

พฤติกรรมของถัง เก็บความร้อนคอนกรีตอัดแรงที่หลัง



นายอภิชาติ ยุคคานนท์

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคตามหลักสูตรปริญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์วิทยุโทรพยากรณ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

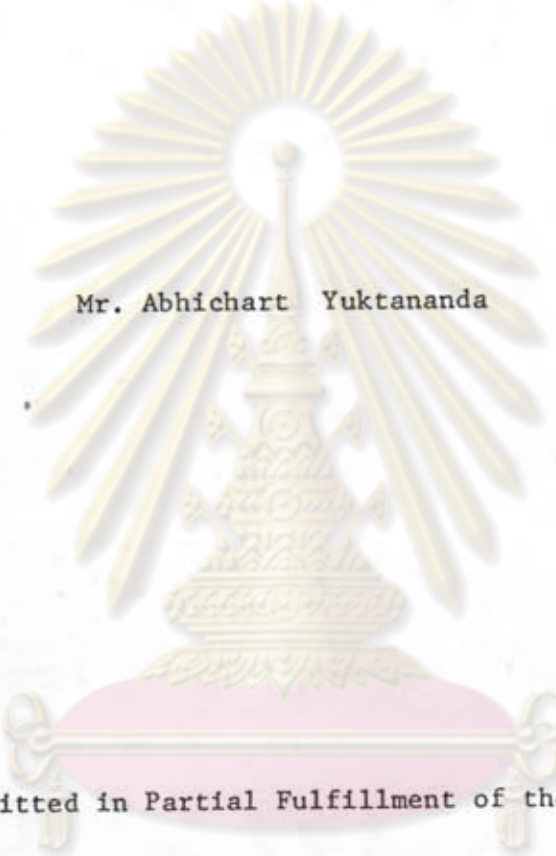
พ.ศ. 2526

ISBN 974-562-469-1

010585

i18203409

BEHAVIOR OF A POST-TENSIONED CONCRETE HEAT STORAGE TANK



Mr. Abhichart Yuktananda

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Civil Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1983

หัวข้อวิทยานิพนธ์

พฤติกรรมของถัง เก็บความร้อนคอนกรีตอัดแรงที่หลัง

โดย

นายอภิชาติ ยุกदानนท์

ภาควิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์



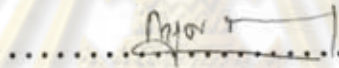
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการ
ศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุประดิษฐ์ บุญนาค)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา จันทร์ราษฎร์)



..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ)



..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พฤติกรรมของถัง เก็บความร้อนคอนกรีตอัดแรงที่หลัง
ชื่อนิสิค	นายอภิชาติ บุคคานนท์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา	2525



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษากฎพฤติกรรมของถัง เก็บความร้อนคอนกรีตอัดแรงที่หลัง โดยการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีอีลาสติกและทฤษฎีวิสโคอีลาสติกเชิงเส้นตรงโดยใช้หลังการสมนัย เพื่อศึกษาการกระจายของหน่วยแรงและความเครียดที่ระยะเวลาสั้นและระยะเวลายาวนาน ดังจำลองเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 1.40 เมตร สูง 1.53 เมตร ผนังหนา 0.15 เมตร ได้สร้างขึ้นเพื่อทดสอบด้วยการอัดแรงและเพิ่มอุณหภูมิภายในดังขึ้นอย่างช้า ๆ เพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับผลทางทฤษฎี

การวิเคราะห์อีลาสติกโดยวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์ เพื่อศึกษากฎพฤติกรรมต่าง ๆ ใน 4 กรณี กรณีที่หนึ่ง เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิภายในถัง ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิผิวในกับผิวนอก 20° เซลเซียส หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงและแนวตั้งบนผนังมีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยมีหน่วยแรงอัดมากที่สุดที่ผิวใน และหน่วยแรงดึงมากที่สุดที่ผิวนอกประมาณ 35 กก./ซม.² กรณีที่สอง เมื่อมีการอัดแรง หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงและแนวตั้งบนผนังเป็นหน่วยแรงอัดซึ่งมีค่าประมาณ 35 กก./ซม.² กรณีที่สามและสี่ เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิร่วมกับการอัดแรง โดยพิจารณาแรงดึงประสิทธิผลในเหล็ก เสริมอัดแรงมีค่าเท่ากับแรงดึงที่เวลาถ่ายแรงและที่เวลาอนันต์ตามลำดับ การกระจายของหน่วยแรงในทั้งสองกรณีนี้คล้ายคลึงกัน เพียงแต่ในกรณีที่สี่นั้น หน่วยแรงอัดประสิทธิผล เนื่องจากการอัดแรงมีค่าน้อยกว่า ทำให้ในกรณีที่สี่มีหน่วยแรงดึงเกิดขึ้นที่ผิวนอกของผนัง โดยทั่ว ๆ ไปราว 15 กก./ซม.² ในขณะที่หน่วยแรงที่ผิวนอกของถังในกรณีที่สามมีค่าเกือบเท่ากับศูนย์

การวิเคราะห์วิสโคอีลาสติกเพื่อศึกษาผลการเพิ่มอุณหภูมิและการอัดแรงที่หน้าตัดบนผนัง ซึ่งอยู่สูงจากขอบด้านล่าง 80 ซม. พบว่าหน่วยแรงและความเครียดปรับการกระจายไปสู่สภาวะคงตัวในเวลารวดเร็ว เมื่อเวลาผ่านไปเพียง 70 วัน หน่วยแรงอัดที่ผิวในมีค่าลดลงและหน่วยแรง

ดิ่งที่ผิวนอกกลายเป็นหน่วยแรงอัดซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจนเกือบเท่ากับที่ผิวใน หลังจากนั้น ถ้าลดอุณหภูมิของถังลง เป็นปกติ หน่วยแรงอัดที่ผิวในจะลดลง เกือบ เป็นศูนย์ และหน่วยแรงอัดที่ผิวนอกจะเพิ่มขึ้นประมาณ 35 กก./ซม.²

สำหรับการทดลองได้คัม น้ำมันภายในถังให้ร้อนขึ้นถึง 124° เซลเซียส ในระยะเวลา 10 วัน อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ เป็นประมาณ 5.8° เซลเซียส/ชั่วโมง ในช่วงที่ให้ ความร้อนพบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิตั้งแต่ผิวในกับผิวนอกมีค่ามากที่สุด 17° เซลเซียส ที่ อุณหภูมิ 124° เซลเซียสนี้ ตัวถังยังอยู่ในสภาพปกติ ไม่เกิดรอยร้าวหรือร้าวซึมที่ส่วนใดของผนังเลย แต่ น้ำมันในถังขยายตัวจนล้นออกมาทางข้อต่อของถังทำความร้อนกับผาบน และตามซอกหัวยึด เหล็ก เสริมอัดแรงแนวตั้งที่อยู่ด้านบน ใช้น้ำมันที่ออกมาทำให้การทดลองต้องยุติ เนื่องจากจะเป็น การไม่ปลอดภัยในการให้ความร้อนต่อไป อย่างไรก็ตาม จากการ เปรียบเทียบการกระจายความ เครียดและอุณหภูมิที่บันทึกจากการทดลองกับที่วิเคราะห์จากทางทฤษฎี พบว่ามีลักษณะสอดคล้องกันดี

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์และผลการทดลองแล้ว คาดว่าถังคอนกรีตอัดแรงที่หลังคง ใช้งานได้ถึง 200° เซลเซียส ถ้าใช้เหล็กเสริมอัดแรงชนิดที่มีการผ่อนคลายแรงดึงต่ำ และใช้ มาตรการที่ดี เพื่อลดการ เซทตัวของลิ่มยึด เหล็ก เสริมอัดแรงให้น้อยที่สุด



ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

๘

Thesis Title Behavior of a Post-Tensioned Concrete Heat Storage Tank

Name Mr. Abhichart Yuktananda

Thesis Advisor Associated Professor Panitan Lukkunaprasit, Ph. D.

Department Civil Engineering

Academic Year 1982



ABSTRACT

The purpose of this thesis is to study the behavior of a post-tensioned concrete heat storage tank. Elastic and viscoelastic analyses using the Correspondence Principle were performed to predict its short and long term responses. A tank model, 1.40 m. in diameter, 1.53 m. in height, and 0.15 m. in wall thickness, was built, prestressed and heated up gradually. Experimental results obtained were compared with theoretical solutions.

In the elastic analysis, the finite element method was employed to predict the response of the tank for four different load cases. In the first load case in which the tank was only heated internally, producing a temperature gradient of 20° C between the interior and exterior surfaces of the wall, the stress distribution in the wall in both the circumferential and vertical directions were similar, with maximum compressive and tensile stresses of about 35 kg./cm.² occurring at the interior and exterior surfaces, respectively. In the second case with prestress loading, circumferential and vertical compressive stresses of approximately 35 kg./cm.² were produced in the wall. Under the simultaneous action of temperature increase and prestressing, with prestressing forces at transfer and at long term considered in the third and fourth load cases, respectively, the distribution of stresses in both

cases were similar. In the fourth case, the effective prestressing force, being less than the third one, resulted in tensile stresses of about 15 kg./cm.^2 at the exterior surface in the major part of the wall, whereas practically no tension was produced in the third load case.

A viscoelastic analysis was performed to predict the long term response to the high temperature and prestress loading. A section of the wall of the tank, 80 cm. above the bottom, was considered. It was found that redistribution of stresses and strains approached the steady state very rapidly. After only 70 days, the magnitude of the compressive stress at the interior surface of the wall decreased significantly and the tensile stress at the exterior surface reversed to compressive stress of magnitude very close to that at the interior surface. Subsequently, if the temperature were reduced to room temperature, the magnitude of the compressive stress at the interior surface would decrease to nearly zero value and that at the exterior surface would increase by about 35 kg./cm.^2 .

In the experiment, heat was supplied to the oil stored inside the tank until its temperature was increased to 124° C within 10 days. The rate of increase in temperature was approximately 5.8° C/hr. during the heating period. The maximum temperature difference between the interior and exterior surfaces of the wall was found to be 17° C . At the final temperature of 124° C , the tank was still in normal condition. Neither visible cracks nor leakage of the wall were observed, but the heated oil in the tank expanded and overflowed through the connection between the heater and the lid, and through the grooves between the jaws of the vertical anchorages. The vaporized oil made it hazardous to continue the test. However, comparison between recorded results and those predicted theoretically revealed good agreement in strain and tem-

perature distribution in the wall.

In the light of the analyses and experiment, it is speculated that post-tensioned concrete tanks could be used to store heat up to 200 °C provided that low relaxation prestressing steel is employed, and appropriate measure is taken to minimize prestressing loss due to wedge set.



ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



กิติกรรมประกาศ

ในการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำความรู้ทั้งทางภาคทฤษฎี และภาคปฏิบัติตลอดจนตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนจบ และรองศาสตราจารย์ ดร. การุญ จันทรางศุ และรองศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลัมสุวรรณ ที่กรุณาตรวจพร้อมทั้งเป็นกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ผู้เขียนขอขอบคุณ บริษัทผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด บริษัทนครหลวงวิสดุภัณฑ์ จำกัด ที่กรุณาให้ยืมอุปกรณ์การอัดแรง บริษัทไทยสะเปเซียลัวร์ จำกัด ที่กรุณาทดสอบลวดอัดแรง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้ทุนสนับสนุนบางส่วน บัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้ทุนอุดหนุนในการทำวิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือสำหรับการทดลอง เจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมโยธา เพื่อนและน้อง ๆ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการวิจัย และคุณพรทิพย์ เซษรุโซติศักดิ์ ที่ได้กรุณาช่วยพิมพ์ต้นฉบับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ท้ายที่สุด ผู้เขียนปรารถนาที่จะแสดงความรำลึกถึงพระคุณของบิดาและมารดา ที่ได้ให้ความสนับสนุนและกำลังใจแก่ผู้เขียนมาโดยตลอด จนสำเร็จการศึกษาในระดับนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อภิชาติ ยุกคานนท์



สารบัญ

ญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
กิตติกรรมประกาศ	ฅ
สารบัญ	ญ
รายการตารางประกอบ	ฉ
รายการรูปประกอบ	ฐ
สัญลักษณ์	ด
นิยามของคำต่าง ๆ ที่ใช้ในภาษาเทคนิค	ถ
บทที่	

1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 การสำรวจงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์และขอบข่ายของการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย	4
2. คุณสมบัติของคอนกรีต เหล็ก เสริมและ เหล็ก เสริมอัดแรงที่อุณหภูมิสูง ...	5
2.1 คุณสมบัติของคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง	5
2.2 คุณสมบัติของ เหล็ก เสริมธรรมดาและ เหล็ก เสริมอัดแรงที่อุณหภูมิสูง	9
3. ทฤษฎีการวิเคราะห์โครงสร้าง	11
3.1 บทนำ	11
3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างโดยทฤษฎีอีลาสติก	11
3.3 ครีพคอมโพลแอนซ์	15
3.4 การวิเคราะห์โครงสร้างโดยทฤษฎีวิสโคอีลาสติกเชิงเส้นตรง ..	18
4. การวิเคราะห์ออกแบบดึงและการทดลอง	22
4.1 การวิเคราะห์และออกแบบดึงทดลอง	22

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่

4.2 การสร้างถังทดลอง	27
4.3 การติดตั้งอุปกรณ์	27
4.4 เครื่องมือวัดต่าง ๆ	28
4.5 การอัดแรง	29
4.6 การทดลองให้อุณหภูมิภายในถังสูงขึ้น	30
5. ผลการทดลอง	32
5.1 ผลการอัดแรง	32
5.2 ผลการทดลองทำให้อุณหภูมิภายในถังสูงขึ้น	34
6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	37
เอกสารอ้างอิง	39
ภาคผนวก	111
ก. ตัวอย่างการวิเคราะห์เสาคอนกรีตเสริม เหล็กโดยทฤษฎีวิสโคอีลาสติกเชิง เส้นตรง ซึ่งอาศัยหลักการสมนัย	111
ข. ตัวอย่างการคำนวณการวิเคราะห์ถังทดลองโดยทฤษฎีวิสโคอีลาสติกเชิง เส้นตรงซึ่งอาศัยหลักการสมนัย	118
ค. การหาแรงดึงประสิทธิผล	120
ง. ผลการทดสอบ เชือกเหล็กลด 7 เส้น ϕ 1 นิ้ว เกรด 270K	123
จ. การทดสอบสัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อนของปูนทรายและ ความสัมพันธ์ระหว่างความ เกรียดที่เกิดขึ้นจริงกับความ เกรียดที่ได้จาก เกจวัดความ เกรียดแบบไฟฟ้า	126
ประวัติผู้เขียน	131

รายการตารางประกอบ

ตารางที่	หน้า
2.1 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของหินชนิดต่าง ๆ	43
2.2 ผลของความชื้นต่อการนำความร้อนของคอนกรีต	44
2.3 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่าง ๆ	45
2.4 สัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อนของปูนทราย	46
2.5 สัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อนของหินชนิดต่าง ๆ	47
2.6 สัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อนของหินชนิดต่าง ๆ	48
2.7 สัมประสิทธิ์การขยายตัวของคอนกรีตที่ใช้หินชนิดต่าง ๆ	49
2.8 การเสื่อมสญูแรงดึงจากแรงดึงเริ่มแรก 60, 70 และ 80 เปอร์เซ็นต์ของ กำลังรับแรงดึงประลัยของ เหล็ก เสริมอัดแรง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ที่เวลา 5 ปี	50
4.1 แสดงผลของความหนาของฉนวนคืออุณหภูมิแตกต่างของผนังคอนกรีตและหน่วย แรงดึงสูงสุด	51
4.2 สัดส่วนคละของทรายหยาบ	52
4.3 สัดส่วนคละของหินปูนขนาดโตสุด $\frac{1}{2}$ นิ้ว	53
4.4 สัดส่วนคละของหินปูนขนาดโตสุด $\frac{3}{4}$ นิ้ว	53

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการรูปประกอบ

รูปที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับอุณหภูมิ	54
2.2 การขยายตัวของคอนกรีตที่ถูกปิดผนึก เมื่อมีวัฏจักรของอุณหภูมิ 21-149-21 °ซ	55
2.3 การขยายตัวและการหดตัวของคอนกรีต เมื่อให้ความชื้นระเหยออกได้หลังจากการเพิ่มอุณหภูมิครั้งแรก	56
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกับอุณหภูมิ โดยที่ไม่มีแรงอัดขณะเพิ่มอุณหภูมิและทดสอบกำลังที่อุณหภูมิสูง	57
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกับอุณหภูมิ โดยใส่แรงอัด 40 เปอร์เซ็นต์ของกำลังประลัยขณะเพิ่มอุณหภูมิและทดสอบกำลังที่อุณหภูมิสูง	58
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกับอุณหภูมิ โดยไม่มีแรงอัดขณะเพิ่มอุณหภูมิและทดสอบกำลังที่อุณหภูมิห้อง	59
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตกับอุณหภูมิ	60
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกับอุณหภูมิ	61
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกับอุณหภูมิ	62
2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกับอุณหภูมิ	63
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกับอุณหภูมิ .	64
2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนัก กำลังรับแรงอัด โมดูลัสยืดหยุ่น กำลังยืดเหนียวของคอนกรีตกับอุณหภูมิ	65
2.13 ผลของสภาพความชื้นของคอนกรีตต่อหน่วยแรงและความเครียดที่ 149 °ซ (หลังจากเพิ่มและลดอุณหภูมิ 21-149-21 °ซ จำนวน 5 รอบ)	66
2.14 อิทธิพลของการให้อุณหภูมิต่อหน่วยแรงและความเครียดของก้อนคอนกรีตที่ถูกปิดผนึกที่ 149 °ซ	67
2.15 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของก้อนคอนกรีตที่ถูกปิดผนึก	68

2.16	ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของ เหล็ก เสริมธรรมดา กับอุณหภูมิ (ชิ้นส่วนถูกทำให้ร้อนขึ้น แล้วแช่ไว้ 30 นาที จากนั้นทดสอบทันทีที่อุณหภูมิสูง) ..	69
2.17	ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของ เหล็ก เสริมอัดแรงกับอุณหภูมิ (ชิ้นส่วนถูกทำให้ร้อนขึ้น แล้วแช่ไว้ 30 นาที จากนั้นปล่อยให้เย็นแล้วทดสอบที่อุณหภูมิห้อง)	70
2.18	ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของ เหล็ก เสริมอัดแรงกับอุณหภูมิ (ชิ้นส่วนถูกทำให้ร้อนขึ้น แล้วแช่ไว้ 30 นาที จากนั้นทดสอบทันทีที่อุณหภูมิสูง)	71
2.19	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงของ เหล็ก เสริมอัดแรงกับอุณหภูมิ (ชิ้นส่วนถูกทำให้ร้อนขึ้น แล้วแช่ไว้ จากนั้นทดสอบที่อุณหภูมิสูงหรือปล่อยให้เย็นลงแล้วทดสอบที่อุณหภูมิห้อง)	72
3.1	วัตถุ 3 มิติใด ๆ ภายใต้แรงกระทำ	73
3.2	สภาพสมดุลของอนุภาคที่จุดใด ๆ	73
3.3	ฟังก์ชันความเครียดซึ่งไม่คืนกลับ ที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง	74
3.4	ครีพคอมไพลแอนซ์ที่ใช้ในการวิจัยนี้	
	$J(T, t, \tau) = \frac{1}{3000000} + \frac{T}{25} [46.2 \times 10^{-6} (t^{0.025} - \tau^{0.025}) + 0.638 \times 10^{-6} [1 - \exp\{-22.4 \times 10^6 ((42.6 \times 10^{-6}) (t^{0.025} - \tau^{0.025}))\}]]$	
(ก)	แสดงฟังก์ชันสำหรับอุณหภูมิคงที่ 25° เซลเซียส	
(ข)	แสดงฟังก์ชันสำหรับเวลาเริ่มต้นใส่แรงกระทำที่ 30 วัน	75
4.1	รูปตัดขวางผนังและฉนวน	76
4.2	แสดงการลดของอุณหภูมิตามความหนาของผนังและฉนวนจากการคำนวณ ..	76
4.3	แสดงโครงสร้างจำลองของถังทดสอบ ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์	77
4.4	การกระจายของหน่วยแรงที่หน้าตัด 1, 2, 3 บนผนัง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิ วิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์	78

ศูนย์วิจัยที่ปรึกษา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่

4.5	การกระจายของหน่วยแรงที่หน้าตัด 1, 2, 3 บนผนัง เนื่องจากการอัดแรง วิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์	79
4.6	การกระจายของหน่วยแรงที่หน้าตัด 1, 2, 3 บนผนัง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิ และการอัดแรง วิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์	80
4.7	การกระจายของหน่วยแรงที่หน้าตัด 1, 2, 3 บนผนัง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิและ การอัดแรงภายใต้แรงดึงประสิทธิผล วิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์ ...	81
4.8	การกระจายของหน่วยแรงที่หน้าตัด 4, 5 บนพื้นตั้ง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิ วิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์	82
4.9	การกระจายของหน่วยแรงที่หน้าตัด 4, 5 บนพื้นตั้ง เนื่องจากการอัดแรง วิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์	83
4.10	การกระจายของหน่วยแรงที่หน้าตัด 4, 5 บนพื้นตั้ง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิ และการอัดแรง วิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์	84
4.11	การกระจายของหน่วยแรงที่หน้าตัด 4, 5 บนพื้นตั้ง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิ และการอัดแรง ภายใต้แรงดึงประสิทธิผล วิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์	85
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงแนวเส้นรอบวงที่ผิวนอกของผนัง ($Z = 80$ ซม) กับเวลาจากการวิเคราะห์โดยทฤษฎีวิสโคอีลาสติก	86
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงแนวเส้นรอบวงที่ผิวในของผนัง ($Z = 80$ ซม) กับเวลาจากการวิเคราะห์โดยทฤษฎีวิสโคอีลาสติก	87
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดแนวเส้นรอบวงที่ผิวนอกของผนัง ($Z = 80$ ซม) กับเวลาจากการวิเคราะห์โดยทฤษฎีวิสโคอีลาสติก	88
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดแนวเส้นรอบวงที่ผิวในของผนัง ($Z = 80$ ซม) กับเวลาจากการวิเคราะห์โดยทฤษฎีวิสโคอีลาสติก	89
4.16	การกระจายของหน่วยแรงแนวเส้นรอบวงที่หน้าตัดผนัง ($Z = 80$ ซม) ที่เวลา 30 ถึง 100 วัน จากการวิเคราะห์โดยทฤษฎีวิสโคอีลาสติก ($\bar{E} = 300,000$ $250,000$ 200,000)	90
4.17	แสดงรูปด้านของถังทดลอง	91
4.18	แสดงรูปแปลนของถังทดลอง	92

รูปที่

หน้า

4.19	แสดงรูปตัด A ของถังทดลอง	93
4.20	แสดงรูปตัด B ของถังทดลอง	94
4.21	แสดง เหล็ก เสริมพื้นชั้นล่างของถังทดลอง	95
4.22	แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ของถังทดลอง	96
4.23	แสดงตำแหน่ง เกจวัดความ เครียดแบบไฟฟ้าบนผนังด้านที่ 1	97
4.24	แสดงตำแหน่ง เกจวัดความ เครียดแบบไฟฟ้าและ เทอร์โมคัป เบิลบนผนังด้านที่ 2 .	98
4.25	แสดงตำแหน่ง เกจวัดความ เครียดแบบไฟฟ้าและ เทอร์โมลัมป์ เบิลบนผนังด้านที่ 3 .	99
4.26	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดกับความ เครียดของกระบอกวัดแรงอัด ที่ 60° ซ และ 100° ซ	100
4.27	ถังทดลอง เหล็กอุปกรณ์และอัดแรง เสร็จ	101
5.1	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของถังทดลองกับ เวลา	102
5.2	การกระจายของอุณหภูมิตามความหนาของผนังถังทดลอง เมื่อเวลาเริ่ม เปิด สวิตซ์แห่งทำความร้อนตั้งแต่วันที่ 2 ถึงวันที่ 11 ของการทดลองเพิ่มอุณหภูมิ .	103
5.3	การกระจายของอุณหภูมิตามความหนาของผนังถังทดลอง เมื่อเวลาเริ่ม เปิด สวิตซ์แห่งทำความร้อนตั้งแต่วันที่ 2 ถึงวันที่ 11 ของการทดลองเพิ่มอุณหภูมิ .	104
5.4	การกระจายของอุณหภูมิตามความหนาของผนัง เมื่อเวลา เริ่ม เปิดและหลังจาก ปิดสวิตซ์แห่งทำความร้อนของวันที่ 10 ของการทดลองเพิ่มอุณหภูมิ	105
5.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความ เครียดในแนว เส้นรอบวง (เกจหมายเลข 17) กับ อุณหภูมิที่ผิวนอกของผนังถัง (T24)	106
5.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความ เครียดในแนว เส้นรอบวง (เกจหมายเลข 18) กับ อุณหภูมิที่ผิวนอกของผนังถัง (T24)	106
5.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความ เครียดในแนวตั้ง (เกจหมายเลข 19) กับอุณหภูมิ ที่ผิวนอกของผนังถัง (T24)	107
5.8	ความสัมพันธ์ระหว่างความ เครียดในแนวตั้ง (เกจหมายเลข 20) กับอุณหภูมิที่ ผิวนอกของผนังถัง (T24)	107
5.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความ เครียดในแนวตั้ง (เกจหมายเลข 22) กับอุณหภูมิที่ ผิวนอกของผนังถัง (T24)	108

รูปที่

ค

หน้า

5.10	ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวเส้นรองวง (เกจหมายเลข 23) กับ อุณหภูมิที่ผิวนอกของผนังถัง (T14)	108
5.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวตั้ง (เกจหมายเลข 24) กับอุณหภูมิ ที่ผิวนอกของผนัง (T14)	109
5.12	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงใน เหล็ก เสริมอัดแรงกับเวลา ขณะทำการทดลอง เพิ่มอุณหภูมิ	110



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สัญลักษณ์

E	โมดูลัสยืดหยุ่น
E_i	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่เวลาเริ่มต้นแรงกระทำ
$\bar{E}(x, s)$	$\frac{1}{s\bar{J}(x, s)}$
f_i	แรงที่เกิดบนสสารวัตถุต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรในแนวแกน i
$f(t)$	ฟังก์ชันความเครียดซึ่งไม่คืนกลับ
$J(x, t' - t')$	ครีพคอมไพลแอนซ์
$\bar{J}(x, s)$	การแปลงลาปลาซของครีพคอมไพลแอนซ์
s	พารามิเตอร์ของการแปลงลาปลาซ
t	เวลา
t'	เวลาเสมือน
T	อุณหภูมิ
ΔT	อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป
u_i	การเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกน i
x_1, x_2, x_3	พิกัดคาร์ทีเซียน 3 มิติ
ν_{ij}	ส่วนประกอบของหน่วยแรงที่จุดใด ๆ
ν_r	หน่วยแรงในแนวรัศมี
ν_θ	หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง
ν_ϕ	หน่วยแรงในแนวตั้ง
ϵ_{ij}	ส่วนประกอบของความเครียดที่จุดใด ๆ
τ	เวลาที่เริ่มมีแรงกระทำ
τ_0	เวลาที่เริ่มต้นของฟังก์ชัน $f(t)$
ν	อัตราส่วนปัวซอง
α	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน
ϕ_i	ฟังก์ชันแห่งการประมาณ

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นิยามของคำต่าง ๆ ที่ใช้ในภาษาเทคนิค

การขยายตัว เนื่องจากความร้อน	Thermal expansion
การคืบ	Creep
การตอบสนอง	Response
การนำความร้อน	Thermal conductivity
การ เปลี่ยนตำแหน่ง	Displacement
การ เปลี่ยนรูปร่าง	Deformation
การแปลงลาปลาซ	Laplace transformation
การผกผันการแปลงลาปลาซ	Laplace transform inversion
การผ่อนคลาย	Relaxation
การอัดแรง	Prestressing
กิริยา	Action
เกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้า	Electrical strain gauge
กำลังรับแรงดัด	Flexural strength
กำลังรับแรงดึง	Tensile strength
กำลังรับแรงอัด	Compressive strength
กฎแห่งวัสดุ	Constitutive law
ระบบวัดแรงอัด	Load cell
คำตอบแบบสูตร	Closed form solution
ครีพคอมพลีแอนซ์	Creep compliance
ความเครียด	Strain
ความเครียดซึ่งไม่คืนกลับ	Irrecoverable strain
จุดขั้ว	Node
ซีเมนต์	Cement
ไดนามิกครีแลกเซชัน	Dynamic relaxation
ตัวประกอบ	Factor
ถังปฏิกรณ์คอนกรีตอัดแรง	Prestressed concrete reactor vessel

ถังความดันคอนกรีตอัดแรง	Prestressed concrete pressure vessel
ที่สมมาตรรอบแกนหมุน	Axisymmetric
แท่งทำความร้อน	Heater
เทอร์โมคัปเปิล	Thermocouple
ทฤษฎีโครงสร้างเปลือกบาง	Thin shell theory
ทฤษฎีวิสโคอีลาสติก	Viscoelastic theory
ปูน	Cement paste
ปูนทราย	Mortar
พิกัดคาร์ทีเซียน	Cartesian coordinates
ฟังก์ชันแทรกการประมาณ	Interpolation function
ไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์	Finite difference
ไฟไนต์เอลิเมนต์	Finite element
โมดูลัสยืดหยุ่น	Modulus of elasticity
มวลรวม	Aggregate
แรงที่เกิดบนสสารวัตถุ	Body force
รอยร้าวไมโคร	Microcracking
วิธีเชิงตัวเลข	Numerical method
เวลาเสมือน	Pseudo-time
สติฟเนส	Stiffness
สภาพขอบเขต	Boundary condition
สภาวะคงตัว	Steady state
หัวยึด	Grip
หน่วยแรง	Stress
หน่วยแรงในแนวตั้ง	Vertical stress
หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง	Circumferential stress
หลักการสมนัย	Correspondence principle
อัตราส่วนปัวซอง	Poisson's ratio