หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

คุณสมบัติของคอนกรีต เหล็กเสริม และเหล็กเสริมอัดแรงที่อุณหภูมิสูง

2.1 คุณสมบัติของคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง

เมื่อคอนกรีตถูกความร้อน ทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น คุณสมบัติต่าง ๆ จะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของคอนกรีต ปริมาณความชื้น อัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ ช่วงระยะเวลาที่อยู่ในสภาวะอุณหภูมิสูง ฯลฯ คุณสมบัติสำคัญที่นำมากล่าวในที่นี้ ได้แก่ การนำความร้อน การขยายตัว กำลังและโมดูลัสยืดหยุ่น และการล้า

2.1.1 การนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของคอนกรีต

การนำความร้อนของคอนกรีตขึ้นอยู่กับส่วนประกอบที่สำคัญคือปูน (cement paste) และมวลรวม สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของปูน และมวลรวมมีค่าระหว่าง 0.8-1.1 และ 1.0-4.5 กิโลแคลอรี/ม.-ชม.-° ซ ตามลำดับ[1] การนำความร้อนของคอนกรีตจะสูงขึ้นเมื่อคอนกรีตมีมวลรวมผสมมากขึ้น คอนกรีตที่มีหินปูนเป็นมวลรวมโดยทั่วไปจะมีสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.8-2.24 กิโลแคลอรี/ม.-ชม.-° ซ และคอนกรีตที่มีความหนาแน่นน้อยก็จะมีการนำความร้อนน้อยดังในตารางที่ 2.3 คอนกรีตที่มีความหนาแน่น 1600 กก./ม.^{3} มีการนำความร้อนเพียง 30 เปอร์เซนต์ของคอนกรีตธรรมดา เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นความชื้นภายในเนื้อคอนกรีตจะลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตจะลดลงตามปริมาณความชื้นที่สูญเสียไป ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งการนำความร้อนที่ 750° เซลเซียส จะมีค่าประมาณ 50 เปอร์เซนต์ของการนำความร้อนที่อุณหภูมิห้อง ในตารางที่ 2.2 จะเห็นว่าการนำความร้อนของคอนกรีตที่มีความชื้น 0 เปอร์เซนต์มีเพียง 65 เปอร์เซนต์ของการนำความร้อนของคอนกรีตที่มีความชื้น 8 เปอร์เซนต์

2.1.2 การขยายตัวของคอนกรีตเนื่องจากความร้อน

การขยายตัวของคอนกรีตขึ้นกับส่วนประกอบและสัดส่วนการผสม รวมทั้งความชื้นในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เนื่องจากคอนกรีตประกอบด้วยหินประมาณ 70-80 เปอร์เซนต์ ดังนั้นการขยายตัวของคอนกรีตจึงได้รับอิทธิพลจากการขยายตัวของหินมากที่สุด สัมประสิทธิ์การขยายตัวของหินชนิดต่าง ๆ มีค่าระหว่าง 1.1×10^{-6} ถึง 16×10^{-6} ต่อ ° เซลเซียส (ดูตารางที่ 2.5 และ 2.6) สัมประสิทธิ์การขยายตัวของคอนกรีตซึ่งใช้หินต่าง ๆ

มีค่าระหว่าง 7.4×10^{-6} ถึง 13.1×10^{-6} ต่อ ° เซลเซียส ตามตารางที่ 2.7 คอนกรีตที่มีหินปูนเป็นมวลรวมจะมีการขยายตัวต่ำสุดคือ 7.4×10^{-6} ต่อ ° เซลเซียส และจะสังเกตได้ว่าคอนกรีตที่มีผิวแห้งในอากาศมีการขยายตัวมากกว่าคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเพียง 5.9×10^{-6} ต่อ ° เซลเซียส และยังพบอีกว่าคอนกรีตที่มีผิวแห้งในอากาศนี้จะมีการขยายตัวมากกว่าคอนกรีตทั้งที่แห้งที่สุดและที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (1) เนื่องจากในสองกรณีหลังไม่มีการขยายตัวจากการเคลื่อนที่ของน้ำในช่องว่าง(pore) ในเนื้อคอนกรีต

จากการทดลอง Bertero และ Polivka (9) พบว่าสำหรับคอนกรีตที่ถูกปิดผนึกกันน้ำหนีออกนั้น อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่ต่ำกว่าทำให้คอนกรีตมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวสูงกว่า กล่าวคือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวมีค่าเป็น 8.46×10^{-6} ต่อ ° เซลเซียสและ 9.0×10^{-6} ต่อ ° เซลเซียส เมื่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 11.1° เซลเซียสต่อชั่วโมงและ 5.5° เซลเซียสต่อชั่วโมงตามลำดับ หลังจากทำการทดลองต่อไปโดยเพิ่มและลดอุณหภูมิเป็นวัฏจักรจาก 21 ถึง 149° เซลเซียส พบว่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวมีค่าลดลงคือ ในการเพิ่มอุณหภูมิ 11.1° เซลเซียสต่อชั่วโมงรอบที่ 14 มีค่าเป็น 7.6×10^{-6} ต่อ ° เซลเซียส นอกจากนี้ยังพบอีกว่าหลังจากการเพิ่มและลดอุณหภูมิวัฏจักรที่ 13 เกิดการขยายตัวตกค้างถาวร (permanent residual expansion) ประมาณ 730×10^{-6} ซม./ซม. (ดูรูปที่ 2.2) แสดงว่าภายในเนื้อคอนกรีตเกิดรอยร้าวไมโครขึ้นขณะที่มีการเพิ่มและลดอุณหภูมิ ในกรณีที่น้ำสามารถระเหยออกจากคอนกรีตได้โดยอิสระดัง เช่นผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 2.3 การหดตัวเนื่องจากการสูญเสียน้ำมีมากกว่าการขยายตัวเนื่องจากรอยร้าวไมโคร ผลลัพธ์จึงเป็นการหดตัวที่ตกค้างซึ่งมีค่าประมาณ 180×10^{-6} ซม./ซม. และค่อนข้างคงที่สำหรับทุกรอบวัฏจักรของการเพิ่มและลดอุณหภูมิตั้งแต่รอบที่ 1 - 14

2.1.3 กำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

สาเหตุหนึ่งที่กำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลงก็คือ อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและความชื้นภายในเนื้อคอนกรีตซึ่งทำให้เกิดรอยร้าวไมโคร ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้ว ผลการทดลองที่จะกล่าวต่อไปแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอุณหภูมิขณะทำการทดสอบ หน่วยแรงขณะที่มีการเพิ่มอุณหภูมิ การเพิ่มและลดอุณหภูมิเป็นวัฏจักรซึ่งมีผลต่อกำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

Abrams (3) ได้ทำการทดลองแท่งคอนกรีตทรงกระบอกภายใต้อิทธิพลของ

ความร้อนในช่วงระยะเวลาสั้น 3 แบบคือ

1. แท่งคอนกรีตถูกทำให้ร้อน หลังจากถึงอุณหภูมิที่กำหนดแล้ว จึงกดจน

2. แท่งคอนกรีตถูกทำให้ร้อนโดยที่มีแรงอัดกดไว้บางส่วนในขณะเดียวกัน หลังขากถึงอุณหภูมิที่กำหนดแล้วจึงเพิ่มแรงกดจนวิบัติ

3. แท่งคอนกรีตถูกทำให้ร้อนจนอุณหภูมิที่กำหนด แล้วก็ถูกปล่อยให้เย็นลงอย่างช้า ๆ และนำไปเก็บไว้ 7 วัน หลังจากนั้น จึงนำมากดจนวิบัติ

จากการทดลองพบว่าการให้ความร้อนแบบที่ 1 และแบบที่ 3 มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงเมื่ออุณหภูมิยิ่งสูงขึ้น คือลดลง 15 และ 35 เปอร์เซนต์ตามลำดับที่ 300° เซลเซียส สำหรับแบบที่ 2 นั้นกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเกือบคงเดิมในช่วงอุณหภูมิไม่เกิน 400° เซลเซียส (ดูรูปที่ 2.5 , 2.6 และ 2.7)

Sullivan และ Poucher[14] ได้ทำการทดลองคานคอนกรีตไม่เสริมเหล็กภายใต้แรงดัดและความร้อนหลายแบบในช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 400° เซลเซียส และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในช่วง 45 ถึง 150° เซลเซียสต่อชั่วโมง กำลังรับแรงดัดของคานเหล่านี้ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิยิ่งสูงขึ้นโดยที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400° เซลเซียส จะมีค่าเป็น 95, 75, 43 และ 0 เปอร์เซนต์ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.7

การทดลองของ Takeda, Tamane และ Furumura[4] กับแท่งคอนกรีต 3 กลุ่มได้ผลดังนี้คือ

กลุ่มที่ 1 แท่งคอนกรีตทรงกระบอกถูกทำให้ร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว (90° เซลเซียสต่อชั่วโมง) หลังจากถึงอุณหภูมิที่กำหนดแล้วอุณหภูมินั้นจะถูกรักษาให้คงที่ 1 ชั่วโมง แล้วจึงปล่อยให้ลดลง และนำแท่งคอนกรีตไปทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ปรากฏว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการให้อุณหภูมิสูงขึ้น ที่อุณหภูมิ 300° เซลเซียสกำลังรับแรงอัดจะเหลือประมาณ 75 เปอร์เซนต์และกำลังรับแรงดึงเหลือประมาณ 45 เปอร์เซนต์ (ดูรูปที่ 2.8 และ 2.9) โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเหลือประมาณ 30 เปอร์เซนต์ที่ 300° เซลเซียส ดังจะเห็นได้ในรูปที่ 2.10

กลุ่มที่ 2 แท่งคอนกรีตทรงกระบอกถูกทำให้ร้อนขึ้นด้วยอัตราช้ากว่ากลุ่มแรกมาก (7.5° เซลเซียสต่อชั่วโมง) หลังจากถึงอุณหภูมิที่กำหนดก็รักษาไว้ให้คงที่ 1-2 ชั่วโมง แล้วทำการกดจนวิบัติทันที ปรากฏว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.45 มีกำลังรับแรงอัดลด

ลงเพียงเล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วงไม่เกิน 300° เซลเซียสคือประมาณ 5 เปอร์เซนต์ ส่วนคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.70 กำลังรับแรงอัดจะเหลือประมาณ 80 เปอร์เซนต์ เมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วง 100 ถึง 300° เซลเซียส (ดูรูปที่ 2.11)

กลุ่มที่ 3 แท่งคอนกรีตทรงกระบอกได้รับความร้อน 30° เซลเซียสต่อชั่วโมง จนถึงอุณหภูมิที่กำหนดแล้วถูกรักษาไว้ให้คงที่ 72 ชั่วโมง จากนั้นถูกปล่อยให้เย็นลงอย่างช้า ๆ จนถึงอุณหภูมิห้องแล้วทิ้งไว้ 48 ชั่วโมงจึงทำการทดสอบ ปรากฏว่าที่อุณหภูมิ 300° เซลเซียสกำลังรับแรงอัดของแท่งคอนกรีตมีเพียง 75 เปอร์เซนต์ของกำลังรับแรงอัดเมื่ออุณหภูมิปกติ ส่วนกำลังยืดเหนี่ยวสูงสุดจะลดไปมากจนเหลือเพียง 45 เปอร์เซนต์ของค่าปกติ (ดูรูปที่ 2.12)

จากการทดลองของ Bertero และ Polivka[9] ดังแสดงในรูปที่ 2.13, 2.14 และ 2.15 จะเห็นได้ว่าการที่คอนกรีตถูกปิดผนึกกันน้ำระเหยออกมีผลทำให้กำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตด้อยลงอย่างชัดเจน ถ้ายิ่งเพิ่มจำนวนวัฏจักรหรือแช่อุณหภูมิไว้เป็นระยะเวลานานขึ้นคุณสมบัติทั้งสองนี้ก็ยิ่งลดลง ในการทดลองมีวัฏจักรของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 21-149-21° เซลเซียส ผลการทดลองคอนกรีตที่ผ่าน 3 และ 14 วัฏจักร ปรากฏว่ากำลังของคอนกรีตลดลง 25 และ 50 เปอร์เซนต์ตามลำดับ ในการทดลองคงอุณหภูมิไว้ที่ 148° เซลเซียส ปรากฏว่าคอนกรีตที่ผ่านการทดลอง 7 วันและ 25 วัน มีกำลังลดลง 30 และ 70 เปอร์เซนต์ตามลำดับ

2.1.4 การคืบของคอนกรีตและผลของการระเหยของความชื้น

การคืบของคอนกรีตที่อุณหภูมิปกติขึ้นกับขนาดของแรงอัด อายุของคอนกรีตตอนใส่แรงกระทำ ปริมาณความชื้นในเนื้อคอนกรีตและบรรยากาศ ส่วนผสมของคอนกรีต ฯลฯ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการคืบของคอนกรีตก็มีขนาดมากขึ้นตามอุณหภูมิ

Nasser[16] สรุปว่าความสัมพันธ์ระหว่างการคืบกับอัตราส่วนของหน่วยแรงอัดต่อกำลังของคอนกรีตมีลักษณะเป็นเส้นตรงภายในช่วงอุณหภูมิ 1-96° เซลเซียส โดยที่อัตราส่วนของหน่วยแรงอัดต่อกำลังของคอนกรีตมีค่าไม่เกิน 70 เปอร์เซนต์ ในการทดลองนั้นคอนกรีตไม่มีการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียน้ำ เพราะคอนกรีตถูกแช่ในน้ำตลอดเวลาของการทดลอง เมื่อเวลา 6 เดือนการคืบที่ 21° เซลเซียสเฉลี่ยได้ 7.1×10^{-6} ซม./ซม. ต่อ กก./ซม.^{2} และการคืบที่อุณหภูมิ 46, 71 และ 96° เซลเซียส มีขนาดเป็น 1.48, 1.61 และ 0.76 เท่าของที่ 21° เซลเซียสตามลำดับ ข้อสังเกตคือที่อุณหภูมิ 71° เซลเซียสมีการคืบมากกว่าที่อุณหภูมิ 96° เซลเซียส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Geymayer[17] รวบรวมรายงานเกี่ยวกับการคืบของคอนกรีตที่อุณหภูมิไม่เกิน 100° เซลเซียส ซึ่งมีทั้งการทดสอบในสภาวะปิดผนึกและไม่ปิดผนึก ในกรณีหลังผลที่ได้จึงรวมทั้งการคืบของคอนกรีตและการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียน้ำ ข้อสรุปสำคัญ ๆ ของ Geymayer คือ ความสัมพันธ์ระหว่างการคืบกับหน่วยแรงมีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยที่หน่วยแรงไม่เกิน 50 เปอร์เซนต์ของกำลังคอนกรีต เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการคืบจะเพิ่มขึ้นที่ 50° เซลเซียส การคืบมีขนาดเป็น 2 ถึง 3 เท่าของที่อุณหภูมิปกติที่ 100° เซลเซียส การคืบจะมีขนาดเป็น 4 ถึง 6 เท่าของที่อุณหภูมิปกติ (ชิ้นส่วนไม่ปิดผนึก) ผลงานบางรายได้รายงานว่าการคืบมากที่สุดเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 80° เซลเซียส แต่ไม่พบข้อสรุปดังกล่าวในรายงานส่วนใหญ่ ส่วนที่มีผลกระทบจากอุณหภูมิน้อยมากคืออัตราส่วนปัวซอง

Wang[5] ทดลองการคืบของคอนกรีตในช่วงอุณหภูมิ 93 ถึง 426° เซลเซียส จากการทดลองพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างการคืบกับอุณหภูมิเป็นเส้นโค้งเล็กน้อยแต่เกือบเป็นเส้นตรง เมื่อเวลา 6 เดือนการคืบที่ 93.3° เซลเซียสวัดได้ 15×10^{-6} ซม./ซม. ต่อ กก./ซม.^{2} ซึ่งมีค่ามากกว่าของ Nasser[16] ประมาณ 1 เท่า เนื่องจากการทดลองของ Wang[5] ใส่คอนกรีตในเตาอบทำให้น้ำระเหยจากคอนกรีตไปได้อย่างอิสระ ความเครียดที่ได้จึงรวมทั้งการคืบและการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียน้ำ

2.2 <u>คุณสมบัติของเหล็กเสริมธรรมดาและเหล็กเสริมอัดแรงที่อุณหภูมิสูง</u>

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าความร้อนทำให้กำลังรับแรงดึงและโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมเปลี่ยนแปลง จากการทดลอง[6,18,19] พบว่าคุณสมบัติทั้งสองนี้มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (ดังรูปที่ 2.16 ถึง 2.19) เมื่อมีอุณหภูมิถึง 200° เซลเซียสคุณสมบัติทั้งสองนี้ลดลงประมาณ 10 เปอร์เซนต์ ทั้งกรณีทดสอบที่อุณหภูมิสูงและกรณีปล่อยให้เย็นแล้วทดสอบที่อุณหภูมิห้อง โดยที่การปล่อยให้เหล็กเสริมเย็นตัวลงมีสองลักษณะคือให้เย็นลงอย่างช้า ๆ เป็นเวลาหลายชั่วโมงและเย็นลงอย่างรวดเร็วภายในเวลา 10-20 วินาที

การทดลองอีกอย่างหนึ่งทำโดยให้มีแรงดึงในเหล็กเสริมบางส่วน แล้วค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิขึ้น เพื่อหาอุณหภูมิสูงสุดที่ทำให้เหล็กเสริมวิบัติ การทดลองนี้[6] พบว่า เมื่อเหล็กเสริมธรรมดามีแรงดึงเท่ากับแรงดึงใช้งาน (หน่วยแรงที่จุดคลาก/1.8) เหล็กทุกเส้นขาดที่อุณหภูมิไม่เกิน 600° เซลเซียส และเมื่อเหล็กเสริมอัดแรงมีแรงดึงเท่ากับ 70 เปอร์เซนต์ของกำลังรับแรงดึง เหล็กเหล่านี้ขาดที่อุณหภูมิไม่เกิน 300° เซลเซียส สิ่งที่มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิที่เหล็กเสริมวิบัติคือหน่วย

แรงดึงในเหล็กเสริม ถ้าหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมน้อย อุณหภูมิที่เหล็กเสริมวิบัติก็จะมาก Abrams และ Cruz[18] ทดลองหาอุณหภูมิที่วิบัติสำหรับเหล็กเสริมอัดแรงที่มีแรงดึง 40, 50, 70 และ 85 เปอร์เซนต์ของกำลังรับแรงดึงประลัยได้ค่าเท่ากับ 449, 421, 320 และ 274° เซลเซียสตามลำดับโดยที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิอยู่ในช่วง 166 - 500° เซลเซียสต่อชั่วโมง

ในการใช้งานเหล็กเสริมอัดแรงยังต้องคำนึงถึงการเสื่อมสูญแรงดึงเนื่องจากการผ่อนคลายอีกด้วยโดยเฉพาะเมื่ออุณหภูมิสูง จากการทดลอง[20] พบว่าเมื่ออุณหภูมิยิ่งสูงการผ่อนคลายแรงดึงยิ่งมีมาก การเสื่อมสูญแรงดึงหลังจาก 1000 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 20, 40, 60 และ 100° เซลเซียสมีค่าเป็น 1.0, 1.9, 3.3 และ 8.0 เปอร์เซนต์ของแรงดึงเริ่มต้น ในการทดลองนี้ได้ใช้เหล็กชนิดที่มีการผ่อนคลายต่ำและดึงด้วยแรง 75 เปอร์เซนต์ของกำลังรับแรงดึงประลัย การทดลองอีกอันหนึ่งซึ่งกระทำโดย Bate และ Corson[19] ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.8 จากตารางนี้ปรากฏว่าที่อุณหภูมิ 100° เซลเซียส เมื่อมีแรงดึงเริ่มต้น 60 เปอร์เซนต์ของกำลังรับแรงดึงประลัย เหล็กเสริมอัดแรงชนิดธรรมดามีการผ่อนคลายแรงดึงเป็น 3 เท่าของเหล็กเสริมอัดแรงชนิดที่มีการผ่อนคลายต่ำ เนื่องจากเหล็กชนิดหลังนี้ได้ผ่านการดึงและให้อุณหภูมิสูงมาครั้งหนึ่งแล้ว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย