

การวิเคราะห์หลังคาโค้งไร้โครงถักช่วงยาว 30 เมตร

THE ANALYSES OF 30-METER SPAN TRUSSLESS CURVED ROOF

ดร. ฉัตร สุจินดา (Dr. Chatr Suchinda)¹

¹อาจารย์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม chatr@spu.ac.th

บทคัดย่อ : หลังคาโค้งไร้โครงถักของบริษัท สุกงา จำกัด ทำด้วยเหล็กพับขึ้นรูปแบบเย็น ช่วงยาว 30 เมตร ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ โครงสร้างแบบนี้มีควมได้เปรียบคือไม่ต้องมีโครงถักเป็นตัวยึดรับอยู่ด้านล่าง จึงไม่จำเป็นต้องมีรูสำหรับยึดพื้นผิวหลังคาเข้ากับ โครงสร้างที่เอาไว้รองรับ ทำให้ไม่เกิดจุดที่มีโอกาสรั่วซึมขึ้น ความท้าทายของโครงสร้างประเภทนี้ก็คือ ตัวหลังคาจะต้องได้รับการ ออกแบบให้สามารถรับน้ำหนักต่าง ๆ ได้เองทั้งหมด ซึ่งสามารถทำได้โดยการผลิตตัวหลังคาจากแผ่นเหล็กพับขึ้นรูปแบบเย็น ที่มีหน้า ตัดเป็นรูปตัวยู และปัดขึ้นรูปเป็นลอน ๆ แล้วนำมาประกอบกันโดยการพับซ้อน ทำให้ไม่เกิดรอยรั่ว เพื่อให้เกิดมั่นใจว่าโครงสร้าง ดังกล่าวจะสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัย จึงได้ทำการทดสอบการรับน้ำหนักของโครงสร้างตัวอย่างขนาดเท่าของจริง ภายใต้งานไขการรับน้ำหนักบรรทุก 2 กรณีคือ (1) น้ำหนักบรรทุกเต็มช่วง และ (2) น้ำหนักบรรทุกครึ่งช่วง ซึ่งประเภทของโครงสร้าง ที่ใช้ ในการวิเคราะห์เป็นแบบสองมิติและพิจารณาถึงผลของ P-Delta โดยใช้โปรแกรม SAP2000 Non-linear ข้อมูลทางเรขาคณิตของ โครงสร้างที่ใช้ในแบบจำลองได้มาจากค่าที่วัดได้จริงของโครงสร้างที่ใช้ทดสอบ ผลของการทำนายค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งที่ได้จาก การวิเคราะห์ดังกล่าวเนื่องจากน้ำหนักที่กระทำเพิ่มขึ้นเป็นช่วง ๆ ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากการทดสอบ รูปทรงของการ โกงตัวของโครงสร้างได้ถูกนำมาเสนอในรูปแบบของกราฟ และได้วิจารณ์เปรียบเทียบระหว่างผลของคำตอบที่ได้จากทั้งการวิเคราะห์ กับการทดสอบ อีกทั้งยังได้นำเสนอแรงภายในและแรงปฏิกิริยาที่ได้จากการวิเคราะห์เพื่อใช้ในการออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างสำหรับ รองรับต่อไป

ABSTRACT: A 30-meter span trussless cold formed steel curved roof had been analyzed. This structure has the advantage of having no supporting trusses therefore no hole is required to fasten the roof surface to the supporting structures. As a result, no potential leaking points are created. The challenge of this type of structures is that the roof itself must withstand all of the loads. This could be achieved by using cold-form corrugated U-shape section made from steel sheets joining together using overlap folding technique. To ensure that the structure can safely withhold the loads, full-scale load tests had been performed under the controlled conditions. Two load cases had been studied: (1) the full-span load and (2) the half-span load. The P-Delta (geometrical non-linear) analyses of two-dimensional frame members using SAP2000 non-linear were performed. The structure geometrical data measured from the actual testing structure were used in this model. The predicted deflections from multi-stage loading were compared with the measured ones. The deformed shapes of the roof structures were present graphically. The comparison of both analytical and experimental results was discussed. Also the internal forces and support reactions from the analyses were reported for further design of the supporting structural members.

KEYWORDS: P-Delta analyses of curved roof, Curved shell structure, Full-scale experiment

1. ความเป็นมา

หลังคาโค้งไร้โครงถักที่มีใช้กันอยู่ในประเทศไทยนั้น ผู้ผลิตคือ **บริษัท สุกนธา จำกัด** ได้ซื้อลิขสิทธิ์มาจากต่างประเทศ ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งรวมถึงความรู้เรื่องระบบการผลิตและข้อกำหนดในการออกแบบต่าง ๆ ระบบหลังคาดังกล่าวมีความยาวช่วงสูงสุด 24.4 เมตร (80 ฟุต) ซึ่งทางบริษัทผู้ผลิตในประเทศไทยกำลังทำการศึกษาและพัฒนาให้สามารถเพิ่มความยาวช่วงได้ถึง 30 เมตร โดยการเพิ่มความหนาของแผ่นเหล็กที่ใช้ และเพื่อให้เกิดความมั่นใจในด้านความปลอดภัย ทางบริษัทฯ จึงได้ผลิตหลังคาตัวอย่างขนาดเท่าของจริงขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดสอบการรับน้ำหนัก และวัดค่าการโก่งตัว และเพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมการรับแรงให้มากขึ้นผู้เขียนจึงได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างตัวอย่างที่ทำการทดสอบดังกล่าว



รูปที่ 1 หลังคาโค้งไร้โครงถักที่ติดตั้งในโครงการบางกอกเกตพลาซ่า หลังคาโค้งนี้ไม่ต้องใช้โครงถักจึงทำให้ดูโล่ง แต่มีความยาวช่วงสูงสุดที่ 24.4 เมตร (80 ฟุต)

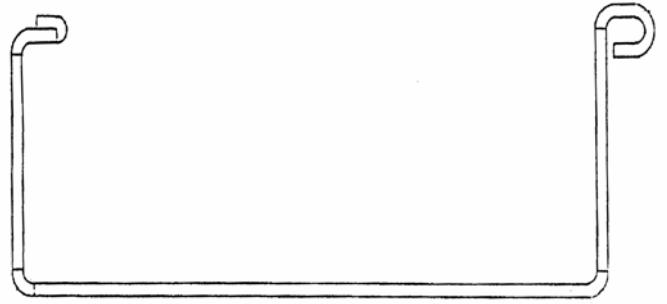
2. การทดสอบขนาดเท่าของจริง (Full-scale Experiment)

2.1. การผลิตชิ้นส่วน

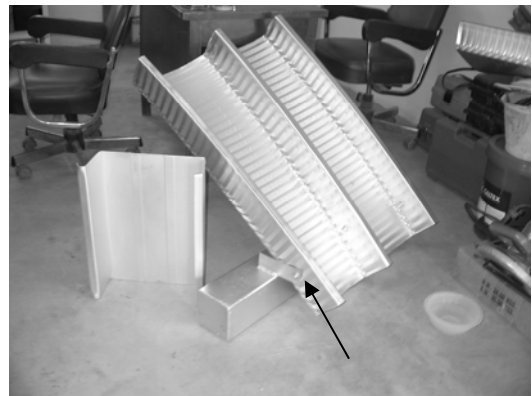
แผ่นเหล็กหนา 1 มม. ได้ถูกนำมาพับขึ้นรูปให้มีหน้าตัดดังแสดงในรูปที่ 2 จากนั้นจึงนำไปผ่านเครื่องรีดขึ้นรูปโดยมีการปรับตั้งให้มีรัศมีความโค้งตามที่กำหนด ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นลอน ๆ (Corrugated) ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3 จุดประสงค์ของลอนดังกล่าวคือ (1) เพื่อสร้างให้เกิดรัศมีความโค้งขึ้น (2) เพื่อเป็นการเสริมความแข็งแรงและเสถียรภาพให้กับหน้าตัด

ชิ้นส่วนที่ผ่านการรีดแล้วได้ถูกนำมาประกอบกันโดยใช้เครื่องกดรีดบริเวณรอยต่อที่ทับซ้อนกันตลอดแนวของความยาว ตัวอย่างที่จะนำมาทดสอบขนาดเท่าของจริงนี้ ประกอบขึ้นจากชิ้นส่วนจำนวน 15 ชิ้นต่อเรียงกันเพื่อให้ได้ความกว้าง 4.5 เมตร (กว้างชิ้นละ 0.30 เมตร) เมื่อผ่านการรีดจะมีรัศมีความโค้ง 23.2 เมตร และเมื่อกำหนดให้มีความยาวช่วง (Span) ในแนวราบเป็น

30 เมตร จะได้ความสูงจากฐานของส่วนโค้งเป็น 5.5 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4



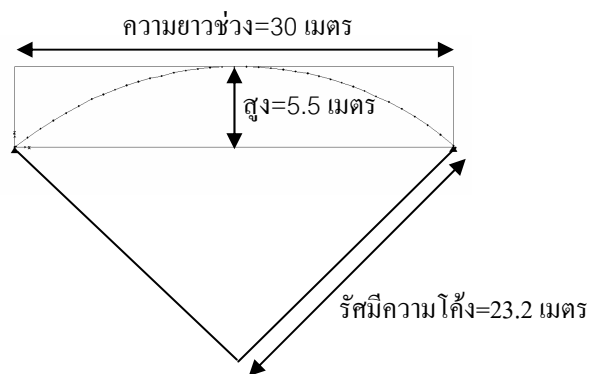
รูปที่ 2: รูปหน้าตัดของหลังคาโค้งไร้โครงถัก สังกัดตรงส่วนขอบ (ทั้งด้านซ้ายและด้านขวา) จะพับเป็นตะเข็บไว้เพื่อใช้เชื่อมต่อระหว่างชิ้นขณะประกอบเข้าด้วยกัน



รูปที่ 3 ชิ้นส่วนหลังคาโค้งตัวอย่าง ด้านซ้าย: ชิ้นส่วนที่ผ่านการพับแล้ว ด้านขวา: ชิ้นส่วนที่ผ่านการรีดเพื่อให้โค้งและเป็นลอน ๆ

2.2. การติดตั้ง

ที่รองรับของหลังคาโค้งที่ใช้มีลักษณะคล้ายกับที่รองรับแบบหมุน (Hinge Supports) ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งได้เจาะรูบริเวณด้านข้างของหน้าตัดในส่วนที่มีแผ่นเหล็กทับซ้อนกัน (บริเวณหัวลูกศรชี้)



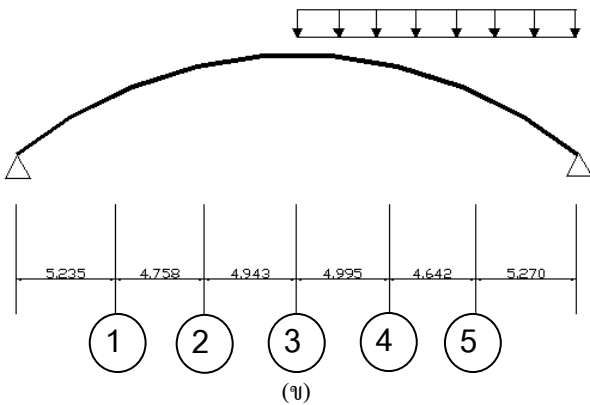
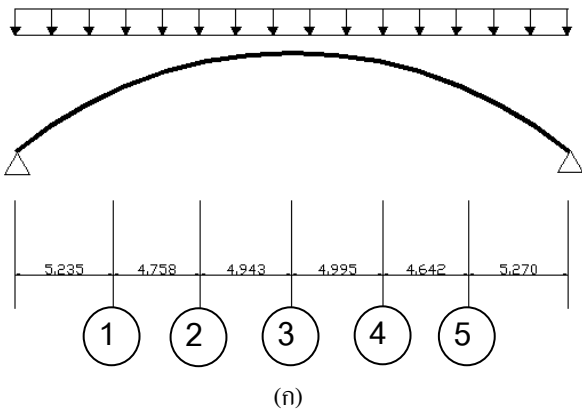
รูปที่ 4 ส่วนสูง รัศมีความโค้ง และความยาวช่วงในแนวราบของหลังคาโค้งที่ใช้ในการทดสอบ

2.3. น้ำหนักบรรทุก

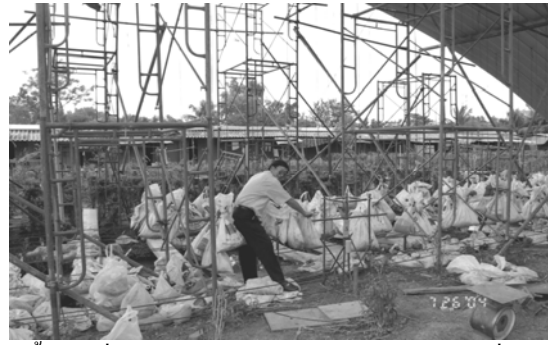
น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบแบ่งเป็น 2 กรณี (Load Cases) คือ (1) น้ำหนักบรรทุกเต็มช่วง (Full Span) ดังแสดงในรูปที่ 5(ก)

และ (2) น้ำหนักบรรทุกครึ่งช่วง (Half Span) ดังแสดงในรูปที่ 5(ข) โดยใช้ถุงทรายที่ชั่งน้ำหนักแล้วนำมาแขวน ณ จุดต่าง ๆ (ที่มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ) ได้หลังคาโค้ง น้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบกระทำเป็นจุดซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมาก เพื่อใช้ประมาณน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Uniform Load) (ดูรูปที่ 6)

วิธีการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกกระทำได้โดยการเพิ่มจำนวนถุงทรายที่แขวนอยู่ ณ จุดรับน้ำหนักแต่ละจุด โดยเฉลี่ยจะได้น้ำหนักกระทำเทียบเท่ากับน้ำหนักบรรทุกกระจายคงที่ 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 kg/m² สำหรับกรณีน้ำหนักบรรทุกเต็มช่วง และ 0, 10, 20, 30 และ 40 kg/m² สำหรับกรณีน้ำหนักบรรทุกครึ่งช่วง ซึ่งได้ถูกจำกัดค่าสูงสุดไว้ต่ำกว่าในกรณีน้ำหนักบรรทุกเต็มช่วง เนื่องจากหลังคาโค้งที่รับน้ำหนักบรรทุกครึ่งช่วง มีเสถียรภาพต่ำกว่า



รูปที่ 5 น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบและตำแหน่งที่ใช้วัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง แสดงแนวที่ 1 ถึงแนวที่ 5
(ก) กรณีน้ำหนักบรรทุกเต็มช่วง (Full Span)
(ข) กรณีน้ำหนักบรรทุกครึ่งช่วง (Half Span)



รูปที่ 6 น้ำหนักที่ใช้แขวนคือถุงทรายแขวนไว้หลาย ๆ จุดเพื่อประมาณน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Uniform Load) การเพิ่มน้ำหนักสามารถทำได้โดยการเพิ่มจำนวนถุงทรายที่แขวนไว้ในแต่ละจุดแขวน

2.4. การวัดค่าการเคลื่อนตัว

การเคลื่อนตัวที่วัดมีทั้งในแนวดิ่งและแนวราบอีกสองแนว ซึ่งค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง (Vertical Deflection) นี้ เป็นค่าที่จะใช้ในการเปรียบเทียบกับผลจากการวิเคราะห์ (เนื่องจากเป็นทิศทางเดียวกับทิศทางของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ) ค่าการเคลื่อนตัวดังกล่าวได้แบ่งออกเป็น 5 แนว ดังแสดงในรูปที่ 5 คือแนวที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ซึ่งค่าที่จะใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์จะเป็นค่าที่ได้มาจากการเฉลี่ยของค่าที่วัดได้จริงทั้งหมด แนวละ 3 จุดเรียงกันตลอดความกว้าง

3. ผลการทดสอบ

ค่าเฉลี่ยของการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งที่วัดได้ทั้ง 5 แนว ในกรณีน้ำหนักบรรทุกเต็มช่วงและครึ่งช่วงได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 แสดงค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของหลังคาโค้งในกรณีน้ำหนักบรรทุกเต็มช่วง (Full Span)

น้ำหนักบรรทุก (kg/m ²)	การเคลื่อนตัวในแนวดิ่งเฉลี่ยของหลังคาโค้ง (cm) (เครื่องหมาย + แสดงทิศทางขึ้น, - แสดงทิศทางลง)				
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	แนวที่ 3	แนวที่ 4	แนวที่ 5
10	-0.97	-1.83	-1.33	0.47	0.83
20	-2.93	-4.00	-2.57	0.70	2.57
30	-6.13	-8.30	-3.80	2.07	4.93
40	-9.87	-12.50	-5.37	3.90	7.93
50	-15.17	-18.57	-8.83	6.27	12.63
60	-26.73	-32.30	-14.50	12.37	22.37
60 (น้ำหนักคงที่ 24 ชม)	-28.93	-34.18	-15.58	12.27	22.95

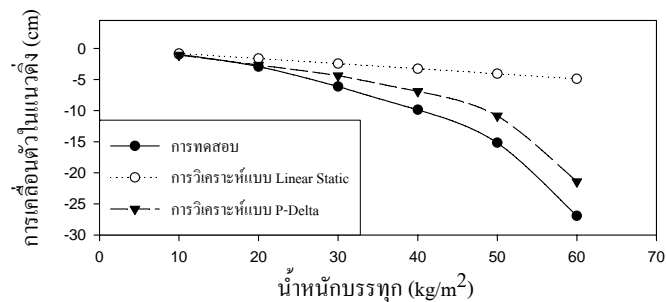
ตารางที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของหลังคาโค้งในกรณีน้ำหนักบรรทุกครึ่งช่วง (Half Span)

น้ำหนักบรรทุก (kg/m ²)	การเคลื่อนตัวในแนวดิ่งเฉลี่ยของหลังคาโค้ง (cm) (เครื่องหมาย + แสดงทิศทางขึ้น, - แสดงทิศทางลง)				
	แนวที่ 1	แนวที่ 2	แนวที่ 3	แนวที่ 4	แนวที่ 5
10	7.53	6.43	-0.23	-6.32	-6.47
20	16.27	13.63	-1.20	-14.82	-14.77
30	27.23	22.23	-3.87	-26.85	-26.53
40	37.37	29.13	-9.05	-40.58	-39.13
40 (น้ำหนักคง ถ้ำ 24 ซม)	41.37	31.57	-10.40	-46.27	-44.70

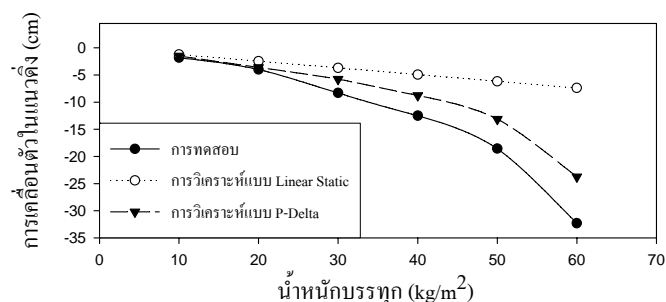
ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าเฉลี่ยของการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง ณ แนวที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ในกรณีน้ำหนักบรรทุกเต็มช่วง (Full Span) ดังแสดงไว้ในกราฟรูปที่ 7 ถึงรูปที่ 11 ส่วนในกรณีน้ำหนักบรรทุกครึ่งช่วง (Half Span) ดังแสดงไว้ในกราฟรูปที่ 12 ถึงรูปที่ 16

3.1. วิเคราะห์ผลการทดสอบ

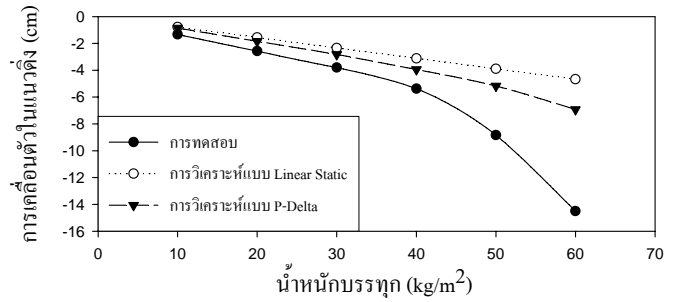
จากกราฟรูปที่ 7 ถึงรูปที่ 16 (เฉพาะเส้นกราฟของการทดสอบจริง) ทั้งในกรณีน้ำหนักบรรทุกเต็มช่วง (Full Span) และในกรณีน้ำหนักบรรทุกครึ่งช่วง (Half Span) จะสังเกตได้ว่าเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งและน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น มีลักษณะพฤติกรรมแบบไม่เป็นเส้นตรง (Non-



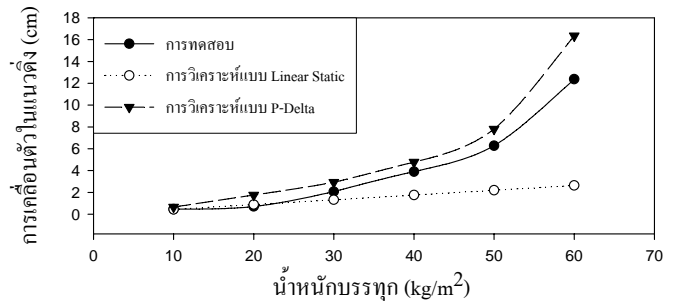
รูปที่ 7 ค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง กรณีน้ำหนักบรรทุกเต็มช่วง (Full Span) ณ แนวที่ 1



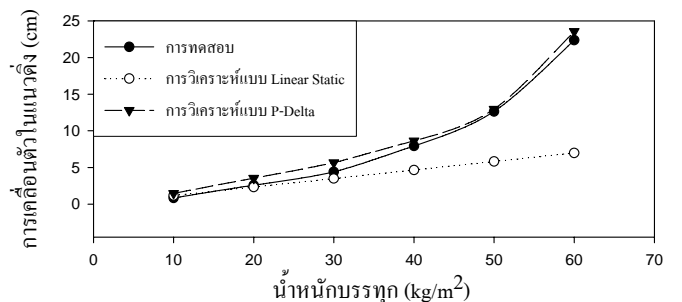
รูปที่ 8 ค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง กรณีน้ำหนักบรรทุกเต็มช่วง (Full Span) ณ แนวที่ 2



รูปที่ 9 ค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง กรณีน้ำหนักบรรทุกเต็มช่วง (Full Span) ณ แนวที่ 3

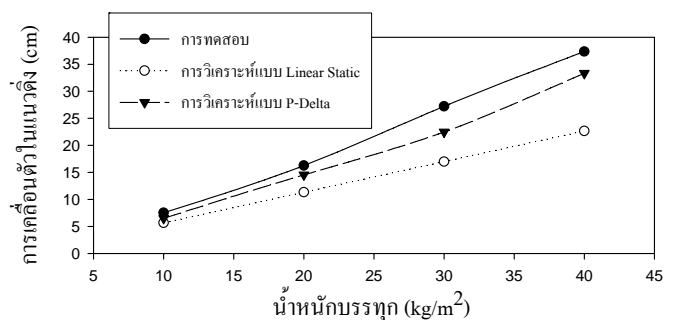


รูปที่ 10 ค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง กรณีน้ำหนักบรรทุกเต็มช่วง (Full Span) ณ แนวที่ 4

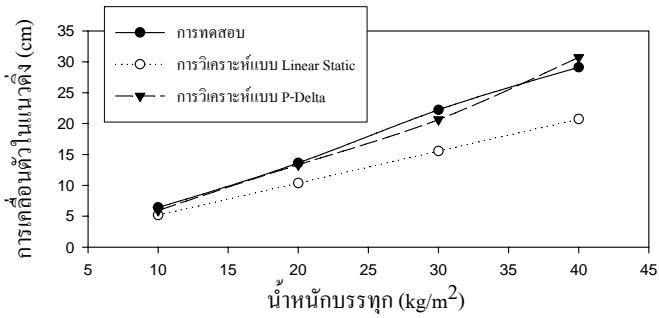


รูปที่ 11 ค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง กรณีน้ำหนักบรรทุกเต็มช่วง (Full Span) ณ แนวที่ 5

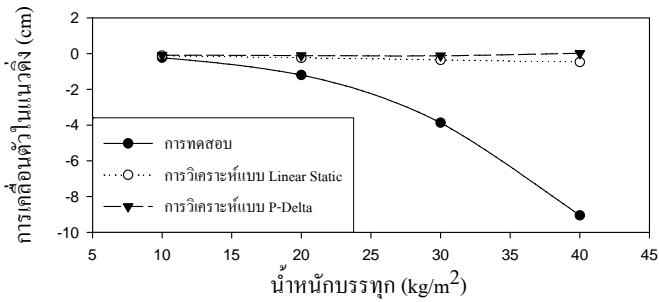
linear) เนื่องจากหลังคาโค้งดังกล่าวมีแรงภายในทั้งที่เป็นโมเมนต์ดัด (Bending Moment) และแรงตามแนวแกน (Axial Force) เกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน จึงทำให้เกิดผลของโมเมนต์อันดับที่สอง (Secondary Moment) ขึ้น



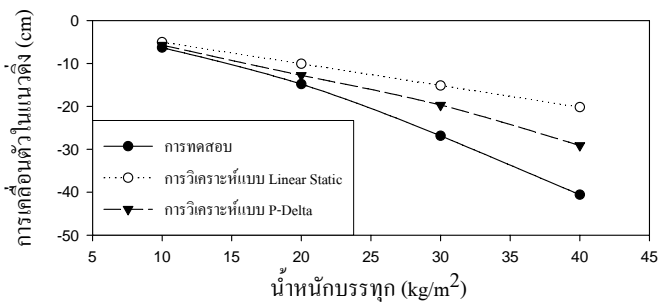
รูปที่ 12 ค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง กรณีน้ำหนักบรรทุกครึ่งช่วง (Half Span) ณ แนวที่ 1



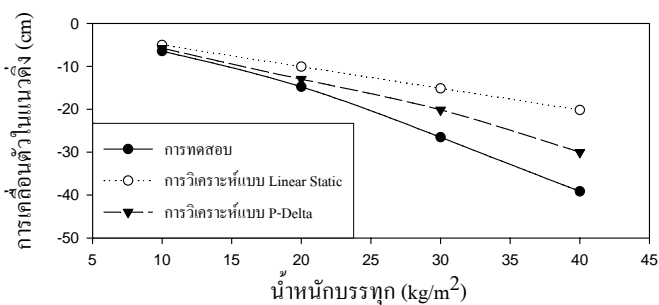
รูปที่ 13 ค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง กรณีน้ำหนักบรรทุกครึ่งช่วง (Half Span) ณ แนวที่ 2



รูปที่ 14 ค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง กรณีน้ำหนักบรรทุกครึ่งช่วง (Half Span) ณ แนวที่ 3



รูปที่ 15 ค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง กรณีน้ำหนักบรรทุกครึ่งช่วง (Half Span) ณ แนวที่ 4



รูปที่ 16 ค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง กรณีน้ำหนักบรรทุกครึ่งช่วง (Half Span) ณ แนวที่ 5

4. การวิเคราะห์

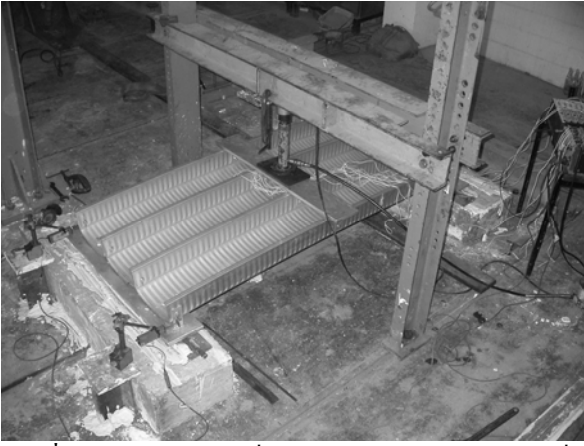
เนื่องจากพฤติกรรมการรับน้ำหนักของหลังคาโค้งไม่เป็นเชิงเส้นตรง (Non-linear) การวิเคราะห์จึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงผลของโมเมนต์อันดับสอง ซึ่งในการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟ

ไนท์อีลีเมนต์ (Finite Element) นั้นจะแบ่งการพิจารณาผลของโมเมนต์อันดับสองได้เป็นสองส่วนคือ (1) $P-\Delta$ กับ (2) $P-\delta$ [1] $P-\Delta$ หมายถึงผลของโมเมนต์อันดับที่สองที่เกิดจากระยะเยื้องศูนย์กลางระหว่างปลายทั้งสองข้างของชิ้นส่วน (Element) ส่วนผลของ $P-\delta$ หมายถึงผลกระทบของระยะเยื้องศูนย์กลางภายในชิ้นส่วนของโครงสร้างเอง ซึ่งถ้าแรงตามแนวแกนเป็นแรงอัดจะทำให้ชิ้นส่วนโครงสร้างนั้นมีความแข็ง (Stiffness) ลดลง ดังนั้นความโค้งและรูปร่างของหลังคา ก่อนการรับน้ำหนักบรรทุกจึงมีความสำคัญ ซึ่งหลังคาโค้งที่ใช้ทดสอบดังกล่าวนี้มีความเบี้ยวอยู่ ความไม่สมบูรณ์ (Imperfection) นี้จะส่งผลทำให้เสถียรภาพของหลังคาลดลง ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงความเบี้ยวของหลังคาโค้งนี้ด้วย โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์หลังคาโค้งนี้คือ SAP2000 Non-linear [2] ซึ่งมีความสามารถในการวิเคราะห์โครงสร้างแบบพี-เดลต้าได้

ประเภทของโครงสร้างที่ใช้เป็นแบบ โครงข้อแข็งระนาบ (Plane Frame) เนื่องจากลักษณะการรับน้ำหนักของหลังคาโค้งเป็นแบบสองมิติ ได้พิจารณาใช้ที่รองรับที่ปลายทั้งสองด้านเป็นแบบจุดหมุน (Hinge Support) พื้นที่หน้าตัดของโครงข้อแข็งที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้คำนวณจากรูปร่างจริงดังแสดงในรูปที่ 2 ส่วนค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia) เป็นค่าที่มีความซับซ้อนมาก เนื่องจากหลังคาโค้งได้ถูกคิดให้เป็นลอน ๆ ทำให้ค่าความแข็งของการคด (Bending Rigidity) เปลี่ยนไป ดังนั้นค่าโมเมนต์ความเฉื่อยจึงไม่สามารถคำนวณได้จากรูปทรงของหน้าตัด ผู้เขียนและคณะจึงได้ออกแบบการทดสอบย่อยขึ้นเพื่อหาค่าความแข็งของการคดดังกล่าว

4.1. การทดสอบย่อยเพื่อหาค่าของความแข็งของการคด

การทดสอบย่อยนี้กระทำกับชิ้นส่วนหลังคาโค้งช่วงยาว 2 เมตร (ดังแสดงในรูปที่ 17) โดยนำชิ้นส่วนที่ผ่านการรีดให้โค้งและเป็นลอน ๆ มาต่อกัน 3 ชิ้นตามความกว้าง และเพื่อให้หลังคาที่ใช้ทดสอบมีการรับน้ำหนักแต่เฉพาะการคด (ไม่มีแรงตามแนวแกนที่จะทำให้เกิดผลของโมเมนต์อันดับที่สองเข้ามาเกี่ยวข้อง) จึงได้กำหนดให้ที่รองรับด้านหนึ่งเป็นแบบจุดหมุน (Hinge Support) และอีกด้านหนึ่งเป็นแบบจุดหมุนกลิ้งได้ (Roller Support) น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ทดสอบเป็นแรงกระทำแบบจุด (Point Load) กระทำ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของช่วง (Mid-span) เมื่อทราบความสัมพันธ์ระหว่างค่าของน้ำหนักบรรทุกกับค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งแล้ว จะสามารถนำไปหาค่าความแข็งของการคดได้ด้วยวิธีการลองผิดลองถูก (Trial & Error)



รูปที่ 17 การทดสอบย่อยเพื่อใช้หาค่าความแข็งของการตัด (ที่ห้องปฏิบัติการโครงสร้าง สถาบัน AIT)

4.2. การเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (การทดสอบขนาดเท่าของจริง) ในกรณีน้ำหนักบรรทุกเต็มช่วง (Full Span)

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของกราฟระหว่างค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งที่ได้จากการทดสอบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้งแบบ Linear Static และแบบ P-Delta (ดังแสดงในรูปที่ 7 ถึงรูปที่ 11) จะสังเกตได้ว่าเส้นกราฟจากการทดสอบและจากการวิเคราะห์แบบ P-Delta มีลักษณะโค้งไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันให้เห็นว่าพฤติกรรมการรับน้ำหนักของหลังคาโค้งนี้ มีผลของโมเมนต์อันดับที่สองเกิดขึ้นจริง แต่ถ้าเปรียบเทียบกับเส้นกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ Linear Static แล้วจะต่างกันมาก

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของเส้นกราฟการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง ณ แนวที่ 3 ที่ได้จากการทดสอบและจากการวิเคราะห์แบบ P-Delta นี้จะเห็นได้ว่าลักษณะของกราฟแตกต่างกันมากกว่าแนวอื่น ๆ (แนวที่ 1, 2, 4 และ 5) เนื่องจาก แนวที่ 3 เป็นแนวที่อยู่ใกล้กับจุดหมุนของการโยตัวของโครงสร้างมากที่สุด (ดูรูปที่ 18) จึงเกิดความคลาดเคลื่อนได้สูงกว่า



รูปที่ 18 แสดงรูปทรงที่เปลี่ยนไป (Deformed Shape) ซึ่งได้จากการวิเคราะห์แบบ P-Delta ในกรณีน้ำหนักบรรทุกเต็มช่วง (Full Span) ขนาด 60 kg/m^2

4.3. การเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (การทดสอบขนาดเท่าของจริง) ในกรณีน้ำหนักบรรทุกครึ่งช่วง (Half Span)

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของกราฟระหว่างค่าการโก่งตัวในแนวตั้งที่วัดได้จากการทดสอบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ

Linear Static และแบบ P-Delta (ดังแสดงในรูปที่ 11 ถึงรูปที่ 15) จะสังเกตได้ว่าเส้นกราฟจากการวิเคราะห์แบบ P-Delta มีลักษณะโค้งคล้ายกับเส้นกราฟจากการทดสอบมากกว่าเส้นกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ Linear Static และเมื่อเปรียบเทียบเส้นกราฟการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง ณ แนวที่ 3 ระหว่างที่ได้จากการทดสอบและจากการวิเคราะห์แบบ P-Delta จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟมีความแตกต่างกันมากกว่าแนวอื่น ๆ เนื่องจาก แนวที่ 3 เป็นแนวที่อยู่ใกล้กับจุดหมุนของการโยตัวของโครงสร้างมากที่สุด (ดูรูปที่ 19)



รูปที่ 19 แสดงรูปทรงที่เปลี่ยนไป (Deformed Shape) ซึ่งได้จากการวิเคราะห์แบบ P-Delta ในกรณีน้ำหนักบรรทุกครึ่งช่วง (Half Span) ขนาด 40 kg/m^2

เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง รูปที่ 18 กับรูปที่ 19 จะสังเกตได้ว่าทิศทางการโยนในกรณีน้ำหนักบรรทุกเต็มช่วง (โยไปทางขวา) จะกลับทิศกับการโยนในกรณีน้ำหนักบรรทุกครึ่งช่วง (โยไปทางซ้าย) เนื่องจากการโยนที่เกิดขึ้นในกรณีน้ำหนักบรรทุกเต็มช่วงนั้นน้ำหนักที่ใส่มีความสมมาตรดังนั้นการโยจึงเกิดไปในทิศทางเดียวกับความเบี่ยงเริ่มต้นของโครงสร้าง (ก่อนการทดสอบหลังคาโค้งนี้มีการโยไปทางขวา) ส่วนการโยที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกครึ่งช่วงนั้น จะโยไปในทิศทางตรงข้ามกับฝั่งที่น้ำหนักบรรทุกที่กระทำ (เปรียบเทียบรูปที่ 4(ข) กับรูปที่ 18)

4.4. แรงภายใน (โมเมนต์คัตและแรงตามแนวแกน) และแรงปฏิกิริยาที่จุดรองรับ

4.4.1. กรณีน้ำหนักบรรทุกเต็มช่วง (Full Span)

รูปที่ 20 ถึงรูปที่ 22 แสดงถึงแผนผังและค่าสูงสุดของแรงภายในและแรงปฏิกิริยาที่จุดรองรับในกรณีน้ำหนักบรรทุกเต็มช่วง

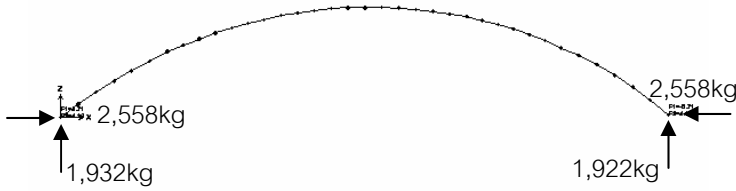


รูปที่ 20 แผนผังโมเมนต์คัต (Bending Moment Diagram) ต่อความกว้าง $0.30 \text{ เมตร (1 ชั้น)}$ กรณีน้ำหนักบรรทุกเต็มช่วง (Full Span) 60 kg/m^2

ซึ่งส่งผลให้เกิดผลของโมเมนต์อันดับสองขึ้น จึงทำให้พฤติกรรม การรับน้ำหนักของหลังคาโค้งที่ศึกษานี้ไม่เป็นเชิงเส้นตรง



รูปที่ 21 แผนผังแรงตามแนวแกน (Axial Force) ต่อความกว้าง 0.30 เมตร (1 ชั้น) กรณีน้ำหนักบรรทุกทุกเต็มช่วง (Full Span) 60 kg/m^2



รูปที่ 22 แรงปฏิกิริยาที่จุดรองรับ ต่อความกว้าง 0.30 เมตร (1 ชั้น) กรณี น้ำหนักบรรทุกทุกเต็มช่วง (Full Span) 60 kg/m^2

4.4.2. กรณีน้ำหนักบรรทุกครึ่งช่วง (Half span)

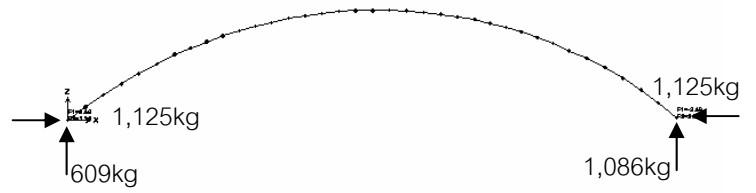
รูปที่ 23 ถึงรูปที่ 25 แสดงถึงแผนผังและค่าสูงสุดของแรงภายใน และแรงปฏิกิริยาที่จุดรองรับในกรณีน้ำหนักบรรทุกครึ่งช่วง



รูปที่ 23 แผนผังโมเมนต์ดัด (Bending Moment Diagram) ต่อความกว้าง 0.30 เมตร (1 ชั้น) กรณีน้ำหนักบรรทุกครึ่งช่วง (Half Span) ขนาด 40 kg/m^2



รูปที่ 24 แผนผังแรงตามแนวแกน (Axial Force) กรณีน้ำหนักบรรทุกครึ่ง ช่วง (Half Span) ขนาด 40 kg/m^2



รูปที่ 25 แรงปฏิกิริยาที่จุดรองรับ กรณีน้ำหนักบรรทุกครึ่งช่วง (Half Span) ขนาด 40 kg/m^2

ผลของการวิเคราะห์หลังคาโค้งดังกล่าวด้วยวิธี P-Delta ซึ่ง พิจารณาถึงผลของโมเมนต์อันดับที่สอง สำหรับกรณีน้ำหนัก บรรทุกเต็มช่วง (Full Span) 50 kg/m^2 ได้ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด $1,110 \text{ kg-m}$ ค่าแรงตามแนวแกนสูงสุด $3,234 \text{ kg}$ และค่าแรง ปฏิกิริยาที่จุดรองรับสูงสุดในแนวตั้ง $1,869 \text{ kg}$ และในแนวนอน $2,592 \text{ kg}$ ส่วนผลของการวิเคราะห์สำหรับกรณีน้ำหนักบรรทุก ครึ่งช่วง (Half Span) 40 kg/m^2 ได้ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด $1,187 \text{ kg-m}$ ค่าแรงตามแนวแกนสูงสุด $1,558 \text{ kg}$ และค่าแรงปฏิกิริยาที่จุด รองรับสูงสุดในแนวตั้ง $1,033 \text{ kg}$ และในแนวนอน $1,192 \text{ kg}$ ซึ่ง ค่าที่กล่าวมาข้างต้นนี้ทั้งหมดเป็นค่าต่อความกว้างของหลังคา โโค้ง 0.30 เมตรหรือ 1 ชั้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณปราโมทย์ ขรรค์บริวาร แห่งบริษัท สุนธา จำกัด ที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีในการให้ข้อมูลเบื้องต้น และ จัดทำการทดสอบหลังคาโค้งช่วงยาว 30 เมตร ตลอดจนอนุญาต ให้เผยแพร่ข้อมูลในการทดสอบครั้งนี้ ขอขอบคุณ ดร. สรรค์ สยามภักดิ์ แห่งห้องปฏิบัติการโครงสร้าง สถาบัน AIT ที่ ช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกอย่างยิ่ง ในทำการทดสอบ ย่อยเพื่อหาความแข็งแรงของการดัด และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณ ดร. ณัฐวัฒน์ จุฑารัตน์ แห่งมหาวิทยาลัยศรีปทุม ที่ได้สละเวลาให้ ความช่วยเหลือและประสานงานอีกทั้งยังให้คำปรึกษาอันเป็น ประโยชน์ ทั้งต่อการทดสอบทั้งสองและการวิเคราะห์หลังคาโค้ง ครั้งนี้อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wilson, E. J., 2001. Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures. Berkeley California, USA: Computers and Structures, Inc.
- [2] Computers and Structures, Inc. 2002. SAP2000 Getting Started. Berkeley California, USA: Computers and Structures, Inc.

5. สรุป

จากการเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง ที่วัดได้จากการ ทดสอบหลังคาโค้งขนาดเท่าของจริงและค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ ด้วยวิธี P-Delta สามารถสรุปได้ว่า หลังคาโค้งไร้โครงถักที่ศึกษา นี้มีพฤติกรรมการรับน้ำหนักเหมือนกับโครงสร้างประเภท Arch คือเกิดแรงภายในทั้งโมเมนต์ดัดและแรงตามแนวแกนพร้อมกัน