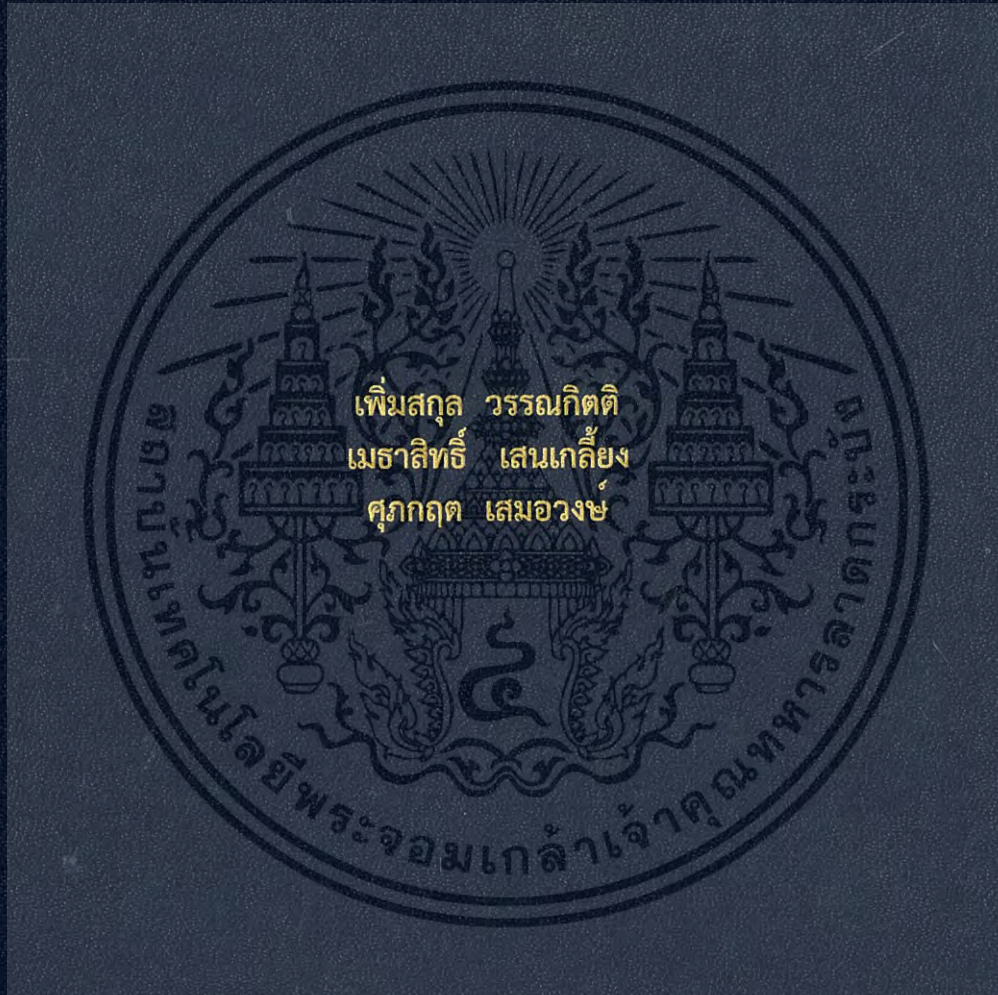


การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในลวดอัดแรงของอาคารคอนกรีตอัด
แรงที่มีการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน

THE ANALYSIS OF DETERIORATION ON PRESTRESSED
CONCRETE BUILDING DUE TO TIME DEPENDENT



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในลวดอัดแรงของอาคารคอนกรีตอัด

แรงที่มีการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน

THE ANALYSIS OF DETERIORATION ON PRESTRESSED
CONCRETE BUILDING DUE TO TIME DEPENDENT



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE ANALYSIS OF DETERIORATION ON PRESTRESSED
CONCRETE BUILDING DUE TO TIME DEPENDENT

Permsakul Wannakitti

Maytasit Sankleang

Supakrit Samerwong

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ **ACADEMIC YEAR 2017** อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในลวดอัดแรงของอาคารคอนกรีตอัดแรงที่มีการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน
THE ANALYSIS OF DETERIORATION ON PRESTRESSED CONCRETE BUILDING DUE TO TIME DEPENDENT

นักศึกษา นาย เพิ่มสกุล วรรณกิติ รหัสนักศึกษา 57010938
 นาย เมธาสิทธิ์ เสนเกลี้ยง รหัสนักศึกษา 57011027
 นาย ศุภกฤต เสมอวงศ์ รหัสนักศึกษา 57011258
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.อัฐวิทย์ สุจรีตพงศ์

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ		ลายมือชื่อ
ดร.อัฐวิทย์ สุจรีตพงศ์		
ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร		
ผศ.สมเกียรติ ขวัญพฤษ์		
ผศ.ดร.อำพน จรัสรุ่งเกียรติ		
รศ.สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์		
อาจารย์ทรงกลด แซ่อึ้ง		

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 4/6/61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในลวดอัดแรงของอาคารคอนกรีตอัด

แรงที่มีการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน

นาย เพิ่มสกุล วรรณกิตติ รหัสนักศึกษา 57010938

นาย เมธาสิทธิ์ เสนเกลี้ยง รหัสนักศึกษา 57011027

นาย ศุภกฤต เสมอวงษ์ รหัสนักศึกษา 57011258

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.อัฐวิทย์ สุจริตพงศ์

ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีเกี่ยวกับวัสดุและกรรมวิธีในการก่อสร้างได้มีการพัฒนามากขึ้นจากอดีต ในสำหรับโครงสร้างพื้นนั้น การใช้พื้นคอนกรีตอัดแรงนั้นเป็นหนึ่งในวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการก่อสร้าง เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความสะดวกรวดเร็วและช่วยในการประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงหน่วยแรงของลวดอัดแรงของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง โดยมุ่งเน้นการศึกษาถึงการเสื่อมลดของชิ้นส่วนในโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง โดยจำลองพื้นคอนกรีตอัดแรงในโปรแกรม Midas Gen และทำการวิเคราะห์ โดยผลจากการวิเคราะห์คือ เมื่อเวลาผ่านไป 30 ปี ผลจากการการเสื่อมลดในโครงสร้างพื้นคอนกรีตอัดแรงนั้น ยังอยู่ในเกณฑ์ของมาตรฐานในการก่อสร้าง และภายในโครงสร้างมีพฤติกรรมที่เปลี่ยนไป จากแรงกระทำภายนอกเท่าเดิม ยกตัวอย่างเช่น หน่วยแรงดึง โมเมนต์ดัด และค่าการโก่งตัว เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE ANALYSIS OF DETERIORATION ON PRESTRESSED CONCRETE BUILDING DUE TO TIME DEPENDENT

Mr. Permsakul Wannakitti Student ID. 57010938

Mr. Maytasit Sankleang Student ID. 57011027

Mr. Supakrit Samerwong Student ID. 57011258

Advisor: Dr. Atavit Sujaritpong

Academic Year 2017

ABSTRACT

The development of materials technology and construction process has evolved from the past. For slab construction, prestressed concrete is one of the most commonly used methods of construction. This is a quick and easy way to save on construction costs.

This research investigates the strength of prestressed concrete structures, by attention to the deterioration in prestressed concrete structures. By model and analysis the prestressed slab from MIDAS GEN. The results are: Over time, over 30 years the effects of the deterioration of the prestressed concrete structure will remain in the standard of construction. Within the behavioral of structure change from fixed load. For example, tensile strength, bending moment, and deflection values.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรเล่มนี้สำเร็จลงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ดร.อภิวุฒิ สุจริตพงศ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง คอยแนะนำช่วยเหลือในการ แก้ไขปัญหา คอยให้ความรู้ เอาใจใส่ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือจนสำเร็จได้ด้วยดี พวกเราผู้จัดทำ รู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในทุก ๆ รายวิชาที่ศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐาน โดยคณาจารย์ท่านต่าง ๆ ได้ ถ่ายทอดความรู้ทั้งทางด้านวิชาการ ความรู้ทั่วไป และประสบการณ์ต่าง ๆ จนสามารถนำมาใช้ในการ ทำงานและการดำเนินชีวิตได้อย่างดีเยี่ยม ตลอดจนขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ร่วมเป็นกรรมการ ในการทดสอบ

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือซึ่งกันและกันในการ ทำโครงการ รวมถึงตลอดระยะเวลาที่ได้เรียนรู้ศึกษาในภาควิชาโยธานี้ตลอดมา

ขอขอบคุณผู้ตอบแบบสอบถามทุกท่านที่ได้กรุณาให้ข้อมูลโดยการตอบแบบสอบถามตาม ความเป็นจริงและครบถ้วน

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดาอันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ความรักและกำลังใจใน การสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนของคณะผู้จัดทำมาโดยตลอด ทำให้คณะผู้จัดทำมีวันนี้ได้ คณะ ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูง

เพิ่มสกุล วรณกิตติ

เมธาสิทธิ์ แสนเกลี้ยง

ศุภกฤต เสมอวงษ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษาของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
1.6 วิธีการศึกษา.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	4
2.1 ประวัติความเป็นมาของคอนกรีตอัดแรง.....	4
2.2 คอนกรีตอัดแรง.....	5
2.3 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต.....	6
2.3.1 การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขณะถ่ายแรง.....	6
2.3.2 การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขณะรับน้ำหนักบรรทุก.....	7
2.4 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมอัดแรง.....	8
2.5 ค่าโมเมนต์ที่ทำให้เกิดคอนกรีตเริ่มแตกร้าว.....	10
2.6 กำลังประลัยของคอนกรีตอัดแรง.....	12
2.6.1 สมมติฐานการวิเคราะห์โมเมนต์ตัดประลัย.....	12
2.6.2 การกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตเทียบเท่าเป็นรูป สี่เหลี่ยม.....	13
2.6.3 หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่สถานะประลัย.....	14
2.7 การเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7.1 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริมอัดแรง (friction loss)	18
2.7.2 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต (elastic shortening loss)	19
2.7.3 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึด (anchorage loss)	21
2.7.4 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต (shrinkage loss).....	21
2.7.5 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการคืบของคอนกรีต (creep loss).....	22
2.7.6 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการคายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง (steel relaxation loss)	22
2.8 ระยะเยื้องศูนย์ของลวดอัดแรงภายนอก.....	23
2.9 ผลกระทบเนื่องจากเวลา.....	24
2.9.1 การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดเนื่องจากผลของเวลา.....	24
2.9.2 กำลังรับแรงอัดภายใต้น้ำหนักที่กระทำอย่างต่อเนื่อง.....	25
2.9.3 การเพิ่มขึ้นของโมดูลัสยืดหยุ่นเนื่องจากผลของเวลา.....	26
2.9.4 การคืบและการหดตัว.....	27
2.9.4.1 นิยาม.....	27
2.9.4.2 ช่วงที่บังคับใช้.....	27
2.9.4.3 การคืบ.....	28
2.9.4.4 การหดตัว.....	36
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	40
3.1 ศึกษาข้อมูลและข้อกำหนดมาตรฐานของการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรง.....	40
3.2 คุณสมบัติของวัสดุก่อสร้างสะพาน.....	41
3.2.1 คอนกรีต.....	41
3.2.2 ลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรง.....	41
3.2.3 ระบบคอนกรีตอัดแรงที่หลัง.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การจำลองโมเดลโครงสร้างพื้นคอนกรีตอัดแรง.....	44
บทที่ 4 ผลการดำเนินการ.....	74
4.1 การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตอัดแรง.....	76
4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าแรงดึงในลวดเกลียวอัดแรง.....	81
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	84
เอกสารอ้างอิง.....	85



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ตารางแสดงค่าหน่วยแรงของคอนกรีตที่เปลี่ยนไปที่หน้าตัด D-D.....	82
4.2 ตารางแสดงค่าหน่วยแรงของคอนกรีตที่เปลี่ยนไปที่หน้าตัด D'-D'.....	82



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคอนกรีตของคานคอนกรีตอัดแรง.....5
2.2	หน่วยแรงดึงที่เพิ่มขึ้นของเหล็กเสริมอัดแรงในคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยว.....9
2.3	โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้า..... 11
2.4	การกระจายของหน่วยการยืดหดตัวและหน่วยแรงที่สถานะประลัย.....13
2.5	การเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง..... 17
2.6	การลดลงของระยะเยื้องศูนย์ของลวดอัดแรงภายนอก.....23
2.7	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การคืบของโครงสร้างคอนกรีต..... 33
2.8	แสดงค่าการหดตัวของโครงสร้างคอนกรีต..... 37
3.1	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย..... 43
3.2	แบบเหล็กในพื้นที่ Post – tension..... 45
3.3	แบบการวาง tendon ในพื้นที่ Post – tension.....46
3.4	profile tendon ในแนวแกน x..... 47
3.5	profile tendon ในแนวแกน y..... 48
3.6	ตั้งค่าเริ่มต้นของโปรแกรม..... 49
3.7	หน้าต่างเริ่มต้นของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....50
3.8	แสดง Define Grid..... 51
3.9	แสดง Add/Modify grid Lines..... 51
3.10	แสดงค่า grid ในแกน x และ ในแนวแกน y..... 52
3.11	แสดง Grid ของพื้นที่ทั้งแกน x และแกน y.....52
3.12	แสดง Grid ของลวดอัดแรงที่ใส่ Profile ของลวดเรียบร้อยแล้ว.....53
3.13	แสดงการกำหนดคุณสมบัติของเสา..... 54
3.14	แสดงการกำหนดคุณสมบัติของพื้น..... 55
3.15	แสดงการกำหนดคุณสมบัติของลวดอัดแรง.....56
3.16	แสดงหน้าต่างกำหนดหน้าตัดของวัสดุ.....57
3.17	การตั้งค่า Creep/Shrinkage..... 58
3.18	แสดงการตั้งค่า Comp.Strength.....59
3.19	แสดงวิธีการสร้างจุดเชื่อมของเสา.....60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.20	สร้าง Nodes ของเสาครบทุกจุดแล้ว.....61
3.21	แสดงวิธีสร้างเส้น Element.....62
3.22	แสดงการสร้าง Element.....63
3.23	หน้าต่างชั้นตอน Mesh พื้น.....64
3.24	หน้าต่างเมื่อทำการ Mesh พื้นเรียบร้อยแล้ว.....65
3.25	แสดงวิธีกำหนด Properties ของ Tendon.....66
3.26	Add Tendon Profile.....67
3.27	แสดงการใส่ข้อมูล Profile Tendon.....68
3.28	แสดงหน้าต่างการสร้าง Construction Stage.....69
3.29	แสดงหน้าต่างหลังจากเลือก Construction Stage.....70
3.30	แสดงการตั้งค่าหน้า Construction Stage.....71
3.31	แสดงหน้าต่างแยกจากการตั้งค่า Time Dependent Control.....72
3.32	แสดงการตั้งค่า Creeps Coefficients of Construction Stage.....73
4.1	แสดงตัวอย่างพื้นคอนกรีตอัดแรงที่โมเดลเสร็จเรียบร้อยแล้ว.....74
4.2	หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนพื้นคอนกรีตอัดแรง.....75
4.3	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา หลังก่อสร้างเสร็จ,5ปี,10ปี,15ปีและ20ปีที่ผิวด้านบนของคอนกรีตอัดแรงที่หน้าตัด D-D.....76
4.4	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา หลังก่อสร้างเสร็จ,5 ปี,10ปี ,15ปีและ20ปีที่ผิวด้านล่างของคอนกรีตอัดแรงที่หน้าตัด D-D.....77
4.5	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา หลังก่อสร้างเสร็จ,5ปี,10ปี,15ปีและ 20ปีที่ผิวด้านบนของคอนกรีตอัดแรงที่หน้าตัด D'-D'.....78
4.6	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา หลังก่อสร้างเสร็จ,5ปี,10ปี,15ปีและ20ปีที่ผิวด้านล่างของคอนกรีตอัดแรงที่หน้าตัด D'-D'.....79
4.7	รูปตัดแสดงลวดเกลียวอัดแรงในหน้าตัด D – D และ D'- D'81
4.8	กราฟแสดงหน่วยแรงของลวดเกลียวอัดแรงหน้าตัด D-D.....82
4.9	กราฟแสดงหน่วยแรงของลวดเกลียวอัดแรงหน้าตัด D'-D'.....83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีเกี่ยวกับวัสดุและกรรมวิธีในการก่อสร้างมีการพัฒนามากขึ้น รวมถึงการออกแบบวัสดุก่อสร้างที่มีแนวโน้มการออกแบบให้มีขนาดเล็กลงทั้งนี้ยังต้องการให้ได้วัสดุที่มีคุณภาพสูงขึ้น รับน้ำหนักได้มากขึ้น ลดระยะเวลาการก่อสร้างที่หน้างานให้น้อยลง และลดต้นทุนในการก่อสร้าง ดังนั้นวัสดุที่นำมาใช้ออกแบบและก่อสร้างจะต้องมีกำลังสูงและสามารถทำงานได้ง่ายและรวดเร็ว สำหรับในส่วนของโครงสร้างพื้นนั้นพื้นคอนกรีตอัดแรงถือเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้ในงานก่อสร้างมากเนื่องจากเป็นระบบการก่อสร้างที่มีความสะดวกรวดเร็วช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างซึ่งในท้องตลาดยังมีผู้ผลิตจำนวนมากให้เลือกใช้ตามความต้องการ โดยระบบโครงสร้างประเภทนี้จะมีลวดอัดแรงทำหน้าที่หลัก คือ การรับแรงดึงอันเนื่องมาจากการอัดแรงและจากการรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานที่สภาวะต่าง ๆ ดังนั้นแรงดึงในลวดอัดแรงจึงมีความสำคัญในการรักษาเสถียรภาพของโครงสร้างไว้ ซึ่งปกติแล้วหน่วยแรงดึงของลวดอัดแรงสามารถคำนวณหาที่สภาวะต่าง ๆ ได้ด้วยหลักการของการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงที่ได้มีการคำนึงถึงการเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงซึ่งการเสื่อมลดจะเกิดขึ้นทันทีหลังจากถ่ายแรง(immediate loss)และจะเกิดการสูญเสียแรงดึงเพิ่มเติมเมื่อเวลาผ่านไป(time-dependent loss)รวมทั้งคำนึงถึงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในขณะทำการถ่ายแรง (transfer stage)และหน่วยแรงที่เกิดขึ้นขณะรับน้ำหนักบรรทุก (working stage) แต่เมื่อโครงสร้างอยู่ในช่วงการใช้งานเป็นการยากที่จะทำการตรวจสอบหาหน่วยแรงดึงในลวดอัดแรงเนื่องจากการเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงตามหลักการของการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง แต่การจะนำทฤษฎีและหลักการของการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงมาใช้เพื่อให้สอดคล้องกับปัญหาจริงในการหาหน่วยแรงของลวดอัดแรงในคอนกรีตอัดแรงภายหลังที่มีการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานนั้นยังไม่มี การแสดงหรือพิสูจน์ไว้อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นปัญหาเบื้องต้นนำไปสู่การทำงานวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งในปัจจุบันได้มีโปรแกรมที่ช่วยในการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างหลากหลายทางคณะผู้ทำงานวิจัยเรื่อง การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในลวดอัดแรงของอาคารคอนกรีตอัดแรงที่มีการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานได้ใช้โปรแกรม Midas Gen ในการจำลองพื้นคอนกรีตอัดแรงและหาหน่วยแรงของลวดอัดแรงที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาลงถึงหน่วยแรงของลวดอัดแรงของโครงสร้างพื้นคอนกรีตอัดแรง โดยมุ่งเน้นศึกษาเพื่อให้เข้าใจถึงการเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง โดยมีการจำลองพื้นคอนกรีตอัดแรงในโปรแกรม Midas Gen และวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเพื่อที่สามารถนำผลการวิเคราะห์ไปใช้ในการออกแบบซึ่งจะนำไปสู่แนวทางการพัฒนาการก่อสร้างพื้นคอนกรีตอัดแรงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรงและปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง
2. เพื่อศึกษาการใช้โปรแกรม MidasGen ในการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองได้
3. เปรียบเทียบหน่วยแรงพื้นคอนกรีตอัดแรงหลังจากก่อสร้างเสร็จและหลังจากที่มีการเสื่อมสภาพไปเป็นเวลา 5 ปี, 10 ปี, 15 ปี และ 20 ปี

1.3 ขอบเขตการศึกษาของงานวิจัย

1. วิเคราะห์เฉพาะโครงสร้างพื้นคอนกรีตอัดแรง
2. มาตรฐานงานคอนกรีตอัดแรงในอาคารมถ.102-2550 ส่วนของพื้นคอนกรีตอัดแรง
3. ศึกษาการเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงหลังจากก่อสร้างเสร็จและหลังจากที่มีการเสื่อมสภาพไปเป็นเวลา 5 ปี, 10 ปี, 15 ปี และ 20 ปี
4. วิเคราะห์หน่วยแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงโดยใช้โปรแกรม Midas Gen
5. ใช้แบบพื้นคอนกรีตอัดแรงขนาด 29.00x 15.00 m. ในการจำลอง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นคอนกรีตอัดแรง อาทิเช่น ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์
2. ศึกษาวิธีการออกแบบโครงสร้างพื้นคอนกรีตอัดแรง
3. ศึกษาการใช้โปรแกรม Midas Gen
4. สร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Midas Gen
5. เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม Midas Gen กับค่าสูงสุดที่ยอมรับได้
6. สรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1.สามารถใช้โปรแกรม Midas Gen ในการสร้างแบบจำลองได้
- 2.สามารถใช้โปรแกรม Midas Gen ในการวิเคราะห์แบบจำลองได้
- 3.มีความรู้เพิ่มเติมในการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นคอนกรีตอัดแรง
- 4.ได้ทราบสาเหตุที่ส่งผลต่อการเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง
- 5.เป็นแหล่งข้อมูลสำหรับงานวิจัยต่าง ๆ ในอนาคต

1.6 วิธีการศึกษา

- 1.ทบทวนวรรณกรรมโดยการศึกษาหลักการและทฤษฎีการวิเคราะห์โครงสร้างที่เกี่ยวข้อง
- 2.ศึกษาข้อกำหนดในการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรง
- 3.ศึกษาการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Midas Gen
- 4.วิเคราะห์หน่วยแรง แรงเฉือน โมเมนต์ตัด การโก่งตัวของโครงสร้างด้วยโปรแกรม Midas Gen
- 5.สรุปผลการวิเคราะห์โครงสร้าง
- 6.เสนอข้อเสนอแนะและข้อจำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 ประวัติความเป็นมาของคอนกรีตอัดแรง

แต่เดิมเมื่อหลายร้อยปีก่อน การสร้างอาคารหรือสิ่งก่อสร้างใหญ่ๆ ต้องใช้งานคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นหลัก ซึ่งมีข้อจำกัดหลายข้อที่ทำให้ไม่สามารถทำให้ประสิทธิภาพของชิ้นงานนั้น ๆ มีคุณภาพสูงขึ้น จนกระทั่งราว ๆ ปี 1886 P.H. Jackson วิศวกรชาวสหรัฐอเมริกา ได้ทำการจดทะเบียนรูปแบบการก่อสร้างแผ่นคอนกรีตโดยวิธีการชั้นเหล็กเพื่อยึดให้พื้นคอนกรีตเชื่อมต่อกัน ต่อมาก็ได้มีการพัฒนาคิดค้นกันต่อไปเรื่อย ๆ เพื่อให้สามารถเรียกประสิทธิภาพของคอนกรีตและเหล็กให้มากขึ้นรองรับน้ำหนักบรรทุกได้มากขึ้น

ในเวลาไล่เลี่ยกัน คือใน ค.ศ.1888 C.E.W. Doehring ชาวเยอรมัน ได้จดลิขสิทธิ์การก่อสร้างแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงด้วยลวดเหล็ก แต่วิธีการนี้ในสมัยนั้นยังไม่ประสบความสำเร็จ เนื่องจากลวดเหล็กในสมัยนั้นมีกำลังรับแรงดึงต่ำ แรงดึงที่ให้แก่ลวดจะสูญเสียไปมาก เนื่องจากผลของการหดตัว(Shrinkage) และการคืบ(Creep) ของคอนกรีต

การพัฒนาคอนกรีตอัดแรงได้มีลักษณะของการพัฒนาได้ใกล้เคียงความจริงมากขึ้นเมื่อ ปี1908 CHARLES R.STEINER ได้จดทะเบียนเกี่ยวกับ Reinforced concrete construction โดยวิธีการที่ใช้คือ เมื่อคอนกรีตเริ่มมีการหดตัวลง ก็จะทำให้การขึ้นนอตเพื่อตึงเหล็กในคอนกรีตให้ตึง เพื่อป้องกันการหดตัวของคอนกรีต แต่การทำคอนกรีตอัดแรงด้วยวิธีนี้นั้น ไม่ได้รับความนิยมมากนัก เพราะทำให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้นมาก

หลังจากนั้นราว 17ปี R.E. Dill ได้เสนอวิธีการสร้างคอนกรีตอัดแรงด้วยวิธีการใหม่ คือ นำสารป้องกันการยึดเหนี่ยวเคลือบเหล็กก่อนการเทคอนกรีต ซึ่งเมื่อคอนกรีตเริ่มแข็งตัวก็จะทำการตึงเหล็กอีกครั้งหนึ่ง แต่ก็ยังไม่ได้รับความนิยมอีกเช่นกัน ด้วยเหตุผลเดิมคือ ทำให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสูงขึ้น

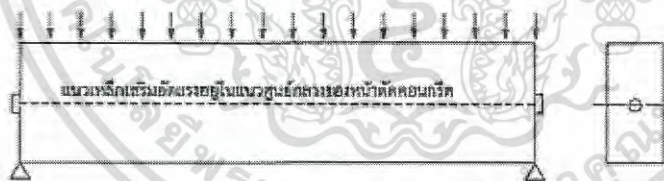
คอนกรีตอัดแรงตามแบบปัจจุบันนี้มีต้นกำเนิดมาตั้งแต่ในปี ค.ศ.1928 จากวิศวกรชาวฝรั่งเศส นามว่า E.Freyssinetซึ่งวิธีการที่เขานำมาใช้นั้นคือ การตึงลวดให้ตึงเสียก่อนที่จะมีการเทคอนกรีตลงไป ซึ่งเมื่อคอนกรีตหดตัวและตึงเหล็กกลับมาก็จะทำให้เกิดแรงดึงมาชดเชย-หักล้างกับแรงดึงที่เกิดขึ้นในตอนแรก ซึ่งหลังจากนั้นก็ได้มีการพัฒนาระบบตึงลวดไปตามลำดับ จนเรียกได้ว่าเป็นต้นกำเนิดของ Pre-tensioned concrete นั้นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 คอนกรีตอัดแรง

การอัดแรง หมายถึง การให้ความเค้นแก่องค์อาคารแม้ขณะที่องค์อาคารนั้นยังไม่มีน้ำหนักบรรทุกกระทำ ข้อแตกต่างระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็กและคอนกรีตอัดแรงคือ คอนกรีตเสริมเหล็กจะประกอบด้วยคอนกรีตและเหล็กเสริม แต่ในคอนกรีตอัดแรงเหล็กเสริมกับคอนกรีตจะอยู่ในสภาพความเค้นตั้งแต่แรก ทั้ง ๆ ที่ยังไม่ได้รับแรงกระทำจากภายนอก โดยเหล็กอยู่ในสภาพความเค้นดึง ทำให้คอนกรีตอยู่ในสภาพความเค้นอัด ส่วนเหล็กอยู่ในสภาพความเค้นดึง ทำให้พฤติกรรมของเหล็กและคอนกรีตในการใช้งานดีขึ้น เหล็กจะสามารถใช้งานได้ในช่วงแรงดึงสูงๆ และคอนกรีตซึ่งรับแรงอัดได้ดีแต่รับแรงดึงได้ต่ำ เมื่อให้แรงอัดไว้ก่อนก็เท่าเป็นการปรับปรุงความสามารถในการรับแรงดึงของคอนกรีต

พิจารณาคานคอนกรีตจากรูปที่ 2.1 สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกกระทำดังรูป (ก) ผลของโมเมนต์จะก่อให้เกิดหน่วยแรงอัดที่ผิวบนและหน่วยแรงดึงที่ผิวล่าง ดังรูป (ค) แต่สำหรับคานคอนกรีตอัดแรง หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคอนกรีต จะเป็นผลรวมของหน่วยแรงเนื่องจากการอัดแรงในรูป (ข) และหน่วยแรงเนื่องจากโมเมนต์ภายนอกรูป (ค) ซึ่งผลรวมของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคอนกรีตทั้งผิวบนและผิวล่างแสดงไว้ในรูป (ง) จะเห็นว่าผลของโมเมนต์ภายนอกก่อให้เกิดหน่วยแรงดึงที่ผิวล่างของคอนกรีต แต่เนื่องจากคานคอนกรีตอัดแรงได้รับหน่วยแรงอัดไว้ก่อนแล้วเมื่อรับโมเมนต์จากภายนอกหน่วยแรงดึงที่ผิวล่างของคอนกรีตจะหักล้างกับหน่วยแรงอัดที่ได้จากการอัดแรง หน้าตัดคานคอนกรีตอัดแรงหลังจากได้รับโมเมนต์จากภายนอกจะไม่มีส่วนใดเกิดหน่วยแรงดึง ดังนั้นการอัดแรงจะเป็นการช่วยในพฤติกรรมการรับแรงดึงในคอนกรีต



(ก) คานคอนกรีตอัดแรง



(ข) หน่วยแรงเนื่องจากการอัดแรง



(ค) หน่วยแรงเนื่องจากโมเมนต์ภายนอก



(ง) ผลรวมหน่วยแรงจาก (ข) และ (ค)

รูปที่ 2.1 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคอนกรีตของคานคอนกรีตอัดแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต

การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต เป็นการวิเคราะห์คอนกรีตอัดแรงในสถานการณ์ใช้งาน (service state) โดยมีสมมติฐานว่าคอนกรีตเป็นวัสดุยืดหยุ่นในการใช้งาน ดังนั้นทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ ทฤษฎีอีลาสติก สำหรับคอนกรีตอัดแรงนี้หลักการที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต สถานการณ์ใช้งาน คือ หลักการรวมแรง หน่วยแรง σ_c ตำแหน่งใดๆ ที่เกิดขึ้นหลังจากการอัดแรง P มีระยะเยื้องศูนย์กลาง e และโมเมนต์ภายนอก M จะหาได้จากสมการที่ 2.1

$$\sigma_c = \frac{p}{A} \pm \frac{pe_y}{I} \pm \frac{M_y}{I} \quad (2.1)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต
 I คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดคอนกรีต
 y คือ ระยะระหว่างตำแหน่งบนหน้าตัดคอนกรีตที่พิจารณากับแนวแกนละเทิน

สำหรับเครื่องหมายที่ใช้ในการคำนวณหน่วยแรงในคอนกรีตนี้ เนื่องจากคอนกรีตมีคุณสมบัติรับแรงอัดได้ดี และหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนคอนกรีตมักจะพิจารณาความสามารถในการรับแรงอัดเป็นหลัก ดังนั้นการคำนวณจะใช้เครื่องหมาย (+) สำหรับหน่วยแรงอัดในคอนกรีตและใช้เครื่องหมายลบ (-) สำหรับหน่วยแรงดึงในคอนกรีต

การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตในสถานการณ์ใช้งานสามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขณะถ่ายแรง (transfer stage) และขณะรับน้ำหนักบรรทุก (working stage)

2.3.1 การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขณะถ่ายแรง

การวิเคราะห์จะพิจารณาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตทันทีที่ถ่ายแรงจากเหล็กเสริมอัดแรงสู่คอนกรีต ซึ่งแรงอัดที่ใช้คำนวณในขั้นนี้จะเป็นแรงที่หักลบการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมที่เกิดขึ้นทันทีทันใด P_i และโมเมนต์ที่นำมาคำนวณเป็นโมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักตัวเองเท่านั้น M_G เท่านั้น เพราะขณะที่ทำการถ่ายแรงยังไม่มีน้ำหนักบรรทุกจากภายนอก ดังนั้นสมการที่ใช้ในการคำนวณหน่วยแรงในคอนกรีตที่เกิดขึ้นที่ขั้นตอนนี้คือ

$$\sigma_c = \frac{p_i}{A} \pm \frac{p_i e_y}{I} \pm \frac{M_G y}{I} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขณะรับน้ำหนักบรรทุก

ขั้นตอนนี้จะพิจารณาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ขณะที่มือน้ำหนักบรรทุกภายนอกกระทำมากระทำแรงอัดที่ใช้ในการคำนวณเป็นแรงที่หักลบการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทั้งหมด (ทั้งจากการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใด และที่เกิดขึ้นตามเวลา) P_e แรงนี้เรียกว่าแรงอัดประสิทธิผล (effective prestressing force) และโมเมนต์ที่นำมาคำนวณเป็นโมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด (รวมน้ำหนักตัวเองด้วย) M_T ดังนั้นสมการที่ใช้ในการคำนวณหน่วยแรงในคอนกรีตที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้คือ

$$\sigma_c = \frac{P_e}{A} \pm \frac{P_e e y}{I} \pm \frac{M_T y}{I} \quad (2.3)$$



2.4 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมอัดแรง

การวัดหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมอัดแรงในคอนกรีตอัดแรง กระทำขณะทำการดึงเหล็กเสริมอัดแรง และหลังจากนั้นจะมีการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริม เนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ เช่น การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริมอัดแรง การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง เป็นต้นและเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกมากกระทำเพิ่มเติมหน่วยแรงในเหล็กเสริมอัดแรงก็จะมีเปลี่ยนแปลงอีกเล็กน้อยเนื่องจากการโก่งตัวขององค์อาคารนั้น ๆ ในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงในเหล็กเสริมอัดแรงที่เกิดจากการโก่งตัวของคานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติมในช่วงสถานะการใช้งานโดยที่คอนกรีตยังไม่เกิดการแตกร้าว

ก) สำหรับคอนกรีตอัดแรงระบบมีการยึดเหนี่ยว

ในคอนกรีตอัดแรงระบบมีการยึดเหนี่ยว เหล็กเสริมอัดแรงและคอนกรีตที่อยู่โดยรอบจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวเกิดขึ้น ทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงหน่วยการยึดหดตัวที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริมอัดแรง $\Delta\varepsilon_s$ และค่าการเปลี่ยนแปลงหน่วยการยึดหดตัวของคอนกรีต $\Delta\varepsilon_c$ ที่อยู่โดยรอบเท่ากันการคำนวณหน่วยแรงที่เปลี่ยนไปของเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากการโก่งตัวสามารถคำนวณได้จากทฤษฎีอีลาสติก ดังนี้

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_s &= \Delta\varepsilon_c \\ \frac{\Delta\sigma_s}{E_s} &= \frac{\Delta\sigma_c}{E_c} \\ \Delta\sigma_s &= \frac{E_s}{E_c} \Delta\sigma_c = n\Delta\sigma_c = n \frac{M}{I} \end{aligned} \quad (2.4)$$

โดยที่	$\Delta\sigma_s$	คือ	หน่วยแรงที่เปลี่ยนไปของเหล็กเสริมอัดแรงที่เกิดจากการโก่งตัวของคานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติม
	M	คือ	โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติมที่กระทำต่อคานที่หน้าตัดใด ๆ
	n	คือ	อัตราส่วนโมดูลัส
	I	คือ	โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัด
	y	คือ	ระยะห่างจากตำแหน่งศูนย์กลางเหล็กเสริมอัดแรงถึงแนวแกนสะเทินหรือเท่ากับ e

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข) สำหรับคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยว

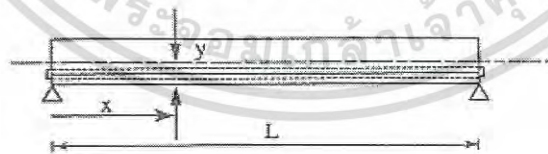
การเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงของคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยวแตกต่างไปจากของระบบที่มีการยึดเหนี่ยว เหล็กเสริมอัดแรงจะมีการขยับเคลื่อนตัวสัมพันธ์กับคอนกรีตที่อยู่โดยรอบ เนื่องจากไม่มีการยึดเหนี่ยวระหว่างผิวทั้งสอง ดังนั้นสมการ 2.4 ไม่สามารถนำมาใช้กับการคำนวณหาหน่วยแรงที่เปลี่ยนไปของเหล็กเสริมอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยว พิจารณาคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยวของคานช่วงเดียวดังรูปที่ 2.2 เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุก หน้าตัดคอนกรีตที่กึ่งกลางช่วงคานจะมีโมเมนต์เกิดขึ้นสูงสุด หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงของคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยวที่กึ่งกลางช่วงคานจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ช้ากว่าของคอนกรีตอัดแรงระบบที่มีการยึดเหนี่ยว ที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อมีการเพิ่มหน่วยการยึดตัวในเหล็กเสริมอัดแรงชนิดไร้การยึดเหนี่ยวนี้จะกระจายไปตลอดคาน เนื่องจากเหล็กเสริมอัดแรงมีอิสระในการเคลื่อนตัวสัมพันธ์กับคอนกรีตที่อยู่โดยรอบ การเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงของคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยวจะเฉลี่ยไปตลอดความยาวคาน ดังนั้นการคำนวณจึงเริ่มต้นด้วยการคำนวณหาความยาวที่เพิ่มขึ้นของเหล็กเสริมอัดแรง ΔL ก่อน โดยที่ ΔL นี้เท่ากับค่าที่ได้จากการอินทิเกรตหน่วยการยึดตัวของคอนกรีตที่ตำแหน่งเดียวกับเหล็กเสริมอัดแรงตลอดความยาวคาน คือ

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

$$\text{ค่าเฉลี่ยของหน่วยยึดหาได้จาก } \frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{M_y}{E_c I} dx$$

ดังนั้นค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงดึงที่เพิ่มขึ้นหาได้จาก

$$\Delta \sigma_s = E_s \frac{\Delta L}{L} = \frac{n}{L} \int_0^L \frac{M_y}{E_c I} dx \quad (2.5)$$



(ก) ก่อนรับน้ำหนักบรรทุกกระทำ



(ข) หลังรับน้ำหนักบรรทุกกระทำ

รูปที่ 2.2 หน่วยแรงดึงที่เพิ่มขึ้นของเหล็กเสริมอัดแรงในคอนกรีตอัดแรงระบบไร้การยึดเหนี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ค่าโมเมนต์ที่ทำให้เกิดคอนกรีตเริ่มแตกร้าว

การแตกร้าวในคอนกรีตจะเกิดขึ้นเมื่อหน่วยแรงที่ผิวบนสุดหรือล่างสุด เกิดหน่วยแรงดึงขึ้นจนเกิดค่าที่คอนกรีตสามารถรับได้ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับโมเมนต์ที่กระทำต่อคาน ค่าโมเมนต์ภายนอกที่ทำให้คอนกรีตอัดแรงเริ่มแตกร้าวก็คือ ค่าโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตมีหน่วยแรงดึงเกิดขึ้นเท่ากับ โมดูลัสของการแตกหัก (modulus of rupture) จากสมการ

$$\sigma_c = \frac{P}{A} + \frac{P_{ecb}}{I} - \frac{M_{cb}}{I} \quad (2.6)$$

ถ้าคอนกรีตถูกพิจารณาว่าเริ่มแตกร้าว

$$\begin{aligned} -f_r &= \frac{P}{A} + \frac{P_{ecb}}{I} - \frac{M_{cr}c_b}{I} \\ M_{cr} &= P_e + \frac{PI}{Ac_b} - \frac{f_r I}{c_b} \end{aligned} \quad (2.7)$$

โดยที่ M_{cr} คือ โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าว
 f_r คือ โมดูลัสของการแตกหักของคอนกรีต $\cong 2.0\sqrt{f'_c}$ (ksc)

คราวนี้ขอให้อธิบายอีกแง่หนึ่ง ถ้าให้ M_1 เป็นโมเมนต์ที่ทำให้หน่วยแรงในคอนกรีตมีค่าเป็นศูนย์ จากสมการที่ 2.6 แทนค่า $\sigma_c = 0$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{P}{A} + \frac{P_{ecb}}{I} - \frac{M_1 c_b}{I} \\ M_1 &= P_e + \frac{PI}{Ac_b} = P \left(e + \frac{r^2}{c_b} \right) \end{aligned} \quad (2.8)$$

โดยที่ M_1 คือ โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตมีหน่วยแรงเป็นศูนย์

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

คอนกรีตสามารถรับหน่วยแรงดึงเท่ากับ f_r ถ้าให้ M_2 เป็นโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตมีหน่วยแรงดึงเป็น f_r โดยทฤษฎีอีลาสติกสามารถหาค่าโมเมนต์ M_2 ได้จาก

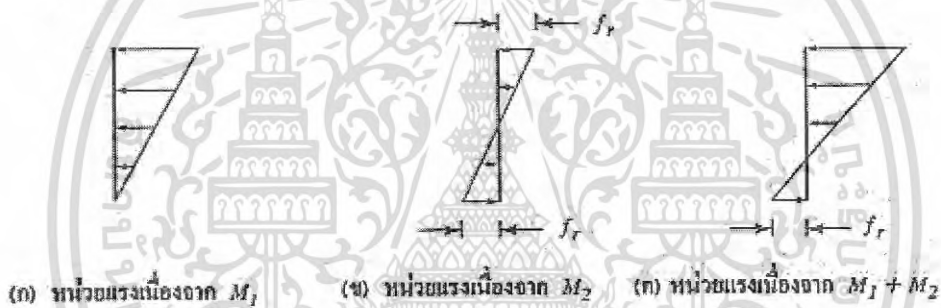
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$\begin{aligned}\sigma_c &= \frac{M_2 c_b}{I} \\ f_r &= \frac{M_2 c_b}{I} \\ M_2 &= \frac{f_r I}{c_b}\end{aligned}\quad (2.9)$$

โดยที่ M_2 คือ โมเมนต์ที่คอนกรีตสามารถรับได้เนื่องจากโมดูลัสของการแตกหัก f_r

จากสมการที่ 2.7-2.9 จะได้ว่า $M_{cr} = M_1 + M_2$ โดยที่ M_1 คือโมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตมีหน่วยแรงเป็นศูนย์ ถ้าสมมติว่าคอนกรีตไม่สามารถรับแรงดึงได้เลย ดังนั้นคานคอนกรีตอัดแรงจะเริ่มมีการแตกร้าวเมื่อโมเมนต์ที่กระทำมีค่าเท่ากับ M_1 สำหรับ M_2 คือ ค่าโมเมนต์ที่คานสามารถรับได้เพิ่มเติมเนื่องจากการที่คอนกรีตสามารถรับแรงดึงได้เท่ากับโมดูลัสของการแตกหัก หน่วยแรงในคอนกรีตที่เกิดขึ้นเนื่องจากโมเมนต์เหล่านี้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โมเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตเริ่มแตกร้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 กำลังประลัยของคอนกรีตอัดแรง

สิ่งสำคัญที่สุดในการออกแบบ คือ กำลังที่โครงสร้างสามารถรับได้จะต้องได้รับการออกแบบให้เพียงพอ เพราะถ้าโครงสร้างเกิดการวิบัติเนื่องจากกำลังที่ไม่เพียงพอ ผลเสียหายที่จะตามมาจะรุนแรงและค่าใช้จ่ายของความเสียหายก็สูงมาก ดังนั้นความน่าจะเป็นที่เกิดวิบัติเนื่องจากกำลังที่ไม่เพียงพอต้องทำให้มีโอกาสน้อยที่สุด ทั้งนี้ควรพิจารณาร่วมกันไปกับค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมด้วย เพราะกำลังที่เพิ่มขึ้นหมายถึงค่าใช้จ่ายที่สูงตาม

การออกแบบให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและในเหล็กน้อยกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ที่กำหนดไว้ในสถานะการใช้งานก็ไม่ได้หมายถึง ความปลอดภัยอย่างเพียงพอที่แท้จริงของโครงสร้างต่อการรับกำลัง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องตรวจสอบกำลังที่สถานะประลัย เพื่อให้แน่ใจว่าโครงสร้างมีความสามารถในการรับกำลังได้อย่างเหมาะสม

2.6.1 สมมติฐานการวิเคราะห์โมเมนต์ตัดประลัย

สมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณหาโมเมนต์ตัดประลัยขององค์อาคารที่ใช้อยู่ทั่วไปมีดังนี้

ก) การกระจายของหน่วยการยึดหดตัวในคอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นเส้นตรงกล่าวคือหน่วยการยึดหดตัวในคอนกรีตและเหล็กเสริม เป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางจากแนวแกนสะเทิน

ข) คอนกรีตไม่รับแรงดึง หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งก็คือ กำลังในการรับแรงดึงของคอนกรีตไม่ถูกนำมาพิจารณาในการคำนวณ

ค) ที่สถานะประลัย หน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ผิวด้านรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 0.003

พฤติกรรมของคอนกรีตอัดแรงที่สถานะประลัยคล้ายกับคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปหลักการที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์กำลังอัดประลัยของคาน คือ หลักการแรงคู่ควบภายในในช่วงสถานะการใช้งานก่อนที่คอนกรีตเกิดการแตกร้าว คอนกรีตอัดแรงจะแตกต่างจากคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปตรงที่ในคอนกรีตอัดแรง แรงคู่ควบ C-T จะมีค่าคงที่แม้ว่าโมเมนต์ภายนอกเพิ่มขึ้น แต่แกนของโมเมนต์คู่ควบมีค่ามากขึ้นตามโมเมนต์ภายนอกที่เพิ่มขึ้น เมื่อคานรับน้ำหนักภายนอกเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จนเลยสถานะการณ์ใช้งาน การแตกร้าวของคอนกรีตจะเกิดขึ้น ตอนนั้นแกนของโมเมนต์คู่ควบมีค่าค่อนข้างคงที่เหมือนคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ดังนั้นเมื่อโมเมนต์ภายนอกเพิ่มขึ้นต่อไป แรงคู่ควบ C-T จะมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งหมายความว่า หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงจะเริ่มเพิ่มขึ้นและหน่วยแรงอัดในคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นจนสัมพันธ์ของหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัวของคอนกรีตไม่เป็นเส้นตรงอีกต่อไป จนกระทั่งเมื่อโมเมนต์ภายนอกมีค่าเท่ากับโมเมนต์ตัดประลัย คานก็ถึงจุดวิบัติ

การวิบัติจะเกิดขึ้นเมื่อคอนกรีตเกิดการอัดระเบิด (crushing) ตามมาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. ได้กำหนดหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ผิวด้านรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 0.003 ที่สถานะประลัยการวิบัติขององค์อาคารแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลัก (tension failure) และการวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลัก (compression failure) การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักเริ่มต้นโดยการที่การยึดหดตัวของเหล็กเสริมมีค่าเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

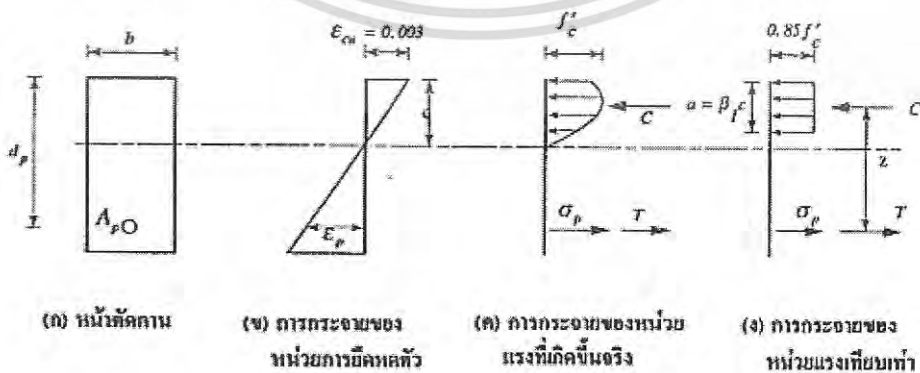
อย่างมาก (การคลาของเหล็กเกิดขึ้น) และวิบัติในที่สุดเมื่อตอยกริตอัดระเบิด ($\epsilon_c = 0.003$) การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักนี้เกิดขึ้นเมื่อปริมาณเหล็กเสริมน้อยกว่าสมดุล (under-reinforcement) ส่วนการวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลักนี้ องค์กรจะวิบัติขณะที่การโก่งตัวยังมีน้อยเพราะเหล็กเสริมก็ยังยึดไม่มากการวิบัติชนิดนี้มีลักษณะเปราะ (brittle) และเกิดขึ้นเมื่อปริมาณเหล็กเสริมมากกว่าเกณฑ์สมดุล (over-reinforcement)

2.6.2 การกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตเทียบเท่าเป็นรูปสี่เหลี่ยม

การกระจายของหน่วยการยึดหดตัวและหน่วยแรงที่สถานะประลัยแสดงไว้ดังรูป 2.4 ที่สถานะประลัย ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงกับหน่วยการยึดหดตัวไม่เป็นเส้นตรง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในขณะที่การกระจายของหน่วยการยึดหดตัวเป็นเส้นตรงและเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางจากแนวแกนสะเทินดังรูป 2.4(ข) การกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตที่อยู่เหนือแกนสะเทินจะมีลักษณะเป็นรูปเส้นโค้งดังรูป 2.4(ค) เพื่อให้การคำนวณกระทำได้ง่ายขึ้น การกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง จึงถูกแทนที่โดยการกระจายของหน่วยแรงอัดเทียบเท่าเป็นรูปสี่เหลี่ยมดังรูป 2.4 (ง) รูปสี่เหลี่ยมเทียบเท่านี้ ใช้หลักการของการที่แรงอัดลัพธ์ C ในคอนกรีตจะต้องมีค่าเท่าเดิม และตำแหน่งของแรงอัดลัพธ์ C ต้องอยู่ในตำแหน่งเดิม ดังนั้นพื้นที่ภายในรูปสี่เหลี่ยมของรูป 2.4 (ง) จึงต้องมีพื้นที่เท่ากับพื้นที่ภายในรูปโค้งของรูป 2.4(ค) และตำแหน่งของเส้นทรอยด์ของพื้นที่ทั้งสองต้องอยู่ในระดับเดียวกัน มาตรฐานสำหรับอาคารอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 กำหนดให้ความกว้างของหน่วยแรงอัดรูปสี่เหลี่ยมเทียบเท่าที่มีค่าเท่ากับ $0.85 f'_c$ และความสูงของรูปสี่เหลี่ยม a มีค่าเท่ากับ $\beta_1 c$ ดังรูป 2.4 (ง) โดยที่ c เป็นระยะตั้งฉากจากแกนสะเทินถึงผิวของคอนกรีตที่รับแรงอัดและค่า β_1 เป็นตัวแปรที่หาได้จาก

$$\beta_1 = 0.85 \quad \text{เมื่อ } f'_c \leq 300 \text{ กก./ชม.}^2 \tag{2.10}$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.0008(f'_c - 300) \geq 0.65 \quad \text{เมื่อ } f'_c > 300 \text{ กก./ชม.}^2 \tag{2.11}$$



(ก) หน้าตัดตาม (ข) การกระจายของหน่วยการยึดหดตัว (ค) การกระจายของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริง (ง) การกระจายของหน่วยแรงเทียบเท่า

รูปที่ 2.4 การกระจายของหน่วยการยึดหดตัวและหน่วยแรงที่สถานะประลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่สถานะประลัย

การออกแบบคอนกรีตอัดแรงที่สถานะประลัยต้องออกแบบให้การวิบัติเกิดขึ้นในลักษณะแรงดึงเป็นหลัก เพราะการวิบัติชนิดนี้เกิดขึ้นหลังจากเหล็กมีการยืดตัวเกินจุดคลาดไปแล้วองค์อาคารจะมีการโก่งตัวมาก่อนเกิด การวิบัติซึ่งการวิบัติลักษณะเช่นนี้ความเหนียว (ductility) การออกแบบให้เกิดการวิบัติชนิดแรงดึงเป็นหลัก ปริมาณเหล็กเสริมอัดแรงจะต้องมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์สมดุล การคำนวณหาปริมาณเหล็กพอดีเกณฑ์สมดุลไม่สามารถทำได้โดยตรง เพราะไม่สามารถกำหนดจุดคลาดได้แน่นอนของเหล็กเสริมอัดแรงได้

มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง ว.ส.ท. ปี 2537 ได้กำหนดพิกัดของเหล็กเสริมในคอนกรีตอัดแรง เพื่อที่จะให้แน่ใจว่าปริมาณเหล็กเสริมในคอนกรีตอัดแรงน้อยกว่าเกณฑ์สมดุล ไว้ดังต่อไปนี้

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

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

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 = $A_s / b d_p$
	ρ	คือ	อัตราส่วนของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงดึง = $A_s / b d$
	ρ'	คือ	อัตราส่วนของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงอัด = $A'_s / b d$
	d_p	คือ	ระยะจากผิวที่เกิดหน่วยแรงอัดมากที่สุดถึงจุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมอัดแรง, ซม.
	d	คือ	ระยะจากผิวที่เกิดหน่วยแรงอัดมากที่สุด ถึงจุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงดึง, ซม.
	b	คือ	ความกว้างของคาน, ซม.
	A_{ps}	คือ	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมอัดแรง, ซม.
	A_s	คือ	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงดึง, ซม.
	A'_s	คือ	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงอัด, ซม.
	f_{ps}	คือ	หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่สภาวะวิบัติ, กก./ซม. ²
	f_y	คือ	กำลังคลากของเหล็กเสริมธรรมดา, กก./ซม. ²
	$\omega_{pw}, \omega_w, \omega'_w$	คือ	ดัชนีเหล็กเสริมสำหรับหน้าตัดคานที่มีปีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ก) สำหรับองค์อาคารที่เสริมเหล็กอัดแรงชนิดยึดเหนี่ยว

$$f_{ps} = f_{pu} \left\{ 1 - \frac{r_p}{\beta_1} \left[\rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{d_p} (\omega - \omega') \right] \right\} \quad (2.12)$$

โดยที่ r_p คือ ตัวคูณที่คำนึงถึงระดับกำลังกลางของเหล็กเสริมอัดแรง 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, กก./ซม.²

เมื่อมีเหล็กเสริมธรรมดารับแรงอัดในการคำนวณ f_{ps} ในสมการที่ 2.12 (หมายถึงถ้าการคำนวณสมการที่ 2.12 มีพจน์ของ ω' ร่วมอยู่ด้วย) ค่าต่อไปนี้จะต้องเป็นไปตามสมการที่ 2.13 และที่ 2.14

$$\left[\rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{d_p} (\omega - \omega') \right] \geq 0.17 \quad (2.13)$$

$$\text{และ } d' \leq 0.15d_p \quad (2.14)$$

ถ้า $\left[\rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{d_p} (\omega - \omega') \right] \geq 0.17$ การคำนวณหาค่าให้แทนค่า f_{ps} ในสมการที่ 2.12 ให้แทนค่า

ω' ด้วยศูนย์

ข) สำหรับองค์อาคารที่เสริมเหล็กอัดแรงชนิดไม่ยึดเหนี่ยวและมีอัตราส่วนความยาวช่วงต่อความลึกไม่เกิน 35

$$f_{ps} = f_{se} + 700 + \frac{f_c'}{100\rho_p} \quad (2.15)$$

โดยที่ f_{se} คือ หน่วยแรงดึงประสิทธิผลของเหล็กเสริมอัดแรง, กก./ซม.²

ค่า f_{ps} ในสมการที่ 2.15 จะต้องไม่เกิน f_{py} และไม่เกิน $f_{se} + 4,000$ กก./ซม.²

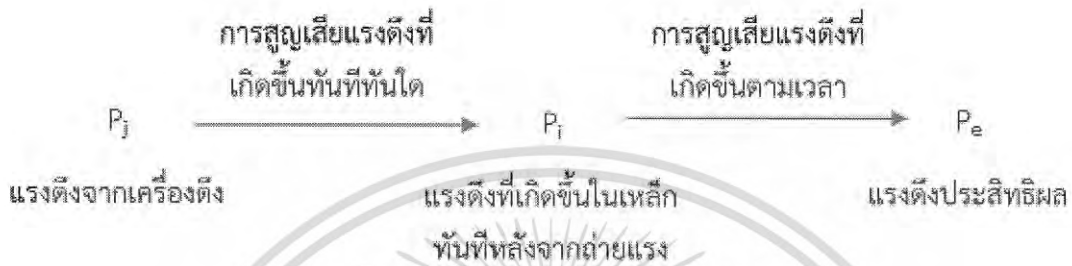
ค) สำหรับองค์อาคารที่เสริมเหล็กอัดแรงชนิดไม่ยึดเหนี่ยวและมีอัตราส่วนความยาวช่วงต่อความลึกเกินกว่า 35

$$f_{ps} = f_{se} + 700 + \frac{f_c'}{300\rho_p} \quad (2.16)$$

ค่า f_{ps} ในสมการที่ 2.16 จะต้องไม่เกิน f_{py} และไม่เกิน $f_{se} + 2,000$ กก./ซม.²

2.7 การเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง

ในการอัดแรงจะมีการสูญเสียแรงดึงเกิดขึ้นในเหล็กเสริมอัดแรงซึ่งการสูญเสียแรงดึงนี้มีทั้งการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใดหลังจากถ่ายแรง(immediate loss) และการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลา(time dependent loss)



รูปที่ 2.5 การเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง

ก) การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใดหลังจากถ่ายแรง

การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใดนี้มีสาเหตุมาจากหลายประการด้วยกันแต่ที่มักจะนำมาพิจารณาในการออกแบบได้แก่การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริมอัดแรง(friction loss) การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต(elastic shortening loss) และการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึด(anchorage loss) นอกจากนี้การสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงอาจมีสาเหตุอื่น ๆ เช่นการหดตัวของไม้แบบในชั้นส่วนที่เป็นคอนกรีตอัดแรงชนิดตั้งเหล็กก่อนการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ฯลฯ การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใดหาได้จากผลต่างของค่าแรงดึงที่วัดได้ขณะดึงด้วยเครื่องดึงไฮดรอลิก(P_j) กับแรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กทันทีหลังจากถ่ายแรง(P_i)

$$\text{การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใด} = P_j - P_i$$

ข) การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลา

การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลามีสาเหตุหลักๆ มาจากการหดตัวของคอนกรีตจากการสูญเสียความชื้น(shrinkage loss) การคืบ(creep loss) และการคายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง(steel relaxation loss) ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้นการสูญเสียแรงดึงนี้จะเพิ่มขึ้นตามเวลาโดยที่อัตราการสูญเสียแรงดึงจะเร็วในช่วงแรกๆ และค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้นถ้าให้(P_e)คือแรงดึงที่เหลือในเหล็กเสริมอัดแรงหลังจากการสูญเสียแรงดึงจากสาเหตุทั้งหมดได้เกิดขึ้นแล้วการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลาจึงหาได้จาก

$$\text{การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลา} = P_i - P_e$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริมอัดแรง (friction loss)

การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดเกิดขึ้นในขั้นตอนการดึงเหล็กของคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กที่หลังความฝืดระหว่างเหล็กเสริมอัดแรงกับท่อที่ใช้ร้อยเหล็กเสริมอัดแรง(hollow duct) จะทำให้แรงดึงในเหล็กค่อยๆลดลงตามระยะที่ห่างออกไปจากปลายเหล็กเสริมที่ทำการดึงค่าการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดขึ้นอยู่กับค่ามูรวมของความโค้งระยะห่างจากปลายเหล็กเสริมที่ทำการดึงชนิดของเหล็กเสริมอัดแรงและชนิดท่อที่ใช้ร้อยเหล็กเสริมอัดแรงการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดจะพิจารณาในคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กที่หลังเท่านั้นส่วนในคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อนขณะที่ดึงจะไม่ใช่ท่อร้อยและไม่มี ความฝืดเกิดขึ้นขณะดึงจึงไม่ต้องนำมาพิจารณา ในมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของว.ส.ท. ปี2537 ได้กำหนดสมการสำหรับการคำนวณการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดดังสมการที่2.17

$$P_x = P_j e^{-(kx + \mu\alpha)} \quad (2.17)$$

โดยที่	P_x	คือ	แรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่ระยะ x จากสมอยึด, kg.
	P_j	คือ	แรงดึงที่ปลายที่ทำการดึงสวด, kg.
	e	คือ	ค่าคงที่เท่ากับ 2.71828
	k	คือ	สัมประสิทธิ์ของความคด (wobble coefficient), m^{-1}
	μ	คือ	สัมประสิทธิ์ความฝืด (friction coefficient), rad^{-1}
	x	คือ	ระยะตามแนวราบที่วัดจากปลายเหล็กเสริมอัดแรงที่ทำการดึงถึงตำแหน่งที่พิจารณา, m
	α	คือ	ผลรวมทั้งหมดของมุมที่เปลี่ยนไปจากปลายเหล็กเสริมอัดแรงที่ทำการดึงถึงตำแหน่งที่พิจารณา, rad

2.7.2 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต (elastic shortening loss)

ก) กรณีของคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน

ในคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อนเหล็กเสริมอัดแรงจะถูกดึงค้างไว้ก่อนการเทคอนกรีตและเมื่อทำการถ่ายแรงจากเหล็กเสริมอัดแรงเข้าสู่คอนกรีตคอนกรีตจะหดตัวเนื่องจากแรงอัดตามทฤษฎีอีลาสติกในขณะเดียวกันเหล็กเสริมอัดแรงก็จะสั้นลงตามดัดนั้นการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงจึงเกิดขึ้นโดยที่การสูญเสียหน่วยการยืดตัวในเหล็กเสริมอัดแรงเท่ากับการหดตัวของคอนกรีตที่เกิดขึ้นถ้าพิจารณาคอนกรีตอัดแรงที่มีแนวเหล็กเสริมอัดแรงกระทำที่ศูนย์กลางหน้าตัดของคอนกรีตในกรณีนี้ไม่มีผลของโมเมนต์ดัดเข้ามาเกี่ยวข้องมีแต่ผลของแรงตามแนวแกนดังนั้นค่าการสูญเสียหน่วยแรงดึงจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต ES หาได้จากสมการ 2.18

$$ES = n f_{cir} = (E_s/E_{ci}) f_{cir} \quad (2.18)$$

โดยที่	f_{cir}	คือ	หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นที่คอนกรีต ณ ตำแหน่งศูนย์กลางของเหล็กเสริมอัดแรง
	E_s	คือ	โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมอัดแรง
	E_{ci}	คือ	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตขณะถ่ายแรงหาได้จาก $E_{ci} = 15200 \sqrt{f'_{ci}}$

หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นที่คอนกรีต ณ ตำแหน่งศูนย์กลางของเหล็กเสริมอัดแรง ($y=e$) คือ

$$f_{cir} = \frac{P_0}{A} + \frac{P_0 e^2}{I} - \frac{M_G e}{I} \quad (2.19)$$

โดยที่	P_0	คือ	แรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงหลังจากถ่ายแรงสู่คอนกรีตแล้ว
--------	-------	-----	--

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข) กรณีของคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กที่หลัง

การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีตในคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กที่หลังต่างไปจากคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อนถ้ามีเหล็กเสริมอัดแรงเพียง 1 เส้นในคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กที่หลังการหดตัวของคอนกรีตจะเกิดขึ้นขณะทำการอัดแรงเนื่องจากแรงในเหล็กเสริมอัดแรงที่วัดจากเครื่องอัดแรงเป็นค่า หลังจากการหดตัวของคอนกรีตได้เกิดขึ้นแล้วดังนั้นจึงไม่มีการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต

ถ้ามีเหล็กเสริมอัดแรงมากกว่า 1 เส้นและการอัดแรงกระทำที่ละเส้นจะพบว่าขณะที่ทำการอัดแรงในเหล็กเส้นแรกไม่มีการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเมื่อทำการอัดแรงเหล็กเส้นที่สองการหดตัวของคอนกรีตจะเกิดขึ้นต่อไปทำให้เกิดการสูญเสียแรงดึงบนเหล็กเส้นแรกเนื่องจากการหดตัวนี้ส่วนเหล็กเส้นที่สองไม่มีการสูญเสียแรงดึงจะพบว่าเหล็กเส้นแรกทำการอัดแรงมีการสูญเสียแรงดึงมากที่สุดเหล็กเส้นถัดมามีการสูญเสียแรงดึงลดลงจนกระทั่งเส้นสุดท้ายจะไม่มีการสูญเสียแรงดึงเลยสามารถคำนวณหาค่าการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกสำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กที่หลังได้ดังนี้

$$ES = 0.5(E_s/E_{ci})f_{cir} \quad (2.20)$$

2.7.3 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึด (anchorage loss)

ในคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กที่หลังการถ่ายแรงจากเครื่องดึงจะกระทำผ่านสมอยึดซึ่งอยู่ที่ปลายเหล็กเสริมอัดแรงสมอยึดจะมีการขยับตัวเพื่อเข้าที่ขณะที่ทำการถ่ายแรงจากเครื่องดึงเหล็กเข้าสู่สมอยึดการขยับตัวของสมอยึดนี้ทำให้เกิดการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงเพราะเหล็กเสริมอัดแรงจะขยับตัวตามดั่งนั้นแรงดึงที่สูญเสียเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึดที่ปลายคาน DP_{anc} จากสมการ 2.21

$$\Delta P_{anc} = \theta_{anc} L_{anc} \quad (2.21)$$

$$L_{anc} = \sqrt{\frac{2A_s E_s \Delta_s}{\theta_{anc}}} \quad (2.22)$$

โดยที่	Δ_a	คือ	ระยะการขยับตัวเข้าที่ของสมอยึด
	A_s	คือ	พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมอัดแรง
	θ_{anc}	คือ	ค่าความลาดชันที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึดมีค่าเท่ากับสองเท่าของความชันของการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความผิด
	L_{anc}	คือ	ระยะจากปลายสมอยึดจนถึงจุดที่ไม่มีการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึด

2.7.4 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต (shrinkage loss)

การสูญเสียแรงดึงในกรณีนี้มีสาเหตุจากการหดตัวของคอนกรีตเนื่องจากการสูญเสียความชื้นในคอนกรีตสามารถหาได้ดังนี้

$$\text{สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน} SH=1200+11RH \quad (2.23)$$

$$\text{สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน} SH=0.8(1200-11RH) \quad (2.24)$$

โดยที่	SH	คือ	หน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต, ksc
	RH	คือ	ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศตลอดปี, %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.5 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการคืบของคอนกรีต (creep loss)

การคืบที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขึ้นกับเวลาและค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนคอนกรีตการคืบจะทำให้เกิดการสูญเสียแรงในเหล็กเสริมอัดแรงสำหรับการคำนวณหาค่าหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่สูญเสียเนื่องจากการคืบของคอนกรีตสามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$CR = 12f_{cir} - f_{cds} \quad (2.25)$$

โดยที่ CR คือ หน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากการคืบของคอนกรีต, ksc.
 f_{cds} คือ หน่วยแรงดึงในคอนกรีตที่จุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากน้ำหนักคงที่ทั้งหมดยกเว้นน้ำหนักคงที่ที่มีอยู่แล้วในขณะอัดแรง, ksc

2.7.6 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการคายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง (steel relaxation loss)

การสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงกรณีนี้เกิดจากการคายแรงดึงในตัวเหล็กเสริมเองขนาดของแรงดึงที่ลดลงขึ้นกับค่าของหน่วยแรงดึงแรกเริ่มเวลาที่ผ่านไปหลังจากดึงเหล็กเสริมอัดแรงและชนิดของเหล็กเสริมอัดแรงสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อน

ก) ลวดเกลียวอัดแรงเกรด 1725 และ 1860 (มอก. 420-2525)

$$RE = 1410 - 0.4ES - 0.2(SH + CR) \quad (2.26)$$

ข) ลวดอัดแรง (มอก. 95-2525)

$$RE = 1270 - 0.4ES - 0.2(SH + CR) \quad (2.27)$$

สำหรับคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กทีหลัง

ก) ลวดเกลียวอัดแรงเกรด 1725 และ 1860 (มอก. 420-2525)

$$RE = 1410 - 0.3FR - 0.4ES - 0.2(SH + CR) \quad (2.28)$$

ข) ลวดอัดแรง (มอก. 95-2525)

$$RE = 1270 - 0.3FR - 0.4ES - 0.2(SH + CR) \quad (2.29)$$

ค) เหล็กเส้นอัดแรง

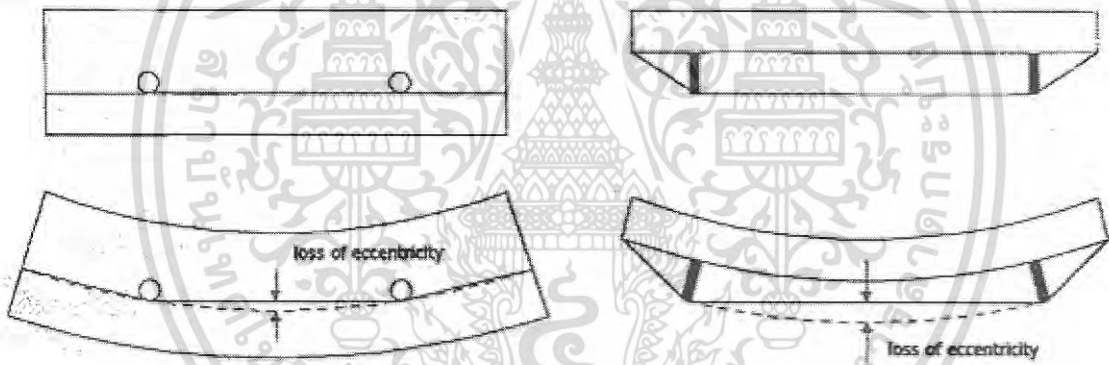
$$RE = 210 \quad (2.30)$$

โดยที่ RE คือ หน่วยแรงดึงที่สูญเสียในเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากการคายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงเอง, ksc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 ระยะเวลาเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอก

ในกรณีของระบบลวดอัดแรงภายใน การเปลี่ยนตำแหน่งของลวดอัดแรงจะสอดคล้องของการเปลี่ยนตำแหน่งของคอนกรีต ดังนั้นระยะเวลาเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงที่ใช้ในการคำนวณจึงเป็นค่าคงที่ แต่ในกรณีของระบบลวดอัดแรงภายนอก การเปลี่ยนตำแหน่งของลวดอัดแรงจะไม่สอดคล้องกับการเปลี่ยนตำแหน่งของคอนกรีต ยกเว้นจุดที่มีดีวิเอเตอร์ (deviator) และแป้นยึดลวดอัดแรง(jacking corbel) การไม่สอดคล้องกันนี้จึงทำให้เกิดการลดลงของระยะเวลาเยื้องศูนย์กลางดังแสดงในรูป 2.6 ซึ่งเรียกว่า loss of eccentricity (second-order effect) เนื่องจากระยะเวลาเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอกจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อน้ำหนักกระทำมีการเปลี่ยนแปลงการคำนวณหาค่าระยะเวลาเยื้องศูนย์กลางจึงมีขั้นตอนมากขึ้นในการคำนวณหาค่าระยะเวลาเยื้องศูนย์กลางต้องทราบระยะแอ่นตัวของคานเสียก่อน และการหาระยะแอ่นตัวของคานจะต้องทราบระยะเวลาเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรง ดังนั้นการทดลองต้องทำแบบ trial and error



รูปที่ 2.6 การลดลงของระยะเวลาเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรงภายนอก

2.9 ผลกระทบเนื่องจากเวลา

2.9.1 การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดเนื่องจากผลของเวลา

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ t วัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุผสม (ปูนซีเมนต์) , อุณหภูมิ และสภาพการบ่มคอนกรีต สำหรับคอนกรีตที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และใช้มาตรฐานการบ่มของ ISO 2736/2 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่าง ๆ $f_{cm}(t)$ สามารถทำการคาดคะเนได้จากสมการ (2.31) และ (2.32)

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t)f_{cm} \quad (2.31)$$

และ

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left\{s \left[1 - \left(\frac{28}{t/t_1}\right)^{1/2}\right]\right\} \quad (2.32)$$

เมื่อ

$f_{cm}(t)$

คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ t วัน

f_{cm}

คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

β_{cc}

คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของอายุคอนกรีต

t

คือ อายุของคอนกรีต (วัน)

t_1

คือ อายุของคอนกรีต 1 วัน

s

ค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุผสม (สามารถแยกประเภทได้ดังนี้ $s = 0.20$ สำหรับปูนซีเมนต์แข็งตัวเร็วและกำลังสูง(ชนิดRS) , $s = 0.25$ สำหรับปูนซีเมนต์ที่แข็งตัวปกติ (ชนิดNและR) , $s = 0.38$ สำหรับปูนซีเมนต์ที่แข็งตัวช้า (ชนิดSL))

เนื่องจากผลปฏิกิริยาตอบโต้ของปัจจัยต่างๆส่งผลให้กำลังรับแรงอัดภายใต้น้ำหนักที่กระทำอย่างต่อเนื่อง $f_{cm,sus}(t, t_0)$ เกิดค่าที่น้อยที่สุด เมื่อระยะเวลาของน้ำหนักที่กระทำที่น้อยที่สุดขึ้นอยู่กับอายุของน้ำหนักที่กระทำ และระยะเวลาวิกฤติ $(t - t_0)_{crit}$

สำหรับน้ำหนักที่กระทำที่ 28 วัน คอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมของปูนซีเมนต์ชนิดแข็งตัวปกติ (ชนิด N) ใช้ค่า $(t - t_0)_{crit} = 2.8$ และ $f_{cm,sus min} = 0.78f_{cm}$. ซึ่งเป็นค่าทั่วไปของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่รับน้ำหนักที่กระทำอย่างต่อเนื่อง

สำหรับกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตภายใต้น้ำหนักที่กระทำอย่างต่อเนื่องไม่สามารถให้ข้อมูลได้เนื่องจากมีผลการทดลองพื้นฐานไม่เพียงพอ

2.9.2 กำลังรับแรงอัดภายใต้น้ำหนักที่กระทำอย่างต่อเนื่อง

เมื่อวัสดุต้องรับหน่วยแรงอัดสูงอย่างต่อเนื่อง กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะลดลงโดยผลจากน้ำหนักเนื่องจากเวลา การลดลงของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเกิดขึ้นจากผลของความชุ่มชื้นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถรวบรวมผลกระทบเนื่องจากหน่วยแรงอัดที่กระทำอย่างต่อเนื่องและความชุ่มชื้นได้จากสมการ (2.33) และ (2.34)

$$f_{cm,sus}(t, t_0) = f_{cm}\beta_{cc}(t)\beta_{c,sus}(t, t_0) \quad (2.33)$$

และ

$$\beta_{c,sus}(t, t_0) = 0.96 - 0.12 \left\{ \ln \left[72 \left(\frac{t-t_0}{t_1} \right) \right] \right\}^{1/4} \quad (2.34)$$

เมื่อ

$f_{cm,sus}(t, t_0)$ คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ t วัน เมื่อวัสดุต้องรับหน่วยแรงอัดสูงอย่างต่อเนื่องที่น้ำหนักที่กระทำที่ $t_0 < t$

$\beta_{cc}(t)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์จากสมการ(2.32)

$\beta_{c,sus}(t, t_0)$ คือค่าสัมประสิทธิ์ของเวลาภายใต้อายุของคอนกรีต $t - t_0$ (วัน) โดยค่าสัมประสิทธิ์นี้จะอธิบายการลดลงของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตภายใต้น้ำหนักเนื่องจากเวลาและกำหนดไว้สำหรับ $t - t_0 > 0.015$ วัน (= 20 นาที)

t_0 คือ อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มรับน้ำหนัก

$(t - t_0)$ คือ เวลาที่คอนกรีตรับน้ำหนักภายใต้น้ำหนักเนื่องจากเวลา (วัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.3 การเพิ่มขึ้นของโมดูลัสยืดหยุ่นเนื่องจากผลของเวลา

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน สามารถทำการคาดคะเนได้จากสมการ (2.35)

$$E_{ci}(t) = \beta_E(t)E_{ci} \quad (2.35)$$

และ

$$\beta_E(t) = \beta_{cc}(t)^{0.5} \quad (2.36)$$

เมื่อ

$E_{ci}(t)$ คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ t วัน

E_{ci} คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

$\beta_E(t)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของอายุคอนกรีต t (วัน)

$\beta_{cc}(t)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์จากสมการ(2.32)

ความแตกต่างระหว่างการคืบและการหดตัวนั้นเป็นไปตามหลักการ โดยทั่วไปความเครียดจะเกิดขึ้นที่คอนกรีตทั้งที่ได้รับความกระทำและไม่ได้รับความกระทำ ซึ่งควรจะพิจารณาทั้ง 2 กรณีเนื่องจากเป็นปรากฏการณ์ทางกายภาพ

นอกจากนี้การแยกความเครียดในตอนต้นและความเครียดที่ได้รับผลกระทบจากการคืบเป็นไปตามหลักการการวิเคราะห์โครงสร้าง น้ำหนักทั้งหมดที่กระทำให้เกิดความเครียดที่คอนกรีตนั้นมีผลของความคืบเป็นปัจจัยสำคัญ โดยความเครียดและความคืบที่เกิดขึ้นในตอนต้นนั้นถูกกำหนดให้มีความถี่ที่ดำเนินการรวบรวมน้ำหนักทำให้เกิดความเครียดได้อย่างถูกต้อง

สำหรับการคาดคะเนค่าความเครียดเริ่มต้นเนื่องจากผลของการคืบ $\varepsilon_{ci}(t)$ ขึ้นอยู่กับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นตามที่กำหนดไว้ในสมการที่ (2.35)

แบบจำลองไม่ได้คาดการณ์คุณสมบัติทางการไหลเฉพาะที่ภายในภาพตัดขวางของชิ้นส่วนคอนกรีต เช่น การเปลี่ยนแปลงของความเค้นภายใน ความชื้น หรือผลของการแตกหักเฉพาะจุด

โดยแบบจำลองไม่สามารถใช้ได้กับ

- วัสดุคอนกรีตที่รับอุณหภูมิสูง (เช่น เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์) หรือต่ำ (เช่น ถังบรรจุก๊าซธรรมชาติเหลว)
- สภาพอากาศที่แห้งมาก (ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย < 40%)
- โครงสร้างที่ทำมาจากคอนกรีตมวลเบา

ในกรณีนี้จะพิจารณาว่าคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นแบบเชิงเส้น แต่ในความเป็นจริงแล้วการคืบเป็นปรากฏการณ์ที่ไม่เป็นเส้นตรงซึ่งหน่วยแรงจะสังเกตได้จากการทดลองโดยให้หน่วยแรงมีค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.4 การคืบและการหดตัว

2.9.4.1 นิยาม

ความเครียดทั้งหมดที่เวลา t , $\varepsilon_c(t)$ ของชิ้นส่วนคอนกรีตที่รับน้ำหนักเนื่องจากเวลามากกว่า 1 แกน โดยค่าความเค้นของคอนกรีตมีค่าคงที่ $\sigma_c(t_0)$ อาจแสดงได้ดังนี้

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_{ci}(t_0) + \varepsilon_{cc}(t) + \varepsilon_{cT}(t) \quad (2.37)$$

$$= \varepsilon_{c\sigma}(t) + \varepsilon_{cn}(t) \quad (2.38)$$

เมื่อ

$\varepsilon_{ci}(t_0)$	คือ ความเครียดเริ่มต้นเนื่องจากน้ำหนักที่กระทำ
$\varepsilon_{cc}(t)$	คือ ความเครียดเนื่องจากการคืบที่เวลา $t > t_0$
ε_{cs}	คือ ความเครียดเนื่องจากการหดตัว
$\varepsilon_{cT}(t)$	คือ ความเครียดเนื่องจากความร้อน
$\varepsilon_{c\sigma}(t)$	คือ ค่าความเค้นที่ขึ้นกับความเครียด ; $\varepsilon_{c\sigma}(t) = \varepsilon_{ci}(t_0) + \varepsilon_{cc}(t)$
$\varepsilon_{cn}(t)$	คือ ค่าความเค้นที่ไม่ขึ้นกับความเครียด ; $\varepsilon_{cn}(t) = \varepsilon_{cs}(t) + \varepsilon_{cT}(t)$

2.9.4.2. ช่วงที่บังคับใช้

แบบจำลองของการคืบและการหดตัวได้คาดคะเนพฤติกรรมของหน้าตัดคอนกรีต โดยแบบจำลองนี้ใช้ได้กับคอนกรีตโครงสร้างเท่าไป $12\text{MPa} < f_{ck} \leq 80\text{MPa}$ โครงสร้างได้รับหน่วยแรงอัด $|\sigma_c| < 0.4f_{cm}(t_0)$ ที่น้ำหนักเนื่องจากเวลาและมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยอยู่ที่ 40 ถึง 100% และมีอุณหภูมิ 5 ถึง 30 องศาเซลเซียส

นี้เป็นแบบจำลองที่ได้รับการยอมรับซึ่งสามารถนำไปใช้กับพฤติกรรมของหน้าตัดคอนกรีตที่รับหน่วยแรงดึงได้ด้วย และแบบจำลองนี้ยังนำไปคาดคะเนพฤติกรรมการคืบของคอนกรีตเมื่อรับหน่วยแรงอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.4.3. การคืบ

(ก) สมมุติฐานและความสัมพันธ์พื้นฐานของสมการ

หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ต้องมีค่าไม่เกิน $|\sigma_c| < 0.4f_{cm}(t_0)$ การคืบของคอนกรีตมีความสัมพันธ์เป็นปฏิภาคโดยตรงกับหน่วยแรงของคอนกรีต

สำหรับหน่วยแรงอัดคงที่ ที่เวลา t_0 จะทำให้เกิด

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_{ct}} \phi(t, t_0) \quad (2.39)$$

ในส่วนนี้มีการกำหนดสูตรสำหรับการคืบของคอนกรีต เช่น การคืบตัวของคอนกรีตหลังจากที่รับน้ำหนักที่กระทำสามารถคาดคะเนได้จากค่าสัมประสิทธิ์อายุการใช้งานของคอนกรีตที่รับน้ำหนักกระทำและฟังก์ชันสำหรับการอธิบายการเพิ่มขึ้นของการคืบ ในกรณีอื่นการคืบอธิบายได้จากการนำสมการมารวมกันของโมดูลัสยืดหยุ่นเมื่อเวลาผ่านและความเครียดของคอนกรีตเมื่อมีความหนืด สำหรับข้อดีและข้อเสียของทั้งสองสมการได้ทำให้เกิดแบบจำลองที่สามารถคาดคะเนการคืบของคอนกรีตโดยมีพื้นฐานมาจากการรวมกันมีชื่อว่า ‘การประเมินพฤติกรรมของคอนกรีตตามเวลา’ CEB Bulletin 199, Lausanne, 1990

หลักการ principle of superposition เป็นการสันนิษฐานว่าพฤติกรรมของคอนกรีตเป็นเส้นตรงแต่ในความเป็นจริงแล้วพฤติกรรมของคอนกรีตมีพฤติกรรมที่ไม่เป็นเส้นตรงดังนั้นความผิดพลาดจากการคาดคะเนสามารถหลีกเลี่ยงได้จากการใช้ principle of superposition กับพฤติกรรมการคืบของคอนกรีต โดยเฉพาะเมื่อไม่มีน้ำหนักที่กระทำหรือคอนกรีตที่มีความเครียดต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ทำให้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการคืบได้ โดยทำการปรับเทียบให้ตรงกับพื้นฐานของการทดลอง (การคืบเนื่องจากกำลังอัด) ของโครงสร้างคอนกรีต

สำหรับแบบจำลองจะมีการพิจารณาตัวแปรเหล่านี้ซึ่งเป็นที่คำนึงถึงสำหรับนักออกแบบ เช่น คุณสมบัติของกำลังรับแรงอัด มิติของชิ้นส่วนโครงสร้าง ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย ชิ้นส่วนของโครงสร้างเมื่อรับน้ำหนักกระทำ ระยะเวลาของน้ำหนักกระทำ ประเภทของปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตามการคืบของคอนกรีตนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงอัดและระยะเวลาที่น้ำหนักกระทำแต่ผลของระดับความชุ่มชื้นและองค์ประกอบต่าง ๆ ทำให้ค่าการคืบของคอนกรีตลดลง

เมื่อ

$\phi(t, t_0)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการคืบ

E_{ci} คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

หน่วยแรงอัดของคอนกรีตมีค่าขึ้นกับความเครียดของคอนกรีต $\varepsilon_{c\sigma}(t, t_0)$

แสดงดังสมการ

$$(t, t_0) = \sigma_c(t_0) \left[\frac{1}{E_c(t_0)} \frac{\phi(t, t_0)}{E_{ci}} \right] = \sigma_c(t_0) J(t, t_0) \quad (2.40)$$

เมื่อ

$J(t, t_0)$ คือ ฟังก์ชันของการคืบหรือมาตรฐานของการคืบ ซึ่งจะแสดงหน่วยแรงอัดทั้งหมด

$E_c(t_0)$ คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุของน้ำหนักที่กระทำตามสมการ (2.35) ดังนั้น

$\frac{1}{E_c(t_0)}$ จะแสดงความเครียดของคอนกรีตเริ่มต้นเนื่องจากน้ำหนักกระทำ

สำหรับตัวแปรของหน่วยแรงอัดและความเครียด ตามหลักการของ the principle of superposition จะสมมุติให้ถูกต้องบนพื้นฐานของข้อสันนิษฐานและนิยามตามข้างต้น ดังนั้นสมการของคอนกรีตจะแสดงดังสมการ

$$\varepsilon_c(t) = \sigma_c(t_0) J(t, t_0) + \int_{t_0}^t J(t, \tau) \frac{\partial \sigma_c(\tau)}{\partial \tau} d\tau + \varepsilon_{cn}(t) \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) ค่าสัมประสิทธิ์การคืบ

ค่าสัมประสิทธิ์การคืบคำนวณได้จากสมการ

$$\phi(t, t_0) = \Phi_0 \beta_c(t, t_0) \quad (2.42)$$

เมื่อ

Φ_0 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การคืบตามที่คาดการณ์ไว้จากสมการ (2.43)

β_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์การคืบเนื่องจากเวลาเมื่อมีน้ำหนักมากระทำต่อวัตถุ ตามสมการ (2.48)

t คือ อายุของคอนกรีต (วัน) ขณะที่ทำการพิจารณา

t_0 คือ อายุของคอนกรีตขณะที่รับน้ำหนักกระทำ (วัน) ตามสมการ (2.50)

การลดลงของสัดส่วนระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์และการเพิ่มขึ้นของระดับความชุ่มชื้น ดังนั้นการกระจายผลเนื่องจากการคืบและการหดตัวของคอนกรีตมีความผิดพลาดเกิดขึ้นในแบบจำลองและความไม่แน่นอนอันมีสาเหตุมาจากคุณสมบัติของวัสดุและสภาพแวดล้อม โดยการคาดคะเนผลลัพธ์จะพิจารณาจากค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นหลังจากที่ทำการให้น้ำหนักกระทำและทำให้มีสภาพแห้ง ซึ่งทำให้การคาดคะเนความผิดพลาดได้ดีกว่าปล่อยให้น้ำหนักมากระทำ และทำให้มีสภาพแห้งมากระทำเป็นเวลานานโดยฐานข้อมูลในห้องปฏิบัติการได้คาดคะเนตัวแปรค่าเฉลี่ยของฟังก์ชันการคืบเป็น $V = 20\%$ ซึ่งทำการประมาณจากการแจกแจงให้สอดคล้องทุก 5% และ 10% ซึ่งจะแสดงค่าเฉลี่ยที่ด้านบนและด้านล่างตามลำดับดังนี้

$$\Phi_{0.10} = 0.74\Phi; \quad \Phi_{0.05} = 0.66\Phi$$

$$\Phi_{0.90} = 1.26\Phi; \quad \Phi_{0.95} = 1.34\Phi$$

การคาดคะเนความผิดพลาดควรจะนำมาพิจารณาความน่าจะเป็นตามความเหมาะสม

เนื่องจากยังไม่ทราบแน่นอนว่าค่าการคืบตัวนั้นเข้าใกล้ค่าที่แน่นอน แต่อย่างไรก็ตามฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแสดงดังสมการ (2.48) ซึ่งจะใช้ค่าเชิงเส้นกำกับสำหรับเวลา $t \rightarrow \infty$ โดยการประเมินค่าผลลัพธ์จะอยู่บนพื้นฐานของการทดสอบระบุตามสมการ (2.48) จะมีความสมเหตุสมผลสำหรับการประมาณค่าการคืบของคอนกรีตเมื่อมีน้ำหนักมากระทำที่อายุ 70 ปี ภายใต้เงื่อนไขที่ระบุในตาราง 2.1.10 จากการสังเกตการทดลองการคืบตัวของคอนกรีตที่ 30 ปี 70 ปี และ 150ปี ซึ่งค่าหลังจากปีที่ 70 จะมีค่าน้ำหนักที่มากระทำไม่เกิน 5 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสัมประสิทธิ์การคืบตามที่คาดการณ์ไว้แสดงดังสมการ

$$\Phi_0 = \Phi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0) \quad (2.43)$$

และ

$$\Phi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH/RH_0}{0.46(h/h_0)^{1/3}} \quad (2.44)$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5.3}{(f_{cm}/f_{cm0})^{0.5}} \quad (2.45)$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0.1 + (t_0/t_1)^{0.2}} \quad (2.46)$$

เมื่อ

$$h = 2A_c / u \quad (2.47)$$

f_{cm} คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (MPa)

$f_{cm0} = 10$ MPa

RH คือ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อม (%)

$RH_1 = 100\%$

h คือ ขนาดที่คาดการณ์ไว้ของชั้นส่วนโครงสร้าง (mm) A เป็นหน้าตัด และ u เป็นเส้นรอบวงของชั้นส่วนโครงสร้างที่สัมผัสกับบรรยากาศ

$h_0 = 100$ mm

$t_1 = 1$ วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคืบเนื่องจากผลของเวลา แสดงดังสมการ

$$\beta_c(t - t_0) = \left[\frac{(t-t_0)/t_1}{\beta_H + (t-t_0)/t_1} \right]^{0.3} \quad (2.48)$$

และ

$$\beta_H = 150 \left\{ 1 + \left(1.2 \frac{RH}{RH_0} \right)^{18} \right\} \frac{h}{h_0} + 250 \leq 1500 \quad (2.49)$$

เมื่อ

$$t_1 = 1 \text{ วัน}$$

$$RH_0 = 100\%$$

$$h_0 = 100 \text{ มิลลิเมตร}$$

ในกรณีที่ค่าที่ได้มีความแม่นยำต่ำ ค่าจากรูปที่ 2.7 สามารถใช้ค่าสัมประสิทธิ์การคืบตัวของคอนกรีตเมื่อมีน้ำหนักมากกว่าที่อายุ 70 ปีขึ้นได้แทนได้สำหรับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไปที่มีคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดมีค่าระหว่าง 20 ถึง 50 MPa ที่อายุที่ 70 ปี ถือว่าเป็นค่าสุดท้ายของค่าสัมประสิทธิ์ของการคืบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Age at loading t_0 (days)	Dry atmospheric conditions (indoors) (RH = 50%)			Humid atmospheric conditions (out of doors) (RH = 80%)		
	Notional size $2A_c/u$ (mm)					
	50	150	600	50	150	600
1	5.8	4.8	3.9	3.8	3.4	3.0
7	4.1	3.3	2.7	2.7	2.4	2.1
28	3.1	2.6	2.1	2.0	1.8	1.6
90	2.5	2.1	1.7	1.6	1.5	1.3
365	1.9	1.6	1.3	1.2	1.1	1.0

รูปที่ 2.7 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์การคืบของโครงสร้างคอนกรีต

รูปที่ 2.7 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์การคืบของโครงสร้างคอนกรีต สำหรับคอนกรีตที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่าง 10 องศาเซลเซียสถึง 20 องศาเซลเซียส โดยคอนกรีตที่มีอุณหภูมิแปรผันระหว่าง -20 องศาเซลเซียสถึง +40 องศาเซลเซียสก็สามารถใช้ได้เช่นกัน

ความแตกต่างระหว่างประเภทของซีเมนต์จะให้ผลลัพธ์ของระดับความชื้นที่แตกต่างกัน การคืบของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับระดับความชื้นที่มีช่วงเวลามากกว่าอายุของคอนกรีต ดังนั้นผลกระทบเนื่องจากประเภทของซีเมนต์จะคำนึงถึงการปรับเปลี่ยนน้ำหนักที่กระทำเนื่องจากเวลา ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของระดับความชื้นสามารถประมาณได้จากประเภทของปูนซีเมนต์ ค่า t_0 ตามสมการที่ (2.52) นำไปใช้ในสมการ (2.46) ช่วงเวลาที่น้ำหนักกระทำ $t - t_0$ ที่ใช้ในสมการที่ (2.50) เป็นเวลาจริงที่น้ำหนักกระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) ผลกระทบเนื่องจากประเภทของปูนซีเมนต์และอุณหภูมิในการบ่ม

ผลกระทบเนื่องจากประเภทของปูนซีเมนต์ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์จะคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่กระทำเนื่องจากเวลาตามสมการที่ (2.50)

$$t_0 = t_{0,T} \left[\frac{9}{2 + \left(\frac{t_{0,T}}{t_{1,T}} \right)^{1.2}} + 1 \right]^x \geq 0.5 \text{ days} \quad (2.50)$$

เมื่อ

$t_{0,T}$ คือ อายุของคอนกรีตที่รับน้ำหนักบรรทุก (วัน)

$t_{1,T} = 1$ วัน

พฤติกรรมการคืบของคอนกรีตด้วยซีเมนต์ผสมจะสามารถคำนวณค่าโดยประมาณด้วยสมการดังต่อไปนี้ แต่อย่างไรก็ตามการคาดคะเนอาจมีข้อผิดพลาด ปัจจัยสำคัญของพฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นการแตกหักขนาดเล็ก เนื่องจากการหดตัวหรือการรับน้ำหนักที่กระทำมากและหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้น

จากสมการที่ (2.51) แสดงให้เห็นถึงความเรียบง่ายโดยไม่คำนึงถึงการลดลงแบบไม่เชิงเส้นโดยการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักที่กระทำและการลดลงของความชื้นระหว่างรับน้ำหนักกระทำ สำหรับคอนกรีตมวลเบาและมีความชื้นสัมพัทธ์สูง ค่าสัมประสิทธิ์จะมีค่าต่ำ $\alpha_\sigma = 0.5$

สำหรับระยะเวลาในการบ่มขึ้นส่วนคอนกรีต $t_s < 14 \text{ days}$ ที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อมปกติ เป็นระยะเวลาที่ทำการบ่มขึ้นส่วนคอนกรีตแล้วไม่ทำให้เกิดการหดตัว ดังนั้นตัวแปรนี้ไม่ได้คำนึงถึงผลของอุณหภูมิขณะบ่มขึ้นส่วนคอนกรีต

สมการที่ (2.53) และ (2.58) เป็นระยะเวลาจริงที่มีการอบแห้ง $(t - t_s)$ ใช้ได้โดยไม่มีผลกระทบของการปรับเปลี่ยน t_0 หรือ t_s ตามสมการที่(2.50)

คล้ายกับการคืบและการหดตัวของคอนกรีตจะไม่ขึ้นกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยการหดตัวของคอนกรีตจะลดลงโดยการลดลงของอัตราส่วนระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์และการลดลงของปริมาณปูนซีเมนต์ ความหมายของค่าสัมประสิทธิ์ของที่ใช้ในการคาดคะเนการหดตัวของคอนกรีตต้องประมาณให้อยู่บนพื้นฐานโดยฐานข้อมูลในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลลัพธ์ $V_s = 35\%$ ซึ่งทำการประมาณจากการแจกแจงให้สอดคล้องทุก 5 % และ 10%

α คือ อิทธิพลเนื่องจากประเภทของปูนซีเมนต์

α เท่ากับ -1 สำหรับปูนซีเมนต์ที่แข็งตัวช้า (ชนิดSL), 0 สำหรับปูนซีเมนต์ที่แข็งตัวปกติ (ชนิดNและR) และ 1 สำหรับปูนซีเมนต์แข็งตัวเร็วและกำลังสูง (ชนิดRS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ง) ผลกระทบเนื่องจากหน่วยแรงอัดสูง

สำหรับหน่วยแรงอัดมีอยู่ในช่วง $0.4f_{cm}(t_0) < |\sigma_c| < 0.6f_{cm}(t_0)$ โดยการคืบแบบไม่เชิงเส้นจ
 คำนึงถึงตามสมการ (2.51) และ (2.52)

$$\phi_{0,k} = \phi_0 \exp[\alpha_\sigma(k_\sigma - 0.4)] \quad \text{for } 0.4 < \alpha_\sigma \leq 0.6 \quad (2.51)$$

$$\phi_{0,k} = \phi_0 \quad \text{for } k_\sigma \leq 0.4 \quad (2.52)$$

เมื่อ

$\phi_{0,k}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การคืบแบบไม่เชิงเส้นตามที่คาดการณ์

$$k_\sigma = |\sigma_c|/f_{cm}(t_0)$$

$$\alpha_\sigma = 1.5.$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.4.4. การหดตัว

ค่าการหดตัวทั้งหมด $\epsilon_{cs}(t, t_s)$ คำนวณได้จาก

$$\epsilon_{cs}(t, t_s) = \epsilon_{cso} \beta_s (t - t_s) \quad (2.53)$$

เมื่อ

ϵ_{cso} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การหดตัวตามที่คาดการณ์ (สมการ (2.54))

β_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์การหดตัวเนื่องจากเวลา

t คือ อายุของคอนกรีต (วัน) ขณะที่ทำการพิจารณา

t_s คือ อายุของคอนกรีตที่เริ่มมีการหดตัว

ค่าสัมประสิทธิ์การหดตัวตามที่คาดการณ์หาได้จาก

$$\epsilon_{cso} = \epsilon_s (f_{cm}) \beta_{RH} \quad (2.54)$$

$$\epsilon_{cs0.10} = 0.55 \epsilon_{cs}; \epsilon_{cs0.05} = 0.42 \epsilon_{cs}$$

$$\epsilon_{cs0.90} = 1.45 \epsilon_{cs}; \epsilon_{cs0.95} = 1.58 \epsilon_{cs}$$

ในกรณีที่ค่าที่ได้มีความแม่นยำต่ำ ค่าจากตารางรูปที่ 2.8 สามารถใช้ค่าสัมประสิทธิ์การหดตัวของคอนกรีตเมื่อมีน้ำหนักมากกระทำที่อายุ 70 ปีขึ้นไปได้แทนได้สำหรับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไปที่มีคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดมีค่าระหว่าง 20 ถึง 50 MPa ที่อายุที่ 70 ปี ถือว่าเป็นค่าสุดท้ายของค่าสัมประสิทธิ์ของการหดตัว

Dry atmospheric conditions (inside) ($RH = 50\%$)			Humid atmospheric conditions (outside) ($RH = 80\%$)		
Notional size $2A_c/u$ (mm)					
50	150	600	50	150	600
-0.57	-0.56	-0.47	-0.32	-0.31	-0.26

รูปที่ 2.8 ตารางแสดงค่าการหดตัวของโครงสร้างคอนกรีต

สำหรับการคำนวณค่าการหดตัวของชิ้นส่วนคอนกรีตขนาดใหญ่หลังจากที่ผ่านการอบแห้งเป็นระยะเวลาเวลานานค่าการหดตัวคำนวณได้จากสมการ (2.58) สำหรับ $2A_c/U = 500$ มิลลิเมตร และค่าจากตารางที่ 2.1.11 สำหรับชิ้นส่วนที่เกิดการหดตัวที่มีขนาด $2A_c/U = 600$ มิลลิเมตร

โดย

$$\varepsilon_s(f_{cm}) = \left[160 + 10\beta_{sc} \left(9 - \frac{f_{cm}}{f_{cmo}} \right) \right] \times 10^{-6} \quad (2.55)$$

เมื่อ

f_{cm} คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

$f_{cmo} = 10$ MPa

β_{sc} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ขึ้นกับประเภทของปูนซีเมนต์เท่ากับ 4 สำหรับปูนซีเมนต์ที่แข็งตัวช้า (ชนิดSL) เท่ากับ 5 สำหรับปูนซีเมนต์ที่แข็งตัวปกติ (ชนิดNและR) และเท่ากับ 8 สำหรับปูนซีเมนต์แข็งตัวเร็วและกำลังสูง (ชนิดRS)

$$\beta_{RH} = -1.550\beta_{sRH} \text{ for } 40\% \leq RH < 99\%$$

$$\beta_{RH} = +0.25 \quad \text{for } RH \geq 99\% \quad (2.56)$$

เมื่อ

$$\beta_{sRH} = 1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \quad (2.57)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ที่บรรยากาศปกติ

$RH_0 = 100\%$.

การหาค่าเนื่องจากผลของเวลา แสดงดังสมการ

$$\beta_s(t - t_1) = \left[\frac{(t - t_s)/t_1}{350(h/h_0)^2 + (t - t_s)/t_1} \right]^{0.5} \quad (2.58)$$

เมื่อ

h หาได้จากสมการ (2.47)

$t_1 = 1 \text{ day}$

$h_0 = 100 \text{ mm.}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ภูมิเกียรติสว่างวงศ์(2559)การวิจัยนี้มุ่งศึกษาการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างของสะพานที่ก่อสร้างโดยวิธีโครงสร้างยื่นสมดุลซึ่งจะพิจารณาถึงสภาพการรับน้ำหนักบรรทุกและการใช้งานตามการก่อสร้างจริงโดยรูปแบบของสะพานเป็นคานต่อเนื่อง 3 ช่วง รับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อตัวโครงสร้างโดยจะเปลี่ยนน้ำหนักกระทำไปตามขั้นตอนต่าง ๆ ของการก่อสร้างโครงสร้างจากสภาพน้ำหนักบรรทุกที่แตกต่างกันในแต่ละขั้นตอนนี้จะคำนึงถึงผลของการสูญเสียแรงดึงของลวดอัดแรงที่เกิดขึ้นทันทีทันใดหลังจากการถ่ายแรงและมีการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลาในระหว่างการก่อสร้างจนไปถึงขั้นตอนสุดท้ายของการก่อสร้างเมื่อทำการก่อสร้างสุดท้ายของการหล่อชิ้นส่วนหล่อปิดและทำการดึงลวดอัดแรงของช่วงกลางโครงสร้างเปลี่ยนสภาพจากช่วงคานยื่นช่วงเดียวเป็นคานต่อเนื่อง โดยการออกแบบและวิเคราะห์ 3 ขั้นตอนตามการก่อสร้างจริง จะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อเปรียบเทียบโมเมนต์ดัด แรงเฉือน แรงบิดและหน่วยแรงทั้ง 3 ช่วงของการก่อสร้าง รวมถึงการแอ่นตัวระหว่างการก่อสร้างและหลังการใช้งานเปรียบเทียบกับค่าที่ยอมรับเพื่อนำผลการวิจัยไปใช้งานในการก่อสร้างจริงหรือตรวจสอบโครงสร้างสะพานที่ก่อสร้างด้วยวิธีโครงสร้างยื่นสมดุลในอนาคตต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิจัยนี้มีขั้นตอนการศึกษา 2 ขั้นตอนประกอบด้วยขั้นตอนแรกการจำลองแบบโครงสร้างพื้นคอนกรีตอัดแรงตามแบบอาคารพักอาศัยโดยมีน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน EURO 3.05 โดยใช้กรณีศึกษาจากตัวอย่างพื้นคอนกรีตอัดแรงที่มีน้ำหนักสถิตคงที่และพิจารณาพฤติกรรมภายในชั้นส่วนของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงประกอบด้วยลวดอัดแรงและคอนกรีตเมื่อการก่อสร้างเสร็จสิ้นกับช่วงเวลาหลังจากการก่อสร้าง 5 ปี 10 ปี 15 ปี และ 20 ปีตามลำดับโดยพฤติกรรมภายในชั้นส่วนโครงสร้างต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจะถูกนำมาวิเคราะห์โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในขั้นตอนที่ 2 โดยการพิจารณาพฤติกรรมภายในชั้นส่วนโครงสร้างพื้นคอนกรีตอัดแรงตามช่วงเวลาดังกล่าว

การศึกษาวิจัยนี้จะพิจารณาองค์ประกอบรวมอื่น ๆ ทางด้านโครงสร้างที่เกี่ยวข้องและเสนอแนะรูปแบบของกราฟทั้งนี้วิธีการศึกษาและข้อมูลต่าง ๆ ยังสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลในการจัดทำโปรแกรมออกแบบสำเร็จรูปสำหรับออกแบบ

3.1 ศึกษาข้อมูลและข้อกำหนดมาตรฐานของการออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรง

3.1.1 มาตรฐานการออกแบบ (Design Standard)

การจำลองโครงสร้างพื้นคอนกรีตอัดแรงดำเนินการตามข้อกำหนดดังมาตรฐานดังต่อไปนี้

1. EN 1992-1-1 (2004) (English): Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]
2. มยผ. 1102-52 มาตรฐานงานคอนกรีตอัดแรง
- 2.2 CEB-FIP model code for concrete structures 1990, for time dependent behavior of concrete shrinkage and creep

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 คุณสมบัติของวัสดุก่อสร้างสะพาน

กำลังวัสดุที่ใช้ในการคำนวณหรือควบคุมคุณภาพวัสดุนอกจากที่ระบุไว้ในแบบแล้วจะใช้ค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

3.2.1 คอนกรีต

ค่ากำลังอัดของแท่งคอนกรีตมาตรฐานที่ 28 วันมีค่าดังนี้

ส่วนพื้น	350.00 กก/ชม ²
ส่วนเสา	240.00 กก/ชม ²
MODULUS OF ELASTICITYมีค่าดังนี้	
ส่วนพื้น	274.60 ตัน/ชม ²
ส่วนเสา	238.00 ตัน/ชม ²

3.2.2 ลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรง

ลวดเหล็กกล้าตีเกลียวจะใช้เป็นกรณีเป็นเหล็กเสริมอัดแรงซึ่งจะใช้ลวดตีเกลียวชนิด 7 เส้นเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7mm (Uncoated 7 – Wire Low Relaxation Strand) เกรด 270 ตามมาตรฐาน ASTM A416-1987 หรือมอก. 420, CLASS 1860 หรือเทียบเท่าโดยมีค่าแรงดึงสูงไม่น้อยกว่า 18600 กก/ชม²

3.2.3 ระบบคอนกรีตอัดแรงที่หลัง

ความแข็งแรงของเหล็กทนแรงดึงสูงสุด	19.00 ตัน/ชม ²
ความแข็งแรงของเหล็กทนแรงดึงเฉลี่ย(ส่วนปลาย)	10.80 ตัน/ชม ²
หน้าตัดลวดอัดแรง	0.99 ชม ²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบ Boned System

- ระบบBoned System เนระบบที่มีการยึดเหนี่ยวระหว่างลวดเหล็กกล้าตีเกลียวกับพื้นคอนกรีตโดยจะห่อหุ้มด้วยท่อเหล็กที่ขึ้นเป็นลอนเพื่อช่วยในเรื่องของแรงยึดเหนี่ยวภายหลังเมื่อทำการอัดแรงมีการอัดน้ำปูนเพื่อให้จับยึดระหว่างลวดเหล็กกล้าตีเกลียวกับท่อเหล็กใช้กับอาคารที่พัก

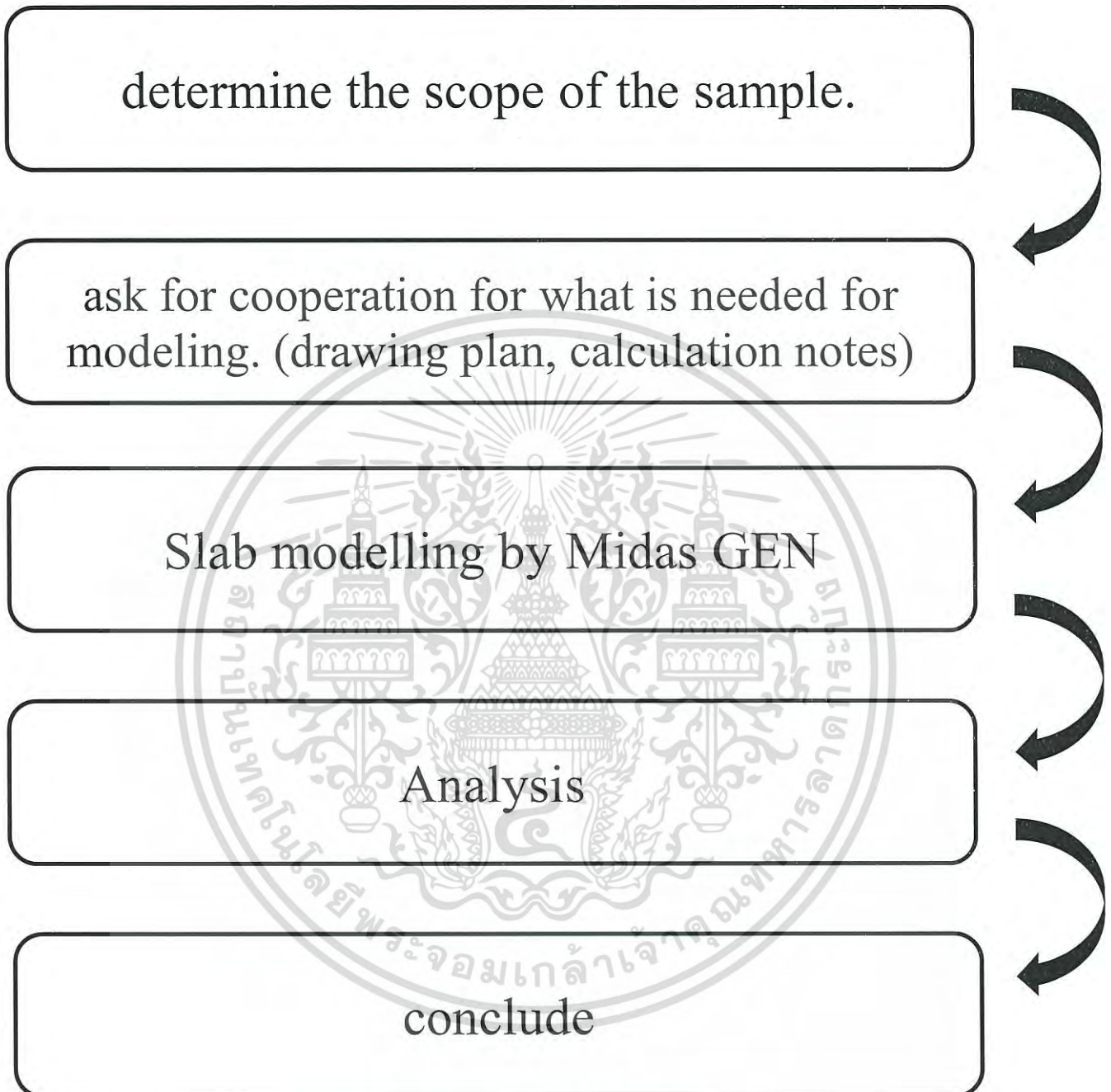
ข้อดี

- หลังจากอัดน้ำปูนแรงอัดกระจายสู่พื้นได้ทั้งเส้นลวด
- หากเส้นลวดได้รับความเสียหายจะเกิดความเสียหายเฉพาะจุดทำให้เหมาะสมกับอาคารพักอาศัยที่มีแนวโน้มในการต่อเติมในอนาคตสูง

ข้อเสีย

- มีค่าใช้จ่ายสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การจำลองโมเดลโครงสร้างพื้นคอนกรีตอัดแรง

ศึกษาโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่ใช้หลักการของไฟไนต์เอลิเมนต์โดยรูปแบบโครงสร้างที่ทำการวิเคราะห์โดยเลือกโปรแกรมที่สามารถวิเคราะห์โครงสร้างได้อย่างถูกต้องและได้รับการยอมรับในการวิเคราะห์โครงสร้างและทดสอบความถูกต้องด้วยการจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรมเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์โครงสร้าง

ชนิดของโครงสร้าง : พื้น Post-tension

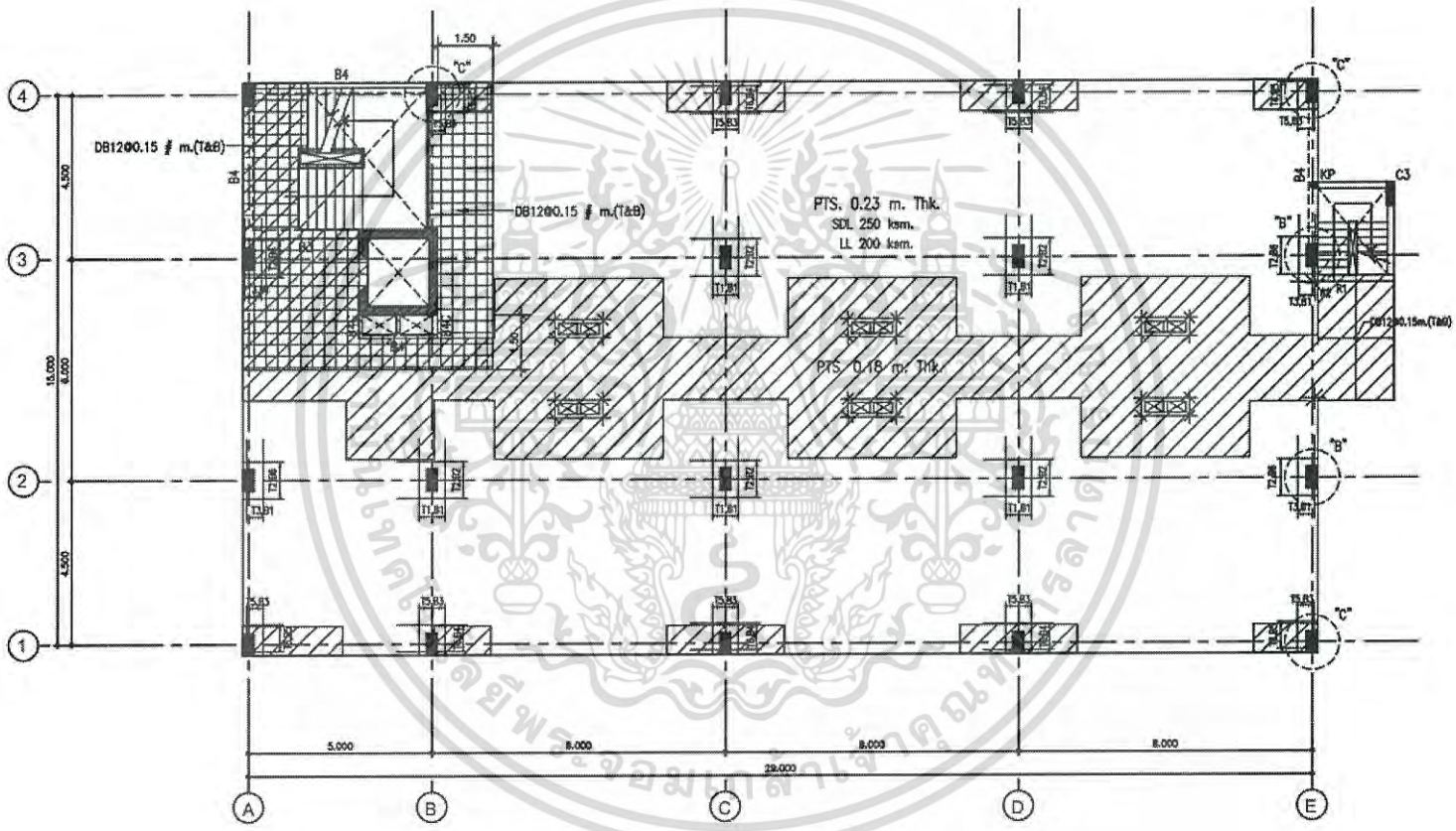
ขนาดของพื้น : 15 x 29 เมตร

ความหนาพื้น : 0.23 เมตร

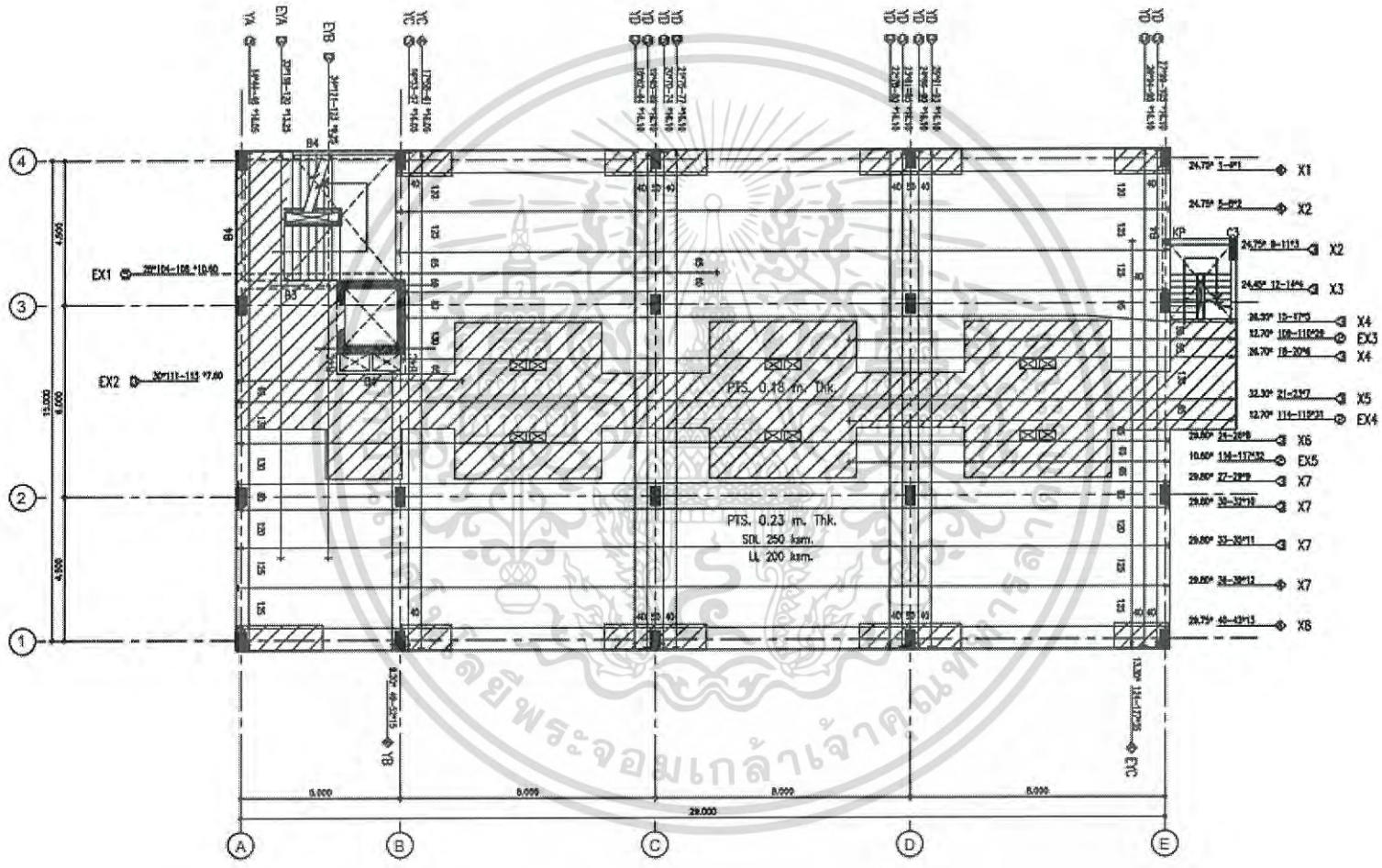
ขนาดเสา : 0.6 x 0.4 เมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แบบเหล็กในพื้น Post - tension

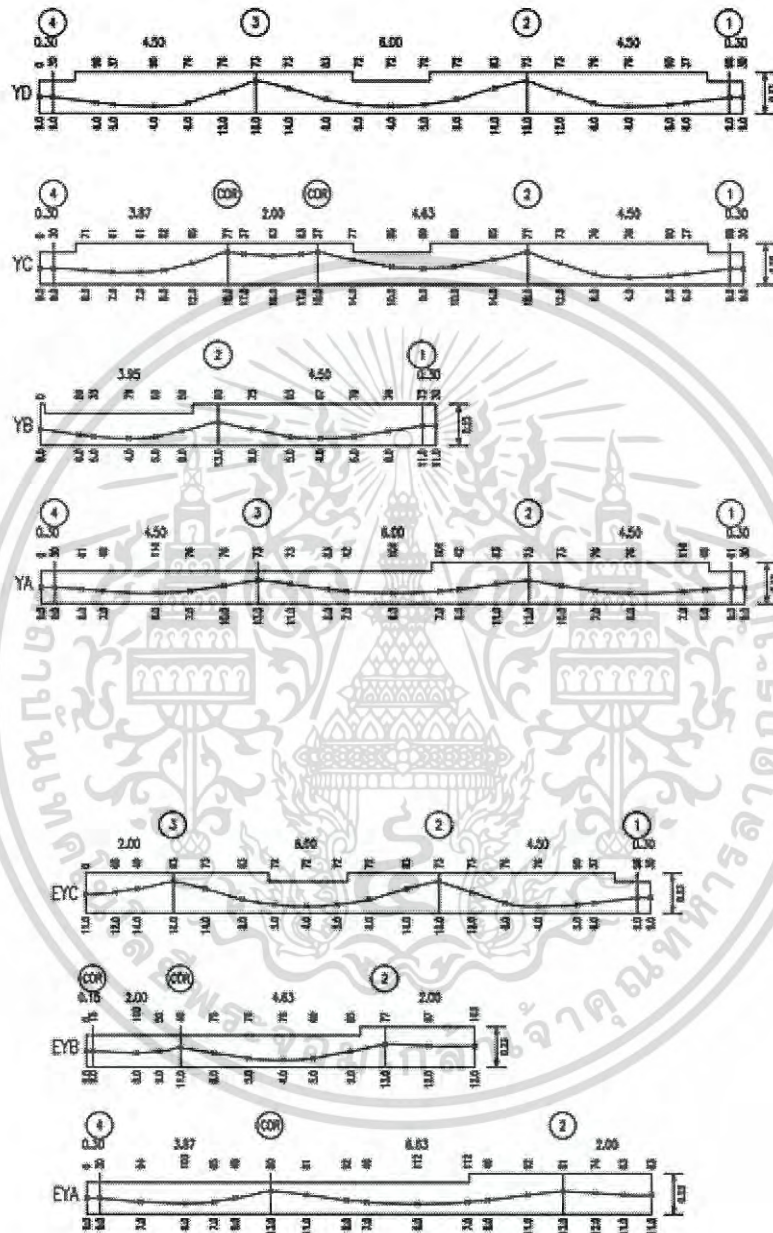


รูปที่ 3.3 แบบการวาง tendon ในพื้น Post-tension



รูปที่ 3.4 profile tendon ในแนวแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 profile tendon ในแนวแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเริ่มต้นใช้งานโปรแกรม

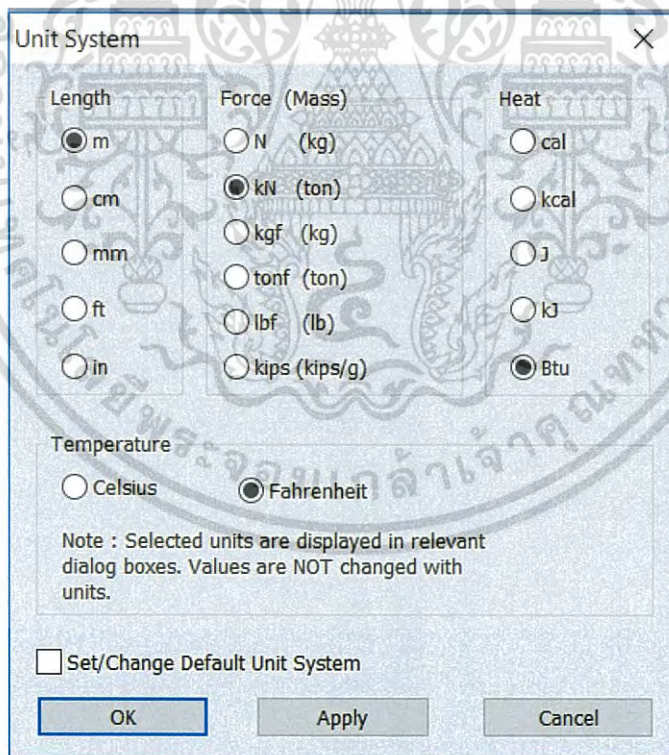
เปิดโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จากนั้นเลือกเมนูFile – New หรือเลือกNew Project จากกรอบProject Tasks และเมื่อโปรแกรมถูกโหลดขึ้นมาจะแสดงหน้าต่างNew ดังรูปที่ 3.6แล้วใส่ข้อมูลดังนี้

ชนิดโครงสร้าง = Space

ชื่อไฟล์ = Edited1

หน่วยความยาว = Meter

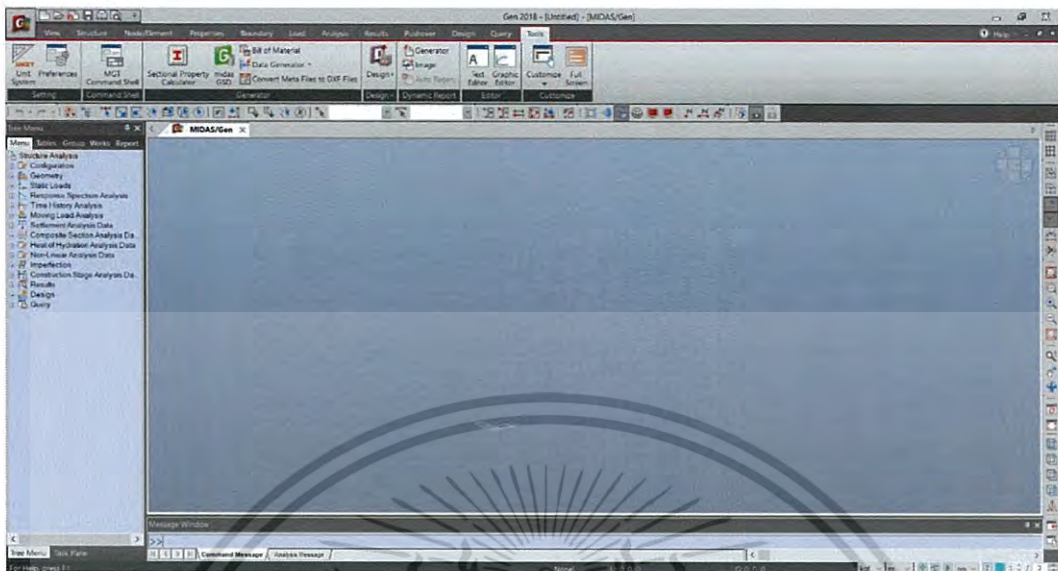
หน่วยแรง = Kilogram



รูปที่ 3.6 ตั้งค่าเริ่มต้นของโปรแกรม

จากนั้นคลิกOK จะได้ดังรูป 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 หน้าต่างเริ่มต้นของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

ส่วนประกอบของหน้าต่างโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงดังรูป 3.7 ประกอบด้วยดังนี้

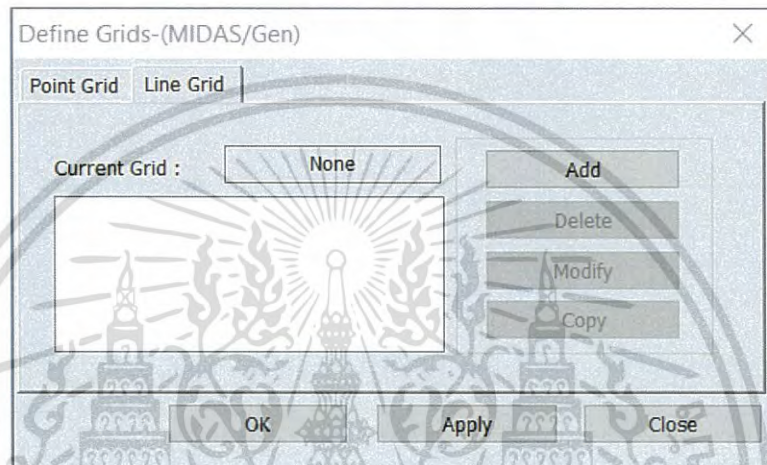
- Menu Bar อยู่บนสุดของหน้าจอเราสามารถเรียกได้ทุกคำสั่งของโปรแกรมได้จากเมนูนี้
- Toolbar ทูลบาร์ที่อยู่ถัดไปจากเมนูแบบที่อยู่ในแนวตั้งด้านซ้ายซึ่งสามารถกดเข้าออกได้สำหรับคำสั่งที่ใช้บ่อยเพื่อความสะดวกในการใช้โปรแกรมโดยเราสามารถกำหนดเอง
- Main window เป็นพื้นที่ที่ใหญ่สุดบริเวณหน้าจอใช้แสดงแบบจำลองและผลการคำนวณ
- Page Control เป็นชุดแถบขวาของเมนูวินโดวมี 2 แถวคือแต่ละหน้าหลักจะแยกเป็นหน้าย่อยใช้ทำงานเฉพาะอย่างการเรียงหน้าหลักหน้าย่อยจะเป็นไปตามลักษณะการทำงาน
- Data Area เป็นพื้นที่ด้านซ้ายของจอแสดงกล่องโต้ตอบตารางหรือกล่องรายการต่าง ๆ ตามลักษณะการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดเส้นตาราง

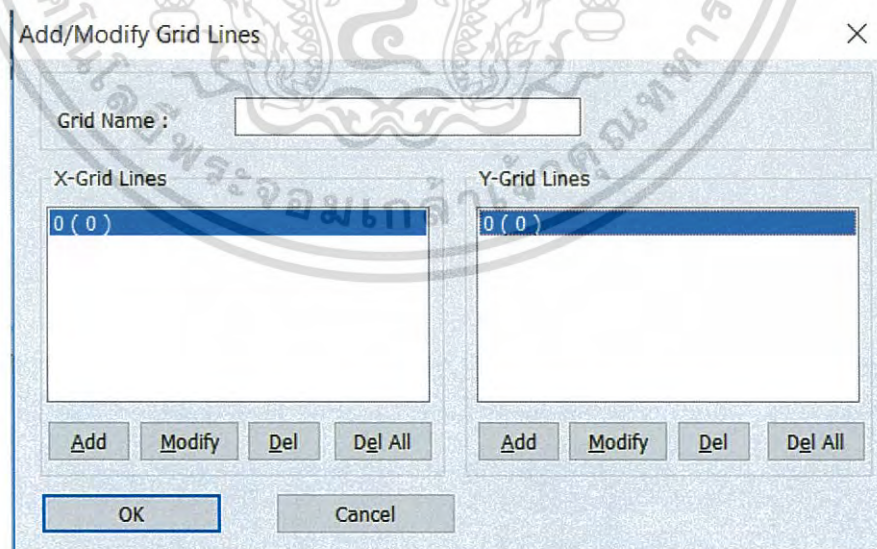
กำหนดเส้นตารางที่ใช้ได้แก่เส้นตารางสำหรับการวางเสาและเส้นตารางสำหรับการวางแนวลวดอัดแรง เพื่อให้สะดวกต่อการโมเดลตัวอย่าง

โดยการเลือกเมนู Structure -> Grids -> Define Line Grid จะเกิดหน้าต่างดังรูป 3.8



รูปที่ 3.8 แสดง Define Grid

หลังจากนั้นคลิก add จะเกิดหน้าต่างดังรูป 3.9



รูปที่ 3.9 แสดง Add/Modify grid Lines

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตั้งชื่อ Grid ว่าSlab ->กดAdd ในแกนx ใส่ค่าตามระยะพื้นในแบบ -> OK จะได้ดังรูป 3.10

Add/Modify Grid Lines ×

Grid Name :

X-Grid Lines	Y-Grid Lines
-15 (0) 2900 (2915)	0 (0)

รูปที่ 3.10 แสดงค่าgrid ในแกนx ทำซ้ำในแนวแกน

ทำซ้ำในแนวแกนy จะได้ดังรูป3.11 จากนั้นคลิกOK

Add/Modify Grid Lines ×

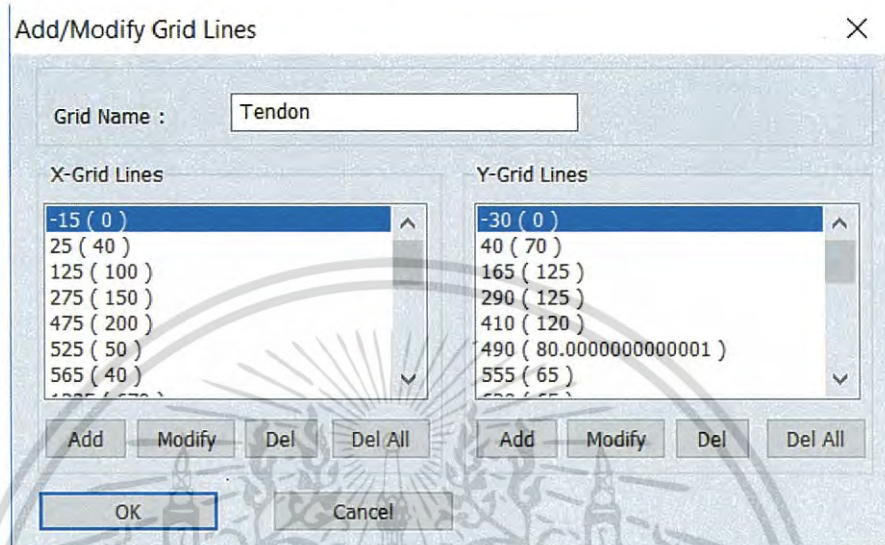
Grid Name :

X-Grid Lines	Y-Grid Lines
-15 (0) 2915 (2930)	-30 (0) 1530 (1560)

รูปที่ 3.11 แสดงGrid ของพื้นที่ทั้งแกนx และแกนy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นทำGrid ของลวดอัดแรงโดยวิธีเดิมคือAdd ->ตั้งชื่อTendon -> Add ใส่profile ของลวดอัดแรงในแต่ละแกนดังรูป 3.12จากนั้นกดOK



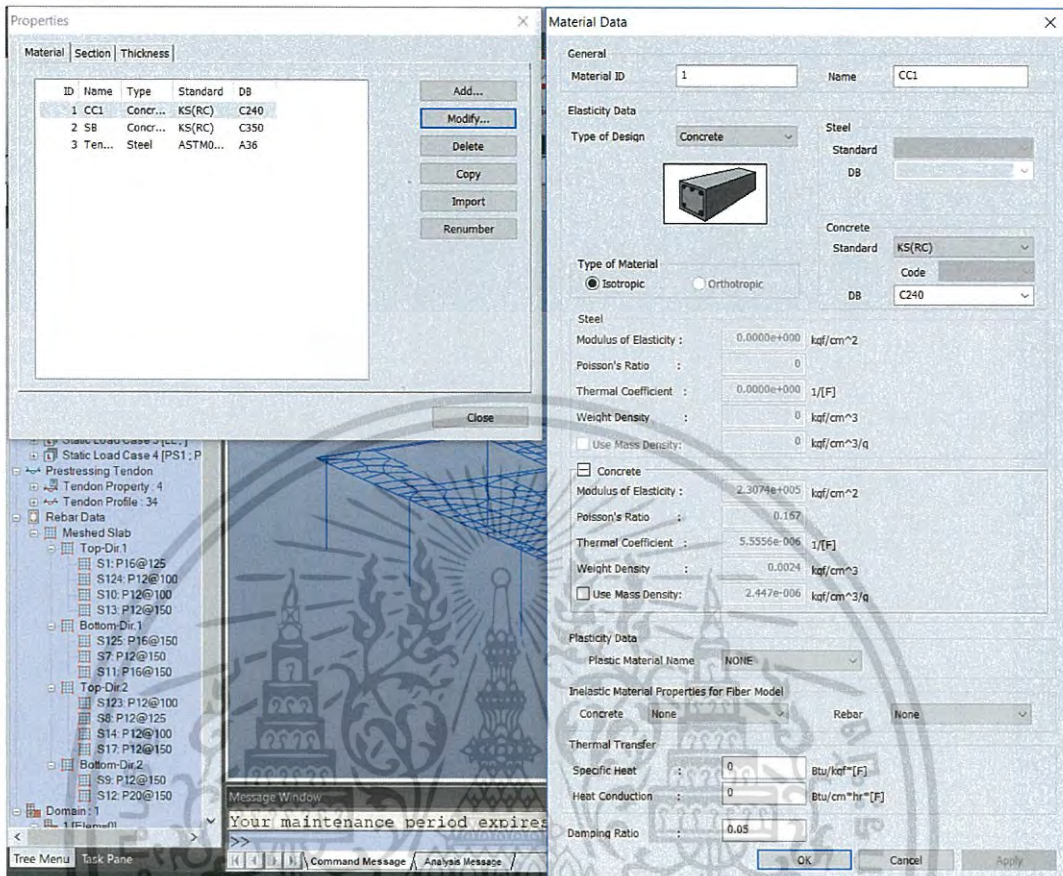
รูปที่ 3.12 แสดงGrid ของลวดอัดแรงที่ใส่Profile ของลวดเรียบร้อยแล้ว

กำหนดคุณสมบัติวัสดุ

กำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ได้แก่คุณสมบัติของคอนกรีตอัดแรงและคุณสมบัติของลวดเหล็กกล้าในส่วน
ของSuperstructure เพื่อให้โมเดลที่ผู้ใช้ได้จำลองแล้วนั้นมีความใกล้เคียงกับโครงสร้างพื้นคอนกรีตอัดแรงของจริง
มากที่สุดคลิกModel -> Properties -> Material Data

- คลิกแถบด้านข้าง หน้าหลัก Properties -> Material Data -> Type of Design โดยกำหนดให้
คุณสมบัติของคานเป็นคอนกรีต, เหล็กเสริมและลวดอัดแรงดังรูป 3.13

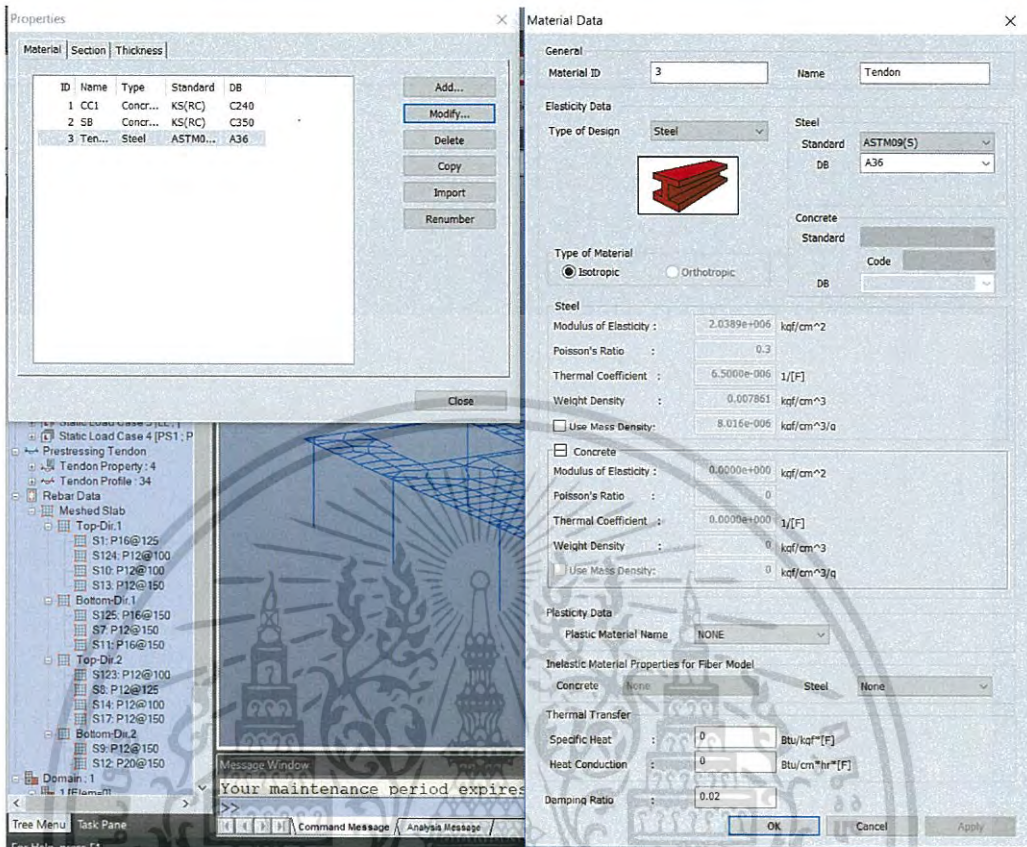
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 แสดงการกำหนดคุณสมบัติของเสา

- โดยคุณสมบัติของคอนกรีตใช้มาตรฐาน KS(RC) เลือกรหัส C240 ซึ่งมีค่า Modulus of Elasticity เท่ากับ $2.3074 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



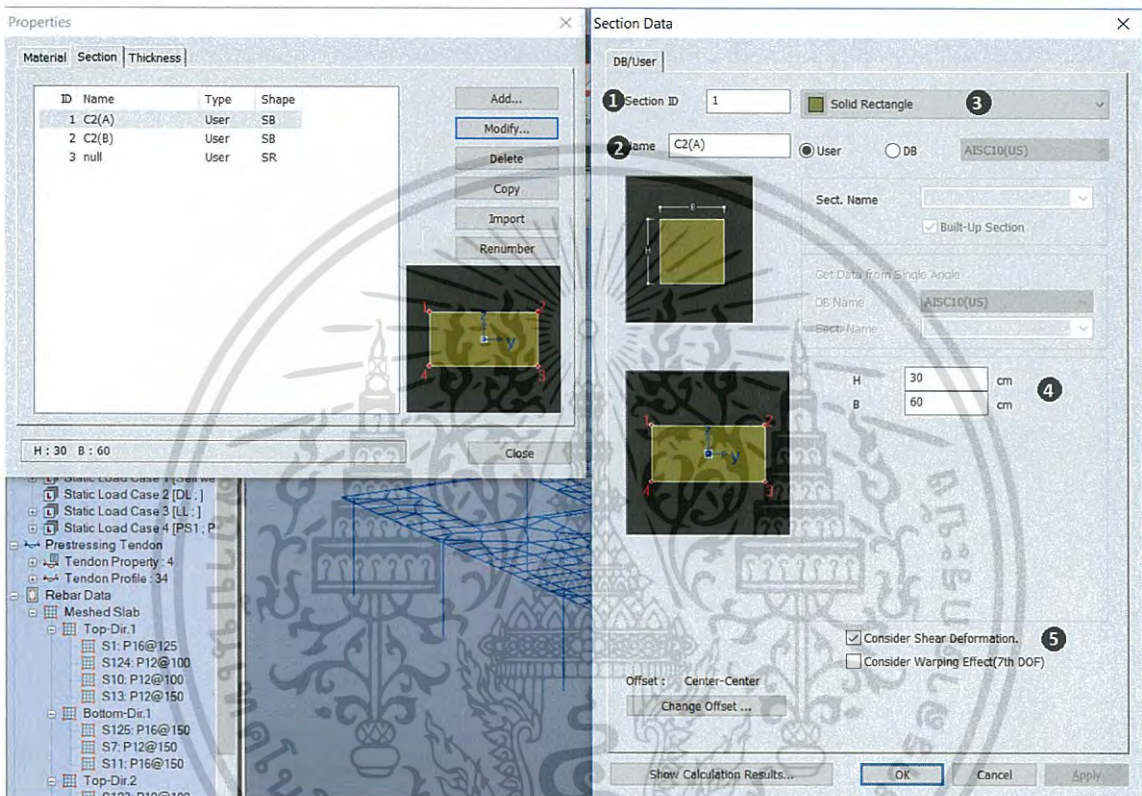
รูปที่ 3.15 แสดงการกำหนดคุณสมบัติของลวดอัดแรง

- คุณสมบัติของลวดเหล็กกล้าตีเกลียวใช้มาตรฐาน ASTM(S) เลือกร A36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดคุณสมบัติของหน้าตัดที่ใช้

ประกอบด้วยหน้าตัดเสาขนาด 30x60 cm และพื้นคอนกรีตอัดแรง โดยคลิก Model properties -> Section Properties -> Add -> ใส่ค่าตามรูป 3.16 จากนั้นกด OK หลังจากนั้นทำในส่วนของพื้น



รูปที่ 3.16 แสดงหน้าต่างกำหนดหน้าตัดของวัสดุ

- หมายเลข 1 ใส่เลขลำดับของหน้าตัด
- หมายเลข 2 ใส่ชื่อของหน้าตัด
- หมายเลข 3 ใส่ชนิดของหน้าตัด
- หมายเลข 4 ใส่ขนาดของหน้าตัด
- หมายเลข 5 เลื่อนมาพิจารณาการเสีรูปของหน้าตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดค่ามาตรฐานการสูญเสียกำลังเกิดขึ้นจากเวลา

กำหนดค่าตัวแปรที่ทำให้เกิดการสูญเสียแรงภายในโครงสร้างคอนกรีตมีขั้นตอนดังนี้คลิกProperties -> Time Dependent ผู้ใช้จะใช้คำสั่งไฟล์ 4 คำสั่งในการกำหนดค่าได้แก่

1. Creep/Shrinkage

ขั้นตอนการกำหนดมาตรฐานการสูญเสียกำลังของคอนกรีตของCreep และShrinkage ใส่ข้อมูลดังนี้

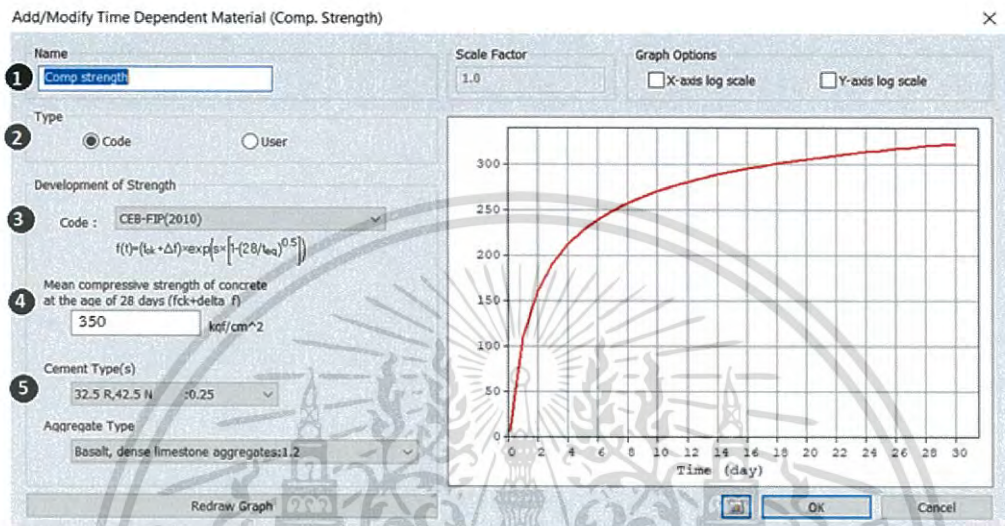
รูปที่ 3.17 การตั้งค่าCreep/Shrinkage

- | | |
|-----------|--|
| หมายเลข 1 | ใส่ชื่อCreep/Shrinkage |
| หมายเลข 2 | ใส่ค่ากำลังแรงอัดของคอนกรีตเมื่ออายุได้ 28 วันเท่ากับ 350 ksc |
| หมายเลข 3 | ใส่ความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อมในประเทศไทยผู้ใช้ใส่ 70% |
| หมายเลข 4 | ค่าประมาณขนาดของชิ้นส่วนใส่ 25 cm (ความลึกเทียบเท่าของหน้าตัด) |
| หมายเลข 5 | ชนิดของคอนกรีตเลือก 32.5 R, 42.5 N |
| หมายเลข 6 | จำนวนวันที่เริ่มสังเกตการณ์หดตัวของคอนกรีตใส่3วัน |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Comp. Strength

ขั้นตอนการกำหนดมาตรฐานการสูญเสียกำลังในส่วนของกำลังอัดคอนกรีตใส่ข้อมูลดังนี้



รูปที่ 3.18 แสดงการตั้งค่าComp.Strength

- หมายเลข 1 ใส่ชื่อCom.Strength
- หมายเลข 2 ใส่Typeเลือก Code
- หมายเลข 3 Development of Strength Code เลือก: CEB-FIP (2010)
- หมายเลข 4 ค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดคือ 350 ksc
- หมายเลข 5 Cement Type(s) เลือกN,R :0.25 เป็นแบบปกติ

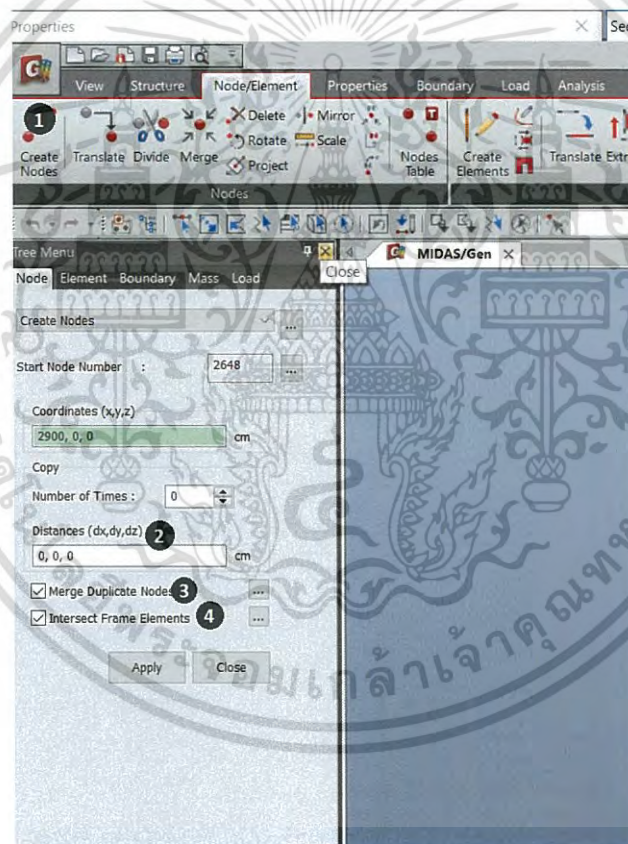
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างแบบจำลอง

เริ่มการสร้างแบบจำลองพื้นคอนกรีตอัดแรงโดยเริ่มจากแบ่งส่วนการสร้างเป็น 2 ส่วนคือส่วนเสาและส่วนพื้น

การสร้างแบบจำลองเสา

เริ่มจากสร้างจุดเชื่อมของเสาตาม Grid Line ที่ได้วางไว้โดยคลิก Node/Element -> Create Node -> ใส่พิกัดตำแหน่งเสา -> คลิก Merge Duplicate Nodes -> คลิก Intersect Frame Elements -> Apply ตามรูป 3.19

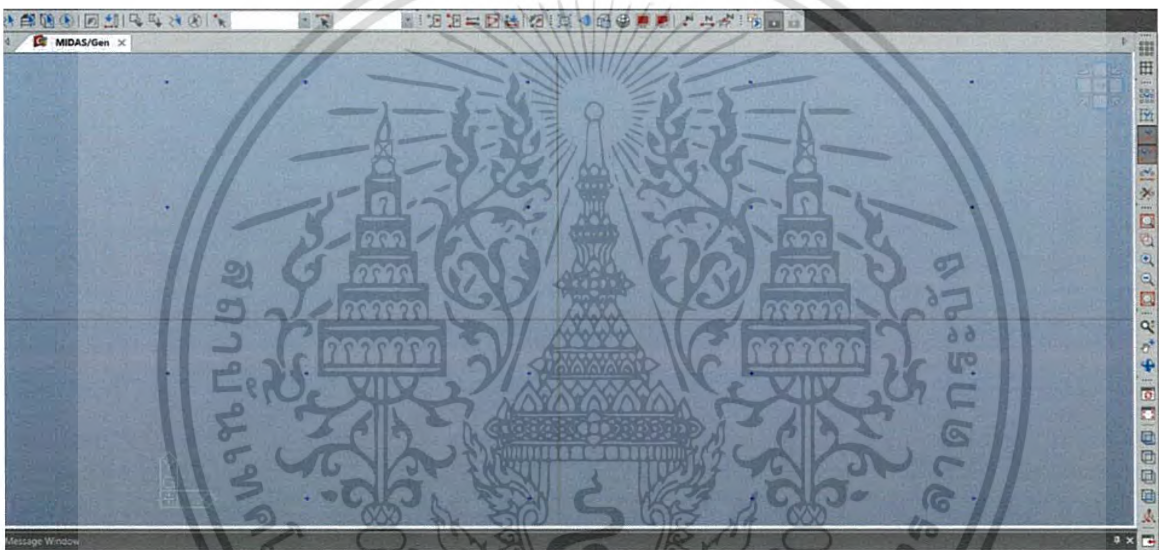


รูป 3.19 แสดงวิธีการสร้างจุดเชื่อมของเสา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หมายเลข 1 ปุ่ม Create Node
- หมายเลข 2 กำหนดพิกัดของเสา
- หมายเลข 3 เลือกทำสำเนาจุดเชื่อมของเสา(เพื่อถ่ายสำเนาจุดเชื่อมต่อ)
- หมายเลข 4 เลือกเพื่อแยกวัสดุในการวิเคราะห์

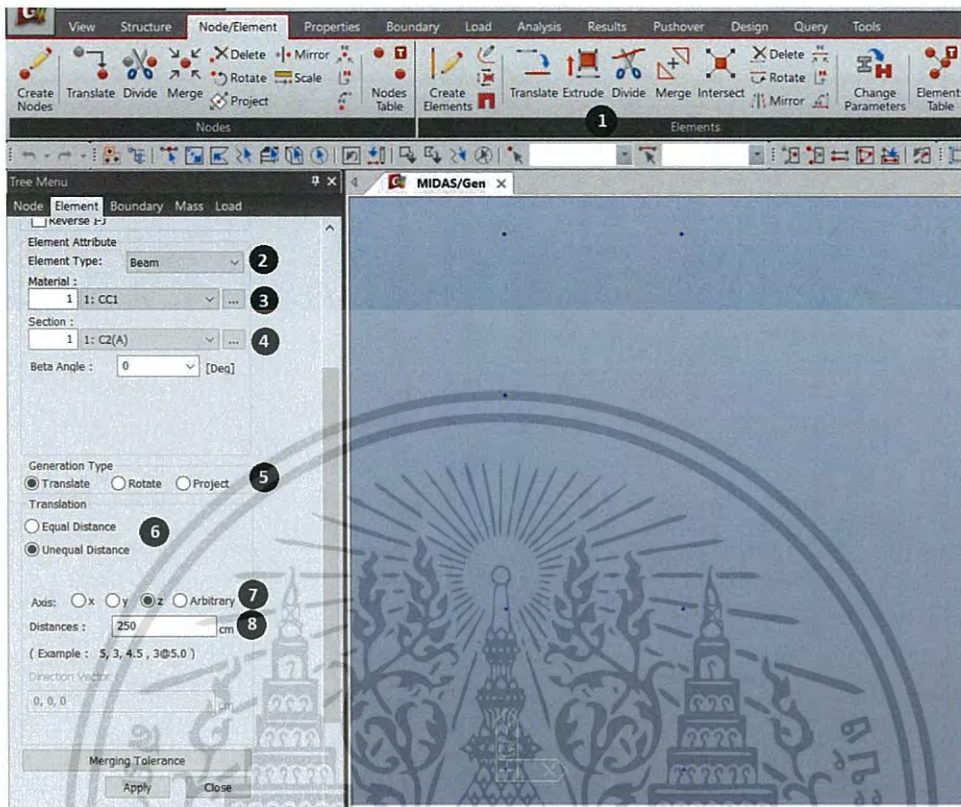
เมื่อทำครบทุกจุดเชื่อมแล้วจะได้ดังรูป 3.20



รูปที่ 3.20 เมื่อสร้าง Nodes ของเสาครบทุกจุดแล้ว

หลังจากนั้นเป็นคัตลอก Node ขึ้นมา 250 cm เพื่อที่จะทำการสร้างเส้น Element ของเสาขึ้นมาโดยคลิก Extrude -> Element type เลือก beam -> Material 1 เลือกเป็น CC1 -> Section 1 เลือกเป็น C2(A) -> Generation Type เลือกเป็น Translate -> Translation เลือก Unequal Distance -> Axis เลือก แกน z -> Distance เลือก 250 cm และทำซ้ำให้ครบทุก Node ดังรูป 3.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

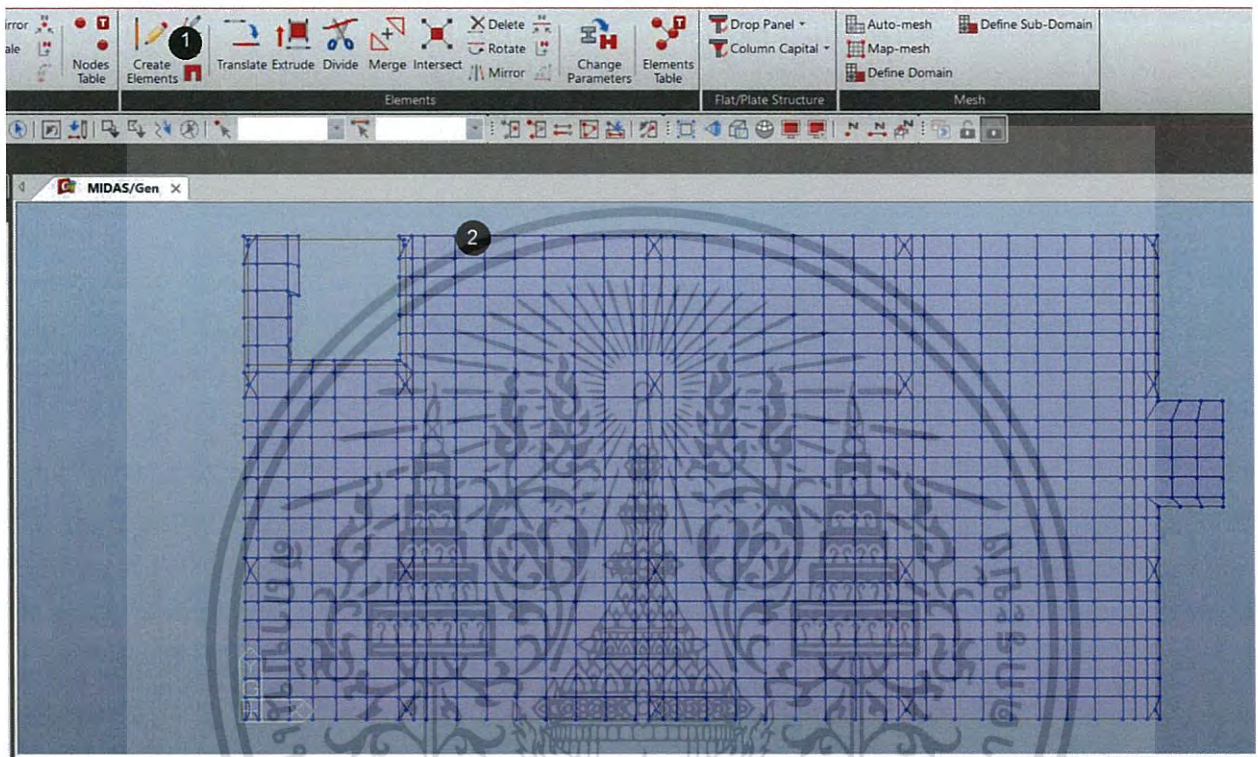


รูปที่ 3.21 แสดงวิธีสร้างเส้นElement

- หมายเลขที่ 1 ปุ่มExtrude
- หมายเลขที่ 2 เลือกElement Type เป็นbeam
- หมายเลขที่ 3 Material เลือก CC1
- หมายเลขที่ 4 Section เลือกC2(A)
- หมายเลขที่ 5 Generation Type เลือกTranslate
- หมายเลขที่ 6 Translation เลือกUnequal Distance
- หมายเลขที่ 7 Axis เลือกแกนz
- หมายเลขที่ 8 Distance ใส่ 250 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

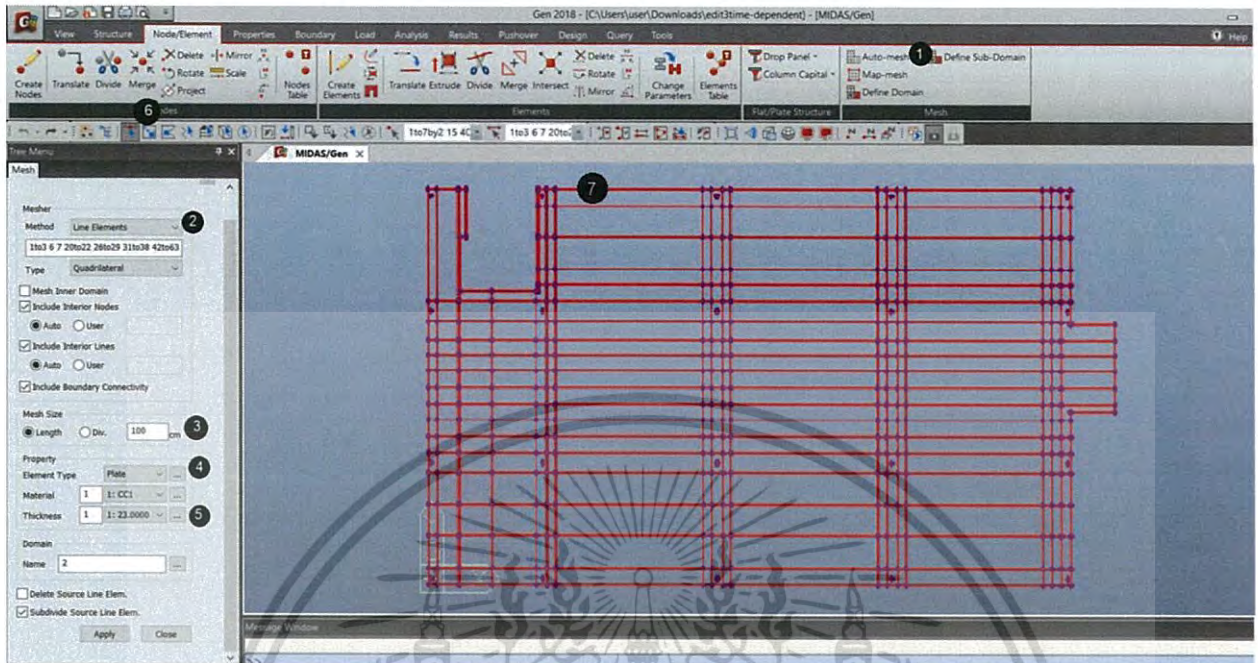
สร้างแบบจำลองพื้นเริ่มจากคลิกCreate Elements ร้าง Node ตามรายละเอียดแบบพื้นตัวอย่างดังรูป3.22



รูปที่ 3.22 แสดงการสร้างElement

- หมายเลข 1 เลือกCreate Element เพื่อสร้างElements
 หมายเลข 2 ลากElement เชื่อมNode ตามแบบพื้น

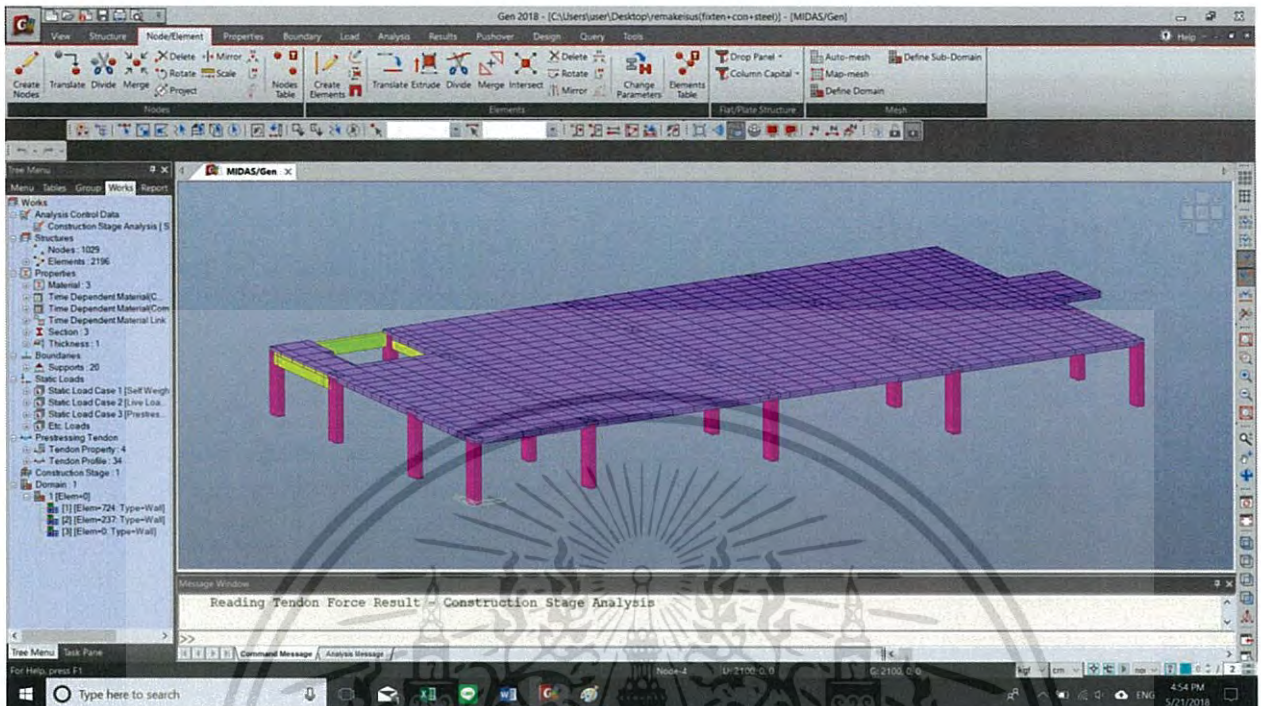
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.23 หน้าต่างขั้นตอนMesh พื้น

- หมายเลข 1 เลือกเป็นAuto Mesh
- หมายเลข 2 เลือกเป็นLine Elements
- หมายเลข 3 กำหนดMesh Size เป็น 100 cm(ค่าสำหรับ design)
- หมายเลข 4 เลือกประเภทพื้นว่าเป็นพื้นหนาหรือบาง
- หมายเลข 5 เลือกความหนาของพื้น
- หมายเลข 6 เลือกSelect Single แล้วทำการครอบตำแหน่งพื้นและช่องเปิด
- หมายเลข 7 ตัวอย่างเมื่อครอบหมดแล้วหลังจากนั้นกดApply

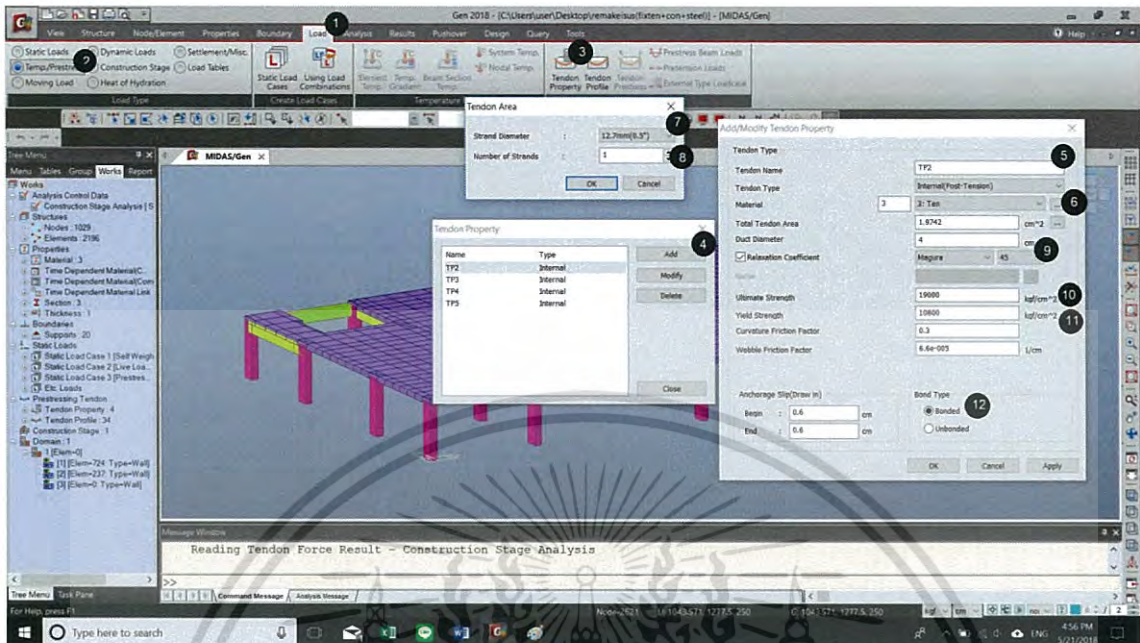
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 หน้าต่างเมื่อทำการMesh พื้นเรียบร้อยแล้ว

หลังจากนั้นเริ่มทำการใส่ลวดอัดแรงในพื้นที่โดยคลิกLoad -> Temp./Prestress -> Tendon Properties จะขึ้นหน้าตาดังรูป3.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.25 แสดงวิธีการกำหนดProperties ของTendon

- หมายเลข 1 เลือกLoad
- หมายเลข 2 เลือกTemp./Prestress
- หมายเลข 3 เลือกTendon Properties
- หมายเลข 4 หน้าต่างกำหนดProperties เลือกAdd เพิ่มProperties
- หมายเลข 5 ตั้งชื่อTendon
- หมายเลข 6 กำหนด Materials เพื่อเลือกจำนวนลวดในท่อ
- หมายเลข 7 เลือกขนาดหน้าตัดของTendon
- หมายเลข 8 เลือกจำนวน Tendon ในท่อ
- หมายเลข 9 เลือกขนาดของท่อใส่Tendon
- หมายเลข 10 ใส่ค่าUlt. Strength ตามในรายงานการคำนวณ
- หมายเลข 11 ใส่ค่าYield Strength ตามในรายงานการคำนวณ
- หมายเลข 12 เลือกBonded (รูปแบบตามแบบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นเป็นการใส่Profile ของTendon โดยเลือกTendon Profile -> Add จะขึ้นหน้าต่างตามรูป 3.26

Add/Modify Tendon Profile

Tendon Name : Group : Default

Tendon Property :

Assigned Elements :

Input Type
 2-D 3-D

Curve Type
 Spline Round

Straight Length of Tendon
 Begin : m
 End : m

Typical Tendon No. of Tendons :

Transfer Length
 Begin : End : m

Profile
 Reference Axis : Straight Curve Element

Y

	x(m)	y(m)	fix	Rz[deg]
1			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

z

	x(m)	z(m)	fix	Ry[deg]	BO
1			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Point of Sym.: First Last

Profile Insertion Point : End-I End-J of Elem.

x Axis Direction : I->J J->I of Elem.

x Axis Rot. Angle : [deg] Projection

Offset y : m z : m

รูป 3.26 แสดงหน้าต่างAdd Tendon Profile

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่มใส่Profile ตามรูป 3.27

Add/Modify Tendon Profile

Tendon Name : **THP2(EX4).1** Group : Default

Tendon Property : TP2

Assigned Elements : 380to386 540 541 1749 1750 1966 1973

Input Type : 2-D 3-D

Curve Type : Spline Round

Straight Length of Tendon : Begin : 0 cm End : 0 cm

Typical Tendon No. of Tendons : 1

Transfer Length : User defined Length Begin : 0 cm End : 0 cm

Profile Reference Axis : Straight Curve Element

Y : 3.00308 -96.9969

z : 3.00308 -96.9969

	x(cm)	y(cm)	z(cm)	fix	Ry[deg]	Rz[deg]
1	-8.000	0.0000	-2.500	<input type="checkbox"/>	0.00	0.00
2	81.000	0.0000	-1.500	<input type="checkbox"/>	0.00	0.00
3	118.00	0.0000	-0.500	<input type="checkbox"/>	0.00	0.00
4	192.00	0.0000	1.5000	<input type="checkbox"/>	0.00	0.00
5	276.00	0.0000	-0.500	<input type="checkbox"/>	0.00	0.00
6	353.00	0.0000	-3.500	<input type="checkbox"/>	0.00	0.00
7	423.00	0.0000	-5.500	<input type="checkbox"/>	0.00	0.00
8	473.00	0.0000	-6.500	<input type="checkbox"/>	0.00	0.00
9	592.00	0.0000	-7.500	<input type="checkbox"/>	0.00	0.00
10	711.00	0.0000	-6.500	<input type="checkbox"/>	0.00	0.00
11	761.00	0.0000	-5.500	<input type="checkbox"/>	0.00	0.00

Point of Sym.: First Last Make Symmetric Tendon

Profile Insertion Point : 1908, 685, 250 cm

x Axis Direction : X Y Vector

x Axis Rot. Angle : 0 [deg] Projection

Grad. Rot. Angle : Y 0 [deg]

OK Cancel Apply

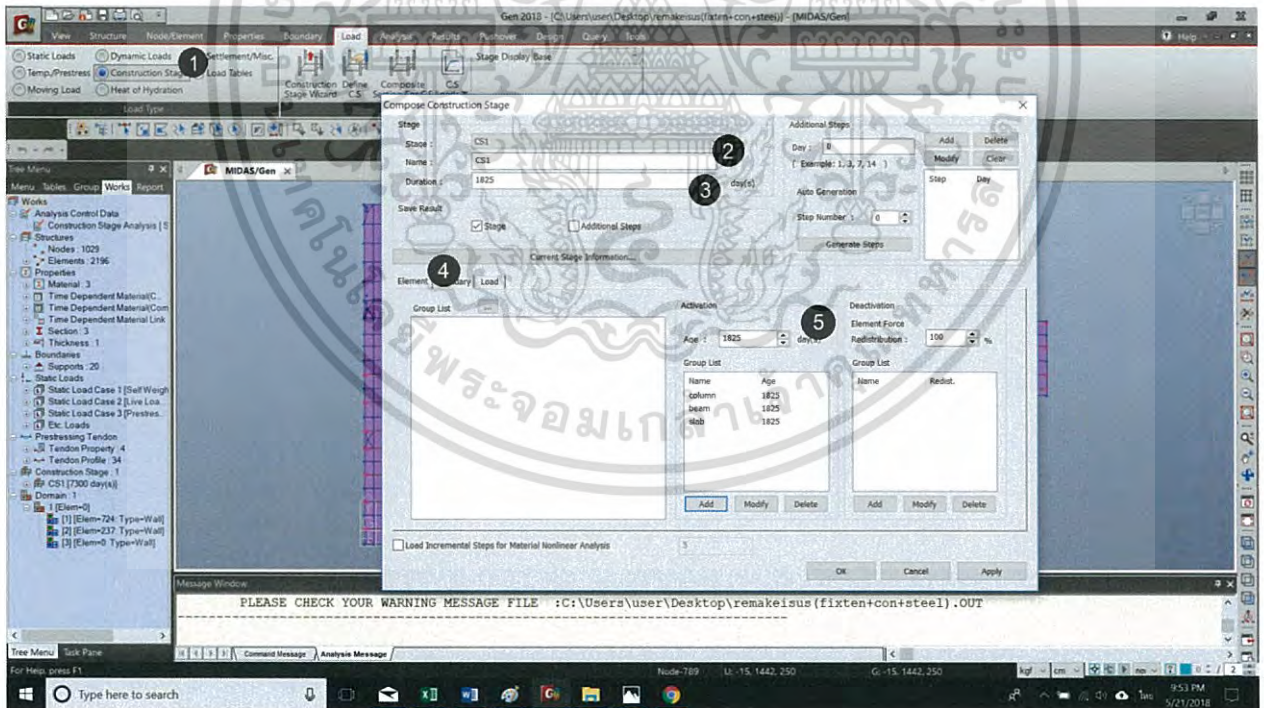
รูปที่ 3.27 แสดงการใส่ข้อมูลProfile Tendon

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หมายเลข 1 กำหนดชื่อของท่อนั้น
- หมายเลข 2 เลือกProfile Properties
- หมายเลข 3 เลือกเป็น 3-D
- หมายเลข 4 เลือกเป็นStraight
- หมายเลข 5 เลือกพิกัดจุดกำเนิดของลวด
- หมายเลข 7 ทำการครอบตำแหน่งของลวดจะได้ค่าข้อมูลตั้งตำแหน่งที่ 7
- หมายเลข 8 เลือกแกนของTendon

และทำให้ครบทุกเส้นตามแบบ

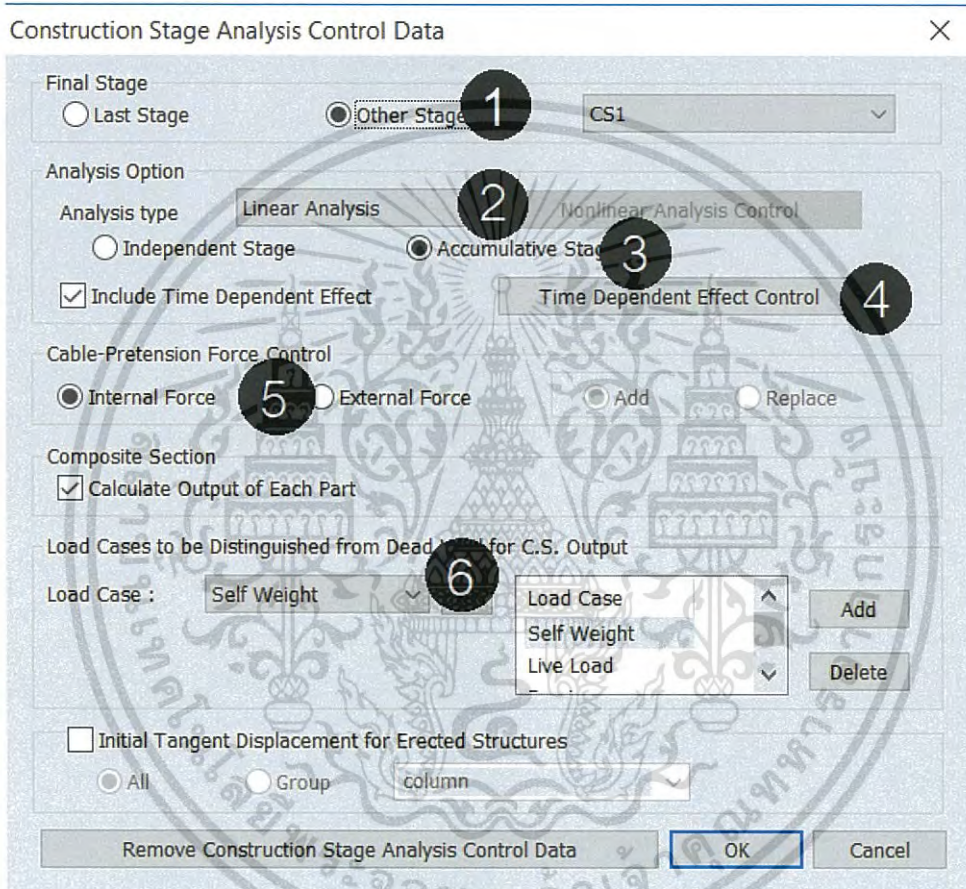
ทำการใส่แบ่งช่วงเวลาของการรับน้ำหนักของโมเดลตัวอย่าง โดยการเลือก Construction stage -> Add เพื่อเพิ่มชุดเวลาของโครงสร้าง หลังจากนั้น ตั้งชื่อ เลือกช่วงเวลา หลังจากนั้นกด และทำซ้ำจนครบทุกช่วงเวลาที่ต้องการวิเคราะห์



รูปที่ 3.28 แสดงหน้าต่างการสร้าง Construction Stage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีที่มีขั้นตอนการก่อสร้าง หรือชุดเวลาที่ต้องการจะทำการวิเคราะห์แค่ 2 ชุดหรือ 2 ช่วงเวลา คือตอนเริ่มก่อสร้างและหลังก่อสร้างเสร็จ ให้เลือกเป็นแบบ Last Stage แต่ในกรณีของกลุ่มของข้าพเจ้าได้ทำการวิเคราะห์ช่วงเวลามากกว่า 2 ช่วง ดังนั้นจึงเลือกเป็นแบบ Other Stage และทำการเลือก Construction Stage ตามช่วงเวลาที่กำหนด ดังรูป 3.30



รูป 3.30 แสดงการตั้งค่าหน้า Construction Stage

- หมายเลข 1 เลือก Other Stage
- หมายเลข 2 เลือกรูปแบบการวิเคราะห์ เลือกรูปแบบ Linear Analysis
- หมายเลข 3 เลือก Accumulative Stage ในกรณีที่วัสดุมีการใส่คุณสมบัติของ Time dependent ในตัววัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข 4 เลือก Time Dependent Control เพื่อเลือกคุณสมบัติที่ต้องการเจาะจงลงไปในตัววัสดุ เมื่อกดเลือก จะขึ้นตารางใหม่ดังรูป 3.31

หมายเลข 4.1 ทำการเลือกทั้งพฤติกรรม Creep & Shrinkage

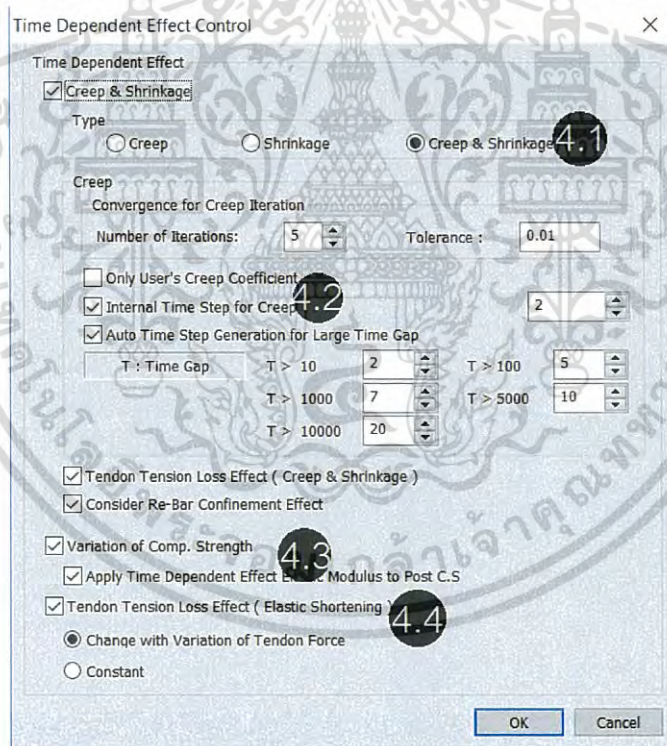
หมายเลข 4.2 เลือกใช้คำสั่งที่มีความละเอียดมากกว่า โดยเลือก Internal Time Step for Creep และ Auto Time Step Generation for Large Time Gap

หมายเลข 4.3 ทำการเลือก Apply Time Dependent Effect. เพื่อให้ผลของ Time dependent มีผลกับโมเดลตั้งแต่ก่อนเข้าช่วงเวลาของ Construction Stage

หมายเลข 4.4 เลือก Tendon tension Loss Effect เพื่อให้เกิดการลดแรงดึงในลวดเสี้ยวอัดแรง

หมายเลข 5 ทำการเลือก Internal Force เนื่องจากลวดเสี้ยวอัดแรงใช้ระบบ Post Tension

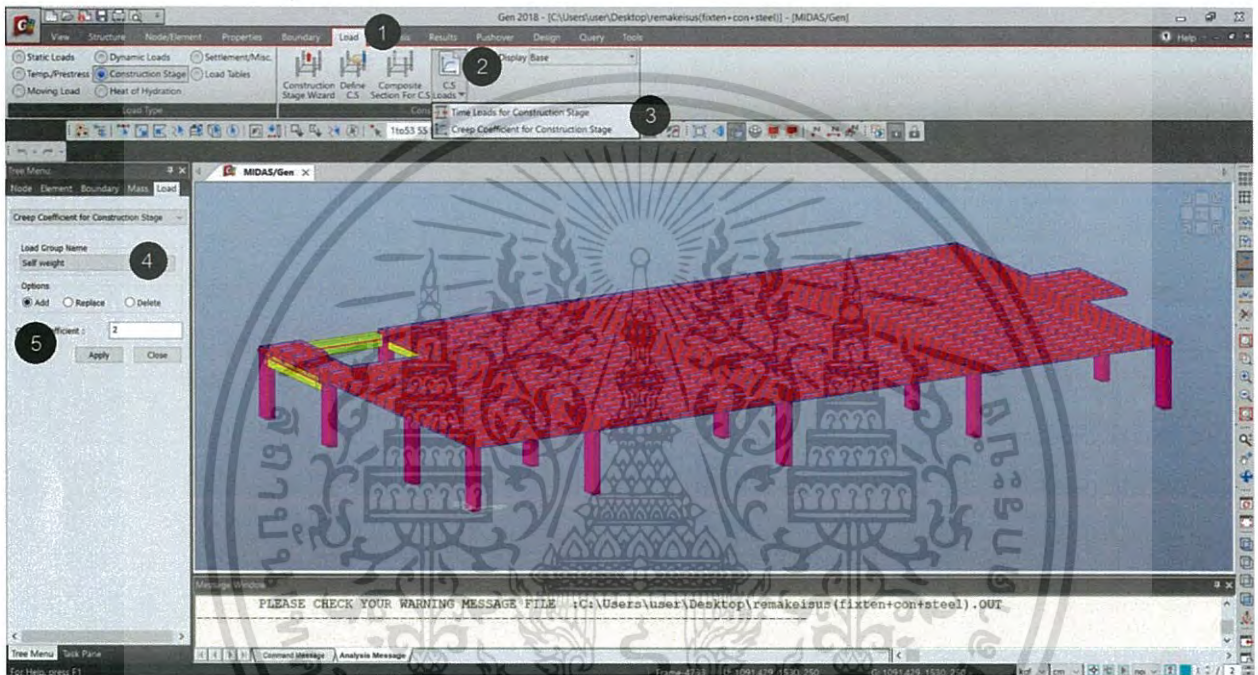
หมายเลข 6 ทำการเพิ่ม Load ตาม Load Case ที่ได้สร้างไว้ในตอนต้น



รูปที่ 3.31 แสดงหน้าต่างแยกจากการตั้งค่า Time Dependent Control

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นทำการใส่ค่าสัมประสิทธิ์ของ Creep เข้าไปในทุก Element โดยเริ่มจาก เลือก Load -> CS Loads -> Creeps Coefficients of Constructions Stage หลังจากนั้นเลือก Self-Weight -> Add หลังจากนั้นเลือก Coefficients เป็น 2 ตามรายการคำนวณ ดังรูป 3.32



รูปที่ 3.32 แสดงการตั้งค่า Creeps Coefficients of Construction Stage

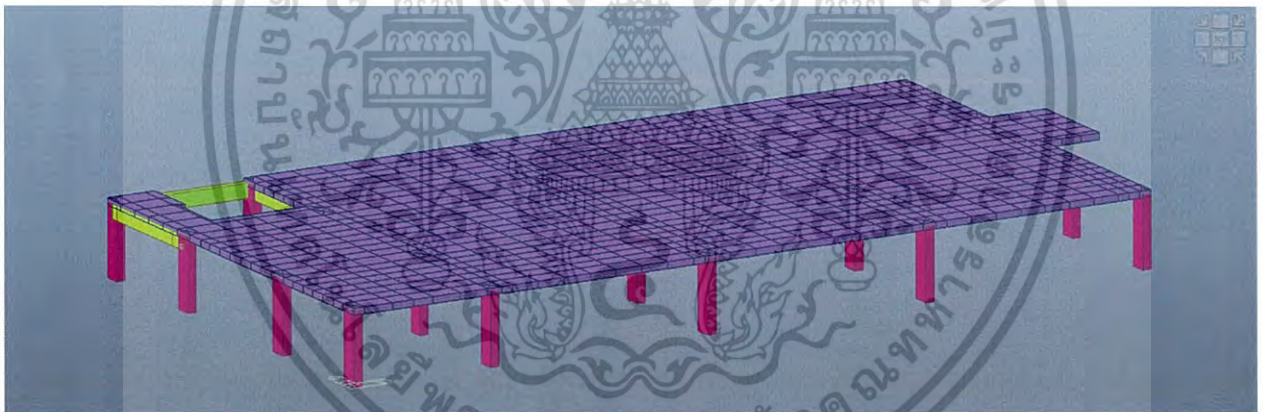
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการดำเนินการ

การวิเคราะห์หน่วยแรงของโครงสร้างพื้นคอนกรีตอัดแรงจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยโปรแกรม Midas Gen 2018 โดยจะแบ่งการวิเคราะห์เป็น 4 ช่วงเวลาคือ หลังก่อสร้างเสร็จ และหลังจากระยะเวลาผ่านไป 5 ปี 10 ปี 15 ปี 20 ปี เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลของหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

- เปรียบเทียบผลของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวบนและผิวล่างของคอนกรีต
- หน่วยแรงที่เปลี่ยนไปของลวดอัดแรง

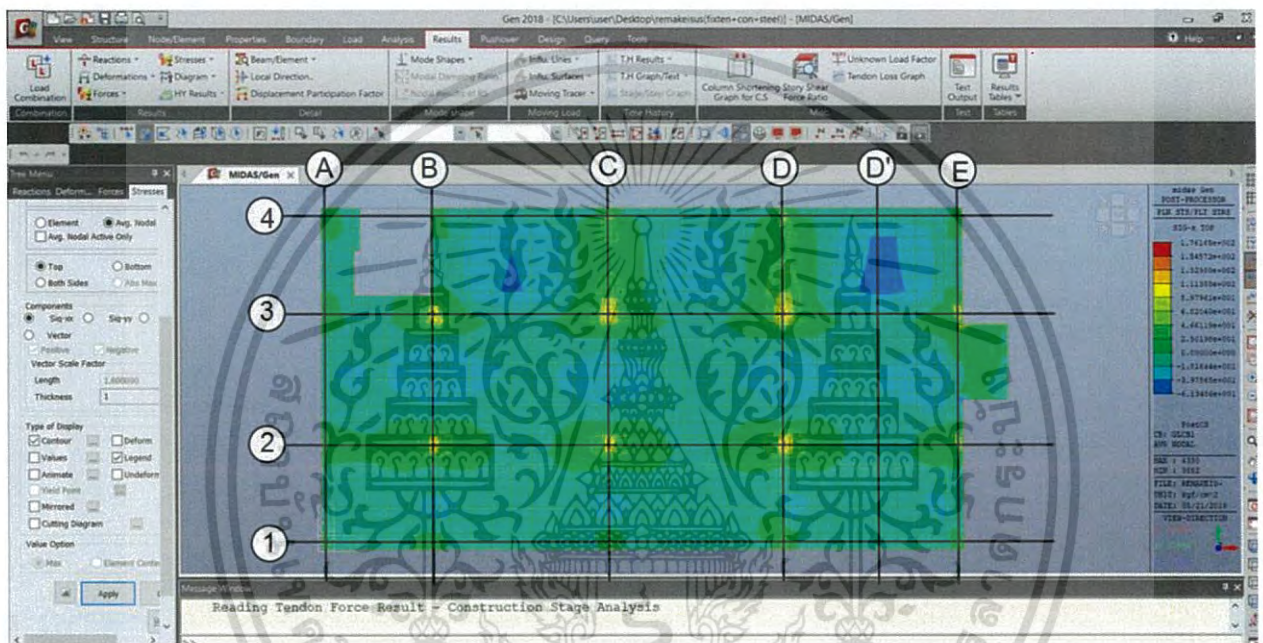


รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างพื้นคอนกรีตอัดแรงที่โมเดลเสร็จเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมMidas Gen

จากภาพหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนพื้นคอนกรีตอัดแรงสามารถสังเกตเห็นได้ว่าบริเวณ หน้าตัด D-D และ หน้าตัด D'-D' มีหน่วยแรงที่เกิดขึ้นมากกว่าบริเวณอื่นจึงได้ทำการเลือกหน้าตัดทั้งสองมาพิจารณา

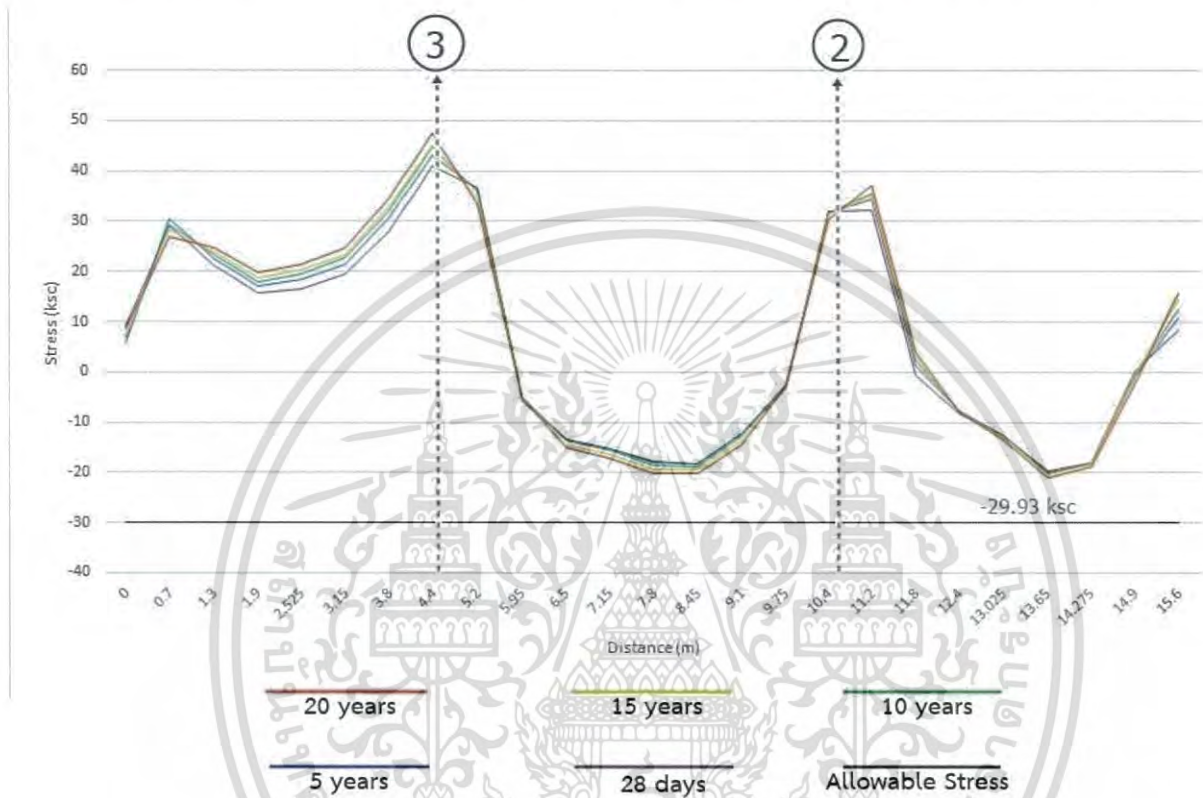


รูปที่ 4.2 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนพื้นคอนกรีตอัดแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

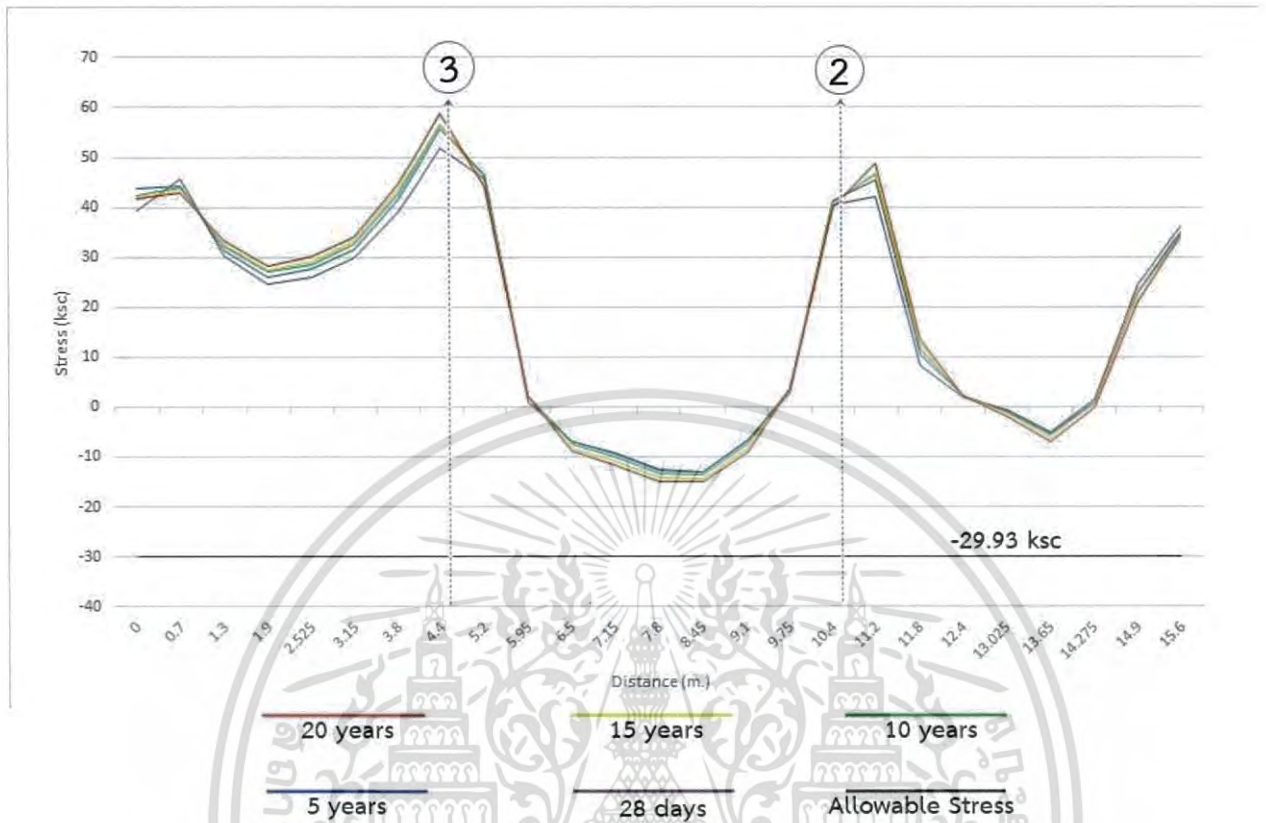
4.1 การวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตอัดแรง

จากการวิเคราะห์ โมเดลด้วยโปรแกรม Midas Gen ได้ผลของหน่วยแรงที่ได้ดังตารางต่อไปนี้



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา หลังก่อสร้างเสร็จ , 5 ปี, 10ปี , 15 ปีและ 20 ปีที่ผิวด้านบนของคอนกรีตอัดแรงที่หน้าตัด D – D

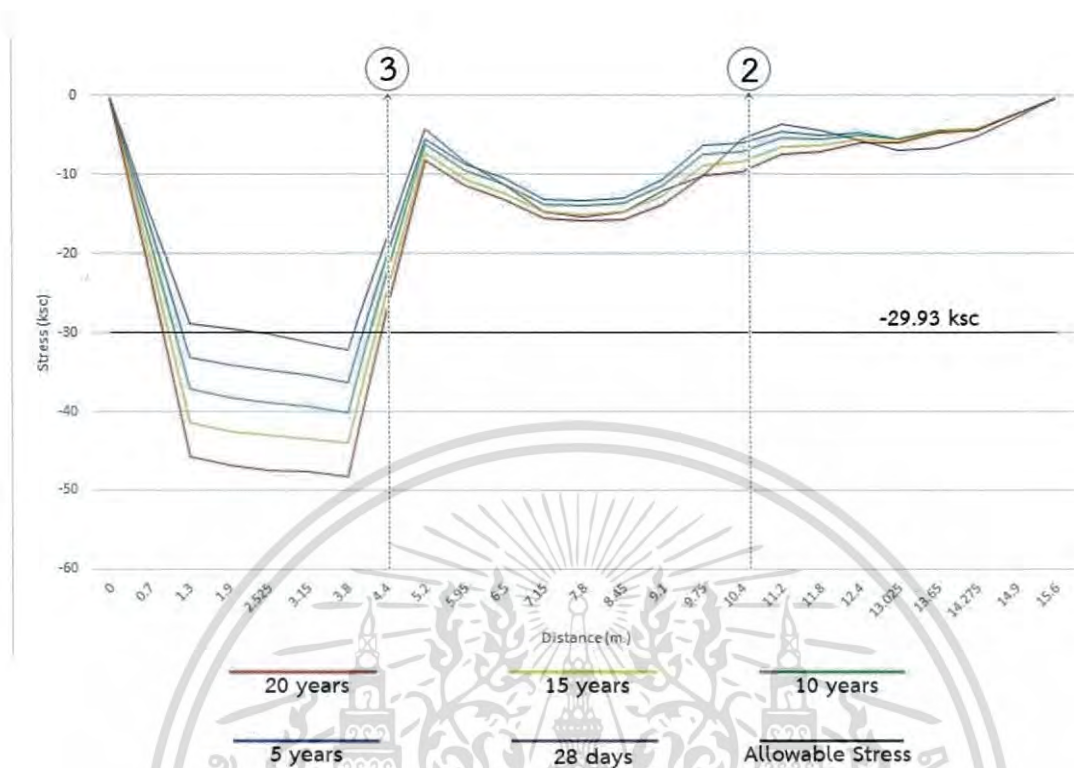
จากรูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้น ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ระยะ 4.4 เมตร ในทุกช่วงเวลา โดยช่วงเวลา 20 ปี เป็นช่วงเวลามีค่าหน่วยแรงมากที่สุดเท่ากับ 47.6 กก./ซม.^2 และจุดที่มีหน่วยแรงต่ำสุดอยู่ที่ระยะ 13.63 เมตร ในทุกช่วงเวลา โดยช่วงเวลา 20 ปี เป็นช่วงเวลามีค่าหน่วยแรงต่ำที่สุดเท่ากับ -21.1 กก./ซม.^2 โดยหน่วยแรงที่เกิดในทุกเวลานั้น มีค่ามากกว่าหน่วยแรงดิ่งที่ยอมให้ ซึ่งเท่ากับ -29.93 กก./ซม.^2



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา หลังก่อสร้างเสร็จ , 5 ปี, 10ปี , 15 ปีและ 20 ปีที่ผิวด้านล่างของคอนกรีตอัดแรงที่หน้าตัด D – D

จากรูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้น ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ระยะ 4.4 เมตร ในทุกช่วงเวลา โดยช่วงเวลา 20 ปี เป็นช่วงเวลามีค่าหน่วยแรงมากที่สุดเท่ากับ 58.7 กก./ซม.² และจุดที่มีหน่วยแรงต่ำสุดอยู่ที่ระยะ 8.45 เมตร ในทุกช่วงเวลา โดยช่วงเวลา 20 ปี เป็นช่วงเวลามีค่าหน่วยแรงต่ำที่สุดเท่ากับ -15.1 กก./ซม.² โดยหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในทุกเวลานั้น มีค่ามากกว่าหน่วยแรงดิ่งที่ยอมให้ ซึ่งเท่ากับ -29.93 กก./ซม.²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา หลังก่อสร้างเสร็จ , 5 ปี , 10 ปี , 15 ปี และ 20 ปีที่ผิวด้านบนของคอนกรีตอัดแรงที่หน้าตัด D' - D'

จากรูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้น ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ระยะ 0 เมตร และ 15.6 เมตร ในทุกช่วงเวลา โดยช่วงเวลาหลังก่อสร้างเสร็จ เป็นช่วงเวลามีค่าหน่วยแรงมากที่สุดเท่ากับ -0.3 กก./ซม.^2 และจุดที่มีหน่วยแรงต่ำสุดอยู่ที่ระยะ 3.80 เมตร ในทุกช่วงเวลา โดยช่วงเวลา 20 ปี เป็นช่วงเวลามีค่าหน่วยแรงต่ำที่สุดเท่ากับ -48.2 กก./ซม.^2 โดยหน่วยแรงที่เกิดในทุกเวลานั้น มีช่วงที่เกิดหน่วยแรงดึงต่ำกว่าหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ซึ่งเท่ากับ -29.93 กก./ซม.^2 ประกอบด้วย

ช่วงหลังการก่อสร้างคือช่วงระยะ 2.23 เมตร ถึง 3.89 เมตร โดยมีหน่วยแรงต่ำสุดคือ -32.2 กก./ซม.^2

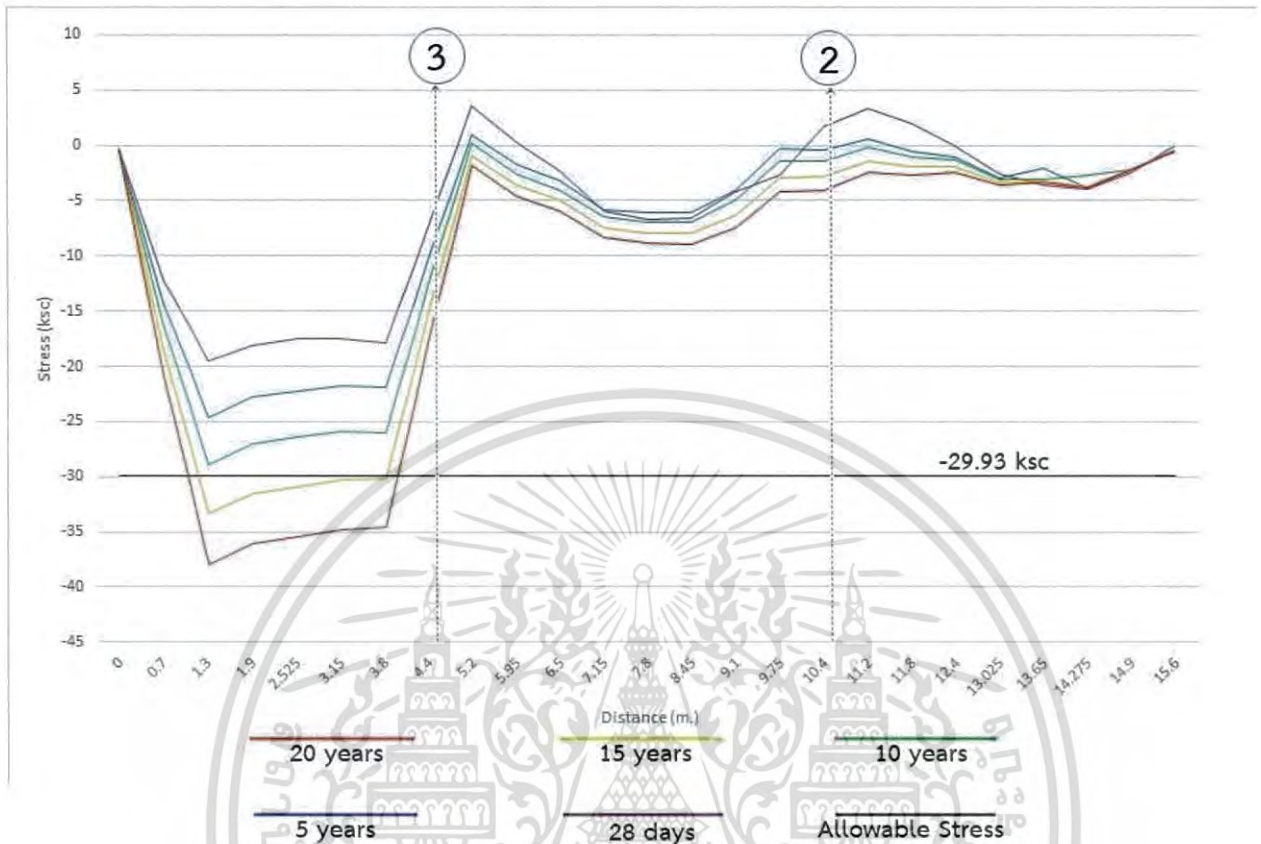
ช่วงเวลา 5 ปี คือช่วงระยะ 1.18 เมตร ถึง 4.03 เมตร โดยมีหน่วยแรงต่ำสุดคือ -36.3 กก./ซม.^2

ช่วงเวลา 10 ปี คือช่วงระยะ 1.06 เมตร ถึง 4.14 เมตร โดยมีหน่วยแรงต่ำสุดคือ -40.1 กก./ซม.^2

ช่วงเวลา 15 ปี คือช่วงระยะ 0.97 เมตร ถึง 4.23 เมตร โดยมีหน่วยแรงต่ำสุดคือ -44 กก./ซม.^2

ช่วงเวลา 20 ปี คือช่วงระยะ 0.88 เมตร ถึง 4.31 เมตร โดยมีหน่วยแรงต่ำสุดคือ -48.2 กก./ซม.^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา หลังก่อสร้างเสร็จ , 5 ปี , 10ปี , 15 ปี และ 20 ปีที่ผิวด้านล่างของคอนกรีตอัดแรงที่หน้าตัด D'- D'

จากรูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้น ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ระยะ 5.2 เมตร ในช่วงเวลาหลังก่อสร้างเสร็จ โดยมีค่าหน่วยแรงเท่ากับ 3.6 กก./ชม.² และจุดที่มีหน่วยแรงต่ำสุดอยู่ที่ระยะ 1.3 เมตร ในทุกช่วงเวลา โดยช่วงเวลา 20ปี เป็นช่วงเวลาที่มียค่าหน่วยแรงต่ำที่สุดเท่ากับ-38 กก./ชม.² โดยหน่วยแรงที่เกิดในช่วงเวลา15 ปี และ 20 ปีนั้น มีช่วงที่เกิดหน่วยแรงดิ่งต่ำกว่าหน่วยแรงดิ่งที่ยอมให้ซึ่งเท่ากับ -29.93 กก./ชม.² ประกอบด้วย

ช่วงเวลา 15 ปี คือช่วงระยะ 1.16เมตร ถึง 3.81เมตร โดยมีหน่วยแรงต่ำสุดคือ -33.3 กก./ชม.²

ช่วงเวลา 20 ปี คือช่วงระยะ 1.10เมตร ถึง 9.96เมตร โดยมีหน่วยแรงต่ำสุดคือ -38 กก./ชม.²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในพื้นที่คอนกรีตอัดแรงด้วยโปรแกรม Midas Gen ค่าหน่วยแรงมีการเปลี่ยนแปลงหลังจากก่อสร้างเสร็จจนกระทั่งเวลาผ่านไป 5 ปี 10 ปี 15 ปี และ 20 ปี เป็นเปอร์เซ็นต์ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าหน่วยแรงของคอนกรีตที่เปลี่ยนไปที่หน้าตัด D-D

หน้าตัด D-D				
Stress-Top (ksc.)				
ระยะเวลา	max	%	min	%
หลังก่อสร้างเสร็จ	41	-	-19.7	-
5 ปี	43.2	5.37	-19.9	1.02
10 ปี	44.8	9.27	-20.1	2.03
15 ปี	45.2	10.24	-20.5	4.06
20 ปี	47.6	16.10	-21.1	7.11
Stress-Bot (ksc.)				
ระยะเวลา	max	%	min	%
หลังก่อสร้างเสร็จ	51.8	-	-13	-
5 ปี	55.7	7.53	-13.1	0.77
10 ปี	56.6	9.27	-13.6	4.62
15 ปี	56.6	9.27	-14.4	10.77
20 ปี	58.7	13.32	-15.1	16.15

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าหน่วยแรงของคอนกรีตที่เปลี่ยนไปที่หน้าตัด D'-D'

หน้าตัด D'-D'				
Stress-Top (ksc.)				
ระยะเวลา	Max	%	min	%
หลังก่อสร้างเสร็จ	-3.6	-	-32.2	-
5 ปี	-4.6	27.78	-36.3	12.73
10 ปี	-5.4	50.00	-40.1	24.53
15 ปี	-6.5	80.56	-44	36.65
20 ปี	-7.5	108.33	-48.2	49.69
Stress-Bot (ksc.)				
ระยะเวลา	Max	%	min	%
หลังก่อสร้างเสร็จ	3.6	-	-19.5	-
5 ปี	0.9	75.00	-24.6	26.15
10 ปี	0.2	94.44	-28.9	48.21
15 ปี	-0.9	125.00	-33.3	70.77
20 ปี	-1.8	150.00	-38	94.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการเปรียบเทียบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากหน้าตัด D – D และหน้าตัด D' – D' จะใช้หน่วยแรงที่ยอมให้ของโครงสร้างขณะรับน้ำหนักบรรทุกทุกดังนี้

หน่วยแรงที่ยอมให้ขณะรับน้ำหนักบรรทุก

$$\text{Compressive stress} = 157.5 \text{ ksc}$$

$$\text{Tensile stress} = -29.93 \text{ ksc}$$

4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าแรงดึงในลวดเกลียวอัดแรง

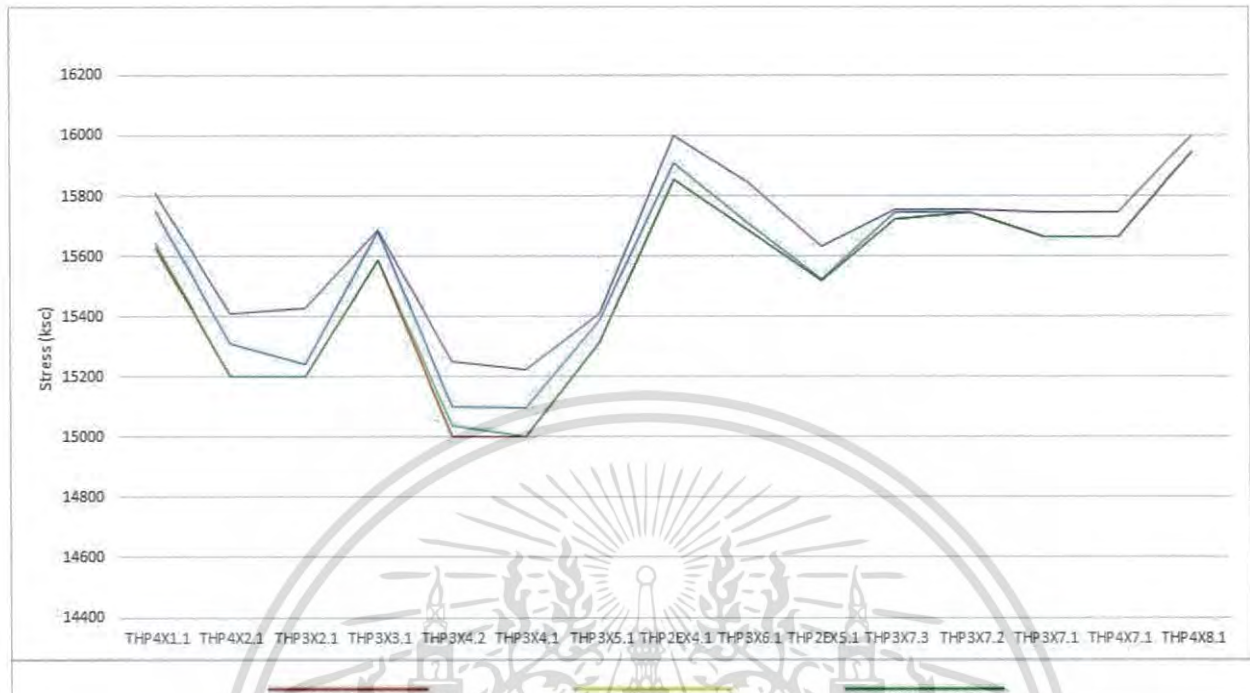
พิจารณาหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในลวดเกลียวอัดแรงบางส่วนในหน้าตัด D – D และ หน้าตัด D' – D' ดังรูป

4.7



รูปที่ 4.7 รูปตัดแสดงลวดเกลียวอัดแรงในหน้าตัด D – D และ D' – D'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

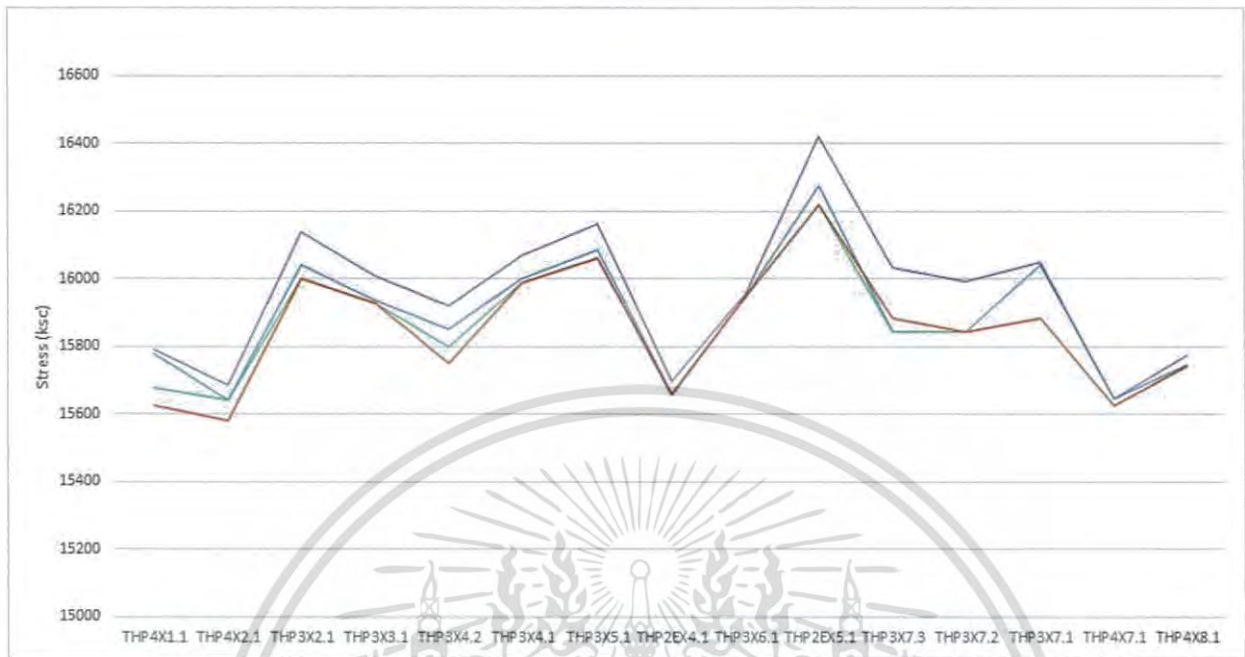


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงหน่วยแรงของลวดเกลียวอัดแรงหน้าตัด D-D

จากรูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในลวดอัดเกลียว ดังนี้

- ช่วงเวลาก่อสร้างเสร็จ มีหน่วยแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดที่เส้นลวด THP2EX4.1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 16000 กก./ชม.² และต่ำสุดที่เส้นลวด THP3EX4.1 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 15226 กก./ชม.²
- ช่วงเวลา 5 ปี มีหน่วยแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดที่เส้นลวด THP4EX8.1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 15947 กก./ชม.² และต่ำสุดที่เส้นลวด THP3EX4.1 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 15098 กก./ชม.²
- ช่วงเวลา 10 ปี มีหน่วยแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดที่เส้นลวด THP2EX4.1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 15856กก./ชม.² และต่ำสุดที่เส้นลวด THP3EX4.1 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 15000 กก./ชม.²
- ช่วงเวลา 15 ปี มีหน่วยแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดที่เส้นลวด THP2EX4.1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 15856 กก./ชม.² และต่ำสุดที่เส้นลวด THP3EX4.1 และ THP3EX4.2 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 15000 กก./ชม.²
- ช่วงเวลา 20 ปี มีหน่วยแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดที่เส้นลวด THP2EX4.1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 15856 กก./ชม.² และต่ำสุดที่เส้นลวด THP3EX4.1 และ THP3EX4.2 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 15000 กก./ชม.²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงหน่วยแรงของลวดเกลียวอัดแรงหน้าตัด D'-D'

จากรูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในลวดอัดเกลียว ดังนี้

- ช่วงเวลาก่อสร้างเสร็จ มีหน่วยแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดที่เส้นลวด THP2EX5.1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 16420 กก./ชม.² และต่ำสุดที่เส้นลวด THP2EX4.1 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 15700 กก./ชม.²
- ช่วงเวลา 5 ปี มีหน่วยแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดที่เส้นลวด THP2EX5.1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 16275 กก./ชม.² และต่ำสุดที่เส้นลวด THP2EX4.1 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 15660 กก./ชม.²
- ช่วงเวลา 10 ปี มีหน่วยแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดที่เส้นลวด THP2EX5.1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 16221กก./ชม.² และต่ำสุดที่เส้นลวด THP4EX7.1 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 15624 กก./ชม.²
- ช่วงเวลา 15 ปี มีหน่วยแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดที่เส้นลวด THP2EX5.1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 16221กก./ชม.² และต่ำสุดที่เส้นลวด THP4EX7.1 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 15624 กก./ชม.²
- ช่วงเวลา 20 ปี มีหน่วยแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดที่เส้นลวด THP2EX5.1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 16221กก./ชม.² และต่ำสุดที่เส้นลวด THP4EX7.1 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 15624 กก./ชม.²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

- 5.1 จากการศึกษาผู้วิจัยได้มีความเข้าใจในการออกแบบและก่อสร้างพื้นคอนกรีตอัดแรงแบบดิ่งเหล็กที่หลังซึ่งการออกแบบจะออกแบบให้ปริมาณลวดเพียงพอสำหรับโมเมนต์ที่เกิดขึ้นและเพื่อให้พื้นมีประสิทธิภาพสมบูรณ์รวมทั้งเพื่อความปลอดภัยในการใช้งานในบริเวณที่ต้องออกแบบด้านทานแรงแผ่นดินไหวจำเป็นต้องมีเหล็กเสริมเพิ่มให้ครบถ้วนตามที่กฎหมายและมาตรฐานกำหนด
- 5.2 จากการศึกษาผู้วิจัยได้มีความเข้าใจในการสร้างโมเดลแบบจำลองพื้นคอนกรีตอัดแรงด้วยโปรแกรม Midas Genซึ่งมีความซับซ้อนเนื่องจากการออกแบบอย่างอิสระจึงต้องเข้าใจหลักการออกแบบในแต่ละขั้นตอนฟังก์ชันการทำงานมีหลากหลายสามารถจำลองโครงสร้างพื้นได้ใกล้เคียงกับสิ่งก่อสร้างจริงและถ้าทำการศึกษาเพิ่มเติมผู้ใช้งานสามารถโมเดลแบบจำลองโครงสร้างอาคารรูปแบบต่าง ๆ ได้อีกด้วย
- 5.3 จากการวิเคราะห์หน่วยแรงดิ่งของลวดเกลียวอัดแรงที่สูญเสียแรงดิ่งขณะรับน้ำหนักบรรทุกหลังจากก่อสร้างเสร็จจนกระทั่งเวลาผ่านไป 5ปี 10ปี 15ปีและ 20ปีจะพบว่าหน่วยแรงดิ่งจะลดลงมากในช่วงแรกหลังจากเวลาผ่านไปหน่วยแรงดิ่งจะค่อยๆลดน้อยลง
- 5.4 จากผลการวิเคราะห์หน่วยแรงดิ่งในคอนกรีตดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 สรุปได้ว่าหน่วยแรงของพื้นคอนกรีตอัดแรงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปเนื่องจากผลของการคืบของคอนกรีตความชื้นที่เปลี่ยนไปในคอนกรีตและการคลายแรงดิ่งของเหล็กเสริมอัดแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ภูมิเกียรติสว่างวงศ์. “การวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างสะพานคอนกรีตเหล็กเสริมอัดแรงที่ก่อสร้างแบบคานยื่นสมดุลตาม AASHTO LRFD HL-93” ปริญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2559
- [2] นเรศ พันธธาร. การออกแบบคอนกรีตอัดแรง. กรุงเทพฯ : หอสมุดกลาง. 2543
- [3] fib Model Code for Concrete Structures 2010. Herausgeber ist der fib (the International Federation for Structural Concrete). (2556).
- [4] CEB-FIP Model Code 1990: Design Code. Comité euro-international du béton. (2536).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้