

การพัฒนาสมการเพื่อทำนายการเคลื่อนตัวด้านข้างและโมเมนต์ดัด
ของเสาเข็มจากงานขุดดินลึกข้างเคียง

DEVELOPMENT OF EQUATIONS FOR EVALUATING LATERAL PILE
MOVEMENT AND BENDING MOMENT DUE TO NEARBY DEEP EXCAVATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-093-013

การพัฒนาสมการเพื่อทำนายการเคลื่อนตัวด้านข้างและโมเมนต์ดัด
ของเสาเข็มจากงานขุดดินลึกข้างเคียง

DEVELOPMENT OF EQUATIONS FOR EVALUATING LATERAL PILE
MOVEMENT AND BENDING MOMENT DUE TO NEARBY DEEP EXCAVATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-093-013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF EQUATIONS FOR EVALUATING LATERAL PILE
MOVEMENT AND BENDING MOMENT DUE TO NEARBY DEEP EXCAVATION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

KMITL-2017-EN-M-093-013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาสมการเพื่อทำนายการเคลื่อนตัวด้านข้างและโมเมนต์ดัดของเสาเข็ม
จากงานขุดดินลึกข้างเคียง

Thesis Title Development of Equations for Evaluating Lateral Pile Movement and
Bending Moment due to Nearby Deep Excavation

นักศึกษานางสาวดวงกมล ศิริรักษ์

รหัสประจำตัว 58601286

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศ.ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม) รศ.ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-093-013

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.พรเกษม	จงประดิษฐ์	ม.ร.ท. จง
ผศ.ดร.ธนาดล	คงสมบูรณ์	คง
ผศ.ดร.อาทิตย์	เพชรศิธร	ตม
รศ.ดร.สกุล	ท้าวโนทยาน	สกล ท้าวโนทยาน
ศ.ดร.สุชัชวีร์	สุวรรณสวัสดิ์	←

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 22 มีนาคม พ.ศ. 2560 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
โดยไม่ได้รับอนุญาตจากคณะวิศวกรรมศาสตร์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าขอมเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 22 มีนาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาสมการเพื่อทำนายการเคลื่อนตัวด้านข้างและโมเมนต์ดัดของเสาเข็มจากงานชุดดินลึกข้างเคียง
นักศึกษา	นางสาวดวงกมล ศิริรักษ์
รหัสประจำตัว	58601286
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ศาสตราจารย์.ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์(ร่วม)	รองศาสตราจารย์.ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาสมการเพื่อทำนายค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างและโมเมนต์ดัดของเสาเข็มที่เกิดจากงานชุดดินลึกในบริเวณใกล้เคียงเพื่อการประเมินเบื้องต้น สมการได้พิจารณาปัจจัยอิทธิพลที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็มได้แก่ ความแข็งแรงและค่าสติเฟนสของชั้นดิน ความหนาของกำแพงกันดิน ความลึกการขุด ขนาดของเสาเข็ม รวมถึงความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน โดยที่ไม่มีค่าตรวจวัดจริงในทางปฏิบัติ การศึกษานี้เสนอวิธีการสร้างข้อมูลเทียม (Artificial Data) จากการจำลองปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และนำข้อมูลที่ได้มาสร้างสมการโดยวิธีการวิเคราะห์เชิงถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปร (Multiple linear regression analysis) จากการศึกษาพบว่าผลการทำนายค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างและโมเมนต์ดัดของเสาเข็มจากสมการได้ผลเป็นที่น่าพอใจ และให้ความแม่นยำกว่าวิธีของการศึกษาก่อนหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ;อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Development of equations for evaluating lateral pile movement and bending moment due to nearby deep excavation
Student	Miss Duangkamol Sirirak
Student ID.	58601286
Degree	Master of Engineering
Program	Civil Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Professor.Dr.Suchatvee Suwansawat
Thesis Co-Advisor	Associate Prof.Dr.Pornkasem Jongpradist

ABSTRACT

This research presents the development of equations for preliminary evaluation on the lateral pile movement and bending moment due to nearby deep excavation. All essentially considered parameters, i.e., soil strength stiffness, thickness of diaphragm wall, excavation depth, diameter of pile and thickness of soft clay are included in the developed equations. Due to that it is practically impossible to get the measurement data, the artificial data of pile movement and moment have been generated from deformation analyses using finite element method. The equations are constructed by the multiple linear regression analysis of artificial data in conjunction to transformation technique. The prediction of the proposed equations can provide a good satisfaction to the pile movement and bending moment data and higher accuracy than one in previous research.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา ศ.ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่อนุญาตให้ใช้โปรแกรม Plaxis 3D เวอร์ชัน 2012.1

ขอขอบคุณทุนวิจัยจากโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) และ บริษัท ดี ทู คอนซัลท์ เอเชีย จำกัด ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยสัญญาเลขที่ MSD5810136

ขอขอบคุณบิดา มารดา นายประทีป หลือประเสริฐ นายนฤนาถ เหมะ นางสาวกชมน เรืองวิโรจนกุล และนางสาวณัฐธิดา ขวัญลิขิต ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยนี้เป็นอย่างดี และร่วมเป็นกำลังใจสำคัญ

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ดวงกมล ศิริรักษ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII

บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	3
2.1 ชั้นดินกรุงเทพมหานคร.....	3
2.1.1 ชั้นดินถม (Filled)	5
2.1.2 ชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานคร.....	6
2.1.3 ชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรก.....	6
2.1.4 ชั้นใต้น้ำของดินกรุงเทพฯ.....	7
2.2 แบบจำลองดิน.....	8
2.2.1 ชนิดของแบบจำลอง.....	8
2.2.2 ตัวแปรข้อมูลดิน.....	9
2.2.3 แบบจำลองสำหรับงานขุดดินลึกแบบใช้กำแพงกันดินในชั้นดินกรุงเทพมหานคร.....	10
2.3 Small strain stiffness.....	14
2.3.1 คำนิยามและบทบาทของ small strain stiffness.....	14
2.3.2 small strain stiffness และ stiffness degradation curve ของดินกรุงเทพฯ.....	15
2.4 ชนิดของระบบในการขุดดินลึกในกรุงเทพมหานคร.....	15
2.4.1 กำแพงไดอะแฟรม (diaphragm wall)	16
2.4.2 กำแพงเข็มพืด (sheet pile wall).....	17
2.4.3 กำแพงเสาเข็ม (contiguous pile wall).....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ iv อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5 การเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงกันดิน	17
2.6 การเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็มที่อยู่ข้างเคียงงานขุดดินลึก	18
2.6.1 รายละเอียดโครงการ	19
2.6.2 ข้อมูลดิน	20
2.6.3 พฤติกรรมของเสาเข็ม	20
2.7 เงื่อนไขการเคลื่อนตัวที่หัวเสาเข็ม (pile head condition).....	21
2.8 สมการเพื่อทำนายการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินจากกระบวนการขุด.....	23
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	27
3.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์	27
3.2 การศึกษาคุณสมบัติชั้นดินกรุงเทพมหานคร	28
3.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนตัวและโมเมนต์ดัดของเสาเข็ม.....	29
3.4 แบบจำลอง เพื่อประมาณค่าการเคลื่อนตัวและโมเมนต์ดัดของเสาเข็มในระบบ 2 มิติ	29
3.4.1 ลักษณะของแบบจำลอง	29
3.4.2 ชนิดของแบบจำลอง และตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา.....	31
3.4.3 โครงข่ายของแบบจำลอง	32
3.5 แบบจำลอง เพื่อประมาณค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มในระบบ 3 มิติ	34
3.5.1 ลักษณะของแบบจำลอง	34
3.5.2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา.....	35
3.5.3 Plane Strain Ratio.....	35
3.6 การสร้างสมการเชิงเส้น ด้วยการวิเคราะห์เชิงถดถอย.....	36
บทที่ 4 อภิปรายผล.....	37
4.1 บทนำ	37
4.2 การพัฒนาสมการ เพื่อประมาณค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็ม	38
4.2.1 ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆและค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มจากการวิเคราะห์.....	38
4.2.2 วิธีการปรับแก้ความสัมพันธ์ของตัวแปรกับค่าการเคลื่อนตัวให้อยู่ในรูปแบบเชิงเส้น	44
4.2.3 สร้างสมการด้วยการวิเคราะห์เชิงถดถอย.....	51
4.2.4 อัตราส่วนระหว่างการเคลื่อนตัวของเสาเข็มและการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน.....	54

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2.5 อิทธิพลของระยะห่างจากมุมของกำแพงกันดิน (corner effect).....	56
4.2.6 Plane Strain Ratio.....	59
4.3 การพัฒนาสมการ เพื่อประมาณค่าโมเมนต์ดัดของเสาเข็ม	62
4.3.1 การปรับแก้ความสัมพันธ์ของตัวแปรกับค่าโมเมนต์ดัด ให้อยู่ในรูปแบบเชิงเส้น	62
4.3.2 สร้างสมการด้วยการวิเคราะห์เชิงถดถอย.....	63
บทที่ 5 สรุปผล.....	67
เอกสารอ้างอิง.....	70
ภาคผนวก.....	74
ประวัติผู้เขียน.....	80



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัดต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของชั้นดินถม [9].....	5
2.2 คุณสมบัติของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ [9].....	6
2.3 คุณสมบัติของชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรก [9].....	7
2.4 คุณสมบัติของชั้นใต้น้ำดินกรุงเทพฯ [9]	7
2.5 MC soil model parameters.....	10
2.6 MCC soil model parameters.....	10
2.7 HS and HSsmall soil model parameters.....	10
2.8 ตัวอย่างของการขุดเจาะในเขตกรุงเทพมหานครช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา [19].....	16
2.9 ตัวแปรและขอบเขตในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ [6].....	24
2.10 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการเปลี่ยนแปลงของเส้นตรงของห้าตัวแปร [6].....	24
2.11 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ [6].....	25
3.1 ตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าในที่ใช้ในการศึกษา.....	31
3.2 ค่าของตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองชั้นดินทางไฟไนต์เอลิเมนต์ [7,25].....	32
3.3 ตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ใช้ในการศึกษา [7,25].....	35
4.1 สัมประสิทธิ์ตัวคูณของสมการพาราโบลิคเพื่อปรับค่าความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปเชิงเส้น.....	44
4.2 สัมประสิทธิ์ของตัวแปร สำหรับสมการที่ 4.2.....	51
4.3 เปรียบเทียบความแตกต่างของตัวแปรอิทธิพล.....	53
4.4 สัมประสิทธิ์ตัวคูณของสมการพาราโบลิค สำหรับค่าโมเมนต์บวก.....	55
4.5 สัมประสิทธิ์ของตัวแปร สำหรับสมการที่ 4.3.....	55
4.6 สัมประสิทธิ์ตัวคูณของสมการพาราโบลิค.....	59
4.7 สัมประสิทธิ์ของตัวแปร สำหรับสมการที่ 4.4.....	60
4.8 สัมประสิทธิ์ตัวคูณของสมการพาราโบลิค สำหรับค่าโมเมนต์บวก.....	62
4.9 สัมประสิทธิ์ตัวคูณของสมการพาราโบลิค สำหรับค่าโมเมนต์ลบ.....	63
4.10 สัมประสิทธิ์ของตัวแปร สำหรับสมการที่ 4.5.....	64
4.11 สัมประสิทธิ์ของตัวแปร สำหรับสมการที่ 4.6.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้งviอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กำลังรับแรงเฉือนของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯและชั้นดินแข็ง [8].....	3
2.2 สัมประสิทธิ์ความดันดินของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ชั้นดินแข็ง และ ทราบาย [8].....	4
2.3 ลักษณะแรงดันน้ำของชั้นดินกรุงเทพฯ [9].....	5
2.4 ค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงกันดิน จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองชนิดต่างๆ	11
2.5 เปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของกำแพงกันดิน จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองชนิดต่างๆของกรณีศึกษา	12
2.6 ค่าการเคลื่อนตัวจาก sensitivity analysis ด้วยแบบจำลอง HSsmall	13
2.7 โค้งสูญเสียความแข็ง (stiffness degradation curve) [17]	15
2.8 รูปแบบการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงไดอะแฟรม [20]	18
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของกำแพงกันดินต่อความถี่การขุดกับระบบของความแข็งแรง (system stiffness) ในชั้นดินเหนียว	18
2.10 ภาพตัดของหลุมขุด [23]	19
2.11 แผนผังตำแหน่งของเสาเข็มและอุปกรณ์ตรวจวัด [23].....	19
2.12 ลักษณะและคุณสมบัติของชั้นดิน [23].....	20
2.13 ผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของเสาเข็มและชั้นดิน [23]	21
2.14 การเคลื่อนตัวและโมเมนต์ดัดของเสาเข็มที่มีสภาวะหัวเสาเข็มต่างกัน.....	22
2.15 การเคลื่อนตัวและโมเมนต์ดัดของเสาเข็มที่มีสภาวะหัวเสาเข็มต่างกัน.....	23
2.16 การเคลื่อนตัวและโมเมนต์ดัดของเสาเข็มที่หัวเสาเข็มไม่ถูกยึดรั้งใดๆ [1].....	23
2.17 การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินจากสมการ 2.1 และ 2.2 เปรียบเทียบกับค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินจากผลตรวจวัดจริงจาก และการวิเคราะห์โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ [6].....	26
3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการการวิเคราะห์.....	27
3.2 ข้อมูลชั้นดินกรณีศึกษา BMAH [15].....	28
3.3 ตัวแปรที่นำมาพิจารณาเพื่อสร้างข้อมูลเทียม.....	29
3.4 ลักษณะทางกายภาพของการจำลองระบบ 2 มิติ.....	30
3.5 ลักษณะแบบจำลองในกรณีที่เสาเข็มมีพฤติกรรมแบบ fixed-head.....	30
3.6 โครงข่ายแบบจำลองของกรณีศึกษา.....	33
3.7 ตำแหน่ง monitoring section for 2D.....	33
3.8 ลักษณะทางกายภาพของการจำลองระบบ 3 มิติ.....	34
4.1 พฤติกรรมของเสาเข็ม ที่มีสภาพหัวเข็ม (head condition) ต่างกัน	37
4.2 ความสัมพันธ์ของตัวแปร (correlation) กับการเคลื่อนตัวด้านข้างและโมเมนต์ดัดของ	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้งviiiอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับความกว้างของการขุดดิน.....	39
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับความลึกของการขุดดิน.....	39
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับ system stiffness ของกำแพงกันดิน.....	40
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับ stiffness ของเสาเข็ม	40
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับความยาวของเสาเข็ม.....	41
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับระยะห่างระหว่างเสาเข็มกับกำแพงกันดิน.....	41
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับ Normalize shear strength	42
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับ Normalize shear strength	42
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับ Normalize initial shear modulus.....	43
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับ Normalize initial shear modulus	43
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน	44
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับความกว้างของการขุดดิน.....	45
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับความลึกของการขุดดินหลังปรับรูปแบบ.....	46
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับ system stiffness ของกำแพงกันดินหลังปรับรูปแบบ.....	46
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับ stiffness ของเสาเข็มหลังปรับรูปแบบ	47
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับความยาวของเสาเข็มหลังปรับรูปแบบ.....	47
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับระยะห่างระหว่างเสาเข็มกับกำแพงกันดินหลังปรับรูปแบบ.....	48
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับ Normalize shear strength ของดินเหนียวอ่อนหลังปรับรูปแบบ.....	48
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับ Normalize shear strength ของดินเหนียวแข็งหลังปรับรูปแบบ.....	49
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับ Normalize initial shear modulus ของดินเหนียวอ่อนหลังปรับรูปแบบ.....	49
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับ Normalize initial shear modulus ของดินเหนียวแข็งหลังปรับรูปแบบ.....	50
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับความหนาชั้นดินเหนียวอ่อนหลังปรับรูปแบบ .	50
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ทำนายโดยสมการกับค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 เปรียบเทียบระหว่างผลการทำนายด้วยสมการที่นำเสนอกับผลการทำนายด้วยสมการของ Poulos et al.(1997) [2].....	54
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน (P_{max}/W_{max}) ที่ประมาณโดยสมการกับอัตราส่วน	56
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเข็มกับระยะห่างจากมุมของกำแพงกันดินที่อัตราส่วน B/L ต่างๆ.....	57
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเข็มกับระยะห่างจากมุมของกำแพงกันดินที่ความลึกการขุดต่างๆ.....	57
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเข็มกับระยะห่างจากมุมของกำแพงกันดินที่ความลึกของเสาเข็มต่างๆ.....	58
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเข็มกับระยะห่างจากมุมของกำแพงกันดินที่ระยะห่างระหว่างเสาเข็มกับกำแพงกันดินต่างๆ.....	58
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า PSR ที่ประมาณโดยสมการกับค่า PSR ที่ได้จากการวิเคราะห์	60
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ทำนายโดยสมการที่ 4.2 และ 4.4 กับค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์.....	61
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์บวกสูงสุดที่ทำนายโดยสมการที่ 4.4 กับค่าโมเมนต์บวกสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์.....	65
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์ลบสูงสุดที่ทำนายโดยสมการที่ 4.5 กับค่าโมเมนต์ลบสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อxอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การขยายตัวในเขตเมืองในปัจจุบันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ต้องการปัจจัยในการดำเนินชีวิตเพิ่มมากขึ้น การพัฒนาระบบสาธารณูปโภคและสิ่งก่อสร้างพื้นฐาน เพื่อตอบสนองต่อความต้องการดังกล่าวจึงเป็นสิ่งจำเป็น แต่ด้วยพื้นที่การก่อสร้างบนผิวดินที่มีอย่างจำกัด การก่อสร้างใต้ดินจึงมีความจำเป็นในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ณ ปัจจุบัน

การก่อสร้างโครงสร้างใต้ดินด้วยการขุดลึกในพื้นที่ตัวเมืองที่มีสิ่งก่อสร้างอยู่ก่อนอย่างหนาแน่น อาจส่งผลกระทบต่ออาคารข้างเคียงที่มักมีฐานรากแบบเสาเข็ม ถึงแม้ว่ามีการใช้กำแพงกันดิน (Retaining wall) ป้องกันความเสียหายแล้วก็ตาม ในขั้นตอนการออกแบบงานขุดจึงจำเป็นต้องสามารถประเมินผลกระทบต่อเสาเข็มดังกล่าว ทั้งในส่วนของ การเคลื่อนตัวด้านข้างและโมเมนต์ดัด ซึ่งส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของโครงสร้าง การทำนายเบื้องต้นจึงมีความสำคัญที่จะประเมินว่าจำเป็นต้องวิเคราะห์รายละเอียดเชิงลึกต่อไปหรือไม่ ที่ผ่านมามีการศึกษาถึงผลกระทบจากงานขุดลึกต่อเสาเข็มที่อยู่ใกล้เคียงพอสมควร เช่น Leung et al. (2000) [1] ที่มักเป็นการศึกษาที่พิจารณาแต่เฉพาะโครงการใดโครงการหนึ่ง แต่การประเมินแบบทั่วไปที่ใช้ได้กับหลายๆโครงการมีจำนวนน้อยมาก มีเพียง Poulos and Chen (1997) [2] ที่พัฒนาในรูปกราฟความสัมพันธ์ เพื่อทำนายการเคลื่อนตัวด้านข้างและโมเมนต์ดัดของเสาเข็ม

ในงานขุดลึกมีการศึกษาเพื่อทำนายการเคลื่อนตัวของดิน และกำแพงกันดินรูปแบบต่างๆ จำนวนหนึ่ง มักนิยมเป็นรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดต่อความลึกการขุด กับปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน เช่น ความหนาของกำแพงกันดิน และอัตราส่วนความปลอดภัย [3,4] และระยะห่างจากบริเวณขุด [5] การศึกษาดังกล่าวต้องใช้ข้อมูลตรวจวัดในอดีตจำนวนมากพอในการพัฒนาสมการ จากข้อจำกัดดังกล่าวสมการที่ผ่านมามีมักอยู่ในรูปแบบฟังก์ชันกับปัจจัยอิทธิพลเพียงหนึ่งหรือสองตัว

เพื่อแก้ไขข้อจำกัดเกี่ยวกับจำนวนข้อมูลตรวจวัดและปัจจัยอิทธิพล Kung et al. (2007) [6] ได้เสนอแนวคิดและวิธีการสร้างข้อมูลเทียมค่าการเคลื่อนตัวของดินและกำแพงกันดินจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขงานขุดลึกโดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite element method, FEM) โดยมีการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลวัดจริงกรณีศึกษา ก่อน ด้วยวิธีนี้สามารถได้ค่าการเคลื่อนตัวของดินและกำแพงกันดินจากตัวแปรปัจจัยอิทธิพลที่หลากหลายมากขึ้น จากการวิเคราะห์ตัวแปร (parametric study) ส่งผลให้สามารถคำนึงถึงปัจจัยอิทธิพลต่างๆที่มากขึ้น เพื่อใช้ในการสร้างสมการสำหรับงานขุดลึกในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ Wonglert et al. (2012) [7] ได้ใช้หลักการดังกล่าว เพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างสมการทำนายค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินเปรียบเทียบกับค่าตรวจวัดจริงของกรณีที่มีการเก็บรวบรวม ปรากฏว่าให้การทำนายในระดับที่น่าพอใจ

เนื่องจากการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวและโมเมนต์ดัดของเสาเข็มในระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างงานชุดลิคไม่สามารถทำได้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ขยายการนำวิธีดังกล่าวเพื่อพัฒนาสมการอย่างง่ายเพื่อประมาณค่าการเคลื่อนตัวและโมเมนต์ดัดของเสาเข็ม ด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปร (multiple linear regression) ครอบคลุมปัจจัยอิทธิพลต่างๆ เช่น ความลึกของการขุดดิน ระยะห่างของเสาเข็มถึงกำแพงกันดิน คุณสมบัติต่างๆของชั้นดินและความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน เพื่อเป็นเครื่องมือในการประเมินเบื้องต้นผลกระทบจากการขุดลิคต่อเสาเข็มข้างเคียง

นอกจากนี้ในส่วนของ การประมาณค่าโมเมนต์ดัดยังพบว่าการศึกษาเพื่อทำนายค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็มที่ผ่านมา [2] เป็นการทำนายในลักษณะที่เสาเข็มมีพฤติกรรมแบบ free-head ซึ่งในการก่อสร้างจริง บริเวณหัวเสาเข็มถูกยึดไว้ด้วยฐานราก จึงมีพฤติกรรมแบบ fixed-head ที่จะส่งผลให้มีการเคลื่อนตัวน้อยกว่าแบบ free-head แต่เกิดโมเมนต์ดัดมากกว่า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสร้างสมการประมาณค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่มีพฤติกรรมแบบ free-head และประมาณค่าการโมเมนต์ดัดของเสาเข็มที่มีพฤติกรรมแบบ fixed-head เพื่อให้ได้ผลการทำนายที่วิกฤติสูงสุดที่จะเกิดในแต่ละกรณี

1.2 วัตถุประสงค์

พัฒนาสมการ เพื่อประมาณค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างและโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็ม ที่อยู่ใกล้เคียงบริเวณที่มีการขุดดินลึกแบบมีค้ำยัน ในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานคร ด้วยวิธีการสร้างข้อมูลเทียม และการวิเคราะห์เชิงถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปร

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1) ประมาณค่าการเคลื่อนตัวและโมเมนต์ดัดของเสาเข็มบริเวณใกล้เคียงงานขุดดินลึกแบบมีค้ำยัน ในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานคร
- 2) จำลองการเคลื่อนตัวของเสาเข็มด้วยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ (PLAXIS 3D 2013.1)
- 3) สมมติฐานของแบบจำลองเสาเข็มเป็นแบบ embedded pile
- 4) คุณสมบัติของแบบจำลองกำแพงกันดินอ้างอิงจากคุณสมบัติของ Diaphragm wall

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

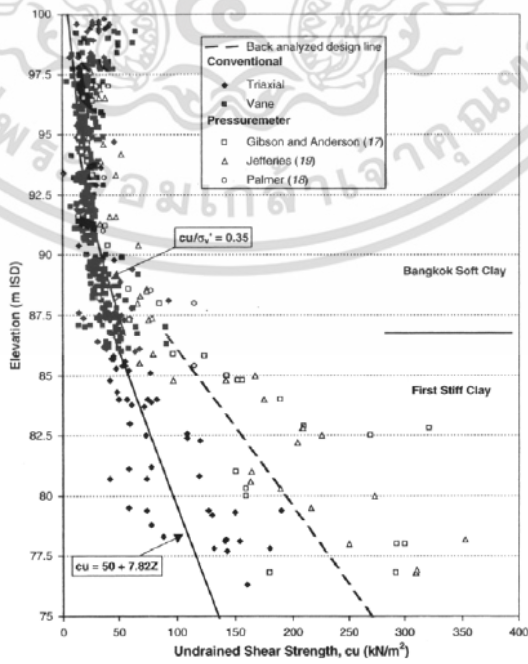
วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 ชั้นดินกรุงเทพมหานคร

กรุงเทพมหานครตั้งอยู่บริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา เป็นส่วนหนึ่งของที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่างของประเทศไทย มีความลาดเอียงของระดับพื้นดินจากทิศเหนือ จะค่อยๆลาดเอียงลงสู่อ่าวไทยทางทิศใต้ ซึ่งเกิดจากรอยเลื่อนในอดีต ความลึกของชั้นหินแข็งชั้นล่างที่อยู่ใต้ดินยังไม่ทราบแน่ชัด แต่คาดว่าอยู่ระหว่างความลึก 550 ถึง 2,000 เมตร จากระดับน้ำใต้ดิน [8]

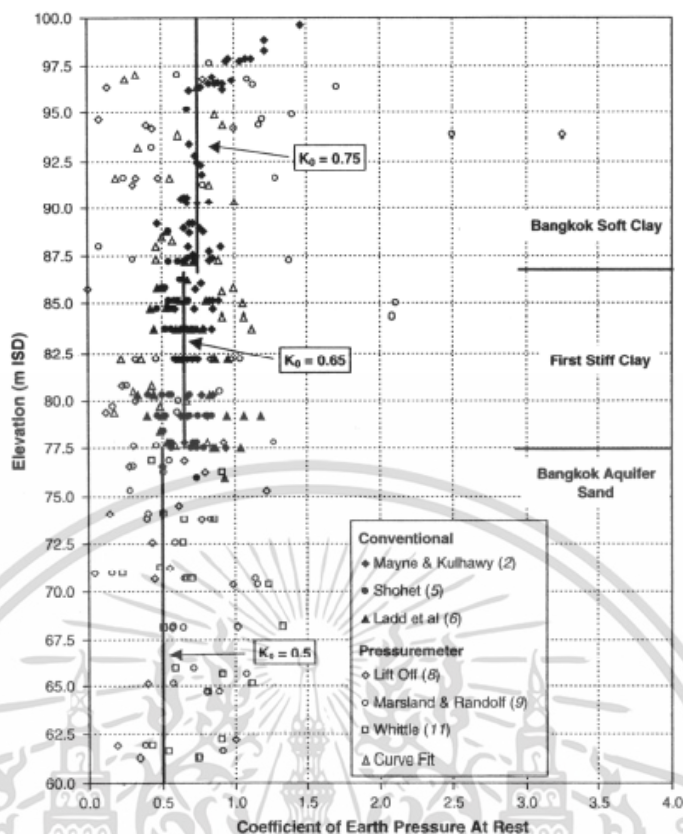
การทดสอบหาค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (undrained shear strength) และสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างของดินกรุงเทพมหานคร [8] อธิบายได้ดังรูปที่ 2.1 และ 2.2 โดยข้อมูลทั่วไปของชั้นดินเป็นดังนี้

0 ถึง 2 เมตร	ชั้นดินถม
2 ถึง 11 เมตร	ชั้นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมาก
11 ถึง 15 เมตร	ชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง
15 ถึง 24 เมตร	ชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรก
24 ถึง 36 เมตร	ชั้นดินทรายชั้นแรก
36 ถึง 43 เมตร	ชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง
> 43 เมตร	ชั้นดินทรายชั้นที่สอง



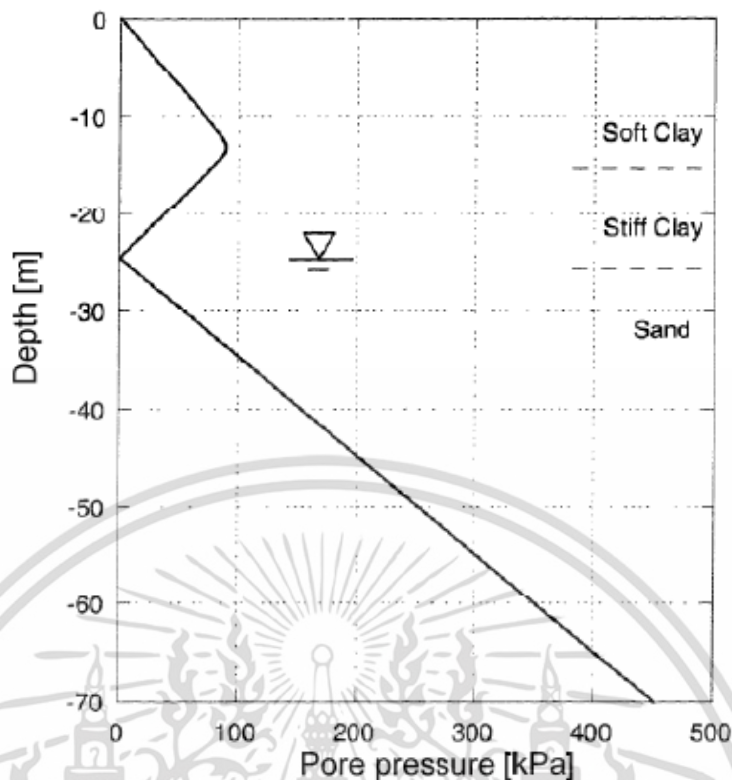
รูปที่ 2.1 กำลังรับแรงเฉือนของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพและชั้นดินแข็ง [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 สัมประสิทธิ์ความดันดินของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ชั้นดินแข็ง และทราย [8]

การสูบน้ำใต้ดินมาใช้ ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร มีทั้งการนำมาใช้ในครัวเรือน และใช้ในอุตสาหกรรม ส่งผลให้ค่าศักย์น้ำ (piezometric head) ของลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนล่างลดต่ำลง แม้ว่าในเบื้องต้นระดับน้ำใต้ดินเริ่มลดลงที่ตัวเมืองกรุงเทพมหานคร แต่เมื่อแหล่งอุตสาหกรรมมีการกระจายตัวออกจากตัวเมือง และมีการสูบน้ำใต้ดินมาใช้เพื่ออุตสาหกรรมในบริเวณดังกล่าว ก็ส่งผลให้ค่าศักย์น้ำในบริเวณนั้นลดลง ในขณะที่ศักย์น้ำกรุงเทพมหานครกลับฟื้นฟูขึ้นมา ซึ่งระดับน้ำใต้ดินในกรุงเทพมหานครนั้นมีความดันดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะแรงดันน้ำของชั้นดินกรุงเทพฯ [9]

2.1.1 ชั้นดินถม (Filled)

โดยทั่วไปแล้วชั้นดินถมนั้นจะประกอบด้วย ดินเหนียว, ดินทราย, กรวด, ดินลูกรัง ที่ประกอบด้วยแร่ธาตุต่างๆ ซึ่งจะพบอยู่ที่ระดับลึกไม่เกิน 4 เมตร คุณสมบัติโดยทั่วไปแสดงไว้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของชั้นดินถม [9]

Parameter	Made Ground
Bulk unit weight	18 kN/m ³
Undrained shear strength	N/A
Effective shear strength	$C' = 0, \phi' = 25$
Stiffness	$E' = 500$ kPa
Poisson ratio	0.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานคร

ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ใกล้น้ำทะเล ในพื้นที่ปากแม่น้ำเจ้าพระยา โดยทั่วไปบริเวณพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลมีลักษณะชั้นดินเป็นดินเหนียว (Bangkok Clay) ชั้นดินนี้เกิดจากการทับถมของตะกอนดินจากการพัดพาของน้ำเป็นเวลานาน ปกคลุมอ่าวไทยบริเวณกรุงเทพฯ และพื้นที่ภาคกลาง ดังนั้นสภาพทางธรณีวิทยาจะแตกต่างจากภูมิภาคอื่นๆ ชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) เป็นชั้นดินที่อยู่ใต้ชั้นบนสุด หนาประมาณ 10-15 เมตร เป็นดินอ่อนถึงอ่อนมาก มีความไวตัวสูง พังทลายได้ง่ายหากถูกรบกวน ยุบตัวง่ายเมื่อน้ำหนักมากกระทำ ชั้นดินเหนียวอ่อนนี้เป็นชั้นดินที่ก่อปัญหาทางด้าน การออกแบบและการก่อสร้างเป็นอย่างมาก ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ [9]

Parameters	Bangkok soft clay
Unit weight	16 kN/m ³
PL	20-40%
LL	55-90%
LI	0.5-1.0
PI	30-50%
Water content	50-80%
Clay content	35-85%
Undrained shear strength, s_u	20+3.5(z-7) kPa <i>z begin at 7 m from surface</i>
Undrained elastic modulus, E_u	6250 + 900(z-7) kPa
Effect friction angle, ϕ'	23
K_o	0.75
OCR	1.2
Coefficient of permeability, k	3.0×10^{-9} m/s

2.1.3 ชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรก

ชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรกโดยทั่วไปลักษณะสีน้ำตาลอ่อน หรือสีเขียวปนเทา สีเทาปนสีน้ำตาล หรือมีลักษณะเป็นดินเหนียวปนโคลนที่มีสีเหลืองน้ำตาล โดยเมื่อความลึกเพิ่มขึ้นจะเริ่มเป็นดินเหนียวปนทรายซึ่งโดยลักษณะของดินเหนียวแข็งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ดังตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติของชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรก [9]

Parameters	Above 20 m	Below 20 m
Unit weight	19 kN/m ³	19 kN/m ³
PL	25-40%	15-25%
LL	60-80%	30-50%
LI	-0.25 to 0.4	-0.25 to 0.4
PI	30-50%	15-30%
Water content	25-40%	15-25%
Clay content	85%	20%
Undrained shear strength, s_u	78 kPa at 13 m to 120 kPa at 20 m	120 kPa
Undrained elastic modulus, E_u	43,000 kPa at 13 m to 52800 kPa at 20 m	52,800 kPa
Effect friction angle, ϕ'	26	26
K_o	0.65	0.65
OCR	1.65	1.65
Coefficient of permeability, k	1×10^{-9} m/s	1×10^{-9} m/s

2.1.4 ชั้นให้น้ำของดินกรุงเทพฯ

ชั้นให้น้ำประกอบด้วยเม็ดกรวดเม็ดทรายขนาดใหญ่และกลสมมน จึงสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ โดยวางตัวสลับอยู่กับชั้นดินเหนียว ซึ่งชั้นให้น้ำของดินกรุงเทพฯมหานครนี้มีชั้นกรวดทรายสลับกับดินเหนียวหนาถึง 1,830 เมตร ชั้นให้น้ำที่นำมาใช้งานแบ่งได้ 8 ชั้น ซึ่งอยู่ลึกจากผิวดินลงไปถึง 600 เมตร ส่วนที่ลึกลงไปกว่านั้นก็มีชั้นให้น้ำอยู่อีก แต่ยังไม่มีการนำมาใช้ ตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติของชั้นให้น้ำดินกรุงเทพฯมหานคร

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของชั้นให้น้ำดินกรุงเทพฯ [9]

Parameter	Dense Sand
Unit weight	20 kN/m ³
Clay content	<35%
Effect friction angle, ϕ'	36
K_o	1.5
OCR	0.5
Coefficient of permeability, k	1×10^{-7} m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 แบบจำลองดิน

2.2.1 ชนิดของแบบจำลอง

เทคนิคการขุดดินในปัจจุบัน ตัวอย่างเช่น การใช้กำแพงกันดิน สามารถช่วยลดการเสียรูปของชั้นดิน และมีความปลอดภัยมากกว่าในอดีต แต่อย่างไรก็ตาม การขุดดิน และติดตั้งกำแพงกันดินในชั้นดินเหนียวอ่อน เช่น ในชั้นดินกรุงเทพมหานคร ก็ยังคงเป็นเรื่องยากที่จะควบคุมการเคลื่อนที่ของดิน จึงมีการใช้วิธีการเชิงตัวเลข เพื่อประมาณค่าการเคลื่อนที่ของดิน รวมถึงการเสียรูปของกำแพงกันดิน และเสาะหามาตรฐานเชิงตัวเลข เพราะเป็นวิธีที่สามารถปรับขั้นตอนให้เหมาะสมได้หลายรูปแบบ

ความลึกส่วนใหญ่ของงานขุดในกรุงเทพมหานครอยู่ที่ประมาณ 5-15 เมตร และอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน ซึ่งแบบจำลองดินทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของชั้นดินกรุงเทพมหานครได้ และเป็นที่รู้จัก คือ Elastic model, Elastic-perfectly plastic, Mohr-Coulomb (MC) model, Modified Cam Clay (MCC) model เนื่องจากแบบจำลองเหล่านี้สามารถหาตัวแปรในการจำลองได้ง่าย

ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข แบบจำลองจะสามารถอธิบายให้เห็นถึงพฤติกรรมของดิน และวัสดุค้ำยัน ซึ่งแบบจำลองดินที่เหมาะสม จะให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องสูง โดยหัวข้อนี้จะวิเคราะห์แบบจำลองดินชนิดต่างๆ เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ใช้งานได้ มีตัวแปรเพียงพอ และสามารถใช้ได้กับโปรแกรมทางวิศวกรรมที่เลือกใช้

1) Mohr-Coulomb (MC)

แบบจำลองของมอร์-คูลอมบ์ เป็นที่นิยมอย่างมาก ในงานธรณีเทคนิค โดยมีที่มาจาก การทดสอบในห้องปฏิบัติการ มีความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ เช่น E และ ν ที่แสดงถึงความยืดหยุ่นของดิน (soil elasticity) ϕ และ c ที่แสดงถึงสภาพพลาสติกของดิน (soil plasticity) และ ψ ซึ่งเป็นมุมไวด์เลชันของดินทราย

2) Modified Cam Clay (MCC)

Roscoe and Burland (1968) [10] ได้พัฒนาแบบจำลองโมดิฟายแคมเคลย์ (Modified Cam Clay, MCC) ขึ้น โดยมีการพิจารณาพลังงานที่สูญเสียไป ทั้งในกระบวนการเปลี่ยนแปลงปริมาตรแบบพลาสติก และกระบวนการเฉือนเปี้ยวเบนพลาสติก แบบจำลองดินชนิดนี้เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย ในกลุ่มผู้ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ เพราะตัวแปรนำเข้า สามารถหาได้จากข้อมูลตรวจวัดต่างๆไป นอกจากนี้ ยังสามารถอธิบายพฤติกรรมความเค้น ความเครียดของดินได้

3) Hardening-Soil model (HS)

Hardening-Soil model เป็นแบบจำลองขั้นสูงสำหรับจำลองพฤติกรรมของดิน ซึ่งเป็นการปรับปรุงแบบจำลอง Mohr-Coulomb (MC) โดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ มุมเสียดทานของดิน (ϕ) ค่าการยึดเกาะกันของดิน (c) และมุมไวด์เลชัน (ψ) ส่วนค่าโมดูลัสของดินที่ต้องทำการป้อนเพิ่มเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าในกรณีของ Mohr-Coulomb ได้แก่ ค่า Triaxial loading stiffness (E_{s0}) ค่า Triaxial unloading stiffness (E_{ur}) และค่า Oedometer loading stiffness (E_{oed})

4) Hardening Soil model with small-strain stiffness (HSsmall)

แบบจำลอง HSsmall เป็นการปรับปรุง แบบจำลอง Hardening-Soil โดยการพิจารณาเพิ่มค่าความแข็งของดิน (stiffness) ในช่วงระดับความเครียดน้อยๆ การกำหนดค่า small strain stiffness มีที่มาจากงานวิจัยของ Benz (2006) [11] ที่ช่วงระดับความเครียดน้อยๆ ดินส่วนมากจะแสดงค่าความแข็งสูงกว่าที่ระดับความเครียดวิศวกรรม ซึ่งความแข็งนี้ มีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเส้นตรงกับความเครียด พฤติกรรมนี้ถูกอธิบายด้วยแบบจำลอง HSsmall โดยเพิ่มตัวแปร strain-history และเพิ่มสองตัวแปรวัตถุ ได้แก่ G_0 และ $\gamma_{0.7}$ ซึ่ง G_0 คือ small-strain shear modulus และ $\gamma_{0.7}$ คือ strain level ที่ shear modulus ลดลงเหลือ 70% ของ small-strain shear modulus

2.2.2 ตัวแปรข้อมูลดิน

คุณสมบัติทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพฯ [12] มีการศึกษามาจากข้อมูลในพื้นที่จริง เช่น ค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (untrained shear strength), ค่า SPT เพื่อนำมาใช้ในการกำหนดค่าให้ตัวแปรต่างๆที่นำมาใช้ศึกษา ดังสรุปไว้ในตารางที่ 2.5, 2.6 และ 2.7

โดยทั่วไปแล้ว ลักษณะและคุณสมบัติของชั้นดินกรุงเทพฯจะค่อนข้างมีความคงที่ ซึ่งในการศึกษาที่ผ่านมา ก็มีการนำเสนอข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ได้ และได้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ ในประเทศไทยมีงานวิจัยจำนวนมากที่อธิบายคุณสมบัติของชั้นดินจากข้อมูลในสนาม โดยเป็นการศึกษาทดลองเพื่ออธิบายค่าความแข็งของดิน และนิยมอธิบายในรูปของแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (untrained shear strength, s_u) ตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์การขุดดิน ในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ Teparaksa et al. (1999) [13] ได้นำเสนอว่า $E_u = 500 s_u$ สำหรับดินเหนียวอ่อน และ $E_u = 2000 s_u$ สำหรับดินเหนียวแข็ง Pankoh (2005) [14] ได้นำเสนอว่า $E_u = 250 s_u$ สำหรับดินเหนียวอ่อน และ $E_u = 1500 s_u$ สำหรับดินเหนียวแข็ง ซึ่งค่าตัวแปรที่แนะนำให้ใช้ในการอธิบายความแข็งของดิน (soil stiffness) แสดงไว้ในตารางที่ 2.5-2.7

ตารางที่ 2.5 MC soil model parameters

Soil layer	Wea. Crust	Soft Clay	Med. Clay	Stiff Clay	Sand
γ_{sat} [kN/m ³]	17	16	18	18	20
ν' [-]	0.32	0.33	0.33	0.33	0.3
ϕ' [°]	22	22	22	22	36
c [kPa]	8	5	10	18	0
E' [kPa]	6000	5000	20000	60000	80000
R_{inter}	1	1	1	1	0.7

ตารางที่ 2.6 MCC soil model parameters

Soil layer	Wea. Crust	Soft Clay	Med. Clay	Stiff Clay	Sand
λ [-]	0.182	0.358	0.111	0.111	-
κ [-]	0.053	0.09	0.026	0.026	-
e_{int} [-]	3.24	3.6	1.17	1.02	-
M [-]	1.05	0.93	0.88	0.88	-

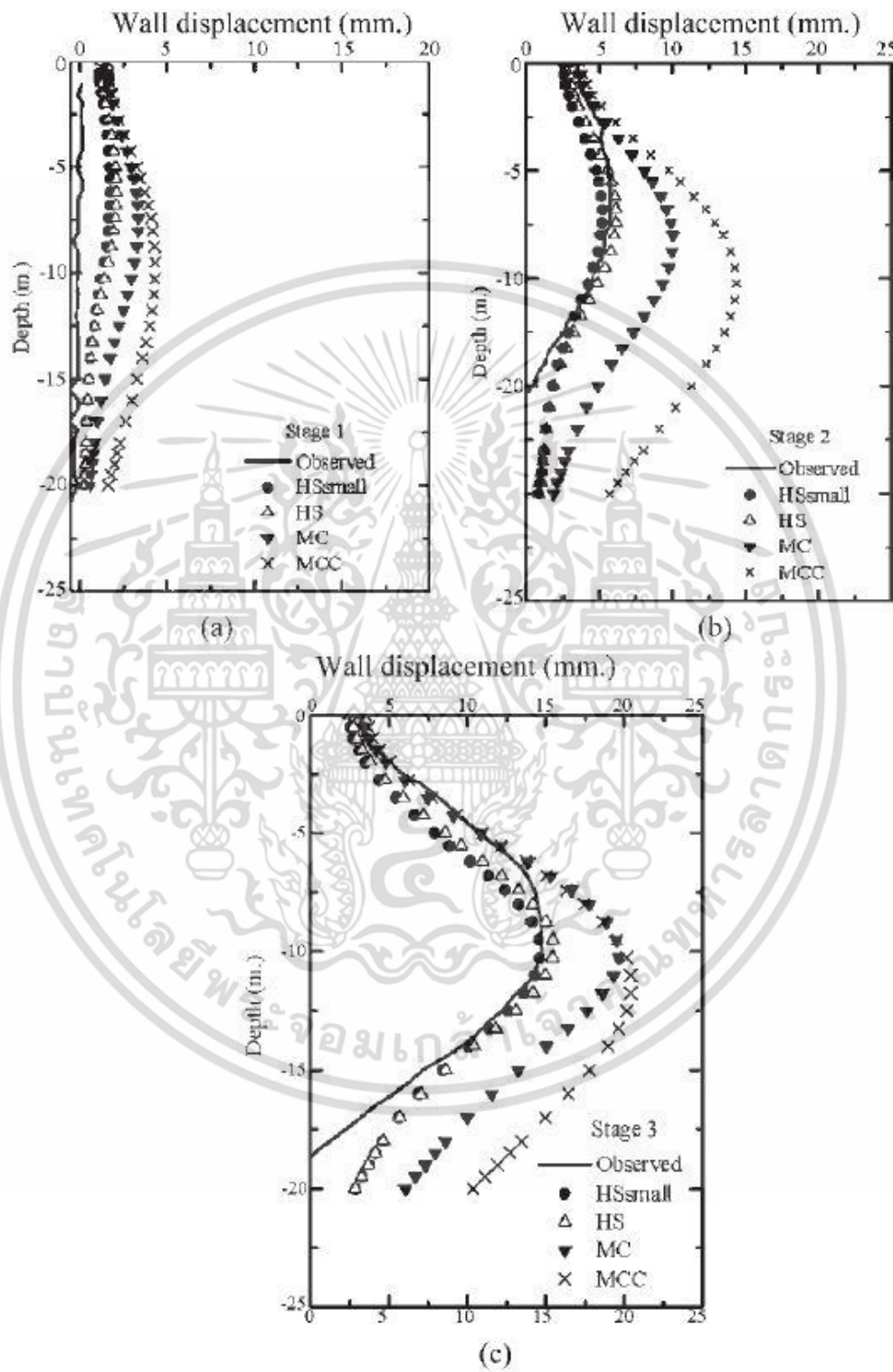
ตารางที่ 2.7 HS and HSsmall soil model parameters

Soil layer	Wea. Crust	Soft Clay	Med. Clay	Stiff Clay	Sand
E_{oed}^{ref} [kPa]	-	5000	20000	60000	-
E_{50}^{ref} [kPa]	-	5000	20000	60000	-
E_{ur}^{ref} [kPa]	-	15000	100000	180000	-
G_0^{ref} [kPa]	-	14200	42000	80000	-
$\gamma_{0.7}$ [-]	-	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	-
m [-]	-	1	1	1	-
p_{ref} [kPa]	-	100	65	95	-

2.2.3 แบบจำลองสำหรับงานขุดดินลึกแบบใช้กำแพงกันดินในชั้นดินกรุงเทพมหานคร

ในปี 2008 Wonglert et al. (2008) [15] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองชนิดต่างๆ โดยใช้แบบจำลองแต่ละชนิด มาวิเคราะห์เพื่อทำนายค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินในชั้นดิน กรุงเทพมหานครในโครงการก่อสร้างอาคารจอดรถใต้ดิน BMAH ซึ่งเป็นการก่อสร้างแบบ Top-Down โดยใช้กำแพงกันดินหนา 0.8 เมตร เป็นอาคารจอดรถ 4 ชั้น ขุดดินลึก 13 เมตร พื้นที่ใช้สอย ประมาณ 2,800 ตารางเมตร มีโครงสร้างคานที่ -0.5 เมตร เป็นค้ำยันชั้นแรกและพื้นค้ำยันหนา 0.3 เมตร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมตร ติดตั้งที่ -2.5, -5.6 และ -8.1 เมตร และนำค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากแบบจำลอง มาเปรียบเทียบกับผลตรวจวัดจริง ดังรูปที่ 2.4

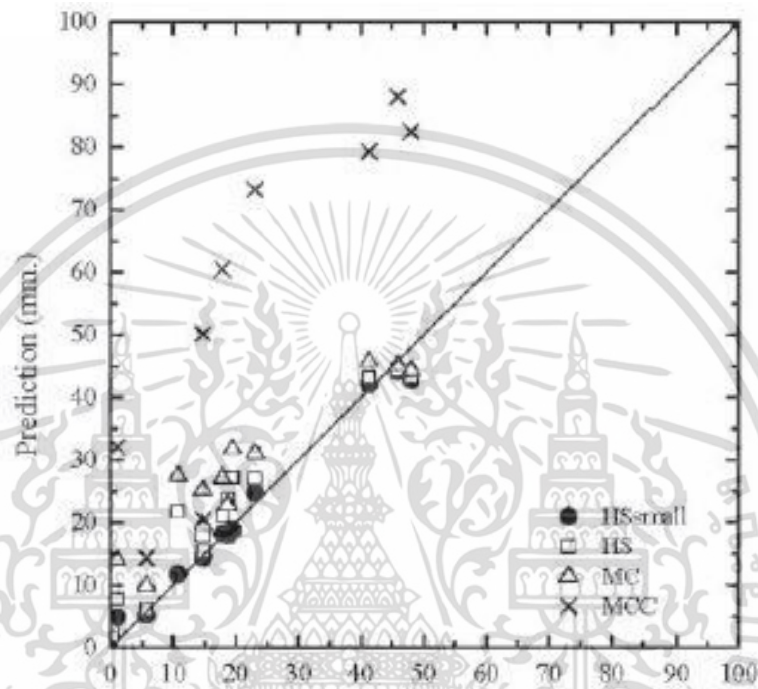


รูปที่ 2.4 ค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงกันดิน จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองชนิดต่างๆ

(a) ขุดดินลึก 2.0 เมตร (b) ขุดดินลึก 5.7 เมตร (c) ขุดดินลึก 11.0 เมตร [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

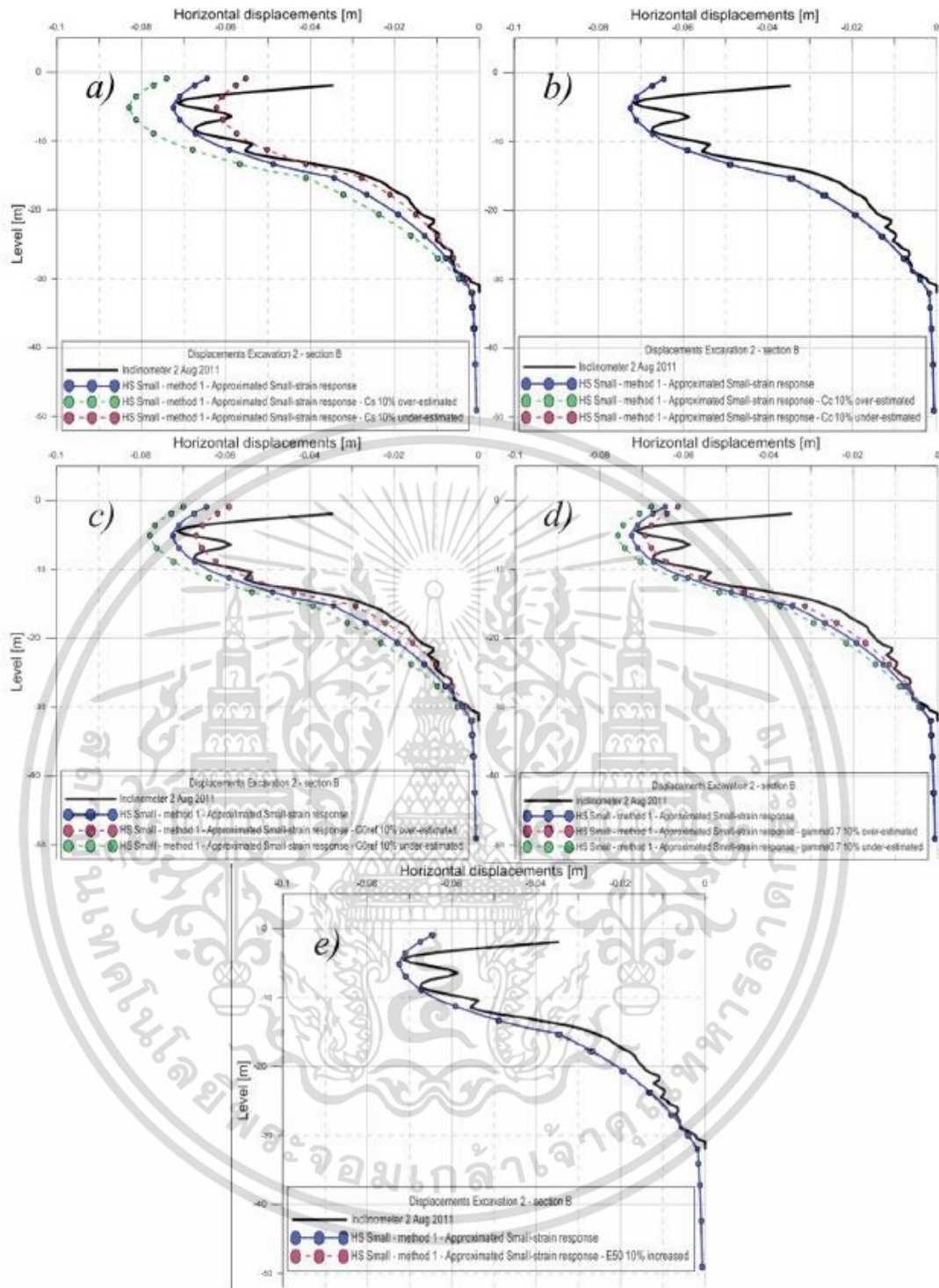
นอกจากนี้ [15] ยังได้วิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของกำแพงกันดิน จากหลายๆกรณี (Green Tower, Thammasart University, Oriflème Building และ BMAH) พบว่าผลจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง HSsmall มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าตรวจวัดจริงมากที่สุด ดังรูปที่ 2.5 เพราะกำแพงกันดินเป็นวัสดุแข็งเกร็ง (rigid) มีช่วงความเครียดต่ำ ทำให้ดินมีพฤติกรรมอยู่ในช่วง small strain stiffness [15]



รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของกำแพงกันดิน จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองชนิดต่างๆ ของกรณีศึกษา [15]

Dawd and Trygg (2013) [16] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างในงานขุดดินลึกในชั้นดินเหนียวอ่อน Gothenburg ซึ่งวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลอง HSsmall ในการศึกษาดังกล่าว มีการวิเคราะห์ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปร (parameter sensitivity analysis) ตัวแปรที่วิเคราะห์ ได้แก่ c_s (swelling index), c_c (compression index), G_0^{ref} (reference initial shear modulus), $\gamma_{0.7}$ (threshold shear strain) และ E_{50}^{ref} (reference secant modulus) โดยทดลองเปลี่ยนค่าของตัวแปร เพิ่มขึ้น 10% และลดลง 10% ดังรูปที่ 2.6 ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง HSsmall คือ ตัวแปร c_c และ E_{50}^{ref} ไม่ส่งผลต่อค่าการเคลื่อนตัว ส่วนตัวแปร c_s , G_0^{ref} และ $\gamma_{0.7}$ มีผลต่อค่าการเคลื่อนตัวอย่างเป็นนัยยะสำคัญ ซึ่งตัวแปร G_0^{ref} และ $\gamma_{0.7}$ มีการนำพิจารณาเฉพาะในแบบจำลอง HSsmall เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ค่าการเคลื่อนตัวจาก sensitivity analysis ด้วยแบบจำลอง HSsmall โดยเพิ่มและลดค่าตัวแปร 10% (a) c_s (b) c_c (c) G_0^{ref} (d) $\gamma_{0.7}$ (e) E_{50} [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

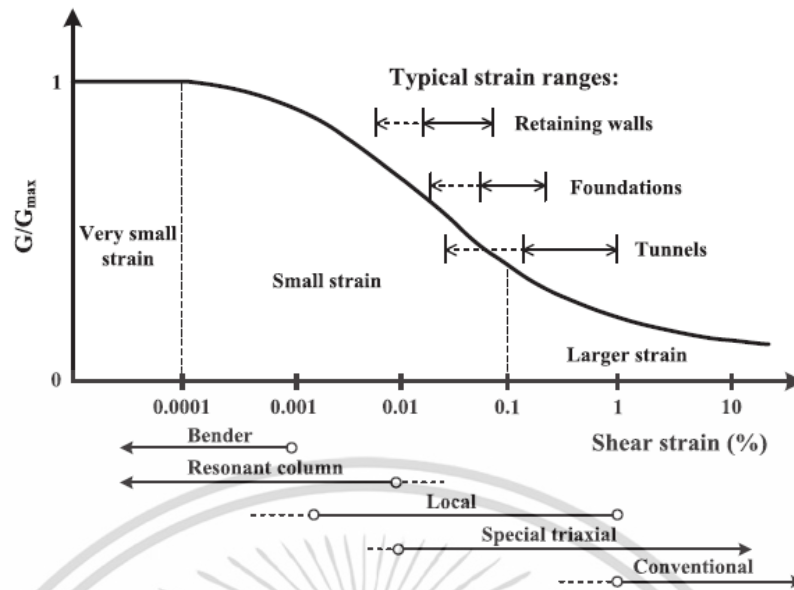
2.3 Small strain stiffness

Likitlersuang et al. (2013) [17] ศึกษาเกี่ยวกับความแข็งของดินในช่วงความเครียดต่ำ (small strain stiffness) และโค้งการสูญเสียความแข็ง (stiffness degradation curve) ของดินเหนียวกรุงเทพฯ ซึ่งเป็นที่ทราบกันว่าความแข็งของดินมีความสำคัญมากต่อการวิเคราะห์ทางธรณีเทคนิค โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ พารามิเตอร์ที่ต้องการคือความแข็งของดินในช่วงความเครียดต่ำและความเครียดที่ขึ้นอยู่กับความแข็ง (strain dependent stiffness) ทั้งสองพารามิเตอร์มักจะใช้ในการควบคุมพฤติกรรมในช่วงความเครียดต่ำของดิน ตัวอย่างเช่นในแบบจำลอง Hardening soil model with small strain stiffness (HSsmall)

2.3.1 คำนิยามและบทบาทของ small strain stiffness

Initial stiffness modulus เป็นปัจจัยที่สำคัญของดินที่เกี่ยวข้องกับการทำนายค่าการเคลื่อนตัวของดิน และการแปลงผลค่าจากสนาม โดยมี small strain shear modulus (G_{max}) และ สัดส่วนการหน่วง (damping ratio : D) เป็นพารามิเตอร์สำคัญ โดยทั่วไป โค้งการสูญเสียความแข็งใช้อธิบายโมดูลัสของแรงเฉือน (shear stiffness) ที่แต่ละความเครียดเฉือน (shear strain) Atkinson and Sallfors (1991) [18] ได้จำแนกระดับของความเครียดออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ระดับความเครียดต่ำมาก (the very small strain level) เป็นช่วงที่โมดูลัสความแข็ง (stiffness modulus) เป็นค่าคงที่ในช่วงอีลาสติก ระดับความเครียดต่ำ (the small strain level) เป็นช่วงที่โมดูลัสความแข็งมีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเส้นตรงกับความเครียด ระดับความเครียดสูง (the large strain level) เป็นช่วงที่ดินใกล้จะพังทลาย และมีความแข็งต่ำกว่าช่วงอื่น รูปที่ 2.7 อธิบายตัวอย่างของโค้งสูญเสียความแข็ง โดยเปรียบเทียบกับพฤติกรรมของงานก่อสร้างทางธรณีเทคนิค และตรวจวัดความแม่นยำจากการตรวจสอบในห้องปฏิบัติการ

การใช้แบบจำลอง HSsmall ในการวิเคราะห์ มีตัวแปรสำคัญ คือ shear modulus (G_0) และ reference threshold shear strain ($\gamma_{0.7}$) ซึ่ง $\gamma_{0.7}$ เป็นค่า shear strain ในช่วงที่ $G/G_0 = 0.7$



รูปที่ 2.7 โค้งสูญเสียความแข็ง (stiffness degradation curve) [17]

2.3.2 small strain stiffness และ stiffness degradation curve ของดินกรุงเทพฯ

จากการศึกษา [17] ถึงพฤติกรรมของความแข็งของดินเหนียวกรุงเทพฯในช่วงความเครียดต่ำ โดยให้ความสนใจที่สองตัวแปรสำคัญ คือ small strain shear modulus (G_{max}) และ reference threshold shear strain ($\gamma_{0.7}$) ได้ข้อสรุปสำคัญดังนี้

- G_{max} ของดินเหนียวกรุงเทพฯ มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันตลอดพื้นที่กรุงเทพฯ และค่าของ G_{max} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความลึก โดยมีความแตกต่างกันชัดเจนระหว่างดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง

- แนวคิดในการใช้ reference threshold shear strain ($\gamma_{0.7}$) มาประมาณเป็นค่า volumetric threshold shear strain (γ_{lv}) มีความสมเหตุสมผล ดังนั้น $\gamma_{0.7}$ จึงสามารถใช้เป็น input parameter ในแบบจำลอง Hardening soil model with small strain stiffness (HSsmall) ได้

2.4 ชนิดของระบบในการขุดดินลึกในกรุงเทพมหานคร

งานขุดดินลึกจำนวนมากในกรุงเทพมหานครส่วนใหญ่แล้วจะใช้การป้องกัน 3 ระบบ ได้แก่ กำแพงไดอะแฟรม (diaphragm wall) กำแพงเข็มพืด (sheet pile wall) และ กำแพงเสาเข็ม (contiguous pile wall) ซึ่งเหตุผลหลักในการตัดสินใจว่าจะเลือกใช้ระบบใดก็คือ ราคา ระดับความลึกในการขุด และลักษณะโครงสร้างใต้ดิน กำแพงเข็มพืดจะมีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างต่ำ ส่วนกำแพงไดอะแฟรมถูกพัฒนามาเพื่อใช้ในการขุดดินที่มีความลึกมากๆ และกำแพงเสาเข็มถูกดัดแปลงมาจาก กำแพงไดอะแฟรม เพื่อใช้ในลักษณะของการขุดดินลึก แต่จะมีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่า ตัวอย่างส่วนการขุดดินลึกในกรุงเทพมหานคร ในช่วงสองทศวรรษ ได้แสดงในตารางที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 ตัวอย่างของการขุดเจาะในเขตกรุงเทพมหานครช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา [19]

Sheet piles Wall	Contiguous piles wall	Diaphragm wall
Charoen Nakorn	Bangplad Underpass	Bangkok. United Insurance
Paolo Hospital	Millennium Condo	Building
Saladang		IFCT Tower
Gaysorn Plaza		International Trade Center
Ramaland		Green Tower
Baiyok II Tower		Winsor Hotel
Siam Motor Machine		Le Raffine 24
		Lumpini Park
		TPI Building
		Oriflame Building
		Sathorn Complex
		Pratunam Complex
		China Tower
		President Tower
		Rajavej Hotel
		Central Rachada Rama III
		United Business Center II
		Thammasart University
		Dindang Underpass

2.4.1 กำแพงไดอะแฟรม (diaphragm wall)

มีเหตุผลหลักในการเลือกใช้ คือ เทคนิคการก่อสร้างที่รวดเร็ว เนื่องจากมีความสะดวกสบายในการทำงานขุดดินสามารถทำได้โดยง่าย และมีการก่อสร้างที่มีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ราคาต่อหน่วยพื้นที่ (m^2) ของการขุดเจาะยังลดลงอีกด้วย

กำแพงไดอะแฟรมถูกออกแบบมา เพื่อให้สามารถต้านทานต่อแรงกระทำของโครงสร้าง และยังสามารถต้านทานแรงในแนวราบ อันเนื่องมาจากแรงดันดิน แรงจากน้ำหนักรถบรรทุก และแรงดันน้ำได้อีกด้วย ค่าการเคลื่อนตัวและความเครียดที่เกิด ขึ้นอยู่กับระบบค้ำยันและระดับความลึก นอกจากนี้ความแข็งแรงของกำแพงไดอะแฟรม ยังมากกว่ากำแพงเข็มพืด จึงมีการเสียรูปน้อยกว่าเมื่อได้รับโมเมนต์ดัดสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 กำแพงเข็มพืด (sheet pile wall)

โดยทั่วไปแล้ว กำแพงเข็มพืดมีประโยชน์เพื่อใช้เป็นโครงสร้างชั่วคราวของการขุดระดับดิน ใน กรุงเทพมหานคร ใช้กำแพงเข็มพืดในการทำงานจำนวนมากและเป็นที่ยอมรับ เพราะการก่อสร้างมีราคาที่ถูกกว่า และในด้านของเวลานั้น ก็มีการทำงานง่ายกว่า กำแพงเข็มพืดสามารถเคลื่อนย้ายออกหลังจากการก่อสร้างเสร็จสิ้นได้ โดยการรื้อหรือการใช้ static vibrating และขณะใช้งานยังสามารถเชื่อมต่อกับชั้นอื่นๆได้ การก่อสร้างกำแพงเข็มพืด มีการนำวัสดุหลายๆมาใช้งาน เช่น ไม้ คอนกรีต และเหล็ก ซึ่งกำแพงเข็มพืดเหล็กถูกใช้งานมากในงานขุดดิน

2.4.3 กำแพงเสาเข็ม (contiguous pile wall)

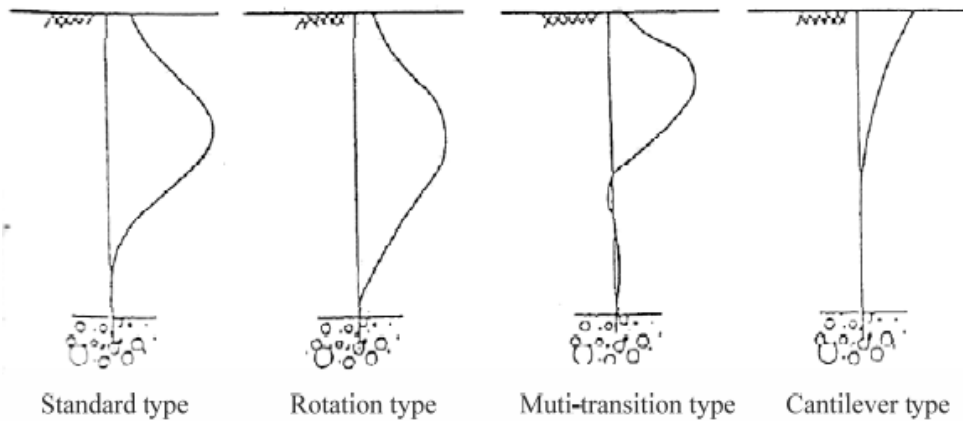
กำแพงเสาเข็มถูกนำมาพิจารณาใช้งาน เหมือนเป็นกำแพงไคแฟรมแบบประยุกต์ ซึ่งแต่ละชั้นจะถูกก่อสร้างขึ้นมาเป็นเสาเข็มเจาะที่ต่อเนื่องกัน ทั้งต่อเนื่องกันเป็นเส้นตรง และมีการสลับฟันปลา กำแพงกันดินชนิดนี้มีการนำมาใช้ก่อนที่จะมีการพัฒนากำแพงไคแฟรมแบบคอนกรีต แต่ใน กรุงเทพมหานคร กำแพงเสาเข็มเจาะนี้เป็นที่รู้จักชื่อกำแพงไคแฟรม

2.5 การเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงกันดิน

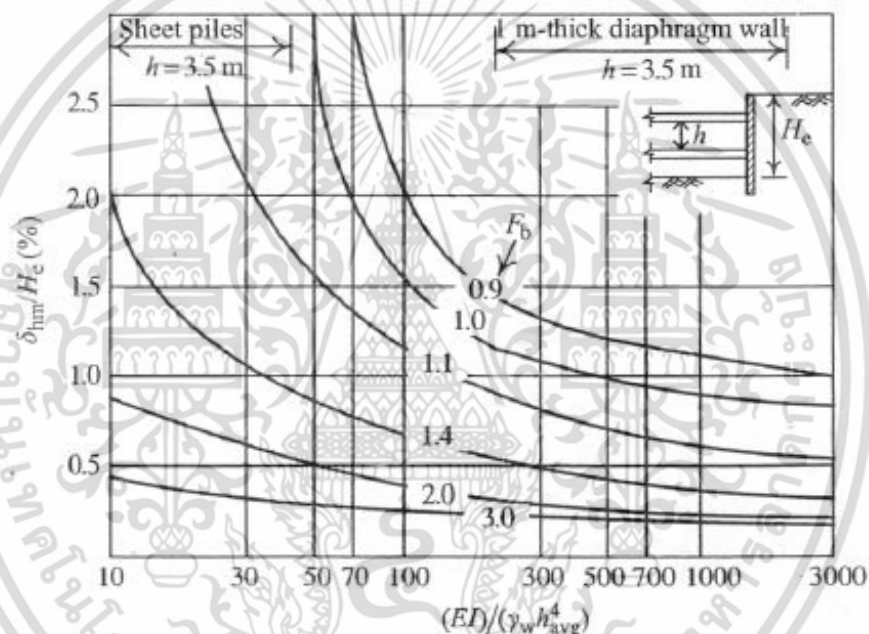
Wu et al. (1997) [20] ได้สรุปข้อมูลของโครงการ MRT ในประเทศไต้หวัน และระบุเกี่ยวกับรูปแบบของการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน ซึ่งสามารถแบ่งอย่างง่ายได้เป็น 4 แบบ ดังนี้คือ 1. standard movement 2. rotation movement 3. multi-point movement 4. cantilever movement ดังรูปที่ 2.8 แสดงรูปแบบการเคลื่อนตัวของกำแพงไคแฟรมทั้ง 4 แบบ

Clough and O'Rourke (1990) [5] ได้ศึกษาการเคลื่อนตัวเกี่ยวข้องกับการขุดดินลึก ด้วยตัวอย่างข้อมูลของการตรวจวัดในพื้นที่ และการศึกษาจากข้อมูลก่อนหน้านี้ โดยนำเสนอ Semi-empirical เพื่อที่จะประมาณค่าการเคลื่อนตัวของการขุดดินในชั้นดินเหนียว ซึ่งก็คือค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของกำแพงกันดิน ค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของกำแพงกันดินประมาณโดยใช้ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกันกับสัดส่วนความปลอดภัย (safety factor) และระบบของความแข็งแกร่ง (system stiffness) ซึ่ง system stiffness ประกอบด้วย flexural stiffness (EI) ระยะห่างเฉลี่ยของค้ำยัน (h_{av}) และหน่วยน้ำหนักของน้ำ (γ_w) ดังแสดงในรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 รูปแบบการเคลื่อนตัวของตัวด้านข้างของกำแพงไดอะแฟรม [20]



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของตัวด้านข้างสูงสุดของกำแพงกันดินต่อความลึกการขุดกับระบบของความแข็งแรง(system stiffness) ในชั้นดินเหนียว [5]

2.6 การเคลื่อนตัวของตัวด้านข้างของเสาเข็มที่อยู่ข้างเคียงงานขุดดินลึก

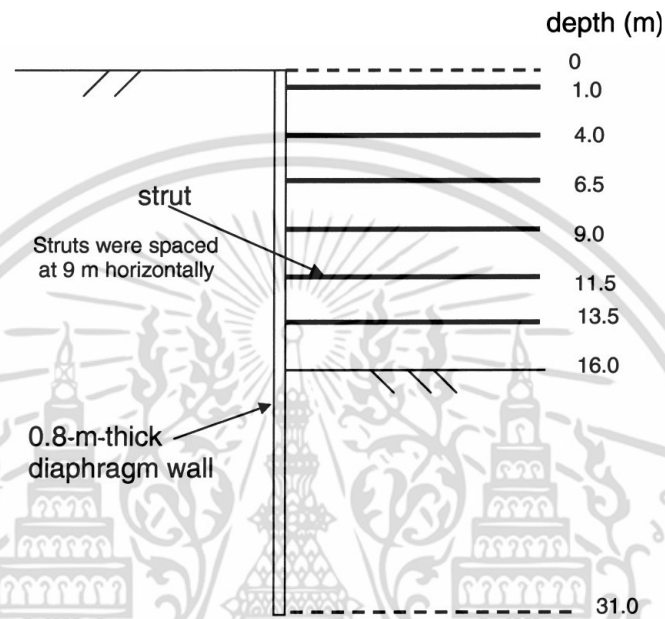
งานวิจัยจำนวนมากทำการศึกษาค่าการทรุดตัวของผิวดิน และการเคลื่อนตัวของตัวด้านข้างของกำแพงกันดินในงานขุดดินลึก [5,21,22] ซึ่งการเคลื่อนตัวของตัวด้านข้างของดินและกำแพงกันดินในงานขุดดินลึกส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาของเสาเข็มที่อยู่ข้างเคียง

Goh et al. (2003) [23] ได้ทำการศึกษาและนำเสนอผลตรวจวัดจากการทดลองเสมือนจริงเพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มที่มีอยู่ก่อน ที่อยู่ข้างเคียงบริเวณที่มีการขุดดินลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 รายละเอียดโครงการ

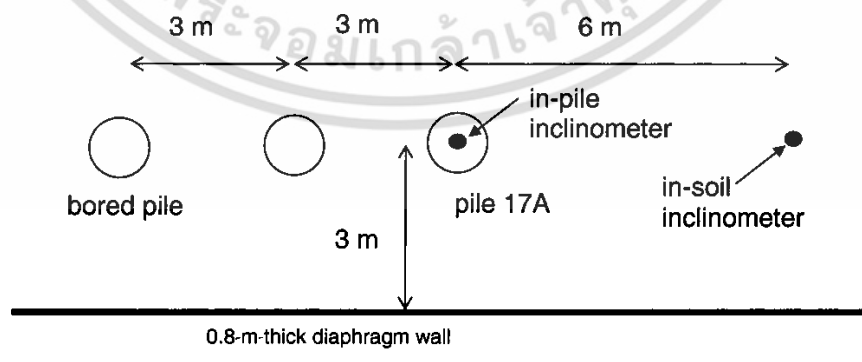
ก่อสร้างอุโมงค์แบบขุดและกลบ ที่มีความยาว 127.5 เมตร และกว้าง 20 เมตร ด้วยการขุดดินลึก 16 เมตร โดยป้องกันหลุมขุดด้วยกำแพงกันดินหนา 0.8 เมตร และลึก 31 เมตร จากผิวดิน มีการค้ำยัน 6 ระดับ ตำแหน่งของค้ำยันในงานก่อสร้าง แสดงดังรูปที่ 2.10 เสาค้ำที่อยู่วางเฉียงเป็นเสาค้ำเอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร และลึก 46 เมตร จากผิวดิน



Not to scale

รูปที่ 2.10 ภาพตัดของหลุมขุด [23]

เสาค้ำเอนวางตัวอยู่ด้านหลังกำแพงกันดินเป็นระยะ 3 เมตร แผนผังการวางตำแหน่งของเสาค้ำเอน และอุปกรณ์ตรวจวัดแสดงในรูปที่ 2.11



PLAN VIEW

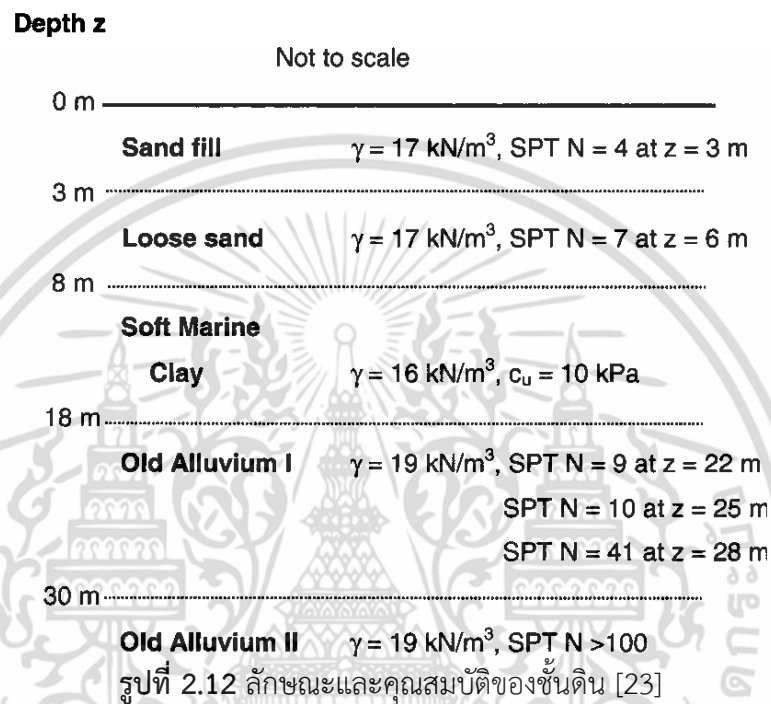
(Not to scale)

รูปที่ 2.11 แผนผังตำแหน่งของเสาค้ำเอนและอุปกรณ์ตรวจวัด [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 ข้อมูลดิน

พื้นที่บริเวณที่ทำการศึกษประกอบด้วยชั้นทรายถมวางตัวบนชั้นดินเหนียวสมุทร (Marine clay) ด้านล่างเป็นดินที่เกิดจากการทับถมของตะกอนลำน้ำที่มีอายุมาก (Old Alluvium) น้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับ 4 เมตร ต่ำจากผิวดิน ลักษณะและคุณสมบัติของชั้นดินที่อนุมานมาจากหลุมเจาะในบริเวณใกล้เคียงแสดงในรูปที่ 2.12

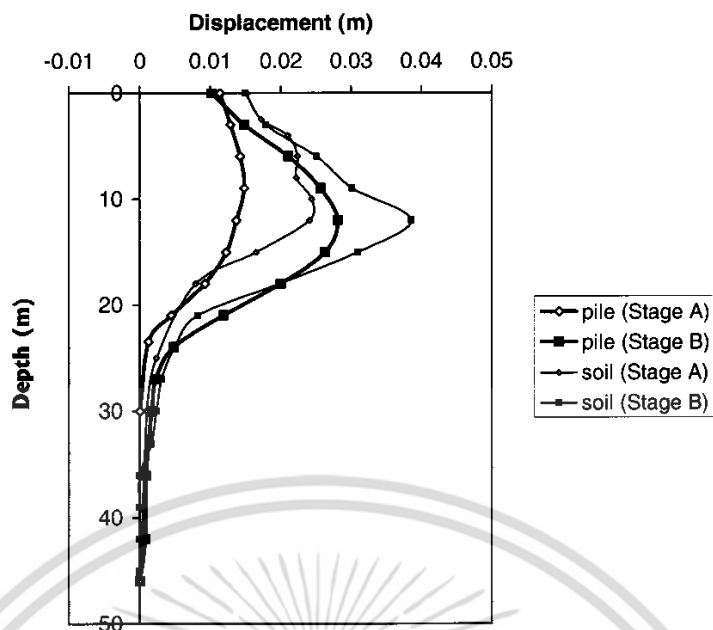


2.6.3 พฤติกรรมของเสาเข็ม

เสาเข็มถูกก่อสร้างหลังจากการก่อสร้างกำแพงกันดิน และมีการอ่านค่าอุปกรณ์ตรวจวัดทั้งสิ้น 2 ครั้ง ครั้งแรก (Stage A) เมื่อมีการขุดดินไปถึงค้ำยันระดับที่ 3 และครั้งที่สอง (Stage B) เมื่อมีการขุดดินไปถึงความลึกสุดท้าย

ค่าตรวจวัดการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม แสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งลักษณะรูปร่างโค้งของการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม มีรูปร่างเช่นเดียวกับการเคลื่อนตัวที่พบจำนวนมากในกำแพงกันดินแบบมีค้ำยันหลายระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



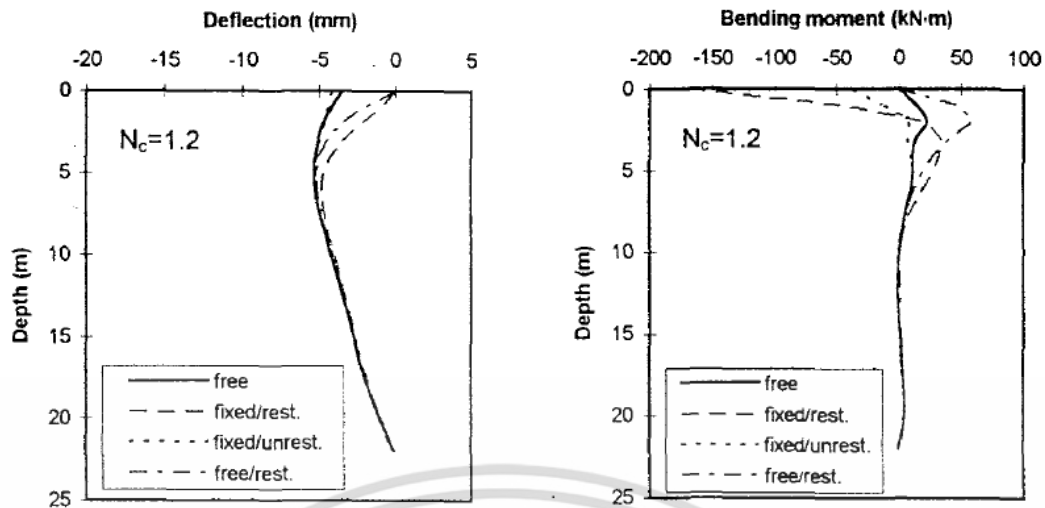
รูปที่ 2.13 ผลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของเสาเข็มและชั้นดิน [23]

2.7 เงื่อนไขการเคลื่อนตัวที่หัวเสาเข็ม (pile head condition)

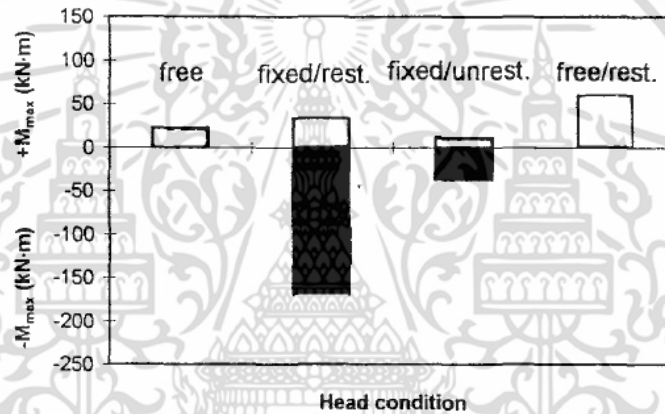
เสาเข็มที่อยู่ในสถานการณ์การใช้งานที่ต่างกัน อาจมีเงื่อนไขการเคลื่อนตัวที่หัวเสาเข็ม (pile head condition) ที่ต่างกันด้วยเช่นกัน ซึ่งก็มีงานวิจัยที่ศึกษาถึงผลกระทบของเงื่อนไขการเคลื่อนตัวที่หัวเสาเข็มที่มีต่อการเคลื่อนตัวด้านข้างและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้น โดยมีทั้งการศึกษาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับบาวนด์รีเอลิเมนต์ [24] และการศึกษาโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge model) [1]

การศึกษาของ Poulos and Chen (1996) [24] ศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มที่อยู่ข้างเคียงบริเวณที่มีการขุดดินโดยใช้กำแพงกันดินในชั้นดินเหนียว โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับบาวนด์รีเอลิเมนต์ และได้เปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวและโมเมนต์ดัดที่เกิดในเสาเข็มที่มีเงื่อนไขการเคลื่อนตัวที่หัวเสาเข็ม ต่างกัน ดังรูปที่ 2.14 ได้แก่ เสาเข็มที่สามารถหมุนและเคลื่อนตัวได้อย่างอิสระ (free), เสาเข็มที่ไม่สามารถหมุนและเคลื่อนตัวได้ (fixed/restrained), เสาเข็มที่ไม่สามารถหมุนได้ แต่เคลื่อนตัวได้ (fixed/unrestrained) และเสาเข็มที่สามารถหมุนได้ แต่เคลื่อนตัวไม่ได้ (free/restrained) ซึ่งพบว่าเงื่อนไขการเคลื่อนตัวที่หัวเสาเข็มส่งผลอย่างมากต่อพฤติกรรมของเสาเข็มที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งโมเมนต์ดัดของเสาเข็ม เมื่อหัวเสาเข็มถูกยึดตรึงไว้ ทำให้โมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้น ทำให้ความเสี่ยงที่เสาเข็มที่เสียหายเพิ่มมากขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) Deflection and bending moment profile

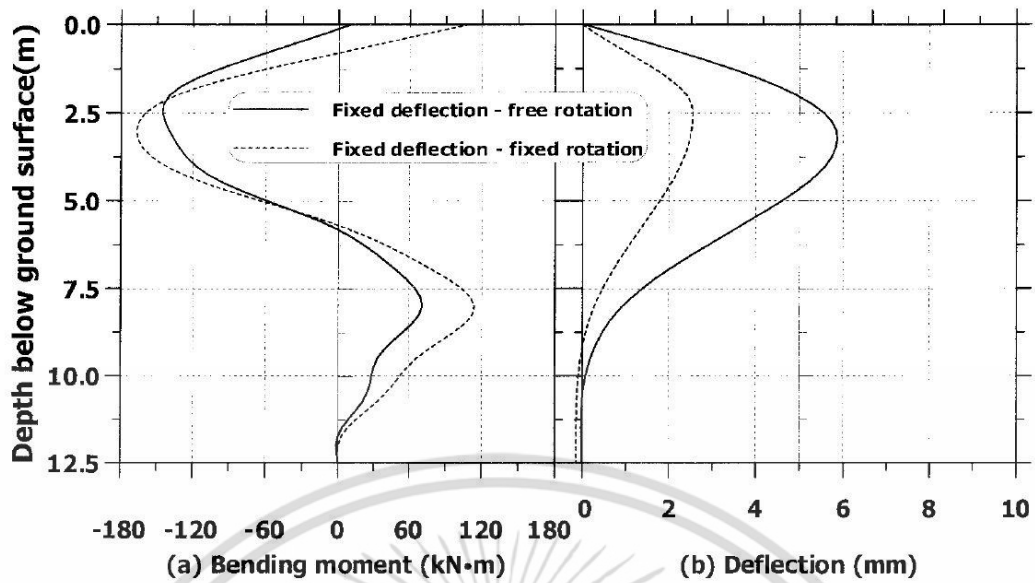


(b) Maximum bending moment

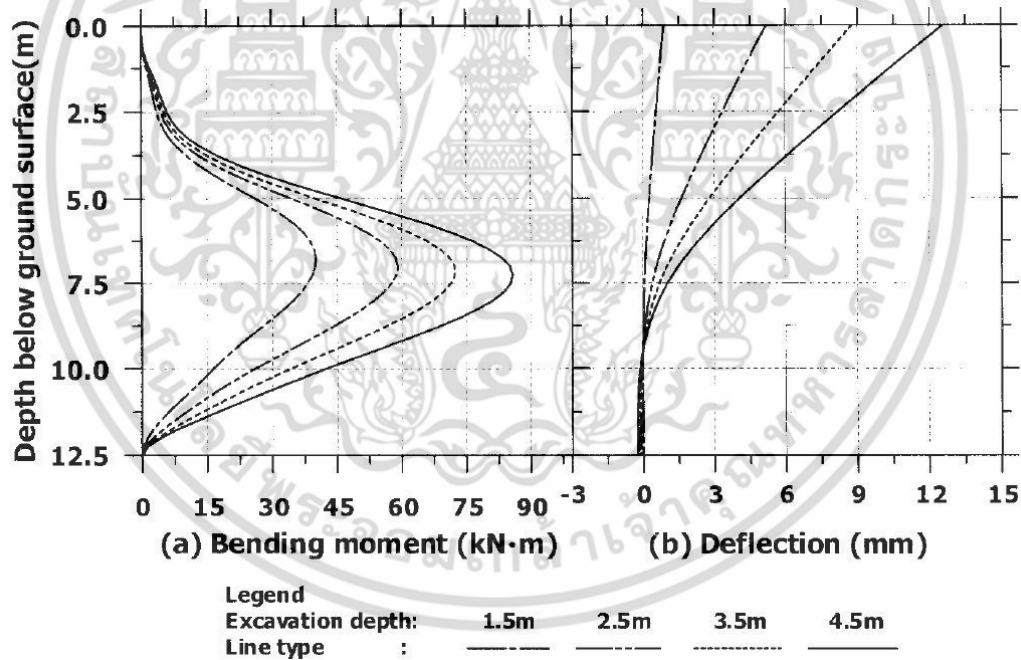
รูปที่ 2.14 การเคลื่อนตัวและโมเมนต์ดัดของเสาเข็มที่มีสภาวะหัวเสาเข็มต่างกัน (a) การเคลื่อนตัวและโมเมนต์ดัดของเสาเข็ม (b) โมเมนต์ดัดสูงสุด [24]

การศึกษาของ Lueng et al. (2000) [1] ศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มที่อยู่ข้างเคียงบริเวณที่มีการขุดดินโดยใช้กำแพงกันดินในชั้นทราย โดยใช้ centrifuge model และได้ศึกษาค่าการเคลื่อนตัวและโมเมนต์ดัดที่เกิดในเสาเข็มที่ถูกยึดรั้งหัวเสาเข็มไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 2.15 ประกอบด้วยเสาเข็มที่ถูกยึดรั้งหัวเสาเข็มไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ แต่สามารถหมุนได้ และเสาเข็มที่ถูกยึดรั้งหัวเสาเข็มไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่และหมุน เมื่อเปรียบเทียบกับเสาเข็มที่หัวเสาเข็มไม่ถูกยึดรั้งใดๆ ในรูปที่ 2.16 พบว่า เสาเข็มที่หัวเสาเข็มไม่ถูกยึดรั้งมีค่าการเคลื่อนตัวมากที่สุด และเสาเข็มที่ถูกยึดรั้งหัวเสาเข็มไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่และหมุนเกิดโมเมนต์ดัดมากที่สุด ทั้งโมเมนต์บวก และโมเมนต์ลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 การเคลื่อนตัวและโมเมนต์ดัดของเสาเข็มที่มีสภาวะหัวเสาเข็มต่างกัน (a) โมเมนต์ดัด (b) การเคลื่อนตัว [1]



รูปที่ 2.16 การเคลื่อนตัวและโมเมนต์ดัดของเสาเข็มที่หัวเสาเข็มไม่ถูกยึดรั้งใดๆ [1]

2.8 สมการเพื่อทำนายการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินจากกระบวนการขุด

Kung et al. (2007) [6] ได้นำเสนอการสร้างสมการ สำหรับทำนายการเคลื่อนตัวสูงสุดของกำแพงกันดิน การทรุดตัวสูงสุดที่ผิวดิน และรูปร่างของการทรุดตัวที่ผิวดิน เนื่องจากการขุดในชั้นดินเหนียวอ่อนและชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง ซึ่งขั้นตอนการสร้างสมการมีการสร้างข้อมูลเทียมจำนวนมากโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และใช้แบบจำลองดินแบบ small-strain ข้อมูลเทียมที่ได้จากการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์นี้ประกอบด้วย การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินและการทรุดตัวของพื้นผิวดินจากการขุดดิน ในชั้นดินเหนียวอ่อนและชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง ตัวแปรในการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.9 ตัวแปรและขอบเขตในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ [6]

Variable	Applicable range
Excavation depth, H_e (m)	0-30
$\ln(EI/\gamma_w h^4_{avg})$	≥ 0
Excavation width, B (m)	0-100
Normalize shear strength (s_u/σ'_v)	0.2-0.4
E_i/σ'_v	200-1200

กรณีที่เหมาะสมในตารางที่ 2.9 มีความสำคัญ ดังนี้ 1) ตัวแปรทั้งห้าตัว แต่ละตัวแปรมีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนตัวสูงสุดของกำแพงกันดิน และ 2) เพื่อใช้ในการสร้างข้อมูลเทียมสำหรับการวิเคราะห์เชิงถดถอย ก่อนการวิเคราะห์เชิงถดถอย ตัวแปรทั้งห้าตัวจะต้องถูกปรับแก้ ให้มีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนตัวสูงสุดของกำแพงกันดินแบบเป็นเส้นตรง ซึ่งหลังจากการวิเคราะห์เพื่อหารูปแบบการปรับแก้ ได้ฟังก์ชันที่นำมาใช้ดังสมการที่ 2.1

$$X = t(x) = a_1x^2 + a_2x + a_3 \quad (2.1)$$

เมื่อ x = ตัวแปรของข้อมูล H_e , $\ln(EI/\gamma_w h^4_{avg})$, $B/2$, s_u/σ'_v และ E_i/σ'_v และ X = ตัวแปรที่ได้รับการปรับแก้ค่าแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์ a_1 , a_2 , และ a_3 สำหรับใช้ในการปรับแก้แต่ละตัวแปรแสดงในตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการเปลี่ยนแปลงของเส้นตรงของห้าตัวแปร [6]

Variables (x)	Applicable Range	Coefficients of Eq. 2.2		
		a_1	a_2	a_3
H_e (m)	0-30	-0.4	24	-50
$\ln(EI/\gamma_w h^4_{avg})$	≥ 0	11.5	-295	2,000
$B/2$ (m)	0-100	-0.04	4	90
s_u/σ'_v	0.2-0.4	3,225	-2,882	730
E_i/σ'_v	200-1200	0.00041	-1	500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีทั้งหมด 144 กรณี ถูกสมมติใช้เพื่อสร้างสมการประมาณค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของ
 กำแพงกันดิน (δ_{hm}) สมการที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงถดถอยที่แสดงในสมการ 2.2

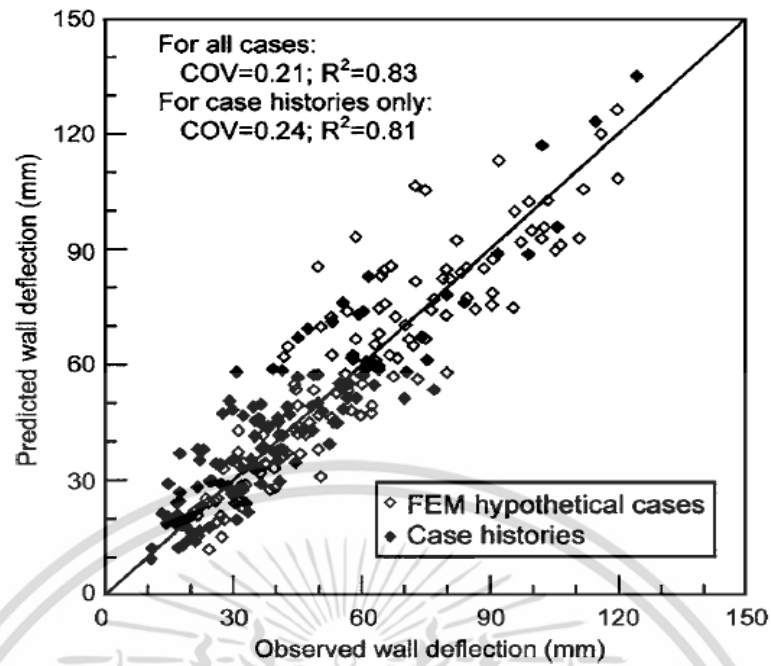
$$\delta_{hm} \text{ (mm)} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_5X_5 + b_6X_1X_2 + b_7X_1X_3 + b_8X_1X_5 \quad (2.2)$$

ตารางที่ 2.11 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ [6]

	X	B
0	-	-13.41973
1	t(H_e)	-0.49351
2	t[ln($EI/\gamma_w h^4_{avg}$)]	-0.09872
3	t($B/2$)	0.06025
4	t(s_u/σ_v)	0.23766
5	t(E_t/σ_v)	-0.15406
6	-	0.00093
7	-	0.00285
8	-	0.00198

การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินคำนวณโดยใช้สมการ 2.2 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการเคลื่อน
 ตัวของกำแพงกันดินที่ตรวจวัดจริงจาก 30 กรณี และค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินจากการ
 วิเคราะห์โดยใช้ไฟไนท์เอลิเมนต์ 144 ตัวอย่าง ดังแสดงในรูป 2.17 สมการ 2.1 และสมการ 2.2 มี
 ประสิทธิภาพในการประเมินค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของกำแพงกันดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง
 ปานกลาง ให้ค่าสัมประสิทธิ์การคำนวณสูง (R^2) และค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงต่ำ (COV)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินจากสมการ 2.1 และ 2.2 เปรียบเทียบกับค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินจากผลตรวจวัดจริงจาก และการวิเคราะห์โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

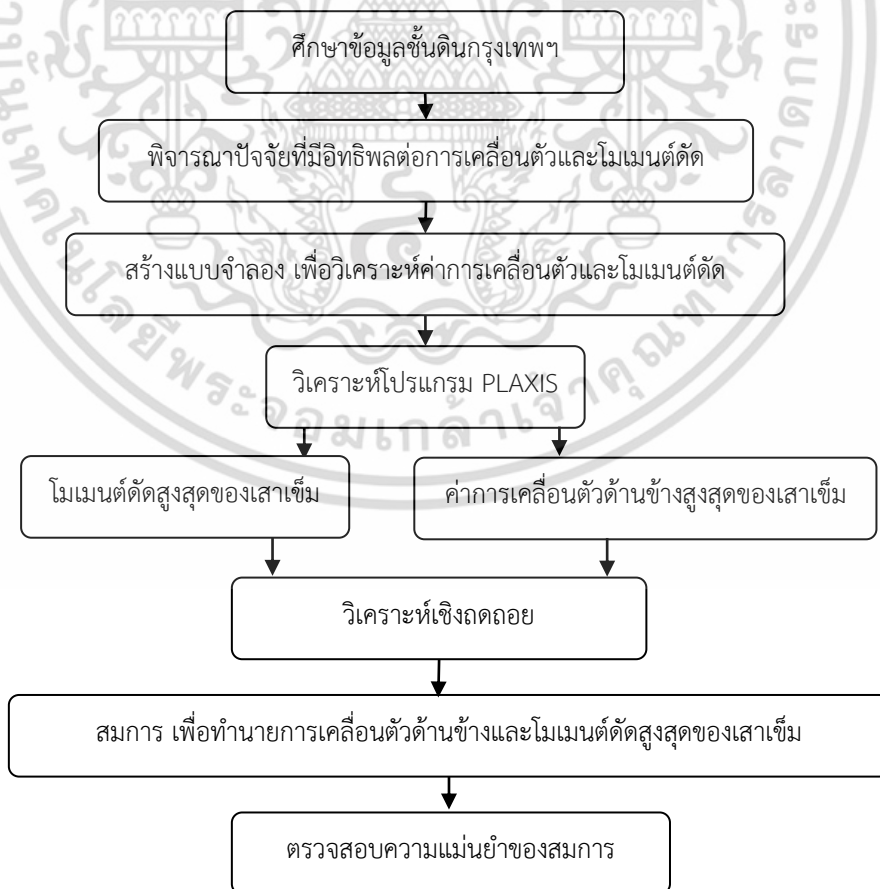
บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์

การพัฒนาสมการอย่างง่าย เพื่อประมาณค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างและโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็มที่อยู่ใกล้เคียงบริเวณงานขุดดินลึกในชั้นดินกรุงเทพฯ ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยขั้นตอนตามแผนผังดังรูปที่ 3.1

- 1) ศึกษาข้อมูลชั้นดิน รูปแบบการก่อสร้างจากกรณีศึกษาของการขุดดินแบบมีค้ำยันในกรุงเทพมหานคร
- 2) พิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนตัวและโมเมนต์ดัดของเสาเข็ม
- 3) สร้างข้อมูลเทียมโดยใช้ปัจจัยในข้อ 2 โดยใช้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เหมาะสมเพื่อวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัวและโมเมนต์ดัดของเสาเข็ม
- 4) สร้างสมการ โดยใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงถดถอย
- 5) ตรวจสอบความแม่นยำของสมการ โดยเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวที่ได้กับแบบจำลอง



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

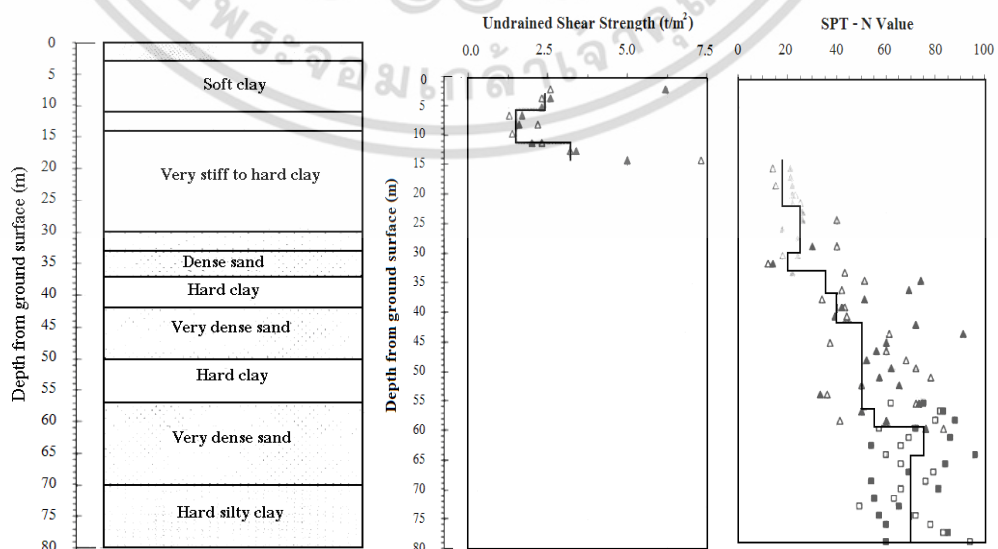
3.2 การศึกษาคุณสมบัติชั้นดินกรุงเทพมหานคร

กรณีศึกษาของการขุดดินลึกแบบมีค้ำยันในกรุงเทพมหานครที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือ โครงการก่อสร้างอาคารจอดรถใต้ดิน BMAH เนื่องจากมีข้อมูลเพียงพอสามารถนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ได้อย่างเหมาะสม ซึ่งข้อมูลชั้นดินของโครงการดังกล่าวแสดงในรูปที่ 3.2 โดยแบ่งชั้นดินตามระดับความลึก ดังนี้

- 0 ถึง 2 เมตร ชั้นดินถม
- 2 ถึง 11 เมตร ชั้นดินเหนียวอ่อน
- 11 ถึง 15 เมตร ชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง
- 15 ถึง 24 เมตร ชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรก
- 24 ถึง 36 เมตร ชั้นทรายชั้นแรก
- 36 ถึง 43 เมตร ชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง
- > 43 เมตร ชั้นทรายชั้นที่สอง

การก่อสร้างของโครงการดังกล่าวเป็นแบบ Top-Down โดยใช้กำแพงกันดินหนา 0.8 เมตร เป็นอาคารจอดรถ 4 ชั้น ขุดดินลึก 13 เมตร พื้นที่ใช้สอยประมาณ 2,800 ตารางเมตร มีโครงสร้างคานที่ความลึก -0.5 เมตร เป็นค้ำยันชั้นแรก และมีพื้นค้ำยัน หนา 0.3 เมตร ติดตั้งอยู่ที่ความลึก 2.5, 5.6 และ 8.1 เมตร โดยมีลำดับขั้นของการขุด และขั้นตอนการก่อสร้าง ดังนี้

- 1) ขุดดินลึก 1 เมตร และสร้างคานที่ระดับ -0.5 เมตร
- 2) ขุดดินลึก 5.6 เมตร และสร้างพื้นที่ระดับ -5.3 เมตร
- 3) ขุดดินลึก 13 เมตร และสร้างฐานราก
- 4) สร้างพื้นที่ระดับ -8.1 เมตร
- 5) สร้างพื้นที่ระดับ -2.5 เมตร



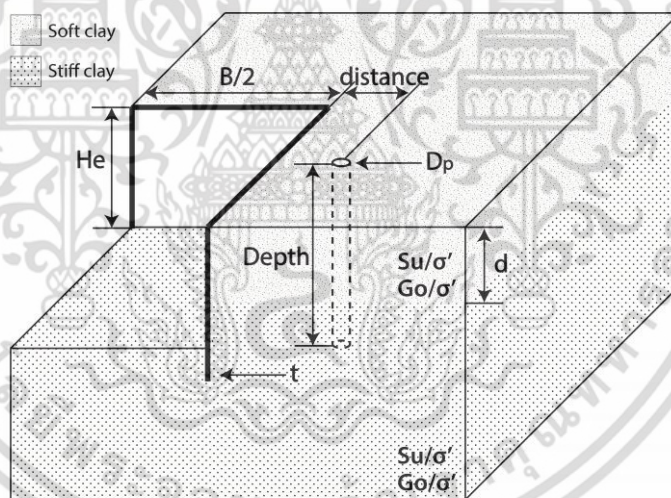
รูปที่ 3.2 ข้อมูลชั้นดินกรณีศึกษา BMAH [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้ผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนตัวและโมเมนต์ดัดของเสาเข็ม

ตัวแปรที่นำมาพิจารณาเพื่อสร้างข้อมูลเทียมแสดงดังรูป 3.3 ได้แก่ ขนาดของบริเวณที่ทำการขุดดิน (B), ความลึกของการขุดดิน (H_e), ขนาดของกำแพงกันดิน (t) ซึ่งขนาดของกำแพงกันดินจะพิจารณาในรูปของ system stiffness ประกอบด้วย flexural stiffness (EI) ระยะห่างเฉลี่ยของค้ำยัน (h_{avg}) และหน่วยน้ำหนักของน้ำ (γ_w), ขนาดของเสาเข็ม (D_p) จะพิจารณา flexural stiffness (EI), ความลึกของเสาเข็ม (Depth), ระยะห่างระหว่างเสาเข็มกับกำแพงกันดิน (Distance), ค่า Normalize shear strength (s_u/σ'_v) และค่า Normalize initial shear modulus (G_0/σ'_v) [6,7,25] นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังมีการพิจารณา ความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน (d) ซึ่งมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของเสาเข็ม โดยเมื่อชั้นดินเหนียวอ่อนหนาขึ้น กำแพงกันดินและเสาเข็ม มีแนวโน้มการเคลื่อนตัวและโมเมนต์ดัดที่มากขึ้นเช่นกัน

ปัจจัยดังกล่าวนำมาใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยโปรแกรม PLAXIS 3D เวอร์ชัน 2013.1 [26] เพื่อหาค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเข็ม และสร้างสมการเพื่อประมาณค่าการเคลื่อนตัว ทั้งในระบบ 2 มิติ และ 3 มิติต่อไป



รูปที่ 3.3 ตัวแปรที่นำมาพิจารณาเพื่อสร้างข้อมูลเทียม

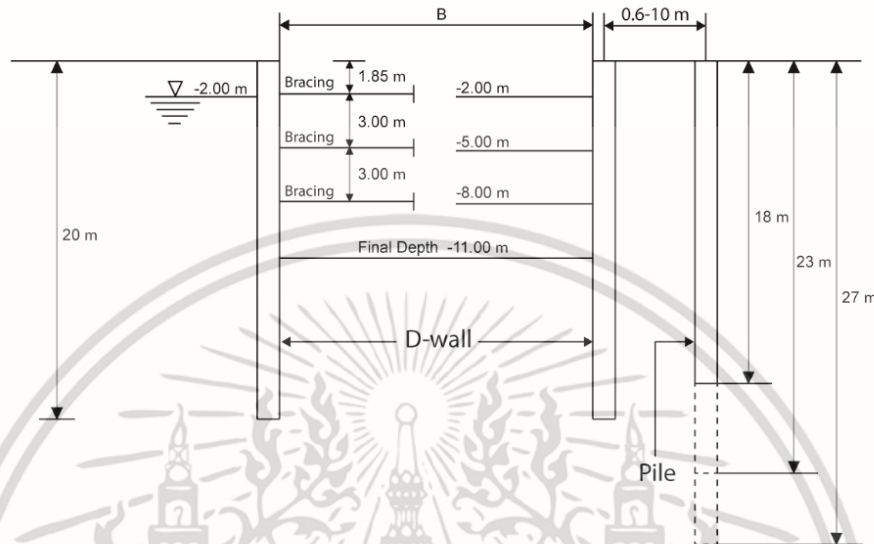
3.4 แบบจำลอง เพื่อประมาณค่าการเคลื่อนตัวและโมเมนต์ดัดของเสาเข็มในระบบ 2 มิติ

3.4.1 ลักษณะของแบบจำลอง

ปัจจัยที่เชื่อว่ามีอิทธิพลต่อค่าการเคลื่อนตัวและโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็มในการขุดแบบมีค้ำยันในชั้นดินกรุงเทพมหานครได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้แล้ว ส่วนพื้นฐานของการขุด ตัวอย่างเช่น ความลึกของแต่ละชั้นในการขุดดิน รวมถึงขั้นตอนการทำงาน ระดับของค้ำยัน และตำแหน่งของ

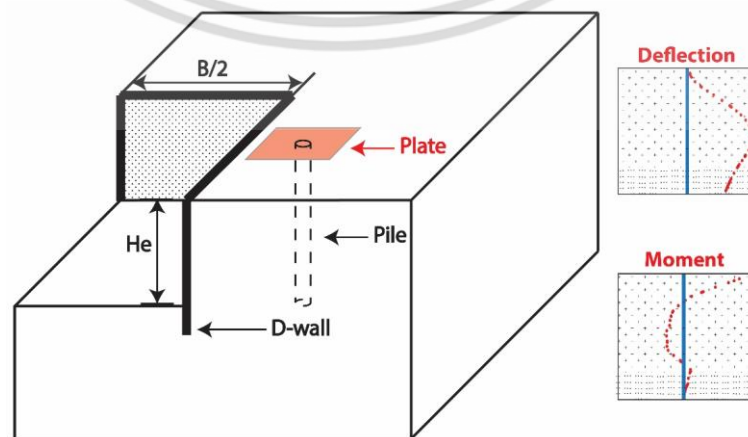
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสาเข็ม สำหรับการวิเคราะห์ในกรณีต่างๆที่จำลองขึ้นมา แสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.4 ความลึกของการขุดดิน อยู่ที่ 2, 5, 8 และ 11 เมตร ค้ำยันอยู่ที่ระดับ 1.85, 4.85, และ 7.85 เมตร และกำแพงกันดิน ลึก 20 เมตร



รูปที่ 3.4 ลักษณะทางกายภาพของการจำลองระบบ 2 มิติ

สำหรับการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็ม จะวิเคราะห์ในกรณีที่หัวเสาเข็มมีพฤติกรรมแบบ free-head ซึ่งจะมีค่าการเคลื่อนตัวที่วิกฤตกว่ากรณีที่หัวเสาเข็มมีพฤติกรรมแบบ fixed-head และในขณะเดียวกันจะวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ตัดในกรณีที่หัวเสาเข็มมีพฤติกรรมแบบ fixed-head ซึ่งมีค่าโมเมนต์ที่วิกฤตกว่า [1,2,24] โดยการวิเคราะห์ในกรณีที่หัวเสาเข็มมีพฤติกรรมแบบ fixed-head นั้น แบบจำลองมีลักษณะเช่นเดียวกับ free-head แตกต่างกันเพียงบริเวณหัวเสาเข็ม จะถูกยึดตรึงไว้ด้วยวัสดุ ที่กำหนดค่าความแข็ง จนกระทั่งสามารถยึดตรึงหัวเสาเข็มได้เต็มที่ (ไม่เกิดการเคลื่อนที่ของเสาเข็มที่บริเวณหัวเสาเข็มและค่าโมเมนต์ของเสาเข็มเกิดสูงสุด) ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ลักษณะแบบจำลองในกรณีที่เสาเข็มมีพฤติกรรมแบบ fixed-head

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาร่วมกัน เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 ชนิดของแบบจำลอง และตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

ชนิดของแบบจำลองดิน (Soil model) ในการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นสิ่งส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ โดยแบบจำลองสำหรับดินเหนียวในการศึกษานี้ คือแบบจำลอง Hardening Soil model with small strain stiffness (HSsmall) ซึ่งเป็นแบบจำลองดินแบบอิลาสโตพลาสติกที่พิจารณาค่าสตีเฟนของดินแบบอิลาสติก ในช่วงความเครียดต่ำ (small strain) ซึ่งเป็นช่วงของพฤติกรรมเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน แบบจำลองชนิดนี้ได้ถูกตรวจสอบและนำมาใช้ในการวิเคราะห์การก่อสร้างต่างๆในชั้นดินกรุงเทพฯ [27]

สำหรับชั้นดินถม และชั้นทรายใช้แบบจำลองพฤติกรรมของชั้นดินแบบอิลาสติก-พลาสติกแบบสมบูรณ์ ตามทฤษฎี Mohr-Coulomb (MC) โดยปัจจัยที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าในแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา เพื่อทำการวิเคราะห์ตัวแปร (parametric study) และค่าที่ใช้ในแบบจำลองชั้นดินทางไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าในที่ใช้ในการศึกษา

ตัวแปร	ค่าที่เปลี่ยนแปลง
ความลึกของการขุดดิน, H_e	2, 5, 8, 11 m.
ขนาดของบริเวณที่ทำการขุดดิน, B	20, 40, 60, 80 m.
ความหนาของกำแพงกันดิน, t	0.6, 0.8, 1.0, 1.2 m.
ขนาดของเสาเข็ม, D_p	0.5, 0.75, 1.0, 1.25 m.
ความลึกของเสาเข็ม, Depth	15, 18, 23 m.
ระยะห่างระหว่างเสาเข็มกับกำแพงกันดิน, Distance	0.6, 1, 3, 5, 10 m.
Normalize shear strength (soft clay), $s_{u,so} / \sigma'_v$	0.27, 0.30, 0.35, 0.38, 0.4
Normalize shear strength (stiff clay), $s_{u,st} / \sigma'_v$	0.45, 0.60, 0.75, 0.90, 1.05
Normalize initial shear modulus (soft clay), $G_{0,so} / \sigma'_v$	350, 450, 600, 750, 900 (times of $s_{u,so} / \sigma'_v$)
Normalize initial shear modulus (stiff clay), $G_{0,st} / \sigma'_v$	600, 700, 900, 1100, 1300 (times of $s_{u,st} / \sigma'_v$)
ความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน, D	11, 14, 16.5 m.

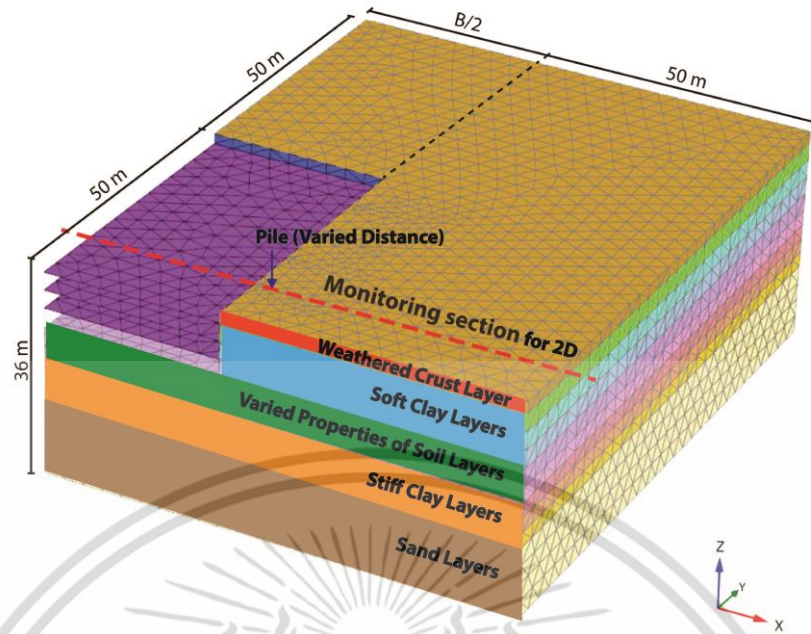
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ค่าของตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองชั้นดินทางไฟไนต์เอลิเมนต์ [7,25]

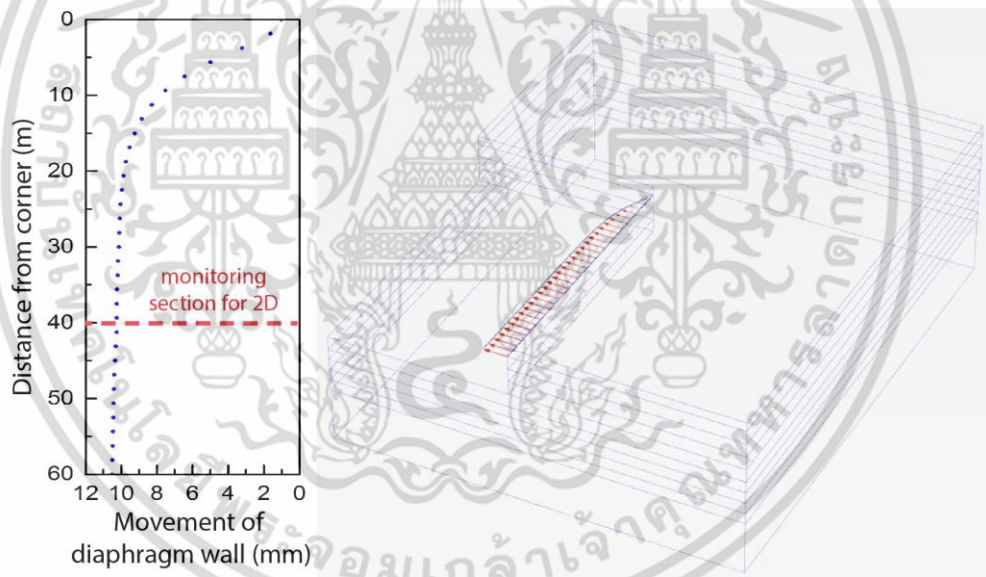
ชั้นดิน	ดินถม	ดินเหนียวอ่อน	ดินเหนียวแข็ง	ทราย
แบบจำลอง	MC	HSsmall	HSsmall	MC
E' [kPa]	6000	-	-	80000
E_{oed}^{ref} [kPa]	-	4000-9000	34000-53000	-
E_{50}^{ref} [kPa]	-	4000-9000	34000-53000	-
E_{ur}^{ref} [kPa]	-	12000-27000	104000-158000	-
G_0^{ref} [kPa]	-	9000-20300	78300-118800	-
$\gamma_{0.7}$ [-]	-	1×10^{-4}	1×10^{-4}	-
$\lambda_{0.7}$ [kN/m ³]	17	16	18	20
v' [-]	0.3	0.33	0.33	0.2
ϕ' [°]	22	0	0	36
c [kPa]	15	15-34	87-132	1
m [-]	-	1	1	-

3.4.3 โครงข่ายของแบบจำลอง

รูปที่ 3.6 แสดงให้เห็นถึงโครงข่าย (meshes) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยทำการวิเคราะห์ในรูปแบบ 3 มิติ เพื่อนำไปใช้สร้างสมการทั้งแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ โดยสำหรับการสร้างสมการแบบ 2 มิติ จะเก็บข้อมูลโดยที่ตำแหน่งของเสาเข็ม เป็นบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบจาก corner effect โดยบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบจาก corner effect หาได้จากการจำลองการขุดดินที่มีขนาดมากที่สุดของขอบเขตการศึกษา ($B/2 = 40$ เมตร) บริเวณที่ได้รับผลกระทบจาก corner effect กำแพงกันดินจะเคลื่อนตัวน้อย ดังนั้นจึงพิจารณาใช้ตำแหน่งที่การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินคงที่ เป็นตำแหน่งของเสาเข็ม (monitoring section for 2D) ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 โครงข่ายแบบจำลองของกรณีศึกษา



รูปที่ 3.7 ตำแหน่ง monitoring section for 2D

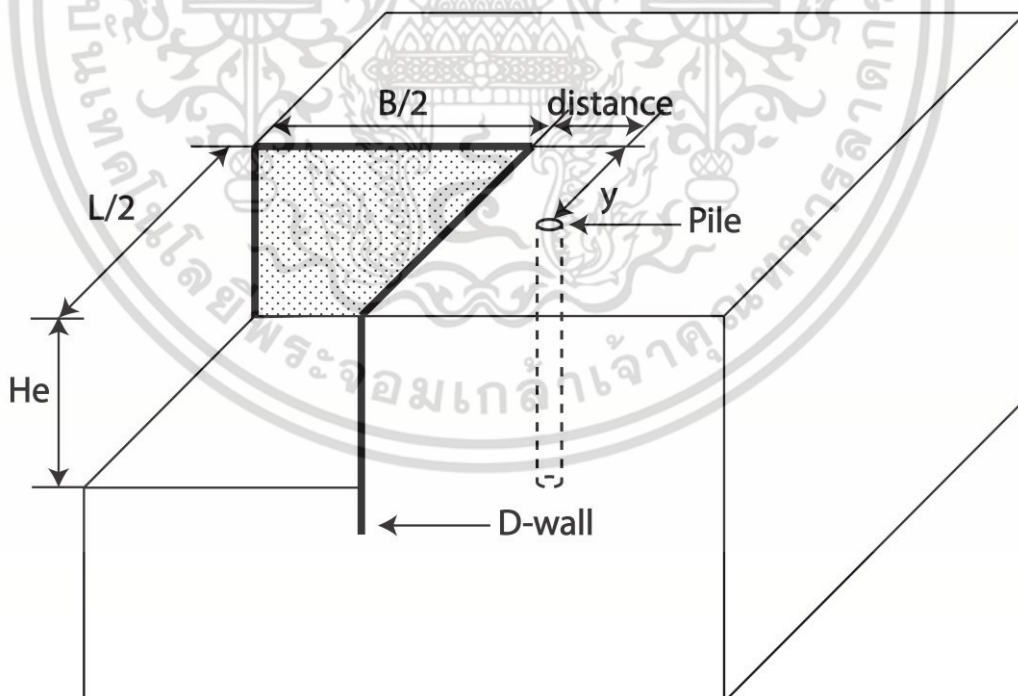
ขนาดของโครงข่ายแบบจำลองในแนวราบ มีความกว้างและยาวถัดไปด้านหลังกำแพงกันดิน 50 เมตร ในแนวตั้งจะมีความลึกครอบคลุมไปจนถึงความลึกสุดท้ายของชั้นทรายชั้นแรกประมาณ 36 เมตรจากผิวดิน เพื่อให้ครอบคลุมบริเวณทั้งหมดที่อาจจะได้รับผลกระทบจากการเคลื่อนตัว นอกจากนี้ แบบจำลองกำหนดความกว้างของบริเวณที่ขุดดินเพียงหนึ่งในสี่เท่านั้น เพราะถือว่าการขุดมีลักษณะสมมาตร (symmetric) ชนิดของแบบจำลองของกำแพงกันดินจะจำลองในรูปแบบของแผ่นบาง (plate) และเสาเข็ม จะจำลองในรูปแบบของ embedded pile [28] ที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากับน้ำหนักบรรทุกที่ใช้งาน (allowable load) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 แบบจำลอง เพื่อประมาณค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มในระบบ 3 มิติ

ในความเป็นจริงแล้ว การเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่อยู่ในตำแหน่งใกล้กับมุมของกำแพงกันดิน จะมีค่าน้อยลง เมื่อเทียบกับเสาเข็มที่อยู่ตำแหน่งห่างออกไป ทั้งนี้เป็นเพราะความกว้าง (B) ความยาว (L) ของการขุด และระยะห่างจากมุมของกำแพงกันดินถึงเสาเข็ม (y) ล้วนมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็มทั้งสิ้น งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาลงถึงปัจจัยในระบบ 3 มิติ ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็ม ซึ่งปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับขนาดของงานขุดดิน และระยะห่างจากมุมมีอิทธิพลค่อนข้างมาก ในหัวข้อนี้พิจารณาถึงระยะห่างจากมุมของกำแพงกันดินถึงเสาเข็ม (y) ความกว้าง (B) ความยาว (L) และความลึก (H_e) ของการขุดดิน เพื่อหาการเคลื่อนที่สูงสุดของเสาเข็ม มาสร้างสมการด้วยการวิเคราะห์เชิงถดถอยต่อไป

3.5.1 ลักษณะของแบบจำลอง

การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อสร้างสมการแบบ 3 มิติ มีการสร้างแบบจำลองเพียงหนึ่งในสี่ของบริเวณที่ขุดดินเช่นเดียวกับสมการแบบ 2 มิติ รวมถึงรายละเอียดต่างๆ ของแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยรูปแบบของแบบจำลอง และตัวแปรที่ใช้ ได้แก่ ความยาวของบริเวณขุดดินที่มีค่าคงที่ ($L = 100$ เมตร), ความกว้างของการขุดดิน ($B = 20, 40, 60$ และ 80 เมตร) และความลึกของการขุดดิน ($H_e = 2, 5, 8$ และ 11 เมตร) [22,29,30]



รูปที่ 3.8 ลักษณะทางกายภาพของการจำลองระบบ 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

จากหัวข้อที่ผ่านมา ได้อธิบายถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็มในระบบ 3 มิติ ซึ่งค่าตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลอง เพื่อศึกษาผลกระทบจากบริเวณมุม ในการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัวในระบบ 3 มิติ แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ใช้ในการศึกษา [7,25]

ตัวแปร	ค่าที่เปลี่ยนแปลง
ความลึกของการขุดดิน, H_e	2, 5, 8, 11 เมตร
ความกว้างของบริเวณที่ทำการขุดดิน, B	20, 40, 60, 80 เมตร
ความยาวของบริเวณที่ทำการขุดดิน, L	100 เมตร
ความหนาของกำแพงกันดิน, t	1 เมตร
ขนาดของเสาเข็ม, D_p	1 เมตร
ความลึกของเสาเข็ม, Depth	15, 18, 23 เมตร
ระยะห่างระหว่างเสาเข็มกับกำแพงกันดิน, Distance	0.6, 1, 3, 5, 10 เมตร
Normalize shear strength (soft clay), $S_{u,so} / \sigma'_v$	0.35
Normalize shear strength (stiff clay), $S_{u,st} / \sigma'_v$	0.75
Normalize initial shear modulus (soft clay), $G_{0,so} / \sigma'_v$	600
Normalize initial shear modulus (stiff clay), $G_{0,st} / \sigma'_v$	900
ความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน, D	14 เมตร
ระยะห่างจากมุมของกำแพงกันดินถึงเสาเข็ม, y	10, 20, 30 เมตร

* สำหรับปัจจัยความหนาของกำแพงกันดิน (t), ขนาดของเสาเข็ม (D_p), Normalize shear strength (S_u/σ'_v), Normalize initial shear modulus (G_0/σ'_v) และความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน มีค่าคงที่ เนื่องจากปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มในระบบ 3 มิติมาก คือปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับขนาดการขุด [22,29,30]

3.5.3 Plane Strain Ratio

หลังจากมีการศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็มทั้งในระบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ทำให้สามารถทราบค่า Plane Strain Ratio (PSR) ซึ่งเป็นสัดส่วนของค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดในระบบ 3 มิติ ต่อค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดในระบบ 2 มิติ ภายใต้เงื่อนไขที่ระนาบความเครียดเดียวกัน หรือก็คือการมีปัจจัยอื่นๆที่เหมือนกันนั่นเอง ค่า PSR ของค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มแสดงถึงพฤติกรรมของ corner effect ถ้า PSR มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าการวิเคราะห์ในระบบ 3 มิติ อยู่ภายใต้เงื่อนไขของระนาบความเครียด และไม่ได้รับผลกระทบจาก corner effect ความสัมพันธ์ระหว่างระบบ 3 มิติ และ 2 มิติ แสดงในสมการที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$PSR = \delta_{3D} / \delta_{2D} \quad (3.1)$$

ในการศึกษานี้ มีการหาค่า PSR เพื่อสร้างสมการอย่างง่าย ที่เชื่อมโยงการวิเคราะห์ในระบบ 3 มิติ และ 2 มิติ เข้าด้วยกัน โดยมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาสมการที่สามารถประมาณค่าการเคลื่อนตัว ด้านข้างของเสาเข็มในงานขุดดินลึกในชั้นดินกรุงเทพมหานคร ได้ครอบคลุม และมีความถูกต้อง แม่นยำมากที่สุด

3.6 การสร้างสมการเชิงเส้น ด้วยการวิเคราะห์เชิงถดถอย

จากการวิเคราะห์โดยแบบจำลองในกรณีศึกษาในหัวข้อก่อนหน้านี้ จะได้ค่าการเคลื่อนตัว และโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็ม จากนั้นนำปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนตัวและโมเมนต์ดัดของ เสาเข็มแต่ละตัวมาสร้างกราฟความสัมพันธ์กับค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเข็มและโมเมนต์ดัดสูงสุด ของเสาเข็ม ทั้งโมเมนต์บวกและโมเมนต์ลบ แล้วปรับแก้ ให้มีความสัมพันธ์แบบเป็นเส้นตรง แล้วจึง นำมาเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์เชิงถดถอยแบบเชิงเส้น เพื่อให้ได้สมการที่ใช้ในการประมาณค่าการ เคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็มที่มีรูปแบบดังสมการที่ 3.2 โดยมีปัจจัยต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อน ตัวเป็นตัวแปรอิสระ (x) และมีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเข็มเป็นตัวแปรตาม (y)

$$y = ax + c \quad (3.2)$$

โดยที่การปรับปรุงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวกับตัวแปรต่างๆ ให้เป็นแบบเส้นตรง ใช้หลักการเปลี่ยนรูปแบบ (Transformation) ซึ่งการเลือกใช้ค่าปรับแก้ จะพิจารณาเลือกจาก เส้นกราฟที่มี R^2 สูงสุด แล้วนำไปใช้กับกราฟเส้นอื่นๆสำหรับปัจจัยเดียวกัน

3.7 การตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของสมการ

ในการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของเสาเข็มที่อยู่ข้างเคียงงานขุดดินลึก พฤติกรรมของเสาเข็ม ดังกล่าว ทั้งการเคลื่อนตัวและโมเมนต์ดัด ไม่มีรายงานการตรวจวัดจริง ดังนั้นการตรวจสอบความ เหมาะสมของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้และวิธีการจำลองและวิเคราะห์ จึงทำได้เพียงตรวจสอบกับผลการ วิเคราะห์จากไฟไนต์เอลิเมนต์เฉพาะการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินกับค่าตรวจวัดจริงในอดีตโดยไม่ พิจารณาเสาเข็มที่อยู่ด้านข้าง ซึ่งงานวิจัยในอดีต [15] ที่ใช้วิธีการวิเคราะห์และพารามิเตอร์ชุด เดียวกันได้ตรวจสอบแล้วว่า แบบจำลอง พารามิเตอร์ และวิธีการที่ใช้ ให้ผลใกล้เคียงกับค่าตรวจวัด จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

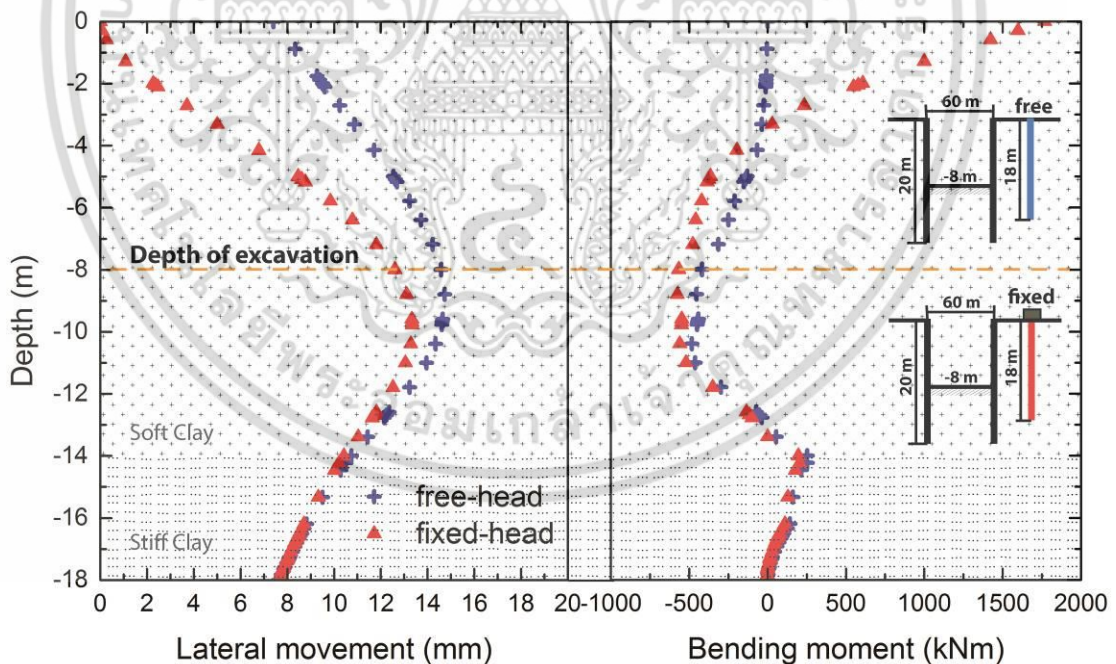
บทที่ 4

อภิปรายผล

4.1 บทนำ

บทนี้อธิบายถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างสมการทำนายผลตอบสนองของเสาเข็มจากงานขุดลึกข้างเคียง โดยส่วนแรกเป็นสมการประมาณค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเสาเข็ม และส่วนที่สองเป็นสมการประมาณค่าโมเมนต์คัตของเสาเข็ม ซึ่งประกอบด้วยโมเมนต์บวกสูงสุด และโมเมนต์ลบสูงสุด

จากที่อธิบายถึงแบบจำลองในหัวข้อที่ 3.4 และผลการวิเคราะห์เบื้องต้นดังแสดงในรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าที่กรณีที่มีปัจจัยต่างๆเหมือนกัน เสาเข็มมีพฤติกรรมแบบ free-head มีการเคลื่อนตัวด้านข้างมากกว่าแบบ fixed-head แต่เกิดโมเมนต์คัตน้อยกว่า ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้ในการประมาณค่าการเคลื่อนตัวด้านข้าง เพื่อให้ได้การเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดที่อาจจะเกิดได้ คือแบบจำลองที่เสาเข็มมีพฤติกรรมแบบ free-head ในขณะเดียวกัน แบบจำลองที่ใช้ในการประมาณค่าโมเมนต์คัต เพื่อให้ได้โมเมนต์คัตสูงสุดที่อาจจะเกิดได้ คือแบบจำลองที่เสาเข็มมีพฤติกรรมแบบ fixed-head

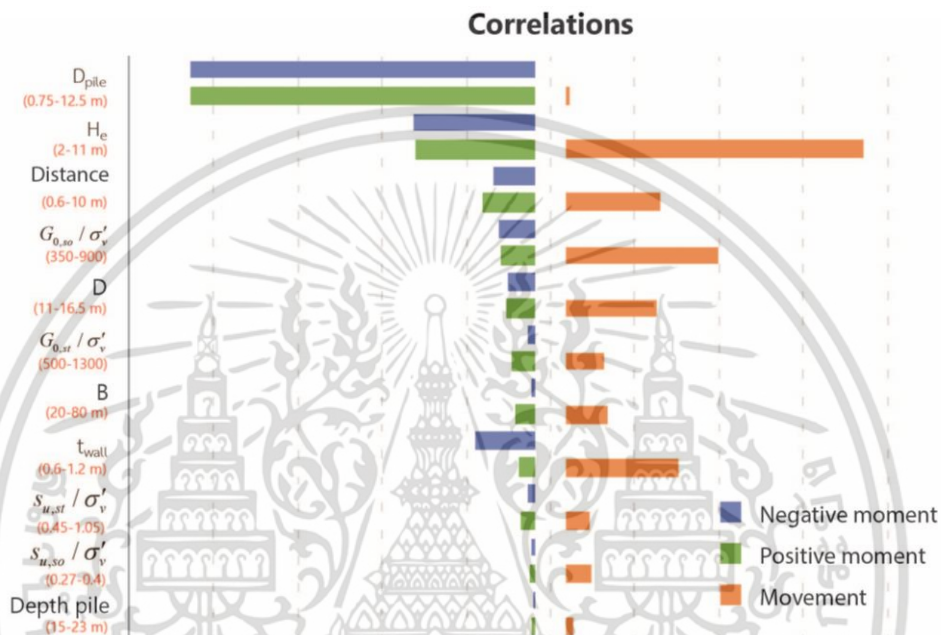


รูปที่ 4.1 พฤติกรรมของเสาเข็ม ที่มีสภาพหัวเข็ม (head condition) ต่างกัน

นอกจากนี้ เมื่อวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆที่ใช้ในสมการในหัวข้อที่ 3.3 กับการเคลื่อนตัวด้านข้างและโมเมนต์คัตของเสาเข็ม จะได้ความสัมพันธ์ของตัวแปร (correlation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งความสัมพันธ์นี้ มาจากการนำข้อมูลที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งหมดมาวิเคราะห์ด้วย ซอร์ฟแวร์ทางสถิติ (SPSS) โดยความสัมพันธ์มีค่าตั้งแต่ 0-1 ตัวแปรที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวและ โมเมนต์ดัดของเสาเข็มมาก จะยังมีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งความลึกของการขุดดิน (H_e) เป็นตัวแปรที่มีผลต่อ การเคลื่อนตัวของเสาเข็มมากที่สุด ส่วนขนาดของเสาเข็ม (D_p) เป็นตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดโมเมนต์ ดัดมากที่สุด และมากกว่าตัวแปรอื่นหลายเท่าตัว



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของตัวแปร (correlation) กับการเคลื่อนตัวด้านข้างและโมเมนต์ดัดของ เสาเข็ม

4.2 การพัฒนาสมการ เพื่อประมาณค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็ม

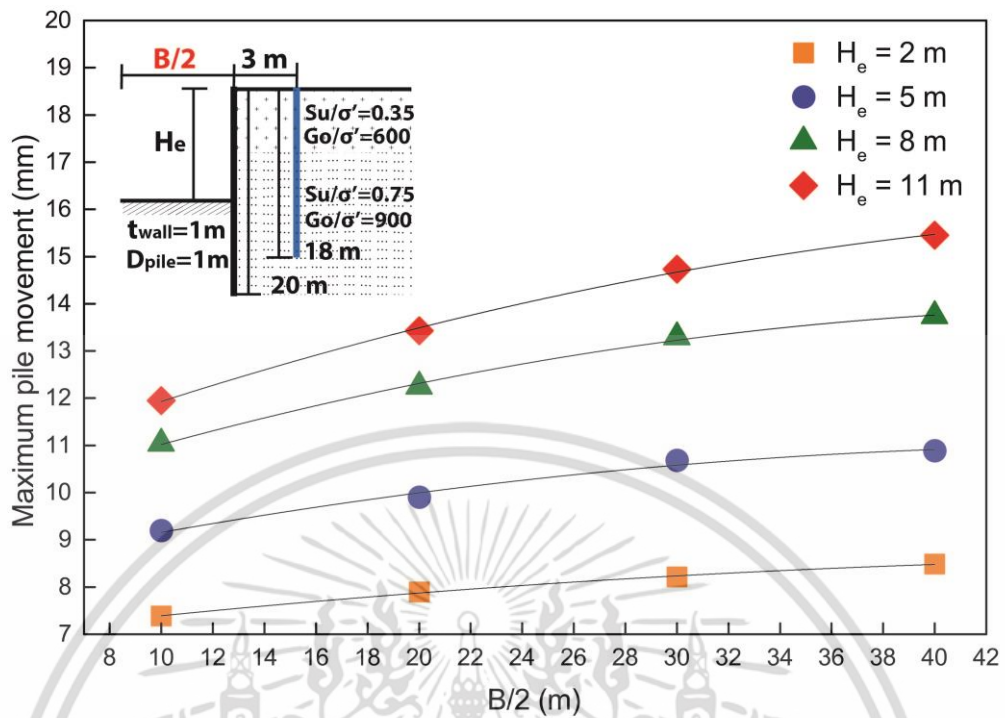
4.2.1 ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆและค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มจากการวิเคราะห์

การสร้างสมการ จะใช้วิธีการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้น ตามที่เคยกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.6 โดย สมการจะประกอบด้วยตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ซึ่งต้องให้ตัวแปรมี ความสัมพันธ์กับค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเข็มแบบเป็นเชิงเส้นก่อนนำมาสร้างสมการ

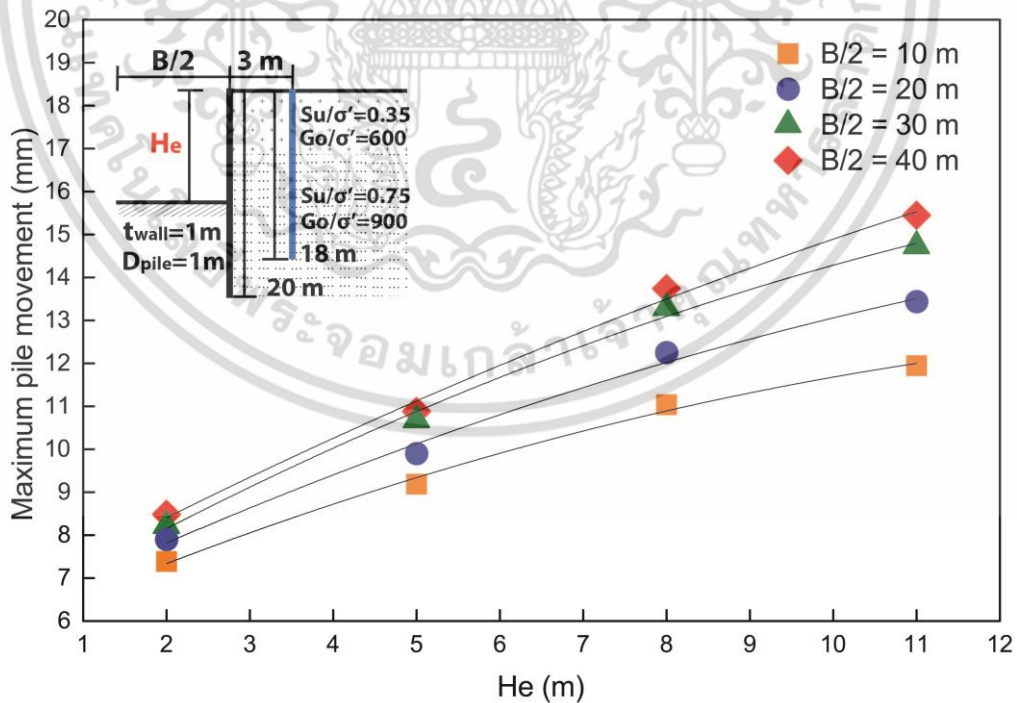
จากการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆในแกน x กับค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของ เสาเข็มจากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในแกน y ดังรูปที่ 4.3-4.13 เห็นได้ว่าเป็นความสัมพันธ์ แบบพาราโบลา ซึ่งได้สมการของฟังก์ชันพาราโบลาแสดงในสมการที่ 4.1

$$X = t(x) = ax^2 + bx + c \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

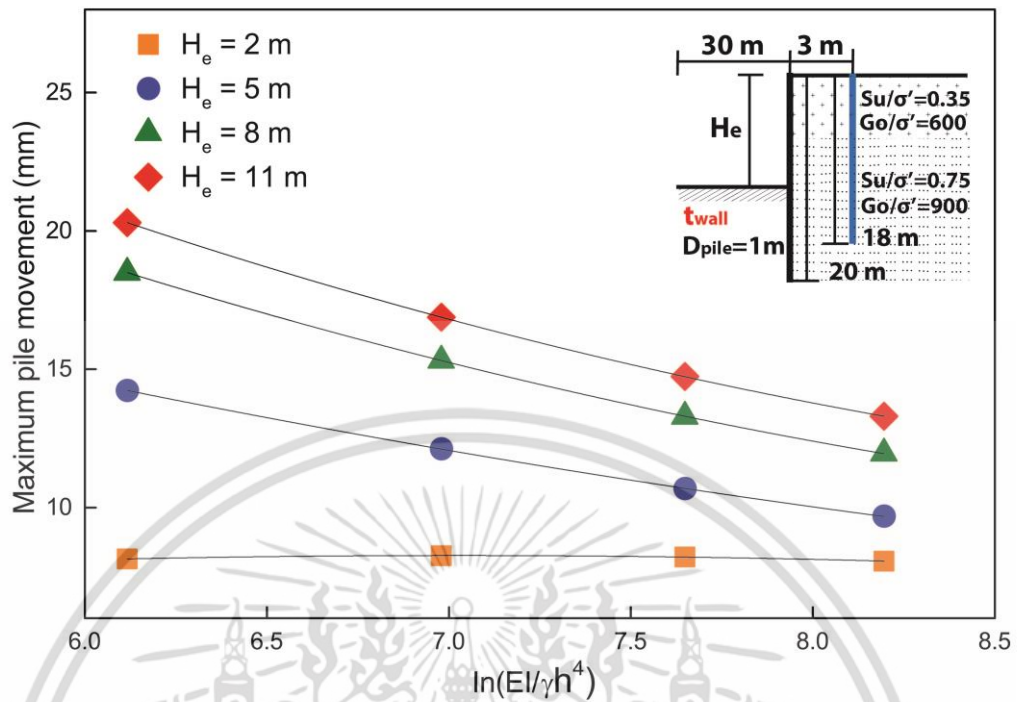


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับความกว้างของการขุดดินโดยพิจารณาเพียงครั้งเดียว

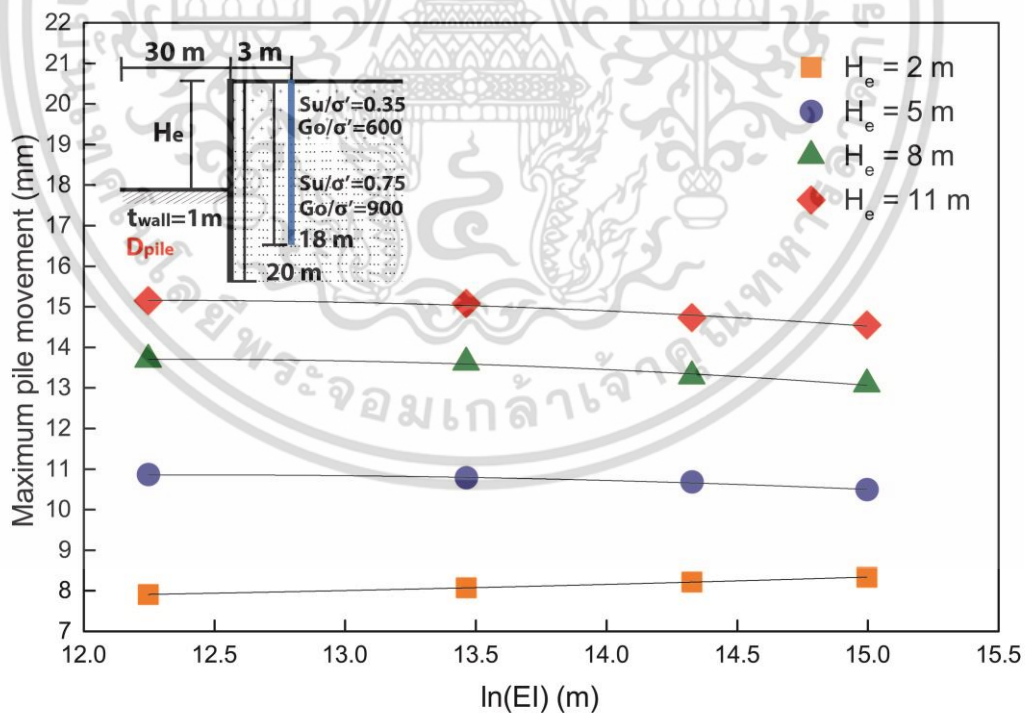


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับความลึกของการขุดดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

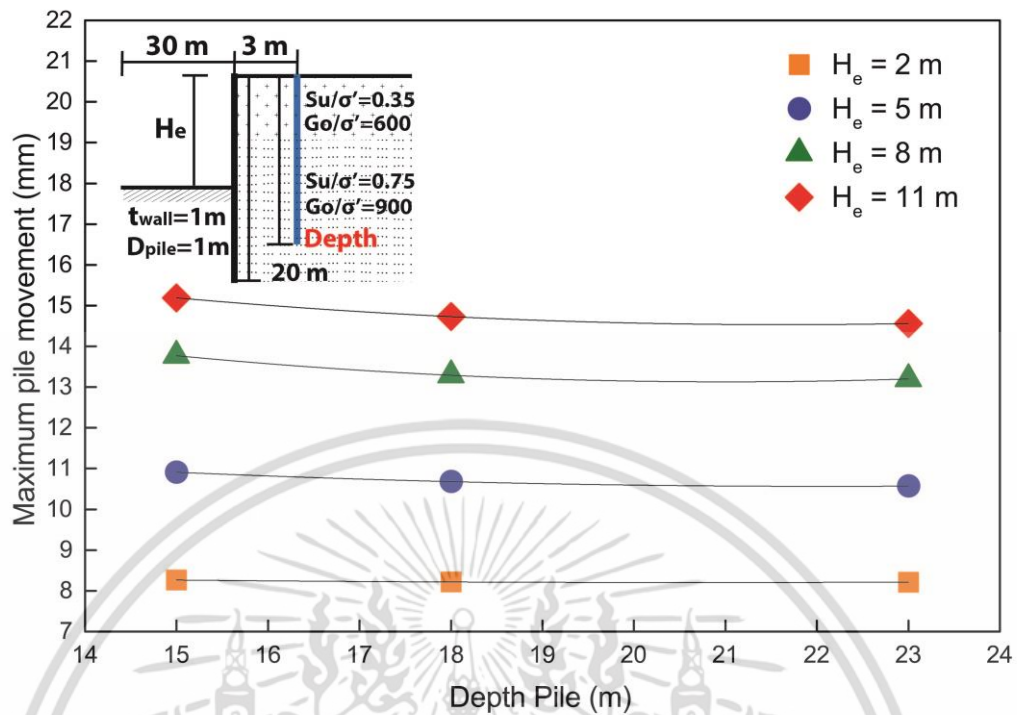


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับ system stiffness ของกำแพงกันดิน

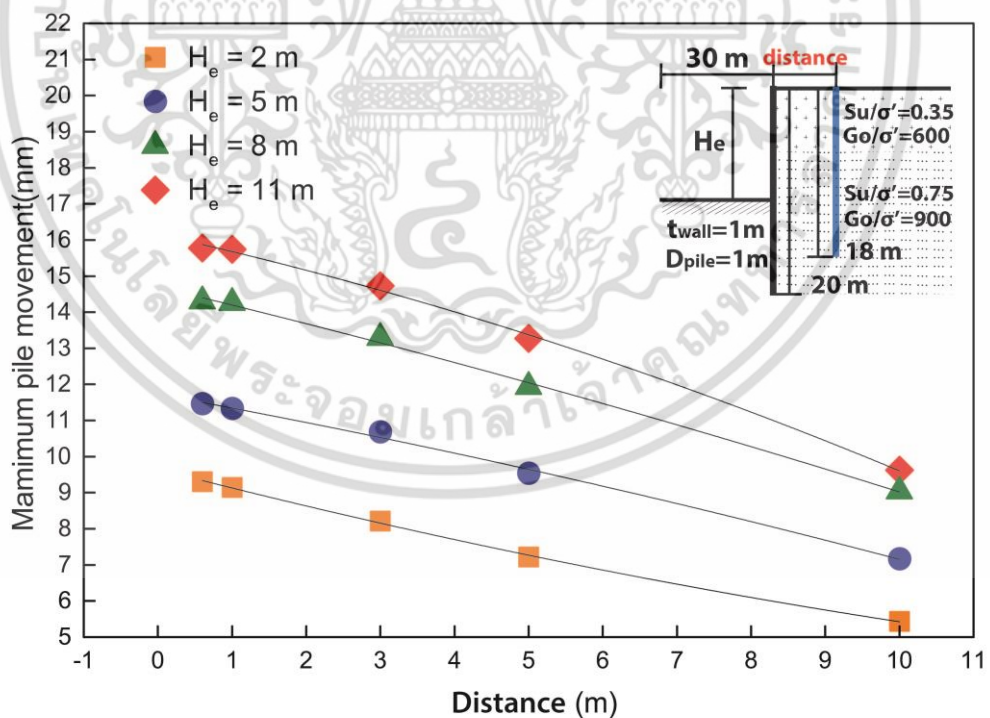


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับ stiffness ของเสาเข็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

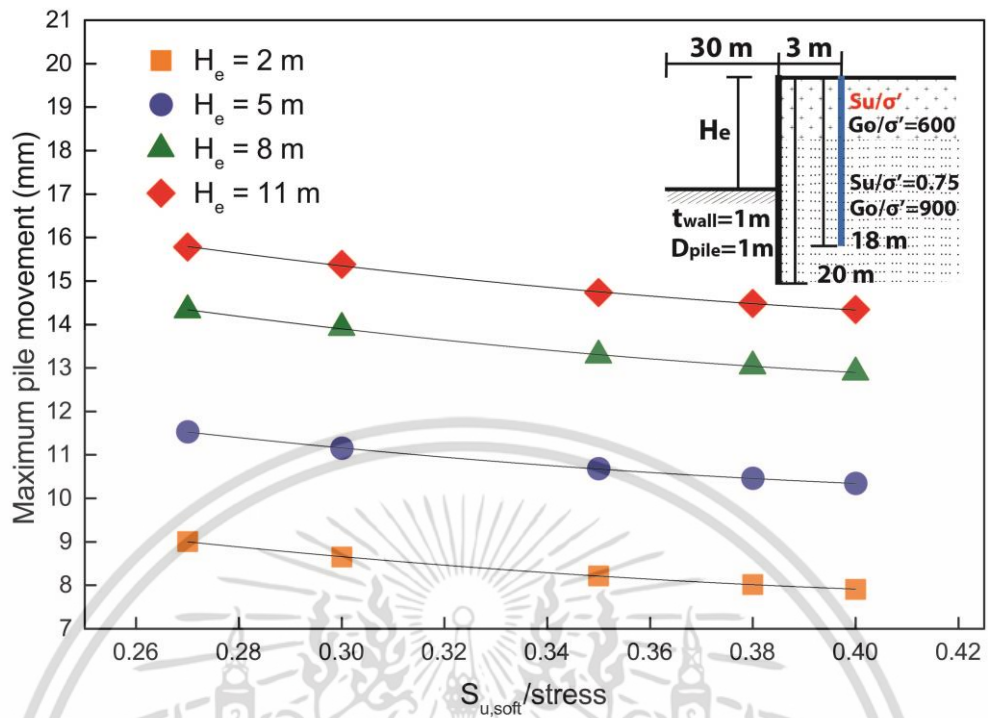


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับความยาวของเสาเข็ม

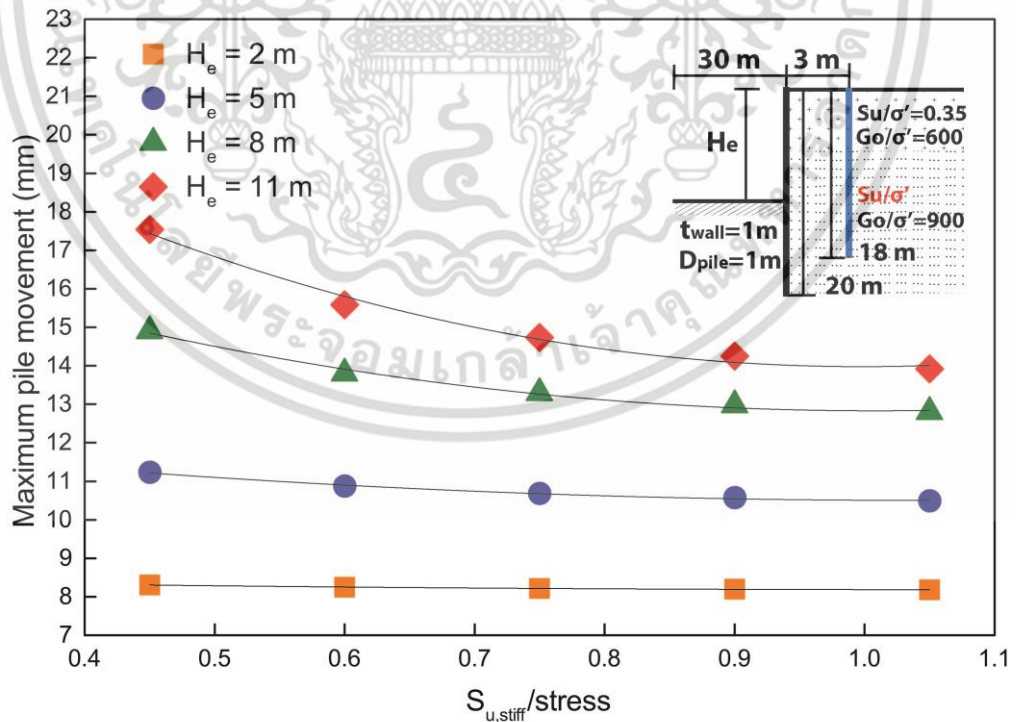


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับระยะห่างระหว่างเสาเข็มกับกำแพงกันดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

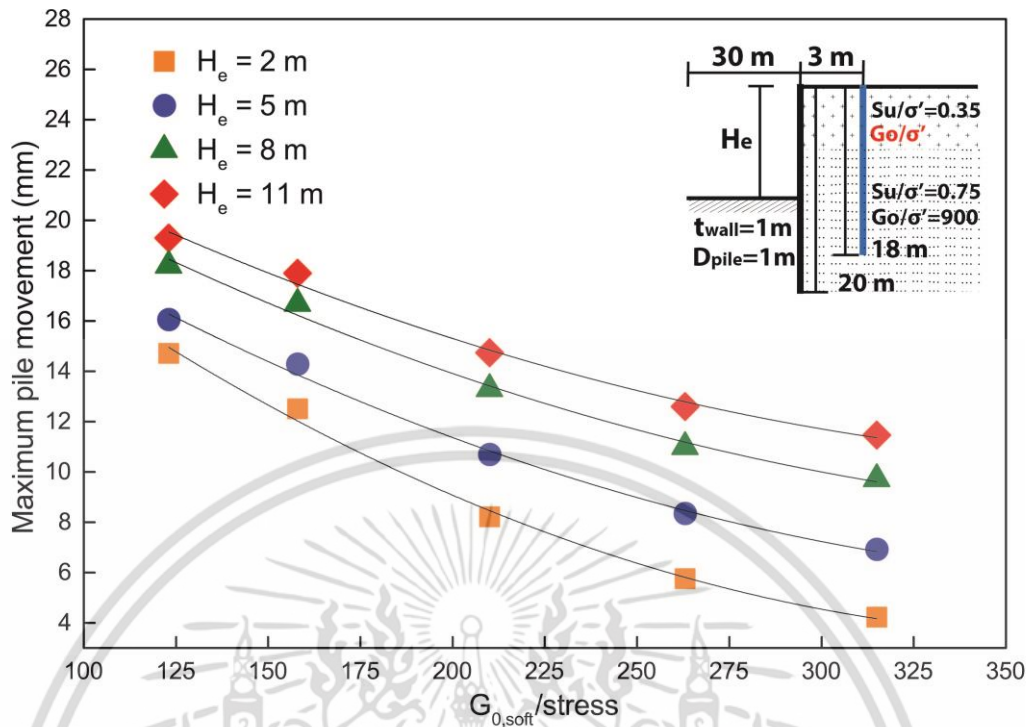


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับ Normalize shear strength ของดินเหนียวอ่อน

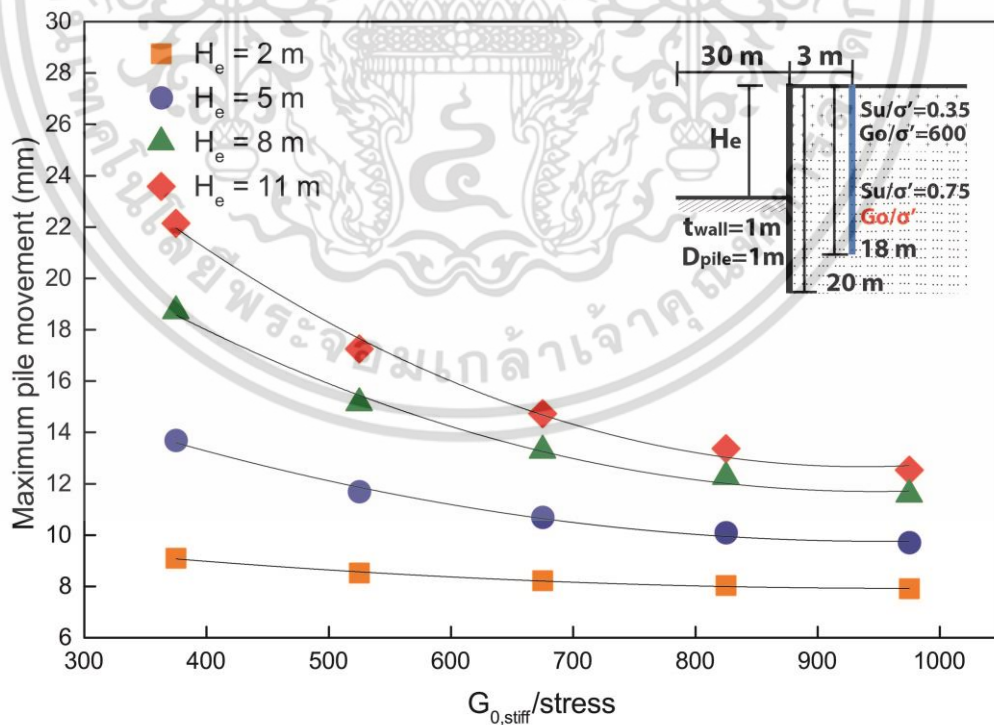


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับ Normalize shear strength ของดินเหนียวแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

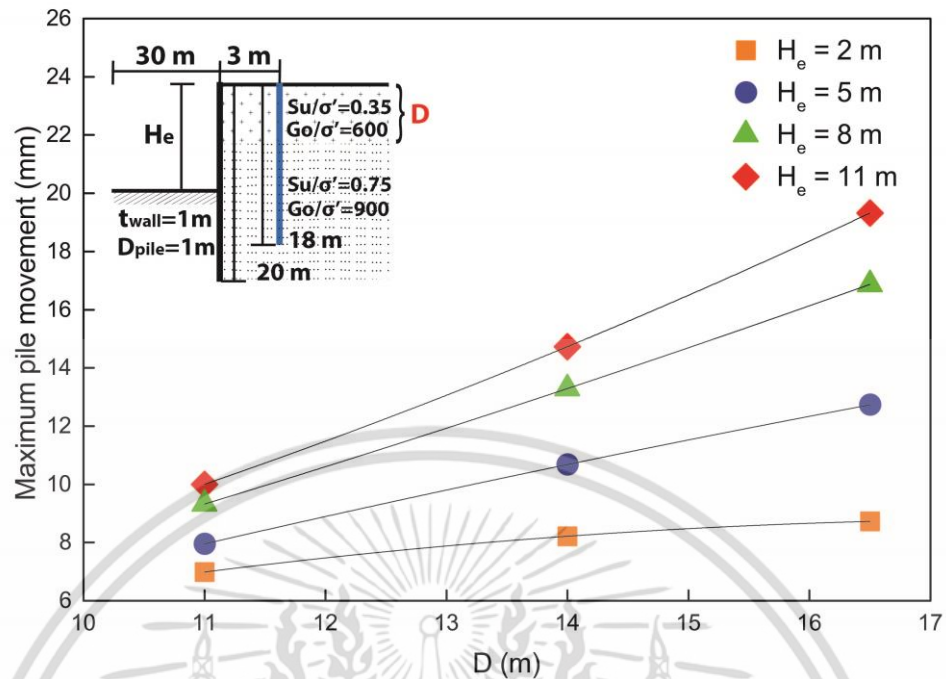


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับ Normalize initial shear modulus ของดินเหนียวอ่อน



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับ Normalize initial shear modulus ของดินเหนียวแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน

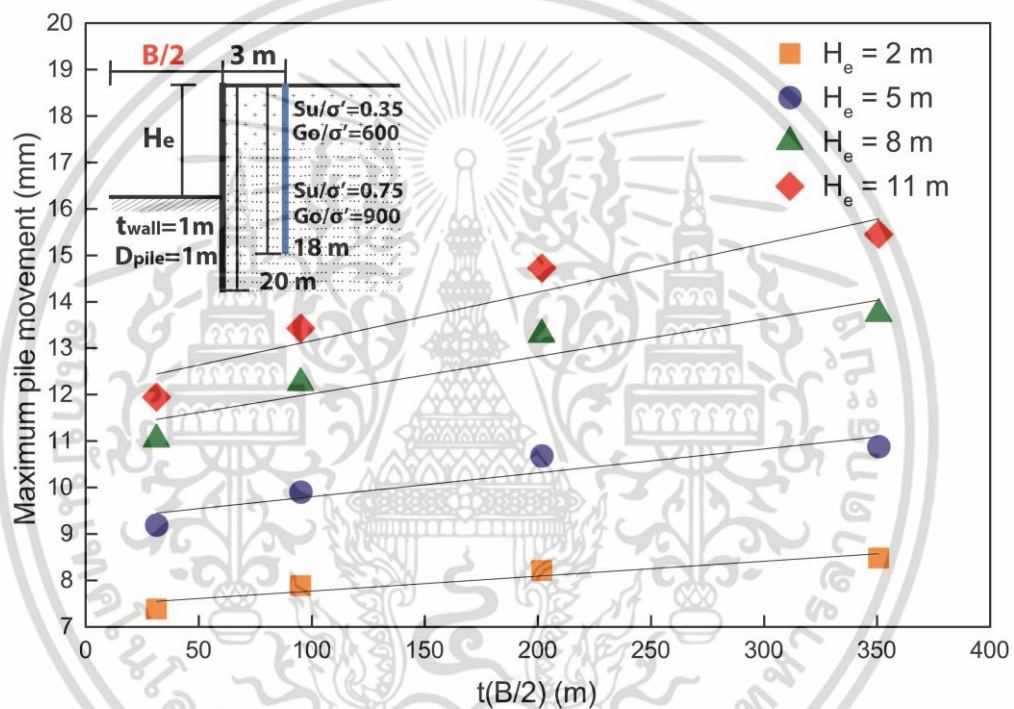
4.2.2 วิธีการปรับแก้ความสัมพันธ์ของตัวแปรกับค่าการเคลื่อนตัวให้อยู่ในรูปแบบเชิงเส้น

ตารางที่ 4.1 สัมประสิทธิ์ตัวคูณของสมการพาราโบลิกเพื่อปรับค่าความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปแบบเชิงเส้น

ตัวแปร	ช่วงที่พิจารณา	สัมประสิทธิ์ตัวคูณในสมการที่ (4.1)		
		a	b	c
B/2 [m]	10-40	0.213	-0.0019	9.99
H_e [m]	2-11	1.10772	-0.02842	6.04938
$\ln(EI/\gamma_w h_{avg}^4)$	6.1-8.2	-10.38488	0.49041	65.46978
$\ln(EI)$	12.2-15	1.29571	-0.05233	2.83726
Depth of pile [m]	15-23	-0.30217	0.00683	13.905
Distance [m]	0.6-10	-0.53006	0.01075	9.65076
$S_{u,soft}/\sigma'_v$	0.27-0.4	-29.8288	30.95466	17.32238
$S_{u,stiff}/\sigma'_v$	0.45-1.05	-0.67076	0.31429	8.54234
$G_{0,soft}/\sigma'_v$	123-315	-0.13307	1.75E-04	28.66613
$G_{0,stiff}/\sigma'_v$	375-975	-0.00626	3.23E-06	10.96663
D [m]	11-16.5	0.8257	0.01988	-2.166

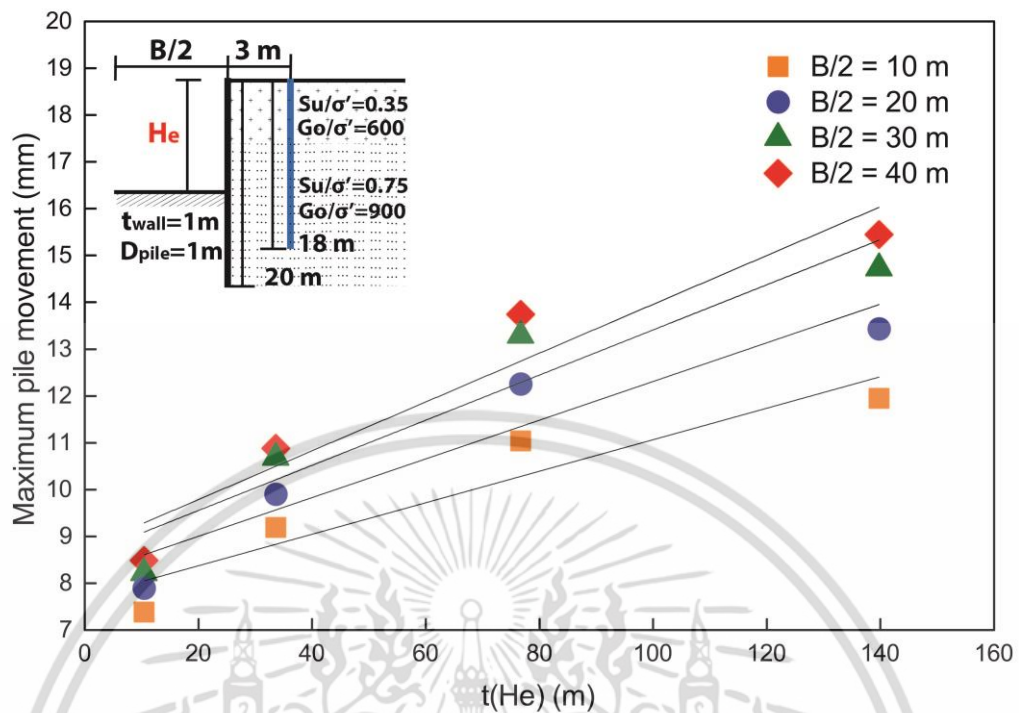
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับแก้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวกับตัวแปรต่างๆ ที่เป็นแบบพาราโบลิกให้เป็นแบบเชิงเส้น ใช้หลักการเปลี่ยนรูปแบบ (Transformation) [29] ซึ่งการเลือกใช้ค่าปรับแก้สมการพาราโบลิก จะพิจารณาเลือกจากเส้นกราฟที่มี R^2 สูงสุด แล้วนำไปใช้กับกราฟเส้นอื่นๆ สำหรับปัจจัยเดียวกัน โดยจากการเลือกใช้ ค่า R^2 มีค่าตั้งแต่ 0.97-0.99 ตารางที่ 4.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณของสมการพาราโบลิกของแต่ละปัจจัย หลังจากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณมาทำการปรับปรุงเพื่อให้เป็นแบบเชิงเส้นแล้ว จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.14-4.24 ซึ่งหลังปรับปรุงแล้ว ค่า R^2 มีค่าอยู่ในช่วง 0.72-0.99

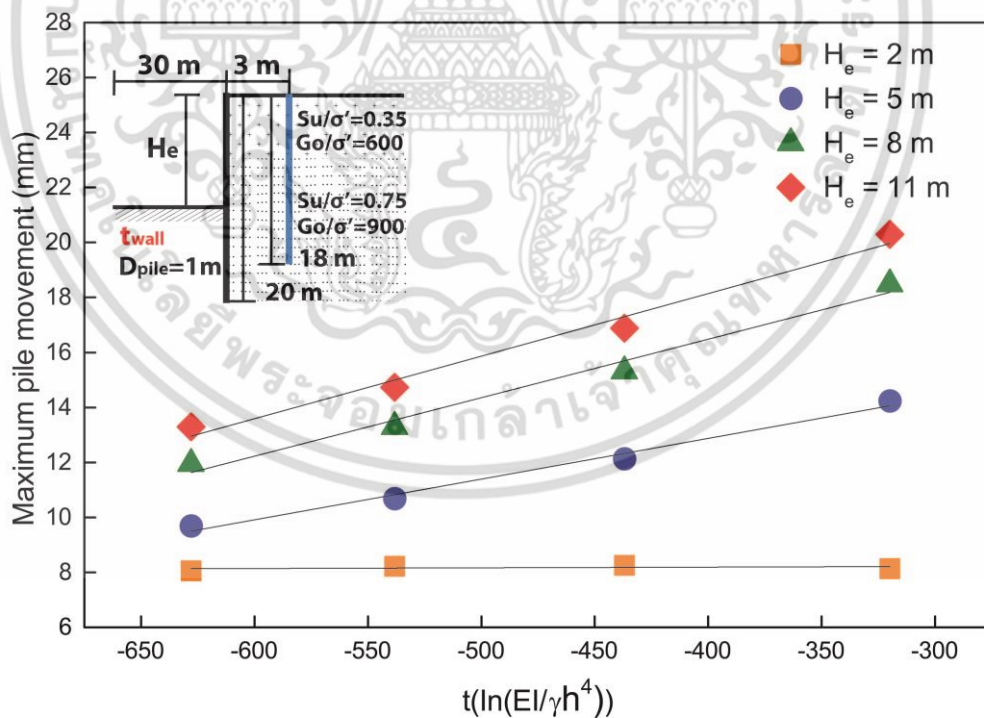


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับความกว้างของการขุดดินโดยพิจารณาเพียงครั้งเดียวหลังปรับรูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

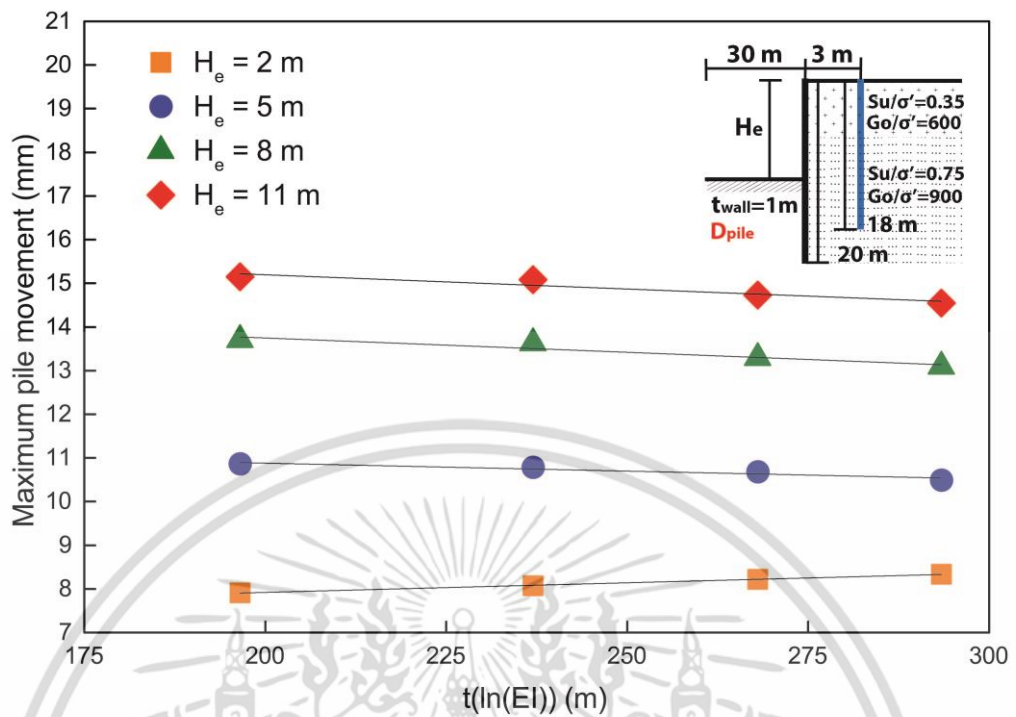


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับความลึกของการขุดดินหลังปรับรูปแบบ

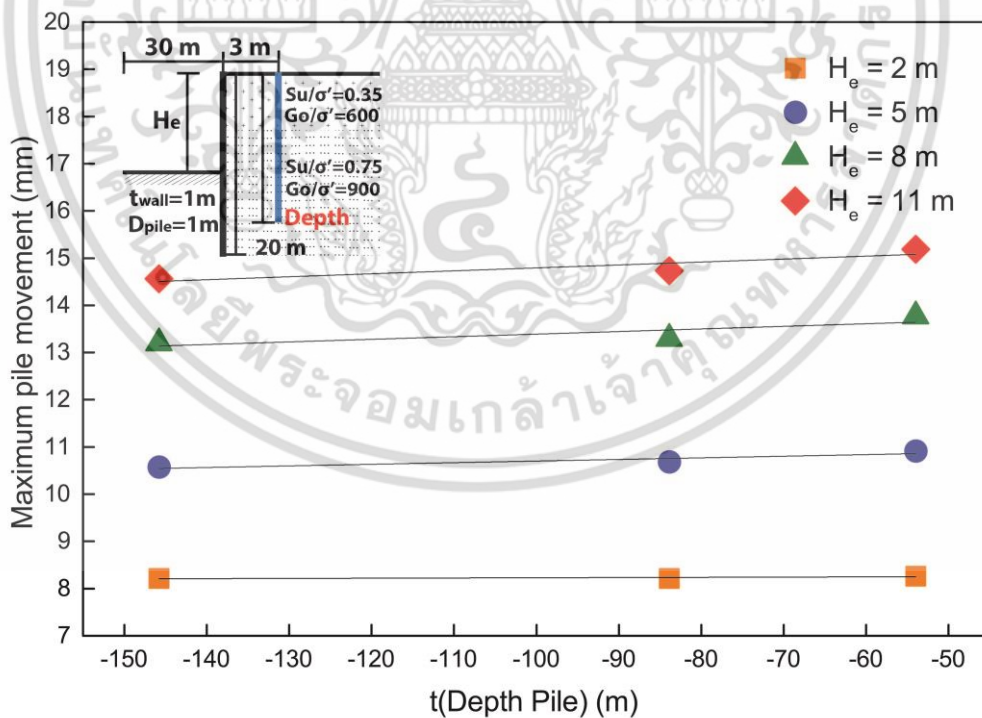


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับ system stiffness ของกำแพงกันดินหลังปรับรูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

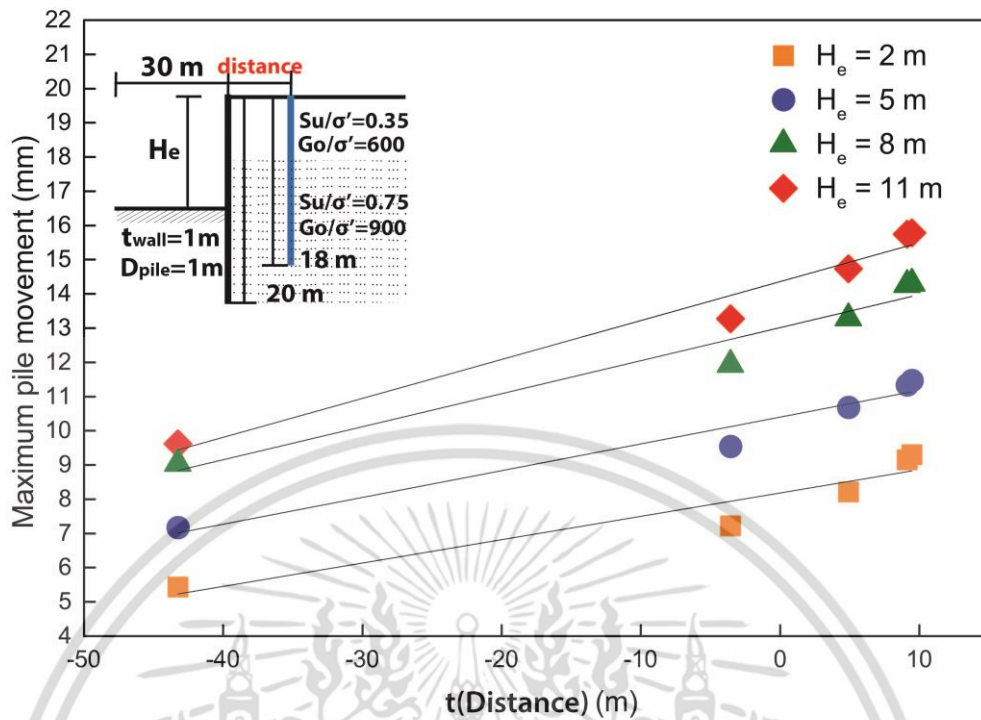


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับ stiffness ของเสาเข็มหลังปรับรูปแบบ

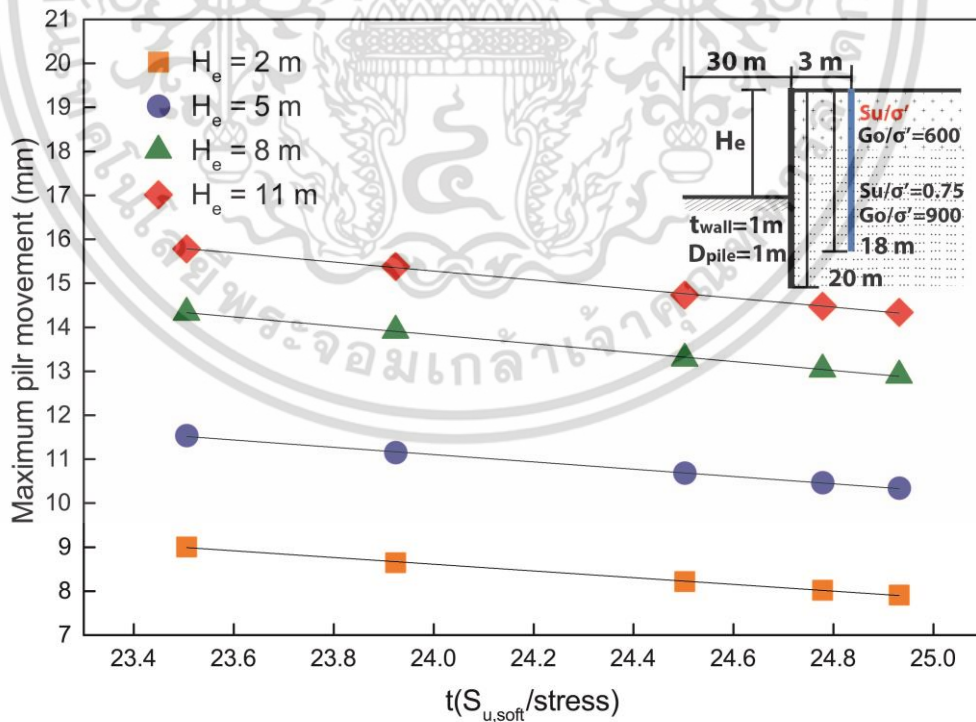


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับความยาวของเสาเข็มหลังปรับรูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

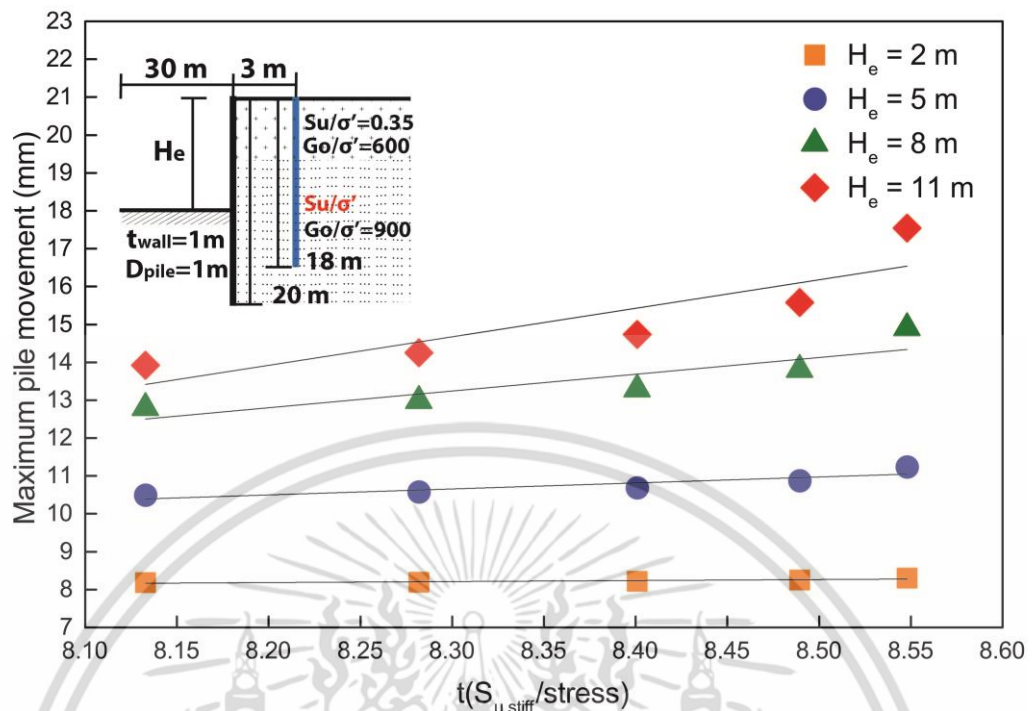


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับระยะห่างระหว่างเสาเข็มกับกำแพงกันดิน หลังปรับรูปแบบ

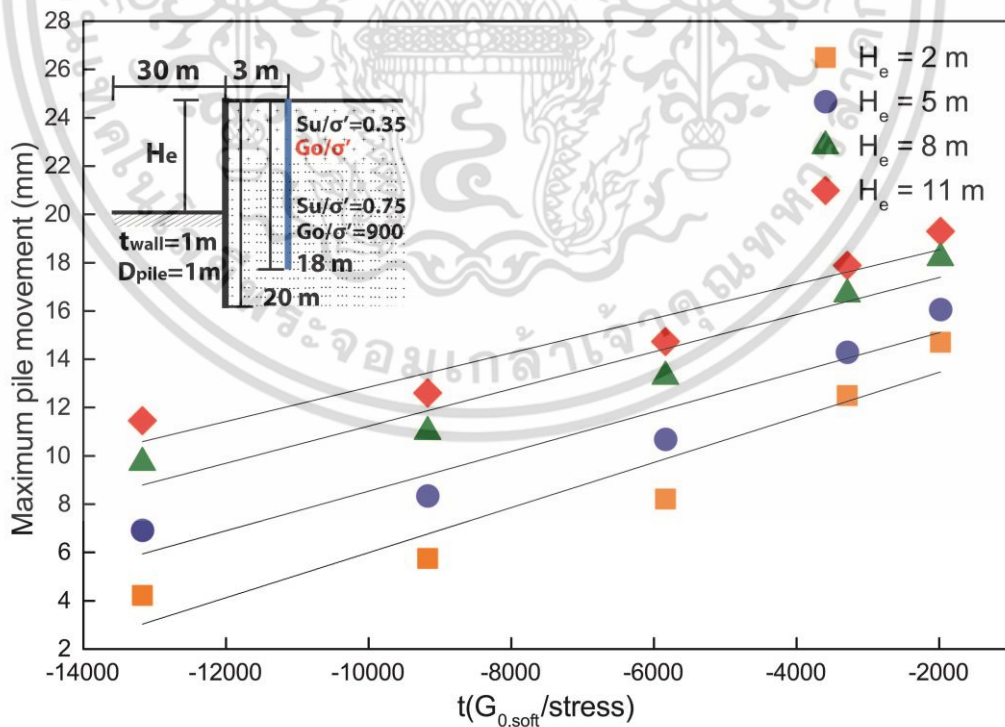


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับ Normalize shear strength ของดิน เหนียวอ่อนหลังปรับรูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

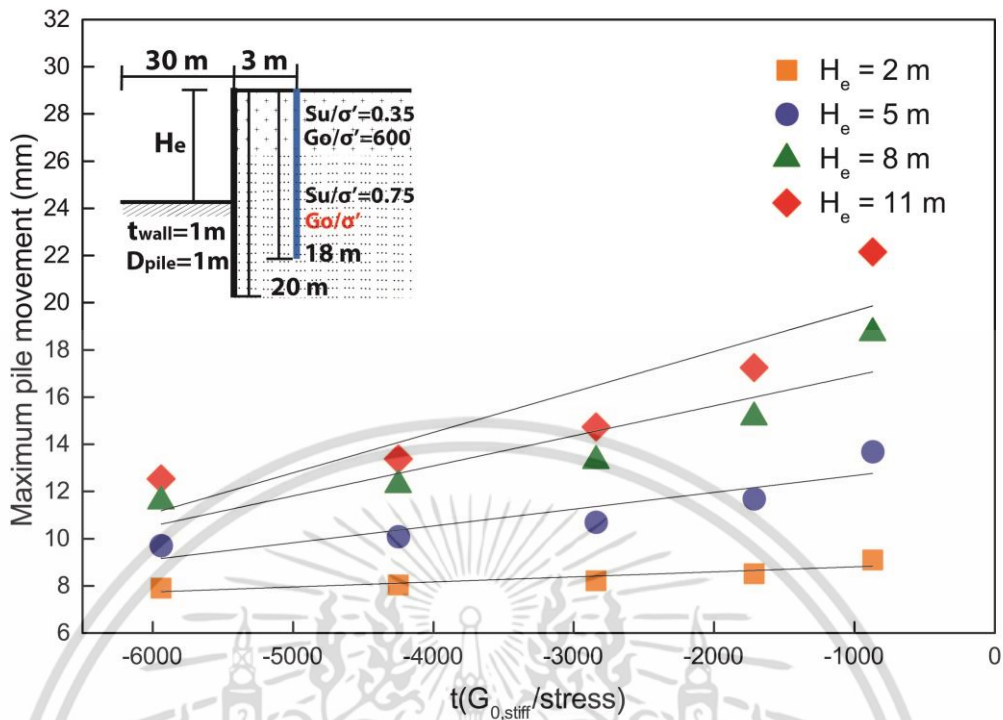


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับ Normalize shear strength ของดินเหนียวแข็งหลังปรับรูปแบบ

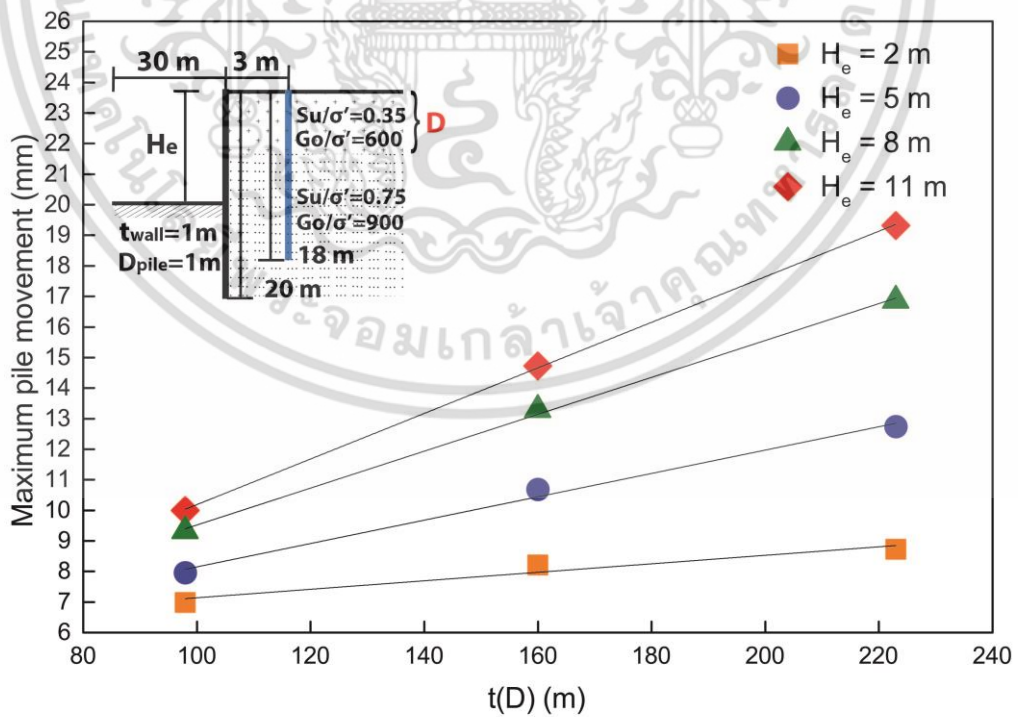


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับ Normalize initial shear modulus ของดินเหนียวอ่อนหลังปรับรูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับ Normalize initial shear modulus ของดินเหนียวแข็งหลังปรับรูปแบบ



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนหลังปรับ

รูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 สร้างสมการด้วยการวิเคราะห์เชิงถดถอย

จากขั้นตอนในหัวข้อก่อนหน้า นำปัจจัยที่ปรับค่าแล้วมาเข้ากระบวนการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปรเพื่อสร้างสมการสำหรับประมาณค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเข็มในงานขุดดินลึกแบบมีค้ำยัน ดังสมการที่ 4.2 และมีค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรสำหรับสมการ ดังตารางที่ 4.2

$$\delta_m = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_5X_5 + b_6X_6 + b_7X_7 + b_8X_8 + b_9X_9 + b_{10}X_{10} + b_{11}X_{11} \quad (4.2)$$

ตารางที่ 4.2 สัมประสิทธิ์ของตัวแปร สำหรับสมการที่ 4.2

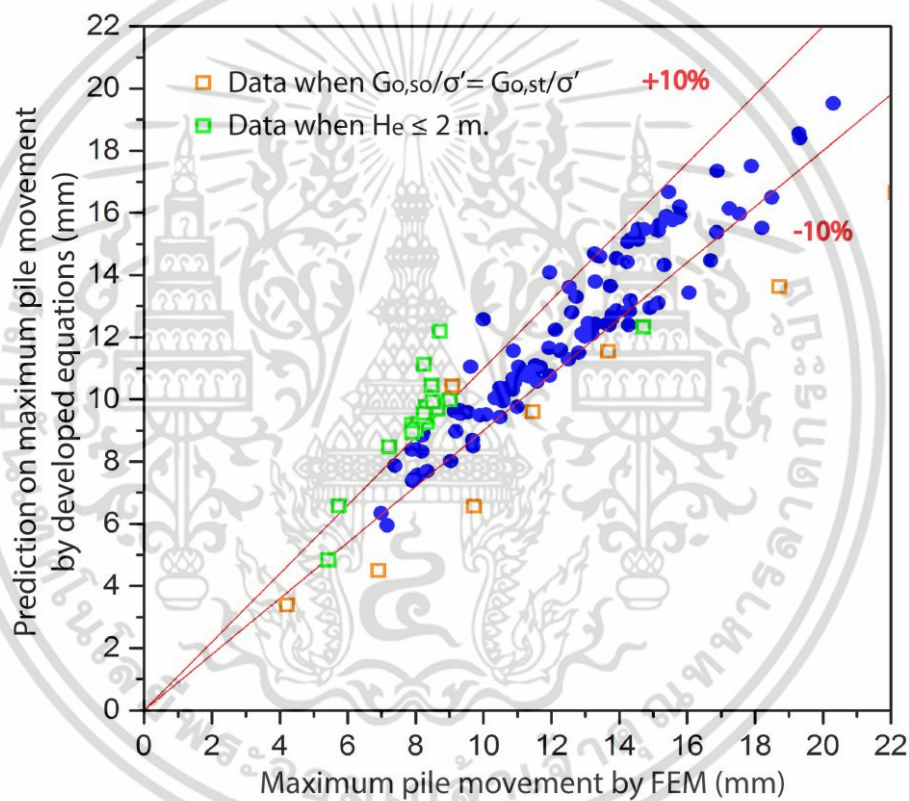
Subscript	X	b
0	-	5.0462
1	t(B/2)	0.0081
2	t(H _e)	0.0481
3	t(ln(EI/γ _w h ⁴ _{avg}))	0.0186
4	t(ln(EI))	0.0006
5	t(Depth)	0.0053
6	t(Distance)	0.0916
7	t(s _{u,soft} /σ' _v)	-0.7441
8	t(s _{u,stiff} /σ' _v)	3.4575
9	t(G _{0,soft} /σ' _v)	0.0008
10	t(G _{0,stiff} /σ' _v)	0.0006
11	t(D)	0.0467

จากสมการที่ 4.2 ที่พัฒนาขึ้นเมื่อนำมาใช้ทำนายการเคลื่อนตัวของเสาเข็มจากค่าปัจจัยอิทธิพลต่างๆ พบว่าค่าการเคลื่อนตัวที่ทำนายได้จากสมการที่ 4.2 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การกระจายตัวของข้อมูลอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.25 คือ ชุดข้อมูลส่วนใหญ่มีความคลาดเคลื่อนในช่วงขอบเขตร้อยละ 10 มีเพียงบางกรณีเท่านั้นที่ผลการทำนายมีความคลาดเคลื่อน ซึ่งพบว่าข้อมูลที่คลาดเคลื่อนส่วนใหญ่เกิดจาก 2 ปัจจัย ดังนี้

1) ตัวแปรคุณสมบัติของดิน คือค่า Normalize initial shear modulus (G₀/σ'_v) เมื่อ G₀/σ'_v ของดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งมีค่าเท่ากัน การทำนายได้ค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟ

ไนต์เอลิเมนต์ (under prediction) อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติค่า G_0/σ_v ของดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งจะมีแตกต่างกันชัดเจน [17,29]

2) ตัวแปรที่เกี่ยวกับความลึกของการขุด (H_e) คือ กรณีที่มีการขุดดินลึกตั้งแต่ผิวดินถึงความลึกที่ 2 เมตร เนื่องจากในแบบจำลองที่วิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กำหนดให้ดินที่ความลึก 0-2 เมตรเป็นชั้นดินถม แต่ในการพัฒนาสมการ ได้พิจารณาว่าดินด้านบนทั้งหมดเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนและถัดลงไปเป็นชั้นดินเหนียวแข็ง เพื่อลดปัจจัยลง อย่างไรก็ตามช่วงการขุดดินลึก 0-2 เมตร เสาเข็มมีการเคลื่อนตัวเพียงเล็กน้อย และการทำนายอาจมีความจำเป็นน้อยกว่าการขุดดินที่ระดับความลึกอื่นๆ



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ทำนายโดยสมการกับค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลการทำนายค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มจากสมการที่ 4.2 ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ กับวิธีที่เคยมีการนำเสนอมาในอดีต [2] ในกรณีเดียวกัน ดังรูปที่ 4.26 พบว่าผลการทำนายด้วยสมการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ มีความใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์มากกว่า เนื่องจากการทำนายค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มจาก [2] ครอบคลุมเพียงตัวแปร shear strength, ความลึกของการขุด, ขนาดของเสาเข็ม, ความหนาของกำแพงกันดิน, ความเอกสสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

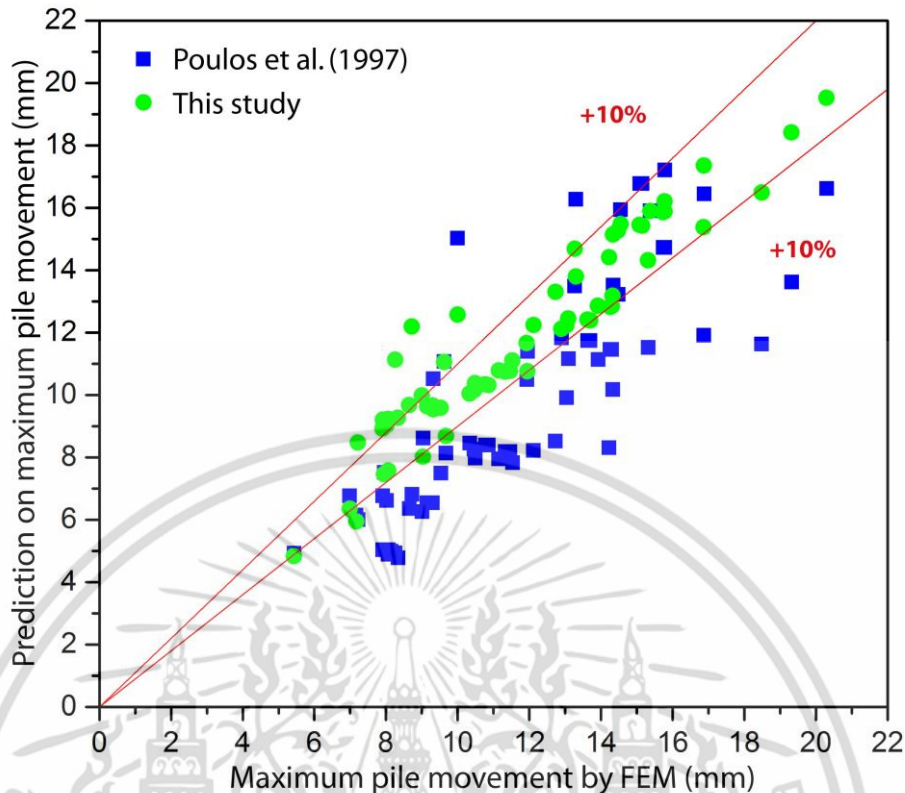
แข็งและระยะห่างของค้ำยัน ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งมีจำนวนน้อยกว่าตัวแปรอิทธิพลที่นำเสนอในสมการที่ 4.2 ดังนั้นในการทำนายเพื่อเปรียบเทียบในรูปที่ 4.26 ในส่วนของผลการทำนายจากงานวิจัยนี้จึงน้อยกว่าในรูปที่ 4.25 โดยเปรียบเทียบเฉพาะในกรณีที่ตัวแปรจาก [2] มีการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบความแตกต่างของตัวแปรอิทธิพล

ประเภทของตัวแปร	สมการ 4.2	สมการของ Poulos et al.,1997
ขนาดของการขุด		
- ความลึกของการขุดดิน	✓	✓
- ความกว้างของบริเวณที่ขุดดิน	✓	✗
คุณสมบัติของกำแพงกันดิน		
- ความหนาของกำแพงกันดิน	✓	✓
คุณสมบัติของเสาเข็ม		
- ขนาดของเสาเข็ม	✓	✓
- ความลึกของเสาเข็ม	✓	✗
- ระยะห่างจากกำแพงกันดิน	✓	✓
คุณสมบัติของชั้นดิน		
- Normalize shear strength (soft clay), $s_{u,soft} / \sigma'_v$	✓	✓*
- Normalize shear strength (stiff clay), $s_{u,stiff} / \sigma'_v$	✓	✓*
- Normalize initial shear modulus (soft clay), $G_{0,soft} / \sigma'_v$	✓	✗
- Normalize initial shear modulus (stiff clay), $G_{0,stiff} / \sigma'_v$	✓	✗
- ความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน	✓	✗

*พิจารณาในรูปของ undrained shear strength โดยไม่ได้แยกเป็นของชั้นดินเหนียวอ่อนและแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบระหว่างผลการทำนายด้วยสมการที่นำเสนอกับผลการทำนายด้วยสมการของ Poulos et al.(1997) [2]

4.2.4 อัตราส่วนระหว่างการเคลื่อนตัวของเสาเข็มและการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน

การตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็มที่อยู่ใกล้เคียงบริเวณที่มีการขุดดินลึก ไม่สามารถทำได้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นในกรณีที่สามารถตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินได้ หากทราบอัตราส่วนระหว่างการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเสาเข็ม (P_{max}) และการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของกำแพงกันดิน (W_{max}) จะสามารถประเมินค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มได้เช่นกัน

การสร้างสมการเพื่อทำนายอัตราส่วนระหว่างการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเสาเข็ม และการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของกำแพงกันดิน (P_{max}/W_{max}) มีวิธีการเช่นเดียวกับการสร้างสมการประมาณค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็ม โดยปรับปรุงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน P_{max}/W_{max} กับตัวแปรต่างๆ ที่เป็นแบบพาราโบลิกให้เป็นแบบเส้นตรง โดยตารางที่ 4.4 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณของสมการพาราโบลิก

นำปัจจัยที่ปรับค่าแล้วมาเข้ากระบวนการวิเคราะห์หาค่าถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปรเพื่อสร้างสมการสำหรับประมาณค่าอัตราส่วน P_{max}/W_{max} ดังสมการที่ 4.3 และมีค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรสำหรับสมการประมาณค่าอัตราส่วน P_{max}/W_{max} ดังตารางที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์ตัวคูณของสมการพาราโบลิก สำหรับค่าโมเมนต์บวก

ตัวแปร	ช่วงที่พิจารณา	สัมประสิทธิ์ตัวคูณในสมการที่ (4.1)		
		a	b	c
B/2 [m]	10-40	0.0037	-0.0001	0.8814
H _e [m]	2-11	0.0244	-0.0014	0.8287
ln(EI/γ _w h ⁴ _{avg})	6.1-8.2	-0.0112	0.0019	0.9162
ln(EI)	12.2-15	0.0542	-0.0022	0.6124
Depth [m]	15-23	0.0046	-0.0001	0.8980
Distance [m]	0.6-10	-0.0531	0.0008	1.0298
S _{u,soft} /σ' _v	0.27-0.4	0.0262	-0.0372	0.9357
S _{u,stiff} /σ' _v	0.45-1.05	-0.0161	0.0074	0.8951
G _{0,soft} /σ' _v	123-315	-0.0005	0.0000	0.9965
G _{0,stiff} /σ' _v	375-975	0.0002	0.0000	0.9038
D [m]	11-16.5	-0.0052	0.0003	0.9578

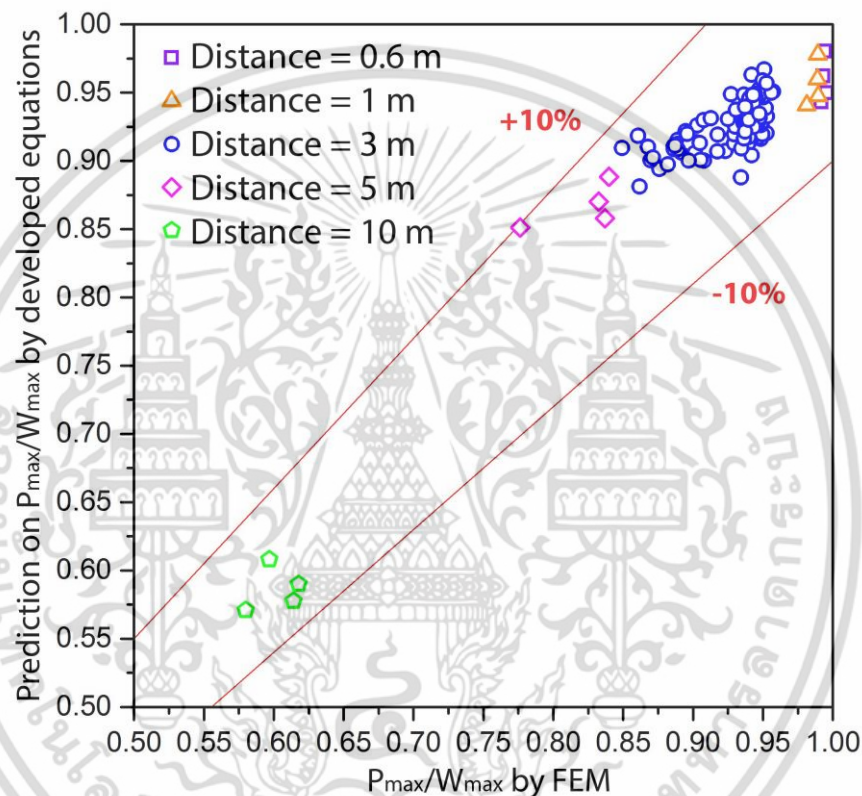
$$P_{\max}/W_{\max} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_5X_5 + b_6X_6 + b_7X_7 + b_8X_8 + b_9X_9 + b_{10}X_{10} + b_{11}X_{11} \quad (4.3)$$

ตารางที่ 4.5 สัมประสิทธิ์ของตัวแปร สำหรับสมการที่ 4.3

Subscript	X	b
0	-	0.5954
1	t(B/2)	0.0057
2	t(H _e)	0.0131
3	t(ln(EI/γ _w h ⁴ _{avg}))	-0.0446
4	t(ln(EI))	0.0005
5	t(Depth)	-0.0005
6	t(Distance)	0.0704
7	t(S _{u,soft} /σ' _v)	-0.0749
8	t(S _{u,stiff} /σ' _v)	0.3890
9	t(G _{0,soft} /σ' _v)	0.0002
10	t(G _{0,stiff} /σ' _v)	-0.0003
11	t(D)	-0.0218

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.27 แสดงผลลัพธ์ของการประมาณอัตราส่วน P_{max}/W_{max} จากสมการที่ 4.3 เทียบกับอัตราส่วน P_{max}/W_{max} จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ อัตราส่วน P_{max}/W_{max} ที่ประมาณจากสมการ มีค่าใกล้เคียงกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยส่วนใหญ่มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 10 ซึ่งระยะห่างระหว่างเสาเชื่อมกับกำแพงกันดินเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราส่วน P_{max}/W_{max} ซึ่งระยะห่างระหว่างเสาเชื่อมกับกำแพงกันดิน (distance) น้อยลง ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเชื่อมและกำแพงกันดินจะใกล้เคียงกันมากขึ้น



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน (P_{max}/W_{max}) ที่ประมาณโดยสมการกับอัตราส่วน (P_{max}/W_{max}) ที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

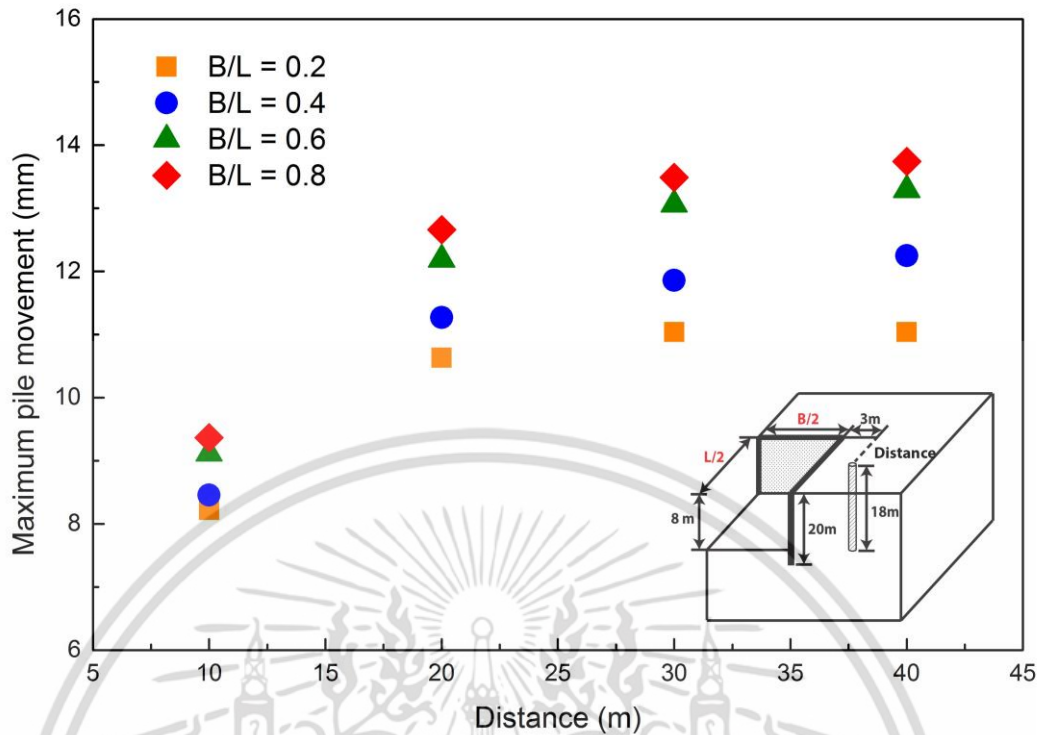
4.2.5 อิทธิพลของระยะห่างจากมุมของกำแพงกันดิน (corner effect)

เสาเข็มที่อยู่ตำแหน่งใกล้กับมุมของกำแพงกันดินจะมีค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดน้อยกว่าเสาเข็มที่อยู่ตำแหน่งห่างออกไป ซึ่งเป็นผลมาจาก corner effect

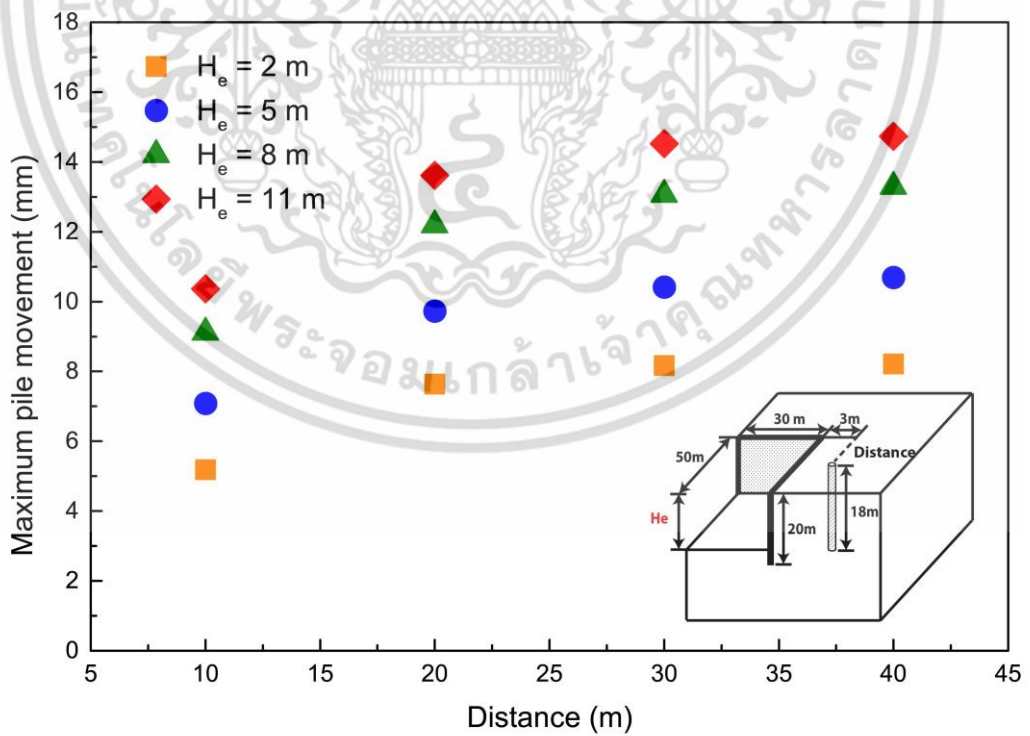
รูปที่ 4.28-4.31 แสดงผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเสาเข็ม ที่มีระยะห่างจากมุมของกำแพงกันดินแตกต่างกัน พบว่าค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเข็มจะมีค่าต่างกัน โดยการเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเข็มที่อยู่ตำแหน่งใกล้กับมุมของกำแพงกันดินจะมีค่าน้อยลง เมื่อเทียบกับเสาเข็มที่อยู่ตำแหน่งห่างออกไป แม้ว่าปัจจัยอื่นๆที่ใช้ในการประมาณค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดในระบบ

๒ มิติ จะมีค่าเท่ากันก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

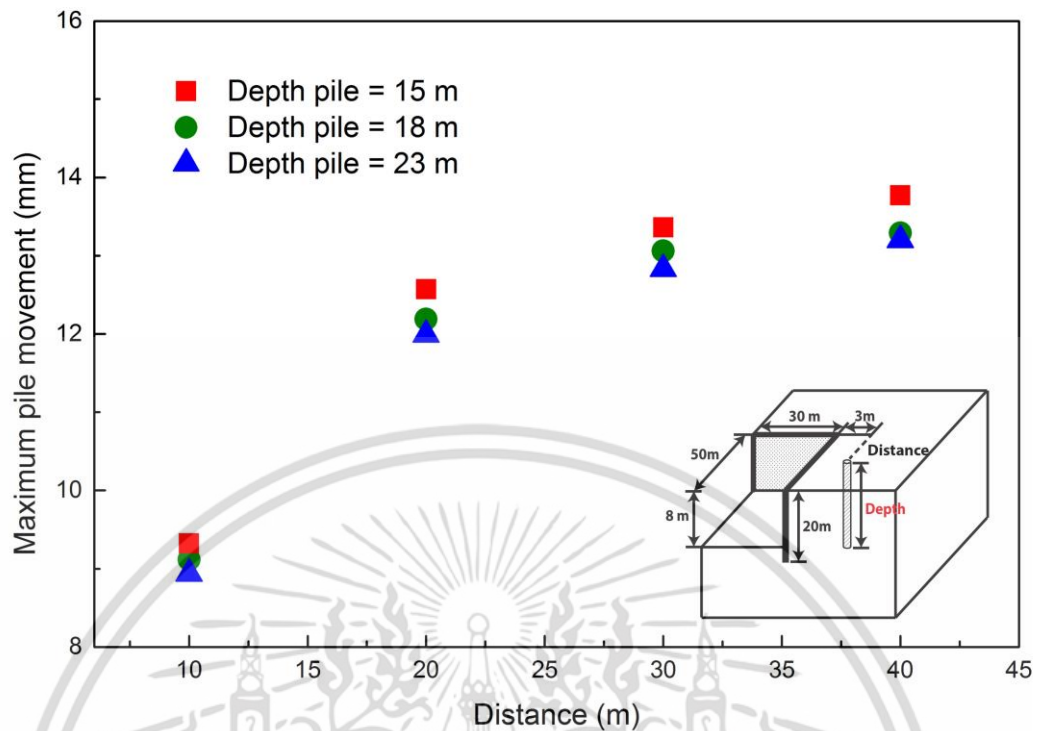


รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเข็มกับระยะห่างจากมุมของกำแพงกันดิน ที่อัตราส่วน B/L ต่างๆ

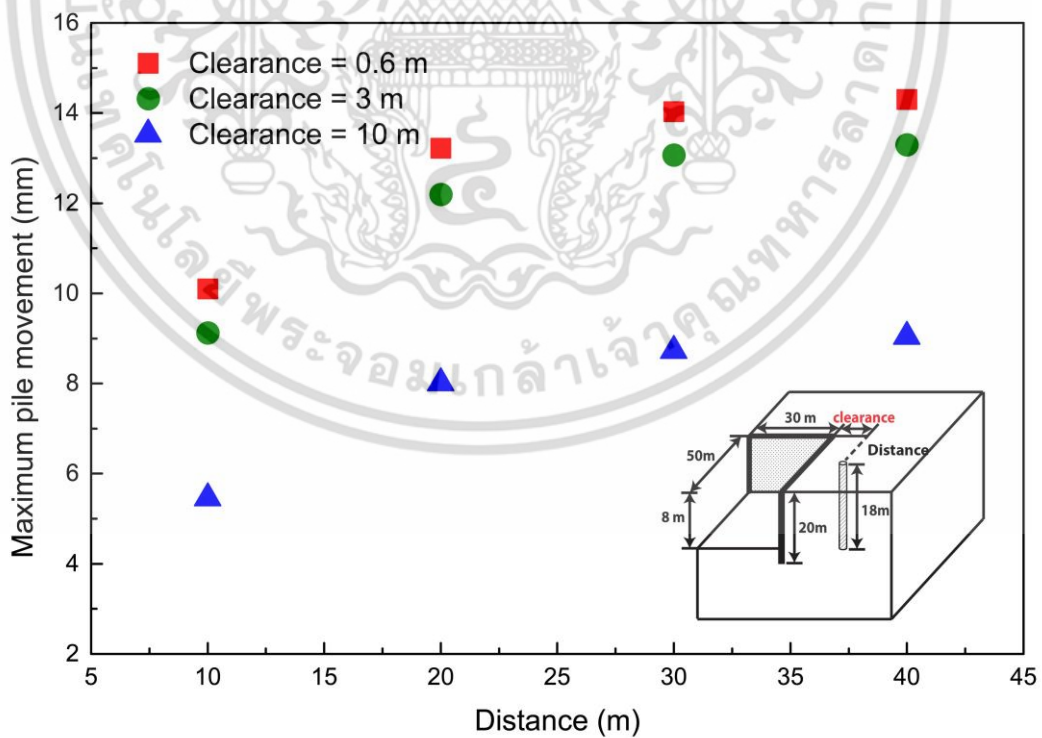


รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเข็มกับระยะห่างจากมุมของกำแพงกันดิน ที่ความลึกการขุดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเข็มกับระยะห่างจากมุมของกำแพงกันดิน ที่ความลึกของเสาเข็มต่างๆ



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเข็มกับระยะห่างจากมุมของกำแพงกันดิน ที่ระยะห่างระหว่างเสาเข็มกับกำแพงกันดินต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6 Plane Strain Ratio

Plane Strain Ratio (PSR) หมายถึงพฤติกรรมของสัดส่วนระหว่างค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มในระบบ 3 มิติ (3D) และ 2 มิติ (2D) ซึ่ง PSR ของการเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเข็มแสดงให้เห็นอิทธิพลของระยะห่างจากมุมของกำแพงกันดิน เมื่อได้รับอิทธิพลมาก PSR จะมีค่าน้อย และเสาเข็มมีค่าการเคลื่อนตัวน้อย เมื่อ PSR มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าตำแหน่งของเข็มไม่ได้รับอิทธิพลจากระยะห่างจากมุมของกำแพงกันดิน และมีค่าการเคลื่อนตัวในระบบ 3 มิติ เท่ากับระบบ 2 มิติ

ก่อนสร้างสมการเพื่อประมาณค่า PSR ต้องทำการปรับแก้ให้ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่า PSR มีความสัมพันธ์กับค่า PSR แบบเป็นเส้นตรง เช่นเดียวกับกับขั้นตอนการสร้างสมการที่ 4.2 และ 4.3 ในระบบ 2 มิติ ซึ่งปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่า PSR มาก คือปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับขนาดของการขุด [22,29,30] ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ แสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 สัมประสิทธิ์ตัวคูณของสมการพาราโบลิก

ตัวแปร	ช่วงที่พิจารณา	สัมประสิทธิ์ตัวคูณในสมการที่ (4.1)		
		a	b	c
B/L [m]	0.4-0.8	0.1238	-0.1792	0.9107
H _e [m]	2-11	-8.1E-05	1.9E-03	0.8464
Depth [m]	15-23	-0.0004	1.32E-02	0.7433
Distance [m]	0.6-10	0.0002	-7E03	0.8766
Distance from corner [m]	10-30	-0.0009	5.33E-02	0.2281

นำปัจจัยที่ปรับแก้ค่าด้วยสัมประสิทธิ์ตัวคูณในตารางที่ 4.6 แล้ว มาเข้ากระบวนการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปรเพื่อสร้างสมการอย่างง่ายสำหรับประมาณค่า PSR ของเสาเข็มดังสมการที่ 4.4 และมีค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรสำหรับสมการ ดังตารางที่ 4.7

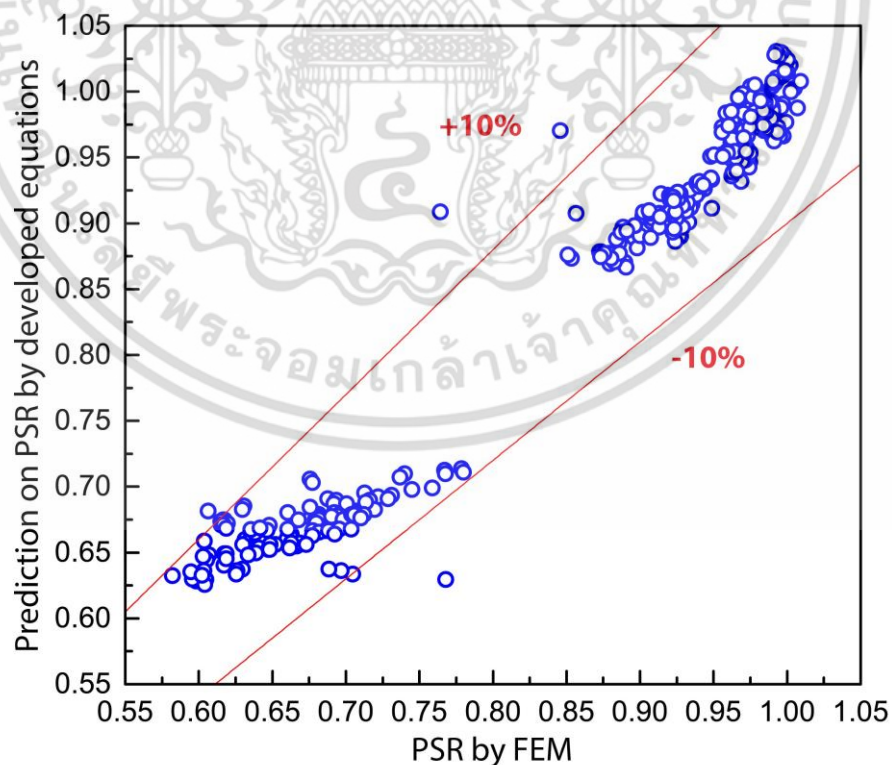
$$PSR = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_5X_5 \quad (4.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 สัมประสิทธิ์ของตัวแปร สำหรับสมการที่ 4.4

Subscript	X	b
0	-	-2.71
1	t(B/L)	0.969
2	t(H _e)	1.046
3	t(Depth)	0.236
4	t(Distance)	0.984
5	t(Distance from corner)	0.916

รูปที่ 4.32 แสดงผลลัพธ์ของการประมาณค่า PSR จากสมการ เทียบกับค่า PSR จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ค่า PSR ในช่วง 0.7-0.85 ไม่ปรากฏในกราฟความสัมพันธ์ เนื่องจากในแบบจำลองได้จัดตำแหน่งของเสาเข็มให้มีระยะห่างจากมุมของกำแพงกันดินห่างกันต้นละ 10 เมตร ดังนั้นค่า PSR ในช่วงดังกล่าวเป็นช่วงที่ไม่มีเสาเข็มพอดี และค่า PSR ที่ประมาณจากสมการ มีค่าใกล้เคียงกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยส่วนใหญ่มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 10



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า PSR ที่ประมาณโดยสมการกับค่า PSR ที่ได้จากการวิเคราะห์

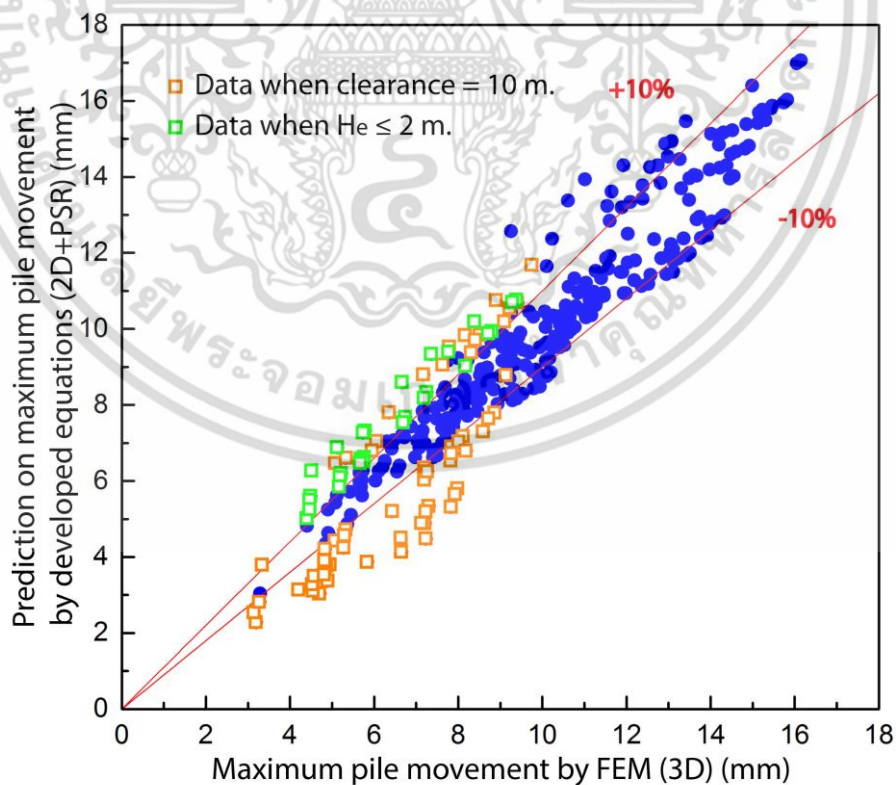
ไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำสมการที่ 4.2 ซึ่งเป็นสมการประมาณเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเข็มในระบบ 2 มิติ มาใช้ร่วมกับสมการที่ 4.4 ซึ่งเป็นสมการประมาณค่า PSR จึงสามารถประมาณค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเข็มในระบบ 3 มิติ ที่มีเงื่อนไขอยู่ในขอบเขตที่กำหนดได้ โดยเมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากสมการดังกล่าว กับค่าจากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.33 แนวโน้มของชุดข้อมูลส่วนใหญ่มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงขอบเขตร้อยละ 10 มีเพียงบางกรณีเท่านั้นที่ผลการทำนายมีความคลาดเคลื่อน ซึ่งพบว่าข้อมูลดังกล่าวส่วนใหญ่เกิดจาก 2 ปัจจัย ดังนี้

1) ตัวแปรระยะห่างระหว่างเสาเข็มกับกำแพงกันดิน (distance) คือกรณีที่เสาเข็มมีระยะห่างจากกำแพงกันดิน 10 เมตร ซึ่งจะได้รับผลกระทบจาก corner effect น้อยลง

2) ตัวแปรที่เกี่ยวกับความลึกของการขุด (H_e) คือ กรณีที่มีการขุดดินลึกตั้งแต่ผิวดินถึงความลึกที่ 2 เมตร เนื่องจากในแบบจำลองที่วิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กำหนดให้ดินที่ความลึก 0-2 เมตรเป็นชั้นดินถม แต่ในการพัฒนาสมการ ได้พิจารณาว่าดินด้านบนทั้งหมดเป็นชั้นดินเหนียวอ่อน และถัดลงไปเป็นชั้นดินเหนียวแข็ง เพื่อลดปัจจัยลง อย่างไรก็ตามช่วงการขุดดินลึก 0-2 เมตร เสาเข็มมีการเคลื่อนตัวเพียงเล็กน้อย และการทำนายอาจมีความจำเป็นน้อยกว่าการขุดดินที่ระดับความลึกอื่นๆ



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ทำนายโดยสมการที่ 4.2 และ 4.4 กับค่า

การเคลื่อนตัวสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การพัฒนาสมการ เพื่อประมาณค่าโมเมนต์ดัดของเสาเข็ม

นอกจากการเคลื่อนตัวด้านข้างแล้ว โมเมนต์ดัดที่เกิดมากเกินไประหว่างเสาเข็ม ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เสาเข็มเกิดความเสียหายได้ ไม่ว่าจะเกิดโมเมนต์บวกหรือโมเมนต์ลบ ดังนั้นในส่วนนี้จึงเป็นการสร้างสมการเพื่อประมาณค่าโมเมนต์บวกและโมเมนต์ลบของเสาเข็ม โดยใช้วิธีการเช่นเดียวกับการสร้างสมการประมาณค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็ม

4.3.1 การปรับแก้ความสัมพันธ์ของตัวแปรกับค่าโมเมนต์ดัด ให้อยู่ในรูปแบบเชิงเส้น

ตัวแปรที่มีอิทธิพลแสดงในตารางที่ 3.1 เช่นเดียวกับการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็ม ปรับปรุงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์ดัดกับตัวแปรต่างๆ ที่เป็นแบบพาราโบลาให้เป็นแบบเส้นตรง โดยตารางที่ 4.8 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณของสมการพาราโบลา เพื่อปรับแก้ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับโมเมนต์บวกสูงสุดของเสาเข็ม และตารางที่ 4.9 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณของสมการพาราโบลา เพื่อปรับแก้ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับโมเมนต์ลบสูงสุดของเสาเข็ม

ตารางที่ 4.8 สัมประสิทธิ์ตัวคูณของสมการพาราโบลา สำหรับค่าโมเมนต์บวก

ตัวแปร	ช่วงที่พิจารณา	สัมประสิทธิ์ตัวคูณในสมการที่ (4.1)		
		a	b	c
B/2 [m]	10-40	-	-	-
H_e [m]	2-11	21.11	359.24	492.86
$\ln(EI/\gamma_w h^4_{avg})$	6.1-8.2	32.22	-649.6	4910.01
$\ln(EI)$	13.4-14.3	-3956.16	163.94	24105.54
Depth [m]	15-23	-	-	-
Distance [m]	0.6-10	11.99	-215.47	2343.38
$S_{u,soft}/\sigma'_v$	0.27-0.4	-	-	-
$S_{u,stiff}/\sigma'_v$	0.45-1.05	-	-	-
$G_{0,soft}/\sigma'_v$	123-315	-	-	-
$G_{0,stiff}/\sigma'_v$	375-975	-	-	-
D [m]	11-16.5	-	-	-

* สำหรับปัจจัยขนาดของบริเวณที่ทำการขุดดิน (B/2), ความลึกของเสาเข็ม (Depth), Normalize shear strength (S_u/σ'_v), Normalize initial shear modulus (G_0/σ'_v) และความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน (d) มีความสัมพันธ์กับโมเมนต์บวกแบบเป็นเส้นตรงอยู่แล้ว ดังนั้นจึงไม่ต้องปรับปรุค่าด้วยสมการพาราโบลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 สัมประสิทธิ์ตัวคูณของสมการพาราโบลิก สำหรับค่าโมเมนต์ลบ

ตัวแปร	ช่วงที่พิจารณา	สัมประสิทธิ์ตัวคูณในสมการที่ (4.1)		
		a	b	c
B/2 [m]	10-40	0.041	0.956	516.325
H _e [m]	2-11	-5.025	94.695	124.145
ln(EI/γ _w h ⁴ _{avg})	6.1-8.2	57.096	-1138.05	5939.51
ln(EI)	13.4-14.3	69.06	-1715.94	10727.83
Depth [m]	15-23	-	-	-
Distance [m]	0.6-10	-2.067	-2.346	610.114
S _{u,soft} /σ' _v	0.27-0.4	-	-	-
S _{u,stiff} /σ' _v	0.45-1.05	-	-	-
G _{0,soft} /σ' _v	123-315	-	-	-
G _{0,stiff} /σ' _v	375-975	-	-	-
D [m]	11-16.5	-	-	-

* สำหรับปัจจัยความลึกของเสาเข็ม (Depth), Normalize shear strength (S_u/σ'_v), Normalize initial shear modulus (G₀/σ'_v) และความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน (d) มีความสัมพันธ์กับโมเมนต์ลบบนแบบเป็นเส้นตรงอยู่แล้ว ดังนั้นจึงไม่ต้องปรับค่าด้วยสมการพาราโบลิก

4.3.2 สร้างสมการด้วยการวิเคราะห์เชิงถดถอย

นำปัจจัยที่ปรับค่าแล้วมาเข้ากระบวนการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปรเพื่อสร้างสมการสำหรับประมาณค่าโมเมนต์ดัดของเสาเข็มในงานขุดดินลึกแบบมีค้ำยัน ดังสมการที่ 4.5 และ 4.6 และมีค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรสำหรับสมการประมาณค่าโมเมนต์บวกและโมเมนต์ลบบ ดังตารางที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ

$$M_m^+ = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_5X_5 + b_6X_6 + b_7X_7 + b_8X_8 + b_9X_9 + b_{10}X_{10} + b_{11}X_{11} \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 สัมประสิทธิ์ของตัวแปร สำหรับสมการที่ 4.5

Subscript	X	b
0	-	-9238.02
1	t(B/2)	18.322
2	t(H _e)	0.829
3	t(ln(EI/γ _w h ⁴ _{avg}))	0.701
4	t(ln(EI))	-0.008
5	t(Depth)	2.42
6	t(Distance)	0.95
7	t(s _{u,soft} /σ' _v)	-1836.32
8	t(s _{u,stiff} /σ' _v)	276
9	t(G _{0,soft} /σ' _v)	-3.923
10	t(G _{0,stiff} /σ' _v)	-0.479
11	t(D)	79.378

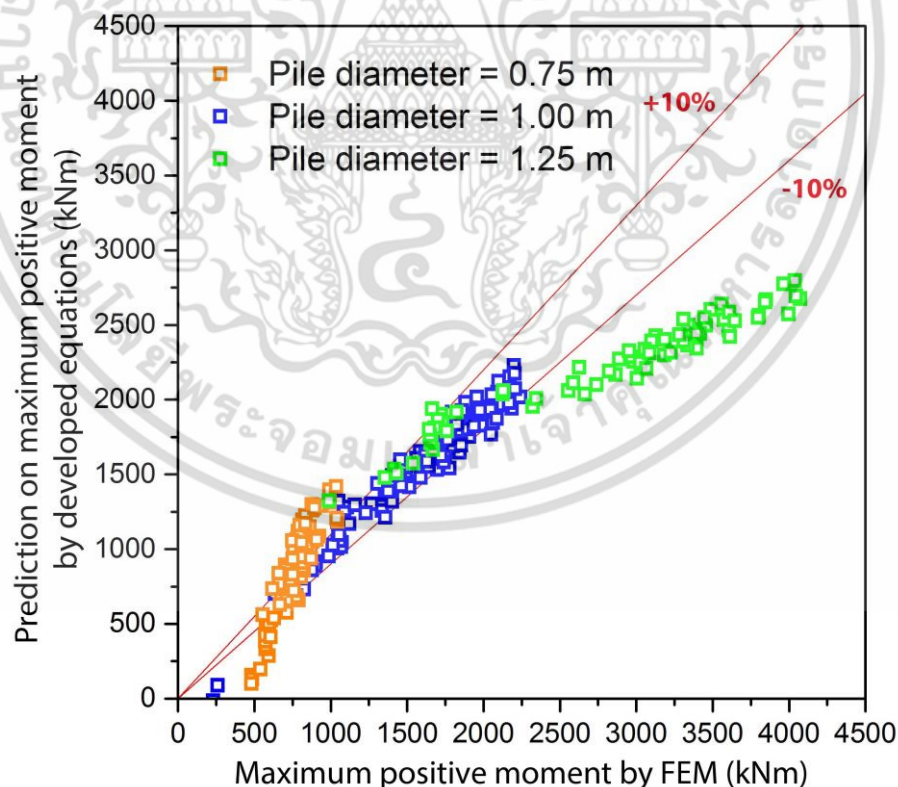
$$M_m = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_5X_5 + b_6X_6 + b_7X_7 + b_8X_8 + b_9X_9 + b_{10}X_{10} + b_{11}X_{11} \quad (4.6)$$

ตารางที่ 4.11 สัมประสิทธิ์ของตัวแปร สำหรับสมการที่ 4.6

Subscript	X	b
0	-	-1659.54
1	t(B/2)	0.759
2	t(H _e)	1.093
3	t(ln(EI/γ _w h ⁴ _{avg}))	0.527
4	t(ln(EI))	2.158
5	t(Depth)	0.909
6	t(Distance)	0.784
7	t(s _{u,soft} /σ' _v)	-739.777
8	t(s _{u,stiff} /σ' _v)	93.877
9	t(G _{0,soft} /σ' _v)	-1.635
10	t(G _{0,stiff} /σ' _v)	-0.2
11	t(D)	30.78

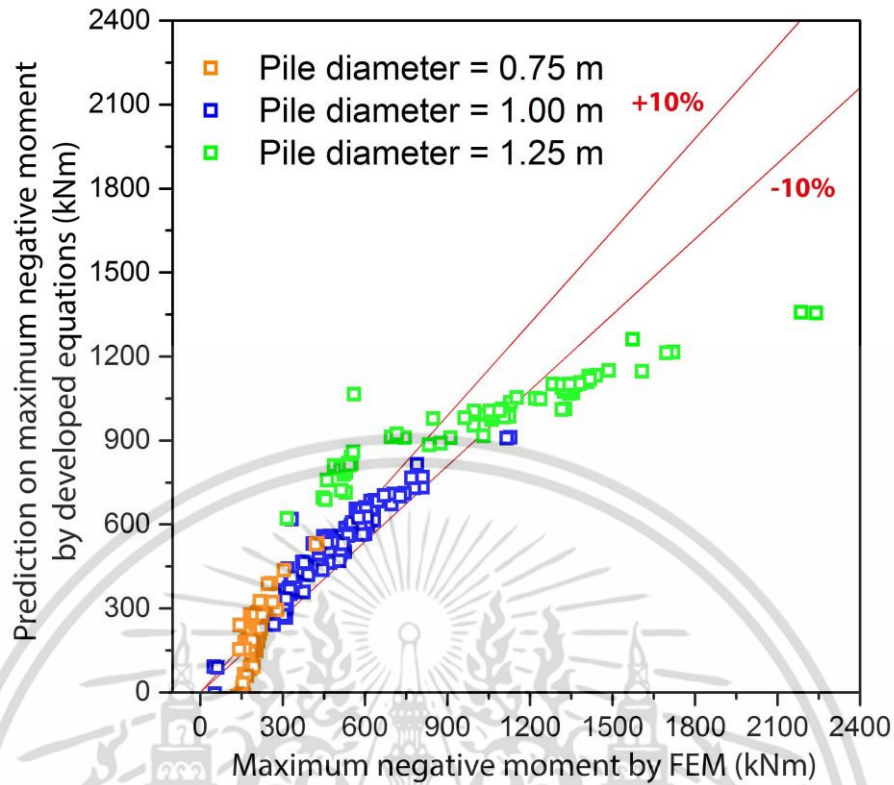
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่พัฒนาขึ้นเมื่อนำมาใช้ทำนายโมเมนต์ดัดของเสาเข็มจากค่าปัจจัยอิทธิพลต่างๆ พบว่าค่าโมเมนต์บวกและโมเมนต์ลบที่ทำนายได้จากสมการที่ 4.5 และ 4.6 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าโมเมนต์บวกและโมเมนต์ลบจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การทำนายโมเมนต์ดัดของเสาเข็มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เมตร มีแนวโน้มอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังรูปที่ 4.34 และ 4.35 คือชุดข้อมูลส่วนใหญ่มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงขอบเขตร้อยละ 10 ของข้อมูล แต่เสาเข็มขนาดอื่นๆ เมื่อทำนายด้วยสมการเดียวกันมีความคลาดเคลื่อน เนื่องจากขั้นตอนการปรับแก้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกับโมเมนต์ดัดสูงสุดให้เป็นเส้นตรง ปรับแก้ด้วยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละตัวแปร กับโมเมนต์ดัดสูงสุด โดยกำหนดให้ตัวแปรอื่นมีค่าคงที่ ตัวอย่างดังรูปที่ 4.3-4.13 และขนาดของเสาเข็มที่ใช้ในการปรับแก้ตัวแปรอื่นๆ คือเสาเข็มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เมตร ซึ่งขนาดของเสาเข็มเป็นปัจจัยที่มีผลต่อโมเมนต์ดัดอย่างมาก ทำให้การปรับแก้ดังกล่าว เหมาะสมกับเสาเข็มขนาด 1 เมตร เพียงขนาดเดียว ดังนั้น สมประสิทธิ์สำหรับการปรับแก้ในตารางที่ 4.8 และ 4.9 รวมถึงสมการที่ 4.5 และ 4.6 จึงมีความแม่นยำ เมื่อใช้ในการทำนายโมเมนต์ดัดสูงสุดทั้งบวกและลบในเสาเข็มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เมตร หากต้องการใช้ทำนายโมเมนต์ดัดในเสาเข็มขนาดอื่นๆ ก็สามารถใช้อิทธิพลได้เช่นกัน แต่ต้องมีการปรับแก้ความสัมพันธ์และสร้างสมการสำหรับเสาเข็มขนาดนั้นๆ



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์บวกสูงสุดที่ทำนายโดยสมการที่ 4.4 กับค่าโมเมนต์บวกสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์ลบลสูงสุดที่ทำนายโดยสมการที่ 4.5 กับค่าโมเมนต์ลบลสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผล

งานวิจัยนี้พัฒนาสมการเพื่อประมาณค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างและโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็ม ที่อยู่ใกล้เคียงบริเวณที่มีการขุดดินลึกแบบมีค้ำยัน ในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานคร ด้วยวิธีการสร้างข้อมูลเทียม (artificial data) และการวิเคราะห์เชิงถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปร (multiple linear regression) ให้ครอบคลุมปัจจัยอิทธิพล ได้แก่ ขนาดของบริเวณที่ทำการขุดดิน (B), ความลึกของการขุดดิน (H_c), ขนาดของกำแพงกันดิน (t), ขนาดของเสาเข็ม (D), ความลึกของเสาเข็ม (Depth), ระยะห่างระหว่างเสาเข็มกับกำแพงกันดิน (Distance), Normalize shear strength (s_u/σ_v), Normalize initial shear modulus (G_0/σ_v) และความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน (d)

สมการที่พัฒนาในงานวิจัยนี้ แบ่งออกได้เป็นสองส่วน ส่วนแรก คือสมการประมาณค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มที่หัวเสาเข็มมีพฤติกรรมแบบ free-head ในส่วนนี้ประกอบด้วยสมการประมาณค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มเมื่อไม่พิจารณาผลกระทบจากมุม และสมการประมาณค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มที่ได้รับผลกระทบแบบจากมุม ส่วนที่สองคือสมการประมาณค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็ม โดยหัวเสาเข็มมีพฤติกรรมแบบ fixed-head ซึ่งเป็นพฤติกรรมในกรณีที่หัวเสาเข็มถูกยึดตรึงเต็มที่ด้วยฐานราก และทำให้เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุดประกอบด้วยสมการประมาณค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด

ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. สมการประมาณค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มเมื่อไม่พิจารณาผลกระทบจากมุม ได้แก่

$$\delta_m = 5.0462 + 0.0081X_1 + 0.0481X_2 + 0.0186X_3 + 0.0006X_4 + 0.0053X_5 + 0.0916X_6 - 0.7441X_7 + 3.4575X_8 + 0.0008X_9 + 0.0006X_{10} + 0.0467X_{11}$$

(ตัวแปรของสมการ แสดงในตารางที่ 4.2)

ซึ่งผลการทำนายจากสมการนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ มีค่าใกล้เคียงกันมาก ส่วนใหญ่มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 10 มีเพียงบางส่วนที่มีความคลาดเคลื่อนมากกว่าร้อยละ 10 คือ กรณีที่ความลึกการขุดอยู่ในช่วงชั้นดินถม และกรณีที่ชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งมีค่า Normalize initial shear modulus (G_0/σ_v) ใกล้เคียงกันมากเกินไป

2. เมื่อเปรียบเทียบผลการทำนายด้วยสมการประมาณค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มในระนาบ 2 มิติที่นำเสนอ กับผลการทำนายด้วยสมการของ Poulos et al.(1997) [2] ผลการทำนายด้วยสมการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ มีความใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมนต์มากกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะว่าสมการของ Poulos et al.(1997) [2] มีข้อจำกัดของจำนวนตัวแปรตั้งที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 และไม่คำนึงถึง soil stiffness at small strain range

3. สมการประมาณค่าอัตราส่วนระหว่างการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเสาเข็ม และการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของกำแพงกันดิน (P_{max}/W_{max}) ได้แก่

$$P_{max}/W_{max} = 0.5954 + 0.0057X_1 + 0.0131X_2 - 0.0446X_3 + 0.0005X_4 - 0.0005X_5 + 0.0704X_6 - 0.0749X_7 + 0.3890X_8 + 0.0002X_9 - 0.0003X_{10} - 0.0218X_{11}$$

(ตัวแปรของสมการ แสดงในตารางที่ 4.5)

สมการนี้เป็นแนวทางใช้ประเมินค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มได้ ในกรณีที่ทราบค่าการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน

4. สมการประมาณค่า Plane Strain Ratio (PSR) เพื่อหาการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มที่ได้รับผลกระทบจากมุม ได้แก่

$$PSR = -2.71 + 0.969X_1 + 1.046X_2 + 0.236X_3 + 0.984X_4 + 0.916X_5$$

(ตัวแปรของสมการ แสดงในตารางที่ 4.7)

ซึ่งผลการทำนายโดยใช้สมการนี้ร่วมกับสมการประมาณค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มเมื่อไม่พิจารณาผลกระทบจากมุม เพื่อหาการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มที่ได้รับผลกระทบจาก corner effect แบบ 3 มิติ เมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ มีค่าใกล้เคียงกันมาก ส่วนใหญ่มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 10 มีเพียงบางส่วนที่มีความคลาดเคลื่อนมากกว่าร้อยละ 10 คือ กรณีที่ความลึกการขุดอยู่ในช่วงชั้นดินถม และกรณีที่เสาเข็มมีระยะห่างจากกำแพงกันดินมากๆ

5. สมการประมาณค่าโมเมนต์บวกและโมเมนต์ลบสูงสุดของเสาเข็ม (สำหรับเสาเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร) ได้แก่

$$M_m^+ = -9238.02 + 18.322X_1 + 0.829X_2 + 0.701X_3 - 0.008X_4 + 2.42X_5 + 0.95X_6 - 1836.32X_7 + 276X_8 - 3.923X_9 - 0.479X_{10} + 79.378X_{11}$$

(ตัวแปรของสมการ แสดงในตารางที่ 4.10)

$$M_m^- = -1659.54 + 0.759X_1 + 1.093X_2 + 0.527X_3 + 2.158X_4 + 0.909X_5 + 0.784X_6 - 793.777X_7 + 93.877X_8 - 1.635X_9 - 0.2X_{10} + 30.78X_{11}$$

(ตัวแปรของสมการ แสดงในตารางที่ 4.11)

ซึ่งผลการทำนายโมเมนต์ดัดของเสาเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร จากสมการนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ มีค่าใกล้เคียงกันมาก ส่วนใหญ่มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 10 หากต้องการใช้ทำนายโมเมนต์ดัดในเสาเข็มขนาดอื่นๆก็สามารถใช้วิธีนี้ได้เช่นกัน แต่ต้องมีการปรับแก้ความสัมพันธ์และสร้างสมการสำหรับเสาเข็มขนาดนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้สมการที่พัฒนาขึ้นมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง แต่ผลการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิทธิพลที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวด้านข้างและโมเมนต์ดัดของเสาเข็ม สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มข้างเคียงจากงานขุดดิน ลึกด้วยวิธีอื่นได้ นอกจากนี้วิธีการสร้างข้อมูลเทียมรวมกับการวิเคราะห์เชิงถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปรยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมในอนาคตได้หลากหลายอีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Leung C.F., Chow Y.K. and Shen, R.F. “Behavior of pile subject to excavation induced soil movement.” **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, vol.126, 2000. pp.947-954
- [2] Poulos H.G. and Chen L.T. “Pile response due to excavation induced lateral soil movement.” **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, vol.123, 1997. pp. 94-99
- [3] Mana A.I and Clough G.W. “ Prediction of movements for braced cuts in clay.” **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, vol. 107, 1981. pp.759-777
- [4] Moormann C. “Analysis of wall and ground movement due to deep excavation in soft soil based on a new worldwide database.” **Soils and Foundations**, vol.44, No.1, 2004. pp.87-98
- [5] Clough G.W. and O'Rourke T.D. “ Construction induced movement of in situ walls.” **in Proceeding of Design and Performance of Earth Retaining Structure, Geotechnical Special Publication**, No. 25, 1990. pp.493-470
- [6] Kung G. T. C., Juang C. H., Hsiao E. C. L. and Hashash Y.M. A. “Simplified model for wall deflection and ground-surface settlement cause by braced excavation in clays.” **Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering**, vol.133, 2007. pp.731-747
- [7] Wonglert A., Jongpradist P., Kalasin T., Submanee Wong C., Kongkitkul W. and Youwai S. “Semi-Empirical Equations for Predicting Wall Movements Due to Deep Excavation in Bangkok Soft Soil.” **in Proceeding of World Tunnel Congress 2012**, Bangkok.
- [8] Prust R.E., Davies J., and Hu S. “Pressuremeter investigate for mass rapid transit in Bangkok, Thailand.” **Journal of the transportation research board, Transportation research of the national academies**, Washington D.C. , No.1928, 2005. pp.207 -217

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [9] Suwanawat S. “**Earth pressure balance (EPB) shield tunneling in Bangkok ground response and prediction of surface settlements using artificial neural networks.**” PhD. Thesis, Massachusetts Institute of technology, Cambridge, USA. 2002.
- [10] Roscoe K.H. and Burland J.B. “On the generalized stress – strain behavior of ‘wet clay’.” **Engineering plasticity (eds J. Heyman and F. A. Leckie)**, Cambridge: Cambridge University Press., 1968. pp. 535–609
- [11] Benz T. “**Small-strain stiffness of soil and its numerical consequences.**” PhD. Thesis, Institut fur geotechnik, Universitat Stuttgart, 2006.
- [12] Oonchittikul S. “**Performance of bored poles in Bangkok subsoils.**” MD. Thesis, AIT, Thailand. 1990
- [13] Teparaksa W. “Analysis of lateral wall movement for deep brace excavation of Bangkok subsoils.” in **Proceedings of Civil and Environment Engineering Conference New Frontiers & Challenges**, Bangkok, Thailand, 1999.
- [14] Pankoh T. “**Behavior of diaphragm wall for deep excavation in Bangkok caly.**” MD. Thesis, Chulalongkorn, 2005.
- [15] Wonglert A., Jongpradist P. and Kalasin T. “Wall movement analysis of deep excavation in Bangkok subsoil considering small strain stiffness.” **Journal of Research in Engineering and Technology**, vol.5, No.4, 2008. pp.393-405
- [16] Dawd S. And Trygg R. “**FE analyses of horizontal deformations due to excavation processes in deep layers of soft Gothenburg clay.**” MD. Thesis, Chalmers University of Technology, 2013.
- [17] Likitlersuang S., Teachavorasinskun S., Surarak C., Oh E. and Balasubramaniam A. “Small Strain stiffness and stiffness degradation curve of Bangkok Clays.” **Journal of Soils and Foundations** vol.53(4), 2013. pp.498-509
- [18] Atkinson J.H. and Sallfors G. “Experimental determination of stress-strain-time characteristics in laboratory and in situ tests.” in **Proceedings of 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Florence, vol.3, 1991. pp.915- 956

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [19] Wonglert A. “**Semi-empirical model for predicting lateral wall movement due to braced excavation in Bangkok subsoil.**” MD. Thesis, King Mongkut’s University of Technology Thonburi, 2008.
- [20] Wu P.J., Wang M.J., Peng Y.R. and Duann S.W. “Deformation of diaphragm walls.” **7th Symposium on Current Researches in Geotechnical Engineering**, Taiwan, 1997.
- [21] Peck, R.B. “Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground.” in **Proceeding of the 7th Int. Conf on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Mexico, State of the Art Volume, 1969. pp.225-290
- [22] Ou C.Y., Hsieh P.G. and Chiou D.C. “Characteristics of ground surface settlement during excavation.” **Canadian Geotechnical Journal.**, vol.30, No.5, 1993. pp.758-767
- [23] Goh A.T.C., Wong K.S., Teh C.I. and Wen “Pile Response Adjacent to Braced Excavation.” **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, vol.129, No.4, 2003. pp.383-386
- [24] Poulos H.G. and Chen L.T. “Pile response due to unsupported excavation induced lateral soil movement.” **Canadian Geotechnical Journal**, vol.33, 1996. pp.670-677
- [25] Jongpradist P., Rukdeechuai T. and Arangelovski G. “Development of simplified models for predicting lateral pile movement caused by brace excavation in clay by numerical.” **International Conference on Advances in Civil Engineering for Sustainable Development**, 2014. pp.127-132
- [26] PLAXIS Version 8 Manual. A.A. Balkema Publishers, 2013.
- [27] Jongpradist P., Kaewsri T., Sawatparnich A., Suwansawat S., Youwai S., Kongkitkul W. and Sunitsakul J. “ Development of tunneling influence zones for adjacent pile foundations by numerical analyses. ” **Tunnelling and Underground Space Technology** 34, 2013. pp.96–109
- [28] Engin H.K., Septanika E.G. and Brinkgreve R.B.J. “Estimation of pile group behavior using embedded piles.” **International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics**, 2008. pp.3231-3238

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [29] Rukdeechuai T. “Simplified model for predicting lateral pile movement caused by braced excavation in Bangkok subsoils.” MD. Thesis, King Mongkut’s University of Technology Thonburi, 2008.
- [30] Ou C.Y., Chiou D.C. and Wu T.S., “Three –dimensional finite element analysis of deep excavation”, *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 122, No.5, 1996.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

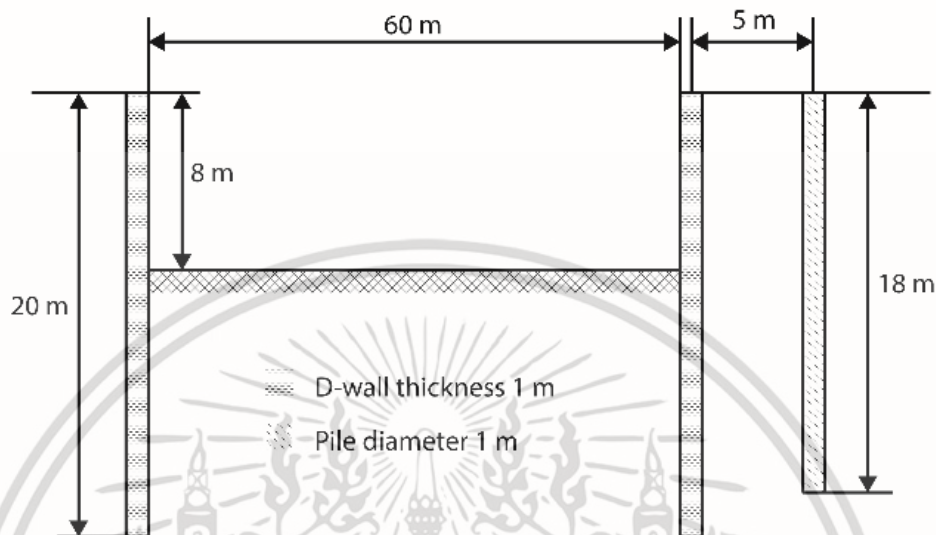
ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ตัวอย่างการใช้สมการทำนายค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มในระบบ 2 มิติ



รูปที่ ก.1 กรณีตัวอย่าง เพื่อแสดงการทำนายโดยใช้สมการ

ตัวอย่างการทำนายค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็มจากงานขุดดินลึกข้างเคียง ที่มีลักษณะดังรูปที่ ก.1 และมีตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ ดังนี้

- ขนาดของงานขุด 60 เมตร ($B/2 = 30$ m)
- ขุดดินลึก 8 เมตร ($H_e = 8$ m)
- กำแพงกันดินหนา 1 เมตร ($E = 1.5 \times 10^7$ kPa, $I = 1/12$ m⁴, $\gamma_w = 9.81$ kN/m², $h_{avg} = 3$ m และ $\ln(EI/\gamma_w h_{avg}^4) = 7.64848475$)
- เสาเข็มมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร ($E = 2.6 \times 10^7$ kPa, $I = 0.0491$ m⁴ และ $\ln(EI) = 14.3263362$)
- เสาเข็มลึก 18 เมตร (Depth = 18 m)
- เสาเข็มมีระยะห่างจากกำแพงกันดิน 5 เมตร (Clearance = 5 m)
- บริเวณงานขุดมี Normalize shear strength ของดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง 0.35 และ 0.75 ตามลำดับ ($s_{u,so}/\sigma'_v = 0.35$, $s_{u,st}/\sigma'_v = 0.75$)
- บริเวณงานขุดมี Normalize initial shear modulus ของดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง 210 และ 675 ตามลำดับ ($G_{o,so}/\sigma'_v = 210$, $G_{o,st}/\sigma'_v = 675$)
- บริเวณงานประกอบด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 14 เมตร อยู่ด้านบน และด้านล่างเป็นชั้นดินเหนียวแข็ง ($d = 14$ m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 1 คือการปรับแก้ค่าตัวแปร โดยแทนค่าของตัวแปรเป็นค่า x ในสมการที่ 4.1 และมีสัมประสิทธิ์ตัวคูณของสมการพาราโบลาคงตัวตามที่ 4.1

ตัวอย่างเช่น $B/2 = x = 30$ m จากตารางที่ 4.1 $a = 0.213$, $b = -0.0019$ และ $c = 9.99$ แทนค่าในสมการที่ 4.1 ได้ $X = 201.633$ m ค่าปรับแก้ของตัวแปรอื่นๆแสดงในตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ตัวอย่างการปรับแก้ตัวแปร

ตัวแปร	x	X
$B/2$ [m]	30	201.633
H_e [m]	8	76.7161
$\ln(EI/\gamma_w h^4_{avg})$	7.64848475	-538.2877
$\ln(EI)$	14.3263362	268.0241
Depth [m]	18	-83.8751
Clearance [m]	5	-3.547
$S_{u,so}/\sigma'_v$	0.35	24.5025
$S_{u,st}/\sigma'_v$	0.75	8.4008
$G_{0,so}/\sigma'_v$	210	-5840
$G_{0,st}/\sigma'_v$	675	-2840
d [m]	14	159.9495

ขั้นตอนที่ 2 คือการนำค่าตัวแปรที่ปรับแก้แล้ว มาประมาณค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ด้วยสมการที่ 4.2 ซึ่งมีสัมประสิทธิ์ของตัวแปร ดังตารางที่ 4.2 ค่าที่ใช้ในสมการที่ 4.2 ของกรณีตัวอย่างนี้แสดงในตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.2 สัมประสิทธิ์ของตัวแปร สำหรับสมการที่ 4.2

Subscript	X	b	bX
0	-	5.0462	5.0462
1	201.633	0.0081	1.6332
2	76.7161	0.0481	3.69
3	-538.2877	0.0186	-10.0122
4	268.0241	0.0006	0.1908
5	-83.8751	0.0053	-0.4445
6	-3.5467	0.0916	-0.3249
7	24.5025	-0.7441	-18.2323
8	8.4008	-3.4575	29.0458
9	-5840	0.0008	-4.672
10	-2840	0.0006	-1.7047
11	159.9495	0.0467	7.4696
ค่าการเคลื่อนตัวที่ประมาณได้ (δ_m)			11.685

จากตัวอย่างการใช้สมการ เพื่อทำนายค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็มจากงานขุดดินลึกข้างเคียง ในกรณีนี้ ได้ค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเสาเข็ม 11.685 มิลลิเมตร ซึ่งในเงื่อนไขเดียวกัน ได้ค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างจากไฟไนต์เอลิเมนต์ 11.93 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

สมการทำนายโมเมนต์บวกสูงสุดในเสาเข็ม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.25 เมตร

ตารางที่ ข.1 สัมประสิทธิ์ตัวคูณของสมการพาราโบลาเพื่อปรับค่าความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปเชิงเส้น

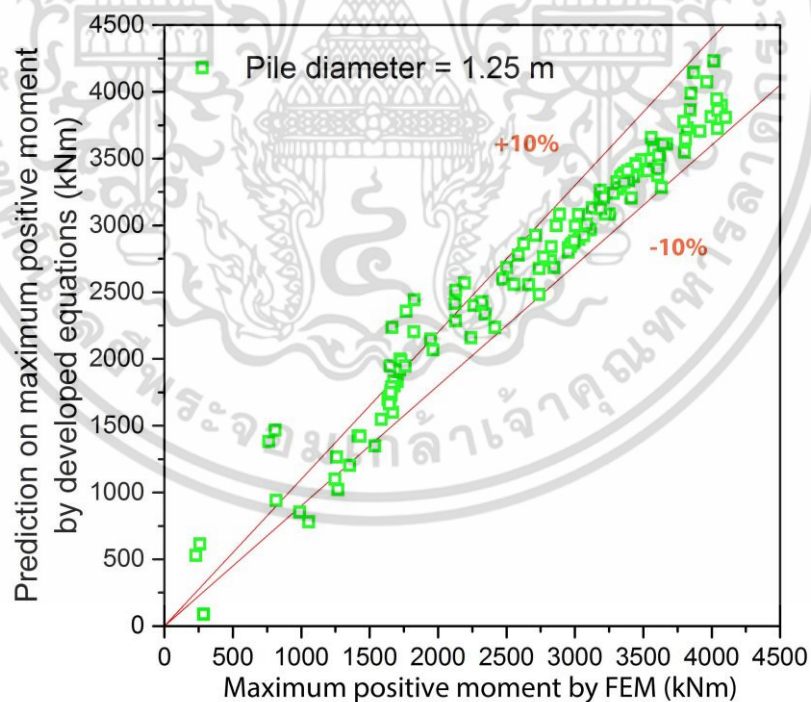
ตัวแปร	ช่วงที่พิจารณา	สัมประสิทธิ์ตัวคูณในสมการที่ (4.1)		
		a	b	c
B/2 [m]	10-40	-0.445	60.15	-1898.5
H _e [m]	2-11	-38.61	701.34	502.46
$\ln(EI/\gamma_w h_{avg}^4)$	6.1-8.2	33.47	-905.98	8360.88
$\ln(EI)$	12.2-15	163.94	-3656.16	24105.54
Depth of pile [m]	15-23	-	-	-
Clearance [m]	0.6-10	16.38	-304.95	2396.39
$S_{u,soft}/\sigma'_v$	0.27-0.4	-	-	-
$S_{u,stiff}/\sigma'_v$	0.45-1.05	-	-	-
$G_{0,soft}/\sigma'_v$	123-315	-	-	-
$G_{0,stiff}/\sigma'_v$	375-975	-	-	-
D [m]	11-16.5	-	-	-

* สำหรับปัจจัยความลึกของเสาเข็ม (Depth), Normalize shear strength (S_u/σ'_v), Normalize initial shear modulus (G_0/σ'_v) และความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน (d) มีความสัมพันธ์กับโมเมนต์ลบแบบเป็นเส้นตรงอยู่แล้ว ดังนั้นจึงไม่ต้องปรับปรุงค่าด้วยสมการพาราโบลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 สัมประสิทธิ์ของตัวแปร สำหรับสมการที่ 4.5

Subscript	X	b
0	-	-11482.1
1	$t(B/2)$	0.857
2	$t(H_e)$	0.878
3	$t(\ln(EI/\gamma_w h^4_{avg}))$	0.717
4	$t(\ln(EI))$	1.255
5	$t(\text{Depth})$	-3.798
6	$t(\text{Clearance})$	1.39
7	$t(S_{u,soft}/\sigma'_v)$	-1035.93
8	$t(S_{u,stiff}/\sigma'_v)$	-280.333
9	$t(G_{0,soft}/\sigma'_v)$	-6.166
10	$t(G_{0,stiff}/\sigma'_v)$	-1.334
11	$t(D)$	181.879



รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์บวกสูงสุดที่ทำนายโดยสมการที่ 4.4 กับค่าโมเมนต์บวกสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวดวงกมล ศิริรักษ์
 วัน เดือน ปีเกิด 31 สิงหาคม 2535
 ที่อยู่ 35/3/3 ถนนมหาจักรพรรดิ ตำบลหน้าเมือง อำเภอเมือง
 จังหวัดฉะเชิงเทรา 24000

ประวัติการศึกษา 2557 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

พ.ศ. 2559 ดวงกมล ศิริรักษ์, ธนพงษ์ รักดีช่วย, พรเกษม จงประดิษฐ์ และสุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์
 “การพัฒนาสมการเพื่อทำนายการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็มจากงานชุดดินลึก
 ข้างเคียง”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 33, ฉบับที่ 4, 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้