



# ผลกระทบของเครื่องมือตรวจวัดต่อการตรวจวัดการถ่ายแรงของ เสาเข็มดินซีเมนต์ภายใต้การรับแรงในแนวแกน

## Effects of Instrumentation Devices on Load Transfer Measurement of Deep Cement Mixing Piles under Axial Loading

ธนัญญ์ โยนจอหอ พรเกษม จงประดิษฐ์\* และ สิริวรรณ ไวยชิตา  
TananatYonjoho, Pornkasem Jongpradist\* and Siriwan Waichita  
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140  
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,  
King Mongkut's University of Technology Thonburi,  
Bangmod, Thung Khru, Bangkok 10140, Thailand  
\*E-mail: pornkasem.jon@kmutt.ac.th, Telephone Number: 0-2470-9305

### บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาผลกระทบของอุปกรณ์ตรวจวัดต่อการตรวจวัดการถ่ายแรงของเสาเข็มดินซีเมนต์ภายใต้การรับแรงในแนวแกนในชั้นดินกรณีศึกษา โดยใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อประเมินอิทธิพลของความถี่และขนาดของอุปกรณ์ตรวจวัด การศึกษานี้พิจารณาอุปกรณ์ตรวจวัดแบบ strain gauge ที่ติดตั้งบนแท่งทรงกระบอกตันแล้วฝังที่แกนกลางเสาเข็มดินซีเมนต์ในขณะก่อสร้าง จากการศึกษาพบว่าความถี่และขนาดของอุปกรณ์ตรวจวัดที่ฝังจะส่งผลกระทบต่อการตรวจวัดการถ่ายแรงของเสาเข็มดินซีเมนต์ถึงแม้ไม่กระทบต่อความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่หัวเข็มและการทรุดตัวอย่างเด่นชัด เมื่ออัตราส่วนระหว่างความถี่ของอุปกรณ์ตรวจวัดต่อเสาเข็มดินซีเมนต์และขนาดของอุปกรณ์ตรวจวัดยิ่งมากจะส่งผลกระทบต่อการตรวจวัดการถ่ายแรงในเสาเข็มดินซีเมนต์มากขึ้น ผลการศึกษาเสนอข้อแนะนำสำหรับการเลือกวัสดุและขนาดของอุปกรณ์ตรวจวัดที่สัมพันธ์กับเสาเข็มดินซีเมนต์ เพื่อจำกัดค่าความคลาดเคลื่อนของผลการตรวจวัดอย่างเหมาะสม

### ABSTRACT

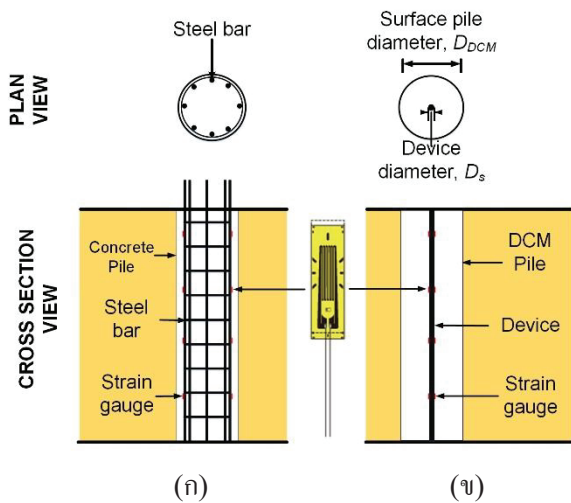
This study aimed at investigating the effects of installed instrumentation devices on load transfer measurement in deep cement mixing (DCM) piles under axial loading by series of numerical analyses. The configuration of the installed devices focused in this study is cylindrical bar on which the strain gauges are attached, before embedding into DCM piles during construction. The numerical study showed that, the stiffness and size of the instrument device have strong effect on the load transfer of DCM pile. Although insignificant effect on the load-settlement curves can be seen. The greater of stiffness ratio and area between the device and DCM pile are, the larger error of load transfer calculation is seen. The findings of this study are used to establish a guideline for the selection of an appropriate device material and its dimension in order to control the allowable measurement error.

Received 15 March 2018  
Revised 30 May 2018  
Accepted 21 June 2018

## 1. บทนำ

ในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา เทคนิคการทำเสาเข็มดินซีเมนต์หรือ Deep Cement Mixing (DCM) ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในด้านการปรับปรุงฐานรากของถนน สะพาน เขื่อนขนาดเล็ก โครงสร้างกำแพงกันดิน และในพื้นที่ดินอ่อน ปัจจุบันเทคนิค DCM เริ่มมีการนำไปใช้ในการรองรับอาคารบ้านเรือนขนาดเล็ก จึงทำให้ความเข้าใจในพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์ขณะรับแรงและกลไกการถ่ายแรงมีความจำเป็นยิ่งขึ้น

ประเด็นที่พบในการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงของเสาเข็มดินซีเมนต์ภายใต้เงื่อนไขสภาพการรับแรงในแนวแกนในปัจจุบันคือยังอาศัยองค์ความรู้การตรวจวัดการถ่ายแรงในเสาเข็มคอนกรีตมาใช้ที่เป็นการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (strain gauges) กับเหล็กเสริม ดังแสดงในรูปที่ 1(ก) จากนั้นนำค่าความเครียดที่อ่านได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งความลึกต่าง ๆ ไปแปลผลเป็นแรงที่ถ่ายลงสู่เสาเข็ม โดยคูณด้วยพื้นที่หน้าตัดและค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (elastic modulus) ของเสาเข็มคอนกรีตการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงในเสาเข็มดินซีเมนต์ได้มีความพยายามในการนำ strain gauges ไปติดกับวัสดุต่างๆ เช่น เหล็ก [1], Polyvinyl chloride (PVC) plastic pipe [2], Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) plastic pipe [4] และยาง [5] ที่มีขนาด



รูปที่ 1 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการถ่ายแรงสำหรับ (ก) เสาเข็มคอนกรีต (ข) เสาเข็มดินซีเมนต์ [3]

ต่าง ๆ กัน แล้วฝังที่แกนกลางเสาเข็มดินซีเมนต์ในขณะที่ก่อสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 1(ข) เพื่อทำการตรวจวัดค่าความเครียดในแต่ละความลึกจากนั้นแปลผลเป็นแรงที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มดินซีเมนต์ตามองค์ความรู้จากวิธีของเสาเข็มคอนกรีตโดยนำค่าความเครียดที่อ่านได้ในแต่ละความลึกคูณด้วยพื้นที่หน้าตัดและค่าความแกร่งของเสาเข็มดินซีเมนต์ อย่างไรก็ตามค่าความแกร่งระหว่างเสาเข็มคอนกรีตกับเหล็กเสริมจะมีความต่างกันประมาณ 10 เท่า ในขณะที่เสาเข็มดินซีเมนต์มีค่าความแกร่งต่ำกว่าเสาเข็มคอนกรีตมากจึงเป็นที่น่าสงสัยเกี่ยวกับการแปลผลจากความเครียดที่อ่านได้ในเสาเข็มดินซีเมนต์ตามแนวคิดของเสาเข็มคอนกรีตว่าจะยังคงความน่าเชื่อถือมากน้อยเพียงใด

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของความแกร่งและขนาดของตัวติดตั้ง strain gauge รูปทรงกระบอกตัน [4] ต่อการตรวจวัดการถ่ายแรงในเสาเข็มดินซีเมนต์ภายใต้การรับแรงในแนวแกนโดยวิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) เพื่อได้ข้อจำกัดของวิธีตรวจวัดแบบนี้และได้ข้อแนะนำสำหรับช่วงความแกร่งของวัสดุและขนาดที่เหมาะสม

## 2. วิธีการศึกษา

### 2.1 พฤติกรรมการถ่ายแรงในเสาเข็มดินซีเมนต์

ที่ผ่านมาสมมติฐานหลักที่ใช้คือ อุปกรณ์ที่ฝังกับเนื้อเสาเข็มดินซีเมนต์จะเสีรูปร่างไปด้วยกัน (compatible) จึงถือว่าค่าความเครียดที่อ่านได้เป็นตัวแทนของเสาเข็มดินซีเมนต์ จากนั้นนำค่าความเครียดที่อ่านได้มาแปลผลเป็นแรงที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มดินซีเมนต์ในแต่ละความลึกได้โดยการคำนวณตามสมการที่ 1

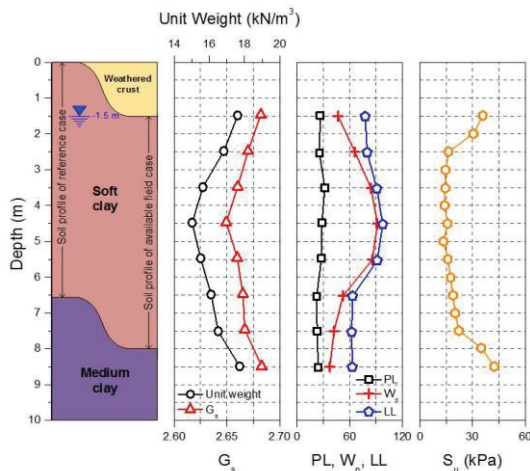
$$P_i = A_p \times E_p \times \varepsilon_i \quad (1)$$

เมื่อ  $P_i$  หมายถึง แรงตามแนวแกนที่ระดับความลึกต่างๆ (กิโลนิวตัน),  $A_p$  หมายถึง พื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม (ตารางเมตร),  $E_p$  หมายถึง ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของเสาเข็ม (กิโลนิวตันต่อตารางเมตร) และ  $\varepsilon_i$  หมายถึง

ค่าความเครียดที่อ่านได้จาก strain gauges ที่ระดับความลึกต่าง ๆ

### 2.2 กรณีศึกษา

งานนี้เลือกกรณีศึกษาการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) จังหวัด ปทุมธานี [6] เป็นกรณีต้นแบบ ลักษณะของชั้นดินของกรณีศึกษาแสดงดังรูปที่ 2 และมีระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ -1.5 เมตร



รูปที่ 2 สภาพชั้นดินของกรณีศึกษาที่ใช้ในการวิเคราะห์ [7]

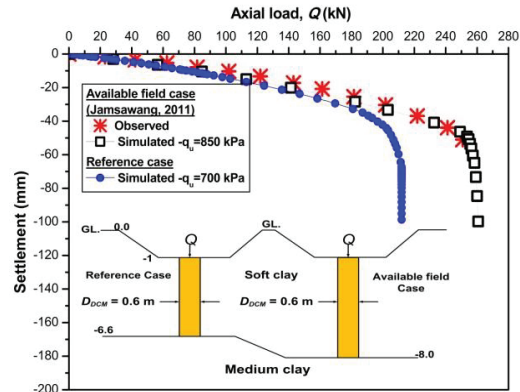
### 3. การวิเคราะห์เชิงตัวเลข

การศึกษานี้ใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D วิเคราะห์แบบสมมาตรแนวแกน (2D-Axisymmetric) ภายใต้เงื่อนไขการรับแรงในแนวแกนที่ทำให้การแปรเปลี่ยนค่าคุณสมบัติและขนาดของวัสดุที่ใช้ติด strain gauges

#### 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตารางที่ 1 แสดงพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ตรวจวัดที่ได้จากค่าคุณสมบัติของวัสดุจริง [8-9] และใช้ในการศึกษานี้ พารามิเตอร์ดินสำหรับการวิเคราะห์ แสดงในตารางที่ 2 โดยได้ผ่านการทดสอบเทียบกับผลทดสอบดินบริเวณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชียโดยงานวิจัยก่อนหน้า [7] เพื่อยืนยันความถูกต้องของวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษานี้ ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขกรณีต้นแบบถูก

นำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลตรวจวัดในสนามดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่า ผลจากการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับข้อมูลการตรวจวัดวิธีการวิเคราะห์และชุดพารามิเตอร์ที่ใช้จึงมีความเหมาะสมสำหรับการใช้ในการศึกษา [6]



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบผลการตรวจวัดในสนามกับผลจากวิธีวิเคราะห์ที่เชิงตัวเลข

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของอุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข [8-9]

Material	Model	$E'$ (MPa)	$\nu'$	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
Rubber	LE	100	0.48	8.81
PE Plastic Pipe (1)	LE	350	0.40	9.32
PE Plastic Pipe (2)	LE	700	0.40	9.32
ABS Plastic Pipe (1)	LE	1,400	0.34	10.79
ABS Plastic Pipe (2)	LE	2,180	0.34	10.79
PVC Plastic Pipe	LE	4,100	0.40	13.73
Steel	LE	197,000	0.3	78.5

หมายเหตุ: LE=Linear Elastic, PE=Polyethylene

#### 3.2 แบบจำลองและเงื่อนไขขอบเขต

แบบจำลองการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4 ประกอบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 เมตร ยาว 5.6 เมตร (ลดความยาวลงจากตัวต้นแบบเพื่อให้เหมาะสมกับแบบจำลองย่อส่วนที่กำลังดำเนินการ-ไม่ได้แสดงผลการศึกษาในบทความนี้) มีแผ่นเหล็ก (steel plate)

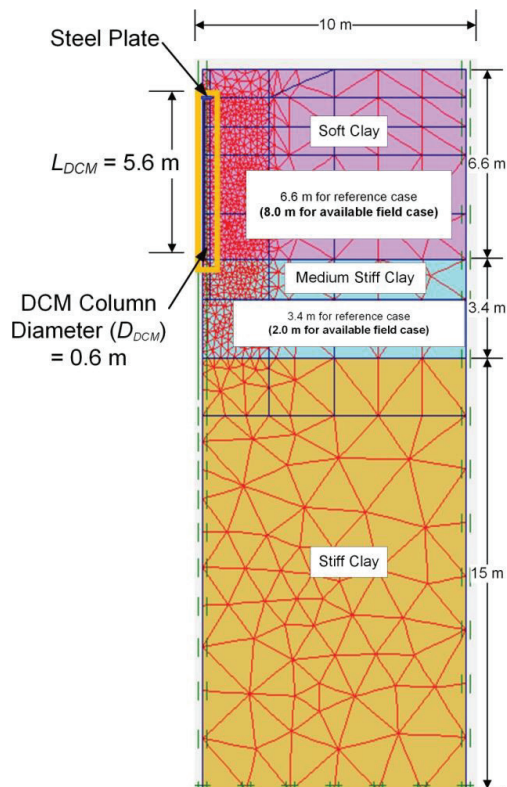
บริเวณด้านบนของเสาเข็มเพื่อกระจายแรงกระทำให้สม่ำเสมอทั้งหน้าตัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ และภายในเสาเข็มดินซีเมนต์จะมีการจำลองการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4, 8, 12 และ 16 เซนติเมตรยาว 5.6 เมตรในแต่ละกรณีของการวิเคราะห์ จะพิจารณาค่าตรวจวัดที่ความลึกต่าง ๆ โดยกำหนดชั้นดิน

ให้มีความกว้าง 10 เมตร ลึก 25 เมตรตามทิศทางแกน x และ y เงื่อนไขขอบที่ใช้ด้านล่างสุดของแบบจำลองได้ทำการจำกัดไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ในทุกทิศทาง เงื่อนไขขอบสำหรับด้านข้างของแบบจำลองจะทำการจำกัดไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ด้านข้างตามทิศทางของแกน x โดยทำการวิเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขแบบไม่ระบายน้ำ

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ดินที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข [7]

Material	Model	$E_{50}^{ref}, E'$ (MPa)	$E_{oed}^{ref}$ (MPa)	$E_{ur}^{ref}$ (MPa)	$\nu', \nu_{ur}$	m	$K_o^{NC}$	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$C'$ (kPa)	$\phi'$ (deg)	$R_f$	OCR	$p^{ref}$ (kPa)
Weathered Crust	MC	5	-	-	0.25	1	0.600	17	8	22	-	-	-
Soft Clay	HS	5	5	15	0.20	1	0.625	15	6	22	0.9	1.1	100
Medium Clay	HS	20	20	100	0.20	1	0.625	15	10	22	0.9	2.0	65
Stiff Clay	HS	60	60	180	0.20	1	0.625	18	18	22	0.9	2.5	95
DCM ( $q_u=700$ kPa)	MC	70	-	-	0.33	-	0.577	15	328	25	-	-	-

หมายเหตุ: HS=Hardening Soil, MC=Mohr-Coulomb



รูปที่ 4 โครงตาข่ายและเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

#### 4. ผลการศึกษา

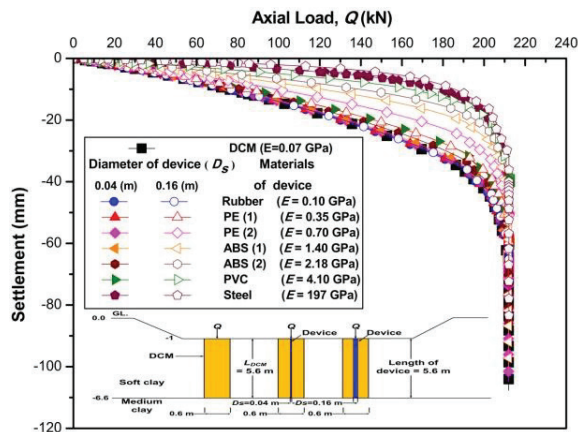
##### 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์

รูปที่ 5 แสดงเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่ให้กับการทรุดตัวที่หัวเสาเข็มดินซีเมนต์กรณีที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและกรณีมีอุปกรณ์ที่ค่าความแกร่งต่าง ๆ จากสัญลักษณ์ที่บแสดงกรณีขนาดอุปกรณ์ที่เล็กที่สุดในการศึกษา (4 เซนติเมตร) ในขณะที่สัญลักษณ์โปร่งแสดงผลของกรณีที่อุปกรณ์มีขนาดใหญ่ที่สุดในการศึกษา (16 เซนติเมตร)

สำหรับกรณีอุปกรณ์ขนาดเล็ก ในรูปที่ 5 พบว่า เส้นโค้งกรณีต่าง ๆ มีความคล้ายกันยกเว้นกรณีอุปกรณ์ติดตั้งเป็นเหล็ก (ค่าความแกร่งมากที่สุดในการศึกษา) เมื่อพิจารณาอย่างละเอียดจะเห็นได้ว่าที่น้ำหนักบรรทุกเดียวกันการทรุดตัวของกรณีที่อุปกรณ์ติดตั้งแกร่งกว่ามีค่าน้อยกว่า อย่างไรก็ตามค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มทุกกรณีที่คำนวณตามวิธีของ De Beer [10] นั้นมีค่าประมาณ 200 กิโลนิวตัน แสดงว่าความแกร่งและ

ขนาดของอุปกรณ์ติดตั้งไม่ส่งผลต่อกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มดินซีเมนต์ นอกจากนี้ ไม่ส่งผลการทรุดตัวในภาพรวมเช่นเดียวกัน หากค่าความแกร่งและขนาดของอุปกรณ์ติดตั้งไม่สูงมากเกินไป

เมื่อพิจารณากรณีขนาดอุปกรณ์ใหญ่ที่น้ำหนักบรรทุกเดียวกันค่าการทรุดตัวน้อยลงตามลำดับเมื่อความแกร่งของอุปกรณ์มีค่ามากขึ้น แสดงให้เห็นว่าขนาดอุปกรณ์ส่งผลค่อนข้างมากต่อพฤติกรรมทรุดตัว อย่างไรก็ตามเช่นเดียวกับกรณีก่อนหน้านี้ หากใช้วิธีคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกตามวิธีของ De Beer ค่าที่ได้ไม่ต่างกัน ทั้งนี้หากใช้วิธีการอื่นค่าแต่ละกรณีที่มีความแกร่งต่างกันอาจให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกต่างกัน

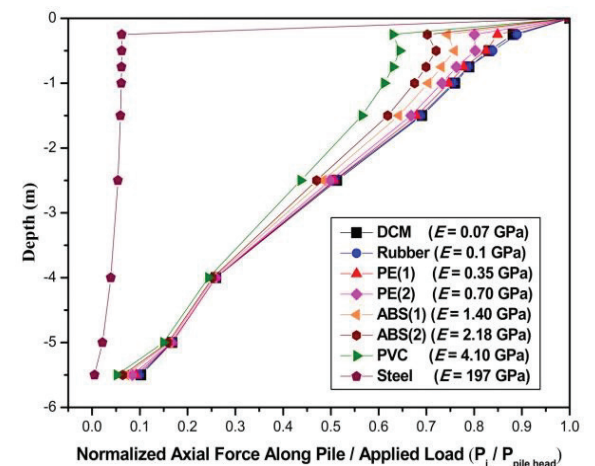


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์กรณีที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและกรณีมีอุปกรณ์ที่ค่าความแกร่งต่าง ๆ

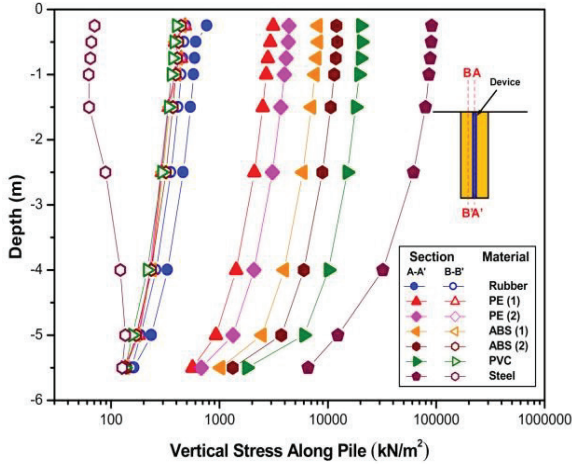
#### 4.2 พฤติกรรมถ่ายแรงตามความลึกของเสาเข็มดินซีเมนต์

รูปที่ 6 แสดงการถ่ายแรงของเสาเข็มดินซีเมนต์กรณีที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและกรณีมีอุปกรณ์ที่ค่าความแกร่งต่าง ๆ พบว่า หากมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดที่มีค่าความแกร่งสูงกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ส่งผลให้ค่าแรงที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มดินซีเมนต์ตามความลึกด้วยการคำนวณดังสมการที่ 1 นั้นมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด และมีค่าน้อยเมื่อค่าความแกร่งเพิ่มมากขึ้น จากการตรวจสอบพบว่าเป็นผลจากการที่ความเค้นใน

แนวตั้งที่ส่งถ่ายมาที่อุปกรณ์ตรวจวัดมากกว่าส่วนที่ส่งถ่ายลงสู่เสาเข็มดินซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยหน้าตัด A-A' และ B-B' แสดงการกระจายค่าความเค้นในแนวตั้งตามความลึกบริเวณอุปกรณ์ตรวจวัดและเสาเข็มดินซีเมนต์ตามลำดับ ทำให้สามารถอธิบายกลไกการถ่ายแรงได้ว่า เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ที่แกร่งกว่าลงไปบนเสาเข็มดินซีเมนต์ในขณะที่รับแรงร่วมกัน อุปกรณ์ที่แกร่งกว่าจะรับแรงด้วยอัตราส่วนต่อพื้นที่ที่มากกว่า ดังนั้นแรงที่เนื้อเสาเข็มดินซีเมนต์รับจึงน้อยกว่า ทำให้ค่าความเครียด (ซึ่งที่เกิดในอุปกรณ์และเนื้อดินซีเมนต์ซึ่งมีค่าเท่ากันตามหลัก strain compatibility) ลดลง ส่งผลให้การทรุดตัวของเข็มลดลง อย่างไรก็ตามแรงผลลัพธ์ (ในอุปกรณ์และเนื้อดินซีเมนต์) ที่แต่ละความลึกยังคงไม่ต่างไปจากเดิม เพราะในภาพรวมยังคงเป็นกลไกการถ่ายแรงสู่ดินรอบข้าง จากสิ่งที่ค้นพบข้างต้นบ่งชี้เป็นนัยว่าอัตราส่วนแรงที่รับโดยอุปกรณ์ส่งผลต่อการตรวจวัดการถ่ายแรงโดยตรง ดังนั้นนอกจากความแกร่งของอุปกรณ์ติดตั้ง (สัมพันธ์กับเสาเข็ม) แล้วขนาดหน้าตัด (สัมพันธ์กับหน้าตัดเสาเข็ม) จะมีบทบาทที่สำคัญเช่นเดียวกัน



รูปที่ 6 การถ่ายแรงตามความลึกในเสาเข็มดินซีเมนต์กรณีที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและกรณีมีอุปกรณ์ที่ค่าความแกร่งต่าง ๆ เมื่อให้แรงที่หัวเข็มเท่ากับน้ำหนักบรรทุกออกแบบ



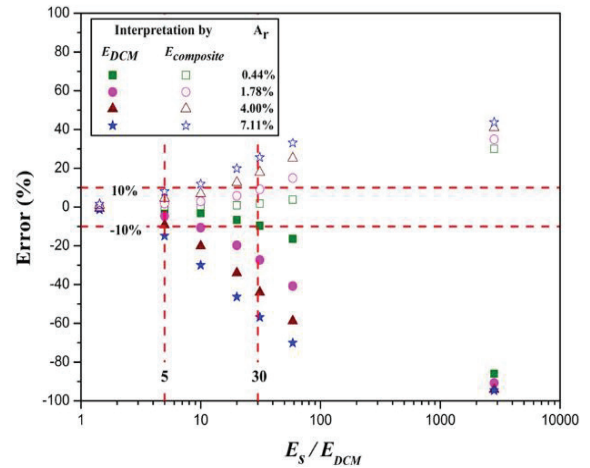
รูปที่ 7 การกระจายความเค้นในแนวดิ่งตามความลึกของเสาเข็มดินซีเมนต์เมื่อนำหน้าทับบรรทุกออกแบบ

### 4.3 ผลกระทบจากขนาดและความแกร่งของอุปกรณ์ต่อความคลาดเคลื่อนการตรวจวัดการถ่ายแรง

จากผลการค้นพบในส่วนก่อนหน้า เพื่อที่จะพิจารณาอิทธิพลของทั้งอัตราส่วนความแกร่ง และขนาดหน้าตัดของอุปกรณ์ตรวจวัดสัมพันธ์กับเสาเข็มดินซีเมนต์ร่วมกัน ส่วนนี้วิเคราะห์เชิงตัวแปร (parametric study) ด้วยการแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วนต่าง ๆ เนื่องจากกรณีวิเคราะห์มีจำนวนมาก และเพื่อการนำไปสู่ข้อแนะนำในทางปฏิบัติ จึงนำผลการวิเคราะห์มาคำนวณในรูปแบบของค่าความผิดพลาดในการวัดแรง โดยเทียบกับกรณีอ้างอิงที่ไม่มีอุปกรณ์ตรวจวัด รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดของการแปลผลจากการตรวจวัดการถ่ายแรงในเสาเข็มดินซีเมนต์กับอัตราส่วนความแกร่งของอุปกรณ์ตรวจวัดที่ 40 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มดินซีเมนต์เนื่องจากแรงที่ความลึกต่าง ๆ ไม่เท่ากัน การคำนวณค่าความผิดพลาดในการศึกษานี้จึงใช้พื้นที่ใต้กราฟการกระจายแรงตามความลึกและหารกลับด้วยความยาวของเสาเข็มเป็นตัวแทนแรงในแต่ละกรณีศึกษา ซึ่งค่าความผิดพลาดคำนวณตามสมการที่ 2 ทั้งนี้ทุกกรณีมีความยาวเสาเข็มเท่ากัน

$$Error = \left( \frac{F_{DCM} - F_s}{F_{DCM}} \right) \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ Error หมายถึง ค่าความผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์),  $F_{DCM}$  หมายถึง ตัวแทนแรงตามความลึกของกรณีที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด (กิโคโนวัติน) และ  $F_s$  หมายถึง ตัวแทนแรงตามความลึกของกรณีที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด (กิโคโนวัติน)



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดของแปลผลการตรวจวัดการถ่ายแรงกับอัตราส่วนความแกร่งของอุปกรณ์ตรวจวัดต่อเสาเข็มดินซีเมนต์

จากรูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่า เมื่ออัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของอุปกรณ์ตรวจวัดต่อเสาเข็มดินซีเมนต์ ( $A_r$ ) มีค่ามาก จะส่งผลให้การแปลผลความเครียดเป็นแรงที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มดินซีเมนต์ตามความลึกดังสมการที่ 1 มีค่าความผิดพลาดในการตรวจวัดมีค่าสูงขึ้น สำหรับกรณีที่อัตราส่วนความแกร่งของอุปกรณ์ตรวจวัดต่อเสาเข็มดินซีเมนต์น้อย ปัจจัยด้านขนาดของอุปกรณ์จะมีผลกระทบต่อ การตรวจวัดน้อย ในทางตรงกันข้ามผลกระทบจากขนาดของอุปกรณ์จะสูงขึ้นหากอัตราส่วนความแกร่งมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้หากหน้าตัดอุปกรณ์เล็กพอ (0.44%) สามารถควบคุมค่าผิดพลาดไม่ให้เกิน 10% ได้ด้วยใช้วัสดุที่ค่าอัตราส่วนความแกร่งไม่เกิน 30 เท่า หากพิจารณาหน้าตัดเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดด้วยหน้าตัดผสม (composite section) โดยใช้วิธีการแปรผลการตรวจวัดตามสมการที่ 1 แต่มีการปรับเปลี่ยนการคำนวณจากค่า  $E_{DCM}$  เป็น  $E_{composite}$  โดยคำนวณได้จากสมการที่ 3

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีหน้าตัดผสมแสดงด้วยสัญลักษณ์โปรงในรูปที่ 8 พบว่า ค่าความผิดพลาดของการแปลผลการตรวจวัดการถ่ายแรงมีค่าที่ลดลง แต่ความผิดพลาดเป็นการแปลผลได้แรงที่มากขึ้น หากควบคุมค่าผิดพลาดไม่ให้เกิน 10% สามารถใช้วัสดุอะไรก็ได้ในการศึกษานี้ (ยกเว้นเหล็ก) เมื่อใช้วัสดุติดตั้งขนาดเล็กพอ (0.44%) หรือสามารถใช้น้ำหนักที่ใหญ่ขึ้นได้ (1.78%) กับวัสดุที่ค่าอัตราส่วนความแข็งแรงไม่เกิน 30 เท่า แสดงให้เห็นว่าสามารถปรับลดความคลาดเคลื่อนได้จากการใช้ค่าความแข็งแรงของหน้าตัดผสม อย่างไรก็ตาม วิธีนี้จะสามารถแก้ไขความคลาดเคลื่อนจากการแปรผลการถ่ายแรงได้เท่านั้น แต่ไม่ครอบคลุมถึงเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับค่าการทรุดตัว

$$E_{composite} = \left[ \frac{(E_{DCM} \times A_{DCM}) + (E_s \times A_s)}{A_{DCM} + A_s} \right] \quad (3)$$

เมื่อ  $E_{composite}$  หมายถึง ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของวัสดุหน้าตัดผสม (กิโลนิวตันต่อตารางเมตร),  $E_{DCM}$  หมายถึง ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของเสาเข็มดินซีเมนต์ (กิโลนิวตันต่อตารางเมตร),  $E_s$  หมายถึง มอดุลัสยืดหยุ่นของอุปกรณ์ตรวจวัด (กิโลนิวตันต่อตารางเมตร),  $A_{DCM}$  หมายถึง พื้นที่หน้าตัดในส่วนของเสาเข็มดินซีเมนต์ (ตารางเมตร) และ  $A_s$  หมายถึง พื้นที่หน้าตัดในส่วนของอุปกรณ์ตรวจวัด (ตารางเมตร)

## 5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาผลกระทบของความแข็งแรงและขนาดอุปกรณ์ตรวจวัดต่อการตรวจวัดการถ่ายแรงในเสาเข็มดินซีเมนต์ สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ความแข็งแรงและขนาดของอุปกรณ์ตรวจวัดจะส่งผลกระทบต่อเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่ให้กับค่าการทรุดตัว โดยเมื่ออัตราส่วนความแข็งแรงและพื้นที่หน้าตัดระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัดกับเสาเข็ม

ดินซีเมนต์มีค่ามากขึ้น จะทำให้เสาเข็มเกิดการทรุดตัวที่น้อยลง แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มกับวิธีการหาค่าที่อ้างอิงกับความชันส่วนสุดท้ายของเส้นโค้ง

2) ค่าความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออุปกรณ์ตรวจวัดที่มีขนาดหน้าตัดใหญ่ต่อเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยเฉพาะเมื่ออัตราส่วนความแข็งแรงต่างกันมาก

3) จากผลการศึกษาที่ได้สามารถนำมาพัฒนาเป็นข้อแนะนำสำหรับการเลือกวัสดุและขนาดของอุปกรณ์ตรวจวัดที่เหมาะสมเพื่อให้ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการตรวจวัดมีค่าต่ำกว่า 10% สามารถทำได้ดังนี้

- สำหรับการแปลผลตามแนวคิดของเสาเข็มคอนกรีตควรเลือกขนาดของอุปกรณ์ตรวจวัดที่มีอัตราส่วนพื้นที่ต่ำกว่า 4.0% สำหรับกรณีที่อุปกรณ์ตรวจวัดมีค่าความแข็งแรงมากกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ไม่เกิน 5 เท่า แต่ในกรณีที่อัตราส่วนค่าความแข็งแรงของอุปกรณ์ตรวจวัดต่อเสาเข็มดินซีเมนต์อยู่ระหว่าง 5 ถึง 30 เท่า ควรเลือกขนาดอุปกรณ์ตรวจวัดที่มีอัตราส่วนพื้นที่ต่ำกว่า 0.44%

- สำหรับการแปลผลตามแนวคิดของของหน้าตัดผสมสำหรับกรณีที่อุปกรณ์ตรวจวัดมีค่าความแข็งแรงมากกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ไม่เกิน 5 เท่า ไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยด้านขนาด แต่ในกรณีที่ค่าความแข็งแรงของอุปกรณ์ตรวจวัดสูงกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์อยู่ระหว่าง 5 ถึง 30 เท่า ควรเลือกขนาดอุปกรณ์ตรวจวัดที่มีอัตราส่วนพื้นที่ต่ำกว่า 1.78% อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ยังเป็นการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเท่านั้นควรมีการทดสอบโดยติดตั้ง strain gauges กับวัสดุที่มีขนาดและความแข็งแรงที่ต่างกันเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดเพื่อยืนยันผลการศึกษานี้

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่สนับสนุนทุนวิจัยและวิชาการตามแผนกลยุทธ์ เลขที่ทุน CE-KMUTT-6212

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Isenhower, W. M., Arrellaga, J.A., Wang, S.T. and Johnson, J. O. Experience with Geojet Piles in Sandy Clays. Soil Improvement for Big Digs, Geotechnical Special Publication 1998; 81, pp. 72-82.
- [2] Kataoka, K., Goto., T., Ogino, T., Shimizu, K. and Nakano, K. Bearing Capacity of a Soil-Cement Column in Soft Ground. Central Research Laboratory, Osaka Cement Co., Ltd., Osaka, Japan, 1992; 149-166.
- [3] Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd, (2018). Strain Gages. [Online] available: <http://www.kyowa-ei.com/>
- [4] Duan, J. and Oweis, I. Load Transfer of Cement-Soil Column by Full Scale Load Test in Soft Clay. International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Apr 13-17, 2004, New York, USA, 8(33).
- [5] Piromyaporn, S. Field Behavior of Soil Cement Column Under Axial Loading. Master of Engineering Thesis, Geotechnical Engineering Program, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 2009.
- [6] Jamsawang, P., Bergado, D.T. and Voottipruex, P. Field Behavior of Stiffened Deep Cement Mixing Columns. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement, 2011; 164(1): 33-49.
- [7] Phutthananon, C., Jongpradist, J., Yensri, P. and Jamsawang, P. Dependence of Ultimate Bearing Capacity and Failure Behavior of T-Shaped Deep Cement Mixing Piles on Enlarged Cap Shape and Pile Strength. *Computers and Geotechnics*, 2018; 97: 27-41.
- [8] Material Properties of PVC. The European Council of Vinyl Manufacturers, Belgium, 2012, [Online] available: <http://www.pvc.org/en/>
- [9] Material Properties. Engineering Tool Box, 2009, [Online] available: <https://www.engineeringtoolbox.com/>
- [10] De Beer, E.E. and Walays, M. Franki Piles with Over Expanded Bases. La Technique des Travaux, Belgium, 1986; 333, pp. 48.