



การวิเคราะห์พฤติกรรมของคาน

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของคานคอนกรีตอัดแรงจากการทดลองจะได้ศึกษาถึงผลของการโก่งตัวจากน้ำหนักบรรทุก โมเมนต์ดัดแตกเร็วและกำลังดัดประลัย ซึ่งคานคอนกรีตอัดแรงทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงมากในการศึกษานี้จะแสดงพฤติกรรมแตกต่างออกไปจากคานทำด้วยคอนกรีตธรรมดา ดังนั้น ข้อกำหนดของมาตรฐานการออกแบบต่าง ๆ ซึ่งให้ความเชื่อถือได้สำหรับชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กทำด้วยคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำกว่า 550 กก./ซม^2 จึงไม่สามารถใช้ได้กับคานทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงมากได้ นอกจากนี้ ในบทนี้ยังได้ศึกษาถึงการเสื่อมสูญของการอัดแรงจากการทดลองนี้ประกอบด้วย

การเสื่อมสูญของการอัดแรง (Loss of Prestress)ก. การหดตัวอีลาสติก (Elastic Shortening)

จากการศึกษาข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าความเครียดของคอนกรีตและลวดอัดแรงตามลำดับขั้นตอนต่าง ๆ ซึ่งได้กล่าวไว้โดยละเอียดในบทที่ 4 มาคำนวณการเสื่อมสูญของการอัดแรงในคานซึ่งทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงมากดังแสดงไว้ตามตารางที่ 11 พบว่า ในการคำนวณค่าการเสื่อมสูญของการอัดแรงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีตโดยสมการที่ 3 จะมีค่าเฉลี่ยของค่าการเสื่อมสูญที่ได้จากการทดลองต่อค่าที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ 1.016 และมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.024 แสดงว่าการคาดคะเนการเสื่อมสูญของการอัดแรงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีตในคานทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงมากโดยทฤษฎีอีลาสติกให้ผลดีและใกล้เคียงกับความเป็นจริงมาก ซึ่งน่าจะสืบเนื่องมาจากพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังสูงมากที่มีความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่เกิดขึ้นกับความเครียดเกือบจะเป็นเส้นตรงอย่างแท้จริง

ตารางที่ 11 แสดงการเสื่อมสลายของการอัดแรงเนื่องจากการหดตัวอิลาสติกของคอนกรีต

ตัวอย่างที่	พื้นที่หน้าตัด (ซม^2 .)	โมดูลัสแห่ง ความยืดหยุ่น ($\text{กก.}/\text{ซม}^2$.)	แรงอัดหลังการ เสื่อมสลาย (ตัน)	การเสื่อมสลายจากการหดตัว อิลาสติก (%)		ทดสอบ
				ทดสอบ	คำนวณ	คำนวณ
B1	170.6	4.15×10^5	4.175	1.15	1.09	1.05
B2	169.0	3.20×10^5	7.533	2.95	2.86	1.03
B3	170.2	5.10×10^5	9.732	2.58	2.67	0.97
B4	169.9	4.68×10^5	14.143	3.98	3.89	1.02
B5	170.4	5.08×10^5	19.823	4.52	4.46	1.01
B6	169.5	3.81×10^5	22.240	7.36	7.18	1.02
						Av.1.016
						S.D.0.024

ข. การล้าของลวดอัดแรง (Stress Relaxation in Steel)

ในการทดลองได้ทำการวัดหาค่าการล้าของลวดอัดแรงโดยติด Electrical Strain Gauge ณ จุดต่าง ๆ จุดตลอดความยาวของเส้นลวดโดยเว้นระยะห่างเท่าๆ กัน เพื่อวัดค่าความเครียดที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อถึงเส้นลวดไว้ด้วยแรงคงที่เป็นระยะเวลาประมาณ 7 วัน จากการทดลองพบว่า การล้าของลวดอัดแรงจะเกิดขึ้นสูงในช่วง 3 วันแรกหลังจากนั้น จะมีค่าน้อยมากจนไม่สามารถอ่านค่าความแตกต่างได้ ดังนั้น ในการคำนวณค่าการเสื่อมสูญของการอัดแรงเนื่องจากการล้าของลวดอัดแรงจึงคำนวณจากค่าการล้าที่เกิดขึ้นในช่วง 3 วันแรก เท่านั้น ซึ่งการเสื่อมสูญเนื่องจากการล้าของลวดอัดแรงนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 12 และมีค่าเฉลี่ยการเสื่อมสูญของการอัดแรงเท่ากับ 3.07 %

ค. การคืบตัวและการหดตัวของคอนกรีต (Creep and Shrinkage of Concrete)

การคืบตัวของคอนกรีตที่เกิดขึ้นในตัวอย่างคานที่ทำการทดสอบ ได้คำนวณจากผลการวัดความเครียดโดยใช้ Electrical Strain Gauge ที่ติดไว้กับเส้นลวดอัดแรงโดยถือว่าความเครียดของลวดอัดแรงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลามีค่าเท่ากับความเครียดของคอนกรีตที่เกิดขึ้นในการวัดได้ใช้ Strain Indicator ซึ่งสามารถวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความเครียดได้ละเอียดถึง 1×10^{-6} ชม./ชม. การบันทึกค่าเริ่มตั้งแต่หลังการตัดลวดอัดแรงโดยบันทึกค่าเมื่อคานมีอายุ 3, 7, 14 และ 28 วันตามลำดับ ค่าความแตกต่างของความเครียดที่ได้จากการบันทึกในแต่ละช่วงจะเป็นค่าการคืบตัวและการหดตัวของคอนกรีตที่เกิดขึ้น

ค่าการคืบตัวของคอนกรีตที่วัดได้จากคานตัวอย่างที่ทำการทดลองนี้ พบว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงอัดในคานมีค่าสูง โดยค่าความแตกต่างของความเครียดที่ได้จากการบันทึกในช่วง 28 วัน จะมีค่าตั้งแต่ 0.68×10^{-4} ชม./ชม. ในคาน B1 และ 1.66×10^{-4} ชม./ชม. ในคาน B6 นอกจากนี้ การคืบตัวซึ่งเกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงจะต่ำกว่าการคืบตัวของคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำกว่า เห็นได้จากคาน B3 ซึ่งมีกำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 1096 กก./ cm^2 .

จะมีค่าการคืบตัวเกิดขึ้นเพียง 0.176×10^{-4} ซม./ชม. ในขณะที่คาน B2 ซึ่งมีกำลังอัดของคอนกรีตเพียง 688 กก./ชม. จะมีค่าการคืบตัวเกิดขึ้นถึง 1.85×10^{-4} ซม./ชม. ทั้ง ๆ ที่ตามปกติคาน B2 ควรจะมีค่าการคืบตัวต่ำกว่าคาน B3 เนื่องจากปริมาณแรงอัดในคานที่น้อยกว่า

ในการเสื่อมสูญของการอัดแรงเนื่องจากการคืบตัวของคอนกรีต จากการทดลองดังแสดงไว้ในตารางที่ 12 ได้จากการเสื่อมสูญของการอัดแรงทั้งหมดในระยะเวลา 28 วัน โดยหักการเสื่อมสูญของการอัดแรงจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีตและการล้าของลวดอัดแรงออก ค่าการเสื่อมสูญของการอัดแรงที่เหลือจะเป็นค่าการเสื่อมสูญเนื่องจากการคืบตัวของคอนกรีตทั้งหมด โดยคิดว่า การเสื่อมสูญของการอัดแรงเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีตไม่เกิดขึ้นเพราะในระยะ 3 วันแรกคานจะได้รับการบ่มขึ้นหลังจากนั้นเมื่อตัดลวดแล้วจะถูกนำไปบ่มใต้น้ำจนอายุครบ 28 วัน การเสื่อมสูญของการอัดแรงเนื่องจากการคืบตัวของคอนกรีตจากการทดลองจะมีค่าต่ำในคานที่มีแรงอัดต่ำและจะมีค่าสูงในคานที่มีแรงอัดสูง เห็นได้จากคาน B1 ซึ่งมีค่าแรงอัด 4175 กก. จะมีการเสื่อมสูญเพียง 1.21 % ส่วนในคาน B6 ซึ่งมีค่าแรงอัด 22240 กก. จะมีการเสื่อมสูญถึง 3.05 % การเสื่อมสูญของการอัดแรงในการทดลองนี้จะต่ำกว่าที่เกิดขึ้นในคานทำด้วยคอนกรีตธรรมดา พิจารณาจากคาน B2 ซึ่งมีค่าแรงอัด 7533 กก. จะมีการเสื่อมสูญของการอัดแรงเนื่องจากการคืบตัวของคอนกรีต 3.46 % ซึ่งสูงกว่าที่เกิดขึ้นในคาน B6 เนื่องจากคาน มีกำลังอัดของคอนกรีตอยู่ในช่วงปานกลางเท่านั้น คือ 688 กก./ชม². ในขณะที่คาน B6 มีกำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 819 กก./ชม². ดังนั้น อาจจะสรุปได้ว่า การเสื่อมสูญของการอัดแรงเนื่องจากการคืบตัวของคอนกรีตในคานที่ทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงจะต่ำกว่าที่เกิดขึ้นในคานทำด้วยคอนกรีตธรรมดา

เมื่อพิจารณาการคืบตัวของคอนกรีตกำลังสูงมากต่อแรงที่เกิดขึ้นจากการอัดแรงในช่วง 28 วันแรกแล้ว ปรากฏว่า การคืบตัวต่อหน่วยแรงจะมีค่าตั้งแต่ $0.0000096-0.00000371$ กก./ชม². โดยจะเห็นได้ชัดว่า คอนกรีตที่มีกำลังสูงกว่าการคืบตัวต่อหน่วยแรงจะเกิดขึ้นน้อยกว่า ดังเช่นในคาน

ตารางที่ 12. แสดงข้อมูลการเสื่อมสูญของการอัดแรงของคานจากการทดลอง

ตัวอย่างที่	แรงอัด เริ่มแรก (ตัน)	แรงอัดหลัง การเสื่อมสูญ (ตัน)	การเสื่อมสูญ รวมที่ 28 วัน (%)	การเสื่อมสูญของการอัดแรง (%)		
				การหดตัว อีลาสติก	การล้าของ ลวดอัดแรง	การคืบตัว คอนกรีต
B1	4.455	4.175	6.03	1.15	3.67	1.21
B2	8.420	7.533	10.53	2.95	4.12	3.46
B3	10.507	9.732	7.38	2.58	3.10	1.70
B4	15.256	14.143	7.30	3.98	1.84	1.79
B5	21.848	19.823	9.27	4.52	2.53	2.22
B6	25.738	22.240	13.59	7.36	3.18	3.05
					Av. 3.07	

ตารางที่ 13 แสดงค่าอัตราส่วนระหว่างการสืบตัวของคอนกรีต
ต่อหน่วยแรงอัดในคาน

ตัวอย่างที่	การสืบตัว ของคอนกรีต ที่ 28 วัน	หน่วยแรง (กก./ซม. ² .)	การสืบตัวของ คอนกรีต หน่วยแรง
B1	0.68×10^{-4}	26.11	2.60×10^{-6}
B2	1.85×10^{-4}	49.82	3.71×10^{-6}
B3	0.76×10^{-4}	61.73	1.23×10^{-6}
B4	0.87×10^{-4}	89.79	0.96×10^{-6}
B5	1.54×10^{-4}	128.22	1.20×10^{-6}
B6	1.66×10^{-4}	151.85	1.09×10^{-6}
		Av.	1.79×10^{-6}

B5 ซึ่งคอนกรีตมีกำลังอัด 1092 กก./ซม². การคืบตัวต่อหน่วยแรงจะเกิดขึ้นเพียง 0.0000012/กก./ซม². ในขณะที่ในคาน B2 ซึ่งคอนกรีตมีกำลังอัดเพียง 688 /กก./ซม². การคืบตัวต่อหน่วยแรงจะสูงถึง 0.00000371/กก./ซม². สำหรับค่าเฉลี่ยของการคืบตัวต่อหน่วยแรงที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าประมาณ 0.00000179/กก./ซม². เทียบกับคอนกรีตธรรมดาซึ่งเกิดขึ้นประมาณ 0.00000227/กก./ซม². แล้วจะเกิดขึ้นเพียง 78.8 % ของช่วงเวลาเดียวกัน

การโก่งตัวของคาน (Deflections)

ก. การโก่งตัวขึ้นเนื่องจากการอัดแรง (Camber)

จากผลการโก่งตัวของคานในช่วงต่าง ๆ ซึ่งวัดได้จากการทดลองดังแสดงไว้ในตารางที่ 14 การโก่งตัวขึ้นเนื่องจากการอัดแรงของคานจะมีค่าน้อยกว่าที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรงธรรมดามาก เนื่องจากค่าสติฟเนส (EI) ของคานที่มีค่าสูงเพราะค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่สูงขึ้น นอกจากนี้ จากการทดสอบพบว่าคานที่มีการอัดแรงไว้สูงก็จะมีค่าการโก่งตัวขึ้นมากกว่าคานที่มีการอัดแรงไว้ต่ำ สังเกตได้จากคาน B6 ซึ่งมีลวดอัดแรง 6 เส้นและมีค่าแรงอัดประมาณ 22240 กก. จะมีการโก่งตัวขึ้น 5.0 มม. ขณะที่คาน B1 ซึ่งมีลวดอัดแรง 1 เส้นและมีค่าแรงอัดประมาณ 4175 กก. จะมีการโก่งตัวขึ้นเพียง 1.0 มม.

สำหรับการคาดคะเนการโก่งตัวขึ้นโดยอาศัยสมมุติฐานว่า คานคอนกรีตมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด (homogeneous) และอยู่ในสภาพอีลาสติคโดยสมการที่ 8 เมื่อนำผลการโก่งตัวขึ้นจริงมาเปรียบเทียบกับผลการคาดคะเนดังแสดงไว้ในตารางที่ 14 จะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.98 และค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.147 ซึ่งแสดงผลเป็นที่น่าพอใจมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากคอนกรีตกำลังสูงมากจะมีพฤติกรรมของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดเป็นเส้นตรงตลอดในช่วงแรก จึงทำให้การคาดคะเนการโก่งตัวขึ้นเนื่องจากการอัดแรงซึ่งเป็นการคาดคะเนโดยทฤษฎีอีลาสติคให้ผลใกล้เคียงกับความ เป็นจริงมาก

ตารางที่ 14 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างการโก่งตัวขึ้นและการโก่งตัว
ที่จุดแตกตัวของคานจากการทดลองกับการคำนวณ

ตัวอย่างที่	การโก่งตัวขึ้นจากการอัดแรง			การโก่งตัวที่จุดแตกร้า		
	ทดสอบ (มม.)	คำนวณ (มม.)	ทดสอบ / คำนวณ	ทดสอบ (มม.)	คำนวณ (มม.)	ทดสอบ / คำนวณ
B1	-1.0	-0.9	1.11	1.00	1.10	0.90
B2	-2.0	-2.0	1.00	1.70	1.45	1.17
B3	-1.3	-1.4	0.93	0.48	0.44	1.09
B4	-2.8	-2.4	1.16	0.95	1.12	0.85
B5	-2.1	-3.0	0.70	0.90	0.87	1.03
B6	-5.0	-5.1	0.98	0.54	0.41	1.32
		Mean	0.98		Mean	1.06
		S.D.	0.147		S.D.	0.158

ข. การโก่งตัวที่จุดแตกร้าว (Deflection at Flexural Cracking)

จากการทดลองเมื่อคานคอนกรีตอัดแรงรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ คานจะค่อย ๆ โก่งตัวลงด้วย อัตราการโก่งที่เกือบจะคงที่จนกระทั่งผิวล่างของคานเกิดรอยร้าว ค่าการโก่งตัวที่จุดแตกร้าวของคานนี้แสดงไว้ในตารางที่ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีต ขนาดและระยะเยื้องศูนย์กลางของการอัดแรง และชนิดของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อคานดังจะเห็นจากคาน B3 และ B5 ซึ่งมีโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นของคอนกรีตใกล้เคียงกัน แต่คาน B5 ซึ่งมีค่าแรงอัดประมาณ 19823 กก. จะโก่งตัวถึง 0.90 มม. ที่จุดแตกร้าว ส่วนคาน B3 ซึ่งมีค่าแรงอัดประมาณ 9732 กก. จะโก่งตัวเพียง 0.48 มม. ก็เกิดรอยร้าวขึ้น

ในการคาดคะเนการโก่งตัวที่จุดแตกร้าวของคานโดยสมการที่ 10 ได้ใช้ค่าโมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ได้จากผลการทดสอบแท่งคอนกรีตที่มีอายุเท่ากับคาน และได้แสดงผลเปรียบเทียบกับค่าการโก่งตัวจริงไว้ในตารางเดียวกัน ซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกันมาก โดยมีค่าเฉลี่ยของการโก่งตัวจริงต่อการคาดคะเนเท่ากับ 1.06 และมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.158 แสดงให้เห็นว่าการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางคานขณะที่เริ่มมีการแตกร้าวในคานคอนกรีตอัดแรงทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงมาก สามารถใช้สมการที่ 10 ซึ่งได้จากความสัมพันธ์แบบเส้นตรงของโมเมนต์กับความโค้งในช่วงก่อนการแตกร้าวของคานมาคาดคะเนการโก่งตัวได้อย่างใกล้เคียงเช่นเดียวกับในคานทำด้วยคอนกรีตธรรมดา ดังนั้น สมการระหว่างการโก่งตัวกับน้ำหนักบรรทุกในรูปแบบต่าง ๆ ตามทฤษฎีอีลาสติคจึงสามารถนำมาใช้ในการคาดคะเนการโก่งตัวของคานคอนกรีตกำลังสูงมากได้

ค. การโก่งตัวที่จุดประลัย (Deflection at Ultimate)

การโก่งตัวของคานหลังจากเกิดการแตกร้าวจนกระทั่งถึงจุดประลัยแสดงไว้ในรูปที่ 30 โดยกราฟแสดงลักษณะการโก่งในช่วงสุดท้ายของคาน B1 และ B2 ซึ่งมีปริมาณลวดอัดแรงน้อยจะแสดงพฤติกรรมในช่วงสุดท้ายอย่างชัดเจน ส่วนในคาน B3 และ B4 จะแสดงแนวโน้มของอัตราการโก่งที่เพิ่มขึ้นในตอนปลายของพฤติกรรมเพียงเล็กน้อย สำหรับคาน B5

และ B6 ซึ่งมีปริมาณลวดอัดแรงมาก คานจะเกิดการวิบัติเกือบจะทันทีหลังการถึงจุดกลางของลวดอัดแรง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในคานคอนกรีตอัดแรงที่มีปริมาณลวดอัดแรงมากจะมีการโก่งตัวที่จุดประลัยของคานต่ำ ดังจะเห็นได้จากค่าการโก่งตัวของคาน B6 ซึ่งมีค่า 24.4 มม. ส่วนในคาน B1 ซึ่งมีปริมาณลวดอัดแรงน้อยจะมีค่าการโก่งตัวที่จุดประลัยถึง 55.0 มม.

นอกจากนี้คานที่ทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงมากยังมีค่าสตีฟเนสสูงทำให้การโก่งตัวที่จุดประลัยต่ำกว่าคานทำด้วยคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำ สังเกตได้จากคาน B1 ซึ่งมีการอัดแรงต่ำกว่าคาน B2 ควรจะมีการโก่งตัวที่จุดประลัยสูงกว่า แต่คาน B1 มีการโก่งตัวเพียง 55.0 มม. ในขณะที่คาน B2 มีการโก่งตัวถึง 61.0 มม.

สำหรับการคาดคะเนการโก่งตัวที่จุดประลัยของคานโดยอาศัยวิธีการตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยหาค่าโมเมนต์ความเคี้ยวของหน้าตัดที่จุดประลัยมาใช้ในสมการที่ 11 ได้แสดงผลไว้ในตารางที่ 15 ผลการคาดคะเนที่คิดจากกำลังดัดประลัยตามวิธีของ ACI จะมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าการโก่งตัวจริงถึง 19.3 % และมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.323 แต่เมื่อนำวิธีการดังกล่าวมาคำนวณโดยคิดจากกำลังดัดประลัยจริงของคานจะคลาดเคลื่อนไปโดยต่ำกว่าค่าจริงเพียง 1.0 % โดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.284 ซึ่งนับว่ายังผิดพลาดมาก เนื่องจากการคาดคะเนด้วยวิธีนี้ Warwaruk, Sozen และ Seiss³² สามารถใช้คาดคะเนกับคานคอนกรีตอัดแรงจำนวน 81 ตัวโดยมีความคลาดเคลื่อนเพียง 9 % และมีความเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำเพียง 0.18 ข้อแตกต่างที่เห็นได้ชัดก็คือสำหรับคอนกรีตกำลังสูงมากนี้ การสมมุติสี่เหลี่ยมผืนผ้าเสมือนแทนการกระจายหน่วยแรงดัด (Equivalent Rectangular Stress Block) ยังผิดไปจากพฤติกรรมจริงมากดังที่พิสูจน์ไว้โดย Nedderman²⁰ ทำให้การคำนวณค่าโมเมนต์ความเคี้ยวที่จุดประลัยผิดพลาดไปด้วย และค่ากำลังดัดประลัยที่คำนวณโดยวิธีของ ACI ยังไม่ใกล้เคียงกับความจริงนักทำให้การคาดคะเนการโก่งตัวที่จุดประลัยผิดพลาดยิ่งขึ้นดังแสดงไว้ให้เห็นแล้วในตาราง

ตารางที่ 15 แสดงผลการเปรียบเทียบการโก่งตัวที่จุดประลัยของคานกับการคาดคะเน

ตัวอย่างที่	โมดูลัสแห่งความยืดหยุ่น (กก./ซม. ²)	โมเมนต์ความเฉื่อย (หน้าตัดแตราว) ซม. ⁴ .	การโก่งตัวที่จุดประลัย (มม.)			ทดสอบ	ทดสอบ
			ทดสอบ	คำนวณ	คำนวณ M_u จริง ๆ	คำนวณ (ACI M_u)	คำนวณ (M_u จริง ๆ)
B1	4.15×10^5	375.30	55.0	49.4	61.1	1.11	0.90
B2	3.20×10^5	1089.74	61.0	39.0	53.3	1.56	1.14
B3	5.10×10^5	1198.39	41.5	32.9	36.2	1.26	1.15
B4	4.68×10^5	1415.28	30.3	34.0	38.3	0.89	0.79
B5	5.08×10^5	1959.28	42.4	26.3	28.6	1.61	1.48
B6	3.81×10^5	2087.21	24.4	33.2	40.8	0.73	0.60
					Mean	1.193	1.010
					S.D.	0.323	0.284

ความเหนียวของคาน (Ductility)

ACI ได้กำหนดปริมาณลวดอัดแรงเอาไว้ว่า

$$\omega_p \text{ หรือ } \omega + \omega_p - \omega' < 0.30$$

เพื่อที่คานคอนกรีตอัดแรงจะได้มีความเหนียวเพียงพอที่จะแสดงพฤติกรรมการโก่งในช่วงสุดท้ายได้ก่อนที่จะถึงจุดประลัย

สำหรับคานคอนกรีตอัดแรงทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงมากนี้เนื่องจากคอนกรีตจะมีความเปราะกว่าคอนกรีตธรรมดาและมีการแตกที่จุดประลัยรุนแรง จึงมีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณา กำหนดปริมาณลวดอัดแรงและเหล็กเสริมเสียใหม่ จากตารางที่ 16 พิจารณาปริมาณลวดอัดแรงและการวิบัติของคานที่จุดประลัย จะพบว่าคาน B3 ซึ่งมีค่า ω_p เท่ากับ 0.182 และ f'_c เท่ากับ 1096 กก./ตร.ซม. จะมีการวิบัติแบบแรงอัด ส่วนคาน B2 ซึ่งมีค่า ω_p เท่ากับ 0.192 และ f'_c เท่ากับ 688 กก./ตร.ซม. จะมีการวิบัติแบบแรงดึง แสดงให้เห็นว่านอกจากปริมาณเหล็กเสริมแล้วกำลังอัดของคอนกรีตยังมีผลต่อลักษณะการวิบัติของคานด้วย ดังนั้น ในการกำหนดค่าสูงสุดของปริมาณลวดอัดแรงและเหล็กเสริมที่ใช้ในคานคอนกรีตอัดแรงอาจกำหนดให้มีค่าลดลงตามกำลังอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นแทนที่จะกำหนดเป็นค่าตายตัว

การทดลองนี้พอจะสรุปได้ว่าสำหรับคานคอนกรีตอัดแรงที่มีค่ากำลังอัดของคอนกรีตไม่เกิน 1100 กก./ตร.ซม. ค่า ω_p หรือ $\omega + \omega_p - \omega'$ ที่ไม่มากกว่า 0.15 จะทำให้เกิดการวิบัติเป็นแบบแรงดึงอย่างแน่นอน

จากตารางเมื่อพิจารณาค่าความเหนียวของคานซึ่งได้จากการทดลองแล้วจะเห็นว่าจะมีค่าความเหนียวระหว่าง 1.46-9.16 ซึ่งสำหรับค่าความเหนียวนี้ตามที่ Furlong³³ ได้เสนอแนะเอาไว้ดังสมการที่ 12 พิจารณาคานคอนกรีตอัดแรงในการทดลองมีค่าความยาวต่อความลึกเท่ากับ 12.5 ดังนั้น ค่าความเหนียวจะต้องมากกว่า 3.94 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเหนียวที่ได้จากการทดลองแล้วจะมีเพียงคาน B5 และ B6 ที่มีค่าความเหนียวต่ำกว่า 3.94 ส่วนคาน B3

และ B4 จะมีค่าความเหนียว 5.12 และ 6.19 ตามลำดับซึ่งก็ยังไม่เพียงพอที่จะทำให้การรืบริดเป็นแบบแรงดึงอย่างแน่นอน เนื่องจากคอนกรีตกำลังสูงมากจะมีความเปราะมากกว่าคอนกรีตธรรมดาและมีการแตกหักอย่างรุนแรง จึงอาจจำเป็นต้องกำหนดค่าความเหนียวของคานทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงมากกว่า 7.00 จึงจะทำให้แน่ใจได้ว่าคานจะเกิดการรืบริดเป็นแบบแรงดึงก่อนแรงอัด

โมเมนต์ดัดแตกร้าวของคาน (Cracking Moment)

ก. โมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตกำลังสูงมาก (Modulus of Rupture)

ค่าโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตที่ได้จากการทดลองสามารถคำนวณได้จากสมการแรงดัดโดยสมการที่ 17 และได้แสดงค่าไว้ดังตารางที่ 17 โดยแสดงผลเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตในรูป f_r/f'_c จะเห็นได้ว่าสำหรับคานคอนกรีตอัดแรงทำด้วยกำลังสูงมากซึ่งมีค่ากำลังอัดของคอนกรีตอยู่ระหว่าง 688-1096 กก./ตร.ซม. จะมีค่าโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตระหว่าง 5.6-7.4 % ของค่ากำลังอัด

การคาดคะเนโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตนี้ ACI ได้ให้สูตรในการคำนวณไว้ว่าจะมีค่าเท่ากับ $1.99\sqrt{f'_c}$ กก./ตร.ซม. เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับตารางที่ 18 พบว่า ค่าที่ได้จากการทดลองจะสูงกว่า เฉลี่ยประมาณ 5 % และมีความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.097 เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองมาคำนวณ โดยกำหนดให้เท่ากับ $C/\sqrt{f'_c}$ โดยที่ C เป็นสัมประสิทธิ์ จะพบว่า C จะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.09 ซึ่งสามารถสรุปผลได้ว่า สูตรในการคำนวณหาโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตโดย ACI ยังสามารถใช้คาดคะเนโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตกำลังสูงมากได้อย่างใกล้เคียง ดูผลเปรียบเทียบตามรูปที่ 32

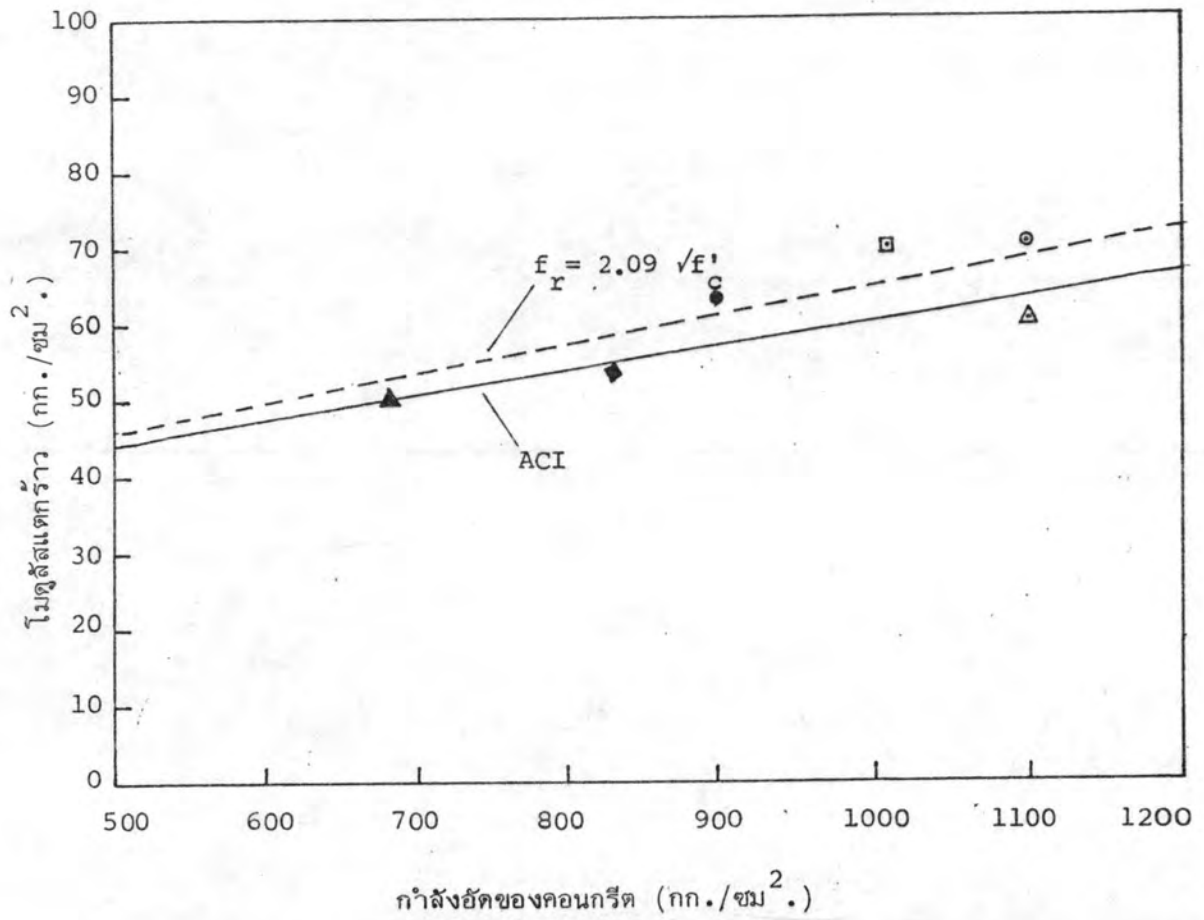
สำหรับค่าหน่วยแรงดึงที่ได้จากการทดสอบแท่งคอนกรีตทรงกระบอกตาม ASTM C 496 (Splitting Tensile Strength of Moulded Concrete Cylinders) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 17 โดยมีค่าเฉลี่ยของโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตต่อหน่วยแรงดึงที่ได้จากการ

ตารางที่ 16 แสดงปริมาณลวดอัดแรงและความเหนียวของคาน

ตัวอย่างที่	ρ	$\rho \frac{f_{ps}}{f'_c}$	การโค้งตัวที่ จุดแตกร้าว	การโค้งตัวที่ จุดประลัย	u
B1	0.0022	0.079	1.00	55.0	8.90
B2	0.0042	0.192	1.70	61.0	9.16
B3	0.0068	0.182	0.48	41.5	6.19
B4	0.0086	0.251	0.95	30.3	5.12
B5	0.0107	0.280	0.90	42.4	2.07
B6	0.0128	0.390	0.54	24.4	1.46

ตารางที่ 17 แสดงค่าโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตกำลังสูงมาก

ตัวอย่าง ที่	f'_c	f_r (ทดสอบ)	$\frac{f_r}{f'_c}$	f_r (ACI)	$\frac{f_r \text{ (ทดสอบ)}}{f_r \text{ (ACI)}}$	$\frac{f_r}{f_t}$ (Split test)	$\frac{f_r}{f_t}$
B1	892	64.8	0.073	59.4	1.09	62.4	1.04
B2	688	51.2	0.074	52.2	0.98	48.2	1.06
B3	1096	71.7	0.065	65.9	1.09	65.7	1.09
B4	1006	70.7	0.070	58.1	1.22	55.5	1.27
B5	1092	60.8	0.056	63.1	0.96	65.4	0.98
B6	819	53.5	0.065	56.9	0.94	49.1	1.09
Mean					1.05	Mean	1.08
S.D.					0.097	S.D.	0.100



รูปที่ 32. แสดงความสัมพันธ์ของกำลังอัดกับโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตจากการทดลอง
เปรียบเทียบกับ เส้นกราฟที่ได้จากการคาดคะเน

ทดสอบเท่ากับ 1.08 และมีความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.100 ซึ่งพอจะสรุปผลได้ว่าการหาค่าโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตกำลังสูงมากจากการทดสอบแท่งคอนกรีตด้วยวิธีนี้จะให้ผลใกล้เคียงพอสมควร

ข. การคาดคะเนโมเมนต์ดัดแตกร้าวของคาน (Cracking Moment Prediction)

ค่าโมเมนต์ดัดแตกร้าวของคานคอนกรีตอัดแรงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 18

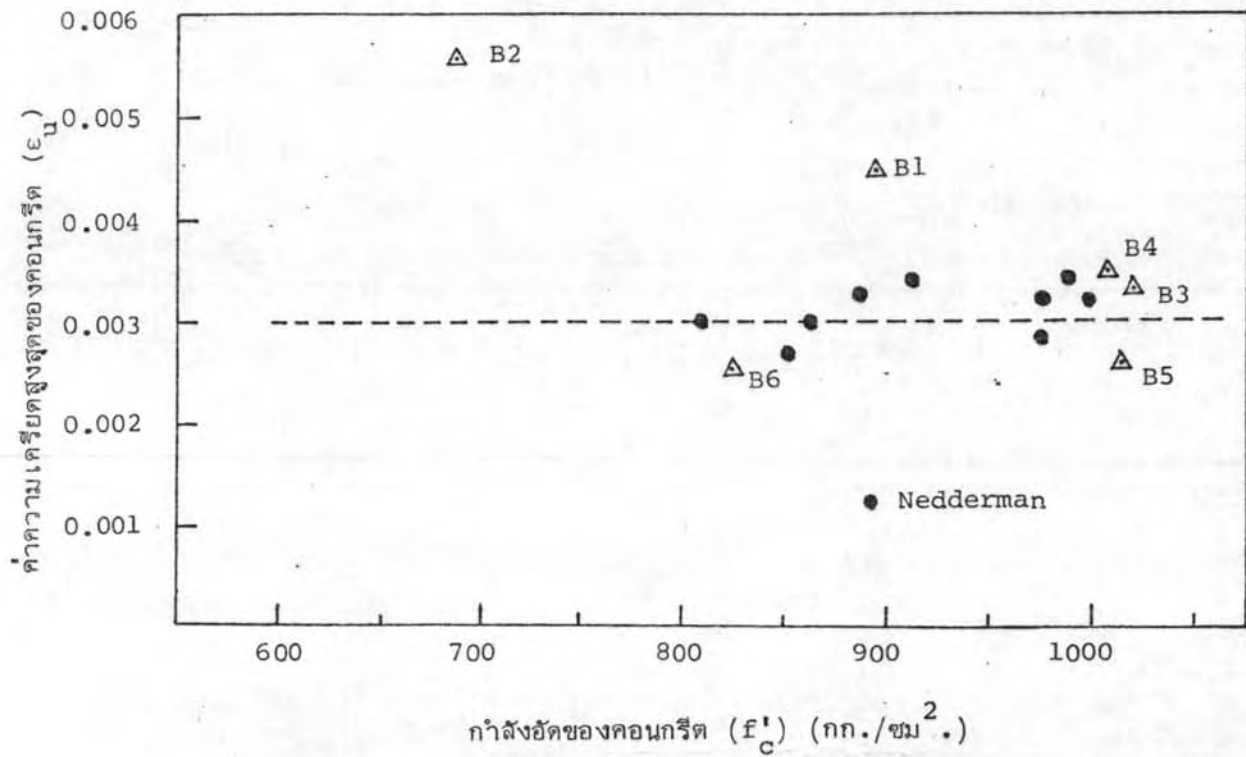
$$M_{cr} = P_e + \frac{PI}{A_c} + \frac{f_r I}{c}$$

โดยที่ทุกค่าจะทราบได้จากคานแต่ละตัวที่จะทำการคาดคะเน พิจารณาจาก 2 เทอมแรกของสมการ คือ P_e และ PI/A_c ว่าในคานคอนกรีตอัดแรงทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงมากแล้วค่าการอัดแรงที่เพิ่มขึ้นจากคุณสมบัติในการรับแรงอัดของคอนกรีต จะมีผลให้ความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดแตกร้าวของคานเพิ่มตามไปด้วย เป็นการเพิ่มช่วงฮิสทิสติกของคานในการใช้งานให้มากขึ้น แต่สำหรับเทอม $f_r I/c$ จะมีผลต่อโมเมนต์ดัดแตกร้าวของคานเพียงเล็กน้อย สืบเนื่องจากค่าโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตที่มีอัตราการเพิ่มลดลงเมื่อเทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น โดยที่ความสัมพันธ์ของโมดูลัสแตกร้าวกับกำลังอัดของคอนกรีตสามารถแสดงได้โดย Empirical Formula อาศัยข้อมูลจากผลการทดลองจำนวนมากพอของคานคอนกรีตและคานคอนกรีตอัดแรงทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงกว่า 550 กก./ตร.ซม. จากการวิจัยต่อไปในอนาคต จึงจะทำให้การคาดคะเนโมเมนต์ดัดแตกร้าวของคานคอนกรีตกำลังสูงมาก เป็นไปอย่างถูกต้อง และให้ค่าที่ใกล้เคียงยิ่งขึ้น

กำลังดัดประลัยของคาน (Ultimate Moment)

ก. ค่าความเครียดสูงสุด (Maximum Strains)

ในการคาดคะเนกำลังดัดประลัยของคานนั้นมีความจำเป็นต้องทราบค่าความเครียดสูงสุดของคอนกรีตเพื่อที่จะสามารถคำนวณหาหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นที่จุดประลัย ซึ่งโดยปกติแล้วคานคอนกรีตและคานคอนกรีตอัดแรงทำด้วยคอนกรีตธรรมดานั้น ค่าความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ผิวบน



รูปที่ 33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับค่าความเครียดอัดสูงสุดที่เกิดขึ้นในคาน

ของคานจะอยู่ระหว่าง 0.002-0.007 ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของคอนกรีต ลักษณะของหน้าตัดและ ปริมาณเหล็กเสริม

Hognestad, Hanson และ McHenry⁴⁰ ได้สรุปผลไว้ว่าค่าความเครียดสูงสุดที่ผิวบนของคานคอนกรีตจะลดลงเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น แต่ก็เป็นที่ยอมรับกันว่า การกระจายของค่าความเครียดสูงสุดเนื่องจากตัวแปรต่าง ๆ หลายตัว สามารถแทนด้วยค่าความเครียดที่เหมาะสมซึ่งจะทำให้ผลการคาดคะเนกำลังดัดประลัยของคานใกล้เคียงกับความ เป็นจริงมากที่สุด โดยค่าที่เหมาะสมนี้จะใช้แตกต่างกันออกไประหว่าง 0.003-0.004

จากรูปที่ 33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสูงสุดของคานที่ได้ จากการทดลองกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตและแสดงข้อมูลจากการทดลองตามวิธีของ PCA โดย Nedderman²⁰ ประกอบ พบว่า การกระจายค่าความเครียดสูงสุดไม่แตกต่างจากคอนกรีตธรรมดานัก และค่าความเครียดสูงสุดที่เหมาะสมซึ่งกำหนดไว้โดย ACI ให้ $\epsilon_u = 0.003$ ก็ยังสามารถใช้ได้โดยค่าความเครียดสูงสุดที่ได้จากการทดลองมีเพียง 2 ค่าที่ต่ำกว่า 0.003 แต่ทั้ง 2 ค่าได้จากคานที่มีปริมาณลวดอัดแรงสูง ดังนั้น อาจสรุปได้ว่า ค่าความเครียดที่เหมาะสม ในการคำนวณหากำลังดัดประลัยของคานคอนกรีตอัดแรงทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงมาก ยังคงสามารถใช้ค่าความเครียดที่เหมาะสมของวิธีการคาดคะเนกำลังดัดประลัยแต่ละวิธีในการคำนวณ ได้

ข. การคาดคะเนกำลังดัดประลัยของคาน (Ultimate Moment Prediction)

จากการทดลองได้แสดงค่ากำลังดัดประลัยของคานและผลการคาดคะเนด้วยวิธีการต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 18 และ 19 โดยสามารถที่จะสรุปผลได้ดังนี้

การคาดคะเนโดยอาศัยการกระจายหน่วยแรงอัดเป็นรูปสามเหลี่ยม (Triangular Stress Distribution) จะมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยถึง 14.7 % โดยจะคาดคะเนกำลังดัดประลัยได้ต่ำกว่าการทดลอง และมีความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.132 ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการ

ตารางที่ 18 เปรียบเทียบผลการคาดคะเนกำลังดัดประลัยของคานกับผลการทดลอง

ตัวอย่างที่	f'_c (กก./ซม. ²)	ω	M_u (ทดสอบ) (กก.-ม.)	M_u (Δ) (กก.-ม.)	$\frac{M_u \text{ (ทดสอบ)}}{M_u \text{ (\Delta)}}$	M_u (Para) (กก.-ม.)	$\frac{M_u \text{ (ทดสอบ)}}{M_u \text{ (Para)}}$	M_u (Para) by Nedderman	$\frac{M_u \text{ (ทดสอบ)}}{M_u \text{ (Para)}}$
B1	892	0.079	1550	1319.74	1.17	1337.13	1.16	1383.92	1.12
B2	688	0.192	3025	2154.90	1.40	2389.06	1.27	2459.35	1.23
B3	1096	0.192	3600	3195.73	1.12	3364.67	1.07	3495.15	1.03
B4	1006	0.251	4125	3969.00	1.04	4007.85	1.03	4166.67	0.99
B5	1092	0.280	4625	4735.65	0.98	4810.28	0.96	4973.12	0.96
B6	819	0.390	5275	4522.06	1.17	4775.05	1.10	4976.42	1.06
Mean					1.147	Mean	1.098	Mean	1.060
S.D.					0.132	S.D.	0.098	S.D.	0.096

ตารางที่ 19 เปรียบเทียบผลการคาดคะเนกำลังดัดประลัยของคานกับผลการทดลอง

ตัวอย่างที่	f'_c (กก./ซม ² .)	ω	M_u (ทดสอบ) (กก.-ม.)	M_u (Rectangular)			M_u (ทดสอบ) Hog.	M_u (ทดสอบ) ACI Approx.	M_u (ทดสอบ) ACI High Strength
				Hognestad	ACI Approx.	ACI High Strength			
B1	892	0.079	1550	2069.42	1443.19	1252.90	0.75	1.07	1.24
B2	688	0.192	3025	2641.54	2562.12	2212.06	0.83	1.18	1.37
B3	1096	0.182	3600	5530.69	2884.44	3275.65	0.65	0.93	1.10
B4	1006	0.251	4125	6159.71	4579.11	3662.05	0.67	0.90	1.13
B5	1092	0.280	4625	7112.29	5355.08	4252.95	0.65	0.86	1.09
B6	819	0.390	5275	6723.92	5406.68	4293.80	0.78	0.98*	1.23
* ไม่รวมอยู่ในค่าเฉลี่ย						Mean	0.721	0.988	1.193
						S.D.	0.069	0.119	0.098

คาดคะเนไม่อยู่ในเกณฑ์เป็นที่น่าพอใจ ส่วนพฤติกรรมของคานก็ยังมีลักษณะ เช่นเดียวกับคานคอนกรีตอัดแรงธรรมดา กล่าวคือ หลังจากที่เกิดหน่วยแรงสูงสุดขึ้นที่ผิวบนของคานแล้วก็ยังมีความสามารถรับแรงดัดเพิ่มขึ้นอีก โดยกระจายแรงดัดออกตามความยาวคาน ซึ่งแสดงให้เห็นได้ชัดเจนจากการแตกร้าวของคานจากการทดลอง นอกจากนี้ สมมุติฐานที่ว่าหน่วยแรงดัดสูงสุด เกิดขึ้นที่ผิวบนของคานก็ไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมจริง จึงพอจะสรุปได้ว่าการคาดคะเนโดยอาศัยการกระจายหน่วยแรงเป็นรูปสามเหลี่ยมนี้ไม่อาจให้ผลได้อย่างถูกต้อง แต่อาจใช้ในการคาดคะเนได้อย่างปลอดภัยซึ่งตรงกับผลการสรุปของ Leslie, Rajagopalan และ Everade²¹

การคาดคะเนโดยอาศัยการกระจายหน่วยแรงอัดเป็นรูปเส้นโค้งพาราโบลา (Parabolic Stress Distribution) สามารถคาดคะเนกำลังดัดประลัยของคานเฉลี่ยต่ำกว่าการทดลอง 9.8 % และมีความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.098 การคาดคะเนด้วยวิธีนี้จะให้ผลใกล้เคียงกว่าการใช้รูปสามเหลี่ยม และเมื่อกำหนดค่า k_{3p} เท่ากับ 0.88 ตามการวิเคราะห์ของ Nedderman ก็จะทำให้ผลการคาดคะเนที่คลาดเคลื่อนไปเหลือเพียง 6.0 % และมีความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.096 ดังนั้น จึงสามารถที่จะสรุปได้ว่าการคาดคะเนโดยอาศัยรูปเส้นโค้งพาราโบล่าจะให้ผลที่ใกล้เคียงกับการใช้รูปสามเหลี่ยม

การคาดคะเนโดยอาศัยรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Equivalent Rectangular Stress Block) ซึ่งในการวิเคราะห์นี้ได้้นำวิธีการของ Janney, Hognestad และ McHenry³⁹ และการคำนวณโดยอาศัยสมการประมาณค่าหน่วยแรงในลวดอัดแรงที่จุดประลัยของ ACI ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในปัจจุบันมาเปรียบเทียบกันและพบว่า การคาดคะเนด้วยวิธีแรกจะมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของ 27.9 % และไม่ปลอดภัยเนื่องจากจะได้ค่าสูงกว่ากำลังดัดประลัยจริงจากการทดลอง ส่วนวิธีการหลังจะคาดคะเนได้ใกล้เคียงกว่ามาก โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเพียง 1.2% และมีความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.119 แต่ผลการคาดคะเนก็ยังไม่ปลอดภัยเนื่องจากสูงกว่าผลจากการทดลองและไม่ได้นำผลจากกำลังอัดของคอนกรีตที่สูงขึ้นเข้ามาเกี่ยวข้อง จะเห็นได้จากผลการคาดคะเนทั้ง 2 แบบนี้ว่า มีความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงการ

คาดคะเนกำลังตัดประลัยของคานให้สอดคล้องกับกำลังอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น

สำหรับการคาดคะเนกำลังตัดประลัยของ ACI ซึ่งได้นำผล เนื่องจากกำลังอัดของคอนกรีตเข้ามาพิจารณานั้น ⁴² จะให้ค่าต่ำกว่าที่ได้จากการทดลอง โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 19.3 % และมีความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.098 ซึ่งให้ผลที่ไม่ดีพอและได้ถูกแสดงให้เห็นโดยการทดลองของ Nedderman แล้วว่าผิดไปจากพฤติกรรมจริงของการกระจายหน่วยแรงอัดที่จุดประลัยในคอนกรีตกำลังสูงมาก เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างระยะจากผิวบนของคานถึงแรงอัดรวมต่อระยะจากผิวบนถึงแกนสะเทินของคานไม่ได้เปลี่ยนแปลงตามกำลังอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นโดยตรง ดังนั้น วิธีการลดค่าความลึกของหน่วยแรงอัด เสมือนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสมควรที่จะต้องมีการวิจัยเพิ่มเติมเพื่อปรับปรุง