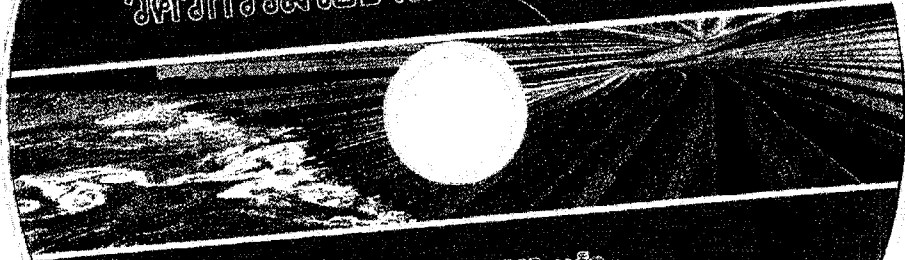




การประชุมวิชาการ

วิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ ๑๑



20 - 22 พฤษภาคม 2549 สุโขทัย



การศึกษาการใช้เส้นพลาสติกที่ใช้แล้วแบบสั้นผสมในคอนกรีต

INVESTIGATION OF THE USE OF RECYCLED SHORT PLASTIC WIRES IN CONCRETE

อมรรัตน์ สุริยวิจิตรเศรษฐ์ (Amornrat Suriyawichitseranee)¹

สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (Sittichai Seangatith)²

อำนาจ อภิชาติวัลลภ³ (Amnat Apichatvullop)³

¹นักศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

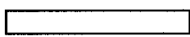
บทคัดย่อ : ในช่วงที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยจำนวนมากประสบความสำเร็จในการนำเส้นใยประเภทต่างๆ เช่น โพลีโพรพิลีน (polypropylene) และไนลอน มาผสมในคอนกรีตเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงดึง การดูดซับพลังงาน และลดการแตกร้าวของคอนกรีต แต่ยังไม่มีการวิจัยคอนกรีตเสริมเส้นใย polyethylene terephthalate (PET) และ high density polyethylene (HDPE) แม้ว่าเส้นใยทั้งสองชนิดจะมีคุณสมบัติทางกลที่ค่ากำลังรับแรงดึงสูงใกล้เคียงกับโพลีโพรพิลีนและไนลอน และเป็นพลาสติกอีกชนิดหนึ่งซึ่งเป็นส่วนใหญ่อยู่นอกขยะพลาสติกซึ่งนับวันจะมีปริมาณมากขึ้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีนำพลาสติก PET และ HDPE มาเสริมคอนกรีตเพื่อให้ได้กำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น และลดการแตกร้าว โดยใช้เส้นพลาสติก PET และ HDPE ที่ใช้แล้วแบบสั้นผสมในคอนกรีต ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ รูปร่างเส้นพลาสติกตรงและซิกแซก และปริมาณเส้นพลาสติกที่เสริมในคอนกรีต พบว่า การเสริมเส้นพลาสติกให้กำลังรับแรงอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงเมื่อปริมาณเส้นพลาสติกมากขึ้น แต่จะช่วยให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น

ABSTRACT : In the past few years, a number of researchers have successfully used plastic fibers such as polypropylene and nylon as reinforcing fibers in concrete. The fibers increase the tensile strength and energy absorption, and reduce cracking in concrete. However, so far no researchers have tried polyethylene terephthalate (PET) and high density polyethylene (HDPE) as reinforcing fibers in concrete although they have tensile strengths close to that of the polypropylene and nylon and are readily available from plastic wastes. This research experimented with PET and HDPE plastic wires as reinforcing materials for concrete to determine the optimal amount and shape of plastic wires. The studied parameters were water-cement ratio, fiber shape: straight and zigzag, and percent of plastic fiber. From the tests, it was found that, by increasing the amount of plastic wires, the compressive strength and the modulus of elasticity of the concrete were decreased and the flexural strength of concrete were increased.

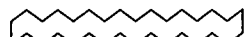
KEYWORDS: Short plastic wires, Compressive strength, Flexural strength, Recycled plastic, Concrete.

1 บทนำ

นักวิจัยหลายท่านประสบผลสำเร็จในการทำคอนกรีตเสริมเส้นใยประเภทต่างๆ ทั้งเส้นใยบริสุทธิ์และเส้นใยที่ทำจากวัสดุที่ใช้แล้ว เช่น โพลีโพรพิลีน (polypropylene) [1], [2] และไนลอน (nylon) [3] เส้นใยทำให้คอนกรีตรับแรงดึง ดูดซับพลังงานได้มากขึ้น และลดการแตกร้าวของคอนกรีต โดยคอนกรีตดังกล่าวเหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานพื้นถนน อิฐบล็อก หรือกระเบื้องปูหลังคา เพื่อให้โครงสร้างเหล่านี้สามารถรับแรงกระแทกได้เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นแล้ว จากการศึกษาคุณสมบัติทางกลของพลาสติกที่ใช้แล้ว พบว่า PET (polyethylene terephthalate) และ HDPE (high density polyethylene) มีกำลังรับแรงดึงสูงประมาณ 20 – 40 MPa [4] ซึ่งใกล้เคียงกับกำลังรับแรงดึงของโพลีโพรพิลีนและไนลอน แต่ยังไม่มีการนำพลาสติกสองชนิดนี้ซึ่งมีปริมาณเป็นส่วนใหญ่ของขยะพลาสติกที่สามารถหาได้ง่ายมาใช้เป็นเส้นใยเสริมกำลังของคอนกรีต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ลองทำคอนกรีตเสริมเส้นใยพลาสติก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาณและรูปร่างของเส้นพลาสติก PET และ HDPE ที่เหมาะสม ศึกษาคุณสมบัติและพฤติกรรมทางกลของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกแบบเส้นที่ทำจากพลาสติกที่ใช้แล้วดังกล่าว ในที่นี้คุณสมบัติทางกลที่สนใจประกอบด้วย กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด โมดูลัสยืดหยุ่น และลักษณะการวิบัติตัวแปรในการศึกษาประกอบด้วย อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) 3 ค่าได้แก่ 0.4, 0.5, และ 0.6 เส้นพลาสติกแบบเส้นชนิด PET และ HDPE ที่ได้จากขวดบรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้ว โดยเส้นพลาสติกมีขนาดกว้าง 1.5 มม. ยาว 25.4 มม. ความหนาของเส้นพลาสติก PET และ HDPE เป็น 0.5 และ 0.6 มม. ตามลำดับ เส้นพลาสติกมี 2 รูปร่างคือ ตรงและซิกแซก ดังแสดงในรูปที่ 1 และปริมาณเส้นพลาสติกที่เสริมในคอนกรีตร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5, และ 2.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต



a. รูปร่างที่ 1 (s)



b. รูปร่างที่ 2 (z)

รูปที่ 1 รูปร่างเส้นพลาสติกที่ใช้

2 ตัวอย่างและวิธีทดสอบ

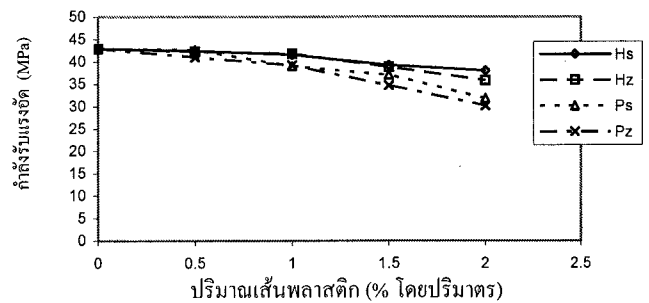
ในการทดสอบกำลังรับแรงอัด ตัวอย่างทดสอบเป็นคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาด $\varnothing 15 \times 30$ ซม. โดยทดสอบตามมาตรฐาน

ASTM 39-96 [5] สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดัด ตัวอย่างทดสอบเป็นคานคอนกรีตขนาด $10 \times 10 \times 50$ ซม. โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM 78-94 [6] และในการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM 469-94 [7] ตัวอย่างทดสอบถูกบ่มในถุงพลาสติกและเก็บไว้ในห้องบ่มคอนกรีตเป็นเวลา 28 วัน ตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงอัดและการทดสอบกำลังรับแรงดัดมีจำนวนอย่างละ 60 ชุด ชุดละ 3 ตัวอย่าง สัญลักษณ์ที่ใช้แทนเส้นพลาสติกมีดังนี้ H แทน HDPE, P แทน PET, s แทนเส้นพลาสติกตรง และ z แทนเส้นพลาสติกซิกแซก เช่น Hs หมายถึง เส้นพลาสติก HDPE ตรง เป็นต้น

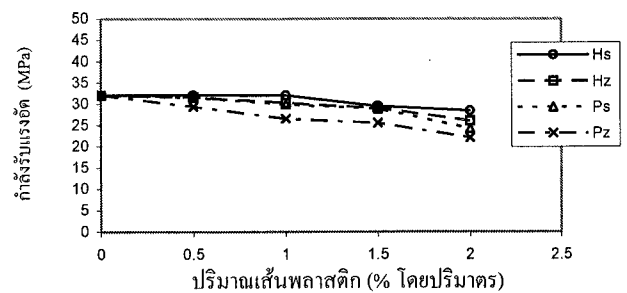
3 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 กำลังรับแรงอัด

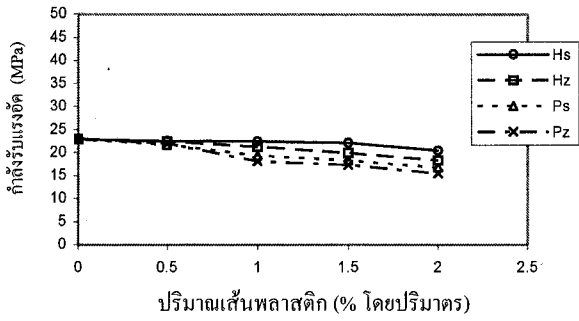
การทดสอบกำลังรับแรงอัดพบว่า เมื่อพลีตกำลังรับแรงอัดกับปริมาณเส้นพลาสติกจะได้กราฟเส้นโค้งดังแสดงในรูปที่ 2 – 4 จะเห็นว่าคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลง



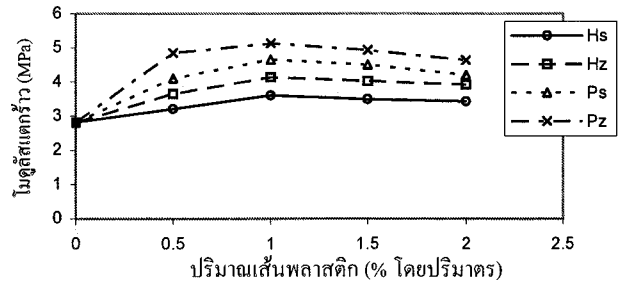
รูปที่ 2 กราฟกำลังรับแรงอัดที่ w/c เท่ากับ 0.4



รูปที่ 3 กราฟกำลังรับแรงอัดที่ w/c เท่ากับ 0.5



รูปที่ 4 กราฟกำลังรับแรงอัดที่ w/c เท่ากับ 0.6

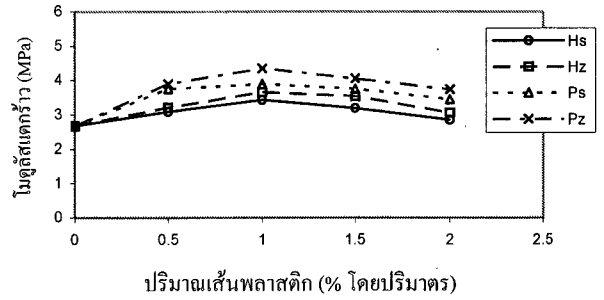


รูปที่ 6 กราฟโมดูลัสแตกร้าวที่ w/c เท่ากับ 0.4

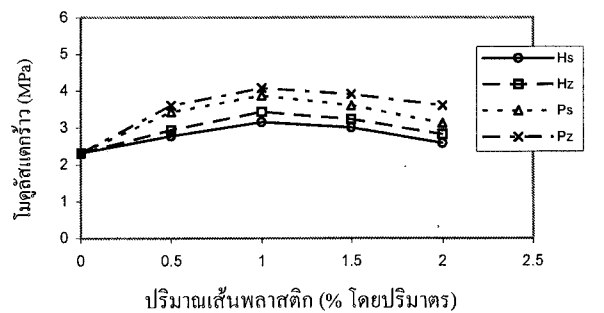
การเสริมเส้นพลาสติก PET และ HDPE ในคอนกรีตมีผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลที่ได้ใน [1], [11]-[16] ดังแสดงในรูปที่ 5 เมื่อพิจารณาปริมาณเส้นใยสังเคราะห์ที่เสริมในคอนกรีตอยู่ในช่วงร้อยละ 0.1 ถึง 2 โดยปริมาตร จะเห็นว่า การเสริมเส้นพลาสติก Hs, Hz, และ Ps ให้กำลังรับแรงอัดลดลงน้อยกว่าเส้นใยโพลีโพรพิลีนและเส้นใยคาร์บอน และมีร้อยละการลดลงใกล้เคียงกับเส้นใยเหล็ก ส่วนเส้นใยธรรมชาติจะเสริมในปริมาณมากกว่าร้อยละ 2 ให้กำลังรับแรงอัดลดลงมากกว่า กำลังรับแรงอัดยังขึ้นกับชนิด ขนาด และรูปร่างของเส้นใย จะพบว่าเส้นพลาสติกซิกแซกกำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงมากกว่าเส้นพลาสติกตรง ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับผลที่ได้ในคอนกรีตเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนแบบลอนที่ทำให้กำลังรับแรงอัดคอนกรีตลดลงน้อยกว่าเส้นใยตรงที่ปริมาณเส้นใยเท่ากัน

3.2 กำลังรับแรงดัด

กำลังรับแรงดัดสามารถใช้ค่าโมดูลัสแตกร้าวในการเปรียบเทียบ จากการศึกษามือถือค่าโมดูลัสแตกร้าวกับปริมาณเส้นพลาสติกที่เสริมในคอนกรีต ได้กราฟเส้นโค้งคว่ำดังแสดงในรูปที่ 6 – 8

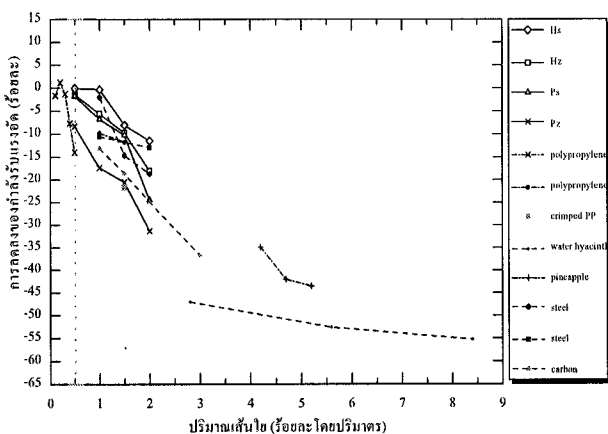


รูปที่ 7 กราฟโมดูลัสแตกร้าวที่ w/c เท่ากับ 0.5



รูปที่ 8 กราฟโมดูลัสแตกร้าวที่ w/c เท่ากับ 0.6

ซึ่งพบว่า คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกมีค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นพลาสติกประมาณร้อยละ 5 ถึง 50 ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เดียวกัน โมดูลัสแตกร้าวมีค่าสูงสุดเมื่อคอนกรีตมีปริมาณเส้นพลาสติกร้อยละ 1.0 โดยปริมาตร เมื่อพิจารณาคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกตามชนิด และรูปร่างของขอบเส้นพลาสติกพบว่า ที่ปริมาณเส้นพลาสติกเท่ากัน ค่าโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก Pz มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ เส้นพลาสติก Ps, Hz และ Hs ตามลำดับ การเสริมเส้นพลาสติกชนิด PET ให้ค่าโมดูลัสแตกร้าวสูงกว่าการเสริมเส้นพลาสติกชนิด HDPE เนื่องจากพลาสติกชนิด PET มีกำลังรับแรงดึงสูงกว่าพลาสติกชนิด HDPE คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกซิกแซกให้ค่าโมดูลัสแตกร้าวสูงกว่าคอนกรีตที่เสริมเส้นพลาสติกตรง ทั้งนี้เส้นพลาสติกซิกแซกทำ

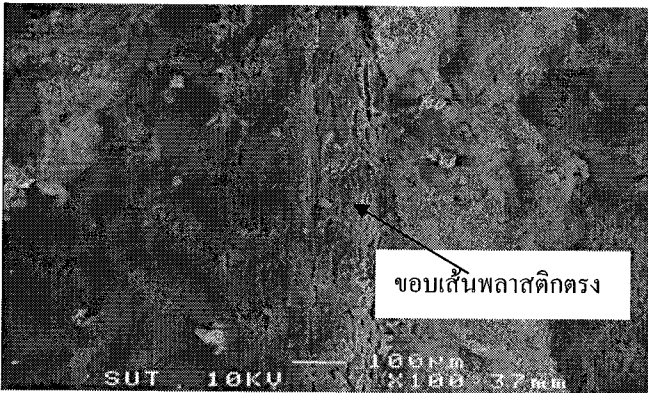


รูปที่ 5 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยชนิดต่างๆ

ให้การยึดเกาะของเส้นพลาสติกกับเนื้อคอนกรีตได้ดีกว่าเส้นพลาสติกตรง ดังแสดงในรูปที่ 9 - 10



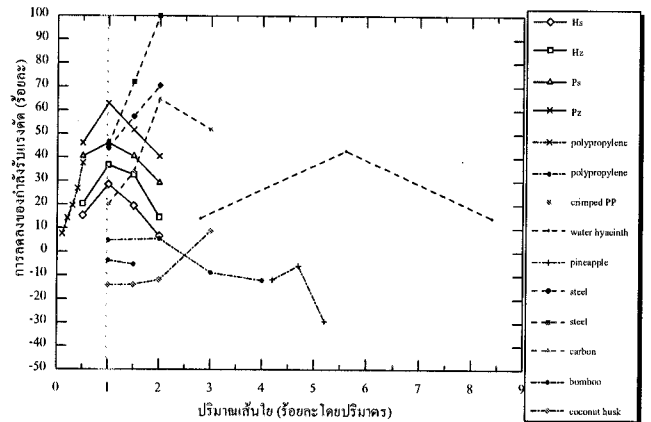
รูปที่ 9 เส้นพลาสติกขอบซิกแซกในเนื้อคอนกรีต



รูปที่ 10 เส้นพลาสติกขอบตรงในเนื้อคอนกรีต

คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก PET และ HDPE มีกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มคล้ายคอนกรีตเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่ได้ใน [1] และ [8] ซึ่งเป็นกลุ่มเส้นใยสังเคราะห์เหมือนกัน ซึ่งการเสริมเส้นพลาสติกให้กำลังรับแรงดัดสูงสุดที่ปริมาณเส้นใยร้อยละ 1.0 เมื่อปริมาณเส้นพลาสติกมากกว่าร้อยละ 1.0 กำลังรับแรงดัดลดลงเนื่องจากการแตกร้าวภายในระหว่างซีเมนต์พลัสกับเส้นใยมีปริมาณเพิ่มขึ้น การเสริมเส้นพลาสติกปริมาณร้อยละ 1.0 มีร้อยละการเพิ่มสูงกว่าเส้นใยโพลีโพรพิลีนและเส้นใยคาร์บอน รวมถึงเส้นใยธรรมชาติดังแสดงในรูปที่ 11 การเสริมเส้นพลาสติก Pz ปริมาณร้อยละ 1.0 ให้ร้อยละการเพิ่มของกำลังรับแรงดัดสูงกว่าเส้นใยเหล็ก แต่การเสริมเส้นพลาสติก Hs และ Hz ปริมาณร้อยละ 1.0 ให้ร้อยละการเพิ่มของกำลังรับแรงดัดต่ำกว่าเส้นใยเหล็ก ส่วนคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กและเส้นใยคาร์บอนให้กำลังรับแรงดัดสูงขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยมากกว่าร้อยละ 1.0 ซึ่งกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยนั้นขึ้นกับ

ปัจจัยต่างๆ ได้แก่ชนิด รูปร่าง ขนาด และปริมาณของเส้นใย จึงมีปริมาณเส้นใยที่เหมาะสมแตกต่างกัน

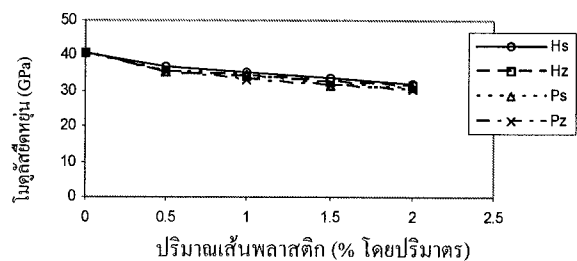


รูปที่ 11 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยชนิดต่างๆ

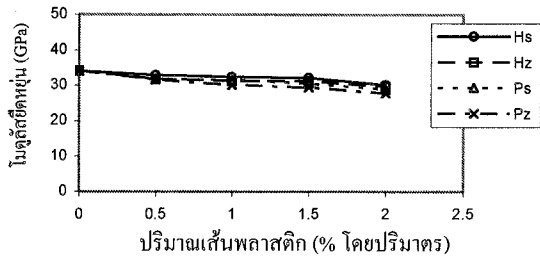
3.3 โมดูลัสยืดหยุ่น

เมื่อพล็อตโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดกับปริมาณเส้นพลาสติกจะได้กราฟเกือบเส้นตรงดังที่แสดงในรูปที่ 12 - 14

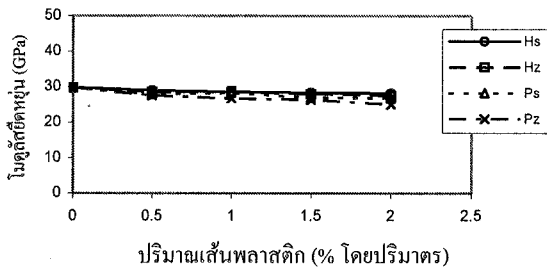
ซึ่งแสดงว่า โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นพลาสติก (ร้อยละ 3 ถึง 24) คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.4 ให้โมดูลัสยืดหยุ่นลดลงมากที่สุด(ร้อยละ 8 ถึง 24) ส่วนที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 และ 0.6 โมดูลัสยืดหยุ่นลดลง(ร้อยละ 3 ถึง 15) เมื่อพิจารณาชนิดพลาสติกและรูปร่างของเส้นพลาสติกพบว่า เส้นพลาสติกทั้งสองชนิดและทั้งสองรูปร่างให้โมดูลัสยืดหยุ่นใกล้เคียงกัน ซึ่งน่าจะมาจากโมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกมีค่าน้อยกว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต



รูปที่ 12 กราฟโมดูลัสยืดหยุ่นที่ w/c เท่ากับ 0.4

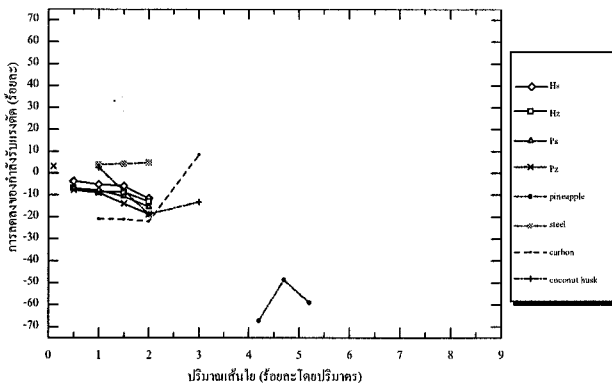


รูปที่ 13 กราฟโมดูลัสยืดหยุ่นที่ w/c เท่ากับ 0.5



รูปที่ 14 กราฟโมดูลัสยืดหยุ่นที่ w/c เท่ากับ 0.6

คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติก PET และ HDPE มีโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงแต่ไม่มากนัก ซึ่งผลคล้ายกับคอนกรีตเสริมเส้นใยชนิดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 15

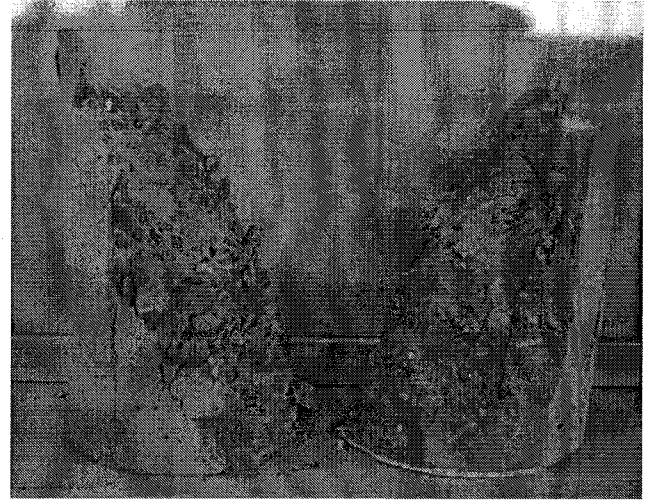


รูปที่ 15 การเปรียบเทียบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเสริมเส้นใยชนิดต่างๆ

3.4 ลักษณะการวิบัติ

เมื่อพิจารณาลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบการรับแรงอัดพบว่า คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกและคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นพลาสติกมีการวิบัติแบบเดียวกันคือ วิบัติเนื่องจากแรงอัดและแรงเฉือนร่วมกัน ดังแสดงในรูปที่ 16 จะสังเกตเห็นได้ว่า รอยแตกร้าวของตัวอย่างคอนกรีต จะทำมุมประมาณ 50-60 องศากับแนวระดับ สาเหตุที่ทำให้คอนกรีตวิบัติในลักษณะดังกล่าว เนื่องจาก คอนกรีตเป็นวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน รวมทั้งแรงเสียดทานระหว่างหั่วกและตัวอย่างทดสอบเนื่องจาก

การขยายตัวด้านข้าง ทำให้หน่วยแรง ที่เกิดขึ้นในวัสดุเปลี่ยนไป และลักษณะวิบัตินี้เหมือนกับที่เกิดกับคอนกรีตเสริมเส้นใยจากพรมที่ใช้แล้ว [9]



รูปที่ 16 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตรูปทรงกระบอก

สำหรับการวิบัติของคานคอนกรีตพบว่า คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกทั้ง 4 แบบ ได้แก่ Hs, Hz, Ps และ Pz ที่ปริมาณเส้นพลาสติกร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร มีลักษณะการวิบัติเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นพลาสติก คือคานตัวอย่างทดสอบจะขาดที่กึ่งกลางจากด้านล่างและแยกเป็นสองส่วนอย่างรวดเร็วเมื่อแรงกระทำขึ้นถึงค่าสูงสุด แต่คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกร้อยละ 1.0, 1.5 และ 2.0 คานตัวอย่างทดสอบจะเกิดรอยแยกที่กึ่งกลางแต่ไม่ขาดเป็นสองส่วน เพราะมีเส้นพลาสติกยึดไว้ ดังแสดงในรูปที่ 17 ซึ่งคล้ายกับที่เกิดกับคอนกรีตที่เสริมเส้นใยจากพรมที่ใช้แล้ว [9] และเส้นใยเหล็ก แต่อย่างไรก็ตามการใช้เส้นใยประเภทต่างๆ เสริมในคอนกรีตวัตถุประสงค์หลักไม่ใช่เพื่อเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตแต่เพื่อเส้นใยจะเข้ามาเชื่อมช่องว่างของรอยแตกร้าวและเพิ่มความเหนียว [10]



รูปที่ 17 ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตที่เสริมเส้นพลาสติก

4 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาพบว่า การเสริมเส้นพลาสติกที่ใช้แล้วแบบสั้นในคอนกรีตสามารถสรุปผลดังนี้

1. กำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อปริมาณเส้นพลาสติกเพิ่มขึ้น การเสริมเส้นพลาสติก Hs ให้กำลังรับแรงอัดลดลงน้อยที่สุด และ Pz ให้กำลังรับแรงอัดต่ำที่สุด
2. คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกมีกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น และการเสริมเส้นพลาสติกทุกแบบปริมาณร้อยละ 1.0 โดยปริมาตร จะให้กำลังรับแรงดัดสูงที่สุด เส้นพลาสติกที่ให้กำลังรับแรงดัดดีที่สุดคือเส้นพลาสติก Pz ส่วนเส้นพลาสติก Hs ให้กำลังรับแรงดัดต่ำที่สุด
3. คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกมีโมดูลัสยืดหยุ่นลดลง และชนิดและรูปร่างของเส้นพลาสติกมีผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นน้อยมาก
4. การวิบัติของคอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกร้อยละ 0.5 เป็นแบบทันทีทันใด เช่นเดียวกับคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นพลาสติก และเมื่อเสริมเส้นพลาสติกร้อยละ 1.0, 1.5, และ 2.0 เส้นพลาสติกจะยึดช่วยให้คอนกรีตไม่ขาดจากกัน
5. คอนกรีตเสริมเส้นพลาสติกมีกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้น และอัตราการลดลงของกำลังรับแรงดัดมากที่สุดที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.4, 0.5 และ 0.6 ตามลำดับ

5 เอกสารอ้างอิง

- [1] ตระกูล อร่ามรักษ์, ประเสริฐ สุวรรณวิชา และพรชัย ธรรมอักษร, 2000. อิทธิพลของเส้นใยโพลีโพรพิลีนต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 6: MAT-25 – MAT-30.
- [2] Naaman, A. E., Garcia, S., Korkmaz, M., and Li, V.C., 1996. Investigation of the use of carpet waste PP fibers in concrete. *Journal of materials in civil engineering*: 782 – 791.
- [3] Khajuria, A., and Balaguru, P., 1992. *Fiber reinforced cement and concrete*. London: E&FN Spon.

- [4] Selke, S. E., 1997. *Understanding Plastics Packaging Technology*. Munich: Carl Hanser Verlag.
- [5] American Society for Testing and Materials (ASTM), 1996. *Annual Book of ASTM Standards: Standard Method of Test for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens: C39*. Volume 04.02. New York: Clearance Center.
- [6] American Society for Testing and Materials (ASTM), 1994. *Annual Book of ASTM Standards: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading): C78*. Volume 04.02. New York: Clearance Center.
- [7] American Society for Testing and Materials (ASTM), 1994. *Annual Book of ASTM Standards: Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ration of Concrete in Compression: C469*. Volume 04.02. New York: Clearance Center.
- [8] Gupta, P., Banthia, N., and Yan, C., 2000. Fiber reinforced wet-mix shotcrete under impact. *Journal of materials in civil engineering*: 81 – 90.
- [9] Wang, Y., Zureick, A. H., Cho, B. S., and Scott, D. E., 1994. Properties of fiber reinforced concrete using recycled fibers from carpet industrial waste. *Journal of materials science*, 29(16) : 191-4199.
- [10] Derucher, K. N., Korfiatis, G. P., and Ezeldin, A. S., 1994. *Materials for Civil and Highway Engineers*, 3th ed. New Jersey: Prentice Hall.
- [11] อนพัช พรหมมาณพ, 2541. คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เสริมเส้นใยสังเคราะห์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [12] พงษ์ศักดิ์ ศรีอำไพ, 2542. คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เสริมเส้นใยสังเคราะห์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [13] Nitima Tantadilok, 2003. *EFFECT OF STEEL FIBERS AND FLY ASH ON CONCRETE STRENGTH*. Kasetsart University.
- [14] Fukushima, T., Shirayama, K., Hitotsuya, K., and Maruyama, T., 1992. *Fiber Reinforced Cement and Concrete*. London: E&FN Spon.
- [15] Ramirez-Coretti, A., 1992. *Fiber Reinforced Cement and Concrete*. London: E&FN Spon.
- [16] Swamy, R. N., 1988. *Natural Fiber Reinforced Cement and Concrete*. London: Blackie.