

การศึกษาความสามารถของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง สำหรับโครงสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่งพังในเขตพื้นที่ กรุงเทพมหานคร

The feasible useable study of Prestressed Concrete piles for Embankment structure in Bangkok.

ปณญวณ จันพลโท^{1,*} นันทวัฒน์ ปานประดิษฐ์² เจษฎา วราภรณ์³ นพดล โค้วสุวรรณ⁴ หัสตินทร์ แสงวิสัย⁵ และ วัชราน ระนอง⁶

^{1,2,3,4} วิทยาลัยการชลประทาน สถาบันสมทบมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.นนทบุรี

⁵ วิศวกรโยธาปฏิบัติการ กรมชลประทาน จ.กรุงเทพมหานคร

⁶ วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ กรมชลประทาน จ.กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: Poonyawatjunponto@gmail.com

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์และออกแบบเขื่อนป้องกันตลิ่งพังในปัจจุบันมีหลายทฤษฎีด้วยกันในการวิเคราะห์ วิธีพิจารณาดินแบบอิสระ (Free Earth Support Method) วิธีพิจารณาดินแบบยึดแน่น (Fixed Earth Support Method) หรือ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ซึ่งแต่ละทฤษฎีนั้นให้ผลลัพธ์ในการออกแบบที่แตกต่างกันไป ผู้วิจัยจึงได้ทำการเปรียบเทียบทฤษฎีที่มีหลักการการวิเคราะห์ที่มีความใกล้เคียงกัน คือวิธีพิจารณาดินแบบยึดแน่น กับ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SAP2000 นำมาวิเคราะห์ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (Bangkok Clay) อ้างอิงจากข้อมูลผลทดสอบดินจากกรมโยธาธิการและผังเมือง จากผลการวิจัยพบว่าทฤษฎีวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ให้นิเวศภายในโครงสร้างน้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากการคำนึงถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับโครงสร้าง (Soil-Structure Interaction) และมีสมมติฐานในการพิจารณาแรงต้านของดินที่แตกต่างจากวิธีจุดยึดแน่นที่แรงดันพาสซีฟนั้นคงที่ งานวิจัยนี้จึงได้วิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่งพังซึ่งเป็นเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง ทั้งในรูปแบบยืนต้นเดี่ยว (Free Standing) และรูปแบบที่มีเสาเข็มยึดรั้ง (Anchorage Pile) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ อีกทั้งผู้วิจัยได้ทำการสอบเทียบโปรแกรมด้วยวิธีสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation Method) ซึ่งผลการเปรียบเทียบนั้นมีความสอดคล้องกันในระดับทศนิยมภายใต้เกณฑ์การวิเคราะห์ที่ตรงกัน เช่น ค่ามอดูลัสดินที่อยู่ในช่วงอีลาสติก จุดรองรับที่ปลายเสาเข็ม ผลการศึกษาจากการออกแบบยังแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างในเกณฑ์ความปลอดภัยและข้อกำหนดในการเสริมเหล็กสำหรับเสาเข็มแต่ละรูปแบบ โดยที่เสาเข็มที่มีค่าโมเมนต์เฉื่อยต่างกันก็ให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันด้วย ทั้งนี้อาจมีเกณฑ์ในการวิเคราะห์ชนิดอื่นที่ผู้วิจัยไม่ได้คำนึงถึง งานวิจัยนี้จึงเป็นแนวทางในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่งพังและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ: ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ, วิธีพิจารณาดินแบบยึดแน่น, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, สมการเชิงอนุพันธ์, ปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับโครงสร้าง, เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง

Abstract

Currently, there are several theories for the analysis and design of riverbank protection structures. These include the Free Earth Support Method, the Fixed Earth Support Method, and the Finite Element Method, each yielding different design outcomes. This research compares two theories with similar analytical principles: the Fixed Earth Support Method and the Finite Element Method. The commercial software SAP2000 was employed to analyze Bangkok soft clay, using soil test data from the Department of Public Works and Town & Country Planning.

The research findings indicate that the Finite Element Method significantly results in lower internal structural forces due to its consideration of Soil-Structure Interaction and its different assumption regarding soil resistance compared to the Fixed Earth Support Method, where passive pressure is constant. This research also analyzed and designed reinforced concrete pile riverbank protection structures in both Free-Standing and Anchorage Pile configurations using the Finite Element Method. Furthermore, the program was calibrated using the Differential Equation Method, showing consistent results within decimal precision under the same analytical criteria, such as the soil modulus in the elastic range and the support at the pile tip.

The design study also reveals differences in safety criteria and reinforcement requirements for each pile configuration, with piles

having different moments of inertia also yielding varying results. It is noted that there may be other analytical criteria not considered in this study. This research provides a guideline for the analysis and design of riverbank protection structures and can be further applied in the future.

Keywords: Bangkok soft clay, Fixed Earth Support Method, Finite Element Method, Differential Equation Method, Soil-Structure Interaction, Prestressed Concrete Pile.

1. คำนำ

พื้นที่กรุงเทพมหานครมีลักษณะธรณีวิทยาเป็นดินเหนียวอ่อนที่เรียกว่า “ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ” ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการพังทลายของตลิ่ง ปัจจุบันมีหลายหน่วยงานที่รับผิดชอบด้านการออกแบบและก่อสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่ง เช่น กรมโยธาธิการและผังเมือง กรมชลประทาน และกรมเจ้าท่า โดยรูปแบบของเขื่อนป้องกันตลิ่งพังสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ อาคารในแนวลาด และอาคารในแนวตั้ง [1] วิทยานิพนธ์การศึกษาค้นคว้าและจัดทำแบบมาตรฐานเขื่อนป้องกันตลิ่งพังระบุว่า ปัจจัยในการออกแบบที่สำคัญที่สุดคือปัจจัยด้านชลศาสตร์ [2] โดยเขื่อนแบบอาคารในแนวตั้งมักส่งผลกระทบต่อลำน้ำน้อยกว่า และใช้พื้นที่ก่อสร้างน้อยกว่าแบบแนวลาด

เขื่อนแนวตั้งมีองค์ประกอบหลักในการรับแรงคือเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง ตามมาตรฐาน มอก. 396-2549 ซึ่งในงานวิจัยนี้พิจารณาเขื่อนแนวตั้ง 2 รูปแบบ ได้แก่ 1) แบบยืนต้นเดี่ยว (Free Standing) เป็นรูปแบบโครงสร้างอาคารที่ทำการติดตั้งเสาเข็มรูปตัวไอโดยเว้นระยะห่างเท่าๆกัน พร้อมแผ่นพื้นสำเร็จระหว่างเสาเข็ม 2) แบบที่มีเสายึดตั้ง (Anchorage Pile) เป็นรูปแบบโครงสร้างอาคารทำการติดตั้งเสาเข็ม 2 แถวเว้นระยะห่างเท่าๆกัน พร้อมแผ่นพื้นสำเร็จระหว่างเสาเข็มแถวหน้า และหล่อคานยึดตั้ง (Cab Beam) เพื่อยึดโครงสร้างเข้าด้วยกัน

ปัจจุบันการวิเคราะห์หาหน่วยแรงภายในโครงสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่งพังใน 2 รูปแบบที่กล่าวมาข้างต้นมีหลายทฤษฎี เช่น การวิเคราะห์หาหน่วยแรงภายในอาคารป้องกันตลิ่ง ซึ่งมักใช้ทฤษฎีพิจารณาดินแบบยึดแน่น (Fixed Earth Support Method) สำหรับทฤษฎีนี้มีข้อสังเกตหลายประการ เช่น การคำนวณค่าการแอ่นตัวไม่ได้กล่าวถึงในทฤษฎีนี้ สำหรับทฤษฎีนี้ไม่สามารถประยุกต์กับโครงสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่งพังที่มีเสายึดตั้ง (Anchorage Pile) ที่มีการหล่อคอนกรีตปิดหัวเสาเข็มอัดแรงทั้งต้นหน้าและต้นหลังซึ่งจะทำให้ลักษณะของโครงสร้างอยู่ในรูปแบบโครงข้อแข็ง (Rigid Frame) แต่เนื่องจากทฤษฎีกลับสมมติจุดต่อระหว่างเสาเข็มและโครงสร้างเป็นจุดต่อหมุนได้ จึงไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของโครงสร้างด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงยกตัวอย่างผลการทดสอบดินจากเว็บไซต์ SOIL GIS DPT ของกรมโยธาธิการและผังเมือง มาวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างทฤษฎีพิจารณาดินแบบยึดแน่น (Fixed Earth Support Method) กับ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SAP2000 พร้อมสอบเทียบความถูกต้องด้วยวิธีสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential

Equation Method) อีกทั้งมีการออกแบบเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กเสริมตามขวางในเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงเพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ต่อไปในอนาคต

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 2.1 เพื่อศึกษารรณกรรมและหลักทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเขื่อนป้องกันตลิ่งพัง โดยใช้เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอเป็นองค์ประกอบหลักของโครงสร้าง
- 2.2 เพื่อศึกษาพฤติกรรมและการออกแบบเขื่อนป้องกันตลิ่งพังในรูปแบบยืนต้นเดี่ยว (Free Standing) และแบบที่มีเสายึดตั้ง (Anchorage Pile) โดยมีระยะห่างระหว่างเสาเข็ม 1.50 เมตร
- 2.3 เพื่อเปรียบเทียบทฤษฎีพิจารณาดินแบบยึดแน่น (Fixed Earth Support Method) ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) และสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation Method) ในการวิเคราะห์หน่วยแรงภายในของโครงสร้าง
- 2.4 เพื่อวิเคราะห์และออกแบบขนาดหน้าตัดเสาเข็มรูปตัวไอ เหล็กเสริมตามยาวและเหล็กเสริมตามขวางของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงให้สอดคล้องกับมาตรฐาน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในอนาคต

3. ขอบเขตการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้นำตัวอย่างผลทดสอบดินที่ได้จากเว็บไซต์ SOIL GIS DPT มา 1 ตัวอย่าง มาใช้ในการออกแบบอาคารป้องกันตลิ่งพัง โดยกำหนดรูปแบบการออกแบบเป็น 2 ลักษณะได้แก่ 1.แบบยืนต้นเดี่ยว (Free Standing) ทำการออกแบบโดยใช้เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ 2 ขนาด ได้แก่ I-35 และ I-40 โดยกำหนดระยะห่างระหว่างเสาเข็ม 1.50 เมตร และระยะระหว่างดินเดิมกับระดับดินขุด 2.00 เมตร, 2.แบบที่มีเสายึดตั้ง (Anchorage Pile) ใช้เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ ขนาด I-35 และ I-40 เช่นเดียวกัน โดยกำหนดระยะห่างระหว่างเสาเข็ม 1.50 เมตร และระยะระหว่างดินเดิมกับระดับดินขุด 3.00 เมตร การวิเคราะห์เปรียบเทียบดำเนินการโดยใช้ ทฤษฎีพิจารณาดินแบบยึดแน่น (Fixed Earth Support Method) และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ผ่านโปรแกรมสำเร็จรูป SAP2000 โดยผลหน่วยแรงภายในที่ได้จากการวิเคราะห์จะถูกนำมาใช้ในการออกแบบเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงทั้งในด้านขนาดหน้าตัด และการจัดวางเหล็กเสริมต่อไป

4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

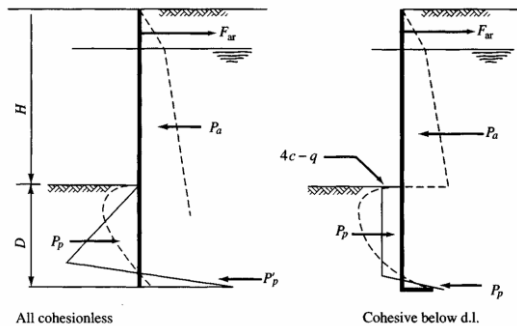
- 4.1 ได้ข้อมูลเชิงเปรียบเทียบระหว่างทฤษฎีพิจารณาดินแบบยึดแน่น (Fixed Earth Support Method) ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) และสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation Method) สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่งพัง
- 4.2 ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของโครงสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่งพังแบบยืนต้นเดี่ยวและแบบมีเสายึดตั้ง ภายใต้สภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ
- 4.3 ได้ข้อมูลแรงภายในจากการวิเคราะห์โครงสร้าง, แรงดึงในลวดอัดแรง, และการเลือกขนาดหน้าตัดเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง

4.4 เป็นกรณีศึกษาต้นแบบที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบ
เขื่อนป้องกันตลิ่งในเขตดินอ่อน หรือในโครงการที่ต้องการใช้ไฟไนต์เอ
ลิเมนต์ เพื่อการวิเคราะห์ที่ละเอียดขึ้นในอนาคต

5. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

5.1 วิธีพิจารณาดินแบบยึดแน่น (Fixed Earth Support Method)

ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์อาคารป้องกันตลิ่งแนวตั้งแบบยืนต้นเดี่ยว
(Free Standing) มักนิยมใช้วิธีพิจารณาดินแบบยึดแน่น (Fixed Earth
Support) สังเกตได้จากเส้นประแรงดันของดินตรงส่วนปลายด้านล่างของ
เสาเข็ม (Pile tip) จะมีแรงดันด้านกลับฝั่งที่เป็นตลิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 1 [4]



รูปที่ 1 สมมุติฐานและลักษณะของแรงดันของดิน (เส้นประ) สำหรับทฤษฎี
Fixed Earth Support Method [4]

5.2 ค่ามอดูลัสดินที่แนะนำสำหรับการออกแบบ (Recommended Design of Soil Modulus)

Terzaghi (1955) แนะนำค่า k_s สำหรับดินเหนียว (โดยที่ k_s มี
ค่าคงที่ตามความลึก) พบว่ามีค่าการตอบสนองของชั้นดินฐานรากใน
แนวราบและแปลงเป็นหน่วยที่ใช้ในหัวข้อนี้ พบว่าค่า k_s อยู่ในช่วง 58 ถึง
232 ปอนด์/นิ้ว² ต่อ นิ้ว ในการวิเคราะห์เสาเข็มส่วนใหญ่ตามวิธีการ
ตอบสนองของชั้นดินฐานรากในแนวราบที่ใช้ในสหรัฐอเมริกา แนวคิดและ
ค่าที่แนะนำข้างต้นถูกนำมาใช้ [9]

$$k_s = 67 \frac{S_u}{B} \quad (1)$$

โดยที่ k_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันดินในแนวราบ

S_u คือ ค่าแรงเฉือนไม่ระบายน้ำของดิน

B คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k'_s}{4EI}} \quad (2)$$

โดยที่ E คือ อีลาสติคมอดูลัสของวัสดุ

I คือ โมเมนต์อินเนอร์เชียรของชิ้นส่วนที่พิจารณา

y คือ ค่าการแอ่นตัวของโค้งอีลาสติค

k'_s คือ ความแข็งของดินฐานราก

e คือ ค่าคงตัว 2.718

5.3 ความต้านทานแรงด้านข้างสูงสุดของกลุ่มเสาเข็มในดินเหนียว (Ultimate Lateral Load Resistance Of Pile Groups In Cohesive Soil)

ข้อมูลจำกัดเกี่ยวกับความต้านทานแรงด้านข้างสูงสุดของกลุ่มเสาเข็ม
ความต้านทานแรงด้านข้างสูงสุดของกลุ่มสามารถคำนวณได้จาก
ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$(Q_u)_G = G_e n Q_u \quad (3)$$

โดยที่ G_e คือ ประสิทธิภาพกลุ่ม

n คือ จำนวนเสาเข็มในกลุ่ม

Q_u คือ ความต้านทานแรงด้านข้างสูงสุดเสาเข็มเดี่ยว

S/B	G_e		
	2 × 2 group	3 × 3 group	Recommended
1	2	3	4
3	0.42	0.39	0.40
3.5	0.50	0.42	0.45
4.0	0.57	0.44	0.50
4.5	0.61	0.47	0.55
5.0	0.63	0.48	0.55
6.0 ^b	—	—	0.65
8.0 ^b	—	—	1.00

S = center-to-center pile spacing.
 B = Pile diameter or width.
^a These values have been obtained from curves provided by Prakash and Saran (1967).
^b = Extrapolated values.

รูปที่ 2 ประสิทธิภาพกลุ่มเสาเข็มรับแรงด้านข้าง [6]

5.4 สมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation Method)

สำหรับเสาเข็มในช่วงที่อยู่ในช่วงระดับตลิ่งถึงดินขุดวิเคราะห์โดยใช้
สมการโค้งอีลาสติค (Elastic curve) ดังสมการที่ (4) [5]

$$\frac{D^2 y}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (4)$$

สำหรับปัญหาโดยทั่วไปที่ค่าความแข็งเกร็ง (Flexural rigidity, EI) เป็น
ค่าคงที่ตลอดช่วงที่พิจารณา สมการที่ (4) สามารถกระจายออกมาได้ 3
สมการดังนี้

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = w(x) \quad (5)$$

$$EI \frac{d^3 y}{dx^3} = V(x) \quad (6)$$

$$EI \frac{dy}{dx} = \theta(x) \quad (7)$$

โดยที่ E คือ อีลาสติคมอดูลัสของวัสดุ

I คือ โมเมนต์อินเนอร์เชียรของชิ้นส่วนที่พิจารณา

y คือ ค่าการแอ่นตัวของโค้งอีลาสติค

w คือ ฟังก์ชันของแรงที่กระทำต่อโครงสร้าง

V คือ ฟังก์ชันของแรงเฉือน

θ คือ ฟังก์ชันของลาดโค้งอีลาสติค

M คือ ฟังก์ชันของโมเมนต์ภายในโครงสร้าง

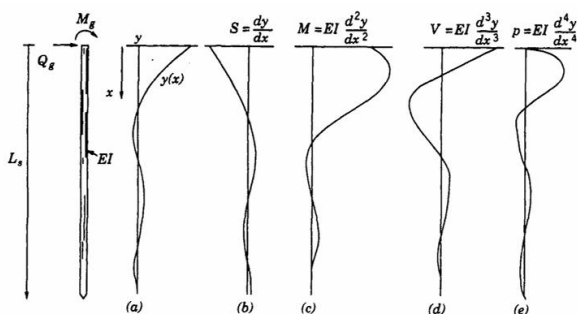
5.5 ทฤษฎี คานบนฐานรากยืดหยุ่น (Beam On Elastic Foundation)

เมื่อคานบนฐานรากที่มีค่าความยืดหยุ่น สามารถใช้ผลเฉลยจากทฤษฎีนี้ได้โดยพิจารณาว่าดินฐานรากมีแรงต้านกลับเมื่อมีแรงกระทำและมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการยุบตัวที่เกิดจากแรงกระทำที่มากขึ้นในลักษณะคล้ายสปริง ตามสมการอนุพันธ์สมการที่ (8) และผลเฉลยทั่วไปดังสมการที่ (9) [4,7]

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = -k'_s y \quad (8)$$

$$y = e^{\beta x} [C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x] + e^{-\beta x} [C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x] \quad (9)$$

โดยที่ E คือ โมดูลัสของยืดหยุ่นของวัสดุ
 I คือ โมเมนต์อินเนอร์เชียรของชิ้นส่วนที่พิจารณา
 y คือ ค่าการแอ่นตัวของคาน
 k'_s คือ ความแข็งของดินฐานราก
 C_n คือ ค่าคงที่ใดๆ



รูปที่ 3 เสาเข็มยาว L ฝังอยู่ในดินทั้งหมด และรับแรง Q_s และโมเมนต์ M_g
(a) การโก่งตัว (b) ความชัน (c) โมเมนต์ (d) แรงเฉือน (e) แรงปฏิกิริยาดิน [6]

5.6 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ Finite Element Method โดยโปรแกรมสำเร็จรูป SAP2000

โปรแกรม SAP2000 เป็นซอฟต์แวร์วิเคราะห์โครงสร้างที่พัฒนาโดยบริษัท Computers and Structures, Inc. (CSI) จากสหรัฐอเมริกาและเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมโยธาและโครงสร้าง โปรแกรมนี้มีความสามารถในการจำลองและวิเคราะห์โครงสร้างที่ซับซ้อนได้หลากหลายรูปแบบรวมถึงการวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีหลักที่ใช้ในการศึกษานี้

5.7 การแบ่งประเภทขององค์อาคารคอนกรีตอัดแรงและกำหนดค่าวัสดุที่ใช้ในการออกแบบ

5.7.1 คอนกรีตอัดแรงแบบไม่แตกร้าว (Prestressed Class U)

ความเค้นที่เกิดขึ้นและการคำนวณการเสียรูปของโครงสร้างภายใต้ภาระการใช้งานสามารถคำนวณได้โดยถือว่าหน้าตัดนั้นยังไม่แตกร้าวดังสมการที่ (10), (11)

$$f_t \leq 0.45 f'_c \quad (10)$$

$$f_b \leq 2.0 \sqrt{f'_c} \quad (11)$$

โดยที่ f_t คือ ความเค้นเหินแฉงแกนสะเทิน
 f'_c คือ ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน
 f_b คือ ความเค้นที่เกิดขึ้นได้แกนสะเทิน

5.7.2 คอนกรีตอัดแรงแบบช่วงเปลี่ยนแปลง (Prestressed Class T)

ความเค้นที่เกิดขึ้นของโครงสร้างภายใต้ภาระการใช้งานสามารถคำนวณได้โดยถือว่าหน้าตัดนั้นยังไม่แตกร้าว แต่การคำนวณการเสียรูปของโครงสร้างภายใต้ภาระการใช้งานจะถือว่าหน้าตัดนั้นแตกร้าว

$$2.0 \sqrt{f'_c} < f_b \leq 3.2 \sqrt{f'_c} \quad (12)$$

โดยที่ f'_c คือ ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน
 f_b คือ ความเค้นที่เกิดขึ้นได้แกนสะเทิน

5.7.3 คอนกรีตอัดแรงแบบแตกร้าว (Prestressed Class C)

ความเค้นที่เกิดขึ้นและการคำนวณการเสียรูปของโครงสร้างภายใต้ภาระการใช้งานสามารถคำนวณได้โดยถือว่าหน้าตัดนั้นแตกร้าว โดยที่ในการออกแบบคอนกรีตอัดแรงที่สภาวะนี้จะต้องคำนึงถึงเรื่องการควบคุมรอยร้าวเพิ่มเติมอีกด้วย

$$3.2 \sqrt{f'_c} < f_b \quad (13)$$

โดยที่ f'_c คือ ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน
 f_b คือ ความเค้นที่เกิดขึ้นได้แกนสะเทิน

5.7.4 สรุปข้อกำหนดการออกแบบเพื่อความสามารถในการใช้งาน (Serviceability design requirements)

ชิ้นส่วนของอาคารคอนกรีตอัดแรงที่เกิดการดัดตัวสามารถจำแนกประเภทได้ตามเกณฑ์ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4

	Prestressed			Nonprestressed
	Class U	Class T	Class C	
Assumed behavior	Uncracked	Transition between uncracked and cracked	Cracked	Cracked
Section properties for stress calculation at service loads	Gross section 24.5.2.2	Gross section 24.5.2.2	Cracked section 24.5.2.3	No requirement
Allowable stress at transfer	24.5.3	24.5.3	24.5.3	No requirement
Allowable compressive stress based on uncracked section properties	24.5.4	24.5.4	No requirement	No requirement
Tensile stress at service loads 24.5.2.1	$f_t \leq 2\sqrt{f'_c}$	$2\sqrt{f'_c} < f_t \leq 3.2\sqrt{f'_c}$	No requirement	No requirement
Deflection calculation basis	24.2.3.8, 24.2.4.2	24.2.3.9, 24.2.4.2	24.2.3.9, 24.2.4.2	24.2.3, 24.2.4.1
Crack control	No requirement	No requirement	24.3	24.3
Computation of M_o or f_t for crack control	—	—	Cracked section analysis	$M/A_s \times \text{lever arm}$, or 24.3
Side skin reinforcement	No requirement	No requirement	9.7.2.3	9.7.2.3

รูปที่ 4 ตารางสรุปข้อกำหนดการออกแบบเพื่อความสามารถในการใช้งาน (Serviceability design requirements) [10]

5.7.5 กำหนดใช้กำลังอัดของคอนกรีต

กำหนดใช้คอนกรีตอัดแรง หน่วยน้ำหนัก 2400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน แห่งทรงกระบอกขณะใช้งาน f'_c มีค่าเท่ากับ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

5.7.6 กำหนดใช้คุณสมบัติเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต เหล็กเส้นกลมและเหล็กข้ออ้อย

กำหนดใช้คุณสมบัติเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตเหล็กเส้นกลมและเหล็กข้ออ้อย ตามมาตรฐานมอก.20-2559และมาตรฐานมอก.24-2559 ตามลำดับ

6.1.2 การจำแนกชั้นดินเพื่อใช้ในการวิเคราะห์

กำหนดระดับหัวเสาเข็มและระดับปลายเสาเข็ม ที่ระดับ +0.00 ม. และ -18.50 ม. ตามลำดับ

พิจารณาแบ่งชั้นดินจากรูที่ 5 และ 6 ได้ 3 ชั้น โดยทำการเฉลี่ยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของชั้นดินที่ 1 2 และ 3 ที่ระดับ 3.00-6.45 เมตร 9.00-10.95 เมตร และ 12.00-18.45 เมตร มีค่าเท่ากับ 0.77, 1.60 และ 7.55 ตันต่อตารางเมตร ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปผลดินสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์

ระดับ (เมตร)	ความหนา (เมตร)	ชนิด	γ_{sat} ตันต่อลบ.ม.	S_u ตันต่อตร.ม.
(+0.00) – (-9.00)	9.00	CH	1.635	0.77
(-9.00) – (-12.00)	3.00	CH	1.591	1.60
(-12.00) – (-18.50)	6.50	CL	1.832	7.55

6.1.3 ค่ามอดูลัสที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในส่วนนี้จะนำผลการจำแนกชนิดดินที่ได้ประเมินไว้ก่อนหน้านี้มาใช้ในการประมาณค่ามอดูลัสของแรงปฏิกิริยาดินเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์แรงด้านข้างที่มากกระทำต่อไป ดังแสดงในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2 สำหรับเชื่อมป้องกันดิ่งพังในรูปแบบยืนต้นเดียว

ระดับ (เมตร)	Moment of inertia ซม. ⁴	G_e	k'_s กก./ซม.	β 1/ซม.
(+0.00) – (-9.00)	118324.58	1	5.14	0.00249
	(I – 35 x 35)			
	206313.33	1	5.14	0.00217
(-9.00) – (-12.00)	118324.58	1	10.72	0.00299
	(I – 35 x 35)			
	206313.33	1	10.72	0.00260
(-12.00) – (-18.50)	118324.58	1	50.58	0.00441
	(I – 35 x 35)			
	206313.33	1	50.58	0.00384

ตารางที่ 3 สำหรับเชื่อมป้องกันดิ่งพังในรูปแบบที่มีเสาเข็มยึดตั้ง

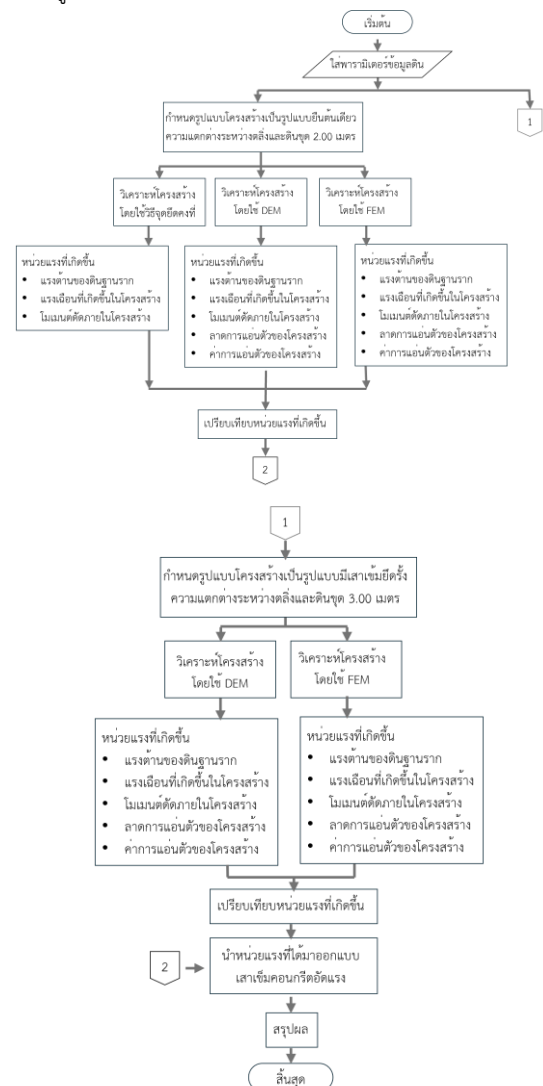
ระดับ (เมตร)	Moment of inertia ซม. ⁴	G_e	k'_s กก./ซม.	β 1/ซม.
(+0.00) – (-9.00)	118324.58	0.5	2.57	0.00209
	(I – 35 x 35)			
	206313.33	0.5	2.57	0.00182
(-9.00) – (-12.00)	118324.58	0.5	2.57	0.00209
	(I – 35 x 35)			
	206313.33	0.5	2.57	0.00182

(-9.00) – (-12.00)	118324.58	0.5	5.36	0.00252
	(I – 35 x 35)			
	206313.33	0.5	5.36	0.00219
(-12.00) – (-18.50)	118324.58	0.5	25.29	0.00371
	(I – 35 x 35)			
	206313.33	0.5	25.29	0.00323
(-18.50) – (-21.00)	118324.58	0.5	25.29	0.00371
	(I – 35 x 35)			
	206313.33	0.5	25.29	0.00323

7. ขั้นตอนการวิเคราะห์

7.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในการศึกษาความสามารถของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง สำหรับโครงสร้างเชื่อมป้องกันดิ่งพัง เพื่อให้เห็นหน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ในแต่ละทฤษฎีและความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดของเสาเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 7



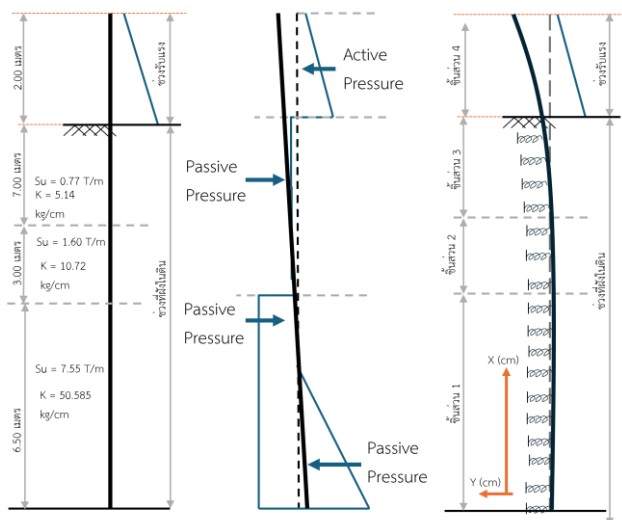
รูปที่ 7 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เนื่องจากวิธีพิจารณาแบบดินยึดแน่น (Fixed Earth Support Method) ไม่ได้กล่าวถึงการวิเคราะห์หาผลการแอนตัวและค่าการแอนตัวของโครงสร้างผู้วิจัยจึงเปรียบเทียบกับหน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้นจากวิธีนี้

7.2 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีต่างๆ

7.2.1 โครงสร้างเขื่อนกันตลิ่งพังกแบบยืนต้นเดี่ยว (Free Standing)

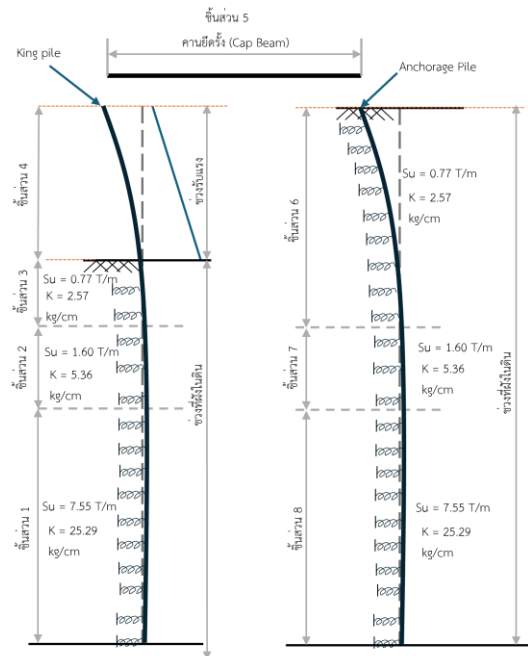
สำหรับวิธีพิจารณาแบบดินยึดแน่น (Fixed Earth Support Method) ใช้พารามิเตอร์ในตารางที่ 1 ในการคำนวณแรงดันดินด้านแอคทีฟและพาสซีฟ สำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) และวิธีสมการอนุพันธ์ (Differential Equation Method) ใช้พารามิเตอร์จากตารางที่ 2 ในการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 พารามิเตอร์ของดินและแผนภาพแรงอิสระของการวิเคราะห์โครงสร้างเขื่อนกันตลิ่งพังกชนิดยืนต้นเดี่ยว (Free Standing)

7.2.2 โครงสร้างเขื่อนกันตลิ่งพังกแบบมีเสาเข็มยึดรั้ง (Anchorage Pile)

สำหรับวิธีพิจารณาแบบดินยึดแน่น (Fixed Earth Support Method) ไม่สามารถคำนวณได้เนื่องจากสมมติฐานของวิธีนี้ไม่ได้กล่าวถึงรูปแบบที่โครงสร้างเสาเข็มด้านหน้า (King Pile) เชื่อมติดกับเสาเข็มด้านหลัง (Anchorage Pile) โดยมีการถ่ายโมเมนต์ แรงเฉือน การแอนตัว และลาดการแอนตัว ผ่านคานยึดรั้ง (Cap Beam) ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงไม่ได้ใช้ทฤษฎีนี้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง สำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) และวิธีสมการอนุพันธ์ (Differential Equation Method) ใช้พารามิเตอร์จากตารางที่ 3 ในการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 9



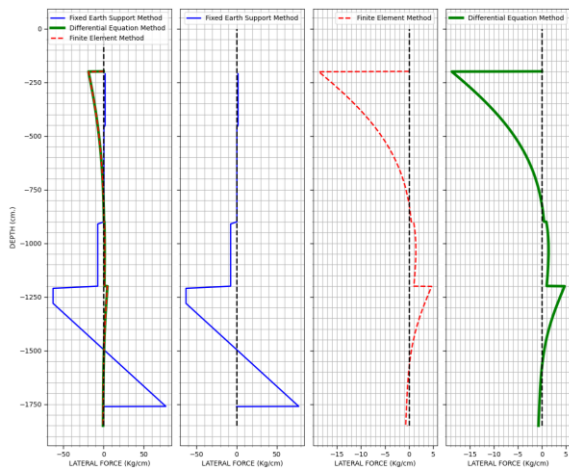
รูปที่ 9 แสดงพารามิเตอร์ของดินและแผนภาพแรงอิสระของการวิเคราะห์โครงสร้างเขื่อนกันตลิ่งพังกชนิดมีเสาเข็มยึดรั้ง (Anchorage Pile)

7.3 เปรียบเทียบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์โครงสร้าง

7.3.1 ผลการวิเคราะห์อาคารป้องกันตลิ่งแบบยืนต้นเดี่ยว (Free Standing)

โดยเปรียบเทียบด้วยกัน 3 วิธี ได้แก่วิธีพิจารณาแบบดินยึดแน่น (Fixed-Earth Support method) ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SAP2000 และ สมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation Method) ได้กราฟแรงต้านของดินฐานราก แรงเฉือนภายในโมเมนต์ตัด ของโครงสร้างเขื่อนกันตลิ่งพังกโดยใช้เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง I-35 เป็นโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 10-12 ตามลำดับ

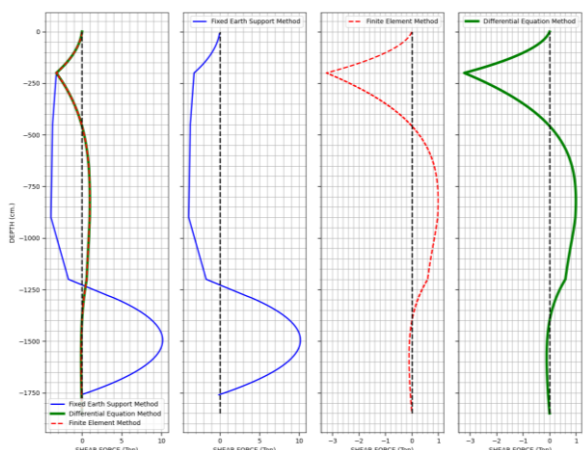
ในทฤษฎีพิจารณาดินยึดแน่น (Fixed Earth Support Method) แรงดันด้านพาสซีฟแปรผันตรงตามค่าแรงเฉือนไม่ระบายน้ำของดินและความลึก ซึ่งชั้นดินเหนียวอ่อนมากในระดับ ± 0.00 เมตร ถึง -9.00 เมตร แรงดันด้านพาสซีฟมีค่าน้อยกว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และสมการอนุพันธ์ที่สมมุติให้ดินมีลักษณะคล้ายสปริงเมื่ออาคารได้รับแรงภายนอกแล้วเกิดการแอนตัวตัวไปกดทับดินแล้วจึงเกิดแรงต้านของดินฐานราก ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 กราฟแรงดันของดินฐานรากโดยใช้วิธีวิเคราะห์ทั้ง 3 วิธี สำหรับโครงสร้างแบบยืนต้นเดียว (Free Standing) โดยใช้เสาเข็ม I-35

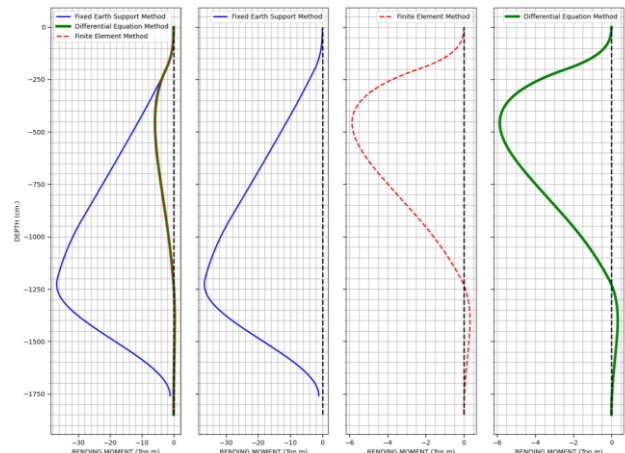
แรงเฉือนซึ่งเกิดจากการสะสมผลต่างของแรงดันดิน (แรงดันดินจากส่วนรับแรงหักกลับด้วยแรงดันของดินฐานราก) ด้วยวิธีพิจารณาแบบดินยึดแน่น ค่าแรงดันของดินฐานรากที่มีค่าน้อยกว่าแรงดันด้านแอคทีฟในดินชั้นแรก (± 0.000 เมตร ถึง -9.000 เมตร) ทำให้แรงเฉือนที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้นในค่าพีคในช่วงแรก (-3.9 ตัน) ที่ระดับ -9.000 เมตร หลังจากนั้นแรงเฉือนจะมีค่าลดลงเนื่องจากอยู่ในช่วงชั้นดินที่มีค่าแรงเฉือนไม่ระบายน้ำ 1.60 ตันต่อตารางเมตร ซึ่งมีค่ามากกว่าดินชั้นแรก และที่ระดับ -12.25 เมตร แรงเฉือนมีค่าเป็นศูนย์

สำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีสมการเชิงอนุพันธ์ เนื่องจากผลลัพธ์เป็นการคำนึงถึงการแอ่นตัวต่อแรงดันของดินฐานรากที่มีค่าเยอะในช่วงแรกทำให้แรงเฉือนภายในโครงสร้างลดลงอย่างรวดเร็ว แรงเฉือนมีค่าเท่ากับศูนย์ที่ระดับ -4.57 เมตรดังแสดงในรูปที่ 11



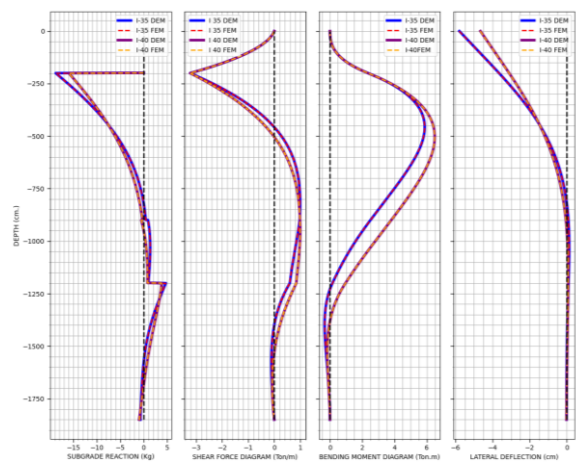
รูปที่ 11 กราฟแรงเฉือนภายในโดยใช้วิธีวิเคราะห์ทั้ง 3 วิธี สำหรับโครงสร้างแบบยืนต้นเดียว (Free Standing) โดยใช้เสาเข็ม I-35

โมเมนต์ดัดภายในโครงสร้างสามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของแรงเฉือน การคำนวณโดยใช้วิธีพิจารณาแบบดินยึดแน่นได้ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด 36.8 ตัน-เมตร ที่ระดับ -12.25 เมตร การคำนวณโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และสมการเชิงอนุพันธ์ให้ค่าโมเมนต์ดัดเท่ากัน 5.866 ตัน-เมตร ที่ระดับ -4.57 เมตรดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 กราฟโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างทั้ง 3 วิธี สำหรับโครงสร้างแบบยืนต้นเดียว (Free Standing) โดยใช้เสาเข็ม I-35

จากการวิเคราะห์พบว่า โครงสร้างเชื่อมกันถล่มพังที่ใช้เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง I-35 มีการแอ่นตัว 5.79 เซนติเมตร แรงดันดินฐานราก -18.75 กิโลกรัม ที่ระดับ -2.00 เมตร โดยแรงเฉือนลดลงจนเป็นศูนย์ที่ระดับ -4.57 เมตร และเกิดโมเมนต์ดัดสูงสุด -5.866 ตัน-เมตร ในขณะที่กรณีของเสาเข็ม I-40 ค่าการแอ่นตัวลดลงเหลือ 4.65 เซนติเมตร แรงดันดินฐานราก -15.96 กิโลกรัม ที่ระดับ -2.00 เมตร และแรงเฉือนลดลงเป็นศูนย์ที่ระดับ -5.03 เมตร ส่งผลให้เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุด -6.49 ตัน-เมตร ดังแสดงในรูปที่ 13

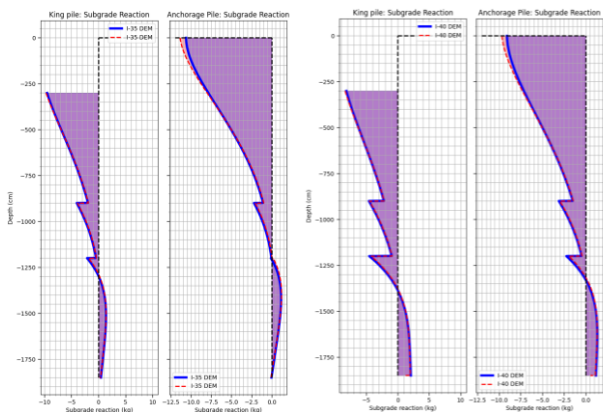


รูปที่ 13 กราฟเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แรงดันดินฐานราก แรงเฉือนโมเมนต์ดัด และการแอ่นตัวของเสาเข็ม I-35 และ I-40 ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และสมการเชิงอนุพันธ์

7.3.2 ผลการวิเคราะห์เชื่อกันตลิ่งพังกนดมิเสาเข็มยึดรั้ง (Anchorage Pile)

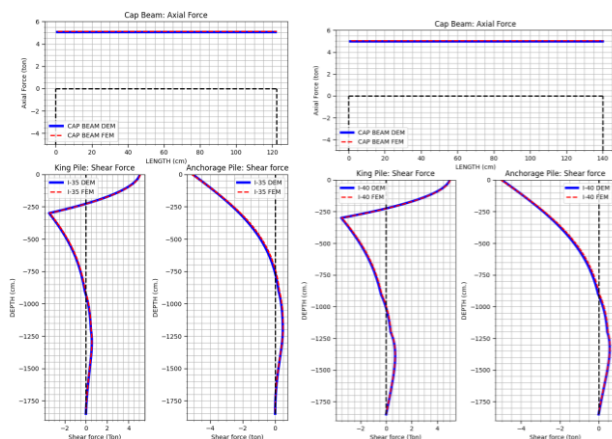
เปรียบเทียบด้วยกัน 2 วิธี คือโฟมโหนดโพลิเมอร์ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SAP2000 และ สมการเชิงอนุพันธ์ ได้กราฟแรงต้านของดินฐานราก แรงเฉือน โมเมนต์ดัด และการแอ่นตัวของโครงสร้าง โดยใช้เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง I-35 และ I-40 เป็นโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 14-18 ตามลำดับ

แรงต้านของดินฐานรากทั้งที่ใช้เสาเข็ม I-35 และ I-40 เป็นโครงสร้างด้วยทั้ง 2 วิธีการวิเคราะห์ให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงและเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือเสาเข็มยึดรั้งจะรับแรงต้านของดินฐานรากมากกว่าเสาเข็มต้นหน้าดังแสดงในรูปที่ 14



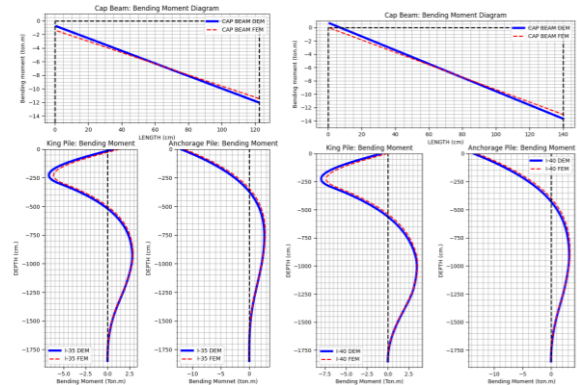
รูปที่ 14 กราฟแรงต้านของดินฐานรากสำหรับโครงสร้างแบบมีเสาเข็มยึดตั้ง โดยใช้เสาเข็ม I-35 และ I-40 ตามลำดับ

แรงดันด้านข้างของดินกระทำต่อเสาเข็มต้นหน้า กลายเป็นแรงเฉือน ส่วนหนึ่งจะถูกกระจายลงดินฐานรากด้านล่างและอีกส่วนหนึ่งจะถ่ายขึ้นด้านบนผ่านแรงตามแนวแกนของคานยึดรั้งกระทำถ่ายเข้าสู่เสาเข็มยึดรั้งที่ปลายด้านบนของเสาเข็มในรูปแบบแรงเฉือนดังแสดงในรูปที่ 15



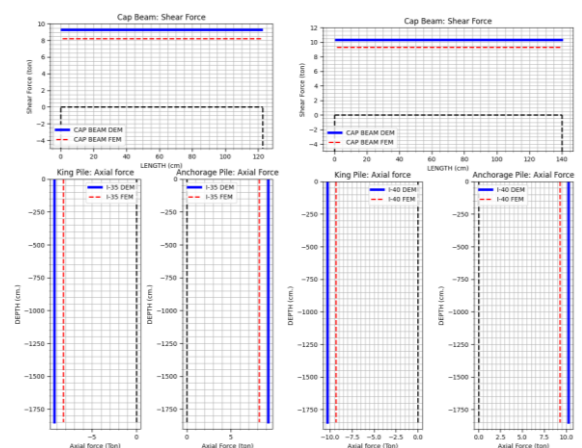
รูปที่ 15 กราฟแรงตามแนวแกนของคานยัดรั้ง แรงเฉือนของโครงสร้าง
เสาเข็มต้นหน้า และเสาเข็มยัดรั้ง โดยใช้เสาเข็ม I-35 และ I-40 ตามลำดับ

โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำแบบกระจายตัวไม่สม่ำเสมอกระทำกับเสาเข็มต้นหน้าส่วนหนึ่งถ่ายแรงลงดินฐานรากและอีกส่วนถ่ายแรงผ่านคานยึดรั้งเป็นแรงกระทำแบบจุดมายังเสาเข็มยึดรั้ง แรงกระทำแบบจุดดังกล่าวส่งผลให้เกิดโมเมนต์ดัดที่เสาเข็มยึดรั้งสูงกว่าเสาเข็มต้นหน้า ทั้งโครงสร้างที่ใช้เสาเข็ม I-35 และเสาเข็มโอ 4-40 ดังแสดงในรูปที่ 16



รูปที่ 16 กราฟไมเนตต์ดัดของคานยัดรั้ง โครงสร้างเสาเข็มต้นหน้า และ
เสาเข็มยัดรั้ง โดยใช้เสาเข็ม I-35 และ I-40 ตามลำดับ

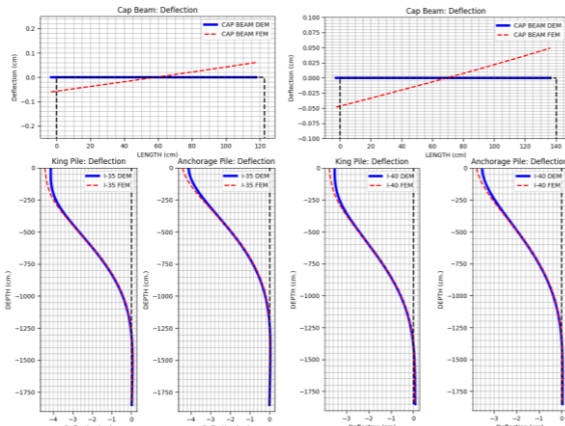
แม้ว่าเขื่อนป้องกันตลิ่งพังจะวิเคราะห์เพียงแรงที่มากกระทำแนวราบตามแรงดันดินก็ตาม แต่ก็ทำให้เกิดแรงตามแนวแกนในเสาเข็มโครงสร้างได้ซึ่งเป็นแรงในแนวตั้ง แรงตามแนวแกนในเสาเข็มโครงสร้างนี้เกิดจากการรับโมเมนต์ดัดของคานยึดรั้ง เมื่อคานยึดรั้งมีโมเมนต์ดัดเกิดขึ้นเป็นหน่วยแรงภายในก็จะเกิดแรงเฉือนตามมาดังสมการอนุพันธ์สมการที่ 4 และสมการที่ 6 เมื่อพิจารณาแรงเฉือนเหล่านี้ที่จุดเริ่มต้นและสิ้นสุดของคานยึดรั้งซึ่งเชื่อมแน่นกับเสาเข็มโครงสร้างก็จะกลายเป็นแรงตามแนวแกนในเสาเข็มโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 17 แรงเฉือนของคานยึดตั้ง แรงตามแนวแกนของโครงสร้างเสาเข็มต้น
หน้าและเสาเข็มยึดตั้ง โดยใช้เสาเข็ม I-35 และ I-40 ตามลำดับ

เนื่องจากการศึกษาในครั้งนี้ได้ครอบคลุมถึงแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้น
ในเสาเข็มโครงสร้าง ส่งผลให้แบบจำลองวิธีสมการอนพันธ์ที่ใช้ในการ

วิเคราะห์จิงขาดเงื่อนไขการรองรับการเปลี่ยนแปลงระยะยึดหด (Strain) ตามแนวแกนของวัสดุ ซึ่งปรากฏดังแสดงในรูปที่ 18 จากรูปด้านบน ซึ่งเปรียบเทียบความแตกต่างของการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของคานยึดรั้งระหว่างวิธีสมการอนุพันธ์และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า ที่ปลายด้านซ้าย วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงการแอ่นตัวลง (ค่าติดลบ) อันเป็นผลจากการหดตัวของเสาเข็มต้นหน้าที่เกิดจากแรงตามแนวแกน ในขณะที่ปลายด้านขวาแสดงการแอ่นตัวขึ้น (ค่าเป็นบวก) เนื่องมาจากแรงดึงที่กระทำต่อเสาเข็มยึดรั้ง ดังแสดงในรูปที่ 18

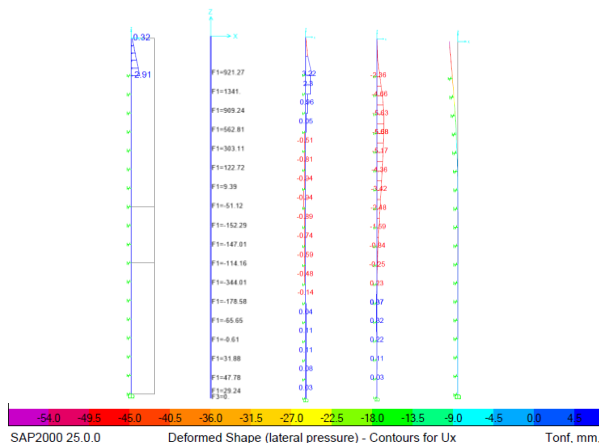


รูปที่ 18 การแอ่นตัวของคานยึดรั้ง เสาเข็มต้นหน้า และเสาเข็มยึดรั้ง โดยใช้เสาเข็ม I-35 และ I-40 ตามลำดับ

7.4 ผลการวิเคราะห์โดยวิธี Finite Element ด้วยโปรแกรม SAP2000 และ ออกแบบ Prestressed Concrete Design [10]

7.4.1 อาคารป้องกันตลิ่งแบบยื่นต้นเดียว (Free Standing)

รูปภาพแสดงถึงแผนภาพแรงอิสระ แรงต้านของดินฐานราก แรงเฉือน โมเมนต์ดัด และ ค่าการแอ่นตัว ที่ได้จากโปรแกรม SAP2000 จากซ้ายไปขวาตามลำดับ ดังรูปที่ 19

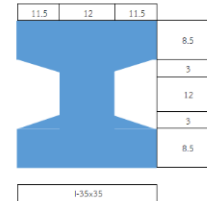


รูปที่ 19 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของเสาเข็ม I-35

จากรูปที่ 19 กำหนดให้ใช้แรงเฉือน 3.5 ตัน และโมเมนต์ดัด 6.0 ตัน-เมตร ในการตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้น

ขั้นตอนการตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้น

ทดลองเลือกใช้หน้าตัดเสาเข็ม I-35 ดังรูปที่ 20



รูปที่ 20 ขนาดและมิติเสาเข็ม I-35

ทดลองเสริม 7-Wire Stand, PC-Stand Ø9.53 Grade 1860 จำนวน 8 เส้น effective prestress = 60.178 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ตรวจสอบ Stress ที่เกิดขึ้นในหน้าตัด

$$f_t = \frac{P_e}{A_g} + \frac{Mc}{I} = 148.92 \text{ ksc} < 0.45f_c'$$

$$f_b = \frac{P_e}{A_g} - \frac{Mc}{I} = -28.56 \text{ ksc} < 2.0\sqrt{f_c'}$$

ออกแบบ Prestressed เป็น Prestressed Class U ตาม [10]

ตรวจสอบกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดเสาเข็ม I-35

$$\text{Flexure-shear strength } V_{ci} = 0.16\sqrt{f_c'}b_wd_p + \frac{V_uM_{cr}}{M_u}$$

$$\text{Web-shear strength } V_{cw} = (0.93\sqrt{f_c'} + 0.3f_{pc})b_wd_p$$

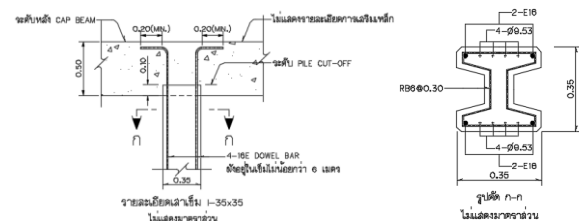
ได้ $V_{ci} = 9.691$ ตัน (ตัวควบคุม) และ $V_{cw} = 13.81$ ตัน

โดยที่ $\phi V_n = \phi V_c > V_u$

แต่ $\frac{V_u}{\phi} > \frac{V_c}{2}$ เสริมเหล็กปลอกชั้นต่ำ

สรุปผลการออกแบบ

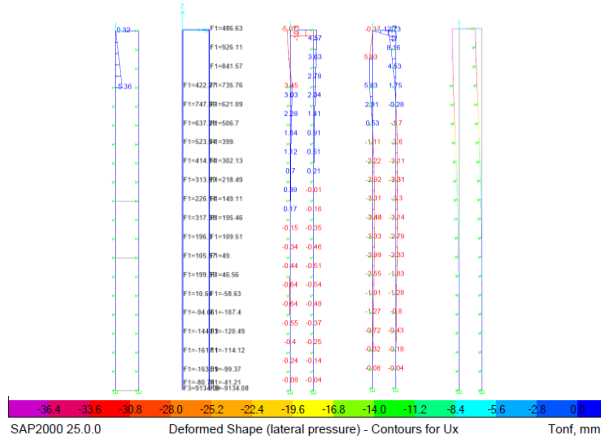
ใช้หน้าตัดเสาเข็ม I-35 เสริม 7-Wire Stand PC-Stand Ø9.53 Grade 1860 จำนวน 8 เส้น เสริม Deformed Bar Ø16 Grade SD40 จำนวน 4 เส้น เสริม เหล็กปลอก Round Bar Ø6 Grade SR24 ระยะห่าง 30 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 21



รูปที่ 21 รายละเอียดการเสริมเหล็กเสาเข็ม I-35

7.4.2 อาคารป้องกันตลิ่งแบบเสาเข็มยึดรั้ง (Anchorage Pile)

รูปภาพแสดงถึงแผนภาพแรงอิสระ แรงต้านของดินฐานราก แรงเฉือน โมเมนต์ดัด และ ค่าการแอ่นตัว ที่ได้จากโปรแกรม SAP2000 จากซ้ายไปขวาตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 22

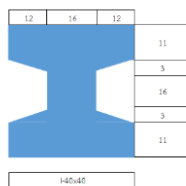


รูปที่ 22 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของเสาเข็ม I-40

จากรูปที่ 22 กำหนดให้ใช้ค่าแรงตามแนวแกน 9.5 ตัน (แรงดึง) แรงเฉือน 5.0 ตัน และโมเมนต์ดัด 13.0 ตัน-เมตร ในการตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 24

ขั้นตอนการตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้น

ทดลองเลือกใช้หน้าตัดเสาเข็ม I-35 ดังรูปที่ 23



รูปที่ 23 ขนาดและมิติเสาเข็ม I-40

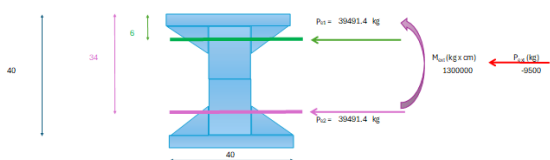
ทดลองเสริม 7-Wire Stand PC-Stand Ø9.53 Grade 1860 จำนวน 12 เส้น Effective Prestress = 63.696 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ตรวจสอบ Stress ที่เกิดขึ้นในหน้าตัด

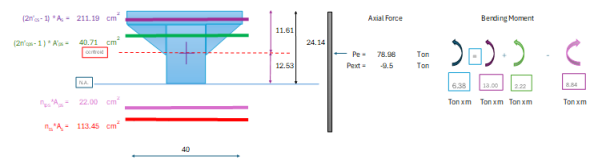
$$f_t = \frac{P_e}{A_g} + \frac{P}{A_g} + \frac{Mc}{I} = 182.06 \text{ ksc} > 0.45f_c'$$

$$f_b = \frac{P_e}{A_g} + \frac{P}{A_g} - \frac{Mc}{I} = -69.99 \text{ ksc} > 3.2\sqrt{f_c'}$$

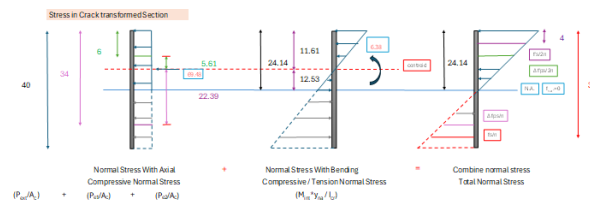
ออกแบบ Prestressed เป็น Prestressed Class C ตาม [10]



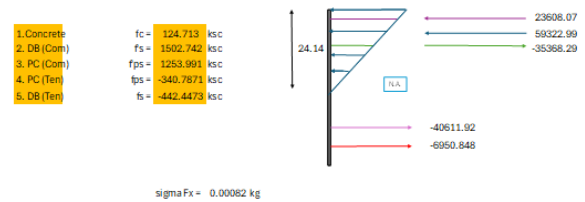
รูปที่ 24 แรงภายในที่เกิดขึ้นกับหน้าตัดเสาเข็ม I-40



รูปที่ 25 การแปลงคุณสมบัติวัสดุของคอนกรีตอัดแรงแบบแตกร้าว



รูปที่ 26 แผนภาพหน่วยแรงตั้งฉากกับหน้าตัดเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง



รูปที่ 27 ความเค้นและแรงสุทธิที่เกิดขึ้นภายในหน้าตัดคอนกรีตอัดแรง

ตรวจสอบความเค้นที่เกิดขึ้นกับวัสดุในหน้าตัดคอนกรีต

- 1.แรงอัดที่เกิดขึ้นสูงสุดในหน้าตัดคอนกรีต 124.71 ksc < 157.5 ksc
- 2.เหล็กเสริมรับแรงอัด Deformed Bar 1502.74 ksc < 1700 ksc
- 3.เหล็กเสริมรับแรงอัด 7-wire stand PC stand 1253.99 ksc < 1700 ksc
- 4.เหล็กเสริมรับแรงดึง 7-wire stand PC stand -340.79 ksc < -1700 ksc
- 5.เหล็กเสริมรับแรงดึง Deformed Bar -442.45 ksc < -1700 ksc

ตรวจสอบกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดเสาเข็ม I-40

$$\text{Flexure-shear strength } V_{ci} = 0.16\sqrt{f_c'}b_wd_p + \frac{V_uM_{cr}}{M_u}$$

$$\text{Web-shear strength } V_{cw} = (0.93\sqrt{f_c'} + 0.3f_{pc})b_wd_p$$

ได้ $V_{ci} = 5.194$ ตัน (ตัวควบคุม) และ $V_{cw} = 20.99$ ตัน

โดยที่ $\phi V_n = \phi V_c < V_u$ ต้องเสริมเหล็กปลอกรับแรงเฉือนเพิ่ม

ทดลองเสริม RB Ø9 Grade SR24 ระยะห่าง 17.5 เซนติเมตร

จาก $V_s = \frac{A_vf_yd}{s}$ จะได้ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนจากเหล็กปลอก

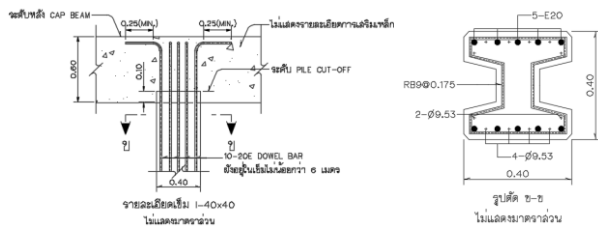
ได้ $V_s = 6.280$ ตัน

ตรวจสอบ $\phi V_n = \phi(V_c + V_n) = 8.606$ ตัน $> V_u$

สรุปผลการออกแบบ

ใช้หน้าตัดเสาเข็ม I-40 เสริม 7-Wire Stand PC-Stand Ø9.53 Grade 1860 จำนวน 12 เส้น เสริม Deformed Bar Ø16 Grade SD40 จำนวน

10 เส้น เสริม เหล็กปอก Round Bar Ø9 Grade SR24 ระยะห่าง 17.5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 28



รูปที่ 28 รายละเอียดการเสริมเหล็กเสาเข็ม I-40

8. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผลการศึกษา

จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบวิธีจุดยึดแน่นของดิน (Fixed Earth Support Method) และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่งในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ พบว่าวิธีจุดยึดแน่นให้ค่าหน่วยแรงภายในโครงสร้างที่สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ความแตกต่างนี้มีสาเหตุหลักมาจากสมมติฐานในการพิจารณาแรงต้านของดิน โดยวิธีจุดยึดแน่นพิจารณาแรงต้านเป็นแรงดันพาสซีฟคงที่ ในขณะที่วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คำนึงถึงการแปรผันของแรงต้านตามการแอ่นตัวของโครงสร้าง ซึ่งมีค่าสูงสุดใกล้ระดับดินตลิ่ง ส่งผลให้แรงเฉือนในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกดังแสดงในรูปที่ 10 ถึง รูปที่ 12 แม้ว่าจะมีสมมติฐานที่แตกต่างกันในภาพรวม แต่ทั้งวิธีจุดยึดแน่นของดินและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีแนวโน้มที่สอดคล้องกันในระดับความลึกที่มากขึ้น โดยที่ระดับประมาณ -15.00 เมตร วิธีจุดยึดแน่นแสดงให้เห็นว่าแรงต้านของดินลดลงจนเป็นศูนย์ และโครงสร้างเริ่มเคลื่อนตัวเข้าหาดินด้านขวา ในทำนองเดียวกัน วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็แสดงให้เห็นว่าแรงต้านดินเปลี่ยนทิศทางจากด้านซ้าย (ค่าลบ) ไปเป็นศูนย์ที่ระดับ -12.98 เมตร (สำหรับเสาเข็ม I-35) และ -13.88 เมตร (สำหรับเสาเข็ม I-40) ซึ่งเป็นจุดที่เสาเข็มไม่มีการเคลื่อนตัวในแนวราบ และลึกลงไปกว่านั้น แรงต้านดินจะมีทิศทางไปทางด้านขวา (ค่าบวก) สอดคล้องกับการแอ่นตัวของโครงสร้างตามที่แสดงในรูปที่ 13

เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation Method) พบว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันในด้านหน่วยแรงและการแอ่นตัว ภายใต้เงื่อนไขการรับแรงที่คล้ายคลึงกัน แม้ว่าวิธีสมการเชิงอนุพันธ์จะไม่ได้พิจารณาการยึดหดตัวตามแนวแกนของเสาเข็ม คอนกรีตอัดแรงผลการวิเคราะห์โครงสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่งแบบมีเสาเข็มยึดตั่งแสดงให้เห็นว่า โมเมนต์ดัดสูงสุดเกิดขึ้นที่ปลายด้านบนของเสาเข็มยึดตั่ง โดยมีแนวโน้มสอดคล้องกันระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีสมการเชิงอนุพันธ์

นอกจากนี้ ผลการศึกษาพบว่าสำหรับเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงที่มีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นเท่ากัน แต่มีค่าโมเมนต์เฉื่อยรอบแกนดัดแตกต่างกัน (เสาเข็ม

I-35 และ I-40) จะให้ผลลัพธ์ที่ต่างกัน โดยโครงสร้างที่มีค่าโมเมนต์เฉื่อยสูงกว่า (เสาเข็ม I-40) จะมีการแอ่นตัวและแรงต้านดินน้อยกว่าในช่วงแรก แต่มีแรงเฉือนลงลึกและโมเมนต์ดัดมากกว่าโครงสร้างที่มีค่าโมเมนต์เฉื่อยน้อยกว่า (เสาเข็ม I-35)

จากผลการออกแบบ พบว่าอาคารป้องกันตลิ่งแบบยืนต้นเดี่ยว (Free Standing) ที่ใช้เสาเข็ม I-35 มีโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นไม่เกินค่าที่คอนกรีตรับได้ ส่งผลให้หน้าตัดคอนกรีตไม่แตกฉ่ำ จากเกณฑ์ [10] ที่กำหนดไว้ หน้าตัดคอนกรีตนี้จัดอยู่ในกลุ่ม Prestress Class U ซึ่งหมายความว่าคอนกรีตยังสามารถต้านทานแรงเฉือนได้เพียงพอ โดยไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงเหล็กเสริมตามขวางเพื่อรับแรงเฉือนเพิ่มเติมภายในโครงสร้าง

สำหรับการออกแบบอาคารป้องกันตลิ่งแบบมีเข็มยึดตั่ง (Anchorage Pile) พบว่าเสาเข็ม I-40 ต้องรับโมเมนต์ดัดและหน่วยแรงดึงในระดับสูง หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นเกินกว่าค่าที่คอนกรีตสามารถต้านทานได้ ส่งผลให้หน้าตัดคอนกรีตเกิดการแตกฉ่ำ จากเกณฑ์ [10] ที่กำหนดไว้ หน้าตัดนี้จัดอยู่ในกลุ่ม Prestress Class C ซึ่งหมายความว่าควรเสริมเหล็กเสริมตามยาว (Non-Prestressed Reinforcement) เพิ่มเติม นอกจากนี้ ยังจำเป็นต้องพิจารณาเหล็กเสริมตามขวาง เพื่อช่วยรับแรงเฉือนที่เกินขีดความสามารถของคอนกรีต

8.2 ปัญหาและอุปสรรค

ในงานวิจัยครั้งนี้ต้องใช้ความรู้นอกเหนือจากการเรียนการสอนในห้องเรียนจึงจำเป็นต้องศึกษานอกห้องเรียนเป็นส่วนใหญ่

การอ่านข้อมูลดินและการแปลงค่าพารามิเตอร์ของดินจะมีค่าที่ไม่ตายตัว ขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ออกแบบ

8.3 ข้อเสนอแนะ

การวิเคราะห์โครงสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่งพึงแม้ว่าวิเคราะห์เพียงแรงในแนวราบตามทิศทางของแรงดันดินก็สามารถเกิดแรงดึงและแรงอัดขึ้นได้ในเสาเข็มโครงสร้างดังนั้นควรจะวิเคราะห์รวมถึงพารามิเตอร์การทรุดตัวของดินและการยึดหดของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงในแนวตั้งร่วมด้วย

ในงานวิจัยครั้งนี้ตั้งสมมติฐานว่าดินฐานรากมีลักษณะคล้ายสปริงซึ่งอยู่ในช่วงเอลลาสติกเท่านั้นจึงควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับพฤติกรรมของดินฐานรากที่มีพฤติกรรมนอกช่วงเอลลาสติก

ควรมีการนำวิธีวิเคราะห์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับกรณีศึกษาโครงการจริงและเปรียบเทียบผลกับข้อมูลการเฝ้าระวังพฤติกรรมของโครงสร้างภายหลังการก่อสร้าง

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาความสามารถของเข็มคอนกรีตอัดแรง สำหรับโครงสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่งในเขตกรุงเทพมหานครฯ ผู้จัดทำได้เรียนรู้หลักการออกแบบเขื่อนป้องกันตลิ่งพังโดยใช้เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงและได้เรียนรู้โปรแกรมสำเร็จรูป SAP2000 ในการจัดทำโครงงานเสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับการสนับสนุนจากอาจารย์ทุกท่าน ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณ อาจารย์ชัย-

ยะ พึ่งโพธิ์สภ ผู้อำนวยการวิทยาลัยการชลประทาน อาจารย์วัชร ณะ ณะ และอาจารย์ กรตสุวรรณ โพธิ์สุวรรณ ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ที่คอย สนับสนุนให้คำปรึกษาชี้แนะ และติดตามการทำงานมาโดยตลอด ขอขอบคุณ วิทยาลัยการชลประทานที่ให้โอกาสจัดทำโครงการวิศวกรรมในครั้งนี้ คณาจารย์ทุกท่านที่เป็นกำลังใจและคอยช่วยเหลือลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] เอนก จินฉวาโส และ วิกรม พนิชการ (2561). การศึกษารูปแบบ เชื้อนป้องกันตลิ่งพังของกรมโยธาธิการและผังเมืองเพื่อจัดทำ ฐานข้อมูลในเขตพระนครศรีอยุธยา. *วารสารวิชาการ วิศวกรรมสาร เกษมบัณฑิต*, ปีที่ 8, ฉบับที่ 3, หน้า 221-245.
- [2] ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2556). โครงการศึกษาและจัดทำแบบ มาตรฐานเชื้อนป้องกันตลิ่งพัง, หน้า 1-54.
- [3] Braja M. Das, Nagaratnam Sivakugan (2016). *Principles of foundation engineering*, pp.767-772.
- [4] Bowles, J.E. (1997). *Foundation and Analysis Design*. The McGraw-Hill Companies, Inc., pp.725-770.
- [5] R. C. Hibbeler. (2011). *Mechanics of materials*. Prentice hall, pp.569-576.
- [6] Shamsheer Prakash. Hari D. Sharma (1990). *Pile foundations in engineering practice*. John Wiley & Sons, Inc., pp.196-418.
- [7] M. Hetenyi, (1946). Beam on elastic foundation theory with applications in the fields of civil and mechanical engineering. Cushing-Malloy Inc., pp.38-47.
- [8] Robert F. Mast, P.E. (1998). Analysis of Cracked Prestressed Concrete Section: A practical Approach, BERGER/ABAM Engineer Inc., pp. 1-12.
- [9] D.E. Becker and I.D. Moore. (2006). *Canadian Foundation Engineering Manual*. Canadian Geotechnical Society., pp. 128-131.
- [10] ACI Committee 318. (2019). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) and commentary. American Concrete Institute., pp. 405-466.