บทที่ ๔

คุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูงมาก

๔.๑ การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) เพื่อการนำไปประยุกต์ใช้ในงานโครงสร้างทั่ว ๆ ไป คุณสมบัติที่ทำการทดสอบมี กำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่น สัดส่วนพัวซอง และกำลังดึงแยกตัว

๔.๑.๑ การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตโดยใช้ตัวอย่างเป็นแท่งกระบอกขนาดประมาณ ϕ ๑๕ x ๓๐ ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C ๓๙ - ๘๐ (๓) โดยใช้เครื่องแอมสเลอร์ ๕๐๐ ตัน เริ่มด้วยวางตัวอย่างให้แกนตามยาวอยู่ในแนวดิ่ง โดยที่ปลายทั้งสองมีกระดาษชานอ้อยขนาด ๒๐ x ๒๐ x๑ ซม. รองรับเพื่อให้น้ำหนักแผ่ลงบนพื้นที่หน้าตัดอย่างสม่ำเสมอ เมื่อปรับเครื่องเรียบร้อยแล้วก็เริ่มกดน้ำหนักด้วยอัตราที่สม่ำเสมอประมาณ ๓.๕ กก/ซม^{๒}/วินาที จนกระทั่งชิ้นตัวอย่างถูกอัดแตก กำลังอัดประลัยได้จากการหารแรงอัดสูงสุดด้วยพื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่าง

ลักษณะการแตกหักของตัวอย่างคอนกรีตที่รับแรงอัดมักแตกออกเป็นรูปกรวยคู่โดยมีปลายกรวยอยู่ที่กึ่งกลางของตัวอย่าง การแตกหักจะเกิดเสียงดังระเบิดเสมอดังแสดงในรูปที่ ๔.๒๔

๔.๑.๒ การทดสอบกำลังดึงแยกตัว

การทดสอบกำลังดึงแยกตัวของคอนกรีตโดยใช้ตัวอย่างเป็นแท่งกระบอกขนาดประมาณ ϕ ๑๕ x๓๐ ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C ๔๙๖ - ๘๐ (๑๑) โดยใช้เครื่องแอมสเลอร์ ๕๐๐ ตัน เริ่มด้วยวางตัวอย่างให้แกนตามยาวอยู่ในแนวนอน ที่ผิวสัมผัสของตัวอย่าง มีไม้อัดขนาด ๐.๓x ๒.๕x ๓๕ ซม. วางรองรับเพื่อให้น้ำหนักแผ่ลงสม่ำเสมอตลอดความยาว

ของตัวอย่าง เมื่อปรับเครื่องเรียบร้อยแล้วก็เริ่มกดน้ำหนักด้วยอัตราที่สม่ำเสมอประมาณ ๑๐ กก/ซม^{๒} / นาที จนกระทั่งชิ้นตัวอย่างถูกกดแตก กำลังดึงแยกตัวได้จากสมการ

$$f_t = \frac{2P}{\pi l d} \quad \text{..................(2)}$$

ในเมื่อ f_t = กำลังดึงแยกตัว , กก/ซม^{๒}

P = น้ำหนักกดสูงสุด , กก.

l = ความยาวของแท่งตัวอย่าง , ซม.

d = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งตัวอย่าง,ซม.

ลักษณะการแตกหักของตัวอย่างคอนกรีตมักแตกแยกออกจากกันในแนวดิ่งเสมอดังแสดงในรูปที่ ๔.๒๕

ศูนย์วิทยทรัพยากร สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

๔.๑.๓ การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต โดยทั่วไปจะหาจากเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเค้น ซึ่งได้จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต โดยติดเครื่องมืออ่านความเค้น (Strain Indicator) เข้าไปด้วยในการทดสอบสำหรับคอนกรีตทั่ว ๆ ไป จะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C ๔๖๙ - ๘๐ (๑๐) โดยที่ตัวอย่างติดเกจวัดความเค้นแบบไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ ๔.๑ เป็นชนิดทับหลังด้วยกระดาษ มีความยาวของเกจ ๗๕ มม. และมีเกจแฟคเตอร์ ๒.๐๓ เป็นชนิดที่ให้ความต้านทาน ๑๒๐ โอห์ม เมื่อวางตัวอย่างตรงกลางของเครื่องแล้วจึงต่อสายไฟเข้าเครื่องอ่านความเค้นแบบ "Half Bridge " เมื่อปรับเครื่องเรียบร้อยแล้วก็เริ่มกดน้ำหนักด้วยอัตราที่สม่ำเสมอประมาณ ๓ กก/ ซม^{๒} / วินาที โดยอ่านค่าความเค้นจากเครื่องทุก ๆ ๑๐ ตัน จนกระทั่งแท่งตัวอย่างถูกอัดแตก ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นได้จากสมการดังนี้

$$E_c = \frac{(S_2 - S_1)}{(\epsilon_2 - 0.00005)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(3)$$

ในเมื่อ E_c = โมดูลัสยืดหยุ่น , กก/ซม^{๒}

S_2 = หน่วยแรงอัดที่ ๔๐ % ของกำลังอัดคอนกีต,กก/ซม^{๒}

S_1 = หน่วยแรงอัดที่ค่าความเค้น ๐.๐๐๐๐๕ , กก/ซม^{๒}

ϵ_2 = ความเค้นที่หน่วยแรงอัด ๔๐ % ของกำลังอัดคอนกรีต

๔.๑.๔ การวัดค่าสัดส่วนพัวซอง

สัดส่วนพัวซองเป็นค่าการป่องตัวออกข้างของเนื้อคอนกรีตเมื่อมีแรงกระทำในแนวแกน เนื่องจากโดยทั่วไปแล้ว ค่าการขยายตัวออกด้านข้างจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการหดตัวตามแนวแกน ในการทดสอบนี้จึงใช้การวัดด้วยเกจวัดความเค้นแบบไฟฟ้า ติดด้านข้างของทรงกระบอกบริเวณกึ่งกลางตัวอย่างทรงกระบอก และเกจที่ติดนี้จะต้องให้ตั้งฉากกับแนวแรงที่กระทำ ดังแสดงในรูปที่ ๔.๒ การวัดค่าสัดส่วนพัวซอง ได้เริ่มต้นจากการอ่านค่าความเค้นทุก ๆ น้ำหนักที่กด ๑๐ ตัน เช่นเดียวกับการดำเนินการทดสอบตามหัวข้อ ๔.๑.๓ จนกระทั่งตัวอย่างทรงกระบอกเกิดการวิบัติ

เนื่องจากค่าความเค้นที่อ่านได้จากเครื่องเป็นความเค้นที่ผิวตามแนวเส้นรอบวง (Tangential Strain , ϵ_θ) ของตัวอย่างทรงกระบอก ดังนั้นจึงนำค่าความเค้นนี้ไปแปลงเป็นค่าความเค้นในแนวรัศมี (Radial Strain , ϵ_r) เสียก่อน

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ ๔.๓ $\epsilon_\theta = \dfrac{(r + u)\ d\theta - rd\theta}{rd\theta} = \dfrac{u}{r}$

$$\therefore \quad U = r.\epsilon_\theta \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

$\because \quad \epsilon_r = \dfrac{\text{ส่วนยืดออกแนวรัศมี}}{\text{เส้นผ่าศูนย์กลาง}} = \dfrac{2u}{d} \quad \ldots\ldots\ldots (5)$

แทนค่า u ลงใน(๕) จะได้

$$\epsilon_r = \frac{2r\ .\ \epsilon_\theta}{d} = \epsilon_\theta \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (6)$$

ในเมื่อ ϵ_θ = ความเค้นที่ผิวตามแนวเส้นรอบวง

ϵ_r = ความเค้นในแนวรัศมี

u = ส่วนยืดออกแนวรัศมี

r = รัศมีของทรงกระบอก

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกระบอก

จากการพิจารณาความเค้นดังแสดงในรูปที่ ๔.๓ พบว่าความเค้นในแนวรัศมีจะเท่ากับความเค้นที่ผิวตามแนวเส้นรอบวง เนื่องจากอัตราการยืดตัวตามแนว θ คงที่ เมื่อได้ค่าความเค้นในแนวรัศมีและความเค้นในแนวแกน (Axial Stain , ϵ_a) ซึ่งอ่านได้จากเครื่องเช่นเดียวกัน จึงนำไปหาค่าสัดส่วนพัวซอง แล้วเขียนกราฟแสดงสัดส่วนพัวซองที่ค่าระดับหน่วยแรงอัดต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ ๔.๑๗

๔.๒ ผลจากการเติมสารผสมคอนกรีต

จำนวนสารผสมคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาจากการทดลองโดยใช้สารผสมระหว่าง ๑.๕ ถึง ๖ % โดยน้ำหนักของซีเมนต์ซึ่งเป็นอัตราที่ทดลองกับปูนก่อมาแล้ว พบว่าอัตราในช่วงนี้ไม่มีผลต่อกำลังอัดของปูนก่อ สำหรับในคอนกรีตซึ่งมีวลรวมหยาบเป็นส่วนผสมด้วย พบว่าจำนวนสารผสมนี้จะทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะพิจารณาในลักษณะต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

๔.๒.๑ การไหลของคอนกรีต

อัตราสารผสมคอนกรีตจะทำให้การไหลของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้นโดยจะขึ้นกับสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ ตามที่แสดงในรูปที่ ๔.๔ จะเห็นได้ว่าเมื่อสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้น จะทำให้อัตราการไหลลื่นเพิ่มขึ้นมากกว่าเมื่อสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์น้อย จากรูปจะเห็นว่าเมื่อใช้สารผสม ๓ % ในคอนกรีตที่มีสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ ๐.๓๒ จะให้ค่าการไหลสูงกว่าคอนกรีตที่มีสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ ๐.๓๐ ถึง ๑๔๘ % แต่ในขณะเดียวกันจำนวนสารผสมเดียวกันนี้ของคอนกรีตที่มีสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ ๐.๓๐ จะให้ค่าการไหลสูงกว่าสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ ๐.๒๘ เพียง ๕๐ % เท่านั้น

๔.๒.๒ การลดปริมาณน้ำ

โดยทั่วไปเมื่อเติมสารผสมลงในคอนกรีตจะทำให้สามารถลดปริมาณน้ำในส่วนผสมลงได้ โดยที่การไหลลื่นยังเท่าเดิม ซึ่งจะต้องศึกษาถึงอัตราสารผสมที่ใช้ตามที่แสดงในรูปที่ ๔.๖ นั้นแสดงอัตราการลดปริมาณน้ำเมื่อเติมสารผสมเพื่อให้ได้การไหลลื่นต่าง ๆ กัน ยกตัวอย่างเช่น เมื่อการไหลลื่น ๑๐ % ของคอนกรีตที่มีสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ ๐.๓๒ โดยที่ไม่เติมสารผสมคอนกรีตเมื่อต้องการลดปริมาณน้ำ ๖.๒๕ % จะต้องเติมสารผสม ๑.๕ % ถ้าเผื่อต้องการจะลดปริมาณน้ำ ๑๒.๕ % จะต้องเติมสารผสมคอนกรีตเพิ่มเป็น ๒.๓ % และในทำนองเดียวกันถ้าจะลดปริมาณน้ำลงไปอีกถึง ๑๘.๗๕ % ก็จะต้องเติมสารผสมคอนกรีตถึง ๓.๖ % จากรูปสรุปว่าอัตราการลดปริมาณน้ำจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับจำนวนสารผสมที่ใช้เพิ่มขึ้น

๔.๒.๓ สัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์แท้จริง

เนื่องจากสารผสมคอนกรีตที่ใช้มีน้ำผสมอยู่ด้วย ดังนั้นเมื่อใช้ผสมคอนกรีต จะทำให้สัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์เปลี่ยนแปลงไปและส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง ตารางที่ ๔.๔ แสดงถึงกำลังอัดของคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ที่แท้จริง หรือจากกราฟแสดงในรูปที่ ๔.๗ จะเห็นได้ว่าเมื่อเติมสารผสมเพิ่มมากขึ้น จะทำให้กำลังของคอนกรีตลดลงในอัตราที่ค่อนข้างจะสม่ำเสมอ คือประมาณ ๒.๘ % ต่อจำนวนสารผสมเพิ่มที่เติมทุก ๆ ๑ % ยกตัวอย่างเช่น ที่สัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ ๐.๒๘ เมื่อเติมสารผสมเพิ่ม ๓ % จะทำให้กำลังคอนกรีตลดลงประมาณ ๘ %

๔.๓ กำลังของคอนกรีต

๔.๓.๑ กำลังอัดของคอนกรีต เป็นคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่มีความสำคัญมากอันหนึ่ง ทั้งนี้เพราะโครงสร้างทั่ว ๆ ไปมักจะออกแบบให้คอนกรีตรับแรงอัดเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นผลกระทบที่มีต่อกำลังอัดของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับเวลา สัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ และอัตราสารผสมที่เติมลงไปในส่วนผสมคอนกรีต

ก) อายุของคอนกรีต

ปกติคอนกรีตเมื่อมีอายุมากขึ้น อัตราของปฏิกิริยาทางเคมีก็จะมากขึ้นด้วยเป็นผลให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้น จากผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ ๓ , ๗ , ๒๘ และ ๙๐ วัน ดังแสดงในตารางที่ ๔.๒ เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต่าง ๆ กับกำลังอัดเมื่อมีอายุ ๙๐ วัน ดังแสดงในรูปแผนภูมิ (Histogram) ในรูปที่ ๔.๘ พบว่าอัตรากำลังของคอนกรีตที่อายุต่าง ๆ กันมีค่าเทียบเป็นสัดส่วนกับกำลังที่อายุ ๙๐ วัน จะมีค่าใกล้เคียงกันมาก ถึงแม้ว่าสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์จะเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม ในตารางที่ ๔.๕ แสดงให้เห็นว่าเมื่ออายุ ๓ วัน จะมีค่าอัตรากำลังอยู่ในช่วงระหว่าง ๖๖ - ๖๘ % แต่เมื่ออายุ ๗ วัน จะมีค่าระหว่าง ๗๕ - ๗๘ % และเมื่ออายุ ๒๘ วัน จะมีค่าอัตรากำลังระหว่าง ๙๐ - ๙๒ % ของกำลังอัดคอนกรีตอายุ ๙๐ วัน ซึ่งพอจะสรุปได้ว่าอัตราของปฏิกิริยาทางเคมีจะมีค่าใกล้เคียงกันมาก ถึงแม้ว่าสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์และอัตราสารผสมจะต่างกันก็ตาม

การเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังที่อายุ ๙๐ วัน เป็นเกณฑ์พบว่า อัตราการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ ๓ , ๗ และ ๒๘ วัน จะมีค่าใกล้เคียงกันมากถึงแม้ว่าสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์จะเปลี่ยนไปก็ตาม ดังแสดงในตารางที่ ๔.๖ ซึ่งเป็นผลที่ได้จากตารางที่ ๔.๕ โดยนำเปอร์เซนต์กำลังอัดที่อายุต่าง ๆ เมื่อเทียบกับอายุ ๙๐ วัน มาแสดงให้เข้าใจถึงอัตราการเพิ่มกำลังอัดที่อายุต่าง ๆ พบว่าอัตราการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ ๓ วัน จะมีค่าระหว่าง ๔๕ - ๕๐ % หรือประมาณ ๔๗.๙ % โดยเฉลี่ย และอัตราการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ ๗ วัน จะมีค่าระหว่าง ๒๗ - ๓๓ % หรือประมาณ ๓๑% โดยเฉลี่ยส่วนการเพิ่มกำลังอัดที่อายุ ๒๘ วัน จะมีค่าอยู่ระหว่าง ๗ - ๑๐ % หรือประมาณ ๘.๘ % โดยเฉลี่ยถ้าจะดูจากรูปที่ ๔.๙ จะเห็นว่าสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์มีผลน้อยมากต่อการเพิ่มกำลังทั้งที่อายุ ๓ , ๗ และ ๒๘ วัน

เมื่อพิจารณาถึงจำนวนสารผสมคอนกรีตที่ใช้เมื่อเทียบกับกำลังที่เพิ่มขึ้นในตารางที่ ๔.๗ ซึ่งเป็นผลที่ได้จากตารางที่ ๔.๕ โดยนำอัตราการเพิ่มกำลังอัดที่อายุต่าง ๆ ของจำนวนสารผสมต่าง ๆ กันมาแสดงในตารางนี้ จะสังเกตุเห็นว่าเมื่อเติมสารผสมคอนกรีตจะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ ๓ , ๗ และ ๒๘ วัน ไม่ต่างกันมากนัก กล่าวคือที่อายุ ๓ วัน มีอัตราการเพิ่มกำลังอัดอยู่ระหว่าง ๔๗ - ๕๖ % หรือประมาณ ๔๘.๕ % โดยเฉลี่ย และคอนกรีตอายุ ๗ วัน อัตราการเพิ่มกำลังอัดอยู่ระหว่าง ๒๖ - ๓๗ % หรือประมาณ ๓๑ % โดยเฉลี่ย ส่วนคอนกรีตอายุ ๒๘ วัน จะมีอัตราการเพิ่มกำลังอัดอยู่ระหว่าง ๗ - ๑๑ % หรือประมาณ ๙.๑ % โดยเฉลี่ย หรือถ้าจะดูความสัมพันธ์ที่ละเอียดขึ้น จากรูปที่ ๔.๑๐ จะพบว่าจำนวนสารผสมระหว่าง ๓ - ๔.๕ % จะให้กำลังส่วนเพิ่มที่ ๓ วัน และ ๗ วันสูงสุด ส่วนอัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตอายุ ๒๘ วัน จะเท่า ๆ กัน

ในกรณีของคอนกรีตที่ไม่มีการผสมสารผสมคอนกรีต จะให้อัตราการเพิ่มกำลังอัดลดลง กล่าวคือ คอนกรีตอายุ ๓ วัน อัตราการเพิ่มกำลังอัดประมาณ ๓๗.๘ % และที่อายุ ๗ วัน อัตราการเพิ่มกำลังอัดประมาณ ๒๑.๒ % โดยที่อายุ ๒๘ วัน อัตราการเพิ่มกำลังน้อยมาก คือประมาณ ๔.๔ % จึงสรุปได้ว่าคอนกรีตที่เติมสารผสมลงในส่วนผสมจะทำให้มวล-

ของซีเมนต์กระจายออกอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น เป็นผลให้อัตราปฏิกิริยาทางเคมีเพิ่มขึ้นจึงทำให้อัตราการเพิ่มกำลังสูงมากกว่าคอนกรีตที่ไม่เติมสารผสม

ข) สัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์

โดยทั่วไปสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ เป็นปัจจัยอันสำคัญซึ่งส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตมากที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ใช้ส่วนผสมของคอนกรีต คือ ซีเมนต์ ทราย และ หิน คงที่แล้วให้สัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์เป็นตัวแปรระหว่าง ๐.๒๖ ถึง ๐.๓๒ โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาหาสัดส่วนที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด ถึงแม้ว่ากำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นในขณะที่สัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ลดลง โดยที่การหล่อคอนกรีตต้องทำให้แน่นสมบูรณ์เหมือนกันหมด จากรูปที่ ๔.๑๑ ซึ่งได้จากผลการทดสอบการไหลของคอนกรีตในตารางที่ ๔.๑ และผลการทดสอบกำลังอัดในตารางที่ ๔.๒ แล้วจึงนำมาหาความสัมพันธ์กันระหว่างการไหลกับกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ ๒๘ วัน จากรูปแสดงให้เห็นว่าสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ ๐.๒๘ จะทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติดีที่สุดทั้งทางกำลังและการไหลของคอนกรีต

อนึ่ง ถ้ากำหนดการไหลของคอนกรีตเป็นเกณฑ์แล้วพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่มีสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ต่าง ๆ กันตามรูปที่ ๔.๑๒ พบว่าสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ ๐.๒๘ จะให้กำลังอัดของคอนกรีตอายุ ๒๘ วัน สูงกว่าสัดส่วนอื่น ๆ ยกตัวอย่าง เช่น เมื่อการไหลเท่ากับ ๒๐ % สัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ ๐.๒๘ จะให้กำลังอัดสูงกว่าสัดส่วนอื่นประมาณ ๔ - ๑๑ %

ค) อัตราสารผสมที่ใช้

อัตราสารผสมที่ใช้ผสมคอนกรีตอาจพิจารณาได้จากกำลังอัดของคอนกรีตและจากการเพิ่มความไหลลื่นเมื่อพิจารณาถึงกำลังอัดคอนกรีตแล้ว จะพบว่าเมื่อใช้สารผสมคอนกรีตจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง เนื่องจากในสารผสมคอนกรีตมีส่วนผสมของน้ำอยู่ด้วย ดังนั้นเมื่อใช้ในอัตราสูง ก็จะทำให้สัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ในส่วนผสมเพิ่มขึ้นไปด้วย ซึ่งย่อมจะทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง จากการทดลองยังพบอีกว่า เมื่อใช้สารผสมคอนกรีตอัตราสูงในคอนกรีตที่มี

สัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ ๆ จะมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตที่มีสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์สูง ๆ ดังแสดงในรูปที่ ๔.๑๓ เมื่อใช้สารผสมในอัตรา ๓ % ที่สัดส่วนของน้ำ-ต่อซีเมนต์ ๐.๒๘ จะทำให้กำลังอัดลดลงจากคอนกรีตที่ไม่เติมสารผสมประมาณ ๑๐ % แต่ในสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ ๐.๓๒ เมื่อให้สารผสมในอัตราเดียวกันนี้จะทำให้กำลังอัดคอนกรีตลดลงถึง ๒๑ %

แต่ถ้าพิจารณาถึงกำลังอัดที่ลดเมื่อใช้สารผสมเพิ่มขึ้นมาเขียนกราฟแสดงความ - สัมพันธ์ดังรูปที่ ๔.๑๔ จะเห็นว่าคอนกรีตที่มีสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ ๐.๒๘ นั้นอัตราการลดกำลังจะน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์อื่น ๆ และเมื่อเติมสารผสมเพิ่มมากขึ้น โดยทั่วไปจะเห็นว่าเมื่อเติมสารผสมในอัตราที่เกิน ๔.๕ % จะให้อัตรากำลังที่ลดน้อยลงกว่า ในช่วงระหว่าง ๑ - ๓ %

๔.๓.๒ ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเค้น

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเค้นของคอนกรีตที่อายุ ๙๐ วัน ได้จากการทดสอบโดยอาศัยเกจวัดความเค้นชนิดไฟฟ้า โดยเฉลี่ยจากตัวอย่างทดสอบทรงกระบอก ๒ ตัวอย่าง ค่าที่วัดได้จากเริ่มทดสอบจนถึงจุดวิบัติของตัวอย่างทดสอบเกือบ ๑๐๐% ของกำลังอัดคอนกรีต ลักษณะของกราฟดังแสดงในรูปที่ ๔.๑๕ จะเป็นเส้นตรงเกินกว่า ๗๐ % ของกำลังอัดแล้วค่อย ๆ เบี่ยงเบนออกจากความสัมพันธ์แบบเส้นตรงเพียงเล็กน้อย ค่าความเค้นที่จุดสุดท้ายก่อนการวิบัติที่วัดมีค่าระหว่าง ๐.๐๐๒๑ ถึง ๐.๐๐๒๗ ซม/ซม และเมื่อเฉลี่ยแล้วจะมีค่า ๐.๐๐๒๓ ซม/ซม เป็นที่น่าเสียดายที่ค่าความเค้นหลังจากที่ได้กำ-ลังสูงสุดแล้วไม่สามารถจะวัดได้ด้วยเครื่องมือที่มีอยู่ ดังนั้นกราฟสมบูรณ์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเค้นจึงไม่สามารถจะหาได้ในงานวิจัยนี้

ก) โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกำลังสูง

จากกราฟในรูปที่ ๔.๑๕ สามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นได้เมื่อเขียนกราฟหา-ความสัมพันธ์กับกำลังอัดของคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ ๔.๑๖ สามารถที่จะเขียนเป็นสมการ

i 18005068

โดยอาศัยวิธีการ Least Square ดังนี้

$$E_c = 27,000 \sqrt{f'_c} - 344,000 \; ....(7)$$

ในเมื่อ E_c = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต , กก/ซม๒

f'_c = กำลังอัดของคอนกรีต , กก/ซม๒

เมื่อนำผลจากการทดสอบนี้เปรียบเทียบกับสูตรของ ACI 318-77 (1) หรือเปรียบเทียบกับสมการที่เสนอโดย Inge Lyse (๔๑) จะให้ค่าต่ำกว่าสูตรที่เสนอทั้งสอง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับสมการของ Nilson (๒๔) ซึ่งทำการทดสอบเกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีตที่มีกำลังอัดระหว่าง ๒๑๐ กก/ซม๒ ถึง ๘๔๐ กก/ซม๒ พบว่าสมการจากการทดสอบจะให้ค่าสูงกว่าค่าที่เสนอโดย Nilson กล่าวคือ ค่าที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าต่ำกว่าสูตรคาดคะเนของ ACI และ Inge Lyse ประมาณ ๗.๕ % และ ๑๗ % โดยเฉลี่ยตามลำดับ แต่สมการที่ได้จากการทดสอบจะให้ค่าสูงกว่าสูตรของ Nilson ประมาณ ๗ % โดยเฉลี่ยในช่วงของกำลังอัดระหว่าง ๖๕๐ - ๘๕๐ กก/ซม๒

ข) ความเค้นสูงสุด

จากรูปที่ ๔.๑๕ จะสังเกตุเห็นว่าค่าความเค้นสูงสุดของแต่ละกำลังอัดจะมีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากเป็นคอนกรีตกำลังสูงมาก ค่าความเค้นที่วัดได้จึงมีค่าน้อย และค่าความเค้นที่จุดวิบัติจึงวัดไม่ได้ เพราะการวิบัติของแท่งกระบอกคอนกรีตกำลังสูงจะเกิดการระเบิดทันทีทันใด ดังนั้นค่าความเค้นสูงสุดที่วัดได้นี้จะมีค่าประมาณ ๙๕ % ของกำลังอัดคอนกรีต จากรูปยังพบอีกว่าค่าความเค้นสูงสุดไม่ขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคอนกรีต และความเค้นจะมีค่าน้อยเมื่อคอนกรีตมีกำลังสูง

ค) สัดส่วนพัวซอง

ค่าสัดส่วนพัวซองของตัวอย่างทดสอบดังที่แสดงในรูปที่ ๔.๑๗ จะเห็นได้ว่าในแต่ละตัวอย่างจะให้ค่าตั้งแต่เริ่มแรกจนถึงวิบัติต่างกันน้อยมาก ค่าเฉลี่ยของแต่ละตัวอย่างทด-

สอบได้แสดงไว้ในตารางที่ ๔.๘ พบว่าค่าเฉลี่ยในแต่ละตัวอย่างจะอยู่ระหว่าง ๐.๑๖ ถึง ๐.๒๓ ค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ ๐.๑๙๒ นอกจากนี้ยังพบอีกว่า กำลังของคอนกรีตที่ทำการทดสอบไม่มีผลต่อสัดส่วนพัวซองเลย

๔.๓.๓ กำลังดึงของคอนกรีต

ในคอนกรีตทั่ว ๆ ไปกำลังดึงจะมีค่าประมาณ ๘ - ๑๔ % ของกำลังอัด และค่ากำลังดึงที่ได้จากการทดสอบแบบดึงโดยตรง (Direct Tension) กับการทดสอบแบบการแยกตัวจะให้ค่าที่แตกต่างอยู่ประมาณ ๑๕ % โดยค่าแรงดึงแยกตัวจะมีค่ามากกว่า อย่างไรก็ดีในการทดสอบโดยวิธีแรงดึงโดยตรงนั้น มีความยุ่งยากเกี่ยวกับเครื่องมือและการทดสอบมาก ดังนั้น ASTM จึงได้กำหนดการทดสอบแบบการแยกตัวแทนซึ่งให้ค่าที่สอดคล้องกันมาก [๕๓]

การทดสอบกำลังดึงแยกตัวโดยใช้แท่งกระบอกคอนกรีตขนาด ϕ๑๕x ๓๐ ซม. โดยวางในแนวราบแล้วออกแรงกระทำตั้งฉากกับแกนของตัวอย่างทดสอบตามแนวความยาวของตัวอย่าง วิธีการนี้ได้เสนอแนะครั้งแรกเมื่อ ๑๙๕๒ โดย Akazawa [๕๒]

ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังทั้งสองนี้ได้มีผู้วิจัยมาก่อนแล้วหลายคน โดย Evans [๕๕] ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับผลของเงื่อนไขการบ่มที่มีต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของคอนกรีต โดยใช้กรวดเป็นส่วนผสม และบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิต่างกัน พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงแยกตัวกับกำลังอัดของลูกบาศก์คอนกรีต ในกรณีการบ่มปกติสามารถเขียนสมการแทนได้ดังนี้

$$f_t = 0.06f'_c + 50 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8)$$

ในเมื่อ f_t = กำลังดึงแยกตัว , กก/ซม^๒

f'_c = กำลังอัดของลูกบาศก์คอนกรีต , กก/ซม^๒

สำหรับกรณีการบ่มที่อุณหภูมิสูงสามารถเขียนสมการแทนได้ดังนี้

$$f_t = 0.07f'_c + 20 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (9)$$

Nilson[๒๔] ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีตที่มีกำลังอัดระหว่าง ๒๑๐ กก/ซม๒ ถึง ๘๔๐ กก/ซม๒ พบว่าความสัมพันธ์ในคอนกรีตธรรมดาจะไม่แตกต่างจากคอนกรีตกำลังสูงเท่าใดนัก และยังแนะนำให้ใช้สูตรคาดคะเนกำลังดึงของคอนกรีตซึ่งเขียนแทนด้วยสมการดังนี้

$$f_t = 1.8\sqrt{f'_c} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(10)$$

ในเมื่อ f_t = กำลังดึงแยกตัว , กก/ซม๒

f'_c = กำลังอัดแท่งกระบอกคอนกรีต , กก/ซม๒

Yamamoto[๕๖] ได้ทำการทดลองศึกษาผลของสารหน่วงการก่อตัวที่มีต่อคอนกรีตพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงแยกตัวกับกำลังอัดสามารถเขียนแทนด้วยสมการเส้นตรงดังนี้

$$f_t = 0.05f'_c + 10 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (11)$$

และ Perera[๒๓] ได้ทดลองศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่มีกำลังอัดระหว่าง ๑๓๕ กก/ซม๒ ถึง ๗๘๑ กก/ ซม๒ พบว่าความสัพมันธ์นี้สามารถเขียนแทนด้วยสมการดังนี้

$$f_t = 0.06f'_c + 5 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(12)$$

ในงานวิจัยนี้ ใช้สารผสมคอนกรีตที่ได้จากอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษซึ่งมีคุณสมบัติแตกต่างไปบ้าง ในการทดสอบจะเป็นเฉพาะคอนกรีตที่มีกำลังสูงมาก จากการทดสอบพบว่า กำลังดึงโดยวิธีแยกตัว จะมีค่าประมาณ ๖ % ของกำลังอัด และเมื่อเขียนในกราฟสามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์โดยอาศัยวิธีการ Least Square ดังนี้

$$f_t = 4.13\sqrt{f'_c} - 65 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(13)$$

ในเมื่อ f_t = กำลังดึงแยกตัว , กก/ซม๒

f'_c = กำลังอัดของคอนกรีต , กก/ซม๒

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ได้จากการทดสอบพบว่าจะให้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองของ Perera โดยที่ค่าที่ได้จากการทดสอบจะต่ำกว่าค่าที่เสนอแนะของ Perera

ประมาณ ๖ % โดยเฉลี่ย แต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองของ Nilson และ Yamamoto ยังมีความแตกต่างกันอยู่ กล่าวคือ ในช่วงที่กำลังอัดของคอนกรีตต่ำกว่า ๗๕๐ กก/ซม๒ ค่าที่ได้จากการทดสอบจะต่ำว่าค่าที่ได้จากสมการทั้งสอง แต่ในช่วงที่กำลังอัดสูงกว่า ๗๕๐ กฎ/ซม๒ จะพบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลองทั้งสอง จากรูปดังกล่าว จะพบอีกว่าค่าที่ได้จากการทดลองของ Nilson จะให้ค่าที่สูงกว่าการทดลองทั้งหมด

๔.๓.๔ กำลังต้านทานแรงเฉือน

การทดสอบหากำลังต้านทานแรงเฉือนโดยตรงนั้น มีความยุ่งยากเนื่องจากเครื่องมือทดสอบอาจทำให้เกิดหน่วยแรงอย่างอื่นเข้ามาเกี่ยวข้อง อีกทั้งคอนกรีตมีความต้านทานแรงเฉือนสูงกว่าแรงดึง ดังนั้นการทดสอบหากำลังต้านทานแรงเฉือนจึงไม่นิยมกัน

โดยทั่วไปกำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตมีค่าเฉลี่ยประมาณ ๑๒ % ของกำลังอัดคอนกรีต(๕๓) อย่างไรก็ดีกำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตอาจหาได้จากวิธีเขียนรูปวงกลมการแตกร้าวของมอร์ (Mohr Rupture Diagram) ซึ่งจากการคำนวณโดยวิธีนี้พบว่ากำลังต้านทานแรง - เฉือนของคอนกรีตมีค่าประมาณ ๒๐ % ของกำลังอัด (๕๔)

ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตโดยตรง แต่ได้คำนวณหาโดยวิธีของมอร์ โดยนำค่ากำลังอัดและกำลังดึงแยกตัวของคอนกรีตแต่ละค่ามาเขียนรูปครึ่งวงกลมบนแกนนอนที่มีค่าลบและบวกตามลำดับ และให้กำลังต้านทานแรงเฉือนอยู่บนแกนดิ่ง ดังแสดงในรูปที่ ๔.๔ กำลังต้านทานแรงเฉือนได้จากการลากเส้นสัมผัสครึ่งวงกลมของกำลังอัดและกำลังดึงแยกตัวตัดแกนดิ่งจากการคำนวณโดยวิธีนี้พบว่า กำลังต้านทานแรง-เฉือน มีค่าประมาณ ๑๓ % ของกำลังอัดคอนกรีต เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์กับกำลังอัดของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ ๔.๑๙ สามารถเขียนสมการโดยวิธี Least Square ได้ดังนี้

$$f_v = 7.75\sqrt{f'_c} - 116 \quad \text{..........(14)}$$

โดยที่ f_v = กำลังต้านทานแรงเฉือน , กก/ซม๒

f'_c = กำลังอัดของคอนกรีต , กก/ซม๒