SE-ED's TEXTBOOK

เหมาะสำหรับ นักศึกษาระดับ ปวส. ปริญญาตรี และผู้ที่สนใจทั่วไป

- หนังสือเล่มนี้เรียบเรียงตามจุดประสงค์รายวิชา สมรรถนะรายวิชาและคำอธิบายรายวิชา หลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) พุทธศักราช 2563 ของสำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ

รหัสวิชา 30100-0301 ทฤษฎีโครงสร้าง

ทฤษฎีโครงสร้าง

Theory of Structures

เอกชัย รัตนโน

ซีเอ็ด

ทฤษฎีโครงสร้าง

โดย เอกชัย รัตนโน

สงวนลิขสิทธิ์ตามกฎหมาย โดย เอกชัย รัตนโน © พ.ศ. 2566
ห้ามคัดลอก ลอกเลียน ดัดแปลง ทำซ้ำ จัดพิมพ์ หรือกระทำอื่นใด โดยวิธีการใดๆ ในรูปแบบใดๆ
ไม่ว่าส่วนหนึ่งส่วนใดของหนังสือเล่มนี้ เพื่อเผยแพร่ในสื่อทุกประเภท หรือเพื่อวัตถุประสงค์ใดๆ
นอกจากจะได้รับอนุญาต

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ

เอกชัย รัตนโน.

ทฤษฎีโครงสร้าง. -- กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2566.
456 หน้า.
1. วิศวกรรมโครงสร้าง. 2. การวิเคราะห์โครงสร้าง (วิศวกรรมศาสตร์).
I. ชื่อเรื่อง.

624.17

Barcode (e-book) : 9786160851089

จัดพิมพ์และจัดจำหน่ายโดย

บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน)
SE-EDUCATION PUBLIC COMPANY LIMITED

เลขที่ 1858/87-90 ถนนบางนา-ตราด แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260
โทรศัพท์ 0-2826-8000

[หากมีคำแนะนำหรือติชม สามารถติดต่อได้ที่ comment@se-ed.com]

30100-0301 ทฤษฎีโครงสร้าง 3 - 0 – 3
(Theory of Structures)

จุดประสงค์รายวิชา เพื่อให้

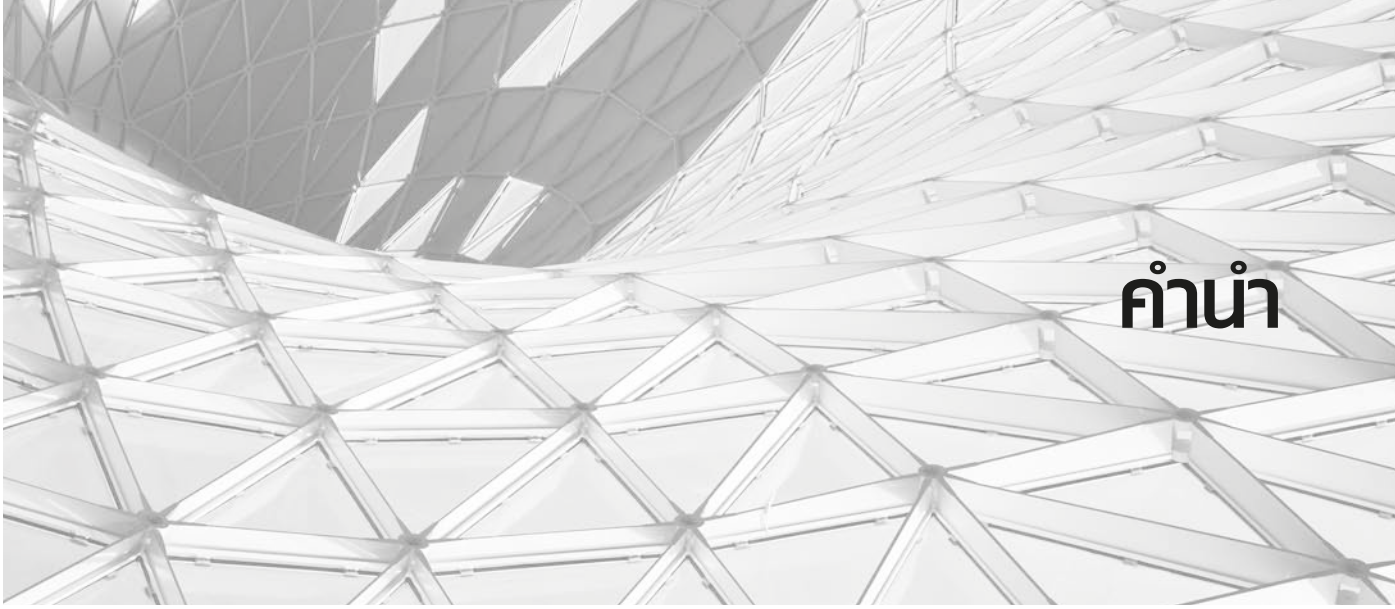
1. เข้าใจวิธีการหาแรงในโครงสร้าง
2. สามารถคำนวณแรงปฏิกิริยา แรงเฉือน โมเมนต์ดัด เส้นอิทธิพล การโก่งตัวของคาน แรงในชิ้นส่วนของโครงข้อหมุน และคานต่อเนื่อง
3. มีกิจนิสัยในการทำงานที่ดี สนใจใฝ่รู้ ทำงานด้วยความรอบคอบ และมีความรับผิดชอบ

สมรรถนะรายวิชา

1. แสดงความรู้เกี่ยวกับหลักการวิเคราะห์แรงภายในโครงสร้าง
2. คำนวณแรงปฏิกิริยาและแรงภายในโครงสร้าง
3. เขียนเส้นอิทธิพลในคานและโครงข้อหมุน
4. คำนวณค่าการโก่งตัวของคาน

คำอธิบายรายวิชา

ศึกษาเกี่ยวกับความรู้เบื้องต้นที่เกี่ยวกับโครงสร้าง แรงปฏิกิริยา แรงเฉือน และโมเมนต์ดัด แรงภายในชิ้นส่วนของโครงข้อหมุน เส้นอิทธิพลในคานและโครงข้อหมุน การโก่งตัวของคานโดยวิธีพื้นที่โมเมนต์และคานเสมือน การวิเคราะห์คานต่อเนื่องโดยวิธีสมการสามโมเมนต์



คำนำ

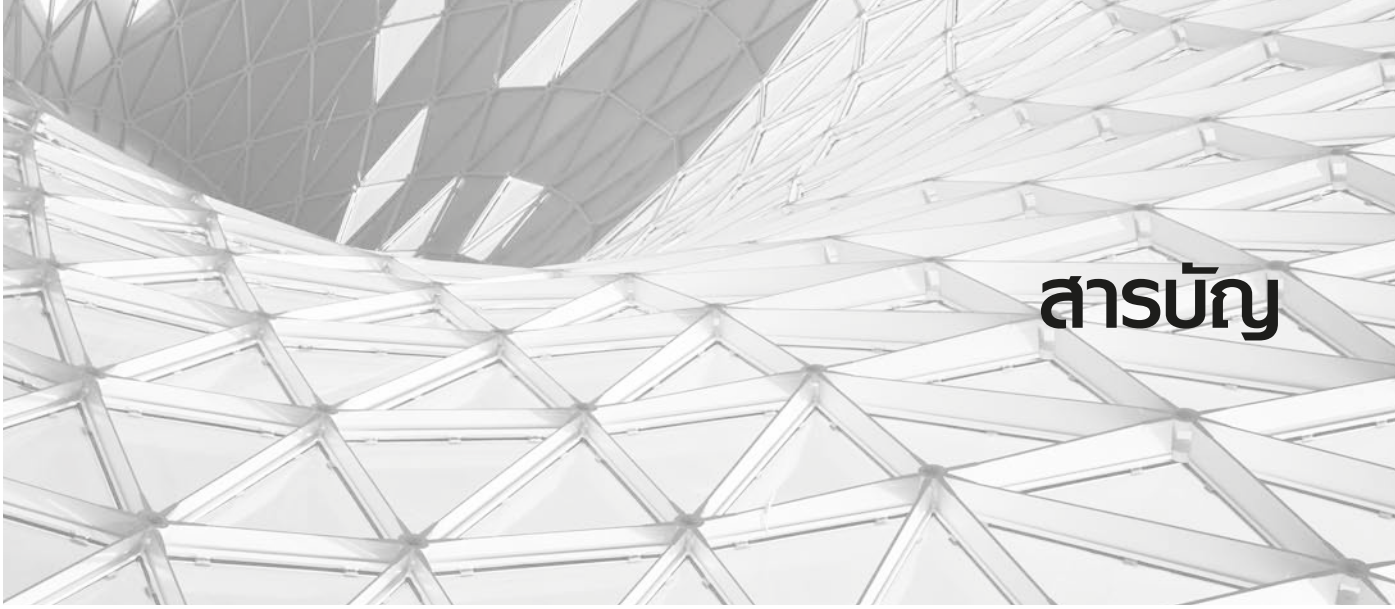
วิชา **ทฤษฎีโครงสร้าง (Theory of Structures)** เป็นวิชาเรียนในระดับ ปวส. ซึ่งอยู่ในหมวดวิชาทักษะวิชาชีพ กลุ่มทักษะวิชาชีพพื้นฐาน **รหัสวิชา 30100-0301** ในสาขา ช่างก่อสร้าง เทคนิคสถาปัตยกรรม สำรวจ และโยธา โดยเนื้อหาศึกษาเกี่ยวกับความรู้เบื้องต้นที่เกี่ยวกับโครงสร้าง แรงปฏิกิริยา แรงเฉือน และโมเมนต์ดัด แรงภายใน ชิ้นส่วนของโครงข้อหมุน เส้นอินฟลูเอ็นซไลน์ในคานและโครงข้อหมุน การโก่งตัวของคานโดยวิธีพื้นที่โมเมนต์และคานเสมือน และการวิเคราะห์คานต่อเนื่องโดยวิธีสมการสามโมเมนต์ นอกจากนี้ ผู้เขียนยังได้เพิ่มเติมเนื้อหา เช่น การหาน้ำหนักบรรทุกบนโครงสร้าง โครงข้อหมุน 3 มิติ การหาการโก่งตัวโดยวิธีอินทิเกรต 2 ชั้น และเคเบิล เป็นต้น เพื่อให้หนังสือเล่มนี้ใช้เป็นพื้นฐานในการเรียนได้ถึงระดับปริญญาตรี ในสาขาวิศวกรรมโยธา และวิศวกรรมอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

หนังสือเล่มนี้ ผู้เขียนใช้ความวิริยะอุตสาหะในการเขียนทั้งข้อความ การอธิบายให้เข้าใจได้ง่าย และการเขียนรูปภาพประกอบการคำนวณไว้มาก และแสดงตัวอย่างที่คลอบคลุมเนื้อหา อีกทั้งได้ออกแบบการเรียนรู้คือ จัดทำแบบฝึกหัดท้ายบทเรียนเพื่อฝึกให้นักศึกษาคำนวณและเติมคำตอบลงในช่องว่าง เพื่อให้นักศึกษาเกิดทักษะในการคำนวณเป็นขั้นตอน จากนั้นจะให้ทำแบบฝึกหัดด้วยตนเอง โดยจะมีเฉลยคำตอบไว้ท้ายเล่มทุกข้อ เพื่อให้นักศึกษาสามารถตรวจคำตอบได้

การจัดทำหนังสือเล่มนี้ หากเกิดข้อบกพร่องประการใด ผู้เขียนขอน้อมรับไว้ และยินดีรับคำแนะนำติชมจากท่านผู้อ่านทุกท่าน เพื่อที่จะได้นำมาปรับปรุงแก้ไขในการจัดพิมพ์ครั้งต่อไป

เอกชัย รัตนโน

เพจ Aekrachai Book



สารบัญ

บทที่ 1 โครงสร้าง 11

1.1 วิวัฒนาการโครงสร้าง 11
1.2 ประเภทของโครงสร้าง 14
1.3 จุดรองรับ 20
1.4 แบบจำลองในการวิเคราะห์โครงสร้าง 25
1.5 ดีเทอร์มิเนตและความมั่นคงของโครงสร้าง 28
สรุป 36
แบบฝึกหัด 38

บทที่ 2 น้ำหนักบรรทุกกระทำบนโครงสร้าง 49

2.1 น้ำหนักบรรทุกคงที่ 50
2.2 น้ำหนักบรรทุกจร 56
2.3 แรงลม 57
2.4 น้ำหนักบรรทุกกระแทก 58
2.5 แรงแผ่นดินไหว 58
2.6 แรงดันน้ำและดิน 58
2.7 การรวมน้ำหนักบรรทุก 59
สรุป 69
แบบฝึกหัด 70

บทที่ 3 แรงปฏิกิริยา 81

3.1 สมการสมดุลสถิตยศาสตร์ 81
3.2 คานอย่างง่าย 82
3.3 แรงกระทำแบบกระจายเพิ่มขึ้นหรือลดลงไม่สม่ำเสมอ 93
3.4 คานที่มีสมการเงื่อนไข 98
3.5 โครงข้อแข็งและโครงข้อหมุน 102
สรุป 110
แบบฝึกหัด 112

บทที่ 4 โครงข้อหมุน 131

4.1 โครงข้อหมุน 131
4.2 การวิเคราะห์โครงข้อหมุน 133
4.3 วิธีจุดต่อ 134
4.4 แรงในชิ้นส่วนเป็นศูนย์ 141
4.5 วิธีภาคตัด 154
4.6 การวิเคราะห์โครงข้อหมุนแบบผสม 162
4.7 โครงข้อหมุน 3 มิติ 166
สรุป 172
แบบฝึกหัด 174

บทที่ 5 แรงเฉือนและโมเมนต์ดัด 193

5.1 การคิดเครื่องหมาย 194
5.2 สมการแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด 195
5.3 แผนภาพแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด 199
5.4 ความสัมพันธ์ของแรงภายในคานและน้ำหนักบรรทุก 209
5.5 แรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูงสุด 213
5.6 เส้นโค้งอิลาสติกแสดงการโก่งตัว 220
สรุป 234
แบบฝึกหัด 236

บทที่ 6 การโก่งตัวของคานโดยวิธีเรขาคณิต 255

6.1 วิธีอินทิเกรตสองครั้ง 257
6.2 วิธีพื้นที่โมเมนต์ 264
6.3 วิธีคานคอนจูเกต 280
สรุป 287
แบบฝึกหัด 290

บทที่ 7 สมการสามโมเมนต์ 305

7.1 สมการสามโมเมนต์ 305
สรุป 318
แบบฝึกหัด 320

บทที่ 8 อินฟลูเอ็นซไลน์ 327

8.1 อินฟลูเอ็นซไลน์ของคานและโครงข้อแข็งโดยใช้วิธีสมการสมดุล 327
8.2 หลักการของมุลเลอร์-เบรสเลา (Muller-Breslau's Principle) 353
8.3 อินฟลูเอ็นซไลน์ของคานหลักที่รองรับระบบพื้น 360
8.4 อินฟลูเอ็นซไลน์ของโครงข้อหมุน 377
8.5 ค่าสูงสุดของแผนภาพเส้นอินฟลูเอ็นซไลน์ที่เกิดจากแรงกระทำแบบชุดน้ำหนักแบบจุด 385
สรุป 398
แบบฝึกหัด 399

บทที่ 9 เคเบิล 423

9.1 เคเบิลรับน้ำหนักบรรทุกแบบจุด 423
9.2 เคเบิลรับน้ำหนักบรรทุกแบบกระจายสม่ำเสมอ 428
สรุป 431
แบบฝึกหัด 432
เฉลยแบบฝึกหัด 438

บรรณานุกรม 451

1 โครงสร้าง (Structural)

โครงสร้างในทางวิศวกรรมโยธาคือ องค์ประกอบของชิ้นส่วนหรือองค์อาคารต่างๆ ประกอบเข้าด้วยกันเป็นรูปทรงและเกิดพื้นที่อาณาบริเวณขึ้น เพื่อใช้ประโยชน์อย่างใดอย่างหนึ่งของมนุษย์ เช่น โครงสร้างบ้านพักอาศัย คือโครงสร้างที่ประกอบด้วยชิ้นส่วน คาน เสา พื้น โครงหลังคา ตอม่อ ฐานราก และอาจจะมีบันไดหรือไม่มี ซึ่งทั้งหมดจะประกอบเข้าด้วยกัน โครงสร้างบางอย่างอาจไม่ต้องการอาณาบริเวณหรือพื้นที่ใช้สอย เช่น เขื่อนกักเก็บน้ำ จะประกอบด้วย ฐานราก ผนังคอนกรีต หรือผนังคอนกรีตแกนดินเหนียว หรืออื่นๆ เพื่อวัตถุประสงค์ใช้ในการกั้นขวางลำน้ำ หรือต้านทานแรงดันน้ำ

การเรียนรู้ศาสตร์ทางด้านโครงสร้าง จะต้องมีความเข้าใจถึงเรื่องของวิวัฒนาการโครงสร้าง (Evolution Structures) ประเภทของโครงสร้าง (Classification of Structures) จุดรองรับ (Support) แบบจำลองในการวิเคราะห์โครงสร้าง (Structures Analytical Models) และดีเทอร์มิเนต (Determinate) และความมั่นคงของโครงสร้าง ซึ่งเนื้อหาทั้งหมดนี้จะอยู่ในบทที่ 1 พร้อมรูปประกอบ และมีแบบฝึกหัดให้นักศึกษาได้ลองหัดทำเพื่อเกิดทักษะเบื้องต้นในการคำนวณด้านโครงสร้าง

1.1 วิวัฒนาการโครงสร้าง (Evolution Structures)

ได้มีการสันนิษฐานกันว่ามนุษย์น่าจะรู้จักการสร้างที่อยู่อาศัยเมื่อประมาณ 10,000 ปีที่ผ่านมา ซึ่งก่อนหน้านั้นมนุษย์ได้อาศัยอยู่ตามถ้ำและป่าเขา เมื่อได้รู้จักการทำเกษตรกรรมและการเลี้ยงสัตว์ มนุษย์จึงเริ่มทำการสร้างที่พักอาศัยขึ้นใกล้กับที่ทำกินของตัวเอง เริ่มจากการทำกระโจมโดยใช้หนังสัตว์มาขึงแล้วใช้เสาตั้งตรงกลาง และนี่คือปฐมบทของวิวัฒนาการโครงสร้าง (Evolution Structures)

ต่อมามนุษย์เริ่มอยู่ร่วมกันเป็นสังคม มีจำนวนคนที่มากขึ้น มีผู้นำ มีความเชื่อต่างๆ เกิดขึ้น จุดนี้เองที่โครงสร้างได้มีวิวัฒนาการจากโครงสร้างเล็กๆ ที่ไม่ซับซ้อน มีพื้นที่ใช้สอยไม่มาก สู่โครงสร้างที่ใหญ่โตขึ้น เพื่อใช้เป็นศูนย์รวมจิตใจ ใช้เป็นที่กราบไหว้เคารพบูชาสิ่งศักดิ์สิทธิ์ ในการก่อสร้างมนุษย์ค่อยๆ ใช้วิธีการปฏิบัติคือ การลองผิดลองถูก สร้างสิ่งก่อสร้างที่ใหญ่โตขึ้นเรื่อยๆ มีไม่น้อยที่สิ่งก่อสร้างเหล่านั้นต้องพังทลายลงไปเพื่อให้ได้มาซึ่งทฤษฎีและขอบเขตในการก่อสร้างแบบใหม่ ทั้งนี้วัสดุที่นำมาก่อสร้างส่วนใหญ่จะหามาจากธรรมชาติและใช้แรงงานคน ซึ่งก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ขอบเขตในการก่อสร้างยังมีข้อจำกัดอยู่ ตัวอย่างการก่อสร้างในอดีตกาลซึ่งได้รับการยกย่องให้เป็นหนึ่งในเจ็ดสิ่งมหัศจรรย์ของโลก เช่น ในราว 2,600 ปีก่อนคริสตกาลหรือกว่า 4,600 ปี มาแล้ว ชาวอียิปต์ได้ก่อสร้างพีระมิดคีออปส์หรือพีระมิดคูฟูรูปทรงสามเหลี่ยม หรือที่นิยมเรียกกันโดยทั่วไปว่า มหาพีระมิดแห่งกีซา มีความสูงถึง 147 เมตร จัดว่าเป็นสิ่งก่อสร้างทางประวัติศาสตร์ที่มีความเก่าแก่และมีขนาดใหญ่มากที่สุด และเมื่อประมาณ 200 ปีก่อนคริสตศักราช ชาวโรมันได้ก่อสร้างโคลิเซียม (Coliseum) หรือทวิอัฒจันทร์ฟลาเวียน (Flavian Amphitheatre) ซึ่งเป็นสนามกีฬากลางแจ้งขนาดใหญ่ตั้งอยู่ใจกลางกรุงโรม โดยอัฒจันทร์เป็นรูปวงกลมก่อด้วยอิฐและหินทรายวัดโดยรอบได้ประมาณ 527 เมตร สูง 57 เมตร สามารถจุผู้ชมได้ประมาณ 50,000 คน

ในเอเชียก็มีสิ่งก่อสร้างขนาดใหญ่เกิดขึ้นเช่นเดียวกัน ได้แก่ นครวัด (Angkor Wat) สร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นศาสนสถาน ตั้งอยู่ในเมืองพระนคร จังหวัดเสียมราฐ ประเทศกัมพูชา โดยสร้างในรัชสมัยพระเจ้าสุริยวรมันที่ 2 ผู้ครองอาณาจักรขอมช่วงปี ค.ศ. 1113-1150 ตัวประสาทก่อสร้างด้วยหินทรายหินดินดาน หรือศิลาแลงมาวางซ้อนทับกันเป็นโครงสร้าง มีขนาดพื้นที่และบริเวณโดยรอบกว่า 200,000 ตารางเมตร เป็นต้น

รูปที่ 1.1 นครวัด

ที่มา : www.google.co.th/search=Angkor+Wat&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwi_5KfK9LrWAhXFs48KHYIVDsQQ_ AUICigB&biw=1366&bih=662#imgrc=gqzRFCdk6p-gQM:

ในระยะเวลาต่อมาได้มีนักวิจัยและนักวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ได้ค้นคว้าทฤษฎีทางคณิตศาสตร์และฟิสิกส์ขึ้นหลายอย่าง เมื่อนำทฤษฎีเหล่านั้นมาใช้วิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างและพัฒนาวัสดุที่นำมาก่อสร้าง ส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่สลับซับซ้อน ตอบสนองความต้องการของมนุษย์ได้มากขึ้น เช่น ในปี ค.ศ. 1564-1642 กาลิเรโอ กาลิเลอี (Galileo Galilei) นักวิทยาศาสตร์ชาวอิตาลี ได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของวัตถุที่มีความเร่งคงที่ ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญของวิชาฟิสิกส์ในเรื่องจลนศาสตร์ อีกทั้งยังเสนอแนวคิดการคาดการณ์ความแข็งแรงของคานยื่นโดยประมาณ แม้ว่าการทดลองแนวคิดที่ได้อาจล้มเหลวแต่ก็ถือว่าเป็นรากฐานเพื่อใช้เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างในอนาคตต่อไป

ปี ค.ศ. 1641-1725 เซอร์ไอแซก นิวตัน (Sir Isaac Newton) นักฟิสิกส์และนักคณิตศาสตร์ได้เขียนหนังสือเรื่อง *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* มีเนื้อหาเกี่ยวกับกฎแรงโน้มถ่วงสากล และกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน (Laws of Motion) ซึ่งถือเป็นรากฐานทางวิทยาศาสตร์-ฟิสิกส์

ปี ค.ศ. 1635-1703 โรเบิร์ต ฮุค (Robert Hooke) ได้ศึกษาเกี่ยวกับค่าความสัมพันธ์ของสมการเชิงเส้นระหว่าง แรงและการเสียรูปของวัสดุ โดยกฎของเขาชื่อว่า กฎของฮุค (Hooke's Law)

ปี ค.ศ. 1707-1783 เลออนฮาร์ด ออยเลอร์ (Leonhard Euler) นักคณิตศาสตร์-ฟิสิกส์ ชาวสวิส ได้พัฒนาการออกแบบโครงสร้างโดยใช้วิธีเดาค่า (Trial and Error) ผลงานอันเป็นที่ยอมรับในหมู่วิศวกรรมโครงสร้างอย่างสูงได้แก่ ทฤษฎีการโก่งเดาะของเสา (Theory of Buckling of Column) ซึ่งถือเป็นศาสตร์ด้านกลศาสตร์ (Mechanics) และนำมาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง เป็นต้น

ยังมีนักวิทยาศาสตร์และนักฟิสิกส์ท่านอื่นๆ อีกมากที่ได้นำเสนอวิธีต่างๆ เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง เช่น จอห์น แบร์นูลลี (John Bernoulli) ได้เสนอหลักการของงานเสมือน (Principle of Virtual), ชาร์ล-ออกุสแต็ง เดอ คูลลอมบ์ (Charles-Augustin de Coulomb) ได้เสนอการวิเคราะห์การดัดตัวของคานในช่วงยืดหยุ่น และคลาปิรอง (Clapeyron) ได้เสนอสูตรสมการสามโมเมนต์ (Three-Moment Equation) ใช้ในการวิเคราะห์คานต่อเนื่อง

ปัจจุบันคอมพิวเตอร์และโปรแกรมสำเร็จรูปได้ถูกนำมาใช้ช่วยในการวิเคราะห์ผลแทนการคำนวณด้วยมือ แต่ผลการคำนวณที่ได้จากคอมพิวเตอร์จะต้องออกมาสอดคล้องกับความเป็นจริง ซึ่งวิศวกรโยธาที่มีประสบการณ์เท่านั้นจึงจะสามารถใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณได้ ประกอบกับการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่มีการวิจัยอย่างต่อเนื่อง ทำให้โครงสร้างสมัยใหม่มีขอบเขตในการก่อสร้างน้อยมาก เช่น สะพานชิงเต่าไฮ่วาน (Qingdao Haiwan Bridge) ที่สร้างขึ้นในประเทศจีน ทอดผ่านอ่าวเจียวโจวทางชายฝั่งตอนใต้ของคาบสมุทรซานตง ตัวสะพานมีความยาว 42.5 กิโลเมตร มีความกว้าง 35 เมตร แบ่งเป็น 8 ช่องทางวิ่ง สะพานนี้มีเสารองรับถึง 5,000 ต้น ใช้คอนกรีตกว่า 2.3 ล้านลูกบาศก์เมตร ใช้เหล็กมากถึง 450,000 ตัน สามารถรองรับแรงจากแผ่นดินไหวขนาด 8 แมกนิจูดได้ ถือเป็นสะพานข้ามทะเลที่ยาวที่สุดแห่งหนึ่งของโลก และในตะวันออกกลางอาคาร

บุรจญ์เคาะลีฟะฮ์ (Burj Khalifa Building) หรือหอคอยดูไบ ในประเทศสหรัฐอาหรับเอมิเรตส์ เป็นตึกที่มีความสูงประมาณ 828 เมตร มีจำนวน 163 ชั้น ซึ่งกลายมาเป็นตึกที่มีความสูงที่สุดในโลกอีกแห่งหนึ่ง

รูปที่ 1.2 ตึกบุรจญ์เคาะลีฟะฮ์
ที่มา : https://th.wikipedia.org/wiki/%บุรจญ์เคาะลีฟะฮ์

1.2 ประเภทของโครงสร้าง (Classification of Structures)

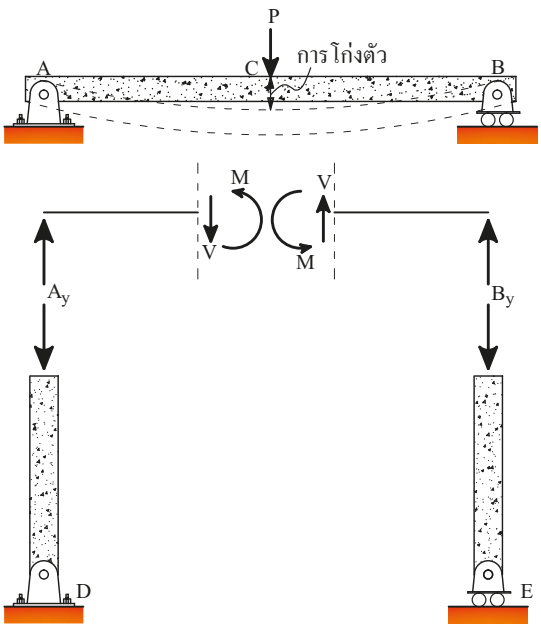
โครงสร้าง (Structures) จะประกอบขึ้นด้วยชิ้นส่วน (Elements) ต่างๆ ประกอบเข้าด้วยกันหรือยึดโยงกันอยู่ในตำแหน่งต่างๆ ในลักษณะ 3 มิติ โดยโครงสร้างจะทำหน้าที่เป็นตัวถ่ายน้ำหนักแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้งาน ตลอดจนการรับน้ำหนักกระทำต่างๆ เพื่อการตั้งอยู่ของตัวโครงสร้างเอง แล้วถ่ายน้ำหนักต่างๆ เหล่านั้นลงสู่พื้นดิน โดยประเภทโครงสร้างสามารถแบ่งได้ดังนี้

1.2.1 คานและเสา (Beam and Columns)

คานและเสา (Beam and Columns) เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยโครงสร้างตามแนวราบคือ คาน และโครงสร้างตามแนวดิ่งคือ เสา ส่วนใหญ่ใช้จำลองโครงสร้างที่ไม่รับแรงมากและไม่คิดผลของแรงกระทำด้านข้าง เช่น บ้านพักอาศัย บ้านแฝด และอาคารพาณิชย์ความสูงไม่เกิน 4 ชั้น เป็นต้น

รูปที่ 1.3 โครงสร้าง คาน และเสา (Beam and Columns Structures)

คาน (Beam) จะรับน้ำหนักตามแนวขวางทำให้เกิดการดัด (Flexural) ตัวขึ้น รูปภายนอกจะเกิดการโก่งตัวด้วย เมื่อพิจารณาที่หน้าตัดใดๆ ของคานจะพบว่ามีแรงภายในเกิดขึ้นคือ แรงเฉือน โมเมนต์ดัด นอกจากนั้นถ้าพิจารณาในช่วงพฤติกรรมอีลาสติกที่หน้าตัดคานใดๆ จะเกิดความเค้นดัดสูงสุดที่ขอบผิวคานด้านรับแรงอัด และเช่นกัน ความเค้นดึงสูงสุดก็จะเกิดขึ้นตรงที่ขอบผิวคานด้านรับแรงดึง



รูปที่ 1.4 แสดงแนวคิดโครงสร้างคานและเสา (Beam and Columns Structures)

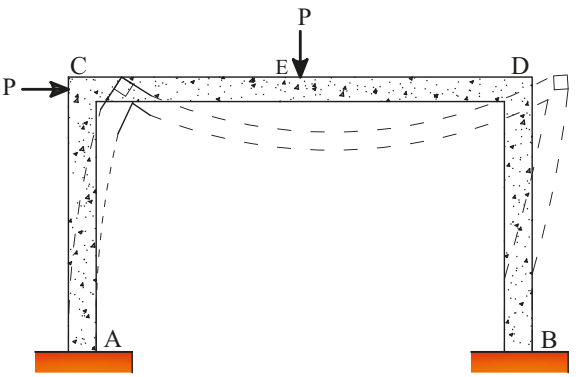
เสา (Columns) จะรับน้ำหนักทางแนวแกน ซึ่งโครงสร้างแบบนี้จะถือว่าเสาเกิดการวิบัติแบบถูกบีบอัดจนแตก (Crushing) นั่นหมายถึงเสานี้จะมีค่าอัตราส่วนความชะลูดน้อยๆ เรียกอีกอย่างว่า เสาสั้น

การถ่ายเทแรงจะเกิดจากคานรับน้ำหนักจากพื้นและถ่ายแรงลงหัวเสา ซึ่งปลายทั้งสองข้างของคานจะวางลงบนเสา ทำให้เสารับน้ำหนักตามแนวแกน ซึ่งเสาที่ใช้ได้จะต้องมีค่าความชะลูดไม่เกินค่าที่กำหนด จากนั้นน้ำหนักจากเสาก็จะถูกถ่ายแรงลงสู่ดิน การที่จะนำโครงสร้าง คาน และเสา (Beam and Columns Structures) ไปใช้งานจะต้องใช้โครงสร้างนี้หลายๆ ชุด เพื่อประกอบกัน ทำให้เกิดเป็นบริเวณพื้นที่ใช้สอยขึ้น

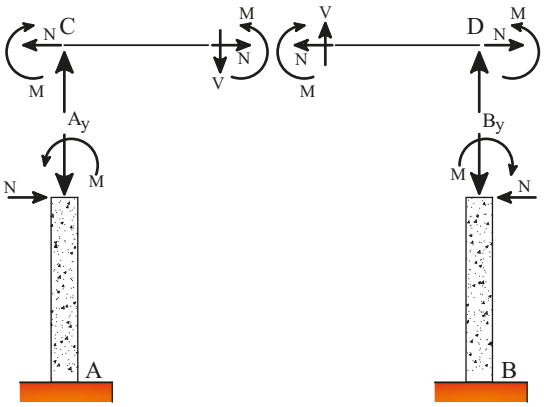
1.2.2 โครงข้อแข็ง (Frames)

โครงข้อแข็ง (Frames) เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยโครงสร้างตามแนวราบและแนวดิ่งคือ คานกับเสาหรือแผ่นพื้นกับเสา โครงข้อแข็งที่ปลายคานต่อกับเสาจะเป็นการยึดต่อเสมือนเป็นชิ้นส่วนเดียวกัน ทำให้จุดต่อนี้มีสภาวะแข็งแกร่ง (Rigid Joints) จึงทำให้ระบบโครงสร้างแบบนี้สามารถรับแรงในแนวนอนหรือแรงกระทำด้านข้างได้

รูปที่ 1.5 โครงข้อแข็ง (Frames)



รูปที่ 1.6 แสดงแนวคิดโครงข้อแข็ง (Frames)



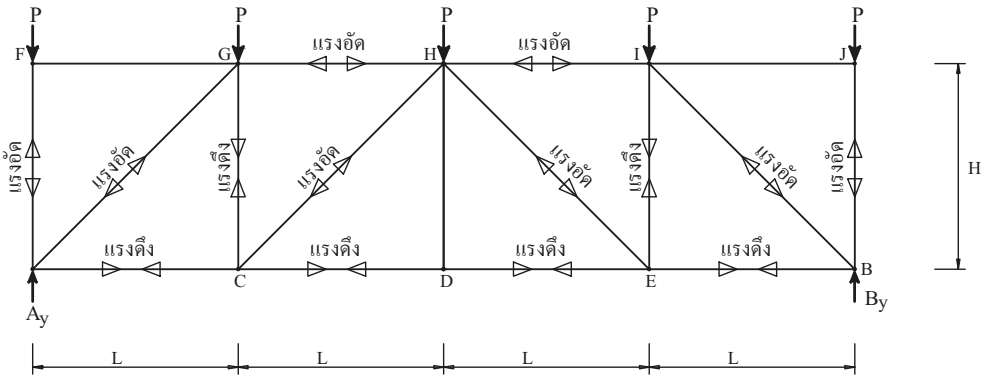
รูปที่ 1.7 การถ่ายแรงของโครงข้อแข็ง (Frames)

การรับแรงในโครงข้อแข็งนี้ ชิ้นส่วนคานจะรับแรงกระทำตามแนวขวาง ซึ่งจะเกิดแรงภายในขึ้นคือ แรงตามแนวแกน แรงเฉือน และโมเมนต์ดัด ซึ่งแรงทั้งหมดจะถูกถ่ายลงสู่เสา ทำให้โครงสร้างแบบโครงข้อแข็งนี้ เสาจะรับทั้งแรงแนวแกนและโมเมนต์ดัด เรียกว่า คาน-เสา (Beam-Column) ซึ่งการวิบัติของเสาจะเกิดจากการโก่งเดาะ (Flexural Buckling) คือเสาเกิดการโก่งโค้งตัวเนื่องจากการรับโมเมนต์ดัดร่วมกับแรงตามแนวแกน ส่วนการนำไปใช้งานจะต้องนำโครงข้อแข็งหลายๆ ชุดประกอบเข้าด้วยกัน เพื่อให้เกิดบริเวณพื้นที่ใช้สอยขึ้นเช่นกัน

1.2.3 โครงข้อหมุน (Trusses)

โครงข้อหมุน (Trusses) เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนที่เป็นท่อนหรือแท่งตรงมายึดต่อกันเป็นรูปสามเหลี่ยม โครงสร้างแบบนี้จะถ่ายเทแรงกันระหว่างชิ้นส่วน ทำให้สามารถทำเป็นโครงสร้างที่มีช่วงความยาวได้มาก ตัวโครงข้อหมุนเมื่อรับน้ำหนักก็จะเกิดการโก่งตัวเช่นเดียวกับคาน แต่ชิ้นส่วนจะถูกสมมติฐานให้รับเฉพาะแรงดึง (Tension Force) หรือแรงอัด (Compression Force) เท่านั้น โครงสร้างประเภทนี้จะถูกใช้ทำเป็นโครงหลังคาและสะพานเป็นส่วนใหญ่

รูปที่ 1.8 โครงข้อหมุน (Truss)



รูปที่ 1.9 การถ่ายแรงภายในโครงข้อหมุน

จากรูปที่ 1.9 แสดงการถ่ายแรงภายในโครงข้อหมุน ซึ่งจะมีเฉพาะท่อนรับแรงดึงและท่อนรับแรงอัดเท่านั้นดังที่กล่าวมาแล้ว อย่างไรก็ตาม บางชิ้นส่วนหรือบางท่อนของโครงข้อหมุนอาจไม่ได้รับแรงใดๆ เลย แต่จะมีไว้เพื่อสร้างเสถียรภาพของโครงข้อหมุนนั้นๆ ให้ทรงตัวอยู่ได้

1.2.4 โครงโค้ง (Arches)

โครงโค้ง (Arches) เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนที่เป็นก้อนมาวางทับซ้อนกันหรือการหล่อวัสดุเนื้อเดียวกันขึ้นรูปโค้ง โดยตัวโครงสร้างจะอยู่ได้ด้วยน้ำหนักกดทับของตัวเองเพื่อให้เกิดแรงอัดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นความแข็งแรงของโครงสร้างประเภทนี้จะอยู่ที่การจัดรูปร่างของตัวโครงสร้างเองโดยจะไม่ยอมให้เกิดแรงดึงหรือแรงดัดขึ้นได้เลย เพราะแรงเหล่านี้จะทำให้โครงโค้งเกิดการวิบัติขึ้นได้

รูปที่ 1.10 โครงโค้ง (Arches)

1.2.5 เคเบิล (Cable)

เคเบิล (Cable) เป็นโครงสร้างที่มีรูปทรงเป็นแท่งเรียวตรง (Tie Rod) ตัวของโครงสร้างเองจะมีการอ่อนตัว (Flexible) ได้ เมื่อถูกรับแรงในแนวดิ่งรวมกับน้ำหนักตัวเองโครงสร้างจะโค้งตัวแบบคาทีนารี (Catenary) โดยเคเบิลจะใช้รับแรงดึงที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับโครงสร้าง

รูปที่ 1.11 เคเบิล (Cable)

1.2.6 โครงสร้างพื้นผิว (Surface Structural)

โครงสร้างพื้นผิวคือ โครงสร้างที่มีความหนาน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดของตัวโครงสร้างเอง วัสดุที่ใช้ทำจะต้องมีการดัดตัวได้สูง เช่น พวกผืนผ้าใบในโครงสร้างแบบกระโจม วัสดุจะพองตัวได้ด้วยความดันของอากาศและการยึดรั้งที่จุดกึ่งกลางและขอบ โครงสร้างแบบนี้จะพิจารณาให้รับเฉพาะแรงดึงเท่านั้น

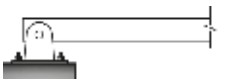
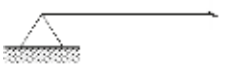
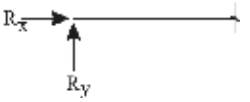
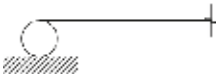
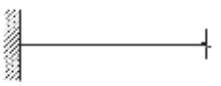
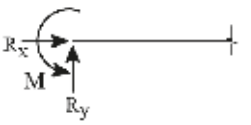
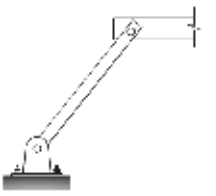
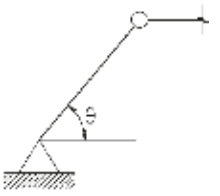
โครงสร้างพื้นผิวอีกประเภทหนึ่งที่ทำจากวัสดุแข็งเกร็ง เช่น คอนกรีตเสริมเหล็กในโครงสร้างแบบแผ่นพับ โครงสร้างเปลือกบางทรงประทุน หรือโครงสร้างแบบโดม โครงสร้างเหล่านี้จะมีความหนาน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดของตัวโครงสร้างเดียวกัน แต่การพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นจะใช้ทฤษฎีของแผ่นบางหรือผนังบาง (Plates and Shell) ซึ่งจะคำนวณแบบ 3 มิติ โดยจะมีทั้งแรงตามแนวแกน แรงเฉือน และโมเมนต์ดัด

รูปที่ 1.12 โดม (Dome)

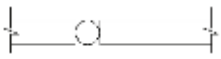
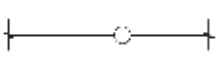
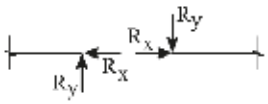
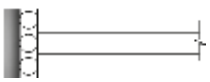
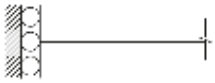
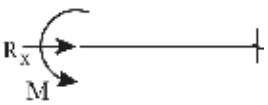
1.3 จุดรองรับ (Support)

ในตารางที่ 1.1 แสดงจุดรองรับชนิดต่าง ๆ โดยแนวคิดจุดรองรับที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ จุดรองรับแบบบานพับ จุดรองรับแบบล้อเลื่อน และจุดรองรับแบบยึดแน่น

ตารางที่ 1.1 แสดงจุดรองรับชนิดต่าง ๆ (Type of Support)

ชนิด (Type)	สัญลักษณ์ (Symbol)	แบบร่าง (Sketch)	แรงปฏิกิริยา (Reaction Force)	ตัวไม่รู้ค่า (Unknowns)
แบบหมุด (Pin)				2
ล้อเลื่อน (Roller)				1
ล้อโยก (Rocker)				
แผ่นยางแข็ง (Elastomeric Pad)				
ยึดแน่น (Fixed End)				3
ข้อยึด (Link)				1

ตารางที่ 1.1 (ต่อ) แสดงจุดรองรับชนิดต่าง ๆ (Type of Support)

ชนิด (Type)	สัญลักษณ์ (Symbol)	แบบร่าง (Sketch)	แรงปฏิกิริยา (Reaction Force)	ตัวไม่รู้ค่า (Unknowns)
บานพับ (Hinge)				-
ที่เลื่อน (Guide)				2

โครงสร้าง (Structures) ในการคำนวณหาค่าแรงต่าง ๆ ที่เกิดกับชิ้นส่วนโครงสร้างจะต้องใส่จุดรองรับ (Support) ให้กับโครงสร้างนั้น โดยจุดรองรับนี้จะเป็นเพียงแนวคิดจุดรองรับ (Ideal Support) ที่ผู้คำนวณออกแบบทำการใส่ลงไปในโครงสร้างจำลอง (Analytical Model) โดยกระทำผ่านแนวแกนสะเทินของชิ้นส่วนโครงสร้าง ซึ่งแต่ละจุดรองรับจะมีแรงต้านทานอยู่หรือจำนวนตัวไม่รู้ค่า ซึ่งจะเรียกชื่อในภาพรวมว่า “แรงปฏิกิริยา (Reaction)”

1.3.1 จุดรองรับแบบหมุด (Pin Support)

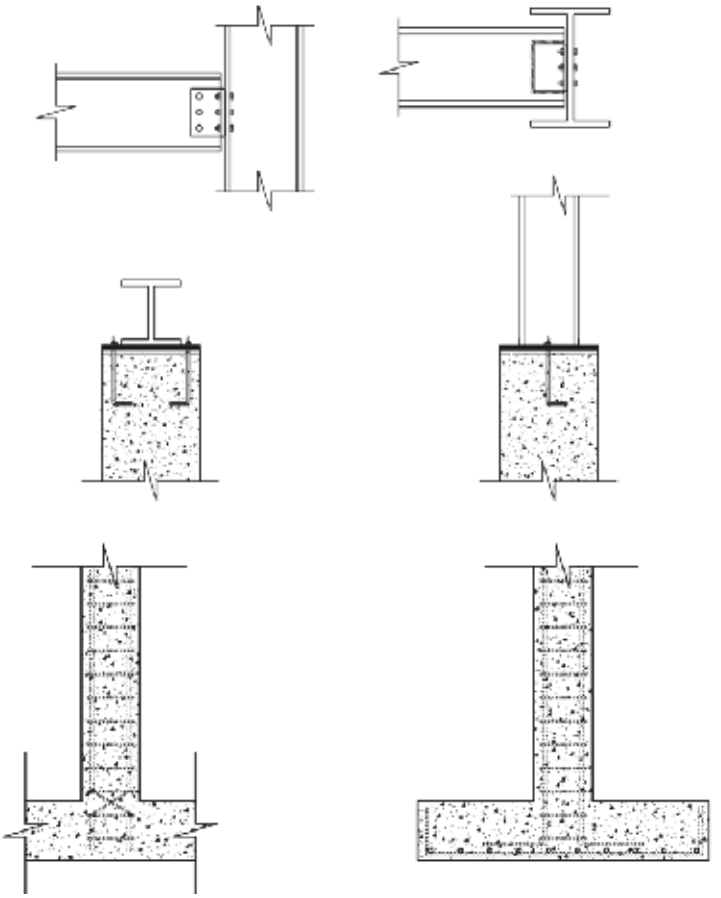
จุดรองรับแบบหมุด (Pin Support) เป็นแนวคิดจุดรองรับของโครงสร้างที่ยึดรั้งแบบหมุดที่ไม่คิดค่าแรงเสียดทาน จุดรองรับแบบนี้จะยอมให้โครงสร้างหมุนตัวได้โดยอิสระ (Rotate Freely) แต่จะไม่ยอมให้เกิดการเคลื่อนตัวตามแนวแกน ดังนั้นจะมีแรงปฏิกิริยาหรือตัวไม่รู้ค่าจำนวน 2 แรงคือ แรงในแนวขนานและแรงในแนวตั้งฉากกับฐานจุดรองรับ

รูปที่ 1.13 แสดงจุดรองรับแบบหมุด

ที่มา : http://martybugs.net/gallery/image.cgi?img=IMG_A33446

ในรูปที่ 1.14 แสดงจุดรองรับแบบหมุด จุดรองรับแบบนี้จะมีแรงปฏิกิริยาจำนวน 2 แรงดังที่กล่าวมาแล้ว โดยแรงปฏิกิริยาในแนวนอนจะเขียนสัญลักษณ์ R_x มีทิศทางที่เป็นได้อยู่ 2 ทิศทางคือ ต้านทานแรงไปทางซ้ายมือและต้านทานแรงไปทางขวามือ ส่วนแรงปฏิกิริยาในแนวดิ่งจะเขียนสัญลักษณ์ R_y มีทิศทางที่เป็นได้อยู่ 2 ทิศทางคือ ต้านทานแรงขึ้นไปและต้านทานแรงลงมา

โดยการเขียนสัญลักษณ์แรงต้านทานซ้าย-ขวา และต้านทานขึ้น-ลง จะใช้หัวลูกศรแทนการชี้ทิศ โดยในแรงปฏิกิริยา 1 แรงจะสามารถต้านทานได้เพียงทิศทางเดียวเท่านั้น



รูปที่ 1.14 แสดงแนวคิดจุดรองรับแบบหมุด

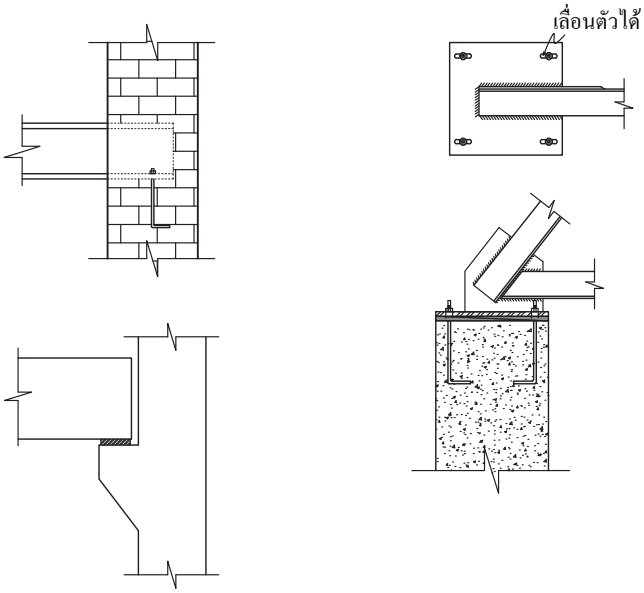
1.3.2 จุดรองรับแบบล้อเลื่อน (Roller Support)

จุดรองรับแบบล้อเลื่อน (Roller Support) เป็นแนวคิดจุดรองรับของโครงสร้างที่วางไว้หรือกดทับไว้ในทิศทางตั้งฉากกับฐานจุดรองรับ

รูปที่ 1.15 แสดงจุดรองรับแบบล้อเลื่อน

ที่มา : https://www.quora.com/What-is-the-meaning-of-pin-support-anroller-support-in-real-life-example

จุดรองรับแบบนี้จะยอมให้โครงสร้างเกิดการหมุนรอบแกนที่ตั้งฉากกับแนวระนาบของฐานจุดรองรับได้ และให้มีการเคลื่อนตัวหรือขยับตัวตามแนวขนานกับฐานจุดรองรับได้ จุดรองรับแบบนี้จะมีแรงที่ทำหน้าที่ต้านทานหรือแรงปฏิกิริยาจำนวน 1 แรงเท่านั้นคือ แรงในแนวตั้งฉากกับฐานจุดรองรับ



รูปที่ 1.16 แสดงแนวคิดจุดรองรับแบบล้อเลื่อน

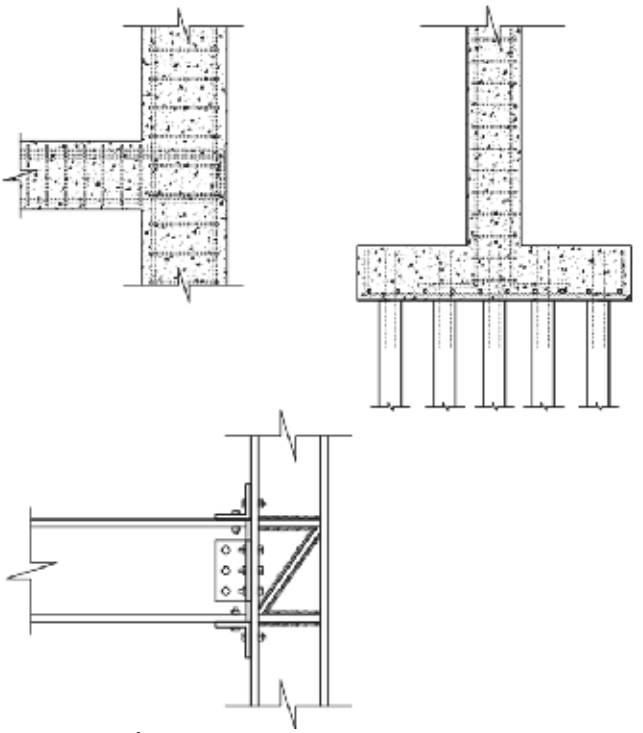
จากรูปที่ 1.16 แสดงสัญลักษณ์ของจุดรองรับแบบล้อเลื่อน จุดรองรับแบบนี้จะมีแรงปฏิกิริยาจำนวน 1 แรงดังที่กล่าวมาแล้ว แรงปฏิกิริยาในแนวดิ่งจะเขียนสัญลักษณ์ว่า R_y มีทิศทางที่เป็นได้อยู่ 2 ทิศทางคือ ต้านทานแรงขึ้นไปและต้านทานแรงลงมา โดยจะใช้สัญลักษณ์หัวลูกศรแทนการชี้ทิศ และในแรงปฏิกิริยา 1 แรงจะมีทิศทางการต้านได้แค่ทิศทางเดียว

1.3.3 จุดรองรับแบบยึดแน่น (Fixed Support)

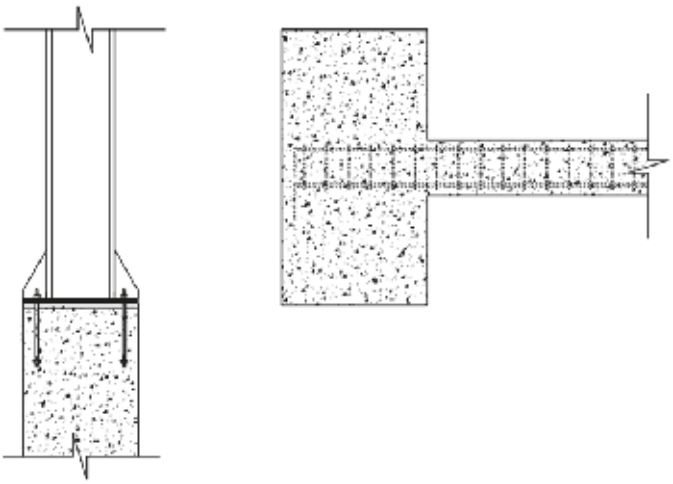
จุดรองรับแบบยึดแน่น (Fixed Support) เป็นแนวคิดจุดรองรับของโครงสร้างที่ยึดรั้งโครงสร้างไว้ในทิศทางขนานและตั้งฉากกับแนวแกนสะเทินของโครงสร้าง อีกทั้งจุดรองรับแบบนี้ไม่ยอมให้โครงสร้างเกิดการหมุนรอบแกนที่ตั้งฉากกับแนวระนาบของฐานจุดรองรับได้ ดังนั้นจุดรองรับแบบนี้จะมีแรงปฏิกิริยาจำนวน 3 แรงคือ แรงในแนวขนาน แรงในแนวตั้งฉาก และโมเมนต์ดัด

รูปที่ 1.17 แสดงจุดรองรับแบบยึดแน่น

ที่มา : https://theconstructor.org/structural-engg/types-of-supports-reactions-uses-structures/16974/



รูปที่ 1.18 แสดงแนวคิดจุดรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 1.18 (ต่อ) แสดงแนวคิดจุดรองรับแบบยึดแน่น

จากรูปที่ 1.18 แสดงสัญลักษณ์ของจุดรองรับแบบยึดแน่น จุดรองรับแบบนี้จะมีแรงปฏิกิริยาจำนวน 3 แรงดังที่กล่าวมาแล้ว โดยแรงปฏิกิริยาในแนวนอนจะเขียนสัญลักษณ์ว่า R_x แรงปฏิกิริยาในแนวดิ่งจะเขียนสัญลักษณ์ว่า R_y ส่วนโมเมนต์ที่ต้านทานจะเขียนสัญลักษณ์ว่า M โดยโมเมนต์ต้านทานนี้จะมีทิศทางในการต้านทานอยู่ 2 ทิศทางคือ โมเมนต์ต้านทานหมุนทวนเข็มนาฬิกา และโมเมนต์ต้านทานหมุนตามเข็มนาฬิกา

1.4 แบบจำลองในการวิเคราะห์โครงสร้าง (Structures Analytical Models)

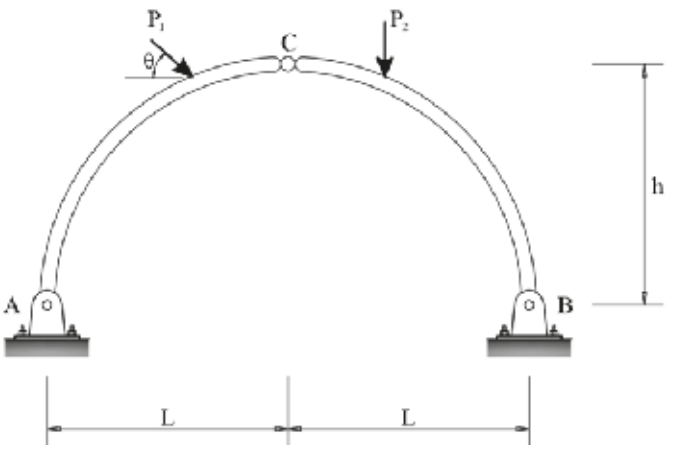
ในการสร้างแบบจำลองโครงสร้าง (Structures Models) เพื่อนำมาวิเคราะห์โครงสร้าง วิศวกรจะต้องจินตนาการไปถึงสภาวการณ์ต่างๆ ที่จะเกิดขึ้นกับโครงสร้าง เมื่อโครงสร้างนั้นได้ถูกก่อสร้างขึ้นและถูกน้ำหนักบรรทุกกระทำ โดยพยายามจำลองแบบโครงสร้างให้ลดความซับซ้อนในตัวโครงสร้างให้ได้มากที่สุด แต่สามารถครอบคลุมในทุกพฤติกรรมที่จะเกิดขึ้นกับทุกๆ ชิ้นส่วนของโครงสร้างนั้น ซึ่งจะเห็นว่าในการสร้างแบบจำลองนี้ จะต้องใช้วิศวกรที่มีแนวคิด (Ideal) มีประสบการณ์ มีความรู้ความสามารถในการออกแบบเป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม ในโครงสร้างอย่างง่ายการสร้างแบบจำลองโครงสร้างอาจไม่ยากนัก เช่น การออกแบบโครงสร้างเล็กๆ บ้านเดี่ยวสองชั้น อาจเลือกการจำลองแบบโครงสร้างคาน เสา หรือโครงข้อหมุนที่ไม่สลับซับซ้อน อาจจำลองโครงสร้างในรูปแบบ 2 มิติ (Plan) และใส่จุดรองรับข้างหนึ่งเป็นแบบหมุด และอีกข้างหนึ่งเป็นแบบล้อเลื่อน ส่วนโครงสร้างของอาคารสูงอาจไม่สามารถคำนวณด้วยมือได้ อาจต้องใช้โปรแกรมสำเร็จรูปคอมพิวเตอร์โดยจำลองโครงสร้างเป็นแบบ 3 มิติ ซึ่งในการยกตัวอย่างต่างๆ ตลอดจนวิธีการคำนวณ

ในหนังสือเล่มนี้ จะเป็นการวิเคราะห์โครงสร้างอย่างง่าย แต่จะมีการวิเคราะห์โครงสร้างคานอย่างยากในบทที่ 7 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเรียนการวิเคราะห์โครงสร้างขั้นสูงต่อไป

ในการสร้างแบบจำลองของโครงสร้างจะต้องอาศัยการเขียนรูปอิสระของโครงสร้าง (Free-Body Diagrams) คือการแสดงรายละเอียดของแรงที่กระทำอยู่กับโครงสร้างเพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้น โดยแรงที่กระทำกับโครงสร้างจะมีด้วยกัน 3 ประเภทคือ แรงที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกภายนอก แรงที่เกิดจากแรงต้านทานตรงจุดรองรับหรือแรงปฏิกิริยา และแรงภายในชิ้นส่วนโครงสร้างหรือจุดต่อของโครงสร้าง ซึ่งการเขียนรูปอิสระจะเขียนได้ใน 2 ลักษณะ ดังนี้

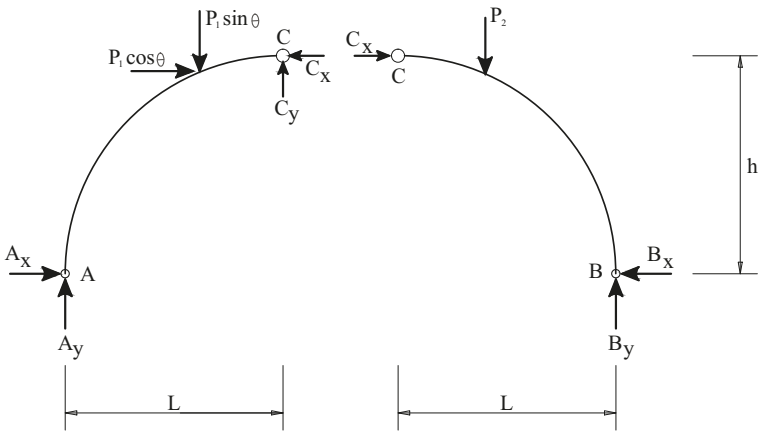
ลักษณะที่ 1 การเขียนรูปอิสระทั้งหมดของหรือทั้งชิ้นส่วนโครงสร้าง แสดงตัวอย่างดังในรูปที่ 1.19 ซึ่งโจทย์กำหนดเป็นโครงโค้งแบบ Three-Hinged Arch มีแรงกระทำจากภายนอก

ทำการเขียนรูปอิสระที่แรงกระทำจากน้ำหนักบรรทุกภายนอก P_1 กระทำอยู่ในลักษณะเอียงเป็นมุม θ กับแนวแกน x ใช้หลักการตรีโกณมิติหาองค์ประกอบของแรงในแนวแกน x และ y ส่วนแรง P_2 กระทำอยู่ในแนวแกน y อยู่แล้ว จึงไม่ต้องหาองค์ประกอบใดๆ



รูปที่ 1.19 แสดงการกำหนดโครงสร้างแบบโครงโค้ง Three-Hinged Arch และสัญลักษณ์ของจุดรองรับ

พิจารณาแรงตรงจุดรองรับที่จุด A เป็นแบบหมุด (Pin Support) มีแรงปฏิกิริยา 2 ตัวคือ ในแนวแกน y ตั้งชื่อเป็น A_y ทิศทางสมมติให้ชี้ขึ้น และในแนวแกน x ตั้งชื่อเป็น A_x ทิศทางสมมติให้ชี้ไปทางขวามือ ที่จุด B เป็นแบบหมุดเช่นเดียวกัน ใช้แนวทางการเขียนแรงปฏิกิริยาเช่นเดียวกับจุด A ส่วนการตรวจสอบทิศทางของแรงปฏิกิริยาที่ถูกต้องจะเกิดจากการคำนวณหาค่าแรงปฏิกิริยาเหล่านั้น โดยจะอธิบายในบทที่ 3

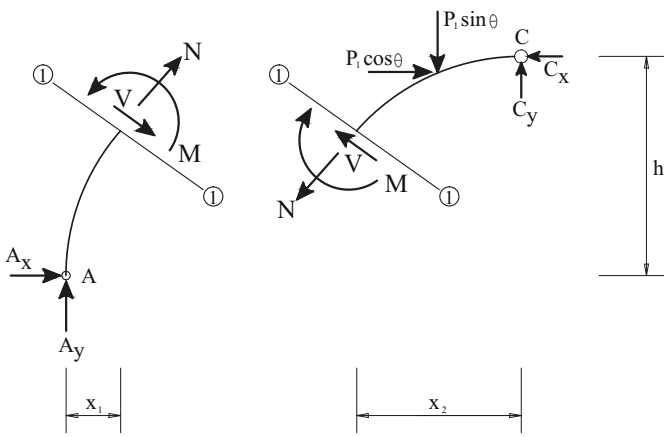


รูปที่ 1.20 แสดงการเขียนรูปอิสระทั้งหมดของโครงสร้าง

ที่จุด C จะมีจุดรองรับแบบบานพับ (Hinge Support) ซึ่งเป็นจุดรองรับแบบพิเศษ จะมีแรงปฏิกิริยาภายในเกิดขึ้นในแนวแกน x และแกน y ก็ต่อเมื่อทำการแยกชิ้นส่วนของโครงสร้างออกจากกันที่จุดนี้ แต่ถ้าประกอบโครงสร้างเข้าด้วยกันที่จุดนี้ ค่าแรงปฏิกิริยาภายในจะเกิดการหักล้างกัน เนื่องจากทิศทางตรงข้ามกัน ทำให้แรงปฏิกิริยาภายในเป็นศูนย์ โดยที่ไม่มีโมเมนต์ดัดภายในเกิดขึ้น ณ จุดนี้ รูปอิสระทั้งหมดของโครงสร้างแสดงดังในรูปที่ 1.20

ลักษณะที่ 2 การเขียนรูปอิสระเฉพาะส่วนของโครงสร้างหรือเฉพาะหน้าตัดใดๆ

แสดงตัวอย่างดังในรูปที่ 1.21 สามารถเขียนรูปอิสระเฉพาะส่วนของโครงโค้งแบบ Three-Hinged Arch โดยในที่นี้จะยกตัวอย่างการเขียนรูปอิสระของหน้าตัด 1-1 ที่ด้านซ้ายมือ ซึ่งจะเกิดแรงภายในขึ้นมา 3 แรง โดยทำการสมมติทิศทางขึ้นมาก่อน แรงภายในดังกล่าว ได้แก่ แรงตามแนวแกน (Axial Force), แรงเฉือน (Shear Force) และโมเมนต์ดัด (Bending Moment) ส่วนหน้าตัด 1-1 ที่ด้านขวามือจะเกิดแรงภายในขึ้นเช่นเดียวกันกับด้านซ้ายมือ แต่มีทิศทางตรงข้ามกัน จะอธิบายโดยละเอียดอีกครั้งในบทที่ 4



รูปที่ 1.21 แสดงการเขียนรูปอิสระเฉพาะส่วนของโครงสร้างหรือเฉพาะหน้าตัดใดๆ

1.5 ดีเทอร์มิเนตและความมั่นคงของโครงสร้าง (Determinacy and Stability Structures)

ก่อนที่จะทำการคำนวณโครงสร้าง เราจะต้องทราบว่าโครงสร้างนั้นเป็นโครงสร้างประเภทใด เพื่อจะได้เลือกใช้วิธีการคำนวณที่เหมาะสม ซึ่งวิธีการจำแนกโครงสร้างจะพิจารณาจาก จำนวนแรงปฏิกิริยา แรงภายใน จำนวนชิ้นส่วนหรือจุดต่อของโครงสร้าง ร่วมกับจำนวนสมการสมดุล โดยจะไม่นำเอาแรงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกภายนอกที่มากระทำกับโครงสร้างเกี่ยวข้อง โดยผลที่ได้จะจำแนกโครงสร้างออกเป็น 3 ประเภทคือ

1. โครงสร้างไร้เสถียรภาพ (Structural is Statically Unstable) หมายถึงโครงสร้างที่ไม่มั่นคงหรือทรงตัวอยู่ไม่ได้ ไม่ควรนำไปก่อสร้าง

2. โครงสร้างอย่างง่าย (Structural is Statically Determinate) หมายถึงโครงสร้างที่สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการสมดุล

3. โครงสร้างอย่างยาก (Structural is Statically Indeterminate) หมายถึงโครงสร้างที่ไม่สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการสมดุล จะต้องอาศัยเงื่อนไขอื่นๆ เข้าช่วย

การจำแนกโครงสร้างจะมีการพิจารณาใน 2 กรณีคือ กรณีของการสถิตยศาสตร์ภายนอก และกรณีของสถิตยศาสตร์ภายใน ซึ่งจะอธิบายดังต่อไปนี้

1.5.1 สถิตยศาสตร์ภายนอก (External Statically)

การจำแนกโครงสร้างโดยพิจารณาจากสถิตยศาสตร์ภายนอกคือ การนำเอาจำนวนสมการสมดุลซึ่งมีอยู่ 3 สมการ มาเปรียบเทียบกับจำนวนของแรงปฏิกิริยา (R) ที่จุดรองรับ ร่วมกับตัวเงื่อนไขดังนี้

$$R = 3 + C \qquad \text{..... (1.1)}$$

โดยที่ R = ผลรวมของแรงปฏิกิริยาที่จุดรองรับ (Reaction)

C = จำนวนตัวเงื่อนไข (Equation of Condition)

จากสมการที่ (1.1) ใช้สำหรับตรวจสอบสถิตยศาสตร์ภายนอกโครงสร้างได้ทุกโครงสร้าง หรือทุกชิ้นส่วนโครงสร้าง เช่น คาน โครงข้อแข็ง โครงข้อหมุน และโครงโค้ง เป็นต้น สำหรับวิธีการใช้สมการ ซึ่งถ้าตรวจสอบแล้วเป็นไปตามสมการถือว่าเป็นโครงสร้างอย่างง่าย แต่ถ้าตรวจสอบแล้วไม่เป็นไปตามสมการจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ $R < 3 + C$ จะเป็นโครงสร้างไร้เสถียรภาพ และ $R > 3 + C$ จะเป็นโครงสร้างอย่างยาก

เมื่อตรวจสอบแล้วถ้าพบว่าเป็นโครงสร้างอย่างยาก จะต้องหาคำนวณหาค่าจำนวนดีกรีอินดีเทอร์มิเนทภายนอก เพื่อประโยชน์ในการเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างอย่างยากนั้นต่อไป ซึ่งหาค่าได้จาก

$$U = R - (3 + C) \qquad \text{..... (1.2)}$$

1.5.2 สถิตยศาสตร์ภายในคานและโครงข้อแข็ง (Internal Statically of Beam and Frame)

การจำแนกโครงสร้างโดยพิจารณาจากสถิตยศาสตร์ภายในของคานและโครงข้อแข็งคือ การนำเอาจำนวนแรงปฏิกิริยา (R) รวมกับจำนวนแรงภายในของภาคตัดชิ้นส่วนของคาน (M) ซึ่ง 1 ภาคตัดจะมีแรงภายในจำนวน 3 แรงต่อ 1 ชิ้นส่วน เมื่อคิดทั้งหมดจะเท่ากับ 3M เปรียบเทียบกับจำนวนสมการสมดุลกับจุดต่อ (j) กล่าวคือ ที่ 1 จุดต่อจะใช้สมการสมดุลในการคำนวณจำนวน 3 สมการ ดังนั้นเมื่อคิดทั้งหมดจะเท่ากับ 3j การจำแนกจะใช้สมการที่ (1.3)

$$R + 3M = 3j + C \qquad \text{..... (1.3)}$$

โดยที่ M = ผลรวมจำนวนชิ้นส่วนโครงสร้าง (Member)

J = ผลรวมจำนวนจุดต่อ (Joint)

สำหรับวิธีการใช้สมการที่ (1.3) ซึ่งถ้าตรวจสอบแล้วเป็นไปตามสมการถือว่าเป็นโครงสร้างอย่างง่าย แต่ถ้าตรวจสอบแล้วไม่เป็นไปตามสมการจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ $R + 3M < 3j + C$ จะเป็นโครงสร้างไร้เสถียรภาพ และ $R + 3M > 3j + C$ จะเป็นโครงสร้างอย่างยาก

เมื่อตรวจสอบแล้วถ้าพบว่าเป็นโครงสร้างอย่างยาก จะต้องหาคำนวณหาค่าจำนวนดีกรีอินดีเทอร์มิเนทภายใน ซึ่งได้จาก

$$U = (R + 3M) - (3j + C) \qquad \text{..... (1.4)}$$

1.5.3 สถิตยศาสตร์ภายในโครงข้อหมุน (Internal Statically of Truss)

การจำแนกโครงข้อหมุนโดยพิจารณาจากสถิตยศาสตร์ภายในคือ การนำจำนวนแรงปฏิกิริยา (R) รวมกับจำนวนชิ้นส่วนโครงข้อหมุน (M) เปรียบเทียบกับจำนวนสมการสมดุลกับจุดต่อ (j) กล่าวคือ ที่ 1 จุดต่อ จะใช้สมการสมดุลในการคำนวณจำนวน 2 สมการ ดังนั้นเมื่อคิดทั้งหมดจะเท่ากับ 2j การจำแนกจะใช้สมการที่ (1.5)

$$R + M = 2j \qquad \text{..... (1.5)}$$

สำหรับวิธีการใช้สมการที่ (1.5) ซึ่งถ้าตรวจสอบแล้วเป็นไปตามสมการถือว่าเป็นโครงสร้างอย่างง่าย แต่ถ้าตรวจสอบแล้วไม่เป็นไปตามสมการจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ $R + M < 2j$ จะเป็นโครงสร้างไร้เสถียรภาพ และ $R + M > 2j$ จะเป็นโครงสร้างอย่างยาก

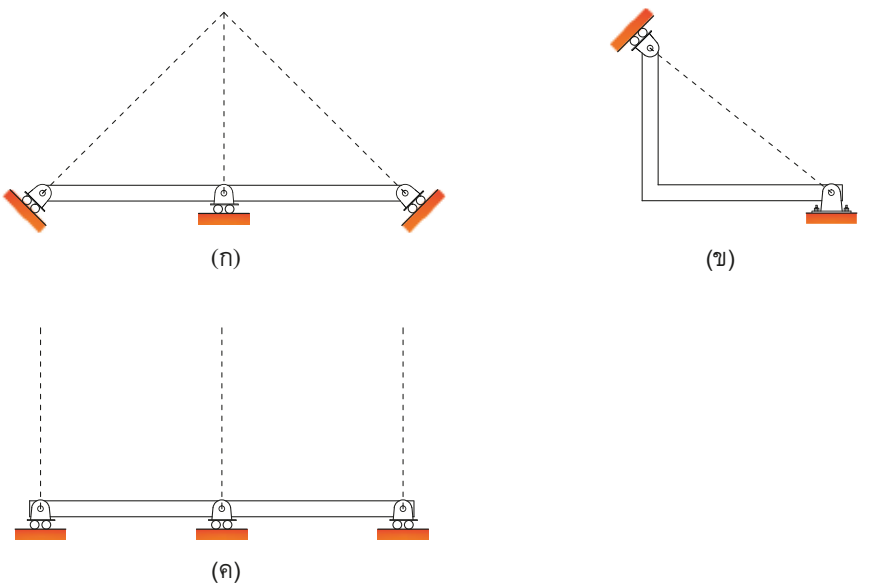
เมื่อตรวจสอบแล้วถ้าพบว่าเป็นโครงสร้างอย่างยาก จะต้องคำนวณหาค่าจำนวนดีกรีอินดีเทอร์มิเนทภายใน ซึ่งได้จาก

$$U = (R + M) - 2j \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (1.6)$$

1.5.4 การพิจารณาโครงสร้างไร้เสถียรภาพ (Structural unstable)

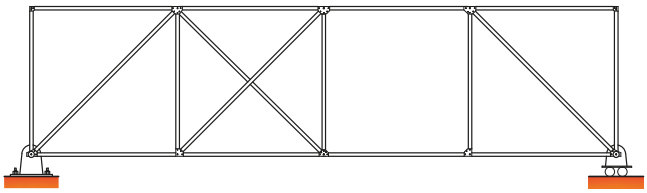
ในกรณีที่คานและโครงข้อแข็งมีความเป็นโครงสร้างอย่างง่ายทั้งภายในและภายนอก ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (1.1), (1.3) และโครงข้อหมุนมีความเป็นโครงสร้างอย่างง่ายทั้งภายในและภายนอกซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (1.1), (1.5) แล้วนั้น อย่างไรก็ตาม จะต้องพิจารณาถึงการใส่จุดรองรับที่เหมาะสมที่ทำให้โครงสร้างมีความเสถียรภาพทรงตัวอยู่ได้มั่นคง หรือในโครงข้อหมุนนอกจากจะพิจารณาจากจุดรองรับแล้ว ยังต้องพิจารณาชิ้นส่วนของโครงข้อหมุนที่มาประกอบกัน โดยต้องคำนึงถึงความมีเสถียรภาพด้านรูปทรงเรขาคณิตด้วย วิธีพิจารณาโครงสร้างดังกล่าวมีดังนี้

1. โครงสร้าง คาน โครงข้อแข็ง หรือโครงข้อหมุนที่มีแรงปฏิกิริยาตรงจุดรองรับ มีแนวพบกันที่จุดจุดหนึ่งหรือมีลักษณะขนานกัน โครงสร้างเช่นนี้จะเป็นโครงสร้างไร้เสถียรภาพ ดังแสดงในรูปที่ 1.22

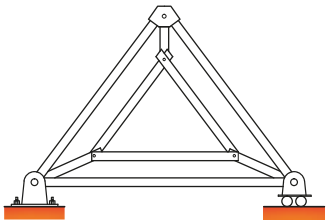


รูปที่ 1.22

2. โครงข้อหมุนที่มีการจัดวางชิ้นส่วนโครงสร้างที่ไม่เป็นรูปสามเหลี่ยม หรือชิ้นส่วนมีแรงภายในมีแนวพบกันที่จุดจุดหนึ่ง โครงสร้างเช่นนี้จะเป็นโครงสร้างไร้เสถียรภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.23



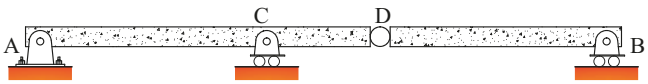
(ก)



(ข)

รูปที่ 1.23

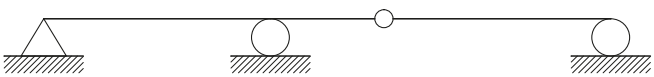
ตัวอย่างที่ 1.1 จากโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1.24 จงจำแนกโครงสร้างดังกล่าว โดยวิเคราะห์ทั้งสถิตยศาสตร์ภายนอกและภายใน



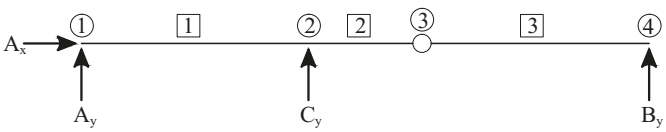
รูปที่ 1.24

วิธีทำ

เขียนแบบร่างโครงสร้าง (Sketch)



เขียนรูปอิสระ (Free-Body Diagrams)



สถิตยศาสตร์ภายนอก (1.1) $R = 3 + C$

แทนค่า $4 = 3 + 1$

คำนวณ $4 = 4$

เป็นไปตามสมการที่ (1.1) เป็นโครงสร้างอย่างง่าย **ตอบ**

สถิตยศาสตร์ภายใน (1.3) $R + 3M = 3j + C$

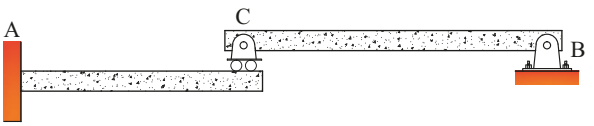
แทนค่า $4 + 3(3) = 3(4) + 1$

คำนวณ $13 = 13$

เป็นไปตามสมการที่ (1.3) เป็นโครงสร้างอย่างง่าย **ตอบ**

ข้อสังเกต ตัวอย่างที่ 1.1 สมการเงื่อนไขที่จุด D จะเป็นแบบ Hinge จะคิดเป็น C = 1

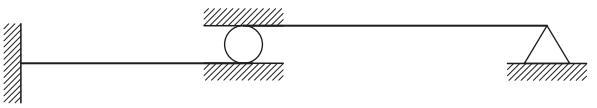
ตัวอย่างที่ 1.2 จากโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1.25 จงจำแนกโครงสร้างดังกล่าว โดยวิเคราะห์ทั้งสถิตยศาสตร์ภายนอกและภายใน



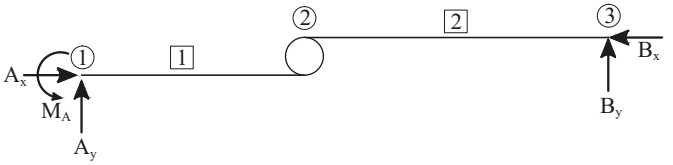
รูปที่ 1.25

วิธีทำ

เขียนแบบร่างโครงสร้าง (Sketch)



เขียนรูปอิสระ (Free-Body Diagrams)



สถิตยศาสตร์ภายนอก (1.1) $R = 3 + C$

แทนค่า $5 = 3 + 2$

คำนวณ $5 = 5$

เป็นไปตามสมการที่ (1.1) เป็นโครงสร้างอย่างง่าย **ตอบ**

สถิตยศาสตร์ภายใน (1.3) $R + 3M = 3j + C$

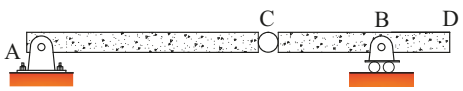
แทนค่า $5 + 3(2) = 3(3) + 2$

คำนวณ $11 = 11$

เป็นไปตามสมการที่ (1.3) เป็นโครงสร้างอย่างง่าย **ตอบ**

ข้อสังเกต ตัวอย่างที่ 1.2 สมการเงื่อนไขที่จุด C จะเป็นแบบ Internal Hinge จะคิดเป็น C = 2

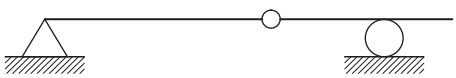
ตัวอย่างที่ 1.3 จากโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1.26 จงจำแนกโครงสร้างดังกล่าว โดยวิเคราะห์ทั้งสถิตยศาสตร์ภายนอกและภายใน



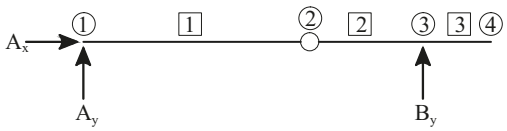
รูปที่ 1.26

วิธีทำ

เขียนแบบร่างโครงสร้าง (Sketch)



เขียนรูปอิสระ (Free-Body Diagrams)



สถิตยศาสตร์ภายนอก (1.1) $3 = 3 + C$

แทนค่า $3 = 3 + 1$

คำนวณ $3 < 4$

ไม่เป็นไปตามสมการที่ (1.1) เป็นโครงสร้างไร้เสถียรภาพ **ตอบ**

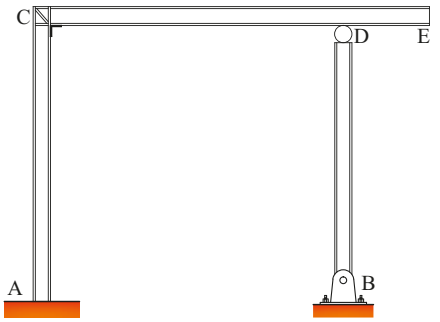
สถิตยศาสตร์ภายใน (1.3) $R + 3M = 3j + C$

แทนค่า $3 + 3(3) = 3(4) + 1$

คำนวณ $12 < 13$

ไม่เป็นไปตามสมการที่ (1.3) เป็นโครงสร้างไร้เสถียรภาพ **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 1.4 จากโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1.27 จงจำแนกโครงสร้างดังกล่าว โดยวิเคราะห์ทั้งสถิตยศาสตร์ภายนอกและภายใน

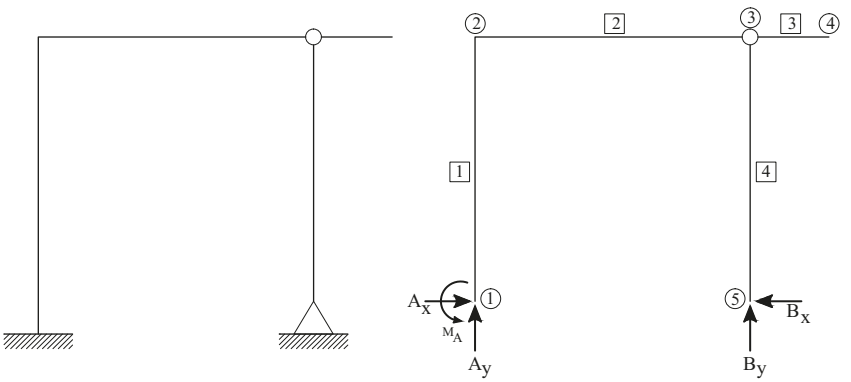


รูปที่ 1.27

วิธีทำ

เขียนแบบร่างโครงสร้าง (Sketch)

เขียนรูปอิสระ (Free-Body Diagrams)



รูปที่ 1.27 (ต่อ)

สถิตยศาสตร์ภายนอก (1.1) $5 = 3 + C$

แทนค่า $5 = 3 + 1$

คำนวณ $5 > 4$

จาก (1.2) $U = R - (3 + C)$

จำนวนตัวไม่ทราบค่า $U = 5 - (3 + 1)$

$U = 1$

ไม่เป็นไปตามสมการที่ (1.1) เป็นโครงสร้างอย่างยาก มีจำนวนดีกรีอินดีเทอร์มิเนทภายนอก 1 ตัว **ตอบ**

สถิตยศาสตร์ภายใน (1.3) $R + 3M = 3j + C$

แทนค่า $5 + 3(4) = 3(5) + 1$

คำนวณ $17 > 16$

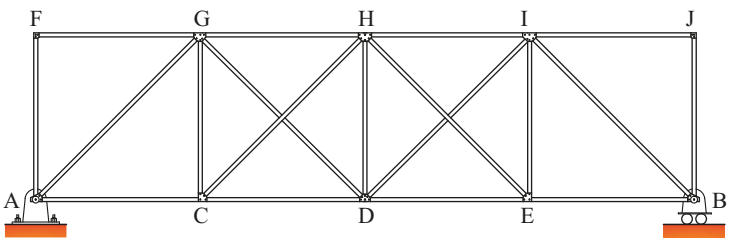
จาก (1.4) $U = (R + 3M) - (3j + C)$

$U = (5 + 3 \cdot 4) - (3 \cdot 5 + 1)$

$U = 1$

ไม่เป็นไปตามสมการที่ (1.3) เป็นโครงสร้างอย่างยาก มีจำนวนดีกรีอินดีเทอร์มิเนทภายใน 1 ตัว **ตอบ**

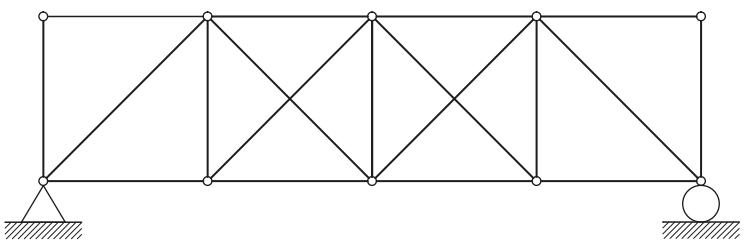
ตัวอย่างที่ 1.5 จากโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1.28 จงจำแนกโครงสร้างดังกล่าว โดยวิเคราะห์ทั้งสถิตยศาสตร์ภายนอกและภายใน



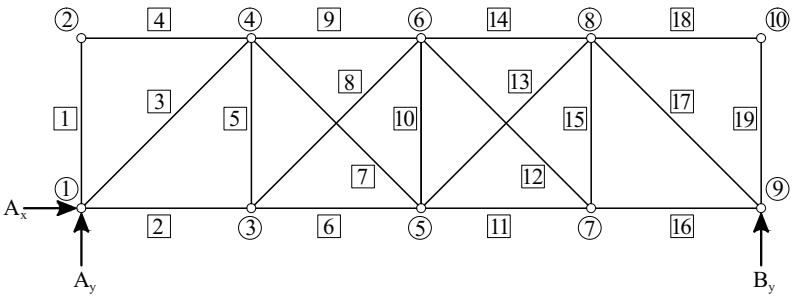
รูปที่ 1.28

วิธีทำ

เขียนแบบร่างโครงสร้าง (Sketch)



เขียนรูปอิสระ (Free-Body Diagrams)



สถิตยศาสตร์ภายนอก (1.1) $3 = 3 + C$

แทนค่า $3 = 3 + 0$

คำนวณ $3 = 3$

เป็นไปตามสมการที่ (1.1) เป็นโครงสร้างอย่างง่าย **ตอบ**

สถิตยศาสตร์ภายใน (1.5) $R + M = 2j$

แทนค่า $3 + 19 = 2(10)$

คำนวณ $22 > 20$

จาก (1.6) $U = (R + M) - 2j$

$U = (3 + 19) - 2(10)$)

$U = 2$

ไม่เป็นไปตามสมการที่ (1.5) เป็นโครงสร้างอย่างยาก มีจำนวนดีกรีอินดีเทอร์มิเนทภายใน 2 ตัว **ตอบ**

สรุป (Summary)

โครงสร้าง (Structures) จะประกอบขึ้นด้วยชิ้นส่วน (Elements) ต่างๆ ประกอบเข้าด้วยกันหรือยึดโยงกันอยู่ในตำแหน่งต่างๆ ในลักษณะ 3 มิติ ประเภทโครงสร้างสามารถแบ่งได้คือ คานและเสา (Beam and Columns) ซึ่งคาน (Beam) เมื่อรับน้ำหนักจะทำให้เกิดการดัด (Flexural) ตัว เกิดการโก่งตัว เสา (Columns) จะรับน้ำหนักทางแนวแกนเป็นหลัก แต่ถ้าเป็นโครงข้อแข็งเสาจะรับโมเมนต์ดัดด้วย โครงข้อหมุน (Trusses) เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนที่เป็นท่อนหรือแท่งตรงมายึดต่อกันเป็นรูปสามเหลี่ยม สมมติฐานให้รับเฉพาะแรงดึง (Tension Force) หรือแรงอัด (Compression Force) เท่านั้น ส่วนโครงโค้ง (Arches) ตัวโครงสร้างจะอยู่ได้ด้วยน้ำหนักกดทับของตัวเอง เพื่อให้เกิดแรงอัดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ

เคเบิล (Cable) เป็นโครงสร้างที่มีรูปทรงเป็นแท่งเรียวตรง (Tie Rod) จะใช้รับแรงดึงที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับโครงสร้าง ส่วนโครงสร้างพื้นผิว (Surface Structural) คือโครงสร้างที่มีความหนาน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดของตัวโครงสร้างเอง

ดีเทอร์มิเนตและความมั่นคงของโครงสร้าง (Determinacy and Stability Structures)

สถิตยศาสตร์ภายนอก (External Statically)

$$R = 3 + C \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (1.1)$$

จำนวนดีกรีอินดีเทอร์มิเนทภายนอกหาได้จาก

$$U = R - (3 + C) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (1.2)$$

สถิตยศาสตร์ภายในคานและโครงข้อแข็ง (Internal Statically of Beam and Frame)

$$R + 3M = 3j + C \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (1.3)$$

จำนวนดีกรีอินดีเทอร์มิเนทภายในหาได้จาก

$$U = (R + 3M) - (3j + C) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (1.4)$$

สถิตยศาสตร์ภายในโครงข้อหมุน (Internal Statically of Truss)

$$R + M = 2j \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (1.5)$$

จำนวนดีกรีอินดีเทอร์มิเนทภายในหาได้จาก

$$U = (R + M) - 2j \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (1.6)$$

แบบฝึกหัดบทที่ 1

1. จากโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1.29 จงจำแนกโครงสร้างดังกล่าว โดยวิเคราะห์ทั้งสถิตยศาสตร์ภายนอกและภายใน

รูปที่ 1.29

วิธีทำ

เขียนแบบร่างโครงสร้าง (Sketch)

เขียนรูปอิสระ (Free-Body Diagrams)

สถิตยศาสตร์ภายนอก (1.1) $R = 3 + C$

แทนค่า .....

คำนวณ .....

จาก (1.2) .....

จำนวนตัวไม่ทราบค่า .....

$U = 2$

ไม่เป็นไปตามสมการที่ (1.1) เป็นโครงสร้างอย่างยาก มีจำนวนดีกรีอินดีเทอร์มิเนทภายนอก 2 ตัว **ตอบ**

สถิตยศาสตร์ภายใน (1.3) $R + 3M = 3j + C$

แทนค่า .....

คำนวณ $17 > 15$

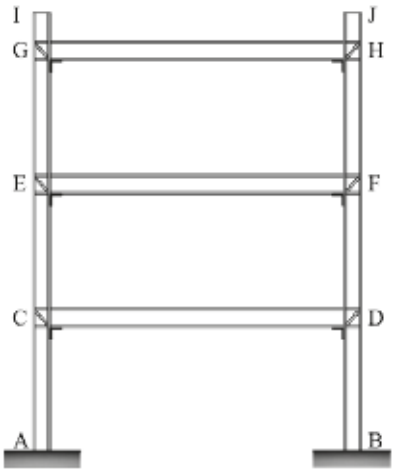
จาก (1.4) .....

.....

.....

ไม่เป็นไปตามสมการที่ (1.3) เป็นโครงสร้างอย่างยาก มีจำนวนดีกรีอินดีเทอร์มิเนทภายใน 2 ตัว **ตอบ**

2. จากโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1.30 จงจำแนกโครงสร้างดังกล่าว โดยวิเคราะห์ทั้งสถิตยศาสตร์ภายนอกและภายใน



รูปที่ 1.30

วิธีทำ

เขียนแบบร่างโครงสร้าง (Sketch)

เขียนรูปอิสระ (Free-Body Diagrams)

สถิตยศาสตร์ภายนอก (1.1) $R = 3 + C$

แทนค่า .....

คำนวณ .....

จาก (1.2) .....

จำนวนตัวไม่ทราบค่า .....

.....

ไม่เป็นไปตามสมการที่ (1.1) เป็นโครงสร้างอย่างยาก มีจำนวนดีกรีอินดีเทอร์มิเนทภายนอก 3 ตัว **ตอบ**

สถิตยศาสตร์ภายใน (1.3) .....

แทนค่า .....

คำนวณ .....

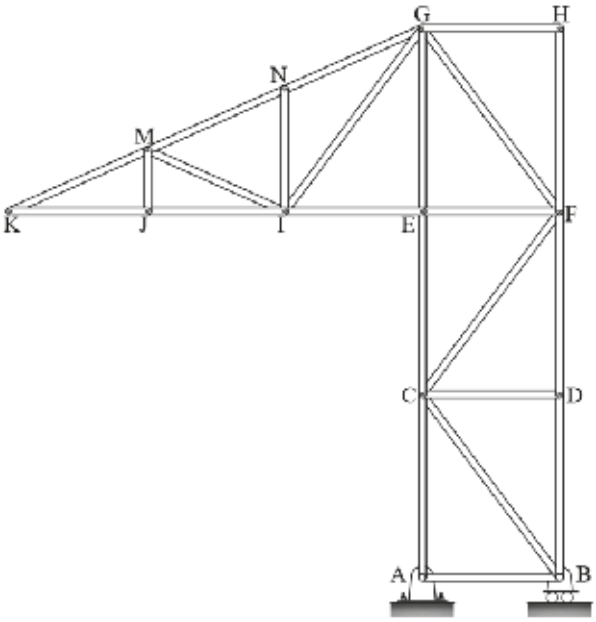
จาก (1.4) $U = (R + 3M) - (3j + C)$

.....

$U = 9$

ไม่เป็นไปตามสมการที่ (1.3) เป็นโครงสร้างอย่างยาก มีจำนวนดีกรีอินดีเทอร์มิเนทภายใน 9 ตัว **ตอบ**

3. จากโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1.31 จงจำแนกโครงสร้างดังกล่าว โดยวิเคราะห์ทั้งสถิตยศาสตร์ภายนอกและภายใน



รูปที่ 1.31

วิธีทำ

เขียนแบบร่างโครงสร้าง (Sketch)

เขียนรูปอิสระ (Free-Body Diagrams)

สถิตยศาสตร์ภายนอก (1.1) $3 = 3 + C$

แทนค่า .....

คำนวณ .....

เป็นไปตามสมการที่ (1.1) เป็นโครงสร้างอย่างง่าย **ตอบ**

สถิตยศาสตร์ภายใน (1.5) $R + M = 2j$

แทนค่า .....

คำนวณ .....

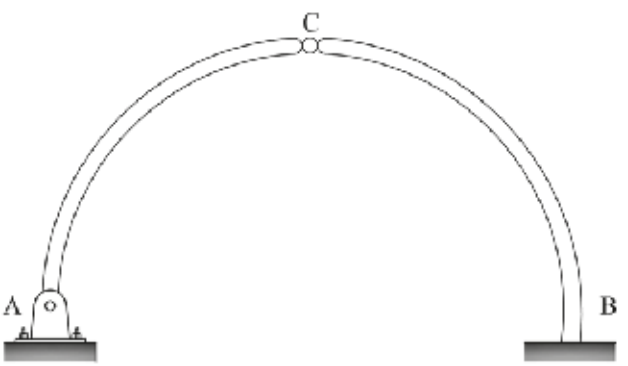
จาก (1.6) .....

.....

.....

เป็นไปตามสมการที่ (1.5) เป็นโครงสร้างอย่างง่าย **ตอบ**

4. จากโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1.32 จงจำแนกโครงสร้างดังกล่าว โดยวิเคราะห์ทั้งสถิตยศาสตร์ภายนอกและภายใน



รูปที่ 1.32

วิธีทำ

เขียนแบบร่างโครงสร้าง (Sketch)

เขียนรูปอิสระ (Free-Body Diagrams)

สถิตยศาสตร์ภายนอก (1.1) $R = 3 + C$

แทนค่า .....

คำนวณ .....

จาก (1.2) .....

จำนวนตัวไม่ทราบค่า .....

.....

..... **ตอบ**

สถิตยศาสตร์ภายใน (1.3) .....

แทนค่า .....

คำนวณ .....

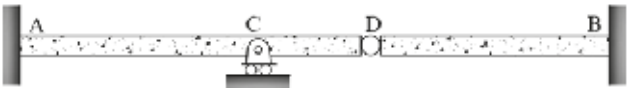
จาก (1.4) $U = (R + 3M) - (3j + C)$

.....

.....

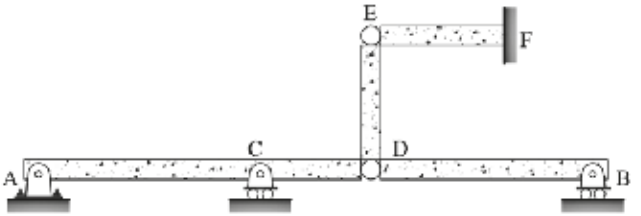
ไม่เป็นไปตามสมการที่ (1.3) เป็นโครงสร้างอย่างยาก มีจำนวนดีกรีอินดีเทอร์มิเนทภายใน 1 ตัว **ตอบ**

5. จากโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1.33 จงจำแนกโครงสร้างดังกล่าว โดยวิเคราะห์ทั้งสถิตยศาสตร์ภายนอกและภายใน



รูปที่ 1.33

6. จากโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1.34 จงจำแนกโครงสร้างดังกล่าว โดยวิเคราะห์ทั้งสถิตยศาสตร์ภายนอกและภายใน

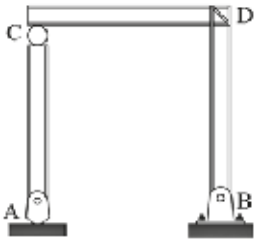


รูปที่ 1.34

7. จากโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1.35 จงจำแนกโครงสร้างดังกล่าว โดยวิเคราะห์ทั้งสถิตยศาสตร์ภายนอกและภายใน

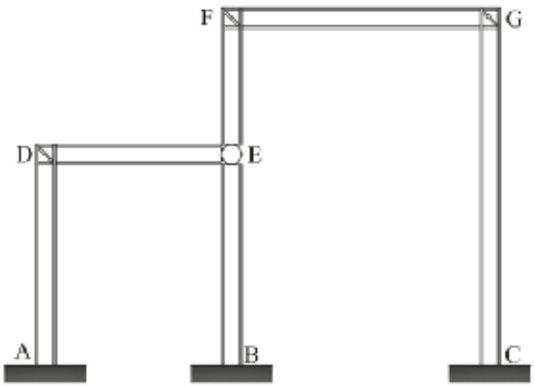
รูปที่ 1.35

8. จากโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1.36 จงจำแนกโครงสร้างดังกล่าว โดยวิเคราะห์ทั้งสถิตยศาสตร์ภายนอกและภายใน



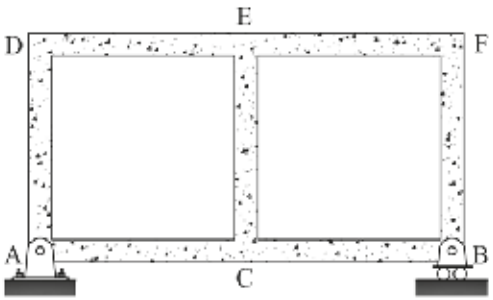
รูปที่ 1.36

9. จากโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1.37 จงจำแนกโครงสร้างดังกล่าว โดยวิเคราะห์ทั้งสถิตยศาสตร์ภายนอกและภายใน



รูปที่ 1.37

10. จากโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1.38 จงจำแนกโครงสร้างดังกล่าว โดยวิเคราะห์ทั้งสถิตยศาสตร์ภายนอกและภายใน



รูปที่ 1.38

11. จากโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1.39 จงจำแนกโครงสร้างดังกล่าว โดยวิเคราะห์ทั้งสถิตยศาสตร์ภายนอกและภายใน

รูปที่ 1.39