



การวิเคราะห์โครงสร้าง อินดีเทอมีเนตทางสถิต

Structural Analysis for Statically Indeterminate Structures

ผศ. ดร.อนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ

การวิเคราะห์โครงสร้างอินดีเทอมีเนตทางสถิต

Structural Analysis for statically Indeterminate Structures

ผู้เขียน	อนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ
บรรณาธิการบริหาร	จุฑาทิพย์ สุกาญจนาศเรษฐ์
บรรณาธิการ	กฤษฎาญจน์ โปไฟฟ้า
กองบรรณาธิการ	สุขุมลย์ คุณาคติภพ, ชุตินา สัมพันธ์
ศิลปกรรม	พลสิทธิ์ศัทคุณ จุลละมณฑล, ยศวดี ใจดี

หนังสือเล่มนี้สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ (ฉบับเพิ่มเติม) พ.ศ.2558

Copyright © 2022 ห้ามมิให้นำส่วนหนึ่งส่วนใดหนังสือเล่มนี้เพื่อเป็นการผลิตใหม่ ห้ามทำซ้ำ ห้ามมิให้ทำการละเมิดลิขสิทธิ์ด้วยการส่งเนื้อหาสาระสำคัญ ทั้งทางอิเล็กทรอนิกส์หรือรูปแบบต่าง ๆ รวมถึงการถ่ายเอกสาร การทำสำเนา การเก็บข้อมูลในทุกรูปแบบ โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ

อนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ.

การวิเคราะห์โครงสร้างอินดีเทอมีเนตทางสถิต.-- นนทบุรี : สยามจุลละมณฑล, 2567.

372 หน้า

1. การวิเคราะห์โครงสร้าง (วิศวกรรมศาสตร์). I. ชื่อเรื่อง.

624.171

ISBN 978-616-94537-9-6

พิมพ์ครั้งที่ 1 ธันวาคม 2567

จัดพิมพ์โดย

บริษัท สยามจุลละมณฑล จำกัด

เลขที่ 98/28 ถนนเกตุ้อำพัฒนา ตำบลบางคูรัด อำเภอบางบัวทอง จังหวัดนนทบุรี 11110

โทร.063 451 9359, 061 519 3641, 092 425 5229 www.siamclmt.com

Email: siamclmtcenter@siamclmt.com

ราคา 350 บาท

คำนำสำนักพิมพ์

โครงสร้างเป็นรากฐานของสิ่งปลูกสร้างที่จะทำให้สิ่งปลูกสร้างนั้น ๆ แข็งแรง คงทน และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ซึ่งสำหรับวิศวกรโยธาแล้วการศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์โครงสร้างเป็นพื้นฐานที่สำคัญที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ หนังสือการวิเคราะห์โครงสร้างอินดีเทอมิเนตทางสถิติเล่มนี้ จะเป็นหนึ่งในตัวช่วยสำหรับผู้ที่ยังสับสน ไม่แน่ใจ มีคำถาม หรือมีข้อสงสัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์โครงสร้าง โดยเนื้อหาประกอบไปด้วยพื้นฐาน หลักการ และทฤษฎีเกี่ยวกับการวิเคราะห์โครงสร้าง ตัวอย่างการคำนวณ และคำอธิบายอย่างเป็นขั้นตอน พร้อมทั้งภาพประกอบที่ช่วยให้เข้าใจง่ายขึ้น เหมาะสำหรับผู้สนใจด้านการวิเคราะห์โครงสร้าง ผู้รับเหมาโครงการก่อสร้างต่าง ๆ ซึ่งนำความรู้ในหนังสือเล่มนี้ไปใช้แก้ปัญหาด้านโครงสร้างที่เกิดขึ้นได้

สำนักพิมพ์หวังเป็นอย่างยิ่งว่า หนังสือเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ในการเรียนรู้ของ นักเรียน นักศึกษา และบุคคลทั่วไป หากมีข้อผิดพลาดประการใด หรือมีข้อเสนอแนะ ดิชมิตใด ๆ เกี่ยวกับหนังสือเล่มนี้ สำนักพิมพ์ฯ ยินดีเป็นอย่างยิ่งที่จะน้อมรับไว้เพื่อนำมาพัฒนาการจัดพิมพ์ในโอกาสต่อไป

สำนักพิมพ์สยามจุลละมณทล

คำนำผู้เขียน

หนังสือการวิเคราะห์โครงสร้างอินดีเทอมิเนตทางสถิติเล่มนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผู้อ่านมีความรู้ความเข้าใจหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์โครงสร้าง ซึ่งเป็นความรู้พื้นฐานที่สำคัญของศาสตร์ด้านวิศวกรรมโยธา และวิศวกรรมโยธาที่อยู่ในแวดวง การออกแบบโครงสร้าง รวมถึงวิศวกรประจำหน่วยงาน หนังสือเล่มนี้มุ่งเน้นการแก้ปัญหาการวิเคราะห์โครงสร้างอินดีเทอมิเนตทางสถิติที่มีความซับซ้อนด้วยวิธีการที่หลากหลาย ขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของปัญหาและความซับซ้อนของวิธีการ ผู้อ่านอาจนำความรู้จากหนังสือเล่มนี้ไปประยุกต์กับปัญหาที่พบเจอในสถานการณ์จริง ตลอดจนเลือกวิธีการที่เหมาะสมกับการแก้ปัญหาต่าง ๆ ได้ ผู้เขียนนำประสบการณ์ทั้งจากการเป็นวิศวกรภาคสนาม นักวิจัย และอาจารย์ที่มีประสบการณ์สอนรายวิชาวิเคราะห์โครงสร้างมา 7 ปี เรียบเรียงหนังสือเล่มนี้ขึ้นโดยในแต่ละตัวอย่างมีการอธิบายขั้นตอนการแก้ปัญหาอย่างชัดเจน (step by step) ประกอบกับรูปที่ใช้สื่อสารในแต่ละขั้นตอนการแก้ปัญหาให้ผู้อ่านเข้าใจในประเด็นที่ผู้เขียนอยากจะสื่อสาร นอกจากนี้ผู้เขียนยังประยุกต์แบบจำลองสื่อการสอนด้านวิศวกรรมโครงสร้างจาก Mola Structural Model ที่ได้รับความนิยมทั่วโลกมาสอดแทรกในเนื้อหาให้ผู้อ่านเข้าใจพฤติกรรมของโครงสร้างได้อย่างดี

หนังสือเล่มนี้เหมาะกับนิสิตนักศึกษาสาขาวิศวกรรมโยธายัง ใช้เป็นหนังสืออ่านเพิ่มเติมจากเอกสารประกอบการเรียนการสอนในชั้นเรียนของแต่ละสถาบันได้ดี มีโจทย์ตัวอย่างให้นิสิตนักศึกษา ฝึกแก้ปัญหาพร้อมคำอธิบายที่ละเอียดและเข้าใจง่าย นอกจากนี้ หนังสือเล่มนี้ยังเหมาะกับนักศึกษาระดับ ปวช. และ ปวส. ด้านการก่อสร้างที่ต้องมีความรู้ด้านการวิเคราะห์โครงสร้างเช่นเดียวกัน และหนังสือเล่มนี้ยังเหมาะกับบุคคลทั่วไปที่สนใจด้านการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวัตถุประสงค์ที่หลากหลาย เช่น ต้องการมีความรู้พื้นฐานด้านการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อใช้ในชีวิตประจำวัน หรือผู้รับเหมาโครงการก่อสร้างต่าง ๆ ที่จะนำความรู้ไปใช้แก้ปัญหาด้านโครงสร้างที่เกิดขึ้นกับโครงการของตนเองได้

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าหนังสือเล่มนี้จะเป็นประโยชน์กับผู้อ่าน
ไม่ว่าจะเป็นประโยชน์ทางการเรียน การทำงาน หรือการใช้ชีวิตประจำวัน หากมี
ข้อแนะนำหรือข้อผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขออภัยไว้และขออภัยมา ณ ที่นี้

ผศ. ดร.อนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ

ผู้เขียน

สารบัญ

หน้า

คำนำสำนักพิมพ์

คำนำผู้เขียน

สารบัญ

สารบัญตาราง

สารบัญภาพ

บทที่ 1 บทนำ (Introduction)	1
1.1 ความสำคัญของการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง	1
1.2 ลำดับขั้นตอนในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง	3
1.3 การจำแนกลักษณะของโครงสร้าง	4
1.4 หน้าที่กระทำต่อโครงสร้าง	13
1.5 สภาวะสมดุลและแรงปฏิกิริยาที่จุดรองรับ (Equilibrium and Support Reactions)	14
1.6 โครงสร้างที่คำนวณได้ทางสถิตและความไม่เสถียรของโครงสร้าง (Statically Determinate Structures and Structural Instability)	16
1.7 โครงสร้างดีเทอร์มิเนตและอินดีเทอร์มิเนตทางสถิต (Statically Determinate and Indeterminate Structures)	20
1.8 ข้อดีและข้อด้อยของโครงสร้าง Determinate และ Indeterminate	22
1.9 วิธีวิเคราะห์	25

บทที่ 2 วิธีการเสียรูปที่สอดคล้อง (Method of Consistent Deformation)	27
2.1 การวิเคราะห์คาน	27
2.2 การวิเคราะห์โครงถัก	40
2.3 การวิเคราะห์โครงข้อแข็ง	55
2.4 แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 2	64
บทที่ 3 วิธีงานที่น้อยที่สุดของ Castigliano (Castigliano's Theorem, Method of Least Work)	67
3.1 บทนำ	67
3.2 แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 3	74
บทที่ 4 วิธีความลาดชัน-การโก่งตัว (Slope-Deflection Method)	75
4.1 สมการความลาดชัน-การโก่งตัว (Slope-Deflection Equation)	75
4.2 การวิเคราะห์คาน	85
4.3 การวิเคราะห์โครงข้อแข็ง	97
4.4 แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 4	105
บทที่ 5 วิธีการกระจายโมเมนต์ (Moment Distribution Method)	107
5.1 หลักการวิเคราะห์	107
5.2 การวิเคราะห์คาน	116
5.3 การวิเคราะห์โครงข้อแข็งที่ไม่มีการเคลื่อนตัวด้านข้าง (Non-Sidesway Frames)	133
5.4 การวิเคราะห์โครงข้อแข็งที่มีการเคลื่อนตัวด้านข้าง (sidesway frames)	141
5.5 แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 5	155

บทที่ 6 วิธีความแข็ง (Stiffness Method)	159
6.1 พื้นฐานของวิธีความแข็ง	159
6.2 เมทริกซ์ความแข็งของชิ้นส่วนโครงถัก (Member Stiffness Matrix of Truss)	161
6.3 เมทริกซ์แปลงแกนของชิ้นส่วนโครงถัก (Transformation Matrix of Truss Member)	164
6.4 การวิเคราะห์โครงถักด้วยวิธีความแข็ง	168
6.5 เมทริกซ์ความแข็งของชิ้นส่วนคาน (Member Stiffness Matrix of Beam)	190
6.6 การวิเคราะห์คานด้วยวิธีความแข็ง	193
6.7 เมทริกซ์ความแข็งของชิ้นส่วนโครงข้อแข็ง (Member Stiffness Matrix of Frame)	210
6.8 เมทริกซ์แปลงแกนของชิ้นส่วนโครงข้อแข็ง (Transformation Matrix of Frame Member)	214
6.9 การวิเคราะห์โครงข้อแข็งด้วยวิธีความแข็ง	218
6.10 แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 6	238
บทที่ 7 การวิเคราะห์โดยการประมาณของโครงสร้างอินดีเทอมีเนต (Approximate Analysis of Indeterminate Structures)	241
7.1 สมมติฐานของการวิเคราะห์โครงข้อแข็งรับแรงในแนวดิ่งโดยการประมาณ	241
7.2 การวิเคราะห์โดยการประมาณของโครงข้อแข็งรับแรงในแนวดิ่ง	244
7.3 สมมติฐานของการวิเคราะห์โครงข้อแข็งรับแรงในแนวราบโดยการประมาณ	248
7.4 การวิเคราะห์โดยการประมาณของโครงข้อแข็งรับแรงในแนวราบ	249
7.5 แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 7	256

บทที่ 8 เส้นอิทธิพลของโครงสร้างอินดีเทอมีเนต (Influence Lines for Statically Indeterminate Structures)	259
8.1 ทบทวนการสร้างเส้นอิทธิพลของโครงสร้างดีเทอมีเนต	260
8.2 หลักการของ Müller-Breslau ในการสร้างเส้นอิทธิพลของโครงสร้าง	268
8.3 การสร้างเส้นอิทธิพลของโครงสร้างอินดีเทอมีเนต	271
8.4 แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 8	288
บทที่ 9 บทนำของการวิเคราะห์โครงสร้างแบบพลาสติก (Introduction to Plastic Analysis of Structures)	289
9.1 บทนำ	289
9.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด	290
9.3 พฤติกรรมของหน้าตัดอีลาสติกและพลาสติก	291
9.4 การวิเคราะห์แบบพลาสติกโดยวิธีสมดุล (Equilibrium Method)	296
9.5 แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 9	305
เอกสารอ้างอิง	307
ภาคผนวก ก เฉลยแบบฝึกหัดท้ายบท	308
ภาคผนวก ข สมการและสูตรการคำนวณ	340
ดัชนี	344
ประวัติผู้เขียน	351

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการคำนวณหาโมเมนต์ภายในคานหรือ โครงข้อแข็งด้วยวิธีการกระจายโมเมนต์	114
6.1 แสดงสรุปความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำการเสียรูป และค่า ความแข็ง ในระบบ Global และ Local	167
6.2 แสดงค่ามุม θ , $\sin\theta$, $\cos\theta$, $\sin\theta \cos\theta$, $\sin^2\theta$ และ $\cos^2\theta$ ของทุกชิ้นส่วน	169
6.3 แสดงค่ามุม θ , $\sin\theta$, $\cos\theta$, $\sin\theta \cos\theta$, $\sin^2\theta$ และ $\cos^2\theta$ ของทุกชิ้นส่วน	183
6.4 แสดงค่าความยาวชิ้นส่วน (L) มุม θ , $\sin\theta$, $\cos\theta$, $\sin\theta$ $\cos\theta$, $\sin^2\theta$ และ $\cos^2\theta$ ของทุกชิ้นส่วน	219
6.5 แสดงค่าความยาวชิ้นส่วน (L) มุม θ , $\sin\theta$, $\cos\theta$, $\sin\theta$ $\cos\theta$, $\sin^2\theta$ และ $\cos^2\theta$ ของทุกชิ้นส่วน	230

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างโครงสร้าง Cable-Stayed ที่สร้างโดย ChatGPT	4
1.2 ตัวอย่างลักษณะโครงสร้างสะพานแขวน หรือ Suspension Bridge ที่สร้างโดย ChatGPT	6
1.3 ตัวอย่างโครงสร้างเสาที่ทำหน้าที่รับแรงอัดเป็นหลักที่สร้างโดย ChatGPT	9
1.4 ตัวอย่างโครงสร้างอุโมงค์ที่สร้างโดย ChatGPT ที่มีลักษณะเป็น Arch	9
1.5 ตัวอย่างโครงสร้างสะพานที่มีลักษณะเป็นโครงข้อหมุน สร้างโดย ChatGPT	10
1.6 ทิศทางของแรงแผ่นดินไหวที่เป็นแรงเฉือนกระทำที่ฐานของ อาคาร	11
1.7 ตัวอย่างโครงสร้างคานที่รับแรงดัดเป็นหลักที่สร้างโดย ChatGPT	12
1.8 สมการสมดุลจำนวน 3 สมการสำหรับโครงสร้าง 2 มิติ	14
1.9 สมการสมดุลจำนวน 6 สมการสำหรับโครงสร้าง 3 มิติ	15
1.10 ลักษณะการเชื่อมต่อกันของชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีเสถียรภาพ ภายใน (internally stable structures)	17
1.11 โครงสร้างที่ไม่มีเสถียรภาพภายใน (Internally Unstable Structures)	17
1.12 โครงสร้างที่คำนวณทางสถิตได้ (Externally Statically Determinate Structures)	18
1.13 โครงสร้างที่คำนวณทางสถิตไม่ได้ (Externally Statically Indeterminate Structures)	18

1.14 โครงสร้างที่ไม่มีเสถียรภาพภายนอก (Externally Statically Unstable Structures)	18
1.15 โครงสร้างที่ไม่มีเสถียรภาพรูปแบบพิเศษ (Geometrically Unstable Externally)	18
1.16 โครงสร้างที่คำนวณได้ทางสถิต (Statically Determinate Externally)	19
1.17 ตัวอย่างโครงสร้างคาน 2 ชั้นที่ต่อเนื่องกันด้วยจตุรรองรับแบบล้อเลื่อนภายใน (internal roller)	20
1.18 สมการสมดุลสำหรับโครงสร้าง Determinate	21
1.19 ตัวอย่างลักษณะโครงสร้างในรายวิชาการวิเคราะห์โครงสร้าง ดีเทอมิเนตและอินดีเทอมิเนตทางสถิต	21
1.20 ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างดีเทอมิเนตและอินดีเทอมิเนต	23
1.21 เสถียรภาพของโครงสร้างดีเทอมิเนตและอินดีเทอมิเนต	24
1.22 การหดตัวหรือขยายตัวของโครงสร้างดีเทอมิเนตและอินดีเทอมิเนต	25
2.1 ตัวอย่างคาน Indeterminate	27
2.2 การพิจารณาคานด้วยวิธีการเสียรูปที่สอดคล้อง	28
2.3 พิจารณาโครงสร้าง Redundant ให้ถูกกระทำด้วยแรงหนึ่งหน่วย	28
2.4 โครงสร้างของตัวอย่างที่ 2.1	28
2.5 พิจารณาด้วยหลักการ Superposition โครงสร้างของตัวอย่างที่ 2.1	30
2.6 พังวัดคุณสมบัติของโครงสร้างจริงในการคำนวณ Δ_{B0} ของตัวอย่างที่ 2.1	31
2.7 พังวัดคุณสมบัติของโครงสร้างเสมือนในการคำนวณ Δ_{B0} ของตัวอย่างที่ 2.1	31
2.8 พังวัดคุณสมบัติของโครงสร้างจริงในการคำนวณ Δ_{BB} ของตัวอย่างที่ 2.1	33
2.9 พังวัดคุณสมบัติของโครงสร้างเสมือนในการคำนวณ Δ_{BB} ของตัวอย่างที่ 2.1	33
2.10 แรงปฏิกิริยาทั้งหมดในโครงสร้างของตัวอย่างที่ 2.1	34

2.11	แผนผังแรงเฉือนและแผนผังโมเมนต์ดัดของตัวอย่างที่ 2.1	35
2.12	โครงสร้างของตัวอย่างที่ 2.2	35
2.13	พิจารณาด้วยหลักการ Superposition โครงสร้างของตัวอย่างที่ 2.2	35
2.14	ผังวัตถุอิสระของโครงสร้างจริงในการคำนวณ Δ_{c0} ของตัวอย่างที่ 2.1.2	36
2.15	ผังวัตถุอิสระของโครงสร้างเสมือนในการคำนวณ Δ_{c0} ของตัวอย่างที่ 2.2	37
2.16	ผังวัตถุอิสระของโครงสร้างจริงในการคำนวณ Δ_{cc} ของตัวอย่างที่ 2.2	38
2.17	ผังวัตถุอิสระของโครงสร้างเสมือนในการคำนวณ Δ_{cc} ของตัวอย่างที่ 2.2	38
2.18	แรงปฏิกิริยาทั้งหมดในโครงสร้างของตัวอย่างที่ 2.2	39
2.19	แผนผังแรงเฉือนและแผนผังโมเมนต์ดัดของตัวอย่างที่ 2.2	40
2.20	ตัวอย่างโครงถัก Indeterminate	41
2.21	หลักการ Superposition สำหรับตัวอย่างโครงถัก Indeterminate	41
2.22	โครงสร้างของตัวอย่างที่ 2.3	42
2.23	พิจารณาด้วยหลักการ Superposition โครงสร้างของตัวอย่างที่ 2.3	43
2.24	ใช้หลักการงานเสมือนคำนวณการเคลื่อนตัว Δ_{D0} ของโครงถักในตัวอย่างที่ 2.3	44
2.25	ใช้หลักการงานเสมือนคำนวณการเคลื่อนตัว Δ_{D0} ของโครงถักในตัวอย่างที่ 2.3	46
2.26	คำนวณแรงปฏิกิริยาทั้งหมดเมื่อทราบค่า D_x เท่ากับ -1.59 ตัน	48
2.27	แรงภายในชิ้นส่วนทั้งหมดของโครงถักในตัวอย่าง 2.3	48
2.28	โครงสร้างของตัวอย่างที่ 2.4	49
2.29	พิจารณาด้วยหลักการ Superposition โครงถักในตัวอย่างที่ 2.4	49
2.30	ใช้หลักการงานเสมือนคำนวณการเคลื่อนตัว Δ_{D0} ของโครงถักในตัวอย่างที่ 2.4	50

2.31 ใช้หลักการงานเสมือนคำนวณการเคลื่อนตัว Δ_{DD} ของโครงถัก ในตัวอย่างที่ 2.4	52
2.32 คำนวณแรงปฏิกิริยาทั้งหมดหลังจากทราบค่า D_x เท่ากับ -0.8 ตัน	54
2.33 แรงภายในชั้นส่วนทั้งหมดของโครงถักในตัวอย่างที่ 2.4	54
2.34 ตัวอย่างโครงข้อแข็งแบบ Indeterminate	55
2.35 หลักการ Superposition สำหรับตัวอย่างโครงข้อแข็ง Indeterminate	56
2.36 โครงสร้างของตัวอย่างที่ 2.5	57
2.37 พิจารณาด้วยหลักการ Superposition โครงสร้างของตัวอย่างที่ 2.5	58
2.38 ใช้หลักการงานเสมือนคำนวณการเคลื่อนตัว Δ_{CO} ของโครง ข้อแข็งในตัวอย่างที่ 2.5	59
2.39 โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจริงในการคำนวณ Δ_{CO} ของ ตัวอย่างที่ 2.5	59
2.40 โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างเสมือนในการคำนวณ Δ_{CO} ของตัวอย่างที่ 2.5	60
2.41 โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจริงในการคำนวณ Δ_{CC} ของ ตัวอย่างที่ 2.5	61
2.42 โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างเสมือนในการคำนวณ Δ_{CC} ของตัวอย่างที่ 2.5	61
2.43 แรงปฏิกิริยาทั้งหมดบนโครงสร้างของตัวอย่างที่ 2.5	63
2.44 แผนผังของแรงภายในทั้งหมดบนโครงสร้างของตัวอย่างที่ 2.5	63
3.1 แสดงพลังงานความเครียดของคานาอยู่ในฟังก์ชันของแรงกระทำ ภายนอกและ Redundant	67
3.2 โครงสร้างคานาของตัวอย่างที่ 3.1	70
3.3 แรงปฏิกิริยาในรูปของ B_y บนโครงสร้างคานาของตัวอย่างที่ 3.1	71
3.4 แรงปฏิกิริยาทั้งหมดบนโครงสร้างของตัวอย่างที่ 3.1	73
3.5 แผนผังแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดบนโครงสร้างคานาของตัวอย่างที่ 3.1	73

4.1	โครงสร้างคานเมื่อรับน้ำหนักกระทำและเกิดการเสียรูป	75
4.2	แสดงค่าบวกและลบของโมเมนต์ดัดและการเคลื่อนตัวเชิงมุม	76
4.3	หลักการ Superposition พิจารณาโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจาก การเคลื่อนตัวและโมเมนต์ยึดแน่นที่ปลาย	76
4.4	โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นที่จตุรรองรับเนื่องจากการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง	77
4.5	โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นที่จตุรรองรับเนื่องจากการเคลื่อนตัวเชิงมุม	78
4.6	โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นที่จตุรรองรับเนื่องจากแรงกระทำภายนอก	79
4.7	โมเมนต์ยึดแน่นที่ปลายของคานเนื่องจากแรงกระทำรูปแบบต่าง ๆ	81
4.8	ชั้นส่วนที่มีปลายข้างหนึ่งเป็นจตุรรองรับแบบจุดหมุน	83
4.9	ลักษณะโครงสร้างที่มีปลายข้างหนึ่งเป็นคานยื่น	84
4.10	พิจารณาน้ำหนักกระทำบนชั้นส่วนยื่นเป็นแรงกระทำที่จุดต่อ	84
4.11	โครงสร้างของตัวอย่างที่ 4.1	85
4.12	แสดงโมเมนต์ดัดที่ปลายของทุกชั้นส่วนของตัวอย่างที่ 4.1	87
4.13	แสดงแผนผังแรงเฉือนและแผนผังโมเมนต์ดัดของตัวอย่างที่ 4.1	89
4.14	โครงสร้างของตัวอย่างที่ 4.2	89
4.15	แสดงค่าและทิศทางของโมเมนต์ดัดที่ปลายของทุกชั้นส่วนบน โครงสร้างของตัวอย่างที่ 4.2	91
4.16	แสดงแผนผังแรงเฉือนและแผนผังโมเมนต์ดัดของตัวอย่างที่ 4.2	91
4.17	โครงสร้างของตัวอย่างที่ 4.3	92
4.18	แสดงค่าและทิศทางของโมเมนต์ดัดที่ปลายของทุกชั้นส่วนบน โครงสร้างของตัวอย่างที่ 4.3	93
4.19	แสดงแผนผังแรงเฉือนและแผนผังโมเมนต์ดัดของตัวอย่างที่ 4.3	94
4.20	โครงสร้างของตัวอย่างที่ 4.4	94
4.21	แปลงน้ำหนักกระทำเป็นแรงเฉือนและโมเมนต์ที่จุด D	95
4.22	แสดงค่าและทิศทางของโมเมนต์ดัดที่ปลายของทุกชั้นส่วนบน โครงสร้างของตัวอย่างที่ 4.4	96
4.23	แสดงแผนผังแรงเฉือนและแผนผังโมเมนต์ดัดของตัวอย่างที่ 4.3	97

4.24 โครงสร้างของตัวอย่างที่ 4.5	97
4.25 แสดงค่าและทิศทางของโมเมนต์ดัดที่ปลายของทุกชิ้นส่วนบน โครงสร้างของตัวอย่างที่ 4.5	100
4.26 แสดงค่าและทิศทางของโมเมนต์ดัดและแรงปฏิกิริยาทั้งหมด ของตัวอย่างที่ 4.5	104
4.27 แสดงแผนผังแรงเฉือน แผนผังแรงในแนวแกนและแผนผัง โมเมนต์ดัดของตัวอย่างที่ 4.5	107
5.1 แสดงโมเมนต์ดัดที่ปลายชิ้นส่วนและการโก่งตัวเนื่องจากแรง ภายนอก	107
5.2 แสดงค่าบวกและลบของโมเมนต์ดัด	108
5.3 โครงสร้างคานจำลองแสดงโมเมนต์ที่สอดคล้องกับความลาดชัน เมื่อปลายข้างหนึ่งเป็นจุดหมุนและอีกข้างหนึ่งยึดแน่น	108
5.4 โครงสร้างคานจำลองแสดงโมเมนต์ที่สอดคล้องกับความลาดชัน เมื่อปลายทั้งสองข้างเป็นจุดหมุน	110
5.5 โมเมนต์ที่เกิดขึ้นที่ปลายเมื่อปลายข้างหนึ่งเป็นจุดหมุนและอีก ข้างหนึ่งยึดแน่น	111
5.6 โมเมนต์ที่เกิดขึ้นที่ปลายเมื่อปลายทั้งสองข้างเป็นจุดหมุน	112
5.7 ค่าโมเมนต์ที่กระจายไปตามแต่ละชิ้นส่วนเมื่อค่า K ไม่เท่ากัน	112
5.8 ลักษณะโครงสร้างที่มีปลายข้างหนึ่งเป็นคานยื่น	115
5.9 พิจารณาน้ำหนักกระทำบนชิ้นส่วนยื่นเป็นแรงกระทำที่จุดต่อ	116
5.10 โครงสร้างของตัวอย่างที่ 5.1	116
5.11 แสดงผลลัพธ์ของโมเมนต์ดัดที่ปลายของทุกชิ้นส่วนของ ตัวอย่างที่ 5.1	119
5.12 แสดงแรงปฏิกิริยาของโครงสร้างคานในตัวอย่างที่ 5.1	121
5.13 แสดงแผนผังแรงเฉือนและแผนผังโมเมนต์ดัดของตัวอย่างที่ 5.1	121
5.14 โครงสร้างของตัวอย่างที่ 5.2	121

5.15 แสดงผลลัพธ์ของโมเมนต์ดัดที่ปลายของทุกชิ้นส่วนของ ตัวอย่างที่ 5.2	125
5.16 แสดงแรงปฏิกิริยาของโครงสร้างคานในตัวอย่างที่ 5.2	127
5.17 แสดงแผนผังแรงเฉือนและแผนผังโมเมนต์ดัดของตัวอย่างที่ 5.2	127
5.18 โครงสร้างของตัวอย่างที่ 5.3	127
5.19 แสดงผลลัพธ์ของโมเมนต์ดัดที่ปลายของทุกชิ้นส่วนและแรง ปฏิกิริยาของตัวอย่างที่ 5.3	132
5.20 แสดงแผนผังแรงเฉือนและแผนผังโมเมนต์ดัดของตัวอย่างที่ 5.3	133
5.21 โครงสร้างของตัวอย่างที่ 5.4	133
5.22 แสดงผลลัพธ์ของโมเมนต์ดัดที่ปลายของทุกชิ้นส่วนของ ตัวอย่างที่ 5.4	137
5.23 แสดงผลลัพธ์ของแรงปฏิกิริยาและการถ่ายแรงผ่านจุดต่อ ทั้งหมดของตัวอย่างที่ 5.4	140
5.24 แสดงแผนผังแรงเฉือน แผนผังแรงในแนวแกน และแผนผัง โมเมนต์ดัดของตัวอย่างที่ 5.4	141
5.25 ลักษณะโครงสร้างจำลองโครงข้อแข็งเมื่อเกิดการเคลื่อนตัว ด้านข้าง	142
5.26 ลักษณะโครงข้อแข็งเมื่อเกิดการเคลื่อนตัวด้านข้าง	142
5.27 โครงสร้างของตัวอย่างที่ 5.5	143
5.28 แสดงการคำนวณค่า R ได้จากผลรวมของแรงเฉือนที่จุด A และ B	146
5.29 แสดงการคำนวณค่า Q ได้จากผลรวมของแรงเฉือนที่จุด A และ B	150
5.30 แสดงผลลัพธ์ของโมเมนต์ดัดที่ปลายของทุกชิ้นส่วนในตัวอย่าง ที่ 5.5	152
5.31 แสดงแผนผังแรงเฉือน แผนผังแรงในแนวแกน และแผนผัง โมเมนต์ดัดของตัวอย่างที่ 5.5	154
6.1 แสดงลักษณะการพิจารณาชิ้นส่วนและจุดต่อของโครงสร้าง	159
6.2 แสดงระบบพิกัด Global และ Local ของโครงสร้างและชิ้นส่วน	160

6.3 จำนวนการเคลื่อนตัวอิสระของแต่ละชนิดโครงสร้าง	161
6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและการเสียรูปหรือ การเคลื่อนตัว	162
6.5 ทิศทางของแรงภายในชิ้นส่วนในระบบ Local และ Global	164
6.6 โครงถักของตัวอย่างที่ 6.1	168
6.7 แสดงการให้ลำดับ DOF ของโครงถักตัวอย่างที่ 6.1	169
6.8 ทิศทางของแรงปฏิกิริยาที่คำนวณได้ในตัวอย่างที่ 6.1	176
6.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง DOF ของชิ้นส่วนในระบบ Local (δ) และ ระบบ Global (u)	176
6.10 โครงถักของตัวอย่างที่ 6.2	182
6.11 แสดงการให้ลำดับ DOF ของโครงถักตัวอย่างที่ 6.2	183
6.12 ทิศทางของแรงปฏิกิริยาที่คำนวณได้ในตัวอย่างที่ 6.2	187
6.13 จำนวนการเคลื่อนตัวอิสระ (Degree of Freedom, DOF) ของ โครงสร้างคาน	191
6.14 โครงสร้างคานของตัวอย่างที่ 6.3	194
6.15 แสดงการให้ลำดับ DOF ของโครงสร้างคานในตัวอย่างที่ 6.3	194
6.16 โครงสร้างคานของตัวอย่างที่ 6.4	203
6.17 แสดงการให้ลำดับ DOF ของโครงสร้างคานตัวอย่างที่ 6.4	203
6.18 จำนวนการเคลื่อนตัวอิสระ (Degree of Freedom, DOF) ของ ชิ้นส่วนโครงข้อแข็ง	211
6.19 ทิศทางของแรงภายในชิ้นส่วนในระบบ Local และ Global ของ ชิ้นส่วนโครงข้อแข็ง	215
6.20 โครงข้อแข็งของตัวอย่างที่ 6.5	218
6.21 แสดงการให้ลำดับ DOF ของโครงสร้างคานตัวอย่างที่ 6.5	219
6.22 โครงข้อแข็งของตัวอย่างที่ 6.6	229
6.23 แสดงการให้ลำดับ DOF ของโครงสร้างคานตัวอย่างที่ 6.6	229
7.1 ตัวอย่างโครงสร้างอาคารที่อยู่ระหว่างการก่อสร้าง	242

7.2 ตัวอย่างการพิจารณาโครงสร้าง 3 มิติ ให้วิเคราะห์ในรูปแบบ 2 มิติ	242
7.3 ผังโมเมนต์ดัด (Bending Moment Diagram) ของคานอย่างง่าย และคานที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น	243
7.4 ผังโมเมนต์ดัด (bending moment diagram) ของคานที่นำไปวิเคราะห์โดยการประมาณ	244
7.5 สมมติฐานกำหนดให้เสาภายในรับแรงเฉือนเป็น 2 เท่าของเสาริมนอก	248
7.6 สมมติฐานกำหนดให้จุดดัดกลับเกิดขึ้นที่กึ่งกลางคานและเสา	249
8.1 ตัวอย่างคานอย่างรับน้ำหนักกระทำแบบเคลื่อนที่ได้	260
8.2 รูปร่างเส้นอิทธิพลของแรงปฏิกิริยาที่จุด A และ B ของคานตัวอย่าง	269
8.3 รูปร่างเส้นอิทธิพลของ A_y โดยหลักการของ Müller-Breslau	269
8.4 รูปร่างเส้นอิทธิพลของ B_y โดยหลักการของ Müller-Breslau	270
8.5 รูปร่างเส้นอิทธิพลของ V_c โดยหลักการของ Müller-Breslau	270
8.6 การคำนวณค่า Δ_1 และ Δ_2 โดยหลักการตรีโกณมิติสำหรับการสร้างเส้นอิทธิพลของแรงเฉือน	270
8.7 รูปร่างเส้นอิทธิพลของ M_c โดยหลักการของ Müller-Breslau	270
8.8 การคำนวณค่า θ_1 และ θ_2 โดยหลักการตรีโกณมิติสำหรับการสร้างเส้นอิทธิพลของโมเมนต์ดัด	271
8.9 ใช้วิธีการเสียรูปที่สอดคล้องพิสูจน์หลักการของ Müller-Breslau	272
8.10 ตัวอย่างเส้นอิทธิพลเชิงคุณภาพของโมเมนต์ดัดและแรงปฏิกิริยาของโครงสร้างคาน	272
8.11 ตัวอย่างเส้นอิทธิพลเชิงคุณภาพของโมเมนต์ดัดและแรงปฏิกิริยาของโครงข้อแข็ง	273
8.12 ตัวอย่างเส้นอิทธิพลเชิงคุณภาพของแรงเฉือน โมเมนต์ดัด และแรงปฏิกิริยาของโครงคานต่อเนื่อง	273

8.13 แยกโครงสร้างที่ถูกนำหน้ากระทำ 1 หน่วย บวกกับโครงสร้าง Redundant	274
8.14 ร่างเส้นอิทธิพลของคาน และตำแหน่งคำนวณค่าการเคลื่อนตัว	275
8.15 คานจริงและคาน Conjugate ของโครงสร้างเพื่อคำนวณค่า การเคลื่อนตัว	275
8.16 เส้นอิทธิพลที่สมบูรณ์ของตัวอย่างที่ 8.6	278
8.17 ระยะทั้งหมดในการสร้างสมการสมดุลของแรงปฏิกิริยาทั้งหมด	279
9.1 โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นบนคานที่มีปลายยึดแน่นสองข้าง	290
9.2 โครงสร้างเกิดโมเมนต์ดัดพลาสติกที่จุดกึ่งกลางคาน	290
9.3 ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบ ข) แบบจำลองพลาสติกแบบสมบูรณ์	291
9.4 ความเค้นและความเครียดของหน้าตัดเมื่อรับโมเมนต์ดัด	292
9.5 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดใด ๆ เมื่อรับโมเมนต์ดัดพลาสติก	293
9.6 ระยะต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณ $\bar{y}$	295
9.7 ผังโมเมนต์ดัดของคานอย่างง่าย	298
9.8 ผังโมเมนต์ดัดของคานในตัวอย่างที่ 9.3 และตำแหน่งที่เกิด โมเมนต์ดัดพลาสติก	300
9.9 ผังโมเมนต์ดัดของคานในตัวอย่างที่ 9.4 และตำแหน่งที่เกิด โมเมนต์ดัดพลาสติก	302
9.10 ผังวัตถุอิสระที่หน้าตัด B พิจารณาจากจุด C	303

บทที่ 1 บทนำ (Introduction)

1.1 ความสำคัญของการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง

การวิเคราะห์โครงสร้างเป็นหนึ่งในสาขาวิชาหลักที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในวิศวกรรมโยธา วิชาที่มุ่งเน้นการศึกษาความแข็งแรง เสถียรภาพ และพฤติกรรมของโครงสร้างต่าง ๆ ตั้งแต่สิ่งก่อสร้างขนาดเล็กจนถึงโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ เช่น ตึกสูง สะพาน เขื่อน และโครงสร้างพื้นฐานอื่น ๆ

ความสำคัญของการวิเคราะห์โครงสร้างสรุปเป็นข้อ ๆ ดังนี้

- ความปลอดภัยของโครงสร้าง การวิเคราะห์โครงสร้างเป็นพื้นฐานสำคัญในการออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างที่ปลอดภัย วิศวกรต้องมีความรู้ในการวิเคราะห์เพื่อประเมินความแข็งแรงและเสถียรภาพของโครงสร้างได้อย่างแม่นยำ ทั้งนี้ เพื่อป้องกันโครงสร้างพังทลายหรือเสื่อมสภาพที่อาจทำให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน การวิเคราะห์ที่ถูกต้องจะช่วยให้คาดการณ์และป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

- การประหยัดทรัพยากร วัสดุก่อสร้างเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อทั้งด้านต้นทุนและสิ่งแวดล้อม การวิเคราะห์โครงสร้างที่แม่นยำจะช่วยลดการใช้วัสดุโดยไม่ลดทอนความแข็งแรงของโครงสร้างได้ ซึ่งส่งผลให้การก่อสร้างดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพและประหยัดค่าใช้จ่าย อีกทั้งยังช่วยลดปริมาณขยะและการปล่อยมลพิษที่เกิดจากกระบวนการผลิตวัสดุได้

- การบำรุงรักษาและการซ่อมแซม การวิเคราะห์โครงสร้างไม่เพียงแต่ช่วยออกแบบโครงสร้างใหม่เท่านั้น แต่ยังเป็นเครื่องมือสำคัญในการวางแผนบำรุงรักษาและซ่อมแซมโครงสร้างที่มีอยู่เดิม การเข้าใจพฤติกรรมและจุดอ่อนของโครงสร้างช่วยให้วิศวกรกำหนดวิธีบำรุงรักษาและซ่อมแซมได้อย่างเหมาะสม ซึ่งจะช่วยยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างและลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมที่เกิดจากการเสื่อมสภาพ

- การพัฒนานวัตกรรม การศึกษาการวิเคราะห์โครงสร้างเปิดโอกาสให้วิศวกรพัฒนานวัตกรรมใหม่ ๆ ในการออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างที่ทนทานและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น การค้นคว้าและพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ใหม่ ๆ รวมถึงการใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัยจะช่วยให้ออกแบบโครงสร้างที่ตอบสนองต่อความต้องการและสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงได้ดียิ่งขึ้น

- การประเมินความเสี่ยง ในยุคที่ภัยพิบัติทางธรรมชาติมีความถี่และรุนแรงเพิ่มขึ้น การวิเคราะห์โครงสร้างเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการประเมินความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นจากแผ่นดินไหว พายุ หรือแรงกระแทกจากภายนอก วิศวกรใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์โครงสร้างในการวางแผนและออกแบบโครงสร้างที่ต้านทานภัยพิบัติได้อย่างเหมาะสม ซึ่งจะช่วยลดความเสียหายและเพิ่มความปลอดภัยให้แก่ผู้ใช้งานโครงสร้าง

สำหรับวิศวกร การวิเคราะห์โครงสร้างเป็นความรู้และทักษะที่จำเป็นอย่างยิ่งเนื่องจากเป็นพื้นฐานในการออกแบบและตรวจสอบโครงสร้างที่วิศวกรรับผิดชอบ ความรู้ในด้านนี้จะช่วยให้วิศวกรทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและมั่นใจในความปลอดภัยของโครงสร้างที่ตนเองออกแบบ การศึกษาในวิชานี้ยังเปิดโอกาสให้วิศวกรพัฒนาทักษะและความรู้ในด้านอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมโยธาได้อีกด้วยในระดับประเทศ การวิเคราะห์โครงสร้างมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานที่มีคุณภาพและความปลอดภัย การมีโครงสร้างพื้นฐานที่แข็งแรงและมีประสิทธิภาพช่วยเสริมสร้างความมั่นคงและความเจริญรุ่งเรืองให้แก่ประเทศ นอกจากนี้ การวิเคราะห์โครงสร้างช่วยให้รับมือกับภัยพิบัติทางธรรมชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดความเสียหายและความสูญเสียที่อาจเกิดขึ้น ดังนั้น การวิเคราะห์โครงสร้างจึงเป็นเครื่องมือที่สำคัญที่ช่วยให้วิศวกรออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างที่มีความปลอดภัย ประหยัดทรัพยากร และตอบสนองความต้องการของสังคมได้ ผู้เรียนที่ศึกษาในวิชานี้จะได้รับความรู้และทักษะที่สำคัญที่จะนำไปใช้ประกอบอาชีพวิศวกรรมโยธาและการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของประเทศในอนาคต

1.2 ลำดับขั้นตอนในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง

- การวางแผน ในขั้นตอนการวางแผนต้องทราบถึงวัตถุประสงค์ของอาคาร หรือสิ่งก่อสร้างที่เจ้าของต้องการ เช่น ใช้เพื่ออยู่อาศัย, เป็นห้องสมุด, เป็นหอประชุม รวมทั้งลักษณะของน้ำหนักที่จะกระทำต่ออาคารเพื่อวิเคราะห์และออกแบบได้อย่างถูกต้อง

- การประมาณน้ำหนักบรรทุก เมื่อทราบวัตถุประสงค์การใช้งานของอาคารที่จะวิเคราะห์และออกแบบแล้วก็จะประมาณน้ำหนักบรรทุกที่จะกระทำต่อโครงสร้าง โดยอ้างอิงน้ำหนักบรรทุกจากมาตรฐานต่าง ๆ เช่น วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) ซึ่งจะต้องพิจารณาน้ำหนักบรรทุกที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ น้ำหนักบรรทุกคงที่ น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ และแรงกระทำจากสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ เช่น แรงลมหรือแรงแผ่นดินไหว

- การออกแบบโครงสร้างเริ่มแรก ด้วยประสบการณ์ของผู้ออกแบบหรือการวิเคราะห์โดยวิธีประมาณทำให้ทราบเบื้องต้นได้ว่า ขนาดของชิ้นส่วนของแต่ละองค์อาคารจะมีขนาดประมาณเท่าไร ซึ่งจะช่วยลดขั้นตอนการออกแบบได้

- การก่อสร้าง เมื่อวิเคราะห์และออกแบบเรียบร้อยแล้ว จึงนำแบบก่อสร้างที่ได้ไปก่อสร้างต่อไป

- การตรวจสอบสภาวะการใช้งาน เพื่อให้อาคารที่วิเคราะห์และออกแบบมีอายุการใช้งานมากขึ้น จำเป็นต้องตรวจสอบสภาวะใช้งานของอาคารนั้นจากมาตรฐานต่าง ๆ แม้ว่าผู้ออกแบบจะยืนยันว่า อาคารรับน้ำหนักได้แต่ก็บอกไม่ได้ว่าอาคารนี้มีอายุการใช้งานยาวนานหรือไม่ ตัวอย่างเช่น หอประชุมชั้นสองเมื่อมีผู้ใช้งานเต็มพื้นที่พื้นจะโก่งตัวมากกว่ามาตรฐาน แม้จะรับน้ำหนักได้ก็ถือว่าอาคารนี้ไม่ปลอดภัย ดังนั้นการตรวจสอบดังกล่าวจึงสำคัญมาก

1.3 การจำแนกลักษณะของโครงสร้าง

- โครงสร้างรับแรงดึงหรือเคเบิล (cable-stayed structure) โครงสร้างชนิด Cable-Stayed หรือสะพานสายเคเบิล เป็นโครงสร้างที่ใช้สายเคเบิลรับและถ่ายแรงจากโครงสร้างหลักไปยังฐานรองรับ โครงสร้างประเภทนี้มีการออกแบบที่โดดเด่นและมีประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักมาก ดังนั้น จึงนิยมก่อสร้างสะพานขนาดใหญ่ รูปตัวอย่างโครงสร้าง Cable-Stayed ที่สร้างโดย ChatGPT แสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างโครงสร้าง Cable-Stayed ที่สร้างโดย ChatGPT

โครงสร้างชนิด Cable-Stayed หรือสะพานสายเคเบิลมีหลักการและองค์ประกอบสำคัญ ดังนี้

เสา (towers or pylons) เสาหรือเสาคอนกรีตที่สูงจากพื้นเป็นโครงสร้างหลักที่รองรับสายเคเบิล โดยเสาจะถูกติดตั้งตรงกลางหรือที่จุดสำคัญบนสะพาน

สายเคเบิล (cables) สายเคเบิลที่ยึดจากเสามายังพื้นสะพาน โดยสายเคเบิลจะถ่ายแรงจากสะพานไปยังเสา

พื้นสะพาน (bridge deck) ส่วนที่เป็นพื้นหรือผิวสะพานที่ยึดติดกับสายเคเบิล โดยพื้นสะพานจะรับน้ำหนักจากการใช้งานและถ่ายแรงไปยังสายเคเบิล

ฐานรองรับ (anchorage) จุดที่สายเคเบิลถูกยึดติดกับพื้นสะพานหรือโครงสร้างฐานราก เพื่อให้แน่ใจว่าสายเคเบิลอยู่ในตำแหน่งที่มั่นคง

หลักการทำงานของ Cable-Stayed Structures

การรับน้ำหนักและการถ่ายแรง สายเคเบิลจะรับน้ำหนักจากพื้นสะพานและถ่ายแรงไปยังเสา ทำให้แรงกดและแรงดึงในสะพานถูกกระจายอย่างสมดุล โครงสร้าง Cable-Stayed จัดเรียงสายเคเบิลในรูปแบบที่หลากหลาย เช่น รูปพัด (fan), รูปกากบาท (harp) หรือแบบกึ่งลอย (semi-fan) ซึ่งแต่ละแบบมีข้อดีและการประยุกต์ใช้แตกต่างกัน

การกระจายแรงในเสา เสาจะรับแรงจากสายเคเบิลและถ่ายแรงลงไปยังฐานรองรับ เสาต้องแข็งแรงและเสถียรพอที่จะรองรับแรงทั้งหมดที่เกิดขึ้น

การออกแบบที่ประหยัดและมีประสิทธิภาพ โครงสร้าง Cable-Stayed ใช้วัสดุอย่างประหยัดเนื่องจากสายเคเบิลรับแรงดึงได้ดี และสร้างสะพานที่มีช่วงกลางยาวได้โดยไม่ต้องมีฐานรองรับเพิ่มเติม

ข้อดีของ Cable-Stayed Structures

ความยืดหยุ่นในการออกแบบ ออกแบบสะพานในรูปแบบที่หลากหลายตามความต้องการของโครงการได้

ประหยัดวัสดุและต้นทุน ใช้ปริมาณวัสดุน้อยกว่าโครงสร้างประเภทอื่นในการสร้างสะพานช่วงยาว

มีโครงสร้างที่แข็งแรง รับน้ำหนัก และมีเสถียรภาพที่ดี

ความสวยงามและโดดเด่น มีความสวยงามทางสถาปัตยกรรม ทำให้นิยมสร้างสะพานที่เป็นจุดเด่นของเมือง

ข้อจำกัดและความท้าทาย

การออกแบบและการก่อสร้างซับซ้อน ต้องคำนวณและออกแบบอย่างแม่นยำ รวมถึงการก่อสร้างที่มีความเชี่ยวชาญ

ต้องบำรุงรักษาและตรวจสอบสายเคเบิลและส่วนประกอบอื่น ๆ อย่างต่อเนื่องเพื่อความปลอดภัย

ดังนั้นโครงสร้างชนิด Cable-Stayed จึงเป็นโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพรับน้ำหนักและมีความยืดหยุ่นในการออกแบบ ทำให้สร้างสะพานที่แข็งแรง สวยงาม และประหยัดวัสดุ อย่างไรก็ตาม โครงสร้างประเภทนี้จะรับแรงดึงเพียงอย่างเดียว โดยจะรับแรงดัดหรือแรงอัดไม่ได้ เช่น เคเบิลหรือลวดกำลังสูงที่ใช้รับแรงดึงสำหรับโครงสร้างสะพานดังตัวอย่างในรูปที่ 1.1

- **โครงสร้างสะพานแขวน (suspension bridge)** เป็นหนึ่งในประเภทของสะพานที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากรองรับช่วงยาวและรับน้ำหนักได้มาก โครงสร้างนี้มีการออกแบบที่ซับซ้อนและต้องการการวิเคราะห์ที่ละเอียดอ่อน รูปตัวอย่างโครงสร้าง Suspension Bridge ที่สร้างโดย ChatGPT แสดงดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 ตัวอย่างลักษณะโครงสร้างสะพานแขวน หรือ Suspension Bridge
ที่สร้างโดย ChatGPT

โครงสร้างชนิด Suspension Bridge หรือ สะพานแขวนมีหลักการและองค์ประกอบสำคัญดังนี้

เสา (towers or pylons) หรือ หอคอย เป็นโครงสร้างแนวตั้งที่รองรับสายเคเบิลหลัก เสาวางไว้ที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของช่วงกลางสะพาน และเสาต้องแข็งแรงเพียงพอที่จะรองรับน้ำหนักจากสายเคเบิลหลักและถ่ายแรงลงไปยังฐานราก

สายเคเบิล (cables) สายเคเบิลหลักเป็นสายเคเบิลที่คล้องจากเสาหนึ่งไปยังอีกเสาหนึ่ง และรองรับน้ำหนักจากสะพานทั้งหมด สายเคเบิลหลักจะถ่ายแรงดึงไปยังเสาและต่อไปยังฐานราก

สายเคเบิลแนวตั้ง (suspender cables or hangers) คือ สายเคเบิลที่ห้อยลงมาจากสายเคเบิลหลักเพื่อรองรับพื้นสะพานจะถ่ายน้ำหนักจากพื้นสะพานไปยังสายเคเบิลหลัก

พื้นสะพาน (bridge deck) เป็นส่วนที่รองรับการจราจรและถ่ายน้ำหนักไปยังสายเคเบิลแนวตั้ง ต้องแข็งแรงพอที่จะรองรับน้ำหนักจากการจราจรและแรงลม

ฐานราก (foundation) เป็นจุดที่ยึดสายเคเบิลหลักกับพื้นดินหรือโครงสร้างอื่น ๆ เพื่อให้สายเคเบิลหลักมั่นคง และต้องแข็งแรงเพียงพอที่จะรองรับแรงดึงจากสายเคเบิลหลัก

หลักการทำงานของ Suspension Bridge

การถ่ายแรง น้ำหนักจากการจราจรและตัวสะพานถูกถ่ายผ่านพื้นสะพานไปยังสายเคเบิลแนวตั้ง สายเคเบิลแนวตั้งจะถ่ายน้ำหนักต่อไปยังสายเคเบิลหลัก ซึ่งคล้องลงมาเพื่อรับน้ำหนัก

การกระจายแรงดึง สายเคเบิลหลักรับแรงดึงที่เกิดจากน้ำหนักของสะพานและการจราจร และถ่ายแรงดึงนี้ไปยังเสาและฐานราก เสาและฐานรากต้องรับแรงดึงเหล่านี้และถ่ายลงไปยังพื้นดินอย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย

เสถียรภาพของโครงสร้าง เสถียรภาพของสะพานขึ้นอยู่กับการกระจายแรงดึงในสายเคเบิลหลักและการรองรับแรงจากเสาและฐานราก สายเคเบิลหลักที่แข็งแรงและยึดติดที่มั่นคง ทำให้สะพานเสถียรและทนทานต่อแรงภายนอก เช่น แรงลม แผ่นดินไหว

ข้อดีของ Suspension Bridge

การรองรับช่วงยาว สะพานแขวนรองรับช่วงยาวได้โดยไม่ต้องมีเสารองรับช่วงกลาง ทำให้เหมาะสำหรับการข้ามแม่น้ำหรือช่องเขากว้างที่ต้องการความยาวช่วงมาก ความยืดหยุ่นในการออกแบบ ออกแบบให้มีรูปแบบและขนาดที่หลากหลายตามความต้องการของโครงการ

ความสวยงามและโดดเด่น มีความสวยงามและโดดเด่นทางสถาปัตยกรรม ทำให้เป็นที่นิยมในการสร้างสะพานที่เป็นสัญลักษณ์ของเมือง

ข้อจำกัดและความท้าทาย

ต้นทุนการก่อสร้างสูง การก่อสร้างสะพานแขวนมีต้นทุนสูงเนื่องจากต้องใช้วัสดุและเทคโนโลยีที่มีความซับซ้อน รวมทั้งความสามารถและประสบการณ์ของผู้ก่อสร้าง

ความท้าทายทางวิศวกรรม การออกแบบและการก่อสร้างต้องคำนวณและวิเคราะห์อย่างแม่นยำ เพื่อให้แน่ใจว่าสะพานปลอดภัยและเสถียรภาพ

การบำรุงรักษา สะพานแขวนต้องการการบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่อง เพื่อตรวจสอบความแข็งแรงและความเสถียรของสายเคเบิลและโครงสร้างอื่น ๆ

- **โครงสร้างรับแรงอัด (compression member)** โครงสร้างรับแรงอัดส่วนมากจะเป็นเสาซึ่งรับน้ำหนักดันทันบนที่ถูกถ่ายมาจากพื้นและคานตามลำดับ ซึ่งโครงสร้างเสานี้ เมื่อรับน้ำหนักแล้วจะถ่ายแรงเข้าสู่เสาชั้นถัดไปหรือฐานรากต่อไป ดังตัวอย่างในรูปที่ 1.3 ซึ่งเป็นรูปโครงสร้างที่สร้างโดย ChatGPT นอกจากโครงสร้างเสาที่รับแรงอัดแล้วโครงสร้างรูปแบบโค้ง (arch) รับแรงอัดได้เช่นเดียวกัน โดยเมื่อน้ำหนักกระทำจากด้านบนจะเกิดการถ่ายแรงออกด้านข้างซึ่งจะถูกต้านไว้โดยชิ้นส่วนที่อยู่ติดกัน ทำให้โครงสร้างลักษณะนี้รับแรงอัดได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นเดียวกัน รูปตัวอย่างโครงสร้าง Arch ที่สร้างโดย ChatGPT สำหรับการก่อสร้างอุโมงค์ แสดงดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.3 ตัวอย่างโครงสร้างเสาที่ทำหน้าที่รับแรงอัดเป็นหลักที่สร้างโดย ChatGPT

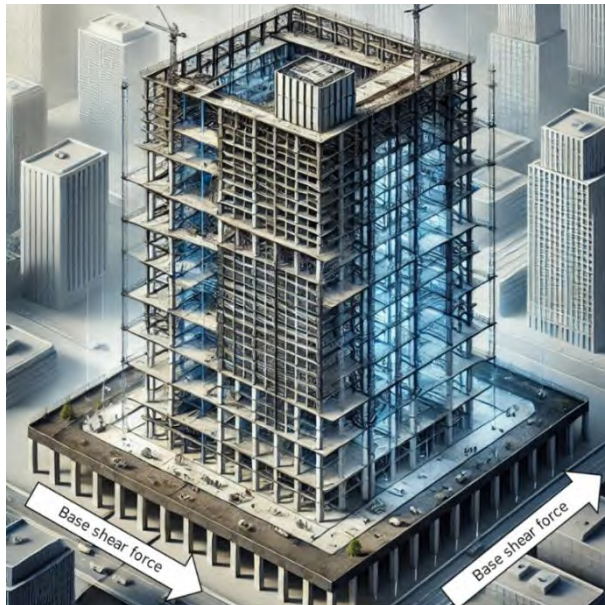


รูปที่ 1.4 ตัวอย่างโครงสร้างอุโมงค์ที่สร้างโดย ChatGPT ที่มีลักษณะเป็น Arch

- **โครงถักหรือโครงข้อหมุน (truss)** โครงถักหรือข้อหมุน (truss) เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนหลาย ๆ ชิ้นเชื่อมต่อกันเป็นรูปทรงเรขาคณิตต่าง ๆ โดยทั่วไปใช้สามเหลี่ยมเป็นหลัก เนื่องจากเป็นรูปทรงที่มีเสถียรและกระจายแรงได้ดี โครงข้อหมุนมักใช้สร้างสะพาน หลังคา และโครงสร้างอาคารต่าง ๆ โครงสร้างชนิดนี้รับน้ำหนักผ่านจุดต่อที่เป็นจุดหมุน (hinge) โดยชิ้นส่วนที่นำมาประกอบเป็นโครงข้อหมุนทำหน้าที่รับแรงในแนวแกนเท่านั้นซึ่งประกอบไปด้วยแรงดึงและแรงอัด จากนั้นจึงถ่ายแรงต่อไปยังชิ้นส่วนอื่น ๆ จนไปถึงจุดรองรับ ตัวอย่างโครงถักหรือโครงข้อหมุนของโครงสร้างสะพานที่สร้างโดย ChatGPT แสดงดังรูปที่ 1.5 โครงข้อหมุนประยุกต์กับโครงสร้างสะพาน ช่วยให้แข็งแรงและรับน้ำหนักได้ดีมาก ประยุกต์กับโครงหลังคาขนาดใหญ่ เช่น สนามกีฬา โรงงาน เพื่อให้ได้พื้นที่กว้างมาก และประยุกต์กับโครงสร้างอาคารที่ต้องการความแข็งแรงและเสถียรภาพสูง เช่น อาคารสูง โรงจอดรถ โครงสร้างชั่วคราวสำหรับก่อสร้างสะพานขนาดใหญ่



รูปที่ 1.5 ตัวอย่างโครงสร้างสะพานที่มีลักษณะเป็นโครงข้อหมุน สร้างโดย ChatGPT



รูปที่ 1.6 ทิศทางของแรงแผ่นดินไหวที่เป็นแรงเฉือนกระทำที่ฐานของอาคาร

- **โครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหวที่พิจารณาแรงเฉือนที่ฐาน (base shear in earthquake-resistant structures)** โครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหว (earthquake-resistant structures) ออกแบบมาเพื่อรับมือกับแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากแผ่นดินไหว หนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาในการออกแบบโครงสร้างเหล่านี้คือ แรงเฉือนที่ฐาน (base shear) ซึ่งเป็นแรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่ฐานรากของโครงสร้างเมื่อเกิดแผ่นดินไหว ในการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารต้านทานแผ่นดินไหวจะพิจารณาแรงแผ่นดินไหวเป็นแรงกระทำในแนวราบผ่านพื้นดินเข้าสู่อาคาร โดยแรงกระทำด้านข้างนี้ทำให้เกิดแรงเฉือนในองค์อาคารทำให้อาคารเกิดความเสียหายได้ ผู้ออกแบบจะระบุโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนในอาคารเพื่อใช้รับแรงกระทำดังกล่าวโดยเฉพาะ ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการต้านทานแรงด้านข้าง เช่น แรงแผ่นดินไหว การพิจารณาออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหวช่วยลดความเสี่ยงจากการเกิดความเสียหายและการถล่มของโครงสร้าง ช่วยให้โครงสร้างมีเสถียรภาพและมั่นคงเมื่อต้องรับแรงสั่นสะเทือน และช่วยลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับโครงสร้างและสิ่งของภายใน

โครงสร้าง รูปที่ 1.6 เป็นรูปโดย ChatGPT แสดงทิศทางของแรงเฉือนที่ฐานซึ่งเกิดจากแรงแผ่นดินไหวต่อตัวอย่างโครงสร้างอาคาร

- **โครงสร้างรับแรงดัด (flexural member)** โครงสร้างรับแรงดัดเป็นโครงสร้างที่ออกแบบมาเพื่อรับและถ่ายแรงดัด (bending moments) ที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำที่พยายามทำให้โครงสร้างโค้งงอ เช่น แรงลม น้ำหนักบรรทุก แรงอื่น ๆ ที่กระทำในแนวตั้งฉากกับแนวของโครงสร้าง สำหรับโครงสร้างรับแรงดัดประกอบด้วย คาน เสา พื้น เป็นต้น โครงสร้างรับแรงดัดและแรงเฉือนที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกและแรงกระทำอื่น ๆ ซึ่งแรงดัดจะทำให้คานโค้งงอ โดยส่วนที่อยู่ด้านบนของคานจะรับแรงอัด (compression) (เหนือแกนสะเทิน) และส่วนที่อยู่ด้านล่างจะรับแรงดึง (tension) (ใต้แกนสะเทิน) คอนกรีตเป็นวัสดุเปราะ รับแรงดึงได้ไม่ดี ดังนั้น จำเป็นต้องใช้เหล็กเสริมในคานคอนกรีตจะช่วยรับแรงดึงที่เกิดขึ้น การวิเคราะห์หาแรงดัดที่เกิดขึ้นและออกแบบโครงสร้างให้รับแรงดัดที่เกิดขึ้นได้จึงสำคัญต่อโครงสร้างอาคารทุกประเภท รูปที่ 1.7 แสดงตัวอย่างโครงสร้างคาน ที่สร้างโดย ChatGPT



รูปที่ 1.7 ตัวอย่างโครงสร้างคานที่รับแรงดัดเป็นหลักที่สร้างโดย ChatGPT

1.4 น้ำหนักกระทำต่อโครงสร้าง

ลักษณะของน้ำหนักที่กระทำต่อโครงสร้างมีหลายลักษณะ แต่ละลักษณะมีความสำคัญต่อโครงสร้างแตกต่างกันขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย น้ำหนักกระทำโดยทั่วไป มีดังนี้

- น้ำหนักกระทำคงที่ (dead load) คือ น้ำหนักที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลกกระทำอย่างคงที่ต่อโครงสร้าง โดยไม่เปลี่ยนตำแหน่งที่กระทำและกระทำตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้าง เช่น น้ำหนักของโครงสร้างหรือเครื่องมือหรือเครื่องจักรที่ติดตั้งอย่างถาวรบนอาคาร

- น้ำหนักบรรทุกจร (live load) คือ น้ำหนักบรรทุกที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าหรือตำแหน่งได้ตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้าง เช่น น้ำหนักของผู้ใช้อาคารเพอร์นิเจอร์สำนักงาน

- น้ำหนักบรรทุกกระแทก (impact load) คือ น้ำหนักบรรทุกที่เกิดจากความเร่งกระทำต่อโครงสร้าง เช่น รถยนต์ชนโครงสร้างกั้นตบถนนสายหลัก

- น้ำหนักกระทำจากธรรมชาติ (environmental load) คือ น้ำหนักกระทำที่เกิดจากธรรมชาติ เช่น แรงแลม แรงแผ่นดินไหว

- น้ำหนักกระทำทางชลศาสตร์และปฐพี (hydrostatic and soil pressure) คือ น้ำหนักกระทำโดยแรงดันของน้ำหรือดินกระทำต่อโครงสร้างจะถูกน้ำหนักจากด้านบนกดทำให้ส่วนล่างพยายามที่จะขยายออกด้านข้าง ส่งผลให้เกิดแรงดันต่อกำแพงเขื่อน

- น้ำหนักกระทำที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (thermal load) เกิดขึ้นเมื่อชิ้นส่วนเกิดการเปลี่ยนแปลงความยาว (ยืดหรือหด) ทำให้เกิดแรงภายในต่อชิ้นส่วนที่อยู่ติดกัน อาจส่งผลให้เกิดความเสียหายได้ จึงจำเป็นต้องพิจารณาน้ำหนักกระทำประเภทนี้ โดยเฉพาะโครงสร้างเหล็กที่มีค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงรูปต่ออุณหภูมิสูง

- น้ำหนักกระทำอื่น ๆ เช่น การเคลื่อนตัวของจตุรรองรับหรือความผิดพลาดจากการประกอบชิ้นงานที่ไม่ตรงตามแบบก่อสร้าง ทำให้เกิดแรงกระทำที่ไม่ได้ออกแบบไว้

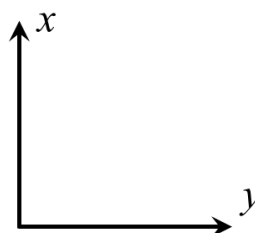
- การรวมน้ำหนัก (load combination) เมื่อทราบน้ำหนักกระทำที่เป็นไปได้ที่จะเกิดกับโครงสร้างนั้น ๆ แล้วจำเป็นจะต้องพิจารณากรณีที่น้ำหนักกระทำร่วมกันในหลาย ๆ รูปแบบ เช่น พิจารณาแรงลมในส่วนของชั้นที่ 15 ขึ้นไป หรือแรงแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นเมื่อมีการใช้งานเต็มพื้นที่ ซึ่งเป็นกรณีที่เกิดขึ้นได้ จากนั้นจึงพิจารณาแรงภายในที่เกิดขึ้นเทียบกับมาตรฐานของสภาวะการใช้งาน ปัจจัยที่ต้องพิจารณาสำหรับสภาวะการใช้งาน ได้แก่ การเสียรูป, การสั่นสะเทือน, รอยร้าว, การกัดกร่อน และความล้า

1.5 สภาวะสมดุลและแรงปฏิกิริยาที่จุดรองรับ (Equilibrium and Support Reactions)

1.5.1 สมการสภาวะสมดุล

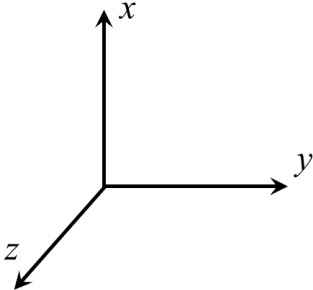
ในการวิเคราะห์โครงสร้างจำเป็นต้องพิจารณาสภาวะสมดุลเนื่องจากโครงสร้างต้องหยุดนิ่งจึงจะใช้งานได้อย่างปลอดภัย สมการที่ใช้พิจารณาสภาวะสมดุลขึ้นอยู่กับปัญหาที่วิเคราะห์โดยแบ่งเป็นปัญหาระบบ 2 มิติ หรือ 3 มิติ จำนวนสมการที่ใช้แตกต่างกัน ดังนี้

- ระบบ 2 มิติ (plane system) พิจารณาแรงในแนวนอนและแรงในแนวตั้ง รวมถึงโมเมนต์ที่เกิดขึ้นรอบแกน z ดังนั้น สมการที่ต้องพิจารณาทั้งหมดจะเท่ากับ 3 สมการดังรูปที่ 1.8


$$\begin{aligned}\sum F_x &= 0 \\ \sum F_y &= 0 \\ \sum M_z &= 0\end{aligned}$$

รูปที่ 1.8 สมการสมดุลจำนวน 3 สมการสำหรับโครงสร้าง 2 มิติ

- ระบบ 3 มิติ (space system) พิจารณาแรงในแนวนอน แรงในแนวตั้ง และแรงในแนวตั้งฉากออกจากกระนาบ x-y รวมถึงโมเมนต์ที่เกิดขึ้นรอบแกน x, y และ z ดังนั้น สมการที่ต้องพิจารณาทั้งหมดจะเท่ากับ 6 สมการดังรูปที่ 1.9



$$\begin{array}{ll} \sum F_x = 0 & \sum M_x = 0 \\ \sum F_y = 0 & \sum M_y = 0 \\ \sum F_z = 0 & \sum M_z = 0 \end{array}$$

รูปที่ 1.9 สมการสมดุลจำนวน 6 สมการสำหรับโครงสร้าง 3 มิติ

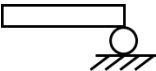
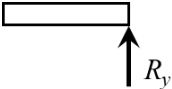
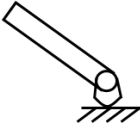
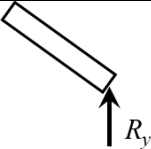
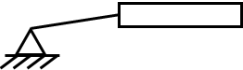
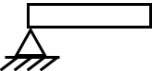
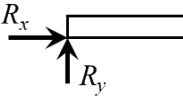
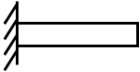
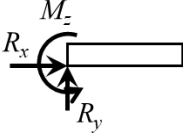
1.5.2 แรงภายนอกและแรงภายใน (external and internal forces)

แรงกระทำภายนอก (external forces) คือ แรงที่กระทำต่อโครงสร้าง รวมถึงแรงปฏิกิริยาที่จุดรองรับอันเนื่องมาจากแรงกระทำภายนอก

แรงกระทำภายใน (Internal forces) คือ แรงที่เกิดขึ้นภายในองค์อาคาร เนื่องจากแรงกระทำจากภายนอกต่าง ๆ โดยชนิดของแรงภายในขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้าง เช่น แรงภายในโครงข้อหมุนจะเป็นแรงในแนวแกนเท่านั้น หรือแรงภายในคานจะประกอบไปด้วยแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด

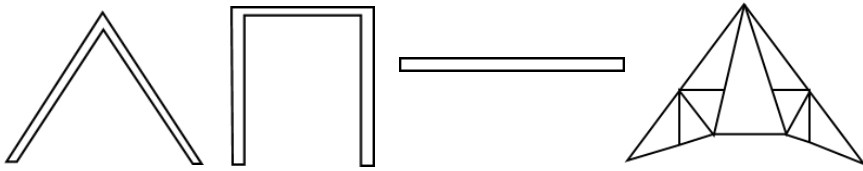
1.5.3 จุดรองรับรูปแบบต่าง ๆ ของโครงสร้าง 2 มิติ

จำนวนหรือลักษณะของแรงปฏิกิริยาที่จุดรองรับขึ้นอยู่กับชนิดของจุดรองรับ การที่จุดรองรับจะมีแรงปฏิกิริยาในทิศทางใด ต้องไม่เคลื่อนในทิศทางนั้นจึงจะเกิดแรงต้านทานเป็นแรงปฏิกิริยาได้ เช่น บานพับประตู (hinge) หมุนได้เพราะใช้สำหรับเปิด-ปิดประตู ดังนั้น บานพับจะไม่มีแรงปฏิกิริยาในทิศทางต้านทานโมเมนต์ได้ หรือจุดรองรับแบบล้อเลื่อน (roller) เคลื่อนที่ในแนวราบได้ จะไม่มีแรงปฏิกิริยาต้านข้างที่ต้านทานการเคลื่อนในแนวราบ ตัวอย่างของจุดรองรับและลักษณะของแรงปฏิกิริยาแสดงดังตารางด้านล่าง

ชนิดของจุดรองรับ	รูปร่างการจำลอง	แรงปฏิกิริยา
Roller		
Rocker		
Link		
ชนิดของจุดรองรับ	รูปร่างการจำลอง	แรงปฏิกิริยา
Hinge		
Fixed		

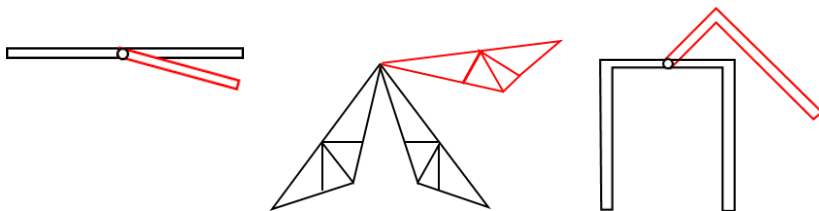
1.6 โครงสร้างที่คำนวณได้ทางสถิตและความไม่เสถียรของโครงสร้าง (Statically Determinate Structures and Structural Instability)

- เสถียรภาพภายใน (internal stability) คือ โครงสร้างที่ต้านทานการเสียรูปได้ด้วยตัวเองหรือไม่เกิดการเสียรูปเมื่อมีการถอดจุดรองรับออก เนื่องจากจุดต่อของชิ้นส่วนเป็นจุดยึดแน่น (rigid joint) หรือเชื่อมต่อกันด้วยจุดยึดหมุน (hinge) แต่เชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างรูปแบบปิดดังรูปที่ 1.10



รูปที่ 1.10 ลักษณะการเชื่อมต่อกันของชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีเสถียรภาพภายใน
(Internally Stable Structures)

ในขณะที่โครงสร้างที่ไม่มีเสถียรภาพภายในจะมีจุดต่อบางตำแหน่งที่เป็นจุดหมุน ทำให้โครงสร้างเสียรูปหรือหมุน เนื่องจากโครงสร้างไม่ได้เชื่อมต่อกันในลักษณะปิด ดังรูปที่ 1.11



รูปที่ 1.11 โครงสร้างที่ไม่มีเสถียรภาพภายใน (Internally Unstable Structures)

- การคำนวณได้ทางสถิตของโครงสร้างที่มีเสถียรภาพภายใน (Static Determinacy of Internally Stable Structures)

ระบบโครงสร้าง 2 มิติแต่ละรูปแบบจำแนกเป็นโครงสร้างที่คำนวณได้ทางสถิตโดยอาศัยการพิจารณาจำนวนตัวไม่รู้ค่า (unknown) คือ จำนวนแรงปฏิกิริยาที่จุดรองรับ ประกอบกับจำนวนสมการสมดุล สำหรับปัญหา 2 มิติ นั้นจะมีสมการสมดุลทั้งหมด 3 สมการ คือ $\sum F_x = 0$ $\sum F_y = 0$ และ $\sum M_z = 0$ โดยจำนวนตัวไม่รู้ค่าของโครงสร้างบ่งบอกลักษณะของโครงสร้างได้ ดังนี้

Unknown (r) = 3 (equilibrium equations) = โครงสร้างที่คำนวณได้ทางสถิต

Unknown (r) > 3 (equilibrium equations) = โครงสร้างที่คำนวณไม่ได้ทางสถิต

Unknown (r) < 3 (equilibrium equations) = โครงสร้างที่ไม่มีเสถียรภาพ

จำนวนตัวไม่รู้ค่าส่วนเกินคำนวณได้โดย DI (Degree of Indeterminacy) = Unknown – 3