



การประยุกต์ออกแบบการเสริมความแข็งแรงของเสาเข็มเพื่อรับแรงดันดินด้านข้าง

APPLICATION REINFORVEMENT DESIGN OF PILES TO RECEIVE LATERAL EARTH
PRESSURE



จิรายุทธ พลุกำ
ชินพัฒน์ รัชตภูษิต
รวีโรจน์ สุวรรณไตรย์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ต่อเนื่อง

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



APPLICATION REINFORVEMENT DESIGN OF PILES TO RECEIVE LATERAL EARTH
PRESSURE



JIRAYUT PLUKHAM

CHINNAPAT RATCHATAPOOSIT

RAWIROT SUWANNATRAI

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING (CONTINUING PROGRAM)
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การประยุกต์ออกแบบการเสริมความแข็งแรงของเสาเข็มเพื่อรับ
แรงดันดินด้านข้าง

A special Project Title APPLICATION REINFORCEMENT DESIGN OF PILES TO
RECEIVE LATERAL EARTH PRESSURE

นักศึกษา นายจิรายุทธ พลุดำ รหัสนักศึกษา 63015026
นายชินพัฒน์ รัชตภูษิต รหัสนักศึกษา 63015040
นายรวีโรจน์ สุวรรณไตรย์ รหัสนักศึกษา 63015145

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา (ต่อเนื่อง)
ปีการศึกษา 2565
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ผศ.สมเกียรติ ขวัญพฤษ์

| คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ | ลายมือชื่อ |
|--|--|
| รศ.ดร.ชลิตา อุตะภา ผศ.สมเกียรติ ขวัญพฤษ์ รศ.ดร.แหลมทอง เหล่าคงถาวร |  |

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 6 พฤษภาคม 2566

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารองรับแล้ว



(รศ.ดร.ชลิตา อุตะภา)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ออกแบบการเสริมความแข็งแรงของเสาเข็มเพื่อรับแรงดันดินด้านข้าง

| | | | |
|-------------|-------------|--------------|----------|
| นายจิรายุทธ | พลูคำ | รหัสนักศึกษา | 63015026 |
| นายชินพัฒน์ | รัชตภูษิต | รหัสนักศึกษา | 63015040 |
| นายวีโรจน์ | สุวรรณไตรย์ | รหัสนักศึกษา | 63015145 |

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.สมเกียรติ ขวัญพุกษ์

ปีการศึกษา 2565

บทคัดย่อ

จากสภาพดินในแต่ละพื้นที่ที่มีความหลากหลายในทางคุณสมบัติของดินต่าง ๆ ทำให้ในการออกแบบ กำแพงกันดินโดยใช้เสาเข็มเป็นไปได้หลากหลายวิธี และการเสริมกำลังของเสาเข็มนั้น ทำได้หลายวิธี จึงเป็น ปัญหาของวิศวกรในการหาวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการเสริมกำลังของเสาเข็มโดย ต้องคำนึงถึงปัจจัยความ ปลอดภัยต่างๆ อาทิ สัดส่วนความปลอดภัยต่อการเลื่อนไถล ความปลอดภัยต่อการรับโมเมนต์ดัด เป็นต้น

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของดินที่มีต่อเสาเข็ม 2) เพื่อหาแนวทางเพิ่มความแข็งแรงของเสาเข็มอัดแรงเพื่อรับแรงดันข้าง 3) จัดทำโปรแกรมออกแบบเสริมกำลังให้กับเสาเข็ม ใช้รูปแบบการวิจัยเชิงวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D ในการวิเคราะห์หาโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในเข็มและ ออกแบบเสริมกำลังให้กับเสาเข็มอัดแรงรูปตัว ไอ (I) ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel

ผลการศึกษาการเสริมกำลังให้กับเสาเข็มอัดแรงรูปตัว ไอ (I) ด้วยเหล็กเสริมไม่อัดแรงนั้น ทำให้เสาเข็มนั้นสามารถรับโมเมนต์ดัดที่เกิดจากแรงดันดินด้านข้างได้ดียิ่งขึ้น และสามารถใช่วิธีการเสริมกำลังเสาเข็มอัดแรงจากงานวิจัยนี้ นำไปพัฒนาใช้กับโปรแกรมสำเร็จรูปได้

ข้อเสนอแนะการวิเคราะห์หาโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในเสาเข็มอัดแรงรูปตัว ไอ (I) จะต้องเปรียบเทียบกับ โปรแกรมคำนวณเชิงตัวเลข อาทิเช่น Plaxis 2D และ SAB 2000 เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องมากขึ้น

APPLICATION REINFORVEMENT DESIGN OF PILES TO RECEIVE LATERAL EARTH
PRESSURE

Mr. Jirayut Plukham Student ID. 63015026

Mr. Chinnapat Ratchatapoosit Student ID. 63015040

Mr. Rawirot Suwannatrai Student ID. 63015145

Advisor: Asst. Prof. Somkiat Khwanpruk

Academic Year 2022

ABSTRACT

The various kind of soil components are diverse in each area; therefore, there are many methods to design retaining wall designed by using concrete piles. Also, there are many methods to reinforce the concrete pile. As a result, engineers must delve into the most proper method to reinforce the concrete pile based on the safety factors such as the safety proportion of sliding, and the safety of bending moment.

The purposes of this study are three main objectives: 1) to study the behavior of soil related to the pile, 2) to delve into the methods of prestressed concrete pile reinforcement supporting the lateral load, and 3) to develop the package software to design the reinforcement of concrete pile. An analytical study method using Plaxis 2D program was applied to analyze the moment on the concrete pile. Microsoft Excel was applied to design and calculate the reinforcement load of I shape prestressed concrete pile.

The results of this study show that the reinforcement load of I shape prestressed concrete pile by using a reinforced deformed steel bar resulting the concrete pile increasing the support of the bending moment of the lateral load of soil, and the

methods of prestressed concrete pile reinforcement from this study can apply to develop the package software.

The recommendation in the analysis of the moment in I shape prestressed concrete pile is comparing from the numerical calculated program such as Plaxis 2D and SAB 2000 to more accurate information.



กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.สมเกียรติ ขวัญฤกษ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะและปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง คอยให้ความรู้ เอาใจใส่ พร้อมทั้งช่วยตรวจสอบความถูกต้องของเล่มปริญญาานิพนธ์ การใช้งานของโปรแกรมจนสำเร็จได้ด้วยดี พวกเราผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ต่าง ๆ ในรายวิชาที่ศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐานในการทำงาน โดยได้รับการถ่ายทอดความรู้ทางด้านวิชาการ ความรู้ทั่วไป ข้อคิด คุณธรรม และประสบการณ์ต่าง ๆ จากคณาจารย์ทุกท่าน จนสามารถนำมาใช้ในการทำงานและการดำเนินชีวิตประจำวันได้เป็นอย่างดี ตลอดจนขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ร่วมเป็นกรรมการในการสอบ

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมโยธาและรุ่นพี่ ที่คอยให้คำแนะนำ ให้ความเห็นเพื่อที่จะได้นำไปปรับใช้ให้ดียิ่งขึ้น และช่วยเหลือซึ่งกันและกันในทุก ๆ เรื่อง จนทำให้โครงการแล้วเสร็จ รวมถึงตลอดระยะเวลาที่ได้ศึกษาเรียนรู้และอยู่ร่วมกันในภาควิชาวิศวกรรมโยธานี้ตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ความรักและความอบอุ่น อีกทั้งยังเป็นกำลังใจสำคัญที่ทำให้พวกเราผู้จัดทำโครงการ ทำให้มีความรู้สึกที่ดียิ่งขึ้นกว่าเดิม ที่มีพวกท่านคอยอยู่เบื้องหลัง เป็นอีกหนึ่งแรงผลักดันที่ทำให้โครงการนี้ประสบผลสำเร็จ อีกทั้งยังช่วยเหลือสนับสนุนค่าเล่าเรียนและศึกษาจนผู้จัดทำมีวันนี้ได้ พวกเราผู้จัดทำซึ่งในพระคุณเป็นอย่างสูง

สารบัญ

หน้า

| | |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | IV |
| สารบัญ..... | V |
| สารบัญตาราง..... | VIII |
| สารบัญรูป..... | IX |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์..... | 1 |
| 1.3 ขอบเขตของโครงการ..... | 1 |
| 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ..... | 2 |
| 1.5 ขั้นตอนการศึกษา..... | 2 |
| บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์..... | 3 |
| 2.1 ประเภทของกำแพงกันดิน..... | 3 |
| 2.1.1 กำแพงกันดินแบบถ่วงน้ำหนัก Gravity Retaining Wall..... | 3 |
| 2.1.2 กำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็กแบบ Cantilever wall..... | 4 |
| 2.1.3 กำแพงกันดินแบบ Piling Wall..... | 4 |
| 2.1.4 กำแพงกันดินแบบ Anchored wall..... | 5 |
| 2.1.5 กำแพงกันดินแบบ Diaphragm Wall..... | 6 |
| 2.2 ทฤษฎีแรงดันดินข้าง..... | 7 |
| 2.2.1 การวิเคราะห์หาแรงดันดินที่กระทำกับกำแพงกันดิน..... | 8 |
| 2.2.2 โมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดกับกำแพงกันดิน..... | 10 |
| 2.2.3 การวิเคราะห์หาโมเมนต์ดัดด้วยวิธีจำลองดินด้วยสปริง..... | 11 |
| 2.3 เสถียรภาพภายใน..... | 12 |
| 2.3.1 การออกแบบคอนกรีตอัดแรง..... | 12 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|-----------|--|----|
| 2.3.1.1 | วิธีการอัดแรง..... | 12 |
| 2.3.1.2 | ข้อกำหนดการออกแบบ..... | 12 |
| 2.3.1.3 | เหล็กเสริมอัดแรง..... | 12 |
| 2.3.1.3.1 | ลวดอัดแรง (Prestressing wire)..... | 19 |
| 2.3.1.3.2 | ลวดอัดแรงตีเกลียว (Prestressing strand)..... | 20 |
| 2.3.1.4 | การเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง..... | 22 |
| 2.3.1.5 | หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต..... | 27 |
| 2.3.1.6 | หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมอัดแรง..... | 28 |
| 2.3.1.7 | ค่าโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าว (Cracking moment)..... | 30 |
| 2.3.1.8 | กำลังประลัยของคอนกรีตอัดแรง..... | 32 |
| 2.3.1.9 | การออกแบบหน้าตัดเพื่อรับโมเมนต์ดัด..... | 38 |
| 2.3.1.10 | กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีต..... | 41 |
| บทที่ 3 | วิธีการดำเนินการ..... | 45 |
| 3.1 | แผนการดำเนินงานโครงการ..... | 45 |
| 3.2 | ขั้นตอนการดำเนินการ..... | 46 |
| 3.2.1 | ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง..... | 46 |
| 3.2.2 | รวบรวมข้อมูลเสาเข็มจากบริษัทผู้ผลิตเสาเข็มรูปตัวไอ..... | 46 |
| 3.2.3 | วิเคราะห์โมเมนต์ที่เกิดในเสาเข็มด้วยโปรแกรมเชิงตัวเลข..... | 48 |
| 3.2.3.1 | โปรแกรม Plaxis 2D..... | 48 |
| 3.2.3.2 | วิเคราะห์ด้วยวิธีจำลองดินด้วยสปริง..... | 52 |
| 3.2.3.3 | รูปแบบกำแพงที่จะทำการวิเคราะห์หาโมเมนต์ดัด..... | 53 |
| 3.2.4 | กระบวนการทำงานของโปรแกรมออกแบบเสริมกำลังเสาเข็ม..... | 57 |
| 3.2.5 | การวิเคราะห์หาแรงดันดินที่กระทำกับเสาเข็ม..... | 57 |
| 3.2.6 | ตรวจสอบโครงสร้างเสาเข็มอัดแรงรูปตัวไอ..... | 59 |
| 3.2.7 | ออกแบบเสริมกำลังให้กับเสาเข็มอัดแรงรูปตัว ไอ..... | 61 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | |
|---|----|
| 3.2.8 เขียนโปรแกรมออกแบบและเสริมกำลังเสาเข็มรูปตัว ไอ ด้วย โปรแกรม Excel..... | 64 |
| 3.3 วิธีการใช้งานโปรแกรม Excel..... | 64 |
| บทที่ 4 การวิเคราะห์ตรวจสอบและประเมินผล..... | 72 |
| 4.1 บทนำ..... | 72 |
| 4.2 ผลการวิเคราะห์กำลังกันดินแบบเสาเข็มอัดแรงรูปตัว ไอ ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D..... | 72 |
| 4.3 ผลการวิเคราะห์กำลังกันดินแบบเสาเข็มอัดแรงรูปตัว ไอ ด้วยวิธี Soil spring จากโปรแกรม SAB 2000..... | 76 |
| 4.4 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ตัดที่ได้จากโปรแกรมคำนวณเชิงตัวเลขและจากการคำนวณ ด้วยมือ (Excel)..... | 81 |
| 4.5 การออกแบบเสริมกำลังเสาเข็มอัดแรงรูปตัว ไอ..... | 83 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 84 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย..... | 84 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 85 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 86 |
| ภาคผนวก..... | 88 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 91 |

สารบัญตาราง

หน้า

| | | |
|---------------|--|----|
| ตารางที่ 2.5 | ระยะโค้งสูงสุดที่ยอมให้..... | 16 |
| ตารางที่ 2.6 | แสดงรูปเหล็กเสริมอัดแรง..... | 18 |
| ตารางที่ 2.7 | แสดงคุณสมบัติลวดอัดแรงตามมาตรฐาน ASTM A421..... | 19 |
| ตารางที่ 2.8 | แสดงคุณสมบัติลวดอัดแรงตามมาตรฐาน มอก. 95-2534..... | 19 |
| ตารางที่ 2.9 | คุณสมบัติของลวดอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น มีการคลายแรงดึงต่ำตามมาตรฐาน ASTM A416..... | 20 |
| ตารางที่ 2.10 | คุณสมบัติของลวดอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น มีการคลายแรงดึงต่ำตามมาตรฐาน มอก. 420-2534..... | 21 |
| ตารางที่ 2.11 | คุณสมบัติของเหล็กเสริมไม่อัดแรง..... | 21 |
| ตารางที่ 2.12 | การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต..... | 25 |
| ตารางที่ 2.13 | ค่าประมาณของการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง (ไม่รวมการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความผิดและการเข้าที่ของสมอ)..... | 26 |
| ตารางที่ 3.1 | ชื่อขนาดและมิติของภาพตัดขวางเสาเข็มรูปตัว ไอ..... | 47 |
| ตารางที่ 3.2 | ประสิทธิภาพการตอก..... | 50 |
| ตารางที่ 3.3 | ค่าปรับแก้เนื่องจากขนาดหลุมเจาะ, หัวเก็บตัวอย่าง และ ความยาวของก้านเจาะ..... | 51 |
| ตารางที่ 3.4 | คุณสมบัติชั้นดินในการสร้างแบบจำลอง..... | 51 |
| ตารางที่ 3.5 | คุณสมบัติของเสาเข็มในการสร้างแบบจำลอง..... | 52 |
| ตารางที่ 3.6 | ผลการคำนวณหาค่า K..... | 52 |
| ตารางที่ 4.1 | แสดงแรงโมเมนต์ตัดของกำแพงแบบที่ 1..... | 76 |
| ตารางที่ 4.2 | แสดงแรงโมเมนต์ตัดของกำแพงแบบที่ 2..... | 77 |
| ตารางที่ 4.3 | แสดงแรงโมเมนต์ตัดของกำแพงแบบที่ 3..... | 78 |
| ตารางที่ 4.4 | แสดงแรงโมเมนต์ตัดของกำแพงแบบที่ 4..... | 79 |
| ตารางที่ 4.5 | แสดงแรงโมเมนต์ตัดของกำแพงแบบที่ 5..... | 80 |

สารบัญรูป

หน้า

| | |
|--|----|
| รูปที่ 1.1 แผนภูมิการดำเนินการศึกษา..... | 2 |
| รูปที่ 2.1 กำแพงกันดินแบบถ่วงน้ำหนัก Gravity wall..... | 3 |
| รูปที่ 2.2 กำแพงกันดินแบบคานยื่น Cantilever wall..... | 4 |
| รูปที่ 2.3 กำแพงกันดิน Piling wall..... | 4 |
| รูปที่ 2.4 รูปต่างๆของกำแพงกันดิน Anchored Sheet Pile walls มี (a) anchor plate หรือ beam; (b) tieback; (c) vertical anchor pile; (d) anchor beam กับ batter piles..... | 5 |
| รูปที่ 2.5 กำแพงกันดินแบบ Diaphragm wall..... | 6 |
| รูปที่ 2.6 แรงดันด้านข้างบนกำแพงกันดิน..... | 7 |
| รูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพแรงดันดินที่กระทำกับกำแพง..... | 8 |
| รูปที่ 2.8 แสดงแผนภาพแรงตัดดินด้านข้าง..... | 8 |
| รูปที่ 2.9 แสดงแผนภาพโมเมนต์ตัดที่เกิดกับตัวกำแพง..... | 10 |
| รูปที่ 2.10 การจำลองดินด้วยสปริง..... | 12 |
| รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการอัดแรง..... | 13 |
| รูปที่ 2.12 การเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง..... | 22 |
| รูปที่ 2.13 หน่วยแรงดึงที่เพิ่มขึ้นของเหล็กเสริมอัดแรงในคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยว..... | 30 |
| รูปที่ 2.14 โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าว..... | 31 |
| รูปที่ 2.15 การกระจายของหน่วยการยึดหดตัวและหน่วยแรงที่สถานะประลัย..... | 34 |
| รูปที่ 2.16 แผนผังกำลังอัดของเสา..... | 38 |
| รูปที่ 2.17 เสาคอนกรีตที่สถานะประลัย..... | 44 |
| รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินโครงการ..... | 45 |
| รูปที่ 3.2 ชื่อขนาดและมิติของภาคตัดขวางเสาเข็มรูปตัว ไอ ตามมาตรฐาน มอก. 396-2549..... | 46 |
| รูปที่ 3.3 แบบขยายเสาเข็ม I 22x22..... | 47 |
| รูปที่ 3.4 แบบขยายเสาเข็ม I 26x26..... | 48 |
| รูปที่ 3.5 แบบขยายเสาเข็ม I 35x35..... | 48 |

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

| | |
|---|----|
| รูปที่ 3.6 โมเดลจำลองแบบที่ 1..... | 54 |
| รูปที่ 3.7 โมเดลจำลองแบบที่ 2..... | 55 |
| รูปที่ 3.8 โมเดลจำลองแบบที่ 3..... | 55 |
| รูปที่ 3.9 โมเดลจำลองแบบที่ 4..... | 56 |
| รูปที่ 3.10 โมเดลจำลองแบบที่ 5..... | 56 |
| รูปที่ 3.11 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรม..... | 57 |
| รูปที่ 3.12 แผนผังการคำนวณวิเคราะห์แรงดันดิน..... | 58 |
| รูปที่ 3.13 แผนผังการวิเคราะห์โครงสร้างเสาเข็มอัดแรงรูปตัวไอ..... | 60 |
| รูปที่ 3.14 ก แผนภูมิการออกแบบเสริมกำลังให้กับเสาเข็มอัดแรงรูปตัว ไอ..... | 62 |
| รูปที่ 3.14 ข แผนภูมิการออกแบบเสริมกำลังให้กับเสาเข็มอัดแรงรูปตัว ไอ..... | 63 |
| รูปที่ 4.1 แผนภาพโมเมนต์ดัด กำแพงแบบที่ 1..... | 73 |
| รูปที่ 4.2 แผนภาพโมเมนต์ดัด กำแพงแบบที่ 2..... | 73 |
| รูปที่ 4.3 แผนภาพโมเมนต์ดัด กำแพงแบบที่ 3..... | 74 |
| รูปที่ 4.4 แผนภาพโมเมนต์ดัด กำแพงแบบที่ 4..... | 74 |
| รูปที่ 4.5 แผนภาพโมเมนต์ดัด กำแพงแบบที่ 5..... | 75 |
| รูปที่ 4.6 แสดงแรงโมเมนต์ดัดของกำแพงแบบที่ 1..... | 76 |
| รูปที่ 4.7 แผนภาพโมเมนต์ดัดของกำแพงแบบที่ 2..... | 77 |
| รูปที่ 4.8 แผนภาพโมเมนต์ดัดของกำแพงแบบที่ 3..... | 78 |
| รูปที่ 4.9 แผนภาพโมเมนต์ดัดของกำแพงแบบที่ 4..... | 79 |
| รูปที่ 4.10 แผนภาพโมเมนต์ดัดของกำแพงแบบที่ 5..... | 80 |
| รูปที่ 4.11 โมเดลการสร้างกำแพงใน Excel..... | 81 |
| รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความสูงของกำแพงที่ระยะห่างเสาเข็ม 1.50 เมตร..... | 81 |
| รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความสูงของกำแพงที่ระยะห่างเสาเข็ม 1.00 เมตร..... | 82 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากสภาพดินในแต่ละพื้นที่มีความหลากหลายในทางคุณสมบัติของดินต่างๆ ทำให้ในการออกแบบกำแพงกันดินโดยใช้เสาเข็มเป็นไปได้หลากหลายวิธี และการเสริมกำลังของเสาเข็มนั้นก็ทำได้หลายวิธี จึงเป็นปัญหาของวิศวกรในการหาวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการเสริมกำลังของเสาเข็มโดยต้องคำนึงถึงปัจจัยความปลอดภัยต่าง ๆ อาทิ สัดส่วนความปลอดภัยต่อการเลื่อนไถล ความปลอดภัยต่อการรับโมเมนต์ดัด ความปลอดภัยต่อการรับแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็ม ดังนั้นหากมีวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการเสริมกำลังเสาเข็มตามสภาพดินประเภทต่างๆ ก็จะทำให้การออกแบบกำแพงกันดินด้วยเสาเข็มได้ประสิทธิภาพสูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของดินที่มีต่อเสาเข็ม
2. เพื่อหาแนวทางเพิ่มความแข็งแรงของเสาเข็มอัดแรงเพื่อรับแรงด้านข้าง
3. จัดทำโปรแกรมออกแบบเสริมกำลังให้กับเสาเข็ม

1.3 ขอบเขตของโครงการ

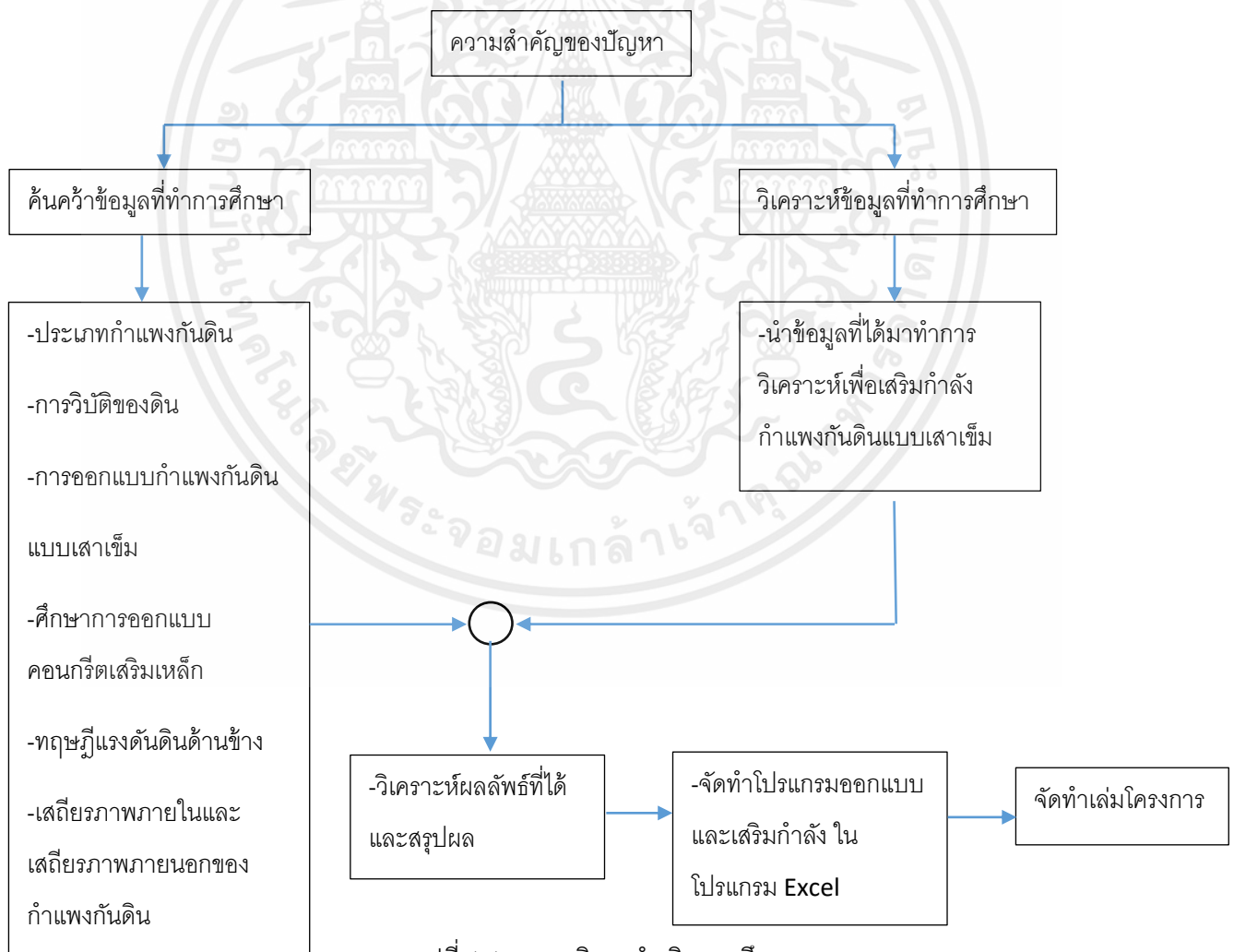
1. ใช้เสาเข็มรูปตัว ไอ และแผ่นเสียบในการรับแรงดันดินด้านข้าง
2. ใช้ค่าคุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนเขตลาดกระบังในการวิเคราะห์แรงดันดินด้านข้าง
3. ความสูงของกำแพงไม่เกิน 3 เมตร
4. ตรวจสอบกำลังโครงสร้างการรับโมเมนต์ดัดของหน้าตัดเสาเข็มอัดแรงรูปตัว ไอ
5. ออกแบบเสริมกำลังหน้าตัดเสาเข็มอัดแรงรูปตัว ไอ ด้วย Microsoft Excel เท่านั้น

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ผู้ที่นำไปศึกษาสามารถนำโปรแกรมที่เขียนไปใช้ในการออกแบบกำแพงกันดินโดยใช้เสาเข็มรับแรงดันดินได้
2. สามารถหาวิธีการเสริมกำลังให้กับกำแพงกันดินได้

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. สืบค้นข้อมูลดินในบริเวณที่จะศึกษา
2. ศึกษาวรรณกรรมเรื่อง แรงดันดินด้านข้างและการออกแบบคอนกรีตอัดแรง
3. วิเคราะห์แรงดันดินที่มากระทำกับกำแพงและทำการออกแบบเสริมกำลังเสาเข็ม
4. นำผลการออกแบบและเสริมกำลังลงในโปรแกรม Microsoft Excel และจัดรูปแบบโปรแกรม



รูปที่ 1.1 แผนภูมิการดำเนินการศึกษา

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 ประเภทของกำแพงกันดิน

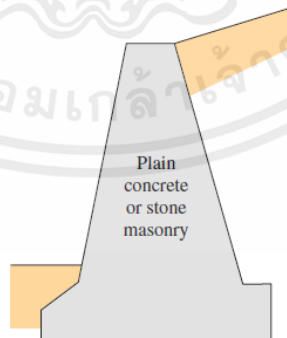
ประเภทของกำแพงกันดินนั้น สามารถจำแนกประเภทได้ด้วยรูปแบบโครงสร้างของกำแพงกันดิน และ วัสดุที่ใช้ในการสร้างกำแพงกันดิน โดยลักษณะของโครงสร้างกำแพงกันดินแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักคือ

1. กำแพงกันดินแบบไม่ใช้เสาเข็ม ใช้สำหรับรับแรงที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ที่ผิวดิน

2. กำแพงกันดินแบบเสาเข็ม เป็นกำแพงที่มีบางส่วนของกำแพงฝังลงในดินเพื่อที่จะใช้แรงต้านทานแรงดันดินด้านข้างจากส่วนที่ฝังลงในดิน

2.1.1 กำแพงกันดินแบบถ่วงน้ำหนัก Gravity Retaining Wall

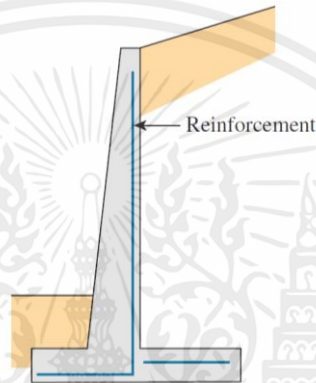
ก่อสร้างโดยใช้คอนกรีตล้วน (Plain Concrete) หรือก่อสร้าง โดยใช้หิน (Stone masonry) โดยขึ้นอยู่กับเสถียรภาพของน้ำหนักของตัวเองและน้ำหนักของดินที่มากระทำ กำแพงกันดินประเภทนี้ยังมีความสูงมากก็จะเปลืองค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างตามไปด้วย โดยส่วนมากมักจะใช้กำแพงกันดินแบบถ่วงน้ำหนักในกรณีที่ต้องการความสูงในช่วง 1 – 5 เมตร และขนาดของฐานจะต้องมีความกว้างประมาณ 0.5 – 0.7 เท่าของความสูงของกำแพง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 [23]



รูปที่ 2.1 กำแพงกันดินแบบถ่วงน้ำหนัก Gravity wall [23]

2.1.2 กำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็กแบบ Cantilever wall

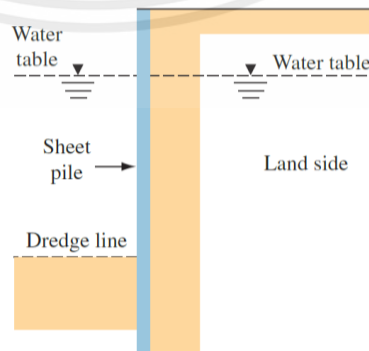
เป็นรูปแบบของกำแพงกันดินที่ถูกพัฒนามาจากแบบถ่วงน้ำหนักโดยมีหน้าที่เหมือนกันแต่แตกต่างกันที่ มีการเพิ่มคานด้านล่างให้ยื่นเข้าไปในฝั่งดินที่มีระดับความสูงที่มากกว่า เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการกันดิน โดยที่ไม่ต้องอาศัยเสาเข็ม สร้างโดยใช้คอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งประกอบไปด้วย thin stem และ base slab Retaining Walls ประเภทนี้เหมาะแก่การก่อสร้างที่มีความสูงประมาณ 8 เมตร (25 ฟุต) เพราะจะทำให้ประหยัดค่าก่อสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 [23]



รูปที่ 2.2 กำแพงกันดินแบบคานยื่น Cantilever wall [23]

2.1.3 กำแพงกันดินแบบ Piling Wall

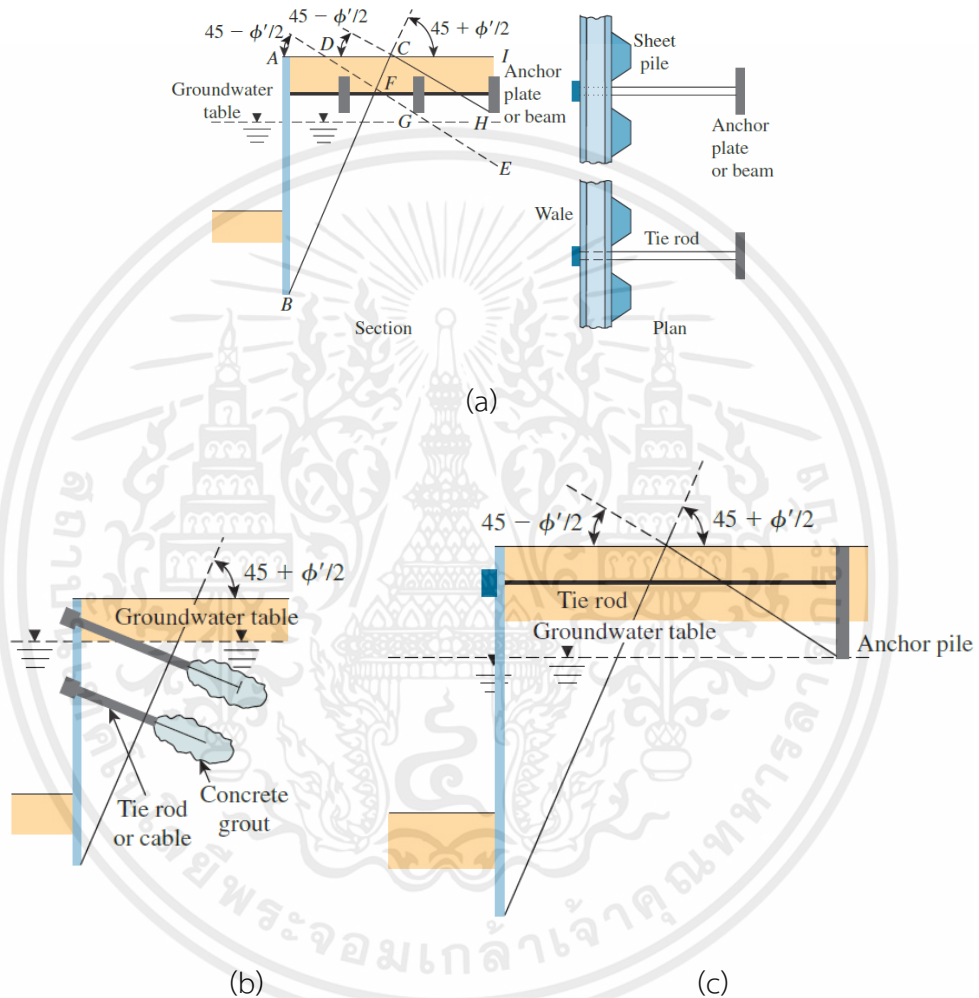
กำแพงกันดินชนิดนี้ ส่วนใหญ่จะใช้เป็นเหล็กซีทีไพล์เพราะมีความจำเป็นต้องใช้การตอกเสาเข็มตามแนวของกำแพง จึงต้องใช้แรงต้านจากดินในระดับดินด้านที่ต่ำกว่าทั้งสองฝั่ง ในการรับแรงดันจากดินที่สูงกว่า เหมาะกับการป้องกันดินสไลด์ตามแนวตลิ่ง และงานฐานรากชั้นใต้ดินของอาคารขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 [24]

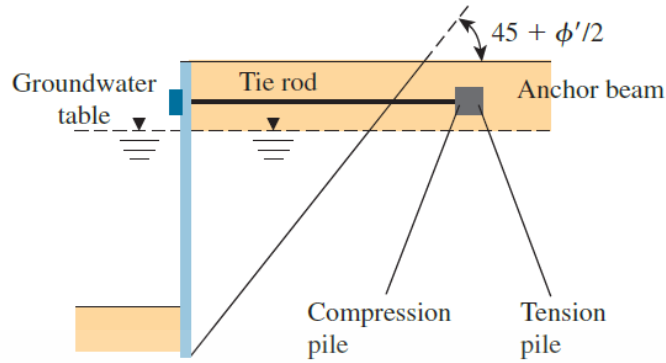


รูปที่ 2.3 กำแพงกันดิน Piling wall [24]

2.1.4 กำแพงกันดินแบบ Anchored wall

ความพิเศษของลักษณะการก่อสร้างกำแพงดินชนิดนี้ จะอยู่ที่มีการใช้สมอ ช่วยในการยึดกำแพง เพื่อเพิ่มแรงต้านให้กับกำแพง และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกำแพงดินรูปแบบอื่น ที่ถูกสร้างไว้เสร็จเรียบร้อยแล้วอีก เป็นการเพิ่มความปลอดภัย ดังแสดงในรูปที่ 2.4 [25]



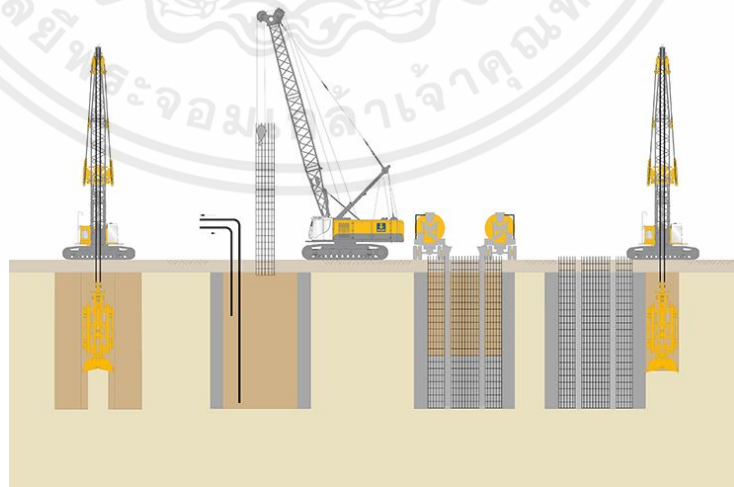


(d)

รูปที่ 2.4 รูปต่างๆของกำแพงกันดิน Anchored Sheet Pile walls มี (a) anchor plate หรือ beam; (b) tieback; (c) vertical anchor pile; (d) anchor beam กับ batter piles [25]

2.1.5 กำแพงกันดินแบบ Diaphragm Wall

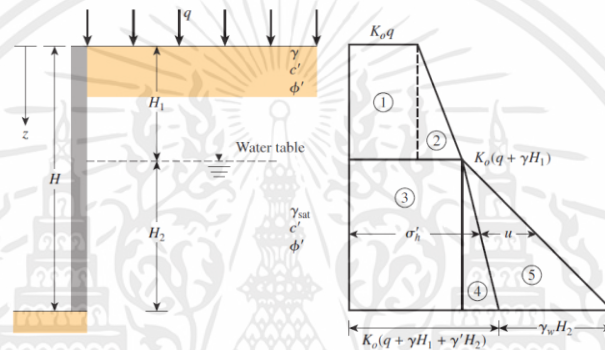
เป็นระบบที่ใช้คอนกรีตหล่อในที่ คล้ายคลึงการทำเสาเข็มเจาะระบบเปียก โดยใช้กระเช้าตักดิน ชุดหลุมเอาดินขึ้นมาก่อนตามขนาด และแนวที่จะทำกำแพง ใส่สารละลายเบนโทไนต์เพื่อป้องกันการพังทลายของดิน แล้วหย่อนเหล็กเสริมที่ผูกเป็นโครงไว้แล้วลงไปก่อนเทคอนกรีต เมื่อทิ้งไว้จนคอนกรีตแข็งตัวมีกำลังตามกำหนดแล้ว จึงขุดดินข้างในกำแพงออก เพื่อทำชั้นใต้ดิน หรือก่อสร้างส่วนอื่น จึงเหมาะสำหรับกับงานฐานรากชั้นใต้ดินของอาคารขนาดใหญ่ หรืองานตอม่อ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 [26]



รูปที่ 2.5 กำแพงกันดินแบบ Diaphragm wall [26]

2.2 ทฤษฎีแรงดันด้านข้าง

การออกแบบโครงสร้างกำแพงกันดินต้องทราบค่าแรงดันดินด้านข้างที่กระทำต่อโครงสร้างกำแพงกันดิน เพื่อนำไปคำนวณหาสัดส่วนโครงสร้างกำแพงที่เหมาะสมเพียงพอที่จะทำให้เกิดการวิบัติแรงดันข้างจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดิน เช่น ค่าหน่วยน้ำหนักของดิน (γ) ,ค่ามุมเสียดทานภายในของเม็ดดิน (ϕ) ,แรงยึดเหนี่ยวของมวลดิน (C) ขึ้นอยู่กับผิวสัมผัสของโครงสร้างกับมวลดิน ดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่นกรณีที่ดินถมอยู่ในแนวราบกับสันของกำแพงแรงดันดินแบบ Active (P_a) และ Passive (P_p) แผนภาพแรงดันดินที่กระทำกับกำแพงจะเป็นไปดังรูปที่ 2.6 [1]



รูปที่ 2.6 แรงดันด้านข้างบนกำแพงกันดิน [1]

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \quad \text{---(2.2.1)}$$

เมื่อ P_a = แรงดันดินด้านข้างแบบ Active

H = ความสูงของดินถมหลังกำแพง

γ = หน่วยน้ำหนักของดิน

ϕ = มุมเสียดทานภายในของดิน

ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างหรือ ค่า k สามารถหาได้ตามสมการดังนี้

$$K_a = \tan \left(45 - \frac{\phi}{2} \right)^2 \quad \text{---(2.2.2)}$$

ค่า k สำหรับดินเหนียวที่มีการอัดตัวแน่นเกินกว่าปกติ

$$K_0 = 0.44 + 0.42 \left(\frac{PI(\%)}{100} \right) \quad \text{---(2.2.3)}$$

ค่า K สำหรับดินเหนียวที่มีการอัดตัวปกติ

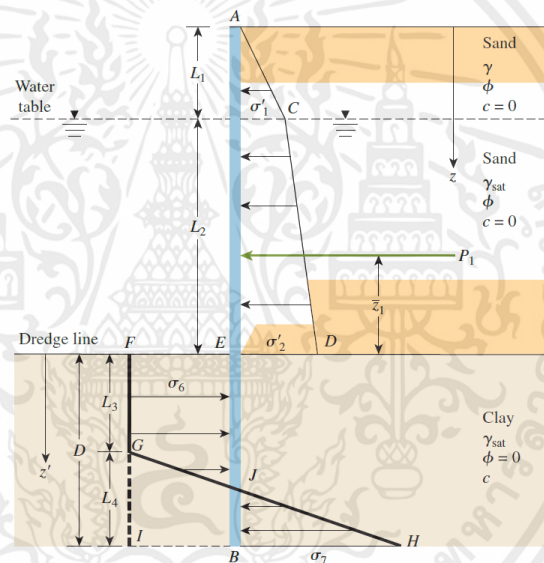
$$K_0 = 0.4 + 0.007(PI) \quad \text{---(2.2.4)}$$

ค่า K สำหรับดินทราย

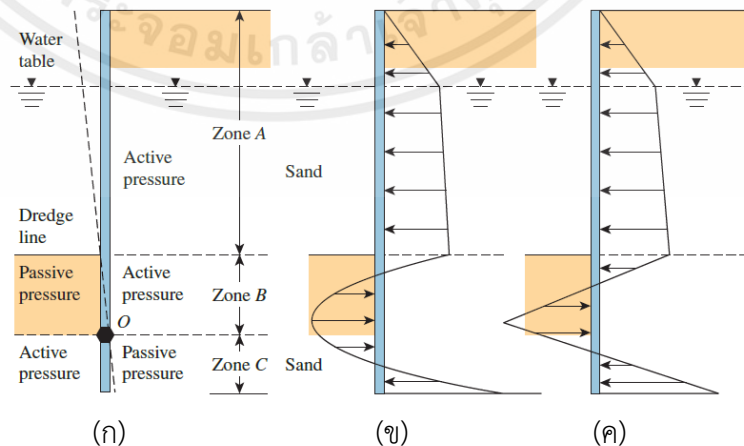
$$K_0 = 1 - \sin(\phi) \quad \text{---(2.2.5)}$$

2.2.1 การวิเคราะห์หาแรงดันดินที่กระทำกับกำแพงกันดิน

การวิเคราะห์หาแรงดันดินกับกำแพงที่ต้องฝังลงกับชั้นดินเหนียวที่ไม่มีการระบายน้ำออก โดยให้สมมติฐานให้มุมเสียดทานในเม็ดดินมีค่าเท่ากับศูนย์ และกำแพงมีการถมด้วยดินเม็ดหยาบ แผนภาพแรงดันดินสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 2.7 [14] และ รูปที่ 2.8 [14]



รูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพแรงดันดินที่กระทำกับกำแพง [14]



รูปที่ 2.8 แสดงแผนภาพแรงดันดินด้านข้าง [14]

Braja M. Das , Nagaratnam Sivakugan [14] ได้กล่าวไว้ว่า จากความลึกใดๆที่ลึกกว่าค่า L_1+L_2 ที่เป็นชั้นดินเหนียว $\phi=0$ ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินประสิทธิผลที่สภาวะ Active ของ Rankine $K_a=1$ และ ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินประสิทธิผลที่สภาวะ Passive ของ Rankine $K_p=1$ เหนือจุดหมุนที่จุด O ตามรูปที่ 2.8 (ก) [14] แรงดันดินที่สภาวะ Active จากด้านขวาไปซ้ายคือ

$$\sigma_a = [\gamma L_1 + \gamma' L_2 + \gamma_{sat}(z - L_1 - L_2)] - 2c \quad \text{---(2.2.4)}$$

ในทำนองเดียวกันแรงดันดินในสภาวะ Passive จากซ้ายไปขวาคือ

$$\sigma_p = \gamma_{sat}(z - L_1 - L_2) + 2c \quad \text{---(2.2.5)}$$

ดังนั้นความดันสุทธิคือ

$$\begin{aligned} \sigma_6 &= \sigma_p - \sigma_a = [\gamma_{sat}(z - L_1 - L_2) + 2c] - [\gamma L_1 + \gamma' L_2 + \gamma_{sat}(z - L_1 - L_2)] + 2c \\ \sigma_6 &= 4c - (\gamma L_1 + \gamma' L_2) \quad \text{D} \end{aligned} \quad \text{---(2.2.6)}$$

ที่ด้านล่างของกำแพงแรงดันดินในสภาวะ Passive จากด้านขวาไปซ้ายคือ

$$\sigma_p = (\gamma L_1 + \gamma' L_2 + \gamma_{sat} D) + 2c \quad \text{---(2.2.7)}$$

ในทำนองเดียวกันแรงดันดินในสภาวะ Active จากซ้ายไปขวาคือ

$$\sigma_a = \gamma_{sat} D - 2c \quad \text{---(2.2.8)}$$

เพราะฉะนั้นความดันสุทธิคือ

$$\sigma_7 = \sigma_p - \sigma_a = 4c + (\gamma L_1 + \gamma' L_2) \quad \text{---(2.2.9)}$$

การรวมพื้นที่ IBJG ทั้งสองด้านของแผนภาพความดันเพื่อให้แก่สมการได้ง่ายขึ้น จากสมการสมดุล $\sum F_H = 0$ พื้นที่แผนภาพแรงดัน ACDE ลบกับพื้นที่ EFIB บวกกับพื้นที่ GIH เท่ากับ 0 หรือ

$$P_1 - \sigma_6(D) + \frac{1}{2} L_4 [\sigma_6 + \sigma_7] = 0 \quad \text{---(2.2.10)}$$

แทนค่า

$$P_1 - [4c - (\gamma L_1 + \gamma' L_2)]D + \frac{1}{2} L_4 [4c - (\gamma L_1 + \gamma' L_2) + 4c + (\gamma L_1 + \gamma' L_2)] = 0$$

เมื่อ $P_1 =$ พื้นที่ ACDE

$D =$ ระยะฝังเสาเข็มตามทฤษฎี

จัดให้อยู่ในรูป L_4 จะได้

$$L_4 = \frac{D[4c - (\gamma L_1 + \gamma' L_2)] - P_1}{4c} \quad \text{---(2.2.11)}$$

ผลรวมของโมเมนต์รอบจุด B $\sum M_B = 0$ จะได้

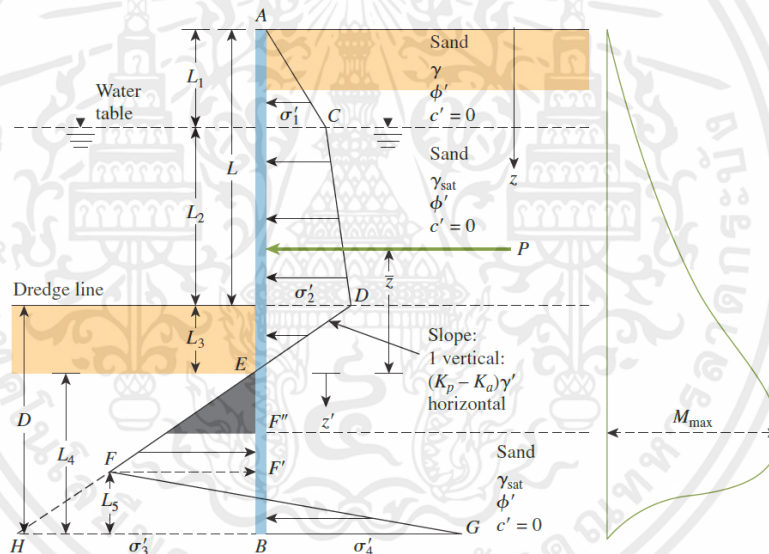
$$P_1 - (D + z_1) - [4c - (\gamma L_1 + \gamma' L_2)] \frac{D^2}{2} + \frac{1}{2} L_4 (8c) \left(\frac{L_4}{3} \right) = 0 \quad \text{---} \quad (2.2.12)$$

เมื่อ $z_1 =$ ระยะจุดศูนย์กลางแรงดันของพื้นที่ ACDE วัดจากระดับฐานกำแพง
แทนค่าสมการที่ 2.2.11 ใน สมการที่ 2.2.12 จะได้

$$D^2 [4c - (\gamma L_1 + \gamma' L_2)] - 2DP_1 - \frac{P_1(P_1 + 12cz_1)}{(\gamma L_1 + \gamma' L_2) + 2c} = 0 \quad \text{---} (2.2.13)$$

เมื่อแก้สมการที่ 2.10 แล้วจะได้ความยาวของเสาเข็มตามทฤษฎีที่ฝังลงไปนชั้นดินเหนียว

2.2.2 โมเมนต์ตัดสูงสุดที่เกิดกับกำแพงดินดิน แสดงตามรูปที่ 2.9 [14]



รูปที่ 2.9 แสดงแผนภาพโมเมนต์ตัดที่เกิดกับตัวกำแพง [14]

จากรูปที่ 2.9 [14] ค่าโมเมนต์ตัดสูงสุด (แรงเฉือนเป็น 0) จะอยู่ระหว่าง $L_1 + L_2 < z < L_1 + L_2 + L_3$ ตำแหน่งโมเมนต์ตัดสูงสุด z' (เมื่อ $z' = 0$ วัดจากฐานกำแพง) จากแรงเฉือนเป็น 0 ให้

$$P_1 - \sigma_6 z' = 0$$

หรือ

$$z' = \frac{P_1}{4c - (\gamma L_1 + \gamma' L_2)} \quad \text{---} (2.2.14)$$

โมเมนต์ตัดสูงสุดสามารถหาได้จากสมการ

$$M_{max} = P_1(z' + z_1) - \frac{\sigma_6 z'^2}{2}$$

หรือ

$$M_{max} = P_1(z' + z_1) - \frac{(4c - (\gamma L_1 + \gamma' L_2))z'^2}{2} \quad \text{----(2.2.15)}$$

เมื่อรู้ขนาดของโมเมนต์ดัดสูงสุดแล้วสามารถเลือกหน้าตัดเสาเข็มได้จากสมการ

$$S = \frac{M_{max}}{\sigma_{all}} \quad \text{----(2.2.16)}$$

เมื่อ S = Section Modulus ของเสาเข็ม

σ_{all} = ความเค้นที่ยอมให้ของคอนกรีตที่ใช้ทำเสาเข็ม

z' = ความลึกตำแหน่งที่เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุดวัดจากฐานกำแพง

2.2.3 การวิเคราะห์หาโมเมนต์ดัดด้วยวิธีจำลองดินด้วยสปริง

การวิเคราะห์หาโมเมนต์ดัดของกำแพงด้วยวิธีการจำลองดินด้วยสปริง (Soil Spring) นั้นจะเป็นวิธีที่นำไปใช้กับโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง เช่น SAB 2000 โดยจะหาค่าคงที่ของสปริงเพื่อนำไปกำหนดค่าจุดรองรับแบบสปริงในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง

การจำลองดินด้วยสปริง

ชาย แสงใส [16] ได้กล่าวไว้ว่า พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์เสาเข็มในกรณีที่ต้องรับแรงในแนวราบคือค่าสติฟเนสของสปริงที่แทนดิน เรียกว่า ค่าโมดูลัสต้านทานแรงแนวราบของดิน (Modulus of horizontal subgrade reaction) k_s มีหน่วยเป็น แรง/ปริมาตร เช่น ตัน/ม³ เมื่อทราบค่า k_s ก็จะสามารถคำนวณสติฟเนสของสปริง (K) ของดินดังนี้

$$K = k_s \times B \times \Delta L \quad \text{----(2.2.17)}$$

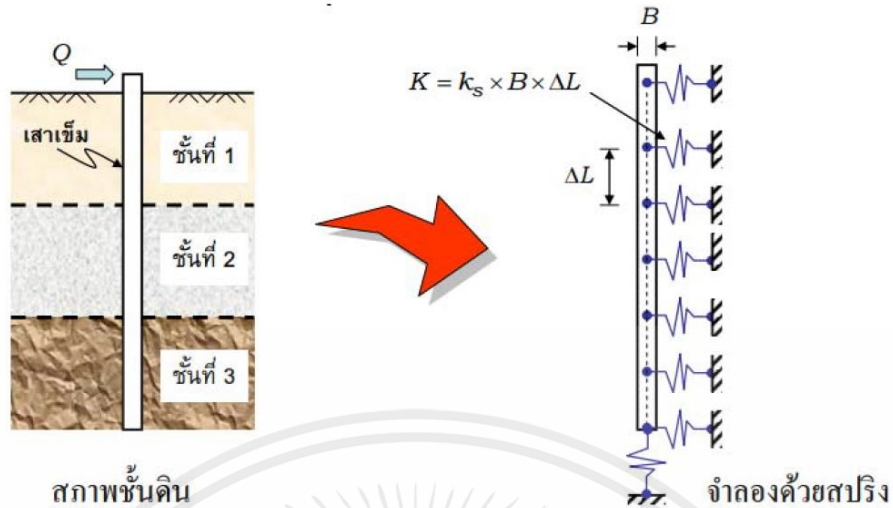
โดยที่ K คือ สติฟเนสของสปริง

k_s คือ Modulus of horizontal subgrade reaction

B คือ ความกว้างของเสาเข็ม

ΔL คือ ความยาวในพื้นที่รับผิวดิน

เมื่อคำนวณสติฟเนสของสปริง (K) แต่ละชั้นเรียบร้อยแล้ว จึงนำไปวิเคราะห์โมเมนต์ดัดในเสาเข็มเพื่อออกแบบการเสริมเหล็กในเสาเข็มต่อไป



รูปที่ 2.10 การจําลองดินด้วยสปริง [16]

Davisson, M.T (1970) [15] ได้เสนอสูตรการคำนวณหาค่า k_s สำหรับกินเหนียวไว้ดังนี้

$$k_s = 67 \frac{S_u}{B} \quad \text{---(2.2.18)}$$

โดยที่ S_u คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength) มีหน่วยเป็นตัน/ม³

B คือ ความกว้างของเสาเข็ม

2.3 เสถียรภาพภายใน

2.3.1 การออกแบบคอนกรีตอัดแรง

การออกแบบคอนกรีตอัดแรงเป็นการเลือกวัสดุที่จะใช้ในการเสริมกำลังของเสาเข็มที่จะนำมาเป็นโครงสร้างรับแรงต้านข้างของกำแพงกันดิน วัสดุที่จะใช้ได้แก่ คอนกรีต และ เหล็กเสริมอัดแรง การใช้วิธีออกแบบคอนกรีตอัดแรงนี้จะช่วยให้ประหยัดเวลาในการก่อสร้างและคุณภาพของผลิตภัณฑ์เสาเข็ม เนื่องจากเป็นการผลิตในโรงงานทำให้สามารถควบคุมคุณภาพได้ดี การการผลิตในสถานที่ก่อสร้าง ในการวิจัยนี้จะใช้วิธี คอนกรีตอัดแรงชนิดตั้งเหล็กก่อน ในการออกแบบ

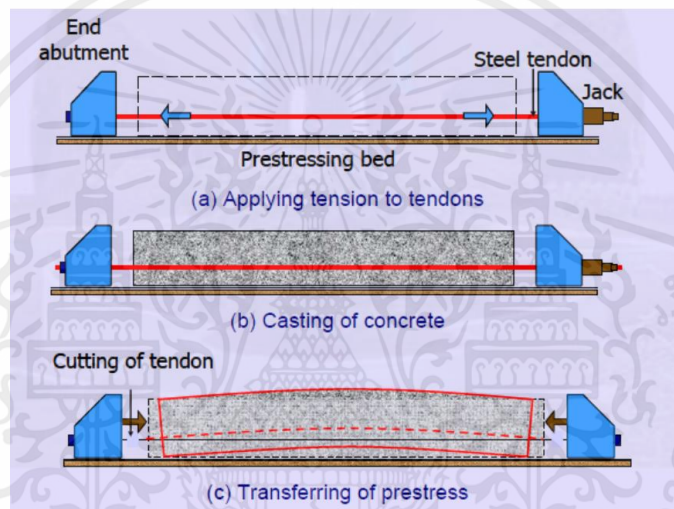
2.3.1.1 วิธีการอัดแรง

นเรศ พันธธรร, 2541 [2] ได้กล่าวไว้ว่า วิธีการอัดแรงสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด

ได้แก่ คอนกรีตอัดแรงชนิดตั้งเหล็กก่อน คอนกรีตอัดแรงชนิดตั้งเหล็กทีหลัง

คอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน

การเหล็กจะกระทำก่อนการหล่อคอนกรีต เหล็กเสริมอัดแรงจะถูกดึงค้างไว้ที่ระหว่างที่ค้ำ (Fixed Abutment) ที่ปลายทั้งสองข้าง หลังจากที่ได้ติดตั้งไม้แบบตามรูปแบบที่ได้ออกแบบไว้แล้ว ก็จะมีการเทคอนกรีตลงในไม้แบบที่มีเหล็กเสริมอัดแรงที่ถูกดึงค้างไว้ จากนั้นทำการบ่มคอนกรีตจนคอนกรีตได้กำลังถึงค่าที่ต้องการ จากนั้นก็ทำการตัดเหล็กเสริมอัดแรงที่ปลายทั้งสองข้าง ดังรูปที่ เหล็กเสริมอัดแรงพยายามที่จะหดตัวลง คอนกรีตจะถูกอัดโดยเหล็กเสริมอัดแรงนี้ การอัดแรงเกินขึ้นโดยการถ่ายแรงผ่านแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมอัดแรง ดังแสดงในรูปที่ รูปที่ 2.11 [17]



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการอัดแรง [17]

คอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กที่หลัง

คอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กที่หลัง เริ่มต้นโดยการหล่อคอนกรีตในไม้แบบที่ติดตั้งไว้โดยจะต้องมีการฝังท่อสำหรับร้อยเหล็กเสริม (Hollow duct) ในตำแหน่งที่ออกแบบไว้จากนั้นจึงร้อยเหล็กเสริมอัดแรงและเทคอนกรีต เมื่อคอนกรีตมีกำลังที่ถึงค่าที่ออกแบบไว้จึงทำการดึงเหล็กเสริมอัดแรงอาจดึงข้างเดียว หรือดึงสองข้าง เมื่อดึงแล้วจะทำการยึดปลายด้านที่ดึงโดยใช้อุปกรณ์ยึดปลาย เหล็กเสริมอัดแรงจึงถูกดึงค้างไว้บนคอนกรีตทำให้เกิดแรงอัดในคอนกรีต เมื่ออัดแรงเสร็จแล้วขั้นตอนต่อไปคือการอัดน้ำปูน (Grouting) เข้าไปในท่อที่ร้อยเหล็กเสริมอัดแรง น้ำปูนที่เข้าไปในท่อจะทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมอัดแรงกับคอนกรีต นอกจากนี้ น้ำปูนยังช่วยหุ้มเหล็กเสริมอัดแรงจะช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมอัดแรงด้วย

2.3.1.2 ข้อกำหนดการออกแบบ

สถานการณ์ใช้งาน (Service state)

ที่สถานการณ์ใช้งาน โครงสร้างต้องมีความสามารถในการใช้งานได้ตามกำหนด หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและในเหล็กจะต้องไม่เกินค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ การโก่งตัว การแตกร้าวและการกัดกร่อนต้องไม่มากเกินไปเกินข้อกำหนด

หน่วยแรงที่ยอมให้ที่ยอมให้ของคอนกรีตสำหรับองค์อาคารรับแรงดัด (มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537)

หน่วยแรงชั่วคราวในคอนกรีตทันทีที่ถ่ายแรงจากเหล็กเสริมอัดแรง ก่อนการเสื่อมลดของแรงดึง อันเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต (Shrinkage) การคืบของคอนกรีต (Creep) และการคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง (Steel relaxation) ต้องมีค่าไม่เกินดังต่อไปนี้

หน่วยแรงอัด

- สำหรับหน่วยแรงที่เกิดจากการอัดแรงเป็นรูปสามเหลี่ยม 0.60f'_{ci}
- สำหรับหน่วยแรงอัดที่เกิดจากการอัดแรงเท่า ๆ กันตลอดหน้าตัดองค์อาคาร 0.45f'_{ci}

หน่วยแรงดึง

- สำหรับองค์อาคารที่ไม่เสริมเหล็กธรรมดายึดเหนี่ยวในการช่วยรับแรงดึง 0.80√f'_{ci}
- สำหรับองค์อาคารที่มีเหล็กเสริมธรรมดายึดเหนี่ยว 1.60√f'_{ci}

หน่วยแรงในคอนกรีตที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน (หลังการเสื่อมลดทั้งหมดของแรงดึงในเหล็กเสริมรับแรงอัด) ต้องมีค่าไม่เกินค่าต่อไปนี้

หน่วยแรงอัด

- กรณีโครงสร้างรับหน่วยแรงเนื่องจากแรงดัด 0.45fc'
- กรณีโครงสร้างรับหน่วยแรงอัดโดยตรง 0.30fc'

หน่วยแรงดึง

- หน่วยแรงดึงในบริเวณคอนกรีตซึ่งถูกอัดแรงมาก่อน

$$1.6\sqrt{fc'}$$

หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริมอัดแรงจะต้องไม่เกินค่าดังต่อไปนี้

- ขณะดึงด้วยเครื่องดึงเหล็ก 0.94f_{py}
- แต่ไม่เกิน 0.80f_{pu}

- ทันทีที่ถ่ายแรงเข้าสู่อาคาร 0.70f_{pu}
- โดยที่ f'_{ci} คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตขณะถ่ายแรง โดยทดสอบจากแท่งคอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐาน
- f'_c คือ กำลังอัดประลัยที่ 28 วัน โดยทดสอบจากแท่งคอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐาน
- f_{py} คือ กำลังครากของเหล็กเสริมอัดแรง
- f_{pu} คือ กำลังประลัยของเหล็กเสริมอัดแรง

สถานะประลัย (Ultimate state)

เป็นสถานะที่โครงสร้างสิ้นสุดความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก การวิเคราะห์ที่สถานะนี้เป็นการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักเกินน้ำหนักบรรทุก (Overload) ก่อนที่โครงสร้างจะพังลง ซึ่งในการออกแบบจะต้องมีค่าตัวคูณน้ำหนัก (load factor) ไม่น้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ได้กำหนดค่าตัวคูณน้ำหนัก ดังแสดงไว้ในหัวข้อ 2.3.1.2.1

ตารางที่ 2.5 ระยะโก่งสูงสุดที่ยอมให้ [2]

| ประเภทของชิ้นงาน | การโก่งตัวที่พิจารณา | พิกัดการโก่งตัว |
|--|---|-----------------|
| ดาดฟ้าเรียบไม่รองรับหรือเชื่อมยึดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง (non-structural) ซึ่งอาจเสียหายจากการโก่งตัวมากเกินไป | การโก่งตัวทันทีเนื่องจากน้ำหนักจร | $\frac{L}{180}$ |
| พื้นไม่รองรับหรือเชื่อมยึดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ซึ่งอาจเสียหายจากการโก่งตัวมากเกินไป | การโก่งตัวทันทีเนื่องจากน้ำหนักจร | $\frac{L}{360}$ |
| พื้นและดาดฟ้ารองรับหรือเชื่อมยึดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ซึ่งอาจเสียหายจากการโก่งตัวมากเกินไป | ส่วนของการโก่งตัวทั้งหมด ที่เกิดขึ้นหลังจากการติดตั้งชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง และ (ผลรวมของการโก่งตัวระยะยาวจากน้ำหนักบรรทุกคงค้าง การโก่งตัวทันทีจากน้ำหนักบรรทุกจรใดๆที่เพิ่มขึ้น) | $\frac{L}{480}$ |
| พื้นและดาดฟ้ารองรับหรือเชื่อมยึดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ซึ่งไม่น่าจะเสียหายจากการโก่งตัวมากเกินไป | | $\frac{L}{240}$ |

ค่าตัวคูณน้ำหนัก (มาตรฐานสำหรับอาคารคอร์กรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537)

$$U=1.4D+1.7L$$

---(2.3.1)

โดยที่ U = กำลังน้ำหนักที่ต้องการ

D = น้ำหนักบรรทุกคงที่

L = น้ำหนักบรรทุกจร

ในการออกแบบจะต้องออกแบบให้กำลังที่ออกแบบ (Design strength) ไม่น้อยกว่ากำลังที่ต้องการ (Required strength) โดยที่กำลังที่ออกแบบหาได้จากการคูณกำลังระบุ (Nominal strength) ด้วยตัวคูณลดกำลัง (Strength reduction factor) มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ได้กำหนดค่าตัวคูณลดกำลัง สำหรับกรณีต่างๆ ดังแสดงไว้





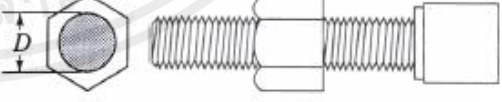

| | | |
|--------------------------------|-----|---|
| กำลังที่ต้องการ | ≤ | กำลังที่ออกแบบ |
| M_u | ≤ | ϕM_n |
| P_u | ≤ | ϕP_n |
| V_u | ≤ | ϕV_n |
| โดยที่ M_u, P_u, V_u | คือ | กำลังที่ต้องการของโมเมนต์ แรงอัดและแรงเฉือนตามลำดับ |
| $\phi M_n, \phi P_n, \phi V_n$ | คือ | กำลังที่ออกแบบของโมเมนต์ แรงอัดและแรงเฉือนตามลำดับ |
| M_n, P_n, V_n | คือ | กำลังระบุของโมเมนต์ แรงอัดและแรงเฉือนตามลำดับ |
| ϕ | คือ | ตัวคูณลดกำลัง |

2.4.1.2.1 ตัวคูณลดกำลัง ϕ

- กรณีของแรงดัด อาจมีหรือไม่มีแรงดึงในแนวแกน 0.90
- กรณีของแรงดึงในแนวแกน 0.90
- กรณีของแรงอัด หรือแรงอัดร่วมกับแรงดัด
สำหรับชิ้นส่วนปลอกเกลียว 0.75
- สำหรับชิ้นส่วนปลอกเดี่ยว 0.70
- กรณีรับแรงเฉือนและแรงบิด 0.85
- กรณีแรงกด 0.70

2.3.1.3 เหล็กเสริมอัดแรง

นเรศ พันธราช, 2541 [3] ได้กล่าวไว้ว่า เหล็กเสริมอัดแรงที่ใช้อยู่ทั่วไปมี 3 ชนิด คือ ลวดอัดแรง (Prestressing wire) ลวดอัดแรงตีเกลียว (Prestressing strand) และเหล็กเส้นอัดแรง (Prestressing bar) ขนาดและรูปร่างเหล็กเสริมอัดแรงชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.6 [3]

| ชนิด | ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง | | รูปร่าง |
|---|----------------------|-------------|--|
| | มม. | นิ้ว | |
| ลวดอัดแรงชนิดเรียบ (Plain round wire) | 2.0-9.0 | 0.08-0.36 |  |
| ลวดอัดแรงชนิดมีร่อง (Indented wire) | 5.0-7.0 | 0.200-0.276 |  |
| ลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น (Seven-wire strand) | 6.2-15.2 | 0.250-0.600 |  |
| ลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 19 เส้น (Nineteen-wire strand) | 17.8-21.8 | 0.700-0.860 |  |
| เหล็กเส้นอัดแรงชนิดกลม (Round bar) | 9.2-32.0 | 0.362-1.260 |  |
| เหล็กเส้นอัดแรงชนิดข้ออ้อย (Threaded bar) | 23.0-32.0 | 0.906-1.260 |  |

ตารางที่ 2.6 แสดงรูปเหล็กเสริมอัดแรง [3]

2.3.1.3.1 ลวดอัดแรง (Prestressing wire)

ลวดอัดแรงที่ใช้อยู่ในปัจจุบันผลิตตามมาตรฐาน ASTM A421 ซึ่งได้กำหนดคุณสมบัติขั้นต่ำของลวดได้แก่ กำลังดึงประลัย กำลังครากและค่าการยึดตัวขณะขาด ในการออกแบบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของลวดอัดแรงอาจใช้ค่าคงที่เท่ากับ 2.04×10^6 กก./ชม.² ลวดอัดแรงที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมีอยู่ 2 ชนิด ได้แก่

1. ชนิดปลายยึดเป็นปม (type BA) ลวดชนิดนี้ที่ปลายลวดจะทำให้เป็นปม (Bottom anchorage) เพื่อช่วยในการยึดจับปลาย ลวดชนิดนี้นิยมใช้กันมากในประเทศสหรัฐอเมริกา
 2. ชนิดปลายยึดเป็นลิ้ม (type WA) ลวดชนิดนี้ใช้การยึดจับปลายด้วยลักษณะของลิ้ม (Wedge anchorage) ไม่มีการทำปมที่บริเวณปลาย ลวดชนิดนี้นิยมใช้กันทั่วไปในประเทศไทย
- คุณสมบัติของลวดอัดแรงตามมาตรฐาน ASTM A421 และ มอก. 95-2534 แสดงไว้ในตารางที่

2.7 [3]

ตารางที่ 2.7 แสดงคุณสมบัติลวดอัดแรงตามมาตรฐาน ASTM A421 [3]

| ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง | พื้นที่หน้าตัด | กำลังดึงประลัยอย่างน้อยที่สุด | กำลังครากอย่างน้อยที่สุด 1% |
|-----------------------|------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| มม. | มม. ² | กก./ชม. ² | กก./ชม. ² |
| 4 | 12.57 | 17,500 | 15,000 |
| 5 | 19.64 | 17,500 | 15,000 |
| 7 | 38.48 | 16,000 | 13,500 |
| 9 | 63.62 | 14,500 | 12,500 |

ตารางที่ 2.8 แสดงคุณสมบัติลวดอัดแรงตามมาตรฐาน มอก. 95-2534 [3]

| ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง | พื้นที่หน้าตัด | กำลังดึงประลัยอย่างน้อยที่สุด | | กำลังครากอย่างน้อยที่สุด 1% | |
|-----------------------|------------------|-------------------------------|--------|-----------------------------|--------|
| | | กก./ชม. ² | | กก./ชม. ² | |
| มม. | มม. ² | BA | WA | BA | WA |
| 4.88 | 18.70 | - | 17,580 | - | 14,060 |
| 4.98 | 19.48 | 16,870 | 17,580 | 13,500 | 14,060 |
| 6.35 | 31.67 | 16,870 | 16,870 | 13,500 | 13,500 |
| 7.01 | 38.59 | - | 16,520 | - | 13,220 |

2.3.1.3.2 ลวดอัดแรงตีเกลียว (Prestressing strand)

ลวดอัดแรงตีเกลียวผลิตโดยการนำลวดหลาย ๆ เส้นมาพันกันเป็นเกลียว เช่น ลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น (seven-wire strand) และลวดอัดแรงตีเกลียวชนิดลวด 19 เส้น (nineteen-wire strand) การใช้ลวดขนาดเล็กมาทำเป็นลวดอัดแรงตีเกลียวทำให้การทำงานสะดวกมากขึ้น เพราะการตัดงอทำได้ดีกว่ากรณีลวดเส้นใหญ่เส้นเดียวที่มีพื้นที่หน้าตัดรวมเท่ากันและการควบคุมคุณภาพก็ทำได้ดีกว่า

ลวดอัดแรงตีเกลียวที่ใช้กันมากจะเป็นลวดอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น และมีการคลายแรงต่ำ (low relaxation) ผลิตมาตรฐาน ASTM A416 โดยมี 2 เกรด คือเกรด 250 (มีกำลังดึงประลัยอย่างน้อย 250,000 ปอนด์/นิ้ว หรือ 17,580 กก./ซม.²) และเกรด 270 (มีกำลังดึงประลัยอย่างน้อย 270,000 ปอนด์/นิ้ว หรือ 18,980 กก./ซม.²) ซึ่งเกรด 250 และ 270 ตามมาตรฐาน ASTM A416 จะเทียบเท่ากับลวดอัดแรงในมาตรฐาน มอก. 420-2534 เกรด 1725 (กำลังดึงประลัย 1,725 นิวตัน/มม.²) และเกรด 1860 (กำลังดึงประลัย 1,860 นิวตัน/มม.²) ตามลำดับ ในการออกแบบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของลวดอัดแรงตีเกลียวอาจใช้ค่าคงที่เท่ากับ 1.97×10^6 กก./ซม.² คุณสมบัติของลวดอัดแรงตีเกลียวตามมาตรฐาน ASTM A416 และ มอก. 420-2534 แสดงไว้ในตารางที่ 2.8 [3] และ ตารางที่ 2.9 [3] ตามลำดับ ตารางที่ 2.9 คุณสมบัติของลวดอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น มีการคลายแรงดึงต่ำตามมาตรฐาน ASTM A416 [3]

| เกรด | ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง | พื้นที่หน้าตัด | แรงดึงที่จุดประลัย | แรงดึงที่จุดคราก (1% หน่วยการยึดตัว) |
|------|-----------------------|------------------|--------------------|--------------------------------------|
| | มม. | มม. ² | กก. | กก. |
| 250 | 6.35 | 23.22 | 4,080 | 3,680 |
| | 7.94 | 37.42 | 6,580 | 5,930 |
| | 9.53 | 51.61 | 9,070 | 8,170 |
| | 11.11 | 69.68 | 12,240 | 11,020 |
| | 12.7 | 92.9 | 16,320 | 14,690 |
| | 15.24 | 139.35 | 24,490 | 22,050 |
| 270 | 9.53 | 54.84 | 10,430 | 9,390 |
| | 11.11 | 74.19 | 14,060 | 12,660 |
| | 12.7 | 98.71 | 18,730 | 16,850 |
| | 15.24 | 140 | 26,580 | 23,930 |

ตารางที่ 2.10 คุณสมบัติของลวดอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น มีการคลายแรงดึงต่ำตามมาตรฐาน มอก. 420-2534 [3]

| เกรด | ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง | พื้นที่หน้าตัด | แรงดึงที่จุดประลัย | แรงดึงที่จุดคราก 1% หน่วยการยึดตัว |
|------|-----------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|
| | มม. | มม. ² . | กก. | กก. |
| 1725 | 9.53 | 51.61 | 9,070 | 8,163 |
| | 12.70 | 92.90 | 16,320 | 14,688 |
| | 15.24 | 139.35 | 24,490 | 22,041 |
| 1860 | 9.53 | 54.84 | 10,430 | 9,387 |
| | 12.70 | 98.71 | 18,730 | 16,857 |
| | 15.24 | 140.00 | 26,580 | 23,922 |

เหล็กเสริมไม่อัดแรง (Non-prestressed reinforcement)

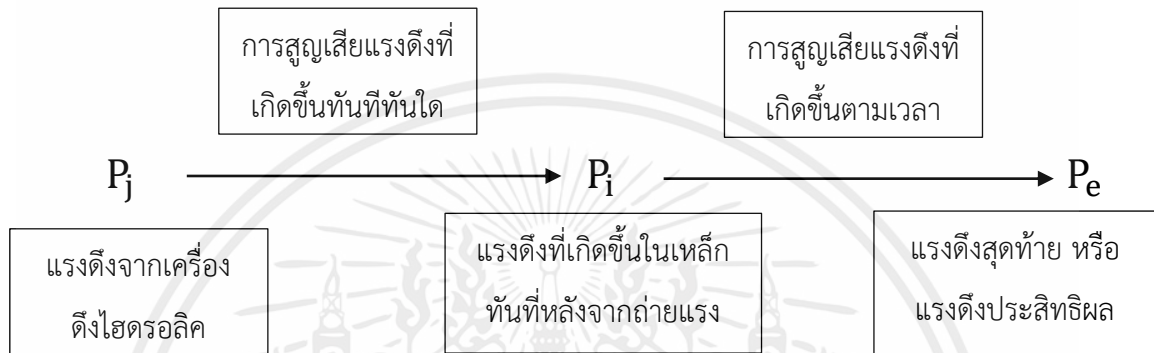
ในคอนกรีตอัดแรงบางครั้งก็จะมีเสริมเหล็กชนิดไม่อัดแรง ซึ่งเป็นเหล็กกล้าละมุน (mild steel) เหล็กเส้นไม่อัดแรงที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมี 2 ชนิด คือ เหล็กเส้นกลม (round bar) และเหล็กข้ออ้อย (deformed bar) เกรดของเหล็กซึ่งเป็นตัวบอกกำลังครากของเหล็กมี SR24 SD30 SD40 และ SD50 โมดูลัสยืดหยุ่นที่ใช้ในการออกแบบให้ใช้เท่ากับ 2.04×10^6 กก./ซม.² สำนักงานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ได้กำหนดคุณสมบัติของเหล็กเสริมไม่อัดแรงดังตารางที่ 2.10 [4]

ตารางที่ 2.11 คุณสมบัติของเหล็กเสริมไม่อัดแรง [4]

| ชนิดของเหล็กเสริม | กำลังคราก | กำลังดึงประลัย |
|-------------------|---------------------------|---------------------------|
| | ไม่น้อยกว่า (กก/ตร.ซม) | ไม่น้อยกว่า (กก/ตร.ซม) |
| SR-24 | 2400 | 3900 |
| SD-30 | 3000 | 4900 |
| SD-40 | 4000 | 5700 |
| SD-50 | 5000 | 6300 |

2.3.1.4 การเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง

นเรศ พันธราธร, 2541 [5] ได้กล่าวไว้ว่า ในการอัดแรงจะมีการสูญเสียแรงดึงเกิดขึ้นในเหล็กเสริมอัดแรง ซึ่งการสูญเสียแรงดึงนี้มีทั้งการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใดหลังจากการถ่ายแรง (immediate loss) และการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลา (time-dependent loss) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 [2]



รูปที่ 2.12 การเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง [2]

การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใดหลังจากการถ่ายแรง

การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใดนี้มีสาเหตุจากหลายประการด้วยกัน ที่มักจะนำมาพิจารณาในการออกแบบ ได้แก่ การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริมอัดแรง (friction loss) การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต (elastic shortening loss) และการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยัด (anchorage loss) นอกจากนี้การสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง อาจจะมีสาเหตุอื่น ๆ เช่น การหดตัวของไม้แบบในชิ้นส่วนที่เป็นคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใด หาได้จากผลต่างของค่าแรงดึงที่วัดได้ขณะดึงด้วยเครื่องดึงไฮดรอลิก P_j กับ แรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กทันทีหลังจากถ่ายแรง P_i

$$\text{การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใด} = P_j - P_i \quad \text{---(2.3.2)}$$

การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต (elastic shortening loss)

กรณีของคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน ในคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน เหล็กเสริมอัดแรงจะถูกดึงค้างไว้ก่อนการเทคอนกรีตและเมื่อทำการถ่ายแรงจากเหล็กเสริมอัดแรงสู่คอนกรีต คอนกรีตจะเกิดการหดตัวเนื่องจากแรงอัดตามทฤษฎีอีลาสติก ในขณะเดียวกันเหล็กเสริมอัดแรงจะสั้นลงตาม ดังนั้น

การสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงจึงเกิดขึ้น โดยที่การสูญเสียหน่วยการยึดตัวในเหล็กเสริมอัดแรง ($\Delta\varepsilon_s$) เท่ากับหน่วยการหดตัวของคอนกรีต (ε_c) ถ้าพิจารณาคอนกรีตอัดแรงที่มีแนวเหล็กเสริมอัดแรงกระทำที่ศูนย์กลางหน้าตัดคอนกรีต ซึ่งในกรณีนี้ไม่มีผลของโมเมนต์ดัดมาเกี่ยวข้อง แต่มีผลของแรงตามแนวแกน

$$\Delta\varepsilon_s = \varepsilon_c$$

$$\Delta\varepsilon_s = \frac{\sigma_c}{E_c} = \frac{P_0}{A_c E_c}$$

โดยที่ P_0 คือ แรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงหลังจากถ่ายแรงสู่คอนกรีตแล้ว ซึ่งค่า P_0 นี้ยังไม่ทราบค่า แต่สามารถใช้ค่าเท่ากับ 0.9 ของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงก่อนการถ่ายแรงเป็นค่าประมาณเบื้องต้นสำหรับการคำนวณ

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต

E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

ดังนั้น ค่าการสูญเสียหน่วยแรงดึงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต E_s หาได้จาก

$$E_s = \Delta\sigma_s = E_s \Delta\varepsilon_s = \frac{E_s P_0}{E_c A_c} = n \frac{P_0}{A_c} \quad \text{---(2.3.3)}$$

สมการที่ 3.3 อาจเขียนในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$E_s = n f_{cir} = \frac{E_s}{E_{ci}} f_{cir} \quad \text{---(2.3.4)}$$

โดยที่ f_{cir} คือ หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นที่คอนกรีต ณ ตำแหน่งศูนย์กลางของเหล็กเสริมอัดแรง

$$\text{(ในกรณีของแนวเหล็กเสริมอัดแรงกระทำที่ศูนย์กลางของหน้าตัด } f_{cir} = \frac{P_0}{A_c}$$

E_s คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมอัดแรง

E_{ci} คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตขณะถ่ายแรง หาได้จาก $E_{ci} = 15200\sqrt{f'_{ci}}$

ในกรณีที่มีผลของโมเมนต์เข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งมาจากโมเมนต์เนื่องจากการเอียงศูนย์ (P_e) และโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักตัวเอง (M_G) การคำนวณหาค่าการสูญเสียหน่วยแรงดึงเนื่องจากการหดอีลาสติกของคอนกรีตสามารถใช้สมการที่ 3.4 เพียงแต่ค่า f_{cir} จะต้องคำนวณจากสมการที่ 3.6

$$\text{หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต } \sigma_c = \frac{P}{A} \pm \frac{Pey}{I} \pm \frac{My}{I} \quad \text{---(2.3.5)}$$

หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นที่คอนกรีต ณ ตำแหน่งศูนย์กลางของเหล็กเสริมอัดแรง ($y=e$) คือ

$$f_{cir} = \frac{P_0}{A} + \frac{P_0 e^2}{I} - \frac{M_{Ge}}{I} \quad \text{---(2.3.6)}$$

การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลา

การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลามีสาเหตุหลักๆ มาจาก การหดตัวของคอนกรีตจากการสูญเสียความชื้น (shrinkage loss) การคืบ (creep loss) และหารคลายตัวแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง (steel relaxation loss) ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้นการสูญเสียแรงดึงนี้จะเพิ่มขึ้นตามเวลาโดยที่อัตราการสูญเสียแรงดึงจะเร็วในช่วงแรกและค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้น ถ้าให้ P_e คือแรงดึงที่เหลือในเหล็กเสริมอัดแรงหลังจากการสูญเสียแรงดึงจากสาเหตุทั้งหมดได้เกิดขึ้นแล้ว การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลาจึงหาได้จาก

$$\text{การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลา} = P_i - P_e \quad \text{---(2.3.7)}$$

การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต (shrinkage loss)

การสูญเสียแรงดึงในกรณีนี้มีสาเหตุจากการหดตัวของคอนกรีต เนื่องจากการสูญเสียความชื้นในคอนกรีต มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง ว.ส.ท. ปี 2537 ได้เสนอให้ใช้ค่าการสูญเสียหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากการหดตัว เมื่อเวลาผ่านไปนาน ๆ ดังนี้

$$\text{สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน} \quad SH = 1200 - 11RH \quad \text{---(2.3.8)}$$

$$\text{สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กทีหลัง} \quad SH = 0.80(1200 - 11RH) \quad \text{---(2.3.9)}$$

โดยที่ SH คือ หน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต (กก./ชม.²)

RH คือ ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศตลอดปี (หน่วยเป็นร้อยละ)

การคำนวณหาการสูญเสียหน่วยแรงดึงเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต นอกจากจะใช้สมการที่ 2.3.8 และ 2.3.9 แล้ว อาจใช้ค่าประมาณตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.11 [6]

ตารางที่ 2.12 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต [6]

| ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศตลอดปี (ร้อยละ) | ค่าหน่วยแรงดึงที่สูญเสีย (กก./ซม. ²) | |
|--|--|-------------------------------------|
| | คอนกรีตอัดแรง ชนิดดึงเหล็กก่อน | คอนกรีตอัดแรงชนิด ดึงเหล็กทีหลัง |
| 0-25 | 1,060 | 850 |
| 26-75 | 700 | 560 |
| 76-100 | 350 | 380 |

การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการคืบของคอนกรีต (creep loss)

การคืบที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขึ้นอยู่กับเวลาและค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนคอนกรีตการคืบจะทำให้เกิดการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ได้เสนอให้ใช้สมการที่ 3.14 สำหรับการคำนวณหาค่าหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่สูญเสียเนื่องจากการคืบของคอนกรีต ทั้งในคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อนและดึงเหล็กทีหลังดังต่อไปนี้

$$CR = 12f_{cir} - 7f_{cds} \quad \text{---(2.3.10)}$$

โดยที่ CR คือ หน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากการคืบของคอนกรีต, (กก./ซม.²)

f_{cir} คือ หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นที่คอนกรีตที่จุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรงทันทีหลังจาก
การทำการถ่ายแรง, (กก./ซม.²)

f_{cds} คือ หน่วยแรงดึงในคอนกรีตที่จุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากการรับน้ำหนัก
คงที่ทั้งหมด ยกเว้นน้ำหนักคงที่ซึ่งมีอยู่แล้วขณะอัดแรง, (กก./ซม.²)

การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง (steel relaxation loss)

การสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงในกรณีนี้ เกิดเนื่องจากการคลายแรงดึงในตัวเหล็กเสริมอัดแรง ขนาดของแรงดึงที่ลดลงขึ้นอยู่กับค่าของหน่วยแรงดึงแรกเริ่ม เวลาที่ผ่านไปหลังจากดึงเหล็กเสริมอัดแรง และชนิดของเหล็กเสริมอัดแรง ในการคำนวณออกแบบสามารถใช้มาตรฐานอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ซึ่งได้แสดงไว้ในสมการ 3.15-3.19 ดังต่อไปนี้

สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน

ก) ลวดเกลียวอัดแรง เกรด 1725 และ 1860 (มอก. 420-2525)

$$RE = 1410 - 0.4ES - 0.2(SH + CR) \quad \text{---(2.3.11)}$$

ข) ลวดอัดแรง (มอก. 95-2525)

$$RE = 1270 - 0.4ES - 0.2(SH + CR) \quad \text{---(2.3.12)}$$

- โดยที่ RE คือ หน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรง เนื่องจากการคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงเอง, (กก./ซม.²)
- ES คือ หน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรง เนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต, (กก./ซม.²)
- SH คือ หน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรง เนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต, (กก./ซม.²)
- CR คือ หน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรง เนื่องจากการคืบของคอนกรีต, (กก./ซม.²)

ค่าประมาณของการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง

การคำนวณค่าการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง สามารถใช้ค่าประมาณตามตารางที่ 2.10 ตามมาตรฐานอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ซึ่งประเมินภายใต้สมมติฐานของคอนกรีตน้ำหนักปกติ (normal weight concrete) การอัดแรงในระดับธรรมดาและภายใต้สภาวะแวดล้อมปานกลาง ค่าการสูญเสียแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงในตารางที่ 2.10 ไม่รวมถึงการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดและการเข้าที่ของสมอยึด

ตารางที่ 2.13 ค่าประมาณของการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง (ไม่รวมการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดและการเข้าที่ของสมอ) [2]

| ชนิดของเหล็กเสริมอัดแรง | ค่าหน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรง, กก./ซม. ² | |
|---------------------------------------|--|--------------------------------|
| | f'c = 300 กก./ซม. ² | f'c = 350 กก./ซม. ² |
| สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน | | |
| - ลวดเกลียวอัดแรง | - | 3,160 |
| - | | |
| สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กทีหลัง | | |
| - ลวดอัดแรง, ลวดเกลียวอัดแรง | 2,270 | 2,320 |
| - เหล็กเส้นอัดแรง | 1,570 | 1,620 |

2.3.1.5 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต

นเรศ พันธธาร, 2541 [7] ได้กล่าวไว้ว่า การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต เป็นการวิเคราะห์คอนกรีตอัดแรงในสถานการณ์ใช้งาน (service state) โดยสมมติฐานว่าคอนกรีตเป็นวัสดุยืดหยุ่นในสถานการณ์ใช้งานดังนั้นทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ ทฤษฎีอิลาสติก สำหรับคอนกรีตอัดแรงนี้หลักการที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตในสถานการณ์ใช้งาน คือ หลักการรวมแรง โดยหน่วยแรงในคอนกรีต σ_c ณ ตำแหน่งใด ๆ ที่เกิดขึ้นจากการอัดแรง P มีค่าเชิงศูนย์ e และโมเมนต์ภายนอก M จะหาได้จาก

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \pm \frac{Pey}{I} \pm \frac{My}{I} \quad \text{----(2.3.13)}$$

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต

I คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดคอนกรีต

y คือ ระยะระหว่างตำแหน่งบนหน้าตัดคอนกรีตที่พิจารณากับแนวแกนสะเทิน

สำหรับเครื่องหมายที่ใช้ในการคำนวณหน่วยแรงในคอนกรีตนี้ เนื่องจากคอนกรีตมีคุณสมบัติในการรับแรงอัดได้ดี และหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนคอนกรีตมักจะพิจารณาความสามารถในการรับแรงอัดเป็นหลัก ดังนั้นการคำนวณนี้จะใช้เครื่องหมาย (+) สำหรับหน่วยแรงอัดในคอนกรีตและใช้เครื่องหมาย (-) สำหรับหน่วยแรงดึงในคอนกรีต

การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตในสถานการณ์ใช้งานนี้ การวิเคราะห์ยังแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขณะถ่ายแรง (transfer stage) และขณะรับน้ำหนักบรรทุก (working stage)

การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขณะถ่ายแรง

การวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้ จะพิจารณาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตทันทีที่ถ่ายแรงจากเหล็กเสริมอัดแรงสู่คอนกรีต ซึ่งแรงอัดที่ใช้คำนวณในขั้นตอนนี้จะเป็นแรงที่หักลบการสูญเสียแรงดึงในเหล็กที่เกิดขึ้นทันทีทันใด P_i และโมเมนต์ที่นำมาคำนวณเป็นโมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักตัวเอง M_G เท่านั้น เพราะขณะถ่ายแรงยังไม่มีน้ำหนักบรรทุกจากภายนอกกระทำดังนั้นสมการที่ใช้ในการคำนวณหน่วยแรงในคอนกรีตที่เกิดขึ้นที่ขั้นตอนนี้ คือ

$$\sigma_c = \frac{P_i}{A} \pm \frac{P_i e y}{I} \pm \frac{M_G y}{I} \quad \text{----(2.3.14)}$$

การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขณะรับน้ำหนักบรรทุกทุก

ขั้นตอนนี้จะพิจารณาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ขณะที่มีน้ำหนักบรรทุกภายนอกกระทำ แรงอัดที่ใช้ในการคำนวณเป็นแรงที่หักลบการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทั้งหมด (ทั้งจากการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใด และที่เกิดขึ้นตามเวลา) P_e แรงนี้เรียกว่าแรงอัดประสิทธิผล (effective prestressing force) และโมเมนต์ที่นำมาคำนวณเป็นโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด (รวมน้ำหนักตัวเองด้วย) M_T ดังนั้นสมการที่ใช้ในการคำนวณหน่วยแรงในคอนกรีตที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ คือ

$$\sigma_c = \frac{P_e}{A} \pm \frac{P_e e y}{I} \pm \frac{M_T y}{I} \quad \text{---(2.3.15)}$$

2.3.1.6 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมอัดแรง

นเรศ พันธราธร, 2541 [9] ได้กล่าวไว้ว่า การวัดหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมอัดแรงในคอนกรีตอัดแรง กระทำขณะทำการดึงเหล็กเสริมอัดแรง และหลังจากนั้นจะมีการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริม เนื่องจากสาเหตุต่างๆ และเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกมากกระทำเพิ่มเติมหน่วยแรงในเหล็กเสริมอัดแรงก็จะมีการเปลี่ยนแปลงอีกเล็กน้อยเนื่องจากการโก่งตัวของคานนั้น ๆ ในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงในเหล็กเสริมอัดแรงที่เกิดจากการดกตัวของคานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติมในช่วงสถานะใช้งานโดยที่คอนกรีตยังไม่เกิดการแตกร้าว

ก) สำหรับคอนกรีตอัดแรงระบบมีการยึดเหนี่ยว

ในคอนกรีตอัดแรงระบบมีการยึดเหนี่ยว เหล็กเสริมอัดแรงและคอนกรีตที่อยู่โดยรอบจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวเกิดขึ้น ทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงหน่วยการยึดหดตัวที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริมอัดแรง $\Delta \epsilon_s$ และค่าการเปลี่ยนแปลงหน่วยการยึดหดตัวของคอนกรีต $\Delta \epsilon_c$ ที่อยู่โดยรอบเท่ากันการคำนวณหน่วยแรงที่เปลี่ยนไปของเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากการโก่งตัวสามารถคำนวณได้จากทฤษฎีอัสติคดังนี้

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_s &= \Delta \epsilon_c \\ \frac{\Delta \sigma_s}{E_s} &= \frac{\Delta \sigma_c}{E_c} \\ \Delta \sigma_s &= \frac{E_s}{E_c} \Delta \sigma_c = n \Delta \sigma_c = n \frac{M y}{I} \end{aligned} \quad \text{---(2.3.16)}$$

โดยที่ $\Delta \sigma_s$ คือ หน่วยแรงที่เปลี่ยนไปของเหล็กเสริมอัดแรงที่เกิดขึ้นจากการโก่งตัวของคานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติม

M คือ โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติมที่กระทำต่อคานที่หน้าตัดใด ๆ

n, l คือ อัตราส่วนโมดูลัส และโมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัด ตามลำดับ

y คือ ระยะห่างจากตำแหน่งศูนย์กลางเหล็กเสริมอัดแรงถึงแนวแกนสะเทินหรือเท่ากับ e

จากสมการที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าหน่วยแรงดึงที่เปลี่ยนไปของเหล็กเสริมอัดแรงจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าโมเมนต์ M สำหรับคานช่วงเดียวโมเมนต์ที่กึ่งกลางช่วงคานจะมีค่ามากที่สุด ดังนั้นหน่วยแรงดึงที่เปลี่ยนไปของเหล็กเสริมอัดแรงจะเปลี่ยนไปมากที่สุดที่กึ่งกลางช่วงคานและค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงน้อยลงจนไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลยที่หน้าตัดบริเวณที่รองรับ

ข) สำหรับคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยว

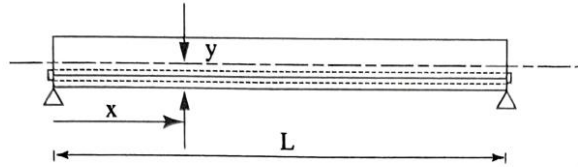
การเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงของคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยว แตกต่างไปจากของระบบมีการยึดเหนี่ยว เหล็กเสริมอัดแรงจะมีการขยับเคลื่อนตัวสัมพันธ์กับคอนกรีตที่อยู่โดยรอบเนื่องจากไม่มีการยึดเหนี่ยวระหว่างผิวทั้งสอง ดังนั้นสมการที่ 2.3.16 ไม่สามารถนำมาใช้กับการคำนวณหาหน่วยแรงดึงที่เปลี่ยนไปของเหล็กเสริมอัดแรงในคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยว พิจารณาคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยวของคานช่วงเดียวดังรูปที่ 2.9 [9] เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุก หน้าตัดคอนกรีตที่กึ่งกลางช่วงคานจะมีโมเมนต์เกิดขึ้นสูงสุด หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงของคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยวที่กึ่งกลางช่วงคานจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ช้ากว่าของคอนกรีตอัดแรงระบบมีการยึดเหนี่ยว ที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อมีการเพิ่มหน่วยการยึดตัวในเหล็กเสริมอัดแรงเกิดขึ้น หน่วยการยึดตัวในเหล็กเสริมอัดแรงชนิดไร้การยึดเหนี่ยวนี้จะกระจายไปตลอดคานเนื่องจากเหล็กเสริมอัดแรงมีอิสระในการเคลื่อนตัวสัมพันธ์กับคอนกรีตที่อยู่โดยรอบ การเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงของคอนกรีตอัดแรงไร้การยึดเหนี่ยวจะเฉลี่ยไปตลอดความยาวคาน ดังนั้นการคำนวณจึงเริ่มต้นด้วยการคำนวณหาความยาวที่เพิ่มขึ้นของเหล็กเสริมอัดแรง ΔL ก่อน โดยที่ ΔL นี้เท่ากับค่าที่ได้จากการอินทิเกรตหน่วยการยึดตัวของคอนกรีตที่ตำแหน่งเดียวกับเหล็กเสริมอัดแรงตลอดความยาวคาน คือ

$$\Delta L = \int_0^L \epsilon_c dx = \int_0^L \frac{My}{E_c I} dx$$

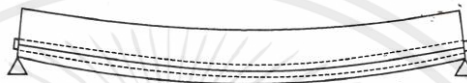
$$\text{ค่าเฉลี่ยของหน่วยการยึดตัวหาได้จาก } \frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{My}{E_c I} dx$$

ดังนั้นค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงดึงที่เพิ่มขึ้นหาได้จาก

$$\Delta \sigma_s = E_s \frac{\Delta L}{L} = \frac{n}{L} \int_0^L \frac{My}{E_c I} dx \quad \text{----(2.3.17)}$$



(ก) ก่อนนำน้ำหนักบรรทุกกระทำ



(ข) หลังนำน้ำหนักบรรทุกกระทำ

รูปที่ 2.13 หน่วยแรงดึงที่เพิ่มขึ้นของเหล็กเสริมอัดแรงในคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยว [9]

2.4.1.7 ค่าโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าว (Cracking moment)

นเรศ พันธธาร, 2541 [10] การแตกร้าวในคอนกรีตจะเกิดขึ้นเมื่อหน่วยแรงที่ผิวบนสุดหรือล่างสุด เกิดหน่วยแรงดึงขึ้นจนเกินค่าที่คอนกรีตสามารถรับได้ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับโมเมนต์ที่กระทำต่อคาน ค่าโมเมนต์ภายนอกที่ทำให้คอนกรีตอัดแรงแตกร้าวก็คือค่าโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตมีหน่วยแรงดึงเกิดขึ้นเท่ากับโมดูลัสของการแตกหัก (Modulus of rupture) จากสมการที่ 2.3.13 หน่วยแรงดึงในคอนกรีตที่เกิดขึ้นที่ผิวล่างของคานคอนกรีตอัดแรงช่วงเดียว หาได้จาก

$$\sigma_c = \frac{P}{A} + \frac{Pec_b}{I} - \frac{Mc_b}{I} \quad \text{---(2.3.18)}$$

ถ้าคอนกรีตเริ่มแตกร้าว จะได้ว่า

$$-f_r = \frac{P}{A} + \frac{Pec_b}{I} - \frac{Mc_b}{I} \quad \text{---(2.3.19)}$$

$$M_{cr} = Pe + \frac{PI}{Ac_b} + \frac{f_r I}{c_b} \quad \text{---(2.3.20)}$$

โดยที่ M_{cr} คือ โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าว

f_r คือ โมดูลัสของการแตกหักของคอนกรีต $\cong 2.0\sqrt{f'_c}$

พิจารณาอีกทางหนึ่ง ถ้าให้ M_1 เป็นโมเมนต์ที่ทำให้หน่วยแรงในคอนกรีตมีค่าเป็นศูนย์ จากสมการที่ 2.4.16 แทนค่า $\sigma_c = 0$ จะได้ว่า

$$0 = \frac{P}{A} + \frac{Pec_b}{I} - \frac{Mc_b}{I}$$

$$M_1 = Pe + \frac{PI}{Ac_b} = P\left(e + \frac{r^2}{c_b}\right) \quad \text{---(2.3.21)}$$

โดยที่ M_1 คือ โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตมีหน่วยแรงเป็นศูนย์

r คือ รัศมีจโรจน์ของหน้าตัดมีค่าเท่ากับ $\sqrt{\frac{I}{A}}$

คอนกรีตสามารถรับหน่วยแรงดึงเท่ากับ f_r ถ้าให้ M_2 เป็นโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตมีหน่วยแรงดึงเป็น f_r โดยทฤษฎีอิลาสติกสามารถหาค่าโมเมนต์ M_2 ได้จาก

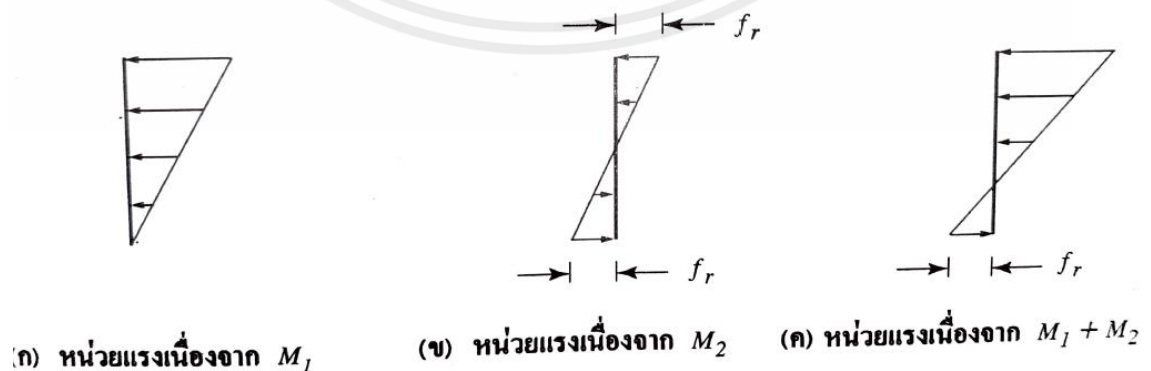
$$\sigma_c = \frac{M_2 c_b}{I}$$

$$f_r = \frac{M_2 c_b}{I}$$

$$\text{ดังนั้น } M_2 = \frac{f_r I}{c_b} \quad \text{---(2.3.22)}$$

โดยที่ M_2 คือ โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตสามารถรับได้เนื่องจากโมดูลัสของการแตกหัก f_r

จากสมการที่ 2.3.20 - 2.3.22 จะได้ว่า $M_{cr} = M_1 + M_2$ โดยที่ M_1 คือ โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตมีหน่วยแรงเป็นศูนย์ ถ้าสมมติว่าคอนกรีตไม่สามารถรับแรงดึงได้เลย ดังนั้นคานคอนกรีตอัดแรงจะเริ่มมีการแตกร้าวเมื่อโมเมนต์มากกระทำมีค่าเท่ากับ M_1 สำหรับ M_2 คือ ค่าโมเมนต์ที่คานสามารถรับได้เพิ่มเติมเนื่องจากการที่คอนกรีตสามารถรับแรงดึงได้เท่ากับโมดูลัสของการแตกหัก หน่วยแรงในคอนกรีตที่เกิดขึ้นเนื่องจากโมเมนต์เหล่านี้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.10 [10]



รูปที่ 2.14 โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าว [10]

2.3.1.8 กำลังประลัยของคอนกรีตอัดแรง

นเรศ พันธธรร, 2541 [11] ได้กล่าวไว้ว่า สิ่งสำคัญที่สุดในการออกแบบ คือ กำลังที่โครงสร้างสามารถรับได้จะต้องได้รับการออกแบบให้เพียงพอ เพราะถ้าโครงสร้างเกิดการวิบัติเนื่องจากกำลังที่ไม่เพียงพอ ผลเสียหายที่ตามมาจะรุนแรงและค่าใช้จ่ายของความเสียหายก็สูงมาก ดังนั้นความน่าจะเป็นที่เกิดวิบัติเนื่องจากกำลังที่ไม่เพียงพอต้องทำให้มีโอกาสน้อยที่สุด ทั้งนี้ควรพิจารณาร่วมกันไปกับค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมด้วย เพราะกำลังที่เพิ่มขึ้นหมายถึงค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นตาม

การออกแบบในหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและในเหล็กน้อยกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ที่กำหนด ไว้ในสถานการณ์ใช้งานที่ไม่ได้หมายถึง ความปลอดภัยอย่างเพียงพอที่แท้จริงของโครงสร้างต่อการรับกำลัง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องตรวจสอบกำลังที่สถานะประลัย เพื่อให้แน่ใจว่าโครงสร้างมีความสามารถในการรับกำลังได้อย่างเหมาะสม

1. สมมติฐานการวิเคราะห์โมเมนต์ตัดประลัย

สมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณหาโมเมนต์ตัดประลัยขององค์อาคารที่ใช้อยู่ทั่วไปมีดังนี้

- ก) การกระจายของหน่วยการยึดหดตัวในคอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นเส้นตรง กล่าวคือหน่วยการยึดหดตัวในคอนกรีตและเหล็กเสริม เป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางจากแนวแกนสะเทือน
- ข) คอนกรีตไม่รับแรงตัด หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งก็คือ กำลังในการรับแรงดึงของคอนกรีตไม่ถูกนำมาพิจารณาในการคำนวณ
- ค) ที่สถานะประลัย หน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ผิวด้านรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 0.003

พฤติกรรมของคอนกรีตอัดแรงที่สถานะปาไหลคล้ายกับคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปหลักการที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์กำลังอัดประลัยของคาน คือ หลักการแรงคู่ควบภายใน ในช่วงสถานะที่ใช้งานก่อนที่คอนกรีตเกิดการแตกร้าว คอนกรีตอัดแรงจะแตกต่างจากคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปตรงที่คอนกรีตอัดแรง แรงคู่ควบ C-T จะมีค่าคงที่แม้ว่าโมเมนต์ภายนอกเพิ่มขึ้น เมื่อขานรับน้ำหนักภายนอกเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จนเลยช่วงสถานการณ์ใช้งาน การแตกร้าวของคอนกรีตจะเกิดขึ้น ตอนนี้แกนของโมเมนต์คู่ควบมีค่าค่อนข้างคงที่เหมือนคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ดังนั้นเมื่อโมเมนต์ภายนอกเพิ่มขึ้นต่อไป แรงคู่ควบ C-T จะมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งหมายความว่า หน่วยแรงในเหล็กเสริมอัดแรง จะเริ่มเพิ่มขึ้นและหน่วยแรงอัดในคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นจนความสัมพันธ์ของหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัวของคอนกรีตไม่เป็นเส้นตรงอีกต่อไปจนกระทั่งเมื่อโมเมนต์ภายนอกมีค่าเท่ากับโมเมนต์ตัดประลัย คานก็ถึงจุดวิบัติ

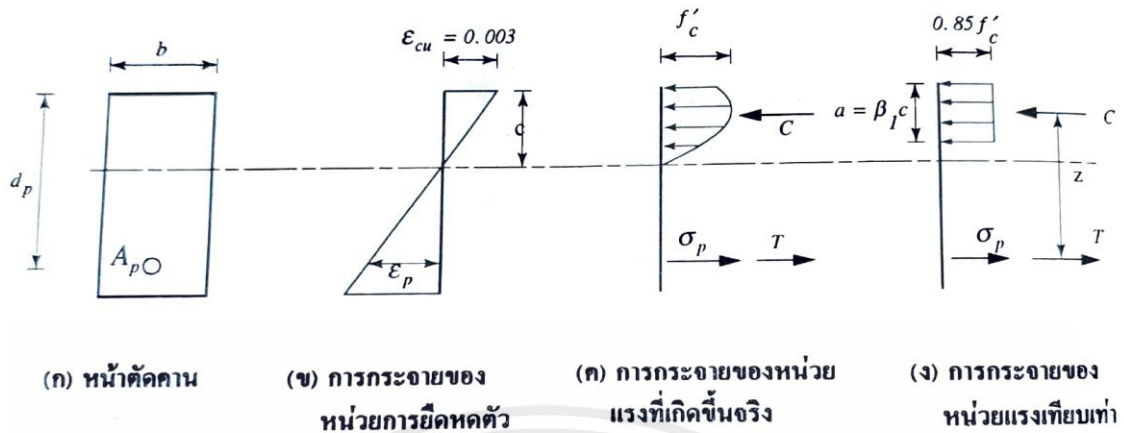
การเกิดวิบัติจะเกิดขึ้นเมื่อคอนกรีตเกิดการอัดระเบิด (crushing) มาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท.ได้กำหนดหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ผิวด้านรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 0.003 ที่สถานะประลัยการวิบัติของ

อาคารแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลัก (tension failure) และการวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลัก (compression failure) การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักเริ่มต้นโดยการที่การยืดตัวของเหล็กเสริมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก (การครากของเหล็กเกิดขึ้น) และวิบัติในที่สุดเมื่อคอนกรีตอัดระเบิด ($\epsilon_c = 0003$) การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักนี้เกิดขึ้นเมื่อปริมาณเหล็กเสริมน้อยกว่าเกณฑ์สมดุล (under-reinforcement) ส่วนการวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลักคอนกรีตจะอัดระเบิด ($\epsilon_c = 0003$) ขณะที่เหล็กเสริมยังไม่ถึงจุดคราก ดังนั้น การวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลักนี้จึงมีลักษณะที่การโก่งตัวยังมีน้อยเพราะเหล็กเสริมก็ยังยึดไม่มาก การวิบัติชนิดนี้จึงมีลักษณะเปราะ (brittle) และเกิดขึ้นเมื่อปริมาณเหล็กเสริมมากกว่าเกณฑ์สมดุล (over-reinforcement)

2. การกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตเป็นรูปสี่เหลี่ยม (equivalent rectangular concrete stress distribution)

การกระจายของหน่วยการยืดหดตัวและหน่วยแรงที่สถานะประลัยแสดงไว้ในรูป 2.15 [11] ที่สถานะประลัยความสัมพันธ์ของหน่วยแรงกับหน่วยการยืดหดตัวไม่เป็นเส้นตรง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการกระจายของหน่วยการยืดหดตัวเป็นเส้นตรงและสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางจากแนวแกนสะเทินดังรูป 2.15 (ข) [11] การกระจายของหน่วยแรงในคอนกรีตที่อยู่เหนือแนวแกนสะเทินจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งดังรูป 2.15 (ค) [11] เพื่อให้การคำนวณกระทำได้ง่ายขึ้น การกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งจึงถูกแทนที่โดยการกระจายของหน่วยแรงอัดรูปสี่เหลี่ยมดังรูป 2.15 (ง) [11] รูปสี่เหลี่ยมที่เทียบเท่านี้ใช้หลักการของแรงลัพธ์ C ต้องอยู่ภายในตำแหน่งเดิม ดังนั้นพื้นที่ภายในรูปสี่เหลี่ยมของรูป 2.11 (ง) [11] จึงต้องมีพื้นที่เท่ากับพื้นที่ภายในรูปโค้งของรูป 2.15 (ค) [11] และตำแหน่งของเส้นทรอยด์ของพื้นที่ทั้งสองต้องอยู่ที่ระดับเดียวกัน มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 กำหนดให้ความกว้างของหน่วยแรงอัดรูปสี่เหลี่ยมเทียบเท่ามีค่าเท่ากับ $0.85 f'_c$ และความสูงของรูปสี่เหลี่ยม a มีค่าเท่ากับ $\beta_1 c$ ดังนั้นที่ (ง) โดยที่ c เป็นระยะตั้งฉากจากแกนสะเทินถึงผิวของคอนกรีตที่รับแรงอัดและค่า β_1 เป็นตัวแปรที่หาได้จาก

$$\beta_1 = \left\{ \begin{array}{ll} 0.85 & f'_c \leq 280 \text{ ksc.} \\ 0.85 - 0.05 \left(\frac{f'_c - 280}{70} \right) & 280 \text{ ksc.} \leq f'_c \leq 560 \text{ ksc.} \\ 0.65 & f'_c > 560 \text{ ksc.} \end{array} \right\}$$



รูปที่ 2.15 การกระจายของหน่วยการยืดหดตัวและหน่วยแรงที่สถานะประลัย [11]

3. หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่สถานะประลัย

ออกแบบคอนกรีตอัดแรงที่สถานะประลัย ต้องออกแบบให้การวิบัติเกิดขึ้นในลักษณะแรงดึงเป็นหลัก เพราะการวิบัติชนิดนี้จะเกิดขึ้นหลังจากเหล็กมีการยืดตัวเกินจุดครากไปแล้ว องค์กรอาคารจะมีการโค้งตัวมาก่อนเกิดการวิบัติซึ่งกันระหว่างลักษณะเช่นนี้มีความเหนียว (ductility) ออกแบบให้เกิดการวิบัติชนิดแรงดึงเป็นหลัก ปริมาณเหล็กเสริมอัดแรงจะต้องมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์สมมูล การคำนวณหาปริมาณเหล็กพอดีสมมูลไม่สามารถทำได้โดยตรง เพราะไม่สามารถกำหนดจุดครากที่แน่นอนของเหล็กเสริมอัดแรงได้

มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ได้กำหนดพิสัยของเหล็กเสริมในคอนกรีตอัดแรงเพื่อที่จะให้แน่ใจว่าปริมาณเหล็กเสริมในคอนกรีตอัดแรงน้อยกว่าเกณฑ์สมมูลไว้ดังต่อไปนี้

$$\omega_p + (\omega + \omega') \frac{d}{d_p} \leq 0.36\beta_1 \quad \text{----(2.3.23)}$$

$$\omega_{pw} + (\omega_w + \omega'_w) \frac{d}{d_p}$$

- โดยที่ ω_p คือ ดัชนีเหล็กเสริมอัดแรง = $\rho_p f_{ps} / f'_c$
 ω คือ ดัชนีเหล็กเสริมธรรมดารับแรงดึง = $\rho f_y / f'_c$
 ω' คือ ดัชนีเหล็กเสริมธรรมดารับแรงอัด = $\rho' f_y / f'_c$
 ρ_p คือ อัตราส่วนของเหล็กเสริมอัดแรง = $A_{ps} / b d_p$
 ρ คือ อัตราส่วนของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงดึง = $A_s / b d_p$
 ρ' คือ อัตราส่วนของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงอัด = $A'_s / b d_p$

d_p คือ ระยะจากผิวที่เกิดหน่วยแรงอัดมากที่สุด ถึงจุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมอัดแรง, ซม.

d คือ ระยะจากผิวที่เกิดหน่วยแรงอัดมากที่สุด ถึงจุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงดึง, ซม.

b คือ ความกว้างของคาน, ซม.

A_{ps} คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมอัดแรง, ซม²

A_s คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงดึง, ซม²

A'_s คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงอัด, ซม²

f_{ps} คือ หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่สภาวะวิบัติ, กก/ซม²

f_y คือ กำลังครากของเหล็กเสริมธรรมดา, กก/ซม²

ω_{pw} , ω_w , ω'_w คือ ดัชนีเหล็กเสริมสำหรับหน้าตัดคานที่มีปีก เช่น รูปตัวที และ ไอ คำนวณเช่นเดียวกับ และ ตามลำดับ แต่ความกว้าง b ที่ใช้เป็นความกว้างของตัวแกนและปริมาณเหล็กเสริมต้องเป็นส่วนที่ทำให้เกิดหน่วยแรงอัดในตัวแกนเท่านั้น

สำหรับค่า f_{ps} คือหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง ณ สถานะประลัย โดย f_{ps} สามารถคำนวณได้โดยใช้พื้นฐานความสอดคล้องของหน่วยการยึดหดตัว ในกรณีที่หน่วยแรงดึงประลัยมีค่าไม่น้อยกว่า $0.5 f_{pu}$ สามารถใช้ค่า f_{ps} โดยประมาณดังต่อไปนี้

ก) สำหรับองค์อาคารที่เสริมเหล็กอัดแรงชนิดยึดเหนี่ยว (bonded tendon)

$$f_{ps} = f_{pu} \left\{ 1 - \frac{r_p}{\beta_1} \left[\rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{d_p} (\omega + \omega') \right] \right\} \quad \text{---(2.4.22)}$$

โดยที่ r_p คือ ตัวคูณที่คำนึงถึงระดับกำลังครากของเหล็กเสริมอัดแรง มีค่าดังนี้

$$0.40 \text{ เมื่อ } 0.85 \leq f_{py}/f_{pu} < 0.90$$

$$0.28 \text{ เมื่อ } f_{py}/f_{pu} \geq 0.90$$

f_{pu} คือ หน่วยแรงดึงประลัยในเหล็กเสริมอัดแรง

เมื่อมีเหล็กเสริมธรรมดารับแรงอัดในการคำนวณ f_{ps} ในสมการที่ 2.3.24 (หมายถึงถ้าการคำนวณสมการที่ 2.4.22 มีพจน์ของ ω' รวมอยู่ด้วย) ค่าต่อไปนี้จะต้องเป็นไปตามสมการที่ 2.3.25 และ 2.3.26

$$\left[\rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{d_p} (\omega + \omega') \right] \geq 0.17 \quad \text{---(2.3.25)}$$

$$\text{และ } d' \leq 0.15d_p \quad \text{---(2.3.26)}$$

ถ้า $\left[\rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{d_p} (\omega + \omega') \right] < 0.17$ การคำนวณหาค่า f_{ps} ในสมการที่ 2.3.24 ให้แทนค่า ω' ด้วยศูนย์

ข) สำหรับองค์อาคารที่เสริมเหล็กเสริมอัดแรงรับแรงดึงชนิดไม่ยึดเหนี่ยว (unbonded tendon) และมีอัตราส่วนความยาวช่วงต่อความลึกไม่เกิน 35

$$f_{ps} = f_{se} + 700 + \frac{f'_c}{100\rho_p} \quad \text{---(2.3.27)}$$

โดยที่ f_{se} คือ หน่วยแรงดึงประสิทธิผลของเหล็กเสริมอัดแรง, กก/ชม²

ค่า f_{ps} ในสมการที่ 2.5.25 จะต้องไม่เกิน f_{py} และไม่เกิน $f_{se}+4000$ กก/ชม²

ค) สำหรับองค์อาคารที่เสริมเหล็กเสริมอัดแรงชนิดไม่ยึดเหนี่ยว และมีอัตราส่วนความยาวต่อความลึกเกินกว่า 35

$$f_{ps} = f_{se} + 700 + \frac{f'_c}{300\rho_p} \quad \text{---(2.3.28)}$$

ค่า f_{ps} ในสมการที่ 2.5.26 จะต้องไม่เกิน f_{py} และไม่เกิน $f_{se}+2000$ กก/ชม²

4. โมเมนต์ดัดประลัย

โมเมนต์ดัดประลัยของคานคอนกรีตอัดแรง หาได้จากโมเมนต์ของแรงคู่ควบ $C - T$ ที่สถานะประลัยซึ่งที่สถานะประลัยมีแรงอัดลัพท์ในคอนกรีต C หาได้จากการกระจาย ของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตเทียบเท่าเป็นรูปสี่เหลี่ยม และแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง T หาได้จาก $T = A_{ps} f_{ps}$ โดยที่ f_{ps} หาได้จากสมการที่เสนอโดยมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. 2537 และปริมาณเหล็กเสริมจะต้องน้อยกว่าเกณฑ์สมดุลกล่าวคือ จะต้องสอดคล้องกับสมการที่ 2.3.23

$$\text{จากรูป 2.11 จะได้ว่า} \quad C = 0.85f'_c ab \quad \text{---(2.3.29)}$$

$$T = A_{ps} f_{ps}$$

เนื่องจากแรงอัดลัพท์ในคอนกรีต C จะต้องเท่ากับแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง T ดังนั้น

$$C = T$$

$$0.85f'_c ab = A_{ps} f_{ps}$$

$$a = \frac{A_{ps} f_{ps}}{0.85f'_c b} \quad \text{---(2.3.30)}$$

โมเมนต์ดัดประลัยของหน้าตัดหรือบางที่อาจเรียกว่ากำลังระบุของโมเมนต์ (Nominal strength)

M_n สามารถหาได้จาก

$$M_n = Cz = Tz = C(d_p - \frac{a}{2}) = T(d_p - \frac{a}{2}) \quad \text{---(2.3.31)}$$

มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ได้เสนอตัวคูณลดกำลัง (strength reduction factor) ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ผ่านมา กำลังที่ออกแบบของโมเมนต์ (design strength) จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับกำลังที่ต้องการ (required strength) ดังแสดงไว้ในสมการที่ 2.3.32

$$\phi M_n \geq M_u \quad \text{---(2.3.32)}$$

โดยที่ $\phi = 0.9$ (จากตารางที่ 2.6)

คอนกรีตอัดแรงที่เสริมเหล็กอัดแรงที่ไม่ยึดเหนี่ยว (unbonded tendon) จะมีโมเมนต์ดัดประลัยมากกว่าในคอนกรีตอัดแรงที่เสริมเหล็กอัดแรงชนิดยึดเหนี่ยว (bonded tendon) เหตุผลหนึ่งที่สำคัญคือในคอนกรีตอัดแรงที่เสริมเหล็กอัดแรงที่ไม่ยึดเหนี่ยว เมื่อเกิดรอยแตกกว้างขึ้นจำนวนรอยแตกกว้างจะน้อยกว่าแต่ขนาดของรอยแตกกว้างแต่ใหญ่กว่าในกรณีที่เหล็กเสริมอัดแรงชนิดยึดเหนี่ยว รอยแตกภายในคอนกรีตอัดแรงระบบมีการยึดเหนี่ยวมีการกระจายที่ดีกว่าไม่หล่อแต่เรามีขนาดเล็ก รอยแตกที่ใหญ่จะทำให้หน่วยการหดตัวในคอนกรีตมีค่ามากที่หน้าตัดที่เกิดรอยแตกกว้างดังนั้นโมเมนต์ดัดประลัยของคอนกรีตอัดแรงระบบในการยึดเหนี่ยวจึงมีค่าลดลง

มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง ว.ส.ท. ปี 2537 ได้กำหนดให้เพิ่มเหล็กเสริมธรรมดาสำหรับคานคอนกรีตอัดแรงชนิดรายการยึดเหนี่ยวน้อยกว่าค่าต่อไปนี้

$$A_s = 0.004A \quad \text{---(2.3.33)}$$

โดยที่ A_s คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมธรรมดา

A คือ พื้นที่หน้าตัดซึ่งอยู่ระหว่างแกนศูนย์กลางของหน้าตัดพื้นผิวด้านที่เกิดหน่วยแรงดึงเครื่องจากโมเมนต์ดัด

นอกจากนี้มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท.ปี 2537 ได้กำหนดให้กำลังที่ออกแบบของโมเมนต์ ϕM_n จะต้องไม่น้อยกว่า 1.2 เท่าของโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าวนี้ก็เพื่อป้องกันการวิบัติแบบทันทีทันใดหลังจากเกิดการแตกร้าว เพราะการโก่งตัวขององค์อาคารจะเกิดมากขึ้นหลังจากมีการแตกร้าวขึ้น โดยปกติต้องออกแบบให้องค์อาคารโครงตัวให้มากพอเพื่อเป็นสัญญาณเตือนให้รู้ก่อนที่จะเกิดการวิบัติ ดังนั้นโมเมนต์ดัดประลัยควรมีค่ามากกว่าโมเมนต์ที่ทำให้เพียงพอ

$$\phi M_n \geq 1.2M_{cr} \quad \text{---(2.3.34)}$$

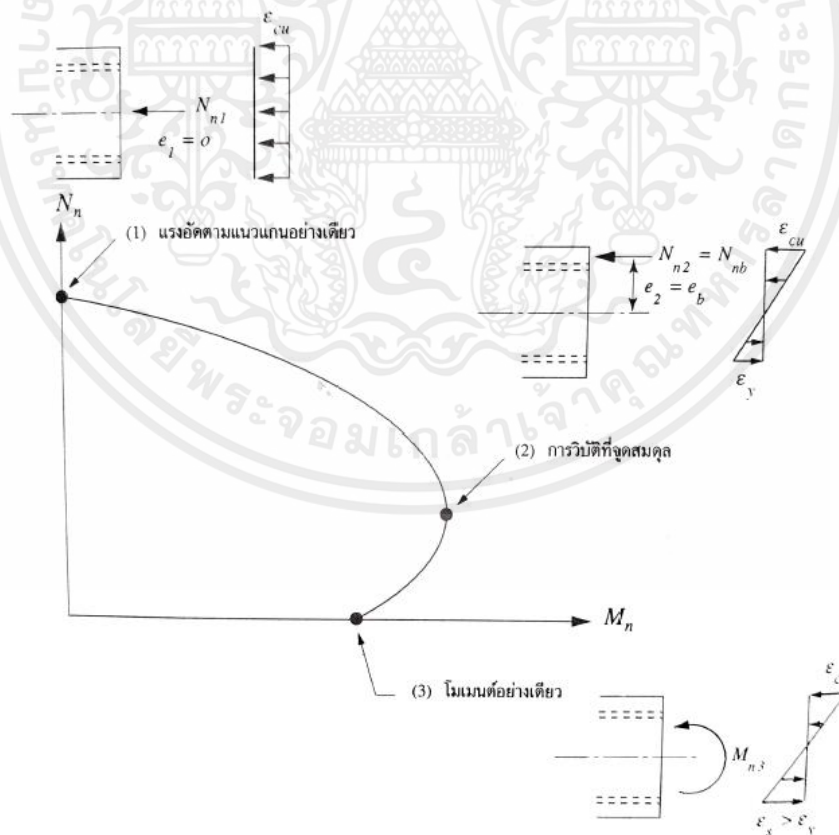
โดยที่ M_{cr} คำนวณจากการให้โมดูลัสของการแตกหักของคอนกรีต $f_r = 2.0\sqrt{f'_c}$

2.3.1.9 กำลังที่สถานะประลัยของเสาคอนกรีตอัดแรงรับแรงอัด

กำลังของเสาสั้น

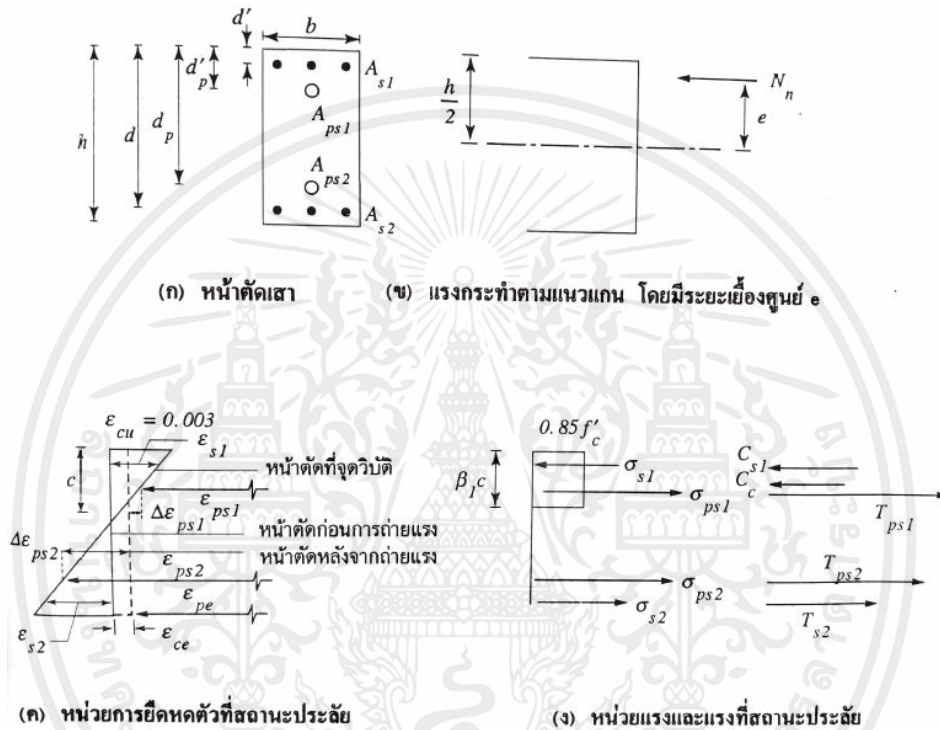
นเรศ พันธธรร, 2541 [12] ได้กล่าวว่า การคำนวณหากำลังของเสาคอนกรีตอัดแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัด จะใช้วิธีเดียวกับการคำนวณหากำลังประลัยของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป โดยปกติกำลังของเสาจะเขียนอยู่ในรูปของแผนผังกำลัง (Strength interaction diagram) ซึ่งเขียนระหว่างกำลังในการรับแรงตามแนวแกน N_n และกำลังในการรับโมเมนต์ดัด M_n

รูปร่างโดยทั่วไปของแผนผังของกำลังของเสาแสดงดังรูปที่ 2.17 [12] เส้นโค้งในรูปแสดงถึงแนววิบัติของเสาหรือกำลังของเสานั้นเอง เสาที่รับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ภายนอกที่มีค่าตกอยู่ภายใต้เส้นโค้งนี้จะปลอดภัยเนื่องจากหน้าตัดสามารถต้านทานได้ แต่ถ้าแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ภายนอกอยู่ภายนอกโค้ง หมายความว่า เสาจะไม่สามารถต้านทานแรงร่วมนี้ได้ การวิบัติของเสาสามารถแบ่งได้เป็นสองส่วนใหญ่ ๆ คือ การวิบัติโดยพฤติกรรมการอัดเป็นหลัก (Compression failure) เมื่อโมเมนต์มีค่าน้อย และการวิบัติที่จุดโดยพฤติกรรมการดึงเป็นหลัก (Tension failure) เมื่อโมเมนต์มีค่ามาก การวิบัติทั้งสองส่วนจะถูกแบ่งแนวโดยการวิบัติที่จุดสมดุล (Balanced failure)



รูปที่ 2.16 แผนผังกำลังของเสา [12]

พิจารณาเสาสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดความกว้าง b และความยาว h หน้าตัดประกอบด้วยเหล็กเสริมธรรมดาไม่อัดแรง A_{s1} และ A_{s2} เหล็กเสริมอัดแรง A_{ps1} และ A_{ps2} ดังในรูปที่ 2.18 (ก) [12] เสารับแรงตามแนวแกน N_n โดยมีระยะเยื้องศูนย์กลาง e ดังแสดงในรูป 2.18 (ข) [12] หน่วยการยึดหดตัวที่สถานะประลัย และหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่สถานะประลัยแสดง ในรูป 2.18 (ค) (ง) [12]



รูปที่ 2.17 เสาคอนกรีตที่สถานะประลัย [12]

N_n สามารถหาได้จาก

$$N_n = C_c + C_{s1} - T_{ps1} - T_{ps2} - T_{s2} \quad \text{---(2.3.35)}$$

M_n สามารถหาได้จากโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลางหน้าตัด

$$M_n = N_n * e = C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + C_{s1} \left(\frac{h}{2} - d' \right) - T_{ps1} \left(\frac{h}{2} - d'p \right) - T_{ps2} \left(dp - \frac{h}{2} \right) - T_{s2} \left(d - \frac{h}{2} \right) \quad \text{---(2.3.36)}$$

โดยที่

$$C_c = 0.85 f'_c \beta_1 c b \quad \text{---(2.3.37)}$$

$$C_{s1} = A_{s1} f_y \quad \text{ถ้า} \quad \epsilon_{s1} \geq \epsilon_y$$

$$C_{s1} = A_{s1}E_s\varepsilon_{s1} \quad \text{ถ้า} \quad \varepsilon_{s1} < \varepsilon_y \quad \text{---(2.3.38)}$$

$$\varepsilon_{s1} \text{ หาได้จาก} \quad \varepsilon_{s1} = 0.003 \left(\frac{c-d'}{c} \right) \quad \text{---(2.3.39)}$$

$$T_{s2} = A_{s2}f_y \quad \text{ถ้า} \quad \varepsilon_{s2} \geq \varepsilon_y$$

$$T_{s2} = A_{s2}E_s\varepsilon_{s2} \quad \text{ถ้า} \quad \varepsilon_{s2} < \varepsilon_y \quad \text{---(2.3.40)}$$

$$\varepsilon_{s2} \text{ หาได้จาก} \quad \varepsilon_{s2} = 0.003 \left(\frac{d-c}{c} \right) \quad \text{---(2.3.41)}$$

เมื่อให้แรงอัดประสิทธิผล P_e กระทำที่ศูนย์กลางของหน้าตัดเสา จะก่อให้เกิดหน่วยแรงอัดบนหน้าตัดมีค่าเท่ากับ ε_{ce} ซึ่งหาได้จาก

$$\varepsilon_{ce} = \frac{P_e}{(nA_{s1}+nA_{s2}+A_c)E_c} \cong \frac{P_e}{[(n-1)A_s+A_g]E_c} \quad \text{---(2.3.42)}$$

$$\text{โดยที่} \quad n = \frac{E_s}{E_c}$$

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต

A_g คือ พื้นที่หน้าตัดของเสา

A_s คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมไม่อัดแรง = $A_{s1}+A_{s2}$

เมื่อให้แรงกระทำตามแนวแกน N_n โดยมีระยะเยื้องศูนย์กลาง e จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง $\Delta\varepsilon_{ps1}$ และ $\Delta\varepsilon_{ps2}$ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.3.43 และ 2.3.44 ตามลำดับ

$$\Delta\varepsilon_{ps1} = 0.003 \left(\frac{c-d'rp}{c} \right) - \varepsilon_{ce} \quad \text{---(2.3.43)}$$

$$\Delta\varepsilon_{ps2} = 0.003 \left(\frac{dp-c}{c} \right) + \varepsilon_{ce} \quad \text{---(2.3.44)}$$

หน่วยการยืดหดตัวในเหล็กเสริมอัดแรงที่สถานะประลัยสามารถหาได้จาก

$$\varepsilon_{ps1} = \varepsilon_{pe} - \Delta\varepsilon_{ps1} \quad \text{---(2.3.45)}$$

$$\varepsilon_{ps2} = \varepsilon_{pe} + \Delta\varepsilon_{ps2} \quad \text{---(2.3.46)}$$

$$\text{โดยที่} \quad \varepsilon_{pe} \text{ คือหน่วยการยืดตัวประสิทธิผลของเหล็กเสริมอัดแรง} = \frac{P_e}{A_{ps}E_{ps}}$$

จากหน่วยการยืดหดตัวในเหล็กเสริมอัดแรง ε_{ps1} และ ε_{ps2} ที่ได้จากสมการที่ 2.3.45 และ 2.3.46 สามารถนำไปคำนวณหาหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง σ_{ps1} และ σ_{ps2} ที่สถานะประลัยได้

แรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงสามารถหาได้จาก

$$T_{ps1} = A_{ps1}\sigma_{ps1} \quad \text{----(2.3.47)}$$

$$T_{ps2} = A_{ps2}\sigma_{ps2} \quad \text{----(2.3.48)}$$

2.4.1.10 กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีต

นเรศ พันธธรร, 2541 [13] ได้กล่าวว่า คอนกรีตมีความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนได้ ซึ่งกำลังในการต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตนี้ เป็นตัวกำหนดว่ามีความจำเป็นต้องเสริมเหล็กเสริมรับแรงเฉือนได้หรือไม่ ถ้ากำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีตนี้มีมากเพียงพอที่จะต้านทานแรงเฉือนภายนอกได้อย่างปลอดภัยก็ไม่จำเป็นต้องเสริมเหล็กเสริมรับแรงเฉือน ในทางตรงกันข้ามถ้ากำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีตมีค่าน้อยเกินไป เมื่อเทียบกับแรงเฉือนภายนอก ก็จำเป็นต้องออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

กำลังในการต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีตจะพิจารณาจากค่าที่น้อยของ 2 ค่าต่อไปนี้ คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด V_{ci} และกำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัวเอง V_{cw} กล่าวคือ ถ้า V_{ci} น้อยกว่า V_{cw} กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีต V_c จะเท่ากับ V_{ci} และในทางตรงกันข้ามถ้า V_{cw} น้อยกว่า V_{ci} จะได้ว่า V_c จะเท่ากับ V_{cw}

กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลร่วมกันของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด

มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง ว.ส.ท. ปี 2537 ได้เสนอวิธีการคำนวณค่า V_{ci} ดังแสดงในสมการที่ 2.3.49

$$V_{ci} = 0.16\sqrt{f'_c}b_wd_p + V_d + \frac{\Delta V_i\Delta M_{cr}}{\Delta M_{max}} \quad \text{----(2.3.49)}$$

โดยที่ V_{ci} คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีการแตกร้าวเนื่องจากผลร่วมกันของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด

f'_c คือ กำลังประลัยของคอนกรีต

b_w คือ ความกว้างของตัวแกนคาน

d_p คือ ระยะจากผิวบนสุดที่เกิดหน่วยแรงอัดถึงจุดศูนย์กลางของเหล็กอัดแรง ไม่น้อยกว่า $0.8h$ โดยที่ h เป็นความลึกของหน้าตัด

V_d คือ แรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักของตัวเองที่หน้าตัดที่พิจารณา

ΔV_i คือ แรงเฉือนเพิ่มส่วน เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด ยกเว้นน้ำหนักตัวเอง

ΔM_{max} คือ โมเมนต์เพิ่มส่วนที่มากที่สุด เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกทั้งหมัด ยกเว้น น้ำหนักตัวเอง

ΔM_{cr} คือ ค่าโมเมนต์ที่เพิ่มเติมจากโมเมนต์ของน้ำหนักตัวเองที่ทำให้เกิดการแตกร้าว เนื่องจากผลของโมเมนต์ ที่หน้าตัดที่พิจารณา หาได้จากสมการที่ 2.4.50

$$\Delta M_{cr} = \frac{I}{y_t} (f_r + f_{pe} - f_d) \quad \text{---(2.3.50)}$$

โดยที่

I คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดคาน

y_t คือ ระยะที่วัดจากแกนศูนย์ถ่วงของหน้าตัดถึงผิวคอนกรีตที่จะแตกร้าว

f_r คือ โมดูลัสของการแตกหักซึ่งในกรณีนี้ให้ใช้ค่าเท่ากับ $= 1.6\sqrt{f'c}$

f_{pe} คือ หน่วยแรงในคอนกรีตบริเวณผิวที่จะเกิดการแตกร้าวที่เกิดขึ้นเนื่องจากการอัดแรง

f_d คือ หน่วยแรงในคอนกรีตบริเวณผิวที่จะเกิดการแตกร้าวที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักตัวเอง

กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัวแกน

มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง ว.ส.ท. ปี 2537 ได้เสนอวิธีการคำนวณค่า V_{cw} ดังแสดงในสมการที่ 2.3.51

$$V_{cw} = (0.93\sqrt{f'c} + 0.3f_{pc})b_w d_p + V_p \quad \text{---(2.3.51)}$$

โดยที่

V_{cw} คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีแตกร้าวเนื่องจากผลของแรงเฉือนในตัวแกน

f_{pc} คือ หน่วยแรงในคอนกรีตบริเวณศูนย์ถ่วงของหน้าตัด เนื่องจากการอัดแรง

V_p คือ แรงประกอบย่อยในแนวตั้งของแรงอัดในเหล็กเสริมอัดแรงที่หน้าตัดที่พิจารณาซึ่งมีค่าเท่ากับ $P \sin \alpha$ หรือ $P\alpha$

d_p คือ ระยะจากผิวนอกสุดที่เกิดหน่วยแรงอัดถึงจุดศูนย์ถ่วงของเหล็กอัดแรง ไม่น้อยกว่า $0.8h$ โดยที่ h เป็นความลึกของหน้าตัด

ค่าของ V_c ที่หาได้ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า $0.53\sqrt{f'c}b_w d_p$ และไม่เกิน $1.33\sqrt{f'c}b_w d_p$

กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

ในกรณีที่กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีตมีค่าไม่เพียงพอที่จะต้านทานแรงเฉือนภายนอก ต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือนเพื่อช่วยในการต้านทานแรงเฉือนภายนอกได้

จากสมการ

$$V_s \geq \frac{V_u}{\phi} - V_c$$

หรือ V_s ที่น้อยที่สุดที่ต้องช่วยในการรับแรงเฉือน คือ

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c \quad \text{----(2.3.52)}$$

โดยที่ V_s คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

V_u คือ กำลังรับแรงเฉือนที่ต้องการ

V_c คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีตซึ่งเป็นค่าน้อยระหว่าง V_{ci}

และ V_{cw}

ค่าของ V_s สามารถคำนวณได้ดังนี้

เหล็กเสริมปลอกเดี่ยววางตั้งฉากกับแนวองค์อาคาร

$$V_s = \frac{A_v f_y d_p}{s} \quad \text{----(2.3.53)}$$

โดยที่ A_v คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน จะมีค่าเป็น 2 เท่าของพื้นที่เหล็กที่ใช้

f_y คือ กำลังครากของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

s คือ ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

d_p คือ ระยะจากผิวบนสุดที่เกิดหน่วยแรงอัดถึงจุดศูนย์กลางของเหล็กอัดแรง

ระยะเรียงของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

ระยะเรียงของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่วางตั้งฉากกับแนวแกนของคานจะต้องไม่ห่างเกิน $\frac{3}{4} h$

ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

ค่า V_s ในการออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือน จะต้องมีค่าไม่มากกว่า $2.12\sqrt{f'c}b_w d_p$ ถ้ามากกว่าให้ออกแบบขนาดหน้าตัดให้ใหญ่ขึ้น

ถ้าค่าแรงเฉือนเพิ่มส่วน V_u มีค่าน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของกำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของ

คอนกรีต $V_u \leq \frac{\phi V_c}{2}$ ไม่จำเป็นต้องเสริมเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

ถ้าค่าแรงเฉือนเพิ่มส่วน V_u มีค่ามากกว่าครึ่งหนึ่งของกำลังต้านทานแรงเฉือนในส่วนของคอนกรีต $V_u > \frac{\phi V_c}{2}$ ให้เสริมเหล็กเสริมรับแรงเฉือนไม่น้อยกว่าปริมาณต่ำสุดของการเสริมเหล็กรับแรงเฉือน $(A_v)_{min}$ ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.3.54

$$(A_v)_{min} = \frac{3.5b_w s}{f_y} \quad \text{---(2.3.54)}$$

ในกรณีของคานคอนกรีตอัดแรงซึ่งมีแรงอัดประสิทธิผลในเหล็กเสริมอัดแรง P_e ไม่น้อยกว่า 40% ของกำลังดึงประลัยของเหล็กเสริมอัดแรง F_{pu} ปริมาณต่ำสุดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนอาจใช้ค่าที่น้อยกว่าระหว่างสมการที่ 2.3.54 และ 2.3.55

$$(A_v)_{min} = \frac{A_{ps} f_{pus}}{80 f_y d_p} \sqrt{\frac{d_p}{b_w}} \quad \text{---(2.3.55)}$$

โดยที่ A_{ps} คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมอัดแรง

f_{pu} คือ หน่วยแรงดึงที่จุดประลัยของเหล็กเสริมอัดแรง

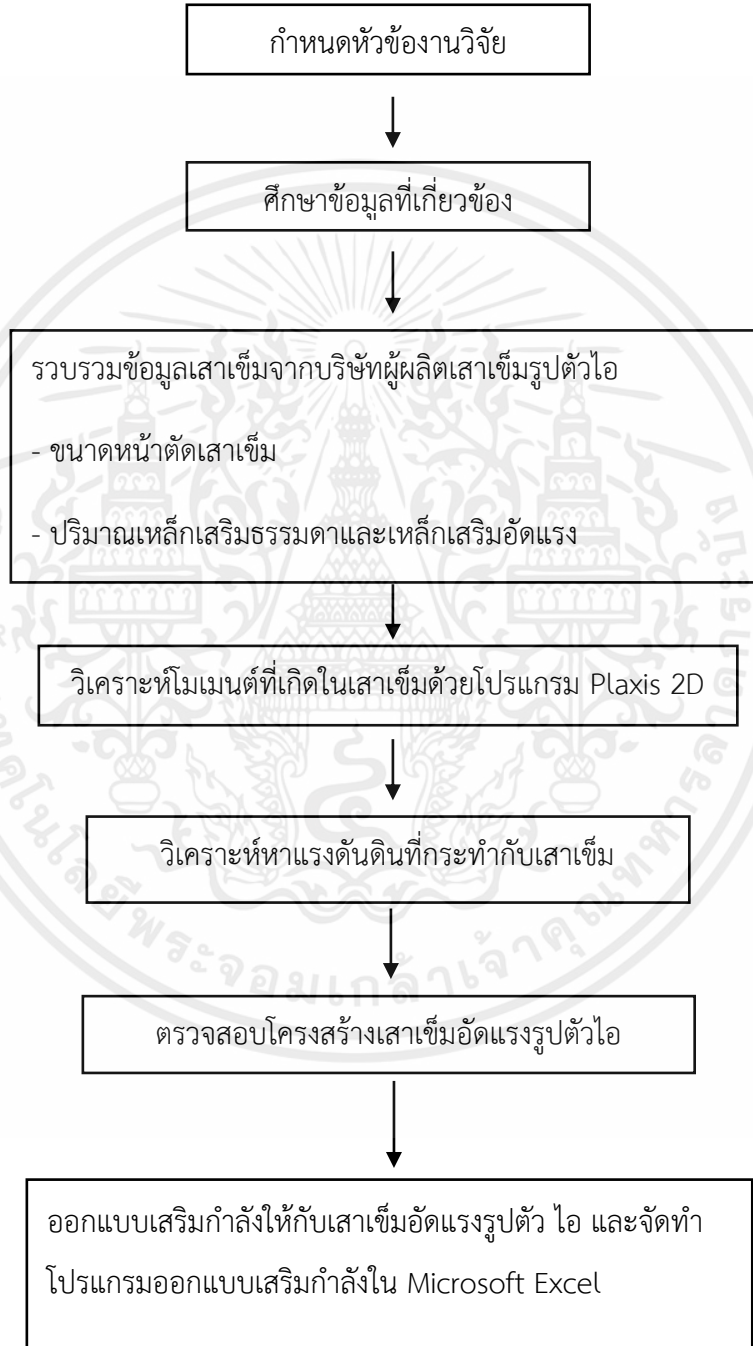


บทที่ 3

วิธีการดำเนินการ

3.1 แผนการดำเนินงานโครงการ

เป็นไปตามรูปที่ 3.1 ซึ่งแสดงถึงแผนผังของการดำเนินโครงการ



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินโครงการ

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการ

3.2.1 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

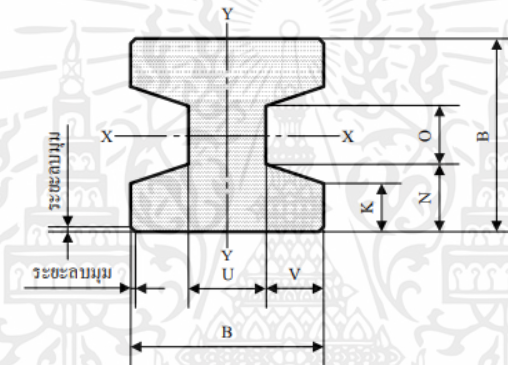
การศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์โมเมนต์ที่เกิดในเสาเข็มอัดแรงรูปตัวไอ จำเป็นต้องศึกษาข้อมูลดังต่อไปนี้

- การออกแบบคอนกรีตอัดแรง

3.2.2 รวบรวมข้อมูลเสาเข็มจากบริษัทผู้ผลิตเสาเข็มรูปตัวไอ

งานวิจัยนี้จำเป็นต้องรวบรวมข้อมูลขนาดหน้าตัดเสาเข็มอัดแรงรูปตัวไอ จากบริษัทผู้ผลิตเพื่อนำมาวิเคราะห์โมเมนต์ที่เสาเข็มอัดแรงสามารถรับได้ โดยจะมีข้อมูลดังต่อไปนี้

- ขนาดหน้าตัดเสาเข็มอัดแรงรูปตัวไอ แสดงในรูปที่ 3.2 [22]



| ชื่อขนาด | มิติ mm | | | | | | พื้นที่ภาคตัดขวางระบุ mm ² |
|-------------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| I-B x B | B | K | N | O | U | V | A _c |
| I-180 x 180 | 180 | 60 | 75 | 30 | 70 | 55 | 27 450 |
| I-220 x 220 | 220 | 65 | 85 | 50 | 80 | 70 | 38 600 |
| I-260 x 260 | 260 | 65 | 85 | 90 | 90 | 85 | 48 900 |
| I-300 x 300 | 300 | 75 | 105 | 90 | 100 | 100 | 66 000 |
| I-350 x 350 | 350 | 85 | 115 | 120 | 120 | 115 | 88 000 |
| I-400 x 400 | 400 | 110 | 140 | 120 | 160 | 120 | 124 000 |
| I-450 x 450 | 450 | 120 | 160 | 130 | 170 | 140 | 154 900 |

รูปที่ 3.2 ชื่อขนาดและมิติของภาคตัดขวางเสาเข็มรูปตัว ไอ ตามมาตรฐาน มอก. 396-2549 [22]

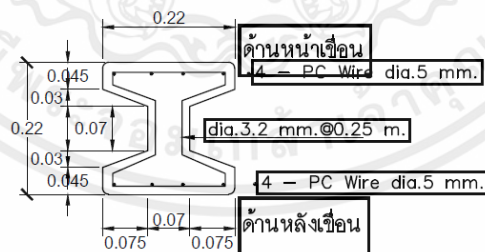
ตารางที่ 3.1 ชื่อขนาดและมิติของภาพตัดขวางเสาเข็มรูปตัว ไอ ของ บริษัท ปทุมธานีคอนกรีต จำกัด [27]

| TYPE OF PILES (mm x mm) | MAX LENGTH PER PIECE (m) | CONCRETE CROSS SECTION AREA (cm ²) | ESTIMATED PERIMETER (cm) | MOMENT OF INERTIA OF CONCRETE (cm ⁴) | WEIGHT (kg/m) | RECOMMENDED SAFE LOAD (BKK AREA) (Ton) |
|-------------------------|--------------------------|--|--------------------------|--|---------------|--|
| I - 180 x 180 | 21 | 216 | 89 | 8,070 | 52 | 8 - 15 |
| I - 180 x 180 | 21 | 274.5 * | 89 | 8,654 | 66 | 10 - 15 |
| I - 220 x 220 | 21 | 332 | 105 | 17,656 | 80 | 15 - 23 |
| I - 220 x 220 | 21 | 363 | 105 | 18,479 | 87 | 15 - 25 |
| I - 220 x 220 | 21 | 386 * | 109 | 19,366 | 93 | 15 - 25 |
| I - 260 x 260 | 25 | 460 | 126 | 34,510 | 110 | 25 - 30 |
| I - 260 x 260 | 25 | 485 | 124 | 35,944 | 116 | 30 - 33 |
| I - 260 x 260 | 25 | 489 * | 131 | 37,037 | 117 | 30 - 34 |
| I - 300 x 300 | 27 | 570 | 154 | 59,251 | 137 | 35 - 40 |
| I - 300 x 300 | 24 | 660 | 143 | 65,659 | 158 | 40 - 45 |
| I - 300 x 300 | 26 | 660 * | 150 | 66,240 | 158 | 40 - 45 |
| I - 350 x 350 | 29 | 808 | 166 | 112,245 | 194 | 50 - 55 |
| I - 350 x 350 | 30 | 880 * | 168 | 121,808 | 211 | 50 - 60 |
| I - 350 x 370 | 25 | 880 | 168 | 121,808 | 211 | 50 - 60 |
| I - 400 x 400 | 25 | 1,240 | 180 | 206,692 | 298 | 55 - 80 |
| I - 400 x 400 | 27 | 1,240 * | 197 | 209,823 | 298 | 55 - 80 |
| I - 450 x 450 | 28 | 1,455 | 219 | 323,811 | 349 | 70 - 100 |
| I - 450 x 450 | 28 | 1,549 * | 222 | 336,443 | 372 | 70 - 100 |
| I - 500 x 500 | 24 | 1,950 | 245 | 515,771 | 468 | 80 - 120 |

- ปริมาณเหล็กเสริมอัดแรง จะแบ่งได้ตามขนาดของเสาเข็ม ดังนี้

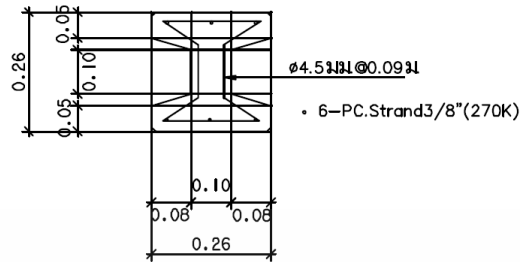
1. เสาเข็มอัดแรงรูปตัวไอ ขนาด 22 x 22 cm. จำนวนลวดอัดแรงทั้งหมด 8 เส้น

ใช้ลวดอัดแรงชนิด PC wire Ø 5mm. ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แบบขยายเสาเข็ม I 22x22

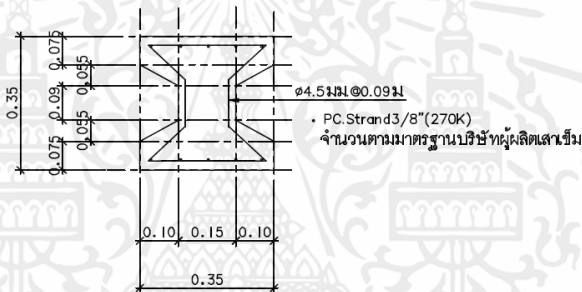
2. เสาค้ำอัดแรงรูปตัวไอ ขนาด 26 x 26 cm. จำนวนลวดอัดแรงทั้งหมด 6 เส้น
ใช้ลวดอัดแรงชนิด PC Strand 3/8” 270K ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แบบขยายเสาค้ำเข็ม I 26x26

3. เสาค้ำอัดแรงรูปตัวไอ ขนาด 35 x 35 cm. จำนวนลวดอัดแรงตามมาตรฐาน
ผู้ผลิตแต่จะเจ้า ใช้ลวดอัดแรงชนิด PC Strand 3/8” 270K ดังแสดงในรูปที่

3.5



รูปที่ 3.5 แบบขยายเสาค้ำเข็ม I 35x35

3.2.3 วิเคราะห์โมเมนต์ที่เกิดในเสาค้ำด้วยโปรแกรมเชิงตัวเลข

3.2.3.1 โปรแกรม Plaxis 2D

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลองในโปรแกรม Plaxis 2D นี้จะใช้ข้อมูลชั้นดินเหนียวในเขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร ดังตารางที่ 3.1 ที่ได้มาจากการเจาะสำรวจดินในบริเวณพื้นที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในการสร้างแบบจำลอง โดยจะกำหนดคุณสมบัติของชั้นดินให้เป็นแบบ Soft soil Model และคุณสมบัติของเสาค้ำจะกำหนดคุณสมบัติเป็นแบบอีลาสติก (Elastic) เนื่องจากในสภาพจริงเสาค้ำจะจัดวางห่างกันทำให้เมื่อสร้างแบบจำลองในโปรแกรม Plaxis 2D จึงต้องปรับแก้ค่าความแข็งแรงของเสาค้ำด้วยวิธี 2มิติ-เท่ากัน (2D-Equal) [21]

ศลิษา ไชยพุทธ [21] ได้กล่าวว่า การสมมติให้คุณสมบัติของกำแพงเสาเข็มที่จำลองเป็น กำแพงยาวต่อเนื่องมาสมมติเท่ากับเสาเข็มแต่ละต้น โดยกำหนดให้ค่าความแข็งแรงแรงแนวแกน (EA) หรือค่าความแข็งเชิงตัด (EI) เท่ากัน เรียกว่า วิธี 2 มิติ-EA เท่ากัน (2D-Equal EA) และวิธี 2 มิติ-EI เท่ากัน (2D-Equal EI) ตามลำดับตั้งนั้นความกว้างประสิทธิผลของกำแพงเสาเข็ม จึงมีค่า ไม่เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม การแปลงเสาเข็มที่มีรูปร่างเป็น 3 มิติ ให้เป็นกำแพงเสาเข็ม 2 มิติ ดังแสดงในสมการที่ 3.1 และ 3.2

$$\text{วิธี 2 มิติ-EA เท่ากัน; } E_{wall}A_{wall} = n_{col}(E_{col}A_{col})/(n_{col} - 1)s \quad \text{---(3.1)}$$

$$\text{วิธี 2 มิติ-EI เท่ากัน; } E_{wall}I_{wall} = n_{col}(E_{col}I_{col})/(n_{col} - 1)s \quad \text{---(3.2)}$$

โดยที่ n_{col} คือ จำนวนเสาเข็มในทิศทางแนวระนาบ

E_{col} คือ ค่า Modulus of Elastic ของเสาเข็ม

A_{col} คือ ค่าพื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม

s คือ ระยะห่างระหว่างเสาเข็มสองต้นในทิศทางตามแนวระนาบ

จากสมการด้านบนกำหนดให้ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม 1.5 m. ใช้เสาเข็ม I 35 จะได้ค่าคุณสมบัติของเสาเข็มโดยกำหนดระยะห่างระหว่างเสาเข็ม 1.5 m. ดังตารางที่ 3.2 [22]

จากข้อมูลดินที่ได้มาจำลองในโมเดลแบบจำลองนั้นจะมีค่าหน่วยน้ำหนักของดิน ค่าพิกัดของอัตราตะเปิร์ก ค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ และค่า SPT เนื่องจากในโปรแกรม Plaxis 2D ต้องการค่าตัวแปรอีก 3 ตัวแปร คือ ค่า Modulus of elasticity (E) ค่าดัชนีการยุบตัว (C_s) และค่าดัชนีการกดอัด (C_c) ซึ่งค่าตัวแปรทั้ง 3 นี้สามารถหาค่าได้จากสมการด้านล่างดังต่อไปนี้ สมการของ Kulhawy and Mayne, 1990 [1] สำหรับหาค่า ค่าดัชนีการยุบตัว (C_s) และค่าดัชนีการกดอัด (C_c)

$$C_c = \frac{PI\%}{74} \quad \text{---(3.3)}$$

$$C_s = \frac{C_c}{5} \quad \text{---(3.4)}$$

เมื่อ PI = ค่าดัชนีพลาสติกิก

สมการของ Kulhawy and Mayne, 1990 [1] สำหรับหาค่า Modulus of elasticity (E)

$$\frac{E_s}{p_a} = \alpha N_{60} \quad \text{---(3.5)}$$

เมื่อ E_s = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดิน

p_a = ค่าความกดอากาศ

a = 5 สำหรับทรายละเอียด

10 สำหรับทรายอัดตัวปกติ

15 สำหรับทรายอัดตัวเกิน

สมการของ Skempton, 1986 [20] สำหรับหาค่า N_{60}

$$N_{60} = \frac{E_m C_B C_s C_r}{0.6} * N \quad \text{----(3.6)}$$

E_m = ประสิทธิภาพของการตอก (ตารางที่ 3.1) [20]

C_B = ค่าปรับแก้เนื่องจากขนาดของหลุมเจาะ (ตารางที่ 3.2) [20]

C_s = ค่าปรับแก้เนื่องจากวิธีการเก็บตัวอย่างด้วยกระบอกเก็บตัวอย่างแบบผ่าซีก (ตารางที่ 3.2) [20]

C_r = ค่าปรับแก้เนื่องจากความยาวของก้านเจาะ (ตารางที่ 3.2) [20]

N = ค่า SPT ที่วัดได้จากการทดสอบ

ตารางที่ 3.2 ประสิทธิภาพการตอก Coduto 2001 [20]

| ประเทศ | ชนิดของดัมตอก | วิธีการปล่อยดัมตอก | ประสิทธิภาพของการตอก |
|---------------|-------------------|----------------------------------|----------------------|
| จีน | แบบปล่อยอัตโนมัติ | ปล่อยเป็นรอบ | 0.60 |
| | แบบโดนัท | ปล่อยด้วยมือ | 0.55 |
| | แบบโดนัท | ก้วาน | 0.50 |
| ญี่ปุ่น | แบบโดนัท | ใช้โกปล่อยดัม | 0.78 – 0.85 |
| | แบบโดนัท | ก้วาน 2 รอบและปล่อยด้วยวิธีพิเศษ | 0.65 – 0.67 |
| สหราชอาณาจักร | แบบปล่อยอัตโนมัติ | ปล่อยเป็นรอบ | 0.73 |
| สหรัฐอเมริกา | แบบนรภัย | ก้วาน 2 รอบ | 0.55-0.60 |
| | แบบโดนัท | ก้วาน 2 รอบ | 0.45 |

ตารางที่ 3.3 ค่าปรับแก้เนื่องจากขนาดหลุมเจาะ, หัวเก็บตัวอย่าง และ ความยาวของก้านเจาะ Coduto 2001 [20]

| สาเหตุของการปรับแก้ | ชนิด/ขนาด ของเครื่องมือ | ค่าปรับแก้ |
|-------------------------------------|-----------------------------|------------|
| ขนาดของหลุมเจาะ, C_B | 65 ถึง 115 มิลลิเมตร | 1.00 |
| | 150 มิลลิเมตร | 1.05 |
| | 200 มิลลิเมตร | 1.15 |
| เนื่องจากวิธีการเก็บตัวอย่าง, C_S | วิธีการเก็บแบบมาตรฐาน | 1.00 |
| | เก็บตัวอย่างโดยไม่ใช้ liner | 1.20 |
| เนื่องจากความยาวของก้านเจาะ, C_R | 3 ถึง 4 เมตร | 0.75 |
| | 4 ถึง 6 เมตร | 0.85 |
| | 6 ถึง 10 เมตร | 0.95 |
| | มากกว่า 10 เมตร | 1.00 |

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติชั้นดินในการสร้างแบบจำลอง

| ชั้นดิน | Backfill | Soft Clay 1 ST1 | Soft Clay 2 ST6 |
|---|-----------|--------------------|--------------------|
| Material Model | M-C | Soft soil | Soft soil |
| Level (m.) | h-0 | 0-9 | 9-21 |
| Modulus of elasticity kN/m ² | 11019.093 | | |
| Frictional angle (ϕ) | 35.8 | 1 | 1 |
| Cohesion (c') kN/m ² | 1 | 19.13 | 15.304 |
| Saturated unit weight, (γ_{sat}) kN/m ³ | 19.449 | 15.366 | 14.345 |
| Unsaturated unit weight, (γ_{unsat}) kN/m ³ | 18.933 | 14.911 | 13.734 |
| Compression index, (Cc) | | 0.519 | 0.584 |
| Swell index, (Cs) | | 0.104 | 0.117 |
| Void ratio (e) | 0.719 | 1.982 | 2.678 |
| Poisson's ratio | 0.3 | 0.3 | 0.3 |

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของเสาเข็มในการสร้างแบบจำลอง

| | |
|---------------------------|---------------|
| Material | Pile |
| Material Model | Elastic |
| EA1,EA2 kN/m. | 3,756,701.843 |
| EI1 kN m ² /m. | 52,187.00475 |
| W kN/m/m. | 1.903 |
| v | 0.2 |

3.2.3.2 วิเคราะห์ด้วยวิธีจำลองดินด้วยสปริง

การจำลองดินด้วยสปริงนั้นจะนำข้อมูลดินต้นแบบมาคำนวณหาค่า k_s และ K ตามความลึกของดิน ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.2.17 และ 2.2.18 ซึ่งจะได้ค่าตามตารางที่ 3.5 ดังนี้

ตารางที่ 3.6 ผลการคำนวณหาค่า K

| depth m. | Level m. | dt m | qu kg/m ² | Su kg/m ² | k_s kg/m ³ | K kg/m |
|-------------|-------------|------|-------------------------|----------------------|-------------------------|----------|
| 0-0.5 | 0.00 | 0.5 | 3900 | 1950 | 373285.7 | 65325 |
| 0.5-1 | 0.50 | 0.5 | 3900 | 1950 | 373285.7 | 65325 |
| 1-1.5 | 1.00 | 0.5 | 3900 | 1950 | 373285.7 | 65325 |
| 1.5-2 | 1.50 | 0.5 | 3900 | 1950 | 373285.7 | 65325 |
| 2-2.5 | 2.00 | 0.5 | 3900 | 1950 | 373285.7 | 65325 |
| 2.5-3 | 2.50 | 0.5 | 3900 | 1950 | 373285.7 | 65325 |
| 3-3.5 | 3.00 | 0.5 | 2800 | 1400 | 268000 | 46900 |
| 3.5-4 | 3.50 | 0.5 | 2800 | 1400 | 268000 | 46900 |
| 4-4.5 | 4.00 | 0.5 | 2800 | 1400 | 268000 | 46900 |
| 4.5-5 | 4.50 | 0.5 | 2450 | 1225 | 234500 | 41037.5 |
| 5-5.5 | 5.00 | 0.5 | 2450 | 1225 | 234500 | 41037.5 |
| 5.5-6 | 5.50 | 0.5 | 2450 | 1225 | 234500 | 41037.5 |
| 6-6.5 | 6.00 | 0.5 | 2180 | 1090 | 208657.1 | 36515 |
| 6.5-7 | 6.50 | 0.5 | 2180 | 1090 | 208657.1 | 36515 |
| 7-7.5 | 7.00 | 0.5 | 2180 | 1090 | 208657.1 | 36515 |

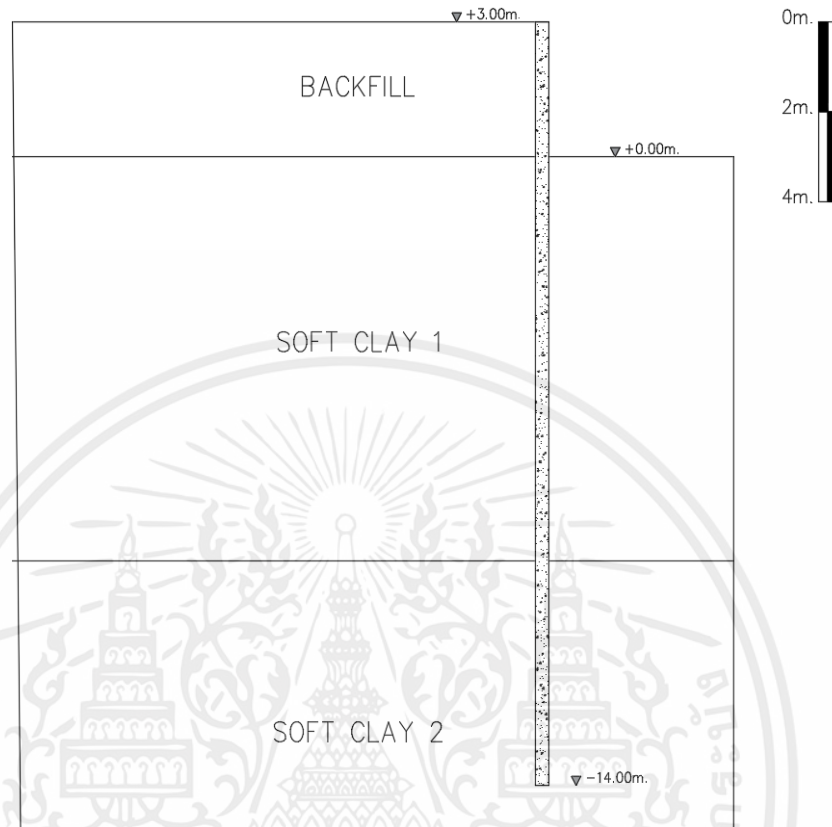
| | | | | | | |
|---------|-------|-----|------|------|----------|---------|
| 7.5-8 | 7.50 | 0.5 | 2240 | 1120 | 214400 | 37520 |
| 8-8.5 | 8.00 | 0.5 | 2240 | 1120 | 214400 | 37520 |
| 8.5-9 | 8.50 | 0.5 | 2240 | 1120 | 214400 | 37520 |
| 9-9.5 | 9.00 | 0.5 | 3120 | 1560 | 298628.6 | 52260 |
| 9.5-10 | 9.50 | 0.5 | 3120 | 1560 | 298628.6 | 52260 |
| 10-10.5 | 10.00 | 0.5 | 3120 | 1560 | 298628.6 | 52260 |
| 10.5-11 | 10.50 | 0.5 | 3290 | 1645 | 314900 | 55107.5 |
| 11-11.5 | 11.00 | 0.5 | 3290 | 1645 | 314900 | 55107.5 |
| 11.5-12 | 11.50 | 0.5 | 3290 | 1645 | 314900 | 55107.5 |
| 12-12.5 | 12.00 | 0.5 | 2750 | 1375 | 263214.3 | 46062.5 |
| 12.5-13 | 12.50 | 0.5 | 2750 | 1375 | 263214.3 | 46062.5 |
| 13-13.5 | 13.00 | 0.5 | 2750 | 1375 | 263214.3 | 46062.5 |
| 13.5-14 | 13.50 | 0.5 | 2900 | 1450 | 277571.4 | 48575 |
| 14-14.5 | 14.00 | 0.5 | 2900 | 1450 | 277571.4 | 48575 |

เมื่อได้ค่า K แล้วเราสามารถกำหนด Spring Support ในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างเช่น SAB2000 เพื่อคำนวณหาค่าโมเมนต์ตัดได้

3.2.3.3 รูปแบบกำแพงที่จะทำการวิเคราะห์หาค่าโมเมนต์ตัด

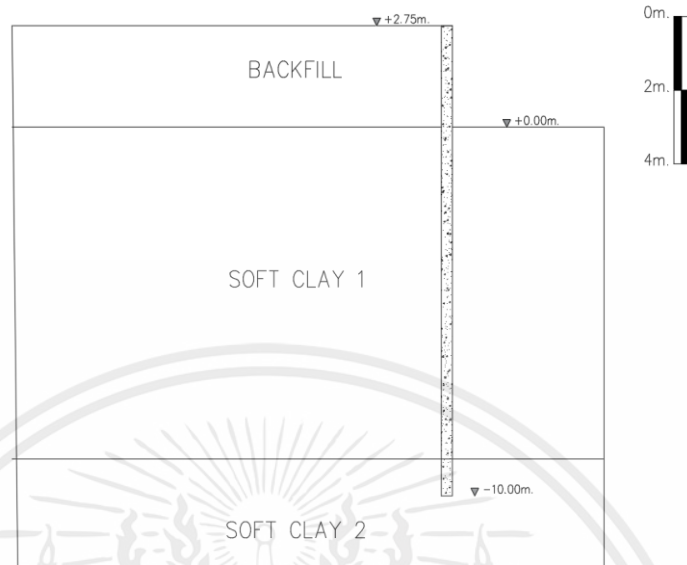
จากข้อมูลคุณสมบัติดินตามตารางที่ 3.1 และคุณสมบัติเสาเข็มตามตารางที่ 3.2 จะนำมาออกแบบโมเดลจำลองของกำแพงกันดินแต่ละขนาดความสูง โดยจะสร้างโมเดลออกเป็น 6 โมเดลจำลองเพื่อเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ตัดที่เกิดขึ้นจากโปรแกรม Plaxis 2D และจากการคำนวณด้วยมือ ข้อมูลแบบจำลองโมเดลมีดังนี้

1. โมเดลจำลองกำแพงความสูง 3.00 เมตร ฝังเสาเข็มลึก 14 เมตร. ดังแสดงในรูปที่ 3.7



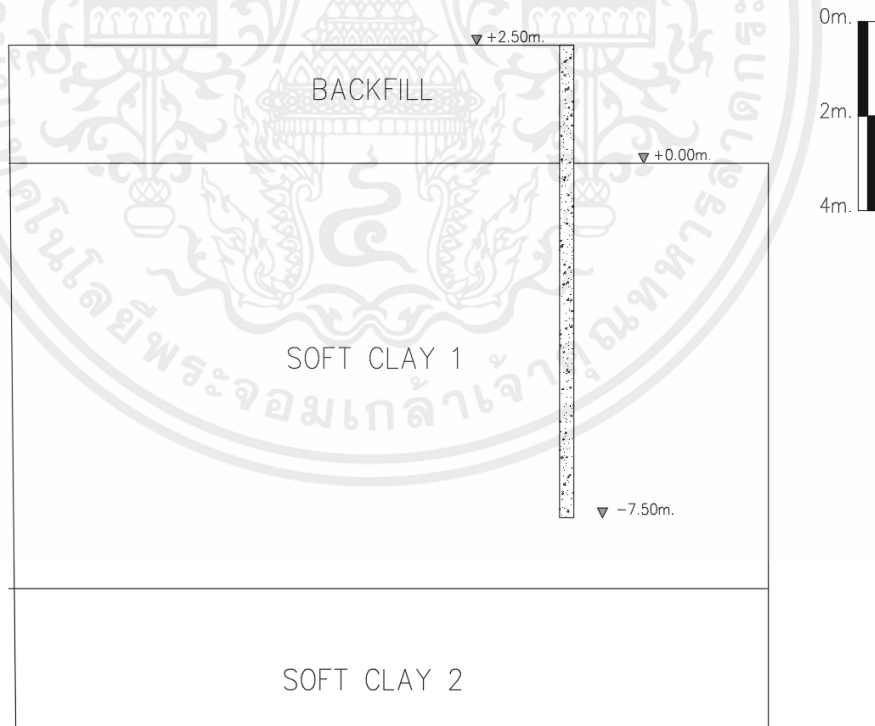
รูปที่ 3.6 โมเดลจำลองแบบที่ 1

2. โมเดลจำลองกำแพงความสูง 2.75 เมตร ฝังเสาเข็มลึก 10 เมตร. ดังแสดงในรูปที่ 3.8



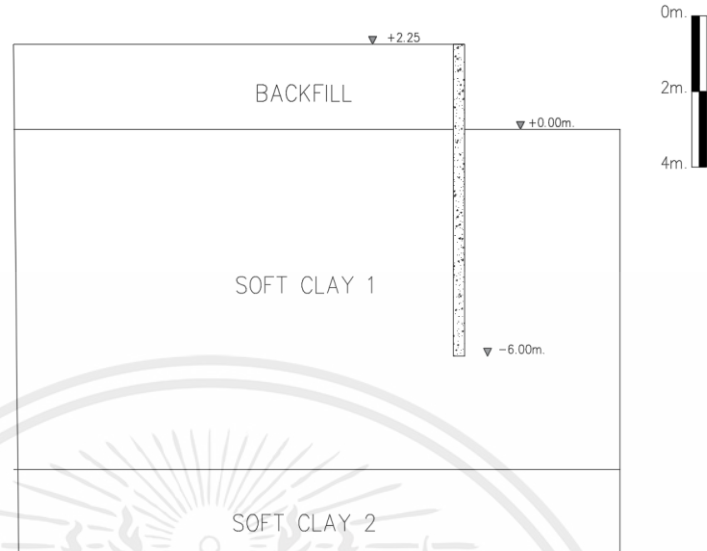
รูปที่ 3.7 โมเดลจำลองแบบที่ 2

3. โมเดลจำลองกำแพงความสูง 2.50 เมตร ฝังเสาเข็มลึก 7.5 เมตร. ดังแสดงในรูปที่ 3.9



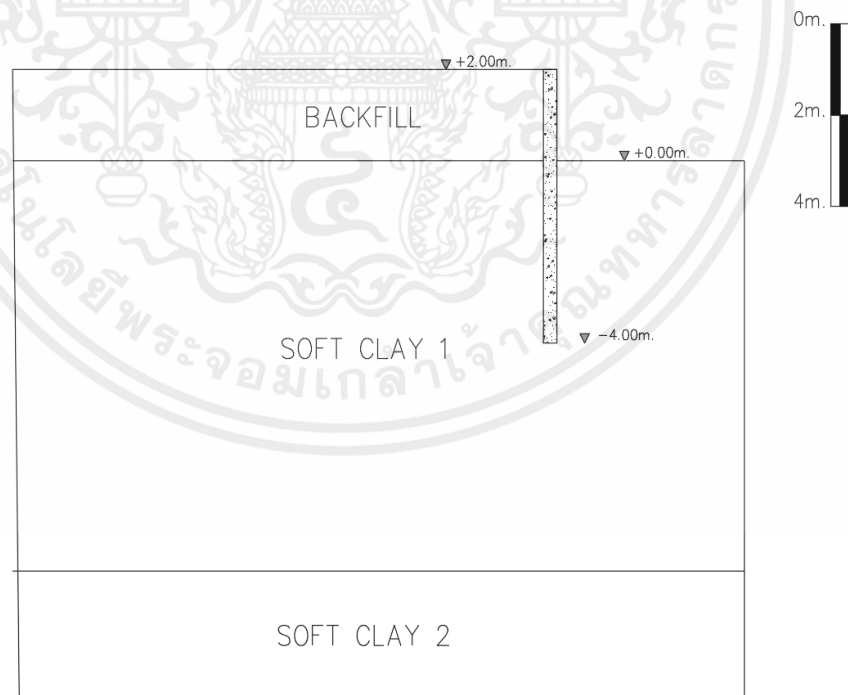
รูปที่ 3.8 โมเดลจำลองแบบที่ 3

4. โมเดลจำลองกำแพงความสูง 2.25 เมตร ฝังเสาเข็มลึก 6 เมตร. ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 โมเดลจำลองแบบที่ 4

5. โมเดลจำลองกำแพงความสูง 2.00 เมตร ฝังเสาเข็มลึก 4 เมตร. ดังแสดงในรูปที่ 3.11

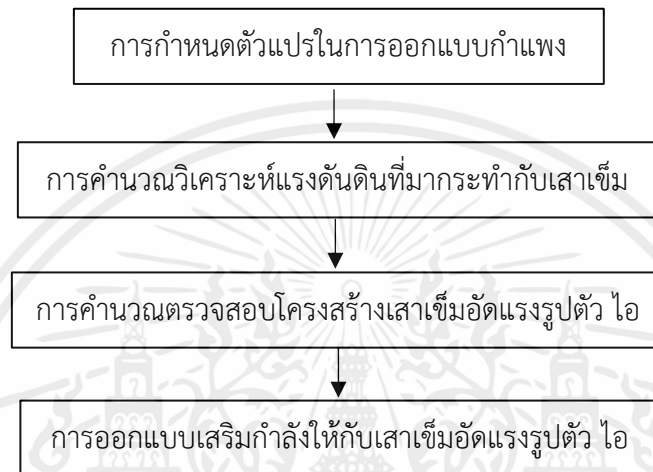


รูปที่ 3.10 โมเดลจำลองแบบที่ 5

3.2.4 การกระบวนการทำงานของโปรแกรมออกแบบเสริมกำลังเสาเข็ม

การออกแบบเสริมกำลังสามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนคือ 1. การกำหนดตัวแปรในการออกแบบ
กำแพง 2. การคำนวณวิเคราะห์แรงดันดินที่มากระทำกับเสาเข็ม 3. การคำนวณตรวจสอบโครงสร้าง
เสาเข็มอัดแรงรูปตัวไอ 4. การออกแบบเสริมกำลังให้กับเสาเข็มอัดแรงรูปตัว ไอ ซึ่งมีรายละเอียดตามรูปที่

3.7

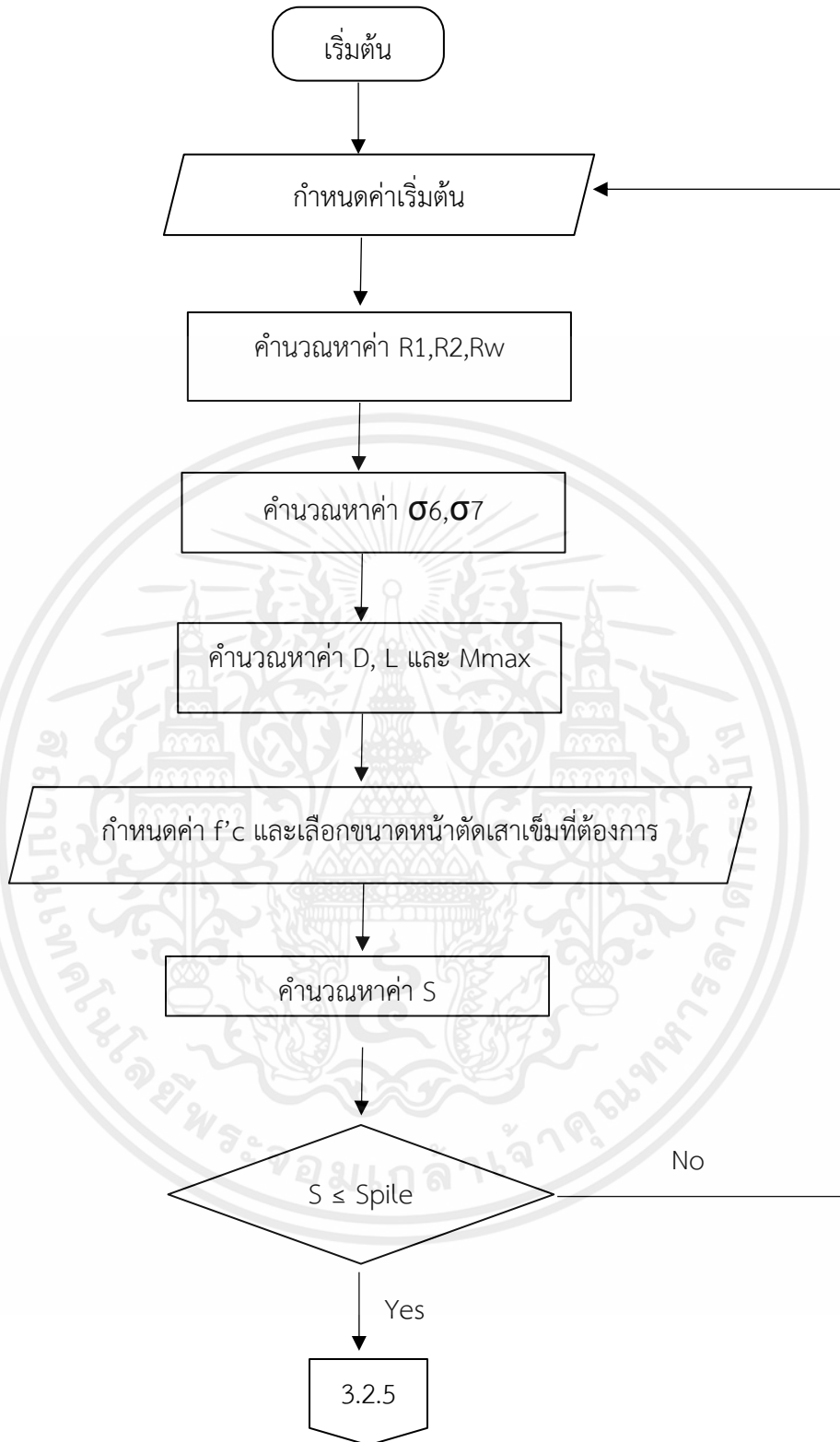


รูปที่ 3.11 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรม

3.2.5 การวิเคราะห์หาแรงดันดินที่กระทำกับเสาเข็ม

การคำนวณหาแรงดันดินที่กระทำกับเสาเข็มนั้น เป็นการคำนวณเพื่อหาแรงภายในที่มา
กระทำกับเสาเข็ม เช่น โมเมนต์ดัด และคำนวณหาความยาวของเสาเข็มที่ต้องฝังลงในดินเพื่อ
ป้องกันการพลิกคว่ำได้ ซึ่งมีรายละเอียดตามรูปที่ 3.13

1. ทำการกำหนดค่าเริ่มต้น เช่น หน่วยน้ำหนักของดิน ค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ
ของดิน มุมเสียดทานภายในของดิน และความสูงของกำแพง
2. วิเคราะห์การแรงดันดินที่มากระทำกับเสาเข็ม ตามสมการที่ 2.2.1
3. วิเคราะห์หาความยาวของเสาเข็มที่ต้องฝังลงในดินเหนียว ตามสมการที่ 2.2.13
4. วิเคราะห์หาโมเมนต์ดัดที่เกิดกับตัวเสาเข็ม ตามสมการที่ 2.2.15
5. ตรวจสอบโมดูลัสของหน้าตัดโดยทำการเลือกหน้าตัดมาเปรียบเทียบกับโมดูลัสหน้า
ตัดที่คำนวณได้ ตามสมการที่ 2.2.16

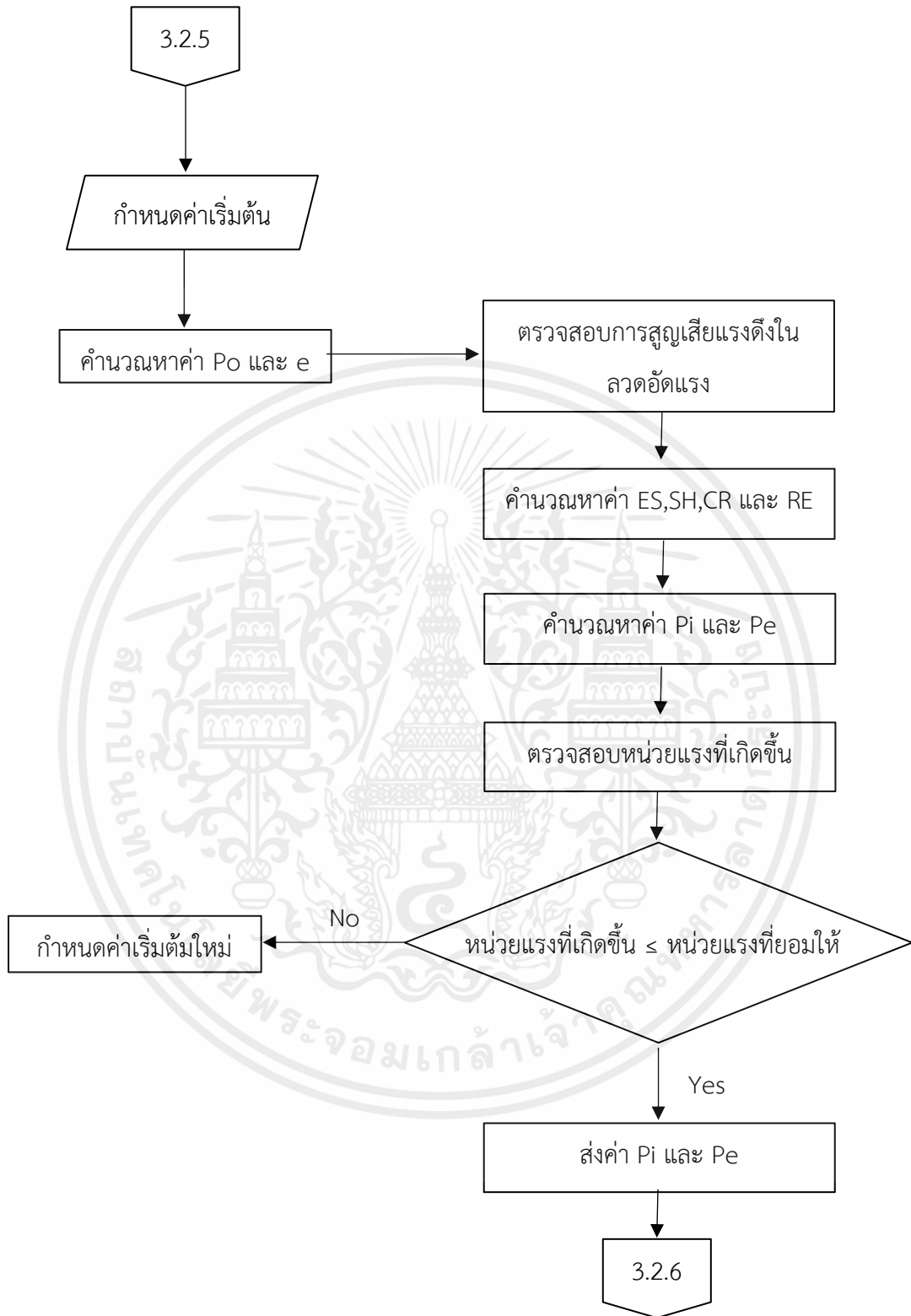


รูปที่ 3.12 แผนผังการคำนวณวิเคราะห์แรงดันดิน

3.2.6 ตรวจสอบโครงสร้างเสาเข็มอัดแรงรูปตัวโอ

การคำนวณเพื่อหาเสถียรภาพภายในของเสาเข็มนั้นต้องทำการตรวจสอบโครงสร้างเสาเข็มอัดแรงรูปตัวโอด้วยวิธี การออกแบบคอนกรีตอัดแรง โดยจะนำหน้าตัดของเสาเข็มอัดแรงแต่ละหน้าตัดมาคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดที่รับได้ของเสาเข็มเพื่อนำมาเลือกขนาดหน้าตัดให้เหมาะสมกับโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจากกำแพงกันดิน ถ้าค่าโมเมนต์ที่รับได้ของเสาเข็มน้อยกว่าก็จะทำการออกแบบเสริมกำลังให้กับเสาเข็มตามหัวข้อ 3.2.7 ซึ่งมีรายละเอียดตามรูปที่ 3.14

1. กำหนดค่าเริ่มต้นโดยกำหนดข้อมูลการออกแบบเช่น ขนาดหน้าตัดของเสาเข็ม , ชนิดและจำนวนลวดอัดแรงที่ใช้ในเสาเข็ม, กำลังประลัยของคอนกรีต
2. คำนวณหาค่าการสูญเสียแรงดึงในลวดอัดแรง เช่น ค่า ES SH CR RE ตามสมการที่ 2.3.4 , 2.3.8 , 2.3.10 และ 2.3.12
3. คำนวณหาค่าหน่วยแรงดึงที่เหลืออยู่ของลวดอัดแรง
4. คำนวณหาค่า P_i และ P_e
5. ตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวคอนกรีตขณะถ่ายแรงและขณะรับน้ำหนักบรรทุก โดยหน่วยแรงที่เกิดขึ้นต้องน้อยกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ ตามสมการที่ 2.3.14 และ 2.3.15
6. ส่งค่า P_i และ P_e เพื่อนำไปคำนวณเสริมกำลังต่อไป

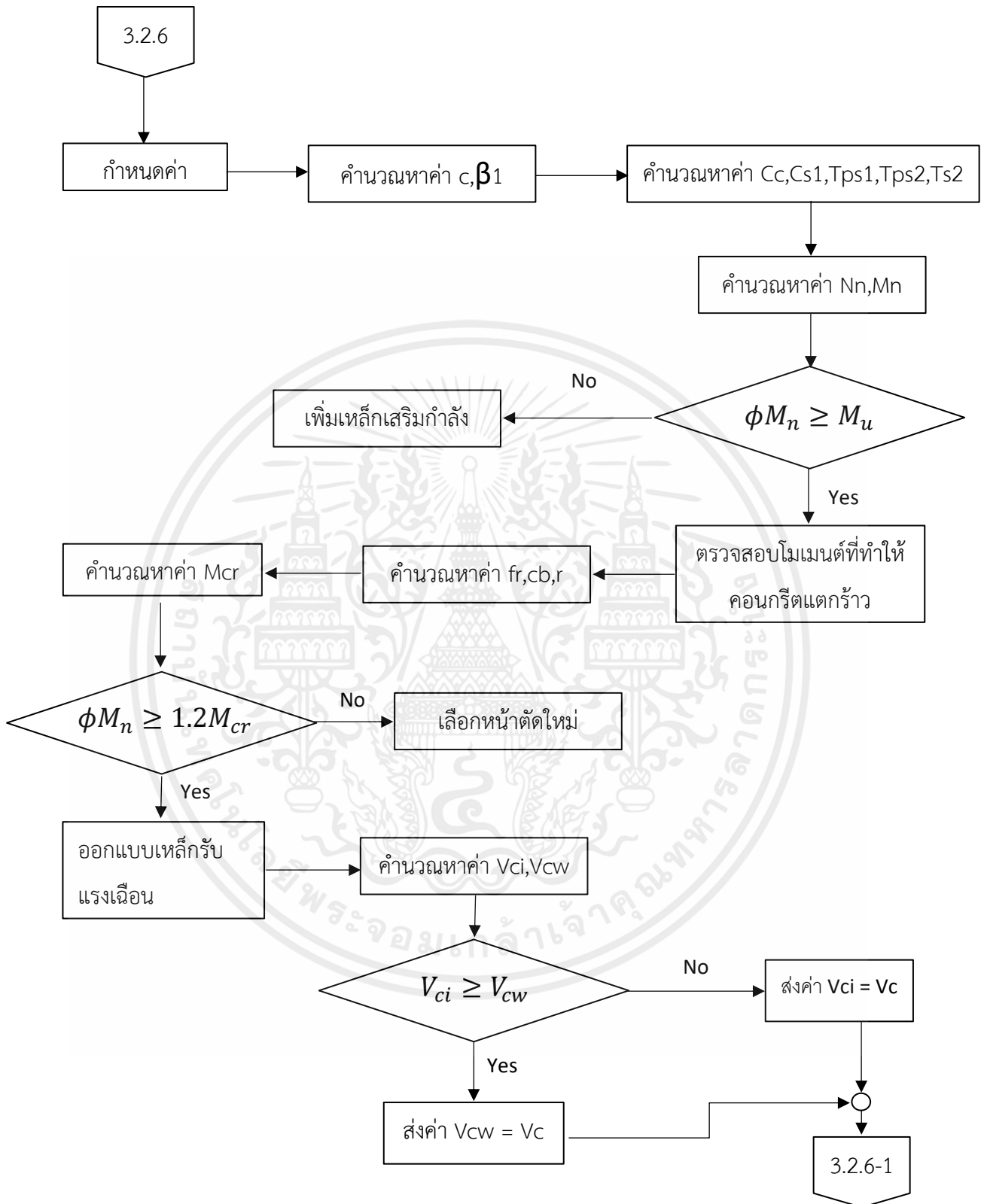


รูปที่ 3.13 แผนผังการวิเคราะห์โครงสร้างเสาเข็มอัดแรงรูปตัวไอ

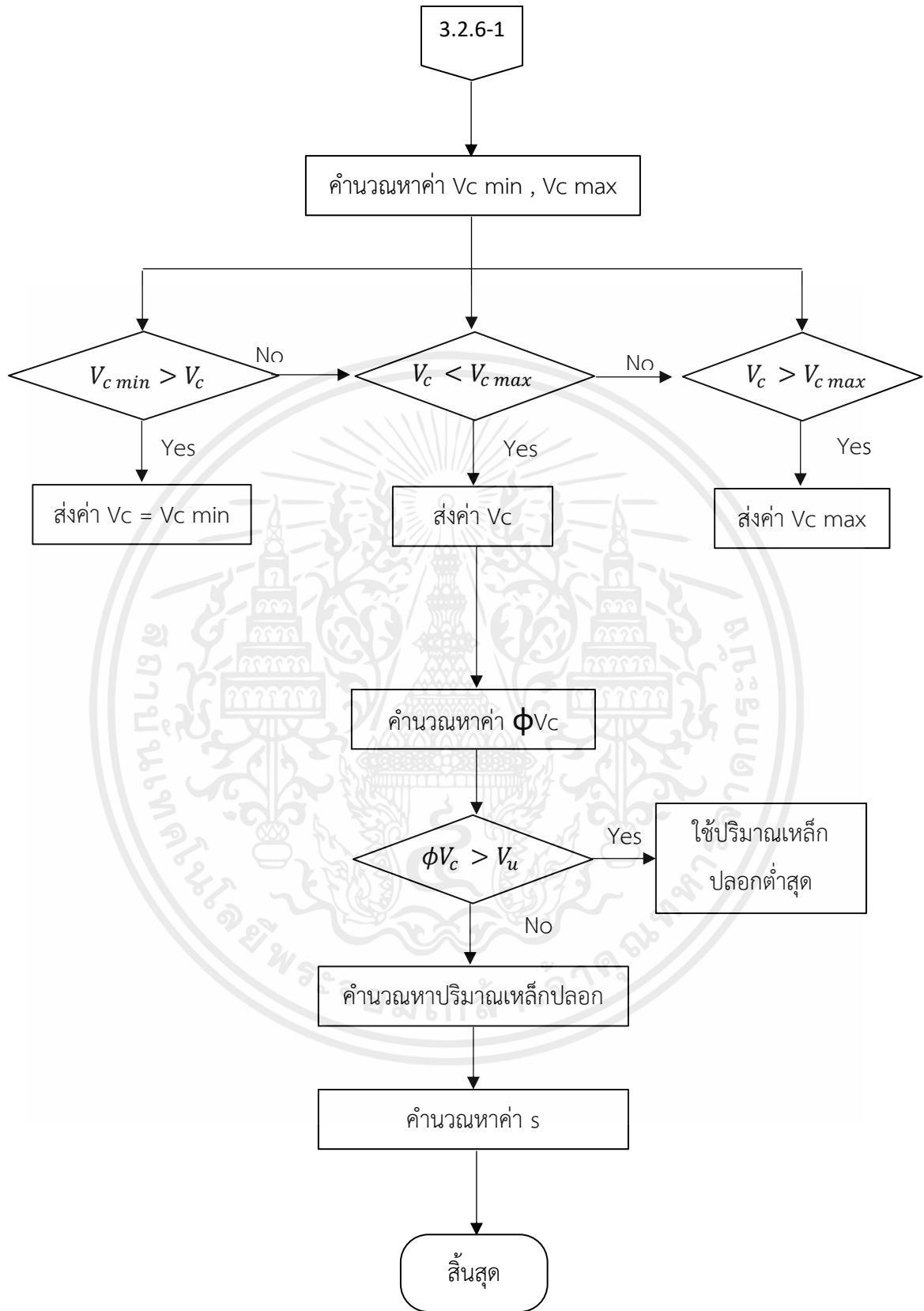
3.2.7 ออกแบบเสริมกำลังให้กับเสาเข็มอัดแรงรูปตัว ไอ

การคำนวณเพื่อหาปริมาณเหล็กเสริมกำลังนั้นจะนำโมเมนต์ดัดที่คำนวณได้จากเสาเข็มอัดแรงรูปตัวไอตามหัวข้อ ที่ 3.2.6 มาออกแบบเสริมกำลังให้กับเสาเข็มอัดแรง ด้วยวิธีการออกแบบคอนกรีตอัดแรง โดยจะเสริมกำลังด้วยเหล็กเสริมแบบไม่อัดแรง เช่น เหล็กเส้นข้ออ้อย ซึ่งมีรายละเอียดตามรูปที่ 3.15 ก-ข

1. กำหนดค่าเริ่มต้นโดยนำค่าโมเมนต์ดัดที่วิเคราะห์ได้จากแรงดันดินด้านข้างที่กระทำกับกำแพง และโมเมนต์ที่หน้าตัดสามารถต้านทานได้ และทดลองเลือกเหล็กเสริม
2. คำนวณหาค่า c และ β_1 เพื่อนำไปหาค่ากำลังของเสาเข็มที่รับได้ต่อไป
3. คำนวณหาค่า $C_c, C_s, T_{ps1}, T_{ps2}, T_s$ ตามสมการที่ 2.3.37 , 2.3.38 , 2.3.47 , 2.3.48 และ 2.3.40
4. เมื่อรวมแรง $C_c, C_s, T_{ps1}, T_{ps2}, T_s$ จะได้แรงในแนวแกน N_n ตามสมการที่ 2.3.35
5. คำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดที่เสารับได้ M_n ตามสมการที่ 2.3.36
6. เปรียบเทียบโมเมนต์ดัดตามสมการ $\phi M_n > M_u$ ถ้าค่า M_u มีค่ามากกว่าต้องเพิ่มเหล็กเสริมกำลัง
7. เมื่อ ϕM_n มีค่ามากกว่า M_u จะทำการนำค่า M_n ไปตรวจสอบโมเมนต์ดัดที่ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว M_{cr} ตามสมการที่ 2.3.21 ว่า $\phi M_n > 1.2 M_{cr}$ เพื่อป้องกันการวิบัติแบบทันทีทันใดเนื่องจากการแตกร้าว
8. ออกแบบเหล็กรับแรงเฉือน โดยคำนวณหาค่า V_{ci} และ V_{cw} ตามสมการที่ 2.3.49 และ 2.3.51 เพื่อนำมาหาค่า V_c
9. คำนวณหาค่า $V_{c \max}$ และ $V_{c \min}$
10. เปรียบเทียบค่า V_c และ V_n ตามสมการ $\phi V_c > V_u$ ถ้า V_u น้อยกว่า ϕM_n จะต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือนไม่น้อยกว่าปริมาณต่ำสุด $A_{v \min}$ ตามสมการที่ 2.3.54 และ 2.3.55



รูปที่ 3.14 ก แผนภูมิการออกแบบเสริมกำลังให้กับเสาเข็มอัดแรงรูปตัว ไอ



รูปที่ 3.14 ข แผนภูมิการออกแบบเสริมกำลังให้กับเสาเข็มอัดแรงรูปตัว ไอ

3.2.8 เขียนโปรแกรมออกแบบและเสริมกำลังเสาเข็มรูปตัว ไอ ด้วย โปรแกรม Excel

งานวิจัยนี้จะจัดทำโปรแกรมออกแบบและเสริมกำลังเสาเข็มรูปตัว ไอ เพื่อนำมาคำนวณออกแบบเสาเข็มอัดแรงรูปตัว ไอ โดยตัวโปรแกรมนี้จะสามารถคำนวณแรงดันดิน โมเมนต์ดัดที่กระทำกับตัวเสาเข็ม และออกแบบเสริมกำลังให้กับเสาเข็มอัดแรงรูปตัว ไอ ได้

3.3 วิธีการใช้งานโปรแกรม Excel

คู่มือการใช้งานโปรแกรม

ชีทที่ 1 HOME PAGE

| PROJECT : | การประยุกต์ออกแบบการเสริมความแข็งแรงของเสาเข็มเพื่อรับแรงดันดินด้านข้าง |
|------------|---|
| OWNER : | KMITL STUDENTS |
| LOCATION : | KMITL WORKSHOP |
| Designer : | KMITL STUDENTS |
| Date : | 25-04-2566 |

GO TO > 1.HOME PAGE
 GO TO > 2.INPUT DATA
 GO TO > 3.Retaining Wall Design
 GO TO > 4.Cal I section
 GO TO > 5.Ixx
 GO TO > 6.Database

HOME PAGE INPUT DATA Retaining Wall Design Cal I section Ixx Database

คลิกปุ่ม NEXT เพื่อไปหน้าถัดไป

คลิกไฮเปอร์ลิงก์เพื่อไปหน้าที่ต้องการ

HOME PAGE: เป็นหน้าแรกของ

INPUT DATA: เป็นหน้ากรอกข้อมูลกำแพงกันดิน

Retainine Wall Design: เป็นหน้ารายการคำนวณกำแพงกัน

Cal I section: เป็นหน้ารายการคำนวณโมเมนต์เสาเข็ม และเสริมกำลังรับ

Ixx: เป็นหน้าข้อมูลเสาเข็มรูปตัวไอ

Database: เป็นหน้าข้อมูลตารางลวดอัดแรง Pc wire, ตารางเหล็กเสริม, ตารางเสาเข็มรูปตัว ไอ

ชีทที่ 2 INPUT DATA

INPUT DATA

กรอกน้ำหนักกระทำ

$q = 500 \text{ kg/m}^2$

กรอกค่าความเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน COHESION

| | | |
|--------------------------|----------|-----------------|
| ระยะห่างเสาเข็ม = | 1.50 | m |
| $\gamma_{\text{sat}} =$ | 1,900.00 | kg/m^3 |
| $\gamma_{\text{clay}} =$ | 1,900.00 | kg/m^3 |
| $\rho_c =$ | 350 | ksc |

กรอกค่าความเสียหายภายในของดิน Internal friction

ข้อมูลหน้าตัดเสาเข็ม

| | | |
|-----|-------|----|
| A = | 35.00 | cm |
| C = | 11.50 | cm |
| D = | 12.00 | cm |
| B = | 35.00 | cm |
| F = | 8.50 | cm |
| G = | 3.00 | cm |
| H = | 12.50 | cm |

กรอกข้อมูลหน้าตัด

คลิก BACK เพื่อย้อนกลับ

< BACK

1. กรอกค่าความสูงของกำแพงกันดิน
2. กรอกค่าระยะฝังในดินของเสาเข็ม
3. กรอกค่าความปลอดภัย Safety Factor
4. กรอกค่าความลึกของแผ่นเสียบ

ชีทที่ 3 Retaining Wall Design รายการคำนวณกำแพงกันดิน

| | | | |
|---|---|---------------------------|--|
| Project : | การประยุกต์ออกแบบการเสริมความแข็งแรงของเสาเข็มเพื่อรับแรงดันดินด้านข้าง | Page : | 1 |
| Owner : | KMITL STUDENTS | Designer : | KMITL STUDENTS |
| Location : | KMITL WORKSHOP | Date : | 25-04-2566 |
| รายการคำนวณกำแพงกันดิน | | | |
| PILE : | | I 35 x 35 cm | |
| 1. ข้อมูลกำแพงกันดิน | | | |
| น้ำหนักบรรทุกก้นกำแพง | q = | 500 kg/m ² | |
| ความสูงของกำแพง | H = | 2.50 m | |
| ความสูงแผ่นเสียบ | H' = | 1.00 m | |
| หน่วยน้ำหนักปริมาตรดิน Submerged unit weight | γ _{sat} = | 1900.00 kg/m ³ | |
| หน่วยน้ำหนักปริมาตรดิน | γ _{clay} = | 1900.00 kg/m ³ | |
| มุมเสียดทานภายในของดิน Internal friction angle | φ Soil = | 30 deg | |
| ค่าความเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน COHESION | c = | 2500 kg/m ² | |
| กำลังอัดคอนกรีต (ที่ 28 วัน) | f _c = | 350 ksc. | |
| พท. หน้าสัมผัสเสาเข็ม | A = | 0.35 m | |
| ระยะห่างเสาเข็ม | @ = | 1.50 m | |
| Plasticity index (P.I.) | P.I. = | 30 % | |
| อัตราส่วนการอัดตัวมากกว่าปกติ (Overconsolidated ratio) | OCR = | 1 | |
| สัมประสิทธิ์ของความดันดิน K _a | | | |
| K ₀ สำหรับดินเหนียวอัดตัวปกติ KO = 0.4+0.007(P ₁) | K ₀ = | 0.610 | <input type="checkbox"/> เล็ก |
| K ₀ สำหรับดินเหนียวอัดตัวมากกว่าปกติ $K_0 \approx K_0^{OCR} \quad K_0 = 0.44 + 0.42 \left(\frac{P.I.(\%)}{100} \right)$ | K ₀ = | 0.566 | <input type="checkbox"/> เล็ก |
| Ka Rankine active pressure coefficient $K_a = \tan^2(45 - \phi'/2)$ | K _a = | 0.333 | <input checked="" type="checkbox"/> เล็ก |
| K ₀ สำหรับดินเหนียวอัดตัวปกติ และ ดินทราย $K_0 = 1 - \sin \phi'$ | K ₀ = | 0.5 | <input type="checkbox"/> เล็ก |
| K _a กำหนดเอง | K _a = | 0.7 | <input type="checkbox"/> เล็ก |
| | K | 0.333 | |
| | USE | K | |
| 2. คำนวณแรงดันดินด้านข้าง | | | |
| แรงดันดินที่กระทำต่อกำแพง | P ₁ = K _a x q | P ₁ = | 166.67 kg/m ² |
| แรงลัพธ์ที่เกิดจากแรงดันดิน | R ₁ = P ₁ x H x 2 | R ₁ = | 625.00 kg |
| แรงดันดินที่กระทำต่อกำแพง | P ₂ = K _a x γ' x H | P ₂ = | 750.00 kg/m ² |
| แรงลัพธ์ที่เกิดจากแรงดันดิน | R ₂ = 1/2 x P ₂ x H x ระยะห่างเสา | R ₂ = | 1406.25 kg |
| แรงดันน้ำที่กระทำต่อกำแพง | P ₃ = γ _w x H | P ₃ = | 2500.00 kg/m ² |
| แรงลัพธ์ที่เกิดจากแรงดันดิน | R ₃ = 1/2 x P ₃ x H x ระยะห่างเสา | R ₃ = | 4687.50 kg |
| แรงดันดินด้านหน้ากำแพง | P ₄ = K _a x γ _{clay} x H' | P ₄ = | 633.33 kg/m ² |
| แรงลัพธ์ของดินหน้ากำแพง | R ₄ = 1/2 x P ₄ x H' x Spacing of pile | R ₄ = | 475.00 kg |
| แรงลัพธ์รวมที่กระทำต่อกำแพง | R = R ₁ +R ₂ +R ₃ -R ₄ | R | 6243.75 Kg |
| | R | Y | 5542.71 |
| | Y | | 0.89 m |
| 3. คำนวณระยะฝังในดิน | | | |
| แรงดันรวมที่กระทำต่อกำแพง | $\bar{P}_a = q + \gamma' H$ | P _a = | 5250.00 kg/m ² |
| $\sigma_6 = 4ca - \bar{P}_a$ | | 4Ca - P _a = | 4987.50 kg/m |
| $\sigma_7 = 4ca + \bar{P}_a$ | | 4Ca + P _a = | 16012.50 kg/m |
| ระยะฝังในดิน D $D^2(4c - \bar{P}_a) - 2DR - \frac{R(12c\bar{P}_a + R)}{\bar{P}_a + 2c} = 0$ | | D = | 3.61 m |
| ระยะฝังในดินจริงเพิ่ม D อีก 30%-40% | | D = | 4.70 m |
| ความยาวเสาเข็ม | | L = | 7.20 m |
| ความยาวเสาเข็มที่ใช้ | Used pile Length | | 8.00 m |
| 4. หาแรงภายใน | | | |
| จุดที่แรงเฉือนเป็นศูนย์ | | z' = | 1.25 |
| โมเมนต์สูงสุดที่กระทำกับกำแพง $M_{max} = R(c' - \bar{P}_a) - \frac{(4c - \bar{P}_a)}{2}$ | | M _{max} = | 9450.92 g-m |
| แรงเฉือนสูงสุดที่กระทำกับกำแพง | V _{max} = R | V _{max} = | 6243.75 g |
| Section modulus ที่เกิดขึ้นจริง | S = (M _{max} x 100)/f _c ' | S = | 2700.26 m ³ |
| Section modulus ที่เสาเข็มรับได้ | | S = | 7033.35 m ³ |
| | | | OK |

กรอกค่า Plasticity

กรอกค่า อัตราส่วนการอัดตัวมากกว่า

คลิกเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดิน K_a คลิกเพียงค่าเดียว

กรอกค่าสัมประสิทธิ์ของความดันดินที่ต้องการ

ถ้าขึ้น NG แสดงว่าค่า Section modulus ที่เกิดขึ้นจริงมากกว่าที่รับได้

ชีทที่ 4 Cal I section คำนวณโมเมนต์เสาเข็มและเสริมกำลังรับแรงอัด

| B | C | D | E | F | G | H | I | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|---|---------------------|--|---|------------------------------|--|----------------|--|--|------|---|-------|---|-------|---|-------|---|-------|---|------|---|------|---|-------|
| Project : | การประยุกต์ออกแบบการเสริมความแข็งแรงของเสาเข็มเพื่อรับแรงดันดินด้านข้าง | | | | | Page : | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Owner : | KMITL STUDENTS | | | Designer : | | KMITL STUDENTS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Location : | KMITL WORKSHOP | | | Date : | | 25-04-2566 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| คำนวณโมเมนต์เสาเข็มและเสริมกำลังรับแรงอัด | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ข้อมูลเสาเข็ม | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Dimension (cm)</th> </tr> <tr> <th></th> <th>(cm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>35.00</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>11.50</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>12.00</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>35.00</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>8.50</td> </tr> <tr> <td>G</td> <td>3.00</td> </tr> <tr> <td>H</td> <td>12.50</td> </tr> </tbody> </table> | | | | Dimension (cm) | | | (cm) | A | 35.00 | C | 11.50 | D | 12.00 | B | 35.00 | F | 8.50 | G | 3.00 | H | 12.50 |
| Dimension (cm) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | (cm) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A | 35.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| C | 11.50 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| D | 12.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B | 35.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| F | 8.50 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| G | 3.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| H | 12.50 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ความยาวเสาเข็ม | L | = | | | | 8.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Area | A | = | | | | 886.00 | กรอกค่าโมเมนต์ที่ใช้ | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Unit weighth | W | = | | | | 2,264 kg/m | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Section Modulus | S | = | I/c | | | 7,033.35 cm ³ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Working moment | Mw | = | | | | 2,000.00 kg ² /m | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Working shear | Vw | = | | | | 6,718.75 kg | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Retaining Wall Moment | Mw | = | | | | 10,384.85 kg ² /m | กรอกค่ากำลังอัดขณะถ่ายแรง | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ข้อมูลการออกแบบ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| กำลังอัดคอนกรีต ที่ 28 วัน | | | f'c | = | | 350.00 ksc | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| กำลังอัดคอนกรีต ขณะถ่ายแรง | | | f'ci | = | | 240.00 ksc | กรอกค่า | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Covering | | | | = | | 3.00 cm | Covering | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Modulus of Elasticity of Concrete | | | Ec=15200sqrt(f'c) | = | | 284,365.96 ksc | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Modulus of Elasticity of Concrete at Time of Initial Prestress | | | Eci=15200sqrt(f'ci) | = | | 235,477.39 ksc | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| หน่วยแรงที่ยอมให้ขณะถ่ายแรง | | | | = | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | หน่วยแรงอัด | | Fci=0.6f'ci | = | | 144 ksc | กรอกค่า Modulus of Elasticity of Prestressed Steel | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | หน่วยแรงดึง | | Fti=-0.8sqrt(f'ci) | = | | (12 ksc) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| หน่วยแรงที่ยอมให้ขณะรับน้ำหนัก | | | | = | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | หน่วยแรงอัด | | Fc=0.45f'c | = | | (29 ksc) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | หน่วยแรงดึง | | Ft=-1.6sqrt(f'c) | = | | (29 ksc) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Modulus of Elasticity of Prestressed Steel | | | Eps | = | | 2,040,000.00 ksc | กรอกค่า Modulus of Elasticity of Non Prestressed Steel | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Modulus of Elasticity of Non Prestressed Steel | | | Es | = | | 2,040,000.00 ksc | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

คลิก Drop down เพื่อเลือกหลอด

| | | | | | |
|---|---|----------|---------------------------------|-----------------|----------------------|
| Project : | การประยุกต์ออกแบบการเสริมความแข็งแรงของเสาเข็มเพื่อรับแรงดันดินด้านข้าง | | | Page : | |
| Owner : | KMITL STUDENTS | | | Designer : | KMITL STU |
| Location : | KMITL WORKSHOP | | | Date : | 25-04-25 |
| คำนวณโมเมนต์เสาเข็มและเสริมกำลังรับแรงอัด | | | | | |
| เลือกหลอดอัดแรง | พื้นที่หน้าตัด | fpu | จำนวนหลอด | กำลังดึงต่อเส้น | กำลังดึง kg |
| ชนิดหลอดอัดแรง | cm ² | ksc | บน | ล่าง | kg |
| PC Strand 1725 Dia 1/2" | 0.93 | 17567.28 | 5 | 5 | 16320.00 |
| ระยะเหล็กด้านบน | | | dp | = | 5.00 cm |
| ระยะเหล็กด้านล่าง | | | dp | = | 30.00 cm |
| พื้นที่หลอดอัดแรงด้านรับแรงอัด | | | A'ps | = | 4.65 cm ² |
| พื้นที่หลอดอัดแรงด้านรับแรงดึง | | | Aps | = | 4.65 cm ² |
| พื้นที่หลอดอัดแรงทั้งหมด | | | At | = | 9.29 cm ² |
| แรงดึงในเหล็กเสริมเมื่อถ่ายแรง | | | P0 = | 0.76 | ton |
| ระยะ CG เหล็กอัดแรงจากด้านบน | | | (Aps'dp+A'ps'dp)/(Aps+A'ps) | | |
| ระยะเชิงศูนย์เหล็กอัดแรง | | | (Aps'dp+A'ps'dp)/(Aps+A'ps)-B/2 | | |
| คำนวณการสูญเสียแรงดึง | | | | | |
| ค่าความชื้นสัมพัทธ์ RH | | | | | 75.00 % |
| ค่าน้ำหนักที่กระทำกับเสาเข็มนอกเหนือจากน้ำหนักของตัวเอง w for fcs | | | | | 100.00 kg/m |
| Mg | | | w*(0.207L) ² /2 | | 291.57 kg |

กรองจำนวน

กรองระยะเหล็ก

กรองเปอร์เซ็นต์หน่วยแรงดึง
ขณะถ่ายแรง

กรองค่าความชื้น

กรองค่าน้ำหนักที่กระทำกับเสาเข็ม
นอกเหนือจากน้ำหนักของตัวเอง

| | | | | | |
|--|---|--------|--|------------|--------------|
| Project : | การประยุกต์ออกแบบการเสริมความแข็งแรงของเสาเข็มเพื่อรับแรงดันดินด้านข้าง | | | Page : | |
| Owner : | KMITL STUDENTS | | | Designer : | KMITL STU |
| Location : | KMITL WORKSHOP | | | Date : | 25-04-25 |
| คำนวณโมเมนต์เสาเข็มและเสริมกำลังรับแรงอัด | | | | | |
| ตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้น | | | | | |
| แรงดึงในเหล็กอัดแรงที่ดึงจากถ่ายแรง | | | Pi | = | P0-ES |
| แรงดึงในเหล็กอัดแรงประสิทธิผล | | | Pe | = | 64,592.19 kg |
| | | | Mg | = | 53,336.01 kg |
| | | | Mt | = | 291.57 kg*m |
| | | | | = | 1.7Mw |
| หน่วยแรงขณะถ่ายแรง | Top | Bottom | | | |
| Stress | ksc | ksc | | | |
| Pi/A | 72.90 | 72.90 | ถ้าขึ้น NG แสดงว่าหน้าตัดไม่สามารถรับหน่วย | | |
| Pe/S | 0.00 | 0.00 | ถ้าขึ้น NG แสดงว่าหน้าตัดไม่สามารถรับ | | |
| Mg/S | 4.15 | -4.15 | | | |
| Total Stress | 77.05 | 68.76 | | | |
| Allowable Stress | 144.00 | 144.00 | | | |
| Total Stress < Allow Stress | OK | OK | | | |
| หน่วยแรงขณะรับน้ำหนักบรรทุก | Top | Bottom | | | |
| Stress | ksc | ksc | | | |
| Pe/A | 60.20 | 60.20 | ถ้าขึ้น NG แสดงว่าหน้าตัดไม่สามารถรับ | | |
| Pe/S | 0.00 | 0.00 | | | |
| Mt/S | 48.34 | -48.34 | | | |
| Total Stress | 108.54 | 11.86 | | | |
| Allowable Stress | 157.50 | 157.50 | | | |
| Total Stress < Allow Stress | OK | OK | ถ้าขึ้น NG แสดงว่าหน้าตัดไม่สามารถรับ | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | | |
|------------|--|------------|--|
| Project : | การประยุกต์ออกแบบการเสริมความแข็งแรงของเสาเข็มเพื่อรับแรงดันด้านข้าง | | |
| Owner : | KMITL STUDENTS | Designer : | |
| Location : | KMITL WORKSHOP | Date : | |

คำนวณโมเมนต์เสาเข็มและเสริมกำลังรับแรงอัด

ออกแบบเสริมกำลัง

| | | | | | | |
|-----------------------|------|-----|------|------|-------|-----------------|
| กรณีบีบอัดที่จุดสมดุล | SD40 | USE | DB20 | 4.00 | 12.57 | cm ² |
| เหล็กเสริมรับแรงดึง | SR24 | USE | DB20 | 4.00 | 12.57 | cm ² |
| เหล็กเสริมรับแรงอัด | SD30 | | | | | |
| | SD40 | | | | | |
| | SD50 | | | | | |

คลิก Drop down เพื่อเลือกขนาดเหล็ก

คลิก Drop down เพื่อเลือกมาตรฐานเหล็ก

กรอกจำนวน

กรอกจำนวน

OK เปลือง

HOME PAGE | INPUT DATA | Retaining Wall Design | **Cal I section** | Ixx | Database | +

ถ้าขึ้น

| | |
|------------|-------------------------|
| OK ประหยัด | แสดงว่าใช้ได้และประหยัด |
| OK เปลือง | แสดงว่าใช้ได้ แต่เปลือง |
| NG | แสดงว่าใช้ไม่ได้ |

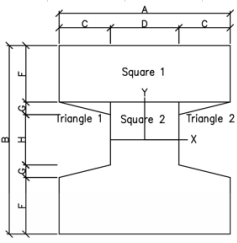
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| B | C | D | E | F | G | H | I |
|---|---|-----------|---|-------------------------------------|----------------|----------------|---------------------------|
| Project : | การประยุกต์ออกแบบการเสริมความแข็งแรงของเสาเข็มเพื่อรับแรงดันดินด้านข้าง | | | | | Page : | 6 |
| Owner : | KMITL STUDENTS | | | Designer : | KMITL STUDENTS | | |
| Location : | KMITL WORKSHOP | | | Date : | 25-04-2566 | | |
| คำนวณโมเมนต์เสาเข็มและเสริมกำลังรับแรงอัด | | | | | | | |
| ตรวจสอบค่าโมเมนต์ค้ำที่ทำให้คอนกรีตแตกร้าว | | | | | | | |
| โมเมนต์การแตกหักของคอนกรีต | | fr | = | $2.0\sqrt{f_c}$ | | 37.42 | ksc |
| | | cb | = | $B/2-e$ | | 17.50 | |
| | | r | = | $\sqrt{r(IA)}$ | | 11.79 | cm |
| โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตแตกร้าว | | Mcr | = | $Pe(e+r^2/cb)+frl/cb$ | | 9,579.44 | kg/m |
| | | ϕMn | = | | | 21,190.30 | kg/m |
| | | 1.2Mcr | = | | | 11,495.33 | kg/m |
| | | ϕMn | > | 1.2Mcr | | | OK |
| ออกแบบเหล็กรับแรงเฉือน | | | | | | | |
| | | Vu | = | $1.7V_w$ | | 11,421.88 | kg |
| | | Vd | = | $0.293W_L$ | | 498.43 | kg |
| | | bw | = | | | 11.50 | cm |
| | | V/M | = | | | 1.10 | m-1 |
| | | yt | = | | | 17.50 | cm |
| | | fr | = | $1.6\sqrt{f_c}$ | | 29.93 | ksc |
| B | C | D | E | F | G | H | I |
| ออกแบบเหล็กรับแรงเฉือน | | | | | | | |
| | | Vu | = | $1.7V_w$ | | 11,421.88 | kg |
| | | Vd | = | $0.293W_L$ | | 498.43 | kg |
| | | bw | = | | | 11.50 | cm |
| | | V/M | = | | | 1.10 | m-1 |
| | | yt | = | | | 17.50 | cm |
| | | fr | = | $1.6\sqrt{f_c}$ | | 29.93 | ksc |
| | | fpe | = | $Pe/A+Pe'e/S$ | | 98.78 | ksc |
| | | fd | = | Mg/S | | | |
| | | Mcr | = | $Iy^*(fr+fpe-fd)$ | | 8.7 | |
| | | Vci | = | $0.18\sqrt{f_c}/bw dp+Vd+VMcr/M$ | | 965.1 | |
| | | fpc | = | | | | |
| เนื่องจากลวดอัดแรงอยู่ในแนวอน | | Vp | = | | | | |
| | | Vcw | = | $(0.93\sqrt{f_c}+0.3fpc)bw dp+Vp$ | | 16.2 | |
| | | Vc | = | | | 16.2 | |
| | | Vcmin | = | $0.53\sqrt{f_c}/bw dp$ | | 3.4 | |
| | | Vcmax | = | $1.33\sqrt{f_c}/bw dp$ | | 8.3 | |
| | USE | Vc | = | | | 8,584.30 | kg |
| Check Shear | | 0.85Vc | = | | | 7,296.65 | kg |
| | | 0.85Vc | < | Vu | | | ต้องเสริมเหล็กรับแรงเฉือน |
| เลือกเหล็กเสริมรับแรงเฉือน | PC Wire 4 | fy | = | 15000.00 | ksc | $fy \leq 4200$ | ksc |
| | | Av | = | 2^*As | | 0.26 | cm ² |
| | | Vs | = | $Vu/\phi-Vc$ | | 4,853.20 | kg |
| ระยะเรียงเหล็กเสริมรับแรงเฉือน | | s | = | $Avfy/dp/Vs$ | | 6.62 | cm |
| | $Vu-\phi Vc/2$ | s | = | $Avfy/3.5bw$ | | 26.61 | cm |
| | $Pe>0.40Fpu$ | s | = | $(80Avfy/dp)/(Apsfpu*\sqrt{dp/bw})$ | | 19.50 | cm |
| <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> HOME PAGE INPUT DATA Retaining Wall Design Cal I section Ixx Database + </div> | | | | | | | |

ถ้าชั้น NG แสดง
ว่าใช้ไม่ได้

ถ้า 0.85Vc มากกว่า Vu ใช้
เสริมเหล็ก Avmin
ถ้า 0.85Vc น้อย Vu ต้อง
เสริมเหล็กรับแรงเฉือน

ชีทที่ 4 Ixx ข้อมูลหน้าตัดเสาเข็ม



| | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------|-------|-------------------|-------|--------------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| A cm | C cm | D cm | B cm | F cm | G cm | H cm | | |
| 35.00 | 11.50 | 12.00 | 35.00 | 8.50 | 3.00 | 12.50 | | |
| ตารางคำนวณค่า I รอบแกน X | | | | | | | | |
| Area type | b cm | h cm | A cm ² | dy cm | Ix cm ⁴ | A*dy ² | Ixx cm ⁴ | S cm ³ |
| Square1 | 35.00 | 8.50 | 297.50 | 13.5 | 1791.20 | 54219.38 | 56010.57 | 7033.35 |
| Square2 | 12.00 | 9.25 | 111.00 | 4.625 | 791.45 | 2374.36 | 3165.81 | |
| Triangle1 | 11.5 | 3 | 17.25 | 8.25 | 8.63 | 1174.08 | 1182.70 | |
| Triangle2 | 11.5 | 3 | 17.25 | 8.25 | 8.63 | 1174.08 | 1182.70 | |
| | | Area | 886.00 | | | | 61541.8 | |
| | | | | | | Ixx 2side | 123084 | |

< BACK

NEXT >

[GO TO > 1.HOME PAGE](#)
[GO TO > 2.INPUT DATA](#)
[GO TO > 3.Retaining Wall Design](#)

ชีทที่ 5 Database ข้อมูลตารางลวด, ตารางเหล็ก, ตารางเหล็กเสริมไม่อัดแรง, ตารางเสาเข็มรูปตัวไอ, ตารางเหล็กปลอก และตารางมาตรฐานของเหล็กเส้น

| ตารางลวดตีแรง Pc wire มอก 95-2534 และ Pc strand มอก 420-2534 | | | | | ตารางเหล็กเสริมไม่อัดแรง SD40 | | | เงื่อนไขคลิก | |
|--|------------|----------------------|-------------|----------|-------------------------------|-----------------------|--------|--------------|-------|
| | ขนาด (mm.) | A (cm ²) | Fpu (ksc) | Fpy(ksc) | ขนาด (mm.) | As (cm ²) | d (cm) | | |
| PC Wire 4 | 4 | 0.1275 | 17500 | 15000 | DB12 | 1.131 | 1.2 | | FALSE |
| PC Wire 5 | 5 | 0.1964 | 17500 | 15000 | DB16 | 2.011 | 1.6 | | FALSE |
| PC Wire 7 | 7 | 0.3848 | 16000 | 13500 | DB20 | 3.142 | 2 | | TRUE |
| PC Wire 9 | 9 | 0.6362 | 14500 | 12500 | DB25 | 4.909 | 2.5 | | FALSE |
| PC Strand 1725 Dia 3/8" | 3/8" | 0.5161 | 17574.11354 | 15816.7 | DB28 | 6.158 | 2.8 | | FALSE |
| PC Strand 1725 Dia 1/2" | 1/2" | 0.929 | 17567.27664 | 15810.55 | DB32 | 8.042 | 3.2 | | |
| PC Strand 1725 Dia 15.24 | 15.24 | 1.3935 | 17574.45282 | 15817.01 | | | | | |
| PC Strand 1860 Dia 3/8" | 3/8" | 0.5484 | 19018.96426 | 17117.07 | | | | | |
| PC Strand 1860 Dia 1/2" | 1/2" | 0.9871 | 18974.77459 | 17077.3 | | | | | |
| PC Strand 1860 Dia 15.24 | 15.24 | 1.4 | 18985.71429 | 17087.14 | | | | | |

| ตารางเสาเข็มรูปตัว ไอ มอก. | | | | | ตารางเหล็กปลอก | | | | มาตรฐานของเหล็กเส้น | | |
|----------------------------|--------|----------------------|----------------------|----------|----------------|----------------------|----------|-------|---------------------|-----------|-----|
| ชนิดเสาเข็ม | b (cm) | A (cm ²) | I (cm ⁴) | w (kg/m) | ขนาด (mm.) | A (cm ²) | fy (ksc) | | เกรด | รับแรงดึง | ksc |
| I22x22 | 22 | 386 | 19366 | 93 | RB6 | 6 | 0.283 | 2400 | SR24 | 2400 | ksc |
| I26x26 | 26 | 489 | 37037 | 117 | RB9 | 9 | 0.636 | 2400 | SD30 | 3000 | ksc |
| I30x30 | 30 | 660 | 66240 | 158 | PC Wire 4 | 4 | 0.1275 | 15000 | SD40 | 4000 | ksc |
| I35x35 | 35 | 880 | 121808 | 211 | PC Wire 5 | 5 | 0.1964 | 15000 | SD50 | 5000 | ksc |
| I40x40 | 40 | 1240 | 209823 | 298 | | | | | | | |

< BACK

[GO TO: 1.HOME PAGE](#)

บทที่ 4

การวิเคราะห์ตรวจสอบและประเมินผล

4.1 บทนำ

ในบทนี้ส่วนแรกจะเป็นผลการวิเคราะห์กำแพงกันดินแบบเสาเข็มอัดแรงรูปตัว ไอ ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D และโปรแกรม SAB 2000 ด้วยวิธีการจำลองดินด้วยสปริง โดยพื้นที่ตัวอย่างการคำนวณจะเป็นบริเวณดินเหนียวอ่อน เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ส่วนที่สองจะเป็นการเปรียบเทียบผลค่าโมเมนต์ตัดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมเชิงตัวเลข และวิธีการคำนวณด้วยมือ และส่วนที่ 3 จะเป็นการออกแบบเสริมกำลังให้กับเสาเข็มอัดแรงรูปตัว ไอ

4.2 ผลการวิเคราะห์กำแพงกันดินแบบเสาเข็มอัดแรงรูปตัว ไอ ด้วยโปรแกรม Plaxis 2D

จากรูปแบบกำแพงที่ทำการวิเคราะห์สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

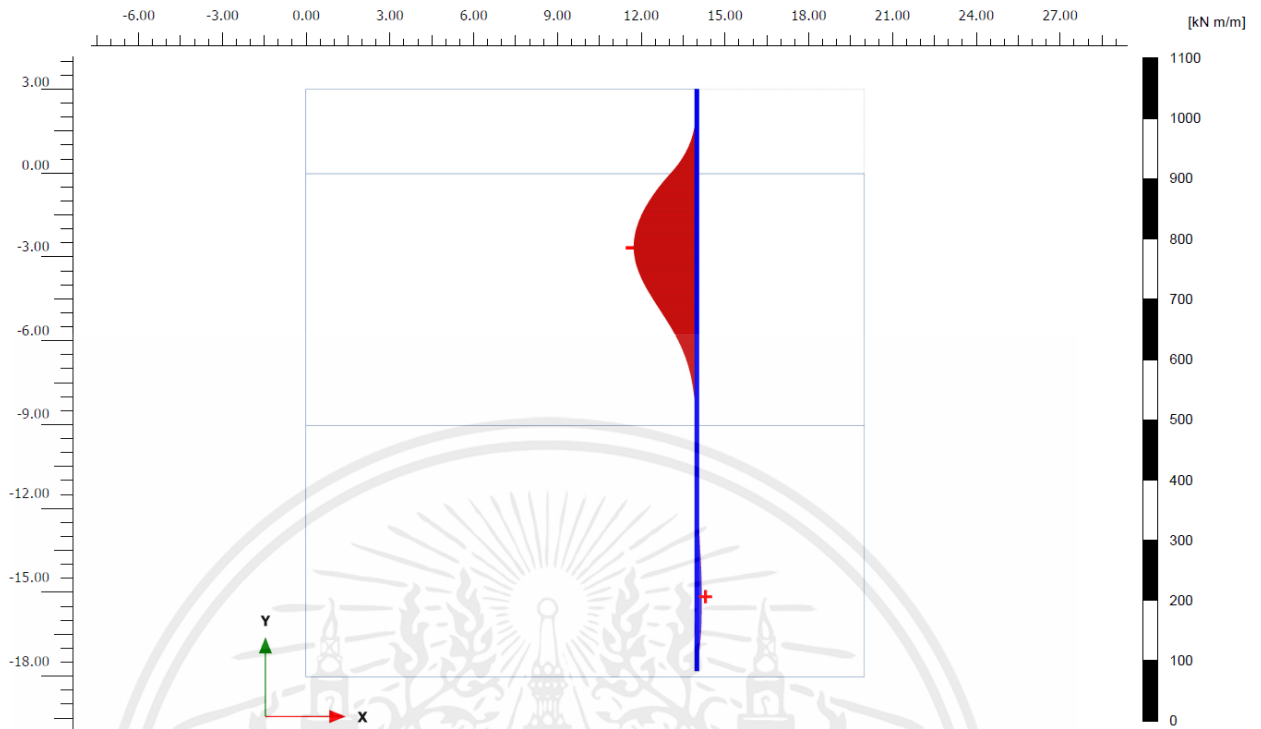
รูปแบบที่ 1 ความสูง 3.00 เมตร ฝังเสาเข็มลึก 17.5 เมตร. ระยะห่างเสาเข็ม 1.5 m.

รูปแบบที่ 2 กำแพงความสูง 2.75 เมตร ฝังเสาเข็มลึก 10 เมตร. ระยะห่างเสาเข็ม 1.5 m.

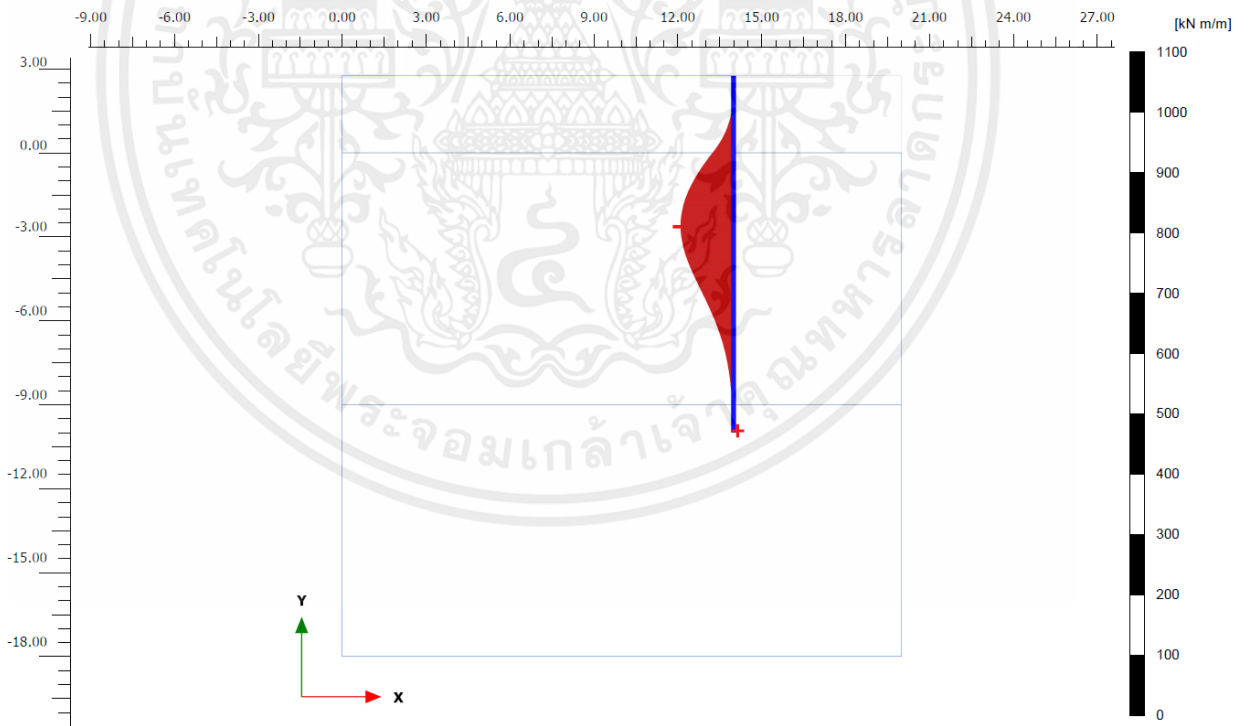
รูปแบบที่ 3 กำแพงความสูง 2.50 เมตร ฝังเสาเข็มลึก 8 เมตร. ระยะห่างเสาเข็ม 1.5 m.

รูปแบบที่ 4 กำแพงความสูง 2.25 เมตร ฝังเสาเข็มลึก 6 เมตร. ระยะห่างเสาเข็ม 1.5 m.

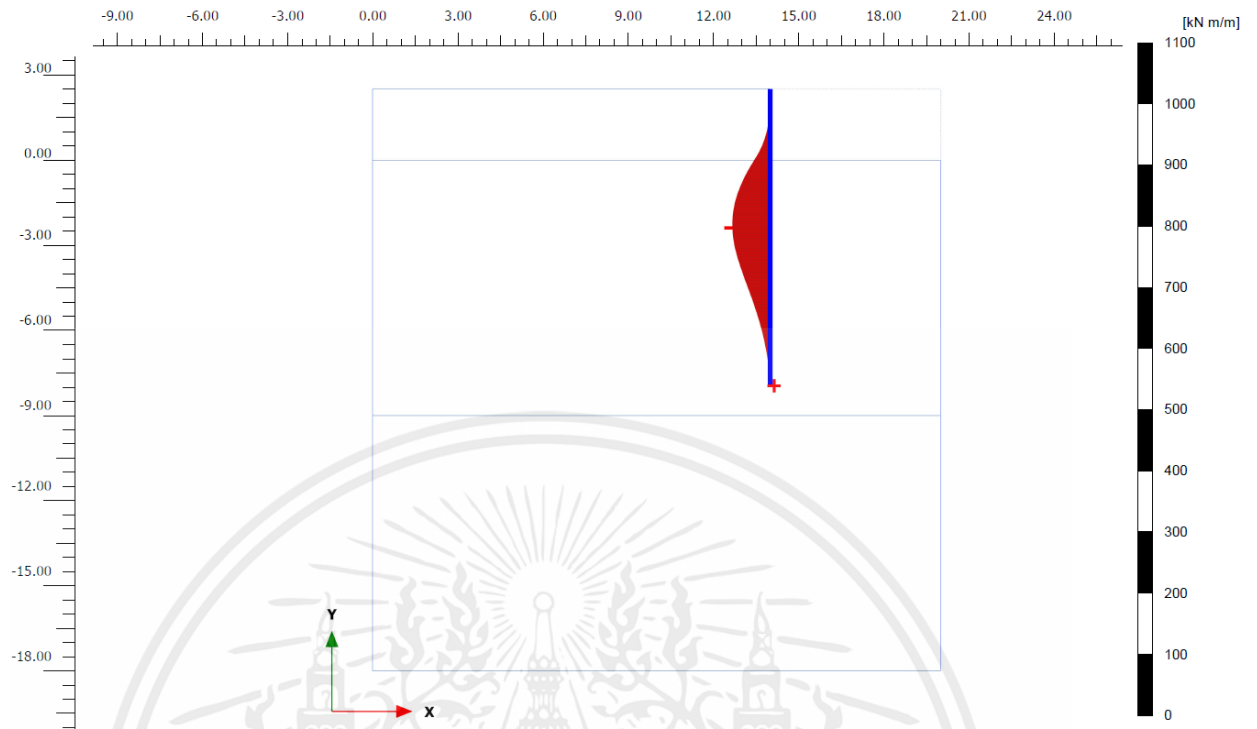
รูปแบบที่ 5 กำแพงความสูง 2 เมตร ฝังเสาเข็มลึก 4 เมตร. ระยะห่างเสาเข็ม 1.5 m.



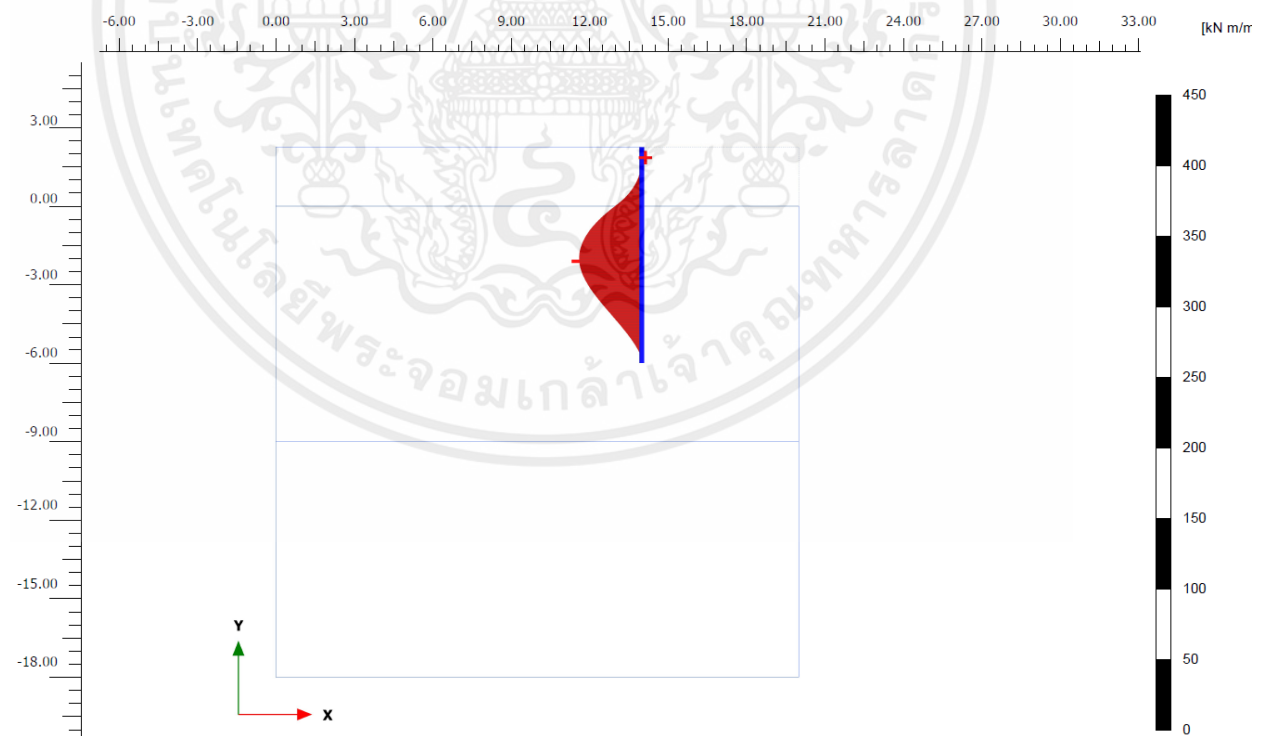
รูปที่ 4.1 แผนภาพโมเมนต์ดัด กำแพงแบบที่ 1



รูปที่ 4.2 แผนภาพโมเมนต์ดัด กำแพงแบบที่ 2

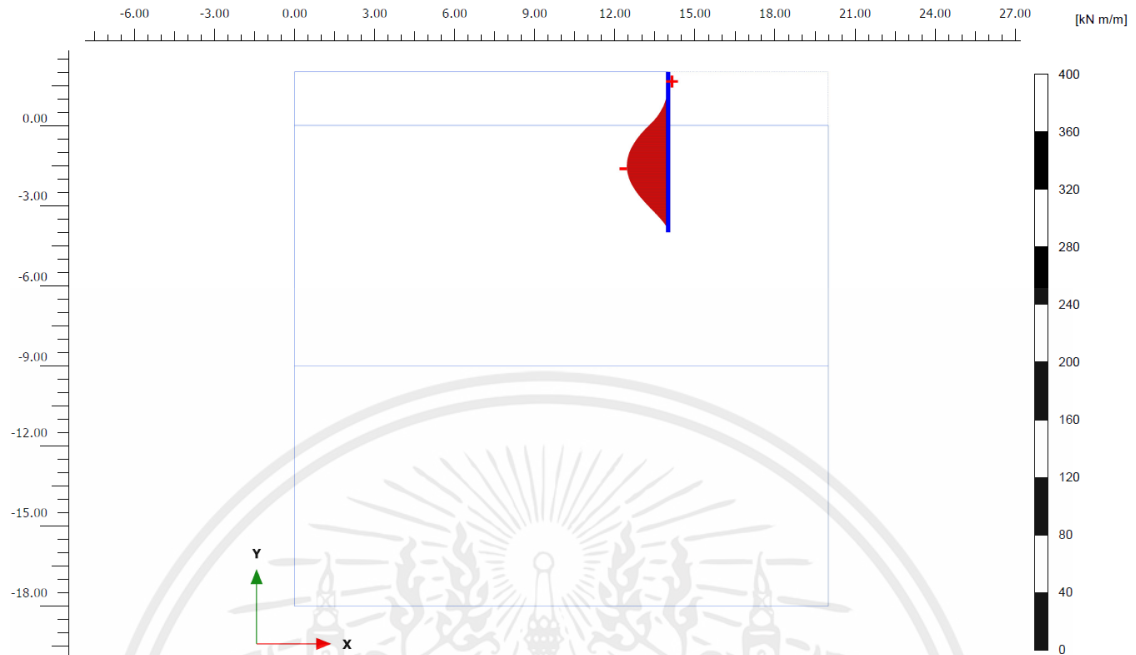


รูปที่ 4.3 แผนภาพโมเมนต์ดัด กำแพงแบบที่ 3



รูปที่ 4.4 แผนภาพโมเมนต์ดัด กำแพงแบบที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



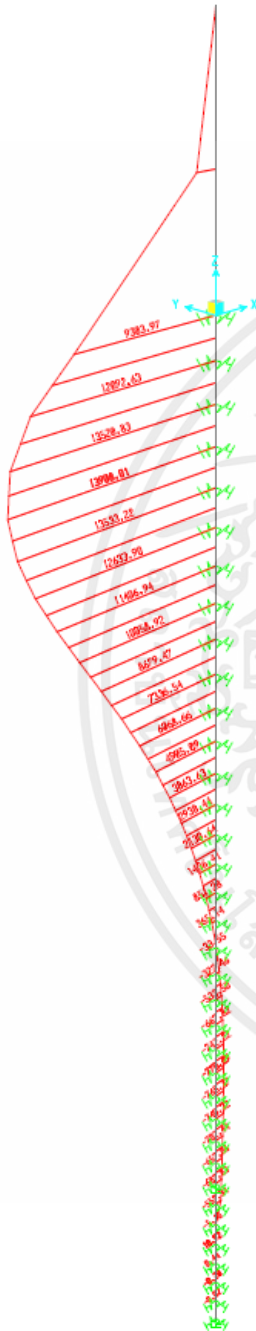
4.5 แผนภาพโมเมนต์ดัด กำแพงแบบที่ 5

จากการวิเคราะห์แบบจำลองกำแพงกันดินด้วยเสาเข็มรูปตัว ไอ จำนวน 5 แบบ ตามรูปที่ 4.1-4.5 ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ด้วยข้อมูลดินในพื้นที่เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ที่จะใช้เป็นข้อมูลดินต้นแบบตามตารางที่ 3.1 และข้อมูลเสาเข็ม ตามตารางที่ 3.2 สามารถสรุปผลลัพธ์การวิเคราะห์ได้ดังนี้

1. กำแพงแบบที่ 1 สูง 3.00 เมตร มีค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด 11,518.858 kg*m/m
2. กำแพงแบบที่ 2 สูง 2.75 เมตร มีค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด 9,634.047 kg*m/m
3. กำแพงแบบที่ 3 สูง 2.50 เมตร มีค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด 6,764.526 kg*m/m
4. กำแพงแบบที่ 4 สูง 2.25 เมตร มีค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด 4,867.482 kg*m/m
5. กำแพงแบบที่ 5 สูง 2.00 เมตร มีค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด 3,142.711 kg*m/m

4.3 ผลการวิเคราะห์กำแพงกันดินแบบเสาเข็มอัดแรงรูปตัว ไอ ด้วยวิธี Soil spring จากโปรแกรม SAB 2000

กำแพงแบบที่ 1 ความสูง 3.00 เมตร ฝังเสาเข็มลึก 18 เมตร. ระยะห่างเสาเข็ม 1.50 m.



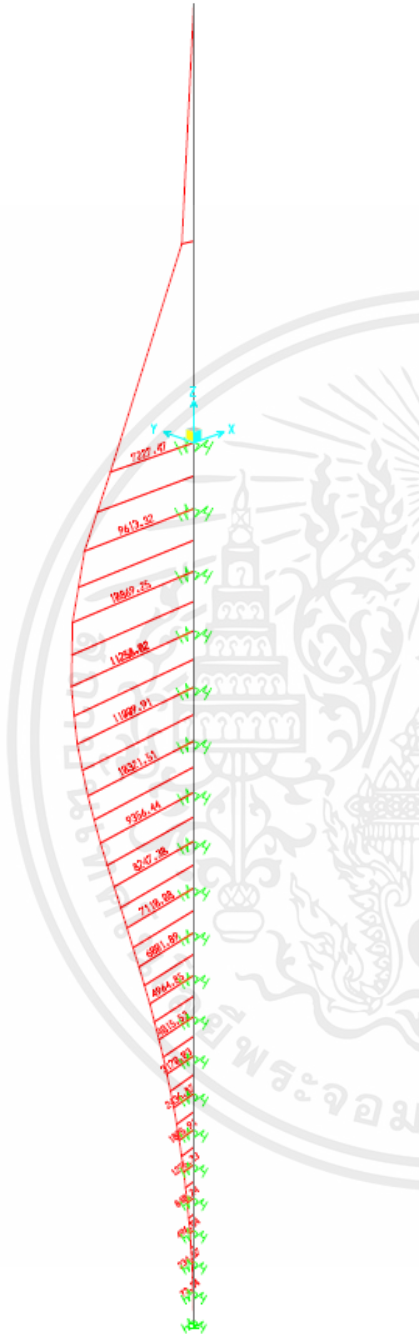
ตารางที่ 4.1 แสดงแรงโมเมนต์ตัดของกำแพงแบบที่ 1

| Frame | Station | OutputCase | M3 | Level |
|-------|---------|------------|----------|-------|
| Text | m | Text | Kgf-m | m |
| 34 | 1.5 | LIVE | 1273.47 | 1.5 |
| 34 | 3 | LIVE | 9303.97 | 0 |
| 4 | 0.5 | LIVE | -557.34 | -0.5 |
| 5 | 0.5 | LIVE | 12092.63 | -1 |
| 6 | 0.5 | LIVE | 13520.83 | -1.5 |
| 7 | 0.5 | LIVE | 13908.01 | -2 |
| 8 | 0.5 | LIVE | 13533.22 | -2.5 |
| 9 | 0.5 | LIVE | 12633.9 | -3 |
| 10 | 0.5 | LIVE | 11406.94 | -3.5 |
| 11 | 0.5 | LIVE | 10058.92 | -4 |
| 12 | 0.5 | LIVE | 8679.47 | -4.5 |
| 13 | 0.5 | LIVE | 7336.54 | -5 |
| 14 | 0.5 | LIVE | 6068.66 | -5.5 |
| 15 | 0.5 | LIVE | 4905.09 | -6 |
| 16 | 0.5 | LIVE | 3863.63 | -6.5 |
| 17 | 0.5 | LIVE | 2938.44 | -7 |
| 18 | 0.5 | LIVE | 2130.64 | -7.5 |
| 19 | 0.5 | LIVE | 1436.41 | -8 |
| 20 | 0.5 | LIVE | 851.28 | -8.5 |
| 21 | 0.5 | LIVE | 365.14 | -9 |

รูปที่ 4.6 แสดงแรงโมเมนต์ตัดของกำแพงแบบที่ 1

รูปแบบที่ 2 กำแพงความสูง 2.75 เมตร ฝั่งเสาเข็มลึก 10.00 เมตร. ระยะห่างเสาเข็ม 1.50 m.

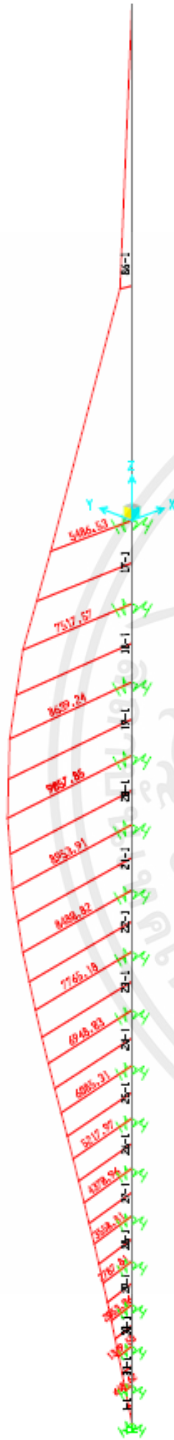
ตารางที่ 4.2 แสดงแรงโมเมนต์ดัดของกำแพงแบบที่ 2



| Frame | Station | OutputCase | M3 | Level |
|-------|---------|------------|------------|-------|
| Text | m | Text | Kgf-m | m |
| 1 | 1.375 | LIVE | 996.28 | 1.375 |
| 1 | 2.75 | LIVE | 7227.47 | 0 |
| 4 | 0.5 | LIVE | 73.34 | -0.5 |
| 5 | 0.5 | LIVE | 9613.32 | -1 |
| 6 | 0.5 | LIVE | 10869.25 | -1.5 |
| 7 | 0.5 | LIVE | 11258.02 | -2 |
| 8 | 0.5 | LIVE | 11009.91 | -2.5 |
| 9 | 0.5 | LIVE | 10321.51 | -3 |
| 10 | 0.5 | LIVE | 9356.44 | -3.5 |
| 11 | 0.5 | LIVE | 8247.38 | -4 |
| 12 | 0.5 | LIVE | 7110.08 | -4.5 |
| 13 | 0.5 | LIVE | 6001.89 | -5 |
| 14 | 0.5 | LIVE | 4964.85 | -5.5 |
| 15 | 0.5 | LIVE | 4015.53 | -6 |
| 16 | 0.5 | LIVE | 3170.03 | -6.5 |
| 17 | 0.5 | LIVE | 2436.87 | -7 |
| 18 | 0.5 | LIVE | 1805.91 | -7.5 |
| 19 | 0.5 | LIVE | 1275.33 | -8 |
| 20 | 0.5 | LIVE | 840.24 | -8.5 |
| 21 | 0.5 | LIVE | 496.04 | -9 |
| 22 | 0.5 | LIVE | 234.07 | -9.5 |
| 23 | 0.5 | LIVE | -7.112E-12 | -10 |

รูปที่ 4.7 แผนภาพโมเมนต์ดัดของกำแพงแบบที่ 2

รูปแบบที่ 3 กำแพงความสูง 2.50 เมตร ฝั่งเสาเข็มลึก 8.00 เมตร. ระยะห่างเสาเข็ม 1.50 m.



รูปแบบที่ 4 กำแพงความสูง 2.25 เมตร ฝั่งเสาเข็มลึก 6.00 เมตร. ระยะห่างเสาเข็ม 1.50 m.

ตารางที่ 4.4 แสดงแรงโมเมนต์ตัดของกำแพงแบบที่ 4

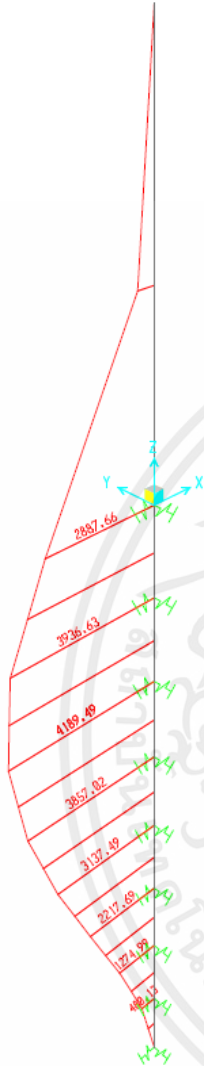
| Frame | Station | OutputCase | M3 | Level |
|-------|---------|------------|------------|-------|
| Text | m | Text | Kgf-m | m |
| 1 | 1.125 | LIVE | 568.31 | 1.125 |
| 1 | 2.25 | LIVE | 4049.39 | 0 |
| 3 | 0.5 | LIVE | 5592.75 | -0.5 |
| 4 | 0.5 | LIVE | 6297.76 | -1 |
| 5 | 0.5 | LIVE | 6355.18 | -1.5 |
| 6 | 0.5 | LIVE | 5936.96 | -2 |
| 7 | 0.5 | LIVE | 5196.08 | -2.5 |
| 8 | 0.5 | LIVE | 4267.72 | -3 |
| 9 | 0.5 | LIVE | 3290.65 | -3.5 |
| 10 | 0.5 | LIVE | 2341.56 | -4 |
| 11 | 0.5 | LIVE | 1490.06 | -4.5 |
| 12 | 0.5 | LIVE | 780.45 | -5 |
| 13 | 0.5 | LIVE | 266.37 | -5.5 |
| 14 | 0.5 | LIVE | -1.241E-10 | -6 |

รูปที่ 4.9 แผนภาพโมเมนต์ตัดของกำแพงแบบที่ 4

รูปแบบที่ 5 กำแพงความสูง 2.00 เมตร ฝั่งเสาเข็มลึก 4.00 เมตร. ระยะห่างเสาเข็ม 1.50 m.

ตารางที่ 4.5 แสดงแรงโมเมนต์ตัดของกำแพงแบบที่ 5

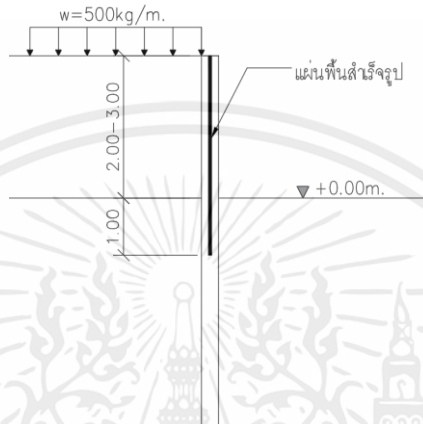
| Frame | Station | OutputCase | M3 | Level |
|-------|---------|------------|------------|-------|
| Text | m | Text | Kgf-m | m |
| 159 | 0 | LIVE2 | 2.096E-11 | 2 |
| 159 | 1 | LIVE2 | 410.06 | 1.5 |
| 159 | 2 | LIVE2 | 2887.66 | 0 |
| 161 | 0.5 | LIVE2 | 3936.63 | -0.5 |
| 162 | 0.5 | LIVE2 | 4189.49 | -1 |
| 163 | 0.5 | LIVE2 | 3857.02 | -1.5 |
| 164 | 0.5 | LIVE2 | 3137.49 | -2 |
| 165 | 0.5 | LIVE2 | 2217.69 | -2.5 |
| 166 | 0.5 | LIVE2 | 1274.99 | -3 |
| 167 | 0.5 | LIVE2 | 480.13 | -3.5 |
| 168 | 0.5 | LIVE2 | -6.655E-11 | -4 |



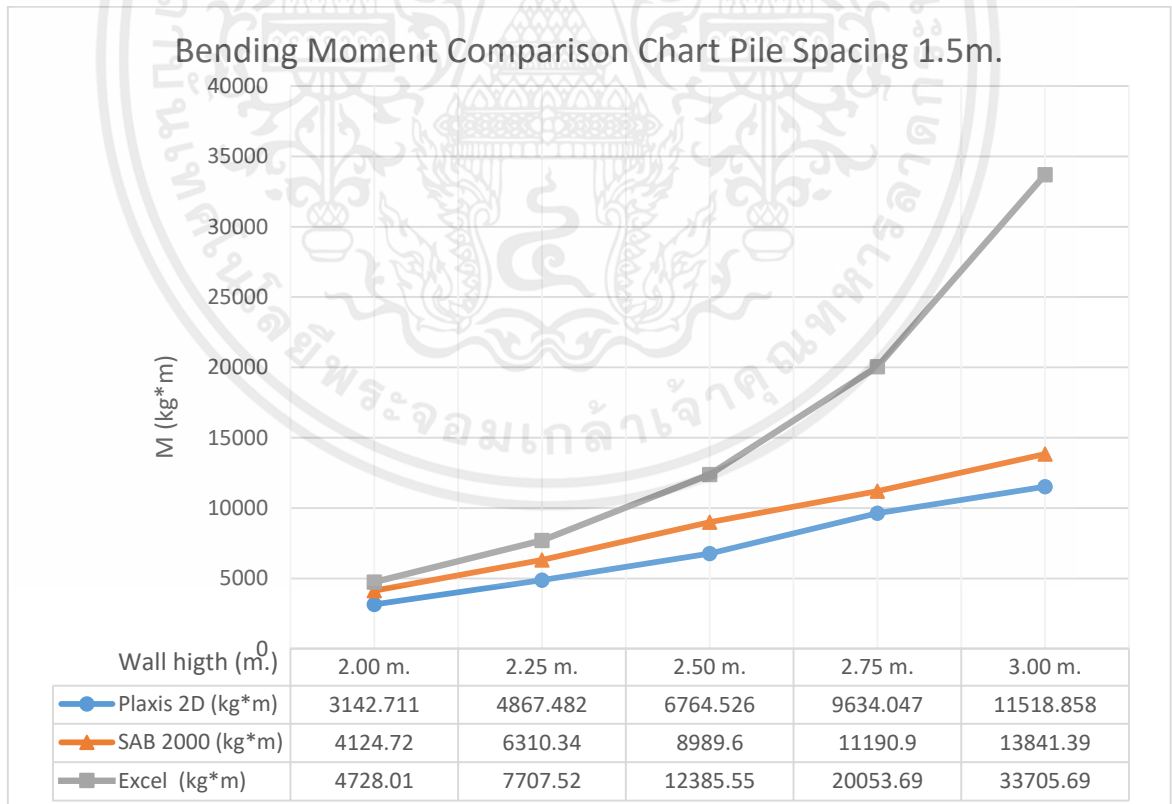
รูปที่ 4.10 แผนภาพโมเมนต์ตัดของกำแพงแบบที่ 5

4.4 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดที่ได้จากโปรแกรมคำนวณเชิงตัวเลขและจากการคำนวณด้วยมือ (Excel)

จากการคำนวณหาค่าโมเมนต์ที่กระทำกับเสาเข็มอัดแรงรูปตัว ไอ ด้วยโปรแกรมคำนวณเชิงตัวเลขเช่น Plaxis 2D วิธีจำลองดินด้วยสปริง (Soil Spring) จากโปรแกรม SAB 2000 และวิธีคำนวณด้วยมือ (Microsoft Excel) นั้นสามารถเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดได้ตามกราฟดังนี้



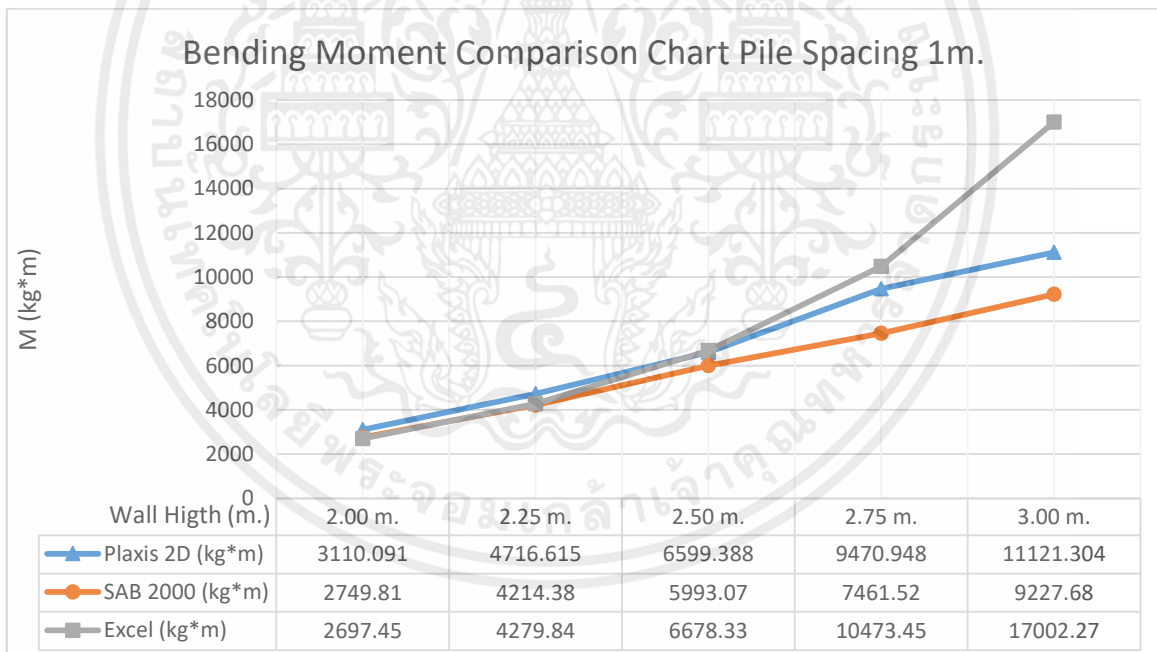
รูปที่ 4.11 โมเดลโครงสร้างกำแพงใน Excel



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความสูงของกำแพงที่ระยะห่างเสาเข็ม 1.50 เมตร

จากกราฟได้แสดงค่าโมเมนต์ดัดที่ได้จากคำนวณด้วยโปรแกรมเชิงตัวเลข จากการคำนวณด้วยมือตามความสูงของกำแพง ซึ่งได้แบ่งรูปแบบกำแพงออกเป็น กำแพงสูง 2.00 เมตร , 2.25 เมตร , 2.50 เมตร , 2.75 เมตร , 3.00 เมตร โดยทุกทำ ความสูงของกำแพงจะมีระยะห่างของเสาเข็มเท่ากับ 1.50 เมตร ข้อมูลดินที่ใช้ในโปรแกรม Excel มีดังนี้ หน่วยน้ำหนักของดิน 1944.90 kg/m^3 $c = 1950 \text{ kg/m}^2$ $\phi = 35.8$ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลลัพธ์ได้ดังนี้

จากค่าโมเมนต์ดัดที่คำนวณได้จากโปรแกรม Plaxis 2D จะมีค่าสอดคล้องกับค่าโมเมนต์ดัดจากโปรแกรม SAB 2000 ซึ่งจะมีค่าต่างกันอยู่ที่ 20.42% โดยเฉลี่ย ส่วนค่าโมเมนต์ดัดที่ได้จากการคำนวณด้วย Excel นั้นจะเห็นได้ว่ามีค่าที่สูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามความสูงของกำแพง โดยความสูงของกำแพงที่ 2.00 ถึง 2.25 เมตร นั้นยังมีค่าโมเมนต์ดัดที่ใกล้เคียงกันอยู่ แต่ความสูงตั้งแต่ 2.50 ถึง 3.00 เมตร นั้นจะไม่สอดคล้องกันค่าที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์เชิงตัวเลข เนื่องจากเมื่อกำแพงมีความสูงเพื่อขึ้นและระยะห่างของเสาเข็มที่มากจะทำให้แรงดันดินที่มากกระทำกับตัวกำแพงจะมีค่าที่สูงขึ้นตาม จึงทำให้ค่าโมเมนต์ดัดที่ได้ก็จะมีค่าที่สูงขึ้นมาก



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความสูงของกำแพงที่ระยะห่างเสาเข็ม 1.00 เมตร

จากกราฟได้แสดงค่าโมเมนต์ดัดที่ได้จากคำนวณด้วยโปรแกรมเชิงตัวเลข และ จากการคำนวณด้วยมือตามความสูงของกำแพง ซึ่งได้แบ่งรูปแบบกำแพงออกเป็น กำแพงสูง 2.00 เมตร , 2.25 เมตร , 2.50 เมตร , 2.75 เมตร , 3.00 เมตร โดยทุกทำ ความสูงของกำแพงจะมีระยะห่างของเสาเข็มเท่ากับ 1.00

เมตร ข้อมูลดินที่ใช้ในโปรแกรม Excel มีดังนี้ หน่วยน้ำหนักของดิน 1944.90 kg/m^3 $C = 1950 \text{ kg/m}^2$
 $\phi = 35.8$ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

จากค่าโมเมนต์ดัดที่คำนวณได้จากโปรแกรม Plaxis 2D จะมีค่าสอดคล้องกับค่าโมเมนต์ดัดจากโปรแกรม SAB 2000 ซึ่งจะมีค่าต่างกันอยู่ที่ 13.93 % โดยเฉลี่ย ส่วนค่าโมเมนต์ดัดที่ได้จากการคำนวณด้วย Excel นั้นจะเห็นได้ว่ามีค่าที่สูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามความสูงของกำแพง โดยความสูงของกำแพงที่ 2.00 ถึง 2.75 เมตร นั้นยังมีค่าโมเมนต์ดัดที่ใกล้เคียงกันอยู่ แต่ความสูงของกำแพงที่ 3.00 เมตร นั้นจะไม่สอดคล้องกันค่าที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์เชิงตัวเลข เนื่องจากเมื่อกำแพงมีความสูงเพื่อขึ้นก็จะทำให้แรงดันดินที่มากกระทำกับตัวกำแพงมีค่าที่สูงขึ้นตาม จึงทำให้ค่าโมเมนต์ดัดที่ได้ก็จะมีค่าที่สูงขึ้นมาก

4.5 การออกแบบเสริมกำลังเสาเข็มอัดแรงรูปตัว ไอ

การออกแบบเสริมกำลังให้กับเสาเข็มนั้นจะใช้วิธีการเสริมกำลังให้กับเสาเข็มด้วยเหล็กเสริมไม่อัดแรง จำพวก เหล็กเส้นข้ออ้อย SD30 SD40 มาเสริมกำลัง ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณเหล็กเสริมไม่อัดแรงด้วยวิธีการออกแบบคอนกรีตอัดแรง ขั้นตอนการคำนวณสามารถจำแนกได้ดังนี้

1. คำนวณหาโมเมนต์ที่หน้าตัดของเสาเข็มที่มีเหล็กเสริมอัดแรงสามารถรับได้ด้วยวิธีการออกแบบด้วยวิธีการออกแบบสำหรับกำลังประลัยของหน้าตัดตามหัวข้อที่ 2.5.1.11 เมื่อได้ค่ากำลังโมเมนต์ของหน้าตัดเสาเข็มมาแล้ว ก็จะนำมาเทียบกับค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นเมื่อกำแพงรับแรงดันดินด้านข้าง
2. คำนวณหาปริมาณเหล็กเสริมไม่อัดแรงจากวิธี การเพิ่มเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึงเพียงอย่างเดียวตามหัวข้อที่ 2.5.1.12 และถ้าคำนวณออกมาแล้วปริมาณเหล็กเสริมนั้นว่าเกินสมดุลแล้วทำให้เกิดการวิบัติแบบแรงอัด (Compression failure) ตามสมการที่ 2.5.21 ทำให้ต้องเพิ่มเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงอัดเข้าไปด้วย ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงอัดด้วยวิธี การเพิ่มเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึงและแรงอัดตามหัวข้อที่ 2.5.1.13
3. เมื่อได้ปริมาณเหล็กเสริมแล้วก็จะตรวจสอบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวคอนกรีตด้วยวิธี การออกแบบโดยทฤษฎีอีลาสติก ตามหัวข้อที่ 2.5.1.10

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการการพิเศษฉบับนี้ศึกษาเรื่องการเสริมกำลังให้กับเสาเข็มเพื่อรับแรงดันดินด้านข้าง โดยมุ่งเน้นให้เสาเข็มนั้นสามารถรับแรงดันดินด้านข้างได้โดยไม่เกิดการวิบัติจากเสถียรภาพภายในของตัวเสาเข็มเอง โดยใช้ข้อมูลดินต้นแบบในบริเวณเขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร มาใช้ในการหาแรงดันดินที่กระทำกับเสาเข็มเพื่อนำแรงภายในเสาเข็มไปใช้ในการออกแบบเสริมกำลัง และสร้างโปรแกรมออกแบบเสริมกำลังให้กับเสาเข็มต่อไป ผลของการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การศึกษาพฤติกรรมดินที่กระทำกับเสาเข็มนั้นในหัวข้อการวิจัยนี้จะพิจารณาที่โมเมนต์ดัดที่เกิดกับตัวเสาเข็มเป็นหลัก ซึ่งจากการวิเคราะห์หาโมเมนต์ดัดที่กระทำกับเสาเข็มในโปรแกรมเชิงตัวเลขทั้ง Plaxis 2D และ SAB 2000 นั้น จะได้ค่าโมเมนต์ดัดที่สอดคล้องกันตามรูปที่ 4.13 และ 4.14 ส่วนค่าโมเมนต์ที่คำนวณได้จาก โปรแกรม Microsoft Excel นั้น ค่าโมเมนต์ดัดจะมีค่าที่สูงขึ้นตามความสูงของกำแพง และพบค่าโมเมนต์ดัดไม่สอดคล้องเมื่อความสูงของกำแพงมีค่าที่สูงขึ้น
2. จากการวิเคราะห์หาโมเมนต์ดัดจากการคำนวณด้วยมือและจากโปรแกรมคำนวณเชิงตัวเลขตามรูปที่ 4.12 และ 4.13 เพื่อเปรียบเทียบกับกันนั้น พบว่าค่าโมเมนต์ที่ได้จากการวิเคราะห์ที่ระยะห่างของเสาเข็มที่ 1.50 เมตร นั้นจะมีค่าโมเมนต์ดัดสอดคล้องกัน ตั้งแต่ความสูงที่ 2.00 เมตร ถึง 2.25 เมตร ส่วนความสูงที่ 2.50 เมตร ถึง 3.00 เมตร โดยได้สอดคล้องกับดินลงไปใต้ระดับดินเดิม 1.00 เมตร นั้นพบว่าค่าโมเมนต์จะมีค่าที่สูงจะไม่สอดคล้องกัน และกำแพงที่มีระยะห่างเสาเข็ม 1.00 เมตรพบว่าจะมีค่าโมเมนต์ดัดสอดคล้องกัน ตั้งแต่ความสูงที่ 2.00 เมตร ถึง 2.75 เมตร ส่วนความสูงที่ 3.00 เมตร นั้นพบว่าค่าโมเมนต์จะมีค่าที่สูงจะไม่สอดคล้องกัน
3. จากการเสริมกำลังให้กับเสาเข็มอัดแรงรูปตัว ไอ ด้วยเหล็กเสริมไม่อัดแรงนั้นทำให้เสาเข็มสามารถรับโมเมนต์ดัดที่เกิดจากแรงดันดินด้านข้างได้สูงขึ้นได้โดยไม่เกิดการวิบัติจากเสถียรภาพภายใน

4. จากการสร้างโปรแกรมออกแบบเสริมกำลังให้กับเสาเข็มที่จัดทำขึ้นมา นั้น ค่าความสูงของกำแพงที่ระยะห่างของเสาเข็มที่ 1.00 เมตรนั้น ความสูงไม่ความเกิน 2.75 เมตร และค่าความสูงของกำแพงที่ระยะห่างของเสาเข็มที่ 1.50 เมตรนั้น ความสูงไม่ความเกิน 2.25 เมตร ถ้าจะใช้ความสูงนอกเหนือจากที่ระบุ ผู้จัดทำจึงเสนอแนะให้ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับโปรแกรมคำนวณเชิงตัวเลขอื่นๆด้วย เช่น Plaxis 2D หรือ SAB 2000 เป็นต้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากโปรแกรมออกแบบเสริมกำลังให้กับเสาเข็มที่จัดทำขึ้นมา นั้น ค่าความสูงของกำแพงที่ระยะห่างของเสาเข็มที่ 1.00 เมตรนั้น ความสูงไม่ความเกิน 2.75 เมตร และค่าความสูงของกำแพงที่ระยะห่างของเสาเข็มที่ 1.50 เมตรนั้น ความสูงไม่ความเกิน 2.25 เมตร ถ้าจะใช้ความสูงนอกเหนือจากที่ระบุ ผู้จัดทำจึงเสนอแนะให้ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับโปรแกรมคำนวณเชิงตัวเลขอื่นๆด้วย เช่น Plaxis 2D หรือ SAB 2000 เป็นต้น

2. การจัดทำโปรแกรมออกแบบเสริมกำลังให้กับเสาเข็มนี้สามารถนำไปพัฒนาเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปได้ในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] Braja M. Das , Nagaratnam Sivakugan Principles of Foundation Engineering Ninth Edition ,Cengage 2017 page 643
- [2] นเรศ พันธราธร การออกแบบคอนกรีตอัดแรง พิมพ์ครั้งที่ 2 มกราคม/2541 หน้า 7-16
- [3] นเรศ พันธราธร การออกแบบคอนกรีตอัดแรง พิมพ์ครั้งที่ 2 มกราคม/2541 หน้า 43-47
- [4] นเรศ พันธราธร การออกแบบคอนกรีตอัดแรง พิมพ์ครั้งที่ 2 มกราคม/2541 หน้า 49
- [5] นเรศ พันธราธร การออกแบบคอนกรีตอัดแรง พิมพ์ครั้งที่ 2 มกราคม/2541 หน้า 51-52,60-61
- [6] นเรศ พันธราธร การออกแบบคอนกรีตอัดแรง พิมพ์ครั้งที่ 2 มกราคม/2541 หน้า 71-74
- [7] นเรศ พันธราธร การออกแบบคอนกรีตอัดแรง พิมพ์ครั้งที่ 2 มกราคม/2541 หน้า 81-82
- [8] นเรศ พันธราธร การออกแบบคอนกรีตอัดแรง พิมพ์ครั้งที่ 2 มกราคม/2541 หน้า 87-89
- [9] นเรศ พันธราธร การออกแบบคอนกรีตอัดแรง พิมพ์ครั้งที่ 2 มกราคม/2541 หน้า 87-89
- [10] นเรศ พันธราธร การออกแบบคอนกรีตอัดแรง พิมพ์ครั้งที่ 2 มกราคม/2541 หน้า 91-93
- [11] นเรศ พันธราธร การออกแบบคอนกรีตอัดแรง พิมพ์ครั้งที่ 2 มกราคม/2541 หน้า 98-105
- [12] นเรศ พันธราธร การออกแบบคอนกรีตอัดแรง พิมพ์ครั้งที่ 2 มกราคม/2541 หน้า 409-413
- [13] นเรศ พันธราธร การออกแบบคอนกรีตอัดแรง พิมพ์ครั้งที่ 2 มกราคม/2541 หน้า 178-185
- [14] Braja M. Das , Nagaratnam Sivakugan Principles of Foundation Engineering Ninth Edition ,Cengage 2017 page 768-770
- [15] H.G. Poulos , E.H. Davis Pile Foundation Analysis And Design, N.P. (1980) page 174
- [16] ชาย แสงไสว รายการคำนวณ เชื้อกันดินพังก ม.ป.ท. (ม.ป.ป.) หน้า 21
- [17] <https://williams-works.com/prestressed-concrete-101/>
- [18] Braja M. Das , Nagaratnam Sivakugan Principles of Foundation Engineering Ninth Edition ,Cengage 2017 page 40-41
- [19] Braja M. Das , Nagaratnam Sivakugan Principles of Foundation Engineering Ninth Edition ,Cengage 2017 page 91
- [20] พรพจน์ ต้นเส็ง วิศวกรรมฐานราก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 1/2554 หน้า 19-20

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [21] ศลิษา ไชยพุทธ เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพชั้นดิน พิมพ์ครั้งที่ 1 2561 หน้า 9-27 ถึง 9-28
- [22] มอก 396-2549 ยกเลิกและกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเสาเข็มคอนกรีตและเสาเข็มอัดแรง วันที่ 6 พฤศจิกายน พ.ศ. 2549
- [23] Braja M. Das , Nagaratnam Sivakugan Principles of Foundation Engineering Ninth Edition ,Cengage 2017 page 695
- [24] Braja M. Das , Nagaratnam Sivakugan Principles of Foundation Engineering Ninth Edition ,Cengage 2017 page 753
- [25] Braja M. Das , Nagaratnam Sivakugan Principles of Foundation Engineering Ninth Edition ,Cengage 2017 page 803
- [26] https://www.thaibauer.com/en/construction_methods/diaphragm_walls/
- [27] บริษัท ปทุมธานีคอนกรีต จำกัด
- [28] W SOIL TESTING CO.,LTD. (BORING LOG , SUMMARY OF TEST RESLUTS แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร)

ภาคผนวก (ต่อ)



การเจาะสำรวจสภาพชั้นดิน (Soil Exploration)

ภาคผนวก ข

| BORING LOG | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----------|--------------|--------|------------|---|---------------------|----|---|----|-------|----|----|-------------------------|---|---|--|---|---|
| PROJECT : งานปรับปรุงโครงสร้างถนนบาทวิศิษฏ์ (Atankon Lab) : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง LOCATION : แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร | | | | | BORING NO : BH-1 DEPTH (m) : 24.45 m COORD. N : 13.727483 E : 100.773121 | | | ELEV. (m) : - GWL (m) : - DATE STARTED : 04/25/65 DATE FINISHED : 05/25/65 | | | | | | | | | | |
| SOIL DESCRIPTION | DEPTH (m) | GEOLOGIC LOG | METHOD | SAMPLE NO. | RECOVER (cm) | SPT-N VALUE (blows) | | | | W (%) | | | Q (kg/cm ²) | | | TOTAL UNIT WEIGHT (kg/m ³) | | |
| | | | | | | 20 | 40 | 60 | 80 | 20 | 40 | 60 | 80 | 2 | 4 | | 6 | 8 |
| 16.95-24.45 m. Clayey Sand, Loose to Very Dense, Grayish Brown, (SC) | 21 | WO | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 22 | WO | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 23 | SS | | 5 | | | | | | | | | | | | | | |
| | 24 | WO | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 25 | SS | | 6 | | | | | | | | | | | | | | |
| | 26 | WO | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 27 | SS | | 7 | | | | | | | | | | | | | | |
| END of Hole at 24.45 m. | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 31 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 32 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 33 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 34 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 35 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 36 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 37 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 38 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 39 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 40 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 41 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 42 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 43 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 44 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

W SOILTESTING CO.,LTD.
 164/79 ม.6 ต.บางกรวย อ.บางกรวย จ.นนทบุรี 11130
 โทรศัพท์ 092-275-0896, 087-9105-871 Email: w.soiltest@gmail.com

ข-3

BORING LOG แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก (ต่อ)

W.SOLTESTING CO.,LTD.
 164/79 จ.6 บางนาเหนือ อ.บางนา กทม.11130
 โทรศัพท์ 092-2750896, 081-9105871 Email: w.soltesting@gmail.com

2

| SUMMARY OF TEST RESULTS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|---------------------|-------|--------------|-----------------------|-------|-------|-------|--------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------|---------------|-------------------------------|---------------|-------------|--------|
| Project งานเป็นรูปถ่ายและทดสอบพันพีซีกรอม (Fabrication Lab) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Location พระโขนงตะวันออก เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร | | | | | | | | | | | | Borehole No. | | BH-1 | | | | | |
| UTM E : 100.773121 | | | | | | Ground Water | | | | | | - | | | | | | | |
| N : 13.727463 | | | | | | Elevation | | | | | | - | | | | | | | |
| Total Depth (m.) 24.45 m. | | | | | | Date. | | | | | | 6/09/2565 | | | | | | | |
| Sample | Depth | | Wn | Atterberg Limit (%) | | | Gradation (% Passing) | | | | | qu t _m ² | γ _i g/cm ³ | SPT-N blow/s | Soil Color | Consistency or Rel.Density | Soil Group | Symbol | |
| | Form | To | | LL | PL | PI | No.4 | No.10 | No.40 | No.60 | No.100 | | | | | | | | No.200 |
| S61 | 1.00 | 1.45 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| S71 | 2.00 | 2.45 | 67.65 | 62.96 | 24.55 | 38.43 | - | - | - | - | - | 3.90 | 1.52 | - | Gray | Soft | Fat Clay | CH | |
| S72 | 3.00 | 3.45 | 62.18 | - | - | - | - | - | - | - | - | 2.80 | 1.45 | - | Gray | Soft | Fat Clay | CH | |
| S73 | 4.50 | 4.95 | 68.87 | 67.23 | 26.49 | 40.74 | - | - | - | - | - | 2.45 | 1.38 | - | Gray | Very Soft | Fat Clay | CH | |
| S74 | 6.00 | 6.45 | 90.59 | - | - | - | - | - | - | - | - | 2.18 | 1.39 | - | Gray | Very Soft | Fat Clay | CH | |
| S75 | 7.50 | 7.95 | 86.75 | - | - | - | - | - | - | - | - | 2.24 | 1.41 | - | Gray | Very Soft | Fat Clay | CH | |
| S76 | 9.00 | 9.45 | 90.69 | 69.63 | 26.58 | 43.25 | - | - | - | - | - | 3.12 | 1.40 | - | Gray | Soft | Fat Clay | CH | |
| S77 | 10.50 | 10.95 | 65.11 | - | - | - | - | - | - | - | - | 3.29 | 1.42 | - | Gray | Soft | Fat Clay | CH | |
| S78 | 12.00 | 12.45 | 61.69 | 66.63 | 24.58 | 44.05 | - | - | - | - | - | 2.75 | 1.41 | - | Gray | Very Soft | Fat Clay | CH | |
| S79 | 13.50 | 13.95 | 90.95 | - | - | - | - | - | - | - | - | 2.91 | 1.45 | - | Gray | Soft | Fat Clay | CH | |
| S710 | 15.00 | 15.45 | 78.19 | - | - | - | - | - | - | - | - | 3.58 | 1.46 | - | Gray | Soft | Fat Clay | CH | |
| S82 | 16.50 | 16.95 | 72.56 | - | - | - | - | - | - | - | - | NP | 1.49 | 3 | Gray | Soft | Fat Clay | CH | |
| S83 | 18.00 | 18.45 | 25.39 | - | - | - | 100.00 | 85.58 | 26.28 | 9.50 | 2.87 | 0.68 | NP | 1.80 | 9 | Grayish Brown | Loose | Clayey Sand | SC |
| S84 | 19.50 | 19.95 | 21.70 | - | - | - | - | - | - | - | - | NP | 1.93 | 37 | Grayish Brown | Dense | Clayey Sand | SC | |
| S85 | 21.00 | 21.45 | 22.86 | - | - | - | 100.00 | 71.79 | 18.18 | 5.92 | 1.61 | 0.46 | NP | 1.93 | 29 | Grayish Brown | Medium Dense | Clayey Sand | SC |
| S86 | 22.50 | 22.95 | 23.50 | - | - | - | 100.00 | 79.69 | 22.23 | 5.21 | 2.24 | 0.57 | NP | 2.00 | 82 | Grayish Brown | Very Dense | Clayey Sand | SC |
| S87 | 24.00 | 24.45 | 21.00 | - | - | - | - | - | - | - | - | NP | 2.00 | 80 | Grayish Brown | Very Dense | Clayey Sand | SC | |



การสำรวจทางธรณีวิทยา (Soil Exploration)

ภาคผนวก

SUMMARY OF TEST RESULTS แวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ-นามสกุล** นายจिरายุทธ พลุคำ
- วัน เดือน ปีเกิด** 4 มิถุนายน 2541
- ที่อยู่** 232 หมู่ที่ 8 ตำบลจำปาหวาย อำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา 56000
- โทร** 09-9141-4224
- ประวัติการศึกษา**
- พ.ศ.2556 จบการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนบ้านจำปาหวาย
 - พ.ศ.2559 จบการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนพะเยาพิทยาคม
 - พ.ศ.2562 จบการศึกษาระดับหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) วิทยาลัยเทคนิคพะเยา
 - ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (ต่อเนื่อง) ชั้นปีที่ 3
- Email** jirayut.pk241536@gmail.com

ประวัติผู้เขียน

| | |
|------------------|---|
| ชื่อ-นามสกุล | นายชินวัฒน์ รัชตภูษิต |
| วัน เดือน ปีเกิด | 25 กุมภาพันธ์ 2543 |
| ที่อยู่ | 514/3-4 ถนนหลักเมือง ตำบลในเมือง อำเภอเมืองสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์ 32000 |
| โทร | 09-5702-1118 |
| ประวัติการศึกษา | <ul style="list-style-type: none"> - พ.ศ.2557 จบการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนบ้านตะตังไถ่ - พ.ศ.2560 จบการศึกษาระดับหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) วิทยาลัยเทคนิคสุรินทร์ - พ.ศ.2562 จบการศึกษาระดับหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) วิทยาลัยเทคนิคสุรินทร์ - ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (ต่อเนื่อง) ชั้นปีที่ 3 |
| Email | chinnapatnutrs@gmail.com |

ประวัติผู้เขียน

| | |
|------------------|---|
| ชื่อ-นามสกุล | นายวีโรจน์ สุวรรณไตรย์ |
| วัน เดือน ปีเกิด | 9 ตุลาคม 2542 |
| ที่อยู่ | 118/8 ตำบลโคกศิลา อำเภอเจริญศิลป์ จังหวัดสกลนคร 47290 |
| โทร | 09-8127-4050 |
| ประวัติการศึกษา | - พ.ศ. 2558 จบการศึกษาระดับมัธยมต้น โรงเรียนสว่างแดนดิน สกลนคร - พ.ศ.2560 จบการศึกษาระดับหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) วิทยาลัยเทคนิคสว่างแดนดิน สกลนคร - พ.ศ.2562 จบการศึกษาระดับหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) วิทยาลัยเทคนิคสว่างแดนดิน สกลนคร - ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (ต่อเนื่อง) ชั้นปีที่ 3 |
| Email | rweero5843@gmail.com |