



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง ผลของช่องเปิดขนาดใหญ่ต่อพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการวิเคราะห์
ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้น

Finite Effect of Large Opening on Behavior of Reinforced Concrete Beam by
Nonlinear Finite Element Analysis

نامผู้วิจัย นายภาณุมาศ โยธามาศย์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิจพัฒน์ ภู่วรรณ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ยอดสุใจ, D.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงกูร, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลของช่องเปิดขนาดใหญ่ต่อพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการวิเคราะห์
ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้น

Effect of Large Opening on Behavior of Reinforced Concrete Beam by
Nonlinear Finite Element Analysis

โดย

นายภาณุมาศ โยธามาศย์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาณูมาศ โยชามาตย์ 2553: ผลของช่องเปิดขนาดใหญ่ต่อพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้น ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิจพัฒน์ ภู่วรรณ, Ph.D.
216 หน้า

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ โดยทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งการวิเคราะห์ได้จำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นแบบ 3 มิติ และพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุเป็นแบบไร้เชิงเส้น ในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ ความสามารถในการรับแรงจะสัมพันธ์กับขนาดของช่องเปิด เนื่องจากพฤติกรรมการพังทลายจะเกิดบริเวณช่องเปิด และการพิจารณาลักษณะการพังทลายบริเวณช่องเปิดมีพฤติกรรมเสมือนเป็นจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge)

ผลงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าหากเพิ่มความยาวช่องเปิด 120 ซม.จากความยาวคาน 300 ซม. จะทำให้น้ำหนักบรรทุกสูงสุดลดลง 44.89 เปอร์เซ็นต์ หากเพิ่มความลึกช่องเปิดเป็น 65 เปอร์เซ็นต์ของขนาดหน้าตัดคาน จะทำให้น้ำหนักบรรทุกสูงสุดลดลง 38.14 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์แบบจำลอง 3 มิติ พบว่าขนาด และตำแหน่งของช่องเปิดมีอิทธิพลกับน้ำหนักบรรทุกการแอ่นตัว ดังนั้นหากความยาวของช่องเปิดมีค่าความชะลูด (Slenderness ratio) ของชิ้นส่วนรับแรงอัดไม่เกิน 22 ($KL/r < 22$) และความลึกมีค่าใกล้เคียงร้อยละ 40 ของความลึกคาน ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักบรรทุกสูงสุดจะลดลงมีค่าไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์

การเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของแบบจำลอง 3 มิติ และ 1 มิติ มีค่าต่างกันประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง 1 มิติสามารถใช้ประมาณพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ได้พอสังเขป

Paunumart Yotarmart 2010: Effect of Large Opening on Behavior of Reinforced Concrete Beam by Nonlinear Finite Element Analysis. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Kitjapat Phuvoravan, Ph.D. 216 pages.

This paper presents nonlinear analytical study on the flexural behavior of reinforced concrete (RC) beam with large opening by finite element analysis. The RC beam was modeled by three dimensional solid elements and truss elements with nonlinear material property. Different sizes of large opening were considered before analysis process, since the complex behavior of flexural failure takes place around the large opening. In the consideration of failure, representation of plastic hinge formation and appropriate modeling technique must be employed.

The analysis results show that the opening size has a significant effect on the load-deflection behavior and ultimate load capacity. The ultimate load capacity decreases by 44.89 % when the opening length is 120 cm. (from 300 cm. total beam length), and it decreases by 38.14 % when the opening depth increases to 65 percent of the total beam depth. In addition, The results from the 3-D analytical model show that the opening size and its location has a significant effect on the load-deflection behavior and ultimate load capacity. When the slenderness ratio of opening is not more than 22 ($Kl/r < 22$) and the depth of opening is not more than 40% of the depth beam the ultimate load capacity decreases by 5%.

Furthermore, one dimensional beam model with rigid links was also developed to propose simplified alternative modeling technique of RC beam with large opening. When comparing the ultimate load capacity between 3D analysis model and 1D analysis model, the maximum difference is approximately 20%. Thus, it can be concluded that 1D analysis model can only be used to roughly approximate the capacity and the behaviour of RC beam with large opening.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ เป็นความภูมิใจอย่างยิ่งในการเรียนที่ข้าพเจ้าได้ตั้งใจทำ และนำเสนอแนวคิดเชิงพฤติกรรมคานคองกริตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ ความสำเร็จของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ที่เคารพ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิจพัฒน์ ภูววรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วันชัย ยอดสุดใจ และอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้ข้าพเจ้าได้ใช้เป็นอาวุธในการจัดเถลาวิทยานิพนธ์ รวมถึงการแนะแนวทางของความคิด ที่ปมถึงรากลึกของศาสตร์แห่งวิศวกรรม และส่วนหนึ่งที่เป็นแรงผลักดันให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จ คือกำลังใจจากทางครอบครัวที่เป็นแรงสนับสนุนให้ข้าพเจ้าได้สู้ บนเส้นทางมหาบัณฑิต

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณสิ่งศักดิ์สิทธิ์ที่ช่วยคลบ้นดาลประทานพรให้ข้าพเจ้ามีความสำเร็จทุกๆ สิ่งที่ข้าพเจ้าหวังตลอดระยะเวลาในการใช้ชีวิตบนรั้วมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาณุมาศ โยธามาตย์

กรกฎาคม 2553

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	30
อุปกรณ์	30
วิธีการ	30
ผลและวิจารณ์	82
สรุปและข้อเสนอแนะ	183
สรุป	183
ข้อเสนอแนะ	186
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	187
ภาคผนวก	190
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	216

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ลักษณะทางกายภาพของคานทดสอบที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่	31
2	ลักษณะทางกายภาพของคานทดสอบที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ กรณีที่ 1 (3 มิติ)	33
3	ลักษณะทางกายภาพของคานทดสอบที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ กรณีที่ 2 (3 มิติ)	35
4	ลักษณะทางกายภาพของคานทดสอบที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ กรณีที่ 3 (3 มิติ)	37
5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดภายใต้แรงอัดแกนเดียว ของคอนกรีต	41
6	คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในคานคอนกรีตจากผลการทดสอบ	43
7	คุณสมบัติทางกายภาพของของเหล็กลเสริมที่ใช้ในคานคอนกรีตจาก ผลการทดสอบ	43
8	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอิเล็กเมนต์-การแอ่นตัวสูงสุด	57
9	จำนวนอิเล็กเมนต์ และชนิดของอิเล็กเมนต์คานคอนกรีต 3 มิติ กรณีที่ 1 การเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด	59
10	จำนวนอิเล็กเมนต์ และชนิดของอิเล็กเมนต์คานคอนกรีต 3 มิติ กรณีที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความลึกของช่องเปิด	60
11	จำนวนอิเล็กเมนต์ และชนิดของอิเล็กเมนต์คานคอนกรีต 3 มิติ กรณีที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความลึกของช่องเปิด	61
12	ลักษณะทางกายภาพของคานทดสอบที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ กรณีที่ 1 (1 มิติ)	65
13	ลักษณะทางกายภาพของคานทดสอบที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ กรณีที่ 2 (1 มิติ)	67
14	ลักษณะทางกายภาพของคานทดสอบที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ กรณีที่ 3 (1 มิติ)	69
15	ขนาด และรายละเอียดหน้าตัดคาน กรณีแปลงหน้าตัดคาน	71

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
16	ชนิดของเอลิเมนต์ และชนิดหน้าตัดคาน กรณีที่ 1	77
17	ชนิดของเอลิเมนต์ และชนิดหน้าตัดคาน กรณีที่ 2	78
18	ชนิดของเอลิเมนต์ และชนิดหน้าตัดคาน	79
19	ชนิดของเอลิเมนต์ และชนิดหน้าตัดคาน กรณีน้ำหนักบรรทุก บนชิ้นส่วนล่าง	80
20	ชนิดของเอลิเมนต์ และชนิดหน้าตัดคานกรณีผ่านน้ำหนักบรรทุก	81
21	อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเทียบกับ EX_R2-600 (น้ำหนักบรรทุก สูงสุด 18,609.82 กก.)	83
22	อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเทียบกับแบบจำลอง 3 มิติ กรณีหน้าตัด เต็ม	108
23	อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเทียบกับแบบจำลอง 3 มิติ กรณีหน้าตัด เต็ม	128
24	อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเทียบกับแบบจำลองหลัก 3 มิติ	147
25	เปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวกรณีเปลี่ยนแปลงความยาวช่องเปิด	175
26	เปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวกรณีเปลี่ยนแปลงความลึกช่องเปิด	177
27	เปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวกรณีเปลี่ยนแปลงตำแหน่งช่องเปิด	179

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การกระจายความเค้นของคานที่มีช่องเปิดตามทฤษฎีกำลังประลัย	9
2	ลักษณะการวิบัติเนื่องจากแรงดัด และแรงเฉือนร่วมกัน	10
3	ลักษณะการวิบัติแบบคาน (Beam-type failure)	12
4	การกระจายความเค้นในหน้าตัดคานการวิบัติแบบโครงข้อแข็ง (Frame-type failure)	13
5	รายละเอียดการเสริมเหล็กคานคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาดเล็ก	15
6	การวิบัติภายใต้แรงดัด และแรงเฉือน	16
7	รายละเอียดการเสริมเหล็กกรอบช่องเปิดขนาดใหญ่	17
8	คานที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ ภายใต้น้ำหนักบรรทุก (b) Free-body diagram at opening , (c) Free-body diagram of the chords	18
9	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับแรงดัด	19
10	พฤติกรรมเสมือนเป็นจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) ของช่องเปิดขนาดใหญ่	20
11	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัด และโมเมนต์ดัดในชิ้นส่วนรับแรงดัด	21
12	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัด และโมเมนต์ดัดในชิ้นส่วนรับแรงอัด	24
13	เหล็กเสริมบริเวณรอบช่องเปิดขนาดใหญ่	26
14	ลักษณะการแอ่นตัว และจุดดัดกลับบริเวณกลางช่องเปิดเนื่องจากแรงเฉือน	28
15	ลักษณะการแอ่นของคานที่มีช่องเปิดเนื่องจากโมเมนต์ดัด และแรงเฉือน	29
16	ขนาด และรายละเอียดการเสริมเหล็กคานคอนกรีต กรณีที่ 1 (3 มิติ)	32
17	ขนาด และรายละเอียดการเสริมเหล็กคานคอนกรีต กรณีที่ 2 (3 มิติ)	34
18	ขนาด และรายละเอียดการเสริมเหล็กคานคอนกรีต กรณีที่ 3 (3 มิติ)	36
19	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดภายใต้แรงอัดแกนเดียวของคอนกรีต	40
20	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดภายใต้แรงอัดแกนเดียวของคอนกรีต	41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดสำหรับเหล็กเสริมและเหล็กปลอก	42
22	เอลิเมนต์ของคอนกรีต Solid65 (ANSYS 2003)	45
23	พื้นผิวการวิบัติ Failure Surface สำหรับคอนกรีต (ANSYS 2003)	47
24	เอลิเมนต์ของเหล็กเสริมตามยาว Link8 (ANSYS 2003)	52
25	ลักษณะสภาวะเงื่อนไขขอบเขต ของแบบจำลองคาน 3 มิติ	54
26	ลักษณะน้ำหนักบรรทุก ของคานโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	55
27	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเอลิเมนต์-การแอ่นตัวสูงสุด	57
28	แบบจำลอง 3 มิติ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	58
29	การลดความอิสระในการเคลื่อนที่ (DOF) ด้วยวิธี Diaphragm assumption and Matrix condensation	62
30	ขนาด และรายละเอียดการเสริมเหล็กคานคอนกรีต กรณีที่ 1 (1 มิติ)	64
31	ขนาด และรายละเอียดการเสริมเหล็กคานคอนกรีต กรณีที่ 2 (1 มิติ)	66
32	ขนาด และรายละเอียดการเสริมเหล็กคานคอนกรีต กรณีที่ 3 (1 มิติ)	68
33	ขนาด และรายละเอียดการเสริมเหล็กคานคอนกรีต กรณีแปลงหน้าตัดคาน	71
34	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 1 มิติจากโปรแกรมเชิงพาณิชย์ (ANSYS)	72
35	เอลิเมนต์ 2-D Elastic Beam (Beam 3)	73
36	การจำลองเอลิเมนต์ของเหล็กเสริมในแผ่นพื้น และคอนกรีตที่เชื่อมต่อด้วย Rigid Link	74
37	เอลิเมนต์ MPC 184 (Multipoint Constraint Elements)	75
38	ลักษณะสภาวะเงื่อนไขขอบเขต ของแบบจำลองคาน 1 มิติ	76
39	ลักษณะรายละเอียด กรณีที่ 1 การเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด 1 มิติ	77
40	ลักษณะรายละเอียด กรณีที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความลึกของช่องเปิด 1 มิติ	78
41	ลักษณะรายละเอียด กรณีที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด 1 มิติ	79

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
42	ลักษณะรายละเอียด กรณีที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด 1 มิติ	80
43	ลักษณะรายละเอียด กรณีที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด 1 มิติ	81
44	ตำแหน่งจุดพิจารณาการแอ่นตัว คานทดสอบที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่	83
45	การสอบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ	84
46	ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลองหลัก 3 มิติ	85
47	พฤติกรรมน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว ของแบบจำลองหลัก 3 มิติ	86
48	พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานแบบจำลองหลัก 3 มิติ	87
49	พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานแบบจำลองหลัก 3 มิติ Section-PL	88
50	พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานแบบจำลองหลัก 3 มิติ Section-ROE	89
51	พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานแบบจำลองหลัก 3 มิติ Section-ROI	90
52	พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานแบบจำลองหลัก 3 มิติ Section-CL	91
53	พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานแบบจำลองหลัก 3 มิติ Section-LOI	92
54	พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานแบบจำลองหลัก 3 มิติ Section-LOE	93
55	รูปแบบการแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีต (Solid 65)	94
56	สัญลักษณ์แสดงการแตกร้าว	95
57	รูปแบบการแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีตแบบจำลองหลัก 3 มิติ ภายใต้การแตกร้าวครั้งแรก (First crack)	96

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
58	รูปแบบการแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีตแบบจำลองหลัก 3 มิติ ภายใต้การแตกร้าว Flexural cracks	96
59	รูปแบบการแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีตแบบจำลองหลัก 3 มิติ ภายใต้การแตกร้าว Diagonal tensile cracks	97
60	รูปแบบการแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีตแบบจำลองหลัก 3 มิติ ภายใต้น้ำหนักบรรทุกสูงสุด	98
61	หน้าตัดคานของแรงดึงในเหล็กเสริมแบบจำลองหลัก 3 มิติ	98
62	จำนวนเอลิเมนต์เหล็กเสริมตามยาวแบบจำลองหลัก 3 มิติ	99
63	พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 1 แบบจำลองหลัก 3 มิติ	100
64	พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 2 แบบจำลองหลัก 3 มิติ	101
65	พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 3 แบบจำลองหลัก 3 มิติ	102
66	พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 4 แบบจำลองหลัก 3 มิติ	103
67	ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลอง 3 มิติ กรณีหน้าตัดเต็ม	104
68	ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลงขนาด ความยาวช่องเปิดเท่ากับ 120 ซม.($R_f - 120$)	105
69	น้ำหนักบรรทุก- การโก่งตัวกระดกของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลง ความยาวช่องเปิดเท่ากับ 80 ซม.($R_f - 80$) ถึง 120 ซม. ($R_f - 120$) ความลึกทั้งหมด 18 ซม.	106
70	น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัวของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลง ความยาวช่องเปิดเท่ากับ 40 ซม. ($R_f - 40$) ถึง 120 ซม. ($R_f - 120$) ความลึกทั้งหมด 18 ซม.	107

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
71	น้ำหนักบรรทุก- ความยาวช่องเปิด ของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลงความยาวช่องเปิดเท่ากับ 40 ซม. ($R_f - 40$) ถึง 120 ซม. ($R_f - 120$) ความลึกทั้งหมด 18 ซม.	109
72	พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$)	110
73	พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$) Section-PL	111
74	พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$) Section-ROE	112
75	พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$) Section-ROI	113
76	พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$) Section-CL	114
77	พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$) Section-LOI	115
78	พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$) Section-LOE	116
79	รูปแบบการแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีตขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$) ภายใต้การแตกร้าว First crack	117
80	รูปแบบการแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีตขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$) ภายใต้การแตกร้าว Flexural cracks	117
81	รูปแบบการแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีตขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$) ภายใต้การแตกร้าวน้ำหนักบรรทุกสูงสุด	118
82	หน้าตัดคานของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณีขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$)	119

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
83	จำนวนเอลิเมนต์เหล็กเสริมตามยาวขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึกลง 18 ซม. ($R_f - 120$)	119
84	พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 1 ขนาดช่องเปิด ยาว 120 ซม. ลึกลง 18 ซม. ($R_f - 120$)	120
85	พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 2 ขนาดช่องเปิด ยาว 120 ซม. ลึกลง 18 ซม. ($R_f - 120$)	121
86	พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 3 ขนาดช่องเปิด ยาว 120 ซม. ลึกลง 18 ซม. ($R_f - 120$)	122
87	พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 4 ขนาดช่องเปิด ยาว 120 ซม. ลึกลง 18 ซม. ($R_f - 120$)	123
88	ลักษณะการแอ่นตัวของแบบจำลอง 3 มิติ กรณีหน้าตัดเต็ม	124
89	ลักษณะการแอ่นตัวของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลงขนาดความลึก ช่องเปิดเท่ากับ 26 ซม. ($R_d - 26$) ความยาวทั้งหมด 60 ซม.	125
90	น้ำหนักบรรทุก- การโก่งตัวกระดกของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลงขนาดความลึกช่องเปิดเท่ากับ 26 ซม. ($R_d - 26$) ความยาวทั้งหมด 60 ซม.	126
91	น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัวของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลง ขนาดความลึกช่องเปิดเท่ากับ 14 ซม. ($R_d - 14$) ถึง 26 ซม. ($R_d - 26$) ความยาวทั้งหมด 60 ซม.	127
92	น้ำหนักบรรทุก-ความลึกช่องเปิดของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลง ขนาดความลึกช่องเปิดเท่ากับ 14 ซม. ($R_d - 14$) ถึง 26 ซม. ($R_d - 26$) ความยาวทั้งหมด 60 ซม.	129
93	พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดลึกลง 26 ซม. ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$)	130

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
94	พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$) Section-PL	131
95	พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$) Section-ROE	132
96	พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$) Section-ROI	133
97	พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$) Section-CL	134
98	พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$) Section-LOI	135
99	พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$) Section-LOE	136
100	การแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีตขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_d - 26$) ภายใต้อการแตกร้าว First cracks	137
101	การแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีตขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_d - 26$) ภายใต้อการแตกร้าว Flexural cracks	137
102	การแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีตขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_d - 26$) ภายใต้อการแตกร้าวน้ำหนักบรรทุกสูงสุด	138
103	หน้าตัดคานของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณีขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$)	138
104	จำนวนเอลิเมนต์เหล็กเสริมตามยาวขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$)	139
105	พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 1 ขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$)	139
106	พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 2 ขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$)	140

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
107	พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 3 ขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$)	141
108	พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 4 ขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$)	142
109	น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัวของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลง ตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 65 ซม. ($R_p - 65$)	144
110	น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัวของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลง ตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 115 ซม. ($R_p - 115$)	148
111	น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัวของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลง ตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 165 ซม. ($R_p - 165$)	145
112	น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัวของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลง ตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 215 ซม. ($R_p - 215$)	145
113	น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัวของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลง ตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$)	146
114	น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัวของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลง ตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 65 ซม. ($R_p - 65$) ถึง 265 ซม. ($R_p - 265$)	147
115	น้ำหนักบรรทุก-ตำแหน่งช่องเปิดของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลง ตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 65 ซม. ($R_p - 65$) ถึง 265 ซม. ($R_p - 265$)	148

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
116	พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคาน การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$)	149
117	พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคาน การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 25$) Section-PL	150
118	พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคาน การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 25$) Section-LOI	151
119	พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคาน การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 25$) Section-CL	152
120	พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคาน การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 25$) Section-ROI	153
121	พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคาน การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 25$) Section-ROE	154
122	รูปแบบการแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีตตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$) ภายใต้การแตกร้าว First crack	155
123	รูปแบบการแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีตตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$) ภายใต้การแตกร้าว Diagonal tensile cracks	155

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
124	รูปแบบการแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีตตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$) ภายใต้การแตกร้าว Compressive cracks	156
125	รูปแบบการแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีตตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$) ภายใต้การแตกร้าวน้ำหนักบรรทุกทุกสูงสุด	157
126	พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณีที่จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$)	157
127	จำนวนเอลิเมนต์เหล็กเสริมตามยาวตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$)	158
128	พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 1 ขนาดตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$)	159
129	พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 2 ขนาดตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$)	160
130	พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 3 ขนาดตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$)	161
131	พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 4 ขนาดตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$)	162
132	ลักษณะการ โกงตัวกระดกของแบบจำลอง 3 มิติ	163
133	แรงภายในคานที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่รอบช่องเปิด	164
134	น้ำหนักบรรทุกทุก-การแอ่นตัวคานหน้าตัดเต็ม	165
135	การกระจายความเค้นตามแนวยาวคาน (แกน X) ของคานหน้าตัดเต็ม	166
136	การกระจายความเค้นตามระนาบ (แกน XY) ของคานหน้าตัดเต็ม	166
137	น้ำหนักบรรทุกทุก-การแอ่นตัวคานที่มีขนาดช่องเปิดขนาดยาว 10 ซม. ลึก 18 ซม.	167

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
138	การกระจายความเค้นตามระนาบ (แกน XY) ของคานที่มีช่องเปิด ขนาด กว้าง 10 ซม. ลึก 18 ซม.	168
139	การกระจายความเค้นตามแนวแกนยาวคาน (แกน X) ของคาน ที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่	169
140	ค่าแรงภายในบริเวณมุมช่องเปิด กรณีที่ 1 น้ำหนักบรรทุก 700 กก	170
141	ค่าแรงภายในบริเวณมุมช่องเปิด กรณีที่ 2 น้ำหนักบรรทุก 3,500 กก.	171
142	ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลอง 1 มิติ ขนาดช่องเปิดยาว 40 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_{fs} - 40$)	173
143	ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลองหลัก 1 มิติ กรณีเปลี่ยนแปลง ความยาว	174
144	ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลอง 1 มิติ ขนาดช่องเปิดยาว 60 ซม. ลึก 14 ซม. ($R_{ds} - 14$)	176
145	ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลองหลัก 1 มิติ กรณีเปลี่ยนแปลง ความลึก	177
146	น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัวของแบบจำลอง 1 มิติ การเปลี่ยนแปลง ตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็น ระยะ 65 ซม. ($R_{ps} - 65$)	178
ภาพผนวกที่		
ก1	ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลอง 1 มิติ ขนาดช่องเปิดยาว 40 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_{fs} - 40$)	192
ก2	ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลองหลัก 1 มิติ ขนาดช่องเปิด ยาว 60 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_{fs} - 60$, $R_{ds} - 18$ และ $R_{ps} - 10$)	192

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก3 ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลองหลัก 1 มิติ ขนาดช่องเปิด ยาว 80 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_{ls} - 80$)	193
ก4 ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลอง 1 มิติ ขนาดช่องเปิด ยาว 100 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_{ls} - 100$)	193
ก5 ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลองหลัก 1 มิติ ขนาดช่องเปิด ยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_{ls} - 120$)	194
ข1 ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลอง 1 มิติ ขนาดช่องเปิด ยาว 60 ซม. ลึก 14 ซม. ($R_{ds} - 14$)	196
ข2 ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลอง 1 มิติ ขนาดช่องเปิด ยาว 60 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_{ds} - 18$)	196
ข3 ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลอง 1 มิติ ขนาดช่องเปิด ยาว 60 ซม. ลึก 22 ซม. ($R_{ds} - 22$)	197
ข4 ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลอง 1 มิติ ขนาดช่องเปิด ยาว 60 ซม. ลึก 26 ซม. ($R_{ds} - 26$)	197
ค1 น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัวของแบบจำลอง 1 มิติ การเปลี่ยนแปลง ตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 65 ซม. ($R_{ps} - 65$)	199
ค2 น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัวของแบบจำลอง 1 มิติ การเปลี่ยนแปลง ตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 65 ซม. ($R_{ps} - 115$)	199
ค3 น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัวของแบบจำลอง 1 มิติ การเปลี่ยนแปลง ตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 65 ซม. ($R_{ps} - 165$)	200
ค4 น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัวของแบบจำลอง 1 มิติ การเปลี่ยนแปลง ตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 65 ซม. ($R_{ps} - 215$)	200

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ค5 น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัวของแบบจำลอง 1 มิติ การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_{ps} - 265$)	201
จ1 แบบจำลองคานปกติเมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำ	208
จ2 แรงเฉือนแบบจำลองคานปกติเมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำ	208
จ3 โมเมนต์ดัดแบบจำลองคานปกติเมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำ	209
จ4 แรงเฉือนแบบจำลองคานปกติเมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำ	209
จ5 แบบจำลองคานเพิ่มแรงเฉือน 100 กิโลกรัม และค่าโมเมนต์ 10 กิโลกรัม-เมตร บริเวณตำแหน่งช่องเปิด	210
จ6 แรงเฉือนแบบจำลองคานเพิ่มแรงเฉือน 100 กิโลกรัม และค่าโมเมนต์ 10 กิโลกรัม-เมตร บริเวณตำแหน่งช่องเปิด	210
จ7 โมเมนต์แบบจำลองคานเพิ่มแรงเฉือน 100 กิโลกรัม และค่าโมเมนต์ 10 กิโลกรัม-เมตร บริเวณตำแหน่งช่องเปิด	211
จ8 การแอ่นตัวแบบจำลองคานเพิ่มแรงเฉือน 100 กิโลกรัม และค่าโมเมนต์ 10 กิโลกรัม-เมตร บริเวณตำแหน่งช่องเปิด	211
จ9 แบบจำลองคานเพิ่มแรงเฉือน 1000 กิโลกรัม และค่าโมเมนต์ 10 กิโลกรัม-เมตร บริเวณตำแหน่งช่องเปิด	212
จ10 แรงเฉือนแบบจำลองคานเพิ่มแรงเฉือน 1000 กิโลกรัม และค่าโมเมนต์ 10 กิโลกรัม-เมตร บริเวณตำแหน่งช่องเปิด	212
จ11 โมเมนต์ดัดแบบจำลองคานเพิ่มแรงเฉือน 1000 กิโลกรัม และค่าโมเมนต์ 10 กิโลกรัม-เมตร บริเวณตำแหน่งช่องเปิด	212
จ12 การแอ่นตัวแบบจำลองคานเพิ่มแรงเฉือน 1000 กิโลกรัม และค่าโมเมนต์ 10 กิโลกรัม-เมตร บริเวณตำแหน่งช่องเปิด	213
จ13 แรงภายในที่เกิดขึ้นของคานที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่	213

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
จ14 แบบจำลองคานเพิ่มแรงเฉือน 1000 กิโลกรัม และค่าโมเมนต์ 350 กิโลกรัม-เมตร ฝั่งไกลน้ำหนักบรรทุกทุก และ 100 กิโลกรัม-เมตร ฝั่งไกลน้ำหนักบรรทุกทุก บริเวณตำแหน่งช่องเปิด	214
จ15 แรงเฉือนคานเพิ่มแรงเฉือน 1000 กิโลกรัม และค่าโมเมนต์ 350 กิโลกรัม-เมตร ฝั่งไกลน้ำหนักบรรทุกทุก และ 100 กิโลกรัม-เมตร ฝั่งไกลน้ำหนักบรรทุกทุก บริเวณตำแหน่งช่องเปิด	214
จ16 โมเมนต์คานเพิ่มแรงเฉือน 1000 กิโลกรัม และค่าโมเมนต์ 350 กิโลกรัม-เมตร ฝั่งไกลน้ำหนักบรรทุกทุก และ 100 กิโลกรัม-เมตร ฝั่งไกลน้ำหนักบรรทุกทุก บริเวณตำแหน่งช่องเปิด	215
จ17 การแอ่นตัวคานเพิ่มแรงเฉือน 1000 กิโลกรัม และค่าโมเมนต์ 350 กิโลกรัม-เมตร ฝั่งไกลน้ำหนักบรรทุกทุก และ 100 กิโลกรัม-เมตร ฝั่งไกลน้ำหนักบรรทุกทุก บริเวณตำแหน่งช่องเปิด	215

ผลของช่องเปิดขนาดใหญ่ต่อพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการวิเคราะห์ ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้น

Effect of Large Opening on Behavior of Reinforced Concrete Beam by Nonlinear Finite Element Analysis

คำนำ

การก่อสร้างในปัจจุบัน ได้ใช้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งมีคุณสมบัติแข็งแรง คงทน สามารถอยู่ได้นานหลายปี ทำให้วิวัฒนาการก่อสร้างจะต้องมีความประหยัด ปลอดภัย และก่อสร้างได้รวดเร็ว ซึ่งการติดตั้งงานระบบสาธารณูปโภคได้กาน มีส่วนสำคัญกับการออกแบบขนาดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีผลทำให้ระยะฝ้าระหว่างชั้น ไม่เพียงพอสำหรับการอยู่อาศัย เกิดความไม่สบาย และบางทีจะต้องเพิ่มขนาดความสูงของชั้นอาคาร ซึ่งจะมีผลเสียหลายด้านอาทิเช่น การขออนุญาตอาคารผิดจากแบบที่ทำการก่อสร้าง ทางด้านเศรษฐกิจจะทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการลงทุนเพิ่ม และทำให้เป็นอันตรายเนื่องจากการรับน้ำหนักบรรทุกมากเกินไปที่โครงสร้างกำหนด เพื่อให้เกิดความปลอดภัยควรออกแบบขนาดช่องเปิดของคานล่วงหน้าเพื่อสามารถประมาณพฤติกรรมของการรับแรงเมื่อรอบช่องเปิด และโมเมนต์ดัดประลัยของคานได้

การออกแบบส่วนใหญ่จะละเลยการพิจารณาลักษณะของช่องเปิดเพื่อนำมาลดกำลังของคาน แต่จะพิจารณาช่องเปิดที่เจาะทะลุผ่านคานมีขนาดเล็กหรือใหญ่ หากมีขนาดเล็กก็วางตำแหน่งช่องเปิดอยู่ต่ำกว่าแกนสะเทินของคานเพื่อจะได้ไม่ต้องลดกำลังคาน ตามสมมติฐานคอนกรีตไม่ช่วยรับแรงดึง แต่หากวางเหนือแกนสะเทินผู้ออกแบบจะพยายามเลี่ยงไม่ให้เกิด หรือหากมีช่องเปิดขนาดใหญ่จะขยายหน้าตัดคานให้ลึกขึ้น ปัญหาส่วนใหญ่ผู้ออกแบบไม่เชื่อมั่นในพฤติกรรมที่เปลี่ยนไปของคาน เช่น พฤติกรรมการแอ่นตัวที่ไม่เป็นเส้นตรงเนื่องจากลักษณะของช่องเปิดที่ใหญ่ขึ้น ความเค้นที่มากบริเวณมุมของช่องเปิด (Stress concentration)

งานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึง ปัจจุบันได้ทดสอบคานที่มีช่องเปิดขนาดต่าง ๆ มากมายจนสามารถวิเคราะห์ และออกแบบพฤติกรรมที่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัย อาทิเช่น การวิบัติแบบคาน (Beam-type failure) และการวิบัติแบบโครงข้อแข็ง (Frame-type failure)

ซึ่งทฤษฎีที่นำมาวิเคราะห์ได้แก่ วิธีความสมดุล (Equilibrium) วิธีความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับแรงดัด (Interaction curve) และวิธกลไกการวิบัติ (Collapse Mechanism) ความสำคัญของการวิเคราะห์จะพิจารณาการแตกร้าวบริเวณชั้นส่วนบน และชั้นส่วนล่าง จะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอในการรับแรงอัด ร่วมกับโมเมนต์ดัดทำให้มีพฤติกรรมคล้ายชิ้นส่วนวีเรนดีล (Vierendeel panel) เมื่อเกิดการวิบัติบริเวณข้อต่อเสมือนเป็นจุดหมุนพลาสติก (Plastic hinge) ที่ไม่สามารถรับแรงดัดได้ ส่งผลให้การแอ่นตัวของคานมีค่าเพิ่มมากขึ้น หรือเป็นเหตุทำให้คานวิบัติได้ แต่ด้วยวิธีการวิเคราะห์ และออกแบบมีการพัฒนาเพิ่มมากขึ้น วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นแนวทางหนึ่งที่สะดวก รวดเร็ว และมีความถูกต้องสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ รวมทั้งวิเคราะห์หาความแข็งแรงเพื่อจะประเมินกำลังที่เหลืออยู่ของโครงสร้างคาน โดยใช้โปรแกรมเชิงพาณิชย์ที่มีชื่อว่า แอนซิส (ANSYS) เป็นเครื่องมือช่วยในการศึกษาครั้งนี้ การวิเคราะห์โดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีประโยชน์อย่างมากต่อความเข้าใจพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ โดยที่ไม่ต้องใช้วิธีการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นวิธีที่เสียค่าใช้จ่ายสูง และเสียเวลา แต่ในการศึกษาครั้งนี้จะมีการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อแสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้มาจากวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นมีความถูกต้อง และแม่นยำ

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการสร้างแบบจำลอง และพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ภายใต้น้ำหนักกระทำเพิ่มแบบคงที่
2. เพื่อประเมินกำลังของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ภายใต้การเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด การเปลี่ยนแปลงความลึกของช่องเปิด และการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของช่องเปิด
3. เพื่อศึกษาวิธีการสร้างโมเดลที่ไม่ซับซ้อน 1 มิติของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่

ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้นำเสนอพฤติกรรมของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ บนจตุรกรรับอย่างง่ายโดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ อ้างอิงจากบทความที่มีผลการทดสอบ และข้อมูลของคานที่เพียงพอ สำหรับการสร้างแบบจำลองในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเปรียบเทียบ และอ้างอิงกับงานวิจัยของ Tan (1982) ซึ่งทำการทดสอบพฤติกรรมโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด การเปลี่ยนแปลงความลึกของช่องเปิด และการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของช่องเปิด การวิเคราะห์พฤติกรรมแบบจำลอง 3 มิติ จะวิเคราะห์ค่าน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว ค่าความเค้นแนวยาวของคานที่เกิดขึ้นตามระดับความลึกต่างๆ ของหน้าตัดคาน ค่าแรงดัดของเหล็กเสริม และพฤติกรรมการแตกร้าวของคาน ซึ่งแบบจำลอง 3 มิติ ได้พิจารณาคุณสมบัติของวัสดุ (Material property) คอนกรีต และเหล็กเสริม แบบไร้เชิงเส้น (Nonlinearity) และแบบจำลอง 1 มิติ ได้ใช้เทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการสร้างแบบจำลอง พร้อมวิเคราะห์ค่าน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัวในช่วงยืดหยุ่น เทียบกับแบบจำลอง 3 มิติ

การตรวจเอกสาร

โครงสร้างคานคอนกรีตจะมีความแข็งแรงอย่างถูกวิธีได้นั้นต้องประกอบด้วยเหล็กเสริมที่มีคุณสมบัติรับแรงดึง และคอนกรีตทำหน้าที่รับแรงอัดอีกทั้งมีสัมประสิทธิ์การยึดหดตัวเท่าๆ กัน เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำในคานอย่างง่ายจะเกิดความเค้นขึ้นบริเวณด้านบน และด้านล่าง ทำให้พฤติกรรมคล้ายคานยืม ส่งผลให้เกิดการส่งถ่ายความเค้นจนคอนกรีตเริ่มเกิดการแตกร้าว และวิบัติในที่สุดซึ่งหากกล่าวถึงคอนกรีตเป็นวัสดุที่เปรียบเสมือนหินที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นมา ในเนื้อคอนกรีตอาจแยกเป็นสองส่วนใหญ่ๆ คือซีเมนต์เพสต์ (cement paste) วัสดุผสม (aggregates) น้ำ และฟองอากาศเป็นส่วนที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีทำหน้าที่เป็นตัวประสานคล้ายกาว โดยจะเข้าไปแทรกตามช่องว่างของหิน และทราย ทำยาคอนกรีตจะแข็งตัวแล้วมีกำลังรับแรงตามต้องการ ความแข็งแรงของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของซีเมนต์ และคอนกรีตสามารถใช้ได้ดีกว่าวัสดุอื่นๆ เนื่องจากสามารถทำให้มีรูปร่างลักษณะขนาดได้ตามต้องการ มีราคาถูกเมื่อเทียบกับปริมาณที่ได้ คอนกรีตส่วนที่ห่อหุ้มเหล็กเสริมจะทำให้เหล็กเสริมทนทานต่อเพลิงไหม้ และการเป็นสนิมผุกร่อนได้ดี โครงสร้างคอนกรีตเห็นอยู่ทั่วไปได้แก่ สะพาน เขื่อน อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก และโครงสร้างหลังคาแบบเปลือกล้าง เหล็กเสริมเป็นวัสดุเหล็กกล้าละมุน (Mild steel) ทำได้โดยการนำเหล็กแท่งเล็ก (Billet) เหล็กแท่งใหญ่ (Bloom) หรือเหล็กแท่งหล่อ (Ingot) ซึ่งมีแร่เหล็ก คาร์บอน และธาตุอื่นบางชนิด เช่น แมงกานีส ฟอสฟอรัส กำมะถัน ซิลิกอน มาหลอมละลายเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิสูง แล้วรีดเป็นเส้นด้วยลูกรีดในขณะที่ยังร้อนอยู่ (กรรมวิธีรีดร้อน) เหล็กกล้าละมุนเป็นเหล็กกล้าที่มีปริมาณของคาร์บอนผสมอยู่ต่ำ หากเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้สูงขึ้น ความแข็งแรงก็จะเพิ่มขึ้น แต่จะยังเปราะหักง่ายกว่า

การศึกษาคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่เป็นสิ่งที่มีความสำคัญมากในด้านระบบสาธารณูปโภคได้คาน แต่บางครั้งมีการทำช่องเปิดคานเป็นรูปร่างต่างๆ เพื่อความสวยงามซึ่งหากมีความเข้าใจในพฤติกรรมของคานช่องเปิดไม่ว่าจะเป็นคานเหล็ก คานไม้ หรือคานคอนกรีตล้วนแต่นักวิจัยมากมายที่ศึกษาพฤติกรรมเพื่อจะได้ใช้ประโยชน์สูงสุด Prentzas (1968) เป็นบุคคลแรกที่ได้ทำการศึกษาคานคอนกรีตที่มีช่องเปิดลักษณะต่างๆ เช่น รูปวงกลม รูปสี่เหลี่ยม รูปสามเหลี่ยม รูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน รูปห้าเหลี่ยมคางหมู และรูปหลายเหลี่ยม ซึ่งส่วนมากลักษณะการใช้งานของช่องเปิดจะใช้กับงานระบบเป็นส่วนใหญ่ไม่ว่าจะเป็นงานท่อของระบบน้ำซึ่งใช้รูปวงกลม และงานระบบแอร์จะใช้รูปสี่เหลี่ยม แต่ก็ยังไม่เกิดความเชื่อมั่นในการใช้งานเนื่องจากมีรอยร้าวเกิดขึ้นที่มุมของช่องเปิดทำให้ Hanson (1969) ได้ศึกษาพฤติกรรมคานต่อเนื่องรูปตัวที ที่มีช่องเปิด

รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส พบว่าลักษณะการวิบัติแบบคาน (Beam-type failure) หมายถึง รอยร้าวเข้าสู่ศูนย์กลางของช่องเปิดยกเว้นช่องเปิดที่อยู่ใกล้บริเวณจุดรองรับซึ่งเรียกว่าบริเวณหน้าตัดวิกฤต ต่อมา *Somes and Corley (1974)* ได้ศึกษาพฤติกรรมคานที่มีช่องเปิดรูปวงกลมในคานต่อเนื่อง ภายใต้พฤติกรรมของแรงเฉือน ซึ่งมีการทดสอบคล้าย *Hanson (1969)* แตกต่างจากช่องเปิดสี่เหลี่ยม เป็นวงกลมพบว่าหากเส้นผ่านศูนย์กลางเกิน 0.25 ของความลึกคานถือว่าเป็นช่องเปิดขนาดใหญ่ แต่ปัญหาของรอยแตกร้าวยังไม่หมด *Nasser et al., (1967)* ได้ศึกษาพฤติกรรมและออกแบบคานคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่พบว่าเหล็กเสริมตามแนวทแยงที่บริเวณมุมของช่องเปิดสามารถเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนได้ และ *Salum (1977)* ได้ศึกษาคานคอนกรีตที่มีช่องเปิดภายใต้เงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้น ในการทดสอบได้กำหนดลักษณะของคานที่แตกต่างกัน 6 แบบ พบว่าหากมีการเพิ่มเหล็กเสริมตามยาว และเหล็กเสริมตามขวางอย่างเพียงพอจะช่วยให้การวิบัติบริเวณช่องเปิดลดน้อยลง ซึ่งหากคานที่ไม่มีการเสริมเหล็กอย่างเพียงพอ และรับน้ำหนักบรรทุกบริเวณช่องเปิด คานจะวิบัติแบบโครงข้อแข็ง (Frame-type failure) หมายถึง รอยร้าวไม่เข้าสู่ศูนย์กลางของวงกลม

Mansur and Tan (1989) ได้ศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ภายใต้ แรงบิด โมเมนต์ดัด และแรงเฉือน พบว่าหากคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดมีพฤติกรรมเป็นไปตามทฤษฎีของคาน และหากความลึกหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเปิดน้อยกว่าร้อยละ 40 ของความลึกคานจะกำหนดให้เป็นช่องเปิดขนาดเล็ก พร้อมทั้งเสริมเหล็กบริเวณช่องเปิดเพื่อป้องกันการเกิดความเค้นมากที่สุดที่มุม (Stress concentration) *Savage et al. (1996)* ได้ศึกษาพฤติกรรมคานสำเร็จรูปตัวที่คู่ที่มีช่องเปิด ลักษณะช่องเปิด ตำแหน่ง และความต้องการของวัสดุใช้ตามขนาดมาตรฐาน PCI Double Tee การทดสอบใช้ความยาวคาน 13.7 ม.(ซึ่งจะคิดเพียงขาเดียวของตัวที่คู่) น้ำหนักบรรทุกจร 345 กก./ม² น้ำหนักบรรทุกคงที่ 122 กก./ม² ความหนาปีกคาน 5 ซม. ความลึกคาน 60 ซม. ขนาดช่องเปิดลึก 30 ซม. ยาว 60 ซม. ความหนาระหว่างช่องเปิด 45 ซม. ยึดตามทฤษฎี Strut-and-tie ซึ่งจะต้องรักษาระยะความกว้างระหว่างช่องเปิดไม่น้อยกว่าครึ่งของความกว้างช่องเปิด ผลกระทบของน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว พบว่าการแอ่นตัวคานสำเร็จรูปตัวที่คู่ที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่หลายช่อง มีพฤติกรรมเหมือนคานสำเร็จรูปที่ไม่มีช่องเปิดถึงจุดที่มีการแตกร้าว เนื่องจากค่าการแอ่นตัวของคานมีความสอดคล้องกับค่าการสั่น และค่าน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว ที่ได้จากการทดสอบในช่วงใช้งานมีค่าใกล้เคียงกันมากระหว่างคานที่มีช่องเปิด และไม่มีช่องเปิด ซึ่งต่อมาเพื่อความมั่นใจในพฤติกรรมของคานที่มีช่องเปิดเช่น การแอ่นตัวที่มากที่สุด ความเค้นที่เกิดขึ้นจะลดทอนกำลังของคานอย่างไร *Kanarkard et al. (2002)* ได้ศึกษา

พฤติกรรมของคานคอนกรีตขนาดเล็กซึ่งกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเปิดน้อยกว่าร้อยละ 40 ของความลึกคาน จากการวิจัยพบว่าคานที่มีช่องเปิด รูปวงกลมเหนือแกนสะเทิน และคานที่มีช่องเปิดรูปวงกลมใต้แกนสะเทิน กรณีรับโมเมนต์ดัดคานมีความปลอดภัยถึงกำลังประลัย ซึ่งมีลักษณะการแตกร้าวคล้ายกับคานหน้าตัดเต็มตามมาตรฐาน ACI และมาตรฐาน ว.ส.ท. สำหรับคานที่มีช่องเปิดรูปวงกลมเหนือแกนสะเทิน และคานที่มีช่องเปิดรูปวงกลมใต้แกนสะเทิน กรณีรับโมเมนต์ดัดร่วมกับแรงเฉือนปลอดภัยถึงกำลังประลัยเช่นเดียวกัน แต่พบการแตกร้าววิบัติแบบคาน (Beam-type failure) จากช่องเปิดขนาดใหญ่รูปสี่เหลี่ยมพื้นผ้าได้กำหนดค่าความลึกของช่องเปิดไม่เกินร้อยละ 40 ของความลึกคาน แต่ยังไม่ได้กำหนดความเหมาะสมของควมยาวชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่างซึ่ง Tan (1982) ได้กำหนดค่าความเหมาะสมของการออกแบบความชะลุดของชิ้นส่วนบน โดยมาตรฐาน ACI 318-99 ได้กำหนดสัดส่วน $Kl_u / r < 22$ (รายละเอียดได้นำเสนอในหัวข้อการออกแบบคานคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่)

Hutangkura (2003) ได้ศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่มีเสากลางแบ่งระหว่างช่องเปิดซึ่งใช้คานทดสอบ 4 แบบ เป็นช่องเปิดขนาดใหญ่ทั้งสิ้น ทำการทดสอบคล้ายการทดสอบของ Tan (1982) จากนั้นนำค่าน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว ที่ตำแหน่งต่างๆ มาวิเคราะห์ พบว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเสากลางแบ่งระหว่างช่องเปิดเมื่อมีการเสริมกำลังรับแรงรอบช่องเปิดเพียงพอจะไม่เกิดการพังทลายเนื่องจากความเค้นดัดบริเวณหน้าตัดเต็ม และความเค้นเฉือนที่หน้าตัดต่างๆ การพังทลายจะเกิดบริเวณชิ้นส่วนต่อเชื่อมบนเหนือช่องเปิดส่วนที่เกิดโมเมนต์ดัดในหน้าตัดที่สูง การโก่งตัวสูงสุดจะเกิดบริเวณตำแหน่งของช่องเปิดส่วนที่เกิดโมเมนต์ดัดในหน้าตัดที่สูง ส่วนกรณีที่มีเสากลางแบ่งระหว่างช่องเปิดจะทำให้ช่องเปิดมีขนาดเล็กลงซึ่งสามารถรับแรงดัดประลัยได้ใกล้เคียงกับคานที่มีช่องเปิดเดี่ยว(ที่มีคุณสมบัติขนาด และตำแหน่งเดียวกับช่องเปิดบริเวณส่วนที่เกิดโมเมนต์ดัดสูง) และช่องเปิดส่วนที่เกิดโมเมนต์ต่ำมีผลให้การโก่งตัวในคานคอนกรีตเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดลดลง

ภายในปีเดียวกัน Abdalla *et al.* (2003) ได้ออกแบบรอยแตกร้าวค้ำงบริเวณรอบช่องเปิดเพื่อเสริมความแข็งแรงด้วยแผ่นประกอบ CFRP การทดสอบพฤติกรรมบริเวณส่วนรับแรงเฉือนคานคอนกรีตที่มีช่องเปิด จะต้องใช้แผ่นประกอบยึดรอบๆ บริเวณช่องเปิดเพื่อควบคุมรอยแตกร้าวซึ่งวัตถุประสงค์ของการทดสอบมุ่งประเด็นเพื่อหาคำตอบดังนี้ การแอ่นตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก ค่าการกระจายความเค้นดัดบริเวณช่องเปิด รูปแบบการแตกร้าว และน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ทำให้คานคอนกรีตเสริมความแข็งแรงด้วยแผ่นประกอบ CFRP วิบัติ ขนาดคานกว้าง 10 ซม. ลึก 25 ซม.

ยาว 200 ซม. ใช้หน้าหนักบรรทุกแบบกระทำ 2 จุด ขนาดช่องเปิดมีลักษณะดังนี้ ลึก 10 ซม. และทำการเปลี่ยนแปลงความยาวตั้งแต่ 10 ถึง 30 ซม. ลักษณะที่ 2 ใช้ขนาดความยาว 30 ซม. ลึก 15 ซม. เท่าเดิม แต่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแผ่นประกอบ CFRP จากการทดสอบพบว่า คานคอนกรีตที่มีช่องเปิดลึก ประมาณ 0.6 ของความลึกโดยไม่ได้เสริมด้วยแผ่นประกอบ CFRP คำน้หนักบรรทุก สูงสุดลดลง 75 เปอร์เซ็นต์ หากทำการเสริมด้วยแผ่นประกอบ CFRP สามารถลดค่าการแอ่นตัว และควบคุมรอยแตกร้าวบริเวณช่องเปิดได้ ซึ่งส่งผลให้กำลังน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเพิ่มขึ้น ส่วนการวิบัติด้วยแรงเฉือนบริเวณมุมช่องเปิดจะเกิดจากการวิบัติของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นประกอบ CFRP และคอนกรีต

แนวคิดเรื่องคานเจาะรูเป็นที่น่าสนใจอย่างต่อเนื่องทำให้ Yoo *et al.* (2004) ได้ทำการทดสอบคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็ก และคานลิกคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิด การทดสอบใช้มาตรฐาน The Australian Standard (AS3600-01) ซึ่งจุดประสงค์ได้เน้นหาคำตอบเรื่องการเปลี่ยนแปลงขนาดของช่องเปิด และค่ากำลังอัดของคอนกรีต การทดสอบใช้คาน 16 ตัว และแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นตอนแรกใช้คาน 8 ตัว ให้ความสำคัญกับการเปลี่ยนแปลงขนาดของคานคอนกรีต และคานอัดแรงที่มีช่องเปิด ขนาดช่องเปิดที่ใช้ทดสอบได้แก่ 15x15 ซม., 18x18 ซม., 210x210 ซม. และ 240x240 ซม. ค่ากำลังอัดคอนกรีตใช้ 39.31 เมกะพาสคัล ขั้นตอนที่สองจะเพิ่มค่ากำลังอัดคอนกรีต 77.6 เมกะพาสคัล และน้ำหนักบรรทุกจะเปรียบเทียบแบบกระทำ 1 จุด และกระทำ 2 จุด พบว่ารูปแบบรอยแตกร้าวจะปรากฏแบบ Tied-arch system หมายถึงรอยแตกร้าวจะส่งผลเสียหายต่อระบบในภาพรวมทำให้คานเกิดการวิบัติ การแตกร้าวครั้งแรกจะปรากฏที่มุมบนและมุมล่างช่องเปิด และลำดับต่อไปรอยแตกร้าวจะปรากฏชัดเจนมากขึ้นบริเวณน้ำหนักบรรทุกกระทำ และจะรองรับ ที่น้ำหนักบรรทุกกระทำสูงสุด การเพิ่มขึ้นของขนาดช่องเปิดจาก 15-24 ซม. ทำให้ค่าความแข็งแรงลดลงจาก 22.9 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 17.8 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานคอนกรีต และสำหรับคานคอนกรีตอัดแรง ที่น้ำหนักบรรทุกกระทำสูงสุด การเพิ่มขึ้นของขนาดช่องเปิดจาก 15-24 ซม. ทำให้ค่าความแข็งแรงลดลงจาก 70.0 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 34.4 เปอร์เซ็นต์ การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนระหว่าง การวิเคราะห์ และการทดสอบ มีค่าตั้งแต่ 0.41-1.67 มีค่าเฉลี่ยของอัตราส่วน 0.79 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการประมาณค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดควรพิจารณาตัวประกอบของตำแหน่ง และขนาดของช่องเปิด เพื่อให้การประมาณค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดมีความถูกต้อง

วิวัฒนาการทางด้านคอมพิวเตอร์ได้ขยายตัวขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้การวิเคราะห์โครงสร้างทางด้านวิศวกรรมหันมาใช้คอมพิวเตอร์เป็นเครื่องด้วยการใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ต่างๆ อาทิเช่น SAP, 2000; STAADPRO, 2006 และ ANSYS ทำให้ Al-Kaisy *et al.* (2005) ได้ศึกษาพฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ ภายใต้แรงดัด การสร้างแบบจำลองของคานเป็นแบบ 3 มิติ ที่มีคุณสมบัติไร้เชิงเส้น คอนกรีตใช้เอลิเมนต์ชนิดไอโซพารามเมตริกซ์ (Isoparametric Solid Element) มี 20 จุดต่อ เหล็กเสริมใช้เอลิเมนต์ที่ฝังในคอนกรีตมีคุณสมบัติรับแรงในแนวแกน ระหว่างคอนกรีต และเหล็กเสริมใช้แรงยึดเหนี่ยวแบบสมบูรณ์ ขนาดของน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นจะถูกกำหนดโดยวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) และใช้ Incremental-iterative technique ในการควบคุมน้ำหนักบรรทุก โดยแสดงรูปแบบการแตกร้าว (Crack patterns) แบบ Smeared crack ในการศึกษาได้นำผลของการทดสอบ Tan (1982) มาเปรียบเทียบกับแบบจำลอง 3 มิติ ที่สร้างขึ้นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งนำผลของน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว และน้ำหนักบรรทุกปลายมาวิเคราะห์ พบว่าการเพิ่มค่าแรงดัดในคอนกรีตให้มีค่าสูงขึ้นจะช่วยทำให้น้ำหนักบรรทุกปลายมีค่าเพิ่มขึ้น และช่วยในเรื่องการแตกร้าวที่ลดลง การเพิ่มเหล็กเสริมตามยาวตรงบริเวณใต้คานจะช่วยทำให้น้ำหนักบรรทุกปลายมีค่าเพิ่มขึ้น

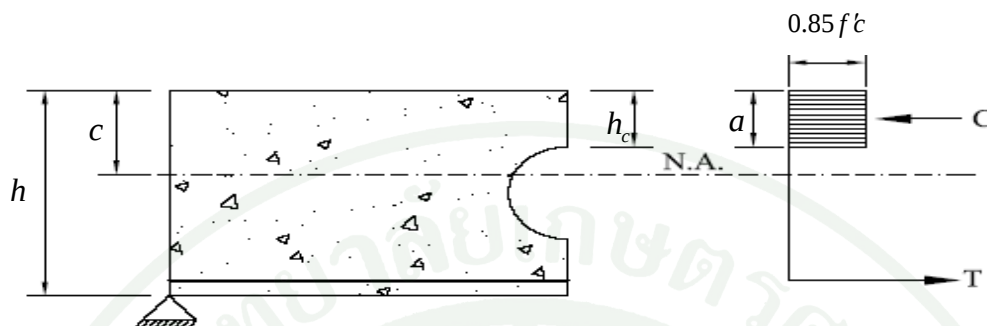
พฤติกรรมคานคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาดเล็ก

1. การรับแรงดัดล้วนของคานที่มีช่องเปิดขนาดเล็ก

ในการพิจารณาช่องเปิดที่มีรูปร่างวงกลม สี่เหลี่ยม หรือรูปร่างที่มีลักษณะคล้ายกับสี่เหลี่ยม ซึ่งจะกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเปิดน้อยกว่าร้อยละ 40 ของความลึกคาน และสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมแบบคานได้ (Mansur and Tan, 1989) เนื่องจากการวิเคราะห์ และการออกแบบของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดเล็ก และช่องเปิดขนาดใหญ่ภายในคานจะส่งผลให้การไหลของความเค้นไม่ต่อเนื่องทำให้ความเค้นไปรวมตัวกันมากที่จุดเดียว (stress concentration) และเกิดการแตกร้าวขึ้นรอบช่องเปิด ฉะนั้นจำเป็นต้องมีเหล็กดัดรอบช่องเปิดให้เพียงพอเพื่อป้องกันการแตกร้าวที่เกิดขึ้น

การรับแรงดัดของคานที่มีช่องเปิดขนาดเล็กหากจะสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมแบบคานได้อย่างสมบูรณ์จะต้องกำหนดตำแหน่งของช่องเปิดขนาดเล็กให้อยู่ในบริเวณรับแรงดึง (tension zone) เนื่องจากคอนกรีตบริเวณนี้จะมีการแตกร้าวเกิดขึ้นตลอดเวลาในช่วงการรับแรงดัด และ

ในการออกแบบด้วยวิธีกำลังประลัย ความลึกที่เป็นพื้นที่รับความเค้นอัดของคานจะมีส่วนสำคัญมากในการพิจารณาพฤติกรรมของคานดังภาพที่ 1 ซึ่งมีค่าตามสมการที่ 1



ภาพที่ 1 การกระจายความเค้นของคานที่มีช่องเปิดตามทฤษฎีกำลังประลัย

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} \quad (1)$$

เมื่อ A_s = พื้นที่เหล็กเสริมรับแรงดึง (cm^2)
 f_y = กำลังครากของเหล็กเสริม (ksc)
 f'_c = กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (ksc.)
 b = ความกว้างของคาน (cm.)

Salam (1977) and Tan *et al.* (1996) กล่าวว่าค่าความแข็งแรงของคานที่มีช่องเปิดจะไม่มีผลกระทบหากตำแหน่งของช่องเปิดไม่กระทบกับพื้นที่รับแรงอัดของคอนกรีตในสภาวะประลัย และส่งผลให้ค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดลดลง แต่อย่างไรก็ตามรอยแตกร้าวก็ยังคงปรากฏ การแตกร้าวขนาดเล็กๆ รอบบริเวณช่องเปิด ดังนั้นค่า h_c จะเกี่ยวเนื่องจากพื้นที่การรับแรงอัดของคานซึ่งหาก h_c มีค่ามากกว่า a หรือเป็นไปตามสมการที่ 2 ก็ไม่จำเป็นต้องลดกำลังของคาน

$$h_c \geq \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} \quad (2)$$

การหาค่ากำลังโมเมนต์ดัดสามารถพิจารณาจาก การกระจายความเค้นของคานที่มีช่องเปิดตามทฤษฎีกำลังประลัยดังภาพที่ 1 ซึ่งกำลังของโมเมนต์ (nominal strength, M_n) ได้ดังสมการที่ 3

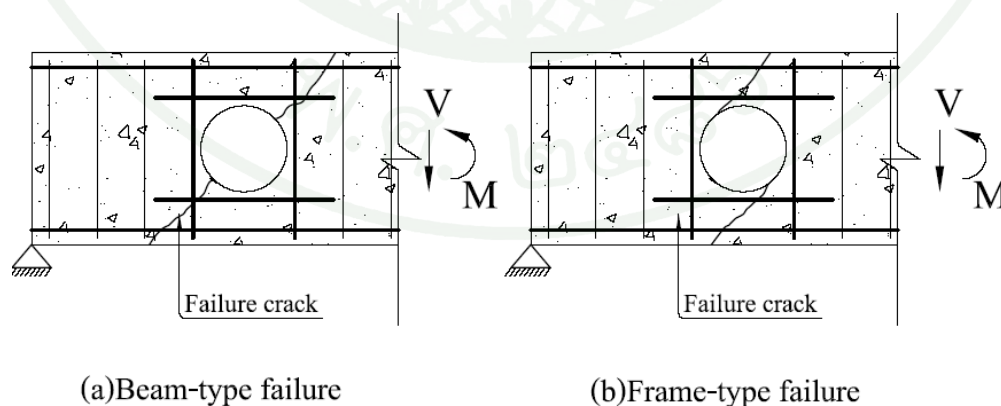
$$M_n = 0.85 f'_c b a \left(d - \frac{a}{2} \right) = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (3)$$

หากค่า h_c น้อยกว่า a จะต้องลดกำลังของคานซึ่งให้แทนค่า $a = h_c$ ดังสมการที่ 4

$$M_n = 0.85 f'_c b a \left(d - \frac{h_c}{2} \right) = A_s f_y \left(d - \frac{h_c}{2} \right) \quad (4)$$

2. การรับแรงดัด และแรงเฉือนร่วมกันของคานที่มีช่องเปิดขนาดเล็ก

ในคานทั่วไปแรงเฉือนจะเกิดขึ้นร่วมกับแรงดัดเสมอ แสดงดังภาพที่ 2 จากผลการทดสอบของ Hanson (1969); Somes and Corley (1974); Salam (1977) and Weng (1998) ได้ชี้ให้เห็นว่าคานสามารถวิบัติได้ 2 ลักษณะ อันดับแรกเป็นลักษณะการวิบัติทั่วไป มีรอยร้าวเข้าสู่ศูนย์กลางของวงกลมดังภาพ 2(a) และอันดับที่สองเป็นลักษณะการวิบัติด้วยการแตกร้าวแบบอิสระ ตามแนวทะแยงมุม (diagonal cracks) มีรอยร้าวไม่เข้าสู่ศูนย์กลางของวงกลม ดังภาพ 2(b) จากนั้น Mansur (1998) จึงได้กำหนดให้คานมีการวิบัติสองลักษณะ ได้แก่ วิบัติแบบคาน (Beam-type failure) และการวิบัติแบบโครงข้อแข็ง (Frame-type failure) ตามลำดับ



ภาพที่ 2 ลักษณะการวิบัติเนื่องจากแรงดัด และแรงเฉือนร่วมกัน

กลไกการต้านทานแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กในระยะแรกใช้หลักการทำงานเกี่ยวกับการรับแรงของโครงข้อหมุน กล่าวคือ เหล็กเสริมตามยาว และเหล็กเสริมตามขวางทำหน้าที่รับแรงดึง โดยมีคอนกรีตด้านบน ทำหน้าที่รับแรงอัด การศึกษาในระยะหลังปี 1960 พบว่ากลไกการต้านทานแรงเฉือนประกอบด้วยองค์ประกอบหลายประการ เมื่อโมเมนต์ดัด และแรงเฉือนในช่วงการเฉือนเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงภายนอกจนเกิดกำลังการแตกร้าวของคอนกรีตจะเริ่มเกิดรอยแตกร้าวได้คานเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และเบนออกเป็นรอยร้าวทแยงมุม จนกระทั่งเคลื่อนตัวไปถึงส่วนที่รับแรงอัด ซึ่งจากการวิบัติเนื่องจากแรงดัด และแรงเฉือนร่วมกันทั้งสองกรณี เพื่อป้องกันการวิบัติ ที่จะเกิดขึ้นต้องอาศัยค่าความสามารถของคอนกรีต และเหล็กเสริมในการต้านทานการวิบัติตามมาตรฐาน ACI ดังสมการที่ 5

$$V_n = V_c + V_s \quad (5)$$

เมื่อ V_n = กำลังรับแรงเฉือนของคานตาม ACI

V_c = กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต

V_s = กำลังรับแรงเฉือนของเหล็ก

2.1 วิบัติแบบคาน (Beam-type failure)

ในการวิบัติแบบคาน (Beam-type failure) ได้ค้นพบจากการศึกษาของ Some and Corley, and Hanson (1969) ซึ่งไม่มีผลกระทบน้ำหนักกระทำแบบเป็นจุด (Concentrated Load) เข้ามาเกี่ยวข้องกับบริเวณช่องเปิด คานจะมีการวิบัติ เกิดขึ้น 45° และลักษณะการวิบัติ มีรอยร้าวเข้าสู่ศูนย์กลางของวงกลม ดังภาพที่ 3 ซึ่งกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต (V_c) ที่รับได้เมื่อมีช่องเปิดแสดงดังสมการที่ 6

$$V_c = 0.53\sqrt{f'_c}b(d_v - d_0) \quad (6)$$

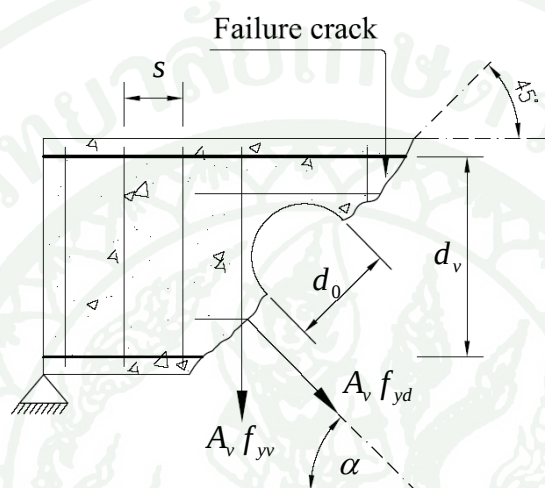
เมื่อ d_0 = ขนาดของช่องเปิด (cm.)

d_v = ความลึกของประสิทธิภาพของคาน (cm.)

f'_c = กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (ksc.)

b = ความกว้างของคาน (cm.)

หลังจากการตรวจสอบกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต (V_c) ลำดับต่อไปจะต้องเสริมเหล็กเพื่อป้องกันการแตกร้าวเนื่องจากแรงส่วนเกินที่กำลังคอนกรีตรับได้ กำลังรับแรงเฉือนของเหล็ก (V_s) ประกอบด้วยเหล็กเสริมในคั้ง (V_{sv}) รวมกับเหล็กเสริมในแนวเส้นทแยงมุม (V_{sd}) ดังแสดงในสมการที่ 7 และภาพที่ 3 ได้อธิบายรายละเอียดการเสริมเหล็กบริเวณช่องเปิดในการวิบัติแบบคาน (Beam-type failure)



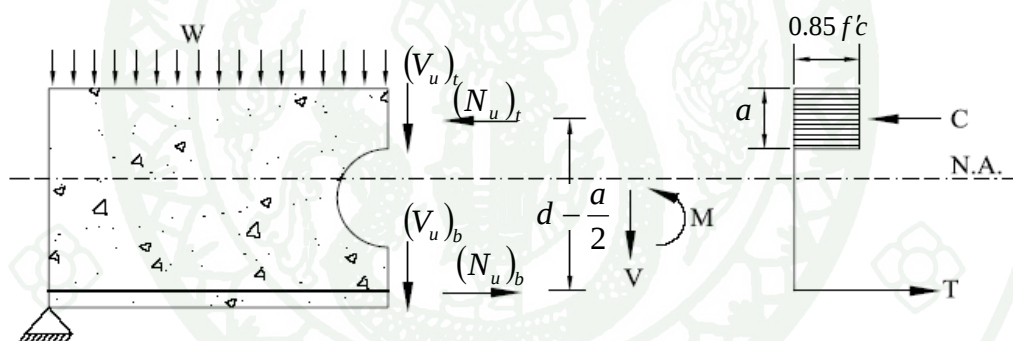
ภาพที่ 3 ลักษณะการวิบัติแบบคาน (Beam-type failure)

$$V_s = V_{sv} + V_{sd} = \frac{A_v f_{yv}}{s} (d_v - d_0) + A_d f_{yd} \sin \alpha \quad (7)$$

- เมื่อ
- A_v = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมในแนวคั้ง (cm^2 .)
 - f_{yv} = กำลังครากของเหล็กเสริมในแนวคั้ง (ksc.)
 - s = ระยะเรียงของเหล็กเสริมในแนวคั้ง (cm.)
 - d_v = ระยะระหว่างเหล็กเสริมตามยาวตั้งแต่ด้านบนถึงด้านล่าง (cm.)
 - d_0 = ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเปิด (cm.)
 - A_d = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมในแนวทแยง (cm^2 .)
 - f_{yd} = กำลังครากของเหล็กเสริมในแนวทแยง (ksc.)
 - α = มุมระหว่างเหล็กเสริมในแนวทแยง และรอยแตกร้าว

2.2 การวิบัติแบบโครงข้อแข็ง (Frame-type failure)

การวิบัติแบบโครงข้อแข็งเป็นการวิบัติด้วยการแตกร้าวแบบอิสระ ตามแนวทแยงมุม (Diagonal cracks) มีรอยร้าวไม่เข้าสู่ศูนย์กลางของวงกลมดังภาพ 2(b) จากพฤติกรรมคานจะมีความอิสระของส่วนบน และส่วนล่าง คล้ายกับโครงข้อแข็งซึ่งในการออกแบบพฤติกรรมการวิบัติของคานต้องพิจารณาแผนภาพส่วนอิสระ (Free body diagram) ของคานดังแสดงในภาพที่ 4 เมื่อคานอย่างง่ายมีน้ำหนักบรรทุกกระทำสม่ำเสมอจะสามารถกระจายความเค้นในหน้าตัดคานในชั้นส่วนบนรับแรงอัด และชั้นส่วนล่างรับแรงดึง การออกแบบโดยวิธีกำลังคานจะเริ่มแตกร้าวเมื่อมีความเครียดประมาณ 0.003 หรือ 0.0035 (แล้วแต่มาตรฐานกำหนด) โดยทั่วไปการกระจายความเค้นบนหน้าตัดคอนกรีตขององค์อาคารเป็นพาราโบลา หากไม่พิจารณาส่วนที่เป็นความเค้นดึง ส่วนที่เป็นการกระจายความเค้นอัดอาจประมาณเทียบเท่ากับพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่มีความเข้มหรือ กว้าง $0.85 f'_c$ (ACI10.2.7.1) เท่ากันแต่มีความลึกแตกต่างกัน $a = \beta_1 c$ (ACI10.2.7.1; Whitney, 1942)



ภาพที่ 4 การกระจายความเค้นในหน้าตัดคานการวิบัติแบบโครงข้อแข็ง (Frame-type failure)

$$(N_u)_t = \frac{M_u}{(d - \frac{a}{2})} = -(N_u)_b \quad (8)$$

- เมื่อ
- $(N_u)_t$ = แรงอัดตามแนวแกนของชั้นส่วนบน
 - $(N_u)_b$ = แรงดึงตามแนวแกนของชั้นส่วนล่าง
 - M_u = โมเมนต์ดัดประลัยที่กึ่งกลางของช่องเปิด
 - d = ความลึกของประสิทธิภาพของคาน

- a = ค่าที่น้อยกว่าระหว่างความลึกเทียบเท่าของการกระจายความเค้นอัดในรูปสี่เหลี่ยม ($a = \beta_1 \cdot c$)
- β_1 = สัดส่วนของความลึกเทียบเท่าของการกระจายความเค้นอัดในรูปสี่เหลี่ยมต่อระยะจากผิวนอก ของความเค้นอัดถึงแนวแกนสะเทิน
- c = ระยะจากผิวนอก ของความเค้นอัดถึงแนวแกนสะเทิน

กำลังรับแรงเฉือนประลัยของคานาวิบัติแบบโครงข้อแข็ง (Frame-type failure) จะพิจารณา กำลังการรับแรงของส่วนที่อยู่เหนือ และได้ช่องเปิดซึ่งได้จากการกระจายแรงเฉือนประลัยเข้าสู่ชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่าง

Nasser *et al.* (1967) ได้เสนอสัดส่วนการกระจายแรงเฉือนเข้าสู่สองชิ้นส่วนบริเวณช่องเปิด ขึ้นกับสัดส่วนของพื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วน ดังสมการที่ 9 และ 10

$$(V_u)_t = V_m \left[\frac{A_t}{A_t + A_b} \right] \quad (9)$$

$$(V_u)_b = V_u - (V_u)_t \quad (10)$$

เมื่อ

$(V_u)_t$ = แรงเฉือนที่กระจายเข้าสู่ชิ้นส่วนบน

$(V_u)_b$ = แรงเฉือนที่กระจายเข้าสู่ชิ้นส่วนล่าง

V_m = แรงเฉือนที่กึ่งกลางช่องเปิด

A_t = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนบนบริเวณกึ่งกลางช่องเปิด

A_b = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนล่างบริเวณกึ่งกลางช่องเปิด

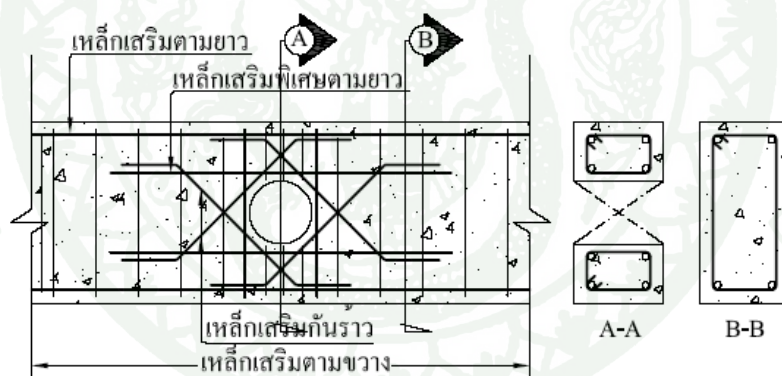
ต่อมา Barney *et al.* (1977) ได้เสนอสัดส่วนการกระจายแรงเฉือนเข้าสู่สองชิ้นส่วนบริเวณช่องเปิด ขึ้นกับสัดส่วนของสติฟเนสการดัด (Flexural Stiffness) ดังสมการที่ 11 และ 12

$$(V_u)_t = V_m \left[\frac{I_{gt}}{I_{gt} + I_{gb}} \right] \quad (11)$$

$$(V_u)_t = V_m \left[\frac{I_{gb}}{I_{gt} + I_{gb}} \right] \quad (12)$$

เมื่อ I_{gt} = โมเมนต์ดัดความเฉื่อยของชิ้นส่วนบน
 I_{gb} = โมเมนต์ดัดความเฉื่อยของชิ้นส่วนล่าง
 V_m = แรงเฉือนที่กึ่งกลางช่องเปิด

จากภาพรวมได้มีการศึกษาทำให้ทราบพฤติกรรมคานที่มีช่องเปิดขนาดเล็กซึ่งสิ่งที่สำคัญอันดับแรกควรเป็นการตรวจสอบขนาดของช่องเปิดไม่ให้เกินร้อยละ 40 ของความลึกคาน จากนั้นต้องตรวจสอบตำแหน่งช่องเปิดไม่ให้รบกวนพื้นที่รับแรงอัด และหากกรณีอยู่ใกล้จุดรองรับควรวางให้อยู่ในบริเวณหน้าตัดวิกฤตเพื่อความสะดวกเปรียบเทียบพฤติกรรม แต่สิ่งที่ยังน่ากังวลจะเป็นเรื่องการแอ่นตัวซึ่งหากคานมีช่องเปิดขนาดใหญ่ จะส่งผลให้ค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดลดลง ซึ่งรายละเอียดการเสริมเหล็กช่องเปิดขนาดเล็กแสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 รายละเอียดการเสริมเหล็กคานคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาดเล็ก

พฤติกรรมคานคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่

1. การวิเคราะห์คานคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่

ช่องเปิดขนาดใหญ่จะมีการพิจารณาคล้ายช่องเปิดขนาดเล็ก ซึ่งหากช่องเปิดขนาดใหญ่อยู่ตำแหน่งที่มีอิทธิพลของโมเมนต์เพียงอย่างเดียว ต้องพิจารณา ความลึกของชิ้นส่วนที่รับแรงอัดไม่น้อยกว่าหรือมีค่าเท่ากับความลึกของค่าความเค้นอัดที่สภาวะประลัย (Ultimate compressive

stress block) และหากโครงสร้างมีการวิบัติแบบไม่มั่นคง (instability failure) ในบริเวณชิ้นส่วนที่รับแรงอัดให้ตรวจสอบอัตราส่วนความชะลูดเพื่อจำกัดความยาวของชิ้นส่วนที่รับแรงอัด (Mansur and tan,1999)

ลักษณะพฤติกรรมการวิบัติภายใต้แรงดัด และแรงเฉือน จะเกิดรอยร้าวรอบช่องเปิด ลักษณะการแตกร้าวจะพบมากบริเวณจุดต่อ เนื่องจากการส่งถ่ายแรงของความเค้นที่เหมือนคอคอด บริเวณชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่าง คล้ายชิ้นส่วนวีเรนดีล (Vierendeel panel) เป็นโครงข้อแข็ง ประกอบขึ้นจากชิ้นส่วนยึดต่อกับข้อที่แข็งแรงระหว่างชิ้นส่วนลูกตั้งกับชิ้นส่วนหลักบน ชิ้นส่วนวีเรนดีล ไม่ใช่โครงถักจริงๆ เนื่องจากชิ้นส่วนประกอบ และข้อต่อต้องรับแรงดัด ซึ่งไม่ได้เป็นแรงในแนวแกนเท่านั้น (เนื่องจากไม่ใช่ชิ้นส่วนประกอบกันเป็นสามเหลี่ยม) และมีพฤติกรรมที่วัตถุไม่สามารถต้านทานค่าความเค้นได้อีกต่อไป โดยจะแสดงออกในรูปของการแตกร้าว และจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อย่างต่อเนื่อง จนเกิดจากการเสียรูปแบบพลาสติก เนื่องจากวัสดุนั้นรับแรงที่มากกว่ากำลังคราก และเป็นสาเหตุของการเสียรูปอย่างถาวรจนกระทั่งพังเสียหายในที่สุด แสดงในภาพที่ 6 ซึ่งจะปรากฏการวิบัติที่ข้อต่อของชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่างทั้ง 4 จุด

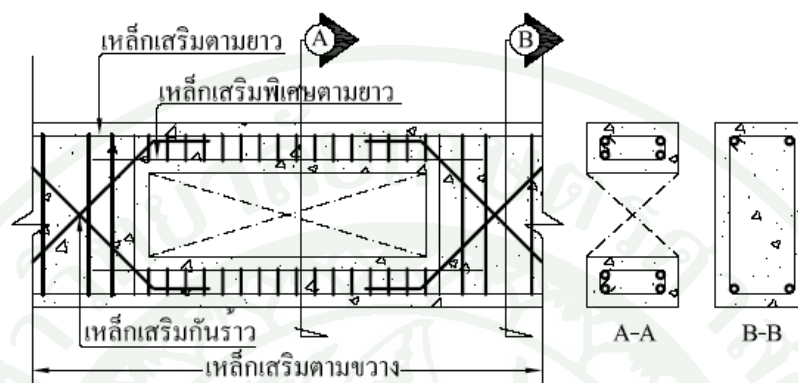


ภาพที่ 6 การวิบัติภายใต้แรงดัด และแรงเฉือน

ที่มา: Mansur (2006)

หากช่องเปิดขนาดใหญ่อยู่ตำแหน่งใกล้จุดรองรับ และมีอิทธิพลของแรงเฉือนจะเกิดการแตกร้าวเนื่องจากคอนกรีตไม่สามารถรับแรงดัดได้ ดังนั้นต้องมีการเสริมเหล็กกรอบช่องเปิดให้เพียงพอเพื่อป้องกันการวิบัติเนื่องจากการแตกร้าวของคอนกรีต (Siao and Yap, 1990) ซึ่งจากการพิจารณาเหล็กเสริมเพื่อรับแรงเฉือนแสดงในภาพที่ 7 พบว่าจะต้องมีการเสริมเหล็กทั้งทางขวางและทางดิ่ง พร้อมทั้งเสริมเหล็กพิเศษตามยาว เพื่อให้รับโมเมนต์ดัด ร่วมกับแรงอัด และแรงดัดได้

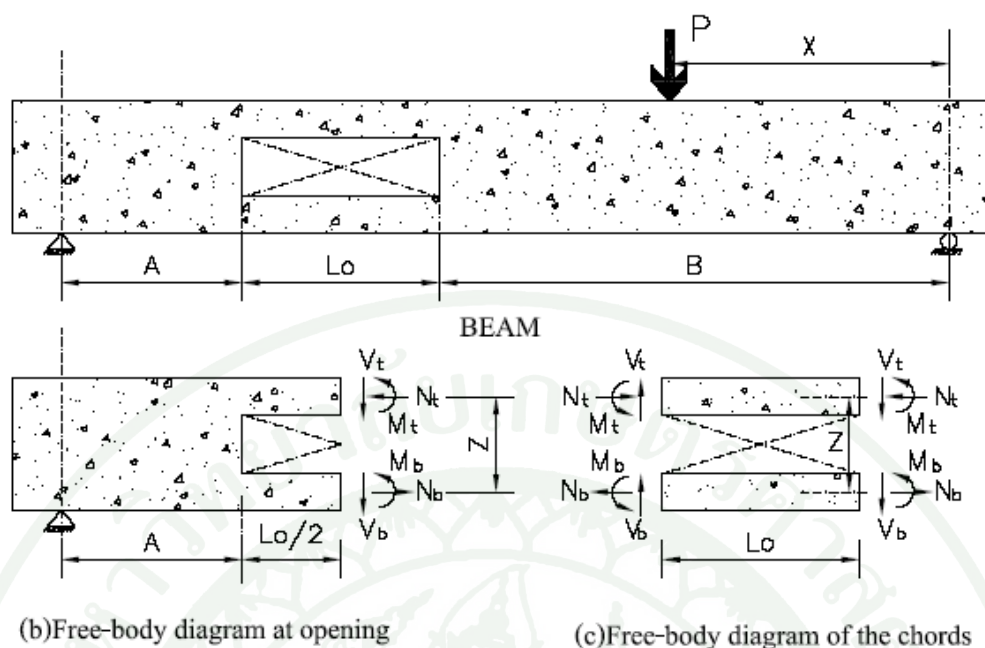
ที่สำคัญการเสริมเหล็กจะช่วยในเรื่องการส่งถ่ายค่าความเค้นได้มากขึ้นเนื่องจากวัสดุมีความแข็งแรงขึ้น มีพื้นที่หน้าตัดเทียบเท่ามากขึ้น และส่งผลให้การแอ่นตัวของคานลดน้อยลงตามลำดับ



ภาพที่ 7 รายละเอียดการเสริมเหล็กกรอบช่องเปิดขนาดใหญ่

2. การวิเคราะห์กำลังในสถานะประลัยของช่องเปิดขนาดใหญ่

ในการวิเคราะห์กำลังในสถานะประลัยของช่องเปิดขนาดใหญ่ จากการทดสอบได้สังเกตพบว่า รูปแบบที่สิ้นสุดการวิบัติของคานทำให้เกิดการทํานายพฤติกรรมในช่วง กำลังประลัยของคานได้ (Mansur *et al.*, 1984) ซึ่งเป็นพื้นฐานของ การวิเคราะห์ภาวะน้ำหนักบรรทุกวิบัติอย่างสมบูรณ์ (collapse load) ซึ่งหน้าตัดโครงสร้างที่วิบัติจะอยู่ในสถานะพลาสติก หรือหน่วยแรงถึงจุดคราก (Yield) ทั้งหน้าตัด การวิเคราะห์นี้ใช้กับวัสดุที่มีความเหนียว แต่ก่อนอื่นจะต้องมีความเข้าใจในเรื่อง ความสมดุล (Equilibrium), ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดกับแรงดัด (Interaction curve) และ กลไกการวิบัติ (Collapse Mechanism) ซึ่งในที่นี้จะอธิบายถึงคานที่มีจุดรองรับอย่างง่าย และมีน้ำหนักบรรทุกที่กระทำแบบ 1 จุด ระยะห่าง x จากจุดรองรับ ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 คานที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ ภายใต้น้ำหนักบรรทุก (b)Free-body diagram at opening ,
(c) Free-body diagram of the chords

2.1 วิธีความสมดุล (Equilibrium)

วิธีความสมดุล (Equilibrium) เป็นวิธีที่ใช้พิจารณาแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบของโครงสร้าง แรงภายในที่เกิดขึ้นย่อมมีความสมดุลเสมอ จากรูปที่ 8 แผนภาพอิสระ (free-body diagram) มีน้ำหนักบรรทุกกระทำเป็นจุด ซึ่งลักษณะคานเป็นช่องเปิดขนาดใหญ่ มีจุดรองรับแบบง่าย บริเวณด้านล่างของคานจะเกิดแรงดึง และด้านบนจะเกิดแรงอัด ซึ่งตำแหน่งบริเวณรอบๆ ช่องเปิดจะมีพฤติกรรมคล้ายจุดคั่นกลับบริเวณจุดกึ่งกลางของช่องเปิดระหว่างชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่าง ดังภาพที่ 8(b) และ 8(c) ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า แรงตามแกนได้แก่ N_t และ N_b โมเมนต์ดัดได้แก่ M_t และ M_b แรงเฉือนได้แก่ V_t และ V_b ตัวแปร 6 ค่า ที่กล่าวมานี้สามารถเขียนเป็นสมการสมดุลได้ ดังสมการที่ 13, 14 และ 15

$$M_t + M_b + Nz = M_m \quad (13)$$

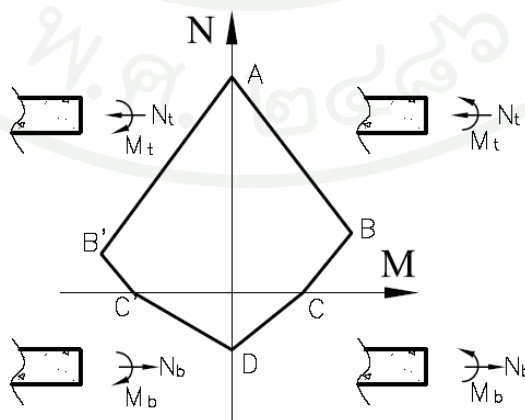
$$N_t + N_b = 0 \quad (14)$$

$$V_t + V_b = V_m \quad (15)$$

ซึ่ง M_m และ V_m เป็น โมเมนต์ และแรงเฉือนเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกบริเวณกึ่งกลางช่องเปิด จากสมการที่ 13, 14 และ 15 มีตัวแปรที่ไม่ทราบค่า 6 ตัวแปร แต่มีเพียง 3 สมการทำให้ติดตัวแปรที่หาค่าไม่ได้ 3 ตัวแปร ดังนั้นจึงต้องอาศัยวิธีความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดกับแรงดัด (Interaction curve) เพื่อนำมาแก้สมการดังกล่าวในการหาแรงภายในที่เกิดขึ้น

2.2 วิธีความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดกับแรงดัด (Interaction curve)

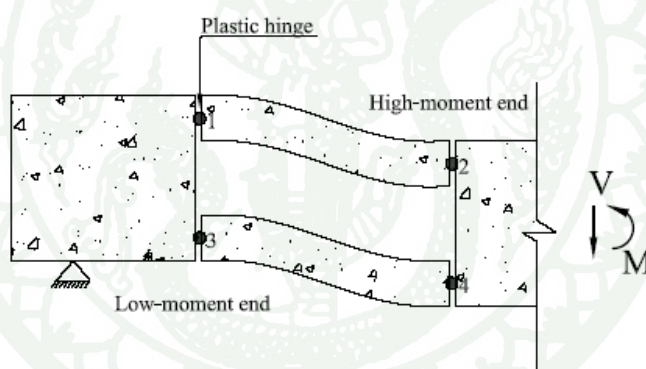
จากภาพที่ 8(b) และ 8(c) จะมีแรงตามแกน โมเมนต์ดัด และ แรงเฉือน กระทำที่ชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่าง ซึ่งสามารถเขียนวิธีความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดกับแรงดัด (Interaction curve) หากกำหนดให้ชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่างสามารถรับแรงเฉือนได้อย่างเพียงพอ ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดกับแรงดัด (Interaction curve) จะแสดงค่าระหว่าง แรงตามแกน (N) และโมเมนต์ดัด (M) ดังภาพที่ 9 สำหรับชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่างสามารถพิจารณาล้ำแรงเยื้องศูนย์ ซึ่งมีทั้งแรงดึง และแรงอัดเกิดขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดกับแรงดัด (Interaction curve) จากแผนภาพสามารถอธิบายได้ว่า ชิ้นส่วนบนจะรับโมเมนต์ดัดร่วมกับแรงอัด พิกัด ABC จะเกิดโมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกาพร้อมกับแรงอัด จุด B เป็นจุดสถานะแรงกระทำพอดี (Balanced loading) พิกัด AB'C' จะเกิดโมเมนต์ตามเข็มนาฬิกา ร่วมกับแรงอัด จุด B' เป็นจุดสถานะแรงกระทำพอดี (Balanced loading) ทำให้พฤติกรรมชิ้นส่วนบนคล้ายพฤติกรรมของเสา หากช่องเปิดมีความยาวมากเกินไปก็จะต้องทำการวิเคราะห์หาความชะลูดต่อไป ชิ้นส่วนล่างจะเกิดแรงดึง ร่วมกับโมเมนต์ดัดพิกัด CD จะเกิดโมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกาพร้อมกับแรงดึง และพิกัด CD จะเกิดโมเมนต์ตามเข็มนาฬิกาพร้อมกับแรงดึง ซึ่งชิ้นส่วนล่างจะต้องวิเคราะห์ความเหนียวให้เพียงพอไม่ให้เหล็กเสริมน้อยหรือมากเกินไป



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับแรงดัด

2.3 วิธีการการวิบัติอย่างสมบูรณ์ (Collapse Mechanism)

วิธีการการวิบัติ (Collapse Mechanism) คือรูปแบบที่โครงสร้างอยู่ในสภาพวิบัติอย่างสมบูรณ์ หรือโครงสร้างอยู่ในภาวะที่ขาดเสถียรภาพ (Unstable) วิธีการเกิดกลไกการวิบัติจะพิจารณาดำแหน่งที่โครงสร้างมีโอกาสเกิดจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) และทำให้โครงสร้างวิบัติ (Collapse) ในทุกรูปแบบเท่าที่จะเป็นไปได้ แล้วพิจารณาว่ารูปแบบใดต้องใช้แรงน้อยที่สุด รูปแบบนี้คือรูปแบบการวิบัติที่แท้จริง ในโครงสร้างประเภทอินดีเทอมีเนท ที่สร้างจากวัสดุเหนียว เช่น เหล็กการวิบัติของหน้าตัดเพียงตำแหน่งเดียวอาจไม่ทำให้เกิดความวิบัติของโครงสร้าง จากการทดสอบที่สอดคล้องกันพบว่าบริเวณช่องเปิดขนาดใหญ่ จะประกอบด้วยจุดหมุน 4 จุด โดย Mansur *et al.* 1992 ได้เสนอให้พิจารณาลักษณะการพังทลายบริเวณช่องเปิดมีพฤติกรรมเสมือนเป็นจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) หน้าตัดที่หน่วยแรงถึงจุดครากตลอดหน้าตัดไม่สามารถรับแรงดัดเพิ่มได้อีก มีพฤติกรรมคล้ายจุดต่อหมุน (hinge) ดังแสดงในภาพที่ 10



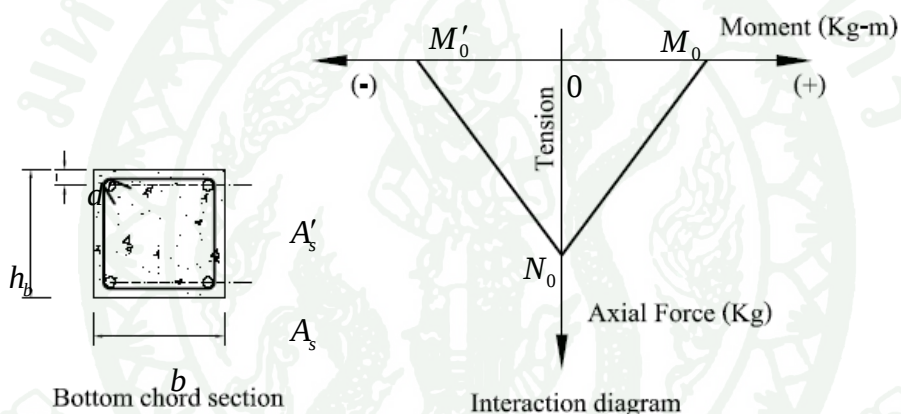
ภาพที่ 10 พฤติกรรมเสมือนเป็นจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) ของช่องเปิดขนาดใหญ่

3. การออกแบบคานคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่

โครงสร้างคานคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่พื้นฐานได้กล่าวมาพอสมควรซึ่งได้แก่วิธีความสมดุล (Equilibrium) วิธีความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับแรงดัด (Interaction curve) และวิธีการการวิบัติ (Collapse Mechanism) ซึ่งล้วนแต่เป็นการออกแบบเพื่อความแข็งแรงเท่านั้น การตรวจสอบการแอ่นตัวก็สิ่งที่สำคัญ เนื่องจากการคาดเดาพฤติกรรมของโมเมนต์อินเนอร์เซียที่หายไปจากช่องเปิด และจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) ในการออกแบบควรมีการตรวจสอบ แรงที่สภาวะประลัย และหน่วยแรงใช้งานเพื่อตรวจสอบการแอ่นตัวซึ่งโดยทั่วไปจะมี

การเปรียบเทียบกับค่าที่ยอมรับให้ และทำการควบคุมรอยร้าวด้วยการเสริมเหล็กเพิ่มที่มุมของช่องเปิดขนาดใหญ่ ซึ่งขั้นตอนการออกแบบ และคำนวณออกแบบดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณแรงดึงที่ขึ้นส่วนล่าง $(N_u)_b$ เกิดบนขึ้นส่วนล่างที่มีพฤติกรรมรับแรงดึงร่วมกับแรงดัด ซึ่งวิธีการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับแรงดัด (Interaction curve) จะมีค่าตามความสามารถของหน้าตัดขึ้นส่วนล่าง (Bottom chord section) มีความหมายว่า พื้นที่หน้าตัด และเหล็กเสริมที่มากขึ้น สามารถเพิ่มความแข็งแรงมากขึ้น ค่า N_0 คือ ค่าแรงดึงสูงสุด, M_0 คือ โมเมนต์ดัดสูงสุด ทิศทางเข้มนาฬิกา, M'_0 คือ โมเมนต์ดัดสูงสุด ทิศทางเข้มนาฬิกา สามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 11 และการคำนวณหาค่าแรงดึงที่ขึ้นส่วนล่าง $(N_u)_b$ สามารถทำได้ดังสมการที่ 16-19



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึง และโมเมนต์ดัดในขึ้นส่วนรับแรงดึง

$$(N_u)_b = \left[\frac{2M_M - (M'_0)_b - (M_0)_b}{2Z - [(M'_0)_b + (M_0)_b] / (N_0)_b} \right] \quad (16)$$

$$Z = \left[\frac{h_t + h_b}{2} \right] + d_0 + (0.5 - \alpha_a) \gamma_b h_b \quad (17)$$

$$\alpha_a = \left[\frac{A'_s}{A_s + A'_s} \right] \quad (18)$$

$$\gamma_b = \left[\frac{h_b - 2(C_c) - 0.5(\phi_s + \phi'_s)}{h_b} \right] \quad (19)$$

เมื่อ $(M'_0)_b$ มีเครื่องหมายเป็นลบและ $(M_0)_b$ มีเครื่องหมายเป็นบวก

ขั้นตอนที่ 2 เมื่อได้แรงดึงที่ขึ้นส่วนล่าง $(N_u)_b$ ขั้นตอนต่อไปจะใช้ วิธีความสมดุล (Equilibrium) ในการเทียบเท่าแรงที่เกิดขึ้นเพื่อหาค่าโมเมนต์ดัดประลัยที่ขึ้นส่วนล่าง $(M_u)_b$ และ $(M_u')_b$ ที่เกิดขึ้น ดังสมการที่ 20 และ 21

$$(M_u)_b = (M_u)_{b,4} = [(N_0)_b - (N_u)_b] \times \left[\frac{(M_0)_b}{(N_0)_b} \right] \quad (20)$$

$$(M_u')_b = (M_u)_{b,3} = [(N_0)_b - (N_u)_b] \times \left[\frac{(M_o')_b}{(N_0)_b} \right] \quad (21)$$

ขั้นตอนที่ 3 ค่าโมเมนต์ดัดประลัยที่ขึ้นส่วนล่าง $(M_u)_b$ และ $(M_u')_b$ ก็สามารถคำนวณแรงเฉือนที่กระจายในขึ้นส่วนล่าง $(V_u)_b$ และบน $(V_u)_t$ ของช่องเปิดได้ดังสมการที่ 22 และ 23

$$(V_u)_b = \left[\frac{(M_u)_{b,4} - (M_u)_{b,3}}{I_0} \right] \quad (22)$$

$$(V_u)_t = V_m - (V_u)_b \quad (23)$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณแรงภายในของขึ้นส่วนบนเหนือช่องเปิดดังสมการที่ 24

$$(N_u)_t = -(N_u)_b \quad (24)$$

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณโมเมนต์ดัดที่ปลายจุดหมุนซึ่งการพิจารณาขึ้นส่วนบนที่รับแรงอัดร่วมกับโมเมนต์ดัด เมื่อ $(M_u)_{t,2}$ คือ ค่าโมเมนต์ดัดประลัยทวนเข็มนาฬิกาที่ขึ้นส่วนบนซึ่งจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับ $(M_u)_{t,1}$ ซึ่งจะกำหนดให้มีลักษณะการเสริมเหล็กที่สมมาตรเสมอแสดงดังสมการที่ 25

$$(M_u)_{t,2} = \left[\frac{(V_u)_t I_0}{2} \right] = -(M_u)_{t,1} \quad (25)$$

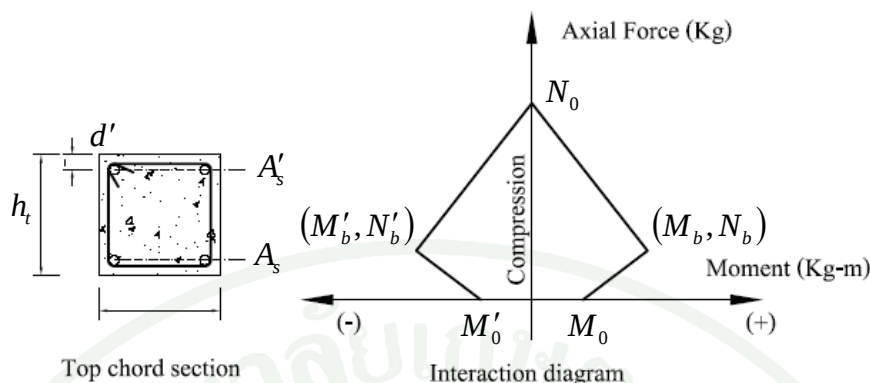
ขั้นตอนที่ 6 คำนวณปริมาณเหล็กเสริมตามยาวในขึ้นส่วนบนรับแรงอัดร่วมกับโมเมนต์ดัดเสมือนเสา หากทำการวิเคราะห์เป็นเสายาว (Long column) คือเสาที่มีมิติของหน้าตัด (กว้าง หรือ ยาว) น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับความสูง ในทางปฏิบัติจะเปรียบเทียบหรือแสดงโดยใช้อัตราส่วนความชะลูด (Slenderness ratio, l_u / r) โดยที่ r คือรัศมีไจเรชัน (Radius of gyration) ยิ่งเสามีความ

จะลุดมากขึ้น กำลังของเสามีแนวโน้มลดลง ซึ่งหากเสามีจุดยึดหมุน(Hinged) ที่ปลายทั้งสองข้าง ด้านทานแรงตามแกน ซึ่งมีระยะเยื้องศูนย์ จะเกิดการโก่งเดาะชนิดโค้งเดียว (Single curvature buckling) ที่เกิดเนื่องจากอิทธิพลของระยะเยื้องศูนย์ และระยะโก่งตัวมากที่สุดที่กึ่งกลางคาน ในกรณี เสามีความชะลุดมากๆ ระยะโก่งตัวจะเพิ่มขึ้น เมื่อแรงตามแกนลดลง ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ คัด และแรงตามแกนจึงเป็นเส้น โค้ง การวิบัติของเสาอาจเกิดจากกำลังของวัสดุ ไม่สามารถต้านทานแรงภายนอก (Material failure) หรือเนื่องจากเสาสถูญเสถียรภาพ (Instability failure) ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงพฤติกรรมของความชะลุดซึ่งพฤติกรรมการโก่งเดาะที่คาดเดาได้ยาก เมื่อชิ้นส่วนเชื่อมต่อภายในคาน Tan (1982) ได้เสนอให้พิจารณาเป็นกรณีของเสาที่ไม่พิจารณาผล ของความชะลุด (Slenderness ratio) โดยมาตรฐาน ACI 318-99 กำหนดสัดส่วนดังนี้ และสามารถ อธิบายการออกแบบชิ้นส่วนรับแรงอัดร่วมกับโมเมนต์คัต ดังสมการที่ 26

$$\frac{Kl_u}{r} < 22 \quad (26)$$

โดยที่ k = ตัวประกอบความยาวประสิทธิผลของชิ้นส่วนรับแรงอัด
 l_u = ความยาวของชิ้นส่วนรับแรงอัด
 r = รัศมีไจเรชัน (Radius of gyration)

ปริมาณเหล็กเสริมตามยาวในชิ้นส่วนรับแรงอัดร่วมกับโมเมนต์คัตสามารถอธิบายได้ ดังภาพที่ 12 เมื่อ N_0 คือแรงอัดสูงสุด, M_0 คือโมเมนต์คัตสูงสุด ทวนเข็มนาฬิกา, M'_0 คือโมเมนต์ คัตสูงสุด ตามเข็มนาฬิกา, (M_b, N_b) และ (M'_b, N'_b) จุดสภาวะแรงกระทำพอดี (Balanced loading) หากพิกัดโมเมนต์คัต และแรงตามแกนตกอยู่เหนือเส้นสภาวะแรงกระทำพอดี (Balanced loading) การคำนวณออกแบบจะพิจารณาแรงอัดเป็นหลัก (Compression control) หากพิกัดโมเมนต์คัต และ แรงตามแกนตกอยู่ใต้เส้นสภาวะแรงกระทำพอดี (Balanced loading) การคำนวณออกแบบกำลัง ของหน้าตัดเสาโดยพิจารณาแรงดึงเป็นหลัก (Tension control) หรือเสาจะวิบัติภายใต้แรงดึงเป็น หลัก และหากพิกัดโมเมนต์คัต และแรงตามแกนตกอยู่ตรงเส้นสภาวะแรงกระทำพอดี(Balanced loading) เสาจะวิบัติเนื่องจากแรงดึง และแรงอัดพร้อม ๆ กัน



ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัด และโมเมนต์คดในชิ้นส่วนรับแรงอัด

3.1 การออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือนบริเวณชิ้นส่วนรอบช่องเปิด

แรงเฉือน (Shear) ซึ่งเป็นหน่วยแรงภายในของค้ำอาคาร เกิดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกหรือแรงภายนอก แรงเฉือนอาจจะอยู่ในแนวนอน (Horizontal shear) หรือตามแนวตั้ง (Vertical shear) แรงเฉือนทำให้ค้ำอาคารมีแนวโน้มที่จะขาดออกจากกันตามทิศทางที่ขนานกับแรงนั้น หากมีแรงเฉือนทั้งแนวนอน และแนวตั้งเกิดร่วมกัน จะเกิดแรงดึงลัพธ์ ในแนวทแยง (Diagonal tension) การออกแบบเหล็กเสริมตามขวางบริเวณรอบช่องเปิด พิจารณาส่วนของแรงเฉือนที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนรอบช่องเปิดเมื่อมีแรงตามแกนกระทำ โดย Mansur and Tan(1999) แสดงดังสมการที่ 27 และ 28

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณกำลังรับแรงเฉือน เมื่อมีแรงดึงเกิดขึ้นในชิ้นส่วน

$$\phi V_c = \phi 0.17 \left[1 + 0.29 \frac{N_u}{bd} \right] \sqrt{f'_c} bd \quad (27)$$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณกำลังรับแรงเฉือน เมื่อมีแรงอัดเกิดขึ้นในชิ้นส่วน

$$\phi V_c = \phi 0.17 \left[1 + 0.073 \frac{N_u}{bd} \right] \sqrt{f'_c} bd \quad (28)$$

เมื่อ	V_c	= แรงเฉือนคอนกรีต
	ϕ	= ค่าส่วนลดแรงเฉือน ใช้ค่า 0.85
	N_u	= แรงดึงประลัย
	b	= ความกว้างของหน้าตัด
	d	= ความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัด
	f'_c	= กำลังอัดของคอนกรีต

ขั้นตอนที่ 3 กำลังรับแรงเฉือนในเหล็กเสริมในกรณีที่เกิดแรงเฉือนส่วนเกินในคอนกรีตตามทฤษฎี จะใช้คอนกรีตรับแรงเฉือน แต่หากไม่พอจะต้องใช้เหล็กเสริมช่วยในการรับแรงเฉือนซึ่งกลไกด้าน และถ่ายเทแรงเฉือนในองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัย ประกอบด้วย Dowel action เป็นกลไกเนื่องจากเหล็กเสริม ซึ่งพยายามต้านการตัดเฉพาะบริเวณ (Local bending) Aggregate interlocking เป็นกลไกที่จะถ่ายแรงผ่านบริเวณรอยแตกโดยอาศัยการยึดเกาะของผิวมวลรวม และ Uncracked portion เป็นกลไกด้านแรงเฉือนจากส่วนองค์อาคารภายใต้หน่วยแรงอัด ซึ่งยังมีได้แตกร้าว โดยทั่วไปปฏิกิริยาต้านแรงเฉือนจะเกิดขึ้นโดยลำดับแต่ไม่สามารถคาดคะเนนัยสำคัญของแต่ละกลไกได้อย่างชัดเจนซึ่งแสดงดังสมการที่ 29 และ 30

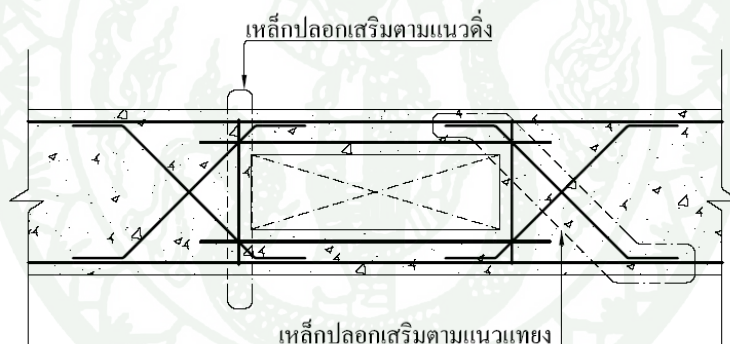
$$\phi V_s = V - \phi V_c \quad (29)$$

$$\phi V_s = \frac{A_v f_{yv} d}{s} \quad (30)$$

เมื่อ	V	= แรงเฉือนที่ออกแบบ
	V_c	= แรงเฉือนคอนกรีต
	V_s	= แรงเฉือนในเหล็กเสริม
	d	= ความลึกประสิทธิภาพของหน้าตัด
	s	= ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก
	A_v	= พื้นที่เหล็กปลอกเสริมตามแนวดิ่ง
	f_{yv}	= ความเค้นดึงครากของเหล็กปลอกเสริมตามแนวดิ่ง

3.2 การออกแบบเพื่อป้องกันการเกิดรอยแยกรอบช่องเปิด

โดยส่วนมากการวิบัติภายใต้แรงเฉือนจะเกิดขึ้นที่มุมของช่องเปิดเนื่องจากการส่งถ่ายความเค้นที่มีปริมาณมาก เข้าสู่ชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่าง ซึ่งรอยแตกเหล่านี้ส่งผลให้เกิดความเสียหายเบื้องต้นทำให้วัสดุอ่อนลง และส่งผลให้เกิดความเค้นมหาศาลระหว่างมวลรวมและ ซีเมนต์เฟลส์การปิดหุ้มตัวของคอนกรีตจะถูกควบคุมโดยความเค้นดึงที่เพิ่มขึ้นรวมถึงการเพิ่มขึ้นของขนาดของรอยแตกร้าว จนกระทั่งความเค้นดึงถึงจุดสูงสุด ดังนั้นจะต้องมีเหล็กเสริมพิเศษเพื่อป้องกันการเกิดรอยแยกแนวทแยงรอบช่องเปิดแบ่งเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นเหล็กปลอกเสริมตามแนวตั้งบริเวณปลายช่องเปิด และเหล็กเสริมตามแนวทแยงบริเวณมุมของช่องเปิด ดังภาพที่ 13 ซึ่ง Tan (1982) ได้แสดงความเห็นของการเสริมเหล็กตามแนวทแยง และเหล็กปลอกเสริมตามแนวตั้งบริเวณมุมของช่องเปิด ความเค้นที่มุมควรจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า และนำค่าแรงเฉือนประลัยไม่น้อยกว่ากึ่งหนึ่งมาพิจารณาซึ่งแสดงดังสมการที่ 30



ภาพที่ 13 เหล็กเสริมบริเวณรอบช่องเปิดขนาดใหญ่

ขั้นตอนที่ 1 หน้าตัดเหล็กปลอกเสริมตามแนวทแยง (A_d) พิจารณาจาก

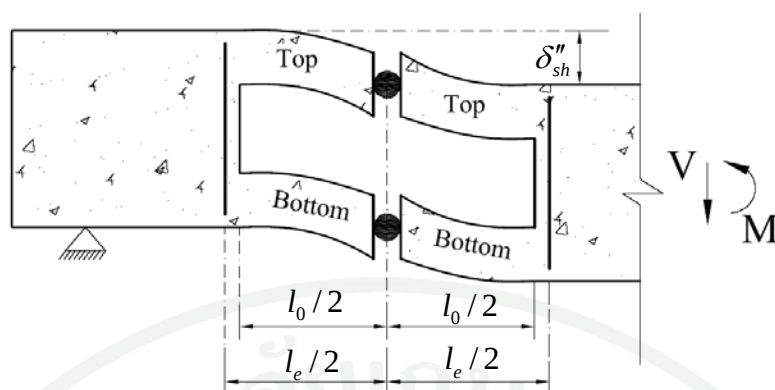
$$A_d = \frac{0.50(\eta V)}{\phi f_{yd} \sin \alpha} \quad (31)$$

- เมื่อ V = แรงเฉือนที่ออกแบบ
 η = Shear Concentration ใช้ค่า 2
 ϕ = ค่าส่วนลดแรงเฉือน ใช้ค่า 0.85

$$\begin{aligned}\alpha &= \text{มุมระหว่างเหล็กเสริมตามแนวทแยงเทียบกับแกนคาน} \\ f_{yd} &= \text{ความเค้นดึงที่ครากของเหล็กเสริมตามแนวทแยง} \\ f_{yv} &= \text{ความเค้นดึงที่ครากของเหล็กปลอกเสริมตามแนวดิ่ง}\end{aligned}$$

4. การวิเคราะห์การโก่งของคาน

การวิเคราะห์ค่าการโก่งตัวของคานคอนกรีตเกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และค่าการแอ่นตัว ในการคำนวณออกแบบวิศวกรส่วนมากมักจะเลยหรือหลีกเลี่ยงตรวจสอบ อาจเพราะเห็นว่าลำดับขั้นตอนมีความยุ่งยาก มาตรฐาน ACI กล่าวถึงเรื่องการโก่งตัวขององค์อาคาร คอนกรีตเสริมเหล็กโดยกำหนดความหนา หรือความลึกต่ำสุดขององค์อาคารกรณีไม่ตรวจสอบ องค์การโก่งตัวที่ได้จากผลวิเคราะห์โครงสร้าง การพิจารณาค่าการโก่งตัวมี 2 ลักษณะคือ การโก่งตัวทันที (Immediate deflection) หรือการโก่งตัวระยะสั้น และการโก่งตัวระยะยาว (Long term deflection) ACI 9.5.1 กำหนดหลักเกณฑ์เบื้องต้นว่า องค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก จะต้องออกแบบให้แข็งแรงเพียงพอ (Adequate stiffness) เพื่อจำกัดการโก่งตัว หรือการเปลี่ยนรูปร่างลดทอนกำลัง (Strength) หรืออายุการใช้งาน (Serviceability) ขององค์อาคาร การวิเคราะห์การโก่งตัวทันที (Immediate Deflection) สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้ เมื่อแรงกระทำมีค่าน้อยคานจะอยู่ในช่วงอีลาสติก และเมื่อน้ำหนักบรรทุกมีค่ามากขึ้น คานผ่านเข้าสู่ช่วงอนีลาสติก ซึ่งพฤติกรรมของคานประกอบด้วยช่วงก่อนเกิดการแตกร้าว ช่วงเหล็กเสริมก่อนถึงจุดคลาก และช่วงอนีลาสติก การวิเคราะห์การโก่งตัวแบบทันที (Immediate deflection) เมื่อน้ำหนักบรรทุกมีค่าสูงกว่าน้ำหนักบรรทุกที่จะแตกร้าว คานจะเกิดรอยร้าวกระจายอยู่ทั่วช่วงคาน เมื่อน้ำหนักบรรทุกมีค่ามากขึ้น รอยร้าวจะเคลื่อนตัวสูงขึ้น และกระจายไปสู่ช่วงที่มีแรงเฉือน (Shear span) บนหน้าตัดที่มีรอยร้าว แกนสะเทินจะกำหนดโดยการสมมูล และการแจกแจงความเครียดของหน้าตัดร้าวเปลี่ยนพื้นที่ (Cracked transformed section) ส่วนหน้าตัดที่อยู่ระหว่างรอยร้าว แกนสะเทินจะกำหนดโดยการสมมูล และการแจกแจงความเครียดของหน้าตัดไม่ร้าวเปลี่ยนพื้นที่ (Uncracked transformed section) และจะลดต่ำกว่าแกนสะเทินที่แตกร้าว การศึกษาคานที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่จะพิจารณาจุดกึ่งกลางช่องเปิดเปรียบเสมือนจุดหมุน (Hinges) ซึ่ง Barney, et al.(1977) ได้เสนอว่าค่าการแอ่นตัวของคานจะพิจารณาจากโมเมนต์คัต และแรงเฉือน แสดงดับภาพที่ 14 และจากวิธีพื้นที่ของความโค้ง สามารถหาค่าการแอ่นตัวเนื่องจากแรงเฉือน (δ'_{sh}) ดังสมการที่ 32 ค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางช่องเปิดมีค่าเท่ากับ $2\delta'_{sh}$

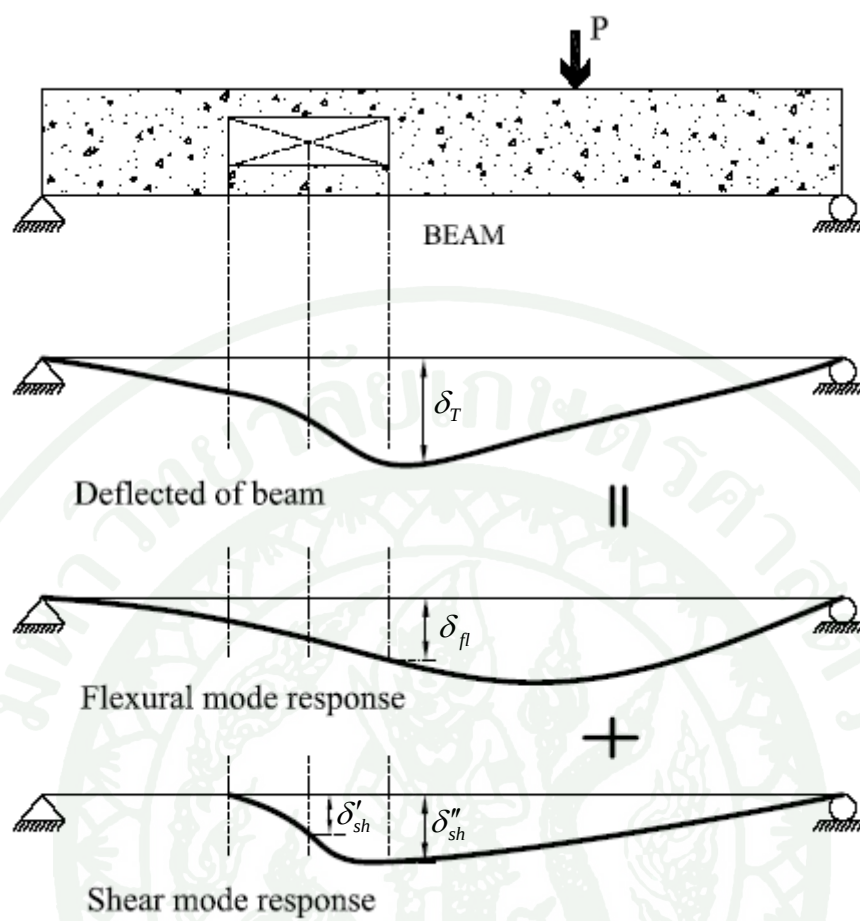


ภาพที่ 14 ลักษณะการแอ่นตัว และจุดคั่นกลับบริเวณกลางช่องเปิดเนื่องจากแรงเฉือน

$$\delta_{sh}'' = 2\delta_{sh}' = \frac{Vl_e^3}{12E_c(I_t + I_b)} \quad (33)$$

เมื่อ V = แรงเฉือนที่ออกแบบ
 l_e = ระยะระหว่างเหล็กปลอกในแนวตั้งรอบช่องเปิด
 E_c = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต
 I_t = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนบน
 I_b = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นส่วนล่าง

การคำนวณระยะแอ่นตัวที่กระทำในปัจจุบันมักจะเลยที่จะคิดระยะแอ่นตัวเนื่องจากแรงเฉือน ด้วยเหตุผลเนื่องจาก ผู้ออกแบบมักให้ความสำคัญกับกำลังในการต้านทานมากกว่า การตรวจสอบความเหมาะสมของสภาพใช้งาน และโดยการประเมินว่าคานส่วนใหญ่มีมิติอยู่ในช่วงที่เป็นคานคั่น (Slender beam) ซึ่งทำให้ระยะแอ่นตัวเนื่องจากแรงเฉือนมีปริมาณน้อยเทียบกับ ระยะแอ่นตัวเนื่องจากแรงคด รวมทั้งความยุ่งยากซับซ้อนของพฤติกรรมมารับแรงเฉือน แต่หากคานมีมิติเป็นคานลึก (Deep beam) หรือเมื่อเกิดรอยแตกทแยง (Diagonal cracking) บนเอนของคาน ปริมาณของระยะแอ่นตัวเนื่องจากแรงเฉือนจะมาก โดยที่มีอาจจะละเลยได้ Dilger(1966) ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญในการพิจารณาระยะแอ่นตัวเนื่องจากแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก หากเลยที่จะคำนวณระยะแอ่นตัวส่วนนี้จะทำให้ผลการคำนวณน้อยกว่าที่ควรจะเป็น ดังนั้นค่าการแอ่นตัวของคานที่พิจารณาจากโมเมนต์คด และแรงเฉือนสามารถแสดงดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ลักษณะการแอ่นของคานที่มีช่องเปิดเนื่องจากโมเมนต์ดัด และแรงเฉือน

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์
2. แผ่นโปรแกรมแอนซิส (ANSYS)

วิธีการ

การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ ภายใต้น้ำหนักกระทำเพิ่มแบบคงที่ สามารถทำการศึกษได้หลายแบบ ซึ่งวิธีสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นทางเลือกที่จะทำให้ประหยัดต้นทุนในการศึกษาพฤติกรรม และยังมีความถูกต้อง ซึ่งวิธีสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จำเป็นต้องเข้าใจหลักการเบื้องต้นก่อนเช่น ชนิดของอีลิเมนต์ที่บ่งบอกคุณสมบัติแตกต่างกัน หากสร้างแบบจำลองชนิด Solid Element จะต้องทำความเข้าใจถึงวิธีการแบ่งเอลิเมนต์ (Mesh) ที่แสดงอัตราส่วน ด้านกว้าง : ด้านยาว : ความลึก ซึ่งมีความสำคัญมากกับผลเฉลย เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) น้ำหนักบรรทุก และคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ภายใต้น้ำหนักกระทำเพิ่มแบบคงที่ ซึ่งแบบจำลองการแตกร้าวใช้แบบ Smeared crack และใช้คุณสมบัติของวัสดุแบบไร้เชิงเส้น (Nonlinearity)

การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ ในวิทยานิพนธ์ได้ศึกษาพฤติกรรมคาน 3 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 การเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด กรณีที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความลึกของช่องเปิด และกรณีที่ 3 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของช่องเปิดซึ่งอันดับแรก กำหนดขนาด และรายละเอียดการเสริมเหล็กคานคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ พร้อมรายละเอียดคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในคานคอนกรีต จากนั้นทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ และ 1 มิติ กำหนดชนิดของเอลิเมนต์ รูปแบบการแตกร้าว สภาวะขอบเขตของจตุรรองรับ และประเภทของน้ำหนักบรรทุก ตามความเหมาะสมของแบบจำลอง แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบพฤติกรรม น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว

1. คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ 3 มิติ

ขนาด และรายละเอียดการเสริมเหล็กคานคอนกรีตจะใช้อ้างอิงจากบทความที่มีผลการทดสอบ และข้อมูลของคานที่เพียงพอ สำหรับการสร้างแบบจำลองในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเปรียบเทียบ และอ้างอิงกับงานวิจัยของ Tan(1982) แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งจะพิจารณาคาน R_2 มีขนาดช่องเปิด ความกว้าง 60 ซม. ความลึก 18 ซม.แสดงดังภาพที่ 16, 17 และ 18 คานทั้ง 3 กรณีจะมีขนาดความกว้าง 20 ซม.ความลึก 40 ซม.และความยาว 330 ซม.ตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบ 1 จุด ห่างจากขอบคานด้านที่ไม่มีช่องเปิด 100 ซม. มีค่าคงที่ทุกการเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด

ตารางที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของคานทดสอบที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่

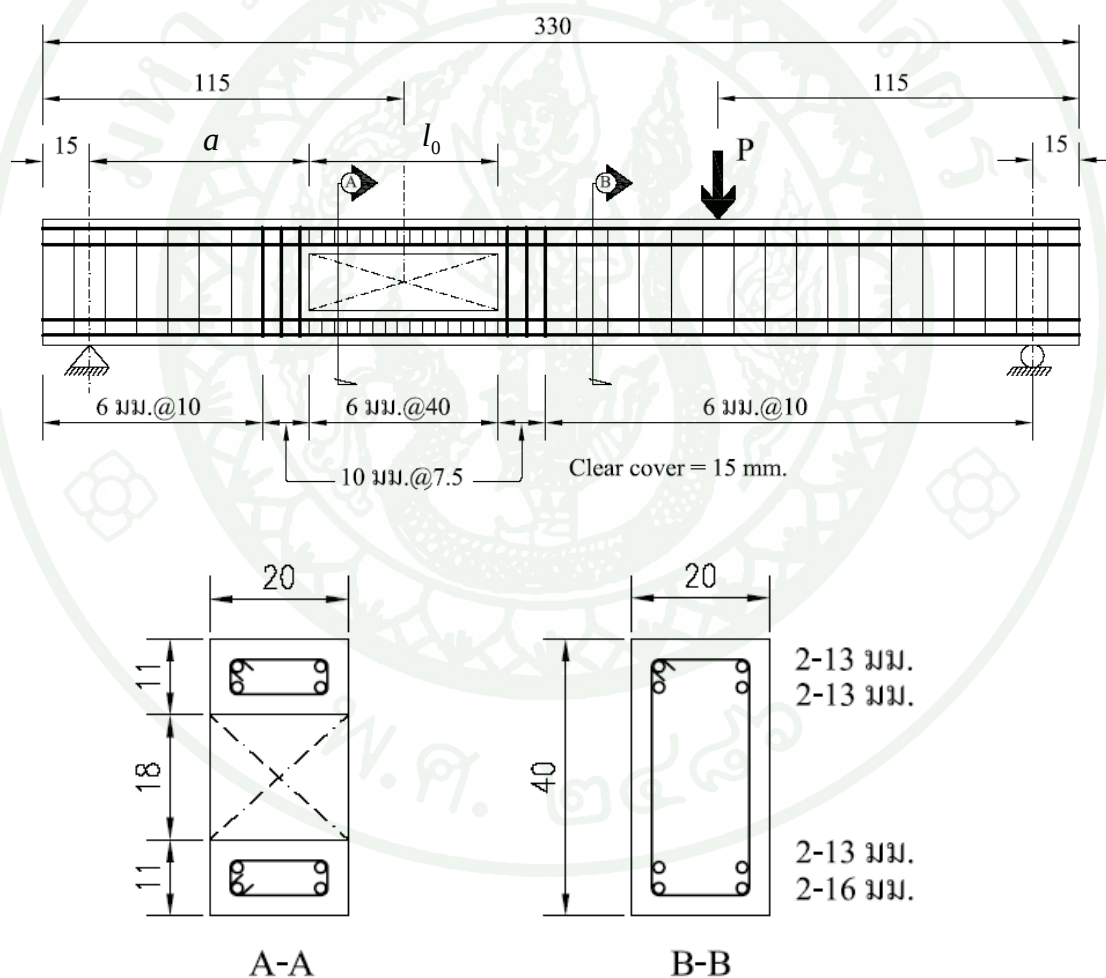
คานทดสอบ	หน่วย	Tan (1982)
		คาน R_2
ความยาวรวมของคาน ; L'	ซ.ม.	330
ความยาวรวมระหว่างฐานรองรับของคาน ; L	ซ.ม.	300
ความกว้างของคาน ; B	ซ.ม.	20
ความลึกของคาน ; D	ซ.ม.	40
ความลึกของช่องเปิด ; d_0	ซ.ม.	18
ความยาวของช่องเปิด ; l_0	ซ.ม.	60
ความลึกของช่วงต่อส่วนบน ; h_t	ซ.ม.	11
ความลึกของช่วงต่อส่วนบน ; h_b	ซ.ม.	11
ความยาวจากจุดรองรับถึงขอบของช่องเปิด ; a	ซ.ม.	70

ที่มา: Tan (1982)

รายละเอียด ขนาดความยาว ความกว้าง ความลึก ตำแหน่งการเสริมเหล็กตามยาว และเหล็กทางขวาง ขนาดช่องเปิดที่เปลี่ยนแปลงของคานทั้ง 3 สามารถแยกเป็นกรณีดังต่อไปนี้

1.1 กรณีที่ 1 การเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด 3 มิติ

การเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด แสดงดังภาพที่ 16 กำหนดศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 100 ซม. มีค่าคงที่ทุกการเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด ซึ่งค่าที่มีการเปลี่ยนแปลง จะใช้ขนาด l_0 และค่า a ดังนี้ 60 ซม. ($a=70$ ซม.), 80 ซม. ($a=60$ ซม.), 100 ซม. ($a=50$ ซม.) และ 120 ซม. ($a=40$ ซม.) ตามลำดับ สำหรับเหล็กเสริมตามยาวอธิบายจากภาพตัด B-B บริเวณส่วนรับแรงอัดจะเสริมเหล็ก 2-13 มม. จำนวน 4 เส้น บริเวณส่วนรับแรงดึงเสริมเหล็ก 2-13 มม. จำนวน 2 เส้น และเสริมเหล็ก 2-16 มม. จำนวน 2 เส้น



ภาพที่ 16 ขนาด และรายละเอียดการเสริมเหล็กคานคอนกรีต กรณีที่ 1 (3 มิติ)

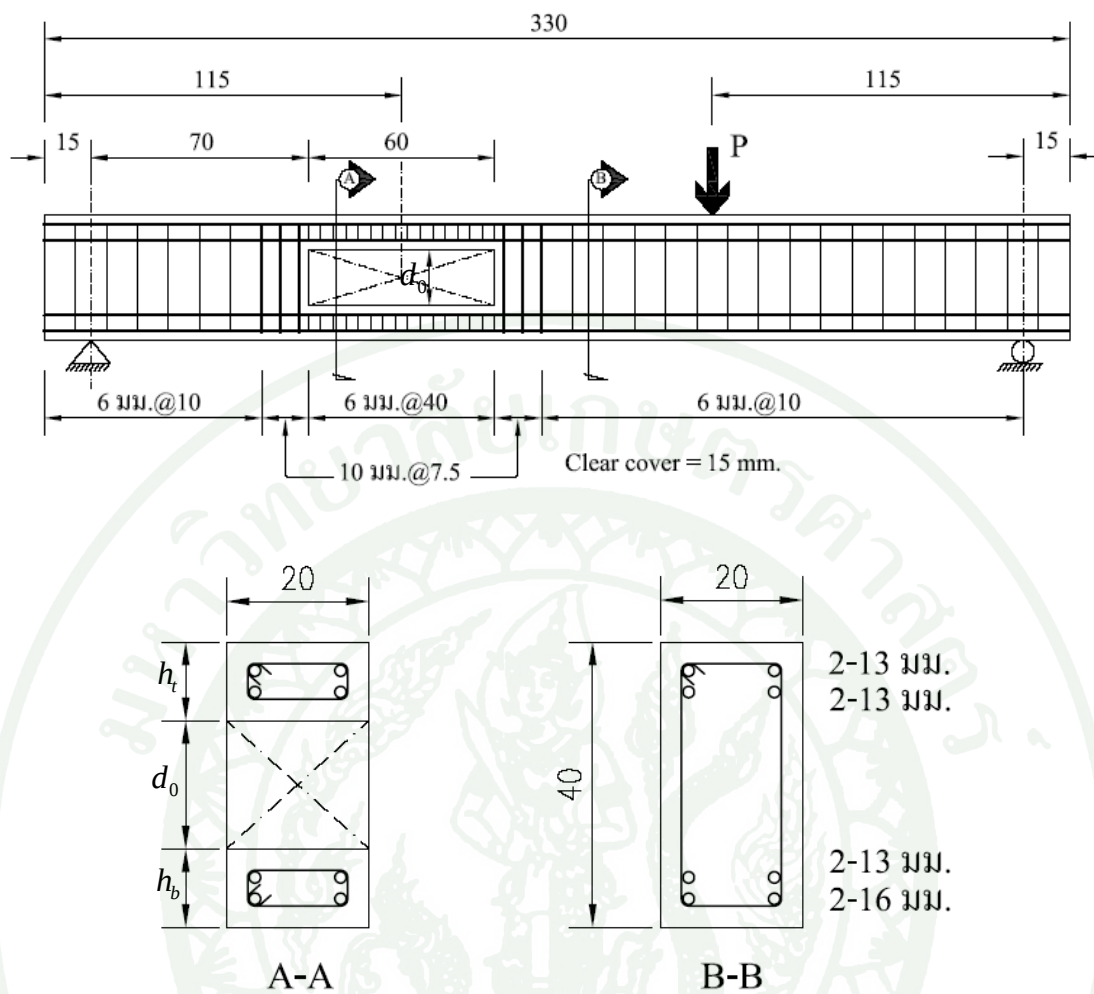
จากลักษณะทางกายภาพการเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิดคานสามารถสรุประดับความยาวของช่องเปิดแบ่งออกเป็น 4 ระดับดังนี้ $R_l - 60$ กำหนดความยาว 60 ซม., $R_l - 80$ กำหนดความยาว 80 ซม., $R_l - 100$ กำหนดความยาว 100 ซม., $R_l - 120$ กำหนดความยาว 120 ซม. และ $R_l - No$ จะเป็นลักษณะคานหน้าตัดเต็ม แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของคานทดสอบที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ กรณีที่ 1 (3 มิติ)

คานทดสอบ	หน่วย	กรณีที่ 1 (3 มิติ)				
		$R_l - No$	$R_l - 60$	$R_l - 80$	$R_l - 100$	$R_l - 120$
ความยาวรวมของคาน ; L'	ซ.ม.	330	330	330	330	330
ความยาวรวมระหว่างฐานรองรับของคาน ; L	ซ.ม.	300	300	300	300	300
ความกว้างของคาน ; B	ซ.ม.	20	20	20	20	20
ความลึกของคาน ; D	ซ.ม.	40	40	40	40	40
ความลึกของช่องเปิด ; d_0	ซ.ม.	-	18	18	18	18
ความยาวของช่องเปิด ; l_0	ซ.ม.	-	60	80	100	120
ความลึกของช่วงต่อส่วนบน ; h_t	ซ.ม.	-	11	11	11	11
ความลึกของช่วงต่อส่วนบน ; h_b	ซ.ม.	-	11	11	11	11
ความยาวจากจุดรองรับถึงขอบของช่องเปิด ; a	ซ.ม.	-	70	60	50	40

1.2 กรณีที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความลึกของช่องเปิด 3 มิติ

การเปลี่ยนแปลงความลึกของช่องเปิด แสดงดังภาพที่ 17 กำหนดศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 100 ซม. มีค่าคงที่ทุกการเปลี่ยนแปลงความลึกของช่องเปิด ซึ่งค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงอธิบายระยะความลึกที่เปลี่ยนแปลงจากภาพตัด A-A จะใช้ขนาด d_0 ความลึก 18 ซม. ($h_t = 11$ ซม., $h_b = 11$ ซม.) , 22 ซม. ($h_t = 9$ ซม., $h_b = 9$ ซม.) , 26 ซม. ($h_t = 7$ ซม., $h_b = 7$ ซม.) ตามลำดับ สำหรับเหล็กเสริมตามยาวอธิบายจาก ภาพตัด B-B บริเวณส่วนรับแรงอัดจะเสริมเหล็ก 2-13 มม. จำนวน 4 เส้น บริเวณส่วนรับแรงดึงเสริมเหล็ก 2-13 มม. จำนวน 2 เส้น และเสริมเหล็ก 2-16 มม. จำนวน 2 เส้น



ภาพที่ 17 ขนาด และรายละเอียดการเสริมเหล็กคานคอนกรีต กรณีที่ 2 (3 มิติ)

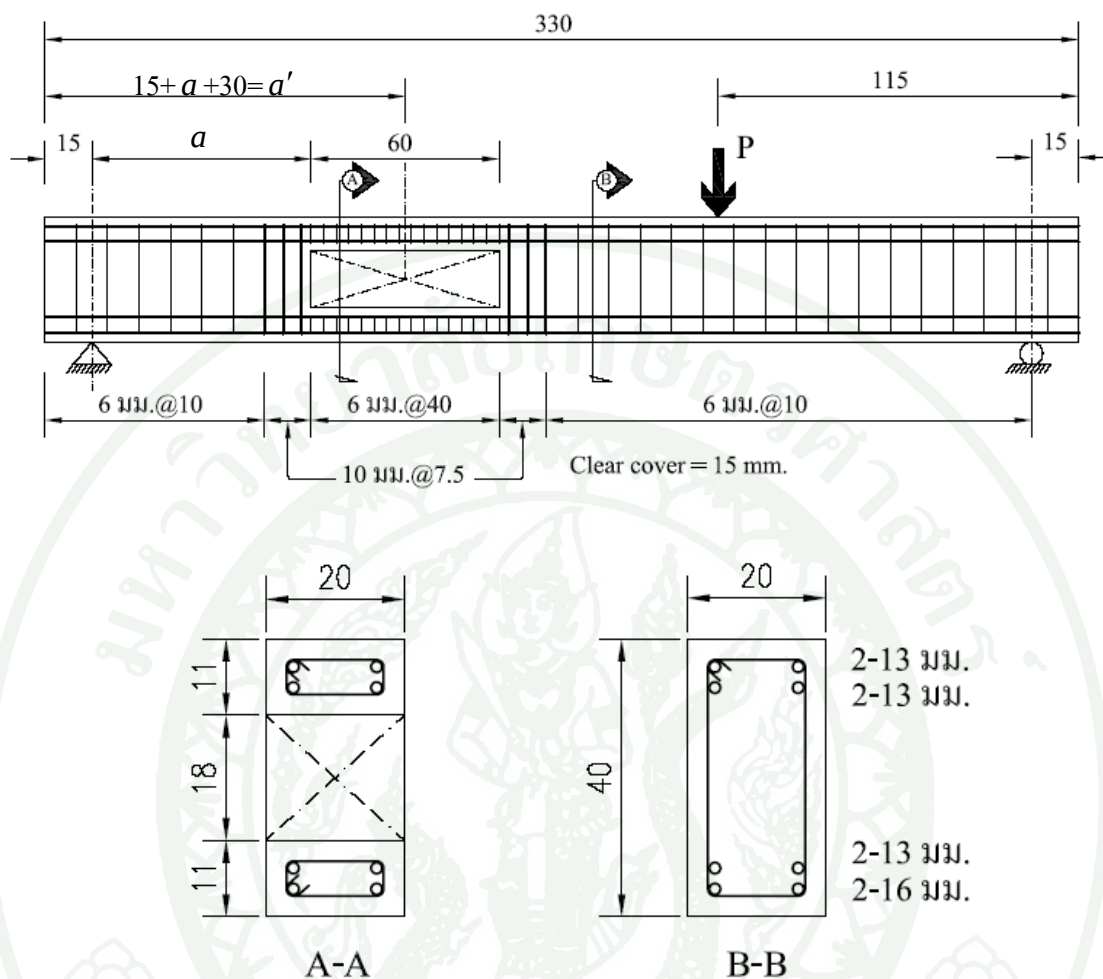
จากลักษณะทางกายภาพการเปลี่ยนแปลงความลึกของช่องเปิดคานสามารถสรุประดับความยาวของช่องเปิดแบ่งออกเป็น 3 ระดับดังนี้ R_d - 18 กำหนดความลึก 18 ซม., R_d - 22 กำหนดความลึก 22 ซม., R_d - 26 กำหนดความยาว 26 ซม. และ R_f - No จะเป็นลักษณะคานหน้าตัดเต็มแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของคานทดสอบที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ กรณีที่ 2 (3 มิติ)

คานทดสอบ	หน่วย	กรณีที่ 2 (3 มิติ)			
		$R_d - No$	$R_d - 18$	$R_d - 22$	$R_d - 26$
ความยาวรวมของคาน ; L'	ซ.ม.	330	330	330	330
ความยาวรวมระหว่างฐานรองรับของคาน ; L	ซ.ม.	300	300	300	300
ความกว้างของคาน ; B	ซ.ม.	20	20	20	20
ความลึกของคาน ; D	ซ.ม.	40	40	40	40
ความลึกของช่องเปิด ; d_0	ซ.ม.	14	18	22	26
ความยาวของช่องเปิด ; l_0	ซ.ม.	60	60	60	60
ความลึกของช่วงต่อส่วนบน ; h_t	ซ.ม.	13	11	9	7
ความลึกของช่วงต่อส่วนบน ; h_b	ซ.ม.	13	11	9	7
ความยาวจากจุดรองรับถึงขอบของช่องเปิด ; a	ซ.ม.	70	70	70	70

1.3 กรณีที่ 3 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของช่องเปิด 3 มิติ

การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของช่องเปิด แสดงดังภาพที่ 18 ศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 65 ซ.ม. ($a=20$ ซ.ม.), 115 ซ.ม. ($a=70$ ซ.ม.), 165 ซ.ม. ($a=120$ ซ.ม.), 215 ซ.ม. ($a=170$ ซ.ม.), 265 ซ.ม. ($a=220$ ซ.ม.) ตามลำดับ ขนาดความลึกและความยาวของช่องเปิดมีค่าคงที่ทุกการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของช่องเปิดอธิบายจาก ภาพตัด A-A สำหรับเหล็กเสริมตามยาวอธิบายจาก ภาพตัด B-B บริเวณส่วนรับแรงอัดจะเสริมเหล็ก 2-13 มม. จำนวน 4 เส้น บริเวณส่วนรับแรงดึงจะเสริมเหล็ก 2-13 มม. จำนวน 2 เส้น และเสริมเหล็ก 2-16 มม. จำนวน 2 เส้น



ภาพที่ 18 ขนาด และรายละเอียดการเสริมเหล็กคานคอนกรีต กรณีที่ 3 (3 มิติ)

จากลักษณะทางกายภาพการเปลี่ยนแปลง ตำแหน่งของช่องเปิดคานสามารถสรุประดับตำแหน่งของช่องเปิดแบ่งออกเป็น 5 ระดับ ดังนี้ $R_p - 65$ กำหนดศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 65 ซม., $R_p - 115$ กำหนดศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 115 ซม., $R_p - 165$ กำหนดศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 165 ซม., $R_p - 215$ กำหนดศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 215 ซม., $R_p - 265$ กำหนดศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม.สามารถแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ลักษณะทางกายภาพของคานทดสอบที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ กรณีที่ 3 (3 มิติ)

คานทดสอบ	หน่วย	กรณีที่ 3 (3 มิติ)				
		$R_p - 65$	$R_p - 115$	$R_p - 165$	$R_p - 215$	$R_p - 265$
ความยาวรวมของคาน ; L'	ซ.ม.	330	330	330	330	330
ความยาวรวมระหว่างฐานรองรับของคาน ; L	ซ.ม.	300	300	300	300	300
ความกว้างของคาน ; B	ซ.ม.	20	20	20	20	20
ความลึกของคาน ; D	ซ.ม.	40	40	40	40	40
ความลึกของช่องเปิด ; d_0	ซ.ม.	18	18	18	18	18
ความยาวของช่องเปิด ; l_0	ซ.ม.	60	60	60	60	60
ความลึกของช่วงต่อส่วนบน ; h_t	ซ.ม.	11	11	11	11	11
ความลึกของช่วงต่อส่วนบน ; h_b	ซ.ม.	11	11	11	11	11
ความยาวจากจุดรองรับถึงขอบของช่องเปิด ; a	ซ.ม.	20	70	120	170	220
ศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคาน ; a'	ซ.ม.	65	115	165	215	265

2. การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบจำลอง 3 มิติ

แบบจำลอง 3 มิติประกอบด้วยวัสดุหลักๆ ได้แก่ คอนกรีต และเหล็กเสริมซึ่งมีเทคนิคหลายประการในการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เช่น การพิจารณาแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตเหมือนการติดสปริง การฝังเหล็กเสริมเข้าภายในเอลิเมนต์คอนกรีต และบางทีอาจจะไม่พิจารณาการแตกร้าว ซึ่งจะทำให้ได้แค่ช่วงอีลาสติกเท่านั้น ซึ่งข้อดีของแบบจำลอง 3 มิติที่พิจารณาการแตกร้าวเนื่องจากการแตกร้าวของคานจะละเอียดอ่อนมาก เมื่อปรากฏการแตกร้าวจะไม่สามารถส่งถ่ายแรงได้ แต่สามารถรับแรงอัดได้ หากเปลี่ยนมาเป็นการแตกอัดซึ่งทำให้การวิเคราะห์แบบจำลอง 3 มิติ ทำได้ใกล้เคียงความจริงรวมทั้งการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละระดับไม่ว่าจะเป็นน้ำหนักบรรทุกทุกที่เพิ่มขึ้น จนทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของระดับแกนสะเทินที่ยกขึ้นตามรอยแตกร้าว ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตเกิดการวิบัติ

การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีสร้างแบบจำลองผ่านกราฟิกในวินโดว Graphical User Interface (GUI) ซึ่งเหมาะสำหรับผู้ที่เริ่มต้นหรือผู้ที่ ยังไม่มีประสบการณ์ในการสร้างแบบจำลองเนื่องจากง่ายในการแก้ไขแบบ และยังมีรูปแบบที่สวยงาม สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวอย่างเป็นขั้นตอนเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจในการสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ ดังนี้

1. กำหนดคุณสมบัติวัสดุ (Material property) แล้วนำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด

2. กำหนดชนิดของเอลิเมนต์ (Element type)

3. กำหนดสภาวะขอบเขต

4. กำหนดรายละเอียดหน้าหน้ากับรรทุก

5. กำหนดรายละเอียดของจำนวนเอลิเมนต์

6. กำหนดรายละเอียดแบบจำลอง 3 มิติ

1. คุณสมบัติของวัสดุ (Material Property)

คานคอนกรีตเสริมเหล็กมีส่วนประกอบสำคัญหลักๆ 2 ประการได้แก่ คอนกรีต และเหล็กเสริม การออกแบบคอนกรีต และเหล็กเสริม จำเป็นต้องรู้จักความสามารถในการรับภาระ ของชิ้นส่วนนั้น ถ้าหากรูปทรงของชิ้นส่วนไม่ซับซ้อน เราก็สามารถคำนวณหา คำตอบที่แน่แท้ได้ (Analytical solution) ซึ่งการสร้างแบบจำลองไฟในเอลิเมนต์ที่จะทำให้เหมือนสภาพจริงนั้นเป็นไปได้ยากมากยิ่งขึ้นวัสดุที่ประกอบด้วยมวลสารต่างๆ เช่น คอนกรีต พลาสติก เหล็ก ฯลฯ ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์แบบจำลองไฟในเอลิเมนต์คอนกรีต และเหล็กเสริมจะกำหนดให้เป็นวัสดุเนื้อเดียว (Homogeneous material)

1.1 คุณสมบัติคอนกรีต

การสร้างแบบจำลองไฟในเอลิเมนต์ การศึกษาคุณสมบัติของเนื้อคอนกรีตอาจแยกเป็นสองส่วนใหญ่ๆ คือซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) วัสดุผสม (Aggregates) น้ำ และฟองอากาศ ซึ่งกว่าจะได้คุณสมบัติทางกลที่แน่นอนต้องมีการศึกษา และทดสอบคอนกรีต ซึ่งคุณสมบัติทางกลหรือกลสมบัติของคอนกรีตขึ้นอยู่กับความเกี่ยวเนื่องกับการต้านทานแรงรวม ได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E_c) กำลังอัดประลัย (Ultimate compressive strength, f'_c) โมดูลัสแตกร้าว และอัตราส่วนปัวซองส์ (Poisson's ratio) อันดับแรกจะกล่าวถึงค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E_c) คอนกรีตคือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ ที่หาจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด ทุกเส้นความสัมพันธ์แทบไม่ปรากฏส่วนใดที่เป็นเส้นตรง ดังนั้นในการหาความสัมพันธ์ภายใต้การคดขององค์อาคารต้านทานแรงคดจึงกำหนดค่าความเครียดของคอนกรีต ณ ผิวด้านที่เกิดหน่วยแรงอัดที่ 0.003 และเนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุเปราะจึงไม่ปรากฏจุดคราก ดังนั้นสิ่งที่ได้จากการทดสอบคือ กำลังอัดประลัย (Ultimate Compressive Strength) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดภายใต้แรงอัดแกนเดียวสำหรับแบบจำลองของคอนกรีตสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ 34 และ 35 ซึ่งได้รับการเสนอโดย Desayi and Krishnan ในปี ค.ศ. 1964.

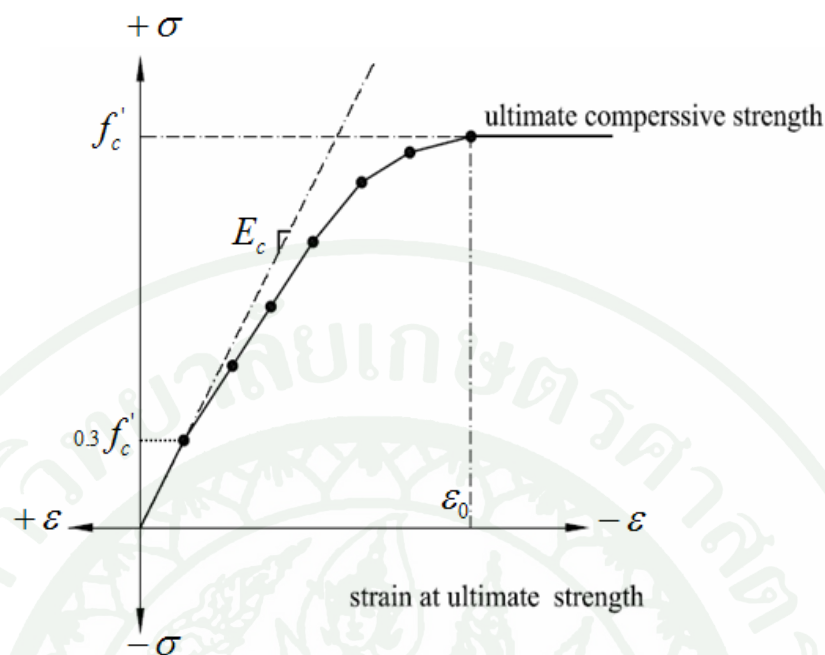
$$f = \frac{E_c \varepsilon}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2} \quad (34)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{2 f'_c}{E_c} \quad (35)$$

เมื่อ f = ความเค้นที่จุดต่างๆของความเครียด, ksc

ε = ความเครียดที่จุดของความเค้น

ε_0 = ความเครียดที่จุดวิกฤติของกำลังรับแรงอัด (f'_c)

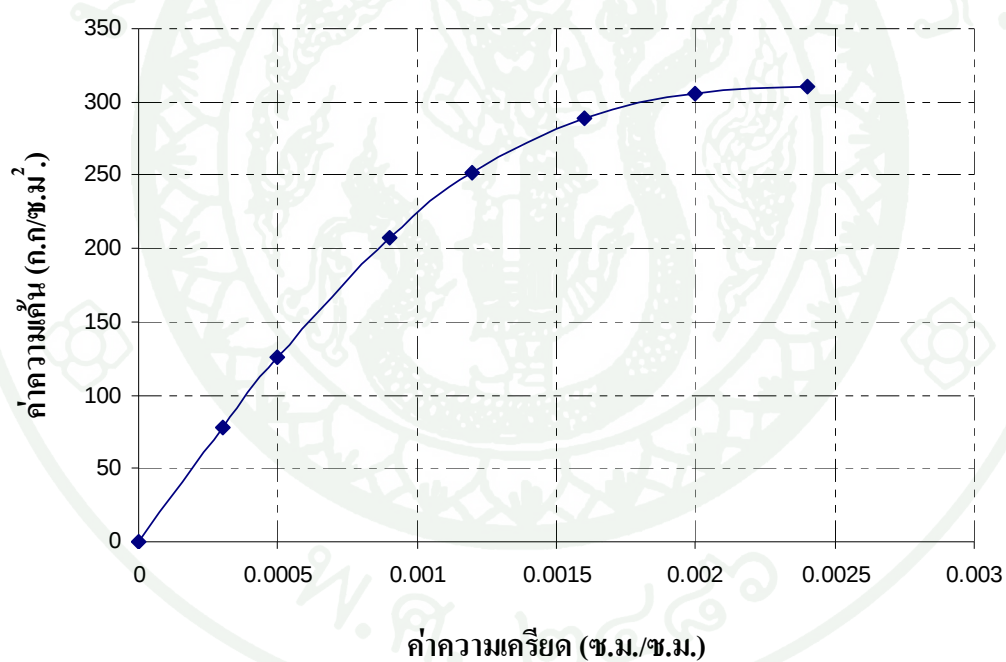


ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดภายใต้แรงอัดแกนเดียวของคอนกรีต

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด ภายใต้แรงอัดแกนเดียวของคอนกรีตดังภาพที่ 19 ซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมดังนี้ ค่าความเค้นจะยังคงอยู่ในช่วงอีลาสติกที่ประมาณ $0.3 f'_c$ รอยแตกริ้วเล็กๆ (Micro cracks) ที่ปรากฏในคอนกรีตการทดสอบยังคงสภาพไม่ขยายตัว และเมื่อค่าความเค้นเพิ่มสูงขึ้นค่าความเครียดจะไม่แปรผันตรงกับค่าความเค้นที่เพิ่มขึ้นซึ่งปรากฏรอยแตกในคอนกรีตจะขยายจนไม่เสถียร (Unstable) ความเค้นจะลดลงอย่างรวดเร็วจนวิบัติ หรือถูกอัดจนแตก (Crushing failure) หลังจากจุดนี้คอนกรีตจะเข้าสู่พฤติกรรมแบบ สภาวะพลาสติกสมบูรณ์ (Perfectly plastic) หมายถึงค่าความเครียดจะยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ขณะที่ความเค้นเท่าเดิม สำหรับคานกรณีศึกษาสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด ภายใต้แรงอัดแกนเดียวของคอนกรีต ดังตารางที่ 5 และภาพที่ 20

ตารางที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดภายใต้แรงอัดแกนเดียวของคอนกรีต

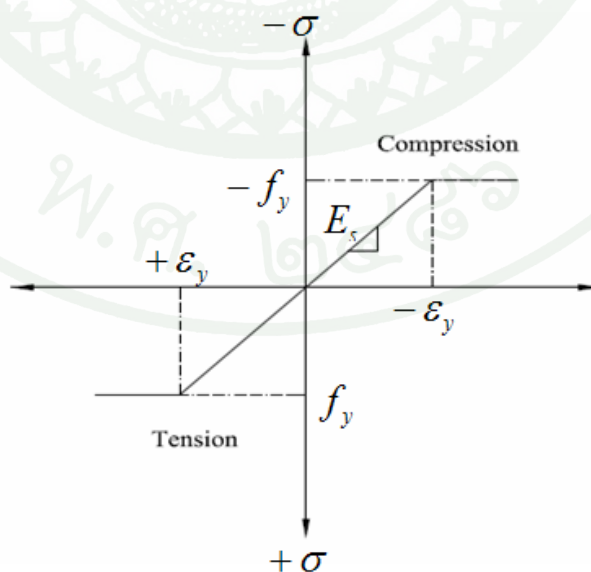
ตำแหน่งที่	ค่าความเครียด (ช.ม./ช.ม.)	ค่าความเค้น (ก.ก./ช.ม. ²)
1	0.0003	77.99
2	0.0005	126.37
3	0.0009	207.30
4	0.0012	251.33
5	0.0016	288.58
6	0.002	306.08
7	0.0024	309.92



ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดภายใต้แรงอัดแกนเดียวของคอนกรีต

1.2 เหล็กเสริม และเหล็กปลอก

การสร้างแบบจำลองไฟในเอลิเมนต์ คุณสมบัติของเหล็กเสริมจะประกอบด้วยแร่เหล็ก คาร์บอน และธาตุอื่นบางชนิด เช่น แมงกานีส ฟอสฟอรัส กำมะถัน ซิลิกอน มาหลอมละลายเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิสูง แล้วรีดเป็นเส้นด้วยลูกรีดในขณะที่ยังร้อนอยู่ (กรรมวิธีรีดร้อน) เหล็กเมื่อนำมาใช้ในคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีพฤติกรรมรับแรงดึงเป็นหลัก ซึ่งโดยปกติในการออกแบบจะกำหนดมาตรฐานกำลังครากสูงสุด เนื่องจากพฤติกรรมคอนกรีตเสริมเหล็กจะกำหนดให้เหล็กเสริมเกิดความเหนียว และวิบัติก่อนคอนกรีตซึ่งจะทำให้เตือนก่อนการวิบัติหากคอนกรีตเกิดการวิบัติก่อนรอยแตกร้าวจะปรากฏไม่ชัดเจน ซึ่งเป็นอันตรายมาก ในการคำนวณระยะโก่งตัวขององค์อาคารและการกระจายของเหล็กเสริมรับแรงดัดจะมีความวิกฤติยิ่งขึ้นหากกำลังครากของเหล็กเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด ของเหล็กเสริมตามยาว ในการสร้างแบบจำลองไฟในเอลิเมนต์ของเหล็กเสริม นักวิจัยมักจะใช้กราฟหน่วยแรง และความเครียดสมมติ แทนกราฟที่ได้จากผลการทดลอง ซึ่งจะสมมติให้เป็นแบบยืดหยุ่น - พลาสติกอย่างสมบูรณ์ (Elastic perfectly plastic) คือเมื่อเหล็กเสริมรับแรงดึง หรือแรงอัดจะมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น ตรง (Linear-elastic) สามารถกลับไป กลับมาที่ตำแหน่งเดิมได้ จนกระทั่งถึงจุดคลากจะไม่พิจารณาผลของการแข็งตัวเพิ่มเนื่องจากการแข็งด้วยความเครียด (Strain hardening) ดังแสดงในภาพที่ 21 และได้สมมติให้ชนิดการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตเป็นแบบแรงยึดเหนี่ยวสมบูรณ์ (Perfect bond)



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดสำหรับเหล็กเสริมและเหล็กปลอก

1.3 รายละเอียดคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

รายละเอียดคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ ได้นำมาจากการทดสอบของ Tan(1982) ซึ่งทำงานวิจัยนี้กับรูปทรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ภายใต้โมเมนต์คด และแรงเฉือนแสดงดังตารางที่ 6 และคุณสมบัติทางกายภาพของของเหล็กเสริมที่ใช้ในคานคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 6 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในคานคอนกรีตจากผลการทดสอบ

คานทดสอบ	หน่วย	Tan (1982)
		คาน R_2
อัตราส่วนบัวของ; ν	-	0.2
กำลังรับแรงอัดประลัยของแท่งคอนกรีต; f_c'	ก.ก/ซ.ม. ² .	310
กำลังรับแรงดึงของแท่งคอนกรีต; f_t	ก.ก/ซ.ม. ² .	24.16
โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ; E_c	ก.ก/ซ.ม. ² .	264,208
โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม ; E_s	ก.ก/ซ.ม. ² .	2,039,432

ที่มา: Tan (1982)

ตารางที่ 7 คุณสมบัติทางกายภาพของของเหล็กเสริมที่ใช้ในคานคอนกรีตจากผลการทดสอบ

เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (มม.)	กำลังรับแรงดึงครากของ เหล็กเสริม (ก.ก/ซ.ม. ²)
	Tan (1982)
6	3,620
10	4,548
13	4,283
16	5,088

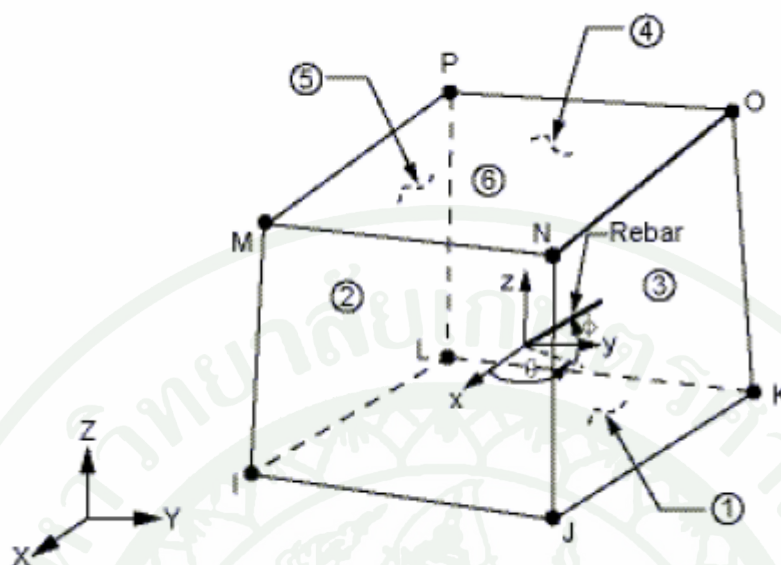
ที่มา: Tan (1982)

2. ชนิดของเอลิเมนต์ (Element type)

การเลือกชนิดเอลิเมนต์มีความสำคัญ เนื่องจากการแสดงผลลัพธ์ต้องขึ้นอยู่กับเอลิเมนต์ที่จะนำมาใช้ซึ่ง ภูริต (2552) ใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยการศึกษาประสิทธิภาพ และประสิทธิภาพของการพยากรณ์ จากการประยุกต์ใช้เอลิเมนต์ 3 ชนิด คือ เอลิเมนต์ต่อเนื่องแบบแปดหน้าเอลิเมนต์ต่อเนื่องแบบสี่หน้า และเอลิเมนต์ต่อเนื่องความเครียดระนาบ 2 มิติ แบบสี่เหลี่ยม โดยพิจารณาสมมติฐานพลาสติกซีดี และเงื่อนไขขอบเขตสมมาตร จากผลวิเคราะห์ที่ได้จากเอลิเมนต์ทั้ง 3 ชนิด พบว่าเอลิเมนต์ต่อเนื่องความเครียดระนาบ 2 มิติ แบบสี่เหลี่ยม และเอลิเมนต์ทรงแปดหน้าซึ่งทั้งคู่เป็นเอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น เป็นเอลิเมนต์ที่มีประสิทธิภาพสูงให้การพยากรณ์คำตอบที่มีค่าใกล้เคียงกันและ ความแม่นยำมากกว่าเอลิเมนต์ทรงสี่หน้าซึ่งเป็น เอลิเมนต์แบบเชิงเส้น นอกจากนี้เอลิเมนต์ต่อเนื่อง ความเครียดระนาบ 2 มิติ แบบสี่เหลี่ยม จัดเป็นเอลิเมนต์ที่มีประสิทธิภาพสูงใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุดเมื่อ เปรียบเทียบกับเอลิเมนต์อีก 2 ชนิด ดังนั้นในงานวิจัยได้เลือกใช้คอนกรีตเป็นเอลิเมนต์เป็นทรง 3 มิติ ซึ่งมีคุณสมบัติการแตกร้าวของคอนกรีตได้ และเหล็กเสริมใช้เป็นทรง 1 มิติ ซึ่งพิจารณาคุณสมบัติของการยึด และหดตัว

2.1 ชนิดเอลิเมนต์ (Element type) ของคอนกรีต

เอลิเมนต์ของคอนกรีตจะใช้เอลิเมนต์ขนาดเล็กที่มีลักษณะเป็นทรง 3 มิติ ในโปรแกรมเชิงพาณิชย์ที่มีชื่อว่า แอนซิส (ANSYS) จะกำหนดให้ชื่อ Solid65 คุณสมบัติโดยทั่วไปมี 8 จุดต่อ ซึ่งแต่ละจุดต่อจะมีความอิสระในการเคลื่อนที่ (Degree of Freedom) ได้ใน 3 ทิศทางคือในทิศทางตามแนวแกน X, Y และ Z สามารถกำหนดคุณสมบัติของเหล็กเสริมในเอลิเมนต์ได้ซึ่งในงานวิจัยไม่ได้ใช้คุณสมบัตินี้เนื่องจากมีความซับซ้อน ความสัมพันธ์ของรูปร่าง (Shape function) ที่ใช้ในการประมาณค่าภายในของการขจัด (Displacement interpolation) สำหรับเอลิเมนต์เป็นความสัมพันธ์แบบเส้นตรงเอลิเมนต์ ชนิดนี้สามารถยึดหดได้ในช่วงพลาสติก สามารถแตกร้าวได้ใน 3 ทิศทาง และสามารถรองรับการวิบัติแบบแตกอัดได้ ดังแสดงในภาพที่ 22 จะสังเกตเนื่องจากคุณสมบัติของคอนกรีตจะกำหนดภายใต้แรงอัดแกนเดียว ดังนั้นการแตกอัดทั้งสามทิศทางจะใช้คุณสมบัติภายใต้แรงอัดแกนเดียว และเอลิเมนต์ของคอนกรีต Solid65 ยังสามารถจำลองการแตกร้าวได้เหมือนคอนกรีต พฤติกรรมของคอนกรีตเมื่อแตกร้าว จะไม่สามารถรับแรงดึงได้ แต่หากการแตกร้าวนั้นเปลี่ยนมาเป็นการรับแรงอัด รอยแตกร้าวนั้นก็ยังสามารถส่งถ่ายแรงได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะกล่าวในลำดับต่อไป



ภาพที่ 22 เอลิเมนต์ของคอนกรีต Solid65 (ANSYS 2003)

ที่มา: ANSYS (2003)

การวิบัติของคอนกรีตซึ่งคอนกรีตเป็นวัสดุเปราะ จะพังด้วยการแตกแบบเปราะ (การผ่าแยก) ที่ผิวรอยต่อ และในมอร์ตาร์ยักเว้นในกรณีการรับแรงอัดสูง 3 แกน ซึ่งอาจจะเกิดการเลื่อนไถลจากแรงเฉือน พฤติกรรมความเหนียว การวิบัติเกิดขึ้นโดยการผ่าแยกจากแรงดึง กับการแตกของพื้นผิว ซึ่งตั้งฉากกับทิศทางของหน่วยแรงดึง หรือความเครียดสูงสุด การทำนายพฤติกรรมเชิงหลายแกนโดยทั่วไปคุณสมบัติของวัสดุ ได้มาจากการทดสอบอย่างง่าย เช่น รับแรงแกนเดียว ซึ่งให้ค่ากำลังอัดคอนกรีต (f'_c) และค่ากำลังดึงของคอนกรีต (f_t) การทำนายนี้จะเกี่ยวข้องกับการคำนวณกำลังในสถานะรับแรง 3 แกน ซึ่งได้ข้อมูลมาจากการทดสอบแกนเดียว ทฤษฎีการวิบัติที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีหลายวิธีอาทิเช่น ทฤษฎีหน่วยแรงหลักสูงสุด ทฤษฎีความเครียดหลักสูงสุด ทฤษฎีโดยพื้นฐานของกลไกการแตกร้าว-ความเข้มของหน่วยแรง, ความแกร่ง และหลักในการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตแบบไร้เชิงเส้น มีการแทรกแซงกระบวนการวิเคราะห์หาสถานะของหน่วยแรง และการเสียรูปในโครงสร้างหรือองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก หลายปัจจัยดังต่อไปนี้

- 1) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง- ความเครียดแบบไร้เชิงเส้น

2) การแตกร้าวที่ดำเนินอยู่

3) ข้อคำนึงถึงด้านการเสริมเหล็ก

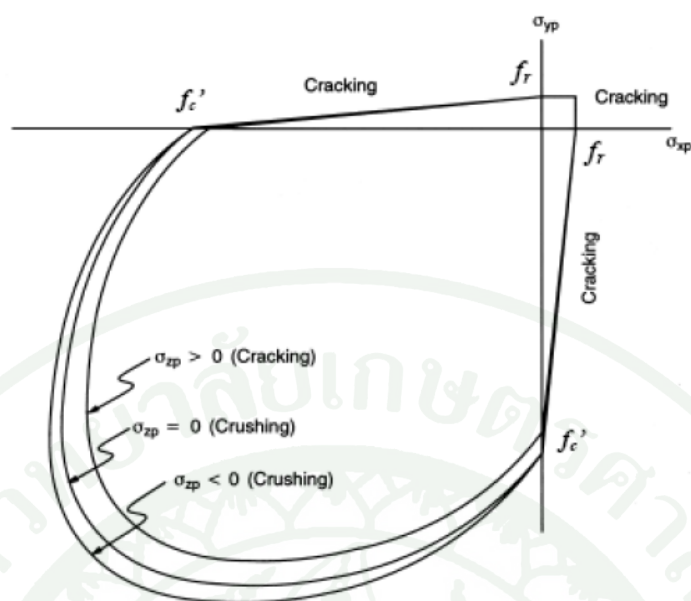
4) การคืบและการหดตัว (พฤติกรรมซึ่งขึ้นกับเวลา)

5) ปัญหาการถ่ายแรงเฉือน แรงกระทำแบบวัฏจักรวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำให้มีการหาหน่วยแรงภายใน และเปลี่ยนตำแหน่งจริงเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของโครงสร้าง นอกจากนี้การปรับปรุงผลเฉลยเชิงวิเคราะห์นั้นยังช่วยให้เข้าใจ และสามารถสรุปพฤติกรรมของส่วนโครงสร้างที่สังเกตได้จากการทดลอง

ดังนั้นในการวิเคราะห์หาคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่จะใช้เกณฑ์การวิบัติของ Willam and Warnke (1975) ภายใต้สภาวะความเค้นตามแนวแกนถูกนำมาใช้ประเมินการวิบัติของคอนกรีต และใช้จำแนกรูปแบบของการวิบัติ (Crushing) ที่จุดกึ่งกลางเอลิเมนต์ของคอนกรีต หรือที่จุดใดจุดหนึ่งในจุดรวมแรง (Integration points) เกณฑ์การวิบัติแสดงให้เห็นในความสัมพันธ์ดังสมการที่ 36

$$\frac{F}{f'_c} - S \geq 0 \quad (36)$$

เมื่อ	F	= ฟังก์ชันของ Principal stress state ($\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}$)
	S	= Failure surface ในเทอมของความเค้นหลัก
	f'_c	= กำลังแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต
	$\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}$	= ทิศทางของ Principal stress state



ภาพที่ 23 พื้นผิวการวิบัติ Failure surface สำหรับคอนกรีต (ANSYS 2003)

ที่มา: ANSYS (2003)

จากภาพที่ 23 แสดงพื้นผิวในการวิบัติ 3 มิติ ในแนวแกนจะแสดง 2 ทิศทางได้แก่ σ_{xp}, σ_{yp} ซึ่งทิศทาง σ_{zp} จะแสดงเป็นพื้นผิวการวิบัติ ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 3 ระดับดังนี้ $\sigma_{zp} < 0$, $\sigma_{zp} = 0$ และ $\sigma_{zp} > 0$ สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนว่า หากค่า $\sigma_{zp} \geq 0$ คอนกรีตวิบัติแบบแตกอัด (Crushing) สิ่งที่กำหนดการแตกร้าวของคอนกรีตได้แก่ ค่ากำลังอัดคอนกรีต (f_c') และ ค่ากำลังดึงของคอนกรีต (f_r) สำหรับสถานะของความเค้นในสองแกนจากภาพที่ 10 สามารถแบ่งรูปแบบการวิบัติได้เป็น 4 โหมด ดังนี้

1) $0 \geq \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ (แรงอัด-แรงอัด-แรงอัด) คอนกรีตได้รับการพิจารณาว่าแตกแบบบดขยี้เมื่อสอดคล้องตามเงื่อนไขสมการที่ 36

2) $\sigma_1 \geq 0 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ (แรงดึง-แรงอัด-แรงอัด) ถ้าสมการที่ 36 สอดคล้องตามเงื่อนไข รอยแตกร้าวจะเกิดขึ้นในทิศทางตั้งฉากกับ σ_1

3) $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0 \geq \sigma_3$ (แรงดึง-แรงดึง-แรงอัด) ถ้าสมการที่ 36 สอดคล้องตามเงื่อนไข กำลังรับแรงดึงประลัยจะลดลงแบบเป็นเส้นตรงตามการลดลงของ σ_3 ในขณะเดียวกันรอยแตกร้าวจะเกิดขึ้นในระนาบตั้งฉากกับความเค้นหลัก σ_1 หรือ σ_2 ตัวใดตัวหนึ่ง

4) $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0$ (แรงดึง-แรงดึง-แรงดึง) ถ้าสมการที่ 36 สอดคล้องตามเงื่อนไข กำลังรับแรงดึงประลัยถูกสมมุติให้มีค่าเท่ากับ หน่วยแรงดึงของคอนกรีต (f_t) ในขณะเดียวกันรอยแตกร้าวจะเกิดขึ้นในระนาบ σ_1 , σ_2 หรือ σ_3

ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด สามารถแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะเหนียวของวัสดุ (Brittleness and ductility) และบางครั้งอาจใช้อธิบายความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ซึ่งความเค้น หมายถึงแรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติ และความยากในการวัดหาค่า ซึ่งความเค้นจะอยู่ในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ด้วยเหตุผลที่ว่า แรงกระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านทานภายใน และความเครียดหมายถึง การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ (เกิดความเค้น) การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือการเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติกหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic deformation or Elastic strain) และการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic seformation or Plastic Strain) ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้น-ความเครียด ของเอลิเมนต์คอนกรีต 3 มิติ ประกอบด้วยตัวแปรสองตัวได้แก่ อัตราส่วนปัวซอง(ν)และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (E_c) สามารถหาได้ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ 37

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E_c}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (37)$$

ในการวิเคราะห์วัสดุไร้เชิงเส้น สิ่งที่สำคัญในการพิจารณาคุณสมบัติของคอนกรีต จะต้องพิจารณารอยแตกร้าวของคอนกรีต เนื่องจากต้องปรับปรุงค่าความแข็งแรงให้สามารถส่งถ่ายแรง ได้เมื่อเกิดรอยร้าว ดังนั้นหากพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้น-ความเครียด จะสามารถ เขียนค่าสตีเฟนสมเทริกซ์ของเอลิเมนต์คอนกรีตแสดงดังภาพที่ 38 ก่อนที่จะทำการปรับปรุงค่า ความแข็งแรงคอนกรีตจะต้องมีความเข้าใจเรื่องการแตกร้าวของคอนกรีต ซึ่งโดยทั่วไปการแตกร้าวจะมี 2 ชนิดได้แก่ Discrete crack และ Smeared crack ซึ่งลักษณะการใช้แบบจำลองก็แตกต่างกันโดย ส่วนมากแบบจำลอง Smeared crack จะได้รับการใช้งานมากเนื่องจากจำลองการแตกร้าวให้ กระจายอยู่ภายในชิ้นส่วนย่อย สามารถแสดงการแตกร้าวได้ละเอียดมากขึ้น โดยรอยแตกร้าวที่ เกิดขึ้นจะตั้งฉากกับทิศทางของความเค้นหลัก (Principal stress) โดยเฉลี่ยค่าความสัมพันธ์ ระหว่าง ความเค้น-ความเครียด แต่มีข้อเสียซึ่งจะต้องแบ่งขนาดชิ้นส่วนให้เหมาะสมกับลักษณะของ โครงสร้าง หากชิ้นส่วนมีขนาดใหญ่ หากเกิดการแตกร้าวขึ้นจะทำค่าสตีเฟนสมของโครงสร้าง ลดลงทันที โครงสร้างจะไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามความเป็นจริง

$$[D_c] = \frac{E_c}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix} \quad (38)$$

สำหรับเอลิเมนต์คอนกรีต (Solid65) ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้ในการจำลองพฤติกรรม ของคอนกรีตนั้นจะพิจารณาการแตกร้าว และการแตกอัด (Crushing) ซึ่งรอยแตกร้าวในคอนกรีตจะ สามารถเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อความเค้นดึงในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมีค่าเกินความเค้นดึงประลัย (f_t) ของคอนกรีต โดยหลังจากที่คอนกรีตเกิดการแตกร้าว โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจะลดลงจนมีค่า เป็นศูนย์เฉพาะในทิศทางที่ขนานกับทิศทางของความเค้นดึง สำหรับลักษณะการวิบัติแบบแตกอัด (Crushing) คอนกรีตนั้นจะสามารถเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อความเค้นทั้งหมดในสามทิศทางถูกอัด และ เส้นสถานะของความเค้นอยู่นอกพื้นผิวการวิบัติ มีผลทำให้โมดูลัสยืดหยุ่นลดลงจนมีค่าเท่ากับศูนย์ ในทุกทิศทาง ส่งผลให้ความมั่นคงทางโครงสร้างของคอนกรีตสูญเสียอย่างสมบูรณ์

การเกิดรอยแตกร้าวในเอลิเมนต์คอนกรีต 3 มิติสามารถเกิดขึ้นได้ทั้ง 3 ทิศทางคือ ที่จุดกึ่งกลางของแต่ละเอลิเมนต์ และจุดใดจุดหนึ่งในจุดรวมแรง (Integration points) เมื่อรอยแตกร้าวเกิดขึ้นค่าสตีเฟนสมเทริกของคอนกรีตส่วนที่ยังไม่เกิดรอยแตกร้าวจะถูกปรับเปลี่ยนไป ด้วยการใช้ ค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายแรงเฉือนในกรณีความเค้นดึง (β_t) เพื่อให้เข้ากับสภาพ ความเสียหายทางกลของคอนกรีต การปรากฏของรอยแตกร้าวที่จุดรวมแรง (Integration points) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายแรงเฉือนในกรณีความเค้นดึง (β_t) จะถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อแทนค่าตัวคูณลดกำลังของการถ่ายแรงเฉือน ค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายแรงเฉือนในกรณีความเค้นดึง (β_t) จะมีค่าอยู่ในระหว่าง 0-1 โดยถ้าหากสัมประสิทธิ์การถ่ายแรงเฉือนในกรณีความเค้นดึง (β_t) มีค่าเท่ากับ 0 รูปแบบการเกิดรอยแตกร้าวจะเป็นลักษณะแบบราบเรียบ และเมื่อเกิดรอยแตกร้าวจะเกิดการสูญเสียคุณสมบัติการถ่ายแรงเฉือนอย่างสมบูรณ์ แต่ถ้าหากสัมประสิทธิ์การถ่ายแรงเฉือนในกรณีความเค้นดึง (β_t) มีค่าเท่ากับ 1 รูปแบบการเกิดรอยแตกร้าวจะเป็นลักษณะแบบขรุขระ เมื่อเกิดรอยแตกร้าวจะไม่มี การสูญเสียคุณสมบัติการถ่ายแรงเฉือน โดยที่การเปลี่ยนแปลง สตีเฟนสมเทริกของเอลิเมนต์คอนกรีตเมื่อเกิดรอยแตกร้าวเฉพาะทิศทางเดียว สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 39 Kachlakev, et al. (2001) ได้อธิบายถึงหลักการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายแรงเฉือน(β_t) ซึ่งจะต้องกำหนดให้มีค่ามากกว่า 0.2 ไม่เช่นนั้นการส่งถ่ายรอยแตกร้าวจะไม่เกิดขึ้น

$$[D_c^{ck}] = \frac{E_c}{(1+\nu)} \begin{bmatrix} \frac{R^t(1+\nu)}{E_c} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(1-\nu)} & \frac{\nu}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\nu}{(1-\nu)} & \frac{1}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2} \end{bmatrix} \quad (39)$$

เมื่อ R^t = Secant Modulus
 β_t = สัมประสิทธิ์การถ่ายแรงเฉือนในกรณีความเค้นดึง

หากรอยแตกร้าวนี้ปิดลง ความเค้นอัดที่ตั้งฉากกับระนาบรอยแตกร้าวยังสามารถส่งผ่านรอยร้าวต่อไปได้ ซึ่งจะไม่เหมือนกับกรณีที่เกิดรอยร้าวจากแรงดึง สัมประสิทธิ์การถ่ายแรงเฉือนในกรณีความเค้นอัด (β_c) จะใช้กับรอยร้าวที่ถูกปิดลงเท่านั้นซึ่งมักจะมีค่ามากกว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายแรงเฉือนในกรณีความเค้นดึง (β_t) ค่าสถิติคุณสมบัติของเอลิเมนต์คอนกรีต (Solid65) ในกรณีที่รอยร้าวถูกปิดลงเฉพาะทิศทางเดียว สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 41

$$[D_c^{ck}] = \frac{E_c}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_c(1-2\nu)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_c(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix} \quad (41)$$

2.2 ชนิดเอลิเมนต์ (Element type) ของเหล็กเสริม

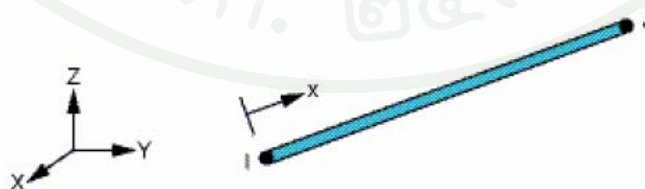
ก่อนจะเสนอการใช้เอลิเมนต์ของเหล็กเสริม ต้องทำความเข้าใจถึงพฤติกรรมการเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ Tavaréz (2001) พบว่าวิธีการเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีอยู่ 3 วิธี ได้แก่ Discrete model , Embedded model และ Smeared model ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันดังต่อไปนี้

1) Discrete model เป็นการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็กที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง Fanning (2001) พบว่าพฤติกรรมการตอบสนองของคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยคอนกรีตใช้ Smeared model และเหล็กเสริมใช้ Discrete model เป็นวิธีที่ดีที่สุด โดยเอลิเมนต์ของเหล็กเสริมที่ใช้ในแบบจำลองชนิดนี้จะเป็นแบบแท่ง (Bar element) หรือแบบคาน (Beam element) ในหนึ่งเอลิเมนต์ย่อย มี 2 จุดต่อ (Node) แต่ละจุดต่อจะมีความอิสระในการเคลื่อนที่ (DOF) ได้ใน 3 ทิศทาง เชื่อมต่อกับจุดต่อของคอนกรีตโดยจุดต่อของเอลิเมนต์เหล็กเสริม และจุดต่อของเอลิเมนต์คอนกรีตจะอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน ข้อดีของแบบจำลองนี้คือ การวางตำแหน่งเหล็กเสริมถูกต้องตามความเป็นจริง แต่ก็มีข้อเสียคือ การแบ่งพื้นที่ของแบบจำลองคอนกรีตจะถูกจำกัดโดยตำแหน่ง ของเหล็กเสริม รวมถึงปริมาตรของคอนกรีตจะไม่ถูกหักออกจากปริมาตรของเหล็กเสริม ที่เพิ่มขึ้น

2) Embedded model เป็นการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็กเสริม ด้วยวิธีการฝังคุณสมบัติของเหล็กเสริมเข้าไปในเอลิเมนต์ของคอนกรีตซึ่งจะช่วยลดข้อจำกัดของการแบ่งเอลิเมนต์คอนกรีตได้ดีขึ้น เนื่องจากค่าความแข็งของเอลิเมนต์เหล็กเสริม และเอลิเมนต์ของคอนกรีตจะแยกกันอย่างชัดเจน แบบจำลองนี้ถูกสร้างขึ้นโดยการเคลื่อนตำแหน่งของเหล็กเสริมจะสอดคล้องกับคอนกรีตที่หุ้มอยู่รอบเหล็กเสริมนั้น แบบจำลองนี้เหมาะสำหรับคอนกรีตที่เสริมเหล็กแบบซับซ้อน อย่างไรก็ตามแบบจำลองชนิดนี้จะทำให้จุดต่อ และความอิสระในการเคลื่อนที่ (DOF) เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงทำให้การคำนวณใช้เวลามากขึ้นไปด้วย

3) Smeared Model เป็นการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็กเสริมด้วยวิธีนี้กำหนดให้เหล็กเสริมกระจายอย่างสม่ำเสมอในบริเวณเนื้อคอนกรีตด้วยการแบ่งเอลิเมนต์ของไฟไนต์เอลิเมนต์วิธีนี้จะใช้สำหรับ Large-Scale Model ซึ่งเหล็กเสริมไม่มีผลต่อพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างทั้งหมด

จากทั้ง 3 วิธี สรุปเลือกใช้ Discrete model เนื่องจากวิธีที่เหมาะสมที่สุดกับแบบจำลองคานคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ ดังนั้นเอลิเมนต์ของเหล็กเสริม และเหล็กปลอกถูกแทนด้วยเอลิเมนต์ Link 8 เคยใช้เอลิเมนต์ชนิดนี้กับแบบจำลอง trusses, sagging cables, links, springs และอื่นๆ อีกมากมาย เอลิเมนต์ Link 8 มีลักษณะเป็นท่อนมี 2 จุดต่อ ในแต่ละจุดต่อจะมีความอิสระในการเคลื่อนที่ได้ใน 3 ทิศทาง คือในทิศทางตามแนวแกน X, Y และ Z (ไม่สามารถรับโมเมนต์) ซึ่ง Shape function ที่ใช้ในการประมาณค่าภายในของการขจัด (Displacement interpolation) สำหรับเอลิเมนต์เป็น Linear shape function เอลิเมนต์สามารถรับแรงดึง และแรงอัดได้ในแนวทิศทางเดียวเท่านั้น สามารถยืดหดตัวได้ในช่วงพลาสติก และได้สมมติให้ชนิดการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริม และคอนกรีตเป็นแบบแรงยึดเหนี่ยวสมบูรณ์ (Perfect bond) ดังแสดงในภาพที่ 24



ภาพที่ 24 เอลิเมนต์ของเหล็กเสริมตามยาว Link8 (ANSYS 2003)

ที่มา: ANSYS (2003)

ความสัมพันธ์ระหว่างแรง และการเคลื่อนที่ของเอลิเมนต์หลักเสริมสามารถหาได้ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ 42

$$\begin{Bmatrix} F_{ix} \\ F_{iy} \\ M_i \\ F_{jx} \\ F_{jy} \\ M_j \end{Bmatrix} = \frac{AE_s}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{ix} \\ v_{iy} \\ \theta_i \\ u_{jx} \\ v_{jy} \\ \theta_j \end{Bmatrix} \quad (42)$$

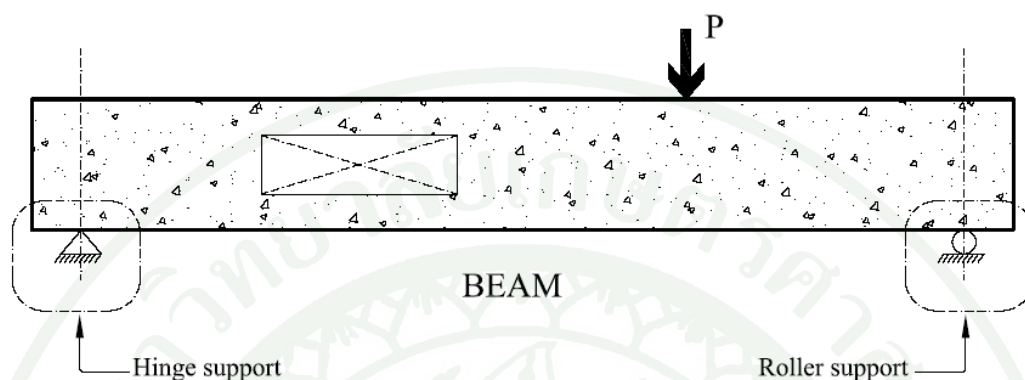
เมื่อ A = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม

E_s = มอดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม

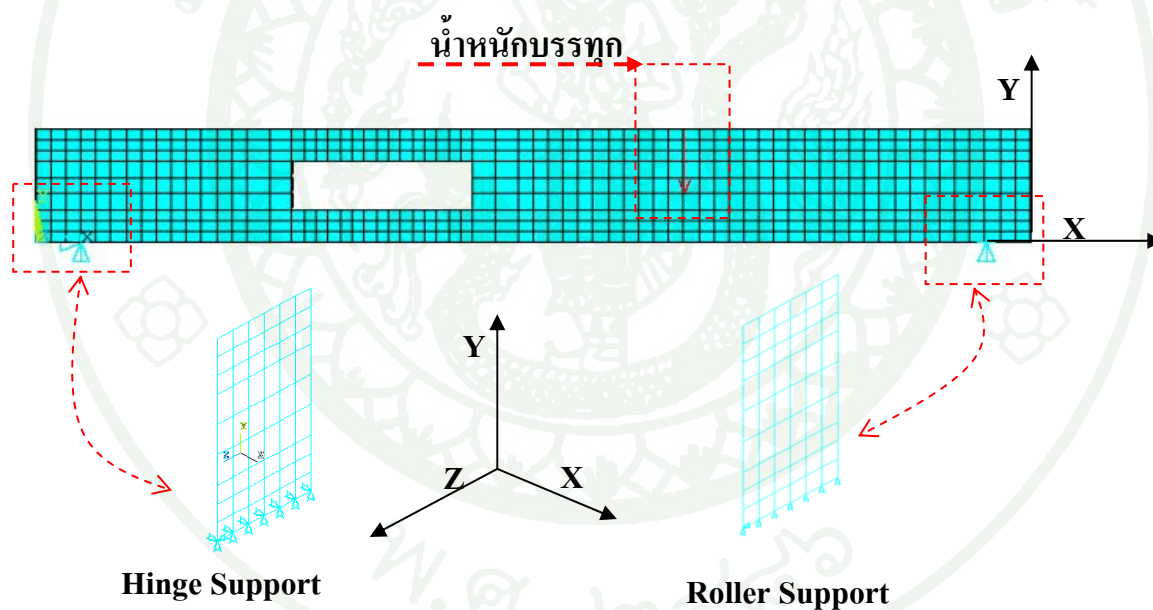
3. สภาวะเงื่อนไขขอบเขต

โดยทั่วไปโครงสร้างจะมีคุณสมบัติ Stable เพื่อให้สามารถต้านทานน้ำหนักบรรทุกที่มากกระทำได้ หากจุรองรับไม่สามารถต้านทานน้ำหนักบรรทุกที่มากกระทำได้ โครงสร้างจะถูกเรียกว่า Unstable Structure คานอย่างง่ายเป็นโครงสร้างที่สามารถคำนวณหาแรงปฏิกิริยาโดยใช้เพียงแค่สมการสมดุลพื้นฐาน หรือที่เรียกกันว่า Equilibrium Equation มี 3 สมการพื้นฐานในการแก้ไขสมการ ได้แก่ $\Sigma F_x = 0$, $\Sigma F_y = 0$ และ $\Sigma M = 0$ และสามารถเรียกโครงสร้างนั้นว่า Determinate Structure คานอย่างง่ายจะประกอบด้วย Hinge support (สามารถต้านทานแรงแนวราบ และแนวตั้งได้) และ Roller support (สามารถต้านทานแรงแนวราบเท่านั้น) ในการกำหนดสภาวะเงื่อนไขขอบเขตเป็นสิ่งสำคัญ จะต้องกำหนดสภาวะเงื่อนไขขอบเขตให้เหมือนสภาวะใช้งานจริง ซึ่งกระบวนการแก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นเงื่อนไขขอบเขตเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอันจะก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่แตกต่างกันไป สภาวะเงื่อนไขขอบเขตที่เปลี่ยนแปลงไปจะก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่มีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน Tan (1982) ได้ใช้คานที่มีจุรองรับอย่างง่ายในการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 25(A) ฐานรองรับแบบ Hinge support จะกำหนดค้ำกับช่องเปิดขนาดใหญ่ และฐานรองรับแบบ Roller support จะกำหนดค้ำกับน้ำหนักบรรทุกทุก ในวิทยานิพนธ์ฐานรองรับแบบ Roller support ถูกสร้างให้สามารถเคลื่อนได้ในแนวแกน X (แกนตามความยาวคาน) โดยกำหนดให้ความอิสระในการเคลื่อนที่ (DOF) เป็น 0 (ศูนย์) ในแนวแกน Y และ Z ($U_y=0, U_z=0$) สภาวะเงื่อนไขขอบเขตการยึดรั้งของฐานรองรับแสดงดังภาพที่ 25(B) ส่วนฐานรองรับ

แบบ Hinge support ไม่สามารถให้เคลื่อนได้ทุกทิศทาง โดยกำหนดให้ความอิสระในการเคลื่อนที่ (DOF) เป็น 0 (ศูนย์) ในแนวแกน X,Y และ Z ($U_x=0$, $U_y=0$, $U_z=0$) ในการใส่ฐานรองรับจะใส่ตามทุกจุดต่อ (Node)



(A) ลักษณะสถานะเงื่อนไขขอบเขต ของคานที่ใช้ทดสอบ Tan (1982)

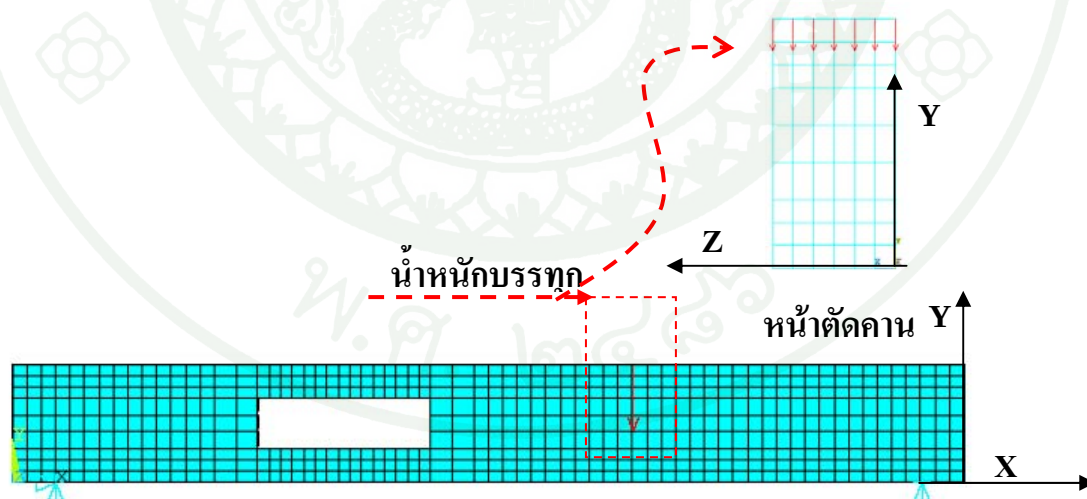


(B) ลักษณะสถานะเงื่อนไขขอบเขต ของคานโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

ภาพที่ 25 ลักษณะสถานะเงื่อนไขขอบเขต ของแบบจำลองคาน 3 มิติ

4. น้ำหนักบรรทุก

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว ของโครงสร้างคานคอนกรีตด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ มีความสำคัญในเชิงการวิเคราะห์วัสดุแบบไร้เชิงเส้น เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกกระทำคานจะเริ่มแอ่นตัวจนปรากฏการแตกร้าวครั้งแรก (First crack) และเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไปเหล็กเสริมจะทำหน้าที่รับแรงดึง และการแตกร้าวของคอนกรีตจะเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งคอนกรีตเกิดการวิบัติ พฤติกรรมของน้ำหนักบรรทุกจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้หลักการของ นิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) วิธีนี้นิยมใช้กันมากเพราะไม่ยุ่งยาก และมีอัตราการใช้สูง มีฐานารมาจากอนุกรมเทย์เลอร์ น้ำหนักบรรทุกที่มากระทำจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนๆ (Load step) ขนาดของน้ำหนักบรรทุกจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ (หากทำการเพิ่มช่วงของน้ำหนักมากคำตอบจะไม่ลู่เข้า) ในการคำนวณจะสมมติค่า Stiffness matrix (K) แล้วคำนวณหาการแอ่นตัวที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก การทำซ้ำจะทำการตรวจสอบ และปรับปรุงค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างแรงภายนอก และแรงภายในหากค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยกว่าที่กำหนด (Convergence criteria) ปกติจะใช้ไม่เกิน 1 และผลลัพธ์ลู่เข้าหาผลลัพธ์ที่ถูกต้อง (Converged solution) ก็จะหยุดทำซ้ำ จำนวนสูงสุดของการทำซ้ำ (Iteration) ขึ้นอยู่กับสภาพปัญหา และค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ (Convergence tolerance limits)



ภาพที่ 26 ลักษณะน้ำหนักบรรทุก ของคานโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้การตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ (Convergence criteria) ตั้งอยู่บนพื้นฐานของ น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ (Convergence tolerance limits) ของน้ำหนักบรรทุกใช้ 0.05 และการแอ่นตัวใช้ 0.05 และเป็นแบบ Point load แต่เนื่องจากแบบจำลองมีลักษณะเป็นสามมิติ ซึ่งมีหลายจุดต่อในระนาบเดียวกันหากใส่ Point load ที่ตำแหน่งเดียวจะทำให้เกิดความเค้นมาก ดังนั้นจึงจะต้องใส่ Point load โดยหารจำนวนจุดในระนาบ ดังแสดงในภาพที่ 26 ซึ่งมีทั้งหมด 7 จุดต่อ (หาก Point load = 700 kg น้ำหนักที่กระทำจะได้ 100 กก./จุดต่อ)

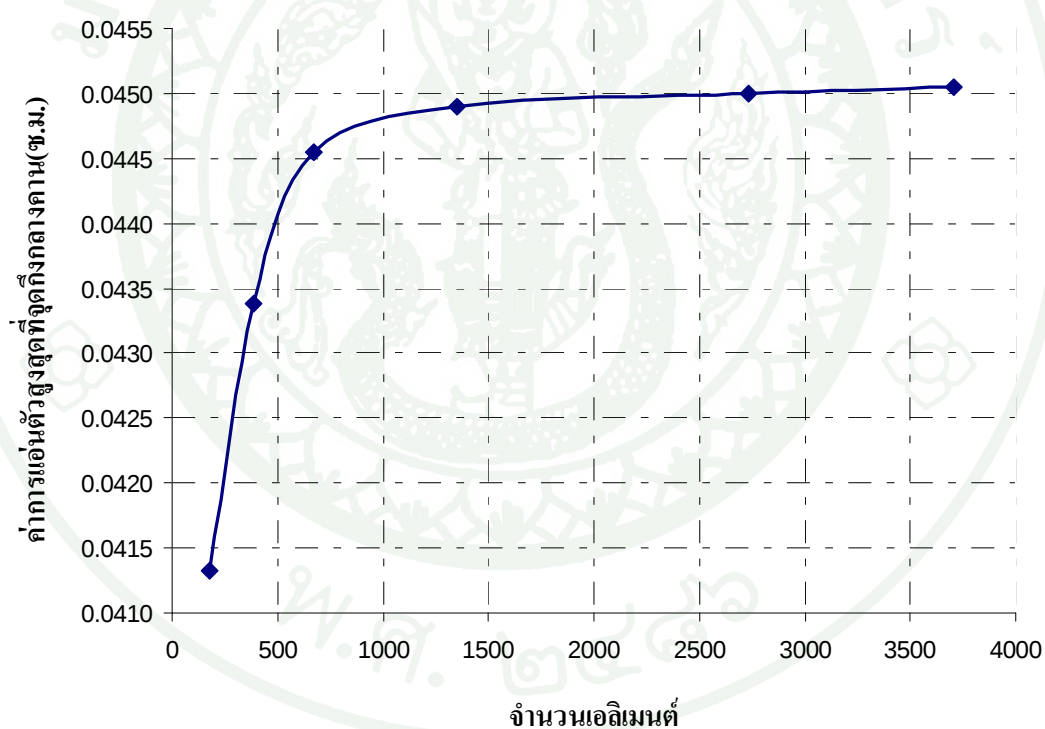
5. ความละเอียดของจำนวนเอลิเมนต์

ผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาในปัญหานั้นๆ ซึ่งหมายความว่า หลักการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนรากฐานที่ว่า สมการที่สร้างขึ้นมานั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับ สมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาได้ประกอบกันเข้าทำให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ ซึ่งในความหมายทางกายภาพจะคล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมเข้าด้วยกัน ก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง และจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่หามาลงในระบบสมการชุดใหญ่นี้ แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าวซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของปัญหานั้น (ภาสกร, 2550) และ ธีรนัย (2551) ได้ทดสอบจำนวนเอลิเมนต์ที่มากขึ้นกับค่าการแอ่นตัวซึ่งแสดงให้เห็นว่า การแบ่งจำนวนเอลิเมนต์ ทีละเล็กละน้อยมากขึ้นเท่าใด ก็จะทำให้มีการลู่เข้าของผลลัพธ์ (Converged solution) ถูกต้องมากยิ่งขึ้น ดังนั้นการกำหนดจำนวน เอลิเมนต์ทีละเล็กละน้อยจะยิ่งช่วยทำให้การแก้สมการดังกล่าวซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการแบ่งจำนวนเอลิเมนต์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องจาก

วิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำนายพฤติกรรมของคาน ดังนั้นเพื่อแสดงความถูกต้องของแบบจำลองในวิทยานิพนธ์ จะทำการแบ่งเอลิเมนต์ย่อยจาก 180 387 675 1,350 2,736 และ 3708 เอลิเมนต์แสดงในตารางที่ 8 และภาพที่ 27 ซึ่งแบบจำลองจะลู่เข้าที่จำนวน 1,500 เอลิเมนต์ ในวิทยานิพนธ์ จะใช้แบบจำลองคอนกรีตที่มีขนาด 3,348 เอลิเมนต์ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าจำนวนการแบ่งเอลิเมนต์สามารถก่อให้เกิดผลเฉลยที่ถูกต้องได้

ตารางที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอิเล็กเมนต์-การเอนตัวสูงสุด

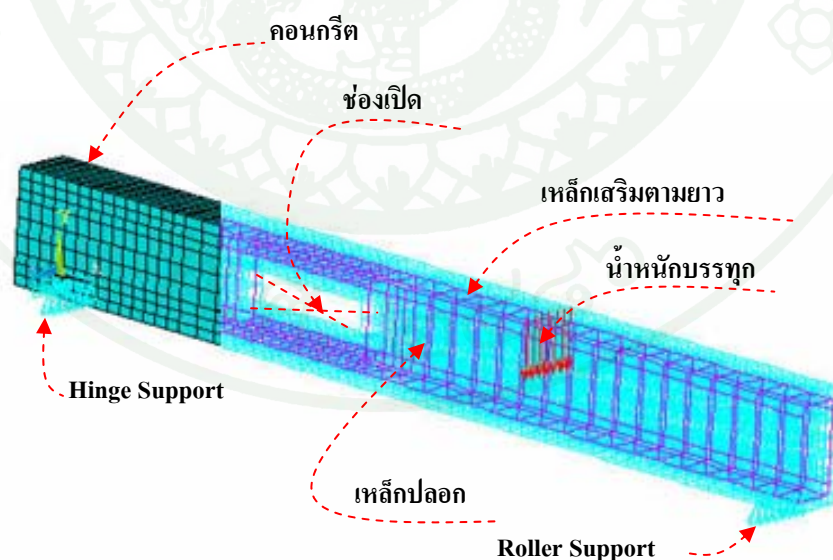
ตำแหน่งที่	จำนวนอิเล็กเมนต์	ค่าการเอนตัวสูงสุดที่จุดกึ่งกลางคาน(ช.ม.)
1	180	0.04132
2	387	0.04338
3	675	0.04455
4	1350	0.04489
5	2736	0.04500
6	3708	0.04505



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอิเล็กเมนต์-การเอนตัวสูงสุด

6. รายละเอียดแบบจำลอง 3 มิติ

จากที่ได้ทำการพิสูจน์จำนวนเอลิเมนต์แบบจำลอง 3 มิติ ที่ผลเฉลยจะมีค่าความถูกต้องประมาณ 1,500 เอลิเมนต์ ซึ่งในการทำจริงแบบจำลอง 3 มิติ ประกอบด้วยเอลิเมนต์คอนกรีต และเอลิเมนต์ของเหล็กเสริมในการสร้างแบบจำลองจะต้องแบ่งเอลิเมนต์คอนกรีตให้เหมาะสมกับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ตำแหน่งของเหล็กเสริม ตำแหน่งจตุรรองรับ ตำแหน่งของน้ำหนักรบรรทุก และตำแหน่งของช่องเปิด อีกทั้งยังต้องดูความเหมาะสมของอัตราส่วน ความกว้าง ความยาว ความลึก ให้ไม่ต่างเกินไป แสดงดังภาพที่ 16 เหนือช่องเปิดด้านความลึกของหน้าตัดจะมีเหล็กเสริมตามยาว 2 ชั้น วางเรียงกันทำให้ บริเวณชั้นส่วนบน และชั้นส่วนล่างด้านความลึกต้องแบ่งเอลิเมนต์ให้ได้ 3 ช่วง ความลึกของเอลิเมนต์มีขนาดเท่ากับ 3.67 ซม.ทางด้านความกว้าง เมื่อจำกัดขนาด เอลิเมนต์จากความลึกได้แบ่งเป็น 6 ช่วง ความกว้างเอลิเมนต์มีขนาด 3.33 ซม.ทางด้านความยาวจะแบ่งเป็น 3 บริเวณ ได้แก่บริเวณช่วงเหล็กปลอกกระยะเรียง 10 ซม.เอลิเมนต์มีขนาดยาว 2.5 ซม.บริเวณช่วงเหล็กปลอกกระยะเรียง 7.5 ซม.เอลิเมนต์มีขนาดยาว 7.5 ซม.ช่วงเหล็กปลอกกระยะเรียง 4 ซม. เอลิเมนต์มีขนาดยาว 4 ซม.แสดงดังภาพที่ 28 ซึ่งจากการแบ่งขนาดเอลิเมนต์จะต้องมีความระมัดระวังเป็นอย่างมากกับ ปัจจัยหลายอย่างทำให้จำนวนเอลิเมนต์มีขนาดเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้การประมวลผลทำได้ช้าลงตามลำดับ และสามารถอธิบายรายละเอียดของเอลิเมนต์ของทั้ง 3 กรณีได้จากตาราง 9, 10 และ 11 ตามลำดับ



ภาพที่ 28 แบบจำลอง 3 มิติ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ 9 จำนวนเอลิเมนต์ และชนิดของเอลิเมนต์คานคอนกรีต 3 มิติ กรณีที่ 1 การเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด

ความยาวช่องเปิด (ซ.ม.)	คุณสมบัติวัสดุ	ชนิดของเอลิเมนต์	จำนวนเอลิเมนต์
หน้าตัดเต็ม	คอนกรีต	Solid 65	3,657
	เหล็กตามยาว	Link 8	552
	เหล็กปลอก	Link 8	944
60	คอนกรีต	Solid 65	3,348
	เหล็กตามยาว	Link 8	552
	เหล็กปลอก	Link 8	952
80	คอนกรีต	Solid 65	3,312
	เหล็กตามยาว	Link 8	560
	เหล็กปลอก	Link 8	990
100	คอนกรีต	Solid 65	3,276
	เหล็กตามยาว	Link 8	568
	เหล็กปลอก	Link 8	1049
120	คอนกรีต	Solid 65	3,240
	เหล็กตามยาว	Link 8	576
	เหล็กปลอก	Link 8	1126

ตารางที่ 10 จำนวนเอลิเมนต์ และชนิดของเอลิเมนต์คานคอนกรีต 3 มิติ กรณีที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความลึกของช่องเปิด

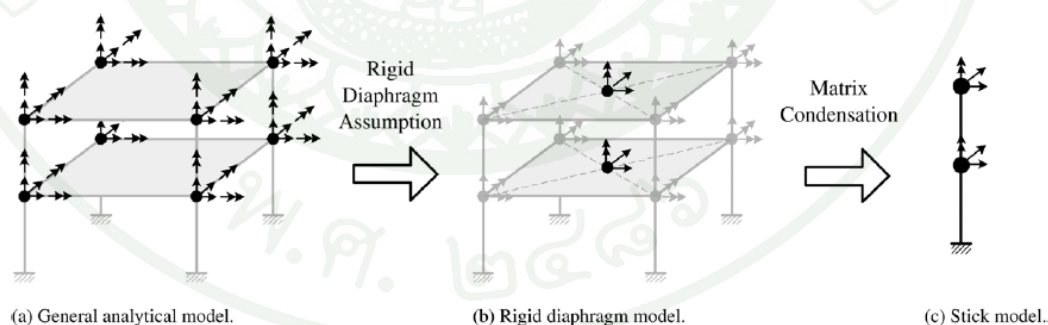
ความลึกช่องเปิด (ซ.ม.)	คุณสมบัติวัสดุ	ชนิดของเอลิเมนต์	จำนวนเอลิเมนต์
หน้าตัดเต็ม	คอนกรีต	Solid 65	3,657
	เหล็กตามยาว	Link 8	552
	เหล็กปลอก	Link 8	944
18	คอนกรีต	Solid 65	3,348
	เหล็กตามยาว	Link 8	552
	เหล็กปลอก	Link 8	952
22	คอนกรีต	Solid 65	3,972
	เหล็กตามยาว	Link 8	552
	เหล็กปลอก	Link 8	1,076
26	คอนกรีต	Solid 65	4,248
	เหล็กตามยาว	Link 8	552
	เหล็กปลอก	Link 8	1,177

ตารางที่ 11 จำนวนเอลิเมนต์ และชนิดของเอลิเมนต์คานคอนกรีต 3 มิติ กรณีที่ 3 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของช่องเปิด

ตำแหน่งช่องเปิด (ซ.ม.)	คุณสมบัติวัสดุ	ชนิดของเอลิเมนต์	จำนวนเอลิเมนต์
65	คอนกรีต	Solid 65	3,348
	เหล็กตามยาว	Link 8	552
	เหล็กปลอก	Link 8	952
115	คอนกรีต	Solid 65	3,348
	เหล็กตามยาว	Link 8	552
	เหล็กปลอก	Link 8	952
165	คอนกรีต	Solid 65	3,348
	เหล็กตามยาว	Link 8	552
	เหล็กปลอก	Link 8	952
215	คอนกรีต	Solid 65	3,348
	เหล็กตามยาว	Link 8	552
	เหล็กปลอก	Link 8	952
265	คอนกรีต	Solid 65	3,348
	เหล็กตามยาว	Link 8	552
	เหล็กปลอก	Link 8	952

3. คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ 1 มิติ

ลำดับต่อไปจะกล่าวถึงคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ 1 มิติ เป็นการใช้เทคนิคทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยให้แบบจำลอง 1 มิติ มีลักษณะง่าย สะดวก และพร้อมใช้งาน มีการศึกษาในเรื่องการใช้เทคนิคทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อลดระยะเวลาในการคำนวณเพื่อให้เอลิเมนต์ง่ายขึ้น Guen Lee *et al.* (2005) ได้วิเคราะห์ของโครงสร้างตีกรวมกับแผ่นพื้นเนื่องจากผลกระทบของการสั่น ซึ่งโครงสร้างส่วนมากจะไม่สนใจผลกระทบของค่าความแข็งของแผ่นพื้น และค่าคานรูปตัวที (T-section beam) ทำให้ค่าความแข็งทางแนวราบของโครงสร้างมีค่าน้อย และเพื่อความถูกต้อง ในการวิเคราะห์ควรกำหนดให้แผ่นพื้น และคานควรมีการแบ่งจำนวนเอลิเมนต์ให้เพียงพอ แต่ปัญหาคือใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่มาก ดังนั้นควรใช้เทคนิคทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ได้แก่ Substructuring techniques, Super-elements, and Rigid diaphragms มาใช้ในการลดความอิสระในการเคลื่อนที่ (DOF) แสดงดังภาพที่ 29 การวิเคราะห์โครงสร้างของตึกในระนาบ (in-plane) จะไม่นำค่าความแข็งของแผ่นพื้นมาวิเคราะห์ เมื่อใช้เทคนิค Rigid diaphragms จะมี 3 DOF ในแต่ละจุดต่อดังนี้ ทิศทางในแนวราบ 2 DOF และทิศทางในการหมุนตัว 1 DOF และนอกจากนี้หากใช้เทคนิค matrix condensation จะถูกเรียกว่า stick model ซึ่งมี 3 DOF ในแต่ละชั้น ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้ ในแต่ละชั้นแบบจำลองทั่วไปจะมี 24 DOF แบบจำลอง Rigid diaphragms 15 DOF และท้ายสุดแบบจำลอง stick model ซึ่งมี 3 DOF



ภาพที่ 29 การลดความอิสระในการเคลื่อนที่ (DOF) ด้วยวิธี Diaphragm assumption and Matrix condensation

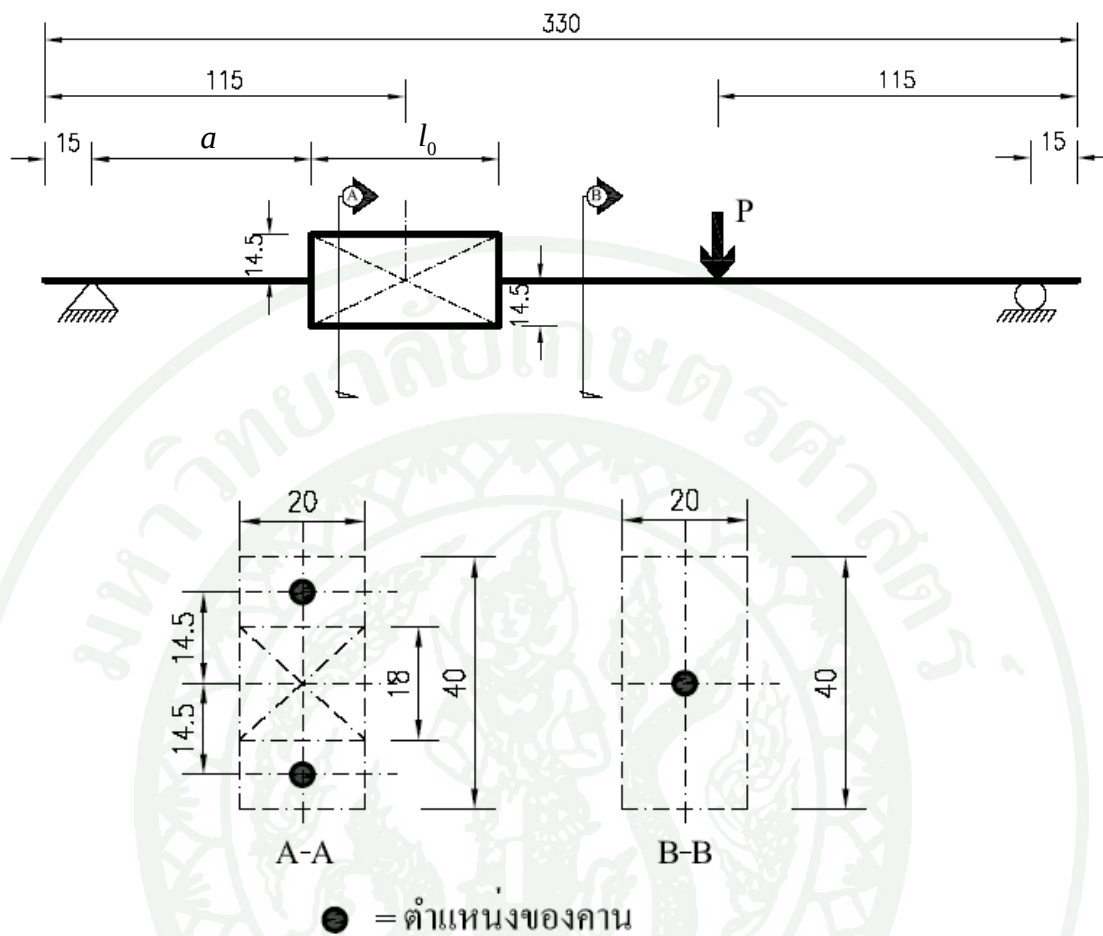
ที่มา: Guen Lee *et al.* (2005)

ลักษณะทางกายภาพของคาน และวิธีการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 1 มิติ ข้อมูลของคานเช่น คุณสมบัติวัสดุ (Material property) สภาวะขอบเขต และพฤติกรรมน้ำหนักบรรทุก ได้อ้างอิงกับงานวิจัยของ Tan (1982) ที่พิจารณาคาน R_2 และได้ศึกษาพฤติกรรมคาน 3 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 การเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด กรณีที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความลึกของช่องเปิด และกรณีที่ 3 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของช่องเปิด ซึ่งเหมือนแบบจำลอง 3 มิติ ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น การศึกษาแบบจำลอง 1 มิติจะศึกษาเพียงช่วงเส้นตรงเท่านั้น (จุดแรกของการแตกร้าว) เพื่อให้ง่าย และใช้เวลาน้อยในการวิเคราะห์พฤติกรรมคานคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ จำเป็นต้องหาวิธีสร้างแบบจำลองให้ง่ายขึ้นซึ่งกำหนดให้มีจำนวนเอลิเมนต์น้อยลง พฤติกรรมน้ำหนักบรรทุก- การแอ่นตัว มีค่าใกล้เคียงความจริงหากสามารถเปรียบเทียบพฤติกรรมในช่วงก่อนจุดแรกของการแตกร้าวได้อย่างชัดเจน

ลักษณะการสร้างแบบจำลอง 1 มิติ จะยึดจุดศูนย์กลางของหน้าตัดคานคอนกรีตในการสร้างชิ้นส่วนของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และจะต้องมีการแปลงหน้าตัดคานคอนกรีตโดยให้แบบจำลอง 1 มิติ มีค่าความแข็งเทียบเท่าแบบจำลอง 3 มิติ เรียกว่าค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดแปลง (I_{tr}) ซึ่งจะพิจารณาคอนกรีตเต็มพื้นที่เนื่องจากยังไม่มีเกิดการแตกร้าวเกิดขึ้น บริเวณรอบช่องเปิดจะใช้เทคนิคทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อยืดรั้งให้ช่องเปิดมีพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว เป็นไปตามทฤษฎีซึ่งรายละเอียด ขนาดความยาว ความกว้าง ความลึก ตำแหน่งการเสริมเหล็กตามยาว และเหล็กทางขวาง ขนาดช่องเปิดที่เปลี่ยนแปลงของคานทั้ง 3 กรณี แสดงได้ดังต่อไปนี้

1. กรณีที่ 1 การเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด 1 มิติ

การเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด แสดงดังภาพที่ 30 กำหนดศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 100 ซม. มีค่าคงที่ทุกการเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด ซึ่งค่าที่มีการเปลี่ยนแปลง จะใช้ขนาด l_0 และค่า a ดังนี้ 40 ซม. ($a=80$ ซม.), 60 ซม. ($a=70$ ซม.), 80 ซม. ($a=60$ ซม.), 100 ซม. ($a=50$ ซม.) และ 120 ซม. ($a=40$ ซม.) จากภาพตัด A-A ตำแหน่งของคานชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่างห่างจากระยะศูนย์กลางหน้าตัดเป็นระยะ 14.5 ซม. มีค่าคงที่ทุกการเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด และจากภาพตัด B-B ตำแหน่งของคานจะอยู่ศูนย์กลางของหน้าตัด ปริมาณเหล็กเสริม และคอนกรีตที่หายไป จะทำการแปลงหน้าตัดเพื่อหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดแปลง (I_{tr})



ภาพที่ 30 ขนาด และรายละเอียดการเสริมเหล็กคานคอนกรีต กรณีที่ 1 (1 มิติ)

จากลักษณะทางกายภาพการเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิดคานสามารถสรุประดับความยาวของช่องเปิดแบ่งออกเป็น 5 ระดับ ดังนี้ $R_{ls} - 40$ กำหนดความยาว 40 ซม., $R_{ls} - 60$ กำหนดความยาว 60 ซม., $R_{ls} - 80$ กำหนดความยาว 80 ซม., $R_{ls} - 100$ กำหนดความยาว 100 ซม., $R_{ls} - 120$ กำหนดความยาว 120 ซม. แสดงดังตารางที่ 12 สำหรับเหล็กเสริมตามยาวใช้ปริมาณเท่าเดิมตามแบบจำลอง 3 มิติ บริเวณส่วนรับแรงอัดจะเสริมเหล็ก 2-13 มม. จำนวน 4 เส้น บริเวณส่วนรับแรงดึงจะเสริมเหล็ก 2-13 มม. จำนวน 2 เส้น และเสริมเหล็ก 2-16 มม. จำนวน 2 เส้น

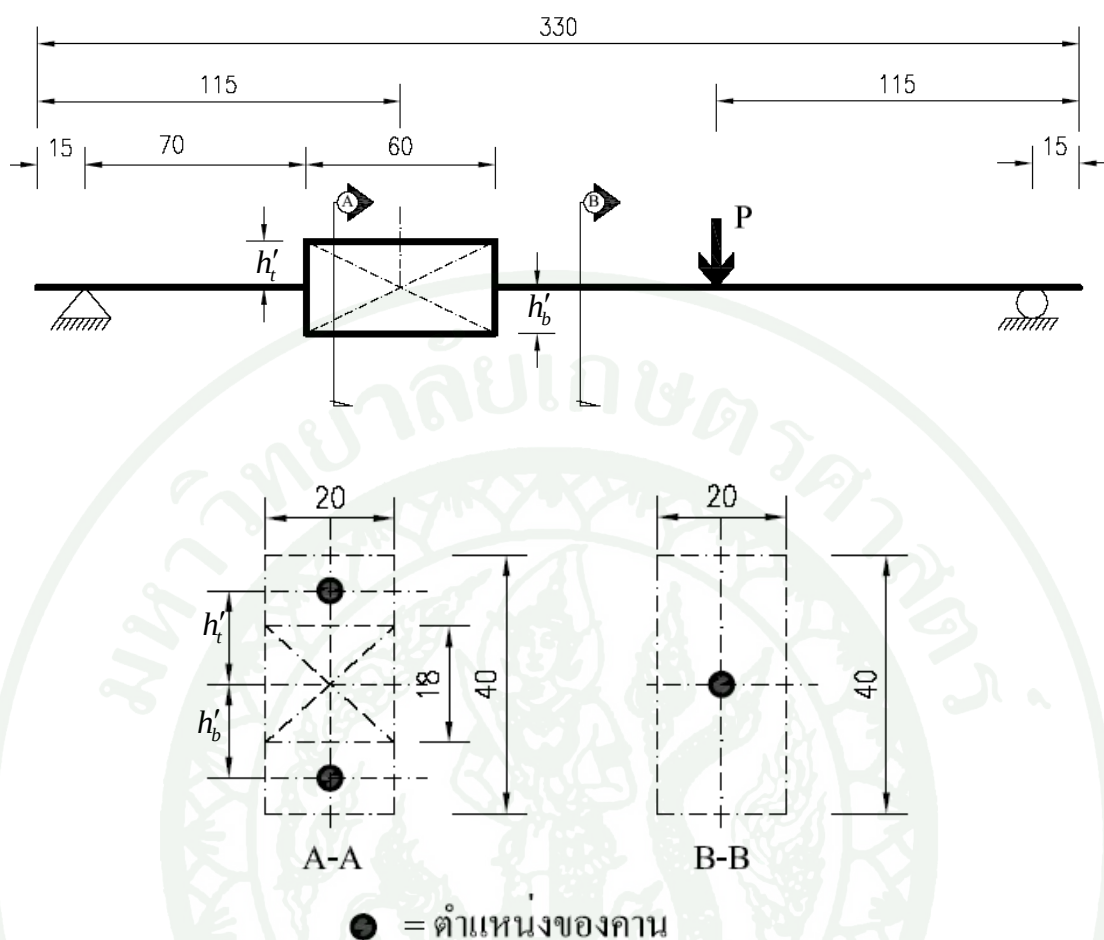
ตารางที่ 12 ลักษณะทางกายภาพของคานทดสอบที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ กรณีที่ 1 (1 มิติ)

คานทดสอบ	หน่วย	กรณีที่ 1 (1 มิติ)				
		$R_{ls} - 40$	$R_{ls} - 60$	$R_{ls} - 80$	$R_{ls} - 100$	$R_{ls} - 120$
ความยาวรวมของคาน ; L'	ซ.ม.	330	330	330	330	330
ความยาวรวมระหว่างฐานรองรับของคาน ; L	ซ.ม.	300	300	300	300	300
ความกว้างของคาน ; B	ซ.ม.	20	20	20	20	20
ความลึกของคาน ; D	ซ.ม.	40	40	40	40	40
ความลึกของช่องเปิด ; d_0	ซ.ม.	18	18	18	18	18
ความยาวของช่องเปิด ; l_0	ซ.ม.	40	60	80	100	120
ความลึกของช่วงต่อส่วนบน ; h_t	ซ.ม.	11	11	11	11	11
ความลึกของช่วงต่อส่วนล่าง ; h_b	ซ.ม.	11	11	11	11	11
ความยาวจากจุดรองรับถึงขอบของช่องเปิด ; a	ซ.ม.	80	70	60	50	40

หมายเหตุ ลักษณะความกว้าง ความยาว และความลึกของหน้าตัดคานแสดงไว้เพื่อนำไปแปลงเป็นค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดแปลง (I_{tr})

2. กรณีที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความลึกของช่องเปิด 1 มิติ

การเปลี่ยนแปลงความลึกของช่องเปิด แสดงดังภาพที่ 31 กำหนดศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 100 ซม. มีค่าคงที่ทุกการเปลี่ยนแปลงความลึกของช่องเปิด ซึ่งค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงอธิบายระยะความลึกที่เปลี่ยนแปลงจากภาพตัด A-A ตำแหน่งคานของชั้นส่วนบน (h'_t) และชั้นส่วนล่าง (h'_b) ห่างจากศูนย์กลางหน้าตัดเท่ากับ 13.5, 14.5, 15.5 และ 16.5 ซม. ตามลำดับ ความยาวจากจุดรองรับถึงขอบของช่องเปิด มีค่าคงที่เท่ากับ 70 ซม. และจากภาพตัด B-B ตำแหน่งของคานจะอยู่ศูนย์กลางของหน้าตัด ปริมาณเหล็กเสริม และคอนกรีต ที่หายไป จะทำการแปลงหน้าตัดเพื่อหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดแปลง (I_{tr})



ภาพที่ 31 ขนาด และรายละเอียดการเสริมเหล็กคานคอนกรีต กรณีที่ 2 (1 มิติ)

จากลักษณะทางกายภาพการเปลี่ยนแปลงความลึกของช่องเปิดคานสามารถสรุประดับความยาวของช่องเปิดแบ่งออกเป็น 4 ระดับ ดังนี้ R_{ds} - 14 กำหนดความลึก 14 ซม., R_{ds} - 18 กำหนดความลึก 18 ซม., R_{ds} - 22 กำหนดความลึก 22 ซม., R_{ds} - 26 กำหนดความยาว 26 ซม. แสดงดังตารางที่ 13 สำหรับเหล็กเสริมตามยาวใช้ปริมาณเท่าเดิมตามแบบจำลอง 3 มิติ บริเวณส่วนรับแรงอัดจะเสริมเหล็ก 2-13 มม. จำนวน 4 เส้น บริเวณส่วนรับแรงดึงจะเสริมเหล็ก 2-13 มม. จำนวน 2 เส้น และเสริมเหล็ก 2-16 มม. จำนวน 2 เส้น

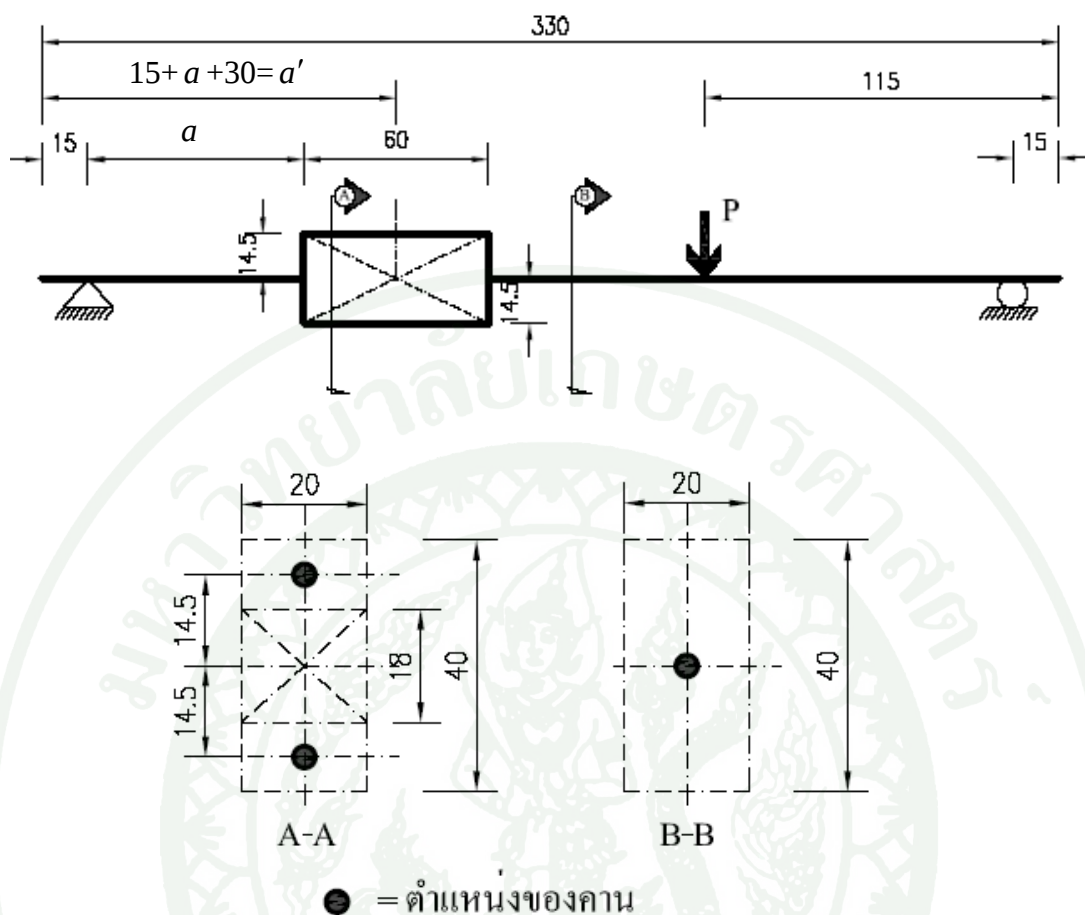
ตารางที่ 13 ลักษณะทางกายภาพของคานทดสอบที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ กรณีที่ 2 (1 มิติ)

คานทดสอบ	หน่วย	กรณีที่ 2 (1 มิติ)			
		$R_{ds} - 14$	$R_{ds} - 18$	$R_{ds} - 22$	$R_{ds} - 26$
ความยาวรวมของคาน ; L'	ซ.ม.	330	330	330	330
ความยาวรวมระหว่างฐานรองรับของคาน ; L	ซ.ม.	300	300	300	300
ความกว้างของคาน ; B	ซ.ม.	20	20	20	20
ความลึกของคาน ; D	ซ.ม.	40	40	40	40
ความลึกของช่องเปิด ; d_0	ซ.ม.	14	18	22	26
ความยาวของช่องเปิด ; l_0	ซ.ม.	60	60	60	60
ความลึกของช่วงต่อส่วนบน ; h_t	ซ.ม.	13	11	9	7
ความลึกของช่วงต่อส่วนล่าง ; h_b	ซ.ม.	13	11	9	7
ความยาวจากจุดรองรับถึงขอบของช่องเปิด ; a	ซ.ม.	70	70	70	70
ตำแหน่งของคานช่วงต่อส่วนบน ; h'_t	ซ.ม.	13.5	14.5	15.5	16.5
ตำแหน่งของคานช่วงต่อส่วนล่าง ; h'_b	ซ.ม.	13.5	14.5	15.5	16.5

หมายเหตุ ลักษณะความกว้าง ความยาว และความลึกของหน้าตัดคานแสดงไว้เพื่อนำไปแปลงเป็นค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดแปลง (I_{tr})

3. กรณีที่ 3 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของช่องเปิด 1 มิติ

การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของช่องเปิด แสดงดังภาพที่ 32 ศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 65 ซ.ม. ($a=20$ ซ.ม.), 115 ซ.ม. ($a=70$ ซ.ม.), 165 ซ.ม. ($a=120$ ซ.ม.), 215 ซ.ม. ($a=170$ ซ.ม.), 265 ซ.ม. ($a=220$ ซ.ม.) ตามลำดับ ขนาดความลึก และความยาวของช่องเปิดมีค่าคงที่ทุกการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของช่องเปิดอธิบายจาก จากภาพตัด A-A ตำแหน่งของคานขึ้นส่วนบน และขึ้นส่วนล่างห่างจากระยะศูนย์กลางหน้าตัดเป็นระยะ 14.5 ซ.ม. มีค่าคงที่ทุกการเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด และจากภาพตัด B-B ตำแหน่งของคานจะอยู่ศูนย์กลางของหน้าตัด ปริมาณเหล็กเสริม และคอนกรีต ที่หายไป จะทำการแปลงหน้าตัดเพื่อหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดแปลง (I_{tr})



ภาพที่ 32 ขนาด และรายละเอียดการเสริมเหล็กคานคอนกรีต กรณีที่ 3 (1 มิติ)

จากลักษณะทางกายภาพการเปลี่ยนแปลง ตำแหน่งของช่องเปิดคานสามารถสรุป ระดับตำแหน่งของช่องเปิดแบ่งออกเป็น 5 ระดับ ดังนี้ $R_{ps} - 65$ กำหนดศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 65 ซม., $R_{ps} - 115$ กำหนดศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 115 ซม., $R_{ps} - 165$ กำหนดศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 165 ซม., $R_{ps} - 215$ กำหนดศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 215 ซม., $R_{ps} - 265$ แสดงดังตารางที่ 14 กำหนดศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. สามารถแสดงดังตารางที่ 3 สำหรับเหล็กเสริมตามยาวใช้ปริมาณเท่าเดิมตามแบบจำลอง 3 มิติ บริเวณส่วนรับแรงอัดจะเสริมเหล็ก 2-13 มม. จำนวน 4 เส้น บริเวณส่วนรับแรงดึงจะเสริมเหล็ก 2-13 มม. จำนวน 2 เส้น และเสริมเหล็ก 2-16 มม. จำนวน 2 เส้น

ตารางที่ 14 ลักษณะทางกายภาพของคานทดสอบที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ กรณีที่ 3 (1 มิติ)

คานทดสอบ	หน่วย	กรณีที่ 3 (1 มิติ)				
		$R_{ps} - 65$	$R_{ps} - 115$	$R_{ps} - 165$	$R_{ps} - 215$	$R_{ps} - 265$
ความยาวรวมของคาน ; L'	ซ.ม.	330	330	330	330	330
ความยาวรวมระหว่างฐานรองรับของคาน ; L	ซ.ม.	300	300	300	300	300
ความกว้างของคาน ; B	ซ.ม.	20	20	20	20	20
ความลึกของคาน ; D	ซ.ม.	40	40	40	40	40
ความลึกของช่องเปิด ; d_0	ซ.ม.	18	18	18	18	18
ความยาวของช่องเปิด ; l_0	ซ.ม.	60	60	60	60	60
ความลึกของช่วงต่อส่วนบน ; h_t	ซ.ม.	11	11	11	11	11
ความลึกของช่วงต่อส่วนล่าง ; h_b	ซ.ม.	11	11	11	11	11
ความยาวจากจุดรองรับถึงขอบของช่องเปิด ; a	ซ.ม.	20	70	120	170	220
ศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคาน ; a'	ซ.ม.	65	115	165	215	265

หมายเหตุ ลักษณะความกว้าง ความยาว และความลึกของหน้าตัดคานแสดงไว้เพื่อนำไปแปลงเป็นค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดแปลง (I_{tr})

4. วิธีการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 1 มิติ

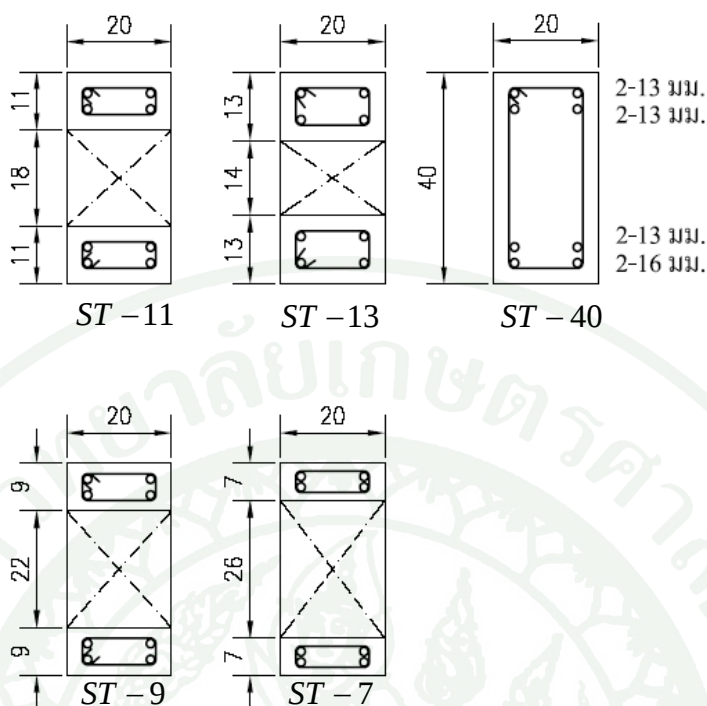
ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ ที่สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว เป็นขั้นตอนจนถึงการวิบัติของแบบจำลอง และสามารถบอกรายละเอียดการแตกร้าวเอลิเมนต์ได้ แต่มีข้อเสีย เช่น ใช้เวลาในการขึ้นรูปนาน การแบ่งจำนวนเอลิเมนต์คอนกรีตก็ต้องสอดคล้องกับการเสริมเหล็ก กล่าวคือ คาน 1 ตัวต้องประกอบด้วยเอลิเมนต์ของคอนกรีต และเหล็กเสริม ที่มีทั้งเหล็กเสริมแนวยาว และเหล็กเสริมแนวตั้ง รวมเอลิเมนต์แล้วไม่ต่ำกว่า 3,000 เอลิเมนต์ การวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ที่ต้องใช้เวลานานเนื่องจากต้องผ่านกระบวนการทำซ้ำของน้ำหนักบรรทุกเพื่อให้ได้ซึ่งผลเฉลยที่ถูกต้อง สิ่งเหล่านี้ล้วนทำให้

เสียเวลา หากเราสามารถทราบพฤติกรรมของคานที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่อย่างถ่องแท้ และต้องการทราบเพียงน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว ในช่วงก่อนการแตกร้าวของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 1 มิติ จะสามารถช่วยประหยัดเวลา การสร้างแบบจำลอง 1 มิติ ทำได้ง่ายประกอบไปด้วยเอลิเมนต์ไม่ถึง 10 เอลิเมนต์ ไม่ต้องกังวลเรื่องการแบ่งจำนวนเอลิเมนต์ แต่สิ่งที่สำคัญจะต้องให้ความสนใจพฤติกรรมรอบช่องเปิด การยึดติดชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่างให้มีแนวโน้มของการเสียรูปในทิศทางเดียวกัน สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวอย่างเป็นขั้นตอนเพื่อให้เข้าใจความเข้าใจในการสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ 1 มิติ ดังนี้

- 1) กำหนดค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดแปลง (I_{tr})
- 2) กำหนดชนิดเอลิเมนต์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 1 มิติ
- 3) กำหนดสภาวะขอบเขต และน้ำหนักบรรทุก
- 4) กำหนดรายละเอียดแบบจำลอง 1 มิติ

1. ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดแปลง (I_{tr})

ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดแปลง หลักการกำหนดให้แปลงหน้าตัดคานให้เป็นวัสดุเพียงชนิดเดียว (แปลงหน้าตัดเหล็กเสริมให้เป็นหน้าตัดคอนกรีต หรือกลับกัน) โดยใช้อัตราส่วนระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก และคอนกรีต (Modular ratio, n) ตามมาตรฐาน วสท. นั้นยังกำหนดเพิ่มเติมว่า ค่าอัตราส่วนโมดูลัสจะต้องไม่น้อยกว่า 6 และจะต้องเป็นจำนวนเต็ม (กรณีพิเศษให้ปัดเป็นจำนวนเต็มที่ใกล้เคียง) เพื่อความละเอียดต้องหักพื้นที่เหล็กเสริมด้วย ในวิทยานิพนธ์ได้กำหนดหน้าตัดคานสำหรับแปลงหน้าตัดเหล็กเสริมให้เป็นหน้าตัดคอนกรีต แสดงดังภาพที่ 33 ซึ่ง ST-40 หมายถึงคานขนาดกว้าง 20 ซม. ลึก 40 ซม. ST-13 หมายถึงคานที่มีชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่างขนาดกว้าง 20 ซม. ลึก 13 ซม. ST-11 หมายถึงคานที่มีชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่างขนาดกว้าง 20 ซม. ลึก 11 ซม. ST-9 หมายถึงคานที่มีชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่างขนาดกว้าง 20 ซม. ลึก 9 ซม. และ ST-7 หมายถึงคานที่มีชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่างขนาดกว้าง 20 ซม. ลึก 7 ซม. ในการสร้างแบบจำลอง 1 มิติ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดแปลง (I_{tr}) ของชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่าง จะมีค่าต่างกันเนื่องจากเป็นเอลิเมนต์ที่ต่างกัน ซึ่งสามารถสรุปค่า พื้นที่หน้าตัด (A_{tr}) และ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดแปลง (I_{tr}) ได้ดังตารางที่ 15



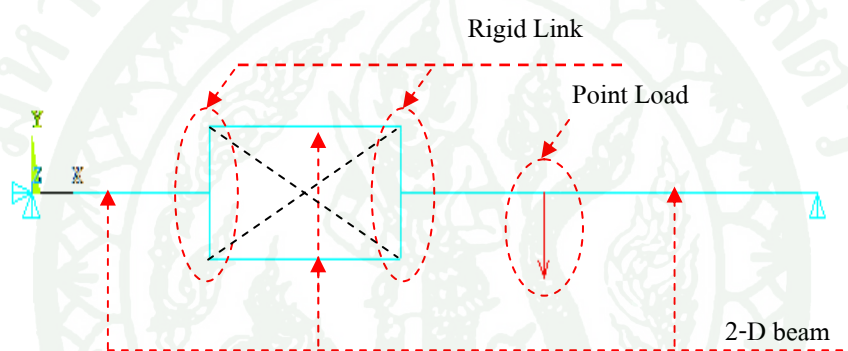
ภาพที่ 33 ขนาด และรายละเอียดการเสริมเหล็กคานคอนกรีต กรณีแปลงหน้าตัดคาน

ตารางที่ 15 ขนาด และรายละเอียดหน้าตัดคาน กรณีแปลงหน้าตัดคาน

ชนิดหน้า ตัดคาน	ชั้นส่วน	กว้าง (ซ.ม.)	ลึก (ซ.ม.)	A_r (ซ.ม. ²)	I_r (ซ.ม. ⁴)
ST-40	-	20	40	892	126,950
ST _t -13	บน	20	13	301	3,854
ST _b -13	ล่าง	20	13	311	3,903
ST _t -11	บน	20	11	261	2,356
ST _b -11	ล่าง	20	11	271	2,391
ST _t -9	บน	20	9	221	1,306
ST _b -9	ล่าง	20	9	231	1,330
ST _t -7	บน	20	7	181	709
ST _b -7	ล่าง	20	7	191	744

2. ชนิดเอลิเมนต์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 1 มิติ

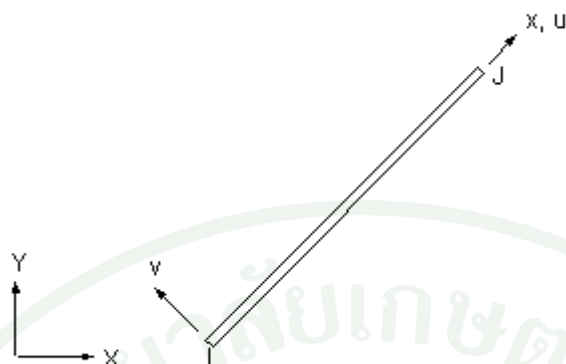
การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 1 มิติจะประกอบด้วยวัสดุทำหน้าที่คล้ายกับคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งใช้คุณสมบัติโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดแปลง (I_r) และวัสดุที่ทำหน้าที่เชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างช่องเปิดเพื่อให้พฤติกรรมน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว สอดคล้องระหว่างชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่าง แสดงดังภาพที่ 34 เป็นลักษณะแบบการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 1 มิติ จากโปรแกรมเชิงพาณิชย์ (ANSYS) ซึ่งใช้เอลิเมนต์ 2-D beam เป็นวัสดุที่ทำหน้าที่คล้ายกับคอนกรีตเสริมเหล็ก แล้วใช้ Rigid link เชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่าง สามารถอธิบายรายละเอียดชนิดเอลิเมนต์ได้ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 34 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 1 มิติจากโปรแกรมเชิงพาณิชย์ (ANSYS)

2.1 ชนิดเอลิเมนต์ (2-D beam)

เอลิเมนต์ 2-D Beam จากโปรแกรมเชิงพาณิชย์ (ANSYS) จะกำหนดให้ชื่อ Beam 3 คุณสมบัติโดยทั่วไปสามารถรับแรงดึง แรงอัด และ โมเมนต์คดได้ เอลิเมนต์ชนิดนี้มี 2 จุดต่อ ซึ่งแต่ละจุดต่อมีความอิสระในการเคลื่อนที่ (Degree of Freedom) ได้ใน 3 ทิศทางคือในทิศทางตามแนวแกน X, Y และหมุนรอบแกน Z ดังภาพที่ 35 ได้แสดงคุณสมบัติเรขาคณิต ตำแหน่งของจุดต่อ ซึ่งเอลิเมนต์ชนิดนี้ประกอบด้วย พื้นที่หน้าตัด โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัด ความสูง และคุณสมบัติของวัสดุ ความเครียดเริ่มแรกของเอลิเมนต์ชนิดนี้กำหนดให้เท่ากับ Δ/L , เมื่อ Δ คือ ผลต่างระหว่างความยาวของเอลิเมนต์ L คือ ความยาวของเอลิเมนต์ และเอลิเมนต์นี้ไม่มีผลของแรงเฉือนเข้ามาเกี่ยวข้องกับการแอ่นตัว ซึ่งค่าเมทริกซ์สติเฟเนส สำหรับชิ้นส่วน โครงสร้าง 2-D Elastic Beam แสดงดังสมการที่ 43



ภาพที่ 35 เอลิเมนต์ 2-D Elastic Beam (Beam 3)

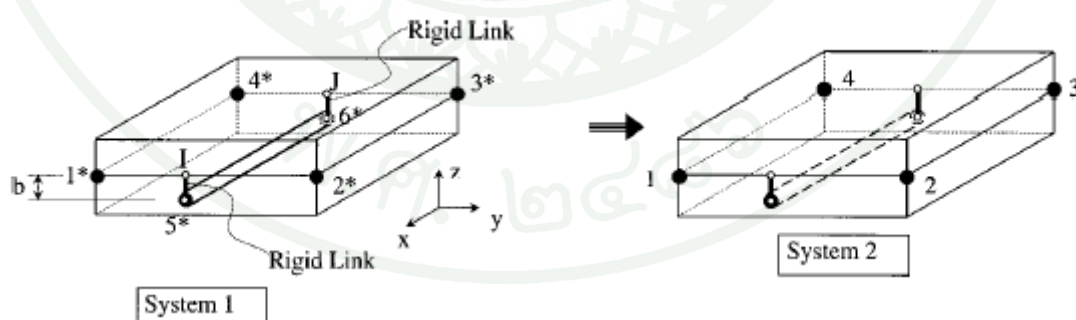
ที่มา: ANSYS (2003)

$$K = \begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & -\frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & \frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (43)$$

- เมื่อ A = พื้นที่หน้าตัดของเอลิเมนต์
 E = โมดูลัสยืดหยุ่นของเอลิเมนต์
 L = ความยาวของเอลิเมนต์
 I = โมเมนต์ความเฉื่อยของเอลิเมนต์

2.2 ชนิด Rigid link

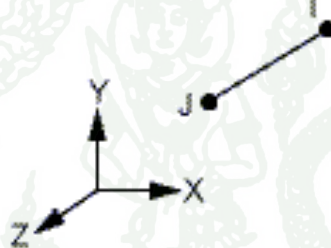
อันดับแรกต้องทำความเข้าใจว่าทำไมต้องใช้ Rigid link จากพฤติกรรมรอบช่องเปิด ทำให้สามารถสรุปวิธีสร้างแบบจำลองดังแสดงในภาพที่ 20 พฤติกรรมรอบช่องเปิดของชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนมีทิศทางการเคลื่อนที่ตรงข้ามกัน ชิ้นส่วนบนรับแรงอัดวัสดุมีการหดตัว ชิ้นส่วนล่างรับแรงดึงทำให้พฤติกรรมของชิ้นส่วนที่ต่อยึดกับชิ้นส่วนทั้งสองต้องรับภาระในการส่งถ่ายแรง และหากใช้เป็นวัสดุอย่างอื่นจะต้องมีค่าการแอ่นตัวเนื่องจากความแข็งเพิ่มขึ้นเพราะชิ้นส่วนที่ต่อยึดกับชิ้นส่วนทั้งสองมีค่าความยาวซึ่ง มีแรงเนื่องจากชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่างกระทำ เปรียบเสมือนคานยื่น หรือไม่ก็ต้องใช้เป็นชิ้นส่วนที่ใหญ่ๆ มากจนไม่มีผลกับการเสียรูปของ โครงสร้าง ดังนั้นจึงกำหนดให้เป็น Rigid link มีงานวิจัยที่รองรับการใช้เทคนิค Rigid link เพื่อมา เชื่อมต่อความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุ 2 ชิ้น Phuvoravan and Sotelino (2005) ได้แสดงให้เห็นการ เชื่อมต่อความสัมพันธ์ระหว่างเหล็กเสริมในแผ่นพื้น และคอนกรีตเพื่อยึดตรึงการเคลื่อนที่ให้ สอดคล้องกัน การสร้างแบบจำลองทำได้โดย เอลิเมนต์ของเหล็กเสริมจะถูกแทนด้วย Euler beam element เอลิเมนต์ของคอนกรีตจะถูกแทนด้วย Kirchhoff shell element 4 จุดต่อการเชื่อมยึด ระหว่างเหล็กเสริมในแผ่นพื้น และคอนกรีต จะใช้เอลิเมนต์แบบ Rigid link การเชื่อมระหว่าง เอลิเมนต์ช่วยให้ลดจุดต่อลงได้โดยพฤติกรรมของวัสดุจะรวมกันเป็นเอลิเมนต์เดียว (Embedded) เอลิเมนต์นี้สามารถตอบสนองพฤติกรรมไร้เชิงเส้น (Nonlinearity) แสดงดังภาพที่ 36 การจำลอง เอลิเมนต์ของเหล็กเสริมในแผ่นพื้นคอนกรีตที่เชื่อมต่อด้วย Rigid link



ภาพที่ 36 การจำลองเอลิเมนต์ของเหล็กเสริมในแผ่นพื้น และคอนกรีตที่เชื่อมต่อด้วย Rigid link

ที่มา: Phuvoravan and Sotelino (2005)

เนื่องจากมีการศึกษารองรับการใช้ Rigid link วิทยานิพนธ์นี้จะใช้เทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยการเชื่อมต่อ Rigid link บริเวณรอบช่องเปิดเพื่อยึดรั้งชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่าง เพื่อให้การเคลื่อนที่ระหว่างชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่างสอดคล้องกัน โปรแกรมเชิงพาณิชย์ (ANSYS) จะกำหนดให้ชื่อ MPC 184 (Multipoint constraint elements) คุณสมบัติโดยทั่วไป มีทั้งหมด 2 จุดต่อ ซึ่งแต่ละจุดต่อจะมีความอิสระในการเคลื่อนที่ และหมุนตัวรอบแกนในทิศทางตามแนวแกน X, Y และ Z สามารถใช้ยึดรั้งระหว่างจุดต่อ 2 จุด ให้มีความสัมพันธ์สอดคล้องกัน ซึ่งยังสามารถส่งถ่ายแรง และโมเมนต์ในการวิเคราะห์โครงสร้างได้อีกด้วย ข้อจำกัดในการใช้ Rigid link มีดังต่อไปนี้ ความยาวจะต้องมีค่ามากกว่า 0 ระหว่างจุดต่อ I ถึง J แสดงดังภาพที่ 37 และพื้นที่ Rigid link จะมีค่าเป็น 1 หน่วยเสมอ



ภาพที่ 37 เอลิเมนต์ MPC 184 (Multipoint constraint elements)

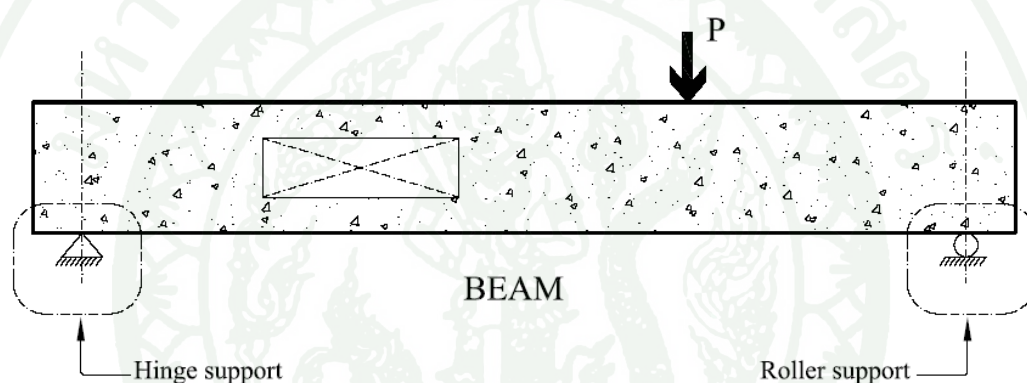
ที่มา: Ansys (2003)

3. สภาวะขอบเขต และน้ำหนักบรรทุก

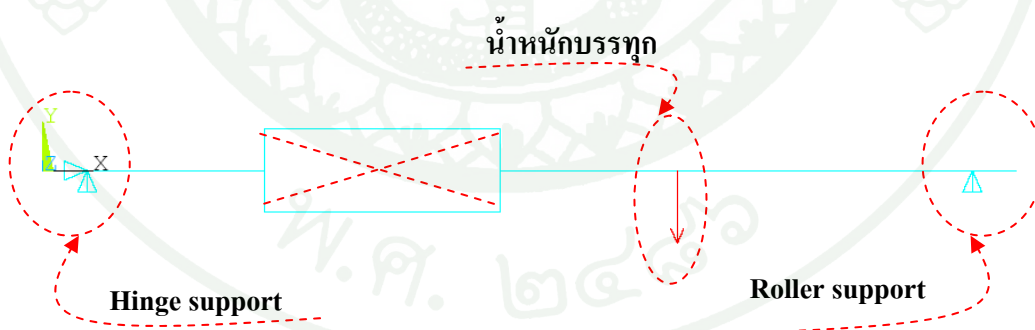
ลักษณะสภาวะขอบเขตของแบบจำลอง 1 มิติ จะคล้ายกับแบบจำลอง 3 มิติ จะต่างกันตรงจำนวนจุดต่อที่มีเพียงด้านละ 1 จุดต่อ เท่านั้นทำให้ความอิสระในการเคลื่อนที่มีค่าน้อยลง ส่งผลให้เวลาในการคำนวณผลเฉลยน้อย ซึ่ง Tan (1982) ได้ใช้กันอย่างง่ายในการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 38(A) ฐานรองรับแบบ Hinge support จะกำหนดให้ล็อกกับช่องเปิดขนาดใหญ่ และฐานรองรับแบบ Roller support จะกำหนดให้ล็อกกับน้ำหนักบรรทุก ในวิทยานิพนธ์ฐานรองรับแบบ Roller support ถูกสร้างให้สามารถเคลื่อนได้ในแนวแกน X (แกนตามความยาวคาน) โดยกำหนดให้ความอิสระในการเคลื่อนที่ (DOF) เป็น 0 (ศูนย์) ในแนวแกน Y และ Z ($U_y=0, U_z=0$) สภาวะเงื่อนไขขอบเขตการยึดรั้งของฐานรองรับแสดง

ดังภาพที่ 38(B) ส่วนฐานรองรับแบบ Hinge support ไม่สามารถให้เคลื่อนได้ทุกทิศทาง โดยกำหนดให้ ความอิสระในการเคลื่อนที่ (DOF) เป็น 0 (ศูนย์) ในแนวแกน X,Y และ Z ($U_x=0$, $U_y=0$, $U_z=0$) ในการ ใส่ฐานรองรับจะใส่ตามทุกจุดต่อ (Node)

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว ของโครงสร้างคานคอนกรีตด้วยวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์ 1 มติ มีความสำคัญในเชิงการวิเคราะห์ห้วงยัดหยุ่น เมื่อมีน้ำหนักบรรทุก กระทำคานจะเริ่มแอ่นตัวจนปรากฏการแตกร้าวครั้งแรก (First crack) ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ น้ำหนักบรรทุกที่จุดก่อนการแตกร้าวครั้งแรกเท่านั้น โดยได้น้ำหนักบรรทุกจากการวิเคราะห์ แบบจำลอง 3 มิติ ซึ่งตำแหน่งที่ใส่น้ำหนักบรรทุกจะใส่ตรงกับแบบจำลอง 3 มิติ ทุกกรณี



(A) ลักษณะสถานะเงื่อนไขขอบเขต ของคานที่ใช้ทดสอบ Tan (1982)



(B) ลักษณะสถานะเงื่อนไขขอบเขต ของคานโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

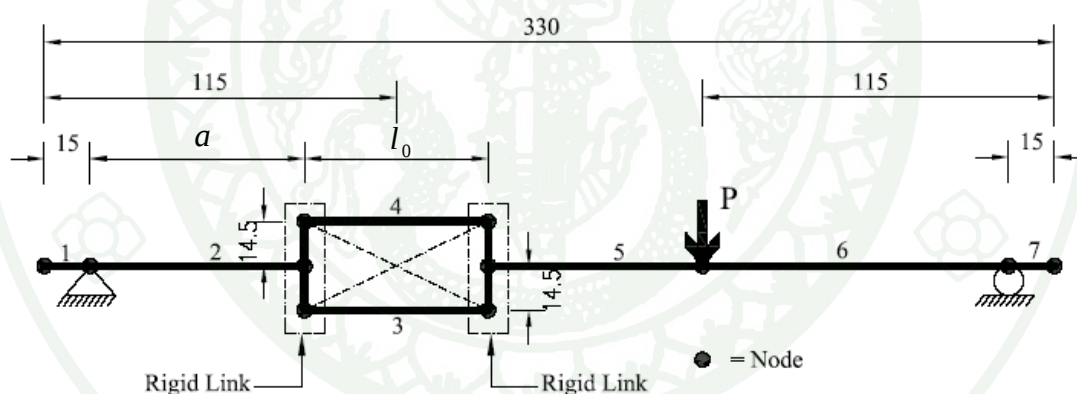
ภาพที่ 38 ลักษณะสถานะเงื่อนไขขอบเขต ของแบบจำลองคาน 1 มิติ

4. รายละเอียดแบบจำลอง 1 มิติ

รายละเอียดของแบบจำลอง 1 มิติ ได้กล่าวมาบ้างแล้วข้างต้น ต่อไปจะสรุปการสร้างแบบจำลอง 1 มิติ ซึ่งลักษณะการเชื่อมเอลิเมนต์ทำอย่างไร และตำแหน่งเอลิเมนต์แต่ละตัวเป็นอย่างไร การสร้างแบบจำลอง 1 มิติ อาจไม่ยากนักแต่ก็ต้องอธิบายรายละเอียดกันพอสมควร ซึ่งจะสรุปเป็นกรณีดังต่อไปนี้

4.1 กรณีที่ 1 การเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด 1 มิติ

การเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด 1 มิติ ใช้เอลิเมนต์ 2-D beam ได้แก่ เอลิเมนต์ 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ซึ่งความยาวของเอลิเมนต์ 2 และ 5 จะลดความยาวลง เนื่องจากขยายช่องเปิด และขณะเดียวกัน เอลิเมนต์ 3 และ 4 ยาวเพิ่มขึ้น เอลิเมนต์ 3 และ 4 จะใช้ Rigid link เชื่อมยึดจากจุดต่อของเอลิเมนต์ 2,5 ถึง เอลิเมนต์ 3,4 มีความยาว 14.5 ซม.แสดงดังรูปภาพที่ 39 และชนิดหน้าตัดตามแสดงดังตารางที่ 16



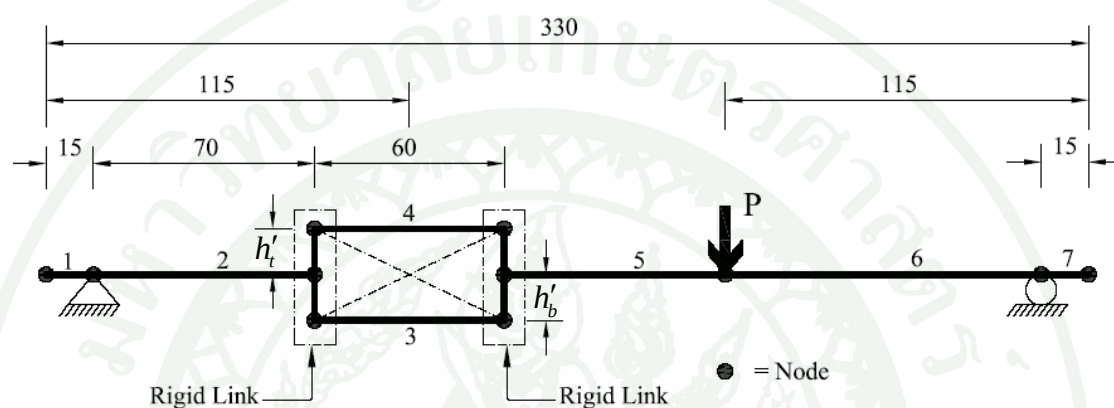
ภาพที่ 39 ลักษณะรายละเอียด กรณีที่ 1 การเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด 1 มิติ

ตารางที่ 16 ชนิดของเอลิเมนต์ และชนิดหน้าตัดตาม กรณีที่ 1

ความยาว ช่องเปิด (ซ.ม.)	เอลิเมนต์	ชนิดเอลิเมนต์	ชนิดหน้าตัดตาม
	1,2,5,6,7		ST – 40
40,60,80,100,120	3	2-D beam	ST _b – 11
	4		ST _t – 11

4.2 กรณีที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความลึกของช่องเปิด 1 มิติ

การเปลี่ยนแปลงความลึกของช่องเปิด 1 มิติ ใช้เอลิเมนต์ 2-D beam ได้แก่เอลิเมนต์ 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ซึ่งความลึกของช่องเปิดที่เปลี่ยนแปลงทำให้ Rigid link มีความยาวเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปภาพที่ 40 และชนิดหน้าตัดคานแสดงดังตารางที่ 17



ภาพที่ 40 ลักษณะรายละเอียด กรณีที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความลึกของช่องเปิด 1 มิติ

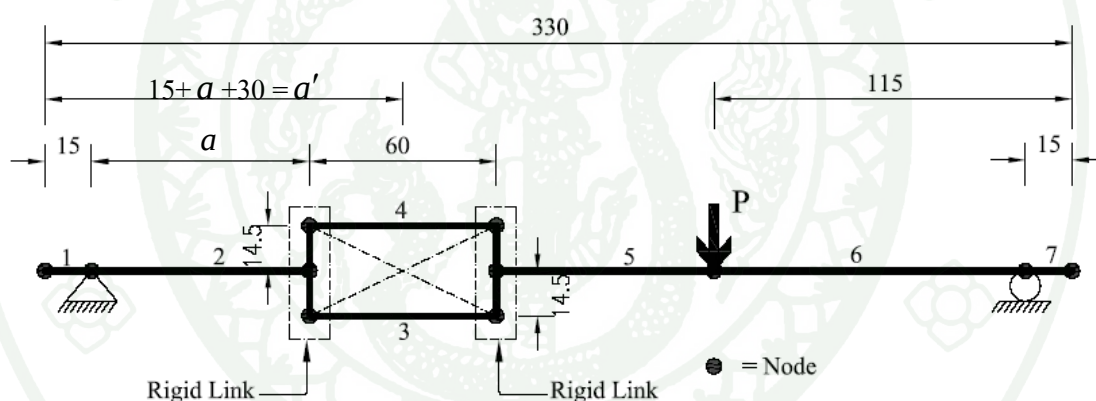
ตารางที่ 17 ชนิดของเอลิเมนต์ และชนิดหน้าตัดคาน กรณีที่ 2

ความลึก ช่องเปิด (ซ.ม.)	เอลิเมนต์	ชนิดเอลิเมนต์	ชนิดหน้าตัดคาน
14, 18, 22, 26	1,2,5,6,7		ST – 40
	3		ST _b – 13
14	4		ST _t – 13
	3		ST _b – 11
18	4	2-D beam	ST _t – 11
	3		ST _b – 9
22	4		ST _t – 9
	3		ST _b – 7
26	4		ST _t – 7

4.3 กรณีที่ 3 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของช่องเปิด 1 มิติ

การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของช่องเปิด 1 มิติ มีจุดที่จะต้องพิจารณา 3 ช่วงได้แก่ ช่องเปิดก่อนถึงน้ำหนักบรรทุก ช่องเปิดตรงน้ำหนักบรรทุก และช่องเปิดผ่านน้ำหนักบรรทุก ซึ่งแต่ละกรณี ใช้เอลิเมนต์ 2-D beam จำนวน 7 เอลิเมนต์เท่ากัน จะต่างกันตรงตำแหน่ง และความยาวของเอลิเมนต์ ซึ่งรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

1) ช่องเปิดก่อนถึงน้ำหนักบรรทุก ใช้เอลิเมนต์ 2-D beam ได้แก่เอลิเมนต์ 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ซึ่งเอลิเมนต์ 2 และ 5 ความยาวของเอลิเมนต์จะเปลี่ยนแปลง เนื่องจากตำแหน่งของช่องเปิดเปลี่ยนแปลง ขณะเดียวกัน เอลิเมนต์ 3 และ 4 ความยาวจะคงที่ และใช้ Rigid link เชื่อมยึดจากจุดต่อของเอลิเมนต์ 2,5 ถึงเอลิเมนต์ 3,4 มีความยาว 14.5 ซม. แสดงดังรูปภาพที่ 41 และชนิดหน้าตัดตามแสดงดังตารางที่ 18

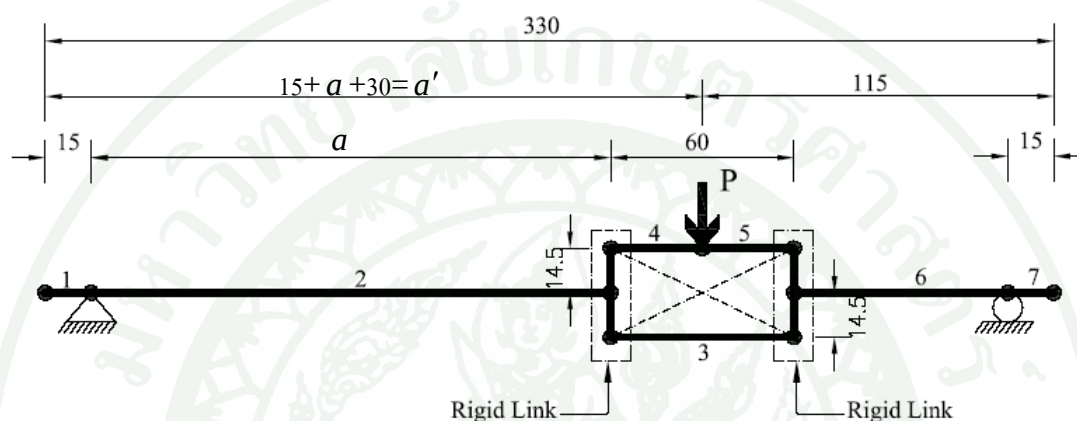


ภาพที่ 41 ลักษณะรายละเอียด กรณีที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด 1 มิติ

ตารางที่ 18 ชนิดของเอลิเมนต์ และชนิดหน้าตัดตาม

ตำแหน่ง ช่องเปิด (ซ.ม.)	เอลิเมนต์	ชนิดเอลิเมนต์	ชนิดหน้าตัดตาม
	1,2,5,6,7		ST – 40
65,115,165	3	2-D beam	ST _b – 11
	4		ST _t – 11

2) ช่องเปิดตรงน้ำหนักบรรทุก ใช้เอลิเมนต์ 2-D beam ได้แก่เอลิเมนต์ 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ซึ่งเอลิเมนต์ 2 และ 6 ความยาวของเอลิเมนต์จะเปลี่ยนแปลง เนื่องจากตำแหน่งของช่องเปิดเคลื่อนที่มาอยู่ได้น้ำหนักบรรทุก และน้ำหนักบรรทุกจะอยู่ตำแหน่งระหว่างจุดต่อ เอลิเมนต์ 4 และ 5 จะใช้ Rigid link เชื่อมยึดจากจุดต่อของเอลิเมนต์ 2,6 ถึง เอลิเมนต์ 3,4,5 มีความยาว 14.5 ซม. แสดงดังรูปภาพที่ 42 และชนิดหน้าตัดคานแสดงดังตารางที่ 19

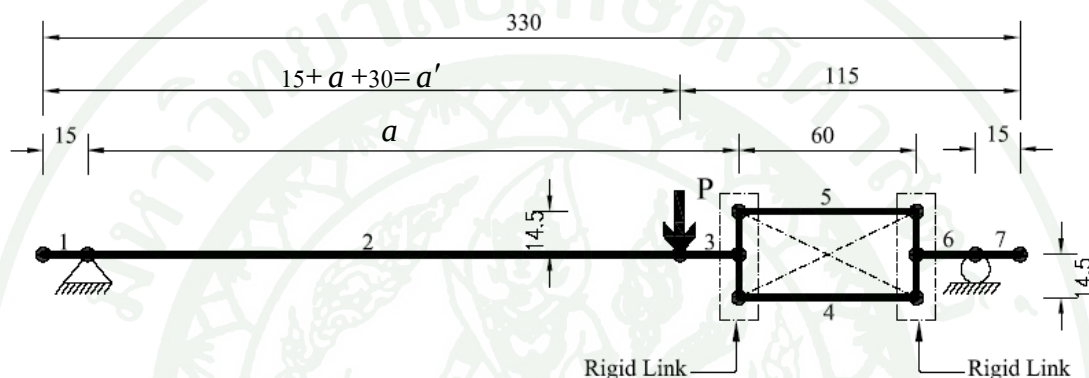


ภาพที่ 42 ลักษณะรายละเอียด กรณีที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด 1 เมตร

ตารางที่ 19 ชนิดของเอลิเมนต์ และชนิดหน้าตัดคาน กรณีน้ำหนักบรรทุกบนชิ้นส่วนล่าง

ตำแหน่ง ช่องเปิด (ซ.ม.)	ตำแหน่ง เอลิเมนต์	ชนิดเอลิเมนต์	ชนิดหน้าตัดคาน
	1,2,6,7		$ST - 40$
215	3	2-D beam	$ST_b - 11$
	4,5		$ST_t - 11$

3) ช่องเปิดผ่านน้ำหนักบรรทุกทุก ใช้เอลิเมนต์ 2-D beam ได้แก่เอลิเมนต์ 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ซึ่งเอลิเมนต์ 3 และ 6 ความยาวของเอลิเมนต์จะเปลี่ยนแปลง เนื่องจากตำแหน่งของช่องเปิดเปลี่ยนแปลงตามความยาวที่กำหนดไว้เหมือนแบบจำลอง 3 มิติ และขณะเดียวกัน น้ำหนักบรรทุกจะอยู่ตำแหน่งระหว่างจุดต่อ เอลิเมนต์ 2 และ 3 จะใช้ Rigid link เชื่อมยึดจากจุดต่อของเอลิเมนต์ 3,6 ถึง เอลิเมนต์ 4,5 มีความยาว 14.5 ซม. แสดงดังรูปภาพที่ 43 และชนิดหน้าตัดคานแสดงดังตารางที่ 20



ภาพที่ 43 ลักษณะรายละเอียด กรณีที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด 1 มิติ

ตารางที่ 20 ชนิดของเอลิเมนต์ และชนิดหน้าตัดคานกรณีผ่านน้ำหนักรบรรทุก

ตำแหน่ง ช่องเปิด (ซ.ม.)	เอลิเมนต์	ชนิดเอลิเมนต์	ชนิดหน้าตัดคาน
	1,2,3,6,7		ST – 40
265	4	2-D beam	ST _b – 11
	5		ST _t – 11

ผลและวิจารณ์

จากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ จะต้องมีการสอบเทียบแบบจำลองว่ามีความถูกต้องมากน้อยเพียงไร ดังนั้นจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของ Tan (1982) และเมื่อทำการสอบเทียบเสร็จจะสามารถพิจารณาพฤติกรรมต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

1) อธิบายพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว ของแบบจำลอง 3 มิติ ทั้ง 3 กรณี พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว จะมากหรือน้อยเกิดจากแรงต้านทานภายในของวัสดุ และการแอ่นตัวจะสอดคล้องตามน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นซึ่งจะพิจารณาเป็นช่วงๆ เช่น ช่วงก่อนการแตกร้าว และช่วงน้ำหนักบรรทุกประลัย

2) อธิบายการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานของแบบจำลอง 3 มิติ ทั้ง 3 กรณี พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงตามยาวคาน บ่งบอกค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณที่รับแรงอัด และบริเวณรับแรงดึง ของคอนกรีต หากคอนกรีตไม่สามารถรับแรงดึงได้ แนวแกนสะเทินจะเลื่อนระดับขึ้น ส่งผลให้กำลังของคานถึงกำลังประลัย จนกระทั่งเกิดการวิบัติ

3) อธิบายรูปแบบการแตกร้าวแบบจำลอง 3 มิติ เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้น เมื่อหน่วยแรงดึงในแกนหลัก (Principal tensile stress) ที่เกิดขึ้นมีค่าเกินกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต จะเกิดการแตกร้าวจนกระทั่งเกิดการวิบัติ

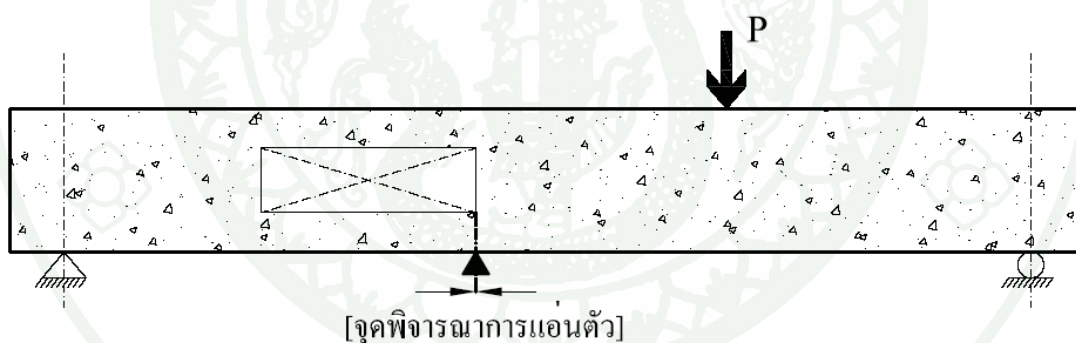
4) อธิบายพฤติกรรมแรงดึงที่เกิดของเหล็กเสริมตามยาวของแบบจำลอง 3 มิติ ทั้ง 3 กรณี พฤติกรรมแรงดึงของเหล็กเสริมจะบ่งบอกคุณสมบัติขณะรับน้ำหนักบรรทุก เมื่อมีแรงดึงมากแสดงว่าคอนกรีตได้ผลักรากให้เหล็กเสริมรับแรงดึง หรือที่น้ำหนักบรรทุกประลัย กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมอาจจะถึงกำลังคราก

5) เปรียบเทียบพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว ของแบบจำลอง 3 มิติ และแบบจำลอง 1 มิติ ทั้ง 3 กรณี ในช่วงยืดหยุ่นก่อนการแตกร้าวครั้งแรก

ซึ่งในหัวข้อต่างๆ ที่กล่าวมา จะขยายให้ชัดเจนยิ่งขึ้นตามลำดับสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

การสอบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ

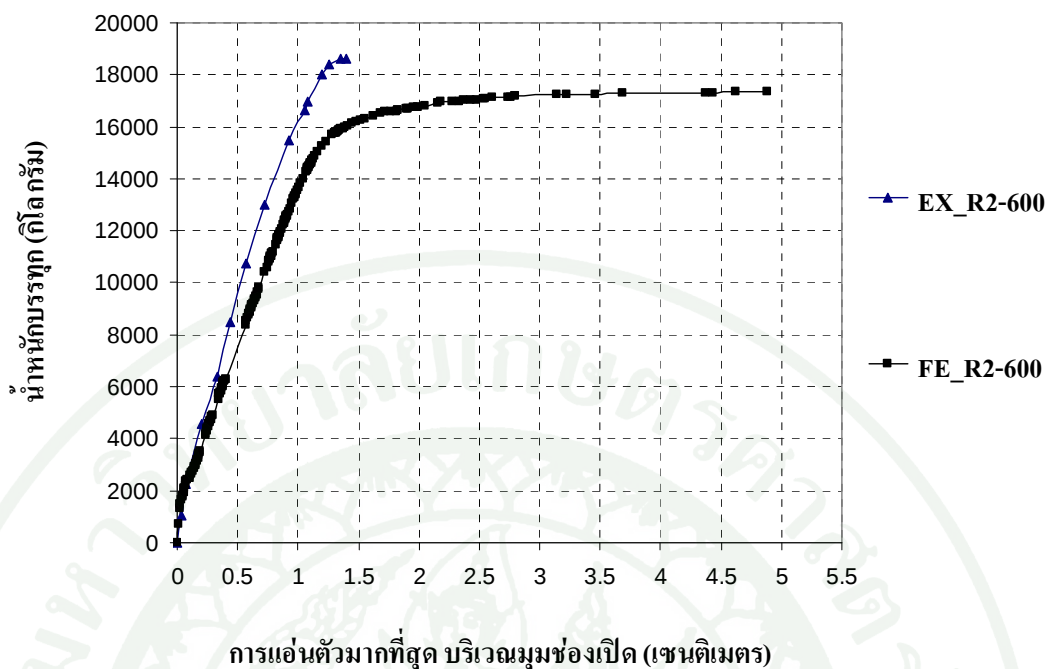
การสอบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ เป็นขั้นต้นของการพิจารณาพฤติกรรมจนถึงความน่าเชื่อถือด้วยวิธีการสร้างแบบจำลอง ซึ่งจะทำให้การเปรียบเทียบพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว กับการทดสอบของ Tan (1982) ดังภาพที่ 44 จุดพิจารณาการแอ่นตัวจะเป็นบริเวณมุมช่องเปิด ซึ่งเป็นจุดที่มีค่าการแอ่นตัวมากที่สุด และมีโมเมนต์มากที่สุด การสอบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ แสดงดังภาพที่ 45 น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว ใช้อักษรย่อ EX_R2-600 (ขนาดช่องเปิดยาว 60 ซม. ลึก 18 ซม.) และน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัวของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ใช้อักษรย่อ FE_R2-600 ผลการสอบเทียบในช่วง น้ำหนักบรรทุกไม่เกิน 6,000 กก. ค่าการแอ่นตัวมีลักษณะใกล้เคียงกัน และพฤติกรรมของกราฟน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ก็จะค่อยๆ เริ่มเบนออกห่าง จนถึงน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 17,358 กก. แบบจำลอง 3 มิติ จะมีพฤติกรรมพลาสติกคือการแอ่นตัวมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่น้ำหนักบรรทุกสูงที่สุดที่ ค่าความแตกต่างของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเมื่อเทียบกับผลการทดสอบมีค่า 6.7 เปอร์เซ็นต์ (%) แสดงดังตารางที่ 21



ภาพที่ 44 ตำแหน่งจุดพิจารณาการแอ่นตัว คานทดสอบที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ (Tan ,1982)

ตารางที่ 21 อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเทียบกับ EX_R2-600 (น้ำหนักบรรทุกสูงสุด 18,609.82 กก.)

ความยาวช่องเปิด (ซ.ม.)	น้ำหนักบรรทุกสูงสุด P_{UL} (กก.)	P_{UL} / EX_R2-600	เปอร์เซ็นต์ (%)
60	17,358	0.933	6.70



ภาพที่ 45 การสอบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ

พฤติกรรมน้ำหนักบรรจุ-การแอ่นตัว มีความแตกต่างกันถึงจะไม่มากนักอาจเนื่องจากขีดจำกัดของการสร้างแบบจำลองที่ยังคงตั้งสมมติฐานให้คุณสมบัติวัสดุเป็นวัสดุเนื้อเดียว (Homogeneous material) ซึ่งไม่เหมือนกับคอนกรีตจริงที่ประกอบด้วยเนื้อซีเมนต์ และช่องว่างของอากาศ ประการที่สองลักษณะการเชื่อมต่อของเหล็กเสริมกับเอลิเมนต์คอนกรีตทำได้ใกล้เคียงความเป็นจริงน้อยมาก เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง คอนกรีต และเหล็กเสริม ถูกสมมติให้เป็นแรงยึดเหนี่ยวสมบูรณ์ ที่ไม่มีการเลื่อนหลุดของเหล็กเสริมจากเอลิเมนต์คอนกรีต

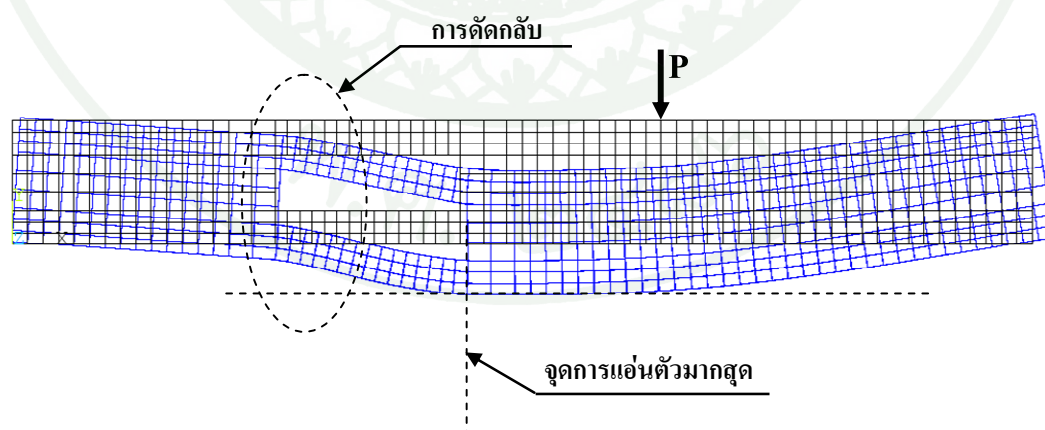
พฤติกรรมแบบจำลองหลัก 3 มิติ

จากการสอบเทียบแบบจำลองได้ใช้ขนาดช่องเปิดยาว 60 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_l - 60$, $R_d - 18$ และ $R_p - 10$) ในการวิเคราะห์จะใช้ขนาดจากการสอบเทียบแบบจำลองเป็นแบบจำลองหลัก 3 มิติ กับทุกสถานะที่เปลี่ยนแปลงดังนี้ กรณีที่ 1 การเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิดใช้ชื่อ $R_l - 60$ กรณีที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความลึกของช่องเปิดใช้ชื่อ $R_d - 18$ กรณีที่ 3 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของช่องเปิดใช้ชื่อ $R_p - 10$ ดังนั้นจะอธิบายพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรจุ-การแอ่นตัว ของแบบจำลองหลัก 3 มิติ (ขนาดช่องเปิดยาว 60 ซม. ลึก 18 ซม.) ก่อนเป็นอันดับแรก และตำแหน่งที่

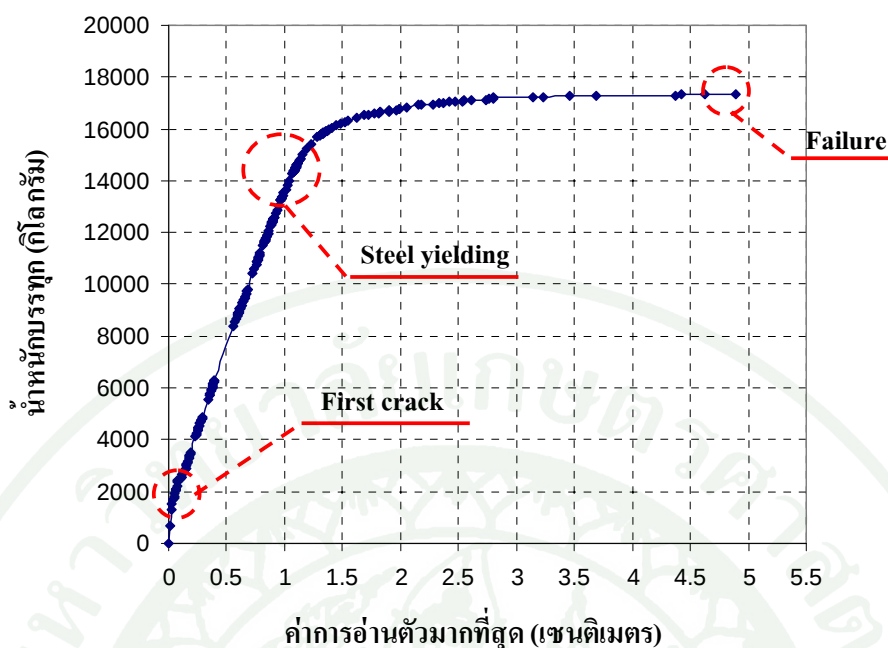
เกิดการแอ่นตัวสูงสุด ของคานที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ เป็นสิ่งที่คาดเดาลำบากเนื่องจากผลกระทบหลายรูปแบบของช่องเปิด ซึ่งการวิเคราะห์พฤติกรรมจะใช้ภาพจากโปรแกรมแอนซิส (ANSYS) ประกอบการอธิบาย และแยกเป็นกรณีย่อย เพื่อให้ชัดเจน และเข้าใจง่าย ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว ของแบบจำลองหลัก 3 มิติ

พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว ของแบบจำลองหลัก 3 มิติ มีขนาดช่องเปิดเท่ากับการทดสอบ EX_R2-600 (Tan ,1982) ซึ่งพฤติกรรมการแอ่นตัวเมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำ คานเริ่มแอ่นตัวตามพฤติกรรมของคานที่มีจุดรองรับอย่างง่าย และเมื่อน้ำหนักบรรทุกมากขึ้นการส่งถ่ายความเค้นผ่านระหว่างชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่าง ทำได้ยากขึ้น เนื่องจากช่องเปิดมีความยาวทำให้เกิดการคัดกลับที่มุมบนช่องเปิดฝั่งใกล้น้ำหนักบรรทุก (ทั้งชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่าง) ดังภาพที่ 46 จุดการแอ่นตัวมากที่สุดอยู่มุมช่องเปิดใกล้น้ำหนักบรรทุก และลักษณะชิ้นส่วนล่าง และชิ้นส่วนบนมีพฤติกรรมการคัดกลับรูปตัวเอส (S) ซึ่งพฤติกรรมน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัวแสดงดังภาพที่ 47 การแตกร้าวครั้งแรก (First crack) น้ำหนักบรรทุก ประมาณ 1,676 กก. และคานยังสามารถรับน้ำหนักบรรทุกต่อไปได้ จนเข้าสู่สภาวะไร้เชิงเส้นกระทั่งถึงจุดที่เหล็กเกิดการคราก (Steel yielding) น้ำหนักบรรทุก ประมาณ 15,800 กก. ต่อไปจะเข้าสู่ช่วงพลาสติกที่น้ำหนักบรรทุกจะคงที่เมื่อเทียบกับการแอ่นตัวที่เพิ่มขึ้นซึ่งพฤติกรรมนี้จะเกิดขึ้นเร็วมาก จนกระทั่งน้ำหนักบรรทุก 17,358 กก. คานจะวิบัติ (Failure)



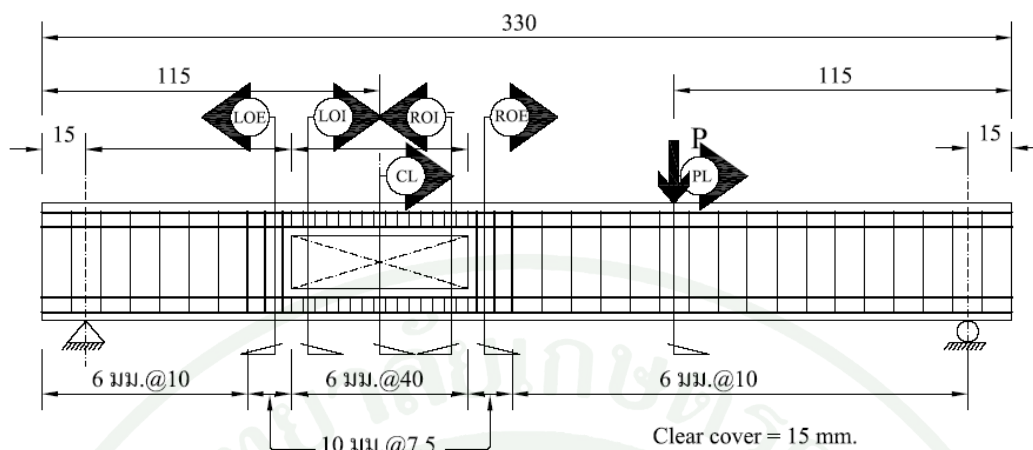
ภาพที่ 46 ลักษณะการแอ่นตัว แบบจำลองหลัก 3 มิติ



ภาพที่ 47 พฤติกรรมน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว แบบจำลองหลัก 3 มิติ

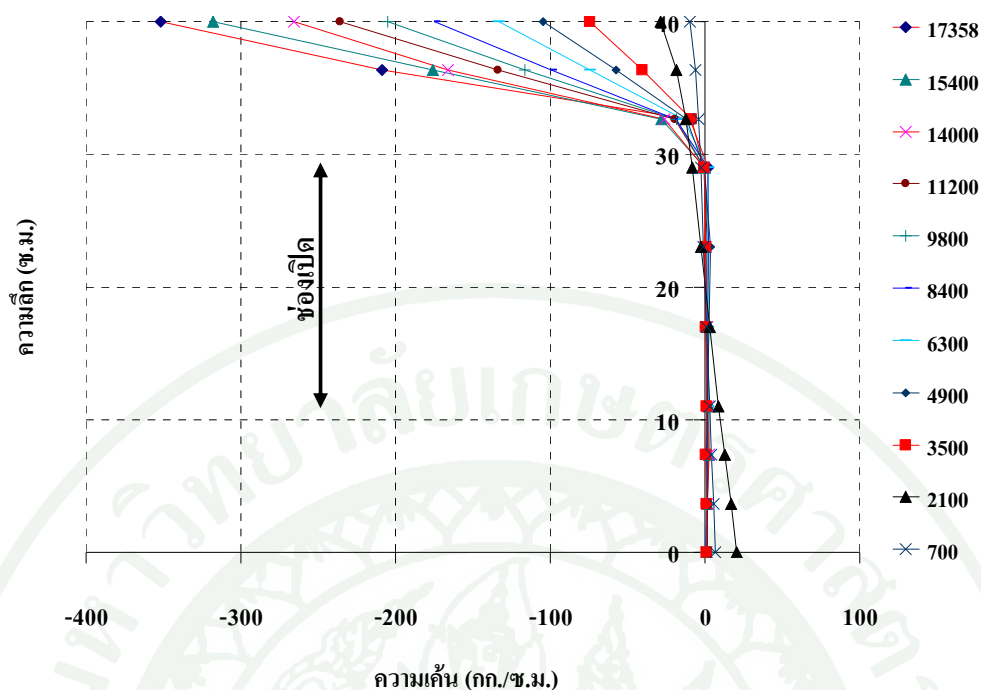
2. พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานแบบจำลองหลัก 3 มิติ

การวิเคราะห์พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคาน แบบจำลองหลัก 3 มิติ แสดงดังภาพที่ 48 ได้อธิบายลักษณะของตำแหน่งหน้าตัดที่จะต้องตัดผ่านเพื่ออธิบายได้แก่หน้าตัดคานที่น้ำหนักบรรทุกกระทำเรียกว่า Section-PL ตำแหน่งจะห่างจากจุดรองรับ 115 ซม. หน้าตัดคานก่อนเข้าสู่ช่องเปิดติดกับมุมช่องเปิดด้านที่ใกล้น้ำหนักบรรทุก เรียกว่า Section-ROE หน้าตัดคานภายในติดกับมุมช่องเปิดด้านที่ไกลน้ำหนักบรรทุกเรียกว่า Section-ROI หน้าตัดคานศูนย์กลางช่องเปิดเรียกว่า Section-CL หน้าตัดคานภายในติดกับมุมช่องเปิดด้านที่ไกลน้ำหนักบรรทุกเรียกว่า Section-LOI และหน้าตัดก่อนเข้าสู่ช่องเปิดติดกับมุมช่องเปิดด้านที่ใกล้น้ำหนักบรรทุก เรียกว่า Section-LOE สามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้



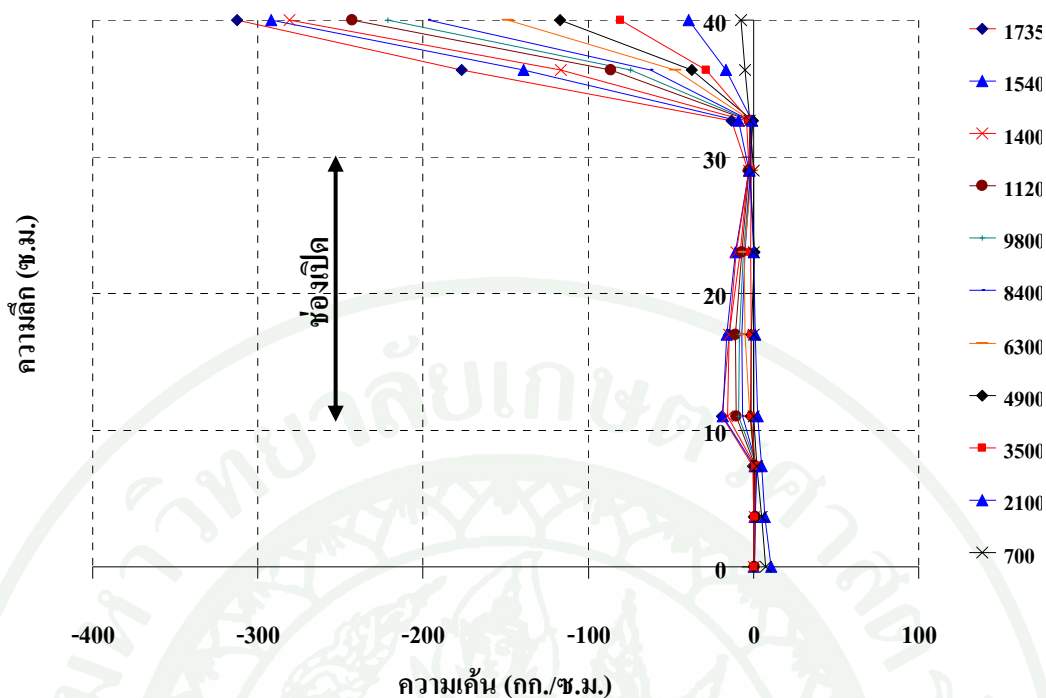
ภาพที่ 48 พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานแบบจำลองหลัก 3 มิติ

พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรง ในหน้าตัดคาน แบบจำลองหลัก 3 มิติ Section-PL อยู่ตำแหน่งได้น้ำหนักบรรทุกทุกสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างการรับแรงคัด และการการกระจายของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัดคาน มีแนวโน้มคล้ายคลึงกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปโดยช่วงแรกความสัมพันธ์การการกระจายของหน่วยแรง (Stress distribution) บนหน้าตัดคานจะเป็นแบบเชิงเส้น และมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการยืดหดตัวที่น้ำหนักบรรทุก 700 กก. แกนสะเทินจะอยู่ประมาณกึ่งกลางคานคือ 20 ซม. พฤติกรรมส่วนบนจะรับแรงอัด และส่วนล่างจะรับแรงดึง จนกระทั่งน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น 2,100 กก. ค่าหน่วยแรงดึงเพิ่มขึ้นประมาณ 21 กก./ซ.ม.² ซึ่งมีค่าประมาณ 10% ของกำลังต้านทานแรงอัดการวิบัติแบบแรงดึงในคานคอนกรีตจะปรากฏการแตกร้าวครั้งแรก และส่วนด้านเหนือแกนสะเทินจะรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้น เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นเท่ากับ 3,500 กก. หน่วยแรงดึงของคอนกรีตลดลง และเลื่อนระดับแกนสะเทินให้สูงขึ้นประกอบกับส่วนที่รับแรงเหนือแกนสะเทินรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้น เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกมากขึ้นจนทำให้ หน่วยแรงดึงในคอนกรีตที่ท้องคานมีค่าเท่ากับหรือเกินกว่าความต้านทานแรงดึงของคอนกรีต คานจะเริ่มแตกร้าวเนื่องจากโมเมนต์คดแตกร้าว (Cracking moment) ทำให้เกิดรอยร้าวเนื่องจากแรงคด (Flexural cracks) ในบริเวณที่เกิดรอยร้าวนี้ ตำแหน่งของแนวแกนสะเทินจะขยับสูงขึ้น หากเพิ่มน้ำหนักบรรทุกในคานมากขึ้นรอยร้าวก็จะเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งน้ำหนักบรรทุกเพิ่มสูงขึ้นถึงน้ำหนักบรรทุกประลัยหน่วยแรงอัดของคอนกรีตมีค่าประมาณ 340 กก./ซ.ม.² ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต



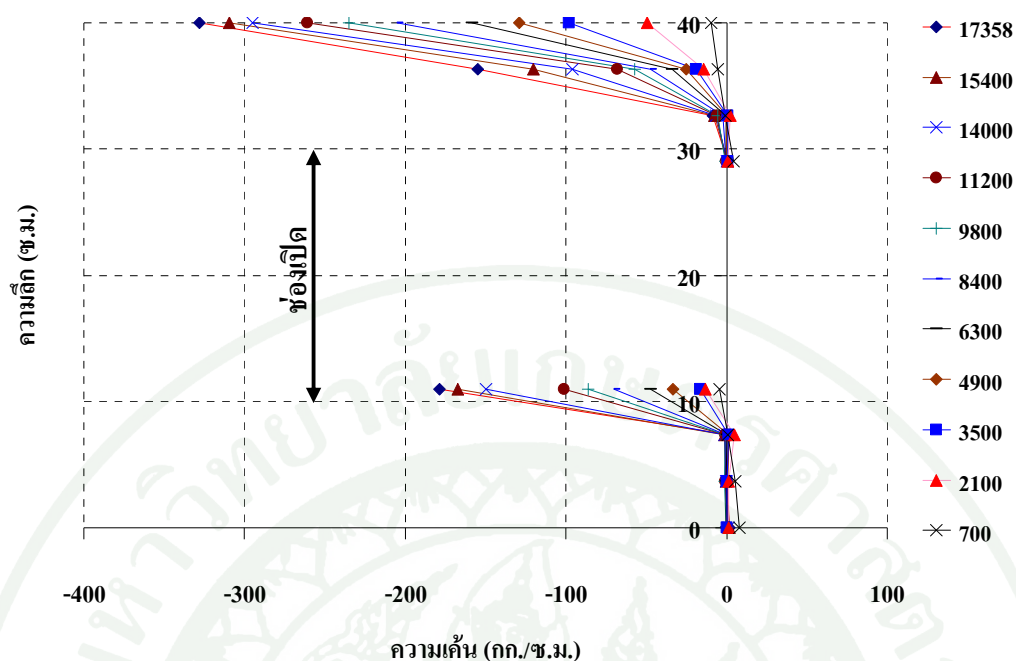
ภาพที่ 49 พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานแบบจำลองหลัก 3 มิติ Section-PL

พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานแบบจำลองหลัก 3 มิติ Section-ROE อยู่ใกล้ช่องเปิดฝั่งน้ำหน้าบรรทุกทุกสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างการรับแรงตัดและการกระจายของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัดคาน มีแนวโน้มคล้ายหน้าตัดพฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานแบบจำลองหลัก 3 มิติ Section-PL ลักษณะพฤติกรรมการรับแรงดึงของคอนกรีตจะรับได้มากที่สุดที่น้ำหน้าบรรทุก 2,100 กก. และเมื่อเพิ่มน้ำหน้าบรรทุกมากขึ้นพฤติกรรมการรับแรงอัดจะปรากฏสองส่วน ส่วนแรกหน่วยแรงอัดจะเพิ่มขึ้นตามปกติเหนือแกนสะเทินที่ยกเพิ่มขึ้นจากผลของน้ำหน้าบรรทุกที่เพิ่มขึ้น ส่วนที่สองหน่วยแรงอัดได้รับผลกระทบจากชั้นส่วนล่างที่มีผลกระทบคล้ายพฤติกรรมของคานในตำแหน่งส่วนบนของชั้นส่วนล่างใกล้หน้าหน้าบรรทุกจะปรากฏหน่วยแรงอัดมีค่าประมาณ 20 กก./ซ.ม.² ในระหว่างช่องเปิดค่ากำลังอัดจะลดต่ำลงจนมีค่าใกล้เคียงกับศูนย์ ในตำแหน่งส่วนล่างของชั้นส่วนบนใกล้หน้าหน้าบรรทุกและจากตำแหน่งความลึกคาน 30 ซม. ถึง 40 ซม. การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงน้ำหน้าบรรทุก 17,358 กก. ส่งผลให้ค่าความเค้นมีค่า 315 กก./ซ.ม.² ซึ่งใกล้เคียงกับค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต



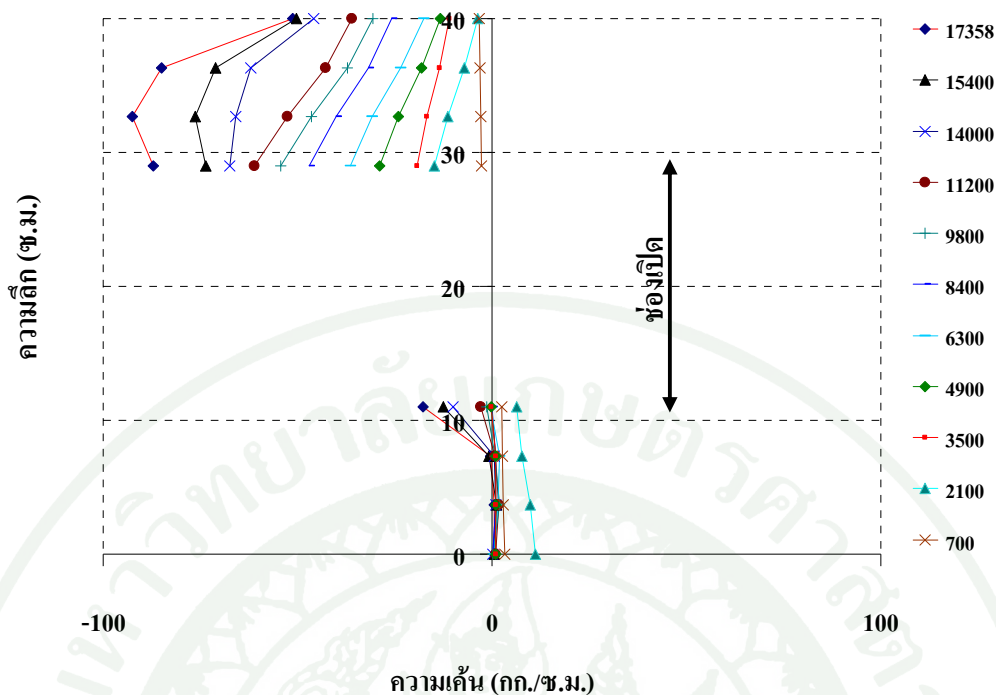
ภาพที่ 50 พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานแบบจำลองหลัก 3 มิติ Section-ROE

เมื่อเข้าสู่พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานแบบจำลองหลัก 3 มิติ Section-ROI จะพิจารณาเฉพาะชั้นส่วนบน และชั้นส่วนล่าง ทำให้ไม่มีการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดบริเวณช่องเปิด พฤติกรรมจะมีอิทธิพลตามทฤษฎีที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้นชั้นส่วนบนจะมีพฤติกรรมรับแรงอัด และมีโมเมนต์ดัดกระทำ มากกว่าชั้นส่วนล่างเนื่องจากชั้นส่วนบนคอนกรีตทำหน้าที่รับแรงอัด และในชั้นส่วนล่างคอนกรีตจะทำหน้าที่รับแรงดึง พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานจะเป็นแบบเชิงเส้น และมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการยึดหดตัว ที่น้ำหนักบรรทุกทุก 700 กก. แกนสะเทินจะอยู่ประมาณกึ่งกลางชั้นส่วนบน และชั้นส่วนล่าง มีระยะ 6.5 ซม. และเมื่อน้ำหนักบรรทุกสูงมากขึ้นคอนกรีตจะไม่สามารถรับหน่วยแรงดึงได้ แกนสะเทินก็จะยกตัวสูงขึ้น พร้อมทั้งหน่วยแรงอัดเพิ่มสูงมากขึ้นตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 51



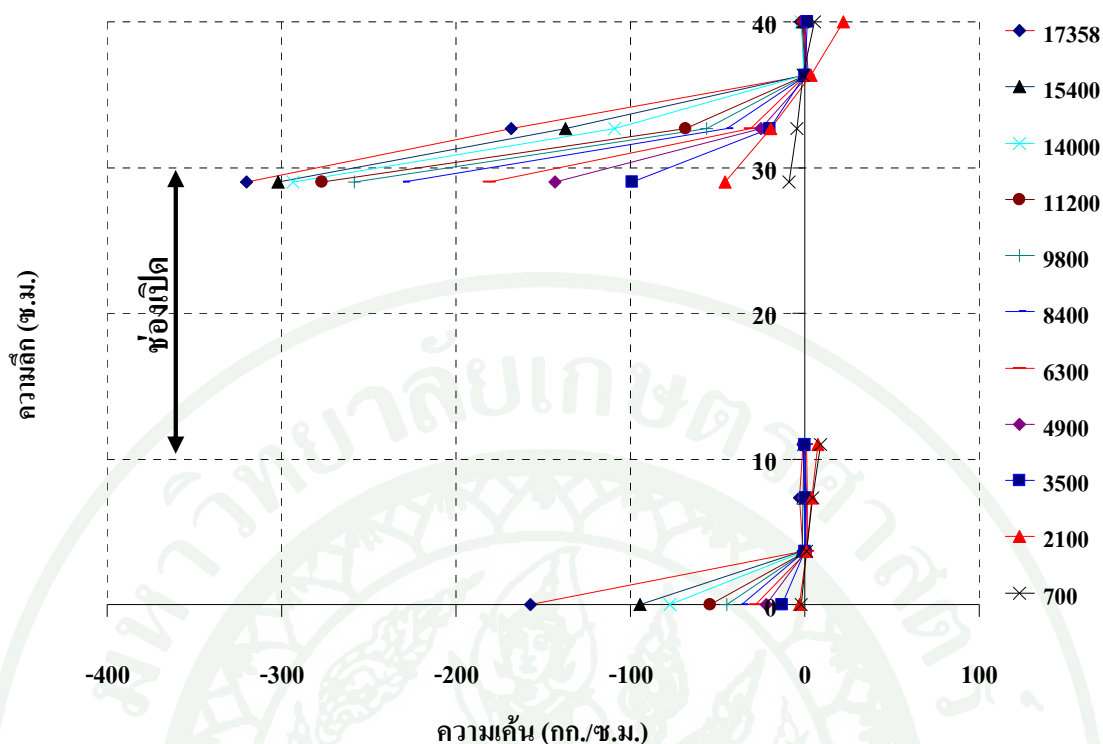
ภาพที่ 51 พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานแบบจำลองหลัก 3 มิติ Section-ROI

เมื่อเข้าสู่ศูนย์กลางช่องเปิด พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานแบบจำลองหลัก 3 มิติ Section-CL พฤติกรรมชั้นส่วนบนจะเกิดแรงอัดเพียงอย่างเดียว ที่น้ำหนักบรรทุก 700 กก. หน่วยแรงอัดคอนกรีตจะมีค่าประมาณ 4 กก./ซ.ม.² และเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุก 17,358 กก. หน่วยแรงอัดคอนกรีตจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นมีค่าประมาณ 87 กก./ซ.ม.² บริเวณชั้นส่วนล่างเมื่อน้ำหนักบรรทุก 700 กก. จะเกิดหน่วยแรงดึงเพียงอย่างเดียวมีค่าประมาณ 4 กก./ซ.ม.² ที่น้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น 2,100 กก. จะเป็นตำแหน่งหน่วยแรงดึงสูงสุดที่คอนกรีตรับได้บริเวณชั้นส่วนล่างมีค่าประมาณ 20 กก./ซ.ม.² และเมื่อน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นตำแหน่งเหนือแกนสะเทินจะปรากฏหน่วยแรงอัดขึ้น และเพิ่มปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มมากขึ้น แสดงดังภาพที่ 52



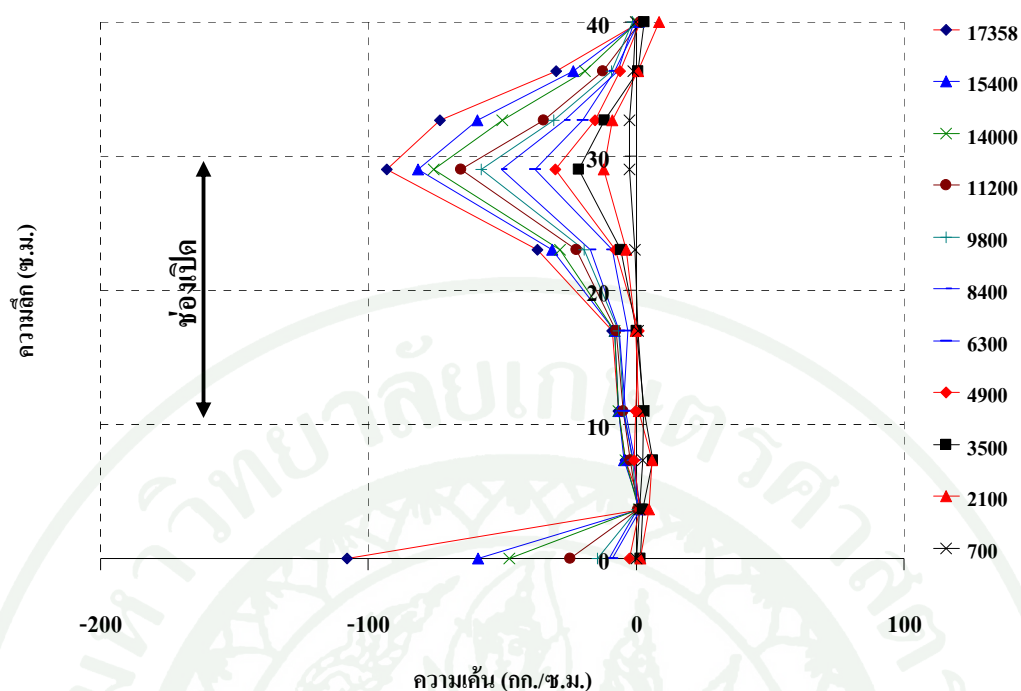
ภาพที่ 52 พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานแบบจำลองหลัก 3 มิติ Section-CL

พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานแบบจำลองหลัก 3 มิติ Section-LOI พฤติกรรมของหน่วยแรงในหน้าตัดคานจะตรงข้ามกับพฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานแบบจำลองหลัก 3 มิติ Section-ROI เนื่องจากบริเวณชิ้นส่วนบนจะเกิดโมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกา ทำให้ปรากฏพฤติกรรมของการรับแรงอัดอยู่บริเวณด้านล่างของชิ้นส่วนบนซึ่งในช่วงน้ำหนักบรรทุก 700 กก. – 2100 กก. หน่วยแรงดึง และแรงอัดจะเป็นสัดส่วนเส้นตรง และเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มมากขึ้นคอนกรีตส่วนบนของชิ้นส่วนบนจะไม่สามารถต้านทานหน่วยแรงดึงได้ และพฤติกรรมของหน่วยแรงอัดจะมีค่ามากที่สุดประมาณ 310 กก./ซ.ม.² บริเวณชิ้นส่วนล่างมีความคล้ายกับชิ้นส่วนบนแต่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่หน้าตัดจะน้อยกว่าซึ่งมีค่าประมาณ 150 กก./ซ.ม.² แสดงดังภาพที่ 53



ภาพที่ 53 พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานแบบจำลองหลัก 3 มิติ Section-LOI

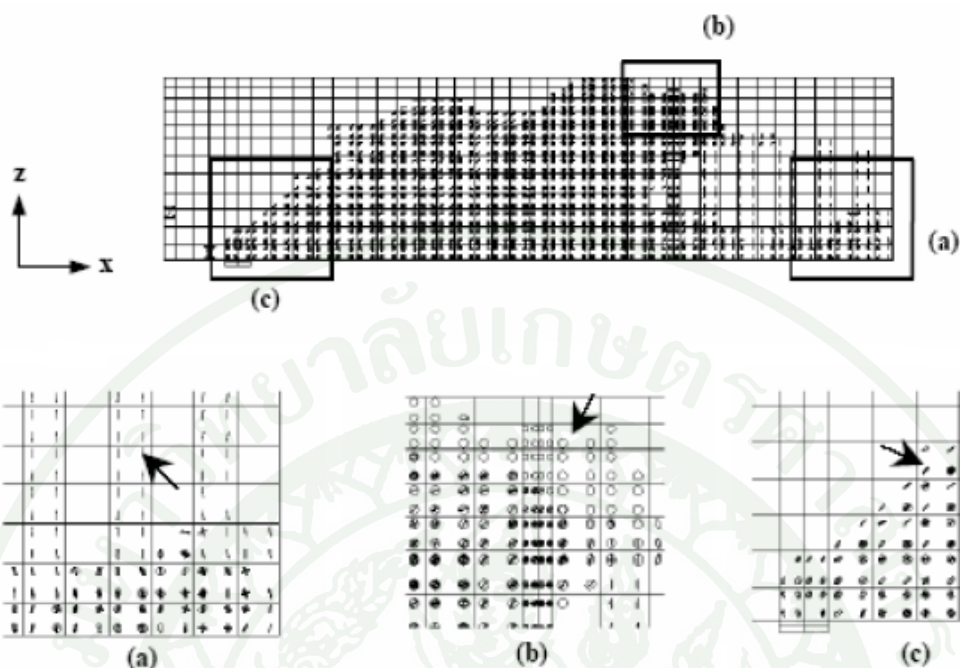
หน้าตัดคานท้ายสุดเป็นพฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานแบบจำลองหลัก 3 มิติ Section-LOE การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานจะมีอิทธิพลของการดัดกลับในชั้นส่วนบน และชั้นส่วนล่าง สามารถแบ่งส่วนที่รับแรงอัดออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ตำแหน่งความลึกคาน 30 ซม. มีค่าความเค้นอัดประมาณ 90 กก./ซ.ม.² และค่าหน่วยแรงจะลดต่ำลงเรื่อยๆ จนใกล้เคียงศูนย์ และหน่วยความเค้นอัดจะมีมากที่สุดตำแหน่งมุมล่างชั้นส่วนบนมีค่าประมาณ 110 กก./ซ.ม.² ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของการดัดกลับ และการโก่งตัวกระดกที่ทำให้คานมีพฤติกรรมโมเมนต์ดัดทวน เข้มนาฬิกาแสดงดังภาพที่ 54



ภาพที่ 54 พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานแบบจำลองหลัก 3 มิติ Section-LOE

3. พฤติกรรมการแตกร้าวของแบบจำลองหลัก 3 มิติ

รูปแบบการแตกร้าวของคานคอนกรีตเป็นคุณสมบัติที่เอลิเมนต์คอนกรีต (Solid 65) สามารถแสดงได้ในรูปแบบของ Smeared model ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น ซึ่งรูปแบบการแตกร้าวของคอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะดังภาพที่ 55 (a) หน่วยแรงดึงในแกนหลัก (Principal tensile stress) จะมีค่ามากในทิศทาง X (ทิศทางตามแนวยาวคาน) เมื่อหน่วยแรงดึงในแกนหลัก (Principal tensile stress) ที่เกิดขึ้นมีค่าเกินกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต จะเกิดการแตกร้าวซึ่งมีสัญลักษณ์เป็นวงกลม (0) ปรากฏขึ้นในทิศทางตั้งฉากกับหน่วยแรงประธาน (Principal stress) ในทิศทาง X ด้วยเหตุนี้สัญลักษณ์แสดงการแตกร้าวที่แสดงในภาพจะตั้งเป็นเส้นที่ตรงซึ่งเกิดที่จุดรวมแรง (Integration points) ของเอลิเมนต์คอนกรีต

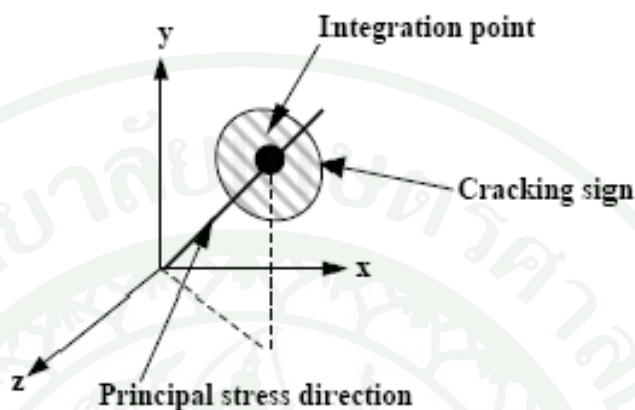


ภาพที่ 55 รูปแบบการแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีต (Solid 65) ; (a) flexural cracks, (b) compressive crack, (c) diagonal tensile cracks

ที่มา: Wolanski (2004)

ภาพ 55(b) แสดงสัญลักษณ์การแตกร้าวของคอนกรีตเอลิเมนต์ บริเวณใต้จุดที่รองรับน้ำหนักบรรทุก สำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่รับแรงอัดตามแกนในทิศทางเดียว รอยแตกร้าวจะเริ่มขยายตัวขนานไปกับทิศทางของน้ำหนักบรรทุก ด้วยเหตุที่รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจากความเครียดดึง (Tensile strain) ดังนั้นสัญลักษณ์ เป็นวงกลม (0) จะปรากฏขึ้นในทิศทางตั้งฉากกับความเครียดดึง (Tensile strain) ในทิศทาง y ที่ตำแหน่ง จุดรวมแรง (Integration points) ของเอลิเมนต์คอนกรีตใกล้กับบริเวณรับน้ำหนักบรรทุก ซึ่งการแตกร้าวชนิดนี้เรียกว่าการแตกร้าวจากอัด (Compressive cracks) สำหรับภาพที่ 55 (c) แสดงสัญลักษณ์การแตกร้าวเมื่อความเค้นตั้งฉาก (Normal stress) และความเค้นเฉือน (Shear stress) เกิดขึ้นบนเอลิเมนต์คอนกรีต โดยปกติแล้วความเค้นในทิศทางตั้งฉากจะเกิดขึ้นในทิศทาง X และความเค้นเฉือนจะเกิดในระนาบ XZ ดังนั้นทิศทางของความเค้นดึงหลัก (Principal tensile stress) จะเอียงออกจากแนวระนาบ เมื่อกำลังรับแรงดึงที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของคอนกรีต สัญลักษณ์การแตกร้าว (0) จะปรากฏในทิศทางเฉียงเป็นเส้นตรง โดยตั้งฉากกับทิศทางของความเค้นหลัก (Principal stress) ที่ตำแหน่งจุดรวมแรง (Integration points) ของเอลิเมนต์คอนกรีต ซึ่งการแตกร้าวชนิดนี้เรียกว่า การแตกร้าวในแนวเอียงหรือเฉียง

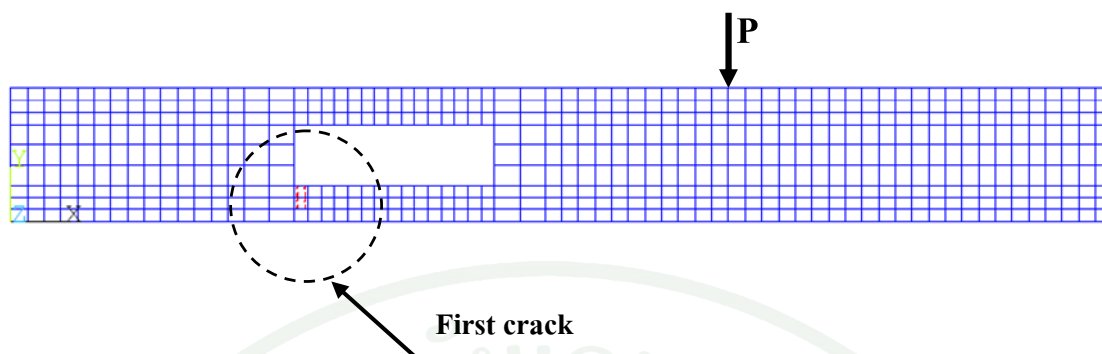
ทแยงมุม (Diagonal tension cracks) ซึ่งสัญลักษณ์แสดงการแตกร้าวแสดงดังภาพที่ 56 จากที่ได้บรรยายแบบจำลอง 3 มิติ พฤติกรรมการแตกร้าวของคอนกรีตสามารถนำมาอธิบายพฤติกรรมการแตกร้าวคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ได้ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 56 สัญลักษณ์แสดงการแตกร้าว

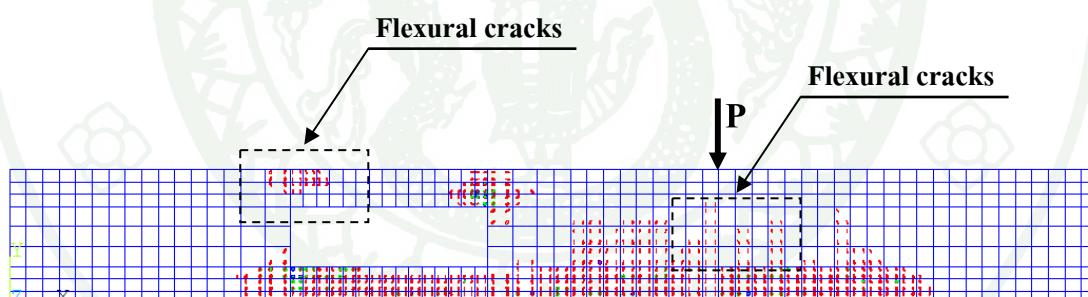
ที่มา: Wolanski (2004)

พฤติกรรมการแตกร้าวของแบบจำลองหลัก 3 มิติ มีขนาดช่องเปิดเท่ากับการทดสอบ EX_R2-600 ของ Tan (1982) การแตกร้าวในครั้งแรกจะเกิดบริเวณบนชิ้นส่วนล่างมุมช่องเปิดฝั่งไกลน้ำหนักบรรทุกแสดงดังภาพที่ 57 การแตกร้าวชนิดนี้มีสัญลักษณ์หน่วยแรงดึงในแกนหลัก (Principal tensile stress) จะมีค่ามากในทิศทาง X (ทิศทางตามแนวยาวคาน) เมื่อหน่วยแรงดึงในแกนหลัก (Principal tensile stress) ที่เกิดขึ้นมีค่าเกินกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต จะเกิดการแตกร้าวซึ่งมีสัญลักษณ์เป็นวงกลม (0) ปรากฏขึ้นในทิศทางตั้งฉากกับหน่วยแรงประธาน (Principal stress) ในทิศทาง X ด้วยเหตุนี้สัญลักษณ์แสดงการแตกร้าวที่แสดงในภาพจะตั้งเป็นเส้นที่ตั้งตรงซึ่งเกิดที่จุดรวมแรง (Integration points) ของเอลิเมนต์คอนกรีต และสามารถอธิบายพฤติกรรมการแตกร้าวเนื่องจากโมเมนต์คดได้จากการเสียรูปตามที่ได้กล่าวมาแล้ว เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกกระทำ ดังรูปที่ 57 จะเกิดการยัดรีงทั้งชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่างทำให้เกิดโมเมนต์ขึ้นที่ด้านบน และชิ้นส่วนล่างยังมีสภาวะการรับแรงดึง ดังนั้นการแตกร้าวครั้งแรก (First crack) และมีน้ำหนักบรรทุก 1,676 กก. จึงเกิดในบริเวณนี้



ภาพที่ 57 รูปแบบการแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีตแบบจำลองหลัก 3 มิติ
ภายใต้การแตกร้าวครั้งแรก (First crack)

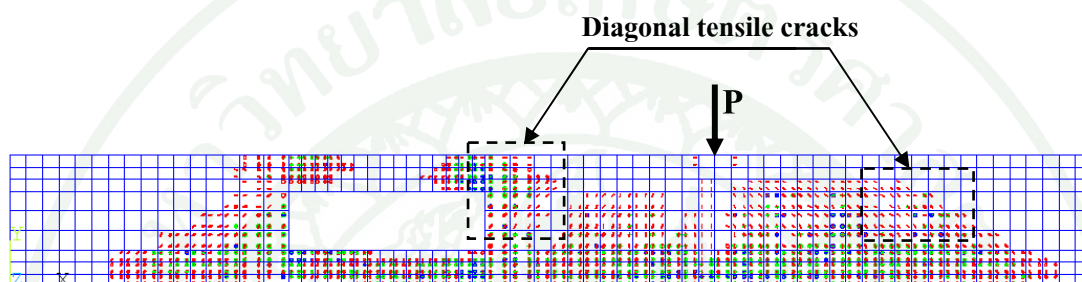
เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มสูงขึ้นที่น้ำหนักบรรทุกเฉลี่ย 5,000 กก. การแตกร้าว Flexural cracks จะเพิ่มมากขึ้นบริเวณใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำ และบริเวณชิ้นส่วนล่างที่รับแรงดึง แสดงดังภาพที่ 58 และบริเวณมุมช่องเปิดฝั่งไกลน้ำหนักบรรทุกทุกจะเกิด Flexural cracks จากทางด้านบนคานซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีโมเมนต์ดัดเกิดขึ้นบริเวณนี้



ภาพที่ 58 รูปแบบการแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีตแบบจำลองหลัก 3 มิติ
ภายใต้การแตกร้าว Flexural cracks

เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มสูงขึ้นที่น้ำหนักบรรทุกเฉลี่ย 10,000 กก. จะเกิดการแตกร้าว Diagonal tensile cracks ที่เกิดจากเมื่อความเค้นตั้งฉาก (Normal stress) และความเค้นเฉือน (Shear stress) เกิดขึ้นบนเอลิเมนต์คอนกรีต โดยปกติแล้วความเค้นในทิศทางตั้งฉากจะเกิดขึ้นในทิศทาง X และความเค้นเฉือนจะเกิดในระนาบ XZ ดังนั้นทิศทางของความเค้นดึงหลัก (Principal tensile stress) จะเอียงออกจากแนวระนาบ เมื่อค่ารับแรงดึงที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าค่ารับแรงดึงสูงสุดของคอนกรีต สัญลักษณ์การแตกร้าว (0) จะปรากฏในทิศทางเฉียงเป็นเส้นตรง โดยตั้งฉากกับ

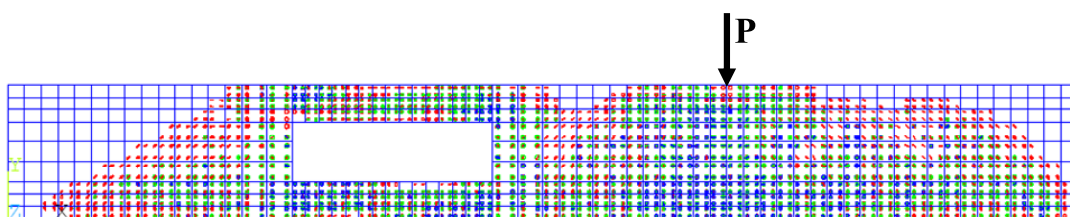
ทิศทางของความเค้นหลัก (Principal stress) ที่ตำแหน่งจุดรวมแรง (Integration points) ของเอลิเมนต์คอนกรีตดังภาพที่ 59 โดยปกติการแตกร้าว Diagonal tensile cracks จะเป็นพฤติกรรมของแรงเฉือนที่เริ่มจากจุดรองรับ ซึ่งบริเวณรอบช่องเปิดมีพฤติกรรม การแตกร้าว Diagonal tensile cracks เช่นกันในส่วนบน และชิ้นส่วนล่างเมื่อมีถ่ายเทแรงเฉือนจากน้ำหนักบรรทุก จะปรากฏพฤติกรรมข้างช่องเปิดคล้ายจุดรองรับเนื่องจากช่องเปิดที่ยาวมากจะไม่มีจุดรองรับระหว่างความยาว ดังนั้นบริเวณที่เชื่อมต่อกับคานจะทำหน้าที่คล้ายจุดรองรับ



ภาพที่ 59 รูปแบบการแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีตแบบจำลองหลัก 3 มิติ

ภายใต้การแตกร้าว Diagonal tensile cracks

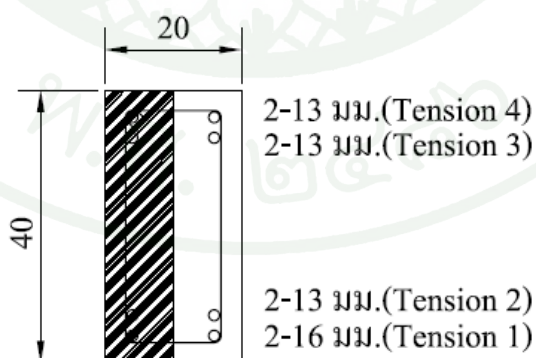
ที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดการแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีตจะเกิดขึ้นทั่วทั้งบริเวณคานคอนกรีตและขั้วตัวเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากการถ่ายเทแรง การแตกร้าวทั้ง 3 ชนิดจะเกิดขึ้นหมด และวิบัติเมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 17,358 กก. แสดงดังภาพที่ 60 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการแตกร้าวบริเวณรอบช่องเปิด และได้น้ำหนักบรรทุก ซึ่งแสดงสัญลักษณ์การแตกร้าวของคอนกรีตเอลิเมนต์ บริเวณใต้จุดที่รองรับน้ำหนักบรรทุก สำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่รับแรงอัดตามแกนในทิศทางเดียว รอยแตกร้าวจะเริ่มขยายตัวนานไปกับทิศทางของน้ำหนักบรรทุก ด้วยเหตุที่รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจากความเครียดดึง (Tensile strain) ดังนั้นสัญลักษณ์ เป็นวงกลม (0) จะปรากฏขึ้นในทิศทางตั้งฉากกับความเครียดดึง (Tensile strain) ในทิศทาง y ที่ตำแหน่ง จุดรวมแรง (Integration points) ของเอลิเมนต์คอนกรีตใกล้กับบริเวณรับน้ำหนักบรรทุก ซึ่งการแตกร้าวชนิดนี้เรียกว่าการแตกร้าวจากอัด (Compressive cracks) และการแตกร้าว Diagonal tensile cracks จะเกิดบริเวณจุดรองรับ และบริเวณมุมของช่องเปิด



ภาพที่ 60 รูปแบบการแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีตแบบจำลองหลัก 3 มิติ ภายใต้น้ำหนักบรรทุกสูงสุด

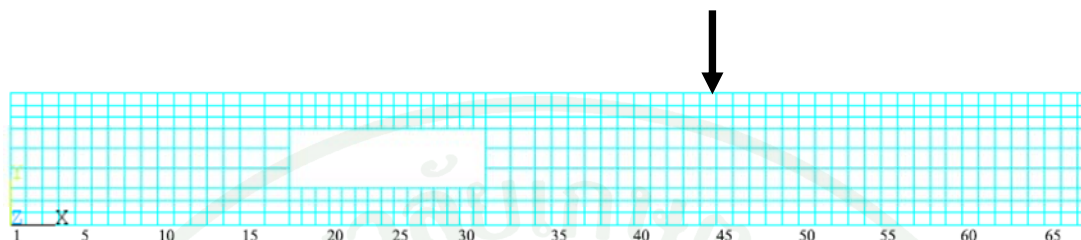
4. พฤติกรรมแรงดึงในเหล็กเสริมแบบจำลองหลัก 3 มิติ

การพิจารณาพฤติกรรมของหน่วยแรงดึงของคอนกรีตทำให้ทราบพฤติกรรมการแตกร้าวของคอนกรีตที่ส่งถ่ายแรงไปสู่เหล็กเสริม พฤติกรรมโดยทั่วไปเมื่อคานมีน้ำหนักบรรทุกกระทำ คอนกรีตส่วนที่อยู่ใต้แกนสะเทินจะทำหน้าที่รับแรงดึง และคอนกรีตส่วนที่อยู่เหนือแกนสะเทินจะทำหน้าที่รับแรงอัด และเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มสูงขึ้นส่วนที่อยู่ใต้แกนสะเทินจะทำหน้าที่รับแรงดึงจนรับไม่ไหวจึงได้ส่งถ่ายแรงไปสู่เหล็กเสริมทำให้ปรากฏการแตกร้าวขึ้น และรอยแตกร้าวจะขยับสูงขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้คานวิบัติในที่สุด การพิจารณาพฤติกรรมในเหล็กเสริมมีข้อดีสามารถบอกพฤติกรรมของการแตกร้าวได้ ซึ่งจะพิจารณาเหล็กเสริมจำนวน 4 เส้น แสดงดังภาพที่ 61 จะระบุชื่อตามตำแหน่งจากใต้คานเหล็กเสริม $\Phi 16$ มม. กำหนด Tension 1 ส่วนเหล็กเสริมตำแหน่งถัดไป $\Phi 13$ มม. กำหนด Tension 2, Tension 3 และ Tension 4 ตามลำดับ



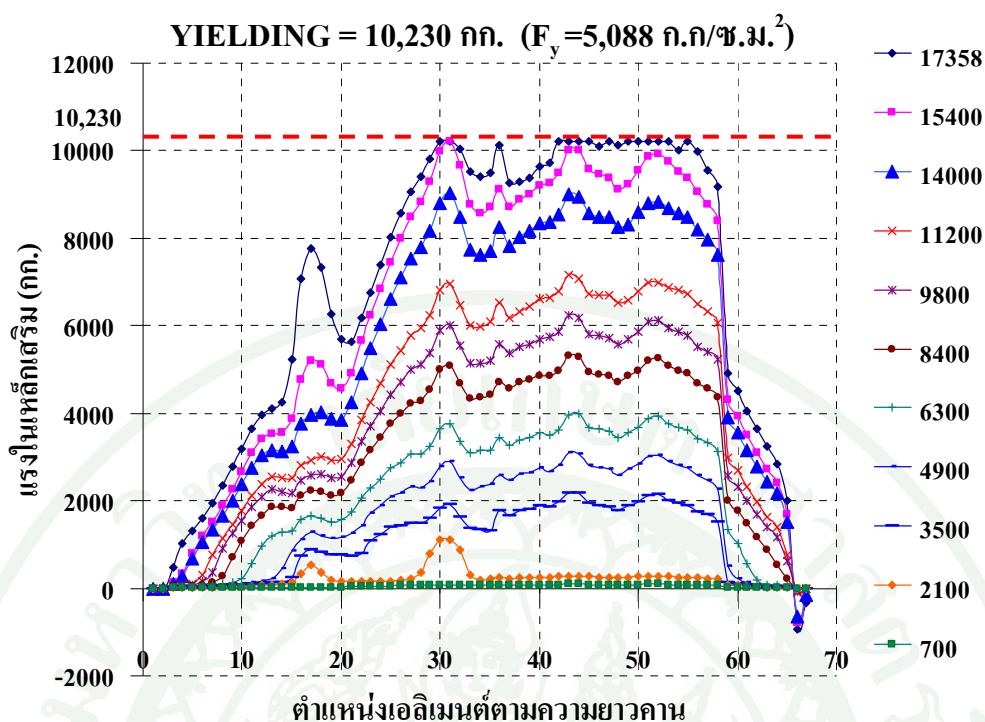
ภาพที่ 61 หน้าตัดคานของแรงดึงในเหล็กเสริมแบบจำลองหลัก 3 มิติ

ผลลัพธ์ของแรงดึงจะแสดงเป็นเอลิเมนต์เหล็กเสริมตามยาวตามภาพที่ 62 สำหรับแบบจำลองหลัก 3 มิติ จะมีจำนวนเอลิเมนต์เหล็กเสริมตามยาวเท่ากับ 67 เอลิเมนต์ โดยนับจากฝั่งที่อยู่ไกลจากน้ำหนักบรรทุกทุกเป็นเอลิเมนต์ที่ 1



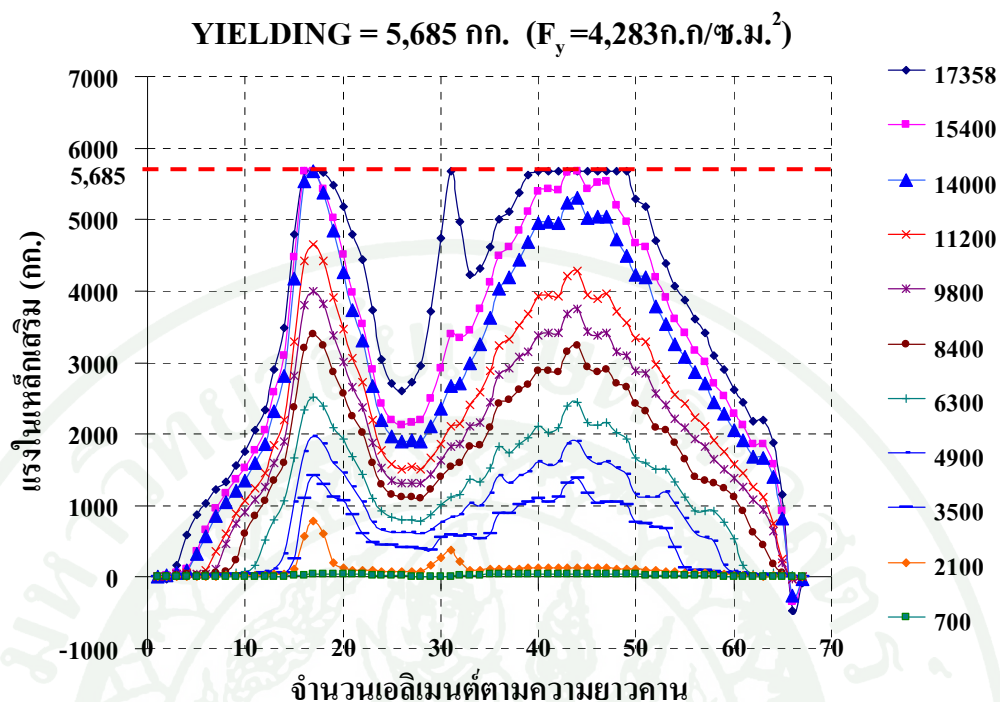
ภาพที่ 62 จำนวนเอลิเมนต์เหล็กเสริมตามยาวแบบจำลองหลัก 3 มิติ

พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 1 เป็นเหล็กเสริมอันดับแรกที่ทำหน้าที่รับแรงดึงเมื่อคอนกรีตเริ่มเกิดการแตกร้าว แสดงดังภาพที่ 63 ที่ระดับน้ำหนักบรรทุก 700 กก. พฤติกรรมการรับแรงดึงยังไม่เกิดขึ้นในเหล็กเสริม คอนกรีตยังสามารถรับแรงดึงได้ ที่ระดับน้ำหนักบรรทุก 2,100 กก. ตำแหน่งเอลิเมนต์ 30 จะปรากฏแรงดึงในเอลิเมนต์เหล็กเสริมมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งมุมช่องเปิดฝั่งใกล้น้ำหนักบรรทุก และมีการแอ่นตัวมากที่สุด พฤติกรรม การรับแรงดึงของเหล็กเสริมจะเพิ่มมากขึ้นตามน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มสูงขึ้น ที่ระดับน้ำหนักบรรทุก 17,358 กก. แรงดึงในเอลิเมนต์เหล็กเสริมก็เพิ่มสูงขึ้นมีค่าประมาณ 10,230 กก. ซึ่งเป็นค่าการครากของเหล็กเสริมตำแหน่งเอลิเมนต์ 30 – 55 สำหรับตำแหน่งเอลิเมนต์ 4 และ 65 จะมีพฤติกรรมการรับแรงอัดเล็กน้อยเนื่องจากเป็นตำแหน่งของจุดรองรับ



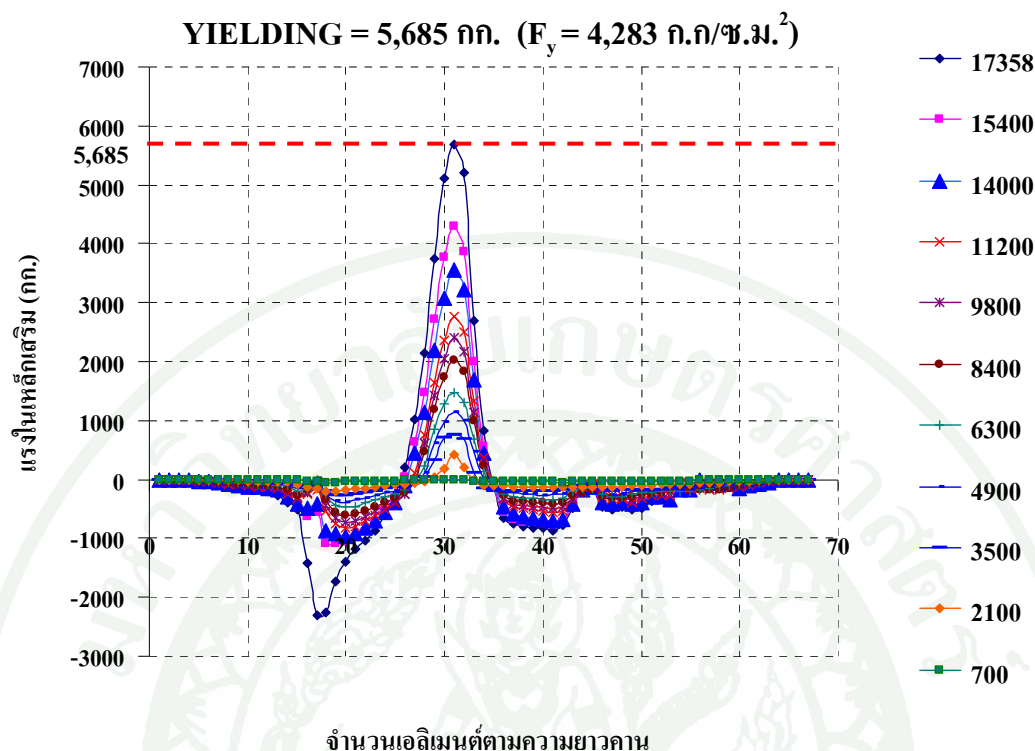
ภาพที่ 63 พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 1 แบบจำลองหลัก 3 มิติ

พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 2 เป็นลำดับถัดมาที่จะต้องรับแรงดึงซึ่งที่ระดับน้ำหนักบรรทุก 2,100 กก. ตำแหน่งเอลิเมนต์ 17 จะปรากฏแรงดึงในเอลิเมนต์เหล็กเสริมมากที่สุดซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งมุมบนช่องเปิดชั้นส่วนล่าง ฟังโกลน้ำหนักบรรทุก ที่มีโมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกา และเป็นเหตุเนื่องจากการแตกร้าวครั้งแรกที่จะปรากฏบริเวณนี้ พฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็กเสริมจะเพิ่มมากขึ้นตามน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งระดับน้ำหนักบรรทุก 17,358 กก. แรงดึงในเอลิเมนต์เหล็กเสริมก็เพิ่มสูงขึ้นมีค่าประมาณ 5,685 กก. ซึ่งเป็นค่าการครากของเหล็กเสริมตำแหน่งเอลิเมนต์ 17, 31 และ 40-50 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดแรงดึงขึ้นในเหล็กเสริมบริเวณมุมช่องเปิดจนทำให้เหล็กเกิดการครากแสดงดังภาพที่ 64



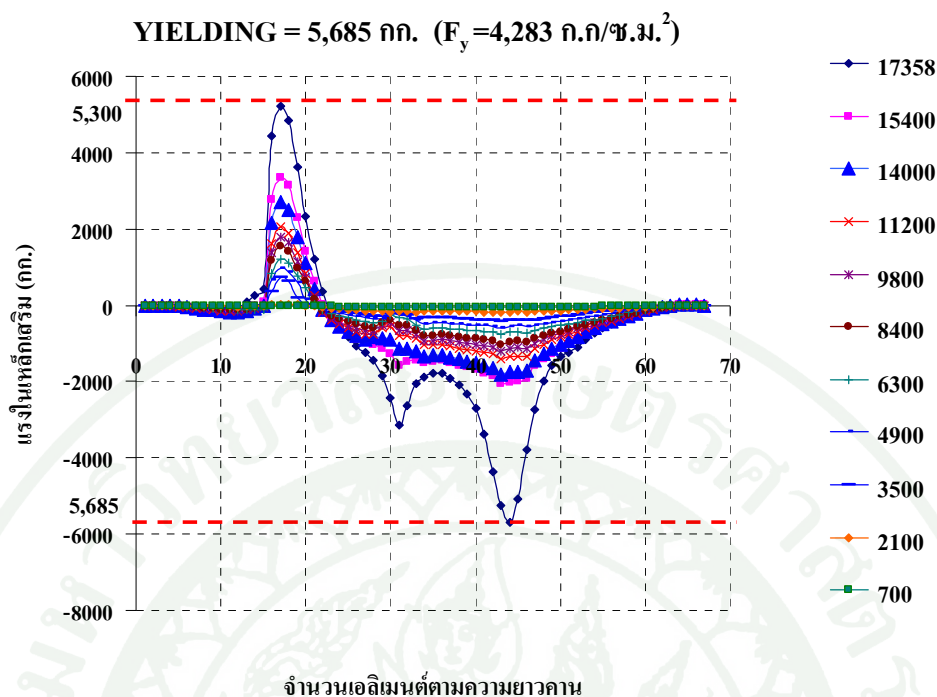
ภาพที่ 64 พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 2 แบบจำลองหลัก 3 มิติ

พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 3 เป็นเหล็กที่อยู่ในช่วงพฤติกรรมรับแรงอัด เนื่องจากมีช่องเปิดจึงทำให้ตำแหน่งกรณี Tension 3 จะปรากฏพฤติกรรมทั้งแรงดึง และแรงอัดในเหล็กเสริม ที่น้ำหนักบรรทุกทุก 2,100 ถึง 17,358 กก. ตำแหน่งเอลิเมนต์ 30 ซึ่งเป็นบริเวณมุมช่องเปิดขึ้นส่วนบนฝั่งใกล้น้ำหนักบรรทุก จะปรากฏพฤติกรรมแรงดึงจนกระทั่งถึงกำลังครากของเหล็กเสริมเนื่องจากบริเวณดังกล่าวคอนกรีตจะแตกร้าวและส่งถ่ายแรงดึงสู่เหล็กเสริมพร้อมยกระดับแกนสะเทินซึ่งในส่วนได้น้ำหนักบรรทุกทุกจะปรากฏแรงอัด แต่ตำแหน่งเอลิเมนต์ 15 และ 45 จะมีพฤติกรรมรับแรงดึงอยู่บ้างแต่จะไม่เกิดส่วนที่รับแรงอัด เนื่องจากได้รับอิทธิพลของขึ้นส่วนบนที่มีการกระจายหน่วยแรงให้มีพฤติกรรมของคานมีทั้งแรงดึง และแรงอัดในขึ้นส่วนบน เมื่อการกระจายหน่วยแรงเข้าสู่สถานะของหน้าตัดรวมตำแหน่ง เหล็กเสริมกรณี Tension 3 จะต้องเข้าสู่สภาวะรับแรงอัดตามสมมติฐานของคานอย่างง่าย แสดงดังภาพที่ 65



ภาพที่ 65 พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 3 แบบจำลองหลัก 3 มิติ

พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 4 เป็นตำแหน่งสุดท้ายของเหล็กเสริมในตำแหน่งได้น้ำหนักบรรทุก พฤติกรรมโดยส่วนใหญ่เหล็กเสริมกรณี Tension 4 จะทำหน้าที่รับแรงอัดจนกระทั่งน้ำหนักบรรทุก 17,358 กก. กำลังของเหล็กเสริมจะอัดจนถึงกำลังคราก และในส่วนตำแหน่งเอลิเมนต์ 17 เหล็กเสริมจะรับแรงดึงกระทั่งน้ำหนักบรรทุก 17,358 กก. กำลังของเหล็กเสริมจะดึงเกือบจะถึงกำลังครากมีค่า 5,300 กก. เนื่องจากพฤติกรรมของคานที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่จะปรากฏโมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกาบริเวณมุมบนของช่องเปิดทั้งชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่างฝั่งใกล้น้ำหนักบรรทุก เพื่อทำให้เกิดสมดุลของแรงภายในเนื่องจากการถ่ายแรงของชิ้นส่วนล่างจะทำหน้าที่รับแรงดึง ชิ้นส่วนล่างทำหน้าที่รับแรงอัด เมื่อทำการสมดุลแรงที่เกิดขึ้นแล้วทั้งโมเมนต์คัต และแรงตามแกนจะทำให้พฤติกรรมของโมเมนต์คล้ายหน้าตัดเต็ม แสดงดังภาพที่ 66



ภาพที่ 66 พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 4 แบบจำลองหลัก 3 มิติ

กรณีที่ 1 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด 3 มิติ

การพิจารณาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด 3 มิติ จะมีลำดับขั้นตอนการพิจารณาแรงภายในคล้ายกรณีแบบจำลองหลัก 3 มิติ อาทิเช่น พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว พฤติกรรมการแตกร้าวของคาน และพฤติกรรมแรงดึงในเหล็กเสริม ความแตกต่างของพฤติกรรมจะเด่นชัดมากเนื่องจากการเน้นประเด็นการเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิดเมื่อช่องเปิดยาวขึ้นจะต้องมีตัวแปรที่ทำให้เกิดความสมดุล ซึ่งการอธิบายจะขยายความในเนื้อหาที่สำคัญเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ และไม่ซ้ำกับกรณีที่ผ่านมาแล้วข้างต้น

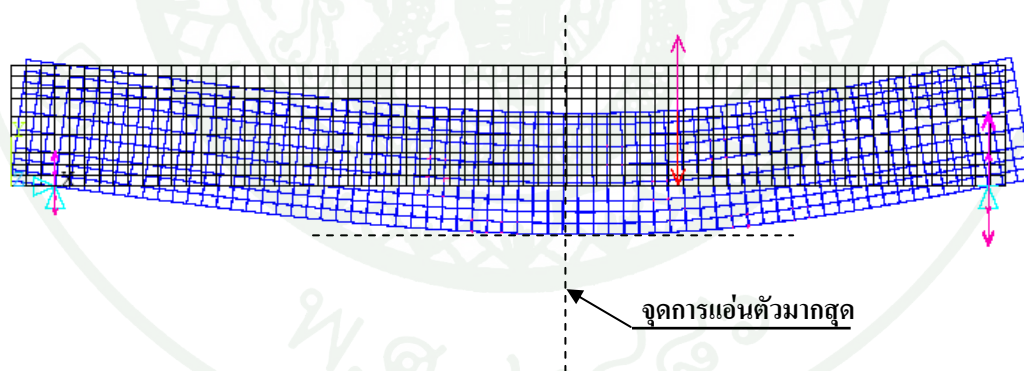
1. พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว ของการเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด 3 มิติ

การพิจารณาพฤติกรรม ความยาวของช่องเปิดที่เพิ่มขึ้นยังไม่เคยมีใครระบุไว้ถึงพฤติกรรมที่เปลี่ยนแปลงความยาวช่องเปิด เนื่องจาก Mansur and Tan (1989) ได้ศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ภายใต้ แรงบิด โมเมนต์ดัด และแรงเฉือน พบว่าหากคาน

คอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดมีพฤติกรรมเป็นไปตามทฤษฎีของคาน และหากความลึกหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเปิดน้อยกว่าร้อยละ 40 ของความลึกคานจะกำหนดให้เป็นช่องเปิดขนาดเล็ก ดังนั้น ความยาวที่เปลี่ยนแปลงยังไม่ได้กล่าวอ้างถึงในงานวิจัย ซึ่งรายละเอียดสรุปได้ดังต่อไปนี้

1.1 ลักษณะการแอ่นตัวของแบบจำลอง 3 มิติ กรณีหน้าตัดเต็ม

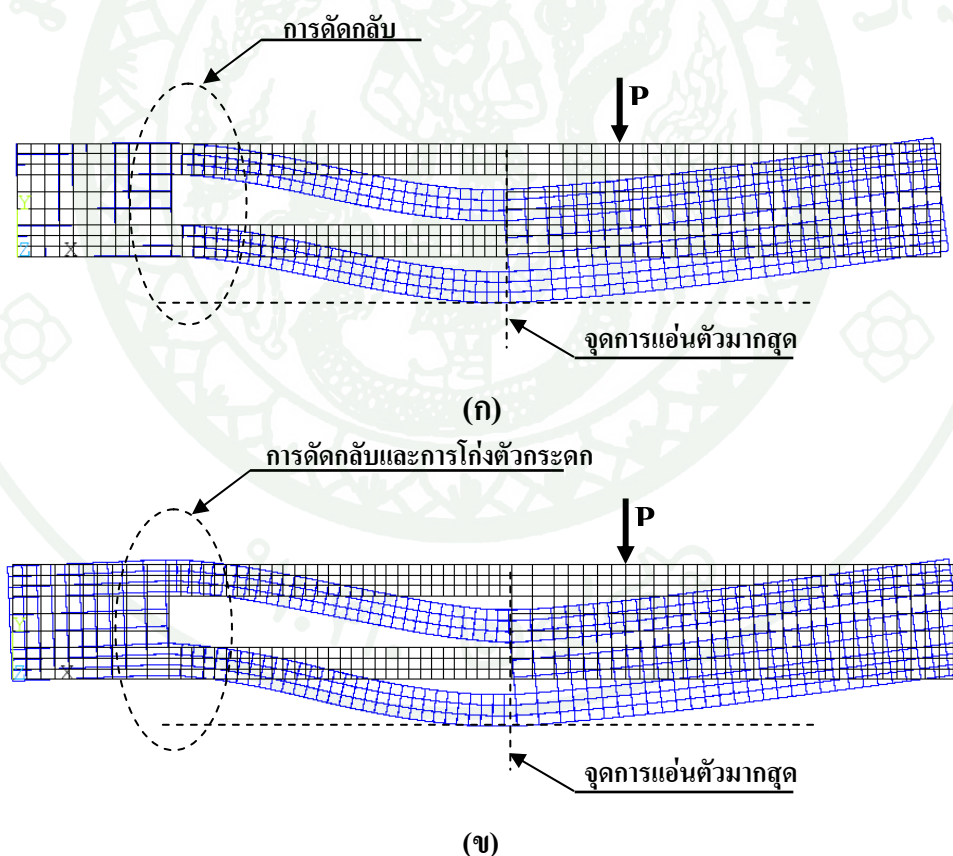
ลักษณะการแอ่นตัวของแบบจำลอง 3 มิติ กรณีหน้าตัดเต็ม แสดงดังภาพที่ 67 พฤติกรรมการเสีรูปคานจะแอ่นตัวมากที่สุดใกล้เคียงกึ่งกลางคาน คำนำน้หนักบรรทุก-การแอ่นตัวจะมีค่ามากกว่าแบบจำลองหลัก 3 มิติ การแตกร้าวครั้งแรก (First crack) น้ำหนักบรรทุกประมาณ 2,477 กก. คานยังสามารถรับน้ำหนักบรรทุกต่อไปได้ และเข้าสู่สภาวะไร้เชิงเส้น จนกระทั่งถึงจุดที่เหล็กเกิดการคราก (Steel yielding) น้ำหนักบรรทุก ประมาณ 15,800 กก. จะเข้าสู่ช่วงพลาสติกที่น้ำหนักบรรทุกจะขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับการแอ่นตัวที่เพิ่มขึ้นซึ่งพฤติกรรมนี้จะเกิดขึ้นเร็วมากจนกระทั่งน้ำหนักบรรทุก 17,644 กก. คานจะวิบัติ (Failure) พฤติกรรมแบบจำลอง 3 มิติ กรณีหน้าตัดเต็ม ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมก่อนมีช่องเปิดซึ่งจะพบการแอ่นตัวมากที่สุดบริเวณมุมช่องเปิดใกล้ น้ำหนักบรรทุก ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อต่อไป



ภาพที่ 67 ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลอง 3 มิติ กรณีหน้าตัดเต็ม

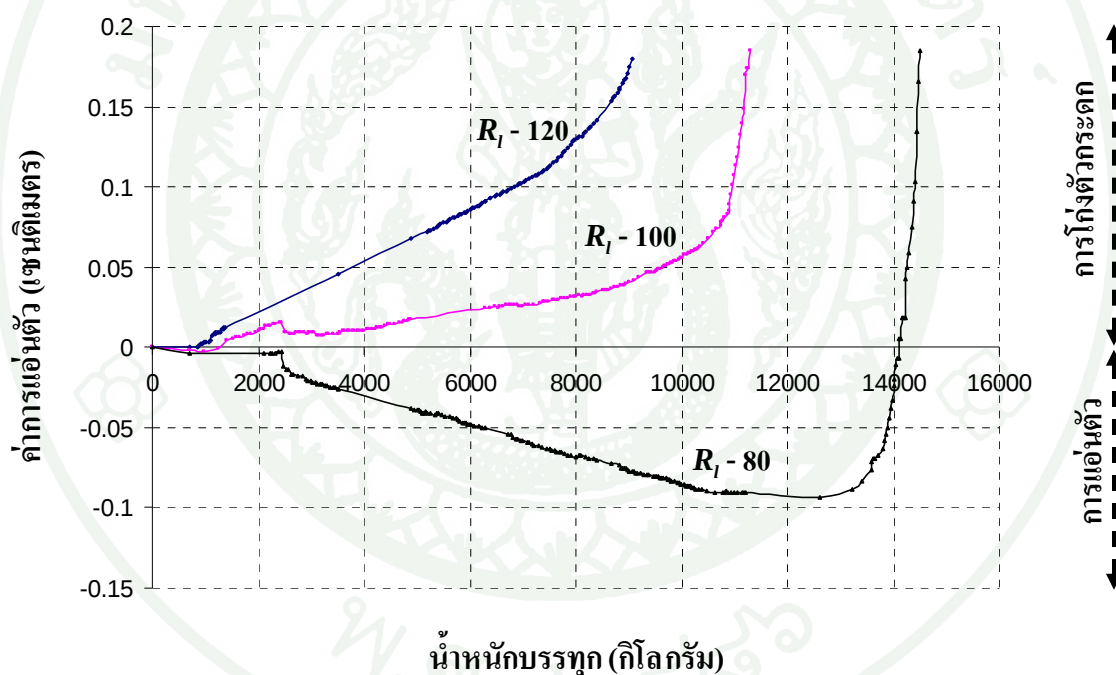
1.2 การเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวช่องเปิดเท่ากับ 80 ซม. ($R_f - 80$) ถึง 120 ซม. ($R_f - 120$) ความลึกทั้งหมด 18 ซม.

สืบเนื่องจากพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว ของแบบจำลองหลัก 3 มิติ มีพฤติกรรมการยัดรีงในชั้นส่วนบน และชั้นส่วนล่างซึ่งหากเพิ่มขนาดความยาวช่องเปิดเท่ากับ 80 ซม. ($R_f - 80$) ถึง 120 ซม. ($R_f - 120$) ความลึกทั้งหมด 18 ซม. พฤติกรรมจะคล้ายมีการดัดกลับที่มุมบนช่องเปิดใกล้หน้าหนักบรรทุก (ทั้งชั้นส่วนบน และชั้นส่วนล่าง) แสดงดังภาพที่ 68(ก) และหากเพิ่มขนาดหน้าหนักบรรทุกมากขึ้นจะปรากฏการดัดกลับ และการโก่งตัวกระดก แสดงดังภาพที่ 68(ข) ซึ่งพฤติกรรมเช่นนี้อาจจะเป็นไปได้ยากในเชิงคานที่มีจุดรองรับอย่างง่าย แต่หากพิจารณาให้ละเอียดการแอ่นตัวของคานจะมีแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดเข้ามาเกี่ยวข้อง หากคานที่มีความลึก เช่นนี้ แสดงให้เห็นถึงแรงเฉือนมีอิทธิพลมากหากความยาวของชั้นส่วนเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งทำให้คานมีการโก่งตัวกระดก และจุดการแอ่นตัวมากที่สุดยังคงอยู่มุมช่องเปิดใกล้กับหน้าหนักบรรทุก



ภาพที่ 68 ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวช่องเปิด เท่ากับ 120 ซม. ($R_f - 120$)

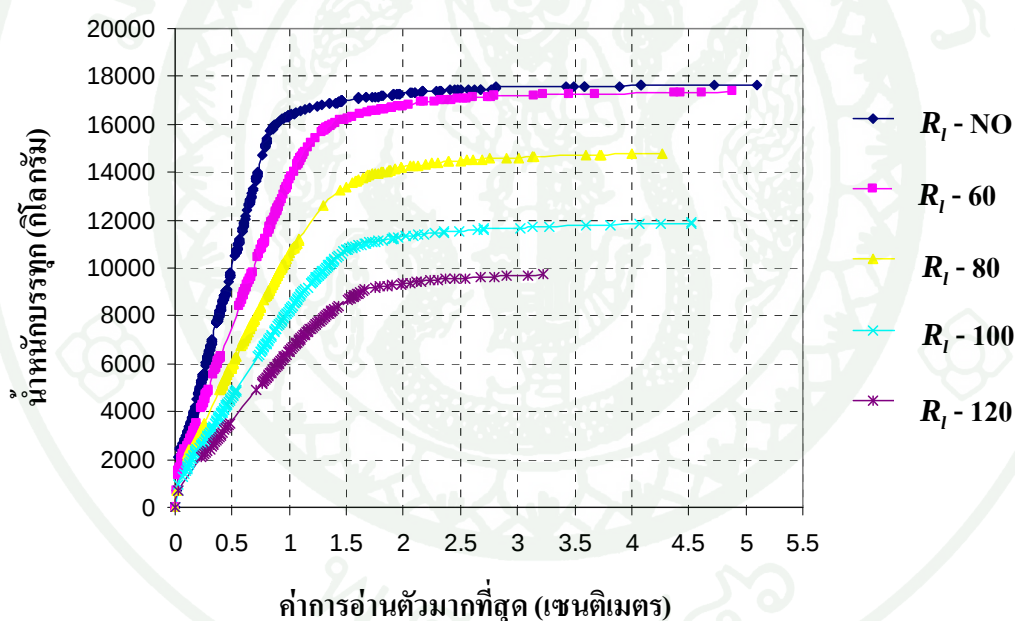
จากภาพที่ 68 ตำแหน่งที่มีการคัดกลับ และการโค้งตัวกระดูกสามารถนำมาเขียนอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัวได้ดังภาพที่ 69 ซึ่งคานที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวช่องเปิดเท่ากับ 80 ซม. ($R_f - 80$) จะเกิดการแอ่นตัวปกติประมาณ น้ำหนักบรรทุก 14,000 กก. จากนั้นคานจะเริ่มการโค้งตัวกระดูกจนถึงน้ำหนักบรรทุกประลัย คานที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวช่องเปิดเท่ากับ 100 ซม. ($R_f - 100$) จะเกิดการแอ่นตัวปกติประมาณน้ำหนักบรรทุก 1,000 กก. จากนั้นคานจะเริ่มการโค้งตัวกระดูกจนถึงน้ำหนักบรรทุกประลัย คานที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวช่องเปิดเท่ากับ 120 ซม. ($R_f - 120$) จะเกิดการโค้งตัวกระดูกทันทีที่มีน้ำหนักบรรทุก จากภาพรวมการโค้งตัวกระดูกในคานมีความสัมพันธ์กับขนาดความยาวของช่องเปิดหากช่องเปิดมีความยาวมาก อย่างเช่น ขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ($R_f - 120$) คานจะกระดูกทันที



ภาพที่ 69 น้ำหนักบรรทุก- การโค้งตัวกระดูกของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลงความยาวช่องเปิดเท่ากับ 80 ซม. ($R_f - 80$) ถึง 120 ซม. ($R_f - 120$) ความลึกทั้งหมด 18 ซม.

1.3 สรุปการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวช่องเปิดกรณีหน้าตัดเต็ม ถึงความยาว 120 ซม.
($R_l - 120$) ความลึกทั้งหมด 18 ซม.

การเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวช่องเปิดกรณีหน้าตัดเต็มถึงความยาว 120 ซม. ($R_l - 120$) สามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัวที่มากที่สุด ดังภาพที่ 70 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า หากช่องเปิดมีความยาวมากขึ้น น้ำหนักบรรทุกที่คานสามารถรับได้จะมีค่าน้อยลง แต่ถ้าหากขนาดความยาวของช่องเปิดยังคงไม่มาก คานยังสามารถแสดงพฤติกรรมของคานคล้ายหน้าตัดเต็มได้ ค่าน้ำหนักบรรทุกที่คานสามารถรับได้ไม่แตกต่างกันมาก แสดงดัง แบบจำลองหลัก 3 มิติ พฤติกรรมของกราฟน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว จะมีพฤติกรรมคล้ายการวิบัติจากเหล็กเสริมที่มีการยึดตัว หมายถึงเหล็กจะวิบัติถึงกำลังครากก่อนคอนกรีต



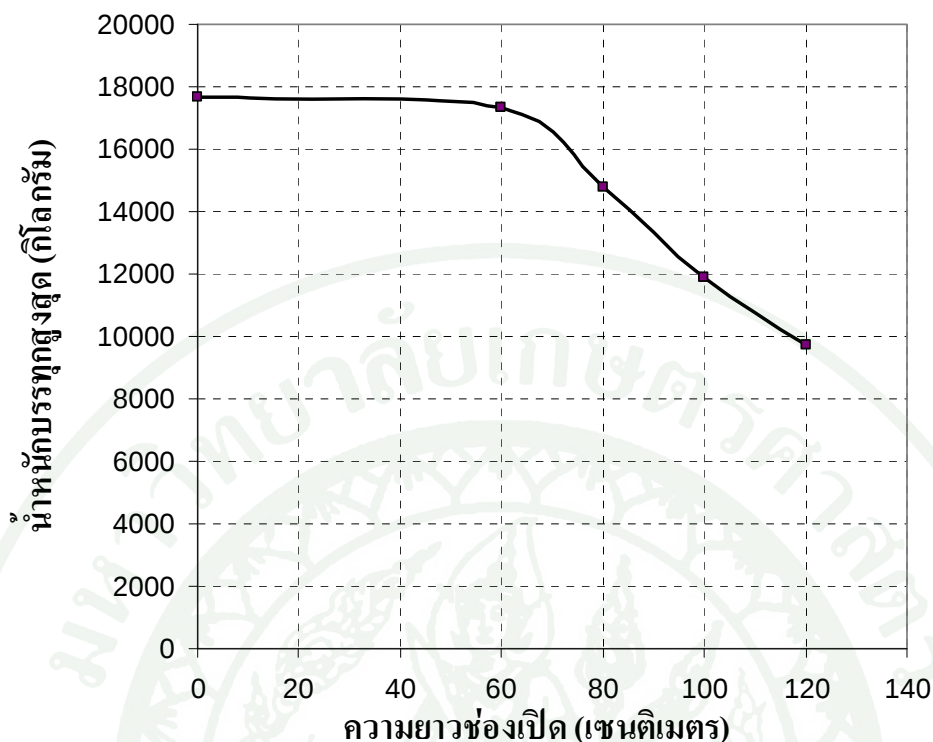
ภาพที่ 70 น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว ของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลงความยาวช่องเปิดหน้าตัดเต็ม ถึง ความยาว 120 ซม. ($R_l - 120$) ความลึกทั้งหมด 18 ซม.

อัตราส่วนน้ำหนักรรทุกสูงสุดเทียบกับแบบจำลอง 3 มิติ กรณีหน้าตัดเต็ม ดังตารางที่ 22 หากช่องเปิดเพิ่มความยาวจากกรณีหน้าตัดเต็ม เป็น 60 ซม. ($R_f - 60$) ค่าน้ำหนักรรทุกสูงสุดลดลง 1.62 เปอร์เซ็นต์ หากช่องเปิดเพิ่มความยาวเป็นขนาด 80 ซม. ($R_f - 80$) ค่าน้ำหนักรรทุกสูงสุดลดลง 16.20 เปอร์เซ็นต์ หากช่องเปิดเพิ่มความยาวเป็นขนาด 100 ซม. ($R_f - 100$) ค่าน้ำหนักรรทุกสูงสุดลดลง 32.55 เปอร์เซ็นต์ และหากช่องเปิดเพิ่มความยาวเป็นขนาด 120 ซม. ($R_f - 120$) ค่าน้ำหนักรรทุกสูงสุดลดลง 44.89 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 22 อัตราส่วนน้ำหนักรรทุกสูงสุดเทียบกับแบบจำลอง 3 มิติ กรณีหน้าตัดเต็ม

ความยาวช่องเปิด (ซ.ม.)	น้ำหนักรรทุกก่อนการแตกร้าว P_{cr} (กก.)	น้ำหนักรรทุกสูงสุด P_{ul} (กก.)	$P_{ul} / R_f - No$	เปอร์เซ็นต์ (%)
หน้าตัดเต็ม	2,477	17,644	1.000	0.00
60	1,676	17,358	0.984	1.62
80	1,294	14,786	0.838	16.20
100	1,267	11,900	0.674	32.55
120	888	9,724	0.551	44.89

แนวโน้มสัดส่วนของกำลังรับน้ำหนักรรทุกกับการเพิ่มของขนาดช่องเปิดซึ่งสามารถสรุปได้ดังภาพที่ 71 ขนาดช่องเปิด 60 ซม. ($R_f - 60$) ความลึก 18 ซม. ค่าน้ำหนักรรทุก จะไม่แตกต่างจากแบบจำลอง 3 มิติ กรณีหน้าตัดเต็ม เนื่องจากการถ่ายเทแรงภายในของคานายังคงรักษาสภาวะคล้ายหน้าตัดเต็มได้ และหากเพิ่มขนาดช่องเปิดตั้งแต่ 60 ซม. ($R_f - 60$) เป็น 120 ซม. ($R_f - 120$) พฤติกรรมของน้ำหนักรรทุกจะลดลงเกือบเป็นเส้นตรง ค่าความชันคงที่ ซึ่งเป็นที่แน่ชัดว่าหากมีการเพิ่มขนาดความยาวของช่องเปิดจะทำให้กำลังรรทุกสูงสุดลดลง แต่การจะเพิ่มความยาวของช่องเปิดได้นั้น จะต้องพิจารณาค่าความแข็งแรงของชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่างถึงการรับแรงตามแนวแกน โมเมนต์ดัด และแรงเฉือนได้หรือไม่ กรณีนี้เป็นการกำหนดค่าความลึกคงที่ (ความลึกทั้งหมด 18 ซม.) ทำให้เป็นเหตุผลถึงการลดลงของน้ำหนักรรทุกคงที่เนื่องจากความเหมาะสมของชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่างก็เป็นได้ ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยควรจะตรวจสอบความเหมาะสมของการออกแบบความชะลูดให้แน่ใจตามมาตรฐาน

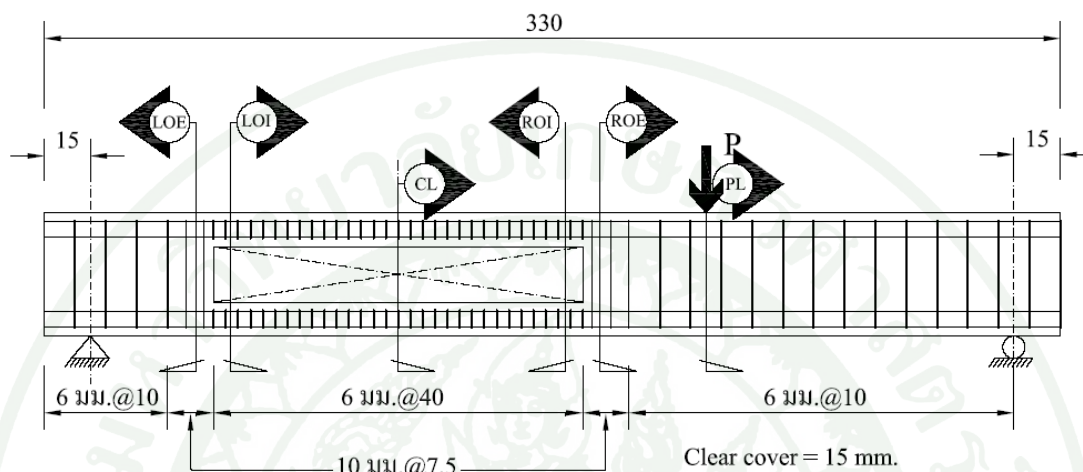


ภาพที่ 71 น้ำหนักรบรรทุก- ความยาวช่องเปิด ของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลงความยาวช่องเปิดกรณีหน้าตัดเต็ม ถึง 120 ซม. ($R_f - 120$) ความลึกทั้งหมด 18 ซม.

2. พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานของขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$)

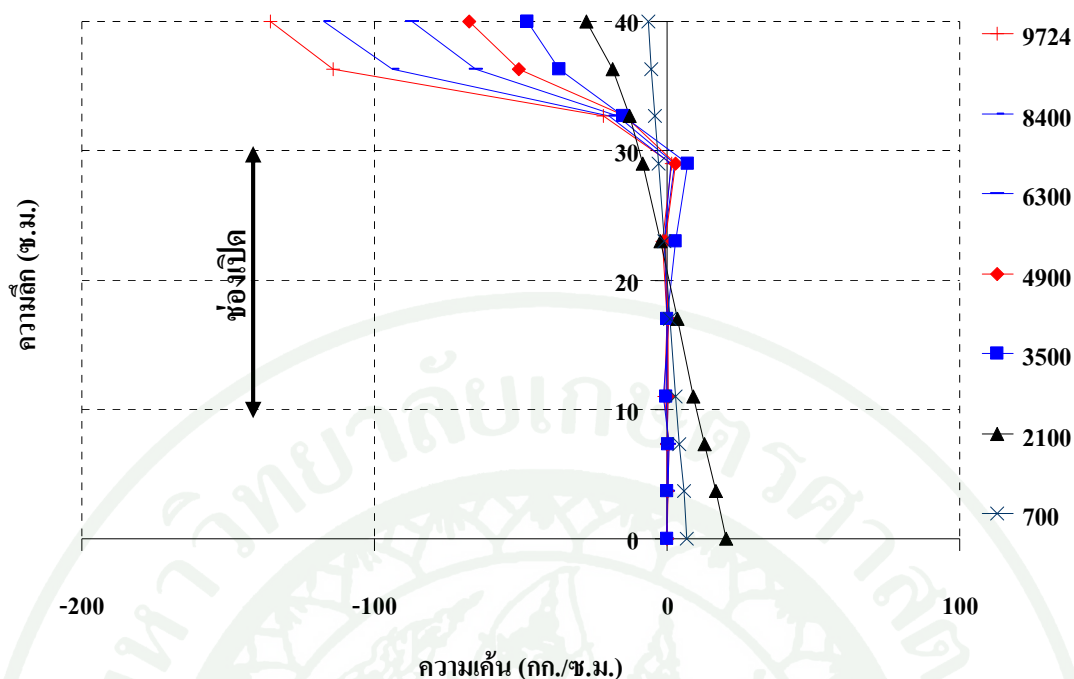
การวิเคราะห์พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานจะกำหนดขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$) เนื่องจากเป็นกรณีที่วิกฤตที่สุด แสดงดังภาพที่ 72 ลักษณะของตำแหน่งหน้าตัดคล้ายกับแบบจำลองหลัก 3 มิติ ซึ่งจะต้องอธิบายการตัดผ่านหน้าตัดคานได้แก่ หน้าตัดคานที่น้ำหนักรบรรทุกกระทำเรียกว่า Section-PL ตำแหน่งจะห่างจากจุดรองรับ 115 ซม. หน้าตัดคานก่อนเข้าสู่ช่องเปิดติดกับมุมช่องเปิดด้านที่ใกล้กับน้ำหนักรบรรทุก เรียกว่า Section-ROE หน้าตัดคานภายในติดกับมุมช่องเปิดด้านที่ใกล้กับน้ำหนักรบรรทุกเรียกว่า Section-ROI หน้าตัดคานศูนย์กลางช่องเปิด เรียกว่า Section-CL หน้าตัดคานภายในติดกับมุมช่องเปิดด้านที่ไกลกับน้ำหนักรบรรทุกเรียกว่า Section-LOI และหน้าตัดก่อนเข้าสู่ช่องเปิดติดกับมุมช่องเปิดไกลกับน้ำหนักรบรรทุก เรียกว่า Section-LOE พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคาน จะเป็นการศึกษาค่าหน่วยแรงตามยาวของคาน (แกน X) ในขั้นตอนการหาค่าหน่วยแรงจะได้จากการเฉลี่ยจำนวนจุดต่อในแต่

ละแวกตามระนาบ XZ ซึ่งค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจะมีค่าหน่วยแรงจะเป็นพฤติกรรมแรงตามแกนทำให้ปรากฏเป็นแรงดึง และแรงอัด ส่งผลให้ชั้นส่วนบน และชั้นส่วนล่างมีพฤติกรรมคล้ายเสา และสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้



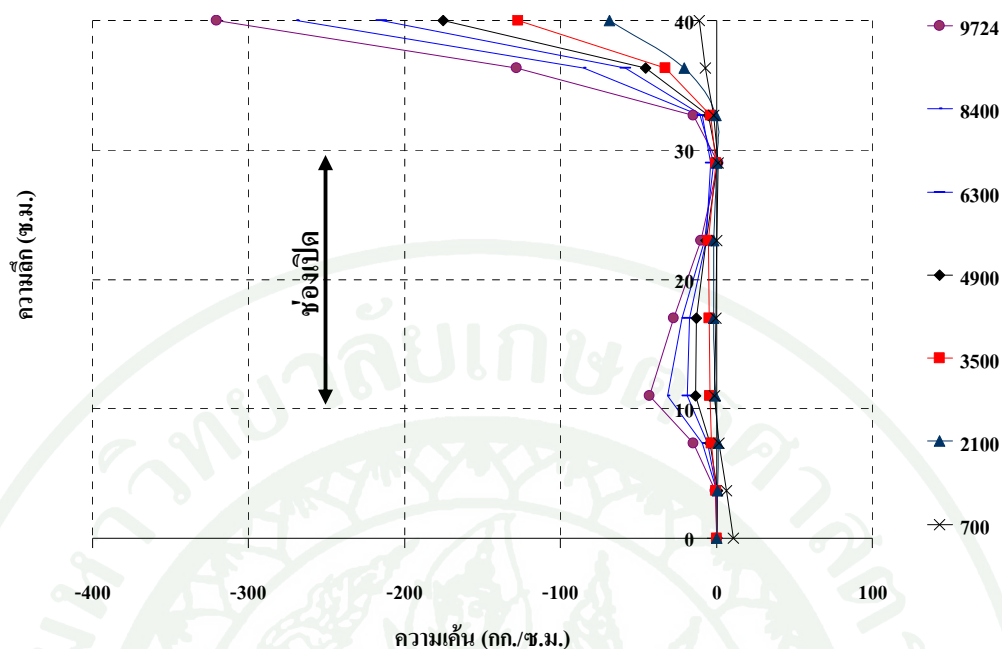
ภาพที่ 72 พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$)

พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคาน Section-PL จะคล้ายกับพฤติกรรมแบบจำลองหลัก 3 มิติ แสดงได้ดังภาพที่ 73 ในช่วงน้ำหนักบรรทุก 700 กก. การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานยังคงเป็นแบบเชิงเส้นและมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการยืดหดตัว เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุก 2,100 กก. ค่าหน่วยแรงดึงเพิ่มขึ้นประมาณ 20 กก./ซ.ม.² ซึ่งจะเป็นการแตกร้าวครั้งแรก และเมื่อเพิ่มระดับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นคอนกรีตไม่สามารถรับแรงดึงได้ ทำให้ส่งถ่ายแรงไปยังเหล็กเสริมรับแรงดึงแทน และเลื่อนระดับแกนสะเทินเพิ่มมากขึ้น มีค่าแรงอัดมากที่สุดประมาณ 135 กก./ซ.ม.² ซึ่งแรงอัดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกำลังอัดประลัยคอนกรีตของแบบจำลองหลัก 3 มิติ ทำให้สังเกตพฤติกรรมของการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานได้ว่าคานมีการวิบัติในส่วนอื่นที่ไม่ใช่ส่วนได้น้ำหนักบรรทุก เนื่องจากความยาวช่องเปิดเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานบริเวณก่อนเข้าชั้นส่วนบน และชั้นส่วนล่างทำได้ยาก มีความเข้มข้นของค่าความเค้นสูง ปรากฏชัดในเรื่องการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดมีค่าน้อยลงหากความยาวของช่องเปิดเพิ่มมากขึ้น



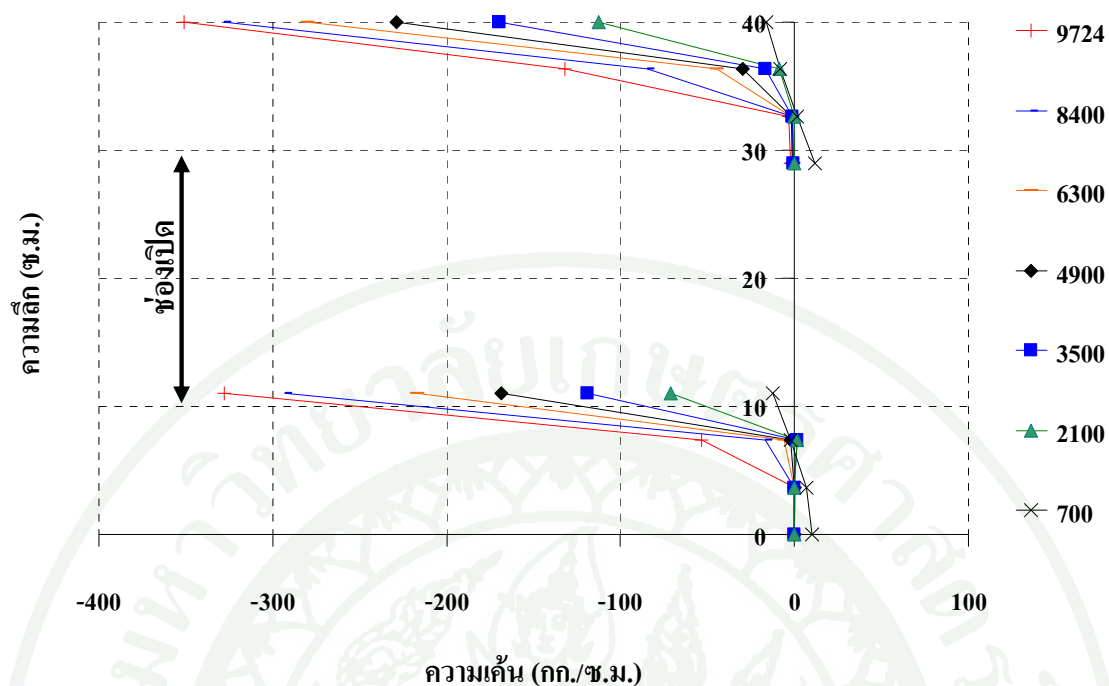
ภาพที่ 73 พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม.
($R_I - 120$) Section-PL

พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_I - 120$) Section-ROE อยู่ใกล้ช่องเปิดฝั่งน้ำหน้าบรรทุกทุกสามารแสดงได้ดังภาพที่ 74 ความสัมพันธ์ระหว่างการรับแรงดัด และการกระจายของหน่วยแรงที่เกิดขึ้น ในช่วงน้ำหน้าบรรทุก 700 กก. การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานยังคงเป็นแบบเชิงเส้น และมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการยืดหดตัว เมื่อเพิ่มน้ำหน้าบรรทุก 2,100 กก. ค่าความเค้นที่เกิดในคอนกรีตมีค่าเกินหน่วยแรงดึงที่รับได้จึงทำให้คอนกรีตแตกร้าว และไม่สามารถรับหน่วยแรงดึงได้ พฤติกรรมการรับแรงอัดจะปรากฏสองส่วน ส่วนแรกหน่วยแรงอัดจะเพิ่มขึ้นตามปกติเหนือแกนสะเทินที่ยกเพิ่มขึ้นจากผลของน้ำหน้าบรรทุกที่เพิ่มขึ้น ส่วนที่สองหน่วยแรงอัดได้รับผลกระทบจากชั้นส่วนล่างที่มีผลกระทบคล้ายพฤติกรรมของคาน ในตำแหน่งส่วนบนของชั้นส่วนล่างใกล้หน้าหน้าบรรทุกจะปรากฏหน่วยแรงอัดมีค่าประมาณ 40 กก./ซ.ม.² ในระหว่างช่องเปิดค่ากำลังอัดจะลดต่ำลงจนมีค่าใกล้เคียงกับศูนย์ ในตำแหน่งส่วนล่างของชั้นส่วนบนใกล้หน้าหน้าบรรทุก และจากตำแหน่งความลึกคาน 30 ซม. ถึง 40 ซม. การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงน้ำหน้าบรรทุก 9,724 กก. ทำให้ค่าความเค้นมีค่า 315 กก./ซ.ม.² ซึ่งใกล้เคียงกับค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต



ภาพที่ 74 พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม.
($R_f - 120$) Section-ROE

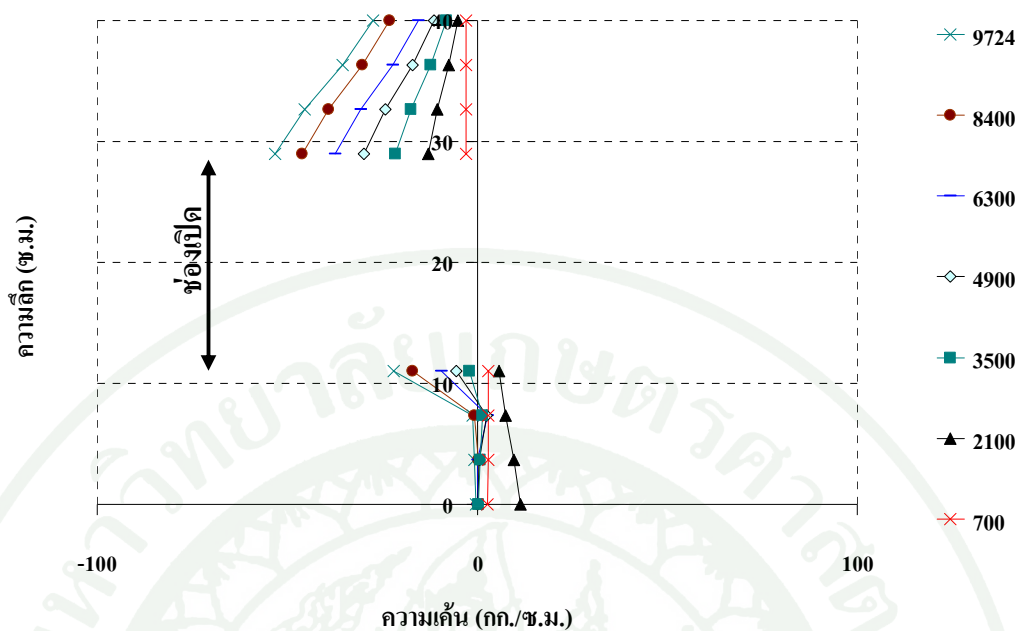
พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$) Section-ROI ที่น้ำหนักบรรทุกทุก 700 กก. การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานยังคงเป็นแบบเชิงเส้นและมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการยืดหดตัว ทั้งชั้นส่วนล่าง และชั้นส่วนบน แกนสะเทินจะอยู่ประมาณกึ่งกลางชั้นส่วนบน และชั้นส่วนล่าง มีระยะ 6.5 ซม. และเมื่อน้ำหนักบรรทุกสูงมากขึ้นที่น้ำหนักบรรทุก 2,100 กก. คอนกรีตจะไม่สามารถรับหน่วยแรงดึงได้ แกนสะเทินก็จะยกตัวสูงขึ้นพร้อมทั้งหน่วยแรงอัดเพิ่มสูงมากขึ้นตามลำดับ น้ำหนักบรรทุก 9,724 กก. หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าประมาณ 330 กก./ซ.ม.² ใกล้เคียงกันทั้งชั้นส่วนบน และชั้นส่วนล่าง เนื่องจากการเพิ่มความยาวช่องเปิดทำให้ความเข้มข้นระหว่างมุมช่องเปิดมีค่ามาก การแสดงถึงพฤติกรรมการรับแรงอัดที่มากของชั้นส่วนล่างทำให้คาดว่าน่าจะมีแรงดึงขึ้นในเหล็กเสริมมากกว่ากรณีแบบจำลองหลัก 3 มิติ Section-ROI เพื่อทำให้หน้าตัดมีความสมดุลแรงในหน้าตัดรวมแสดงดังภาพที่ 75



ภาพที่ 75 พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม.

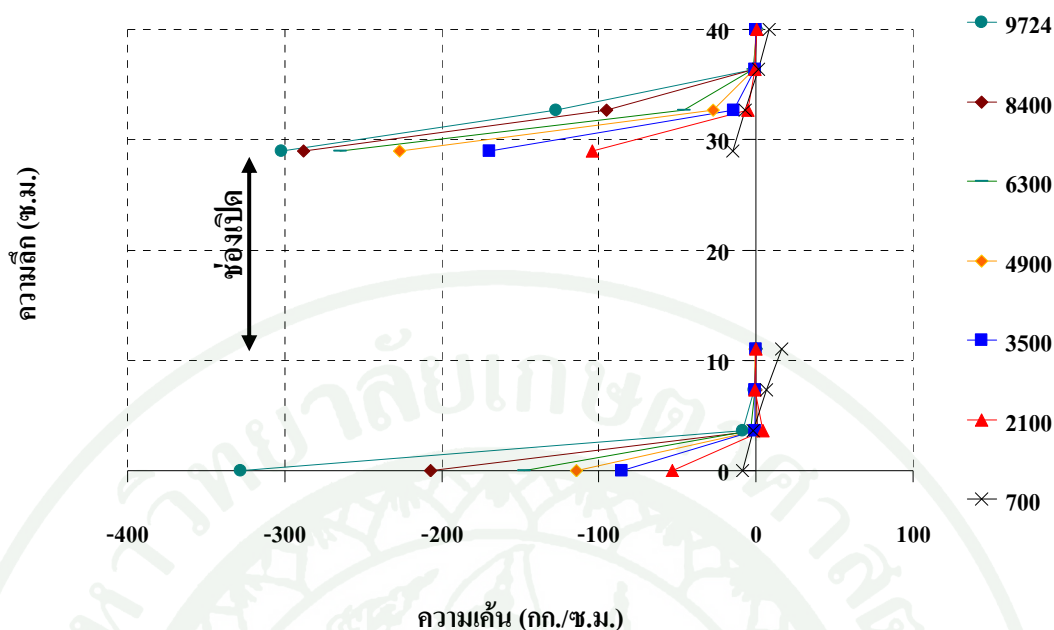
($R_f - 120$) Section-ROI

เมื่อเข้าสู่ศูนย์กลางช่องเปิด พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$) Section-CL พฤติกรรมชั้นส่วนบนจะเกิดแรงอัดเพียงอย่างเดียว และเพิ่มขึ้นจนถึงน้ำหนักบรรทุก 9,724 กก. มีค่าความเค้นประมาณ 50 กก./ซ.ม.² บริเวณชั้นส่วนล่างเมื่อน้ำหนักบรรทุก 700 กก. จะเกิดหน่วยแรงดึงเพียงอย่างเดียวมีค่าประมาณ 4 กก./ซ.ม.² ที่น้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น 2,100 กก. จะเป็นตำแหน่งหน่วยแรงดึงสูงสุดที่คอนกรีตรับได้บริเวณชั้นส่วนล่างมีค่าประมาณ 22 กก./ซ.ม.² และเมื่อน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นตำแหน่งเนื้อแกนสะเทินจะปรากฏหน่วยแรงอัดขึ้น และเพิ่มปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งถึงน้ำหนักบรรทุก 9,724 กก. แสดงดังภาพที่ 76



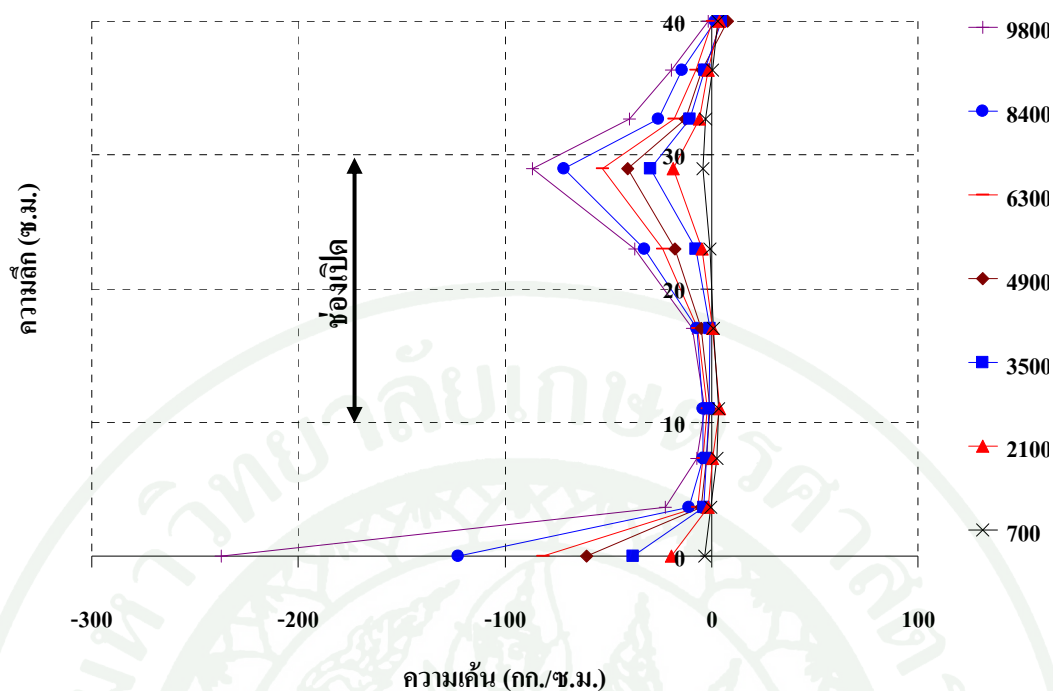
ภาพที่ 76 พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม.
(R_I -120) Section-CL

พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. (R_I -120) Section-LOI มีความสอดคล้องกับ แบบจำลองหลัก 3 มิติ Section-LOI ในช่วงน้ำหนักบรรทุก 700 กก. หน่วยแรงดึง และแรงอัดจะเป็นสัดส่วนเส้นตรง และเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มมากขึ้นคอนกรีตส่วนบนของชิ้นส่วนบนจะไม่สามารถต้านทานหน่วยแรงดึงได้เนื่องจากเกิดโมเมนต์ทวนเฉือนนาฬิกา และพฤติกรรมของหน่วยแรงอัดจะมีค่ามากที่สุดประมาณ 325 กก./ซ.ม.² บริเวณชิ้นส่วนล่าง และชิ้นส่วนบนจะมีหน่วยแรงอัดที่ใกล้เคียงกันแสดงดังภาพที่ 77



ภาพที่ 77 พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม.
(R_I -120) Section-LOI

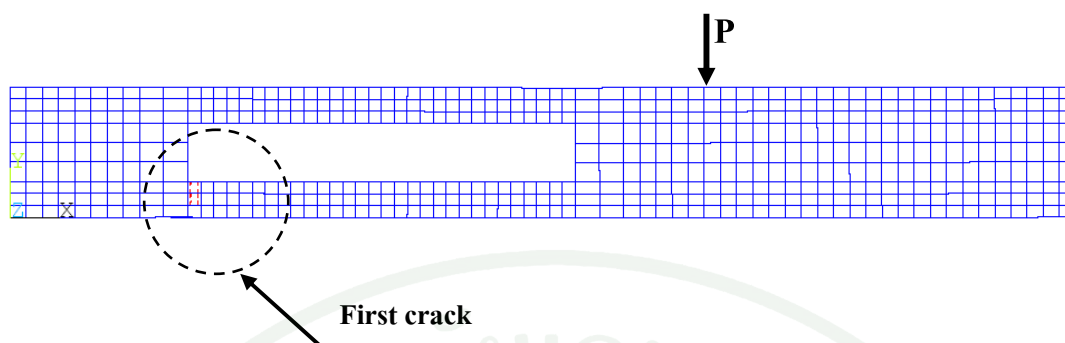
พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม.
(R_I -120) Section-LOE การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานจะมีอิทธิพลของการดัดกลับใน
ชั้นส่วนบน และชั้นส่วนล่างคล้ายแบบจำลองหลัก 3 มิติ Section-LOI แต่จะต่างตรงค่าหน่วย
แรงอัดมากที่สุดบริเวณตำแหน่งมุมล่างชั้นส่วนบนมีค่าประมาณ 220 กก./ซ.ม.² ซึ่งแสดงให้เห็นถึง
พฤติกรรมการส่งถ่ายความเค้นบริเวณมุมของช่องเปิดมีค่ามากเมื่อเพิ่มขนาดความยาวของช่องเปิด
แสดงดังภาพที่ 78



ภาพที่ 78 พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม.
(R_f -120) Section-LOE

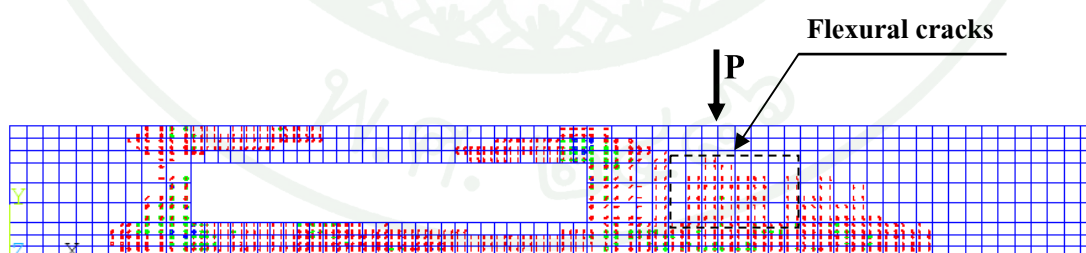
3. พฤติกรรมการแตกร้าวของขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. (R_f -120)

พฤติกรรมการแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด จะมีพฤติกรรมที่คล้ายกันซึ่งสามารถสรุปการแตกร้าวด้วยขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. (R_f -120) การแตกร้าวครั้งแรก (First cracks) จะเกิดบริเวณบนชิ้นส่วนล่างมุมช่องเปิดฝั่งใกล้หน้าทับบรรทุกเหมือนแบบจำลองหลัก 3 มิติ ซึ่งแสดงให้เห็นดังภาพที่ 79 การแตกร้าวจะเป็นแบบ Flexural cracks คือหน่วยแรงดึงในแกนหลัก (Principal tensile stress) จะมีค่ามากในทิศทาง X (ทิศทางตามแนวยาวคาน) เมื่อหน่วยแรงดึงในแกนหลัก (Principal tensile stress) ที่เกิดขึ้นมีค่าเกินกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต ความยาวช่องเปิดที่เพิ่มมากขึ้นทำให้บริเวณมุมของช่องเปิดมีค่าแรงเฉือน และค่าโมเมนต์ดัดกลับเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในการกระจายค่าความเค้น การแตกร้าวครั้งแรกจึงเกิดที่หน้าทับบรรทุกต่ำกว่าแบบจำลองหลัก 3 มิติ



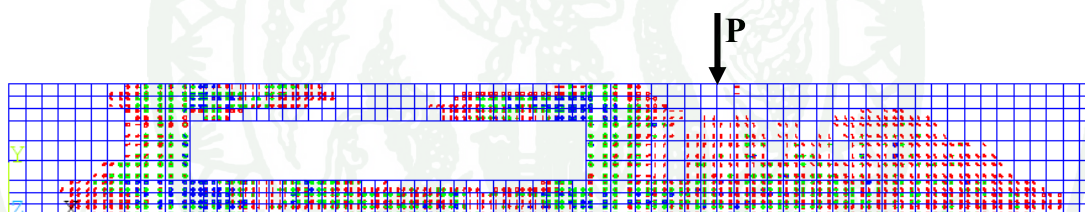
ภาพที่ 79 รูปแบบการแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีตขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$)
ภายใต้การแตกร้าว First crack

เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกมากขึ้นการแตกร้าว Flexural cracks หน่วยแรงดึงในแกนหลัก (Principal tensile stress) ที่เกิดขึ้นมีค่าเกินกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตการแตกร้าว Flexural cracks จะขยายเพิ่มมากขึ้นบริเวณได้น้ำหนักบรรทุก และขึ้นส่วนบน และขึ้นส่วนล่าง บริเวณรับแรงดึง สังเกตบริเวณขึ้นส่วนบนจะเกิดโมเมนต์คดในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ทำให้รูปแบบการแตกร้าว Flexural cracks เริ่มเกิดจากด้านบนคาน ลงมาด้านล่างคาน ส่วนบริเวณมุมฝังใกล้น้ำหนักบรรทุกจะเกิด รูปแบบการแตกร้าว Flexural cracks จากด้านล่างขึ้นด้านบนตามพฤติกรรมของคาน เมื่อคอนกรีตไม่สามารถรับแรงดึงได้ ระดับของแกนสะเทินจะยกขึ้นเรื่อยๆ จนคานเกิดการวิบัติ แสดงดังภาพที่ 80



ภาพที่ 80 รูปแบบการแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีตขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$)
ภายใต้การแตกร้าว Flexural cracks

น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยการแตกร้าจะเพิ่มมากขึ้น และเกิดการแตกร้าทั้ง 3 ชนิดดังที่ได้กล่าวมา ซึ่งจะเกิดการแตกร้ามากบริเวณมุมช่องเปิดซึ่งหมายความว่าหากช่องเปิดมีขนาดยาวมากขึ้นขึ้นส่วนบน และขึ้นส่วนล่างจะเกิดการแตกร้าเพิ่มมากขึ้นจนเป็นเหตุทำให้กานเกิดการวิบัติแสดงดังภาพที่ 81 การแตกร้าบริเวณใต้น้ำหนักบรรทุกไม่ได้ยกตัวสูงขึ้น พื้นที่รับแรงอัดของคอนกรีตยังสามารถใช้งานได้ แต่สิ่งที่ส่งผลให้กานวิบัติเนื่องจากรอยแตกร้าบริเวณมุมของช่องเปิดที่เกิดแรงเฉือน และโมเมนต์คดมากเกินไปจนทำให้กานวิบัติสังเกตได้จากบริเวณกึ่งกลางช่องเปิดไม่ปรากฏรอยแตกร้าเนื่องจากตามทฤษฎีจุดกึ่งกลางช่องเปิดจะเป็นจุดดัดกลับทำให้ไม่มีผลของโมเมนต์คดเข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งจะเกิดแต่เพียงแรงอัดเท่านั้น ส่วนบริเวณด้านล่างรอยแตกร้าปรากฏชัดเนื่องจากขึ้นส่วนล่างรับแรงดึงทำให้ขึ้นส่วนเอลิเมนต์มีการส่งถ่ายแรงดึงเพื่อกองสภาพสมดุล และได้น้ำหนักบรรทุกรอยแตกร้าแบบ Flexural cracks ได้หยุดการแตกร้าในช่วงระดับหนึ่งซึ่งบ่งบอกว่ากานไม่ได้วิบัติตรงจุดนี้ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดกานขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$) Section-PL ที่มีค่าหน่วยแรงอัดสูงสุด 135 กก./ซ.ม.²

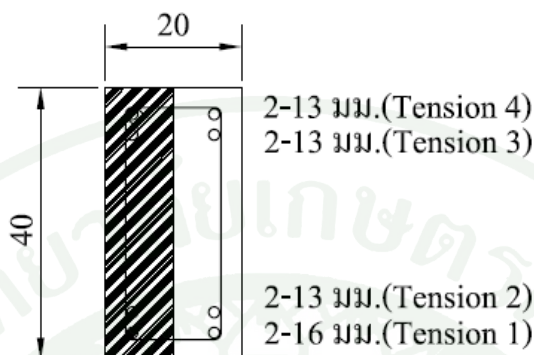


ภาพที่ 81 รูปแบบการแตกร้าเอลิเมนต์คอนกรีตขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$) ภายใต้การแตกร้าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด

4. พฤติกรรมแรงดึงในเหล็กเสริมของขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$)

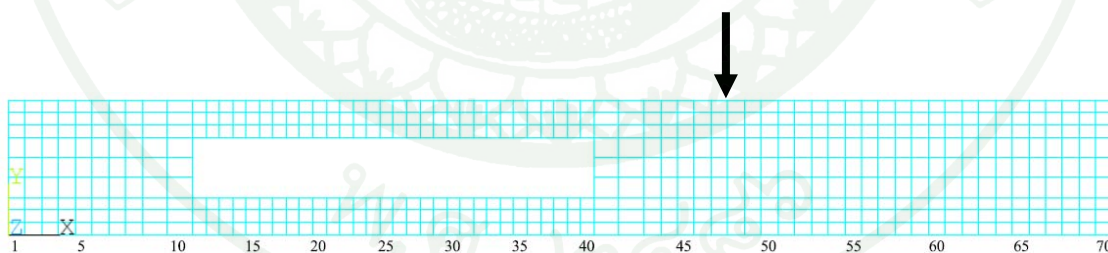
การพิจารณาพฤติกรรมแรงดึงในเหล็กเสริมของขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$) ซึ่งจะกำหนดให้ เหล็กเสริมจำนวน 4 เส้น แสดงดังภาพที่ 82 จะระบุชื่อตามตำแหน่งจากใต้กานเหล็กเสริม $\Phi 16$ มม. กำหนด Tension 1 ส่วนเหล็กเสริมตำแหน่งถัดไป $\Phi 13$ มม. กำหนด Tension 2, Tension 3 และ Tension 4 ตามลำดับ คล้ายกรณีแบบจำลองหลัก 3 มิติ พฤติกรรมแรงดึงในเหล็กเสริมขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$) มีความน่าสนใจเนื่องจากการศึกษาที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ขึ้นส่วนล่างที่รับแรงดึงบริเวณมุมช่องเปิดปรากฏค่าความเค้นอัดที่มาก ดังนั้น

หากจะเป็นไปตามทฤษฎีหน่วยแรงดึงจะมากขึ้นเพื่อทำให้เกิดความสมดุล สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 82 หน้าตัดคานของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณีขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม.
ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$)

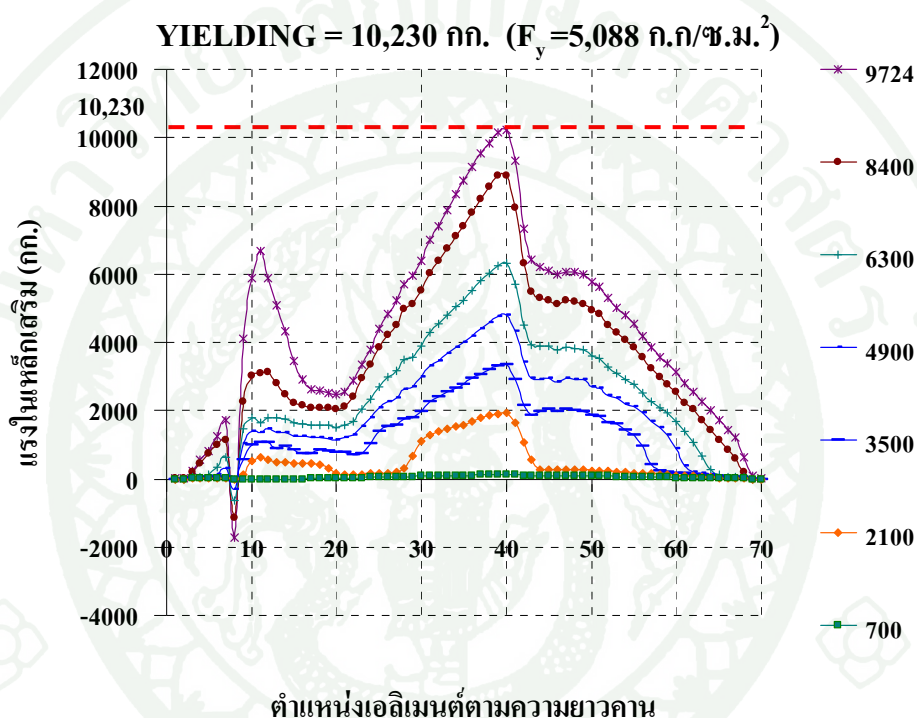
ผลลัพธ์ของแรงดึงจะแสดงเป็นเอลิเมนต์เหล็กเสริมตามยาวคานดังภาพที่ 83 สำหรับขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$) จะมีจำนวนเอลิเมนต์เหล็กเสริมตามยาวเท่ากับ 70 เอลิเมนต์ ซึ่งมีค่ามากกว่าแบบจำลองหลัก 3 มิติ เนื่องจากตำแหน่งชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่างจะแบ่งละเอียดยาวช่องละ 4 ซม. เพื่อใส่เหล็กปลอก ให้มีความปลอดภัยจากแรงเฉือน



ภาพที่ 83 จำนวนเอลิเมนต์เหล็กเสริมตามยาวขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$)

พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 1 เป็นเหล็กเสริมอันดับแรกที่ทำหน้าที่รับแรงดึงเมื่อคอนกรีตเริ่มเกิดการแตกร้าว แสดงดังภาพที่ 84 พฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็กเสริมจะปรากฏ 2 ส่วนได้แก่ บริเวณมุมของช่องเปิด แต่จะมีค่ามากที่สุดบริเวณมุมช่องเปิดฝั่งใกล้ น้ำหนักบรรทุก ที่ระดับน้ำหนักบรรทุก 700 กก. พฤติกรรมการรับแรงดึงยังไม่เกิดขึ้นในเหล็กเสริม คอนกรีตยังสามารถรับแรงดึงได้ ที่ระดับน้ำหนักบรรทุก 2,100 กก. ตำแหน่งเอลิเมนต์ 40 จะปรากฏ

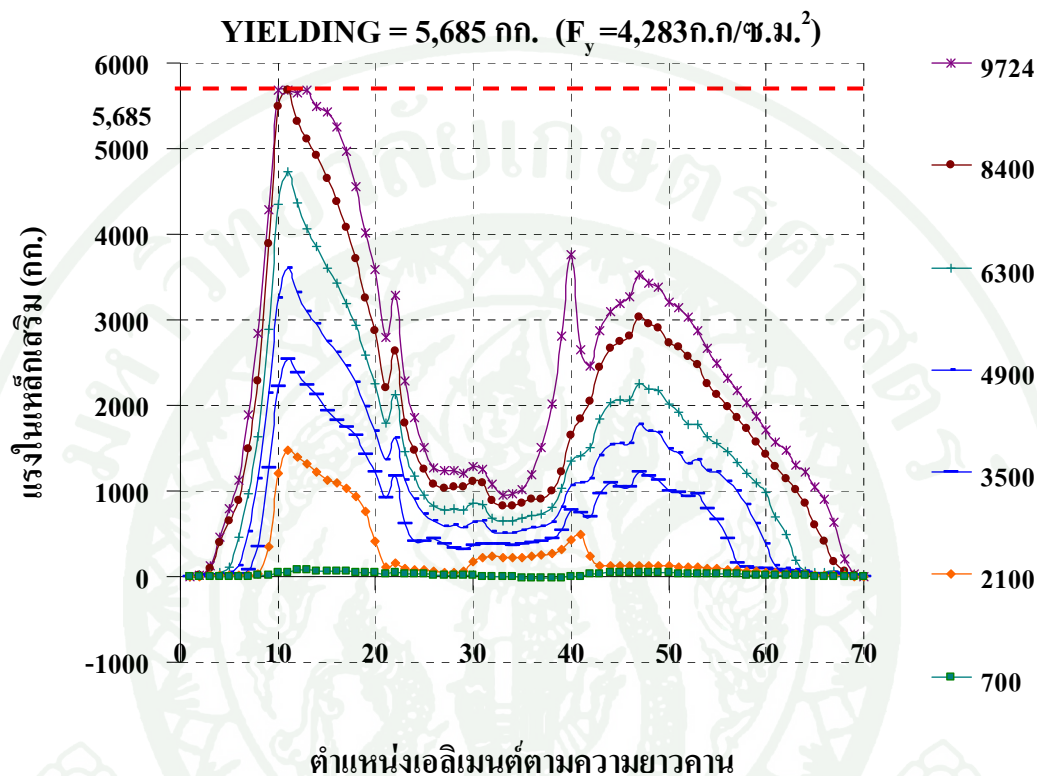
แรงดึงในเอลิเมนต์เหล็กเสริมมากที่สุดซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งมุมช่องเปิดฝั่งใกล้หน้าหนักบรรทุก และมีการแอ่นตัวมากที่สุด พฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็กเสริมจะเพิ่มมากขึ้นตามน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มสูงขึ้น ที่ระดับน้ำหนักบรรทุก 9,724 กก. แรงดึงในเอลิเมนต์เหล็กเสริมก็เพิ่มสูงขึ้นมีค่าประมาณ 10,230 กก. ซึ่งเป็นค่าการครากของเหล็กเสริม ตำแหน่ง เอลิเมนต์ 40 สำหรับตำแหน่งเอลิเมนต์ 8 จะมีพฤติกรรมการรับแรงอัดเล็กน้อยเนื่องจากเป็นตำแหน่งของจุกรองรับ



ภาพที่ 84 พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 1 ขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$)

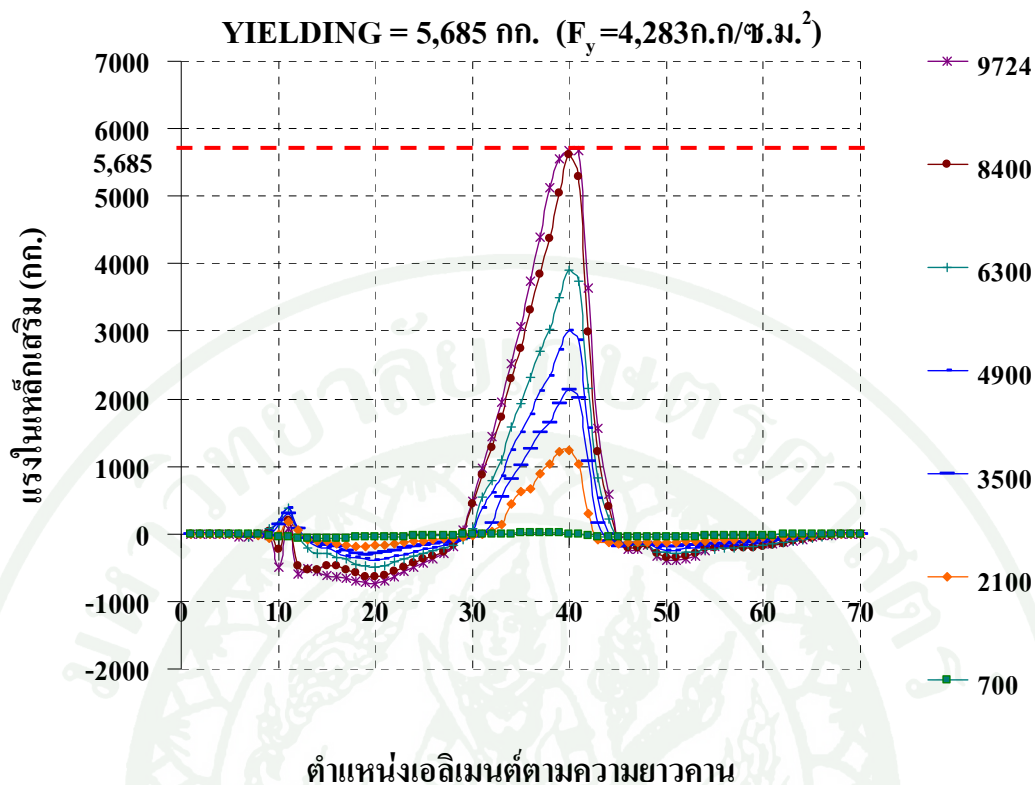
พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 2 เป็นลำดับถัดมาที่จะต้องรับแรงดึง ลักษณะพฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 2 จะสลับพฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 1 ขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$) เนื่องจากค่าแรงดึงในเหล็กเสริมจะมากที่สุดตำแหน่งเอลิเมนต์ 10 บริเวณที่เกิดการตัดกลับ และการโก่งตัวกระดกที่ระดับน้ำหนักบรรทุก 2,100 กก. ถึง น้ำหนักบรรทุก 9,724 กก. แรงดึงในเหล็กเสริมจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ กระทั่งถึงจุดคราก แรงดึงในเอลิเมนต์เหล็กเสริมก็เพิ่มสูงขึ้นมีค่า 5,658 กก.แสดงดังภาพที่ 85 และที่ตำแหน่งเอลิเมนต์ 40 มีแรงดึงในเหล็กเสริม แต่ไม่มากจนทำให้เหล็กเสริมถึงจุดครากซึ่งแรงดึงในเอลิเมนต์เหล็กเสริมมีค่า 3,500 กก. กรณีเช่นนี้ทำให้สรุปพฤติกรรมแรงดึงของเหล็กเสริมในชั้น

ส่วนล่างได้ว่าจะมีพฤติกรรมการครากที่มุมช่องเปิดทั้งสองมุมแต่ทิศทางจะตรงกันข้ามขึ้นกับพฤติกรรมของโมเมนต์คัตที่เกิดขึ้นมุมช่องเปิดฝั่งใต้น้ำหนักบรรทุกทุกจะเกิดการครากในกรณี Tension 1 และมุมช่องเปิดฝั่งใต้น้ำหนักบรรทุกจะเกิดการครากในกรณี Tension 1



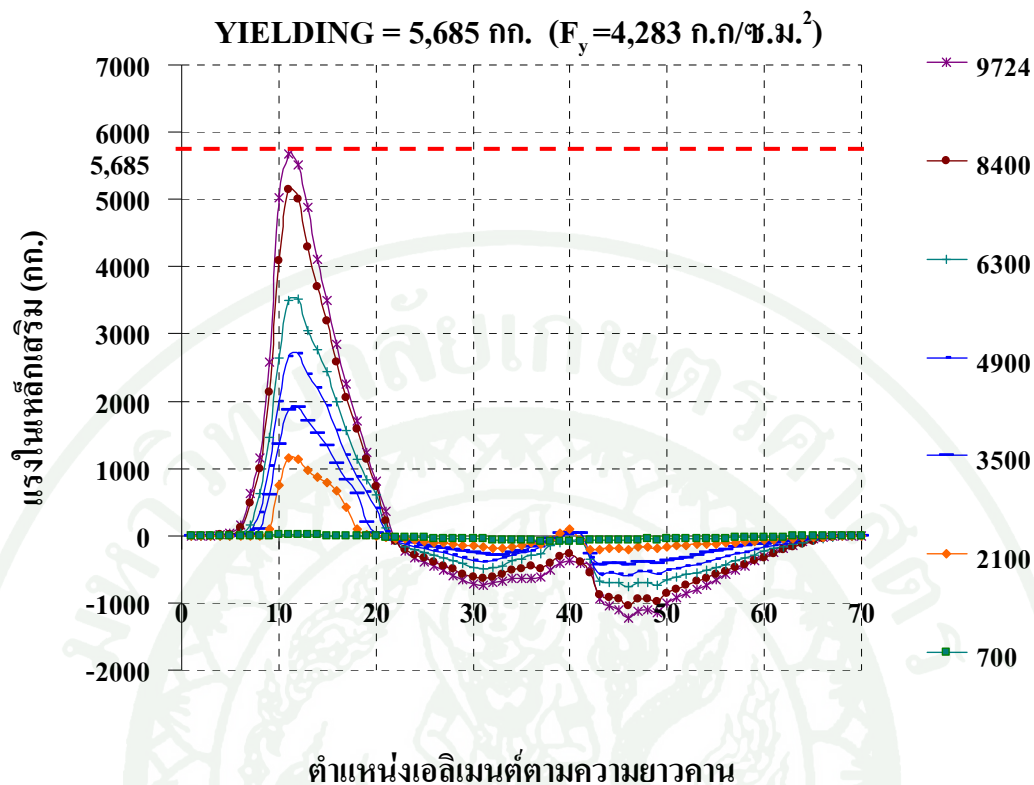
ภาพที่ 85 พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 2 ขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม.
ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$)

พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 3 จะปรากฏพฤติกรรมทั้งแรงดึง และแรงอัดในเหล็กเสริม ที่น้ำหนักบรรทุก 2,100 ถึง 9,724 กก. ตำแหน่งเอลิเมนต์ 40 ซึ่งเป็นบริเวณมุมช่องเปิดขึ้นส่วนบนฝั่งใต้น้ำหนักบรรทุก จะปรากฏพฤติกรรมแรงดึงจนกระทั่งถึงกำลังครากของเหล็กเสริมเนื่องจากบริเวณดังกล่าวคอนกรีตจะแตกร้าว และส่งถ่ายแรงดึงสู่เหล็กเสริมพร้อมยกระดับแกนสะเทินซึ่งในส่วนใต้น้ำหนักบรรทุกจะปรากฏแรงอัด แต่ตำแหน่งเอลิเมนต์ 10 จะมีพฤติกรรมรับแรงดึงอยู่บ้าง เนื่องจากได้รับอิทธิพลของชิ้นส่วนบนที่มีการกระจายหน่วยแรงให้คอนกรีตรับแรงดึงเมื่อคอนกรีตไม่สามารถรับแรงดึงได้จึงเลื่อนระดับแกนสะเทินขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเข้าสู่ กรณี Tension 3 ที่สามารถรับแรงดึงได้ แต่สามารถวัดตรงตำแหน่งอื่นก่อนค่าแรงดึงในตำแหน่งเอลิเมนต์ที่ 10 จึงไม่สูงมากนัก แสดงดังภาพที่ 86



ภาพที่ 86 พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 3 ขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม.
ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$)

พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 4 เป็นตำแหน่งสุดท้ายของเหล็กเสริมในตำแหน่งได้น้ำหนักบรรทุก พฤติกรรมโดยส่วนใหญ่เหล็กเสริมกรณี Tension 4 ในส่วนตำแหน่งเอลิเมนต์ 10 เหล็กเสริมจะรับแรงดึงกระทั่งน้ำหนักบรรทุก 9,724 กก. กำลังของเหล็กเสริมจะถึงจนถึงกำลังคราก และที่ตำแหน่งเอลิเมนต์ 40 เหล็กจะเกิดแรงดึงขึ้นเล็กน้อยแต่ก็ไม่มากกว่าการเกิดกำลังอัดทำให้ยังมีอิทธิพลของกำลังอัดเกิดขึ้น แสดงดังภาพที่ 66 ซึ่งจากภาพรวมทั้งหมดของการรับแรงดึงของเหล็กเสริมตั้งแต่กรณี Tension 1-4 ทำให้สรุปได้ว่าหากเพิ่มความยาวของช่องเปิดมากจนทำให้ค่าความเค้นสูงบริเวณมุมช่องเปิด จะทำให้คานต้องปรับหน่วยแรงให้อยู่ในสถานะสมดุลกระทั่งค่าโมเมนต์ แรงตามแนวแกน และแรงเฉือนทำให้พฤติกรรมการวิบัติเกิดบริเวณมุมของช่องเปิดทั้ง 4 มุม และพฤติกรรมการวิบัติจะเป็นแบบเกิดการครากของเหล็กเสริมที่มุมของช่องเปิดแล้วคอนกรีตจึงจะเกิดการอัดจนพังซึ่งเรียกตามหลักวิชาการว่า ปริมาณเหล็กเสริมน้อยกว่าภาวะสมดุล (Under reinforcement)



ภาพที่ 87 พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 4 ขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม.
ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$)

กรณีที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความลึกของช่องเปิด 3 มิติ

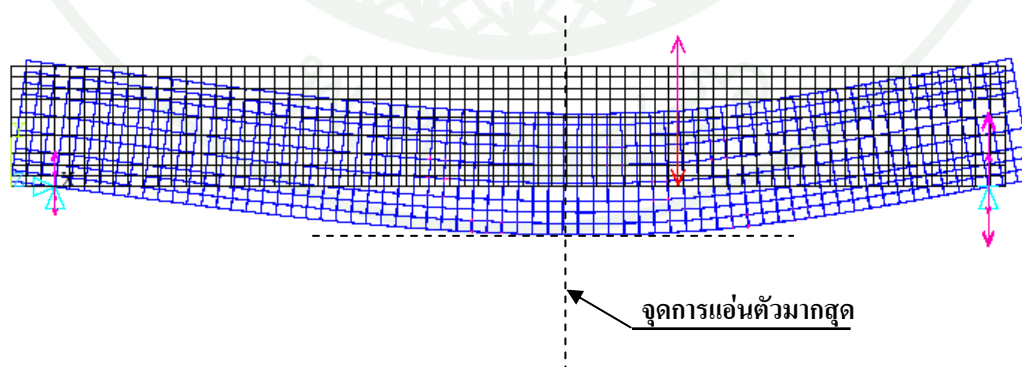
จากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความยาวช่องเปิด ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการวิบัติของคานที่จะเกิดบริเวณมุมของชั้นส่วนล่าง และชั้นส่วนบน ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีความอ่อนแออย่างมาก เนื่องจากมีการกระจายหน่วยแรงผ่านชั้นส่วนบน และชั้นส่วนล่างทำให้ค่าหน่วยแรงมีความเข้มข้นสูงเกินกว่ากำลังของเหล็กเสริม และคอนกรีตจะรับได้ ต่อไปเป็นการพิจารณาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความลึกของช่องเปิด 3 มิติ จะมีลำดับขั้นตอนการพิจารณาแรงภายในค้ำยันกรณีขนาดแบบจำลองหลัก 3 มิติ อาทิเช่น พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกทุก-การแอ่นตัว พฤติกรรมการแตกร้าวของคาน พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคาน และพฤติกรรมแรงดึงในเหล็กเสริม ซึ่งการอธิบายจะขยายความในเนื้อหาที่สำคัญเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ และไม่ซ้ำกับกรณีที่ผ่านมาแล้วข้างต้น

1. พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว ของการเปลี่ยนแปลงความลึกของช่องเปิด 3 มิติ

การพิจารณาพฤติกรรม ความลึกของช่องเปิดที่เพิ่มขึ้นจะพิจารณาความลึกตั้งแต่ 14 ซม. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 40 ของความลึกคาน Mansur and Tan (1989) กำหนดให้เป็นคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ เพื่อศึกษาช่องเปิดตั้งแต่ขนาดเล็ก ไปจนถึงขนาดใหญ่ และสามารถขยายความลึกได้จนถึง 26 ซม. เนื่องจากมีความจำกัดของระยะหุ้ม และขนาดความลึก 18 ซม. จะแบบจำลองหลัก 3 มิติ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ดังนั้นค่าการเปลี่ยนแปลงความลึกของช่องเปิดสามารถแสดงรายละเอียด และสรุปผลดังต่อไปนี้

1.1 ลักษณะการแอ่นตัวของแบบจำลอง 3 มิติ กรณีหน้าตัดเต็ม

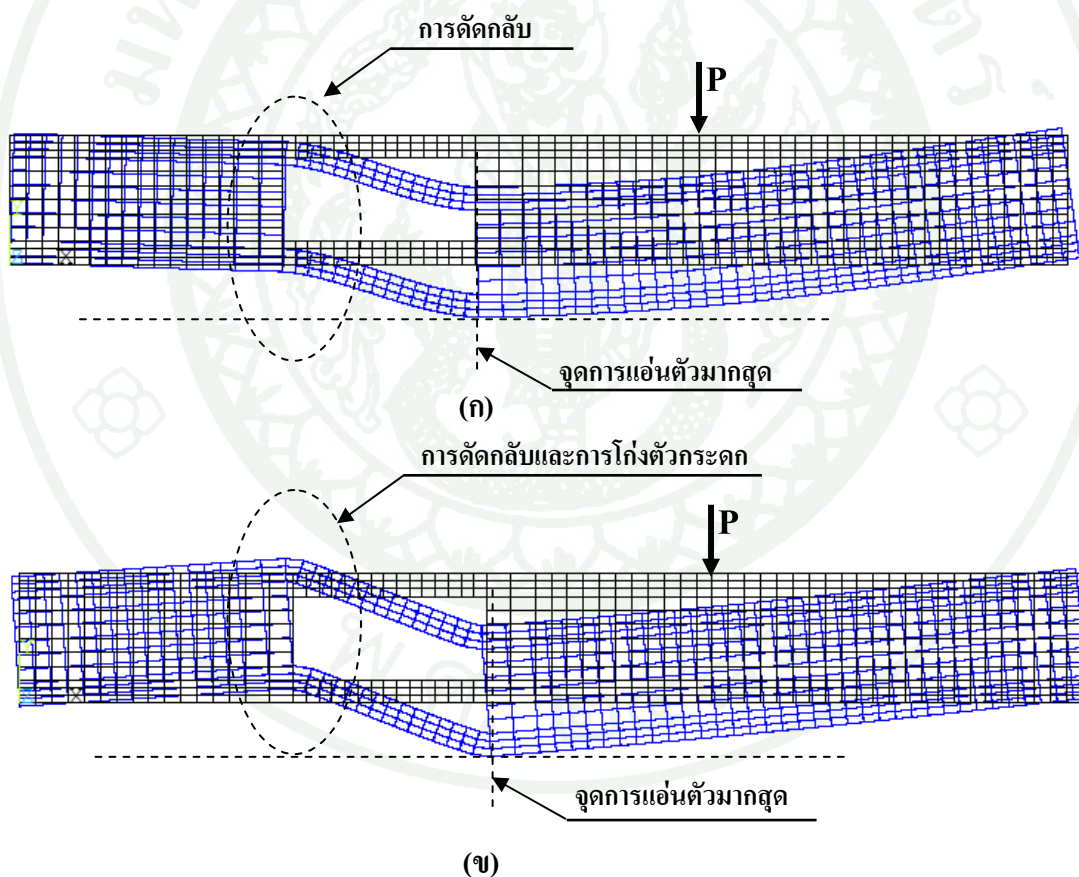
ลักษณะการแอ่นตัวของแบบจำลอง 3 มิติ กรณีหน้าตัดเต็ม แสดงดังภาพที่ 88 ซึ่งเคยได้กล่าวแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ ซึ่งในกรณีนี้เป็นการเปรียบเทียบความลึกของช่องเปิด ซึ่งจุดเริ่มต้นควรที่จะอ้างอิงจาก กรณีหน้าตัดเต็มเพื่อให้เปรียบเทียบลักษณะการแอ่นตัวได้ชัดเจนยิ่งขึ้น การแตกร้าวครั้งแรก (First crack) น้ำหนักบรรทุกประมาณ 2,477 กก. คานยังสามารถรับน้ำหนักบรรทุกต่อไปได้ และเข้าสู่สภาวะไร้เชิงเส้น จนกระทั่งถึงจุดที่เหล็กเกิดการคราก (Steel yielding) น้ำหนักบรรทุกประมาณ 15,800 กก. จะเข้าสู่ช่วงพลาสติกที่น้ำหนักบรรทุกจะขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับการแอ่นตัวที่เพิ่มขึ้นซึ่งพฤติกรรมนี้จะเกิดขึ้นเร็วมาก จนกระทั่งน้ำหนักบรรทุก 17,644 กก.



ภาพที่ 88 ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลอง 3 มิติ กรณีหน้าตัดเต็ม

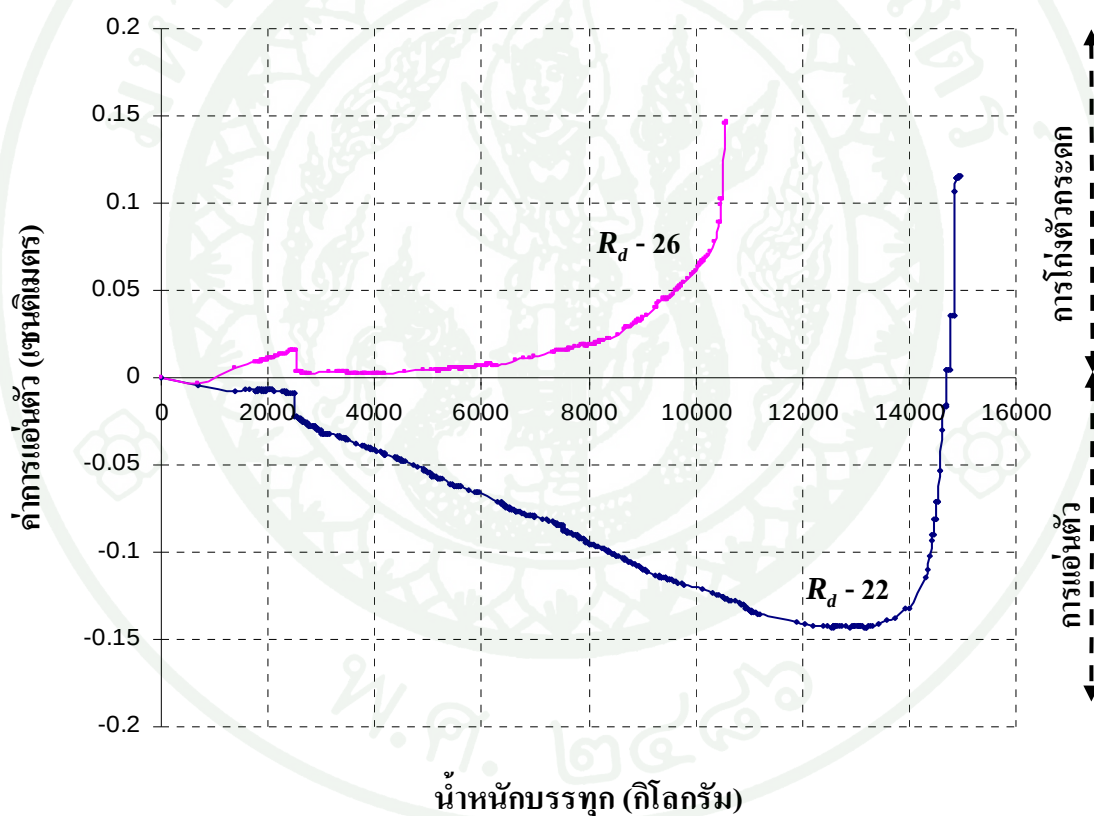
- 1.2 การเปลี่ยนแปลงขนาดความลึกช่องเปิดเท่ากับ 22 ซม. ($R_d - 22$) ถึง 26 ซม.
($R_d - 26$) ความยาวทั้งหมด 60 ซม.

พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงขนาดความลึกช่องเปิดมีอิทธิพลคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงความยาวเนื่องจาก ค่าความแข็งแรงของชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่างลดลงทำให้ค่าการแอ่นตัวเพิ่มสูงขึ้นแสดงดังแบบจำลองหลัก 3 มิติ มีพฤติกรรมการยัดรีงในชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่างซึ่งหากเพิ่มขนาดความลึกช่องเปิดเท่ากับ 22 ซม. ถึง 26 ซม. พฤติกรรมจะคล้าย มีการยัดรีงในชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่างแสดงดังภาพที่ 89(ก) และหากเพิ่มขนาดน้ำหนักรบรรทุกมากขึ้นจะปรากฏการโก่งตัวกระดก แสดงดังภาพที่ 89(ข) คล้ายกับพฤติกรรม的增加ความยาวของชิ้นส่วนที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น



ภาพที่ 89 ลักษณะการแอ่นตัวของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลงขนาดความลึกช่องเปิดเท่ากับ 26 ซม. ($R_d - 26$) ความยาวทั้งหมด 60 ซม.

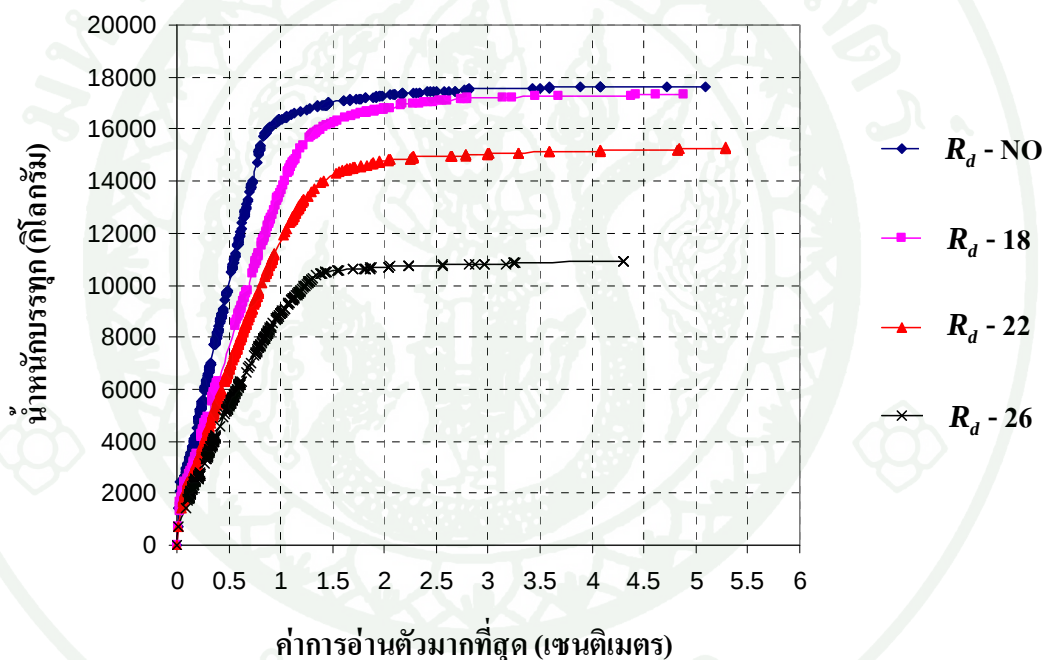
จากภาพที่ 89 ตำแหน่งที่มีการตัดกลับ และการโค้งตัวกระดูกสามารถนำมาเขียนอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว ได้ดังภาพที่ 90 ซึ่งคานที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดความลึกช่องเปิดเท่ากับ 22 ซม. ($R_d - 22$) จะเกิดการแอ่นตัวปกติประมาณน้ำหนักบรรทุก 14,500 กก. จากนั้นคานจะเริ่มการโค้งตัวกระดูกจนถึงน้ำหนักบรรทุกประลัย คานที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดความลึกช่องเปิดเท่ากับ 26 ซม. ($R_d - 26$) จะเกิดการแอ่นตัวปกติประมาณน้ำหนักบรรทุก 900 กก. จากนั้นคานจะเริ่มการโค้งตัวกระดูกจนถึงน้ำหนักบรรทุกประลัย จากภาพรวมการโค้งตัวกระดูกในคานมีความสัมพันธ์กับขนาดความลึกของช่องเปิดหากช่องเปิดมีความลึกมากอย่างเช่น ขนาดความลึกช่องเปิดเท่ากับ 26 ซม. ($R_d - 26$) คานจะมีอิทธิพลของการโค้งตัวกระดูกมาก



ภาพที่ 90 น้ำหนักบรรทุก-การโค้งตัวกระดูก ของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลงขนาดความลึกช่องเปิดเท่ากับ 22 ซม. ($R_d - 22$) ถึง 26 ซม. ($R_d - 26$) ความยาวทั้งหมด 60 ซม.

3.3 สรุปการเปลี่ยนแปลงขนาดความลึกช่องเปิดกรณีหน้าตัดเต็ม ถึงความลึก 26 ซม. ($R_d - 26$) ความยาวทั้งหมด 60 ซม.

การเปลี่ยนแปลงขนาดความลึกช่องเปิดกรณีหน้าตัดเต็ม ถึงความลึก 26 ซม. ($R_d - 26$) ความยาวทั้งหมด 60 ซม. สามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุก- การแอ่นตัว ที่มากที่สุด ดังภาพที่ 91 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า หากช่องเปิดมีความลึกมากขึ้น น้ำหนักบรรทุกที่คานสามารถรับได้จะมีค่าน้อยลง แต่ถ้าหากขนาดความยาวของช่องเปิดยังคงไม่มากนักก็ยังสามารถแสดงพฤติกรรมของคานคล้ายหน้าตัดเต็มได้ค่าน้ำหนักบรรทุกที่คานสามารถรับได้ไม่แตกต่างกันมากนัก แสดงดังความลึกช่องเปิดเท่ากับ 18 ซม. ($R_d - 18$)



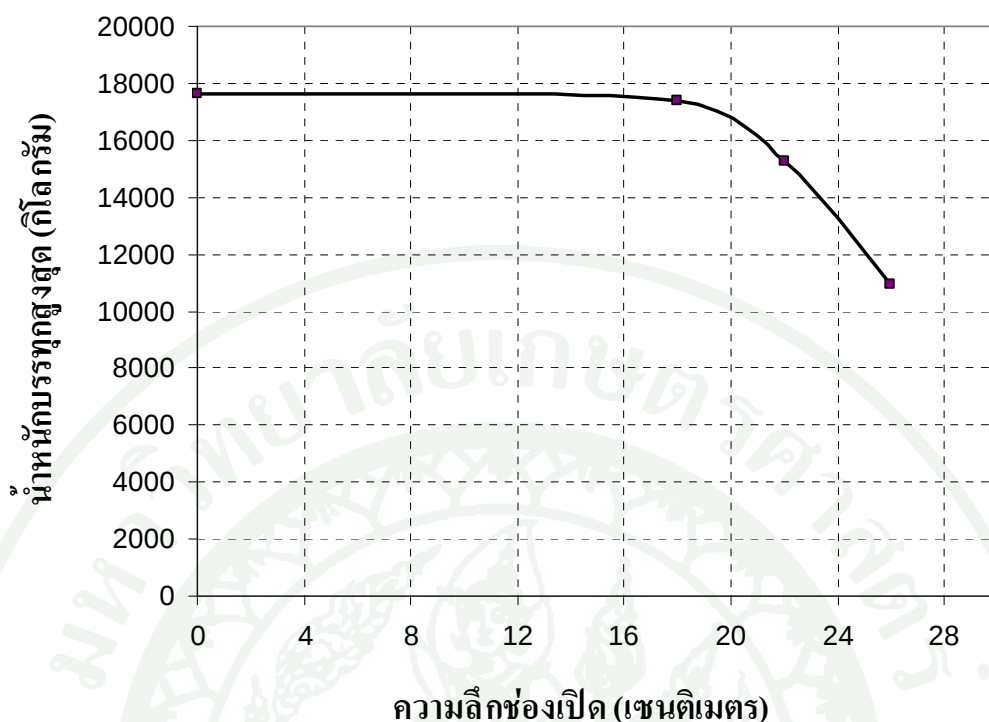
ภาพที่ 91 น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว ของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลงขนาดความลึกกรณีหน้าตัดเต็ม ถึงความลึก 26 ซม. ($R_d - 26$) ความยาวทั้งหมด 60 ซม.

อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเทียบแบบจำลอง 3 มิติ กรณีหน้าตัดเต็ม แสดงดังตารางที่ 23 หากช่องเปิดเพิ่มความลึกเป็นขนาด 18 ซม. ($R_d - 18$) ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดลดลง 1.62 เปอร์เซ็นต์ หากช่องเปิดเพิ่มความลึกเป็นขนาดเป็น 22 ซม. ($R_d - 22$) ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดลดลง 13.36 เปอร์เซ็นต์ หากช่องเปิดเพิ่มความลึก เป็น 26 ซม. ($R_d - 26$) ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดลดลง 38.14 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 23 อัตราส่วนน้ำหนักรรทุกสูงสุดเทียบกับแบบจำลอง 3 มิติ กรณีหน้าตัดเต็ม

ความลึกช่องเปิด (ซ.ม.)	น้ำหนักรรทุกก่อนการแตกร้า P_{cr} (กก.)	น้ำหนักรรทุกสูงสุด P_{ul} (กก.)	$P_{ul} / R_d - No$	เปอร์เซ็นต์ (%)
หน้าตัดเต็ม	2,477	17,644	1.000	0.00
18	1,676	17,358	0.984	1.62
22	1,400	15,286	0.866	13.36
26	778	10,914	0.619	38.14

แนวโน้มสำคัญของกำลังรับน้ำหนักรรทุกกับการเพิ่มของขนาดช่องเปิดซึ่งสามารถสรุปได้ดังภาพที่ 92 การเปลี่ยนแปลงขนาดความลึกจากกรณีหน้าตัดเต็ม เป็นความลึก 18 ซ.ม. ($R_d - 18$) ค่าน้ำหนักรรทุก จะไม่แตกต่างกันมาก เนื่องจากการถ่ายเทแรงภายในของคานายังคงรับสภาวะคล้ายหน้าตัดเต็มได้ และหากเพิ่มขนาดความลึกช่องเปิดเท่ากับ 18 ซ.ม. ($R_d - 18$) เป็น 26 ซ.ม. ($R_d - 26$) พฤติกรรมของน้ำหนักรรทุกจะลดลงเกือบเป็นเส้นตรง มีลักษณะเป็นเส้นโค้งคู่เข้าเล็กน้อย ซึ่งเป็นที่แน่ชัดว่าหากมีการเพิ่มขนาดความลึกของช่องเปิดจะทำให้กำลังรรทุกสูงสุดลดลง การเพิ่มขนาดความลึกของช่องเปิดทำให้ชั้นส่วนล่าง และชั้นส่วนบน มีค่าความแข็งแรงลดลงแต่ด้วยความสอดคล้องของการกำหนดความยาวช่องเปิดคงที่ (ความยาวทั้งหมด 60 ซ.ม.) ทำให้เป็นเหตุผลถึงการลดลงของน้ำหนักรรทุกคงที่เนื่องจากความเหมาะสมของชั้นส่วนบน และชั้นส่วนล่างก็เป็นได้ ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยควรจะตรวจสอบความเหมาะสมของการออกแบบความชะลูดให้แน่ใจตามมาตรฐาน

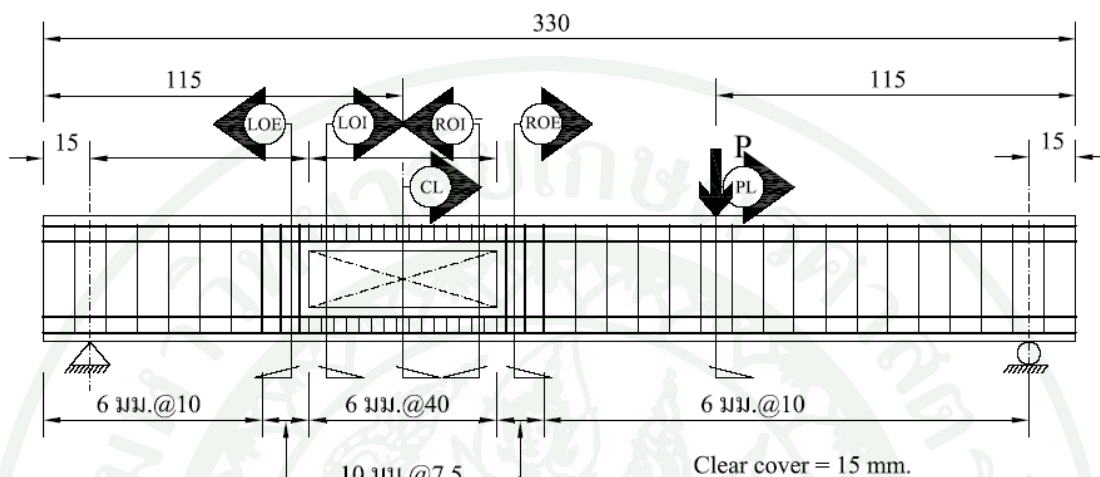


ภาพที่ 92 น้ำหนักรวมสูงสุด-ความลึก ช่องเปิดของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลงขนาดความลึกช่องเปิดเท่ากับ 14 ซม. ($R_d - 14$) ถึง 26 ซม. ($R_d - 26$) ความยาวทั้งหมด 60 ซม.

2. พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานของขนาดช่องเปิด ลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$)

การวิเคราะห์พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_l - 120$) ทำให้ทราบถึงค่าความเค้นอัดของหน้าตัดที่สำคัญคือ จุดใดที่ทำให้คอนกรีตมีค่าถึงกำลังอัดประลัยที่คอนกรีตรับได้ และทราบถึงพฤติกรรมของการแตกร้าวของการต้านทานความเค้นดึงของคอนกรีตที่ทำการยกแกนสะเทินขึ้นหากเกิดการแตกร้าวเนื่องจากคอนกรีตไม่สามารถต้านทานความเค้นดึงได้ ดังนั้นต่อไปจะพิจารณาการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานของขนาดช่องเปิด ลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$) ซึ่งเป็นกรณีที่เกิดจากการเพิ่มความลึกของช่องเปิดแสดงดังภาพที่ 93 ลักษณะของตำแหน่งหน้าตัดคล้ายกับกรณีที่กำลังข้างต้นซึ่งจะต้องตัดผ่านเพื่ออธิบายได้แก่ หน้าตัดที่น้ำหนักรวมทุกกระทำเรียกว่า Section-PL ตำแหน่งจะห่างจากจุดรองรับ 115 ซม. หน้าตัดก่อนเข้าสู่ช่องเปิดติดกับมุมช่องเปิดด้านที่ใกล้กับน้ำหนักรวมทุก เรียกว่า Section-ROE หน้าตัดภายในติดกับมุมช่องเปิดด้านที่ใกล้กับน้ำหนักรวมทุกเรียกว่า Section-ROI

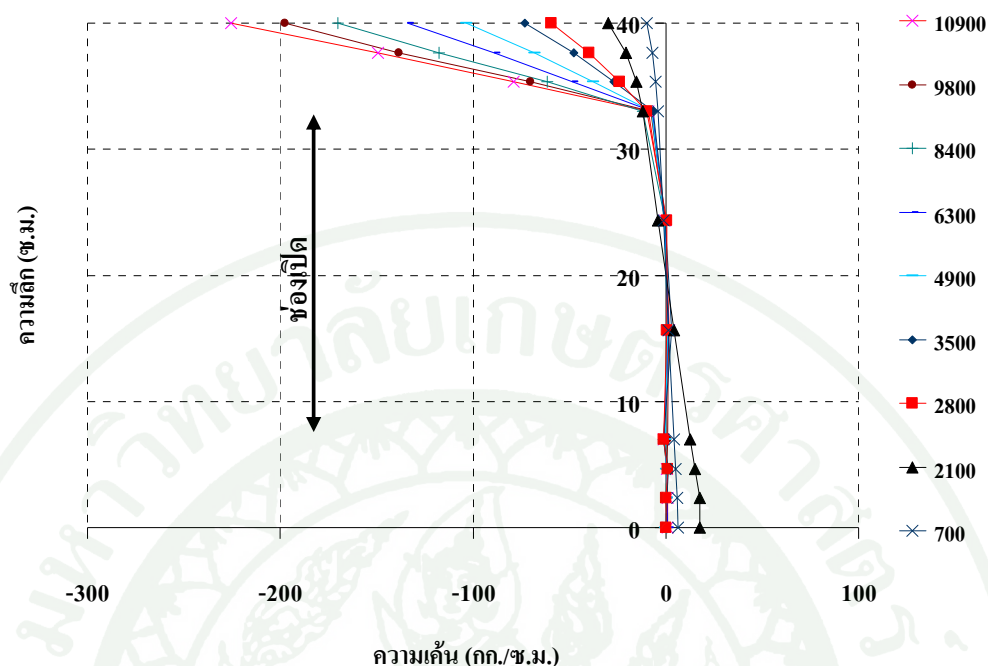
หน้าตัดศูนย์กลางช่องเปิด เรียกว่า Section-CL หน้าตัดภายในติดกับมุมช่องเปิดด้านที่ไกลน้ำหนักบรรทุก เรียกว่า Section-LOI และหน้าตัดก่อนเข้าสู่ช่องเปิดติดกับมุมช่องเปิดด้านที่ใกล้น้ำหนักบรรทุก เรียกว่า Section-LOE



ภาพที่ 93 พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม.

($R_d - 26$)

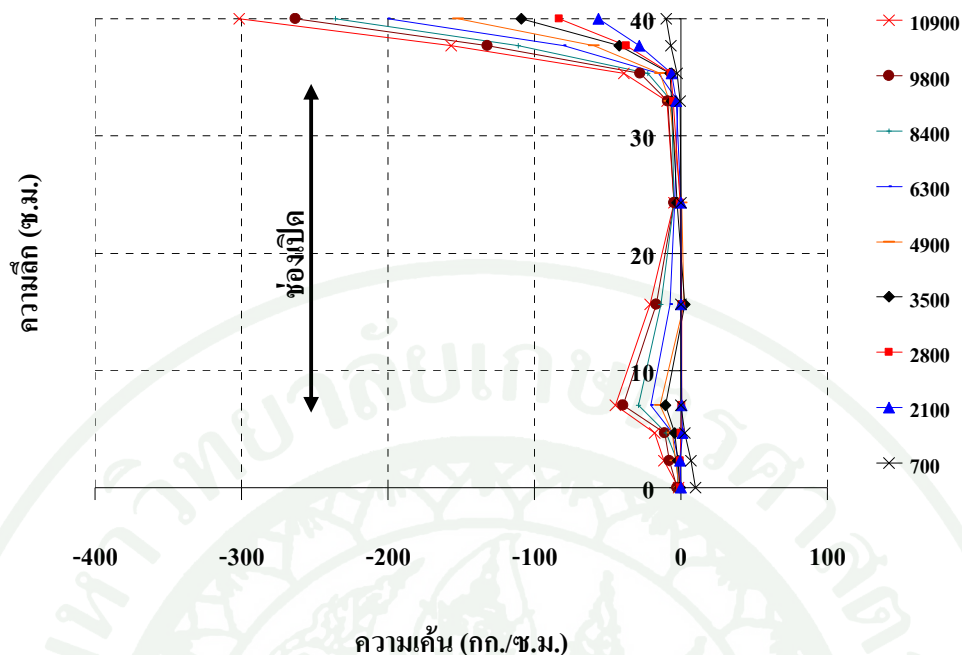
พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$) Section-PL จะคล้ายกับพฤติกรรมแบบจำลองหลัก 3 มิติ แสดงได้ดังภาพที่ 94 ในช่วงน้ำหนักบรรทุก 700 กก. การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานยังคงเป็นแบบเชิงเส้น และมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการยืดหดตัว เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุก 2,100 กก. ค่าหน่วยแรงดึงเพิ่มขึ้นประมาณ 17 กก./ซ.ม.² เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุก 2,800 กก. ระดับแกนสะเทินจะเลื่อนเพิ่มสูงขึ้น และคอนกรีตไม่สามารถต้านทานแรงดึงได้ คานยังสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้เรื่อยๆ กระทั่งน้ำหนักบรรทุก 10,900 กก. ส่งผลให้หน่วยแรงอัดคอนกรีตมีค่า 225 กก./ซ.ม.² ซึ่งยังไม่ถึงกำลังประลัยของคอนกรีต ทำให้มีความสอดคล้องกับขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$) Section-PL ที่มีค่าแรงอัดมากสุดประมาณ 135 กก./ซ.ม.² แสดงว่าที่น้ำหนักบรรทุก 10,900 กก. คานได้วิบัติตรงตำแหน่งอื่น



ภาพที่ 94 พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม.

(R_d - 26) Section-PL

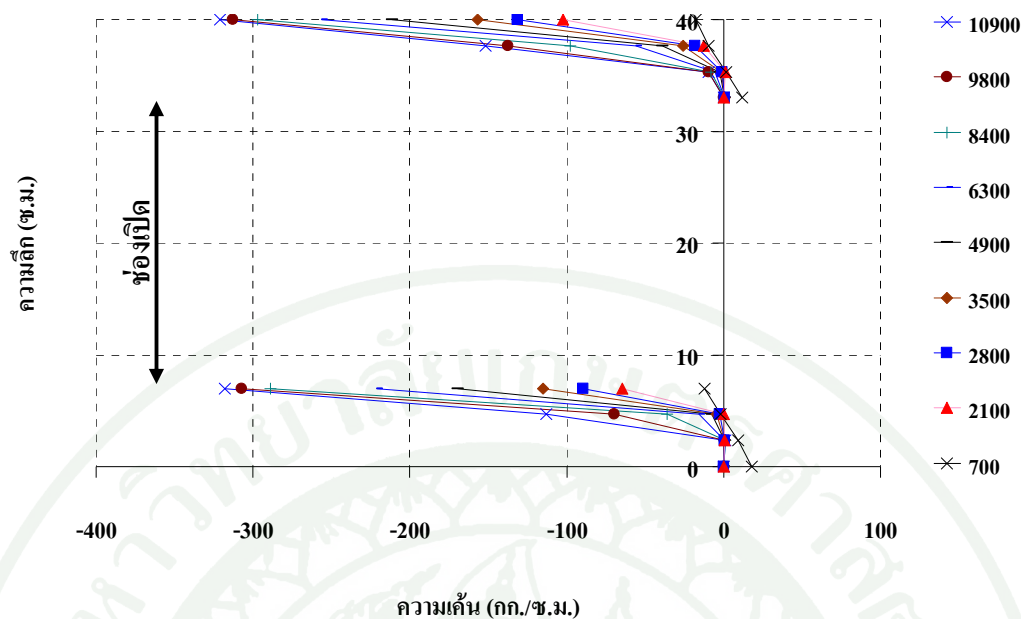
พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม. (R_d - 26) Section-ROE อยู่ใกล้ช่องเปิดฝั่งน้ำหนักบรรทุกทุกสามารถแสดงดังภาพที่ 95 ความสัมพันธ์ระหว่างการรับแรงดัด และการกระจายของหน่วยแรงที่เกิดขึ้น ในช่วงน้ำหนักบรรทุกทุก 700 กก. การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานยังคงเป็นแบบเชิงเส้น และมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการยืดหดตัว เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุก 2,100 กก. เป็นช่วงในพฤติกรรมไร้เชิงเส้นปรากฏการรับแรงอัดบนหน้าตัดสองส่วนคือตำแหน่งความลึกคาน 0-24 และ 33-40 ซม. คล้ายกับกรณีที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ซึ่งการเพิ่มขนาดของความลึกช่องเปิดไม่ได้ส่งผลกระทบมากนัก กับพฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงของหน้าตัดคาน ซึ่งหน่วยแรงอัดสูงสุดยังคงเกิดตำแหน่งความลึกคาน 40 ซม. เช่นเดิม มีค่าเท่ากับ 301 กก./ซ.ม.^2 (มีค่าใกล้เคียงกำลังอัดประลัยของคอนกรีต)



ภาพที่ 95 พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม.

($R_d - 26$) Section-ROE

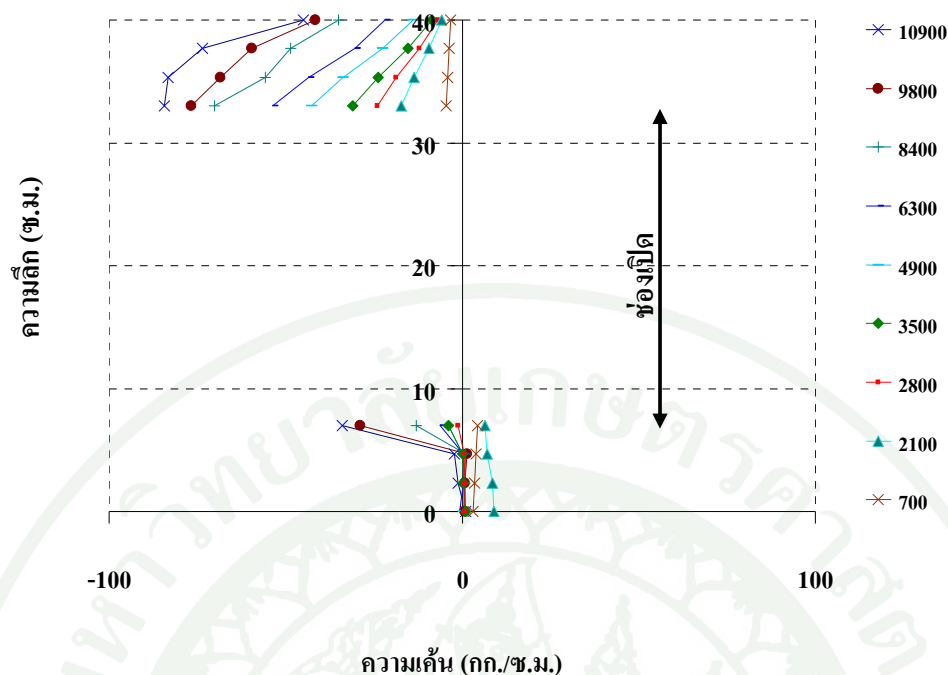
พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$) Section-ROI ที่น้ำหนักบรรทุกทุก 700 กก. การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานยังคงเป็นแบบเชิงเส้น และมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการยืดหดตัว ทั้งชั้นส่วนล่าง และชั้นส่วนบน เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มสูงขึ้น การกระจายความเค้นของหน้าตัดก็มากขึ้นตามลำดับ จากพฤติกรรมทั้งชั้นส่วนบน และชั้นส่วนล่าง มีค่าความเค้นอัดที่ใกล้เคียงกัน คล้ายกับกรณีขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_l - 120$) Section-ROI เมื่อน้ำหนักบรรทุกทุก 10,900 กก. ค่าความเค้นอัดมีค่าประมาณ 314 กก./ซ.ม.² ซึ่งเป็นค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าที่มุมช่องเปิดใกล้กับน้ำหนักบรรทุกทุกคอนกรีตได้วิบัติทั้งชั้นส่วนบน และชั้นส่วนล่างแสดงดังภาพที่ 96



ภาพที่ 96 พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม.

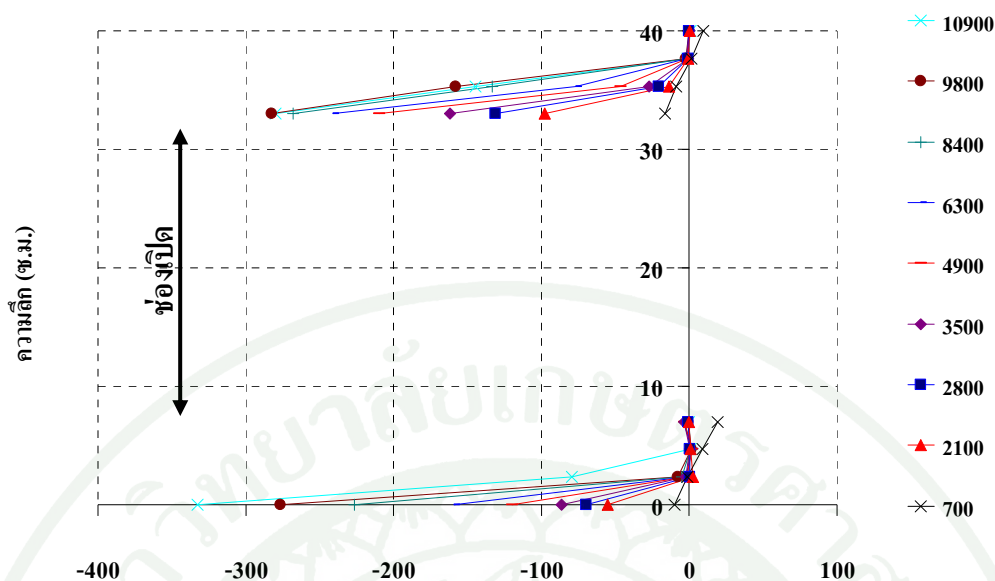
(R_d - 26) Section-ROI

พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม. (R_d - 26) Section-CL พฤติกรรมชิ้นส่วนบนจะเกิดแรงอัดเพียงอย่างเดียว และชิ้นส่วนล่างในช่วงแรกจะเกิดแรงดึงเพียงอย่างเดียว กระทั่งน้ำหนักบรรทุก 2,800 กก. จึงเริ่มปรากฏแรงอัดเกิดขึ้นและเพิ่มมากขึ้นจนถึงน้ำหนักบรรทุก 10,900 กก. มีค่าความเค้นอัดประมาณ 34 กก./ซ.ม.² ในกรณีชิ้นส่วนบนจะมีอิทธิพลของแรงอัดใกล้เคียงกับ แบบจำลองหลัก 3 มิติ Section-CL เนื่องจากขนาดความยาวของชิ้นส่วนมีค่าไม่มากนักทำให้การกระจายค่าความเค้นตามแนวแกนส่งผลไปถึงอีกฝั่งได้ง่าย ที่น้ำหนักบรรทุก 10,900 กก. มีค่าความเค้นอัดประมาณ 80 กก./ซ.ม.² แสดงดังภาพที่ 97



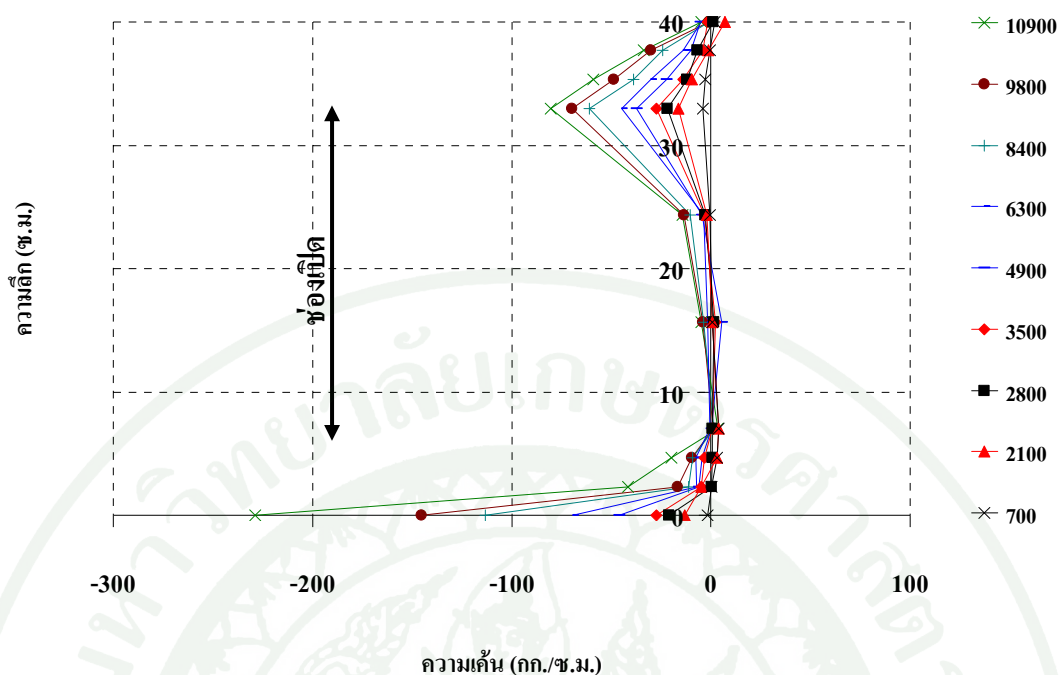
ภาพที่ 97 พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม.
($R_d - 26$) Section-CL

พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$) Section-LOI แสดงดังภาพที่ 98 ในช่วงน้ำหนักบรรทุก 700 กก. การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานยังคงเป็นแบบเชิงเส้น และมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการยืดหดตัวทั้งชิ้นส่วนบนและชิ้นส่วนล่าง และเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกตำแหน่งมุมชิ้นส่วนล่างจะมีพฤติกรรมความเค้นอัดเกิดขึ้น ซึ่งในช่วงน้ำหนักบรรทุก 2,100 – 6,300 กก. ความเค้นอัดบริเวณชิ้นส่วนบนจะมีค่ามากกว่าชิ้นส่วนล่าง แต่เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกตั้งแต่ 6,300 – 10,900 กก. ค่าความเค้นอัดบริเวณชิ้นส่วนล่างจะมีค่ามากกว่าชิ้นส่วนบน และมากเท่ากับค่ากำลังประลัยของคอนกรีต มีค่าประมาณ 80 กก./ซ.ม.²



ภาพที่ 98 พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม.
(R_d - 26) Section-LOI

พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม. (R_d - 26) Section-LOE แสดงดังภาพที่ 99 พฤติกรรมการรับแรงอัดจะประกอบด้วยสองส่วน ซึ่งมีอิทธิพลของชั้นส่วนบน และชั้นส่วนล่าง การพิจารณาหน่วยแรงอัดที่ส่งผ่านมาจากชั้นส่วนบนจะมีค่าลดลงมากกว่าชั้นส่วนล่าง คล้ายกรณี ขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. (R_l - 120) Section-LOE ซึ่งแสดงให้เห็นพฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงอัด ในชั้นส่วนบน หน่วยแรงอัดจะสามารถกระจายลงมาสู่ตำแหน่งด้านล่างของคานได้ แต่ในชั้นส่วนล่างการกระจายแรงอัดจากด้านล่างของคานขึ้นด้านบนทำได้ลำบาก ซึ่งท้ายที่สุดแล้วโมเมนต์รวมทั้งหน้าตัดคานจะต้องเป็นลักษณะคล้ายคานยืมคือด้านบนเป็นแรงอัด และด้านล่างรับแรงดึง

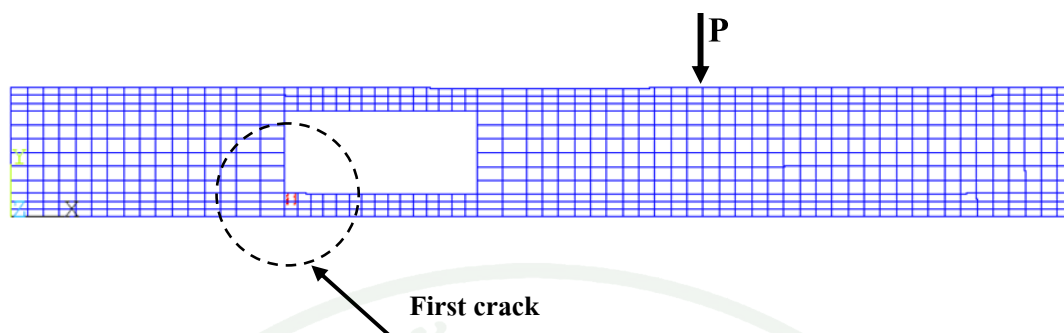


ภาพที่ 99 พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม.

($R_d - 26$) Section-LOE

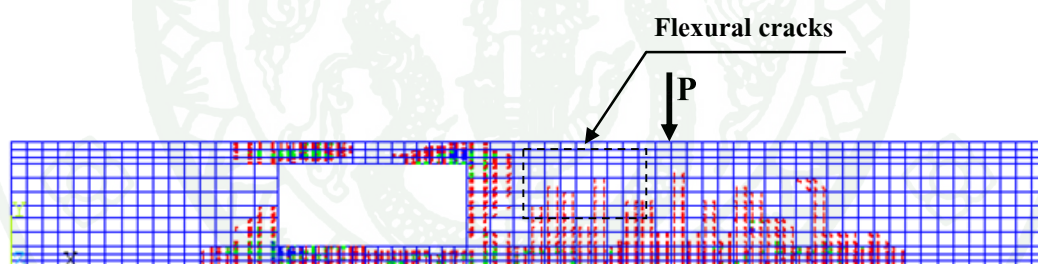
3. พฤติกรรมการแตกร้าวของขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นการแตกร้าวครั้งแรกจะปรากฏขึ้นบริเวณมุมล่างช่องเปิดฝั่งไกลจากน้ำหนักบรรทุก และพฤติกรรมการแตกร้าวของการเปลี่ยนแปลงความลึกของช่องเปิดมีแนวโน้มการแตกร้าวครั้งแรก (First cracks) จะเกิดบริเวณบนชิ้นส่วนล่างมุมล่างช่องเปิดฝั่งไกล น้ำหนักบรรทุกเช่นกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมคานคอนกรีตที่มีช่องเปิดหากเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งความยาว และความลึกที่มากเกินไปจนทำให้ค่าความแข็งแรงของชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่างไม่สามารถต้านทานกำลังรับแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดได้การส่งถ่ายความเค้น ไม่ว่าจะเป็นแรงเฉือน และ โมเมนต์ดัดทำได้ยากบริเวณมุมช่องเปิดจะต้องมีการเสริมเหล็กให้เพียงพอ ซึ่งหากช่องเปิดมีขนาดลึกมากดังภาพที่ 100 ข้อควรระวังการเสริมเหล็กบริเวณช่องเปิดอาจมากเกินไปทำให้พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กไม่วิบัติด้วยการคราก แต่คล้ายคานเหล็ก



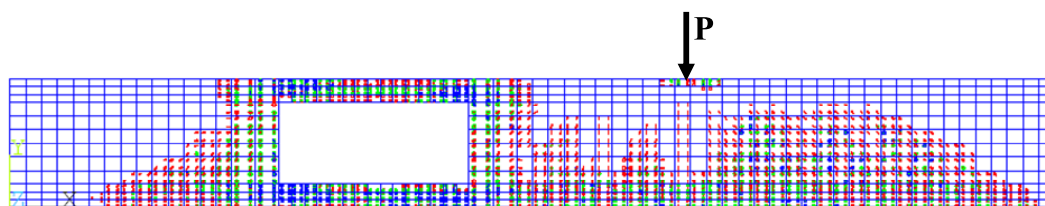
ภาพที่ 100 รูปแบบการแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีตขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_d - 26$)
ภายใต้การแตกร้าว First cracks

เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกมากขึ้นการแตกร้าว Flexural cracks จะเพิ่มมากขึ้นทั้งส่วนบน และ
ขึ้นส่วนล่าง บริเวณรอบช่องเปิดจะเกิดการแตกร้าวแบบ Diagonal tensile cracks แสดงดังภาพที่
101 ซึ่งรูปแบบการแตกร้าวจะคล้ายกับกรณีที่มีความยาวช่องเปิดเพิ่มมากขึ้น ขนาดช่องเปิดยาว
120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_l - 120$)



ภาพที่ 101 รูปแบบการแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีตขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_d - 26$)
ภายใต้การแตกร้าว Flexural cracks

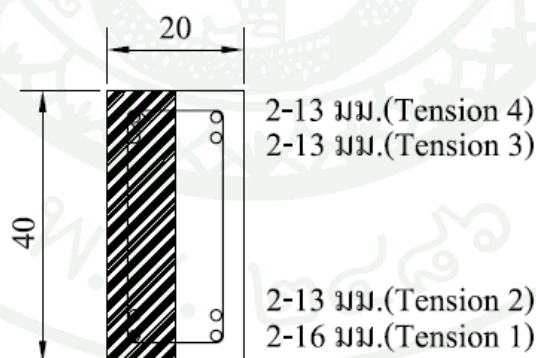
น้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นเท่ากับ 10,914 กก. ส่งผลให้คานคอนกรีตขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม.
ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$) วิบัติ การแตกร้าวจะเพิ่มมากขึ้นทั้งบริเวณคาน การแตกร้าว Flexural cracks
บริเวณใต้คานยกตัวสูงขึ้นแต่ยังคงไม่มากนักที่จะทำให้คานวิบัติ และบริเวณมุมช่องเปิด การ
แตกร้าวเพิ่มมากขึ้นมีทั้งการแตกร้าว Diagonal tensile cracks การแตกร้าว Flexural cracks และการ
แตกร้าวจากอัด (Compressive cracks) แสดงดังภาพที่ 102 การแตกร้าวที่มากบริเวณช่องเปิดทำให้
สรุปได้ว่าการวิบัติเนื่องจากสาเหตุที่ช่องเปิดมีความลึกมากไปจนไม่สามารถส่งถ่ายความเค้นได้
เหมือนคานที่ไม่มีช่องเปิด ความอ่อนแอของชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่างส่งผลให้มีรอยแตกร้าว
มากซึ่งบริเวณชิ้นส่วนบนพบรอยแตกร้าวทั่วทั้งชิ้นส่วนเหมือนแบบจำลองหลัก 3 มิติ



ภาพที่ 102 รูปแบบการแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีตขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$)
ภายใต้การแตกร้าวน้ำหนักบรรทุกสูงสุด

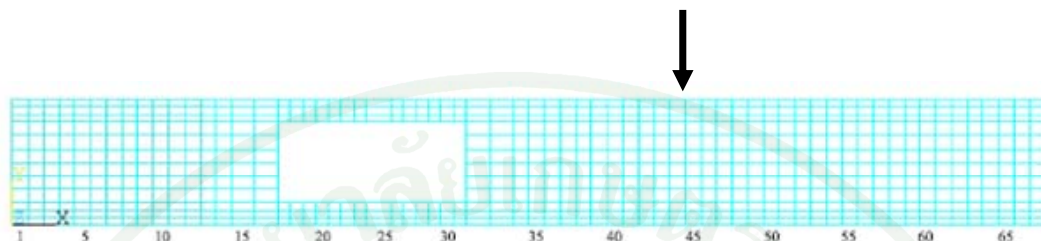
4. พฤติกรรมแรงดึงในเหล็กเสริมของขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$)

จากกรณีที่ผ่านมาการพิจารณาแรงดึงในเหล็กเสริมทำให้ทราบพฤติกรรมการครากของเหล็กเสริมว่าอยู่ตำแหน่งใดของหน้าตัด ในกรณีขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$) ช่องเปิดมีขนาดความยาวมาก ทำให้การวิบัติเกิดบริเวณมุมช่องเปิด และมีพฤติกรรมการครากของเหล็กเสริม ต่อไปจะเป็น การพิจารณาพฤติกรรมแรงดึงในเหล็กเสริมของขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$) ซึ่งจะกำหนดให้ เหล็กเสริมจำนวน 4 เส้น แสดงดังภาพที่ 103 จะระบุชื่อตามตำแหน่งจากใต้คานเหล็กเสริม $\Phi 16$ มม.กำหนด Tension 1 ส่วนเหล็กเสริมตำแหน่งถัดไป $\Phi 13$ มม. กำหนด Tension 2, Tension 3 และ Tension 4 ตามลำดับคล้ายกรณีแบบจำลองหลัก 3 มิติ



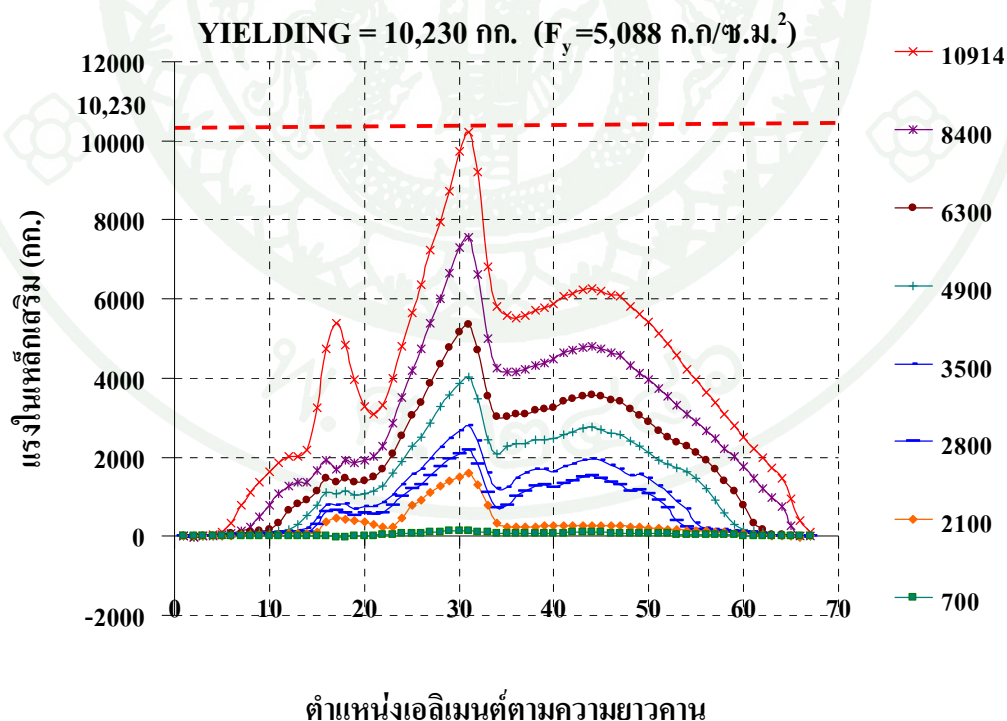
ภาพที่ 103 หน้าตัดคานของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณีขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม.
ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$)

การแสดงตำแหน่งเอลิเมนต์แสดงดังภาพที่ 104 สำหรับขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$) จะมีจำนวนเอลิเมนต์หลักเสริมตามยาวเท่ากับ 67 เอลิเมนต์ ตำแหน่งที่มีความน่าสนใจจะเป็นมุมของช่องเปิดได้แก่ ตำแหน่งเอลิเมนต์ 15-35 แสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้



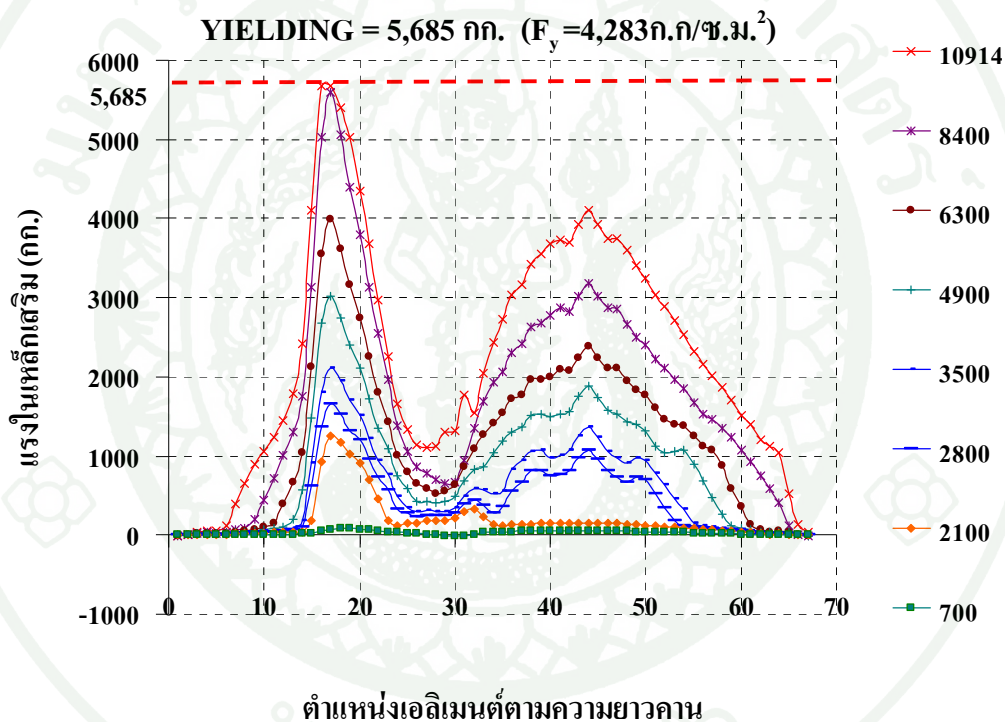
ภาพที่ 104 จำนวนเอลิเมนต์หลักเสริมตามยาวขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$)

พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 1 แสดงดังภาพที่ 105 พฤติกรรมการรับแรงดึงมากสุดบริเวณมุมช่องเปิดฝั่งใกล้หน้าทับรทุกตำแหน่งเอลิเมนต์ 30 และมีค่าแรงดึงจนถึงจุดครากของเหล็กเสริม เมื่อน้ำหนักบรรทุก 10,914 กก. ซึ่งมีความสอดคล้องกับ ขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_l - 120$) ที่มีค่าแรงดึงมากสุดบริเวณมุมช่องเปิดฝั่งใกล้หน้าทับรทุก



ภาพที่ 105 พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 1 ขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$)

พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 2 เป็นลำดับถัดมาที่จะต้องรับแรงดึง ตำแหน่งเอลิเมนต์ 16 เป็นตำแหน่งที่รับแรงดึงมากที่สุดจนถึงกำลังครากของเหล็กเสริมที่น้ำหนักบรรทุก 10,914 กก. และตำแหน่งเอลิเมนต์ 40-50 จะได้รับผลกระทบของแรงดึงเช่นกันเนื่องจากผลกระทบของหน้าตัดรวมที่เหล็กในตำแหน่งต่ำกว่าแกนสะเทินจะต้องรับแรงดึง แต่ก็ยังไม่ถึงจุดคราก แสดงดังภาพที่ 106 กรณีเช่นนี้ทำให้สรุปได้ว่าที่มุมช่องเปิดของชิ้นส่วนล่างเหล็กเสริมจะรับแรงดึงถึงจุดคราก ฟังก์ชันที่อยู่ใกล้กับน้ำหนักบรรทุกเหล็กเสริมจะเกิดการครากที่กรณี Tension 1 และมุมช่องเปิดฟังก์ชันน้ำหนักบรรทุกเหล็กเสริมจะเกิดการครากที่กรณี Tension 2 ตรงตามทฤษฎีที่ได้กล่าวอ้างไว้ก่อนหน้านี้

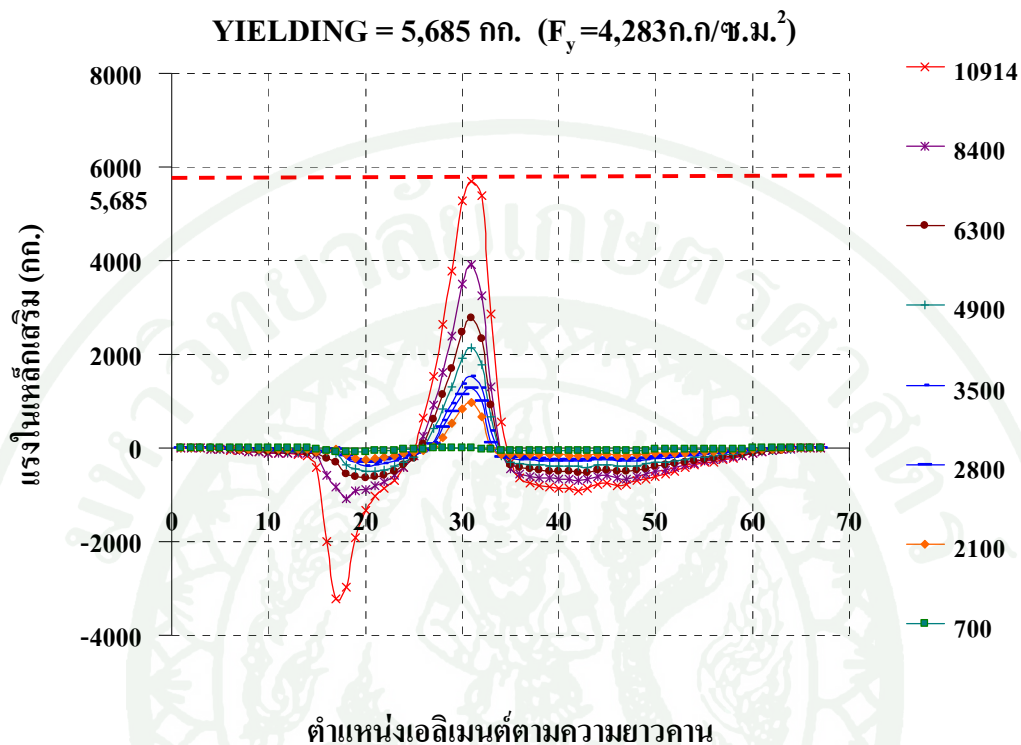


ภาพที่ 106 พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 2 ขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม.

ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$)

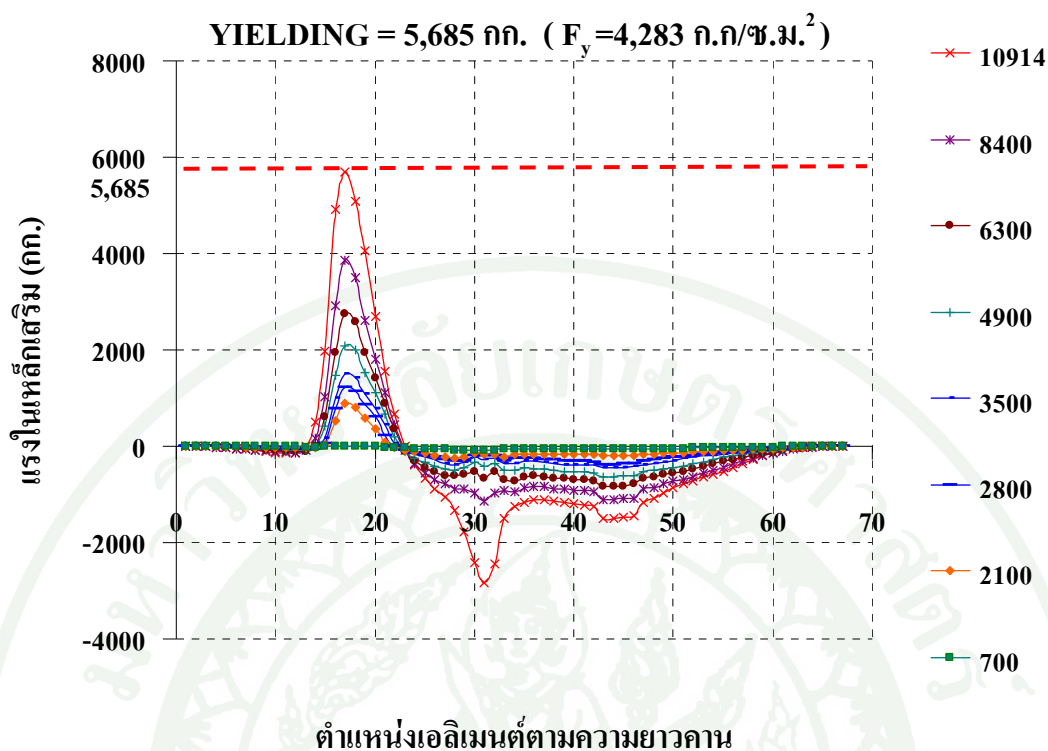
พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 3 ตำแหน่งเอลิเมนต์ 30 จะเกิดแรงดึงมากที่สุด จนกระทั่งถึงการครากของเหล็กเสริม ซึ่งตรงกับมุมช่องเปิดฟังก์ชันน้ำหนักบรรทุก เนื่องจากบริเวณดังกล่าวได้รับอิทธิพลจากคานหน้าตัดเต็มก่อนเข้าสู่ช่องเปิด ทำให้ตำแหน่งกรณี Tension 3 จะต้องทำหน้าที่รับแรงดึงก่อนที่คานจะวิบัติ และตรงกับตำแหน่งที่อยู่บริเวณมุมช่องเปิดทำให้ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นมากกว่าบริเวณหน้าตัดเต็ม และตำแหน่งเอลิเมนต์ที่ 17 ปรากฏเหล็กเสริมรับแรงอัดซึ่งมุม

ช่องเปิดฝั่งที่ไกลจากน้ำหน้าบรรทุกจะได้รับอิทธิพลของชั้นส่วนบนทำให้มุมล่างของชั้นส่วนบนเกิดแรงอัดคล้ายกรณีขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$) แสดงดังภาพที่ 107



ภาพที่ 107 พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 3 ขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม. ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$)

พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 4 เป็นตำแหน่งสุดท้ายของเหล็กเสริมในตำแหน่งได้น้ำหน้าบรรทุก พฤติกรรมแรงดึงมากที่สุดจะอยู่ตำแหน่งเอลิเมนต์ 17 เหล็กจะรับแรงดึงจนกระทั่งถึงจุดคราก และตำแหน่งเอลิเมนต์ 25-67 เหล็กจะมีพฤติกรรมการรับแรงอัดแต่ไม่มากนัก ทำให้สรุปได้ว่าหากเพิ่มความลึกของช่องเปิดมากจนทำให้ค่าความเค้นสูงบริเวณมุมช่องเปิดทำให้อัตราส่วนความชะลูดมีผลอย่างมากเมื่อพื้นที่หน้าตัดของชั้นส่วนบน และชั้นส่วนล่างลดลง การส่งถ่ายค่าหน่วยแรงทำได้ยากขึ้นจุดต่อระหว่างชั้นส่วนบน และชั้นส่วนล่างจึงต้องรับภาระหนักในการต้านทานค่าหน่วยแรงดังนั้นบริเวณมุมของช่องเปิดทั้ง 4 มุม การวิบัติจะเป็นแบบเกิดการครากของเหล็กเสริมที่มุมของช่องเปิดแล้วคอนกรีตจึงจะเกิดการอัดจนพังซึ่งเรียกตามหลักวิชาการว่าปริมาณเหล็กเสริมน้อยกว่าภาวะสมดุล (Under reinforcement)



ภาพที่ 108 พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กลูกเสริมกรณี Tension 4 ขนาดช่องเปิดลึก 26 ซม.
ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$)

กรณีที่ 3 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของช่องเปิด 3 มิติ

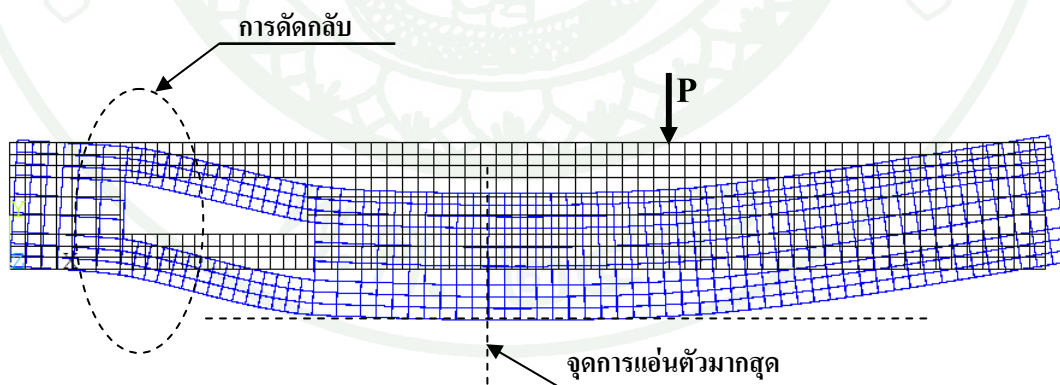
การพิจารณาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของช่องเปิด ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมอิทธิพลของน้ำหนักบรรทุกทุกเมื่อช่องเปิดอยู่ใกล้ หรือ ไกล จากตัวอย่างที่ผ่านมาระดับของช่องเปิดจะรุนแรงมากขึ้นเมื่อช่องเปิดมีขนาดยาวมากขึ้น และช่องเปิดมีขนาดลึกมากขึ้น แต่กรณีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของช่องเปิด การวิบัติจะเกิดจากความเข้มข้นของความเค้นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการวิเคราะห์จะมีลำดับขั้นตอนการพิจารณาแรงภายในคล้ายกรณีข้างต้นอาทิเช่น พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว พฤติกรรมการแตกร้าวของคาน และพฤติกรรมแรงดึงในเหล็กลูกเสริม ซึ่งการอธิบายจะขยายความในเนื้อหาที่สำคัญเพื่อให้เข้าใจต่อความเข้าใจ และไม่ซ้ำกับกรณีที่ผ่านมาแล้วข้างต้น

1. พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว ของการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของช่องเปิด 3 มิติ

การพิจารณาตำแหน่งของช่องเปิดที่แตกต่างกันในขณะตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกคงที่จะสามารถทราบพฤติกรรมการแอ่นตัวมากที่สุด ซึ่งแบบจำลองหลัก 3 มิติ การแอ่นตัวของชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่างจะเกิดตรงบริเวณมุมช่องเปิดใกล้กับน้ำหนักบรรทุก แต่เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของช่องเปิดจะสามารถสรุป รายละเอียดพฤติกรรมการแอ่นตัว-น้ำหนักบรรทุกได้ดังต่อไปนี้

1.1 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 65 ซม. ($R_p - 65$)

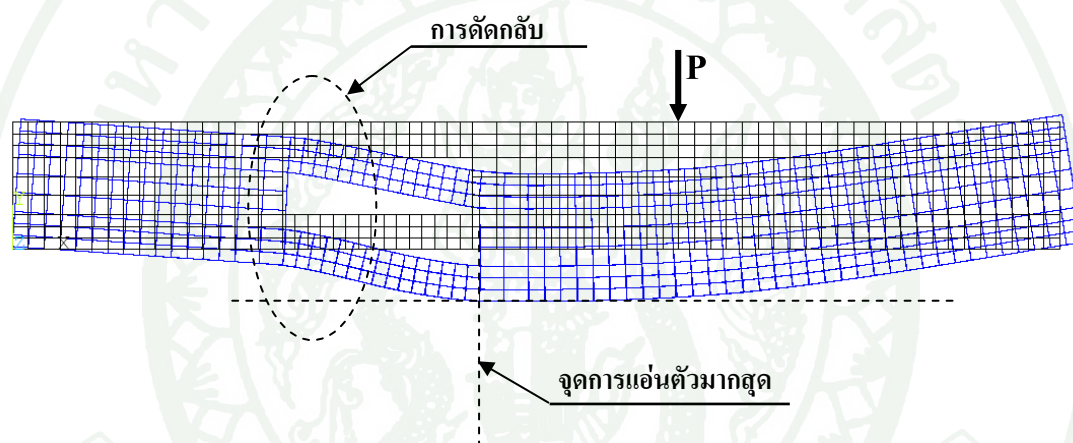
การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 65 ซม. ($R_p - 65$) สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 109 เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกกระทำคานเริ่มแอ่นตัว และเกิดการดัดกลับส่วนบน และชิ้นส่วนล่างใกล้จุดรองรับแบบ Hinge support แต่ยังไม่ส่งผลกระทบมากเหมือนแบบจำลองหลัก 3 มิติ ทำให้จุดการแอ่นตัวมากที่สุดเกิดบริเวณระหว่างมุมช่องเปิด และน้ำหนักบรรทุก



ภาพที่ 109 น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว ของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 65 ซม. ($R_p - 65$)

1.2 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 115 ซม.
($R_p - 115$)

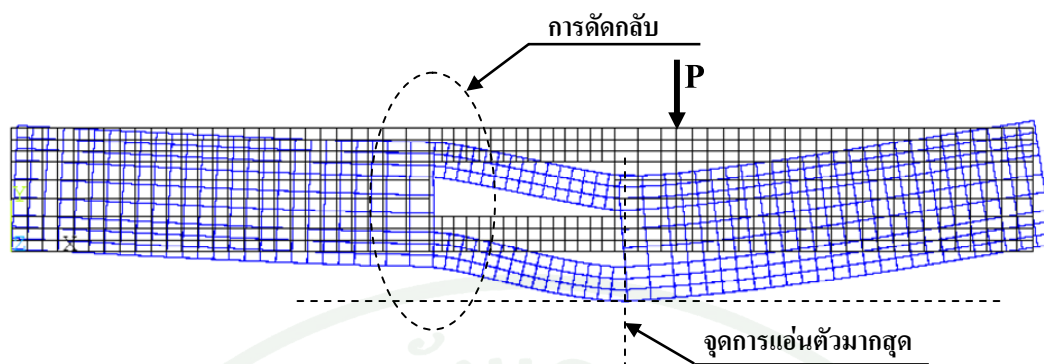
พฤติกรรมการแอ่นตัวของคานการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 115 ซม. ($R_p - 115$) ซึ่งเป็นคานแบบจำลองหลัก 3 มิติ ที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น แต่เพื่อให้เรียงลำดับความสอดคล้องของลักษณะพฤติกรรมการแอ่นตัวจึงได้นำมากล่าวไว้อีกในหัวข้อนี้ การแอ่นตัวมากที่สุดเมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำจะเลื่อนจากบริเวณระหว่างมุมช่องเปิด และน้ำหนักบรรทุก มาเกิดที่มุมช่องเปิดใกล้กับน้ำหนักบรรทุกแสดงดังภาพที่ 110



ภาพที่ 110 น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัวของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 115 ซม. ($R_p - 115$)

1.3 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 165 ซม.
($R_p - 15$)

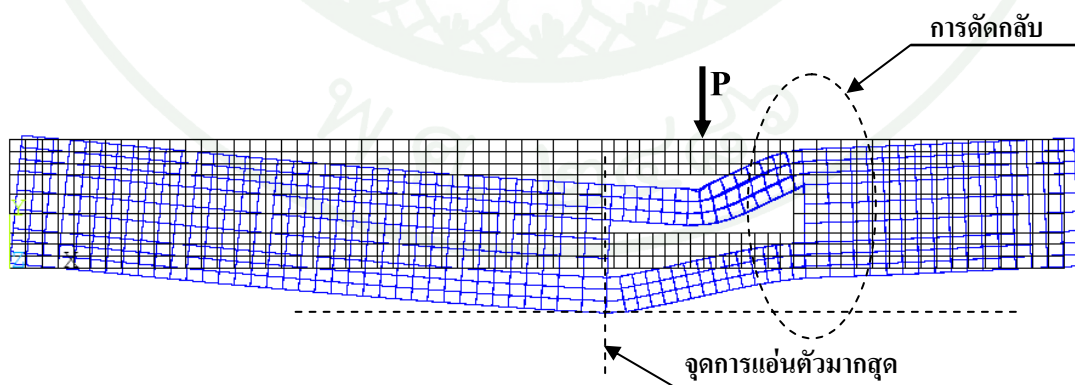
พฤติกรรมการแอ่นตัวของคานการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 165 ซม. ($R_p - 165$) มีตำแหน่งใกล้กับน้ำหนักบรรทุกมากขึ้น อิทธิพลของการส่งถ่ายความเค้นจะมีมาก ทำให้การยึดรั้งที่ขึ้นส่วนบน และขึ้นส่วนล่าง ปรากฏการตัดกลับที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น และการแอ่นตัวมากที่สุดจะเกิดมุมช่องเปิดใกล้กับน้ำหนักบรรทุก ดังภาพที่ 111



ภาพที่ 111 น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว ของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 165 ซม.(R_p -15)

1.4 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 215 ซม.(R_p -215)

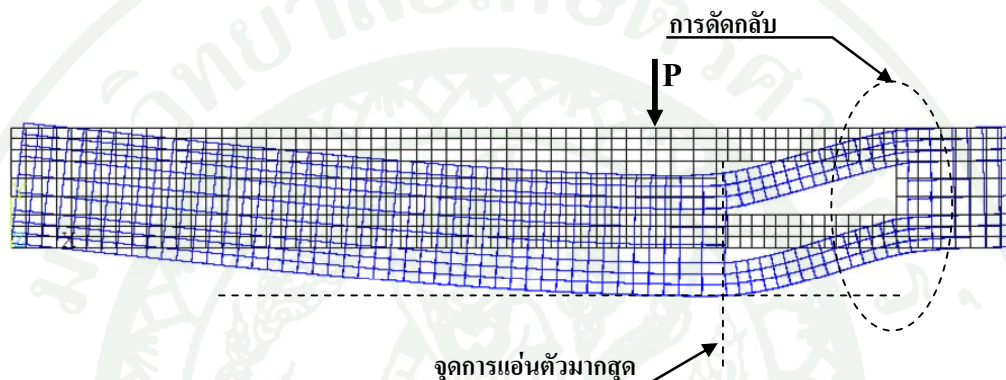
พฤติกรรมของการแอ่นตัวของคานการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 215 ซม.(R_p -215) ปรากฏตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกอยู่ตรงกลางชิ้นส่วนบน ทำให้การยึดรั้งเปลี่ยนตำแหน่งมาทางด้านที่มีจุดรองรับ Roller Support และตำแหน่งการแอ่นตัวมากที่สุดอยู่ตำแหน่งมุมช่องเปิดตรงข้ามกับจุดที่เกิดการยึดรั้ง ซึ่งพฤติกรรมของชิ้นส่วนบนจะเกิดแรงอัดร่วมกับแรงดัด จนทำให้ขนาดความลึกช่องเปิดถูกบีบ อาจจะทำให้ท่อที่ร้อยผ่านเกิดการเสียหายได้แสดงดังภาพที่ 112



ภาพที่ 112 น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัวของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 215 ซม. (R_p -215)

1.5 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$)

พฤติกรรมการแอ่นตัวของคานการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. การยึดรั้งจะเกิดตำแหน่งขึ้นส่วนบน และขึ้นส่วนล่างทางด้านที่มีจุดรองรับ Roller support และการแอ่นตัวมากที่สุดอยู่มุมช่องเปิดใกล้กับน้ำหนักรรทุก ดังภาพที่ 114

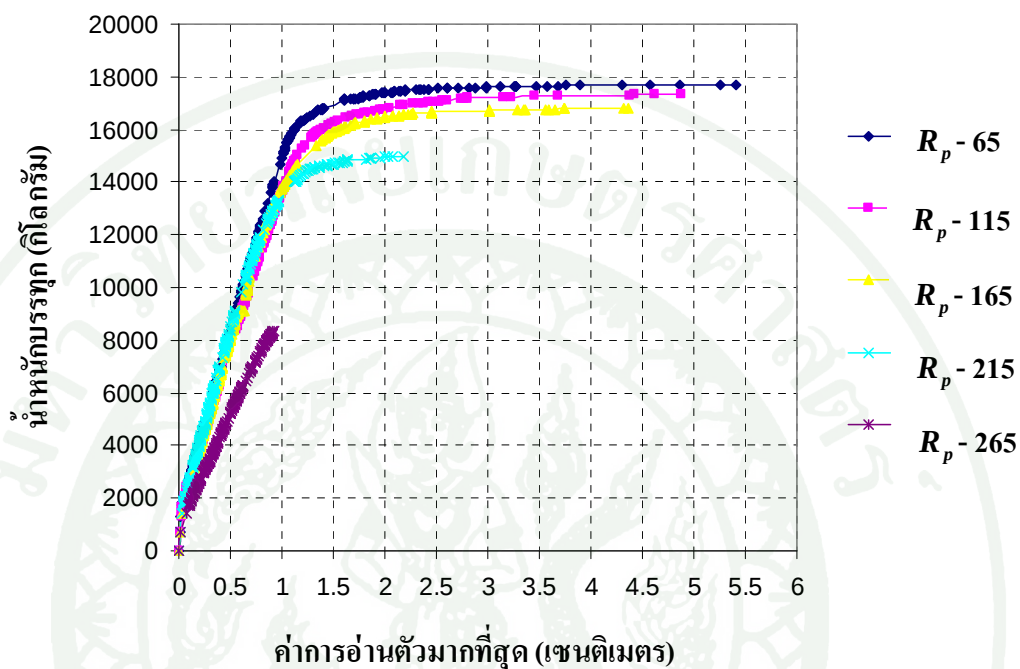


ภาพที่ 113 น้ำหนักรรทุก-การแอ่นตัวของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$)

4.6 สรุปพฤติกรรมระหว่างน้ำหนักรรทุก-การแอ่นตัว การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 65 ซม. ($R_p - 65$) ถึง 265 ซม. ($R_p - 265$)

การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 65 ซม. ($R_p - 65$) ถึง 265 ซม. ($R_p - 265$) สามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักรรทุก-การแอ่นตัวที่มากที่สุด ดังภาพที่ 115 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า หากช่องเปิดมีความลึกไม่มากนักซึ่งประมาณ 40 เท่าของความลึกคาน และความยาวของขึ้นส่วนบน และขึ้นส่วนล่างไม่มากเกินไป ยังคงรักษาสถานะคานคล้ายหน้าตัดเดิมได้ การเปลี่ยนตำแหน่งจะไม่ทำให้คานมีการโก่งตัวระดก และหากช่องเปิดมีอิทธิพลของความเค้นเนื่องจากน้ำหนักรรทุกมาก เช่น การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$) คำน้ำหนักรรทุก-การแอ่นตัว จะมีค่าลดลง และลักษณะน้ำหนักรรทุก-การแอ่นตัว มีลักษณะไม่เกิดความเหนียวขึ้นกับโครงสร้าง คือแรงดึงของเหล็กเสริมไม่ถึงจุดคราก ในขณะที่คอนกรีตมีค่าแรงอัดเกินกำลังอัด

ประลัย และสามารถสรุปอัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเทียบกับการเปลี่ยนตำแหน่งช่องเปิด R_d - 18 ดังตารางที่ 24

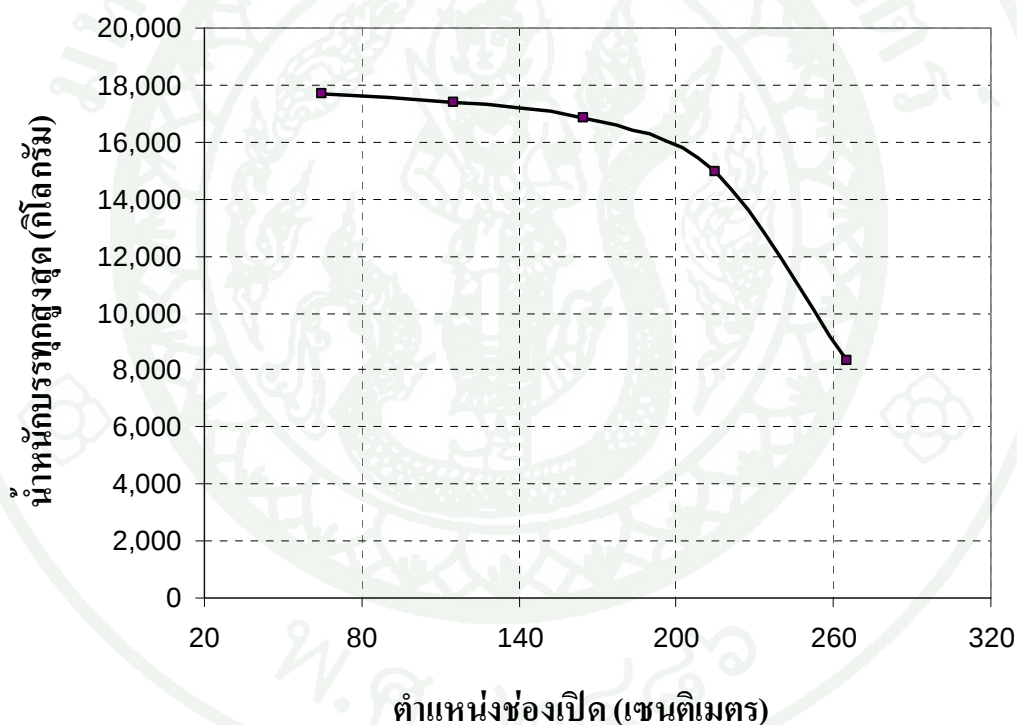


ภาพที่ 114 น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัวของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 65 ซม. (R_p - 65) ถึง 265 ซม. (R_p - 265)

ตารางที่ 24 อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเทียบกับแบบจำลองหลัก 3 มิติ

ตำแหน่งช่องเปิด (ซ.ม.)	น้ำหนักบรรทุกก่อนการแตกร้าว P_{cr} (กก.)	น้ำหนักบรรทุกสูงสุด P_{ul} (กก.)	$P_{ul} / R_d - 18$	เปอร์เซ็นต์ (%)
65	1,785	17,709	1.0202	-2.02
115	1,676	17,358	1.0000	0
165	1,575	16,813	0.9686	3.13
215	1,715	14,975	0.8627	13.72
265	892	8,327	0.4797	52.02

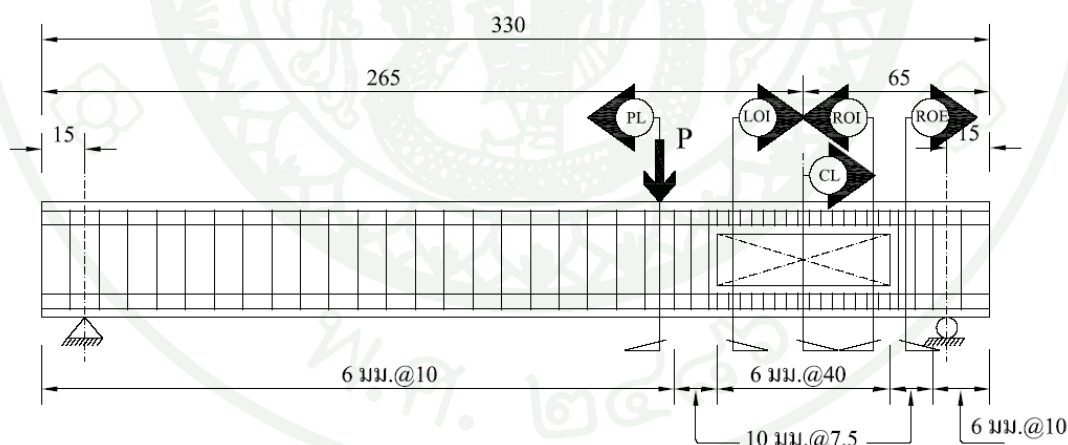
แนวโน้มนักส่วนของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกกับการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของช่องเปิดซึ่งสามารถสรุปได้ดังภาพที่ 116 ที่ตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 65 ซม. ($R_p - 65$) ถึง 165 ซม. ($R_p - 165$) คำนี้นักบรรทุกทุก มีลักษณะลดลงคงที่ เนื่องจากสภาพในการส่งถ่ายความเค้นยังคงเหมือนเดิม แตกต่างตรงค่าความเข้มข้นของความเค้น หากช่องเปิดอยู่ใกล้ น้ำหนักบรรทุกก็ยิ่ง ส่งผลอย่างมาก แต่เมื่อตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 165 ซม. ($R_p - 165$) ถึง 265 ซม. ($R_p - 265$) คำนี้นักบรรทุกทุกลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งอิทธิพลของแรงเฉือนมีผลอย่างมากกับตำแหน่งของช่องเปิด ที่ทำให้คอนกรีตมีการสูญเสียกำลังอย่างรวดเร็ว หากเป็นตามมาตรฐานโดยทั่วไป ช่องเปิดขนาดเล็กจะทำการเจาะช่องเปิดภายในคานไม่เกินระยะความลึกประสิทธิภาพของคาน ซึ่งจะไม่รบกวนการสูญเสียกำลังของคาน



ภาพที่ 115 น้ำหนักบรรทุก-ตำแหน่งช่องเปิดของแบบจำลอง 3 มิติ การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 65 ซม. ($R_p - 65$) ถึง 265 ซม. ($R_p - 265$)

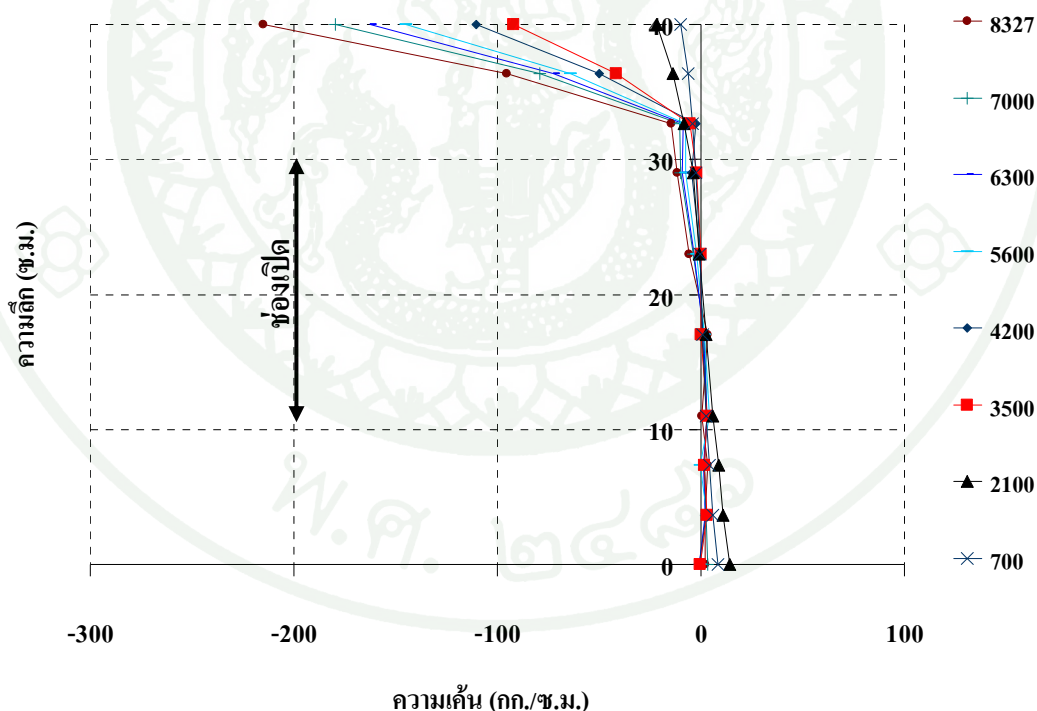
2. พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานของการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$)

การวิเคราะห์พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงภายในคานจะวิเคราะห์เพียงกรณี การเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง ศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 25$) แสดงดังภาพที่ 117 ซึ่งในกรณีอื่นมีลักษณะการกระจายค่าความเค้นที่คล้ายกับแบบจำลองหลัก 3 มิติ ดังนั้นจึงจะกล่าวเพียงกรณีที่สำคัญเนื่องจากพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง ศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$) มีลักษณะของการวิบัติแบบไม่เหนียว และลักษณะของตำแหน่งหน้าตัดคล้ายกับกรณีที่กล่าวข้างต้นซึ่งจะต้องตัดผ่านเพื่ออธิบายได้แก่ หน้าตัดที่น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำเรียกว่า Section-PL ตำแหน่งจะห่างจากจุดรองรับ 115 ซม. หน้าตัดก่อนเข้าสู่ช่องเปิดติดกับมุมช่องเปิดด้านที่ไกลน้ำหนักบรรทุก เรียกว่า Section-ROE หน้าตัดภายในติดกับมุมช่องเปิดด้านที่ใกล้ น้ำหนักบรรทุก เรียกว่า Section-ROI หน้าตัดศูนย์กลางช่องเปิด เรียกว่า Section-CL และหน้าตัดภายในติดกับมุมช่องเปิดด้านที่ใกล้ น้ำหนักบรรทุก เรียกว่า Section-LOI



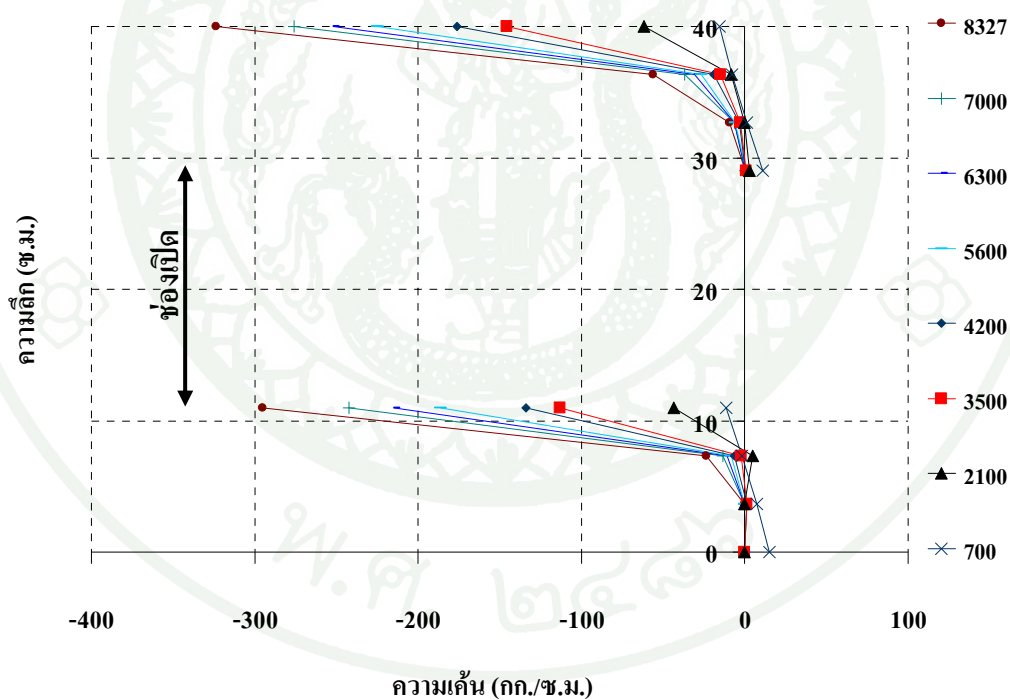
ภาพที่ 116 พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคาน การเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง ศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$)

พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานกรณีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง ศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$) Section-PL แสดงได้ดังภาพที่ 118 ในช่วงน้ำหนักบรรทุก 700 กก. ค่าหน่วยแรงดึงเพิ่มขึ้นประมาณ 4 กก./ซ.ม.² การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานยังคงเป็นแบบเชิงเส้น และมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการยืดหดตัว เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุก 2,100 กก. ค่าหน่วยแรงดึงเพิ่มขึ้นประมาณ 14 กก./ซ.ม.² เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุก 3,500 กก. ระดับแกนสะเทินจะเลื่อนเพิ่มสูงขึ้น และคอนกรีตไม่สามารถต้านทานแรงดึงได้ คานยังสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้เรื่อยๆ กระทั่งน้ำหนักบรรทุก 8,327 กก. ส่งผลให้หน่วยแรงอัดคอนกรีตมีค่า 215 กก./ซ.ม.² ซึ่งยังไม่ถึงกำลังประลัยของคอนกรีต จะเห็นได้ว่าตรงตำแหน่งหน้าตัดที่อยู่ห่างไกลจากช่องเปิดจะได้รับอิทธิพลจากหน่วยแรงที่เกิดระหว่างมุมช่องเปิดน้อยมาก ค่าความเค้นยังคงมีลักษณะพฤติกรรมคล้ายคานหน้าตัดเต็ม ดังนั้นการให้ความสำคัญของพฤติกรรมคานอย่างง่ายจะเป็นสิ่งที่บ่งบอกพฤติกรรมโดยส่วนใหญ่ในคาน ยกเว้นค่าความเค้นบริเวณมุมช่องเปิดเท่านั้น



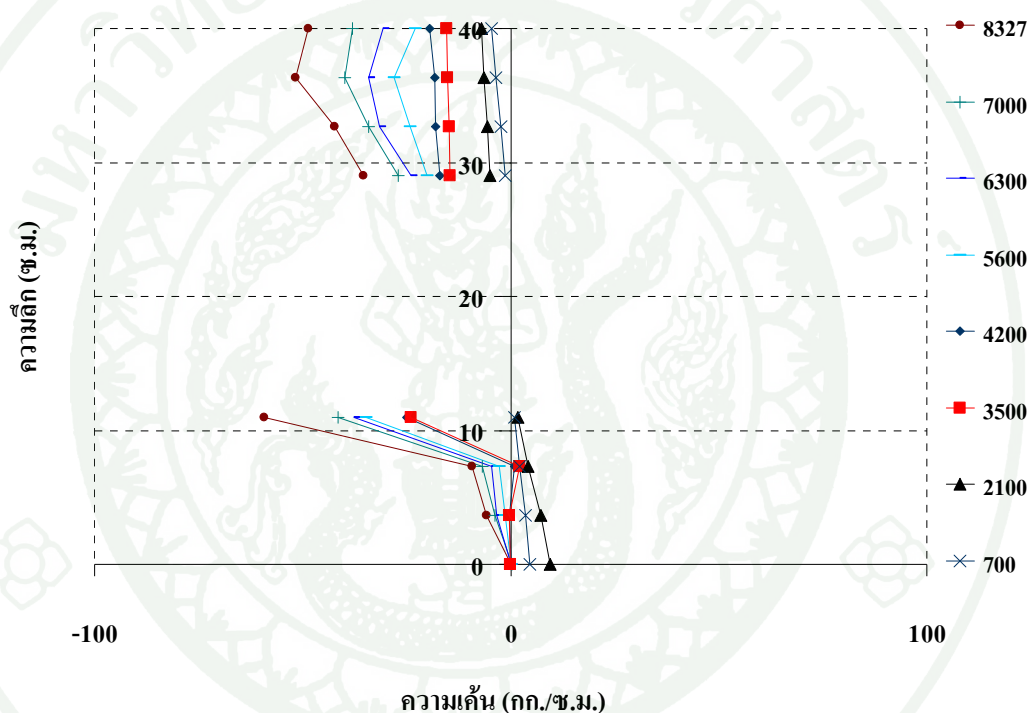
ภาพที่ 117 พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคาน การเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง
ศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 25$) Section-PL

พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานกรณีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง ศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 25$) Section-LOI แสดงได้ดังภาพที่ 119 ที่น้ำหนักบรรทุกทุก 700 กก. การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานยังคงเป็นแบบเชิงเส้น และมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการยืดหดตัว ทั้งชั้นส่วนล่าง และชั้นส่วนบน เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มมากขึ้นที่น้ำหนักบรรทุก 2,100 กก. คอนกรีตจะไม่สามารถรับหน่วยแรงดึงได้ แกนสะเทินก็จะยกตัวสูงขึ้นพร้อมทั้งหน่วยแรงอัดเพิ่มสูงมากขึ้นตามลำดับ น้ำหนักบรรทุก 8,327 กก. หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าประมาณ 300 กก./ซ.ม.² ใกล้เคียงกันทั้งชั้นส่วนบน และชั้นส่วนล่าง เนื่องจากตำแหน่งของช่องเปิดอยู่ใกล้จุดรองรับทำให้อิทธิพลของน้ำหนักบรรทุกมากการส่งถ่ายค่าความเค้นผ่านช่องเปิดทำได้ไม่ราบรื่นเปรียบเหมือนคอคอดของเส้นทางที่มีการจราจรของความเค้นที่มาก ดังนั้นหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ซึ่งอาจจะเป็นตำแหน่งที่ทำให้คานวิบัติก็เป็นได้



ภาพที่ 118 พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคาน การเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง ศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 25$) Section-LOI

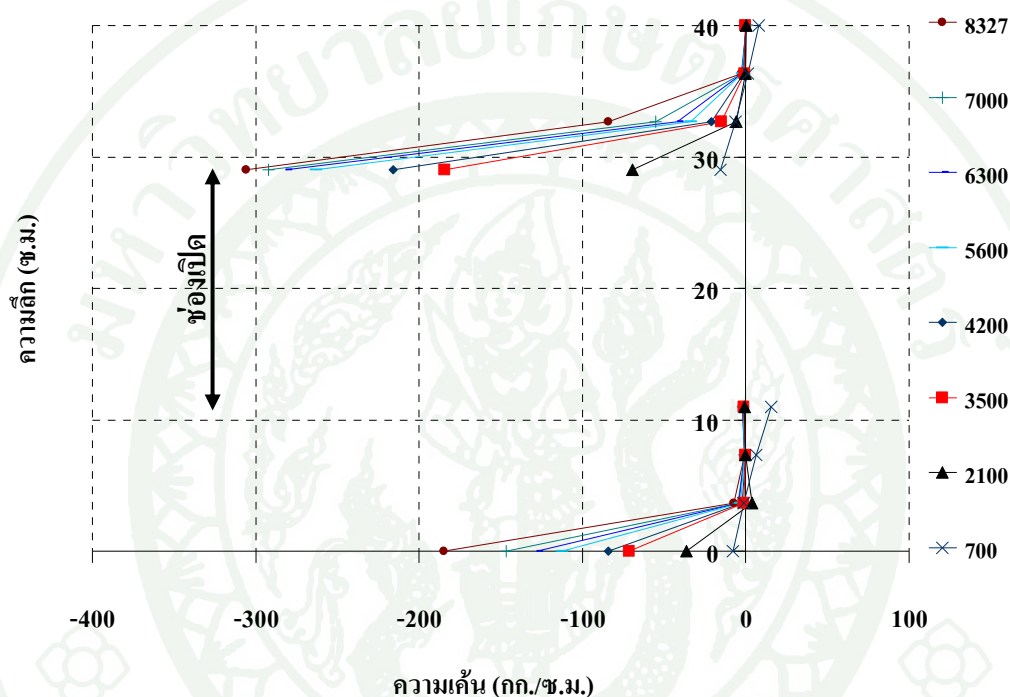
พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานกรณีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง ศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$) Section-CL แสดงได้ดังภาพที่ 120 พฤติกรรมชิ้นส่วนบนจะเกิดแรงอัดเพียงอย่างเดียว และชิ้นส่วนล่างในช่วงแรกจะเกิดแรงดึงเพียงอย่างเดียว กระทั่งน้ำหนักบรรทุกทุก 3,500 กก. จึงเริ่มปรากฏแรงอัดเกิดขึ้น และเพิ่มมากขึ้นจนถึงน้ำหนักบรรทุกทุก 8,327 กก. มีค่าความเค้นอัดประมาณ 59 กก./ซ.ม.² ในกรณีชิ้นส่วนบนจะมีอิทธิพลของแรงอัดน้อยกว่ากรณีที่ผ่านมาเนื่องจากพฤติกรรมที่วิบัติจากการแตกอัดของคอนกรีตก่อนที่เหล็กเสริมจะมีค่าแรงดึงถึงจุดคราก



ภาพที่ 119 พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคาน การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 25$) Section-CL

พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานกรณีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง ศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 25$) Section-ROI แสดงได้ดังภาพที่ 121 ในช่วงน้ำหนักบรรทุกทุก 700 กก. การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานยังคงเป็นแบบเชิงเส้น และมีความเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการยืดหดตัวทั้งชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่าง และเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกตำแหน่งมุมชิ้นส่วนล่างจะมีพฤติกรรมความเค้นอัด และความเค้นดึงเกิดขึ้น ในชิ้นส่วนบนจะมีค่าความเค้นอัดมากกว่าชิ้นส่วนล่าง กรณีน้ำหนักบรรทุกเท่ากันเนื่องจากชิ้นส่วนบนได้รับ

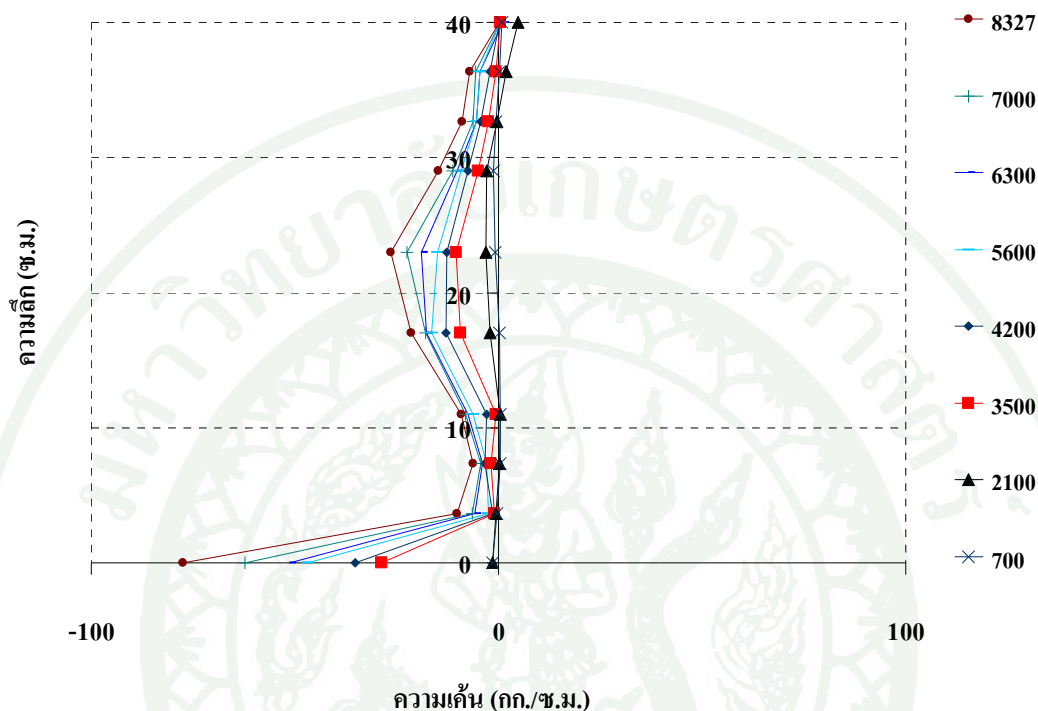
อิทธิพลของน้ำหนักบรรทุกทุกในกรณีการรับแรงอัด แต่ชั้นส่วนล่างจะกระทบกับพฤติกรรมการรับแรงดึงทำให้พฤติกรรมการรับแรงอัดในชั้นส่วนบน มากกว่าในชั้นส่วนล่าง ซึ่งจากการวิเคราะห์พฤติกรรมชั้นส่วนบนอาจจะเห็นสาเหตุทำให้คานวิบัติได้เนื่องจากตำแหน่งของชั้นส่วนได้รับผลกระทบจากน้ำหนักบรรทุกมาก ค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจึงมีค่ามากตามลำดับจนทำให้คอนกรีตวิบัติก่อนเหล็กเสริม



ภาพที่ 120 พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคาน การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 25$) Section-ROI

พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานกรณีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 25$) Section-ROE แสดงได้ดังภาพที่ 122 เมื่อน้ำหนักบรรทุก 700 กก. จะเกิดหน่วยแรงดึงที่ตำแหน่งบนคาน และแรงอัดตำแหน่งด้านล่างคาน ซึ่งจะเป็นสัดส่วนเส้นตรง และเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกเพิ่มมากขึ้นพฤติกรรมของหน้าตัดจะส่งถ่ายค่าความเค้นจากชั้นส่วนบน และชั้นส่วนล่างทำให้หน่วยแรงอัดมากสุดบริเวณตำแหน่งล่างมีค่าประมาณ 77 กก./ซ.ม.² พฤติกรรมโดยรวมของหน้าตัด Section-ROE จะได้รับอิทธิพลของแรงอัดเป็นส่วนมากโดยเริ่มตั้งแต่ตำแหน่งบนสุด และมากขึ้นเรื่อยๆ ที่ตำแหน่ง 25 ซม. และลดลง

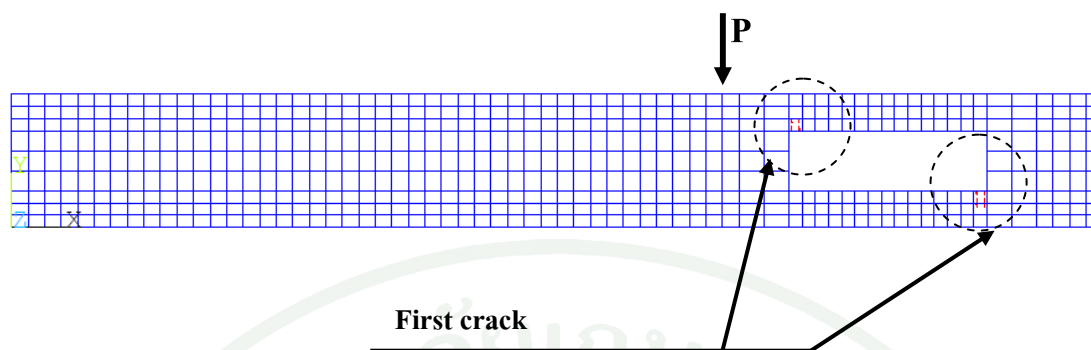
ที่ตำแหน่งประมาณส่วนบนของชิ้นส่วนล่างซึ่งจะมีพฤติกรรมรับแรงดึงเป็นส่วนใหญ่ และหน่วยแรงอัดเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งน้ำหนักบรรทุกทุก 8,327 กก. ซึ่งเป็นหน่วยสูงสุดของหน้าตัด



ภาพที่ 121 พฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคาน การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$) Section-ROE

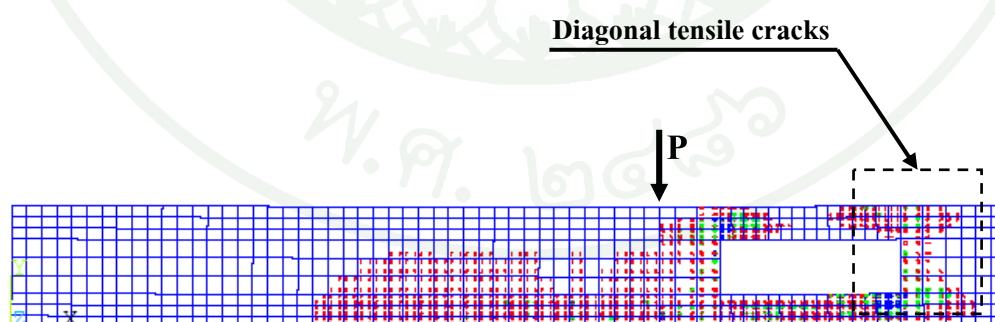
3. พฤติกรรมการแตกร้าวในหน้าตัดคาน การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$)

ตำแหน่งของช่องเปิดได้เลื่อนผ่านน้ำหนักบรรทุกทุกไปทางด้านขวา อิทธิพลการเข้าใกล้ น้ำหนักบรรทุก ทำให้การเปลี่ยนรูปร่างการคดเปลี่ยนไปพฤติกรรมการแตกร้าวเป็นแบบ Flexural cracks เมื่อหน่วยแรงดึงในแกนหลัก (Principal tensile stress) ที่เกิดขึ้นมีค่าเกินกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต จะเกิดการแตกร้าวซึ่งมีสัญลักษณ์เป็นวงกลม (0) ปรากฏขึ้นในทิศทางตั้งฉากกับหน่วยแรงประธาน (Principal stress) ในทิศทาง X ซึ่งปรากฏการแตกร้าวในชิ้นส่วนบนจะเกิดบริเวณมุมล่างซ้าย และปรากฏการแตกร้าวในชิ้นส่วนล่างบริเวณมุมบนขวา ทำให้อ้างอิงได้ถึง การเปลี่ยนรูปร่างการคดของช่องเปิดทำให้เกิดแรงดึงด้านล่างซ้าย และด้านบนขวา ของช่องเปิด แสดงดังรูปที่ 123



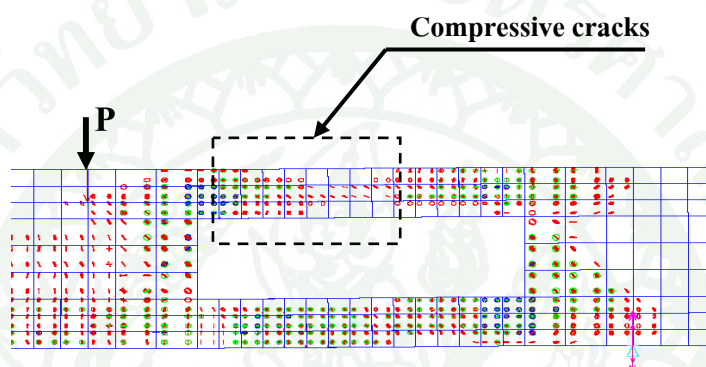
ภาพที่ 122 รูปแบบการแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีตตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$) ภายใต้การแตกร้าว First crack

เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มสูงขึ้นที่น้ำหนักบรรทุกประลัย 4,601 กก. จะเกิดการแตกร้าว Diagonal tensile cracks ที่เกิดจากความเค้นดัดฉาก (Normal stress) และความเค้นเฉือน (Shear stress) เกิดขึ้นบนเอลิเมนต์คอนกรีต โดยปกติแล้วความเค้นในทิศทางดัดฉากจะเกิดขึ้นในทิศทาง X และความเค้นเฉือนจะเกิดในระนาบ XZ ดังนั้นทิศทางของความเค้นดัดหลัก (Principal tensile stress) จะเอียงออกจากแนวระนาบ เมื่อกำลังรับแรงดัดที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดของคอนกรีต สัญลักษณ์การแตกร้าว (0) จะปรากฏในทิศทางเฉียงเป็นเส้นตรง โดยตั้งฉากกับทิศทางของความเค้นหลัก (Principal stress) ที่ตำแหน่งจุดรวมแรง (Integration points) ของเอลิเมนต์คอนกรีตดังภาพที่ 124



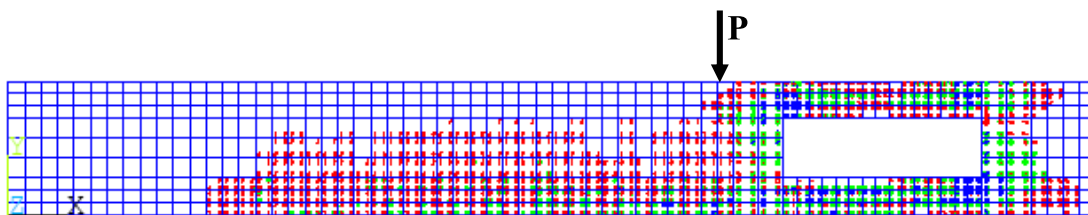
ภาพที่ 123 รูปแบบการแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีตตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$) ภายใต้การแตกร้าว Diagonal tensile cracks

เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุก 5,889 กก. ลักษณะการแตกร้าวจะปรากฏแรงอัดที่ขึ้นส่วนบน สัญลักษณะการแตกร้าวของคอนกรีตเอลิเมนต์ จะเริ่มขยายตัวขนานไปกับทิศทางของน้ำหนักบรรทุก ด้วยเหตุที่รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจาก ความเครียดดึง (Tensile strain) ดังนั้นสัญลักษณ์เป็นวงกลม (0) จะปรากฏขึ้นในทิศทางตั้งฉากกับ ความเครียดดึง (Tensile strain) ในทิศทาง y ที่ตำแหน่ง จุดรวมแรง (Integration points) ของเอลิเมนต์คอนกรีตใกล้ กับบริเวณรับน้ำหนักบรรทุก ซึ่งการแตกร้าวชนิดนี้เรียกว่าการแตกร้าวจากอัด (Compressive cracks)



ภาพที่ 124 รูปแบบการแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีตตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคาน เป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$) ภายใต้การแตกร้าว Compressive cracks

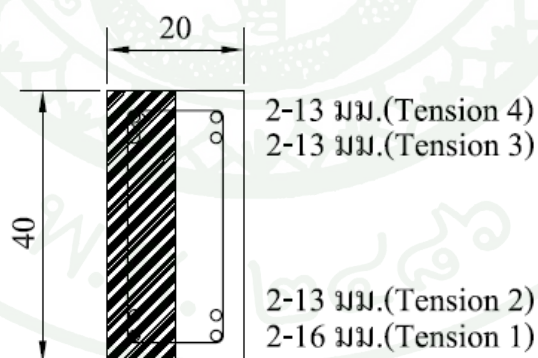
เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นเท่ากับ 8,327 กก. ลักษณะการแตกร้าวขยับตัวสูงมากขึ้นจนทำให้คานวิบัติ แสดงดังรูปที่ 125 ลักษณะการแตกร้าวเนื่องจาก Flexural cracks บริเวณกลางคาน ขยับตัวไม่สูงมากนัก แต่รอยแตกร้าวที่มากจะปรากฏบริเวณรอบช่องเปิดฝั่งใกล้ น้ำหนักบรรทุก ซึ่งน้ำหนักบรรทุกที่วิบัติมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับคานกรณีก่อนหน้านี้เกือบครึ่ง เนื่องจากตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกมีอิทธิพลของแรงเฉือนจากจุดรองรับเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ขึ้นส่วนล่างและขึ้นส่วนบน ต้องรับภาระส่งถ่ายแรงเฉือนที่เกิดขึ้น คานจึงวิบัติด้วยน้ำหนักบรรทุกประลัยที่น้อยกว่ากรณีต่างๆ



ภาพที่ 125 รูปแบบการแตกร้าวเอลิเมนต์คอนกรีตตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$) ภายใต้การแตกร้าวน้ำหนักบรรทุกสูงสุด

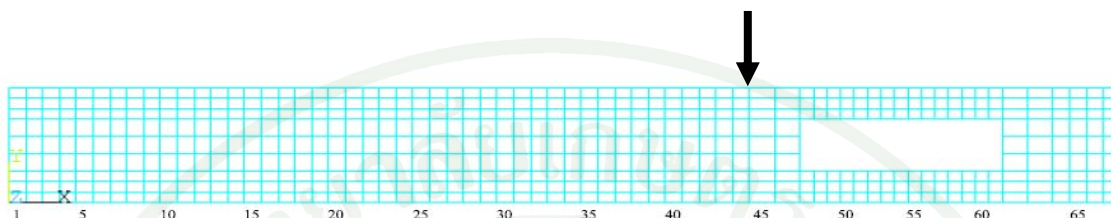
4. พฤติกรรมแรงดึงในเหล็กเสริมของการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$)

จากการพิจารณาค่าความเค้น และการแตกร้าวของคานที่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$) ทำให้ทราบว่าพฤติกรรมของคานมีแนวโน้มที่เหล็กเสริมมีแรงดึงไม่ถึงกำลังคราก และ กำหนดให้ เหล็กเสริมจำนวน 4 เส้น แสดงดังภาพที่ 126 จะระบุชื่อตามตำแหน่งจากใต้คานเหล็กเสริม $\Phi 16$ มม. กำหนด Tension 1 ส่วนเหล็กเสริมตำแหน่งถัดไป $\Phi 13$ มม. กำหนด Tension 2, Tension 3 และ Tension 4 ตามลำดับ คล้ายแบบจำลองหลัก 3 มิติ



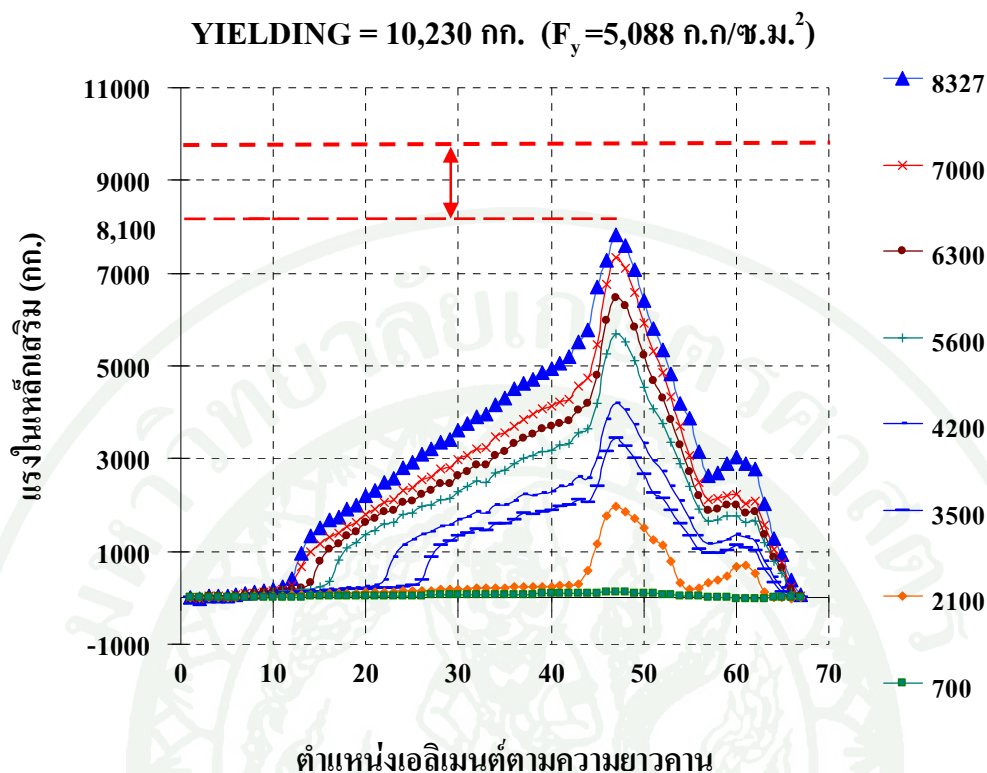
ภาพที่ 126 พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณีที่จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$)

การแสดงตำแหน่งเอลิเมนต์แสดงดังภาพที่ 127 ตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$) จะมีจำนวนเอลิเมนต์หลักเสริมตามยาวเท่ากับ 67 เอลิเมนต์ ตำแหน่งที่มีความน่าสนใจจะเป็นมุมของช่องเปิดได้แก่ ตำแหน่งเอลิเมนต์ 46-62 แสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้



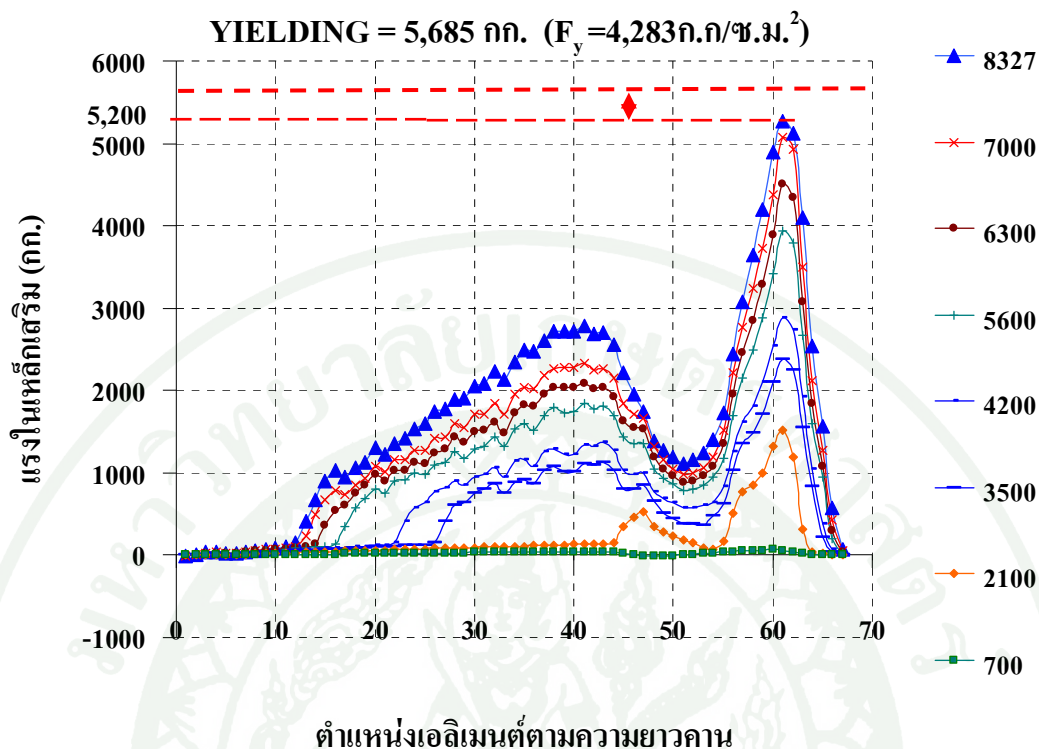
ภาพที่ 127 จำนวนเอลิเมนต์หลักเสริมตามยาวตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$)

พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 1 แสดงดังภาพที่ 128 พฤติกรรมการรับแรงดึงมากสุดบริเวณมุมช่องเปิดฝั่งใกล้หน้าทับรทุกตำแหน่งเอลิเมนต์ 48 มีแนวโน้มแรงดึงมากที่สุดตั้งแต่หน้าทับรทุก 2100 กก. ถึง หน้าทับรทุก 8,327 กก. ซึ่งมีค่าแรงดึงในเหล็กเสริมสูงสุดประมาณ 8,100 กก. ซึ่งไม่ถึงแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม คือมีค่าแรงดึงเท่ากับ 10,230 กก. ดังนั้นในตำแหน่งชิ้นส่วนล่างบริเวณมุมช่องเปิดฝั่งใกล้หน้าทับรทุกจะไม่เกิดพฤติกรรมความเหนียวของโครงสร้าง



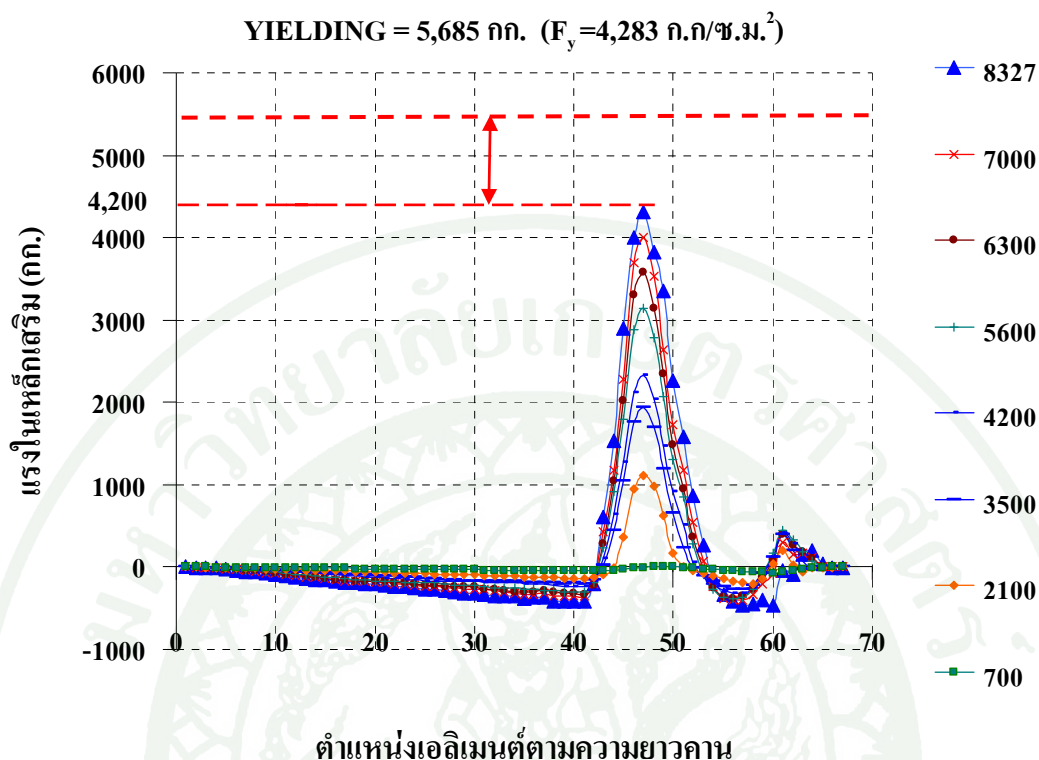
ภาพที่ 128 พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 1 ขนาดตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$)

พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 2 เป็นลำดับถัดมาที่จะต้องรับแรงดึง ตำแหน่งเอลิเมนต์ 60 เป็นตำแหน่งที่รับแรงดึงมากสุดมีค่าแรงดึงในเหล็กเสริมประมาณ 5,200 กก. ซึ่งไม่ถึงกำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม ซึ่งมีค่า 5,685 กก. การรับแรงดึงที่ตำแหน่งเอลิเมนต์ 60 จะรับแรงดึงมากที่สุดตั้งแต่น้ำหนักบรรทุกทุก 2,100 กก. เรื่อยไปจนถึงน้ำหนักบรรทุก 8,327 กก. ซึ่งพฤติกรรมบริเวณด้านบนของชิ้นส่วนล่างในคานที่มีช่องเปิดจะต้องรับแรงดึงขึ้นเพื่อทำให้ทิศทางของโมเมนต์เป็นโมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกา มีผลทำให้แรงภายในเกิดภาวะสมดุล ดังนั้นในตำแหน่งชิ้นส่วนล่างบริเวณมุมช่องเปิดฝั่งใกล้น้ำหนักบรรทุกจะไม่เกิดพฤติกรรมความเหนียวของโครงสร้าง แสดงดังภาพที่ 129



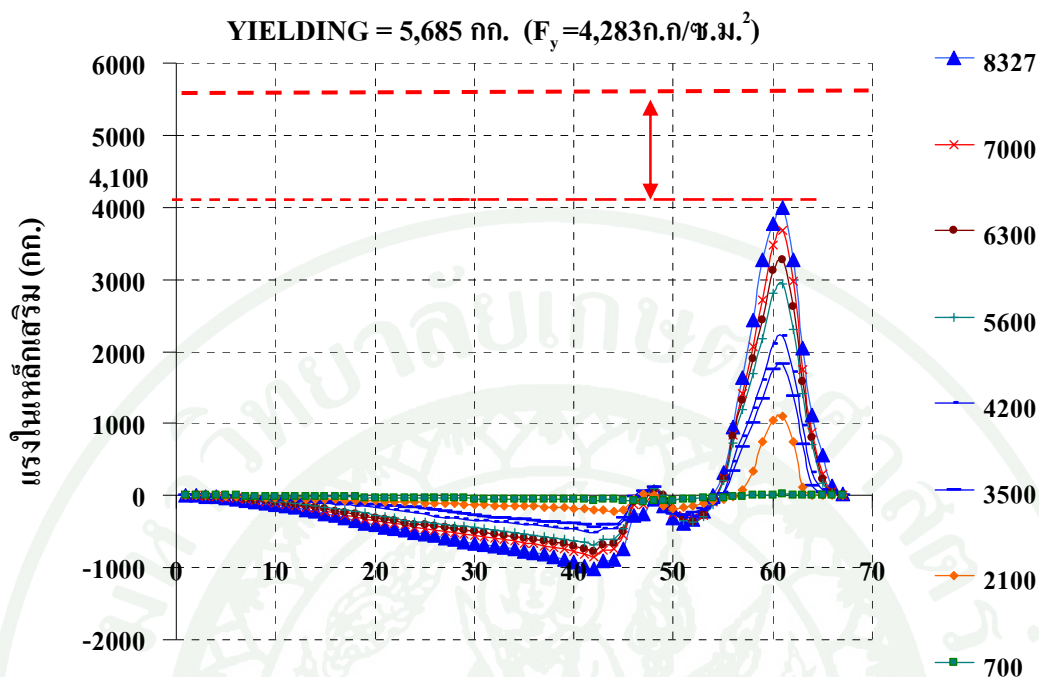
ภาพที่ 129 พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 2 ขนาดตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$)

พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 3 จะปรากฏพฤติกรรมทั้งแรงดึง และแรงอัดในเหล็กเสริม ที่น้ำหนักบรรทุกทุก 2,100 ถึง 8,327 กก. ตำแหน่งเอลิเมนต์ 48 ซึ่งเป็นบริเวณมุมช่องเปิดขึ้นส่วนบนฝั่งใกล้กับน้ำหนักบรรทุก จะปรากฏพฤติกรรมแรงดึงจนกระทั่งแรงดึงในเหล็กเสริมมีค่าประมาณ 4,200 กก. ซึ่งมีค่าน้อยกว่ากำลังรับแรงดึงที่จุดคราก พฤติกรรมของแรงดึงของเหล็กเสริมที่เกิดขึ้นตามปกติจะไม่พบในคานที่ไม่มีช่องเปิด ซึ่งหากพิจารณาถึงขึ้นส่วนบนในการส่งถ่ายค่าความเค้นจะต้องมีพฤติกรรมของ แรงอัด และแรงดึงบริเวณมุมช่องเปิดทุกมุม ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าในตำแหน่งขึ้นส่วนล่างบริเวณมุมช่องเปิดฝั่งใกล้กับน้ำหนักบรรทุกจะไม่เกิดพฤติกรรมความเหนียวของโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 130



ภาพที่ 130 พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 3 ขนาดตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$)

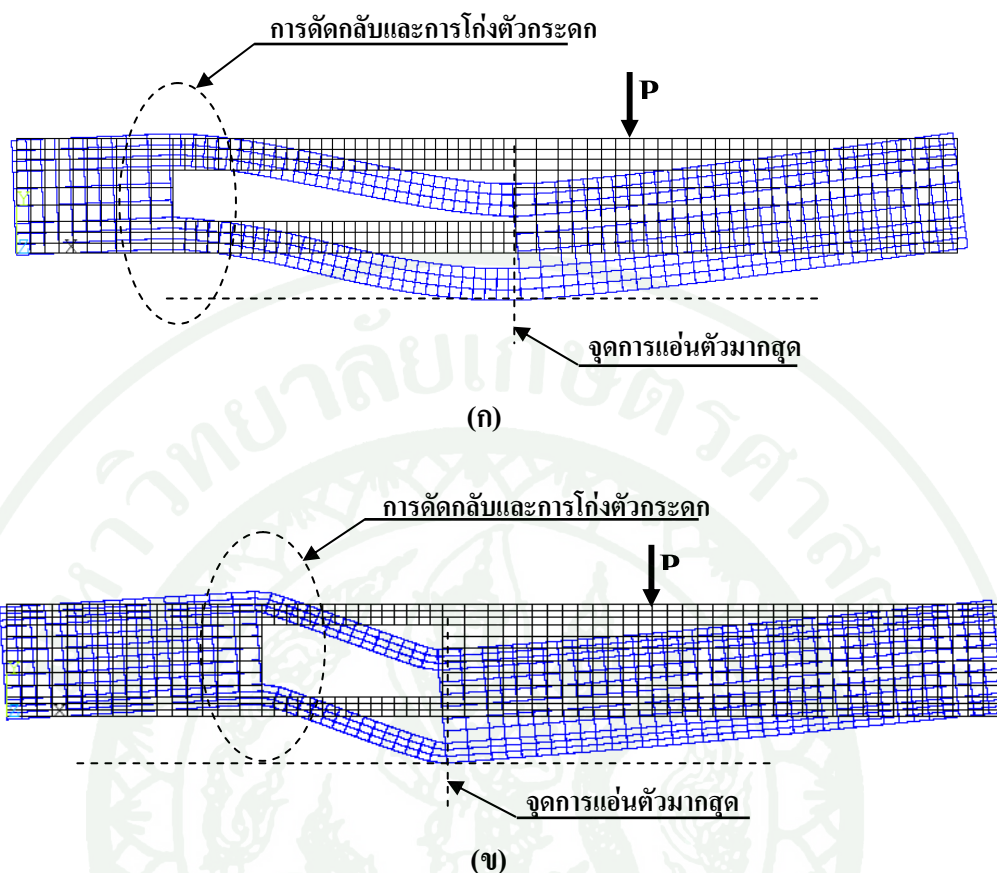
พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 4 เป็นตำแหน่งสุดท้ายของเหล็กเสริมในตำแหน่งได้น้ำหนักบรรทุก พฤติกรรมโดยส่วนใหญ่เหล็กเสริมกรณี Tension 4 ในส่วนตำแหน่งเอลิเมนต์ 60 เหล็กเสริมจะรับแรงดึงกระทั่งน้ำหนักบรรทุก 8,327 กก. กำลังของเหล็กเสริมจะดึงไม่ถึงกำลังครากของเหล็กเสริม และที่ตำแหน่งเอลิเมนต์ 48 เหล็กเสริมจะเกิดแรงดึงขึ้นเล็กน้อยแต่ก็ไม่มากกว่าการเกิดกำลังอัดทำให้ยังมีอิทธิพลของกำลังอัดเกิดขึ้น แสดงดังภาพที่ 131 ซึ่งจากภาพรวมทั้งหมดของการรับแรงดึงของเหล็กเสริมตั้งแต่ กรณี Tension 1-4 ทำให้สรุปได้ว่าพฤติกรรมของเหล็กเสริมมีแนวโน้มการรับแรงดึงต่ำกว่าจุดคราก แต่จากค่าความเค้นของหน้าตัดที่ได้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่ามากเท่ากับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ซึ่งสามารถสรุปพฤติกรรมการวิบัติได้ว่าเป็นแบบแตกอัด



ภาพที่ 131 พฤติกรรมของแรงดึงในเหล็กเสริมกรณี Tension 4 ขนาดตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_p - 265$)

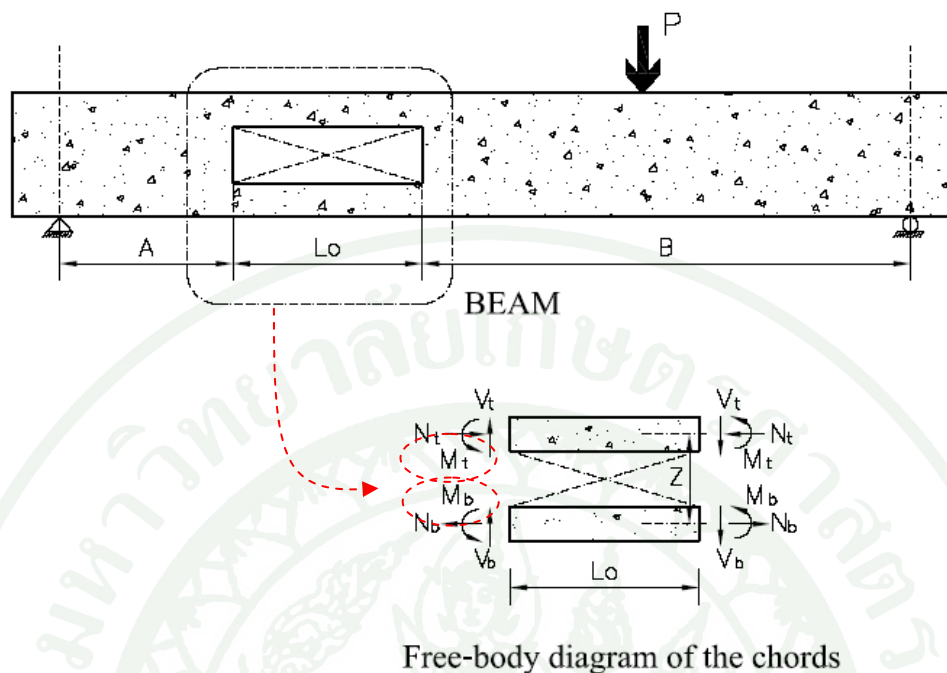
การวิเคราะห์พฤติกรรมการโก่งตัวกระดก

การศึกษาพฤติกรรมคานที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ทั้ง 3 กรณี ทำให้ทราบพฤติกรรมการแอ่นตัว พฤติกรรมการกระจายความเค้นคอนกรีตที่หน้าตัด พฤติกรรมแรงดึงของเหล็กเสริม ซึ่งทั้งหมดก็ล้วนแต่เป็นไปตามสมมติฐาน แต่สิ่งที่แปลกจากความรู้สึกได้แก่คานที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่หากเพิ่มความยาวมากเกินไป หรือความลึกมากเกินไปจะทำให้คานเกิดการโก่งตัวกระดก บริเวณด้านบน ของชิ้นส่วนบนฝั่งไกลน้ำหนักบรรทุกทุกแสดงดังภาพที่ 132



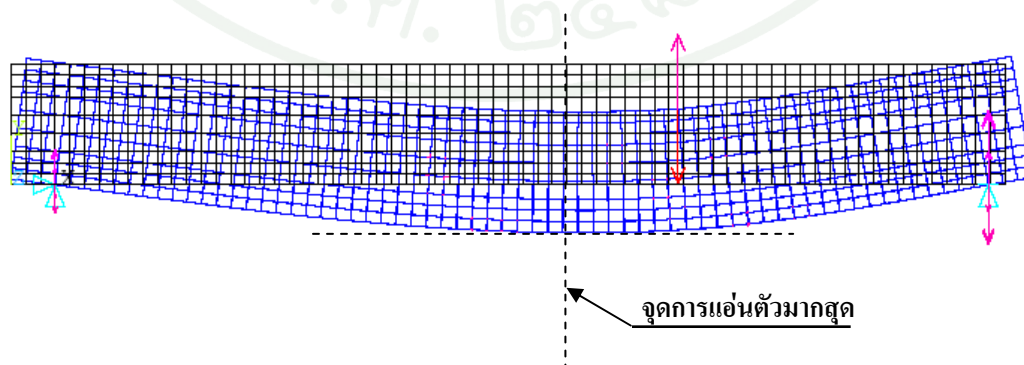
ภาพที่ 132 ลักษณะการโก่งตัวกระดูกของแบบจำลอง 3 มิติ

ดังนั้นจะต้องเริ่มวิเคราะห์พฤติกรรมการแอ่นตัวตั้งแต่คานหน้าตัดเต็มเพื่อจะได้ทราบพฤติกรรมการแอ่นตัว และค่าแรงภายในรอบช่องเปิดตามทฤษฎี ซึ่งก่อนจะทำการวิเคราะห์ถึงแรงภายในระหว่างช่องเปิดว่าแรงใดมีผลทำให้เกิดการโก่งตัวกระดูก แสดงดังภาพที่ 133 วิธีความสมดุลจะมีแรงภายในเข้ามาเกี่ยวข้องทั้งหมด 6 ตัวแปร ดังนี้ แรงตามแกนได้แก่ N_t และ N_b โมเมนต์คัตได้แก่ M_t และ M_b แรงเฉือนได้แก่ V_t และ V_b ซึ่งจะปรากฏทิศทาง M_t และ M_b บริเวณมุมช่องเปิดฝั่งไกลน้ำหนักบรรทุก ที่มีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งผิดจากความรู้สึกทำให้ต้องวิเคราะห์โมเมนต์คัตรอบช่องเปิดร่วมกับพฤติกรรมการแอ่นตัว



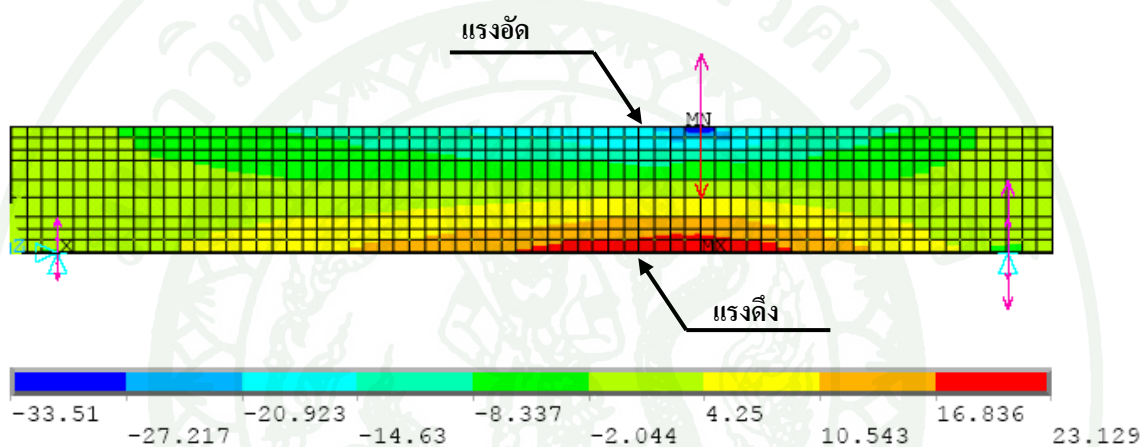
ภาพที่ 133 แรงภายในคานที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่รอบช่องเปิด

อันดับแรกจะเริ่มจากพฤติกรรมคานหน้าตัดเต็ม ซึ่งจะแสดงค่าการแอ่นตัวค่าการกระจายความเค้นตามแนวยาวคาน (แกน X) และพฤติกรรมแรงเฉือน ที่จะบ่งบอกความสัมพันธ์ของความสมดุลภายในคานได้อย่างชัดเจน แสดงดังภาพที่ 144 ค่าการแอ่นตัวคานหน้าตัดเต็มที่กำหนดค่าคุณสมบัติเหมือนคาน การทดสอบของ Tan (1982) เพียงแต่ไม่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ ซึ่งลักษณะการแอ่นตัวมากที่สุดจะปรากฏอยู่ระหว่างกึ่งกลางคาน และน้ำหนักรรทุก



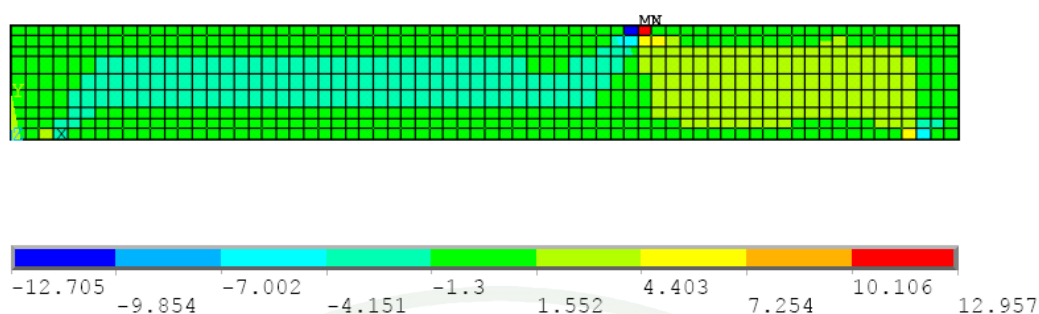
ภาพที่ 133 น้ำหนักรรทุก-การแอ่นตัวคานหน้าตัดเต็ม

พฤติกรรมการกระจายความเค้นตามแนวยาวคาน (แกน X) ของคานหน้าตัดเต็มจะปรากฏแรงอัด มากที่สุดประมาณ 33.51 กก./ซ.ม.^2 และแรงดึงมากที่สุดประมาณ $23.129 \text{ กก./ซ.ม.}^2$ บริเวณน้ำหนักรรทุก พฤติกรรมที่เห็นดังภาพที่ 134 เป็นทฤษฎีเบื้องต้นในคานอย่างง่ายที่พบเห็นโดยทั่วไป เมื่อคานมีน้ำหนักรรทุกเพิ่มขึ้นลักษณะแรงดึงในคอนกรีตจะสูงขึ้นทำให้คอนกรีตแตกร้าว และเลื่อนระดับของแกนสะเทินสูงขึ้น ขณะที่ทำการส่งถ่ายแรงดึงให้กับเหล็กเสริมพร้อมกับการต้านทานแรงอัดให้กับคอนกรีต ซึ่งเป็นตามค่าลักษณะของความเค้น SECTIN PL ดังที่ได้กล่าวในตัวอย่างที่ผ่านมาก่อนหน้านี้



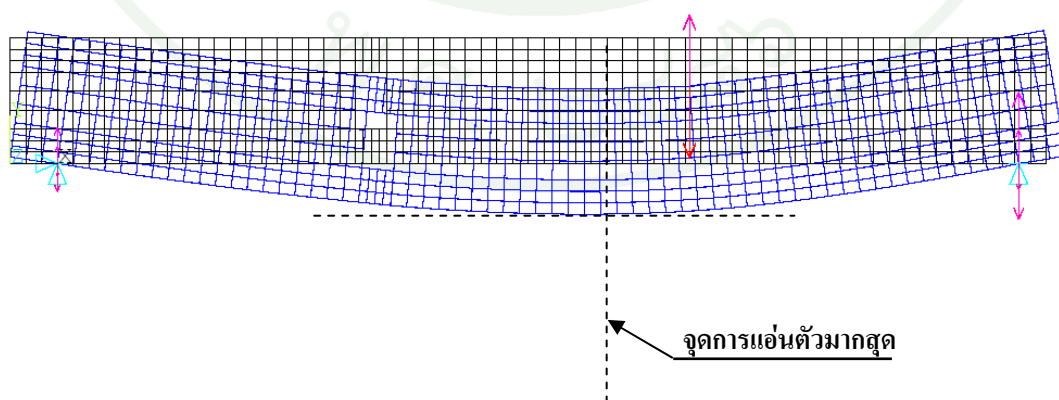
ภาพที่ 134 การกระจายความเค้นตามแนวยาวคาน (แกน X) ของคานหน้าตัดเต็ม

ต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมแรงเฉือนของคานหน้าตัดเต็ม ซึ่งจะพิจารณาการกระจายความเค้นตามระนาบ (แกน XY) ลักษณะของแรงเฉือนจะมีค่ามากที่สุดบริเวณกึ่งกลางคาน ในระนาบ XY แสดงดังภาพที่ 135 การพัฒนาแรงเฉือนจะเริ่มจากจุดรองรับ และมีค่าคงที่เรื่อยมาจนกระทั่งเปลี่ยนทิศทางตำแหน่งน้ำหนักรรทุก ซึ่งจากภาพที่ 135 ค่าแรงเฉือนฝั่งซ้ายของน้ำหนักรรทุกจะมีค่ามากที่สุด 12.75 กก./ซ.ม.^2 และค่าแรงเฉือนฝั่งซ้ายของน้ำหนักรรทุกจะมีค่ามากที่สุด $12.957 \text{ กก./ซ.ม.}^2$



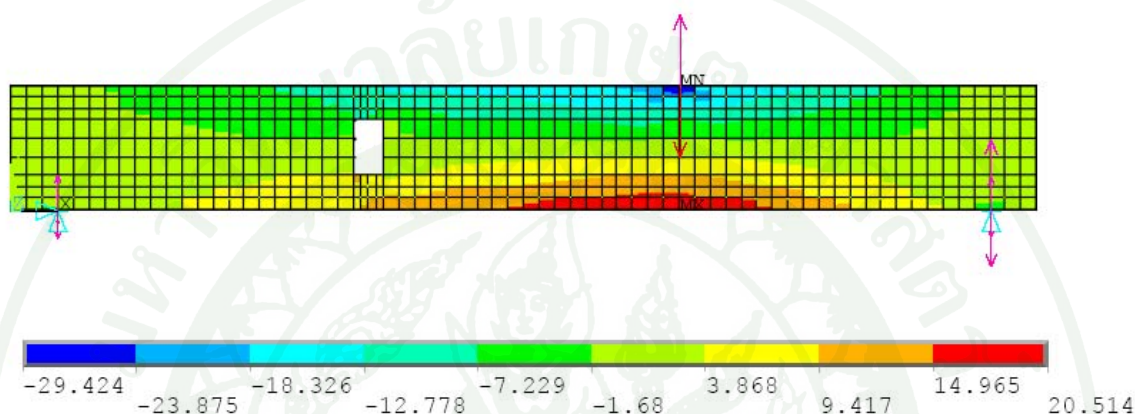
ภาพที่ 135 การกระจายความเค้นตามระนาบ (แกน XY) ของคานหน้าตัดเต็ม

จากทั้งหมดที่กล่าวมาเป็นพฤติกรรมตามทฤษฎีของคานอย่างง่ายที่ไม่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ต่อไปจะกล่าวกรณี คานที่มีช่องเปิดขนาดกว้าง 10 ซม. ลึก 18 ซม. ซึ่งตามทฤษฎีของ Mansur and Tan (1989) ได้ศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ภายใต้แรงบิด โมเมนต์ดัด และแรงเฉือน พบว่าหากคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดมีพฤติกรรมเป็นไปตามทฤษฎีของคาน และหากความลึกหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเปิดน้อยกว่าร้อยละ 40 ของความลึกคานจะกำหนดให้เป็นช่องเปิดขนาดเล็ก ดังนั้นความลึก 18 ซม. ยังคงมีพฤติกรรมเป็นคานที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ เนื่องจากไม่ได้กำหนดความยาวช่องเปิด แสดงค่าการแอ่นตัวของคานที่มีขนาดช่องเปิดขนาดยาว 10 ซม. ลึก 18 ซม. ดังภาพที่ 136 ซึ่งไม่ปรากฏการโก่งตัวกระดก และลักษณะการแอ่นตัวยังคงเป็นเหมือนคานอย่างง่าย ซึ่งจากตัวอย่างนี้ทำให้สรุปแนวโน้มของการโก่งตัวกระดกอาจเนื่องจากความยาวที่เพิ่มขึ้น แต่จะต้องมีข้อมูลยืนยันมากกว่านี้ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาการกระจายความเค้นตามแนวแกนยาวคาน (แกน X) ของคานที่มีช่องเปิดขนาดยาว 10 ซม. ลึก 18 ซม.



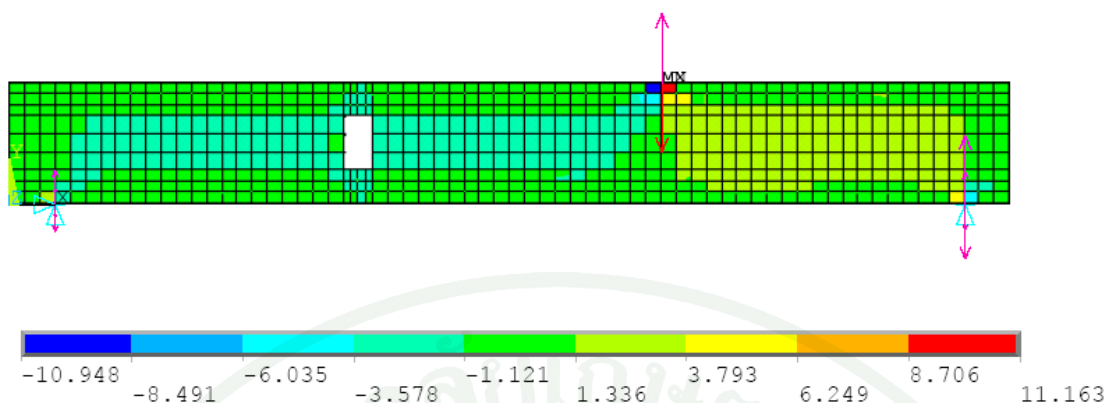
ภาพที่ 136 หน้าหนักบรรทุก-การแอ่นตัวคานที่มีขนาดช่องเปิดขนาดยาว 10 ซม. ลึก 18 ซม.

เมื่อทำการเจาะรูคานที่มีช่องเปิดยาว 10 ซม. ลึก 18 ซม. ทำให้พฤติกรรมค่าความเค้นเคลื่อนผ่านช่องเปิดได้ไม่สะดวกนัก จะสังเกตได้จากภาพที่ 137 ค่าความเข้มข้นของความเค้นอัดขนาด 7.229 กก./ซ.ม.² จะขาดหายไปพร้อมกับความเค้น ขนาด 18.326 กก./ซ.ม.² ทำให้พฤติกรรมมีความเค้นบริเวณมุมช่องเปิดมาก แต่ก็ไม่ปรากฏว่าเอลิเมนต์คอนกรีตมุมช่องเปิดพังไกล่น้ำหนักบรรทุกเกิดแรงดึง ตามขนาดช่องเปิดทั้ง 3 กรณีที่ผ่านมา



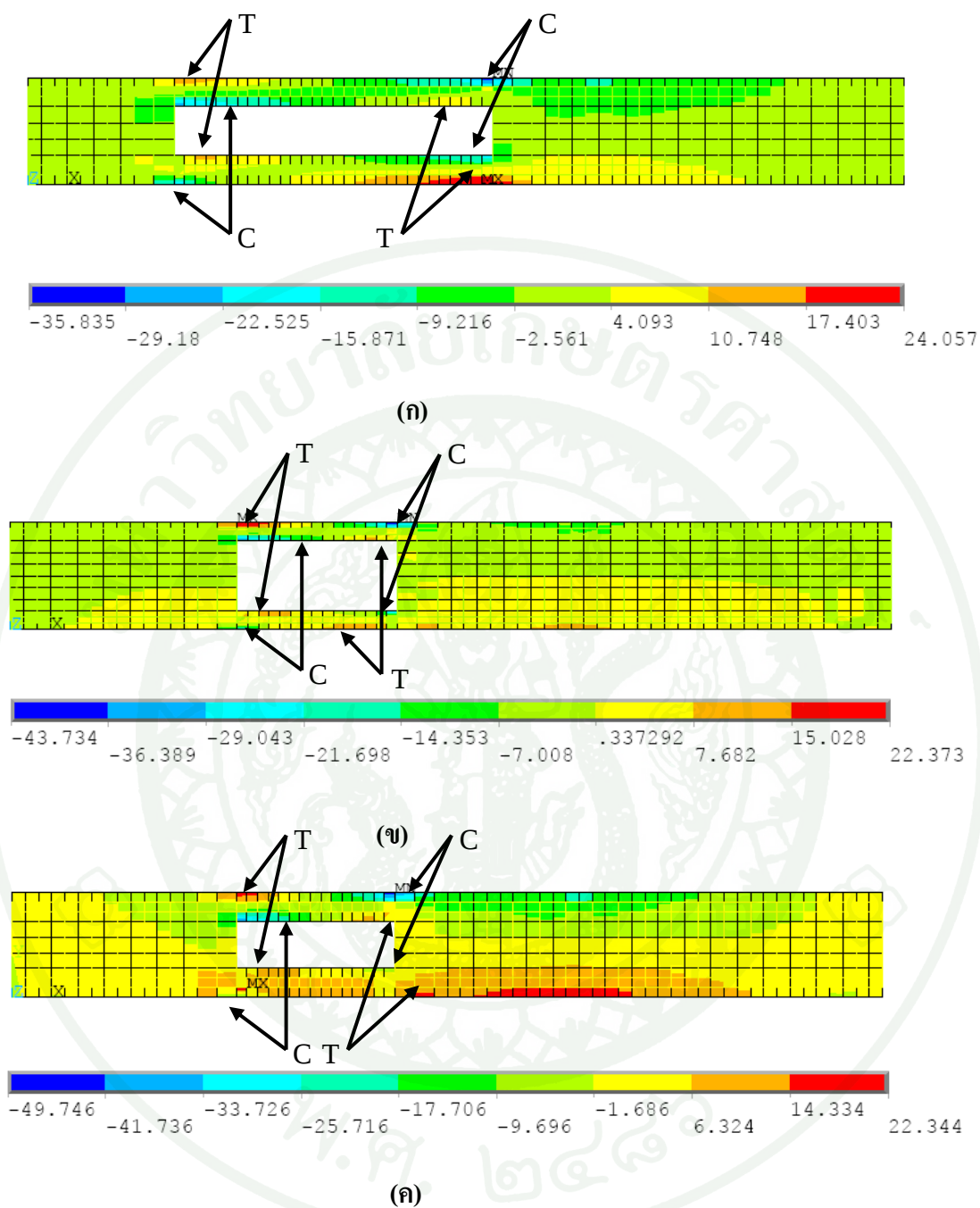
ภาพที่ 137 การกระจายความเค้นตามแนวแกนยาวคาน (แกน X) ของคานที่มีช่องเปิดขนาดยาว 10 ซม. ลึก 18 ซม.

การกระจายความเค้นตามระนาบ (แกน XY) ของคานที่มีช่องเปิดขนาดยาว 10 ซม. ลึก 18 ซม. มีลักษณะพฤติกรรมที่ไม่ต่างกันมากนักเทียบกับคานหน้าตัดเต็ม หากความเค้นเฉือนเคลื่อนผ่านช่องเปิดจะทำการกระจายเข้าสู่ชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่าง ซึ่งหากนำมารวมกัน ก็จะมีค่าเท่ากับแรงเฉือนหน้าตัดเต็มซึ่งอิทธิพลของแรงเฉือนจะมีผลกระทบน้อยมาก



ภาพที่ 138 การกระจายความเค้นตามระนาบ (แกน XY) ของคานที่มีช่องเปิดขนาดกว้าง 10 ซม. ลึก 18 ซม.

ซึ่งต่อไปเป็นการอธิบายค่าการกระจายความเค้นตามแนวยาวคาน (แกน X) ของคานที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่จะเป็นการพิจารณาความชัดเจนของค่าความเค้นบริเวณมุมช่องเปิด แสดงดังภาพที่ 139 (ก) ขนาดความยาวช่องเปิดเท่ากับ 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$) (ข) ขนาดความลึกช่องเปิดเท่ากับ 26 ซม. ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$) และ (ค) แบบจำลองหลัก 3 มิติ ขนาดความยาวช่องเปิด 60 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 60$, $R_d - 18$ และ $R_p - 10$) ช่องเปิดขนาดใหญ่ทั้งสองลักษณะมีพฤติกรรมของความเค้นตามแนวยาวคาน (แกน X) ที่คล้ายกันซึ่งบริเวณขึ้นส่วนบน และขึ้นส่วนล่าง มุมช่องเปิดฝั่งไกลน้ำหนักบรรทุก จะปรากฏด้านบนขึ้นส่วนเป็นแรงดึง ด้านล่างขึ้นส่วนเป็นแรงอัด แต่มุมช่องเปิดฝั่งไกลน้ำหนักบรรทุกจะมีทิศทางของค่าความเค้นแตกต่างกันซึ่งด้านบนขึ้นส่วนเป็นแรงอัด ด้านล่างขึ้นส่วนเป็นแรงดึง ซึ่งพฤติกรรมที่เกิดขึ้น อาจจะเป็นที่มาของการโก่งตัวกระดูก เนื่องจากมีโมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกา กระทำบริเวณมุมของช่องเปิดฝั่งไกลน้ำหนักบรรทุก ซึ่งตรงกับ ทฤษฎีของ Mansur et al. (1984) แต่ในแบบจำลองหลัก 3 มิติ กลับไม่ปรากฏการโก่งตัวกระดูกขึ้นทำให้วิเคราะห์ได้ว่าหากความยาว หรือความลึกเพิ่มมากขึ้นจนทำให้คานมีค่าโมเมนต์ที่มุมช่องเปิดเปลี่ยนแปลงไปอาจจะส่งอิทธิพลให้คานเกิดการโก่งตัวกระดูก



ภาพที่ 139 การกระจายความเค้นตามแนวแกนยาวคาน (แกน X) ของคานที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่

(ก) ขนาดความยาวช่องเปิดเท่ากับ 120 ซม. ลีค 18 ซม. ($R_l - 120$)

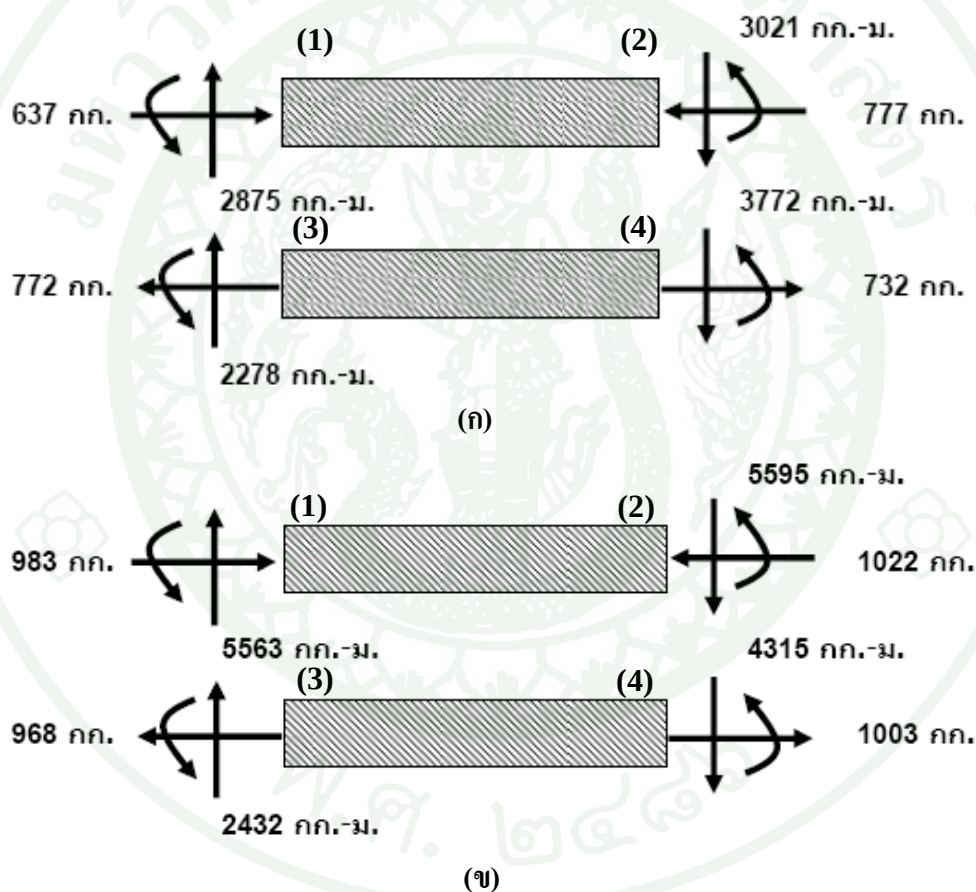
(ข) ขนาดความลึกช่องเปิดเท่ากับ 26 ซม. ยาว 60 ซม. ($R_d - 26$)

(ค) แบบจำลองหลัก 3 มิติ ขนาดความยาวช่องเปิด 60 ซม. ลีค 18 ซม. ($R_l - 60$,
 $R_d - 18$ และ $R_p - 10$)

T หมายถึง แรงดึง, C หมายถึง แรงอัด

ลำดับต่อไปเป็นการอธิบายค่าโมเมนต์ของชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่าง ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิด ซึ่งจะทำให้การเปรียบเทียบกับ แบบจำลองหลัก 3 มิติ และขนาดความยาวช่องเปิดเท่ากับ 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_l - 120$) ในน้ำหนักบรรทุกที่เท่ากัน ค่าต่างๆ ที่ปรากฏ จะได้จากค่ากระจายความเค้น ของหน้าตัดคาน และค่าแรงดึงในเหล็กเสริมจากที่ได้กล่าวไว้แล้วก่อนหน้านี้รายละเอียดมีดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 น้ำหนักบรรทุก 700 กก.



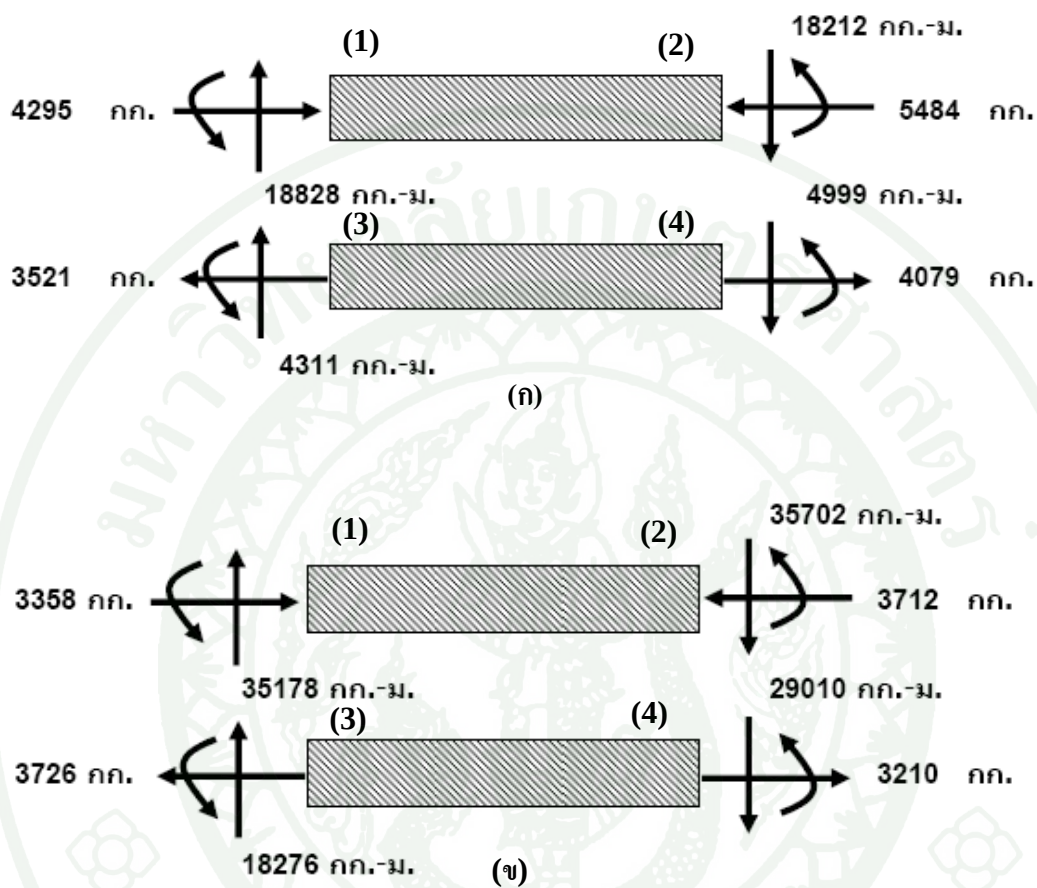
ภาพที่ 140 ค่าแรงภายในบริเวณมุมช่องเปิด กรณีที่ 1 น้ำหนักบรรทุก 700 กก.

(ก) แบบจำลองหลัก 3 มิติ ขนาดความยาวช่องเปิด 60 ซม. ลึก 18 ซม.

($R_l - 60$, $R_d - 18$ และ $R_p - 10$)

(ข) ขนาดความยาวช่องเปิดเท่ากับ 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_l - 120$)

กรณีที่ 2 น้ำหนักบรรทุก 3,500 กก.



ภาพที่ 141 ค่าแรงภายในบริเวณมุมช่องเปิด กรณีที่ 2 น้ำหนักบรรทุก 3,500 กก.

(ก) แบบจำลองหลัก 3 มิติ ขนาดความยาวช่องเปิด 60 ซม. ลีค 18 ซม. (R_l - 60,

R_d - 18 และ R_p - 10)

(ข) ขนาดความยาวช่องเปิดเท่ากับ 120 ซม. ลีค 18 ซม. (R_l - 120)

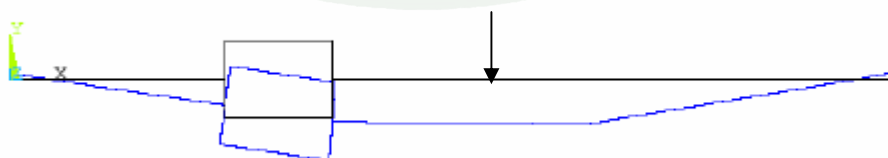
จากภาพที่ 139 เป็นการเปรียบเทียบขนาดความยาวช่องเปิดขึ้นจาก 60 ซม. เป็น 120 ซม. ภายใต้น้ำหนักบรรทุก 700 กก. สังเกต ภาพที่ 140 (ก) แบบจำลองหลัก 3 มิติ ค่าแรงตามแกนมีค่าประมาณ 700 กก. และค่าโมเมนต์ดัดมีค่าประมาณ 3,000 กก.-ซม. เมื่อทำการเพิ่มขนาดความยาวขึ้นเป็น 120 ซม. ดังภาพ 140 (ข) ขนาดความยาวช่องเปิดเท่ากับ 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$) ค่าแรงตามแกนจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยมีค่าประมาณ 1,000 กก. และค่าโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 1.5 เท่า มีค่าประมาณ 5,000 กก.-ซม. ตรงตำแหน่งมุมช่องเปิด 1,2 และ 4 ส่วนตำแหน่งมุมช่องเปิด 3 ค่าโมเมนต์ดัด จะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ไม่แตกต่างจากขนาดความยาวช่องเปิด 60 ซม. มากนัก และ ภาพที่ 141 เป็นการเปรียบเทียบขนาดความยาวช่องเปิดขึ้นจาก 60 ซม. เป็น 120 ซม. ภายใต้น้ำหนักบรรทุก 3,500 กก. สังเกต ภาพที่ 141 (ก) แบบจำลองหลัก 3 มิติ ค่าแรงตามแกนมีค่าประมาณ 4,000 กก. และค่าโมเมนต์ดัดมีค่าประมาณ 18,000 กก.-ซม. บริเวณมุมช่องเปิด 1 และ 2 ส่วน บริเวณมุมช่องเปิด 3 และ 4 ค่าโมเมนต์ดัดมีค่าประมาณ 4,000 กก.-ซม. เมื่อทำการเพิ่มขนาดความยาวขึ้นเป็น 120 ซม. ดังภาพ 141 (ข) ขนาดความยาวช่องเปิดเท่ากับ 120 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_f - 120$) ค่าแรงตามแกนมีค่าไม่ต่างกันมากนัก จะมีค่าประมาณ 3,700 กก. และค่าโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 2 เท่า มีค่าประมาณ 35,000 กก.-ซม. ตรงตำแหน่งมุมช่องเปิด 1 และ 2 สำหรับตำแหน่งมุมช่องเปิด 3 ค่าโมเมนต์ดัด จะมีค่าเพิ่มขึ้นมากจากเดิมประมาณ 10 เท่า มีค่าประมาณ 18,000 กก.-ซม. ดังนั้นจากค่าแรงภายในที่ปรากฏสามารถสรุปได้ว่า ที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากันเมื่อมีการเพิ่มขนาดความยาวช่องเปิด จะมีผลทำให้ค่าโมเมนต์ดัดภายในมีค่ามากขึ้น ซึ่งทิศทางโมเมนต์ดัดภายในบริเวณมุมช่องเปิด 1 และ 3 มีอิทธิพลมาก เนื่องจากทิศทางของโมเมนต์เป็นการทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการโก่งตัวกระดกได้ และในกรณีที่เพิ่มขนาดความลึกค่าโมเมนต์จะมีค่าเท่าเดิม แต่ค่าความแข็งของชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่างมีค่าความแข็งน้อยลง การต้านทานแรงโมเมนต์ดัด ทำได้ยากซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการโก่งตัวกระดกได้ในกรณีการเพิ่มขนาดความลึกของช่องเปิด

เปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวแบบจำลอง 1 มิติ และ 3 มิติ

การพิจารณาเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวแบบจำลอง 1 มิติ และ 3 มิติ ใช้เกณฑ์น้ำหนักบรรทุกที่เท่ากัน 700 กก. เนื่องจากเป็นน้ำหนักบรรทุกที่ไม่เกิดจุดการแตกร้าวครั้งแรกซึ่งน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว ยังอยู่ในช่วงยืดหยุ่น และการเปรียบเทียบตำแหน่งการแอ่นตัวสูงสุดกำหนดบริเวณมุมช่องเปิดฝั่งใกล้น้ำหนักบรรทุก คุณสมบัติของเอลิเมนต์ที่ใช้สร้างแบบจำลอง 3 มิติ เป็นเอลิเมนต์ที่สามารถรับแรงดึง แรงอัด แรงดัด และแรงเฉือนได้ แต่ไม่สามารถจำลองคุณสมบัติการเสียดรูปเนื่องจากแรงเฉือนได้ และไม่สามารถสร้างคุณสมบัติการยึดรั้งของบริเวณมุมฝั่งไกลน้ำหนักบรรทุกให้เกิดสถานะโมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกาได้ ดังนั้นจะทำการเป็นเทียบทั้ง 3 กรณี ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวช่องเปิด การเปลี่ยนแปลงขนาดความลึกช่องเปิด และการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งช่องเปิด สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1. เปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวแบบจำลอง 1 มิติ และ 3 มิติ กรณีเปลี่ยนแปลงความยาวช่องเปิด

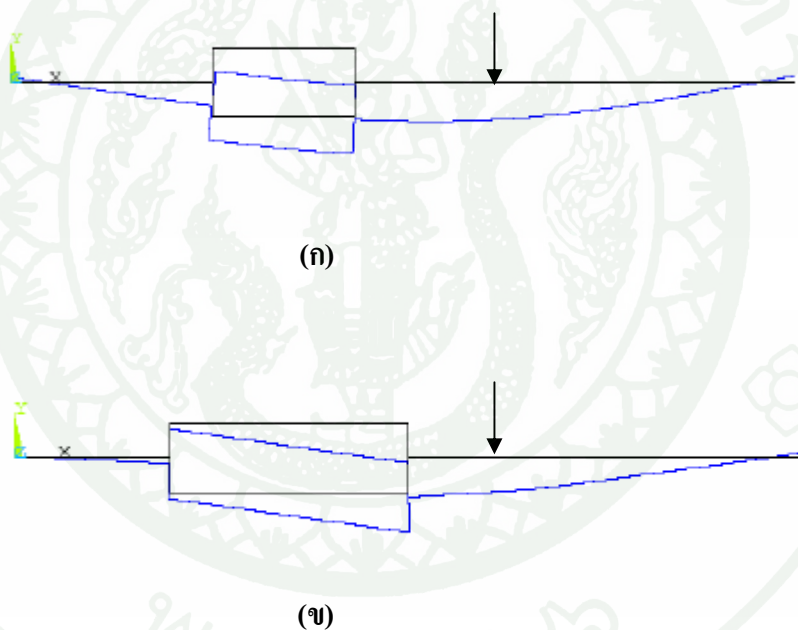
การเปลี่ยนแปลงความยาวช่องเปิดกรณีแบบจำลอง 3 มิติ ได้แสดงให้เห็นถึงรูปแบบการเสียดรูปของคานได้อย่างชัดเจน ค่าการแอ่นตัวที่มากที่สุดจะปรากฏบริเวณมุมช่องเปิดฝั่งใกล้น้ำหนักบรรทุก ดังนั้นการเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวของแบบจำลอง 1 มิติ และแบบจำลอง 3 มิติ จะกำหนดบริเวณมุมช่องเปิดฝั่งใกล้น้ำหนักบรรทุกเป็นเกณฑ์ แสดงดังภาพที่ 142 ลักษณะการแอ่นตัวของแบบจำลอง 1 มิติ ขนาดช่องเปิดยาว 40 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_{ls} - 40$) การแอ่นตัวมากที่สุดจะปรากฏ บริเวณใกล้ช่องเปิดซึ่ง ตรงกับพฤติกรรมแบบจำลอง 3 มิติ ขนาดช่องเปิดยาว 40 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_l - 40$) ส่วนบริเวณจุดรองรับคานจะมีการกระดกขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากสภาพความเป็นจริงเมื่อจุดรองรับอยู่ห่างจากของคานเป็นระยะ 15 ซม. ซึ่งไม่มีแรงต้านกระทำจึงทำให้เกิดการกระดก



ภาพที่ 142 ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลอง 1 มิติ ขนาดช่องเปิดยาว 40 ซม.

ลึก 18 ซม. ($R_{ls} - 40$)

เมื่อขยายความยาวช่องเปิดจาก 40 ซม. เป็น 60 ซม. ลักษณะการแอ่นตัวของคานจะราบเรียบ เนื่องจากระยะชั้นส่วนระหว่างมุมช่องเปิด และน้ำหนักบรรทุกที่มีความยาวลดลง แสดงดังภาพที่ 143 (ก) ลักษณะการแอ่นตัวของแบบจำลองหลัก 1 มิติ ขนาดช่องเปิดยาว 60 ซม. ลีกลึก 18 ซม. ($R_{ls} - 60$) และพฤติกรรมการแอ่นตัวบริเวณมุมช่องเปิดฝั่งใกล้น้ำหนักบรรทุกมีค่าแอ่นตัวมากที่สุด และเมื่อขยายช่องเปิดจาก 60 ซม. เป็น 120 ซม. ปรากฏการแอ่นตัวที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น และบริเวณมุมช่องเปิดฝั่งไกลน้ำหนักบรรทุกไม่ปรากฏพฤติกรรมการแอ่นตัวกระดก เช่น กรณีแบบจำลอง 3 มิติ ซึ่งจากการตรวจสอบแบบจำลอง 1 มิติ ไม่ปรากฏโมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกาบริเวณมุมช่องเปิดฝั่งไกลน้ำหนักบรรทุก ซึ่งพฤติกรรมของโมเมนต์จะเป็นโมเมนต์ตามเข็มนาฬิกาตลอดหน้าตัดคาน



ภาพที่ 143 ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลองหลัก 1 มิติ กรณีเปลี่ยนแปลงความยาว

(ก) ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลองหลัก 1 มิติ ขนาดช่องเปิดยาว 60 ซม.

ลึกลึก 18 ซม. ($R_{ls} - 60$)

(ข) ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลอง 1 มิติ ขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม.

ลึกลึก 18 ซม. ($R_{ls} - 120$)

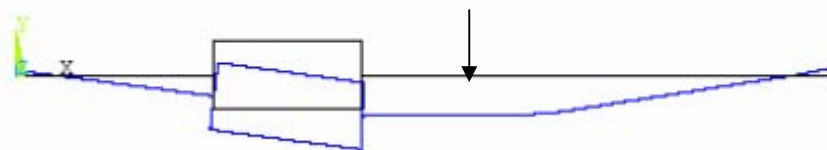
จากการศึกษาพฤติกรรมน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว กรณีเปลี่ยนแปลงความยาวช่องเปิด ทุกกรณีค่าการแอ่นตัวมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งไม่เกิน 16.47 เปอร์เซ็นต์ และค่าการแอ่นตัวของแบบจำลอง 3 มิติ จะมีค่ามากกว่า 1 มิติ ซึ่งตรงกับทฤษฎีที่คุณสมบัติของเอลิเมนต์ 1 มิติ จะไม่สามารถพิจารณาการเสถียรเนื่องจากแรงเฉือนได้ แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของช่องเปิดมีผลทำให้แบบจำลอง 3 มิติ มีค่าการแอ่นตัวเพิ่มมากขึ้น และแบบจำลอง 1 มิติ เช่นกันเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของช่องเปิดมีผลทำให้ค่าการแอ่นตัวเพิ่มมากขึ้น ดังตารางที่ 25

ตารางที่ 25 เปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวกรณีเปลี่ยนแปลงความยาวช่องเปิด

ความยาวช่องเปิด (ซ.ม.)	น้ำหนักบรรทุก (กก.)	ค่าการแอ่นตัว (ซ.ม.)		เปอร์เซ็นต์ (%)
		3 มิติ	1 มิติ	
R2-400	(2,193) ,700	-	0.00913	-
R2-600	(1,676) ,700	0.01346	0.01206	10.40
R2-800	(1,294) ,700	0.01651	0.01479	10.42
R2-1000	(1,267) ,700	0.02093	0.01852	11.49
R2-1200	(888) ,700	0.02650	0.02332	12.03

2. เปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวแบบจำลอง 1 มิติ และ 3 มิติ กรณีเปลี่ยนแปลงความลึกช่องเปิด

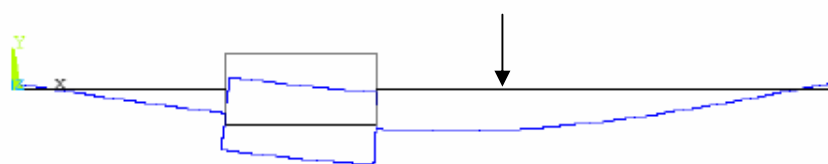
กรณีการเปลี่ยนแปลงความลึกช่องเปิดจากตัวอย่างแบบจำลอง 3 มิติ ทำให้ชัดเจนในเรื่องแรงภายในรอบช่องเปิดจะมีค่าเท่าเดิม เพียงแต่การเปลี่ยนแปลงความลึกช่องเปิดทำให้ชิ้นส่วนบนและชิ้นส่วนล่างมีพื้นที่ในการส่งถ่ายค่าความเค้นน้อยลง ซึ่งเปิดเหตุผลหลักของพฤติกรรมค่าน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว ที่น้อยลงเมื่อเพิ่มความลึกของช่องเปิด และกรณีต่อไปแบบจำลอง 1 มิติ ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลอง 1 มิติ ขนาดช่องเปิดยาว 60 ซ.ม. ลึก 14 ซ.ม. ($R_{ds} - 14$) แสดงดังรูปที่ 144 พฤติกรรมการแอ่นตัวคล้ายแบบจำลองหลัก 1 มิติ ซึ่งขนาดความลึกช่องเปิดไม่ต่างกันมากทำให้รักษาสภาพะกานได้ใกล้เคียงกัน



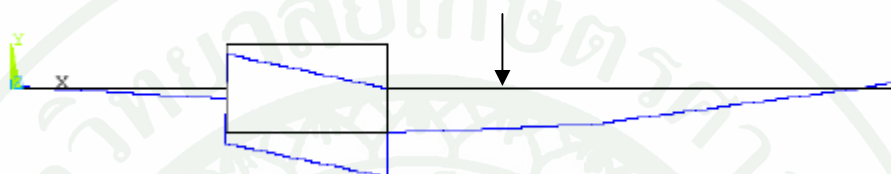
ภาพที่ 144 ลักษณะการแ่่นตัว ของแบบจำลอง 1 มิติ ขนาดช่องเปิดยาว 60 ซม.

ลึก 14 ซม. ($R_{ds} - 14$)

เมื่อทำการเพิ่มความลึกช่องเปิด จาก 18 ซม. เป็น 22 ซม. ค่าความแข็งของชั้นส่วนบน และชั้นส่วนล่าง จะปรากฏชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อใส่น้ำหนักบรรทุกรูปแบบการแ่่นตัวภาพที่ 145 (ก) ลักษณะการแ่่นตัว ของแบบจำลองหลัก 1 มิติ ขนาดช่องเปิดยาว 60 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_{ds} - 18$) การแ่่นตัวสม่ำเสมอตลอดแนวคัน สำหรับภาพที่ 145 (ก) ลักษณะการแ่่นตัว ของแบบจำลองหลัก 1 มิติ ขนาดช่องเปิดยาว 60 ซม. ลึก 18 ซม. ($R_{ds} - 18$) ชั้นส่วนบน และชั้นส่วนล่างมี ลักษณะค่าความชันของชั้นส่วนแตกต่างจากชั้นส่วนอื่นๆ เนื่องจากค่าความแข็งของหน้าตัดคันที่ ลดลง และสามารถสรุปพฤติกรรม การเปลี่ยนแปลงความลึกของช่องเปิดพฤติกรรมน้ำหนักบรรทุก การแ่่นตัว มีแนวโน้มเหมือนกับการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของช่องเปิดคือ เมื่อเปลี่ยนแปลง ความลึกของช่องเปิดค่าการแ่่นตัวจะเพิ่มมากขึ้นทั้งกรณีแบบจำลอง 3 มิติ และแบบจำลอง 1 มิติ ซึ่งหากเปลี่ยนแปลงค่าความลึกจาก 14 ซม. ถึง 26 ซม. ค่าการแ่่นตัวมีค่าไม่ต่างกันมากนักเท่ากับ 20.09 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังตารางที่ 26



(ก)



(ข)

ภาพที่ 145 ลักษณะการแอนตัว ของแบบจำลองหลัก 1 มิติ กรณีเปลี่ยนแปลงความลึก

(ก) ลักษณะการแอนตัว ของแบบจำลองหลัก 1 มิติ ขนาดช่องเปิดยาว 60 ซม.

ลึก 18 ซม. ($R_{ds} - 18$)

(ข) ลักษณะการแอนตัว ของแบบจำลอง 1 มิติ ขนาดช่องเปิดยาว 60 ซม.

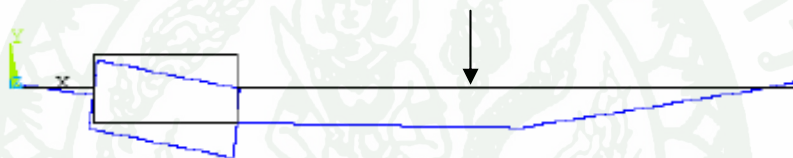
ลึก 26 ซม. ($R_{ds} - 26$)

ตารางที่ 26 เปรียบเทียบค่าการแอนตัวกรณีเปลี่ยนแปลงความลึกช่องเปิด

ความลึกช่อง เปิด (ซ.ม.)	น้ำหนัก บรรทุก (กก.)	ค่าการแอนตัว (ซ.ม.)		เปอร์เซ็นต์ (%)
		3 มิติ	1 มิติ	
R2-14	(2,145) ,700	-	0.01059	-
R2-18	(1,676) ,700	0.01346	0.01206	10.40
R2-22	(1,400) ,700	0.01534	0.01309	14.67
R2-26	(778) ,700	0.02022	0.01616	20.09

3. เปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวแบบจำลอง 1 มิติ และ 3 มิติ กรณีเปลี่ยนแปลงตำแหน่งช่องเปิด

การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของช่องเปิด ในแบบจำลอง 3 มิติ ทำให้ทราบพฤติกรรมการวิบัติของคานเนื่องจากการแตกหักของคอนกรีต ก่อนที่เหล็กเสริมจะถึงกำลังคราก ในกรณีตำแหน่งของช่องเปิดอยู่ใกล้หน้าหน้าบรทุก และจุดรองรับ แต่เมื่อช่องเปิดอยู่ตำแหน่งอื่นๆ พฤติกรรมการวิบัติยังคงมีความเหนียวเหมือนกรณีอื่นๆ และเมื่อพิจารณาพฤติกรรมแบบจำลอง 1 มิติ ขณะช่องเปิดอยู่ไกลจากอิทธิพลของหน้าหน้าบรทุกค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างย่อมมีผลน้อยสังเกตค่าความชันของชิ้นส่วนระหว่างมุมช่องเปิด และหน้าหน้าบรทุกมีค่าน้อยมาก ซึ่งคล้ายกับแบบจำลอง 3 มิติในกรณีที่อยู่ตำแหน่งเดียวกัน แสดงดังภาพที่ 146 และการเปลี่ยนตำแหน่ง กรณีต่างๆ สามารถพิจารณาได้จากภาพผนวกที่ ค ซึ่งจะมีลักษณะไม่ต่างจาก แบบจำลอง 3 มิติ มากนัก



ภาพที่ 146 หน้าหน้าบรทุก-การแอ่นตัว ของแบบจำลอง 1 มิติ การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 65 ซม. ($R_{ps} - 65$)

ซึ่งสามารถสรุปพฤติกรรมหน้าหน้าบรทุก-การแอ่นตัว กรณีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของช่องเปิด อิทธิพลของช่องเปิดจะมีมากขึ้นจากการเปลี่ยนตำแหน่ง เมื่อตำแหน่งของช่องเปิดเข้าใกล้หน้าหน้าบรทุกจะทำให้แบบจำลอง 3 มิติ มีค่าการแอ่นตัวเพิ่มขึ้น และแบบจำลอง 1 มิติ ซึ่งมีค่าการแอ่นตัวไม่ต่างกันมากนักเท่ากับ 16.37 เปอร์เซนต์ แสดงดังตารางที่ 27

ตารางที่ 27 เปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวกรณีเปลี่ยนแปลงตำแหน่งช่องเปิด

ความยาวช่อง เปิด (ซ.ม.)	น้ำหนัก บรรทุก (กก.)	ค่าการแอ่นตัว (ซ.ม.)		เปอร์เซ็นต์ (%)
		3 มิติ	1 มิติ	
R2-65	(1,785) ,700	0.01107	0.00926	16.37
R2-115	(1,676) ,700	0.01346	0.01206	10.40
R2-165	(1,575) ,700	0.01303	0.01156	11.30
R2-215	(1,715) ,700	0.01288	0.01136	11.82
R2-265	(892) ,700	0.01645	0.01295	21.30

เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ลดลงแบบจำลอง 3 มิติ

การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ลดลงเนื่องจากการเพิ่มช่องเปิดที่ยาวและลึกมากขึ้นซึ่งหากจะกล่าวแล้วคงต้องเกี่ยวเนื่องกับค่าอัตราส่วนความชะลุดของชิ้นส่วนบน ที่มีค่าความแข็งแรงลดน้อยลงทำให้สภาวะความมั่นคงลดน้อยลงเนื่องจากชิ้นส่วนบนจะมีพฤติกรรมการรับแรงอัดซึ่งแสดงดังตารางที่ 28 และ 29 กำหนดให้ค่า K หมายถึง ตัวประกอบความยาวประสิทธิผลของชิ้นส่วนรับแรงอัด มีค่าเท่ากับ 1 ทุกกรณี I หมายถึง ความยาวของชิ้นส่วนรับแรงอัด และ r หมายถึง รัศมีไจเรชัน (Radius of gyration) มีค่าเท่ากับ 0.3 ของความลึกของชิ้นส่วนรับแรงอัด แต่งานวิจัยนี้ไม่ได้ลงลึกในส่วนของการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชะลุดจึงไม่สามารถกล่าวอ้างเป็นทฤษฎีที่ชัดเจนได้

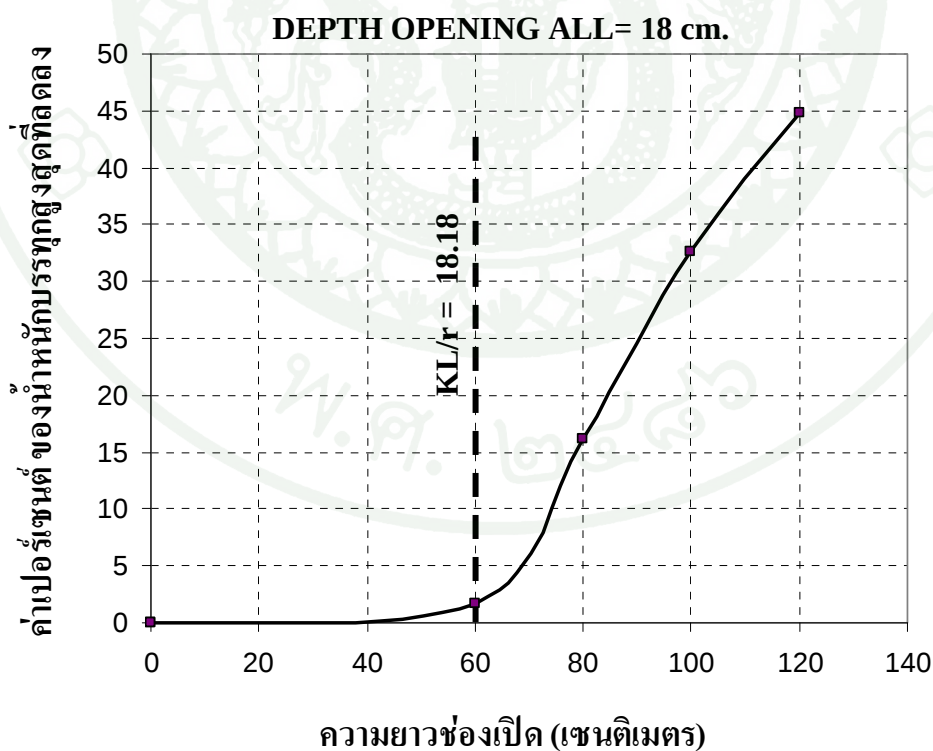
ตารางที่ 28 เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชะลุด กรณีเปลี่ยนแปลงความยาวช่องเปิด

ความยาวช่องเปิด (ซ.ม.)	น้ำหนักบรรทุกก่อนการแตกร้าว P_{cr} (กก.)	น้ำหนักบรรทุกสูงสุด P_{ul} (กก.)	$P_{ul} / R_f - No$	เปอร์เซ็นต์ (%)	$\frac{KL}{r}$
0	2,477	17,644	1.000	0.00	-
60	1,676	17,358	0.984	1.62	18.18
80	1,294	14,786	0.838	16.20	24.24
100	1,267	11,900	0.674	32.55	30.30
120	888	9,724	0.551	44.89	36.36

ตารางที่ 29 เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชะลุด กรณีเปลี่ยนแปลงความลึกช่องเปิด

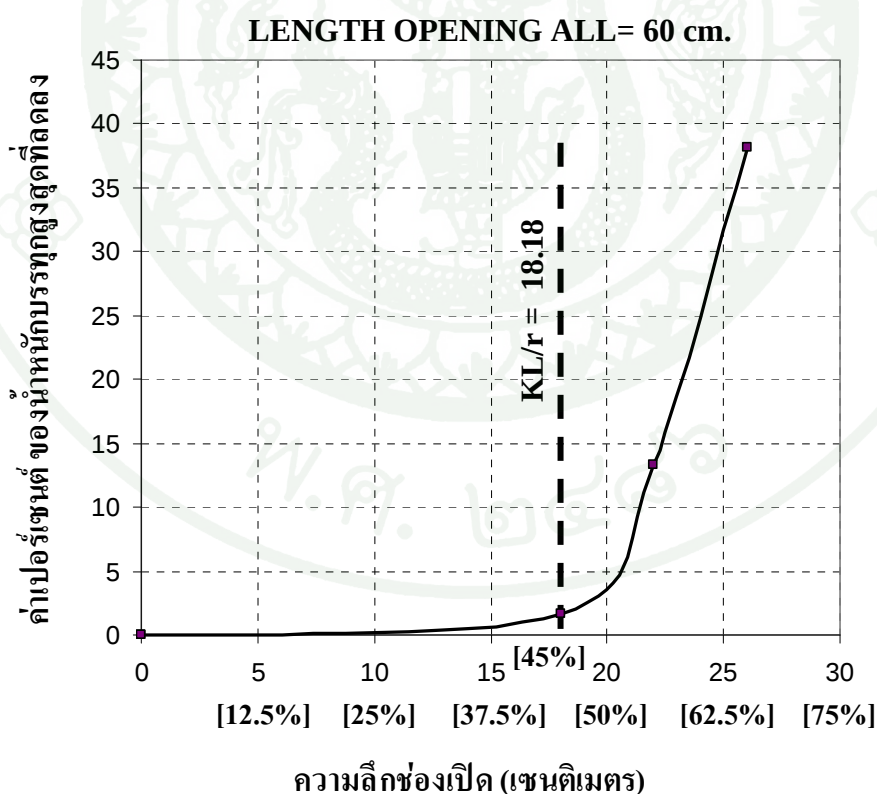
ความลึกช่องเปิด (ซ.ม.)	น้ำหนักบรรทุกก่อนการแตกร้าว P_{cr} (กก.)	น้ำหนักบรรทุกสูงสุด P_{ul} (กก.)	$P_{ul} / R_d - No$	เปอร์เซ็นต์ (%)	$\frac{KL}{r}$
0	2,477	17,644	1.000	0.00	-
18	1,676	17,358	0.984	1.62	18.18
22	1,400	15,286	0.866	13.36	22.22
26	778	10,914	0.619	38.14	28.57

ดังนั้นจากตารางที่ 28 และ 29 สามารถสรุปค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ลดลงได้ 2 กรณี ดังนี้ภาพที่ 147 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความยาว กรณีที่ 1 ได้กำหนดค่าความลึกของช่องเปิดคงที่มีค่า 18 ซม. และเพิ่มขนาดความยาวของช่องเปิดจาก Tan (1982) ได้เสนอให้พิจารณาเป็นกรณีของเสาที่ไม่พิจารณาผลของความชะลูด (Slenderness ratio) โดยมาตรฐาน ACI 318-99 กำหนดสัดส่วน $KL/r < 22$ กำหนดให้ค่า K หมายถึง ตัวประกอบความยาวประสิทธิผลของชิ้นส่วนรับแรงอัด มีค่าเท่ากับ 1 ทุกกรณี L หมายถึง ความยาวของชิ้นส่วนรับแรงอัด และ r หมายถึง รัศมีไจเรชัน (Radius of gyration) จากภาพที่ 147 ขนาดช่องเปิดที่ความยาว 60 ซม. ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดลดลงเท่ากับ 1.26 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าไม่ต่างมากนักเนื่องจากเกณฑ์ที่กำหนดสัดส่วนของค่าความชะลูด (Slenderness ratio) มีค่าเท่ากับ 18.18 ซึ่งใกล้เคียงกับเกณฑ์ของ Tan (1982) แต่หากเพิ่มขนาดความยาวของช่องเปิดเพิ่มมากขึ้นเป็นความยาว 80 ซม. ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดลดลงเท่ากับ 16.20 เปอร์เซ็นต์ และเพิ่มขึ้นมากขึ้นเรื่อยๆ ตามความยาวที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่ง ขนาดความยาวของช่องเปิดเพิ่มมากขึ้นเป็นความยาว 120 ซม. ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดลดลงเท่ากับ 44.89 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าเป็นอัตราส่วนการลดของน้ำหนักบรรทุกที่มาก และควรมีการออกแบบโครงสร้างเพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุกก่อนการใช้งาน



ภาพที่ 147 ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความยาว

กรณีที่ 2 แสดงดังภาพที่ 148 การเพิ่มความลึกช่องเปิดโดยกำหนดให้ความยาวของช่องเปิดคงที่เท่ากับ 60 ซม. จะพิจารณาที่ขนาดความลึกของช่องเปิดเท่ากับ 18 ซม. ซึ่งมีค่าประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ของหน้าตัด(ความลึกทั้งหมดเท่ากับ 40 ซม.) จากทฤษฎี Mansur and Tan (1989) ได้ศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ภายใต้ แรงบิด โมเมนต์ดัด และแรงเฉือน พบว่าหากคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดมีพฤติกรรมเป็นไปตามทฤษฎีของคาน และหากความลึกหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเปิดน้อยกว่าร้อยละ 40 ของความลึกคานจะกำหนดให้เป็นช่องเปิดขนาดเล็ก ดังนั้นที่ความลึก 18 ซม. มีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎีของ Mansur and Tan (1989) ทำให้ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดลดลงเท่ากับ 1.62 เปอร์เซ็นต์ และค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักบรรทุกสูงสุดลดลงจะลดลงมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งที่ขนาดความลึกของช่องเปิดมีค่า 26 ซม. ซึ่งมีค่าประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์ของหน้าตัด(ความลึกทั้งหมดเท่ากับ 40 ซม.) ทำให้ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดลดลงเท่ากับ 38.14 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่มากมีอัตราส่วนการลดของน้ำหนักบรรทุกที่มาก และควรมีการออกแบบโครงสร้างเพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุกก่อนการใช้งาน



ภาพที่ 148 ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความลึก

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมคานคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ และสามารถนำไปวิเคราะห์แบบจำลองที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ 1 มิติ อย่างง่ายการศึกษาได้ทำการวิเคราะห์คานที่มีช่องเปิด 3 มิติ ด้วยโปรแกรมเชิงพาณิชย์ ที่มีความสามารถในการวิเคราะห์โครงสร้างไร้เชิงเส้น การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ จะใช้เอลิเมนต์ Solid 65 และเหล็กเสริมใช้ Link 8 จากแบบจำลอง 3 มิติ สามารถจำลองคุณสมบัติการแตกร้าวได้ซึ่งมีความสำคัญในเชิงพฤติกรรมการวิบัติแบบต่างๆ และลำดับต่อไปเมื่อได้ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว สามารถนำไปวิเคราะห์การสร้างแบบจำลอง 1 มิติ ที่พิจารณาน้ำหนักบรรทุกก่อนการแตกร้าวได้

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองคานคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่สามารถวิเคราะห์สภาพที่เกิดขึ้นได้เสมือนจริงในลักษณะขั้นตอนการรับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เอลิเมนต์ของคอนกรีต และเหล็กเสริมได้รับอิทธิพลแรงดึง และแรงอัด ซึ่งเราสามารถวิเคราะห์ตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคาน ดึงในเหล็กเสริม และพฤติกรรมการแตกร้าว ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้สามารถบ่งบอกถึงสภาวะก่อน และขณะเกิดการวิบัติได้ว่า เกิดจากสาเหตุใด ซึ่งการศึกษาขอบเขตของขนาดช่องเปิดมีส่วนสำคัญจึงสามารถสรุปได้ 3 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 การเปลี่ยนแปลงความยาวของช่องเปิดจะกำหนดให้ความลึกของช่องเปิดคงที่เท่ากับ 18 ซม. เนื่องจากจะต้องรักษาความลึกให้ใกล้เคียงร้อยละ 40 ของความลึกคานจากทฤษฎี Mansur and Tan (1989) ดังนั้นพฤติกรรมความยาวของช่องเปิดจะส่งอิทธิพลทำให้ค่าน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว มีค่าแตกต่างกันจากการวิเคราะห์พบว่าหากเพิ่มความยาวของช่องเปิดมากขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักบรรทุกสูงสุดจะลดลงมากขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งขนาดความยาวของช่องเปิดเพิ่มมากขึ้นเป็นความยาว 120 ซม. ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดลดลงเท่ากับ 44.89 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าหากความยาวของช่องเปิดยังคงมีค่าความชะลูด (Slenderness ratio) ของชิ้นส่วนรับแรงอัด ไม่เกิน 22 ($Kl/r < 22$) จากทฤษฎีของ Tan (1982) ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักบรรทุกสูงสุดจะลดลงมีค่าไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์

กรณีที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความลึกของช่องเปิด จะกำหนดให้ความยาวของช่องเปิดคงที่เท่ากับ 60 ซม. เนื่องจากต้องรักษาค่าความชะลูด(Slenderness ratio) ของชิ้นส่วนรับแรงอัดไม่เกิน 22 ($Kl/r < 22$) จากทฤษฎีของ Tan (1982) ดังนั้นพฤติกรรมความลึกของช่องเปิดจะส่งอิทธิพลทำให้ค่าน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว มีค่าแตกต่างกันจากการวิเคราะห์พบว่าความลึกของช่องเปิดที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักบรรทุกสูงสุดลดลงจนกระทั่งขนาดความลึกของช่องเปิดเพิ่มมากขึ้นเป็นความลึก 26 ซม. หรือเทียบเท่า 65 เปอร์เซ็นต์ ของหน้าตัดคาน ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดลดลงเท่ากับ 38.14 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าหากความยาวของช่องเปิดยังคงมีค่าความชะลูด (Slenderness ratio) ของชิ้นส่วนรับแรงอัด ไม่เกิน 22 ($Kl/r < 22$) จากทฤษฎีของ Tan (1982) และค่าความลึกให้ใกล้เคียงร้อยละ 40 ของความลึกคานจากทฤษฎี Mansur and Tan (1989) ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักบรรทุกสูงสุดจะลดลงมีค่าไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์

กรณีที่ 3 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของช่องเปิดจะใช้ช่องเปิดขนาดยาว 60 ซม. ลึก 18 ซม. ซึ่งเป็นขนาดของแบบจำลองหลัก และค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักบรรทุกสูงสุดจะลดลงไม่มากนักมีค่าไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ จากการวิเคราะห์พบว่าหากตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดอยู่ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับจุดรองรับ ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดลดลง 52.02 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าตำแหน่งของช่องเปิดอยู่ห่างอิทธิพลของน้ำหนักบรรทุกค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักบรรทุกสูงสุดจะลดลงไม่มากนัก

การวิเคราะห์การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานแบบจำลอง 3 มิติ พบว่าอิทธิพลของช่องเปิดจะส่งผลกระทบต่อค่าการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานอันเนื่องมาจากพฤติกรรมของการส่งถ่ายแรงอัด แรงคด และแรงเฉือนระหว่างชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่าง หากหน้าตัดคานอยู่ห่างจากช่องเปิดพฤติกรรมการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานจะคล้ายคานหน้าตัดเต็ม อิทธิพลระหว่างชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่างของหน้าตัดบริเวณมุมช่องเปิดฝั่งใกล้น้ำหนักบรรทุกจะมีพฤติกรรมการอัดที่ด้านบน และแรงดึงที่ด้านล่าง กรณีชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่างฝั่งไกลน้ำหนักบรรทุกจะมีพฤติกรรมการอัดที่ด้านล่าง และแรงดึงที่ด้านบน การวิเคราะห์การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานแบบจำลอง 3 มิติ สามารถอธิบายพฤติกรรมการวิบัติของคานได้ โดยช่วงแรกความล้มพังการกระจายของหน่วยแรง (Stress distribution) บนหน้าตัดคานจะเป็นแบบเชิงเส้น และมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการยืดหดตัว เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มสูงขึ้นคอนกรีตจะเริ่มเกิดการแตกร้าว และผลึกภาระให้เหล็กเสริมรับแรงดึง พร้อมทั้งขยับแนวแกนสะเทินขึ้นเพื่อปรับสมดุลระหว่างแรงอัด และแรงดึง และเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจนถึงน้ำหนักบรรทุกประลัยค่าความเค้นของหน้าตัดคอนกรีตจะปรากฏชัดเจนว่าคานได้วิบัติเนื่องจากการแตกอัดของคอนกรีต

การวิเคราะห์แรงดึงในเหล็กเสริมของแบบจำลอง 3 มิติ พบว่าอิทธิพลของช่องเปิดขนาดใหญ่จะส่งผลกระทบต่อแรงดึงในเหล็กเสริมเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกถึงกำลังประลัย แรงดึงในเหล็กเสริมจะถึงกำลังครากทุกเส้น โดยเฉพาะบริเวณมุมช่องเปิดจะปรากฏทุกกรณีซึ่งเรียกว่าพฤติกรรมของความเหนียวของโครงสร้าง ยกเว้นกรณีที่ตำแหน่งของช่องเปิดอยู่ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับจุดรองรับ เหล็กเสริมจะไม่ถึงกำลังคราก คอนกรีตจะปรากฏการวิบัติก่อนเรียกว่าพฤติกรรมของการแตกเปราะ (Brittle failure) ของโครงสร้างคอนกรีต และการวิเคราะห์แรงดึงในเหล็กเสริมของแบบจำลอง 3 มิติ ยังช่วยอธิบายพฤติกรรมการแตกร้าวของคอนกรีตได้ เนื่องจากแรงดึงที่เพิ่มขึ้นของเหล็กเสริมจะเกิดจากการผลัดภาระของคอนกรีตที่ไม่สามารถรับแรงดึงได้

การวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกร้าวของแบบจำลอง 3 มิติ พบว่าอิทธิพลของการขยายช่องเปิดจะทำให้พฤติกรรมการแตกร้าวปรากฏมากรอบบริเวณช่องเปิด ยิ่งช่องเปิดขยายความยาว หรือความลึกมาก ทำให้ชิ้นส่วนบน และชิ้นส่วนล่าง ต้องรับภาระการส่งถ่ายความเค้นที่มากขึ้น รอยแตกร้าวครั้งแรกจะปรากฏบริเวณมุมบน ของช่องเปิดฝั่งใกล้น้ำหนักบรรทุก เป็นการแตกร้าว Flexural cracks เนื่องจากคอนกรีตจะต้องรับแรงดึงที่มาก เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกมากขึ้น รอยแตกร้าวจะปรากฏเพิ่มมากขึ้นทั้งบริเวณใต้น้ำหนักบรรทุก และรอบบริเวณช่องเปิดพร้อมปรากฏการแตกร้าว Diagonal tensile cracks ที่บริเวณจุดรองรับ เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกถึงกำลังประลัยจะปรากฏรอยแตกร้าว Compressive cracks ที่มีความสอดคล้องจากการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัด คานทำให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกร้าวต่างๆ พร้อมบ่งบอกพฤติกรรมการวิบัติได้

การวิเคราะห์การเปรียบเทียบการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ และแบบจำลอง 1 มิติ การสร้างแบบจำลอง 1 มิติ จะสามารถใช้เพื่อตรวจสอบค่าน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัว ในช่วงก่อนการแตกร้าวได้เท่านั้น ซึ่งจากความยาว ความลึกที่เพิ่มขึ้น และการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งให้ผลลัพธ์ในแนวโน้มเดียวกัน มีค่าการแอ่นตัวสูงสุดต่างกันประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ค่าความแข็งของแบบจำลอง 1 มิติ มีค่ามากกว่าแบบจำลอง 3 มิติ เนื่องจากลักษณะของการสร้างแบบจำลองที่แตกต่างกัน และค่าคุณสมบัติของคอนกรีต 1 มิติ ที่ไม่รองรับการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือน ซึ่งในกรณีที่ไมต้องการความถูกต้องมากนักแบบจำลอง 1 มิติ อาจใช้เพื่อประเมินกำลัง และวิเคราะห์พฤติกรรมเบื้องต้นได้

ข้อเสนอแนะ

การศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ได้อธิบายพฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ หากมีการเพิ่มขนาดของช่องเปิด จะส่งผลให้น้ำหนักบรรทุกของคานมีค่าลดน้อยลง และตำแหน่งของช่องเปิดที่อยู่ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับจุดรองรับ เป็นสาเหตุที่ทำให้คานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ลดน้อยลง ซึ่งเมื่อนำแบบจำลอง 3 มิติ มาเปรียบเทียบกับ แบบจำลอง 1 มิติ ที่ใช้น้ำหนักบรรทุกไม่เกินจุดการแตกร้าวครั้งแรก ทำให้พฤติกรรมคานน้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัวของแบบจำลอง 1 มิติ มีค่าใกล้เคียงแบบจำลอง 3 มิติ แต่ก็ยังไม่สามารถใช้แบบจำลอง 1 มิติ แทนแบบจำลอง 3 มิติ ได้สมบูรณ์มากนัก เนื่องจากพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะต้องมีการวิบัติของเหล็กเสริมและคอนกรีตร่วมกัน จึงจะสามารถหาน้ำหนักบรรทุกประลัยได้ ดังนั้นควรมีการพัฒนาการสร้างแบบจำลอง 1 มิติ ให้มีความสามารถใกล้เคียงแบบจำลอง 3 มิติ

พฤติกรรมของน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในงานวิจัยเป็นลักษณะแรงกระทำ 1 จุด ซึ่งกำหนดตำแหน่งคงที่ แต่จากการใช้งานทั่วไปคานคอนกรีตจะพบลักษณะของน้ำหนักบรรทุกแบบสม่ำเสมอ เนื่องจากการกระจายน้ำหนักบรรทุกจากแผ่นพื้นคอนกรีต ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาพฤติกรรมเพิ่มเติมเพื่อให้คานคอนกรีตที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่มีสภาวะขอบเขตที่เสมือนจริงมากที่สุด

พฤติกรรมการโก่งตัวกระดกที่เกิดบริเวณมุมช่องเปิดฝั่งไกลน้ำหนักบรรทุกจะเกิดเนื่องจากการเพิ่มความยาว และความลึกของช่องเปิดมากเกินไป จนทำให้โมเมนต์ทวนเข้ามาพิภพบริเวณมุมช่องเปิดมีค่าเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้คานเกิดการโก่งตัวกระดก ดังนั้นควรมีการพัฒนาพร้อมทั้งวิเคราะห์พฤติกรรมการโก่งตัวกระดกเพื่อชี้ประเด็นปัญหาให้ชัดเจนยิ่งขึ้น

ในการวิจัยขนาดของความยาว และความลึกของคานมีลักษณะคงที่ ทำให้ไม่สามารถทำนายพฤติกรรมนอกเหนือจากงานวิจัยได้ ดังนั้นควรมีการเพิ่มตัวแปรให้มากขึ้นเช่น ลักษณะความยาวของช่องเปิด และลักษณะความกว้างของช่องเปิด ที่มีผลกับขนาดของคานที่เปลี่ยนแปลง

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

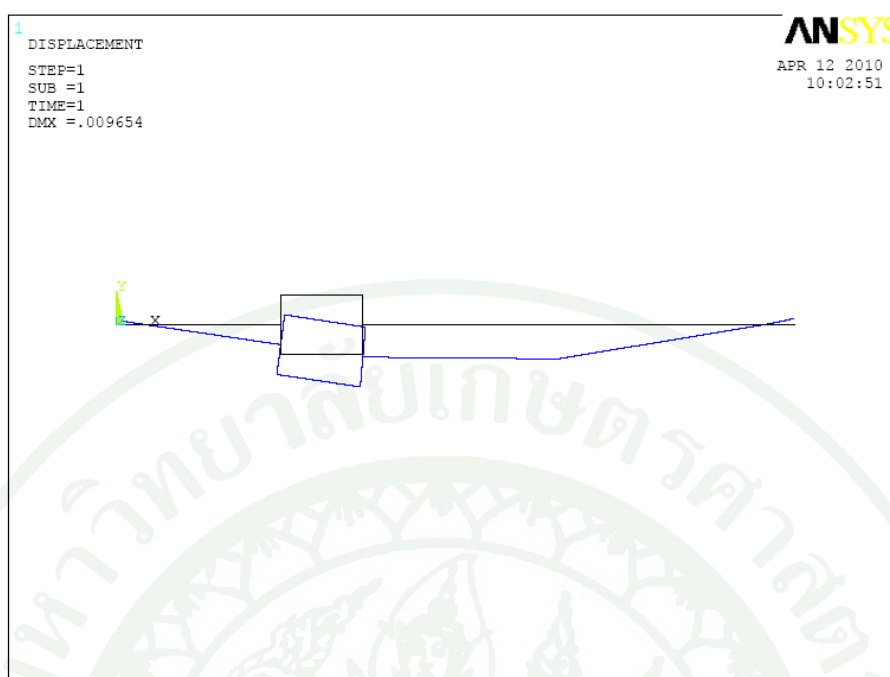
- ชยานนท์ หารรรณบุญ, ทวีป ชัยสมภพ, อภิวัฒน์ โอฬารัตนชัย. 2548. การศึกษาการแอ่นตัวเนื่องจากแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยกระบวนการวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- นนทวัฒน์ หุตางกูร. 2546. พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเสากลางแบ่งระหว่างช่องเปิด. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต, กรุงเทพมหานคร.
- ชั้นยธร อมตวีระกุล. 2551. พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดสนิมโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.
- วินิต ช่อวิเชียร. 2540. การออกแบบโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วสท. 2527. มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก. ม.ป.ท., กรุงเทพมหานคร.
- สถาพร โกคา. 2545. การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 2. ไลบรารี นาย, กรุงเทพฯ.
- สหชัย แก่นอากาศ, อิทธิพงศ์ พันธุ์นิกุล, วนิดา แก่นอากาศ. 2545. พฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิดขนาดเล็ก. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, อุบลราชธานี.
- ACI. 1995. **Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary-ACI318-95**. Detroit.
- Al-Kaisy D.I.A. 2005. **Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams with Large Opening under Flexure**. M.Sc. Thesis, University of Technology.

- Al-Shaarbaf I, A.S. 1990. **Three Dimensional Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beam in Torsion**. Ph.D. Thesis, University of Bradford.
- ANSYS, ANSYS User's Manual, 2003.
- Barney, G. B., W. G. Corley, J. M. Hanson and R. A. Parmelee. 1977. **Behavior and design of prestressed concrete beams with large web openings**. J. Prestressed Concrete Inst., 22(6): 32-61.
- Hanson, J. M. 1969. **Square openings in webs of continuous joists**. Research and Development Bulletin, RD 100.01D, Portland Cement Assoc, Stokie, 111.
- Lee, D.G., S.K. Ahn, J.K. Kim. 2005. Efficient seismic analysis of building structure including floor slab. **Engineering Structures** 27 (2005) 675–684.
- Maaddawy, T.E., K. Soudki, T. Topper. 2005. Analytical Model to Predict Nonlinear Flexural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams. **ACI Structural Journal**. 102 (4): 550-559.
- Mansur, M.A. 1998. Effect of openings on the behaviour and strength of R/C beams in shear. Cement and Concrete Composites. **Elsevier Science Ltd**. 20 (6): 477-486.
- Mansur, M.A. and A. Hasnat. 1979. Concrete beams with small openings under torsion. **Journal of the Structural Division, ASCE**, 106 (ST11, Nov.): 2433-2447.
- Mansur, M.A. and K.H. Tan. 1999. **Concrete Beams with Openings, Analysis and Design**. CRC Press LLC, United States of America.
- Mansur, M.A. and Tan, K.H. 1989. **Strength of R/C beams with large openings under combined torsion, bending and shear**. **Proceedings of the International Conference on Highrise Buildings**. 25-27 Mar., Nanjing, China, pp. 380-385.

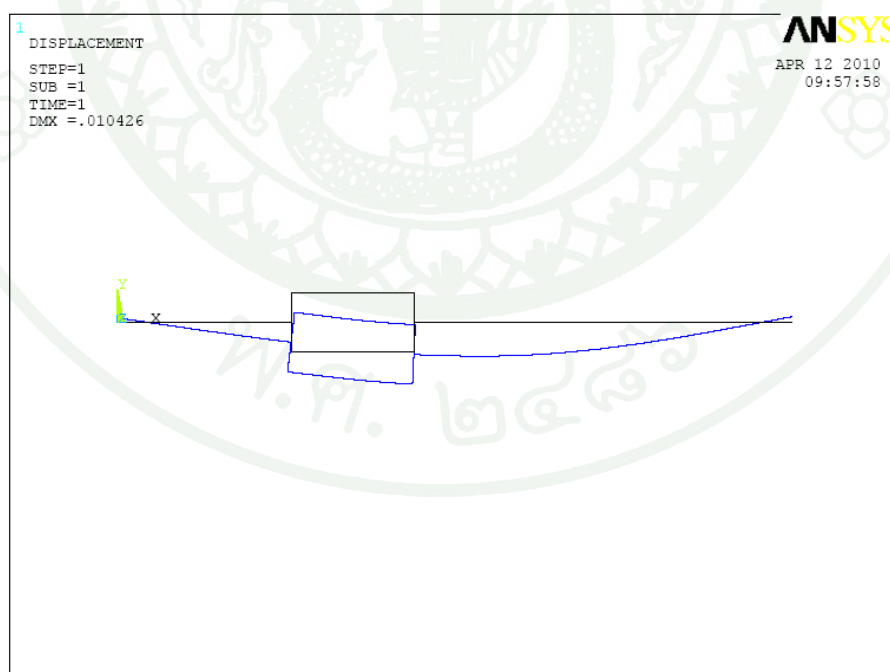
- Ngo, D. and A.C. Scordelis. 1967. Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams. **ACI Structural Journal** 64 (3): 152-163.
- Prentzas, E.G. 1968. **Behaviour and reinforcement of concrete beams with large rectangular apertures.** Ph.D. Thesis, University of Sheffield,U.K
- Phuvoravan, K. and E.D. Sotelino. 2005. Nonlinear Finite Element for Reinforced Concrete Slabs. **Journal of structural engineering ASCE.** 131 (4): 643-649.
- Somes, N.F. and W.G. Corley. 1974. **Circular openings in webs of continuous beams. Shear in Reinforced Concrete.** Special Publication SP-42, American Concrete Institute, Detroit.
- Wolanski, A.J. 2004. **Flexural Behavior of Reinforced and Prestressed Concrete Beams Using Finite Element Analysis.** M.S. Thesis, Marquette University.



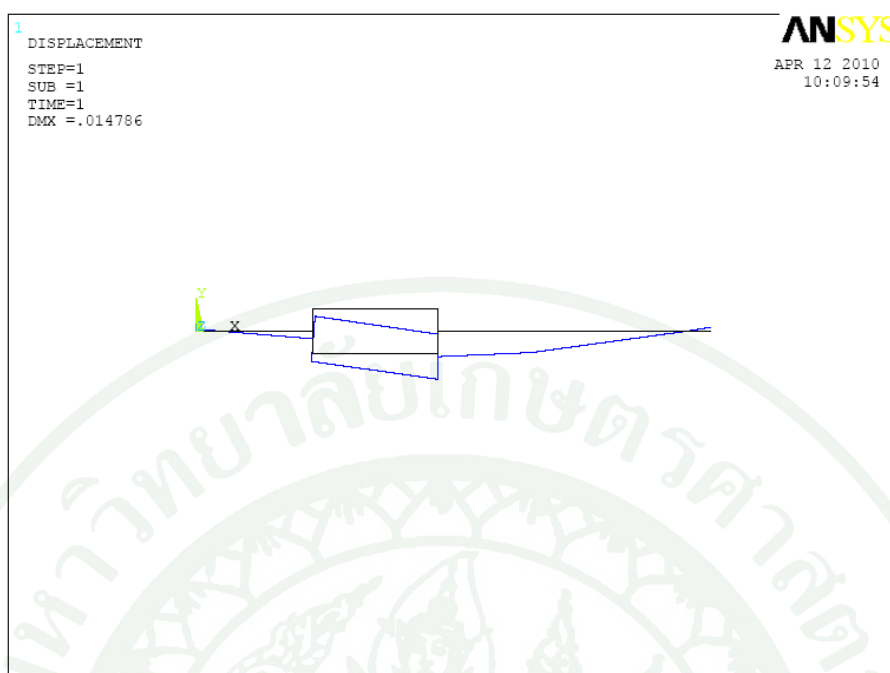




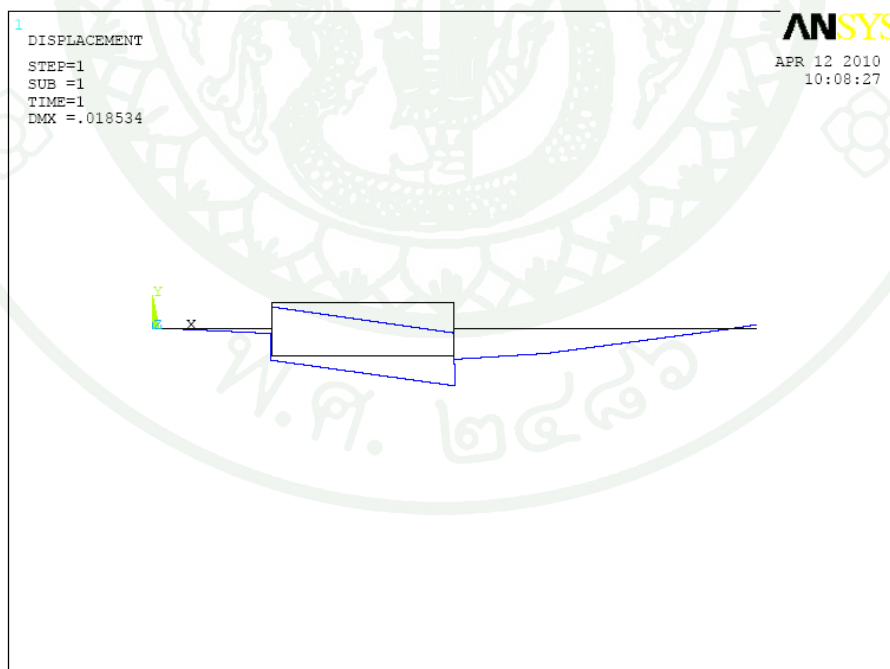
ภาพผนวกที่ ก1 ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลอง 1 มิติ ขนาดช่องเปิดยาว 40 ซม.
ลึก 18 ซม. ($R_{ls} - 40$)



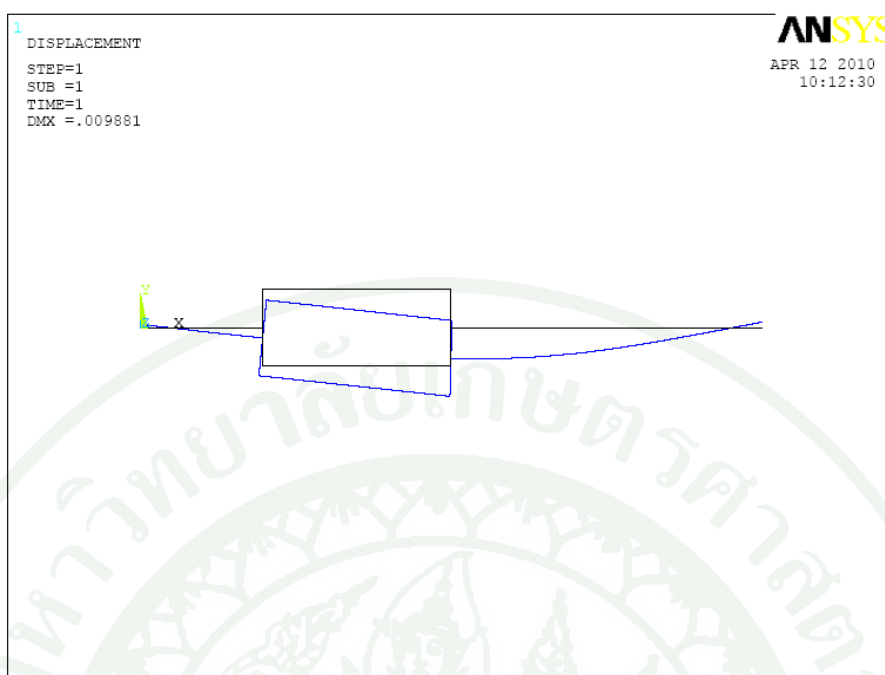
ภาพผนวกที่ ก2 ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลองหลัก 1 มิติ ขนาดช่องเปิดยาว 60 ซม.
ลึก 18 ซม. ($R_{ls} - 60$, $R_{ds} - 18$ และ $R_{ps} - 10$)



ภาพผนวกที่ ก3 ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลอง 1 มิติ ขนาดช่องเปิดยาว 80 ซม.
ลึก 18 ซม. ($R_s - 80$)



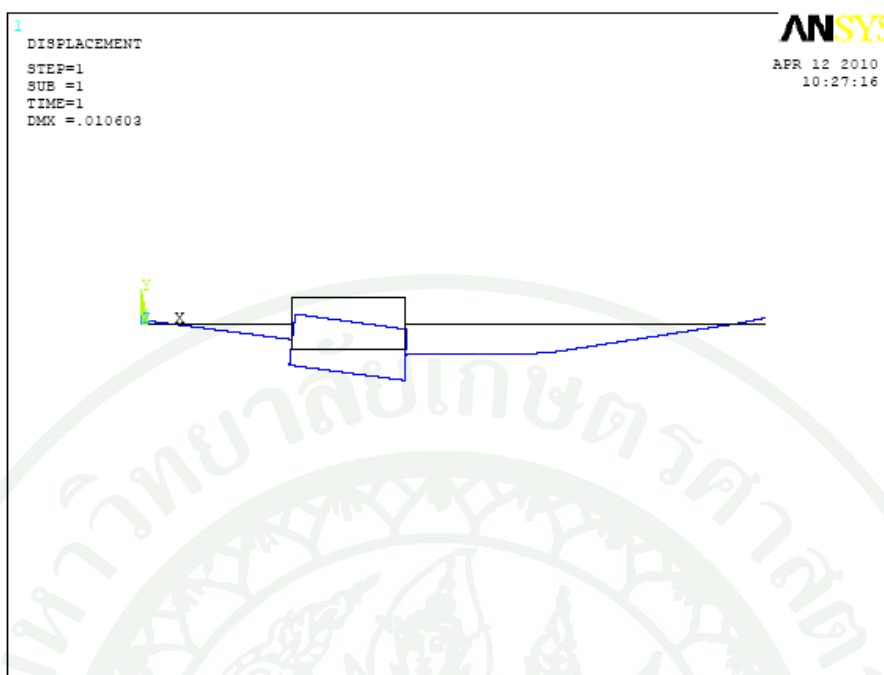
ภาพผนวกที่ ก4 ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลอง 1 มิติ ขนาดช่องเปิดยาว 100 ซม.
ลึก 18 ซม. ($R_s - 100$)



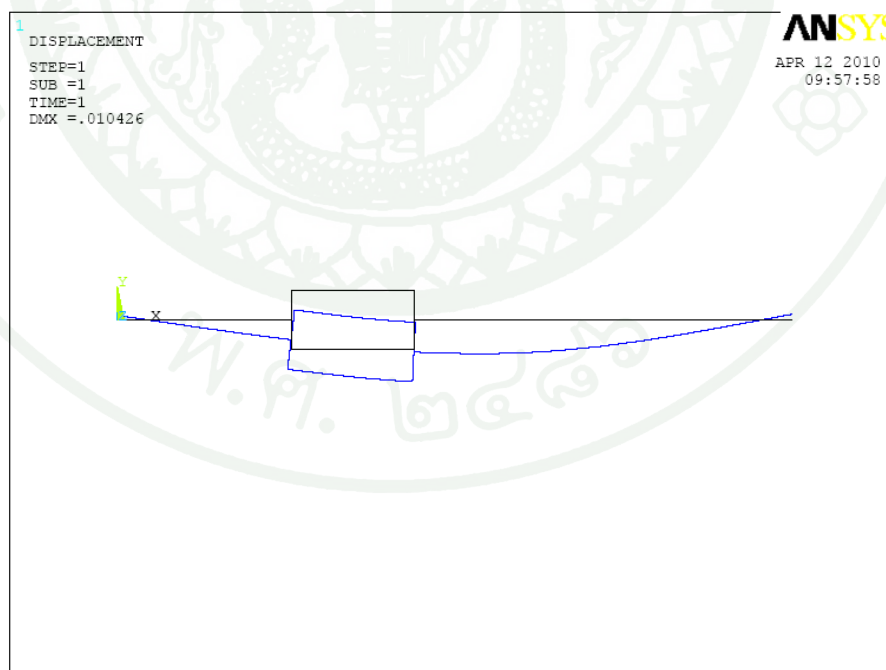
ภาพผนวกที่ ก5 ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลอง 1 มิติ ขนาดช่องเปิดยาว 120 ซม.

ลึก 18 ซม. ($R_s - 120$)

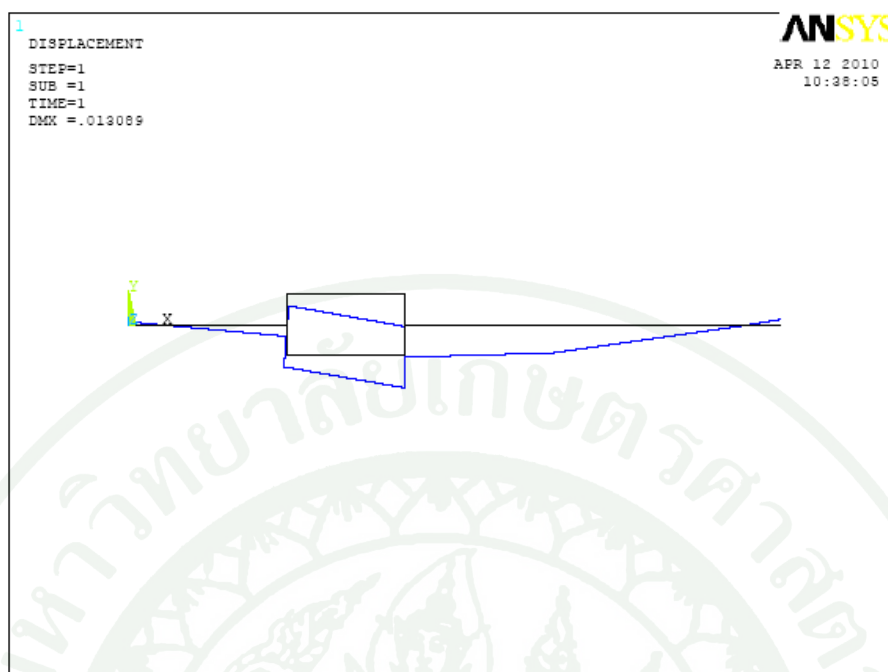




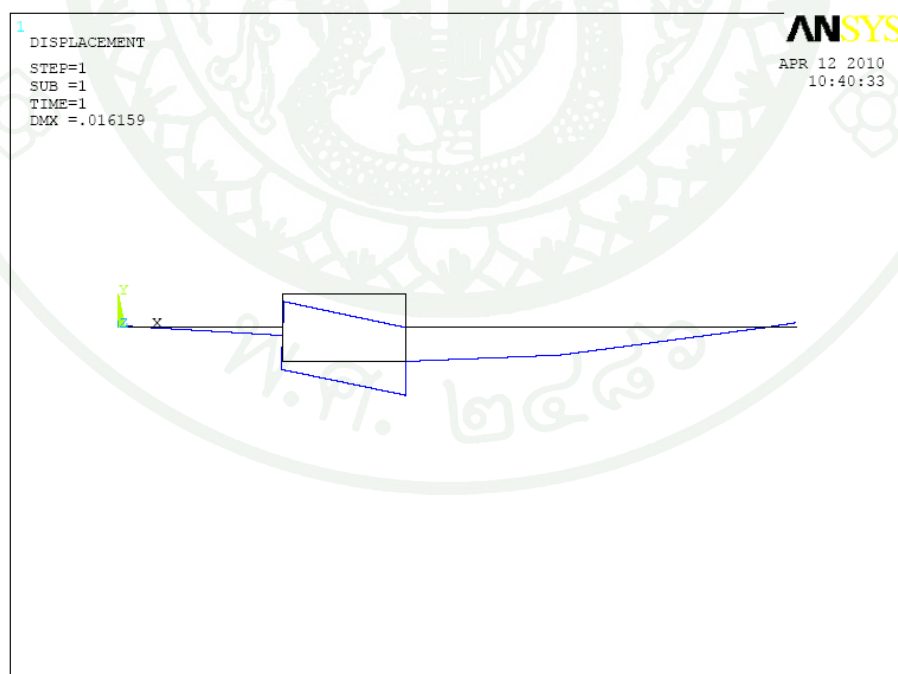
ภาพผนวกที่ ข1 ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลอง 1 มิติ ขนาดช่องเปิดยาว 60 ซม.
ลึก 14 ซม. ($R_{ds} - 14$)



ภาพผนวกที่ ข2 ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลองหลัก 1 มิติ ขนาดช่องเปิดยาว 60 ซม.
ลึก 18 ซม. ($R_{ds} - 18$)



ภาพผนวกที่ ข3 ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลอง 1 มิติ ขนาดช่องเปิดยาว 60 ซม.
ลึก 22 ซม. ($R_{ds} - 22$)

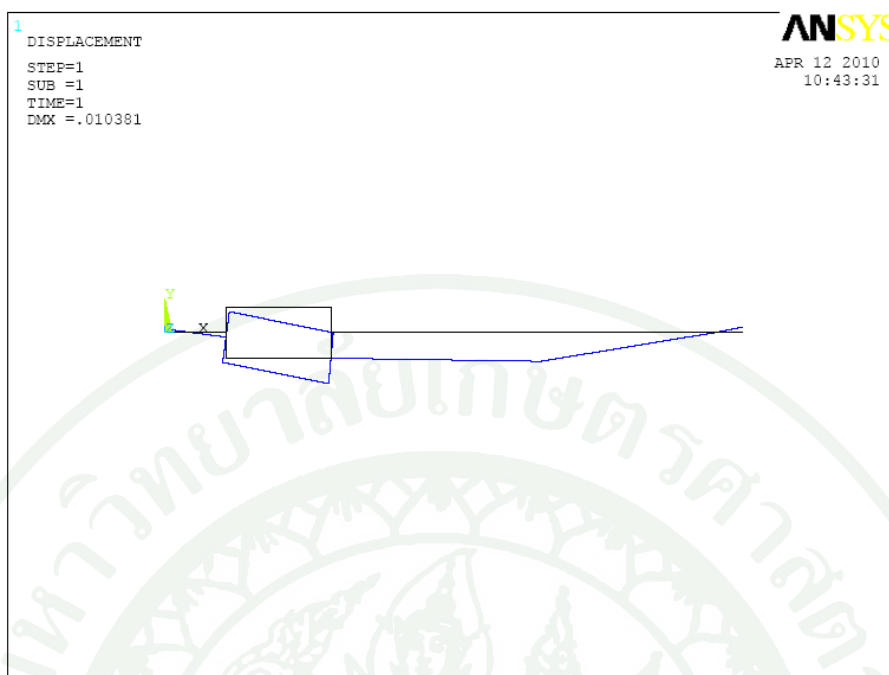


ภาพผนวกที่ ข4 ลักษณะการแอ่นตัว ของแบบจำลอง 1 มิติ ขนาดช่องเปิดยาว 60 ซม.
ลึก 26 ซม. ($R_{ds} - 26$)

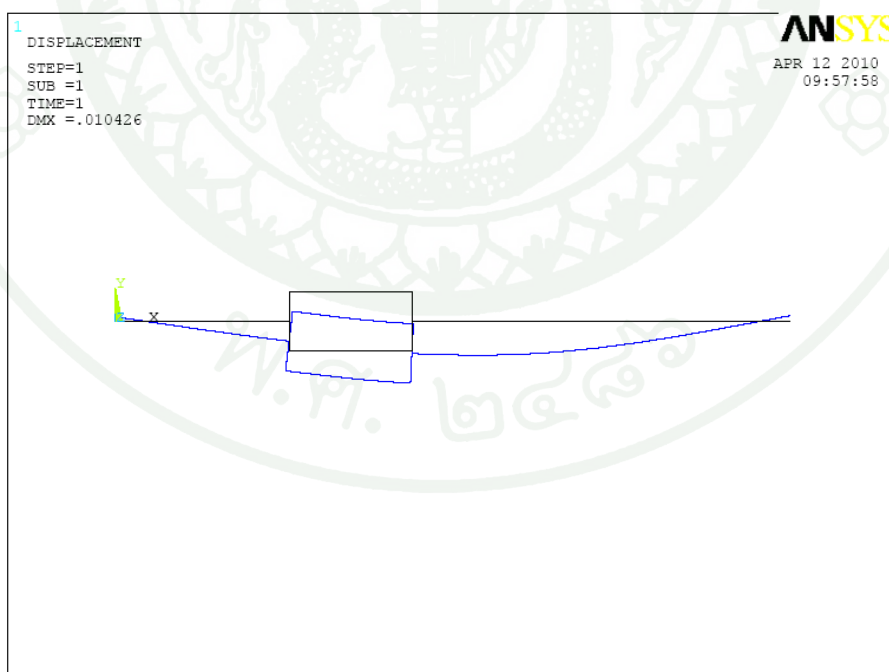


ภาคผนวก ค

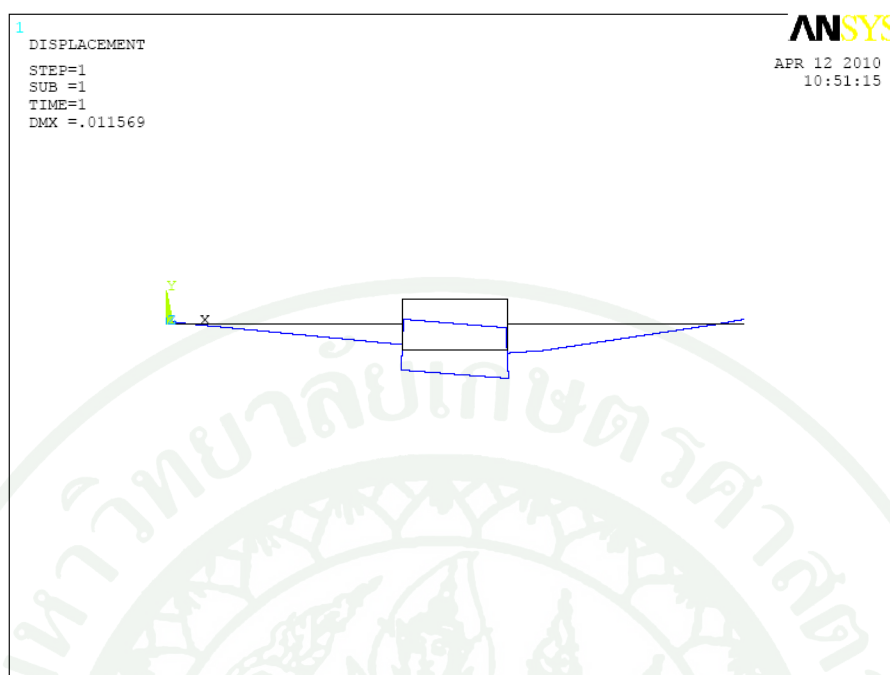
ลักษณะน้ำนักบรรทุก-การแอ่นตัวแบบจำลอง 1 มิติ กรณีที่ 3



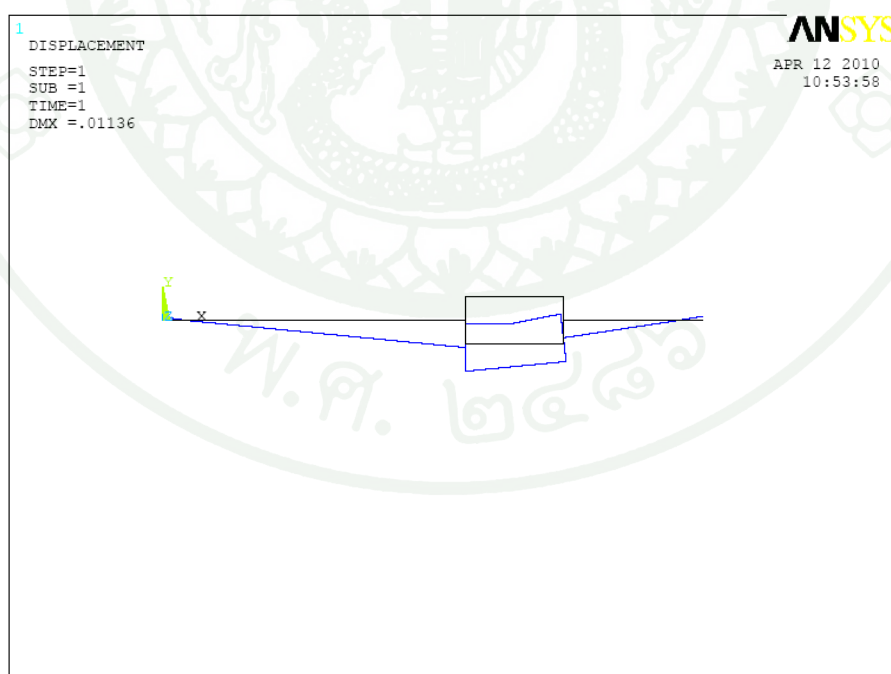
ภาพผนวกที่ ค1 น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัวของแบบจำลอง 1 มิติ การเปลี่ยนแปลง
ตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 65 ซม. ($R_{ps} - 65$)



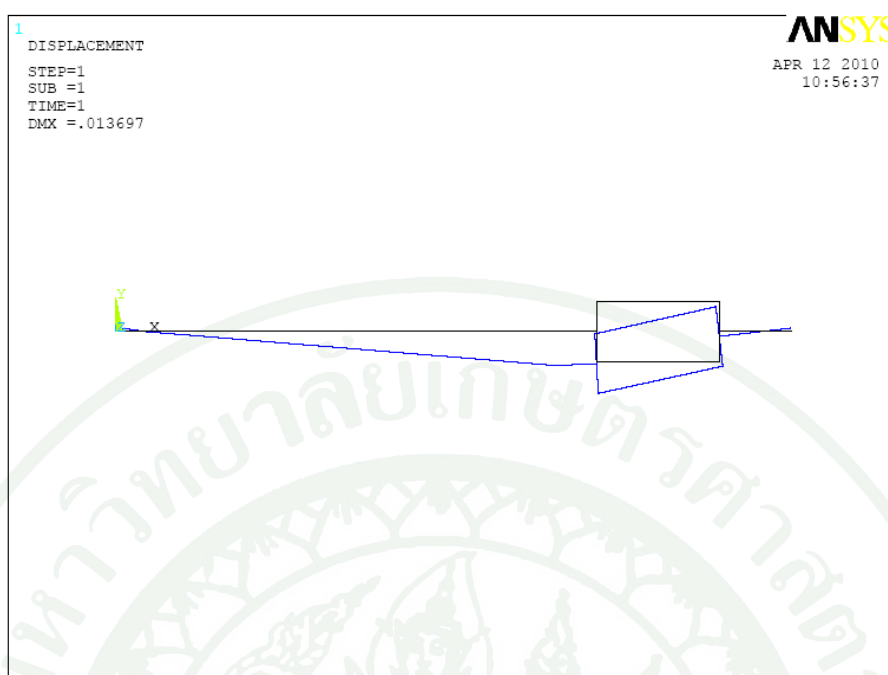
ภาพผนวกที่ ค2 น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัวของแบบจำลองหลัก 1 มิติ การเปลี่ยนแปลง
ตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 115 ซม. ($R_{ps} - 115$)



ภาพผนวกที่ ค3 น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัวของแบบจำลอง 1 มิติ การเปลี่ยนแปลง
ตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 165 ซม. ($R_{ps} - 165$)



ภาพผนวกที่ ค4 น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัวของแบบจำลอง 1 มิติ การเปลี่ยนแปลง
ตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 215 ซม. ($R_{ps} - 215$)



ภาพผนวกที่ ค5 น้ำหนักบรรทุก-การแอ่นตัวของแบบจำลอง 1 มิติ การเปลี่ยนแปลง
ตำแหน่งศูนย์กลางของช่องเปิดห่างจากขอบคานเป็นระยะ 265 ซม. ($R_{ps} - 265$)



ภาคผนวก ง

ขนาดน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น สำหรับแบบจำลองหลัก 3 มิติ
ขนาดช่องเปิดยาว 60 ซม. ลึก 18 ซม.

(R_l - 60, R_d - 18 และ R_p - 10)

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	700	1	1	3
2	1330	2	1	17
3	1503.2	2	2	25
4	1676.5	2	3	33
5	1746.5	2	4	68
6	1816.5	2	5	71
7	1921.5	2	6	78
8	2026.5	2	7	82
9	2096.5	2	8	100
10	2100	2	9	102
11	2227.6	3	1	153
12	2355.1	3	2	157
13	2425.1	3	3	175
14	2495.1	3	4	202
15	2565.1	3	5	227
16	2635.1	3	6	234
17	2705.1	3	7	268
18	2775.1	3	8	287
19	2845.1	3	9	307
20	2915.1	3	10	327
21	2985.1	3	11	339
22	3055.1	3	12	355
23	3125.1	3	13	360
24	3195.1	3	14	384
25	3265.1	3	15	401
26	3335.1	3	16	420
27	3405.1	3	17	425
28	3475.1	3	18	442
29	3500	3	19	451
30	4130	4	1	482
31	4200	4	2	510
32	4270	4	3	524
33	4340	4	4	529
34	4410	4	5	538
35	4480	4	6	547
36	4550	4	7	550
37	4620	4	8	567
38	4690	4	9	572
39	4760	4	10	601
40	4830	4	11	626
41	4900	4	12	634
42	5530	5	1	672
43	5703.2	5	2	682
44	5749.9	5	3	709
45	5796.6	5	4	716
46	5866.6	5	5	720
47	5971.6	5	6	728
48	6018.3	5	7	755
49	6064.9	5	8	761

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
50	6111.6	5	9	771
51	6158.3	5	10	783
52	6204.9	5	11	785
53	6251.6	5	12	810
54	6298.3	5	13	821
55	6300	5	14	822
56	8400	6	1	847
57	8527.6	7	1	870
58	8655.2	7	2	879
59	8782.7	7	3	885
60	8829.4	7	4	906
61	8876.1	7	5	910
62	8922.7	7	6	933
63	8969.4	7	7	936
64	9039.4	7	8	939
65	9086.1	7	9	970
66	9132.7	7	10	974
67	9202.7	7	11	979
68	9307.7	7	12	982
69	9354.4	7	13	1027
70	9401.1	7	14	1031
71	9471.1	7	15	1039
72	9541.1	7	16	1041
73	9646.1	7	17	1048
74	9751.1	7	18	1052
75	9800	7	19	1056
76	10430	8	1	1080
77	10603	8	2	1096
78	10776	8	3	1105
79	10854	8	4	1113
80	10901	8	5	1127
81	10948	8	6	1136
82	10994	8	7	1148
83	11041	8	8	1150
84	11111	8	9	1154
85	11156	8	10	1158
86	11200	8	11	1160
87	11484	9	1	1183
88	11611	9	2	1204
89	11668	9	3	1212
90	11696	9	4	1237
91	11724	9	5	1243
92	11752	9	6	1255
93	11780	9	7	1260
94	11822	9	8	1262
95	11885	9	9	1265
96	11980	9	10	1270
97	12074	9	11	1275
98	12216	9	12	1281

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
99	12312	9	13	1294
100	12355	9	14	1303
101	12383	9	15	1312
102	12411	9	16	1322
103	12439	9	17	1325
104	12481	9	18	1329
105	12509	9	19	1335
106	12537	9	20	1337
107	12568	9	21	1341
108	12600	9	22	1343
109	12728	10	1	1391
110	12855	10	2	1394
111	13047	10	3	1401
112	13238	10	4	1409
113	13266	10	5	1424
114	13294	10	6	1426
115	13336	10	7	1433
116	13378	10	8	1435
117	13441	10	9	1437
118	13535	10	10	1440
119	13677	10	11	1450
120	13819	10	12	1455
121	14000	10	13	1464
122	14284	11	1	1498
123	14341	11	2	1524
124	14361	11	3	1551
125	14381	11	4	1552
126	14411	11	5	1556
127	14441	11	6	1558
128	14486	11	7	1562
129	14531	11	8	1564
130	14561	11	9	1570
131	14581	11	10	1576
132	14601	11	11	1580
133	14621	11	12	1582
134	14651	11	13	1584
135	14696	11	14	1587
136	14764	11	15	1590
137	14865	11	16	1594
138	15017	11	17	1598
139	15245	11	18	1603
140	15400	11	19	1611
141	15684	12	1	1647
142	15741	12	2	1669
143	15761	12	3	1676
144	15781	12	4	1679
145	15811	12	5	1684
146	15831	12	6	1691
147	15851	12	7	1698

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
148	15871	12	8	1701
149	15901	12	9	1704
150	15946	12	10	1709
151	15991	12	11	1712
152	16058	12	12	1716
153	16160	12	13	1724
154	16205	12	14	1741
155	16251	12	15	1747
156	16319	12	16	1754
157	16422	12	17	1769
158	16524	12	18	1781
159	16570	12	19	1797
160	16590	12	20	1818
161	16610	12	21	1836
162	16630	12	22	1843
163	16650	12	23	1854
164	16670	12	24	1866
165	16690	12	25	1867
166	16710	12	26	1872
167	16730	12	27	1886
168	16750	12	28	1897
169	16770	12	29	1898
170	16800	12	30	1908
171	16928	13	1	1964
172	16948	13	2	1981
173	16968	13	3	2007
174	16988	13	4	2016
175	17008	13	5	2025
176	17028	13	6	2034
177	17048	13	7	2045
178	17068	13	8	2054
179	17088	13	9	2059
180	17118	13	10	2068
181	17138	13	11	2089
182	17158	13	12	2095
183	17178	13	13	2106
184	17198	13	14	2107
185	17218	13	15	2165
186	17238	13	16	2182
187	17258	13	17	2231
188	17278	13	18	2270
189	17298	13	19	2370
190	17318	13	20	2382
191	17338	13	21	2431
192	17358	13	22	2504
193	18200	13	99999	2604

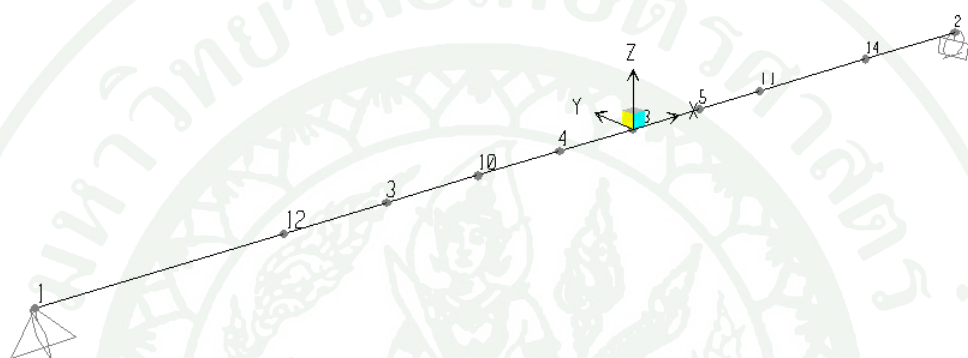


ภาคผนวก จ
การสอบเทียบการโก่งตัวกระดกของแบบจำลอง 3 มิติ

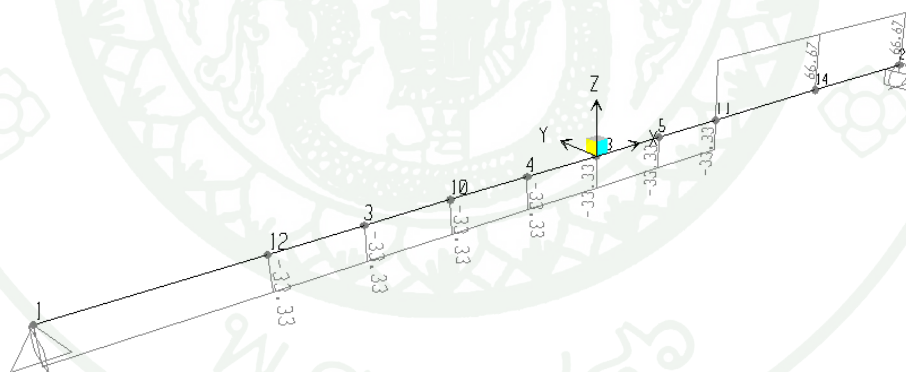
การทดสอบคานจะเริ่มจากการสร้างแบบจำลองอย่างง่ายเพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมการโก่งตัวของคานซึ่งจะแบ่งขั้นตอนการวิเคราะห์เป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

1. ค่าการแอ่นตัวของคานปกติเมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำ

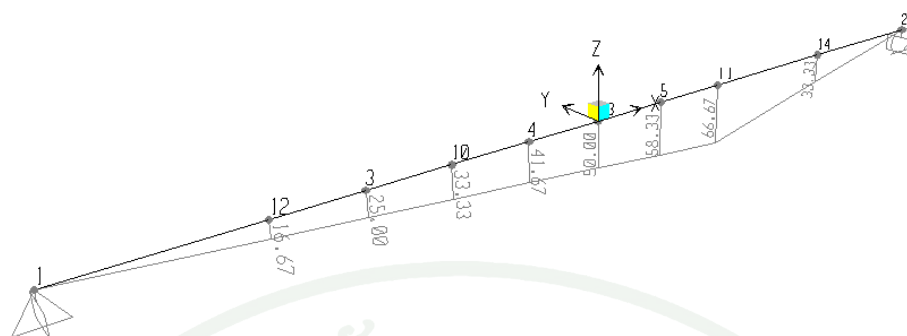
พฤติกรรมค่าแรงเฉือน โมเมนต์คัต และการแอ่นตัวเมื่อน้ำหนักกระทำจะมีพฤติกรรมเหมือนคานปกติ



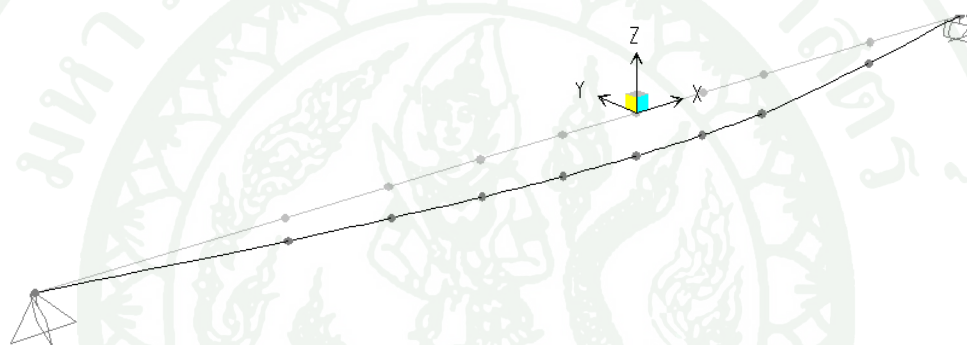
ภาพผนวกที่ จ1 แบบจำลองคานปกติเมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำ



ภาพผนวกที่ จ2 แรงเฉือนแบบจำลองคานปกติเมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำ



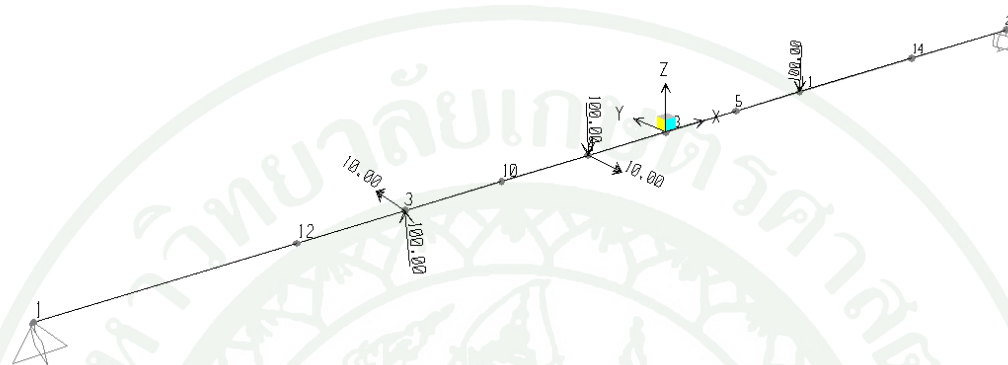
ภาพผนวกที่ จ3 โมเมนต์ดัดแบบจำลองคานปกติเมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำ



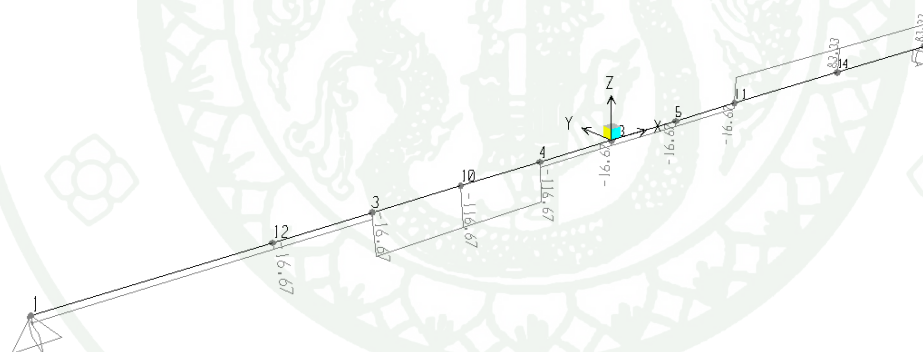
ภาพผนวกที่ จ4 แรงเฉือนแบบจำลองคานปกติเมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำ

2. เพิ่มแรงเฉือน 100 กิโลกรัม และค่าโมเมนต์ 10 กิโลกรัม-เมตร บริเวณตำแหน่งช่องเปิด

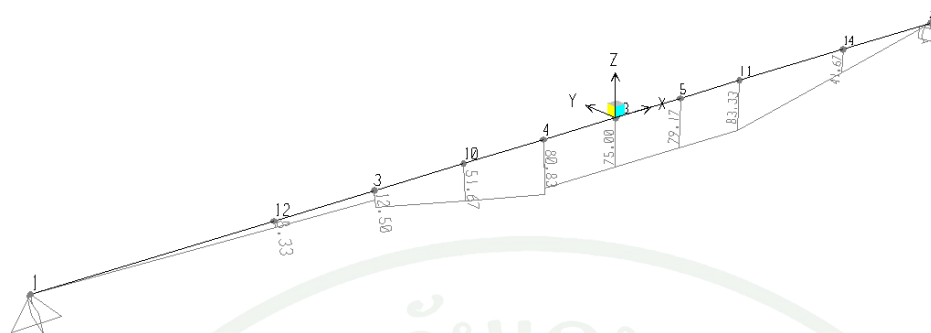
การเพิ่มขนาดน้ำหนักบรรทุก และ โมเมนต์คัตจะเป็นการใส่แรงสมดุลเข้าไปซึ่งจะไม่มีผลต่อคานแต่จะมีอิทธิพลไปสู่จตุรกรับ



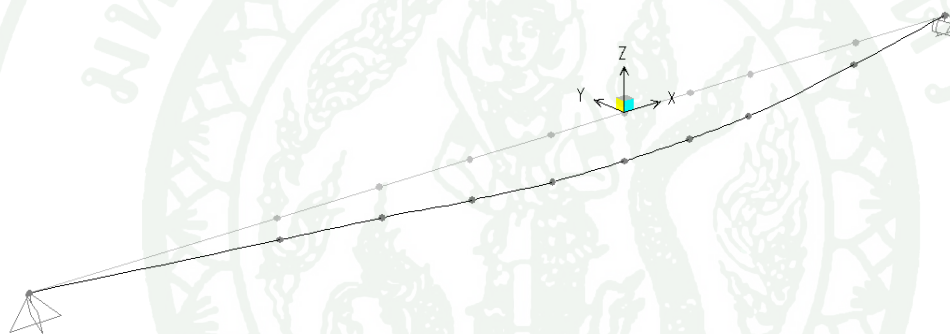
ภาพผนวกที่ จ5 แบบจำลองคานเพิ่มแรงเฉือน 100 กิโลกรัม และค่าโมเมนต์ 10 กิโลกรัม-เมตร บริเวณตำแหน่งช่องเปิด



ภาพผนวกที่ จ6 แรงเฉือนแบบจำลองคานเพิ่มแรงเฉือน 100 กิโลกรัม และค่าโมเมนต์ 10 กิโลกรัม-เมตร บริเวณตำแหน่งช่องเปิด

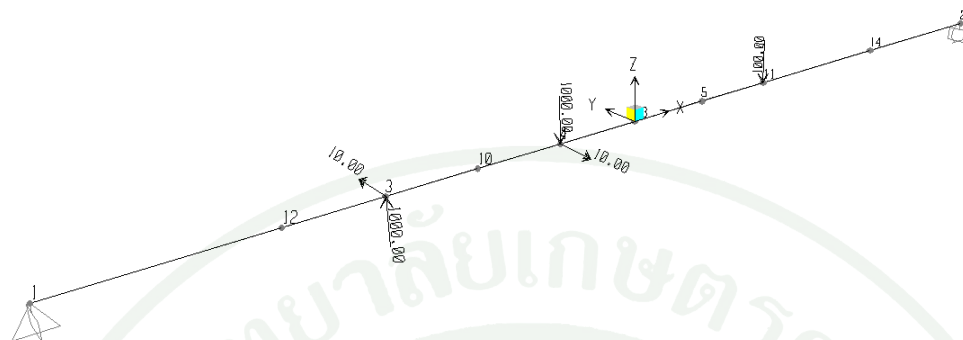


ภาพผนวกที่ จ7 โมเมนต์แบบจำลองคานเพิ่มแรงเฉือน 100 กิโลกรัม และค่าโมเมนต์ 10 กิโลกรัม-เมตร บริเวณตำแหน่งช่องเปิด

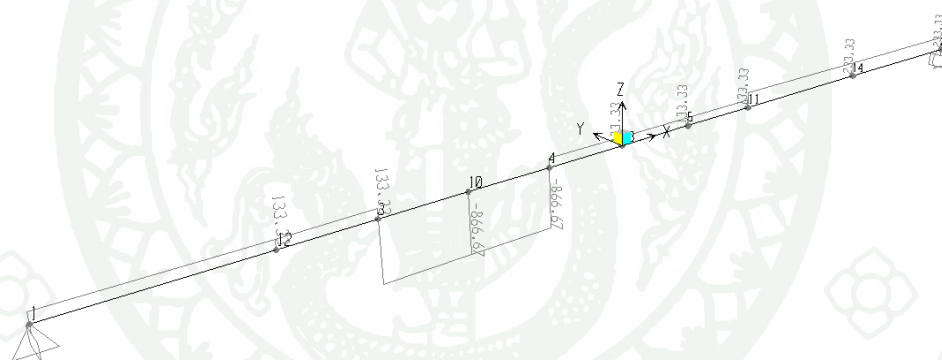


ภาพผนวกที่ จ8 การแอ่นตัวแบบจำลองคานเพิ่มแรงเฉือน 100 กิโลกรัม และค่าโมเมนต์ 10 กิโลกรัม-เมตร บริเวณตำแหน่งช่องเปิด

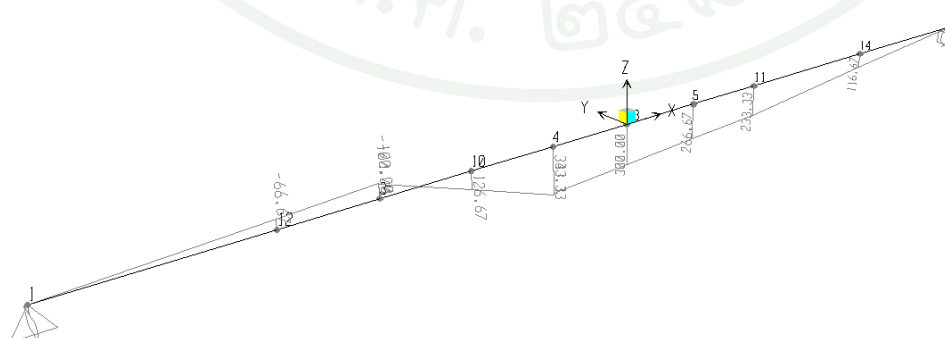
3. เพิ่มแรงเฉือน 1000 กิโลกรัม และค่าโมเมนต์ 10 กิโลกรัม บริเวณตำแหน่งช่องเปิด



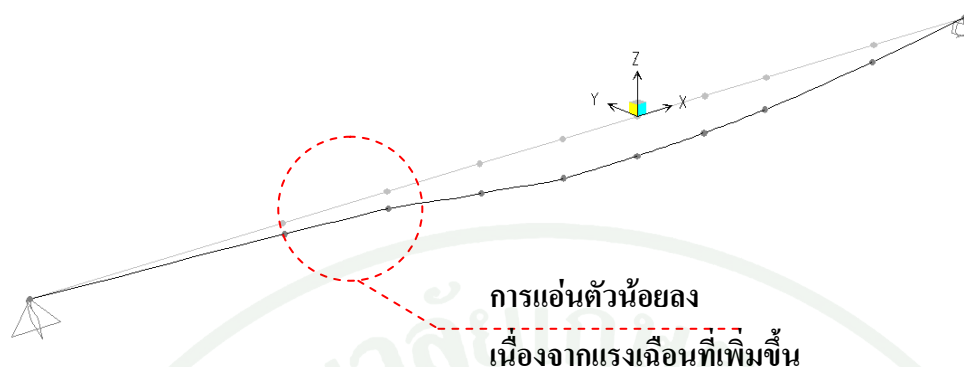
ภาพผนวกที่ จ9 แบบจำลองคานเพิ่มแรงเฉือน 1000 กิโลกรัม และค่าโมเมนต์
10 กิโลกรัม-เมตร บริเวณตำแหน่งช่องเปิด



ภาพผนวกที่ จ10 แรงเฉือนแบบจำลองคานเพิ่มแรงเฉือน 1000 กิโลกรัม และค่าโมเมนต์
10 กิโลกรัม-เมตร บริเวณตำแหน่งช่องเปิด

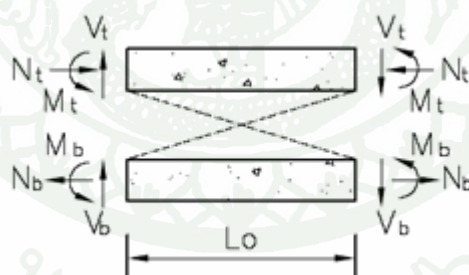


ภาพผนวกที่ จ11 โมเมนต์คัตแบบจำลองคานเพิ่มแรงเฉือน 1000 กิโลกรัม และค่าโมเมนต์
10 กิโลกรัม-เมตร บริเวณตำแหน่งช่องเปิด



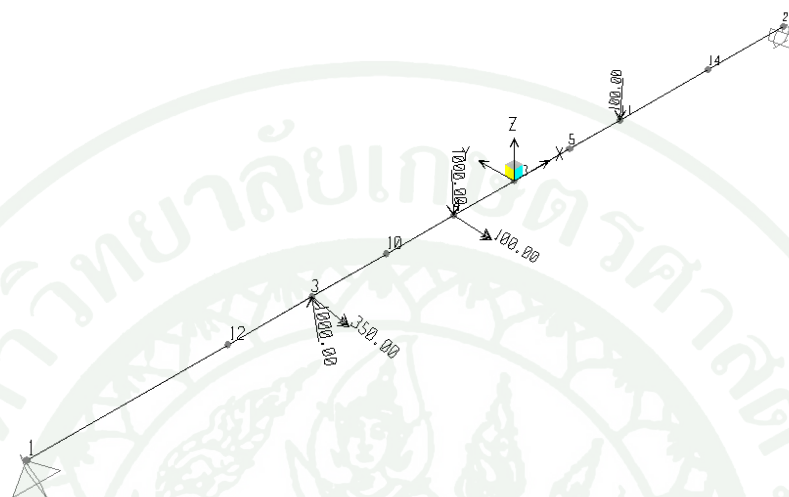
ภาพผนวกที่ จ12 การแอ่นตัวแบบจำลองคานเพิ่มแรงเฉือน 1000 กิโลกรัม และค่าโมเมนต์ 10 กิโลกรัมบริเวณตำแหน่งช่องเปิด

ซึ่งทำการเพิ่มแรงเฉือนมากเพียงใดก็ไม่สามารถทำให้คานโค้งตัวกระดกได้จึงต้องอ้างอิงกับตามทฤษฎีที่ กำลังประลัยของคานได้(Mansur et al., 1984) ดังภาพผนวกที่ จ13 จะปรากฏโมเมนต์ตามเข็มนาฬิกาทั้งสองด้านของชิ้นส่วนดังนั้นจึงทำการใส่น้ำหนักบรรทุกทุกตามทฤษฎีดังกล่าว

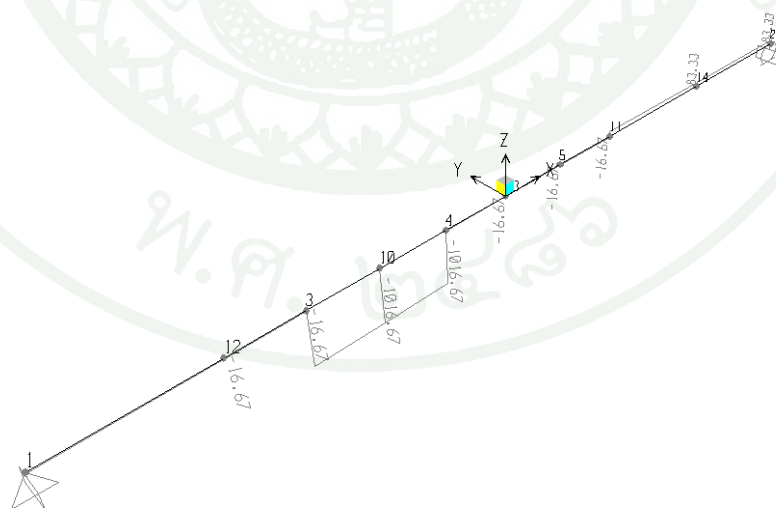


ภาพผนวกที่ จ13 แรงภายในที่เกิดขึ้นของคานที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่

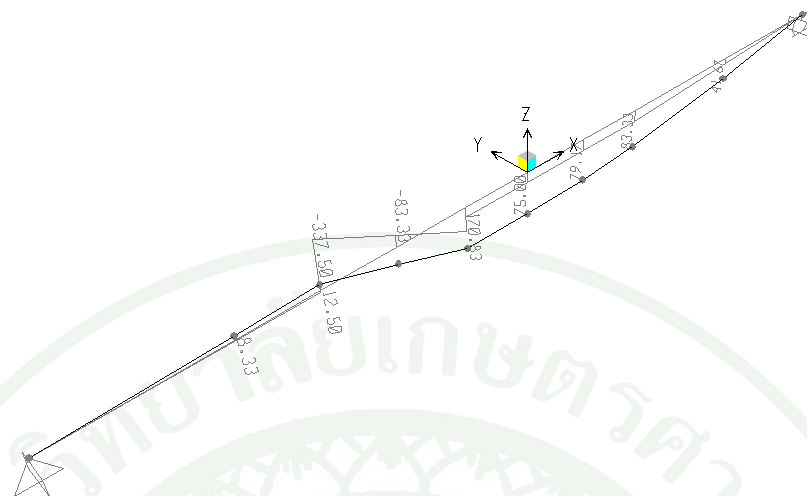
4. เพิ่มแรงเฉือน 1000 กิโลกรัม และค่าโมเมนต์ 350 กิโลกรัม-เมตร กิโลกรัม-ฟุต ไกลน้ำหนักบรรทุกทุก
และ 100 กิโลกรัม-เมตร ฟุต ไกลน้ำหนักบรรทุก บริเวณตำแหน่งช่องเปิด



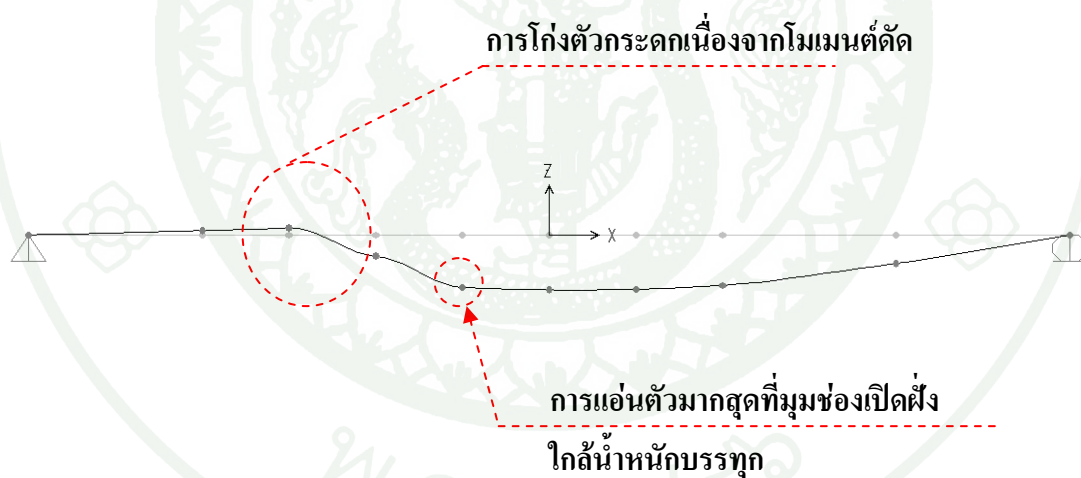
- ภาพผนวกที่ จ14 แบบจำลองคานเพิ่มแรงเฉือน 1000 กิโลกรัม และค่าโมเมนต์ 350 กิโลกรัม-เมตร
ฟุต ไกลน้ำหนักบรรทุกทุก และ 100 กิโลกรัม-เมตร ฟุต ไกลน้ำหนักบรรทุก
บริเวณตำแหน่งช่องเปิด



- ภาพผนวกที่ จ15 แรงเฉือนคานเพิ่มแรงเฉือน 1000 กิโลกรัม และค่าโมเมนต์ 350 กิโลกรัม-เมตร
ฟุต ไกลน้ำหนักบรรทุกทุก และ 100 กิโลกรัม-เมตร ฟุต ไกลน้ำหนักบรรทุก
บริเวณตำแหน่งช่องเปิด



ภาพผนวกที่ จ16 โมเมนต์คานเพิ่มแรงเฉือน 1000 กิโลกรัม และค่าโมเมนต์ 350 กิโลกรัม-เมตร
 ฝั่งไกลน้ำหนักบรรทุก และ 100 กิโลกรัม-เมตร ฝั่งไกลน้ำหนักบรรทุก
 บริเวณตำแหน่งช่องเปิด



ภาพผนวกที่ จ17 การแอ่นตัวคานเพิ่มแรงเฉือน 1000 กิโลกรัม และค่าโมเมนต์ 350 กิโลกรัม-เมตร
 ฝั่งไกลน้ำหนักบรรทุก และ 100 กิโลกรัม-เมตร ฝั่งไกลน้ำหนักบรรทุก
 บริเวณตำแหน่งช่องเปิด

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อสกุล	นายภาณุมาศ โยธามาศย์
เกิดวันที่	วันพฤหัสบดีที่ 28 กรกฎาคม พ.ศ. 2526
สถานที่เกิด	จังหวัดอุบลราชธานี
ประวัติการศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี พ.ศ. 2548
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2553-ปัจจุบัน บริษัท แฟลทอรี เพอร์เฟค จำกัด พ.ศ. 2549-2552 บริษัท เบสท์ เอนจิเนียริง คอนซัลแตนท์ จำกัด พ.ศ. 2548 หจก.เหรียญทองวัสดุ