

พฤติกรรมของคานลึกกอนกรีตเสริมเหล็ก: การทดสอบและการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ Behavior of Reinforced Concrete Deep Beam: Experiment and Finite Element Analysis

ปราชญ์ อมรพิญโญ และ จารึก ถีระวงษ์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

E-Mail: prach.amornpinyo@gmail.com, jaruekte@kku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการทดสอบคานลึกกอนกรีตเสริมเหล็ก จำนวน 9 ตัวอย่าง ที่ถูกออกแบบตามแบบจำลององค์อาคารรับแรงอัดและแรงดึงในภาคผนวก A ของมาตรฐาน ACI 318-11 โดยมีปริมาณเหล็กเสริมควบคุมการแตกร้าว และอัตราส่วนช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลที่แตกต่างกัน จากผลการทดสอบพบว่า รูปแบบการวิบัติของคานลึกกอนกรีตเสริมเหล็กเปลี่ยนจากการวิบัติเนื่องจากการแตกในแนวทแยงเป็นการวิบัติเนื่องจากการเฉือนร่วมกับการดัด เมื่อคานลึกกอนกรีตเสริมเหล็กมีอัตราส่วนช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณการเสริมเหล็กควบคุมการแตกร้าว สามารถเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติของคานที่มีอัตราส่วนช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเท่ากัน นอกจากนี้ผู้เขียนวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานลึกกอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบโดยใช้โปรแกรม ANSYS การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้เอลิเมนต์แบบสามมิติ คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุแบบไม่เชิงเส้น ผลการเปรียบเทียบกับคานลึกที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ ให้ผลสอดคล้องทั้งการแอ่นตัวของคาน กำลังรับน้ำหนักสูงสุด และรูปแบบการแตกร้าวของคาน

คำสำคัญ :

คานกรีตเสริมเหล็ก องค์อาคารรับแรงอัดและแรงดึง เหล็กเสริมควบคุมการแตกร้าว คานลึกไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

Experimental program comprised the test of 9 reinforced concrete deep beams designed by strut and tie model according to Appendix A of ACI 318-11. The tested specimens were designed with various shear span to effective depth ratios (a/d ratio) and the crack controlled reinforcement. The results indicate that failure mode of RC deep beam changed from diagonal crack to flexural shear failure when the a/d ratio was increased. Furthermore, the crack controlled

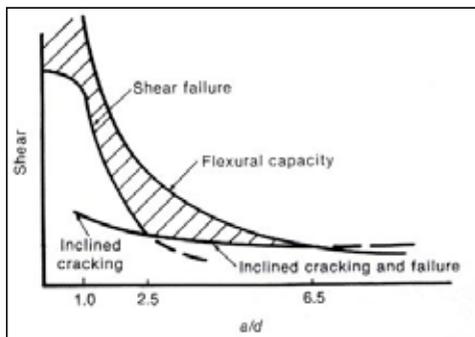
reinforcement has significant influence on the failure mode of the beam with the same a/d ratio. The authors also do a finite element model of the deep beams using ANSYS. The models were created using three-dimensional elements and nonlinear mechanical properties. It is found that the deflections, the ultimate capacities and the cracking patterns obtained from finite element analysis were comparable to those results obtained from experiment.

Keywords : 

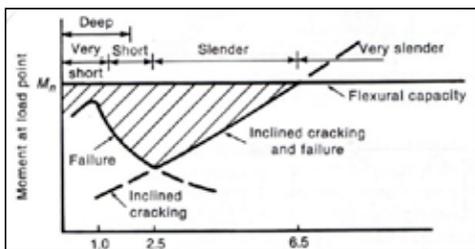
reinforced concrete, strut and tie, crack controlled reinforcement, deep beam, finite element

1. บทนำ 

มาตรฐาน ACI 318-11 [1] ได้ระบุว่า คานลึก คือ คานที่อัตราส่วนช่วงการเฉือนไม่เกินสองเท่าของความลึกประสิทธิผล โดยพฤติกรรมของคานที่รับแรงดัดและแรงเฉือนทำให้เกิดรอยร้าวและการวิบัติในคานมีผลมาจากอัตราส่วนช่วงการเฉือนต่อความลึกดังแสดงในภาพที่ 1 และภาพที่ 2



ภาพที่ 1 รอยร้าวและการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน [2]



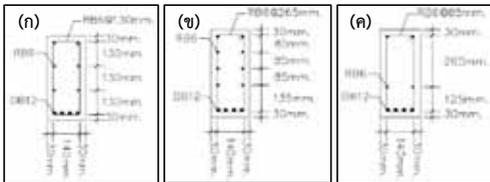
ภาพที่ 2 รอยร้าวและการวิบัติเนื่องจากแรงดัด [3]

เนื่องจากคานลึกมีพฤติกรรมที่แตกต่างจากคานคอนกรีตทั่วไป ในบทความนี้จึงได้นำเสนอการศึกษาพฤติกรรมของคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งออกแบบตามแบบจำลององค์อาคารรับแรงอัดและแรงดึง ตามมาตรฐานของ ACI โดยพิจารณาผลปริมาณเหล็กเสริมตะแกรงที่ใช้ในการควบคุมการแตกร้าวขององค์อาคารรับแรงอัดแนวทแยง และอัตราส่วนระหว่างช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล [4-7] นอกจากนี้บทความนี้ยังได้นำเสนอการสร้างแบบจำลองคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเปรียบเทียบกับพฤติกรรมของคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องกับการทดสอบและเป็นทางเลือกในการศึกษาพฤติกรรมของคานลึก ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของคาน โดยไม่จำเป็นต้องทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองทรัพยากรและแรงงานเป็นอย่างมาก

2. วิธีการทดสอบ 

ตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 9 ตัวอย่างถูกออกแบบตามภาคผนวก A ของมาตรฐาน ACI 318-11 คานตัวอย่างทุกตัวอย่างมีความยาว 2000 มิลลิเมตร กว้าง 200 มิลลิเมตร และลึก 450 มิลลิเมตร ตัวอย่าง

ทดสอบจะถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มตามอัตราส่วนช่วงการเนื่อนต่อความลึกประสิทธิภาพ คือ กลุ่ม A กลุ่ม B กลุ่ม C โดยมีค่าอัตราส่วนช่วงการเนื่อนต่อความลึกประสิทธิภาพอยู่ที่ 1.0 1.5 และ 2.0 ตามลำดับ ในแต่ละกลุ่มมีการเสริมเหล็กควบคุมการแตกร้าว 3 รูปแบบ คือมีปริมาณเหล็กเสริมควบคุมการแตกร้าวแนวนอนต่อแนวตั้ง (ρ_h/ρ_v) อยู่ที่ 1.0 3.0 และ 0.3 ตัวอย่างการเสริมเหล็กในตัวอย่างทดสอบแสดงใน ภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การเสริมเหล็กในตัวอย่างทดสอบ

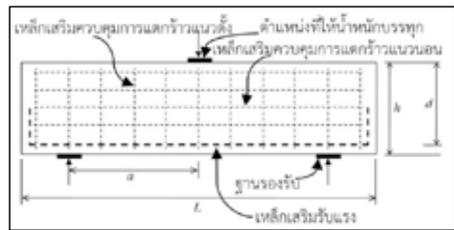
(ก)กลุ่มตัวอย่าง 1 (ข) กลุ่มตัวอย่าง 2 และ (ค) กลุ่มตัวอย่าง 3 [8]

รายละเอียดในการเสริมเหล็ก อัตราส่วนของปริมาณเหล็กเสริมตามมาตรฐาน ACI 318-11 ได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 1 S_h และ S_v คือ ระยะห่างของเหล็กเสริมในแนวนอนและแนวตั้ง ตามลำดับ ตัวอย่าง

ตารางที่ 1 รายละเอียดเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่าง	ตัวอย่างทดสอบ	อัตราส่วน a/d	S_h (mm.)	S_v (mm.)	อัตราส่วนการเสริมเหล็กควบคุมการแตกร้าว ρ_h	ρ_v
A	A1	1.0	130	130	0.00218	0.00218
	A2	1.5	85	265	0.00333	0.00107
	A3	2.0	265	85	0.00107	0.00333
B	B1	1.0	130	130	0.00218	0.00218
	B2	1.5	85	265	0.00333	0.00107
	B3	2.0	285	85	0.00107	0.00333
C	C1	1.0	130	130	0.00218	0.00218
	C2	1.5	85	265	0.00333	0.00107
	C3	2.0	265	85	0.00107	0.00333

ทดสอบถูกให้น้ำหนักบรรทุกแบบจุดแบบทิศทางเดียว (Monotonic load) จำนวน 1 จุดที่กึ่งกลางคาน ในภาพที่ 4 แสดงตำแหน่งที่ให้น้ำหนักบรรทุกฐานรองรับ และรูปร่างของคานตัวอย่าง



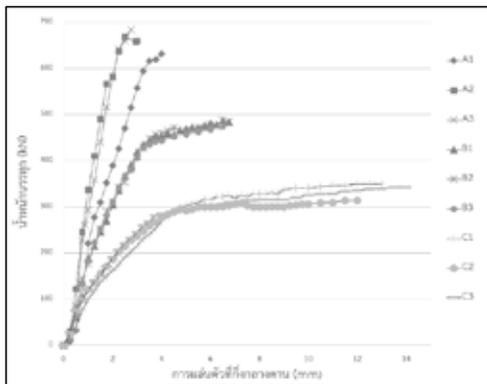
ภาพที่ 4 ตำแหน่งให้น้ำหนักบรรทุกและฐานรองรับของตัวอย่างทดสอบ

3. คุณสมบัติของวัสดุ

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในวันทดสอบได้จากการทดสอบตัวอย่างแท่งทดสอบทรงกระบอกมาตรฐานจำนวน 3 ตัวอย่าง เหล็กเสริมรับแรงตัดใช้เหล็กข้ออ้อยขนาด 12 มิลลิเมตร SD-30 เหล็กเสริมแนวนอนและแนวตั้งที่ใช้ควบคุมการแตกร้าวใช้เหล็กกลมขนาด 6 มิลลิเมตร SR-24 ค่าของคุณสมบัติต่างๆ แสดงไว้ใน ตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต และเหล็กเสริม

ตัวอย่างทดสอบ	f'_c (MPa)	f_{yf} (MPa)	f_{yw} (MPa)
A1	25.4	530	400
A2	27.7	530	400
A3	28.0	530	400
B1	21.4	440	420
B2	23.9	440	420
B3	22.4	440	420
C1	21.6	440	420
C2	22.8	440	420
C3	23.2	440	420



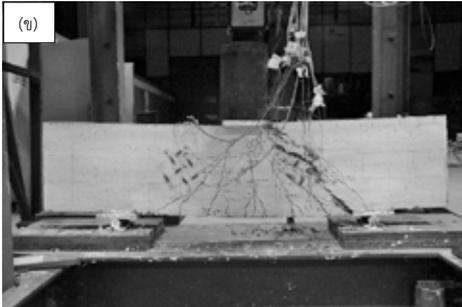
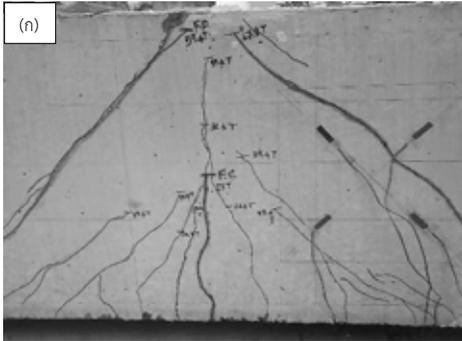
ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และการแอ่นตัวของตัวอย่างทดสอบ

4. ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัว

คานตัวอย่างทั้งหมดมีคุณสมบัติเป็นวัสดุยืดหยุ่น (Elastic material) จนกระทั่งรับน้ำหนักบรรทุกได้ประมาณ 90% ของกำลังรับน้ำหนักสูงสุด ภาพที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน จะเห็นว่าเมื่ออัตราส่วนช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเพิ่มมากขึ้น จะเป็นผลทำให้เกิดรอยแตกร้าว เนื่องจากแรงดัดเร็วขึ้น จากภาพจะเห็นว่าความเหนียว (Ductility) ของตัวอย่างทดสอบจะเพิ่มขึ้นเมื่อตัวอย่างทดสอบมีอัตราส่วนช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลมากขึ้น รูปแบบการวิบัติของตัวอย่างทดสอบเปลี่ยนจากการวิบัติ เนื่องจากการแตกในแนวทแยง (Diagonal-splitting failure) [9] เป็นการวิบัติเนื่องจากการเฉือนร่วมกับการดัด (Flexural shear failure) เมื่อตัวอย่างทดสอบมีอัตราส่วนช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเพิ่มมากขึ้น

5. รูปแบบการวิบัติ

ในการวิบัติของแต่ละตัวอย่างทดสอบมีรูปแบบการวิบัติที่ต่างกันอย่างชัดเจน แต่รูปแบบการวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วนช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเท่ากันจะมีรูปแบบการวิบัติที่คล้ายคลึงกัน รูปแบบการวิบัติเปลี่ยนจากการวิบัติ เนื่องจากการแตกในแนวทแยงภายใต้แรงอัดขององค์อาคารรับแรงอัดแนวทแยงของคอนกรีตไปสู่การแตกในแนวทแยงเนื่องจากแรงดึง ในอัตราส่วนช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลจาก 1.0 ไป 1.5 สำหรับตัวอย่างทดสอบในกลุ่ม A ไม่สามารถให้น้ำหนักบรรทุกต่อไปอีกได้ เนื่องจากเฟรมที่ใช้ในการทดสอบไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มได้ (รับได้ประมาณ 690 kN) และเฟรมเกิดการเคลื่อนที่ สำหรับตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วนช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเท่ากับ 2.0 จากการสังเกต ทุกตัวอย่างมีการวิบัติแบบการเฉือนร่วมกับการดัด (Flexural shear failures) ภาพที่ 6 แสดงตัวอย่างรูปแบบการวิบัติของคานตัวอย่างของกลุ่มตัวอย่าง A B และ C ตามลำดับ



ภาพที่ 6 รูปแบบการวิบัติ (ก) คานทดสอบกลุ่ม A (ข) คานทดสอบกลุ่ม B และ (ค) คานทดสอบกลุ่ม C

6. การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ตัวอย่างทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง ได้แก่ ตัวอย่าง A1 B1 และ C1 ซึ่งมีค่าช่วงการเชื่อมต่อกับความลึกประสิทธิภาพเท่ากับ 1.0 1.5 และ 2.0 ตามลำดับ ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม ANSYS เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมกับตัวอย่างทดสอบที่ได้ถูกทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ

6.1 เอลิเมนต์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

เอลิเมนต์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองแบ่งออกเป็น 3 ชนิดหลักๆ ได้แก่เอลิเมนต์ที่ใช้แทนเหล็กเสริม เอลิเมนต์ที่ใช้แทนส่วนของคอนกรีต และเอลิเมนต์ที่ใช้แทนส่วนของฐานรองรับ [10] ซึ่งได้แสดงรายละเอียดของแต่ละเอลิเมนต์ไว้ในตารางที่ 3

6.1.1 เหล็กเสริม

เหล็กเสริมจะใช้เอลิเมนต์ชนิด Link 8 เนื่องจากเอลิเมนต์ชนิดนี้มีความสามารถในการรับทั้งความเค้นดึงและความเค้นอัด ซึ่งลักษณะของเอลิเมนต์ประกอบไปด้วย 2 nodes แต่ละ node มี 3 ตัวแปรอิสระ [11] ภาพที่ 7 และภาพที่ 8 แสดงรายละเอียดของเหล็กเสริม

6.1.2 คอนกรีต

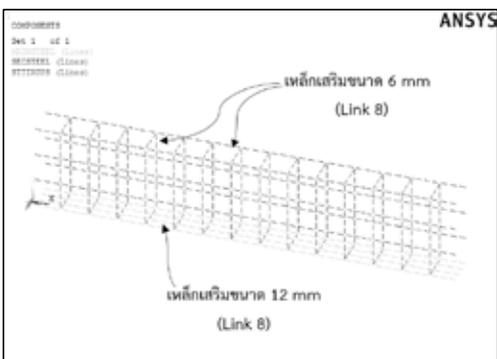
คานคอนกรีตถูกสร้างแบบจำลองโดยใช้เอลิเมนต์ชนิด Solid 65 เนื่องจากเอลิเมนต์ชนิด Solid 65 มีความสามารถในการแตกร้าวเมื่อความเค้นดึงมีค่ามากกว่าโมดูลัสแตกหัก อีกทั้งยังมีความสามารถในการแตกหลุด (Crushing) เมื่อเกิดค่าความเค้นอัดมากกว่าค่าที่ยอมให้ ซึ่งลักษณะของเอลิเมนต์ประกอบไปด้วย 8 nodes แต่ละ node มี 3 ตัวแปรอิสระ ดังแสดงในภาพที่ 8 และภาพที่ 9

6.1.3 แผ่นเหล็ก

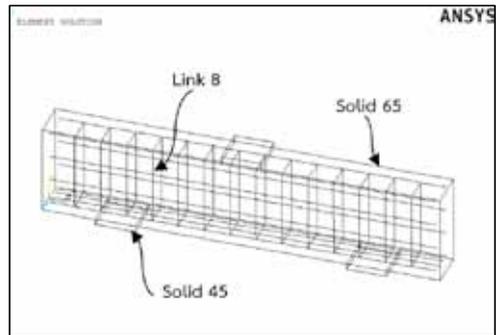
ในส่วนของแผ่นเหล็กที่ใช้เป็นฐานรองรับ (Support) และตำแหน่งที่ให้น้ำหนักบรรทุกจะใช้เอลิเมนต์ชนิด Solid 45 ซึ่งประกอบไปด้วย 8 nodes แต่ละ node มี 3 ตัวแปรอิสระ สามารถเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของ node ในแกน X,Y และ Z ได้ ดังแสดงในภาพที่ 9 และภาพที่ 10

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

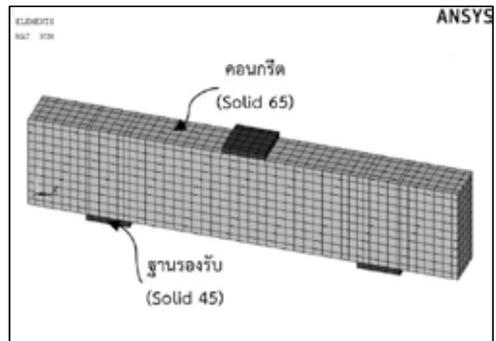
วัสดุ	ชนิดเอลิเมนต์	คุณสมบัติของวัสดุ		
1	Solid65	Linear Isotropic		
		EX	17741MPa	
		PRXY	0.2	
		Multilinear Isotropic		
			Strain	Stress(MPa)
		Point1	0.00037	6.6
		Point2	0.00049	8.4
		Point3	0.00085	13.5
		Point4	0.0012	17.3
		Point5	0.0015	19.5
		Point6	0.0018	20.7
Point7	0.0025	22.0		
Point8	0.004	22.0		
2	Link8	Linear Isotropic		
		EX	200000MPa	
		PRXY	0.3	
		Bilinear Isotropic		
		Yield Stress	440MPa	
		Tangent Modulus	20MPa	
3	Solid45	Linear Isotropic		
		EX	200000MPa	
		PRXY	0.3	



ภาพที่ 7 รายละเอียดของเหล็กเสริมใน ANSYS



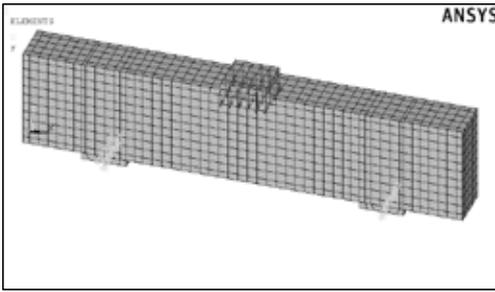
ภาพที่ 8 รายละเอียดของใน ANSYS



ภาพที่ 9 รายละเอียดของคอนกรีตและฐานรองรับใน ANSYS

6.2 การให้น้ำหนักบรรทุกและเงื่อนไขขอบเขต

การสร้างแบบจำลองในบทความนี้ได้สร้างแบบจำลองทั้งหมดเหมือนคานจริง และใช้เงื่อนไขขอบเขตฐานรองรับทางด้านซ้ายเป็นแบบฐานรองรับแบบยึดหมุนเคลื่อนที่ไม่ได้ (Hinge support) คือไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งแนวตั้ง แนวนอน และด้านข้าง ($U_x=0, U_y=0, U_z=0$) ส่วนเงื่อนไขขอบเขตฐานรองรับด้านขวาเป็นฐานรองรับแบบยึดหมุนเคลื่อนที่ได้ (Roller support) คือสามารถเคลื่อนได้ในแนวนอนได้แต่ไม่สามารถเคลื่อนที่ในแนวตั้งและแนวด้านข้าง ($U_y=0, U_z=0$) ส่วนจุดที่ให้น้ำหนักบรรทุกกระทำถูกกำหนดให้เป็นน้ำหนักบรรทุกแบบกระจาย กระทำที่ Nodes ของแผ่นเหล็ก ในทิศทางแนวแกน Y [12] ดังแสดงในภาพที่ 10

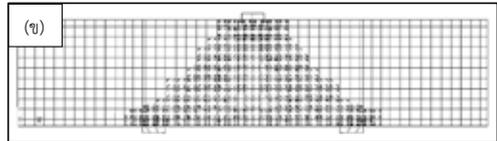


ภาพที่ 10 เส้นโซขอบเขตใน ANSYS

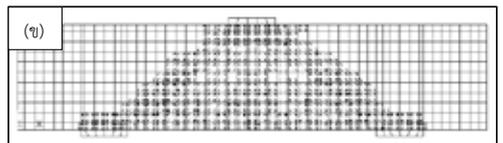
7. ผลการวิเคราะห์จากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

7.1 รูปแบบพฤติกรรมการแตกร้าว

เปรียบเทียบลักษณะการแตกร้าวที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างทดสอบคานลึกลับคอนกรีตเสริมเหล็กในห้องปฏิบัติการ กับที่ถูกสร้างขึ้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน และมีรูปแบบของการแตกร้าวที่คล้ายคลึงกันทั้ง 3 ตัวอย่าง ได้แก่ คานลึกลับที่มีอัตราส่วนช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเท่ากับ 1.0 1.5 และ 2.0 ดังแสดงในภาพที่ 11 ภาพที่ 12 และ ภาพที่ 13 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าทั้งตัวอย่างคานลึกลับที่ได้จากการทดสอบ และจากการสร้างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เกิดรอยแตกร้าวขึ้น 2 ชนิด ได้แก่ รอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด และรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือน นอกจากนี้ยังได้แสดงลักษณะของการกระจายความเค้น (Stress) ที่เกิดขึ้นภายในตัวอย่างทดสอบเพื่อให้เห็นถึงลักษณะการส่งถ่ายแรงภายในที่เกิดขึ้นภายในองค์อาคารรับแรงอัด (Strut) ของคาน



ภาพที่ 11 เปรียบเทียบรูปแบบการแตกร้าวของคาน A1 (ก) คานทดสอบจริง (ข) คานจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และ (ค) ความเค้นที่เกิดขึ้นในคาน



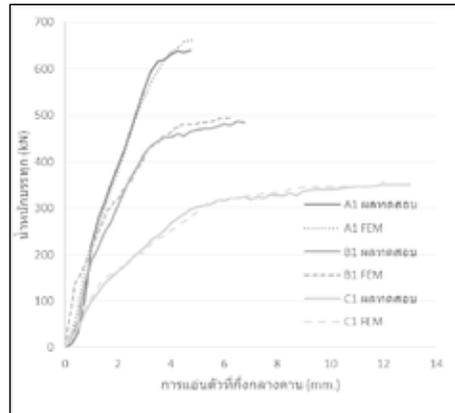
ภาพที่ 12 เปรียบเทียบรูปแบบการแตกร้าวของคาน B1 (ก) คานทดสอบจริง (ข) คานจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และ (ค) ความเค้นที่เกิดขึ้นในคาน

7.2 น้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัว

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า ในช่วงแรกพฤติกรรมกรรมการรับน้ำหนักจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับการแอ่นตัว จนกระทั่งน้ำหนักบรรทุกเกินกว่าค่าโมดูลัสการแตกร้าว แบบจำลองจะเริ่มเกิดการแตกร้าวขึ้น (First crack) ซึ่งพบว่าค่าน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดร้าวรอยแรกขึ้นจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าสูงกว่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการเล็กน้อย หลังจากเกิดรอยแตกร้าว ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดสอบในห้องปฏิบัติการมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน จนกระทั่งเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจนถึงค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด พบว่าค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 4 และภาพที่ 14

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบผลของน้ำหนักบรรทุกจากการทดสอบและจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ตัวอย่าง	น้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดรอยแตกร้าวรอยแรก (kN)		น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (kN)	
	ทดสอบ	FEM	ทดสอบ	FEM
A1	220	230	640	662
B1	138	142	494	499
C1	75	88	350	355



ภาพที่ 14 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการให้น้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน

8. สรุปผล

จากการทดสอบคานลิกคองกรีตเสริมเหล็กที่ถูกออกแบบตามภาคผนวก A ของมาตรฐาน ACI 318-11 จนวิบัติจำนวน 9 ตัวอย่าง โดยคานทุกตัวอย่างมีการให้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบจุดจำนวน 1 จุดแบบทิศทางเดียว (Monotonic load) ที่กึ่งกลางคาน และการสร้างแบบจำลองคานลิกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ สามารถสรุปผลได้ ดังนี้

8.1 เมื่ออัตราส่วนช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพของคานลิกเพิ่มขึ้น ทำให้รูปแบบการวิบัติเปลี่ยนจากการวิบัติ เนื่องจากการแตกในแนวทแยง (Diagonal-splitting failure) เป็นการวิบัติเนื่องจากการเฉือนร่วมกับการดัด (Flexural shear failure) โดยไม่คำนึงถึงอัตราส่วนของเหล็กเสริมแนวขนานต่อแนวตั้ง

8.2 จากการทดสอบคานลึกลับคอนกรีตเสริมเหล็กพบว่าคานที่มีปริมาณเหล็กเสริมแนวอนต่อแนวตั้งมากจะเกิดรอยร้าวแนวทแยงรอยแรกขึ้นค่อนข้างเร็วเมื่อเทียบกับคานที่มีปริมาณเหล็กเสริมแนวอนต่อแนวตั้งน้อย แสดงให้เห็นว่าการจัดเรียงเหล็กเสริมควบคุมการแตกร้าวแนวทแยงมีผลต่อความเร็วในการเกิดการแตกร้าวแนวทแยงของคานลึกลับคอนกรีตเสริมเหล็ก

8.3 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ สามารถนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมของคานลึกลับคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทดสอบจริงจากห้องปฏิบัติการ ให้ผลที่มีแนวโน้มที่สอดคล้องและใกล้เคียงกัน ทั้งในช่วงเชิงเส้น (Elastic range) และไม่เชิงเส้น (Nonlinear range)

8.4 น้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดรอยแตกร้าวรอยแรก (First crack) ที่ได้จากการสร้างแบบจำลองคานลึกลับด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ค่าที่สูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการประมาณ 4.5% 2.9% และ 17.3% ในตัวอย่าง A1 B1 และ C1 ตามลำดับ

8.5 กำลังรับน้ำหนักสูงสุด (Failure) ที่ได้จากการสร้างแบบจำลองคานลึกลับด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ค่าที่สูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการประมาณ 3.4% 1.0% และ 1.4% ในตัวอย่าง A1 B1 และ C1 ตามลำดับ

8.6 การออกแบบตามมาตรฐานของ ACI 318-11 ได้ผลเป็นที่ยอมรับได้ และค่อนข้างปลอดภัยสำหรับการออกแบบ

9. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนการดำเนินงานจากศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

10. เอกสารอ้างอิง

- [1] ACI Committee 318 (2011). Building Code Requirements for Structural Concrete and commentary (ACI 318-11). American Concrete Institute, Mich: Farmington Hills.
- [2] Hsu T. T. C. (1993). Unified Theory of Reinforced Concrete. CRC Press. Florida.
- [3] MacGregor J G. (1997). Reinforced Concrete Mechanics and Design. Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- [4] Brown M D., Sankovich C L., Bayrak O. and Jirsa J O. (2008). Behavior and Efficiency of Bottle-Shaped Struts. ACI Structural Journal, 103(3); 348-355.
- [5] Matamoros A B. and Wong K H. (2003). Design of Simply Supported Deep Beam Using Strut-and-Tie Models. ACI Structural Journal, 100(6); 704-712.
- [6] Brown M D, Sankovich C L., Bayrak O. and Jirsa J O. (2006). Behavior and Efficiency of Bottle-Shaped Struts. ACI Structural Journal, 103; 345-354.
- [7] Russo G., Venir R., and Pauletta M. (2005). Reinforced Concrete Deep Beams-Shear Strength Model and Design Formula. ACI Structural Journal, V. 102, No. 3; 429-437.
- [8] Amornpinyo P. (2010). Influence of Crack Controlled Reinforcement Ratio on Behavior of RC Deep Beam Designed by Strut and Tie Model. Master

[9] Quintero-Febres C G., Parra-Montesinos G J. and Wight J K. (2006). Strength of struts in deep concrete members designed using strut-and-tie method. *ACI Structural Journal*, 103(4); 577-586.

[10] Badiger N S. (2014). Parametric Study on Reinforced Concrete Beam using ANSYS. *Civil and Environmental Research*, 6(8); 88-94

[11] ANSYS User's Manual Revision 12.0 (2009). ANSYS, Inc.: Canonsburg, PA.

[12] Rigotti M. (2002). Diagonal Cracking in Reinforced Concrete Deep Beams-An Experimental Investigation. PhD Dissertation, Building Civil and Environmental Engineering, Department of Engineering, Concordia University, Canada.