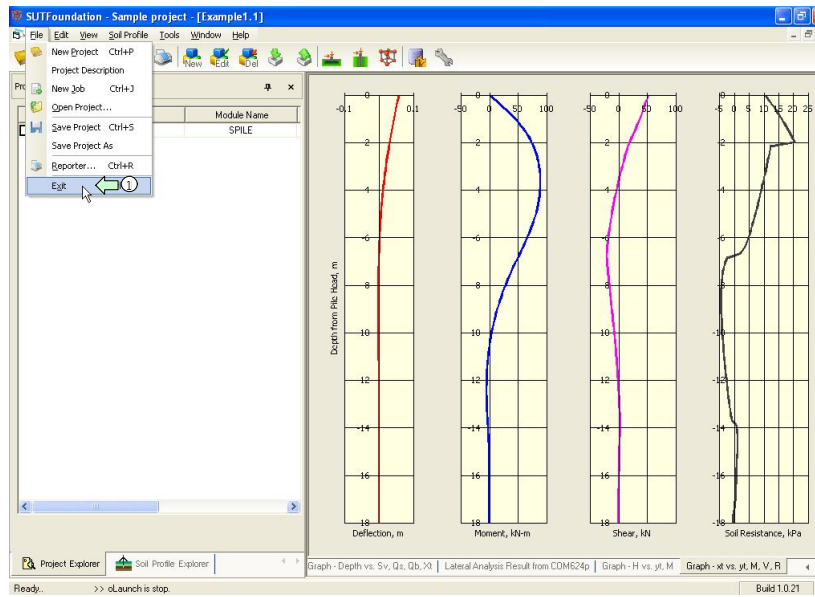
รูปที่ m2.15 การเรียกใช้โมดูลเสถียร

- ขั้นตอนที่ 15 – เมื่อบันทึกเสร็จจะปรากฏหน้าจอแสดงในรูปที่ m2.16



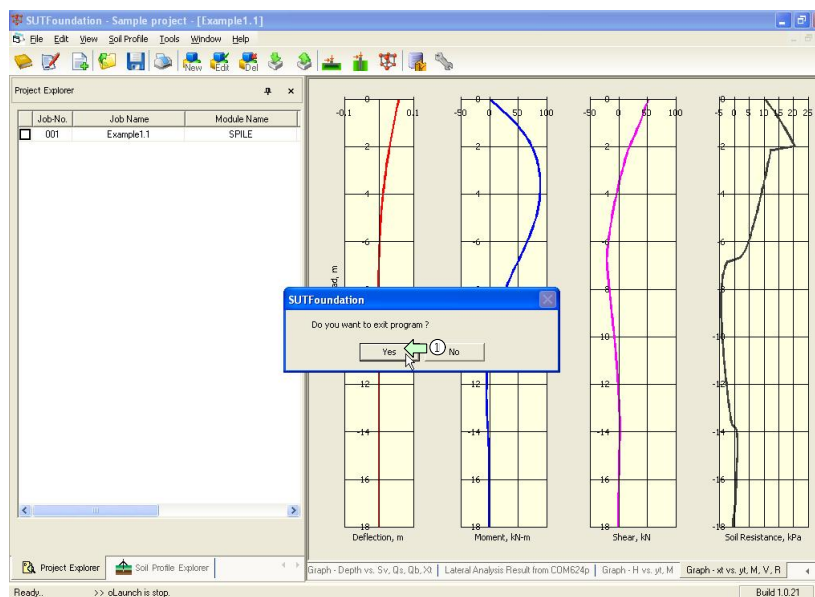
รูปที่ m2.16 หน้าจอเมื่อกำหนดเสร็จ

- ขั้นตอนที่ 16 – การออกจากโปรแกรม



รูปที่ m2.17 การออกจากโปรแกรม

- ขั้นตอนที่ 17 – หน้าจอยืนยันการออกจากโปรแกรม



รูปที่ m2.18 การเรียกใช้โมดูลเสริม

## บทที่ 3

### พื้นฐานการใช้งานโปรแกรม

ในบทนี้จะแนะนำถึงการใช้งานพื้นฐานของ SUTFoundation เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการสร้างโครงการ (Project) ในบทต่อไป โดยการใช้งานพื้นฐานแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆ ได้ดังนี้

- การจัดการทั่วไป
- การจัดการชั้นดิน
- การจัดการหน้าตัดเสาเข็ม
- การตั้งค่าพื้นฐานของโปรแกรม

#### 3.1 การจัดการทั่วไป (general)

##### 3.1.1 ระบบหน่วย (unit)

ระบบหน่วยที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมดของโปรแกรมจะใช้ระบบ SI ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- หน่วยความยาวเป็นเมตร (m)
- หน่วยของแรงเป็นกิโลนิวตัน (kN)
- หน่วยของความดันเป็นกิโลปาสคาล (kPa)

การแปลงหน่วยสำหรับการป้อนข้อมูลในการวิเคราะห์และออกแบบ เมื่อต้องการป้อนข้อมูลที่มีหน่วยต่างจากหน่วยพื้นฐานข้างต้นสามารถทำได้ดังรูปตัวอย่าง

Width, B :	<input type="text" value="3.00"/>	<input type="text" value="m"/>
Length, L :	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="cm"/>
Footing Depth, Df :	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="mm"/>

Axial, Py =	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="kN"/>
Horizontal in x axis, Hx =	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="kg"/>
Horizontal in z axis, Hz =	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="ton"/>
Moment around x-axis, Mx =	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="N"/>
Moment around z-axis, Mz =	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="kN"/>
Eccentric in x-axis, ex =	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="lb"/>
Eccentric in z-axis, ez =	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="kip"/>
		<input type="text" value="kN-m"/>

Axial, Py =	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="kN"/>
Horizontal in x axis, Hx =	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="kN"/>
Horizontal in z axis, Hz =	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="kN"/>
Moment around x-axis, Mx =	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="kN-m"/>
Moment around z-axis, Mz =	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="kg-m"/>
Eccentric in x-axis, ex =	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="ton-m"/>
Eccentric in z-axis, ez =	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="N-m"/>
		<input type="text" value="kN-m"/>
		<input type="text" value="lb-ft"/>
		<input type="text" value="kip-ft"/>

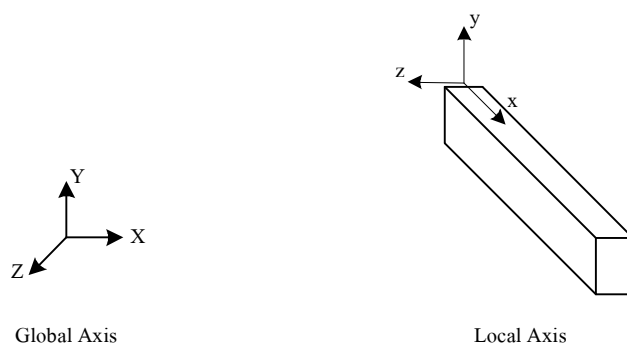
รูปที่ ค3.1

สำหรับการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์คริต การป้อนข้อมูลจะไม่ต้องมีการระบุหน่วยแต่อย่างใด สามารถทราบหน่วยของผลลัพธ์ได้โดยอ้างอิงจากหน่วยของข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่โปรแกรม เช่น ป้อนข้อมูลพิกัด และหน่วยความยาวต่างๆ เข้าสู่โปรแกรม เป็นหน่วยเมตร ดังนั้น ผลลัพธ์จึงโปรแกรมก็จะรายงานระยะการเคลื่อนที่ของจุดต่อออกมาเป็นหน่วยเมตรเช่นกัน เป็นต้น

### 3.1.2 ระบบแกนรวม (global Axis) และระบบแกนองค์อาคาร (local axis)

ระบบแกนรวม (global axis) หมายถึง ระบบแกนรวมของโครงสร้างทั้งหมด

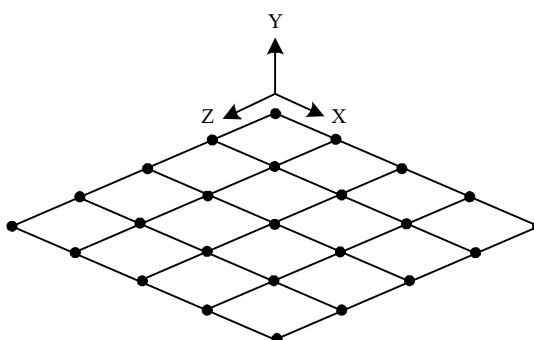
ระบบแกนองค์อาคาร (local axis) หมายถึง ระบบแกนย่อยขององค์อาคาร



รูปที่ m3.2 ระบบแกนรวม และระบบแกนองค์อาคาร

### 3.1.3 พิกัดจุดต่อ (nodal coordinate)

โดยพื้นฐาน โปรแกรมพิจารณาพิกัดจุดต่อขององค์ประกอบ โครงสร้างอยู่บนระนาบ  $X-Z$  และจะพิจารณาการเสียรูปในแนวตั้งของฐานรากตามแนวแกน  $Y$



รูปที่ m3.3

ในโมดูลของการออกแบบโปรแกรมจะสร้างพิกัดจุดต่อให้โดยอัตโนมัติ แต่ในโมดูลของการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์กริดนั้นผู้ใช้ต้องสร้างพิกัดจุดของโครงสร้างเอง

### 3.1.4 คุณสมบัติของวัสดุ (material properties)

คุณสมบัติของวัสดุโครงสร้างที่ต้องป้อนสู่โปรแกรม ประกอบด้วย

- โมดูลัสยืดหยุ่น ( $E$ ) โดยโปรแกรมจะพิจารณาเป็นโครงสร้างฐานรากเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งโมดูลัสยืดหยุ่นจะขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคอนกรีต
- อัตราส่วนโพซอง โดยค่าปกติของโปรแกรม อัตราส่วนโพซองของคอนกรีต จะให้กับ 0.15 อัตราส่วนโพซองของคอนกรีต จะให้กับ 0.33

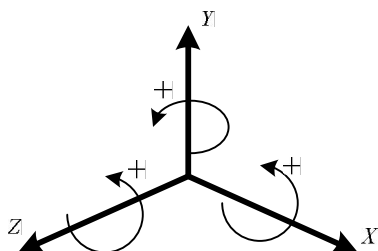
คุณสมบัติของดินที่ต้องป้อนสู่โปรแกรม ประกอบด้วย

- หน่วยน้ำหนัก (unit weight)
- พารามิเตอร์กำลัง ได้แก่ หน่วยแรงยึดเกาะ (cohesion) และมุมเสียดทานภายใน (phi angle)
- พารามิเตอร์ความแกร่ง ได้แก่ โมดูลัสยืดหยุ่น ( $E_s$ ) และอัตราส่วนโพซอง ( $\nu_s$ ) หรือ Vertical sub-grade reaction ( $k_v$ ) และ Horizontal sub-grade reaction ( $k_h$ )

### 3.1.5 น้ำหนักบรรทุก (load)

น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในโปรแกรมจะเป็นน้ำหนักบรรทุกที่กระทำที่จุดต่อและพิจารณาในระบบแกนรวมทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งประกอบด้วย

- น้ำหนักบรรทุกตามแนวตั้งตามแกน  $Y$  มีค่าเป็นบวกเมื่อทิศทางสวนกับแกน  $Y$
- น้ำหนักบรรทุกแนวราบตามแนวแกน  $X$  มีค่าเป็นบวกเมื่อมีทิศทางตามแกน  $X$
- น้ำหนักบรรทุกแนวราบตามแนวแกน  $Z$  มีค่าเป็นบวกเมื่อมีทิศทางตามแกน  $Z$
- โมเมนต์รอบแกน  $X$  มีค่าเป็นบวกเมื่อมีทิศทวนเข็มนาฬิกาตามกฎมือขวา
- โมเมนต์รอบแกน  $Z$  มีค่าเป็นบวกเมื่อมีทิศทวนเข็มนาฬิกาตามกฎมือขวา



รูปที่ 3.4 ค่าบวกของน้ำหนักบรรทุกและโมเมนต์



## 3.2 การจัดการชั้นดิน

### 3.2.1 ระบบของการจัดเก็บชั้นดิน

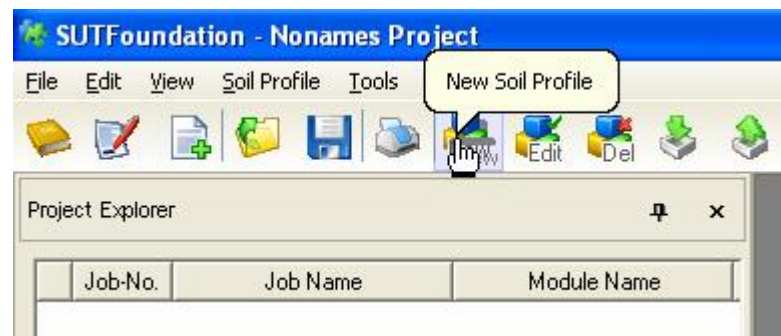
ข้อมูลชั้นดินในโปรแกรม SUTFoundation สามารถจัดเก็บเป็นข้อมูลชั้นดินของทั้งหลุมเจาะ (borehole) และจัดเก็บไว้เป็นฐานข้อมูลดิน (soil database) สามารถนำมาใช้งานได้สะดวก โดยข้อมูลชั้นดินจะประกอบด้วย

- ระดับของชั้นดิน (top depth) วัดตามความลึกของหลุมเจาะตามแนวตั้งจากผิวดินที่อ้างอิงถึงระดับสูงสุดของชั้นดิน
- ชื่อของชั้นดิน (identification)
- ประเภทของชั้นดินแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ดินเหนียว (clay) และดินทราย (sand)
- ประเภทการคำนวณแบ่งเป็น หน่วยแรงรวม และหน่วยแรงประสิทธิภาพ
- หน่วยน้ำหนักของชั้นดินเหนือระดับน้ำ ( $\gamma_{dry}$ )
- หน่วยน้ำหนักของชั้นดินใต้ระดับน้ำ ( $\gamma_{wet}$ )
- หน่วยแรงยึดเกาะ ( $c$ )
- มุมเสียดทานภายใน ( $\phi$ , degree)
- โมดูลัสยืดหยุ่นของดิน ( $E_s$ )
- อัตราส่วนโพซอง ( $\nu_s$ )
- Vertical Sub-grade reaction ( $k_s$ )
- Horizontal Sub-grade reaction ( $k_h$ )


### 3.2.2 การสร้างข้อมูลชั้นดิน (soil profile)

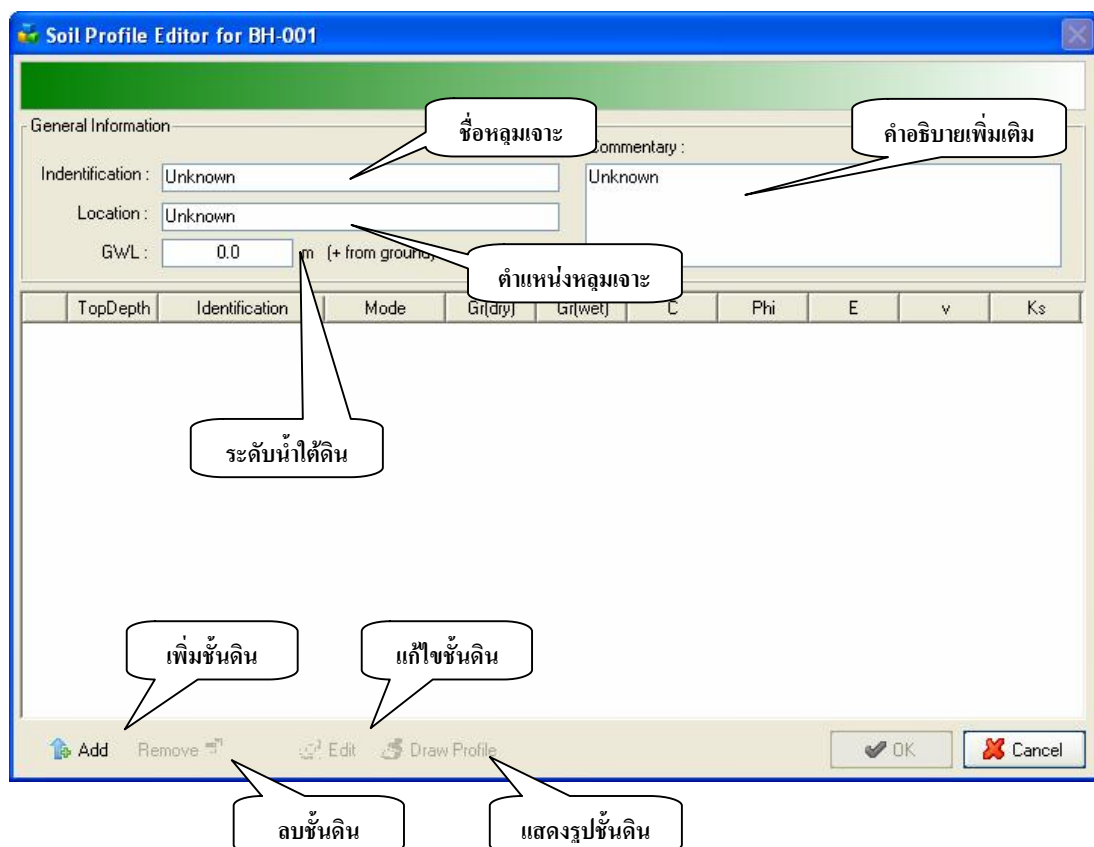
ผู้ใช้งานสามารถเริ่มสร้างข้อมูลชั้นดินได้ดังขั้นตอนต่อไปนี้

- การเริ่มสร้างข้อมูลชั้นดินทำได้ 2 ทาง โดยทาง Menu และทาง Toolbar Menu bar > Soil Profile > New Soil Profile คลิก หรือ ทาง Toolbar ดังรูปที่ m3.5



รูปที่ m3.5 การเริ่มสร้างข้อมูลชั้นดินผ่านทาง Toolbar

- จะเข้าสู่หน้าจอ Profile Editor ซึ่งมีหน้าจอและรายละเอียดดังรูปที่ m3.6
- การเพิ่มชั้นดินใน Soil Profile Editor สามารถทำได้โดยคลิกที่ปุ่ม  จะได้น้ำจอสำหรับใส่ค่าคุณสมบัติของชั้นดินดังรูปที่ m3.7



รูปที่ m3.6 หน้าต่าง Soil Profile Editor

Soil Properties

Library >

General | Strength Parameter | Stiffness

General Properties

Identification: Unknown

Type:  Sand  Clay Undrained

Top depth: 0.00 m

Commentary:

Basic Properties

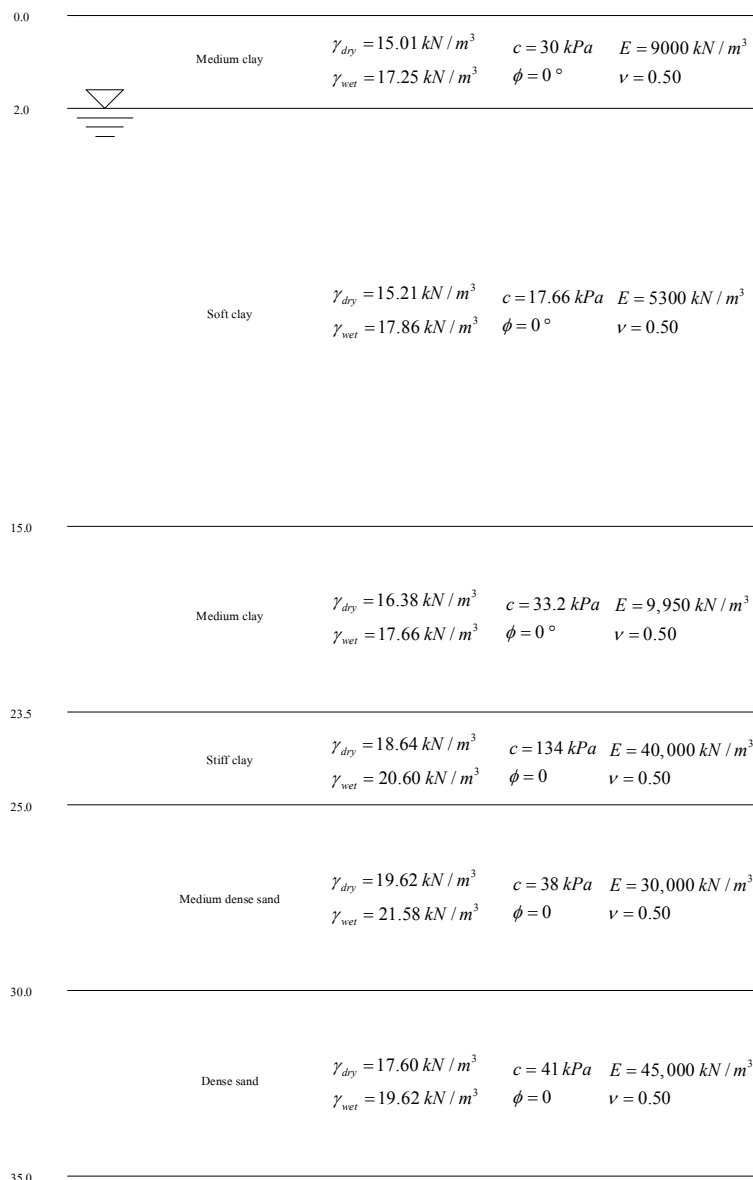
$\gamma_{dry}$  0.00 kN/m3

$\gamma_{wet}$  0.00 kN/m3

Back Next OK Cancel

รูปที่ m3.7 หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลชั้นดิน


### ตัวอย่างการสร้างข้อมูลชั้นดินแบบพื้นฐาน

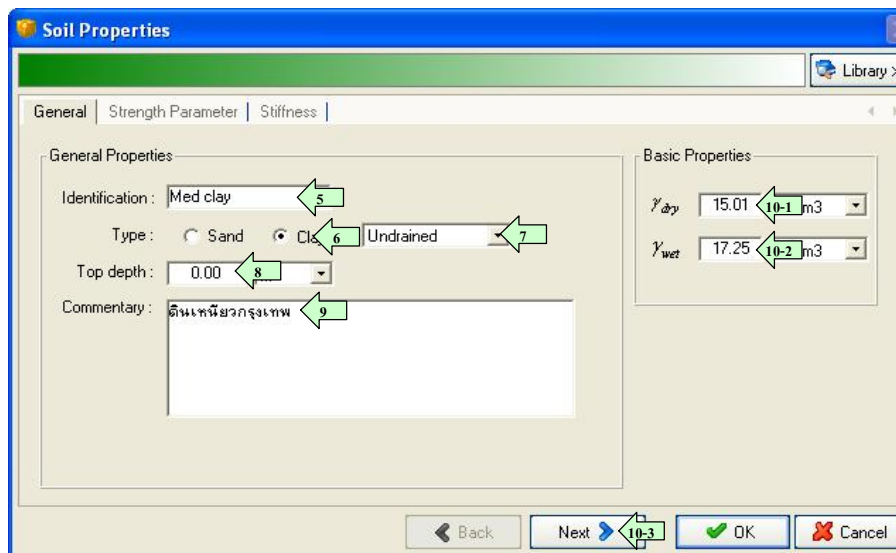


รูปที่ m3.7 ตัวอย่างชั้นดินของหลุมเจาะ

- **ขั้นตอนที่ 1** - คลิก Menu bar > Soil Profile > New Soil Profile จะได้นหน้าจอ Soil Profile Editor ดังรูปที่ m3.8
- **ขั้นตอนที่ 2** - ใส่ข้อมูล ชื่อหลุมเจาะ, ตำแหน่งหลุมเจาะ, คำอธิบายเพิ่มเติม
- **ขั้นตอนที่ 3** - ใส่ระดับน้ำใต้ดิน (GWL) = 2 เมตร

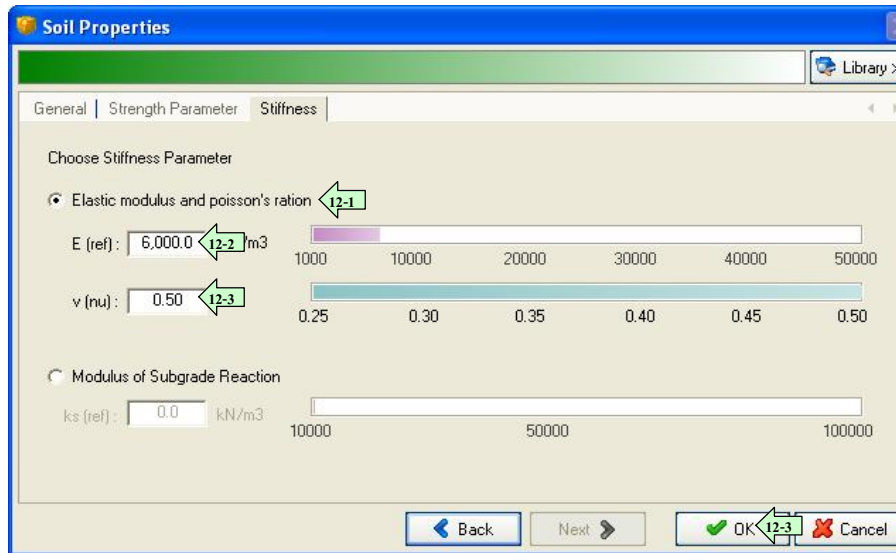
รูปที่ ค3.8

- **ขั้นตอนที่ 4** - คลิกปุ่ม  เพื่อเพิ่มชั้นดินเข้า จะมีหน้าจอแสดงออกมาดังรูปที่ m3.9
- **ขั้นตอนที่ 5** - ใส่ชื่อชั้นดิน = Med clay
- **ขั้นตอนที่ 6** - เลือกประเภทชั้นดินเป็น = Clay
- **ขั้นตอนที่ 7** - เลือกการวิเคราะห์เป็นแบบ = Undrained
- **ขั้นตอนที่ 8** - ใส่ค่าระดับจากผิวดินเริ่มต้นของชั้นดินชั้นนี้เท่ากับ 0.00 เมตร
- **ขั้นตอนที่ 9** - ใส่คำอธิบายเพิ่มของชั้นดินชั้นนี้
- **ขั้นตอนที่ 10** - ใส่ค่าหน่วยน้ำหนักดินเหนือระดับน้ำและใต้ระดับน้ำ แล้วจึงคลิกที่ปุ่ม Next

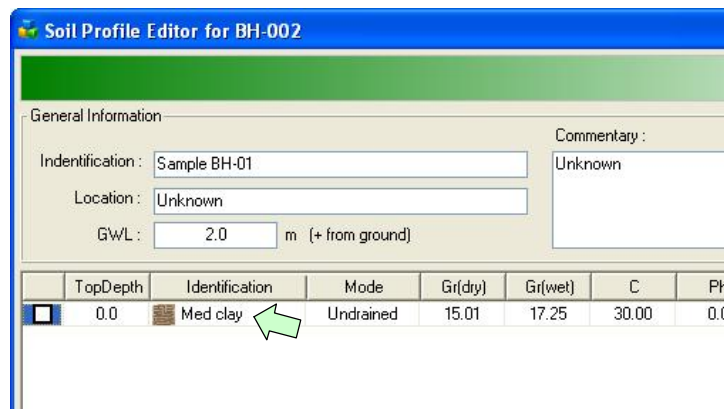


รูปที่ m3.9


- **ขั้นตอนที่ 10** - ใส่ค่าพารามิเตอร์กำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน ได้แก่ หน่วยแรงยึดเหนี่ยว ( $c$ ) และมุมเสียดทานภายใน ( $\phi$ ) แล้วคลิกปุ่ม Next
- **ขั้นตอนที่ 11** - ใส่พารามิเตอร์ความแกร่งของชั้นดิน (จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์กริด และการวิเคราะห์เสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกแนวนอน) ได้แก่ โมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนโพซอง หรือ Modulus of Subgrade reaction โดยสามารถเลือกใส่ได้อย่างใดอย่างหนึ่ง คลิกปุ่ม OK
- **ขั้นตอนที่ 12** - ชั้นดินจะแสดงขึ้นในตารางชั้นดินใน Soil Profile Editor ดังรูปที่ m3.10

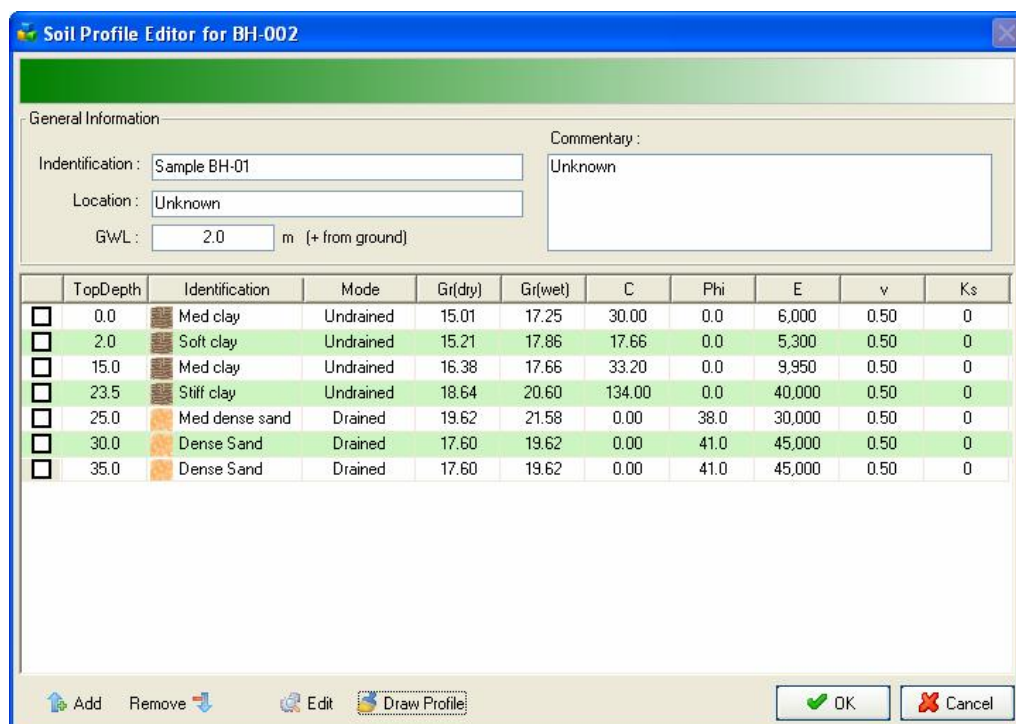


รูปที่ m3.10



รูปที่ m3.11

- **ชั้นตอนที่ 12** - เริ่มสร้างชั้นดินชั้นต่อไป โดยเริ่มทำซ้ำจากข้อ 4-13 อีกครั้ง โดยเปลี่ยนค่าระดับจากผิวดินเริ่มต้นของชั้นดินเป็น 2.0, 15.0, 23.5, 25, 30, 35 ตามลำดับ และค่าพารามิเตอร์กำลังต้านทานแรงเฉือนและพารามิเตอร์ความแกร่งตามข้อมูลหลุมเจาะดังรูปที่ m3.7 แต่ละชั้นตามลำดับจะได้ข้อมูลชั้นดังรูปที่ m3.12 การแก้ไขข้อมูลชั้นดินสามารถทำได้โดยดับเบิลคลิกที่ชั้นดินที่ต้องการแก้ไขหรือคลิกที่ชั้นดินที่ต้องการแก้ไขแล้วคลิกที่ปุ่ม 



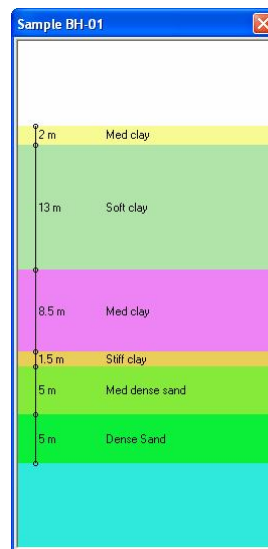
TopDepth	Identification	Mode	Gr(dry)	Gr(wet)	C	Phi	E	v	Ks
0.0	Med clay	Undrained	15.01	17.25	30.00	0.0	6,000	0.50	0
2.0	Soft clay	Undrained	15.21	17.86	17.66	0.0	5,300	0.50	0
15.0	Med clay	Undrained	16.38	17.66	33.20	0.0	9,950	0.50	0
23.5	Stiff clay	Undrained	18.64	20.60	134.00	0.0	40,000	0.50	0
25.0	Med dense sand	Drained	19.62	21.58	0.00	38.0	30,000	0.50	0
30.0	Dense Sand	Drained	17.60	19.62	0.00	41.0	45,000	0.50	0
35.0	Dense Sand	Drained	17.60	19.62	0.00	41.0	45,000	0.50	0

รูปที่ m3.12

การดูชั้นดินในรูปแบบกราฟิกได้ ทำโดยคลิกปุ่ม Draw Profile จะได้ชั้นดินดังรูปที่

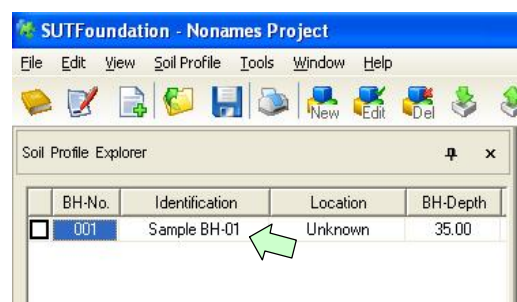
m3.13





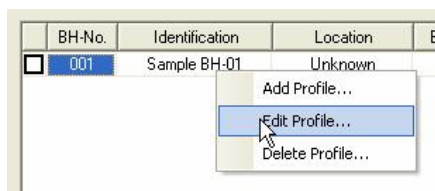
รูปที่ m3.13

1. เมื่อสร้างชั้นดินใน Soil Profile Editor เรียบร้อยแล้ว คลิกปุ่ม OK ชั้นดินที่ได้สร้างขึ้นนั้นจะเข้ามาอยู่ใน Soil Profile Explorer ของโปรแกรม ดังรูปที่ m3.14 ซึ่งเราสามารถชั้นดินใน Project ได้สูงสุด 99 ข้อมูล




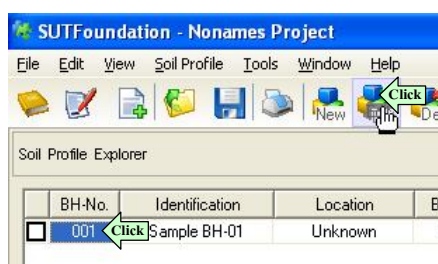
รูปที่ m3.14

- การแก้ไขข้อมูลชั้นดินใน Soil Profile Explorer ทำได้โดยการดับเบิลคลิกที่แถวของชั้นดินที่ต้องการแก้ไขใน Soil Profile Explorer หรือคลิกขวาที่ชั้นดินที่ต้องการจะปรากฏเมนูดังนี้



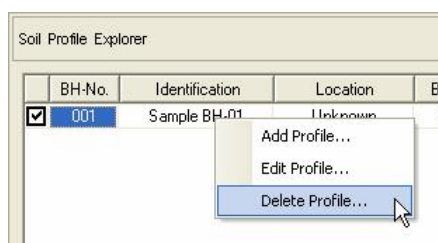
รูปที่ m3.15

แล้วคลิกที่ Edit Profile... หรือคลิกที่ช่อง BH-No ของชั้นดินที่ต้องการแก้ไขแล้วคลิกที่ Toolbar > 




รูปที่ m3.16

- การลบข้อมูลใน Soil Profile Explorer ทำได้โดยการคลิกขวาที่ชั้นดินที่ต้องการจะปรากฏเมนูดังนี้



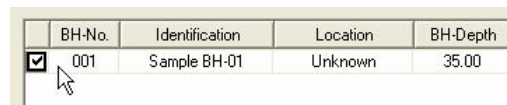
รูปที่ m3.17

แล้วคลิกที่ Delete Profile... หรืออีกวิธีหนึ่งคลิกที่ช่อง BH-No ของชั้นดินที่ต้องการแก้ไขแล้วคลิกที่ Toolbar > 




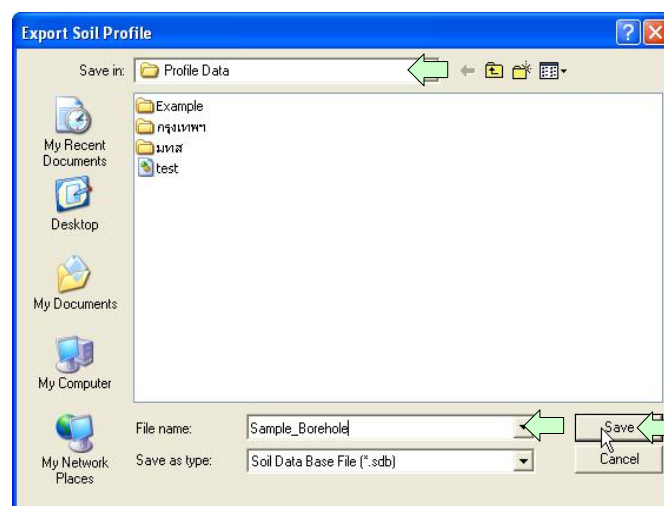
รูปที่ m3.18

- การบันทึกข้อมูลหลุมเจาะ เป็น Soil profile database (\*.sdb) ทำได้ดังขั้นตอนดังนี้
  1. คลิกที่ Check box หน้าชั้นดินที่ต้องการใน Soil profile explorer ดังรูปที่ m3.19



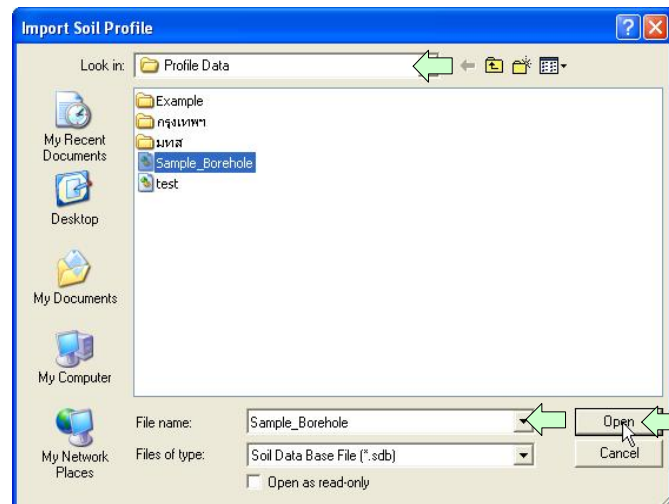
รูปที่ m3.19

2. คลิกที่ Menu > Soil Profile > Export Soil Profile หรือคลิกที่ Toolbar > 
3. จะปรากฏหน้าจอ Export Soil Profile ให้เลือกโฟลเดอร์ที่ต้องการ, ใส่ชื่อไฟล์ที่ต้องการบันทึก แล้วจึงกดปุ่ม Save ดังรูปที่ m3.20



รูปที่ m3.20 หน้าจอบันทึกข้อมูลชั้นดินสู่ไฟล์

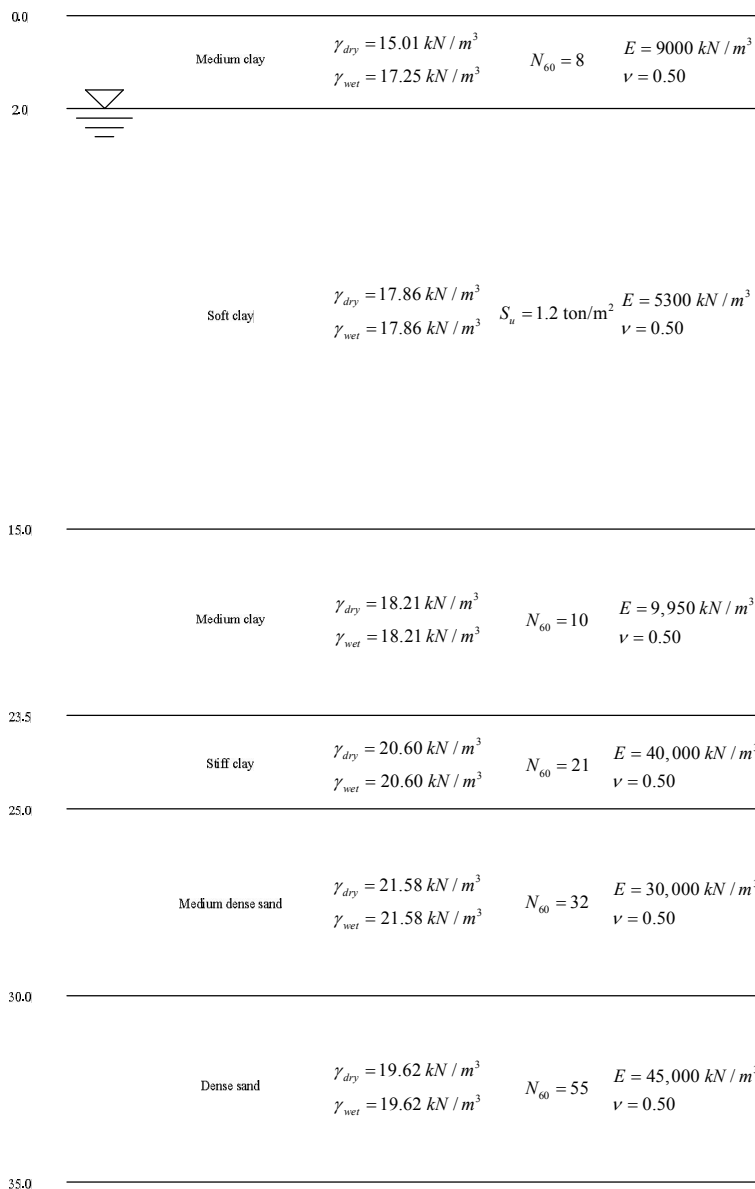
- การนำฐานข้อมูลชั้นดิน (Soil profile database) เข้าสู่ Project ทำได้ดังนี้
  1. คลิก Menu > Soil Profile > Import Soil Profile หรือ Toolbar > 
  2. จะปรากฏหน้าจอ Import Soil Profile ให้เลือกไฟล์ที่ต้องการ, เลือกชื่อไฟล์ที่ต้องการ Import แล้วจึงกดปุ่ม Open ดังรูปที่ m3.21




รูปที่ m3.21

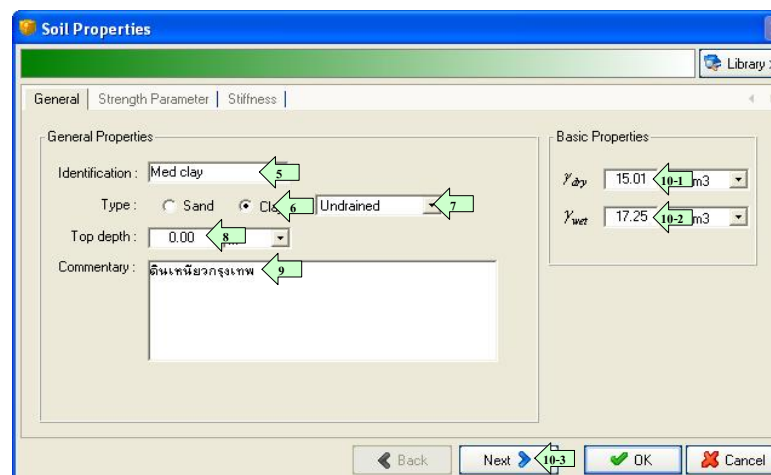
- การเรียกใช้ฐานข้อมูลหลุมเจาะ (ที่มีมากับโปรแกรม) ทำให้โดยคลิกที่ข้อมูลชั้นดินที่ต้องการในตารางของ Library แล้วคลิก  เพื่อลบข้อมูลชั้นดินที่ได้เลือกไว้

• ตัวอย่างการสร้างข้อมูลชั้นดินจากข้อมูล SPT



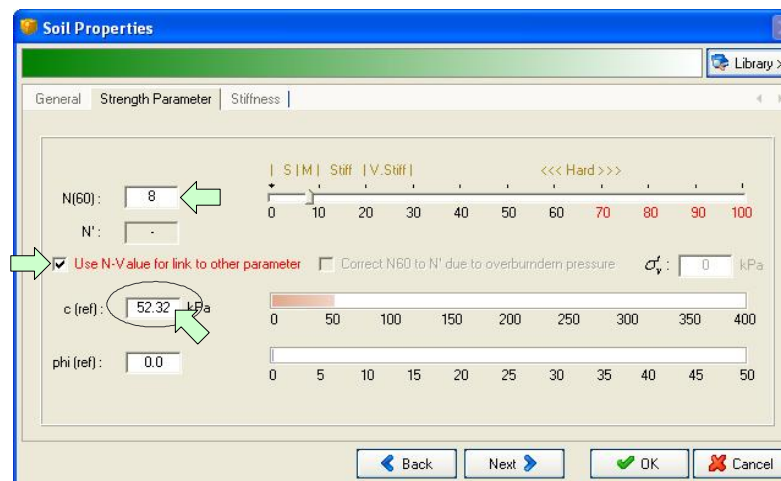
รูปที่ m3.21 แสดงชั้นดินของหลุมเจาะตัวอย่าง

1. คลิก Menu > Soil Profile > New Soil Profile จะได้นหน้าจอ Soil Profile Editor
2. ใส่ข้อมูล ชื่อหลุมเจาะ, ตำแหน่งหลุมเจาะ, คำอธิบายเพิ่มเติม
3. ใส่ระดับน้ำใต้ดิน (GWL) = 2 m.
4. คลิกปุ่ม  เพื่อเพิ่มชั้นดินเข้า จะมีหน้าจอแสดงออกมาดังรูปที่ xx
5. ใส่ชื่อชั้นดิน = Med clay
6. เลือกประเภทชั้นดินเป็น = Clay
7. เลือกการวิเคราะห์เป็นแบบ = Undrained
8. ใส่ค่าระดับจากผิวดินเริ่มต้นของชั้นดินชั้นนี้ = 0.00 m
9. ใส่คำอธิบายเพิ่มของชั้นดินชั้นนี้
10. ใส่ค่าหน่วยน้ำหนักดินเหนือระดับน้ำและใต้ระดับน้ำ แล้วจึงคลิกที่ Next



รูปที่ m3.23

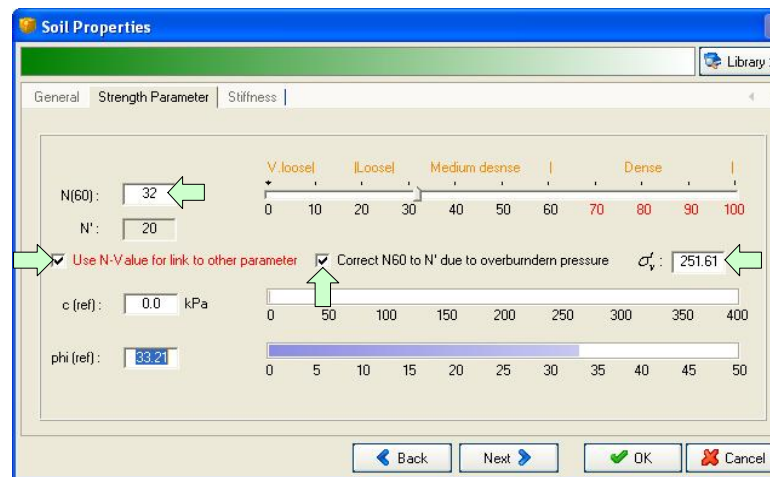
11. คลิก Checkbox – Use N-Value for link to other parameter เพื่อเลือกที่จะใช้ค่า N-Value เพื่อนำไปใช้หาค่าพารามิเตอร์กำลัง
12. ใส่ค่า  $N_{60} = 8$  แล้วกดปุ่ม Enter
13. โปรแกรมจะคำนวณค่า  $c_{ref}$  ออกมาให้ดังรูปที่ xx



รูปที่ m3.24

14. สำหรับพารามิเตอร์ความแรงใช้วิธีป้อนค่าเช่นเดียวกับการสร้างข้อมูลชั้นดินแบบพื้นฐาน  $E = 9,000 \text{ kN/m}^3 > \nu = 0.50 > \text{OK}$
15. สำหรับชั้นดินชั้นต่อไป Add > Identification = Soft clay > Type = clay > Mode = Undrained > Top depth = 2.0 m >  $\gamma_{dry} = \gamma_{wet} = 17.86 \text{ kN/m}^3 > \text{Next} > c = S_u = 1.2$  คลิกที่ Unit >  $\text{t/m}^2 > \phi_{ref} = 0^\circ > \text{Next} > E = 5,300 \text{ kN/m}^3 > \nu = 0.50 > \text{OK}$
16. สำหรับชั้นดินชั้นต่อไป Add > Identification = Med clay > Type = clay > Mode = Undrained > Top depth = 15.0 m >  $\gamma_{dry} = \gamma_{wet} = 18.21 \text{ kN/m}^3 > \text{Next} > \text{Use N-Value for link to other parameter} > N_{60} = 10 > \text{Next} > E = 9,950 \text{ kN/m}^3 > \nu = 0.50 > \text{OK}$
17. สำหรับชั้นดินชั้นต่อไป Add > Identification = Stiff clay > Type = clay > Mode = Undrained > Top depth = 23.5 m >  $\gamma_{dry} = \gamma_{wet} = 20.60 \text{ kN/m}^3 > \text{Next} > \text{Use N-Value for link to other parameter} > N_{60} = 21 > \text{Next} > E = 40,000 \text{ kN/m}^3 > \nu = 0.50 > \text{OK}$
18. สำหรับชั้นทราย การแปลงค่า  $N_{60}$  ไปเป็นค่าพารามิเตอร์กำลังต้านทานแรงเฉือนจำเป็นต้องพิจารณาผลของความเค้นกดทับประสิทธิด้วย โดยสามารถสร้างได้โดยคลิก Add > Identification = Med dense sand > Type = sand > Mode = Drained > Top depth = 2.0 m >  $\gamma_{dry} = \gamma_{wet} = 17.86 \text{ kN/m}^3 > \text{Next}$

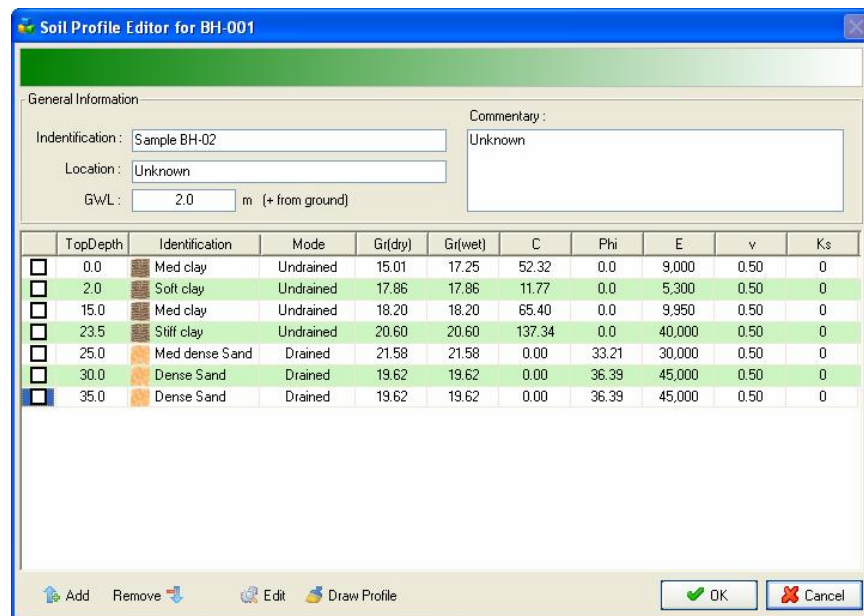
19. คลิก Checkbox – Use N-Value for link to other parameter และคลิก Correct N to N' เพื่อปรับแก้ผลของความเค้นกดทับประสิทธิ แล้วใส่ค่า  $\sigma'_v = 251.61$  kPa
20. ใส่ค่า  $N_{60} = 32$  แล้วกดปุ่ม Enter โปรแกรมจะคำนวณค่า  $\phi_{ref}$  ออกมาให้ดังรูปที่ m3.25




รูปที่ m3.25

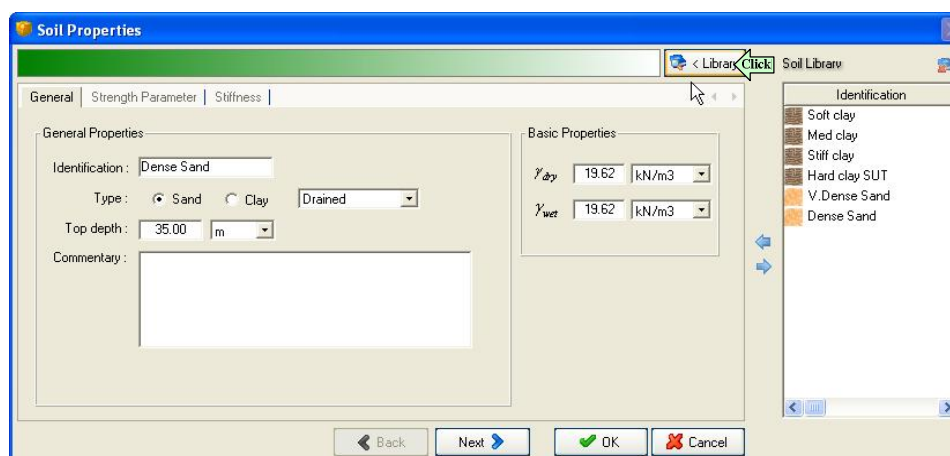
21.  $E = 5,300 \text{ kN/m}^3 > \nu = 0.50 > \text{OK}$
22. สำหรับชั้นทรายชั้นต่อไป Add > Identification = Med dense sand > Type = sand > Mode = Drained > Top depth = 2.0 m >  $\gamma_{dry} = \gamma_{wet} = 17.86 \text{ kN/m}^3$  > Next > Checkbox – Use N-Value for link to other parameter > Correct N to N' >  $\sigma'_v = 305.56 \text{ kPa}$  >  $N_{60} = 55$  >  $E = 45,000 \text{ kN/m}^3$  >  $\nu = 0.50 > \text{OK}$  จะได้ข้อมูลชั้นดินดังรูปที่ xx






รูปที่ m3.26

- การใช้งาน Library ในการช่วยสร้างชั้นดิน ใน Soil Profile Editor มี Library สำหรับช่วยในการเก็บข้อมูลชั้นดิน สามารถเรียกใช้โดยคลิกที่ปุ่ม  Library > ใน Soil Profile Editor ดังรูปที่ m3.27

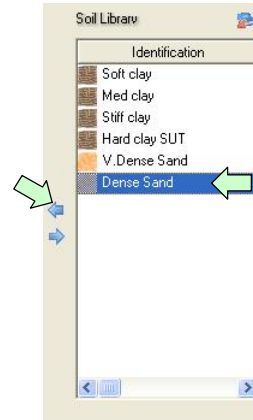


รูปที่ m3.27



- การบันทึกชั้นดินเข้าสู่ Library ทำได้โดยเมื่อป้อนข้อมูลชั้นดินเรียบร้อยแล้ว กดปุ่ม  ข้อมูลชั้นดินจะถูกบันทึกไว้ใน Library โดยจะแสดงชื่อข้อมูลชั้นดินไว้ในตาราง ดังรูปที่ m3.28

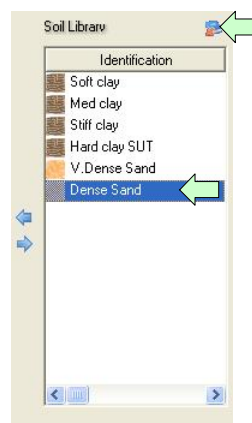


รูปที่ m3.28



รูปที่ m3.29

- การเรียกใช้ข้อมูลชั้นดินจาก Library ทำได้โดยคลิกที่ข้อมูลชั้นดินที่ต้องการในตารางของ Library แล้วคลิก  เพื่อเรียกใช้ข้อมูลชั้นดินที่ได้เลือกไว้ ดังรูปที่ m3.29
- การลบข้อมูลชั้นดินจาก Library ทำได้โดยคลิกที่ข้อมูลชั้นดินที่ต้องการในตารางของ Library แล้วคลิก  เพื่อลบข้อมูลชั้นดินที่ได้เลือกไว้ ดังรูปที่ m3.30



รูปที่ m3.30

## บทที่ 4

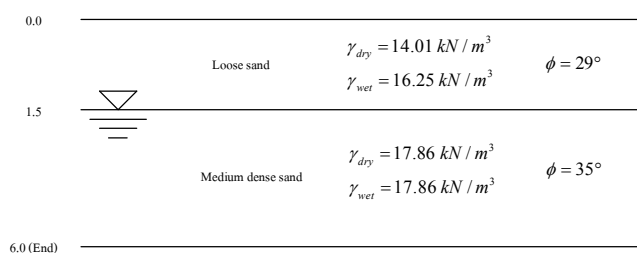
### เริ่มต้นการวิเคราะห์ด้วย SUTFoundation

ในบทนี้จะเริ่มแนะนำถึงการใช้งาน โมดูลสำหรับการวิเคราะห์ใน โปรแกรม SUTFoundation โดยตัวอย่างการใช้งานแบบเป็นขั้นตอนโดยละเอียด ซึ่งจะประกอบด้วยหัวข้อดังต่อไปนี้

- การคำนวณหาขนาดฐานรากที่เหมาะสมของฐานรากตื้น
- การคำนวณหาระดับวางฐานรากที่เหมาะสมของฐานรากตื้น
- การคำนวณหาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินที่มีผลต่อกำลังรับแรงแบกทานของฐานราก
- การคำนวณหาลำดับรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มรับน้ำหนักแนวตั้ง
- การคำนวณการเสียรูป โมเมนต์ แรงเฉือนและหน่วยแรงดันดินที่เกิดขึ้นเมื่อเสาเข็มรับน้ำหนักแนวราบ
- การคำนวณหาลำดับรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มรับน้ำหนักแนวราบ
- การวิเคราะห์หาโมเมนต์ แรงเฉือน และหน่วยแรงดันดินของแผ่นฐานรากตื้น
- การวิเคราะห์หาโมเมนต์ แรงเฉือน และหน่วยแรงดันดินของแผ่นฐานรากเสาเข็ม

#### 4.1 การคำนวณหาขนาดฐานรากที่เหมาะสมของฐานรากตื้น

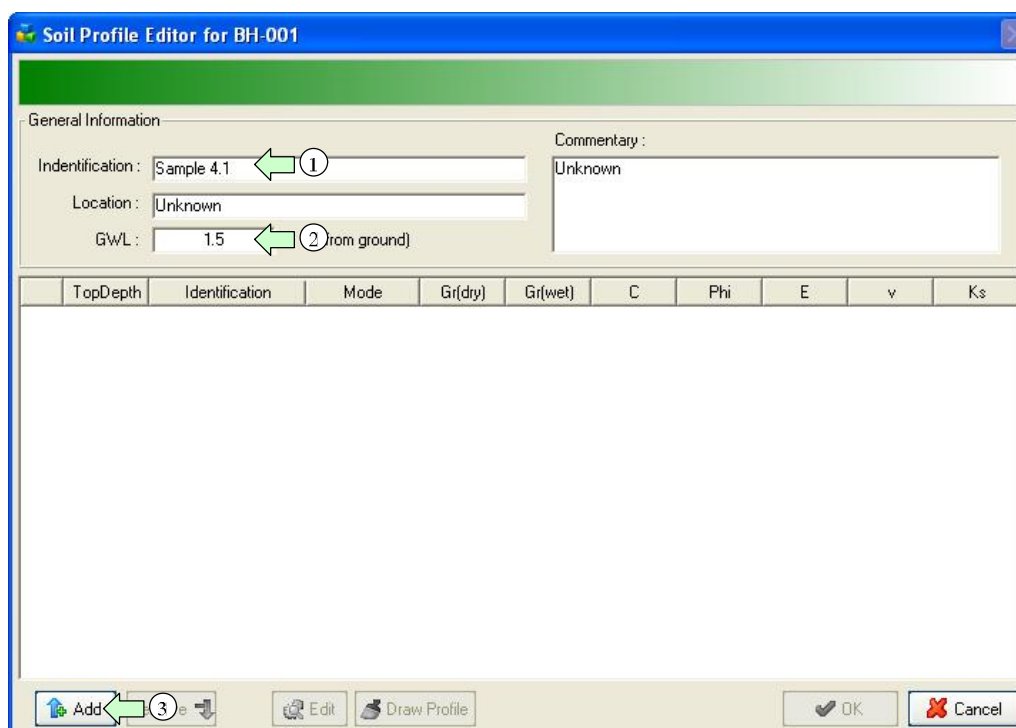
ตัวอย่างที่ 4.1 จากข้อมูลดินหุ้ยมเจาะดังแสดงในรูปที่ m4.1 สมมติว่าต้องการฐานรากแผ่เพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุกทุกจากเสาเท่ากับ  $P_y = 25$  ตัน (245.25 kN),  $M_x = 2$  ตัน-เมตร (19.62 kN-m)




รูปที่ m4.1

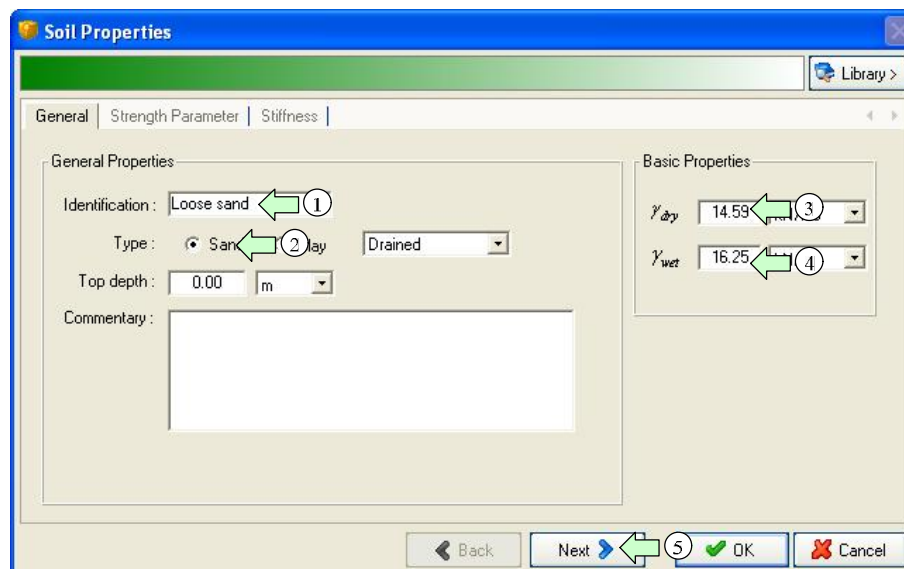
การสร้างข้อมูลหลุมเจาะตามชั้นดินในรูปที่ M4.1 สามารถทำตามขั้นตอนดังนี้

- **ขั้นตอนที่ 1** - เข้าสู่โปรแกรม Window Start menu > เลือกที่ Program option > คลิกที่ SUTFoundation program group > คลิกที่ SUTFoundation
- **ขั้นตอนที่ 2** - คลิกที่ Menu > Soil Profile > New Soil Profile จะได้น้ำจอตั้งแสดงในรูปที่ m4.1 ป้อนชื่อข้อมูลชั้นดินและระดับน้ำใต้ดินดังแสดงในรูปที่ m4.2

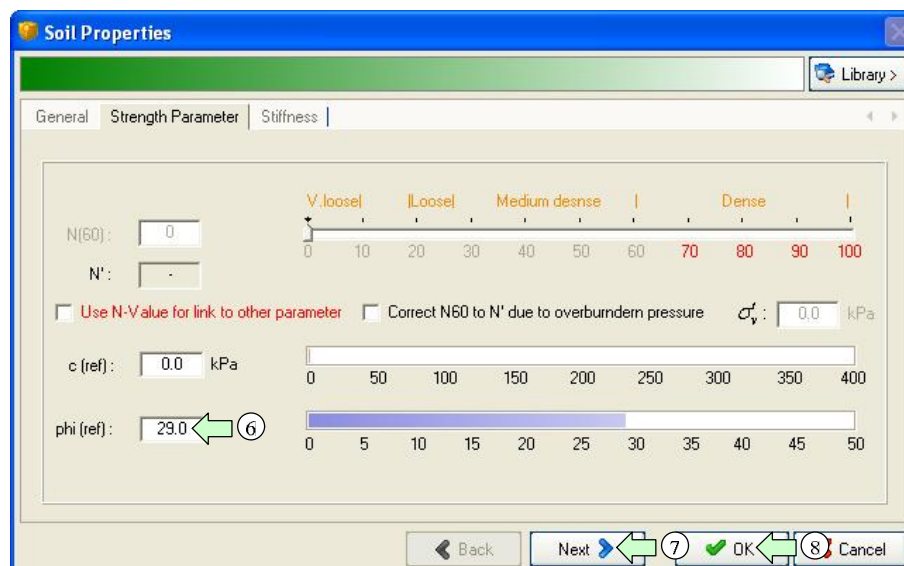


รูปที่ m4.2


- **ขั้นตอนที่ 3** - คลิก  และใส่ข้อมูลดินชั้น Loose sand ดังแสดงในรูปที่ m4.3 และ m4.4

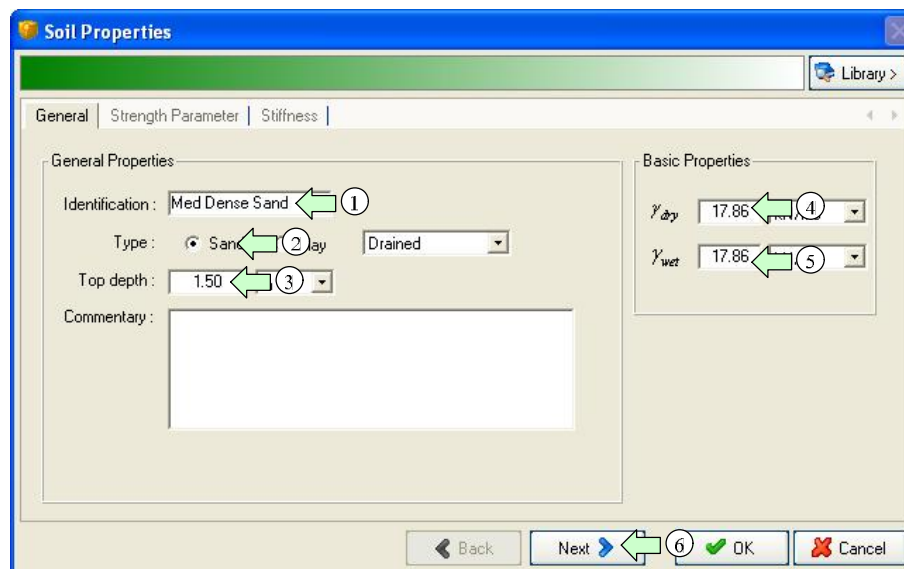


รูปที่ m4.3

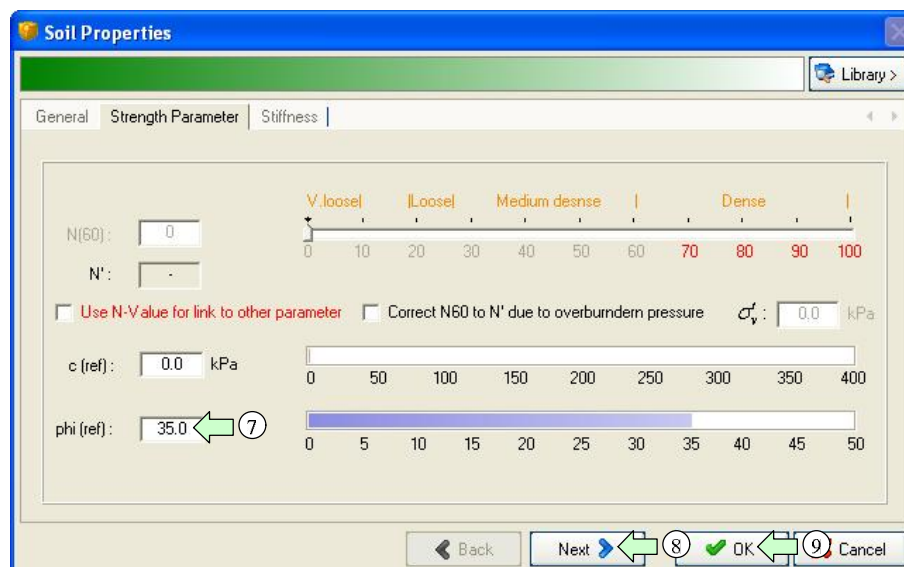


รูปที่ m4.4

- ขั้นตอนที่ 4 - คลิก  และใส่ข้อมูลดินชั้น Medium dense sand ดังแสดงในรูปที่ m4.5 และ m4.6



รูปที่ m4.5




รูปที่ m4.6

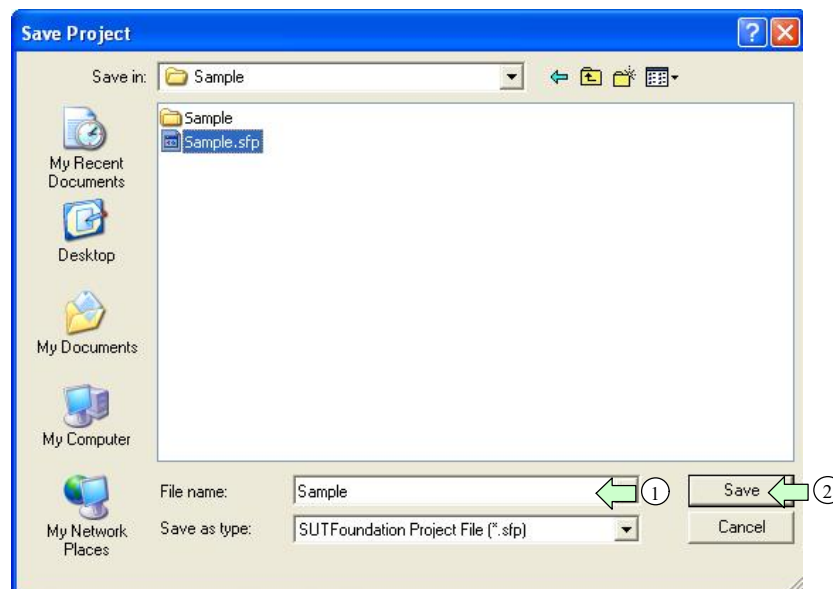
- ขั้นตอนที่ 5 - ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 3 โดยใช้ข้อมูลชั้น Medium dense sand แต่เปลี่ยนระดับ Top depth เป็น 6 เมตร สุดท้ายจะได้หน้าจอ Soil Profile Editor ดังแสดงในรูปที่ m4.6

	TopDepth	Identification	Mode	Gr(dry)	Gr(wet)	C	Phi	E	v	Ks
<input type="checkbox"/>	0.0	Loose	Drained	14.59	16.25	0.00	29.0	0	0.00	0
<input type="checkbox"/>	1.5	Med Dense Sand	Drained	17.86	17.86	0.00	35.0	0	0.00	0
<input checked="" type="checkbox"/>	6.0	Med Dense Sand	Drained	17.86	17.86	0.00	35.0	0	0.00	0

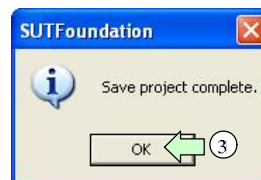
รูปที่ m4.7

- ขั้นตอนที่ 6 - คลิกปุ่ม  เพื่อบันทึกโครงการ จะปรากฏหน้าต่างเพื่อป้อนข้อมูลของโครงการ ดังแสดงในรูปที่ m4.7 และหน้าจอแสดงการบันทึกที่สมบูรณ์แล้วดังแสดงในรูปที่ m4.8

รูปที่ m4.8




รูปที่ m4.9

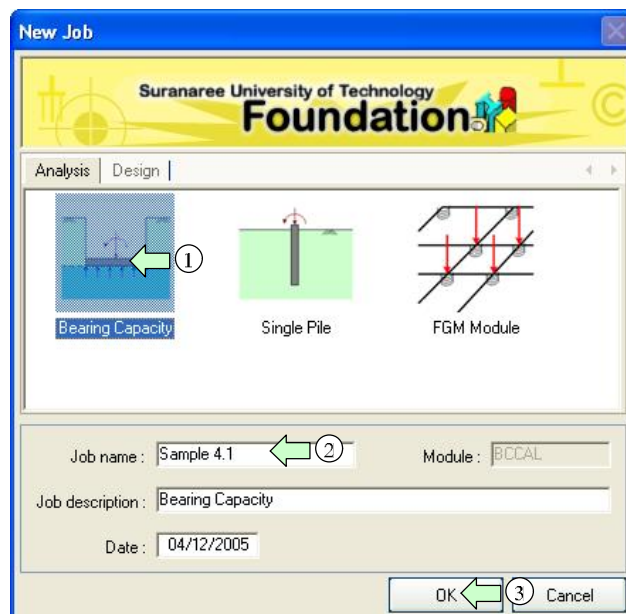


รูปที่ m4.10

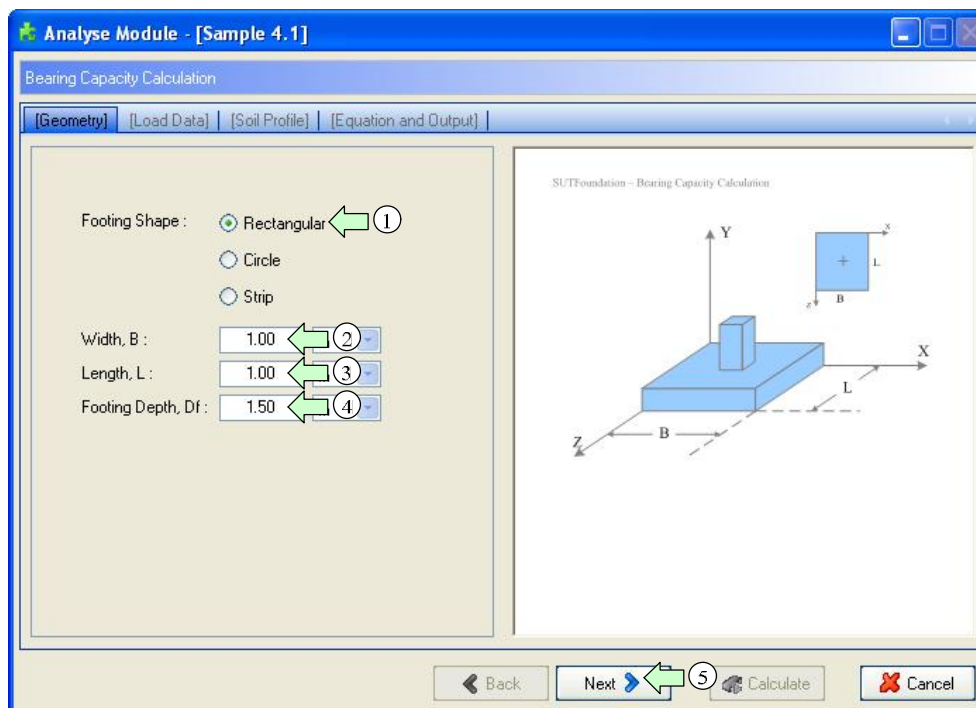
### เริ่มสร้างแผนงาน (Job)

- **ขั้นตอนที่ 1** - คลิก  เพื่อเพิ่มแผนงาน (Job) ในโครงการ (Project) จะปรากฏหน้าจอรูปที่ m4.11 ป้อนข้อมูลและเลือกโมดูลดังแสดงในรูปที่ m4.12 ตามลำดับ
- **ขั้นตอนที่ 2** - จะปรากฏหน้าจอโมดูลดังแสดงในรูปที่ xx ให้ทำตามขั้นตอนตามลูกศรชี้จากรูปที่ m4.10 จนถึงรูปที่ m4.14
- **ขั้นตอนที่ 3** - เมื่อทำตามขั้นตอนตามรูปเรียบร้อยแล้วจะได้ผลการคำนวณจากรูปที่ m4.15

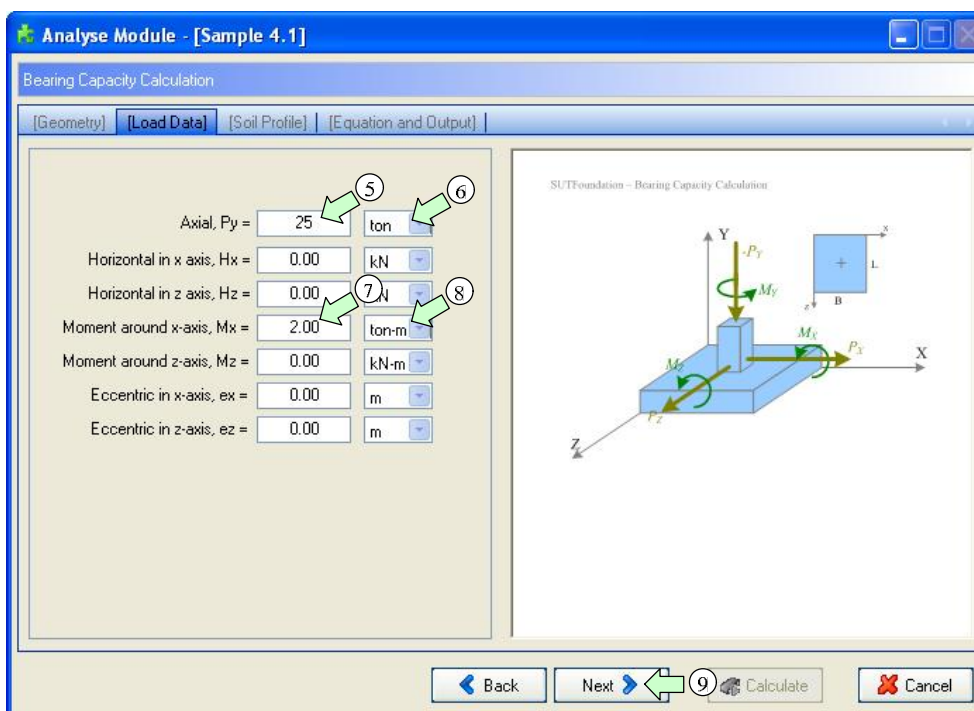




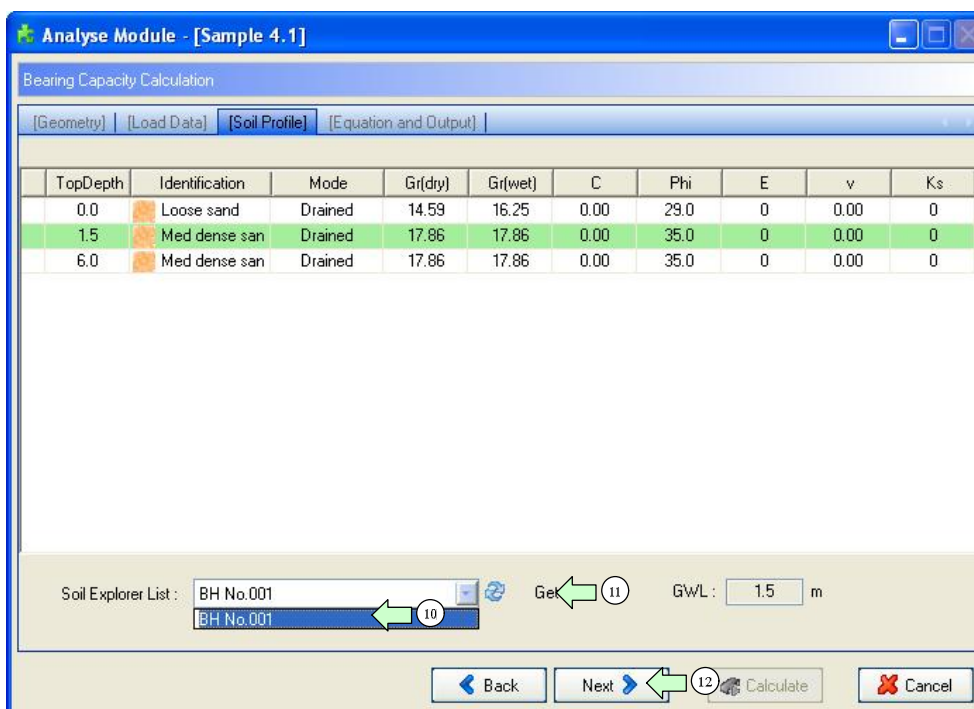
รูปที่ m4.11



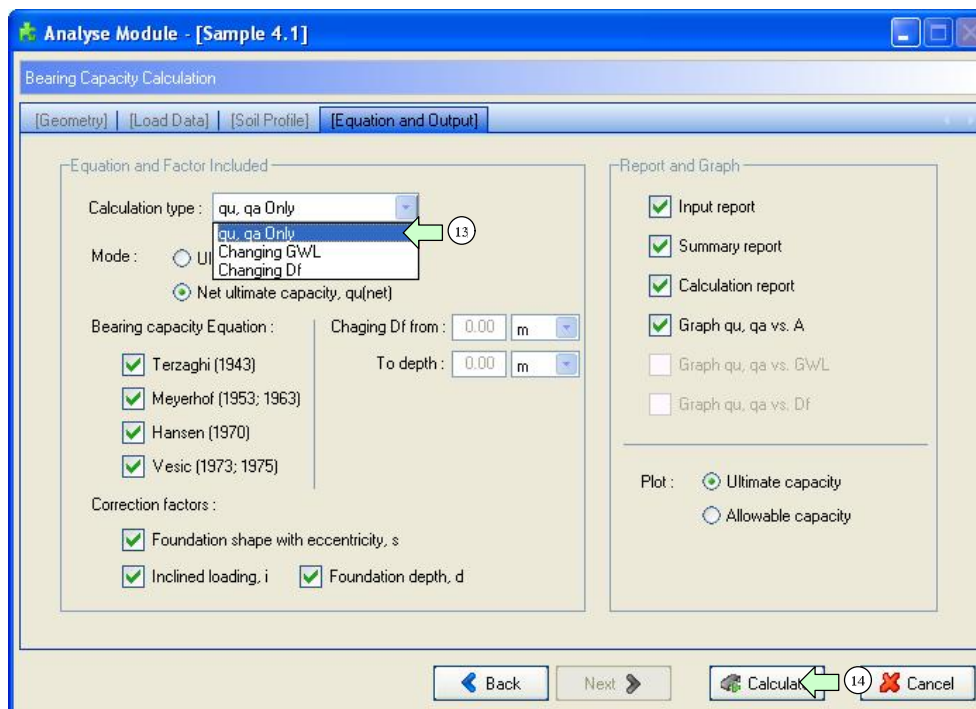
รูปที่ m4.12



រូបទី m4.13



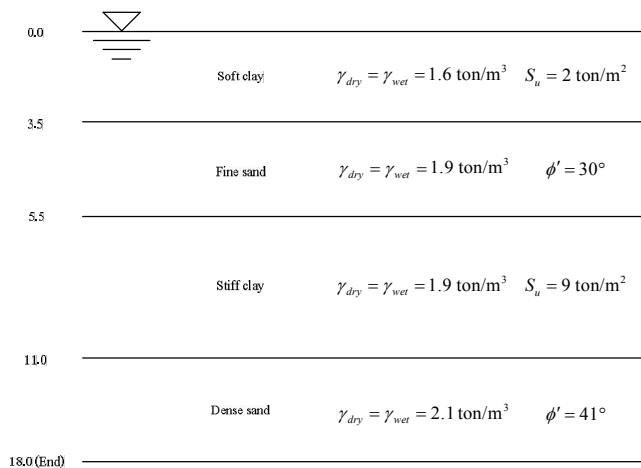
រូបទី m4.14



រូបទី m4.15

#### 4.2 การคำนวณหากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มรับน้ำหนักแนวตั้ง

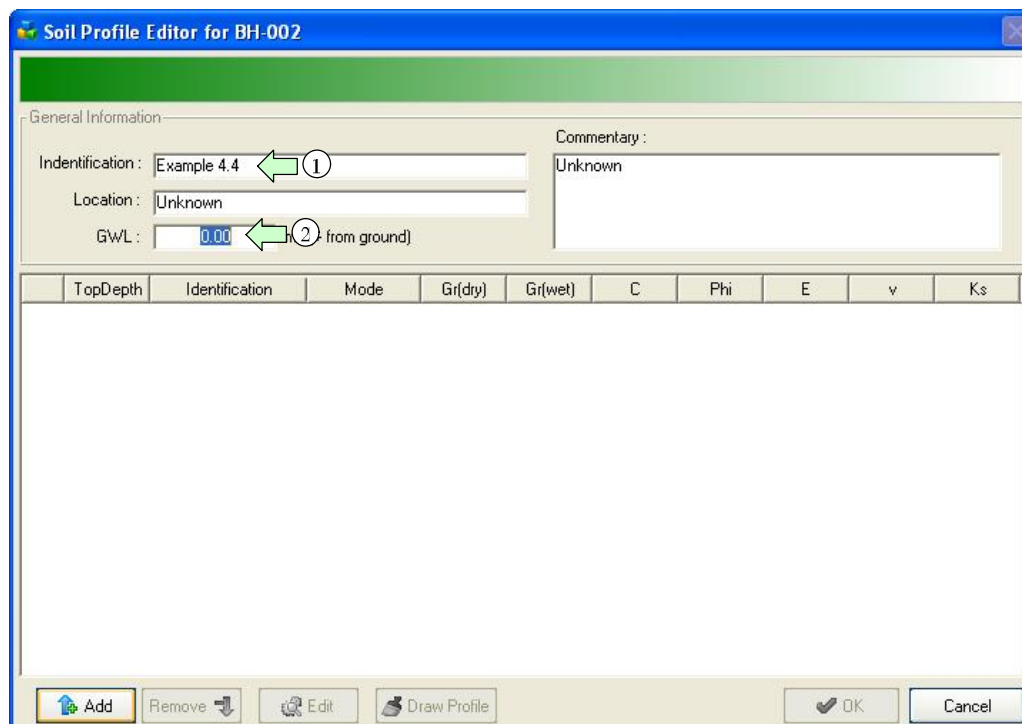
ตัวอย่างที่ 4.4 จากข้อมูลดินหลุมเจาะดังแสดงในรูปที่ m4.15 ต้องการประมาณน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มตอก หน้าตัด 0.40 x 0.40 ยาว 14 เมตร




รูปที่ m4.15

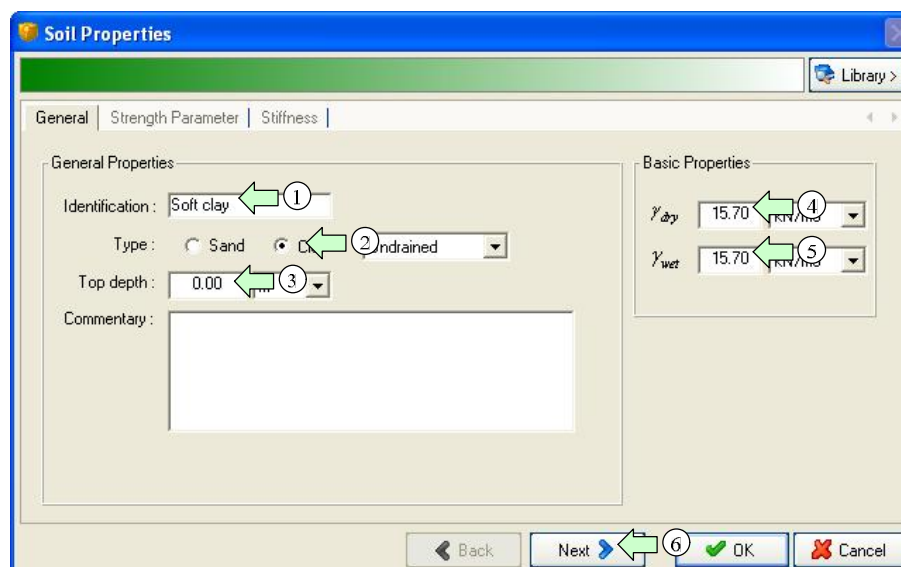
สร้างข้อมูลหลุมเจาะตามชั้นดินในรูปที่ m4.15 ดังนี้

- **ขั้นตอนที่ 1** - เข้าสู่โปรแกรม Window Start menu > เลือกที่ Program option > คลิกที่ SUTFoundation program group > คลิกที่ SUTFoundation
- **ขั้นตอนที่ 2** - คลิกที่ Menu > Soil Profile > New Soil Profile จะได้น้ำจอตั้งแสดงในรูปที่ m4.16 ป้อนชื่อข้อมูลชั้นดินและระดับน้ำใต้ดินดังแสดงในรูปที่ m4.15

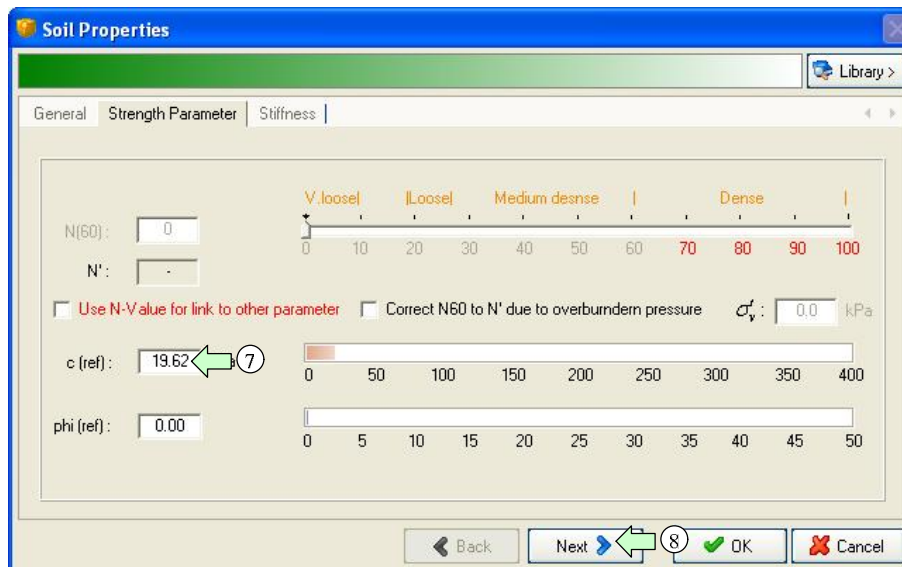


รูปที่ m4.16


- ขั้นตอนที่ 3 - คลิก  และใส่ข้อมูลดินชั้น Loose sand ดังแสดงในรูปที่ m4.15 และ m4.17

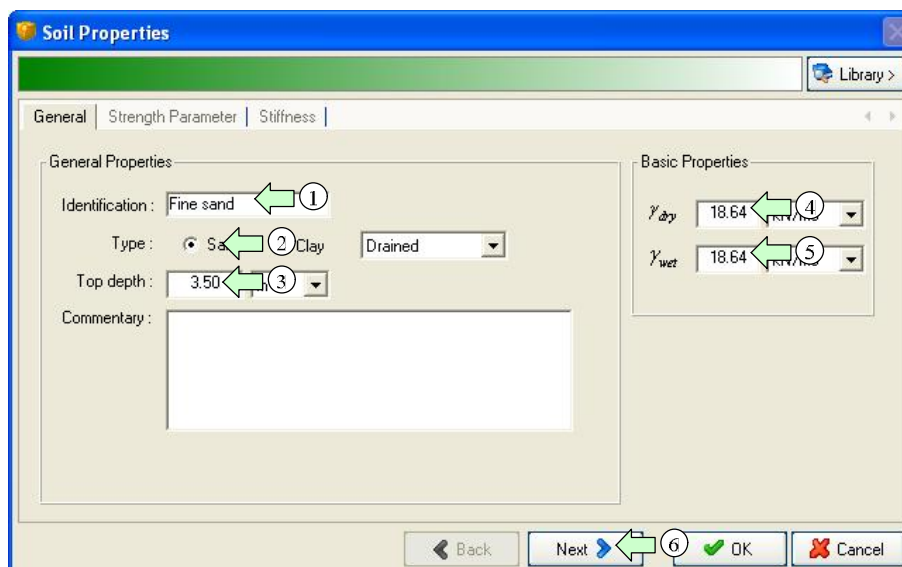


รูปที่ m4.17

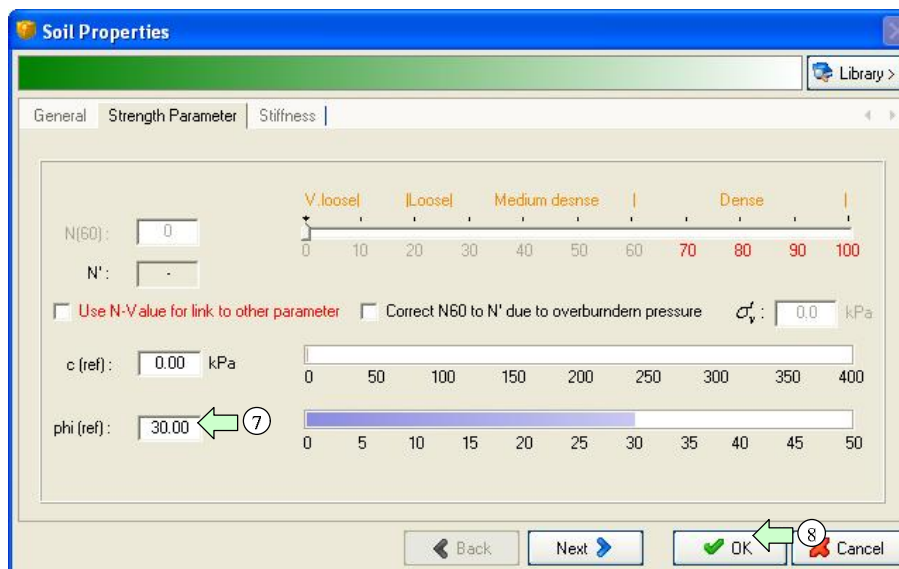


รูปที่ m4.18

- ขั้นตอนที่ 4 - คลิก  และใส่ข้อมูลดินชั้น Fine sand ดังแสดงในรูปที่ m4.18 และ m4.19

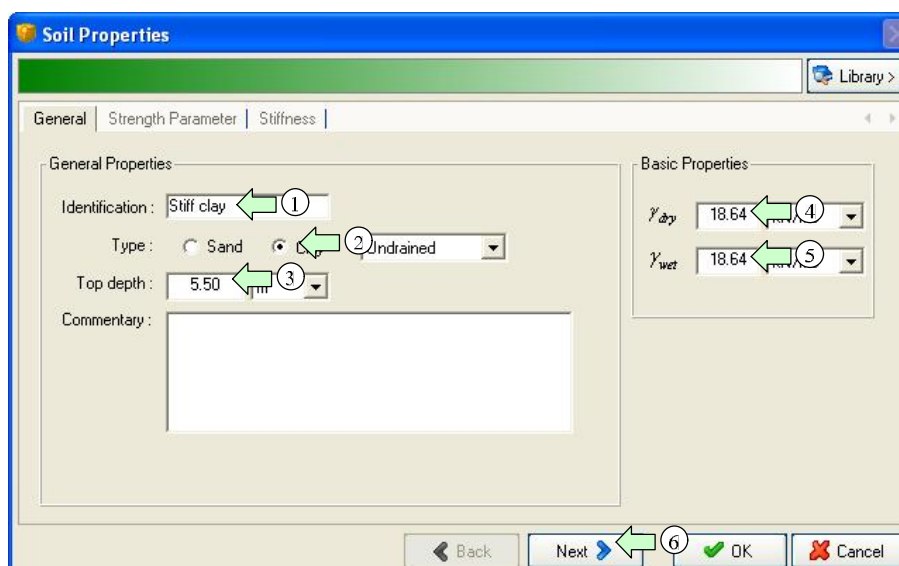


รูปที่ m4.18

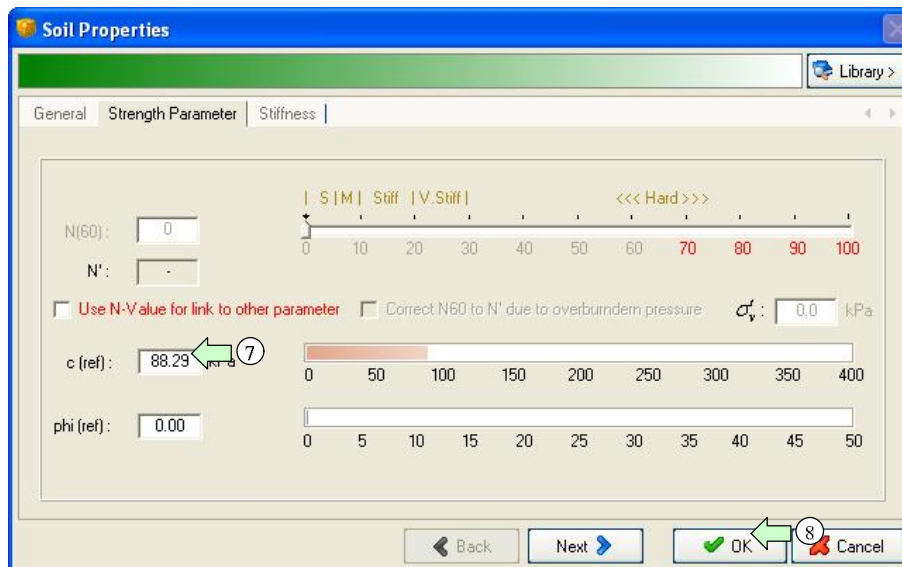


รูปที่ m4.19


- ขั้นตอนที่ 5 - คลิก  และใส่ข้อมูลดินชั้น Stiff clay ดังแสดงในรูปที่ m4.20 และ m4.21

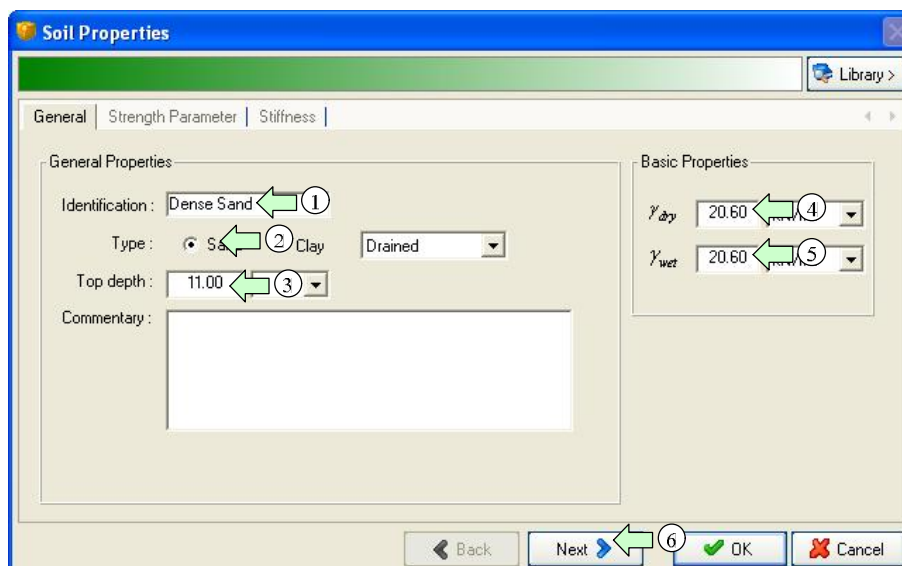


รูปที่ m4.20



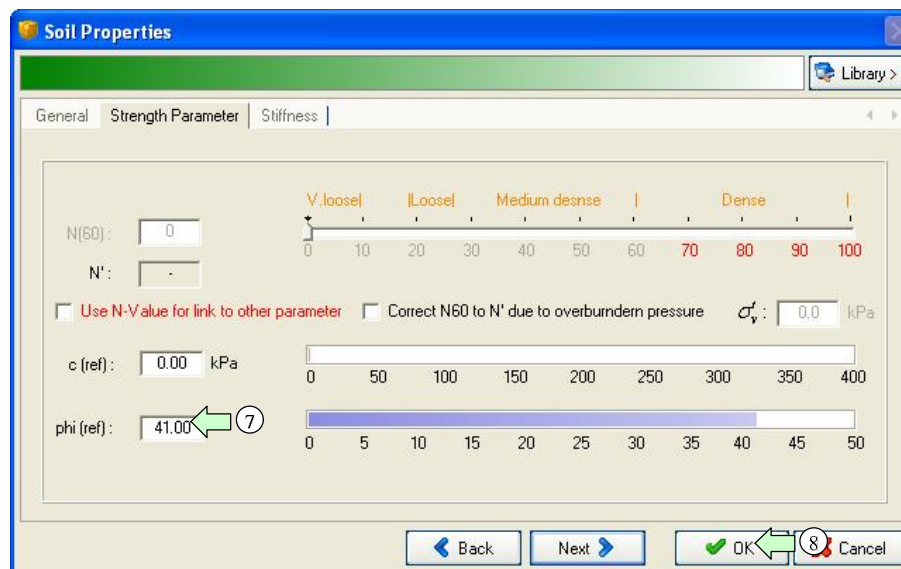
รูปที่ m4.21

- ขั้นตอนที่ 6 - คลิก  และใส่ข้อมูลดินชั้น Dense sand ดังแสดงในรูปที่ m4.22 และ m4.23



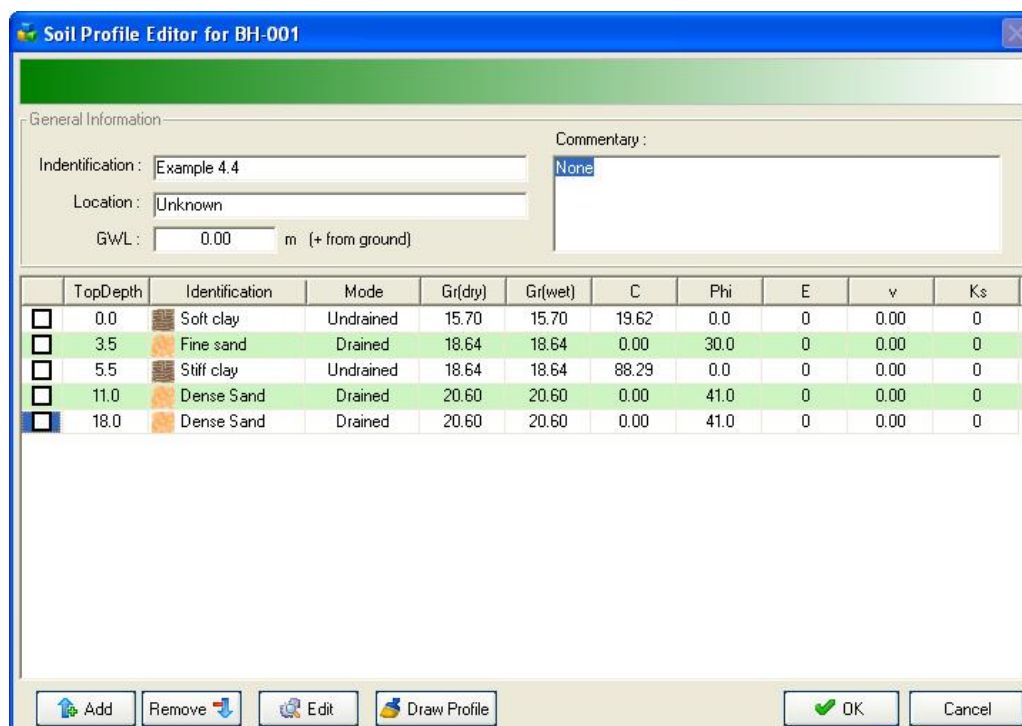
รูปที่ m4.22






รูปที่ m4.23

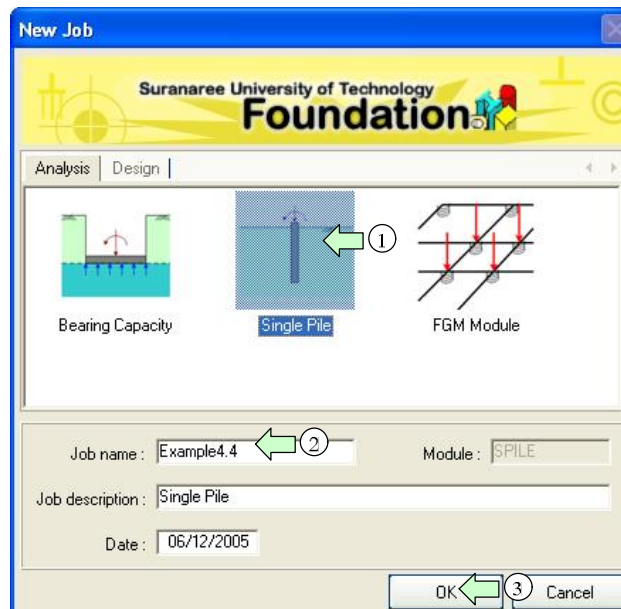
- ขั้นตอนที่ 7 - ทำซ้ำข้อ 3 โดยใช้ข้อมูลชั้น Dense sand แต่เปลี่ยนระดับ Top depth เป็น 18 เมตร สุดท้ายจะได้หน้าจอ Soil Profile Editor ดังแสดงในรูปที่ m4.15



รูปที่ m4.24

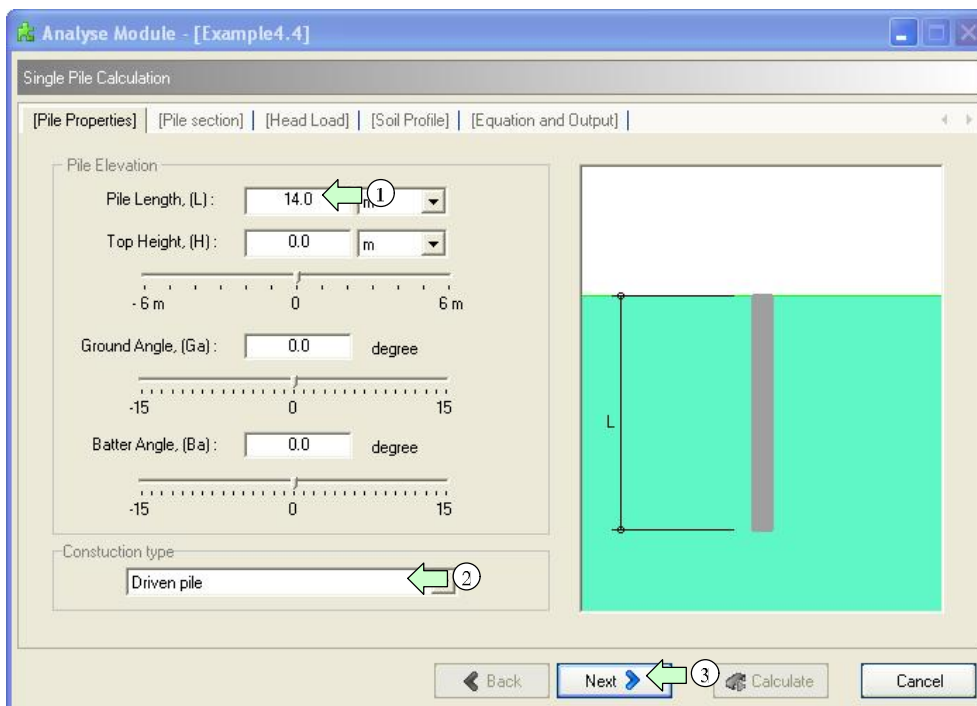
### เริ่มสร้างแผนงาน (Job)

- **ขั้นตอนที่ 1** - คลิก  เพื่อเพิ่มแผนงาน (Job) ในโครงการ (Project) จะปรากฏหน้าดังรูปที่ m4.25 ป้อนข้อมูลและเลือก โมดูลดังแสดงในรูปที่ m4.25 ตามลำดับ

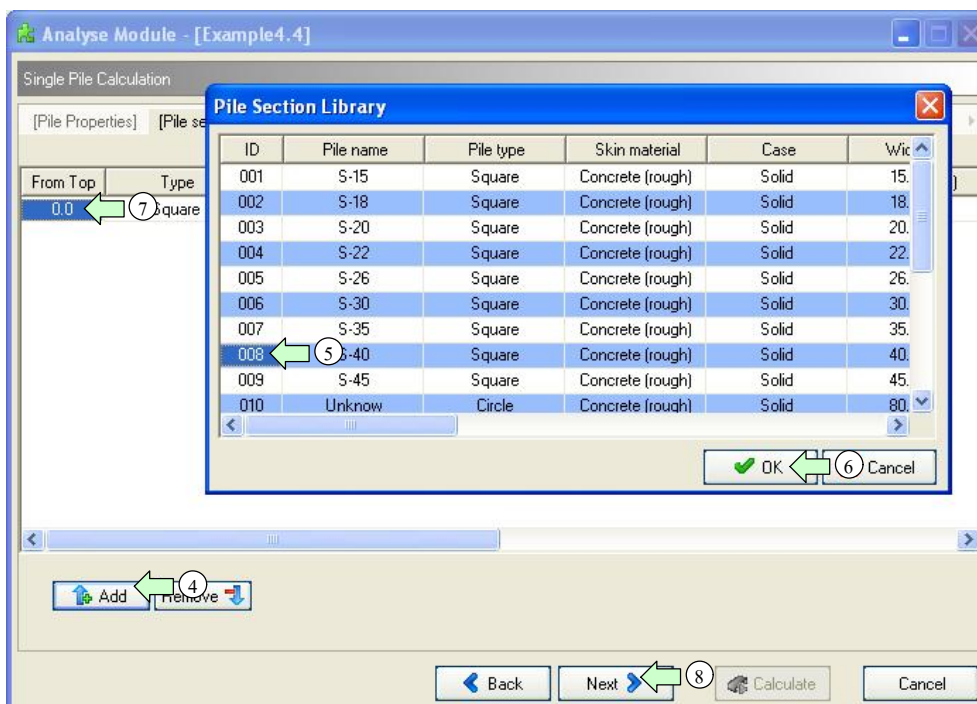


รูปที่ m4.25

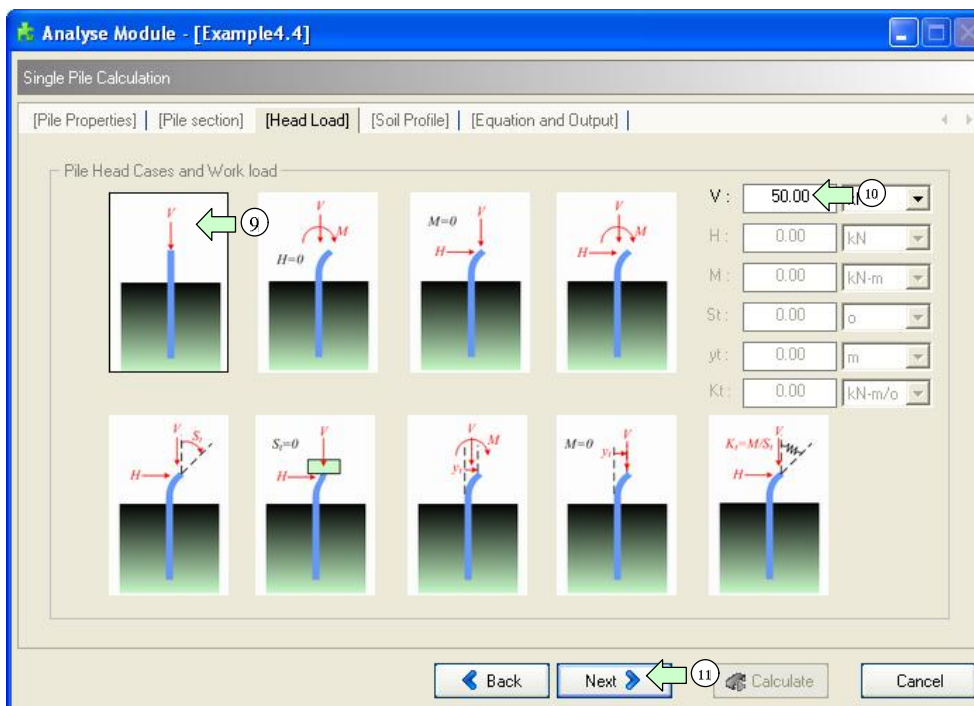
- **ขั้นตอนที่ 2** - จะปรากฏหน้าจอโมดูลดังแสดงในรูปที่ m4.26 ให้ทำตามขั้นตอนตามลูกศรชี้ดังรูปที่ m4.27 จนถึงรูปที่ m4.30



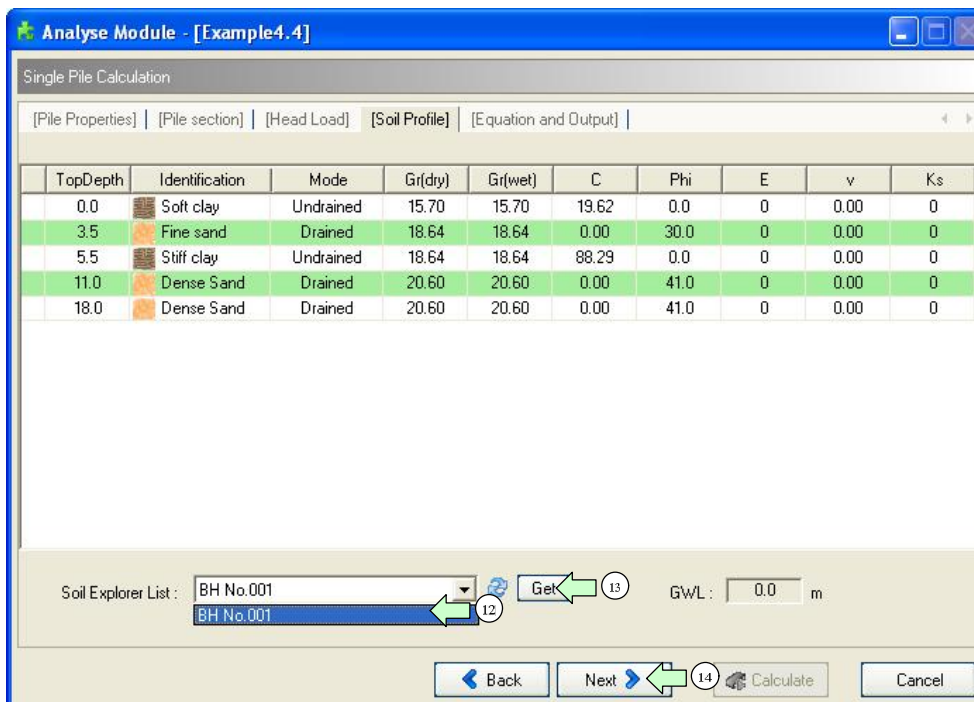
រូបទី m4.26



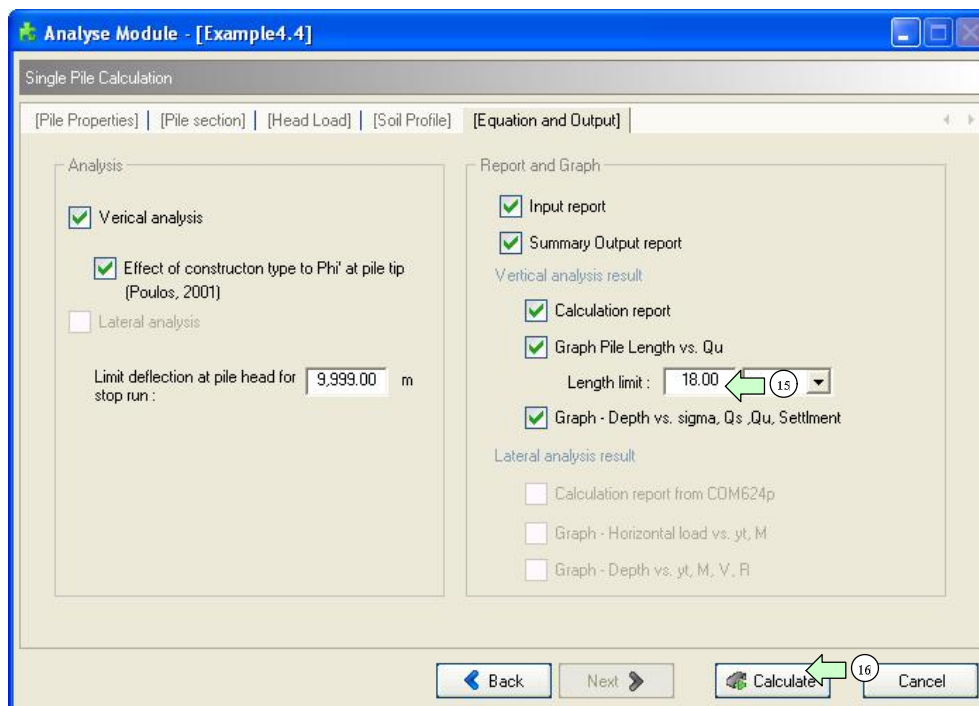
រូបទី m4.27



รูปที่ m4.28



รูปที่ m4.29

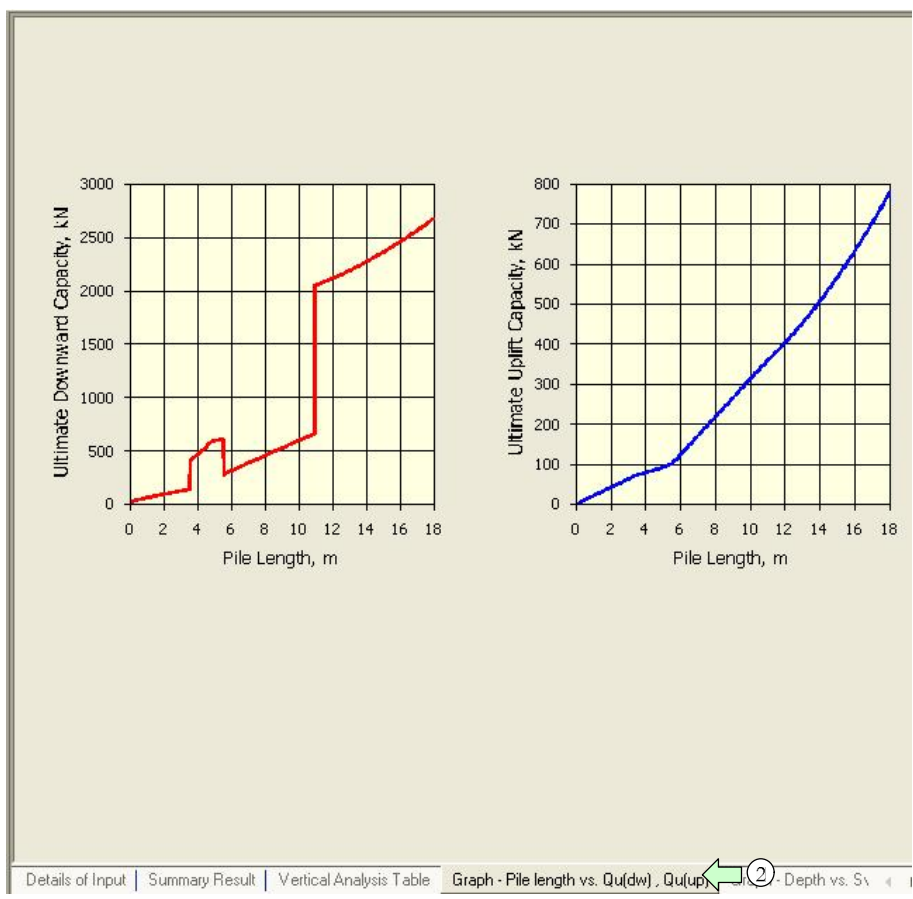


รูปที่ m4.30

- ขั้นตอนที่ 3 - เมื่อทำตามขั้นตอนตามรูปเรียบร้อยแล้วจะได้ผลการคำนวณดังรูปที่ m4.32

Summary Result	
[ Vertical Analysis Result ]	
- Downward	
Ultimate Capacity (Qu)	= 2267.24 kN
Skin Friction (Qs)	= 760.43 kN
End Bearing (Qb)	= 1506.82 kN
Allowable Capacity (Qa)	= 906.90 kN
- Uplift	
Ultimate Capacity (Qu)	= 506.95 kN
Skin Friction (Qs)	= 506.95 kN
End Bearing (Qb)	= 0.00 kN
Allowable Capacity (Qa)	= 202.78 kN
- Work load	
User Input vertical load	= 50.00 kN
Skin Friction (Qs)	= 16.77 kN
End Bearing (Qb)	= 33.23 kN
FS of Work load (FSw)	= 45.34

รูปที่ m4.32



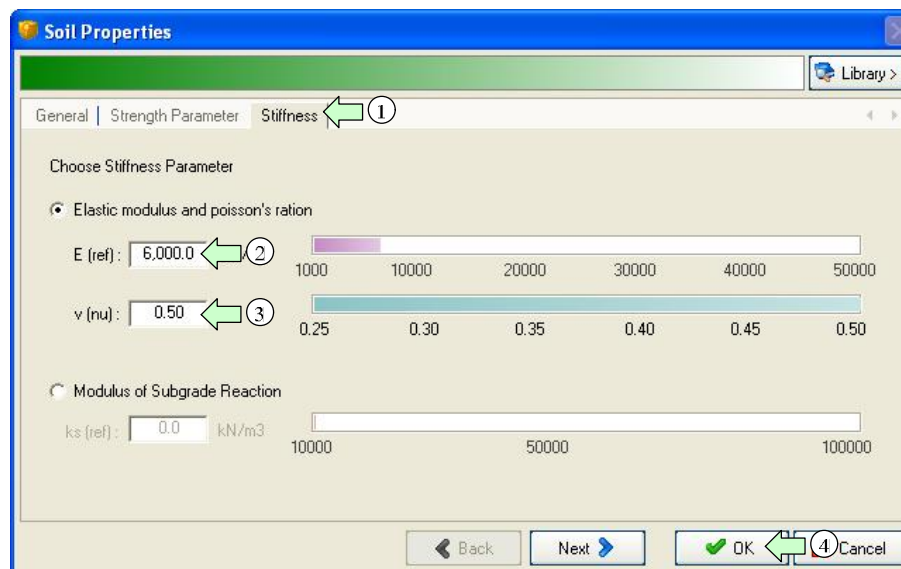
รูปที่ m4.33

4.3 การคำนวณการเสี้ยวรูป โมเมนต์ แรงเฉือนและหน่วยแรงดันดินที่เกิดขึ้นเมื่อเสาเข็มรับน้ำหนักแนวราบ

ตัวอย่างที่ 4.5 จากข้อมูลดินหลุมเจาะดังแสดงในตัวอย่างที่ 4.4 ต้องการคำนวณการเสี้ยวรูป โมเมนต์ แรงเฉือนและหน่วยแรงดันดินของเสาเข็มตอก หน้าตัด 0.40 x 0.40 ยาว 14 เมตร ขณะรับน้ำหนักบรรทุกแนวตั้ง 15 ตัน และน้ำหนักบรรทุกแนวราบ 5 ตัน โดยใช้เงื่อนไขของหัวเข็มเป็นแบบยึดแน่น (Fix head)

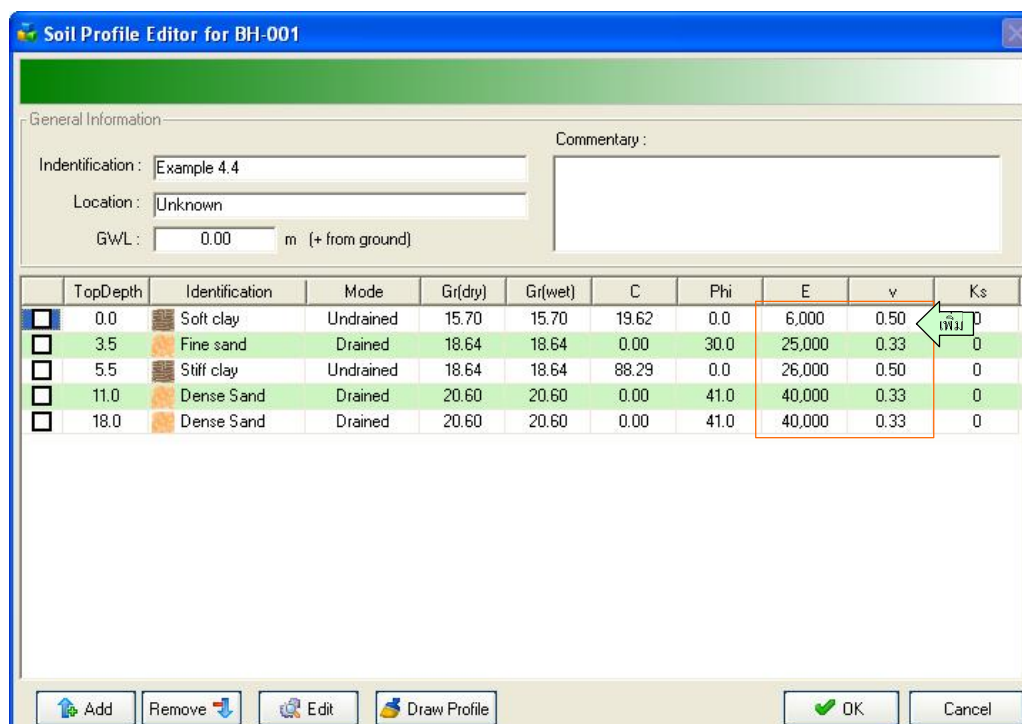
แก้ไขข้อมูลหลุมเจาะตามชั้นดินในรูปที่ m4.15 เพื่อเพิ่มข้อมูลพารามิเตอร์ความแกร่งของดิน ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 - คลิก Soil Profile Explorer > คลิก BH No.001 - Example4.4 เพื่อแก้ไขดังแสดงในรูปที่ m4.34



รูปที่ m4.34


- ขั้นตอนที่ 2 - แก้ไขข้อมูลชั้นดินโดยป้อนข้อมูลโมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนโพซงของของชั้นดินดังแสดงในรูปที่ m4.35

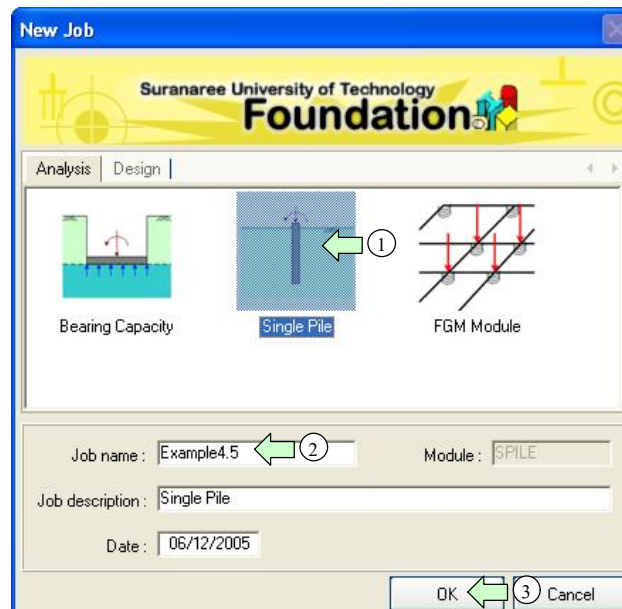


รูปที่ m4.35



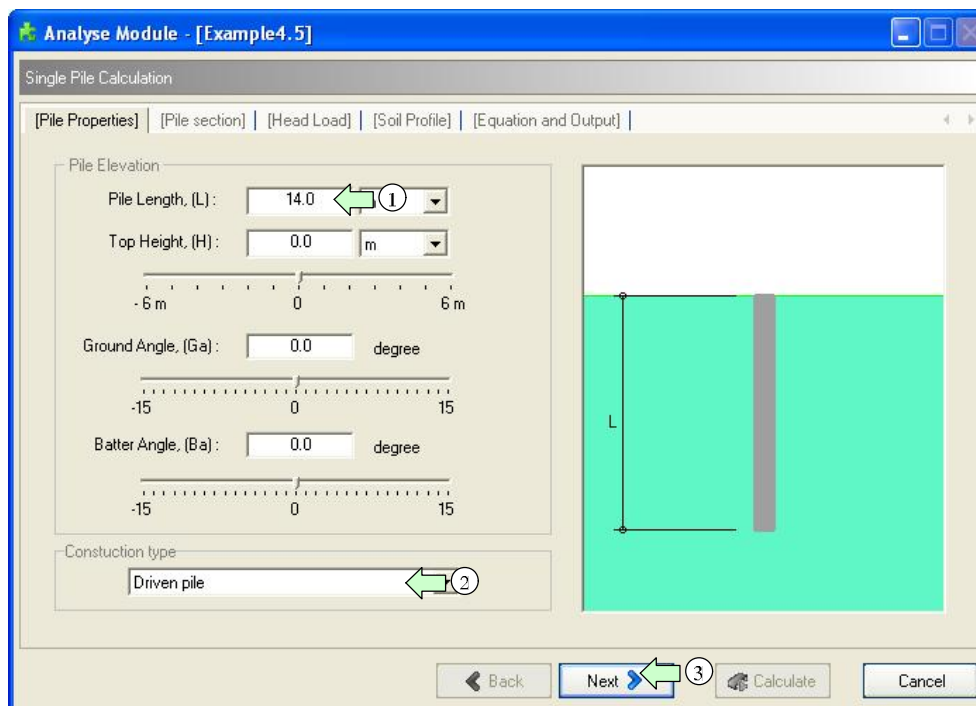
## เริ่มสร้างงาน (Job)

- **ขั้นตอนที่ 1** - คลิก  เพื่อเพิ่มแผนงาน (Job) ในโครงการ (Project) จะปรากฏหน้าดังรูปที่ m4.36 ป้อนข้อมูลและเลือกโมดูลดังแสดงในรูปที่ m4.36 ตามลำดับ

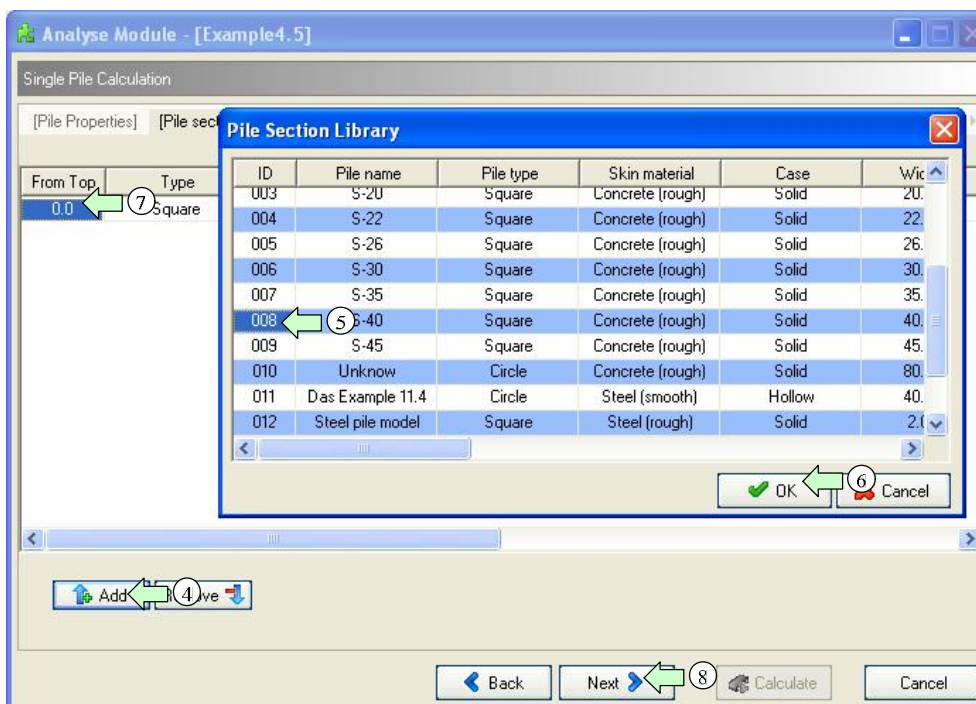


รูปที่ m4.36

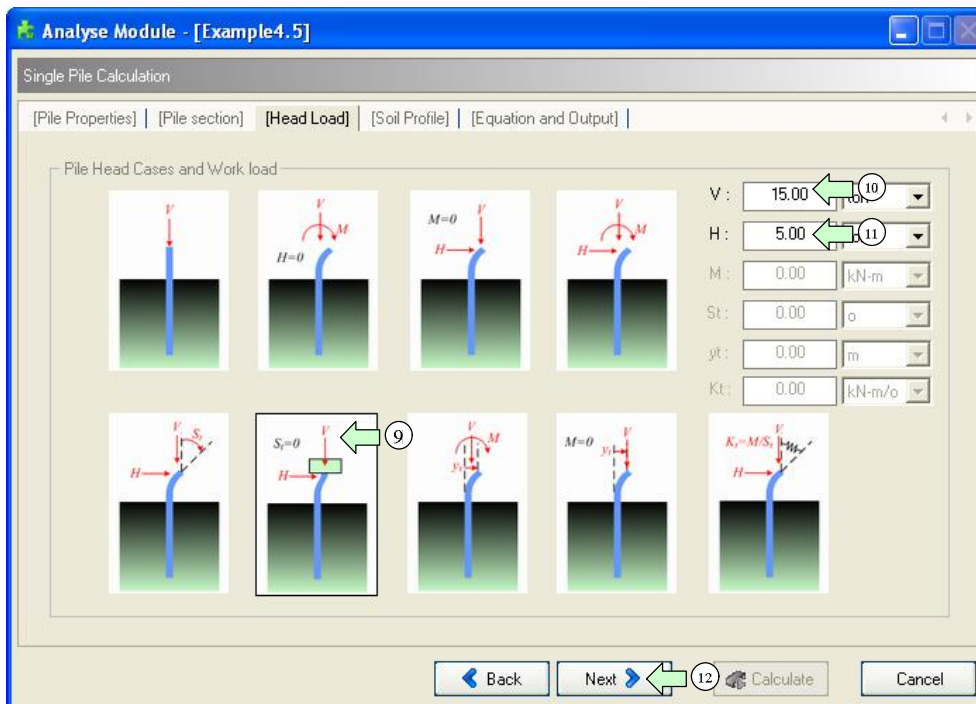
- **ขั้นตอนที่ 2** - จะปรากฏหน้าจอโมดูลดังแสดงในรูปที่ m4.36 ให้ทำตามขั้นตอนตามลูกศรชี้ดังรูปที่ m4.6 จนถึงรูปที่ m4.41



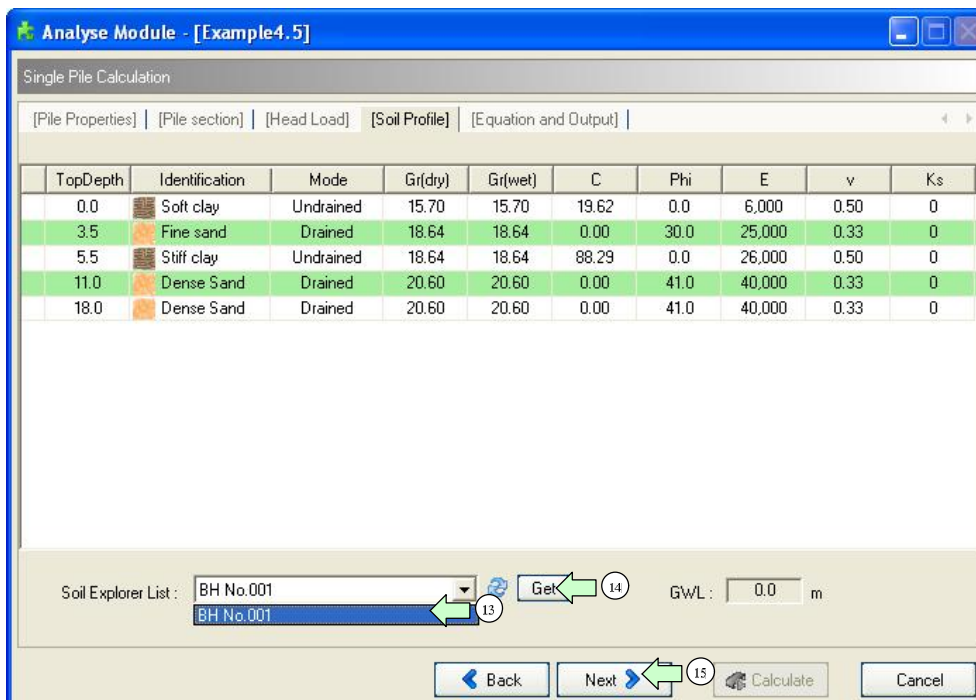
รูปที่ m4.37



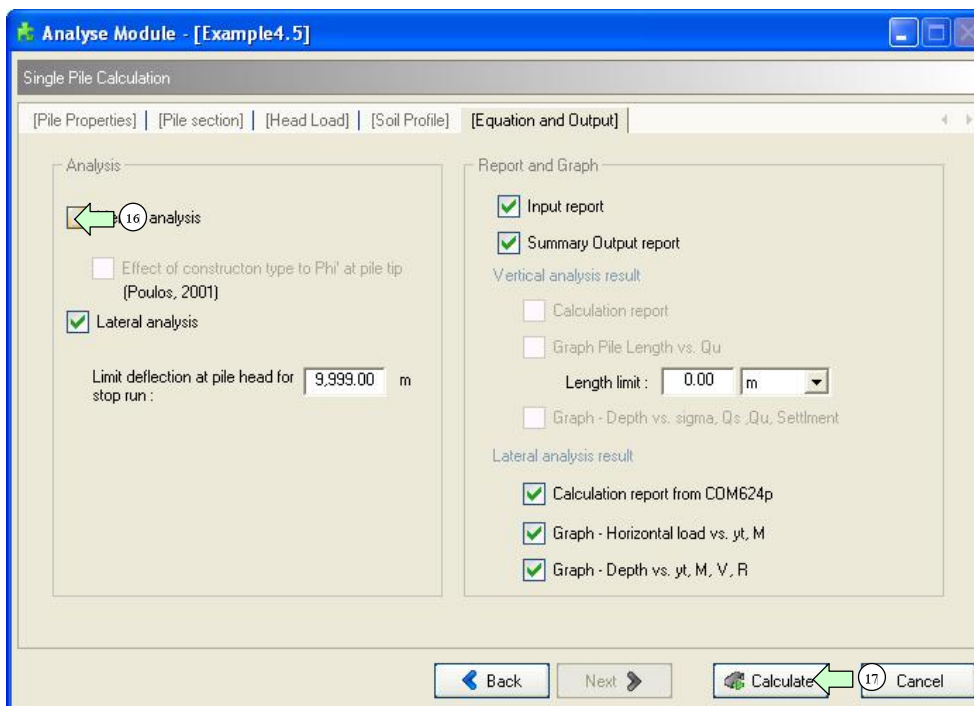
รูปที่ m4.38



รูปที่ m4.39



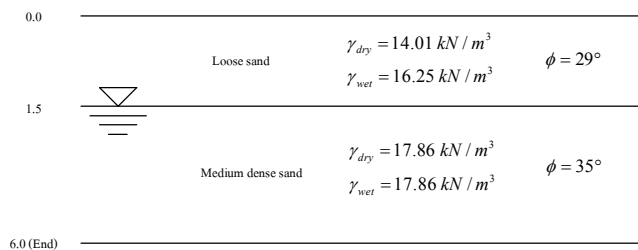
รูปที่ m4.40



รูปที่ m4.41

4.4 การวิเคราะห์หาโมเมนต์ แรงเฉือน และหน่วยแรงดันดินของแผ่นฐานรากดิน

ตัวอย่างที่ 4.6 จากข้อมูลดินหลุมเจาะดังแสดงในรูปที่ m4.42 สมมติว่าต้องการวิเคราะห์ฐานรากแผ่นขนาด 2 เมตร หนา 0.40 เมตร วางที่ความลึก 1.5 เมตร รองรับน้ำหนักบรรทุกจากเสาเท่ากับ  $P_y = 25$  ตัน (245.25 kN),  $M_x = 2$  ตัน-เมตร (19.62 kN-m)




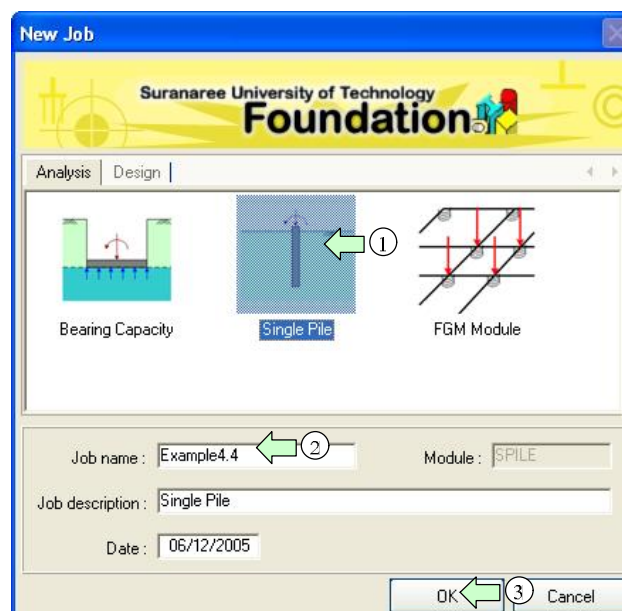
รูปที่ m4.42

สร้างข้อมูลหลุมเจาะตามชั้นดินในรูปที่ m4.42 ดังนี้

- **ขั้นตอนที่ 1** - เข้าสู่โปรแกรม Window Start menu > เลือกที่ Program option > คลิกที่ SUTFoundation program group > คลิกที่ SUTFoundation
- **ขั้นตอนที่ 2** - การสร้างข้อมูลชั้นดินทำเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 4.1

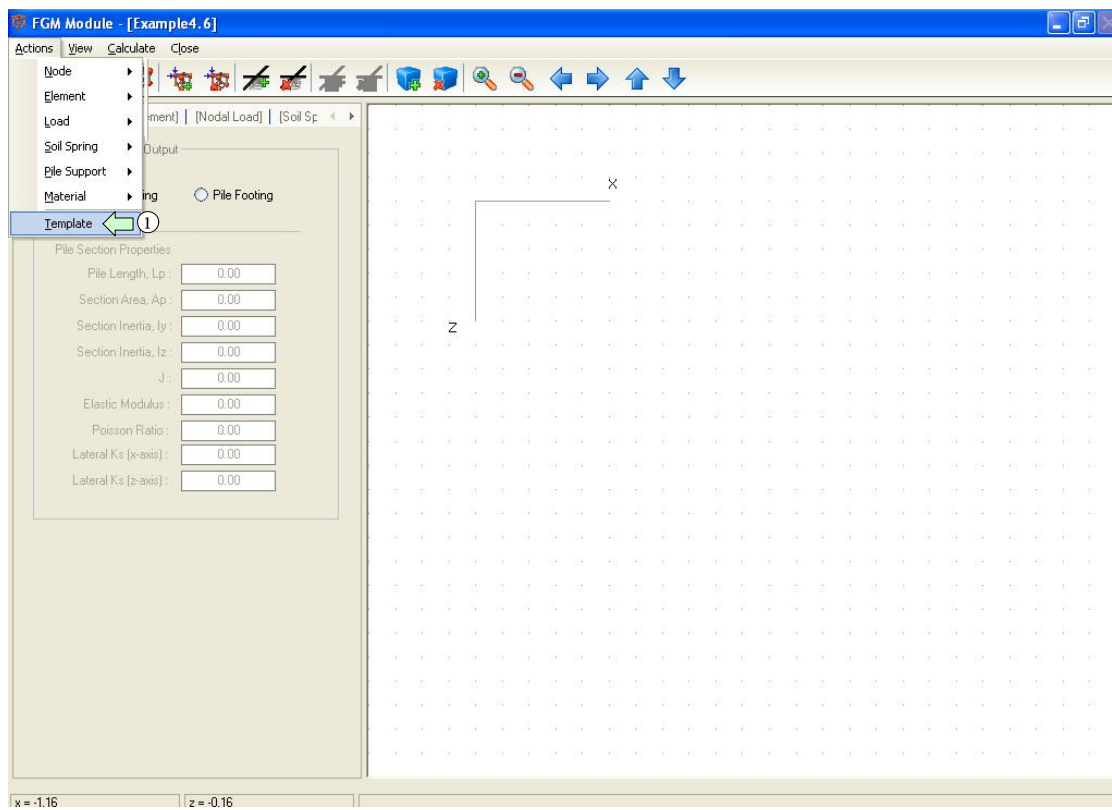
เริ่มสร้างงาน (Job)

- **ขั้นตอนที่ 1** - คลิก  เพื่อเพิ่มแผ่นงาน (Job) ในโครงการ (Project) จะปรากฏหน้าจดังรูปที่ m4.43 ป้อนข้อมูลและเลือกโมดูลดังแสดงในรูปที่ m4.43 ตามลำดับ

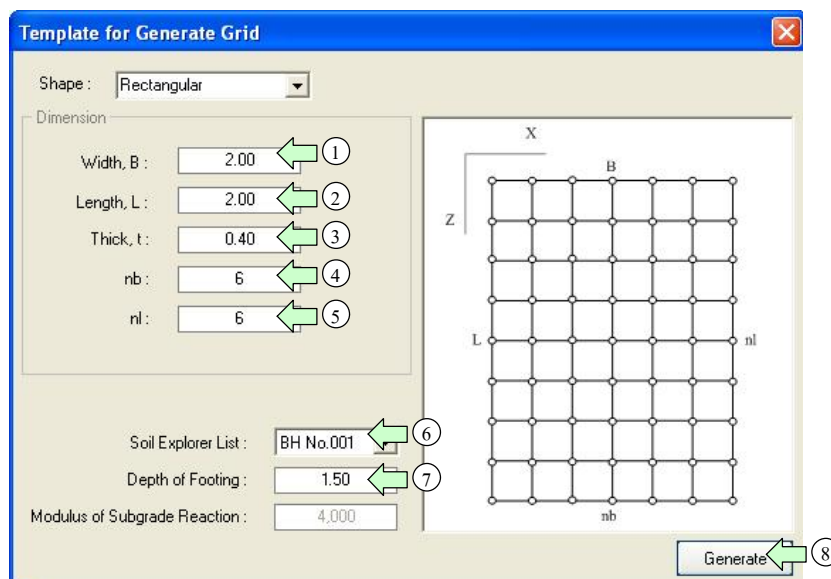


รูปที่ m4.43

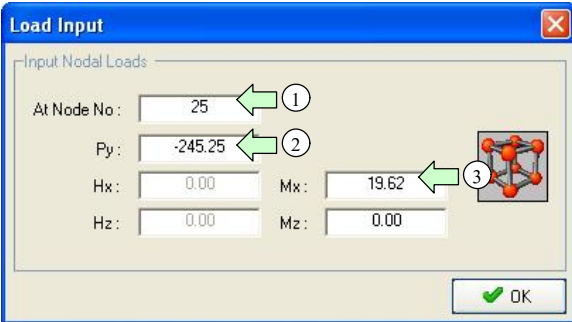
- **ขั้นตอนที่ 2** - จะปรากฏหน้าจอโมดูลดังแสดงในรูปที่ m4.44 ให้ทำตามขั้นตอนตามลูกศรชี้ดังรูปที่ m4.44 จนถึงรูปที่ m4.48



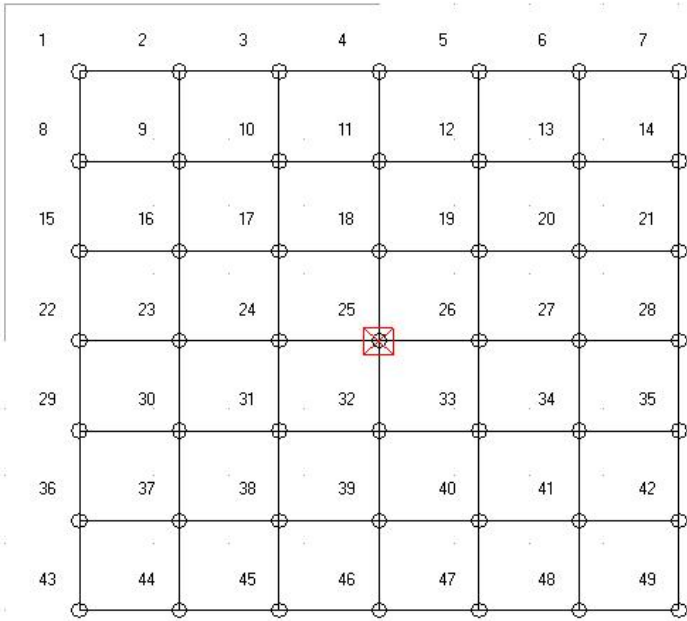
รูปที่ m4.44



รูปที่ m4.45



รูปที่ m4.46



รูปที่ m4.47

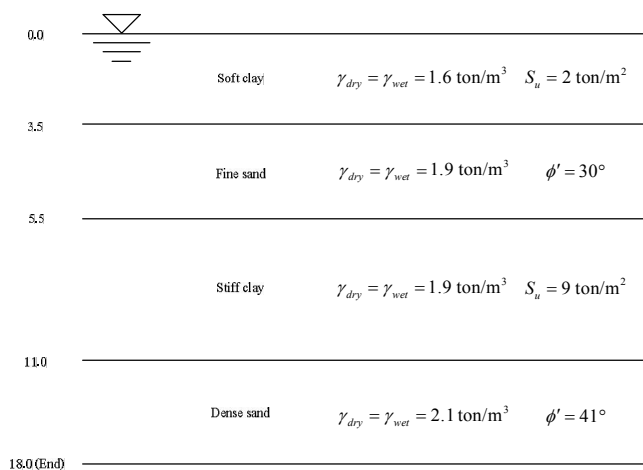
Summary Result			
[ Node Displacement ]			
Node#	dy	teta-x	teta-z
1	1.875E-02	3.490E-03	1.537E-04
2	1.880E-02	3.486E-03	1.444E-04
3	1.884E-02	3.480E-03	1.144E-04
4	1.887E-02	3.477E-03	6.311E-05
5	1.888E-02	3.480E-03	1.185E-05
6	1.888E-02	3.486E-03	-1.819E-05
7	1.888E-02	3.490E-03	-2.758E-05
8	1.758E-02	3.501E-03	1.572E-04
9	1.764E-02	3.495E-03	1.506E-04
10	1.768E-02	3.484E-03	1.219E-04
11	1.771E-02	3.477E-03	6.317E-05
12	1.772E-02	3.484E-03	4.506E-06
13	1.772E-02	3.495E-03	-2.437E-05
14	1.771E-02	3.500E-03	-3.109E-05
15	1.641E-02	3.532E-03	1.616E-04
16	1.647E-02	3.527E-03	1.599E-04
17	1.652E-02	3.513E-03	1.378E-04
18	1.655E-02	3.496E-03	6.319E-05
19	1.656E-02	3.513E-03	-1.142E-05
20	1.655E-02	3.527E-03	-3.367E-05
21	1.654E-02	3.532E-03	-3.545E-05
22	1.523E-02	3.582E-03	1.619E-04
23	1.528E-02	3.586E-03	1.622E-04
24	1.533E-02	3.594E-03	1.481E-04
25	1.537E-02	3.613E-03	6.321E-05
26	1.538E-02	3.594E-03	-2.181E-05
27	1.537E-02	3.586E-03	-3.594E-05
28	1.535E-02	3.582E-03	-3.565E-05

รูปที่ m4.48

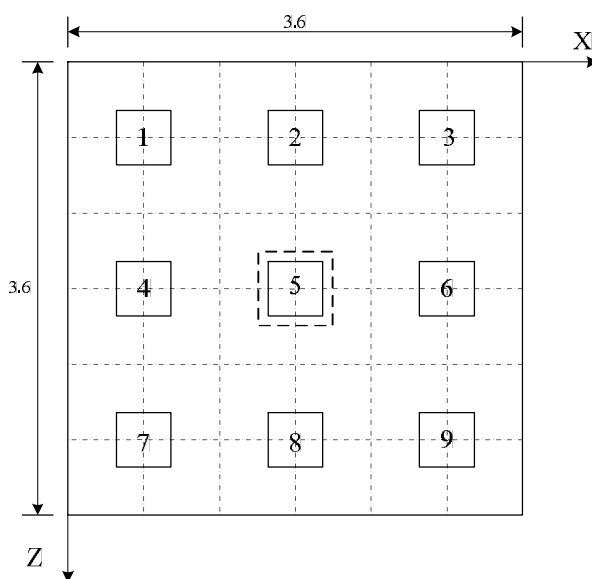
#### 4.5 การวิเคราะห์หาโมเมนต์ แรงเฉือน และหน่วยแรงดันดินของแผ่นฐานรากเสาเข็ม

ตัวอย่างที่ 4.7 จากข้อมูลดินหลุมเจาะดังแสดงในรูปที่ m4.15 สมมติว่าต้องการวิเคราะห์ฐานเสาเข็มขนาด Cap 3.6 x 3.6 เมตร หนา 0.7 เมตร เสาเข็มตอก S-40 ขนาด 0.4 x 0.4 x 14.00 ม. รองรับน้ำหนักบรรทุกทุกจากเสาเท่ากับ  $P_y = 250$  ตัน (2452.5 kN),  $M_x = 112.5$  ตัน-เมตร (1103.6 kN-m) และ  $M_z = -87.5$  ตัน-เมตร (858.4 kN-m) ดังแสดงในรูปที่ m4.49





รูปที่ m4.49




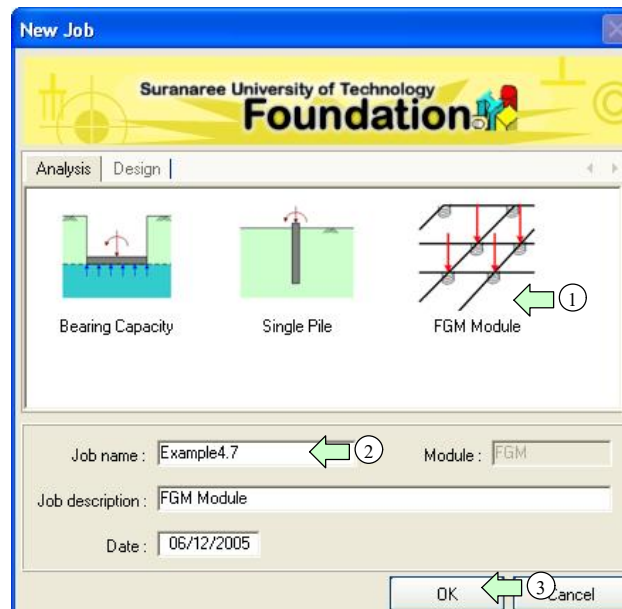
รูปที่ m4.50

สร้างข้อมูลหลุมเจาะตามชั้นดินในรูปที่ m4.49 ดังนี้

- **ขั้นตอนที่ 1** - เข้าสู่โปรแกรม Window Start menu > เลือกที่ Program option > คลิกที่ SUTFoundation program group > คลิกที่ SUTFoundation
- **ขั้นตอนที่ 2** - การสร้างข้อมูลชั้นดินทำเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ E4.4

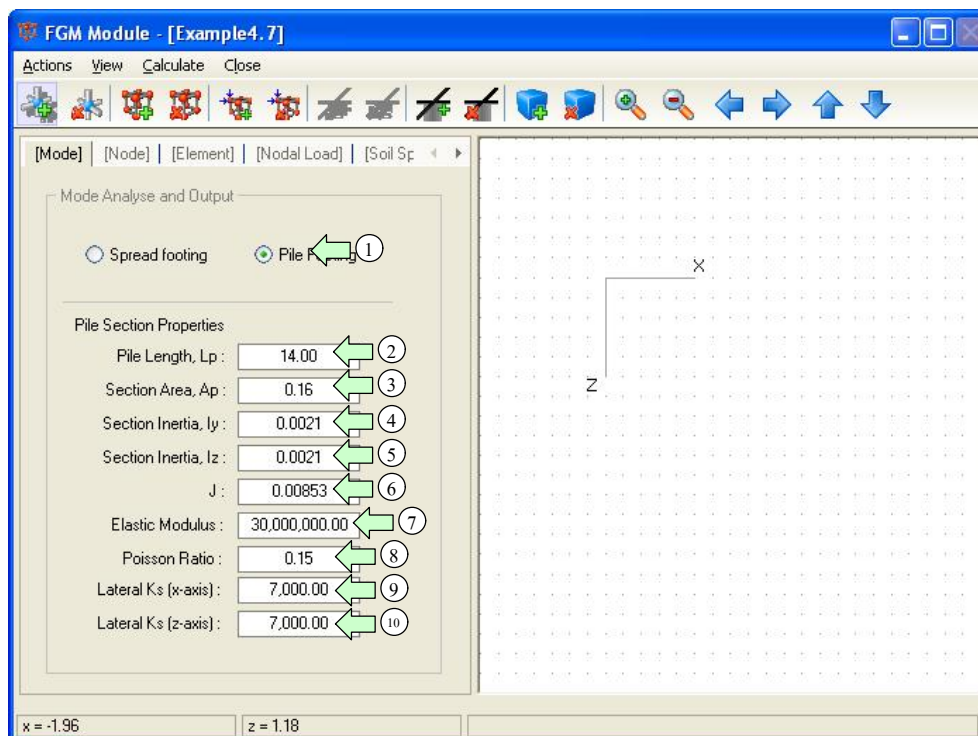
### เริ่มสร้างงาน (Job)

- **ขั้นตอนที่ 1** - คลิก  เพื่อเพิ่มแผนงาน (Job) ในโครงการ (Project) จะปรากฏหน้าดังรูปที่ m4.51 ป้อนข้อมูลและเลือกโมดูลดังแสดงในรูปที่ m4.51 ตามลำดับ



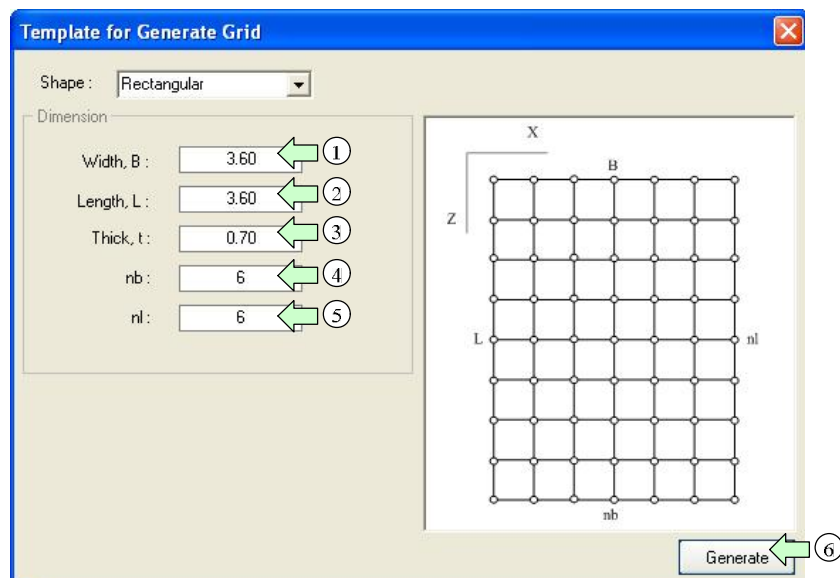
รูปที่ m4.51

- **ขั้นตอนที่ 2** - จะปรากฏหน้าจอโมดูลดังแสดงในรูปที่ m4.52 คลิกที่ Pile footing Option ป้อนข้อมูลของเสาเข็มดังรูปที่ m4.52




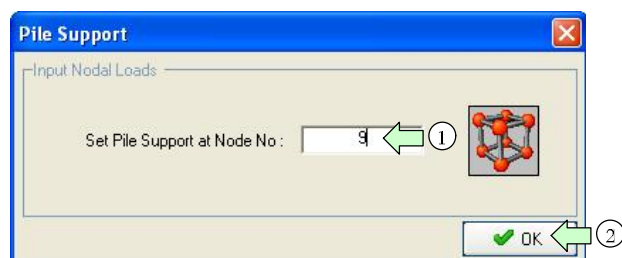
รูปที่ m4.52

- **ขั้นตอนที่ 3** - เลือกใช้ Template ในการสร้างกริด โดยคลิกที่ FGM Menu bar > Actions > Template จะปรากฏหน้าจอ ดังรูปที่ m4.53 ป้อนข้อมูลของกริดที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ m4.53




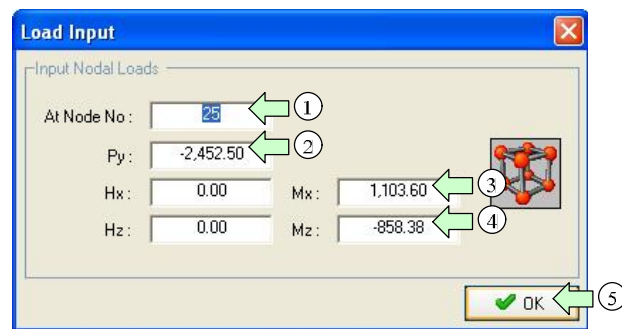
รูปที่ m4.53

- **ขั้นตอนที่ 4** - ใส่น้ำหนักบรรทุกที่จุดต่อที่ต้องการให้ โดยเลือกที่ FGM Toolbar >  แล้วจึงป้อนจุดต่อที่ต้องการให้เป็นเสาเข็มจุดที่ 9, 11, 13, 23, 25, 27, 37, 39 และ 41 ตามลำดับที่ละจุด ดังรูปที่ m4.53



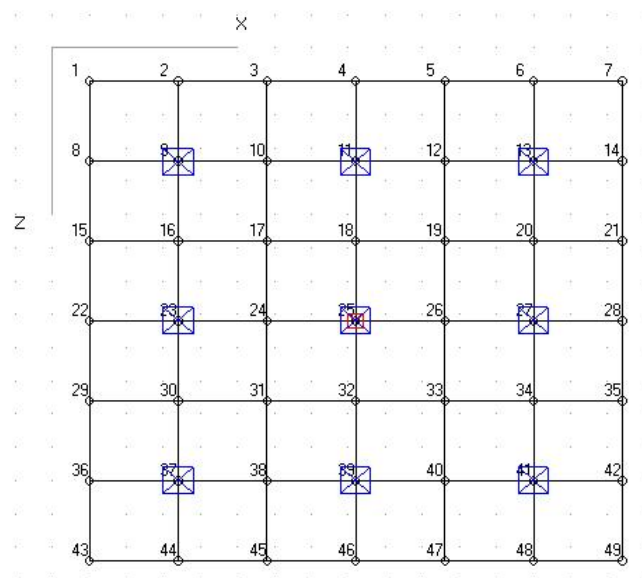
รูปที่ m4.54

- **ขั้นตอนที่ 5** - ใส่น้ำหนักบรรทุกที่จุดต่อ โดยเลือกที่ FGM Toolbar >  จะปรากฏหน้าจอสำหรับป้อนข้อมูลน้ำหนักบรรทุก ป้อนน้ำหนักบรรทุกทุกดังแสดงในรูปที่ m4.55

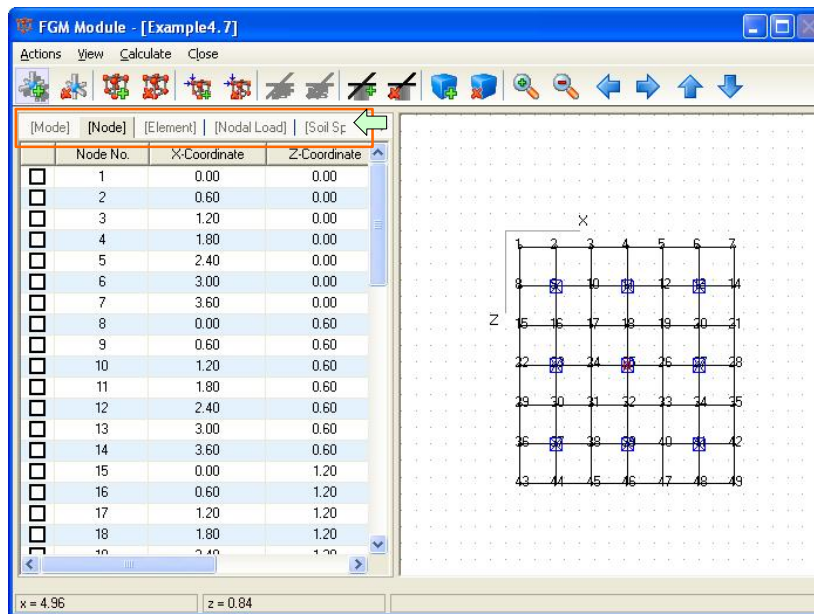


รูปที่ m4.55

- ขั้นตอนที่ 6 - เมื่อสร้างแบบจำลองเสร็จจะได้แบบจำลองดังแสดงในรูปที่ m4.56 ผู้ใช้สามารถดูข้อมูลของแบบจำลองได้จาก Tab ด้านซ้ายมือดังรูปที่ m4.57



รูปที่ m4.56



รูปที่ m4.57

- ขั้นตอนที่ 7 - เริ่มคำนวณ โดยคลิกที่ FGM Menu bar > Calculate จะได้ผลการคำนวณดังแสดงในรูปที่ m4.58

Summary Result					
065	-1.068E-02	-3.674E+02	-3.958E-01	1.499E+02	
066	-3.726E-03	2.367E+01	2.649E-02	-2.347E+01	
067	-1.947E-02	-1.508E-01	-3.634E-03	-1.120E+01	
068	6.616E-03	1.241E+02	-1.536E-01	-4.350E+01	
069	-3.768E-02	3.704E+02	-1.669E-01	-3.216E+01	
070	-5.076E-02	-2.599E+02	-2.742E-01	2.920E+02	
071	-5.718E-02	-2.907E+02	-2.642E-01	1.462E+02	
072	1.645E-02	-2.674E+01	-1.076E-02	-1.486E+00	
073	-6.092E-02	-7.006E+00	1.483E-02	-1.822E-01	
074	7.892E-02	1.241E+02	-2.405E-01	-1.398E+01	
075	-1.289E-01	6.106E+00	-2.203E-01	8.357E+01	
076	9.992E-02	5.688E+01	-2.698E-01	1.193E+02	
077	-1.437E-01	-2.078E+02	-3.430E-01	1.279E+02	
078	6.945E-02	2.964E+01	2.314E-02	-9.371E+00	
079	-1.990E-02	-3.269E+00	-2.018E-02	4.130E+00	
080	-5.211E-03	-4.576E+00	-7.531E-02	1.900E+01	
081	-1.543E-02	-2.943E+01	-1.020E-01	4.874E+01	
082	9.800E-03	-7.534E+00	-1.101E-01	5.630E+01	
083	1.495E-03	-3.115E+01	-9.651E-02	4.006E+01	
084	2.579E-02	-4.212E-01	-2.562E-02	4.308E+00	
			Vertical Reaction at pile head		
Pile No#	Rx	Ry	Rz	Mx	
009	2.641E-01	1.834E+01	2.573E-01	8.705E+00	
011	3.432E-02	-1.321E+02	3.841E-01	9.890E+00	
013	-4.208E-01	-2.009E+02	3.795E-01	9.847E+00	
023	4.161E-01	-1.664E+02	4.225E-02	6.696E+00	
025	4.603E-01	-3.776E+02	5.898E-01	1.181E+01	
027	-6.264E-01	-4.066E+02	4.218E-02	6.696E+00	
037	4.214E-01	-2.635E+02	-4.625E-01	1.983E+00	
039	3.442E-02	-4.409E+02	-6.584E-01	1.546E-01	
041	-5.779E-01	-4.827E+02	-5.849E-01	8.410E-01	

រូបថត m4.58

ภาคผนวก ค.

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์



### บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

1) จิระยุทธ สืบสุข และสุขสันต์ หอพิบูลสุข, โปรแกรมวิเคราะห์และออกแบบฐานราก SUTFoundation. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11 (The 11<sup>th</sup> National Conventional on Civil Engineering), GTE006, เมอร์ลิน บีช รีสอร์ท จ. ภูเก็ต. 20 – 22 เมษายน 2549.

# โปรแกรมวิเคราะห์และออกแบบฐานราก - SUTFoundation

## FOUNDATION ANALYSIS AND DESIGN PROGRAM - SUTFoundation

จิระยุทธ สืบสุข (Jirayoot Suebsook)<sup>1</sup>  
สุขสันต์ หอพิบูลสุข (Suksun Horpibulsuk)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี jirayoot@gtesoft.com

<sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี suksun@sut.ac.th

**บทคัดย่อ :** วิธีที่นิยมสำหรับการคำนวณหาโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนในแผ่นฐานราก คือ วิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) เช่น วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ เป็นต้น โดยวิธีเชิงตัวเลขนี้จำลองฐานรากได้เสมือนกับสภาพจริงในสนามมากและจำลองน้ำหนักบรรทุกได้ในทุกรูปแบบ ถึงแม้ว่าวิธีเชิงตัวเลขจะมีความยืดหยุ่นสูงแต่ก็มีขั้นตอนการได้มาซึ่งคำตอบที่ยุ่งยากซับซ้อน มีผลการคำนวณที่ยากต่อการตีความหมายและให้ผลการคำนวณที่มากเกินไปสำหรับการนำไปใช้ในออกแบบ ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอโปรแกรม SUTFoundation ซึ่งใช้แบบจำลองฐานรากดินและฐานรากเสาเข็มอย่างง่ายที่สร้างขึ้นเพื่อวิเคราะห์หาโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในแต่ละหน้าตัดเพื่อนำไปใช้ออกแบบโครงสร้างฐานราก แบบจำลองฐานรากอย่างง่ายนี้จะช่วยลดเวลาในการคำนวณและช่วยแก้ปัญหาการแปรผลขนาดโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนในแต่ละหน้าตัดที่ยุ่งยากของการคำนวณ โดยวิธีเชิงตัวเลขแบบเดิมแบบจำลองอย่างง่ายให้ผลที่มีความแม่นยำเทียบเท่าวิธีเชิงตัวเลขอื่นๆ ซึ่งได้รับการยืนยันจากผลการเปรียบเทียบคำตอบของแบบจำลองอย่างง่ายกับคำตอบแม่นยำตรงจากทฤษฎียืดหยุ่นและคำตอบจากวิธีเชิงตัวเลข ได้แก่ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีไฟไนต์เลเยอร์

**ABSTRACT :** Conventional means of the estimating bending moment and shear force in footing is numerical method such as finite element and finite difference. These method can well simulate the footing subjected to various loading condition. However, the calculation process in complicated and the calculation result are hard to interpret for footing design. The present paper introduces a foundation analysis and design program named "SUTFoundation". The program provides simplified models for determination of the bending moment and shear force in shallow and deep foundation. These two values at each section are taken for structure design. Using these simplified models, the calculation time is reduced and the interpretation of the calculation results is simple. It is also verified that the accuracy of the calculation results from these simplified model can be compared with the results from the exact solution and the other numerical method.

**KEYWORDS :** SUTFoundation, Foundation analysis, Direct stiffness method, Soil-structure interaction

### 1. บทนำ

การวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างได้ดินแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนที่หนึ่ง คือ การตรวจสอบความสามารถรับน้ำหนักของชั้นดินและเสาเข็ม ขั้นตอนที่สอง คือ การวิเคราะห์หาหน่วยแรงและโมเมนต์ในแผ่นฐานรากและเสาเข็ม และขั้นตอนที่สาม คือ การออกแบบโครงสร้างแผ่นฐานรากและเสาเข็ม โดยแต่ละขั้นตอนมีความสัมพันธ์ต่อกัน การเริ่มต้นคำนวณที่ขั้นตอนใดก่อนนั้นขึ้นอยู่กับเทคนิคของผู้ออกแบบแต่

ละคน โดยการออกแบบมีเป้าหมายที่เหมือนกัน คือ ฐานรากสามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกได้โดยไม่เกิดการวิบัติทั้งในดินแผ่นฐานรากและเสาเข็ม ความยุ่งยากในการออกแบบฐานรากอยู่ที่ขั้นตอนการวิเคราะห์หาหน่วยแรงและโมเมนต์ในแผ่นฐานรากและเสาเข็ม วิธีทั่วไป (Conventional method) สำหรับวิเคราะห์แผ่นฐานราก คือ วิธีกลศาสตร์ของวัสดุโดยสมมติว่าแผ่นฐานรากมีสติเฟนสมากและหน่วยแรงดันดินใต้ฐานรากมีลักษณะกระจายแบบสม่ำเสมอ การวิเคราะห์โดยวิธีนี้ง่ายในการคำนวณแต่ก็มี

ข้อจำกัดค่อนข้างมาก เช่น ไม่ควรนำไปใช้กับฐานรากดินบนชั้นที่อ่อนมากเพราะค่าโมเมนต์ที่คำนวณได้จะมีค่าผิดพลาดในด้านไม่ปลอดภัย, เมื่อนำไปใช้วิเคราะห์ฐานรากเสาเข็ม จุดเชื่อมต่อของเสาเข็มกับฐานรากต้องเป็นแบบหมุนเพียงอย่างเดียว เป็นต้น ดังนั้นแบบจำลองแผ่นฐานรากที่มีพฤติกรรมใกล้เคียงฐานรากจริงมากขึ้นจึงถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางด้วยการคำนวณโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์หรือวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ เช่น Zhuang et al. [1] และ Katzenbach et al. [2] เป็นต้น แม้ว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์จะมีความยืดหยุ่นในการสร้างแบบจำลองและสามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกได้ในทุกรูปแบบ แต่ก็มีข้อดีอยู่ในการนำมาใช้ออกแบบ คือ ตัวแปรไม่ทราบค่าจำนวนมากที่ไม่จำเป็นสำหรับการออกแบบจะมีอยู่ในแบบจำลองด้วย ทำให้ขนาดของปัญหามีขนาดใหญ่เกินจำเป็น การจำลองฐานรากให้มีความง่ายขึ้น (Simplification) แต่ยังคงให้ผลคำตอบที่เพียงพอ (โมเมนต์คดและแรงเฉือน) และแม่นยำต่อการออกแบบเป็นแนวทางการพัฒนาแบบจำลองฐานรากที่เหมาะสมงานวิจัยที่เสนอวิธีการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองฐานรากแบบง่ายได้แก่ วิธีจำลองดินเป็นสปริงรองรับฐานรากและจำลองฐานรากเป็นแถบคาน (Beam on springs) [3] หรือจำลองฐานรากเป็นแผ่น Plate วางอยู่บนสปริง [4] เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม แบบจำลองดังกล่าวยังมีตัวแปรไม่ทราบค่าที่สามารถละทิ้งหรือรวมเป็นตัวแปรเดียวได้ เช่น แรงฝืดรอบเสาเข็มและแรงแบกทานที่ปลายเข็ม เป็นต้น จิระยุทธ [5] ได้พัฒนาแบบจำลองสำหรับฐานรากดินและฐานรากเสาเข็มโดยใช้สมมติฐานว่าชั้นดินที่รองรับฐานรากดินและชั้นดินรอบเสาเข็มมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่นขณะฐานรากรับน้ำหนักบรรทุกทุกอยู่ในช่วงใช้งาน จึงสามารถลดตัวแปรไม่ทราบค่าที่ไม่เกี่ยวข้องกับการออกแบบลงได้มาก แผ่นฐานรากถูกจำลองเป็นชิ้นส่วนโครงข้อแข็งวางไขว้กันแบบตาราง เสาเข็มถูกจำลองเป็นชิ้นส่วนเสา ชั้นดินถูกจำลองเป็นสปริงยืดหยุ่นแบบจำลองฐานรากอย่างง่ายนี้พัฒนามาเพื่อใช้วิธีสติเฟนสตรงคำนวณหาการเปลี่ยนตำแหน่งของแต่ละจุดต่อ แล้วจึงคำนวณหาแรงภายในของแต่ละชิ้นส่วนต่อไป ดังนั้นแบบจำลองฐานรากอย่างง่ายนี้จึงเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้วิเคราะห์โมเมนต์คดและแรงเฉือนในแผ่นฐานราก เพื่อนำโมเมนต์คดและแรงเฉือนนั้นไปคำนวณออกแบบโครงสร้างของฐานราก แบบจำลองอย่างง่ายนี้ถูกนำมาใช้เป็นแบบจำลองพื้นฐานของโปรแกรมสำเร็จรูป SUTFoundation เพื่อเป็นเครื่องมือสำหรับช่วยผู้ออกแบบในการคำนวณออกแบบฐานรากตามขั้นตอนการออกแบบข้างต้นได้

สมบูรณ์ครบถ้วนใน โปรแกรมเดียวตั้งแต่การลองผิดลองถูกเพื่อหาขนาดฐานรากและความยาวเสาเข็มที่เหมาะสมโดยอัตโนมัติ และคำนวณจำนวนเหล็กเสริม ขนาดและระยะจัดเรียงให้ตามมาตรฐาน

บทความนี้เริ่มต้นโดยแสดงลักษณะทั่วไปของ โปรแกรม SUTFoundation และจะแสดงถึงความแม่นยำของแบบจำลองฐานรากดินและฐานรากเสาเข็มอย่างง่ายที่มีอยู่ในโปรแกรมโดยเปรียบเทียบผลคำตอบกับการคำนวณโดยวิธีเชิงตัวเลขอื่นๆ

## 2. ลักษณะทั่วไปของโปรแกรม SUTFoundation

โปรแกรม SUTFoundation เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบงานวิศวกรรมฐานราก โปรแกรมได้จัดเตรียมโมดูลสำหรับวิเคราะห์และออกแบบไว้ให้ผู้ใช้ได้สามารถเลือกใช้อย่างสะดวกและเหมาะสม โมดูลต่างๆ ที่มีในโปรแกรม SUTFoundation ได้แสดงและอธิบายไว้ตามตารางที่ 1 การป้อนข้อมูลของแต่ละโมดูลเป็นแบบตัวอักษร (Text) และแบบกราฟิกร่วมกัน ในโปรแกรมจะมีรูปบรรยายประกอบทำให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ การป้อนข้อมูลชั้นดินจากข้อมูลหลุมเจาะทำได้โดยง่าย สามารถป้อนพารามิเตอร์กำลังต้านทานแรงเฉือนโดยตรงหรือป้อนผลการทดสอบทะลุทะลวงมาตรฐาน (SPT) ก็ได้ ตัวอย่างโมดูลการสร้างและแก้ไขข้อมูลชั้นดินแสดงในรูปที่ 1

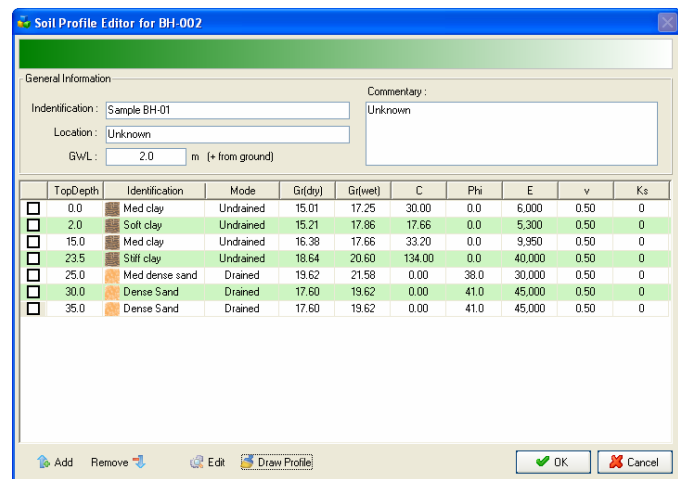
ตารางที่ 1 โมดูลที่จัดเตรียมไว้ในโปรแกรม SUTFoundation

โมดูล	รายละเอียด
BCCAL	คำนวณกำลังรับแรงแบกทานของฐานรากดินแบบเปลี่ยนความลึกและระดับน้ำใต้ดินได้
SPILE	คำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มทั้งแนวตั้งและแนวราบ
FGM	สร้างแบบจำลองและวิเคราะห์แผ่นฐานรากดิน (3DOF/Node) และฐานรากเสาเข็ม (6DOF/Node)
ISOD	ออกแบบฐานรากแผ่ หาขนาดและเหล็กเสริมจากข้อมูลชั้นดิน ตามมาตรฐาน ACI 318-95
COMBD	ออกแบบฐานรากร่วม หาขนาดและเหล็กเสริมจากข้อมูลชั้นดิน ตามมาตรฐาน ACI 318-95
MATD	ออกแบบฐานรากแพ หาขนาดและเหล็กเสริมจากข้อมูลชั้นดิน ตามมาตรฐาน ACI 318-95
PILED	ออกแบบฐานรากเสาเข็ม หาขนาดและเหล็กเสริมจากข้อมูลชั้นดิน ตามมาตรฐาน ACI 318-95

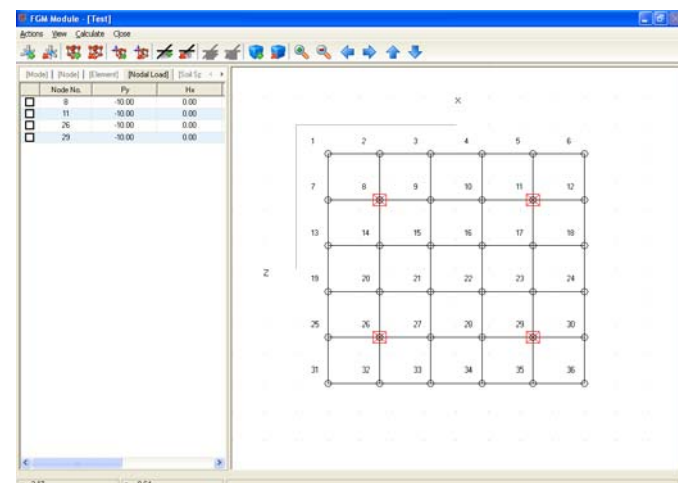
การคำนวณกำลังรับแรงแบกทานของฐานรากดินอาศัยสมการตามวิธี Limit equilibrium analysis รวมเข้ากับเทคนิคการคำนวณแบบลองผิดลองถูก (Trial and error) ทำให้โปรแกรมสามารถคำนวณหาขนาดของฐานราก, ระดับวางฐานราก หรือผล

ของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินได้ การวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยเสาเข็มเดียวแนวตั้งจะใช้วิธีสถิตศาสตร์ การวิเคราะห์แนวราบจะใช้วิธี  $p-y$  curves โดยโปรแกรม COM624P [6]

การวิเคราะห์หาโมเมนต์ แรงเฉือนและการเสีรูปของทั้งระบบฐานรากสามารถได้โดยการเลือกใช้โมดูลสำหรับสร้างแบบจำลองอย่างง่ายของฐานรากค้ำและฐานรากเสาเข็มทั้งแบบผู้ใช้สร้างเองและแบบตัวช่วย (Wizard) ตัวอย่างการสร้างแบบจำลองแผ่นฐานรากค้ำรับน้ำหนักจากเสาจำนวน 4 ต้นแสดงดังรูปที่ 2 ส่วนโมดูลสำหรับออกแบบจะใช้ค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ค้ำที่คำนวณได้โดยอาศัยแบบจำลองอย่างง่ายในการลองผิดลองถูกเพื่อหาขนาดฐานรากที่เหมาะสมและจำนวนเหล็กเสริมคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI และมาตรฐาน ว.ส.ท.



รูปที่ 1 โมดูล Soil Profile Editor สำหรับสร้าง/แก้ไข ข้อมูลชั้นดิน จากข้อมูลหลุมเจาะ

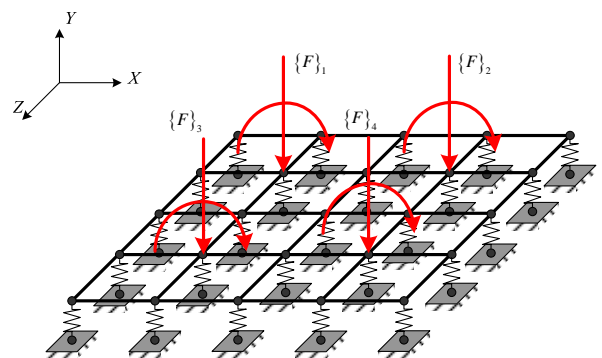


รูปที่ 2 หน้าจอการสร้างแบบจำลองของฐานรากค้ำซึ่งรับน้ำหนักบรรทุกจากเสา 4 ต้น

### 3. แบบจำลองอย่างง่ายสำหรับฐานรากค้ำ

ลักษณะการใช้งานของฐานรากค้ำ คือ ฐานรากที่วางอยู่บนชั้นดินที่มีความแข็งพอสมควรมีการถ่ายน้ำหนักบรรทุกลงสู่ดิน

โดยตรง การกระจายของหน่วยแรงเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกจะขึ้นอยู่กับสตีเฟนของแผ่นฐานรากและสตีเฟนของชั้นดินที่รองรับ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยในแนวตั้งสามารถหาได้ตามวิธี Limit equilibrium analysis ส่วนแรงเฉือนประลัยแนวราบคำนวณได้จาก  $(c + \sigma_v \tan \phi) A_f$  โดยที่  $c$  คือ หน่วยแรงเหนียวของดิน,  $\sigma_v$  คือ หน่วยแรงกดทับแนวตั้ง,  $\phi$  คือ มุมเสียดทานภายในของดินและ  $A_f$  คือ พื้นที่สัมผัสใต้ฐานรากแบบจำลองฐานรากค้ำอย่างง่ายใช้สมมติฐานว่าชั้นดินแต่ละจุดเป็นอิสระต่อกันในการตอบสนองต่อการรับน้ำหนัก ดังนั้นจึงสามารถแบ่งชั้นดินใต้ฐานรากออกเป็นส่วนๆ แล้วแทนด้วยสปริงยืดหยุ่น สตีเฟนของสปริงหาได้โดยใช้หลักการแรงปฏิกิริยาของชั้นดินใต้ฐานราก (subgrade reaction method) แต่ยกเว้นการถ่ายแรงเฉือนในแนวราบลงสู่ชั้นดินใต้ฐานรากแบบจำลองอย่างง่ายสำหรับฐานรากค้ำจะจำลองโครงสร้างแผ่นฐานรากเป็นชิ้นส่วนคาน-เสา (beam-column element) วางไขว้กัน 2 ทางเป็นตารางรองรับด้วยสปริงซึ่งจำลองแทนชั้นดินใต้แผ่นฐานรากดังแสดงได้ดังรูปที่ 3 แบบจำลองนี้ใช้สำหรับการวิเคราะห์ฐานรากค้ำทั้งแบบฐานรากเดี่ยวและฐานรากร่วม การคำนวณหาโมเมนต์ค้ำและแรงเฉือนทำได้โดยวิธีสตีเฟนตรงโดยสมการสตีเฟนของแต่ละชั้นส่วนมีสมมติฐานว่าการเคลื่อนที่ของจุดต่อของแบบจำลองฐานรากค้ำในรูปที่ 3 คือ  $d_y, \theta_x, \theta_z$  แต่ละส่วนของแบบจำลองเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid body) มีพฤติกรรมในช่วงยืดหยุ่นและสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง (Compatibility equations) โดยแรงภายนอกกระทำที่จุดต่อ ( $F_y, M_x, M_z$ )



รูปที่ 3 แบบจำลองฐานรากค้ำอย่างง่าย

สมการพื้นฐานในการคำนวณแสดงดังสมการที่ (1)

$$\{F\} = [K] \cdot \{D\} \quad (1)$$

เมื่อ  $\{F\}$  คือ เวกเตอร์ของแรงภายนอก,  $[K]$  คือ เมตริกซ์ความแกร่งของแผ่นฐานรากรวมร่วมกับสปริงและ  $\{D\}$  คือ เวกเตอร์

การเคลื่อนที่ของจุดต่อ จิระยุทธ [5] ได้เสนอให้ใช้สติเฟนสแรงบิด,  $k_t$  สำหรับสติเฟนสเมตริกซ์ของแต่ละชิ้นส่วนคานตามสมการที่ (2) โดยตัวคูณปรับแก้ค่าคงที่การบิด (Adjust factor,  $\Omega$ ), ซึ่งขึ้นอยู่กับความกว้างและความยาวของชิ้นส่วนคาน-เสาของแบบจำลองตามสมการที่ (3)

$$k_t = \frac{\Omega GJ}{L} \quad (2)$$

เมื่อ  $G$  คือ โมดูลัสแรงเฉือน (Shear modulus),  $J$  คือ ค่าคงที่การบิด (Torsion constant) และ  $L$  คือ ความยาวของชิ้นส่วน

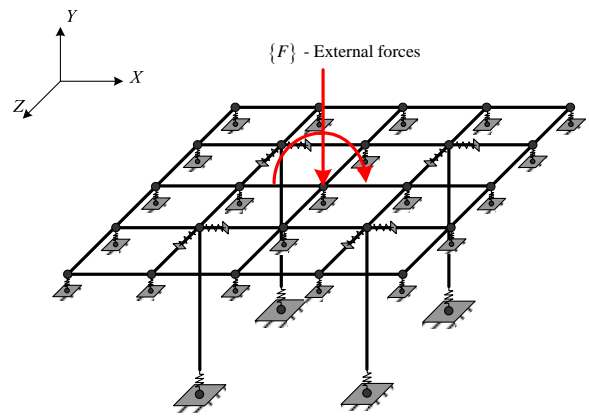
$$\Omega = 0.55L_c / B_c \leq 1.1 \quad (3)$$

เมื่อ  $L_c$  คือ ความยาวของชิ้นส่วนในแบบจำลอง,  $B_c$  คือ ความกว้างของชิ้นส่วนในแบบจำลอง สมการที่ 3 ได้จากการลองผิดลองถูกจนผลการคำนวณโดยแบบจำลองใกล้เคียงกับคำตอบแม่นยำมากที่สุดโดยฐานรากที่นำมาพิจารณามีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวอยู่ในช่วงเท่ากับ 1 ถึง 5

แบบจำลองฐานรากที่ง่ายได้ละทิ้งพฤติกรรมของสปริงแบบไม่เชิงเส้นลงเหลือเพียงช่วงยืดหยุ่นและละทิ้งการถ่ายแรงเฉือนสู่ดินใต้ฐานราก อีกทั้งยังได้เลือกให้ชิ้นส่วนของแผ่นฐานรากมีดิสริความอิสระเพียง 3 ตัวทำให้ช่วยลดเวลาในการสร้างสติเฟนส เมตริกซ์และการแก้สมการเชิงเส้นลงได้มาก

#### 4. แบบจำลองอย่างง่ายสำหรับฐานรากเสาเข็ม

ลักษณะการใช้งานของฐานรากเสาเข็ม คือน้ำหนักบรรทุกถ่ายจากแผ่นฐานรากลงสู่ชั้นดิน โดยผ่านเสาเข็ม แรงปฏิกิริยาที่กระทำต่อเสาเข็มประกอบด้วยแรงฝืดและแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็ม เสาเข็มสามารถรับแรงเฉือนแนวราบจากแผ่นฐานรากได้ โดยแรงปฏิกิริยาต้านแรงเฉือนแนวราบที่เกิดรอบๆ เสาเข็มแบบจำลองอย่างง่ายสำหรับฐานรากเสาเข็มประกอบด้วยสปริงรองรับน้ำหนักบรรทุกแนวตั้งใต้ฐานรากเช่นเดียวกับแบบจำลองอย่างง่ายของฐานรากค้ำ แต่เพิ่มเสาเข็มเข้ามาเป็นตัวถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นดินด้านล่าง โดยสติเฟนสซึ่งต้านทานน้ำหนักบรรทุกแนวตั้งประกอบด้วยสติเฟนสของหน้าตัดเสาเข็มรวมกับความแกร่งของชั้นดินที่ปลายเสาเข็มและความฝืดรอบเสาเข็มซึ่งจะถูกแทนโดยสปริงยืดหยุ่นที่ปลายเข็ม ส่วนสติเฟนสซึ่งต้านทานแรงเฉือนแนวราบประกอบด้วยสติเฟนสของหน้าตัดเสาเข็มและสติเฟนสของดินรอบข้างเสาเข็มซึ่งจะถูกแทนโดยสปริงยืดหยุ่นแนวราบ แบบจำลองฐานรากเสาเข็มอย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แบบจำลองอย่างง่ายสำหรับฐานเสาเข็ม

ชิ้นส่วนสำหรับใช้วิเคราะห์แผ่นฐานรากเสาเข็มจะต่างจากฐานรากค้ำ โดยแผ่นฐานรากถูกจำลองเป็นชิ้นส่วนโครงข้อแข็ง 3 มิติ มีดิสริความอิสระเท่ากับ 12 การเคลื่อนที่ของจุดต่อของแบบจำลองอย่างง่ายสำหรับแผ่นฐานรากเสาเข็ม คือ  $d_x, d_y, d_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$  สมมติฐานและสมการในการคำนวณโดยวิธีสติเฟนสตรงจะใช้เหมือนแบบจำลองของฐานรากค้ำ ปรับแก้ค่าคงที่การบิดสำหรับแบบจำลองฐานรากเสาเข็มประมาณได้จากสมการที่ (4) [5] โดยขอบเขตอัตราส่วนของขนาดฐานรากที่นำมาพิจารณาใช้เช่นเดียวกับสมการที่ (3)

$$\Omega = 0.65L_c / B_c \leq 1.1 \quad (4)$$

ค่าสติเฟนสของสปริงแนวราบหาได้จากความชันช่วงยืดหยุ่นของกราฟระหว่างน้ำหนักบรรทุกแนวราบกับระยะการเสียดรูปที่หัวเสาเข็มซึ่งคำนวณได้จากวิธี  $p-y$  curves โดยโปรแกรม COM624P โปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมแบบ Public domain ส่วนค่าสติเฟนสของสปริงแนวตั้งซึ่งรวมพฤติกรรมของทั้งแรงฝืดรอบเสาเข็มและแรงต้านที่ปลายเข็มหาได้โดยตรงจากความชันช่วงยืดหยุ่นของกราฟระหว่างน้ำหนักบรรทุกแนวตั้งกับระยะการทรุดตัวของเสาเข็มในสนาม หรือคำนวณโดยทางอ้อมได้จากโปรแกรมไฟไนท์เอลลิเมนต์ 2 มิติ โดยใช้แบบจำลองดินแบบยืดหยุ่นหรืออาจประมาณได้จากกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม โดยพิจารณาแรงเสียดทานจะเกิดเต็มที่เมื่อการเคลื่อนที่ของเสาเข็มเกิดประมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์ของเส้นผ่านศูนย์กลางและแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มเกิดเต็มที่เมื่อการเคลื่อนที่ของเสาเข็มเกิดประมาณ 10 - 20 เปอร์เซ็นต์ของเส้นผ่านศูนย์กลาง [7]

แบบจำลองฐานรากเสาเข็มอย่างง่ายมีจุดมุ่งหมายหลักเพื่อหาโมเมนต์ค้ำและแรงเฉือนในแผ่นฐานรากและแรงปฏิกิริยาที่หัวเสาเข็มแต่ละต้นในช่วงใช้งาน ดังนั้นแบบจำลองนี้ได้ใช้สปริง

แทนการตอบสนองต่อน้ำหนักบรรทุกในแนวตั้งที่ปลายฐานราก และในแนวราบที่หัวเข็มแทนการจำลองชั้นดินแบบสามมิติโดยสมบูรณ์ ซึ่งช่วยลดขนาดของปัญหาที่ต้องแก้ลงไปได้อย่างมาก

## 5. ตรวจสอบการวิเคราะห์โดยแบบจำลองฐานรากอย่างง่าย

การตรวจสอบแบ่งเป็นสองส่วน ได้แก่ (1) ตรวจสอบความแม่นยำในการคำนวณโครงสร้างแบบแผ่นสี่เหลี่ยมซึ่งมีการยึดรั้งที่ขอบทั้งสี่ด้านกับคำตอบแม่นยำตรงตามทฤษฎียึดหยุ่น [8] เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง และ (2) ตรวจสอบความแม่นยำในการคำนวณการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มเปรียบเทียบกับวิธีเชิงตัวเลขอื่นๆ ได้แก่ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม FLAC<sup>3D</sup> และวิธีไฟไนต์เลเยอร์ (Finite layer) โดยโปรแกรม APRAF [9]

### 5.1 เปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองอย่างง่ายกับทฤษฎียึดหยุ่นและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

แผ่นวัสดุซึ่งมีคุณสมบัติพื้นฐานดังแสดงในตารางที่ 2 ถูกนำมาใช้สำหรับการตรวจสอบแบบจำลองฐานรากอย่างง่ายที่มีการจำลองแผ่นฐานรากดังได้เสนอแล้วข้างต้นเปรียบเทียบกับคำตอบแม่นยำตรงตามทฤษฎียึดหยุ่น โดยแผ่นฐานรากถูกยึดรั้งที่ขอบโดยรอบทั้งสี่ด้านโดยเปรียบเทียบลักษณะการยึดรั้งของจุดรองรับแบบหมุน (Pinned support) และแบบยึดแน่น (Fixed support) โดยปรับอัตราส่วนความกว้าง ( $B$ ) ต่อความยาว ( $L$ )

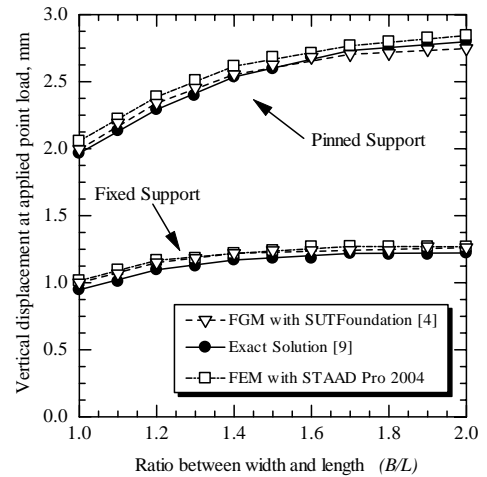
ตารางที่ 2 คุณสมบัติพื้นฐานสำหรับแผ่นวัสดุ

Parameters	Value
Elastic modulus of plate ( $E$ )	$20.68 \times 10^6$ kPa
Poisson ratio of plate ( $\nu$ )	0.15
Point load ( $P$ )	178 kN applying at ( $B/2, L/2$ )
Plate thickness ( $t$ )	15 cm
Number of nodes	81

ผลการคำนวณเปรียบเทียบดังรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าผลการคำนวณโดยแบบจำลองอย่างง่ายสามารถคำนวณการทรุดตัวของแผ่นวัสดุข้างต้นให้ค่าใกล้เคียงมากกับคำตอบแม่นยำจากทฤษฎียึดหยุ่น [8] ทั้งแบบจำลองที่มีการยึดรั้งแบบหมุนและแบบยึดแน่น แบบจำลองที่มีการยึดรั้งแบบหมุนแสดงพฤติกรรมของฐานรากค้ำและฐานรากเสาเข็มที่จุดต่อระหว่างเสาเข็มกับฐานรากเป็นแบบหมุนไม่มีการถ่ายโมเมนต์ดัดลงสู่เสาเข็ม ส่วน

แบบจำลองที่มีการยึดรั้งแบบยึดแน่นแสดงพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็มที่มีการถ่ายโมเมนต์ดัดลงสู่เสาเข็ม

นอกจากผลการคำนวณโดยแบบจำลองอย่างง่ายและคำตอบแม่นยำตรงมีค่าใกล้เคียงกันแล้วยังสามารถยืนยันความถูกต้องและแม่นยำในการคำนวณของแบบจำลองอย่างง่ายโดยผลการคำนวณจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (STAAD Pro 2004) โดยใช้ชิ้นส่วนแบบแผ่นหนา (Thick plate) ดังแสดงในรูปที่ 5 จึงสามารถสรุปได้ว่าการจำลองโครงสร้างแบบแผ่นอย่างง่ายนั้นให้คำตอบที่มีความน่าเชื่อถือเทียบเท่ากับวิธีเชิงตัวเลขอื่น

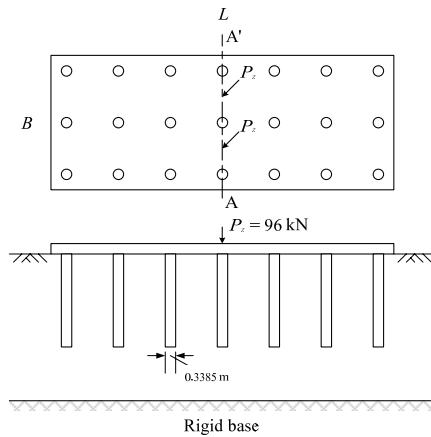


รูปที่ 5 ผลการเปรียบเทียบความแม่นยำในการคำนวณของแบบจำลองอย่างง่ายกับคำตอบแม่นยำตรงและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

### 5.2 เปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองอย่างง่ายกับวิธีเชิงตัวเลขอื่นๆ

ในหัวข้อที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองอย่างง่ายซึ่งนำไปใช้วิเคราะห์โครงสร้างแบบแผ่นแล้ว ในหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของแบบจำลองอย่างง่ายในการนำมาวิเคราะห์แผ่นฐานรากบนเสาเข็ม โดยจะทำการเปรียบเทียบกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม FLAC<sup>3D</sup> และวิธีไฟไนต์เลเยอร์โดยโปรแกรม APRAF [9] ในการวิเคราะห์แผ่นฐานรากบนเสาเข็มจำนวน 21 ต้น โดยแผ่นฐานรากรองรับน้ำหนักบรรทุกแบบจุดจำนวนสองจุดดังรูปที่ 6 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แผ่นฐานรากบนเสาเข็มเป็นไปตามตารางที่ 3 โดยแบบจำลองอย่างง่ายจำเป็นต้องทราบค่าสติเฟนสในแนวตั้งสำหรับสปริงรองรับเสาเข็มแต่ละต้นในแนวตั้ง ซึ่งในการคำนวณนี้จะใช้ค่าสติเฟนสของเสาเข็มแนวตั้งจากการวิเคราะห์เสาเข็มเดี่ยวด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม Plaxis2D วิเคราะห์ปัญหาเป็นแบบหมุนรอบแกนสมมาตร โดยใช้แบบจำลองทั้งดินและเสาเข็มเป็นแบบยึดหยุ่น

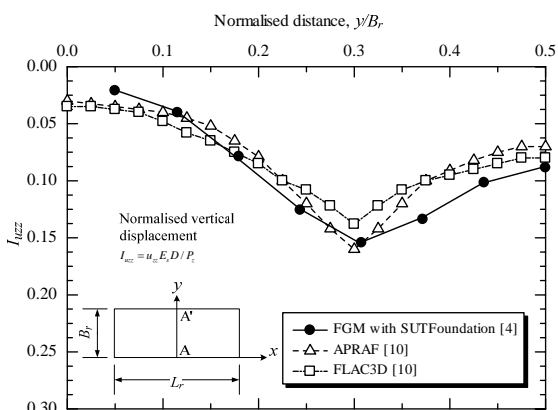
(linear elastic) ผลการวิเคราะห์ที่แผ่นฐานรากบนเสาเข็มทั้ง 3 วิธี แสดงดังรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าค่า Normalized vertical displacement มีค่าใกล้เคียงกันที่ Normalized distance ระหว่าง 0.1 – 0.3 และในช่วง Normalized distance ระหว่าง 0.3 – 0.5 แบบจำลองอย่างง่ายให้ค่าการทรุดตัวมากที่สุด ใน 3 วิธี แต่อย่างไรก็ตาม จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองอย่างง่ายให้ผลการคำนวณที่คาดเคลื่อนเล็กน้อยจากวิธีเชิงตัวเลขอื่นๆ แต่อยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ อีกทั้งมีการคำนวณที่ง่ายกว่า



รูปที่ 6 แผ่นฐานรากบนเสาเข็ม 21 ต้น รองรับน้ำหนักบรรทุกสองจุด

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แผ่นฐานรากบนเสาเข็ม

Parameters	Value
Soil : Soil modulus, $E_s$	8.4 MPa
Poisson's ratio of soil, $\nu_s$	0.3
Depth of the soil layer	65 m
Raft : Raft modulus, $E_r$	84 MPa
Poisson's ratio of raft, $\nu_r$	0.3
Raft width, $B$	3.9 m
Raft length, $L$	9.9 m
Pile : Pile length, $L_p$	15 m
Pile diameter, $D_p$	0.3385 m
Pile modulus, $E_p$	840 MPa
Poisson's ratio of pile, $\nu_p$	0.15



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบการทรุดตัวของแผ่นฐานรากบนเสาเข็ม 21 ต้น

## 5. สรุป

ผลการตรวจสอบเปรียบเทียบการวิเคราะห์โดยแบบจำลองอย่างง่ายสำหรับฐานรากข้างต้นได้แสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของแบบจำลองอย่างง่าย ถึงแม้ว่าผลค่าตอบที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย แต่ก็จัดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในทางวิศวกรรม นอกจากนี้แบบจำลองดังกล่าวยังมีข้อได้เปรียบในแง่ของความง่ายในการคำนวณและการตีความหมายผลการคำนวณ

โปรแกรม SUTFoundation ที่ได้พัฒนาขึ้นนั้นได้ทำให้การออกแบบงานวิศวกรรมฐานรากมีความสะดวกเร็วขึ้น อีกทั้งโปรแกรมนี้ยังเป็นทั้งเครื่องมือช่วยสำหรับวิศวกรโยธาและเครื่องมือช่วยการเรียนการสอนสำหรับนักศึกษาด้านวิศวกรรมปฐพีได้เป็นอย่างดี

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่ให้ความอนุเคราะห์โปรแกรม PLAXIS

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Zhuang, G.M., Lee, I.K. and Zhao, X.H., 1991. Interactive Analysis of Behavior of Raft-Pile Foundation. Proc.Geo-Cosat'91. (2):759-754
- [2] Katzenbach, R., Arslan, U., Moormann, C. and Reul, O., 1998. Piled Raft Foundation – Interaction Between Piles and Raft. *Darmstadt Geotechnics*, Darmstadt Univ. of Technology, No. 4, 279 – 296.
- [3] Bowles, J.E., 1998. *Foundation Analysis and Design*. 4<sup>th</sup> Edition. McGraw-Hill Inc. International Edition. Civil Engineering Series.
- [4] Poulos, H.G., 1994. An Approximate Numerical Analysis of Pile-Raft Interaction. *Int. J. NAM Geomechs*. 18:73 – 92.
- [5] จิระยุทธ สืบสุข, 2548. *การพัฒนาโปรแกรมออกแบบฐานราก*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [6] Reese, L., Wright, S., and Aurora, R., 1984. Analysis of a Pile Group Under Lateral Loading in Laterally Loaded Deep Foundations. Analysis and Performance, *ASTM*. Spec. Tech. Pub. 835, 56-71.
- [7] Whitaker, T., 1976. *The Design of Piled Foundation*, 2<sup>nd</sup> Edition. Pergamon Press, Oxford.
- [8] Timoshenko, S., and Woinowsky-Krieger., 1959. *Theory of Plate and Shells*, 2<sup>nd</sup> Edition. McGraw-Hill Book Co., NY.
- [9] Zhang, H. H., and Small, J. C., 2000. Analysis of capped pile groups subjected to horizontal and vertical loads. *Computer and Geotechnics*, 26(1): 1-21.

## ประวัติผู้เขียน

นายจิระยุทธ สืบสุข เกิดเมื่อวันที่ 9 ธันวาคม 2523 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี จากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรักษ์ ในปี พ.ศ. 2544 จากนั้นผู้เขียนได้มีโอกาสดำเนินงานในบริษัทออกแบบและรับเหมาก่อสร้าง หลังจากทำงานด้านออกแบบและควบคุมการก่อสร้างระยะเวลาหนึ่งแล้วผู้เขียนเกิดแรงจูงใจที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาโททางด้านวิศวกรรมโยธา จึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2546 และในขณะที่ศึกษาอยู่ได้มีโอกาสดำเนินงานเป็นผู้ช่วยสอนและผู้ช่วยวิจัยของสาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี