การเลือกรูปแบบโครงสร้างและการทำงานออกแบบร่วมกับสถาปนิก

เอนก ศิริพานิชกร

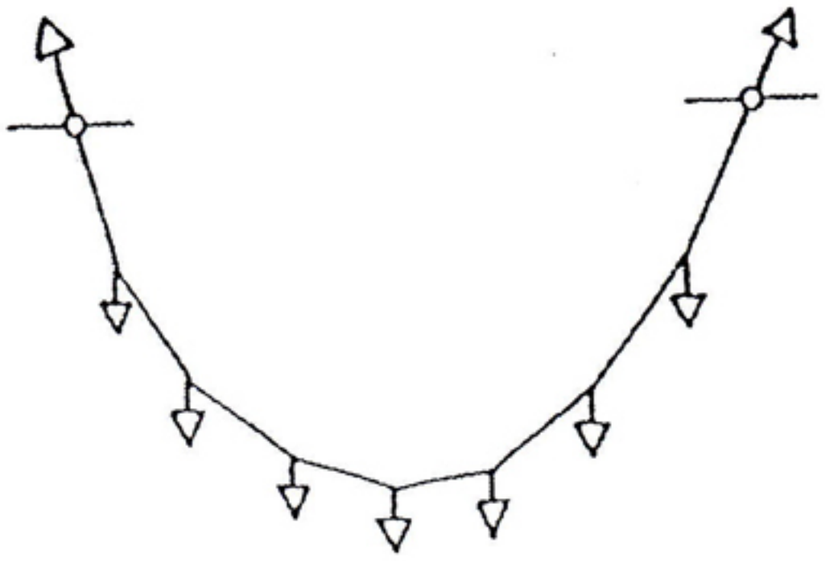
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
e-mail : anek.sir@kmutt.ac.th

งานคำนวณออกแบบวิศวกรรมโครงสร้างสำหรับอาคารต่าง ๆ เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างสถาปนิกและวิศวกรโครงสร้าง เพื่อให้งานออกแบบอาคารเป็นไปด้วยความเรียบร้อยถูกต้อง นอกจากผลการออกแบบที่ต้องเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในงานวิศวกรรมที่ได้แก่องค์อาคารต้องมีความแข็งแรงเพียงพอ (Enough Strength) และสามารถนำไปใช้งานได้ (Servicability) แล้ว การออกแบบที่ดีต้องเป็นไปตามความต้องการด้านสถาปัตยกรรมด้วย ในบทความนี้จะกล่าวสรุปถึงงานของสถาปนิกและวิศวกรโครงสร้างที่เริ่มต้นด้วยกิจกรรมที่ต้องมีความสัมพันธ์กันแล้ว ยังต้องร่วมกันออกแบบเพื่อให้งานที่ได้มามีความถูกต้อง ประหยัด ปลอดภัย ตรงตามวัตถุประสงค์และต้องคำนึงถึงผลการออกแบบที่จะทำให้การก่อสร้างง่ายมีประสิทธิภาพดีอีกด้วย

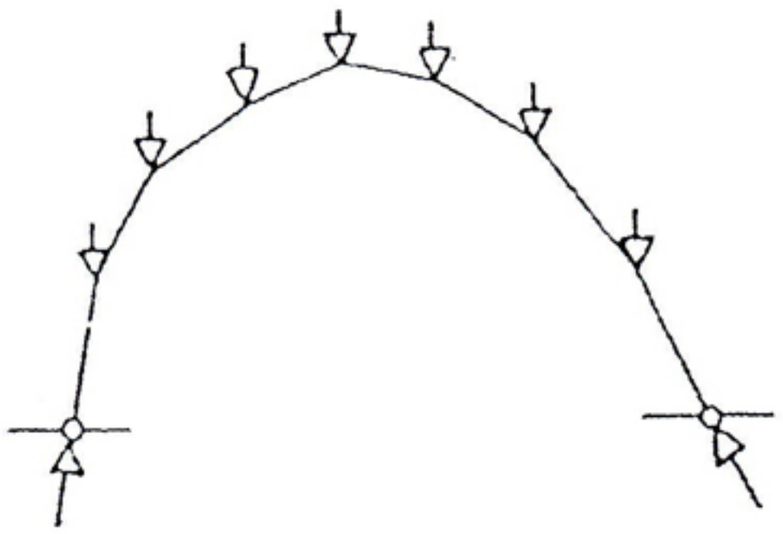
1. รูปแบบโครงสร้าง

ในการออกแบบอาคารในปัจจุบัน แม้ว่าจะมีพลังในการคำนวณออกแบบสูงด้วยเทคโนโลยีล้ำหน้าทางด้านคอมพิวเตอร์ที่พบเห็นในรูปของโปรแกรมในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างที่สามารถสร้างความสะดวกสบายได้อย่างมากมาย แต่วิศวกรมผู้ออกแบบโครงสร้างกลับมีความเข้าใจในความจำเป็นของการกำหนดรูปแบบโครงสร้าง (Structural Form) ลดน้อยลง

รูปแบบโครงสร้างเป็นสิ่งที่มนุษย์รู้จักและได้รับการพัฒนามาตลอดระยะเวลายาวนานในอดีต ทั้งนี้เป็นไปตามความรู้ด้านวัสดุและเทคโนโลยีของการวิเคราะห์คำนวณ รูปแบบโครงสร้างแรกที่มนุษย์รู้จักได้แก่โครงสร้างแขวนรับแรงดึงที่ใช้กับการรับน้ำหนักบรรทุกโดยใช้เคเบิล (Catenary) ดังรูปที่ 1 อย่างไรก็ตามการใช้ประโยชน์ของโครงสร้างดังกล่าวมีน้อยมากด้วยเหตุที่การพัฒนาให้วัสดุมีกำลังดึงสูงในอดีตเป็นเรื่องยาก จึงพิจารณาโครงสร้างโดยเน้นการรับน้ำหนักบรรทุกแล้วทำให้เกิดแรงอัดขึ้นในโครงสร้างแทน ซึ่งสามารถเลือกใช้หินหรือวัสดุปอซโซลานมาทำเป็นโครงสร้าง ซึ่งได้แก่โครงโค้งรับแรงอัด (Arch) ซึ่งก็เป็นโครงสร้างส่วนกลับของโครงเชือกแขวนรับแรงดึงนั่นเอง



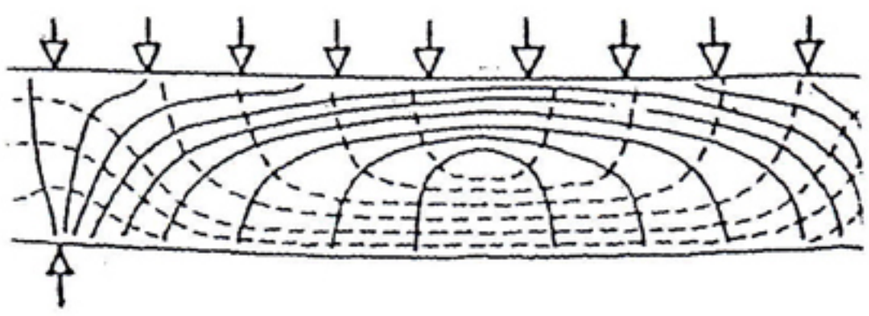
รูปที่ 1 โครงแขวนรับแรงดึง

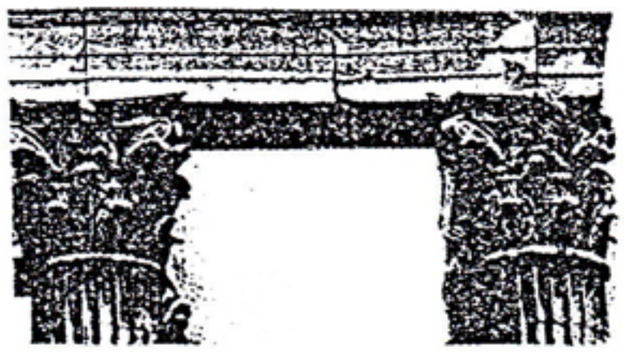


รูปที่ 2 โครงโค้งรับแรงอัด

จะเห็นได้ว่าโครงสร้างยุคก่อนมักเป็นโครงสร้างโค้ง (Vault Structures) ที่เห็นเป็นเป็นโครงสร้างหลังคาในอาคารใหญ่ทั่วไป และเมื่อมีความพยายามในการก่อสร้างโครงสร้างในรูปแบบอื่น ๆ เช่น โครงสร้างคาน พัฒนาการของการจัดองค์ประกอบของโครงสร้างในยุคต้นสามารถดำเนินการได้ผ่านโครงสร้างที่มีอัตราส่วนของความยาวช่วงต่อความลึกสูง และเมื่อเทคโนโลยีของการผลิตวัสดุมีมากขึ้น โครงสร้างในยุคต่อ ๆ มา ก็สามารถดำเนินการได้อย่างกว้างขวางเพื่อสอดคล้องกับการใช้อาคารที่กำหนดไว้โดยสถาปนิกที่ต้องการให้โครงสร้างมีช่วงยาวมากขึ้น มีพื้นที่ต่าง ๆ มากยิ่งขึ้น

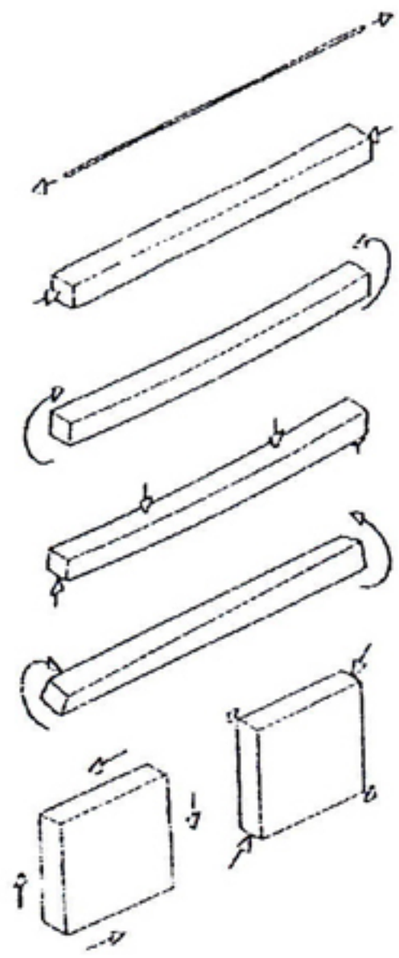
แนวคิดของโครงสร้างยุคต้นดังกล่าวซึ่งใช้รับแรงดึงและแรงอัด เป็นรากฐานสำคัญของการกำหนดรูปแบบโครงสร้างในยุคหลัง ซึ่งจะเห็นได้ว่าการกำหนดรูปแบบของโครงสร้างประเภทคานก็มีแนวคิดในการรับแรงโดยการกำหนดให้หน้าตัดมีหน่วยแรงดึงและแรงอัดไม่เกินค่าที่ยอมให้สำหรับวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้าง ดังรูปที่ 3 ที่แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมในการรับแรงของคาน





รูปที่ 3 แรงดึงและแรงอัดที่เกิดขึ้นในคาน ส่วนล่างของหน้าตัดคานเสียหายจากแรงดึงที่เกิดขึ้น

ผลของการพัฒนาแนวคิดในการกำหนดโครงสร้างทำให้เกิดรูปแบบทางโครงสร้างมากมายด้วยความรู้ทางด้านกลศาสตร์วัสดุและทฤษฎีโครงสร้าง อาทิเช่น แผ่นพื้น(Slab or Plate) โครงสร้างเปลือกบาง (Shell Structure) คาน (Beam) โครงข้อหมุน (Truss) เป็นต้น โดยโครงสร้างทั้งหมดมีรูปแบบของการรับแรงต่าง ๆ เป็นไปตามรูปที่ 4

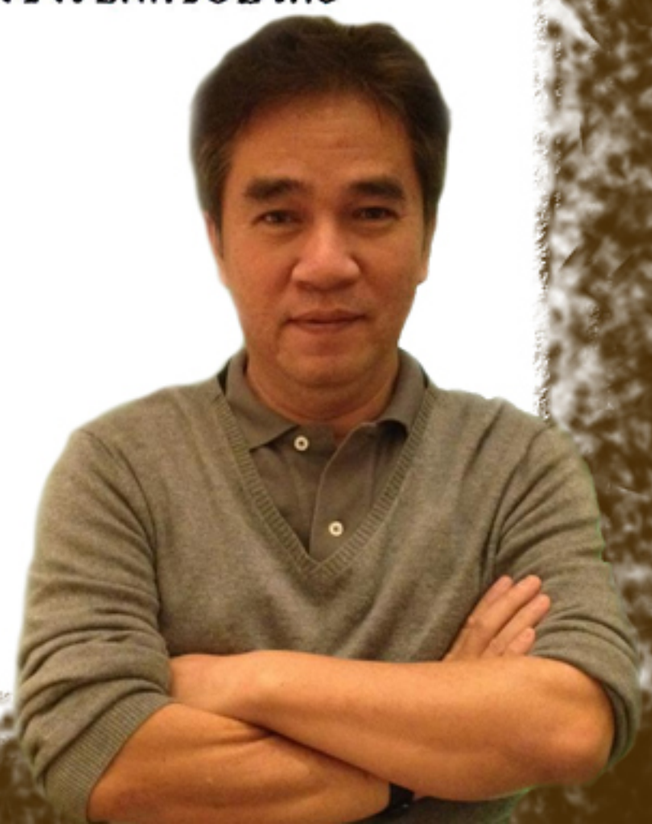


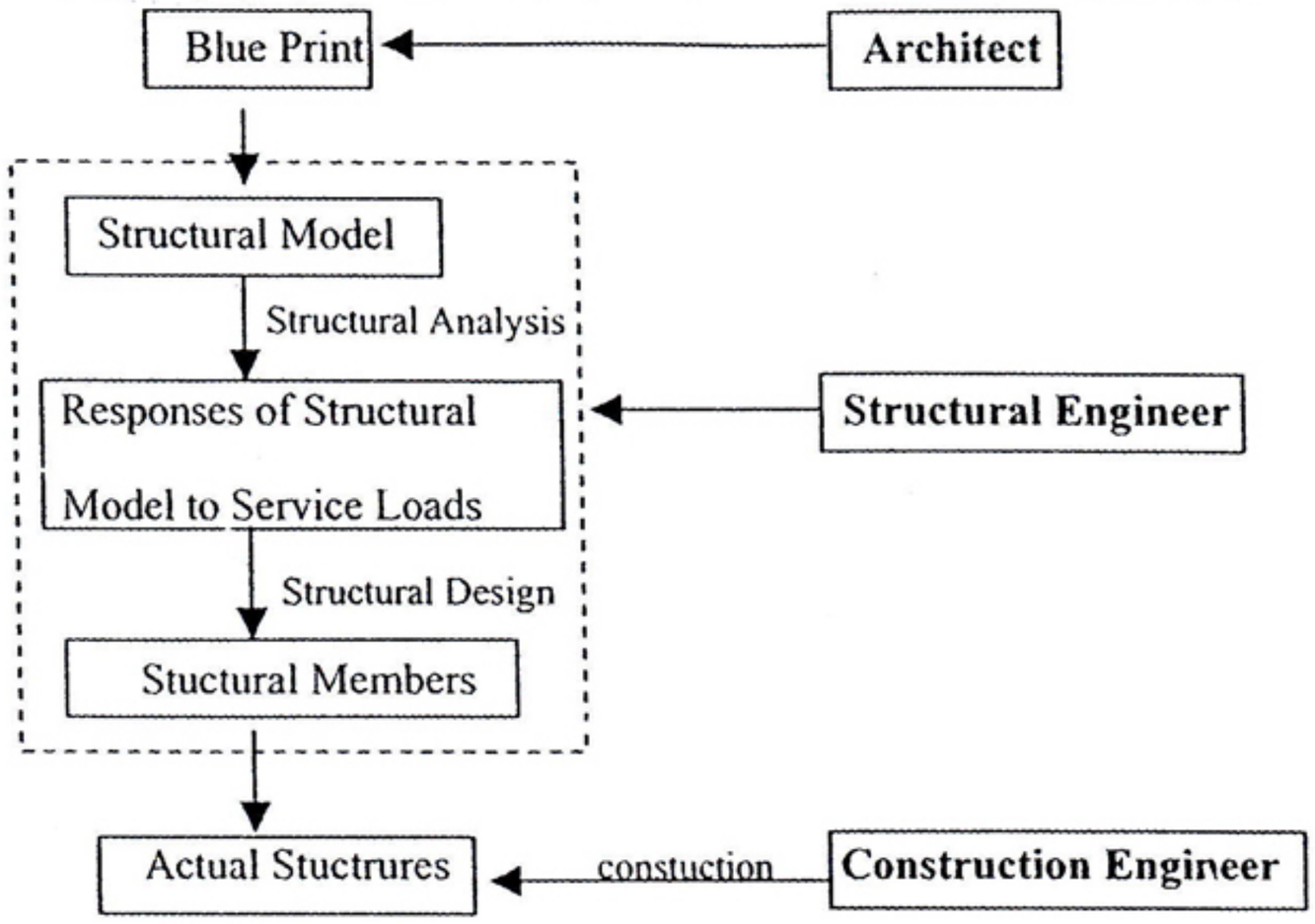
รูปที่ 4 แรงที่กระทำกับโครงสร้างประเภทต่าง ๆ

2. กิจกรรมของการออกแบบอาคาร

จุดเริ่มต้นของกิจกรรมการออกแบบอาคารมาจากการพิจารณาถึงความต้องการและข้อกำหนดที่ผ่านทางแบบสถาปัตยกรร่มหรือที่เรียกกันติดปากว่า "แบบพิมพ์เขียว-Blue Print" วิศวกรโครงสร้างจะได้นำเอาความรู้คณิตศาสตร์ กลศาสตร์วิศวกรรมและกลศาสตร์วัสดุ แปลงแนวคิดของสถาปนิกมาจัดทำเป็นหุ่นจำลองทางโครงสร้าง (Structural Model) ที่ประกอบไปด้วย องค์อาคาร (Members) จุดต่อ (Joints) และที่รองรับ (Supports) ซึ่งการกำหนด Model นับเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของการกำหนดแนวคิดทางโครงสร้างเพื่อให้งานออกแบบดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูงใช้งานได้ดี ประหยัด ถูกต้องตามความจำเป็นของงานนั้น

วิศวกรโครงสร้างจะนำเอา Models ไปวิเคราะห์โครงสร้าง (Structural Analysis) และตรวจสอบผลของการวิเคราะห์โครงสร้างนั้นกับเกณฑ์ในการออกแบบ หากผลการวิเคราะห์สอดคล้องได้ตามเกณฑ์ ก็จะนำไปทำการออกแบบโครงสร้าง (Structural Design) ต่อไป ถ้าไม่ผ่านเกณฑ์ต้องย้อนกลับไปปรับปรุงหุ่นจำลองโครงสร้างใหม่ ซึ่งอาจหมายถึงแค่เพิ่มขนาดของโครงสร้าง หรือปรับเปลี่ยน Models ไปเลย ผลของการออกแบบโครงสร้างจะนำไปสู่การก่อสร้างซึ่งรับผิดชอบโดยวิศวกรก่อสร้างที่อยู่ที่หน้างานทำให้ได้อาคารจริง (Actual Structures) ต่อไป





รูปที่ 5 ผังแสดงกิจกรรมของงานออกแบบและการก่อสร้างอาคาร

จากผังความสัมพันธ์ในแต่ละกิจกรรม ตั้งแต่งานออกแบบสถาปัตยกรรมจนถึงการก่อสร้างแล้วเสร็จของอาคาร (รูปที่ 5) จะเห็นว่าทุกกิจกรรมล้วนแต่มีความสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งการกำหนดรูปแบบของโครงสร้างที่ผ่านการสร้างหุ่นจำลองที่ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดทางสถาปัตยกรรม การวิเคราะห์หุ่นจำลองหนึ่งจะมีผลทำให้ได้องค์อาคารที่มีขนาดและคุณภาพอย่างหนึ่ง ดังนั้นในอาคารหลังหนึ่ง ๆ วิศวกรแต่ละคนอาจดำเนินจำลองหุ่นโครงสร้างที่แตกต่างกัน ผลของการจำลองอย่างหนึ่งอาจมีผลทำให้การก่อสร้างประหยัดขึ้น ลดความยุ่งยากในการก่อสร้าง ใช้งานได้มากขึ้นกว้างขวางขึ้น

หุ่นจำลองโครงสร้างที่ต้องมีองค์ประกอบขององค์อาคาร และจุดต่อ/ที่รองรับของอาคารหนึ่ง ๆ นั้นสามารถที่จะมีได้หลายแบบขึ้นอยู่กับแนวคิดในการกำหนดโครงสร้างผ่านหุ่นจำลอง ที่เป็นไปตามความเข้าใจ ประสบการณ์ของผู้ออกแบบ และความร่วมมือระหว่างสถาปนิกและวิศวกรในระหว่างการออกแบบเบื้องต้น

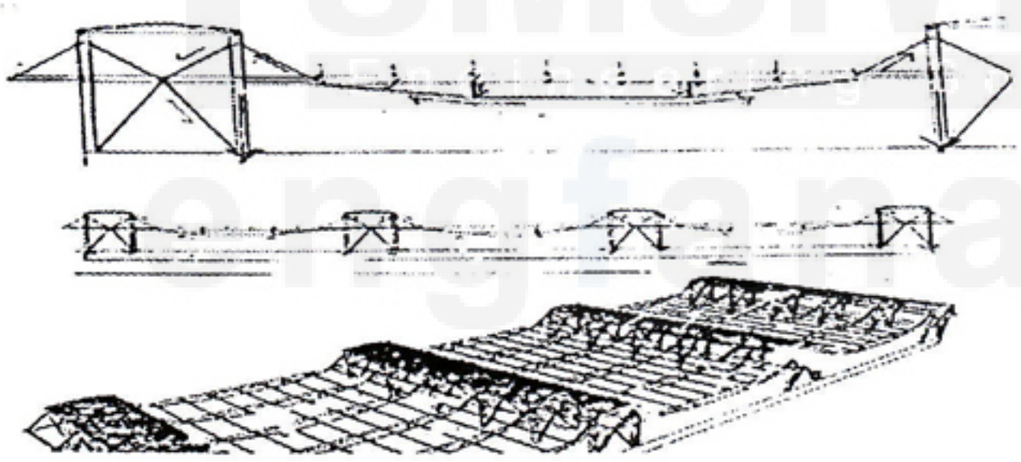
3. แนวคิดของการกำหนดรูปแบบทางโครงสร้าง

ลองมาพิจารณาโครงหลังคาของโรงนาเก่าแก่หลังหนึ่งอายุมากกว่า 150 ปี (รูปที่ 6) มีการก่อสร้างโดยใช้ไม้เพื่อรับแรงดัดโดยผ่านการดึงตึง (Intensicned) ของเชือกเพื่อดัดไม้ให้โก่งขึ้นก่อนการรับแรง หรือตามความเข้าใจในความรู้ปัจจุบันคือการอัดแรง (Prestressing) นั่นเอง

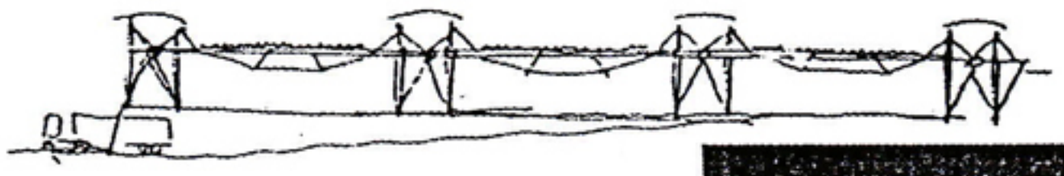
แนวคิดโครงสร้างนี้พัฒนามาจากการนำเอาบุคคลในครอบครัวรวม 4 คน ที่ต่างคนก็มีความมั่นคงแข็งแรง (ดู แกงแนง (Bracing) ต่าง ๆ ในโครง) กางแขนออกและจับมือกันเพื่อรองรับน้ำหนัก แต่เมื่ออยู่ห่างกันมากเกินไป (Long Span) ต่างคนจึงต้องจับเชือกและเมื่อดึงให้ตึง ก็จะสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ แนวคิดดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 7

เมื่อพิจารณาในด้านวิศวกรรมโครงสร้างจะพบว่าหลังคาอาคารดังกล่าวมีการใช้ Bracing เพื่อให้ไปสมดุลกับแรงดึงในเส้นเชือก และนำไปโยงในจุดต่อต่าง ๆ มีผลให้เกิดเฉพาะแรงตามแนวแกน (Axial Force) เท่านั้น ทำให้ขนาดขององค์อาคารไม่โตเกินไปโดยเฉพาะอย่างยิ่งเสา

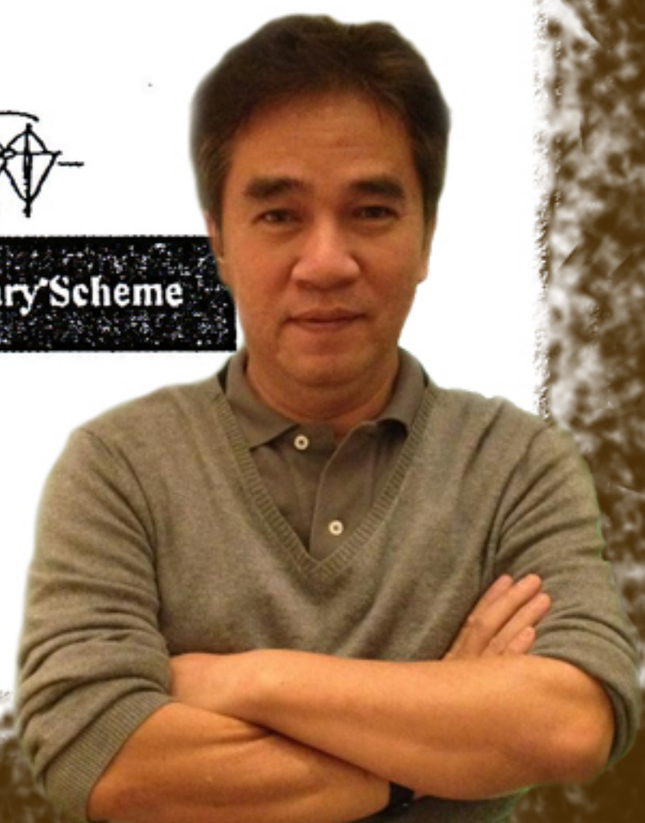
ในปัจจุบันด้วยเทคโนโลยีทั้งการคำนวณออกแบบและวัสดุ วิศวกรอาจเลือกที่ใช้แนวคิดทางโครงสร้างแบบอื่น ซึ่งก็สามารถที่จะตอบสนองความต้องการของผู้ออกแบบงานสถาปัตยกรรมได้ ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งเป็นตัวอย่างอีก 1 แบบ จะสังเกตเห็นว่าการกำหนดรูปแบบใหม่โดยใช้โครงข้อหมุน (Truss) เหล็ก มีผลทำให้องค์อาคารในโครง (Frame) เปลี่ยนแปลงไปและมีเฉพาะเท่าที่จำเป็นเท่านั้นเอง

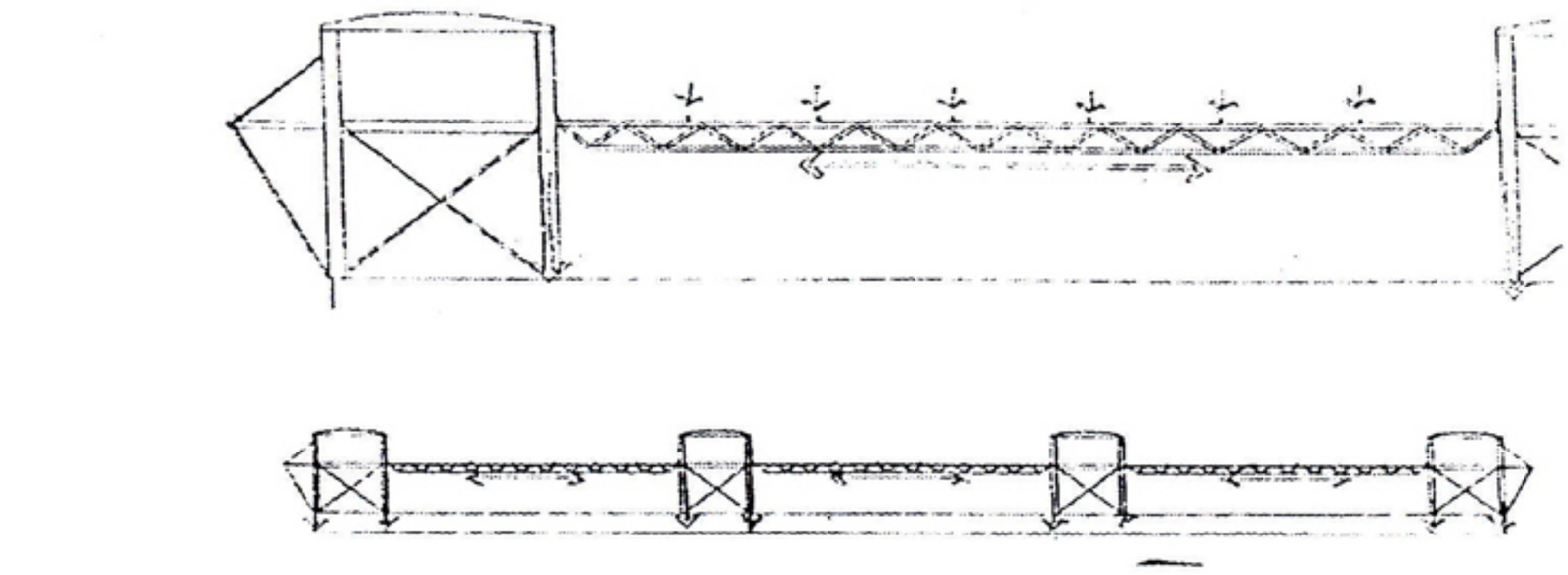


รูปที่ 6 โครงหลังคาที่ออกแบบโดยใช้เชือกดึงตึงกับโครงไม้



รูปที่ 7 แนวคิดในการกำหนดโครงสร้างโครงหลังคาในรูปที่ 2





รูปที่ 8 โครงหลังคาที่มีแนวคิดทางโครงสร้างแบบอื่น โดยใช้เป็นโครงข้อหมุน

4. คำถามระหว่างการทำงานร่วมกันของสถาปนิกและวิศวกรโครงสร้าง

ในระหว่างการพัฒนาแบบก่อสร้าง หากพิจารณาองค์ประกอบของอาคาร จะพบว่าประกอบไปด้วยระบบทางราบ (Horizontal Subsystem) ซึ่งได้แก่ ระบบพื้นใช้รับน้ำหนักบรรทุกตามแนวดิ่ง (Gravity Loads) และระบบทางดิ่ง (Vertical Subsystem) ซึ่งได้แก่เสา กำแพงที่ใช้ต้านแรงด้านข้าง ดังแสดงในรูปที่ 9 ดังนั้นการแสวงหาระบบโครงสร้างที่เหมาะสม (Suitable Structural System) เป็นสิ่งที่มีความสำคัญที่สุด คำถามเบื้องต้นที่มักได้รับระหว่างการพัฒนาแบบ จึงประกอบไปด้วย

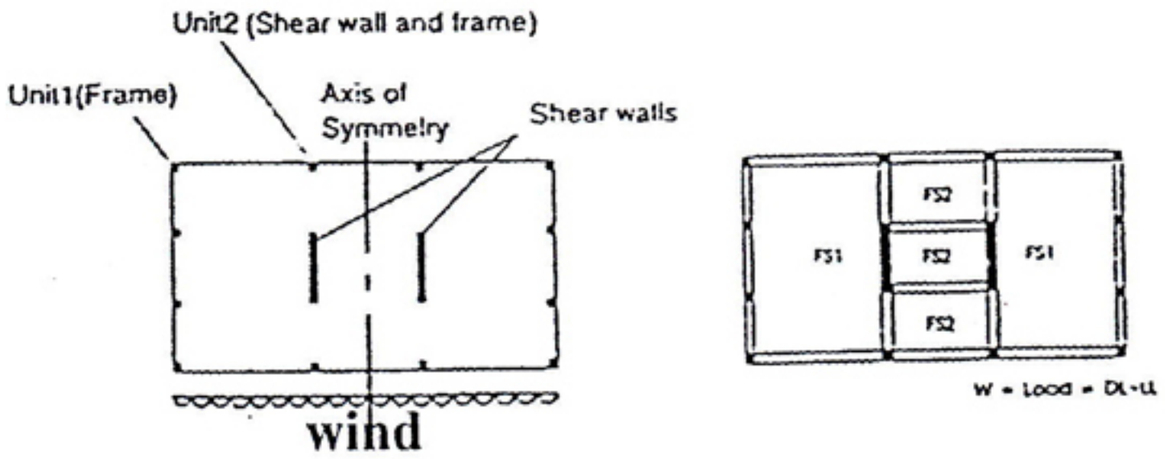
<u>4.1 ระบบพื้น</u>

พื้นเป็นระบบทางราบที่สำคัญและมีราคาค่าก่อสร้างไม่ต่ำกว่าร้อยละ 40 ของมูลค่าอาคาร นอกจากนั้นพื้นแต่ละระบบต่างก็มีความลึกตลอดจนมีความแข็งแรงที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกระบบพื้นจึงมีความสำคัญมาก ระบบที่สำคัญในประเทศไทยได้แก่

ก. ระบบแผ่นพื้นสำเร็จรูปและระบบแผ่นพื้นรับแรงทางเดียว

ข. ระบบแผ่นพื้นสองทางซึ่งมีทั้งการใช้เป็นองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กและคอนกรีตอัดแรงแบบดึงภายหลัง (Reinforced Concrete Design and Postensioned Flat Slab)

ค. ระบบผสมระหว่างเหล็กรูปพรรณและคอนกรีตอัดแรง



Vertical system **Horizontal System**

รูปที่ 9 ระบบโครงสร้างของอาคาร

คำถามที่ต้องการจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อแสวงหาระบบพื้นที่เหมาะสม ซึ่งต้องขึ้นอยู่กับ ความยาวช่วง น้ำหนักบรรทุก สถานที่ก่อสร้าง และความต้องการด้านสถาปัตยกรรม พื้นแต่ละระบบต่างก็มีความได้เปรียบ / เสียเปรียบด้วยกันทั้งสิ้น

<u>4.2 เสา</u>

เสาเป็นองค์อาคารที่สำคัญ แต่ขนาดของเสามักเป็นคำถามที่สถาปนิกมักถามอยู่เสมอ ทั้งนี้เพราะวิศวกรต้องการเสาขนาดใหญ่เพื่อความแข็งแรง ในขณะที่สถาปนิกกลับต้องการขนาดพื้นที่กว้าง (Space) ซึ่งเสาควรมีขนาดเล็กที่สุด ซึ่งขัดแย้งกันเสมอ การกำหนดขนาดเสาและอาจหมายรวมถึงฐานรากจึงเป็นสิ่งที่สถาปนิกอยากทราบมากที่สุด

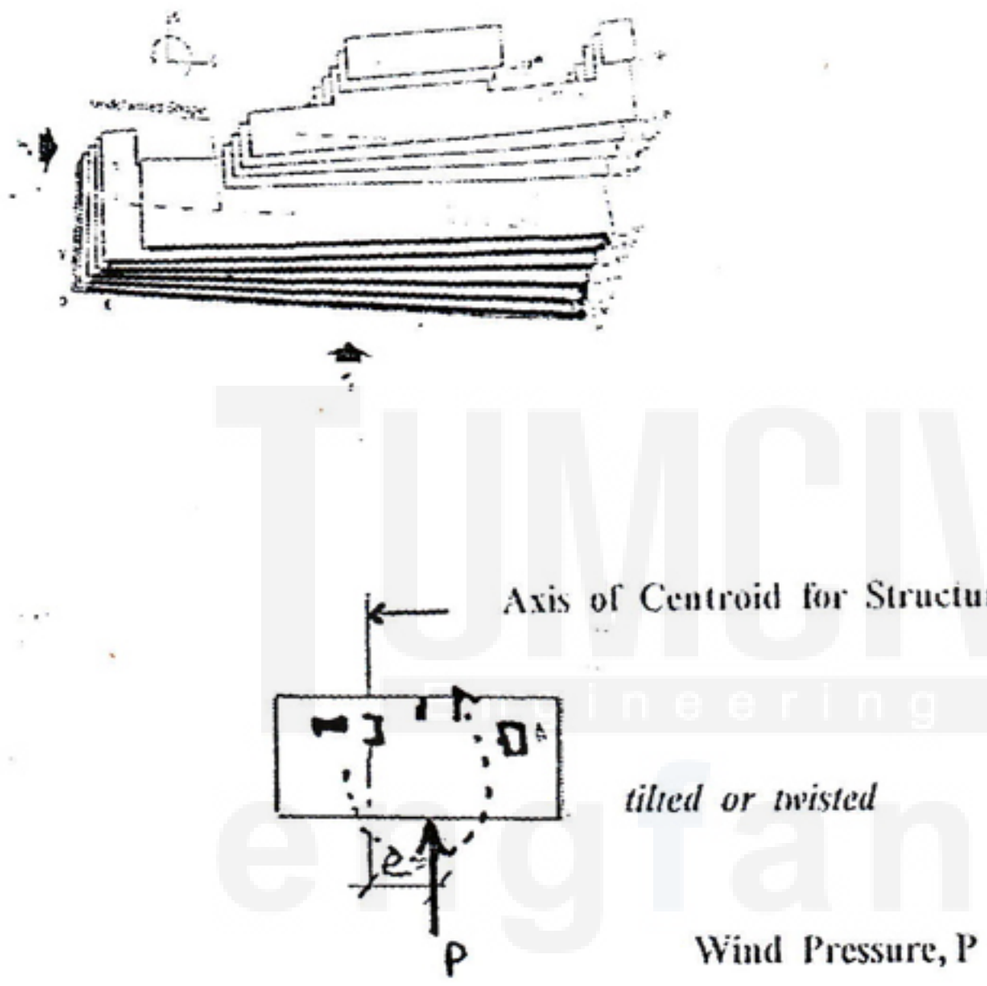
ขนาดของเสาคำนวณเบื้องต้นได้โดยใช้น้ำหนักบรรทุกค่าเฉลี่ยตามพื้นที่ (Floor Area Load) ซึ่งแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับขนาดและประเภทของอาคาร รวมทั้งวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง เช่น อาคารไม้ อาคารเหล็ก และอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก วิศวกรที่มีประสพการณ์สูงสามารถที่จะประมาณการน้ำหนักบรรทุกลงเสาได้จากตัวเลขดังกล่าวที่ทำซ้ำหลายครั้งจนได้ค่าที่มีความถูกต้องมาก การกำหนดขนาดของเสาและระบบฐานรากจึงเป็นเรื่องไม่ยากและคำตอบที่สามารถแจ้งขนาดของเสาให้สถาปนิกทราบในทันทีเป็นประโยชน์อย่างมากในการทำงานร่วมกัน

<u>4.3 ระบบรับแรงด้านข้าง</u>

แม้น้ำหนักของอาคารจะสะท้อนถึงขนาดของเสาและระบบฐานอาคารโดยตรง แต่มีอิทธิพลสูงต่อพฤติกรรมการรับแรงกระทำด้านข้าง ทั้งแรงลมและแรงจากแผ่นดินไหว อาทิเช่น อาคารที่ก่อสร้างด้วยคอนกรีตจะทำให้อาคารมีน้ำหนักมาก และเป็นประโยชน์มากต่อการรับแรงลม เป็นต้น ดัง

นั้นความเข้าใจของวิศวกรโครงสร้างและสถาปนิกในประเด็นนี้จะเป็นประโยชน์มากต่อการกำหนดรูปแบบอาคารต่อไป

การกำหนดระบบของการรับด้านข้างมีความสำคัญต่อราคาของอาคาร โดยทั่วไปสำหรับอาคารที่ออกแบบให้รับแรงลม มักออกแบบโดยต้องไม่ให้เกิดการบิดของอาคาร (Twisting) ซึ่งเกิดจากการที่จุดศุนย์ถ่วงของโครงสร้างในระบบทางดิ่งเยื้องไปจากจุดศูนย์กลางของอาคาร ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 การบิดตัวจากแรงลมในอาคารที่มีจุดศูนย์กลางโครงสร้างทางดิ่งที่เยื้องศูนย์

การร่วมกันพิจารณาและแสวงหาคำตอบในการกำหนดโครงสร้างทางดิ่งเพิ่มเติมเพื่อให้อาคารมีพฤติกรรมที่ดีในการรับแรงจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นในระหว่างการพัฒนาแบบก่อสร้าง

5. บทสรุป

กล่าวกันว่าไม่มีอาคารใดที่มีชื่อเสียงของโลกที่ไม่ได้รับความร่วมมือจากวิศวกรโครงสร้างในการเข้าร่วมพัฒนาแบบ ความเข้าใจในบทบาทของแต่ละฝ่าย นอกจากจะทำให้การออกแบบอาคารเป็นไปด้วยความเรียบร้อยแล้ว อาคารที่ได้รับการออกแบบดังกล่าวจะมีประสิทธิภาพสูง สามารถดำเนินการก่อสร้างไปได้เต็มประสิทธิภาพของระบบต่าง ๆ ที่ประกอบกันขึ้นเป็นอาคาร