

วิธีการทดสอบประสิทธิภาพของเส้นใยสำหรับการเสริมแรงในคอนกรีต Testing Methods of Fiber Efficiency for Concrete Reinforcement

มานิช สรรพกิจทิพากร^{1*} อุทัยฤทธิ์ โรจนวิภาต¹ และ ปิติ สุขนธสุขกุล²
Manote Sappakittipakorn^{1*} Uthairith Rochanavibhata¹ and Piti Sukontasukkul²

บทคัดย่อ

คอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยได้รับการพัฒนาเพื่อลดทอนการเกิดการแตกร้าวจากการหดตัวของคอนกรีตและเพิ่มพฤติกรรมการความเหนียวให้กับคอนกรีตเมื่อมีการแตกร้าวเกิดขึ้น ประสิทธิภาพของเส้นใยที่ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติดังกล่าวของคอนกรีตตรวจสอบได้จากการทดสอบ การทดสอบคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยมีอยู่หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีความเหมาะสมและมีข้อจำกัดแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะการนำคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยไปใช้งาน บทความนี้ได้รวบรวมแนวคิด วัตถุประสงค์ และวิธีการโดยสังเขปของการทดสอบแบบต่างๆ วิธีการทดสอบที่กล่าวถึงในที่นี้จะเป็มาตรฐานการทดสอบของประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นส่วนใหญ่ (American Society of Testing and Materials; ASTM) สำหรับวัดประสิทธิภาพของคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใย โดยแบ่งออกตามวัตถุประสงค์ของการเสริมเส้นใย เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ การเสริมเส้นใยเพื่อลดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต และการเสริมเส้นใยเพื่อเพิ่มความเหนียว

คำสำคัญ: คอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใย การแตกร้าว เนื่องจากการหดตัว ความเหนียวต้านทานการตัดโค้ง การทดสอบประสิทธิภาพของเส้นใยในคอนกรีต

Abstract

Fiber-reinforced concrete (FRC) has been advanced to reduce shrinkage cracks and to enhance ductility in cementitious matrices. Its efficiency can be measured through experimental tests. There are numerous testing methods, each of which has a different significance and limitation depending on the applications of the FRC. Some of these methods, mostly using the testing standards of the American Society of Testing and Materials (ASTM), are reviewed in this article. Presented here, they were categorized into 2 sections based on the uses of the FRC: 1) the tests to determine the ability of fiber "to reduce shrinkage cracks, and 2) the tests to determine the flexural toughness. Their principles, purposes, and brief procedures are also provided.

¹ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* Corresponding Author, Tel. 0-2555-2000 Ext 8625, Email: manotes@kmutnb.ac.th

Keywords: Fiber-Reinforced Concrete, Shrinkage Cracks, Flexural Toughness, Testing of Fiber-Reinforced Concrete

1. บทนำ

คอนกรีตโดยทั่วไปจัดเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการยืดตัว (Low Tensile Strain Capacity) และมักมีการหดตัว (Shrinkage) จากการสูญเสียน้ำในช่วงของการเซตตัวระยะแรก การหดตัวดังกล่าวก่อให้เกิดความเค้นดึง (Tensile Stress) ในจุดที่มีการยึดรั้ง (Constraints) เมื่อคอนกรีตไม่สามารถหดตัวได้อย่างอิสระและมีความเค้นดึงมากกว่ากำลังรับแรงดึง (Ultimate Tensile Strength) จะเกิดรอยแตกกว้างขึ้น การแตกกว้างเช่นนี้มีผลกระทบในทางลบต่อความคงทน ความสวยงาม และความเชื่อมั่นในโครงสร้างคอนกรีต นอกจากนั้น การที่คอนกรีตเป็นวัสดุเปราะ มีพลังงานในการแตกกว้างต่ำ (Low Fracture Energy) การขยายตัวของรอยร้าวจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้คอนกรีตพังทลายได้อย่างฉับพลันเมื่อเริ่มมีการแตกกว้าง ในสภาวะหลังการแตกกว้าง คอนกรีตจึงไร้ความสามารถในการดูดซับพลังงานโดยสิ้นเชิง

ข้อด้อยของคอนกรีตดังกล่าวข้างต้น สามารถแก้ไขได้โดยการเสริมกำลังด้วยเส้นใยที่เหมาะสมทั้งชนิดและปริมาณ และเรียกคอนกรีตชนิดนี้ว่า คอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber Reinforced Concrete) เส้นใยที่จะกล่าวถึงในที่นี้ คือเส้นใยที่มีลักษณะเป็นเส้นเดี่ยว (Discrete Fiber) โดยมีสมมติฐานว่าเส้นใยมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในคอนกรีต และเส้นใยมีทิศทางแบบสุ่ม ดังนั้นเมื่อคอนกรีตเกิดรอยร้าว และรอยร้าวมีแนวพาดผ่านเส้นใย เส้นใยจะช่วยรับความเค้นดึงนั้นโดยอาศัยแรงยึดเหนี่ยวของเส้นใยที่ฝังตัวอยู่ในคอนกรีต ในกรณีที่ความเค้นดึงมีค่าไม่มากนัก เส้นใยที่มีจำนวนมากเพียงพอจะช่วยหยุดยั้งรอยแตกกว้างไม่ให้ขยายตัว และเมื่อความเค้นดึงเพิ่มมากขึ้น รอยแตกขยายตัวจนคอนกรีตไม่สามารถรับกำลังได้ เส้นใยจะยังคงทำหน้าที่แบกรับความเค้นเหล่านั้นต่อไปจนกระทั่งเส้นใยสิ้นสุด

สภาพการรับกำลัง ซึ่งเป็นการพัฒนาพฤติกรรมความเหนียวให้กับคอนกรีต และปกป้องคอนกรีตจากการพังทลายอย่างฉับพลัน [1]-[3] การที่เส้นใยสามารถลดความรุนแรงของการแตกกว้างได้ และเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานการแตกกว้าง ย่อมช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างคอนกรีตให้ดีขึ้น

การสิ้นสุดสภาพการรับกำลังของเส้นใยจากความเค้นดึงเกิดขึ้นได้สองลักษณะ คือการที่เส้นใยขาดจากกันเนื่องจากเส้นใยมีแรงยึดเกาะกับคอนกรีตสูงมากกว่ากำลังรับแรงดึงของเส้นใยเอง หรือการที่เส้นใยลื่นไถลหลุดออกจากคอนกรีตเนื่องจากเส้นใยมีความแข็งแรงมากแต่มีแรงยึดเกาะกับคอนกรีตน้อย ดังนั้นเส้นใยที่มีความแข็งแรงพอเหมาะกับแรงยึดเกาะที่เกิดจากการฝังในคอนกรีตจึงจัดเป็นเส้นใยที่มีประสิทธิภาพดี และทำให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใย การวัดประสิทธิภาพของคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยจำเป็นต้องอาศัยการทดสอบที่เหมาะสมต่อลักษณะของงานที่นำคอนกรีตชนิดนี้ไปประยุกต์ใช้

ในบทความนี้ได้เรียบเรียงวิธีการทดสอบต่างๆ ที่ถูกนำมาใช้สำหรับวัดประสิทธิภาพของคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใย โดยแบ่งตามวัตถุประสงค์ของการเสริมเส้นใยในคอนกรีตออกเป็น 2 หัวข้อ ได้แก่ การลดการแตกกว้างเนื่องจากการหดตัว [4] และการเพิ่มความเหนียวหลังการแตกกว้างเมื่อถูกตัดโค้ง [5],[6] ในแต่ละหัวข้อจะได้อธิบายรายละเอียดของการทดสอบ พร้อมทั้งข้อควรระวังเมื่อต้องทำการทดสอบด้วยวิธีการเหล่านี้

2. การลดการแตกกว้างเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต

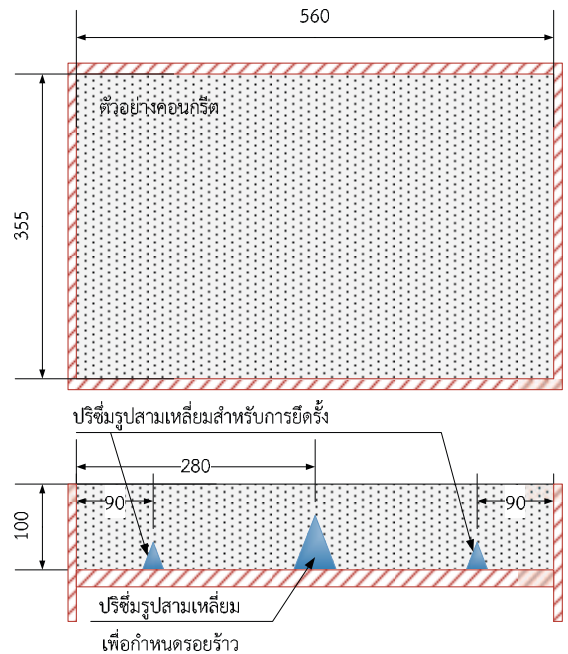
ในการผลิตคอนกรีต มวลรวม (Aggregates) อันได้แก่ หินและทราย ถูกเชื่อมเป็นเนื้อเดียวกันด้วยวัสดุประสาน (Cement Paste) ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างซีเมนต์และน้ำ การที่วัสดุประสานมีน้ำเป็นส่วนประกอบ ทำให้วัสดุประสานเกิดการหดตัวเมื่อน้ำระเหยออกไป หากวัสดุประสานสามารถหดตัวได้อย่างอิสระ การหดตัวที่เกิดขึ้นคงมีผลเพียงทำให้ขนาดเล็กลงและไม่เกิดความเสียหายแต่อย่างใด แต่เมื่อไรก็ตามที่

มีการยึดรั้งไม่ให้วัสดุประสานหลุดตัว การหดตัวจะทำให้เกิดแรงดึงขึ้นภายในวัสดุประสาน โดยมีขนาดแปรผันตามขนาดของการหดตัว และจะทำให้เกิดรอยแตกกว้างเมื่อแรงดึงมีขนาดมากเกินกว่ากำลังของวัสดุประสาน

ระดับความรุนแรงของการแตกร้าวในกรณีนี้สามารถลดลงได้ด้วยการป้องกันการสูญเสียน้ำออกจากคอนกรีต ซึ่งเป็นข้อควรปฏิบัติที่ควรกระทำเป็นปกติในงานคอนกรีต หากว่าการแตกร้าวมีระดับความรุนแรงเกินกว่าที่จะควบคุม การเสริมคอนกรีตด้วยเส้นใยเป็นทางเลือกหนึ่งที่ช่วยแก้ไขปัญหการแตกร้าวได้ เมื่อต้องวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเส้นใยต่อการแตกร้าวในกรณีนี้ เราอาจต้องแยกพิจารณาการแตกร้าวออกเป็น 2 จำพวกตามระยะเวลาที่เกิดขึ้น ได้แก่ การหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage) ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงขณะที่คอนกรีตกำลังก่อตัว (Setting) และการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) ซึ่งเกิดขึ้นหลังจากคอนกรีตแข็งตัวเป็นระยะเวลานาน (อาจใช้เวลาหลายเดือนหรืออาจเป็นปี) โดยอาศัยการทดสอบด้วยวิธีการพิเศษเพื่อแก้ไขอุปสรรคทางด้านเวลา

2.1 การทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีตแบบพลาสติก

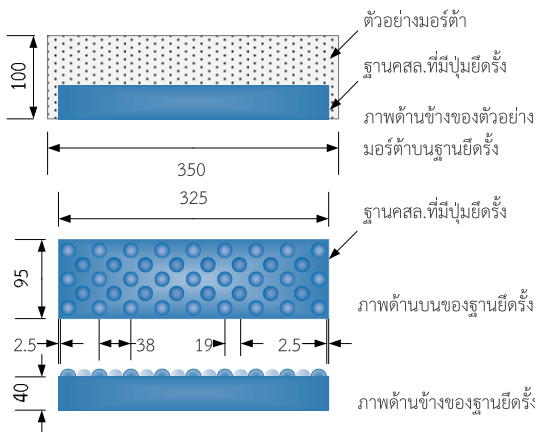
ในส่วนของการหดตัวแบบพลาสติก อาจใช้การทดสอบ ASTM C1579-06 ซึ่งจำลองสถานการณ์ที่ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำที่ผิวอย่างรวดเร็ว (กำหนดให้อัตราการระเหยของน้ำจากผาผิววัดควรมีค่าอย่างน้อย 1.0 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง) ด้วยตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่มีการหมุนเวียนของอากาศอยู่ภายใน ลักษณะของตัวอย่างทดสอบจะเป็นคอนกรีตสด (Fresh Concrete) เตรียมในแบบแผ่นกระดานดังรูปที่ 1 ขนาด 355x560 มิลลิเมตรหนา 100 มิลลิเมตร มีการยึดรั้งที่ฐานด้วยแท่งปริซึมรูปสามเหลี่ยม 2 ชิ้น วางตามแนวกว้าง แต่ละชิ้นห่างจากปลายแต่ละด้านตามแนวยาวเป็นระยะ 90 มิลลิเมตร และมีแท่งปริซึมอีกหนึ่งชิ้นที่ฐานตรงกึ่งกลางช่วงความยาว (Stress Riser) เพื่อควบคุมให้เกิดความเค้นสูงสุดและเกิดรอยร้าวในบริเวณนี้ การทดสอบ



รูปที่ 1 แบบทดสอบแผ่นคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยตามมาตรฐาน ASTM C1579-06 เพื่อวัดประสิทธิภาพของเส้นใยในการลดรอยร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบพลาสติก

จะเริ่มต้นทันทีที่เสร็จสิ้นการผสมและเทลงแบบที่เตรียมไว้ จนกระทั่งคอนกรีตสิ้นสุดการก่อตัว (Final Set) จึงทำการวัดขนาดและหาค่าเฉลี่ยความกว้างของรอยร้าวในการทดสอบคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยหนึ่งๆ จะต้องทำการทดสอบคอนกรีตปกติที่มีส่วนผสมเหมือนกัน แต่ไม่มีเส้นใยควบคู่ไปพร้อมกัน แล้ววิเคราะห์ผลการทดสอบในเชิงเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตที่มีและไม่มีเส้นใยเสริม ในรูปของค่าอัตราส่วนการลดลงของรอยร้าว (Crack Reduction Ratio, CRR) ซึ่งเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของความกว้างรอยร้าวเฉลี่ยที่ลดลงจากการเสริมเส้นใยเทียบกับความกว้างรอยร้าวเฉลี่ยของคอนกรีตปกติ นอกจากนั้น อาจมีการบันทึกเวลาที่เริ่มมีรอยร้าวเกิดขึ้น

ลักษณะของการยึดรั้งมีอิทธิพลอย่างมากต่อการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว การยึดรั้งในมาตรฐาน



รูปที่ 2 ตัวอย่างการทดสอบการแตกร้าวของมอร์ต้าเสริมเส้นใยเนื่องจากการหดตัวของฐานยึดรั้งแบบปุ่ม

ASTM C1579-06 มีลักษณะค่อนข้างจำเพาะซึ่งแตกต่างจากสภาพความเป็นจริง โดยเฉพาะในกรณีของการซ่อมแซมด้วยการเทมอร์ต้าเสริมเส้นใยทับเป็นชั้นบางๆ (Overlay) ซึ่งผิวคอนกรีตเดิม (Substrate) จะถูกเตรียมให้มีความขรุขระทั่วทั้งพื้นผิว ดังนั้นการยึดรั้งจึงเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอในระดับต่ำ การใช้ ASTM C1579-06 อาจให้ผลทดสอบที่ไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง จึงมีการเสนอวิธีการทดสอบแบบใหม่ [7] โดยลักษณะของก้อนทดสอบเป็นคานกว้าง 100 มิลลิเมตร ยาว 350 มิลลิเมตร และหนา 60 มิลลิเมตร เตรียมบนฐาน (Substrate) ทำด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก มีขนาดกว้างยาวลดลงเหลือ 95x325 มิลลิเมตร (เพื่อป้องกันการแอ่นตัวของคอนกรีตในขณะที่ทำการทดสอบ) และหนาเพียง 40 มิลลิเมตร มีการเพิ่มส่วนยึดรั้งไว้ที่ผิวบนของฐานซึ่งอยู่ติดกับผิวล่างของก้อนทดสอบ ด้วยการปั๊มอนุรูปครึ่งทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 18 มิลลิเมตร จัดเป็นแนวระยะห่างจากศูนย์กลางถึงศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร และแต่ละแนววางสลับเหลื่อมกันมีระยะห่าง 38 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2 ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นมาทดแทนการใช้เม็ดกรวดฝังลงบนฐานทั่วทั้งผิวหน้าในการทดสอบแบบเดิม [8]

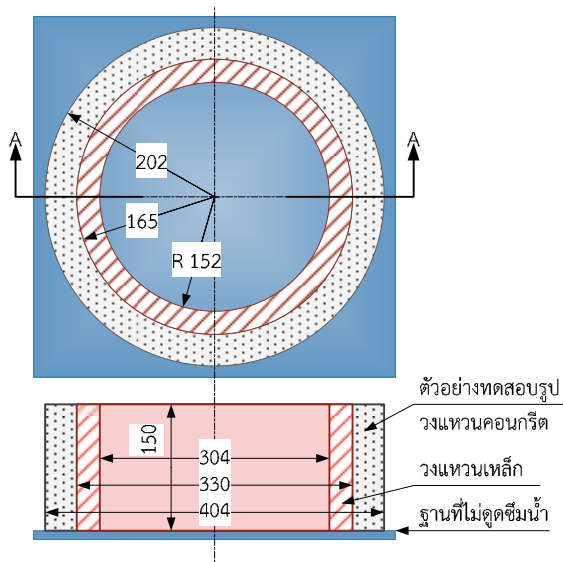
ความเค้นดึงจากการยึดรั้งเช่นนี้จึงเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิวของตัวอย่างทดสอบ ส่งผลให้มี

การแตกร้าวเกิดขึ้นในจุดที่มีกำลังรับแรงต่ำ โดยใช้ระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง แล้วจึงทำการวัดผลจากจำนวนและขนาดของรอยแตกที่เกิดขึ้น การลดลงของรอยร้าวเมื่อมีการเติมเส้นใยในก้อนทดสอบจะเป็นสิ่งบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของเส้นใยนั้นๆ เมื่อนำการทดสอบนี้ไปศึกษาผลกระทบของเส้นใยชนิดต่างๆ [9] พบว่าสามารถจำแนกประสิทธิภาพของเส้นใยได้อย่างชัดเจน รวมทั้งยังแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการผลิตคอนกรีตไร้รอยแตกจากการหดตัว ด้วยการใส่เส้นใยเซลลูโลส (Cellulose Fiber) ในปริมาณ 0.2% หรือเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber) ในปริมาณ 0.1% โดยปริมาตร

2.2 การทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีตแบบแห้ง

สำหรับการหดตัวแบบแห้งนั้น มักจะทำการทดสอบด้วยตัวอย่างทดสอบแบบวงแหวน ตามมาตรฐาน ASTM C1581-09a โดยการหล่อแผ่นวงแหวนคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในเท่ากับ 404 และ 330 มิลลิเมตรตามลำดับ มีหน้ากว้าง 150 มิลลิเมตร และมีความหนาเหลือที่มีหน้ากว้างเท่ากับแผ่นคอนกรีตและหนา 13 มิลลิเมตร แทรกอยู่ตรงกลางดังรูปที่ 3

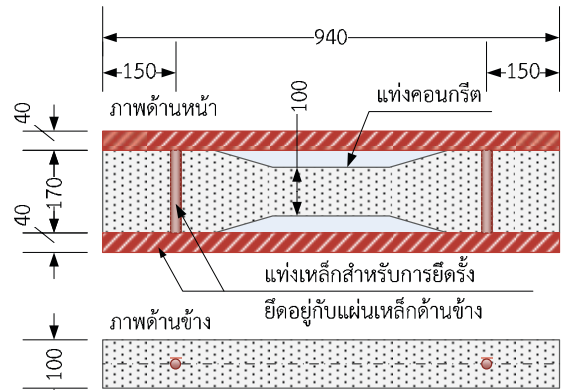
วงแหวนที่ไม่มีแหวนเหล็กตรงกลางจะหดตัวได้อย่างอิสระ ทำให้ขนาดวงแหวนคอนกรีตเล็กลง แต่แหวนเหล็กที่แทรกอยู่จะทำหน้าที่รั้งการหดตัว เปรียบเสมือนมีแรงดันเกิดขึ้นภายในวงแหวน ทำให้เกิดความเค้นอัดในแนวรัศมี (Radial Compressive Stress) และความเค้นดึงตามแนวเส้นรอบวง (Hoop Tensile Stress) ซึ่งเกิดสูงสุดที่ขอบนอก และการที่ขนาดของหน้ากว้างมากกว่าความหนาถึง 3 เท่า ทำให้อยู่ภายใต้การบีบอัดที่บริเวณผิวรอบนอกมีความสม่ำเสมอตามแนวหน้ากว้างของแผ่นทดสอบ แล้วทำการวัดผลจากจำนวนและขนาดความกว้างของรอยร้าวเพื่อดูประสิทธิภาพของเส้นใย ซึ่งข้อดีของการทดสอบลักษณะนี้คือสามารถทดสอบคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยได้โดยตรง มีการใช้การทดสอบนี้ศึกษาประสิทธิภาพของเส้นใยหลักและโพลิโพรพิลีนใน



รูปที่ 3 วงแหวนคอนกรีตสำหรับทดสอบการแตกร้าว เนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง โดยมีท่อเหล็กยึดตั้งที่ตรงกลาง ตามมาตรฐาน ASTM C1581-09a

คอนกรีต [4] พบว่าการทดสอบสามารถแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเส้นใย จากขนาดความกว้างของรอยร้าวในคอนกรีตที่ลดลง โดยลดลงจาก 0.9 มิลลิเมตรในคอนกรีตล้วน เหลือเพียง 0.25 และ 0.1 มิลลิเมตร เมื่อมีการเสริมด้วยเส้นใยโพลีโพรพิลีนและด้วยเส้นใยเหล็กในปริมาณ 0.5% โดยปริมาตร ตามลำดับ (หลังจากการปมในน้ำ 4 วันแล้วเก็บรักษาต่อที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 40% เป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์)

นอกจากนั้น ยังสามารถทดสอบเส้นใยด้วยการวัดความเครียดจากการหดตัวเมื่อมีการยึดตั้ง ตามมาตรฐานการทดสอบ KS F2595 ของประเทศเกาหลีใต้ โดยใช้แท่งคอนกรีตหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมหน้า 100 มิลลิเมตร ยาว 940 มิลลิเมตร และมีหน้ากว้าง 170 มิลลิเมตร ซึ่งมีการคอดที่ช่วงกลางทำให้ขนาดหน้ากว้างลดลงเหลือ 100 มิลลิเมตร มีการฝังแท่งเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร ที่กึ่งกลางความหนา โดยวางขวางหน้าตัดตามแนวด้านกว้างที่ระยะ 150 มิลลิเมตรจากปลายทั้งสอง และแท่งเหล็กนี้ถูกเชื่อมต่อกับแผ่นเหล็กที่ด้านข้างเพื่อ



รูปที่ 4 ตัวอย่างแท่งคอนกรีตสำหรับทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง โดยอาศัยการยึดตั้งจากแท่งเหล็กที่ปลายและแผ่นเหล็กด้านข้าง ตามมาตรฐาน KS F2595

ทำให้เกิดการยึดตั้ง ดังรูปที่ 4

จากการทดสอบคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยโพลีโพรพิลีน (Polypropylene Fiber) ที่ปริมาณ 1% โดยปริมาตร [10] พบว่าสามารถรับความเครียดดึงจากการหดตัวเมื่อถูกยึดตั้งได้ถึง 150 $\mu\epsilon$ ในขณะที่คอนกรีตปกติรับได้เพียง 80 $\mu\epsilon$ ก่อนที่รอยร้าวจะทำให้หน้าตัดของแท่งตัวอย่างขาดออกจากกันโดยสมบูรณ์

3. การเพิ่มความเหนียวหลังการแตกร้าวเมื่อถูกตัดโค้ง

ในขณะที่ชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยถูกตัดโค้ง บริเวณผิวที่รับความเค้นดึงจะมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นเมื่อความเค้นดึงที่กระทำมากกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต แต่เส้นใยที่เชื่อมต่อกับคอนกรีตทั้งสองส่วนที่แยกออกจากกัน จะช่วยแบกทานความเค้นดึงในบริเวณนั้นแทน ทำให้คอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยมีความแข็งแรงสามารถแบกทานน้ำหนักต่อเนื่องที่เพิ่มขึ้นได้แม้ว่าคอนกรีตจะแตกร้าวแล้ว กล่าวได้ว่าคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยมีพฤติกรรมแบบเหนียวมากขึ้น ด้านทานแรงกระทำได้ในสภาวะที่ความเครียดดึงมีค่ามากขึ้น

ในกรณีนี้ ประสิทธิภาพของคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยถูกจำแนกด้วยค่ากำลังที่ยังคงรับได้ (คำนวณจากสมการโมดูลัสของการแตกร้าว) หรืออาจใช้ค่าจาก

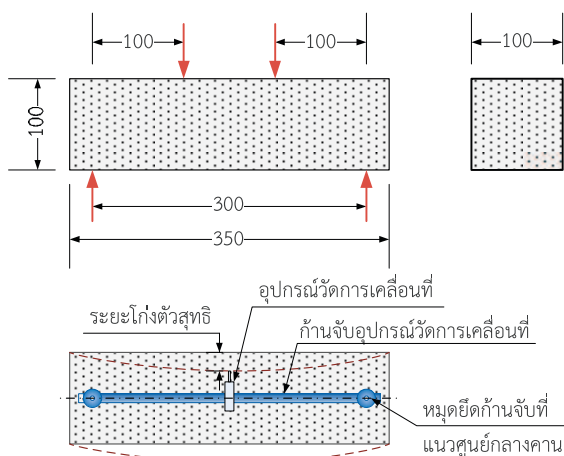
งานที่เกิดขึ้นจากการโก่งตัวของคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใย (คำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนักกระทำและระยะโก่งตัว) การทดสอบเพื่อวัดค่าความเหนียวได้รับการพัฒนามากว่า 30 ปี [5] และอาจกล่าวได้ว่าการทดสอบแรกที่ได้รับการยอมรับ คือการทดสอบคานถูกกระทำภายใต้โมเมนต์ดัด ตามมาตรฐาน ASTM C1018-97 ถึงแม้ว่าการทดสอบนี้ได้ถูกยกเลิกไปตั้งแต่ปี ค.ศ. 2006 แล้วก็ตาม การศึกษาแนวคิด การวิเคราะห์ และข้อจำกัดของมาตรฐานการทดสอบนี้ยังคงมีความสำคัญ เพราะจะช่วยให้เราเข้าใจการพัฒนาการทดสอบความเหนียววิธีอื่นๆ

3.1 การทดสอบความเหนียวด้านทานการดัดโค้งด้วยคาน

มาตรฐาน ASTM C1018-97 เป็นการทดสอบเพื่อวัดค่าความเหนียวจากการดัดคานโดยอาศัยการกด 4 จุด ดังรูปที่ 5 แต่ละจุดห่างเท่าๆ กันเท่ากับหนึ่งในสามของช่วงพาดคาน (Third-Point Loading) สองจุดด้านนอกเป็นฐานรองรับแบบลูกกลิ้ง (Roller Support) แล้ววัดระยะโก่งตัวสุทธิ (Net Deflection) ที่กึ่งกลางคานโดยการติดตั้งก้านจับด้านข้างตามแนวศูนย์กลางของคานทั้งสองด้าน (Yoke) สำหรับจับอุปกรณ์วัดระยะโก่งตัว (Displacement Transducer)

ชุดก้านจับนี้ถูกใช้เพื่อจัดผลการยุบตัวของคานที่ฐานรองรับและการยุบตัวของหัวคานออกจากกระยะโก่งตัวที่วัดได้ และลดความผิดพลาดจากการบิดตัวของคานการทำงานของเครื่องทดสอบถูกควบคุมเพื่อให้มีอัตราการใช้การโก่งตัวคงที่ โดยมาตรฐาน ASTM C1018-97 ได้แนะนำ (แต่ไม่ได้รับเป็นข้อบังคับ) ให้ใช้เครื่องทดสอบที่มีความสามารถในการควบคุมการกดตามการตอบสนองของการโก่งตัวของคาน (Closed Loop, Servo-Controlled Testing System) เพื่อรักษาความเสถียรของคานขณะที่เกิดรอยร้าวแรก

การทดสอบต้องดำเนินไปจนกว่าจะได้รับการโก่งตัวไม่น้อยกว่า 5.5 เท่าของระยะโก่งตัวที่เกิดรอยร้าวแรก (δ) ผลการทดสอบที่บันทึกได้ ได้แก่ ขนาดของแรง



รูปที่ 5 ตัวอย่างคานคอนกรีตถูกดัดโค้งด้วยการกดแบบ 4 จุด และการวัดระยะโก่งตัวสุทธิจากอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ที่ติดตั้งบนก้านจับที่ถูกยึดกับคานตามแนวศูนย์กลาง

กระทำและระยะโก่งตัวของคาน ถูกนำมาแสดงในกราฟ (Load-Deflection Curve) เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าดัชนีความเหนียว (Toughness Index) โดยพิจารณาให้พื้นที่ใต้กราฟเป็นพลังงานที่คอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยดูดซับได้แต่ละช่วงของการโก่งตัว แล้วคำนวณค่าดัชนีความเหนียว (I_5 , I_{10} หรือ I_{20}) จากอัตราส่วนของพลังงานที่การโก่งตัวหนึ่งๆ (3δ , 5.5δ หรือ 10.5δ ตามลำดับ) ต่อพลังงานในขณะที่เกิดรอยร้าวแรก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งที่เกิดรอยร้าวแรกมีความสำคัญอย่างมากต่อผลการวิเคราะห์ในมาตรฐานนี้ นอกจากนั้น ยังมีการคำนวณค่าแฟกเตอร์กำลังส่วนที่เหลืออยู่ (Residual Strength Factor; $R_{5,10}$ และ $R_{10,20}$) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของกำลังในช่วงแต่ละช่วง (ระหว่าง 3δ และ 5.5δ และระหว่าง 5.5δ และ 10.5δ ตามลำดับ) คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับกำลังที่รอยร้าวแรก นั่นคือค่าแฟกเตอร์กำลังส่วนที่เหลืออยู่จะเท่ากับ 100% เมื่อคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยมีพฤติกรรมแบบพลาสติกอย่างสมบูรณ์ (Perfectly Plastic Behavior) โดยคำนวณได้จากค่าดัชนีความเหนียวดังนี้

$$R_{5,10}=20(I_{10}-I_5) \quad (1)$$

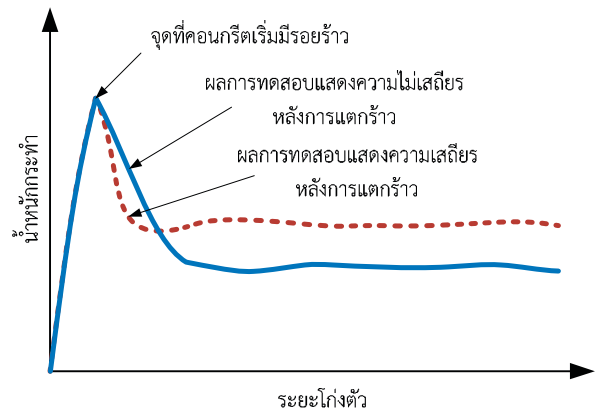
$$R_{10,20}=10(I_{20}-I_{10}) \quad (2)$$

จากการศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยเหล็ก [11] โดยทำการทดสอบด้วยมาตรฐาน ASTM C1018-97 พบว่า วิธีการทดสอบนี้ยังมีอุปสรรคและข้อจำกัดหลายอย่าง ทำให้ขาดความน่าเชื่อถือต่อค่าความเหนียวของคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยที่วัดได้ พร้อมทั้งระบุถึงความต้องการวิธีการทดสอบใหม่เพื่อการจำแนกประสิทธิภาพของคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยสอดคล้องกับรายงานของนักวิจัยกลุ่มต่างๆ [12]-[14] ซึ่งพอจะสรุปได้ ดังนี้

- ข้อจำกัดแรกคือการขาดความชัดเจนในการระบุการเกิดของรอยร้าวแรก จากปกติที่นิยามให้จุดที่ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดลดลงมาก คือจุดที่มีรอยร้าวแรกเกิดขึ้น แต่เนื่องจากคอนกรีตมีความยืดหยุ่นไม่เชิงเส้นสูง (Non-linear Elastic) การเปลี่ยนแปลงของความชันลดลงต่อเนื่อง จึงทำให้ยากต่อการระบุตำแหน่งดังกล่าว

- เครื่องทดสอบเป็นอีกอุปสรรคหนึ่ง เพราะเครื่องทดสอบที่ควบคุมการทำงานด้วยอัตราการเพิ่มน้ำหนักกระทำ (Load Control) หรือควบคุมด้วยอัตราการเคลื่อนที่ของหัวกด (Displacement Control) ไม่สามารถรักษาการโก่งตัวของคานให้มีความเสถียรในขณะที่คอนกรีตเริ่มมีรอยร้าวแรกเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6 ผลการทดสอบและพฤติกรรมของคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยในช่วงดังกล่าวจึงไม่ถูกต้อง ทำให้ผลการวิเคราะห์อื่นๆ มีความผิดพลาดเช่นกัน

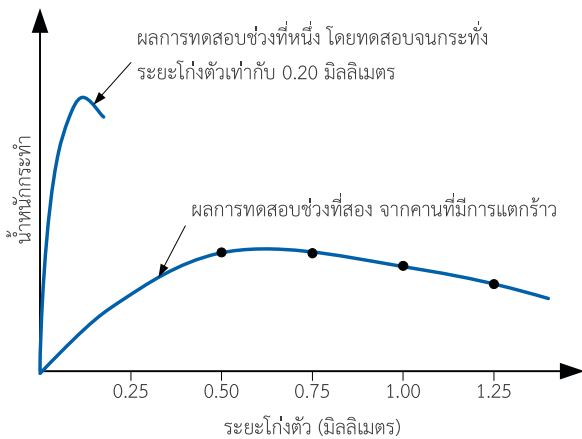
- นอกจากนั้น ผลจากการวิเคราะห์ ได้แก่ ค่าดัชนีความเหนียว (Toughness Index) และแฟกเตอร์กำลังส่วนที่เหลืออยู่ (Residual Strength Factor) ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานเท่านั้น อาจใช้สำหรับเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยต่างๆ แต่ไม่อาจนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบความแข็งแรงของโครงสร้าง



รูปที่ 6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยที่มีและไม่มี ความเสถียรเมื่อเริ่มมีรอยร้าวแรก

ดังนั้น จึงมีความพยายามในการนำเสนอวิธีการทดสอบแบบใหม่ [15] จนกระทั่งในปี ค.ศ. 2000 จึงได้รับการกำหนดเป็นมาตรฐาน ASTM C1399-10 ซึ่งเป็นการทดสอบการตัดคานแบบเดียวกับ ASTM C1018-97 (กำหนดให้ใช้คานขนาด 100x100x350 มิลลิเมตร) แต่มีการแบ่งการทดสอบออกเป็นสองช่วง คือ การตัดให้เกิดรอยร้าวแรกในช่วงที่หนึ่ง ในขณะที่ทำการทดสอบช่วงแรก จะมีการเสริมแผ่นเหล็กรองรับคาน (แผ่นเหล็กจะช่วยป้องกันคานไม่ให้เกิดอัตราการโก่งตัวที่สูงเกินไป) แล้วเริ่มตัดคานจนกระทั่งมีระยะโก่งตัวกึ่งกลางเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร และต้องตรวจสอบให้แน่ใจว่ามีรอยร้าวแรกเกิดขึ้นแล้ว จึงจะสามารถทดสอบคานนั้นต่อได้ ในช่วงที่สอง ให้นำแผ่นเหล็กออก แล้วจึงเริ่มทำการตัดคานที่มีรอยร้าวแล้ว เพื่อวัดค่าเฉลี่ยกำลังที่เหลืออยู่ (Average Residual Strength, ARS) จากค่ากำลังที่ระยะโก่งตัว 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 7 ดังนั้น ผลจากการทดสอบในช่วงนี้จึงเป็นค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพโดยรวมของเส้นใยหลังการแตกร้าว

ถึงแม้ว่ามาตรฐาน ASTM C1399-10 จะช่วยลดปัญหาความไม่ชัดเจนในการระบุรอยร้าวแรก และหลีกเลี่ยงการทรุดตัวฉับพลันของคานได้ วิธีการทดสอบนี้



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ทั่วไประหว่างแรงกระทำและระยะโก่งตัวสุทธิของการทดสอบการดัดคานตามมาตรฐาน ASTM C1399-10 โดยแบ่งเป็นสองช่วง ช่วงที่หนึ่งสำหรับการควบคุมให้คานเกิดรอยร้าวแรก และช่วงที่สองสำหรับวัดกำลังที่คงเหลือหลังจากคานมีรอยร้าว

ก็ยังมีข้อจำกัดบางประการที่อาจมีผลต่อการนำผลประสิทธิภาพของคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยไปใช้งาน

- ประการที่หนึ่ง คือข้อจำกัดของขนาดของคาน เนื่องจากความหนาของคานมีผลต่อแนวการเรียงตัวของเส้นใย (Preferential Alignment) ขนาดของคานทดสอบที่เล็กเกินไป (ขนาดหน้าตัดเล็กกว่า 3 เท่าของความยาวเส้นใย) จะมีผลให้การเรียงตัวของเส้นใยผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริง คือมีแนวโน้มที่จะเรียงอยู่ในระนาบซึ่งเป็นแนวที่เส้นใยแบกรับความเค้นได้เต็มที่ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง ผลการทดสอบในมาตรฐานนี้จึงไม่สามารถนำไปใช้กับชิ้นส่วนที่มีความหนามากกว่า 100 มิลลิเมตร

- เมื่อต้องทดสอบเส้นใยที่ค่อนข้างแข็ง ขนาดหน้าตัดของคานต้องไม่น้อยกว่า 3 เท่าของความยาวเส้นใย ดังนั้น ในกรณีที่เส้นใยยาวกว่า 35 มิลลิเมตร จึงต้องหล่อคานที่มีขนาดหน้าตัดใหญ่ขึ้นแล้วค่อยเลื่อยตัดขนาดให้เล็กลงเหลือ 100x100 มิลลิเมตร ซึ่งไม่เป็น

ที่นิยมนัก เพราะเป็นการเพิ่มความยุ่งยากในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

- เนื่องจากมีการเสริมแผ่นเหล็กที่ด้านล่างในการทดสอบช่วงแรก ผลการทดสอบจึงไม่สามารถระบุค่ากำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) เฉพาะของคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใย หากต้องการค่ากำลังรับแรงดัด จึงจำเป็นต้องทำการทดสอบเพิ่มด้วยมาตรฐานอื่น

- ส่วนประการสุดท้าย คือค่าเฉลี่ยกำลังที่เหลืออยู่ไม่สามารถบอกพฤติกรรมของเส้นใยในขณะที่ย่อยร้าวเริ่มมีการขยายตัวในช่วงต้น เพราะเป็นค่าที่ได้จากการวิเคราะห์คานที่แตกร้าวแล้วจากการถูกดัดจนโก่งตัวมากถึง 0.2 มิลลิเมตร

- ในขณะที่มาตรฐานไม่ระบุระบบการควบคุม (ถือว่าผลการทดสอบไม่ขึ้นกับระบบควบคุม) การทดสอบจึงไม่ถูกจำกัดด้วยเครื่องทดสอบที่มีความซับซ้อน (แตกต่างจากมาตรฐาน ASTM C1609-10 ซึ่งจะได้กล่าวถึงหลังจากนี้) ซึ่งอาจจะนับเป็นข้อดี แต่ทว่ามีการศึกษาเปรียบเทียบการทดสอบคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยตามมาตรฐาน ASTM C1399-10 ระหว่างการใช้เครื่องทดสอบที่ควบคุมด้วยอัตราการเคลื่อนที่ของหัวกด (Open-Loop Control) และเครื่องที่ควบคุมด้วยอัตราการโก่งตัวสุทธิ (Close-Loop Control) [16] พบว่าระบบการควบคุมมีอิทธิพลอย่างมากต่อผลการทดสอบเมื่อคอนกรีตมีกำลังสูง

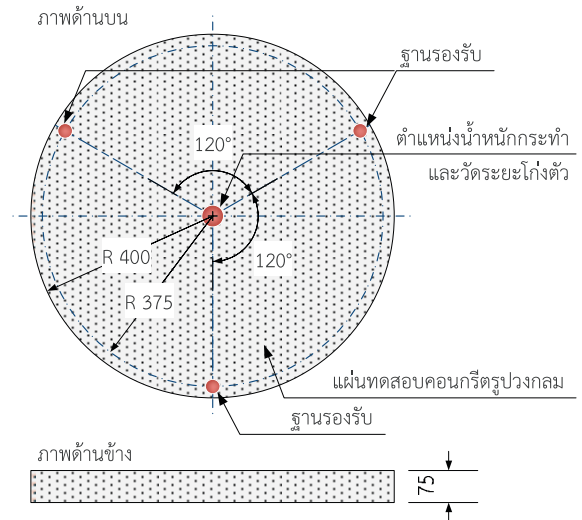
อย่างไรก็ดี เมื่อเทียบกับ ASTM C1018-97 แล้ว มาตรฐาน ASTM C1399-10 ยังคงให้ผลที่ดีกว่าสามารถนำไปเทียบเคียงกับมาตรฐานอื่นๆ เช่น JSCE SF-4 ซึ่งเป็นมาตรฐานของประเทศญี่ปุ่น [17]

ในปี ค.ศ. 2005 มีการนำเสนอมาตรฐาน ASTM C1609-10 เป็นครั้งแรก ซึ่งเป็นวิธีทดสอบที่คล้ายกับมาตรฐาน ASTM C1018-97 แต่มีรายละเอียดการทดสอบที่ถูกปรับปรุงเพื่อแก้ไขข้อจำกัดของ ASTM C1018-97 รวมทั้งมีการเสนอวิธีการวิเคราะห์ผลแบบใหม่ โดยวิธีทดสอบยังเป็นการดัดคานโดยอาศัยการกด 4 จุด แต่ละจุดห่างเท่าๆ กันเท่ากับหนึ่งในสามของช่วงพาดคาน (Third-Point Loading) สองจุดด้านนอกเป็น

ฐานรองรับแบบลูกกลิ้ง (Roller Support) แล้วบันทึกค่าน้ำหนักกระทำและระยะโก่งตัวที่เกิดขึ้น โดยสิ้นสุดการทดสอบเมื่อมีระยะโก่งตัวไม่น้อยกว่า $L/150$ (L คือ ความยาวช่วงพาดของคาน) แล้วคำนวณค่ากำลังที่จุดสูงสุดแรกของแรงกระทำ (First Peak Strength) ค่ากำลังที่จุดสูงสุดของแรงกระทำ (Peak Strength) และค่ากำลังส่วนที่เหลืออยู่ (Residual Strength) ที่ระยะโก่งตัวเท่ากับ $L/600$ และ $L/150$

มาตรฐาน ASTM C1609-10 ใช้คานทดสอบขนาดปกติที่ใช้ทดสอบกำลังรับโมเมนต์ดัด คือ $100 \times 100 \times 350$ มิลลิเมตร ซึ่งขนาดความยาวของเส้นใยที่ทดสอบได้ถูกจำกัดอยู่ที่ 35 มิลลิเมตร แต่ยอมให้ใช้คานที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเป็น $150 \times 150 \times 500$ มิลลิเมตร ซึ่งทำให้สามารถทดสอบเส้นใยที่มีความยาวมากขึ้นถึง 50 มิลลิเมตร (และอาจถึง 75 มิลลิเมตร หากผู้ใช้ยินยอม ซึ่งครอบคลุมเส้นใยส่วนใหญ่ที่มีการใช้งาน) สิ่งนี้เป็นข้อได้เปรียบเหนือมาตรฐาน ASTM C1399-10 เพราะสามารถนำผลการทดลองไปใช้งานได้กว้างขวางกว่า

นอกจากขนาดของคานทดสอบ การควบคุมอัตราการกดเพื่อตัดคานก็มีอิทธิพลอย่างมากต่อผลการทดสอบ ในมาตรฐาน ASTM C1608-10 มีการระบุไว้ชัดเจนว่า เครื่องทดสอบต้องทำงานในระบบที่สามารถควบคุมการกดตามการตอบสนองของการโก่งตัวของคาน (Closed Loop, Servo-Controlled Testing System) ด้วยสาเหตุที่ต้องการรักษาความเสถียรในขณะที่คานรับน้ำหนักผ่านจุดสูงสุดแรก ซึ่ง ณ จุดนี้ คอนกรีตมักมีการแตกร้าวเกิดขึ้น พร้อมกับการปลดปล่อยพลังงานที่สะสมอยู่ในเครื่องทดสอบ ซึ่งจะมีค่ามากเมื่อเครื่องทดสอบมีค่าสติฟเนส (Stiffness) น้อยกว่าคานที่กำลังทดสอบ หากเครื่องทดสอบไม่รับรู้ต่อการเปลี่ยนแปลงนี้เพื่อชะลออัตราการกดให้ช้าลง จะทำให้คานเกิดการทรุดตัวอย่างรวดเร็วและพลาดข้อมูลในช่วงที่เส้นใยเริ่มรับแรง [16] ดังจะเห็นได้จากค่าระยะโก่งตัวที่เพิ่มขึ้นเร็วมากจนเกิดช่องว่างหลังจากจุดที่เกิดแรงสูงสุดแรก ความผิดพลาดของข้อมูลในช่วงนี้ย่อมมีผลต่อการตรวจวัดประสิทธิภาพของเส้นใยเช่นกัน



รูปที่ 8 ตัวอย่างแผ่นคอนกรีตรูปวงกลมสำหรับการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1550-10

3.2 การทดสอบความเหนียวต้านทานการตัดโค้งด้วยแผ่นรูปวงกลม

การเลือกวิธีการทดสอบมักขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่จะนำคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยไปใช้ ยกตัวอย่างเช่นงานพื้นเทบดิน โดยทั่วไปการทดสอบคานมักจะเพียงพอ แต่หากเป็นงานคอนกรีตแบบพ่น (Shotcrete) เพื่อเสริมผนังอุโมงค์ การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบด้วยแผ่นรูปวงกลม (Circular Plate) ตามมาตรฐาน ASTM C1550-10 ดังรูปที่ 8 น่าจะเหมาะสมกว่า เพราะสามารถเตรียมตัวอย่างด้วยการพ่นคอนกรีตในสภาพเหมือนจริง โดยแผ่นทดสอบรูปวงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 800 มิลลิเมตร และหนา 75 มิลลิเมตร แล้วทดสอบด้วยการกดที่จุดศูนย์กลางของแผ่นทดสอบบนฐานรองรับที่ขอบ 3 จุด ในกรณีนี้แผ่นคอนกรีตจะมีรอยแตกเกิดขึ้น 3 รอย เริ่มจากจุดศูนย์กลางไปที่ขอบตรงตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างคู่แต่ละคู่ของฐานรองรับทั้งสาม แล้วทำการวัดผลจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางเช่นเดียวกับการทดสอบคานรับแรงดัด

เนื่องด้วยลักษณะของการแตกร้าวในแผ่นทดสอบมีจำนวนถึง 3 รอย และแต่ละรอยก็มีขนาดใหญ่กว่ารอยร้าวในคาน อิทธิพลของการกระจายตัวแบบสุ่ม

ของเส้นใยที่มีต่อการแปรปรวนของค่าความเหนียวของคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยจึงลดลง จากผลการวิจัยพบว่า การทดสอบนี้ให้ผลที่มีความแม่นยำน่าเชื่อถือมาก [18] ยกเว้นในกรณีที่เกิดรอยร้าวเพียงรอยเดียวพาดผ่านตัวแผ่น ซึ่งควรคิดผลการทดลองออกจากการวิเคราะห์ แต่หาว่ามีข้อเสียที่แผ่นทดสอบมีน้ำหนักมาก (90 กิโลกรัมโดยประมาณ) และมีขนาดใหญ่ทำให้การทดสอบทำได้ค่อนข้างลำบาก

4. สรุป

จากรายละเอียดวิธีการทดสอบดังที่กล่าวมา จะพบว่ามีวิธีการทดสอบประสิทธิภาพคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยอยู่มากมาย การเลือกที่จะทดสอบคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยด้วยวิธีใด จึงควรศึกษาความเหมาะสมต่อลักษณะของงานที่จะนำคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยไปใช้ และให้ความระมัดระวังต่อข้อจำกัดของวิธีการทดสอบนั้นๆ ซึ่งหวังว่าเนื้อหาในบทความนี้ จะช่วยให้ผู้ใช้งานและผู้วิจัยพัฒนาคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยมีความเข้าใจในวิธีการทดสอบคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยมากขึ้น และตระหนักถึงค่าปัจจัยชี้วัดประสิทธิภาพของคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใยที่เหมาะสม

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. J. Majumdar, "Fibre cement and concrete -- a review," *Composites*, vol. 6, no. 1, pp.7-16, 1975.
- [2] S. Mindess, "Thirty Years of Fibre Reinforced Concrete Research at the University of British Columbia," *International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, Coventry, UK, Taylor & Francis, pp.259-268, 2007.
- [3] A. M. Brandt, "Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering," *Composite Structures*, vol. 86, no.1-3, pp.3-9, 2008.
- [4] M. Grzybowski and S. P. Shah "Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete," *ACI Materials Journal*, vol. 87, no.2, pp.138-148, 1990.
- [5] C. D. Johnston, "Definition and Measurement of Flexural Toughness Parameters for Fiber Reinforced Concrete," *Cement, Concrete and Aggregates*, vol. 4, no.2, pp.53-60, 1982.
- [6] P. Sukontasukkul, "Toughness Evaluation of Steel and Polypropylene Fibre Reinforced Concrete Beams under Bending," *Thammasat International Journal of Science and Technology*, vol. 9, no.3, pp.35-41, 2004.
- [7] N. Banthia and R. Gupta "Test Method for Evaluation of Plastic Shrinkage Cracking in Fiber-Reinforced Cementitious Materials," *Experimental Techniques*, vol.31, no.6, pp. 44-48, 2007.
- [8] N. Banthia, C. Yan, et al. "Restrained shrinkage cracking in fiber reinforced concrete: A novel test technique," *Cement and Concrete Research*, vol. 26, no.1, pp.9-14, 1996.
- [9] N. Banthia, R. Gupta, et al. "Development of fiber reinforced concrete repair materials," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 33, no.2, pp.126-133, 2008.
- [10] S. B Kim., N. H. Yi, et al. "M(2006). aterial and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, no.3, pp.232-240, 2010.
- [11] J.-F. Trottier and N. Banthia, "Toughness Characterization of Steel-Fiber Reinforced Concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 6, no.2, pp.264-289, 1994.
- [12] S. Mindess, L. Chen, et al. "Determination of the

- first-crack strength and flexural toughness of steel fiber-reinforced concrete,” *Advanced Cement Based Materials*, vol. 1, no.5, pp.201-208, 1994.
- [13] V. S. Gopalaratnam and R. Gettu “On the characterization of flexural toughness in fiber reinforced concretes,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 17, no.3, p p.239-254, 1995.
- [14] B. Barr, R. Gettu, et al. “Toughness measurement -- the need to think again,” *Cement and Concrete Composites*, vol.18, no. 4, pp.281-297, 1996.
- [15] R. F. Zollo, C. D. Hays, et al. “A new test method for fiber-reinforced concrete,” *Cement, Concrete and Aggregates*, vol. 21, no.2, pp.111-116, 1999.
- [16] N. Banthia, S. Mindess, et al. “Influence of Feedback Control on Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete in ASTM C1399 Tests,” *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 39, no.4, pp.1-7, 2011.
- [17] N. Banthia and S. Mindess, “Toughness Characterization of Fiber-Reinforced Concrete: Which Standard to Use?,” *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 32, pp.138-142, 2004.
- [8] H. Xu, Q. Gu, et al. “Deformation of Round Determinate Panels Containing Fibres,” *Shotcrete for Underground Support X*, Whistler, British Columbia, Canada, ASCE. 2006.