หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ผลการทดลอง และการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลอง

5.1 คานคอนกรีตภายใต้แรงบิด

5.1.1 คานคอนกรีตล้วน

1. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด และมุมบิด นำผลการทดลองของคาน B_0 B_4 B_9 และ B_{11} มาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 5.1 พบว่าในช่วงแรก พฤติกรรมของคานคอนกรีตเป็นแบบวัสดุยืดหยุ่น กล่าวคือความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมจะเป็นเส้นตรงจนถึง 10.80×10^3 11.05×10^3 และ 10.05×10^3 กก-ซม สำหรับคาน B_0 B_4 B_9 หรือเท่ากับ 81 77 และ 82 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ต่อจากนี้เมื่อเพิ่มแรงบิด ความสัมพันธ์จะมีลักษณะค่อยๆ โค้งโดยมีค่าของความชันลดลง จนกระทั่งคานคอนกรีตชำรุด แสดงว่าช่วงหลังนี้พฤติกรรมของการรับแรงเปลี่ยนจากแบบของ Saint Venant's เป็นแบบสลิว โยเกิง

2. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด และความเครียดของคอนกรีต นำค่าความเครียดซึ่งอ่านค่าจากเกจวัดความเครียด ที่ติดไว้บนผิวของคอนกรีต ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของด้านลึกที่ระยะ 1/2 ของความยาวประสิทธิผลของคาน B_0 B_4 และที่ระยะ 1/3 ของความยาวประสิทธิผลของคาน B_9 B_{11} มาเขียนกราฟดังรูปที่ 5.2 พบว่า

ก) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด และหน่วยการหดตัวของคอนกรีต มีลักษณะเป็นเส้นตรงในช่วงแรงบิดน้อยๆ เมื่อเพิ่มแรงบิดความสัมพันธ์นี้จะค่อยๆ โค้งจนกระทั่งคานคอนกรีตเกิดการชำรุด ซึ่งลักษณะของกราฟที่ได้เหมือนกับ กราฟที่ได้จากการทดสอบ หาความต้านทานแรงอัดของคอนกรีต แสดงว่าคอนกรีตในแนวเอียง 45° นี้รับแรงอัด ตลอดเวลาแห่งการรับแรงบิดของคานคอนกรีต

ข) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด และหน่วยการยืดตัวของคอนกรีต มีลักษณะเป็นเส้นตรงในช่วงแรงบิดน้อยๆเช่นกัน แต่ในช่วงแรงบิดมากๆใกล้คานชำรุด ความสัมพันธ์จะไม่แน่นอน เช่น คาน B_{11} ขณะใกล้ชำรุดหน่วยการยืดตัวลดลง ซึ่งอาจสันนิษฐานได้ว่าในช่วงแรก พฤติกรรมของคานคอนกรีต เป็นแบบวัสดุยืดหยุ่น ครั้นใกล้ชำรุดจะเกิดการเปลี่ยนกลไกของการรับแรงบิด

3. ลักษณะการชำรุดของคานคอนกรีตล้วน การชำรุดเกิดในทันทีที่รอยแตกร้าวปรากฏ และมีลักษณะของการชำรุด ดังแสดงในรูปที่ 5.3 จะเห็นได้ว่าระนาบที่เกิดการชำรุด ประกอบด้วยรอยแตกร้าวซึ่งเอียงทำมุมประมาณ 45° กับแกนของคานคอนกรีต ทางด้านลึกทั้ง 2 ด้าน โดยที่รอยแตกด้านหนึ่งจะเรียบกว่าอีกด้านหนึ่ง ซึ่งอาจสันนิษฐานได้ว่าด้านที่เรียบกว่ารับแรงดึง ส่วนด้านที่ขรุขระกว่ารับแรงอัด และรอยแตกทั้ง 2 ด้านดังกล่าว เชื่อมต่อกันด้วยรอยแตกร้าวทางด้านกว้างในลักษณะที่โค้งเล็กน้อย

4. การเปรียบเทียบผลการทดลอง ตารางที่ 5.1 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลจากทางทฤษฎีสคิว เบนดิง อีลาสติก[1] และพลาสติก[2] โดยตลอดการวิเคราะห์ผลจะให้ค่าแรงดึงประลัย มีค่าเท่ากับโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีต หรือมีค่าเท่ากับ $1.99\sqrt{f'_c}$ ตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์คาน B_o ซึ่งมีคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้คือ

ขนาดรูปตัดกว้าง 10 ซม ลึก 15 ซม ความต้านทานแรงอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 170.60 กก/ซม^2 และจากการทดลองพบว่า แรงบิดต้านทานประลัยมีค่าเท่ากับ 13,297 กก-ซม มุมบิดประลัยมีค่าเท่ากับ 57.25×10^{-6} เรเดียน/ซม

ก) ทฤษฎีสคิว เบนดิง

$$T_u^{(1)} = (b^2 + 65)h\sqrt[3]{f'_c}$$

$$= (10^2 + 65)\,15\sqrt[3]{170.60}$$

$$= 13,727 \quad \text{กก-ซม}$$

$$\theta_u^{(1)} = \frac{6.4 \times 10^{-5}(b^2 + 65)}{\beta b^3}$$

$$= \frac{6.4 \times 10^{-5} (10^2 + 65)}{0.196 \times 10^3}$$

$$= 53.9 \times 10^{-6} \quad \text{เรเดียน/ซม}$$

ข) ทฤษฎีอีลาสติก

$$T_u^{(2)} = \alpha b^2 h f_t$$

$$= .231 \times 10^2 \times 15 \times 1.99\sqrt{170.60}$$

$$= 9,006 \quad \text{กก-ซม}$$

ก) ทฤษฎีพลาสติก

$$T_u^{(3)} = (\frac{1}{2} - \frac{1}{6}\frac{b}{h})\, b^2 h\, f_t$$

$$= (\frac{1}{2} - \frac{1}{6} \times \frac{10}{15})\, 10^2 \times 15 \times 1.99\sqrt{170.60}$$

$$= 15,162 \quad \text{กก-ซม}$$

และสำหรับผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบสามารถสรุปได้ดังนี้

ทฤษฎี	ค่าเฉลี่ย		ความเบี่ยงเบนมาตราฐาน	
	T_u ทดลอง / T_u คำนวน	θ_u ทดลอง / θ_u คำนวน	T_u ทดลอง / T_u คำนวน	θ_u ทดลอง / θ_u คำนวน
อีลาสติก	1.48	-	0.031	-
สติว เบนดิง	0.98	1.03	0.034	0.118
พลาสติก	0.88	-	0.019	-

5.1.2 คานคอนกรีตเสริมเหล็ก

1) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมบิด นำผลการทดสอบของคาน B_1 B_2 B_3 B_6 B_7 B_8 B_{10} B_{12} และ B_{13} มาเขียนกราฟโดยแยกเป็นกลุ่มๆ ตามระยะเรียงของเหล็กลูกตั้งคือ 10 7.5 และ 5 ซม ได้ดังรูปที่ 5.4 ถึงรูปที่ 5.6 ตามลำดับ จากกราฟเหล่านี้ พบว่าก่อนคอนกรีตแตกร้าว ความสัมพันธ์ระหว่างมุมบิดและแรงบิด อยู่ในลักษณะเส้นตรง แล้วก่อยเป็นเส้นโค้ง เมื่อคอนกรีตใกล้แตกร้าว ครั้นคอนกรีตแตกร้าว ช่วงนี้แรงบิดจะมีค่าลงที่ในขณะที่มุมบิดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดๆหนึ่ง ความสัมพันธ์จึงเริ่มมีความชัน แสดงความสัมพันธ์อีกครั้งหนึ่ง แสดงว่าก่อนคอนกรีตเกิดการแตกร้าว คานคอนกรีตจะประพฤติเป็นวัสดุยืดหยุ่น และค่าสติฟเนสของการรับแรงบิดขึ้นอยู่กับคอนกรีตเกือบทั้งหมด ครั้นใกล้เกิดการแตกร้าวภายในคานคอนกรีตเริ่มมีการจัดกลไกของการรับแรงใหม่ กล่าวคือเหล็กเสริมเริ่มมีบทบาทในการช่วยรับแรง ทำให้เส้นแสดงความสัมพันธ์เริ่มมีความชันอีกครั้งหนึ่ง แต่ความชันจะน้อยกว่าก่อนคอนกรีตเกิดการแตกร้าว เพราะค่าสติฟเนสของการรับแรงบิดซึ่งขึ้นอยู่กับเหล็กเสริมทั้ง 2 ทิศทาง และกับคอนกรีตมีค่าน้อยกว่า ก่อนคอนกรีตเกิดการแตกร้าว เป็นเหตุให้อัตราการเพิ่มของมุมบิด มากกว่าแรงบิด

นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ถ้ากำหนดปริมาณเหล็กเสริมตามยาวแล้ว ลดระยะเรียงของเหล็กลูกตั้ง หรือกำหนดระยะเรียงของเหล็กลูกตั้ง แล้ว เพิ่มปริมาณเหล็กเสริมตามยาวจะทำให้ความต้านทานแรงบิดประลัยเพิ่มขึ้น และช่วงการเปลี่ยนกลไกของการรับแรงขณะคอนกรีตเกิดการแตกร้าวสั้นเข้า แสดงว่าทั้งเหล็กตามยาว และเหล็กลูกตั้ง มีส่วนช่วยรับแรงบิดและมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน

2) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด และหน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริมตามยาว นำค่าแรงบิดที่อ่านจาก proving ring และหน่วยการยืดตัวของเหล็ก จากเกจวัดความเครียด มาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 5.7 ถึงรูปที่ 5.9 จะเห็นได้ว่าก่อนคอนกรีตแตกร้าว หน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริมมีค่าน้อยมาก แต่ภายหลังคอนกรีตแตกร้าว หน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริมตามยาวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แสดงว่าก่อนคอนกรีต

แตกร้าว คอนกรีตจะเป็นตัวรับแรงบิดเกือบทั้งหมด และหลังคอนกรีตเกิดการแตกร้าว เหล็กเสริมตามยาวจะมีส่วนช่วยในการรับแรงบิดจนกระทั่งคานชำรุด

3) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด และหน่วยการยืดตัวของเหล็กลูกตั้ง รูปที่ 5.10 ถึงรูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด และหน่วยการยืดตัวของเหล็กลูกตั้ง จะเห็นได้ว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับ เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด และหน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริมตามยาว แสดงว่าเหล็กลูกตั้งเริ่มมีส่วนช่วยในการรับแรงบิด หลังคอนกรีตเกิดการแตกร้าว

4) ลักษณะการชำรุด และการเปรียบเทียบผลการทดลอง

การแตกร้าวของคานคอนกรีต การทดลองนี้ พบว่ารอยแตกร้าวครั้งแรกเกิดที่บริเวณกลางของด้านลึกทั้ง 2 ด้าน ที่ระยะ $\frac{1}{3}$ ของความยาวประสิทธิผล และที่กึ่งกลางความยาวคานต่อมาจึงค่อยสังเกตุพบรอยแตกร้าว เกิดขึ้นที่บริเวณกึ่งกลางด้านกว้าง ทั้งผิวบนและล่างของคาน ครั้นเมื่อเพิ่มแรงบิดมากขึ้นอีก รอยแตกร้าวนี้จะค่อยๆ ขยายในลักษณะที่เอียงทำมุมกับแกนของคานไปจดบริเวณขอบคาน และบางรอยจะขยายเข้าไปยังด้านที่ต่อเนื่องกัน จนในที่สุดคานชำรุด จะสังเกตุพบว่ารอยแตกร้าวนี้มีลักษณะเป็นเกลียว แต่จะต่อเนื่องกันเพียง 3 ด้าน ดังรูปที่ 5.13 ถึงรูปที่ 5.20 นอกจากนี้ยังพบอีกว่าในคานแต่ละกลุ่มเมื่อกำหนดระยะเรียงของเหล็กลูกตั้ง แล้วเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมตามยาว รอยแตกร้าวจะเพิ่มขึ้นพร้อมทั้งระยะห่างของรอยแตกร้าวจะมีค่าน้อยลง

การเปรียบเทียบผลการทดลอง ตารางที่ 5.2 ถึงตารางที่ 5.5 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างผลจากการทดลองและผลจากทฤษฎีสคิว เบนดิง ทฤษฎีไดอะโกนอล คอมเพรสชั่น ฟิล ทั้งค่าของความต้านทานแรงบิดประลัย และลักษณะการชำรุด สำหรับการวิเคราะห์ผลทางทฤษฎีสคิว เบนดิง เพื่อให้สามารถครอบคลุมลักษณะของการชำรุดได้ทั้งหมด ได้พิจารณาจาก

ก) กรณีที่เหล็กเสริมในคาน ต่ำกว่าเหล็กเสริมในภาวะสมดุลย์มากๆคือ $\rho_w < 0.5\ \rho_{wb}$ และ $\rho_{st} < 0.5\ \rho_{stb}$ แล้วให้คำนึงถึงผลของคอนกรีตมีส่วนช่วยในการรับแรงบิด ดังสมการ

$$T_u = T_{uc} + T_{us}$$

โดยที่ $T_{uc} = \frac{2.4\, x^2 y \sqrt{f'_c}}{\sqrt{x}}$ ป่อนด์-นิ้ว

T_{us} = ค่าที่วิเคราะห์ได้จากทฤษฎีสคิว เบนดิง

ข) ในการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ ของการเสริมเหล็ก ให้คำนวณหาโดยเทียบกับเนื้อที่ของคอนกรีต ที่บรรจุอยู่ภายในถัดจากเหล็กเสริมตามยาวเข้าไปดังรูปที่ 5.a แทนการเปรียบเทียบกับเนื้อที่ของคอนกรีต ซึ่งล้อมรอบด้วยเส้นแกนกลางของเหล็กลูกตั้ง ดังข้อเสนอแนะของ B.V.Rangan

ตัวอย่างการวิเคราะห์ผล พิจารณาคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B_8 ขนาดรูปตัด กว้าง 10 ซม. ลึก 15 ซม และมีคุณสมบัติอื่นๆ ดังนี้

เหล็กเสริมตามยาว 4 ϕ 9 มม	เนื้อที่หน้าตัด	= 4(.652)	ซม^2
เหล็กลูกตั้ง ϕ 6 มม	เนื้อที่หน้าตัด	= .291	ซม^2
ระยะเรียงของเหล็กลูกตั้ง (s) 7.5 ซม,	A_o	= 4.55 x9.61	ซม^2
ความต้านทานแรงอัดประลัยของคอนกรีต		= 212.7	กก/ซม^2
กำลังคลากของเหล็กเสริมตามยาว		= 3,528	กก/ซม^2
กำลังคลากของเหล็กลูกตั้ง		= 3,788	กก/ซม^2

ผลจากการทดลองพบว่า แรงบิดต้านทานประลัยมีค่าเท่ากับ 17,106 กก-ซม และมีขนาดรูปตัดดังแสดงในรูปที่ 5.a

ทฤษฎีสคิว เบนดิง

$$\alpha = \frac{y}{x} = \frac{6.98}{12.04} = 0.5979 \text{ , } 2\alpha = 1.1594 \text{ , } 1+2\alpha = 2.1594$$

$$1)\ \tan\theta = \sqrt{\frac{\epsilon_w}{\epsilon_s}}\ (1 + 2\alpha) = \sqrt{\frac{3,788}{3,528}}\ (2,1594) = 2,2376$$

2) $r_b = \frac{1 + 2\alpha}{\tan^2\theta} = \frac{2.1594}{2.2376^2} = 0.4313$

3) $\tan\phi = \frac{2\alpha\tan\theta}{2\alpha + \sec^2\theta} = \frac{1.1594(2.2376)}{1.1594 + 2.4509^2} = 0.3620$

$(\epsilon_c)_{ult} = \frac{\epsilon_{cu}(1-\tan^2\phi)}{1+12\tan^2\phi} = \frac{0.003(1-.3620^2)}{1+12(.3620^2)} = 1.0133 \times 10^{-3}$

$$k = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_c + \epsilon_s \cos 2\theta \left[1 + \frac{\tan^2\theta}{1 + 2\alpha}\right]^2}$$

$$= \frac{1.0133 \times 10^{-3}}{1.0133 \times 10^{-3} + \frac{3,528}{2.11 \times 10^6}\left[\frac{1}{2.4509}\right]^2\left[\frac{1+2.2376^2}{2.1594}\right]^2}$$

$= 0.2484$

$$k_1 = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_o}\left[1 - 1/3\frac{\epsilon_c}{\epsilon_o}\right] = \frac{1.0133 \times 10^{-3}}{0.002}\left[1 - \frac{1}{3}\times\frac{1.0133 \times 10^{-3}}{0.002}\right]$$

$= 0.4211$

$$k_2 = \frac{4 - \epsilon_c/\epsilon_o}{12 - 4(\epsilon_c/\epsilon_o)} = \frac{4 - (1.0133 \times 10^{-3}/0.002)}{12 - 4(1.0133 \times 10^{-3}/0.002)}$$

$= 0.3503$

4) $p_{sb} = \frac{1}{2}\frac{f'_c k_1 k \sec^2\theta}{f_{sy}} = \frac{1}{2} \times \frac{212.7}{3,528} \times .4211 \times .2484 \times 2.4509^2$

$= 0.0189$

$$p_{wb} = r_b\,(p_{sb})\,\frac{f_{sy}}{f_{wy}} = .4313 \times 0189 \times \frac{3,528}{3,788}$$

$= 7.5921 \times 10^{-3}$

5) $p_s = A_s/A_o = 2 \times .652/4.55 \times 9.61$

$= 0.0298 > p_{sb}$

$$p_w = 0.9\, A_w x / A_o s = \frac{0.9 \times .291 \times 12.04}{4.55 \times 9.61 \times 7.5}$$

$$= 9.6154 \times 10^{-3} > p_{wb.}$$

$$r = \frac{p_w}{p_s} \times \frac{f_{wy}}{f_{sy}} = \frac{7.5921 \times 10^{-3}}{0.0189} \times \frac{3,788}{3,528} = .4313$$

$$T_u = 2 A_s f_s (1 - k_2 k) x \sqrt{\frac{r}{1 + 2\alpha}}$$

$$= 2 \times .0189 \times 4.55 \times 9.61 \times 3,528 (1 - .3503 \times .2484) \times 6.98 \sqrt{\frac{.4313}{2.1594}}$$

$$= 16,608 \text{ กก-ซม.}$$

ทฤษฎีโคอะโกนอล คอมเพรสชั่น ฟิล

สมมุติ $P_o = 0.9\, P_w$

$$a = \frac{A_{st} f_s}{P_o 0.85 f'_c} + \frac{A_w f_w}{0.85 f'_c s} = \frac{4 \times .652 \times 3528}{0.85 \times 212.7 \times 0.9 \times 38.04} + \frac{.291 \times 3,788}{0.85 \times 212.7 \times 7.5}$$

$$= 2.30$$

$$p_{stb} = \frac{0.85 f'_c k_{1/2}}{f_{sy}} \times \frac{0.003 E_s}{f_{sy} + .003 E_s (1 - k_{1/2})}$$

$$= \frac{1}{2} \times \frac{.85^2 \times 212.7}{3,528} \times \frac{.003 \times 2.11 \times 10^6}{3,528 + .003 \times 2.11 \times 10^6 (1 - \frac{.85}{2})}$$

$$= 0.0391$$

$$p_{wb} = \frac{0.85 f'_c k_{1/2}}{f_{wy}} \times \frac{.003 E_s}{f_{wy} + .003 E_s (1 - k_{1/2})}$$

$$= \frac{1}{2} \times \frac{.85^2 \times 212.7}{3,788} \times \frac{.003 \times 2.11 \times 10^6}{3,788 + .003 \times 2.11 \times 10^6 (1 - \frac{.85}{2})}$$

$$= 0.0339$$

$$f_s = -\epsilon_{ds}E_s(1-k_{1/2}) + \sqrt{\left[\epsilon_{ds}E_s(1-k_{1/2})\right]^2 + \frac{1}{2}\epsilon_{ds}E_s k_3 k_1 \frac{f'_c}{p_{st}}}$$

$$= -1,819.88 + \sqrt{3,311,945 + 486,383.74/p_{st}}$$

$$f_w = -\epsilon_{ds}E_s(1-k_{1/2})\frac{P_o}{P_w} + \sqrt{\left[\epsilon_{ds}E_s(1-k_{1/2})\frac{P_o}{P_w}\right]^2 + \frac{1}{2}\epsilon_{ds}E_s k_3 k_1 \frac{f'_c}{p_w}}$$

$$= -1,819.88\frac{P_o}{P_w} + \sqrt{3,311,945\left(\frac{P_o}{P_w}\right)^2 + 486,383.74/p_w}$$

1) สมมุติให้ $a = 1.60$

$A_o = (x-a)(y-a) = (6.98-1.60)(12.04-1.60) = 56.17$

$P_o = P_w - 4a = 38.04 - 4(1.60) = 31.64$

$p_{st} = \frac{A_{st}}{A_o} = \frac{4(.652)}{56.17} = 0.464 > p_{stb}, f_s = 1,894.20$

$p_w = \frac{A_w P_w}{A_o s} = \frac{0.291 \times 38.04}{56.17 \times 7.5} = .0263 < p_{wb}, f_w = 3,788$

2) ตรวจสอบ $a = \frac{A_{st}f_s}{0.85f'_c P_o} + \frac{A_w f_w}{0.85f'_c s}$

$$= \frac{4(.652)1,894.20}{0.85 \times 212.7 \times 31.64} + \frac{.291 \times 3,788}{0.85 \times 212.7 \times 7.5} = 1.68$$

นำค่า a ที่ได้จาก 2 ไปคำเนินการในขั้นที่ 1 ใหม่จนกระทั่งค่า a ที่ได้จากทั้ง 2 ขั้นเท่ากัน ซึ่งจะได้

$a = 1.68$, $A_o = 54.91$

$P_o = 31.96$

$f_s = 1861.4$

$f_w = 3,788$

$\therefore q = \sqrt{\frac{A_{st}f_s}{P_o} \times \frac{A_w f_w}{s}}$

$$= \sqrt{\frac{4(.652)\ 1861.40}{31.96} \times \frac{.291 \times 3,788}{7.5}} = 150.93$$

$$T_u = 2A_o q = 2 \times 54.9 \times 150.93 = 16,575 \text{ กก-ซม}$$

อาศัยการวิเคราะห์ดังตัวอย่างดังกล่าวข้างต้น สามารถสรุปผลของการเปรียบเทียบได้ดังนี้

ผลการทดลอง	ทฤษฎีสลิว เบนดิง		ทฤษฎีไดอะโกนอล คอมเพรสชั่น ฟิล	
	ค่าเฉลี่ย $\frac{T_u \text{ทดลอง}}{T_u \text{คำนวณ}}$	ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย $\frac{T_u \text{ทดลอง}}{T_u \text{คำนวณ}}$	ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ครั้งนี้	1.118	0.094	1.126	0.105
ของ Hsu	1.010	0.076	1.030	0.072

5.2 คานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงดัด

1) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดและมุมเปลี่ยน นำผลการทดลองของคาน B_{14} B_{15} B_{16} และ B_{17} มาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 5.21 จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมของคานคอนกรีตแบ่งออกได้เป็น 2 ภาวะคือ

ก) ก่อนคอนกรีตแตกร้าว ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัด และมุมเปลี่ยนจะเป็นเส้นตรงโดยมีความชันค่าหนึ่ง

ข) หลังคอนกรีตเกิดการแตกร้าว ความสัมพันธ์ยังคงเป็นเส้นตรง เพียงแต่ค่าของความชันมีค่าน้อยกว่าก่อนคอนกรีตแตกร้าว และการเปลี่ยนภาวะของการรับแรงจากก่อนเกิดการแตกร้าวเป็นภายหลังการแตกร้าว เกิดได้ในทันทีไม่เหมือนกับพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงบิด แสดงว่าการเปลี่ยนกลไกของการรับแรงดึงจากคอนกรีต มาเป็นเหล็กเสริม เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ดังจะสังเกตุได้จาก ไม่มีช่วงที่ค่าแรงดัดมีค่าคงที่ขณะที่มุมเปลี่ยนเพิ่มขึ้น

2) ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่ง รูปที่ 5.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่ง ซึ่งอ่านค่าจากเกจวัดระยะทางตรงจุดกึ่งกลางความยาวคาน จากกราฟจะสังเกตุได้ว่าในช่วงน้ำหนักบรรทุกน้อยๆก่อนคอนกรีตแตกร้าว ความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นเส้นตรง เนื่องจากช่วงนี้ค่าสติฟเนสทางด้านรับแรงดัดส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับคอนกรีตและมีค่าคงที่ ครั้นเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไปเรื่อยๆ ความสัมพันธ์จะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งจนกระทั่งถึงจุดที่เหล็กเสริมรับแรงดึงถึงกำลังคลาก ต่อจากนี้อัตราการเพิ่มของระยะโก่งจะมากในขณะที่ความต้านทานต่อน้ำหนักบรรทุกเริ่มลดค่าลง และขณะคานเกิดการชำรุด ระยะโก่งของคานตัวที่เสริมด้วยเหล็กเสริมรับแรงดึงมากกว่า จะมีค่าน้อยกว่าคานตัวที่มีปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงน้อยกว่า

3) ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และหน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริมรับแรงดึง นำค่าหน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริม ที่ระดับต่างๆของน้ำหนักบรรทุก มาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 5.23 พบว่าในช่วงน้ำหนักบรรทุกน้อยๆ ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงซึ่งมีค่าความชันมาก แสดงว่าช่วงแรกนี้เหล็กเสริมช่วยรับแรงดึงน้อยมาก ทั้งนี้เพราะคอนกรีตก่อนแตกร้าวสามารถรับแรงดึงได้ และมีพฤติกรรมเป็นวัสดุยืดหยุ่น ครั้นเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจนคานคอนกรีตใกล้แตกร้าว เส้นแสดงความสัมพันธ์จะค่อยๆโค้ง แสดงว่าช่วงนี้เริ่มมีการเปลี่ยนกลไกของการรับแรงดึง คือคอนกรีตจะค่อยๆถ่ายแรงดึงไปยังเหล็กเสริม และภายหลังเกิดการแตกร้าว ความสัมพันธ์จะอยู่ในลักษณะเส้นตรงจนถึงจุดที่เหล็กเสริมถึงกำลังคลาก หลังจากนี้หน่วยการยืดตัวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่ความต้านทานในการรับน้ำหนักบรรทุกเริ่มลดลง นอกจากนี้ยังพบอีกว่า เมื่อกำหนดขนาดรูปตัดความต้านทานแรงอัดประลัยของคอนกรีต แล้วเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึง ความต้านทานแรงดัดประลัยของคานจะเพิ่มขึ้น แต่สำหรับคาน B_{17} เหตุที่สามารถรับแรงดัดได้น้อยกว่าคาน B_{16} ทั้งที่คาน B_{16} เสริมเหล็กเสริมน้อยกว่า และปริมาณเหล็กเสริมในคานทั้งสองต่ำกว่าเหล็กเสริมในภาวะสมดุลย์อาจเนื่องมาจากคาน B_{17} ถูกหล่อก่อนคานตัวอื่นๆ จึงทำให้มีหิน ทราย น้อยกว่าคานตัวอื่นๆ เป็นเหตุให้ความต้านทานแรงอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าน้อยกว่า 219.40 กก/ซม^2

4) ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และหน่วยการหดตัวของคอนกรีต นำผลการทดลองของคาน B_{14} B_{15} B_{16} B_{17} มาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 5.24 พบว่าเมื่อน้ำหนักบรรทุกน้อยกว่าน้ำหนักบรรทุกแตกร้าว ความสัมพันธ์จะอยู่ในลักษณะเส้นตรง เนื่องจากพฤติกรรมของคานคอนกรีตช่วงนี้เป็นแบบวัสดุยืดหยุ่น และภายหลังคานคอนกรีตเกิดการแตกร้าว ความสัมพันธ์จะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งจนถึงจุดที่เหล็กเสริมถึงกำลังคลาก แสดงว่าคานคอนกรีตจะไม่ประพฤติเป็นวัสดุยืดหยุ่นอีกต่อไป และหลังจากนี้เหล็กเสริมจะยืดตัวมากทำให้คานเกิดการโค้ง เป็นเหตุให้ความเครียดที่ผิวบนของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งคานเกิดการชำรุด

5) ลักษณะการแตกร้าวและการเปรียบเทียบผลการทดลอง

การแตกร้าว รอยแตกร้าวของคอนกรีตสังเกตุพบครั้งแรกที่บริเวณกึ่งกลางคาน และที่ระยะ 1/3 ของความยาวประสิทธิผลของคาน ในลักษณะเส้นตรงเล็กๆ ต่อมาเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุก รอยแตกร้าวจะเริ่มขยายในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางที่น้ำหนักบรรทุกกระทำ โดยรอยแตกร้าวบริเวณกลางคานยังคงมีลักษณะเป็นเส้นตรง แต่รอยแตกร้าวที่ระยะ 1/3 ของความยาวคานเริ่มโค้งเข้าหาจุดที่น้ำหนักบรรทุกกระทำ จนในที่สุดคานเกิดการชำรุดจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5.25 ถึงรูปที่ 5.28

การเปรียบเทียบผล ตารางที่ 5.7 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ทั้งค่าความต้านทานแรงคัดประลัย และลักษณะการชำรุด

ตัวอย่างการวิเคราะห์ผล พิจารณาคาน B_{16} ขนาดรูปตัด กว้าง 9.80 ซม ลึก 15.60 ซม โดยมีคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

ความลึกประสิทธิผล	=	13.00	ซม
ความต้านทานแรงอัดประลัยของคอนกรีต	=	219.40	กก/ซม^2
กำลังคลากของเหล็กเสริม	=	3,044	กก/ซม^2
เนื้อที่หน้าตัดของเหล็กเสริม	=	2 x 1.133	ซม^2

$$p_b = 0.85\, k_1 \frac{f'_c}{f_y}\left[\frac{E_s \epsilon_u}{E_s \epsilon_u + f_y}\right]$$

$$= 0.85^2 \times \frac{219.40}{3,044}\left[\frac{2.11 \times 10^6 \times 0.003}{2.11 \times 10^6 \times .003 + 3,044}\right]$$

$$= 0.0352$$

$$p = \frac{A_s}{bd}$$

$$= \frac{2 \times 1.133}{9.8 \times 13} = 0.0178 < p_b$$

$$q = p\frac{f_y}{f'_c} = \frac{0.0178 \times 3,044}{219.40}$$

$$= 0.247$$

$$M_u = bd^2 f'_c\, q\, (1-0.59\, q)$$

$$= 9.8 \times 13^2 \times 219.40 \times .247\ (1-.59 \times .247)$$

$$= 766.70 \quad \text{กก-ซม}$$

อาศัยการวิเคราะห์ดังตัวอย่างข้างต้นในที่สุดจะสามารถสรุปผลของการเปรียบเทียบได้ดังนี้ คือ ได้ค่าเฉลี่ยของแรงดัดต้านประลัยจากการทดลองต่อแรงดัดประลัยจากการวิเคราะห์ เท่ากับ 1.15 โดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.174