

บทที่ 4

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้ เป็นการแสดงผลการศึกษาถึงอิทธิพลของเส้นใยโพลีเอทิลีนที่ผสมในสัดส่วนและความขาวดำที่มีต่อพฤติกรรมในการรับแรงดึงและแรงดันของมอร์ต้าซีเมนต์และคอนกรีตตามลำดับ โดยในส่วนแรกจะเป็นการแสดงผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงดึงของมอร์ต้าซีเมนต์ และส่วนสุดท้ายจะเป็นการแสดงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับ ผลการทดสอบกำลังรับแรงดันของคอนกรีต

4.1 ผลการทดสอบหากำลังดึงของมอร์ต้าผสมเส้นใย

ในหัวข้อนี้แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของมอร์ต้าที่ผสมเส้นใยโพลีเอทิลีนที่มีความยาว 5 10 และ 15 ม.m. ในสัดส่วนร้อยละ 1 2 และ 3 โดยปริมาตรของตัวอย่างทดสอบ ซึ่งผลที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ทำการผสมเส้นใย สำหรับการทดสอบที่ใช้จะเป็นการทดสอบหากำลังรับแรงดึงของตัวอย่างทดสอบบริคเกต (Briquette tensile test) ซึ่งรายละเอียดขั้นตอนการทดสอบได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.4 การทดสอบโดยวิธีนี้เป็นอีกวิธีการหนึ่งสำหรับการหากำลังรับแรงดึงของตัวอย่างทดสอบที่มีขนาดเด็ก การทดสอบจะกระทำโดยเครื่องทดสอบกำลังดึงของมอร์ต้าซีเมนต์ อัตราการดึงที่ใช้มีค่าเท่ากับ 1 ม.m./นาที ทำการทดสอบตัวอย่างทดสอบที่อายุ 7 วัน ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบ แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของมอร์ต้า

เงื่อนไขการทดสอบ	แรงดึง (กก.)	ระยะยืด(ม.m.)
1. ไม่มีผสมเส้นใย	159.53	1.099
	156.97	1.063
	160.43	1.087
2. ผสมเส้นใย 5 ม.m. ปริมาณ 1 %	178.94	1.222
	180.96	1.243
	182.42	1.115
3. ผสมเส้นใย 5 ม.m. ปริมาณ 2 %	197.28	1.014
	200.44	0.983
	200.13	1.127
4. ผสมเส้นใย 5 ม.m. ปริมาณ 3 %	207.13	1.453

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของมอร์ต้า

เงื่อนไขการทดสอบ	แรงดึง (กก.)	ระยะยึด(ม.ม.)
4. ผสมเส้นใย 5 ม.m. ปริมาณ 3 %	205.92	1.449
	208.14	1.523
5. ผสมเส้นใย 10 ม.m. ปริมาณ 1 %	110.04	0.722
	101.51	0.624
	115.24	0.727
6. ผสมเส้นใย 10 ม.m. ปริมาณ 2 %	128.24	1.089
	130.43	1.024
	132.19	1.153
7. ผสมเส้นใย 10 ม.m. ปริมาณ 3 %	230.67	1.253
	236.70	1.462
	237.70	1.239
8. ผสมเส้นใย 15 ม.m. ปริมาณ 1 %	120.32	1.018
	180.37	1.456
	124.44	1.082
9. ผสมเส้นใย 15 ม.m. ปริมาณ 2 %	167.71	1.242
	158.68	1.392
	163.83	1.214
10. ผสมเส้นใย 15 ม.m. ปริมาณ 3 %	199.24	1.142
	203.14	1.227
	195.81	1.163

จากตารางที่ 4.1 พบว่า มอร์ต้าที่ผสมเส้นใยโพลีอิทธิลีน ความยาว 5 ม.m. ในปริมาณ 1% โดยปริมาตรของตัวอย่างทดสอบ มีกำลังรับแรงดึงที่สูงขึ้นมากกว่ากรณีไม่ผสมเส้นใย และมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงมากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็น 2% และ 3% โดยปริมาตรของตัวอย่างทดสอบ ตามลำดับ

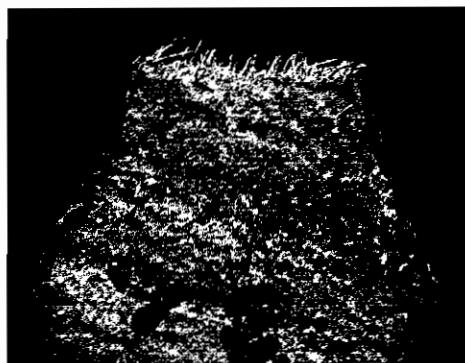
สำหรับการผสมเส้นใยโพลีอิทธิลีนที่มีความยาว 10 ม.m. ปริมาณ 1% และ 2% โดยปริมาตรของตัวอย่างทดสอบ กำลังรับแรงดึงมีค่าต่ำกว่ากรณีมอร์ต้าที่ไม่ผสมเส้นใย แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็น 3% โดยปริมาตรของตัวอย่างทดสอบ กำลังรับแรงดึงกลับมีค่ามากกว่า อายุ่ไร้ค่าการเพิ่ม

ปริมาณเส้นใยโพลิอธิลีน ที่มีความยาว 10 ม.m. จาก 1% เป็น 2% และ 3% ตามลำดับ ผลจากการทดสอบ พบว่า ค่ากำลังรับแรงดึงของมอร์ต้ามีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ กำลังรับแรงดึงของมอร์ต้าที่ผสมเส้นใยโพลิอธิลีน ที่ความยาว 10 ม.m. ที่ปริมาณ 3% โดยปริมาตรตัวอย่างทดสอบ การทดสอบ พบว่า ให้ค่ากำลังรับแรงดึงสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่นๆ

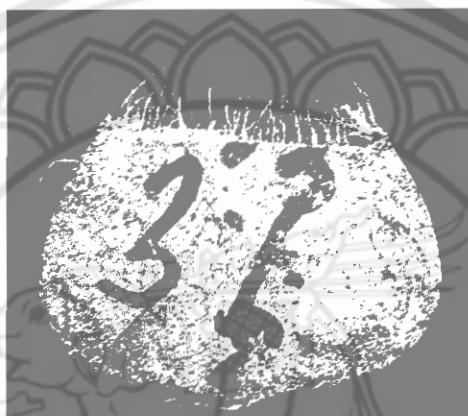
ในส่วนของการผสมเส้นใยโพลิอธิลีน ที่ความยาว 15 ม.m. ผลการทดสอบที่ได้ คล้ายกับกรณีของเส้นใย ที่ความยาว 10 ม.m. นั่นคือ ค่ากำลังรับแรงดึงในกรณีที่ผสมเส้นใยปริมาณ 1% โดยปริมาตรของตัวอย่างทดสอบ มีค่าน้อยกว่ากรณีที่ไม่ผสมเส้นใย สำหรับการผสมเส้นใยที่ปริมาณ 2% และ 3% โดยปริมาตรของตัวอย่างทดสอบ ค่ากำลังรับแรงดึงมีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่ผสมเส้นใย นอกจากนี้หากพิจารณาเฉพาะตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใย พบว่า ปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้กำลังรับแรงดึงของตัวอย่างทดสอบมีค่าสูงขึ้น

จากผลการทดสอบที่ได้ พบว่า การใส่เส้นใยโพลิอธิลีน ที่มีความยาว 5 ม.m. ลงในส่วนผสม มีแนวโน้มในการเพิ่มกำลังการรับแรงดึงของมอร์ต้าซีเมนต์ และค่ากำลังรับแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเส้นใยที่ใช้ สำหรับค่ากำลังรับแรงดึงของตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใยที่มีความยาว 10 ม.m. และ 15 ม.m. ในกรณีที่มีค่าน้อยกว่าตัวอย่างทดสอบที่ไม่ผสมเส้นใย เมื่อพิจารณาผิวแตกหักของตัวอย่างทดสอบ พบว่า ปริมาณเส้นใยที่จัดเรียงตัวตั้งได้ยากกับรอยร้าว มีจำนวนน้อยกว่าในกรณีของตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใย ที่ความยาว 5 ม.m. ดังแสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า นอกเหนือจาก ชนิดของเส้นใยที่ใช้ ปริมาณ แล้วการจัดเรียงตัวของเส้นใย ก็มีผลต่อสมบัติของมอร์ต้าหรือคอนกรีต ดังนั้น นี่จึงอาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่ากำลังรับแรงดึงที่ได้มีค่าน้อยกว่ากรณีที่ไม่ผสมเส้นใย นอกจากนี้ เนื่องจากตัวอย่างทดสอบ มีขนาดเล็ก เส้นใยที่มีความยาว 10 ม.m. และ 15 ม.m. ในขณะที่ผสมจะมีการจับตัวกันเป็นก้อน (fiber balling) ดังแสดงในรูปที่ 3.15 และมีการกระจายตัวในเนื้อของส่วนผสมไม่สม่ำเสมอ ดังนั้น ในการตักมอร์ต้าที่ผสมเส้นใยดังกล่าวมาใส่ลงในแบบหล่อที่มีขนาดเล็ก อาจทำให้ค่าการทดสอบที่ได้มีความแปรปรวนค่อนข้างสูง การศึกษาอิทธิพลของการจัดเรียงตัวของเส้นใยและขนาดความแปรปรวนของผลการทดสอบ จึงเป็นอีกประเด็นที่ควรได้รับการศึกษาเพิ่มเติม แต่เนื่องจากระยะเวลาที่จำกัดในการศึกษานี้ จึงทำให้ไม่สามารถศึกษาในประเด็นที่กล่าวต่อไปได้

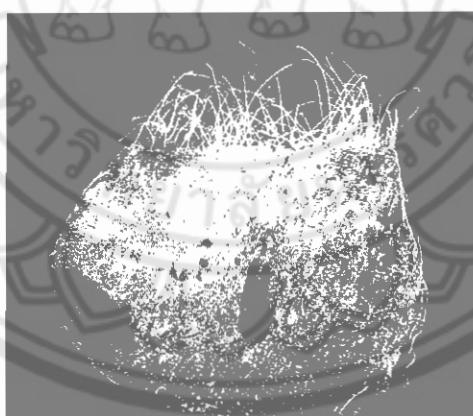




(a)



(b)



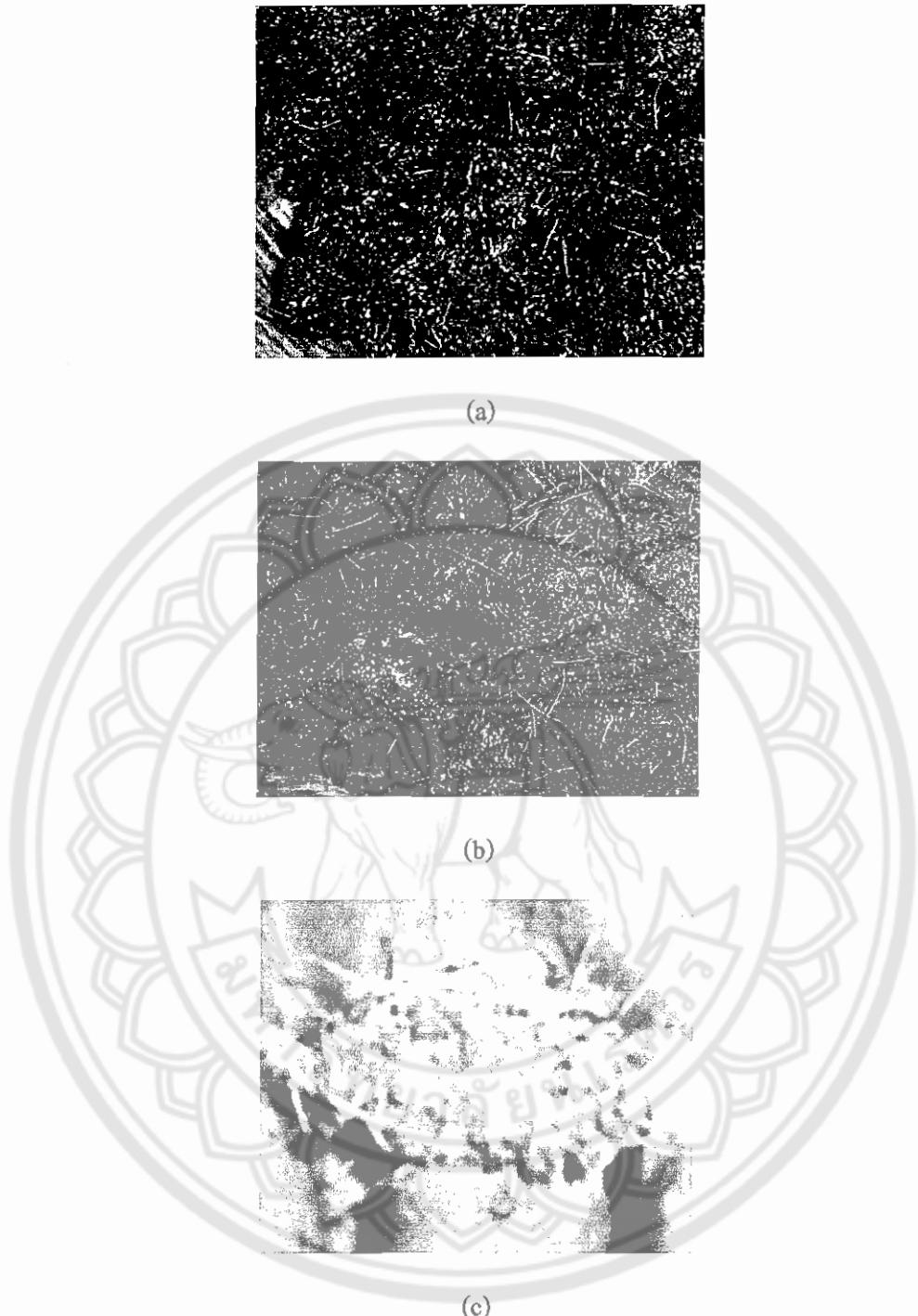
(c)

รูปที่ 4.2 การจัดเรียงตัวของเส้นใยโพลิเอทิลีนที่ผสมในมอร์ต้าซีเมนต์

(a) การจัดเรียงตัว มอร์ต้าที่ผสมเส้นใย ยาว 5 ม.ม.

(b) การจัดเรียงตัว มอร์ต้าที่ผสมเส้นใย ยาว 10 ม.ม.

(c) การจัดเรียงตัว มอร์ต้าที่ผสมเส้นใย ยาว 15 ม.ม.



รูปที่ 4.3 แสดงการกระจายตัวของเส้นไขขยะที่ทำการผสมมอร์ต้า

- (a) มอร์ต้าที่ผสมเส้นไข ยาว 5 ม.m. ปริมาณ 1%
- (b) มอร์ต้าที่ผสมเส้นไข ยาว 10 ม.m. ปริมาณ 2%
- (c) มอร์ต้าที่ผสมเส้นไข ยาว 15 ม.m. ปริมาณ 3%

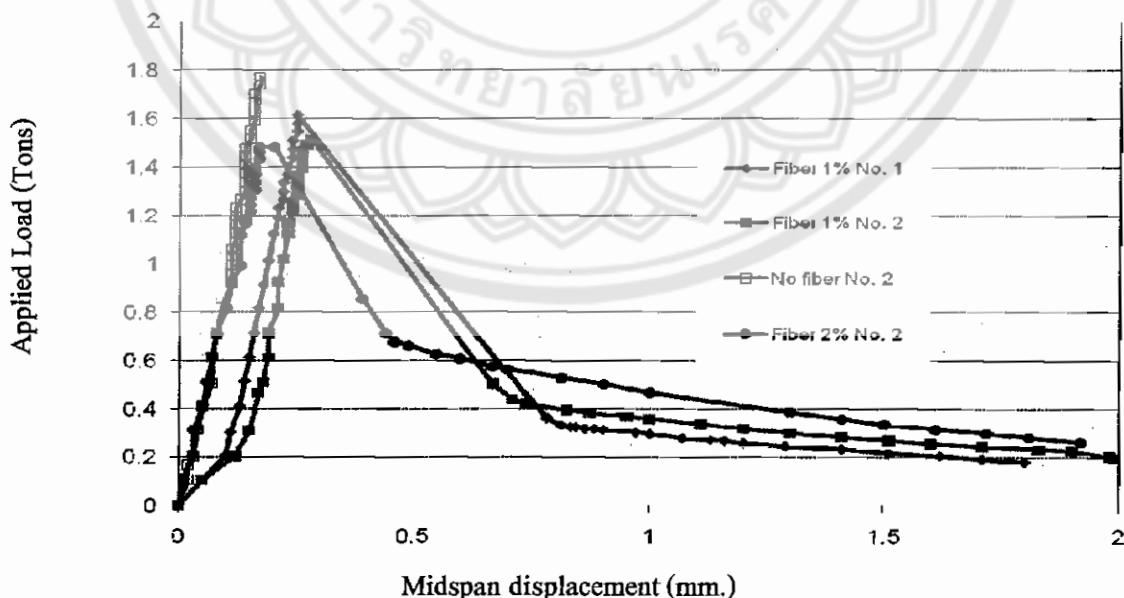
เมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการทดสอบและเทลงแบบหล่อ ผลการศึกษา พบว่า การใช้เส้นใยโพลิเอทิลีน ที่มีความยาว 5 ม.ม. มีความหนาแน่นมากกว่าเส้นใยที่ยาว 10 ม.ม. และ 15 ม.ม. ดังนั้น ใน การทดสอบพฤติกรรมการรับแรงดัดของคอนกรีตที่จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป จึงเลือกใช้เส้นใยที่มีความยาว 5 ม.ม. แต่อย่างไรก็ตาม จากการสังเกตตัวอย่างทดสอบ ภายหลังการทดสอบ พบว่า ตัวอย่างทดสอบ ที่ไม่ผ่านเส้นใยจะขาดออกจากกันทันที แต่ตัวอย่างทดสอบทั้งหมดที่ผ่านเส้นใย จะไม่ขาดออกจากกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และเมื่อทำการดึงตัวอย่างทดสอบ ให้ขาดออกจากกัน พบว่า เส้นใยจะถูกดึงหลุดออกจาก (pull-out failure) เนื่องจากเครื่องทดสอบจะหยุดดึงตัวอย่างทดสอบ เมื่อตัวอย่างทดสอบเริ่มเกิดการแตกร้าว ดังนั้น ในกรณีที่ผ่านเส้นใยจึงไม่สามารถทราบถึง พฤติกรรมภายหลังจากเมื่อเกิดการแตกร้าว ซึ่งโดยทั่วไปเมื่อเกิดการแตกร้าว รอยร้าวดังกล่าวจะถูกยึด รั้งไว้ด้วยเส้นใยที่วางตั้งได้หากบ่อยครั้ง ซึ่งมีผลทำให้ตัวอย่างทดสอบ สามารถรับแรงดึงต่อไปได้อีก และความสามารถในการรับแรงดึงจะขึ้นอยู่กับค่าแรงยึดหน่วงระหว่างเส้นใยกับเพสต์ที่อยู่โดยรอบ ซึ่งค่าแรงยึดหน่วงดังกล่าว จะประกอบด้วยแรงยึดหน่วงเชิงเคมีและเชิงกล สำหรับเส้นใยโพลิเอทิลีน ค่าแรงยึดหน่วงทางเคมีมีค่าน้อยมาก ค่าแรงยึดหน่วงส่วนใหญ่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างเส้นใย และซีเมนเพสต์โดยรอบ ถ้าหากเส้นใยมีระยะผ่องที่เพียงพอ เมื่อค่าแรงดึงในตัวอย่างทดสอบ ณ จุด ใกล้เคียงกับบ่อยแตกร้าวมีค่ามากกว่าความสามารถในการรับแรงดึงของคอนกรีต บริเวณดังกล่าวก็จะเกิดการแตกร้าวขึ้นมาอีก ซึ่งพฤติกรรมการเกิดการแตกร้าวหลายรายรอย ก่อนที่ตัวอย่างทดสอบจะขาดออกจากกันนี้ เป็นพฤติกรรมที่ต้องการ ดังนั้น จะพบว่าเส้นใยควรจะมีกำลังรับแรงดึงและระยะผ่องยึด หรือความยาวที่เพียงพอ แต่เนื่องจากระยะเวลาที่จำกัดในการศึกษา รวมถึงข้อจำกัดในเรื่องของเครื่องมือทดสอบที่มีในห้องปฏิบัติการ จึงทำให้ไม่สามารถศึกษาในเรื่องนี้ต่อไปได้ ดังนั้น หากไม่คำนึงถึงการจับตัวกันเป็นก้อนของเส้นใย อาจจะสามารถกล่าวได้ว่าการทดสอบเส้นใยที่ความยาว 10 ม.ม. หรือ 15 ม.ม. มีแนวโน้มที่จะทำให้ตัวอย่างทดสอบ (มอร์ต้า) มีค่าความหนาแน่นมากกว่าในกรณี 5 ม.ม. จากผลการศึกษาที่ผ่านมา [2] พบว่า ปริมาณของเส้นใยที่ใช้มีผลต่อการจับตัวกันเป็นก้อน (fiber balling) ดังนั้น เส้นใยที่ความยาว 10 ม.ม. และ 15 ม.ม. หากใช้ในปริมาณที่พอเหมาะ น่าจะสามารถป้องกันการจับตัวเป็นก้อนของเส้นใยในขณะทดสอบมอร์ต้าได้



รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะรอยแตกร้าวของตัวอย่างทดสอบบริเวณสำหรับตัวอย่างที่ไม่ผสมเส้นใยและผสมเส้นใยโพลิเอทิลีน ยาว 5 ม.ม. ปริมาณ 2% โดยปริมาตรของตัวอย่างทดสอบ

4.2 พฤติกรรมการรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยโพลิเอทิลีน

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาถึงพฤติกรรมในการรับแรงดัด ของงานคอนกรีตที่ผสมเส้นใยโพลิเอทิลีน ที่มีความยาว 5 ม.ม. ในสัดส่วนตั้งแต่ 1 ถึง 3% โดยผลการทดสอบที่ได้ จะถูกเปรียบเทียบ กับกรณีงานคอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใย รายละเอียดของการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ ได้ถูกกล่าวไว้ แล้วใน หัวข้อ 3.5 สมบัติที่ถูกพิจารณาในหัวข้อนี้ ประกอบด้วยค่าความหนาแน่น และความกว้าง ของรอยร้าว ณ จุดที่งานเริ่มแตกหัก



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่ง ณ จุดกึ่งกลางงานคอนกรีตที่ผสมเส้นใย

รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและค่าการโก่งตัว ณ จุดกึ่งกลางคาน ซึ่งจากผลที่ได้ พบว่า พฤติกรรมภายในช่วงก่อนจะถึงจุดสูงสุด (Pre-peak response) มีพฤติกรรมคล้ายคลึงกัน โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและค่าการโก่งตัว ณ จุดกึ่งกลางคานมีลักษณะเชิงเส้น สำหรับค่าที่บันทึกได้ 3 ตำแหน่งแรก ของกรณีคอนกรีตที่ผสมเส้นใยโพลิเอทิลีน ในปริมาณ 1% โดยปริมาตรคานทดสอบ ซึ่งมีค่าแตกต่างไปจากการอื่นๆ อาจจะเกิดจากการขับตัวของเซนเซอร์ในขณะที่เริ่มทำการทดสอบ

เมื่อคานเริ่มแตกร้าว (ณ จุดสูงสุด) พฤติกรรมของคานที่ไม่ได้ผสมเส้นใยมีความแตกต่างโดยสิ้นเชิงกับกรณีที่ผสมเส้นใย กล่าวคือ ค่ากำลังรับแรงมีค่าต่ำลงอย่างรวดเร็วจนคร่อมบันทึกข้อมูลไม่สามารถบันทึกได้ทัน (กำหนดให้เครื่องบันทึกค่าทุก 1 วินาที ภายหลังจุดสูงสุด) สำหรับกรณีของคานที่ผสมเส้นใย เมื่อคานเริ่มแตกร้าว เส้นใยที่ดัดเรียงตัวในตำแหน่งของรอยแตก จะทำหน้าที่ขึ้นร่องรอยแตกร้าวดังกล่าวไว้ ค่าแรงคงที่ ณ ตำแหน่งตั้งกล่าวจะถูกรับไปโดยเส้นใยเหล่านี้ ซึ่งความสามารถในการรับแรงจากผลการทดสอบ พบว่า จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่ใช้

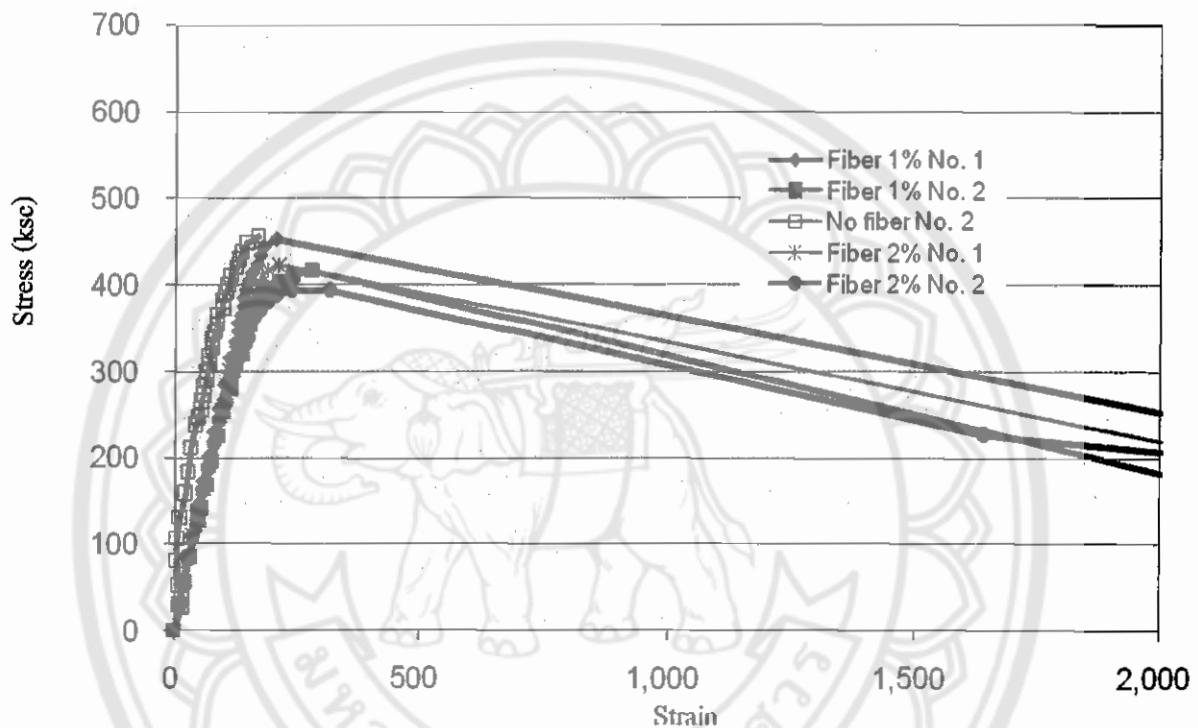
ค่าความเหนียวของคานคอนกรีต สามารถแสดงในรูปของค่าความเหนียว (Toughness index) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงและค่าความโก่งตัวของคาน ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อด้านนี้ ความเหนียวของคานทดสอบ ในหัวข้อ 3.5

ดังที่กล่าวไว้แล้ว ค่าความเหนียวของคานสามารถพิจารณาจากค่าค่าธรรมเนียมเหนียว (Toughness index) ซึ่งคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงกระทำและค่าความโก่ง ณ จุดกึ่งกลางคาน คอนกรีต ค่าที่คำนวณได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 จากผลที่ได้ พบว่า การผสมเส้นใยลงไปมีผลทำให้ค่าความเหนียวของคานสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของคานที่ไม่มีการผสมเส้นใย และเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยขึ้นเป็น 2% โดยปริมาตรของคานทดสอบ พบว่า ค่าค่าธรรมเนียมเหนียวมีค่ามากขึ้น ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านมาซึ่งเป็นการศึกษาภัณฑ์เส้นใยชนิดอื่น

ตารางที่ 4.2 ค่าค่าธรรมเนียมเหนียว (Toughness Indices) ของคานคอนกรีตที่ผสมเส้นใย 1% และ 2%

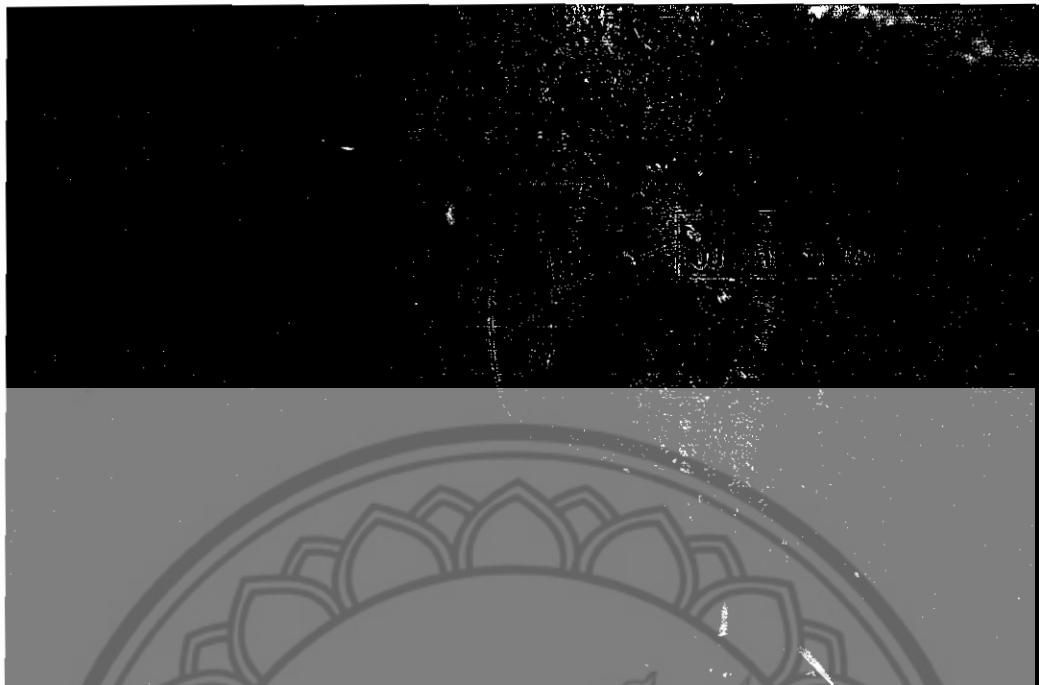
FRC Type	ค่าค่าธรรมเนียมเหนียว (Toughness Indices)		
	I5	I10	I20
Fiber 1%	3.76	6.47	7.42
Fiber 2%	4.37	6.50	8.82

รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดสำหรับงานที่ไม่ผสมเส้นใย และงานที่ผสมเส้นใยโพลิเอทธิลีน ความยาว 5 ม.m. ในปริมาณ 1% และ 2% โดยปริมาตรงานทดสอบ ผลที่ได้พบว่าค่าความเครียด ณ จุดแตกร้าว (cracking strain) ของงาน มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใส่เส้นใยลงในส่วนผสม แต่อย่างไรก็ตามอัตราพลของปริมาณเส้นใย ต่อ ค่าความเครียด ณ จุดแตกร้าวนี้ ยังไม่ชัดเจน ควรต้องมีการศึกษาโดยละเอียดต่อไป



รูปที่ 4.6 พฤติกรรมรับแรงกดของงานคอนกรีตเสริมเส้นใยโพลิเอทธิลีน

เมื่อค่าหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำ มีค่ามากกว่าความสามารถในการรับแรงดึง ของคอนกรีต คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าว หากอยู่แตกร้าวมีความกว้างมากเกินไป ก็อาจส่งผลต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างได้ จากผลการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงดดดของคอนกรีตเสริมเส้นใย พบว่า งานคอนกรีตเสริมเส้นใยที่ใช้ในการทดสอบ มีลักษณะรอยแตกร้าวที่เล็กและแคบ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 เมื่อเปรียบเทียบกับรอยแตกร้าวของงานคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นใย ซึ่งมีรอยแตกร้าวที่กว้าง อย่างเห็นได้ชัดเจน (รูปที่ 4.8) ดังนั้น จากผลการศึกษาในเบื้องต้นนี้ พบว่า เส้นใยมีผลทำให้รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นมีความกว้างลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับงานคอนกรีตที่ไม่เสริมเส้นใย อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาในประเด็นนี้โดยละเอียดต่อไป



รูปที่ 4.7 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นกับคานคอนกรีตที่ผสมเส้นใยโพลิเอทิลีน ความยาว 5 ม. ม. ปริมาณ 2 %



รูปที่ 4.8 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นกับคานคอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใยหลังจากการทดสอบ