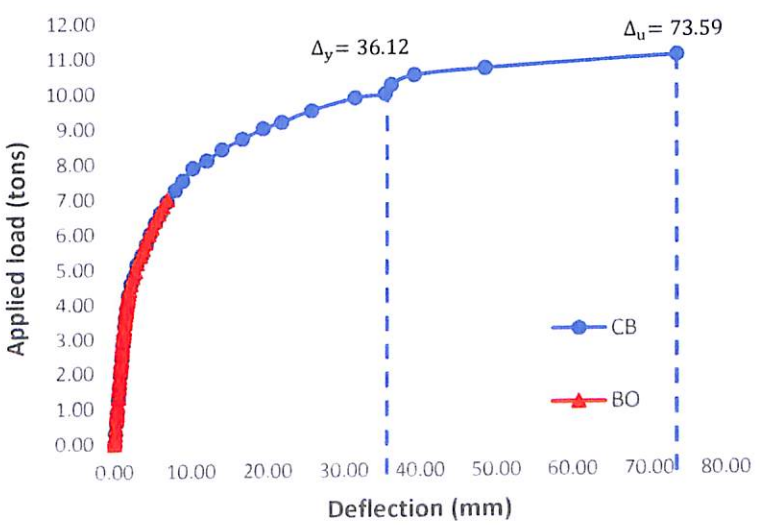
บทที่ 5

วิเคราะห์ผลดำเนินงาน

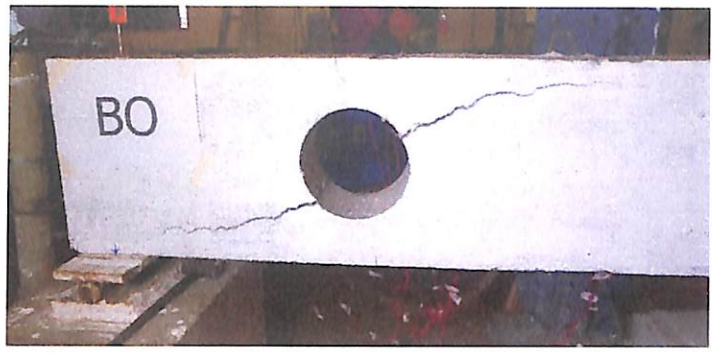
การวิเคราะห์ผลดำเนินงานนี้จะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนคือ ผลกระทบของช่องเปิดขนาดใหญ่ที่มีต่อคานคอนกรีตอัดแรง การจำลองโมเดลการถ่ายแรงภายในของคานทดสอบด้วยวิธี Strut and Tie ผลของการเสริมกำลังภายนอกด้วย CFRP ในคานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ และวิเคราะห์กำลังของคานจากทฤษฎีเทียบกับกำลังที่ได้จากการทดสอบ

5.1 ผลกระทบของช่องเปิดขนาดใหญ่ที่มีต่อคานคอนกรีตอัดแรง

จากผลการทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบของช่องเปิดขนาดใหญ่ ($D_o/h = 0.54$) ที่มีต่อคานคอนกรีตอัดแรง พบว่าในช่วงแรกการรับน้ำหนักบรรทุกของคานที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ (BO) มีพฤติกรรมเหมือนกับคานควบคุม (CB) อย่างชัดเจนดังแสดงในภาพที่ 5.1 ที่เส้นกราฟทับกัน100% จนกระทั่งคาน BO เกิดการวิบัติแบบเฉือน(Shear Failure)ดังภาพที่ 5.2 เนื่องจากผลของช่องเปิดทำให้กำลังต้านทานแรงเฉือนจากคอนกรีตลดลง แทนการวิบัติแบบดัด (Flexural Failure)ที่เกิดในคาน CB ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานคอนกรีตอัดแรงลดลงจากที่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้เท่ากับ 11 ตันในคานCB เหลือ 7.01 ตันในคาน BO คิดเป็น 36.27% ส่วนคาน CB มีค่าความเหนียวที่เทียบจากอัตราส่วน Δ_u/Δ_y หรือ 73.59/36.12 เท่ากับ 2.04



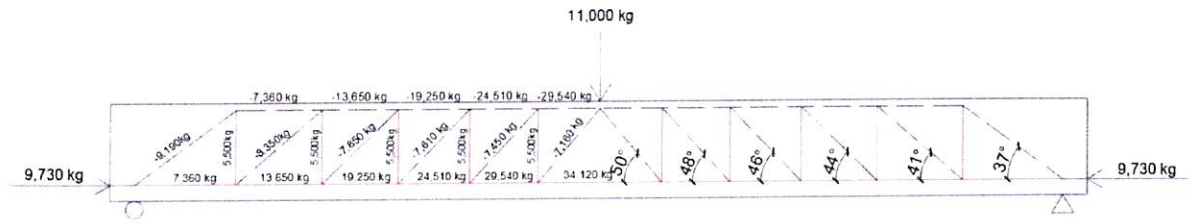
ภาพที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการโก่งตัวของคาน CB และ BO



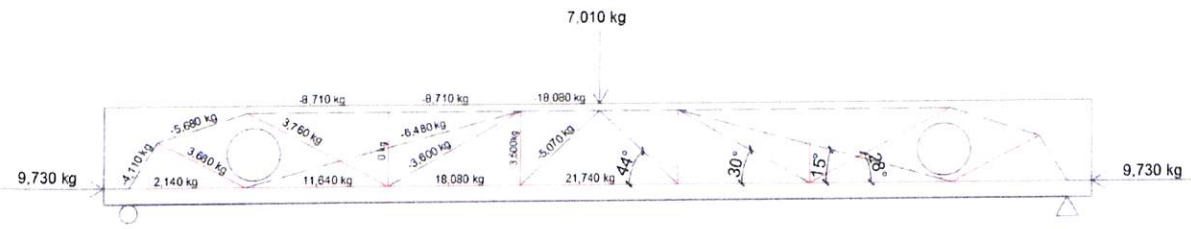
ภาพที่ 5.2 การวิบัติภายใต้แรงเฉือน (Shear Failure) ในคาน BO

5.2 การจำลองโมเดลการถ่ายแรงภายในของคานคอนกรีตอัดแรงด้วยวิธี Strut and Tie

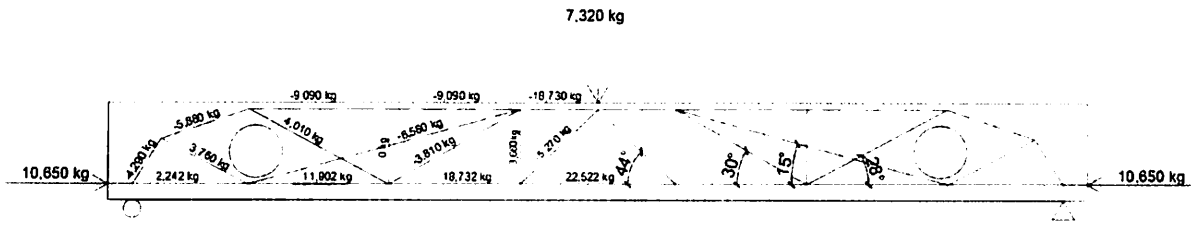
การสร้างแบบจำลองด้วยวิธี Strut and Tie ของคานทดสอบสามารถสร้างแบบจำลองโดยอาศัยรูปแบบโครงข้อหมุนแบบ Howe Truss สำหรับคาน CB และแบบผสมระหว่าง Howe Truss กับ Fan Truss สำหรับคาน BO, BO-1, RBO-1 และ SBO มีแรงอัดเนื่องผลของการอัดแรงกระทำที่ปลายคานทั้งสองข้าง ดังภาพที่ 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 และ 5.7 ตามลำดับ ส่วนมุมเอียงของท่อนอัดพิจารณาได้จากลักษณะรอยร้าวที่เกิดขึ้นขณะคานเกิดการวิบัติซึ่งมุมจะมีค่ามากบริเวณช่วงกลางคานและจะลดลงเมื่อรอยร้าวขยับเข้าใกล้จุดรองรับทั้งสองข้าง พร้อมกับพิจารณาแรงในท่อนดึงและท่อนอัดที่ได้จากผลการทดสอบเปรียบเทียบกับการใช้ Strut and Tie เพื่อให้ได้ค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 5.1 และการเปรียบเทียบแรงในชิ้นส่วนวิกฤติที่พิจารณาจากลักษณะการวิบัติของคานดังแสดงในตารางที่ 5.2



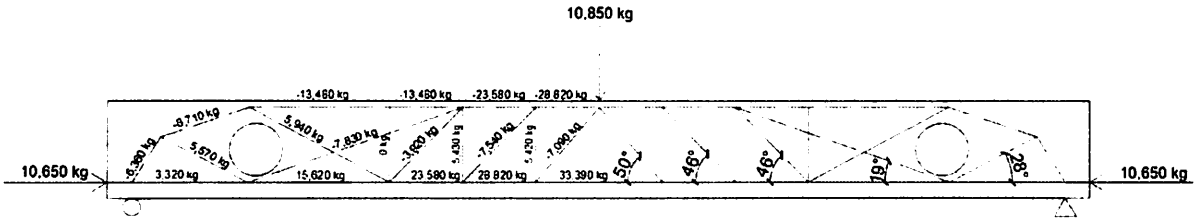
ภาพที่ 5.3 Strut and Tie Model ของคาน CB



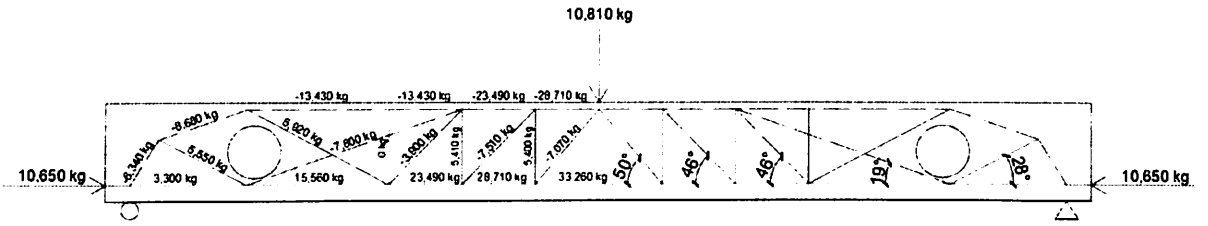
ภาพที่ 5.4 Strut and Tie Model ของคาน BO



ภาพที่ 5.5 Strut and Tie Model ของคาน BO-1



ภาพที่ 5.6 Strut and Tie Model ของคาน RBO-1



ภาพที่ 5.7 Strut and Tie Model ของคาน SBO

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบค่าแรงในท่อนดึงและท่อนอัดที่ได้จากผลการทดสอบกับ Strut and Tie

คาน	แรงในท่อนดึง (Experiment) (kg)	แรงในท่อนดึง (ทฤษฎี STM) (kg)	ความคลาดเคลื่อน (%)	แรงในท่อนอัด (Experiment) (kg)	แรงในท่อนอัด (ทฤษฎี STM) (kg)	ความคลาดเคลื่อน (%)
CB	31,265	34,120	9.13%	29,932	29,540	1.30%
BO	20,422	21,740	6.45%	18,213	18,080	0.73%
BO-1	21,343	22,520	5.52%	18,610	18,730	0.64%
RBO-1	31,564	33,390	5.78%	29,194	28,820	1.28%
SBO	31,658	33,260	5.06%	28,925	28,710	0.74%

จากตารางที่ 5.1 พบว่าที่น้ำหนักบรรทุกที่เท่ากันค่าแรงในท่อนดึง ณ ตำแหน่งกลางคานจากการใช้ทฤษฎี Strut and Tie จะให้ค่าที่มากกว่าแรงในท่อนดึงที่ได้จากผลการทดสอบ ณ ตำแหน่งเดียวกันโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง 5.06 % - 9.13 % ส่วนแรงในท่อนอัด ณ ตำแหน่งด้านบนกลางคานของเหล็กเสริมรับแรงอัดและคอนกรีตจากการใช้ทฤษฎี Strut and Tie จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ ณ ตำแหน่งเดียวกัน มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง 0.64% - 1.30%

ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบแรงในชิ้นส่วนวิกฤติตามลักษณะการวิบัติของคานที่ได้จากผลการทดสอบกับ Strut and Tie

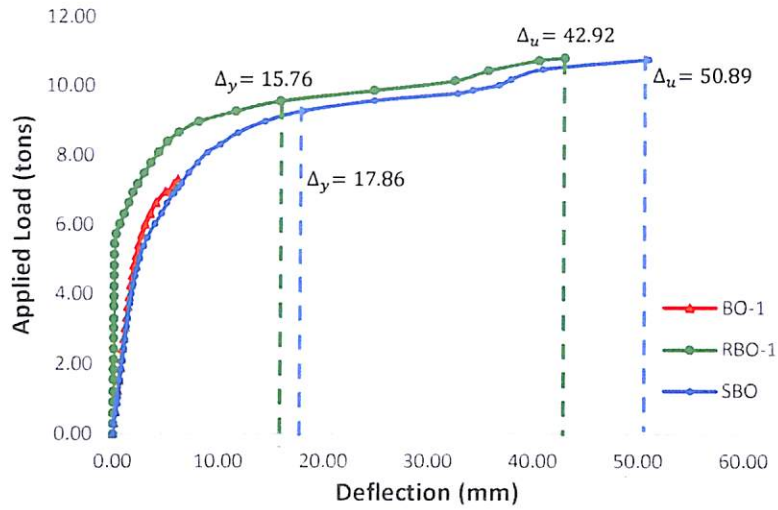
คาน	แรงในท่อนวิกฤติ (Experiment) (kg)	แรงในท่อนวิกฤติ (ทฤษฎี STM) (kg)	ความคลาดเคลื่อน (%)
CB	31,265	34,120	9.13%
BO	3,538	3,760	6.27%
BO-1	3,888	4,010	3.14%
RBO-1	31,564	33,390	5.78%
SBO	31,658	33,260	5.06%

จากตารางที่ 5.2 คาน CB , RBO-1 และ SBO เป็นคานที่มีลักษณะการวิบัติแบบ Flexural Failure ดังนั้นชิ้นส่วนวิกฤติคือตำแหน่งท่อนดึงบริเวณกลางคาน ส่วนคาน BO และBO-1 เป็นคานที่มีลักษณะการวิบัติแบบ Shear Failure ชิ้นส่วนวิกฤติคือท่อนดึงแนวทแยงเอียง 28 องศาบริเวณช่องเปิด พบว่าการใช้ทฤษฎี Strut and Tie จะให้ค่าที่มากกว่าผลการทดสอบ ณ ตำแหน่งเดียวกันโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง 3.14 % - 9.13 %

แบบจำลองที่ใช้สำหรับการเสริมกำลังภายนอกด้วย CFRP ของคาน RBO-1 และ SBO จะเป็นแบบจำลองที่ได้จากคาน BO-1 ดังแสดงในภาพที่ 5.5 มุมของการเสริมกำลังเท่ากับ 28 องศาเป็นมุมที่ทำให้แนว CFRP เกือบตั้งฉากกับรอยร้าวที่เกิดจากการวิบัติแบบ Shear Failure อีกทั้งยังเป็นมุมที่ Strut and Tie สามารถถ่ายแรงภายในผ่านบริเวณช่องเปิดวงกลมขนาดใหญ่ได้อย่างเหมาะสม ซึ่งมีแรงในท่อนดึงและท่อนอัดใกล้เคียงกับผลการทดสอบโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 5.52 % และ 0.64 % ตามลำดับ

5.3 ผลของการซ่อมรอยร้าวและเสริมกำลังภายนอกด้วย CFRP ในคานคอนกรีตอัดแรงมีช่องเปิดขนาดใหญ่

จากผลการทดสอบพบว่าคาน RBO-1 สามารถรับน้ำหนักบรรทุกในช่วง 0-5.45 ตัน โดยไม่เกิดการโก่งตัวเลยเนื่องจากการซ่อมรอยร้าวด้วย Epoxy ที่มีกำลังสูง ทำให้คานมีความแข็งแรง (Stiffness) มากในช่วงแรกเมื่อรับน้ำหนักบรรทุก และจากการใช้ Strut and Tie เพื่อสร้างแบบจำลองการเสริมกำลังด้วย CFRP ให้กับคาน SBO และ RBO-1 พบว่ามุมเอียงเท่ากับ 28 องศาเป็นมุมที่เหมาะสมสำหรับการเสริมกำลังให้กับคานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ ($D_o/h = 0.54$) ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคาน SBO และ RBO-1 เพิ่มขึ้นจาก 7.32 ตัน เป็น 10.81 ตัน และ10.85 ตัน คิดเป็น 47.68% และ 48.22% ตามลำดับ ซึ่งทั้งคู่สามารถเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติจากเดิมวิบัติแบบเฉือน (Shear Failure) เป็นวิบัติแบบดัด (Flexural Failure) ได้เหมือนคานควบคุม (CB) และให้ค่าความเหนียวสูงกว่าคาน CB โดยมีค่าเท่ากับ 2.85 และ 2.72 ตามลำดับ สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคานBO-1 , RBO-1 และSBO ดังภาพที่ 5.8



ภาพที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการโก่งตัวของคาน BO-1,RBO-1และ SBO

5.4 วิเคราะห์และเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกของคานที่ได้จากผลการทดสอบกับทฤษฎี

การวิเคราะห์และเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกของคานคอนกรีตอัดแรงที่ได้จากการทดสอบกับผลจากทฤษฎีตามมาตรฐาน ACI มีรายละเอียดดังนี้

5.4.1 การวิเคราะห์ความสามารถการรับน้ำหนักบรรทุกของคานควบคุม CB

คานควบคุม CB เป็นคานที่มีพฤติกรรมควบคุมโดยแรงดัด และลักษณะการวิบัติของคานเป็นแบบดัด ทำให้การวิเคราะห์หาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานจะหาได้จากโมเมนต์ดัดประลัยของคาน ซึ่งการวิเคราะห์หาความสามารถการรับน้ำหนักบรรทุกของคานสามารถพิจารณาได้จากหลักการที่ต่างกันดังนี้

1. **น้ำหนักบรรทุกของคานจากหน่วยแรงดึงเหล็กเสริมอัดแรงที่สภาวะวิบัติ (f_{ps})**

การวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุกวิธีนี้เป็นการหาค่าโมเมนต์ประลัยของคานโดยใช้ค่าหน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงที่สถาวะวิบัติ f_{ps} เริ่มจากหาค่าความลึกของ Stress Block จากสมดุลย์ของแรงอัดเท่ากับแรงดึง โดยสมมติใช้ค่า f_{ps} และค่า f_y ของเหล็กเสริมรับแรงดึงที่มีค่าคงที่ ส่วน f'_s ใช้เท่ากับ $E_s\varepsilon'_s$

- ค่า f_{ps} จากสมการที่ 2.4 มีค่าเท่ากับ 18,874.82 ksc
- ค่าระยะแกนสะเทิน (c) จากสมดุลย์ของแรงอัดและดึงเท่ากับ 7.03 cm
- ค่า Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงมีค่าเท่ากับ 0.01129 มีค่าเกินจุดคราก สามารถใช้ค่าหน่วยแรงเท่ากับ f_{ps} ได้ถูกต้อง

- ค่า Strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึง มีค่าเท่ากับ 0.01129 มีค่าเกินจุดคราก สามารถใช้ค่า f_y ที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ 5,840 ksc
- ค่า Strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงอัด มีค่าเท่ากับ 0.00087 มีค่าไม่เกินจุดคราก และใช้ค่า f'_s เท่ากับ 1,771 ksc ถูกต้องตามสมมติฐาน
- ค่าโมเมนต์ประลัยมีค่าเท่ากับ 9,657 kg.m น้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 10,165 kg

2. น้ำหนักบรรทุกของคานจากหลักการ Strain Compatibility และ f_{py}, f_y คงที่

การวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุกวิธีนี้หาได้จากการ Trial ค่าระยะแกนสะเทินของหน้าตัด (c) เพื่อหาสมดุลย์แรงอัดเท่ากับแรงดึง และใช้หลักการ Strain Compatibility คำนวณหาค่า Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมไม่อัดแรง ณ ตำแหน่งต่างๆ ของหน้าตัดพร้อมกับใช้นิยามค่ากำลังที่จุดคราก f_{py}, f_y ของเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมไม่อัดแรงมีค่าคงที่เป็นเส้นตรงทำให้ได้ค่าดังต่อไปนี้

- ค่าระยะแกนสะเทิน (c) เท่ากับ 6.86 cm
- ค่า Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงมีค่าเท่ากับ 0.01165 มีค่าเกินจุดคราก และใช้ค่า f_{py} ที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ 17,931.31 ksc
- ค่า Strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึง มีค่าเท่ากับ 0.01165 มีค่าเกินจุดคราก และใช้ค่า f_y ที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ 5,840 ksc
- ค่า Strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงอัด มีค่าเท่ากับ 0.00081 มีค่าไม่เกินจุดคราก และใช้ค่า f'_s เท่ากับ 1,661 ksc
- ค่าโมเมนต์ประลัยมีค่าเท่ากับ 9,396 kg.m น้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 9,891 kg

3. น้ำหนักบรรทุกของคานจากหลักการ Strain Compatibility และ f_{ps}, f_s จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของเหล็กเสริม

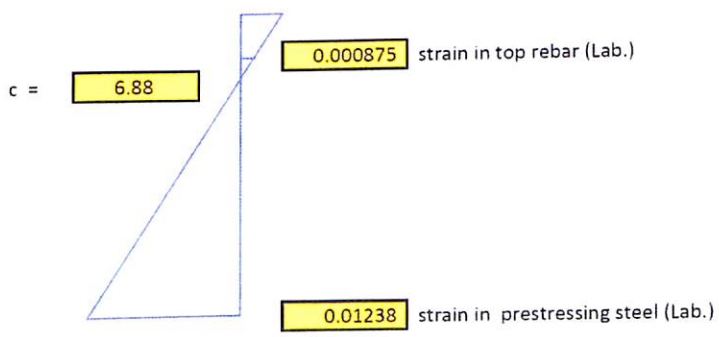
การวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุกวิธีนี้หาได้จากการ Trial ค่าระยะแกนสะเทินของหน้าตัด (c) เพื่อหาสมดุลย์แรงอัดเท่ากับแรงดึง และใช้หลักการ Strain Compatibility ในการคำนวณหาค่า Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมไม่อัดแรง ณ ตำแหน่งต่างๆ ของหน้าตัดพร้อมกับใช้ค่ากำลังที่จุดคราก f_{ps}, f_s ของเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain จากการทดสอบเหล็กตัวอย่าง ทำให้ได้ค่าดังต่อไปนี้

- ค่าระยะแกนสะเทิน (c) เท่ากับ 6.95 cm

- ค่า Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงมีค่าเท่ากับ 0.01147 มีค่าเกินจุดคราก และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงที่ได้จากการทดสอบ ทำให้ได้ค่า f_{ps} เท่ากับ 18,200 ksc
- ค่า Strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึงมีค่าเท่ากับ 0.01147 มีค่าเกินจุดคราก และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่ได้จากการทดสอบ ทำให้ได้ค่า f_s เท่ากับ 5,910 ksc
- ค่า Strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 0.00084 มีค่าไม่เกินจุดคราก และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่ได้จากการทดสอบ ทำให้ได้ค่า f'_s เท่ากับ 1,700 ksc
- ค่าโมเมนต์ประลัยมีค่าเท่ากับ 9,514 kg.m น้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 10,015 kg

4. น้ำหนักบรรทุกของคานจากหลักการ Strain Compatibility โดยใช้ค่า Strain ที่ได้จากการทดสอบ และ f_{ps}, f'_s ที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของเหล็กเสริม

การวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุกวิธีนี้หาได้จากการนำค่า Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบ(Lab.) มาหาค่าระยะแกนสะเทินของหน้าตัด (c) โดยใช้หลักการ Strain Compatibility ดังแสดงในภาพที่ 5.9 พร้อมกับใช้ค่ากำลัง f_{ps}, f'_s ของเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain จากการทดสอบเหล็กตัวอย่างทำให้ได้ค่าดังต่อไปนี้



ภาพที่ 5.9 หาค่า c ด้วยหลักการ Strain Compatibility โดยใช้ค่า Strain ที่ได้จากการทดสอบของคาน CB

- ค่า Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.012382 มีค่าเกินจุดคราก และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงที่ได้จากการทดสอบ ทำให้ได้ค่า f_{ps} เท่ากับ 18,280 ksc

- ค่า Strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.000875 มีค่าไม่เกินจุดคราก และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงที่ได้จากการทดสอบ ทำให้ได้ค่า f_s' เท่ากับ 1,700 ksc
- จากค่า Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่ได้จากการทดสอบ นำมาหาค่าระยะแกนสะเทิน (c) โดยใช้หลักการ Strain Compatibility ได้ค่าเท่ากับ 6.88 cm
- ค่า Strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึง มีค่าเท่ากับ 0.012382 มีค่าเกินจุดคราก และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงที่ได้จากการทดสอบ ทำให้ได้ค่า f_s เท่ากับ 5,920 ksc
- ค่าโมเมนต์ประลัยมีค่าเท่ากับ 9,553 kg.m น้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 10,056 kg

จากการวิเคราะห์หาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานควบคุม CB ในแต่ละวิธีที่ผ่านมาสามารถสรุปและเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากผลการทดสอบกับทฤษฎี ของคาน CB

คาน	A*	B*		C*		D*		E*	
	Pn (kg)	Pn (kg)	Error (%)	Pn (kg)	Error (%)	Pn (kg)	Error (%)	Pn (kg)	Error (%)
CB	11,000	10,165	7.59%	9,891	10.08%	10,015	8.95%	10,056	8.58%

หมายเหตุ : A* คือ น้ำหนักบรรทุกที่ได้จากการทดสอบ , B* คือน้ำหนักบรรทุกของคานจากหน่วยแรงดึงเหล็กเสริมอัดแรงที่สภาวะวิบัติ f_{py} , C* คือ น้ำหนักบรรทุกของคานจากหลักการ Strain Compatibility และ f_{ps},f_y คงที่, D* คือ น้ำหนักบรรทุกของคานจากหลักการ Strain Compatibility และ f_{ps},f_s ที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain จากการทดสอบเหล็กตัวอย่าง, E* คือ น้ำหนักบรรทุกของคานจากหลักการ Strain Compatibility โดยใช้ค่า Strain ที่ได้จากการทดสอบ และ f_{ps},f_s' ที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain จากการทดสอบเหล็กตัวอย่าง

จากตารางที่ 5.2 เห็นได้ว่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานควบคุม CB ที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 11,000 kg และน้ำหนักบรรทุกที่คำนวณจากการใช้ค่าหน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงที่สภาวะวิบัติ (f_{ps}) ตามมาตรฐานของ ACI มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 10,165 kg คิดเป็นความคลาดเคลื่อน 7.59 % และมีความปลอดภัยเนื่องจากให้ค่ากำลังน้อยกว่ากำลังที่ได้จากการทดสอบ

5.4.2 การวิเคราะห์ความสามารถการรับน้ำหนักบรรทุกของคาน BO

คานมีช่องเปิดและไม่เสริมกำลัง (BO) เป็นคานที่มีลักษณะการวิบัติแบบเฉือนบริเวณช่องเปิด เนื่องจากผลของคอนกรีตบริเวณช่องเปิดที่หายไป ทำให้การวิเคราะห์ความสามารถการรับน้ำหนักบรรทุกของคานสามารถหาได้จากกำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตที่เหลืออยู่จากหลักการที่ต่างกันดังนี้

1. **น้ำหนักบรรทุกของคานจากทฤษฎีกำลังต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากคอนกรีต (V_c) ของคานคอนกรีตอัดแรงตามมาตรฐาน ACI**

การวิเคราะห์กำลังต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากคอนกรีตของคานคอนกรีตอัดแรงจะพิจารณาจากค่าน้อยกว่าระหว่าง 2 ค่าคือ V_{ci} และ V_{cw} เนื่องจากผลของช่องเปิดขนาดใหญ่ทำให้คอนกรีตบริเวณช่องเปิดหายไปส่งผลให้ V_{cw} เป็นค่าที่น้อยกว่า ดังนั้นกำลังต้านทานแรงเฉือนจะหาได้จากสมการที่ 2.9 และค่าความลึกของคอนกรีตรับแรงเฉือนจากเดิมมีค่า d_p จะเปลี่ยนเป็น $d_p - d_O$ ดังแสดงในสมการที่ 5.1

$$V_{cw} = \left(0.93\sqrt{f'_c} + 0.3f_{pc}\right)b_w(d_p - d_0) + V_p \qquad (5.1)$$

- $d_p - d_0$ มีค่าเท่ากับ 12 cm
- แรงอัดประสิทธิผลในลวดเกลียวอัดแรง P_e มีค่าเท่ากับ 9,730 kg
- หน่วยแรงในคอนกรีตบริเวณศูนย์ถ่วงของหน้าตัดเนื่องจากการอัดแรง f_{pc} มีค่าเท่ากับ 13.52 ksc
- แรงประกอบย่อยแนวดิ่งของแรงอัดในเหล็กเสริมอัดแรง V_p มีค่าเท่ากับ 0
- V_{cw} มีค่าเท่ากับ 4,429.70 kg น้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 8,859.40 kg

2. **การวิเคราะห์ความสามารถการรับน้ำหนักบรรทุกของคานจากการประยุกต์ทฤษฎีกำลังต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากคอนกรีต (V_c) ของคานคอนกรีตอัดแรงตามมาตรฐาน ACI**

การวิเคราะห์กำลังต้านทานแรงเฉือนของคานที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่โดยการประยุกต์ใช้สมการ ACI มีหลักการคิดจากการวิบัติของคานที่มีช่องเปิดจะเกิดจากรอยร้าวที่คอนกรีตส่วนบนช่องเปิดก่อนและพิจารณาเป็นการวิบัติของคอนกรีตส่วนบนแล้วจึงตามด้วยส่วนล่างของช่องเปิด งานวิจัยนี้ตำแหน่งช่องเปิดอยู่ที่กึ่งกลางความลึกคานทำให้พื้นที่คอนกรีตส่วนบนและส่วนล่างที่เหลืออยู่มีค่าเท่ากัน ดังนั้นความลึกของพื้นที่รับแรงเฉือนซึ่งจะพิจารณาจากความหนาของคอนกรีตส่วนบนช่องเปิดจึงเปลี่ยนจาก d_p ในสมการที่ 2.9 เป็น $(h - d_O)/2$ ดังแสดงในสมการด้านล่าง

$$V_{cw} = (0.93\sqrt{f'_c} + 0.3f_{pc})b_w(\frac{h-d_o}{2}) + V_p \quad (5.2)$$

- $(h - d_0)/2$ มีค่าเท่ากับ 9.25 cm
- แรงอัดประสิทธิผลในลวดเกลียวอัดแรง P_e มีค่าเท่ากับ 9,730 kg
- หน่วยแรงในคอนกรีตบริเวณศูนย์ถ่วงของหน้าตัดเนื่องจากการอัดแรง f_{pc} มีค่าเท่ากับ 13.52 ksc
- แรงประกอบย่อยแนวดิ่งของแรงอัดในเหล็กเสริมอัดแรง V_p มีค่าเท่ากับ 0
- V_{cw} มีค่าเท่ากับ 3,414.56 kg น้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 6,829.13 kg

ดังนั้นการวิเคราะห์หาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคาน BO สามารถสรุปและเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากผลการทดสอบกับทฤษฎี ของคาน BO

คาน	A*	B*			C*		
	Pn (kg)	Vc (kg)	Pn (kg)	Error (%)	Vc (kg)	Pn (kg)	Error (%)
BO	7,010	4,429.70	8,859.40	26.38%	3,414.56	6,829.13	2.58%

หมายเหตุ : A* คือ น้ำหนักบรรทุกที่ได้จากการทดสอบ , B* คือน้ำหนักบรรทุกได้จากสมการกำลังต้านแรงเฉือนเนื่องจากคอนกรีต V_{cw} ตามมาตรฐาน ACI โดยค่าความลึกของคอนกรีตรับแรงเฉือนมีค่า $d_p - d_O$, C* คือ น้ำหนักบรรทุกได้จากการประยุกต์สมการกำลังต้านแรงเฉือนเนื่องจากคอนกรีต V_{cw} ตามมาตรฐาน ACI โดยค่าความลึกของคอนกรีตรับแรงเฉือนมีค่า $(h - d_0)/2$

จากตารางที่ 5.3 เห็นได้ว่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคาน BO ที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 7,010 kg และน้ำหนักบรรทุกจากการประยุกต์สมการกำลังต้านแรงเฉือนเนื่องจากคอนกรีต V_{cw} มีค่าเท่ากับ 6,829.13 kg พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากที่สุดโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 2.58% และยังมีความปลอดภัยเนื่องจากให้ค่ากำลังที่น้อยกว่ากำลังที่ได้จากการทดสอบ

5.4.3 การวิเคราะห์ความสามารถการรับน้ำหนักบรรทุกของคาน BO-1

คานมีช่องเปิดและไม่เสริมกำลัง (BO-1) เป็นคานที่มีลักษณะการวิบัติแบบเฉือนบริเวณช่องเปิด เนื่องจากผลของคอนกรีตบริเวณช่องเปิดที่หายไป ทำให้การวิเคราะห์ความสามารถการรับน้ำหนักบรรทุกของคานสามารถหาได้จากกำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตที่เหลืออยู่ จากหลักการที่ต่างกันดังนี้

1. **กำลังต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากคอนกรีต (V_c) ของคานคอนกรีตอัดแรงตามมาตรฐาน ACI**

การวิเคราะห์กำลังต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากคอนกรีตของคานคอนกรีตอัดแรงจะพิจารณาจากค่าน้อยกว่าระหว่าง 2 ค่าคือ V_{ci} และV_{cw} เนื่องจากผลของช่องเปิดขนาดใหญ่ทำให้คอนกรีตบริเวณช่องเปิดหายไปส่งผลให้ V_{cw} จะเป็นค่าที่น้อยกว่า ดังนั้นกำลังต้านทานแรงเฉือนจะหาได้จากสมการที่ 5.1

- $d_p - d_0$ มีค่าเท่ากับ 12 cm
- แรงอัดประสิทธิผลในลวดเกลียวอัดแรง P_e มีค่าเท่ากับ 10,650 kg
- หน่วยแรงในคอนกรีตบริเวณศูนย์ถ่วงของหน้าตัดเนื่องจากการอัดแรง f_{pc} มีค่าเท่ากับ 14.79 ksc
- แรงประกอบย่อยแนวดิ่งของแรงอัดในเหล็กเสริมอัดแรง V_p มีค่าเท่ากับ 0
- V_{cw} มีค่าเท่ากับ 4,684.34 kg หรือน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 9,368.68 kg

2. **ประยุกต์ทฤษฎีกำลังต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากคอนกรีต (V_c) ของคานคอนกรีตอัดแรงตามมาตรฐาน ACI**

การวิเคราะห์กำลังรับแรงเฉือนของคานที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่โดยการประยุกต์ใช้สมการ ACI ดังแสดงในสมการที่ 5.2

- $(h - d_0)/2$ มีค่าเท่ากับ 9.25 cm
- แรงอัดประสิทธิผลในลวดเกลียวอัดแรง P_e มีค่าเท่ากับ 10,650 kg
- หน่วยแรงในคอนกรีตบริเวณศูนย์ถ่วงของหน้าตัดเนื่องจากการอัดแรง f_{pc} มีค่าเท่ากับ 14.79 ksc
- แรงประกอบย่อยแนวดิ่งของแรงอัดในเหล็กเสริมอัดแรง V_p มีค่าเท่ากับ 0
- V_{cw} มีค่าเท่ากับ 3,610.85 kg เทียบเท่ากับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด 7,221.69 kg

การวิเคราะห์หาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคาน BO-1 สามารถสรุปและเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากผลการทดสอบกับทฤษฎี ของคาน BO-1

คาน	A*	B*			C*		
	Pn (kg)	Vc (kg)	Pn (kg)	Error (%)	Vc (kg)	Pn (kg)	Error (%)
BO-1	7,320	4,684.34	9,368.68	27.99 %	3,610.85	7,221.69	1.34 %

หมายเหตุ : A* คือ น้ำหนักบรรทุกที่ได้จากการทดสอบ , B* คือน้ำหนักบรรทุกได้จากสมการกำลังต้านแรงเฉือนเนื่องจากคอนกรีต V_{cw} ตามมาตรฐาน ACI โดยค่าความลึกของคอนกรีตรับแรงเฉือนมีค่า $d_p - d_O$, C* คือ น้ำหนักบรรทุกได้จากการประยุกต์สมการกำลังต้านแรงเฉือนเนื่องจากคอนกรีต V_{cw} ตามมาตรฐาน ACI โดยค่าความลึกของคอนกรีตรับแรงเฉือนมีค่า $(h - d_0)/2$

จากตารางที่ 5.4 เห็นได้ว่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคาน BO-1 ที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 7,320 kg และน้ำหนักบรรทุกจากการประยุกต์สมการกำลังต้านแรงเฉือนเนื่องจากคอนกรีต V_{cw} มีค่าเท่ากับ 7,221.69 kg พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากที่สุดโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1.34 % และยังมีความปลอดภัยเนื่องจากให้ค่ากำลังที่น้อยกว่ากำลังที่ได้จากการทดสอบ

5.4.4 การวิเคราะห์ความสามารถการรับน้ำหนักบรรทุกของคาน RBO-1

คาน RBO-1 มีลักษณะการวิบัติเป็นแบบดัด ทำให้การวิเคราะห์ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานจะหาจากโมเมนต์ดัดประลัยของคาน ซึ่งการวิเคราะห์หาความสามารถการรับน้ำหนักบรรทุกของคานสามารถพิจารณาได้จากหลักการที่ต่างกันดังนี้

1. **น้ำหนักบรรทุกของคานจากหน่วยแรงดึงเหล็กเสริมอัดแรงที่สภาวะวิบัติ (f_{ps})**

การวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุกวิธีนี้เป็นการหาค่าโมเมนต์ประลัยของคานโดยใช้ค่าหน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงที่สถาวะวิบัติ f_{ps} เริ่มจากหาค่าความลึกของ Stress Block จากสมดุลย์ของแรงอัดเท่ากับแรงดึง โดยสมมติใช้ค่า f_{ps} และค่า f_y ของเหล็กเสริมรับแรงดึงที่มีค่าคงที่ และ $f'_s < f_y$

- ค่า f_{ps} ดังแสดงในสมการที่ 2.4 มีค่าเท่ากับ 18,918.90 ksc
- ค่าระยะแกนสะเทิน (c) จากสมดุลย์ของแรงได้เท่ากับ 6.70 cm.
- ค่า strain ของเหล็กเสริมอัดแรงมีค่าเท่ากับ 0.01200 มีค่าเกินจุดคราก และใช้ค่าหน่วยแรงเท่ากับ f_{ps}
- ค่า strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึง มีค่าเท่ากับ 0.01200 มีค่าเกินจุดคราก และใช้ค่า f_y ที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ 5,840 ksc

- ค่า strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงอัด มีค่าเท่ากับ 0.00076 มีค่าไม่เกินจุดคราก และใช้ค่า f_s' เท่ากับ 1,555.51 ksc ถูกต้องตามสมมติฐาน
- ค่าโมเมนต์ประลัยมีค่าเท่ากับ 9,740.32 kg.m คิดเป็นน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 10,252.97kg

2. น้ำหนักบรรทุกของคานจากหลักการ strain compatibility และ f_{py}, f_y คงที่

การวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุกวิธีนี้หาได้จากการ Trial ค่าระยะแกนสะเทินของหน้าตัด (c) เพื่อหาสมดุลย์แรงอัดเท่ากับแรงดึง และใช้หลักการ Strain Compatibility คำนวณหาค่า Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมไม่อัดแรง ณ ตำแหน่งต่างๆ ของหน้าตัดพร้อมกับใช้นิยามกำลังของเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมไม่อัดแรงมีค่าคงที่เป็นเส้นตรง f_{py}, f_y หลังจุดคราก ทำให้ได้ค่าดังต่อไปนี้

- ค่าระยะแกนสะเทิน (c) เท่ากับ 6.53 cm
- ค่า strain ของเหล็กเสริมอัดแรงมีค่าเท่ากับ 0.01238 มีค่าเกินจุดคราก และใช้ค่า f_{py} ที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ 17,931.31 ksc
- ค่า Strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึง มีค่าเท่ากับ 0.01238 มีค่าเกินจุดคราก และใช้ค่า f_y ที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ 5,840 ksc
- ค่า Strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงอัด มีค่าเท่ากับ 0.00070 มีค่าไม่เกินจุดคราก และใช้ค่า f_s' เท่ากับ 1,438.17 ksc
- ค่าโมเมนต์ประลัยมีค่าเท่ากับ 9,464.77 kg.m หรือน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 9,962.91 kg

3. น้ำหนักบรรทุกของคานจากหลักการ strain compatibility และ f_{ps}, f_s จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของเหล็กเสริม

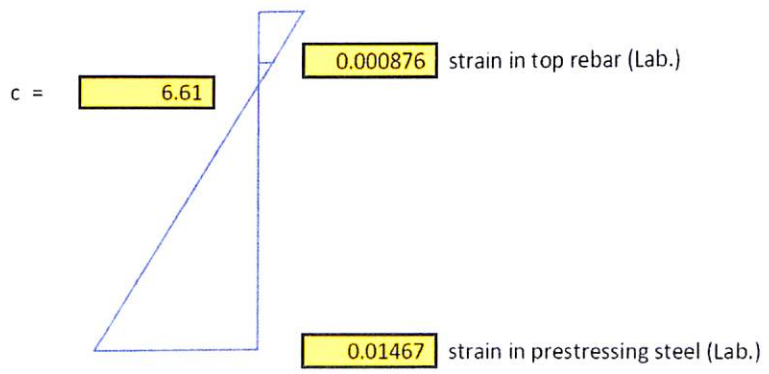
การวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุกวิธีนี้หาได้จากการ Trial ค่าระยะแกนสะเทินของหน้าตัด (c) เพื่อหาสมดุลย์แรงอัดเท่ากับแรงดึง และใช้หลักการ Strain Compatibility ในการคำนวณหาค่า Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมไม่อัดแรง ณ ตำแหน่งต่างๆ ของหน้าตัดพร้อมกับใช้ค่ากำลังที่จุดคราก f_{ps}, f_s ของเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain จากการทดสอบเหล็กตัวอย่าง ทำให้ได้ค่าดังต่อไปนี้

- ค่าระยะแกนสะเทิน (c) เท่ากับ 6.54 cm

- ค่า Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงมีค่าเท่ากับ 0.01236 มีค่าเกินจุดคราก และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงที่ได้จากการทดสอบ ทำให้ได้ค่า f_{ps} เท่ากับ 18,270 ksc
- ค่า Strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึงมีค่าเท่ากับ 0.01236 มีค่าเกินจุดคราก และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่ได้จากการทดสอบ ทำให้ได้ค่า f_s เท่ากับ 5,920 ksc
- ค่า Strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 0.00071 มีค่าไม่เกินจุดคราก และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่ได้จากการทดสอบ ทำให้ได้ค่า f_s' เท่ากับ 1,650 ksc
- ค่าโมเมนต์ประลัยเท่ากับ 9,611.52 kg.m เทียบได้กับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด10,117.39 kg

4. น้ำหนักบรรทุกของคานจากหลักการ Strain Compatibility โดยใช้ค่า Strain ที่ได้จากการทดสอบ และ f_{ps}, f_s' ที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของเหล็กเสริม

การวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุกวิธีนี้หาได้จากการนำค่า Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบ (Lab.) มาหาค่าระยะแกนสะเทินของหน้าตัด (c)โดยใช้หลักการ Strain Compatibility พร้อมกับใช้ค่ากำลังที่จุดคราก f_{ps}, f_s' ของเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain จากการทดสอบเหล็กตัวอย่าง ทำให้ได้ค่าดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.10 หาค่า c ด้วยหลักการ Strain Compatibility โดยใช้ค่า Strain ที่ได้จากการทดสอบของคาน RBO-1

- ค่า Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.01467 มีค่าเกินจุดคราก และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงที่ได้จากการทดสอบ ทำให้ได้ค่า f_{ps} เท่ากับ 18,400 ksc

- ค่า Strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.000876 มีค่าไม่เกินจุดคราก และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงที่ได้จากการทดสอบ ทำให้ได้ค่า f_s' เท่ากับ 1,700 ksc
- จากค่า Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่ได้จากการทดสอบ นำมาหาค่าระยะแกนสะเทิน (c) โดยใช้หลักการ Strain Compatibility ได้ค่าเท่ากับ 6.61 cm
- ค่า Strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึง มีค่าเท่ากับ 0.01467 มีค่าเกินจุดคราก และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงที่ได้จากการทดสอบ ทำให้ได้ค่า f_s เท่ากับ 5,950 ksc
- ค่าโมเมนต์ประลัยเท่ากับ 9,662.22 kg.m หรือน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 10,170.76 kg

จากการวิเคราะห์หาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคาน RBO-1 ในแต่ละวิธีที่ผ่านมาสามารถสรุปและเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 เปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากผลการทดสอบกับทฤษฎี ของคาน RBO-1

คาน	A*	B*		C*		D*		E*	
	Pn (kg)	Pn (kg)	Error (%)	Pn (kg)	Error (%)	Pn (kg)	Error (%)	Pn (kg)	Error (%)
RBO-1	10,850	10,252.97	5.50 %	9,962.91	8.17 %	10,117.39	6.75 %	10,170.76	6.26 %

หมายเหตุ : A* คือ น้ำหนักบรรทุกที่ได้จากการทดสอบ , B* คือน้ำหนักบรรทุกของคานจากหน่วยแรงดึงเหล็กเสริมอัดแรงที่สภาวะวิบัติ f_{py} , C* คือ น้ำหนักบรรทุกของคานจากหลักการ Strain Compatibility และ f_{ps} ,f_y คงที่, D* คือ น้ำหนักบรรทุกของคานจากหลักการ Strain Compatibility และ f_{ps} ,f_s ที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain จากการทดสอบเหล็กตัวอย่าง, E* คือ น้ำหนักบรรทุกของคานจากหลักการ Strain Compatibility โดยใช้ค่า Strain ที่ได้จากการทดสอบ และ f_{ps} ,f_s' ที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain จากการทดสอบเหล็กตัวอย่าง

จากตารางที่ 5.5 เห็นได้ว่าน้ำหนักบรรทุกที่คำนวณจากการใช้ค่าหน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงที่สภาวะวิบัติ (f_{ps}) ตามมาตรฐานของ ACI มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 10,252.97 kg คิดเป็นความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 5.50 % และมีความปลอดภัยเนื่องจากให้ค่ากำลังน้อยกว่ากำลังที่ได้จากการทดสอบ

5.4.5 การวิเคราะห์ความสามารถการรับน้ำหนักบรรทุกของคาน SBO

คาน SBO มีลักษณะการวิบัติเป็นแบบดัด ทำให้การวิเคราะห์ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานจะหาจากโมเมนต์ดัดประลัยของคาน ซึ่งการวิเคราะห์หาความสามารถการรับน้ำหนักบรรทุกของคานสามารถพิจารณาจากหลักการที่ต่างกันดังนี้

1. **น้ำหนักบรรทุกของคานจากหน่วยแรงดึงเหล็กเสริมอัดแรงที่สภาวะวิบัติ (f_{ps})**

การวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุกวิธีนี้เป็นการหาค่าโมเมนต์ประลัยของคานโดยใช้ค่าหน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงที่สถาวะวิบัติ f_{ps} เริ่มจากหาค่าความลึกของ Stress Block จากสมดุลย์ของแรงอัดเท่ากับแรงดึง โดยสมมติใช้ค่า f_{ps} และค่า f_y ของเหล็กเสริมรับแรงดึงที่มีค่าคงที่และ $f_s' < f_y$

- ค่า f_{ps} ดังแสดงในสมการที่ 2.4 มีค่าเท่ากับ 18,918.90 ksc
- ค่าระยะแกนสะเทิน (c) จากสมดุลย์ของแรงได้เท่ากับ 6.70 cm.
- ค่า Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงมีค่าเท่ากับ 0.01200 มีค่าเกินจุดคราก และใช้ค่าหน่วยแรงเท่ากับ f_{ps}
- ค่า Strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึง มีค่าเท่ากับ 0.01200 มีค่าเกินจุดคราก และใช้ค่า f_y ที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ 5,840 ksc
- ค่า Strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงอัด มีค่าเท่ากับ 0.00076 มีค่าไม่เกินจุดคราก และใช้ค่า f_s' เท่ากับ 1,555.51 ksc ถูกต้องตามสมมติฐาน
- ค่าโมเมนต์ประลัยมีเท่ากับ 9,740.32 kg.m เทียบเท่ากับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด 10,252.97 kg

2. **น้ำหนักบรรทุกของคานจากหลักการ Strain Compatibility และ f_{py}, f_y คงที่**

การวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุกวิธีนี้หาได้จากการ Trial ค่าระยะแกนสะเทินของหน้าตัด (c) เพื่อหาสมดุลย์แรงอัดเท่ากับแรงดึง และใช้หลักการ strain compatibility คำนวณหาค่า strain ของเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมไม่อัดแรง ณ ตำแหน่งต่างๆ ของหน้าตัดพร้อมกับใช้นิยามกำลังของเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมไม่อัดแรงมีค่าคงที่เป็นเส้นตรง f_{py}, f_y หลังจุดคราก ทำให้ได้ค่าดังต่อไปนี้

- ค่าระยะแกนสะเทิน (c) เท่ากับ 6.53 cm
- ค่า strain ของเหล็กเสริมอัดแรงมีค่าเท่ากับ 0.01238 มีค่าเกินจุดคราก และใช้ค่า f_{py} ที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ 17,931.31 ksc

- ค่า strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึง มีค่าเท่ากับ 0.01238 มีค่าเกินจุดคราก และใช้ค่า f_y ที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ 5,840 ksc
- ค่า strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงอัด มีค่าเท่ากับ 0.00070 มีค่าไม่เกินจุดคราก และใช้ค่า f'_s เท่ากับ 1,438.17 ksc
- ค่าโมเมนต์ประลัยเท่ากับ 9,464.77 kg.m คิดเป็นน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 9,962.91 kg

3. น้ำหนักบรรทุกของคานจากหลักการ strain compatibility และ f_{ps}, f_s ที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stress กับ strain ของเหล็กเสริม

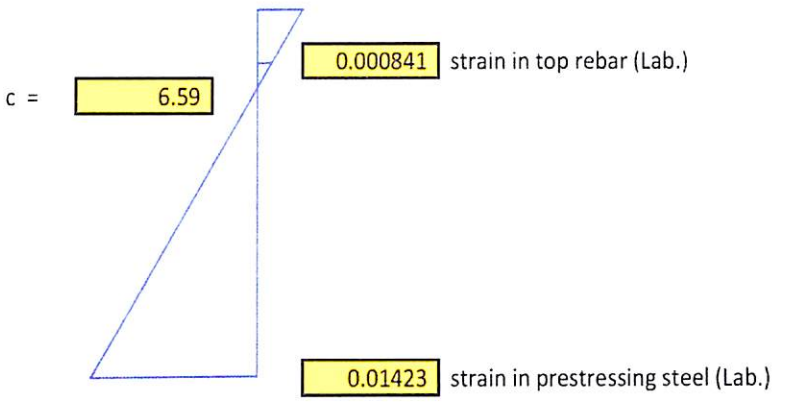
การวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุกวิธีนี้หาได้จากการ Trial ค่าระยะแกนสะเทินของหน้าตัด (c) เพื่อหาสมดุลย์แรงอัดเท่ากับแรงดึง และใช้หลักการ Strain Compatibility ในการคำนวณหาค่า Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมไม่อัดแรง ณ ตำแหน่งต่างๆ ของหน้าตัดพร้อมกับใช้ค่ากำลังที่จุดคราก f_{ps}, f_s ของเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain จากการทดสอบเหล็กตัวอย่าง ทำให้ได้ค่าดังต่อไปนี้

- ค่าระยะแกนสะเทิน (c) เท่ากับ 6.54 cm
- ค่า Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงมีค่าเท่ากับ 0.01236 มีค่าเกินจุดคราก และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงที่ได้จากการทดสอบ ทำให้ได้ค่า f_{ps} เท่ากับ 18,270 ksc
- ค่า Strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึงมีค่าเท่ากับ 0.01236 มีค่าเกินจุดคราก และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่ได้จากการทดสอบ ทำให้ได้ค่า f_s เท่ากับ 5,920 ksc
- ค่า Strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 0.00071 มีค่าไม่เกินจุดคราก และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่ได้จากการทดสอบ ทำให้ได้ค่า f'_s เท่ากับ 1,650 ksc
- ค่าโมเมนต์ประลัยเท่ากับ 9,611.52 kg.m หรือน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 10,117.39 kg

4. น้ำหนักบรรทุกของคานจากหลักการ Strain compatibility โดยใช้ค่า Strain ที่ได้จากการทดสอบ และ f_{ps}, f'_s ที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของเหล็กเสริม

การวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุกวิธีนี้หาได้จากการนำค่า Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบ (Lab.) มาหาค่าระยะแกนสะเทินของหน้าตัด (c)โดยใช้หลักการ

Strain Compatibility พร้อมกับใช้ค่ากำลังที่จุดคราก f_{ps}, f'_s ของเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมไม่อัดแรง ที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain จากการทดสอบเหล็กตัวอย่าง ทำให้ได้ค่าดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.11 หาค่า c ด้วยหลักการ Strain Compatibility โดยใช้ค่า Strain ที่ได้จากการทดสอบของคาน SBO

- ค่า Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.01423 มีค่าเกินจุดคราก และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงที่ได้จากการทดสอบ ทำให้ได้ค่า f_{ps} เท่ากับ 18,380 ksc
- ค่า Strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.00084 มีค่าไม่เกินจุดคราก และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงที่ได้จากการทดสอบ ทำให้ได้ค่า f'_s เท่ากับ 1,690 ksc
- จากค่า Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงและเหล็กเสริมไม่อัดแรงที่ได้จากการทดสอบ นำมาหาค่าระยะแกนสะเทิน (c) โดยใช้หลักการ Strain Compatibility ได้ค่าเท่ากับ 6.59 cm
- ค่า Strain ของเหล็กเสริมไม่อัดแรงรับแรงดึง มีค่าเท่ากับ 0.01423 มีค่าเกินจุดคราก และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของเหล็กเสริมอัดแรงที่ได้จากการทดสอบ ทำให้ได้ค่า f_s เท่ากับ 5,930 ksc
- ค่าโมเมนต์ประลัยเท่ากับ 9,644.43 kg.m หรือน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 10,152.03 kg

จากการวิเคราะห์หาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคาน SBO ในแต่ละวิธีที่ผ่านมา สามารถสรุปและเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 เปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากผลการทดสอบกับทฤษฎี ของคาน SBO

คาน	A*	B*		C*		D*		E*	
	Pn (kg)	Pn (kg)	Error (%)	Pn (kg)	Error (%)	Pn (kg)	Error (%)	Pn (kg)	Error (%)
SBO	10,810	10,252.97	5.15 %	9,962.91	7.84 %	10,117.39	6.41 %	10,152.03	6.08 %

หมายเหตุ : A* คือ น้ำหนักบรรทุกที่ได้จากการทดสอบ , B* คือน้ำหนักบรรทุกของคานจากหน่วยแรงดึงเหล็กเสริมอัดแรงที่สภาวะวิบัติ f_{py} , C* คือ น้ำหนักบรรทุกของคานจากหลักการ Strain Compatibility และ f_{ps} ,f_y คงที่, D* คือ น้ำหนักบรรทุกของคานจากหลักการ Strain Compatibility และ f_{ps} ,f_s ที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain จากการทดสอบเหล็กตัวอย่าง, E* คือ น้ำหนักบรรทุกของคานจากหลักการ Strain Compatibility โดยใช้ค่า Strain ที่ได้จากการทดสอบ และ f_{ps} ,f_s' ที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain จากการทดสอบเหล็กตัวอย่าง

จากตารางที่ 5.6 เห็นได้ว่าน้ำหนักบรรทุกที่คำนวณจากการใช้ค่าหน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงที่สภาวะวิบัติ (f_{ps}) ตามมาตรฐานของ ACI มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 10,252.97 kg คิดเป็นความคลาดเคลื่อน 5.15 % และมีความปลอดภัยเนื่องจากให้ค่ากำลังน้อยกว่ากำลังที่ได้จากการทดสอบ

จากผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานทดสอบทั้งหมดสามารถสรุปค่าการคำนวณน้ำหนักบรรทุกที่ได้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากที่สุดได้ดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 เปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากผลการทดสอบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์

คาน	$P_{n(Exp.)}$, (Tons)	$P_{n(predict)}$, (Tons)	Error (%)
CB	11.00	10.165	7.59 %
BO	7.01	6.829	2.58 %
BO-1	7.32	7.221	1.34 %
RBO-1	10.85	10.252	5.50 %
SBO	10.81	10.252	5.15 %

หมายเหตุ : $P_{n(Exp.)}$ คือค่าน้ำหนักบรรทุกได้จากการทดสอบ , $P_{n(predict)}$ ค่าน้ำหนักบรรทุกได้จากการวิเคราะห์หน้าตัดวิบัติภายใต้แรงดัดหรือแรงเฉือน

จากการวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานทดสอบที่วิบัติภายใต้แรงดัดที่ให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากที่สุดคือ การใช้หน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงที่สถาวะวิบัติ f_{ps} ตามมาตรฐาน ACI ดังสมการที่ 2.4 โดยสมมติใช้ค่า f_{ps} และค่า f_y ของเหล็กเสริมรับแรงดึงมีค่าคงที่ ส่วน f_s' ใช้เท่ากับ $E_s\varepsilon_s'$

$$f_{ps} = f_{pu}\left\{1 - \frac{r_p}{\beta_1}\left[\rho_p \frac{f_{pu}}{f_c'} + \frac{d}{d_p}(\omega - \omega')\right]\right\} \qquad (2.4)$$

ส่วนคานทดสอบที่วิบัติภายใต้แรงเฉือนจะวิเคราะห์โดยประยุกต์ทฤษฎีกำลังต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากคอนกรีต (V_c) ของคานคอนกรีตอัดแรงตามมาตรฐาน ACI ดังสมการที่ 5.2

$$V_{cw} = (0.93\sqrt{f'_c} + 0.3f_{pc})b_w(\frac{h - d_o}{2}) + V_p \quad (5.2)$$