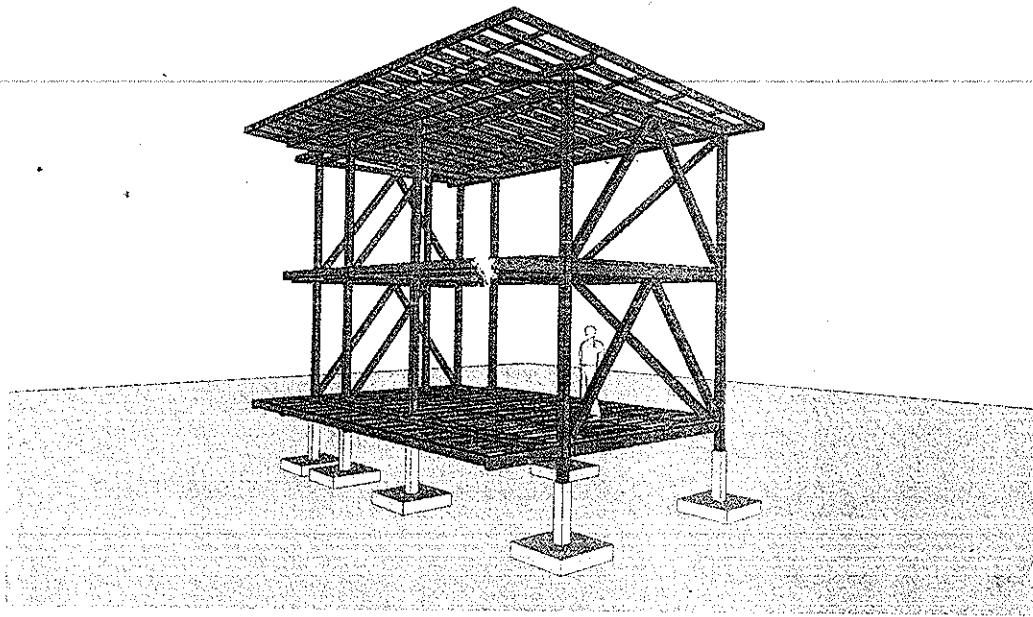


เหล็กโครงสร้างหน้าตัดกลวงในงานโครงสร้างเหล็ก
Hollow Steel Sections in Structural Steel Applications



เสนอ

บริษัท สามชัยสตีล อินดัสตรี จำกัด (มหาชน)

จัดทำโดย

สถานศึกษาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

คำนำ

“การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเพื่อช่วยในการออกแบบระบบโครงสร้างท่อเหล็กกลวง” ฉบับนี้ ได้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบโครงสร้างเหล็กหน้าตัดกลวง ซึ่งถือเป็นเหล็กโครงสร้างที่เกิดขึ้นล่าสุดภายหลังจากการใช้งานโครงสร้างเหล็กแบบดั้งเดิม และเริ่มที่จะได้รับความนิยมมากขึ้นในประเทศไทย

ในอดีตการออกแบบโครงสร้างเหล็กที่ผ่านมาในประเทศไทย จำกัดอยู่แค่การออกแบบเหล็กที่ร้อนเป็นหลัก ซึ่งไม่ได้เน้นความสวยงามเท่าที่ควร อาทิ การออกแบบให้กับอาคารประเภทโรงงาน แต่ในปัจจุบันได้มีการนำโครงสร้างเหล็กเข้ามาออกแบบในอาคารประเภทอื่น ๆ นอกจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น สนามกีฬา อาคารหอประชุม สนามบินฯ ซึ่งอาคารประเภทเหล่านี้ นอกจากความมั่นคงแข็งแรงแล้วยังต้องคำนึงถึงความสวยงามด้วย เพราะฉะนั้น การออกแบบโครงสร้างหน้าตัดกลวง หรือ ระบบท่อโครงสร้างเหล็ก (Hollow Steel Structure) จึงได้เข้ามาสนองความต้องการตรงจุดนี้ได้เป็นอย่างดี

อย่างไรก็ตาม การออกแบบโครงสร้างหน้าตัดกลวงนี้ วิศวกรอาจจะยังไม่คุ้นเคยที่จะออกแบบโดยใช้ระบบท่อโครงสร้างนี้ มีหลายสิ่งที่จะต้องพิจารณาเพิ่มเติมนอกเหนือจากการออกแบบโครงสร้างเหล็กที่ได้เคยปฏิบัติผ่าน ๆ มา ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้โครงสร้างลักษณะนี้เป็นที่แพร่หลายในอุตสาหกรรมอย่างเหมาะสมและปลอดภัย การศึกษาถึงรายละเอียดข้อได้เปรียบ เสียเปรียบในกระบวนการออกแบบทั้งในเชิงของสถาปัตยกรรมและวิศวกรรมรวมถึงด้านราคา และการศึกษาวิธีการก่อสร้าง เป็นสิ่งที่จำเป็น

โครงการ	การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเพื่อช่วยในการออกแบบระบบโครงสร้างท่อเหล็กกลวง		
จัดทำโดย	สถานศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่		
คณะทำงาน	ดร.ปุ่น	เที่ยงบุรณธรรม	หัวหน้าโครงการ
	ดร.ชยานนท์	หรรษาภิญโญ	
	คุณกอบเกียรติ	อัศววัฒนาพร	
	อาจารย์ไกรสร	ลักษณะศิริ	
	อาจารย์อุดม	ฉัตรศิริกุล	

สารบัญ

	หน้า
1. บทนำ	1
2. ปรัชญาการออกแบบ (Design Philosophy)	8
3. ขั้นตอนการออกแบบ (Design Procedure)	12
4. การออกแบบชิ้นส่วนรับแรงอัด	14
5. การตรวจสอบกำลังของจุดต่อ	16
6. การคำนวณหากำลังของจุดต่อโดยอาศัย Design chart	19
7. จุดต่อประเภทอื่น ๆ	22
8. ตัวอย่างการออกแบบโครงสร้างเหล็กหน้าตัดวงกลมชนิดหน้าตัดกลม (Circular Hollow section, CHS)	28
9. ตัวอย่างการออกแบบโครงสร้างเหล็กหน้าตัดวงกลมชนิดหน้าตัดสี่เหลี่ยม (Rectangular Hollow section, RHS)	35
10. การเปรียบเทียบการรับน้ำหนักของโครงสร้างหน้าตัดวงกลม และเหล็กหน้าตัดปีกกว้าง	48
11. เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. สมการคำนวณ และ Design Chart ของจุดต่อเหล็กหน้าตัดวงกลม	
ภาคผนวก ข. สมการคำนวณ และ Design Chart ของจุดต่อเหล็กหน้าตัดวงสี่เหลี่ยม	

1. บทนำ

ในประเทศไทยการออกแบบโครงสร้างเหล็กในประเทศเริ่มเป็นที่แพร่หลายมากขึ้น ด้วยข้อได้เปรียบของโครงสร้างเหล็กที่มีมากกว่าโครงสร้างคอนกรีตในแง่ที่ใช้เวลาการก่อสร้างที่รวดเร็วกว่า สามารถควบคุมคุณภาพการก่อสร้างได้มากกว่า มีน้ำหนักเบา ทำให้ประหยัดโครงสร้าง แต่ข้อจำกัดของโครงสร้างเหล็กเท่าที่ผ่านมาคือ ราคาแพง เนื่องจากต้องมีการนำเข้ามาจากต่างประเทศ ทั้งวิธีการออกแบบก็มีขั้นตอนยุ่งยากกว่าการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเฉพาะวิธีการคำนวณจุดต่อ ข้อต่อต่าง ๆ ซึ่งเป็นจุดที่สำคัญมากจุดหนึ่งของการออกแบบ

การออกแบบที่ดี จะเป็นการคำนึงถึงแง่มุมต่าง ๆ อย่างสมดุล โดยเฉพาะอย่างยิ่งความต้องการทางด้านการใช้งาน ทางด้านสถาปัตยกรรม และ การก่อสร้าง ในปัจจุบันนี้เหล็กหน้าตัดกลวงกำลังเป็นที่นิยมเพิ่มมากขึ้น จะเห็นได้จากประเทศที่พัฒนาแล้วหลายประเทศ เนื่องจากคุณสมบัติพิเศษต่าง ๆ ของเหล็กหน้าตัดกลวง

ในธรรมชาติเราจะสามารถพบเห็นการใช้รูปทรงท่อ (Tubular Shape) ได้หลายรูปแบบ อาทิ ต้นไผ่ หรือต้นหญ้า รูปทรงนี้มีลักษณะพิเศษหลายอย่างเช่น ความสามารถในการรับแรงอัด แรงบิด และสามารถรับแรงดัดได้จากหลายทิศทาง ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ดีในการประยุกต์รูปทรงที่เป็นท่อเข้ากับสถาปัตยกรรมต่าง ๆ

เมื่อเปรียบเทียบเหล็กรูปทรงที่เป็นท่อหรือเหล็กหน้าตัดกลวงนี้กับเหล็กหน้าตัดเปิดชนิดอื่น ๆ เช่น เหล็กรูปตัว I ตัว H เป็นต้น เหล็กหน้าตัดกลวงนี้มีจุดเด่นที่เหนือกว่าอยู่หลายด้านเช่น ความสามารถในการต้านทานการผุกร่อนเพราะขอบมุมของเหล็กหน้าตัดกลวงมีลักษณะมนทำให้การทาสีป้องกันมีประสิทธิภาพที่เหนือกว่า นอกจากนี้ช่องว่างภายในของหน้าตัดสามารถประยุกต์ใช้ได้หลายหลาก ไม่ว่าจะเป็น การเติมคอนกรีตลงไปภายในเพื่อให้โครงสร้างสามารถป้องกันไฟได้ดีขึ้นและรับน้ำหนักได้ดีขึ้นหรือ การใช้ช่องว่างเพื่อเป็นระบบระบายอากาศ หรือระบบส่งผ่านความเย็นและความร้อนภายในอาคาร รูปทรงที่โค้งมนของระบบท่อกลวงยังเป็นข้อดีที่สำคัญสำหรับโครงสร้างในการต้านทานแรงลมและแรงน้ำในธรรมชาติ เนื่องจากว่าท่อลักษณะนี้มีสัมประสิทธิ์ความต้านทานที่ค่อนข้างต่ำ (Drag coefficients)

อย่างไรก็ตามข้อจำกัดอย่างหนึ่งที่ทำให้เหล็กหน้าตัดกลวงยังไม่แพร่หลายเท่าที่ควรจะเป็นคือ ความซับซ้อนของการออกแบบรอยต่อ แม้ว่าปัจจุบันนี้รูปแบบการออกแบบรอยต่อต่าง ๆ จะมีอยู่อย่างแพร่หลายและการวิจัยในปัญหานี้ก็มีมากขึ้นเป็นลำดับ อีกข้อจำกัดอันหนึ่งของเหล็กหน้าตัดกลวงก็คือราคา แต่บางสถานการณ์เมื่อผลิตในปริมาณที่มากการประยุกต์ใช้ระบบโครงสร้างชนิดนี้ ก็เป็น

ทางเลือกที่ดีกว่าระบบอื่นทั้งเชิงของราคาและคุณภาพ เช่น ในงานสถาปัตยกรรม งานโยธา งานโครงสร้างชายฝั่ง งานทางด้านเครื่องกล งานทางด้านเคมีอุตสาหกรรม งานด้านขนส่ง งานด้านเกษตรกรรม และอื่น ๆ

การใช้งานโครงสร้างเหล็กหน้าตัดกลวงในต่างประเทศ ได้เริ่มก่อนประเทศไทยมาเป็นระยะเวลาหลายสิบปีแล้ว ข้อพิจารณาที่แตกต่างจากการออกแบบโครงสร้างเหล็กดั้งเดิมได้นำไปสู่งานค้นคว้าวิจัย เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับการออกแบบ งานค้นคว้าที่สำคัญต่าง ๆ ได้ถูกรวบรวมและจัดสร้างเป็นแนวทางการออกแบบโครงสร้างเหล็กหน้าตัดกลวง โดยองค์กร CIDECT (The International Committee for the Study and Development of Tubular Structures) ที่ได้จัดตั้งในปี ค.ศ. 1962 ซึ่งมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาพฤติกรรมและการออกแบบโครงสร้างเหล็กหน้าตัดกลวงโดยเฉพาะ งานค้นคว้าของ CIDECT ได้ถูกนำไปอ้างอิงอยู่ในมาตรฐานแห่งชาติ และนานาชาติ ที่สำคัญต่าง ๆ ได้แก่ มาตรฐาน DIN (Deutsche Industrie Normung – German Standard) มาตรฐาน NF (Norme Francaise – French Standard) มาตรฐาน BS (British Standard) มาตรฐาน ACNOR/CSA (Canadian Standard) มาตรฐาน AIJ (Architectural Institute of Japan) มาตรฐาน IIW (International Institute of Welding) และมาตรฐาน EUROCODE 3 เป็นต้น

ดังที่ได้รับความน่าเชื่อถือในการอ้างอิงของมาตรฐานต่างๆ ดังที่ได้กล่าว เอกสารฉบับนี้จึงอ้างอิงวิธีการออกแบบโครงสร้างเหล็กหน้าตัดกลวง CIDECT [1], [2] เช่นเดียวกัน เพื่อออกแบบให้ได้โครงสร้างที่สามารถรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัยภายใต้แรงกระทำสถิต (Static loading) รวมทั้งการออกแบบที่พิจารณาการกัดกร่อน และลักษณะการต่อชิ้นส่วนทั้งในโรงงาน (Prefabrication) และการประกอบชิ้นส่วนโครงสร้างย่อย (Prefabricated sub-assemblies) ที่สามารถทำได้อย่างประหยัด และสะดวก

1.1 อะไรคือเหล็กโครงสร้างหน้าตัดกลวง (Hollow Structure Steel)

เหล็กโครงสร้างหน้าตัดกลวง (Hollow Structural Sections, HSS) เป็นเหล็กท่อที่ทำจากกรรมวิธีขึ้นรูปและเชื่อมเหล็กแผ่นที่มีกำลังสูงเพื่อนำมาใช้สำหรับงานโครงสร้าง เหล็กโครงสร้างหน้าตัดกลวงนี้ที่มีศักยภาพในการประยุกต์สูง ไม่เพียงเฉพาะสามารถทดแทนโครงสร้างดั้งเดิมดังเช่น คอนกรีตเสริมเหล็ก หรือแม้กระทั่งสามารถทดแทนโครงสร้างเหล็กหน้าตัดผนังบางชนิดเปิด (open sections) เช่น ดั้ว I และ S เป็นต้น

เนื่องจากคุณสมบัติที่เหนือกว่าทั้งในด้านของความแข็งแรง (Stiffness) และการมีรูปทรงหน้าตัดที่มีเสถียรภาพ (Stability) และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) และรูปทรงเรขาคณิต (Geometrical properties) ของเหล็กโครงสร้างหน้าตัดคดงว และหน้าตัดเปิดจะเห็นได้ถึงการลดปริมาณวัสดุภายใต้สภาวะแรงกระทำในหลาย ๆ ลักษณะ

1.2 การผลิตเหล็กโครงสร้างหน้าตัดคดงว

เหล็กโครงสร้างหน้าตัดคดงวสามารถผลิตได้หลายแบบคือ ขึ้นรูปเป็นท่อกลมและสี่เหลี่ยม หรือเชื่อมด้วยไฟฟ้าแบบ Electric Resistance Welding (ERW) และ Submerged Arc Welding (SAW) การผลิตเหล็กโครงสร้างหน้าตัดคดงวสามารถแจกแจงได้เป็น

1) ERW Weld-Round-Form-Square Process.

เป็นการขึ้นรูปเย็นจากแผ่นเหล็กให้เป็นท่อกลมและเชื่อมปิดด้วยวิธี Electric Resistance Welding ถ้าต้องการท่อเหลี่ยมท่อกลมจะถูกรีดผ่าน rolling stations เพื่อจะเปลี่ยนรูปเป็นท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า

2) ERW Form-Square Weld-Square Process

เป็นการขึ้นรูปเย็นจากแผ่นเหล็กให้เป็นท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าและจึงเชื่อมปิดด้วยวิธี Electric Resistance Welding

3) SAW Process

เป็นการขึ้นรูปเย็นจากแผ่นเหล็กสองชั้น โดยจะกดแผ่นเหล็กเป็นแผ่นโค้งหรือเหลี่ยม แล้วจึงเชื่อมด้วยวิธี Submerged Arc Welding เพื่อจะเปลี่ยนรูปเป็นท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า

การผลิตเหล็กโครงสร้างหน้าตัดคดงวด้วยวิธีขึ้นรูปเย็นนี้ (Cold Formed) มีข้อดีหลายอย่าง อาทิ ความสามารถในการควบคุมความแปรปรวนของรูปร่างท่อ (Dimensional Tolerances) ทั้งความตรงและความเหลี่ยม นอกจากนี้เครื่องจักรการผลิตสมัยใหม่สามารถที่จะผลิตได้ตามขนาดที่หลากหลายตามที่ลูกค้าสั่ง

1.3 ข้อเด่นของเหล็กโครงสร้างหน้าตัดกลวง

เหล็กโครงสร้างหน้าตัดกลวงข้อได้เปรียบหลายอย่าง การเลือกใช้ชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กมักจะต้องพิจารณาหลายๆปัจจัยร่วมกัน ได้แก่ การเปรียบเทียบข้อดี - ข้อด้อยของคุณสมบัติเชิงกล ราคาวัสดุต่อหน่วย ราคาค่าใช้จ่ายการประกอบและการติดตั้ง แม้ว่าราคาต่อหน่วยของเหล็กโครงสร้างชนิดหน้าตัดกลวงจะสูงกว่าเหล็กโครงสร้างชนิดหน้าตัดเปิด การออกแบบเลือกใช้ที่เหมาะสมจะนำไปสู่ราคารวมที่ประหยัดกว่าได้ ข้อเด่นของเหล็กโครงสร้างหน้าตัดกลวงสามารถจำแนกออกมาได้ดังนี้

1.3.1 ความสามารถต้านทานแรงบิด (Torsion) ที่ดี

เนื่องจากเป็นหน้าตัดปิด (Close Periphery) จึงทำให้สามารถต้านทานแรงบิด ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบกว่าการใช้เหล็กรูปพรรณรูปตัวไอ หรือ ตัวซี ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย

เหล็กโครงสร้างชนิดหน้าตัดกลวง โดยเฉพาะชนิดหน้าตัดกลม (Circular Hollow Sections, CHS) เป็นรูปหน้าตัดที่มีความสามารถในการต้านทานการบิดได้ดี เนื่องจากเนื้อหน้าตัดกระจายจากแกนขั้ว (polar axis) อย่างสม่ำเสมอ ตารางที่ 1.1 แสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานการบิดของเหล็กโครงสร้างชนิดหน้าตัดกลวงและเหล็กโครงสร้างชนิดหน้าตัดเปิดที่มีหน่วยน้ำหนักใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าคงที่ของเหล็กโครงสร้างชนิดหน้าตัดกลวงมีค่ามากกว่า 200-300 เท่า

ตารางที่ 1.1 กำลังต้านทานการบิดของหน้าตัดต่างๆ

หน้าตัด	มวล, kg/m	ค่าคงที่ต้านทานการบิด Torsion Constant, J
150 UC 23	23,4	48,7
200 UB 25	25,4	61,2
L 127 x 127 x 13	24,0	166
□ 127 x 127 x 6,3	23,9	11200
φ 168 x 6,3	25,3	21200

1.3.2 อัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักที่ดี

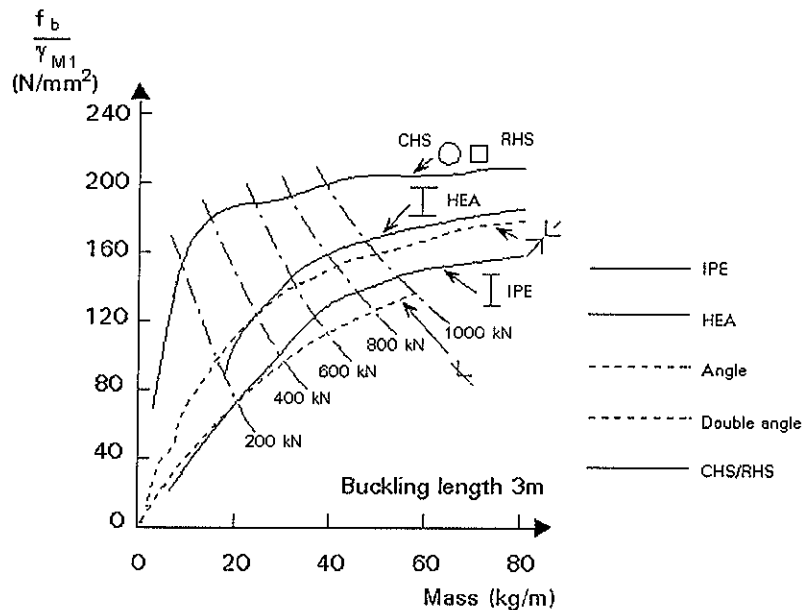
เนื่องจากเหล็กโครงสร้างหน้าตัดกลวงเป็นเหล็กรีดเย็น จึงสามารถผลิตหน้าตัดให้มีความบางได้ด้วย ความแข็งแรงที่เท่ากันจะใช้หน้าตัดมีน้ำหนักน้อยกว่า

1.3.3 ค่าความเค้นครากที่เพิ่มขึ้น

ข้อกำหนดมาตรฐานทั่วไปในบางข้อกำหนดมาตรฐานจะใช้คุณสมบัติเชิงกลพื้นฐานของเหล็ก โครงสร้างหน้าตัดกลวงในการออกแบบ แต่ในบางข้อกำหนดมาตรฐาน อาจพิจารณาค่ากำลังครากที่ เพิ่มขึ้นอีกได้เนื่องจากการตัดเย็บ ซึ่งค่าความเค้นครากเฉลี่ยจะมีค่ามากขึ้น ซึ่งอาจจะถึง 25% ของเหล็ก ก่อขึ้นรูป

1.3.4 เหล็กโครงสร้างหน้าตัดกลวงเป็นหน้าตัดที่เหมาะสมในการทำอาคารเสาและองค์ อาคารแบบโครงถัก (Truss)

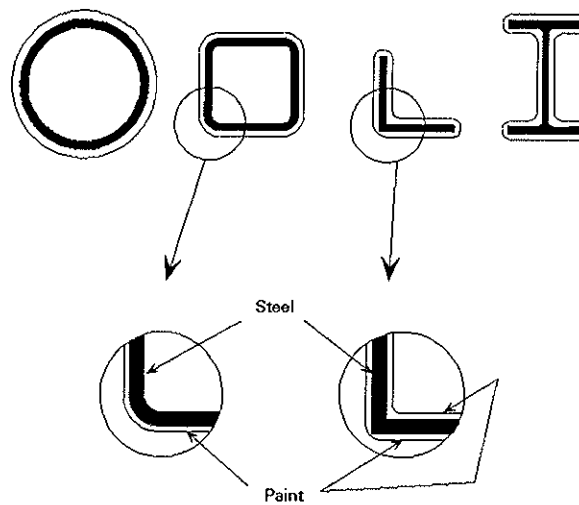
เนื่องจากท่อเหล็กกลม และท่อเหล็กสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีขนาดสมมาตรทั้งสองแกน ทำให้ค่า คุณสมบัติของหน้าตัด อาทิเช่น ค่าโมเมนต์อินเนอร์เซีย, ค่าโมดูลัสไจเรชั่น เป็นต้น ของทั้งสองแกนเท่ากัน ซึ่งเหมาะกับการออกแบบของอาคารรับแรงอัดเพราะองค์อาคารรับแรงอัดมักจะวิบัติในด้านแกนอ่อน สำหรับเหล็กรูปพรรณ โดยทั่วไป การใช้เหล็กโครงสร้างชนิดหน้าตัดกลวงจะประหยัดกว่า รูปที่ 1.1 แสดงการเปรียบเทียบการรับแรงกดของเหล็กหน้าตัดรูปต่างๆ



รูปที่ 1.1 การเปรียบเทียบกำลังการรับน้ำหนักกดต่อหน่วยน้ำหนักของ เหล็กโครงสร้างชนิดหน้าตัดกลวงและเหล็กโครงสร้างชนิดหน้าตัดเปิด

1.3.5 ถ่ายต่อการทาสี หรือการป้องกันไฟไหม้โครงสร้าง

การที่มีพื้นที่ผิวที่น้อยกว่าเหล็กรูปพรรณรูปตัวไอ หรือตัวซี ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการทาสี หรือการ ทำวัสดุป้องกันไฟที่น้อยกว่า อีกทั้งรูปร่างพื้นที่ผิวของเหล็กโครงสร้างหน้าตัดกลมวง ทำให้การทาสีง่าย กว่าเหล็กรูปตัวไอด้วย (ดังแสดงในรูปที่ 1.2) โดยทั่วไปแล้วเหล็กโครงสร้างชนิดหน้าตัดกลมวง จะมีมุมที่ โค้งมน ซึ่งมีคุณสมบัติในการป้องกันการเกิดการกัดกร่อนได้ดีกว่ากรณีที่มีมุมเหลี่ยม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในบริเวณจุดต่อของเหล็กโครงสร้างชนิดหน้าตัดกลมวงที่สามารถเชื่อมต่อได้อย่างราบเรียบและต่อเนื่อง การทำชั้นเคลือบ (Coating) จะทำให้มีอายุการปกป้องที่ยาวนานกว่า



รูปที่ 1.2 ความหนาที่สม่ำเสมอในการฉาบคลุมของเหล็กโครงสร้างชนิดหน้าตัดกลมวง

1.3.6 เหมาะกับโครงสร้างของอาคารที่ต้องการหลีกเลี่ยงฝุ่นละออง

อาคารบางประเภท เช่น โรงงานผลิตอาหาร, อาคารสนามบิน ที่ไม่ต้องการให้เหล็กโครงสร้าง เป็นแหล่งสะสมฝุ่นละออง การใช้เหล็กรูปตัวไอ หรือตัวซี ไม่เหมาะในการออกแบบ เหล็กโครงสร้างหน้า ตัดกลมวงมีการเก็บกักฝุ่นละอองที่ต่ำกว่า

1.3.7 โครงสร้างที่สวยงาม

ด้วยลักษณะของโครงสร้างหน้าตัดกลมวงที่สวยงาม ทำให้สถาปนิกสามารถใช้อาคาร โครงสร้างเป็นส่วนหนึ่งของการตกแต่งอาคารได้ อย่างเช่น โครงหลังคาของสนามบินสุวรรณภูมิ, โครง หลังคาของสระว่ายน้ำ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ การเลือกใช้เหล็กโครงสร้างชนิดหน้าตัดกลมวงใน

โครงสร้างทำให้องตู่สะอาด เรียบร้อย กว้างขวาง รูปร่างเสาที่เรียบง่าย โค้งมนกลมกลืน สามารถเข้ากันได้เป็นอย่างดีกับโครงสร้างแบบแผ่นม้วน (folded structures) หรือ การใช้งานกับคานรูปตัววี (V-type girders) เนื่องจากหน้าตัดกลมกลวงนั้นมีความสามารถในการต้านทานต่อการบิดสูง งานโครงถักโยงยึดเป็นโครงสร้างนั้น การเลือกใช้เหล็กโครงสร้างชนิดหน้าตัดกลวงจะทำให้สามารถเชื่อมต่อกันได้โดยตรง ไม่จำเป็นต้องมีแผ่นเสริมกำลัง (Stiffeners) หรือแผ่นช่วยเชื่อมต่อ (Gusset plates) ซึ่งทำให้สามารถแสดงรูปทรงของโครงสร้างที่สวยงามได้

2. ปรัชญาการออกแบบ (Design Philosophy)

การออกแบบโครงสร้างเหล็กจะเป็นการพิจารณากำลังการรับน้ำหนักของชิ้นส่วนโครงสร้าง และรอยต่อของชิ้นส่วน รวมทั้งการพิจารณาอื่นนอกเหนือไปจากเรื่องกำลัง เช่น ความสามารถในการทำงานได้ ค่าใช้จ่าย การประกอบ การติดตั้ง การตรวจสอบและบำรุงรักษา เป็นต้น รอยต่อระหว่างชิ้นส่วนเหล็กโครงสร้างชนิดหน้าตัดกลวง และหน้าตัดเปิดโดยวิธีการยึดด้วยนอตและแผ่นช่วยเชื่อมต่อ (Gusset plates) ทำให้ผู้ออกแบบสามารถเลือกขนาดหน้าตัดเพื่อรับแรงกระทำได้โดยไม่ต้องพิจารณาถึงรายละเอียดของรอยต่อ ซึ่งในบางประเทศนั้น การให้รายละเอียดของการต่อจะเป็นภาระของผู้ประกอบชิ้นส่วน

สำหรับการต่อชิ้นส่วนเหล็กโครงสร้างชนิดหน้าตัดกลวงโดยวิธีการเชื่อม ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้แผ่นช่วยเชื่อมต่อ (Gusset plates) การเชื่อมต่อจะทำโดยตรงกับชิ้นส่วนที่นำมาต่อกัน รูปร่างรอยต่อพื้นฐาน แสดงในรูปที่ 2.1 กำลังของรอยต่อนั้นจะต้องพิจารณาร่วมกับกำลังและรูปทรงของชิ้นส่วนที่นำมาเชื่อมเข้าด้วยกัน ดังนั้น การออกแบบรอยต่อจะต้องพิจารณาไปพร้อมๆกับการออกแบบเลือกขนาดหน้าตัดของชิ้นส่วนโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น การออกแบบคานโดยการพิจารณาขนาดของแรงที่กระทำต่อชิ้นส่วนอาจจำเป็นต้องทำการเสริมกำลังที่จุดต่อที่ไม่พึงประสงค์ในภายหลัง ซึ่งหมายถึง การเลือกใช้ชิ้นส่วนใดๆจะต้องกระทำโดยพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเชื่อมต่อ (Governing Joint Parameters) ร่วมด้วย เช่น อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาของผนัง ระยะช่องว่าง (Gap) ที่เกิดขึ้นเมื่อนำมาเชื่อมต่อกัน มุมระหว่างชิ้นส่วนที่เชื่อมต่อ เป็นต้น

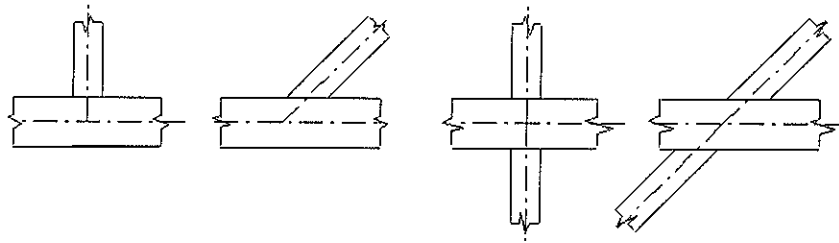
ทั้งนี้ การออกแบบจะต้องพยายามให้เกิดความต้องการในหลายๆข้อพิจารณาร่วมกัน เช่น กำลังต้านทานของชิ้นส่วน ความเสถียรภาพของโครงสร้าง ประหยัดต่อการประกอบและการติดตั้ง รวมทั้งค่าบำรุงรักษาที่ต่ำ ซึ่งโดยข้อพิจารณาทั้งหมดในบางครั้งจะมีความขัดแย้งกัน แนวทางที่แนะนำเพื่อให้การออกแบบที่เหมาะสมที่สุด (Optimum design) อาจกล่าวยกตัวอย่างได้ดังนี้

1. สำหรับโครงสร้างถัก (Lattice structures) โดยทั่วไปจะออกแบบให้รอยต่อเป็นแบบหมุนได้ (pin jointed members) ซึ่งอาจจะเลยโมเมนต์ดัดรอง (Secondary bending moments) หากรอยต่อมีความสามารถต่อการหมุนได้เพียงพอ (rotation capacity) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทางเลือกชิ้นส่วนภายใต้พิสัยขอบเขตค่าความชะลูดของผนัง (wall slenderness) ของชิ้นส่วนที่เชื่อมต่อกัน โดยเฉพาะชิ้นส่วนที่รับแรงอัด (Eurocode 3 [3])

2. โดยปกติจะออกแบบให้รอยต่อชนกันโดยแรงกระทำพบบันที่จุดๆหนึ่ง อย่างไรก็ตาม หากการออกแบบโดยให้เกิดระยะเยื้องของแรงเพียงเล็กน้อยจะช่วยให้วิธีการประกอบชิ้นส่วนง่ายขึ้นก็จะเป็นประโยชน์มากกว่า (รูปที่ 2.2) และสำหรับชิ้นส่วนรับแรงดึงจะไม่ต้องพิจารณาโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเยื้องศูนย์ได้ หากระยะเยื้องต้องไม่เกิน $-0.55 \leq e/d_0$ (หรือ e/h_0) ≤ 0.25 แต่สำหรับชิ้นส่วนรับแรงอัดจะต้องตรวจสอบค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นโดยเสมอ

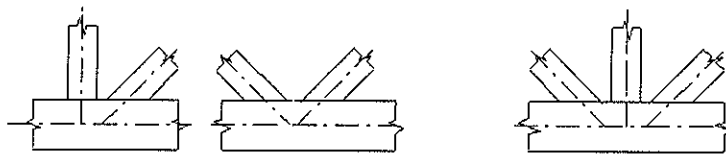
3. การต่อโดยเกิดเหลื่อมกันเต็มหน้าตัด (Full overlapping) จะทำให้เกิดระยะเยื้องโดยประมาณ $e \approx 0.55d_0$ (หรือ $0.55h_0$) แต่จะทำให้การเชื่อมต่อชิ้นส่วนง่ายขึ้นกว่าการเหลื่อมกันบางส่วน (partial overlapping) รวมทั้งจะมีพฤติกรรมต่อการรับแรงดีกว่าการต่อแบบมีช่องว่าง (gap joints) (ดูรูปที่ 2.3) *

4. การต่อแบบมีช่องว่าง (gap joints) จะดีกว่าการต่อแบบการเหลื่อมกันบางส่วน (รูปที่ 2.3) เนื่องจากจะประกอบได้ง่ายกว่าเนื่องจากความแตกต่างของการเตรียมปลาย การเชื่อมสำหรับเหล็ก โครงสร้างหน้าตัดกลวงสี่เหลี่ยมนั้น ไม่มีความแตกต่างกันระหว่างวิธีการต่อแบบเหลื่อมกันทั้งหมด หรือการต่อแบบมีช่องว่าง อย่างไรก็ตาม การออกแบบที่ดีนั้น ระยะช่องว่าง g จะต้องมากกว่า $t_1 + t_2$ เพื่อให้รอยเชื่อมของชิ้นส่วนทั้งสองไม่เหลื่อมทับกัน



T- and Y- joint

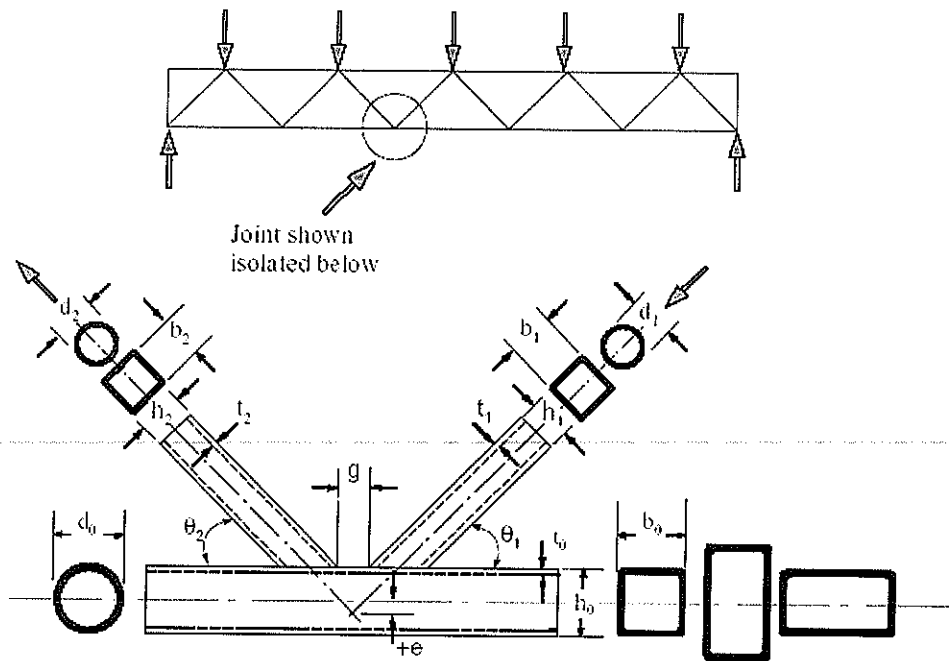
X- joint



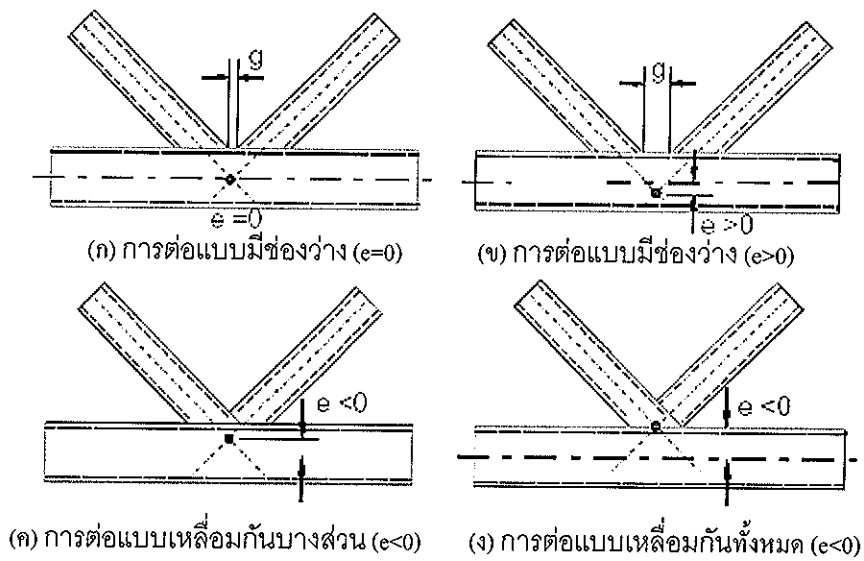
N- and K- joint

KT-joint

รูปที่ 2.1 รอยต่อพื้นฐาน



รูปที่ 2.2 การเชื่อมต่อโดยมีระยะเยื้อง



รูปที่ 2.3 การเชื่อมต่อของ Bracing

5. ปริมาตรรอยเชื่อมเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า t^2 ดังนั้นโดยทั่วไปการเชื่อมชิ้นส่วนโยงยึดที่มีผนังบางจะประหยัดกว่าชิ้นส่วนที่มีผนังหนา

6. การผลิตชิ้นส่วนเหล็กหลัก (Chord) จากโรงงานที่มีความยาวพิเศษจะทำให้ลดรอยต่อระหว่างชิ้นส่วนหลักได้ โดยเฉพาะในโครงการขนาดใหญ่

7. สำหรับโครงสร้างแบบโครงถักโดยทั่วไป เช่น โครงข้อหมุน. (trusses) ปริมาณวัสดุโดยน้ำหนักประมาณ 50% จะใช้สำหรับชิ้นส่วนหลักรับแรงอัด ประมาณ 30% สำหรับชิ้นส่วนหลักรับแรงดึง และประมาณ 20% จะใช้สำหรับชิ้นส่วนโยงยึด ซึ่งกล่าวได้ว่า หากต้องการลดค่าใช้จ่ายในวัสดุ จะต้องพิจารณาที่ชิ้นส่วนหลักรับแรงอัดโดยเลือกให้มีผนังบาง แต่หากพิจารณาการทาสีเคลือบเพื่อป้องกันการผุกร่อนจะต้องเลือกให้มีพื้นที่ผิวภายนอกต่ำที่สุด นอกจากนี้ กำลังของจุดต่อจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดค่าอัตราส่วน d_o/t_o หรือ b_o/t_o และเพิ่มอัตราส่วนของความหนาของชิ้นส่วนหลักต่อความหนาชิ้นส่วนโยงยึด (chord thickness to bracing thickness ratio t_o/t_b) ด้วยเหตุนี้ การออกแบบค่า diameter หรือ width to thickness ratio d_o/t_o หรือ b_o/t_o สำหรับชิ้นส่วนหลักรับแรงอัด จะต้องให้พิจารณาร่วมกันระหว่าง joint strength และค่า buckling strength ของชิ้นส่วนออกแบบ

8. ชิ้นส่วนอวบล่ำ (stocky sections) มักจะถูกเลือกใช้งาน สำหรับชิ้นส่วนหลักรับแรงดึง จะต้องออกแบบให้มีค่า diameter to thickness ratio d_o/t_o ต่ำสุดเท่าที่จะทำได้

9. โดยกำลังของรอยต่อจะขึ้นกับค่ากำลังครากของเหล็กชิ้นส่วนหลัก (Chord) ดังนั้น การเลือกใช้เหล็กประเภทกำลังสูงสำหรับชิ้นส่วนดังกล่าวจะทำให้เกิดการประหยัดกว่า

3. ขั้นตอนการออกแบบ (Design Procedure)

การออกแบบโครงสร้างเหล็กหน้าตัดกลวง จะมีความแตกต่างเพียงเล็กน้อยจากการออกแบบโครงสร้างเหล็กแบบดั้งเดิม ดังแสดงในรายละเอียดเป็นขั้นตอนตามลำดับ (รูปที่ 3.1) ดังนี้

3.1 หาขนาดมิติของโครงถัก (Truss layout)

โดยทั่วไป ความลึกของโครงถัก (h) จะแปรผันกับระยะช่วงพาด (L) โดยที่ ค่าความลึกของโครงถักระนาบเดียว (Uniplanar lattice girders) จะมีค่าระหว่าง $1/10$ - $1/16$ ของระยะช่วงพาด L ทั้งนี้ควรพิจารณาให้โครงสร้างมีจำนวนจุดต่อให้น้อยที่สุด

3.2 ทำการวิเคราะห์โครงถักเพื่อหาขนาดของแรงที่เกิดขึ้น

ในการวิเคราะห์จะสมมติให้จุดต่อระหว่างชิ้นส่วนสามารถหมุนได้อิสระ (pinned joint) และสมมติให้ไม่มีโมเมนต์เกิดขึ้นที่จุดต่อ

3.3 ออกแบบขนาดชิ้นส่วน

3.3.1 ชิ้นส่วนหลัก (Chord)

- ขนาดของแรงตามแนวแกน
- การป้องกันการสีกกร่อน
- ความเพียวบางของผนัง (โดยทั่วไปกำหนดให้ค่า $d_o/t_o = 20-30$ สำหรับ CHS และ $b_o/t_o = S15-25$ สำหรับ RHS)
- ความยาวประสิทธิผล (Effective length) เท่ากับ 0.9 ของความยาวชิ้นส่วน
- ใช้เหล็กชั้นคุณภาพสูง (กำลังครากสูง)

3.3.2 ชิ้นส่วนโยงยึด (Bracing)

- เลือกใช้หน้าตัดที่ผนังบางกว่าของชิ้นส่วนหลัก $t_b < t_o$
- ความยาวประสิทธิผล (Effective length) เท่ากับ 0.75 ของความยาวชิ้นส่วน

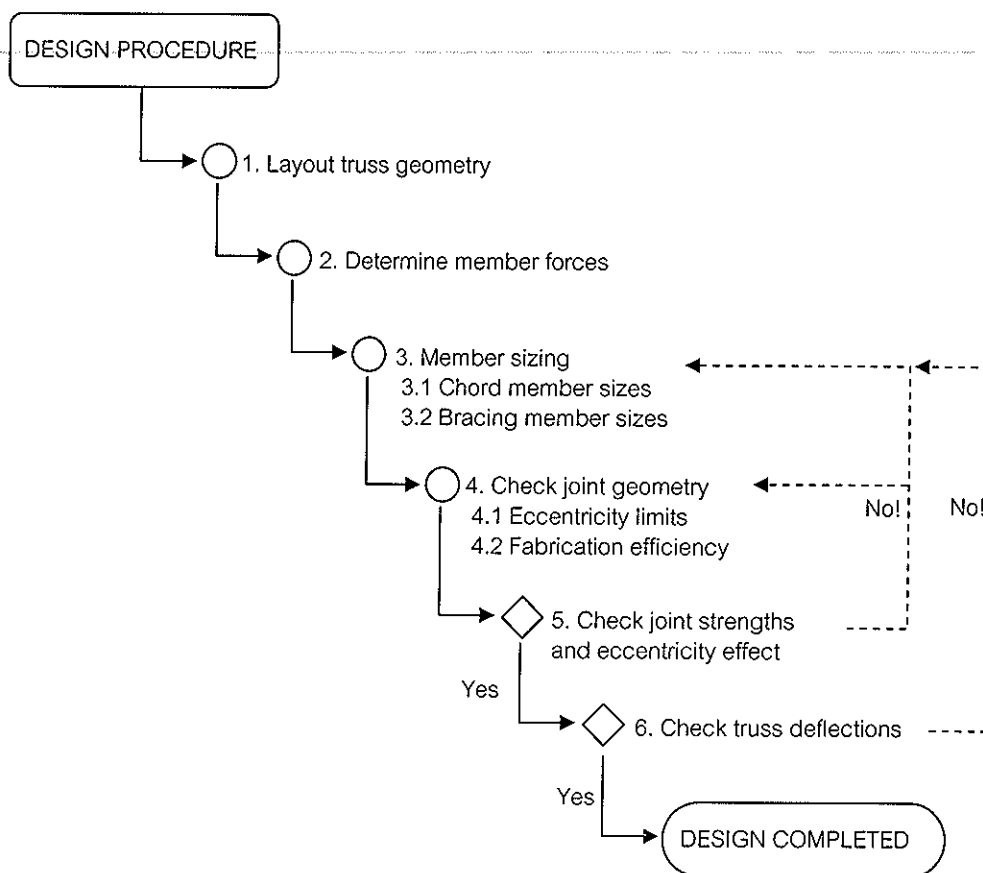
3.4 ตรวจสอบมิติของรอยต่อ และการพิจารณาประสิทธิภาพในการประกอบชิ้นส่วน

- เลือกใช้รอยต่อแบบมีช่องว่าง (Gap joint) จะสามารถทำงานได้ง่ายกว่า
- ตรวจสอบมิติของจุดต่อตามข้อกำหนด
- ตรวจสอบระยะเยื้องจำกัด (Eccentricity limits)

3.5 ตรวจสอบกำลังจุดต่อ และผลของระยะเยื้อง (Eccentricity)

- หากกำลังจุดต่อ หรือประสิทธิภาพจุดต่อ ไม่เพียงพอ จะกลับไปดัดแปลงรอยต่อใหม่ให้เป็นแบบเหลื่อมกัน (Overlap) หรือ เลือกลักษณะขนาดชิ้นส่วนใหม่
- ตรวจสอบผลของโมเมนต์เนื่องจากระยะเยื้อง (ถ้ามี) ที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนหลัก (Chord) โดยพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และแรงตามแนวแกน (Moment-axial force interaction)

3.6 ตรวจสอบระยะแอนตัวที่เกิดขึ้น



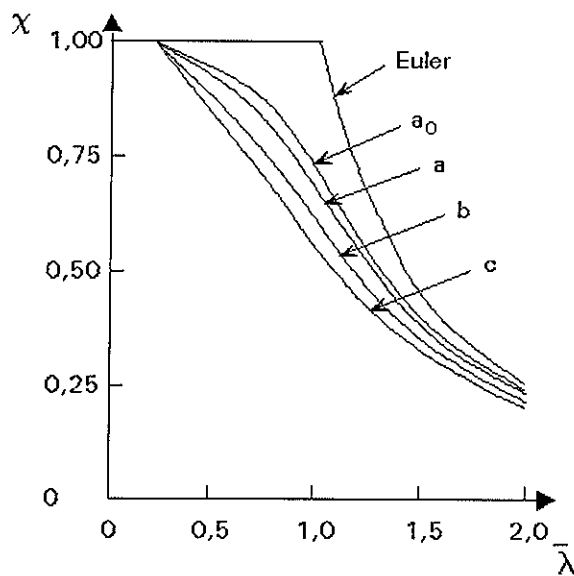
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการออกแบบคานถัก

4. การออกแบบชิ้นส่วนรับแรงอัด

การออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเพื่อรับแรงอัดตามแนวแกน (centrally compressive loading) จะต้องพิจารณาการโก่งเดาะวิกฤต (critical buckling) ซึ่งจะเกี่ยวข้องโดยตรงต่ออัตราส่วนความ slender (slenderness, $\lambda = l/r$) ซึ่งขึ้นกับระยะโก่งเดาะ (buckling length, l) และค่ารัศมีไจเรชั่นของรูปหน้าตัด (radius of gyration, r)

นอกจากนี้ การโก่งเดาะจะเกิดจากผลของการเยื้องของแรงกด (initial eccentricities) ความตรงแนวไม่คดโค้ง (straightness) และการบิดเบี้ยวของหน้าตัดจากการผลิต (geometrical tolerances) หน่วยแรงคงค้าง (residual stresses) ความไม่สม่ำเสมอของเหล็ก (inhomogeneity) และความสัมพันธ์ของหน่วยความเค้นและความเครียด (stress-strain relationship)

จากข้อมูลการศึกษาค้นคว้าโดย the European Convention for Construction Steelwork (และได้รวมไว้ใน Eurocode 3 [3]) ได้แสดงให้เห็นกราฟการโก่งเดาะ (European buckling curves) ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เส้นกราฟการโก่งเดาะ

ตัวคูณลดกำลัง (reduction factor, χ) ดังรูปที่ 4.1 เป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังด้านการโก่งเดาะที่ออกแบบ (design buckling resistance, $N_{b,Rd}$) ต่อกำลังต้านแรงอัดเมื่อหน้าตัดเป็นพลาสติก (axial plastic resistance, $N_{pl,Rd}$) หรือ

$$\chi = \frac{N_{b,Rd}}{N_{pl,Rd}} = \frac{f_{b,Rd}}{f_{yd}}$$

โดยที่

$$f_{b,Rd} = \frac{N_{b,Rd}}{A} \text{ (the design buckling stress)}$$

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_M} \text{ (the design yield strength)}$$

γ_M คือ partial safety factor

ค่า non-dimensional slenderness $\bar{\lambda}$ คำนวณโดย $\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_E}$

$$\text{โดยที่ } \lambda_E = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} \text{ (Euler slenderness).}$$

ทั้งนี้ เหล็กโครงสร้างชนิดหน้าตัดเปิดจะเป็นกราฟในช่วงโค้ง "b" และ "c" ส่วนเหล็กโครงสร้างชนิดหน้าตัดกลวง จะเป็นกราฟในช่วงโค้ง "a" และ "b"

การโก่งเดาะโดยรวม (overall buckling) ของเหล็กโครงสร้างชนิดหน้าตัดกลวงสามารถปรับปรุงให้เพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางให้ใหญ่ขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของผนัง แต่โดยทั้งนี้ จะทำให้มีโอกาสที่จะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะจุดได้ง่าย และเพื่อป้องกันการเกิดการโก่งเดาะเฉพาะจุด จะต้องจำกัดอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของผนัง (d/t, or b/t) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 (Eurocode 3) และในกรณีที่หน้าตัดเป็นชนิดผนังบาง (thin-walled sections) จะต้องพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างการโก่งเดาะโดยรวมและการโก่งเดาะเฉพาะจุดด้วย (interaction between buckling and local buckling)

ตารางที่ 4.1 การโก่งเดาะเฉพาะจุดของเหล็กโครงสร้างชนิดหน้าตัดกลวง

Section	○	□
Plastic design sections	$\frac{d}{t} \leq 50\varepsilon$	$\frac{b}{t} \leq 33\varepsilon$
Compact sections	$\frac{d}{t} \leq 70\varepsilon$	$\frac{b}{t} \leq 38\varepsilon$
Elastic design sections	$\frac{d}{t} \leq 90\varepsilon$	$\frac{b}{t} \leq 42\varepsilon$
Local buckling check for sections with larger d/t or b/t ratios		
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$		

5. การตรวจสอบกำลังจุดต่อ

ในการออกแบบรอยต่อโดยทฤษฎีกำลังประลัยนั้น จะต้องออกแบบให้กำลังรอยต่อที่ออกแบบ (Joint design strength, N^*) มีค่ามากกว่าขนาดของแรงกระทำ (Q_k) คุณตัวคูณเพิ่มค่า (γ_s) ดังแสดงในสมการ คือ

$$N^* \geq \gamma_s \cdot Q_k$$

การหาลำกำลังของรอยต่อนั้นค่อนข้างซับซ้อน ดังนั้น Eurocode 3 ได้เสนอสมการแบบ semi-empirical สำหรับการคำนวณหาลำกำลังของรอยต่อในแต่ละรูปแบบ ดังแสดงในภาคผนวกอย่างไรก็ตาม การคำนวณสามารถทำได้ง่ายกว่าโดยอาศัยชาร์ตการออกแบบ (Design chart) โดยแสดงในรูปของประสิทธิภาพของชิ้นส่วนต่อโยงยึด (Connected bracing) ดังแสดงในสมการด้านล่างนี้

$$\frac{N_i^*}{A_i \cdot f_{yi}} = C_e \cdot \frac{f_{yo} \cdot t_o}{f_{yi} \cdot t_i} \cdot \frac{f(n')}{\sin \theta_i}$$

โดยที่

N_i^* คือ กำลังจุดต่อ

A_i คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนโยงยึด

f_{yi} คือ กำลังครากของชิ้นส่วนโยงยึด

C_e คือ ตัวแปรประสิทธิภาพของจุดต่อ

f_{yo} คือ กำลังครากของชิ้นส่วนหลัก

t_o คือ ความหนาของผนังของชิ้นส่วนหลัก

t_i คือ ความหนาของผนังของชิ้นส่วนโยงยึด

$f(n')$ คือ ตัวแปรเนื่องจากผลของแรงที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนหลัก n' โดยที่ $n' = f_{op} / f_{yo}$

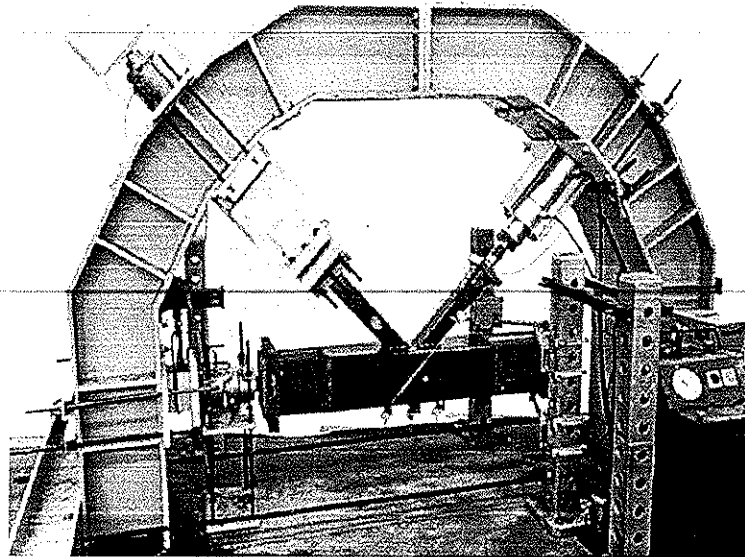
และ f_{op} คือ ความเค้นบนชิ้นส่วนหลักเนื่องจากขนาดของแรงหรือโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้น และ

f_{yo} คือ กำลังครากของชิ้นส่วนหลัก

θ_i คือ มุมเอียงของชิ้นส่วนโยงยึด

สมการคำนวณข้างต้น ได้จากการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองการเสียหายในโหมดต่างๆ (Failure mode) ร่วมกับผลการทดสอบจริง ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งโดยทั่วไป จะวิเคราะห์และทดสอบภายใต้เงื่อนไขการเสียหายใน 2 โหมดคือ เกิดพลาสติกบนหน้าตัดชิ้นส่วนหลัก (Plastification of the chord cross-section) หรือ การเฉือนทะลุบนชิ้นส่วนหลัก (Chord punching shear) ดังนั้น การคำนวณ

จึงจะต้องตรวจสอบข้อกำหนดต่างๆ ว่าอยู่ในช่วงของการทดสอบ (Parametrical ranges) ที่ใช้ในการหาสมการหรือไม่ ดังแสดงในตารางที่ 5.1 ถึง 5.3



รูปที่ 5.1 การทดสอบกำลังของจุดต่อ

ตารางที่ 5.1 ค่าพิคกัดกำหนด d/t_1 สำหรับชิ้นส่วนโยงยึดรับแรงอัด หรือ ค่าประสิทธิภาพจุดต่อกำหนด เพื่อป้องกันการโก่งเดาะเฉพาะจุด

d_1/t_1 limits for which the joint efficiencies derived from Figs. 8.17 to 8.20 can always be used		efficiency limit * for compression brace					
		f_y	d_1/t_1				
yield stress	d_1/t_1 limit		30	35	40	45	50
$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$	$d_1/t_1 \leq 43$	235	1	1	1	1	0.9
$f_y = 275 \text{ N/mm}^2$	$d_1/t_1 \leq 37$	275	1	1	1	0.9	0.9
$f_y = 355 \text{ N/mm}^2$	$d_1/t_1 \leq 28$	355	1	0.9	0.9	0.8	0.8

* $\frac{N_c}{A_c \cdot f_y} \leq$ values given in the table

Considering member buckling the above mentioned limitations will not frequently be critical.

ตารางที่ 5.2 ขอบของหน้าตัดเหล็กกลางที่เชื่อมจัดรัศมีที่สามารถใช้ได้

type of joints	joint parameters (i = 1 or 2, j = overlapped brace)					
	b_i/b_0	compression b_i/l_i	tension b_0/l_0	$(b_1 + b_2)/2b_i$ $b_i/b_1, l_i/l_1$	gap/overlap	eccentricity
T, Y, X	$b_1/b_0 \leq 0.25$ or $b_2/b_0 \leq 0.25$	$\leq 1.25 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$10 \leq \frac{b_0}{l_0} \leq 35$			
X, N gap	$\leq 0.1 + 0.01 \frac{b_1}{l_1}$ $\frac{b_1}{b_1} \leq 0.35$	≤ 35	$b_2 \leq 35$ $b_1 \leq 35$	$0.5 \leq \frac{b_1 + b_2}{2b_i} \leq 1.3$ $l = 1 \text{ or } 2$	$0.5(1 - \beta) \leq \frac{g}{b_0} \leq 1.5(1 - \beta)$ but $g \leq l_i + l_j$	
X, N overlap	≤ 0.25	$\leq 1.1 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$\frac{b_0}{l_2} \leq 40$		$25\% \leq O_j \leq 100\%$	$-0.55 \leq \frac{e}{l_0} \leq 0.25$
for circular beams (web members)	$0.4 \leq \frac{d_1}{b_0} \leq 0.6$	$d_1 \leq 1.5 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$\frac{b_2}{l_2} \leq 20$			

limitations as above (incl. $e = b_i$)

Note 1) Outside this range of validity other failure criteria may be governing, e.g., punching shear, effective width, side wall failure, chord shear or local buckling. If these particular limits of validity are violated the connection may still be checked as one having a rectangular chord using Table 9.1, provided the limits of validity in Table 9.2 are still met.

ตารางที่ 5.3 ช่วงของหน้าตัดเหล็กกลวงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่สามารถใช้ได้

Type of joints	Joint parameters (j = 1 or 2, j = overlapped brace)					
	$\frac{a_1/b_1}{h_1/b_1}$	$\frac{h_1/b_1, h_2/b_2, d/t}{\text{compression}}$ / $\frac{d/t}{\text{tension}}$	h_1/b_1	$\frac{b_0/t_0}{h_0/b_0}$	gap/overlap $\frac{a_1/b_1}{h_1/b_1}$	eccentricity
T, Y, X	≥ 0.25	$\leq 1.25 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$		≤ 35		
X, N gap	$\geq 0.1 + 0.01 \frac{b_1}{b_2}$ ≤ 0.30	≤ 35	$0.5 \leq \frac{h_1}{E_1} \leq 2$	≤ 35	$0.5(1 - \beta) \leq \frac{g}{b_0} \leq 1.5(1 - \beta)$ $g \geq 1 + b_2$	
K, N overlap	≥ 0.25	$\leq 1.1 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$		≤ 40	$25\% \leq O_1 \leq 100\%$ $\frac{t_1}{t_2} \leq 1.0, \frac{b_1}{b_2} \geq 0.75$	$0.55 \leq \frac{e}{h_0} \leq 0.25$
for circular braces (web members)	$0.4 \leq \frac{d}{b_2} \leq 0.8$	$\leq 1.5 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$			limitations as above for $d_1 = b_1$	

Note: \times for $t_1/t_2 \leq 350 \text{ N/mm}^2$, t_2 for $t_1/t_2 \leq 0.8$

^(*) If $g > \text{the larger of } 1.5d_1 - \beta b_0 \text{ and } (1 + \beta_2) b_1$, treat the brace with and punching shear as indicated in 5.3.8 for T-cry-joint

6. การคำนวณหากำลังของจุดต่อ

โดยอาศัย Design chart

Design chart สำหรับการคำนวณค่า C_e ในรูปแบบของรอยต่อต่างๆ รวมทั้งค่า $f(n')$ แสดงในภาคผนวก ข. จากสมการประสิทธิภาพของชิ้นส่วนต่อโยงยึดข้างต้น และการพิจารณา Design chart จะเห็นว่า ตัวแปรประสิทธิภาพของจุดต่อขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วน d_0/t_0 รวมทั้ง $\beta = d_1/d_0$ และจุดต่อจะมีประสิทธิภาพเมื่อ

- กำลังของเหล็กชิ้นส่วนหลักมากกว่ากำลังของเหล็กโยงยึด $f_{yo} > f_{yi}$
- ความหนาของผนังของเหล็กชิ้นส่วนหลักมากกว่าของเหล็กโยงยึด $t_o > t_i$ โดยอาจเลือกใช้ผนังของเหล็กโยงยึดที่บางที่สุดเท่าที่ทำได้ แต่จะต้องระมัดระวังเรื่องการโก่งเดาะ
- มุมเอียงของชิ้นส่วนโยงยึด $\theta_i > 0$ หรือจุดต่อ K จะแข็งแรงกว่าจุดต่อ N

6.1 ตัวอย่างการคำนวณจุดต่อระหว่างเหล็กหน้าตัดกลมกลวง

6.1.1 ตัวอย่างการคำนวณกำลังจุดต่อ T หรือ Y

จงคำนวณหาประสิทธิภาพของชิ้นส่วนต่อโยงยึด ของจุดต่อ T ที่ประกอบด้วย

- Chord: $\text{Ø}219.1 \times 10.0$ $d_0/t_0 = 21.9$
- Bracing: $\text{Ø}168.3 \times 4.5$ $d_1/t_1 = 37.4$

และกำหนดให้ $f_{yo} = f_{yi}$ มุมของชิ้นส่วนโยงยึด $\theta_i = 90^\circ$ และค่า $f_{op} = -0.48f_{yo}$

1. คำนวณหาค่า C_T

$$\beta = d_1/d_0 = 168.3/219.1 = 0.77$$

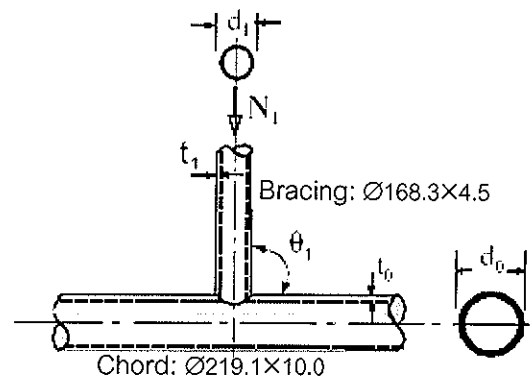
$$d_0/t_0 = 21.9$$

จาก Design chart (รูป ก3) จะได้ค่า $C_T = 0.35$

2. คำนวณหาค่า $f(n')$

$$n' = f_{op}/f_{yo} = -0.48$$

จาก Design chart (รูป ก1) จะได้ค่า $f(n') = 0.79$



3. คำนวณหาประสิทธิภาพของชิ้นส่วนต่อโยงยึด

$$\frac{N_i^*}{A_i \cdot f_{yi}} = C_T \cdot \frac{f_{yo} \cdot t_o}{f_{yi} \cdot t_i} \cdot \frac{f(n')}{\sin \theta_i} = 0.35 \cdot \frac{10}{4.5} \cdot \frac{0.79}{\sin 90} = 0.61$$

6.1.2 ตัวอย่างการคำนวณกำลังจุดต่อ X

จงคำนวณหาประสิทธิภาพของชิ้นส่วนต่อโยงยึด ของจุดต่อ X ที่ประกอบด้วย

- Chord: $\text{Ø}219.1 \times 10.0$ $d_0/t_0 = 21.9$
- Bracing: $\text{Ø}168.3 \times 5.6$ $d_1/t_1 = 30.0$

และกำหนดให้ $f_{yo} = f_{yi}$ มุมของชิ้นส่วนโยงยึด $\theta_i = 90^\circ$ และค่า $f_{op} = -0.48f_{yo}$

1. คำนวณหาค่า C_T

$$\beta = d_1/d_0 = 168.3/219.1 = 0.77$$

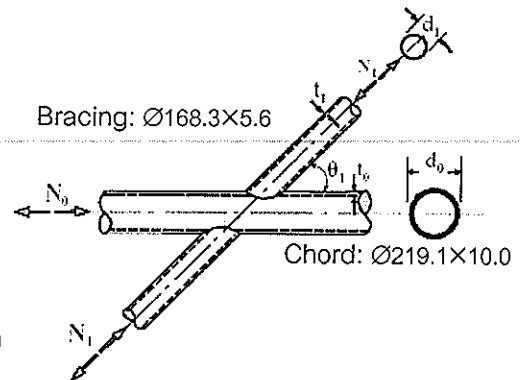
$$d_0/t_0 = 21.9$$

จาก Design chart (รูป n4) จะได้ค่า $C_x = 0.26$

2. คำนวณหาค่า $f(n')$

$$n' = f_{op}/f_{yo} = -0.48$$

จาก Design chart (รูป n1) จะได้ค่า $f(n') = 0.79$



3. คำนวณหาประสิทธิภาพของชิ้นส่วนต่อโยงยึด

$$\frac{N_i^*}{A_i \cdot f_{yi}} = C_T \cdot \frac{f_{yo} \cdot t_0}{f_{yi} \cdot t_i} \cdot \frac{f(n')}{\sin \theta_i} = 0.26 \cdot \frac{10}{5.6} \cdot \frac{0.79}{\sin 90} = 0.37$$

6.1.3 ตัวอย่างการคำนวณกำลังจุดต่อ K หรือ N แบบมีช่องว่าง (Gap)

จงคำนวณหาประสิทธิภาพของชิ้นส่วนต่อโยงยึด ของจุดต่อ K ที่ประกอบด้วย

- Chord: $\text{Ø}219.1 \times 10.0$ (แรงอัด) $d_0/t_0 = 21.9$
- Bracing (1): $\text{Ø}139.7 \times 6.3$ (แรงอัด) $d_1/t_1 = 22.2$
- Bracing (2): $\text{Ø}114.5 \times 5.0$ (แรงดึง) $d_2/t_2 = 22.9$

และกำหนดให้ $f_{yo} = f_{y1} = f_{y2}$ มุมของชิ้นส่วนโยงยึด $\theta_1 = \theta_2 = 40^\circ$ ค่า $f_{op} = -0.3f_{yo}$ และ
ค่าระยะช่องว่าง $g = 85$ มม.

1. คำนวณหาค่า C_K

$$\beta = d_1/d_0 = 139.7/219.1 = 0.64$$

$$d_0/t_0 = 21.9$$

$$g' = g/t_0 = 85/10 = 8.5 \text{ (ต้องทำ Interpolation ระหว่างค่าของ chart } g'=10 \text{ และ } g'=6$$

รูป n5)

จาก Design chart จะได้ค่า $C_K = 0.33$

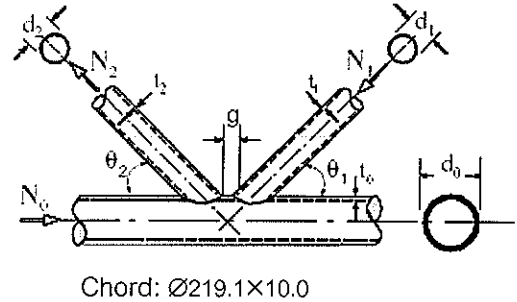
2. คำนวณหาค่า $f(n')$

Bracing (2): $\varnothing 114.5 \times 5.0$

Bracing (1): $\varnothing 139.7 \times 6.3$

$$n' = f_{op} / f_{yo} = -0.3$$

จาก Design chart จะได้ค่า $f(n') = 0.88$



3. คำนวณหาค่าประสิทธิภาพของชิ้นส่วนต่อโยงยึด

$$\frac{N_1^*}{A_1 \cdot f_{y1}} = C_T \cdot \frac{f_{yo} \cdot t_o}{f_{y1} \cdot t_1} \cdot \frac{f(n')}{\sin \theta_1} = 0.33 \cdot \frac{10}{6.3} \cdot \frac{0.88}{\sin 40}$$

$$\frac{N_2^*}{A_2 \cdot f_{y2}} = \frac{N_1^*}{A_2 \cdot f_{y2}} \cdot \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = 1.10 > 1.0$$

6.1.4 ตัวอย่างการคำนวณกำลังจุดต่อ K หรือ N แบบเหลื่อมกัน (Overlap)

จงคำนวณหาประสิทธิภาพของชิ้นส่วนต่อโยงยึด ของจุดต่อ K ที่ประกอบด้วย

- Chord: $\varnothing 219.1 \times 10.0$ (แรงอัด) $d_0 / t_0 = 21.9$
- Bracing (1): $\varnothing 139.7 \times 6.3$ (แรงอัด) $d_1 / t_1 = 22.2$
- Bracing (2): $\varnothing 114.5 \times 5.0$ (แรงดึง) $d_2 / t_2 = 22.9$

และกำหนดให้ $f_{yo} = f_{y1} = f_{y2}$ มุมของชิ้นส่วนโยงยึด $\theta_1 = \theta_2 = 40^\circ$ ค่า $f_{op} = -0.3 f_{yo}$ และร้อยละของการเหลื่อมกัน $50\% < O_v < 100\%$

1. คำนวณหาค่า C_K

$$\beta = d_1 / d_0 = 139.7 / 219.1 = 0.64$$

$$d_0 / t_0 = 21.9$$

จาก Design chart (รูป n6) จะได้ค่า $C_K = 0.44$

2. คำนวณหาค่า $f(n')$

$$n' = f_{op} / f_{yo} = -0.3$$

จาก Design chart จะได้ค่า $f(n') = 0.88$

3. คำนวณหาค่าประสิทธิภาพของชิ้นส่วนต่อโยงยึด

$$\frac{N_1^*}{A_1 \cdot f_{y1}} = C_K \cdot \frac{f_{yo} \cdot t_o}{f_{y1} \cdot t_1} \cdot \frac{f(n')}{\sin \theta_1} = 0.44 \cdot \frac{10}{6.3} \cdot \frac{0.88}{\sin 40} = 0.95$$

$$\frac{N_2^*}{A_2 \cdot f_{y2}} = \frac{N_1^*}{A_2 \cdot f_{y2}} \cdot \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = 1.46 > 1.0$$

6.1 ตัวอย่างการคำนวณจุดต่อระหว่างเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมกลวง

6.2.1 ตัวอย่างการคำนวณกรณีจุดต่อเป็นแบบ X มุมเอียง 45° bracing รับแรงดึง
กำหนดให้

- จุดต่อเป็นแบบ X มุมเอียง 45° bracing รับแรงดึง
- chord: 200x200x8.0 ($A_0 = 6050 \text{ mm}^2$)
- bracing: 100x100x5.0 ($A_1 = 1890 \text{ mm}^2$)
- $f_{y0} = f_{y1} = 355 \text{ N/mm}^2$
- $\theta_1 = 45^\circ$ และ $\sin\theta_1 = 0.707$
- $n = -0.48$

การวิเคราะห์

$$\beta = b_1/b_0 = 100/200 = 0.5$$

$$f(n) = 0.92 \text{ (รูปที่ ข.1)}$$

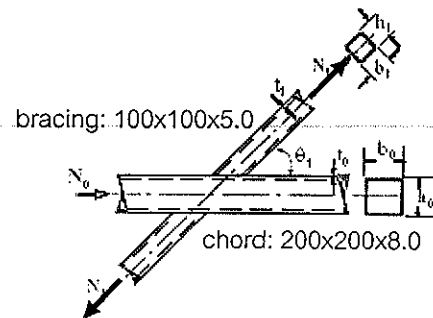
$$b_1/t_1 = 20$$

$$b_0/t_0 = 25$$

จาก Design chart (รูป ข2) จะได้ค่า $C_x = 0.16$

$$\therefore \frac{N_1^*}{A_1 f_{y1}} = 0.16 \left(\frac{8.0}{5.0} \right) \left(\frac{1}{0.707} \right) (0.92) = 0.33$$

$$\therefore N_1^* = 0.33(1890)(0.355) = 224 \text{ kN}$$



6.2.2 ตัวอย่างการคำนวณกรณีจุดต่อเป็นแบบ T, bracing รับแรงอัด
กำหนดให้

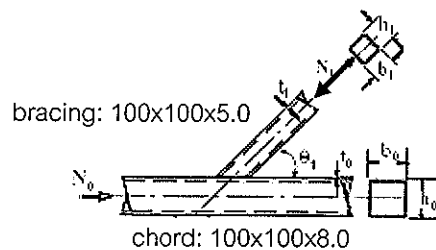
- จุดต่อเป็นแบบ T, bracing รับแรงอัด
- chord: 100x100x8.0 ($A_0 = 2910 \text{ mm}^2$)
- bracing: 100x100x5.0 ($A_1 = 1890 \text{ mm}^2$)
- $f_{y0} = f_{y1} = 355 \text{ N/mm}^2$
- $\theta_1 = 90^\circ$ และ $\sin\theta_1 = 1.0$
- $n = -0.60$

การวิเคราะห์

$$\beta = b_1/b_0 = 100/100 = 1.0$$

$$f(n) = 1.0 \text{ (รูปที่ ข.1)}$$

$$b_1/t_1 = 20 < 30.4$$



$$b_o/t_o = 12.5$$

จาก Design chart (รูป ข3) จะได้ค่า $C_T = 0.68$

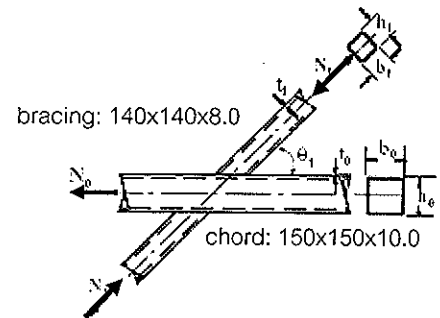
$$\therefore \frac{N_1^*}{A_1 f_{y1}} = 0.68 \left(\frac{8.0}{5.0} \right) (1.0)(1.0) = 1.0$$

$$\therefore N_1^* = 1.0(1890)(0.355) = 671 \text{ kN}$$

หมายเหตุ: แรงต้านของ bracing ที่ได้ จะต้องถูกนำไปตรวจสอบกับเกณฑ์ "effective width" ดังรูป ข4 ต่อไป

6.2.3 ตัวอย่างการคำนวณกรณีจุดต่อเป็นแบบ X มุมเอียง 30° bracing รับแรงอัด กำหนดให้

- จุดต่อเป็นแบบ X มุมเอียง 30° bracing รับแรงอัด
- chord: 150x150x10.0 ($A_o = 5450 \text{ mm}^2$)
- bracing: 140x140x8.0 ($A_1 = 4130 \text{ mm}^2$)
- $f_{y0} = f_{y1} = 355 \text{ N/mm}^2$
- $\theta_1 = 30^\circ$ และ $\sin \theta_1 = 0.5$
- $n = +0.38$



การวิเคราะห์

$$\beta = b_1/b_o = 140/150 = 0.93$$

$\beta > 1 - 1/\gamma$ ดังนั้น ไม่ต้องตรวจสอบเกณฑ์ด้าน punching shear

$f(n) = 1.0$ เนื่องจาก chord อยู่ในสภาวะรับแรงดึง

$$b_1/t_1 = 17.5 < 30.4$$

$$b_o/t_o = 15$$

$$\text{ถ้า } \beta = 0.85$$

$$\begin{aligned} \frac{N_1^*}{A_1 f_{y1}} &= 0.43 \left(\frac{10.0}{8.0} \right) \left(\frac{1}{0.5} \right) (1.0) \\ &= 1.08 \text{ (ใช้เป็น 1.0)} \end{aligned}$$

$$\text{ถ้า } \beta = 1.0$$

$$\begin{aligned} \frac{N_1^*}{A_1 f_{y1}} &= 0.49 \left(\frac{10.0}{8.0} \right) (1.0) \\ &= 0.61 \end{aligned}$$

ทำการ Interpolate เชิงเส้น เพื่อหาค่าประสิทธิภาพของจุดต่อที่ $\beta = 0.93$ จะได้

$$\frac{N_1^*}{A_1 f_{y1}} = 0.79$$

หมายเหตุ: ค่าประสิทธิภาพนี้ จะต้องนำไปตรวจสอบกับเกณฑ์ทางด้าน "effective width" ดังรูป ข5 และเกณฑ์การวิบัติจากแรงเฉือนของ chord (ตาราง ข2) ต่อไป

6.2.4 ตัวอย่างการคำนวณกรณีจุดต่อเป็นแบบ T

ต้องการหา ประสิทธิภาพของจุดต่อ เมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ "effective width" (ต่อเนื่องจากตัวอย่าง 6.2.2)

กำหนดให้

- chord: 100x100x8.0 ($A_0 = 2910 \text{ mm}^2$)
- bracing: 100x100x5.0 ($A_1 = 1890 \text{ mm}^2$)
- $f_{y0} = f_{y1} = 355 \text{ N/mm}^2$
- $\theta_1 = 90^\circ$ และ $\sin\theta_1 = 1.0$

การวิเคราะห์

$$\beta = b_1/b_0 = 100/100 = 1.0$$

$$b_1/t_1 = 20 < 30.4$$

$$b_0/t_0 = 12.5$$

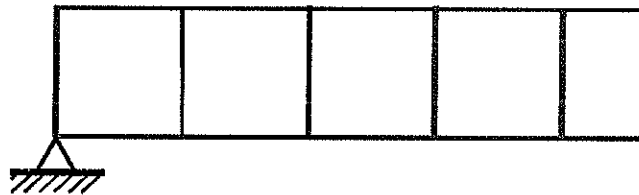
$$t_0/t_1 = 1.6$$

$$\therefore \frac{N_1^*}{A_1 f_{y1}} = 1.00$$

7. จุดต่อประเภทอื่นๆ

7.1 จุดต่อรับโมเมนต์ดัด

จุดต่อที่ต้านทานโมเมนต์ดัด มักเป็นรอยต่อแบบ T ที่ประกอบยึดขึ้นส่วนในโครงถัก Vierendeel หรือ ในโครงสร้างประเภทโครงข้อแข็ง (Framed structures) ดังแสดงในรูปที่ 7.1 โดยโมเมนต์ที่กระทำอาจอยู่ในระนาบเดียวกัน หรือ ตั้งฉากกับโครงสร้างได้ ในบางครั้งอาจมีแรงตามแนวแกนกระทำร่วมด้วย



รูปที่ 7.1 โครงถัก Vierendeel

การคำนวณจุดต่อที่รับโมเมนต์ ก็กระทำในลักษณะเดียวกันกับจุดต่อที่ไม่มีโมเมนต์ดัดที่ได้กล่าวข้างต้น โดยอาจใช้สมการคำนวณ หรือ Design chart ที่แสดงในรูปของประสิทธิภาพของจุดต่อ (Joint efficiency) ดังแสดงในภาคผนวก ค

ในการออกแบบจุดต่อแบบแข็ง (Rigid joint) มีข้อแนะนำคือ เลือกใช้ค่า $\beta = d_1/d_0$ ให้ประมาณเท่ากับ 1 หรือให้ d_0/t_0 มีค่าต่ำ รวมทั้งพยายามให้ t_0/t_1 มีค่าสูง

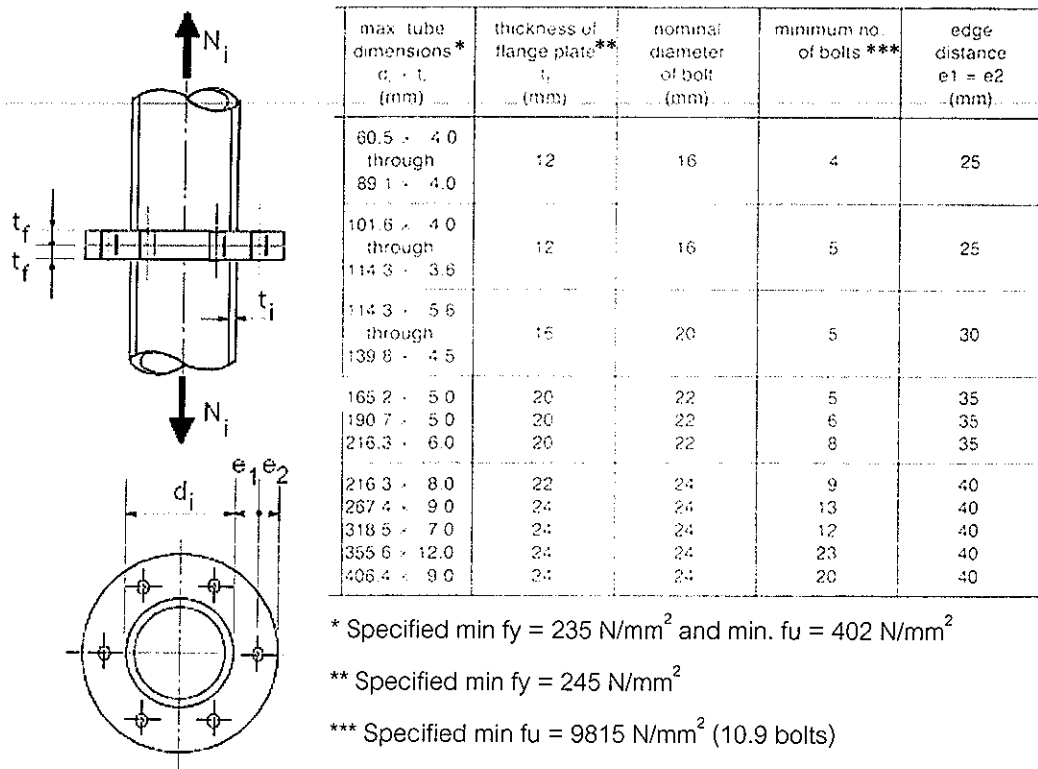
สำหรับ กรณีมีโมเมนต์ดัดกระทำร่วมกับแรงตามแนวแกน การคำนวณจะต้องตรวจสอบผลการปฏิสัมพันธ์ดังกล่าว ตามสมการ Interaction ดังนี้

$$\frac{N_i}{N_i^*} + \left(\frac{M_{ip}}{M_{ip}^*} \right)^2 + \frac{M_{op}}{M_{op}^*} \leq 1.0$$

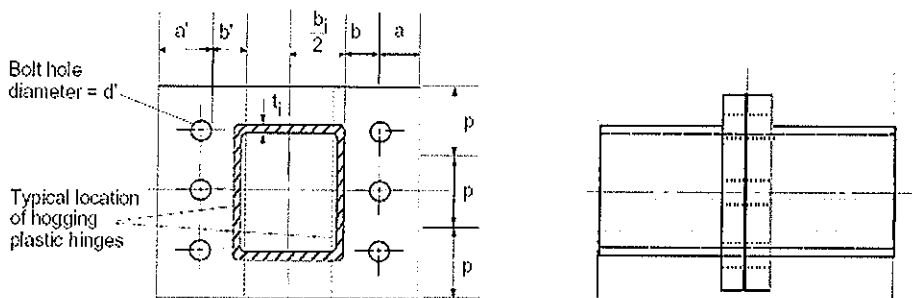
โดยที่ N_i, M_{ip}, M_{op} คือ ขนาดของแรงตามแนวแกน โมเมนต์ดัดในระนาบ และโมเมนต์ดัดตั้งฉากตามลำดับ และเครื่องหมาย $(N_i^*, M_{ip}^*, M_{op}^*)$ คือ กำลังที่ออกแบบ

7.2 จุดต่อขันน๊อต (Bolted connections)

จุดต่อขันน๊อต (Bolted connections) เป็นจุดต่อที่สำคัญ และนิยมใช้ในกรณีการประกอบชิ้นส่วนย่อยหน้างาน (Prefabricated sub-assemblies) การออกแบบจุดต่อชนิดขันน๊อตสำหรับเหล็กโครงสร้างหน้าตัดกลมวงไม่มีความแตกต่างกันกับการออกแบบจุดต่อชนิดเดียวกันของเหล็กโครงสร้างทั่วไป รูปที่ 7.2 ถึง 7.6 แสดงตัวอย่างบางส่วนของรอยต่อแบบขันน๊อต

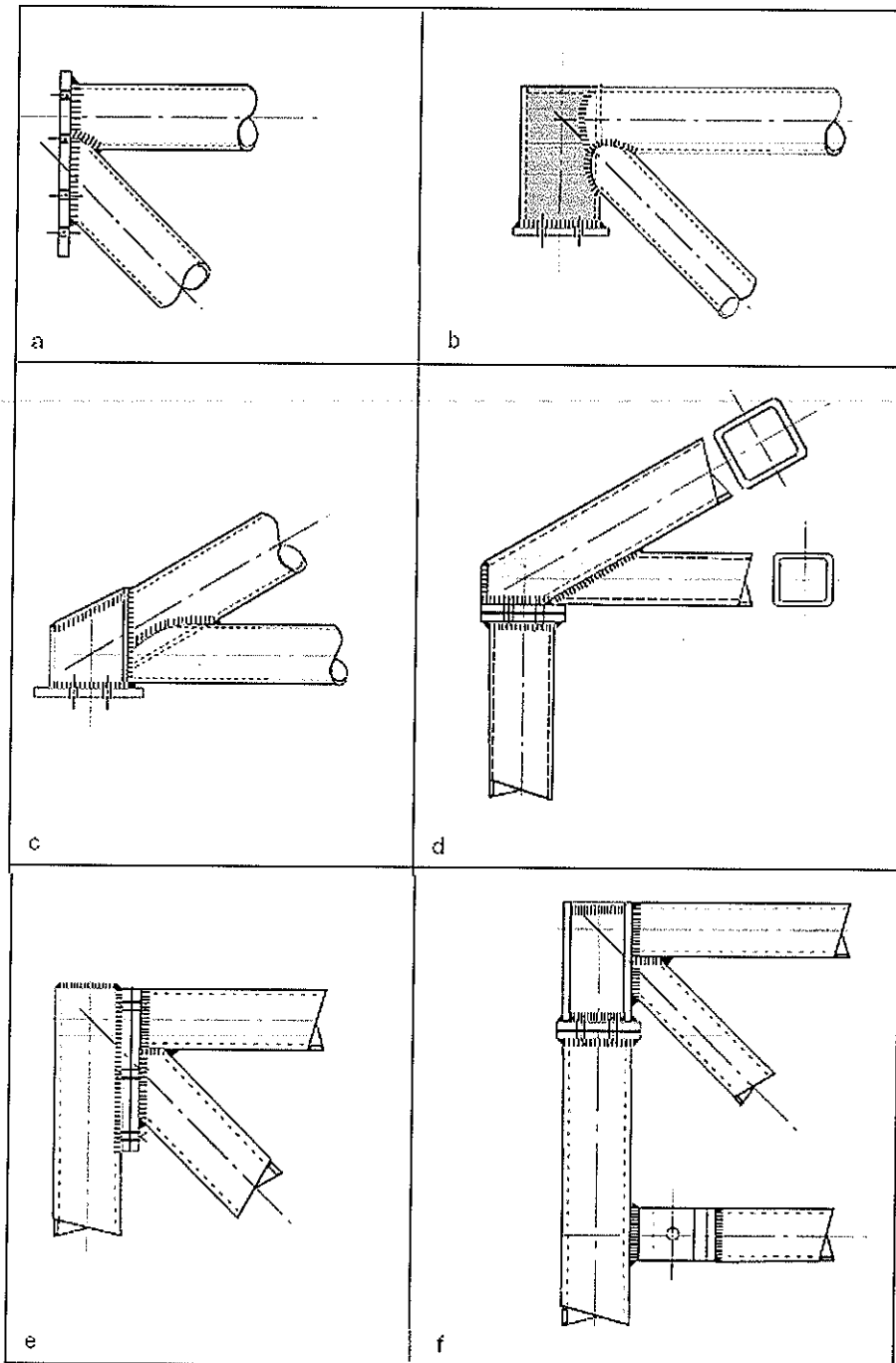


(ก) เหล็กหน้าตัดกลมวง และตารางแนะนำการออกแบบจุดต่อ

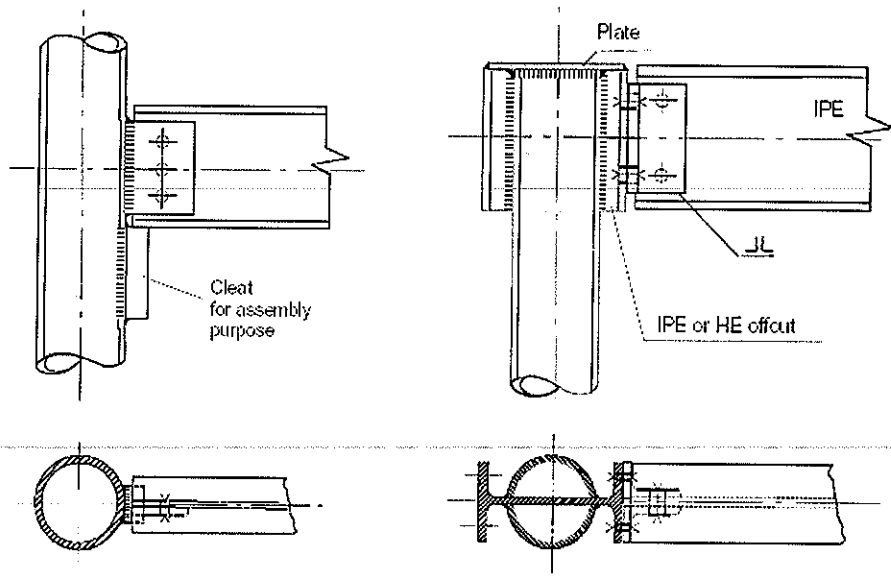


(ข) เหล็กหน้าตัดวงสี่เหลี่ยม

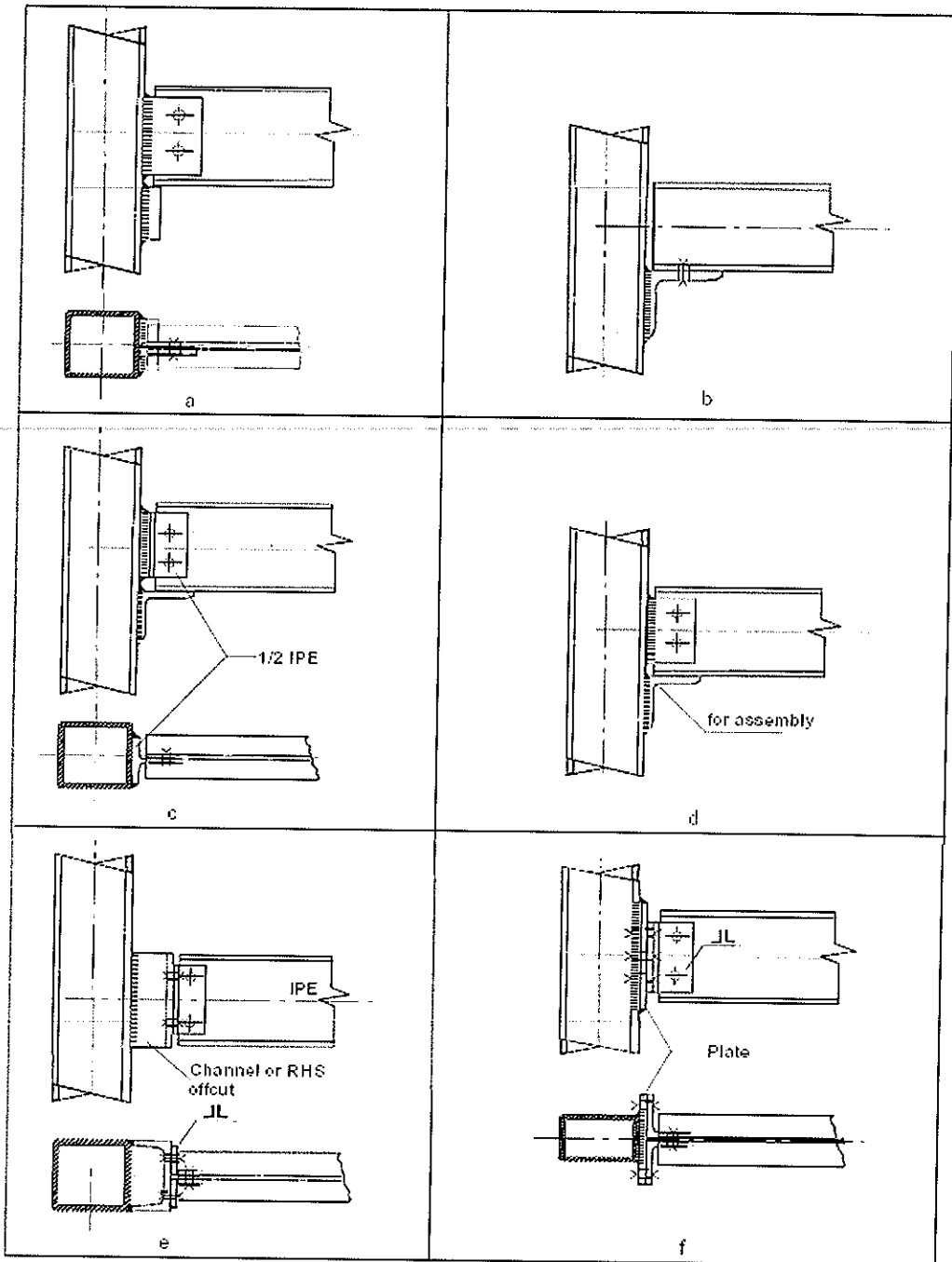
รูปที่ 7.2 Flange plate connection



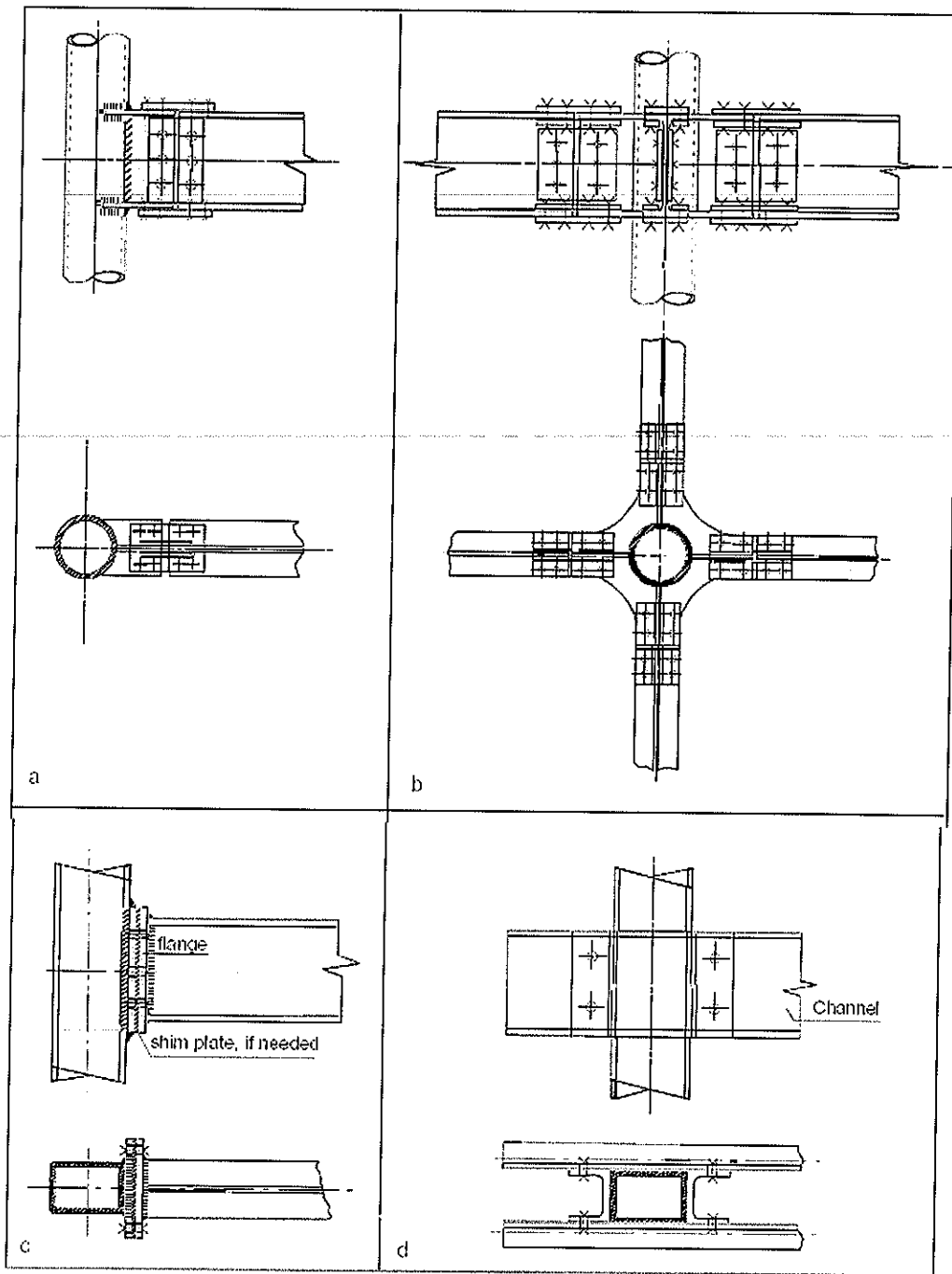
รูปที่ 7.3 จุดต่อชั้นนอตบริเวณจุดรองรับของคาน้ำัก



รูปที่ 7.4 จุดต่อขั้วเนื้อระหว่างคานหน้าตัด I กับเสากลมมกลวง



รูปที่ 7.5 จุดต่อแบบเชื่อมระหว่างคานรูปหน้าตัด I กับเสากลวงสี่เหลี่ยม



รูปที่ 7.6 จุดต่อแบบโมเมนต์ระหว่างคานรูปหน้าตัดเปิดใด ๆ กับเสากลาง

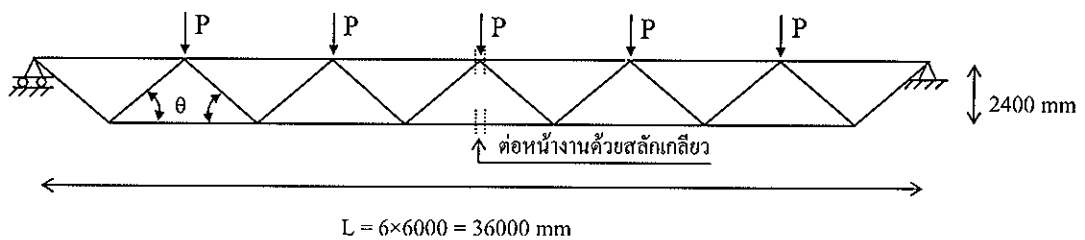
8. ตัวอย่างการออกแบบโครงสร้างเหล็กหน้าตัดกลมวง ชนิดหน้าตัดกลม (Circular Hollow section, CHS)

จงออกแบบโครงถักระนาบเดียว (Uni-planar truss) ที่ออกแบบมีระยะช่วงพาด 36 เมตร รับแรงกระทำเป็นจุดถ่ายจากแปที่เพิ่มค่าแล้ว (factored point load) $P = 108 \text{ kN}$

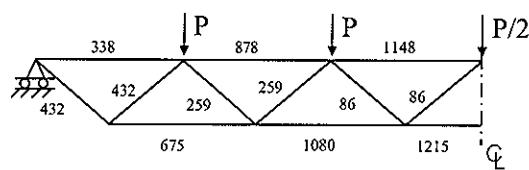
ขั้นตอน 1. การวาง Truss lay-out

Truss depth $\square \text{ span}/15 = 36/15 = 2.40 \text{ m}$.

เลือกรูปโครงถักแบบ Warren truss เนื่องจากมีจำนวนจุดต่อน้อย



ขั้นตอน 2 ทำการวิเคราะห์หาแรงในชิ้นส่วน (Member forces, kN)



ขั้นตอน 3 หาขนาดชิ้นส่วน

กำหนดให้ ชิ้นส่วนบน และล่าง (Chords) เป็นเหล็กกำลังคราก 355 N/mm^2

ชิ้นส่วนโยงยึด (Bracing) เป็นเหล็กกำลังคราก 275 N/mm^2

1 Top Chord (Compression)

Effective length $l_e = 0.9 \times 6000 = 5400 \text{ mm}$

Design load, $N_o = 1148 \text{ kN}$

พิจารณาเลือกหน้าตัด ดังแสดงในตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 การออกแบบหน้าตัดสำหรับ Top Chord

f_{yo} (N/mm ²)	N_o (kN)	le (m)	Possible Sections (mm)	A_o (mm ²)	d_o/t_o	$\bar{\lambda}^*$	χ^*	$\chi \cdot f_{yo} \cdot A_o$ (kN)
355	1148	5.400	Ø193.7-10.0	5771	19.4	1.09	0.61	1245
			Ø219.1-7.1	4728	30.9	0.94	0.71	1189
			Ø219.1-8.0	5305	27.4	0.95	0.71	1329
			Ø244.5-5.6	4202	43.7	0.84	0.78	1159
			Ø244.5-6.3	4714	38.8	0.84	0.78	1298

* Eurocode 3 Bucking curve "a" (ดูรูปที่ 4.1)

จากตารางค่าน้ำหนักที่สามารถรับได้ หน้าตัด Ø244.5-5.6 และ Ø219.1-7.1 จะเหมาะสมที่สุด (ทั้งนี้ จะต้องทำการตรวจว่าหน้าตัดที่เลือกสามารถจัดส่งได้เลย หรือต้องสั่งพิเศษ)

2 Bottom chord (Tension)

จากขนาดของแรง $N_o = 1215$ kN เลือกใช้หน้าตัด ดังแสดงในตารางที่ 8.2

ตารางที่ 8.2 การออกแบบหน้าตัดสำหรับ Bottom Chord

f_{yo} (N/mm ²)	N_o (kN)	Possible Sections (mm)	A_o (mm ²)	d_o/t_o	$f_{yo} \cdot A_o$ (kN)
355	1215	Ø168.3-7.1	3595	23.7	1276
		Ø177.8-7.1	3807	25.0	1351
		Ø193.7-6.3	3709	30.7	1317

3 Diagonal bracings (Compression or Tension)

ความหนา

จะทำการเลือกหน้าตัดโดยที่ $\frac{f_{yo} \cdot t_o}{f_{yi} \cdot t_i} \geq 2.0$ แทนค่าต่างๆ จะได้

$$\frac{355 \cdot 7.1}{275 \cdot t_i} \geq 2.0 \text{ และ } t_i \leq 4.5 \text{ mm}$$

$$\text{Effective length } l_e = 0.75l = 0.75\sqrt{2.4^2 + 3.0^2} = 2.881 \text{ m}$$

เลือกใช้หน้าตัด ดังแสดงในตารางที่ 8.3 และ 8.4

ตารางที่ 8.3 การออกแบบหน้าตัดสำหรับ Compression diagonals

f_{y1} (N/mm ²)	N_i (kN)	l_e (m)	Possible Sections (mm)	A_1 (mm ²)	$\bar{\lambda}^*$	χ^*	$\chi \cdot f_{y1} \cdot A_1$ (kN)
275	432	2.881	Ø168.3-3.6	1862	0.57	0.90	462
			Ø139.7-4.5	1911	0.69	0.85	448
275	259	2.881	Ø114.6-3.6	1252	0.85	0.77	266
			Ø101.6-4.0	1226	0.96	0.70	235
275	86	2.881	Ø88.9-2.0*	546	1.08	0.61	92
			Ø76.1-2.6	600	1.28	0.49	80

*ผนังค่อนข้างบางเกินไปสำหรับงานเชื่อม

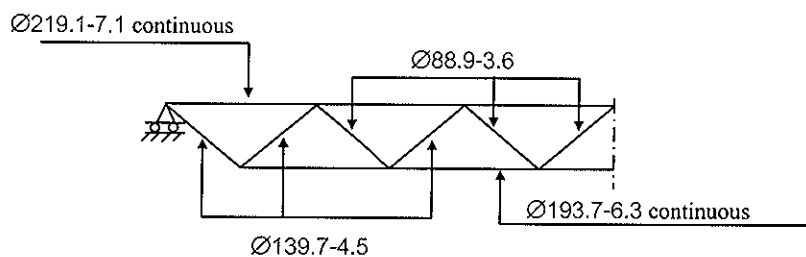
ตารางที่ 8.4 การออกแบบหน้าตัดสำหรับ Tension diagonals

f_{y2} (N/mm ²)	F (kN)	Possible Sections (mm)	A_2 (mm ²)	$f_{y2} \cdot A_2$ (kN)
275	432	Ø133.3-4.0	1621	445
275	259	Ø88.9-3.6	964	265
275	86	Ø48.3-2.3	332	91

4 คัดเลือกหน้าตัดที่เหมาะสม

พิจารณาจำนวนชนิดของหน้าตัด ตามปริมาณการใช้งานของหน้าตัดนั้น ๆ ในโครงการ โดยสรุปได้ทำการเลือกดังนี้

- Top chord: Ø219.1-7.1
- Bottom chord: Ø193.7-6.3 (ขนาดของท่อนส่วนสามารถเชื่อม Bracings แบบมี Gap ได้โดยไม่เกิดระยะเยื้อง)
- Bracings: Ø139.7-4.5
Ø88.9-3.6



ขั้นตอน 4, 5 ตรวจสอบ Joint Geometry และ Joint Strength

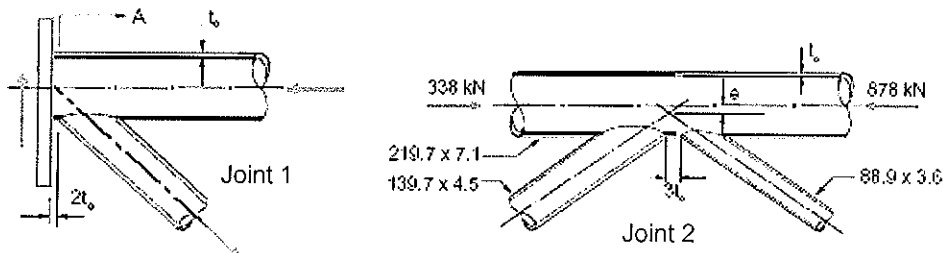
ทำการตรวจสอบกำลังของจุดต่อ ดังแสดงในตารางตรวจสอบกำลังด้านล่าง (ตารางที่ 8.5) และตรวจสอบกำลังเชื่อมบน Top chord ซึ่งจะมีค่ามากที่สุดบริเวณจุดรองรับ

Joint 1

กำหนดให้มีช่องว่าง (g) ระหว่าง plate และ Bracing เท่ากับ $2t_o$

ขนาดของแรงเฉือนกระทำที่จุดต่อบน Top chord, $V = 2.5P = 2.5 \times 108 = 270 \text{ kN}$

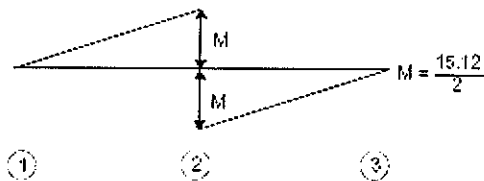
$$\text{Elastic shear capacity} = 0.5A_o \cdot \frac{f_{yo}}{\sqrt{3}} = 0.5 \cdot 4728 \cdot \frac{0.355}{\sqrt{3}} = 485 \text{ kN} (>270 \text{ kN}) \text{ ok}$$



Joint 2

จากตารางที่ 8.5 กำลังของจุดต่อ joint 2 ไม่เพียงพอ ดังนั้น จะทำการปรับลดช่องว่าง gap จาก $12.8t_o$ เหลือ $3t_o$ แล้วทำการคำนวณใหม่ จะได้ค่า joint efficiency เท่ากับ 0.86 (>0.82) แต่จะทำให้เกิดระยะเยื้อง (ลบ) เท่ากับ 28 มม. โดยเกิดโมเมนต์ $M = (878-338) \times 0.028 = 15.12 \text{ kN-m}$ ค่าโมเมนต์ดังกล่าวจะกระจายไปยังละติจูดบน chord เท่ากับ 7.56 kN-m โดยจะต้องตรวจสอบการรับแรงแบบชิ้นส่วน beam-column (ตรวจสอบชิ้นส่วน 2-3 เนื่องจากวิกฤตกว่า)

$$\frac{N_o}{\chi \cdot A_o \cdot f_{yo}} + k \cdot \frac{M_o}{M_{plo}} \leq 1.0$$



โดยที่

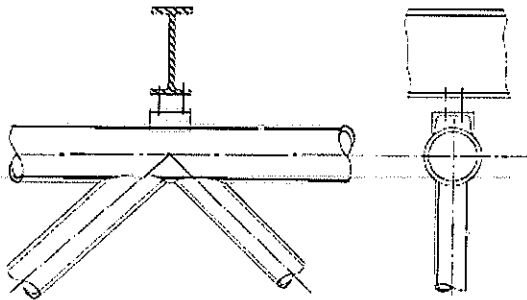
M_{plo} คือ โมเมนต์พลาสติกของ chord หรือ อาจใช้ค่าโมเมนต์ครากแทนด้วย ซึ่งจะปลอดภัยมากขึ้น

k คือ ตัวคูณพิจารณาผล second order effect ขึ้นกับความเรียว (Slenderness) ประเภทหน้าตัด และ Moment diagram ในกรณีนี้ $k = 1.5$

$$\frac{878}{1189} + k \cdot \frac{7.56}{113.3} \leq 1.0$$

$$0.74 + 0.067k < 1.0$$

จุดต่อรับแป



ลักษณะจุดต่อขึ้นกับหน้าตัดแปที่ใช้ รูปแบบโดยง่าย หากไม่มีปัญหาเรื่องการกัดกร่อน อาจใช้หน้าตัด channel คิวเตรียมเป็นจุดรองรับ แล้วเชื่อม และเจาะรูสำหรับยึดต่อด้วยนอตเข้ากับแปอีกที

จุดต่อตรงกลางสำหรับชั้นนอตหน้างาน

Bottom chord

ดังแสดงในรูปที่ 7.2(ก) ในการเชื่อมต่อ chord $\varnothing 190.7-5.0$ ที่มีกำลังคราก 235 N/mm^2 จะต้องใช้ Bolt ขนาด 22 มม. ชนิด 10.9 จำนวน 6 ตัว ดังนั้น จึงต้องทำการปรับเทียบเพื่อให้เชื่อมต่อกับ chord $\varnothing 193.7-6.3$ กำลังคราก 355 N/mm^2 โดยใช้ bolt ชนิดเดียวกัน

$$\frac{193.7 \times 6.3}{190.7 \times 5.0} \cdot \frac{355}{235} \cdot 6 = 12 \text{ ตัว}$$

Top chord

การคำนวณปรับแก้ แสดงดังนี้

$$\frac{219.1 \times 7.1}{216.3 \times 8.0} \cdot \frac{355}{235} \cdot 9 = 12 \text{ ตัว bolt ขนาด 24 มม. ชนิด 10.9}$$

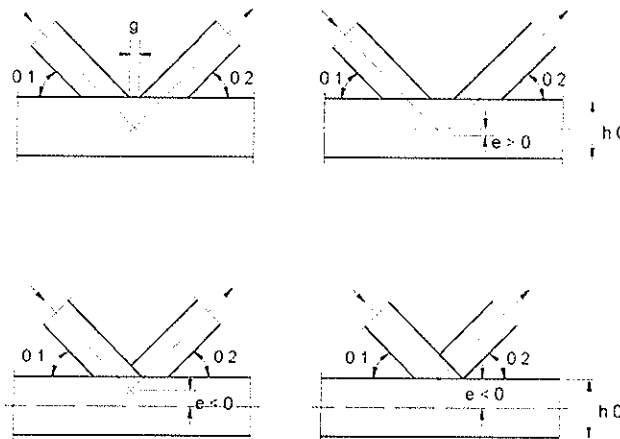
Joint	Chord (mm)	Bracings (mm)	Joint parameter					Actual efficiency	Joint strength efficiency (K-Joint)				Remarks
			d_1/d_o	d_o/t_o	g/t_o	$n' = \frac{f_{op}}{f_{yo}}$	$\frac{N_i}{A_i \cdot f_{yi}}$		C_K	$\frac{f_{op} \cdot t_o}{f_{yo} \cdot t_i}$	$\frac{f(n')}{\sin \theta_1}$	$\frac{N_i^*}{A_i \cdot f_{yi}}$	
1	219.1-7.1	Plate 139.7-4.5	0.64	30.9	2.0	Not appl.	-	0.32	2.04	1.60	$\frac{N_i^*}{A_i \cdot f_{yi}}$ >1.00	Yes*	$N_i^* \geq N_i$
2	219.1-7.1	139.7-4.5 88.9-3.6	0.64	30.9	12.8*	-0.20	0.82 0.98	0.23 0.23	2.04 2.55	1.49	0.70 >1.00	No* Yes	
3	219.1-7.1	139.7-4.5 88.9-3.6	0.64	30.9	12.8	-0.52	0.49 0.32	0.23	2.04 2.55	1.22	0.58 >1.00	Yes Yes	
4	219.1-7.1	88.9-3.6 88.9-3.6	0.41	30.9	18.5	-0.68	0.32 0.32	0.26	2.55 2.55	1.05	0.70 0.70	Yes* Yes*	
5	193.7-6.3	139.7-4.5 139.7-4.5	0.72	30.7	2.9	+	0.82 0.82	0.29	1.81 1.81	1.60	0.85 0.85	Yes Yes	
6	193.7-6.3	88.9-3.6 139.7-4.5	0.72	30.7	9.4	+	0.98 0.49	0.23	2.26 1.81	1.60	>1.00 0.67	Yes Yes	
7	193.7-6.3	88.9-3.6 88.9-3.6	0.46	30.7	15.8	+	0.32 0.32	0.25	2.26 2.26	1.60	0.91 0.91	Yes Yes	

9. ตัวอย่างการออกแบบจุดต่อเหล็กโครงสร้างหน้าตัดกลวง ชนิดหน้าตัดสี่เหลี่ยม (Rectangular Hollow Section, RHS)

เนื้อหาต่อไปนี้จะประกอบด้วยบทนำสำหรับการออกแบบจุดต่อด้วย Design Chart ตัวอย่างการออกแบบจุดต่อ และตัวอย่างการออกแบบโครงถักในระนาบ 2 มิติ ที่ใช้เหล็กรูปพรรณชนิดกลวงรูปตัดสี่เหลี่ยม (Rectangular Hollow Sections, RHS) ที่ใช้การเชื่อม bracing เข้ากับ chord โดยตรง

9.1 บทนำ

โดยทั่วไปแล้ว การวิเคราะห์โครงถักนิยมใช้การวิเคราะห์โดยทฤษฎียืดหยุ่น (Elastic Analysis) ที่สมมติให้มีการเชื่อมต่อของค้ำอาคารเป็นแบบข้อหมุน (Pin Connection) การเยื้องศูนย์ของแรงที่จุดต่อเสมือน (Panel Point) ควรควบคุมให้มีค่าในขอบเขตไม่เกินที่ระบุในรูปที่ 9.1 การเยื้องศูนย์ที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้เกิดโมเมนต์ดัดซึ่งจะต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบของค้ำอาคารของรับแรงอัด โดยการกระจายค่าโมเมนต์ไปสู่ chord ตามอัตราส่วนความแข็ง (Stiffness) ของ chord ทั้งสองด้าน ค่าโมเมนต์จากการเยื้องศูนย์นี้สามารถละไว้สำหรับกรณีการออกแบบของค้ำอาคารรับแรงดึงและตัว bracing



$$-0.55 \leq \frac{e}{h_0} \leq 0.25$$

รูปที่ 9.1 การเยื้องศูนย์ของแรงจากจุดต่อเสมือนและช่วงระยะการเยื้องศูนย์
ที่ไม่ส่งผลต่อการออกแบบ

ทิศทางของระยะเยื้องศูนย์กลาง (Eccentricity, e) ที่วัดไปหาผิวด้านนอกของ chord จะกำหนดให้มีค่าเป็นบวก (+) หากวัดเข้าไปสู่ด้านในก็กำหนดให้เป็นลบ (-) ค่าระยะห่าง (Gap, g) ระยะซ้อนทับ (Overlap, q) และระยะเยื้องศูนย์กลาง (e) ของรอยต่อ สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$g = \left(e + \frac{h_0}{2} \right) \left(\frac{\sin(\theta_1 + \theta_2)}{\sin \theta_1 \sin \theta_2} \right) - \frac{h_1}{2 \sin \theta_1} - \frac{h_2}{2 \sin \theta_2} \quad (9-1)$$

หมายเหตุ: ค่า g ที่เป็นลบ (-) หมายถึงเป็นระยะซ้อนทับ

$$e = \left(\frac{h_1}{2 \sin \theta_1} + \frac{h_2}{2 \sin \theta_2} + g \right) \frac{\sin \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} - \frac{h_0}{2} \quad (9-2)$$

หมายเหตุ: สำหรับรอยต่อแบบซ้อนทับ (Overlap) ให้แทนค่า g ที่เป็นลบ ในสมการ

สมการทั้งสองข้างต้นยังสามารถใช้กับกรณีจุดต่อที่มี stiffening plate วางบนผิวของ chord โดยให้แทนพจน์ของ $\frac{h_0}{2}$ ด้วย $\frac{h_0}{2} + t_p$ เมื่อ t_p คือความหนาของแผ่น stiffening plate

รูปแบบการวิบัติที่จุดต่อของโครงถัก RHS ที่ใช้การยึดต่อแบบเชื่อม สามารถเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ ขึ้นกับ รูปแบบของจุดต่อ สภาพน้ำหนักรรทุก และรายละเอียดทางด้านเรขาคณิตของจุดต่อ ดังรูปที่ 9.2 และรายละเอียดต่อไปนี้

Mode A: การวิบัติแบบพลาสติกที่ผิวหน้าของ chord

Mode B: การเฉือนทะลุที่ผิวหน้าของ chord ตามแนวโดยรอบรูปตัดของ bracing) เกิดได้ทั้งแรงอัดและแรงดึง(

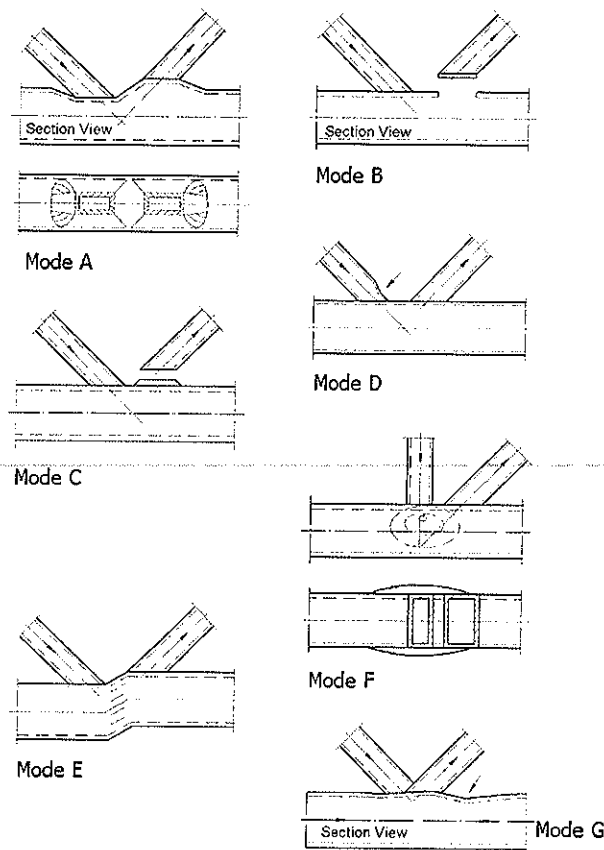
Mode C: การวิบัติจากแรงดึง (ในองค์อาคาร bracing) หรือจากรอยเชื่อม

Mode D: การโก่งเดาะเฉพาะแห่ง (Local Buckling) ของ bracing รับแรงอัด

Mode E: การวิบัติจากแรงเฉือนของ chord ที่มี bracing ยึดต่อแบบ Gap

Mode F: การโก่งเดาะเฉพาะแห่ง (Local Buckling) ของผนัง chord บริเวณที่รับแรงกดจาก bracing

Mode G: การโก่งเดาะเฉพาะแห่ง (Local Buckling) ของผนัง chord ที่บริเวณด้านหลังของ bracing รับแรงดึง



รูปที่ 9.2 รูปแบบการวิบัติของจุดต่อ K และ N

การวิบัติแบบพลาสติกบนผิวหน้าของ chord (Mode A) เป็นรูปแบบที่เกิดขึ้นบ่อยกับจุดต่อแบบ Gap ที่มีค่าอัตราส่วน β (ระหว่างความกว้างของ bracing ต่อความกว้างของ chord ในระดับปานกลาง ไปจนถึงค่อนข้างต่ำ กรณีที่ค่าอัตราส่วนมีค่าปานกลาง $\beta = 0.6$ ถึง 0.8) (การวิบัติมักเกิดขึ้นพร้อมกับการฉีกขาดของผิว chord (Mode B) หรือหาก bracing มีความบางมากๆ ก็อาจเกิดการขาดตัวของ bracing ที่รับแรงดึงขึ้นได้ (Mode C))

รูปแบบการวิบัติใน Mode C และ D นั้นถูกจัดอยู่ในกลุ่มของการวิบัติเดียวกัน เรียกว่า "effect width failures" ค่าแรงต้านทานของจุดต่อในกรณีนี้ขึ้นกับพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพ (effective cross section) ขององค์อาคาร bracing เนื่องจากในบางกรณีผนังขององค์อาคารเพียงบางส่วนเท่านั้นที่มีประสิทธิภาพต่อการรับแรงกระทำ

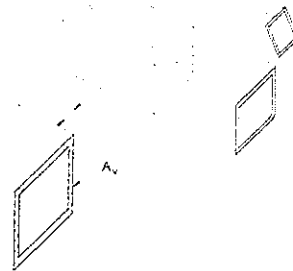
การวิบัติใน Mode D เกิดการโก่งเดาะเฉพาะแห่ง (Local Buckling) ขึ้นกับ bracing รับแรงอัด เป็นรูปแบบที่มักเกิดกับจุดต่อแบบ Overlap ส่วนการวิบัติจากแรงเฉือนที่เกิดกับ chord (Mode E) นั้น มักเกิดกับจุดต่อแบบ Gap ที่ความกว้างของ bracing และ chord มีขนาดใกล้เคียงกัน $\beta \approx 1.0$ (รวมถึงเมื่อ $h_0 < b_0$ สำหรับการวิบัติจาก local buckling failure ใน Mode F และ Mode G พบว่าอาจ

เกิดขึ้นได้บ้างหากอัตราส่วนระหว่างความกว้าง)หรือความลึก(ต่อความหนา ((h_0/t_0) หรือ (b_0/t_0)) ของ chord มีค่าสูงมาก

สมการสำหรับการตรวจสอบกำลังการรับแรงของจุดต่อแต่ละรูปแบบ และการวิบัติ Mode ต่างๆ ได้ถูกสรุปไว้ในตารางภาคผนวก ข1 และ ข2) สำหรับ chord รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส(และ ตารางภาคผนวก ข3 และ ข4) สำหรับ chord รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า(ตามลำดับ

เกณฑ์การออกแบบที่สำคัญสำหรับจุดต่อแบบ Gap K และ Gap N คือ การเกณฑ์การวิบัติแบบพลาสติกของผิว chord (Mode A) ค่าคงที่ต่างๆในสมการเป็นค่าที่ได้จากข้อมูลการวิจัยจำนวนมาก พจน์อื่นๆ ประกอบด้วยตัวแปรทางด้านกำลัง เช่น ความต้านทานโมเมนต์พลาสติกของผิว chord ต่อหน่วยความยาว ($f_{yo}t_0^2/4$) อัตราส่วนความกว้างของ bracing ต่อ chord (β) ความขะลุขลุของผนัง chord (γ) และพจน์ $f(n)$ ซึ่งแสดงถึงผลกระทบจากความเค้นอัดตามแนวแกนของ chord

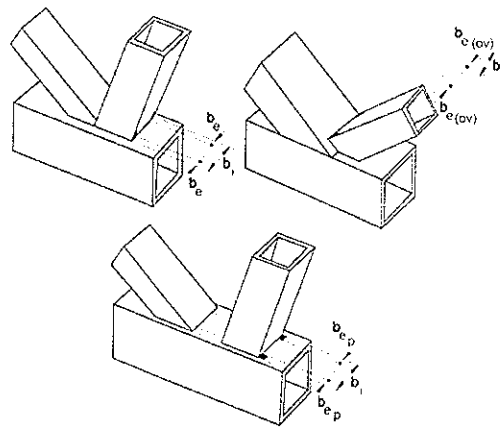
ตารางภาคผนวก ข1 และ ข3 แสดงให้เห็นว่า ขนาดของระยะห่าง (Gap) มีผลน้อยมากต่อการรับแรงของจุดต่อ Gap K และ Gap N ของ RHS chord) นั่นคือไม่มี gap size parameter)



รูปที่ 9.3 พื้นที่รับแรงเค้น (A_1) ของ chord ในบริเวณ Gap ของจุดต่อ K และ N

จากตารางภาคผนวก ข3 จะเห็นว่าการตรวจสอบการรับแรงของจุดต่อสำหรับการวิบัติใน Mode E) การวิบัติของ chord จากแรงเค้นกรณีจุดต่อแบบ Gap K และ Gap N) นั้น มีการแบ่งรูปตัดของ chord ออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือ พื้นที่รับแรงเค้น A_1 ซึ่งประกอบด้วยพื้นที่ผนังด้านข้างรวมกับพื้นที่บางส่วนของส่วนปีก (Flange) ด้านบน)ดังรูปที่ 9.3 (พื้นที่ส่วนนี้ถือว่ารองรับได้ทั้งแรงเค้นและแรงตามแนวแกน ส่วนที่สองคือพื้นที่ส่วนที่เหลือ ($A_0 - A_1$) ซึ่งถือว่าเป็นพื้นที่ที่รับได้เฉพาะแรงตามแนวแกน

ตารางภาคผนวก ข1 และ ข3 ยังแสดงช่วงของของค่ากำลังต้านทานของจุดต่อตามหลักการ “ความกว้างประสิทธิภาพ” (Effective Width) สำหรับจุดต่อแบบ Overlap โดยถือว่าการ Overlap 25% เป็นระยะขั้นต่ำของการซ้อนทับเพื่อให้เกิดพฤติกรรมของจุดต่อแบบ Overlap ค่าการรับแรงของจุดต่อจะเพิ่มขึ้นแบบ linear เมื่อระยะ Overlap มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 25% ถึง 50% จากนั้นจะมีค่าคงที่สำหรับการ Overlap ในช่วง 50-80% และมีค่าคงที่) ในระดับที่สูงขึ้น (สำหรับระยะ Overlap ที่เกินกว่า 80%



รูปที่ 9.4 ความหมายของความกว้างประสิทธิผล (effective width)

รูปที่ 9.5 แสดงกราฟช่วยในการตรวจสอบความเป็นไปได้ของการใช้ Gap K และ Gap N สำหรับ bracing รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่เชื่อมต่อกับ chord รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือแผ่นผ้า ข้อมูลจากกราฟจะแสดงให้ทราบค่าสูงสุดของ β อัตราส่วนระหว่างความกว้างเฉลี่ยของ bracing เทียบกับความกว้างของ chord) ที่ทำให้ระยะเยื้องศูนย์กลางอยู่ในช่วงขอบเขตที่กำหนด ค่า Input parameter ที่ใช้ได้แก่ ค่ามุมระหว่าง chord กับ bracing, θ อัตราส่วน h_0/b_0 ของ chord

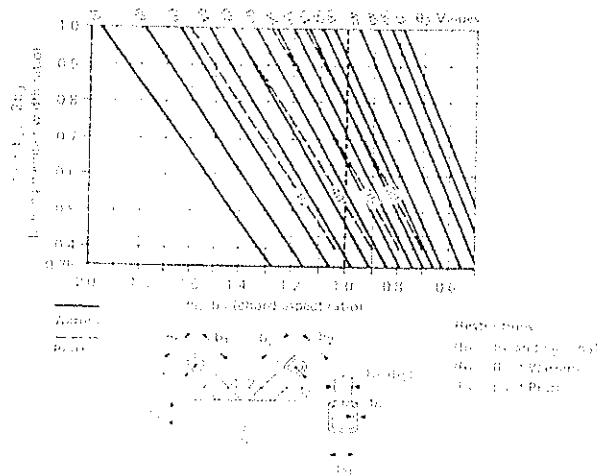


Fig. 10. Allowable design axial member width ratios for RHS gap connections, based on the following code conditions:

รูปที่ 9.5 อัตราส่วนความกว้างของ bracing สำหรับจุดต่อ Gap ที่ทำให้ระยะเยื้องศูนย์กลางอยู่ในเกณฑ์

Reusink and Wardenier (1989) ได้จัดทำชุด Design Chart สำหรับช่วยในการออกแบบจุดต่อแบบ K, N, T, Y และ X โดยอาศัยข้อมูลและข้อเสนอแนะจาก International Institute of Welding

(1989) และ Eurocode (1992) ค่าที่ได้จาก Design Chart จึงมีความสอดคล้องกับสมการในตาราง ภาคผนวก ข1 และมีลักษณะดังภาคผนวก ข5 ถึง ข12

หลักการของ "connection efficiency" คือการเทียบอัตราส่วนระหว่างแรงต้านทานของจุดต่อ (factored resistance) ต่อกำลังการรับแรงครากขององค์อาคาร bracing) คิดพื้นที่เต็มหน้าตัด (ซึ่งเป็นหลักการที่ใช้ในการแสดงผล output ของ chart ในภาคผนวก ข5 ถึง ข12 ดังกล่าวข้างต้น โดยเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพของจุดต่อ (connection efficiency)} = \frac{N_i^*}{A_i f_{yi}} \quad (9-3)$$

จากตารางในภาคผนวก ประสิทธิภาพของจุดต่อแบบ T, Y และ X ที่พิจารณาจากเกณฑ์ด้าน "effective width" ถูกแทนด้วยสัญลักษณ์ C_x , C_T และ C_X ตามแต่รูปแบบของจุดต่อ ค่าทั้งสามนี้จะต้องคูณปรับแก้ด้วยตัวคูณอีก 3 ส่วน เพื่อให้ได้ค่าประสิทธิภาพสุทธิของจุดต่อ โดยค่าปรับแก้ตัวแรกเป็นการปรับแก้ความแตกต่างด้านกำลัง ระหว่างองค์อาคาร chord กับ bracing ได้แก่พจน์ $(f_{y0}t_0)/(f_{yt})$ ซึ่งมักถูกลดรูปเหลือเพียง t_0/t เนื่องจากเหล็กที่ใช้สำหรับ chord และ bracing มักเป็นชั้นคุณภาพเดียวกัน ค่าที่สองได้แก่ การปรับแก้จากผลของมุมเอียงระหว่าง chord กับ bracing มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{\sin \theta_i}$ ใช้กับจุดต่อแบบ T, X และ Gap K และค่าปรับแก้ที่สามเป็นการปรับแก้ขึ้นเนื่องมาจากผลของแรงตามแนวแกนใน chord ที่รับแรงอัด ใช้สัญลักษณ์เป็น $f(n)$ สามารถหาค่าได้จากกราฟในภาคผนวก ข12 ทั้งนี้ สำหรับจุดต่อ RHS รูปตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบ Overlap ค่า $f(n)$ มีค่าเท่ากับ 1.0

ภาคผนวก ข5 ถึง ข8 เป็น chart สำหรับจุดต่อ T, Y และ X โดย ภาคผนวก ข5 ใช้กับจุดต่อทั้งสามรูปแบบที่อยู่ภายใต้สภาวะรับแรงดึง ภาคผนวก ข6 ใช้กับจุดต่อ T และ Y ภายใต้สภาวะรับแรงอัด ภาคผนวก ข7 ใช้กับจุดต่อ X เมื่อจุดต่ออยู่ในสภาวะรับแรงอัด และ ภาคผนวก ข8 สำหรับตรวจสอบเกณฑ์วิบัติจาก "effective width failure" ซึ่งถือว่าจำเป็นสำหรับกรณี $\beta > 0.85$

ภาคผนวก ข9 เป็น chart สำหรับจุดต่อ K และ N แบบ Gap ขณะที่ภาคผนวก ข10 ถึง ข11 เป็น chart สำหรับจุดต่อ K และ N แบบ Overlap

ภาคผนวก ข11 ซึ่งเป็น chart สำหรับจุดต่อ K และ N ที่มีระยะ Overlap $80\% \leq O_L \leq 100\%$ สัญลักษณ์ตัวห้อย j นั้นใช้สำหรับองค์อาคารที่ถูกซ้อนทับ ขณะที่สัญลักษณ์ i ใช้สำหรับองค์อาคารที่ซ้อนทับอยู่

ภาคผนวก ข10 ซึ่งเป็น chart สำหรับจุดต่อ K และ N ที่มีการ Overlap เพียงบางส่วน ต้องมีการแทนค่าใน chart ถึงสองครั้ง ครั้งแรกสำหรับองค์อาคารที่ถูกซ้อนทับและอีกครั้งสำหรับองค์อาคารที่ทับอยู่ จากนั้นจึงนำค่าประสิทธิภาพทั้งสองมารวมกันเป็นประสิทธิภาพรวมของจุดต่อ ดังนั้น จะเห็นได้ว่าหากเป็นการ Overlap อย่างสมบูรณ์แล้ว (chart ในภาคผนวก ข11) ประสิทธิภาพของจุดต่อจะมีค่าตั้งแต่ 0.8

ขึ้นไป ขณะที่จุดต่อที่เป็นแบบ Overlap บางส่วน (chart ในภาคผนวก ข10) ค่าประสิทธิภาพจะเริ่มตั้งแต่ 0.6 เป็นต้นไป ดังนั้น โดยทั่วไปแล้ว จุดต่อแบบที่ Overlap อย่างสมบูรณ์จึงมักแข็งแรงกว่าจุดต่อที่ Overlap เพียงบางส่วน

9.2 ตัวอย่างการคำนวณกรณีจุดต่อเป็นแบบ X มุมเอียง 45° bracing รับแรงดึง
ต้องการหา กำลังการรับแรงขององค์อาคาร bracing
กำหนดให้

- จุดต่อเป็นแบบ X มุมเอียง 45° bracing รับแรงดึง
- chord: 200x200x8.0 ($A_0 = 6050 \text{ mm}^2$)
- bracing: 100x100x5.0 ($A_1 = 1890 \text{ mm}^2$)
- $f_{y0} = f_{y1} = 355 \text{ N/mm}^2$
- $\theta_1 = 45^\circ$ และ $\sin\theta_1 = 0.707$
- $n = -0.48$

การวิเคราะห์โดยใช้ design chart จากภาคผนวก ข5

$$\beta = b_1/b_0 = 100/200 = 0.5$$

$$f(n) = 0.92 \text{ (from Fig.19)}$$

$$b_1/t_1 = 20$$

$$b_0/t_0 = 25$$

$$\therefore \frac{N_1^*}{A_1 f_{y1}} = 0.16 \left(\frac{8.0}{5.0} \right) \left(\frac{1}{0.707} \right) (0.92)$$

$$= 0.33$$

$$\therefore N_1^* = 0.33(1890)(0.355) = 224 \text{ kN}$$

9.3 ตัวอย่างการคำนวณกรณีจุดต่อเป็นแบบ T, bracing รับแรงอัด
ต้องการหา กำลังการรับแรงขององค์อาคาร bracing
กำหนดให้

- จุดต่อเป็นแบบ T, bracing รับแรงอัด
- chord: 100x100x8.0 ($A_0 = 2910 \text{ mm}^2$)
- bracing: 100x100x5.0 ($A_1 = 1890 \text{ mm}^2$)
- $f_{y0} = f_{y1} = 355 \text{ N/mm}^2$
- $\theta_1 = 90^\circ$ และ $\sin\theta_1 = 1.0$

$$- n = -0.60$$

การวิเคราะห์โดยใช้ design chart จากภาคผนวก ข6

$$\beta = b_1/b_0 = 100/100 = 1.0$$

$$f(n) = 1.0 \text{ (from Fig.19)}$$

$$b_1/t_1 = 20 < 30.4$$

$$b_0/t_0 = 12.5$$

$$\therefore \frac{N_1^*}{A_1 f_{y1}} = 0.68 \left(\frac{8.0}{5.0} \right) (1.0)(1.0) = 1.0$$

$$\therefore N_1^* = 1.0(1890)(0.355) = 671 \text{ kN}$$

หมายเหตุ: แรงต้านของ bracing ที่ได้ จะต้องถูกนำไปตรวจสอบกับเกณฑ์ "effective width" ต่อไป

9.4 ตัวอย่างการคำนวณกรณีจุดต่อเป็นแบบ X มุมเอียง 30° bracing รับแรงอัด

ต้องการหา ประสิทธิภาพของจุดต่อ

กำหนดให้

- จุดต่อเป็นแบบ X มุมเอียง 30° bracing รับแรงอัด
- chord: 150x150x10.0 ($A_0 = 5450 \text{ mm}^2$)
- bracing: 140x140x8.0 ($A_1 = 4130 \text{ mm}^2$)
- $f_{y0} = f_{y1} = 355 \text{ N/mm}^2$
- $\theta_1 = 30^\circ$ และ $\sin \theta_1 = 0.5$
- $n = +0.38$

การวิเคราะห์โดยใช้ design chart จากภาคผนวก ข7

$$\beta = b_1/b_0 = 140/150 = 0.93$$

$\beta > 1-1/\gamma$ ดังนั้น ไม่ต้องตรวจสอบเกณฑ์ด้าน punching shear

$f(n) = 1.0$ เนื่องจาก chord อยู่ในสภาวะรับแรงดึง

$$b_1/t_1 = 17.5 < 30.4$$

$$b_0/t_0 = 15$$

$$\text{ถ้า } \beta = 0.85$$

$$\begin{aligned} \frac{N_1^*}{A_1 f_{y1}} &= 0.43 \left(\frac{10.0}{8.0} \right) \left(\frac{1}{0.5} \right) (1.0) \\ &= 1.08 \text{ (ใช้เป็น 1.0)} \end{aligned}$$

ถ้า $\beta = 1.0$

$$\frac{N_1^*}{A_1 f_{y1}} = 0.49 \left(\frac{10.0}{8.0} \right) (1.0) \\ = 0.61$$

ทำการ Interpolate (linearly) เพื่อหาค่าประสิทธิภาพของจุดต่อที่ $\beta = 0.93$ จะได้

$$\frac{N_1^*}{A_1 f_{y1}} = 0.79$$

หมายเหตุ: ค่าประสิทธิภาพนี้ จะต้องนำไปตรวจสอบกับเกณฑ์ทางด้าน "effective width" และเกณฑ์การวิบัติจากแรงเฉือนของ chord ต่อไป

9.5 ตัวอย่างการคำนวณกรณีจุดต่อเป็นแบบ T

ต้องการหา ประสิทธิภาพของจุดต่อ เมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ "effective width") ต่อเนื่องจากตัวอย่างในรูป รูป 9.1)

กำหนดให้

- chord: $100 \times 100 \times 8.0$ ($A_0 = 2910 \text{ mm}^2$)
- bracing: $100 \times 100 \times 5.0$ ($A_1 = 1890 \text{ mm}^2$)
- $f_{y0} = f_{y1} = 355 \text{ N/mm}^2$
- $\theta_1 = 90^\circ$ และ $\sin \theta_1 = 1.0$

การวิเคราะห์โดยใช้ design chart จากภาคผนวก ข8

$$\beta = b_1/b_0 = 100/100 = 1.0$$

$$b_1/t_1 = 20 < 30.4$$

$$b_0/t_0 = 12.5$$

$$t_0/t_1 = 1.6$$

$$\therefore \frac{N_1^*}{A_1 f_{y1}} = 1.00$$

9.6 ตัวอย่างการคำนวณกรณีจุดต่อเป็นแบบ Gap K

ต้องการหา ประสิทธิภาพของจุดต่อ

กำหนดให้

- จุดต่อเป็นแบบ K, bracing ทำมุมเอียง 45°
- chord: $200 \times 200 \times 10.0$ ($A_0 = 7450 \text{ mm}^2$)
- compression bracing: $150 \times 150 \times 8.0$ ($A_1 = 4450 \text{ mm}^2$)
- tension bracing: $140 \times 140 \times 8.0$ ($A_2 = 4130 \text{ mm}^2$)
- $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$
- $n = -0.8$
- ระยะเยื้องศูนย์กลาง, $e = 0.20h_0 = 40$

จากสมการ (9-1):

$$g = \frac{(40 + 100)(\sin 90^\circ)}{\sin 45^\circ \sin 45^\circ} - \frac{150}{2 \sin 45^\circ} - \frac{140}{2 \sin 45^\circ} = 75 > t_1 + t_2 (=16)$$

จากรูปที่ 9.5 ช่วงของ β ที่ใช้ได้คือ $0.35 \leq \beta \leq 1.0$

$$\beta = \frac{b_1 + b_2}{2b_0} = \frac{140 + 150}{2(200)} = 0.725$$

ตรวจสอบ; $0.5(1 - \beta)b_0 \leq g \leq 1.5(1 - \beta)b_0$
 $27.5 \leq g \leq 82.5$...ใช้ได้

ตรวจสอบ;

$$b_2 = 140 \geq 0.77(140 + 150) / 2 = 112$$

$$b_0/t_0 = 20$$

$$b_2/t_2 = 17.5$$

$$b_1/t_1 = 18.8 \leq 30.4$$

$$b_2/b_0 = 0.7 > 0.3 \text{ และ } > 0.35$$

จากภาคผนวก ข12; เมื่อ $n = -0.8$ จะได้ $f(n) = 0.86$

$$\therefore \frac{N_1^*}{A_1 f_{y1}} = 0.35 \left(\frac{10.0}{8.0} \right) \left(\frac{1}{0.707} \right) (0.86) = 0.53$$

และ $\frac{N_2^*}{A_2 f_{y2}} = \frac{N_1^* \sin \theta_1}{A_2 f_{y2} \sin \theta_2} = 0.57$

หมายเหตุ: ถ้า t_1 และ t_2 มีค่าน้อยลง ประสิทธิภาพของจุดต่อสามารถเพิ่มขึ้นได้

9.7 ตัวอย่างการคำนวณกรณีจุดต่อเป็นแบบ Overlap K

ต้องการหา ประสิทธิภาพของจุดต่อ

กำหนดให้

- จุดต่อเป็นแบบ K, bracing เฉียง 45°
- chord: $200 \times 200 \times 10.0$ ($A_0 = 7450 \text{ mm}^2$)
- compression bracing: $150 \times 150 \times 8.0$ ($A_1 = 4450 \text{ mm}^2$) (Overlapped member= j)
- tension bracing: $140 \times 140 \times 8.0$ ($A_2 = 4130 \text{ mm}^2$) (Overlapping member= i)
- $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$
- ระยะเยื้องศูนย์กลาง, $e = -0.30h_0 = -60$

การวิเคราะห์โดยใช้ design chart จากภาคผนวก ข10

จากสมการ (9-1)

$$g = \frac{(-60 + 100)(\sin 90^\circ)}{\sin 45^\circ \sin 45^\circ} - \frac{150}{2 \sin 45^\circ} - \frac{140}{2 \sin 45^\circ} = -125$$

$$\therefore q = 125$$

$$O_v = \frac{q * 100}{p} = \frac{125 * 100}{140 \sin 45^\circ} = 63\%$$

$$b_1/b_2 = 140/150 = 0.93, t_1/t_2 = 8.0/8.0 = 1.0,$$

$$b_0/t_0 = 20, b_2/t_2 = 17.5, b_1/t_1 = 18.8 < 30.4, b_1/b_0 = 0.75, b_2/b_0 = 0.70$$

$$\therefore \frac{N_i^*}{A_i f_{yi}} = 0.38 + 0.36 = 0.74$$

$$\text{ดังนั้น } \frac{N_j^*}{A_j f_{yj}} \leq 0.74$$

9.8 ตัวอย่างการคำนวณกรณีจุดต่อเป็นแบบ Overlap K

ต้องการหา ประสิทธิภาพของจุดต่อ

กำหนดให้

- จุดต่อเป็นแบบ K, bracing เฉียง 45°
- chord: $200 \times 200 \times 10.0$ ($A_0 = 7450 \text{ mm}^2$)
- compression bracing: $150 \times 150 \times 8.0$ ($A_1 = 4450 \text{ mm}^2$) (Overlapped member= j)
- tension bracing: $140 \times 140 \times 8.0$ ($A_2 = 4130 \text{ mm}^2$) (Overlapping member= i)

- $f_{yi} = 355 \text{ N/mm}^2$
- ระยะเยื้องศูนย์กลาง, $e = -0.40h_0 = -80$

การวิเคราะห์โดยใช้ design chart จากภาคผนวก ข11

จากสมการ (9-1)

$$g = \frac{(-80 + 100)(\sin 90^\circ)}{\sin 45^\circ \sin 45^\circ} - \frac{150}{2 \sin 45^\circ} - \frac{140}{2 \sin 45^\circ} = -165$$

$$\therefore q = 165$$

$$O_v = \frac{q * 100}{p} = \frac{165 * 100}{140 \sin 45^\circ} = 83\%$$

$$b_1/b_2 = 140/150 = 0.93, t_1/t_2 = 8.0/8.0 = 1.0,$$

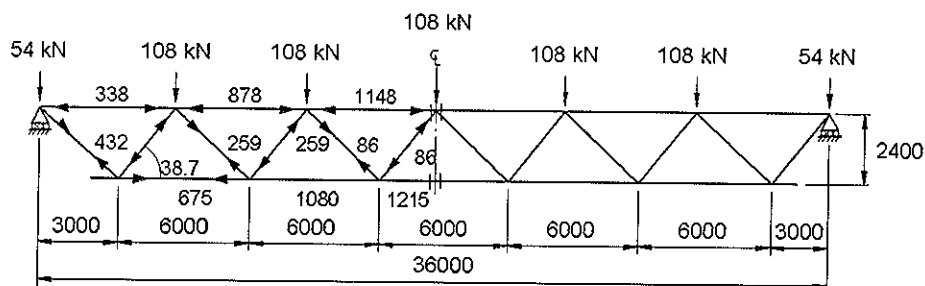
$$b_0/t_0 = 20, b_2/t_2 = 17.5, b_1/t_1 = 18.8 < 30.4, b_1/b_0 = 0.75, b_2/b_0 = 0.70$$

$$\therefore \frac{N_i^*}{A_i f_{yi}} = 0.87$$

$$\text{ดังนั้น } \frac{N_j^*}{A_j f_{yj}} \leq 0.87$$

9.9 ตัวอย่างการออกแบบโครงเหล็ก

ตัวอย่างต่อไปนี้แสดงขั้นตอนการออกแบบโครงเหล็กแบบ Warren โดยในรูปได้แสดงค่าน้ำหนักบรรทุก (factored loads) พร้อมทั้งค่าแรงตามแนวแกนที่วิเคราะห์จาก pin joint analysis ทั้งนี้ให้ถือว่าองค์อาคาร top chord ซึ่งรับแรงอัด ถูกค้ำยันเพื่อป้องกันการโก่งตัวทางข้างจากทุกตำแหน่งที่มีแป้นอัตราส่วน span to depth ratio ของโครงเหล็กเท่ากับ 15 หน่วยแรงครากของเหล็กไม่ต่ำกว่า 355 N/mm^2 หน่วยของแรงและระยะทางที่ใช้คือ กิโลนิวตัน และมิลลิเมตร ตามลำดับ



การออกแบบขนาดองค์อาคาร

Top Chord:

$$\text{Effective Length; } l_e = 0.9L = 0.9(6000) = 5400 \text{ mm.}$$

จากการวิเคราะห์ แรงอัดสูงสุดเท่ากับ 1148 kN; \therefore Design Load, $N_o = 1148 \text{ kN}$.

ตารางที่ 9.1 แสดงกลุ่มของรูปตัดที่มีกำลังรับแรงเพียงพอสู่ design load ทั้งนี้ โดยทั่วไปมักแนะนำให้เลือกรูปตัดที่มีอัตราส่วน b_o/t_o ในช่วงระหว่าง 15 ถึง 25 ดังนั้น ในขั้นตอนนี้ ทดลองเลือกใช้รูปตัด 180x180x8.0 RHS

ตารางที่ 9.1 รูปตัดที่มีกำลังเพียงพอ สามารถใช้เป็น top chord รับแรงอัด

f_y N/mm ²	N_o kN	KL m.	possible sections mm x mm x mm	A_o mm ²	b_o/t_o	λ	χ	$\chi f_y A_o$ kN
355	1148	5.4	200x200x8.0	6050	25.0	0.93	0.71	1530
			180x180x8.0	5410	22.5	1.04	0.64	1230
			200x200x6.3	4820	31.7	0.92	0.72	1230

Bottom Chord:

ตารางที่ 9.2 แสดงกลุ่มของรูปตัดที่มีกำลังรับแรงเพียงพอสู่ design load อย่างไรก็ตาม เพื่อให้จุดต่อมีประสิทธิภาพสูงจึงควรเลือกรูปตัดที่มีความ compact และค่อนข้างหนา ดังนั้นในที่นี้เลือกรูปตัด 150x150x6.3 RHS สำหรับ bottom chord รับแรงดึง

ตารางที่ 9.2 รูปตัดที่มีกำลังเพียงพอ สามารถใช้เป็น bottom chord รับแรงดึง

f_y N/mm ²	N_o kN	possible sections mm x mm x mm	A_o mm ²	b_o/t_o	$\chi f_y A_o$ kN
355	1215	150x150x6.3	3560	23.8	1260
		160x160x5.6	3480	28.6	1240
		180x180x5.0	3460	36.0	1230

Diagonals:

สมมติว่าต้องการออกแบบจุดต่อให้เป็นแบบ Gap Connections เพื่อความสะดวกและประหยัด ดังนั้น จาก รูป 9.4 จะเห็นว่าค่าประสิทธิภาพของจุดต่อจะมีค่าสูงสุดเมื่ออัตราส่วน $(f_y t_o / f_y t)$ มีค่าสูงสุด ดังนั้น ควรพยายามเลือกองค์อาคาร bracing ที่สามารถให้ค่า $(f_y t_o / f_y t) \geq 2.0$ ซึ่งในที่นี้ หมายความว่า ความหนา (t) ควรมีค่าไม่เกิน) หรือมีค่าประมาณ (3.15 มม .

สำหรับองค์อาคาร bracing รับแรงอัด ใช้ค่า effective length, $l_e = 0.75L$

$$l_e = 0.75L = 0.75\sqrt{(2.4^2 + 3.0^2)} = 2.88m.$$

Compression Diagonals

ตารางที่ 9.3 รูปตัดที่มีกำลังเพียงพอ สามารถใช้เป็น bracing รับแรงอัด

f_{y1} N/mm ²	N_1 kN	KL m.	possible sections mm x mm x mm	A_1 mm ²	b_1/t_1	λ	χ	$\chi f_{y1} A_1$ kN
355	432	2.881	120x120x4.0	1850	30.0	0.82	0.79	516
			100x100x5.0	1890	20.0	1.00	0.67	448
	259		100x100x3.6	1380	27.8	0.98	0.68	332
			90x90x3.6	1240	25.0	1.10	0.60	263
	86		70x70x3.2	850	21.9	1.42	0.41	123
			80x80x3.2	978		1.23	0.51	178

Tension Diagonals

ตารางที่ 9.4 รูปตัดที่มีกำลังเพียงพอ สามารถใช้เป็น bracing รับแรงดึง

f_{y2} N/mm ²	N_2 kN	possible sections mm x mm x mm	A_2 mm ²	b_2/t_2	$\chi f_{y2} A_2$ kN
355	432	90x90x3.6	1240	25.0	440
	259	70x70x3.2	850	21.9	302
	86	30x30x2.5	272	12.0	97

การคัดเลือกหน้าตัดที่เหมาะสม

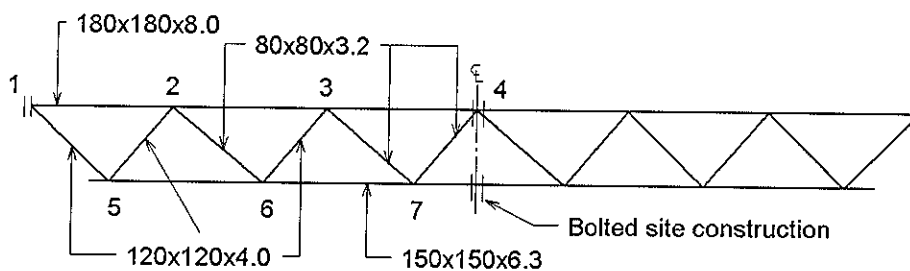
จากการพิจารณาข้างต้น ทำให้สามารถสรุปรูปตัดที่เลือกใช้ได้ดังนี้

Bracing: 120x120x4.0 RHS

80x80x3.2 RHS)เลือก 80x80x3.2 แทน 70x70x3.2 เนื่องจากต้องให้ผ่าน
เกณฑ์ $b_1 \geq 0.77(b_1 + b_2)/2$

Top chord: 180x180x8.0 RHS

Bottom chord: 150x150x6.3 RHS



ตรวจสอบกำลังของจุดต่อ

ตารางที่ 9.5 แสดงการคำนวณแรงต้านของจุดต่อ ผลการตรวจสอบพบว่าทุกจุดต่อมีกำลังที่เพียงพอต่อการใช้งาน ทั้งนี้ อาจเป็นผลมาจากการพยายามออกแบบโดยให้มีค่า (f_{y0t}/f_{yt}) สูงมากเท่าที่จะทำได้ นอกจากนี้ พบว่าทุกจุดต่อสำหรับ compression chord ไม่มีระยะเยื้องศูนย์กลาง ($e=0$) ขณะที่จุดต่อบน chord รับแรงดึงมีระยะเยื้องศูนย์กลางเกิดขึ้นบ้าง แต่ไม่มีผลกระทบต่อกำลังการรับแรงของจุดต่อ

ตารางที่ 9.5 การตรวจสอบกำลังของจุดต่อ

connection	Chord mmxmmxmm	Bracings mmxmmxmm	Connection parameters (check validity range, Fig.15)					Actual efficiency	Connection efficiency (see Fig.15)			remarks				
			β	b_1/t_1	b_2/t_1	e mm.	g/b_0		$C_{K,gap}$	$\frac{f(n)}{\sin\theta_i}$	$\frac{N_i^*}{A_i f_{yt}}$		$N_i^* \geq N_i$			
1	180x180x8.0 $b_0/t_0 = 22.5$	plate 120x120x4.0	0.67	-	30	0	0.18	-	-	-	-	-	-	-	-	$N_i^* \geq N_i$
2	180x180x8.0 $b_0/t_0 = 22.5$	120x120x4.0 80x80x3.2	0.56	30	25	0	0.36	0.66	0.29	0.44	1.60	1.54	0.89	>1.0	yes	yes
3	180x180x8.0 $b_0/t_0 = 22.5$	120x120x4.0 80x80x3.2	0.56	30	25	0	0.36	0.39	0.29	0.44	1.39	1.39	0.81	>1.0	yes	yes
4	180x180x8.0 $b_0/t_0 = 22.5$	80x80x3.2 80x80x3.2	0.44	25	25	0	0.54	0.25	0.34	0.34	1.20	1.20	>1.0	yes	yes	yes
5	150x150x6.3 $b_0/t_0 = 23.8$	120x120x4.0 120x120x4.0	0.80	30	30	18	0.27	0.66	0.34	0.34	1.60	1.60	0.86	yes	yes	yes
6	150x150x6.3 $b_0/t_0 = 23.8$	120x120x4.0 80x80x3.2	0.67	30	25	18	0.48	0.39	0.29	0.42	1.60	1.60	0.73	yes	yes	yes
7	150x150x6.3 $b_0/t_0 = 23.8$	80x80x3.2 80x80x3.2	0.53	25	25	18	0.69	0.25	0.33	0.33	1.60	1.60	>1.0	yes	yes	yes

10. การเปรียบเทียบการรับน้ำหนักของ โครงสร้างหน้าตัดกลวง และเหล็กหน้าตัดปีกกว้าง

หน้าตัดเหล็กแบบกลวงมีคุณสมบัติที่เด่นกว่าหน้าตัดเหล็กปีกกว้างในหลาย ๆ ประเด็น แต่จุดที่เห็นเด่นชัดอย่างมีนัยสำคัญก็คือ การที่หน้าตัดเหล็กแบบกลวงมีแกนสมมาตรของหน้าตัดทั้งสองด้าน คุณสมบัตินี้ทำให้ค่ารัศมีไจเรชัน (Radius of Gyration) ของหน้าตัดมีค่าที่เท่า ๆ กัน ทำให้หน้าตัดเหล็กแบบกลวงสามารถต้านทานแรงอัดได้ดีกว่าหน้าตัดเหล็กปีกกว้างเมื่อเปรียบเทียบในน้ำหนักที่เท่ากัน

เนื่องจากคุณสมบัติการรับแรงอัดขององค์อาคารเหล็กรูปพรรณ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วน kl/r ซึ่ง ค่า kl จะหมายถึง ความยาวประสิทธิภาพขององค์อาคาร และค่า r คือ รัศมีไจเรชันของหน้าตัด การคำนวณในตารางที่แนบ คำนวณโดยใช้สมการเส้นโค้ง SSRC (SSRC Curve) ซึ่งมีพื้นฐานการคำนวณมาจากเส้นกราฟของออยเลอร์ (Euler's Graph) โดยใช้ในการคำนวณแบบ ASD (Allowable Strength Design) ซึ่งเป็นวิธีที่วิศวกรในประเทศไทย นิยมใช้ โดยคำนวณเปรียบเทียบการรับน้ำหนักเหล็กหน้าตัดปีกกว้าง กับเหล็กหน้าตัดกลวงทั้งแบบ หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และ หน้าตัดท่อกลม ซึ่งความสามารถในการน้ำหนักจะแปรผกผันไปตามความยาวประสิทธิภาพ kl ที่เพิ่มขึ้น

การผลการคำนวณเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่า การใช้เหล็กโครงสร้างหน้าตัดกลวง จะประหยัดกว่า การใช้เหล็กแบบปีกกว้าง ประมาณ 15 % เมื่อค่าความยาวประสิทธิภาพมีค่ามากกว่า 2 เมตร และจะสามารถประหยัดได้สูงสุดถึง 30 % เมื่อค่าความยาวประสิทธิภาพประมาณ 4 เมตร ซึ่งเป็นค่าความยาวของเสาบ้านพักอาศัยทั่ว ๆ ไป จากผลการคำนวณจะเห็นได้ว่า เหล็กหน้าตัดกลวงที่มีความกว้าง และเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ สามารถรับแรงอัดได้ดีกว่าหน้าตัดที่มีความกว้างขนาดเล็ก

จะเห็นได้ว่า เมื่อความยาวประสิทธิภาพขององค์อาคารต่ำกว่า 2 เมตร การใช้เหล็กหน้า ตัดกลวง อาจไม่คุ้มค่า เนื่องจาก หน้าตัดที่น้อย ไม่สามารถต้านทานแรงอัดได้มากเท่ากับหน้าตัดเหล็กปีกกว้าง แต่เมื่อค่าความยาวประสิทธิภาพมากกว่า 2 เมตร ค่า kl/r จะมีผลทำให้การรับแรงอัดของหน้าตัดเหล็กปีกกว้าง ลดลงอย่างมาก ซึ่งแตกต่างกับหน้าตัดเหล็กแบบกลวง ที่มีค่า r ที่มากกว่า ทำให้สามารถรับแรงอัดได้มากกว่า

คุณสมบัติของหน้าตัดเหล็กแบบกลวง ที่สามารถขึ้นรูปได้ ทั้งที่มีความหนาไม่มาก ทำให้เกิดข้อได้เปรียบในการคำนวณค่า r เมื่อเปรียบเทียบกับหน้าตัดเหล็กปีกกว้าง ทำให้เหล็กหน้าตัดกลวง ถึงแม้จะมีความกว้าง หรือเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่า แต่สามารถรับกำลังอัดได้มากกว่า แต่หากนำองค์อาคารที่มีขนาดใหญ่ แต่บางไปก่อสร้าง อาจทำให้เกิดการโก่งเดาะเฉพาะจุด (Local Buckling) ได้ง่าย ซึ่งอาจแก้ไขด้วยการเทคนิคการติดตั้งในหน้าตัดได้

การเปรียบเทียบการรับน้ำหนัก (ตัน)

เหล็กโครงสร้างหน้าตัดปีกกว้าง: 100×100×6×8×17.2 กก/ม $F_y = 248 \text{ Mpa}$ น้ำหนัก (กก/ม) = 17.2

ขนาดของ HSS*	φ 4"	φ 5"	φ 6"	100×100×6×8 ×17.2 กก/ม
ความหนาผนัง (มม)	6.0	4.0	3.5	
น้ำหนัก (กก/ม)	12.19	13.40	14.22	
ประหยัด (%)	29.1	22.1	17.3	
ความยาวประสิทธิ์ผล KL (เมตร)	0.0	23	27	33
	0.6	22	25	31
	0.9	22	25	30
	1.2	21	24	28
	1.5	21	24	26
	1.8	20	23	25
	2.1	19	22	23
	2.4	19	22	20
	2.7	18	21	18
	3.0	17	20	15
	3.4	16	20	13
	3.7	15	19	11
	4.0	14	18	9
	4.3	13	17	8
	4.6	12	16	7
	4.9	11	15	6
	5.2	9	15	18
	5.5	8	14	18
	5.8	8	13	17
	6.1	7	11	16
6.4	6	10	15	
6.7	6	9	14	
7.0	5	9	13	
7.3	5	8	12	
7.6	4	7	11	
7.9		7	11	
8.2		6	10	
8.5		6	9	
8.8		5	9	
9.1		5	8	

การเปรียบเทียบการรับน้ำหนัก (ตัน)

เหล็กโครงสร้างหน้าตัดปีกกว้าง: 125×125×6.5×9×23.8 กก/ม $F_y = 248 \text{ Mpa}$ น้ำหนัก (กก/ม) =23.8

ขนาดของ HSS*	φ 4"	φ 5"	φ 6"	125×125×6.5×9 ×23.8 กก/ม
ความหนาผนัง (มม)	6.0	6.0	5.0	
น้ำหนัก (กก/ม)	16.03	19.80	20.14	
ประหยัด (%)	32.6	16.8	15.4	
ความยาวประสิทธิ์ผล KL (เมตร)	0.0	30	38	45
	0.6	29	37	43
	0.9	28	36	42
	1.2	28	36	41
	1.5	27	35	39
	1.8	26	34	37
	2.1	25	33	35
	2.4	24	32	33
	2.7	23	31	31
	3.0	22	30	28
	3.4	20	29	26
	3.7	19	28	23
	4.0	18	27	20
	4.3	16	25	17
	4.6	15	24	15
	4.9	13	23	13
	5.2	12	21	12
	5.5	11	20	11
	5.8	9	18	9
	6.1	9	16	9
	6.4	8	15	
6.7	7	14		
7.0	6	12		
7.3	6	11		
7.6	5	11		
7.9		10		
8.2		9		
8.5		8		
8.8		8		
9.1		7		

การเปรียบเทียบการรับน้ำหนัก (ตัน)

เหล็กโครงสร้างหน้าตัดปีกกว้าง: 150×150×7×10×31.5 กก/ม Fy = 248 Mpa น้ำหนัก (กก/ม) = 31.5

ขนาดของ HSS*	φ 5"	φ 6"	φ 8"	150×150×7×10 ×31.5 กก/ม
ความหนาผนัง (มม)	6.0	6.0	5.0	
น้ำหนัก (กก/ม)	19.80	24.02	26.40	
ประหยัด (%)	37.1	23.7	16.2	
ความยาวประสิทธิ์ผล KL (เมตร)	0.0	38	46	50
	0.6	37	45	50
	0.9	36	44	49
	1.2	36	44	49
	1.5	35	43	48
	1.8	34	42	48
	2.1	33	41	47
	2.4	32	40	46
	2.7	31	40	46
	3.0	30	39	45
	3.4	29	38	44
	3.7	28	37	43
	4.0	27	35	43
	4.3	25	34	42
	4.6	24	33	41
	4.9	23	32	40
	5.2	21	31	39
	5.5	20	29	38
	5.8	18	28	37
	6.1	16	26	36
	6.4	15	25	35
6.7	14	24	34	
7.0	12	22	33	
7.3	11	20	32	
7.6	11	19	31	
7.9	10	17	30	
8.2	9	16	28	
8.5	8	15	27	
8.8	8	14	26	
9.1	7	13	25	

การเปรียบเทียบการรับน้ำหนัก (ตัน)

เหล็กโครงสร้างหน้าตัดปีกกว้าง: 200×200×8×12×49.9 กก/ม Fy = 248 Mpa น้ำหนัก (กก/ม) =49.9

ขนาดของ HSS*	φ 8"	φ 10"	φ 12"	200×200×8×12 ×49.91 กก/ม
ความหนาผนัง (มม)	6.0	6.0	5.0	
น้ำหนัก (กก/ม)	31.53	39.52	39.32	
ประหยัด (%)	36.8	20.8	21.2	
ความยาวประสิทธิ์ผล KL (เมตร)	0.0	60	76	95
	0.6	59	75	93
	0.9	59	74	91
	1.2	58	73	90
	1.5	57	73	88
	1.8	57	72	86
	2.1	56	72	84
	2.4	55	71	82
	2.7	54	70	80
	3.0	54	69	77
	3.4	53	69	75
	3.7	52	68	72
	4.0	51	67	69
	4.3	50	66	66
	4.6	49	65	63
	4.9	48	64	60
	5.2	47	63	57
	5.5	45	62	53
	5.8	44	61	50
	6.1	43	60	46
	6.4	42	59	42
6.7	41	58	38	
7.0	39	56	35	
7.3	38	55	32	
7.6	37	54	30	
7.9	35	53	28	
8.2	34	52	26	
8.5	32	50	24	
8.8	31	49	22	
9.1	29	48	21	

การเปรียบเทียบการรับน้ำหนัก (ตัน)

เหล็กโครงสร้างหน้าตัดปีกกว้าง: 250×250×9×14×72.4 กก/ม $F_y = 248 \text{ Mpa}$

น้ำหนัก (กก/ม) =72.4

ขนาดของ HSS*	φ 10"	φ 12"	φ 14"	250×250×9×14 ×72.4 กก/ม	
ความหนาผนัง (มม)	9.0	6.0	6.0		
น้ำหนัก (กก/ม)	58.62	47.00	51.73		
ประหยัด (%)	19.0	35.1	28.5		
ความยาวประสิทธิ์ผล KL (เมตร)	0.0	112	90	99	138
	0.6	111	89	98	136
	0.9	110	88	97	134
	1.2	109	88	97	132
	1.5	108	87	96	130
	1.8	107	87	96	128
	2.1	106	86	95	126
	2.4	105	85	94	124
	2.7	104	85	94	121
	3.0	103	84	93	119
	3.4	101	83	92	116
	3.7	100	82	92	113
	4.0	99	82	91	111
	4.3	97	81	90	108
	4.6	96	80	89	104
	4.9	95	79	88	101
	5.2	93	78	87	98
	5.5	92	77	87	94
	5.8	90	76	86	91
	6.1	88	75	85	87
	6.4	87	74	84	83
6.7	85	73	83	79	
7.0	83	72	82	75	
7.3	82	71	81	71	
7.6	80	70	80	67	
7.9	78	69	79	63	
8.2	76	68	77	58	
8.5	74	66	76	54	
8.8	72	65	75	50	
9.1	70	64	74	47	

การเปรียบเทียบการรับน้ำหนัก (ตัน)

เหล็กโครงสร้างหน้าตัดปีกกว้าง: 100×100×6×8×17.2 กก/ม $F_y = 248 \text{ Mpa}$ น้ำหนัก (กก/ม) = 17.2

ขนาดของ HSS*	100×100	125×125	120×120	100×100×6×8 ×17.2 กก/ม	
ความหนาผนัง (มม)	4.5	3.2	4.0		
น้ำหนัก (กก/ม)	13.08	12.03	14.87		
ประหยัด (%)	24.0	30.1	13.5		
ความยาวประสิทธิภาพ KL (เมตร)	0.0	25	23	28	33
	0.6	24	22	28	31
	0.9	24	22	27	30
	1.2	23	22	27	28
	1.5	22	21	26	26
	1.8	22	21	26	25
	2.1	21	20	25	23
	2.4	20	20	24	20
	2.7	19	19	24	18
	3.0	18	19	23	15
	3.4	17	18	22	13
	3.7	16	17	21	11
	4.0	15	17	20	9
	4.3	14	16	19	8
	4.6	13	15	19	7
	4.9	11	14	18	6
	5.2	10	13	17	
	5.5	9	13	15	
	5.8	8	12	14	
	6.1	7	11	13	
	6.4	7	10	12	
6.7	6	9	11		
7.0	5	8	10		
7.3	5	8	9		
7.6	5	7	8		
7.9		6	8		
8.2		6	7		
8.5		6	7		
8.8		5	6		
9.1		5	6		

การเปรียบเทียบการรับน้ำหนัก (ตัน)

เหล็กโครงสร้างหน้าตัดปีกกว้าง: 125×125×6.5×9×23.8 กก/ม $F_y = 248 \text{ Mpa}$ น้ำหนัก (กก/ม) = 23.8

ขนาดของ HSS*	125 x 125	150 x150	150 x150	125×125×6.5×9 ×23.8 กก/ม
ความหนาผนัง (มม)	4.5	4.5	5.0	
น้ำหนัก (กก/ม)	16.62	20.15	22.26	
ประหยัด (%)	30.2	15.3	6.5	
ความยาวประสิทธิ์ผล KL (เมตร)	0.0	32	39	45
	0.6	31	38	43
	0.9	30	37	42
	1.2	30	37	41
	1.5	29	36	40
	1.8	29	36	39
	2.1	28	35	38
	2.4	27	34	38
	2.7	26	33	37
	3.0	25	33	36
	3.4	25	32	35
	3.7	24	31	34
	4.0	23	30	33
	4.3	22	29	32
	4.6	21	28	31
	4.9	19	27	30
	5.2	18	26	29
	5.5	17	25	28
	5.8	16	24	26
	6.1	15	23	25
	6.4	13	22	24
6.7	12	20	23	
7.0	11	19	21	
7.3	10	18	20	
7.6	9	17	18	
7.9	9	15	17	
8.2	8	14	16	
8.5	7	13	15	
8.8	7	12	14	
9.1	7	12	13	

การเปรียบเทียบการรับน้ำหนัก (ตัน)

เหล็กโครงสร้างหน้าตัดปีกกว้าง: 150×150×7×10×31.5 กก/ม $F_y = 248 \text{ Mpa}$ น้ำหนัก (กก/ม) = 31.5

ขนาดของ HSS*	150 x150	150 x150	175 x 175	150×150×7×10 ×31.5 กก/ม
ความหนาผนัง (มม)	4.0	6.0	5.0	
น้ำหนัก (กก/ม)	18.01	26.40	26.18	
ประหยัด (%)	42.8	16.2	16.9	
ความยาวประสิทธิ์ผล KL (เมตร)	0.0	34	50	60
	0.6	34	49	58
	0.9	33	49	57
	1.2	33	48	55
	1.5	32	47	54
	1.8	32	46	52
	2.1	31	46	50
	2.4	31	45	48
	2.7	30	44	45
	3.0	29	43	43
	3.4	28	42	40
	3.7	28	40	38
	4.0	27	39	35
	4.3	26	38	32
	4.6	25	37	29
	4.9	24	35	26
	5.2	23	34	23
	5.5	23	33	20
	5.8	22	31	18
	6.1	21	30	16
	6.4	20	28	15
6.7	18	26	14	
7.0	17	25	12	
7.3	16	23	11	
7.6	15	21		
7.9	14	20		
8.2	13	18		
8.5	12	17		
8.8	11	16		
9.1	10	15		

การเปรียบเทียบการรับน้ำหนัก (ตัน)

เหล็กโครงสร้างหน้าตัดปีกกว้าง: 200×200×8×12×49.9 กก/ม Fy = 248 Mpa น้ำหนัก (กก/ม) =49.91

ขนาดของ HSS*	200 x 200	250 x 250	300 x 300	200×200×8×12 ×49.91 กก/ม	
ความหนาผนัง (มม)	6.3	5.0	4.5		
น้ำหนัก (กก/ม)	37.52	37.96	41.34		
ประหยัด (%)	24.8	23.9	17.2		
ความยาวประสิทธิ์ผล KL (เมตร)	0.0	72	73	79	95
	0.6	71	72	78	93
	0.9	70	71	78	91
	1.2	69	71	77	90
	1.5	69	70	77	88
	1.8	68	70	76	86
	2.1	67	69	76	84
	2.4	66	68	75	82
	2.7	65	68	75	80
	3.0	64	67	74	77
	3.4	63	66	74	75
	3.7	62	66	73	72
	4.0	61	65	72	69
	4.3	60	64	72	66
	4.6	59	63	71	63
	4.9	58	62	70	60
	5.2	56	61	70	57
	5.5	55	60	69	53
	5.8	54	60	68	50
	6.1	52	59	67	46
	6.4	51	58	66	42
6.7	50	57	65	38	
7.0	48	56	65	35	
7.3	47	55	64	32	
7.6	45	53	63	30	
7.9	44	52	62	28	
8.2	42	51	61	26	
8.5	40	50	60	24	
8.8	39	49	59	22	
9.1	37	48	58	21	

การเปรียบเทียบการรับน้ำหนัก (ตัน)

เหล็กโครงสร้างหน้าตัดปีกกว้าง: 250×250×9×14×72.4 กก/ม Fy = 248 Mpa น้ำหนัก (กก/ม) = 72.4

ขนาดของ HSS*	250 x 250	300 x 300	350 x 350	250×250×9×14 ×72.4 กก/ม	
ความหนาผนัง (มม)	4.5	6.3	6.3		
น้ำหนัก (กก/ม)	66.47	57.30	67.19		
ประหยัด (%)	8.2	20.9	7.2		
ความยาวประติมาตร KL (เมตร)	0.0	127	109	128	138
	0.6	125	108	127	136
	0.9	125	108	127	134
	1.2	124	107	126	132
	1.5	123	107	126	130
	1.8	122	106	125	128
	2.1	121	105	124	126
	2.4	119	104	123	124
	2.7	118	104	123	121
	3.0	117	103	122	119
	3.4	116	102	121	116
	3.7	114	101	120	113
	4.0	113	100	119	111
	4.3	111	99	119	108
	4.6	110	98	118	104
	4.9	108	97	117	101
	5.2	107	96	116	98
	5.5	105	95	115	94
	5.8	104	94	114	91
	6.1	102	93	113	87
	6.4	100	92	112	83
6.7	98	91	111	79	
7.0	96	90	110	75	
7.3	95	88	108	71	
7.6	93	87	107	67	
7.9	91	86	106	63	
8.2	89	85	105	58	
8.5	87	83	104	54	
8.8	84	82	102	50	
9.1	82	81	101	47	

11. เอกสารอ้างอิง

[1] Wardenier, J., Kurobane, Y., Packer, J.A., Dutta, D. and Yeomans, N. "Design Guide for Circular Hollow Section (CHS) Joints under Predominantly Static Loading" CIDECT (Ed.) and Verlag TÜV Rheinland, Cologne, Germany, 1991.

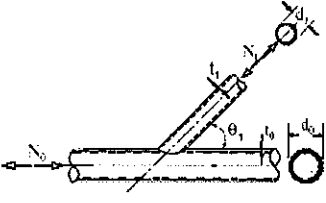
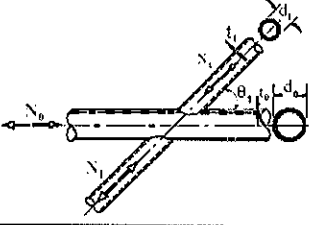
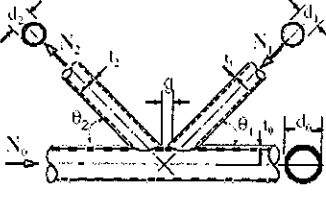
[2] Packer, J.A., Wardenier, J., Kurobane Y., Dutta, D. and Yeomans, N. "Design Guide for Rectangular Hollow Section (RHS) Joints under Predominantly Static Loading" CIDECT (Ed.) and Verlag TÜV Rheinland, Cologne, Germany, 1992.

[3] Eurocode 3: "Design of Steel Structures" - Annex K: Hollow Section Lattice Girder Connections, ENV 1993-1-1, CEN, 1992

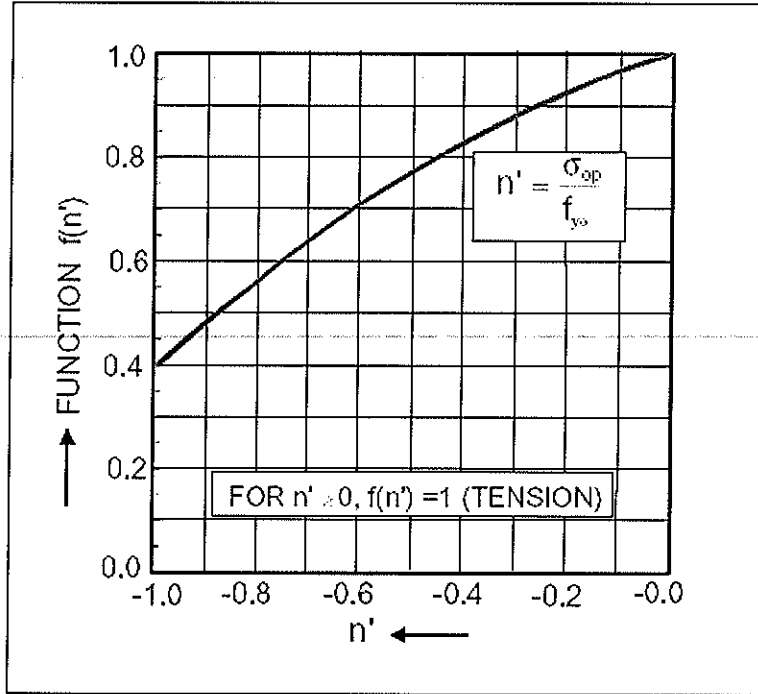
ภาคผนวก ก

สมการคำนวณ และ Design Chart ของจุดต่อเหล็กหน้าตัดวงกลม

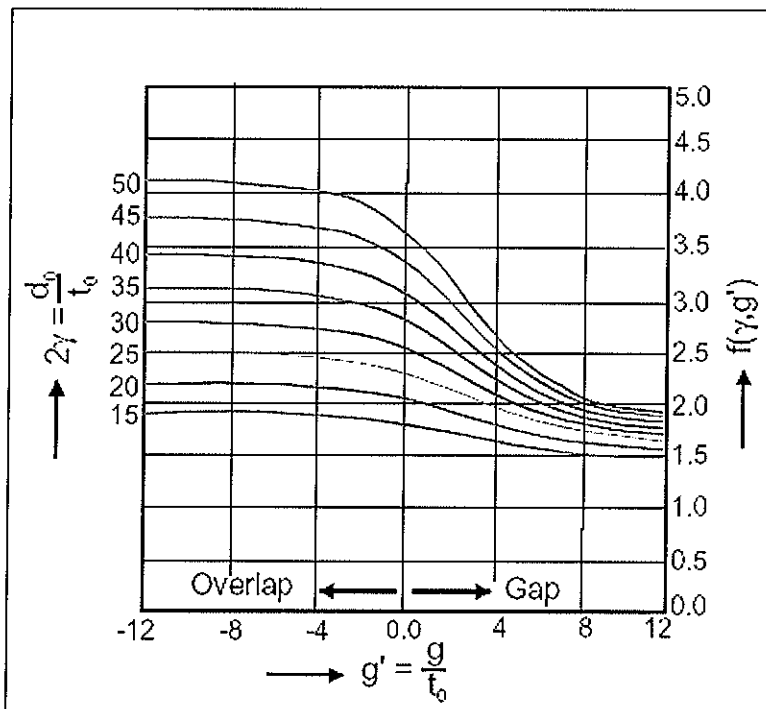
ภาคผนวก ก1. สมการคำนวณกำลังจุดต่อหน้าตัดคดงวงกลม

Type of joint	Design strength (i = 1, 2)			
T- and Y-joints	chord plastification			
	$N_1^* = \frac{f_{yo} \cdot t_0^2}{\sin \theta_1} \cdot (2.8 + 14.2\beta^2) \cdot \gamma^{0.2} \cdot f(n')$ <p style="text-align: right;">(eq. 4.2.1)</p>			
X-joints	chord plastification			
	$N_1^* = \frac{f_{yo} \cdot t_0^2}{\sin \theta_1} \cdot \left[\frac{5.2}{1 - 0.81\beta} \right] \cdot f(n')$			
K and N gap or overlap joints	chord plastification			
	$N_1^* = \frac{f_{yo} \cdot t_0^2}{\sin \theta_1} \cdot \left(1.8 + 10.2 \frac{d_1}{d_0} \right) \cdot f(\gamma, g') \cdot f(n')$ $N_2^* = N_1^* \cdot \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$			
general	punching shear			
punching shear check for T,Y,X and K,N,KT joints with gap	$N_1^* = \frac{f_{yo}}{\sqrt{3}} \cdot t_0 \pi d_i \cdot \frac{1 + \sin \theta_1}{2 \sin^2 \theta_1}$			
functions				
$f(n') = 1.0$ for $n' \geq 0$ $n' = \frac{f_{op}}{f_{yo}}$ (tension)	$f(\gamma, g') = \gamma^{0.2} \cdot \left[1 + \frac{0.024 \gamma^{1.2}}{\exp(0.5 g' - 1.33) + 1} \right]$			
$f(n') = 1 + 0.3n' - 0.3n'^2$ for $n' < 0$ (compression)				
validity ranges				
$0.2 < \frac{d_1}{d_0} \leq 1.0$	$\frac{d_1}{2t_1} \leq 25$ and see table 8.1a	$30^\circ \leq \theta_1 \leq 90^\circ$ $-0.55 \leq \frac{e}{d_0} < 0.25$	$\gamma \leq 25$ $\gamma \leq 20$ (X-joints)	$Ov \geq 25\%$ $g \geq t_1 + t_2$

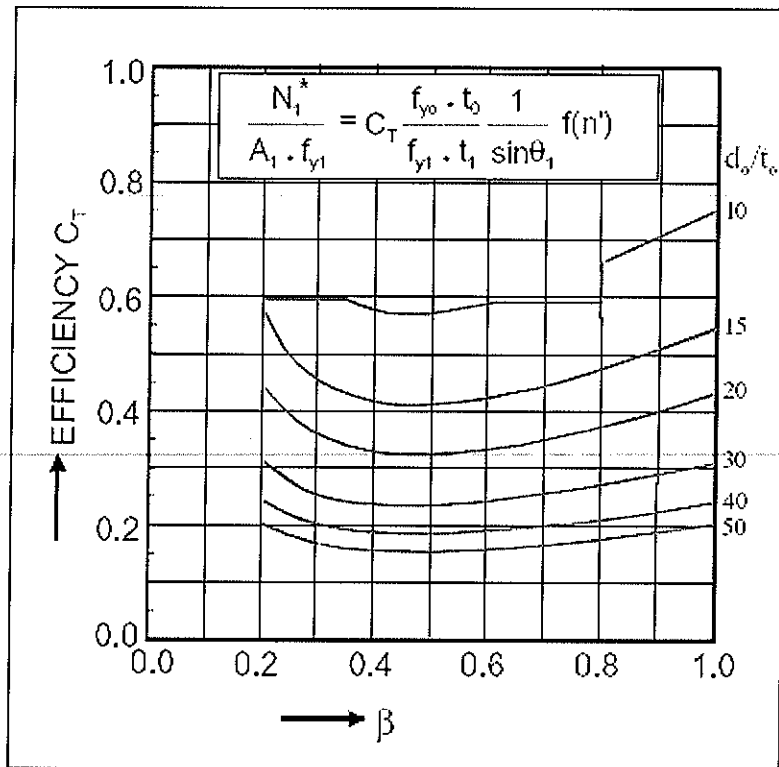
ภาคผนวก ก2. Design Chart การคำนวณกำลังจุดต่อหน้าตัดดกวงกลม



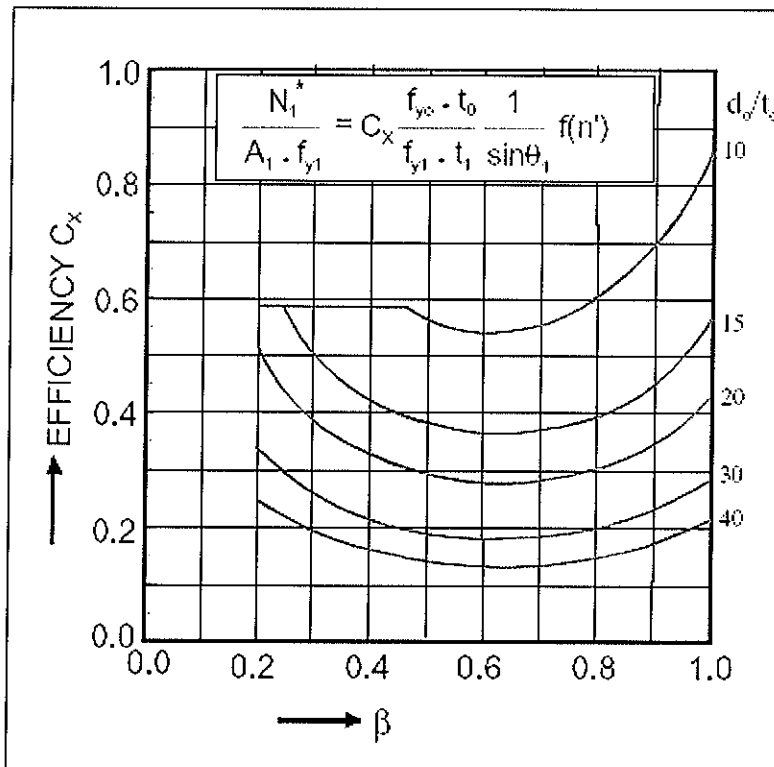
รูป ก1 Chord Prestressing function ($f(n')$)



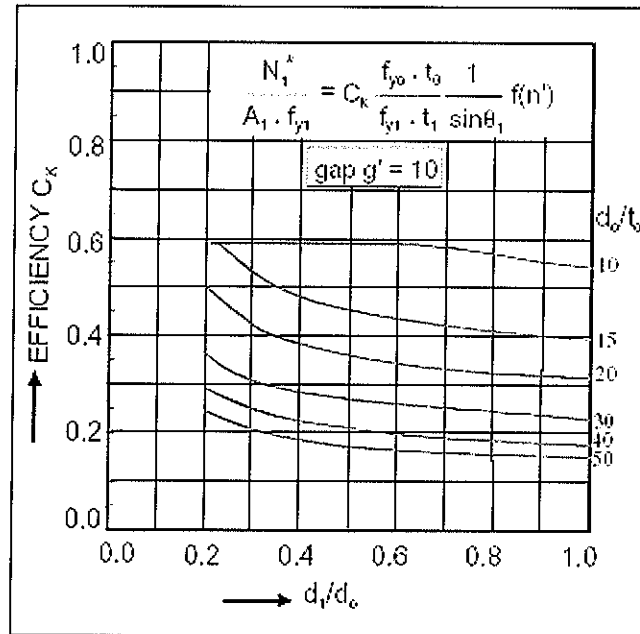
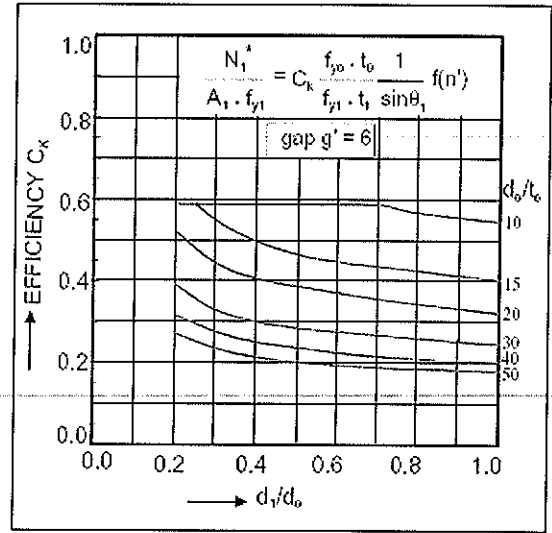
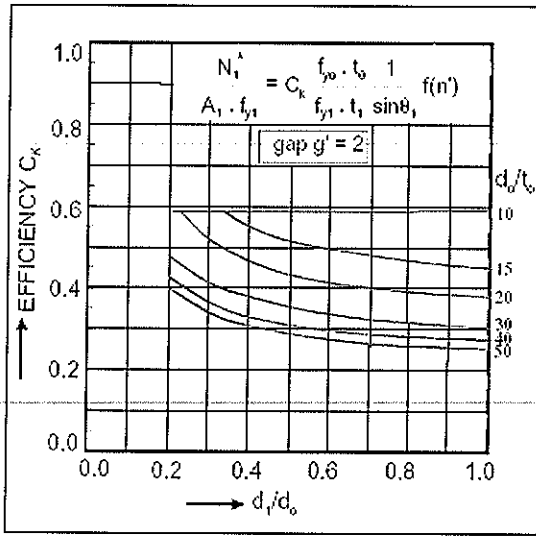
รูป ก2 ฟังก์ชัน $f(\gamma, \gamma')$ สำหรับจุดต่อ K แบบมีช่องว่าง



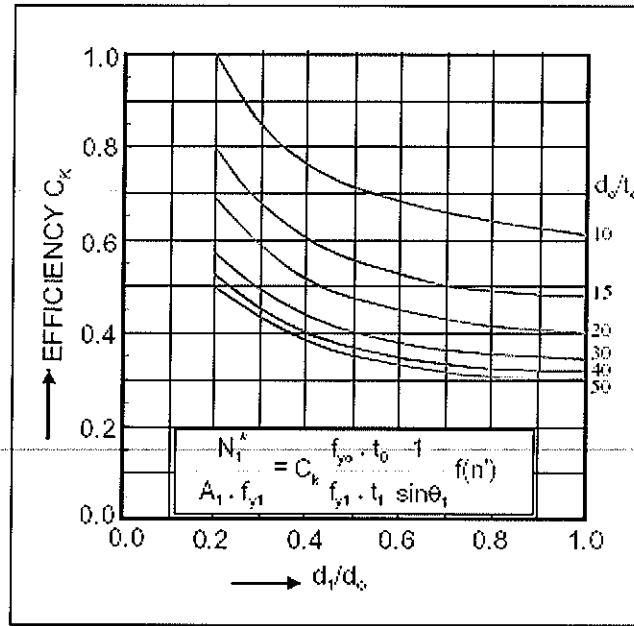
รูป n3 Design Chart สำหรับจุดต่อ T หรือ Y



รูป n4 Design Chart สำหรับจุดต่อ X



รูป ก5 Design Chart สำหรับจุดต่อ K แบบมีช่องว่าง

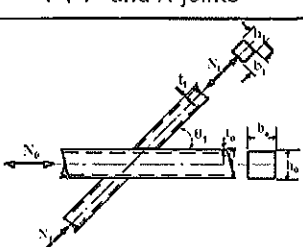
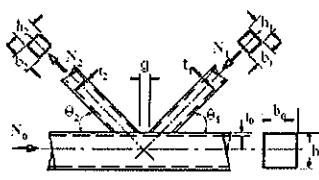
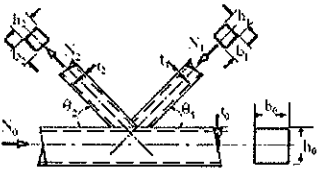


รูป ก6 Design Chart สำหรับจุดต่อ K แบบเหลื่อมกัน

ภาคผนวก ข

สมการคำนวณ และ Design Chart ของจุดต่อเหล็กหน้าตัดกลวงสี่เหลี่ยม

ภาคผนวก ข1. สมการคำนวณกำลังของจุดต่อที่ใช้ bracing หน้าตัดกลวงสี่เหลี่ยมจัตุรัสเชื่อมต่อกับ chord หน้าตัดกลวงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

type of joints	factored joint resistance (i = 1,2)
T-, Y- and X-joints	$\beta \leq 0.85$ basis: chord face yielding
	$N_i^* = \frac{f_{y0} \cdot t_0^2}{(1 - \beta) \sin \theta_1} \cdot \left[\frac{2\beta}{\sin \theta_1} + 4(1 - \beta)^{0.5} \right] \cdot f(n)$
K- and N-gap joints	$\beta \leq 1.0$ basis: chord face plastification
	$N_i^* = 8.9 \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0^2}{\sin \theta_1} \cdot \left[\frac{b_1 + b_2}{2b_0} \right] \cdot \gamma^{0.5} \cdot f(n)$ (i = 1,2)
K- and N-overlap joints ¹	$25\% \leq O_v < 50\%$ basis: effective width
	$N_i^* = f_{yi} \cdot t_i \cdot \left[\left(\frac{O_v}{50} \right) (2h_i - 4t_i) + b_e + b_{e(ov)} \right]$
	$50\% \leq O_v < 80\%$ basis: effective width
	$N_i^* = f_{yi} \cdot t_i \cdot [2h_i - 4t_i + b_e + b_{e(ov)}]$
	$O_v \geq 80\%$ basis: effective width
$N_i^* = f_{yi} \cdot t_i \cdot [2h_i - 4t_i + b_1 + b_{e(ov)}]$	
circular braces	multiply formulae by $\pi/4$ and replace $b_{1,2}$ and $h_{1,2}$ by $d_{1,2}$
	functions
$f(n) = 1.0$ for $n \geq 0$ (tension)	$f(n) = 1.3 + \frac{0.4}{\beta} \cdot n$ for $n < 0$ (compression) but ≤ 1.0
$b_e = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{yi} \cdot t_i} \cdot b_i$ $\leq b_i$	$b_{e(ov)} = \frac{10}{b_j/t_j} \cdot \frac{f_{yj} \cdot t_j}{f_{yi} \cdot t_i} \cdot b_i$ $\leq b_i$
Note ¹ : Effective width computations need only be done for the overlapping brace member. However the efficiency (the joint resistance divided by the full yield capacity of the brace member), of the overlapped brace member is not to be taken higher than that of the overlapping brace member.	

ภาคผนวก ข2. ช่วงของตัวแปรรที่สามารถใช้สมการในภาคผนวก ข2 ได้

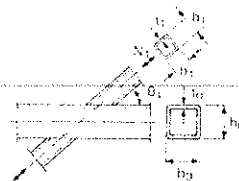
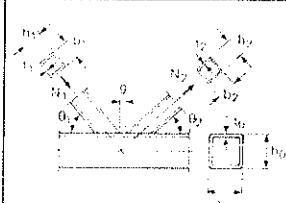
type of connection	connection parameters (i = 1 or 2, j = overlapped bracing)						
	b_i/b_0	compression b_i/t_i	tension	b_0/t_0	$\frac{(b_i + b_j)/2 b_i}{b_j/b_i \cdot t_i/t_j}$	gap/overlap	eccentricity
T, Y, X	$0.25 \leq \beta \leq 0.85^{a)}$	$\leq 1.25 \sqrt{\frac{E}{f_{yi}}}$	≤ 35	$10^{a)}$ $\leq \frac{b_0}{t_0} \leq 35$			
K, N gap	$\geq 0.1 + 0.01 \frac{b_0}{t_0}$ $\beta \geq 0.35$	≤ 35		$15^{a)}$ $\leq \frac{b_0}{t_0} \leq 35$	$b_i \geq 0.77 \frac{b_i + b_j^{c)}$ 2	$0.5 (1 - \beta) \leq \frac{g}{b_0} \leq 1.5 (1 - \beta)^{a)}$ $g \geq t_i + t_j$	$-0.55 \leq \frac{e}{h_0} \leq 0.25$
K, N overlap	≥ 0.25	$\leq 1.1 \sqrt{\frac{E}{f_{yi}}}$		$\frac{b_0}{t_0} \leq 40$	$\frac{t_i}{t_j} \leq 1.0$ $\frac{b_i}{b_j} \geq 0.75$	$25\% \leq O_v \leq 100\%$	
for circular bracings (web members)	$0.4 \leq \frac{d_i}{b_0} \leq 0.8$	$\frac{d_i}{t_i} \leq 1.5 \sqrt{\frac{E}{f_{yi}}}$	$\frac{d_2}{t_2} \leq 50$		limitations as above for $d_i = b_i$		

Note: ^{a)} Outside this range of validity other failure criteria may be governing; e.g., punching shear, effective width, side wall failure, chord shear or local buckling. If these particular limits of validity are violated the connection may still be checked as one having a rectangular chord using Table 3, provided the limits of validity in Table 3a are still met.

^{b)} $f_{yi}, f_{yj} \leq 355 \text{ N/mm}^2$, f_{yi} (or f_{yj})/ $t_0 \leq 0.8$

^{c)} If $\frac{g}{b_0} > \text{the target of } 1.5 (1 - \beta)$ and $(t_i + t_j)$, treat as a T or Y connection

ภาคผนวก ข3. สมการคำนวณกำลังของจุดต่อที่ใช้ bracing หน้าตัดกลวงสี่เหลี่ยมเชื่อมต่อกับ chord หน้าตัดกลวงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

type of connection	factored connection resistance (i = 1,2)	
T-, Y- and X-connections	$\beta \leq 0.85$	basis: chord face yielding
	$N_i^* = \frac{f_{y0} \cdot t_0^2}{(1 - \beta) \sin \theta_1} \cdot \left[\frac{2\eta}{\sin \theta_1} + 4(1 - \beta)^{0.5} \right] \cdot f(n)$	
	$\beta = 1.0$ chord side wall failure ¹	for $0.85 < \beta \leq 1.0$
	$N_i^* = \frac{f_k \cdot t_0}{\sin \theta_1} \cdot \left[\frac{2h_1}{\sin \theta_1} + 10t_0 \right]$	use linear interpolation of chord face yielding and chord side wall criteria
	$\beta > 0.85$	basis: effective width
	$N_i^* = f_{y1} \cdot t_1 \cdot [2h_1 - 4t_1 + 2b_{e1}]$	
	$0.85 \leq \beta \leq 1 - 1/\gamma$	basis: punching shear
	$N_i^* = \frac{f_{y0} \cdot t_0}{\sqrt{3} \sin \theta_1} \cdot \left[\frac{2h_1}{\sin \theta_1} + 2b_{ep} \right]$	
K- and N-gap connections		basis: chord face yielding
	$N_i^* = 8.9 \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0^2}{\sin \theta_1} \cdot \left[\frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4b_0} \right] \cdot \gamma^{0.5} \cdot f(n) \quad (i = 1,2)$	
		basis: chord shear
	$N_i^* = \frac{f_{y0} \cdot A_V}{\sqrt{3} \cdot \sin \theta_1}$	Also, $N_{0(\text{in gap})}^* \leq (A_0 - A_V) f_{y0} + A_V \cdot f_{y0} [1 - (V/V_p)^2]^{0.5}$
		basis: effective width
	$N_i^* = f_{y1} \cdot t_1 \cdot [2h_1 - 4t_1 + b_1 + b_{e1}]$	
	$\beta \leq 1 - 1/\gamma$	basis: punching shear
	$N_i^* = \frac{f_{y0} \cdot t_0}{\sqrt{3} \sin \theta_1} \cdot \left[\frac{2h_1}{\sin \theta_1} + b_1 + b_{ep} \right]$	
K- and N-overlap connections	similar to connections of square hollow sections (Table 2)	
circular bracings	multiply formulae by $\pi/4$ and replace $b_{1,2}$ and $h_{1,2}$ by $d_{1,2}$	
functions		
tension: $f_k = f_{y0}$ compression: $f_k = f_{kn}$ (T-, Y-connections) $f_k = 0.8 \sin \theta_1 \cdot f_{kn}$ (X-connections)		
f_{kn} = buckling stress according to the relevant steelwork specification, using a column slenderness ratio (KL/r) of $3.46 (h_0/t_0 - 2) (1/\sin \theta_1)^{0.5}$		
$f(n) = 1.0$ for $n \geq 0$ (tension) $f(n) = 1.3 + \frac{0.4}{\beta} \cdot n$ for $n < 0$ but ≤ 1.0 (compression)	$V_p = \frac{f_{y0} \cdot A_V}{\sqrt{3}}$	$\alpha = \left(\frac{1}{1 + \frac{4g^2}{3t_0^2}} \right)^{0.5}$
	For square and rectangular bracings, $A_V = (2h_0 + \alpha \cdot b_0) \cdot t_0$ For circular bracings, $A_V = 2h_0 \cdot t_0$	
$b_e = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{y1} \cdot t_1} \cdot b_1$ $\leq b_1$	$b_{ep} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot b_1$ $\leq b_1$	$b_{e(\text{ov})} = \frac{10}{b_1/t_1} \cdot \frac{f_{y1} \cdot t_1}{f_{y1} \cdot t_1} \cdot b_1$ $\leq b_1$
Note ¹ : For X-connections with angles $\theta < 90^\circ$, the chord side walls must be checked for shear		

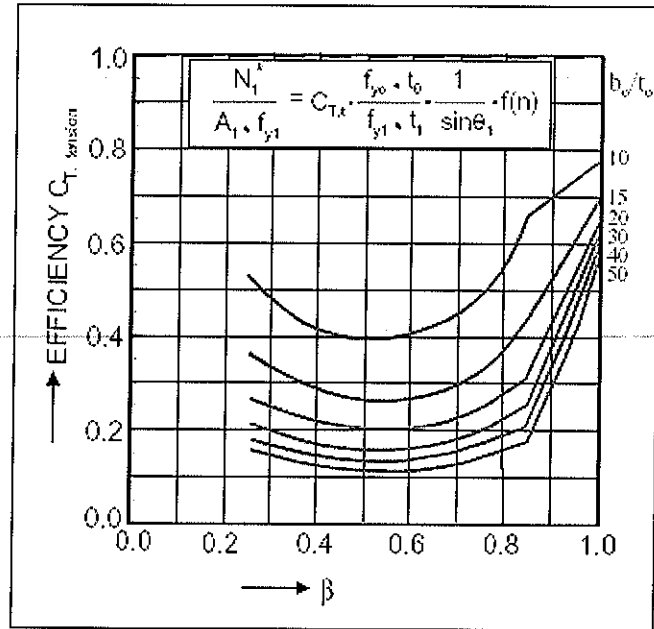
ภาคผนวก ข4. ช่วงของตัวแปรที่สามารถใช้สมการใน ภาคผนวก ข.3 ได้

type of connection	connection parameters (i = 1 or 2, j = overlapped bracing)						
	b_i/b_0 h_i/b_0	$b_i/t_i, h_i/t_i, d_i/t_i$ compression	tension	h_i/b_i	b_0/t_0 h_0/t_0	gap/overlap $b_j/b_i, t_j/t_i$	eccentricity
T, Y, X	≥ 0.25	$\leq 1.25 \sqrt{\frac{E}{f_{y1}}}$			≤ 35		
K, N gap	$\geq 0.1 + 0.01 \frac{b_0}{t_0}$ $\beta \geq 0.35$	≤ 35		$0.5 \leq \frac{h_i}{b_i} \leq 2$	≤ 35	$0.5(1 - \beta) \leq \frac{g}{b_0} \leq 1.5(1 - \beta)^{0.5}$ $g \geq t_1 + t_2$	
	≥ 0.25	$\leq 1.1 \sqrt{\frac{E}{f_{y1}}}$	≤ 35		≤ 40	$25\% \leq O_v \leq 100\%$ $\frac{t_i}{t_j} \leq 1.0, \frac{b_i}{b_j} \geq 0.75$	$-0.55 \leq \frac{e}{h_0} \leq 0.25$
for circular bracings (web members)	$0.4 \leq \frac{d_i}{b_0} \leq 0.8$	$\leq 1.5 \sqrt{\frac{E}{f_{y1}}}$	≤ 50			limitations as above for $d_i = b_i$	

Note: ^{a)} $f_y, f_{y1} \leq 355 \text{ N/mm}^2, f_{y1} \text{ (or } f_{y2})/f_{u1} \leq 0.8$

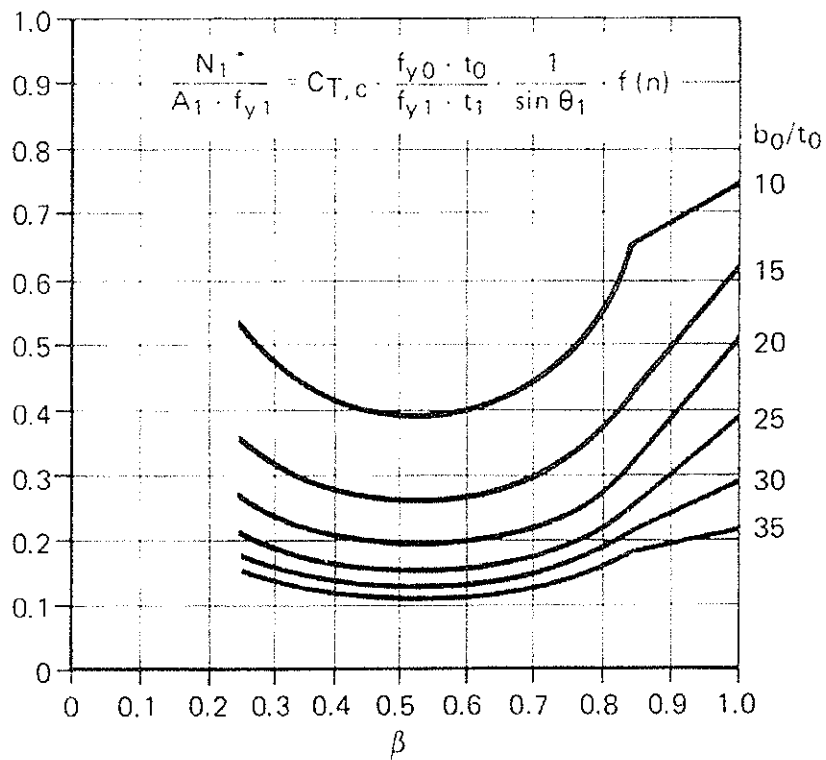
^{b)} if $\frac{g}{b_0} > \text{the larger of } 1.5(1 - \beta) \text{ and } (t_1 + t_2)$, treat as a T or Y connection

ภาคผนวก ข5. Design Chart สำหรับจุดต่อ T, Y และ X ที่มี bracing รับแรงดึง



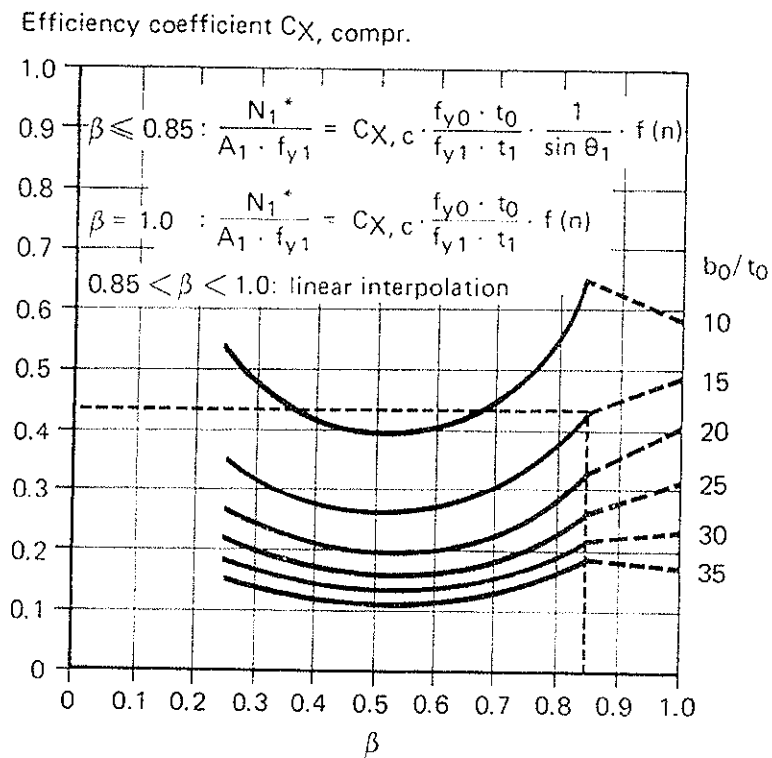
ภาคผนวก ข6. Design Chart สำหรับจุดต่อ T และ Y ที่มี bracing รับแรงอัด

Efficiency coefficient $C_{T, compr.}$



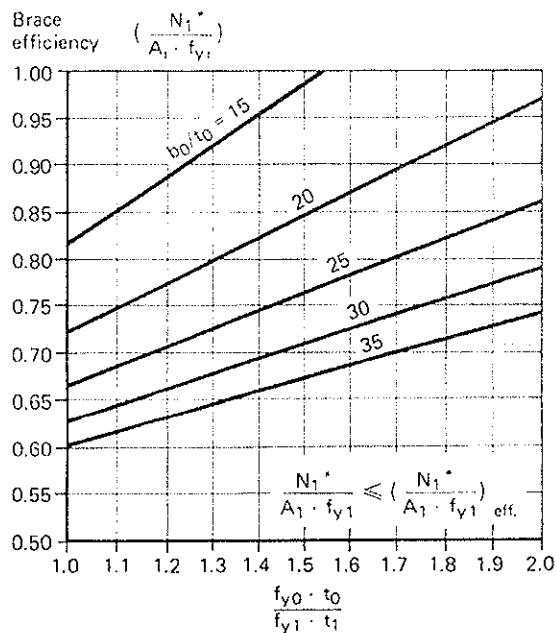
T and Y connections with bracings in compression: calculation example	
<p>connection and symbols</p> <p> $\beta = \frac{b_1}{b_0}$ $n = \frac{t_0}{t_1 \sin \theta_1}$ $N_1^* = \frac{N_0}{A_0 f_{y0}}$ </p>	<p>Assume a T connection with these members (ISO sizes): chord: $100 \times 100 \times 8.0$ ($A_0 = 2910 \text{ mm}^2$) bracings: $100 \times 100 \times 5.0$ ($A_1 = 1890 \text{ mm}^2$) $f_{y0} = f_{y1} = 355 \text{ N/mm}^2$ $\theta_1 = 90^\circ$ and $\sin \theta_1 = 1.0$ $n = -0.60$</p>
<p>ranges of validity</p> <p>$0.25 \leq \beta \leq 1.0$</p> <p>$b_0/t_0 \leq 35$</p> <p>$b_1/t_1 \leq 1.25 \sqrt{E/f_{y1}} \leq 35$ (for compression bracing)</p> <p>$f_{y1} \leq 355 \text{ N/mm}^2$</p> <p>$30^\circ \leq \theta_1 \leq 90^\circ$</p>	<p>$\beta = 100/100 = 1.0$ $f(n) = 1.0$ from Fig. 19 $b_1/t_1 = 20 < 30.4$ $b_0/t_0 = 12.5$</p> <p>$\therefore \frac{N_1^*}{A_1 f_{y1}} = 0.68 \left(\frac{8.0}{5.0} \right) (1.0)(1.0)$ $= 1.09 \dots \text{take as } 1.0$</p> <p>$\therefore N_1^* = 1.0 (1890) (0.355) = 671 \text{ kN}$</p> <p>Note: This resistance is subject to a further bracing "effective width" check, shown in Fig. 14.</p>

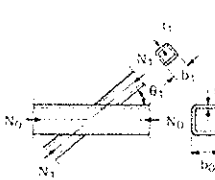
ภาคผนวก ข7. Design Chart สำหรับจุดต่อ X ที่มี bracing รับแรงอัด



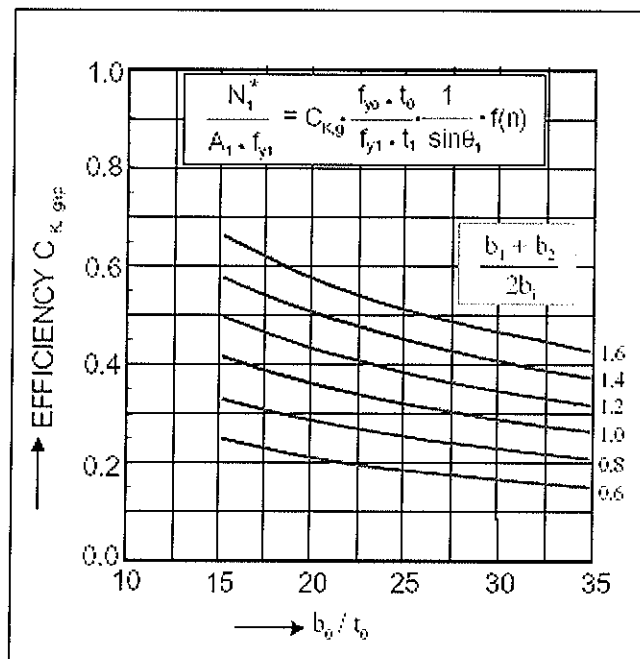
X connections with bracings in compression: calculation example	
<p>connection and symbols</p> <p> $\beta = \frac{b_1}{b_0}$ $n = \frac{t_0}{f_{y0}}$ $= \frac{N_0}{A_0 f_{y0}}$ $\gamma = \frac{b_0}{2t_0}$ </p>	<p>Assume a 30° X connection with these members (ISO sizes): chord: 150 × 150 × 10.0 ($A_0 = 5450 \text{ mm}^2$) bracings: 140 × 140 × 8.0 ($A_1 = 4130 \text{ mm}^2$) $f_{y0} = f_{y1} = 355 \text{ N/mm}^2$ $\theta_1 = 30^\circ$ and $\sin \theta_1 = 0.5$ $n = +0.38$</p>
<p>ranges of validity</p> <p> $0.25 \leq \beta \leq 1.0$ $b_0/t_0 \leq 35$ $b_1/t_1 \leq 1.25 \sqrt{E/f_{y1}} \leq 35$ (for compression bracing) $f_{y1} \leq 355 \text{ N/mm}^2$ $30^\circ \leq \theta_1 \leq 90^\circ$ </p>	<p> $\beta = 140/150 = 0.93$ $\beta > 1 - 1/\gamma$, so punching shear check not necessary $f(n) = 1.0$, as chord is in tension $b_1/t_1 = 17.5 < 30.4$ $b_0/t_0 = 15$ $\therefore \left(\frac{N_1^*}{A_1 f_{y1}} \right)_{\beta=0.85} = 0.43 \left(\frac{10.0}{8.0} \right) \left(\frac{1}{0.5} \right) (1.0) = 1.08$ \therefore take as 1.0 $\left(\frac{N_1^*}{A_1 f_{y1}} \right)_{\beta=1.0} = 0.49 \left(\frac{10.0}{8.0} \right) (1.0) = 0.61$ \therefore interpolating linearly, for $\beta = 0.93$, $\left(\frac{N_1^*}{A_1 f_{y1}} \right) = 0.79$ </p> <p>Note: This efficiency is still subject to further checks for: (I) bracing "effective width" (Fig. 14) (II) chord shear (Table 3)</p>

ภาคผนวก ข8. Design Chart สำหรับเกณฑ์ effective width ของจุดต่อ T, Y และ X ที่มี $\beta > 0.85$

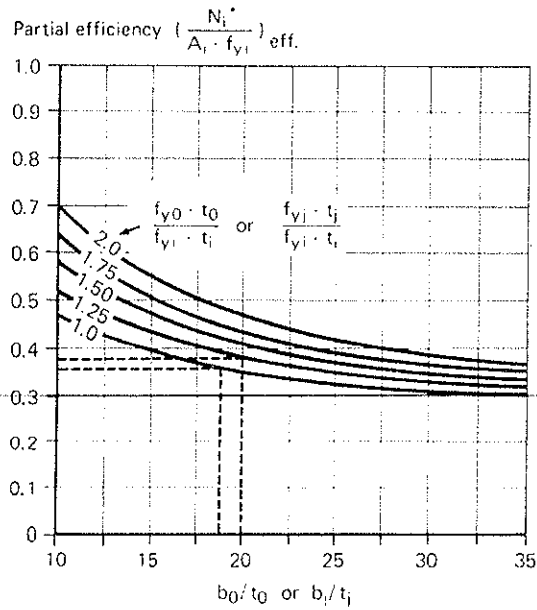


Effective width check for T, Y and X connections: calculation example	
<p>connection and symbols</p>  <p> $\beta = \frac{b_1}{b_c}$ $n = \frac{f_0}{f_{y0}} = \frac{N_0}{A_0 f_{y0}}$ </p>	<p>The T connection from Fig. 12 will be checked for bracing "effective width"</p> <p>chord: $100 \times 100 \times 8.0$ ($A_0 = 2910 \text{ mm}^2$) bracings: $100 \times 100 \times 5.0$ ($A_1 = 1890 \text{ mm}^2$)</p> <p> $f_{y0} = f_{y1} = 355 \text{ N/mm}^2$ $\theta_1 = 90^\circ$ and $\sin \theta_1 = 1.0$ </p>
<p>ranges of validity</p> <p> $0.25 \leq \beta \leq 1.0$ $b_0/t_0 \leq 35$ $b_1/t_1 \leq 35$ (for tension bracing) $b_1/t_1 \leq 1.25 \sqrt{E/f_{y1}} \leq 35$ (for compression bracing) $f_{y1} \leq 355 \text{ N/mm}^2$ $30^\circ \leq \theta_1 \leq 90^\circ$ </p>	<p> $\beta = 100/100 = 1.0$ $b_1/t_1 = 20 < 30.4$ $b_0/t_0 = 12.5$ $t_0/t_1 = 1.6$ </p> <p> $\frac{N_1^*}{A_1 f_{y1}} = 1.00$ </p> <p>This is also the bracing efficiency obtained in Fig. 12 for the chord side wall failure mode</p>

ภาคผนวก ข19. Design Chart สำหรับจุดต่อ K และ N แบบมีช่องว่าง (Gap)

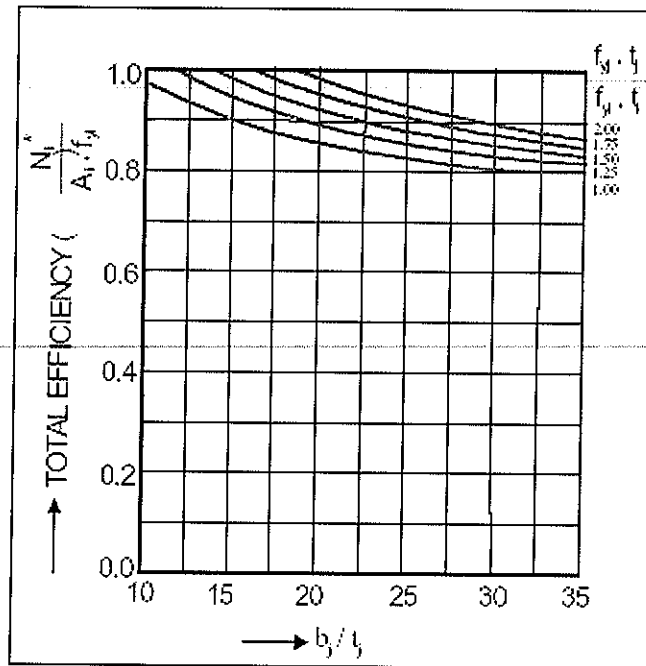


ภาคผนวก ข10. Design Chart สำหรับจุดต่อ K และ N แบบ Gap ที่มี $50\% \leq O_v \leq 80\%$



K and N overlap connections with $50\% \leq O_v < 80\%$: calculation example	
<p>connection and symbols</p>	<p>Assume a 45° K connection with these members (ISO sizes) and $f_{y1} = 355 \text{ N/mm}^2$: chord: $200 \times 200 \times 10.0$ ($A_0 = 7450 \text{ mm}^2$) compression bracing: $150 \times 150 \times 8.0$ ($A_1 = 4450 \text{ mm}^2$) (overlapped member = i) tension bracing: $140 \times 140 \times 8.0$ ($A_2 = 4130 \text{ mm}^2$) (overlapping member = i) eccentricity (e) = $0.30 h_0 = 60$</p>
<p>ranges of validity</p> <p>$b_1/b_0 \geq 0.25$ $b_1/t_1 \leq 1.1 \sqrt{E/f_{y1}}$ $b_2/t_2 \leq 35$ $b_0/t_0 \leq 40$ $t_1/t_2 \leq 1.0$ $b_1/b_2 \leq 0.75$ $50\% \leq O_v < 80\%$ $-0.55 \leq e/h_0 \leq 0.25$ $f_{y1} \leq 355 \text{ N/mm}^2$ $30^\circ \leq \theta_1 \leq 90^\circ$</p>	$g = \left(\frac{60 + 100}{\sin 45^\circ \sin 45^\circ} \right) \frac{150}{2 \sin 45^\circ} \frac{140}{2 \sin 45^\circ} \text{ (Eqn 3.1)}$ $= 125 \quad q = 125$ $O_v = \frac{q \times 100}{p} = \frac{125 \times 100}{140 \sin 45^\circ} = 63\%$ <p>$b_1/b_2 = 140/150 = 0.93$ $t_1/t_2 = 8.0/8.0 = 1.0$ $b_0/t_0 = 20, \quad b_2/t_2 = 17.5, \quad b_1/t_1 = 18.8 \leq 30.4$ $b_1/b_0 = 0.75, \quad b_2/b_0 = 0.70$</p> $\frac{N_i^*}{A_i f_{yi}} = 0.38 + 0.36 = 0.74$ <p>hence $\frac{N_i^*}{A_i f_{yi}} \leq 0.74$ (see Table 2)</p>

ภาคผนวก ข11. Design Chart สำหรับจุดต่อ K และ N แบบ Gap ที่มี $80\% \leq O_v \leq 100\%$



ภาคผนวก ข12. ฟังก์ชัน $f(n)$ สำหรับจุดต่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส แสดงผลจากความเค้นใน chord ที่มีต่อประสิทธิภาพของจุดต่อ T, Y, N, K และ N แบบ Gap

