พฤติกรรมฐานรากเสาเข็มเจาะบนพื้นลาดเอียงภายใต้แรงกระทำด้านข้าง
BEHAVIOR OF BORED PILE FOUNDATION ON SLOPING GROUND UNDER LATERAL LOADING

วิทวัส คำทิพย์[1] สมบูรณ์ เชี่ยงฉิน[1,*] ปรีดา ไชยมหาวัน[1] และ ธนกร ชมภูรัตน์[1]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา
**Corresponding author; E-mail address: somboon.sh@up.ac.th*

บทคัดย่อ

พื้นที่ในภาคเหนือของประเทศไทยมีลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ราบสูงและมีความเสี่ยงที่จะเกิดแผ่นดินไหว จึงมีอาคารที่ก่อสร้างในบริเวณเชิงเขาและข้อคำถามเกี่ยวกับความแข็งแรงของฐานรากอาคารในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวจะถูกถามบ่อยครั้งจากผู้เข้าใช้อาคาร งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงทางด้านข้างของเสาเข็มเจาะที่ก่อสร้างบนเชิงเขาโดยทำการทดสอบ โครงสร้างเสาเข็มเจาะที่ใช้ในการศึกษามีต้นแบบจากอาคารที่พักบุคลากร มหาวิทยาลัยพะเยา ซึ่งเป็นอาคารที่ก่อสร้างบนเชิงเขา และทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์แบบจำลองเสาเข็มที่มีสปริงแทนแรงดันดินด้านข้าง ผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างเสาเข็มเจาะที่ทำการก่อสร้างบนเชิงเขาสามารถต้านทานแรงด้านข้างได้ดี และการวิเคราะห์เสาเข็มที่มีสปริงเป็นแรงดันดินด้านข้างซึ่งวิศวกรใช้ออกแบบเสาเข็มกันทั่วไปแสดงถึงพฤติกรรมของเสาเข็มได้ในทางที่ปลอดภัยถึงแม้ว่าจะเป็นเสาเข็มบนพื้นลาดเอียง

คำสำคัญ: เสาเข็มคอนกรีต, แรงด้านข้าง, พื้นลาดเอียง

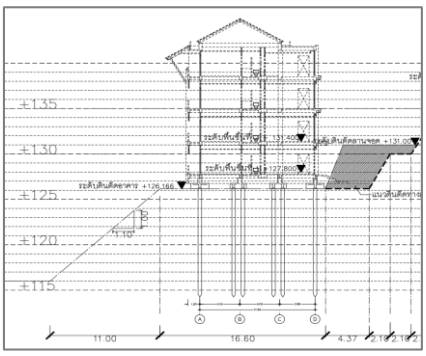
Abstract

The northern region of Thailand has a plateau landscape and a risk of earthquake. Buildings may be constructed on the sloping ground and a question about the strength of pile for resisting earthquake is asked many times from residents. The objectives of this research are to study the behavior of bored pile subjected to lateral loading by doing experiment, the details of bored pile are from the construction drawing of staff dormitory building at University of Phayao where is located on the area of sloping ground, and to compare the experimental results with the analysis of pile model with lateral spring which is taken into account lateral soil pressure. The results of this study show that the pile constructed on the sloping ground can resist the lateral load effectively. In addition, the analysis of pile with lateral spring that usually done by engineers can capture the behavior of pile subjected to lateral loading in the conservative way although the pile is on the sloping ground.

Keywords: Reinforced concrete piles, Lateral loading, Sloping ground

1. บทนำ

โครงสร้างส่วนฐานรากเป็นส่วนสำคัญอย่างมาก หากโครงสร้างฐานรากวิบัติจะส่งผลให้ทั้งโครงสร้างไม่สามารถใช้งานต่อไปได้ และการซ่อมแซมทำได้ยากมาก การออกแบบฐานรากจึงต้องพิจารณาถึงแรงกระทำต่าง ๆ อย่างรอบคอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่เสาเข็มต้องรับแรงกระทำทางด้านข้าง โดยทั่วไปการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างฐานรากเสาเข็มและดินรอบเสาเข็มนั้น จะทำการวิเคราะห์โดยการจำลองสปริงด้านข้างแทนแรงดันจากดินรอบเสาเข็ม ค่าสติฟเนสของสปริงขึ้นอยู่กับสภาพชั้นดินซึ่งต้องทำการเจาะสำรวจไว้ [1] อย่างไรก็ตาม แบบจำลองดังกล่าวจะใช้กับลักษณะภูมิประเทศที่เป็นที่ราบ แต่การก่อสร้างอาคารในพื้นที่ภาคเหนืออาจมีการตั้งอาคารในบริเวณที่ราบติดกับที่ลาดชัน ยกตัวอย่าง อาคารที่พักบุคลากรมหาวิทยาลัยพะเยา ได้มีการก่อสร้างบนที่ราบติดที่ลาดชัน อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดกว้าง 11.55 เมตร ยาว 61.20 เมตร มีจำนวนชั้นทั้งหมด 4 ชั้น เป็นโครงสร้างใช้ระบบเสาเข็มเจาะแห้งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม 0.35 เมตร และมีความลึก 12 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยความลาดชันของดินประมาณ 1 : 1.10 และรูปที่ 2 แสดงอาคารที่พักบุคลากรที่สร้างแล้วเสร็จ เมื่อให้บุคลากรได้เข้าพักอาศัยจะมีบุคลากรจำนวนมากเกิดความกังวลว่าอาคารจะทรุดลงตามความลาดชันของดิน ซึ่งวิศวกรสามารถอธิบายได้ว่าโครงสร้างไม่ได้ถ่ายลงชั้นดินที่ติดที่ลาดชัน แต่มีเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกแล้วถ่ายลงสู่ชั้นดินแข็งด้านล่าง อาคารจึงไม่เกิดการทรุดตัว อีกความกังวลหนึ่งคือเสาเข็มจะรับแรงด้านข้างจากแรงแผ่นดินไหวได้หรือไม่ ซึ่งวิศวกรยังไม่สามารถตอบได้อย่างมั่นใจ เนื่องจากเสาเข็มอยู่ในดินที่ติดที่ลาดชัน จึงไม่ทราบว่าการใช้แบบจำลองสปริงแทนแรงดันของดินนั้นจะเหมาะสมหรือไม่ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงด้านข้างของเสาเข็มเจาะโดยทำการทดสอบและเปรียบเทียบผลทดสอบกับการวิเคราะห์แบบจำลองเสาเข็มที่มีสปริงด้านข้างแทนแรงดันของดินรอบเสาเข็ม



รูปที่ 1 แปลนรูปตัดอาคารที่พักบุคลากร มหาวิทยาลัยพะเยา



รูปที่ 2 อาคารที่พักบุคลากร มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ก่อสร้างแล้วเสร็จ

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

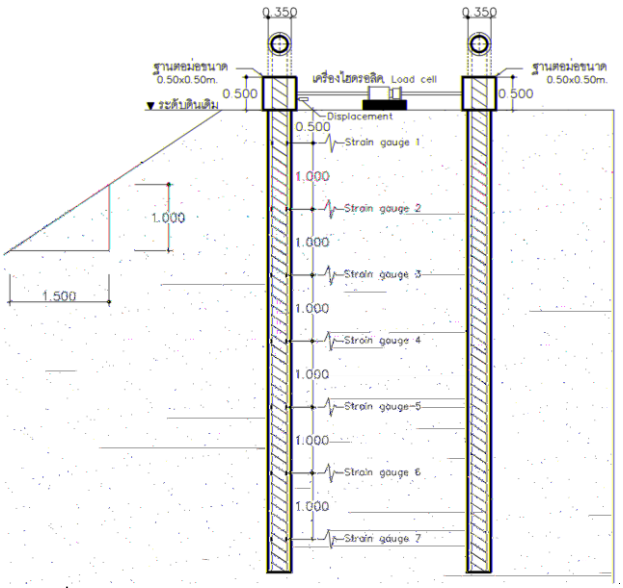
2.1 การทดสอบการรับแรงด้านข้างของเสาเข็ม

รายละเอียดของเสาเข็มที่ใช้ก่อสร้างอาคารที่พักบุคลากร มหาวิทยาลัยพะเยา ดังแสดงในรูปที่ 3 จะถูกนำมาใช้เป็นต้นแบบของเสาเข็มที่จะทำการทดสอบ เสาเข็มมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 350 มิลลิเมตร เหล็กตามยาวเป็นเหล็กข้ออ้อยขนาด 12 มิลลิเมตร (DB12) จำนวน 6 เส้น และเสริมเหล็กกลมขนาด 6 มิลลิเมตร เป็นปลอกเกลียวที่ระยะเรียง 0.15 เมตร บริเวณที่เตรียมตัวอย่างเสาเข็มแล้วทำการทดสอบจะอยู่ใกล้กับที่ตั้งของอาคารที่พักบุคลากร โดยอยู่ติดที่ลาดชันประมาณ 1 : 1.50 การศึกษานี้จะทำการหล่อตัวอย่างเสาเข็มจำนวน 2 ต้น ที่ความลึกในดิน 7 เมตร ตำแหน่งเสาเข็มห่างกันประมาณ 3 เมตร เพื่อให้ถ่ายแรงด้านข้างซึ่งกันและกันระหว่างเสาเข็ม 2 ต้น ดังแสดงในรูปที่ 3 การถ่ายแรงมี 2 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 ให้แรงดันเสาเข็มออกห่างจากกัน (รูปที่ 4(ก)) และ รูปแบบที่ 2 ให้แรงดันเสาเข็มเข้าหากัน (รูปที่ 4(ข)) เสาเข็มต้นที่ติดกับที่ลาดชันจะถูกติดอุปกรณ์วัดค่าความเครียด (strain gauge) ไว้ที่เหล็กเสริมที่ความลึกจากผิวดิน 0.40 1.40 2.40 3.40 4.40 5.40 และ 6.40 เมตร ที่แต่ละระดับความลึกจะมีอุปกรณ์วัดค่าความเครียด 2 ตัว เพื่อนำมาคำนวณความโค้งการดัด (bending curvature) ของเสาเข็มที่แต่ละความลึก และใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณค่าโมเมนต์ดัดที่แต่ละความลึก รูปที่ 5 แสดงขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มตัวอย่างบนพื้นดินเชิงเขา

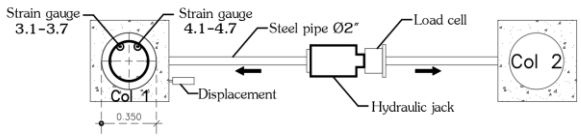
เมื่อทำการวัดค่าคุณสมบัติของวัสดุก่อสร้าง ได้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน f_c' เท่ากับ 36.8 MPa กำลังครากของเหล็กเสริมตามยาว f_y เท่ากับ 650.2 MPa โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมเจาะจะใหญ่กว่า 350 มิลลิเมตร ตามที่กำหนดไว้ เป็น 570 มิลลิเมตร เนื่องจากดินบริเวณที่ทำการศึกษานี้ค่อนข้างแข็ง จึงทำให้หัวเจาะส่ายระหว่างเจาะ จึงทำให้ขนาดของหลุมเจาะใหญ่กว่าแบบก่อสร้าง

รูปที่ 6 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ให้แรงดันด้านข้าง จะใช้เครื่องอัดไฮดรอลิคให้แรงดันเสาเข็มทั้ง 2 ต้น โดยมีอุปกรณ์วัดค่าแรง (Load cell) และอุปกรณ์วัดระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างของเสาเข็ม พร้อมอุปกรณ์วัดค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่แต่ละความลึก ต่อเข้ากับเครื่องเก็บข้อมูล (Data logger) ระหว่างการทดสอบข้อมูลทั้งหมดจะถูกบันทึกไว้ทุก 0.5 วินาที

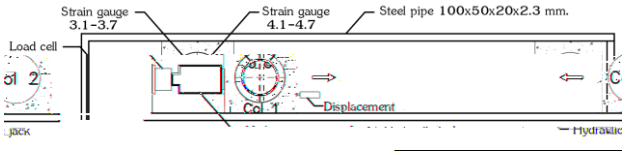
จากการคาดการณ์อย่างง่ายโดยใช้กฎกระทรวง ปี พ.ศ. 2550 สำหรับคำนวณแรงเฉือนที่ฐานจากแผ่นดินไหวจะมีค่าประมาณ 5-7 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักบรรทุก [2] เสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 350 มิลลิเมตร จะรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยในได้ที่ 350 kN ดังนั้น แรงด้านข้างสูงสุดประมาณ 0.07 คูณ 350 เท่ากับ 24.5 kN ตามหลักการออกแบบงานทางวิศวกรรมปฐพีมักจะใช้ค่าความปลอดภัย (Safety factor) เท่ากับ 2.5 ดังนั้น แรงด้านข้างสูงสุดควรทดสอบที่แรงด้านข้างอย่างน้อย 2.5 คูณ 24.5 เท่ากับ 61.25 KN. การทดสอบนี้จึงให้แรงกระทำทางด้านข้างเพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงแรงสูงสุดที่ 65 KN. แล้วลดแรงกระทำเป็นศูนย์



รูปที่ 3 หน้าตัดเสาเข็มเจาะและตำแหน่งการติดอุปกรณ์วัดค่าความเครียด



(ก) รูปแบบการให้แรงด้านข้างแบบที่ 1
(ดันเสาเข็มออกห่างกัน)



(ข) รูปแบบการให้แรงด้านข้างแบบที่ 2
(ดันเสาเข็มเข้าหากัน)

รูปที่ 4 รูปแบบการให้แรงดันด้านข้างระหว่างเสาเข็ม 2 ต้น



(ค) เจาะเสาเข็มความลึก 7 เมตร



(ง) เทคอนกรีตเสาเข็ม

รูปที่ 5 การก่อสร้างเสาเข็มเจาะ



(ก) มัดเหล็กเสริม



(ข) ติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดพร้อมเดินสายไฟ



รูปที่ 6 การทดสอบเสาเข็ม

2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและค่าความโค้งของเสาเข็ม

จากทฤษฎีบทการดัดของคาน ค่าความโค้ง (ϕ) จะมีค่าเท่ากับ M/EI โดยที่ M คือค่าโมเมนต์ดัด EI คือค่าความแข็งการดัด ดังนั้น เพื่อให้การวิเคราะห์แบบจำลองเสาเข็มเจาะที่มีแรงดันดินด้านข้างได้ถูกต้อง ค่า EI ควรได้มาจากความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและค่าความโค้งของหน้าตัดเสาเข็ม นอกจากนี้ ยังสามารถนำมาใช้แปลงค่าความโค้งที่ได้จากการทดสอบมาเป็นค่าโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งวัดค่าความโค้งได้ วิธีการหาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและค่าความโค้ง มีขั้นตอน ดังนี้ (ดูรูปที่ 7 ประกอบ)

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าความเครียดอัดที่ผิวนอกสุดของคอนกรีต (ε_c) โดยมีค่าที่น้อยกว่า 0.003

ขั้นตอนที่ 2 สมมติระยะช่วงคอนกรีตรับแรงอัด (ระยะ *c*) แล้วคำนวณค่าความโค้งการดัด ϕ จาก

$$\phi = \frac{\varepsilon_c}{c} \tag{1}$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณความเครียดและแรงที่เกิดขึ้นของคอนกรีต ความเครียดในส่วนของคอนกรีตจะพิจารณาเฉพาะด้านรับแรงอัดโดยมีความเค้นอัดมากสุดเท่ากับ ε_c ที่ผิวนอกสุดของคอนกรีต ส่วนความเครียดที่ระยะ *x* ใด ๆ ε_{cx} คำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$\varepsilon_{cx} = \varepsilon_c \frac{x}{c} \tag{2}$$

ความเค้นที่ระยะ *x* ใด ๆ f_{cx} คำนวณได้จากความเครียดโดยใช้สมการของ Hognestad [3] ดังแสดงในสมการที่ (3) และทำให้ได้แรงอัดที่ระยะ *x* ใด ๆ ดังแสดงในสมการที่ (4)

$$\begin{aligned} f_{cx} &= f_c' \left[\frac{2\varepsilon_{cx}}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_{cx}}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \\ &= f_c' \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0 c} x - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0 c} \right)^2 x^2 \right] \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} dC_c &= f_{cx} dA \\ &= f_c' \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0 c} x - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0 c} \right)^2 x^2 \right] 2\sqrt{r^2 - (r - c + x)^2}\, dx \end{aligned} \tag{4}$$

ดังนั้น แรงอัดลัพธ์ของคอนกรีตจะได้จากการอินทิเกรทสมการที่ (4) ตั้งแต่ x = 0 ถึง *c* ดังแสดงในสมการที่ (5) ซึ่งในการศึกษานี้จะทำการอินทิเกรทเชิงตัวเลขระหว่างการคำนวณ

$$C_c = \int_0^c f_c' \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0 c} x - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0 c} \right)^2 x^2 \right] 2\sqrt{r^2 - (r - c + x)^2}\, dx \tag{5}$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณความเครียดและแรงที่เกิดขึ้นของเหล็กเสริมตามยาว โดยความเครียดที่เหล็กแต่ละชั้น ε_{si} จะขึ้นอยู่กับระยะ d_i ของเหล็กเสริมแต่ละชั้น ตามสมการที่ (6) และสามารถนำความเครียดนี้ไปคำนวณความเค้นของเหล็กเสริมแต่ละชั้น f_{si} ถ้าความเครียดอยู่ในช่วงยืดหยุ่น ค่าความเค้นจะมีค่าเท่ากับผลคูณของความเครียดกับโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กซึ่งมีค่าเท่ากับ 200 GPa แต่ค่าความเค้นต้องไม่เกินกำลังครากของเหล็กเสริม ดังสมการที่ (7) และแรงในเหล็กเสริมจะคำนวณได้จากผลคูณของความเค้นและพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมในแต่ละชั้น ดังสมการที่ (8)

$$\varepsilon_{si} = \frac{\varepsilon_c}{c}(c - d_i) \tag{6}$$

$$f_{si} = E_s \varepsilon_{si} \le f_y \tag{7}$$

$$F_{si} = f_{si} A_{si} \tag{8}$$

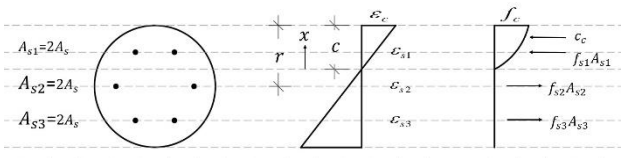
ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบสมดุลระหว่างแรงอัดและแรงดึง ซึ่งผลรวมของแรงจะต้องมีค่าเท่ากับแรงตามแนวแกน (*P*) ที่กระทำกับเสาเข็ม แต่ในการทดลองไม่ได้ให้แรงกระทำตามแนวแกน ดังนั้น ผลรวมของแรงบนหน้าตัดจึงมีค่าเท่ากับศูนย์ หากตรวจสอบแล้วแรงบนหน้าตัดไม่สมดุลให้วนกลับไปทำขั้นตอนที่ 2 อีกครั้ง

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อหน้าตัดมีแรงที่กระทำที่สมดุลแล้ว จึงทำการคำนวณค่าโมเมนต์ดัด โดยพิจารณาที่จุดกึ่งกลางหน้าตัดเป็นแกนพิจารณาค่าโมเมนต์ดัด ตามสมการที่ (9)

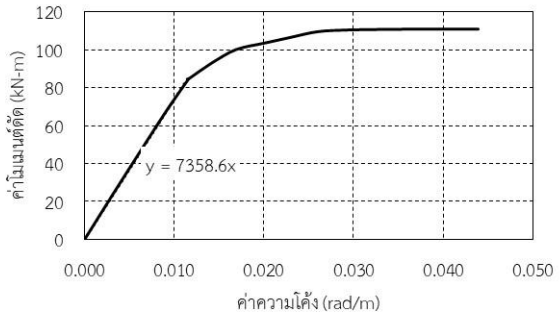
$$M = \int (r - c + x)\, dC_c + \sum F_{si} (r - d_i) \tag{9}$$

เมื่อจบขั้นตอนที่ 6 จะทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์ดัดและค่าความโค้ง 1 จุด เพื่อหาความสัมพันธ์ในจุดต่อไป ให้วนกลับไปทำขั้นตอนที่ 1 ใหม่อีกครั้งโดยเพิ่มค่า ε_c ขึ้นไปเรื่อย ๆ จนถึงค่าความเครียดประลัย ε_{cu} ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.003

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและค่าความโค้งที่ได้ทำการวิเคราะห์หน้าเสาเข็ม ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 570 มิลลิเมตร เมื่อหาค่าความชันของความสัมพันธ์ในช่วงยืดหยุ่นก่อนที่เหล็กเสริมตามแนวยาวจะคราก จะได้ค่า *EI* เท่ากับ 7358.6 kN-m^2



รูปที่ 7 ความโค้งการดัดและแรงกระทำบนหน้าตัดเสาเข็ม



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและค่าความโค้งของเสาเข็ม

2.3 แบบจำลองเสาเข็มและสปริงด้านข้างแทนแรงดันของดิน

เสาเข็มจะถูกจำลองเป็นชิ้นส่วนเฟรม (Frame element) โดยกำหนดให้มีค่า *EI* เท่ากับ 7358.6 kN-m^2 ยาว 7 เมตร ที่ปลายเสาเข็มด้านล่างจะใช้ฐานรองรับแบบล้อเลื่อน (roller) ที่ปลายด้านบนจะเป็นปลายอิสระ และให้แรงกระทำโครงสร้างที่หัวเสาเข็มด้วยขนาด 65 kN สปริงด้านข้างแทนแรงดันดินจะถูกจำลองโดยใช้ค่าสติฟเนสเสนอโดย Davisson [4] ดังแสดงในสมการที่ (10)

$$k_s = \frac{67 s_u}{B} \tag{10}$$

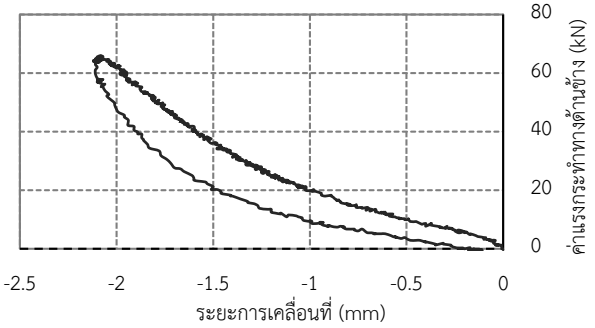
โดยที่ k_s คือ โมดูลัสต้านทานแรงแนวราบของดิน
B คือ ความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม
S_u คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength)

ค่า S_u ในการศึกษานี้จะใช้ข้อมูลจากผลการสำรวจดินที่ทำขึ้นระหว่างการก่อสร้างอาคารที่พักบุคลากร มหาวิทยาลัยพะเยา โดยที่ระดับ 0-1.75 เมตร ค่า S_u = 149.5 kN/m^2 ที่ระดับ 1.75-2.25 เมตร ค่า S_u = 236.3 kN/m^2 ที่ระดับ 2.25-2.75 เมตร ค่า S_u = 323.0 kN/m^2 และที่ระดับลึกกว่านี้ ค่า S_u = 394.8 kN/m^2 โดยการศึกษานี้จะจำลองให้สปริงรับแรงด้านข้างอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกับที่ติดอุปกรณ์วัดความเครียดไว้ คือ ที่ความลึกระดับ 0 0.50 1.50 2.50 3.50 4.50 5.50 และ 6.50 เมตร

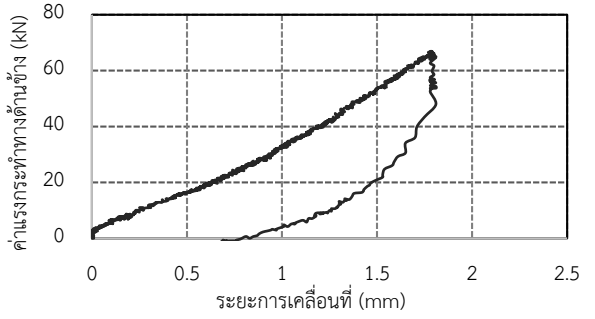
3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการทดสอบ

การทดสอบให้แรงเสาเข็มโดยให้เครื่องอัดไฮดรอลิก โดยเพิ่มแรงอย่างสม่ำเสมอไปจนถึงค่าแรง 65 kN แล้วลดแรงกระทำลงให้เป็นศูนย์ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างและการเคลื่อนที่ด้านข้างแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งพบว่าการเคลื่อนที่ด้านข้างสูงสุดที่ 2.1 มิลลิเมตร ในกรณีที่ดันเสาเข็มไปทางฝั่งที่ลาดชัน (ให้แรงกระทำรูปแบบที่ 1) และการเคลื่อนที่ด้านข้างสูงสุดที่ 1.8 มิลลิเมตร ในกรณีที่ดันเสาเข็มตรงกันข้ามกับฝั่งที่ลาดชัน (ให้แรงกระทำรูปแบบที่ 2) การทดสอบเสาเข็มโดยให้แรงด้านข้างรูปแบบที่ 1 นั้นมีค่าการเคลื่อนที่ด้านข้างมากกว่าการทดสอบเสาเข็มโดยให้แรงด้านข้างรูปแบบที่ 2 จึงสรุปได้ว่าดินที่อยู่ระหว่างเสาเข็มต้นที่ 1 กับเสาเข็มต้นที่ 2 มีความแข็งแรงมากกว่าดินที่อยู่ทางฝั่งที่ลาดชัน จึงต้านการเคลื่อนที่ด้านข้างได้ดีกว่าเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เสาเข็มสามารถรับแรงกระทำด้านข้างที่ 65 kN ได้โดยเสาเข็มไม่เกิดการวิบัติ และเหล็กเสริมยังไม่ถึงจุดคราก ซึ่งสามารถสรุปเป็นนัยได้ว่าเสาเข็มมีความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้ในกรณีนี้



(ก) แรงกระทำรูปแบบที่ 1

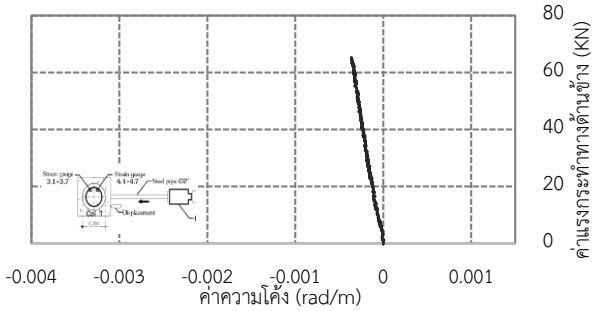


(ข) แรงกระทำรูปแบบที่ 2

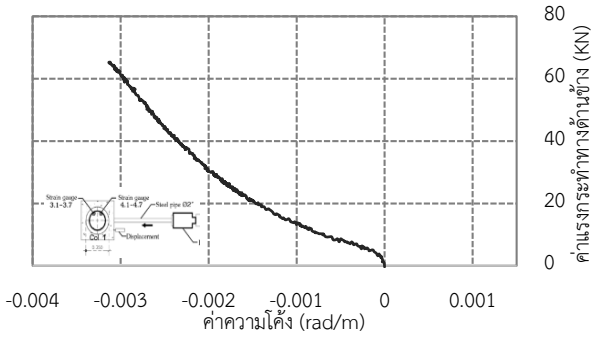
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างและการเคลื่อนที่ด้านข้าง

รูปที่ 10 และรูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างและค่าความโค้งการดัด ϕ ที่คำนวณจากค่าความเครียด 2 ค่า ที่ได้ทำการวัดค่าไว้ คือ ε_{s1} และ ε_{s3} (ดูรูปที่ 7 ประกอบ) ดังนั้น ค่าความโค้งจึงคำนวณได้จากสมการที่ (11)

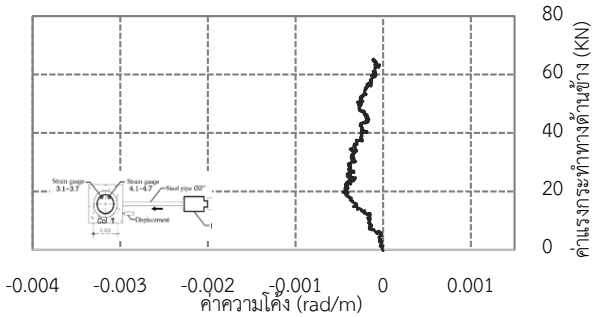
$$\phi = \frac{\varepsilon_{s1} - \varepsilon_{s3}}{d_3 - d_1} \tag{11}$$



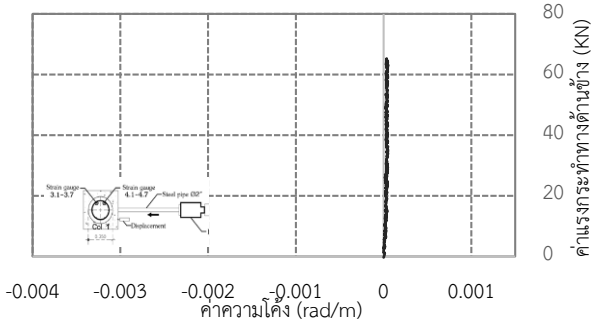
(ก) ที่ตำแหน่ง 0.50 เมตร



(ข) ที่ตำแหน่ง 1.50 เมตร

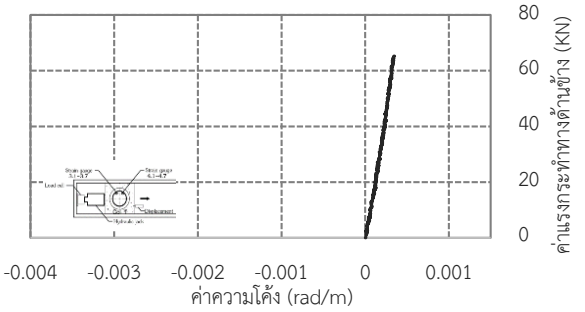


(ค) ที่ตำแหน่ง 2.50 เมตร

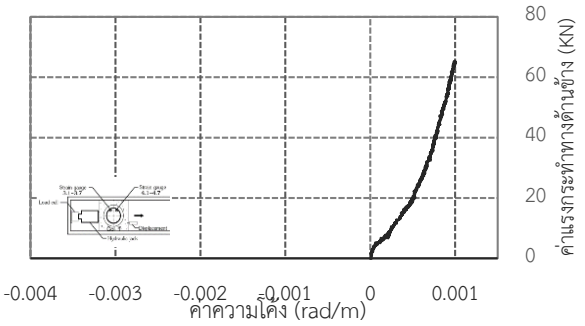


(ง) ที่ตำแหน่ง 3.50 เมตร

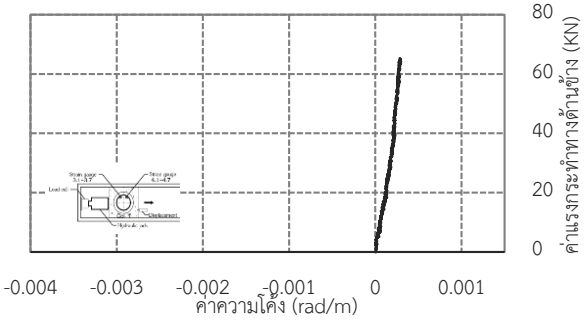
รูปที่ 10 ค่าความโค้งของหน้าตัดเสาเข็ม และโมเมนต์ดัด
จากการให้แรงกระทำรูปแบบที่ 1



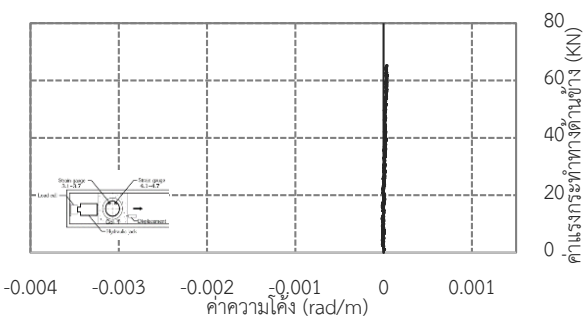
(ก) ที่ตำแหน่ง 0.50 เมตร



(ข) ที่ตำแหน่ง 1.50 เมตร



(ค) ที่ตำแหน่ง 2.50 เมตร



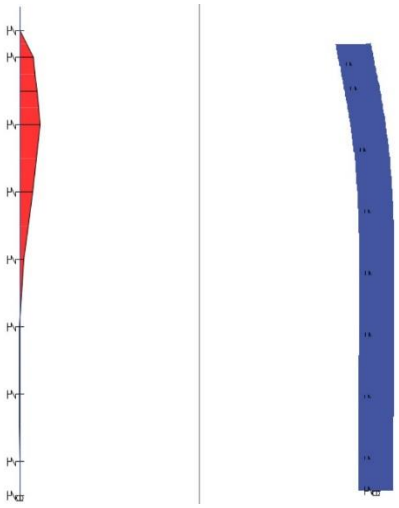
(ง) ที่ตำแหน่ง 3.50 เมตร

รูปที่ 11 ค่าความโค้งของหน้าตัดเสาเข็ม และโมเมนต์ดัด
จากการให้แรงกระทำรูปแบบที่ 2

รูปที่ 10 และ รูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าค่าความโค้งมีค่ามากในช่วงที่ความลึก 0.50 และ 1.50 เมตร และมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่ความลึกตั้งแต่ 3.50 เมตร ลงไป โดยค่าความโค้งการดัดจากการให้แรงในรูปแบบที่ 1 จะมีค่ามากกว่าค่าความโค้งการดัดจากการให้แรงในรูปแบบที่ 2 นั้นแสดงว่าความแข็งของดินทางฝั่งติดที่ลาดชันมีความสามารถต้านทานแรงด้านข้างน้อยกว่าดินทางฝั่งที่ไม่ติดที่ลาดชัน

3.2 ผลการวิเคราะห์และการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ

การวิเคราะห์เสาเข็มในโปรแกรมนั้นได้ทำการจำลองเสาเข็มโดยใช้คุณสมบัติของกำลังอัดคอนกรีต f_c' =36.8 MPa กำลังครากของเหล็กเสริมตามยาว f_y เท่ากับ 650.2 MPa และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มเจาะเท่ากับ 570 มิลลิเมตร และกำหนดให้ค่า *EI* ของเสาเข็มมีค่าเท่ากับ 7358.6 MPa จากนั้นนำค่าของสปริงได้คำนวณไว้ตามสมการที่ 10 มาใส่ที่ระดับความลึก 0 0.50 1.50 2.50 3.50 4.50 5.50 6.50 และ 7.00 เมตร แล้วทำการวิเคราะห์โปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 โมเมนต์ดัดและการแอ่นตัวของเสาเข็มจากการวิเคราะห์

จากการวิเคราะห์เสาเข็มในโปรแกรมจะเห็นได้ว่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในเสาเข็มนั้นมีค่ามากที่สุดในช่วงที่ความลึกลงมาจากดิน 1.50 เมตร หลังจากนั้นค่าโมเมนต์จะค่อย ๆ ลดลง ซึ่งมีลักษณะสอดคล้องกับค่าความโค้งการดัดที่ได้ทำการวัดค่าจากอุปกรณ์วัดความเครียดในรูปที่ 10 และ รูปที่ 11 ตารางที่ 1 แสดงค่าโมเมนต์ดัดในเสาเข็มที่ได้จากการวิเคราะห์และค่าโมเมนต์ที่ได้จากการนำค่าความโค้งที่วัดได้จากการทดสอบที่จุดแรงกระทำด้านข้างสูงสุดคูณกับค่าความแข็งการดัด *EI* จะพบว่าค่าโมเมนต์ดัดที่ได้จากการวิเคราะห์จะให้ค่าที่มากกว่าการทดสอบ หากใช้ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ไปออกแบบเสาเข็มจะทำให้ได้เสาเข็มมีความปลอดภัยในการใช้งาน อย่างไรก็ตาม ค่าโมเมนต์ดัดจากการทดสอบที่แสดงในตารางที่ 1 อาจมีความคลาดเคลื่อนจากอุปกรณ์วัดความเครียดอยู่บ้างจากการแกว่งของสัญญาณไฟฟ้า

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบผลการทดสอบเสาเข็มกับการวิเคราะห์

ความลึกจากระดับพื้นดิน (เมตร)	โมเมนต์ดัดจากการทดสอบ รูปแบบที่ 1 (kN-m)	โมเมนต์ดัดจากการทดสอบ รูปแบบที่ 2 (kN-m)	โมเมนต์ดัดจากการวิเคราะห์ (kN-m)
0.50	2.8	2.6	19.9
1.50	23.0	7.4	30.3
2.50	0.9	2.2	19.0
3.50	0.2	0.2	5.5

4. สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบเสาเข็มและการวิเคราะห์เสาเข็มเพื่อรับแรงทางด้านข้าง สามารถสรุปได้ ดังนี้

4.1 จากการทดสอบเสาเข็ม พบว่า เสาเข็มสามารถรับแรงทางด้านข้างสูงสุดได้อย่างปลอดภัยโดยไม่เกิดการวิบัติ และการครากของเหล็กเสริมตามยาวในเสาเข็ม

4.2 จากการทดสอบเสาเข็ม พบว่า ค่าความโค้งการดัดของเสาเข็มมีค่ามากที่ระดับความลึก 0.50 เมตร และ 1.50 เมตร และมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่ระดับ 3.50 เมตร ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่ค่าโมเมนต์ดัดจะมากสุดที่ระดับความลึก 1.50 เมตร เช่นเดียวกัน

4.3 ค่าโมเมนต์ดัดจากการวิเคราะห์จะมีค่ามากกว่าการทดสอบ ดังนั้นค่าความแข็งของสปริงรับแรงด้านข้างที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่าอ่อนมากไป แต่หากพิจารณาในการนำค่าโมเมนต์ดัดจากการวิเคราะห์ไปใช้ในการออกแบบเสาเข็ม ค่าความแข็งของสปริงนี้มีความเหมาะสมแล้วเพราะเสาเข็มที่ทำการออกแบบจะมีความปลอดภัยมากขึ้น

4.4 ในการศึกษานี้ความลาดชันของดินไม่ส่งผลต่อการรับแรงทางด้านข้างของเสาเข็มอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากดินมีค่ากำลังต้านทานแรงเฉือน S_u ที่มากเพียงพอ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยพะเยา ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย และเครื่องมือกลางในการทดสอบในการการทำการวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณ ห้างหุ้นส่วนจำกัด เวียงพานทวีภัณฑ์ และ บริษัท ดี เอ็นจิเนียริ่ง ดีไซน์ ที่ให้การสนับสนุนการเตรียมตัวอย่างเสาเข็มเจาะ

เอกสารอ้างอิง

[1] Pimanmas A., Chaimahawan P. and Joyklad P. (2012). *Advanced Reinforced Concrete Foundation Structure Design (In Thai)*. Civil Engineering Consultant and Training Co., LTD. Bangkok. 493 pp.

[2] กระทรวงมหาดไทย (2550). กฎกรทรวงกำหนดการรับน้ำหนักความต้านทานความคงทนของอาคารและพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ.2550. ราชกิจจานุเบกษา, เล่มที่ 124, ตอนที่ 86 ก, หน้า 17-25.

[3] Wight J.K. (2016). *Reinforced Concrete : Mechanics and Design*. Pearson.

[4] Davisson, M.T. and Robinson, K.E. (1965). Bending and buckling of partially embedded piles. *Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 2, p. 243.