

การวิเคราะห์กำลังรับแรงทางด้านข้างของเสาเข็มในดินสองชั้นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ Laterally Loaded Pile in Layered Soil by Finite Element Analysis

นพฤทธิ์ ทวีชัย^{1,*} และ วีรยา จิมอ้อย²

¹นักศึกษานิเทศศาสตร์ ²รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี

*Corresponding author; E-mail address: nopparit.taw@dome.tu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอถึงการวิเคราะห์กำลังรับแรงทางด้านข้างของเสาเข็มในชั้นดินที่มีคุณสมบัติของดินแตกต่างกันสองชั้นโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ในการศึกษาครั้งนี้ดำเนินการโดยการสร้างรูปแบบจำลอง 3 มิติของเสาเข็มยาวปลายอิสระที่อยู่ในดินสองชั้น (Pile-Soil Interface) เมื่อรับแรงทางด้านข้าง เพื่อศึกษาพฤติกรรมของแรงกระทำทางด้านข้าง (Lateral Load) ที่กระทำต่อเสาเข็มกับการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Lateral displacement) ของเสาเข็ม เมื่อกำหนดให้เสาเข็มมีคุณสมบัติคงที่และรูปแบบชั้นดินสองกรณีได้แก่ กรณีที่หนึ่งดินชั้นบนเป็นดินเหนียวและดินชั้นล่างเป็นดินทรายและกรณีที่สองดินชั้นบนเป็นดินทรายและดินชั้นล่างเป็นดินเหนียว โดยอัตราส่วนความยาวของเสาเข็มที่ฝังในดินชั้นบนต่อดินชั้นล่าง (L_u/L_b) กำหนดเป็น 4 กรณีหลักได้แก่ 1:1, 1:2, 1:3, และ 1:4 ตามลำดับกำหนดให้ดินเหนียวและดินทรายมีความแน่นปานกลางรวมทั้งมีค่าหน่วยน้ำหนักรวม (Total Unit Weight) เท่ากับ 19.5 kN/m^3 และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดิน (Modulus of Elasticity of Soil) ทั้งสองชั้นในสัดส่วน E_{su}/E_{sb} เท่ากับ 1, 2, 3, และ 4

จากการศึกษาโดยกำหนดให้อัตราส่วนความหนาเริ่มต้นของดินทั้งสองชั้น (L_u/L_b) เท่ากับ 1:1 พร้อมด้วยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้น (E_{su}/E_{sb}) เท่ากับ 1 จนกระทั่งความหนาของดินทั้งสองชั้น (L_u/L_b) เท่ากับ 1:4 และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_{su}/E_{sb}) เท่ากับ 4 แล้วเสร็จ จึงวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็มและแรงดัดจากการกำหนดสัดส่วนอัตราส่วนความหนาของดินและสัดส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นในทุกกรณี พบว่าดินชั้นบนที่มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงกว่าดินชั้นล่างส่งผลให้การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของหัวเสาเข็มมีแนวโน้มลดลงรวมถึงแรงดัดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเช่นกันแสดงให้เห็นถึงเสาเข็มเมื่ออยู่ในดินสองชั้นใดๆ ไม่ว่าจะเป็นดินทรายหรือดินเหนียวอยู่ด้านบนและถึงแม้ความหนาแต่ละชั้นจะไม่เท่ากันหากดินชั้นบนมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่สูงกว่าดินชั้นล่างจะทำให้การเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่หัวของเสาเข็มมีแนวโน้มลดลงและส่งผลให้เสาเข็มมีกำลังรับแรงทางด้านข้างได้สูงขึ้น

คำสำคัญ: เสาเข็มรับแรงทางด้านข้าง, ดินสองชั้น, ชั้นดินเหนียว, ชั้นดินทราย, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

This article presents an analysis of the laterally loaded piles in layered soil using the finite element method. The study is done by creating a 3D model of the free head long piles in layers of soil with a lateral load to study the behavior of lateral load on the pile and the lateral displacement. The soil layers are specified into two cases, the upper sand with the bottom clay

layer and the upper clay layer with the bottom sand layer. The ratios of the pile length embedded in upper layer and bottom layer (L_u/L_b) are separated in 4 cases as 1:1, 1:2, 1:3, and 1:4. The unit weight of both clay and sand is 19.5 kN/m^3 . The modulus elasticity of soil has defined in ratio of E_{su}/E_{sb} which is equal 1, 2, 3, and 4. The results of the study, in which the ratio of piles length embedded in upper layer and bottom layer is equal to 1:1 ($L_u/L_b = 1:1$), show that the elastic modulus of soil is the main factor for the lateral displacement of the pile. From the initial of upper layer and bottom layer is equal to 1:1 including ratio of elastic modulus of E_{su}/E_{sb} is equal to 1, and then vary the upper layer and bottom layer (L_u/L_b) until 1:4 together with E_{su}/E_{sb} from 2, 3, to the highest at 4 until complete all cases. It has been observed that when the modulus of elasticity of the upper soil is higher than the bottom soil, the lateral displacement of the pile head and bending moment on pile shaft still tend to decrease. It means that the type of upper soil has no effect to the lateral displacement either it is sand or clay. If the modulus of elasticity of top soil is higher than the bottom soil, the lateral movement of pile head tends to decrease and results in a higher lateral load capacity.

Keywords: Laterally Loaded Pile, Layered Soil, Clay, Sand, Finite Element Analysis

1. บทนำ

การวิเคราะห์กำลังรับแรงทางด้านข้างของเสาเข็มมีวิธีการที่ค่อนข้างหลากหลายในการเลือกใช้ขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของปัญหาหรือขอบเขตเงื่อนไขระหว่างคุณสมบัติเสาเข็มและสภาพของชั้นดิน โดยทั่วไปการวิเคราะห์กำลังรับแรงทางด้านข้างของเสาเข็มสามารถวิเคราะห์ได้โดยอาศัยวิธีการสำเร็จตามแต่ละหลักวิธีการของบุคคลที่ได้แสดงไว้ทั้งในตำราและบทความทางด้านวิศวกรรมปฐพีรวมทั้งมาตรฐานหรือข้อกำหนดที่เกี่ยวข้อง เว้นแต่ในกรณีศึกษาที่ต้องการวิเคราะห์ถึงลักษณะของพฤติกรรมเสาเข็มรับแรงทางด้านข้างที่มีความซับซ้อนของชั้นดินทำให้วิธีการเชิงตัวเลขเป็นวิธีการที่ค่อนข้างมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์เสาเข็มรับแรงทางด้านข้างอันเนื่องมาจากรูปแบบของหลักวิธีการได้แก่ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่อาศัยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างแรงกระทำและการเปลี่ยนแปลงของวัสดุที่ถูกแรงกระทำภายใต้ขอบเขตรูปร่างและเงื่อนไขที่กำหนดของปัญหาทำให้การวิเคราะห์ค่อนข้างมีความแม่นยำและให้ผลลัพธ์ที่เป็นไปตามสภาพแวดล้อมเงื่อนไขตามกำหนด จึง

ทำให้มีการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มรับแรงทางด้านข้างของ Ashish Mehta and P.D. Pachpor [1] โดยอาศัยแบบจำลอง 3 มิติของเสาเข็มที่มีแรงกระทำทางด้านข้างในชั้นดินสองชั้น พร้อมทั้งกำหนดใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินเป็นพารามิเตอร์หลักเพื่อวิเคราะห์หาผลลัพธ์ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของหัวเสาเข็มและพบว่าค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของหัวเสาเข็มมีค่าลดลงเมื่อชั้นดินที่อยู่บนมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูงกว่าดินชั้นล่าง รวมทั้งกรณีศึกษาของ Elrahman & Eldayam [2] ที่ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์เสาเข็มรับแรงทางด้านข้างโดยเป็นการวิเคราะห์รูปแบบจำลองของเสาเข็มที่อยู่ในชั้นดินเหนียวและกำหนดกรณีศึกษาโดยกำหนดอัตราส่วนระหว่างความยาวของเสาเข็มต่อความกว้างของเสาเข็มเพื่อวิเคราะห์หาลักษณะที่มีผลของแรงดัดที่เกิดขึ้นในเสาเข็มและพบว่าระยะที่มีผลของแรงดัดเกิดขึ้นส่วนบนของเสาเข็มอยู่ในช่วงระหว่าง 0.12 ถึง 0.18 ของความยาวเสาเข็ม จากกรณีการศึกษาดังกล่าวจะเห็นได้ว่ามีการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์เสาเข็มที่รับแรงทางด้านข้างเพื่อประมาณการผลลัพธ์ทั้งในส่วนของการเคลื่อนที่ทางด้านข้างและแรงดัดที่เกิดขึ้น

ดังนั้นในการศึกษาของบทความนี้จึงดำเนินการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์กำลังรับแรงทางด้านข้างของเสาเข็มโดยการสร้างแบบจำลอง 3 มิติที่ประกอบไปด้วยเสาเข็มและชั้นดินที่มีความแตกต่างกันสองชั้นระหว่างดินเหนียวและทรายภายใต้แรงกระทำทางด้านข้างแบบสถิตยศาสตร์ (Static Load) พร้อมทั้งกำหนดคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินที่สำคัญได้แก่ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดิน, E_s (Modulus Elastic of Soil), ค่าอัตราส่วนของปัวซองส์ (Poisson Ratio), และค่าคุณสมบัติของเสาเข็มโดยกำหนดใช้โปรแกรม Midas GTS NX ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่กำหนดใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยตรงในการวิเคราะห์หาผลลัพธ์ของปัญหาทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิคที่มีความซับซ้อนทั้งในรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ

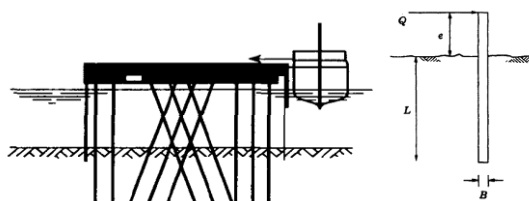
1.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มที่เกิดจากแรงกระทำทางด้านข้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
2. เพื่อศึกษาความแตกต่างในการรับแรงทางด้านข้างเมื่อเสาเข็มอยู่ในดินที่มีความแตกต่างกันสองชั้นระหว่างดินเหนียวและทราย
3. เพื่อศึกษาแนวโน้มของการเคลื่อนที่และแรงดัดที่เกิดขึ้นในเสาเข็ม

2. ทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

2.1 เสาเข็มรับแรงทางด้านข้าง

นอกเหนือไปจากแรงในแนวดิ่งที่กระทำตามแนวก้นของเสาเข็มยังมีแรงกระทำในทิศทางทางด้านข้างหรือในแนวราบที่กระทำต่อเสาเข็มและมีความสำคัญในการพิจารณา โดยส่วนใหญ่ที่มาของแรงกระทำทางด้านข้างนั้นเกิดจากลักษณะรูปแบบของโครงสร้างตามการใช้งานเช่น โครงสร้างท่าเทียบเรือ โครงสร้างนอกชายฝั่ง หรือโครงสร้างตอม่อของสะพานที่ตั้งอยู่ในแม่น้ำหรือชายทะเล ดังแสดงในรูปที่ 1 [3] เป็นต้น

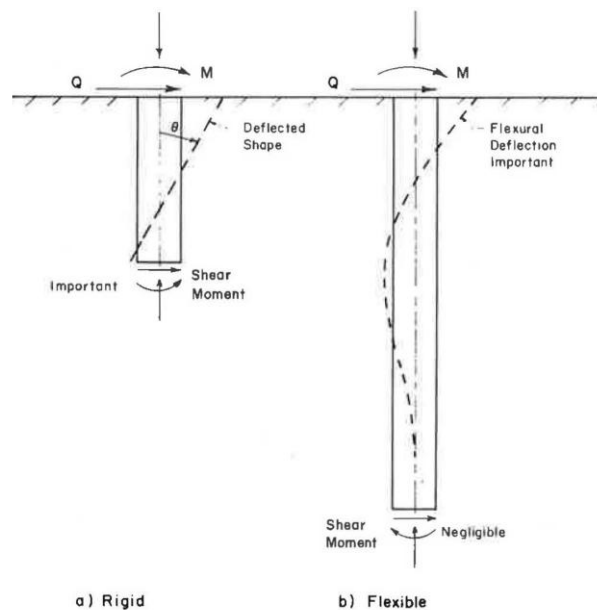


รูปที่ 1 ลักษณะของโครงสร้างที่มีความเกี่ยวข้องกับแรงกระทำทางด้านข้างและแรงกระทำทางด้านข้างที่กระทำต่อเสาเข็ม

2.2 การวิบัติของเสาเข็มรับแรงทางด้านข้าง

เสาเข็มเมื่อรับแรงกระทำทางด้านข้างจนกระทั่งวิบัติจะเกิดการเสียรูปตามลักษณะความยาวหรือความลึกของเสาเข็มในชั้นดินดังแสดงรูปที่ 2 ซึ่งแบ่งเสาเข็มออกเป็นสองประเภทหลัก [4] ได้แก่

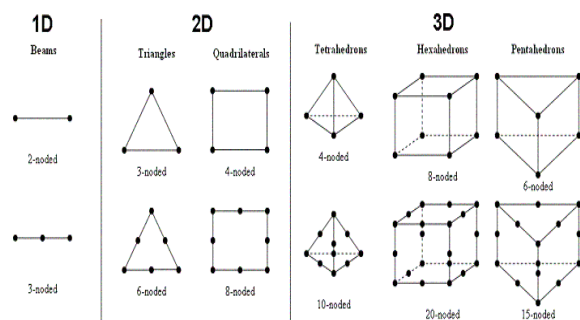
1. เสาเข็มสั้นจะมีการวิบัติโดยการพลิกหรือหมุนและมีจุดหมุนอยู่ที่ดินที่ตำแหน่งใด ๆ
2. เสาเข็มยาวโดยในเสาเข็มยาวจะเกิดความยืดหยุ่นในการแอ่นตัวเมื่อรับแรงกระทำทางด้านข้างไม่เกินค่าที่กำหนดดกเว้นเมื่อกรณีแรงกระทำทางด้านข้างมีขนาดเกินกว่าค่าที่จะรับได้ของเสาเข็มและเกินกำลังต้านทานของแรงดันดินทางด้านข้างจะทำให้เกิดความเสียหายโดยการแตกหักซึ่งมีจุดแตกหักอยู่ใต้ผิวดิน



รูปที่ 2 การเสียรูปของเสาเข็มแบ่งเป็น, (a) ปลายอิสระ, และ (b) ปลายยึดแน่น

2.3 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นับเป็นกระบวนการหนึ่งของการเชิงตัวเลขในการนำมาใช้แก้ปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนได้อย่างชัดเจนโดยสามารถสร้างแบบจำลองรูปร่างของปัญหาให้ใกล้เคียงเป็นไปตามรูปร่างเดิมได้โดยการแบ่งแยกรูปร่างของปัญหาออกเป็นชิ้นย่อยที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตัวอย่างการแบ่งรูปร่างของเอลิเมนต์สำหรับใช้วิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

หลังจากกำหนดรูปร่างของปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์แล้วจึงดำเนินการสร้างสมการเชิงอนุพันธ์ที่เป็นฟังก์ชันของรูปร่างที่พิจารณาสำหรับใช้ในการ

ดำเนินการทางคณิตศาสตร์ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตเพื่อให้ได้ผลเฉลยของปัญหา โดยความแม่นยำหรือความละเอียดของผลลัพธ์คำตอบที่ได้ขึ้นอยู่กับจำนวนและการแบ่งเอลิเมนต์รวมทั้งการเลือกใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์เข้ามาใช้ในการคำนวณให้เหมาะสมกับชิ้นส่วนเอลิเมนต์ที่พิจารณาเช่น การใช้หลักการของความยืดหยุ่นในวัสดุวิเคราะห์กับเอลิเมนต์ 1D ที่มีลักษณะแข็งเกร็งดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งอาศัยหลักการดังนี้ [5]

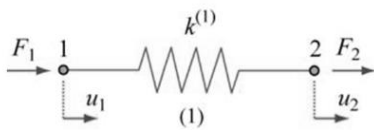
$$\{F\} = \{u\}[K] \quad (1)$$

โดยที่

$\{F\}$ คือ เวกเตอร์ของแรงกระทำที่จุดต่อ

$\{u\}$ คือ เวกเตอร์ของการเคลื่อนที่ที่จุดต่อ

$[K]$ คือ เอลิเมนต์เมทริกซ์ของความแข็งเกร็งของวัสดุที่พิจารณา



รูปที่ 4 ตัวอย่างแบบจำลอง 1D ของเอลิเมนต์วัตถุแข็งเกร็ง (Solid) ในรูปแบบความสัมพันธ์ของระบบสปริง

2.4 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับการวิเคราะห์กำลังรับแรงทางด้านข้างของเสาเข็ม

ในการวิเคราะห์เสาเข็มรับแรงทางด้านข้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการที่ใช้ในการแก้ปัญหาของเสาเข็มในชั้นดินที่มีความซับซ้อนเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามสภาพความเป็นจริง โดยอาศัยพื้นฐานของความสัมพันธ์ระหว่างเสาเข็มและชั้นดินที่ถูกแทนที่ด้วยแบบจำลองสปริงของ Winkler ตลอดความลึกของเสาเข็มในลักษณะของสมการในเชิงอนุพันธ์ที่เป็นความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 5 [6]

$$k_h = \frac{p}{y} \quad (2)$$

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + p = 0 \quad (3)$$

โดยที่

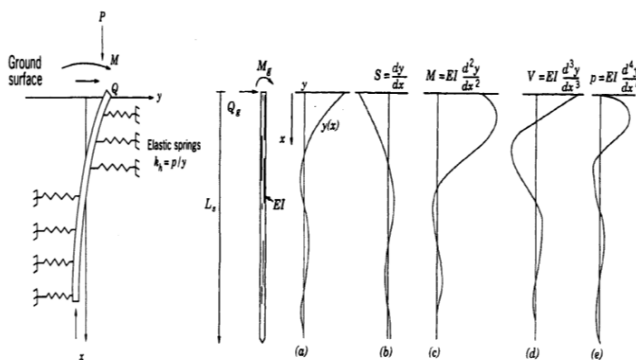
k_h คือ ค่าโมดูลัสต้านทานการกดทางด้านข้างของดิน

p คือ ค่าแรงดันดินต้านทานทางด้านข้าง

y คือ ค่าการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของเสาเข็ม

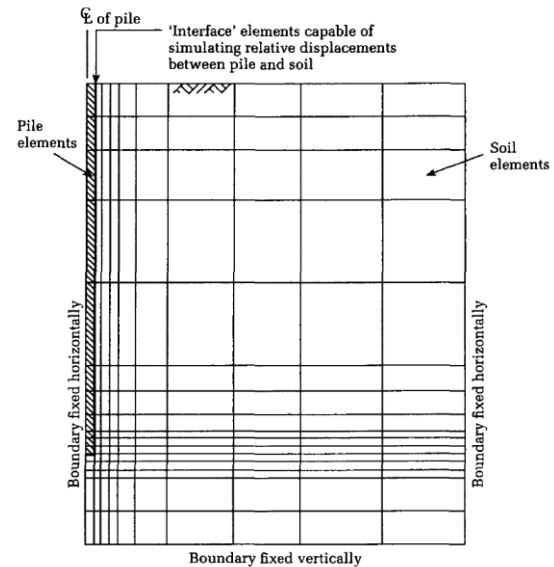
E คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเสาเข็ม

I คือ ค่าโมเมนต์ต้านทานความเฉื่อยของหน้าตัดเสาเข็ม



รูปที่ 5 แบบจำลองลักษณะของ Elastic spring ตลอดความลึกของชั้นดินและฟังก์ชันของสมการเชิงอนุพันธ์ของเสาเข็มเมื่อรับแรงทางด้านข้าง โดยที่ a) การเคลื่อนที่ทางด้านข้าง, b) ค่าความชันของการโก่งตัว, c) แรงดัด, d) แรงเฉือน, และ e) แรงดันดินต้านทานทางด้านข้าง

ดังนั้นในการศึกษาเสาเข็มรับแรงทางด้านข้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีข้อพิจารณาที่สำคัญได้แก่ การสร้างแบบจำลองในรูปแบบ 2 มิติหรือ 3 มิติ, พารามิเตอร์ของดินและเสาเข็ม, ความสัมพันธ์ระหว่างเสาเข็มและชั้นดิน (Pile-Soil Interface), เงื่อนไขขอบเขต, และการกำหนดแรงกระทำ ดังแสดงในรูปที่ 6 [7]



รูปที่ 6 การกำหนดเอลิเมนต์ของเสาเข็มและชั้นดินพร้อมทั้งกำหนดเงื่อนไขขอบเขตสำหรับใช้วิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

3. ขั้นตอนการศึกษา

3.1 การกำหนดตัวแปรและค่าคงที่ในการศึกษา

ในการศึกษาของบทความนี้ได้กำหนดให้เสาเข็มอยู่ในชั้นดินที่มีความแตกต่างกัน 2 รูปแบบได้แก่ ดินเหนียวและทราย โดยคุณสมบัติของดินเหนียวแข็งปานกลางและทรายแน่นปานกลางเป็นไปตามตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

1. ตัวแปรต้นโดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์เฉพาะโมดูลัสยืดหยุ่นของดินเริ่มต้น [8] และแปรผันตามสัดส่วนที่กำหนด

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของดินเหนียวแข็งปานกลาง

Total Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion (kN/m ²)	Initial Modulus of Elasticity of Soil, Es (kN/m ²)	Poisson Ratio
19.5	100	7500	0.4

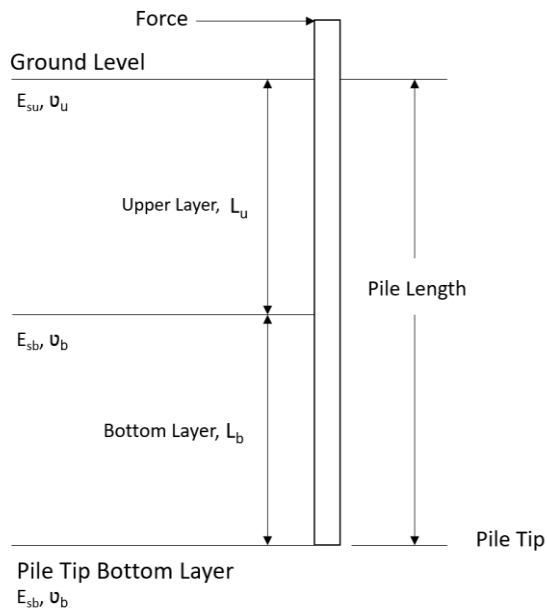
ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของทรายแน่นปานกลาง

Total Unit Weight (kN/m ³)	Friction Angle (°)	Initial Modulus of Elasticity of Soil, Es (kN/m ²)	Poisson Ratio
19.5	38	7500	0.3

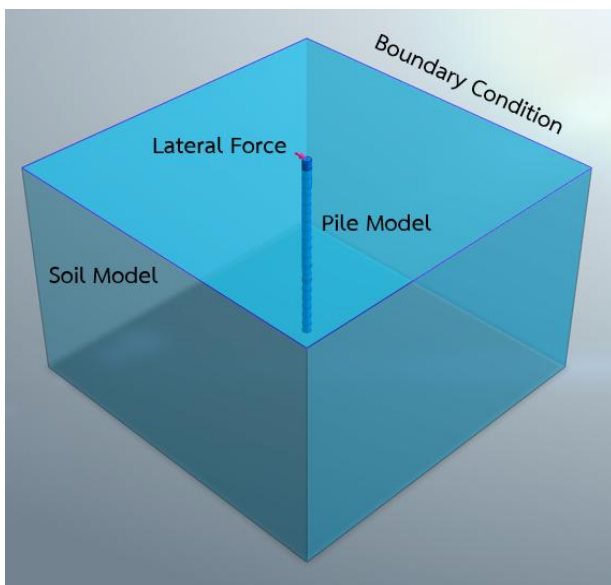
2. ตัวแปรตามคือค่าการเคลื่อนที่และแรงดัดของเสาเข็มที่เกิดขึ้น
3. ค่าคงที่โดยกำหนดให้เสาเข็มคอนกรีตกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 เมตร ระยะความยาวหรือความลึกในชั้นดินเท่ากับ 20 เมตร และมีส่วนที่ยื่นเหนือดินเป็นระยะ 1 เมตร พร้อมทั้งกำหนดให้มี ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น, E_p เท่ากับ 25,742.96 MPa และค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด, I_p เท่ากับ 0.0491 m⁴ รวมทั้งกำหนดแรงกระทำทางด้านข้างคงที่เท่ากับ 150 kN

3.2 การกำหนดแบบจำลอง

ในขั้นตอนเริ่มต้นของการศึกษาได้กำหนดแบบ 2 มิติของความสัมพันธ์ระหว่างเสาเข็มและชั้นดินโดยกำหนดแบ่งดินเป็นสองชั้นได้แก่ ดินชั้นบน (Upper Layer) และดินชั้นล่าง (Bottom Layer) ของความยาวเสาเข็ม และกำหนดให้ดินที่อยู่ใต้ฐานของเสาเข็มเป็นดินชนิดเดียวกันกับดินชั้นล่างของเสาเข็มดังแสดงในรูปที่ 7 จากนั้นจึงดำเนินการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ สำหรับใช้วิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งมีข้อพิจารณาที่สำคัญเบื้องต้นโดยการกำหนดรูปร่างแบบจำลองของปัญหาให้ใกล้เคียงกับสภาพรูปร่างดั้งเดิมหรือสภาพของปัญหาที่แท้จริงเพื่อใช้ในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุและพารามิเตอร์ของดินรวมทั้งข้อกำหนดเงื่อนไขและขอบเขตดังแสดงในรูปที่ 8 เพื่อดำเนินการในขั้นตอนการวิเคราะห์ถัดไป



รูปที่ 7 การกำหนดเอลิเมนต์ของเสาเข็มและชั้นดินพร้อมทั้งกำหนดเงื่อนไขขอบเขตสำหรับใช้วิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

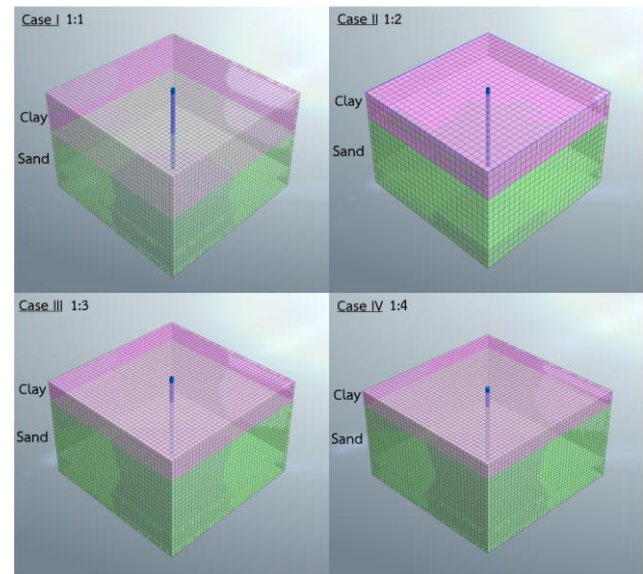


รูปที่ 8 แบบจำลอง 3 มิติของเสาเข็มรับแรงทางด้านข้างที่อยู่ในดิน

3.3 การกำหนดรูปแบบการศึกษา

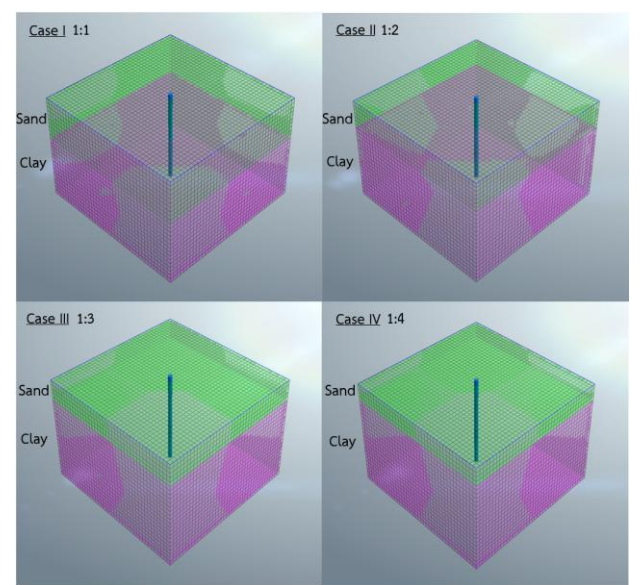
ขั้นตอนของการศึกษาได้กำหนดเงื่อนไขของการวิเคราะห์ออกเป็นสองรูปแบบได้แก่ รูปแบบที่หนึ่งกำหนดให้ดินชั้นบนเป็นดินเหนียวและดินชั้นล่างเป็นทรายและรูปแบบที่สองกำหนดให้ดินชั้นบนเป็นทรายและดินชั้นล่างเป็นดินเหนียว โดยที่ในแต่ละรูปแบบมีการกำหนดอัตราส่วนความหนาของดินชั้นบนต่อดินชั้นล่างออกเป็น 1, 2, 3, และ 4 ตามลำดับพร้อมทั้งกำหนดให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินแปรผันตามอัตราส่วนของความหนาชั้นดินที่กำหนดเช่นกัน

1. รูปแบบที่หนึ่งกำหนดความหนาชั้นดินเหนียวต่อชั้นทรายในอัตราส่วนเท่ากับ 1:1, 1:2, 1:3, และ 1:4 ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 แบบจำลองชั้นดินที่กำหนดชั้นบนเป็นดินเหนียวและชั้นล่างเป็นทรายตามอัตราส่วนที่กำหนด

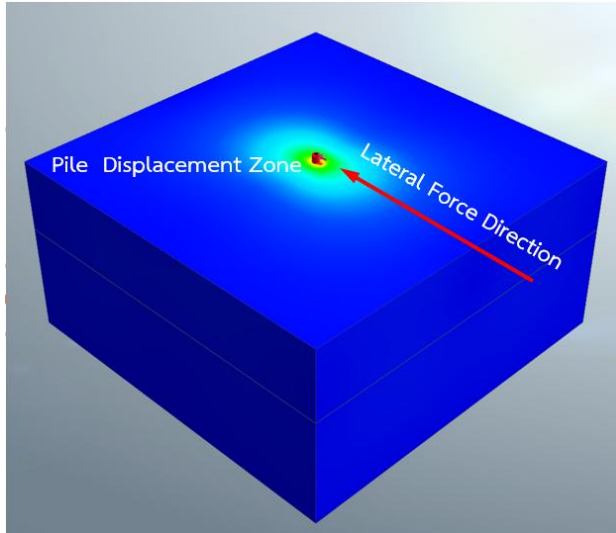
2. รูปแบบที่สองกำหนดความหนาชั้นทรายต่อชั้นดินเหนียวในอัตราส่วนเท่ากับ 1:1, 1:2, 1:3, และ 1:4 ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 แบบจำลองชั้นดินที่กำหนดชั้นบนเป็นทรายและชั้นล่างเป็นดินเหนียวตามอัตราส่วนที่กำหนด

4. ผลการศึกษา

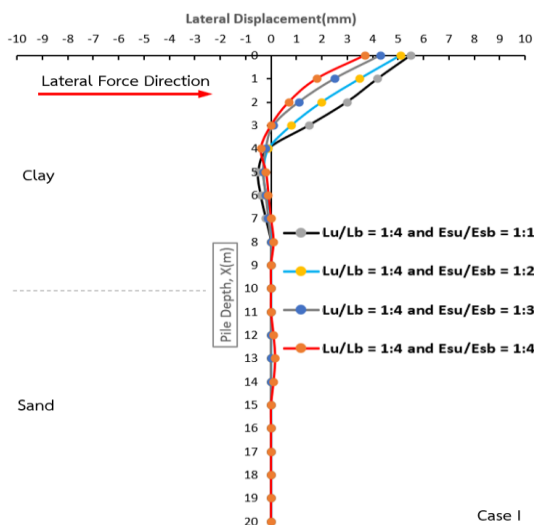
จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านโปรแกรม Midas GTS NX บางส่วนดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 11 ได้ผลลัพธ์ของค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่เกิดขึ้นโดยภาพรวมมีค่าอยู่ระหว่าง 3.6-7.9 มิลลิเมตรพร้อมทั้งค่าเฉลี่ยจากทุกกรณีศึกษาเท่ากับ 5.6 มิลลิเมตร เมื่อกำหนดแรงกระทำทางด้านข้างที่ใช้ในการศึกษาเท่ากับ 150 kN



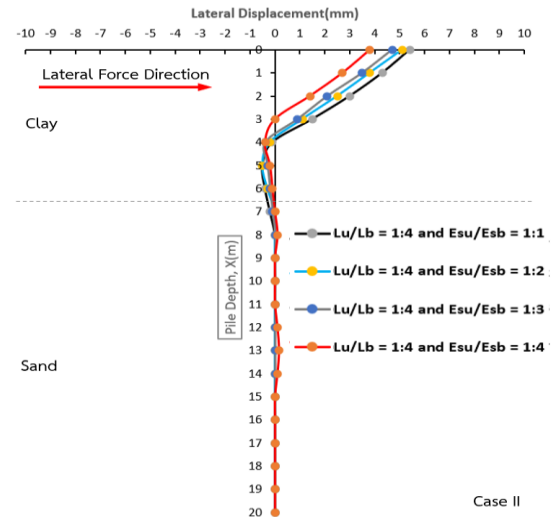
รูปที่ 11 ผลลัพธ์บางส่วนของการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่หัวเสาเข็มจากกรณีศึกษาของดินเหนียวชั้นบนและทรายชั้นล่าง

4.1 ผลการศึกษาในกรณีดินชั้นบนเป็นดินเหนียวและชั้นล่างเป็นทราย

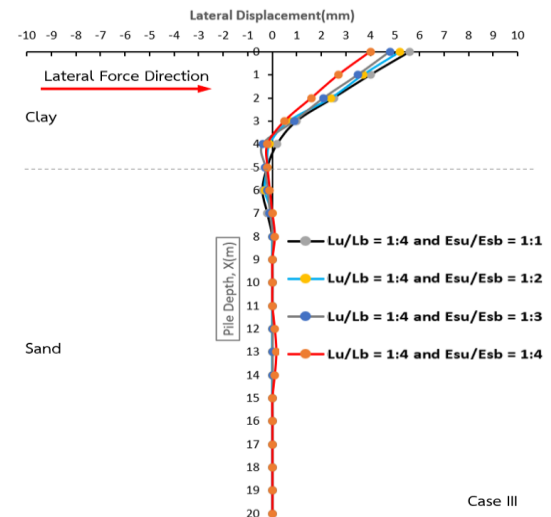
เมื่อนำผลการวิเคราะห์ตามลักษณะสภาพของชั้นดินโดยกำหนดให้ชั้นดินเหนียวอยู่บนชั้นทรายในทุกกรณีศึกษาจะได้ลักษณะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่เกิเกิดขึ้นตลอดระยะความลึกของเสาเข็มทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 12, 13, 14, และ 15 ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นตามเงื่อนไขของค่าอัตราส่วนความหนาแน่นระหว่างดินเหนียวชั้นบนและทรายชั้นล่างและค่าสัดส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นของดินทั้งสองชั้น



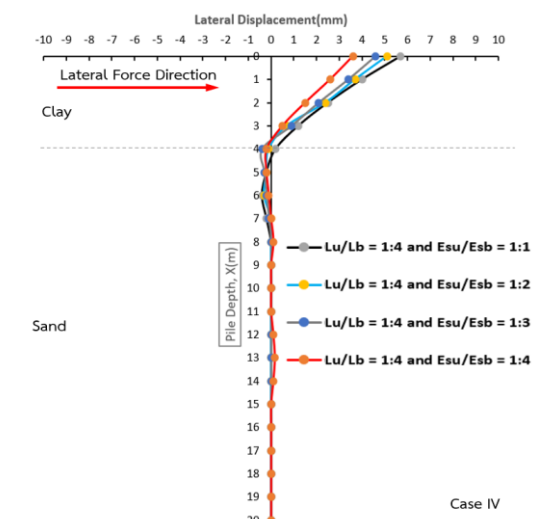
รูปที่ 12 ผลลัพธ์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มจากกรณีศึกษาดินเหนียวชั้นบนและทรายชั้นล่างกรณีที่ 1



รูปที่ 13 ผลลัพธ์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มจากกรณีศึกษาดินเหนียวชั้นบนและทรายชั้นล่างกรณีที่ 2



รูปที่ 14 ผลลัพธ์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มจากกรณีศึกษาดินเหนียวชั้นบนและทรายชั้นล่างกรณีที่ 3



รูปที่ 15 ผลลัพธ์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มจากกรณีศึกษาดินเหนียวชั้นบนและทรายชั้นล่างกรณีที่ 4

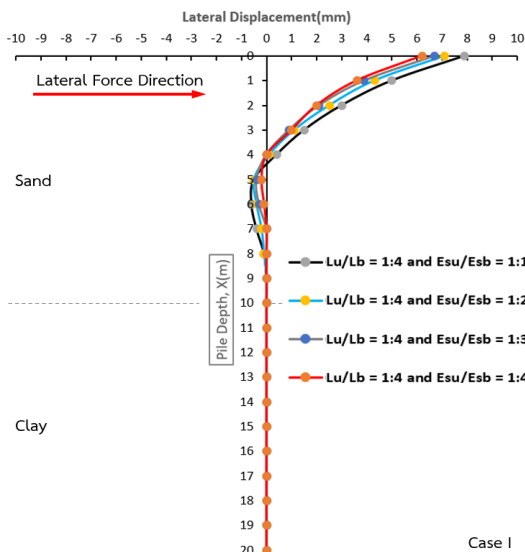
จากผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 12-15 จะได้ว่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มเกิดขึ้นในช่วงระยะความลึกโดยประมาณ 8 เมตรจากปลายหัวเสาเข็ม(หรือผิวดิน)และมีการเคลื่อนทางด้านข้างอยู่ระหว่าง 3.6-5.5 มิลลิเมตร โดยทั้งหมดได้แสดงข้อมูลไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลลัพธ์ของการเคลื่อนตัวทางด้านข้างและแรงดัดที่เกิดขึ้นในกรณีชั้นดินเหนียวและชั้นล่างทราย

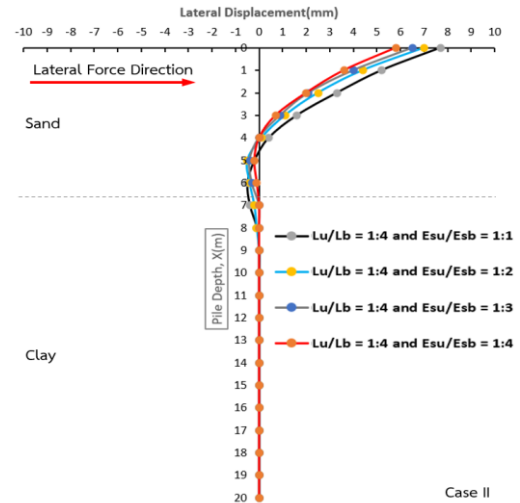
Soil Type	Case	Lu / Lb	Esu / Esb	Maximum Displacement at Pile Head (mm)	Bending Moment	
					Maximum (kN-m)	Depth (m)
Clay / Sand	I	1:1	1	5.5	126.5	2.5
			2	5.0	122.1	2.5
			3	4.1	119.6	2.5
			4	3.5	115.2	2.4
	II	1:2	1	5.4	119.8	2.5
			2	5.1	112.8	2.5
			3	4.9	109.9	2.4
			4	3.8	107.8	2.4
	III	1:3	1	5.3	117.1	2.5
			2	5.1	110.9	2.5
			3	4.8	107.9	2.4
			4	4.0	106.1	2.4
	IV	1:4	1	5.2	117.5	2.5
			2	4.9	114.7	2.4
			3	4.5	108.2	2.4
			4	3.6	105.1	2.4

4.2 ผลการศึกษาในกรณีดินชั้นบนเป็นทรายและชั้นล่างเป็นดินเหนียว

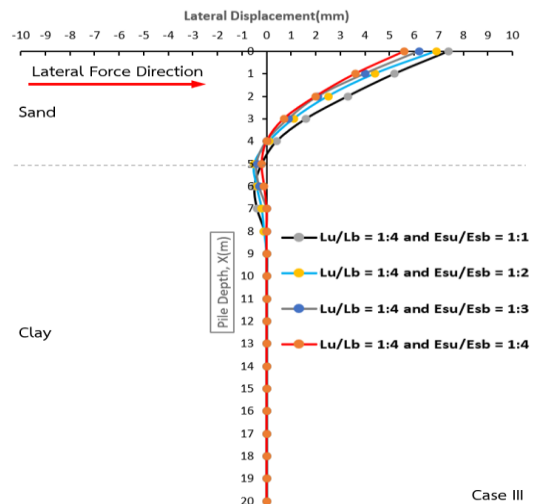
เมื่อนำผลการวิเคราะห์ตามลักษณะสภาพของชั้นดินโดยกำหนดให้ชั้นทรายอยู่บนชั้นดินเหนียวในทุกกรณีศึกษาจะได้ลักษณะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่เกิดขึ้นตลอดระยะความลึกของเสาเข็มทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 16, 17, 18, และ 19 ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นตามเงื่อนไขของค่าอัตราส่วนความหนาระหว่างทรายชั้นบนและดินเหนียวชั้นล่างและค่าสัดส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นของดินทั้งสองชั้น



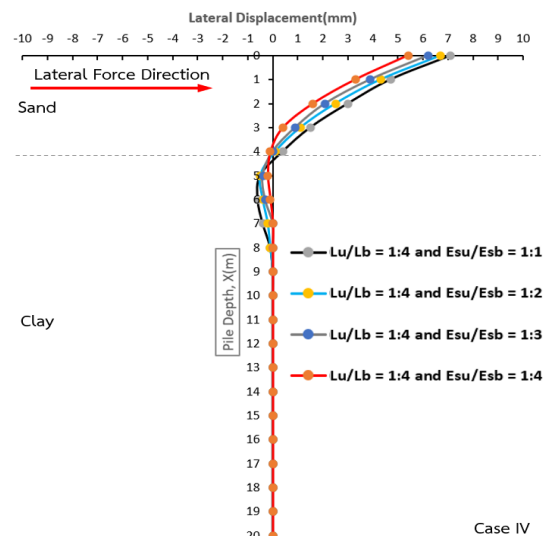
รูปที่ 16 ผลลัพธ์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มจากกรณีศึกษาทรายชั้นบนและดินเหนียวชั้นล่างกรณีที่ 1



รูปที่ 17 ผลลัพธ์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มจากกรณีศึกษาทรายชั้นบนและดินเหนียวชั้นล่างกรณีที่ 2



รูปที่ 18 ผลลัพธ์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มจากกรณีศึกษาทรายชั้นบนและดินเหนียวชั้นล่างกรณีที่ 3



รูปที่ 19 ผลลัพธ์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มจากกรณีศึกษาทรายชั้นบนและดินเหนียวชั้นล่างกรณีที่ 4

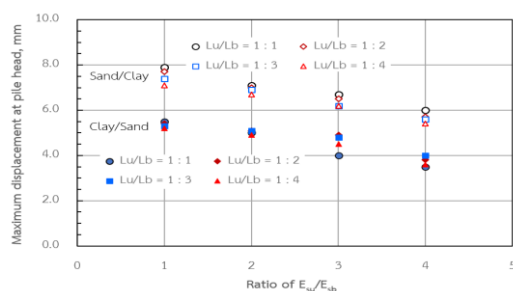
จากผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 16-19 จะได้ว่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มเกิดขึ้นอยู่ในช่วงระยะความลึกโดยประมาณ 8 เมตรจากปลายหัวเสาเข็ม(หรือผิวดิน)และมีค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างอยู่ระหว่าง 5.4-7.9 มิลลิเมตร โดยทั้งหมดได้แสดงข้อมูลไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลลัพธ์ของการเคลื่อนตัวทางด้านข้างและแรงดัดที่เกิดขึ้นในกรณีชั้นบนทรายและชั้นล่างดินเหนียว

Soil Type	Case	L_u / L_b	E_{su} / E_{sb}	Maximum Displacement at Pile Head (mm)	Bending Moment	
					Maximum (kN-m)	Depth (m)
Sand / Clay	I	1:1	1	7.9	127.1	2.8
			2	7.1	124.3	2.75
			3	6.7	121.7	2.75
			4	6.0	119.5	2.7
	II	1:2	1	7.7	121.8	2.75
			2	7.0	115.7	2.7
			3	6.5	113.2	2.7
			4	5.7	109.8	2.7
	III	1:3	1	7.4	126.6	2.8
			2	6.9	117.6	2.7
			3	6.2	114.2	2.7
			4	5.6	111.9	2.7
	IV	1:4	1	7.1	123.1	2.75
			2	6.7	113.8	2.7
			3	6.2	110.2	2.7
			4	5.4	106.9	2.7

4.3 ผลการศึกษาในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินและค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของหัวเสาเข็ม

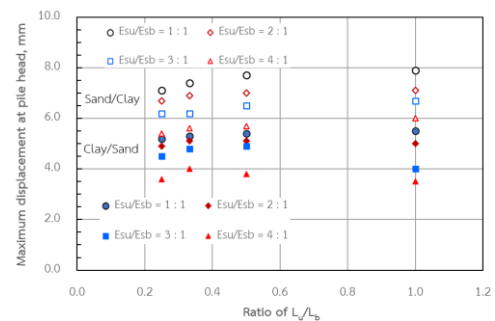
จากผลการศึกษาทั้งหมดทุกกรณีดังแสดงในตารางที่ 3 และ 4 สามารถอธิบายผลการศึกษาในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินและค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของหัวเสาเข็มได้ดังแสดงในรูปที่ 20 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อชั้นทรายอยู่บนชั้นดินเหนียวจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของหัวเสาเข็มมากกว่าชั้นดินเหนียวอยู่บนชั้นทราย โดยความแตกต่างของระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของหัวเสาเข็มที่เกิดขึ้นค่อนข้างจะมีลักษณะคงที่ใกล้เคียงกันเมื่อเปลี่ยนค่าสัดส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นของระหว่างดินทั้งสองชั้นในแต่ละช่วง แต่ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงแนวโน้มของทั้งสองรูปแบบไม่ว่าจะเป็นทรายอยู่บนดินเหนียวหรือดินเหนียวอยู่บนทรายในทุกกรณีพบว่าค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของหัวเสาเข็มมีค่าที่ลดลงเป็นไปในทิศทางเดียวกันเมื่อสัดส่วนของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นระหว่างดินชั้นบนต่อดินชั้นล่างมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นดินและค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่หัวเสาเข็ม

4.4 ผลการศึกษาในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความหนาชั้นดินและค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของหัวเสาเข็ม

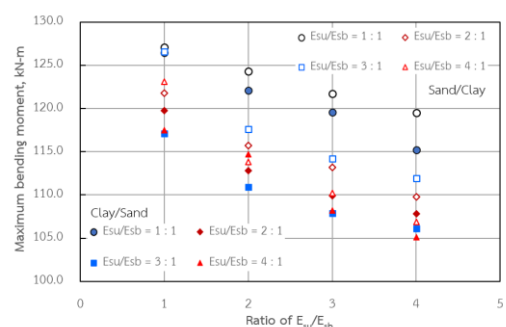
จากผลการศึกษาในตารางที่ 3 และ 4 เช่นกันสามารถอธิบายผลการศึกษาของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนาของดินชั้นบนต่อดินชั้นล่างและค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของหัวเสาเข็มดังแสดงในรูปที่ 21 จะเห็นว่าเมื่อชั้นทรายอยู่บนชั้นดินเหนียวจะเกิดการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของหัวเสาเข็มมากกว่าในกรณีของชั้นดินเหนียวอยู่บนชั้นทรายในอัตราส่วนความหนาที่เท่ากัน และเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนความหนาใดๆ จะพบว่าค่าการเคลื่อนที่ของหัวเสาเข็มลดลงเมื่อสัดส่วนของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินชั้นบนต่อดินชั้นล่างมีค่าเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นถึงลักษณะของความหนาชั้นดินถึงแม้จะอยู่ในอัตราส่วนที่ไม่เท่ากันหากดินชั้นบนมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูงกว่าจะทำให้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของหัวเสาเข็มลดลง เว้นแต่แนวโน้มโดยภาพรวมเมื่ออัตราส่วนความหนาของชั้นดินลดลงค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มไม่ได้ลดลงอย่างชัดเจนแต่อย่างใด



รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนค่าความหนาของชั้นดินและค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่หัวเสาเข็ม

4.5 ผลการศึกษาในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินและแรงดัดที่เกิดขึ้นต่อเสาเข็ม

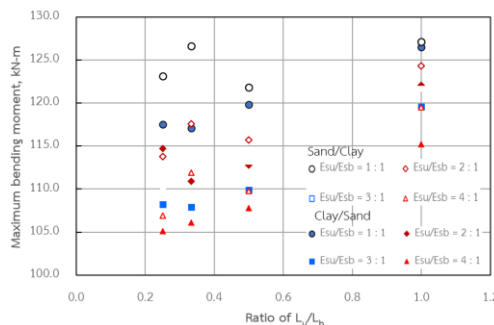
จากผลการศึกษาในตารางที่ 3 และ 4 สามารถอธิบายผลการศึกษาของความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินและแรงดัดที่เกิดขึ้นต่อเสาเข็มได้ดังแสดงในรูปที่ 22 จะเห็นว่าเมื่อชั้นทรายอยู่บนชั้นดินเหนียวจะเกิดผลของแรงดัดที่สูงกว่าชั้นดินเหนียวอยู่บนชั้นทราย โดยมีระยะช่วงความแตกต่างของแรงดัดที่เกิดขึ้นค่อนข้างที่จะคงที่เมื่อเปลี่ยนค่าสัดส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นของระหว่างดินทั้งสองชั้น แต่ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงแนวโน้มของทั้งสองรูปแบบไม่ว่าจะเป็นทรายอยู่บนดินเหนียวหรือดินเหนียวอยู่บนทรายพบว่าแรงดัดที่เกิดขึ้นในเสาเข็มมีค่าลดลงเป็นไปในทิศทางเดียวกันเมื่อสัดส่วนของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นระหว่างดินชั้นบนต่อดินชั้นล่างมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นดินและแรงดัดที่เกิดขึ้นต่อเสาเข็มในกรณีของชั้นดินเหนียวอยู่บนชั้นทราย

4.6 ผลการวิเคราะห์ในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนาแน่นดินและแรงดัดที่เกิดขึ้นต่อเสาเข็ม

จากผลการศึกษาในตารางที่ 3 และ 4 ยังคงสามารถอธิบายผลการศึกษาในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนาแน่นดินชั้นบนต่อดินชั้นล่างและแรงดัดที่เกิดขึ้นต่อเสาเข็มได้ดังแสดงในรูปที่ 23 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อชั้นทรายอยู่บนชั้นดินเหนียวจะเกิดการกระทำของแรงดัดที่สูงกว่าชั้นดินเหนียวอยู่บนชั้นทรายโดยมีระยะช่วงของความแตกต่างค่อนข้างที่จะไม่คงที่ แต่ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงแนวโน้มของทั้งสองรูปแบบไม่ว่าจะเป็นทรายอยู่บนดินเหนียวหรือดินเหนียวอยู่บนทรายพบว่าแรงดัดที่เกิดขึ้นในเสาเข็มมีค่าลดลงเป็นไปในทิศทางเดียวกันเมื่ออัตราส่วนของความหนาแน่นดินระหว่างดินชั้นบนต่อดินชั้นล่างมีค่าลดลง



รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่าความหนาแน่นของชั้นดินและแรงดัดที่เกิดขึ้นต่อเสาเข็มในกรณีของชั้นดินเหนียวอยู่บนชั้นทราย

5. สรุปผลการศึกษา

เมื่อพิจารณาตามความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจากผลการศึกษาโดยสรุปได้ดังนี้

5.1 การเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Lateral Displacement)

1. การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของหัวเสาเข็มลดลงเมื่ออัตราส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินชั้นบนต่อดินชั้นล่างเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ Ashish Mehta and P.D. Pachpor [1] ให้ผลลัพธ์ที่ลดลงเป็นไปในทิศทางเดียวกันรวมทั้งค่าการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นจากผลการศึกษาในทุกกรณีเกิดขึ้นยังคงไม่เกินเกณฑ์ที่ยอมรับได้ไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม กรณีที่ชั้นทรายอยู่บนชั้นดินเหนียวเกิดขึ้นมากกว่าชั้นดินเหนียวอยู่บนชั้นทราย
2. การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของหัวเสาเข็มและอัตราส่วนความหนาแน่นของดินชั้นบนต่อดินชั้นล่างโดยภาพรวมจากผลการศึกษาในทุกกรณีมีแนวโน้มของค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของหัวเสาเข็มเป็นไปในทิศทางที่ลดลงเมื่อพิจารณาเฉพาะในช่วงค่าอัตราส่วนของความหนาแน่นที่ค่าใดค่าหนึ่งยังแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นไม่ว่าดินชั้นบนจะเป็นดินเหนียวหรือทรายหากดินชั้นบนนั้นมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูงกว่าดินชั้นล่างยังคงทำให้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของหัวเสาเข็มลดลง

5.2 แรงดัดที่เกิดขึ้นต่อเสาเข็ม

1. แรงดัดที่เกิดขึ้นสูงสุดนั้นมีค่าเท่ากับ 127.1 kN-m ซึ่งเป็นขนาดที่ไม่เกินกว่ากำลังรับแรงดัดของหน้าตัดเสาเข็มที่ยังไม่มีการพิจารณาเหล็กเสริมเข้ามารับแรงหรือที่เรียกว่าหน้าตัดร้าว

(Cracking Moment Section) ที่มีค่าเท่ากับ 155.6 kN-m ตามการพิจารณาจากมาตรฐาน ACI-318

2. แรงดัดที่เกิดขึ้นในกรณีชั้นดินเหนียวอยู่บนชั้นทรายมีค่าสูงสุดเท่ากับ 126.5 kN-m ที่ระยะความลึก 2.5 เมตร คิดเป็น 0.12 เท่าของความยาวเสาเข็ม และในกรณีชั้นทรายอยู่บนชั้นดินเหนียวมีค่าสูงสุดเท่ากับ 127.1 kN-m ที่ระยะความลึก 2.8 เมตร คิดเป็น 0.14 เท่าของความยาวเสาเข็ม จากทั้งสองกรณีจะเห็นได้ว่าระยะความลึกที่เกิดแรงดัดสูงสุดนั้นอยู่ในช่วงระหว่าง 0.12 ถึง 0.18 ของความยาวเสาเข็มซึ่งยังคงใกล้เคียงและเป็นไปตามผลการศึกษาของบทความที่ได้อ้างอิงในบทนำของ Elrahman & Eldayam [2] ทั้งนี้โดยภาพรวมแล้วแนวโน้มแรงดัดที่เกิดขึ้นต่อเสาเข็มมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของค่าโมดูลัสระหว่างดินชั้นบนต่อดินชั้นล่างมีค่าเพิ่มขึ้น
3. แรงดัดที่เกิดขึ้นต่อเสาเข็มและอัตราส่วนความหนาแน่นของดินชั้นบนต่อดินชั้นล่างเมื่อพิจารณาที่ค่าอัตราความหนาแน่นใดๆจะได้ว่าดินที่ชั้นบนมีค่าโมดูลัสสูงกว่าจะทำให้แรงดัดที่กระทำต่อเสาเข็มลดลง

6. ข้อเสนอแนะ

ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาของบทความนี้อาจเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้เปรียบเทียบกับการศึกษาด้วยวิธีประมาณการเบื้องต้นที่อาศัยการวิเคราะห์หรือคำนวณที่ไม่ซับซ้อนรวมทั้งอาจนำไปใช้ศึกษาเปรียบเทียบในกรณีที่มีการทดสอบด้วยเครื่องมือร่วมกับแบบจำลองและการทดสอบในสนาม

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ashish Mehta and P.D. Pachpor (2010). *Behavior of Laterally Loaded Pile*. Issues Vo.2(12) 7252-7254, International Journal of Engineering Science and Technology.
- [2] F. Elrahman & E.N. Eldayam (2016). *Finite Element Analysis of Laterally Loaded Piles in Clay*. 4th Geo-China International Conference, Shangdong, China, 25-27 July 2016.
- [3] Tomlinson, M.J. (2001). *Foundation Design and Construction*. Piles Subjected to Horizontal or Inclined Load. Published by Longman Group, pp.315-316.
- [4] Davisson, M. T. (1970). *Lateral load capacity of piles*. Highway Research Record No. 333, Highway Research Board, Washington, D.C., pp.107-109.
- [5] Dechaumphai P. *Finite element method in engineering* 5th ed, Chapter 2 Finite Element Equations by Directional Method Chulalongkorn University Press; 2555: 26.
- [6] Prakash S. and Sharma H.D. (1990). *Pile Foundations in Engineering Practice*. Analysis and Design of Pile Foundations under Lateral Loads. Published by John Wiley & Son, Inc., pp.331.
- [7] Fethi Azizi (2000). *Applied Analyses in Geotechnics*, Chapter 14 - Finite Element Modelling in Geotechnics Model. Published E&FN Spon, Inc., pp.733.
- [8] Bowles, J.E. (1996). *Foundation and Analysis Design*. The McGraw-Hill Companies, Inc., pp.123-125