ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับโมดูลัสแตกร้าวสำหรับงานผิวทางคอนกรีต

The Relationship between Ultimate Strength and Modulus of Rupture for Concrete Pavement

คำนำ

คุณสมบัติที่สำคัญของผิวทางคอนกรีต ต้องรับกำลังอัด(Compressive Strength) และที่สำคัญต้องมีความต้านทานแรงดัดงอ (Flexural Strength) ได้ตามข้อกำหนด เนื่องจากผิวทางคอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ง่ายเมื่อมีความต้านทานแรงดัดงอได้น้อย จึงจะทำให้ถนนมีอายุการใช้งานไม่ยาวนาน

ในการก่อสร้างถนนผิวคอนกรีตของกรมทางหลวง จะนำเอามาตรฐานที่กำหนดไว้ ไปควบคุม และตรวจสอบการก่อสร้าง เพื่อให้ได้คุณภาพตามมาตรฐานนั้น การตรวจสอบคุณภาพของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เป็นตัวชี้วัดว่าคอนกรีตมีคุณสมบัติในการรับแรงได้ตามข้อกำหนดหรือไม่ โดยกรมทางหลวงได้กำหนดให้ คอนกรีตจะต้องมีความต้านทานกำลังอัดประลัย ไม่น้อยกว่า 325 กก./ตร.ซม. จากการทดสอบแรงกดของแท่งคอนกรีตตัวอย่างลูกบาศก์ ขนาดกว้าง 15 ซม.ยาว 15 ซม.สูง 15 ซม.ที่อายุ 28 วัน และมีค่าโมดูลัสแตกร้าว ไม่น้อยกว่า 42 กก./ตร.ซม. จากการทดสอบแท่งคานคอนกรีต การทดสอบหาโมดูลัสแตกร้าวจากการเก็บตัวอย่างแท่งคานในสนามนั้นมีความยุ่งยากมากกว่าในห้องปฏิบัติการ เพราะมีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก และต้องนำตัวอย่างส่งไปทดสอบยังห้องปฏิบัติการที่มีเครื่องทดสอบขนาดใหญ่ มีราคาแพง ติดตั้งแบบถาวร ไกลจากสถานที่ก่อสร้าง การควบคุมคุณภาพตามมาตรฐานทำได้ยากกว่าการเก็บตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

Road Research Laboratory ได้ศึกษาความสัมพันธ์ดังกล่าวโดยใช้มวลรวมหยาบ Crushed Limestone และ Rounded Beach Gravel ได้สมการความสัมพันธ์อยู่ในรูปสมการยกกำลังส่วน Portland Cement Association ก็ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์นี้ โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 3 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์แตกต่างกัน (จิรพัฒน์, 2546) ทำให้ได้ความสัมพันธ์เป็นช่วงกว้าง ทำให้การนำไปใช้ไม่ให้ค่าที่แน่นอนชัดเจนเท่าใดนัก อีกทั้งวัสดุที่ใช้อาจมีคุณสมบัติแตกต่างไปจากในประเทศไทย การนำไปใช้อาจทำให้ผลที่ได้คลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงก็ได้

การทดสอบหาความสัมพันธ์ดังกล่าว อาจทำให้สามารถประเมินค่าโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตในสนาม จากการทดสอบกำลังประลัยของตัวอย่างคอนกรีตลูกบาศก์ ขนาด 15 ซม.×15 ซม.×15 ซม.ได้โดยไม่ต้องเก็บแท่งตัวอย่างคานคอนกรีตเหมือนที่ผ่านมาอีก แนวทางการประเมินค่าโมดูลัสแตกร้าวจากความสัมพันธ์นี้ การวิจัยนี้จึงมุ่งหวังว่าจะช่วยลดปัญหาความยุ่งยากในการตรวจสอบคุณภาพของคอนกรีต ทำให้การควบคุม และตรวจสอบคุณภาพของคอนกรีตในงานสนามทำได้ง่ายขึ้นรวมทั้งลดค่าใช้จ่ายจากการขนส่งส่งตัวอย่าง ทำให้ลดต้นทุนในโครงการก่อสร้างถนนผิวคอนกรีตในอนาคตต่อไปได้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับค่าโมดูลัสแตกร้าวของผิวทางคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบหินโม่ และคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบกรวดแม่น้ำ

2. เพื่อเสนอแนวทางการประเมินค่าโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตผิวทางในสนาม จากการทดสอบกำลังอัดประลัยในห้องปฏิบัติการของตัวอย่างคอนกรีต รูปลูกบาศก์ ขนาด 15 ×15×15 ซม.

ขอบเขตการศึกษา

การทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับค่าโมดูลัสแตกร้าวนี้จะใช้ตัวอย่างแท่งคอนกรีตลูกบาศก์ ขนาดกว้าง 15 ซม.ยาว 15 ซม.สูง 15 ซม. เพื่อทดสอบหากำลังอัดประลัย และตัวอย่างแท่งคอนกรีตคานขนาดกว้าง 15 ซม.ลึก 15 ซม.ยาว 76 ซม. จากการทดสอบใช้น้ำหนักกระทำบนจุดแบ่งสามส่วนของช่วงพาดในคานคอนกรีตล้วน หรือวิธี Third Point Loading เพื่อทดสอบหาโมดูลัสแตกร้าว ที่คอนกรีตอายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ในห้องปฏิบัติการจำนวนตัวอย่างที่ทดสอบทั้งหมด 45 ตัวอย่าง โดยเครื่องมือ วิธีการ และมวลรวมที่ใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีตทำการทดสอบตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง การออกแบบส่วนผสมจะใช้วิธี AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่การออกแบบกำลังอัดประลัยของแท่งลูกบาศก์ไม่น้อยกว่า 325 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรที่อายุ 28 วัน และใช้โปรแกรม Microsoft Excel ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบ

การตรวจเอกสาร

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. สมการที่ใช้คำนวณหน่วยแรงเค้น

สุทธิพงศ์ (2539) ความแข็งแรง(Strength) เป็นคุณสมบัติของวัสดุ ในการต้านทานและรองรับภารกรรมสูงๆ โดยไม่มีการเสียหาย วัสดุบางชนิดจะสามารถรองรับภารกรรมแบบหนึ่งได้ดีกว่าอีกแบบหนึ่ง เช่น คอนกรีต จะมีความแข็งแรงในการรองรับแรงกดอัดได้ดีมาก แต่จะมีความแข็งแรงในการรองรับแรงดึงได้น้อย

วัตถุใดๆ ก็ตามที่มีแรงภายนอกมากระทำ จะมีแนวโน้มที่จะเกิดการเสียรูปเนื่องจากแรงเหล่านั้น ถ้าวัตถุนั้นไม่มีการบุบสลายหรือแตกสลายจากกัน วัตถุนั้นจะแสดงความต้านทานและการรองรับแรงภายนอกที่มากระทำเหล่านั้น เป็นค่าเฉลี่ยความเค้นหนึ่งหน่วย ซึ่งเรียกว่า ความเค้น (Stress) เป็นการวัดความเข้มของแรงกด และความต้านทานแรงกดเหล่านั้น ความเค้นมักคิดคำนวณโดยการหารแรงกระทำรวม (F) ด้วยพื้นที่ๆ รองรับแรงกระทำนั้น (A)

$$S = \frac{F}{A} \qquad (1)$$

หน่วยของความเค้นคือ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว(psi) หรือนิวตันต่อตารางเมตร(N/m^2) หน่วย นิวตันต่อตารางเมตร สามารถเรียกได้อีกอย่างว่าหน่วย ปาสคาล(Pascal, Pa)

บรรจบ (ม.ป.ป.) ความเค้นปกติ(Normal Stress) เป็นความเข้มของแรง หรือแรงภายในต่อหน่วยพื้นที่ ทีแรงกระทำ แรงภายในนั้นต้องกระทำตั้งได้ฉากกับพื้นที่ ΔA ใช้สัญลักษณ์ว่า σ(Sigma) โดยใช้วิธี take limit จะได้ว่า

$$\sigma = \lim_{\Delta A \to 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta A}$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \qquad (2)$$

โดยกำหนดให้

σ หมายถึง ความเค้นปกติ (ความเค้นดึงหรืออัด ณ หน้าตัดนั้นๆ)

F หมายถึง แรงลัพธ์ภายในที่กระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดนั้น

A หมายถึง พื้นที่หน้าตัด ณ ตำแหน่งที่แรงภายในกระทำ

สุทธิพงศ์ (2539) ความเค้นดัดและสูตรการยืดหยุ่น สูตรการยืดหยุ่นใช้เพื่อคำนวณหาความเค้นดัดในคานมีรูปแบบสมการพื้นฐานอยู่ 2 แบบคือ

$$S_b = \frac{Mc}{I} \quad (3)$$

$$S_b = \frac{M}{Z} \quad (4)$$

โดยกำหนดให้

S_b = ความเค้นดัดสูงสุด

M = โมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งหน้าตัดที่พิจารณา ซึ่งสามารถคำนวณได้เฉพาะหน้าตัด หรือคิดจากแผนผังโมเมนต์ดัด

c = ระยะทางจากแกนสะเทิน(Neutral axis) ไปยังผิวนอกสุดของคาน หรือเนื้อคานส่วนนอกที่สุด

I = โมเมนต์ของความเฉื่อย (Moment of Inertia) ของพื้นที่หน้าตัดนั้น

Z = โมดูลัสของพื้นที่ (Section Modulus) และ Z = I/c

ในบางกรณี อาจจะต้องมีการคำนวณหาค่าความเค้นภายในชั้นเนื้อในของคาน ในกรณีเช่นนี้จะใช้ระยะทาง y ซึ่งนับจากแกนสะเทินไปยังจุดภายในคาน ที่ต้องการคำนวณหาความเค้น แทนค่า c ในสูตรการยืดหยุ่น ซึ่งจะได้สูตรการยืดหยุ่นใหม่เป็น

$$S_{by} = \frac{My}{I} \quad (5)$$

2. คอนกรีต

บุญฤทธิ์ (ม.ป.ป.) คอนกรีตเป็นวัสดุผสม(Composite Material) โดยเนื้อคอนกรีตแยกออกเป็นสองส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ ซีเมนต์เพสท์ (Cement paste) และ วัสดุมวลรวม (Aggregate)

ซีเมนต์เพสท์ เป็นส่วนผสมของซีเมนต์กับน้ำ ทำหน้าที่เป็นตัวประสานโดยจะไปห่อหุ้มมวลรวม และอุดช่องว่างของมวลรวม ที่จะทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่น ดังนั้นกำลังของคอนกรีตจึงขึ้นอยู่กับกำลังของซีเมนต์เพสท์ด้วย กำลังและความแน่นของซีเมนต์ ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่จะบรรจุอยู่ในช่องว่างรอบเม็ดซีเมนต์ ซึ่งปกติจะระบุในรูปของ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์(Water Cement Ratio) นอกจากนั้นขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ ที่เป็นปฏิกิริยาทางเคมี เรียกว่า ซีเมนต์ไฮเดรชั่น ซึ่งก่อให้เกิดความร้อน (Heat of Hydration) ในเนื้อซีเมนต์เพสท์ ถ้าความร้อนมากเกินไปก็จะเป็นผลเสียต่อซีเมนต์เพสท์ และคอนกรีต

ซีเมนต์เพสท์จะเป็นตัวแทรกประสาน(Filler) กระจายอยู่ในวัสดุมวลรวมช่วยให้คอนกรีตมีความทนทานแข็งแรง และมีราคาถูกด้วย วัสดุมวลรวมจะแบ่งออกเป็นสองพวก ได้แก่ วัสดุมวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) และวัสดุมวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) วัสดุมวลรวมละเอียดหมายถึงวัสดุที่มีขนาดเล็กกว่า 0.475 ที่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานASTM เบอร์ 4 ซึ่งได้แก่ทราย ส่วนวัสดุมวลรวมหยาบ หมายถึงวัสดุที่มีขนาดโตขึ้นไม่สามารถลอดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 ได้แก่หินย่อย หรือ กรวด

3. กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต

ชัชวาลย์ (2537) คุณสมบัติของคอนกรีตในขณะที่ยังอยู่ในสภาพเหลวจะมีความสำคัญเพียงขณะก่อสร้างเท่านั้น ในขณะที่คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วจะมีความสำคัญไปตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตนั้น คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ได้แก่ กำลัง ความทนทาน และการเปลี่ยนแปลงปริมาตร

กำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 ประการ คือ

1. กำลังของมอร์ต้า
2. กำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวม
3. แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวของมอร์ต้ากับมวลรวม

กำลังของมอร์ต้า มีบทบาทอย่างมากต่อกำลังอัดของคอนกรีต โดยกำลังของมอร์ต้านี้ขึ้นอยู่กับความพรุนภายในเนื้อมอร์ต้า อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และ Degree of Hydration แต่ความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังและความพรุนจะถูกควบคุมด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า กำลังของมอร์ต้าขึ้นอยู่อย่างมากกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ การเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติของมวลรวม เช่น การเปลี่ยนแปลงขนาดคละ, ปริมาณ, กำลัง, ลักษณะผิว, ขนาดใหญ่สุด, การดูดซึม และแร่ธาตุต่างๆ จะส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตไม่มากนัก การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังดึงน้อยกว่ากำลังอัด โดยอัตราส่วนของกำลังดึงต่อกำลังอัดของคอนกรีต จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้น

กำลังโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวม สำหรับกำลังของมอร์ต้าที่กำหนดให้ความสามารถต้านแรงของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับกำลังของหิน และแรงยึดเหนี่ยวของมวลรวมกับมอร์ต้า แต่โดยทั่วไปกำลังของมวลรวมจะสูงเป็นหลายเท่าของกำลังของมอร์ต้า ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวจะเป็นตัวควบคุมการแตกของคอนกรีต สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่กำหนดให้ กำลังอัดของคอนกรีตจะลดลงเมื่อใช้หินขนาดใหญ่ขึ้น เพราะหินขนาดใหญ่จะก่อให้เกิดน้ำใต้หินมากขึ้น ทำให้แรงยึดเหนี่ยวของมวลรวมกับมอร์ต้าลดลง ขนาดของมวลรวมยังมีผลต่อกำลังของคอนกรีตที่มีสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ หรือปานกลางมากกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูง การเพิ่มปริมาณของมวลรวมในส่วนผสมจะเป็นการเพิ่มกำลังอัด รวมทั้งถ้าใช้หินที่มีโมดูลัสยืดหยุ่นสูงจะทำให้กำลังของคอนกรีตดีขึ้น

4. กำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต

ความต้านทานแรงดึงของคอนกรีตจะมีค่าต่ำ เมื่อเทียบกับความต้านทานแรงอัดของคอนกรีต ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงและแรงอัด ถ้าทดสอบแรงดึงในคอนกรีตโดยตรง จะได้ค่าประมาณ 7-11 % เมื่อเทียบกับแรงอัด ในคอนกรีตที่มีคุณสมบัติเดียวกัน ความต้านทานแรงดึงในคอนกรีตจึงไม่ได้นำมาพิจารณาในการออกแบบโครงสร้างอาคารทั่วไป โดยให้เหล็กเสริมเป็นส่วนที่รับแรงดึงแทน (บุญฤทธิ์, ม.ป.ป.) แต่ในงานคอนกรีตถนนจะนำเอาค่าของแรงดึงในรูปของหน่วยแรงดัดสูงสุดมาใช้พิจารณาในการออกแบบ หรือ โมดูลัสแตกร้าว (Modulus of Rupture)

วัชรินทร์ (2537) ค่ากำลังแรงดัด(Flexural Strength) หรือโมดูลัสแตกร้าว (Modulus of Rupture) เป็นค่าที่มักจะใช้ประเมินกำลังของผิวทางคอนกรีต ทดสอบโดยหล่อคานเล็กๆ และให้น้ำหนักกระทำบนด้านหนึ่งจนกระทั่งเกิดความเสียหาย เนื่องจากเกิดหน่วยแรงดึงที่ส่วนล่างของ

คาน กำลังแรงดัดมักมีค่าประมาณ 15% ของความต้านทานแรงอัดสำหรับคอนกรีตธรรมดา ความสัมพันธ์ที่ถูกต้องคือ

$$\text{กำลังรับแรงดัด} = K\sqrt{\text{กำลังต้านทานต่อแรงอัด}} \qquad (6)$$

เมื่อ K เป็นค่าคงที่ มีค่าประมาณ 0.7 สำหรับกำลังในหน่วย MPa และมีค่า 8.4 สำหรับกำลังในหน่วย ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

5. การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (Compression Test)

บริษัทผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด [CPAC] (2541) การทดสอบกำลังอัดด้วยวิธี Uniaxial Compression Test ซึ่งกำลังอัดของคอนกรีตที่ทดสอบด้วยวิธีดังกล่าวที่อายุ 28 วัน ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายให้เป็นดัชนีทั่วไปในการวัดกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งการทดสอบทำโดยการหล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐาน ซึ่งที่ใช้กันอยู่แพร่หลาย มี 2 รูปทรงคือ

1. รูปทรงลูกบาศก์ ตามขนาดมาตรฐานอังกฤษ BS 1881: PART 3 ขนาดที่ใช้คือ 15×15×15 ซม.

2. รูปทรงกระบอก ตามมาตรฐานอเมริกา ASTM C 192 ขนาดที่ใช้คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม.

หลังจากคอนกรีตแข็งตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบออก ต่อจากนั้นจึงนำก้อนตัวอย่างไปบ่มในน้ำเพื่อรอการทดสอบกำลังอัดด้วยเครื่องต่อไป

6. การทดสอบกำลังดึงของคอนกรีต (Tensile Strength Test)

CPAC (2541) ถึงแม้ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คอนกรีตจะไม่ได้รับแรงดึงโดยตรงก็ตาม แต่ก็เป็นตัวช่วยในการควบคุมการแตกร้าวของคอนกรีต เนื่องจากผลกระทบต่างๆ เช่น อุณหภูมิ และการหดตัว วิธีวัดแรงดึงในคอนกรีตทำได้ 3 วิธีคือ

6.1 Direct Tensile Test โดยปกติแล้วการให้แรงดึงโดยตรงกับก้อนตัวอย่างคอนกรีตทำได้ยาก เพราะมักเกิดความคลาดเคลื่อนของผลทดสอบ เนื่องจาก เกิดการเยื้องศูนย์ของก้อนตัวอย่างซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญมาก และ มีหน่วยแรงอื่นแทรกเข้ามาจากหัวจับยึดคิดเป็นหน่วยแรงเฉพาะที่ และในที่สุดจะเกิดการแตก ณ บริเวณนี้จากนั้นจะแพร่ขยายไปอย่างรวดเร็ว กำลังดึงที่ได้จะเป็นของบริเวณที่มีกำลังต่ำสุด ซึ่งไม่ตรงกับค่ากำลังของเนื้อคอนกรีตจริง จึงทำให้วิธีการทดลองนี้มีความเชื่อมั่นต่ำทำให้ยังไม่มีการกำหนดมาตรฐานวิธีทดสอบแบบนี้ขึ้น

6.2 Splitting Test การทดสอบด้วยวิธีนี้เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ทดสอบหากำลังดึงของคอนกรีตโดยใช้ก้อนตัวอย่างทรงกระบอกมาตรฐาน วางให้แกนตามยาว อยู่ในแนวนอนบนเครื่องทดสอบแรงอัด ก้อนตัวอย่างจะแตกในแนวดิ่งตามเส้นผ่านศูนย์กลาง จึงสามารถคำนวณกำลังต้านทานแรงดึงบนระนาบแตกร้าวนี้ได้ตามสมการ

$$f_s = \frac{2P}{\pi d L} \qquad (7)$$

f_S = Splitting Strength

P = น้ำหนักกดสูงสุด(กก.)

L = ความยาวของก้อนตัวอย่างทรงกระบอก (ซม.)

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่าง(ซม.)

กำลังดึงที่ได้จากวิธีนี้จะสูงกว่ากำลังดึงจริง ประมาณ 5-12% แต่ถือว่าเป็นค่าที่ใกล้เคียงกว่าค่าที่ได้จากค่ากำลังดัดและข้อดีของวิธีนี้คือ ก้อนตัวอย่างสามารถทดสอบได้ทั้งกำลังอัดและกำลังดึง

6.3 Flexural Tensile Test เนื่องจากการหากำลังดึงของคอนกรีตโดยตรงทำได้ยาก จึงมีความนิยมในการหากำลังดึงของคอนกรีตจากการทดสอบคานคอนกรีต ภายใต้แรงดัดแทน โดยค่าหน่วยแรงดึงจะเกิดสูงสุดที่บริเวณใต้ท้องคานที่เรียกว่า โมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of Rupture) ซึ่งหาได้จากสมการ

$$R = \frac{PL}{bd^2} \qquad (8)$$

R = โมดูลัสแตกร้าว (กก./ตร.ซม.)

P = น้ำหนักกดสูงสุด (กก.)

L = ความยาวของคาน (ซม.)

d = ความลึกเฉลี่ยของคาน (ซม.)

b = ความกว้างเฉลี่ยของคาน (ซม.)

กำลังดึงของคอนกรีตที่คำนวณด้วยวิธีนี้จะมีค่ามากกว่ากำลังดึงโดยตรงของคอนกรีต 50-100% จากผลกระทบของ Strain Gradient เนื่องจากหน่วยการยืดหดตัวในคอนกรีตที่เกิดขึ้น อยู่ในลักษณะส่วนโค้งมิใช่การยืดหดในลักษณะเส้นตรงอย่างที่สมมุติ ซึ่งทำให้โมดูลัสของแตกร้าวมีค่าแตกต่างกันไป ตามขนาดความลึกของคานทดสอบ นอกจากนั้นในกรณีทดสอบกำลังดึงโดยตรง ปริมาตรทั้งหมดของคอนกรีตจะได้รับหน่วยแรงดึงที่กระทำ แต่การทดสอบการดัดนั้น ปริมาตรของคอนกรีตส่วนน้อยบริเวณท้องคานเท่านั้นที่ได้รับหน่วยแรงดึง แต่อย่างไรก็ตามค่ากำลังดัดก็มีประโยชน์สำหรับงานควบคุมคุณภาพคอนกรีตในงานถนน และพื้นสนามบิน เพราะคอนกรีตดังกล่าวต้องรับน้ำหนักในรูปลักษณะของแรงดัด

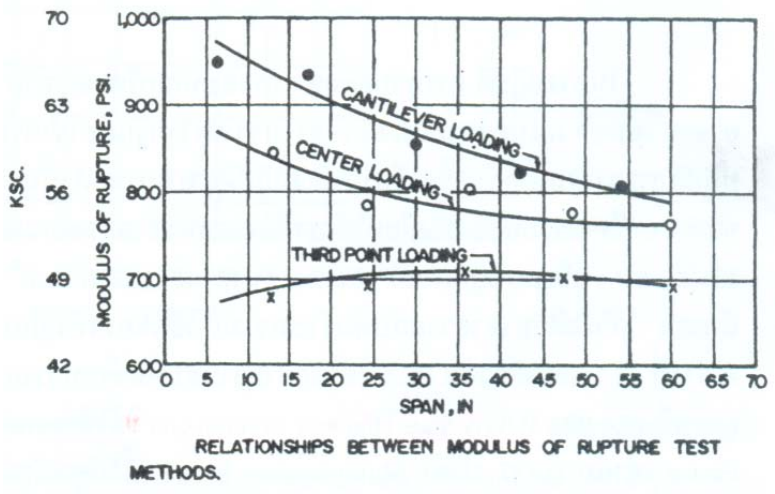
จิรพัฒน์ (2546) การทดสอบโมดูลัสแตกร้าวกระทำได้ 3 วิธี คือ

ก. ทดสอบแบบคานยื่น (Cantilever Loading)

ข. ทดสอบแบบออกแรงกดกลางคานเพียงจุดเดียว(Mid span Loading)

ค. ทดสอบแบบออกแรงกด 2 จุด โดยแบ่งช่วงคานเท่าๆ กันสามช่วง (Third Point Loading)

ค่าโมดูลัสแตกร้าวที่ได้จากการทดลองตามวิธี (ค) จะมีค่าต่ำสุด ดังภาพที่ 1 จึงควรใช้ค่าตามวิธี (ค) มาออกแบบเพราะมีส่วนปลอดภัยสูงกว่าวิธีอื่น คุณภาพของคอนกรีตที่ใช้ทำผิวทางคอนกรีต ควรมีค่า โมดูลัสแตกร้าวประมาณ 650-700 ปอนด์/ตร.นิ้ว และหารด้วย FS = 2 เมื่อนำไปออกแบบก่อสร้างตามแผนภูมิออกแบบของ PCA



ภาพที่ 1 แสดงค่าโมดูลัสแตกร้าวที่ได้จากการทดสอบแต่ละวิธี
ที่มา: จิรพัฒน์ (2546)

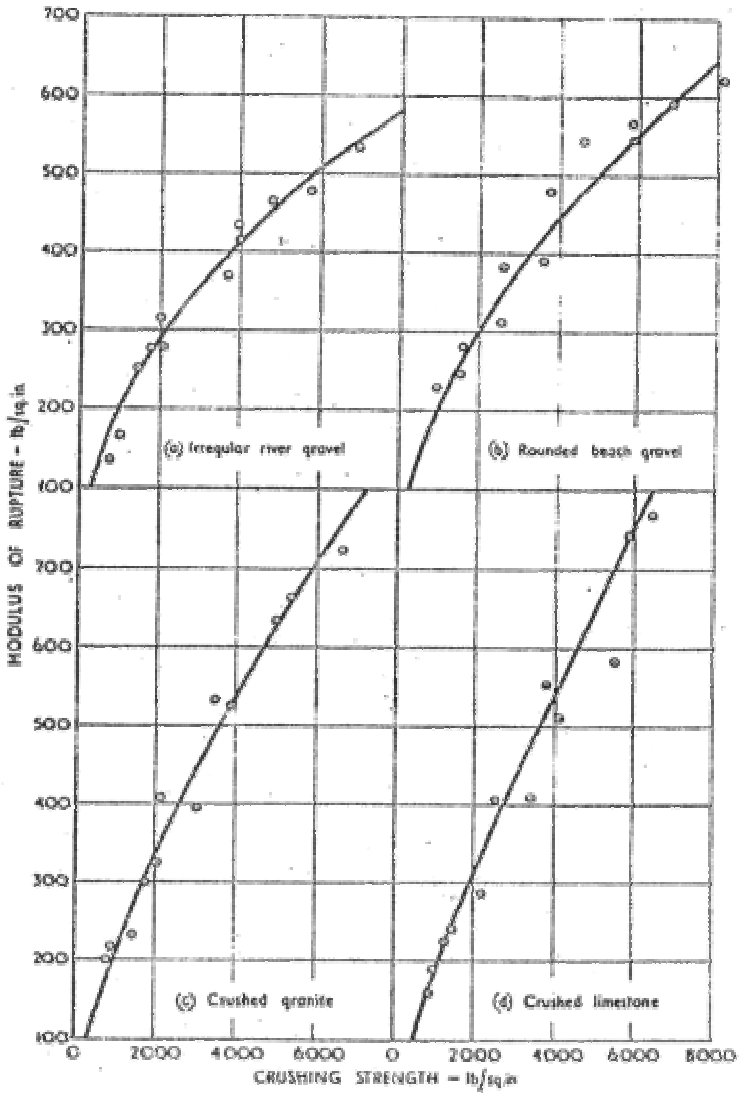
งานวิจัยที่ผ่านมา

Road Research Laboratory ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดของแท่งลูกบาศก์คอนกรีตกับโมดูลัสแตกร้าว ใช้ขนาดของแท่งลูกบาศก์ 4 นิ้ว ×4 นิ้ว ×4 นิ้ว ทดสอบหาค่าแรงอัด และใช้คานคอนกรีตขนาดหน้าตัด 6 นิ้ว ×6 นิ้ว ×27 นิ้ว ทดสอบหาโมดูลัสแตกร้าว โดยวิธี Third Point Loading ใช้ส่วนผสมจากหินและกรวดชนิดต่างๆ ได้ความสัมพันธ์ดังตารางที่ 1 และภาพที่ 2

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดแท่งลูกบาศก์คอนกรีตกับโมดูลัสแตกร้าว โดย Road Research Laboratory (1955)

ชนิดของหินใช้ผสมคอนกรีต	MR (ปอนด์/ตร.นิ้ว)	หมายเหตุ
Irregular River Gravel	$6.5\ F^{0.5}$	F = แรงอัดของแท่งลูกบาศก์คอนกรีต, ปอนด์/ตร.นิ้ว
Rounded Beach Gravel	$4.6\ F^{0.55}$	
Crushed Granite	$1.6\ F^{0.7}$	
Crushed Limestone	$0.7\ F^{0.8}$	

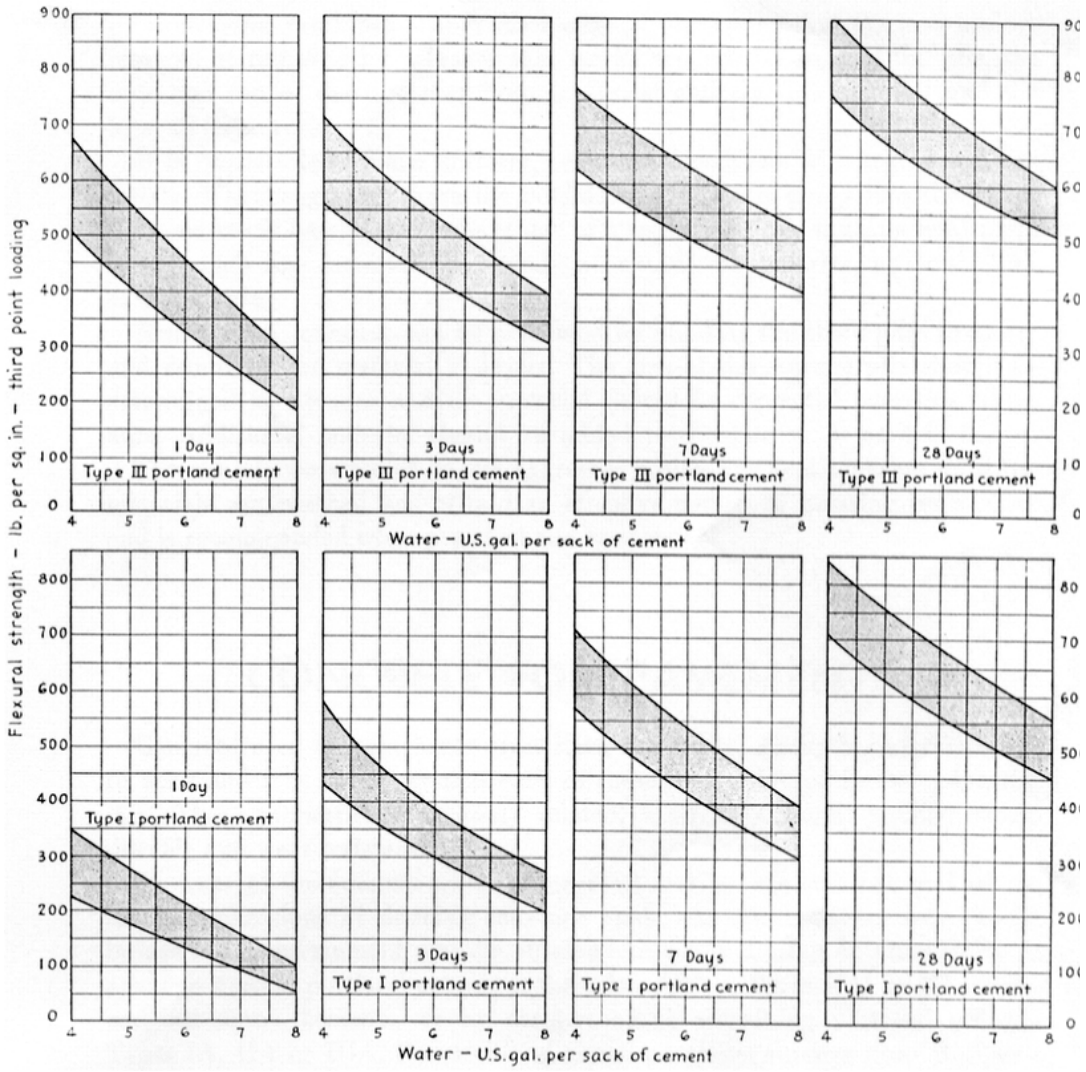
ที่มา: Ruenkrairergsa (1987)



ภาพที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสแตกร้าว (MR) และกำลังประลัย (f'_c) ของคอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมจากหินและกรวด ชนิดต่างๆ โดย Road Research Laboratory (1955)

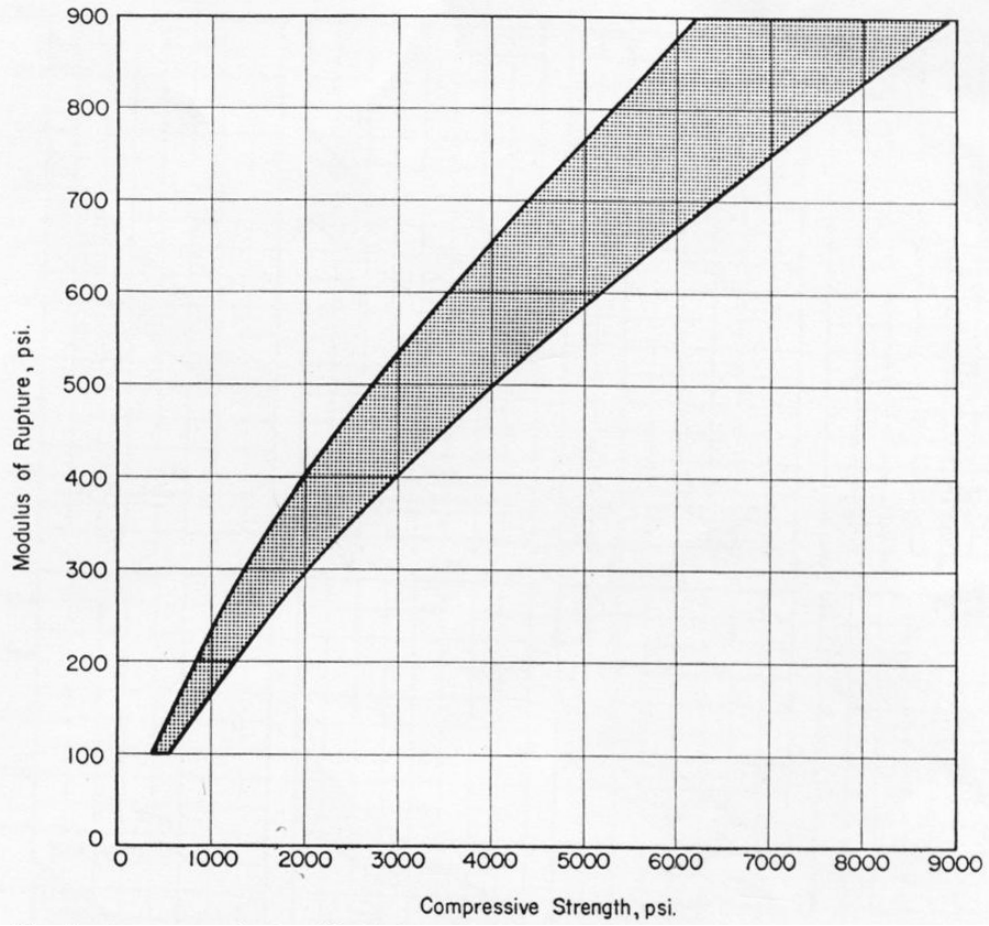
ที่มา: Ruenkrairergsa (1987)

Portland Cement Association ได้วิจัยศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดแท่งคอนกรีตทรงกระบอกกับโมดูลัสแตกร้าวของคานคอนกรีต ใช้แท่งทรงกระบอกขนาด 15 ซม.×30 ซม. คานคอนกรีตทดสอบโดยวิธี Third Point Loading ที่คอนกรีตอายุ 1 ถึง 28 วัน ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และIII คอนกรีตมีการกระจายกักฟองอากาศ ได้ความสัมพันธ์ดังภาพที่ 3 และ 4 (จิรพัฒน์, 2546; Ruenkrairergsa, 1987)



ภาพที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุ โมดูลัสแตกร้าว (MR) และปริมาณน้ำที่ใช้ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I และ III

ที่มา: Portland Cement Association (1955)



ภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังประลัย ($f'c$) และโมดูลัสแตกร้าว (MR) ของคอนกรีต โดย Portland Cement Association (1955)

ที่มา: Ruenkrairergsa (1987)

Ruenkrairergsa et al. (1982) ได้สำรวจหาค่าโมดูลัสแตกร้าวของพื้นคอนกรีตสนามบินดอนเมือง ที่มีอายุ 10-30 ปี โดยการตัดตัวอย่างทดสอบเป็นแท่งคานจากการเจาะพื้นคอนกรีต แล้วนำไปทดสอบตามวิธี Third Point Loading พบว่าที่คอนกรีตอายุ 10 ปี และ 30 ปี ได้ค่าโมดูลัสแตกร้าว อยู่ระหว่าง 530-610 ปอนด์/ตร.นิ้ว และ 270-400 ปอนด์/ตร.นิ้ว ตามลำดับ

ณัฐสม (2546ก) ได้ทำการวิเคราะห์และวิจัยพฤติกรรมคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก เพื่อนำมาใช้งานถนนคอนกรีตโดยทำการทดสอบหาคุณสมบัติของคอนกรีตที่เสริมเส้นใยเหล็กเปรียบเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตล้วน ในด้านกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) กำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) กำลังรับแรงดึง (Tensile Strength) ที่คอนกรีตอายุ 3 วัน 7 วัน และ 28 วัน

ได้คุณสมบัติของคอนกรีตล้วนดังตารางที่ 2 แต่จากการทดลองดังกล่าวไม่ได้ระบุมาตรฐาน จำนวน วิธีการเก็บแท่งตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ และไม่ได้วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงอัดกับค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตไว้

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบคุณสมบัติการรับกำลังของแท่งคอนกรีตตัวอย่าง

อายุ (วัน)	ค่ากำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)	ค่ากำลังรับแรงดัด (กก./ตร.ซม.)	ค่ากำลังรับแรงดึง (กก./ตร.ซม.)
3	228	35	28
7	270	36	35
28	380	44	40

ที่มา: ณัฐสม (2546ก)

ณัฐสม (2546ข) ได้ทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural Strength ของแท่งคอนกรีตขนาดมาตรฐานและแท่งคอนกรีตขนาดย่อส่วน โดยใช้แท่งทดสอบขนาด 15 ซม.×15 ซม.×60 ซม. กับ แท่งทดสอบขนาด 5 ซม.×5 ซม.×29 ซม. จากการผสมคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ และเลื่อยตัดจากถนนคอนกรีตสายกรุงเทพฯ-ชลบุรี-มาบตาพุด ซึ่งเป็นถนนที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 2 ปี ในการทดสอบหากำลังรับแรงดัด และใช้แท่งคอนกรีตตัวอย่างขนาด ∅10 ซม.สูง 20 ซม.จากการ เจาะจากถนนสายดังกล่าวกับแท่งตัวอย่างคอนกรีตขนาด ∅15 ซม.สูง 30 ซม.จากการผสมในห้องปฏิบัติการในการทดสอบหากำลังอัดผลการทดสอบค่ากำลังอัดและกำลังรับแรงดัดจากตัวอย่างคอนกรีตที่เจาะและเลื่อยตัดมีค่าสูงกว่าที่กำหนดไว้ในการออกแบบส่วนผลการทดสอบ ต่างๆ ได้มีการสรุปไว้ดังต่อไปนี้

คอนกรีตที่มีค่ากำลังสูง (มีส่วนผสมของซีเมนต์มากกว่าหรือเท่ากับ 350 กก./ลบ.ม.) จะให้ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดัดของแท่งคานเล็กได้แม่นยำกว่าคอนกรีตที่มีค่ากำลังต่ำ

หากใช้มวลรวมหยาบที่มีคุณสมบัติตามมาตรฐานกรมทางหลวงแล้วถึงแม้ว่าจะเป็นหิน คนละชนิดกันแต่ใช้ส่วนผสมของคอนกรีตสดเหมือนกันจะให้ผลของค่ากำลังรับแรงดัดใกล้เคียงกัน

ค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์น้อยกว่า 350 กก./ลบ.ม. จะไม่เหมาะกับการใช้แท่งคานเล็กทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงดัด เพราะการให้น้ำหนักต่อ แท่งทดสอบอย่างสม่ำเสมอ กระทำได้ยากสำหรับคอนกรีตที่มีค่ากำลังรับแรงดัดต่ำกว่า 35 ksc.

จากผลการวิเคราะห์สมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสำหรับนำไปใช้ในการคำนวณ หาค่ากำลังรับแรงดัดของแท่งคานใหญ่ (F_{t1}) จากค่ากำลังรับแรงดัดของแท่งคานเล็ก (F_{t2}) คือ

$F_{t1} = 0.3230\ F_{t2} + 47.472$ (สำหรับคอนกรีตในสนาม)

$F_{t1} = 0.3255\ F_{t2} + 47.406$ (สำหรับคอนกรีตที่ผสมด้วยหินปูน)

$F_{t1} = 0.3811\ F_{t2} + 44.558$ (สำหรับคอนกรีตที่ผสมด้วยหินแกรนิต)

$F_{t1} = 0.3063\ F_{t2} + 48.343$ (สำหรับคอนกรีตที่ผสมด้วยกรวดบก)

ทุกสมการดังกล่าวจะให้ผลที่แม่นยำในช่วงที่ค่า F_{t2} มีค่าอยู่ระหว่าง 35.0 ksc. ถึง 55.0 ksc.

จากการทดสอบนี้ไม่เหมาะที่จะนำไปหาความสัมพันธ์ ของค่ากำลังรับแรงอัด กับค่ากำลังรับแรงดัด เนื่องจากตัวอย่างแท่งคอนกรีตได้จากการเจาะ เลื่อยตัด และการผสมในลักษณะสภาวะที่แตกต่างกัน อีกทั้งการเลื่อยตัดคานเล็กก็ยังมีความไม่สะดวกเท่าที่ควร และยังมีข้อจำกัดที่จะนำมาใช้กับคอนกรีตที่มีอายุน้อยๆ ซึ่งมักมีค่ากำลังรับแรงยังต่ำอยู่

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์สำหรับทดลองคุณสมบัติของมวลรวม

1.1 ชุดทดลองหาขนาดคละของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM C136

1.2 ชุดทดลองหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM C 127 และ ASTM C 128

1.3 ชุดทดลองหาหน่วยน้ำหนักของมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C 29

1.4 ชุดทดลองหาความต้านทานการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบโดยเครื่องลอสแองเจลิส ตามมาตรฐาน ASTM C 131

2. อุปกรณ์สำหรับเตรียม และทดลองตัวอย่าง

2.1 เครื่องชั่งอ่านได้ละเอียด 0.01กิโลกรัม

2.2 เครื่องผสมคอนกรีต

2.3 ชุดทดลองหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C 143

2.4 เครื่องทดสอบหากำลังอัดคอนกรีต

2.5 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine

วิธีการ

1. การทดลองคุณสมบัติของมวลรวมละเอียด

1.1 ทำการทดลองหาขนาดคละ ตามมาตรฐาน ASTM C 136

1.2 ทำการทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะ และการดูดซึม ตามมาตรฐาน ASTM C 128

1.3 ทำการทดลองหาหน่วยน้ำหนักของมวลรวมละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM C 29

1.4 ทำการทดลองหาสารอินทรีย์ที่เจือปน ตามมาตรฐาน ASTM C 40

2. การทดลองคุณสมบัติของมวลรวมหยาบ

2.1 ทำการทดสอบหาขนาดคละ ตามมาตรฐาน ASTM C 136

2.2 ทำการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ และการดูดซึม ตามมาตรฐาน ASTM C 127

2.3 ทำการทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของมวลรวมหยาบ ตามมาตรฐาน ASTM C 29

2.4 ทำการทดสอบหาความต้านทานการสึกกร่อน โดย Los Angeles Machine ตามมาตรฐาน ASTM C 131

3. การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

มวลรวมที่จะนำมาคำนวณหาสัดส่วนการผสมนั้นต้องทำการทดสอบหาคุณสมบัติต่างๆที่ต้องการ และผ่านเกณฑ์ตามข้อกำหนดก่อน จึงจะทำการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต เพื่อหาสัดส่วนการผสมของคอนกรีต ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 น้ำสะอาด ทราย และหินโม่ หรือกรวดแม่น้ำ โดยการชั่งน้ำหนักของส่วนผสมดังกล่าว การออกแบบจะใช้วิธีการคำนวณจากคุณสมบัติของมวลรวมที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ หรือค่ามาตรฐาน โดยวิธี AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI) ก็จะได้สัดส่วนการผสมของคอนกรีตโดยประมาณ (ตารางที่ 5 และ 6) แล้วนำมาปรับเทียบให้ได้ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงก็จะได้ส่วนผสมของคอนกรีตใน 1 ลูกบาศก์เมตรเพื่อนำไปเป็นส่วนผสมของคอนกรีตที่จะเก็บตัวอย่างเพื่อทดลองต่อไป

4. การหล่อคอนกรีตเพื่อเก็บตัวอย่างและการบ่ม

หลังจากที่ได้สัดส่วนของส่วนผสมคอนกรีตแล้วนำมาปรับแก้ปริมาณน้ำและน้ำหนักของมวลรวมตามปริมาณความชื้นและความจุการดูดซึมของมวลรวมตามสภาพจริง จึงทำการผสมเพื่อเตรียมตัวอย่างสำหรับเก็บไว้ทดลอง ทำการผสมในเครื่องผสม Drum Mixer จนส่วนผสมเข้ากันดีตามลักษณะของคอนกรีตสดที่ไม่มีการแยกตัวของมวลรวม จากนั้นทำการทดลองหาค่าการยุบตัวของคอนกรีตสด โดยวิธี Slump Test จึงทำการบรรจุคอนกรีตสดลงในแบบหล่อที่เตรียมไว้ ตามมาตรฐานการเก็บตัวอย่างทดสอบ หลังจากแกะแบบหล่อตัวอย่างออกจากแบบแล้วทำเครื่องหมายแท่งตัวอย่างเพื่ออ้างอิง และป้องกันการสับสน นำไปบ่มในน้ำสะอาดจนกว่าจะได้อายุตามที่กำหนดไว้สำหรับจะทำการทดลอง โดยแยกออกเป็น 2 กลุ่ม คือมวลรวมหยาบที่ผสมด้วยหินโม่ และกรวดแม่น้ำ ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ของกำลังอัดประลัยและโมดูลัสแตกร้าวเมื่อคอนกรีตมีอายุได้ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ดังตารางที่ 3 และ 4

ตารางที่ 3 จำนวนการเก็บตัวอย่าง และการทำซ้ำ ที่อายุคอนกรีตต่างๆ ที่จะทำการทดลอง

อายุ (วัน)	ทดลองหากำลังอัดประลัย ขนาด 15 ซม.×15 ซม.×15 ซม.			ทดลองหาโมดูลัสแตกร้าว ขนาด 15 ซม.×15 ซม.×76 ซม.		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3
7	3	3	3	3	3	3
14	3	3	3	3	3	3
28	3	3	3	3	3	3
รวม	15	15	15	15	15	15

ตารางที่ 4 ผลสรุปจำนวนตัวอย่างคอนกรีต ที่ทำการทดลองทั้งหมด

ชนิดมวลรวมหยาบ	ทดสอบหากำลังอัดประลัย ขนาด 15 ซม.×15 ซม.×15 ซม.	ทดสอบหาโมดูลัสแตกร้าว ขนาด 15 ซม.×15 ซม.×76 ซม.
หิน	45	45
กรวด	45	45
รวม	90	90

5. การทดลอง

5.1 การทดลองหาค่ากำลังอัดประลัย นำแท่งตัวอย่างขนาด 15 ซม.×15 ซม.×15 ซม. วัดขนาดหน้าตัดแท่งสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่รับน้ำหนักกด ด้วยวิธีการวัดตั้งฉากซึ่งกันและกันเป็นเซนติเมตรทศนิยม 2 ตำแหน่ง ที่ประมาณกึ่งกลางของความสูงของแท่งตัวอย่าง สำหรับคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่าง วัดความสูง และชั่งน้ำหนักของแท่งตัวอย่างเป็นกิโลกรัมทศนิยม 2 ตำแหน่ง บันทึกค่าไว้ นำแท่งตัวอย่างวางบนแผ่นแบริ่งของเครื่องทดลองจัดให้แนวแกนของแท่งตัวอย่างอยู่ในแนวศูนย์กลางน้ำหนักกด เลื่อนแผ่นแบริ่งลงมาให้สัมผัสแนบสนิทกันกับด้านที่รับแรงกด ให้อัตราการกดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอและไม่กระตุก ด้วยอัตราคงที่ในช่วง 1.4 – 2.5

กิโลกรัม ต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที ทำการกดจนแท่งตัวอย่างไม่สามารถรับแรงได้ต่อไป นำค่าที่ตัวอย่างรับกำลังได้สูงสุดมาคำนวณหากำลังอัดประลัย(ภาคผนวก ข)

5.2 การทดลองหาค่าโมดูลัสแตกร้าว โดยวิธี Third Point Loading นำแท่งตัวอย่างขนาด 15 ซม.×15 ซม.×76 ซม. มาแบ่งก้อนตัวอย่างตามยาว โดยเหลือบริเวณปลายไว้สองส่วน ส่วนละไม่น้อยกว่า 2.5 ซม. ส่วนภายในที่เหลือแบ่งเป็น 3 ส่วนเท่าๆ กัน ในการทดลองครั้งนี้แบ่งส่วนละ 16 ซม. โดยขีดเส้นไว้โดยรอบเพื่อบอกตำแหน่งในการวางแท่งตัวอย่างบนเครื่องทดลอง และตำแหน่งน้ำหนักที่กดลงมา ตั้งน้ำหนักกดให้คงที่ระหว่าง 3 - 6 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักสูงสุด จนแท่งตัวอย่างหัก บันทึกค่าน้ำหนักกดสูงสุด นำแท่งตัวอย่างที่หักมาวัดตำแหน่ง ความกว้าง ความลึกตามมาตรฐานการทดลองแล้วคำนวณหาค่าโมดูลัสแตกร้าว (ภาคผนวก ข)

6. การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลอง

ค่ากำลังอัดประลัย และค่าโมดูลัสแตกร้าวที่ได้จากการทดสอบ แยกผลที่ได้จากคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบหินโม่ และมวลรวมหยาบกรวดแม่น้ำไปวิเคราะห์แยกกันโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel นำข้อมูลที่ได้มาเรียบเรียงเป็นข้อมูลคู่อันดับ แล้วคำนวณหาค่าสัมประสิทธ์สหสัมพันธ์ของ Pearson(r) จากนั้นทำการถดถอยเพื่อหาสมการที่เหมาะสมของข้อมูลที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัย และค่าโมดูลัสแตกร้าว จากนั้นหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของโมดูลัสแตกร้าวที่ได้จากสมการการถดถอยกับค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ที่อายุการทดสอบ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ของทั้งหินโม่ และกรวดแม่น้ำ นำผลที่ได้ไปสรุปต่อไป

7. รูปการทดลอง

ภาพที่ 5 และ 6 เป็นการทดลองหาค่าขนาดคละของมวลรวมหยาบกรวดแม่น้ำ โดยใช้ตะแกรงมาตรฐาน ASTM เพื่อให้ได้ตามเกณฑ์ข้อกำหนดของกรมทางหลวง

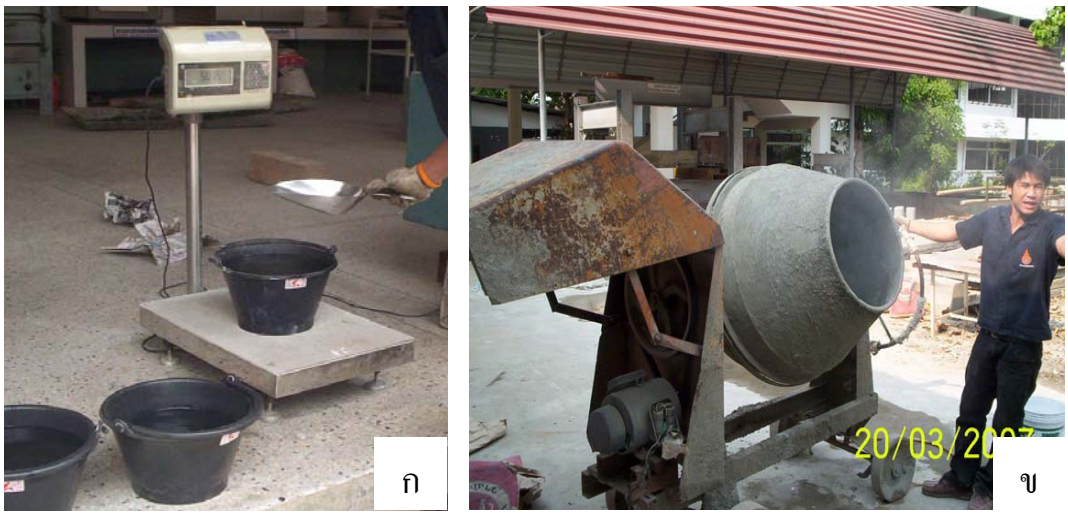
ภาพที่ 5 อุปกรณ์การวิเคราะห์หาขนาดคละของมวลรวมหยาบกรวดแม่น้ำ

ภาพที่ 6 การวิเคราะห์หาขนาดคละของมวลรวมหยาบกรวดแม่น้ำ

การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลรวมละเอียดต้องได้ตามมาตรฐานการทดลอง ใช้เครื่องมือที่มีความละเอียดสูง และควบคุมอุณหภูมิตามที่ระบุไว้ ดังภาพที่ 7ก. และ 7ข. เมื่อได้สัดส่วนการผสมแล้วจึงทำการชั่งตามสัดส่วนดังภาพที่ 8ก. แล้วนำไปผสมโดยใช้โม่ผสมดังภาพที่ 8ข.

ก ข

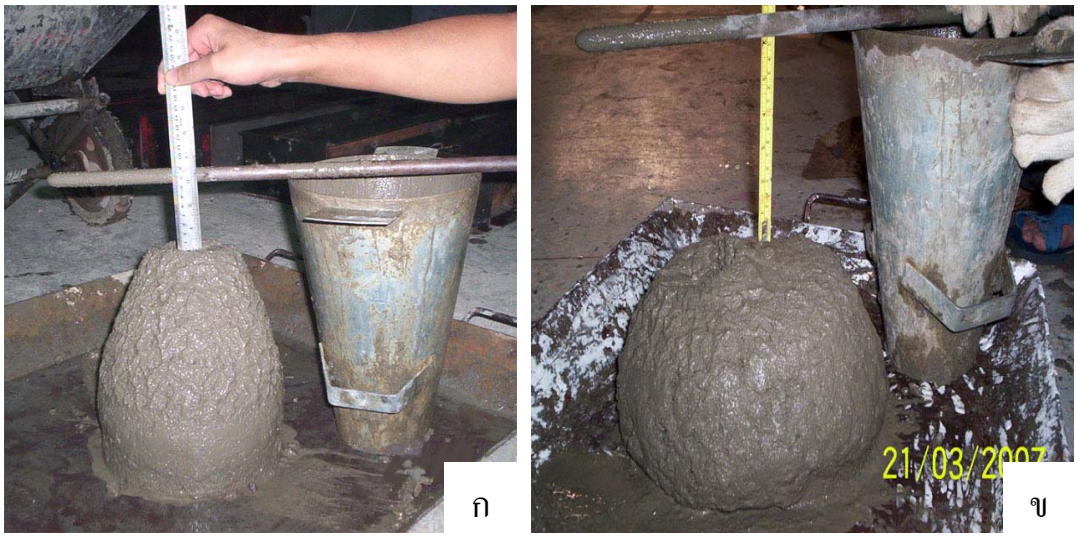
ภาพที่ 7 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของทราย ก. การชั่งน้ำหนักที่ใช้เครื่องชั่งความละเอียดสูง 0.1 กรัม ข. การควบคุมอุณหภูมิขณะทดสอบที่ 20 องศาเซลเซียส



ก ข

ภาพที่ 8 การผสมคอนกรีต ก. การวัดปริมาณน้ำด้วยการชั่ง ข. การผสมคอนกรีตด้วยโม่ผสม

คอนกรีตที่ได้จากการผสมต้องรีบทำการตรวจสอบความสามารถในการเทได้ โดยวัดค่าการยุบตัวดังภาพที่ 9ก. คอนกรีตสดที่ใช้มวลรวมหยาบหินโม่ค่าการยุบตัว 4 – 7 ซม. และ 9ข. คอนกรีตสดที่ใช้มวลรวมหยาบกรวด ค่าการยุบตัว 8 – 12 ซม. มีความสามารถในการเทได้ดี คอนกรีตไม่เกิดการแยกตัว ก่อนนำไปเทลงในแบบหล่อที่เตรียมไว้ ดังภาพที่ 10



ก ข

ภาพที่ 9 การตรวจสอบความสามารถในการเทได้ ก. คอนกรีตสดที่ใช้มวลรวมหยาบหินโม่ ข. คอนกรีตสดที่ใช้มวลรวมหยาบกรวด

ภาพที่ 10 แบบหล่อสี่เหลี่ยมลูกบาศก์และแบบหล่อคานที่ใช้หล่อตัวอย่างคอนกรีต

คอนกรีตสดที่เทลงในแบบหล่อเสร็จแล้วต้องแต่งผิวหน้าให้เรียบดังภาพที่ 11ก. หลังจากคอนกรีตแข็งตัวแล้ว ประมาณ 24 ชั่วโมง จึงทำการแกะแบบหล่อ ทำเครื่องหมายที่แท่งตัวอย่าง ดังภาพที่ 11ข. ก่อนนำไปบ่มในบ่อน้ำดังภาพที่ 12ก. และ 12ข.

ก

ข

ภาพที่ 11 ก. การแต่งผิวคอนกรีตให้เรียบ ข. คอนกรีตที่แกะออกจากแบบหล่อแล้ว

ก

ข

ภาพที่ 12 ก. แท่งตัวอย่างลูกบาศก์ที่บ่มในน้ำ และ ข. แท่งตัวอย่างคานที่นำไปบ่มน้ำ

แท่งตัวอย่างคอนกรีตที่บ่มได้ตามอายุการทดสอบแล้วนำขึ้นมาจากน้ำ วัดขนาด และตำแหน่งที่จะทำการทดสอบ ดังภาพที่ 13ก. และ 13ข. นำแท่งลูกบาศก์ไปทดสอบหากำลังอัดประลัยดังภาพที่ 14ก. จนตัวอย่างเสียหาย ตัวอย่างที่ทดสอบแล้วดังภาพที่ 14ข.

ก

ข

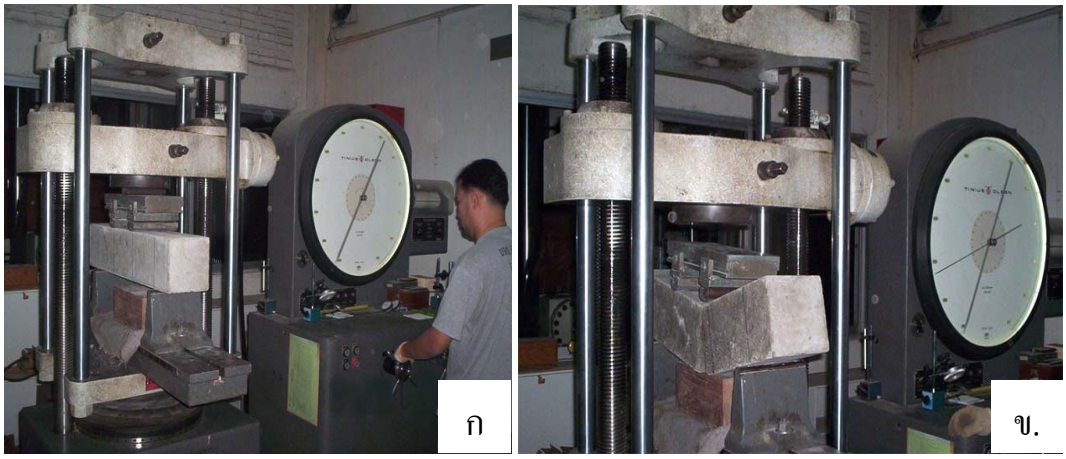
ภาพที่ 13 ก. ตัวอย่างคอนกรีตที่ได้อายุตามกำหนดนำขึ้นจากน้ำและ ข. วัดระยะเตรียมนำไปทดสอบ

ก

ข

ภาพที่ 14 ก. การทดสอบหากำลังอัดประลัยของคอนกรีตแท่งตัวอย่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์
ข. ตัวอย่างที่ทดสอบกำลังอัดประลัยเสร็จแล้ว

การทดสอบหาโมดูลัสแตกร้าวในแท่งตัวอย่างคานคอนกรีตต้องมีการควบคุมการบรรทุกน้ำหนักกระทำสม่ำเสมอตามมาตรฐานการทดสอบ ดังภาพที่ 15ก. จนกว่าแท่งตัวอย่างคานเกิดการแตกหักเสียหายดังภาพที่ 15ข. นำแท่งตัวอย่างไปวัดขนาด ตำแหน่งเสียหายเพื่อคำนวณหาค่าโมดูลัสแตกร้าว แท่งตัวอย่างที่ทดสอบแล้วนำมากองเก็บรอการขนย้ายไปใช้ประโยชน์อื่นๆ ต่อไป ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 15 การทดสอบหาโมดูลัสแตกร้าวขอคอนกรีตแท่งตัวอย่างคาน

ภาพที่ 16 แท่งตัวอย่างคานคอนกรีตที่ทดสอบเสร็จแล้ว

ผลและวิจารณ์

ผล

1. ผลการทดลองคุณสมบัติของมวลรวมละเอียด

ผลการทดลองมวลรวมละเอียดมีขนาดคละอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 33 และ ทล.-ก.201/2544 ค่าความถ่วงจำเพาะ 2.54 ความจุการดูดซึม 1.63 เปอร์เซ็นต์ และค่าโมดูลัสความละเอียด 2.84 มีหน่วยน้ำหนักของมวลรวมละเอียด 1,670 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ผลของการเทียบสีของของเหลวจากการทดลองหาสารอินทรีย์ที่เจือปนมีความเข้มตามแผ่นเทียบสีมาตรฐานเบอร์ 1 และ ความชื้นของมวลรวมละเอียด 1.61 เปอร์เซ็นต์ (ตารางผนวกที่ ก1)

2. ผลการทดลองคุณสมบัติของมวลรวมหยาบ

มีขนาดคละอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 33 และ ทล.- ก.202/2544 หินโม่และกรวดแม่น้ำมีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.70 และ 2.57 ความจุการดูดซึม 1.28 และ 1.15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีหน่วยน้ำหนักของหินโม่และกรวดแม่น้ำ 1,626 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าความต้านทานการสึกกร่อนของหินโม่และกรวดแม่น้ำ 25.69 และ 32.45 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความชื้นหินโม่ และกรวดแม่น้ำเท่ากับ 0.09 และ 0.13 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ(ตารางผนวกที่ ก2 และ ก3)

3. ผลการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

จากการทดลองคุณสมบัติของมวลรวมที่ได้ตามเกณฑ์ข้อกำหนดแล้ว นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาสัดส่วนการผสมคอนกรีตโดยวิธี ACI ได้ปริมาณส่วนผสมของวัสดุต่างๆ ต่อคอนกรีต สด 1 ลูกบาศก์เมตร สำหรับมวลรวมหยาบที่ใช้หินโม่ดังตารางที่ 5 และสำหรับมวลรวมหยาบที่ใช้กรวดแม่น้ำ ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ผลจากการคำนวณสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมด้วยหินโม่

รายการ	จำนวน	หน่วย
1 กำลังอัดประลัยออกแบบที่อายุ 28 วัน (ตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 15 ซม.×15 ซม.×15 ซม.)	325	ksc.
2. ค่าการยุบตัว	30 – 50	มม.
3. ขนาดระบุใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ	3/4	นิ้ว
4. อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์	0.53	-
5. ปริมาณฟองอากาศโดยประมาณ	2.0	%
6. ปริมาณปูนซีเมนต์	350	กก.
7. ปริมาณทราย	795	กก.
8. ปริมาณหินโม่	1001	กก.
9. ปริมาณน้ำ	185	ลิตร

ตารางที่ 6 ผลจากการคำนวณสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมด้วยกรวดแม่น้ำ

รายการ	จำนวน	หน่วย
1 กำลังอัดประลัยออกแบบที่อายุ 28 วัน (ตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 15 ซม.×15 ซม.×15 ซม.)	325	ksc.
2. ค่าการยุบตัว	30 – 50	มม.
3. ขนาดระบุใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ	3/4	นิ้ว
4. อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์	0.53	-
5. ปริมาณฟองอากาศโดยประมาณ	2.0	%
6. ปริมาณปูนซีเมนต์	350	กก.
7. ปริมาณทราย	747	กก.
8. ปริมาณกรวด	1001	กก.
9. ปริมาณน้ำ	185	ลิตร

4. ผลการหล่อคอนกรีตเพื่อเก็บตัวอย่าง

ผลการทดลองหาค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมด้วยมวลรวมหยาบหินโม่และ กรวดมีค่าความยุบตัวอยู่ระหว่าง 4 – 7 และ 8 – 12 เซนติเมตร ตามลำดับ ลักษณะการยุบตัวเป็นแบบ True slump ทั้งหมด มวลรวมไม่มีการแยกตัวออกจากส่วนผสม

5. ผลการทดลอง

5.1 ผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบหินโม่เป็นส่วนผสม ผลการทดสอบหาค่ากำลังอัดประลัยแท่งลูกบาศก์ และโมดูลัสแตกร้าวแท่งคานตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบหินโม่ที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลทดลองจากการผสมคอนกรีตที่ผสมด้วยหินโม่ ชุดที่ 1-3

ตัวอย่างที่	อายุ	กำลังอัดประลัยแท่งลูกบาศก์ (ksc.)			โมดูลัสแตกร้าวแท่งคาน(ksc.)		
	(วัน)	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3
1	1	159	155	131	28	25	20
2	1	163	163	135	29	27	22
3	1	171	165	143	29	28	22
4	3	248	268	264	38	37	34
5	3	248	277	267	39	39	37
6	3	258	282	268	42	41	42
7	7	333	354	332	43	43	44
8	7	333	358	336	46	46	45
9	7	340	368	337	49	48	48
10	14	389	402	372	45	49	46
11	14	389	403	374	48	49	49
12	14	391	406	376	50	51	52
13	28	408	452	428	48	50	51
14	28	412	456	429	49	53	53
15	28	417	471	451	58	58	55

เมื่อนำข้อมูลทั้งหมดมาจัดเรียงตามคู่อันดับของคอนกรีตดังตารางที่ 8 จะได้ข้อมูลสำหรับนำไปวิเคราะห์ และทำการถดถอยเพื่อหาสมการที่เหมาะสมของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับโมดูลัสแตกร้าว

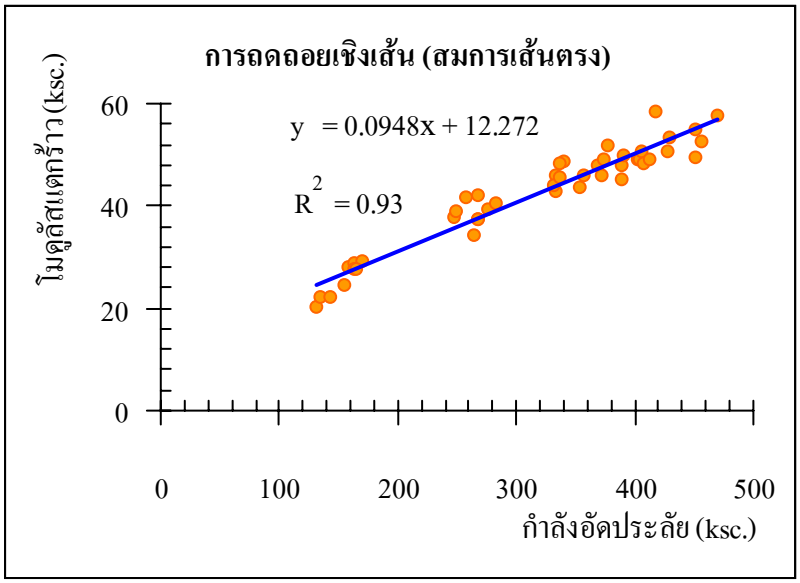
ตารางที่ 8 ค่ากำลังอัดประลัย และโมดูลัสแตกร้าว ของคอนกรีตที่ผสมด้วยหินโม่ทั้ง 3 ชุด

ลำดับที่	อายุ (วัน)	กำลังอัดประลัยแท่งลูกบาศก์ (ksc.)	โมดูลัสแตกร้าวแท่งคาน (ksc.)
1	1	159	28
2	1	163	29
3	1	171	29
4	1	155	25
5	1	163	27
6	1	165	28
7	1	131	20
8	1	135	22
9	1	143	22
10	3	248	38
11	3	248	39
12	3	258	42
13	3	268	37
14	3	277	39
15	3	282	41
16	3	264	34
17	3	267	37
18	3	268	42
19	7	333	43
20	7	333	46
21	7	340	49

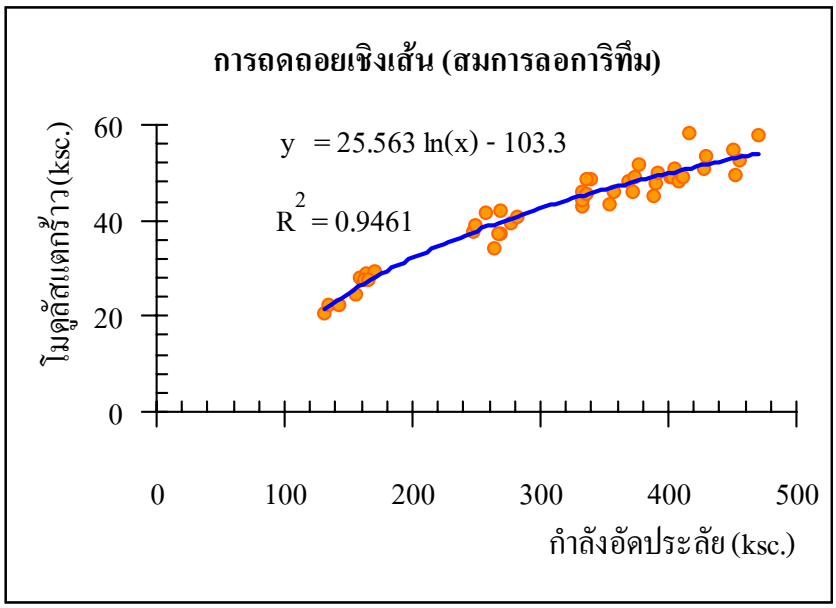
ตารางที่ 8 (ต่อ)

ลำดับที่	อายุ (วัน)	กำลังอัดประลัยแท่งลูกบาศก์ (ksc.)	โมดูลัสแตกร้าวแท่งคาน (ksc.)
22	7	354	43
23	7	358	46
24	7	368	48
25	7	332	44
26	7	336	45
27	7	337	48
28	14	389	45
29	14	389	48
30	14	391	50
31	14	402	49
32	14	403	49
33	14	406	51
34	14	372	46
35	14	374	49
36	14	376	52
37	28	408	48
38	28	412	49
39	28	417	58
40	28	452	50
41	28	456	53
42	28	471	58
43	28	428	51
44	28	429	53
45	28	451	55

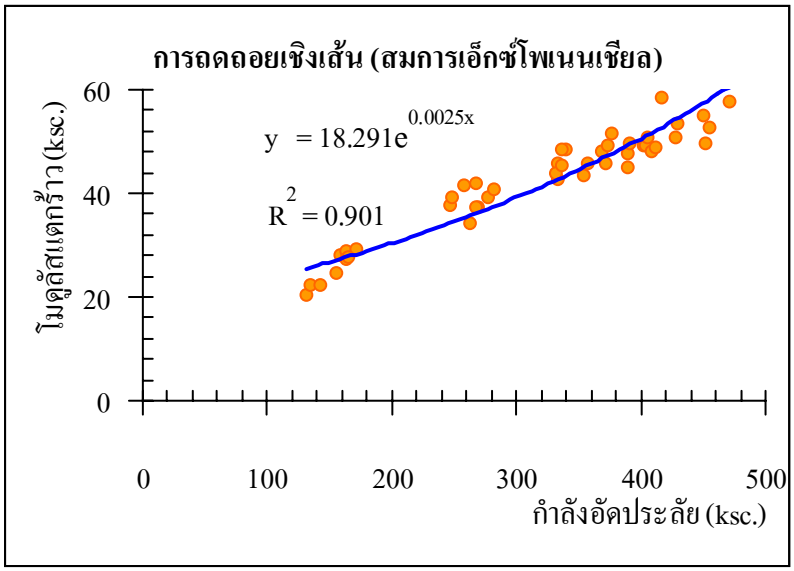
การใช้โปรแกรม Microsoft Excel วิเคราะห์ข้อมูล และหาการถดถอยของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบหินโม่ ในรูปแบบสมการต่างๆ ดัง ภาพที่ 17, 18, 19 และ 20



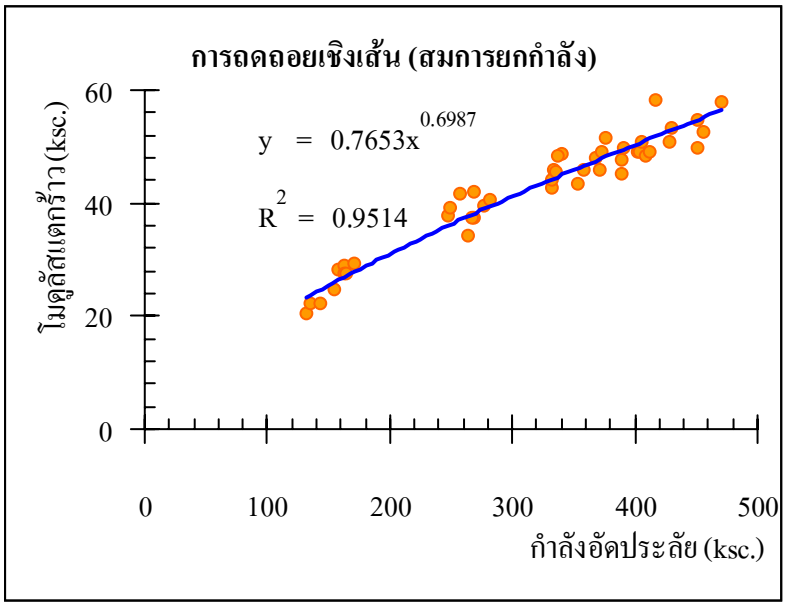
ภาพที่ 17 แสดงผลการถดถอยสมการเชิงเส้น รูปแบบสมการเส้นตรง



ภาพที่ 18 แสดงผลการถดถอยสมการเชิงเส้น รูปแบบสมการลอการิทึม



ภาพที่ 19 แสดงผลการถดถอยสมการเชิงเส้น รูปแบบสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล



ภาพที่ 20 แสดงผลการถดถอยสมการเชิงเส้น รูปแบบสมการยกกำลัง

ผลการประยุกต์การถดถอยสมการเชิงเส้นในรูปแบบที่แสดงในภาพที่ 17, 18, 19 และ 20 จะเห็นได้ว่า รูปแบบของสมการถดถอยที่เหมาะสมสอดคล้องกับข้อมูลการทดสอบคือ รูปแบบของสมการที่มีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R^2) มากที่สุดได้แก่ สมการถดถอยรูปแบบสมการยกกำลัง (power equation) ซึ่ง $R^2 = 0.9514$ นำสมการการถดถอยนี้ไปใช้ประเมินค่าโมดูลัสแตกร้าว (MR) ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบหินโม่ ดังสมการต่อไปนี้

$$y = 0.7653x^{0.6987} \quad (9)$$

จากสมการการถดถอยดังกล่าวจะได้ว่า

$$MR = 0.7653\ F^{0.6987} \quad (10)$$

หรือ $$MR = 0.7653(f_c')^{0.6987} \quad (11)$$

เมื่อ MR = โมดูลัสแตกร้าว มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

F, f_c' = กำลังอัดประลัย มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

เมื่อนำค่าโมดูลัสแตกร้าวที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และค่าโมดูลัสแตกร้าวที่ได้จากการการคำนวณจากสมการที่ใช้มวลรวมหยาบหินโม่ไปหาผลต่างกำลังสองของที่ได้ ดังตารางผนวกที่ ก4 ได้ค่าความเบี่ยงเบนตามอายุคอนกรีตที่1, 3, 7, 14 และ 28 วัน คือ 1.68, 2.65, 2.15, 2.19 และ 3.26 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ จากค่าความเบี่ยงเบนที่ได้แสดงว่าช่วงอายุของคอนกรีตระหว่าง 1 ถึง 14 วัน ผลต่างที่ได้จากการทดสอบ กับค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับโมดูลัสแตกร้าวนั้นผลที่ได้มีความใกล้เคียงกันและมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

5.2 ผลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบหินโม่เป็นส่วนผสม ผลการทดสอบหาค่ากำลังอัดประลัยแท่งลูกบาศก์ และโมดูลัสแตกร้าวแท่งคานตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบกรวดที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลทดลองจากการผสมคอนกรีตที่ผสมด้วยกรวด ชุดที่ 1-3

ตัวอย่างที่	อายุ	กำลังอัดประลัยแท่งลูกบาศก์ (ksc.)			โมดูลัสแตกร้าวแท่ง คาน(ksc.)		
	(วัน)	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3
1	1	167	159	158	19	24	24
2	1	170	160	158	22	25	25
3	1	170	164	164	25	26	25
4	3	245	257	241	35	36	34
5	3	261	268	248	36	36	35
6	3	281	271	258	36	37	36
7	7	298	326	314	42	41	39
8	7	317	326	314	42	41	45
9	7	342	329	320	44	42	46
10	14	334	352	340	45	42	45
11	14	367	356	363	47	44	46
12	14	383	368	366	47	48	47
13	28	402	399	400	45	47	45
14	28	409	400	406	47	50	50
15	28	413	408	422	53	51	51

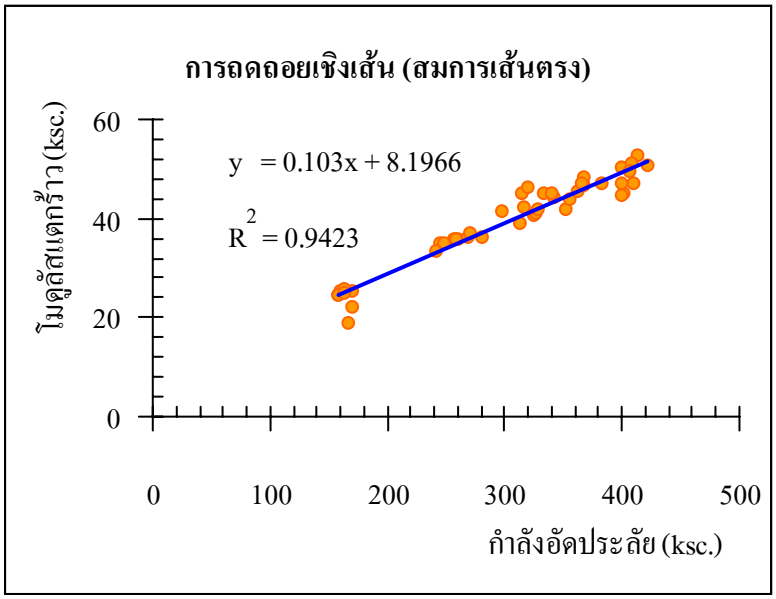
เมื่อนำข้อมูลทั้งหมดมาจัดเรียงตามคู่อันดับของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบกรวด ดังตารางที่ 10 จะได้ข้อมูลสำหรับนำไปวิเคราะห์ และทำการถดถอยเพื่อหาสมการที่เหมาะสมของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับโมดูลัสแตกร้าว

ตารางที่ 10 ค่ากำลังอัดประลัย และโมดูลัสแตกร้าว ของคอนกรีตที่ผสมด้วยกรวดทั้ง 3 ชุด

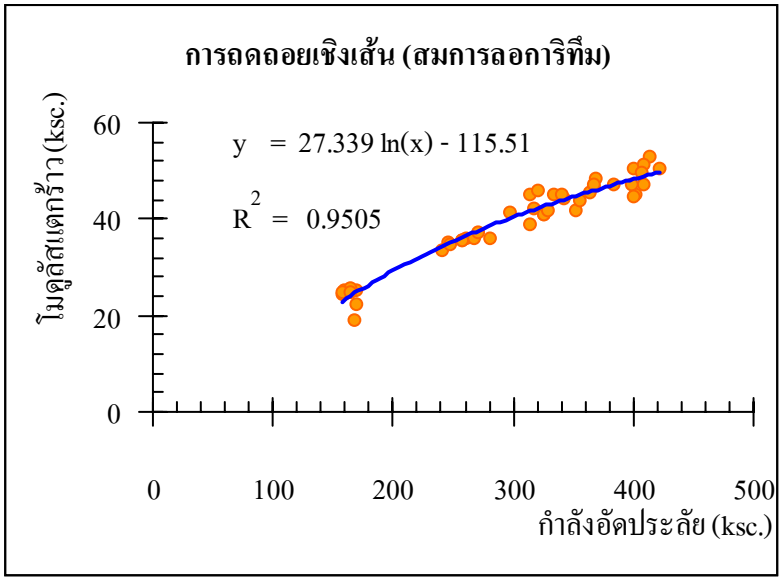
ลำดับที่	อายุ (วัน)	กำลังอัดประลัยแท่งลูกบาศก์ (ksc.)	โมดูลัสแตกร้าวแท่งคาน (ksc.)
1	1	167	19
2	1	170	22
3	1	170	25
4	1	159	24
5	1	160	25
6	1	164	26
7	1	158	24
8	1	158	25
9	1	164	25
10	3	245	35
11	3	261	36
12	3	281	36
13	3	257	36
14	3	268	36
15	3	271	37
16	3	241	34
17	3	248	35
18	3	258	36
19	7	298	42
20	7	317	42
21	7	342	44
22	7	326	41
23	7	326	41
24	7	329	42
25	7	314	39

ตารางที่ 10 (ต่อ)

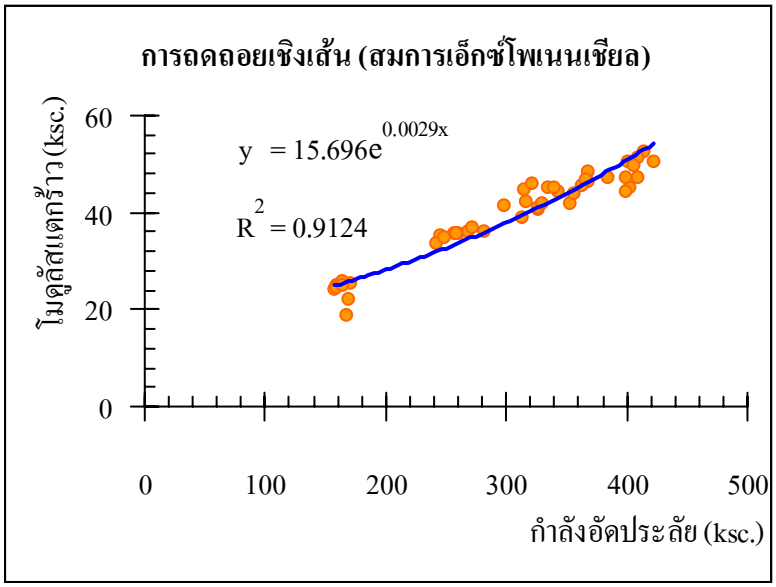
ลำดับที่	อายุ (วัน)	กำลังอัดประลัยแท่งลูกบาศก์ (ksc.)	โมดูลัสแตกร้าวแท่งคาน (ksc.)
26	7	314	45
27	7	320	46
28	14	334	45
29	14	367	47
30	14	383	47
31	14	352	42
32	14	356	44
33	14	368	48
34	14	340	45
35	14	363	46
36	14	366	47
37	28	402	45
38	28	409	47
39	28	413	53
40	28	399	47
41	28	400	50
42	28	408	51
43	28	400	45
44	28	406	50
45	28	422	51



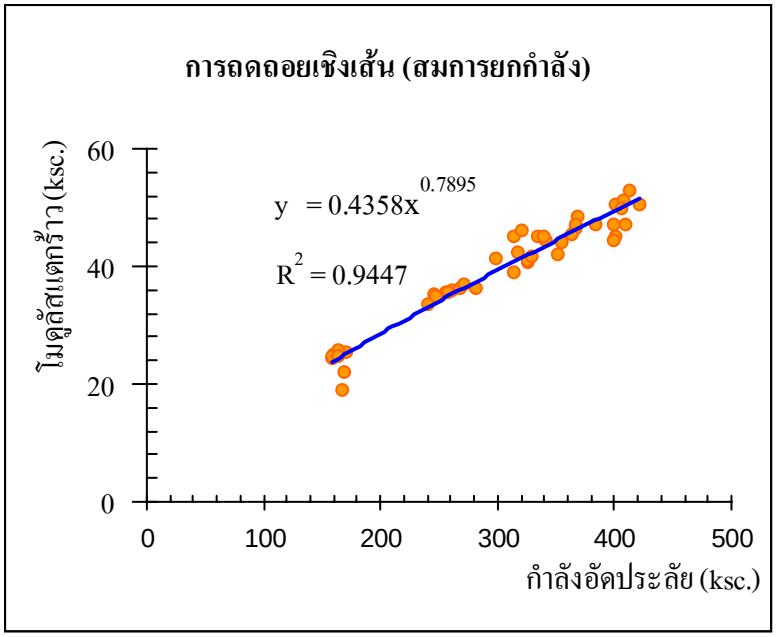
ภาพที่ 21 แสดงผลการถดถอยสมการเชิงเส้น รูปแบบสมการเส้นตรง



ภาพที่ 22 แสดงผลการถดถอยสมการเชิงเส้น รูปแบบสมการลอการิทึม



ภาพที่ 23 แสดงผลการถดถอยสมการเชิงเส้น รูปแบบสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล



ภาพที่ 24 แสดงผลการถดถอยสมการเชิงเส้น รูปแบบสมการยกกำลัง

ผลการประยุกต์การถดถอยสมการเชิงเส้นในรูปแบบที่แสดงในภาพที่ 21, 22, 23 และ 24 จะเห็นได้ว่า รูปแบบของสมการถดถอยที่เหมาะสมสอดคล้องกับข้อมูลการทดสอบคือ รูปแบบของสมการที่มีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R^2) มากที่สุดได้แก่ สมการถดถอยรูปแบบสมการลอการิทึม (logarithm equation) ซึ่ง $R^2 = 0.9505$ นำสมการการถดถอยนี้ไปใช้ประเมินค่าโมดูลัสแตกร้าว (MR) ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบกรวด ดังสมการต่อไปนี้

$$y = 27.339 \ln(x) - 115.51 \quad (12)$$

จากสมการการถดถอยดังกล่าวจะได้ว่า

$$MR = 27.339\ln(F) - 115.51 \quad (13)$$

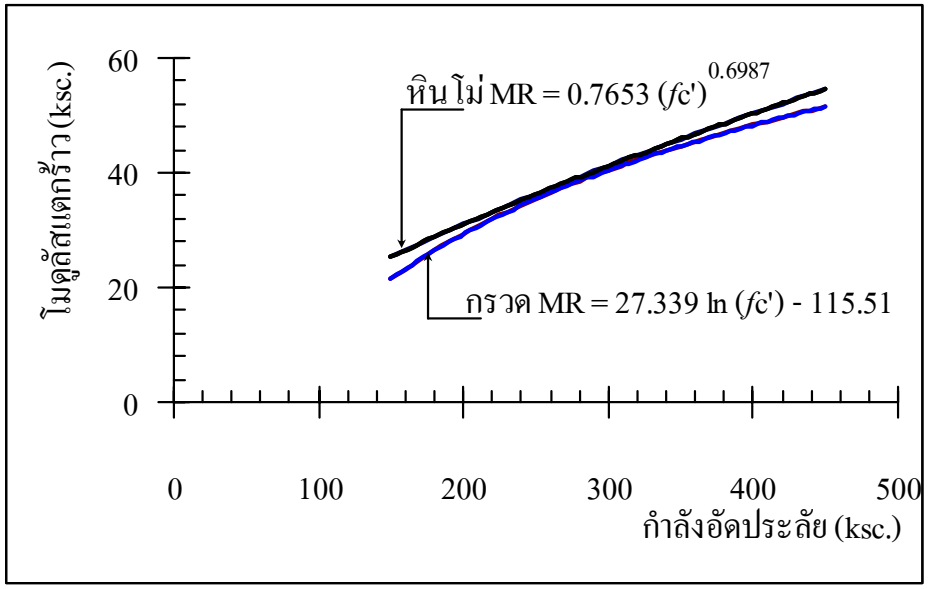
$$MR = 27.339 \ln(f_c') - 115.51 \quad (14)$$

เมื่อ MR = โมดูลัสแตกร้าว มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

F, f_c' = กำลังอัดประลัย มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

เมื่อนำค่าโมดูลัสแตกร้าวที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และค่าโมดูลัสแตกร้าวที่ได้จากการการคำนวณจากสมการที่ใช้มวลรวมหยาบกรวดแม่น้ำไปหาผลต่างกำลังสองของที่ได้ ดังตารางผนวกที่ ก5 ได้ค่าความเบี่ยงเบนตามอายุคอนกรีตที่1, 3, 7, 14 และ 28 วัน คือ 2.47, 1.06, 2.17, 1.58 และ 2.45 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ จากค่าความเบี่ยงเบนที่ได้แสดงว่าช่วงอายุของคอนกรีตระหว่าง 1 ถึง 28 วัน ผลต่างที่ได้จากการทดสอบ กับค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับโมดูลัสแตกร้าวนั้นผลที่ได้มีความใกล้เคียงกัน

5.3 เมื่อนำสมการถดถอยที่ได้จากความสัมพันธ์ดังกล่าว ที่ใช้มวลรวมหยาบหินโม่ และมวลรวมหยาบกรวด มาคำนวณโดยแทนค่ากำลังอัดประลัย ในช่วงระหว่าง 150 – 450 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร นำค่าที่ได้ไปเขียนแผนภูมิจะได้ดังภาพที่ 25 จะเห็นได้ว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบหินโม่ จะให้ค่าโมดูลัสแตกร้าวสูงกว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบกรวดแม่น้ำ



ภาพที่ 25 แสดงเส้นความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังประลัย กับโมดูลัสแตกร้าว จากสมการการถดถอยของคอนกรีต ที่ใช้มวลรวมหยาบหินโม่ และที่ใช้มวลรวมหยาบกรวด

วิจารณ์

จากการทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมที่ใช้สำหรับผสมคอนกรีตเพื่อเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบหาค่ากำลังอัดประลัย(f_c') ของแท่งตัวอย่างรูปลูกบาศก์ และโมดูลัสแตกร้าว (MR) ของแท่งตัวอย่างคานคอนกรีตที่ผสมด้วยหินโม่ และผสมด้วยกรวด โดยหินโม่เป็นหินปูน และกรวดเป็นกรวดแม่น้ำที่ใช้ขนาดโตสุด 3/4 นิ้ว มีคุณสมบัติตามมาตรฐานที่กรมทางหลวงกำหนดสำหรับวัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีต การออกแบบส่วนผสมจะใช้วิธีของ ACI มาตรฐานของกรมทางหลวงกำหนดให้กำลังอัดประลัยต้องไม่น้อยกว่า 325 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และโมดูลัสแตกร้าว (MR) ต้องไม่น้อยกว่า 42 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

1. ผลจากการทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุ

ขนาดคละมวลรวมละเอียดมีขนาดคละผ่านเกณฑ์มาตรฐาน(ตารางผนวกที่ ก1) มวลรวมหยาบหินโม่ มีขนาดคละผ่านเกณฑ์มาตรฐาน(ตารางผนวกที่ ก2) ส่วนกรวดตามธรรมชาติมีก้อนใหญ่ปะปนอยู่มากจึงทำการร่อนเอาขนาดที่ใหญ่กว่าออกคัดขนาดจนได้ขนาดคละตามมาตรฐาน

กำหนด(ตารางผนวกที่ ก3) และจัดเก็บในถุงกระสอบพลาสติกเพื่อควบคุมความชื้นให้คงที่ ก่อนนำไปใช้

2. ผลการออกแบบสัดส่วนการผสมโดย ACI

ตามข้อกำหนดของ ACI จะออกแบบกำลังอัดประลัยของแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอกมาตรฐาน ขนาด Ø 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร จึงต้องมีการปรับเทียบค่ากำลังอัดประลัยให้เท่ากับแท่งตัวอย่างรูปลูกบาศก์(ภาพผนวกที่ ก1)ที่กรมทางหลวงกำหนดไว้ 325 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งได้ค่ากำลังอัดประลัยที่ออกแบบประมาณ 275 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ของแท่งตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน ผลการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตที่ได้ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (ตราช้าง) น้ำหนัก 316 กิโลกรัมต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตรจึงปรับให้เป็น 350 กิโลกรัม ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง

ลักษณะของคอนกรีตที่ผสมตามสัดส่วนที่ผสมด้วยเครื่องผสมแบบ DRUM MIXER คอนกรีตที่ผสมด้วยหินโม่มีลักษณะส่วนผสมเข้ากันดีมีค่าการยุบตัว 4-7 เซนติเมตร ส่วนคอนกรีตที่ใช้กรวดเป็นมวลรวมหยาบมีลักษณะส่วนผสมเข้ากันดี แต่มีค่าการยุบตัวค่อนข้างมาก 8-12 เซนติเมตร ที่เป็นเช่นนี้เพราะกรวดมีลักษณะกลมมน จึงทำให้มีความสามารถในการเทได้สูงกว่าหินโม่ จากการสังเกตและทดสอบถือได้ว่าคอนกรีตมีความข้นเหลวที่ดี

3. ผลจากการทดสอบกำลังอัดประลัย

ค่ากำลังอัดประลัยเฉลี่ยของแท่งตัวอย่างรูปลูกบาศก์ที่อายุ 28 วันสำหรับหินโม่เท่ากับ 435.84 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากที่ออกแบบไว้ 325 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มากกว่า 110.84 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นผลมาจากการที่ต้องเพิ่มปริมาณปูซีเมนต์ให้ได้ไม่น้อยกว่า 350 กิโลกรัมต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตร เท่ากับที่กรมทางหลวงกำหนดไว้ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.53 ซึ่งมีผลโดยตรงต่อกำลังอัดประลัย ทำให้กำลังอัดประลัยที่ได้สูงกว่าที่กำหนดไว้มาก เช่นเดียวกับที่ใช้กรวดเป็นมวลรวมหยาบ ได้ค่ากำลังอัดประลัยเฉลี่ย 406.61 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรมากกว่า 81.61 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่ก็ถือว่าเป็นผลในทางบวก

4. ผลจากการทดสอบโมดูลัสแตกร้าว

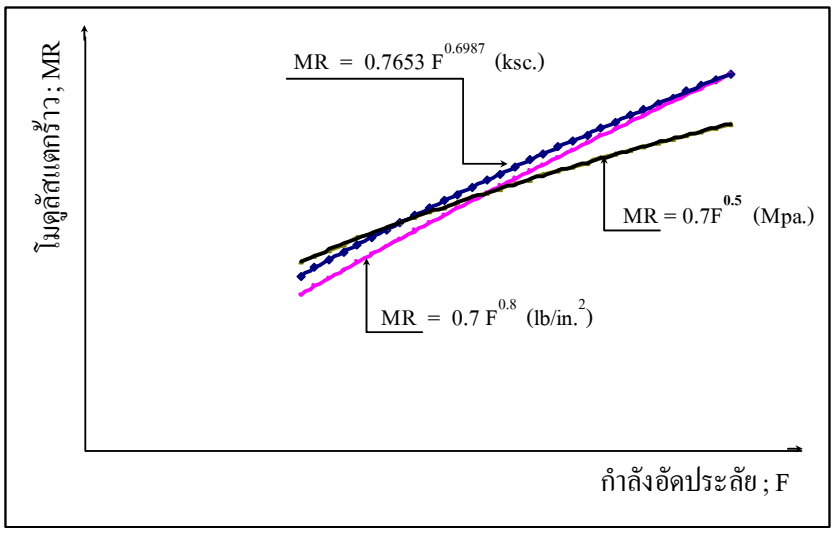
กรมทางหลวงกำหนดให้คอนกรีตมีค่าโมดูลัสแตกร้าวไม่น้อยกว่า 42 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน ผลการทดสอบค่าโมดูลัสแตกร้าวเฉลี่ยคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบหินโม่ 52.71 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรและ คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบกรวด 48.74 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าที่ได้สูงกว่าที่กำหนดไว้ ซึ่งสอดคล้องกับค่ากำลังอัดประลัยที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

5. ผลจากการหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับโมดูลัสแตกร้าว

จากการเขียนแผนภาพการกระจายของข้อมูลทั้งหมดโดยให้กำลังอัดประลัยเป็นตัวแปรอิสระ โมดูลัสแตกร้าวเป็นตัวแปรตาม ลักษณะการกระจายของข้อมูลผลทดสอบคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบหินโม่และใช้มวลรวมหยาบกรวด ตัวแปรมีสหสัมพันธ์ในทางตามกันเมื่อวัดด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ของ Pearson ; r เท่ากับ 0.9644 และ 0.9707 ตามลำดับ ค่าที่ได้เข้าใกล้ 1 แสดงว่าตัวแปรดังกล่าวมีสัมพันธ์กันค่อนข้าสูงในทางตามกัน ความสัมพันธ์จะอยู่ในช่วงของกำลังอัดประลัยตั้งแต่ 150 – 450 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากการเปรียบเทียบค่าทางสถิติข้อมูลของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบหินโม่ข้อมูลมีลักษณะไม่เชิงเส้น เป็นรูปแบบของสมการกำลัง(Power equation) จึงได้ทำการประยุกต์การถดถอยแบบเชิงเส้นได้ความสัมพันธ์ดังสมการ $y = 0.7653x^{0.6987}$ และคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบกรวด ข้อมูลมีลักษณะไม่เชิงเส้น เป็นรูปแบบของสมการลอการิทึม (Logarithm equation) ทำการประยุกต์การถดถอยแบบเชิงเส้นได้ความสัมพันธ์ดังสมการ $y = 27.339\ln(x)-115.51$ ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R^2) เท่ากับ 0.9514 และ 0.9505 ตามลำดับ แสดงว่ารูปแบบการถดถอยกับลักษณะของข้อมูลทดสอบดังกล่าวมีความเหมาะสมค่อนข้างสูง ค่าความเบี่ยงเบนของผลต่างกำลังสองของโมดูลัสแตกร้าวที่ได้จากการทดสอบ กับ ที่ได้จากการคำนวณจากสมการความสัมพันธ์ดังกล่าว พิจารณา ตามอายุคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบหินโม่ และมวลรวมหยาบที่ใช้กรวด 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน คือ 1.68, 2.65, 2.15, 2.19, 3.26 และ 2.47, 1.06, 2.17, 1.58, 2.45 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ (ดังตารางผนวกที่ ก4 และ ก5) แสดงว่าผลการคำนวณจากสมการของมวลรวมหยาบที่ใช้กรวด จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลทดสอบดีกว่ามวลรวมหยาบที่ใช้หินโม่

6. เปรียบเทียบผลที่ได้กับงานวิจัยที่ผ่านมาของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบหินโม่

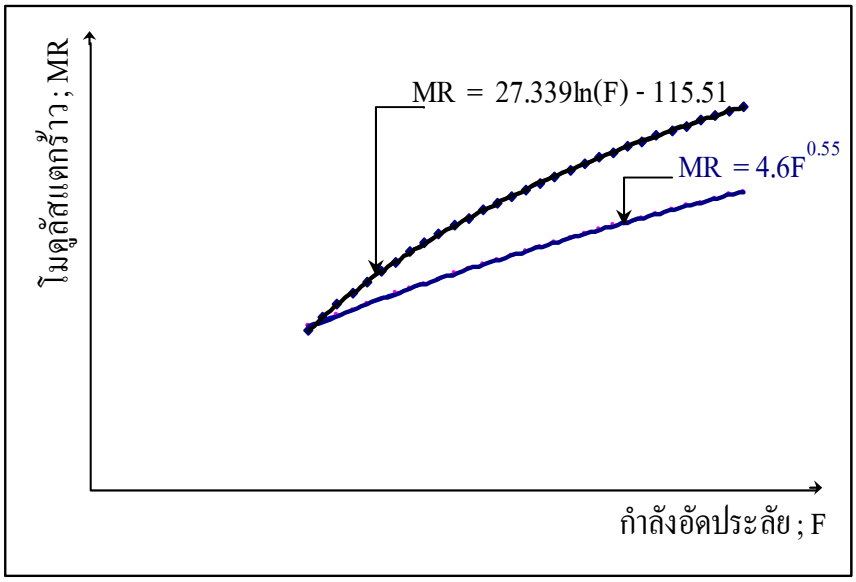
มวลรวมหยาบที่ใช้หินโม่ซึ่งเป็นหินปูนมีลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับโมดูลัสแตกร้าวเป็นรูปแบบสมการกำลัง(Power equation) เช่นเดียวกับผลการวิจัยของ Road Research Laboratory (1955) ที่ใช้มวลรวมหยาบ Crushed Limestone ได้ความสัมพันธ์ดังสมการ $MR = 0.7\ F^{0.8}$ มีหน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว จากสมการทั้งสองจะให้ค่าโมดูลัสแตกร้าวต่างกันที่ค่ากำลังอัดประลัยน้อย แต่จะใกล้เคียงกันเมื่อมีค่ากำลังอัดประลัยสูงๆ และสมการ $MR = 0.7F^{0.5}$ มีหน่วยเป็นเมกะพาสคาล (วัชรินทร์, 2537) ให้ผลของค่าโมดูลัสแตกร้าวที่ต่างกัน ดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้นทั้งสามสมการ

7. เปรียบเทียบผลที่ได้กับงานวิจัยที่ผ่านมาของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบกรวด

สำหรับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบกรวดเป็นส่วนผสมซึ่งเป็นกรวดแม่น้ำมีลักษณะความสัมพันธ์เป็นแบบสมการลอการิทึม (Logarithm equation) ต่างจากผลการวิจัยของ Road Research Laboratory (1955) ที่มีลักษณะความสัมพันธ์เป็นแบบสมการกำลัง (Power equation) ดังสมการ $MR = 4.6\ F^{0.55}$ ซึ่งใช้มวลรวมหยาบ Rounded Beach Gravel ความแตกต่างของความสัมพันธ์ดังกล่าวให้ผลของค่าโมดูลัสแตกร้าวที่ต่างกันเมื่อมีกำลังอัดประลัยเพิ่มขึ้น โดยผลการวิจัยของ Road Research Laboratory (1955) จะให้ค่าโมดูลัสแตกร้าวที่ต่ำกว่าผลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ อย่างมีนัยสำคัญ ดังภาพที่ 27 ทั้งนี้อาจเป็นผลจากแหล่งของมวลรวมหยาบที่ใช้อาจมีความแตกต่างทางด้าน รูปร่าง ผิว และขนาดคละเนื่องจากเป็นวัสดุตามธรรมชาติ



ภาพที่ 27 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้นทั้งสอง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับโมดูลัสแตกร้าวสำหรับงานผิวทางคอนกรีตโดยการเตรียมตัวอย่างในห้องทดลองปฏิบัติการคอนกรีต เพื่อทดสอบหาความสัมพันธ์ดังกล่าวจากคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบหินโม่ซึ่งเป็นหินปูน และคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบกรวดซึ่งเป็นกรวดแม่น้ำที่มีขนาดโตสุด 3/4 นิ้ว คุณสมบัติวัสดุตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง จากการหล่อตัวอย่างรูปลูกบาศก์ขนาด กว้าง15 ซม. ยาว15 ซม. สูง 15 ซม. เพื่อทดสอบหากำลังอัดประลัย และตัวอย่างคานขนาด กว้าง 15 ซม. ลึก15 ซม.ยาว 76 ซม. เพื่อทดสอบหาโมดูลัสแตกร้าว

1.1 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบหินโม่มีลักษณะความสัมพันธ์อยู่ในรูปของสมการกำลัง(Power equation) จากการหาการถดถอยแบบเชิงเส้นดังสมการ (1)

$$MR = 0.7653\,(f_c')^{0.6987} \qquad (1)$$

1.2 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบกรวดมีลักษณะความสัมพันธ์อยู่ในรูปของสมการลอการิทึม (Logarithm equation) จากการหาการถดถอยแบบเชิงเส้นดังสมการ (2)

$$MR = 27.339\ln(f_c')\text{-}115.51 \qquad (2)$$

เมื่อ MR = โมดูลัสแตกร้าว มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

f_c' = กำลังอัดประลัย มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

2. จากการทดสอบหาความสัมพันธ์ดังกล่าวที่กำหนดคุณสมบัติของวัสดุเพื่อนำไปใช้สำหรับงานผิวทางคอนกรีตภายใต้มาตรฐานต่างๆ ของกรมทางหลวง ผลที่ได้จึงเหมาะที่จะนำไปใช้สำหรับการประเมินค่าโมดูลัสแตกร้าวของคานคอนกรีตจากการทดสอบกำลังอัดประลัยของแท่งตัวอย่างทดสอบลูกบาศก์ขนาด กว้าง15 ซม. ยาว15 ซม. สูง 15 ซม. ที่มีกำลังอัดประลัยระหว่าง 150 – 450 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งจะทำให้ลดความยุ่งยากในการเก็บแท่งคานตัวอย่างขนาด กว้าง 15

ซม. ลึก15 ซม.ยาว 60 ซม. ที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก ค่าใช้จ่ายในการทดสอบสูงกว่าแท่งตัวอย่างทดสอบลูกบาศก์ 5-10 เท่า อีกทั้งลดค่าใช้จ่ายด้านแรงงาน การขนส่งได้ด้วย

ข้อเสนอแนะ

1. ปัญหาในการทดสอบครั้งนี้คือจำนวนแบบหล่อคานตามขนาดที่กรมทางหลวงกำหนด เนื่องจากต้องใช้แบบหล่อในแต่ละชุดจำนวนมาก จึงได้เลือกใช้แบบหล่อเดิมที่มีอยู่แล้วคือขนาดกว้าง 15 ซม. ลึก15 ซม.ยาว 76 ซม.ซึ่งมีความยาวมากกว่าที่กำหนด ทดสอบโดยใช้ระยะช่วงตามมาตรฐานการทดสอบ และได้ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างทางทฤษฎีแล้วมีค่าน้อยมากจึงถือได้ว่าไม่มีผลต่อการทดสอบในครั้งนี้

2. การศึกษาในครั้งนี้ใช้ขนาดหินที่มีขนาดโตสุด 3/4 นิ้ว ควรมีการศึกษาความสัมพันธ์ดังกล่าวที่หินขนาดโตสุด 1 นิ้ว ว่ามีผลแตกต่างกันหรือไม่

3. ควรมีการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตที่มีอายุอยู่ระหว่าง 1 ถึง 28 วัน โดยเพิ่มจำนวนวันที่ต้องการตรวจสอบคุณสมบัติของคอนกรีต และตัวอย่างให้มากกว่านี้ โดยหาสมการการถดถอยในแต่ละวัน เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ที่ถูกต้องมากขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

จิรพัฒน์ โชติกไกร. 2546. **การออกแบบทาง**. พิมพ์ครั้งที่ 3. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. 2537. พิมพ์ครั้งที่ 3. **คอนกรีตเทคโนโลยี**. บริษัทผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด, กรุงเทพฯ.

ณัฐสม สงวนวงษ์. 2546ก. **การวิเคราะห์และวิจัยพฤติกรรมคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก เพื่อนำมาใช้งานถนนคอนกรีต**. สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง, กรมทางหลวง.

ณัฐสม สงวนวงษ์. 2546ข. **ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural Strength ของแท่งคอนกรีตขนาดมาตรฐานและแท่งคอนกรีตขนาดย่อส่วน**. สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง, กรมทางหลวง.

บรรจบ อรชร. ม.ป.ป. **กลศาสตร์ของแข็ง.** ศูนย์หนังสือสื่อเสริมกรุงเทพ, กรุงเทพฯ.

บริษัทผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด. 2541. **คู่มือการทดสอบหิน ทราย และคอนกรีต**. บริษัทผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด, กรุงเทพฯ.

บุญฤทธิ์ วิระสันติ. ม.ป.ป. **คอนกรีตเทคโนโลยี**. สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคพายัพ, เชียงใหม่. (อัดสำเนา)

วัชรินทร์ วิทยกุล. 2537. **วัสดุการทาง.** หจก ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, กรุงเทพฯ.

สุทธิพงศ์ ศรีการมณ์. 2539. **ทฤษฎีและตัวอย่างโจทย์ สถิตยศาสตร์และกลศาสตร์ของวัสดุ.** แมคกรอ-ฮิล อินเตอร์เนชั่นแนล เอ็นเตอร์ไพร์ส อิงค์, แปลจาก John J. Jackson and Harold G. Wirtz. **Theory and Problems of Elementary Statics and Strength of Materials.** McGraw-Hill, Inc., New York.

Portland Cement Association. 1955. **Concrete Pavement Manual**. 5th Edition. Portland Cement Association, Illinois U.S.A.

Ruenkrairergsa, T. 1987. **Design of Some Concrete Road in Thailand.** Materials & Research Division, Department of Highways.

Ruenkrairergsa, T., S. Nguansomarng and W. Kasiraksa. 1982. **Investigation of the Bearing Values of the Existing Concrete Pavement of the Bangkok International Airport.** Materials & Research Division, Department of Highways.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ผลการคำนวณและอื่นๆ

ตารางผนวกที่ ก1 ผลการทดสอบคุณสมบัติ และเกณฑ์มาตรฐานสำหรับมวลรวม ละเอียด

ขนาดตะแกรง	ร้อยละที่ค้าง	ร้อยละสะสมที่ค้าง	ร้อยละที่ผ่าน	ร้อยละที่ผ่าน (ทล.- ก.201/2544)
3/8”	0.00	0.00	0.00	100
No. 4	0.70	0.70	99.30	95 - 100
No. 8	8.71	9.41	90.59	-
No. 16	20.55	29.96	70.04	45 - 85
No. 30	28.43	58.39	41.61	-
No. 50	28.85	87.24	12.76	5 - 30
No. 100	10.67	97.91	2.09	0 - 10
PAN	2.09	100.00	0.00	
Total	100.00			

ความถ่วงจำเพาะ(OD) = 2.54

ความจุการดูดซึม = 1.63 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้น = 1.61 เปอร์เซ็นต์

FM = 2.84

ปริมาณสารอินทรีย์เจือปนตามแผ่นเทียบสีมาตรฐานเบอร์ 1

ตารางผนวกที่ ก2 ผลการทดสอบคุณสมบัติ และเกณฑ์มาตรฐานสำหรับมวลรวมหยาบหินโม่

ขนาดตะแกรง	ร้อยละที่ค้าง	ร้อยละสะสมที่ค้าง	ร้อยละที่ผ่าน	ร้อยละที่ผ่าน (ทล.- ก.202/2544)
1 1/2”	0.00	0.00	100.00	100
1”	0.00	0.00	100.00	95 - 100
3/4”	6.03	6.03	93.97	-
1/2”	34.29	40.32	59.68	25 - 60
3/8”	32.80	73.12	26.88	-
No. 4	19.09	92.20	7.80	0 - 10
No. 8	4.99	97.19	2.81	0 - 5
PAN	2.81	100.00	0.00	
Total	100.00			

ความถ่วงจำเพาะ(OD) = 2.70
ความจุการดูดซึม = 1.28 เปอร์เซ็นต์
ปริมาณความชื้น = 0.09 เปอร์เซ็นต์
ขนาดโตสุด = 3/4 นิ้ว
หน่วยน้ำหนักแห้งแน่น = 1,626 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
การสึกกร่อน = 25.69 เปอร์เซ็นต์

ตารางผนวกที่ ก3 ผลการทดสอบคุณสมบัติ และเกณฑ์มาตรฐานสำหรับมวลรวมหยาบกรวดแม่น้ำ

ขนาดตะแกรง	ร้อยละที่ค้าง	ร้อยละสะสมที่ค้าง	ร้อยละที่ผ่าน	ร้อยละที่ผ่าน (ทล.- ก.202/2544)
1 1/2”	0.00	0.00	100.00	100
1”	0.00	0.00	100.00	95 - 100
3/4”	9.69	9.69	90.31	-
1/2”	32.78	42.47	57.53	25 - 60
3/8”	28.25	70.72	29.28	-
No. 4	29.28	100.00	0.00	0 - 10
No. 8	0.00	100.00	0.00	0 - 5
PAN	0.00	100.00	0.00	
Total	100.00			

ความถ่วงจำเพาะ(OD) = 2.57
ความจุการดูดซึม = 1.15 เปอร์เซ็นต์
ปริมาณความชื้น = 0.13 เปอร์เซ็นต์
ขนาดโตสุด = 3/4 นิ้ว
หน่วยน้ำหนักแห้งแน่น = 1,626 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
การสึกกร่อน = 32.45 เปอร์เซ็นต์

ตารางผนวกที่ ก4 ตารางการคำนวณค่าความเบี่ยงเบนตามอายุคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบหินโม่

ลำดับที่	อายุ (วัน)	MRทดสอบ (ksc.)	MRคำนวณ (ksc.)	ผลต่างกำลังสอง	ค่าความเบี่ยงเบน (ksc.)
1	1	28	26	3.15	
2	1	29	27	4.08	
3	1	29	28	1.89	
4	1	25	26	1.63	
5	1	27	27	0.39	
6	1	28	27	0.15	
7	1	20	23	7.30	
8	1	22	24	1.95	
9	1	22	24	4.76	1.68
10	3	38	36	2.96	
11	3	39	36	8.91	
12	3	42	37	21.33	
13	3	37	38	0.49	
14	3	39	39	0.25	
15	3	41	39	1.43	
16	3	34	38	12.35	
17	3	37	38	0.33	
18	3	42	38	15.27	2.65
19	7	43	44	2.32	
20	7	46	44	2.58	
21	7	49	45	13.37	
22	7	43	46	7.47	
23	7	46	47	0.46	
24	7	48	48	0.23	
25	7	44	44	0.02	
26	7	45	45	0.75	
27	7	48	45	14.33	2.15

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

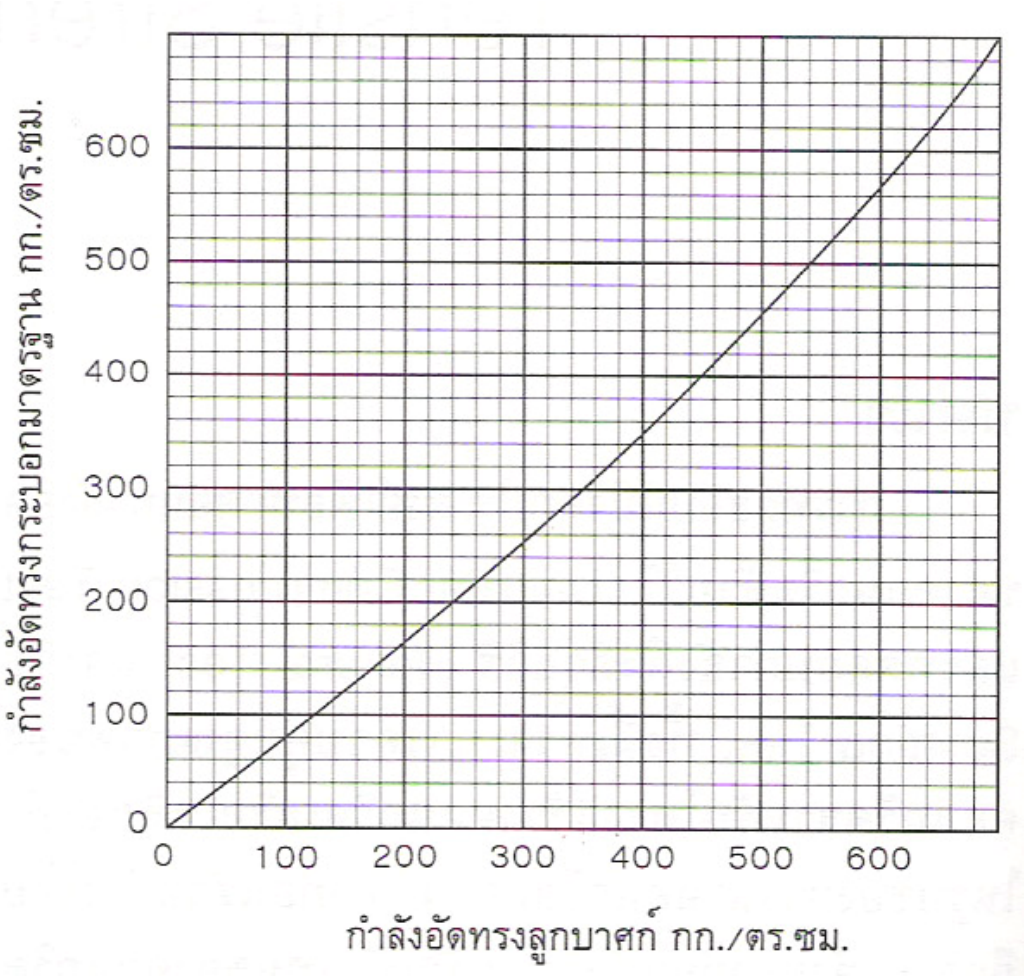
ลำดับที่	อายุ (วัน)	MRทดสอบ (ksc.)	MRคำนวณ (ksc.)	ผลต่างกำลังสอง	ค่าความเบี่ยงเบน (ksc.)
28	14	45	49	18.75	
29	14	48	49	2.78	
30	14	50	50	0.04	
31	14	49	51	2.23	
32	14	49	51	2.12	
33	14	51	51	0.00	
34	14	46	48	3.85	
35	14	49	48	1.43	
36	14	52	48	11.84	2.19
37	28	48	51	8.22	
38	28	49	51	5.98	
39	28	58	52	42.28	
40	28	50	55	26.73	
41	28	53	55	6.22	
42	28	58	56	1.84	
43	28	51	53	4.13	
44	28	53	53	0.21	
45	28	55	55	0.02	3.26

ตารางผนวกที่ ก5 ตารางการคำนวณค่าความเบี่ยงเบนตามอายุคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบกรวดแม่น้ำ

ลำดับที่	อายุ (วัน)	MRทดสอบ (ksc.)	MRคำนวณ (ksc.)	ผลต่างกำลังสอง	ค่าความเบี่ยงเบน (ksc.)
1	1	19	24	29.52	
2	1	22	25	7.23	
3	1	25	25	0.13	
4	1	24	23	1.96	
5	1	25	23	4.03	
6	1	26	24	3.32	
7	1	24	23	2.44	
8	1	25	23	3.09	
9	1	25	24	1.01	2.42
10	3	35	35	0.11	
11	3	36	37	0.55	
12	3	36	39	6.06	
13	3	36	36	0.20	
14	3	36	37	1.48	
15	3	37	38	0.35	
16	3	34	34	0.88	
17	3	35	35	0.08	
18	3	36	36	0.41	1.06
19	7	42	40	1.63	
20	7	42	42	0.23	
21	7	44	44	0.07	
22	7	41	43	3.61	
23	7	41	43	2.87	
24	7	42	43	1.39	
25	7	39	42	6.94	

ตารางผนวกที่ ก5 (ต่อ)

ลำดับที่	อายุ (วัน)	MRทดสอบ (ksc.)	MRคำนวณ (ksc.)	ผลต่างกำลังสอง	ค่าความเบี่ยงเบน (ksc.)
26	7	45	42	10.54	
27	7	46	42	15.21	2.17
28	14	45	43	3.28	
29	14	47	46	0.40	
30	14	47	47	0.00	
31	14	42	45	8.40	
32	14	44	45	1.13	
33	14	48	46	5.99	
34	14	45	44	1.85	
35	14	46	46	0.01	
36	14	47	46	1.30	1.58
37	28	45	48	10.89	
38	28	47	49	3.41	
39	28	53	49	12.83	
40	28	47	48	1.17	
41	28	50	48	4.72	
42	28	51	49	5.41	
43	28	45	48	13.72	
44	28	50	49	1.00	
45	28	51	50	0.74	2.45



ภาพผนวกที่ ก1 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดทรงลูกบาศก์กับกำลังอัดทรงกระบอกมาตรฐาน

ที่มา: CPAC (2546: 86)

ภาคผนวก ข

มาตรฐานการทดสอบ

การทดลองที่ ทล.- ท. 302/2531
กรมทางหลวง กองวิเคราะห์และวิจัย
วิธีการทดลองหาค่าแรงอัดแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกและสี่เหลี่ยมลูกบาศก์
(เทียบเท่า AASHO T 22 – 66 และ BS. 1881 : Part 4 : 1970)

ขอบข่าย

วิธีการทดลองนี้เป็นวิธีการทดลองหาค่าแรงอัด(Compressive Strength) ของแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกและสี่เหลี่ยมลูกบาศก์

วิธีทำ

1 เครื่องมือ

เครื่องมือที่ทำการทดลองประกอบด้วย

1.1 เครื่องทดลอง

ก. เครื่องทดลองเป็นแบบใดก็ได้ที่ให้น้ำหนักกดได้สูงเพียงพอ และสามารถกดได้ตามอัตราที่กำหนดในข้อ 2.5.2

ข. เครื่องทดลอง เมื่อตรวจสอบโดยใช้เครื่องมือมาตรฐานชนิด Elastic Calibration Device แล้วจะต้องมีคุณสมบัติถูกต้องตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

คุณสมบัติของเครื่องทดลอง

- น้ำหนักกดที่ใช้อยู่ในช่วงที่ยอมให้ใช้งานได้ (Loading range) ของเครื่องทดลองนั้นยอมให้ผิดพลาดได้ไม่เกิน ± 1 เปอร์เซ็นต์

หมายเหตุ : หมายความว่า รายงานการตรวจสอบเครื่องทดลอง จะต้องระบุช่วงเวลาที่ยอมให้ใช้งานได้ (Loading range) นั้น จะต้องอยู่ภายในเกณฑ์ที่ยอมให้ผิดพลาดได้ 1 เปอร์เซ็นต์ ไม่ควรรายงานเพียงแต่ว่า เครื่องทดลองใช้ได้หรือใช้ไม่ได้เท่านั้น

- ในการกำหนดพิกัดขั้นต่ำ (Lower Limit) ของช่วงที่ยอมให้ใช้งานได้ (Loading range) ใดๆ ถ้าปรากฏว่าค่าต่ำที่หาได้จากข้อกำหนดข้างบนอยู่ภายในช่วงของน้ำหนักกดเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักกดสูงของช่วงที่ยอมให้ใช้งานได้ (Loading range) นั้นให้ทำการทดลองหาจุดพิกัดชั้นใหม่ โดยให้ตรวจสอบน้ำหนักกดนั้น 5 ครั้ง และผลต่างทางพีชคณิตของค่าผิดพลาดที่สูงสุดและต่ำสุดจะต้องไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์

หมายเหตุ : ค่าผิดพลาดที่ได้จากการทดลองและอ่าน 5 ครั้งติดต่อกันไม่เพียงแต่ว่าทำผิดพลาดแต่ละครั้งต้องไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ค่าแตกต่างระหว่างค่าผิดพลาดทั้งสองครั้งใด ๆ จะต้องไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ด้วย ตัวอย่าง เช่น ถ้าพิกัดชั้นต่ำของช่วงที่ยอมให้ใช้งานได้ (Loading range) มีค่าผิดพลาดที่ต่ำสุด 0.0 เปอร์เซ็นต์ ค่าผิดพลาดที่สูงไม่อาจให้เกิน + 1 เปอร์เซ็นต์ ฯลฯ

- ไม่ว่าในกรณีใดก็ตาม จุดพิกัดต่ำของช่วงที่ยอมให้ใช้งานได้ (Loading range) จะต้องไม่ต่ำกว่าค่าซึ่งมีขนาด 100 เท่าของค่าที่เปลี่ยนน้ำหนักกดที่อ่านได้น้อยที่สุด ที่สามารถประมาณค่าได้ในหน้าปัดของเครื่องมือบ่งชี้ค่าน้ำหนักกดของเครื่องทดลอง

หมายเหตุ : ยกตัวอย่าง เช่น เครื่องทดลองซึ่งมีขีดแบ่งห่างจนสามารถประมาณค่าได้ละเอียด ถึง 1/10 ช่อง จุดพิกัดชั้นต่ำของช่วงที่ยอมให้ใช้งานได้ (Loading range) จะต้องไม่ต่ำกว่า $1/100 \times 100 = 10$ ช่อง ถ้าขีดแบ่งช่องบนหน้าปัดมาตราส่วนบ่งชี้น้ำหนักกดสามารถประมาณได้ละเอียดเพียง 2 ช่อง จุดพิกัดชั้นต่ำของช่วงที่ยอมให้ใช้งานได้ (Loading range) จะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 200 ช่องนั้น

สำหรับเครื่องทดลองทั่วไป น้ำหนักกดที่น้อยที่สุดที่สามารถวัดได้จะอยู่ระหว่างค่าตัวอย่างทั้งสองที่กล่าวมาแล้ว

- ไม่ว่าในกรณีใดก็ตามช่วงที่ยอมให้ใช้งานได้ (Loading range) จะต้องไม่ระบุรวมถึงน้ำหนักกดที่อยู่นอกเหนือช่วง (range) ของน้ำหนักกด (Load) ที่ใช้ในระหว่างการทดสอบเครื่องทดลอง

ห้ามทำการแก้ไข ห้ามมิให้ทำการแก้ไขค่าน้ำหนักกดที่ได้จากการบ่งชี้ของเครื่องทดลองด้วยการคำนวณหรือด้วยการใช้ Calibration diagram เพื่อให้ได้ค่าที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมให้คลาดเคลื่อนได้

ช่วงเวลาที่จะทำการตรวจสอบเครื่องทดลองควรทำการตรวจสอบเครื่องทดลองที่ใช้งานประจำสม่ำเสมอปีละครั้ง ถ้าไม่ค่อยได้ใช้งานให้ตรวจสอบในระยะ 2 หรือ 3 ปีต่อครั้ง แต่อย่างไรก็ตาม ต้องทำการทดสอบเครื่องทันทีหลังจากได้ทำการซ่อม หรือประกอบติดตั้งใหม่หลังจากเคลื่อนย้าย(ไม่รวมถึงเครื่องทดลองชนิดที่ยกไปมาได้) และเมื่อมีเหตุผลที่สงสัยว่าผลทดลองให้ค่าไม่แน่นอน ก็ให้ทำการทดสอบใหม่โดยไม่ต้องคำนึงคิดถึงช่วงระยะเวลาหลังจากการทดสอบครั้งสุดท้าย

ถ้าเครื่องทดลองสามารถให้อัตราการกดได้ค่าเดียว(ตามข้อกำหนด 2.5.2) ต้องจัดให้มีเครื่องประกอบติดเพิ่มที่จะช่วยทำให้ได้อัตราน้ำหนักกดเหมาะสม ในการ Calibrate การทำงานของเครื่องประกอบเพิ่มเติมในการให้น้ำหนักกดที่เหมาะสมนี้ อาจใช้เครื่องกดหรือกำลังมือก็ได้ ช่องสำหรับวางตัวอย่างเพื่อทำการทดลอง จะต้องใหญ่เพียงพอที่จะทำการจัดวาง Elastic Calibration Device ในตำแหน่งที่อ่านค่าได้

เครื่องมือมาตรฐานชนิด Elastic Calibration Device ที่ใช้ในการตรวจสอบเครื่องทดลองนี้โดยทั่วไปใช้แบบ Circular proving ring จะต้องเป็นเครื่องมือที่สามารถรับน้ำหนักกดอยู่ใน range ที่เครื่องทดลองสามารถกดได้และผ่านการตรวจสอบเห็นชอบจากกองวิเคราะห์และวิจัยแล้ว

ค. ส่วนที่ใช้กดของเครื่องทดลองจะต้องประกอบด้วยแผ่นแบริ่งเหล็ก 2 แผ่น ที่มีพื้นที่หน้าแข็ง (ความแข็ง Rockwell hardness จะต้องไม่น้อยกว่า c 55)

แบริ่งแผ่นบนจะต้องเป็นแบบ Spherically seated block คือเป็นแผ่นที่มีพื้นที่หน้าเรียบด้านนูนขึ้นในลักษณะของส่วนครึ่งทรงกลมซึ่งแผ่นนี้จะประกอบติดด้วยกันฝังด้านที่มีส่วนของครึ่งทรงกลมเข้าในที่รองรับที่มีรูปเหมือนกัน และแขวนยึดกับส่วนบนของเครื่องทดลองเพื่อให้เคลื่อนตัวได้

แบริ่งแผ่นต่างเป็นแผ่นเรียบที่มั่นคง เคลื่อนตัวไม่ได้ ใช้สำหรับวางแท่งตัวอย่างจะต้องมีความหนาอย่างน้อย 51 มิลลิเมตร(2 นิ้ว) พื้นที่หน้าแบริ่งจะต้องเรียบ สำหรับแผ่นแบริ่งขนาด 152 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) หรือใหญ่กว่ายอมให้ความเรียบคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน 0.025 มิลลิเมตร(0.001 นิ้ว) ในระยะ 152 มิลลิเมตร(6 นิ้ว) ใดๆ สำหรับแผ่นแบริ่งขนาดเล็กกว่า 152 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) ยอมให้ความเรียบคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน 0.025 มิลลิเมตร(0.001 นิ้ว) ในระยะเท่าขนาดของแผ่นแบริ่งนั้นๆ และสำหรับ แผ่นแบริ่งใหม่ที่ผลิตจากโรงงานยอมให้คลาดเคลื่อนได้ไม่เกินครึ่งหนึ่งของค่าที่

กำหนดดังกล่าว ถ้าขนาดของพื้นหน้าแบริ่งขนาดใดขนาดหนึ่งใหญ่กว่าขนาดของแท่งตัวอย่างเกินกว่า 12 มิลลิเมตร (1/2 นิ้ว) จะต้องขีดหรือเซาะร่องพื้นหน้าแบริ่งให้เป็นรูปวงกลม หรือสี่เหลี่ยมจัตุรัสหลายๆ ขนาด โดยมีจุดศูนย์กลางร่วมเดียวกัน ให้มีขนาดร่องไม่ลึกกว่า 0.8 มิลลิเมตร (1/30 นิ้ว) และไม่กว้างกว่า 12 มิลลิเมตร(3/64 นิ้ว) เพื่อสะดวกในการจัดให้ศูนย์กลางของแท่งตัวอย่างอยู่ในแนวศูนย์กลางของน้ำหนักกด

ง. ขนาดพื้นหน้าแบริ่งของแผ่นแบริ่งอันบนที่ใช้ในการทดลองจะต้องมีขนาดใหญ่ที่สุดไม่เกินกว่าค่าที่กำหนดให้ดังต่อไปนี้

เส้นผ่านศูนย์กลางหรือขนาดสี่เหลี่ยมจัตุรัสของแท่งตัวอย่างทดลอง มิลลิเมตร (นิ้ว)	เส้นผ่านศูนย์กลางหรือขนาดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใหญ่ที่สุดของพื้นหน้าแบริ่ง มิลลิเมตร (นิ้ว)
51 (2)	102 (4)
76 (3)	127 (5)
102 (4)	165 (6 1/2)
152 (6)	254 (10)
202 (8)	279 (11)

จ. ศูนย์กลางของส่วนครึ่งทรงกลมของแบริ่งแผ่นบนจะต้องอยู่ในแนวตรงกับศูนย์กลางของพื้นหน้าแบริ่งทั้งสองถ้ารัศมีของส่วนครึ่งทรงกลมเล็กกว่ารัศมีหรือขนาดของสี่เหลี่ยมจัตุรัสของพื้นหน้าแบริ่งอันบน ส่วนพื้นหน้าแบริ่งที่ยื่นเดินหน้าตัดครึ่งทรงกลมออกไปจะต้องมีความหนาไม่น้อยกว่าค่าที่แตกต่างระหว่างรัศมีทั้งสอง หรือระหว่างรัศมีของส่วนครึ่งทรงกลมกับค่าครึ่งหนึ่งของขนาดสี่เหลี่ยมจัตุรัสของพื้นหน้าแบริ่ง เส้นผ่านศูนย์กลางหรือขนาดของสี่เหลี่ยมจัตุรัสของพื้นหน้าแบริ่งอันบนจะต้องมีขนาดอย่างน้อยที่สุด ใหญ่เท่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนครึ่งทรงกลม พื้นที่หน้าแบริ่งอย่างน้อยที่สุดจะต้องใหญ่เท่าหรือใหญ่กว่าพื้นหน้าของแท่งตัวอย่างทดลองเล็กน้อย แผ่นแบริ่งนี้จะยึดติดแบบสนิทกับที่รองรับแต่ต้องออกแบบให้เคลื่อนไหวได้สามารถบิดหมุนรอบตัวได้อย่างอิสระ และกระดกทำมุมเล็กน้อยได้ทุกทิศทาง

1.2 Veneer Caliper ใช้วัดขนาดของแท่งตัวอย่างชนิดอ่านได้ละเอียดถึง 0.1 มิลลิเมตร

1.3 เครื่องชั่งขนาด 20 กิโลกรัม อ่านได้ละเอียด 1 กรัม

2 วัสดุที่ใช้ประกอบการทดลอง

วัสดุที่ใช้ฉาบผิวหน้ารับแรงอัดของแท่งตัวอย่าง (Capping compound) ที่สามารถรับแรงอัดได้สูงกว่าแรงอัดของแท่งตัวอย่าง

3. แบบฟอร์ม

ใช้แบบฟอร์ม ว.4-01 และ ว.4-02

4. การเตรียมตัวอย่าง

พื้นผิวหน้าทั้งสองด้านของแท่งตัวอย่างที่จะรับน้ำหนักกด ถ้าผิดไปจากพื้นระนาบเกินกว่า 0.050 มิลลิเมตร (0.002 นิ้ว) จะต้องทำการฉาบผิวหน้าแท่งตัวอย่างใหม่(Capping) ด้วยวัสดุตามข้อ 2.2 การวัดขนาดให้วัดหาเส้นผ่านศูนย์กลาง หรือขนาดหน้าตัดแท่งสี่เหลี่ยมจัตุรัสเป็นเซนติเมตร ทศนิยม 2 ตำแหน่ง โดยเฉลี่ยค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ค่าที่วัดได้ หรือวัดขนาดสี่เหลี่ยมหน้าตัดที่รับน้ำหนักกดด้วยวิธีการวัดตั้งฉากซึ่งกันและกัน ที่ประมาณกึ่งกลางของความสูงของแท่งตัวอย่าง ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยหรือขนาดที่วัดได้นี้จะใช้เป็นค่าสำหรับคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่าง ในการวัดความสูงให้วัดความสูงของแท่งตัวอย่าง รวมทั้งความหนาของวัสดุที่ฉาบเป็นเซนติเมตร ทศนิยม 2 ตำแหน่ง การชั่งน้ำหนักแท่งตัวอย่าง เพื่อหาความหนาแน่นของแท่งคอนกรีตให้ใช้น้ำหนักของแท่งคอนกรีตเป็นกิโลกรัม ทศนิยม 2 ตำแหน่ง

5. การทดลอง

5.1 การวางตัวอย่างทดลอง วางแผ่นแบริ่งอันล่างใช้พื้นหน้าด้านแข็งหงายขึ้นบนแท่งเครื่องทดลอง ให้ตรงกับแผ่นแบริ่งอันบน กวาดพื้นผิวหน้าของแผ่นแบริ่งอันบนละอันล่างให้สะอาด วางแท่งตัวอย่างลงบนพื้นแผ่นแบริ่งอันล่าง จัดให้แกนของแท่งตัวอย่างให้อยู่ในแนวศูนย์กลางน้ำหนักกด เลื่อนแผ่นแบริ่งอันบนลงให้สัมผัสกับแท่งตัวอย่าง ในขณะเดียวกันกับที่แผ่นแบริ่งเลื่อนลงให้ใช้มือขยับหมุนแผ่นแบริ่งเบาๆ ด้วย เพื่อให้ผิวหน้าทั้งหมดสัมผัสแนบสนิทกัน ถ้าแท่งตัวอย่างเป็นแท่งลูกบาศก์ให้เลือกด้านที่เรียบ และถูกต้องที่สุดวางกดทดลอง

5.2 อัตราการกด การให้น้ำหนักกดจะต้องเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ และไม่กระตุก เครื่องทดลองแบบใช้สกรู(Screw type) จะต้องเป็นเครื่องที่หัวกดสามารถเคลื่อนที่ด้วยอัตราความเร็ว 1.3 มิลลิเมตร (0.05 นิ้ว) ต่อนาที เครื่องทดลองแบบใช้ไฮดรอลิกต้องเป็นเครื่องที่สามารถให้น้ำหนักกดด้วยอัตรางที่อยู่ในเกณฑ์ช่วง 1.4 ถึง 2.5 กิโลกรัม ต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที (0 ถึง 50 ปอนด์ต่อตารางนิ้วต่อวินาที) ในระยะช่วงครึ่งแรกของน้ำหนักกดสูงสุดที่แท่งคอนกรีตจะรับได้นั้น ยอมให้ใช้อัตรากดสูงกว่ากำหนดได้ และในการควบคุมเครื่องทดลองขณะที่แท่งตัวอย่างกำลัง yield อย่างรวดเร็วทันทีก่อนเกิด failure ห้ามทำการปรับอัตรากดหรือส่วนใดๆ ของเครื่องทดลอง

5.3 ให้ทำการกดจนกระทั่งแท่งตัวอย่าง fail บันทึกค่าน้ำหนักกดสูงสุดที่แท่งตัวอย่างสามารถรับได้ ถ้าแท่งตัวอย่าง fail อย่างผิดปกติให้บันทึกพฤติภาพและแบบรูปลักษณะการ fail ของแท่งตัวอย่างนั้น

การคำนวณ

1 คำนวณหาแรงอัดของแท่งตัวอย่างจากสูตร

$$\text{แรงอัดสูงสุดของแท่งตัวอย่าง} = \frac{\text{น้ำหนักกดสูงสุดที่แท่งตัวอย่างรับได้(กก.)}}{\text{พื้นที่หน้าตัดที่รับน้ำหนักกดของแท่งตัวอย่าง(ตร.ซม.)}}$$

คำนวณแรงอัดสูงสุดของแท่งตัวอย่างเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ทศนิยม 1 ตำแหน่ง

2 คำนวณหาความหนาแน่นของแท่งตัวอย่างจากสูตร

$$\text{ความหนาแน่นของแท่งตัวอย่าง} = \frac{\text{น้ำหนักของแท่งตัวอย่าง(กก.)}}{\text{ปริมาตรของแท่งตัวอย่าง(ลบ.ม.)}}$$

คำนวณความหนาแน่นของแท่งตัวอย่างเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทศนิยม 1 ตำแหน่ง

การรายงาน

การรายงานให้ใช้แบบฟอร์ม ว. 4-01 และ ว. 4-02 รายงานรายละเอียดต่างๆ และให้เพิ่มเติม ถ้ามี ข้อบกพร่องของแท่งตัวอย่างหรือผิวฉาบหน้าแท่งตัวอย่าง(Caps) ลักษณะของการแตกที่ไม่ใช่ลักษณะแตกเป็นรูปกรวย ซึ่งแตกตามปกติ

ข้อควรระมัดระวัง

1. ห้ามมิให้ทำการแก้ไขค่าน้ำหนักกดที่ได้จากการบ่งชี้ของเครื่องทดลอง ด้วยการคำนวณหรือโดยการใช้ Calibration diagram เพื่อให้ได้ค่าที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมให้คลาดเคลื่อนได้

2. การทดลองที่ระบุให้ทดลองแท่งตัวอย่างที่บ่มชื้น จะต้องทำการทดลองให้เร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ หลังจากได้นำแท่งตัวอย่างออกมาจากที่เก็บ

3. การชั่งน้ำหนักแท่งตัวอย่าง เพื่อหาความหนาแน่นของคอนกรีต ให้ชั่งน้ำหนักของแงคอนกรีตเท่านั้น ไม่รวมน้ำหนักของวัสดุที่ฉาบปิดหน้าแท่ง(Caps) ถ้ามี

4. ให้ทำการตรวจสอบเครื่องทดลองที่ใช้งานประจำสม่ำเสมอปีละครั้ง ถ้าไม่ค่อยใช้งาน 2 หรือ 3 ปีต่อครั้ง และเมื่อสงสัยว่าเครื่องทดลองอาจให้ผลทดลองไม่ถูกต้อง หรือหลังจากซ่อมหรือประกอบใหม่ให้ทำการตรวจสอบทันที

หนังสืออ้างอิง

1 The American Association of State Highway Officials “Standard Specification for Highway Materials and Method of sampling and Testing” AASHO T 22-66

2 British Standards 1881 : Part 4:1974

FLEXURAL STRENGTH OF CONCRETE (USING SIMPLE BEAM WITH THIRD POINT LOADING) FOP FOR AASHTO T 97

Scope

This test method covers the determination of flexural strength of concrete using a simple beam with third-point loading.

The most commonly tested beam size is one having a nominal width and depth of 6 inches and a length of at least 20 inches.

Apparatus

Testing Machine: Capacity sufficient to cause specimen failure at prescribed loading rates. The machine shall be either power operated or of the hand operated pump variety such that a single stroke of the pump is sufficient to apply the entire load to specimen failure at the prescribed rate. The apparatus must apply the load continuously and without shock. The machine shall be accurate such that the percentage of error shall not exceed $\pm$ 1.0 percent of the indicated load.

Loading Apparatus: Suitable to insure that applied loads will be perpendicular to the face of the specimen and applied without eccentricity. See FIGURE 1 for a typical acceptable apparatus. The apparatus must be capable of maintaining the specified span length and loading point within 0.05” of that specified.

Load-applying and support blocks must extend across at least the full width of the specimen. The shape of each block shall be a portion of a cylinder, the axis of which is coincident with either the axis of the steel rod or ball on which it pivots. The bearing surfaces shall be case hardened and shall not depart from a plane by more than 0.002” The load-applying and support blocks must be maintained in a vertical position and in contact with the steel rod or ball with spring-load screws.

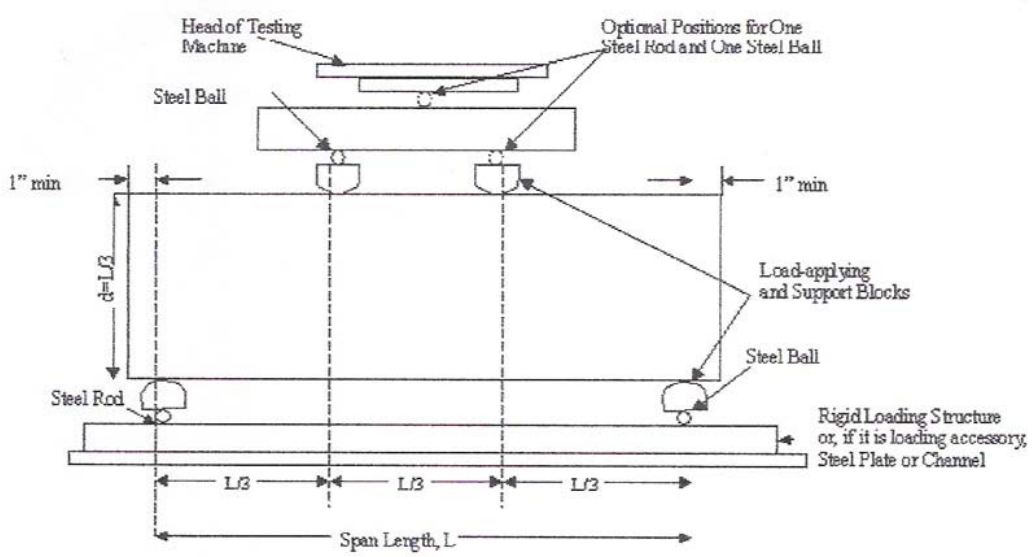


FIGURE 1

Note 1: The support blocks and loading blocks must bear on a steel rod at one location and one steel ball at the opposite location.

Feeler Gages: Of 0.004" and 0.015" thickness, used for measuring gap between test specimen and load-applying or support blocks.

Leather Shims: Uniform thickness of 1/4 inch, 1 to 2 inches in width, extending across the entire bearing width of the specimens.

Specimens

Specimens shall comply with all applicable provisions of either AASHO T 23 or T 126. The test span may not depart by more than 2% of being three times the specimen depth as tested. The sides of the specimens must be at right angles to the top and bottom. The bearing surfaces must be smooth, free of scars, holes, and indentation.

$$\frac{3d - s}{s} \times 100 \quad < 2\%$$

Where:

d = specimen depth as tested

s = test span, distance between supports

Procedure

1. All test specimens for a given test age shall be broken within permissible time tolerances prescribed in Table 1.

Table 1 Permissible Time Tolerances

Specified Age	Tolerance
12 hrs	15 min (2.1%)
24 hrs	30 min (2.1%)
3 days	2 hrs (2.8%)
7 days	6 hrs (3.6%)
28 days	20 hrs (3.0%)
90 days	2 days (2.2%)

2. Flexure tests of moisture-cured specimens shall be made as soon as practicable after removal from moist storage. Specimens shall be kept moist by any convenient method until tested.

3. Place the test specimen in the apparatus by turning the specimen on its side so that the sides as molded become the top and bottom against which the loading and support blocks will bear.

4. Apply a load between 3 and 6% of the anticipated ultimate load.

5. Determine that full bearing is achieved between all four blocks and the specimen. If

full bearing is achieved, the specimen may be tested as is without the use of leather shims or capping.

If there is any gap 1 inch or more in length exceeding 0.004 inches but not greater than 0.015 inches, leather shims may be used to accommodate proper specimen bearing.

If there is any gap 1 inch or more in length exceeding 0.015 inches, the specimen must be ground or capped such that the bearing surfaces meet the required specifications.

6. No loose particles may be trapped between the test specimen and any bearing point, or between shims and bearing points during application of the test load.

7. Apply the load continuously and without shock. Control the rate between 125 and 175 psi per minute when calculated according to the formulas under "Calculation" below.

Measurement of Test Specimens after Test

Take three measurements across each dimension (one at each edge and one at the center) to the nearest 0.05 inches to determine specimen width, depth, and location of the fracture. Fracture location is to be measured along the bottom face as oriented for testing.

If the fracture occurs in a capped section, include the cap thickness in the measurement.

Calculation

If the fracture occurs within the middle third of the span length, calculate the modulus of rupture according to the following formula:

$$R = Pl/bd^2$$

Where:

R = modulus of rupture, psi

P = maximum applied load, lbf

l = span length, in.

b = average specimen width, in.

d = average specimen depth, in.

If the fracture occurs outside of the middle third of span length by not more than 5% calculate the modulus of rupture as follow:

$$R = 3Pa/bd^2$$

Where:

a = average distance between line of fracture and the nearest support measured on the tension face (bottom) of the beam, in.

If the fracture occurs outside of the middle third of span length by more than 5% of span length, discard the results of the test.

Report

Results shall be reported on standard forms approved for use by the agency

Identification number and Specimen age

Average width to the nearest 0.05”

Average depth to the nearest 0.05”

Span length, in.

Maximum load

Modulus of rupture to the nearest 5 psi

Curing history and apparent moisture condition at time of test

If specimen was capped, ground, or if leather shims were used

Observed defects in specimens

Age of specimen.

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายธำรงค์ ปัญญาแก้ว
วัน เดือน ปี ที่เกิด	6 ธันวาคม 2512
สถานที่เกิด	จังหวัดเชียงใหม่
ประวัติการศึกษา	
ระดับปริญญาตรี	ค.อ.บ. (วิศวกรรมโยธา) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์ (พ.ศ. 2538)
	วศ.บ.(วิศวกรรมโยธา) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล (พ.ศ. 2544)
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2550)
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	อาจารย์ 1 ระดับ 5
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ล้านนา เขตพื้นที่เชียงใหม่
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	–
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	–