บทที่ 4

การวิเคราะห์ออกแบบถังและการทดลอง

ในการวิจัยเพื่อศึกษาพฤติกรรมของถังเก็บความร้อนคอนกรีตอัดแรงทีหลังนี้ ได้ออกแบบและสร้างถังทดลองขึ้นใบหนึ่ง โดยภายในบรรจุน้ำมันที่มีจุดเดือดสูง และติดแท่งทำความร้อนสำหรับให้ความร้อนแก่น้ำมัน ทำการทดลองให้อุณหภูมิของน้ำมันสูงขึ้นอย่างช้า ๆ พร้อมกับบันทึกค่าจากเครื่องมือวัดความเครียดและอุณหภูมิที่เตรียมไว้ เพื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี

4.1 <u>การวิเคราะห์และออกแบบถังทดลอง</u>

ถังเก็บความร้อนต้นแบบมีความจุ 7 ลูกบาศก์เมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 1.40 เมตร มีความสูง 5.0 เมตร เก็บน้ำมันร้อนอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 300° เซลเซียส ในการวิจัยนี้ใช้เพียงส่วนของถังที่มีความสูง 1.53 เมตร ทั้งนี้ก็เพื่อความประหยัดโดยที่ยังสามารถศึกษา-พฤติกรรมของถังได้เหมือนเดิม เนื่องจากถังนี้ใช้บรรจุของเหลวดังนั้นจะต้องป้องกันไม่ให้มีการรั่วซึมโดยกำหนดเงื่อนไขในการออกแบบว่าไม่ให้เกิดหน่วยแรงดึงขึ้นในส่วนของโครงสร้างทันทีหลังการถ่ายแรงอัด และเมื่อคิดการเสื่อมสูญการอัดแรงทั้งหมดแล้วจะยอมให้เกิดหน่วยแรงดึงในโครงสร้างขณะใช้งานไม่เกิน 50 เปอร์เซนต์ของหน่วยแรงดึง ซึ่งยอมให้ที่อุณหภูมิปกติในระยะเวลาสั้น โดยที่เมื่อใช้งานเป็นเวลาต่อเนื่องกัน การปรับการกระจายหน่วยแรงเนื่องจากผลของการคืบทำให้หน่วยแรงดึงลดน้อยลงในเวลาเร็วพอควร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาความหนาของผนังในขั้นแรกต้องลองเลือกความหนาที่คิดว่าจะเหมาะสมกับการใช้งานขึ้นมาค่าหนึ่ง และลองวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อนของผนังที่มีฉนวนหุ้ม โดยใช้ทฤษฎีการส่งผ่านความร้อนของท่อทรงกระบอกกลมกลวงที่สภาวะคงตัว[23] (ดูรูปที่ 4.1) ซึ่งมีสูตรว่า

$$Q = \frac{T_1 - T_{amb}}{R_c + R_i + R_a} = \frac{T_1 - T_2}{R_c} \qquad (4.1)$$

โดยที่ Q = ปริมาณความร้อน

T_1 = อุณหภูมิของผนังที่ผิวใน

T_{amb} = อุณหภูมิห้อง

T_2 = อุณหภูมิของผนังที่ผิวนอก

$$R_c = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2 k_c L}$$

$$R_i = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2 k_i L}$$

$$R_a = \frac{1}{2 h_o L r_3}$$

k_c, k_i = สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตและฉนวน

h_o = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ

r_1 = ระยะรัศมีของผิวในของผนังถัง

r_2 = ระยะรัศมีของผิวนอกของผนังถัง

r_3 = ระยะรัศมีของผิวนอกของฉนวนหุ้ม

จากการวิเคราะห์นี้จะได้อุณหภูมิของผนังที่ผิวในและผิวนอก สำหรับนำมาคำนวณหาหน่วยแรงภายใน เนื่องจากอุณหภูมิโดยทฤษฎีอีลาสติก [24] ที่หน้าตัดซึ่งห่างจากขอบเขตและพิจารณาได้ว่าเกิดความเครียดเฉพาะในระนาบ (plane strain) ซึ่งมีสูตรเป็น

$$\sigma_r = \frac{\alpha E T_i}{2(1-\nu)\ln(b/a)}\left[-\ln(b/r) - \frac{a^2}{(b^2-a^2)}\left(1-\frac{b^2}{r^2}\right)\ln(b/a)\right] \quad (4.2)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha E T_i}{2(1-\nu)\ln(b/a)}\left[1-\ln(b/r) - \frac{a^2}{(b^2-a^2)}\left(1+\frac{b^2}{r^2}\right)\ln(b/a)\right] \quad (4.3)$$

$$\sigma_z = \frac{\alpha E T_i}{2(1-\nu)\ln(b/a)}\left[1-2\ln(b/r) - \frac{2a^2}{(b^2-a^2)}\ln(b/a)\right] \quad (4.4)$$

โดยที่ T_i = ผลต่างของอุณหภูมิผิวนอกและผิวในของผนังถัง

b = ระยะรัศมีของผิวนอกของผนังถัง

a = ระยะรัศมีของผิวในของผนังถัง

ส่วนหน่วยแรงเนื่องจากการอัดแรงทั้งในแนวเส้นรอบวงและแนวดิ่ง มีขนาดสม่ำเสมอเกือบเท่ากันทุกจุดบนหน้าตัด จึงสามารถใช้ค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงเนื่องจากการอัดแรงดังนี้

$$\sigma_\theta = \frac{-F_{p,\theta}}{A_\theta} \quad (4.5)$$

$$\sigma_z = \frac{-F_{p,z}}{A_z} \quad (4.6)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่ $F_{p,\theta}$ = แรงอัดในแนวเส้นรอบวง

A_{θ} = พื้นที่หน้าตัดในแนวเส้นรอบวง

$F_{p,z}$ = แรงอัดในแนวดิ่ง

A_{z} = พื้นที่หน้าตัดในแนวดิ่ง

จากการวิเคราะห์เบื้องต้นนี้พบว่าผลของอุณหภูมิทำให้เกิดสถานะของหน่วยแรงแนวดิ่งและหน่วยแรงแนวเส้นรอบวงตามความหนาของผนังคล้ายคลึงกันคือ เกิดหน่วยแรงอัดมากที่สุดที่ผิวในและหน่วยแรงดึงมากที่สุดที่ผิวนอกโดยการกระจายเกือบเป็นเส้นตรง ส่วนหน่วยแรงแนวรัศมีเป็นหน่วยแรงอัดมีขนาดน้อยมากไม่เกิน 10 เปอร์เซนต์ของหน่วยแรงแนวดิ่งที่มากที่สุด โดยมีค่ามากที่สุดอยู่ใกล้กึ่งกลางผนังและมีค่าเป็นศูนย์ที่ผิวในและผิวนอก หน่วยแรงดึงในแนวเส้นรอบวงและแนวดิ่งมีค่าขึ้นกับความหนาของฉนวนกันความร้อนซึ่งหุ้มไว้ เพื่อช่วยลดความร้อนที่สูญเสียและรักษาอุณหภูมิภายในไว้ดังรูปที่ 4.2 ถ้าหากไม่มีฉนวนหุ้มไว้เลยอุณหภูมิที่ผิวในซึ่งสัมผัสกับน้ำมันร้อนและผิวนอกซึ่งสัมผัสกับอากาศจะแตกต่างกันมาก จนอาจทำให้เกิดการแตกร้าวได้ ตารางที่ 4.1 แสดงค่าอุณหภูมิแตกต่างของผิวคอนกรีตด้านในกับด้านนอกและหน่วยแรงดึงสูงสุด เมื่อใช้ความหนาผนัง 0.15 เมตร โดยเปลี่ยนค่าความหนาของฉนวนต่าง ๆ กัน ในการวิจัยนี้เลือกฉนวนหนา 5 ซม. ซึ่งทำให้เกิดอุณหภูมิแตกต่าง 21° เซลเซียสและหน่วยแรงดึงสูงสุด 34.8 กก./ซม.^{2} หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมินี้จำต้องหักล้างโดยการอัดแรง จากผลการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่าต้องใช้เหล็กเสริมอัดแรงพื้นที่หน้าตัดประมาณ 0.3 เปอร์เซนต์ของพื้นที่หน้าตัดคอนกรีต

เพื่อจะวิเคราะห์ถังทดลองให้ละเอียดขึ้น จะต้องใช้การวิเคราะห์อีลาสติกโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอเลเมนต์สำหรับโครงสร้างสมมาตรรอบแกนหมุน โครงสร้างจำลองมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 1.40 เมตร ผนังหนา 0.15 เมตร ความสูง 1.53 เมตร พื้นถังหนา 0.20 เมตร ประกอบด้วย 260 จุดขึ้ว ชิ้นส่วนย่อยของคอนกรีต 204 ชิ้น ชิ้นส่วนย่อยของเหล็กเสริมอัดแรงแนวดิ่ง 37 ชิ้นและชิ้นส่วนย่อยของเหล็กเสริมอัดแรงแนวเส้นรอบวง 6 ชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 การวิเคราะห์แยกเป็น 4 กรณีคือ

1. การเพิ่มอุณหภูมิ
2. การอัดแรง
3. การเพิ่มอุณหภูมิร่วมกับการอัดแรง
4. การเพิ่มอุณหภูมิร่วมกับการอัดแรงภายใต้แรงดึงประสิทธิผลของเหล็กเสริมอัดแรง (ดูการหาแรงดึงขณะถ่ายแรงและแรงดึงประสิทธิผลในภาคผนวก ค)

ในการวิเคราะห์ได้สมมุติให้อุณหภูมิของผิวในเท่ากับ 300° เซลเซียสและผลต่างของอุณหภูมิคือ 20° เซลเซียส โดยที่อุณหภูมิลดลงเป็นเส้นตรงตามระยะรัศมี รูปที่ 4.4 ถึง 4.7 แสดงการกระจายของหน่วยแรงต่าง ๆ ตามความหนาในผนังที่ระยะ 1.34, 0.86 และ 0.34 เมตรจากขอบล่างของถัง ส่วนผลของหน่วยแรงในพื้นถังได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.8 ถึง 4.11 สำหรับหน้าตัดที่ระยะรัศมี 0.625 และ 0.025 เมตร

ผลจากการวิเคราะห์ในกรณีที่มีการอัดแรงนั้น ผนังจะมีหน่วยแรงเป็นหน่วยแรงอัดตลอดทั้งหมด ค่ามากที่สุดเท่ากับ 69 กก./ซม.^{2} อยู่ที่ผิวในขอบบน พื้นถังที่ผิวนอกเกิดหน่วยแรงดึงในแนวเส้นรอบวงและแนวรัศมีประมาณ 18 กก./ซม.^{2} พื้นถังที่ผิวในเกิดหน่วยแรงอัดในแนวเส้นรอบวงและแนวรัศมีประมาณ 23 กก./ซม.^{2} ผลการวิเคราะห์ในกรณีที่มีการเพิ่มอุณหภูมิร่วมกับการอัดแรง ผนังส่วนใหญ่จะมีหน่วยแรงเป็นหน่วยแรงอัด ยกเว้นที่บริเวณผิวนอกขอบล่างเกิดหน่วยแรงดึงในแนวเส้นรอบวงประมาณ 10 กก./ซม.^{2} หน่วยแรงอัดมากที่สุดเท่ากับ 80 กก./ซม.^{2} อยู่ที่ผิวในของผนัง พื้นถังที่ผิวนอกเกิดหน่วยแรงดึงในแนวเส้นรอบวงและแนวรัศมีประมาณ 48 กก./ซม.^{2} ผลการวิเคราะห์ในกรณีที่มีการเพิ่มอุณหภูมิร่วมกับการอัดแรงภายใต้แรงดึงประสิทธิผล ผิวในของผนังเกิดหน่วยแรงอัดในแนวเส้นรอบวงและในแนวดิ่งประมาณ 63 กก./ซม.^{2} ผิวนอกของผนังเกิดหน่วยแรงดึงในแนวเส้นรอบวงและแนวดิ่งประมาณ 15 กก./ซม.^{2} พื้นถังที่ผิวนอกเกิดหน่วยแรงดึงในแนวเส้นรอบวงและแนวรัศมีประมาณ 40 กก./ซม.^{2} พื้นถังที่ผิวในเกิดหน่วยแรงอัดในแนวเส้นรอบวงและแนวรัศมีประมาณ 60 กก./ซม.^{2}

การวิเคราะห์ขั้นสุดท้ายเป็นการวิเคราะห์โดยทฤษฎีวิสโคอีลาสติกเชิงเส้นตรง เพื่อศึกษาพฤติกรรมที่ระยะยาวนานเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิและการอัดแรง การวิเคราะห์นี้ใช้วิธีการของ Jordaan และ Khalifa[15] ตามที่กล่าวในหัวข้อ 3.4 ซึ่งการหาคำตอบอาศัยผลลัพธ์จากการวิเคราะห์อีลาสติกโดยวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์ อายุของคอนกรีตเท่ากับ 30 วันเมื่อมีการอัดแรงร่วมกับการเพิ่มอุณหภูมิ ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข สำหรับหน้าตัดบนผนังที่ระดับความสูง 0.80 เมตรจากก้นถัง ผลการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.12 ถึง 4.16 ซึ่งแสดงหน่วยแรงและความเครียดที่ระยะเวลาต่าง ๆ ตั้งแต่ 30 ถึง 300 วัน หน่วยแรงและความเครียดได้ปรับการกระจายจนอยู่ในสภาวะคงตัวภายใน 300 วัน หน่วยแรงในแนวเส้นรอบวงมีค่าสม่ำเสมอ 42 กก./ซม.^{2} ที่สภาวะคงตัวนี้ หลังจากนั้นถ้าอุณหภูมิลดลงเป็นปกติหน่วยแรงอัดที่ผิวในและผิวนอกจะเท่ากับ 4 และ 75 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ ส่วนความเครียดเมื่อปรับการกระจายแล้วกลับมีค่าลดลงคือ ความเครียดในแนวเส้นรอบวงปรับตัวจาก 2532×10^{-6} ซม./ซม.

เป็น 2253X10^{-6} ซม./ซม. และจาก 2558X10^{-6} ซม./ซม. เป็น 2345X10^{-6} ซม./ซม. สำหรับผิวในและผิวนอกตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนผนังส่วนใหญ่เป็นหน่วยแรงอัด ยกเว้นในกรณีที่มีการเพิ่มอุณหภูมิร่วมกับการอัดแรงภายใต้แรงดึงประสิทธิผลนั้น ปรากฏว่าผิวนอกของผนังเกิดหน่วยแรงดึง แต่ไม่เกินค่าที่ยอมให้ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ผลของการคืบแสดงว่าหน่วยแรงที่ผิวนอกนี้จะมีค่าเปลี่ยนเป็นหน่วยแรงอัดในเวลาอันรวดเร็ว ดังนั้น หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนผนังในทุกกรณีจึงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ อย่างไรก็ตามในการออกแบบได้เสริมเหล็กธรรมดาในผนังเพิ่มเติม เพื่อควบคุมการแตกร้าวในผนัง ในกรณีที่เกิดหน่วยแรงดึงมากกว่าที่คาดคะเนไว้

รูปที่ 4.17 แสดงรูปด้านของถังทดลอง รูปที่ 4.18 แสดงรูปแปลนของถังทดลอง รูปที่ 4.19 และ 4.20 แสดงรูปตัด A และ B ของถังทดลอง รูปที่ 4.21 แสดงเหล็กเสริมพื้นชั้นล่างของถังทดลอง เหล็กเสริมอัดแรงในผนังเป็นชนิดเชือกเหล็กลวด 7 เส้น ø $\frac{1}{2}$ นิ้ว เกรด 270K เหล็กเสริมอัดแรงแนวดิ่งทาจารบีกันสนิม และใส่ในท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 18 มม. ศูนย์กลางของท่อซึ่งฝังอยู่ในผนังคอนกรีตมีระยะห่างกันประมาณ 0.21 เมตร และอยู่ห่างจากผิวคอนกรีตด้านใน 0.10 เมตร แผ่นเหล็กรองหัวยึดหนา $\frac{5}{8}$ นิ้ว ขนาดกว้าง 0.10 ม. x 0.10 ม. ช่วยกระจายแรงกดจากหัวยึดและลดหน่วยแรงของคอนกรีตบริเวณรอบปลายท่อพีวีซี เหล็กเสริมกันร้าวในแนวรัศมีที่ปลายท่อพีวีซีใช้เหล็ก ø 6 มม. ขดเป็นเกลียว เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.07 เมตร ระยะเกลียว 0.03 เมตร จำนวน 5 รอบ

เหล็กเสริมอัดแรงแนวเส้นรอบวงซึ่งทาจารบีกันสนิมได้ถูกออกแบบให้อยู่ชิดผิวถังด้านนอก โดยมีแถบสังกะสีเรียบกว้าง 1 นิ้ว รองระหว่างผนังคอนกรีตและเหล็กเสริม เพื่อลดการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืด การอัดแรงด้วยระบบใช้หัวยึดที่ปลายของเหล็กแต่ละเส้นสำหรับถังขนาดเล็กเช่นนี้จะมีปัญหาเรื่องความฝืดสูง ดังนั้นจึงออกแบบให้เหล็กแต่ละเส้นยาวประมาณ 1 ใน 3 ของเส้นรอบวงโดยมีครีบบนผนังในแนวดิ่ง 3 อันเป็นที่ถ่ายแรงจากหัวยึด

เหล็กเสริมธรรมดาในผนังประกอบด้วยเหล็ก ø 9 มม. ตะแกรง 2 ชั้น โดยมีระยะห่างเส้นต่อเส้น 0.20 และ 0.10 เมตร สำหรับตะแกรงชั้นในและชั้นนอกตามลำดับ

สำหรับแผ่นพื้นถังใช้เหล็กเสริมข้ออ้อย ø 12 มม. วางในแนวรัศมีและเส้นรอบวงโดยมีเหล็กเสริมเพียงพอที่จะรับแรงดึงที่ก้นถังได้ ทั้งนี้เนื่องจากช่วงเวลาการทดลองสั้นเพียงไม่กี่วัน และในการนำไปใช้งานอาจเผื่อให้พื้นถังหนาขึ้นอีกได้โดยเสียค่าใช้จ่ายไม่มาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ฝาปิดด้านบนเป็นแผ่นเหล็กหนา 12 มม. มีข้อต่อเกลียวสำหรับท่อน้ำมัน ท่ออากาศและแท่งทำความร้อน รอยต่อด้านนอกระหว่างขอบบนของผนังคอนกรีตและฝาเหล็กอุดด้วยซิลิโคนโดยรอบ

4.2 การสร้างถังทดลอง

คอนกรีตสำหรับถังทดลองมีกำลังอัดประลัยที่ออกแบบ 350 กก./ซม.^{2} ความยุบตัว 10 ซม. อัตราส่วนผสมเป็นดังนี้

ซีเมนต์	440	กก./ม.^{3}
ทรายหยาบ	680	กก./ม.^{3}
หินขนาดโตสุด $\frac{1}{2}$ นิ้ว	512	กก./ม.^{3}
หินขนาดโตสุด $\frac{3}{4}$ นิ้ว	512	กก./ม.^{3}
อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	0.46	

ซีเมนต์ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่หนึ่ง (ตราช้าง) ขนาดถุงละ 50 กก. ทรายใช้ทรายหยาบแม่น้ำมีสัดส่วนคละตามตารางที่ 4.2 หินใช้หินปูนจากจังหวัดสระบุรีมีสัดส่วนคละตามตารางที่ 4.3 และ 4.4 หินนี้ล้างด้วยน้ำให้สะอาดแล้วเก็บรอไว้ก่อนนำมาใช้งาน

เชือกเหล็กอัดแรงลวด 7 เส้น $\phi \frac{1}{2}$ นิ้วที่ใช้เป็นชนิดเกรด 270K ตามมาตรฐาน ASTM A416-74 จากการทดสอบปรากฏว่ามีกำลังรับแรงดึงประลัย 18,910 กก. โมดูลัสยืดหยุ่น 2,000,000 กก./ซม.^{2} (ดูรายละเอียดผลการทดสอบในภาคผนวก ง) ส่วนเหล็กเสริมธรรมดาใช้เหล็กกลมชนิด SR24 และเหล็กข้ออ้อยชนิด SD30

การเทคอนกรีตจะแบ่งเป็น 2 ครั้ง ครั้งแรกเทพื้นถังก่อน จากนั้นจึงเตรียมฝังเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิของผนังถัง ในรูปที่ 4.21 จะเห็นตำแหน่งที่ฝังเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิที่ผิวใน ผิวนอกและจุดแบ่ง 1 ใน 3 ของความหนาซึ่งทั้งหมดจะมีอยู่ 2 ชุด หลังจากเทพื้นถังแล้ว 21 วันจึงทำการเทคอนกรีตส่วนผนังถัง บ่มโดยใส่น้ำในถังจนเต็มและใช้กระสอบชุ่มน้ำหุ้มไว้โดยรอบจนผนังคอนกรีตอายุได้ 14 วัน

4.3 การติดตั้งอุปกรณ์

ภายในถังทดลองบรรจุก้อนคอนกรีตขนาด 0.15 ม x 0.15 x 0.15 ม. จำนวน 320 ก้อน เพื่อประหยัดน้ำมันที่ใช้ซึ่งก้อนคอนกรีตจะแทนที่น้ำมันถึง 1080 ลิตร การวางก้อนคอนกรีตได้จัดให้เหลือช่องว่างเป็นแนวให้ความร้อนไหลกระจายภายในถังได้ทั่วถึง

ภายนอกถังทดลองติดตั้งถังเหล็กขนาด 100 ลิตร สำหรับเก็บน้ำมันชั่วคราว การ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดูดน้ำมันออกจากถังทดลองมาเข้าถังเหล็กใช้หลักการไหลของของเหลวซึ่งไหลจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำ ส่วนการสูบน้ำมันจากถังเหล็กเข้าถังทดลองใช้ปั๊มซึ่งมีกำลังสูบได้ 10 ลิตรต่อนาที

อุปกรณ์สำหรับทำความร้อนใช้แท่งทำความร้อนด้วยไฟฟ้ารูปตัวยูยาว 1.20 เมตร กว้าง 0.05 เมตร จำนวน 4 ตัว ๆ ละ 1980 วัตต์ จุ่มลงในน้ำมันจากฝาปิดโดยจัดตำแหน่งตามรูปที่ 4.21 ตัวถังโดยรอบหุ้มด้วยฉนวนไมโครไฟเบอร์หนา 2 นิ้ว การวัดความเครียดของคอนกรีตใช้เกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้า (electrical strain gauge) ชนิด N-123A ยี่ห้อ TML ทำด้วยเส้นลวดนิเกิลโครเมียม (Ni - Cr) มีความยาวเกจ (gauge length) 25 มม. มีความกว้างเกจ (gauge width) 1.5 มม. แผ่นพื้นทำด้วยเซอรามิค (ceramic) ยาว 40 มม. กว้าง 8 มม. กาวติดเป็นชนิด AS (อุณหภูมิใช้งาน -30 ถึง 400° เซลเซียส) เนื่องจากอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อเกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้าทำให้เกิดความเครียดปรากฏ (apparent strain) ขึ้นเพื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงจึงต้องทำการแคลิเบรท (calibrate) ค่าที่วัดได้กับค่าจากเอกซเทนโซมิเตอร์ ผลการทดสอบแสดงไว้ในภาคผนวก จ เกจที่ติดบนถังทดลองมีทั้งหมด 8 ตัว (ดูรูปที่ 4.23-4.25) อยู่ที่บริเวณกึ่งกลางความสูงของถังในแนวดิ่งและแนวเส้นรอบวง 6 ตัว อยู่ที่บริเวณขอบล่างของผนังในแนวดิ่ง 1 ตัว และอยู่ที่บริเวณขอบบนของถังในแนวเส้นรอบวง 1 ตัว

กระบอกวัดแรงอัด (load cell) สำหรับวัดแรงอัดจากเหล็กเสริมอัดแรงมีทั้งหมด 4 ตัว ใช้วัดเหล็กแนวดิ่ง 2 ตัวและแนวเส้นรอบวง 2 ตัว สำหรับเหล็กแนวเส้นรอบวงนั้นนับจากขอบล่างของถังขึ้นไปเป็นเส้นที่ 4 อุปกรณ์ที่ใช้ทำกระบอกวัดแรงอัดมีดังนี้

ก. แท่งเหล็กทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 4.60 ซม. เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 1.65 ซม. สูง 6.0 ซม.

ข. เกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้าชนิด QFLA-1 ยี่ห้อ TML ทำด้วยฟอยล์คอปเปอร์นิเกิล (Cu - Ni foil) มีความยาวเกจ 1 มม. มีความกว้างเกจ 1.2 มม. แผ่นพื้นทำด้วยโพลีอิไมด์ (polyimide) ยาว 5 มม. กว้าง 2 มม. กาวติดเป็นชนิด PC-12 (อุณหภูมิใช้งาน -196 ถึง 170° เซลเซียส)

กระบอกวัดแรงอัดได้ถูกทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและความเครียดที่อุณหภูมิห้อง ,60 , 80 และ 100° เซลเซียส ก่อนนำไปใช้งาน ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.26

4.4 <u>เครื่องมือวัดค่าต่าง ๆ</u>

เครื่องมือที่ใช้วัดค่าต่าง ๆ ในการอัดแรงและการเพิ่มอุณหภูมิมีดังนี้

1. เครื่องวัดความเครียดแบบไฟฟ้า (electrical strain indicator) รุ่น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SM-60D ยี่ห้อ KYOWA สามารถอ่านค่าความเครียดได้สูงสุด 30,500 x 10^{-6} ซม./ซม. และต่ำสุด -29,500 x 10^{-6} ซม./ซม. มีความละเอียด 10 x 10^{-6} ซม./ซม. (1 ขีด) ค่าเกจเฟคเตอร์ (gauge factor) คงที่ 2.00

2. กล่องสวิทช์และปรับสมดุลย์ (switching & balancing box) รุ่น SS 24R ยี่ห้อ KYOWA มีช่องสำหรับต่อเกจ 24 ช่อง มีปุ่มปรับความต้านทานของเกจได้เป็น 60, 120, 350 และ 500 โอห์ม สามารถต่อเกจได้เป็น 1, 2 และ 4 เกจ

3. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบตัวเลข (digital temperature indicator) รุ่น DP-48 ยี่ห้อ RKC สำหรับใช้กับเทอร์โมคัปเปิลชนิด CA(K) หรือ IC(J) ค่าสูงสุดที่อ่านได้ 399° เซลเซียส ความละเอียดในหลักสุดท้าย 1° เซลเซียส เพื่อความถูกต้องได้ทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิจริงกับอุณหภูมิที่อ่านได้โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดเดียวกับที่ใช้ในการทดลอง

4. เครื่องเปลี่ยนช่อง (manual changeover device) รุ่น SP-48 ยี่ห้อ RKC ชนิดธรรมดาสำหรับต่อกับเทอร์โมคัปเปิล 5 จุดและชนิดส่งผ่านสำหรับเทอร์โมคัปเปิล 4 จุด

4.5 <u>การอัดแรง</u>

การอัดแรงกระทำเมื่อผนังคอนกรีตมีอายุ 288 วัน เหตุผลที่เสียเวลามากเนื่องจากต้องใช้เวลาในการติดตั้งอุปกรณ์และทดสอบความถูกต้องของเครื่องมือวัดต่าง ๆ ขั้นตอนในการอัดแรงเป็นดังนี้

1. ดึงเหล็กเสริมแนวดิ่ง 11,300 กก. ทีละเส้นเรียงตามลำดับจนครบ โดยดึงปลายบนส่วนปลายล่างยึดไว้กับที่

2. ดึงเหล็กเสริมแนวเส้นรอบวง 11,300 กก. ทีละเส้น ดึง 3 เส้นจึงจะครบรอบเป็น 1 วง เริ่มดึงวงล่างสุดเป็นวงแรก เมื่อดึงวงที่หนึ่งในทิศทางตามเข็มนาฬิกาเสร็จจึงดึงวงที่สองในทิศทางทวนเข็มนาฬิการและดึงวงต่อไปสลับกันเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนเสร็จ การดึงขั้นที่ 1 และ 2 ทำให้ทราบประสิทธิภาพของการดึง จากนั้นจึงทำการดึงขั้นต่อไป

3. ดึงเหล็กเสริมแนวดิ่ง 13,900 กก. ทีละเส้นจนครบโดยดึงปลายบนส่วนปลายล่างยึดไว้กับที่

5. ภายหลังขั้นตอนที่ 4 เสร็จแล้ว 1 เดือน เนื่องจากต้องการทราบแรงดึงที่แน่นอนในขณะทดลองเพิ่มอุณหภูมิในถัง จึงดึงเหล็กเสริมแนวเส้นรอบวง 13,900 กก. ทุกเส้นทุกปลายอีกครั้งหนึ่ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.6 <u>การทดลองให้อุณหภูมิภายในถังสูงขึ้น</u>

หลังจากติดตั้งอุปกรณ์และทำการอัดแรงเสร็จเรียบร้อยพร้อมจะทำการทดลองต่อไป (ดูรูปที่ 4.27) จึงเริ่มทำการทดลองเมื่อผนังคอนกรีตอายุ 323 วัน โดยเปิดสวิทช์แท่งทำความร้อนซึ่งจุ่มอยู่ในน้ำมันและบันทึกค่าจากเครื่องวัดอุณหภูมิ และความเครียดภายในช่วงเวลา 10 วัน ท้ายที่สุดทำให้น้ำมันมีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 124° เซลเซียส รายละเอียดการทดลองมีดังนี้

วันที่ 1 น้ำมันมีอุณหภูมิ 25° เซลเซียส เปิดสวิทช์แท่งทำความร้อนตั้งแต่เวลา 9.00 น. จนถึงเวลา 19.00 น. เป็นเวลา 10 ชั่วโมงต่อเนื่องกัน ทำให้น้ำมันร้อนถึง 75° เซลเซียส

วันที่ 6 เริ่มต้นน้ำมันมีอุณหภูมิ 41° เซลเซียส ให้ความร้อนตั้งแต่เวลา 14.10 น. จึงถึงเวลา 21.20 น. เป็นเวลา 7 ชั่วโมง 10 นาทีต่อเนื่องกันทำให้น้ำมันร้อนถึง 85° เซลเซียส

วันที่ 7 เริ่มต้นน้ำมันมีอุณหภูมิ 74° เซลเซียส เปิดสวิทช์แท่งทำความร้อนตั้งแต่เวลา 7.50 น. ถึง 12.10 น. และ 14.00 น. ถึง 18.00 น. รวมเป็นเวลา 8 ชั่วโมง 20 นาทีทำให้น้ำมันร้อนถึง 103° เซลเซียส

วันที่ 8 เริ่มต้นน้ำมันมีอุณหภูมิ 91° เซลเซียส เปิดสวิทช์แท่งทำความร้อนตั้งแต่เวลา 8.45 น. ถึง 20.00 น. เป็นเวลา 11 ชั่วโมง 15 นาที ต่อเนื่องกัน เนื่องจากภายในถังทดลองมีน้ำอยู่จำนวนหนึ่ง ซึ่งผู้ขายน้ำมันอาจปนไว้และอุณหภูมิสูงถึงจุดเดือดของน้ำ จึงมีไอน้ำออกมาทางท่อระบายอากาศ การที่ไอน้ำระบายออกมา ทำให้ความร้อนสูญเสียไป ดังนั้นอุณหภูมิของน้ำมันจึงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จนกระทั่งเมื่อยุติการให้ความร้อนปรากฏว่าปริมาณไอน้ำลดลงเกือบหมดและอุณหภูมิในถังเป็น 122° เซลเซียส

วันที่ 9 เริ่มต้นมีอุณหภูมิ 105° เซลเซียส เปิดสวิทช์แท่งทำความร้อนตั้งแต่เวลา 8.45 น. ถึง 12.45 น. เป็นเวลา 4 ชั่วโมงต่อเนื่องกัน ปรากฏว่ามีไอของน้ำมันออกมาทางท่อระบายอากาศและตามแนวเหล็กเสริมอัดแรงแนวดิ่ง ทำให้มีกลิ่นน้ำมันเหม็นคลุ้งในบริเวณใกล้เคียงที่ตั้งถังทดลอง อุณหภูมิของน้ำมันเมื่อเวลา 12.45 น. อ่านได้ 112° เซลเซียส

วันที่ 10 เริ่มต้นน้ำมันมีอุณหภูมิ 100° เซลเซียส เปิดสวิทช์แท่งทำความร้อนตั้งแต่เวลา 9.05 น. ถึง 21.05 น. เป็นเวลา 12 ชั่วโมงต่อเนื่องกัน ได้อุณหภูมิสูงสุด 124° เซลเซียส แล้วจำต้องยุติการทดลองเนื่องจากน้ำมันขยายตัวจนเต็มถังทดลอง และล้นออกนอกถัง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทางข้อต่อของแท่งทำความร้อนและซอกหัวยึดเหล็กเสริมอัดแรงแนวดิ่งบางตัว ซึ่งถ้าทำการทดลองให้ความร้อนต่อไปจะเป็นการไม่ปลอดภัย เพราะไอน้ำมันอาจติดไฟได้และยังเป็นอันตรายต่อสุขภาพด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย