



การศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มในชั้นทราย
ที่รับแรงกระทำทางด้านข้าง ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

โดย

นายราชศักดิ์ สุทธินวน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

พ.ศ. 2551

การศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มในชั้นทรายที่รับแรงกระทำทางด้านข้าง
ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Behavior of Laterally Loaded Pile in Sand with Finite Element Method

โดย

นายราชศักดิ์ สุทธินวน

Mr. Ratchasak Suttinual

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

พ.ศ. 2551

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นายราชศักดิ์ สุทธินิวล

เรื่อง

การศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มในชั้นทรายที่รับแรงกระทำทางด้านข้าง
ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ได้รับการตรวจและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 13 พฤษภาคม พ.ศ. 2551

ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุรณัฏฐ์ นัทรวิระ)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิรัช นิมิตต์)

กรรมการวิทยานิพนธ์

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วินัย รักสุนทร)

กรรมการวิทยานิพนธ์

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร คงสมบูรณ์)

คณบดี

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.อุรยา วิสกุล)

บทคัดย่อ

อาคารสิ่งก่อสร้างบริเวณพื้นที่ชายฝั่งทะเลทางภาคตะวันออกและทางภาคใต้ของประเทศไทยที่เป็นท่าเทียบเรือ(Quay) โครงสร้างกันคลื่น (Harbor structure) โครงสร้างกันดินถล่ม (Retaining wall) นั้น มีลักษณะพิเศษ คือ เป็นโครงสร้างที่รับแรงกระทำทางด้านข้าง อันเนื่องมาจากการกระแทกของเรือ แรงลม แรงจากคลื่นกระแทก และแรงดันดิน ซึ่งแรงกระทำทางด้านข้างดังกล่าวจะทำให้เกิดโมเมนต์ดัดถ่ายลงสู่เสาเข็มซึ่งแตกต่างจากเสาเข็มที่รับแรงกระทำตามแนวดิ่ง ด้วยเหตุนี้ผู้ออกแบบจึงจำเป็นต้องเข้าใจพฤติกรรมและผลกระทบที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างเหล่านี้ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด ลักษณะการเคลื่อนตัวและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นของเสาเข็มดิ่ง และเสาเข็มเอียงในดินทรายชั้นเดียว และในดินทราย 2 ชั้นที่มีความหนาแน่นที่แตกต่างกันภายใต้แรงกระทำทางด้านข้าง โดยใช้โปรแกรม PLAXIS Version 8.2 โดยกำหนดให้อัตราส่วนการฝังยึดเท่ากับ 30 และมีมุมเอียงของเสาเข็มจาก -20° ถึง $+20^\circ$ กับแนวดิ่ง ในดินทรายที่มีความหนาแน่นหลวม ($D_r = 30\%$) และความหนาแน่นมาก ($D_r = 70\%$) มีอัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (e/d) เท่ากับ 0 , 4 และ 8 โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Full Scale Model) ทดสอบโดยการเพิ่มแรงกระทำทางด้านข้างบริเวณหัวเสาเข็มของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Full Scale Model) ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งมวลดินด้านหน้าเสาเข็มพิบัติ (Failure load)

จากผลของการวิจัยสรุปได้ว่า 1) ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด และค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็มขึ้นอยู่กับความสามารถแบกทานต่อแรงอัดของดิน (Bearing capacity) และการพัฒนากำลังรับแรงกระทำทางด้านข้างของมวลดิน (Failure mode) ที่อยู่ด้านหน้าเสาเข็ม โดยเสาเข็มเอียงแบบ Negative มีความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด และค่าโมเมนต์ดัดของเสาเข็มมากกว่าเสาเข็มแนวดิ่ง และเสาเข็มเอียงแบบ Positive ตามลำดับ 2) พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด และค่าโมเมนต์ดัดของเสาเข็มมากที่สุดคือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดิน (Modulus of elasticity) 3) เมื่อค่า e/d เพิ่มขึ้น ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มจะมีค่าลดลง แต่ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ e/d เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับ ทฤษฎีของBroms พบว่าความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดจาก FEM มีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎี แต่ในกรณีของโมเมนต์ดัดมีค่าแตกต่างกัน 4) ในกรณีดินสองชั้น ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้าง การเคลื่อนตัวทางข้าง และโมเมนต์ดัดของเสาเข็ม ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินบริเวณหัวเสาเข็มที่มีความหนาประมาณ 5D – 8D

Abstract

In recent year, there are many projects such as retaining wall, Harbor structure that constructed near seashore in the eastern and southern part of Thailand due to the demanding of land. The foundation of those structures has to resist lateral load, which may arise from the action of wind, sea waves, etc. Therefore it is necessary to understand the behavior of pile of these structures. The aims of this research are to study the performance of ultimate lateral resistance, displacement and bending moment of the pile in a homogenous soil and the pile in a two layer soils by using program PLAXIS Version 8.2. The effect of sand density, pile slope and ratio of pile eccentric and pile diameter are also examined. For sand density, two conditions are examined in terms of loose sand ($D_r = 30\%$) and dense sand ($D_r = 70\%$). Pile slope is varied from -20 to $+20$ degree. And the ratio of pile eccentric and pile diameter (e/d) is equal to 0, 4 and 8.

From of the results, it can be concluded that 1) The ultimate lateral resistance and maximum bending moment of pile depend on the earth pressure and failure mode. Therefore the negative batter pile has the highest ultimate lateral resistance. The positive batter pile has the lowest ultimate lateral resistance. 2) The most important parameter, which influence to the capacity of the ultimate lateral resistance and maximum bending moment of pile in sand, is modulus of elasticity. 3) The ultimate lateral resistance decreases with the increasing of e/d but the maximum bending moment increases with increasing of e/d . Compared with Broms 's Theory and FEM method, it is found that the results of ultimate lateral resistance from both are in good agreement but in the case of maximum bending moment are different. 4) In the case of two layer soils, the ultimate lateral resistance and maximum bending moment of pile depend on the properties of soil layer about $5D - 8D$ thick at the pile head.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จเรียบร้อยได้ด้วยดีผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วีรยา จิมอ้อย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นผู้ให้แนวคิดของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนให้คำชี้แนะ ติดตามผล และให้โอกาสผู้วิจัยเสมอมา จนสำเร็จตามวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ และขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.บุรฉัตร ฉัตร์วีระ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วินัย รักสุนทร และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนาตล คงสมบูรณ์ กรรมการวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยเป็นกำลังใจให้เสมอมา และขอขอบคุณ คุณจตุรงค์ เสาวภาคไพฑูลย์ นักศึกษาปริญญาเอก สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ที่ให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรม PLAXIS ตลอดจนขอขอบคุณ สำนักบริหารบำรุงทาง และกองฝึกอบรม กรมทางหลวง ที่ให้โอกาสและช่วยเหลือผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเป็นแนวทางเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการดำเนินงานทางวิศวกรรมได้ไม่มากนัก

ราชศักดิ์ สุทธินวน
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
พ.ศ. 2551

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	(1)
Abstract.....	(2)
กิตติกรรมประกาศ.....	(3)
สารบัญตาราง.....	(7)
สารบัญภาพประกอบ.....	(10)
สัญลักษณ์.....	(20)
 บทที่	 หน้า
1. บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 บทนำ.....	5
2.2 วิธี Conventional static.....	5
2.3 ทฤษฎีของ Broms.....	11
2.4 แรงดันด้านข้างของดิน.....	22
2.5 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	26
2.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29

บทที่	หน้า
3. วิธีการศึกษา	
3.1 การเตรียมข้อมูลสำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	36
3.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของดินในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	37
3.3 การพิจารณาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินที่เหมาะสม.....	44
3.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเสาเข็มในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	55
3.5 การเลือกแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เหมาะสม.....	57
4. ผลและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ	
4.1 บทนำ.....	66
4.2 ความสามารถในการรับแรงกระทำและการเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเข็ม วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยโปรแกรม PLAXIS	67
4.3 การพิบัติของมวลดิน (failure mode) ด้านหน้าเสาเข็ม.....	71
4.4 โมเมนต์ดัด.....	79
5. ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างของเสาเข็มในชั้นดินทราย 2 ชั้น ที่มีความหนาแน่นต่างกัน	
5.1 บทนำ.....	85
5.2 ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างและการเคลื่อนตัวสูงสุดของ เสาเข็มในชั้นทรายที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน โดยใช้โปรแกรม Plaxis....	87
5.3 โมเมนต์ดัด.....	107
6. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุปผลการศึกษา.....	128
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	132

	หน้า
บรรณานุกรม.....	133
ภาคผนวก.....	
ก. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	137
ข. ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	144

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	4
2.1	17
3.1	36
3.2	37
3.3	43
3.4	45
3.5	52
3.6	57
4.1	66
4.2	76
4.3	77
4.4	83
4.5	83
5.1	86
5.2	124
5.3	124

ตารางที่	หน้า
5.4 เปรียบเทียบค่าโมเมนต์สูงสุดของเสาเข็มในชั้นทราย 2 ชั้น ที่มีความหนาแน่นต่างกัน จากการวิเคราะห์ FEM กรณีเสาเข็มแนวตั้ง.....	125
5.5 เปรียบเทียบค่าโมเมนต์สูงสุดของเสาเข็มในชั้นทราย 2 ชั้น ที่มีความหนาแน่นต่างกัน จากการวิเคราะห์ FEM กรณีเสาเข็มเอียงแบบ Neg.-10° กับแนวตั้ง....	125
5.6 เปรียบเทียบค่าโมเมนต์สูงสุดของเสาเข็มในชั้นทราย 2 ชั้น ที่มีความหนาแน่นต่างกัน จากการวิเคราะห์ FEM กรณีเสาเข็มเอียงแบบ Neg.-20° กับแนวตั้ง....	126
6.1 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	129
ข.1 ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มเอียงแบบ Positive ที่ทำมุม +20° กับแนวตั้งโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (PLAXIS Version 8.2).....	145
ข.2 ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มเอียงแบบ Positive ที่ทำมุม +10° กับแนวตั้งโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (PLAXIS Version 8.2).....	146
ข.3 ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มในแนวตั้งโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (PLAXIS Version 8.2)...	147
ข.4 ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มเอียงแบบ Negative ที่ทำมุม -10° กับแนวตั้งโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (PLAXIS Version 8.2).....	148
ข.5 ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มเอียงแบบ Negative ที่ทำมุม -20° กับแนวตั้งโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (PLAXIS Version 8.2).....	149
ข.6 ผลการวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ดัดตลอดความยาวของเสาเข็มที่ฝังตัวในชั้นทรายเมื่อรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด ของเสาเข็มเอียงแบบ Positive ที่ทำมุม +20° กับแนวตั้งโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (PLAXIS Version 8.2)....	150
ข.7 ผลการวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ดัดตลอดความยาวของเสาเข็มที่ฝังตัวในชั้นทรายเมื่อรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด ของเสาเข็มเอียงแบบ Positive ที่ทำมุม +10° กับแนวตั้งโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (PLAXIS Version 8.2).....	150
ข.8 ผลการวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ดัดตลอดความยาวของเสาเข็มที่ฝังตัวในชั้นทรายของเสาเข็มแนวตั้ง โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (PLAXIS Version 8.2).....	151

ตารางที่	หน้า
ข.9 ผลการวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ดัดตลอดความยาวของเสาเข็มที่ฝังตัวในชั้นทราย เมื่อรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด ของเสาเข็มเอียงแบบ Negative ทำมุม -10° กับแนวดิ่ง โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (PLAXIS Version 8.2).....	151
ข.10 ผลการวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ดัดตลอดความยาวของเสาเข็มที่ฝังตัวในชั้นทราย เมื่อรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด ของเสาเข็มเอียงแบบ Negative ทำมุม -20° กับแนวดิ่ง โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (PLAXIS Version 8.2).....	152

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 แสดงลักษณะของเสาเข็มเอียง.....	2
2.1 เสาเข็มหัวเข็มอิสระที่รับแรงกระทำทางด้านข้าง(Ultimate lateral resistance)...	6
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $H_u/P_u dL$ และค่า e/L ในกรณีที่ว่า $P_o = 0$	8
2.3 การกระจายแรงต้านทานของดินทางด้านข้าง (cohesion soil).....	10
2.4 ผลของ Aspect ratio และ adhesion ratio ต่อค่าความต้านทานของดิน ในดินที่มีความเชื่อมแน่น (Purely cohesion soil).....	10
2.5 สัมประสิทธิ์ของแรงดันดินทางด้านข้าง K_o และ K_q	11
2.6 ลักษณะการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม โมเมนต์ และแรงเฉือน.....	11
2.7 เสาเข็มหัวเสาเข็มอิสระในดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น.....	12
2.8 Lateral resistance factor ที่ผิวดิน (0) และที่ความลึกอนันต์(∞).....	13
2.9 ความต้านทานแรงกระทำด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มสั้นในดินทราย.....	13
2.10 ความต้านทานแรงกระทำด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มยาวในดินทราย.....	15
2.11 ค่าการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็มตามทฤษฎีของ Broms ในชั้นดินทราย	16
2.12 การกระจายแรงดันดินที่มีแรงดึงในแนวเอียงกระทำเสาเข็ม.....	20
2.13 การสมมติการกระจายแรงดันดิน.....	20
2.14 เสาเข็มเอียง (Batter pile).....	21
2.15 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการรับกำลังกับมุมเอียงในดินเหนียว..	22
2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของกำแพงกับแรงดันดิน.....	24
2.17 ทฤษฎีของคูลอมบ์สำหรับแรงดันแอคทีฟ.....	25
2.18 ทฤษฎีของคูลอมบ์สำหรับแรงดันพาสซีฟ.....	25
2.19 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของสมการพื้นฐานในการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์...	28
2.20 แสดงลักษณะการเคลื่อนตัวที่ผิวดินของเสาเข็มเอียง.....	29
2.21 รูปแบบของเสาเข็มเอียง.....	31
2.22 แสดงลักษณะการโก่งตัว (Deflection) ของเสาเข็มสั้น(short pile) และเสาเข็มยาว(long pile).....	31
3.1 แสดงหน่วยแรงของดิน ณ สภาวะอยู่กับที่.....	40
3.2 ค่ากำลังแรงเฉือนของทราย.....	42
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง – ความเครียด (Stress – Strain).....	44

ภาพที่	หน้า
3.4 แสดงการกำหนดค่าพารามิเตอร์กรณีค่า E_s , ค่า ϕ' คงที่ แต่ e เปลี่ยนแปลง.....	46
3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนตัว กรณี $E = 5,000 \text{ kPa}$ $\phi' = 35^\circ$ e มีค่าเปลี่ยนแปลง.....	46
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนตัว กรณี $E = 12,500 \text{ kPa}$ $\phi' = 40^\circ$ e มีค่าเปลี่ยนแปลง.....	47
3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนตัว กรณี $E = 25,000 \text{ kPa}$ $\phi' = 45^\circ$ e มีค่าเปลี่ยนแปลง.....	47
3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนตัว กรณี $E = 5,000 \text{ kPa}$ $e = 0.75$ ϕ' มีค่าเปลี่ยนแปลง.....	48
3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนตัว กรณี $E = 12,500 \text{ kPa}$ $e = 1.00$ ϕ' มีค่าเปลี่ยนแปลง.....	48
3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนตัว กรณี $E = 25,000 \text{ kPa}$ $e = 1.25$ ϕ' มีค่าเปลี่ยนแปลง.....	49
3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนตัว กรณี $e = 0.75$ $\phi' = 35^\circ$ E เปลี่ยนแปลง	49
3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนตัว กรณี $e = 1.00$ $\phi' = 40^\circ$ E เปลี่ยนแปลง	50
3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนตัว กรณี $e = 1.25$ $\phi' = 45^\circ$ E เปลี่ยนแปลง	50
3.14 แสดงค่าโมดูลัสของทราเยจากการทดสอบ Direct shear Test	51
3.15 ความสัมพันธ์ของแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มในทรายหลวม เปรียบเทียบระหว่าง ค่า E มีค่าคงที่ กับ ค่า E มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความลึก...	53
3.16 ความสัมพันธ์ของแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มในทรายแน่น เปรียบเทียบระหว่าง ค่า E มีค่าคงที่ กับ ค่า E มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความลึก...	54
3.17 ผลการทดสอบเสาเข็มอะลูมิเนียมด้วยแรงดึง.....	55
3.18 แสดงการแบ่งเอลิเมนต์เป็นรูปสามเหลี่ยม.....	58
3.19 Boundary condition ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	59
3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Shear stress กับค่าร้อยละของ Strain ของดินทราย หลวม.....	60
3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Shear stress กับค่าร้อยละของ Strain ของดินทราย แน่น.....	60
3.22 พื้นผิววิบัติในกรณีกฎการวิบัติแบบมอร์ – คูลอมบี้ ($C = 0$).....	61

ภาพที่	หน้า
3.23 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มแนวดิ่งรับแรงด้านข้างในทรายหลวม e/d = 0 ระหว่าง FEM และ ผลการทดสอบ.....	63
3.24 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มแนวดิ่งรับแรงด้านข้างในทรายแน่น e/d = 0 ระหว่าง FEM และ ผลการทดสอบ.....	63
3.25 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของดินทรายหลวมและทรายแน่น.....	65
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็ม ที่ค่า e/d = 0 ในชั้นทรายที่มีความหนาแน่นหลวม (Loose)	68
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็ม ที่ค่า e/d = 4 ในชั้นทรายที่มีความหนาแน่นหลวม (Loose)	69
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็ม ที่ค่า e/d = 8 ในชั้นทรายที่มีความหนาแน่นหลวม (Loose)	69
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็ม ที่ค่า e/d = 0 ในชั้นทรายที่มีความหนาแน่นมาก (Dense)	70
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็ม ที่ค่า e/d = 4 ในชั้นทรายที่มีความหนาแน่นมาก (Dense)	70
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็ม ที่ค่า e/d = 8 ในชั้นทรายที่มีความหนาแน่นมาก (Dense)... ..	71
4.7 แสดงพื้นที่การบีบตัวของมวลดินหน้าเสาเข็ม กรณีเสาเข็ม Neg.-20 กับแนวดิ่ง ที่ค่า e/d = 0 ในชั้นทรายหลวม.....	72
4.8 แสดงพื้นที่การบีบตัวของมวลดินหน้าเสาเข็ม กรณีเสาเข็ม Neg.-10 กับแนวดิ่ง ที่ค่า e/d = 0 ในชั้นทรายหลวม.....	72
4.9 แสดงพื้นที่การบีบตัวของมวลดินหน้าเสาเข็ม กรณีเสาเข็มแนวดิ่ง ที่ค่า e/d = 0 ในชั้นทรายหลวม.....	73
4.10 แสดงพื้นที่การบีบตัวของมวลดินหน้าเสาเข็ม กรณีเสาเข็ม Pos.+10 กับแนวดิ่ง ที่ค่า e/d = 0 ในชั้นทรายหลวม.....	73
4.11 แสดงพื้นที่การบีบตัวของมวลดินหน้าเสาเข็ม กรณีเสาเข็ม Pos.+20 กับแนวดิ่ง ที่ค่า e/d = 0 ในชั้นทรายหลวม.....	74
4.12a Passive Rankine Pressure.....	75

ภาพที่	หน้า
4.12b มวลดินด้านหน้าเสาเข็มเอียงแบบ Negative และ Positive.....	75
4.13 แสดงความต้านทานต่อแรงกดอัดของดิน.....	75
4.14 ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็ม เมื่อค่า e/d เพิ่มขึ้น.....	78
4.15 ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดของเข็มเอียงต่อเข็มแนวดิ่ง.....	79
4.16 พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเมื่อรับแรงด้านข้าง แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	79
4.17 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่ระยะตามความยาวของเสาเข็มกรณีเสาเข็ม Positive ทำมุม $+20^\circ$ กับแนวดิ่ง.	80
4.18 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่ระยะตามความยาวของเสาเข็มกรณีเสาเข็ม Positive ทำมุม $+10^\circ$ กับแนวดิ่ง.	80
4.19 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่ระยะตามความยาวของเสาเข็มกรณีเสาเข็มแนวดิ่ง.....	81
4.20 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่ระยะตามความยาวของเสาเข็มกรณีเสาเข็ม Positive ทำมุม -10° กับแนวดิ่ง..	81
4.21 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่ระยะตามความยาวของเสาเข็มกรณีเสาเข็ม Positive ทำมุม -20° กับแนวดิ่ง..	82
5.1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาเข็มในชั้นดินทราย 2 ชั้น.....	85
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนตัว เสาเข็มเอียง Pos.+20 กับแนวดิ่ง ที่ค่า $e/d = 0$ และมีอัตราส่วน $\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$ ต่างกัน.....	88
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนตัว เสาเข็มเอียง Pos.+10 กับแนวดิ่ง ที่ค่า $e/d = 0$ และมีอัตราส่วน $\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$ ต่างกัน.....	88
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนตัว เสาเข็มแนวดิ่ง ที่ค่า $e/d = 0$ และมีอัตราส่วน $\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$ ต่างกัน.....	89
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนตัว เสาเข็มเอียง Neg.-10 กับแนวดิ่ง ที่ค่า $e/d = 0$ และมีอัตราส่วน $\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$ ต่างกัน.....	89
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนตัว เสาเข็มเอียง Neg.-20 กับแนวดิ่ง ที่ค่า $e/d = 0$ และมีอัตราส่วน $\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$ ต่างกัน.....	90

ภาพที่	หน้า
5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนตัว เส้าเข็มเอียง Neg.-20 กับแนวดิ่ง ที่ค่า $e/d = 8$ และมีอัตราส่วน $\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$ ต่างกัน	102
5.32 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะฝังตัวและขนาดของเส้าเข็ม (L/d) ต่อความสามารถในการรับแรงสูงสุดที่กระทำทางด้านข้าง ของเส้าเข็มเอียง Pos.+20 กับแนวดิ่ง.....	104
5.33 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะฝังตัวและขนาดของเส้าเข็ม (L/d) ต่อความสามารถในการรับแรงสูงสุดที่กระทำทางด้านข้าง ของเส้าเข็มเอียง Pos.+10 กับแนวดิ่ง.....	104
5.34 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะฝังตัวและขนาดของเส้าเข็ม (L/d) ต่อความสามารถในการรับแรงสูงสุดที่กระทำทางด้านข้าง ของเส้าเข็มแนวดิ่ง.....	105
5.35 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะฝังตัวและขนาดของเส้าเข็ม (L/d) ต่อความสามารถในการรับแรงสูงสุดที่กระทำทางด้านข้าง ของเส้าเข็มเอียง Neg.-10 กับแนวดิ่ง.....	105
5.36 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะฝังตัวและขนาดของเส้าเข็ม (L/d) ต่อความสามารถในการรับแรงสูงสุดที่กระทำทางด้านข้าง ของเส้าเข็มเอียง Neg.-20 กับแนวดิ่ง.....	106
5.37 ค่าโมเมนต์ดัดตลอดความยาวเส้าเข็ม ที่ค่า $e/d = 0$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เส้าเข็ม Positive ทำมุม $+20^\circ$ กับแนวดิ่ง.....	107
5.38 ค่าโมเมนต์ดัดตลอดความยาวเส้าเข็ม ที่ค่า $e/d = 4$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เส้าเข็ม Positive ทำมุม $+20^\circ$ กับแนวดิ่ง.....	108
5.39 ค่าโมเมนต์ดัดตลอดความยาวเส้าเข็ม ที่ค่า $e/d = 8$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เส้าเข็ม Positive ทำมุม $+20^\circ$ กับแนวดิ่ง.....	108
5.40 ค่าโมเมนต์ดัดตลอดความยาวเส้าเข็ม ที่ค่า $e/d = 0$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เส้าเข็ม Positive ทำมุม $+10^\circ$ กับแนวดิ่ง.....	109
5.41 ค่าโมเมนต์ดัดตลอดความยาวเส้าเข็ม ที่ค่า $e/d = 4$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เส้าเข็ม Positive ทำมุม $+10^\circ$ กับแนวดิ่ง.....	109
5.42 ค่าโมเมนต์ดัดตลอดความยาวเส้าเข็ม ที่ค่า $e/d = 8$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เส้าเข็ม Positive ทำมุม $+10^\circ$ กับแนวดิ่ง.....	110
5.43 ค่าโมเมนต์ดัดตลอดความยาวเส้าเข็ม ที่ค่า $e/d = 0$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เส้าเข็มแนวดิ่ง.....	110

ภาพที่	หน้า
5.44 ค่าโมเมนต์ตัดตลอดความยาวเสาเข็ม ที่ค่า $e/d = 4$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เสาเข็มแนวตั้ง.....	111
5.45 ค่าโมเมนต์ตัดตลอดความยาวเสาเข็ม ที่ค่า $e/d = 8$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เสาเข็มแนวตั้ง.....	111
5.46 ค่าโมเมนต์ตัดตลอดความยาวเสาเข็ม ที่ค่า $e/d = 0$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เสาเข็ม Negative ทำมุม -10° กับแนวตั้ง.....	112
5.47 ค่าโมเมนต์ตัดตลอดความยาวเสาเข็ม ที่ค่า $e/d = 4$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เสาเข็ม Negative ทำมุม -10° กับแนวตั้ง.....	112
5.48 ค่าโมเมนต์ตัดตลอดความยาวเสาเข็ม ที่ค่า $e/d = 8$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เสาเข็ม Negative ทำมุม -10° กับแนวตั้ง.....	113
5.49 ค่าโมเมนต์ตัดตลอดความยาวเสาเข็ม ที่ค่า $e/d = 0$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เสาเข็ม Negative ทำมุม -20° กับแนวตั้ง.....	113
5.50 ค่าโมเมนต์ตัดตลอดความยาวเสาเข็ม ที่ค่า $e/d = 4$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เสาเข็ม Negative ทำมุม -20° กับแนวตั้ง.....	114
5.51 ค่าโมเมนต์ตัดตลอดความยาวเสาเข็ม ที่ค่า $e/d = 8$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เสาเข็ม Negative ทำมุม -20° กับแนวตั้ง.....	114
5.52 ค่าโมเมนต์ตัดตลอดความยาวเสาเข็ม ที่ค่า $e/d = 0$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็ม Positive ทำมุม $+20^\circ$ กับแนวตั้ง.....	115
5.53 ค่าโมเมนต์ตัดตลอดความยาวเสาเข็ม ที่ค่า $e/d = 4$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็ม Positive ทำมุม $+20^\circ$ กับแนวตั้ง.....	115
5.54 ค่าโมเมนต์ตัดตลอดความยาวเสาเข็ม ที่ค่า $e/d = 8$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็ม Positive ทำมุม $+20^\circ$ กับแนวตั้ง.....	116
5.55 ค่าโมเมนต์ตัดตลอดความยาวเสาเข็ม ที่ค่า $e/d = 0$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็ม Positive ทำมุม $+10^\circ$ กับแนวตั้ง.....	116

ภาพที่	หน้า
5.56 ค่าโมเมนต์ตัดตลอดความยาวเสาเข็ม ที่ค่า $e/d = 4$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็ม Positive ทำมุม $+10^\circ$ กับแนวดิ่ง.....	117
5.57 ค่าโมเมนต์ตัดตลอดความยาวเสาเข็ม ที่ค่า $e/d = 8$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็ม Positive ทำมุม $+10^\circ$ กับแนวดิ่ง.....	117
5.58 ค่าโมเมนต์ตัดตลอดความยาวเสาเข็ม ที่ค่า $e/d = 0$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็มแนวดิ่ง.....	118
5.59 ค่าโมเมนต์ตัดตลอดความยาวเสาเข็ม ที่ค่า $e/d = 4$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็มแนวดิ่ง.....	118
5.60 ค่าโมเมนต์ตัดตลอดความยาวเสาเข็ม ที่ค่า $e/d = 8$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็มแนวดิ่ง.....	119
5.61 ค่าโมเมนต์ตัดตลอดความยาวเสาเข็ม ที่ค่า $e/d = 0$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็ม Negative ทำมุม -10° กับแนวดิ่ง.....	119
5.62 ค่าโมเมนต์ตัดตลอดความยาวเสาเข็ม ที่ค่า $e/d = 4$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็ม Negative ทำมุม -10° กับแนวดิ่ง.....	120
5.63 ค่าโมเมนต์ตัดตลอดความยาวเสาเข็ม ที่ค่า $e/d = 8$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็ม Negative ทำมุม -10° กับแนวดิ่ง.....	120
5.64 ค่าโมเมนต์ตัดตลอดความยาวเสาเข็ม ที่ค่า $e/d = 0$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็ม Negative ทำมุม -20° กับแนวดิ่ง.....	121
5.65 ค่าโมเมนต์ตัดตลอดความยาวเสาเข็ม ที่ค่า $e/d = 4$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็ม Negative ทำมุม -20° กับแนวดิ่ง.....	121
5.66 ค่าโมเมนต์ตัดตลอดความยาวเสาเข็ม ที่ค่า $e/d = 8$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็ม Negative ทำมุม -20° กับแนวดิ่ง.....	122
ก.1 การกำหนดค่าเริ่มต้น.....	138
ก.2 การกำหนดคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	139
ก.3 การกำหนดคุณสมบัติทางวิศวกรรมของเสาเข็มในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	140

ภาพที่	หน้า
ก.4 กำหนดโครงข่ายในแบบจำลอง (Mesh generation).....	141
ก.5 แสดงการ RUN โปรแกรม PLAXIS.....	142
ก.6 แสดงการเคลื่อนตัวและค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด กรณีทรายแน่น $e/d = 0$	143

สัญลักษณ์

D_{in}	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเสาเข็ม
D_{out}	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเสาเข็ม
t	ความหนาของเสาเข็ม
L	ความยาวของเสาเข็ม
L_{top}	ระยะการฝังตัวของเสาเข็มในทรายชั้นบน
L_{bottom}	ระยะการฝังตัวของเสาเข็มในทรายชั้นล่าง
L/d	อัตราส่วนการฝังยึด (ความยาวของเสาเข็มที่ฝังในชั้นดินทรายต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม)
e/d	อัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางของเสาเข็ม
e	ระยะเยื้องศูนย์กลางของแรงที่กระทำ
%Dr	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดินทราย
I	โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดเสาเข็ม
A	พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม
M	ค่าโมเมนต์ดัดของเสาเข็ม
M_u	ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็ม
P_L	แรงดัดดินที่ปลายของเสาเข็ม
P_0	แรงดัดดินที่บริเวณผิวดิน
P_u	แรงดันดินสูงสุด
H_u	แรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด
Q_u	ความสามารถในการรับแรงกระทำในแนวเอียงสูงสุดของเสาเข็ม
Z	ระดับความลึกจากผิวดิน
Z_r	ระดับความลึกที่บริเวณจุดหมุน
f	ระยะที่เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด
η	Stiffness factor
β	ค่ามุมเอียงของเสาเข็ม
δ	ค่ามุมเอียงของแรงในแนวเอียงที่เอียงออกจากแนวตั้ง
E_s	ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน
E_{pile}	ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเสาเข็มอะลูมิเนียม

I_{pile}	โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดของเสาเข็ม
A	พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม
EA	ค่า normal stiffness
EI	ค่า Flexuar rigidity
$\sigma_{50\%}$	ค่าความเค้นที่ห้าสิบเปอร์เซ็นต์
ε	ค่าความเครียดของดิน
σ_h'	หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ
σ_v'	หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวนอน
K_0	สัมประสิทธิ์ของแรงดันดินทางด้านข้าง ณ สภาวะอยู่กับที่
K_q	สัมประสิทธิ์ของแรงดันดินทางด้านข้าง
K_p	สัมประสิทธิ์ของแรงดันดินทางด้านข้าง
ε_v	ความเครียดตั้งฉากตามแนวดิ่ง
ε_h	ความเครียดตั้งฉากตามแนวราบ
ϕ'	มุมเสียดทานภายในของทราย
ν	อัตราส่วนปัวซอง
δ_{al}	มุมเสียดทานภายในของทรายละเอียด
c_{soil}	ค่าความเชื่อมแน่นของดิน
R_{inter}	มุมเสียดทานภายในบริเวณผิวรอยต่อ
ψ	มุม Dilatancy
e	อัตราส่วนช่องว่าง
FEM	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์
MC	แบบจำลองพฤติกรรมดินแบบ Morh – Coulomb
ρ_d	ความหนาแน่นแห้งของทราย
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
γ_d	หน่วยน้ำหนักแห้งของทราย
γ_{wet}	หน่วยน้ำหนักเปียกของทราย
W_s	น้ำหนักของเม็ดดิน
V	ปริมาตรทั้งหมด

บทที่ 1

บทนำ

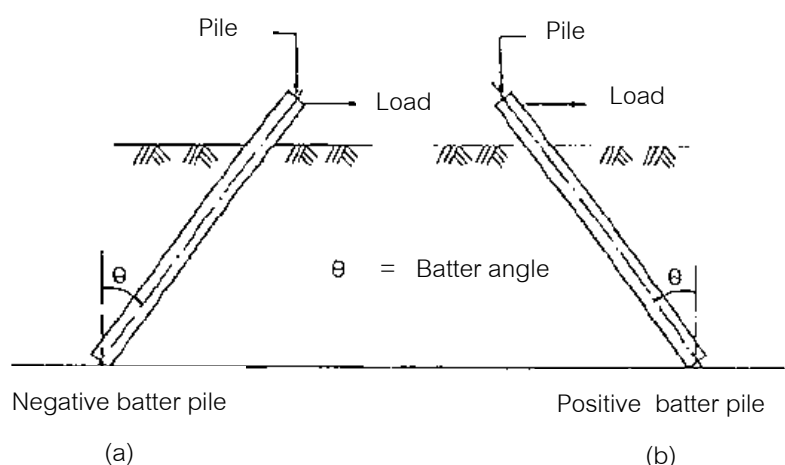
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

อาคารสิ่งก่อสร้างและธุรกิจที่เกี่ยวข้องกับอสังหาริมทรัพย์ในปัจจุบันยังคงมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ส่วนหนึ่งก็เพื่อเพื่อตอบสนองความต้องการพื้นฐานด้านสาธารณูปโภค อีกส่วนหนึ่งก็เพื่อหวังช่วงชิงความได้เปรียบทางธุรกิจ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้พื้นที่ที่มีภูมิประเทศที่เหมาะสมและมีความสามารถที่จะต่อยอดทางธุรกิจได้ อย่างเช่นบริเวณพื้นที่ชายฝั่งทะเลทางภาคตะวันออกและทางภาคใต้ของประเทศไทยต่างเต็มไปด้วยโรงแรม รีสอร์ท ท่าเทียบเรือ(Quay) โครงสร้างกันคลื่น (Harbor structure) โครงสร้างกันดินถล่ม (Retaining wall) ซึ่งโครงสร้างต่างๆ เหล่านี้เป็นโครงสร้างที่มีลักษณะพิเศษ คือ เป็นโครงสร้างที่มีแรงกระทำทางด้านข้าง อันเนื่องมาจากการกระแทกของเรือ แรงลม แรงจากคลื่นกระทบ และแรงดันดิน เป็นแรงหลักที่กระทำต่อโครงสร้าง ด้วยเหตุนี้วิศวกรผู้ออกแบบหรือผู้ที่เกี่ยวข้องจึงมีความจำเป็นต้องเข้าใจพฤติกรรมของโครงสร้างที่รับแรงกระทำทางด้านข้างโดยเฉพาะเสาเข็ม เนื่องจากเป็นส่วนที่แบกรับน้ำหนักทั้งหมด ทั้งนี้เพื่อสร้างความเชื่อมั่นว่าอาคารและสิ่งปลูกสร้างต่างๆ มีความมั่นคงแข็งแรงเพียงพอ

การพิจารณาแรงกระทำทางด้านข้างที่กระทำต่อเสาเข็มมีหลายวิธี แต่ที่นิยมใช้กันในปัจจุบันก็คือ วิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical method) ซึ่งเป็นวิธีคำนวณตามทฤษฎีที่ได้ผลดี แต่ค่อนข้างยุ่งยากในการวิเคราะห์ปัญหา โดยเฉพาะกรณีดินหลายชั้นที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีวิธีการทดสอบแบบจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มที่รับแรงกระทำทางด้านข้าง ซึ่งวิธีนี้ได้ผลดี แต่มีข้อจำกัดเรื่องงบประมาณ และเสียเวลาในการทดสอบแบบจำลอง ด้วยข้อจำกัดและความซับซ้อนในการวิเคราะห์ปัญหาดังกล่าวข้างต้น และเนื่องจากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีในคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน จึงนำไปสู่การพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมด้วยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เนื่องจาก ได้ผลคำตอบที่ถูกต้องแม่นยำ ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย ทั้งยังสามารถ

เปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์และเงื่อนไข ตลอดจนคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆของดินได้สะดวกและรวดเร็ว

การวิจัยนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มในชั้นทรายที่รับแรงกระทำทางด้านข้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม PLAXIS Version 8.2 ทำการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มค้ำและเสาเข็มเอียงภายใต้แรงกระทำทางด้านข้าง ซึ่งจากนิยามของ Murthy (1964) ได้กล่าวว่าเสาเข็มเอียงที่เอียงเข้าหาแรงเรียกว่า “in batter” หรือ “negative batter pile” และเสาเข็มที่เอียงออกจากแรงกระทำเรียกว่า “out batter” หรือ “positive batter pile” ดังแสดงไว้ในรูปภาพที่ 1.1 และการวิจัยนี้จะแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน กล่าวคือ 1) จะทำการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มในชั้นดินทรายที่รับแรงกระทำทางด้านข้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม PLAXIS Version 8.2 เปรียบเทียบกับผลการทดสอบแบบจำลองของเสาเข็มในชั้นดินทรายที่รับแรงกระทำทางด้านข้างของ พัฒนศักดิ์ อบเชย (2003) เพื่อพิจารณาความเหมาะสมของค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่นำไปใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 2) ทำการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มที่รับแรงกระทำทางด้านข้างในชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นที่แตกต่างกันโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม PLAXIS Version 8.2



ภาพที่ 1.1 ลักษณะของเสาเข็มเอียง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มในชั้นดินทรายที่รับแรงกระทำทางด้านข้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม PLAXIS Version 8.2 เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมในหัวข้อดังต่อไปนี้

1. เพื่อศึกษาความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด (Ultimate lateral load) การเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Displacement) และโมเมนต์ดัด (Bending moment) ของเสาเข็มในชั้นดินทรายที่รับแรงกระทำทางด้านข้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม PLAXIS Version 8.2 เปรียบเทียบกับผลการทดสอบแบบจำลองของเสาเข็มในชั้นดินทรายที่รับแรงกระทำทางด้านข้างของ พัฒนศักดิ์ อบเชย (2003)
2. ศึกษาความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด (Ultimate lateral load) การเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Displacement) และโมเมนต์ดัด (Bending moment) ของเสาเข็มในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อค่าพารามิเตอร์ของดินมีการเปลี่ยนแปลง
3. เพื่อศึกษาผลกระทบของชั้นดินทราย 2 ชั้น ที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันต่อพฤติกรรม การรับแรงกระทำทางด้านข้างของเสาเข็ม
4. เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (e/d) ที่แตกต่างกันต่อพฤติกรรมการรับแรงกระทำทางด้านข้างของเสาเข็ม

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยโปรแกรม PLAXIS Version 8.2 ศึกษาเปรียบเทียบกับพฤติกรรมของแบบจำลองของเสาเข็มในชั้นดินทรายที่รับแรงกระทำทางด้านข้าง ของ พัฒนศักดิ์ อบเชย (2003)
2. การศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มที่รับแรงกระทำทางด้านข้างที่ฝังตัวในชั้นดินทราย 2 ชั้นที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน ทั้งกรณีเสาเข็มเอียงแบบ Negative (ที่ทำมุม -10° , -20° กับแนวดิ่ง) เสาเข็มในแนวดิ่ง (Vertical) และเสาเข็มเอียงแบบ Positive (ที่ทำมุม $+10^\circ$, $+20^\circ$ กับแนวดิ่ง)
3. ในกรณีเสาเข็มที่รับแรงกระทำทางด้านข้างที่ฝังตัวในชั้นดินทราย 2 ชั้นที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน จะพิจารณาการศึกษาเป็น 2 กรณี คือ 1) กรณีที่ดินชั้นบนเป็นดินทรายที่มีความหนาแน่นหลวม ($\text{Loose}, L_{\text{top}}$) ดินทรายชั้นล่างเป็นดินทรายที่มีความหนาแน่นมาก ($\text{Dense}, L_{\text{bottom}}$) และ 2) กรณีที่ดินชั้นบนเป็นดินทรายที่มีความหนาแน่นมาก ($\text{Dense}, L_{\text{top}}$) ดินชั้นล่างเป็นดินทรายที่มีความหนาแน่นหลวม ($\text{Loose}, L_{\text{bottom}}$) กำหนดให้ทรายมีความหนาแน่นหลวม (Loose) มีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์($\% D_r$) เท่ากับร้อยละ 30 และทรายที่มีความหนาแน่นมาก (Dense) มีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์($\% D_r$) เท่ากับร้อยละ 70 และมีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวของเสาเข็มในดินทรายชั้นบนต่อทรายชั้นที่ล่าง ($\frac{L_{\text{top}}}{L_{\text{bottom}}}$) เท่ากับ

0.125 , 0.25 , 0.50 , 1 , 2 และ 3 ตามลำดับ และใช้อัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (e/d) เท่ากับ 0 , 4 และ 8 ตามลำดับ

5. คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา เช่น โมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน (Modulus of Elasticity , E_s) , ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative Density, % D_r) , ค่ามุมเสียดทานภายใน (Friction of angle, ϕ') เป็นข้อมูลจากผลการศึกษาแบบจำลองของเสาเข็มในชั้นดินทรายที่รับแรงกระทำทางด้านข้าง ของ พัฒนศักดิ์ ออบเชย (2003) ซึ่งได้สรุปขอบเขตการศึกษาแสดงไว้ในตารางที่ 1.1 ดังนี้

ตารางที่ 1.1

สรุปขอบเขตของการศึกษา

ส่วนที่ 1 การพิจารณาความเหมาะสมของค่าพารามิเตอร์ และเงื่อนไขของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	ส่วนที่ 2 การใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มที่รับแรงกระทำทางด้านข้างที่ฝังตัวในชั้นดินทราย 2 ชั้น
<u>เงื่อนไข</u> 1. เสาเข็มเอียงแบบ Negative เสาเข็มตั้ง และเสาเข็มเอียงแบบ Positive 2. มุมเอียงของเสาเข็ม $[-20^{\circ}, -10^{\circ}, 0^{\circ}, +10^{\circ}, +20^{\circ}$ กับแนวตั้ง] 3. อัตราส่วน (L/d) เท่ากับ 30 4. อัตราส่วน (e/d) เท่ากับ 0 , 4 และ 8 5. ความหนาแน่นสัมพัทธ์(% D_r) เท่ากับ ร้อยละ 30 และ 70 ตามลำดับ 6. เสาเข็มมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน เท่ากับ 0.75 ม. หนา 0.03 ม. ยาว 24.3 ม. 7. คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้จากผลการศึกษาแบบจำลองเสาเข็ม ของ พัฒนศักดิ์ ออบเชย (2003)	<u>เงื่อนไข</u> 1. เสาเข็มเอียงแบบ Negative เสาเข็มตั้ง และเสาเข็มเอียงแบบ Positive 2. มุมเอียงของเสาเข็ม $[-20^{\circ}, -10^{\circ}, 0^{\circ}, +10^{\circ}, +20^{\circ}$ กับแนวตั้ง] 3. อัตราส่วน (L/d) เท่ากับ 30 4. อัตราส่วน (e/d) เท่ากับ 0 , 4 และ 8 5. อัตราส่วนระยะการฝังตัวของเสาเข็มในทรายชั้นบนต่อทรายชั้นล่าง ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) เท่ากับ 0.125 , 0.25 , 0.50 , 1 , 2 และ 3 6. ความหนาแน่นสัมพัทธ์(% D_r) ทรายหลวมเท่ากับร้อยละ 30 ทรายแน่นเท่ากับร้อยละ 70 7. คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้จากผลการศึกษาแบบจำลองเสาเข็มของ พัฒนศักดิ์ ออบเชย (2003)

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

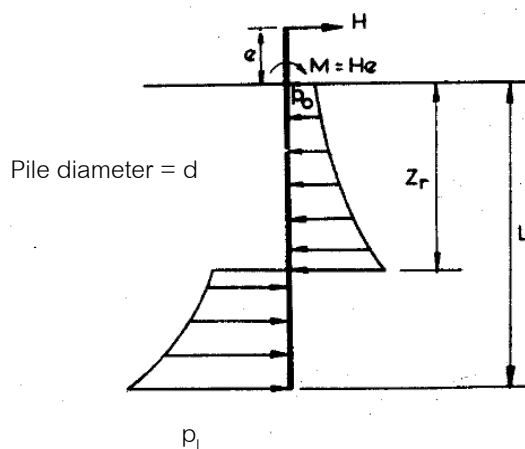
ในโครงสร้างพิเศษบางประเภทเช่น ท่าเทียบเรือ (Quay) โครงสร้างกันคลื่น (Harbor Structure) โครงสร้างกันดิน (Retaining structure) โครงสร้างชายฝั่ง (Offshore structure) และฐานรากของหอคอยสูง ต้องรับแรงในแนวราบที่เกิดจากการกระแทกของเรือ แรงกระทำจากคลื่น และแรงดันดิน และแรงลม เป็นต้น ซึ่งแรงในแนวราบดังกล่าวจะทำให้เกิดโมเมนต์ดัดถ่างลงสู่เสาเข็ม ดังนั้นเสาเข็มที่ต้องรับโครงสร้างดังกล่าวข้างต้นต้องสามารถรับแรงในแนวราบที่เกิดขึ้นได้อย่างปลอดภัย จึงเป็นเหตุจำเป็นให้ต้องหาค่าความสามารถในการต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็ม ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ปัญหาที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีทั้งวิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical method) ซึ่งให้ผลคำตอบอย่างถูกต้องแม่นยำตามทฤษฎี แต่มีความยุ่งยากเกินกว่าจะใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพในทางปฏิบัติ หรืออาจจะใช้วิธีการทดสอบแบบจำลอง (Model test) และเนื่องจากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีในคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน ส่งผลให้วิธีเชิงตัวเลขได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็เป็นรูปแบบหนึ่งของวิธีเชิงตัวเลขที่มีการประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรมอย่างกว้างขวาง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็ม ที่ได้จากการคำนวณจากทฤษฎีของ Broms , การทดสอบแบบจำลองของพัฒนศักดิ์ อบเชย (2003) และการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

2.2 วิธี Conventional static

เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการประมาณค่าความสามารถในการต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด (ultimate lateral resistance) ของเสาเข็ม โดยประมาณได้จากการพิจารณาเป็นแบบสถิตยศาสตร์ (Static) ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.1 และในวิธี Conventional static ได้แบ่งการคำนวณ ออกเป็นชนิดของเสาเข็ม 2 ชนิด คือ

2.2.1 Rigid pile

จากภาพที่ 2.1 เมื่อหัวเข็มของเสาเข็มเกิดการเคลื่อนตัวได้อย่างอิสระ แรงที่กระทำต่อเสาเข็มมีแรงกระทำในแนวราบ (H) โมเมนต์ (M) และแรงดันดินสูงสุดที่ความลึกใดๆ (Z) เท่ากับค่า P_u โดยที่ค่าสูงสุดของค่า H คือ ค่า H_u และ M_u จะทำให้เกิดการพิบัติ



ภาพที่ 2.1 เสาเข็มหัวเข็มอิสระที่รับแรงกระทำทางด้านข้าง(Ultimate lateral resistance)

และจากผลดังกล่าวทำให้เกิดค่าแรงต้านทานสูงสุดของดิน (Ultimate soil resistance) ตามความยาวของเสาเข็ม โดยหาค่าได้จากการพิจารณาสมมูลย์ของแรงในแนวราบและสมมูลย์ของโมเมนต์ ขณะเดียวกันสามารถแก้สมการหาค่า Z_r และค่าแรงในแนวราบสูงสุด (H_u) ได้โดยที่ค่า M_u ได้จาก $H_u \times e$ เมื่อค่า e เท่ากับระยะเยื้องศูนย์กลางของแรงที่กระทำ ซึ่งในการพิจารณาจะพิจารณาเสาเข็มเป็นแถบบางๆ มีความกว้างเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (d) โดยสามารถอธิบายได้จากสมการต่อไปนี้

$$H_u = \int_0^{Z_r} P_u ddz - \int_{Z_r}^L P_u ddz \quad (2.1)$$

$$M_u = H_u \times e = - \int_0^{Z_r} P_u ddz + \int_{Z_r}^L P_u ddz \quad (2.2)$$

- เมื่อ H_u = แรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด
 M_u = โมเมนต์สูงสุดเนื่องจากแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด
 P_u = แรงดันดินสูงสุด (Ultimate soil pressure)
 d = เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม
 e = ระยะเยื้องศูนย์กลางของแรงที่กระทำ
 Z_r = ความลึกของจุดหมุน (Depth of rotation)

ในกรณีที่แรงต้านทานของดินมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดความยาวของเสาเข็มจะได้ค่า $P_0 = P_L = P_u$ ซึ่งได้จากสมการที่ 2.1 และ 2.2 เมื่อพิจารณา ณ จุดพิบัติ

$$Z_r = \frac{1}{2} \left(\frac{H_u}{P_u d} + L \right) \quad (2.3)$$

$$\frac{M_u}{P_u d L^2} = \frac{H_u x e}{P_u d L^2} = \frac{1}{4} \left[1 - \left(\frac{2H_u}{P_u d L} \right) - \left(\frac{H_u}{P_u d L} \right)^2 \right] \quad (2.4)$$

$$\frac{H_u}{P_u d L} = \sqrt{\left(1 + \frac{2e}{L} \right)^2 + 1} - \left(1 + \frac{2e}{L} \right) \quad (2.5)$$

- เมื่อ Z_r = ความลึกของจุดหมุน (Depth of rotation)
 M_u = โมเมนต์สูงสุดเนื่องจากแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด
 P_u = แรงดันดินสูงสุด (Ultimate soil pressure)
 H_u = แรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด (Ultimate lateral load)
 L = ความยาวของเสาเข็มที่ฝังในชั้นดิน
 d = เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม
 e = ระยะเยื้องศูนย์กลางของแรงที่กระทำ

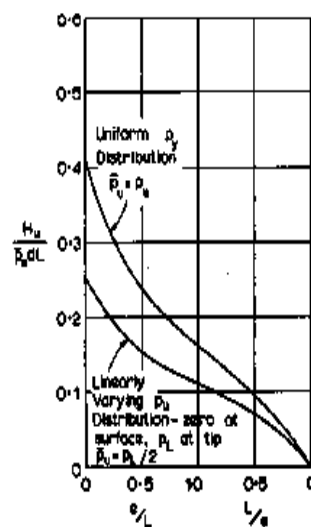
ก็จะสามารถหาค่าความลึกของจุดหมุน (Z_r) และแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด (H_u) ได้จากสมการที่ 2.3 , 2.4 และ 2.5 และสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $H_u/P_u d L$ และค่า e/L ได้จากภาพที่ 2.2

สำหรับในกรณีที่แรงต้านทานของดินมีการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบเส้นตรงตลอดความลึกของชั้นดิน จากค่า P_o ที่บริเวณผิวดินถึง P_L ที่ปลายเสาเข็มจะสามารถหาค่า Z_r และ H_u ได้จากสมการที่ 2.6 และ 2.7

$$4\left(\frac{Z_r}{L}\right)^3 + \left[6\left(\frac{Z_r}{L}\right)^2\right]\left[\frac{e}{L} + \frac{P_o}{P_L - P_o}\right] + \left(\frac{12P_o}{P_L - P_o}\right)\left(\frac{e}{L}\right)\left(\frac{Z_r}{L}\right) - \left(3\frac{e}{L}\right)\left(\frac{P_o + P_L}{P_L - P_o}\right) - \left(\frac{2P_L + P_o}{P_L - P_o}\right) = 0 \quad (2.6)$$

$$\frac{H_u}{P_u dL} = \left(1 - \frac{P_o}{P_L}\right)\left(\frac{Z_r}{L}\right)^2 + \left(2\frac{P_o}{P_L}\right)\left(\frac{Z_r}{L}\right) - \frac{1}{2}\left(1 + \frac{P_o}{P_L}\right) \quad (2.7)$$

เมื่อ P_o = แรงต้านดินที่บริเวณผิวดิน
 P_L = แรงต้านดินที่บริเวณปลายเข็ม



ภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $H_u/P_u dL$ และค่า e/L ในกรณีที่ค่า $P_o = 0$

2.2.2 Nonrigid pile

จากสมมุติฐานข้างต้นถือว่าเสาเข็มมีความแข็ง (Rigid pile) เพียงพอที่ทำให้ดินเกิดการพิบัติก่อนเสาเข็ม แต่ในกรณีเสาเข็มยาวค่าความต้านทานต่อแรงทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มหาได้จากค่าโมเมนต์ ณ จุดที่ยอมให้ของเสาเข็ม ซึ่งเสาเข็มจะเกิดการพิบัติก่อนที่ดินที่อยู่ล้อมรอบ เสาเข็มจะเกิดการพิบัติในกรณีเช่นนี้ค่าโมเมนต์สูงสุดสามารถคำนวณได้ ณ จุดที่ค่าแรงเฉือนในเสาเข็มเป็นศูนย์ เมื่อเสาเข็มเป็นหัวเสาเข็มอิสระ (Free head pile) และจากกรณีดังกล่าวจะสมมุติว่าเกิดแรงต้านทานของดินขึ้นที่จุดนี้ เพราะค่าโมเมนต์สูงสุดไม่เกินโมเมนต์ ณ จุดที่ยอมให้ของหน้าตัดเสาเข็ม ดังนั้นค่าความต้านทานต่อแรงกระทำทางด้านข้างของเสาเข็มจะมีค่าน้อยกว่า

1. แรงในแนวราบซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ดินเกิดการพิบัติตลอดความยาวของเสาเข็ม
2. แรงในแนวราบที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุดเท่ากับค่าโมเมนต์ ณ จุดที่ยอมให้ของหน้าตัดเสาเข็ม

สำหรับค่าความต้านทานสูงสุดของดิน (Ultimate soil resistance) ในดินที่มีความเชื่อมแน่นจะมีค่าความต้านทานของแรงดันดินสูงสุด (P_u) เพิ่มขึ้นจากผิวดินจนถึงความลึกประมาณ 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม จากนั้นจะมีค่าคงที่ตลอดความลึกของเสาเข็ม ดังได้แสดงไว้ในภาพที่ 2.3 ซึ่งเมื่อค่า P_u คงที่การพิบัติทางข้างจะรวมกับการเคลื่อนตัวแบบพลาสติกของดินที่อยู่ล้อมรอบเสาเข็มในแนวราบ ซึ่งค่า P_u สามารถหาได้จากทฤษฎี Plastic สำหรับค่าของ Lateral resistance factor, K_c ($P_u = K_c \times C$) จะมีค่าขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของค่า pile adhesion ต่อค่า cohesion ของดิน (C_u/C) และขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางด้านรูปร่างของเสาเข็ม (d/b) ดังแสดงในภาพที่ 2.4 โดยมีค่าอัตราส่วน $C_u/C = 1$ และ $C_u/C = 0$ สำหรับค่าอัตราส่วนของ C_u/C ที่มีค่านอกเหนือจากค่าดังกล่าว ให้ใช้วิธี linear interpolate จากภาพที่ 2.4 ส่วนเส้นโค้งที่แสดงไว้ในภาพที่ 2.4 ได้จากการวิเคราะห์โดยทฤษฎีพลาสติก โดยมีขีดจำกัดบนมากกว่าขีดจำกัดล่างประมาณร้อยละ 10 ถึง 15 ในการวิเคราะห์จะสมมุติหน้าตัดของเสาเข็มเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน ซึ่งสามารถใช้ได้กับหน้าตัดของเสาเข็มอื่นๆ ที่มีอัตราส่วนเหมือนกัน โดยปกติค่าความต้านทานของดินต่อแรงกระทำทางด้านข้างในดินที่มีความเชื่อมแน่นจะมีค่าประมาณ $9C$

สำหรับในกรณีดินทั่วไปที่มีค่า $C - \phi$ วิธีการหาค่าความต้านทานของดินต่อแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดจะพิจารณาจากทฤษฎีของแรงดันดินที่ถูกเสนอโดย Brinch Hansen (1961) โดยพิจารณาว่าค่าความต้านทานของดินต่อแรงกระทำทางด้านข้างมีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดความยาวของเสาเข็ม ซึ่งค่าความต้านทานของดินที่ความลึกใดๆ สามารถหาได้จากสมการที่ 2.8

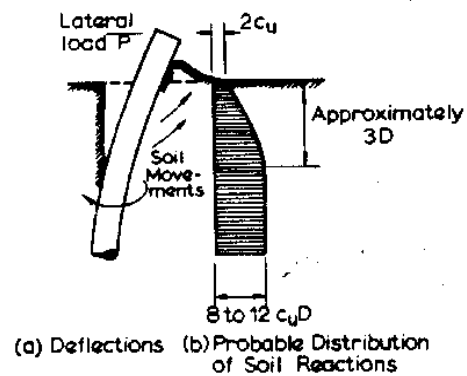
$$P_u = qK_q + CK_c \quad (2.8)$$

เมื่อ q = น้ำหนักกดทับจากดินชั้นบน (Vertical overburden pressure)

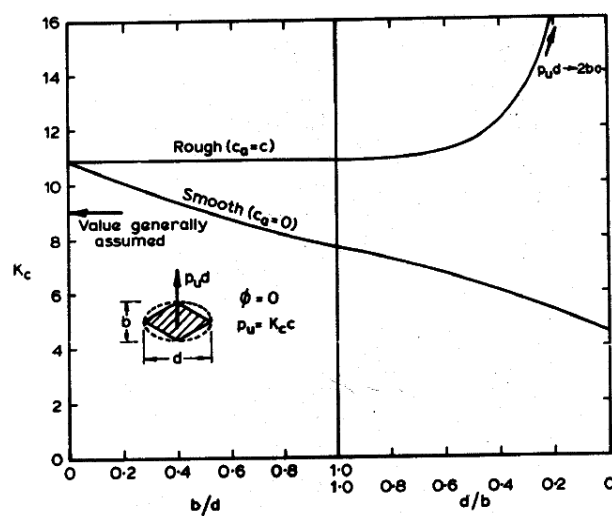
C = ค่า cohesion ของดิน

K_c, K_q = ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินทางด้านข้าง

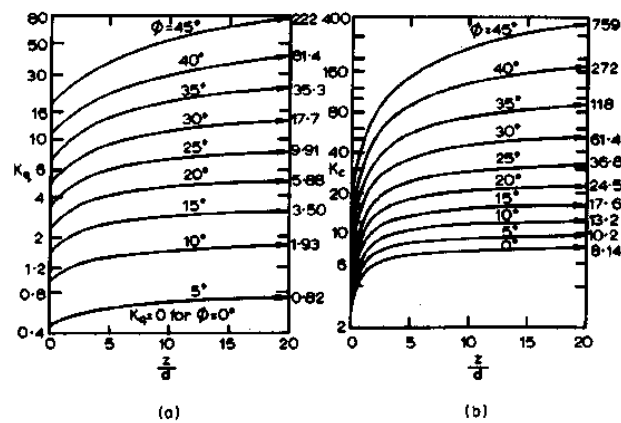
ค่า K_c และ K_q สามารถหาได้จากภาพที่ 2.4 และ 2.5 โดยจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่า ϕ และค่า Z/D



ภาพที่ 2.3 การกระจายแรงต้านทานของดินทางด้านข้าง (cohesion soil)



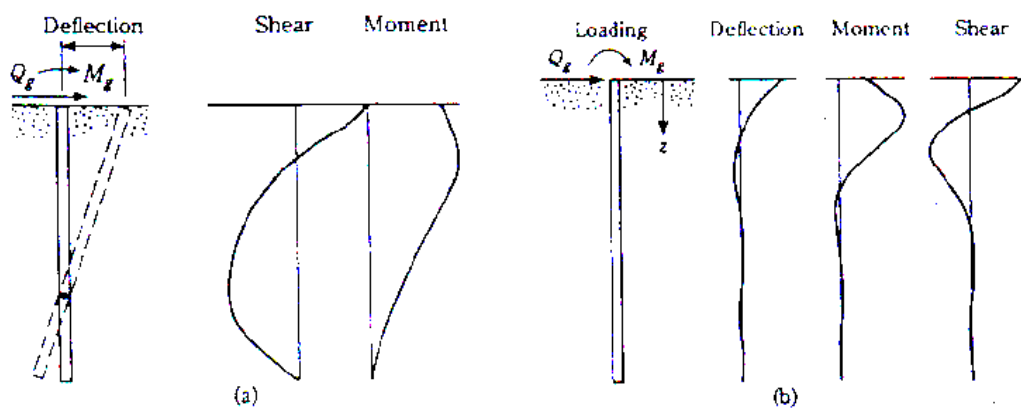
ภาพที่ 2.4 ผลของ Aspect ratio และ adhesion ratio ต่อค่าความต้านทานของดิน
ในดินที่มีความเชื่อมแน่น (Purely cohesion soil)



ภาพที่ 2.5 สัมประสิทธิ์ของแรงดันดินทางด้านข้าง K_c และ K_q

2.3 ทฤษฎีของ Broms

เสาเข็มในแนวดิ่งสามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างโดยหน่วยแรง passive ในดินที่อยู่รอบๆ เสาเข็ม ซึ่งขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเสาเข็ม ความแข็งแรงของดิน และแรงยึดที่ปลายเสาเข็ม โดยทั่วไปเสาเข็มที่รับแรงกระทำทางด้านข้าง สามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณีคือ 1) เสาเข็มสั้นและยึดแข็ง (short and rigid pile) 2) เสาเข็มยาวและยืดหยุ่น (long and elastic pile) ซึ่งได้แสดงลักษณะการเกิดการแอ่นตัวของเสาเข็ม ค่าโมเมนต์และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนเสาเข็มเมื่อเสาเข็มรับแรงกระทำทางด้านข้างไว้ในภาพที่ 2.6 a และ 2.6 b



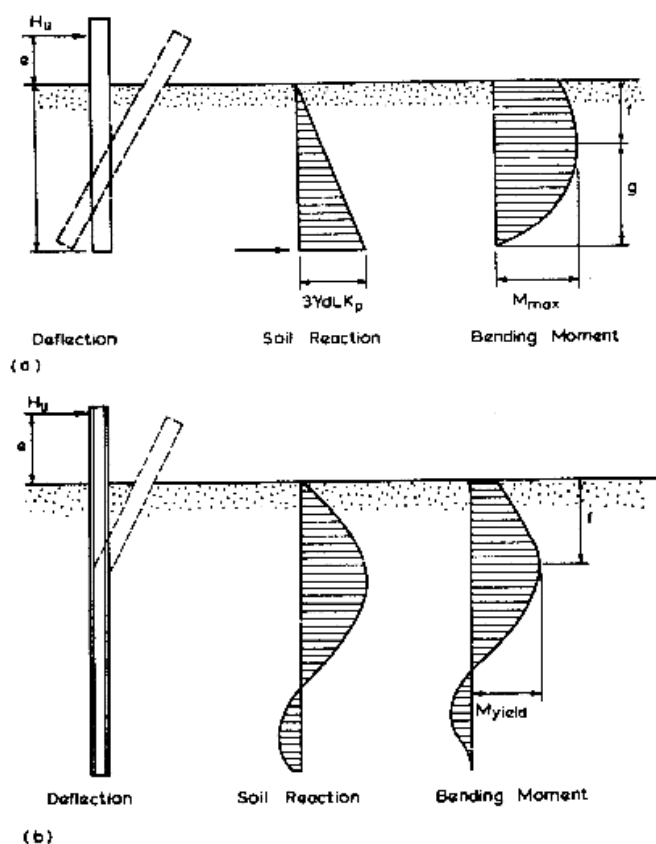
ภาพที่ 2.6 ลักษณะของการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม โมเมนต์และแรงเฉือน
สำหรับ (a) เสาเข็มสั้นและยึดแข็ง (b) เสาเข็มยาวและยืดหยุ่น

Broms (1965) ได้พัฒนาสมการอย่างง่ายขึ้นมาสำหรับเสาเข็มรับแรงกระทำทางด้านข้าง โดยมีสมการดังนี้

1. เกิดการบีบอัดด้วยแรงเฉือนในชั้นดินสำหรับกรณีเสาเข็มสั้น
2. แรงดัดในเสาเข็มถูกต้านโดยแรงต้านพลาสติกของหน้าตัดเสาเข็มสำหรับเสาเข็มยาว

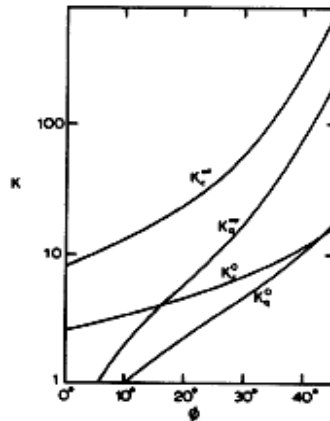
และพิจารณาเสาเข็มแบบหัวเข็มยึดแน่น (Fixed head pile) และเสาเข็มแบบหัวเสาเข็มอิสระ (Free head pile) ในดินที่มีความเชื่อมแน่นและในดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่นแยกออกจากกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะพฤติกรรมของเสาเข็มแบบหัวเสาเข็มอิสระในชั้นดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (ดินทราย)

2.3.1 ความสามารถในการรับแรงด้านข้างสำหรับเสาเข็มแบบหัวเสาเข็มอิสระ (Free head pile)



ภาพที่ 2.7 เสาเข็มหัวเสาเข็มอิสระในดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น

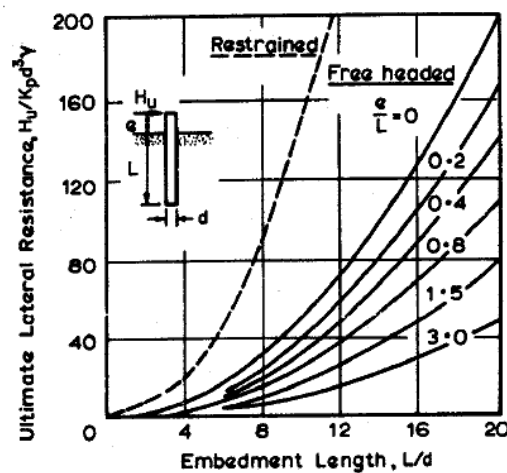
(a) เสาเข็มสั้น (b) เสาเข็มยาว ที่มา : Broms (1965)



ภาพที่ 2.8 Lateral resistance factor ที่ผิวดิน (0) และที่ความลึกอนันต์(∞)

ที่มา : Brinch Hansen (1961)

ความสัมพันธ์ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.9 โดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง L/d กับค่า $H_u / K_p d^3$ สำหรับคำนวณความสามารถในการต้านแรงกระทำทางด้านข้าง H_u สำหรับเสาเข็มสั้น หัวเสาเข็มอิสระ



ภาพที่ 2.9 ความต้านทานแรงกระทำด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มสั้นในชั้นดินทราย

จากภาพที่ 2.7 แสดงถึงความเป็นไปได้ของรูปแบบการพิบัติ การกระจายความต้านทานของดิน และการกระจายโมเมนต์ดัดในเสาเข็มยาวและเสาเข็มสั้น โดยให้ค่าหน่วยน้ำหนักของดิน (γ) มีค่าคงที่ ซึ่งถ้าค่าโมเมนต์สูงสุดมีค่าน้อยกว่าค่าโมเมนต์ ณ จุดที่ยอมให้ของหน้าตัดเสาเข็ม ($M_{\max} < M_y$) เสาเข็มชนิดนั้นจะเป็นเสาเข็มสั้น ดังแสดงในภาพที่ 2.7a เป็นการสมมุติจุดหมุนใกล้ส่วนปลายของเสาเข็มและแรงดันดินที่สูงจะกระทำใกล้จุดนี้ โดยแรงจะถูกรวมเป็นแรงเดียว

และกระทำที่ส่วนปลายของเสาเข็ม ดังนั้นเมื่อพิจารณาสมมูลย์ของโมเมนต์จะได้ค่า H_u ดังแสดงไว้ในสมการที่ 2.9

$$H_u = \frac{0.5\gamma d L^3 K_p}{e + L} \quad (2.9)$$

ดังนั้นค่าโมเมนต์สูงสุดสำหรับเสาเข็มสั้นหัวเสาเข็มอิสระจึงมีค่าเท่ากับ

$$M_{\max} = H_u \sqrt{\left(e + \frac{2}{3} f\right)} \quad (2.10)$$

เมื่อ

- d = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเสาเข็ม
- γ = หน่วยน้ำหนักของดิน
- e = ระยะเยื้องศูนย์กลางที่แรงกระทำ
- f = ระยะที่เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด
- $K_p = \frac{(1 + \sin \phi')}{(1 - \sin \phi')}$

จากภาพที่ 2.7(b) ระยะที่เกิดค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็มยาวหัวเสาเข็มอิสระ จะมีค่าเท่ากับ

$$f = 0.82 \sqrt{\left(\frac{H}{\gamma d K_p}\right)} \quad (2.11)$$

เมื่อ

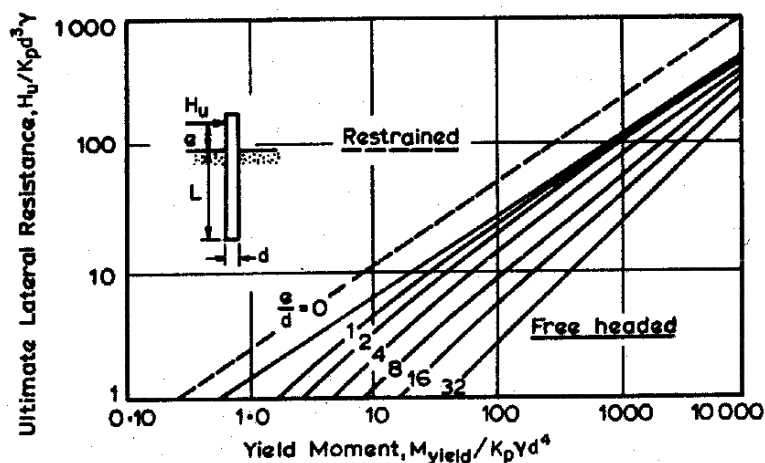
- d = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเสาเข็ม
- γ = หน่วยน้ำหนักของดิน
- H = แรงกระทำกระทำทางด้านข้าง
- $K_p = \frac{(1 + \sin \phi')}{(1 - \sin \phi')}$

ซึ่งที่ระยะ $f = \frac{H}{9K_p d^3}$ ค่าแรงกระทำทางด้านข้าง H_u สำหรับเสาเข็มยาวหัวเสาเข็มอิสระ
จะค่าเป็นแรงกระทำที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็ม ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.12

$$H_u = \frac{M_u}{(e + 1.5d + 0.5f)} \quad (2.12)$$

เมื่อ M_u = ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็ม
 e = ระยะเยื้องศูนย์ที่แรงกระทำ
 f = ระยะที่เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด

ความสัมพันธ์ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.10 โดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์ระหว่าง $H_u / K_p d^3$ กับค่า $M_y / d^4 / K_p$ สำหรับคำนวณความสามารถในการต้านแรงกระทำทางด้านข้าง H_u สำหรับเสาเข็มยาว หัวเสาเข็มอิสระ



ภาพที่ 2.10 ความต้านทานแรงกระทำด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มยาวในชั้นดินทราย

ดังนั้นค่าโมเมนต์สูงสุดสำหรับเสาเข็มยาวหัวเสาเข็มอิสระจึงมีค่าเท่ากับ

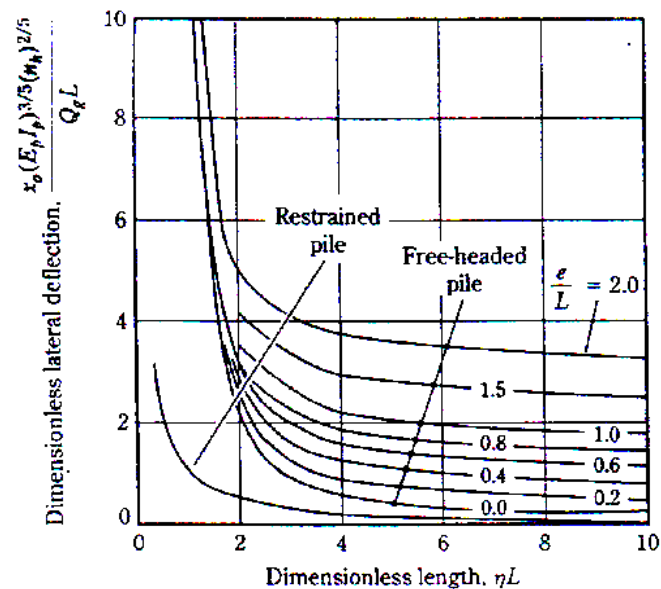
$$M_u = H (e + 0.67 f) \quad (2.13)$$

และที่ ระยะ $e/d = 0$ โมเมนต์ดัดที่หัวเสาเข็มมีค่าเป็นศูนย์ แรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดสามารถหาได้จาก สมการที่ 2.14

$$H_u = \frac{M_u}{e + 0.54 \sqrt{\frac{H_u}{\gamma d K_p}}} \quad (2.14)$$

เมื่อ H_u = แรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด

M_u = ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็ม



ภาพที่ 2.11 ค่าการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็มตามทฤษฎีของ Broms ในชั้นดินทราย

การแอ่นตัวหรือการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็ม (x_0) ภายใต้แรงกระทำสามารถประมาณได้จากภาพที่ 2.11 ซึ่งค่า Stiffness factor (η) สามารถหาได้จาก

$$\text{Stiffness factor, } \eta = \sqrt[5]{\frac{n_h}{E_p I_p}} \quad (2.15)$$

เมื่อ n_h = โมดูลัสยืดหยุ่น ซึ่งจะแปรเปลี่ยนตามชนิดของดิน

E_p = โมดูลัสยืดหยุ่นของเสาเข็ม

I_p = โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดเสาเข็ม

ตารางที่ 2.1

ค่า n_h แปรเปลี่ยนตามชนิดของดิน (Broms, 1965)

Soil	n_h (kN / m^2)
Dry or moist sand	
Loose	1,800 – 2,200
Medium	5,500 – 7,000
Dense	15,000 – 18,000

2.3.2 เสาเข็มที่รับแรงในแนวเอียง (Pile subjected to inclined load)

ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างในกรณีนี้เป็นฟังก์ชันของแรงต้านทานทางด้านข้างและความสามารถรับแรงในแนวดิ่งของเสาเข็ม เมื่อแรงกระทำทำมุมเอียง (δ) ออกเล็กน้อยจากแนวแกน การพิบัติจะเกิดในแนวแกน ส่วนการพิบัติในแนวราบจะเกิดเมื่อแรงกระทำมีมุมเอียง (δ) ออกมาจากแนวแกน ซึ่งสามารถอธิบายรูปแบบการพิบัติทั้งสองกรณีได้ดังนี้

1. การพิบัติในแนวแกนจะเกิดขึ้นเมื่อความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดมีค่าเกินกว่าแรงในแนวราบที่เกิดจากแรงในแนวเอียงสูงสุด

$$H_u > Q_u \sin \delta$$

หรือ

$$H_u > P_u \tan \delta \quad (2.16)$$

เมื่อ Q_u = Ultimate inclined-load capacity of pile

P_u = Ultimate vertical-load capacity of pile

δ = Angle of inclination of load from vertical

2. การพิบัติในแนวราบจะเกิดขึ้นเมื่อความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดมีค่าน้อยกว่าแรงในแนวราบที่เกิดจากแรงในแนวเอียงสูงสุด

$$H_u < P_u \tan \delta \quad (2.17)$$

สำหรับในดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (Cohesionless soil) Broms ได้อธิบายผลของแรงกระทำทางด้านข้าง มีอิทธิพลต่อแรงกระทำในแนวแกน และตามวิธีของ Broms จะเกิดการพิบัติขึ้น 2 แบบ คือ การพิบัติตามแนวแกนและการพิบัติทางด้านข้าง ซึ่งจะอธิบายต่อไป

1. การพิบัติตามแนวแกน (Axial failure)

ในดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่นแรงกระทำทางด้านข้างจะมีอิทธิพลต่อความสามารถในการรับแรงตามแนวแกนของเสาเข็ม ซึ่งได้แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันทางด้านข้างที่เกิดจากแรงกระทำในแนวเอียงไว้ในภาพที่ 2.12 เมื่อแรงในแนวเอียงมีมุมเอียงออกและน้อยจากแนวแกน จะทำให้เกิดแรงดันทางด้านข้างที่มีค่าน้อย โดยจะเกิดขึ้นมากที่บริเวณส่วนหัวและปลายของเสาเข็ม ดังนั้นการสมมุติแรงดันดินทางด้านข้างจะสมมุติให้มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นแบบเส้นตรงจากผิวดิน ซึ่งการพิบัติจะเกิดขึ้นกับดิน โดยมีค่าแรงดันดินสูงสุดเท่ากับ 3 ถึง 9 เท่าของแรงดันด้านทานของ Rankine ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.13 Broms ได้สมมุติว่ามีแรงรวมกระทำที่ปลายของเสาเข็ม (R) และความต้านทานแรงดันดินสูงสุดจะเป็น 5 เท่าของแรงดันด้านทานของ Rankine ที่ความลึกใดๆ (g) และแรงตามแนวแกน (P_u) สามารถคำนวณได้จาก

$$P_u = P_{u0} + \Delta P_u \quad (2.18)$$

เมื่อ P_{u0} = ความสามารถในการรับแรงตามแนวแกนเมื่อมีแรงกระทำตามแนวแกน
 ΔP_u = การเพิ่มแรงต้านทานดิ่งถอนซึ่งเกิดจากแรงกระทำทางด้านข้าง 2 แรง
 คือ แรง T และ R ดังที่แสดงไว้ในภาพที่ 2.13

ดังนั้นความสามารถในการรับแรงในแนวเอียงสูงสุดจะหาได้จาก

$$Q_u = P_u \sec \delta \quad (2.19)$$

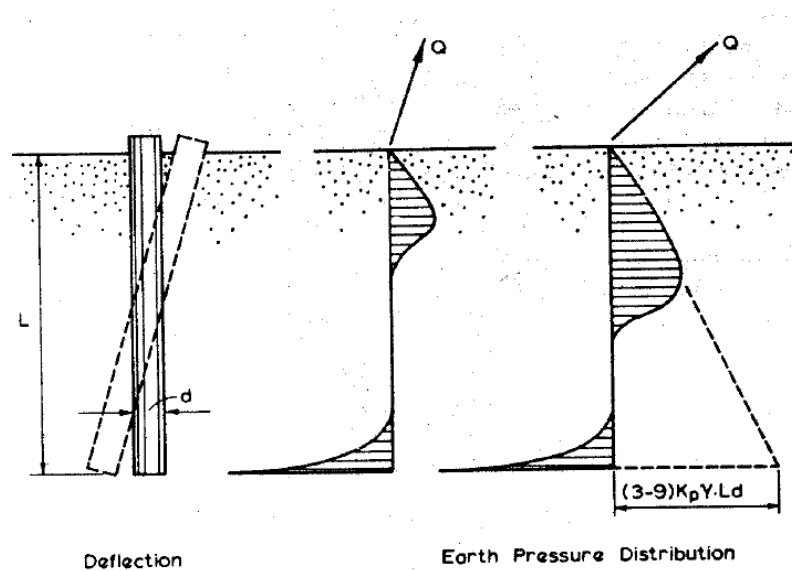
2. การพิบัติทางด้านข้าง (Lateral failure)

จะสมมุติว่าส่วนประกอบของแรงกระทำในแนวเอียงจะไม่มีผลต่อความต้านทานของแรงทางด้านข้างของเสาเข็ม ดังนั้นจะได้

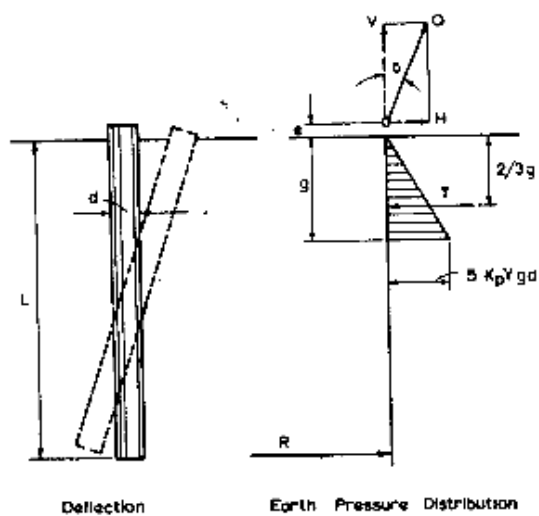
$$Q_u = H_u \operatorname{cosec} \delta \quad (2.20)$$

เมื่อ H_u = ความต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด

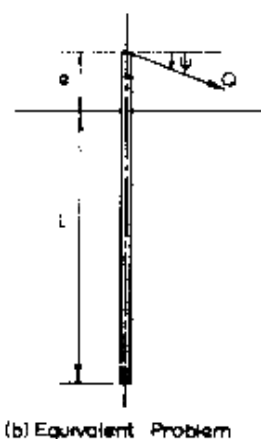
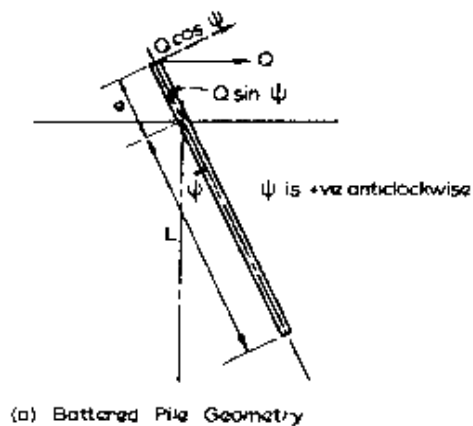
ซึ่งค่าความสามารถในการต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างที่เกิดขึ้นจริงจะมีค่าน้อยกว่า
ค่าที่คำนวณได้จากการพิบัติตามแนวแกนและการพิบัติทางด้านข้าง



ภาพที่ 2.12 การกระจายแรงดันดินที่มีแรงดึงในแนวเอียงกระทำเสาเข็ม



ภาพที่ 2.13 การสมมุติการกระจายแรงดันดิน



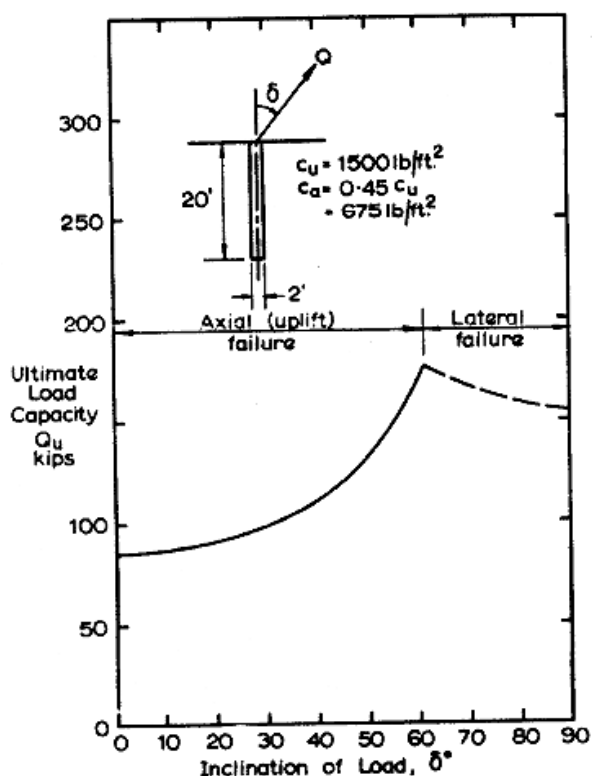
ภาพที่ 2.14 เสาเข็มเอียง (Batter pile)

2.3.3 เสาเข็มเอียง (Batter pile)

จากภาพที่ 2.14a เป็นการแสดงลักษณะของปัญหา และขอบเขตโดยทั่วไปของเสาเข็มเอียง ในทางปฏิบัติจะสมมุติว่าค่าแรงตามแนวแกนสูงสุดและแรงตั้งฉากกับแนวแกนจะไม่มีผลกระทบมาก เพราะว่าการเอียงของผิวดินจะสัมพันธ์กับแนวแกนของเสาเข็ม ดังนั้นสำหรับเสาเข็มเอียงจะพิจารณาเหมือนกับเสาเข็มตั้งที่รับแรงกระทำในแนวเอียง ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.14b โดยมุมของการเอียง(δ) ของแรงกับแนวดิ่งได้แสดงไว้ในภาพที่ 2.15 โดย

$$\delta = 90 + \Psi \quad (2.21)$$

ซึ่งค่าความสามารถในการต้านทานแรงสูงสุด Q_u ของเสาเข็มเอียงสามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกันกับเสาเข็มในแนวตั้งที่รับแรงในแนวเอียง



ภาพที่ 2.15 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการรับกำลังกับมุมเอียงในดินเหนียว

2.4 แรงดันด้านข้างของดิน (Lateral Earth Pressure)

โครงสร้างกันดิน เช่น เขื่อน กำแพงกันดิน เข็มพืด เสาเข็ม ผู้ออกแบบจำเป็นต้องทราบพฤติกรรมแรงดันทางด้านข้างของดินที่กระทำต่อโครงสร้างกันดินนั้นๆ เพื่อให้สามารถออกแบบโครงสร้างกันดินได้อย่างปลอดภัย ทั้งนี้แรงดันดินด้านข้างที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งได้เป็นแบบต่างๆ ตามสภาวะการเคลื่อนตัวของดิน 3 ลักษณะ ดังนี้

1. แรงดันทางข้างของดินในสภาวะอยู่กับที่ (Earth Pressure at rest) เป็นแรงดันของดินที่กระทำต่อผนังโครงสร้างกันดินเมื่อมวลดิน หรือโครงสร้างกันดินไม่มีการเคลื่อนที่แต่อย่างใด

2. แรงดันทางข้างของดินในสภาวะแอคทีฟ (Active Earth Pressure) เป็นแรงดันของดินที่กระทำต่อผนังโครงสร้างกันดิน เมื่อโครงสร้างกันดินเคลื่อนที่หรือขยับออกไปจากดินถมที่อยู่ด้านหลังโครงสร้างกันดิน

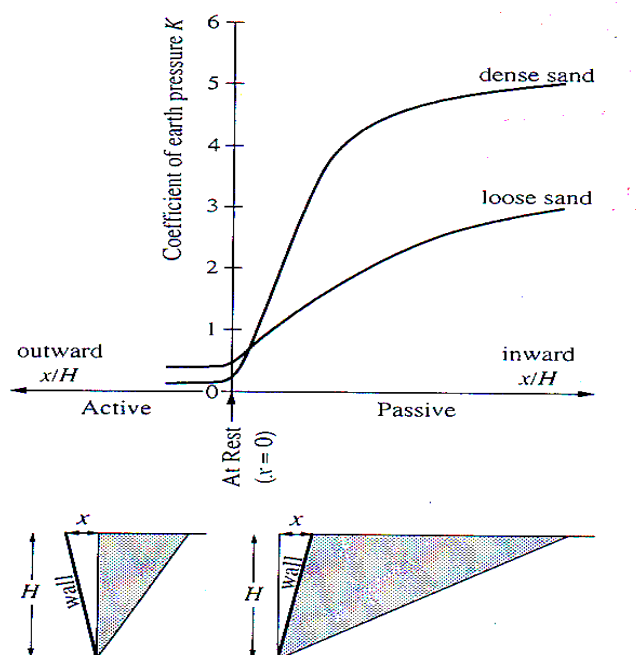
3. แรงดันทางข้างของดินในสภาวะพาสซีฟ (Passive Earth Pressure) เป็นแรงดันของดินที่กระทำต่อผนังโครงสร้างกันดิน เมื่อโครงสร้างกันดินเคลื่อนที่หรือขยับออกไปจากดินถมที่อยู่ด้านหน้าโครงสร้างกันดิน

แรงดันทางข้างของดินขึ้นอยู่กับ หน่วยน้ำหนักของมวลดิน มุมเสียดทานภายในของเม็ดดิน มุมเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสระหว่างผนังโครงสร้างกับเม็ดดิน แรงยึดเหนี่ยวของมวลดิน มุมลาดเอียงของดินถมหลังโครงสร้างกันดิน และมุมลาดเอียงของผนังโครงสร้างกันดิน และทฤษฎีในการคำนวณแรงดันด้านข้าง และการออกแบบโครงสร้างกันดินที่นิยมใช้กัน ได้แก่ ทฤษฎีของแรงคีน (Rankine 's Theory) และทฤษฎีของคูลอมบ์ (Coulomb 's Wedge Theory)

ทฤษฎีของแรงคีน (Rankine 's Theory)

ทฤษฎีนี้ มีสมมติฐานให้ดินที่อยู่หลังโครงสร้างกันดินต้องเป็นดินเม็ดหยาบสภาพแห้งนั่นคือหน่วยแรงเชื่อมแน่น (Cohesion) เป็นศูนย์ และมีเนื้อเดียวกันตลอด และพิจารณาให้ผนังโครงสร้างมีผิวสัมผัสตรงดิ่งไม่มีแรงเสียดทานระหว่างผนังโครงสร้างกับมวลดิน

พิจารณามวลดินด้านหลังโครงสร้างกันดิน เมื่อโครงสร้างกันดินเคลื่อนตัวออกจะทำให้หน่วยแรงดันด้านข้างที่กระทำต่ออนุภาคดินจะค่อยๆ ลดลง จนถึงค่าหนึ่งที่ทำให้ดินพิบัติเนื่องจากแรงเฉือน ดินสภาพนี้อยู่ใน Active state of plastic equilibrium แรงดันของดินที่ต่ำสุดนี้เรียกว่าแรงดันทางข้างของดินในสภาวะแอคทีฟ (Active Earth Pressure) ในขณะที่แรงในแนวดิ่งมีค่าคงที่ ถ้าโครงสร้างกันดินเคลื่อนที่เข้าหาดิน แรงดันทางข้างของมวลดินที่อยู่ด้านหน้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นทีละน้อยจนถึงค่าสูงสุดที่ทำให้ดินพิบัติด้วยแรงเฉือน ดินสภาพนี้อยู่ใน Passive state of plastic equilibrium แรงดันของดินที่ต่ำสุดนี้เรียกว่า แรงดันทางข้างของดินในสภาวะแอคทีฟ (Passive Earth Pressure) ดังแสดงในภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของกำแพงกับแรงดันดิน

เมื่อ K_a และ K_p คือ สัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างของดินในสถานะแอคทีฟ (Coefficient of Active Earth Pressure) และ พาสซีฟ (Coefficient of Passive Earth Pressure) ซึ่งมีค่าเท่ากับ

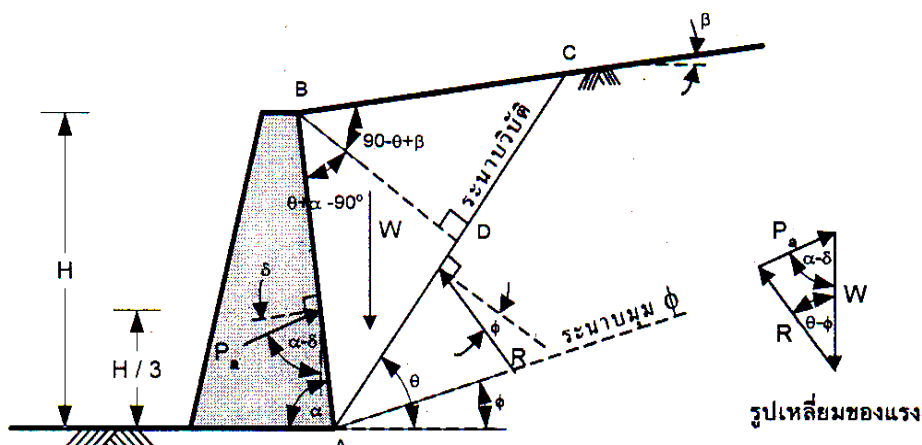
$$K_a = \frac{(1 - \sin \phi')}{(1 + \sin \phi')} = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi'}{2} \right) \quad (2.22)$$

$$K_p = \frac{(1 + \sin \phi')}{(1 - \sin \phi')} = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (2.23)$$

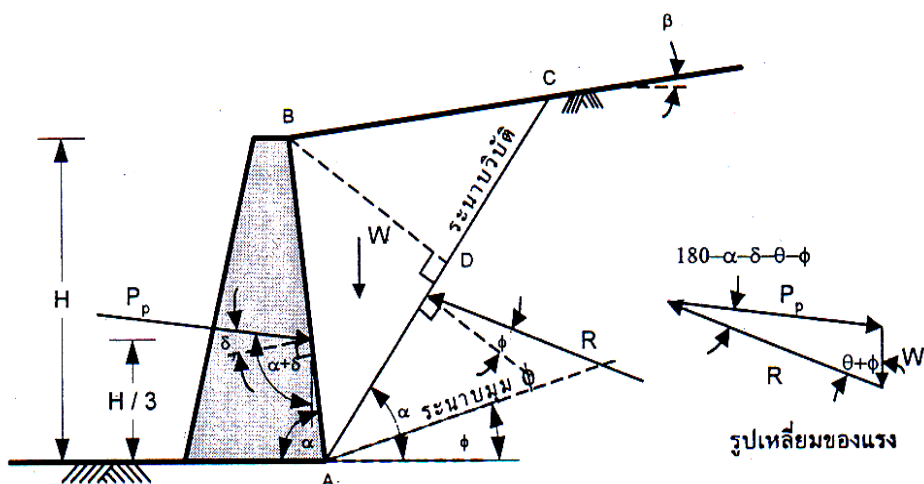
เมื่อ ϕ' = มุมเสียดทานภายในของดินทราย (Friction angle) แบบ Effective stress

ทฤษฎีของคูลอมบ์ (Coulomb's Wedge Theory)

ทฤษฎีนี้สมมติว่าเมื่อดินถมที่อยู่ด้านหลังโครงสร้างกั้นดินเกิดการพิบัติจะมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม (Wedge) ABC ดังแสดงในภาพที่ 2.17 ซึ่งก่อนเกิดการพิบัติ ดินในส่วนที่อยู่เหนือระนาบการพิบัติ (failure plane) จะอยู่ในสภาพสมดุลด้วยแรง 3 แรง คือ 1) น้ำหนักของดินรูปสามเหลี่ยม ABC (W) 2) แรงดันของดินที่กระทำต่อผนังโครงสร้าง และ 3) แรงปฏิกิริยาบนระนาบที่เกิดการพิบัติ (R)



ภาพที่ 2.17 ทฤษฎีของคูลอมบ์สำหรับแรงดันแบบแอคทีฟ



ภาพที่ 2.18 ทฤษฎีของคูลอมบ์สำหรับแรงดันแบบพาสซีฟ

2.5 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

ในการแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรม ปัญหาเหล่านี้จะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ (Partial Differential Equation) และเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา (Boundary Condition) ค่าผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) ของปัญหา ซึ่งจะประกอบด้วยค่าตัวแปรต่างๆกัน ตามตำแหน่งต่างๆ บนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรงจะประกอบด้วยค่าต่างๆ ทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ และการที่จะหาผลเฉลยของคำตอบที่ประกอบด้วยค่าต่างๆจำนวนมากมายเหล่านี้ ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถกระทำได้ จึงก่อให้เกิดการหาผลเฉลยของคำตอบที่เรียกว่า วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Zienkiewicz, 1977 , Reddy, 1985 และ Bathe, 1966) โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์มาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนนับได้ (Finite) โดยแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาโดยใช้โครงข่ายของชิ้นส่วนที่มีขนาดต่างๆกัน และผลเฉลยของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกต้องมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับ 3 ประการหลักคือ ประการแรกการกำหนดรูปร่างของชิ้นส่วนให้ใกล้เคียงกับรูปร่างลักษณะของปัญหาจริงได้มากน้อยเพียงใด ประการที่สอง การประมาณพฤติกรรมของชิ้นส่วนได้ถูกต้องตามสภาพที่แท้จริงหรือไม่ และ ประการสุดท้ายขีดความสามารถของเครื่องคอมพิวเตอร์ และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

หลักการทั่วไปสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ การแบ่งขอบเขตของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆโดยที่ผลเฉลยของแต่ละชิ้นส่วนนั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ และจากเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมา จุดที่ชิ้นส่วนเหล่านี้มาบรรจบกัน เรียกว่า จุดต่อ (Node) โดยที่จุดต่อจะเป็นตำแหน่งของตัวแปรที่ไม่ทราบค่าของปัญหา

2.5.1 สมการไฟไนต์เอลิเมนต์พื้นฐาน

สมการพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์กลศาสตร์ของชิ้นส่วนต่อเนื่อง (Continuum Mechanics) ประกอบด้วยสมการหลัก 3 สมการ ดังนี้

1. สมการสมดุลทางสถิตยศาสตร์ (Static Equilibrium Equation) คือ สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงภายนอก(f) และความเค้น(σ) ของชิ้นส่วน ประกอบด้วย

$$\text{สมการสมดุล (equilibrium equation) : } [\sigma_{ij,j} + h_i = 0]$$

$$\text{สมการเขตจำกัดของหน่วยแรง (stress boundary) : } [T_i = \sigma_{ij} n_j]$$

โดยสามารถสรุปความสัมพันธ์ในรูปเมตริกซ์ได้ ดังนี้

$$A^T \sigma = f \quad (2.24)$$

เมื่อ σ = เมตริกซ์ของความเค้น

f = เมตริกซ์ของแรงภายนอก (external force)

2. สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด – การเคลื่อนตัว (Compatibility Equation) คือ สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด $[\varepsilon]$ ณ จุดที่ต้องการพิจารณา กับเวกเตอร์ของการเคลื่อนที่บริเวณจุดต่อของชิ้นส่วน $[U]$

$$\varepsilon_{ij} = (u_{i,j} + u_{j,i})/2$$

โดยสามารถแสดงในรูปเมตริกซ์ได้ ดังนี้

$$\varepsilon = BU \quad (2.25)$$

เมื่อ ε = เมตริกซ์ของความเครียด

U = เมตริกซ์ของการเคลื่อนตัว

B = เมตริกซ์ความเครียด – การเคลื่อนตัว (strain – displacement matrix)

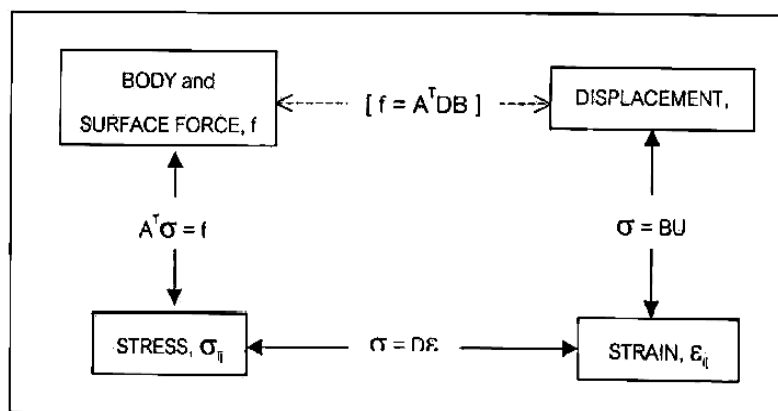
3. สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น – ความเครียด (Constitutive Equation) คือ สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น $[\sigma]$ และความเครียด $[\varepsilon]$ ณ จุดที่ต้องการพิจารณา

โดยสามารถแสดงในรูปเมตริกซ์ได้ ดังนี้

$$\sigma = D\varepsilon \quad (2.26)$$

เมื่อ D = เมตริกซ์ความเค้น – ความเครียด (constitutive matrix)

จากความสัมพันธ์ของทั้ง 3 สมการดังกล่าว สามารถแสดงสรุปได้ดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของสมการพื้นฐานในการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการพิสูจน์ด้วยหลักการของงานเสมือน (principle of virtual work) สามารถพิสูจน์ได้ว่า $[A^T = B^T]$ ดังนั้นจากสมการ 2.24 , 2.25 และ 2.26 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นที่จุดใดๆ ภายในชิ้นส่วนดังนี้

$$[B]^T [D][B] dv\{U\} = \{F_n\} \quad (2.27)$$

- เมื่อ $[B]$ = เมตริกซ์ความเครียด – การเคลื่อนตัว (strain – displacement matrix)
 $[D]$ = เมตริกซ์ความเค้น – ความเครียด (constitutive matrix)
 v = ปริมาตรของชิ้นส่วน
 $\{U\}$ = เวกเตอร์แสดงการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นของจุดต่อในทิศทาง x , y
 $\{F_n\}$ = แรงกระทำที่เพิ่มขึ้นที่จุดต่อ

หรือสามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่าย คือ

$$KU = R \quad (2.28)$$

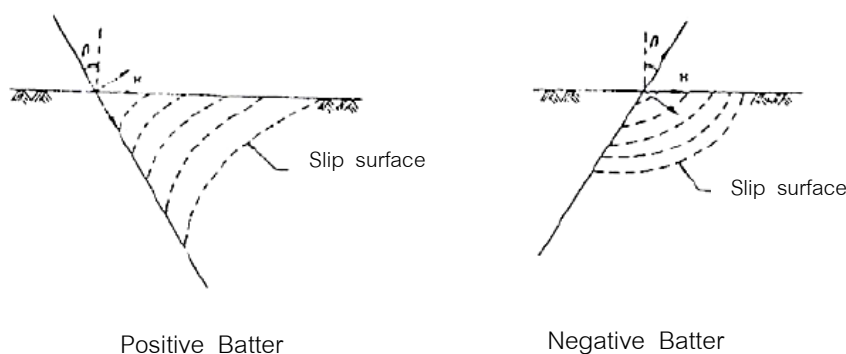
- เมื่อ K = สติฟเนสเมตริกซ์ (stiffness matrix)
 $= [B]^T [D][B]$
 R = เวกเตอร์ของแรงกระทำ (load vector)

จากความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ทำให้ทราบถึงเหตุผลว่าทำไมวิธีนี้จึงเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปในงานทางด้านวิศวกรรม รวมไปถึงงานด้านปฐพีกลศาสตร์ด้วย ดังนั้น จึงสรุปข้อได้เปรียบของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อเทียบกับวิธีการอื่น ได้ดังต่อไปนี้

1. สามารถวิเคราะห์ปัญหาที่มีความสลับซับซ้อนได้เป็นอย่างดี
2. ได้ผลเฉลยของคำตอบที่แม่นยำ รวดเร็ว และสามารถเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ทันที
3. ลดปัญหาข้อจำกัดเรื่องงบประมาณในการทดสอบแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ

2.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tschebotarioff (1953) ได้ทำการทดสอบแบบจำลองของเสาเข็มเอียงในชั้นดินทราย พบว่าลักษณะการเคลื่อนตัวของผิวดินของเสาเข็มที่เอียงแบบ Positive มีการเคลื่อนตัวหงขึ้น (Upward) และเสาเข็มที่เอียงแบบ Negative มีการเคลื่อนตัวในลักษณะกดลง (Downward) ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.20 และได้เสนอว่าเสาเข็มที่เอียงแบบ Negative สามารถต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างได้มากกว่าเสาเข็มที่มีลักษณะการเอียงแบบ Positive



ภาพที่ 2.20 แสดงลักษณะการเคลื่อนตัวของผิวดินของเสาเข็มเอียง ที่มา : Tschebotarioff (1953)

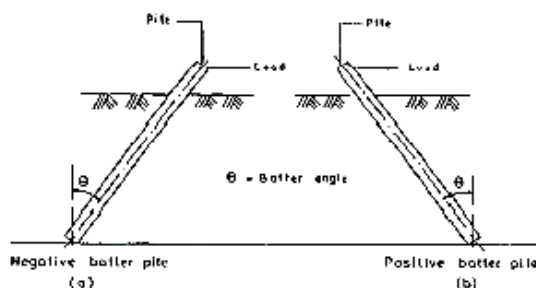
Broms (1964) ได้แนะนำการหาค่าความสามารถในการต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มในชั้นดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น โดยทำการเปรียบเทียบกับ การทดสอบ ซึ่งสรุปได้ดังนี้ 1) การหาค่าความต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มจะสมมุติให้แรงดันดิน

ทางด้านข้างจะเกิดการพิบัติที่ค่าเท่ากับ 3 เท่าของแรงดันด้านทานของ Rankine ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบจะมีค่ามากกว่าค่าที่คำนวณได้จากวิธีการที่นำเสนอประมาณร้อยละ 50 2) ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด ค่าโมเมนต์ลบ ค่าโมเมนต์บวก ที่เกิดขึ้นกับเสาเข็มหัวเสาเข็มอิสระและเสาเข็มหัวเสาเข็มยึดแน่น สามารถคำนวณได้จากแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดที่คำนวณได้จากข้อ 1 และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดสอบกับค่าที่คำนวณได้ พบว่าค่าโมเมนต์ลบ ค่าโมเมนต์บวกของเสาเข็มเดี่ยวมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ ในขณะที่โมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็มกลุ่มมีค่าของการทดสอบมากกว่าค่าที่คำนวณได้ประมาณร้อยละ 70

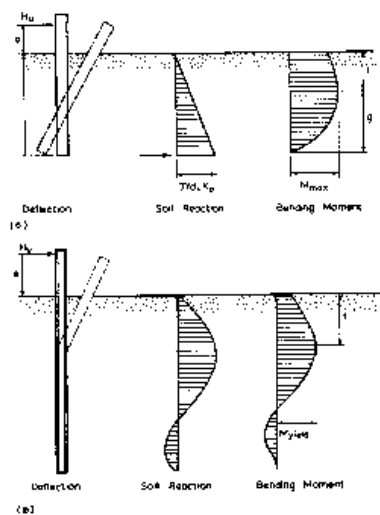
Murthy (1964) ได้ศึกษาแบบจำลองของเสาเข็มเอียง และ Pile Bent ที่ฝังในชั้นทรายแห้ง พบว่ากำลังต้านทานต่อแรงกระทำทางด้านข้างมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมุมเอียงของเสาเข็มอยู่ระหว่าง $+45^{\circ}$ ถึง -45° โดยได้ให้คำจำกัดความของเสาเข็มเอียง (Batter pile) ไว้ว่าถ้าแรงกระทำทางด้านข้างกระทำกับฐานรากหรือเสาเข็มในทิศทางเดียวกับการเอียงจะเรียกว่า “in batter pile” หรือ “Negative batter pile” และถ้าแรงกระทำทางด้านข้างกระทำกับฐานรากหรือเสาเข็มในทิศทางตรงกันข้ามกับการเอียงจะเรียกว่า “out batter pile” หรือ “Positive batter pile” ดังได้แสดงไว้ในภาพที่ 2.20 นอกจากนี้ Murthy ยังได้ทำการศึกษาปัญหาการแบ่งชนิดของเสาเข็มเดี่ยวที่รับแรงกระทำทางด้านข้างโดยมีข้อจำกัดความของเสาเข็มว่า สำหรับเสาเข็มยาว (long pile) ที่มีความยาว “L” ความยาวของเสาเข็มจะไม่มีค่าสำคัญมากนัก เนื่องจากการโก่งตัว (Deflection) ของเสาเข็มจะมีค่าใกล้ศูนย์ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับความยาวของเสาเข็ม ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.7b และจะเรียกเสาเข็มเช่นนี้ว่า เสาเข็มยาวที่มีความยืดหยุ่น ส่วนกรณีเสาเข็มสั้น (short pile) ค่า Flexural stiffness หรือค่า EI ของวัสดุที่ใช้ทำเสาเข็มจะไม่มีค่าสำคัญมากนัก เนื่องจากเสาเข็มจะแสดงพฤติกรรมเหมือนกับชิ้นส่วนที่แข็งหมุนรอบจุดหมุนดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.14a

Yoshiaki (1964) ได้ทำการทดสอบความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มในชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นมากและเปรียบเทียบผลการทดสอบกับทฤษฎีของ Broms พบว่าสมมุติฐานการกระจายแรงดันดินสูงสุดเท่ากับ 3 เท่าของแรงดันด้านทานของ Rankine ดังนั้นของ Broms ไม่ค่อยมีความถูกต้องมากนักเมื่อทรายมีความหนาแน่นมากขึ้น โดยผลการทดสอบมีค่ามากกว่าค่าทฤษฎีของ Broms ร้อยละ 70 ถึง 90 ซึ่งเมื่อเปลี่ยนสมมุติฐานการกระจายแรงดันดินสูงสุดเท่ากับ 5 เท่าของแรงดันด้านทานของ Rankine ทำให้ค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีมีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบ แสดงว่าแรงดันดินที่กระทำต่อเสาเข็มมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทรายมีความหนาแน่นมากขึ้น

Award และ Petrasovits (1969) ได้ทำการทดสอบแบบจำลองเสาเข็มอะลูมิเนียมในชั้นดินทราย พบว่าความต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างของเสาเข็มมีค่าขึ้นอยู่กับมุมเอียงของเสาเข็ม โดยเสาเข็มเอียงแบบ Negative จะมีความสามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดมากกว่าเสาเข็มตั้ง และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมุมเอียงของเสาเข็มมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเสาเข็ม Negative ที่เอียงทำมุม -37° กับแนวดิ่ง มีค่ามากกว่าเสาเข็มในแนวดิ่งประมาณร้อยละ 60 สำหรับเสาเข็ม Positive มีความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดน้อยกว่าเสาเข็มตั้งและจะมีค่าลดลงเมื่อมุมเอียงมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเสาเข็ม Positive เอียงทำมุม $+22.5^\circ$ กับแนวดิ่ง มีค่าน้อยกว่าเสาเข็มในแนวดิ่งประมาณร้อยละ 20 ถึง 25



ภาพที่ 2.21 รูปแบบของเสาเข็มเอียง



ภาพที่ 2.22 แสดงลักษณะการโก่งตัว (Deflection) ของเสาเข็มสั้น (short pile) และเสาเข็มยาว (long pile)

Meyerhof และ Ranjan (1972) ได้ใช้แบบจำลองในการศึกษาความสามารถในการรับกำลังของเสาเข็มในแนวดิ่งที่รับแรงกระทำในแนวเอียงในชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นมากโดยเสาเข็มที่ใช้ศึกษาเป็นเสาเข็มหัวเสาเข็มอิสระ พบว่าผลของการทดสอบที่ได้จากเสาเข็มตั้ง ที่รับแรงกระทำทางด้านข้างมีค่า

ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากวิธี Conventional static และจากผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าความสามารถในการรับแรงในแนวเอียงสูงสุดของเสาเข็มในแนวตั้งในชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นมากจะมีค่าลดลงเมื่อมุมเอียงที่กระทำต่อเสาเข็มเพิ่มขึ้น และเสาเข็มที่ตั้งที่มีอัตราส่วน L/d ต่ำจะทำให้ค่าความสามารถในการรับแรงในแนวเอียงสูงมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความสามารถในการรับแรงในแนวตั้งสูงสุดในการเพิ่มขึ้นของมุมเอียงของแรงกระทำต่อเสาเข็ม

Chari และ Meyerhof (1983) ได้ทำการศึกษาความสามารถสูงสุดของเสาเข็มเดี่ยวที่รับแรงกระทำแนวเอียงในชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นมาก ($D_r = 82\%$) ซึ่งแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษามีเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มเท่ากับ 75 มิลลิเมตร และจากการทดสอบพบว่าความสามารถในการรับแรงกระทำแนวเอียงของเสาเข็มมีค่าลดลงเมื่อมุมเอียงของแนวแรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมุมเอียงของแรงในแนวเอียงมีค่าเท่ากับ $+30^\circ$ กับแนวตั้ง ค่าความสามารถในการรับแรงในแนวเอียงของเสาเข็มลดลงร้อยละ 30 และเมื่อมีมุมในแนวเอียงของแรงในแนวเอียงมีค่าเท่ากับ $+60^\circ$ กับแนวตั้ง ค่าความสามารถในการรับแรงในแนวเอียงของเสาเข็มลดลงถึงร้อยละ 50

Poulos (1985) ได้ทำการศึกษาความสามารถสูงสุดของเสาเข็มเดี่ยวที่รับแรงกระทำทางด้านข้างของเสาเข็มเดี่ยวแนวตั้งที่ฝังตัวในชั้นดินเหนียว 2 ชั้น ที่มีความหนาแน่นที่แตกต่างกัน โดยใช้ทฤษฎีของ Broms (1964) พบว่าความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มขึ้นอยู่กับแรงดันดินด้านข้างและความหนาแน่นของดินแต่ละชั้นที่เสาเข็มฝังตัวอยู่

Limin , Michael และ Peter (1999) ได้ทำการทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงทางด้านข้างของเสาเข็มตั้ง และเสาเข็มเอียงในชั้นทราย ที่มีความหนาแน่นหลวม (looes) และความหนาแน่นปานกลาง (medium dense) โดยใช้เครื่อง Centrifuge ในการทดสอบ พบว่า การเอียงของเสาเข็มและความหนาแน่นของดินมีผลต่อความสามารถในการต้านทานแรงทางด้านข้าง โดยเสาเข็มเอียงแบบ Negative มีความสามารถในการต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเสาเข็มในแนวตั้ง และจะมีค่ามากขึ้นเมื่อดินทรายมีความหนาแน่นมากขึ้น ในทางตรงกันข้ามเสาเข็มเอียงแบบ Positive จะมีค่าความสามารถในการต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างน้อยกว่าเสาเข็มในแนวตั้ง และจะมีค่าลดลงมากเมื่อดินทรายมีความหนาแน่นมากขึ้นและความสามารถในการต้านทานแรงทางด้านข้างของเสาเข็มเอียงจะมีค่าแตกต่างกันมากเมื่อดินทรายมีความแน่นขึ้น

Zhang , Mc. Vay และ Lai (1999) ได้ใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม FLPIER วิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงกระทำทางด้านข้างของเสาเข็มเดี่ยว และเสาเข็มกลุ่ม ของฐานรากสะพานแขวน ซึ่งมีลักษณะเป็นเสาเข็มในแนวตั้งในชั้นดินทรายหลวมและทรายแน่นปานกลาง พบว่าความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้าง ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง และค่าโมเมนต์ดัดที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ มีความสอดคล้องใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงในสนาม

Yang และ Jeremic (2002) ได้ใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม LPILE เปรียบเทียบกับผลการทดสอบแบบจำลองของเสาเข็มในแนวตั้งในชั้นดินหลายชั้นที่รับแรงกระทำทางด้านข้าง

- 1) ดินเหนียวอ่อน (uniform soft clay) 2) ดินชั้นบนและดินชั้นล่างเป็นดินเหนียวอ่อน (soft clay) ชั้นตรงกลางเป็นทรายแน่นปานกลาง (medium dense sand) 3) ดินทรายแน่นปานกลาง (medium dense sand) 4) ชั้นบนและล่างเป็นทรายแน่นปานกลาง (medium dense sand) ชั้นตรงกลางเป็นดินเหนียวอ่อน (soft clay) พบว่า ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุด และค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองมีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ นอกจากนั้นยังพบว่า ชั้นดินที่มีความแตกต่างกันจะมีผลต่อความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างของเสาเข็ม

พงศ์วิทย์ รุ่งบรรณพันธุ์ (2003) ได้ทำการศึกษาพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ พื้นฐาน ที่เสนอโดย Smith และ Griffiths (1999) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์รับน้ำหนักของเสาเข็มเดี่ยว และเสาเข็มกลุ่ม ทั้งที่สภาวะใช้งาน (working stage) และที่สภาวะสุดขีด (ultimate stage) จากการศึกษาพบว่า 1) กรณีแบบจำลองฮิสทอลิกได้ผลใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์ 2) กรณีแบบจำลองฮิสทอลิกความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ และการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยวมีความสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านมา 3) กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่สภาวะสุดขีดมีค่าแตกต่างจากผลการทดสอบในสนามอย่างชัดเจน เนื่องจากระบบไม่สามารถจำลองพฤติกรรมการณ์เคลื่อนตัวที่ผิวรอยต่อของเสาเข็มและดิน

พัฒนศักดิ์ อบเชย (2003) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกระทำทางด้านข้างของแบบจำลองของเสาเข็มแนวตั้งและแนวเอียงในชั้นทรายที่มีความหนาแน่นหลวม (loose) และทรายที่มีความหนาแน่นมาก (dense) พบว่า 1) เสาเข็มเอียงแบบ Negative มีความสามารถรับแรงกระทำทางด้านข้าง ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง และโมเมนต์ดัดของเสาเข็มมากกว่าเสาเข็มในแนวตั้ง และเสาเข็มเอียงแบบ Positive ตามลำดับ 2) ความสามารถในการรับแรงกระทำทาง

ด้านข้างสูงสุด และค่าโมเมนต์ดัดของเสาเข็มในชั้นทรายแน่นจะมีค่ามากกว่าในชั้นทรายหลวม

3) เมื่อค่าอัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลาง (e/d) มีค่าเพิ่มขึ้น ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดจะมีค่าลดลง ในทางตรงกันข้ามค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ ค่า e/d เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับทฤษฎีของ Broms และวิธี Conventional static พบว่าในกรณีดินทรายหลวม ($D_r = 30\%$) ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด และค่าโมเมนต์สูงสุดที่คำนวณได้จากทฤษฎีจะมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดสอบ แต่กรณีดินทรายแน่น ($D_r = 70\%$) พบว่าค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีจะมีค่าแตกต่างกับผลที่ได้จากการทดสอบ โดยความต่างนั้นขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินทางด้านข้าง

Filho , Mendonca และ Paiva (2004) ได้เสนอผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเสาเข็มเดี่ยวที่รับแรงกระทำในแนวดิ่งและแนวราบ โดยการใช้วิธี Boundary Element Method (BEM) เปรียบเทียบกับผลทดสอบแบบจำลองต่างๆ เช่น 1) Kerisel และ Adam 2) Vallabhan และ Sivakumar 3) Ferro และ Venturini 4) Whitaker และ Cooke 5) Poulos และ Davis พบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขมีค่าใกล้เคียงและสอดคล้องกับผลการทดสอบแบบจำลอง

Phoon และ Kulhawy (2004) ได้ทำการรวบรวมข้อมูลผลการทดสอบแบบจำลองของเสาเข็มที่รับแรงกระทำทางด้านข้าง และผลการทดสอบจริงในสนาม เพื่อใช้เป็นข้อมูลเชิงสถิติวิเคราะห์หาค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการใช้แบบจำลอง (model test) พบว่า 1) ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (COV) มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 30% - 40% และค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนของความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้าง และโมเมนต์ดัดระหว่างแบบจำลองและผลการทดสอบในสนามจะอยู่ในช่วง 0.67 - 1.49 และความสามารถในการรับน้ำหนักแบบไฮเพอร์โบลิก (hyperbolic capacity) อยู่ในช่วง 0.98 - 2.28 2) แบบจำลองที่ทำการทดสอบแบบระบายน้ำ (drained) จะมีค่า COV สูงกว่าแบบจำลองที่ทำการทดสอบแบบไม่ระบายน้ำ (undrained) ประมาณ 40% 3) ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการวัดค่าต่างๆ คลาดเคลื่อน การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบคลาดเคลื่อน ข้อมูลที่นำมาใช้คลาดเคลื่อน และข้อจำกัดในการจำลองรูปร่างของแบบจำลอง ตลอดจนค่าพารามิเตอร์ต่างๆทางปฐพีกลศาสตร์

Cheng Fun และ Long (2005) ได้ใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม PILE 3D ศึกษาพฤติกรรมของดินเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแบบจำลองของเสาเข็มแนวดิ่งในชั้นดินทรายที่รับแรงกระทำทางด้านข้าง โดยวิธี Hansen พบว่า 1) บริเวณที่เกิดหน่วยแรงสูงสุดจะอยู่ลึกลงไป

จากผิวดินประมาณ 3 – 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม 2) ค่าสติฟเนส (EI) ของเสาเข็มที่เปลี่ยนไปไม่มีผลสำคัญต่อการเคลื่อนตัวของดิน 3) ค่าความต้านทานสูงสุดของดินที่ความลึกใดๆ มีความสัมพันธ์แบบไร้เชิงเส้นกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม ซึ่งต่างจากทฤษฎีของ Broms ที่กล่าวว่าแรงดันดินทางด้านข้างจะสมมุติให้มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นแบบเส้นตรงจากผิวดิน 4) ค่าความต้านทานสูงสุดของดินจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินด้านข้าง 5) การขยายตัวของดินมีอิทธิพลต่อแรงดันดินด้านข้างสูงสุด 6) การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม PILE 3D มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบแบบจำลอง

ชลิต อินทร์นัยกิจ และ สุรฉัตร สัมพันธ์ธำรักษ์ (2006) ได้ศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวขนาดใหญ่ภายใต้แรงกระทำด้านข้างในส่วนของการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็ม โดยใช้โปรแกรม COM624P ของ FHWA (Federal Highway Administration) ที่พัฒนาโดย Reese (1977) ทำการวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบกับผลการทดสอบเสาเข็มรับแรงด้านข้างในสนาม โดยพบว่าคุณสมบัติของดินบริเวณหัวเสาเข็มมีผลต่อการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มค่อนข้างมาก และค่า Effective Depth (ค่าความลึกที่วัดจากหัวเสาเข็มจนถึงความลึกที่มีค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างเป็นศูนย์) จะมีค่าประมาณ 6D – 8D และผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปมีค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างมากกว่าผลที่ได้จากการทดสอบในสนาม

Yang และ Liang (2006) ได้ใช้วิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลข (numerical method) ด้วยทฤษฎีคานบนฐานรากยืดหยุ่น (Beam on Elastic Foundation) เพื่อหาค่าการเคลื่อนตัวและโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็มแนวดิ่งในชั้นดินทราย 2 ชั้นที่มีความหนาแน่นที่แตกต่างกันที่รับแรงกระทำทางด้านข้าง เปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงในสนาม พบว่า 1) บริเวณที่เกิดหน่วยแรงสูงสุดจะอยู่ลึกลงไปจากผิวดินประมาณ 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม 2) ค่าสติฟเนส (E_s) ของดินที่เปลี่ยนไปมีผลสำคัญต่อการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม 3) การวิเคราะห์ด้วยวิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลข (numerical method) มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบจริงในสนาม

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

3.1 การเตรียมข้อมูลสำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

สิ่งที่สำคัญของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ การจำลองชิ้นส่วน เพื่อให้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแทนคุณสมบัติ รูปแบบของโครงสร้างเสาเข็ม โครงสร้างดิน พฤติกรรมของดิน รูปแบบของแรงกระทำภายนอก และพฤติกรรมการรับแรงของเสาเข็มภายใต้การศึกษาได้อย่างแท้จริง ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นค่าที่ได้จากการศึกษาพฤติกรรมของแบบจำลองของเสาเข็มในชั้นทรายที่รับแรงกระทำทางด้านข้างของ พัฒนศักดิ์ อบเชย (2003)

ตารางที่ 3.1

สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากการทดสอบแบบจำลองของ พัฒนศักดิ์ อบเชย (2003)

ค่าพารามิเตอร์	ทรายหลวม	ทรายแน่น	เสาเข็มจำลอง	หน่วย
Type of material behaviour	Drained	Drained	Elastic	-
หน่วยน้ำหนักแห้ง , γ_d	14.5	16.2	-	kN/m ³
โมดูลัสยืดหยุ่น , E	3,200 – 8,400	5,400 – 25,000	19E+06	kN/m ²
ค่าความเค้นเฉือน , c	0	0	-	kN/m ²
มุมเสียดทานภายในของทราย , ϕ'	41.71	43.85	-	[°]
มุมเสียดทานภายในของทรายที่				
บริเวณผิวอะลูมิเนียม , δ_{al}	36.80	37.51	-	[°]
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเสาเข็ม	-	-	16.2	mm.
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเสาเข็ม	-	-	15.0	mm.
ระยะฝังเสาเข็มในทราย(L/d = 30)	-	-	486	mm.
อัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลาง (e/d)	-	-	0 , 4 , 8	-

3.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของดินในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

3.2.1 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative Density, % D_r)

ในงานวิจัยนี้ใช้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดินทรายเท่ากับร้อยละ 30 และ 70 โดยเป็นค่าความหนาแน่นหลวม (loose) และความหนาแน่นมาก (dense) ซึ่งได้จากการทดสอบหาค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของทรายแห้ง ของ พัฒนศักดิ์ อบเชย (2003)

ตารางที่ 3.2

แสดงค่าความหนาแน่นตามค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่กำหนด (พัฒนศักดิ์ อบเชย, 2003)

ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (% D_r)	ค่าความหนาแน่น (g/cm^3)
30	1.45
70	1.62

จากค่าความหนาแน่นที่กำหนดสามารถหาหน่วยน้ำหนักแห้งของดินทราย (Dry unit weight, γ_d)

$$\gamma_d = \rho_d g \quad (3.1)$$

เมื่อ ρ_d = ค่าความหนาแน่น
 g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีค่าเท่ากับ 10 m/s^2

และเมื่อแทนค่าความหนาแน่นของดินทราย ในสมการที่ 3.1 จะได้หน่วยน้ำหนักแห้งของดินทรายหลวม (loose sand) และทรายแน่น (dense sand) มีค่าเท่ากับ 14.5 kN/m^3 และ 16.2 kN/m^3 ตามลำดับ

3.2.2 หน่วยน้ำหนักแห้ง (Dry unit weight, γ_d)

เป็นอัตราส่วนของน้ำหนักทั้งหมดของดินแห้ง (W_s) ต่อปริมาตรทั้งหมด (V)

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{\gamma_{wet}}{1 + w} \quad (3.2)$$

เมื่อ W_s = น้ำหนักของเม็ดดิน
 V = ปริมาตรทั้งหมด
 w = ปริมาณความชื้น

ดินทรายที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นดินทรายแห้ง ซึ่งมีปริมาณความชื้นเท่ากับศูนย์ เมื่อแทนค่าปริมาณความชื้นในสมการที่ 3.2 จะทำให้หน่วยน้ำหนักแห้ง (Dry unit weight, γ_d) มีค่าเท่ากับหน่วยน้ำหนักเปียก (Wet unit weight, γ_{wet})

3.2.3 ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific gravity of solid particle, G_s)

มีความสำคัญในการคำนวณ ค่าคงตัว (Parameter) ต่างๆ จากความสัมพันธ์องค์ประกอบของดิน ความถ่วงจำเพาะเป็นค่าเฉพาะของเม็ดดินเท่านั้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน $G_s = 2.65$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการศึกษาพฤติกรรมของแบบจำลองของเสาเข็มในชั้นทรายที่รับแรงกระทำทางด้านข้าง ของ พัฒนศักดิ์ ออบเชย (2003)

$$G_s = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} \quad (3.3)$$

เมื่อ W_s = น้ำหนักของเม็ดดิน
 V_s = ปริมาตรของเม็ดดิน
 γ_w = หน่วยน้ำหนักของน้ำ

ดินทราย (Sand) เป็นดินมีขนาดใหญ่ จะมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ $G_s \approx 2.65$

ดินเหนียว (Clay) เป็นดินเม็ดละเอียด จะมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ $G_s \approx 2.75$

3.2.4 อัตราช่องว่าง (Void ratio, e)

อัตราส่วนช่องว่างเป็นตัวบอกรวมถึงคุณสมบัติของดิน ซึ่งลักษณะความแตกต่างของอัตราช่องว่าง (Void ratio) ของโครงสร้างดินขึ้นอยู่กับรูปแบบการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน เช่น การเรียงตัวของดินในสภาพหลวมก็จะมีอัตราช่องว่างมาก และสภาพแน่นจะมีอัตราช่องว่างน้อย ซึ่งทรายในธรรมชาติจะมีอัตราช่องว่างระหว่าง 0.25 – 1.25 สำหรับการวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะกรณีดินทรายแห้ง ซึ่งเมื่อแทนค่าความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักของดินทรายในสมการที่ 3.4 จะได้อัตราส่วนช่องว่างของดินทรายที่มีความหนาแน่นหลวม (Loose) และทรายที่มีความหนาแน่นมาก (Dense) เท่ากับ 1.137 และ 1.018 ตามลำดับ

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{G_s \gamma_{wet}}{\gamma_{dry}} - 1 \quad (3.4)$$

เมื่อ V_v = ปริมาตรของช่องว่างในเนื้อดิน
 V_s = ปริมาตรของเม็ดดิน

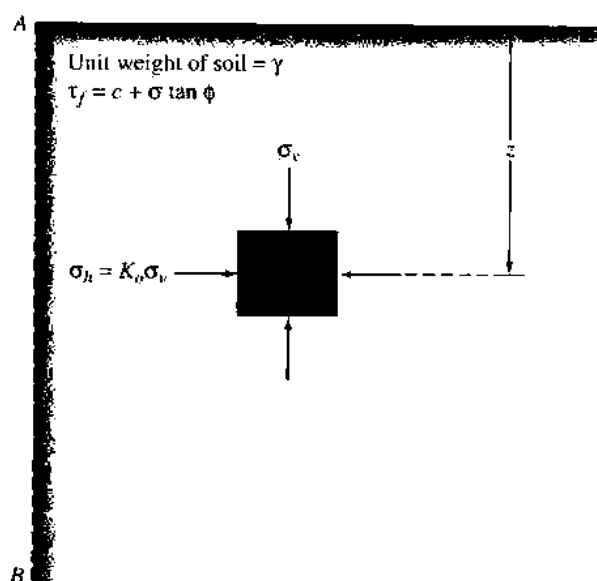
3.2.5 ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างสถิตย (Coefficient of Earth Pressure at Rest)

เมื่อพิจารณามวลดินดังแสดงในภาพที่ 3.5 มวลดินนี้ถูกกั้นด้วยกำแพง AB ที่มีความยาวไม่จำกัดมวลดิน ณ ความลึก z จะถูกกระทำด้วยหน่วยแรงในแนวดิ่ง (σ_v) และหน่วยแรงในแนวราบ (σ_h) สำหรับกรณีนี้พิจารณาเฉพาะกรณีที่หน่วยแรงในแนวดิ่ง และหน่วยแรงในแนวราบเป็นทั้งหน่วยแรงรวมและหน่วยแรงประสิทธิผล และไม่มีแรงเฉือนทั้งในแนวดิ่งและแนวราบ

ถ้าผนัง AB อยู่นิ่งหรือไม่มีการเคลื่อนที่ไปทางซ้ายหรือทางขวา ดินจะอยู่ในสภาวะอิลาสติก ซึ่งหมายถึงความเครียดตามแนวราบมีค่าเท่ากับศูนย์ อัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงในแนวราบต่อแนวดิ่ง เรียกว่า สัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างของดิน ณ สภาวะอยู่กับที่ (K_0)

$$K_o = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \quad (3.5)$$

เมื่อ σ'_h = หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ (Minor Principal Effective Stress)
 σ'_v = หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Major Principal Effective Stress)



ภาพที่ 3.1 แสดงหน่วยแรงของดิน ณ สภาวะอยู่กับที่

JAKY (1944) ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างของดิน ณ สภาวะอยู่กับที่ สำหรับดินทรายพิจารณาเป็นแบบ Effective stress เนื่องจากระดับน้ำอยู่บริเวณนี้และสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปของมุมเสียดทานภายในของดินทราย ดังนี้

$$K_o = 1 - \sin \phi' \quad (3.6)$$

เมื่อ ϕ' = มุมเสียดทานภายในของดินทราย (Friction angle) แบบ Effective stress

3.2.5 อัตราส่วนปัวซองของดินทราย (Poisson' ratio, ν)

อัตราส่วนของหน่วยการยืดหดตัวทางด้านข้างกับแนวแรงต่อหน่วยการยืดตัวทางยาว ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสมการที่ 3.7 หน่วยแรงในแนวดิ่งที่เกิดจากน้ำหนักดินกดทับจะเป็นหน่วยแรงหลักที่มากที่สุด (Major Principal Stress) ส่วนในแนวราบไม่มีหน่วยแรงกระทำทางด้านข้าง ($\sigma'_h = 0$) ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์คุณสมบัติของ stress deformation ของดินในรูปของโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, E_s) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson' ratio, ν) ดังนี้

$$E_s = \frac{\sigma'_v}{\epsilon_v} \quad (3.7)$$

$$\nu = \frac{\epsilon_h}{\epsilon_v} \quad (3.8)$$

เมื่อ σ'_v = หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง (Major Principal Effective Stress)
 ϵ_v = ความเครียดตั้งฉากตามแนวดิ่ง
 ϵ_h = ความเครียดตั้งฉากตามแนวราบ

ซึ่งสมมติให้ไม่มีการยืดหดตัวในแนวราบ เรียกว่า constrained condition ดังนั้นอัตราส่วน $\frac{\sigma'_v}{\epsilon_v}$ ในกรณีนี้เรียกว่า constrained modulus , M ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่น และ constrained modulus ดังนี้

$$M = \frac{\sigma'_v}{\epsilon_v} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3.9)$$

เมื่อ M = constrained modulus
 ν = อัตราส่วนปัวซอง

เมื่อพิจารณาเงื่อนไขจากสมการข้างต้น จะได้ว่า $\sigma_h = 0$ และ $\sigma_v > 0$ ซึ่งพิจารณาเป็น plane strain condition ดังนั้น

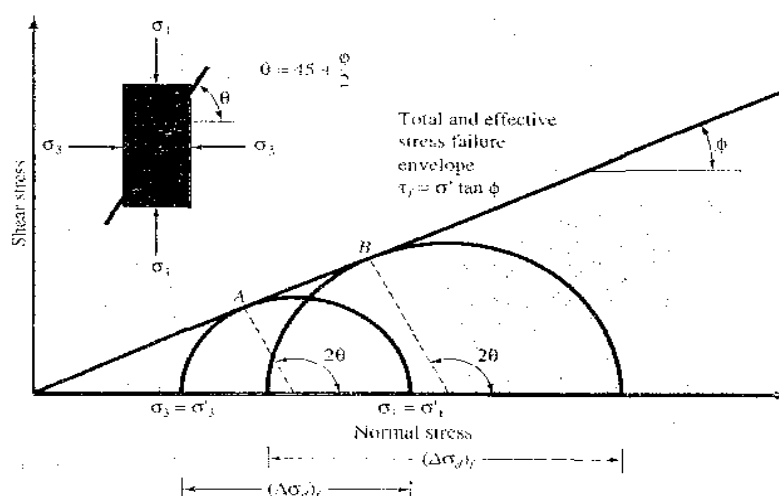
$$K_o = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} = \frac{\nu}{(1-\nu)} \quad (3.10)$$

ซึ่งสามารถหาค่า K_o ได้จากสมการที่ 3.6 และเมื่อแทนค่า K_o ในสมการที่ 3.10 จะได้ อัตราส่วนปัวซอง (Poisson' ratio, ν) ที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับดินทรายหลวม (loose sand) และทรายแน่น (dense sand) มีค่าเท่ากับ 0.25 และ 0.23 ตามลำดับ

3.2.6 ค่ามุมเสียดทานภายในของทราย (Friction of angle, ϕ')

ดินทราย(Sand) ค่ากำลังรับแรงเฉือน จะขึ้นอยู่กับแร่ประกอบของเม็ดดิน ขนาด รูปร่าง ลักษณะพื้นผิวและขนาดคละของมวลดิน แต่น้ำในมวลดินไม่มีผล จากการทดสอบพบว่า ทรายแห้งและทรายอิ่มตัว จะให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงว่า ในขณะที่ทำการทดสอบในดินทราย น้ำสามารถระบายออกได้อย่างอิสระ (ปิยะณัฐ แสงจันทร์, 2003)

ค่ามุมเสียดทานภายในของดินทราย (ϕ') ที่ได้จากการทดสอบ Direct Shear Test จะขึ้นอยู่กับค่า Interlocking ของอนุภาคและแรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวของอนุภาคเมื่อได้รับแรงตั้งฉาก ดังแสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของทราย

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ค่ามุมเสียดทานภายในของดินทราย (ϕ') และค่ามุมเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างทรายกับผิวเสาเข็มอะลูมิเนียม (δ_{al}) ที่ได้จากการศึกษาพฤติกรรมของแบบจำลองของเสาเข็มในชั้นทรายที่รับแรงกระทำทางด้านข้าง ของ พัฒนศักดิ์ อบเชย (2003) ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3

แสดงค่ามุมเสียดทานภายใน และค่ามุมเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างทรายกับผิวเสาเข็มอะลูมิเนียม

ความหนาแน่นของทราย	มุมเสียดทานภายในของ ทราย , ϕ'	มุมเสียดทานที่ผิวระหว่างทรายกับผิว อะลูมิเนียม , δ_{al}
ทรายหลวม (loose sand)	41.71°	36.80°
ทรายแน่น (dense sand)	43.85°	37.51°

บริเวณผิวรอยต่อระหว่างเสาเข็มและดินทราย (Pile soil interface) เป็นส่วนที่สำคัญอีกประการหนึ่งในการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็ม ซึ่งโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Plaxis Version 8.2) กำหนดให้ใช้ค่าพารามิเตอร์ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทานภายในบริเวณผิวรอยต่อ ดังนี้

$$\tan \delta_{al \text{ interface}} = R_{inter} \tan \phi'_{soil} \quad (3.11)$$

$$c_{inter} = R_{inter} c_{soil} \quad (3.12)$$

เมื่อ R_{inter} = Strength reduction factor inter , $R_{inter} < 1.0$
 c_{soil} = ความเชื่อมแน่นของดินทราย = 0

สำหรับบริเวณผิวรอยต่อที่มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับทรายหรือเป็นเนื้อเดียวกัน ค่า $R_{inter} = 1.0$

เมื่อแทนค่ามุมเสียดทานภายในที่แสดงในตารางที่ 3.3 ลงในสมการที่ 3.11 จะได้ค่า R_{inter} ที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับทรายหลวม (loose sand) และทรายแน่น (dense sand) มีค่าเท่ากับ 0.839 และ 0.799 ตามลำดับ

3.2.9 ค่ามุม Dilatancy, (Ψ)

สำหรับดินทรายหวมและทรายแน่น ซึ่งโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Plaxis Version 8.2) กำหนดให้

$$\text{มุม Dilatancy, } (\Psi) = \phi' - 30^\circ \quad (3.13)$$

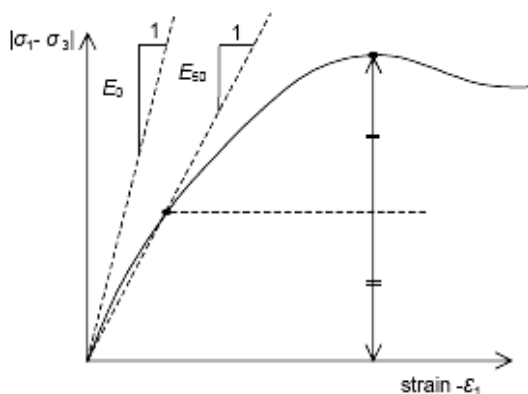
กรณีมุมเสียดทานภายในของทราย (ϕ') มีค่าน้อยกว่า 30° มุม Dilatancy, (Ψ) จะมีค่าเท่ากับ 0

3.3 การพิจารณาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินที่เหมาะสม สำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การประเมินค่าโมดูลัส สำหรับดินทราย จะคำนวณจากผลการทดสอบแรงเฉือนในช่วงครึ่งของหน่วยแรงเค้นสูงสุด (Ultimate) เช่น โมดูลัสซีแคนต์ (Secant Modulus, $E_{50\%}$) ซึ่งสามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นได้จากกราฟหน่วยแรงเค้น – ความเครียด (Stress – Strain) จากการทดสอบตัวอย่างดิน เนื่องจากถ้าจะนำค่าโมดูลัสจากเส้นสัมผัสเริ่มต้น (Initial Tangent Modulus) จะทำให้ได้ค่าหน่วยแรงเค้นน้อยกว่าความเป็นจริง แต่ถ้านำค่าหน่วยแรงเค้นสูงสุด (Ultimate) หน่วยแรงเค้นที่ได้ก็มากกว่าความเป็นจริง อีกทั้งตัวอย่างดินที่พิจารณาอยู่ในช่วงอีลาสติก จึงถือหาค่าโมดูลัสซีแคนต์ (Secant Modulus, $E_{50\%}$) เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดคือมีลักษณะเป็น Linear ดังแสดงในภาพที่ 3.3

$$E_s = \frac{\sigma_{50\%}}{\varepsilon} \quad (3.14)$$

เมื่อ $\sigma_{50\%}$ = หน่วยแรงเค้นที่ห้าสิบเปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเค้น – ความเครียด (Stress – Strain)

เนื่องจากค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน (Modulus of Soil, E_s) เป็นค่าพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ อีกทั้งยังเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับหน่วยแรงเค้นและหน่วยแรงเฉือนของดิน ในสมการที่ 3.15

$$\tau = c + \sigma' \tan \phi' \quad (3.15)$$

เมื่อ

τ = หน่วยแรงเฉือนของดิน แบบ Effective stress

C = หน่วยแรงเชื่อมแน่นของดิน (Cohesion) กรณีทราย $c = 0$

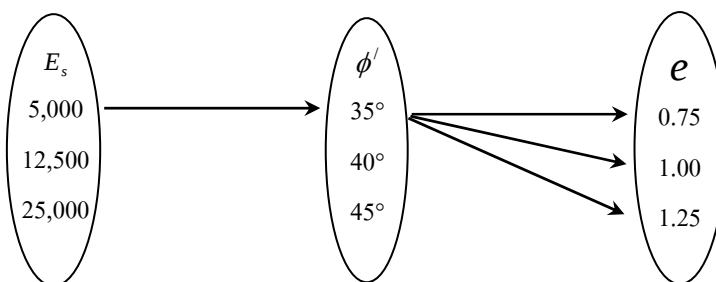
ϕ' = มุมเสียดทานภายในของดินทราย (Friction angle) แบบ Effective stress

เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่แสดง ในสมการที่ 3.15 อาทิเช่น ค่ามุมเสียดทานภายในของทราย (Friction of angle, ϕ') ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน (Modulus of Soil, E_s) เป็นพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กัน เมื่อค่าพารามิเตอร์ตัวใดมีการเปลี่ยนแปลงอาจจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับแรงกระทำทางข้างของดินด้วย ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้พิจารณาถึงความอ่อนไหวของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ เพื่อใช้เป็นข้อควรระวังในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งพารามิเตอร์ที่พิจารณา ประกอบด้วย ค่ามุมเสียดทานภายในของทราย (Friction of angle, ϕ') ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน (Modulus of Soil, E_s) และอัตราช่องว่าง (Void ratio, e) ทำการทดสอบกับแบบจำลองกรณีเสาเข็มแนวตั้ง (Vertical pile) มีแรงแนวราบกระทำที่ระยะ $e/d = 0$ โดยการเพิ่มแรงกระทำไปเรื่อยๆ จนกระทั่งดินพิบัติ และเพื่อให้ครอบคลุมข้อมูลค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของ พัฒนศักดิ์ อบเชย จึงกำหนดข้อมูลที่จะพิจารณา ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ของดินทรายที่พิจารณา

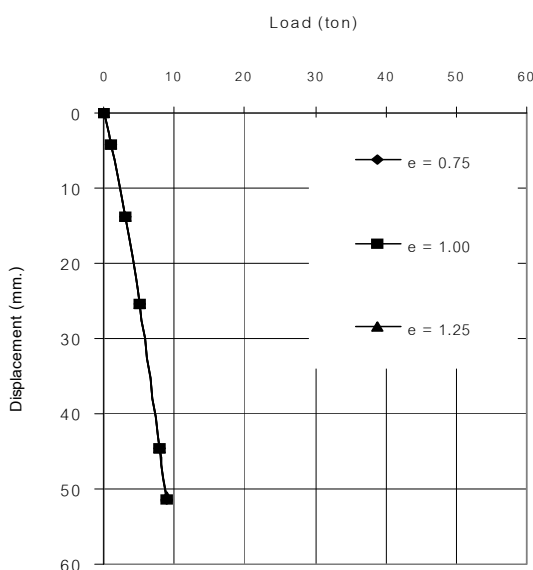
Modulus of Soil, E_s (kPa)	Friction of angle, ϕ' (degree)	Void ratio, e
5,000	35°	0.75
12,500	40°	1.00
25,000	45°	1.25

ค่าพารามิเตอร์ของดินทราย จากตารางที่ 3.4 อาทิเช่น ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน (Modulus of Soil, E_s) ค่ามุมเสียดทานภายในของทราย (Friction of angle, ϕ') และอัตราช่องว่าง (Void ratio, e) จะเป็นข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละ model ที่ทำการทดสอบ ทั้งนี้ ได้แสดงตัวอย่างวิธีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแต่ละ model ไว้ในภาพที่ 3.4



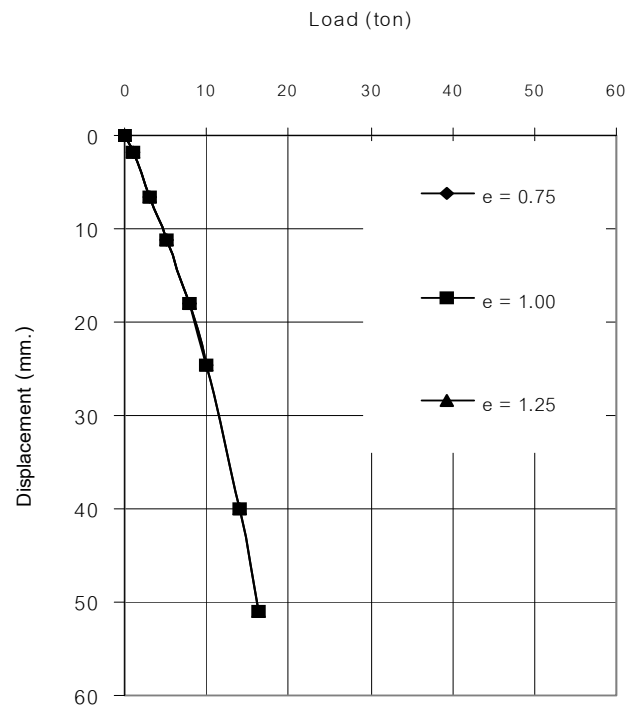
ภาพที่ 3.4 แสดงการกำหนดค่าพารามิเตอร์กรณี ค่า E_s และค่า ϕ' คงที่ ค่า e เปลี่ยนแปลง

จากภาพที่ 3.4 แสดงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองกรณี ค่า $E_s = 5,000$ kPa ค่า $\phi' = 35^\circ$ โดย varies ค่า Void ratio, e ตั้งแต่ [0.75, 1.00, 1.25] จะได้แบบจำลองกรณีนี้จำนวน 3 model และในทำนองเดียวกันสำหรับการจับคู่ลำดับของพารามิเตอร์ในลำดับถัดไปจนครบทุกค่าพารามิเตอร์ จะได้แบบจำลองรวมทั้งหมด จำนวน 27 model ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็ม กรณีเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน (Modulus of Soil, E_s) เปลี่ยนแปลงค่ามุมเสียดทานภายในของทราย (Friction of angle, ϕ') และเปลี่ยนแปลงอัตราช่องว่าง (Void ratio, e) ดังแสดงในภาพที่ 3.5 ถึง 3.13



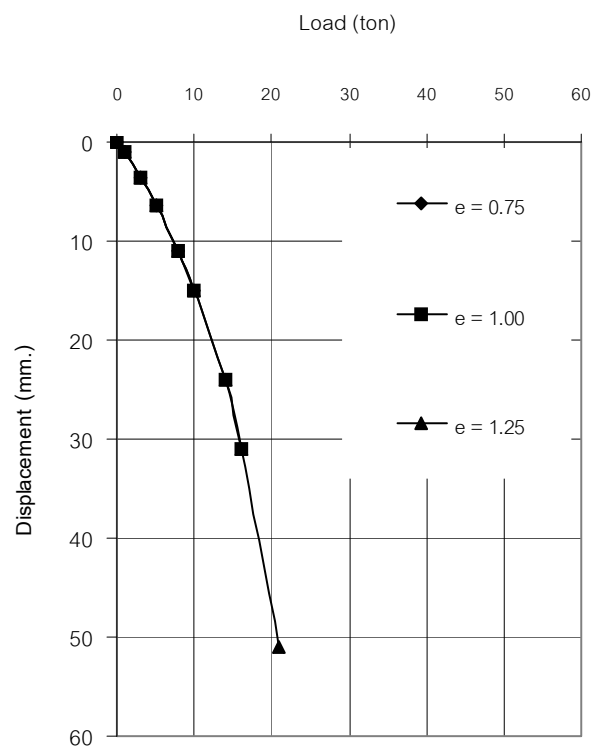
ภาพที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็ม

$\phi' = 35^\circ$ $E_s = 5,000$ kPa และ varies ค่า e



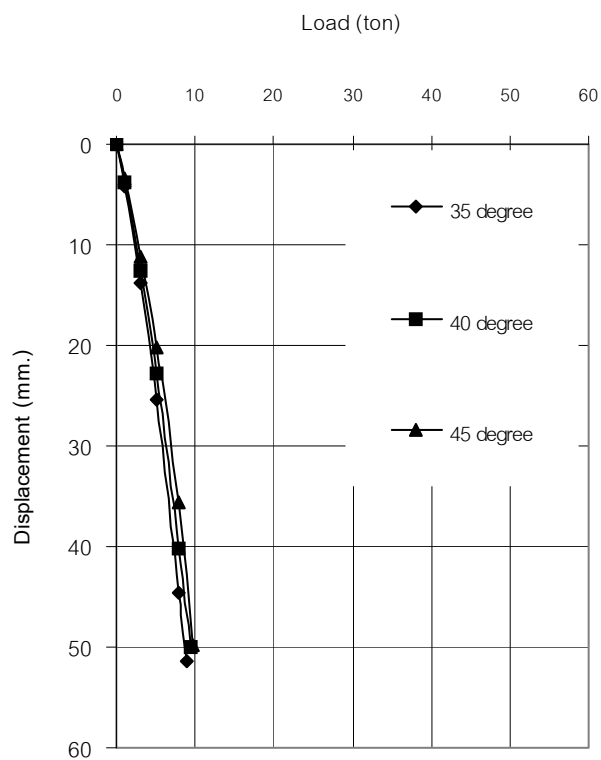
ภาพที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็ม

$\phi' = 40^\circ$ $E_s = 12,500$ kPa และ varies ค่า e



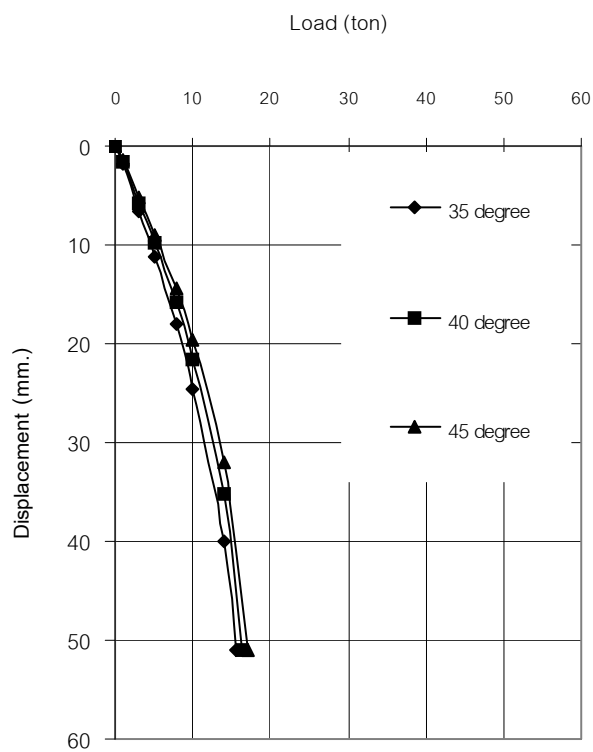
ภาพที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็ม

$\phi' = 45^\circ$ $E_s = 25,000$ kPa และ varies ค่า e



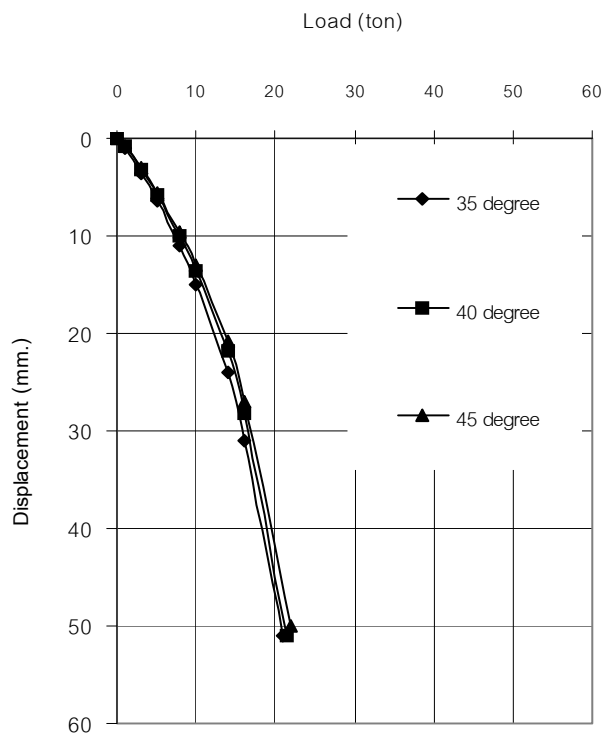
ภาพที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็ม

$E_s = 5,000 \text{ kPa}$ $e = 0.75$ และ varies ค่า ϕ'



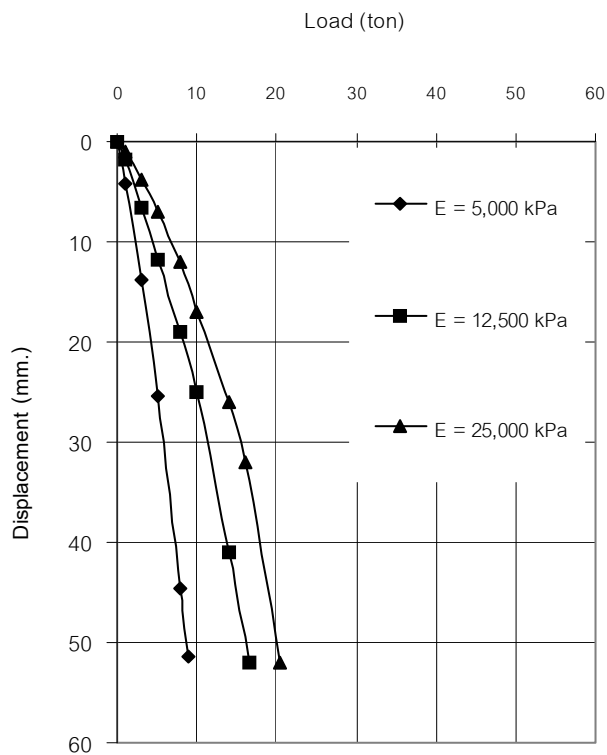
ภาพที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็ม

$E_s = 12,500 \text{ kPa}$ $e = 1.00$ และ varies ค่า ϕ'



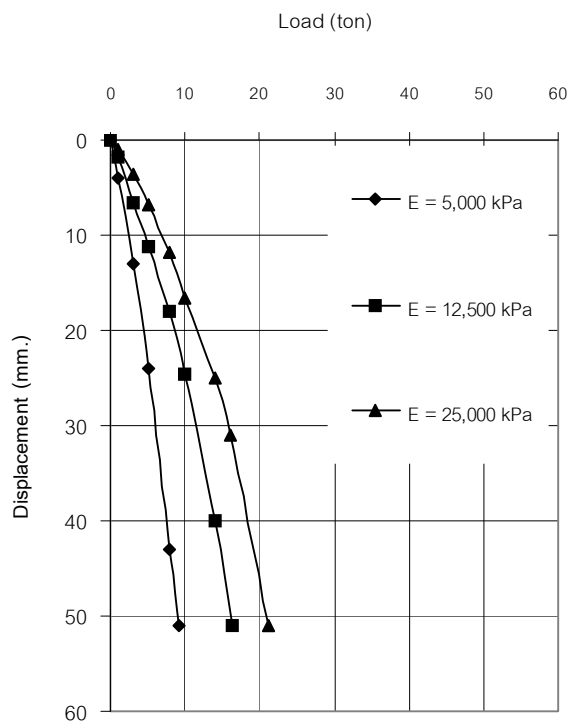
ภาพที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็ม

$E_s = 25,000 \text{ kPa}$ $e = 1.25$ และ varies ค่า ϕ'



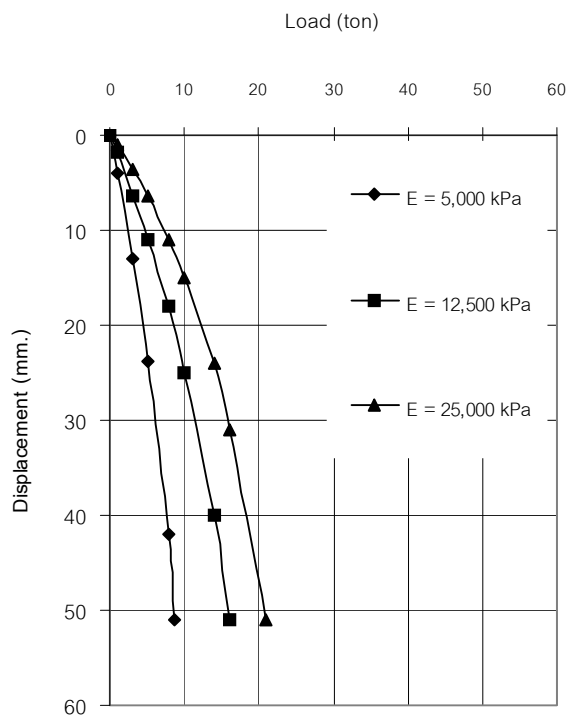
ภาพที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็ม

$\phi' = 35^\circ$ $e = 0.75$ และ varies ค่า E_s



ภาพที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็ม

$\phi' = 40^\circ$ $e = 1.00$ และ varies ค่า E_s

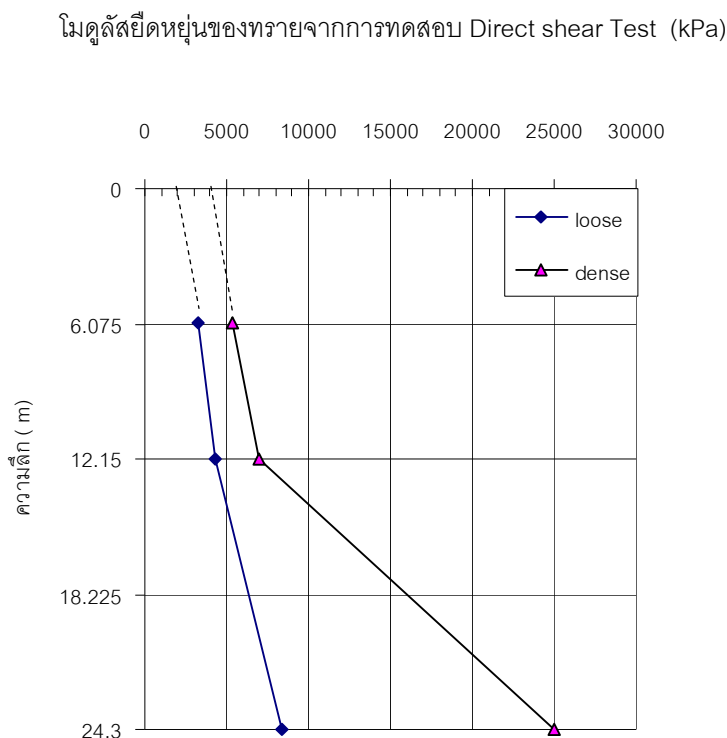


ภาพที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็ม

$\phi' = 45^\circ$ $e = 1.25$ และ varies ค่า E_s

จากภาพที่ 3.5 ถึง 3.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างกับระยะการเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเข็ม สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน (Modulus of Soil, E_s) เปลี่ยนแปลงค่ามุมเสียดทานภายในของทราย (Friction of angle, ϕ') และเปลี่ยนแปลงอัตราช่องว่าง (Void ratio, e) พบว่าเมื่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน (Modulus of Soil, E_s) มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างของเสาเข็มสูงขึ้น เนื่องจากดินทรายที่มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงๆ จะสามารถต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างได้เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้เสาเข็มมีความสามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างได้มากขึ้นด้วย ส่วนกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเสียดทานภายในของทราย (Friction of angle, ϕ') ให้สูงขึ้น จะส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างของเสาเข็มจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราช่องว่าง (Void ratio, e) ไม่มีผลต่อความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างของเสาเข็ม

ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ค่าพารามิเตอร์ที่ผู้วิจัยให้ความสนใจเป็นพิเศษคือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน (Modulus of Soil, E_s) และสำหรับการวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูลค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน (Modulus of Soil, E_s) จากผลการทดสอบความต้านทานแรงเฉือนของทรายโดยวิธีแรงเฉือนตรงในห้องปฏิบัติการของ พัฒนศักดิ์ อบเชย (2003) แสดงผลได้ดังภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 แสดงค่าโมดูลัสของทรายจากการทดสอบ Direct shear Test ของ พัฒนศักดิ์ อบเชย

3.3.1 การพิจารณาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดิน สำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากภาพที่ 3.14 แสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของทรายหลวมและทรายแน่น ที่ระดับความลึกจากผิวดิน เท่ากับ 6.075 , 12.15 และ 24.3 เมตร พบว่าทรายหลวมและทรายแน่น มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Soil, E_s) เพิ่มขึ้นแบบเป็นเส้นตรงตลอดความลึกของทราย แต่เมื่อพิจารณาถึงการนำไปใช้งานในทางปฏิบัติพบว่าข้อมูลค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Soil, E_s) ส่วนใหญ่จะใช้เป็นค่าเฉลี่ยเท่ากันตลอดความลึก ดังแสดงในสมการที่ 3.16

$$E_{S_{avg}} = \frac{(E_{s_1} L_1 + E_{s_2} L_2 + E_{s_3} L_3 + \dots + E_n L_n)}{(L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n)} \quad (3.16)$$

เมื่อ

$E_{S_{avg}}$ = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยของดินทุกชั้น (Modulus of Soil, E_s)

E_{s_n} = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยของดินแต่ละชั้น

L_n = ความหนาของดินแต่ละชั้น

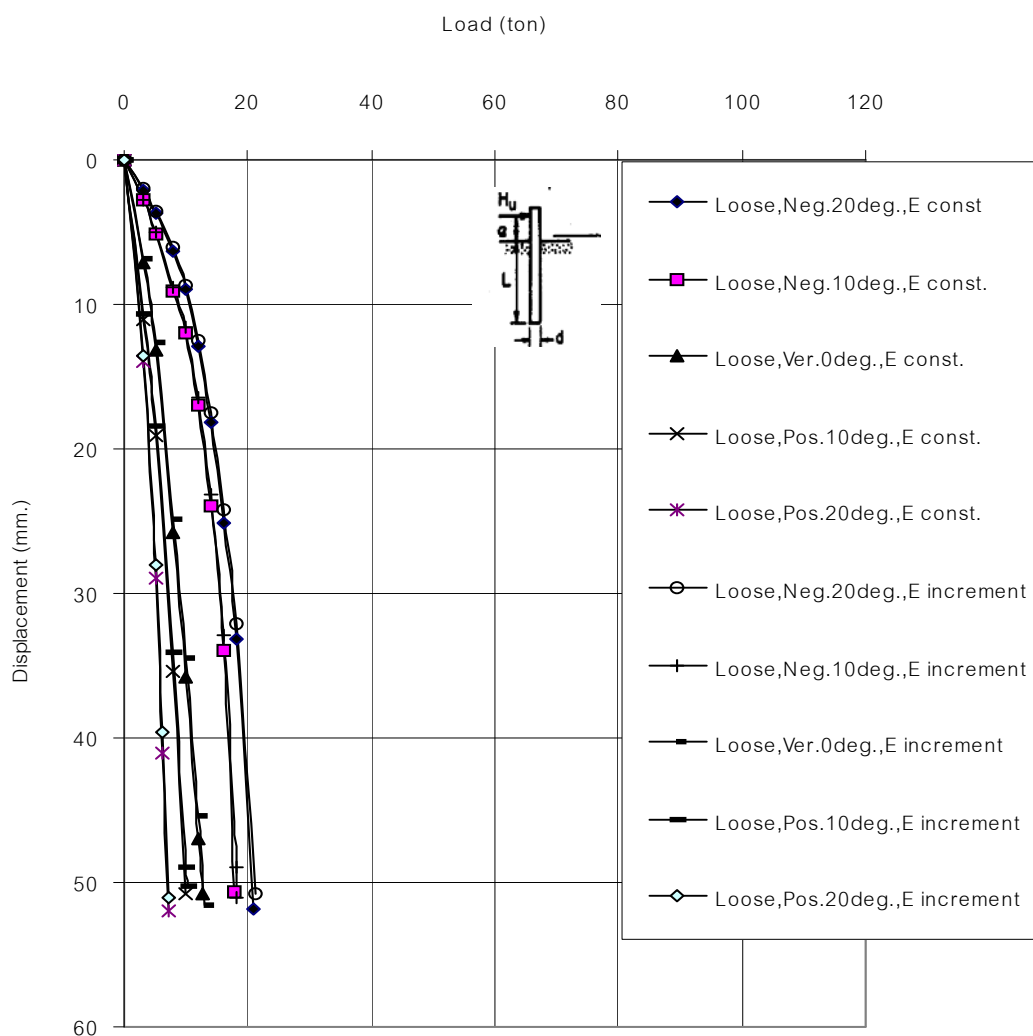
ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้กำหนดแนวทางการพิจารณาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของทรายในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ออกเป็น 2 แนวทาง คือ 1) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของทรายในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ มีค่าเพิ่มขึ้นแบบเป็นเส้นตรงตลอดความลึกของทราย 2) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของทรายในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ มีค่าเฉลี่ยคงที่ตลอดความลึก ซึ่งสรุปได้ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5

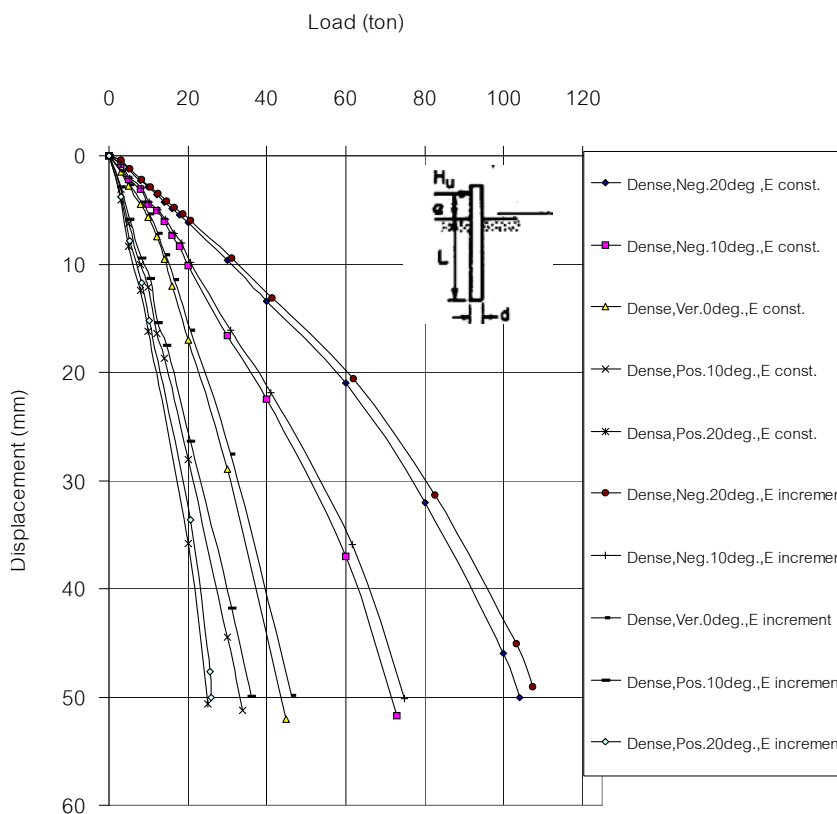
ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของทรายในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

กรณีที่1 : ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึก		กรณีที่2 : ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเฉลี่ยคงที่	
ทรายหลวม	ทรายแน่น	ทรายหลวม	ทรายแน่น
$E_0 = 2,100 \text{ kPa}$	$E_0 = 3,800 \text{ kPa}$	$E_{S_{avg}} = 4,775 \text{ kPa}$	$E_{S_{avg}} = 10,700 \text{ kPa}$
$E_{increment1} = 181 \text{ kPa/m}$	$E_{increment1} = 263 \text{ kPa/m}$		
$E_{increment2} = 337 \text{ kPa/m}$	$E_{increment2} = 1,481 \text{ kPa/m}$		

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์โมดูลัสยืดหยุ่นของทรายทั้งสองกรณี มาสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาเข็มในชั้นทราย ที่มีแรงกระทำทางด้านข้าง มีอัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (e/d) เท่ากับ 0 สำหรับเสาเข็มเอียงแบบ Negative ที่ทำมุม -10° , -20° กับแนวดิ่ง เสาเข็มดิ่ง และเสาเข็มเอียงแบบ Positive ที่ทำมุม $+10^\circ$, $+20^\circ$ กับแนวดิ่ง เมื่อมีแรงทางด้านข้างกระทำ เสาเข็มจะเกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างและการเคลื่อนตัวของเสาเข็มของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินทรายมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึก เปรียบเทียบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของทรายมีค่าเฉลี่ยคงที่ ดังแสดงในภาพที่ 3.15 และ 3.16



ภาพที่ 3.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม (ทรายหลวม)
เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลอง กรณี ค่า E_s คงที่ และ ค่า E_s เพิ่มขึ้นตามความลึก



ภาพที่ 3.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม (ทรายแน่น)
เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลอง กรณี ค่า E_s คงที่ และ ค่า E_s เพิ่มขึ้นตามความลึก

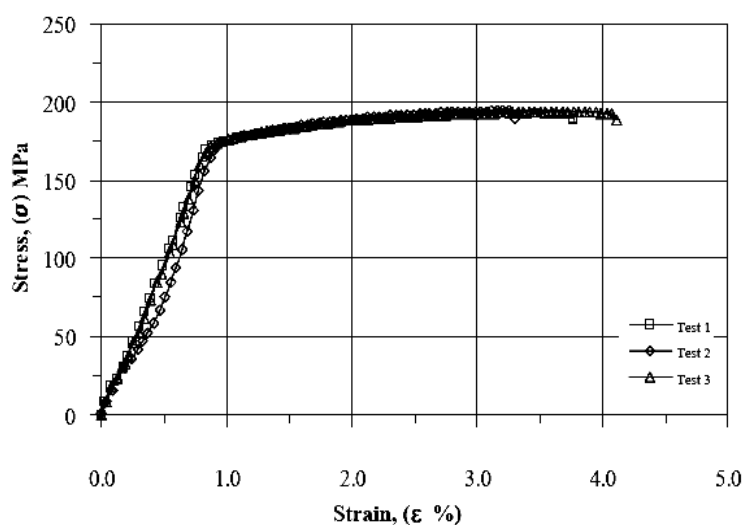
จากภาพที่ 3.15 และ 3.16 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาเข็มในดินทรายที่มีความแน่นหลวม ที่กำหนดให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของทรายมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึก มีผลใกล้เคียงกับแบบจำลองที่กำหนดให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของทรายมีค่าคงที่ตลอดความลึก ซึ่งมีความแตกต่างกันเพียง 0.75 – 1.5% ส่วนกรณีแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาเข็มในดินทรายที่มีความแน่นมาก พบว่าผลที่ได้จะมีความแตกต่างประมาณ 2 – 4% และจากผลการศึกษาของ สุรจักร สัมพันธ์รักษ์, 2006 พบว่าดินบริเวณหัวเสาเข็มที่มีความหนาประมาณ 6D – 8D จะมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนตัว และความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็ม ดังนั้นการพิจารณาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเลือกใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของทรายที่มีค่าคงที่ตลอดความลึกจึงมีความสอดคล้องกับการนำไปใช้งานในทางปฏิบัติ เนื่องจากมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 4%

3.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเสาเข็มในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

3.4.1 โมดูลัสความยืดหยุ่นของเสาเข็ม (Modulus of Pile, E_{pile})

จากการศึกษาพฤติกรรมของแบบจำลองของเสาเข็มในชั้นทรายที่รับแรงกระทำทางด้านข้างของ พัฒนศักดิ์ อบเชย (2003) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแท่งอะลูมิเนียมกลวง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 15 มิลลิเมตร หนา 0.6 มิลลิเมตร ซึ่งโดยดิ่งด้วยเครื่องยูนิเวอร์แซล (Tensile Test) สามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของอะลูมิเนียมได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 19×10^6 kPa

ดังนั้นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงกำหนดให้เสาเข็มมีพฤติกรรมในช่วงอีลาสติก และมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 19×10^6 kPa



ภาพที่ 3.17 ผลการทดสอบเสาเข็มอะลูมิเนียมด้วยแรงดึง

3.4.2 อัตราส่วนปัวซองของเสาเข็ม (Poisson' ratio, ν)

กำหนดอัตราส่วนปัวซองสำหรับเสาเข็มอะลูมิเนียมที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ มีค่าเท่ากับ 0.33

3.4.3 โมเมนต์ความเฉื่อยของเสาเข็ม (Moment of inertia)

$$I = \frac{\pi(D_o^4 - D_i^4)}{64} \quad (3.17)$$

เมื่อ D_o = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเสาเข็ม
 D_i = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเสาเข็ม

3.4.4 พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม (Section area)

$$A = \frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)}{4} \quad (3.18)$$

เมื่อ D_o = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเสาเข็ม
 D_i = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเสาเข็ม

จากค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเสาเข็ม ที่ได้จากสมการที่ 3.17 และพื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มที่ได้จากสมการที่ 3.18 สามารถหาค่า EA (Normal stiffness) และ EI (Flexural rigidity) สำหรับเสาเข็มในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 1.396×10^6 kN และ 1.064×10^5 kN.m² ตามลำดับ

ค่าพารามิเตอร์ของดินทรายและเสาเข็มที่หาได้จาก สมการที่ 3.1 ถึง สมการที่ 3.18 เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของงานวิจัยนี้ ดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

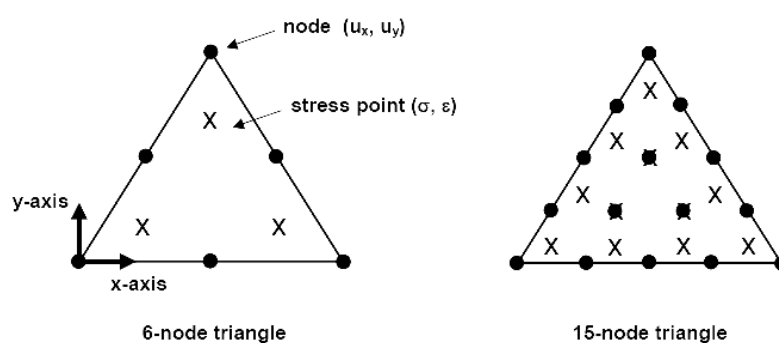
ค่าพารามิเตอร์	Name	ทรายหลวม	ทรายแน่น	เสาเข็ม	Unit
Material model	<i>Model</i>	MC	MC	Linear	-
Material behaviour	<i>Type</i>	drained	drained	undrained	-
Dry soil unit weight	γ_{dry}	14.5	16.2	-	kN/m ³
Wet soil unit weight	γ_{wet}	14.5	16.2	-	kN/m ³
Young's modulus	E_u	4,775	10,700	19E+06	kN/m ²
Poisson's ratio	ν	0.25	0.23	0.33	-
Friction angle	ϕ'	41.71°	43.85°	-	[°]
Dilatancy angle	Ψ	11.71°	13.85°	-	[°]
Cohesion	c	0	0	-	kN/m ²
Reduction factor	R_{inter}	0.839	0.799	-	-
Normal stiffness	EA	-	-	1.396E+06	kN
Flexural rigidity	EI	-	-	1.064E+05	kN.m ²

3.5 การเลือกแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เหมาะสม

3.5.1 การเลือกโครงข่ายในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Mesh generation)

การเลือกใช้ชนิดของโครงข่าย จะต้องเลือกชนิดให้เหมาะสมกับลักษณะของโครงสร้างที่ทำการวิเคราะห์ โดยจะต้องมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุด โปรแกรมที่ใช้เน้นการวิเคราะห์ปัญหาทางปฐพีกลศาสตร์ โดยการสร้างแบบจำลองโมเดลของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ที่ต่อเนื่องกัน โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Plaxis 8.2) ซึ่งเป็นโปรแกรม

ประยุกต์ใช้สำหรับงานโครงสร้างดินหลายชั้น สามารถป้อนพารามิเตอร์ที่เป็นลงไปได้หลายรูปแบบแล้วแต่ความต้องการของผู้ใช้ และการสร้างแบบจำลองให้ใกล้เคียงกับรูปแบบจริงมาก สามารถแบ่งชั้นดินออกเป็นหลายส่วนส่งผลให้ความละเอียดที่ได้สูง ซึ่งในการวิจัยนี้จะพิจารณาปัญหาเป็นแบบ 2 มิติ (Plane Strain) และจะแบ่งเอลิเมนต์เป็นแบบสามเหลี่ยม (Triangular Element) ใน 1 เอลิเมนต์ ประกอบด้วย 6 node นอกจากนี้ยังสามารถปรับความละเอียดของเอลิเมนต์ของโครงสร้าง (mesh refinement) เป็น 5 ระดับ คือ very coarse , coarse , medium , fine , very fine สำหรับการวิจัยนี้เลือกปรับขนาดชิ้นส่วนในระดับ fine



ภาพที่ 3.18 แสดงการแบ่งเอลิเมนต์เป็นรูปสามเหลี่ยม

โดยอาศัยวิธีสมมูล เราได้สมการสมมูลของแรงในเทอมของ Stiffness Matrix และการกระทำที่จุดต่อของชิ้นส่วน สมการดังกล่าวสามารถเขียนในรูปของเมทริกซ์ ได้ดังนี้

$$\{f\} = [k]\{d\} \quad (3.19)$$

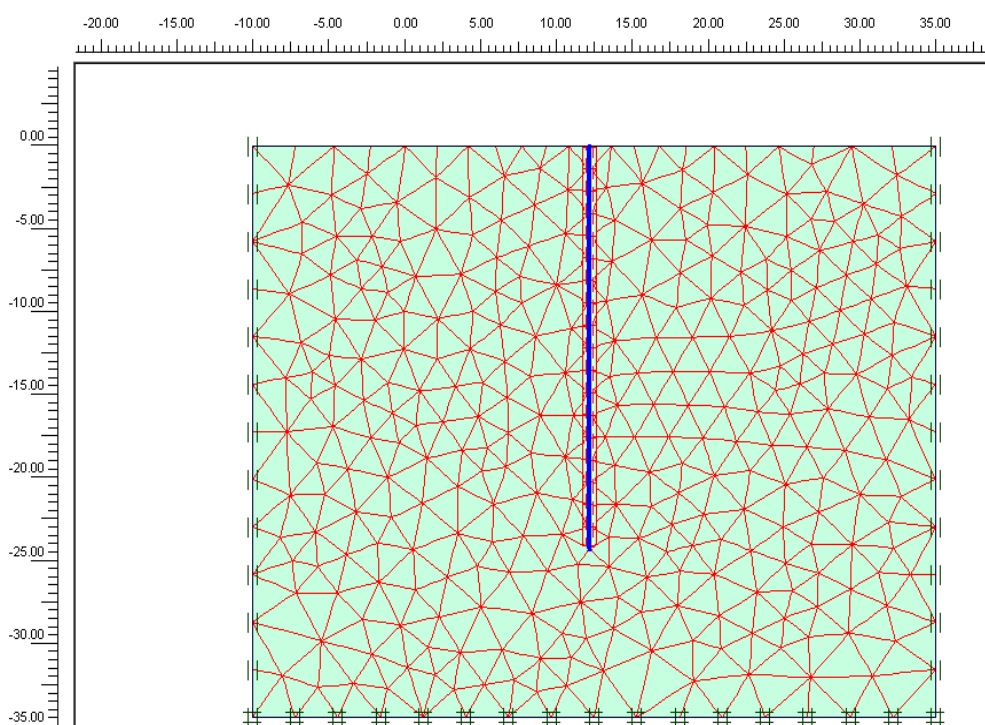
$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdot & \cdot & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdot & \cdot & k_{2n} \\ k_{31} & k_{32} & \cdot & \cdot & k_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdot & \cdot & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \end{Bmatrix}$$

เมื่อ	{f}	คือ	Matrix ของแรงกระทำที่จุดต่อ
	[k]	คือ	Stiffness matrix ของ Element
	{d}	คือ	การกระทำที่จุดต่อที่ยังไม่ทราบค่า
	n	คือ	จำนวนของระดับความเสรีของ element

3.5.2 การพิจารณาเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition)

กำหนดให้การเคลื่อนตัวของจุดต่อที่อยู่บนขอบเขตบางส่วน ถูกจำกัดในทิศทางที่กำหนด โดยพยายามจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างให้ใกล้เคียงกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ให้มากที่สุด โดยกำหนดให้จำกัดการเคลื่อนตัวที่ระนาบขอบเขตต่างๆ ดังนี้

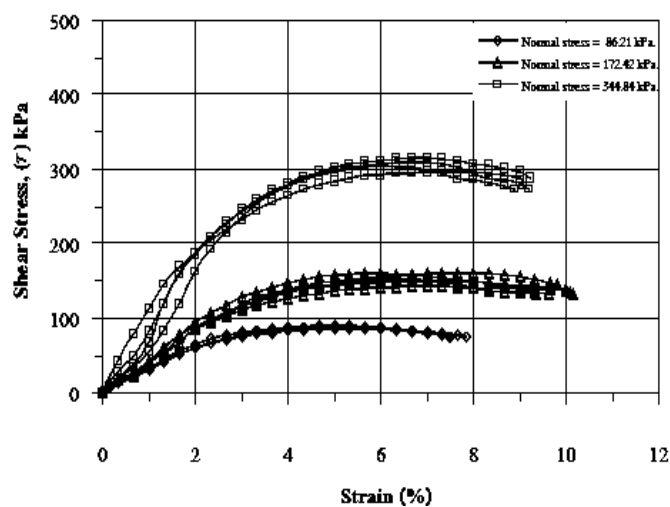
ขอบเขตด้านข้าง	เป็นแบบเคลื่อนตัวได้ในแนวดิ่ง (Roller)
ขอบเขตด้านล่าง	เป็นแบบไม่สามารถเคลื่อนตัวได้ทั้งสองแนว (Fixed)



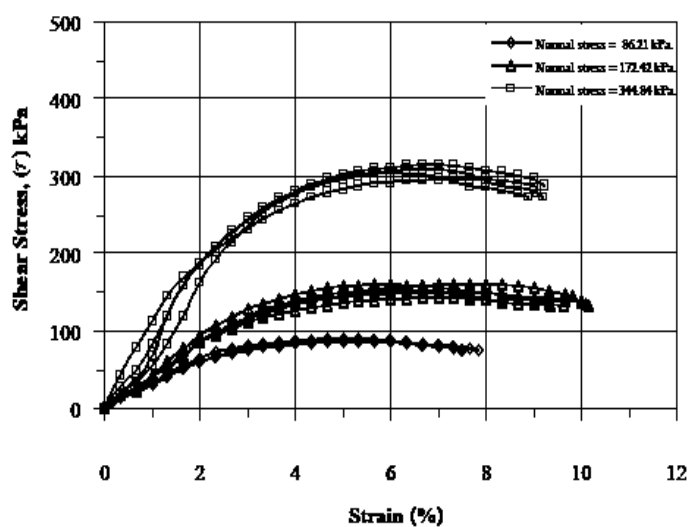
ภาพที่ 3.19 Boundary condition ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

3.5.3 การเลือกแบบจำลองพฤติกรรมของดินแบบมอร์ - คูลอมป์ (Elastic – perfectly plastic)

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Shear stress กับเปอร์เซ็นต์ Strain ที่ได้จากการทดสอบหาค่าความต้านทานแรงเฉือนของทรายโดยวิธีแรงเฉือนตรง ของ พัฒนศักดิ์ อบเชย (2003) จะเห็นว่าพฤติกรรมของดินทรายไม่เป็นแบบเชิงเส้น (Linear elastic) ดังแสดงในภาพที่ 3.20 และภาพที่ 3.21



ภาพที่ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Shear stress กับค่าร้อยละของ Strain ของดินทรายหลวม



ภาพที่ 3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Shear stress กับค่าร้อยละของ Strain ของดินทรายแน่น

ดังนั้นจึงพิจารณาเลือกแบบจำลองของดินในลักษณะ Mohr – Coulomb model เนื่องจากสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุได้ทั้งพฤติกรรมแบบเชิงเส้น หรือแบบอิลาสติก และพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น โดยกำหนดพฤติกรรมของดินเป็นแบบอิลาสติก – พลาสติกสมบูรณ์ (Elastic – perfectly plastic) ภายใต้กฎการวิบัติแบบมอร์-คูลอมบ์ โดยกำหนดให้พื้นผิวคราก (yield surface) เป็นผิวเดียวกับพื้นผิววิบัติ (failure surface) โดยแสดงพื้นผิวดังกล่าวในระบบแกนของหน่วยแรงหลัก (principle stress space) ดังแสดงในภาพที่ 3.22

$$f_{1a} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_3)\sin\phi - c \cos\phi \leq 0$$

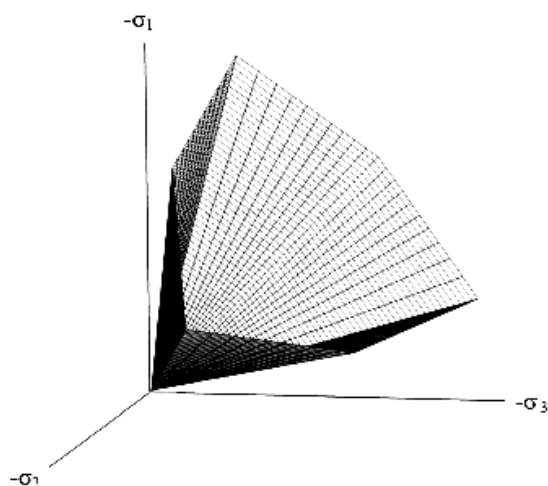
$$f_{1b} = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_2)\sin\phi - c \cos\phi \leq 0$$

$$f_{2a} = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1)\sin\phi - c \cos\phi \leq 0$$

$$f_{2b} = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3)\sin\phi - c \cos\phi \leq 0$$

$$f_{3a} = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_2)\sin\phi - c \cos\phi \leq 0$$

$$f_{3b} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_1)\sin\phi - c \cos\phi \leq 0$$



ภาพที่ 3.22 พื้นผิววิบัติในกรณีกฎการวิบัติแบบมอร์ – คูลอมป์ ($C = 0$)

3.5.4 แรงกระทำภายนอก (External Loading)

ในงานวิจัยนี้ แรงกระทำภายนอกเป็นแรงในแนวราบกระทำที่หัวเสาเข็ม โดยมีอัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์ เท่ากับ 0 , 4 , 8 และพิจารณาระยะการเคลื่อนตัวทางแนวราบ และค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็มที่เกิดขึ้น เปรียบเทียบกับผลการทดสอบการศึกษาศักยภาพพฤติกรรมของแบบจำลองของเสาเข็มในชั้นทรายที่รับแรงกระทำทางด้านข้าง ของ พัฒนศักดิ์ อบเชย (2003)

3.5.5 กฎเกณฑ์การลู่เข้า

กฎเกณฑ์การลู่เข้าจะอธิบายถึงเงื่อนไขในการสิ้นสุดของการหาคำตอบโดยวิธีแทนค่า คำนวณซ้ำ โดยทั่วไปจะมีตัวแปรที่ต่างกันอยู่สามตัวที่ใช้กฎเกณฑ์การลู่เข้า คือ ค่าการเคลื่อนตัว , แรงกระทำคงค้าง และพลังงานภายใน

ในงานวิจัยนี้จะใช้อัตราส่วนของ norm ของแรงกระทำคงค้างต่อ norm ของการเพิ่มขึ้นของแรงกระทำเป็นเกณฑ์สำหรับการสิ้นสุดของการหาคำตอบโดยวิธีการแทนค่าคำนวณซ้ำ การแก้ปัญหที่ขั้นตอนใดๆ จะเกิดการลู่เข้าถ้ามีเงื่อนไขดังนี้

$$\|R\| \leq \frac{\|P\| \times TOL}{100} \quad (3.20)$$

เมื่อ	$\ X_i\ $	=	the Euclidean norm ของเวกเตอร์ $X = \sqrt{\sum X_i^2}$
	R	=	เวกเตอร์ของแรงกระทำคงค้างทั้งหมด
	P	=	การเพิ่มขึ้นของแรงกระทำ
	TOL	=	the convergence tolerance

แรงกระทำคงค้างถูกเลือกในเกณฑ์การลู่เข้าเนื่องจากจะสามารถแทนสภาวะสมดุลล่าสุดของการแก้ปัญหา และจะคำนวณจากแรงกระทำคงค้างทั้งหมด ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดการสะสมของความผิดพลาดในการแก้ปัญหาระหว่างขั้นของแรงกระทำ เนื่องจากแรงกระทำคงค้างคำนวณจากเงื่อนไขในสภาวะสมดุลทั้งหมด ขั้นของแรงกระทำจะลู่เข้าหาผลที่ถูกต้อง

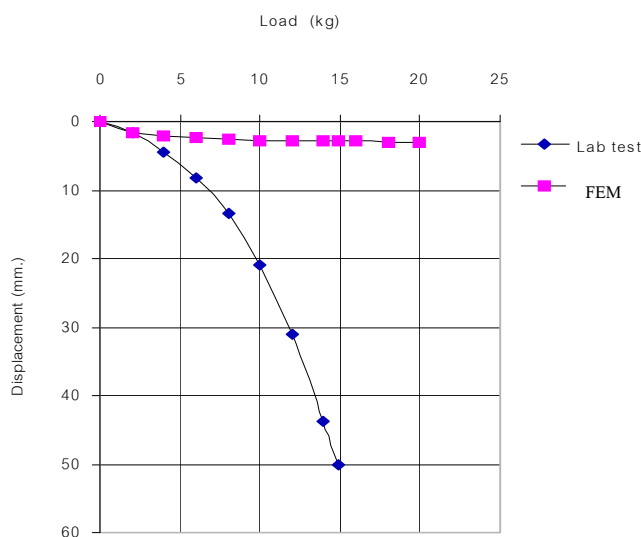
ในงานวิจัยนี้กำหนดส่วนที่ยอมให้ลู่เข้าได้ (convergence tolerance) 3% ในการวิเคราะห์เสาเข็มรับแรงกระทำทางด้านข้างในชั้นดินทราย

3.6 การทดสอบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

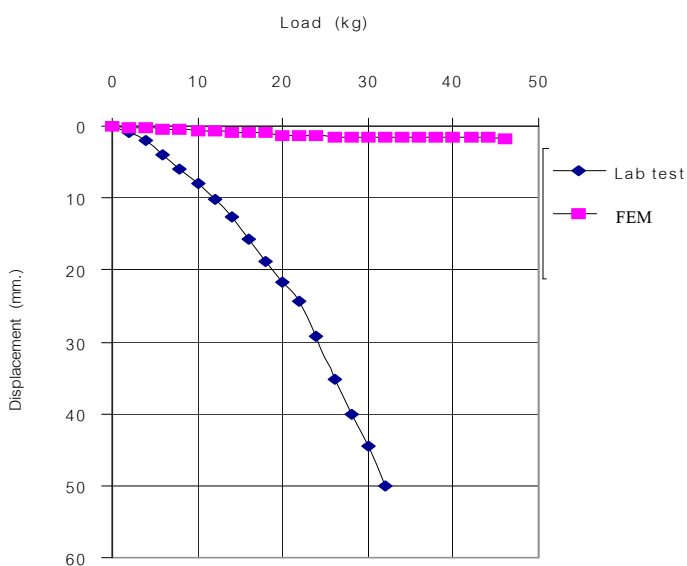
3.6.1 Model เสาเข็มจำลองจากการทดสอบ ของ พัฒนศักดิ์ อบเชย (2003)

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ คุณสมบัติ และเงื่อนไขต่างๆ จากการศึกษากิจกรรมของแบบจำลองของเสาเข็มในชั้นดินทรายที่รับแรงกระทำทางด้านข้าง ของ พัฒนศักดิ์ อบเชย (2003) มาสร้างเป็นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยให้มีทั้งขนาด และ dimension เช่นเดียวกับแบบจำลองที่ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยพิจารณากรณีเสาเข็มแนวตั้งในชั้นทรายหลวม และชั้นทรายแน่นที่รับแรงกระทำทางด้านข้าง โดยมีอัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม $e/d = 0$ ซึ่งแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ในโปรแกรม PLAXIS โดยดินทรายใช้แบบจำลอง Mohr – Coulomb model

และเสาเข็มใช้แบบจำลอง Linear elastic model กำหนดให้แรงทางด้านข้างกระทำที่หัวเสาเข็มจนกระทั่งดินบริเวณรอบเสาเข็มวิบัติ แล้วนำค่าระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่บริเวณผิวดินของเสาเข็มในทุกๆแรงกระทำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็ม ดังแสดงในภาพที่ 3.23 และ 3.24



ภาพที่ 3.23 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มแนวตั้งรับแรงด้านข้างในทรายหลวม $e/d = 0$
ระหว่าง แบบจำลอง FEM และ ผลการทดสอบ



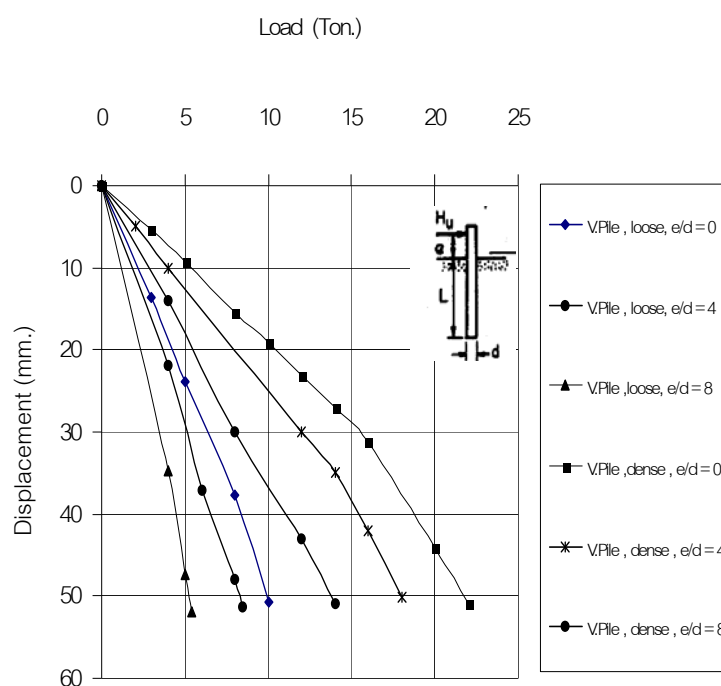
ภาพที่ 3.24 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มแนวตั้งรับแรงด้านข้างในทรายแน่น $e/d = 0$
ระหว่าง แบบจำลอง FEM และ ผลการทดสอบ

จากภาพที่ 3.23 และ 3.24 พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม PLAXIS ไม่สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ พบว่าเมื่อนำขนาดแบบจำลองย่อยลงในห้องปฏิบัติการไปสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมีค่าน้อยมาก เนื่องจากคุณสมบัติของดินและเสาเข็มที่ใช้ในแบบจำลองนั้นเป็นคุณสมบัติซึ่งเป็น scale จริง มีเฉพาะขนาดเท่านั้นที่ลดลง จึงทำให้พฤติกรรมของดินและเสาเข็มในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีการเคลื่อนตัวน้อยมาก หากจะทำการศึกษาแบบจำลองโดยการลดขนาดลง จำเป็นต้องมีการปรับค่าแรงโน้มถ่วงของโลกตามขนาดที่ลดลง ซึ่งโปรแกรม PLAXIS ไม่มีฟังก์ชันในการเปลี่ยนค่าแรงโน้มถ่วง

3.6.2 Model เสาเข็มขนาดเท่าของจริง (Full Scale Model)

เนื่องจากผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองของเสาเข็มเสาเข็มในชั้นดินทรายที่รับแรงกระทำทางด้านข้าง ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Plaxis version 8.2) ได้ผลไม่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากโปรแกรมไม่สามารถวิเคราะห์โดยการเพิ่มค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity , g (m/s^2)) ได้ ผู้วิจัยจึงได้ Model แบบจำลองให้มีขนาดเท่าของจริง (Full Scale Model) โดยดินทรายใช้แบบจำลอง Mohr – Coulomb model และเสาเข็มใช้แบบจำลอง Linear elastic model ซึ่งขอบเขตที่พิจารณาขึ้นอยู่กับขนาดของเสาเข็มโดย Feagin (1953) พบว่าขอบเขตอิทธิพล (Zone of Influence) ที่มีผลต่อการทดสอบคือ 8 ถึง 12 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มในทิศทางของแรง และ 3 ถึง 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มในแนวตั้งฉากกับแรงกระทำ และ 5 ถึง 8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มจากปลายเสาเข็ม ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงปัจจัยดังกล่าว จึงออกแบบให้แบบจำลองมีขนาดใหญ่พอที่จะหลีกเลี่ยงผลกระทบดังกล่าว ซึ่งในวิจัยนี้เลือกขอบเขตของแบบจำลอง (Boundary) มีขนาดมากกว่า 12 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มทุกทิศทาง ซึ่งดูได้จากภาพที่ 3.19 ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PLAXIS พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองในห้องปฏิบัติการซึ่งมีการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของดินทรายหลวม (loose) และทรายแน่น (dense) มีค่าเท่ากับ 50 มม. สำหรับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PLAXIS กรณีเสาเข็มแนวดิ่งในชั้นทรายหลวม (loose) และทรายแน่น (dense) ที่รับแรงกระทำทางด้านข้างโดยมีอัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม $e/d = 0,4,8$ พบว่ามีค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดในช่วงระหว่าง 50–53 มม. แสดงให้เห็นว่า

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาเข็มขนาดเท่าของจริง (Full Scale Model) มีค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดสอบ ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจากนี้จะพิจารณา Full Scale Model ในการศึกษา ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็ม ที่รับแรงกระทำทางด้านข้างโดยมีอัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม $e/d = 0, 4$ และ 8 ดังแสดง ในภาพที่ 3.25



ภาพที่ 3.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็ม
ในดินทรายหลวม (loose) และทรายแน่น (dense)

บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.1 บทนำ

บทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดสอบพฤติกรรมของเสาเข็มในชั้นดินทรายที่รับแรงกระทำทางด้านข้างโดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Full Scale Model) วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PLAXIS Version 8.2 ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด การเคลื่อนตัว และค่าโมเมนต์ดัด ของเสาเข็มเอียงแบบ Negative เสาเข็มตั้ง เสาเข็มเอียงแบบ Positive ในชั้นทรายที่มีความหนาแน่น และค่าอัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มที่แตกต่างกัน พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม PLAXIS Version 8.2 เปรียบเทียบกับผลจากทฤษฎีของ Broms และการทดสอบแบบจำลองของพัฒนศักดิ์ อบเชย (2003) ซึ่งสรุปกรณีต่างๆของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Full Scale Model) ที่จะทำการทดสอบ ได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขในการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Full Scale Model)

มุมเอียงของ เสาเข็มเทียบกับแนวตั้ง	ดินทรายความหนาแน่นหลวม (loose sand)			ดินทรายความหนาแน่นมาก (dense sand)		
	e/d = 0	e/d = 4	e/d = 8	e/d = 0	e/d = 4	e/d = 8
Positive A	+20°	-+20°	+20°	+20°	+20°	+20°
Positive B	+10°	+10°	+10°	+10°	+10°	+10°
Vertical	0°	0°	0°	0°	0°	0°
Negative C	-10°	-10°	-10°	-10°	-10°	-10°
Negative D	-20°	-20°	-20°	-20°	-20°	-20°

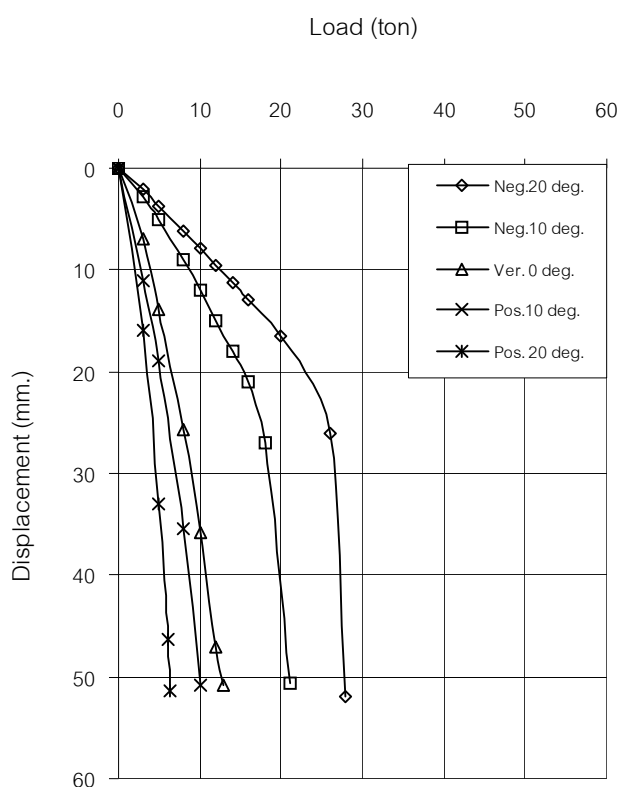
4.2 ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างและการเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเข็มด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Full Scale Model) โดยใช้โปรแกรม PLAXIS Version 8.0

ในการทดสอบพฤติกรรมของเสาเข็มในชั้นดินทรายที่รับแรงกระทำทางด้านข้างด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Full Scale Model) เป็นการให้โปรแกรม PLAXIS Version 8.2 วิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มเชิงแบบ Negative ที่ทำมุม -10° , -20° กับแนวดิ่ง เสาเข็มดิ่ง และเสาเข็มเชิงแบบ Positive ที่ทำมุม $+10^\circ$, $+20^\circ$ กับแนวดิ่ง ในชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นหลวม (Loose) เท่ากับ 1.45 g/cm^3 และค่าความหนาแน่นมาก (Dense) เท่ากับ 1.62 g/cm^3 โดยมีอัตราส่วนความยาวของเสาเข็มที่ฝังในชั้นดินทรายต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (L/d) เท่ากับ 30 และมีอัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (e/d) เท่ากับ 0, 4 และ 8 โดยก่อนทำการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Full Scale Model) ได้มีการศึกษาและพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.1 ถึง 3.6

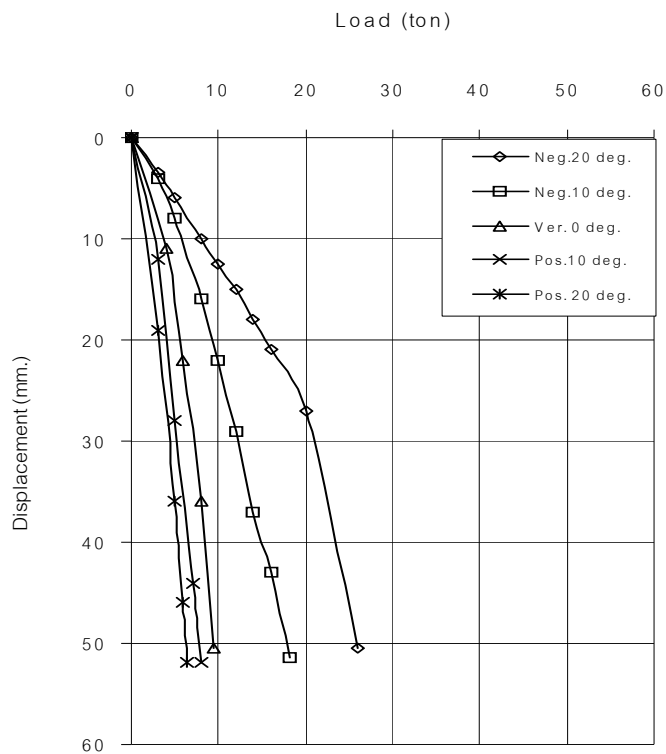
วิธีการทดสอบพฤติกรรมของเสาเข็มในชั้นดินทรายที่รับแรงกระทำทางด้านข้างด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Full Scale Model) จะทำการทดสอบโดยการเพิ่มแรงกระทำทางด้านข้างที่กระทำที่หัวเสาเข็มในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Full Scale Model) ไปเรื่อยๆจนกระทั่งดินทรายที่อยู่ด้านหน้าของเสาเข็มพิบัติ (Failure load) ซึ่งค่าแรงกระทำทางด้านข้างและระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มบริเวณผิวดิน ณ ตำแหน่งที่พิบัติ (Failure load) จะเป็นค่าแรงกระทำทางด้านข้างและระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็ม ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.1 ถึง 4.6 สำหรับผลของค่าโมเมนต์ดัดที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Full Scale Model) จะแสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.3

ภาพที่ 4.1 ถึง 4.6 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มที่เอียงทำมุมต่างๆกับแนวดิ่ง ($+20^\circ$, $+10^\circ$, 0° , -10° , -20° กับแนวดิ่ง) ในชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นหลวม (Loose) และชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นมาก (Dense) ซึ่งจากผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ PLAXIS Version 8.2 พบว่าเมื่อเริ่มต้นเพิ่มแรงกระทำทางด้านข้าง เสาเข็มจะเกิดการเคลื่อนตัวไปทางด้านข้าง โดยช่วงแรกยังมีการเคลื่อนตัวน้อย ซึ่งพิจารณาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มที่มีความชันของกราฟเพิ่มขึ้นทีละน้อย ซึ่งเมื่อเพิ่มแรงกระทำต่อไปพบว่าแรงกระทำที่เพิ่มขึ้นมีค่าน้อย แต่ระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มมีมาก จนทำให้

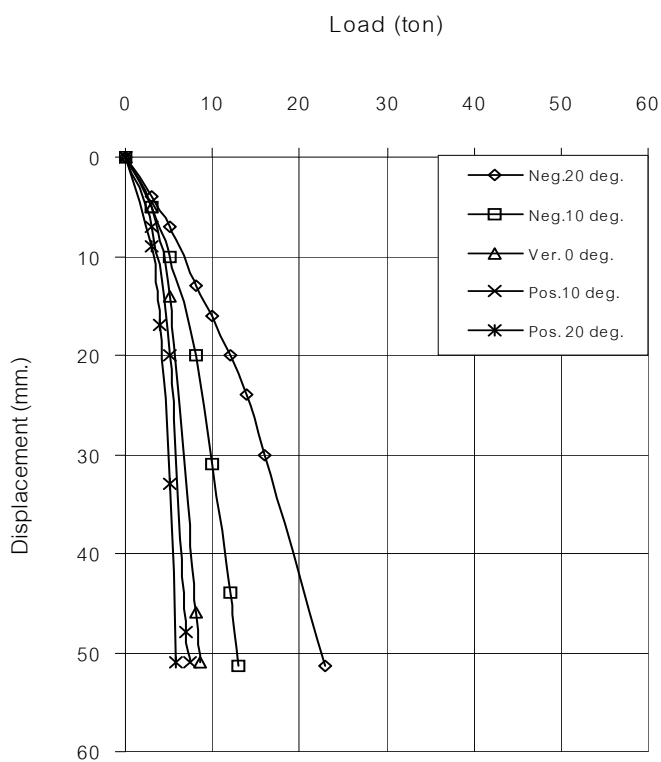
เส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มมีความชันเพิ่มขึ้น และมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเพิ่มขึ้นตามลำดับการเอียงของเสาเข็มจาก $+20^\circ$, $+10^\circ$, 0° , -10° และ -20° กับแนวดิ่ง แตกต่างกันชัดเจน แสดงว่าความเอียงของเสาเข็มมีผลต่อความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างในแต่ละมุมเอียงของเสาเข็ม



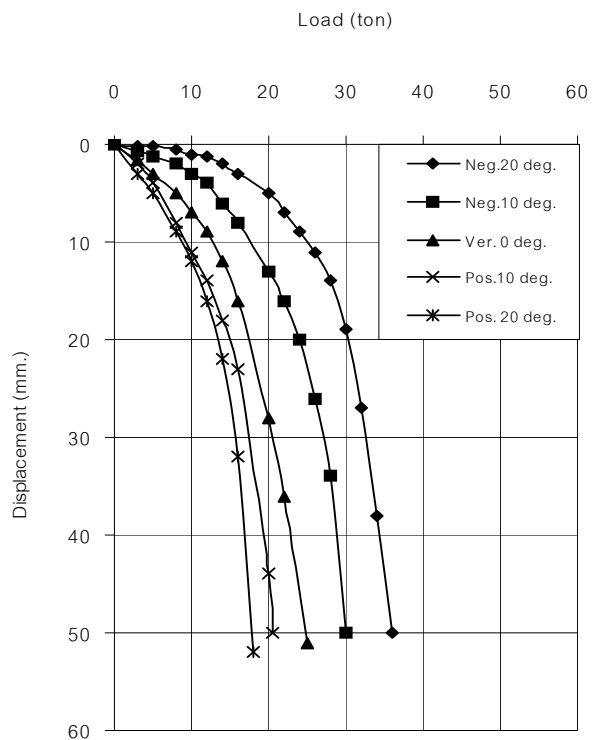
ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มที่ผิวดิน
ที่ค่า $e/d = 0$ ในชั้นทรายที่มีความหนาแน่นหลวม (Loose)



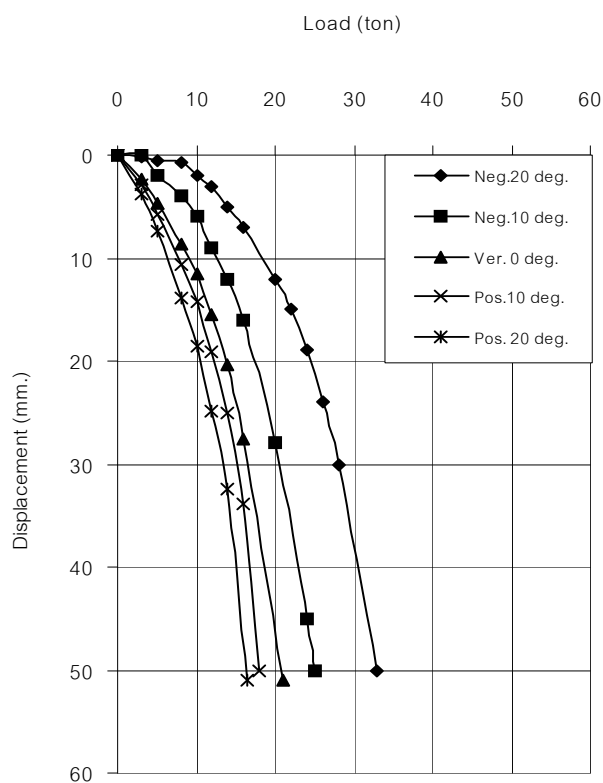
ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มที่ฝังดิน
ที่ค่า $e/d = 4$ ในชั้นทรายที่มีความหนาแน่นหลวม (Loose)



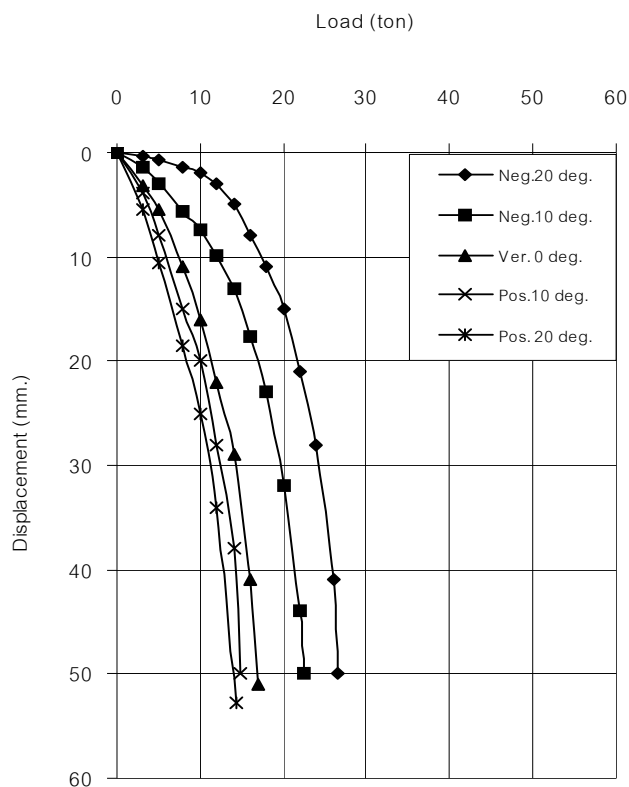
ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มที่ฝังดิน
ที่ค่า $e/d = 8$ ในชั้นทรายที่มีความหนาแน่นหลวม (Loose)



ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มที่ผิวดิน
ที่ค่า $e/d = 0$ ในชั้นทรายที่มีความหนาแน่นมาก (Dense)



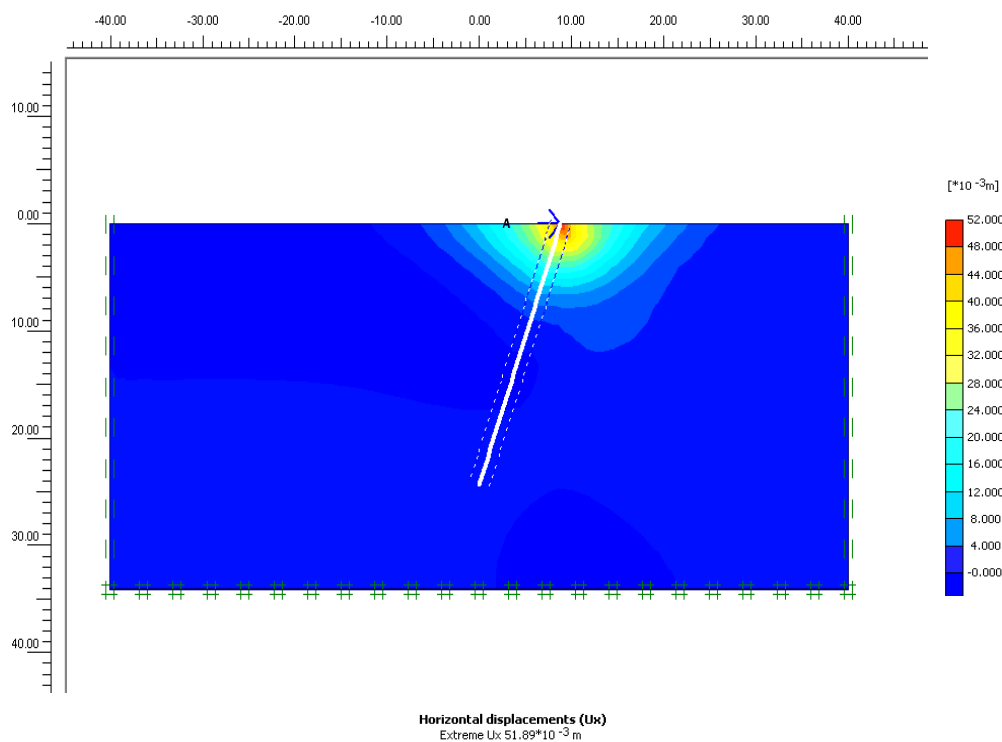
ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มที่ผิวดิน
ที่ค่า $e/d = 4$ ในชั้นทรายที่มีความหนาแน่นมาก (Dense)



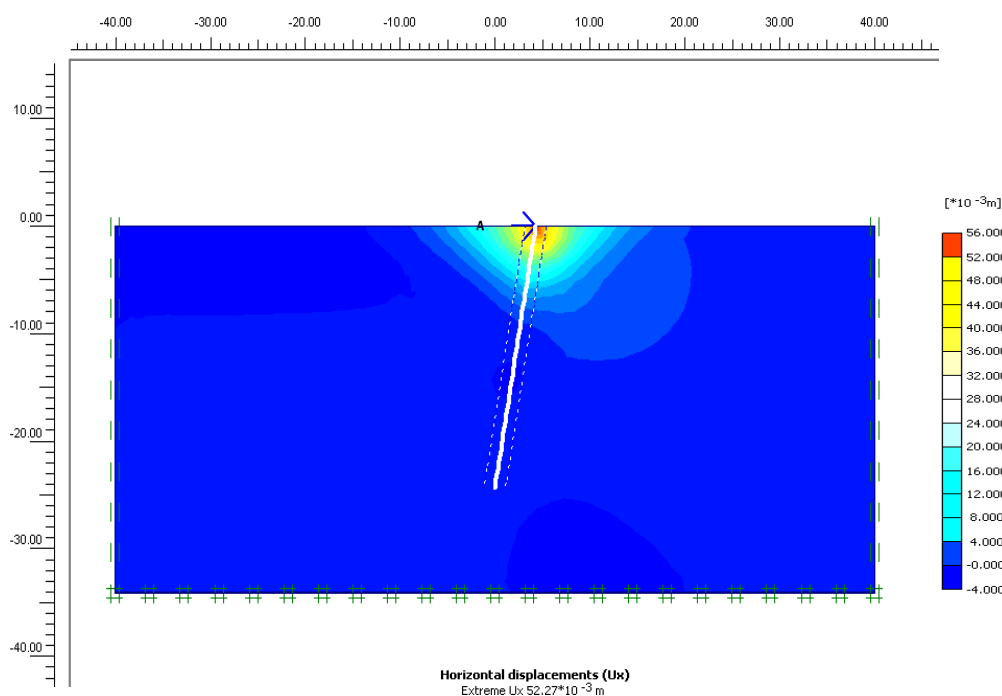
ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มที่ฝังดิน
ที่ค่า $e/d = 8$ ในชั้นทรายที่มีความหนาแน่นมาก (Dense)

4.3 การพิบัติของมวลดิน (failure mode) ที่อยู่ทางด้านหน้าของเสาเข็ม

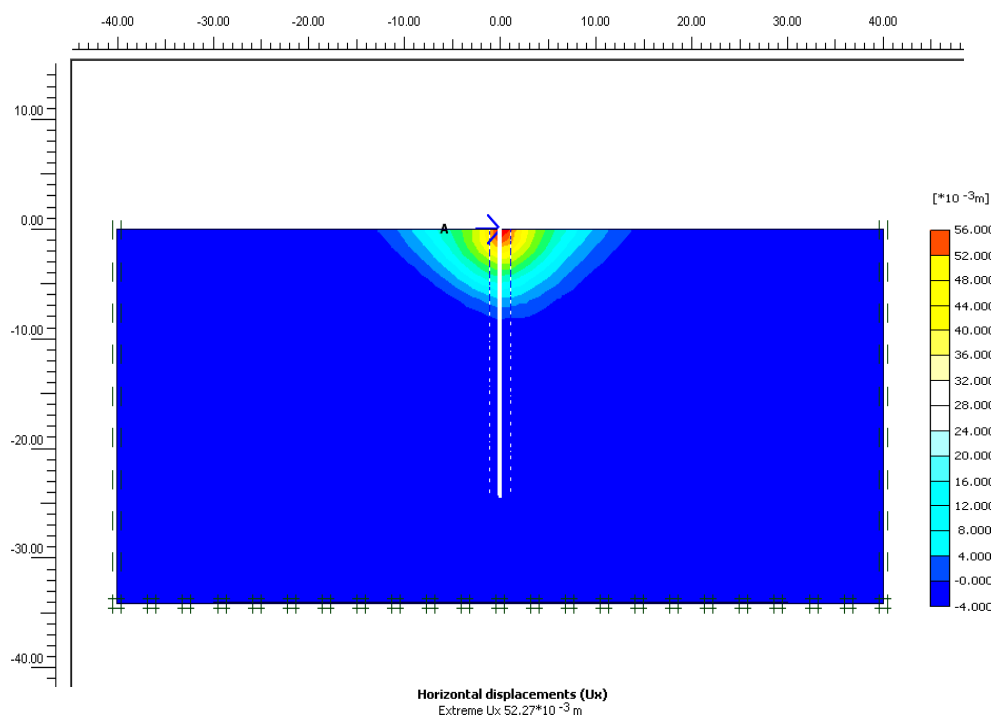
จะเห็นว่าเมื่อมีแรงทางด้านข้างกระทำต่อเสาเข็ม เสาเข็มจะเกิดการเคลื่อนตัวออกจากตำแหน่งเดิมไปในทิศทางเดียวกับแรงที่กระทำ ซึ่งความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างของเสาเข็มนั้นขึ้นอยู่กับการพัฒนากำลังรับแรงกระทำทางด้านข้างของมวลดิน (failure mode) ที่อยู่ทางด้านหน้าของเสาเข็ม ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ กรณีเสาเข็มเอียงแบบ Negative ที่ทำมุม -10° , -20° กับแนวดิ่ง เสาเข็มตั้ง และเสาเข็มเอียงแบบ Positive ที่ทำมุม $+10^\circ$, $+20^\circ$ กับแนวดิ่ง ที่มีแรงทางด้านข้างกระทำบริเวณหัวเสาเข็ม ที่ระยะ (e/d) เท่ากับ 0 จนกระทั่งมวลดินด้านหน้าเสาเข็มพิบัติ ดังแสดงในภาพที่ 4.7 ถึง 4.11



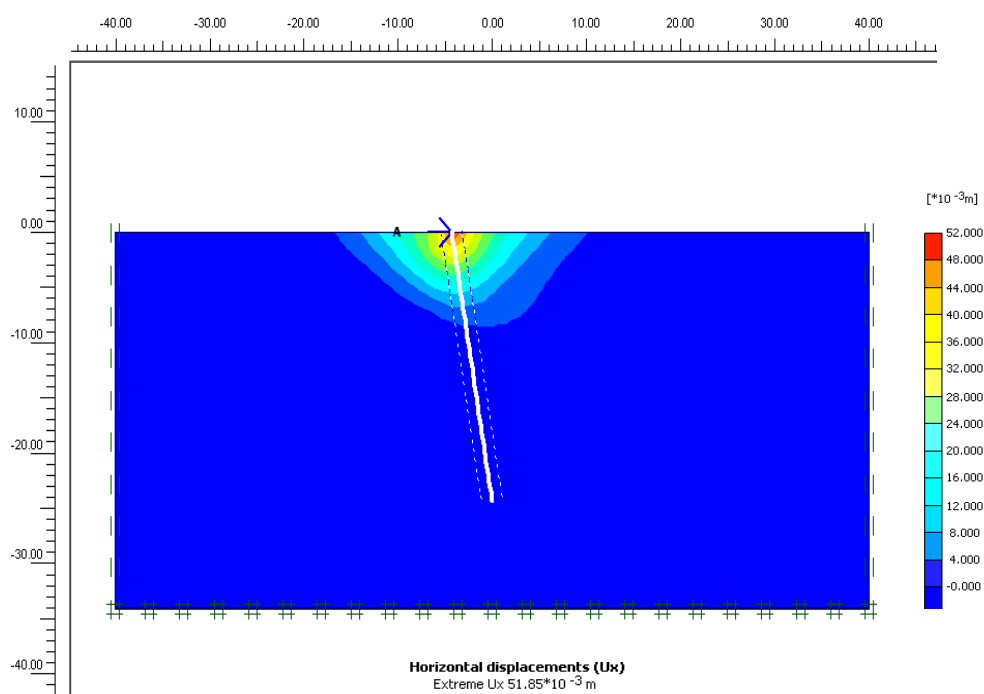
ภาพที่ 4.7 แสดงพื้นที่การบิดของมวลดินที่อยู่ด้านหน้าของ
เสาเข็มเอียงแบบ Negative ที่ทำมุม -20° กับแนวดิ่ง
ที่ค่า $e/d = 0$ ในชั้นทรายที่มีความหนาแน่นมาก (Dense)



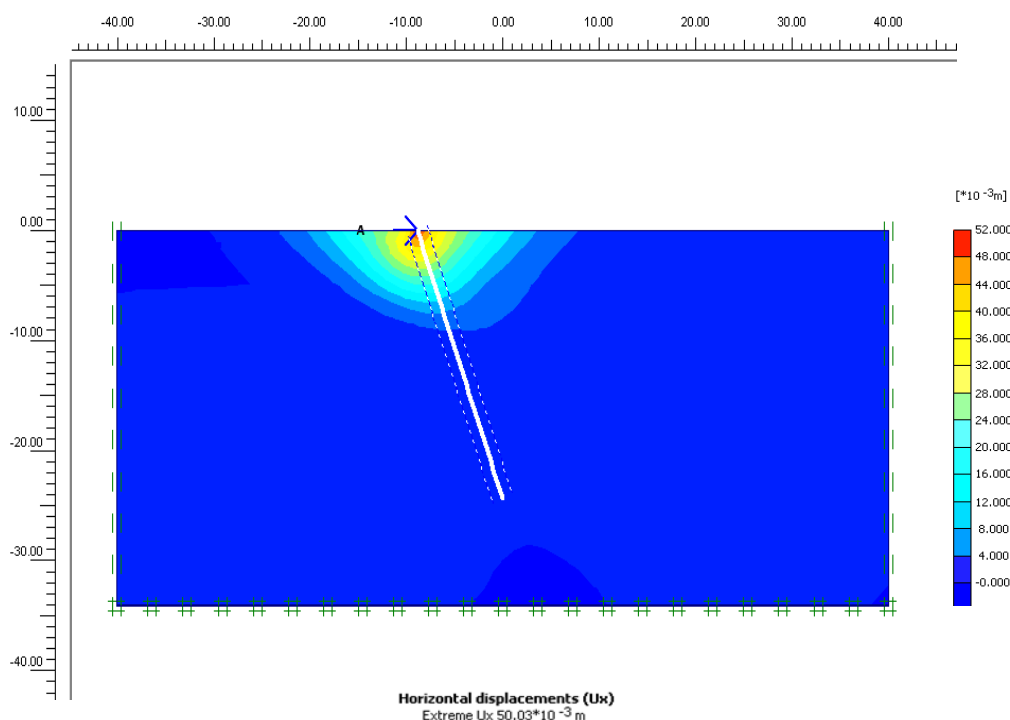
ภาพที่ 4.8 แสดงพื้นที่การบิดของมวลดินที่อยู่ด้านหน้าของ
เสาเข็มเอียงแบบ Negative ที่ทำมุม -10° กับแนวดิ่ง
ที่ค่า $e/d = 0$ ในชั้นทรายที่มีความหนาแน่นมาก (Dense)



ภาพที่ 4.9 แสดงพื้นที่การพิบัติของมวลดินที่อยู่ด้านหน้าของ
เสาเข็มVer. ทำมุม 0 องศา กับแนวดิ่ง
ที่ค่า $e/d = 0$ ในชั้นทรายที่มีความหนาแน่นมาก (Dense)

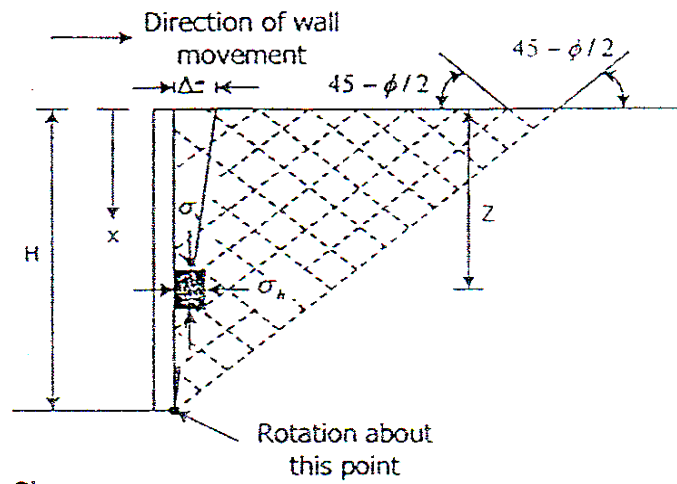


ภาพที่ 4.10 แสดงพื้นที่การพิบัติของมวลดินที่อยู่ด้านหน้าของ
เสาเข็มเอียงแบบ Positive ที่ทำมุม +10° กับแนวดิ่ง
ที่ค่า $e/d = 0$ ในชั้นทรายที่มีความหนาแน่นมาก (Dense)



ภาพที่ 4.11 แสดงพื้นที่การบีบตัวของมวลดินที่อยู่ด้านหน้าของ
เสาเข็มเอียงแบบ Positive ที่ทำมุม +20° กับแนวดิ่ง
ที่ค่า $e/d = 0$ ในชั้นทรายที่มีความหนาแน่นมาก (Dense)

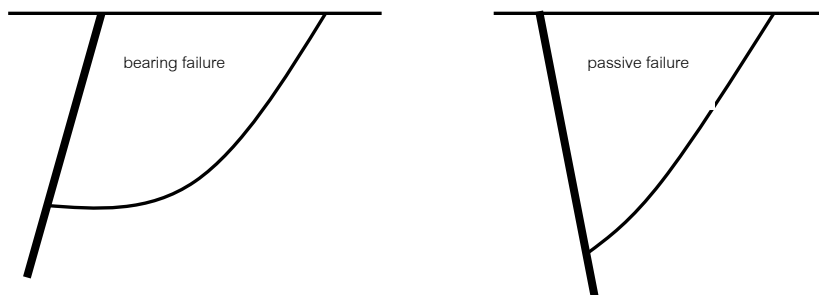
ภายใต้แรงทางด้านข้างที่กระทำที่หัวเสาเข็ม (ที่ระยะ $e/d = 0$) เสาเข็มจะเกิดการเคลื่อนตัวเข้าหามวลดินที่อยู่ด้านหน้าเสาเข็มมากขึ้นจนกระทั่งดินพิบัติ ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงการพัฒนากำลังรับแรงกระทำทางด้านข้างของมวลดิน (failure mode) และหน่วยแรงในแนวนอนที่เกิดขึ้น ตามทฤษฎีของแรงคีน (Rankine 's Theory) และ ทฤษฎีของคูลอมบ์ (Coulomb 's Wedge Theory) พบว่าลักษณะการบีบตัวของมวลดินด้านหน้าของเสาเข็มเอียงแบบ Negative เสาเข็มตั้ง และเสาเข็มเอียงแบบ Positive มีการบีบติดแสดงในภาพที่ 4.7 ถึง 4.11 และเมื่อพิจารณาถึงความสามารถแบกทานต่อแรงอัดของดินที่อยู่ทางด้านหน้าของเสาเข็ม (Bearing capacity) โดยใช้ทฤษฎีของแรงคีน (Rankine 's Theory) อธิบาย จะเห็นว่าลักษณะการเคลื่อนตัวของระนาบการบีบตัวของมวลดิน (failure plane) กรณีเสาเข็มรับแรงกระทำทางด้านข้าง ไม่ได้แตกต่างกับลักษณะที่ดินได้ฐานรากเคลื่อนตัวลงและดันดินข้างๆออกไป ดังแสดงในภาพที่ 4.13



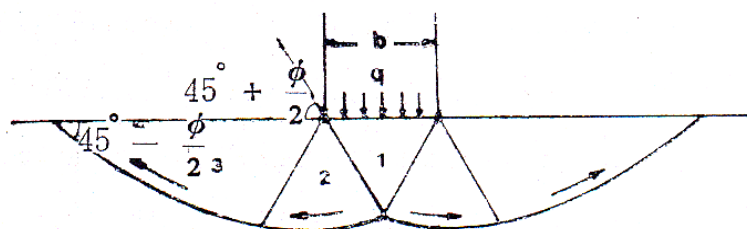
ภาพที่ 4.12 (a) Passive Rankine Pressure

มวลดินหน้าเสาเข็มเอียงแบบ negative

มวลดินหน้าเสาเข็มเอียงแบบ positive



ภาพที่ 4.12 (b) มวลดินด้านหน้าเสาเข็มเอียงแบบ Negative และ Positive



ภาพที่ 4.13 แสดงความต้านทานต่อแรงกดอัดของดิน

จากภาพที่ 4.7 ถึง 4.11 เมื่อนำมาขยายเฉพาะส่วนที่แสดงลักษณะการปับติของมวลดิน ดังแสดงในภาพที่ 4.12 (b) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเสาเข็มเอียงแบบ Negative ที่ทำมุม -10° , -20° กับแนวดิ่ง ลักษณะของการปับติของมวลดิน (failure mode) ที่อยู่ด้านหน้าของเสาเข็มจะคล้ายแบบ Bearing capacity failure จึงทำให้เสาเข็มดังกล่าวมีความสามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างได้สูงสุด ส่วนกรณีเสาเข็มตั้ง และเสาเข็มเอียงแบบ Positive ที่ทำมุม $+10^\circ$, $+20^\circ$ กับแนวดิ่ง ลักษณะของการปับติของมวลดิน (failure mode) ที่อยู่ด้านหน้าของจะมีการปับติคล้ายแบบ Passive Failure ซึ่งความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างจะมีค่าลดลงตามมุมเอียงของเสาเข็มที่เพิ่มขึ้น

และจากผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มในชั้นดินทรายที่รับแรงกระทำทางด้านข้าง ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Full Scale Model) โดยใช้โปรแกรม PLAXIS Version 8.2 ทำให้ได้ค่าแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด (Failure load) ซึ่งในลำดับถัดไปจะได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Full Scale Model) กับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีของ Broms ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 ถึง 4.3

ตารางที่ 4.2

เปรียบเทียบค่าแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม PLAXIS Version 8.2 กับค่าที่ได้จากทฤษฎีของ Broms ($P_u = 3K_p \sigma'_v$) ในชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นหลวม (Loose)

มุมเอียงเข็ม เทียบกับ แนวดิ่ง	ค่าแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด (ตัน)					
	e/d = 0		e/d = 4		e/d = 8	
	FEM	Broms	FEM	Broms	FEM	Broms
$+20^\circ$	8.50	10.22	7.00	8.62	5.80	6.54
$+10^\circ$	10.00	11.10	8.10	9.63	7.30	6.62
$+0^\circ$	12.80	13.62	9.80	11.13	8.07	7.18
-10°	17.80	18.44	12.30	15.44	9.70	10.62
-20°	21.00	24.46	18.50	21.10	15.50	18.43

ตารางที่ 4.3

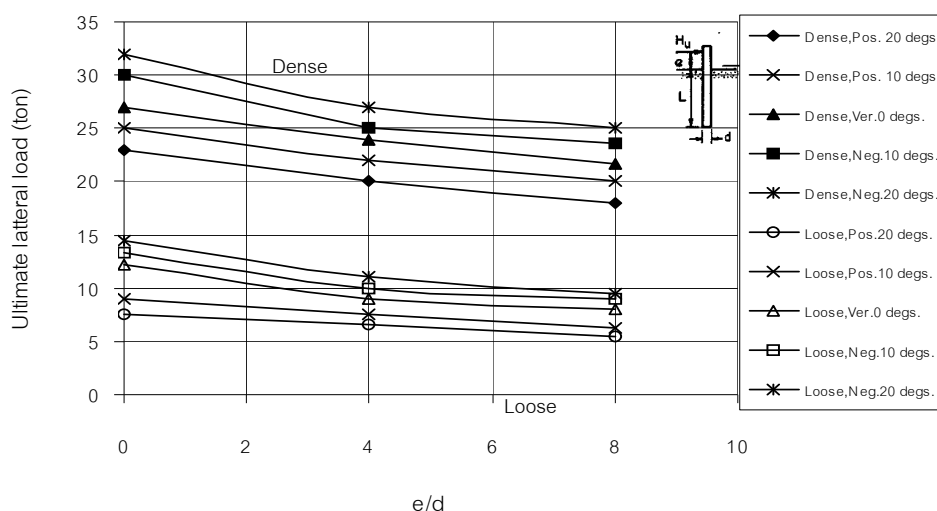
เปรียบเทียบค่าแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์
ด้วยโปรแกรม PLAXIS Version 8.2 กับค่าที่ได้จากทฤษฎีของ Broms ($P_u = 3K_p \sigma'_v$)
ในชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นมาก (Dense)

มุมเอียงเข็ม เทียบกับ แนวดิ่ง	ค่าแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด (ตัน)					
	e/d = 0		e/d = 4		e/d = 8	
	FEM	Broms	FEM	Broms	FEM	Broms
+20°	18.11	21.11	16.40	19.01	14.33	17.01
+10°	20.54	25.11	18.50	23.18	14.90	19.56
+0°	25.08	28.52	21.15	25.22	17.25	21.23
-10°	30.00	34.11	25.00	31.81	22.40	25.81
-20°	36.00	37.64	33.31	34.11	26.50	28.87

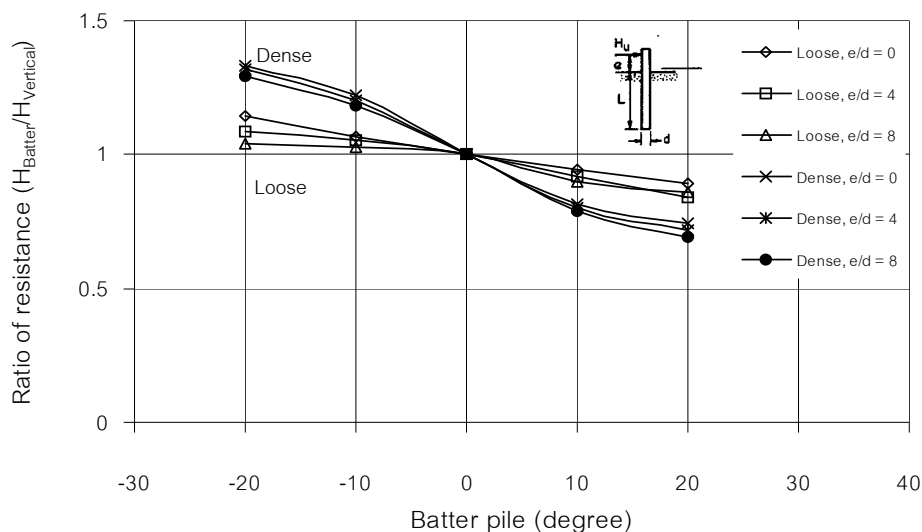
จากตารางที่ 4.2 และ 4.3 ซึ่งได้ แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ในชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นหลวม (Loose) พบว่าความเอียงของเสาเข็มมีผลต่อความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างของเสาเข็ม โดยเสาเข็มที่เอียงแบบ Negative (เอียงทำมุม -20°, -10° กับแนวดิ่ง) จะมีค่าแรงกระทำทางด้านข้างเพิ่มขึ้นตามลำดับมุมเอียงของเสาเข็มเล็กน้อย โดยมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1.15 เท่าของเสาเข็มในแนวดิ่ง ในขณะที่เสาเข็มที่เอียงแบบ Positive (เอียงทำมุม +10°, +20° กับแนวดิ่ง) จะมีค่าแรงกระทำทางด้านข้างลดลงตามลำดับมุมเอียงของเสาเข็มเล็กน้อย จากเสาเข็มดิ่ง โดยมีค่าลดลงประมาณ 0.91 เท่าของเสาเข็มในแนวดิ่ง ซึ่งตรงกันข้ามกับในชั้นทรายที่มีความหนาแน่นมาก (Dense) ค่าความเอียงของเสาเข็มมีผลมากต่อความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างของเสาเข็ม โดยเสาเข็มที่เอียงแบบ Negative (เอียงทำมุม -20°, -10° กับแนวดิ่ง) จะมีค่าแรงกระทำทางด้านข้างเพิ่มขึ้นตามลำดับมุมเอียงของเสาเข็มมาก โดยมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1.33 เท่าของเสาเข็มในแนวดิ่ง ในขณะที่เสาเข็มที่เอียงแบบ Positive (เอียงทำมุม +10°, +20° กับแนวดิ่ง) จะมีค่าแรงกระทำทางด้านข้างลดลงตามลำดับมุมเอียงของเสาเข็มเล็กน้อย จากเสาเข็มดิ่ง โดยมีค่าลดลงประมาณ 0.73 เท่าของเสาเข็มในแนวดิ่ง ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าเสาเข็มที่เอียงแบบ Negative จะมีความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างได้สูงสุด ในขณะที่เสาเข็มแนวดิ่ง และเสาเข็มที่เอียงแบบ Positive จะมีความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างลดลงตามลำดับ

นอกจากนี้ยังพบว่าค่าอัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (e/d) ที่เพิ่มขึ้นจาก 0 , 4 และ 8 มีผลทำให้ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างของเสาเข็มในชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่น หลวมและความหนาแน่นมาก มีค่าลดลง เมื่อ ค่า e/d เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อค่า e มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดโมเมนต์ดัดกระทำต่อเสาเข็มเพิ่มขึ้น ($M=Hxe$) ดังนั้นเสาเข็มจึงต้องรับแรงกระทำทางด้านข้าง พร้อมกับโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้น จึงทำให้ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างของ เสาเข็มลดลง (Broms, 1964) ดังแสดงในภาพที่ 4.14 และ 4.15

จากตารางที่ 4.2 และ 4.3 เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้าง สูงสุดของเสาเข็มที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และจากการคำนวณตามทฤษฎี ของ Broms พบว่าพฤติกรรมของเสาเข็มในชั้นทรายหลวม (loose) และทรายแน่น (dense) เมื่อมีแรง ทางด้านข้างมากระทำจะมีแนวโน้มคล้ายคลึงกัน คือ เสาเข็มที่เอียงแบบ Negative จะมีความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างได้สูงสุด ในขณะที่เสาเข็มแนวตั้ง และเสาเข็มที่เอียง แบบ Positive จะมีความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างลดลงตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณา เปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และจากการคำนวณตามทฤษฎี จะเห็นว่าผลที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีจะมีค่ามากกว่าประมาณ 1.08 ถึง 1.20 เท่าของค่าที่ได้ จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และค่าอัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (e/d) ที่เพิ่มขึ้นจาก 0 , 4 และ 8 มีผลทำให้ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างของเสาเข็มใน ชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นหลวมและความหนาแน่นมาก มีค่าลดลง เมื่อ ค่า e/d เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ เนื่องมาจากเมื่อค่า e มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดโมเมนต์ดัดกระทำต่อเสาเข็มเพิ่มขึ้น ($M=Hxe$) ดังนั้น เสาเข็มจึงต้องรับแรงกระทำทางด้านข้างพร้อมกับโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้น โดยค่าที่ได้จากการคำนวณ ตามทฤษฎีจะมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประมาณ 1.10 ถึง 1.27 เท่า



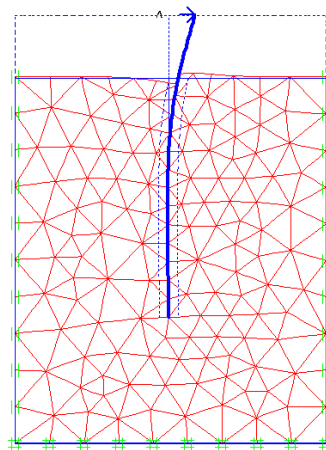
ภาพที่ 4.14 ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็ม เมื่อค่า e/d เพิ่มขึ้น



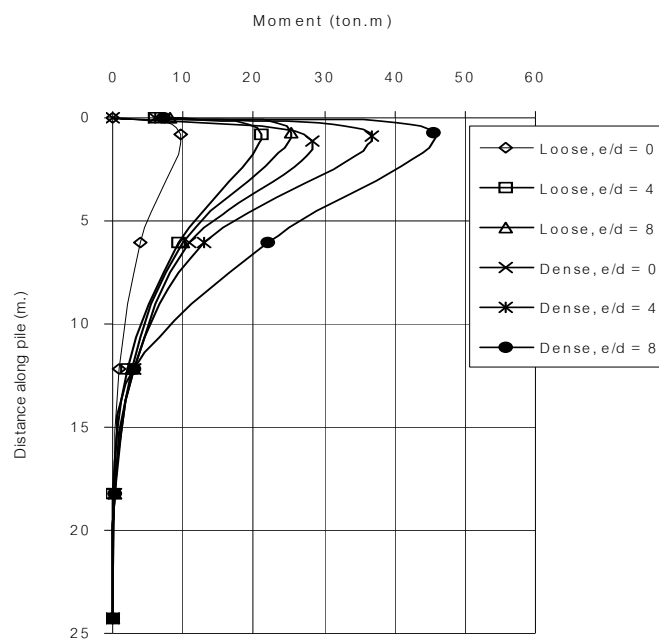
ภาพที่ 4.15 ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มเอียงต่อเสาเข็มแนวตั้ง

4.3 โมเมนต์ดัด (Bending moment)

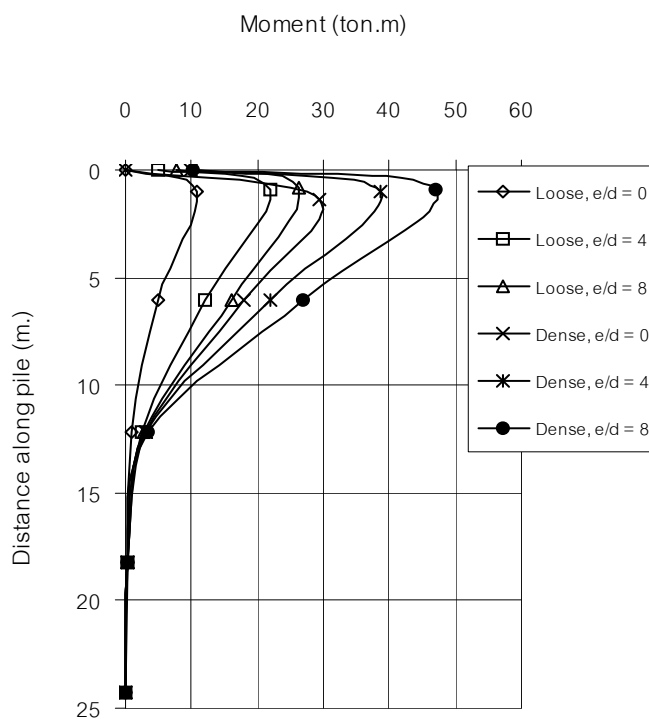
ในการทดสอบพฤติกรรมของเสาเข็มในชั้นดินทรายที่รับแรงกระทำทางด้านข้างด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Full Scale Model) ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ PLAXIS Version 8.2 เมื่อเริ่มต้นเพิ่มแรงกระทำทางด้านข้างจะทำให้เสาเข็มเกิดการโก่งตัว และทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากพฤติกรรมของเสาเข็มที่ปรากฏในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.16 ซึ่งสามารถแสดงค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในแต่ละ node ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ตลอดความยาวของเสาเข็ม ดังแสดงในภาพที่ 4.17 ถึง 4.21



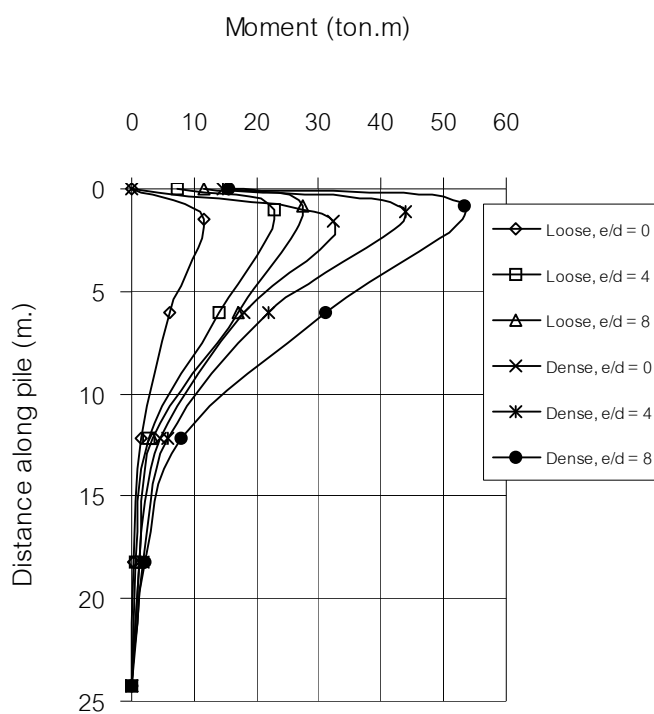
ภาพที่ 4.16 พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเมื่อรับแรงกระทำทางด้านข้าง จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์



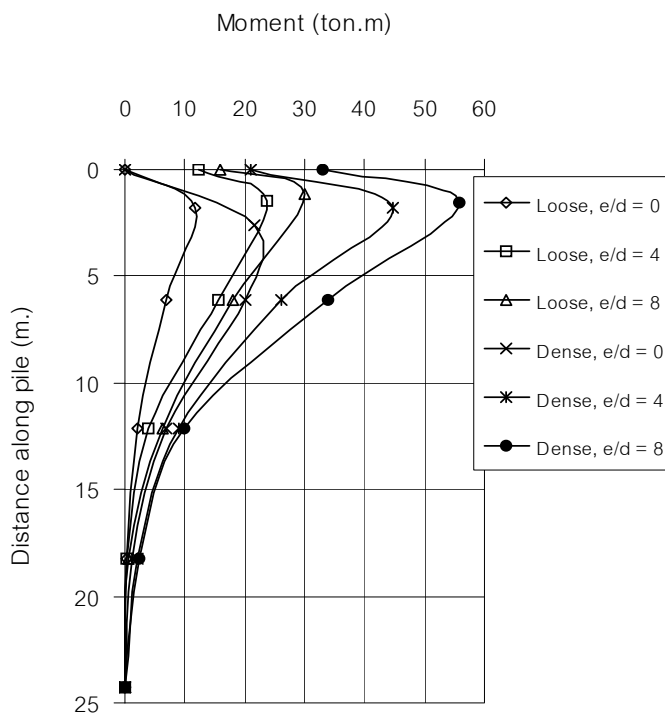
ภาพที่ 4.17 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่ระยะตลอดความยาวของเสาเข็มกรณีเสาเข็ม Positive ทำมุม $+20^\circ$ กับแนวดิ่ง



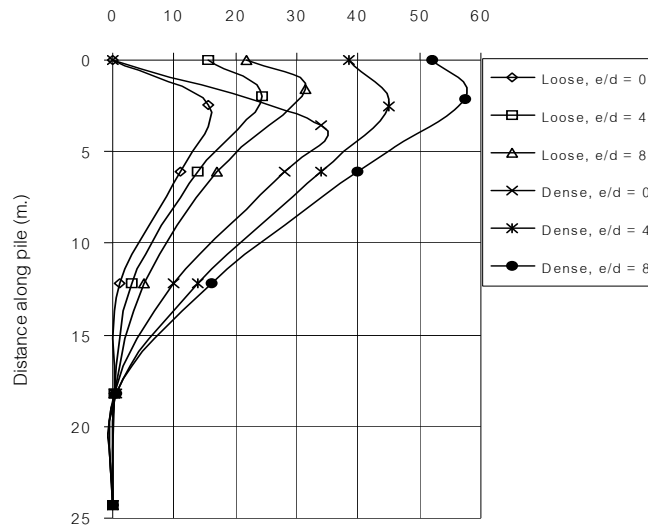
ภาพที่ 4.18 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่ระยะตลอดความยาวของเสาเข็มกรณีเสาเข็ม Positive ทำมุม $+10^\circ$ กับแนวดิ่ง



ภาพที่ 4.19 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์
ที่ระยะตลอดความยาวของเสาเข็มกรณีเสาเข็มแนวตั้ง



ภาพที่ 4.20 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์
ที่ระยะตลอดความยาวของเสาเข็มกรณีเสาเข็ม Negative ทำมุม -10° กับแนวดิ่ง



ภาพที่ 4.21 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์
ที่ระยะตลอดความยาวของเสาเข็มกรณีเสาเข็ม Negative ทำมุม -20° กับแนวดิ่ง

จากภาพที่ 4.17 ถึง 4.21 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นตลอดความยาวของเสาเข็มในชั้นดินทรายหลวมและทรายแน่นมาก ซึ่งค่าของโมเมนต์ดัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากผิวดิน และจะมีค่าสูงสุด (Maximum bending moment) อยู่ในช่วงความลึกประมาณ 1 ถึง 4 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ซึ่งก็คือ ที่ความลึก 0.7 ถึง 3.55 เมตร จากนั้นค่าโมเมนต์ดัดจะมีค่าลดลงเกือบมีค่าเป็นศูนย์ที่ความลึกประมาณ 0.65 เท่าของความยาวเสาเข็มจนถึงส่วนปลายของเสาเข็ม ส่วนค่าโมเมนต์ดัดที่มีค่าแตกต่างกันเนื่องมาจากเสาเข็มฝังตัวในชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นมาก จึงทำให้เสาเข็มมีความสามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างได้มากกว่าในชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นหลวม ทำให้เสาเข็มเกิดการโก่งตัวได้มากขึ้น จึงทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดมากกว่าเสาเข็มในชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นหลวม และเมื่อเพิ่มค่า e/d จาก 0 เป็น 4 และ 8 ตามลำดับ พบว่าจะทำให้ค่าโมเมนต์ดัดตลอดความยาวของเสาเข็มจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่า e/d ทั้งนี้เนื่องมาจากแรงที่กระทำต่อเสาเข็ม ระยะ e มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดที่กระทำต่อเสาเข็ม ($M=Hxe$) จึงทำให้เข็มต้องรับแรงกระทำทางด้านข้างพร้อมกับค่าโมเมนต์ดัด (Hxe) จึงทำให้ค่าโมเมนต์ดัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า e/d (Broms, 1964) เมื่อพิจารณาค่าโมเมนต์ดัดที่ส่วนปลายของเสาเข็มเอียงแบบ Positive เสาเข็มแนวดิ่งและเสาเข็มเอียงแบบ Negative พบว่าที่ส่วนปลายของเสาเข็มจะมีลักษณะเสมือนเป็น Fixed support ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจาก Soil stiffness และ Flexural rigidity ของเสาเข็ม โดยค่าโมเมนต์ดัดส่วนปลายของเสาเข็มกรณีเสาเข็มเอียงแบบ Positive จะมีค่าติดลบ ส่วนกรณีเสาเข็มแนวดิ่ง และเสาเข็มเอียงแบบ Negative ค่าโมเมนต์ที่ส่วนปลายจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากมุมเอียงของเสาเข็ม และแรงดันดินที่กระทำต่อเสาเข็ม

ตารางที่ 4.4

เปรียบเทียบค่าโมเมนต์สูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์
ด้วยโปรแกรม PLAXIS Version 8.2 กับค่าที่ได้จากทฤษฎีของ Broms
ในชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นหลวม (Loose)

มุมเอียงเข็ม เทียบกับ แนวดิ่ง	ค่าโมเมนต์สูงสุด (ตัน-เมตร)					
	e/d = 0		e/d = 4		e/d = 8	
	FEM	Broms	FEM	Broms	FEM	Broms
+20°	9.57	9.89	21.09	23.70	28.31	32.41
+10°	10.82	11.71	22.98	26.34	29.13	34.52
+0°	11.68	14.43	23.11	31.33	29.56	39.89
-10°	11.72	19.41	23.84	39.07	30.08	44.82
-20°	12.81	24.12	24.46	42.24	30.39	51.38

ตารางที่ 4.5

เปรียบเทียบค่าโมเมนต์สูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์
ด้วยโปรแกรม PLAXIS Version 8.2 กับค่าที่ได้จากทฤษฎีของ Broms
ในชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นมาก (Dense)

มุมเอียงเข็ม เทียบกับ แนวดิ่ง	ค่าโมเมนต์สูงสุด (ตัน-เมตร)					
	e/d = 0		e/d = 4		e/d = 8	
	FEM	Broms	FEM	Broms	FEM	Broms
+20°	18.47	25.83	36.75	42.77	45.45	56.47
+10°	19.52	32.13	38.67	45.12	47.08	58.44
+0°	20.23	36.81	43.90	48.73	53.31	63.32
-10°	21.51	46.18	44.84	57.14	55.83	68.11
-20°	22.06	57.71	45.14	71.71	57.84	81.85

จากตารางที่ 4.4 และ 4.5 ซึ่งได้แสดงค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็มที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ในชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นหลวม (Loose) พบว่าค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับการเอียงของเสาเข็มจาก $+20^\circ$, $+10^\circ$, 0° , -10° และ -20° กับแนวดิ่ง ซึ่งโมเมนต์ดัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นน้อย คือมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 0.93 เท่าของค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เพิ่มขึ้นตามมุมเอียง ในขณะที่อิทธิพลของค่า e/d ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้โมเมนต์ดัดมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1.30 เท่าของค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เพิ่มขึ้นตามค่าของ e/d ส่วนในชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นมาก (Dense) พบว่าค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับการเอียงของเสาเข็มจาก $+20^\circ$, $+10^\circ$, 0° , -10° และ -20° กับแนวดิ่ง ซึ่งโมเมนต์ดัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นน้อย คือมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 0.99 เท่าของค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เพิ่มขึ้นตามมุมเอียง ในขณะที่อิทธิพลของค่า e/d ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้โมเมนต์ดัดมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1.23 เท่าของค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เพิ่มขึ้นตามค่าของ e/d

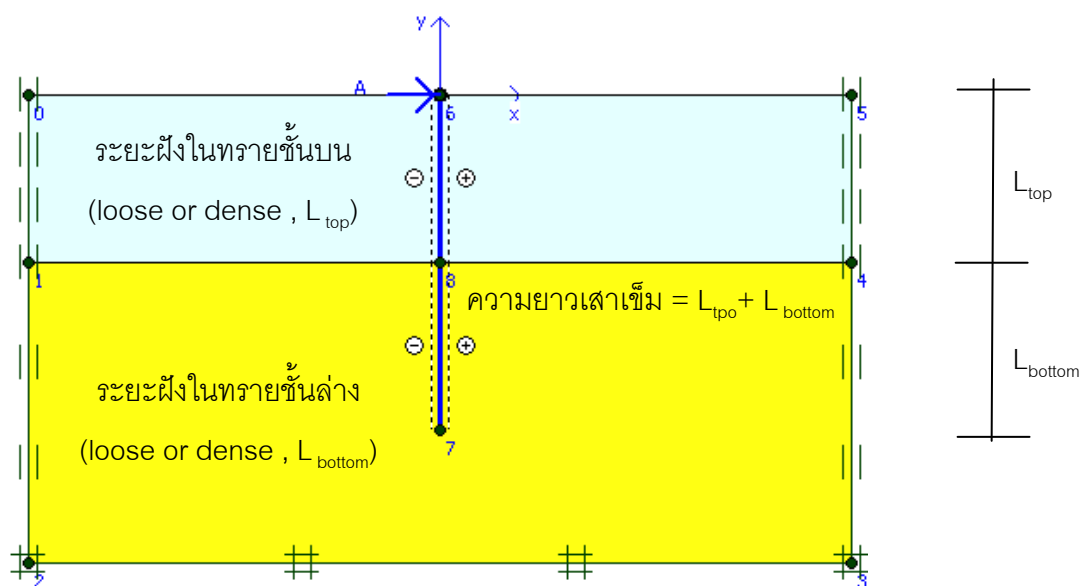
จากตารางที่ 4.4 และ 4.5 เมื่อเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็มที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และจากการคำนวณตามทฤษฎีของ Broms พบว่าพฤติกรรมของเสาเข็มในชั้นทรายหลวม (Loose) และทรายแน่น (Dense) เมื่อมีแรงทางด้านข้างมากกระทำจะมีแนวโน้มคล้ายคลึงกัน คือ ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับการเอียงของเสาเข็มจาก $+20^\circ$, $+10^\circ$, 0° , -10° และ -20° กับแนวดิ่ง แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และจากการคำนวณตามทฤษฎี จะเห็นว่าผลที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีจะมีค่ามากกว่าประมาณ 1.03 ถึง 2.20 เท่าของค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และค่าอัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (e/d) ที่เพิ่มขึ้นจาก 0, 4 และ 8 จะทำให้โมเมนต์ดัดมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1.75 ถึง 2.59 เท่าของค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เพิ่มขึ้นตามค่าของ e/d

บทที่ 5

ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างของเสาเข็มในชั้นดินทราย 2 ชั้น
ที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน

5.1 บทนำ

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (PLAXIS V.8.2) ศึกษาความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างของเสาเข็มในชั้นดินทราย และศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของดิน ต่อความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็ม (Ultimate lateral load) การเคลื่อนตัว (Displacement) และโมเมนต์ดัด (Bending moment) ซึ่งการศึกษาที่ผ่านมาข้างต้นเป็นพฤติกรรมของเสาเข็มในชั้นดินทรายที่มีคุณสมบัติเดียวกันตลอดความลึก (Homogenous soil) แต่ในหัวข้อต่อไปนี้จะผู้วิจัยจะได้ศึกษาความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็ม (Ultimate lateral load) การเคลื่อนตัว (Displacement) และโมเมนต์ดัด (Bending moment) ของเสาเข็มในชั้นดินทราย 2 ชั้นที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน (Non homogenous soil)



รูปภาพที่ 5.1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาเข็มในชั้นดินทราย 2 ชั้น

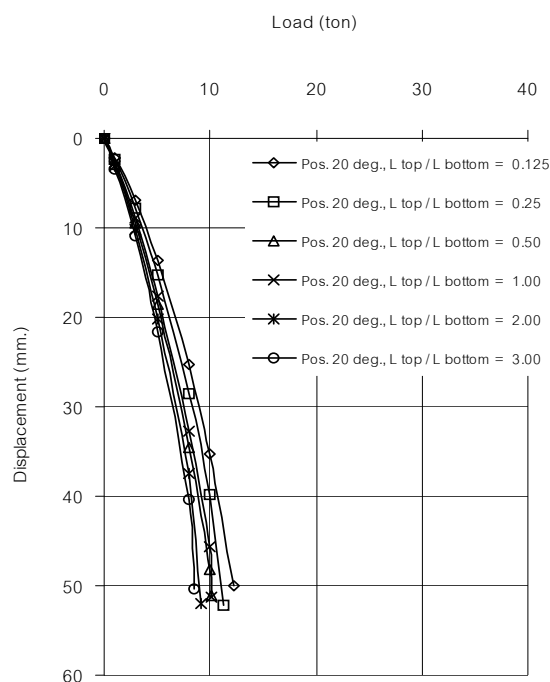
โดยการศึกษาี้ ผู้วิจัยจะให้ความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงระยะความหนาของชั้นดินทรายแต่ละชั้นที่เสาเข็มฝังตัว ว่าจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างของเสาเข็มอย่างไร ซึ่งผู้วิจัยได้พิจารณาการศึกษาเป็น 2 กรณี คือ 1) กรณีที่ดินชั้นบนเป็นดินทรายที่มีความหนาแน่นหลวม (Loose ,L_{top}) ดินทรายชั้นล่างเป็นดินทรายที่มีความหนาแน่นมาก (Dense ,L_{bottom}) และ 2) กรณีที่ดินชั้นบนเป็นดินทรายที่มีความหนาแน่นมาก (Dense ,L_{top}) ดินชั้นล่างเป็นดินทรายที่มีความหนาแน่นหลวม (Loose ,L_{bottom}) ซึ่งได้สรุปข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปข้อมูลการศึกษาเสาเข็มในชั้นดินทราย 2 ชั้นที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน

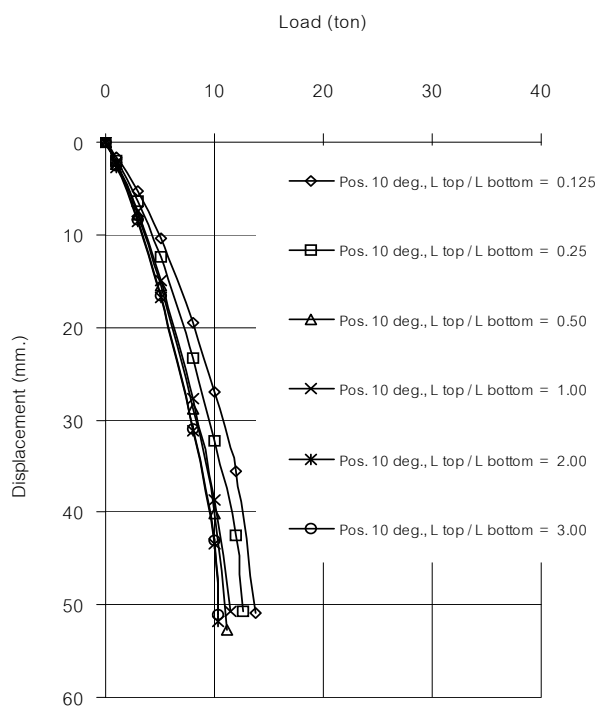
ข้อมูลทางวิศวกรรมของดิน (จากผลการศึกษาของ พัฒนศักดิ์ อบเชย , 2003)			
ทรายหลวม(loose sand)	$\gamma_d = 14.5 \text{ kN/m}^3$	$E_s = 4,775 \text{ kN/m}^2$	$\phi' = 41.71^\circ$
ทรายแน่น(dense sand)	$\gamma_d = 16.2 \text{ kN/m}^3$	$E_s = 10,700 \text{ kN/m}^2$	$\phi' = 43.85^\circ$
ข้อมูลทางวิศวกรรมของเสาเข็ม (จากผลการศึกษาของ พัฒนศักดิ์ อบเชย , 2003)			
$D_o = 0.81 \text{ ม.}$	$L = 24.3 \text{ ม.}$	$EA = 1.396\text{E}+06 \text{ kN}$	$EI = 1.064\text{E}+05 \text{ kN.m}^2$
อัตราส่วนของระยะการฝังตัวของเสาเข็มในดิน ($L_{top} + L_{bottom} = 24.3 \text{ ม.}$)			
$\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = 0.125 ; L_{top} = 2.70 \text{ ม.} ; L_{bottom} = 21.6 \text{ ม.}$	$\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = 1.00 ; L_{top} = 12.15 \text{ ม.} ; L_{bottom} = 12.15 \text{ ม.}$		
$\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = 0.25 ; L_{top} = 4.86 \text{ ม.} ; L_{bottom} = 19.44 \text{ ม.}$	$\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = 2.00 ; L_{top} = 16.20 \text{ ม.} ; L_{bottom} = 8.10 \text{ ม.}$		
$\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = 0.50 ; L_{top} = 8.10 \text{ ม.} ; L_{bottom} = 16.20 \text{ ม.}$	$\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = 3.00 ; L_{top} = 18.225 \text{ ม.} ; L_{bottom} = 6.07 \text{ ม.}$		
เงื่อนไขของแบบจำลอง FEM			
	กรณีที่ 1 $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$	กรณีที่ 2 $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$	
1. อัตราส่วนของระยะการฝังตัวของเสาเข็มในดิน	[0.125 , 0.25 , 0.50 , 1.00 , 2.00 , 3.00]	[0.125 , 0.25 , 0.50 , 1.00 , 2.00 , 3.00]	
2. มุมเอียงของเสาเข็มกับแนวดิ่ง	[+20° , +10° , 0° , -10° , -20°]	[+20° , +10° , 0° , -10° , -20°]	
3. อัตราส่วน (e/d)	[0 , 4 , 8]	[0 , 4 , 8]	

5.2 ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างและการเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเข็ม ในชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน โดยใช้โปรแกรม PLAXIS V.8.2

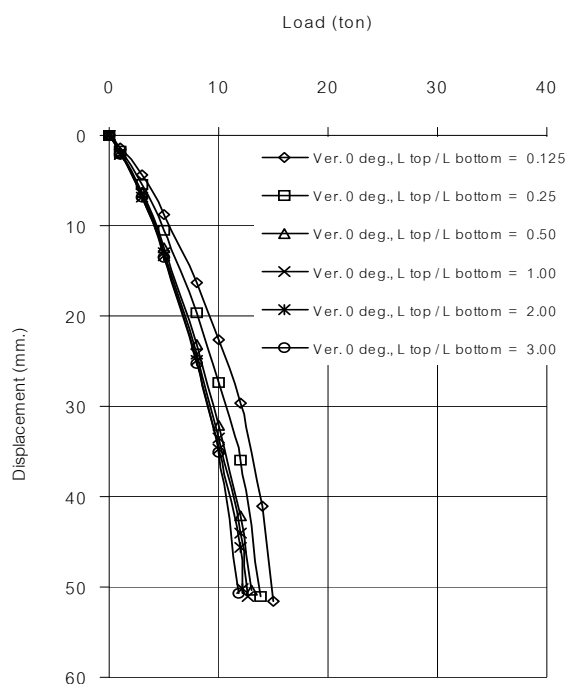
ในการทดสอบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ผู้วิจัยได้พิจารณาการศึกษาเป็น 2 กรณี คือ 1) เป็นการทดสอบแบบจำลองของเสาเข็มเอียงแบบ Negative ที่ทำมุม -10° , -20° กับแนวดิ่ง เสาเข็มตั้ง และเสาเข็มเอียงแบบ Positive ที่ทำมุม $+10^\circ$, $+20^\circ$ กับแนวดิ่ง ที่ดินชั้นบนเป็นชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นหลวม (Loose, L_{top}) และดินชั้นล่างเป็นชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นมาก (Dense, L_{bottom}) โดยมีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวของเสาเข็มในดินชั้นบนต่อดินชั้นล่าง $\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$ เท่ากับ 0.125, 0.25, 0.50, 1.00, 2.00 และ 3.00 และมีแรงในแนวราบ (H_u) กระทำที่อัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (e/d) เท่ากับ 0, 4 และ 8 และ 2) เป็นการทดสอบแบบจำลองกรณีดินชั้นบนเป็นชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นมาก (Dense, L_{top}) และดินชั้นล่างเป็นชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นหลวม (Loose, L_{bottom}) การทดสอบทำโดยการเพิ่มแรงกระทำทางด้านข้างที่กระทำบริเวณหัวเสาเข็มของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Full Scale Model) ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งดินทรายที่อยู่ด้านหน้าของเสาเข็มพิบัติ (Failure load) ซึ่งค่าแรงกระทำทางด้านข้างและระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มบริเวณผิวดิน ณ ตำแหน่งที่พิบัติ (Failure load) จะเป็นค่าแรงกระทำทางด้านข้างและระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็ม ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มดังแสดงในภาพที่ 5.2 ถึง 5.31 สำหรับผลของค่าโมเมนต์ดัดที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Full Scale Model) จะแสดงไว้ในหัวข้อที่ 5.3



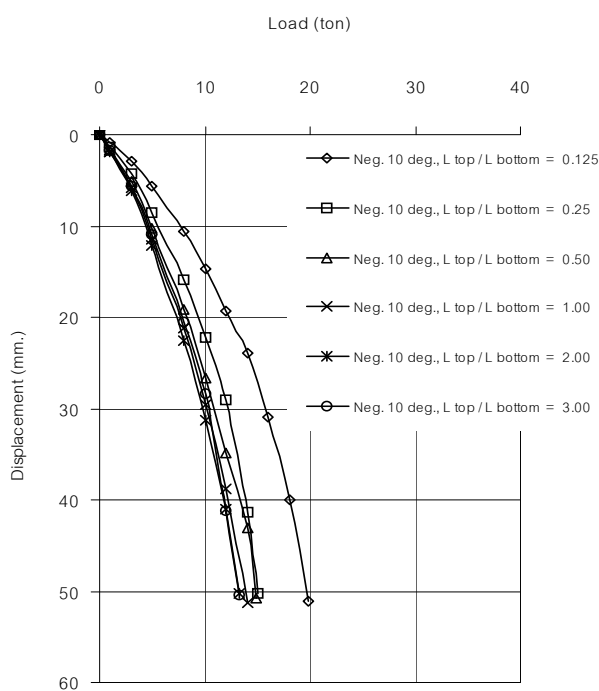
ภาพที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเอียง +20° กับแนวดิ่ง
ที่ค่า $e/d = 0$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายหลุมต่อทรายแน่น ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน



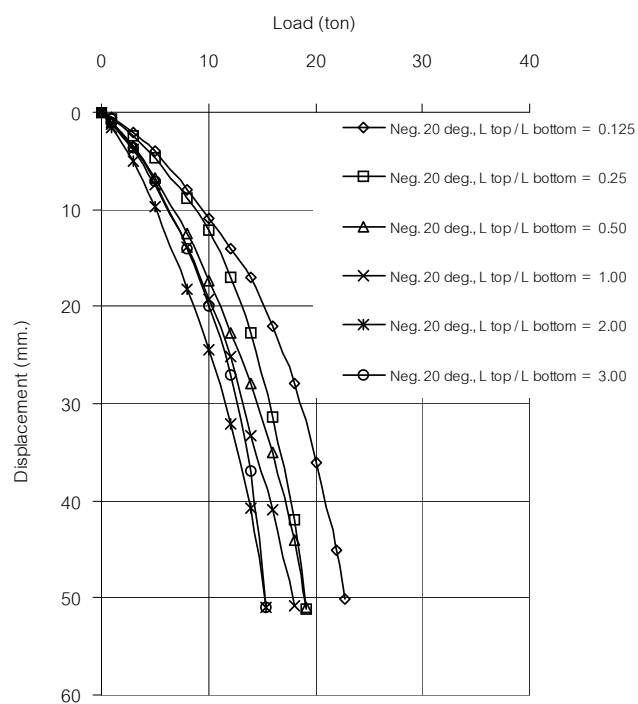
ภาพที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเอียง +10° กับแนวดิ่ง
ที่ค่า $e/d = 0$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายหลุมต่อทรายแน่น ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน



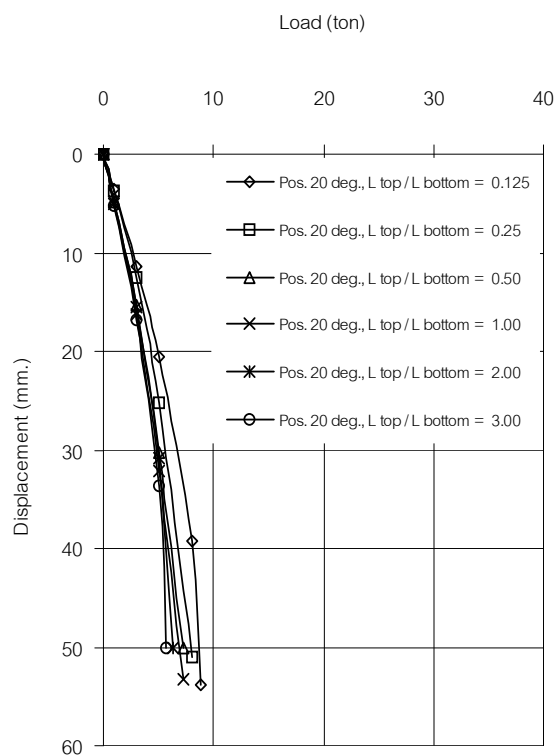
ภาพที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มแนวดิ่ง
ที่ค่า $e/d = 0$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายหลุมต่อทรายแน่น ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน



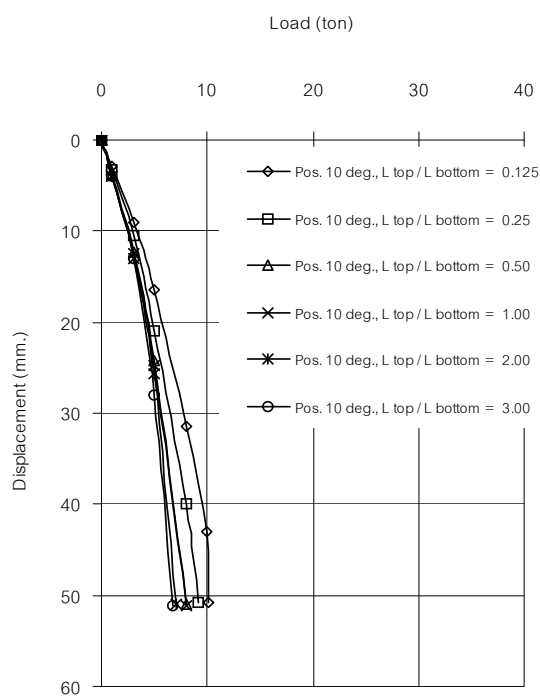
ภาพที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเอียง -10° กับแนวดิ่ง
ที่ค่า $e/d = 0$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายหลุมต่อทรายแน่น ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน



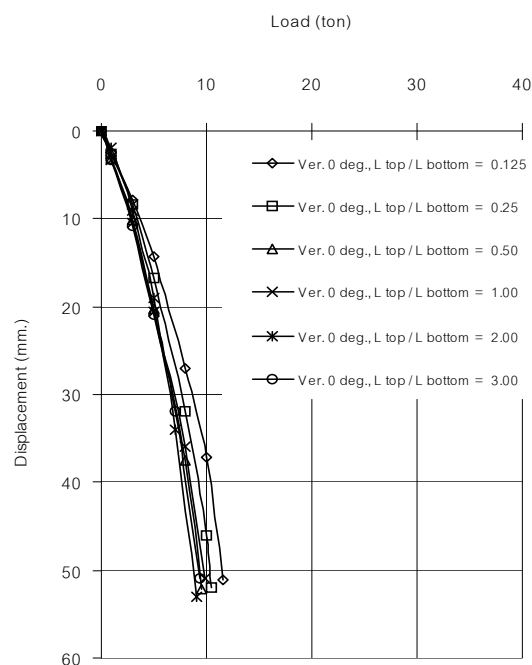
ภาพที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเอียง -20° กับแนวตั้ง
 ที่ค่า $e/d = 0$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายหวมต่อทรายแน่น ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน



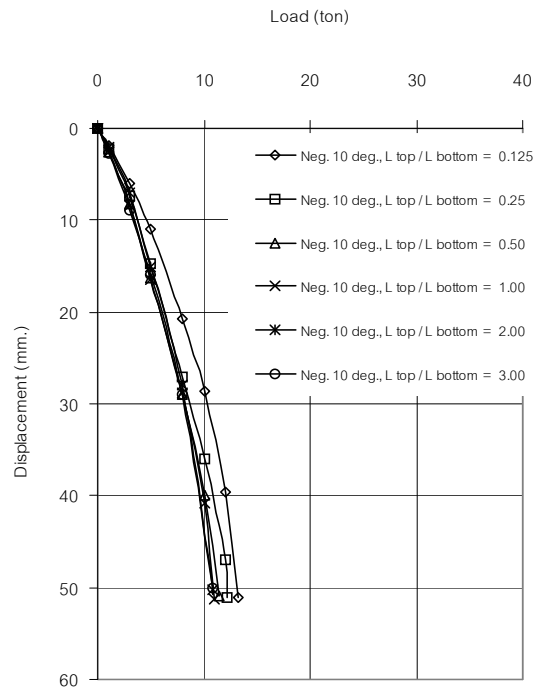
ภาพที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเอียง $+20^\circ$ กับแนวตั้ง
 ที่ค่า $e/d = 4$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายหวมต่อทรายแน่น ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน



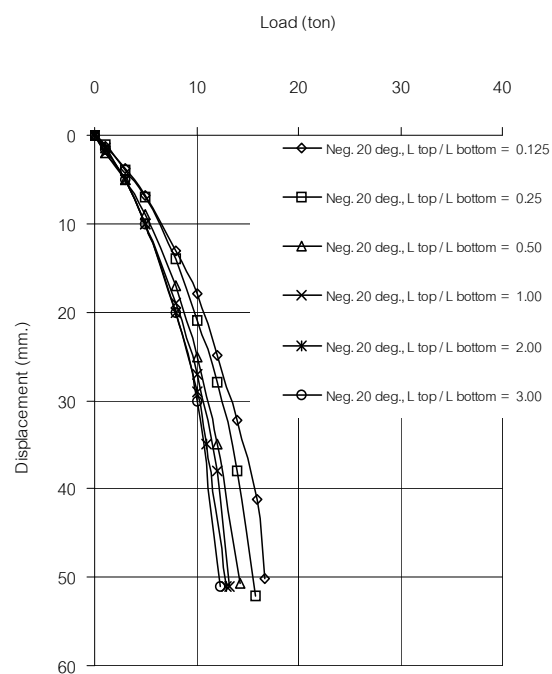
ภาพที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเอียง $+10^\circ$ กับแนวดิ่ง
 ที่ค่า $e/d = 4$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายหวมต่อทรายแน่น ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน



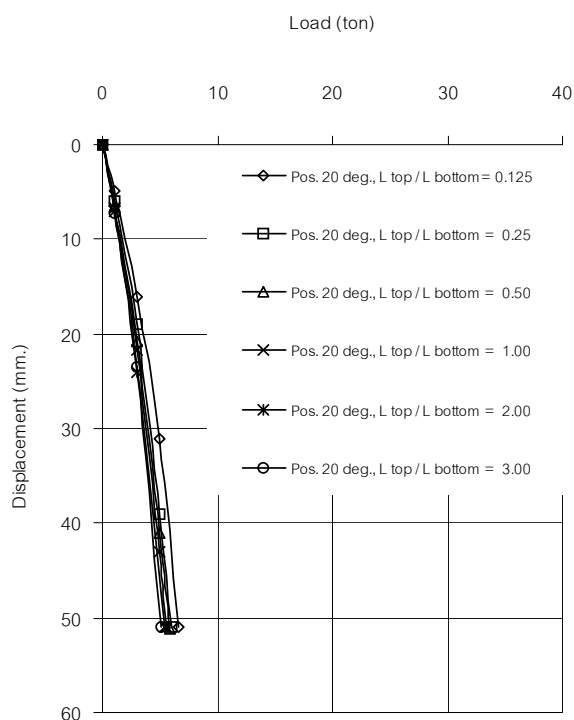
ภาพที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มแนวดิ่ง
 ที่ค่า $e/d = 4$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายหวมต่อทรายแน่น ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน



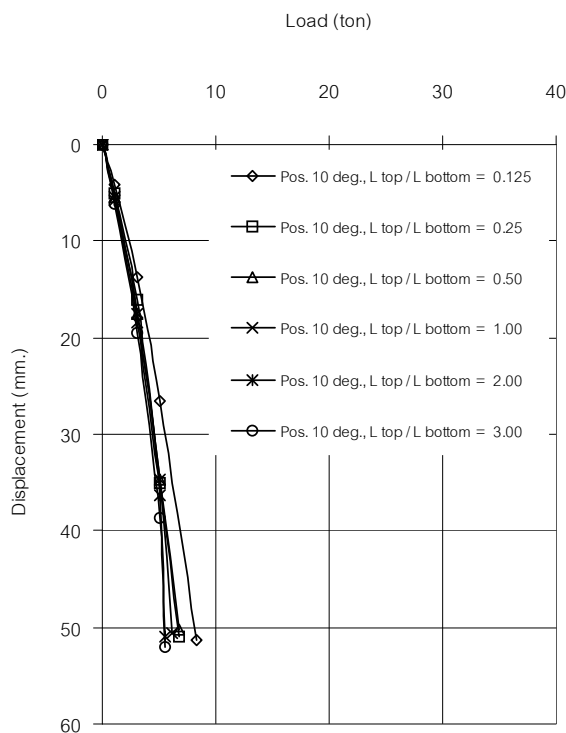
ภาพที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเอียง -10° กับแนวตั้ง
ที่ค่า $e/d = 4$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายหลวมต่อทรายแน่น ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน



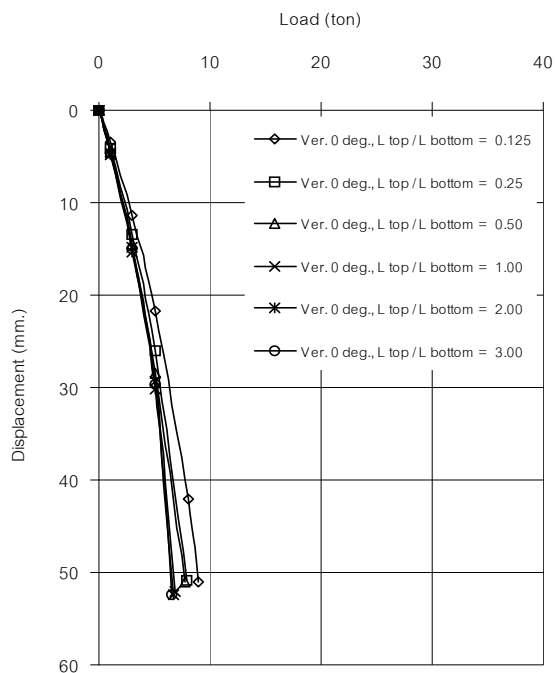
ภาพที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเอียง -20° กับแนวตั้ง
ที่ค่า $e/d = 4$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายหลวมต่อทรายแน่น ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน



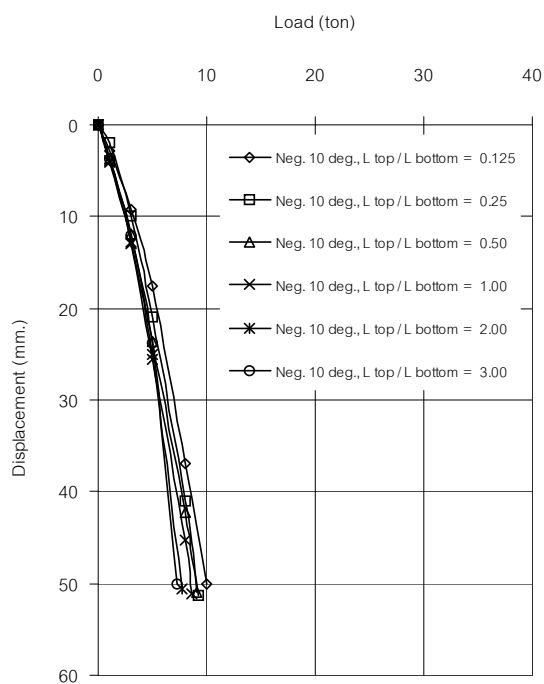
ภาพที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเอียง +20° กับแนวดิ่ง
ที่ค่า $e/d = 8$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายหลุมต่อทรายแน่น ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน



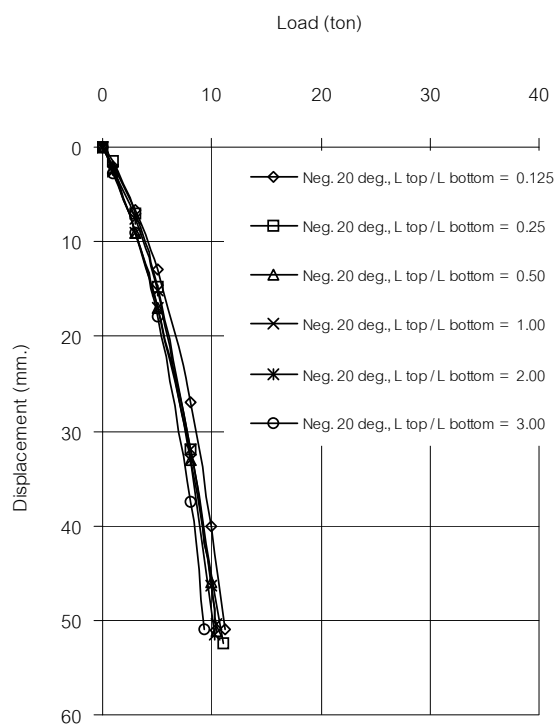
ภาพที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเอียง +10° กับแนวดิ่ง
ที่ค่า $e/d = 8$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายหลุมต่อทรายแน่น ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน



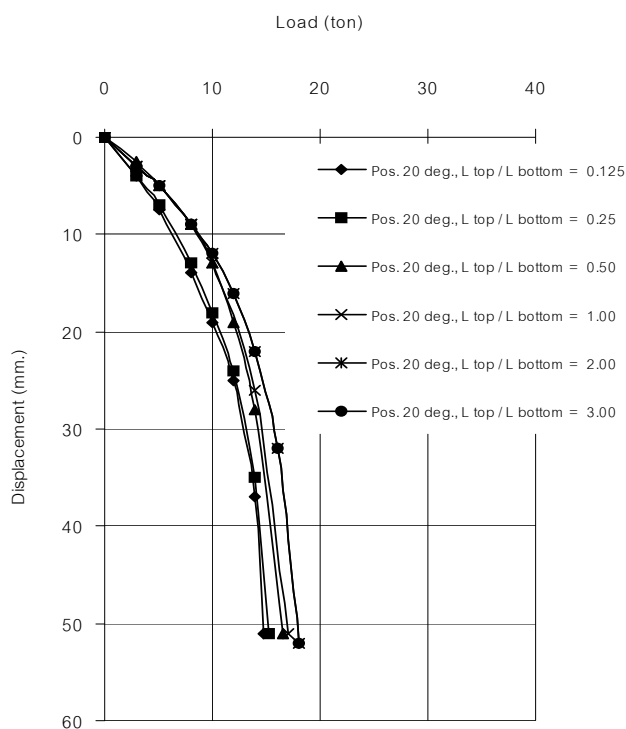
ภาพที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มแนวตั้ง
ที่ค่า $e/d = 8$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายหวมต่อทรายแน่น ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน



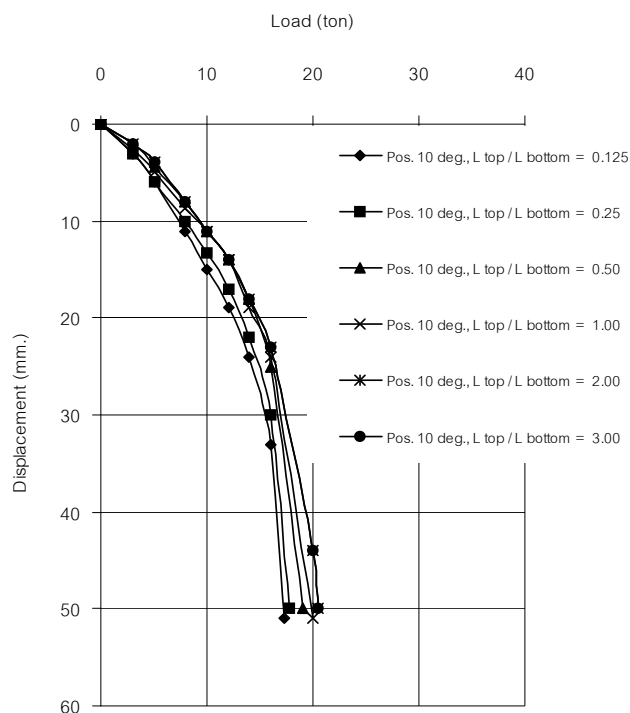
ภาพที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเอียง -10° กับแนวตั้ง
ที่ค่า $e/d = 8$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายหวมต่อทรายแน่น ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน



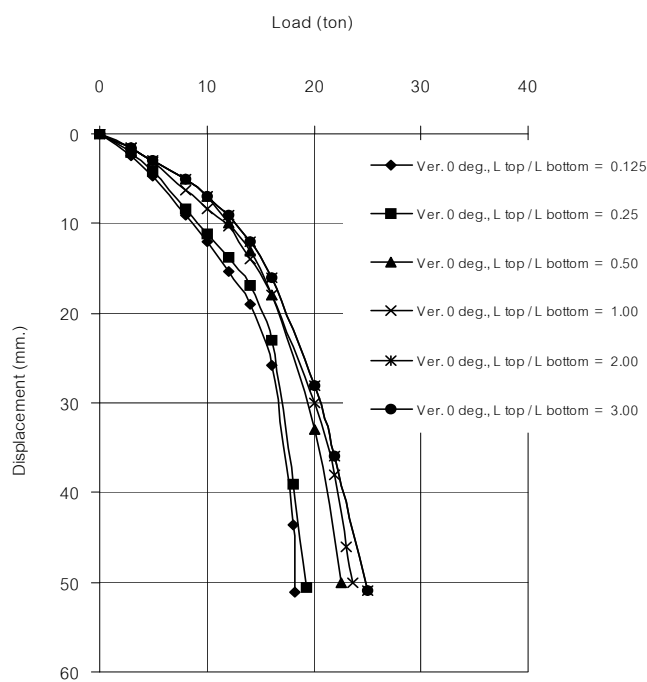
ภาพที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเอียง -20° กับแนวดิ่ง
ที่ค่า $e/d = 8$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายหลวมต่อทรายแน่น ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน



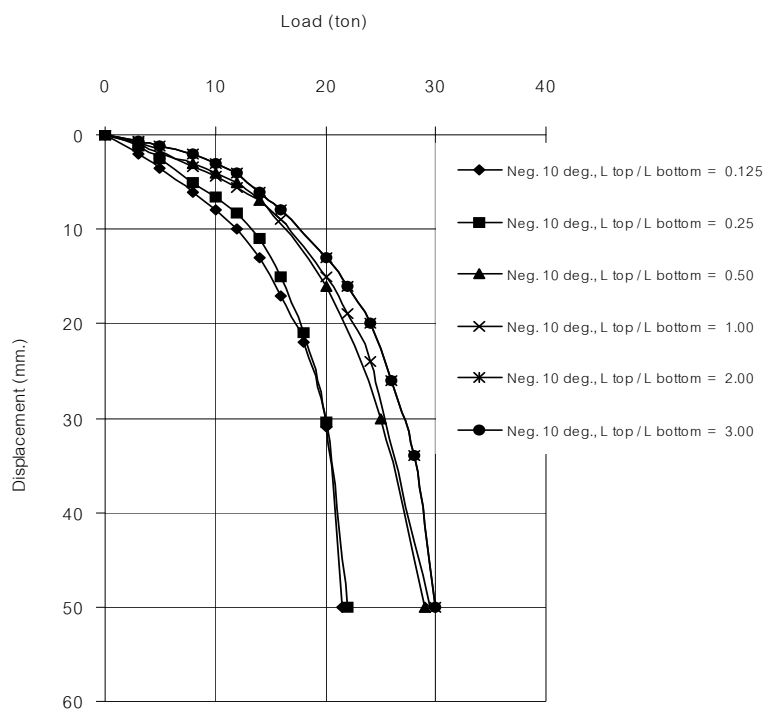
ภาพที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเอียง $+20^\circ$ กับแนวดิ่ง
ที่ค่า $e/d = 0$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายแน่นต่อทรายหลวม ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน



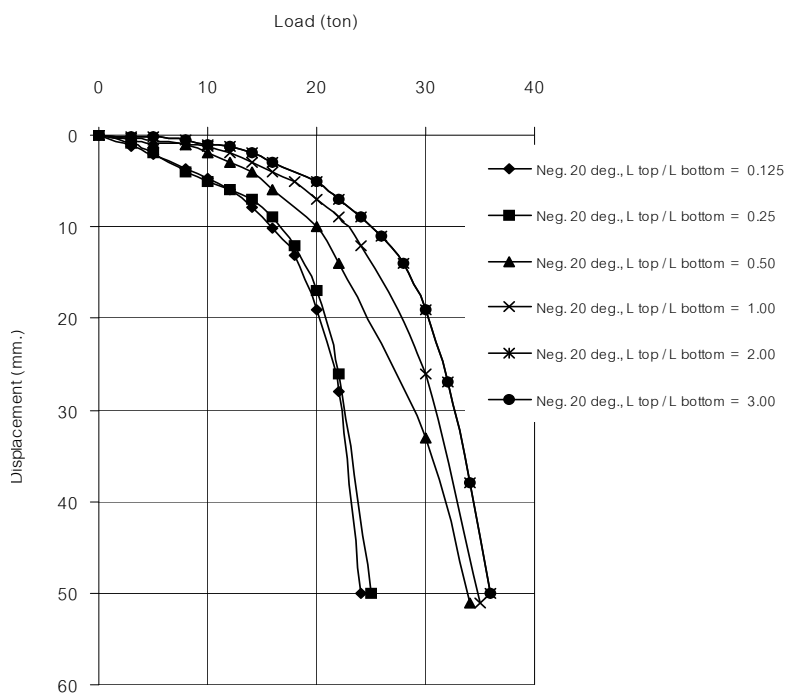
ภาพที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเอียง +10° กับแนวดิ่ง
ที่ค่า $e/d = 0$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายแน่นต่อทรายหลวม ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน



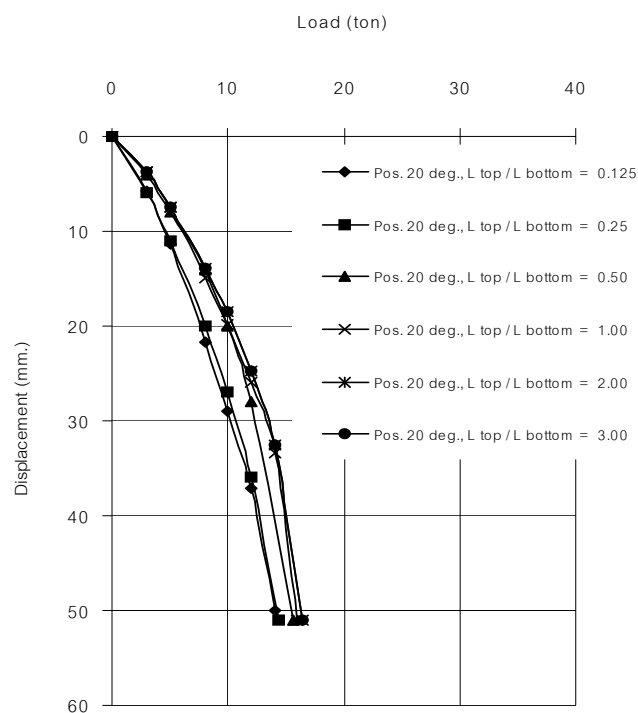
ภาพที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มแนวดิ่ง
ที่ค่า $e/d = 0$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายแน่นต่อทรายหลวม ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน



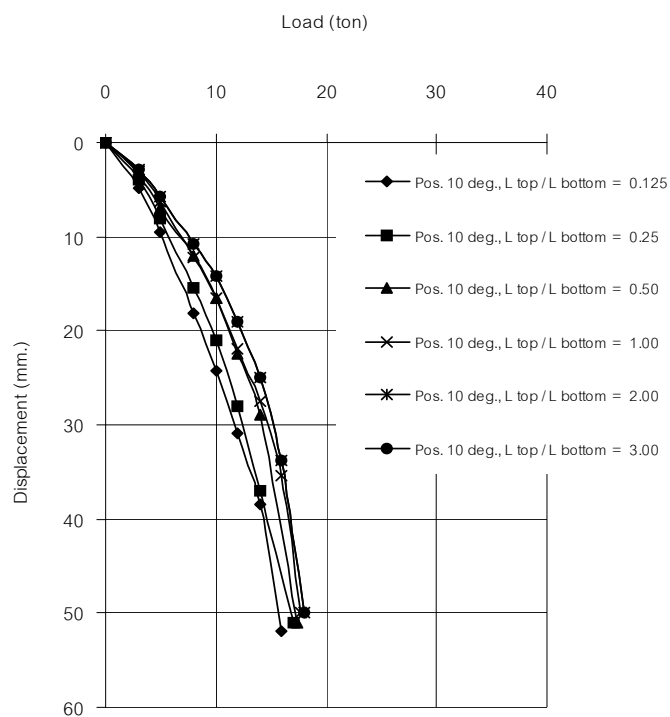
ภาพที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเอียง -10° กับแนวตั้ง
ที่ค่า $e/d = 0$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายแน่นต่อทรายหลวม ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน



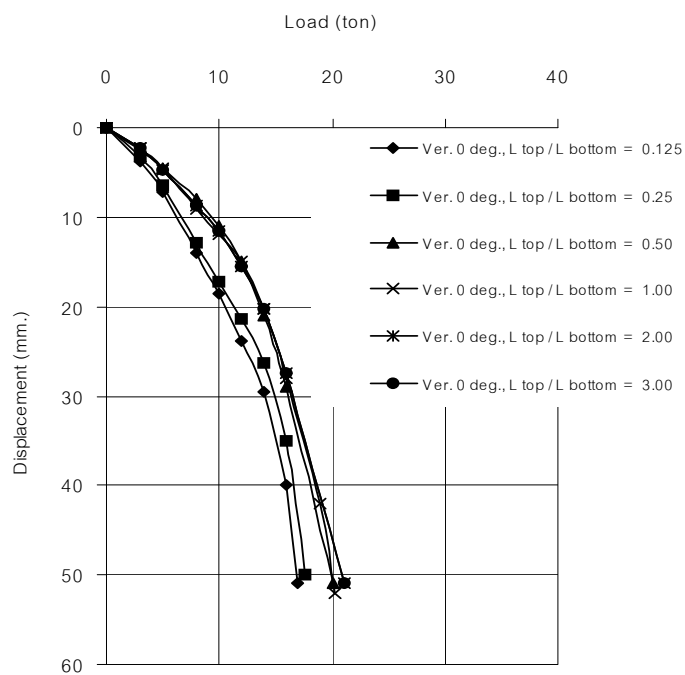
ภาพที่ 5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเอียง -20° กับแนวตั้ง
ที่ค่า $e/d = 0$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายแน่นต่อทรายหลวม ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน



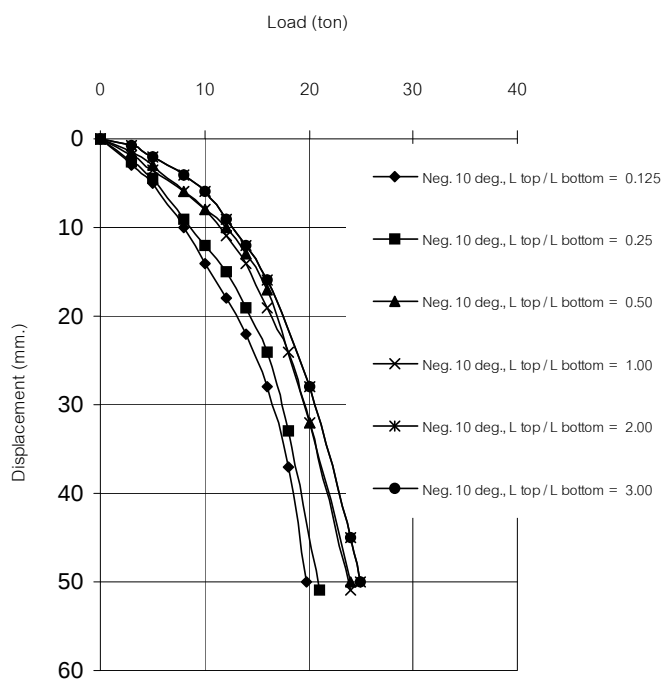
ภาพที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเอียง +20° กับแนวดิ่ง
ที่ค่า $e/d = 4$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายแน่นต่อทรายหลวม ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน



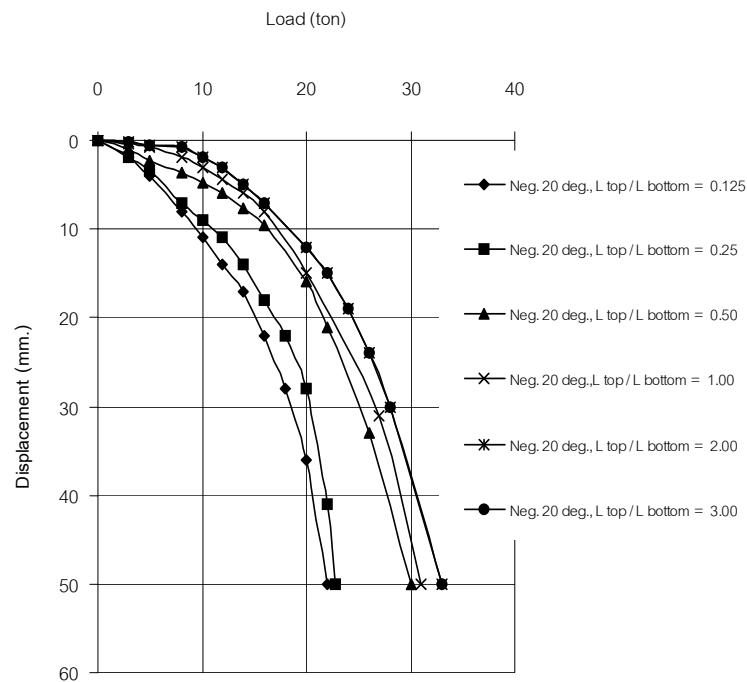
ภาพที่ 5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเอียง +10° กับแนวดิ่ง
ที่ค่า $e/d = 4$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายแน่นต่อทรายหลวม ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน



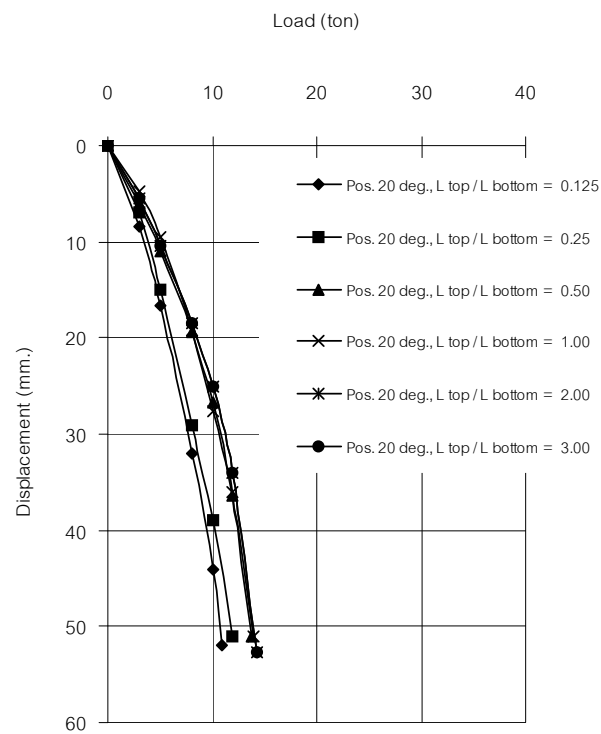
ภาพที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มแนวตั้ง
ที่ค่า $e/d = 4$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายแน่นต่อทรายหลวม ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน



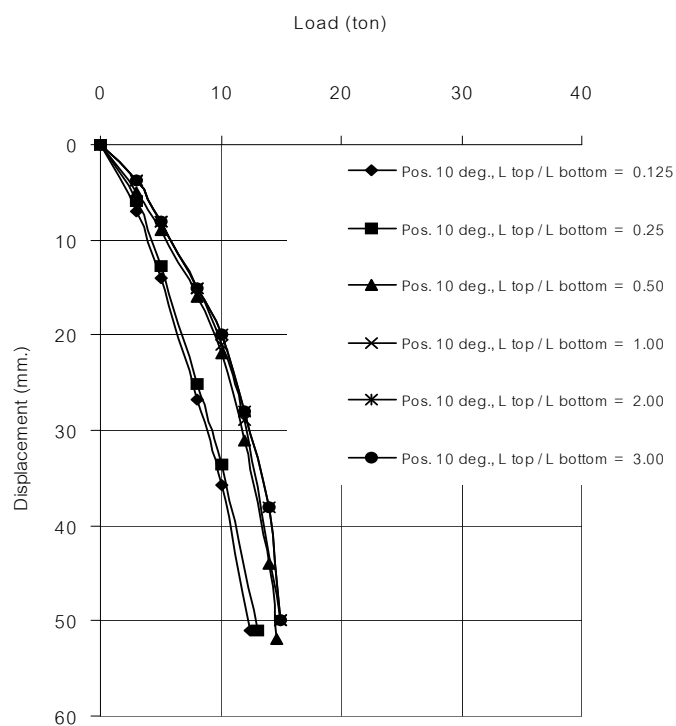
ภาพที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเอียง -10° กับแนวตั้ง
ที่ค่า $e/d = 4$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายแน่นต่อทรายหลวม ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน



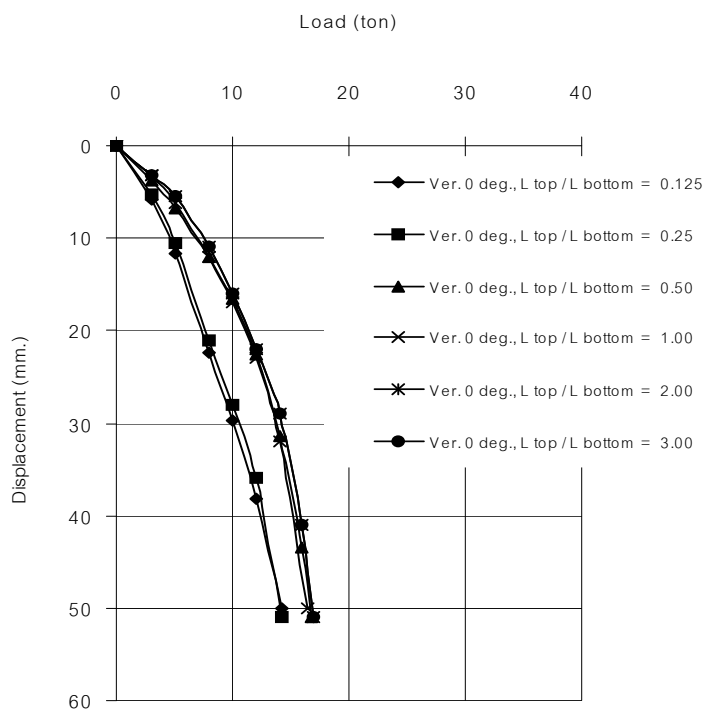
ภาพที่ 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเอียง -20° กับแนวดิ่ง
ที่ค่า $e/d = 4$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายแน่นต่อทรายหลวม ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน



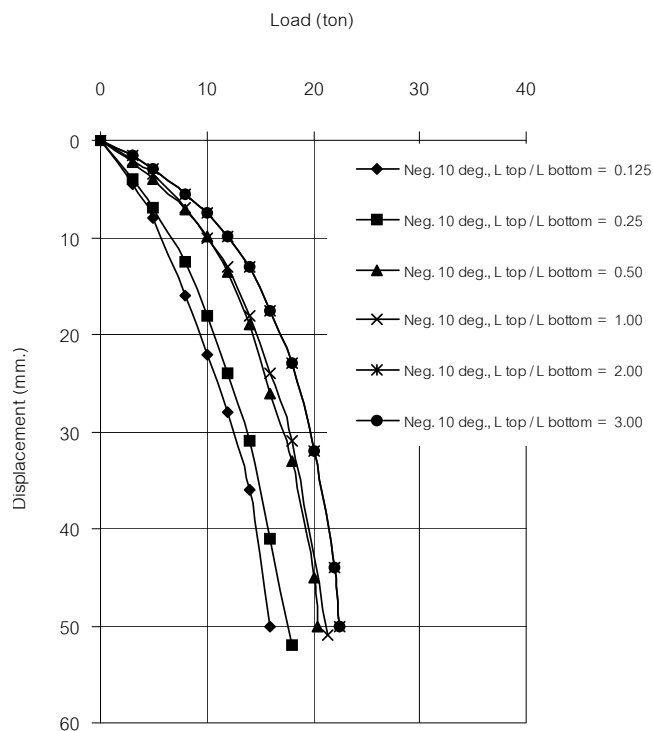
ภาพที่ 5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเอียง $+20^\circ$ กับแนวดิ่ง
ที่ค่า $e/d = 8$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายแน่นต่อทรายหลวม ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน



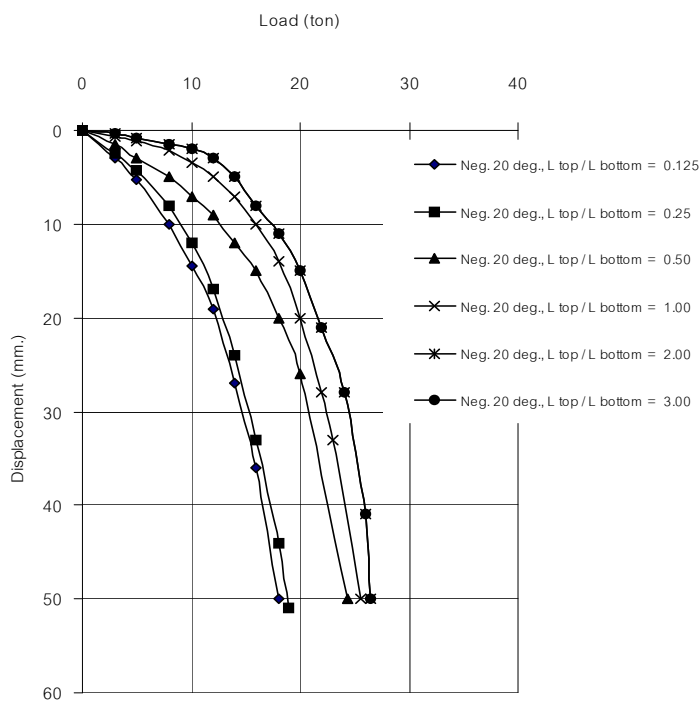
ภาพที่ 5.28 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเอียง +10° กับแนวดิ่ง
ที่ค่า $e/d = 8$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายแน่นต่อทรายหลวม ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน



ภาพที่ 5.29 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มแนวดิ่ง
ที่ค่า $e/d = 8$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายแน่นต่อทรายหลวม ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน



ภาพที่ 5.30 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเอียง -10° กับแนวดิ่ง
 ที่ค่า $e/d = 8$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายแน่นต่อทรายหลวม ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน

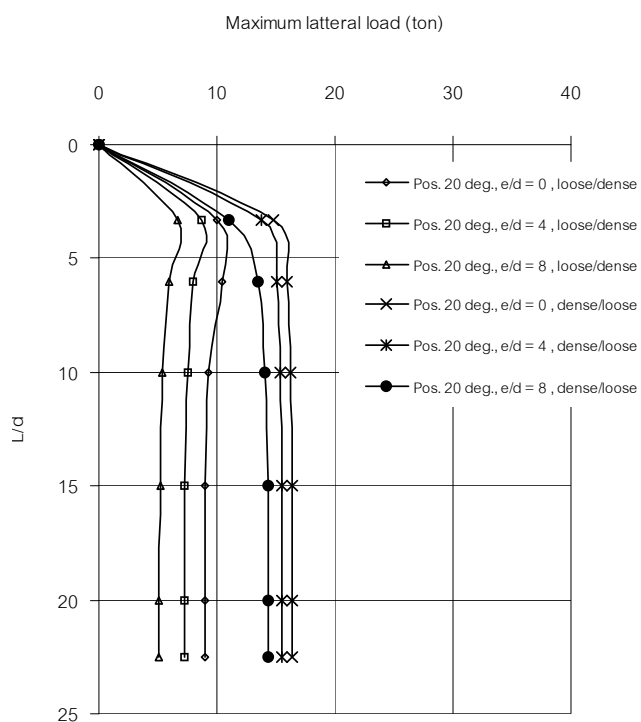


ภาพที่ 5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเอียง -20° กับแนวดิ่ง
 ที่ค่า $e/d = 8$ ที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวในทรายแน่นต่อทรายหลวม ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) ต่างกัน

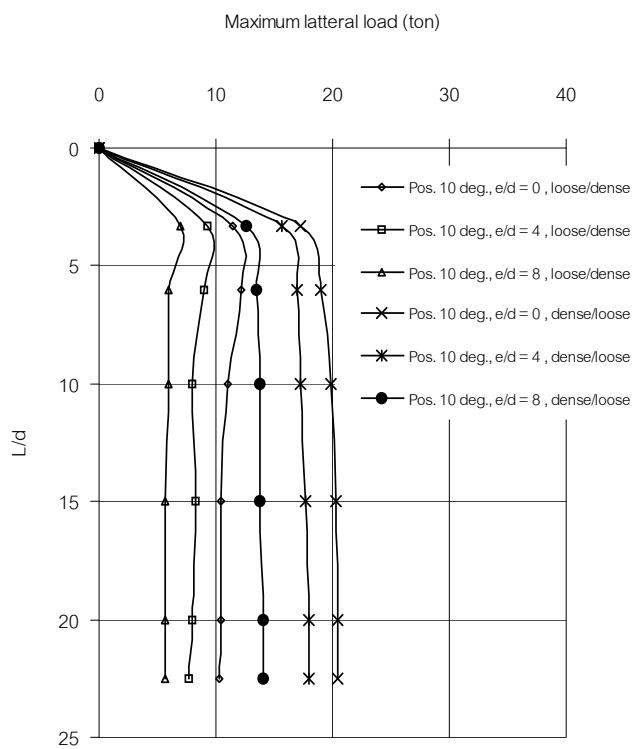
จากภาพที่ 5.2 ถึง 5.16 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มในชั้นดินทราย 2 ชั้น ซึ่งดินทรายชั้นบนเป็นชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นหลวม (Loose, L_{top}) และดินชั้นล่างเป็นชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นมาก (Dense, L_{bottom}) เมื่อมีแรงทางด้านข้างกระทำต่อเสาเข็ม เสาเข็มจะเกิดการเคลื่อนตัวออกจากตำแหน่งเดิมไปในทิศทางเดียวกับแรงที่กระทำ พิจารณาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็ม จะเห็นว่าช่วงแรกความชันของกราฟจะเพิ่มเพิ่มขึ้นทีละน้อย เมื่อเพิ่มแรงกระทำต่อไปพบว่าแรงกระทำที่เพิ่มขึ้นมีค่าน้อยแต่ระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มมีมากจนทำให้เส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มมีความชันเพิ่มขึ้นจนกระทั่งด้านหน้าเสาเข็มดินพิบัติ (Failure Load) ซึ่งความหนาของระยะการฝังตัวของเสาเข็มในทรายหลวมชั้นบนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่ระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่ออัตราส่วนของระยะการฝังตัวของเสาเข็มในทรายหลวมชั้นบนต่อทรายแน่นชั้นล่าง ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) มีอัตราส่วนเพิ่มขึ้นมากกว่า 0.50

จากภาพที่ 5.17 ถึง 5.31 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มในชั้นดินทราย 2 ชั้น ซึ่งดินทรายชั้นบนเป็นชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นมาก (Dense, L_{top}) และดินชั้นล่างเป็นชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นหลวม (Loose, L_{bottom}) เมื่อมีแรงทางด้านข้างกระทำต่อเสาเข็ม เสาเข็มจะเกิดการเคลื่อนตัวออกจากตำแหน่งเดิมไปในทิศทางเดียวกับแรงที่กระทำจนกระทั่งด้านหน้าเสาเข็มดินพิบัติ (Failure Load) ซึ่งความหนาของระยะการฝังตัวของเสาเข็มในทรายแน่นชั้นบนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มมีค่าลดลง แต่ระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่ออัตราส่วนของระยะการฝังตัวของเสาเข็มในทรายแน่นชั้นบนต่อทรายหลวมชั้นล่าง ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$) มีอัตราส่วนเพิ่มขึ้นมากกว่า 0.50

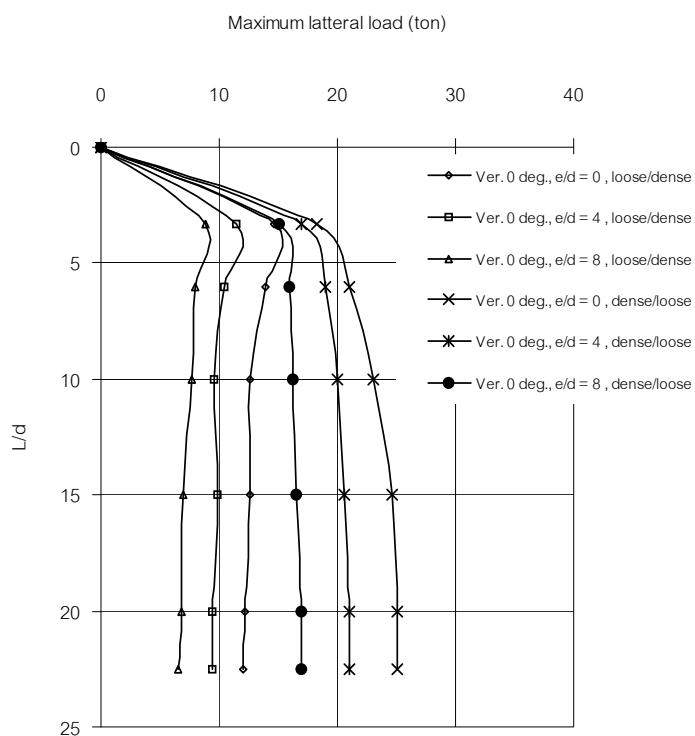
จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มในชั้นดินทราย 2 ชั้น ที่ผ่านมามีแนวโน้มว่าจะเป็น กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ หรือกรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ พบว่าความหนาและคุณสมบัติของดินทรายบริเวณหัวเสาเข็มจะมีผลต่อความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างในแต่ละมุมเอียงของเสาเข็ม ซึ่งผู้วิจัยได้แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของระยะการฝังตัวของเสาเข็มในดินทรายชั้นบนกับขนาดของเสาเข็ม ($\frac{L}{d}$) ต่อความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด (Maximum lateral load) ดังแสดงในภาพที่ 5.32 ถึง 5.36



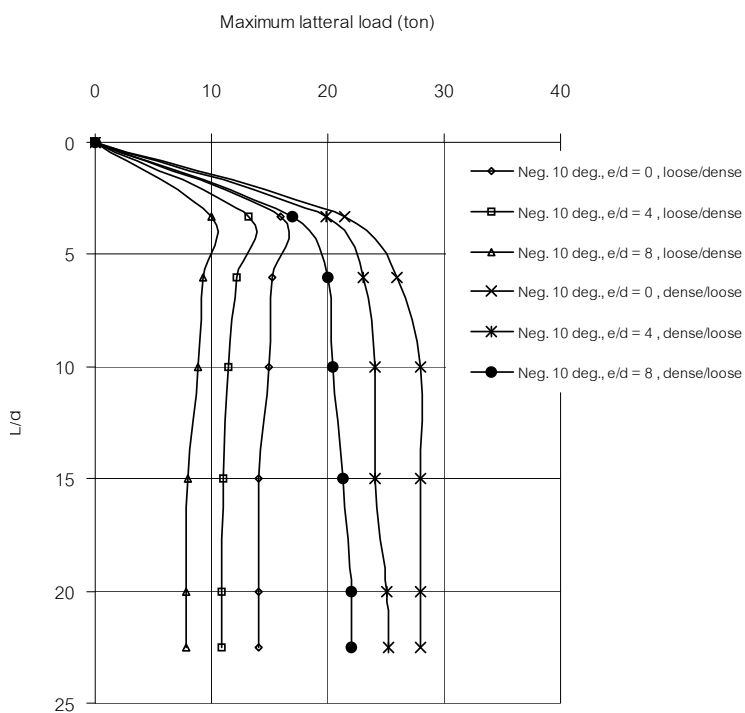
ภาพที่ 5.32 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการฝังตัวของเสาเข็มและขนาดของเสาเข็ม ($\frac{L}{d}$) ต่อความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด ของเสาเข็มเอียง +20° กับแนวตั้ง



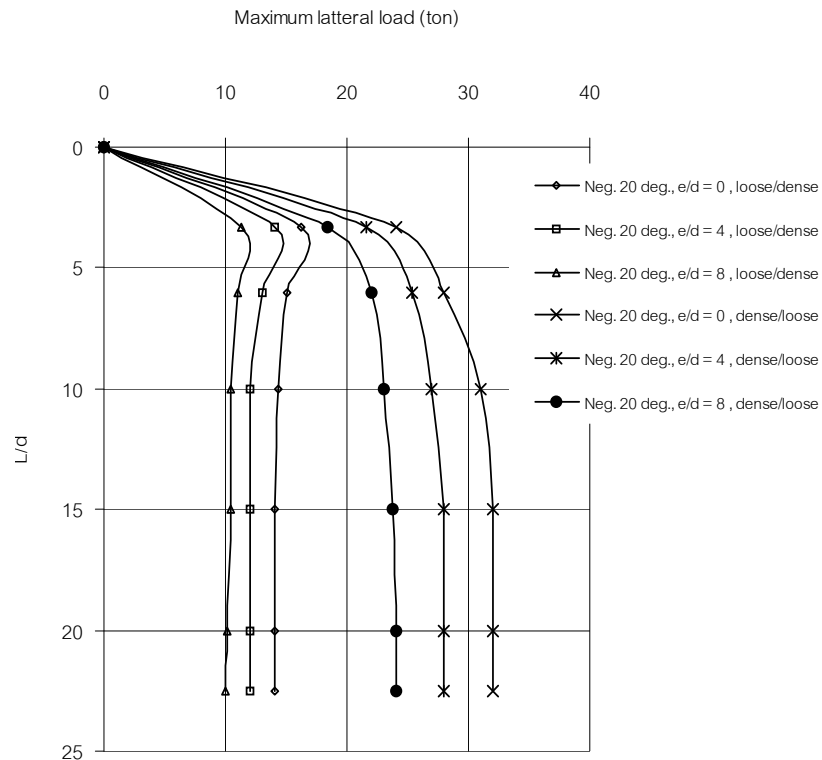
ภาพที่ 5.33 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการฝังตัวของเสาเข็มและขนาดของเสาเข็ม ($\frac{L}{d}$) ต่อความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด ของเสาเข็มเอียง +10° กับแนวตั้ง



ภาพที่ 5.34 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการฝังตัวของเสาเข็มและขนาดของเสาเข็ม ($\frac{L}{d}$)
ต่อความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด ของเสาเข็มเอียง 0° กับแนวดิ่ง



ภาพที่ 5.35 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการฝังตัวของเสาเข็มและขนาดของเสาเข็ม ($\frac{L}{d}$)
ต่อความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด ของเสาเข็มเอียง -10° กับแนวดิ่ง



ภาพที่ 5.36 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการฝังตัวของเสาเข็มและขนาดของเสาเข็ม ($\frac{L}{d}$)

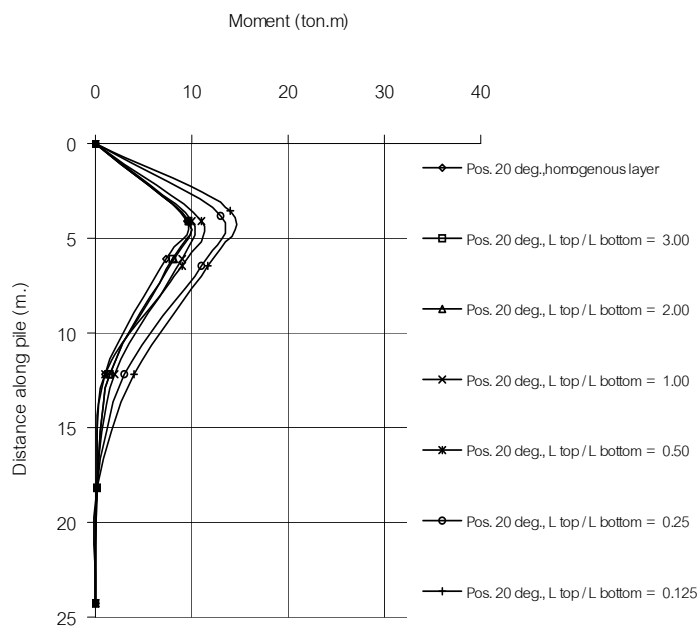
ต่อความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด ของเสาเข็มเอียง -20° กับแนวดิ่ง

จากภาพที่ 5.32 ถึง 5.36 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการฝังตัวของเสาเข็มและขนาดของเสาเข็ม ($\frac{L}{d}$) ต่อความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด (Maximum lateral load) พบว่าการถล่มดินชั้นบนเป็นชั้นทรายหลวม เมื่ออัตราส่วนของระยะการฝังตัวของเสาเข็มในดินทรายเป็นชั้นบนกับขนาดของเสาเข็ม ($\frac{L}{d}$) มีค่าเพิ่มขึ้น ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มจะมีค่าลดลง จนกระทั่งอัตราส่วนของระยะการฝังตัวของเสาเข็มในดินทรายเป็นชั้นบนกับขนาดของเสาเข็ม ($\frac{L}{d}$) มีค่าเท่ากับ 6.00 (ทรายหลวมชั้นบนหนา 4.86 ม.) ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างจะมีค่าคงที่ แม้ว่าความหนาของทรายหลวมชั้นบนจะเพิ่มขึ้นก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากที่ $\frac{L}{d}$ ต่ำๆ ความยาวของเสาเข็มส่วนใหญ่จะมีระยะการฝังตัวในทรายชั้นล่างซึ่งเป็นชั้นทรายแน่นจึงเสมือนเป็นฐานยึดแน่น (Fixed support) ช่วยให้ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความหนาของทรายหลวมชั้นบนมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะการฝังตัวของเสาเข็มในทรายแน่นชั้นล่างลดน้อยลง ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงสูงสุดทางด้านข้างของเสาเข็มมีค่าลดลงด้วย

ส่วนกรณีที่ดินชั้นบนเป็นชั้นทรายแน่น เมื่ออัตราส่วนของระยะการฝังตัวของเสาเข็มในดินทรายชั้นบนกับขนาดของเสาเข็ม ($\frac{L}{d}$) มีค่าเพิ่มขึ้น ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จนกระทั่งอัตราส่วนของระยะการฝังตัวของเสาเข็มในดินทรายชั้นบนกับขนาดของเสาเข็ม ($\frac{L}{d}$) มีค่าเท่ากับ 10 (ทรายแน่นชั้นบนหนา 8.10 ม.) ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างจะมีค่าคงที่ แม้ว่า $\frac{L}{d}$ จะมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าดินทรายบริเวณหัวเสาเข็มที่มีความหนาประมาณ 5 – 8 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม จะมีอิทธิพลผลต่อความสามารถในการรับแรงกระทำสูงสุดทางด้านข้างในแต่ละมุมเอียงของเสาเข็ม

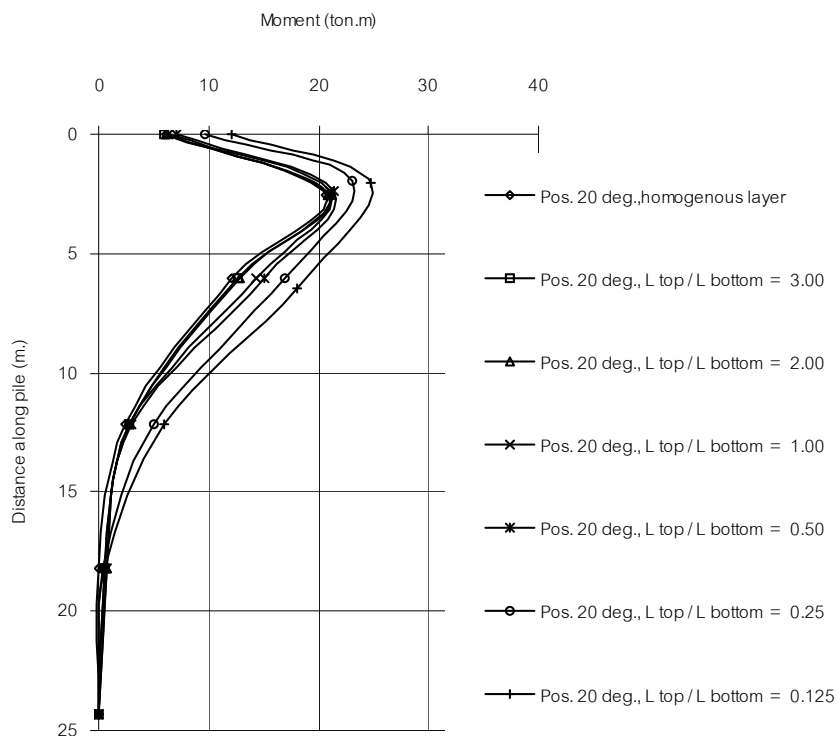
5.3 โมเมนต์ดัด

ในการทดสอบพฤติกรรมของเสาเข็มของเสาเข็มในชั้นดินทราย 2 ชั้นที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน (Non homogenous soil) ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ PLAXIS Version 8.2 เมื่อเริ่มต้นเพิ่มแรงกระทำทางด้านข้างจะทำให้เสาเข็มเกิดการโก่งตัว และทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดขึ้น ดังแสดงค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นตลอดความยาวของเสาเข็ม ในรูปภาพที่ 5.37 ถึง 5.66

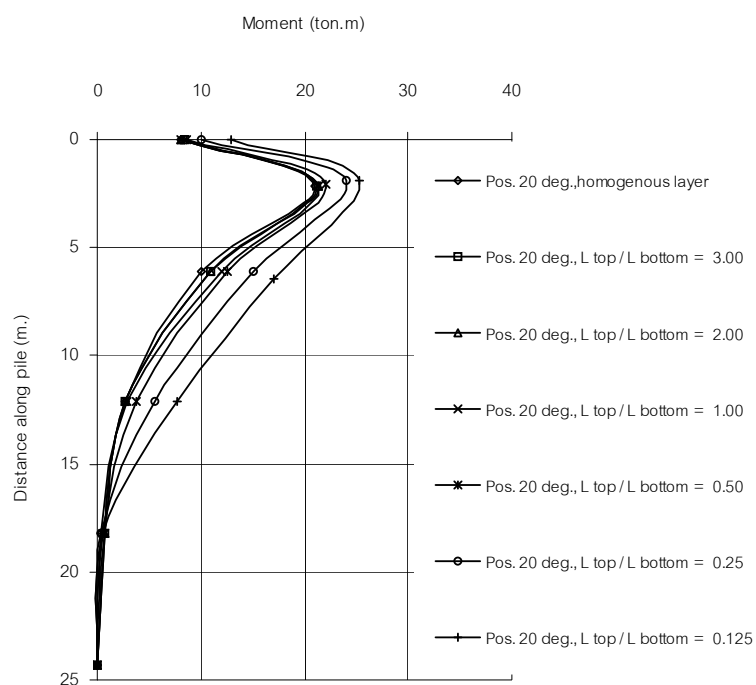


ภาพที่ 5.37 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม

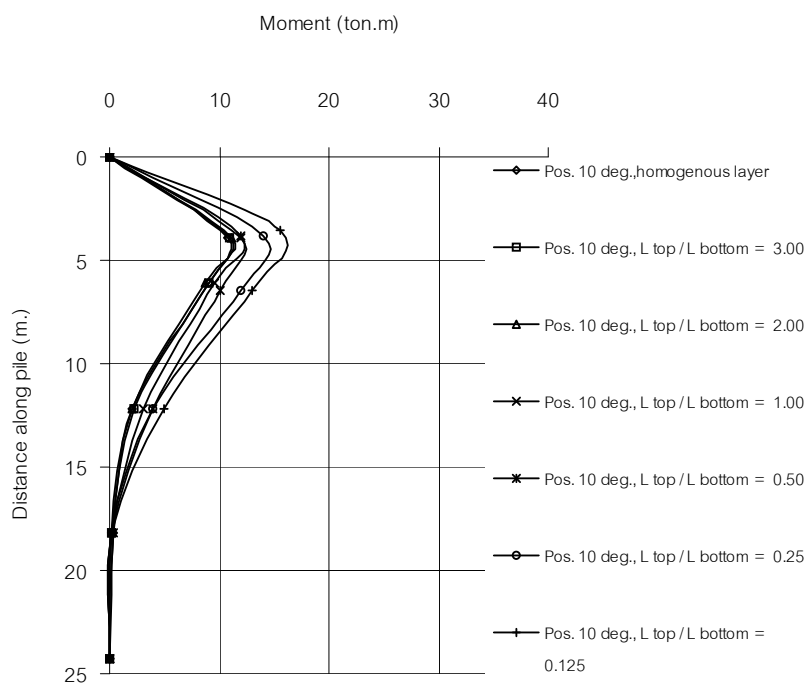
ที่ค่า $e/d = 0$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เสาเข็ม Positive ทำมุม $+20^\circ$ กับแนวดิ่ง



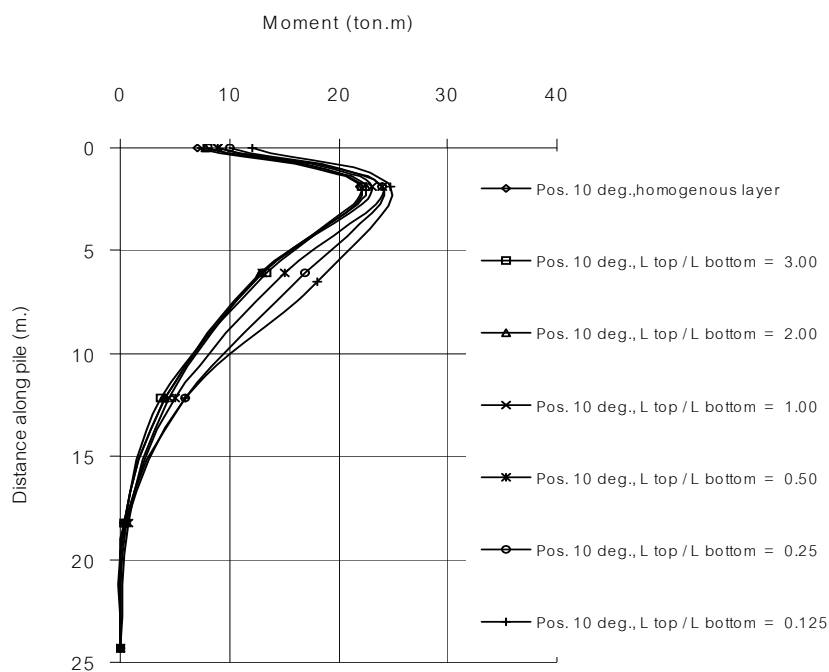
ภาพที่ 5.38 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม
ที่ค่า $e/d = 4$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เสาเข็ม Positive ทำมุม $+20^\circ$ กับแนวดิ่ง



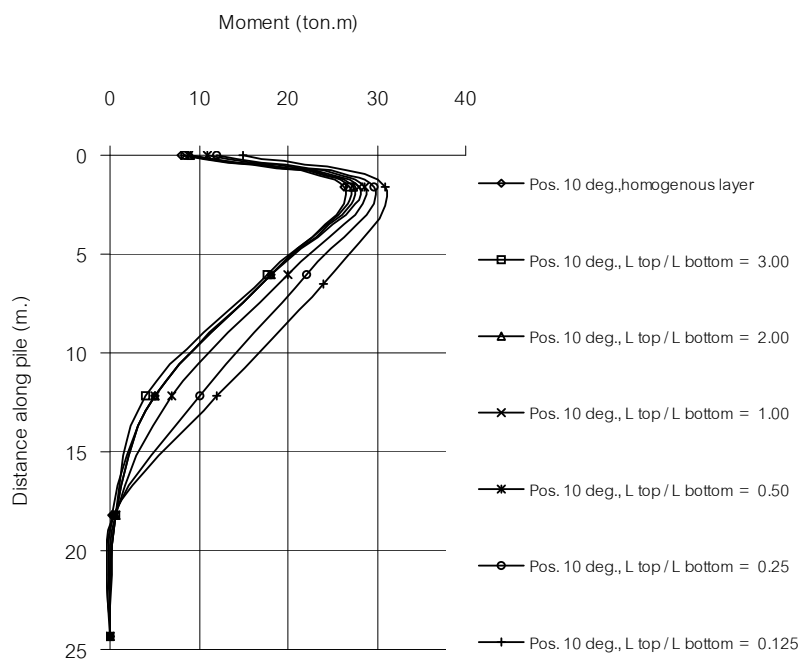
ภาพที่ 5.39 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม
ที่ค่า $e/d = 8$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เสาเข็ม Positive ทำมุม $+20^\circ$ กับแนวดิ่ง



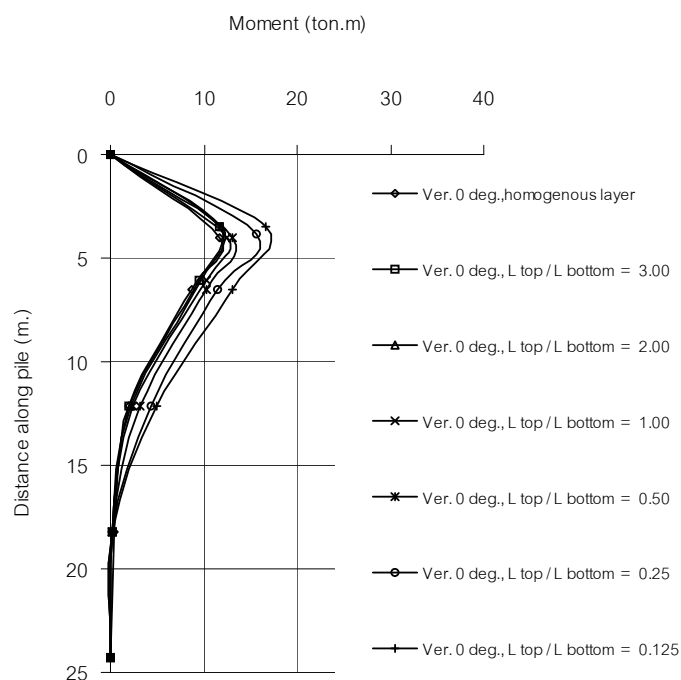
ภาพที่ 5.40 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม
ที่ค่า $e/d = 0$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เสาเข็ม Positive ทำมุม $+10^\circ$ กับแนวดิ่ง



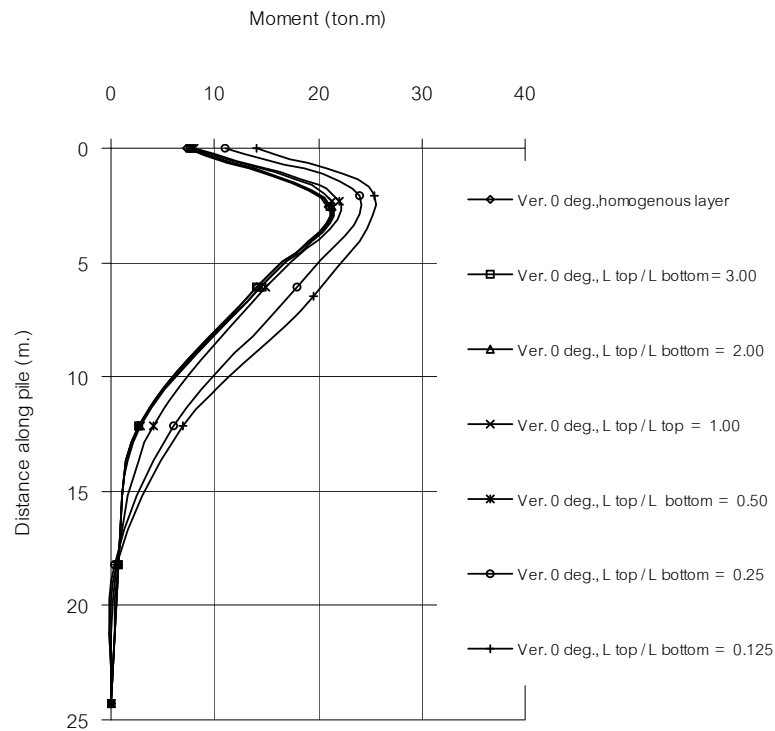
ภาพที่ 5.41 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม
ที่ค่า $e/d = 4$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เสาเข็ม Positive ทำมุม $+10^\circ$ กับแนวดิ่ง



ภาพที่ 5.42 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม
ที่ค่า $e/d = 8$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เสาเข็ม Positive ทำมุม $+10^\circ$ กับแนวดิ่ง

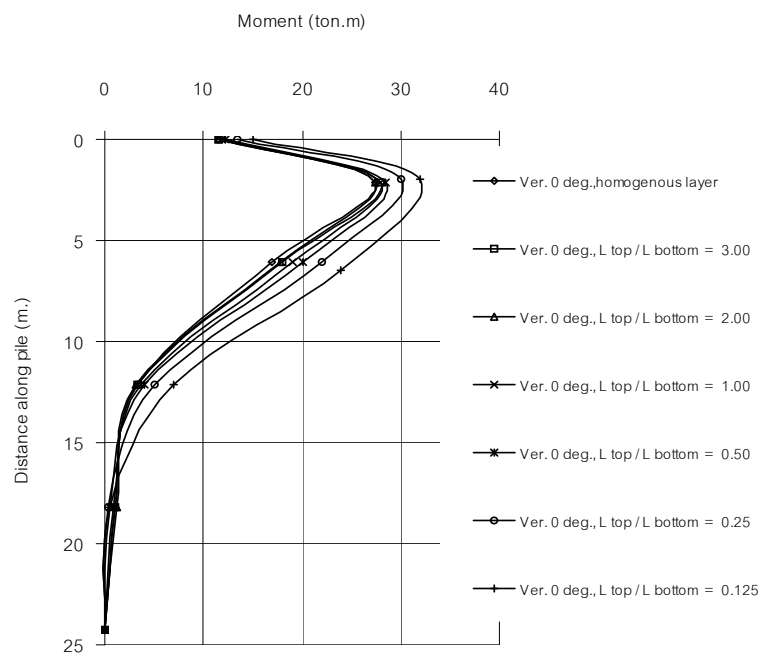


ภาพที่ 5.43 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม
ที่ค่า $e/d = 0$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เสาเข็มแนวดิ่ง



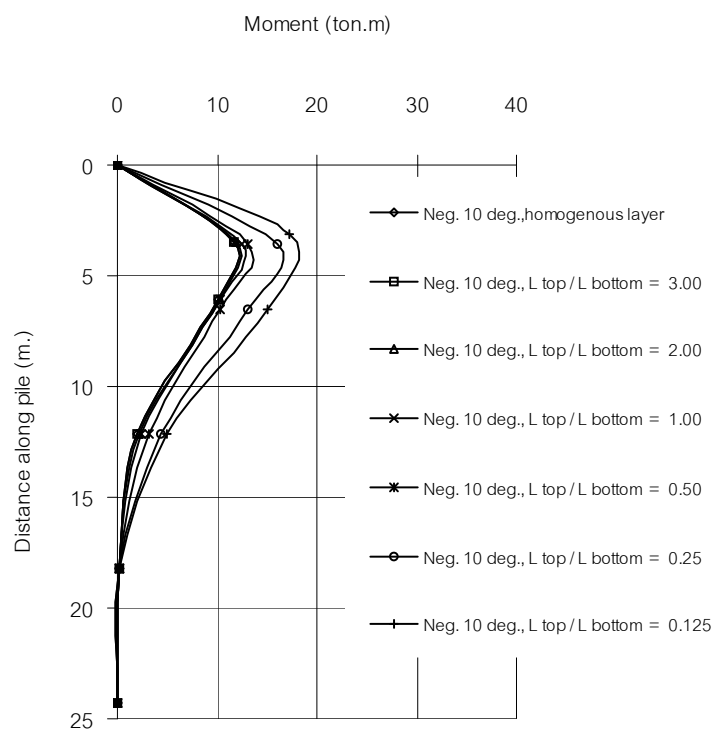
ภาพที่ 5.44 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม

ที่ค่า $e/d = 4$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เสาเข็มแนวตั้ง

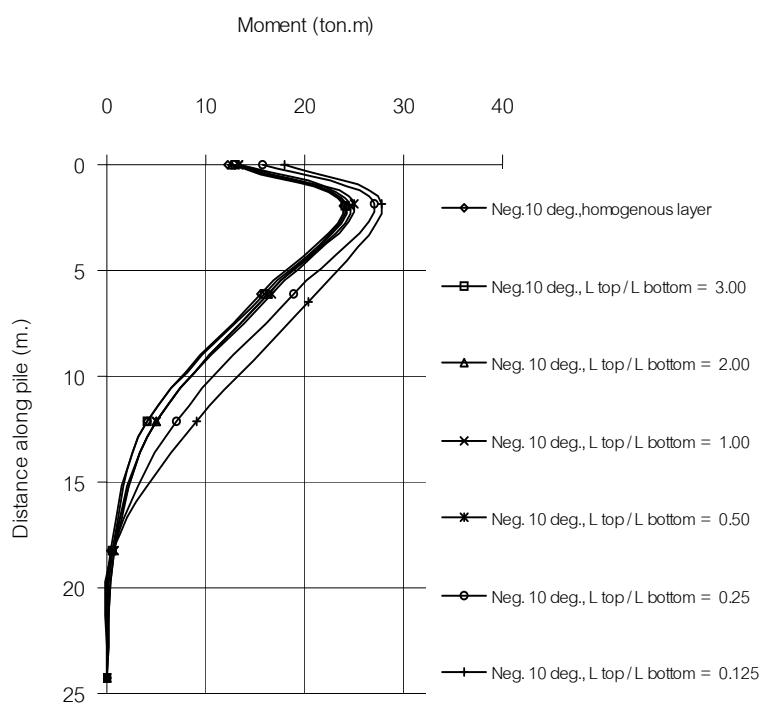


ภาพที่ 5.45 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม

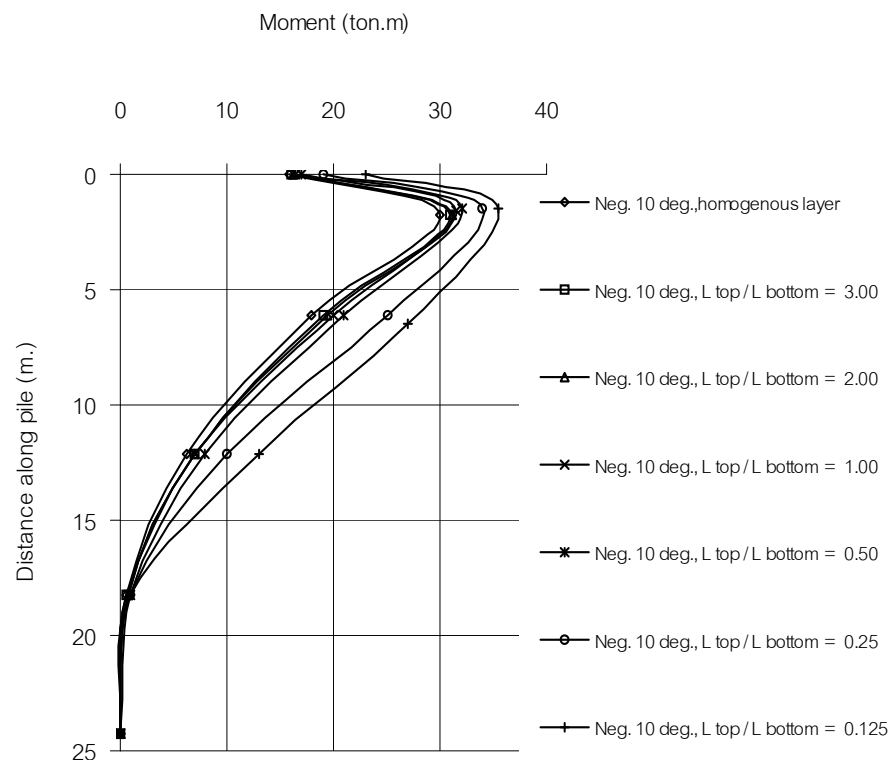
ที่ค่า $e/d = 8$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เสาเข็มแนวตั้ง



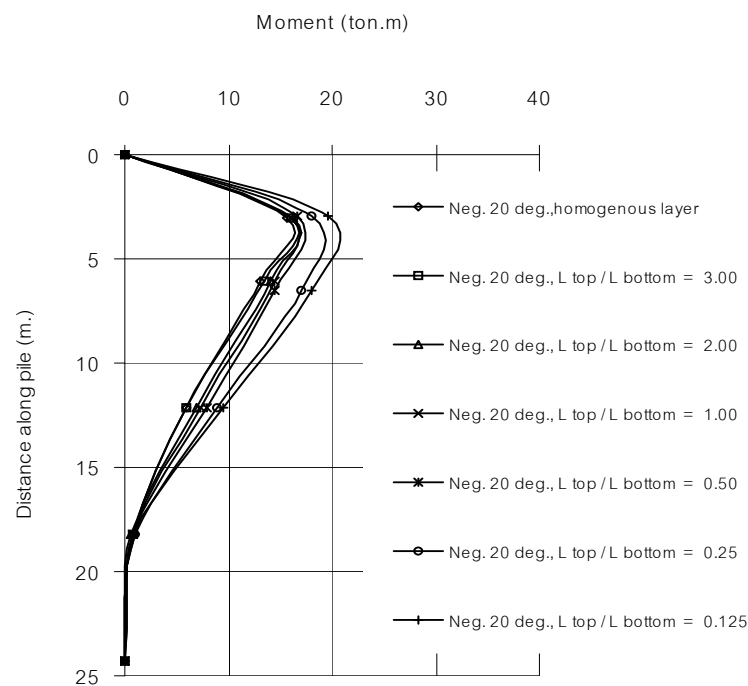
ภาพที่ 5.46 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม
ที่ค่า $e/d = 0$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เสาเข็ม Negative ทำมุม -10° กับแนวดิ่ง



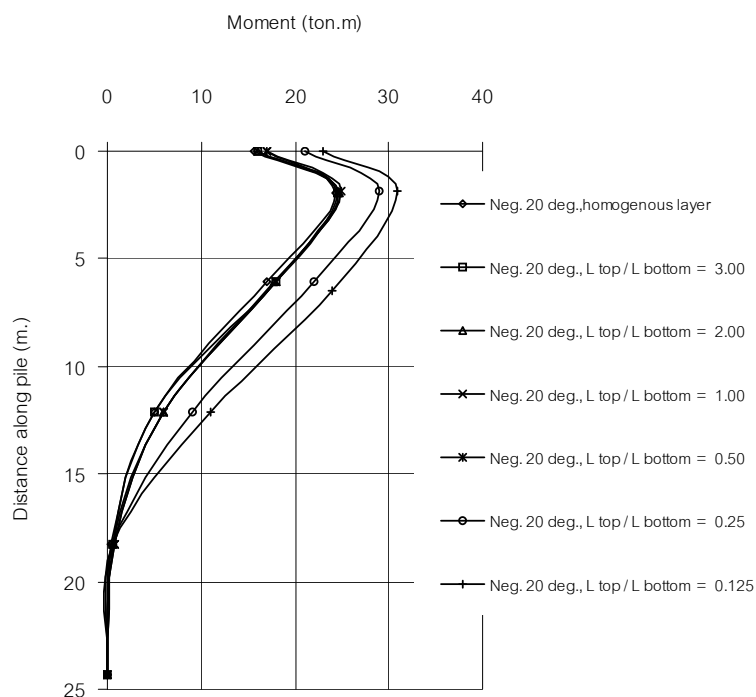
ภาพที่ 5.47 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม
ที่ค่า $e/d = 4$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เสาเข็ม Negative ทำมุม -10° กับแนวดิ่ง



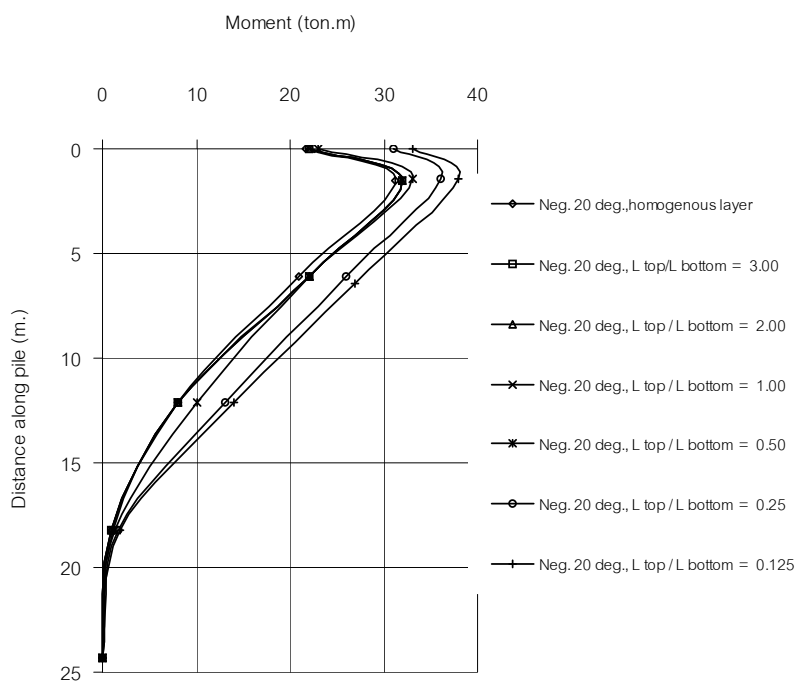
ภาพที่ 5.48 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม
ที่ค่า $e/d = 8$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เสาเข็ม Negative ทำมุม -10° กับแนวดิ่ง



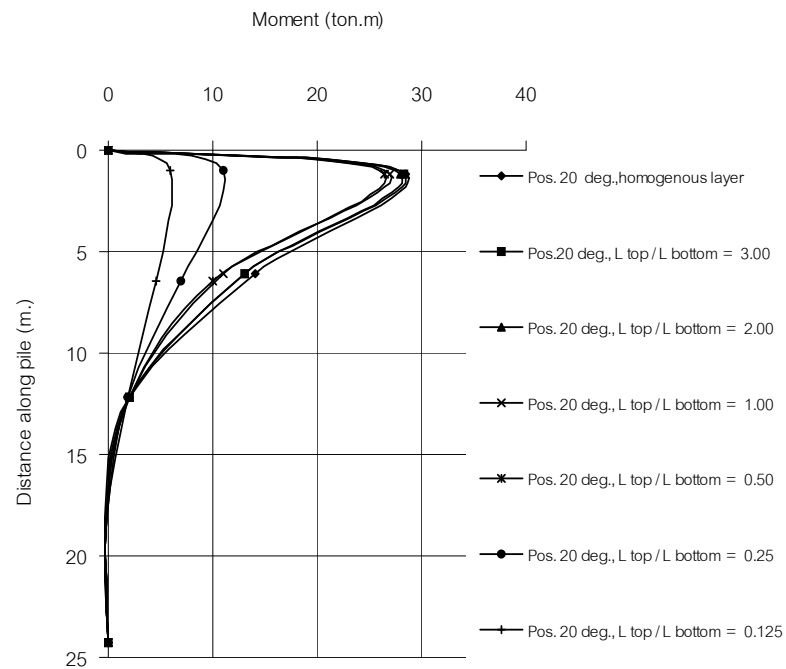
ภาพที่ 5.49 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม
ที่ค่า $e/d = 0$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เสาเข็ม Negative ทำมุม -20° กับแนวดิ่ง



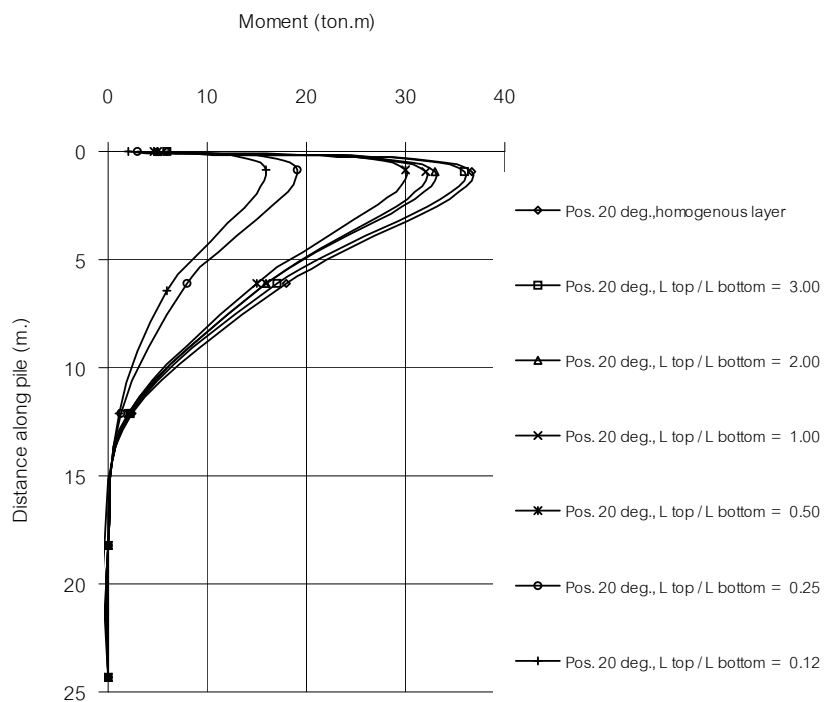
ภาพที่ 5.50 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม
ที่ค่า $e/d = 4$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เสาเข็ม Negative ทำมุม -20° กับแนวดิ่ง



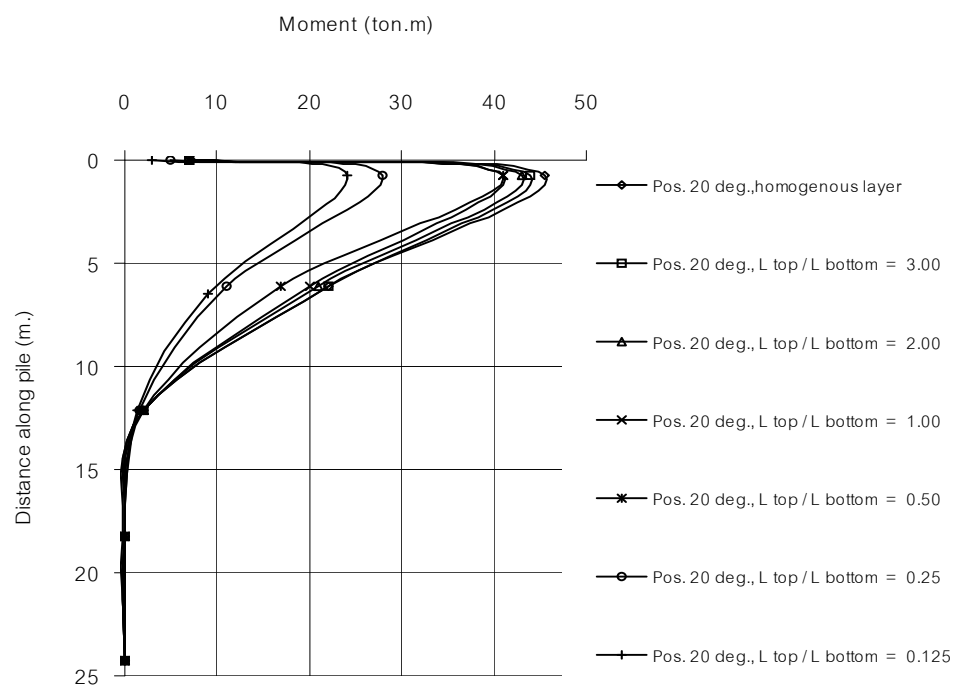
ภาพที่ 5.51 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม
ที่ค่า $e/d = 8$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$ เสาเข็ม Negative ทำมุม -20° กับแนวดิ่ง



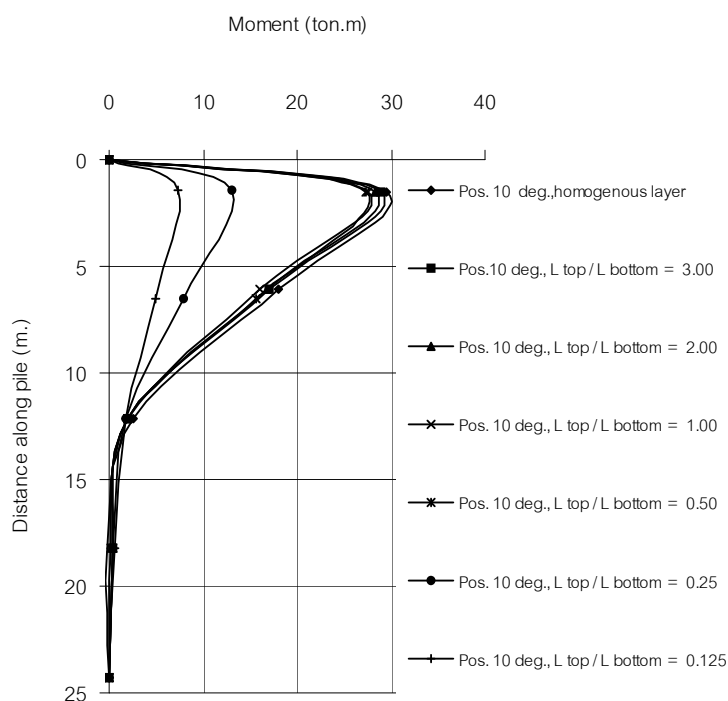
ภาพที่ 5.52 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม
ที่ค่า $e/d = 0$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็ม Positive ทำมุม $+20^\circ$ กับแนวดิ่ง



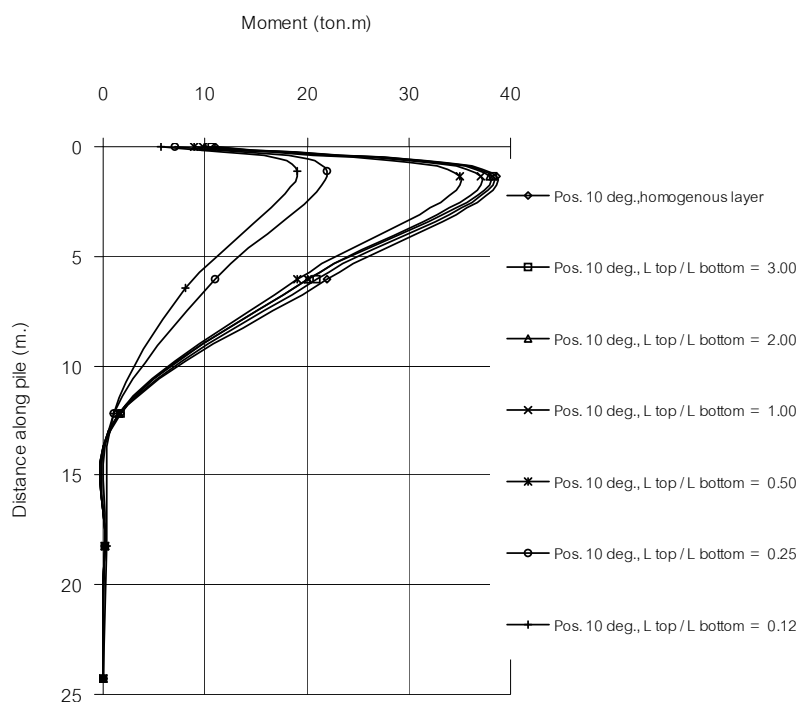
ภาพที่ 5.53 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม
ที่ค่า $e/d = 4$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็ม Positive ทำมุม $+20^\circ$ กับแนวดิ่ง



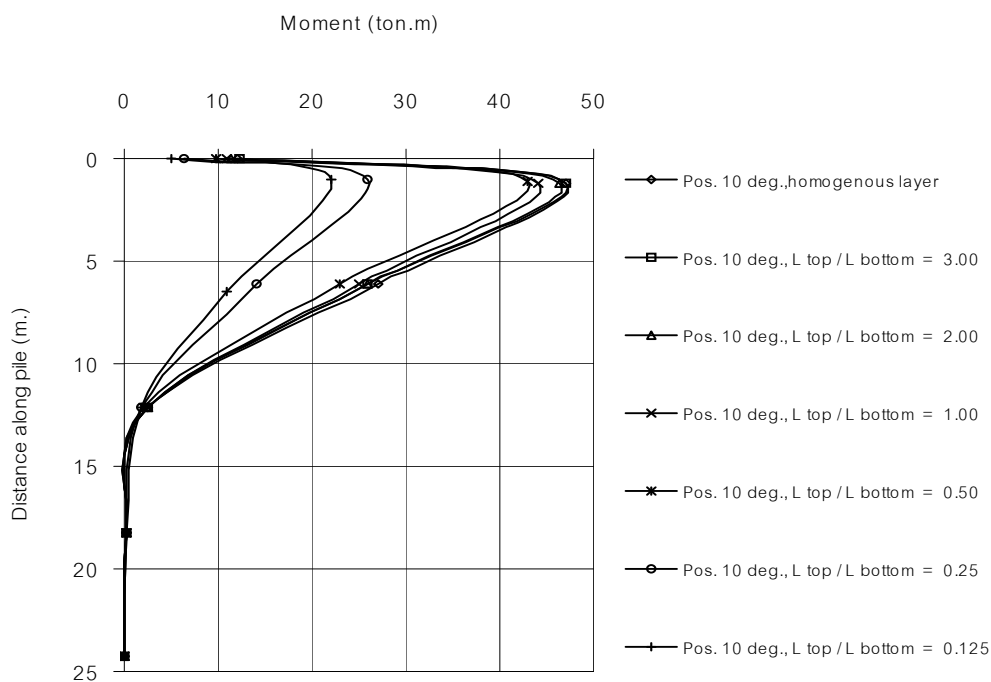
ภาพที่ 5.54 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม
ที่ค่า $e/d = 8$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็ม Positive ทำมุม $+20^\circ$ กับแนวดิ่ง



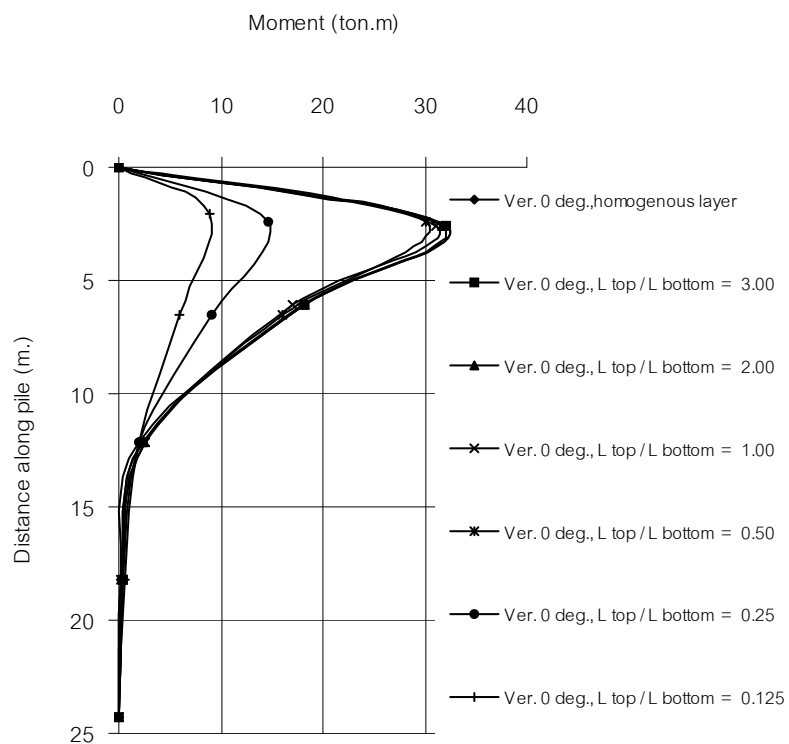
ภาพที่ 5.55 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม
ที่ค่า $e/d = 0$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็ม Positive ทำมุม $+10^\circ$ กับแนวดิ่ง



ภาพที่ 5.56 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม
ที่ค่า $e/d = 4$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็ม Positive ทำมุม $+10^\circ$ กับแนวดิ่ง

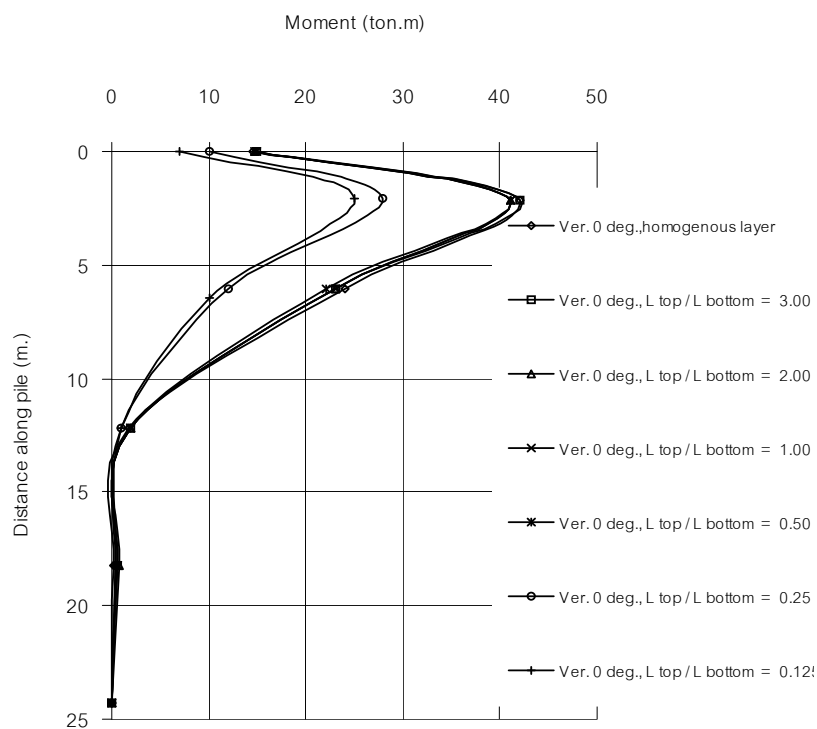


ภาพที่ 5.57 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม
ที่ค่า $e/d = 8$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็ม Positive ทำมุม $+10^\circ$ กับแนวดิ่ง



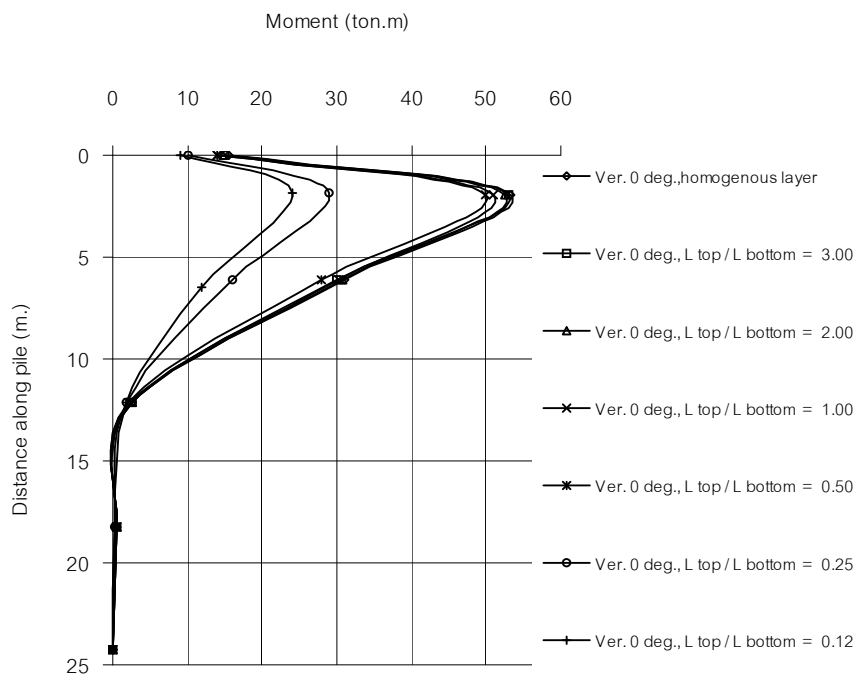
ภาพที่ 5.58 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม

ที่ค่า $e/d = 0$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็มแนวตั้ง



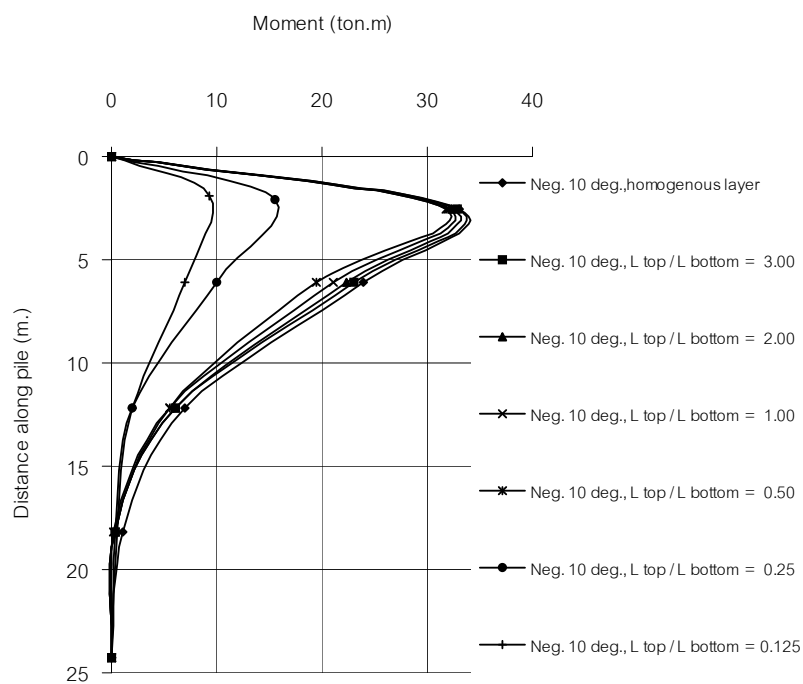
ภาพที่ 5.59 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม

ที่ค่า $e/d = 4$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็มแนวตั้ง



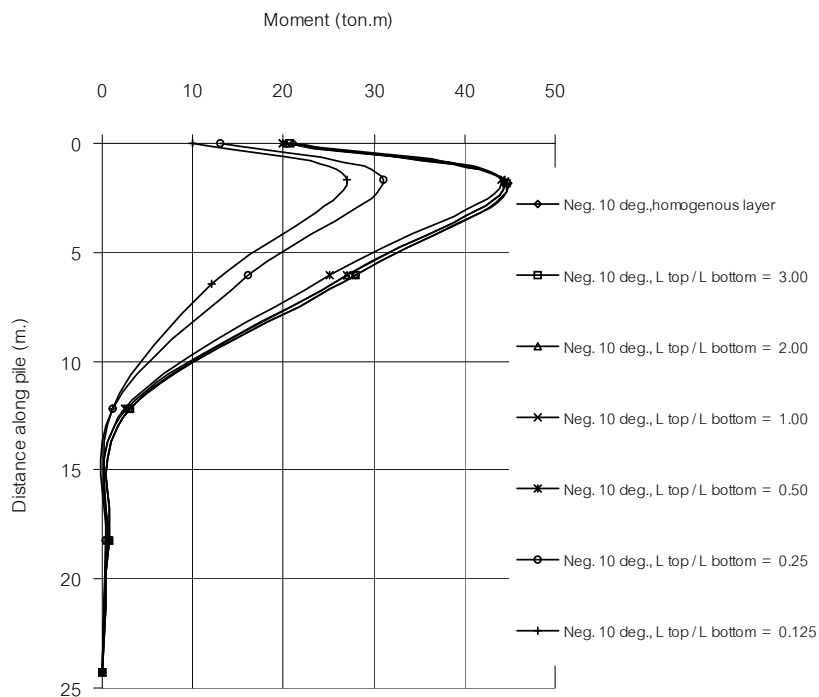
ภาพที่ 5.60 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม

ที่ค่า $e/d = 8$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็มแนวตั้ง

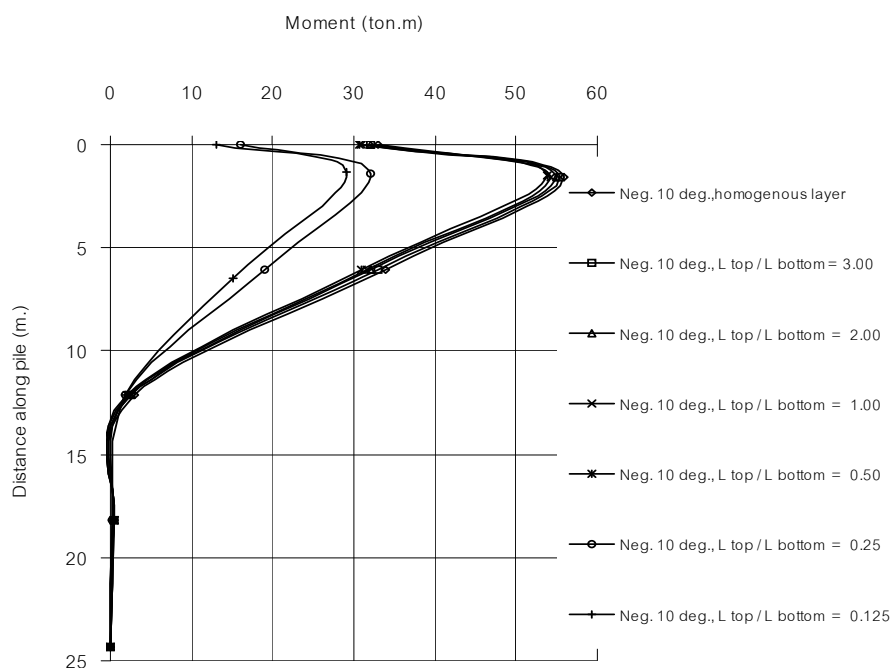


ภาพที่ 5.61 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม

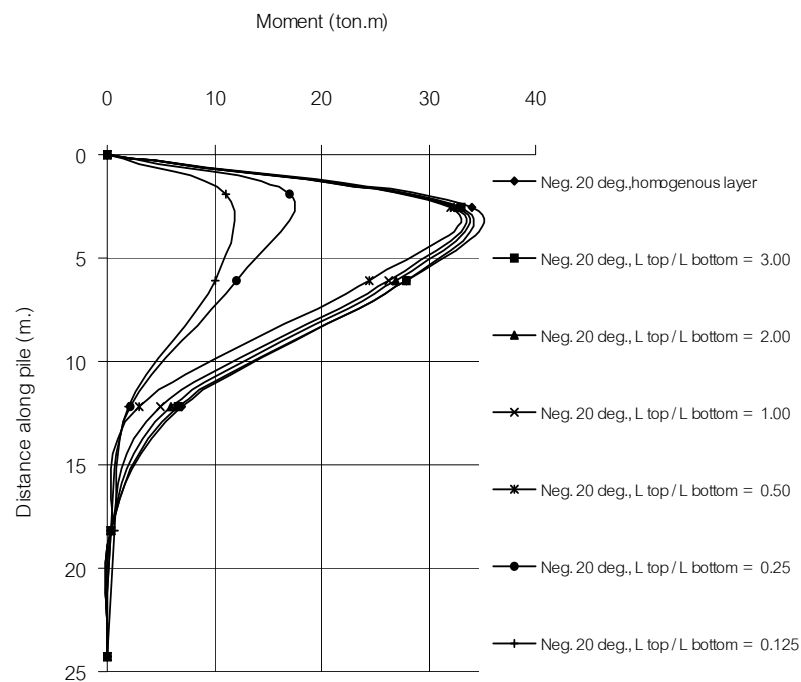
ที่ค่า $e/d = 0$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็ม Negative ทำมุม -10° กับแนวตั้ง



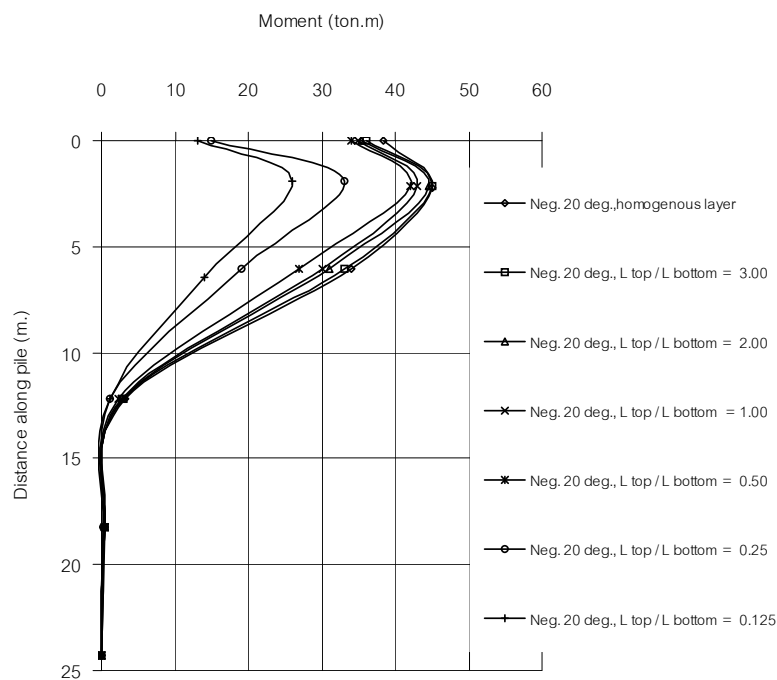
ภาพที่ 5.62 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม
ที่ค่า $e/d = 4$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็ม Negative ทำมุม -10° กับแนวดิ่ง



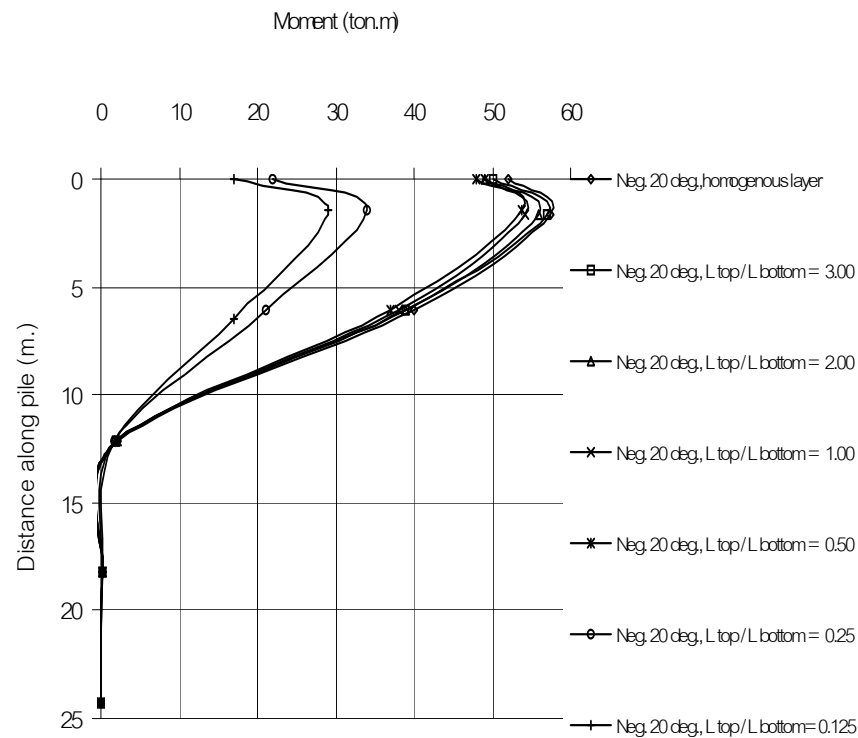
ภาพที่ 5.63 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม
ที่ค่า $e/d = 8$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็ม Negative ทำมุม -10° กับแนวดิ่ง



ภาพที่ 5.64 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม
ที่ค่า $e/d = 0$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็ม Negative ทำมุม -20° กับแนวดิ่ง



ภาพที่ 5.65 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม
ที่ค่า $e/d = 4$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็ม Negative ทำมุม -20° กับแนวดิ่ง



ภาพที่ 5.66 ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ตลอดความยาวของเสาเข็ม

ที่ค่า $e/d = 8$ กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$ เสาเข็ม Negative ทำมุม -20° กับแนวดิ่ง

จากรูปภาพที่ 5.36 ถึง 5.51 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นตลอดความยาวของเสาเข็มที่ฝังตัวอยู่ในชั้นดินทราย 2 ชั้น ซึ่งดินทรายชั้นบนเป็นชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นหลวม (Loose, L_{top}) และดินชั้นล่างเป็นชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นมาก (Dense, L_{bottom}) โมเมนต์ดัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากผิวดิน และจะมีค่าสูงสุด (Maximum bending moment) ที่ระยะความหนาจากผิวดินประมาณ 2 - 5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม (ความหนาประมาณ 1.60 ถึง 4.05 เมตร) จากนั้นโมเมนต์ดัดจะค่อยๆ ลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ ตั้งแต่ที่ความลึกประมาณ 0.70 เท่าของความยาวเสาเข็ม จนกระทั่งถึงส่วนปลายของเสาเข็ม ค่าโมเมนต์ดัดจะมีค่าเป็นศูนย์ และอัตราส่วนของระยะการฝังตัวของเสาเข็มในดินทรายชั้นบนกับขนาดของเสาเข็ม ($\frac{L}{d}$) มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นตลอดความยาวของเสาเข็มมีค่าลดลง เนื่องจากระยะการฝังตัวของเสาเข็มในดินทรายแน่นชั้นล่างมีค่าเปลี่ยนแปลง และเมื่อเพิ่มค่า e/d จาก 0 เป็น 4 และ 8 ตามลำดับ พบว่าจะทำให้โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นตลอดความยาวของเสาเข็มมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่า e/d ทั้งนี้เนื่องมาจากระยะ e ที่เพิ่มขึ้น ทำให้เข็มต้องรับแรงกระทำทางด้านข้างพร้อมกับค่าโมเมนต์ดัด (Hxe) จึงทำให้ค่าโมเมนต์ดัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า e/d (Broms, 1964) เมื่อพิจารณาส่วนปลายของเสาเข็ม พบว่าจะมีลักษณะเสมือนเป็นฐาน

ยึดแน่น (Fixed support) ค่าโมเมนต์ดัดที่ส่วนปลายของเสาเข็มเอียงแบบ Positive เสาเข็มแนวตั้ง และเสาเข็มเอียงแบบ Negative จึงมีค่าเป็นศูนย์

จากรูปภาพที่ 5.52 ถึง 5.66 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นตลอดความยาวของเสาเข็มที่ฝังตัวอยู่ในชั้นดินทราย 2 ชั้น ซึ่งดินทรายชั้นบนเป็นชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นมาก ($Dense, L_{top}$) และดินชั้นล่างเป็นชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นหลวม ($Loose, L_{bottom}$) โมเมนต์ดัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากผิวดิน และจะมีค่าสูงสุด (Maximum bending moment) ที่ระยะความหนาจากผิวดินประมาณ 1.0 – 3.2 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม (ความหนาประมาณ 0.80 ถึง 2.60 เมตร) จากนั้นโมเมนต์ดัดจะมีค่าลดลงเกือบเป็นศูนย์ตั้งแต่ที่ความลึกประมาณ 0.5 เท่าของความยาวเสาเข็ม จนกระทั่งที่ส่วนปลายของเสาเข็มค่าโมเมนต์ดัดจะมีค่าเป็นศูนย์ และอัตราส่วนของระยะการฝังตัวของเสาเข็มในดินทรายชั้นบนกับขนาดของเสาเข็ม ($\frac{L}{d}$) มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าโมเมนต์ดัดค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นตลอดความยาวของเสาเข็มมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะการฝังตัวของเสาเข็มในดินทรายแน่นชั้นล่างมีค่าเปลี่ยนแปลง และเมื่อเพิ่มค่า e/d จาก 0 เป็น 4 และ 8 ตามลำดับ พบว่าจะทำให้โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นตลอดความยาวของเสาเข็มมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่า e/d ทั้งนี้เนื่องมาจากระยะ e ที่เพิ่มขึ้น ทำให้เข็มต้องรับแรงกระทำทางด้านข้างพร้อมกับค่าโมเมนต์ดัด (Hxe) จึงทำให้ค่าโมเมนต์ดัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า e/d (Broms, 1964) เมื่อพิจารณาค่าโมเมนต์ดัดที่ส่วนปลายของเสาเข็มเอียงแบบ Positive เสาเข็มแนวตั้ง และเสาเข็มเอียงแบบ Negative พบว่ากรณีที่ดินชั้นล่างเป็นดินที่มีความหนาแน่นหลวม ที่ส่วนปลายของเสาเข็มจะมีสภาพการยึดแน่นน้อยกว่า กรณีดินชั้นล่างเป็นทรายแน่น ซึ่งเนื่องมาจาก Soil stiffness และ Flexural rigidity ของเสาเข็ม โดยค่าโมเมนต์ดัดส่วนปลายของเสาเข็มกรณีเสาเข็มเอียงแบบ Positive จะมีค่าติดลบ ส่วนกรณีเสาเข็มแนวตั้ง และเสาเข็มเอียงแบบ Negative ค่าโมเมนต์ที่ส่วนปลายจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากมุมเอียงของเสาเข็ม และแรงดันดินที่กระทำต่อเสาเข็ม

ตารางที่ 5.2

เปรียบเทียบค่าโมเมนต์สูงสุดของเสาเข็มในดินทราย 2 ชั้นที่มีความหนาแน่นต่างกัน
จากการวิเคราะห์ FEM กรณี เสาเข็มเอียงแบบ Positive +20° กับแนวดิ่ง

อัตราส่วน ระยะฝังตัว ของเสาเข็ม	ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็ม (ตัน-เมตร)					
	กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$			กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$		
	e/d = 0	e/d = 4	e/d = 8	e/d = 0	e/d = 4	e/d = 8
0.125	14.00	24.70	25.30	6.04	16.08	24.32
0.25	13.00	21.40	24.02	11.16	19.35	28.13
0.50	11.03	21.44	22.02	26.42	30.01	41.41
1.00	10.10	21.02	21.42	27.01	32.04	41.01
2.00	9.73	20.43	20.92	28.03	33.21	43.03
3.00	9.31	19.71	20.06	28.36	36.74	44.06

ตารางที่ 5.3

เปรียบเทียบค่าโมเมนต์สูงสุดของเสาเข็มในดินทราย 2 ชั้นที่มีความหนาแน่นต่างกัน
จากการวิเคราะห์ FEM กรณี เสาเข็มเอียงแบบ Positive +10° กับแนวดิ่ง

อัตราส่วน ระยะฝังตัว ของเสาเข็ม	ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็ม (ตัน-เมตร)					
	กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$			กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$		
	e/d = 0	e/d = 4	e/d = 8	e/d = 0	e/d = 4	e/d = 8
0.125	15.53	24.71	31.10	7.32	19.02	22.11
0.25	14.02	24.10	29.63	13.11	22.21	26.05
0.50	12.01	23.72	28.61	27.34	35.02	43.02
1.00	11.77	23.01	27.92	27.92	36.81	43.78
2.00	10.92	22.22	27.20	28.22	38.06	46.36
3.00	10.63	22.04	27.02	29.04	38.38	47.03

ตารางที่ 5.4

เปรียบเทียบค่าโมเมนต์สูงสุดของเสาเข็มในดินทราย 2 ชั้นที่มีความหนาแน่นต่างกัน

จากการวิเคราะห์ FEM กรณี เสาเข็มแนวตั้ง

อัตราส่วน ระยะฝังตัว ของเสาเข็ม	ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็ม (ตัน-เมตร)					
	กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$			กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$		
	e/d = 0	e/d = 4	e/d = 8	e/d = 0	e/d = 4	e/d = 8
0.125	16.73	25.54	32.12	8.93	25.04	24.02
0.25	15.61	24.03	35.88	14.64	28.24	29.13
0.50	13.22	22.32	28.41	30.27	41.20	50.23
1.00	12.41	21.44	28.03	31.33	41.44	50.45
2.00	11.86	21.27	27.56	31.72	41.06	52.16
3.00	11.37	20.48	27.38	32.33	42.20	53.42

ตารางที่ 5.5

เปรียบเทียบค่าโมเมนต์สูงสุดของเสาเข็มในดินทราย 2 ชั้นที่มีความหนาแน่นต่างกัน

จากการวิเคราะห์ FEM กรณี เสาเข็มเอียงแบบ Negative -10° กับแนวตั้ง

อัตราส่วน ระยะฝังตัว ของเสาเข็ม	ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็ม (ตัน-เมตร)					
	กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$			กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$		
	e/d = 0	e/d = 4	e/d = 8	e/d = 0	e/d = 4	e/d = 8
0.125	17.31	27.07	35.51	9.35	27.10	29.10
0.25	16.14	27.23	28.02	15.51	31.07	32.40
0.50	13.15	25.13	32.22	31.71	44.30	51.16
1.00	12.40	24.46	31.04	32.06	44.26	53.81
2.00	11.82	24.25	30.25	32.44	44.91	54.31
3.00	11.41	24.06	30.07	33.30	45.22	55.01

ตารางที่ 5.6

เปรียบเทียบค่าโมเมนต์สูงสุดของเสาเข็มในดินทราย 2 ชั้นที่มีความหนาแน่นต่างกัน

จากการวิเคราะห์ FEM กรณี เสาเข็มเอียงแบบ Negative -20° กับแนวดิ่ง

อัตราส่วน ระยะฝังตัว ของเสาเข็ม	ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็ม (ตัน-เมตร)					
	กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$			กรณี $\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$		
	e/d = 0	e/d = 4	e/d = 8	e/d = 0	e/d = 4	e/d = 8
0.125	19.71	31.10	38.01	11.10	25.27	29.22
0.25	18.01	29.12	35.19	17.13	32.56	34.81
0.50	16.81	26.43	33.07	31.82	42.11	53.41
1.00	16.21	24.61	32.30	32.41	43.40	54.32
2.00	16.03	24.12	31.07	32.72	44.52	56.30
3.00	16.20	24.10	31.20	33.30	45.73	57.10

จากตารางที่ 5.2 ถึง 5.6 ซึ่งได้แสดงค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็มที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ในดินทราย 2 ชั้นที่มีความหนาแน่นต่างกัน พบว่ากรณีดินทรายชั้นบนเป็นชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นหลวม ($Loose, L_{top}$) และดินชั้นล่างเป็นชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นมาก ($Dense, L_{bottom}$) เมื่ออัตราส่วนของระยะการฝังตัวของเสาเข็มในดินชั้นบน ต่อระยะการฝังตัวของเสาเข็มในดินชั้นล่าง ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Loose}{Dense}$) มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดจะมีค่าลดลง โดยเสาเข็มที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวของเสาเข็มในดินชั้นบนต่อดินชั้นล่าง $\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$ ที่มีค่าตั้งแต่ 0.50 ขึ้นไป ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็มที่เกิดจะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งจะต่างกันประมาณ 2 – 5% แต่สำหรับเสาเข็มที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวของเสาเข็มในดินชั้นบนต่อดินชั้นล่าง $\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$ ที่มีค่าต่ำกว่า 0.50 จะทำให้ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างของเสาเข็มมีค่าลดลงจากเดิมประมาณ 0.93 เท่า

ส่วนกรณีดินทรายชั้นบนเป็นชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นมาก ($Dense, L_{top}$) และดินชั้นล่างเป็นชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นหลวม ($Loose, L_{bottom}$) พบว่าเมื่ออัตราส่วนของระยะการฝัง

ตัวของเสาเข็มในดินชั้นบน ต่อระยะการฝังตัวของเสาเข็มในดินชั้นล่าง ($\frac{L_{top}}{L_{bottom}} = \frac{Dense}{Loose}$) มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย และพบว่าเสาเข็มที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวของเสาเข็มในดินชั้นบนต่อดินชั้นล่าง $\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$ ที่มีค่าตั้งแต่ 0.50 ขึ้นไป ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็มที่เกิดจะมีค่าต่างกันประมาณ 8 – 12% แต่สำหรับเสาเข็มที่มีอัตราส่วนของระยะการฝังตัวของเสาเข็มในดินชั้นบนต่อดินชั้นล่าง $\frac{L_{top}}{L_{bottom}}$ ที่มีค่าต่ำกว่า 0.50 จะทำให้ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างของเสาเข็มมีค่าลดลงจากเดิมประมาณ 1.25 เท่า

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มตึก และเสาเข็มเอียงในดินทรายที่มีคุณสมบัติเดียวกับตลอดความลึก และดินทราย 2 ชั้น ที่มีความหนาแน่นที่แตกต่างกัน ภายใต้แรงกระทำทางด้านข้าง โดยใช้โปรแกรม PLAXIS Version 8.2 เปรียบเทียบกับผลการทดสอบแบบจำลองของเสาเข็มในชั้นดินทรายที่รับแรงกระทำทางด้านข้างของ พัฒนศักดิ์ อบเชย (2003) และจากการคำนวณตามทฤษฎีของ Broms ทั้งนี้เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด ลักษณะการเคลื่อนตัว และโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นตลอดความยาวของเสาเข็ม ที่อัตราส่วนการฝังยึดเท่ากับ 30 และมีมุมเอียงของเสาเข็มจาก -20° , -10° , 0° , $+10^\circ$ และ $+20^\circ$ กับแนวตั้ง ในดินทรายที่มีความหนาแน่นหลวม ($\%D_r = 30\%$) และความหนาแน่นมาก ($\%D_r = 70\%$) มีอัตราส่วนระยะเยื้องศูนย์กลางต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (e/d) เท่ากับ 0, 4 และ 8 โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Full Scale Model) ทดสอบโดยการเพิ่มแรงกระทำทางด้านข้างบริเวณหัวเสาเข็มของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Full Scale Model) ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งดินทรายที่อยู่ด้านหน้าของเสาเข็มพิบัติ (Failure load) ซึ่งจากการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. คุณสมบัติของชั้นดิน และคุณสมบัติของเสาเข็ม ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ สรุปได้ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ค่าพารามิเตอร์	Name	ทรายหลวม	ทรายแน่น	เสาเข็ม	Unit
Material model	<i>Model</i>	Mohr-columb	Mohr-columb	Linear	-
Material behaviour	<i>Type</i>	drained	Drained	undrained	-
Dry soil unit weight	γ_{dry}	14.5	16.2	-	kN/m ³
Wet soil unit weight	γ_{wet}	14.5	16.2	-	kN/m ³
Young's modulus	E_u	4,775	10,700	19E+06	kN/m ²
Poisson's ratio	ν	0.25	0.23	0.33	-
Friction angle	ϕ'	41.71°	43.85°	-	[°]
Dilatancy angle	Ψ	11.71°	13.85°	-	[°]
Cohesion	c	0	0	-	kN/m ²
Reduction factor	R_{inter}	0.839	0.799	-	-
Normal stiffness	EA	-	-	1.396E+06	kN
Flexural rigidity	EI	-	-	1.064E+05	kN.m ²

2. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ จะพิจารณาปัญหาเป็นแบบ 2 มิติ (Plane Strain) และจะแบ่งเอลิเมนต์เป็นแบบสามเหลี่ยม(Triangular Element) ใน 1 เอลิเมนต์ ประกอบด้วย 6 node นอกจากนี้ยังสามารถปรับความละเอียดของ เอลิเมนต์ของโครงสร้าง (mesh refinement) เป็น 5 ระดับ คือ very coarse , coarse , meduim , fine , very fine สำหรับการวิจัยนี้เลือกปรับขนาดขึ้นส่วนในระดับ fine กำหนด Boundary condition ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ให้การเคลื่อนตัวของจุดต่อที่อยู่บนขอบเขตบางส่วน ถูกจำกัดในทิศทางที่กำหนด โดยพยายามจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างให้ใกล้เคียงกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ให้มากที่สุด โดยกำหนดให้จำกัดการเคลื่อนตัวที่ระนาบขอบเขตต่างๆ ดังนี้

ขอบเขตด้านข้าง เป็นแบบเคลื่อนตัวได้ในแนวดิ่ง (Roller)

ขอบเขตด้านล่าง เป็นแบบไม่สามารถเคลื่อนตัวได้ทั้งสองแนว (Fixed)

และเพื่อหลีกเลี่ยงขอบเขตอิทธิพล (Zone of Influence) ขอบด้านซ้ายและขวาของแบบจำลองควรอยู่ห่างจากเสาเข็มไม่น้อยกว่า 12 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม และขอบด้านล่างของแบบจำลองควรอยู่ห่างจากเสาเข็มไม่น้อยกว่า 5 – 8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้ระยะห่างจากเสาเข็มถึงขอบด้านซ้ายและขวาของแบบจำลอง ที่ระยะ 40 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม และปลายเสาเข็มห่างจากขอบด้านล่างประมาณ 12 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ซึ่งระยะดังกล่าวเป็นค่าที่มากเพียงพอเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนทางด้านข้าง

3. ในการทดสอบพฤติกรรมของเสาเข็มในชั้นดินทรายที่ที่รับแรงกระทำทางด้านข้างด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ PLAXIS วิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มเอียงแบบ Negative ที่ทำมุม -20° , -10° กับแนวดิ่ง เสาเข็มตั้ง และเสาเข็มเอียงแบบ Positive ที่ทำมุม $+10^\circ$, $+20^\circ$ กับแนวดิ่ง ในชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นหลวม (Loose) เท่ากับ 1.45 g/cm^3 และค่าความหนาแน่นมาก (Dense) เท่ากับ 1.62 g/cm^3 โดยมีอัตราส่วนความยาวของเสาเข็มที่ฝังในชั้นดินทรายต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (L/d) เท่ากับ 30 และมีอัตราส่วนระยะเอียงศูนย์กลางต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (e/d) เท่ากับ 0 , 4 และ 8 โดยการเพิ่มแรงกระทำทางด้านข้างที่กระทำต่อแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Full Scale Model) ไปเรื่อยๆ จะเห็นว่าเมื่อมีแรงทางด้านข้างกระทำ เสาเข็มจะเกิดการเคลื่อนตัวออกจากตำแหน่งเดิมไปในทิศทางเดียวกับแรงที่กระทำ ซึ่งพบว่าความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างของเสาเข็มในชั้นดินทรายหลวม (loose) และทรายแน่น (dense) นั้นขึ้นอยู่กับการพัฒนากำลังรับแรงกระทำทางด้านข้างของมวลดิน (failure mode) ที่อยู่ทางด้านหน้าของเสาเข็ม ซึ่งค่าแรงกระทำทางด้านข้างและระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มบริเวณผิวดิน ณ ตำแหน่งที่วิบัติ (failure load) จะเป็นค่าแรงกระทำทางด้านข้างและระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็ม และพบว่าเสาเข็มเอียงแบบ Negative ที่ทำมุม -10° , -20° กับแนวดิ่ง การพัฒนากำลังรับแรงกระทำทางด้านข้างของมวลดิน (failure mode) ที่อยู่ด้านหน้าของเสาเข็ม จะมีลักษณะคล้ายการพิบัติแบบ Bearing capacity failure จึงทำให้เสาเข็มมีความสามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างได้สูงสุด ส่วนกรณีเสาเข็มแนวดิ่ง และเสาเข็มเอียงแบบ Positive ที่ทำมุม $+10^\circ$, $+20^\circ$ กับแนวดิ่ง ระนาบของการพิบัติของมวลดิน (failure plane) ที่อยู่ด้านหน้าของจะมีลักษณะคล้ายการพิบัติแบบ Passive Failure ซึ่งความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างจะมีค่าลดลงตามมุมเอียงของเสาเข็มที่เพิ่มขึ้น สำหรับเสาเข็มในชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นหลวม (loose) เสาเข็มที่เอียงแบบ Negative (เอียงทำมุม -10° , -20° กับแนวดิ่ง) จะมีค่าแรงกระทำทางด้านข้าง

เพิ่มขึ้นตามลำดับมุมเอียงของเสาเข็มเล็กน้อย โดยมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1.15 เท่าของเสาเข็มในแนวดิ่ง ในขณะที่เสาเข็มที่เอียงแบบ Positive (เอียงทำมุม $+10^\circ$, $+20^\circ$ กับแนวดิ่ง) จะมีค่าแรงกระทำทางด้านข้างลดลงตามลำดับมุมเอียงของเสาเข็มเล็กน้อย จากเสาเข็มดิ่ง โดยมีค่าลดลงประมาณ 0.91 เท่าของเสาเข็มในแนวดิ่ง ซึ่งตรงกันข้ามกับในชั้นทรายที่มีความหนาแน่นมาก (dense) ค่าความเอียงของเสาเข็มมีผลมากต่อความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างของเสาเข็ม โดยเสาเข็มที่เอียงแบบ Negative (เอียงทำมุม -10° , -20° กับแนวดิ่ง) จะมีค่าแรงกระทำทางด้านข้างเพิ่มขึ้นตามลำดับมุมเอียงของเสาเข็มมาก โดยมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1.33 เท่าของเสาเข็มในแนวดิ่ง ในขณะที่เสาเข็มที่เอียงแบบ Positive (เอียงทำมุม $+10^\circ$, $+20^\circ$ กับแนวดิ่ง) จะมีค่าแรงกระทำทางด้านข้างลดลงตามลำดับมุมเอียงของเสาเข็มเล็กน้อย จากเสาเข็มดิ่ง โดยมีค่าลดลงประมาณ 0.73 เท่าของเสาเข็มในแนวดิ่ง ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าเสาเข็มที่เอียงแบบ Negative จะมีความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างได้สูงสุด ในขณะที่เสาเข็มแนวดิ่ง และเสาเข็มที่เอียงแบบ Positive จะมีความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างลดลงตามลำดับ

4. ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็มที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ในชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นหลวม (Loose) พบว่าค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับการเอียงของเสาเข็มจาก $+20^\circ$, $+10^\circ$, 0° , -10° และ -20° กับแนวดิ่ง ซึ่งโมเมนต์ดัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นน้อย คือมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 0.93 เท่าของค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เพิ่มขึ้นตามมุมเอียง ในขณะที่อิทธิพลของค่า e/d ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้โมเมนต์ดัดมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1.30 เท่าของค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เพิ่มขึ้นตามค่าของ e/d ส่วนในชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นมาก (Dense) พบว่าค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับการเอียงของเสาเข็มจาก $+20^\circ$, $+10^\circ$, 0° , -10° และ -20° กับแนวดิ่ง ซึ่งโมเมนต์ดัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นน้อย คือมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 0.99 เท่าของค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เพิ่มขึ้นตามมุมเอียง ในขณะที่อิทธิพลของค่า e/d ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้โมเมนต์ดัดมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1.23 เท่าของค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เพิ่มขึ้นตามค่าของ e/d

5. เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสาเข็มในชั้นดินทรายโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ PLAXIS Version 8.2 เปรียบเทียบกับการคำนวณตามทฤษฎีของ Broms พบว่าพฤติกรรมของเสาเข็มในชั้นทรายหลวม (loose) และทรายแน่น (dense) เมื่อมีแรงทางด้านข้างมากกระทำจะมีแนวโน้มคล้ายคลึงกัน คือ เสาเข็มที่เอียงแบบ Negative จะมีความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างได้สูงสุด ในขณะที่เสาเข็มแนวดิ่ง และเสาเข็มที่เอียงแบบ Positive จะมีความสามารถในการรับ

แรงกระทำทางด้านข้างลดลงตามลำดับ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และจากการคำนวณตามทฤษฎี พบว่าผลที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีจะมีค่ามากกว่าประมาณ 1.08 ถึง 1.20 เท่าของค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ในขณะที่ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็มที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีจะมีค่ามากกว่าประมาณ 1.03 ถึง 2.59 เท่าของค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

6. จากการพิจารณาความอ่อนไหวของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของดิน ประกอบด้วย ค่ามุมเสียดทานภายในของทราย (Friction of angle, ϕ') ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของดิน (Modulus of Soil, E_s) และอัตราช่องว่าง (Void ratio, e) ของดินทราย พบว่าพารามิเตอร์ของดินที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้าง ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างและโมเมนต์ดัด มากที่สุด คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Soil, E_s) รองลงมาคือค่ามุมเสียดทานภายในของทราย (Friction of angle, ϕ')

7. จากการศึกษาความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างของเสาเข็มในชั้นดินทราย 2 ชั้นที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน (Nonhomogenous soil) พบว่าคุณสมบัติของดินบริเวณหัวเสาเข็ม ที่ระยะความหนาจากผิวดินประมาณ 6 – 8 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มจะมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนตัว และความสามารถในการรับแรงกระทำสูงสุดทางด้านข้าง ในแต่ละมุมเอียงของเสาเข็ม

6.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทดสอบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาเข็มในชั้นทรายภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างดังกล่าวควรที่จะทำการศึกษาแบบจำลองเป็น 3 มิติ เปรียบเทียบผลด้วย เพราะการทดสอบแบบจำลอง 2 มิติ (Plane strain) ขอบเขตและเงื่อนไขทางวิศวกรรมบางอย่างจะใช้เป็นคุณสมบัติ หรือขนาดเทียบเท่า (Equivalent parameter) จึงมีความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความคลาดเคลื่อนว่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้หรือไม่

บรรณานุกรม

- ชินะวัฒน์ มุกตพันธุ์. ปฐพีกลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 5. มหาวิทยาลัยขอนแก่น: หน่วยสารบรรณ
งานบริหารและธุรการ คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2542.
- ปิยะณัฐ แสงจันทร์. การวิเคราะห์แรงที่กระทำต่ออุโมงค์ใต้ดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2545.
- พงศ์วิทย์ รุ่งบรรณพันธุ์. การวิเคราะห์แรงของเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่ม ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์
เอลิเมนต์ 3 มิติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2546.
- พัฒนศักดิ์ อบเชย. พฤติกรรมของแบบจำลองของเสาเข็มในชั้นดินทรายที่รับแรงกระทำทาง
ด้านข้าง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2546.
- วีรยา ฉิมอ้อย. การวิเคราะห์และออกแบบฐานราก. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2549
- Award, A., and Petrasovits, G. "Consideration on the bearing capacity of vertical and
batter pile subject to forces acting in different." Proc.3rd Budapest Conf. On SIM.
and FE. (1989) : 483 – 497.
- Broms, B.B. "Lateral resistance of pile in cohesionless soil." Journal of the Soil
Mechanics and Foundation Division, American Society of Civil Engineers.
90 (May 1964) : 123 – 149.
- Chai – Cheng Fan and James H. long. "Assessment of existing methods for predicting
soil response of laterally loaded piles in sand." Journal of Computers and
Geotechnics. 32 (April 2005) : 247 – 289

Chari, T. R., and Meyerhof, G.G. "Ultimate capacity of rigid single pile under inclined load in sand." Canadian Geotechnical Journal. 20 (June 1983) : 849 – 854.

Das, B.M. Principles of Foundation Engineering. 4th ed. United States of America : Cole Publishing Company, 1999.

Feagin, L.B. "The lateral load test on group of battered and vertical pile." Special Technical Publication. 154 (1953) : 12 – 30.

H.G. Poulos. "Ultimate lateral pile capacity in two - layer soil." Journal of Geotechnical Engineering. 16 (1985) : 25 – 37.

K.K. Phoon and F.H. Kulhawy. "Characterisation of model uncertainties for laterally loaded rigid drilled shafts." Journal of Geotechnique Engineering. 55 (2004) : 45 – 54.

Limin Zhang, Michael C. Mc Yee and Peter Lai. "Numerical analysis of laterally load 3x3 to 7x3 Pile groups in sand." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 125 (1999) : 936 – 946.

Meyerhof, G.G., and Ranjan, G. "The bearing capacity of rigid pile under inclined load in sand." Canadian Geotechnical Journal. 9 (July 1972) : 430 – 446

Murthy, V.N.S. "Behaviour of batter piles embedded in sand subjected and vertical pile." Proc.Symposium on Bearing Capacity of Pile, CBRI Roorkee. (1964) : 142 – 153.

Tschebotarioff, G.P. "The resistance to lateral loading of single pile and pile groups." Special Technical Publication. 154 (1953) : 38 – 48.

R.Matos Filho, A.V. Mendonca and J.B. Paiva. "Static boundary element analysis of piles submitted to horizontal and vertical loads." Journal of Engineering Analysis with Boundary Elements. 29 (October 2004) : 195 – 203.

Yoshimi, Y. "Pile in cohesionless soil subjected to oblique pull." Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, American Society of Civil Engineers. 90 (November 1964) : 11 – 23.

Zhaohui, Y.,and Boris, J. "Numerical analysis of pile behaviour under lateral loads in Layered elastic – plastic soil." International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics. 26 (2002) : 1385 – 1406.

Zienkiewicz, O.C.,and Zhu, J.Z. "The superconvergent patch recovery and a posteriori error estimate. Part 1 : The recovery technique." International Journal for Numerical Methods in Engineering. 33 (1992) : 1331 – 1364.

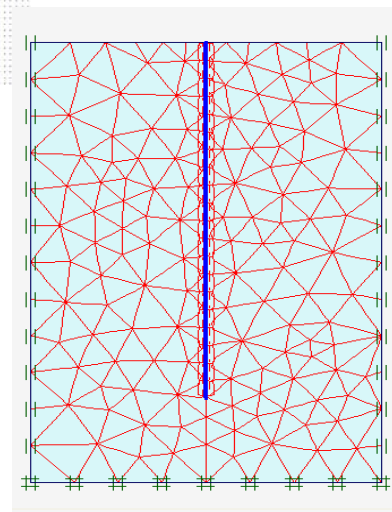
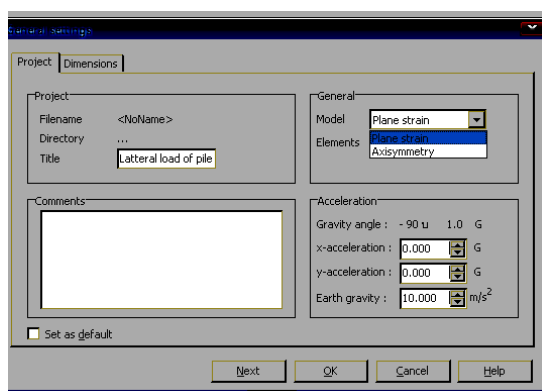
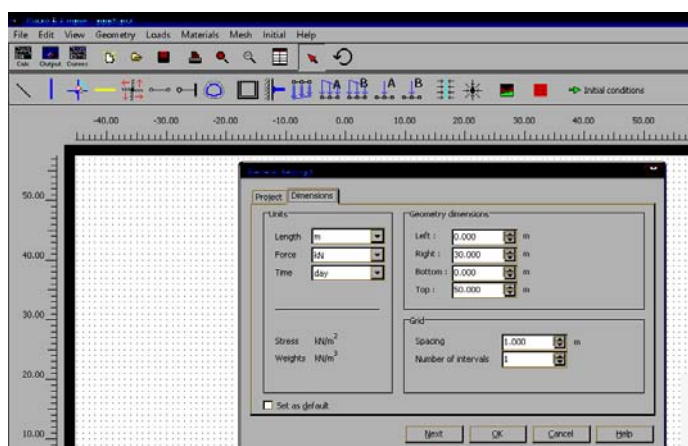
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยโปรแกรม PLAXIS Version 8.0

การกำหนดค่าเริ่มต้นการใช้โปรแกรม PLAXIS

จะเป็นการกำหนดค่าเริ่มต้นที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งในการศึกษานี้จะพิจารณาปัญหาเป็นแบบ 2 มิติ (Plane Strain) หน่วยของความยาว และแรง จะใช้ SI Unit



ภาพที่ ก.1 การกำหนดค่าเริ่มต้น

ซึ่งกำหนดเงื่อนไขให้การเคลื่อนตัวของจุดต่อที่อยู่บนขอบเขตบางส่วน ถูกจำกัดในทิศทางที่กำหนด โดยพยายามจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างให้ใกล้เคียงกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ให้มากที่สุด โดยกำหนดให้จำกัดการเคลื่อนตัวที่ระนาบขอบเขตต่างๆ ดังนี้

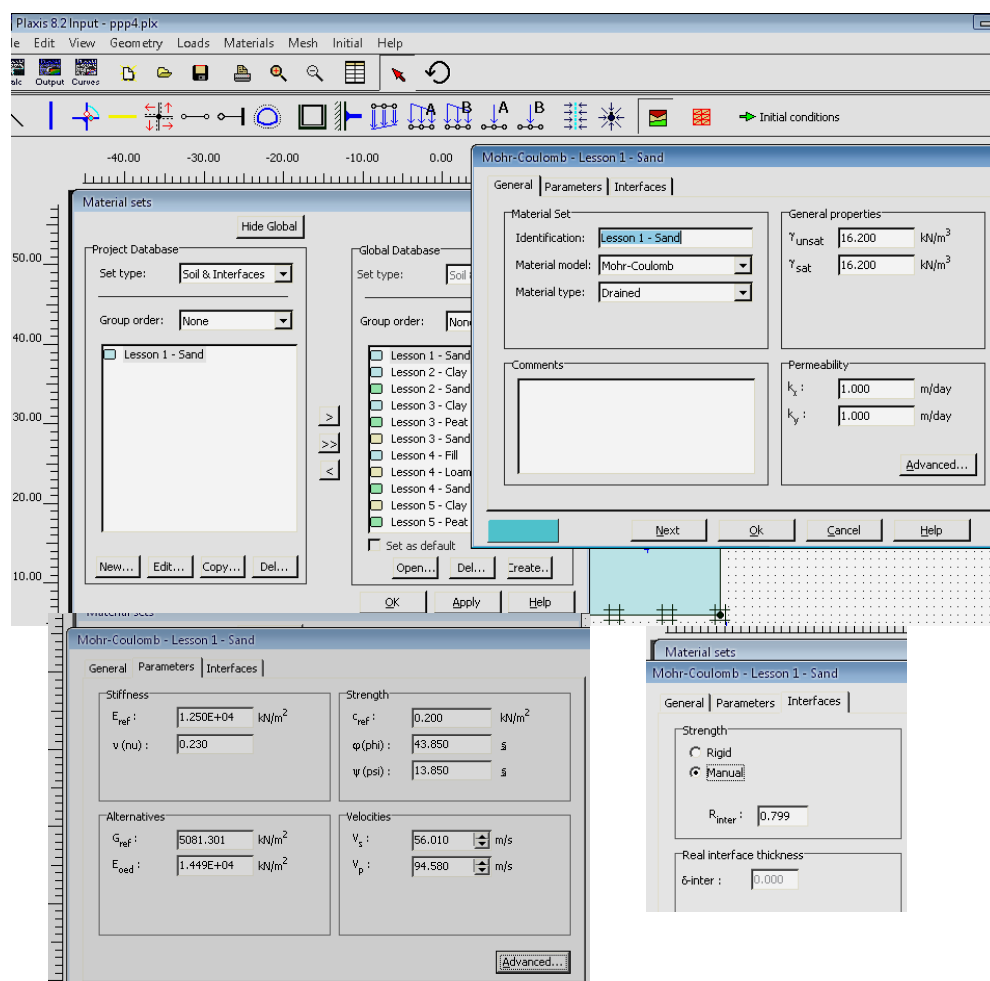
ขอบเขตด้านข้าง เป็นแบบเคลื่อนตัวได้ในแนวดิ่ง (Roller)

ขอบเขตด้านล่าง เป็นแบบไม่สามารถเคลื่อนตัวได้ทั้งสองแนว (Fixed)

และเพื่อหลีกเลี่ยงขอบเขตอิทธิพล (Zone of Influence) ขอบด้านซ้ายและขวาของแบบจำลองควรอยู่ห่างจากเสาเข็มไม่น้อยกว่า 12 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้ระยะห่าง 40 เท่า และปลายเสาเข็มห่างจากขอบด้านล่างประมาณ 12 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม

การกำหนดคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

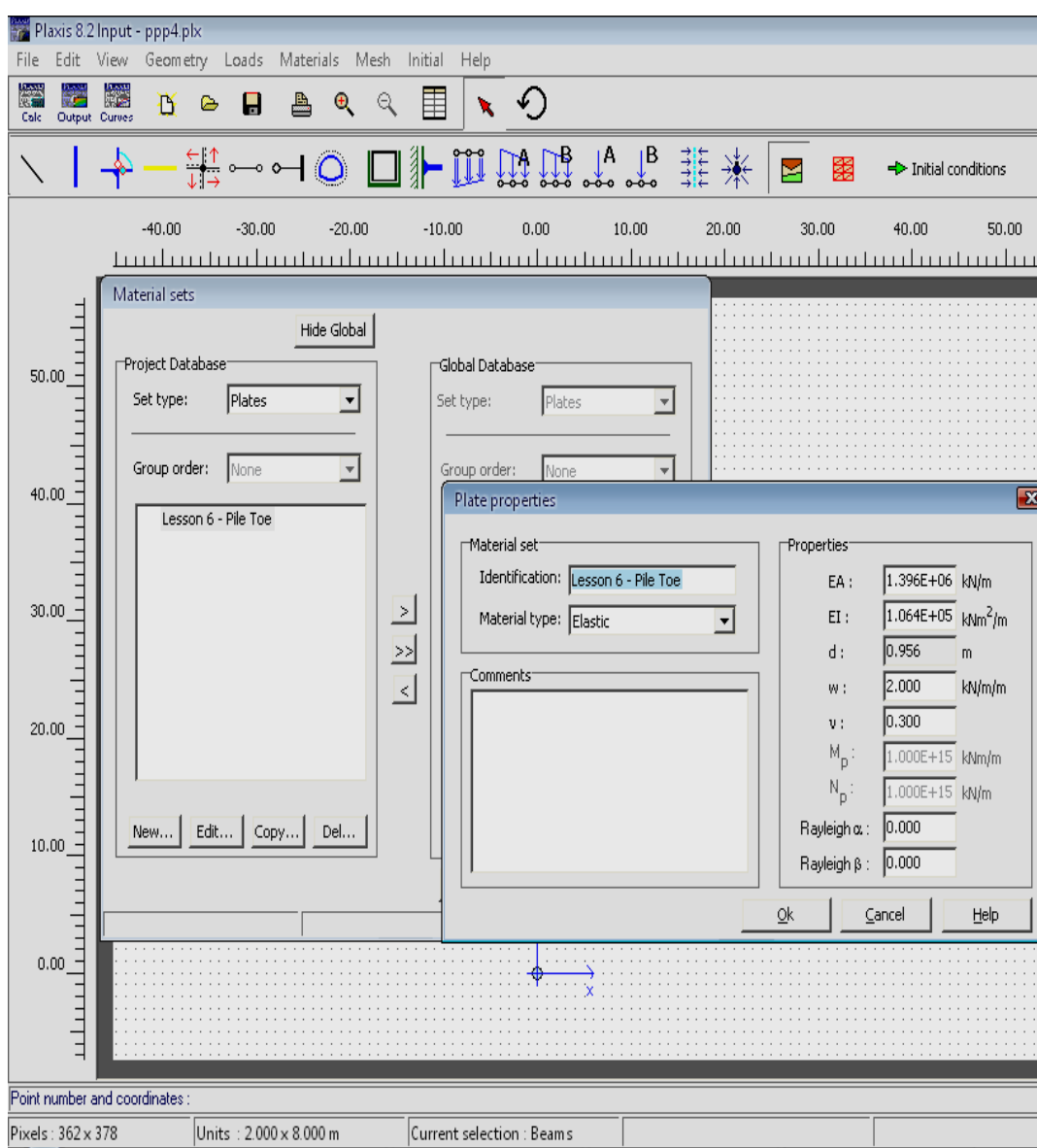
สำหรับชั้นดินทรายในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ กำหนดให้ดินทรายมีพฤติกรรมแบบมอร์-คูลอมบ์ (Mohr – Coulomb Model) และค่าโมดูลัสของดินมีค่าคงที่ตลอดความลึก ซึ่งได้ใส่ค่าคุณสมบัติต่างๆของดินดังแสดงในภาพที่ ก. 2



ภาพที่ ก.2 การกำหนดคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การกำหนดคุณสมบัติทางวิศวกรรมของเสาเข็ม

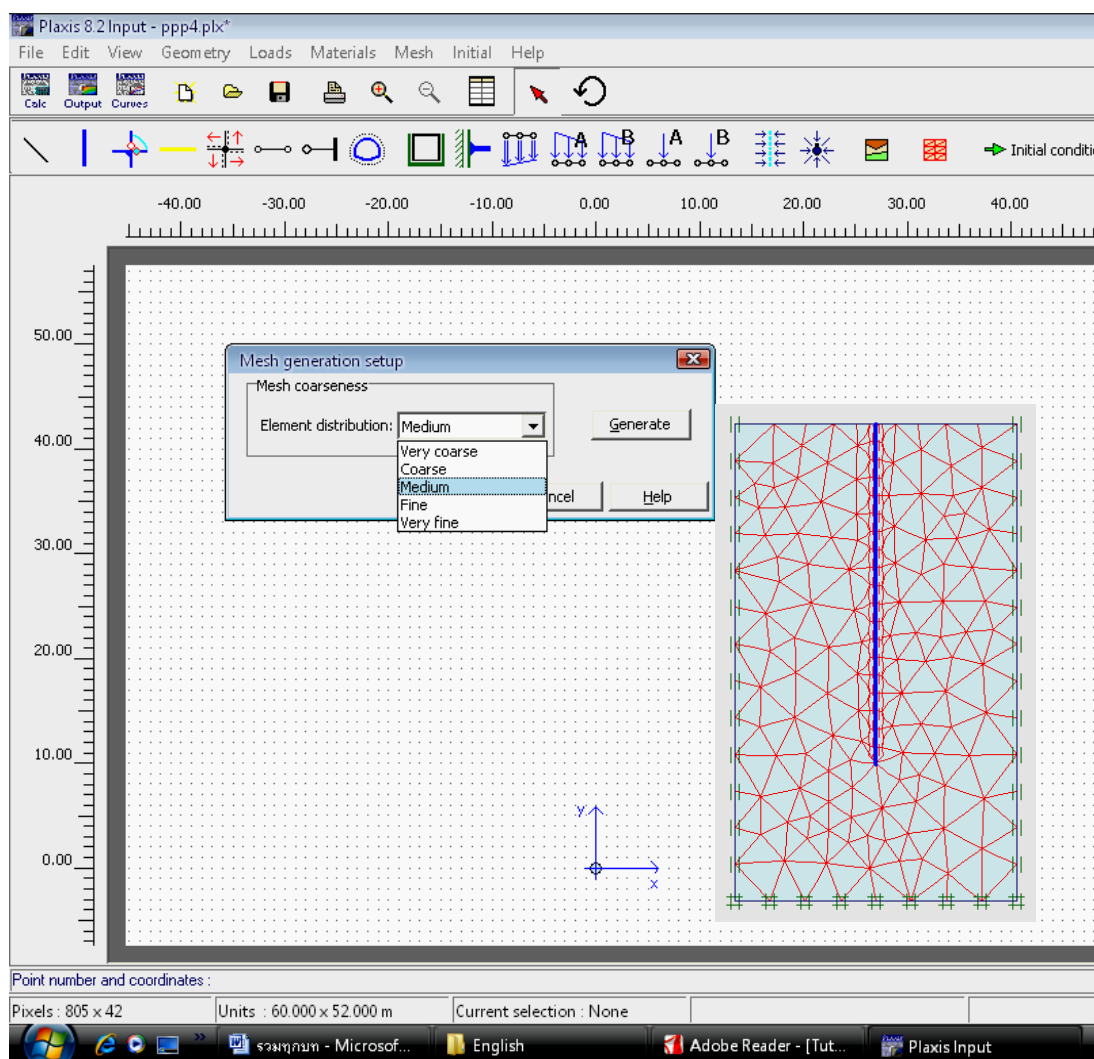
สำหรับเสาเข็มในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ กำหนดให้มีพฤติกรรมเป็นแบบเชิงเส้น (Linear Elastic Model) ซึ่งได้ใส่ค่าคุณสมบัติต่างๆของดินดังแสดงในภาพที่ ก. 3



ภาพที่ ก.3 การกำหนดคุณสมบัติทางวิศวกรรมของเสาเข็มในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

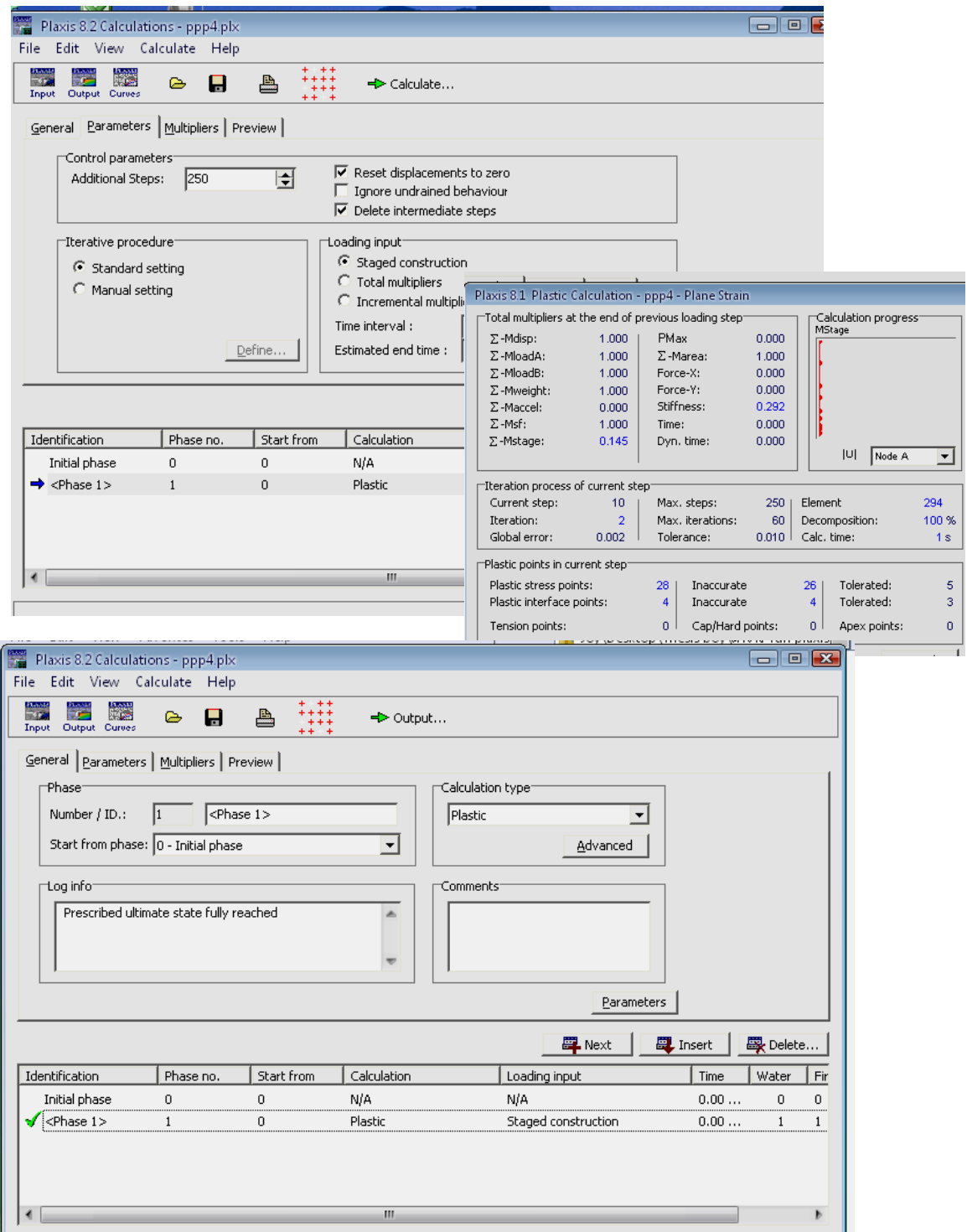
การเลือกโครงข่ายในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Mesh generation)

การวิจัยนี้ จะพิจารณาปัญหาเป็นแบบ 2 มิติ (Plane Strain) และจะแบ่งเอลิเมนต์เป็นแบบสามเหลี่ยม(Triangular Element) ใน 1 เอลิเมนต์ ประกอบด้วย 6 node นอกจากนี้ยังสามารถปรับความละเอียดของ เอลิเมนต์ของโครงสร้าง (mesh refinement) เป็น 5 ระดับ คือ very coarse , coarse , meduim , fine , very fine สำหรับการวิจัยนี้เลือกปรับขนาดขึ้นส่วนในระดับ fine

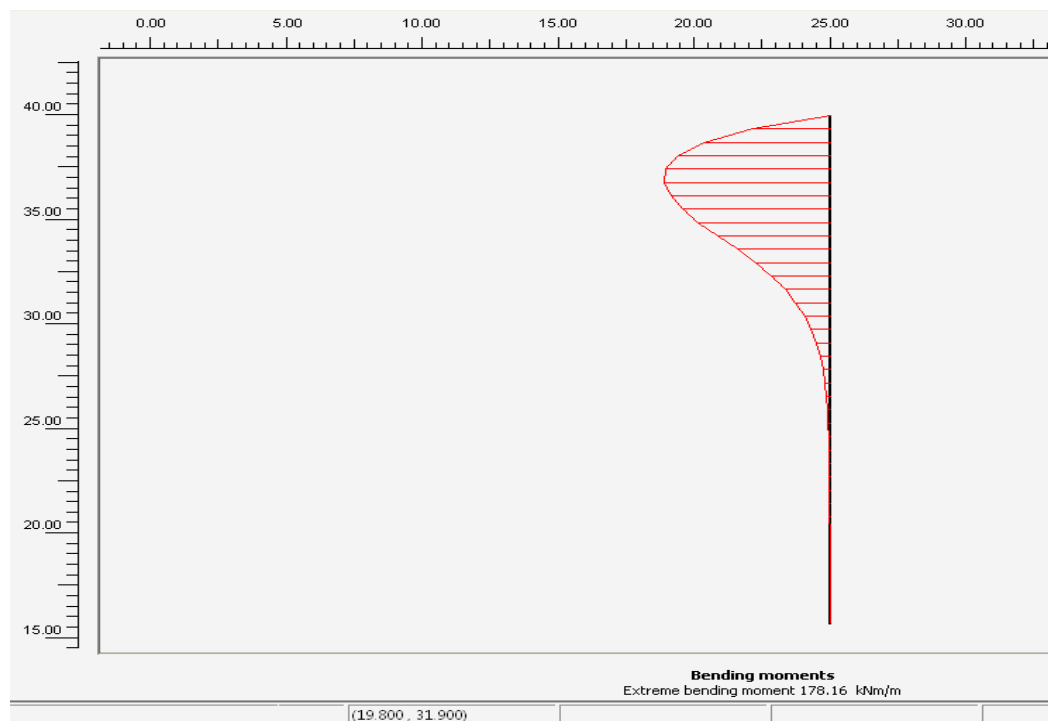
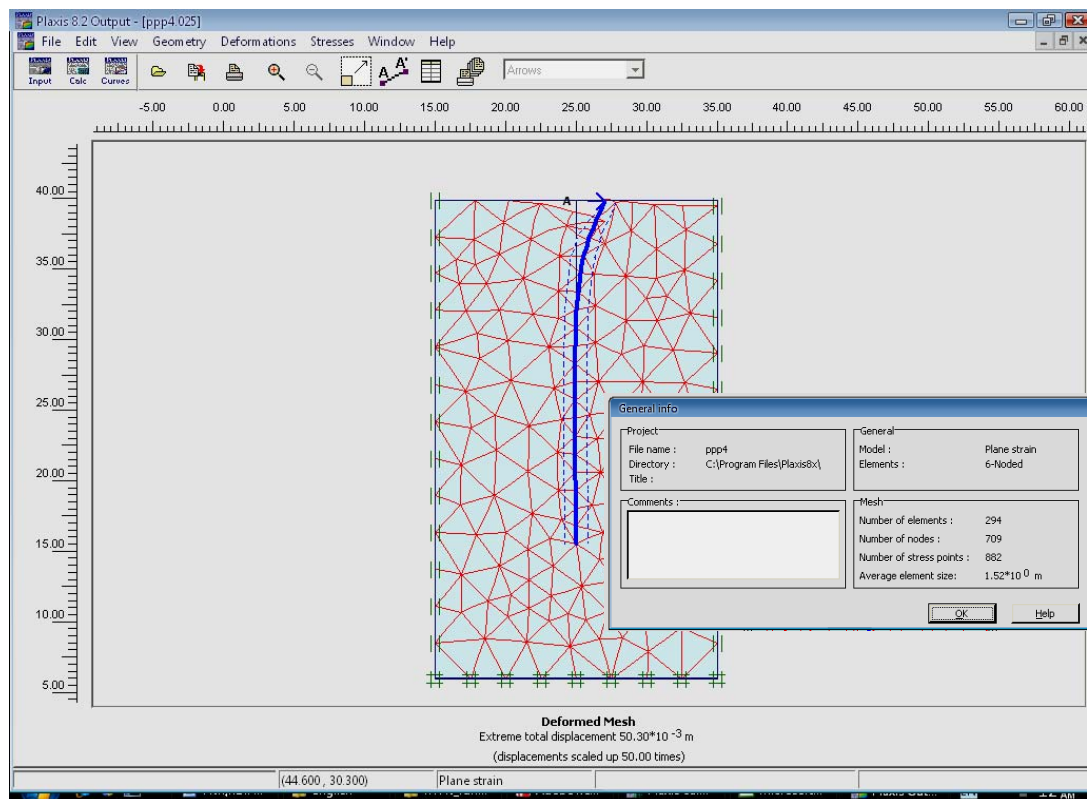


ภาพที่ ก.4 โครงข่ายในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Mesh generation)

การ RUN โปรแกรม PLAXIS



ภาพที่ ก.5 แสดงการ RUN โปรแกรม PLAXIS



ภาพที่ ก.6 แสดงการเคลื่อนตัวและค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็มในชั้นดินทรายที่มีความหนาแน่นมาก (Dense) ที่รับแรงกระทำทางด้านข้าง ค่า $e/d = 0$

โปรแกรม PLAXIS Version 8.2

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยโปรแกรม PLAXIS Version 8.2

ตารางที่ ข.1

ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด

ของเสาเข็มเอียงแบบ Positive ที่ทำมุม +20° กับแนวดิ่ง

โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (PLAXIS Version 8.2)

ชั้นทรายความหนาแน่นหลวม (Loose)						ชั้นทรายความหนาแน่นมาก (Dense)					
e/d = 0		e/d = 4		e/d = 8		e/d = 0		e/d = 4		e/d = 8	
Load (ton)	Disp. (mm.)	Load (ton)	Disp. (mm.)	Load (ton)	Disp. (mm.)	Load (ton)	Disp. (mm.)	Load (ton)	Disp. (mm.)	Load (ton)	Disp. (mm.)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	6.23	3	8.97	3	9.11	3	4.06	3	5.33	3	5.11
5	33.45	5	36.12	5	33.71	5	8.33	5	11.45	5	14.12
6	42.35	6	46.07	5.8	51.02	8	12.44	8	17.33	8	21.22
8.5	51.41	7	51.88			10	16.17	10	19.87	10	24.55
						20	35.78	20	41.13	20	51.45
						29	50.66	21	51.45		

ตารางที่ ข.2

ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด

ของเสาเข็มเอียงแบบ Positive ที่ทำมุม +10° กับแนวดิ่ง

โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (PLAXIS Version 8.2)

ชั้นทรายความหนาแน่นหลวม (Loose)						ชั้นทรายความหนาแน่นมาก (Dense)					
e/d = 0		e/d = 4		e/d = 8		e/d = 0		e/d = 4		e/d = 8	
Load (ton)	Disp. (mm.)	Load (ton)	Disp. (mm.)	Load (ton)	Disp. (mm.)	Load (ton)	Disp. (mm.)	Load (ton)	Disp. (mm.)	Load (ton)	Disp. (mm.)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	11.11	3	12.11	3	7.07	3	3.11	3	4.09	3	4.88
5	19.07	5	28.33	5	20.11	5	6.23	5	7.11	5	9.33
8	35.33	8	48.44	7.3	51.23	8	10.07	8	11.03	8	14.88
10	50.77	8.1	51.08			10	12.12	10	16.11	10	19.07
						12	16.44	20	32.22	20	34.60
						14	18.67	28	50.33	26	51.45
						20	28.09				
						30	44.44				
						41	51.50				

ตารางที่ ๗.3

ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด

ของเสาเข็ม ที่ทำมุม 0° กับแนวดิ่ง

โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (PLAXIS Version 8.2)

ชั้นทรายความหนาแน่นหลวม (Loose)						ชั้นทรายความหนาแน่นมาก (Dense)					
e/d = 0		e/d = 4		e/d = 8		e/d = 0		e/d = 4		e/d = 8	
Load (ton)	Disp. (mm.)	Load (ton)	Disp. (mm.)	Load (ton)	Disp. (mm.)	Load (ton)	Disp. (mm.)	Load (ton)	Disp. (mm.)	Load (ton)	Disp. (mm.)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	7.12	3	8.56	3	11.12	3	1.51	3	2.77	3	4.89
5	13.12	5	17.22	5	19.23	5	3.23	5	5.65	5	7.98
8	25.75	8	36.12	8.07	51.07	8	6.09	8	8.23	8	12.13
10	35.76	9.8	50.44			10	8.34	10	12.11	10	14.55
12	47.03					12	10.09	20	26.09	20	30.09
12.8	50.83					14	12.22	39.2	50.36	36.2	52.11
						16	14.13				
		20	18.54								
						30	27.33				
						55.7	51.07				

ตารางที่ ๔.4

ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด

ของเสาเข็มเอียงแบบ Negative ที่ทำมุม -10° กับแนวดิ่ง

โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (PLAXIS Version 8.2)

ชั้นทรายความหนาแน่นหลวม (Loose)						ชั้นทรายความหนาแน่นมาก (Dense)					
e/d = 0		e/d = 4		e/d = 8		e/d = 0		e/d = 4		e/d = 8	
Load (ton)	Disp. (mm.)	Load (ton)	Disp. (mm.)	Load (ton)	Disp. (mm.)	Load (ton)	Disp. (mm.)	Load (ton)	Disp. (mm.)	Load (ton)	Disp. (mm.)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	2.8	3	4.03	3	7.33	3	0.82	3	1.78	3	2.53
5	5.12	5	8.11	5	14.43	5	2.15	5	3.77	5	4.12
8	9.06	8	13.57	8	31.22	8	3.11	8	4.43	8	6.11
10	13.11	10	23.44	9.7	50.38	10	4.43	10	6.07	10	9.23
12	16.22	12	43.03			12	5.11	12	8.11	12	12.13
14	20.09	12.3	51.37			14	6.09	14	10.91	14	14.15
16	27.09					16	7.35	16	12.33	16	16.07
17.8	50.66					18	8.33	18	14.07	18	20.03
						20	10.12	20	16.11	20	23.11
						30	16.59	30	18.33	30	23.11
						40	22.53	40	28.07	40	36.22
						60	36.44	54	50.45	49	50.95
				79.5	51.77						

ตารางที่ ข.5

ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด

ของเสาเข็มเอียงแบบ Negative ที่ทำมุม -20° กับแนวดิ่ง

โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (PLAXIS Version 8.2)

ชั้นทรายความหนาแน่นหลวม (Loose)						ชั้นทรายความหนาแน่นมาก (Dense)					
e/d = 0		e/d = 4		e/d = 8		e/d = 0		e/d = 4		e/d = 8	
Load (ton)	Disp. (mm.)	Load (ton)	Disp. (mm.)	Load (ton)	Disp. (mm.)	Load (ton)	Disp. (mm.)	Load (ton)	Disp. (mm.)	Load (ton)	Disp. (mm.)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	2.06	3	3.51	3	4.13	3	0.42	3	1.18	3	2.39
5	3.73	5	6.28	5	7.09	5	1.23	5	2.33	5	4.31
8	6.27	8	10.09	8	13.54	8	2.25	8	4.67	8	7.03
10	7.96	10	15.15	10	18.11	10	2.91	10	5.92	10	8.89
12	12.96	12	19.33	12	24.22	12	3.54	12	7.16	12	10.92
14	18.11	14	24.11	14	30.09	14	4.23	14	8.42	14	12.59
16	25.11	16	32.12	15.5	51.19	16	4.88	16	9.63	16	14.46
18	33.22	18	41.11			18	5.50	18	10.92	18	16.61
21	51.86	18.5	50.46			20	6.12	20	12.50	20	18.46
						30	9.62	30	19.11	30	28.94
						40	13.45	40	26.23	40	34.03
						60	21.02	60	40.05	60	48.67
						80	29.93	69.3	50.03	62	51.90
				100	39.11						
						120	50.59				

ตารางที่ ข.6

ผลการวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ดัดตลอดความยาวของเสาเข็มที่ฝังตัวในชั้นทราย
เมื่อรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด ของเสาเข็มเอียงแบบ Positive ที่ทำมุม +20° กับแนวดิ่ง
โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (PLAXIS Version 8.2)

ชั้นทรายความหนาแน่นหลวม (Loose)						ชั้นทรายความหนาแน่นมาก (Dense)					
e/d = 0		e/d = 4		e/d = 8		e/d = 0		e/d = 4		e/d = 8	
L (m.)	M (ton-m.)	L (m.)	M (ton-m.)	L (m.)	M (ton-m.)	L (m.)	M (ton-m.)	L (m.)	M (ton-m.)	L (m.)	M (ton-m.)
0	0	0	6.08	0	8.04	0	0	0	5.99	0	7.22
0.8	9.57	0.8	21.09	0.72	25.3	1.10	28.4	0.9	36.7	0.72	43.44
6.07	4.11	6.07	9.41	6.07	10	6.07	11.11	6.07	13.13	6.07	22.11
12.15	1.11	12.15	2.25	12.15	2.58	12.15	2.89	12.15	3.07	12.15	3.05
18.22	-0.2	18.22	-0.2	18.22	-0.2	18.22	-0.3	18.22	-0.33	18.22	-0.44
24.3	0	24.3	0	24.3	0	24.3	0	24.3	0	24.3	0

ตารางที่ ข.7

ผลการวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ดัดตลอดความยาวของเสาเข็มที่ฝังตัวในชั้นทราย
เมื่อรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด ของเสาเข็มเอียงแบบ Positive ที่ทำมุม +10° กับแนวดิ่ง
โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (PLAXIS Version 8.2)

ชั้นทรายความหนาแน่นหลวม (Loose)						ชั้นทรายความหนาแน่นมาก (Dense)					
e/d = 0		e/d = 4		e/d = 8		e/d = 0		e/d = 4		e/d = 8	
L (m.)	M (ton-m.)	L (m.)	M (ton-m.)	L (m.)	M (ton-m.)	L (m.)	M (ton-m.)	L (m.)	M (ton-m.)	L (m.)	M (ton-m.)
0	0	0	5.04	0	7.71	0	0	0	9.8	0	10.2
1.0	10.8	0.93	21.98	0.80	26.33	1.3	29.5	1.0	38.67	0.9	47.08
6.07	5.11	6.07	12.11	6.07	16.09	6.07	17.11	6.07	22.23	6.07	27.11
12.15	1.07	12.15	2.35	12.15	2.74	12.15	3.75	12.15	3.11	12.15	3.3
18.22	-0.3	18.22	-0.2	18.22	-0.27	18.22	-0.4	18.22	-0.38	18.22	-0.3
24.3	0	24.3	0	24.3	0	24.3	0	24.3	0	24.3	0

ตารางที่ ข.8

ผลการวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ดัดตลอดความยาวของเสาเข็มที่ฝังตัวในชั้นทราย

เมื่อรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด ของเสาเข็ม ที่ทำมุม 0° กับแนวดิ่ง

โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (PLAXIS Version 8.2)

ชั้นทรายความหนาแน่นหลวม (Loose)						ชั้นทรายความหนาแน่นมาก (Dense)					
e/d = 0		e/d = 4		e/d = 8		e/d = 0		e/d = 4		e/d = 8	
L (m.)	M (ton-m.)	L (m.)	M (ton-m.)	L (m.)	M (ton-m.)	L (m.)	M (ton-m.)	L (m.)	M (ton-m.)	L (m.)	M (ton-m.)
0	0	0	7.33	0	11.54	0	0	0	14.6	0	15.6
1.46	11.68	1.03	18.1	0.88	22.5	1.57	32.2	1.1	40.21	0.8	52.2
6.07	6.11	6.07	9.22	6.07	13.1	6.07	18.11	6.07	22.2	6.07	31.07
12.15	1.57	12.15	2.73	12.15	3.27	12.15	4.67	12.15	5.71	12.15	7.91
18.22	0.3	18.22	0.5	18.22	0.76	18.22	1.1	18.22	1.2	18.22	1.8
24.3	0	24.3	0	24.3	0	24.3	0	24.3	0	24.3	0

ตารางที่ ข.9

ผลการวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ดัดตลอดความยาวของเสาเข็มที่ฝังตัวในชั้นทราย

เมื่อรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด ของเสาเข็มเอียงแบบ Negative ที่ทำมุม -10° กับแนวดิ่ง

โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (PLAXIS Version 8.2)

ชั้นทรายความหนาแน่นหลวม (Loose)						ชั้นทรายความหนาแน่นมาก (Dense)					
e/d = 0		e/d = 4		e/d = 8		e/d = 0		e/d = 4		e/d = 8	
L (m.)	M (ton-m.)	L (m.)	M (ton-m.)	L (m.)	M (ton-m.)	L (m.)	M (ton-m.)	L (m.)	M (ton-m.)	L (m.)	M (ton-m.)
0	0	0	12.33	0	15.8	0	0	0	21.11	0	33.7
1.45	11.71	1.45	23.8	1.10	30.08	2.57	21.51	1.80	44.8	1.55	54.05
6.07	7.11	6.07	15.5	6.07	18.23	6.07	11.2	6.07	17.3	6.07	23.65
12.15	2.2	12.15	4.2	12.15	6.22	12.15	4.65	12.15	7.05	12.15	9.8
18.22	0.2	18.22	0.4	18.22	0.5	18.22	1.1	18.22	2.02	18.22	2.41
24.3	0	24.3	0	24.3	0	24.3	0	24.3	0	24.3	0

ตารางที่ ข.10

ผลการวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ดัดตลอดความยาวของเสาเข็มที่ฝังตัวในชั้นทราย
เมื่อรับแรงกระทำทางด้านข้างสูงสุด ของเสาเข็มเอียงแบบ Negative ที่ทำมุม -20° กับแนวดิ่ง
โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (PLAXIS Version 8.2)

ชั้นทรายความหนาแน่นหลวม (Loose)						ชั้นทรายความหนาแน่นมาก (Dense)					
e/d = 0		e/d = 4		e/d = 8		e/d = 0		e/d = 4		e/d = 8	
L (m.)	M (ton-m.)	L (m.)	M (ton-m.)	L (m.)	M (ton-m.)	L (m.)	M (ton-m.)	L (m.)	M (ton-m.)	L (m.)	M (ton-m.)
0	0	0	15.6	0	21.7	0	0	0	38.40	0	52.11
1.67	15.7	1.55	24.4	1.45	31.3	3.55	34.22	2.57	45.1	2.15	57.41
6.07	11	6.07	12.13	6.07	16.33	6.07	22.15	6.07	27.11	6.07	40.09
12.15	1.07	12.15	3.09	12.15	5.44	12.15	9.84	12.15	12.43	12.15	16.11
18.22	0.21	18.22	0.3	18.22	0.3	18.22	0.3	18.22	0.5	18.22	0.71
24.3	0	24.3	0	24.3	0	24.3	0	24.3	0	24.3	0