

การศึกษาค่าประกอบความปลอดภัยของโครงถักหลังคาโค้งที่ติดตั้งด้วยระบบดัดเย็น

กรณีศึกษา: อาคารสนามฟุตซอล มหาวิทยาลัยบูรพา

A study of factor of safety of curved root truss curved with cool

process: case study futsal building Burapha University

นิธิศ ศักดิ์สิทธิ์การ

ธนวรรณ งามมี

โครงการทางวิศวกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

ปีการศึกษา 2560

หัวข้อโครงการ การศึกษาค่าประกอบความปลอดภัยของโครงถักหลังคาโค้งที่ติดตั้งด้วยระบบดัดเย็น

กรณีศึกษา : อาคารสนามฟุตบอล มหาวิทยาลัยบูรพา

โดย นายนิธิศ สักดิ์สิทธิการ

นางสาวธนวรรณ งามมี

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2560

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.อมรชัย ใจยงค์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติโครงการทางวิศวกรรม
นี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต



.....หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

(อาจารย์ ดร.ชาญยุทธ กาฬกาญจน์)



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร.อมรชัย ใจยงค์)

คณะกรรมการสอบโครงการ



.....ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.อมรชัย ใจยงค์)



.....กรรมการ

(อาจารย์ เอนก ชมวงษ์)



.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.พัชรพงษ์ อาสนจินดา)

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันนี้การออกแบบอาคารสาธารณะขนาดใหญ่ มีแนวโน้มถูกออกแบบให้มีลักษณะโครงสร้างช่วงยาว (long span structure) และมีรูปทรงที่ทันสมัยมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นอาคารให้มีรูปทรงอิสระ (free form) หรือการออกแบบระบบหลังคาให้มีรูปทรงโค้งเพื่อตอบสนองมุมมองด้านความสวยงามทางสถาปัตยกรรม สำหรับในประเทศไทย รูปแบบอาคารทรงโค้งโดยทั่วไปมักพบในรูปของอาคารที่มีโครงหลังคาโค้ง เช่น อาคารโรงงาน ห้างสรรพสินค้า และอาคารแสดงสินค้า ซึ่งวิศวกรผู้ทำการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างจำเป็นต้องคำนึงถึงหน่วยแรงที่จะเกิดขึ้นเพิ่มเติมในชิ้นส่วนโค้ง ดังเช่นในการวิเคราะห์โครงสร้างโครงถักโค้ง (curved truss) นอกเหนือจากหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในส่วนโครงถักเนื่องจากแรงตามแนวแกนแล้ว ยังมีหน่วยแรงเพิ่มเติมเนื่องจากโมเมนต์ที่เกิดจากการเอียงศูนย์ของส่วนโค้ง และค่าโมเมนต์ดัดเพิ่มเติมที่เกิดขึ้นจากกรรมวิธีตัดโค้งชิ้นส่วนโดยเฉพาะกรรมวิธีตัดโค้งแบบเย็น (cold process) ซึ่งโดยทั่วไปวิศวกรผู้ออกแบบมักมิได้คำนึงถึงหน่วยแรงที่เกิดจากโมเมนต์ส่วนเพิ่มเติมตามที่กล่าวมานี้ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่ออัตราส่วนความปลอดภัย (factor of safety) ของชิ้นส่วนโค้งที่ได้จะมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบเนื่องจากวิศวกรมิได้รวมผลของหน่วยแรงส่วนเกินนี้ไปรวมไว้ในขั้นตอนการออกแบบหน้าตัด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาวิธีการวิเคราะห์และออกแบบที่ถูกต้องโดยคำนึงถึงหน่วยแรงที่เกิดจากโมเมนต์ดัดเพิ่มเติม และทำการศึกษาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของโครงหลังคาโค้งจากโครงสร้างจริงที่ได้ทำการก่อสร้างและเปิดใช้งานแล้ว โดยในการศึกษานี้ได้นำโครงสร้างหลังคาโค้งของโรงสนามฟุตบอลภายในมหาวิทยาลัยบูรพา มาทำการออกแบบใหม่โดยคำนึงถึงโมเมนต์ดัดที่เกิดจากระยะเอียงศูนย์ของแรงตามแนวแกนกับการแอ่นโค้ง รวมถึงโมเมนต์ดัดเพิ่มเติมที่เกิดจากขั้นตอนการก่อสร้างแบบดัดเย็น จากผลการศึกษาพบว่า หลังจากทีออกแบบโดยคำนึงถึงกรรมวิธีการก่อสร้างด้วยวิธีดัดเย็น ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าไม่ถึง 1.80 ในทุกๆหน้าตัดหลักกลมกลวง โดยการออกแบบชิ้นส่วนโครงถักโค้งที่ดัดโค้งด้วยวิธีดัดเย็น จำเป็นต้องพิจารณาออกแบบหลายๆหน้าตัดเพื่อให้ได้หน้าตัดที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยสูงสุด โดยการเลือกหน้าตัดที่ใหญ่ไม่สามารถชี้วัดได้ว่าหน้าตัดนั้นจะเป็นหน้าตัดที่ให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยสูงสุดเสมอไป เนื่องจากการเลือกหน้าตัดใหญ่ก็จะส่งผลให้ค่าโมเมนต์ที่เกิดจากการดัดโค้งมีค่าเพิ่มขึ้นตามหน้าตัดที่ใหญ่ขึ้น โดยจากการศึกษาหลังคาโค้งอาคารฟุตบอลภายในมหาวิทยาลัยบูรพาพบว่า หน้าตัดหลักกลมกลวงใหม่ที่ถูกออกแบบตามวิธีวิจัยจะมีหน้าตัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 139.8 มิลลิเมตรและความหนา 6 มิลลิเมตร โดยให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.44 ซึ่งเป็นหน้าตัดที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยสูงสุด

Abstract

At this present time, the public buildings has been designed seem to be the long span structure and a more modern shape. The curved roof structure is widely used to satisfy architectural beauty. In Thailand, curved roof structures are most commonly found in the form of shopping mall and exhibition hall. For a part of analysis of curved roof structure, the engineers who analyzed and designed the structural system necessary to take into account the additional stresses due to the bending moment caused by the eccentricity of the arc and the bending process especially the bending cold process which may directly affect to the factor of safety of the whole roof structure. This research emphasizes to study the effect of additional stress due to cold bending process on the factor of safety of curved roof truss. The roof of futsal building in Burapha University is adopted to be a case study in order to evaluate the true safety ratio of the roof structure. The new design takes into account the bending moment resulting from eccentricity of the axial force on the curve and the construction of a cold bending process. The result demonstrates that when considering the total stresses due to additional bending moment cause from shape of curved member and cold bending process, this tends to provide less than 1.80 of the factor of safety for each of steel pipe sections which less than the safety factor according to the design standard of steel structure. This study concluded that the selection of large cross section cannot indicate that it provides the highest factor of safety. For the case study futsal building of Burapha University, the redesigned section of steel pipe which is sized of outside diameter 139.8 mm and a thickness of 6 mm which provide the highest factor of safety is 1.44.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี อาศัยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างยิ่งจากอาจารย์ ดร.อมรชัย ใจยงค์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ผู้ที่คอยให้คำปรึกษาแนะนำแนวคิดและแนวทางสำหรับใช้ดำเนินงาน อีกทั้งยังให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านเป็นอย่างดีเสมอมาขอขอบพระคุณ อาจารย์เอนก ชมวงษ์ และ อาจารย์พัชรพงษ์ อาสนจินดาที่เสียสละเวลาอันมีค่ามาเป็นกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

ขอขอบพระคุณอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้ทางด้านวิชาการ อันเป็นประโยชน์ ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณเพื่อนๆ และรุ่นพี่ในภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกคน รวมถึงผู้ที่เกี่ยวข้องในคณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่คอยเป็นกำลังใจให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือตลอดมา

ท้ายสุด คุณประโยชน์ที่เกิดจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอมอบให้กับบิดาและมารดา รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่าน เพื่อตอบแทนพระคุณที่ได้ช่วยให้คณะผู้จัดทำประสบความสำเร็จในการศึกษา ประโยชน์อันใดที่เกิดจากการทำปริญญานิพนธ์นี้ ล้วนเป็นผลมาจากความกรุณาของทุกท่าน ทางคณะผู้จัดทำ รู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึง ใคร่ขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

นายนิธิต ศักดิ์สิทธิการ

นางสาวธนวรรณ งามมี

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ประวัติความเป็นมา	4
2.2 วิธีการก่อสร้างโครงดัดโค้ง	7
2.3 ผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากการดัดโค้งในโครงถัก	12
2.4 ผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากโมเมนต์ดัดภายในชิ้นส่วนดัดโค้ง	19
2.5 การออกแบบหน้าตัดเหล็กรับแรงตามแนวแกนและแรงดัดด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (ASD)	25
2.6 ตัวอย่างการออกแบบหน้าตัดเหล็กรับแรงตามแนวแกนและแรงดัดด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน(ASD)	30
2.7 ค่าคงที่ของโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ	31
2.8 ความเค้นยอมได้ตัวประกอบความปลอดภัย	31

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 3 การดำเนินการงานวิจัย	34
3.1 โครงสร้างที่ใช้ในการศึกษา	34
3.2 ลักษณะของโครงสร้าง	34
3.3 วิธีการศึกษา	36
3.4 แผนการดำเนินงาน	38
บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการวิจัย	39
4.1 ขั้นตอนการคำนวณ	39
4.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย	40
4.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าการแอ่นตัว	46
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	52
5.1 บทสรุป	52
5.2 ข้อเสนอแนะ	52
เอกสารอ้างอิง	54
ภาคผนวก	55

สารบัญตาราง

เรื่อง	หน้า
ตาราง 2.3 ประเภทของจุดรองรับ	13
ตาราง 2.5 ค่าสัมประสิทธิ์ ψ และ C_m	29
ตาราง 2.7 ค่าคงที่ของโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ	31
ตาราง 3.3 เปรียบเทียบหน้าตัดเหล็ก	36
ตาราง 4.2.1 ตารางค่าความปลอดภัยที่เป็นจุดต่อแบบ Internal hinge	40
ตาราง 4.2.2 ตารางค่าความปลอดภัยที่เป็นจุดต่อแบบ Fixed	43
ตาราง 4.3.1 ตารางค่าการแอ่นตัวที่เป็นจุดต่อแบบ Internal hinge	46
ตาราง 4.3.2 ตารางค่าการแอ่นตัวที่เป็นจุดต่อแบบ Fixed	48

สารบัญรูปภาพ

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 2.1.1 Curved cast iron roof trusses	4
รูปที่ 2.1.2 Curved wrought iron with decorative cast iron inserts	5
รูปที่ 2.1.3 Portal with curved rafters	6
รูปที่ 2.1.4 Curved trusses for sports facility	6
รูปที่ 2.1.5 Curved roof steelwork to retail center	6
รูปที่ 2.1.6 Curved steel supports for walkway	7
รูปที่ 2.2.1 รูปประกอบนิยามศัพท์ในการดัด	8
รูปที่ 2.2.2 การดัดประเภท Mandrel Bending	9
รูปที่ 2.2.3 การดัดแบบ Ram or Push Bending	9
รูปที่ 2.2.4 การดัดแบบ 3-Roll Bending	10
รูปที่ 2.2.5 การดัดแบบ Rotary Draw Bending	10
รูปที่ 2.2.6 การดัดประเภท Compression Bending	11
รูปที่ 2.3.1 การร่างเส้นโค้งอีลาสติกของคานและโครงข้อแข็ง	13
รูปที่ 2.3.2 การร่างเส้นโค้งอีลาสติกโมเมนต์ดัดของคาน	14
รูปที่ 2.3.3 การร่างเส้นโค้งอีลาสติกโดยใช้ moment diagram ของคานและโครงข้อแข็ง	14

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 2.3.2 ความโค้งของส่วนคาน	16
รูปที่ 2.3.3 ความสัมพันธ์ของโมเมนต์และความโค้ง	18
รูปที่ 2.5.1 โครงสร้างที่รับแรงอัดและแรงดัดพร้อมกัน	25
รูปที่ 3.2.1 แบบก่อสร้างหลังคาสานานฟุตชอล	34
รูปที่ 3.2.2 แบบจริงสานานฟุตชอล	35
รูปที่ 3.2.3 ลักษณะของจุดต่อ	35
รูปที่ 3.3.1 deflection ของ Model ตัวอย่างที่มีลักษณะจุดต่อเป็น Internal hinge	37
รูปที่ 3.3.2 deflection ของ Model ตัวอย่างที่มีลักษณะจุดต่อเป็น Fixed	37
รูปที่ 4.2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Factor of Safety และหน้าตัดเหล็ก ตามสมการที่ 2	42
รูปที่ 4.2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Factor of Safety และค่า r ตามสมการที่ 3	42
รูปที่ 4.2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Factor of Safety และหน้าตัดเหล็ก ตามสมการที่ 2	44
รูปที่ 4.2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Factor of Safety และหน้าตัดเหล็ก ตามสมการที่ 3	45
รูปที่ 4.2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Factor of Safety และหน้าตัดเหล็ก ตามสมการที่ 3	45
โดยนำของโครงถักที่เป็น Internal hinge และ Fixed มาเปรียบเทียบ	
รูปที่ 4.3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection (Hinge) และหน้าตัดเหล็ก	48
รูปที่ 4.3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection (Fixed) และหน้าตัดเหล็ก	50

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

เรื่อง

หน้า

รูปที่ 4.3.3 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection และหน้าตัดเหล็ก	50
รูปที่ 4.3.4 Deflection ของ Model ตัวอย่างที่มีลักษณะจุดต่อเป็น Internal hinge	51
รูปที่ 4.3.5 Deflection ของ Model ตัวอย่างที่มีลักษณะจุดต่อเป็น Fixed	51

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันการออกแบบก่อสร้างโดยใช้เหล็กนิยมนั้นมากขึ้น เพราะความสวยงามของแบบก่อสร้าง ความเท่าเทียม ความทันสมัย ความสำคัญกับการออกแบบและตอบโต้ความต้องการของผู้ออกแบบสถาปัตย์ได้อย่างแท้จริง โครงสร้างเหล็กเหล็กดัดนั้นมีอยู่มานาน แต่ข้อคำแนะนำและข้อบังคับในการออกแบบส่วนประกอบเหล็กโค้งก็ยังมีไม่มากนัก

นอกจากนี้ วัสดุที่นำมาใช้ในการออกแบบและก่อสร้างจึงต้องมีกำลังสูงและสามารถทำงานได้ดีสำหรับในส่วนโครงสร้างโครงหลังคา เหล็กจึงถือเป็นวัสดุโครงสร้างที่สำคัญประเภทหนึ่ง ที่ผู้ออกแบบเลือกใช้ ซึ่งโครงสร้างมากที่สุด เนื่องจากเหล็กจัดเป็นวัสดุโครงสร้างที่สำคัญประเภทหนึ่ง ที่ผู้ออกแบบเลือกใช้ ซึ่งโครงหลังคาโค้งส่วนใหญ่จะใช้วิธีการก่อสร้างโดยการดัดเหล็กเป็นท่อนสั้นๆและเชื่อมติดให้ได้ทรงโค้งตามที่ต้องการ แต่ก็ยังเป็นวิธีการก่อสร้างที่ยุ่งยากและเสียเวลา ปัจจุบันจึงมีการก่อสร้างโดยการนำเหล็กท่อนยาวมาทำการดัดโค้ง แทนการดัดเหล็กเป็นท่อนสั้นๆและเชื่อมติด เพื่อเป็นการประหยัดเวลาและง่ายต่อวิธีการก่อสร้าง แม้ว่าการก่อสร้างโดยการนำเหล็กมาดัดโค้ง จะสามารถช่วยให้ประหยัดเวลาและง่ายต่อวิธีการก่อสร้าง แต่เนื่องจากการดัดโค้งของเหล็กทำให้เกิดกำลังภายในเนื้อเหล็ก ซึ่งส่งผลต่อการรับกำลังของโครงสร้างโครงหลังคา ความแข็งแรงของโครงสร้าง ค่าความปลอดภัยของโครงสร้าง การออกแบบโครงสร้างเหล็ก ผู้ออกแบบส่วนใหญ่มักจะไม่ได้คำนึงถึงผลที่เกิดจากโมเมนต์เนื่องจากการดัดโค้ง (Curvature) ของตัวเหล็ก และคำนึงถึงเพียงโมเมนต์จากระยะจากการดัดโค้งเท่านั้น ถ้าออกแบบโดยคำนึงถึงผลที่เกิดจากการดัดโค้ง (Curvature) จะมีแรงจากโมเมนต์ที่เกิดจากการดัดโค้งขึ้นและเกิดผลกระทบต่อค่าความปลอดภัยมากกว่าการออกแบบคำนึงถึงเพียงโมเมนต์จากระยะการดัดโค้งเท่านั้น ซึ่งจะทำให้โครงถักมีค่าความปลอดภัยมีความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้นและค่าการทรุดตัวลดน้อยลง จึงได้นำโครงหลังคาสนามฟุตบอล มหาวิทยาลัยบูรพา มาเป็นกรณีตัวอย่างในการศึกษา

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาวิธีการวิเคราะห์หาแรงภายในของโครงถักที่มีลักษณะการก่อสร้างแบบดัดโค้ง
2. เพื่อศึกษาวิธีการออกแบบชิ้นส่วนโครงถักที่มีการก่อสร้างแบบดัดโค้ง
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของการดัดโค้งที่มีต่ออัตราส่วนความปลอดภัยและการแอ่นตัว

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. การศึกษาโครงถักของหลังคาสนามฟุตบอลมหาวิทยาลัยบูรพาขนาดความกว้าง 27.60 เมตร และมีขนาดความยาว 42 เมตร
2. โครงถักจะถูกระบุให้มีพฤติกรรมแบบยึดหยุ่นเท่านั้น
3. ชิ้นส่วนที่ใช้ในการออกแบบสำหรับการดัดโค้งและชิ้นส่วนอื่นๆ เลือกใช้หน้าตัดท่อกลมกลวงหรือ Steel pipe
4. น้ำหนักบรรทุกจรและน้ำหนักบรรทุกคงที่ พิจารณาจากแผ่นหลังคาเมทัลชีท และใช้น้ำหนักบรรทุกจรและบรรทุกคงที่ 50 kg/m^2 โดยงานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาผลกระทบของแรงลมและแรงอื่นๆ นอกจากน้ำหนักบรรทุกทุกและน้ำหนักคงที่
5. การวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงถักที่เป็น Internal hinge และเป็น fixed โดยโปรแกรม SAP

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้เข้าใจถึงวิธีการวิเคราะห์และออกแบบโครงถักที่มีลักษณะการก่อสร้างแบบโค้งดัดในที่
2. ทำให้ทราบถึงผลกระทบของอัตราส่วนความปลอดภัยและการแอ่นตัวของโครงถักที่มีการก่อสร้างแบบโค้งดัดในที่

1.5 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา

1. ศึกษาหัวข้อเรื่อง
2. ค้นคว้าหาข้อมูล และเอกสารที่เกี่ยวข้อง
3. ดำเนินงานบทที่ 1 บทนำ
4. ดำเนินงานบทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
5. ดำเนินงานบทที่ 3 การดำเนินการงานวิจัย
6. ส่งเล่มรายงาน บทที่1-3
7. เตรียมการนำเสนอต่อคณะกรรมการ ครั้งที่ 1
8. ดำเนินงานบทที่ 4 วิเคราะห์ผลการวิจัย
9. ดำเนินงานบทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ
10. ส่งเล่มรายงานฉบับสมบูรณ์

บทที่2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติความเป็นมา

ก่อนเหล็กจะถูกนิยมนำมาใช้ในการก่อสร้าง ในช่วงศตวรรษที่ 19 โครงสร้างโค้งถูกสร้างขึ้นบ่อยๆ จากเหล็กที่ถูกหล่อขึ้นรูปโค้งจากน้ำเหล็ก (ดังรูป 2.1) หรือสร้างจากเหล็กดัดที่ถูกทำให้อ่อนตัวด้วยความร้อน (ดังรูป 2.2) ทั้งเหล็กแผ่นหรือเหล็กรูปพรรณ

เนื่องจากเหล็กดัดมีลักษณะเปราะบางมาก ช่วงตีเหล็กจึงมักดัดเหล็กให้โค้งโดยการทำให้อ่อนตัวด้วยความร้อนก่อนทำดัดโค้ง



ที่มา: Design of Curved Steel

รูปที่ 2.1.1 Curved cast iron roof trusses

ในช่วงศตวรรษที่ 20 เหล็กรีดร้อนโค้งถูกนำมาช่วยในงานการขุดถ่านหินใต้ดิน เครื่องกดไฮดรอลิกถูกนำมาใช้ในการดัดในระยะแรก แต่ในภายหลังเครื่องดัดแบบ 3 ลูกกลิ้งถูกนำมาใช้เนื่องจากทำให้ขนาดของแผ่น Web หนาพอสมควรจึงไม่เกิดความเสี่ยงต่อการโก่งเฉพาะที่ระหว่างทำการดัด

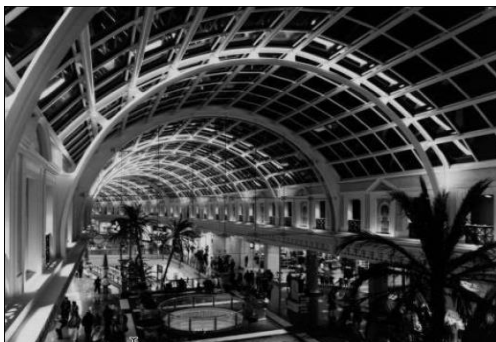


ที่มา: Design of Curved Steel

รูปที่ 2.1.2 Curved wrought iron with decorative cast iron inserts

เหล็กดัดยังใช้ในการประดิษฐ์ลำตัวเรือ ก่อนปี ค.ศ.1910 อุปกรณ์ในการดัดโค้งใช้ร่วมกับ ลูกกลิ้งถูกใช้เพื่อ curve bulb flats, bulb angles and ยางสำหรับใช้บนเรือ ในช่วงปี ค.ศ. 1930 ถึง 1950 ชิ้นส่วนเหล็กโค้งขนาดเล็กถูกนำมาใช้ในโครงสร้างอาคารอย่างง่าย กระท่อมโค้ง โรงสำหรับจอดเครื่องบิน และโรงนา มักมีโครงสร้างเป็นโครงเหล็กโค้ง

โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำอุปกรณ์ที่สามารถโค้งเหล็กได้อย่างถูกต้องและประหยัดข้อได้เปรียบโดยธรรมชาติของการก่อสร้างด้วยโครงเหล็กถูกเสริมด้วยความเป็นไปได้ในการออกแบบใหม่ที่เคยถูกจำกัดไว้ในรูปแบบทางเลือกของการก่อสร้างหรือจำกัดด้วยการพิจารณาค่าใช้จ่าย ข้อได้เปรียบหลักของการใช้วัสดุโค้ง คือ ความสวยงามของชิ้นส่วนและท่อเหล็กที่โค้งงอได้ซึ่งทำให้เปิดโลกทัศน์ใหม่ในการออกแบบโครงสร้างเหล็กการก่อสร้างอาคารสมัยใหม่มักนิยมใช้เหล็กดัดโค้งเพื่อสร้างสุนทรียศาสตร์สมรรถนะเชิงโครงสร้างหรือทั้งสองอย่าง ตัวอย่างทั่วไปแสดงไว้ในขั้นตอนที่ 2.3 ถึง 2.6



ที่มา: Design of Curved Steel
รูปที่ 2.1.3 Portal with curved rafters



ที่มา: Design of Curved Steel
รูปที่ 2.1.4 Curved trusses for sports facility



ที่มา: Design of Curved Steel
รูปที่ 2.1.5 Curved roof steelwork to retail center



ที่มา: Design of Curved Steel

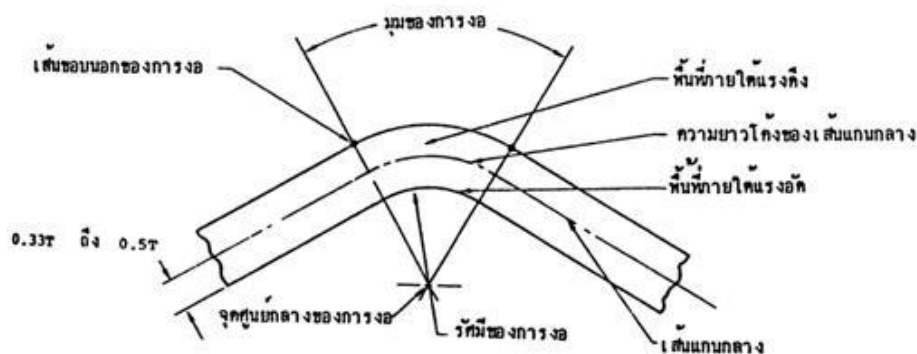
รูปที่ 2.1.6 Curved steel supports for walkway

2.2 วิธีการก่อสร้างโครงสร้างคดโค้ง

การคดโค้งในที่นี้เป็นกรรมวิธีการหนึ่งของการขึ้นรูปโลหะแบบไร้เศษ ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมผลิตเฟอร์นิเจอร์ ก่อสร้าง ฯลฯ การคดส่วนใหญ่ใช้ในงานโลหะแผ่น (Sheet Metal) งานลวด (Wire) งานท่อ (Pipe) และโลหะแท่ง (Rod) การเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของโลหะอยู่ที่บริเวณรัศมีการคด บริเวณนี้จะเกิดข้อบกพร่องได้ง่าย เช่น การย่น การแตก การบิดเบี้ยวของหน้าตัด โดยรัศมีการคดจากความเค้นในการคดความเค้นแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ความเค้นอัด (Compressive Stress) ความเค้นดึง (Tensile Stress) โดยตามทฤษฎีความเค้นอัดจะเกิดที่ด้านในส่วนนี้รัศมีการคดความเค้นดึงเกิดที่ด้านนอกรัศมีการคด

นิยามคำศัพท์ที่ใช้ในงานคดโลหะดังรูปที่ 2.2.1 ซึ่งแนวระนาบบนเส้นแกนกลาง (Neutral Plane) เป็นระนาบที่แบ่งบริเวณในการเกิดความเค้นดึงและความเค้นอัด เส้นแกนกลางนี้ยังใช้ประโยชน์ในการหาความยาวเริ่มต้นได้ด้วย เนื่องจากจะเกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวเล็กน้อยหลังจากการคด ความยาวของเส้นแกนกลางจะเท่ากับความยาวเดิมของชิ้นงาน ส่วนความยาวด้านนอกรัศมีการคดเพิ่มความยาวเพิ่มขึ้น และความยาวด้านในรัศมีการคดจะมีความยาวลดลง นั่นคือความยาวของเส้นแกนกลางจะแสดงถึงความยาวที่แท้จริงของชิ้นงาน ซึ่งขนาดที่แท้จริงของชิ้นงานจะหาได้จากเส้นแกนกลางหลังจากการคดแล้ว มุมคด (Bend Angle) คือ องศาที่นับการโลหะเริ่มต้นถูกคดเป็นมุม รัศมีการคด (Bend Radius) หมายถึงรัศมีการคดทางด้านใน แต่การคดในกรณีโลหะแผ่นก็

มีข้อจำกัดเกี่ยวกับมุมที่ถูกยกเลิกสำหรับกระบวนการคือ มุม 0 องศา และมุม -0 องศา เพราะถ้าขึ้นงานถูกงอที่มุม 360 องศา จะทำให้กลายเป็นการพับขอบไป



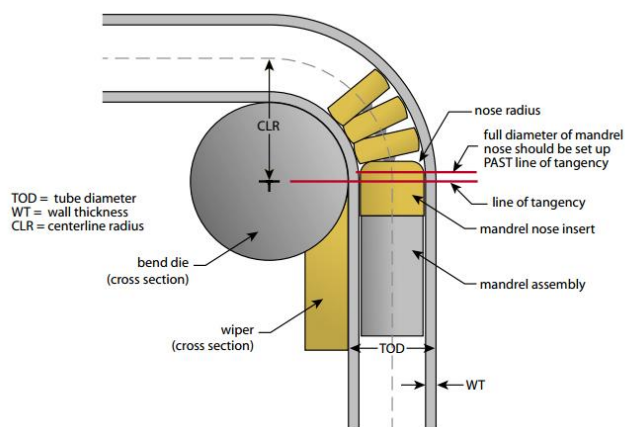
ที่มา : <http://eu.lib.kmutt.ac.th>

รูปที่ 2.2.1 รูปประกอบนิยามศัพท์ในการดัด

การดัดท่อโดยทั่วไป รัศมีดัดน้อยสุดจะมีค่าเป็น 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ การดัดท่อสามารถใช้ความร้อนเข้าช่วยได้ เรียกว่า การดัดร้อน (Hot Bending) หรือ ไม่ใช้ความร้อนเข้าช่วยเรียกว่า การดัดเย็น (Cold Bending) ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของการดัดท่อเป็น 4 แบบ Compression Bending แต่จะให้ความสำคัญกับการดัดประเภทหลักๆ อีก 1 ประเภท Compression Bending เป็นพิเศษเนื่องจากโครงการนี้ใช้การดัดประเภทดังกล่าว ซึ่งประเภทการดัดท่อจะมีดังนี้

2.2.1 การดัดประเภท Mandrel Bending

เป็นระบบการดัดท่อชนิดหนึ่ง การดัดท่อแบบนี้จะช่วยให้อายุการใช้งานของท่อที่ดัดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันโดยตลอด อีกทั้งการดัดแบบนี้ยังช่วยลดข้อจำกัดของการดัดท่อได้ถึง 25 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นในโรงงานอุตสาหกรรม การดัดแบบ Mandrel Bending นั้นสามารถสร้างส่วนดัดโค้งในการดัดได้มากกว่าการดัดที่ไม่ใช้แรงกด หรือ แรงอัด อีกทั้งยังทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่ทำการดัดมีลักษณะที่เป็นวงเต็มตลอดความยาวท่อแม้ว่าจะเป็นส่วนของรัศมีโค้งก็ตาม ซึ่งในอุตสาหกรรมการดัดได้ให้ความสนใจเกี่ยวกับการดัดแบบ Mandrel แต่ชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆ ของการดัดแบบนี้ยังประยุกต์ใช้ในการดัดได้ไม่มาก

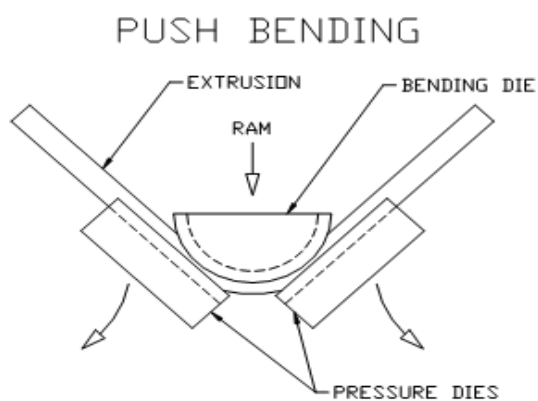


ที่มา : <http://www.burnsstainless.com/bendquality.aspx>

รูปที่ 2.2.2 การดัดประเภท Mandrel Bending

2.2.2. การดัดประเภท Ram or Push Bending

กระบวนการดัดท่อแบบนี้ได้ใช้ระบบไฮดรอลิกส์มาทำให้แม่พิมพ์ตายเคลื่อนที่ลงมา กดลงที่ท่อ ซึ่งท่อจะถูกรองรับด้วยปีกของคาย โดยที่ปีกของคายแยกออกเป็นด้าน และมีลักษณะเป็นโค้งลงตรงศูนย์กลางของการดัดท่อ ซึ่งท่อจะมีการเคลื่อนเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่บริเวณแม่พิมพ์นี้ โดยปีกคายแต่ละด้านจะเป็นตัวช่วยรองรับท่อทั้ง 2 ข้าง ดังรูปที่ 2.2.3 กระบวนการดัดแบบนี้เหมาะสมอย่างมากต่ออุตสาหกรรมที่ต้องผลิตปริมาณมาก และต้องการความรวดเร็วในการผลิต

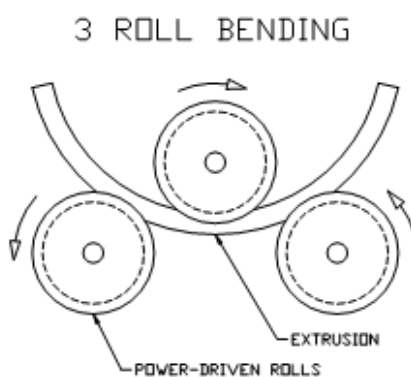


ที่มา : <http://www.alexandriaindustries.com>

รูปที่ 2.2.3 การดัดแบบ Ram or Push Bending

2.2.3. การดัดประเภท 3-Roll Bending

เป็นวิธีการม้วนดัดใช้สำหรับการดัดชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่หรือรัศมีขนาดใหญ่โดยลูกดัดทั้ง 3 ลูกจะถูกจัดวางในรูปทรงปิระมิดดังรูปที่ 2.2.4 ลูกดัดทั้ง 2 ลูกจะถูกยึดติดให้อยู่กับที่ วิธีการนี้คล้ายกับวิธีการดัดแบบ Ram Bending แต่การทำงานต้องให้ลูกกลิ้งทั้งสองข้างหมุนก่อนแล้วจึงจะสามารถดัดชิ้นงานได้เรียกว่า Pipe Rolls

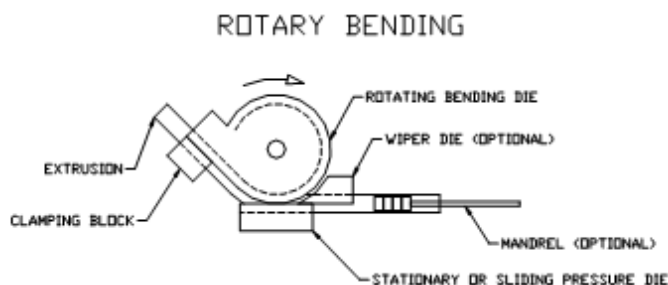


ที่มา : <http://www.alexandriaindustries.com>

รูปที่ 2.2.4 การดัดแบบ 3-Roll Bending

2.2.4. การดัดประเภท Rotary Draw Bending

เป็นการบวนการดัดท่อที่นิยมใช้มากที่สุดเกี่ยวกับการดัดท่อ ซึ่งการดัดแบบนี้จะรักษารูปร่างสำเร็จ และเส้นผ่านศูนย์กลางให้คงที่ ท่อที่ถูกดัดจะถูกลากผ่านลูกกลิ้งที่ติดอยู่กับที่ดัดบนด้ายที่ติดแน่นดังรูปที่ 2.2.5

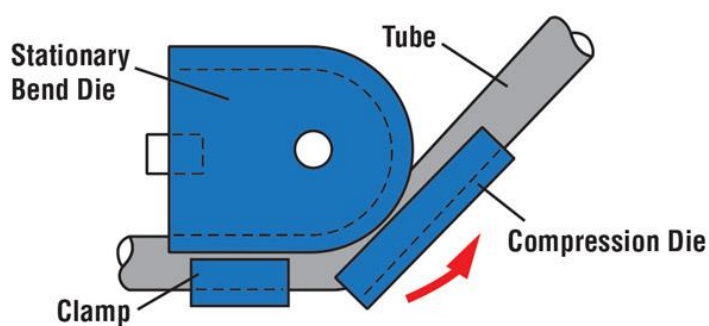


ที่มา : <http://www.alexandriaindustries.com>

รูปที่ 2.2.5 การดัดแบบ Ram or Push Bending

2.2.5. การดัดประเภท Compression Bending

เป็นประเภทของการดัดชนิดหนึ่งซึ่งกล่าวไว้ว่าใช้แรงในการอัดตลอดจนเป็นการประยุกต์มาจากการดัดประเภท Rotary Draw Bending การดัดประเภทนี้ชิ้นส่วนโลหะที่จะหมุนหรือเลื่อนไปรอบๆ โดยลิ้มดัด (Pressure Die) ตามรัศมีการดัดของแม่พิมพ์ดัด (Bend Die) ซึ่งติดอยู่กับที่ ดังรูปที่ 2.2.6



ที่มา : <https://www.thefabricator.com>

รูปที่ 2.2.6 การดัดประเภท Compression Bending

2.3 ผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากการตัดโค้งในโครงถัก

2.3.1 ผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากหน่วยแรงดัด

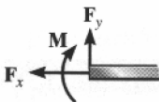
$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI}$$

การโก่งตัวหรือการแอ่นตัว (deflection) ของโครงสร้างเกิดจากสาเหตุหลายประการ เช่น แรง (forces) หรือน้ำหนักบรรทุก (loads) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และการทรุดตัวของรากฐาน (settlement) เป็นต้น ในการออกแบบโครงสร้าง นอกจากเราจะต้องหาค่าของหน่วยแรง (stresses) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างแล้ว เราจะต้องตรวจสอบดูว่าค่าการโก่งตัวของโครงสร้าง ซึ่งรวมถึงมุมหรือความลาดเอียง (slope) และระยะโก่งตัว (deflection) มีค่าเกินค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานการออกแบบ (design code) หรือไม่ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการแตกร้าวและการสั่นขึ้นในโครงสร้าง นอกจากนั้นแล้ว การหาค่าการโก่งตัวยังเป็นพื้นฐานของการวิเคราะห์โครงสร้างแบบ Statically indeterminate ด้วย

โดยทั่วไปแล้ว เราจะร่างเส้นโค้งอีลาสติกได้โดยการสังเกตจุดรองรับของโครงสร้างว่ามีการยึดรั้งโครงสร้างหรือมีการป้องกันไม่ให้เกิดมุมลาดเอียง θ และระยะการโก่งตัว Δ ที่จุดรองรับอย่างไร ดังที่แสดงในตารางที่ 2.3 โดยเราทราบบนมาแล้วว่า

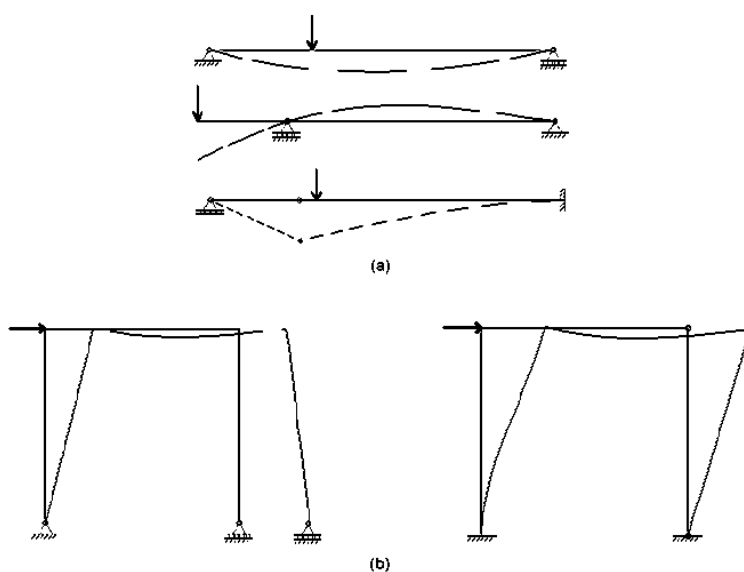
1. จุดรองรับที่ต้านทานแรงกระทำ เช่น หมุด (pin support) และ roller support เป็นต้น จะป้องกันไม่ให้เกิดระยะการโก่งตัวในแนวที่จุดรองรับสามารถต้านแรงกระทำได้
2. จุดรองรับที่ต้านทานต่อโมเมนต์ เช่น จุดรองรับแบบยึดแน่น (fixed support) เป็นต้น จะป้องกันไม่ให้เกิดมุมลาดเอียงและระยะการโก่งตัวที่จุดรองรับ
3. ถ้าจุดต่อขององค์อาคารเป็นแบบยึดแน่น (fixed-connected joint) เช่น จุดต่อในโครงข้อแข็ง เป็นต้น แล้วเมื่อจุดต่อเกิดการหมุนไปเป็นมุม θ แล้ว องค์อาคารที่ถูกเชื่อมต่อกี้จะมีมุมลาดเอียงเกิดขึ้นเท่ากับ θ ด้วย เนื่องจากจุดต่อดังกล่าวสามารถถ่ายโมเมนต์ตัดจากองค์อาคารหนึ่งไปยังอีกองค์อาคารหนึ่งได้
4. ถ้าจุดต่อขององค์อาคารเป็นหมุด (pin-connected joint) แล้ว มุมลาดเอียงที่เกิดขึ้นในองค์อาคารที่ถูกเชื่อมต่อกี้จะมีค่าไม่มีความสามารถในการต้านทานโมเมนต์ดัด

ตาราง 2.3 ประเภทของจุดรองรับ

ประเภทของจุดรองรับ	แรงปฏิกิริยา	การยั้งตัวของจุดรองรับ
 rollers	 F	$\Delta_y = 0$
 pin or hinge	 F_y F_x	$\Delta_x = 0$ $\Delta_y = 0$
 fixed support	 F_y F_x M	$\Delta_x = 0$ $\Delta_y = 0$ $\theta = 0$

ที่มา : เอกสารประกอบการสอนวิชาทฤษฎีโครงสร้าง Theory of Structures เรียบเรียงโดย
ผศ.ดร. สิทธิชัย แสงอาทิตย์ SUT

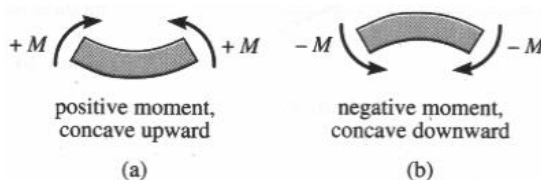
โดยใช้หลักการสังเกตดังกล่าว เราจะร่างเส้นโค้งอีลาสติคของคาน ซึ่งถูกกระทำโดยแรงภายนอกได้ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.3.1a และของโครงข้อแข็ง (Frame) ได้ดังที่แสดงในรูปที่ 2.3.1b (ค่าของการโก่งตัวที่แสดงมีค่ามากกว่าความเป็นจริงมาก)



ที่มา : เอกสารประกอบการสอนวิชาทฤษฎีโครงสร้าง Theory of Structures เรียบเรียงโดย
ผศ.ดร. สิทธิชัย แสงอาทิตย์ SUT

รูปที่ 2.3.1 การร่างเส้นโค้งอีลาสติคของคานและโครงข้อแข็ง

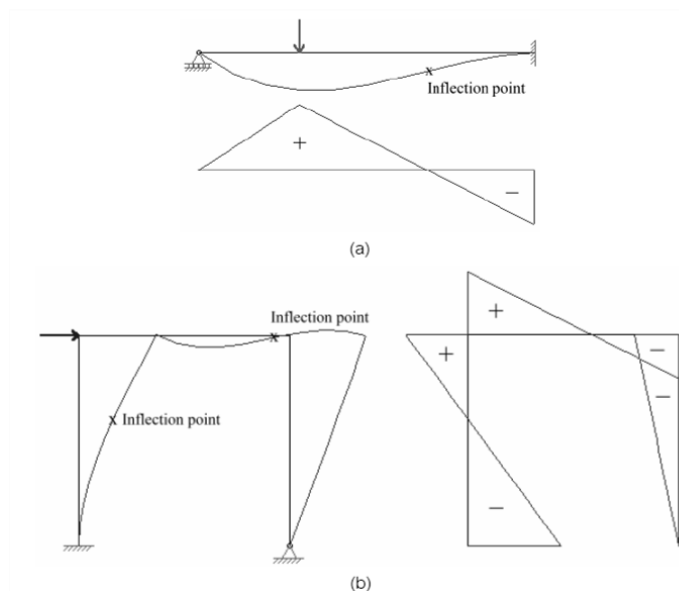
นอกจากนั้นแล้ว เราสามารถเขียนเส้นโค้งอีลาสติกได้โดยใช้ moment diagram ของ โครงสร้างและ Sign convention ของโมเมนต์ดัดที่เราใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง ดังที่แสดงในรูปที่ 2.3.2 จากรูป โมเมนต์ดัดที่เป็นบวกจะทำให้คานเกิดการโค้งหงาย (concave upward) ดังที่แสดงใน รูปที่ 2.3.2a และโมเมนต์ที่เป็นลบจะทำให้คานเกิดการโค้งคว่ำ (concave downward) ดังที่แสดงใน รูปที่ 2.3.2b จุดเชื่อมต่อของโค้งคว่ำและโค้งหงายจะถูกเรียกว่า จุดดัดกลับ (inflection point) ซึ่งเป็นจุดที่โมเมนต์ดัดมีค่าเป็นศูนย์ รูปที่ 2.3.3a และ 2.3.3b เป็นตัวอย่างของการร่างเส้นโค้งอีลาสติก โดยใช้ moment diagram ของคานและโครงข้อแข็ง ตามลำดับ



ที่มา : เอกสารประกอบการสอนวิชาทฤษฎีโครงสร้าง Theory of Structures เรียบเรียงโดย

ผศ.ดร. สิทธิชัย แสงอาทิตย์ SUT

รูปที่ 2.3.2 การร่างเส้นโค้งอีลาสติกโมเมนต์ดัดของคาน



ที่มา : เอกสารประกอบการสอนวิชาทฤษฎีโครงสร้าง Theory of Structures เรียบเรียงโดย

ผศ.ดร. สิทธิชัย แสงอาทิตย์ SUT

รูปที่ 2.3.3 การร่างเส้นโค้งอีลาสติกโดยใช้ moment diagram ของคานและโครงข้อแข็ง

2.3.2 Elastic Beam Theory

พิจารณาคานยื่น (Cantilevered beam) ซึ่งมีจุดเริ่มต้นของระบบแกนตั้งฉาก x-y ที่จุด A ดังที่แสดงในรูปที่ 2.3.2a กำหนดให้ คานถูกกระทำโดยแรงหรือน้ำหนักบรรทุกในตั้งฉากกับแนวแกนของคานและอยู่ในระนาบเดียวกันกับระนาบที่หน้าตัดของคานมีความสมมาตร ดังนั้น ภายใต้แรงกระทำ คานจะเกิดการโก่งตัวในระนาบที่แรงกระทำ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.3.2b โดยที่ระนาบของหน้าตัดของคานไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและยังคงตั้งฉากกับแนวแกนของคานเหมือนก่อนเกิดการโก่งตัว ที่แสดงในรูปที่ 2.3.2d นอกจากนั้นแล้ว กำหนดให้ความยาวของคานมีค่ามากกว่าความลึกของคานมาก ดังนั้น เราจะพิจารณาเฉพาะการโก่งตัวที่เกิดขึ้นจากโมเมนต์เท่านั้น

ความโค้งของส่วนของคาน (Curvature of Differential Element)

จากรูปที่ 2.3.2b และ 2.3.2c ให้เราพิจารณาส่วนของคานที่มีความยาวน้อยมาก dx และอยู่ระหว่างจุด m_1 (ที่ระยะ x จากจุด A) และจุด m_2 (ที่ระยะ $x + dx$ จากจุด A) ภายใต้แรง P ความยาวของส่วนของคานดังกล่าวในแนวแกนสะเทิน (neutral axis) มีค่าเท่ากับ $ds = \rho d\theta$ ดังนั้น ความโค้งของส่วนของคาน dx จะมีค่าเท่ากับ

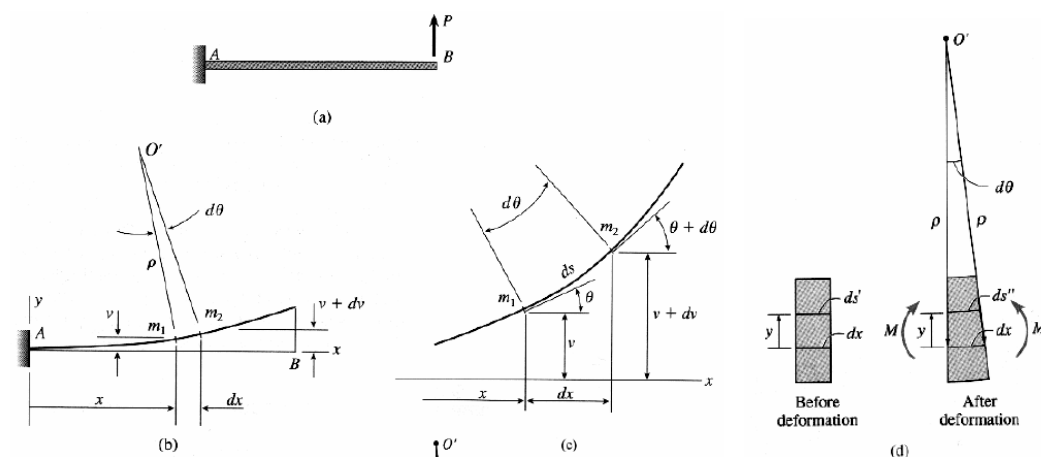
$$\frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{ds}$$

และค่ามุมลาดเอียงของส่วนของคานดังกล่าว ที่แกนสะเทินระหว่างจุด m_1 และ m_2 จะมีค่าเท่ากับ

$$\frac{dv}{dx} = \tan \theta \quad \text{หรือ} \quad \theta = \tan^{-1} \frac{dv}{dx}$$

จากวิชาแคลคูลัส (Calculus) เนื่องจาก θ และ s เป็นฟังก์ชันของ x ดังนั้น เราจะเขียนสมการขอความโค้งใหม่เป็น $\frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{dx} \frac{dx}{ds}$ และแทนค่าสมการ (b) ลงในสมการนี้ เห็นได้ว่า

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{dx} \frac{dx}{ds} = \frac{d}{dx} \left(\tan^{-1} \frac{dv}{dx} \right) \frac{dx}{ds}$$



ที่มา : เอกสารประกอบการสอนวิชาทฤษฎีโครงสร้าง Theory of Structures เรียบเรียงโดย

ผศ.ดร. สิทธิชัย แสงอาทิตย์ SUT

รูปที่ 2.3.2 ความโค้งของส่วนคาน

จากรูปที่ 2.3.3c เราจะได้ว่า

$$ds^2 = dx^2 + dv^2$$

ดังนั้น

$$ds = \sqrt{dx^2 + dv^2}$$

หารสมการ (d) ด้วย dx เราจะได้

$$\frac{ds}{dx} = \left[1 + \left(\frac{dv}{dx} \right)^2 \right]^{1/2}$$

หรือ

$$\frac{dx}{ds} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{dv}{dx} \right)^2 \right]^{1/2}}$$

จากแคลคูลัส เราสามารถพิสูจน์ได้ว่า

$$\frac{d}{dx} \left(\tan^{-1} \frac{dv}{dx} \right) = \frac{\frac{d^2v}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dv}{dx} \right)^2 \right]}$$

แทนสมการ (e) และสมการ (f) ลงในสมการ (c) เราจะได้ ความโค้งของส่วนคานอยู่ในรูป

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\frac{d^2v}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dv}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

ความสัมพันธ์ของโมเมนต์และความโค้ง (Moment Curvature Relationships)

เราจะหาความสัมพันธ์ของโมเมนต์และความโค้งของส่วนของคานาได้โดยการพิจารณา รูปที่ 2.17d ซึ่งเป็นรูปขยายของส่วนของคานาทั้งก่อนและหลังจากที่ถูกกระทำโดยโมเมนต์ดัดภายใน M (internal moment)

ก่อนเกิดการดัด : ความยาวของส่วนของคานาที่แกนสะเทินและที่ระยะ y จากแกนสะเทินจะมีค่าเท่ากันคือ $dx = ds'$

หลังเกิดการดัด : ความยาวของส่วนของคานาที่แกนสะเทินจะยังคงมีความยาวเท่าเดิมคือ (จากค่านิยามของแกนสะเทิน) แต่ความยาวของส่วนของคานาที่ระยะ y จากแกนสะเทินจะมีค่าเปลี่ยนจาก เป็น โดยที่

$$ds'' = (\rho - y)d\theta$$

จากนิยามของความเครียดตั้งฉาก (normal strain) ที่เกิดขึ้นในแนวแกนของคานา เราจะได้ว่า

$$\varepsilon = \frac{ds'' - ds'}{ds'} = \frac{(\rho - y)d\theta - \rho d\theta}{\rho d\theta} = \frac{y}{\rho}$$

หรือ

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{\varepsilon}{y}$$

ถ้าคานาทำด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง (isotropic) และเป็นเนื้อเดียวกัน (homogenous) และมีพฤติกรรมอยู่ในช่วง linear elastic แล้ว จาก Hooke's Law, $\sigma = E\varepsilon$ และ จาก flexurala, $\sigma = \frac{Mc}{I}$ เราจะได้ว่า ความเครียดตั้งฉากที่ตำแหน่ง y มีค่าเท่ากับ $\varepsilon = \frac{My}{EI}$ หรือ

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (2)$$

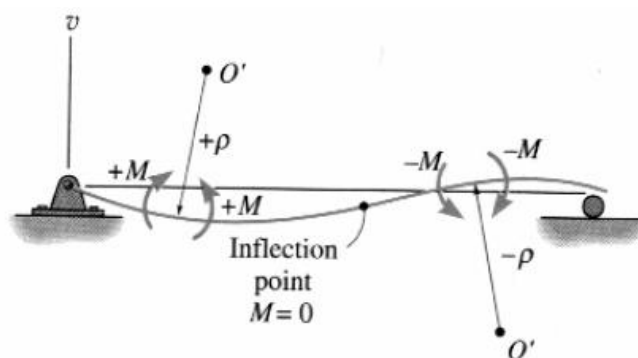
เมื่อ ρ เป็นรัศมีความโค้ง (radius of curvature) ของส่วนของคาน

M เป็นโมเมนต์ดัดภายใน ที่กระทำอยู่บนส่วนของคาน

E เป็นโมดูลัสความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ของวัสดุที่ใช้ทำคาน

I เป็น moment of inertia ของพื้นที่หน้าตัดของคานรอบแกนสะเทิน

EI มักถูกเรียกว่า Flexural rigidity ซึ่งจะมีค่าเป็นบวกเสมอ และรัศมีความโค้ง ρ จะมีเครื่องหมายตามเครื่องหมายของโมเมนต์ M เมื่อ M มีค่าเป็นบวกแล้ว ρ ก็จะมีค่าเป็นบวกด้วย และเมื่อ M มีค่าเป็นลบแล้ว ρ ก็จะมีค่าเป็นลบด้วย ดังที่แสดงตามรูปที่ 2.3.3



ที่มา : เอกสารประกอบการสอนวิชาทฤษฎีโครงสร้าง Theory of Structures เรียบเรียงโดย

ผศ.ดร. สิทธิชัย แสงอาทิตย์ SUT

รูปที่ 2.3.3 ความสัมพันธ์ของโมเมนต์และรัศมีความโค้ง

สมการอนุพันธ์ของเส้นโค้งของการโก่งตัว (Differential Equation of Deflection)

แทนค่าสมการที่ (1) ลงในสมการที่ (2) เราจะได้ สมการอนุพันธ์ของเส้นโค้งของการโก่งตัวอยู่ในรูป

$$\frac{M}{EI} = \frac{\frac{d^2v}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dv}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์ไม่เชิงเส้นตรงอันดับสอง (nonlinear second order differential equation) และถูกเรียกว่า Elastica ค่าการโก่งตัว v ที่หาได้จากสมการนี้จะเป็นค่าการโก่งตัวที่แท้จริงของเส้นโค้งอีลาสติก แต่หามาได้ยากมาก อย่างไรก็ตามค่าของการโก่งตัวของคาน มักจะถูกกำหนดให้มีค่าน้อยมาก เช่น $\frac{L}{360}$ เมื่อ L เป็นความยาวของ span ของคาน เป็นต้น ซึ่งจะทำให้ค่ามุมลาดเอียง $\frac{dv}{dx}$ มีค่าน้อยกว่า 1 มาก ดังนั้น เทอม $\left(\frac{dv}{dx}\right)^2$ ก็จะมีค่าประมาณศูนย์และจะไม่นำมาพิจารณาในการหาค่าการโก่งตัวของคาน ดังนั้น เราเขียนสมการที่ (3) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{M}{EI} = \frac{d^2v}{dx^2}$$

และเราจะได้ว่าความยาวของคานก่อนถูกกระทำโดยแรงจะมีค่าโดยประมาณเท่ากับความยาวของคานหลังถูกกระทำโดยแรงหรือ

$$ds = \sqrt{dx^2 + dv^2} = \left(\sqrt{1 + \left(\frac{dv}{dx}\right)^2} \right) dx \approx dx$$

2.4 ผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากโมเมนต์ดัดภายในชิ้นส่วนตัดโค้ง

วิธีการวิเคราะห์โครงถักในชิ้นส่วนโค้งสามารถวิเคราะห์ได้ 2 วิธีคือ

1. Method of Joints คือการสมดุลของแรงที่กระทำข้อต่อ
 2. Method of Section คือการตัดโครงสร้างเป็นส่วนย่อยแล้วหาแรงในชิ้นส่วนที่ถูกตัด
- เมื่อวิเคราะห์แรงภายในชิ้นส่วนแล้ว เราสามารถนำแรงภายในหรือแรงตามแนวแกนที่

วิเคราะห์ได้มาใช้ในการหาหน้าตัดของโครงถักเพื่อคำนวณต่อหรือเปรียบเทียบกำลังของเหล็กจากสมการ

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

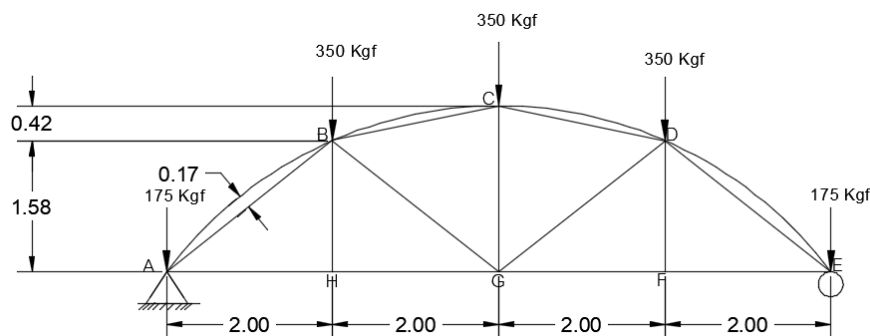
หรือ จากสมการ

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{Mc}{I}$$

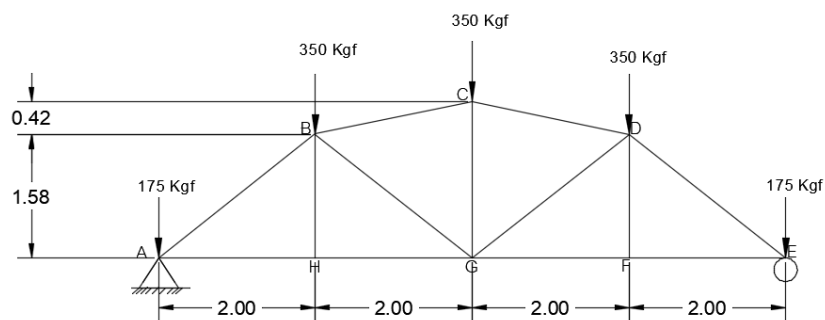
โดย $M = P \times \Delta$

และ Δ = ระยะเนื่องจากการตัดโค้งจากแนวแกน

ตัวอย่างการวิเคราะห์โครงถักชิ้นส่วนโค้ง



เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณหาแรงภายในตามแนวแกนได้จะสามารถพิจารณาโครงถักตามได้ดังนี้



หาแรงปฏิกิริยาที่ข้อบัพอร์ท

$$+\sum M_A = 0 ; \quad 350(2) + 350(4) + 350(6) + 175(8) - E_y(8) = 0$$

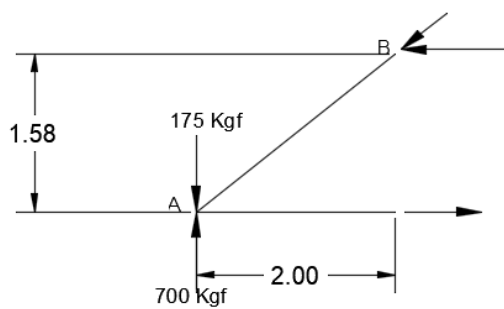
$$E_y = 700 \text{ kgf}.$$

$$+\uparrow \sum F_y = 0 ; \quad A_y + 700 - 350 \times 3 - 175 \times 2 = 0$$

$$A_y = 700 \text{ kgf}.$$

พิจารณาที่

Joint A



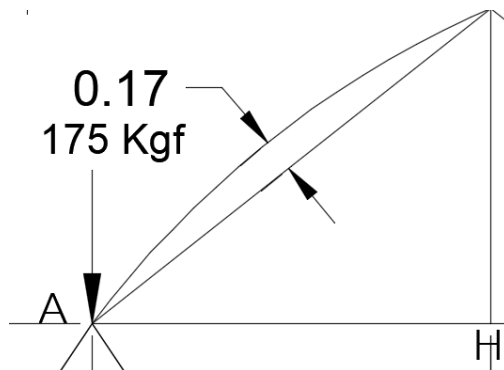
$$+\uparrow \sum F_y = 0 ; \quad 700 - 175 - F_{AB} \sin 38.31 = 0$$

$$F_{AB} = 846.89 \text{ kgf} . (C)$$

$$+\rightarrow \sum F_x = 0 ; \quad -F_{AH} - (846.89 \cos 38.31) = 0$$

$$F_{AH} = -664.53 \text{ kgf} . (T)$$

พิจารณาโมเมนต์ภายในเนื่องจากการตัดโค้ง



โมเมนต์ = แรง $\times$ ระยะตั้งฉากจากจุดหมุน

$$M_{AB} = 846.89 \text{ Kgf} \cdot \times 17 \text{ cm}$$

$$M_{AB} = 14397 \text{ Kg} - \text{cm}$$

กรณีจุดต่อมีลักษณะเป็น Internal hinge

หาพื้นที่หน้าตัดเหล็กจากสมการ

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

และเลือกใช้ Factor of safety = 2

เขียนในรูปสมการจะได้

$$\frac{\sigma}{2} = \frac{P}{A}$$

กำลังเหล็กกล้าคาร์บอน A36 $\sigma = 2400 \text{ Kg} / \text{cm}^2$

แทนค่าจะได้เท่ากับ

$$\frac{2400 \text{ Kg} / \text{cm}^2}{2} = \frac{846.89 \text{ kgf} \cdot}{A}$$

$$A = 0.71 \text{ cm}^2$$

สามารถเลือกเหล็กท่อขนาด Diameter = 21.7 mm. หนา 2 mm.

พื้นที่หน้าตัด = 1.238 cm^2

Moment of inertia = 0.607 cm^4

$$\text{แทนในสมการ} \quad \sigma = \frac{P}{A}$$

$$\text{จะได้} \quad \sigma = \frac{846.89}{1.238}$$

$$\sigma = 684.08 < 1200 \text{ Kg} / \text{cm}^2 \quad \underline{\text{OK}}$$

ด้วยวิธี try out and error

สามารถเลือกเหล็กท่อขนาด Diameter = 76.3 mm. หนา 4 mm.

พื้นที่หน้าตัด = 9.085 cm^2

Moment of inertia = 59.5 cm^4

$$\text{แทนในสมการ} \quad \sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{Mc}{I}$$

$$\text{จะได้} \quad \sigma = \frac{846.89}{9.085} \pm \frac{14397 \times 3.815}{59.5}$$

$$\sigma = 1016.32 < 1200 \text{ Kg} / \text{cm}^2 \quad \underline{\text{OK}}$$

และจากสมการ

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI}$$

$$M = \frac{EI}{\rho}$$

ρ = รัศมีส่วนโค้งของโครงถัก

E = โมดูลัสยืดหยุ่น

$$M = \frac{2.1 \times 10^6 \times 59.5}{500}$$

$$M = 249,900 \text{ Kg} - \text{cm}$$

ด้วยวิธี try out and error

สามารถเลือกเหล็กท่อขนาด Diameter = 216.3 mm. หนา 8 mm.

พื้นที่หน้าตัด = 52.35 cm²

Moment of inertia = 2840 cm⁴

$$\text{แทนในสมการ} \quad \sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{Mc}{I}$$

$$\text{จะได้} \quad \sigma = \frac{846.89}{52.35} \pm \frac{264297 \times 10.815}{2840}$$

$$\sigma = 1022.65 < 1200 \text{ Kg/cm}^2 \quad \underline{\text{OK}}$$

กรณีจุดต่อมีลักษณะเป็น Fixed

หาพื้นที่หน้าตัดเหล็กจากสมการ

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

และเลือกใช้ Factor of safety = 2

$$\text{เขียนในรูปสมการจะได้} \quad \frac{\sigma}{2} = \frac{P}{A}$$

กำลังเหล็กกล้าคาร์บอน A36 $\sigma = 2400 \text{ Kg/cm}^2$

จากโปรแกรม SAP 2000 คำนวณแรงภายในชิ้นส่วน AB มีค่าเท่ากับ 953 Kgf

แทนค่าจะได้เท่ากับ

$$\frac{2400 \text{ Kg/cm}^2}{2} = \frac{953 \text{ kgf.}}{A}$$

$$A = 0.79 \text{ cm}^2$$

สามารถเลือกเหล็กท่อขนาด Diameter = 21.7 mm. หนา 2 mm.

พื้นที่หน้าตัด = 1.238 cm²

Moment of inertia = 0.607 cm⁴

$$\text{แทนในสมการ} \quad \sigma = \frac{P}{A}$$

$$\text{จะได้} \quad \sigma = \frac{953}{1.238}$$

$$\sigma = 769.79 < 1200 \text{ Kg/cm}^2 \quad \underline{\text{OK}}$$

ด้วยวิธี try out and error

สามารถเลือกเหล็กท่อขนาด Diameter = 76.3 mm. หนา 4 mm.

พื้นที่หน้าตัด = 9.085 cm²

Moment of inertia = 59.5 cm⁴

$$\begin{aligned} \text{แทนในสมการ} \quad \sigma &= \frac{P}{A} \pm \frac{Mc}{I} \\ \text{จะได้} \quad \sigma &= \frac{953}{9.085} \pm \frac{16201 \times 3.815}{59.5} \\ \sigma &= 1016.32 < 1200 \text{ Kg/cm}^2 \quad \underline{\text{OK}} \end{aligned}$$

และจากสมการ

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} &= \frac{M}{EI} \\ M &= \frac{EI}{\rho} \\ M &= \frac{2.1 \times 10^6 \times 59.5}{500} \\ M &= 249900 \text{ Kg} - \text{cm} \end{aligned}$$

ด้วยวิธี try out and error

สามารถเลือกเหล็กท่อขนาด Diameter = 216.3 mm. หนา 8 mm.

พื้นที่หน้าตัด = 52.35 cm²

Moment of inertia = 2840 cm⁴

$$\begin{aligned} \text{แทนในสมการ} \quad \sigma &= \frac{P}{A} \pm \frac{Mc}{I} \\ \text{จะได้} \quad \sigma &= \frac{953}{52.35} \pm \frac{266101 \times 10.815}{2840} \\ \sigma &= 1031.54 < 1200 \text{ Kg/cm}^2 \quad \underline{\text{OK}} \end{aligned}$$

2.5 การออกแบบหน้าตัดเหล็กรับแรงตามแนวแกนและแรงดัดด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (ASD)

โครงสร้างส่วนที่รับแรงในแนวแกนนั้น โดยปกติแล้วมักจะมีโมเมนต์ดัดเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างที่วางตัวอยู่ในแนวนอนหรือแนวเอียง ในการคำนวณหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง จำเป็นต้องคำนึงถึงผลที่จะเกิดขึ้นทั้งแรงจากแนวแกนและจากโมเมนต์ดัด โครงสร้างส่วนที่รับแรงในแนวแกนและแรงดัดพร้อมกัน อาจพบได้ทั่วไป เช่น ใสเสาของโครงข้อแข็ง (Rigid frame) ในเสาเอียงศูนย์อันเนื่องมาจากการก่อสร้างที่ไม่ดี ในจันทันของโครงหลังคาเหล็ก หรือในโครงหลังคาเหล็กในลักษณะที่ถูกดัดโค้ง

หน่วยแรงที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งใดๆ ในโครงสร้างสามารถคำนวณได้จาก

$$f = \frac{P}{A} \pm \frac{Mc}{I}$$

ในบางกรณี โมเมนต์ดัดอาจเกิดขึ้นได้ทั้งสองแกน ค่าหน่วยแรงรวมสามารถคำนวณได้จาก

$$f = \frac{P}{A} \pm \frac{M_x y}{I_x} \pm \frac{M_y x}{I_y}$$



ที่มา : เอกสารประกอบการสอนวิชาทฤษฎีโครงสร้าง Theory of Structures เรียบเรียงโดย ผศ.ดร. สิทธิชัย แสงอาทิตย์ SUT

รูปที่ 2.5.1 โครงสร้างที่รับแรงอัดและแรงดัดพร้อมกัน

โครงสร้างที่รับแรงอัดตามแนวแกนและแรงดัดพร้อมกัน จะต้องออกแบบให้เป็นไปตามข้อกำหนดดังนี้

อัตราส่วนของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงต่อหน่วยแรงที่ยอมให้ เนื่องจากแรงอัด และโมเมนต์ดัดรวมกัน จะต้องไม่เกิน 1.0 (สมการ Interaction)

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0$$

เมื่อ f_a = หน่วยแรงอัดในแนวแกนที่เกิดขึ้นจริง $\left(\frac{P}{A}\right)$

f_b = หน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นจริง $\left(\frac{Mc}{I}\right)$

F_a = หน่วยแรงอัดที่ยอมให้

F_b = หน่วยแรงดัดที่ยอมให้

สมการข้างต้น ใช้ได้ดีในกรณีที่อัตราส่วน $\frac{f_a}{F_a}$ มีค่าไม่มาก ถ้าหากอัตราส่วน $\frac{f_a}{F_a}$ มีค่าเพิ่มมากขึ้น สมการข้างต้นจะให้ผลไม่ถูกต้อง เนื่องจากไม่ได้มีการคำนึงถึงผลของโมเมนต์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการโก่งด้านข้าง AISC จึงได้ทำการปรับปรุงสมการข้างต้น ให้มีความเหมาะสมขึ้น ดังนี้

มาตรฐานกำหนดของ AISC สำหรับ Combined stress

1. ถ้า $\frac{f_a}{F_a} > 0.15$

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_a}{F_{ex}}\right) F_{bx}} + \frac{f_{by}}{\left(1 - \frac{f_a}{F_{ey}}\right) F_{by}} \leq 1.0$$

$$\text{และ } \frac{f_a}{0.6F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad M_{AB} = F_{AB} \times L$$

2. ถ้า $\frac{f_a}{F_a} \leq 0.15$

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0$$

เมื่อ f_a = หน่วยแรงอัดในแนวแกนที่เกิดขึ้นจริง $\left(\frac{P}{A}\right)$

กก./ตร.ชม.

f_b = หน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นจริง $\left(\frac{Mc}{I}\right)$

กก./ตร.ชม.

F_a = หน่วยแรงอัดที่ยอมให้

กก./ตร.ชม.

F_b = หน่วยแรงดัดที่ยอมให้

กก./ตร.ชม.

F_e = Euler stress/Safety factor $= \frac{12\pi^2 E}{23\left(\frac{KL}{r_b}\right)^2}$

กก./ตร.ชม.

ค่า F_c' สามารถเพิ่มได้ 1/3 เท่าในกรณีของแรงลมและแรงแผ่นดินไหว

L = ความยาวอิสระในระนาบที่เกิดโมเมนต์ดัด ซม.

r_b = รัศมีจําเริญรอบแกนที่เกิดโมเมนต์ดัด ซม.

K = ตัวคูณประกอบความยาวประสิทธิผลในระนาบที่เกิดโมเมนต์ดัด

C_m = ค่าสัมประสิทธิ์ (Modification factor)

$(1 - \frac{f_a}{F_E})$ = ค่าสัมประสิทธิ์ขยาย (Amplification) เนื่องจากโมเมนต์ที่เพิ่มขึ้นจากการโก่งทาง

ด้านข้าง

ค่าสัมประสิทธิ์ C_m

1. สำหรับองค์อาคารรับแรงอัดในโครงข้อแข็งที่มีการเคลื่อนที่ด้านข้าง

$$C_m = 0.85$$

2. สำหรับองค์อาคารรับแรงอัดที่มีการยึดรั้งการหมุนในโครงข้อแข็งที่ไม่มีการเคลื่อนที่ทาง
ด้านข้าง และไม่มีแรงมากระทำทางด้านข้างระหว่างจุดรองรับในระนาบของการดัด

$$C_m = 0.6 - 0.4\left(\frac{M_1}{M_2}\right)$$

โดยที่ $\frac{M_1}{M_2}$ คืออัตราส่วนระหว่าง ค่าโมเมนต์น้อยต่อโมเมนต์มากที่ปลายช่วงขององค์อาคาร

ระหว่างการค้ำยันในระนาบของแรงดัดที่พิจารณา

ค่า $\frac{M_1}{M_2}$ เป็นบวกเมื่อเกิดการดัดโค้งกลับกัน และเป็นลบเมื่อเกิดโค้งเดียว

3. สำหรับองค์อาคารรับแรงอัดในโครงข้อแข็งที่ไม่มีการเคลื่อนที่ทางด้านข้างในระนาบของแรงกระทำแต่มีแรงต้านข้างกระทำระหว่างจุดรองรับขององค์อาคาร ค่า C_m อาจคำนวณได้จากการวิเคราะห์อย่างไรก็ตามอาจใช้ค่าดังต่อไปนี้ได้

ก. สำหรับองค์อาคารซึ่งมีการยึดรั้งการหมุนที่จุดปลายในระนาบของการดัด

$$C_m = 0.85$$

ข. สำหรับองค์อาคารซึ่งไม่มีการยึดรั้งการหมุนที่จุดปลายในระนาบของการดัด

$$C_m = 1.0$$

โดยปกติแล้วค่า C_m สำหรับโครงสร้างที่มีแรงกระทำด้านข้างที่กำหนดไว้ในข้อที่ 3 นั้น เพียงพอที่จะใช้ในการคำนวณออกแบบ การคำนวณหา C_m ที่แท้จริงนั้นทำได้ยาก อย่างไรก็ตาม ตามข้อกำหนดของ ASD ได้สมการที่ใช้ในการประมาณค่า C_m ไว้ดังนี้

$$C_m = 1 + \Psi \frac{f_a}{F_e}$$

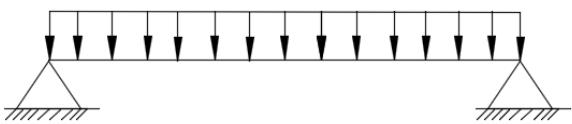
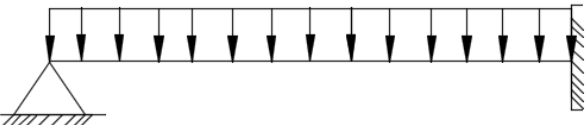
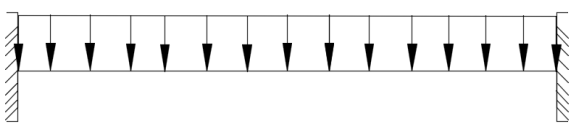
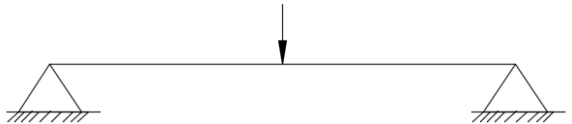
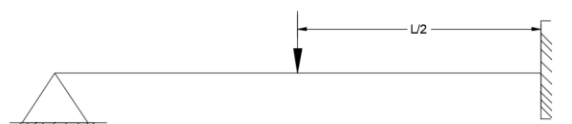
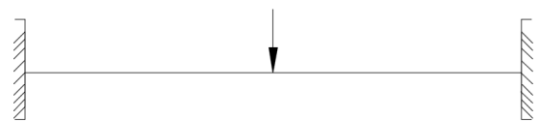
$$\Psi \delta_0 = \frac{\pi^2 \delta_0 EI}{M_0 L} - 1$$

เมื่อ δ_0 = ระยะโก่งสูงสุดเนื่องจากแรงกระทำด้านข้าง

M_0 = โมเมนต์สูงสุดในช่วงขององค์อาคารเนื่องจากแรงกระทำด้านข้าง

ค่า Ψ และ C_m สำหรับกรณีทั่วไปที่มักพบเสมอได้เสมอได้แสดงไว้ในตาราง ดังนี้

ตารางที่ 2.5 ค่าสัมประสิทธิ์ Ψ และ C_m

Case	Ψ	C_m
 (a)	0	1.0
 (b)	-0.4	$1 - 0.4 \frac{f_a}{F_e'}$
 (c)	-0.4	$1 - 0.4 \frac{f_a}{F_e'}$
 (d)	-0.2	$1 - 0.2 \frac{f_a}{F_e'}$
 (e)	-0.3	$1 - 0.3 \frac{f_a}{F_e'}$
 (f)	-0.2	$1 - 0.2 \frac{f_a}{F_e'}$

2.6 ตัวอย่างการออกแบบหน้าตัดเหล็กรับแรงตามแนวแกนและแรงดัดด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (ASD)

เสาขนาด WF400*200*8*13 มม. $A = 84.12$ ตร.ซม. $r_y = 4.54$ ซม. $S_x = 1,190$ ซม.³

ลักษณะจุดยึดปลายเสาเป็นแบบยึดหมุนทั้งสองปลาย , ดังนั้น ค่า $K = 1$, $L = 500$ ซม.

วิธีการ โมเมนต์ที่เกิดขึ้น, $M_{\max} = \frac{P_h L}{4} = \frac{9,000 \times 500}{4} = 1,125,000$ กก.-ซม.

ตรวจสอบหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้น

ค่าอัตราส่วนความชะลูด, $\frac{KL}{r_{\min}} = \frac{1 \times 500}{4.54} = 110$

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} = \sqrt{\frac{2\pi^2 (2,100,000)}{2,400}} = 131$$

$$\text{ดังนั้น } \frac{KL}{r} = C_c$$

ได้หน่วยแรงอัดที่ยอมให้, $f_a = 814$ กก./ตร. ซม.

หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้น, $f_a = \frac{P_V}{A} = \frac{12,000}{84.12} = 143$ กก./ตร. ซม. $< F_a$ ใช้ได้

ตรวจสอบหน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้น

หน่วยแรงดัดที่ยอมให้, $F_b = 0.6F_y = 0.6 \times 2,400 = 1,440$ กก./ตร. ซม.

หน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้น, $f_b = \frac{M_{\max}}{S_x} = \frac{1,125,000}{1,190} = 945$ กก./ตร. ซม. $< F_a$ ใช้ได้

ตรวจสอบหน่วยแรงรวม

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_b}{F_b} \leq 1$$

$$= \frac{143}{814} + \frac{945}{1440} = 0.83 < 1$$

ดังนั้น ขนาดหน้าตัดเสา ที่เลือกใช้สามารถต้านทานแรงในแนวแกนและโมเมนต์ดัดได้อย่างปลอดภัย

2.7 ค่าคงที่ของโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ

ตารางที่ 2.7 มาตรฐาน วสท.1015-40 กำหนดค่าคงที่ทางกลศาสตร์ของวัสดุโครงสร้าง ไว้ดังนี้

โมดูลัสยืดหยุ่น (กก./ตร.ซม.)	โมดูลัสแรงเฉือน (กก./ตร.ซม.)	อัตราส่วนปัวซอง	สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามเส้น
2,040,000	800,000	0.3	0.000012

2.8 ความเค้นยอมได้ตัวประกอบความปลอดภัย

การออกแบบโครงสร้างหรือชิ้นส่วนทางกลภายใต้ภาระภายนอกหนึ่งๆ เพื่อสามารถใช้งานได้ อย่างปลอดภัยและไม่เกิดการพังหรือการแตกหักเสียหายได้นั้น ผู้ออกแบบต้องมีการออกแบบเผื่อโดยใช้ ความเค้นยอมรับได้ (σ_a) มาคำนวณหาขนาดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนทางกลแทน ความเค้นขีดจำกัดความเป็นสัดส่วน (proportional limit stress) ความเค้นคราก (yield stress) หรือ ความเค้นประลัย (ultimate stress) ความเค้นที่กล่าวถึงเหล่านี้พิจารณาจากการดึงทดสอบวัสดุพร้อมเขียนแผนภาพความเค้น (σ) และความเครียด ($\epsilon = \frac{\delta}{L}$) ดังแสดงในภาพ 1.12 คือการนำแท่งวัตถุยาว L พื้นที่หน้าตัด A มาดึงด้วยแรง P โดยจะค่อยๆปรับเพิ่มขนาดของแรง P ให้มากขึ้นเรื่อยๆ พฤติกรรมในด้านความต้านแรงของแท่งวัตถุที่ทำการวัสดุเหนียวจะแสดงในภาพ (ก) และสำหรับวัสดุเจาจะเปราะจะแสดงในภาพ (ข) สำหรับวัสดุเหนียวนั้นแท่งวัตถุจะมีความต้านแรง 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงยืดหยุ่น (elastic range) ช่วงครากตัว (yield range) และช่วงต้านแรงหลังครากตัว (strain hardening range) การเปลี่ยนแปลงความยาวของแท่งวัตถุในแต่ละช่วงมีพฤติกรรมแตกต่างกัน ในช่วงยืดหยุ่น (ช่วง 0-C) พบว่าขนาดแรงดึง P เป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะยืด (δ) และวัตถุไม่มีการผิดรูปอย่างถาวร (เมื่อปลดแรงดึงออกไปวัตถุจะคืนสู่ความยาวเดิม) ความเค้นสูงสุดในช่วงนี้คือที่

จึงจุด B ซึ่งเรียกว่าความเค้นขีดจำกัดความเป็นสัดส่วน ($\sigma_B = \sigma_p$) ช่วง BC ยังอยู่ในช่วงยืดหยุ่น แต่ช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับระยะยืดจะไม่เป็นเชิงเส้น ถ้าออกแรงดึง P เกินช่วงยืดหยุ่น ไปจนกระทั่งถึงจุด C (เริ่มครากตัว) ใน ช่วงครากตัว (ช่วง CD) นี้จะพบว่าแรงดึงไม่เป็นสัดส่วน โดยตรงกับระยะยืด กล่าวคือ เมื่อเพิ่มแรงดึง P เพียงเล็กน้อยระยะยืดจะเปลี่ยนแปลงอย่างมาก จนกระทั่งถึงจุด D (จุดสุดท้ายของการครากตัว) ความเค้นเฉลี่ยของวัตถุในช่วงครากตัวนี้เรียกว่า ความเค้นคราก (σ_Y) และถ้าเพิ่มแรง P ดึงวัตถุต่อไปอีกจนถึง ช่วงต้านแรงหลังครากตัว วัตถุจะมีการเปลี่ยนแปลงระยะยืดอย่างสัมพันธ์กับแรง (มีความต้านแรงและเกิดความเค้นในวัตถุ) จนกระทั่งถึงจุดสูงสุดที่จุด E ซึ่งที่จุดนี้แท่งที่วัตถุจะมีความเค้นสูงสุดและเรียกว่า ความเค้นประลัย (σ_U) ถ้า ยังคงเพิ่มแรงต่อไปอีกวัตถุจะเกิดความเสียหายในที่สุด สำหรับวัสดุเปราะในภาพ (ข) นั้นจะมีความต้านแรง 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงยืดหยุ่นและช่วงผิครูปอย่างถาวร โดยไม่มีช่วงครากตัวเหมือนวัสดุเหนียว

การออกแบบชิ้นส่วนทางกลจะหมายถึงการเลือกขนาดและชนิดของวัสดุที่ใช้ที่เหมาะสม ต่อการใช้งาน โดยต้องไม่ทำให้เกิดความเสียหายกับชิ้นส่วนทางกลและไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้งาน การ เพื่อในการออกแบบจะกำหนดเป็นค่าของ ตัวประกอบความปลอดภัย (Factor of safety, FS) เพื่อใช้ คำนวณความเค้นยอมได้ (σ_a) หรือ (τ_a) และนำค่าไปคำนวณขนาดของชิ้นส่วนทางกลต่อไป สำหรับ งานโครงสร้างเหล็กกล้านั้นจะใช้ความเค้นครากเป็นค่าจำกัดไม่ให้เกิดการผิครูปอย่างถาวรของ โครงสร้าง (ความเค้นครากนี้จะหมายถึงความเค้นตั้งฉากคราก (σ_Y) หรือความเค้นเฉือนคราก (τ_a) ก็ได้) โดยความเค้นยอมได้ต้องมีค่าต่ำกว่าความเค้นคราก ดังนั้นความเค้นยอมได้จึงคำนวณจาก

$$\sigma_a = \frac{\sigma_Y}{FS}, \tau_a = \frac{\tau_Y}{FS}$$

นั่นคือ

$$FS = \frac{\sigma_Y}{\sigma_a} \quad \text{และ} \quad FS = \frac{\tau_Y}{\tau_a}$$

สมการ (1.5) นี้ใช้สำหรับ งานโครงสร้างเหล็กกล้า ซึ่งเป็นการออกแบบไม่ให้เกิดการผิครูปอย่างถาวร เป็นสิ่งสำคัญ

สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนทางกลจะใช้ตัวประกอบความปลอดภัยโดยพิจารณาจากความเค้นประลัย (σ_U หรือ τ_U) ซึ่งสามารถกำหนดตัวประกอบความปลอดภัยได้ดังนี้

$$FS = \frac{\sigma_U}{\sigma_a} \quad \text{และ} \quad FS = \frac{\tau_U}{\tau_a}$$

ตัวประกอบความปลอดภัยสำหรับการออกแบบอยู่ในช่วงประมาณ 1.8-2.0 การออกแบบโดยเลือกใช้ค่าตัวประกอบความปลอดภัยที่ต่ำกว่านี้ ($FS < 1.8$) จะได้ชิ้นส่วนที่มีขนาดไม่ใหญ่พอ และอาจจะเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายกับชิ้นส่วนเนื่องจากความเค้นยอมได้เข้าใกล้ความเค้นคราก หรือความเค้นประลัยสำหรับการเลือกใช้ค่าตัวประกอบความปลอดภัยที่สูงกว่านี้ ($FS > 2.0$) จะได้ชิ้นส่วนที่มีขนาดใหญ่เกินความจำเป็น ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการลงทุนและค่าใช้จ่ายขณะใช้งาน (operating cost) ที่สูงเกินไป การเลือกค่าของตัวประกอบความปลอดภัยนั้นต้องคำนึงถึงความปลอดภัยและการประหยัดค่าใช้จ่ายในการลงทุน ปัจจุบันจึงต้องพิจารณาจากเกณฑ์และข้อกำหนดในการออกแบบตามมาตรฐานกำหนดของหน่วยงานที่มีหน้าที่รับผิดชอบโดยตรง เช่น Code of Standard Practice for steel Building โดย American Institute of Steel Construction (ซึ่งสำหรับงานโครงสร้างเหล็กจะแนะนำให้ใช้ $FS = 1.67$ ภายใต้ภาระสถิต) และสำหรับงานคอนกรีตจะใช้ Building Code Requirement for Reinforced Concrete (ACI 318-89) โดย American Concrete Institute เป็นต้น

บทที่ 3

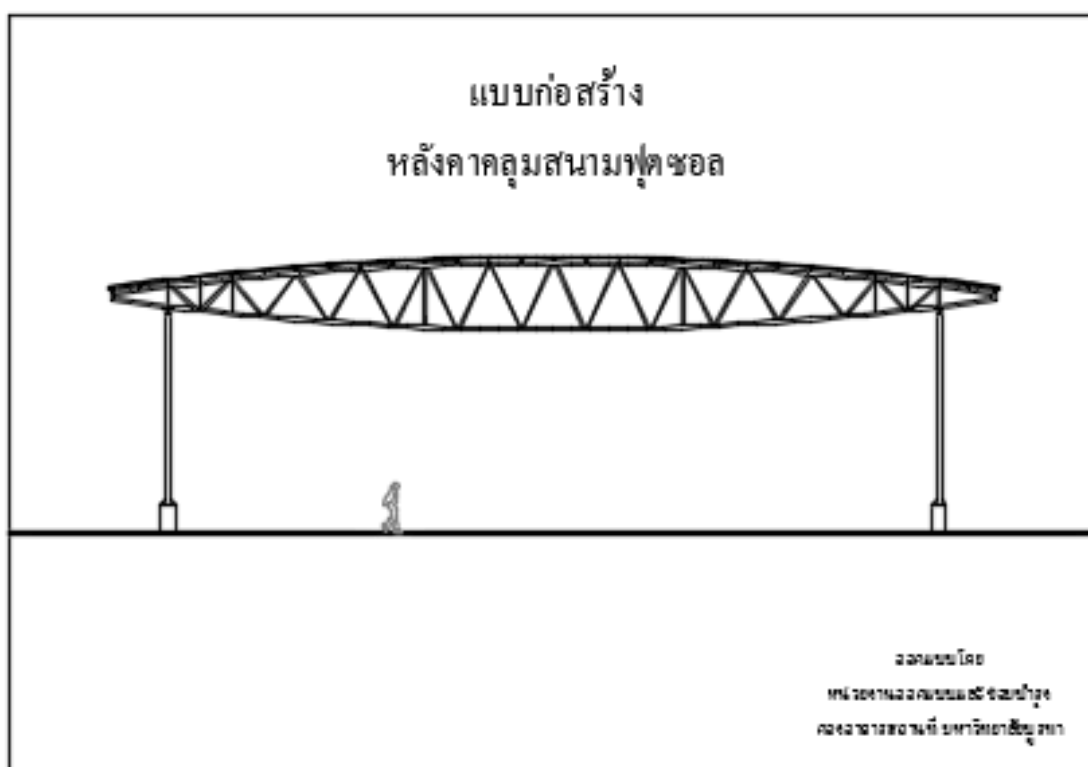
การดำเนินการงานวิจัย

3.1 โครงสร้างที่ใช้ในการศึกษา

โครงสร้างที่ใช้ในการศึกษานี้ เป็นโครงหลังคาสนามฟุตบอลมหาวิทยาลัยบูรพา

3.2 ลักษณะของโครงสร้าง

ลักษณะของโครงสร้างที่ใช้ศึกษามีลักษณะเป็นโครงถักที่ถูกสร้างโดยวิธีการดัดงอ ขนาดความกว้าง 27.60 เมตร และมีขนาดความยาว 42 เมตร โดยใช้เหล็กที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร มีความยาวตามแนวนราบ 63.20 เมตร และมีรัศมีความโค้ง 277.77 เมตร



ที่มา: หน่วยออกแบบและซ่อมบำรุง มหาวิทยาลัยบูรพา

รูปที่ 3.2.1 แบบก่อสร้างหลังคาสนามฟุตบอล



ที่มา: หน่วยออกแบบและซ่อมบำรุง มหาวิทยาลัยบูรพา
รูปที่ 3.2.2 แบบจริงสนามฟุตบอล



ที่มา: หน่วยออกแบบและซ่อมบำรุง มหาวิทยาลัยบูรพา
รูปที่ 3.2.3 ลักษณะของจุดต่อ

3.3 วิธีการศึกษา

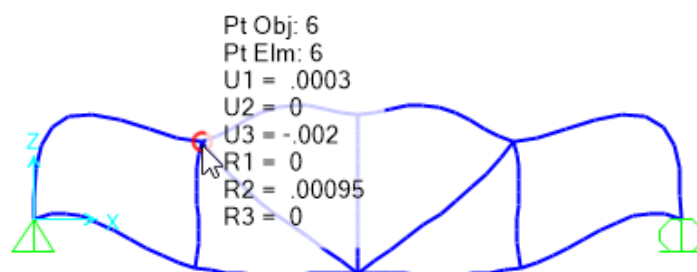
การวิจัยนี้ทำการศึกษาและวิเคราะห์โดยคำนึงถึงโมเมนต์ที่สามารถเพิ่มขึ้นเนื่องจากการตัดโค้งและนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับแบบในการก่อสร้าง

ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบหน้าตัดจากการคำนวณ

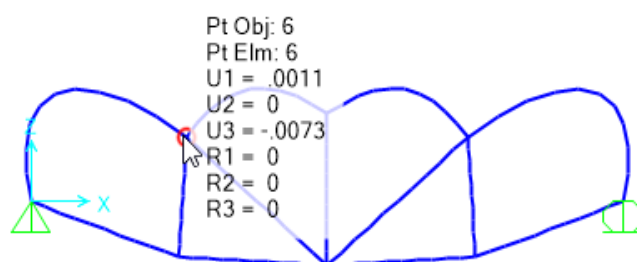
ลักษณะจุดต่อ สมการ	Internal hinge	Fixed
$\sigma = \frac{P}{A}$	Ø 21.7 × 2 mm.	Ø 21.7 × 2 mm.
$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{Mc}{I}; M = P\Delta$	Ø 76.3 × 4 mm.	Ø 76.3 × 4 mm.
$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{Mc}{I}; M = P\Delta + \frac{EI}{\rho}$	Ø 216.3 × 8 mm.	Ø 216.3 × 8 mm.

จากการวิเคราะห์จะเห็นว่าขนาดของหน้าตัดจากที่ได้จากการคำนวณจากสมการทั้งสามสมการจะเห็นได้ว่าจะได้ขนาดหน้าตัดที่สามารถรับแรงได้สูงสุดโดยที่ทำให้เกิดค่า *Stress* (σ) ภายในชิ้นงานมีค่าไม่เกินค่าที่กำหนด (2400 Kg/cm^2) ที่ต่างกัน เนื่องจากผลที่เกิดเนื่องจากโมเมนต์ที่เพิ่มดังสมการ $M = P\Delta$ และ $M = P\Delta + \frac{EI}{\rho}$ จึงทำให้ได้หน้าตัดที่ต่างกันดังตารางด้านบน

3.3.1 ค่าการแอ่นตัว



รูปที่ 3.3.1 Deflection ของ Model ตัวอย่างที่มีลักษณะจุดต่อเป็น Internal hinge



รูปที่ 3.3.2 Deflection ของ Model ตัวอย่างที่มีลักษณะจุดต่อเป็น Fixed

จากรูปที่ 3.3.1 และ 3.3.2 จะพบว่ามีค่าการแอ่นตัวของ Model ตัวอย่างจะพบว่า Model ตัวอย่างที่มีลักษณะจุดต่อเป็น Internal hinge มีค่าการแอ่นตัวอยู่ที่ 0.002 เมตร หรือ 2 มิลลิเมตร และ Model ตัวอย่างที่มีลักษณะจุดต่อเป็น Fixed มีค่าการแอ่นตัวอยู่ที่ 0.007 เมตรหรือ 7 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าน้อยกว่าอัตราส่วนการแอ่นตัวที่ยอมให้ $\frac{L}{360} = 0.02$ เมตร หรือ 2 เซนติเมตร จึงถือว่าปลอดภัย

บทที่ 4

วิเคราะห์ผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงการคำนวณโครงถักและการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัยและค่าการแอ่นตัวของแรงภายในของโครงถักที่มีลักษณะการก่อสร้างแบบดัดโค้ง เนื่องมาจากแรงพลศาสตร์

4.1 ขั้นตอนการคำนวณ

จากการศึกษาได้เลือกการคำนวณพฤติกรรมของโครงถักที่เป็น Internal hinge และ Fixed ในการออกแบบโครงถักที่มีลักษณะการก่อสร้างแบบโค้งดัดในที่ เพื่อนำไปคำนวณหาอัตราส่วนความปลอดภัยต่อไป

4.1.1 ขั้นตอนการคำนวณ

ตัวอย่าง ขนาดหน้าตัด 138.8x6 มิลลิเมตร

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{Mc}{I}; M = PL \quad \text{สมการที่ 2}$$

$$\sigma = \frac{7436}{25.22} + \frac{(7436 \times 1.3)(0.7)}{80.90} = 414.32 \text{ Kgf / cm}^2.$$

$$\sigma = \frac{p}{A} \pm \frac{Mc}{I}; M = PL + \frac{EI}{\rho} \quad \text{สมการที่ 3}$$

$$\sigma = \frac{7436}{25.22} + \frac{(7436 \times 1.3)(0.7)}{80.90} + \frac{(2.04 \times 10^6)(6.99)}{11390} = 1666.26 \text{ Kgf / cm}^2.$$

4.1.2 ขั้นตอนการคำนวณอัตราส่วนความปลอดภัย

$$F.S. = \frac{F_y}{\sigma_1}$$

$$F.S. = \frac{2400}{414.32} = 5.79 \quad \text{สมการที่ 2}$$

$$F.S. = \frac{F_y}{\sigma_2}$$

$$F.S. = \frac{2400}{1666.26} = 1.44 \quad \text{สมการที่ 3}$$

4.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย

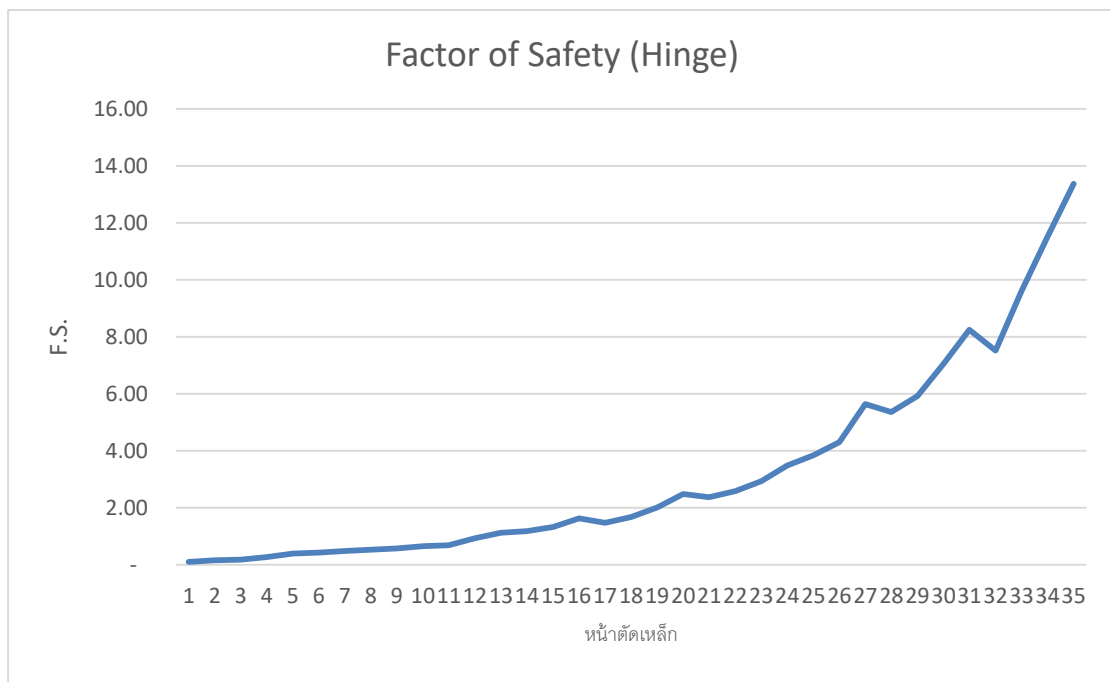
เมื่อทำการคำนวณพฤติกรรมของโครงถักที่เป็น Internal hinge และ Fixed เราจึงนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัยต่อไป

4.2.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงถักที่เป็น Internal hinge โดยโปรแกรม SAP ได้ค่าดังนี้

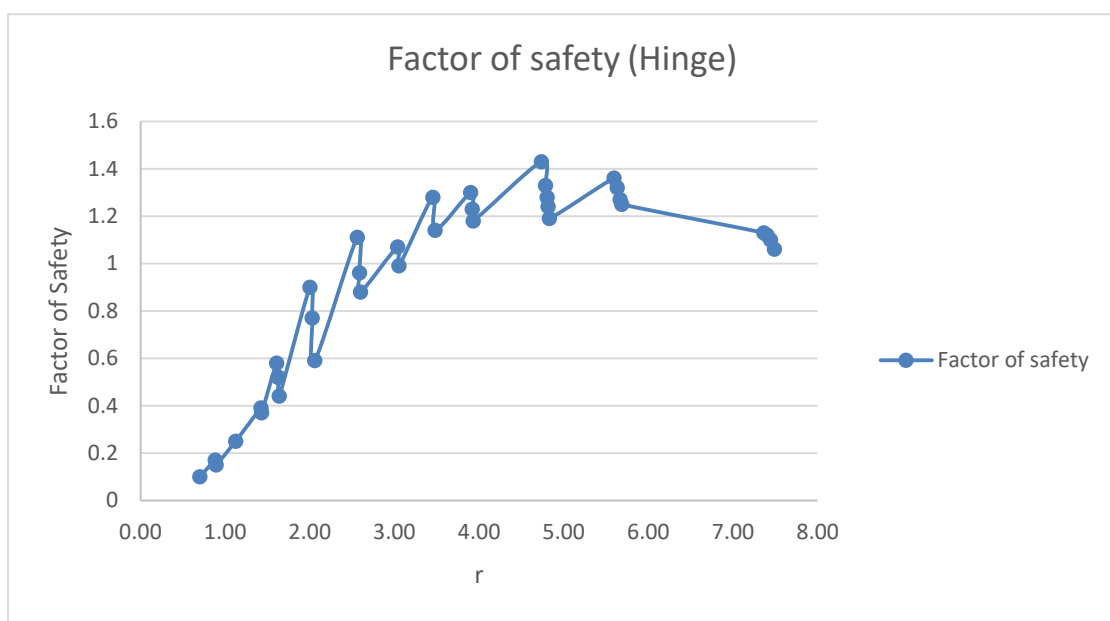
No.	Section	Outsize D	Thickness	F.S.1	F.S.2
		(mm.)	(mm.)	สมการที่ 2	สมการที่ 3
1	D1/2"	21.7	2.0	0.10	0.10
2	D3/4"	27.2	2.0	0.15	0.15
3		27.2	2.3	0.17	0.17
4	D1"	34	2.3	0.26	0.25
5	D1-1/4"	42.7	2.3	0.39	0.37
6		42.7	2.5	0.42	0.39
7	D1-1/2"	48.6	2.3	0.48	0.44
8		48.6	2.5	0.52	0.48

9	D1-1/2"	48.6	2.8	0.57	0.52
10		48.6	3.2	0.65	0.58
No.	Section	Outsize D	Thickness	F.S.1	F.S.2
		(mm.)	(mm.)	สมการที่ 2	สมการที่ 3
11	D2"	60.5	2.3	0.69	0.59
12		60.5	3.2	0.93	0.77
13		60.5	4.0	1.13	0.90
14	D2-1/2"	76.3	2.8	1.17	0.88
15		76.3	3.2	1.33	0.96
16		76.3	4.0	1.62	1.11
17	D3"	89.1	2.8	1.47	0.99
18		89.1	3.2	1.67	1.07
19	D3-1/2"	101.6	3.2	2.01	1.14
20		101.6	4.0	2.48	1.28
21	D4"	114.3	3.2	2.37	1.18
22		114.3	3.5	2.58	1.23
23		114.3	4.0	2.93	1.30
24	D5"	139.8	3.6	3.48	1.24
25		139.8	4.0	3.84	1.28
26		139.8	4.5	4.30	1.33
27		139.8	6.0	5.64	1.43
28	D6"	165.2	4.5	5.35	1.25
29		165.2	5.0	5.92	1.27
30		165.2	6.0	7.04	1.32
31		165.2	7.1	8.25	1.36
32	D8"	216.3	4.5	7.52	1.06
33		216.3	5.8	9.61	1.10
34		216.3	7.0	11.50	1.12
35		216.3	8.2	13.37	1.13

ตาราง 4.2.1 ตารางค่าความปลอดภัยที่เป็นจุดต่อแบบ Internal hinge



รูปที่ 4.2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Factor of Safety และหน้าตัดเหล็ก ตามสมการที่ 2



รูปที่ 4.2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Factor of Safety และค่า r ตามสมการที่ 3

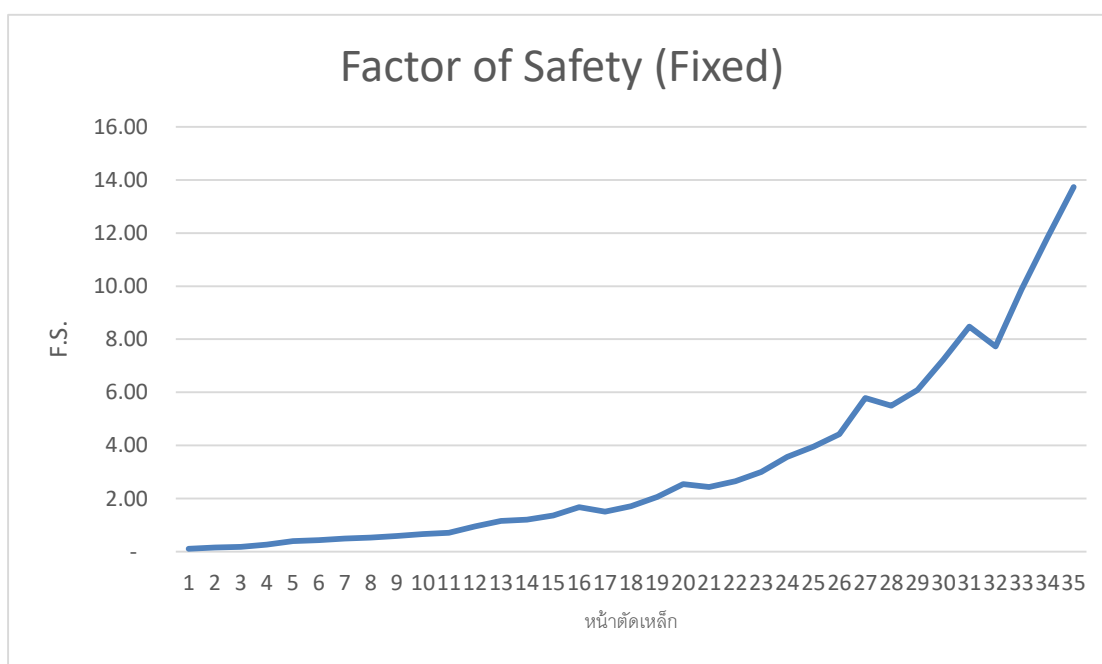
4.2.2 การวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงถักที่เป็น Fixed โดยโปรแกรม SAP ได้ค่าดังนี้

No.	Section	Outsize D	Thickness	F.S.1	F.S.2
		(mm.)	(mm.)	สมการที่ 2	สมการที่ 3
1	D1/2"	21.7	2.0	0.10	0.10
2	D3/4"	27.2	2.0	0.16	0.16
3		27.2	2.3	0.18	0.17
4	D1"	34	2.3	0.27	0.26
5	D1-1/4"	42.7	2.3	0.40	0.38
6		42.7	2.5	0.43	0.40
7	D1-1/2"	48.6	2.3	0.50	0.46
8		48.6	2.5	0.53	0.49
9		48.6	2.8	0.59	0.53
10		48.6	3.2	0.66	0.59
11	D2"	60.5	2.3	0.70	0.61
12		60.5	3.2	0.95	0.78
13		60.5	4.0	1.16	0.92
14	D2-1/2"	76.3	2.8	1.20	0.90
15		76.3	3.2	1.36	0.98
16		76.3	4.0	1.67	1.13
17	D3"	89.1	2.8	1.51	1.01
18		89.1	3.2	1.71	1.09
19	D3-1/2"	101.6	3.2	2.07	1.16
20		101.6	4.0	2.55	1.30
21	D4"	114.3	3.2	2.43	1.19
22		114.3	3.5	2.65	1.24
23		114.3	4.0	3.01	1.32
24	D5"	139.8	3.6	3.57	1.25

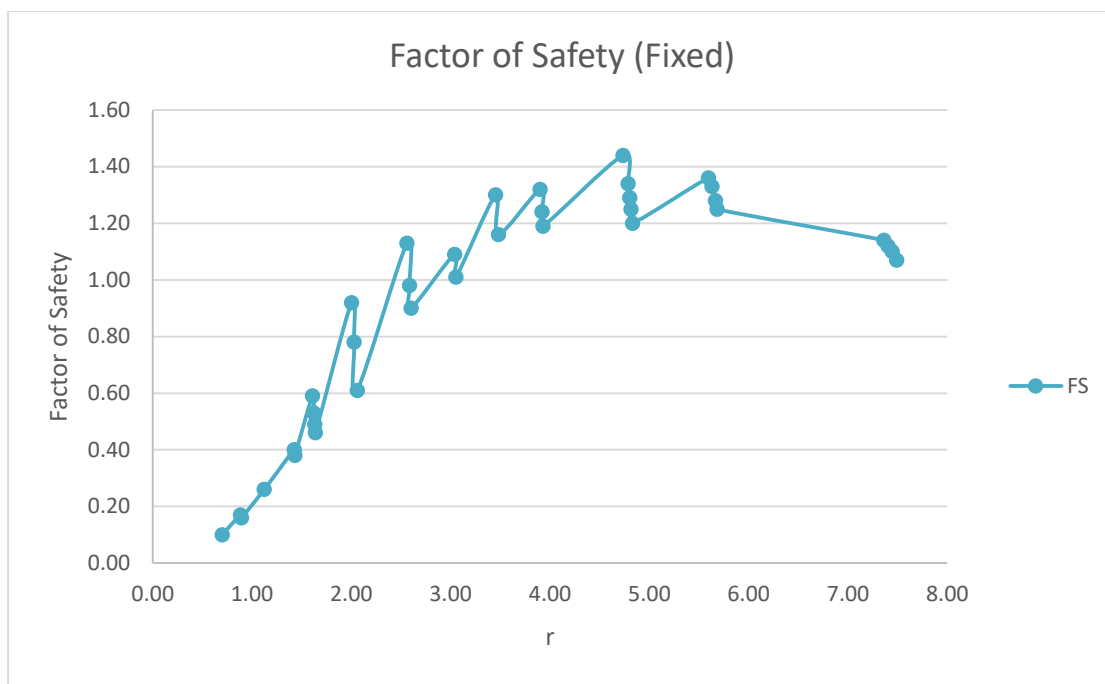
25		139.8	4.0	3.95	1.29
----	--	-------	-----	------	------

No.	Section	Outsize D	Thickness	F.S.1	F.S.2
		(mm.)	(mm.)	สมการที่ 2	สมการที่ 3
26	D5"	139.8	4.5	4.42	1.34
27		139.8	6.0	5.79	1.44
28	D6"	165.2	4.5	5.50	1.25
29		165.2	5.0	6.09	1.28
30		165.2	6.0	7.24	1.33
31		165.2	7.1	8.48	1.36
32	D8"	216.3	4.5	7.73	1.07
33		216.3	5.8	9.87	1.10
34		216.3	7.0	11.82	1.12
35		216.3	8.2	13.74	1.14

ตาราง 4.2.2 ตารางค่าความปลอดภัยที่เป็นจุดต่อแบบ Fixed

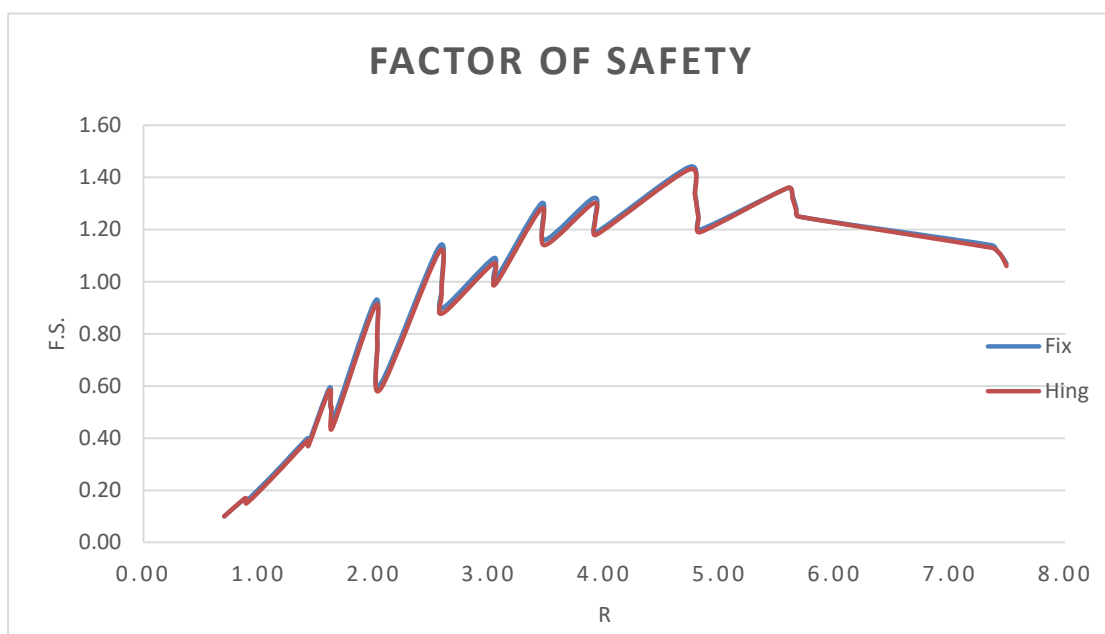


รูปที่ 4.2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Factor of Safety และหน้าตัดเหล็ก ตามสมการที่ 2



รูปที่ 4.2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Factor of Safety และหน้าตัดเหล็ก ตามสมการที่ 3

4.2.3 ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย



รูปที่ 4.2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Factor of Safety และหน้าตัดเหล็ก ตามสมการที่ 3

โดยนำของโครงถักที่เป็น Internal hinge และ Fixed มาเปรียบเทียบ

จากการศึกษาและทดลองออกแบบและเช็คค่าความปลอดภัย โดยการคำนึงถึงผลจากตัดโค้งของโครงถัก (curvature) ทั้งที่มีจุดต่อแบบ Internal hinge และโครงถักที่มีจุดต่อแบบ Fixed ทำให้สามารถทราบได้ว่า

1. หลังจากที่ออกแบบโดยคำนึงถึงกรรมวิธีการก่อสร้างด้วยวิธีตัดเย็นพบว่า ค่า FS มีค่าไม่ถึง 1.8 ทุกๆหน้าตัดเหล็กกลมกลวง

2. การออกแบบชิ้นส่วนโครงถักโค้งที่ตัดโค้งด้วยวิธีตัดเย็น จำเป็นต้องพิจารณาหลายๆ หน้าตัดเพื่อให้ได้หน้าตัดที่มีค่า FS สูงสุด

3.การออกแบบชิ้นส่วนโค้งโดยการเลือกหน้าตัดขนาดใหญ่ไม่สามารถชี้วัดได้ว่าจะเป็นหน้าตัดที่มีค่า FS สูงสุด

4.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าการแอ่นตัว

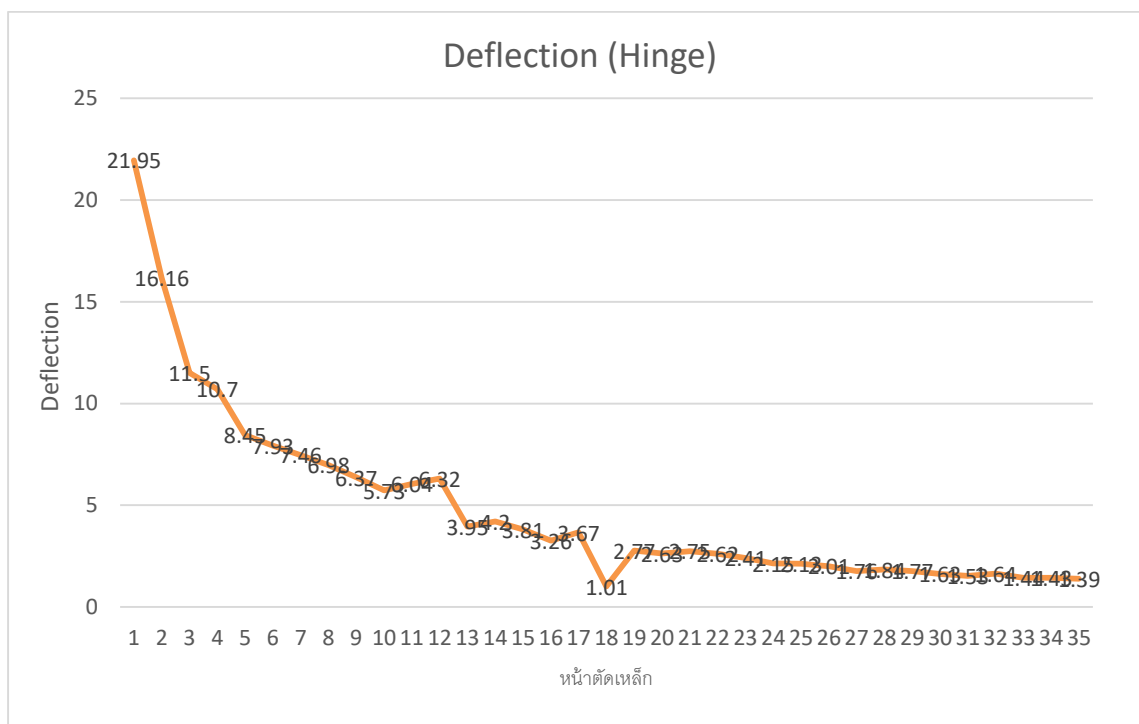
เรานำค่าการแอ่นตัวที่ได้จากโปรแกรม SAP ไปวิเคราะห์ค่าการแอ่นตัว

4.3.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงถักที่เป็น Internal hinge โดยโปรแกรม SAP ได้ค่าดังนี้

No.	Section	Outsize D	Thickness	Deflection
		(mm.)	(mm.)	(mm.)
1	D1/2"	21.7	2.0	21.95
2	D3/4"	27.2	2.0	16.16
3		27.2	2.3	11.5
4	D1"	34	2.3	10.7
5	D1-1/4"	42.7	2.3	8.45
6		42.7	2.5	7.93
7	D1-1/2"	48.6	2.3	7.46
8		48.6	2.5	6.98
9		48.6	2.8	6.37
10		48.6	3.2	5.73

No.	Section	Outsize D	Thickness	Deflection
		(mm.)	(mm.)	(mm.)
11	D2"	60.5	2.3	6.04
12	D2"	60.5	3.2	6.32
13		60.5	4.0	3.95
14	D2-1/2"	76.3	2.8	4.2
15		76.3	3.2	3.81
16		76.3	4.0	3.26
17	D3"	89.1	2.8	3.67
18		89.1	3.2	1.01
19	D3-1/2"	101.6	3.2	2.77
20		101.6	4.0	2.63
21	D4"	114.3	3.2	2.75
22		114.3	3.5	2.62
23		114.3	4.0	2.41
24	D5"	139.8	3.6	2.15
25		139.8	4.0	2.13
26		139.8	4.5	2.01
27		139.8	6.0	1.76
28	D6"	165.2	4.5	1.84
29		165.2	5.0	1.77
30		165.2	6.0	1.63
31		165.2	7.1	1.53
32	D8"	216.3	4.5	1.64
33		216.3	5.8	1.44
34		216.3	7.0	1.43
35		216.3	8.2	1.39

ตาราง 4.3.1 ตารางค่าการแอ่นตัวที่เป็นจุดต่อแบบ Internal hinge



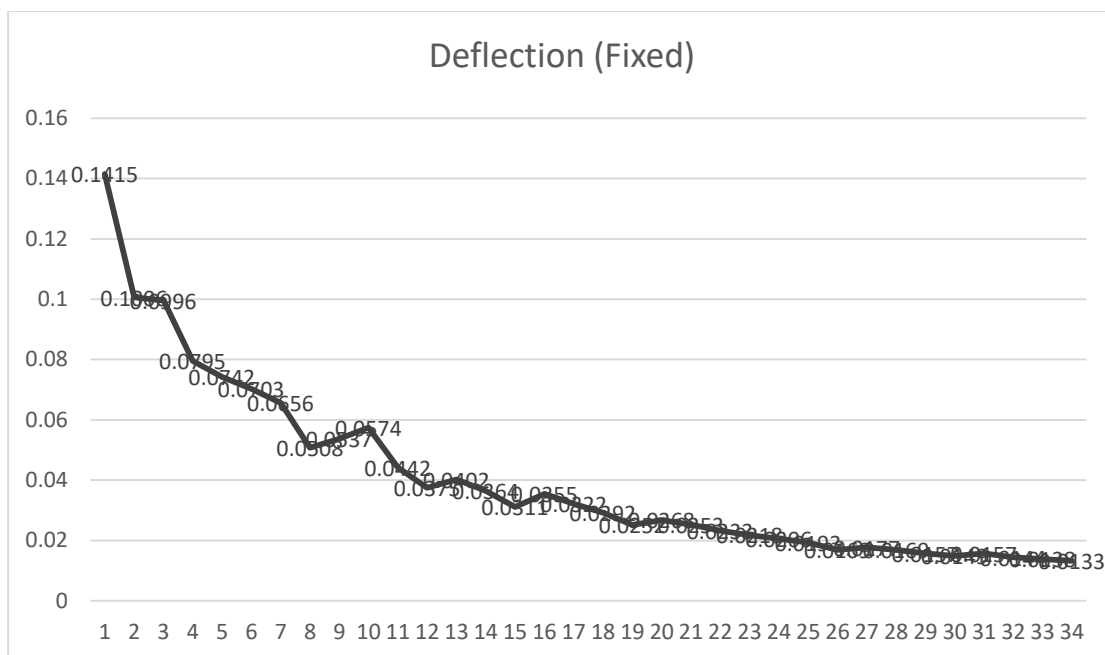
รูปที่ 4.3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection (Hinge) และหน้าตัดเหล็ก

4.3.2 การวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงถักที่เป็น Fixed โดยโปรแกรม SAP ได้ค่าดังนี้

No.	Section	Outsize D	Thickness	Deflection (mm.)
		(mm.)	(mm.)	
1	D1/2"	21.7	2.0	18.12
2	D3/4"	27.2	2.0	14.15
3		27.2	2.3	10.06
4	D1"	34	2.3	9.96
5	D1-1/4"	42.7	2.3	7.95
6		42.7	2.5	7.42
7	D1-1/2"	48.6	2.3	7.03
8		48.6	2.5	6.56
9		48.6	2.8	5.08
10		48.6	3.2	5.37

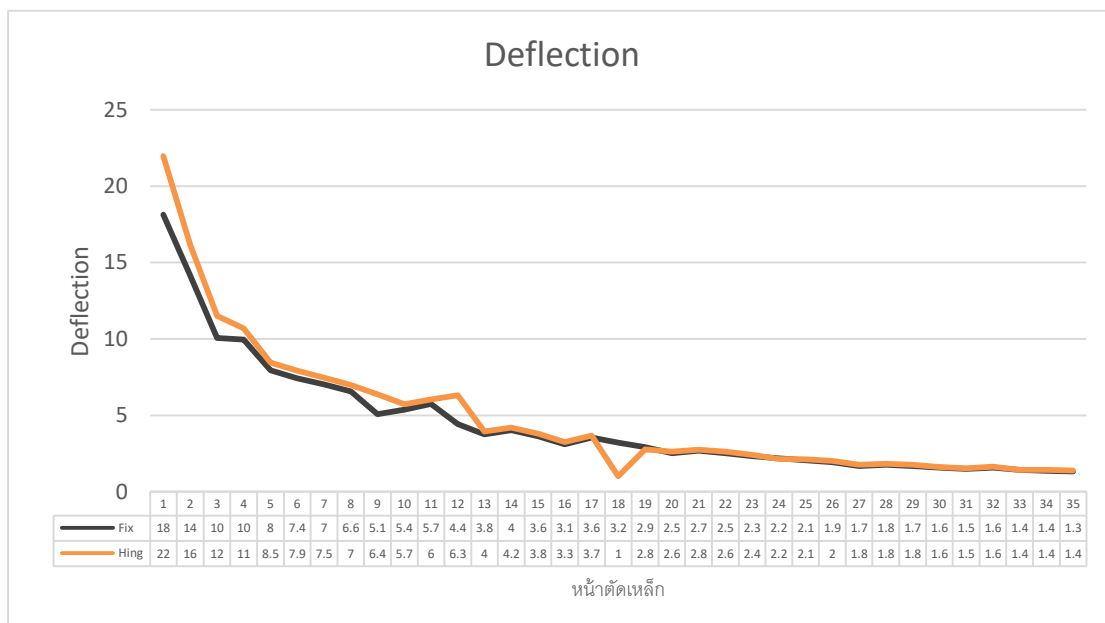
No.	Section	Outsize D	Thickness	Deflection (mm.)
		(mm.)	(mm.)	
11	D2"	60.5	2.3	5.74
12		60.5	3.2	4.42
13	D2"	60.5	4.0	3.75
14	D2-1/2"	76.3	2.8	4.02
15		76.3	3.2	3.64
16		76.3	4.0	3.11
17	D3"	89.1	2.8	3.55
18		89.1	3.2	3.22
19	D3-1/2"	101.6	3.2	2.92
20		101.6	4.0	2.52
21	D4"	114.3	3.2	2.68
22		114.3	3.5	2.53
23		114.3	4.0	2.33
24	D5"	139.8	3.6	2.18
25		139.8	4.0	2.06
26		139.8	4.5	1.93
27		139.8	6.0	1.69
28	D6"	165.2	4.5	1.77
29		165.2	5.0	1.69
30		165.2	6.0	1.57
31		165.2	7.1	1.49
32	D8"	216.3	4.5	1.57
33		216.3	5.8	1.44
34		216.3	7.0	1.38
35		216.3	8.2	1.33

ตาราง 4.3.2 ตารางค่าการแอ่นตัวที่เป็นจุดต่อแบบ Fixed



รูปที่ 4.3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection (Fixed) และหน้าตัดเหล็ก

4.3.3 ผลการวิเคราะห์การวิเคราะห์ค่าการแอ่นตัว



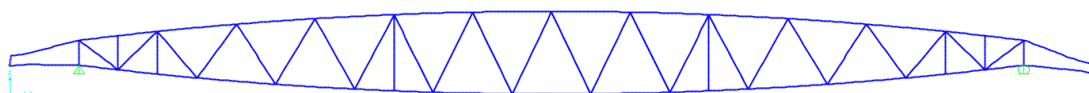
รูปที่ 4.3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection และหน้าตัดเหล็ก

โดยนำของโครงถักที่เป็น Internal hinge และ Fixed มาเปรียบเทียบ

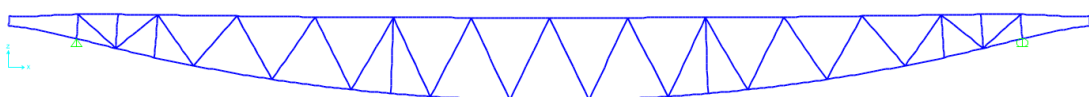
จากการศึกษาและทดลองออกแบบและเช็คค่าความปลอดภัย โดยการคำนึงถึงผลจากตัด
โครงของโครงถัก (curvature) ทั้งที่มีจุดต่อแบบ Internal hinge และโครงถักที่มีจุดต่อแบบ Fixed
ทำให้สามารถทราบได้ว่า

ค่าการแอ่นตัวที่เป็นจุดต่อแบบ Internal hinge และจุดต่อแบบ Fixed ในหน้าตัดเล็กมีค่าที่
ต่างกัน แต่หน้าตัดใหญ่มีค่าการแอ่นตัวที่ใกล้เคียงกัน

4.3.4 ค่าการแอ่นตัว



รูปที่ 4.3.4 deflection ของ Model ตัวอย่างที่มีลักษณะจุดต่อเป็น Internal hinge



รูปที่ 4.3.5 deflection ของ Model ตัวอย่างที่มีลักษณะจุดต่อเป็น fixed

จะพบว่ามีค่าการแอ่นตัวของ Model ตัวอย่างจะพบว่า Model ตัวอย่างที่มีลักษณะจุดต่อ
เป็น Internal hinge มีค่าการแอ่นตัวอยู่ที่ 0.0176 เมตร หรือ 1.76 มิลลิเมตร และ Model ตัวอย่าง
ที่มีลักษณะจุดต่อเป็น Fixed มีค่าการแอ่นตัวอยู่ที่ 0.0169 เมตร หรือ 1.69 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าน้อย

กว่าอัตราส่วนการแอ่นตัวที่ยอมให้ $\frac{L}{360} = 0.02$ เมตร หรือ 2 เซนติเมตรจึงถือว่าปลอดภัย

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

จากการศึกษาค่าประกอบความปลอดภัยและค่าการแอ่นตัวของโครงถักหลังคาโค้งที่ตัดโค้งด้วยระบบตัดเย้น กรณีศึกษา: อาคารสนามฟุตบอล มหาวิทยาลัยบูรพาสามารถสรุปได้ว่า

1. ค่าประกอบความปลอดภัยของชิ้นส่วนโครงถักโค้งของจุดต่อแบบ Fixed มากที่สุดเท่ากับ 1.44 ที่หน้าตัด 139.8×6.0 mm.
2. ค่าประกอบความปลอดภัยของชิ้นส่วนโครงถักโค้งของจุดต่อแบบ Internal Hinge มากที่สุดเท่ากับ 1.43 ที่หน้าตัด 139.8×6.0 mm.
3. ค่าประกอบความปลอดภัยของชิ้นส่วนโครงถักโค้งอาคารฟุตบอล มหาวิทยาลัยบูรพา มีค่าเท่ากับ 1.20 ที่หน้าตัด 139.8×3.2 mm.
4. ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งบริเวณกึ่งกลางโครงถักเมื่อพิจารณาผลการตัดโค้งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2 เซนติเมตร สำหรับหน้าตัด 139.8×3.2 mm. ซึ่งไม่เกินกว่าค่าการโก่งตัวที่ยอมให้เท่ากับ 8 เซนติเมตร
5. เมื่อหน้าตัดเหล็กมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ค่า Moment of Inertia เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าของโมเมนต์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังสมการ $M = P\Delta + \frac{EI}{I}$ และจากสมการ $\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{Mc}{I}$ จะเห็นได้ว่าเมื่อโมเมนต์เพิ่มขึ้น ทำให้เพิ่มขึ้นเมื่อนำไปคำนวณหาค่าประกอบความปลอดภัยพบว่าค่าประกอบความปลอดภัยลดลง เมื่อเทียบกับ $\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{Mc}{I}; M = P\Delta$
6. จากกราฟที่ 4.2.5 ค่าเปรียบเทียบค่าประกอบความปลอดภัย จะพบว่าลักษณะจุดต่อแบบ Fixed มีความแข็งแรงมากกว่าลักษณะจุดต่อแบบ Internal hinge

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาความแตกต่างค่าประกอบความปลอดภัยระหว่างระบบตัดเย้นและระบบตัดรื้อน
2. ควรศึกษาเทคนิคการออกแบบโครงถักหลังคาตัดโค้งด้วยระบบตัดเย้นโดยคำนึงถึง curvature ให้มีค่าประกอบความปลอดภัยให้เหมาะสมต่อการใช้ก่อสร้างจริง

เอกสารอ้างอิง

- [1] รศ.กวี หวังนิเวศน์กุล, "การออกแบบโครงสร้างอาคารเหล็ก", กรุงเทพฯ:โรงพิมพ์ หจก.รุ่งแสงการพิมพ์, 2553
- [2] ประสิทธิ์ แวงแก้ว, อดิสรชัย ลาภรังสิรัตน์, "คู่มืองานเหล็ก", กรุงเทพฯ:ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2554
- [3] รศ.มนตรี พิรุณเกษตร, "กลศาสตร์ของวัสดุ", กรุงเทพฯ:วิทย์พัฒน์, 2550
- [4] ผศ.ดร. สิทธิชัย แสงอาทิตย์ SUT, "เอกสารประกอบการสอนวิชาทฤษฎีโครงสร้าง Theory of Structures"
- [5] ผ.ศ.อุดมวิทย์ กาญจนวงศ์, ธนพฤกษ์ ชามะรัตน์, ปิโยรส ทะเสนฮต, "กำลังวัสดุ", กรุงเทพฯ: สกายบุ๊กส์, 2547
- [6] <https://www.mtec.or.th/mcu/phml/index.php/th/2014-09-12-03-39-42/18-bending-test>, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
- [7] <http://eu.lib.kmutt.ac.th>
- [8] <http://www.burnsstainless.com/bendquality.aspx>
- [9] <http://www.alexandriaindustries.com>
- [10] <https://www.thefabricator.com>

ภาคผนวก

Hing	P =	7643	kg.
	Delta =	1.3	cm.
	rol =	11390	cm.

K=	0.67	
L=	316	m

No.	Section	Outsize D (mm.)	Thickness (mm.)	A (cm ²)	Sx (cm ³)	Ix (cm ⁴)	c (cm)	c/t ratio
1	D1/2"	21.7	2.0	1.24	0.56	0.61	1.085	0.543
2	D3/4"	27.2	2.0	1.58	0.93	1.26	1.36	0.680
3		27.2	2.3	1.80	1.03	1.41	1.36	0.591
4	D1"	34	2.3	2.29	1.70	2.89	1.7	0.739
5	D1-1/4"	42.7	2.3	2.92	2.80	5.97	2.135	0.928
6		42.7	2.5	3.16	3.00	6.40	2.135	0.854
7	D1-1/2"	48.6	2.3	3.35	3.70	8.99	2.43	1.057
8		48.6	2.5	3.62	3.97	9.65	2.43	0.972
9		48.6	2.8	4.03	4.36	10.60	2.43	0.868
10		48.6	3.2	4.56	4.86	11.82	2.43	0.759
11	D2"	60.5	2.3	4.21	5.90	17.83	3.025	1.315
12		60.5	3.2	5.76	7.84	23.72	3.025	0.945
13		60.5	4.0	7.10	9.41	28.47	3.025	0.756
14	D2-1/2"	76.3	2.8	6.47	11.46	43.72	3.815	1.363
15		76.3	3.2	7.35	12.89	49.18	3.815	1.192
16		76.3	4.0	9.09	15.61	59.55	3.815	0.954
17	D3"	89.1	2.8	7.59	15.88	70.75	4.455	1.591
18		89.1	3.2	8.64	17.90	79.76	4.455	1.392
19	D3-1/2"	101.6	3.2	9.89	23.59	119.85	5.08	1.588
20		101.6	4.0	12.26	28.80	146.28	5.08	1.270
21	D4"	114.3	3.2	11.17	30.18	172.47	5.715	1.786
22		114.3	3.5	12.18	32.75	187.15	5.715	1.633
23		114.3	4.0	13.86	36.93	211.07	5.715	1.429
		139.8	3.2	13.73	45.85	320.48	6.99	2.184
24	D5"	139.8	3.6	15.40	51.14	357.43	6.99	1.942
25		139.8	4.0	17.07	56.33	393.73	6.99	1.748
26		139.8	4.5	19.13	62.69	438.17	6.99	1.553
27		139.8	6.0	25.22	80.90	565.53	6.99	1.165
28	D6"	165.2	4.5	22.72	88.85	733.94	8.26	1.836
29		165.2	5.0	25.16	97.83	808.05	8.26	1.652
30		165.2	6.0	30.01	115.26	952.04	8.26	1.377
31		165.2	7.1	35.26	133.66	1,104.05	8.26	1.163
32	D8"	216.3	4.5	29.94	155.32	1,679.76	10.815	2.403
33		216.3	5.8	38.36	196.58	2,126.05	10.815	1.865
34		216.3	7.0	46.03	233.31	2,523.20	10.815	1.545
35		216.3	8.2	53.61	268.74	2,906.46	10.815	1.319

E	2040000	Kg/cm ²
Fy	2400	Kg/cm ³

sigma_1	sigma_2	total	F.S.1	F.S.2	Defection (mm.)
P/A+M/Sx	E*c/rol				
23,945.04	194.33	24,139.37	0.10	0.10	0.220
15,510.92	243.58	15,754.50	0.15	0.15	0.162
13,856.85	243.58	14,100.44	0.17	0.17	0.115
9,176.74	304.48	9,481.22	0.26	0.25	0.107
6,168.54	382.39	6,550.92	0.39	0.37	0.085
5,733.96	382.39	6,116.35	0.42	0.39	0.079
4,971.23	435.22	5,406.46	0.48	0.44	0.075
4,613.78	435.22	5,049.00	0.52	0.48	0.070
4,174.18	435.22	4,609.41	0.57	0.52	0.064
3,717.66	435.22	4,152.89	0.65	0.58	0.057
3,502.83	541.79	4,044.63	0.69	0.59	0.060
2,594.19	541.79	3,135.98	0.93	0.77	0.063
2,132.07	541.79	2,673.86	1.13	0.90	0.040
2,049.09	683.28	2,732.37	1.17	0.88	0.042
1,810.77	683.28	2,494.06	1.33	0.96	0.038
1,477.79	683.28	2,161.08	1.62	1.11	0.033
1,632.48	797.91	2,430.39	1.47	0.99	0.037
1,440.02	797.91	2,237.93	1.67	1.07	0.010
1,193.76	909.85	2,103.61	2.01	1.14	0.028
968.21	909.85	1,878.06	2.48	1.28	0.026
1,013.54	1,023.58	2,037.13	2.37	1.18	0.028
930.76	1,023.58	1,954.35	2.58	1.23	0.026
820.45	1,023.58	1,844.03	2.93	1.30	0.024
773.27	1,251.94	2,025.21	3.10	1.19	0.024
690.48	1,251.94	1,942.42	3.48	1.24	0.022
624.27	1,251.94	1,876.21	3.84	1.28	0.021
558.08	1,251.94	1,810.02	4.30	1.33	0.020
425.85	1,251.94	1,677.79	5.64	1.43	0.018
448.24	1,479.40	1,927.65	5.35	1.25	0.018
405.29	1,479.40	1,884.69	5.92	1.27	0.018
340.90	1,479.40	1,820.30	7.04	1.32	0.016
291.07	1,479.40	1,770.47	8.25	1.36	0.015
319.23	1,937.01	2,256.24	7.52	1.06	0.016
249.81	1,937.01	2,186.82	9.61	1.10	0.014
208.64	1,937.01	2,145.66	11.50	1.12	0.014
179.54	1,937.01	2,116.56	13.37	1.13	0.014

Fix	P =	7436	kg.
	Delta =	1.3	cm.
	rol =	11390	cm.

No.	Section	Outsize D (mm.)	Thickness (mm.)	A (cm ²)	Sx (cm ³)	Ix (cm ⁴)	c (cm)	c/t ratio
1	D1/2"	21.7	2.0	1.24	0.56	0.61	1.085	0.543
2	D3/4"	27.2	2.0	1.58	0.93	1.26	1.36	0.680
3		27.2	2.3	1.80	1.03	1.41	1.36	0.591
4	D1"	34	2.3	2.29	1.70	2.89	1.7	0.739
5	D1-1/4"	42.7	2.3	2.92	2.80	5.97	2.135	0.928
6		42.7	2.5	3.16	3.00	6.40	2.135	0.854
7	D1-1/2"	48.6	2.3	3.35	3.70	8.99	2.43	1.057
8		48.6	2.5	3.62	3.97	9.65	2.43	0.972
9		48.6	2.8	4.03	4.36	10.60	2.43	0.868
10		48.6	3.2	4.56	4.86	11.82	2.43	0.759
11	D2"	60.5	2.3	4.21	5.90	17.83	3.025	1.315
12		60.5	3.2	5.76	7.84	23.72	3.025	0.945
13		60.5	4.0	7.10	9.41	28.47	3.025	0.756
14	D2-1/2"	76.3	2.8	6.47	11.46	43.72	3.815	1.363
15		76.3	3.2	7.35	12.89	49.18	3.815	1.192
16		76.3	4.0	9.09	15.61	59.55	3.815	0.954
17	D3"	89.1	2.8	7.59	15.88	70.75	4.455	1.591
18		89.1	3.2	8.64	17.90	79.76	4.455	1.392
19	D3-1/2"	101.6	3.2	9.89	23.59	119.85	5.08	1.588
20		101.6	4.0	12.26	28.80	146.28	5.08	1.270
21	D4"	114.3	3.2	11.17	30.18	172.47	5.715	1.786
22		114.3	3.5	12.18	32.75	187.15	5.715	1.633
23		114.3	4.0	13.86	36.93	211.07	5.715	1.429
24		139.8	3.2	13.73	45.85	320.48	6.99	2.184
25	D5"	139.8	3.6	15.40	51.14	357.43	6.99	1.942
26		139.8	4.0	17.07	56.33	393.73	6.99	1.748
27		139.8	4.5	19.13	62.69	438.17	6.99	1.553
28		139.8	6.0	25.22	80.90	565.53	6.99	1.165
29	D6"	165.2	4.5	22.72	88.85	733.94	8.26	1.836
30		165.2	5.0	25.16	97.83	808.05	8.26	1.652
31		165.2	6.0	30.01	115.26	952.04	8.26	1.377
32		165.2	7.1	35.26	133.66	1,104.05	8.26	1.163
33	D8"	216.3	4.5	29.94	155.32	1,679.76	10.815	2.403
34		216.3	5.8	38.36	196.58	2,126.05	10.815	1.865
35		216.3	7.0	46.03	233.31	2,523.20	10.815	1.545
36		216.3	8.2	53.61	268.74	2,906.46	10.815	1.319

r	sigma_1	sigma_2	total	F.S.1	F.S.2	Defection
	P/A+M/Sx	E*c/rol				
0.70	23,296.52	194.33	23,490.85	0.10	0.10	0.1812
0.89	15,090.82	243.58	15,334.41	0.16	0.16	0.1415
0.88	13,481.56	243.58	13,725.14	0.18	0.17	0.1006
1.12	8,928.20	304.48	9,232.68	0.27	0.26	0.0996
1.43	6,001.47	382.39	6,383.86	0.40	0.38	0.0795
1.42	5,578.67	382.39	5,961.05	0.43	0.40	0.0742
1.64	4,836.59	435.22	5,271.82	0.50	0.46	0.0703
1.63	4,488.82	435.22	4,924.05	0.53	0.49	0.0656
1.62	4,061.13	435.22	4,496.36	0.59	0.53	0.0508
1.61	3,616.97	435.22	4,052.20	0.66	0.59	0.0537
2.06	3,407.96	541.79	3,949.76	0.70	0.61	0.0574
2.03	2,523.93	541.79	3,065.72	0.95	0.78	0.0442
2.00	2,074.33	541.79	2,616.12	1.16	0.92	0.0375
2.60	1,993.59	683.28	2,676.87	1.20	0.90	0.0402
2.59	1,761.73	683.28	2,445.01	1.36	0.98	0.0364
2.56	1,437.77	683.28	2,121.05	1.67	1.13	0.0311
3.05	1,588.26	797.91	2,386.17	1.51	1.01	0.0355
3.04	1,401.02	797.91	2,198.93	1.71	1.09	0.0322
3.48	1,161.42	909.85	2,071.28	2.07	1.16	0.0292
3.45	941.99	909.85	1,851.84	2.55	1.30	0.0252
3.93	986.09	1,023.58	2,009.68	2.43	1.19	0.0268
3.92	905.56	1,023.58	1,929.14	2.65	1.24	0.0253
3.90	798.23	1,023.58	1,821.81	3.01	1.32	0.0233
4.83	752.33	1,251.94	2,004.27	3.19	1.20	0.0233
4.82	671.78	1,251.94	1,923.72	3.57	1.25	0.0218
4.80	607.36	1,251.94	1,859.30	3.95	1.29	0.0206
4.79	542.97	1,251.94	1,794.91	4.42	1.34	0.0193
4.74	414.32	1,251.94	1,666.26	5.79	1.44	0.0169
5.68	436.10	1,479.40	1,915.51	5.50	1.25	0.0177
5.67	394.31	1,479.40	1,873.72	6.09	1.28	0.0169
5.63	331.67	1,479.40	1,811.07	7.24	1.33	0.0157
5.60	283.19	1,479.40	1,762.59	8.48	1.36	0.0149
7.49	310.58	1,937.01	2,247.60	7.73	1.07	0.0157
7.45	243.04	1,937.01	2,180.06	9.87	1.10	0.0144
7.40	202.99	1,937.01	2,140.00	11.82	1.12	0.0138
7.36	174.68	1,937.01	2,111.69	13.74	1.14	0.0133

ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายนิติศ ศักดิ์สิทธิการ
วัน/เดือน/ปี/เกิด	26 กันยายน พ.ศ. 2538
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	505/3 ถนน คูเมือง อำเภอเมือง ตำบลธาตุเชิงชุม จังหวัด สกลนคร 47000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2551 ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนสกลราชวิทยานุกูล พ.ศ. 2554 ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสกลราชวิทยานุกูล พ.ศ. 2557 มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี
E-mail	nitid938@hotmail.com
ชื่อ-สกุล	นางสาวธนวรรณ งามมี
วัน/เดือน/ปี/เกิด	18 ธันวาคม พ.ศ. 2538
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	9 หมู่ 11 ตำบล เมืองที่ อำเภอ เมืองสุรินทร์ จังหวัด สุรินทร์ 32000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2551 ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนสุรวิทยาคาร พ.ศ. 2554 ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสุรวิทยาคาร พ.ศ. 2557 มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี
E-mail	a_meanney@hotmail.com

1.ความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการออกแบบก่อสร้างโดยใช้เหล็ก นิยมกันมากขึ้น เพราะความสวยงามของแบบ ก่อสร้าง ความเท่า ความทันสมัย ความสำคัญกับการออกแบบและตอบโจทย์ความต้องการของผู้ออกแบบสถาปัตย์ได้อย่างแท้จริง โครงสร้างเหล็กเหล็กดัดนั้น มีอยู่มานานแต่ข้อคำแนะนำและข้อบังคับในการออกแบบส่วนประกอบเหล็กโค้งก็ยังมีไม่มากนัก

นอกจากนี้วัสดุที่นำมาใช้ในการออกแบบและก่อสร้างจึงต้องมีกำลังสูงและสามารถทำงานได้ดี สำหรับในส่วนโครงสร้างโครงหลังคาเหล็กจึงถือเป็นวัสดุ ที่เหมาะสมและนิยมนำมาใช้งาน ก่อสร้างมากที่สุด เนื่องจากเหล็กจัดเป็นวัสดุ โครงสร้างที่สำคัญประเภทหนึ่ง ที่ผู้ออกแบบเลือกใช้ ซึ่งโครงหลังคาโค้งส่วนใหญ่จะใช้วิธีการ ก่อสร้างโดยการตัดเหล็กเป็นท่อนสั้นๆ และเชื่อมติดให้ได้ทรงโค้งตามที่ต้องการ แต่ก็ยังเป็นวิธีการ ก่อสร้างที่ยุ่งยากและเสียเวลา ปัจจุบันจึงมีการ ก่อสร้างโดยการนำเหล็กท่อนยาวมาทำการดัดโค้ง แทนการตัดเหล็กเป็นท่อนสั้นๆและเชื่อมติด เพื่อเป็นการประหยัดเวลาและง่ายต่อวิธีการ ก่อสร้าง แม้ว่าการก่อสร้างโดยการนำเหล็กมาดัด โค้ง จะสามารถช่วยให้ประหยัดเวลาและง่ายต่อ วิธีการก่อสร้าง แต่เนื่องจากการดัดโค้งของเหล็ก ทำให้เกิดกำลังภายในเนื้อเหล็ก ซึ่งส่งผลต่อการรับ กำลังของโครงสร้างโครงหลังคา ความแข็งแรงของ โครงสร้างค่าความปลอดภัยของโครงสร้าง

การออกแบบโครงสร้างเหล็กผู้ออกแบบส่วนใหญ่ มักจะไม่ได้คำนึงถึงผลที่เกิดจากโมเมนต์เนื่องจากการดัดโค้ง (Curvature) ของตัวเหล็ก และ คำนึงถึงเพียงโมเมนต์จากระยะจากการดัดโค้ง เท่านั้น ถ้าออกแบบโดยคำนึงถึงผลที่เกิดจากการ ดัดโค้ง(Curvature) จะมีแรงจากโมเมนต์ที่เกิดจาก การดัดโค้งขึ้นและเกิดผลกระทบต่อค่าความ ปลอดภัยมากกว่าการออกแบบคำนึงถึงเพียง โมเมนต์จากระยะการดัดโค้งเท่านั้น ซึ่งจะทำให้ โครงถักมีค่าความปลอดภัยมีความน่าเชื่อถือเพิ่ม มากขึ้นและค่าการทรุดตัวลดน้อยลง จึงได้นำโครง หลังคาสนามฟุตบอล มหาวิทยาลัยบูรพา มาเป็น กรณีตัวอย่างในการศึกษา

2.วิธีการคำนวณและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เมื่อวิเคราะห์แรงภายในชิ้นส่วนแล้ว เราสามารถนำแรงภายในหรือแรงตามแนวแกนที่ วิเคราะห์ได้มาใช้ในการหาหน้าตัดของโครงถักเพื่อ คำนวณต่อหรือเปรียบเทียบกำลังของเหล็กจาก

สมการ

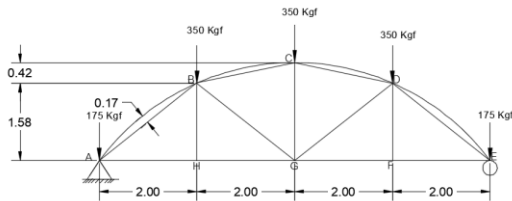
$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{หรือจากสมการ}$$

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{Mc}{I}$$

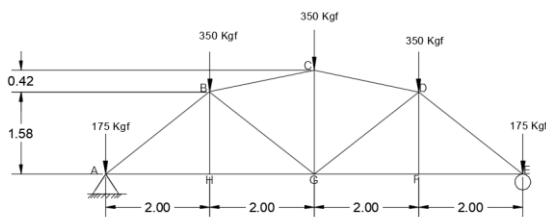
โดย $M = P \times \Delta$

และ Δ = ระยะเนื่องจากการดัดโค้งจาก แนวแกน

ตัวอย่างการวิเคราะห์โครงสร้างชิ้นส่วนโค้ง



เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณหาแรงภายในตาม
แนวแกนได้จะสามารถพิจารณาโครงสร้างได้ตามดังนี้



หาแรงปฏิกิริยาที่ข้อพอร์ท

$$+\sum M_A = 0 ;$$

$$350(2) + 350(4) + 350(6) + 175(8) - E_y(8) = 0$$

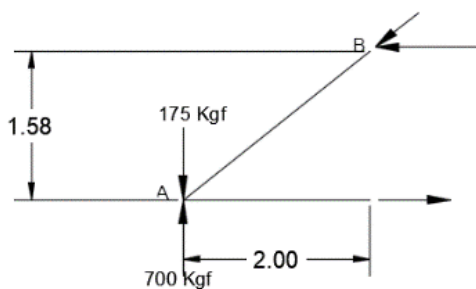
$$E_y = 700 \text{ kgf.}$$

$$+\uparrow \sum F_y = 0 ;$$

$$A_y + 700 - 350 \times 3 - 175 \times 2 = 0$$

$$A_y = 700 \text{ kgf.}$$

พิจารณาที่ Joint A



$$+\uparrow \sum F_y = 0 ;$$

$$700 - 175 - F_{AB} \sin 38.31 = 0$$

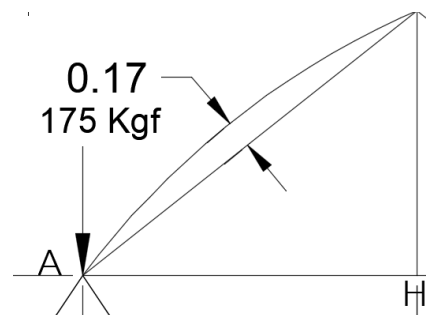
$$F_{AB} = 846.89 \text{ kgf. (C)}$$

$$+\rightarrow \sum F_x = 0 ;$$

$$-F_{AH} - (846.89 \cos 38.31) = 0$$

$$F_{AH} = -664.53 \text{ kgf. (T)}$$

พิจารณาโมเมนต์ภายในเนื่องจากการตัดโค้ง



โมเมนต์ = แรง $\times$ ระยะตั้งฉากจากจุดหมุน

$$M_{AB} = F_{AB} \times \Delta$$

$$M_{AB} = 846.89 \text{ Kgf.} \times 17 \text{ cm}$$

$$M_{AB} = 14397 \text{ Kg-cm}$$

3.ผลการวิเคราะห์

จากการศึกษานี้ได้เลือกการคำนวณ

พฤติกรรมของโครงสร้างที่เป็น Internal hinge และ

Fixed ในการออกแบบโครงสร้างที่มีลักษณะการ

ก่อสร้างแบบโค้งตัดในที่ เพื่อนำไปคำนวณหา

อัตราส่วนความปลอดภัยต่อไป

3.1 ขั้นตอนการคำนวณ

ตัวอย่าง ขนาดหน้าตัด 138.8x6

$$F_{AB} = 846.89 \text{ kgf} \cdot (\text{C}) \quad \sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{Mc}{I};$$

$$M = PL \quad \text{สมการที่ 2}$$

$$\sigma = \frac{7436}{25.22} + \frac{(7436 \times 1.3)(0.7)}{80.90} = 414.32 \text{ Kgf} / \text{cm}^2.$$

$$\sigma = \frac{p}{A} \pm \frac{Mc}{I}; M = PL + \frac{EI}{\rho} \quad \text{สมการที่ 3}$$

$$\sigma = \frac{7436}{25.22} + \frac{(7436 \times 1.3)(0.7)}{80.90} + \frac{(2.04 \times 10^6)(6.99)}{11390} = 1666.26 \text{ Kgf} / \text{cm}^2.$$

3.2 ขั้นตอนการคำนวณอัตราส่วนความ

ปลอดภัย

$$F.S. = \frac{F_y}{\sigma_1}$$

$$F.S. = \frac{2400}{414.32} = 5.79 \quad \text{สมการที่ 2}$$

$$F.S. = \frac{F_y}{\sigma_2}$$

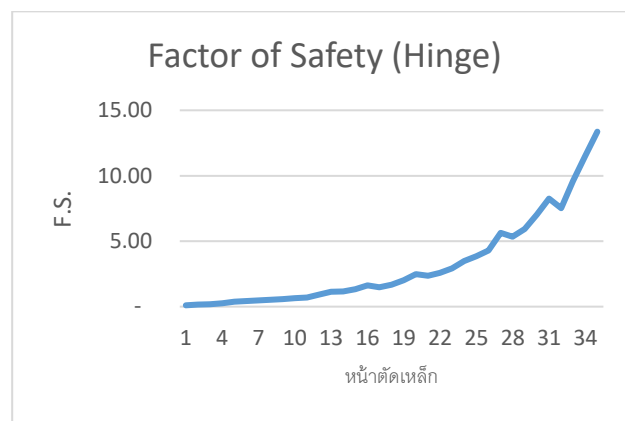
$$F.S. = \frac{2400}{1666.26} = 1.44 \quad \text{สมการที่ 3}$$

3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์อัตราส่วนความ

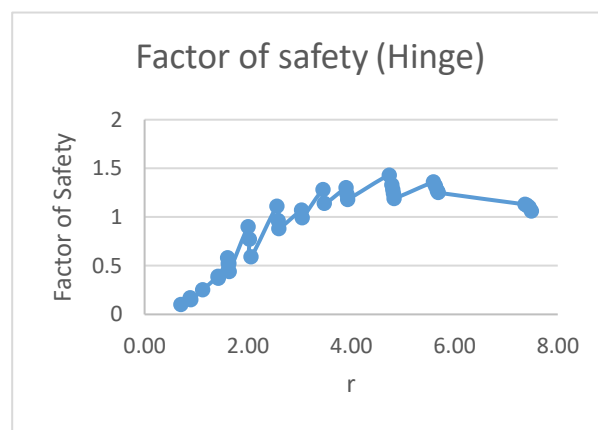
ปลอดภัย

เมื่อทำการคำนวณพฤติกรรมของโครงถักที่เป็น Internal hinge และ Fixed เราจึงนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัยต่อไป

3.3.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงถักที่เป็น Internal hinge โดยโปรแกรม SAP ได้ค่าดังนี้

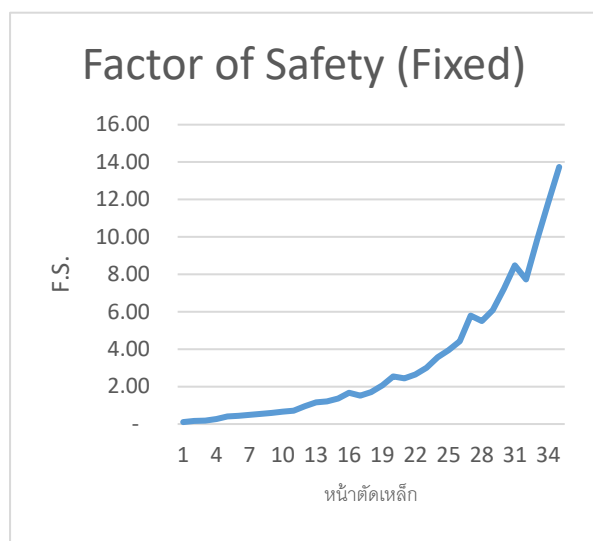


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Factor of Safety และหน้าตัดหลัก ตามสมการที่ 2

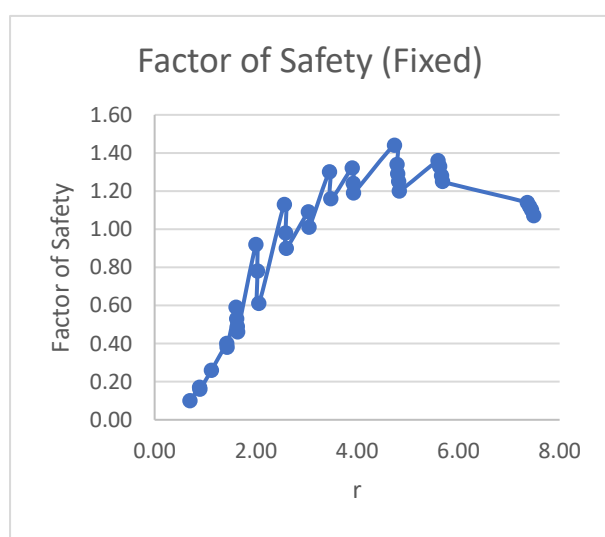


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Factor of Safety และค่า r ตามสมการที่ 3

3.3.2 การวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงถักที่เป็น Fixed โดยโปรแกรม SAP ได้ค่าดังนี้

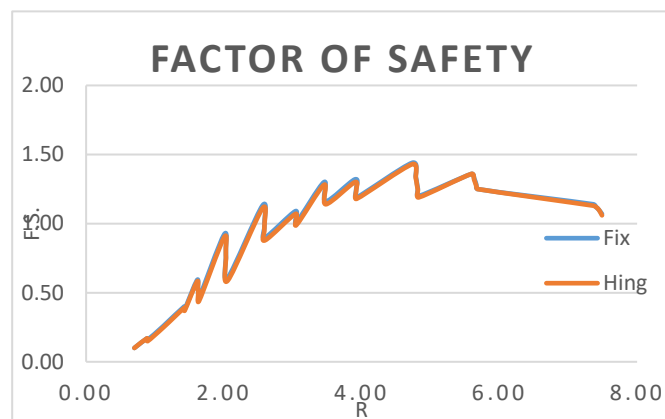


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Factor of Safety และหน้าตัดเหล็ก ตามสมการที่ 2



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Factor of Safety และหน้าตัดเหล็ก ตามสมการที่ 3

3.4 ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย

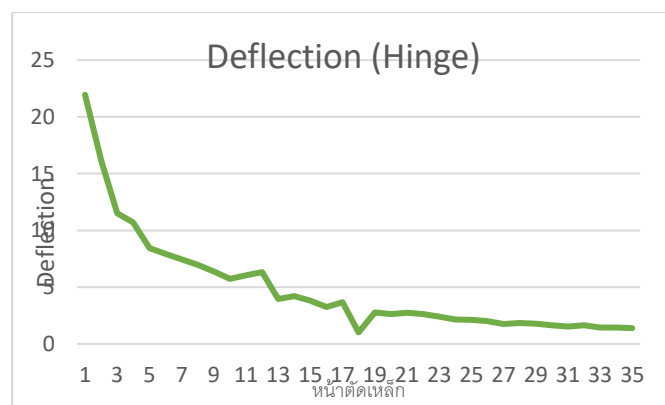


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Factor of Safety และหน้าตัดเหล็ก ตามสมการที่ 3 โดยนำของโครงถักที่เป็น Internal hinge และ Fixed มาเปรียบเทียบ

3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าการแอ่นตัว

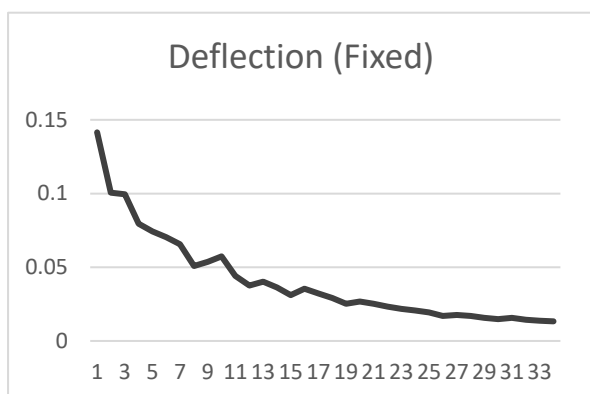
เรานำค่าการแอ่นตัวที่ได้จากโปรแกรม SAP ไปวิเคราะห์ค่าการแอ่นตัว

3.5.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงถักที่เป็น Internal hinge โดยโปรแกรม SAP ได้ค่าดังนี้



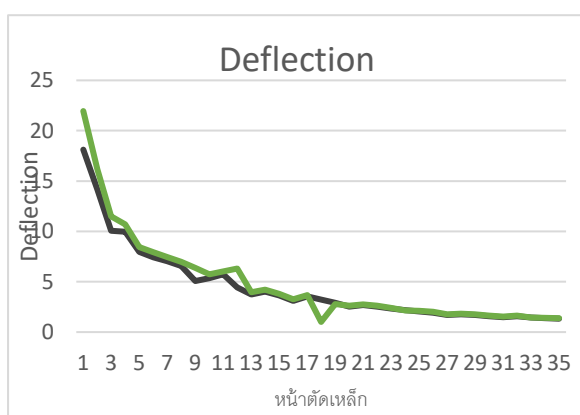
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection (Hinge) และหน้าตัดเหล็ก

3.5.2 การวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงถักที่เป็น Fixed โดยโปรแกรม SAP ได้ค่าดังนี้



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection (Fixed) และหน้าตัดเหล็ก

3.5.3 ผลการวิเคราะห์การวิเคราะห์ค่าการแอ่นตัว



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection และ หน้าตัดเหล็ก

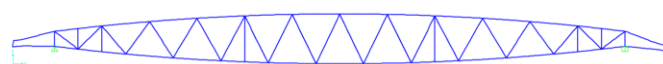
โดยนำของโครงถักที่เป็น Internal hinge และ Fixed มาเปรียบเทียบ

จากการศึกษาและทดลองออกแบบและ เช็ค่าความปลอดภัย โดยการคำนึงถึงผลจากตัด โครงของโครงถัก (curvature) ทั้งที่มีจุดต่อแบบ

Internal hinge และโครงถักที่มีจุดต่อแบบ Fixed ทำให้สามารถทราบได้ว่า

ค่าการแอ่นตัวที่เป็นจุดต่อแบบ Internal hinge และจุดต่อแบบ Fixed ในหน้าตัดเล็กมีค่าที่ ต่างกัน แต่หน้าตัดใหญ่มีค่าการแอ่นตัวที่ใกล้เคียง กัน

3.6 ค่าการแอ่นตัว



deflection ของ Model ตัวอย่างที่มีลักษณะจุดต่อเป็น Internal hinge



deflection ของ Model ตัวอย่างที่มีลักษณะจุดต่อเป็น fixed

จะพบว่ามีการแอ่นตัวของ Model ตัวอย่างจะพบว่า Model ตัวอย่างที่มีลักษณะจุด ต่อเป็น Internal hinge มีการแอ่นตัวอยู่ที่ 0.0176 เมตร หรือ 1.76 มิลลิเมตร และ Model ตัวอย่างที่มีลักษณะจุดต่อเป็น Fixed มีการแอ่น ตัวอยู่ที่ 0.0169 เมตร หรือ 1.69 มิลลิเมตร ซึ่งมี คำน้อยกว่าอัตราส่วนการแอ่นตัวที่ยอมให้ $\frac{L}{360} = 0.02$ เมตร หรือ 2 เซนติเมตรจึงถือว่าปลอดภัย

4.สรุปผลการศึกษา

1. ค่าประกอบความปลอดภัยของชิ้นส่วนโครงถัก
โค้งของจุดต่อแบบ Fixed มากที่สุดเท่ากับ 1.44
ที่หน้าตัด 139.8×6.0 mm.
2. ค่าประกอบความปลอดภัยของชิ้นส่วนโครงถัก
โค้งของจุดต่อแบบ Internal Hinge มากที่สุด
เท่ากับ 1.43 ที่หน้าตัด 139.8×6.0 mm.
3. ค่าประกอบความปลอดภัยของชิ้นส่วนโครงถัก
โค้งอาคารฟุตซอล มหาวิทยาลัยบูรพา มีค่า
เท่ากับ 1.20 ที่หน้าตัด 139.8× 3.2 mm.
4. ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งบริเวณกึ่งกลางโครง
ถักเมื่อพิจารณาผลการตัดโค้งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2
เซนติเมตร สำหรับหน้าตัด 139.8× 3.2 mm.
ซึ่งไม่เกินกว่าค่าการโก่งตัวที่ยอมให้เท่ากับ 8
เซนติเมตร
5. เมื่อหน้าตัดเหล็กมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ค่า
Moment of Inertia เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าของ
โมเมนต์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังสมการ

$$M = P\Delta + \frac{EI}{I}$$
และจากสมการ

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{Mc}{I}$$
จะเห็นได้ว่า เมื่อโมเมนต์
เพิ่มขึ้น ทำให้เพิ่มขึ้นเมื่อนำไปคำนวณหาค่า
ประกอบความปลอดภัยพบว่าค่าประกอบความ
ประกอบภัยลดลง เมื่อเทียบกับ

$$\sigma = \frac{p}{A} \pm \frac{Mc}{I}; M = PL + \frac{EI}{\rho}$$
6. จากกราฟที่ 4.2.5 ค่าเปรียบเทียบค่าประกอบ
ความปลอดภัย จะพบว่าลักษณะจุดต่อแบบ
Fixed มีความแข็งแรงมากกว่าลักษณะจุดต่อ
แบบ Internal hinge

5.บรรณานุกรม

- [1] รศ.กวี หวังนิเวศน์กุล, "การออกแบบโครงสร้าง
อาคารเหล็ก", กรุงเทพฯ:โรงพิมพ์ หจก.รุ่งแสงการ
พิมพ์, 2553
- [2] ประสิทธิ์ แวงแก้ว, ฉัตรชัย ลาภรังสิรัตน์, "คู
เมืองงานเหล็ก", กรุงเทพฯ:ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2554
- [3] รศ.มนตรี พิรุณเกษตร, "กลศาสตร์ของวัสดุ",
กรุงเทพฯ:วิทย์พัฒน์, 2550
- [4] ผศ.ดร. สิริชัย แสงอาทิตย์ SUT, "เอกสาร
ประกอบการสอนวิชาทฤษฎีโครงสร้าง Theory of
Structures"