

# การพัฒนาสมการเพื่อทำนายการเคลื่อนตัวด้านข้าง ของเสาเข็มจากงานขุดดินลึกข้างเคียง

## Development of Equations for Evaluating

## Lateral Pile Movement due to Nearby Deep Excavation

ดวงกมล ศิริรักษ์<sup>1</sup> ธนพงษ์ รัตติช่วย<sup>2</sup> พรเกษม จงประดิษฐ์<sup>2</sup> สุทธิวีร์ สุวรรณสวัสดิ์<sup>1</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

<sup>2</sup>สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาสมการเพื่อทำนายค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็มที่เกิดจากงานขุดดินลึกในบริเวณใกล้เคียงเพื่อการประเมินเบื้องต้น สมการได้พิจารณาอิทธิพลปัจจัยที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็ม ได้แก่ ความแข็งแรงของชั้นดิน ความหนาของกำแพงกันดิน ความลึกการขุด ขนาดของเสาเข็ม รวมถึงความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน โดยที่ไม่มีค่าตรวจวัดจริงในทางปฏิบัติ การศึกษานี้เสนอวิธีการสร้างข้อมูลเทียม(Artificial Data) จากการจำลองปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และนำข้อมูลที่ได้มาสร้างสมการโดยวิธีการวิเคราะห์เชิงถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปร (Multiple linear regression analysis) จากการศึกษาพบว่าผลการทำนายค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็มจากสมการได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

**คำสำคัญ :** การเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็ม, งานขุดดินลึก, วิธีการวิเคราะห์เชิงถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปร

### Abstract

This research presents the development of equations for preliminary evaluation on the lateral pile movement due to nearby deep excavation. All essentially considered parameters, i.e., soil strength, 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 on pile movement 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 data.

**Keywords:** Lateral pile movement, Deep excavation, Multiple linear regression

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. บทนำ

การก่อสร้างโครงสร้างใต้ดินด้วยการขุดลึกในพื้นที่ตัวเมืองที่มีสิ่งก่อสร้างอยู่ก่อนอย่างหนาแน่นอาจส่งผลกระทบต่ออาคารข้างเคียงที่มักมีฐานรากแบบเสาเข็ม ถึงแม้ว่าการใช้กำแพงกันดิน (Retaining wall) ป้องกันความเสียหายหากเสาเข็มอยู่ในระยะที่ใกล้มากในขั้นตอนการออกแบบงานขุดจึงจำเป็นต้องสามารถประเมินการเคลื่อนตัวของเสาเข็มจากการขุดลึกดังกล่าวเพื่อนำไปประเมินเสถียรภาพของโครงสร้างต่อไปอย่างไรก็ตามการประเมินในการออกแบบรายละเอียดต้องการการวิเคราะห์ขั้นสูงที่ต้องการผู้เชี่ยวชาญและวิธีวิเคราะห์ที่สามารถทำงานที่ซับซ้อนได้ การทำนายเบื้องต้นจึงมีความสำคัญที่จะประเมินว่าจำเป็นต้องวิเคราะห์รายละเอียดต่อไปหรือไม่ ที่ผ่านมามีการศึกษาถึงผลกระทบจากงานขุดลึกต่อเสาเข็มที่อยู่ใกล้อยู่พอสมควร เช่น [1] ที่มักเป็นการศึกษาที่พิจารณาแต่เฉพาะกรณีศึกษาหนึ่งๆแต่การประเมินแบบทั่วไปมีจำนวนน้อยมาก มีเพียง [2] ที่พัฒนาในรูปแบบความสัมพันธ์ ที่ซึ่งปัญหาดังกล่าวมีผลกระทบอย่างมากในเมืองใหญ่ที่การพัฒนารุกหน้าไปมาก

ในงานขุดลึกมีการศึกษาเพื่อทำนายการเคลื่อนตัวของดิน และกำแพงกันดินรูปแบบต่างๆจำนวนหนึ่งมักนิยมเป็นรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มต่อความลึกการขุด กับ ปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน เช่น ความหนาของกำแพงกันดิน และอัตราส่วนความปลอดภัย [3,4] และระยะห่างจากบริเวณขุด[5]การศึกษาดังกล่าวต้องใช้ข้อมูลตรวจวัดในอดีตจำนวนที่มากพอในการพัฒนาสมการ จากข้อจำกัดดังกล่าวสมการที่ผ่านมามีมักอยู่ในรูปแบบฟังก์ชันกับปัจจัยอิทธิพลเพียงหนึ่งหรือสองตัว เพื่อแก้ไขข้อจำกัดเกี่ยวกับจำนวนข้อมูลตรวจวัดและปัจจัยอิทธิพล Kung et al.[6] ได้เสนอแนวคิดและวิธีการสร้างข้อมูลเทียมค่าการเคลื่อนตัวของดินและกำแพงกันดินจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขงานขุดลึกโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method, FEM) โดยมีการปรับเทียบผลการวิเคราะห์กับผลตรวจวัดจริงกรณีศึกษา ก่อน ด้วยวิธีนี้สามารถได้ค่าการเคลื่อนตัวของดินและกำแพงกันดินจากตัวแปรปัจจัยอิทธิพลที่

หลากหลายมากขึ้นจากการวิเคราะห์ตัวแปร (Parametric study) ส่งผลให้สามารถคำนึงถึงปัจจัยอิทธิพลต่างๆที่มากขึ้นในการสร้างสมการได้สำหรับงานขุดลึกในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ ได้มีความพยายามที่จะใช้หลักการดังกล่าว[7] ซึ่งเมื่อนำมาใช้ทำนายค่าตรวจวัดจริงของกรณีที่มีการเก็บรวบรวม ปรากฏว่าให้การทำนายในระดับที่น่าพอใจ

เนื่องจากการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มในระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างงานขุดลึกไม่สามารถทำได้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ขยายการนำวิธีดังกล่าวเพื่อพัฒนาสมการเพื่อทำนายการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ด้วยการวิเคราะห์เชิงถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปร (Multiple linear regression) ครอบคลุมปัจจัยอิทธิพลต่างๆ เช่น ความลึกของการขุดดิน ระยะห่างของเสาเข็มถึงกำแพงกันดิน คุณสมบัติต่างๆของชั้นดินและความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน เพื่อเป็นเครื่องมือในการประเมินเบื้องต้นผลกระทบจากการขุดลึกต่อเสาเข็มข้างเคียง

## 2. การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการสร้างสมการเพื่อประมาณค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ด้วยการวิเคราะห์เชิงถดถอยแบบเชิงเส้น ให้ได้สมการที่แม่นยำ และครอบคลุมกับการใช้งาน จำเป็นต้องใช้ข้อมูลในการวิเคราะห์จำนวนมาก ซึ่งข้อมูลเกี่ยวกับพฤติกรรมของเสาเข็มที่ได้รับผลกระทบจากการขุดดินลึกนั้น ไม่มีการตรวจวัดจริงและการทดลองด้วยการจำลองเสมือนจริงนั้นก็ทำได้ค่อนข้างยาก มีค่าใช้จ่ายที่สูง และใช้เวลาในการทำงาน การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเสาเข็มในแต่ละกรณีด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถจำลองความซับซ้อนต่างๆได้ดี สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการศึกษาที่ใช้โปรแกรม PLAXIS 3D เวอร์ชัน 2013.1[8]

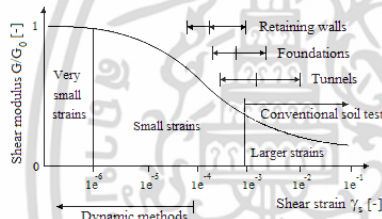
### 2.1 ชนิดของแบบจำลองดิน (Soil model)

ชนิดของแบบจำลองดิน (Soil model) ในการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นสิ่งที่ส่งผลต่อความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ โดยแบบจำลองสำหรับดินเหนียวในการศึกษานี้ คือแบบจำลอง HSsmall (Hardening

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Soil model with small strain stiffness) [9,10] ซึ่งเป็นแบบจำลองดินแบบอิลาสโตพลาสติกที่พิจารณาค่าสตีเฟนของดินแบบอิลาสติก ในช่วงความเครียดต่ำ (small strain) ซึ่งเป็นช่วงของพฤติกรรมเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินดังรูปที่ 1 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  $G/G_0 = 0.7$  [13] แบบจำลองชนิดนี้ ได้ถูกตรวจสอบและนำมาใช้ในการวิเคราะห์การก่อสร้างต่างๆในชั้นดินกรุงเทพฯ [11]

สำหรับชั้นดินถม และชั้นทรายใช้แบบจำลองพฤติกรรมของดินแบบอิลาสติก-พลาสติกแบบสมบูรณ์ตามทฤษฎี Mohr-Coulomb (MC) โดยพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาได้อ้างอิงจากการศึกษาก่อนหน้า [11,12] ดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะพฤติกรรมระหว่างค่าสตีเฟนและความ

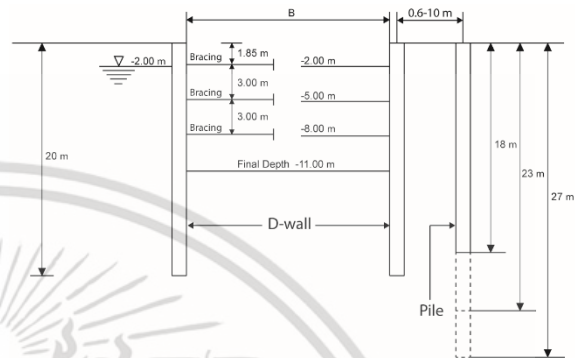
ความเครียดของดินในการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการก่อสร้างชนิดต่างๆ [9]

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของแบบจำลอง ที่ใช้ศึกษา [7,11,12]

ตัวแปร	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	-
$\gamma_{0.7}$ [-]	-	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$	-
$\gamma_s$ [kN/m <sup>3</sup> ]	17	16	18	20
$\nu'$ [-]	0.3	0.33	0.33	0.2
$\phi'$ [°]	22	0	0	36
$c$ [kPa]	15	15-34	87-132	1
$m$ [-]	-	1	1	-

2.2 ลักษณะของแบบจำลอง

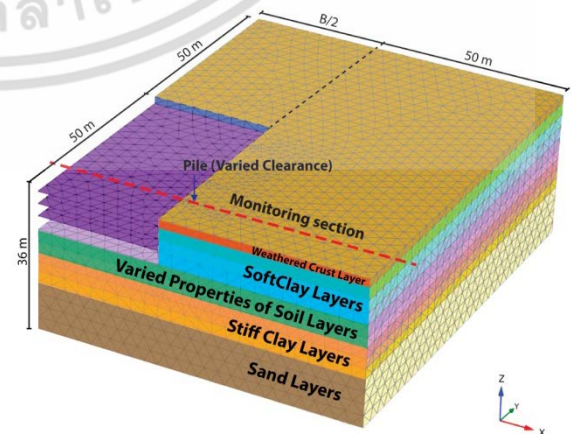
ความลึกของแต่ละชั้นในการขุดดิน รวมถึงขั้นตอนการทำงาน ระดับของค้ำยัน และตำแหน่งของเสาเข็ม ในกรณีต่างๆที่จำลองขึ้นมา แสดงดังรูปที่ 2 ความลึกของการขุดดิน อยู่ที่ 2, 5, 8 และ 11 เมตร ค้ำยันอยู่ที่ระดับ 1.85, 4.85, 7.85 และ 10.85 เมตร



รูปที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของการขุดดินในการศึกษานี้

2.3 โครงข่ายแบบจำลอง

รูปที่ 3 แสดงให้เห็นถึงโครงข่าย (meshes) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยทำการวิเคราะห์ในรูปแบบ 3 มิติ โดยตำแหน่งของเสาเข็ม เป็นบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบจาก corner effect และจากรูปที่เห็นว่าจะมีชั้นดินที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดิน (varied properties of soil layer) ดินชั้นดังกล่าว จะมีคุณสมบัติเป็นดินเหนียวอ่อน หรือดินเหนียวแข็งตามตารางที่ 1 ขึ้นอยู่กับช่วงความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนที่พิจารณาในแต่ละกรณี ซึ่งความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ดังจะอธิบายในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3 โครงข่ายแบบจำลองของกรณีศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของโครงข่ายแบบจำลองในแนวราบ มีความกว้างและยาวถัดไปด้านหลังกำแพงกันดิน 50 เมตร ในแนวตั้งจะมีความลึกครอบคลุมไปจนถึงความลึกสุดท้ายของชั้นทรายชั้นแรกประมาณ 36 เมตรจากผิวดิน เพื่อให้ครอบคลุมบริเวณทั้งหมดที่อาจจะได้รับผลกระทบจากการเคลื่อนตัวของดิน นอกจากนี้ แบบจำลองกำหนดความกว้างของบริเวณที่ขุดดินเพียงหนึ่งในสี่เท่านั้น เพราะถือว่าการขุดมีลักษณะสมมาตร (symmetric) ชนิดของแบบจำลองของกำแพงกันดินจะจำลองในรูปแบบของแผ่นบาง (plate) และเสาเข็ม จะจำลองในรูปแบบของ embedded pile โดยพารามิเตอร์ของกำแพงกันดินและเสาเข็ม แสดงในตารางที่

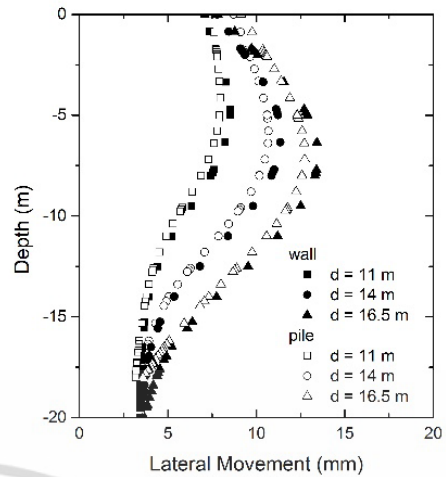
2

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของกำแพงกันดินและเสาเข็มที่ใช้ในการศึกษา [7,11]

ตัวแปร	กำแพงกันดิน	เสาเข็ม	
E	[kPa]	$1.5 \times 10^7$	$2.6 \times 10^7$
$\nu$	[-]	0.15	0.15

#### 2.4 ปัจจัยที่ใช้ในการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการศึกษาที่ผ่านมา [5,6] ได้แสดงให้เห็นถึงตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อผลการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินซึ่งตัวแปรที่จะนำมาพิจารณาเพื่อสร้างข้อมูลเทียบได้แก่ ขนาดของบริเวณที่ทำการขุดดิน (B), ความลึกของการขุดดิน ( $H_c$ ), ขนาดของกำแพงกันดิน (t) ซึ่งขนาดของกำแพงกันดินจะพิจารณาในรูปแบบของ system stiffness ประกอบด้วย flexural stiffness (EI) ระยะห่างเฉลี่ยของค้ำยัน ( $h_{avg}$ ) และหน่วยน้ำหนักของน้ำ ( $\gamma_w$ ), ขนาดของเสาเข็ม (D) จะพิจารณา flexural stiffness (EI), ความลึกของเสาเข็ม (Depth), ระยะห่างระหว่างเสาเข็มกับกำแพงกันดิน (Clearance), Normalize shear strength ( $S_u/\sigma'_v$ ) และ Normalize initial shear modulus ( $G_0/\sigma'_v$ ) ของดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง โดยงานวิจัยนี้ยังได้พิจารณาเพิ่มเติม ถึงผลกระทบที่เกิดจากความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน (d) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า เมื่อชั้นดินเหนียวอ่อนหนาขึ้น กำแพงกันดินและเสาเข็ม มีแนวโน้มการเคลื่อนตัวที่มากขึ้นเช่นกัน

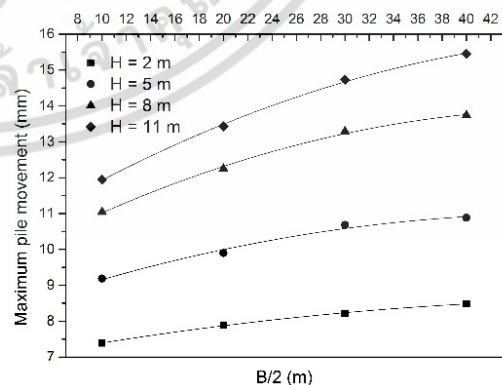


รูปที่ 4 การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินและเสาเข็ม

### 3. ขั้นตอนการสร้างสมการ

#### 3.1 ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆและค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่ได้จากการวิเคราะห์

หลังจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แล้ว จะได้ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเข็ม ในแต่ละกรณี โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเข็มที่ได้จากแบบจำลองกับปัจจัยต่างๆเป็นความสัมพันธ์เป็นแบบพาราโบลา ตัวอย่างเช่นรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของการขุดดินโดยพิจารณาเพียงครั้งเดียว (B/2) ในแกน x กับค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่เกิดขึ้น ในแกน y ซึ่งได้สมการของฟังก์ชันพาราโบลา แสดงในสมการที่ (1) ต้องนำไปเปลี่ยนรูปให้อยู่ในรูปแบบสมการเชิงเส้นเพื่อเข้าสู่การวิเคราะห์เชิงถดถอยต่อไป



รูปที่ 5 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับตัวแปรที่พิจารณากรณีความกว้างของการขุดดิน โดยพิจารณาเพียงครั้งเดียว

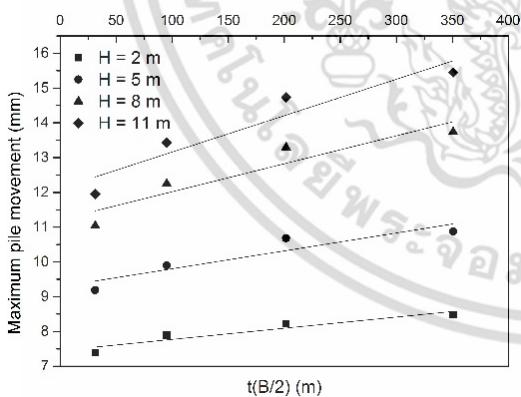
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X = t(x) = ax^2 + bx + c \quad (1)$$

โดยในงานวิจัยนี้ a, b, c คือสัมประสิทธิ์ตัวคูณของสมการพาราโบลา  $x$  คือ ค่าของตัวแปรก่อนการปรับแก้  $X$  คือค่าของตัวแปรหลังการปรับแก้ ซึ่งขั้นตอนการปรับแก้อธิบายในหัวข้อถัดไป

**3.2 วิธีการปรับแก้ความสัมพันธ์ของปัจจัยกับค่าการเคลื่อนตัวให้อยู่ในรูปแบบเชิงเส้น**

การสร้างสมการ โดยวิธีการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปร จำเป็นจะต้องทำให้ปัจจัยมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับค่าการเคลื่อนตัวสูงสุด ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัว กับปัจจัย (ค่า  $x$  ในสมการ 1) ได้แก่ค่าปัจจัยต่างๆของซ้ายมือสุดของตารางที่ 3) ซึ่งยังไม่สัมพันธ์กับแบบเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้นโดยใช้หลักการเปลี่ยนรูปแบบ (Transformation) ซึ่งในการศึกษานี้เลือกใช้ความสัมพันธ์แบบพาราโบลา (ตัวอย่างเช่น แทนค่า  $x$  ลงในสมการ(1)) เพื่อให้ได้ค่าแปลง (ค่า  $X$  ในสมการ(1)) ซึ่งค่าแปลงนี้จะมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับค่าการเคลื่อนตัวสูงสุด ดังรูปที่ 6 แสดงตัวอย่างของความสัมพันธ์ความกว้างของการขุดดินที่ปรับแก้แล้ว ( $t(B/2)$ ) ในแกน  $x$  กับค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่เกิดขึ้น ในแกน  $y$



**รูปที่ 6** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับความกว้างของการขุดดินโดยพิจารณาเพียงครั้งเดียว หลังปรับรูปแบบ

การเลือกใช้ค่าปรับแก้สมการพาราโบลา จะพิจารณาเลือกจากเส้นกราฟที่มี  $R^2$  สูงสุด แล้วนำไปใช้กับกราฟเส้นอื่นๆสำหรับปัจจัยเดียวกัน ซึ่งจากการเลือกใช้ ค่า  $R^2$  มีค่าตั้งแต่ 0.97-0.99 ตารางที่ 3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ตัว

คูณของสมการพาราโบลาของแต่ละปัจจัย โดยช่วงที่พิจารณาในตาราง หมายถึงช่วงของข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังนั้นข้อมูลที่ใช้ในการทำนายควรจะอยู่ในช่วงเดียวกันนี้

**ตารางที่ 3** สัมประสิทธิ์ตัวคูณของสมการพาราโบลา

ตัวแปร	ช่วงที่พิจารณา	สัมประสิทธิ์ตัวคูณในสมการที่ (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
$\ln(EI)[kN\cdot m^2]$	12.2-15	1.29571	-0.05233	2.83726
Depth [m]	15-23	-0.30217	0.00683	13.905
Clearance[m]	0.6-10	-0.53006	0.01075	9.65076
$S_{u,so}/\sigma'_v$	0.27-4	-29.8288	30.95466	17.32238
$S_{u,st}/\sigma'_v$	0.45-1.05	-0.67076	0.31429	8.54234
$G_{0,so}/\sigma'_v$	123-315	-0.13307	1.75E-04	28.66613
$G_{0,st}/\sigma'_v$	375-975	-0.00626	3.23E-06	10.96663
$d$ [m]	11-16.5	0.8257	0.01988	-2.166

**3.3 สร้างสมการด้วยการวิเคราะห์เชิงถดถอย**

จากขั้นตอนในหัวข้อที่ 3.2 นำปัจจัยที่ปรับค่าแล้วมาเข้ากระบวนการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปรเพื่อสร้างสมการสำหรับทำนายการเคลื่อนตัวของเสาเข็มในงานขุดดินลึกแบบมีค้ำยัน ดังสมการที่ (2) และมีค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรสำหรับสมการ ดังตารางที่ 4

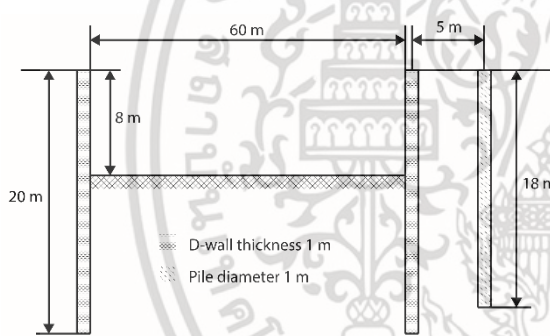
$$\delta_m = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_5X_5 + b_6X_6 + b_7X_7 + b_8X_8 + b_9X_9 + b_{10}X_{10} + b_{11}X_{11} \quad (2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 สัมประสิทธิ์ของตัวแปร สำหรับสมการที่ (2)

Subscript	X	b
0	-	5.0462
1	$t(B/2)$	0.0081
2	$t(H_c)$	0.0481
3	$t(\ln(EI/\gamma_w h_{avg}^4))$	0.0186
4	$t(\ln(EI))$	0.0006
5	$t(\text{Depth})$	0.0053
6	$t(\text{Clearance})$	0.0916
7	$t(S_{u,so}/\sigma'_v)$	-0.7441
8	$t(S_{u,st}/\sigma'_v)$	3.4575
9	$t(G_{0,so}/\sigma'_v)$	0.0008
10	$t(G_{0,st}/\sigma'_v)$	0.0006
11	$t(d)$	0.0467

## 4. การทำนายค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม



รูปที่ 7 กรณีตัวอย่าง เพื่อแสดงการทำนายโดยใช้สมการ

ตัวอย่างการทำนายค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มจากงานขุดดินลึกข้างเคียง ที่มีลักษณะดังรูปที่ 7 และมีตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ ดังนี้

- ขนาดของงานขุด 60 เมตร ( $B/2 = 30$  m)
- ขุดดินลึก 8 เมตร ( $H_c = 8$  C)
- กำแพงกันดินหนา 1 เมตร ( $E = 1.5 \times 10^7$  kPa,  $I = 1/12$  m<sup>4</sup>,  $\gamma_w = 9.81$  kN/m<sup>3</sup>,  $h_{avg} = 3$  m และ  $\ln(EI/\gamma_w h_{avg}^4) = 7.64848475$ )
- เสาเข็มมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร ( $E = 2.6 \times 10^7$  kPa,  $I = 0.0491$  m<sup>4</sup> และ  $\ln(EI) = 14.3263362$ )
- เสาเข็มลึก 18 เมตร ( $\text{Depth} = 18$  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 ( $G_{0,so}/\sigma'_v = 210$ ,  $G_{0,st}/\sigma'_v = 675$ )

- บริเวณงานประกอบด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 14 เมตร อยู่ด้านบน และด้านล่างเป็นชั้นดินเหนียวแข็ง ( $d = 14$  m)

ขั้นตอนที่ 1 คือการปรับแก้ค่าตัวแปร โดยแทนค่าของตัวแปรเป็นค่า  $x$  ในสมการที่ (1) และมีสัมประสิทธิ์ตัวคูณของสมการพาราโบลิกดังตารางที่ 3

ตัวอย่างเช่น  $B/2 = x = 30$  m จากตารางที่ 3  $a = 0.213$ ,  $b = -0.0019$  และ  $c = 9.99$  แทนค่าในสมการที่ (1) ได้  $X = 201.633$  m ค่าปรับแก้ของตัวแปรอื่นๆแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตัวอย่างการปรับแก้ตัวแปร

ตัวแปร	x	X
$B/2$ [m]	30	201.633
$H_c$ [m]	8	76.7161
$\ln(EI/\gamma_w h_{avg}^4)$	7.64848475	-538.2877
$\ln(EI)$	14.3263362	268.0241
$\text{Depth}$ [m]	18	-83.8751
$\text{Clearance}$ [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 คือการนำค่าตัวแปรที่ปรับแก้แล้วมาประมาณค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ด้วยสมการที่ (2) ซึ่งมีสัมประสิทธิ์ของตัวแปร ดังตารางที่ 4 ค่าที่ใช้ในสมการที่ (2) ของกรณีตัวอย่างนี้ แสดงในตารางที่ 6

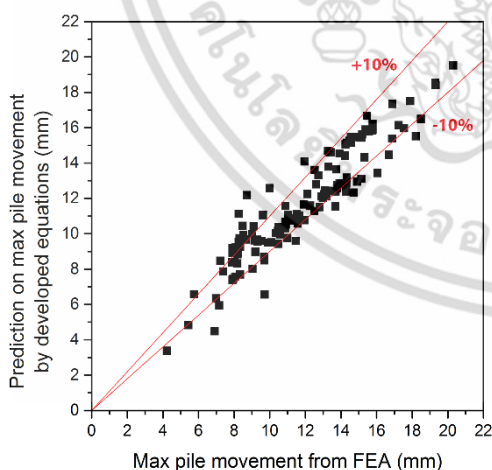
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 สัมประสิทธิ์ของตัวแปร สำหรับสมการที่ (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 ( $\delta_m$ )			11.685

จากตัวอย่างการใช้สมการ เพื่อทำนายค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็มจากงานขุดดินลึกข้างเคียง ในกรณีนี้ ได้ค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเสาเข็ม 11.685 มิลลิเมตร ซึ่งในเงื่อนไขเดียวกัน ได้ค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างจากไฟไนต์เอลิเมนต์ 11.93 มิลลิเมตร

5. ผลการวิเคราะห์



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ทำนายโดยสมการกับค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

จากสมการที่พัฒนาขึ้นเมื่อนำมาใช้ทำนายกลับ การเคลื่อนตัวของเสาเข็มจากค่าปัจจัยอิทธิพลต่างๆ พบว่าค่าการเคลื่อนตัวที่ทำนายได้จากสมการที่ (2) เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าการเคลื่อนตัวจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์มีแนวโน้มเป็นที่น่าพอใจดังรูปที่ 7 คือ ชุดข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ใกล้เส้น 45 องศา และมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงขอบเขตร้อยละ 10 ของข้อมูล

6. สรุปผล

งานวิจัยนี้พัฒนาสมการสำหรับประเมินเบื้องต้น ค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มจากการขุดลึกในบริเวณใกล้เคียง โดยเสนอการใช้การวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปรกับข้อมูลที่สร้างขึ้นจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ มีรูปแบบการใช้งานโดยการปรับแก้ค่าตัวแปรแต่ละตัวด้วยสมการพาราโบลา จากนั้นนำค่าที่ปรับแก้แล้วมาทำนายการเคลื่อนตัวด้านข้างด้วยสมการเส้นตรง

เมื่อเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวที่ทำนายได้จากสมการกับค่าการเคลื่อนตัวจากไฟไนต์เอลิเมนต์ได้การทำนายที่น่าพอใจถึงแม้ว่าจะมีการกระจายตัวอยู่บ้าง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยและวิชาการตามแผนกลยุทธ์เพื่อพัฒนาภาควิชาวิศวกรรมโยธา มจร. (CE-KMUTT 6001) นอกจากนี้ผู้เขียนขอแรกขอขอบคุณทุนวิจัยจากโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) และบริษัท ดี ทุ คอนซัลท์ เอเชีย จำกัด ภายใต้สัญญาเลขที่ MSD58I0136

7. เอกสารอ้างอิง

[1] C.F.Leung, Y.K. Chow, R.F. Shen, "Behavior of pile subject to excavation-induced soil movement," Journal of Geotechnical and Geoenv. Engrg, vol. 126, pp. 947-954, 2000.

[2] H.G. Poulos, L.T. Chen, "Pile response due to excavation induced lateral soil movement," Journal of Geotechnical and Geoenv. Engrg, vol. 123(2), pp. 94-99, 1997.

- [3] A.I.Mana, and G.W.Clough, "Prediction of movements for braced cuts in clay," *Journal of Geotech. Engrg*, vol.107, pp. 759-777, 1981.
- [4] C.Moormann, "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, pp.87-98, 2004.
- [5] G.W.Clough, T.D.O'Rourke, "Construction induced movement of in situ walls," in *Proceeding of Design and Performance of Earth Retaining Structure*, Geotechnical Special Publication No. 25, pp. 493-470, 1990.
- [6] G. T. C. Kung, C. H. Juang, E. C. L. Hsiao, Y.M. A. Hashash, "Simplified model for wall deflection and ground-surface settlement cause by braced excavation in clays," *Journal of Geotechnical and GeoenvironmentEngineering*, vol. 133, pp. 731-747, 2007.
- [7] A. Wonglert, P. Jongpradist, T. Kalasin, C. Submanee Wong, W. Kongkitkul, S. Youwai, "Semi-Empirical Equations for Predicting Wall Movements Due to Deep Excavation in Bangkok Soft Soil" in *Proceeding of World Tunnel Congress 2012*, Bangkok.
- [8] PLAXIS Version 8 Manual. A.A. Balkema Publishers, 2013.
- [9] J.H. Atkinson, G.Salfors, "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, pp. 915-956, 1991.
- [10] T.Schanz, P.A.Vermeer, P.G.Bonnier, "The hardening soil model: formulation and verification," in *Proceedings of Beyond 2000 in Computational Geotechnics-10 years of Plaxis*, pp. 281-296, 1999.
- [11] P.Jongpradist, T.Kaewsri, A.Sawatpanich, S.Suwansawat, S.Youwai, W.Kongkitkul, J.Sunitsakul, "Development of tunneling influence zones for adjacent pile foundations by numerical analyses," *Tunnelling and Underground Space Technology* 34, pp.96-109, 2013.
- [12] R.E.Prust, J.Davies, S.Hu, "Pressure meter investigation for mass rapid transit in Bangkok, Thailand," *Journal of the Transportation Research Board*, Transportation Research of the National Academies, Washington, DC, 1928, pp.207-217, 2005.
- [13] S.Likitlersuang, S.Teachavorasinskun, C.Surarak, E.Oh, A.Balasubramaniam, "Small Strain stiffness and stiffness degradation curve of Bangkok Clays," *Journal of Soils and Foundations* 53(4), pp. 498-509, 2013.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้