บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 ความหมายของอาคารพาณิชย์ตามกฎหมายอาคาร

กฎกระทรวงมหาดไทยฉบับที่ 4 (พ.ศ. 2526)

อาคารพาณิชย์ หมายถึง อาคารที่ใช้เพื่อประโยชน์แห่งการค้า หรือ โรงงานที่ใช้เครื่องจักร ซึ่งเทียบได้ไม่เกิน 5 แรงม้า หรืออาคารที่ก่อสร้างห่างแนวทางสาธารณะไม่เกิน 20 เมตร ซึ่งอาจใช้เป็นอาคารเพื่อประโยชน์แห่งการค้า

กฎกระทรวงฉบับที่ 55 (พ.ศ. 2543)

อาคารพาณิชย์ หมายความว่า อาคารที่ใช้เพื่อประโยชน์ในการพาณิชยกรรม หรือบริการธุรกิจหรือ อุตสาหกรรมที่ใช้เครื่องจักรที่มีกำลังการผลิตเทียบได้น้อยกว่า 5 แรงม้า และให้หมายความรวมถึง อาคารอื่นใดที่ก่อสร้างห่างจากถนนหรือทางสาธารณะไม่เกิน 20 เมตร ซึ่งอาจใช้เป็นอาคารเพื่อประโยชน์ในการพาณิชยกรรมได้

ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร (พ.ศ. 2544)

อาคารพาณิชย์ หมายความว่า อาคารที่ใช้เพื่อประโยชน์ในการพาณิชยกรรม หรือบริการธุรกิจ หรืออุตสาหกรรมที่ใช้เครื่องจักรที่มีกำลังการผลิตเทียบไม่เกิน 5 แรงม้า

2.2 การคำนวณออกแบบ

การคำนวณออกแบบต้องใช้ความรู้ในทางวิศวกรรมโยธาหลายแขนง เพื่อประมวลข้อมูลอันได้แก่น้ำหนัก แรงที่กระทำต่อองค์อาคารหรือโครงสร้างวัสดุ และกลสมบัติโดยเฉพาะคอนกรีตและเหล็กเสริม การจำลองและวิเคราะห์โครงสร้าง การออกแบบจะใช้ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์โครงสร้างผนวกกับกลสมบัติของวัสดุ โดยมีหลักการว่าจะต้องออกแบบโดยคำนึงถึงความมั่นคงแข็งแรง ความประหยัด สามารถก่อสร้างได้ หรือก่อสร้างง่าย ใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์

มาตรฐานในการออกแบบอาคาร อาจออกโดยหน่วยงานรัฐ หรือ องค์กร สถาบันต่างๆ โดยจะกำหนดคุณภาพและกลสมบัติของวัสดุ ส่วนปลอดภัยสมมติฐาน การวิเคราะห์โครงสร้าง วิธีออกแบบองค์อาคารภายใต้แรงต่างๆ ในประเทศไทยมาตรฐานสำหรับออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโยวิธีหน่วยแรงใช้งานและโดยวิธีกำลัง ฉบับแก้ไขปรับปรุง ครั้งที่ 2 พ.ศ.

2534 และพิมพ์ครั้งที่ 2 ในปี พ.ศ. 2540 โดยสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (มาตรฐาน ว.ส.ท.) ถือเป็นมาตรฐานหลัก มาตรฐานต่างประเทศที่นิยมใช้ ได้แก่ American Concrete Institute (ACI), American Association Standards of Highways and Transport Official (AASHTO), British Standard (BS) เป็นต้น

2.3 การคำนวณออกแบบโครงสร้างเหล็ก

2.3.1 โครงสร้างส่วนรับแรงอัด (Compression Members)

ส่วนของโครงสร้างที่จะออกแบบให้ต้านทานต่อแรงอัด มีแรงกระทำตรงปลายทั้งสองข้างและผ่านเส้นผ่านศูนย์ถ่วงของรูปตัด ส่วนของโครงสร้างที่รับแรงอัดที่พบเห็นทั่วไป คือ เสา (column) ของอาคาร แบบอื่นๆ ก็ได้แก่ จันทันเอก (top chord) ของโครงหลังคา หรือ โครงสะพาน ค้ำยัน ตลอดจนส่วนของปีกคานที่รับแรงอัดของคานรูปพรรณ (rolled beam) หรือ ของคานประกอบ (built-up beam)

ข้อแตกต่างที่สำคัญระหว่างโครงสร้างส่วนรับแรงดึงและแรงอัด คือ

1 . แรงดึงจะพยายามดึงโครงสร้างให้อยู่แนวตรงเสมอ แต่แรงอัดจะพยายามทำให้โครงสร้างนั้นแอ่นหรือโก่งตัว

2. รูของตัวยึดในโครงสร้างส่วนที่รับแรงดึง จะลดเนื้อที่หน้าตัดในการรับแรงดึง แต่ในโครงสร้างส่วนที่รับแรงอัด จะสมมติให้ตัวยึดแทนที่รูเจาะเต็มทั้งหมด โดยไม่ต้องคิดหักเนื้อที่ของรูเจาะออก ฉะนั้น การคำนวณออกแบบส่วนของโครงสร้างที่รับแรงอัดจะพิจารณาใช้เนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดของรูปตัด (A_g)

ถ้าให้ P เป็นแรงอัดตามแนวแกนที่กระทำบนเนื้อที่หน้าตัดทั้งหมด (A_g) ที่ตั้งฉากกับแรงอัดนั้น และสมมติให้หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้น (f_a) แผ่กระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดเนื้อที่หน้าตัด ดังนั้น หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้น : $F_a = P/A_g$ หรือแรงอัดที่ส่วนโครงสร้างรับได้ $P = F_a A_g$ ในเมื่อ F_a เป็นหน่วยแรงอัดที่ส่วนโครงสร้างจะสามารถรับได้

ซึ่งเป็นสมการที่จะนำไปออกแบบหาเนื้อที่หน้าตัดของโครงสร้างส่วนที่รับแรงอัดต่อไป เมื่อทราบหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ หรือ กำลังที่ใช้คำนวณออกแบบ (กำลังรับแรงอัดประลัย) ที่กำหนดให้ในแต่ละวิธีของการออกแบบ

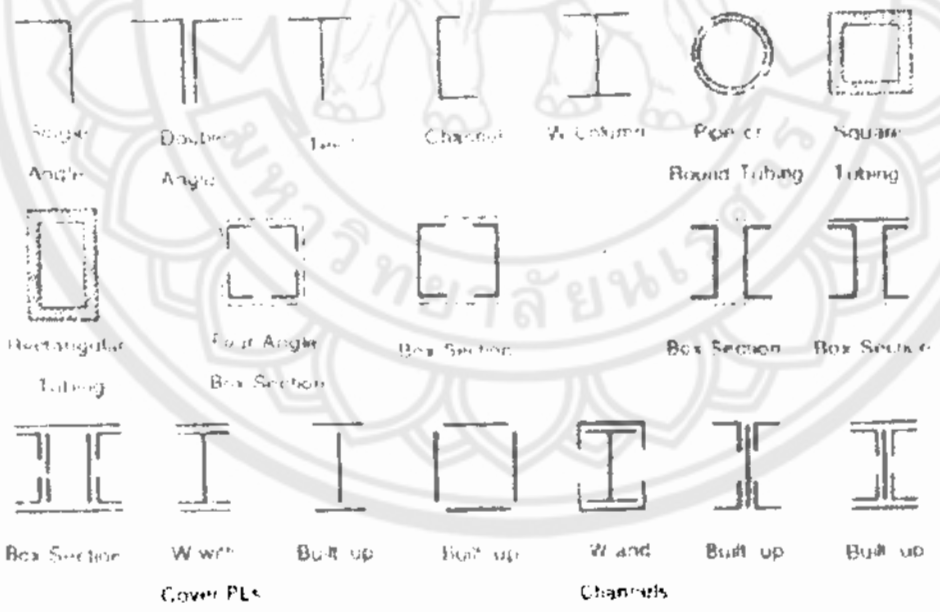
อย่างไรก็ดี ส่วนโครงสร้างที่รับแรงอัดมีแนวโน้มที่จะแอ่นหรือโค้งโก่งตัวจากโมเมนต์ดัด ถึงแม้ว่าแรงอัดนั้นจะกระทำในแนวแกนก็ตาม ผลของการโค้งโก่งตัวดังกล่าว ทำให้ส่วนของ

โครงสร้างนี้ต้องรับโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้น หากโมเมนต์ดัดที่กระทำเพิ่มมีค่าไม่มาก ก็อาจไม่ต้องพิจารณาถึงผลกระทบนี้ การพิจารณาเพื่อออกแบบส่วนของโครงสร้างที่ต้องรับทั้งแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดร่วมกัน ซึ่งต้องพิจารณาถึงผลกระทบของการโค้งโก่งตัว

1. รูปตัดของโครงสร้างส่วนรับแรงอัด

ในทางทฤษฎี สามารถเลือกใช้รูปแบบใดก็ได้เพียงแต่คำนวณให้สามารถรับน้ำหนักได้ปลอดภัยเท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติ การเลือกใช้รูปตัดต้องคำนึงถึงขนาดรูปตัดที่มีจำหน่ายในท้องตลาด ตลอดจนการทำรอยต่อที่ปลายชิ้นส่วน และการใช้งานร่วมกับส่วนโครงสร้างอื่น

หน้าตัดของส่วนโครงสร้างที่รับแรงอัด โดยมากจะเหมือนกับโครงสร้างส่วนที่รับแรงดึง แต่มีข้อที่ต้องพิจารณาคือ กำลังรับแรงอัดส่วนโครงสร้างเป็นปฏิภาคส่วนกลับกับความยาว หรืออัตราส่วนความชะลูด (Slenderness ratio) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความยาวของชิ้นส่วนต่อรัศมีไขเรชันของรูปตัด ดังนั้นโดยทั่วไปจึงมักไม่ค่อยเลือกใช้เหล็กรูปตัดที่เป็นท่อนกลม หรือแผ่นแบน ทั้งนี้เพราะอัตราส่วนความชะลูดมีค่ามาก เว้นแต่แรงอัดที่กระทำมีค่าน้อยและไม่ยาวมาก



รูปที่ 2.1 แสดงรูปตัดของโครงสร้างส่วนที่รับแรงอัด

เหล็กรูปตัดฉากเดี่ยว (Single – angle) นำมาใช้เป็นค้ำยันและรับแรงอัดในโครงสร้างแบบโครงถัก (truss) ขนาดย่อม แบบนี้ไม่ค่อยประหยัดเพราะรัศมีไจเรชันน้อย และเมื่อต่อกับแผ่นเหล็กประกับอาจทำให้เกิดโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเยื้องศูนย์

เหล็กรูปตัดฉากคู่ (Double-angle) ซึ่งได้การจับขาของเหล็กฉากมาชนกัน (back to back) โดยอาจมีแผ่นเหล็กประกับแทรกตรงกลาง มักใช้กันทั่วไปในโครงหลังคาและทำเป็นค้ำยันต้านแรงลมในคานประกอบของโครงสะพาน ปกติ จะเลือกใช้เหล็กฉากชนิดขายาวไม่เท่ากัน (unequal-leg angle) โดยนำเอาขาด้านยาวมาประกบหรือชนกันเพื่อทำให้รัศมีมีไจเรชันในแนวแกนทั้งสอง (X และ Y) เท่าๆ กัน

เหล็กรูปตัดแบบตัวที (Tee) มักนำมาใช้เป็นชิ้นส่วนของจันทันโครงหลังคา ที่ทำรอยต่อด้วยการเชื่อม ส่วนเหล็กรูปตัดแบบร่องหรือราง (channel) มักไม่ค่อยนิยมเนื่องจากรัศมีไจเรชันทางแกนรองมีค่าน้อยมาก แต่ถ้าจะใช้ต้องมีการยึดหรือยันทางด้านข้าง (lateral Support) กันการโก่งรอบแกนรอง สำหรับเหล็กรูปตัดแบบปีกกว้าง (ตัว W) เป็นแบบทั่วไปสำหรับใช้ทำเป็นเสาหรือส่วนของโครงสร้างที่ที่รับแรงอัดในโครงสะพาน เพราะมีรัศมีไจเรชันในแกนกลางทั้งสองไม่ต่างกันนัก

เหล็กรูปตัดแบบท่อกลมกลวง (pipe) นำมาใช้เป็นเสาเพื่อรับหลังคาทางเดินเท้าหรือเสาโรงรถในบ้านเรือนทั่วไป เหมาะสำหรับในกรณีที่รับน้ำหนักน้อยหรือปานกลาง รูปตัดนี้มีข้อดีคือ รัศมีไจเรชันจะเท่ากันทุกแกน ส่วนรูปตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส และสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีรัศมีในกลวง (tube) แต่ก่อนไม่ค่อยนิยมใช้ เพราะมีปัญหาในเรื่องการต่อปลายโดยใช้ตัวยึด แต่ในปัจจุบันไม่มีปัญหาดังกล่าวเพราะใช้การต่อปลายโดยการเชื่อม

สำหรับส่วนโครงสร้างรับแรงอัดในโครงสร้างขนาดใหญ่ หรือโครงสร้างที่มีช่วงยาวปกติจะได้จากการนำเหล็กรูปพรรณแบบต่างๆ เช่นเหล็กฉากเดี่ยว หรือเหล็กรูปรางน้ำ มาประกอบรวมกัน เพื่อให้สามารถรับแรงอัดได้มากขึ้น การต่อยึดรูปตัดที่ประกอบขึ้นเพื่อตรึงให้เสมือนเป็นชิ้นส่วนเดียวกัน กระทำที่ด้านเปิด โดยอาจใช้แผ่นยึดเฉียง(lacing) เป็นตัวช่วยยึด ซึ่งอาจเป็นแบบแผ่นยึดเดี่ยวหรือแผ่นยึดคู่ และใช้แผ่นยึดแบบขวาง (tie plate) ที่ปลายเสา รูปตัดแบบอื่นของส่วนโครงสร้างที่ประกอบขึ้นแสดงไว้ในรูป 3.1 เส้นประที่แสดงหมายถึงเหล็กแผ่นยึด ที่ใช้เป็นระยะๆ ตลอดความยาวของส่วนโครงสร้าง ส่วนเส้นทึบ (solid line) แสดงถึงเหล็กรูปตัดต่างๆ ที่ใช้ตลอดความยาวของส่วนโครงสร้างนั้น รูปตัดที่ประกอบขึ้นจากฉากเหล็ก 4 ท่อน จะทำให้หน้าตัดมีรัศมีไจเรชันมากที่สุด และใช้เป็นส่วนโครงสร้างสำหรับหอสูง หรือที่รับล้อเลื่อน (เครน) ในโรงงาน รูปตัดที่ประกอบจากเหล็กราง (channel)2 ท่อน มักใช้เป็นสารับน้ำหนักอาคาร หรือเป็นส่วนของเหล็กแผ่นตั้งในโครงเหล็กขนาดใหญ่ ส่วนจันทันในโครงสร้างสะพาน

มักประกอบด้วยเหล็กราง I คู่ มีแผ่นประกบ (cover Plate) ที่ด้านบนและมีแผ่นยึดที่ด้านล่าง รูปตัดที่ประกอบจากเหล็กรูปตัว w กับแผ่นประกบหรือกับเหล็กราง ช่วยเพิ่มเนื้อที่ที่ส่วนปีกของชิ้นส่วน (flange) ทำให้สามรถรับน้ำหนักหรือแรงกระทำได้มากขึ้น

2. พฤติกรรมการรับน้ำหนักและลักษณะของการวิบัติ

ปกติ เมื่อเสาต้องรับน้ำหนักหรือแรงกดอัด เสาจะเกิดการโก่งตัวเนื่องจากโมเมนต์ดัด (แต่ในบางกรณี เสาเกิดการโก่งตัวเนื่องจากโมเมนต์บิด ซึ่งจะไม่พิจารณาในบทนี้) เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกมากขึ้น เสาจะโก่งตัวมากขึ้น ตามลำดับ หากหน่วยแรงอัดสูงสุดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของเสายังไม่เกินกว่าหน่วยแรงที่ขีดจำกัดยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ เมื่อลดน้ำหนักที่กระทำ เสาจะค่อยๆๆ คืนตัวกลับสู่สภาพเดิม แต่หากเสาต้องรับน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งถึงน้ำหนักขั้นวิกฤต (critical stress) เสาจะเริ่มสูญเสียความมีเสถียรภาพและจะเริ่มเกิดการวิบัติ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการวิบัติแบบการโค้งโก่งที่เดาะที่เกิดจากการดัด (flexural buckling)

กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาตลอดจนลักษณะของการวิบัติ ขึ้นอยู่กับช่วงความยาวของเสาระหว่างจุดยึดรองรับหรือค้ำยัน เป็นส่วนใหญ่ ที่มักเรียกในพจน์ของความชะลูดของเสา (slenderness) กล่าวคือ

เสาที่มีความยาวน้อยหรือที่เรียกว่าเสาสั้น สามารถรับน้ำหนักได้จนกระทั่งหน่วยแรงอัดวิกฤตที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของเสามีค่าเท่ากับหน่วยแรงที่จุดคราก หรืออาจเลยเข้าไปในช่วงของการแข็งตัวเพิ่ม (strain-hardening) ของวัสดุที่ใช้ก็ได้ การวิบัติของเสาสั้นเป็นลักษณะที่รูปตัดของเสาถูกกดอัดจนบิดเบี้ยวและเสียรูป (crushing) โดยทั่วไป ถือว่า หน่วยแรงอัดวิกฤตบนหน้าตัดเท่ากับหน่วยแรงที่จุดคราก

เสาที่มีความยาวปานกลาง (intermediate column) การวิบัติจะเป็นลักษณะของการโก่งเดาะจากแรงดัดในช่วงอินอิลาสติก (inelastic buckling) โดยหน่วยแรงอัดวิกฤตที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดมีค่าสูงเกินกว่าหน่วยแรงที่ขีดพิกัดยืดหยุ่นของวัสดุ ซึ่งบางส่วนของหน้าตัดอาจต้องรับหน่วยแรงอัดวิกฤตสูงถึงหน่วยแรงที่จุดคราก แต่บางส่วนของหน้าตัดอาจรับหน่วยแรงอัดวิกฤตไม่ถึงจุดคราก

ส่วนเสายาว (long column) การวิบัติจะเป็นลักษณะของการโก่งเดาะจากแรงดัดในช่วงอิลาสติก โดยหน่วยแรงอัดวิกฤตที่เกิดขึ้นตลอดหน้าตัดมีค่าไม่เกินกว่าหน่วยแรงที่พิกัดยืดหยุ่น (proportional limit) ของวัสดุ

ปัจจัยอื่นที่มีผลให้กำลังรับน้ำหนักของเสาลดน้อยลง ได้แก่ ความโค้งโก่งงอของเสาก่อนที่จะรับน้ำหนัก (initial curvature) สภาพของการยึดที่ปลายเสา หน่วยแรงอัดคงค้างจากการเย็นตัวไม่สม่ำเสมอเมื่อผลิตแบบรีดร้อน อัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของชิ้นส่วนตลอดจนตำแหน่งของแรงอัดที่กระทำซึ่งทำให้สาต้องรับแรงเยื้องศูนย์โดยบังเอิญ

3. กำลังรับน้ำหนักของเสาเดี่ยว

น้ำหนักวิกฤตของเสายาวหรือน้ำหนักของออยเลอร์ (Euler critical load) เมื่อปี ค.ศ. 1757 Leonhard Euler ได้เสนอวิธีพิจารณาหากำลังรับน้ำหนักของเสาโดยสมมติว่า เสามีแนวตรง และรับน้ำหนักหรือแรงอัดตามแนวแกนไม่เยื้องศูนย์ (axially loaded column) เสานี้มีหน้าตัดสม่ำเสมอและทำด้วยวัสดุเนื้อเดียวกันตลอดความยาวเสาที่ปลายทั้งสองข้างของเสามีที่รองรับแบบยึดหมุน (pin-ended) ถ้าให้ E เป็นโมดูลัสยืดหยุ่น (elastic modulus) ของวัสดุ I เป็นโมเมนต์อินเนอร์เชีย ของรูปตัดรอบแกนที่รับโมเมนต์ดัด และ L เป็นความยาวของเสา การวิเคราะห์แบบอิลาสติกเพื่อหา น้ำหนักวิกฤตที่ทำให้เสาเกิดการโก่งเนื่องจากแรงดัด ทำได้ดังต่อไปนี้

รูปที่ 2.2 แสดงการโก่งของเสาเนื่องจากแรงดัด

จากสมการส้นโค้งอิลาสติก จะได้

$$EI\left(\frac{d^2y}{dx^2}\right) = -P_e y$$

หรือ $$\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{P_e y}{EI} = 0$$

เมื่อให้ $$k^2 = \frac{P_e}{EI}$$

ดังนั้น $$\frac{d^2y}{dx^2} + k^2 y = 0$$

ทำการแก้สมการโดยสมมติให้คำตอบเป็น $y = e^{mx}$

จากค่าของน้ำหนักวิกฤตที่ได้ จะเห็นว่าเมื่อเสามีความยาวเท่ากัน กำลังรับน้ำหนักของเสาขึ้นอยู่กับค่าความแข็งรงของวัสดุ (EI) และถ้าใช้วัสดุอย่างเดียวกัน จะเห็นว่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าของโมเมนต์อินเนอร์เซีย (I) ของรูปตัด

โดยทั่วไป รูปตัดของเสาเหลูกรูปพรรณมีค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียรอบแกนที่ตั้งฉากกันสองค่า คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียรอบแกนหลัก X เรียกว่า ซึ่งมีค่ามาก และรอบแกนรอง Y เรียกว่า ซึ่งมีค่าน้อย ดังนั้น เสาที่ถูกยึดปลายทั้งสองข้าง การโก่งเดาะเนื่องจากแรงดัดจะเกิดรอบแกน Y เสมอ เพราะมีค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียน้อยที่สุด นั่นคือ กำลังรับน้ำหนักของเสาจะเท่ากับ แต่หากทำค้ำยัน ระหว่างช่วงเสาในทิศทางที่ตั้งฉากกับแกน Y ซึ่งเป็นการลดช่วงความยาวของการโก่งเดาะทางแกน Y ให้น้อยลง กำลังรับน้ำหนักของเสาจะเพิ่มมากขึ้น ฉะนั้น ผู้ออกแบบสามารถเลือกระยะค้ำยันที่เหมาะสมที่จะทำให้กำลังรับน้ำหนักทั้งสองแกน (แกน X และ แกน Y) มีค่าเท่ากันได้

จากการทดลองพบว่า สมการของออยเลอร์ให้ค่าคาดหมายกำลังรับน้ำหนักของเสาได้เฉพาะที่มีอัตราส่วนความชะลูดมากๆ (หรือเสายาวนั่นเอง) และเป็นการโก่งเดาะในช่วงอิลาสติกทั้งสิ้น โดยมีหน่วยแรงอัดวิกฤตที่เกิดบนหน้าตัดเสาไม่เกินกว่าหน่วยแรงที่ขีดพิกัดยืดหยุ่นของวัสดุ

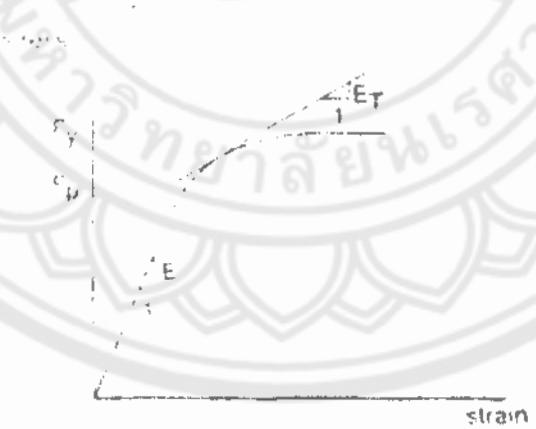
ถ้าให้ เป็นหน่วยแรงที่ขีดพิกัดยืดหยุ่นของวัสดุ ดังนั้น จะได้พิกัดต่ำสุดของอัตราส่วนความชะลูดที่เสาเกิดการโก่งเดาะในช่วงอิลาสติกนั่นคือ เมื่อเสามีอัตราส่วนความชะลูดเกินกว่าค่านี้ เสาจะโก่งเดาะในช่วงอิลาสติก หรือในทำนองกลับกันเมื่อเสามีอัตราส่วนความชะลูดต่ำกว่าค่านี้ เสาจะโก่งเดาะในช่วงอินลาสติก

4. น้ำหนักวิกฤตของเสายาวปานกลาง

เสาที่มีความยาวปานกลางจะเกิดการโก่งเดาะในช่วงอินลาสติกของวัสดุที่ใช้ทำเป็นเสา ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับการหดตัวของวัสดุในช่วงนี้ไม่เป็นเส้นตรงเนื่องจากค่า โมดูลัสในช่วงนี้จะมีค่าลดลงตามขนาดของหน่วยแรงอัดที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่มิได้เป็นสัดส่วนกัน ดังนั้น การคาดหมายกำลังรับน้ำหนักของเสาประเภทนี้จึงไม่สามารถใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น E การวิเคราะห์เพื่อหาน้ำหนักประลัยของเสาที่โก่งเดาะในช่วงอินลาสติก อาจใช้ทฤษฎีโมดูลัสสัมผัส (Tangent Modulus Theory) หรือทฤษฎีโมดูลัสลด (Reduced Modulus Theory) ซึ่งเสนอโดยFreidrich Engesser ในปี ค.ศ. 1889 และในปี ค.ศ. 1895 ตามลำดับ

ทฤษฎีโมดูลัสสัมผัสอาศัยสมมติฐานว่า เสาจะยังไม่โก่งตัวจนกว่าจะรับน้ำหนักถึงน้ำหนักขั้นวิกฤตและในขณะที่เสาเกิดการโก่งเดาะ หน่วยแรงอัดวิกฤตในเสาให้เป็นไปตามค่าโมดูลัสสัมผัส

โมดูลัสสัมผัสเป็นค่าความชันของจุดต่างๆ บนเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับการหดตัว (รูปที่ 3.3) มีค่าเท่ากับค่าโมดูลัสยืดหยุ่น E เมื่อหน่วยแรงอัดมีค่าเท่ากับหน่วยแรงที่ขีดพิกัดยืดหยุ่น และมีค่าลดลงตามลำดับเมื่อหน่วยแรงอัดเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งเป็นศูนย์ที่จุดคราก



รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

Engesser ได้หากำลังรับน้ำหนักของเสาโดยใช้สมการของออยเลอร์ แต่แทนค่าโดยโมดูยืดหยุ่นของ E ด้วยค่าโมดูสัมผัส E_T นั่นคือ

กำลังรับน้ำหนักวิกฤต $P_{cr} = \Pi^2 E_R I / L^2$

ทฤษฎีโมดูลัสลด อาศัยสมมติฐานว่า ขณะที่เสาเกิดการโก่งเดาะจะมีทั้งหน่วยแรงวิกฤตที่เพิ่มขึ้นทางด้านเว้า และลดลงทางด้านนูนของเสา หน่วยแรงอัดวิกฤตที่เพิ่มขึ้นให้เพิ่มตามค่าโมดูลัสสัมผัส E_T ส่วนหน่วยแรงอัดวิกฤตที่ลดลงให้ลดลงตามค่าโมดูลัสยืดหยุ่น E ดังนั้นถ้าให้ E_R เป็นค่าโมดูลัสลด (reduced modulus) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ E และ E_T จะได้

กำลังรับน้ำหนักวิกฤต $P_{cr} = \Pi^2 E_R I / L^2$

โดยที่ $E_R = 2EE_T/(E+E_T)$ สำหรับเสารูปตัว I หรือ WF (ที่ไม่คิดแผ่น web)

$= 4EE_T / \left(\sqrt{E} + \sqrt{E_t}\right)^2$ สำหรับเสารูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เนื่องจาก ค่าของโมดูลัสลด E_r ขึ้นอยู่กับ ค่าของโมดูลัสยืดหยุ่น E และค่าของโมดูลัสสัมผัส E_T ฉะนั้น บางครั้งจึงเรียกทฤษฎีนี้ว่า โมดูลัสคู่ (Double Modulus Theory) จะเห็นว่าการใช้ทฤษฎีทั้งสองมีความยุ่งยากพอควร เพราะค่าน้ำหนักวิกฤตที่ส่วนโครงสร้างจะรับได้ต้องสอดคล้องกับค่าโมดูลัสสัมผัส E_T ที่เปลี่ยนตามไป ในขณะที่เสาเกิดการโก่งเดาะซึ่งต้องใช้วิธีพิจารณาแบบลองผิดลองถูก (Trial - and – Error)

5. การป้องกันการโก่งเดาะเฉพาะแห่ง

ปัจจัยสำคัญของอัตราส่วนระหว่างความกว้างกับความหนาของแต่ละชิ้นส่วนของเสา มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักของเสาไม่น้อย กล่าวคือ หากชิ้นส่วนใดส่วนหนึ่งบางเกินไป ซึ่งหมายความว่าอัตราส่วนระหว่างความกว้างกับความหนาของชิ้นส่วนนั้นมีค่ามาก ชิ้นส่วนดังกล่าวจะมีโอกาสเกิดการโก่งเดาะ ได้ก่อนที่โครงสร้างทั้งหมดจะเกิดการโก่งเดาะ ทำให้เสาทั้งต้นไม้สามารถรับน้ำหนักได้ตามที่คาดคะเนไว้

การพิจารณาหาอัตราส่วนสูงสุดระหว่างความกว้างต่อความหนาของชิ้นส่วน เพื่อป้องกันมิให้เกิดการโก่งเดาะเฉพาะแห่งทั้งในช่วงอิลาสติกหรืออินอิลาสติก สามารถกระทำได้โดยทฤษฎีของแผ่นบาง (Theory of Plates) กล่าวคือ เมื่อแผ่นเหล็กแบนและบางขนาดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ยาว a กว้าง b หนา t เมื่อมีแรงอัดกระทำบนด้านกว้าง b ในทิศที่ขนานกับความยาว a ของแผ่นเหล็ก โดยให้มีสภาพการยึดขอบต่างๆ กัน จะสามารถหาสมการของหน่วยแรงวิกฤตในช่วง อิลาสติกได้ดังช่วงต่อไปนี้ $F_{cr} = k\Pi^2 E/12(1-\mu^2)(b/t)^2$ หรือ $b/t = \sqrt{\Pi^2/12(1-\mu^2)}\sqrt{kE/F_y}$

ในเมื่อ k = ค่าคงที่ ซึ่งขึ้นกับลักษณะการรับแรง อัตราส่วน a/b และการยึดขอบ

E = โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ

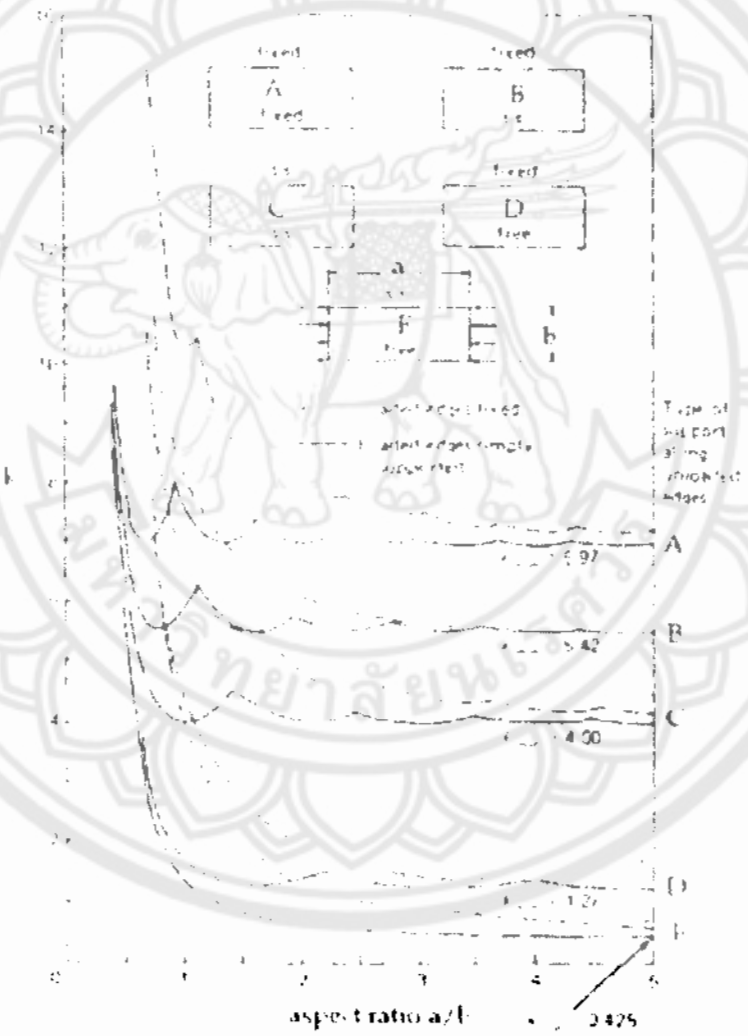
μ = อัตราส่วนปัวซอง(มีค่าเท่ากับ 0.3 สำหรับเหล็กทั่วไป)

ส่วนหน่วยแรงอัดวิกฤตในช่วงอินอิลาสติก ให้แทนค่า E ในสมการข้างต้นด้วย

ถ้าให้หน่วยแรงอัดวิกฤตมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับหน่วยแรงที่จุดคราก (F_y) ดังนั้น

$$b/t \leq \sqrt{\Pi^2/12(1-\mu^2)}\ \sqrt{kE/F_y}$$

แต่จากผลกระทบของหน่วยแรงคงค้างและการโค้งงอเริ่มแรกของแผ่นเหล็กต้องปรับค่า b/t เป็น $b/t \leq 0.67\ \sqrt{kE/F_y}$ เมื่อใช้ $\mu = 0.3$



รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับค่า aspect ratio

ดังนั้นถ้าขอบด้านข้างข้างหนึ่งที่ขนานกับแนวแรงไม่ถูกยึด (ปล่อยอิสระ)และขอบด้านข้างอีกข้างหนึ่งที่ขนานกับแนวแรงถูกยึด (เรียกว่า Unstiffened Element)

เมื่อ k = 0.425 จะได้ b/t ≤ 0.45 $\sqrt{E/F_y}$ ซึ่งเป็นกรณีของเหล็กฉากเดี่ยว

เมื่อ k = 1.277 จะได้ b/t ≤ 0.75 $\sqrt{E/F_y}$ ซึ่งเป็นกรณีของเหล็กแผ่นตั้งของรูปตัดตัว T

เมื่อ k = 0.70 (ค่าระหว่าง 0.425 กับ 1.277) ซึ่งเป็นกรณีสมมติของแผ่นเหล็กส่วนที่เป็นปีกคาน จะได้ b/t ≤ 0.56 $\sqrt{E/F_y}$

6. การออกแบบส่วนโครงสร้างรับแรงอัด – มาตรฐาน AISC

การออกแบบเสาเหล็ก เพื่อให้รับน้ำหนักที่กระทำตามแนวแกนที่ปราศจากการเยื้องศูนย์ อาจใช้ตามมาตรฐานกำหนดเองของ AISC ซึ่งให้ข้อกำหนดในการออกแบบไว้ 2 วิธี คือ วิธี ASD (Allowable Stress Design) และวิธี LRFD(Load and Resistance Factor Design) ในแต่ละวิธีของมาตรฐาน AISC ได้ให้สูตรคำนวณต่างๆ โดยคำนึงถึงพฤติกรรมต่างๆ ของเสาที่ได้กำหนดไว้ข้างต้น ตลอดจนปัจจัยต่างๆ เช่น หน่วยแรงที่ตกค้างเหลืออยู่ (residual stress) เมื่อชิ้นส่วนเย็นไม่สม่ำเสมอขณะถูกรีดร้อน การโค้งโก่งงอของเสาก่อนรับน้ำหนัก การยึดปลายเสาที่มีต่อช่วงความยาวประสิทธิผล (KL) อัตราส่วนความชะลูด (KL/r) ในระนาบของการโก่งเดาะ และคุณภาพของเหล็กที่ใช้ (โมดูลัสยืดหยุ่น E และหน่วยแรงที่จุดคราก F_y) แต่ทั้งนี้เสาและส่วนโครงสร้างรับแรงอัดต้องมีอัตราส่วนความชะลูด (KL/r) ไม่เกินกว่า 200

การพิจารณาการออกแบบส่วนของโครงการที่รับแรงอัด ดังสมการต่อไปนี้ สำหรับรูปตัดของส่วนโครงสร้างที่มีอัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความหนาของแต่ละชิ้นส่วนไม่เกินกว่าค่าที่กำหนดให้สำหรับรูปตัดแบบไม่คอมแพค รูป 3.9 นั่นคือ

ก)เมื่อขอบด้านข้างข้างหนึ่งที่ขนานกับแนวแรงไม่ถูกยึด (unstiffened element)

โดยทั่วไป ให้ใช้ไม่เกิน $0.56\sqrt{E/F_y}$

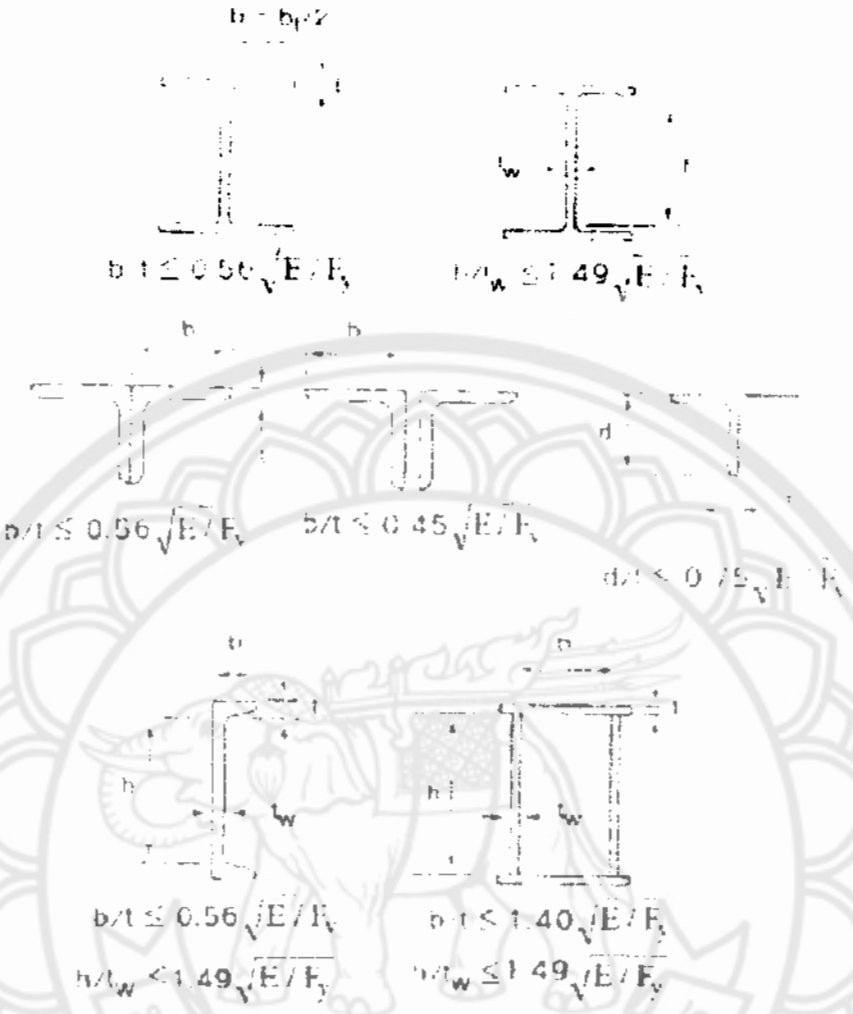
เหล็กฉากเดี่ยวหรือเหล็กฉากคู่ที่มีแผ่นแทรกให้ใช้ไม่เกิน 0.45

เหล็กแผ่นตั้งฉากของเหล็กรูปตัวที ให้ใช้ไม่เกิน $0.75\sqrt{E/F_y}$

ข)เมื่อขอบด้านข้างทั้งสองข้างที่ขนานกับแนวแรงถูกยึด (stiffened element)

โดยทั่วไป ให้ใช้ไม่เกิน 1.49

ท่อเหล็กรูปตัดสี่เหลี่ยม ให้ใช้ไม่เกิน $1.40\sqrt{E/F_y}$



รูปที่ 2.5 แสดงอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของรูปตัดเสา

7. การออกแบบโดยวิธี ASD

หน่วยแรงอัดที่ยอมให้บนหน้าตัดทั้งหมด (A_g) ต่อไปนี้ ขึ้นอยู่กับการโก่งเดาะของเสาทั้งในช่วงอิลาสติกและอินอิลาสติก โดยใช้ค่าอัตราส่วนความชะลูด C_c เป็นตัวกำหนดโดยที่

$$C_c = \sqrt{2\Pi^2 E / F_y}$$

เมื่อ $KL/r \le C_c$: หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ F_a คำนวณได้จาก

$$F_a = \frac{1 - \frac{1}{2}(\frac{KL/r}{C_c})^2}{\frac{5}{3} + \frac{3}{8}(\frac{KL/r}{C_c}) - \frac{1}{8}(\frac{KL/r}{C_c})^3} F_y$$

เมื่อ $KL/r > C_c$

$$F_a = \frac{12\Pi^2 E}{23(KL/r)^2}$$

ในเมื่อ L = ช่วงความยาวของเสาที่ไม่มีค้ำยันทางข้าง ซม.

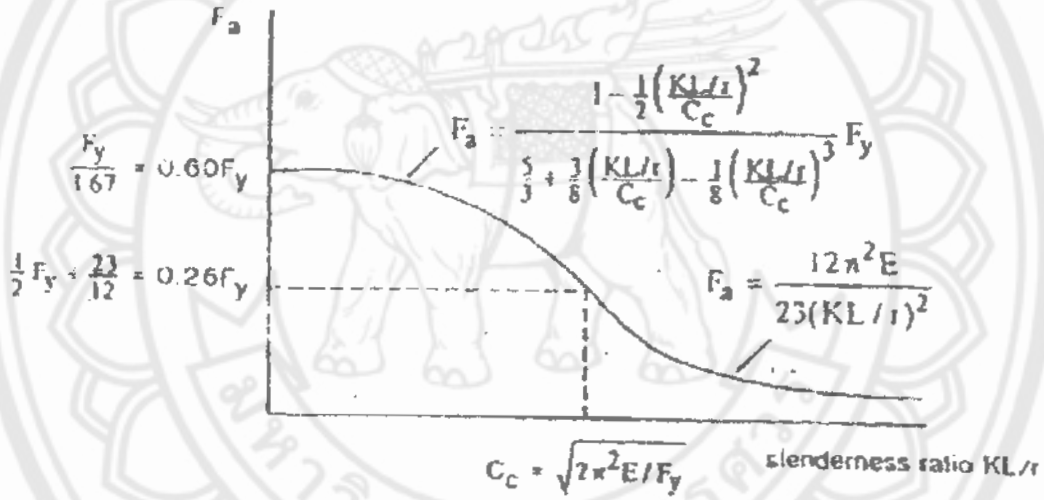
R = รัศมีไจเรชั่น (ที่น้อยที่สุด) ของพื้นที่รอบแกนที่เกิดการโก่งงอ ซม.

E = โมดูลัสหยืดหยุ่นของเหล็ก กก. ต่อ ซม.^{2}

F_y = กำลังจุดครากของเหล็ก กก. ต่อ ซม.^{2}

K = ตัวคูณความยาวประสิทธิผล

F_a = หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ กก. ต่อ ซม.^{2}

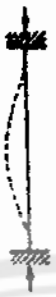
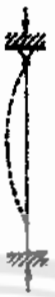
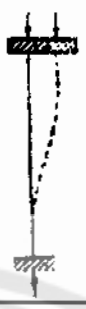
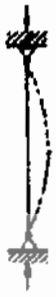


รูปที่ 2.6 แสดงหน่วยแรงอัดที่ยอมให้สำหรับการออกแบบโดยวิธี ASD

ตัวคูณความยาวประสิทธิผล (Effective Length Factor : K)

มาตรฐาน AISC/ASD/LRFD ได้ข้อกำหนดทั่วไปเกี่ยวกับการใช้ตัวคูณประกอบความยาวประสิทธิผลที่ต้องพิจารณาในการออกแบบส่วนโครงสร้างรับแรงอัดดังต่อไปนี้

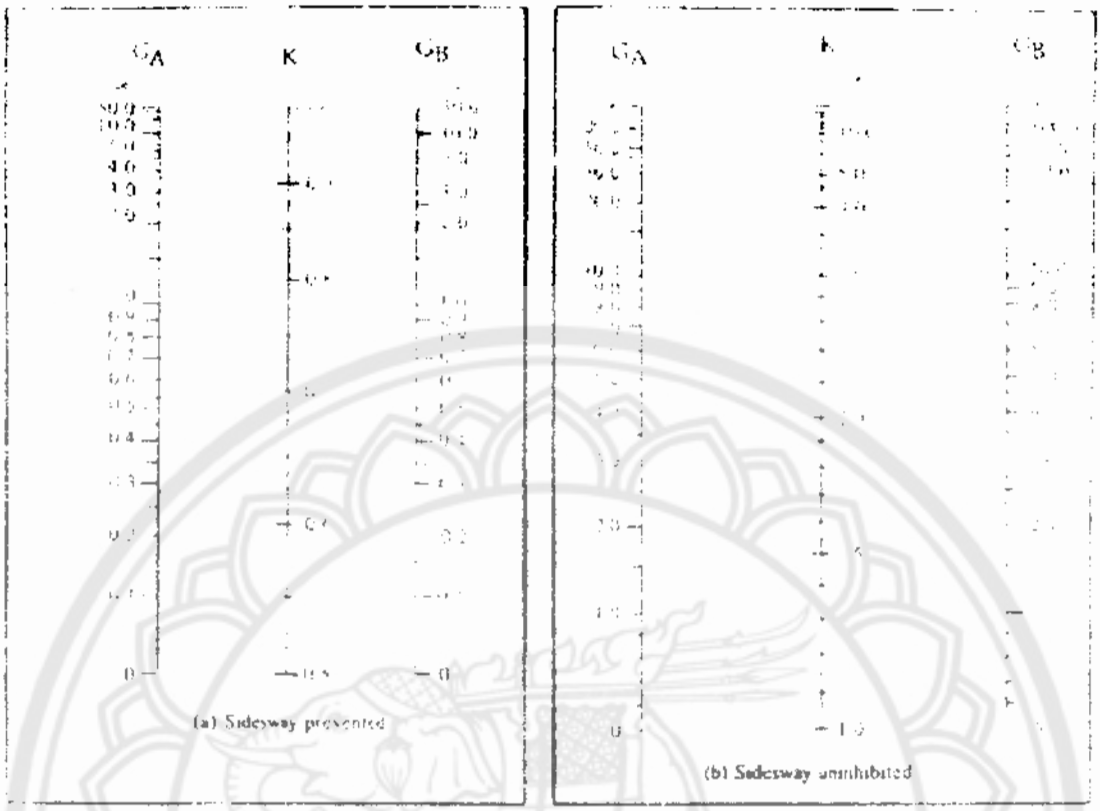
รูปแสดงค่าตัวคูณประกอบประสิทธิผล K ทั้งตามทฤษฎี และที่ใช้ในการออกแบบเสาเมื่อพิจารณาเสมือนว่าเป็นเสาเดี่ยวโดดๆ ทั้งที่ไม่มีการเซและมีการเซ ซึ่งจะเห็นว่าค่าตามทฤษฎีมีค่าน้อยกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบ เพราะในทางปฏิบัติจริงไม่สามารถทำการยึดปลายเสาได้ตรงตามทฤษฎีนั่นเอง

ลักษณะการโค้งงอของเสา แสดงโดยเส้นประ	(ก)	(ข)	(ค)	(ง)	(จ)	(ฉ)
						
ค่า K ตามทฤษฎี	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
ค่า K ที่ใช้ในการออกแบบ	0.65	0.80	1.2	1.0	2.10	2.0
ลักษณะของการยึดปลาย		การหมุนที่ปลายเสา		การเคลื่อนที่ของปลายเสา		
		ไม่มี		ไม่มี		
		มี		ไม่มี		
		ไม่มี		มี		
		มี		มี		

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าตัวคูณประกอบประสิทธิผลของเสา

อนึ่งมาตรฐาน AISC/ASD/LRFD แนะนำให้ใช้ค่า K เท่ากับหนึ่งสำหรับเสาในโครงเฟรมที่ไม่มีการเซด้านข้าง เว้นแต่จะทำการวิเคราะห์ได้ว่าตัว K มีค่าน้อยกว่าหนึ่งและกำหนดให้ต้องวิเคราะห์หาค่าตัว K สำหรับเสาในโครงเฟรมที่ไม่ยอมให้เซทางข้างแต่ทั้งนี้ต้องมีค่าไม่น้อยกว่าหนึ่ง

รูปแสดงเป็น Alignment Chart เพื่อให้หาค่าตัวคูณประกอบความยาวประสิทธิผล K ของเสาในโครงเฟรมทั้งที่มีการเซและไม่มีการเซทางข้าง โดยมีค่าขึ้นอยู่กับตัว G ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างผลรวมของสติฟเนสแฟคเตอร์ของเสาต่อผลรวมของสติฟเนสแฟคเตอร์ของคานที่ปลายบนและปลายล่าง (AและB) ของเสาที่พิจารณา ค่าตัวคูณประกอบความยาวประสิทธิผล K ได้จากการลากเส้นตรงต่อเชื่อมระหว่างค่าตัว G ที่ปลายบนและปลายล่าง



รูปที่ 2.7 แสดงAlignment Chart

อนึ่งเป็นแบบยึดหมุน ให้ค่า G เท่ากับ 10 และเมื่อปลายเสาเป็นแบบยึดแน่นให้ใช้ค่า G เท่ากับ 1

ในกรณีที่ทราบการยึดปลายคานด้านไกลที่แน่นอน ให้คูณค่าสติฟเนสแฟคเตอร์ของคานด้วนค่าต่อไปนี้

เมื่อโครงสร้างไม่มีการเซ

ปลายคานด้านไกลเป็นแบบยึดหมุน คูณด้วย 1.5

ปลายคานด้านไกลเป็นแบบยึดแน่น คูณด้วย 2.0

เมื่อโครงสร้างมีการเซ

ปลายคานด้านไกลเป็นแบบยึดหมุน คูณด้วย 0.5

ปลายคานด้านไกลเป็นแบบยึดแน่น คูณด้วย 0.67

ตัวคูณลดค่าสติฟเนสแฟคเตอร์ (Stiffness Reduction Factor : SRF)

มาตรฐาน AISC/ASD/LRFD ให้ข้อสังเกตว่า Alignment Chart ดังกล่าวได้พัฒนามาจากข้อสมมติฐานตามทฤษฎีอิลาสติกเพียงอย่างเดียว ดังนั้นเมื่อจะนำไปใช้กับเสาที่จะเกิดการโก่งเดาะ

ในช่วงอิลาสติก (เมื่อ f_a มากกว่า 0.26 f_y ตามวิธี ASD) มาตรฐานAISC ให้ปรับแก้ด้วยตัวคูณลดค่าสติฟเนสแฟคเตอร์เสียก่อนซึ่งจะทำให้ค่าของตัว G ที่แต่ละปลายของเสา มีค่าน้อยลงบ้าง นั้นคือ

ถ้าให้ $G' = \sum(I_c / L_c) / \sum(I_g / L_g)$

ดังนั้น $G = [G'][SRF]$

ในที่นี้ I_c, L_c เป็นโมเมนต์อินเนอร์เชียของเสาและของคาน ตามลำดับ

I_g, L_g เป็นช่วงความยาวของเสาและของคาน

เมื่อ $SRF = F_{a(inelastic)} / F_{a(elastic)}$ ในวิธี ASD

=1.0เมื่อเสาโก่งเดาะในช่วงอิลาสติก

8. วิธีการออกแบบโครงสร้างส่วนรับแรงอัด

มีขั้นตอนดังนี้ คือ

1. สมมติค่าหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ หรือค่าของหน่วยแรงวิกฤต (แล้วแต่วิธีที่จะใช้) โดยอย่าให้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ ค่าสูงสุดในสูตรคำนวณออกแบบ

2. หารน้ำหนักที่กระทำด้วยหน่วยแรงอัดที่สมมติขึ้นจากข้อ 1 จะได้ค่าเนื้อที่หน้าตัดของเสาที่ต้องการโดยประมาณ

3. เลือกรูปตัด โดยให้มีเนื้อที่หน้าตัดอย่างน้อยเท่ากับเนื้อที่ที่หาได้จากข้อ 2 และหาค่ารัศมีไจเรชันของรูปตัดที่เลือกใช้ โดยพิจาณาถึงสภาพการค้ำยันด้วย

4. คำนวณหาหน่วยแรงดัดที่ยอมให้ หรือกำลังรับแรงอัดประลัย (แล้วแต่กรณี) ของรูปตัดที่เลือกใช้

5. ถ้าค่าหน่วยแรงอัดที่ยอมให้หรือกำลังรับแรงอัดประลัย ที่ได้ในข้อ 4 มีค่าไม่มากเกินกว่าค่าจริงประมาณ 2 - 3 เปอร์เซ็นต์ ก็แสดงว่าเลือกขนาดรูปตัดได้เหมาะสมแล้ว

6. แต่ค่าหน่วยแรงอัดที่ยอมให้หรือกำลังรับแรงอัดประลัย มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าค่าจริงประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าหน้าตัดที่เลือกใช้ใหญ่ไปหรือเล็กไปกว่าความต้องการ **จำเป็นต้องกลับไปพิจารณาใหม่**

7. เมื่อได้รูปตัดที่เหมาะสม ให้ตรวจสอบเกี่ยวกับการโกงเดาะเฉพาะแห่ง ซึ่งอาจจำเป็นต้องเลือกรูปตัดใหม่ก็ได้

2.3.2 การออกแบบโครงสร้างรับแรงดัด

คานเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างที่รับแรงดัด หรือโมเมนต์ดัด และแรงเฉือน ซึ่งเกิดจากน้ำหนักหรือแรงกระทำในแนวขวางที่ตั้งฉากกับแนวแกนของส่วนโครงสร้าง ทำให้คานแอ่นหรือโก่งตัว ส่วนโครงสร้างที่ทำหน้าที่เสมือนคาน แต่เรียกชื่อต่างไปได้แก่ ตง(Joist) ซึ่งวางถี่ๆ รับน้ำหนักที่ถ่ายจากพื้นโดยตรง คานเอก(Main Beam) เป็นคานใหญ่ที่อาจอยู่โดยรอบพื้นห้องและรับน้ำหนักจากตง หรือเป็นคาที่วางขนานรับน้ำหนักที่ถ่ายจากพื้นสะพาน คานขอบ(Spandrel Beam) เป็นคานริมนอกของอาคารรับน้ำหนักที่ถ่ายจากพื้นและผนัง คานแม่บันได (Stringer) เป็นคานที่รับน้ำหนักจากพื้นและบันไดและถ่ายน้ำหนักให้กับคานอื่นต่อไป

แป(Purlin) เป็นคานในโครงหลังคาที่วางจากจั่วหนึ่งไปอีกจั่วหนึ่งรับน้ำหนักจากเครื่องมุง

รูปที่ 2.8 แสดงการวางตัวของคาน

1. โมเมนต์ดัด แรงเฉือน และการโก่งตัว

โมเมนต์ดัด(M) ที่กระทำต่อคานที่หน้าตัดใดๆ ซึ่งอยู่ทางด้านใดด้านหนึ่งของรูปตัด เป็นผลรวมทางพีชคณิตของโมเมนต์ดัดที่ได้จากการกระทำของน้ำหนักหรือแรงภายนอกที่อยู่ด้านใดด้านหนึ่งของรูปตัดนั้น ค่าโมเมนต์สูงสุด(M_{max}) ที่วิเคราะห์ได้จากทฤษฎีอิลาสติกของการวิเคราะห์ โครงสร้าง อาจเขียนรูปแบบสมการ ดังนี้

$$M_{max} = C_{dm} WL$$

ในที่นี้ W = น้ำหนักทั้งหมดที่กระทำบนคาน

L = ช่วงความยาวของคานระหว่างฐานรองรับที่ปลายทั้งสอง

C_{dm} = ค่าสัมประสิทธิ์ ขึ้นกับลักษณะที่กระทำและลักษณะการยึดปลายคาน (ดังตาราง)

ส่วนแรงดัดในช่วงอิลาสติก พิจารณาได้จากสูตรแรงดัด $f_b = Mc/I$ ซึ่งมีค่าสูงสุดที่หลังคานและท้องคาน โดยที่ c เป็นระยะที่ห่างจากแกนสะเทิน และ I เป็นโมเมนต์อินเนอร์เชียของรูปตัดรอบแกนที่รับโมเมนต์ดัด(M)

แรงเฉือน(V) ที่กระทำต่อคานที่หน้าตัดใดๆ ซึ่งอยู่ทางด้านใดด้านหนึ่งของรูปตัดเป็นผลรวมของพีชคณิตหรือน้ำหนักหรือแรงกระทำภายนอกที่อยู่ทางด้านใดด้านหนึ่งของรูปตัดนั้น

ส่วนหน่วยแรงเฉือนแนวนอนที่เกิดจากแรงเฉือน (v) ในแนวตั้ง พิจารณาจากสูตร $f_v = VQ/It$ ซึ่งมีค่าสูงสุดในแนวแกนสะเทินของรูปตัด โดยที่ Q เป็นโมเมนต์รอบแกนสะเทินของเนื้อที่ส่วนที่อยู่นอกแนวที่ต้องการหาหน่วยแรงเฉือน และ t เป็นความหาของรูปตัดส่วนที่ต้องการหาแรงเฉือน

อย่างไรก็ดี เมื่อใช้คานเหล็กรูปพรรณ เช่น รูปตัดตัว W หรือตัว C หน่วยแรงเฉือนในปีกคานจะมีค่าน้อยมาก ดังนั้น เพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้น จึงให้พิจารณาจากค่า "เฉลี่ย" ของหน่วยแรงเฉือนที่คำนวรจากสมการ $f_v = V/dt_w$ โดยที่ d และ t_w เป็นความลึกทั้งหมดของรูปตัดคานและความหนาเหล็กแผ่นตั้ง(WEB) ตามลำดับ

การแอ่นตัวหรือการโก่งตัวในแนวดิ่ง (Δ) ซึ่งวิเคราะห์ได้จากทฤษฎีอิลาสติกโดย**พิจารณาจากผลการกระทำของโมเมนต์ดัด จะมีค่าการแอ่นตัวหรือการโก่งตัวสูงสุด (Δ_{max}) เขียนอยู่ในรูปสมการดังนี้**

$$\Delta_{max} = C_d \frac{WL^3}{EI}$$

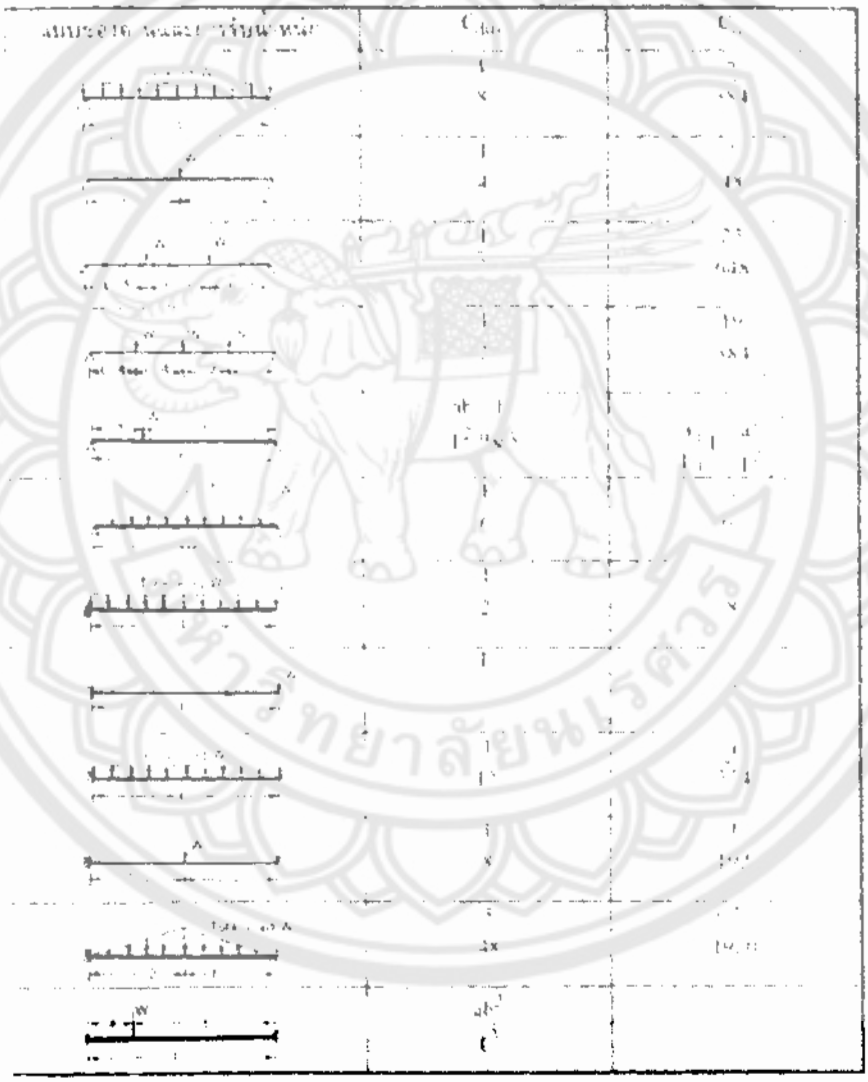
ในที่นี้ W = น้ำหนักบรรทุกทั้งหมดที่กระทำบนคาน

L = ช่วงความยาวของคานระหว่างจุดรองรับทั้งสอง

E = โมดูลัสหยืดหยุ่นของวัสดุ

I = โมเมนต์อินเนอร์เชียของรูปตัดแกนสะเทิน

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์ ขึ้นกับลักษณะที่กระทำและลักษณะการยึดปลายคาน



ตารางที่ 2.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์C_{dm}และC_d

2. การออกแบบส่วนโครงสร้างตามมาตรฐาน AISC/ASD

การจำแนกประเภทของรูปคาน

มาตรฐาน AISC/ASD จำแนกประเภทรูปตัดคานเป็น แบบคอมแพค แบบไม่คอมแพค และแบบชะลูด โดยให้พิจารณาจากอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของแต่ละชิ้นส่วนที่รับแรงอัดเนื่องจากโมเมนต์ดัด ซึ่งได้แก่ แผ่นเหล็กปีกคานและเหล็กแผ่นตั้ง ดังตารางที่

ชิ้นส่วน	อัตราส่วน	คอมแพค	ไม่คอมแพค
ปีกคาน	$b_f/2t_f$	$0.38\sqrt{E/F_y}$	$0.56\sqrt{E/F_y}$
แผ่นตั้ง	d/t_w	$3.76\sqrt{E/F_y}$	$4.46\sqrt{E/F_b}$

ตารางที่ 2.3 อัตราส่วนความกว้างต่อความหนาสำหรับเหล็กรูปพรรณตัว I และตัวW

ในที่นี้ b_f ,t_f เป็นความกว้างและความหนาของเหล็กปีกคาน ตามลำดับ

d,t_w เป็นความลึกและความหนาของเหล็กแผ่นตั้ง ตามลำดับ

E เป็นโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก

F_y เป็นกำลังจุดครากของเหล็ก

$F_b = 0.6F_y$

รูปตัดเป็นแบบคอมแพค : ถ้าเหล็กปีกคานเชื่อมต่อเนื่องกับเหล็กแผ่นตั้งตลอดความยาว โดยมีอัตราส่วน $b_f/2t_f \le 0.38\sqrt{E/F_y}$ และ $d/t_w \le 3.76\sqrt{E/F_y}$

รูปตัดเป็นแบบไม่คอมแพค : ถ้าอัตราส่วน $0.38\sqrt{E/F_y} < b_f/2t_f \le 0.56\sqrt{E/F_y}$ และ $3.76\sqrt{E/F_y} < d/t_w \le 4.46\sqrt{E/F_b}$

อนึ่งมาตรฐาน AISC/ASD กำหนดรูปตัดเป็นแบบคอมแพคบางส่วน เมื่ออัตราส่วน $0.38\sqrt{E/F_y} < b_f/2t_f \le 0.56\sqrt{E/F_y}$ และ $d/t_w \le 3.76\sqrt{E/F_y}$

ระยะค้ำยันทางข้าง

มาตรฐาน AISC/ASD ให้พิจารณาระยะค้ำยันทางข้างคาน (L)ว่าเพียงพอหรือไม่โดยใช้ระยะ L_c เป็นตัวพิจารณา

ในเมื่อระยะ L_cเป็นค่าน้อยของ ก) ค่า$0.444\,b_f\sqrt{E/F_y}$ และ ข) ค่า $0.69E/(dF_y/A_f)$

นั่นคือ เมื่อระยะค้ำยัน L ห่างกันไม่เกินกว่าระยะ L_c แสดงว่าระยะค้ำยันทางข้างพอเพียง

เมื่อระยะค้ำยัน L ห่างกันเกินกว่าระยะ L_c แสดงว่าระยะค้ำยันทางข้างไม่พอเพียง

หน่วยแรงดัดที่ยอมให้ (F_b)

มาตรฐาน AISC/ASD ให้พิจารณาหาหน่วยแรงดัดที่ยอมให้ของเหล็กรูปตัดแบบตัว I,W หรือตัว C ที่ผลิตแบบรีดร้อน จากระยะค้ำยันทางข้าง L ดังต่อไปนี้

ก) เมื่อระยะค้ำยันทางข้างพอเพียง (ระยะค้ำยัน L ห่างกันไม่เกินกว่าระยะ L_c)

1. สำหรับรูปตัดแบบคอมแพค ที่มีความสมมาตรทางแกนรองและรับน้ำหนักในระนาบของแกนรอง

หน่วยแรงดัดที่ยอมให้รอบแกนหลัก $F_b = 0.66 F_y$

หน่วยแกนดัดที่ยอมให้รอบแกนรอง $F_b = 0.75 F_y$

2. สำหรับรูปตัดแบบคอมแพคบางส่วน

หน่วยแรงดัดที่ยอมให้รอบแกนหลัก

$$F_b = F_y\left[0.79 - 0.34\left(\frac{b_f}{2t_f}\right)\sqrt{F_y/E}\right]$$

หน่วยแกนดัดที่ยอมให้รอบแกนรอง

$$F_b = F_y\left[1.075 - 0.85\left(\frac{b_f}{2t_f}\right)\sqrt{F_y/E}\right]$$

3. สำหรับรูปตัดแบบไม่คอมแพค

หน่วยแรงดัดที่ยอมให้รอบแกนหลัก และแกนรอง $F_b = 0.60 F_y$

ข) เมื่อระยะค้ำยันทางข้างไม่พอเพียง (ระยะค้ำยัน L ห่างกันเกินกว่าระยะ L_c)

หน่วยแรงดัดที่ยอมให้สำหรับรูปตัดแบบคอมแพคหรือแบบไม่คอมแพคขึ้นอยู่กับอัตราส่วน L/r_T ดังต่อไปนี้

1. เมื่อ $L/r_t \le \sqrt{3.517EC_b/F_y}$

หน่วยแรงดัดที่ยอมให้รอบแกนหลัก $F_b = 0.60 F_y$

2. เมื่อ $L/r_t \le \sqrt{3.517EC_b/F_y}$

ให้พิจารณาใช้ค่าที่มากที่สุดของหน่วยแรงดัดที่ยอมให้จากสามกรณีต่อไปนี้

ป
TJ
163.5
.B64
ศ115ก
2550

สำนักหอสมุด
19 พ.ย. 2550

2.1 เมื่อ $\sqrt{3.517EC_b/F_y} \le L/r_t \le \sqrt{17.586EC_b/F_y}$

หน่วยแรงดัดที่ยอมให้รอบแกนหลัก $Fb = \left[\frac{2}{3} - \frac{Fy(L/rT)^2}{52.759ECb}\right]Fy \le 0.60Fy$

2.2 เมื่อ $L/r_t \ge \sqrt{17.586EC_b/F_y}$

หน่วยแรงดัดที่ยอมให้รอบแกนหลัก $F_b = \frac{5.862EC_b}{(L/r_T)^2} \le 0.60F_y$

2.3 เมื่อเหล็กปีกคานที่รับแรงอัดเป็นแผ่นตันตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งมีเนื้อที่หน้าตัดมีน้อยกว่าเนื้อที่หน้าตัดของเหล็กปีกคานที่รับแรงดึง หรือกรณีเหล็กรูปรางน้ำ (ไม่ขึ้นกับค่าของ L/r_T)

หน่วยแรงดัดที่ยอมให้รอบแกนหลัก $F_b = \frac{0.414EC_b}{(L_d/A_f)^2} \le 0.60F_y$

ในที่นี้ L = ช่วงความยาวที่ไม่มีการค้ำยันที่เหล็กปีกคานรับแรงอัด ซม.

d = ช่วงความลึกของคาน ซม.

r_T = รัศมีไจเรชันรอบแกนระนาบของเหล็กแผ่นตั้ง(web)ของหน้าตัดที่ประกอบด้วยเนื้อที่ของเหล็กปีกคานรับแรงอัด และหนึ่งในสามของเนื้อที่ของเหล็กแผ่นตั้งที่รับแรงอัด (มีค่าประมาณเท่ากับ $0.26b_f$)

Af = เนื้อที่หน้าตัดของเหล็กปีกคานรับแรงอัด

$C_b = 1.75 + 1.05\left(\frac{M_1}{M_2}\right) + 0.3\left(\frac{M_1}{M_2}\right)^2 \le 2.3$

M1,M 2 = โมเมนต์ดัดรอบแกนตรงตำแหน่งที่ทำค้ำยัน โดยให้ M1<M 2 และให้อัตราส่วน M1/M 2 มีค่าเป็นบวก เมื่อโมเมนต์ดัดทำให้เกิดการโก่งสองทาง อย่างไรก็ดี ในทุกกรณีอาจพิจารณาใช้ค่า C_b เท่ากับหนึ่ง ซึ่งทำให้ได้รูปตัดที่ใหญ่มากขึ้น

หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้(F_v)

แรงเฉือนที่มากที่สุดที่ยอมให้สำหรับเหล็กรูปพรรณ $V = (F_v)dt_w$

เมื่อ $h/t_w \le \sqrt{5E/F_y}$

หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ $F_v = 0.4F_y$

เมื่อ $h/t_w > \sqrt{5E/F_y}$

หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้ $F_v = \frac{F_y}{2.89}(C_v) \le 0.4F_y$

ในที่นี้ d = ความลึกทั้งหมดของคาน

t_w = ความหนาของเหล็กแผ่นตั้ง

h = ขนาดของแผ่นตั้ง เป็นระยะระหว่างช่วงของรอยพอกของเหล็กรูปพรรณ และระยะช่วงว่างระหว่างปีกคานเมื่อหน้าตัดประกอบขึ้นจากการเชื่อม

$C_v = \frac{1.55k_{vE}}{(h/t_w)^2 F_y}$ เมื่อ C_v มีค่าน้อยกว่า 0.8 และ

$C_v = \frac{1.12\sqrt{k_{vE}/F_y}}{h/t_w}$ เมื่อ C_v มีค่าเกินกว่า 0.8

$k_v = 4.00 + 5.34/(a/h)^2$ เมื่อ a/h มีค่าน้อยกว่า 1.0 และ

$k_v = 5.34 + 4.0/(a/h)^2$ เมื่อ a/h มีค่าเกินกว่า 1.0

a = ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมข้างคาน

3. ระยะแอ่นหรือโก่งตัวที่ยอมให้ – มาตรฐาน AISC/ASD

มาตรฐาน AISC/ASD/LRFD กำหนดระยะการโก่งตัวสูงสุดที่ยอมให้ภายใต้การบรรทุกของน้ำหนักคงที่ใช้งานและน้ำหนักจรใช้งาน ดังต่อไปนี้

- L/360 สำหรับงานก่อสร้างต่างๆที่ฉาบผิว
- L/240 สำหรับงานพื้นที่ไม่ฉาบผิว
- L/180 สำหรับงานหลังคาที่ไม่ฉาบผิว

ในที่นี้ L = ช่วงความยาวคาน

อนึ่งมาตรฐาน AISD ให้ข้อสังเกตว่า อาจไม่ต้องคำนวณหาค่าการโก่งตัวของคาน ถ้าใช้อัตราส่วนระหว่างความลึกของคานต่อช่วงความยาวคาน ไม่น้อยกว่าค่าต่อไปนี้

ก) $F_y/(0.027E)$ สำหรับคานที่รองรับพื้น

ข) $F_y/(0.035E)$ สำหรับแปที่รองรับหลังคา

4. วิธีออกแบบคาน

การออกแบบคานเหล็กรูปพรรณ อาจกระทำตามลำดับต่อไปนี้

1. เลือกรูปตัดของคาน คำนวณหาน้ำหนักบรรทุกใช้งานที่เพิ่มค่าแล้ว (ขึ้นกับวิธีการออกแบบ) ที่กระทำบนคาน

2. คำนวณหาโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่มากที่สุดที่คานต้องรับ

3. หาระยะที่ค้ำยันทางข้างคาน

4. คำนวณหาหน่วยแรงดัดที่ยอมให้ หรือ กำลังรับแรงดัดประลัยจากรูปตัดที่เลือกใช้ ซึ่งขึ้นกับประเภทของรูปตัด และระยะค้ำยันทางข้าง

5. คำนวณหาโมดูลัสอิลาสติกของหน้าตัด หรือโมดูลัสพลาสติกที่ต้องการ ทำการเปรียบเทียบกับเหล็กรูปตัดที่เลือกใช้งานข้างต้น หากรูปตัดที่เลือกใช้ไม่เหมาะสม ให้กลับไปดำเนินการใหม่ตั้งแต่ต้น

6. ตรวจสอบ การรับแรงเฉือน และการโก่งตัวในแนวดิ่ง

7. ตรวจสอบการตรากหรือการโก่ง และการเซของเหล็กแผ่นตั้งเมื่อคานรับน้ำหนักแบบจุด

2.4 พฤติกรรมขององค์อาคาร หรือโครงสร้าง

พฤติกรรมขององค์อาคาร หรือโครงสร้างขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพและกลสมบัติขององค์อาคาร หรือโครงสร้าง กับน้ำหนักบรรทุก หรือแรงที่กระทำต่อองค์อาคาร หรือโครงสร้าง ดังนั้น พฤติกรรมขององค์อาคาร หรือโครงสร้าง จึงเกิดภายใต้น้ำหนัก หรือแรงกระทำโดยผลลัพธ์อาทิเช่น หน่วยแรงภายในองค์อาคาร หรือโครงสร้าง การเคลื่อนตัว การแอ่นหรือโก่งตัว พิกัดแตกร้าว หรือเสถียรภาพอื่น ๆ

2.4.1 บันได

บันได (Staircase) เป็นองค์อาคารที่เชื่อมต่อระหว่างชั้นเช่นเดียวกับเสา มีลักษณะคล้ายคลึงกับแผ่นพื้น จึงคำนวณออกแบบเสมือนเป็นแผ่นพื้นต่อเนื่องที่พาดอยู่ระหว่างชั้น บันไดอาจทำได้หลายรูปแบบ อาจมี หรือไม่มีชานพัก (Landing) ก็ได้ขึ้นกับความจำเป็น และประโยชน์ใช้สอย อาจมีคานรองรับที่ชานพัก) บันไดอย่างง่ายมีท้องเรียบ หรือเป็นลักษณะพับผ้า คือท้องบันไดพับเป็นขั้น ๆ คล้ายด้านบน มักไม่ค่อยพบบันไดที่เป็นเสมือนแผ่นพื้นช่วงเดียว เพราะส่วนใหญ่บันไดจะต่อเนื่องกับแผ่นพื้นอื่น ๆ เสมอ บันไดบางชนิดมีคานแม่บันไดขนาบทั้งสองข้างต่อเนื่องควบคู่ไปกับตัวบันได พื้นบันไดจึงเสมือนเป็นแผ่นพื้นทางเดียวที่รองรับด้วยคานแม่บันไดซึ่งขนาบทั้งสองข้าง คานแม่บันไดนี้อาจออกแบบให้บาง และลึกเป็นเสมือนแผงกันตก หรือราวบันไดในตัว บันไดประเภทนี้อาจมีท้องเรียบ หรือเป็นลักษณะพับผ้า บันไดบางชนิดคล้ายพื้นหรือคานที่ยื่นออกมาจากคานแม่บันไดที่รองรับด้านใดด้านหนึ่ง หรือรองรับใต้ตัวบันไดนั้น โดยคานที่รองรับดังกล่าวนี้จะยาวต่อเนื่องควบคู่ไปกับตัวบันได บันไดบางชนิดเป็นคล้ายพื้น หรือคานยื่นออกมาจากผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก บันไดประเภทนี้อาจมีท้องเรียบ หรือพับผ้า บันไดบางชนิดพาดระหว่างชั้น

แม้มีชานพัก แต่ก็ปราศจากคาน หรือเสารองรับชานพักนั้น เรียกบันไดชานพักลอย (Free standing or Dog-leg or Jack-knife staircase) บันไดประเภทนี้อาจมีคานขนาบทั้งสองข้างตลอดระหว่างชั้น หรืออาจมีคานเพียงตัวเดียวรองรับข้างใต้บันได หรืออาจปราศจากคาน โดยออกแบบให้ตัวบันไดทั้งชิ้นเป็นเสมือนคาน นั่นเอง บันไดประเภทนี้อาจมีท้องเรียบ หรือพับผ้า บันไดวน บันไดเวียน หรือบันไดโค้งต่าง ๆ อาจมีคานขนาบทั้งสองข้างตลอดระหว่างชั้น หรืออาจมีคานเพียงตัวเดียว รองรับข้างใต้บันได หรืออาจปราศจากคาน โดยออกแบบให้ตัวบันไดทั้งชิ้นเป็นเสมือนคาน นั่นเอง บันไดประเภทนี้อาจมีท้องเรียบ หรือพับผ้า ส่วนบันไดไม้ และเหล็ก ปกติมักเป็นระบบคานแม่บันไดพาด แล้วทำลูกขั้นด้วยไม้ หรือเหล็ก ตามแต่กรณี

2.4.2 คาน

คาน (Beam) เป็นองค์อาคารที่มักจะอยู่ในแนวราบ เชื่อมต่อกับองค์อาคารในแนวตั้ง เช่น เสา หรือผนัง ปกติคานมีรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพราะคำนวณออกแบบง่าย ก่อสร้างง่าย ประหยัด แต่หากจำเป็น คานอาจมีรูปหน้าตัดเป็นอื่นได้เช่นคานรูปตัวที (Tee beam) ซึ่งอาจเกิดจากความตั้งใจที่จะออกแบบหรือก่อสร้างให้คานนั้นมีรูปเป็นตัวที หรืออาจเกิดในกรณีที่คานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ารองรับพื้น ค.ส.ล. เท หล่อเป็นเนื้อเดียวกัน สามารถพิจารณา หรือผนวกส่วนหนึ่งของแผ่นพื้นเป็นเสมือนปีก (Flange) ของตัวที ทำให้คานแข็งแกร่งมากขึ้นกว่ารูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าธรรมดา มีกำลังต้านทานแรงเพิ่มขึ้น คานอาจทำด้วยไม้ เหล็ก คอนกรีตเสริมเหล็ก หรือคอนกรีตเสริมลวดอัดแรง ขึ้นอยู่กับปัจจัย หรือเหตุผลเช่นช่วงคาน น้ำหนักบรรทุก หรือแรงความประหยัด หรือเหตุผลทางสถาปัตยกรรมที่ต้องการแสดงรูปลักษณ์ของอาคาร คานไม้ มักใช้ประกอบกับระบบพื้น และตงไม้ โดยสมัยโบราณ ตัวคานมักจะวางฝากอยู่กับเสาไม้ ยึดด้วยลิ่ม หรือบากไม้ให้เข้ามุมกัน ปัจจุบันอาจใช้ตะปู ยึดด้วยสลักเกลียว แหวน หรืออุปกรณ์อื่น ๆ โดยคานจะรองรับตง และตงรองรับพื้นไม้กระดานตามลำดับ คานไม้อาจวาง หรือฝากกับเสาคอนกรีต หรือเสาเหล็กก็ได้

คานเหล็ก นิยมใช้ในอาคารขนาดใหญ่ หรืออาคารที่ต้องการให้ก่อสร้างได้รวดเร็ว หรือต้องการให้โครงสร้างมีน้ำหนักเบากว่าใช้คอนกรีตเสริมเหล็ก ไม่นิยมใช้กับอาคารขนาดเล็ก เพราะราคาจะค่อนข้างแพง อีกทั้งต้องออกแบบจุดต่ออย่างพิถีพิถันให้มั่นคงแข็งแรง และต้องป้องกันอัคคีภัย คานเหล็กอาจใช้ประกอบกับเสาเหล็ก หรือเสา ค.ส.ล. คานเหล็กอาจใช้รองรับตงไม้ หรือตงเหล็ก อีกนัยหนึ่ง คานเหล็กอาจรองรับพื้นเหล็ก พื้นคอนกรีต หรือระบบพื้นไม้ก็ได้คาน ค.ส.ล. ส่วนใหญ่หล่อในที่ โดยทั่วไปไม่ใช้คานคอนกรีตกับเสาเหล็ก หรือเสาไม้ เพราะเชื่อมต่อ หรือยึด

กันได้ยาก ส่วนใหญ่จึงใช้ร่วมกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่คานคอนกรีตเสริมเหล็ก ใช้ร่วมกับระบบพื้นได้แทบทุกชนิด เช่น พื้นคอนกรีต (ทั้งแผ่นพื้นกึ่งสำเร็จรูป หรือแผ่นพื้นหล่อในที่) พื้นเหล็ก หรือแม้แต่พื้นไม้ คานคอนกรีตอัดแรง หลักการคล้ายคลึงกับคาน ค.ส.ล.แต่เสริมลวดอัดแรง (Prestressing wire or tendon) ทำให้มีกำลังต้านทานแรงมากขึ้น จึงเหมาะกับโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่นคานสะพาน (Girder) นอกจากที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีคานประกอบ (Composite beam) ซึ่งใช้วัสดุสองชนิดขึ้นไป เช่น ใช้คานเหล็กรูปพรรณประกอบกับคอนกรีต ฐานรองรับคานช่วงเดียว คานต่อเนื่อง และคานยื่น เมื่อรับน้ำหนัก หรือแรง จะถูกดัดเกิดแรงในคาน และคานโก่งตัวในลักษณะแตกต่างกัน

2.4.3 โครงหลังคา

หลังคาเป็นส่วนประกอบที่คลุมอาคารเพื่อให้เกิดพื้นที่ใช้สอย ป้องกันความร้อน ฝน จำแนกตามความลาดชันได้สาม ประเภทคือ หลังคาเรียบ (Flat roof) หลังคาที่ลาดชัน (Sloped plane-roof) และระบบหลังคาที่ซับซ้อน (Complex roof system) หลังคาเรียบมักเป็นหลังคาคอนกรีต เช่นแผ่นพื้น ค.ส.ล ทั้งที่เป็นพื้นชนิดวางบนคาน (แผ่นพื้นทางเดียว แผ่นพื้นสองทาง แผ่นพื้นตง แผ่นพื้นกระทง หรือแผ่นพื้นไร้คานแบบต่าง ๆ) จะต้องทึบน้ำ โดยผสมสารกันซึม หรือทำระบบกันซึมคลุมผิวด้านบน อีกแบบหนึ่งเป็นหลังคาที่ใช้เหล็กแผ่นพับเป็นไม้แบบสำหรับเทคอนกรีต ความหนาของคอนกรีตและเหล็กเสริมในพื้นคอนกรีตจะน้อยกว่าหลังคาเรียบคอนกรีตเสริมเหล็ก หลังจากคอนกรีตแข็งตัวแล้ว แผ่นเหล็กพับจะเป็นทั้งเหล็กเสริมของพื้นหลังคา และเป็นฝ้าเพดานของชั้นที่อยู่ถัดลงมา ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

หลังคาลาดชัน นิยมใช้กับอาคารทั่วไปรวมทั้งโรงงานอุตสาหกรรม หลังคาชนิดนี้ประกอบไปด้วยองค์ประกอบที่สำคัญสองส่วนคือ วัสดุมุงหลังคา และโครงหลังคา ประกอบกันเป็นรูปทรงต่าง ๆ อาทิ เพิงแหงน (Lean to) ปีกผีเสื้อ (Butterfly) จั่ว (Gable) หรือปั้นหยา (Hip)

วัสดุมุงปัจจุบันใช้กระเบื้องชนิดต่าง ๆ หรือแผ่นเหล็กพับขึ้นรูปสำเร็จ(Metal sheet) วัสดุเหล่านี้มีคุณสมบัติ น้ำหนักต่างกัน ราคา วิธีติดตั้ง ต่างกัน

โครงหลังคา ประกอบด้วย จันทัน และแป(Rafter and purlin) อนึ่ง หากจั่วหลังคาเป็นทรงสูงช่วงยาว หรือหลังคามีสันยาว ก็จะมีตั้ง (King post or post) รองรับจันทันและมีอกไก่ (Ridge) เชื่อมยึด หรือพาดบนตั้งเพื่อพรางจันทัน (หรือให้จันทันพรางวางพาด) หากหลังคาช่วงยาวขึ้น หรือมีหลายระดับ เช่น หลังคาอุโบสถทรงไทย ก็อาจต้องมีตั้งโท (Queen post) หากโครงหลังคาเปลี่ยนระนาบ หรือมีหลายมุข เช่น หลังคาทรงปั้นหยา ก็จะต้องมี ตะเฆ่ราง (Valley rafter) หรือตะเฆ่สัน

(Hip rafter) ณ ตำแหน่งที่เปลี่ยนระนาบ อย่างไรก็ตาม อาจสรุปได้ว่า วัสดุมุงหลังคายึดกับแป ถ่ายน้ำหนักผ่านแป สู่ตะเฆ่ หรือจันทัน แล้วถ่ายลงดั้ง คาน (อเส) เสา หรือกำแพง ตามลำดับ แล้วแต่กรณี จันทัน ตะเฆ่ ดั้ง หรืออกไก่ อาจทำด้วยไม้ เหล็ก และคอนกรีต ส่วนแปใช้จะมีแปเหล็ก และแปไม้เท่านั้น แสดงตัวอย่างหลังคาลาดชันแบบต่าง ๆ อนึ่ง อาจใช้โครงถัก (หรือโครงข้อหมุน - Truss) แทนระบบจันทัน ตะเฆ่ โดยเฉพาะในอาคาร หรือโรงงานที่ต้องการพื้นที่ว่างมาก ๆ และตำแหน่งเสาอยู่ห่างกันมากจนไม่สามารถใช้ระบบแรกได้ โครงถักเดิมใช้ทั้งที่ทำจากไม้ และเหล็ก ปัจจุบันนิยมให้เหล็กเป็นส่วนใหญ่ โครงถักนี้อาจมีรูปทรงแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับรูปทรงของหลังคา ความสวยงามทางสถาปัตยกรรม ประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักหรือแรง ส่วนระบบหลังคาที่ซับซ้อน อาทิ หลังคาคลุมอัฒจันทร์สนามกีฬา อาคารสาธารณะขนาดใหญ่ ที่ต้องคลุมพื้นที่ใช้สอยมาก ๆ เน้นความสวยงาม หรือเอกลักษณ์ ต้องคำนวณออกแบบ และก่อสร้างอย่างพิถีพิถัน ใช้ความชำนาญเป็นพิเศษราคาแพง จึงไม่เหมาะกับอาคารขนาดเล็ก หรือที่พักอาศัย ตัวอย่างรูปแบบหลังคาที่มีความซับซ้อน ได้แก่หลังคารูปทรงเรขาคณิต เช่น หลังคาแผ่น หรือเปลือกบาง (Plate or shell) รูปทรงเรขาคณิต เช่น ฝาจีบ (Folded) ครึ่งทรงกลม (Halfspherical)ทรงกระบอกผ่าซีก (Barrel) Hyperbolic-Paraboloid โครงร่ม (Umbrella like) หลังคาระบบตง พื้นกระทง หรือโครงตาข่าย (Grid or plate roof) ระบบขึง หรือดึงรั้ง (Cable roof) ระบบ Arch อนึ่ง โครงหลังคาเหล่านี้อาจใช้วัสดุมุงปกติ เช่นกระเบื้อง แผ่นเหล็ก วัสดุเบา โปร่งใส อาจเป็นเปลือกบางทำด้วยคอนกรีต แผ่นโลหะขึ้นรูป แผ่นวัสดุบาง (Membrane) เช่น ผ้าใบ เป็นต้น

2.4.4 จุดต่อยึด และฐานรองรับ

เมื่อหลายองค์อาคารประกอบกันเป็นโครงสร้าง ก็จะปรากฏจุดต่อยึด (Joint or connection) จุดต่อยึดบางประเภทเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน แต่บางประเภทเป็นวัสดุต่างชนิด เช่น ไม้และเหล็ก เหล็ก และคอนกรีต เป็นต้น จุดต่อยึดวัสดุประเภทเดียวกัน อาจหล่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Monolithic casting) เช่น คอนกรีต หรือเชื่อมยึดติดกันเป็นเนื้อเดียว (Weld) เช่น เหล็กรูปพรรณ หาไม่แล้วอาจอาศัยตัวต่อยึด (Connector) หรืออุปกรณ์กล (Mechanical devices) เช่น ตะปู (Nail) แหวนแบบเรียบหรือมีฟัน (Split or toothed ring) หมุดย้ำ (Rivet) แท่งยึด (Rod) สลักเกลียวปลายปล่อย หรือสลักเกลียวและแหวนยึด (Bolt & nut) เป็นต้น บางครั้ง จุดต่อยึด หรือรอยต่อ เป็นแบบแยกส่วน เพื่อกำหนด หรือควบคุมพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงเช่น รอยต่อเพื่อการยืดหด หรือรอยต่อที่ขยายตัวได้ (Expansion joint) การกำหนดชนิด หรือประเภทของจุดต่อยึด จะต้องคำนึงถึงพฤติกรรมขององค์อาคาร หรือโครงสร้าง และความมั่นคงแข็งแรง หรือกล่าวได้ว่า จุดต่อยึดของ

องค์อาคาร หรือโครงสร้าง จะต้องสอดคล้องกับพฤติกรรมที่ได้กำหนด หรือคำนวณออกแบบไว้ โดยที่ขณะเดียวกัน จุดต่อยึดเหล่านั้นจะต้องสามารถต้านทานแรงต่าง ๆ ได้อย่างมั่นคงปลอดภัย รูปที่ 2.25 แสดงตัวอย่างจุดต่อยึด และตัวต่อยึดประเภทต่าง ๆ ในองค์อาคาร หรือโครงสร้างส่วนฐานรองรับ (Support) เป็นขอบเขต (Boundaries) ขององค์อาคาร หรือโครงสร้าง ซึ่งวาง ติดตั้ง หรือปลูกสร้างบนสิ่งยึดเกาะ หรือฐานที่มั่นคง เช่น เสา ผนังรับแรง ชั้นดิน หรือหิน เป็นต้น ดังที่ได้กล่าวแล้วข้องต้นว่า ฐานรองรับขององค์อาคาร หรือโครงสร้างมีหลายประเภท ได้แก่ จุดยึดหมุน (Hinged) จุดยึดหมุนที่ไถล หรือเคลื่อนที่ได้ (Roller) จุดยึดแน่น(Fixed) และฐานรองรับแบบพิเศษอื่น ๆ เช่น ขดสปริง หรือของไหลภายใต้แรงดัน (Dash pot) หลักการกำหนด หรือคำนวณออกแบบที่รองรับเป็นไปในทำนองเดียวกับจุดต่อยึด คือจะต้องคำนึงถึงพฤติกรรมขององค์อาคาร หรือโครงสร้างภายใต้น้ำหนัก หรือแรง และฐานรองรับจะต้องแข็งแรงปลอดภัย

2.4.5 คอนกรีต

การกำหนดชั้นคุณภาพ หรือกำลังของคอนกรีตเป็นปัจจัยสำคัญที่มีนัยสำคัญต่อความมั่นคงแข็งแรงของอาคาร และค่าก่อสร้าง คอนกรีตที่มีคุณภาพดี หรือคอนกรีตกำลังสูง นอกจากราคาจะแพงแล้ว ยังต้องพิถีพิถันในการควบคุมคุณภาพทุกขั้นตอน ทั้งวัตถุดิบ (มวลรวม ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ น้ำ หรือส่วนผสมอื่น ๆ) ปฏิภาคส่วนผสม การผสม การลำเลียง การเท การสั่น และการบ่ม ในทางปฏิบัติ และการผลิตคอนกรีตในเชิงอุตสาหกรรม (เช่น คอนกรีตผสมเสร็จ) มักจะกำหนดหรือระบุชั้นคุณภาพของคอนกรีตด้วยค่ากำลังอัดประลัย หน่วยเป็นเมกะปาสกาล หรือกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จาก ผลทดสอบกำ ลังอัดแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดΦ 0.15 x 0.30 เซนติเมตร หรือรูปทรงกระบอกขนาด 0.15×0.15×0.15 (ว.ส.ท. 3100 ค) ตารางที่ 2.5 แสดงชั้นคุณภาพ และกำลังอัดประลัยของคอนกรีตตาม มอก.213-2520

ตารางที่ 2.4 ชั้นคุณภาพ และกำลังอัดประลัยของคอนกรีตตาม มอก .213-2520

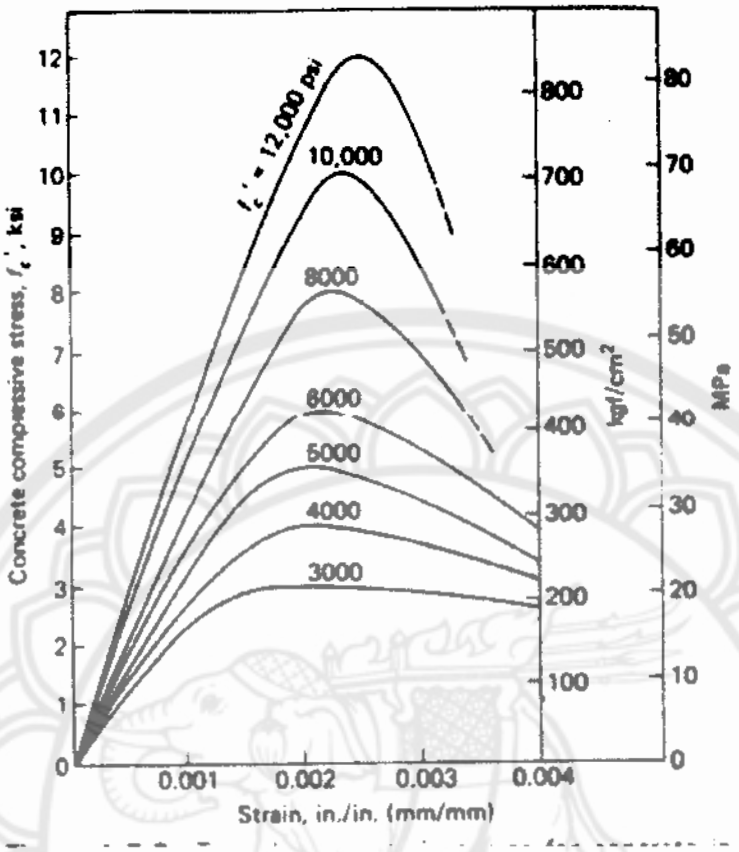
ชั้นคุณภาพ	กำลังต้านทานแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน)	
	แท่งตัวอย่างลูกบาศก์	แท่งตัวอย่างทรงกระบอก
C 10/8	100	80
C 12.5/10	125	100
C 15/12	150	120
C 20/15	200	150
C 25/20	250	200
C 30/25	300	250
C 35/30	350	300
C 40/35	400	350
C 45/40	450	400

คอนกรีตชั้นคุณภาพสูง ๆ จะต้องควบคุมกรรมวิธีการผลิต และการทำงานอย่างเข้มงวด มีต้นทุนผลิตและการทำงานที่สูงขึ้น ตามนัยของ ACI 10.2.7.3 และ R 11.1.2 คอนกรีตธรรมดา (Normal concrete) หมายถึง คอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยไม่เกิน 55 เมกะปาสกาลโดยประมาณ งานวิจัยในปัจจุบันได้กำหนดเกณฑ์จำแนกคอนกรีตปกติและคอนกรีตกำลังสูงไว้แตกต่างกันค่อนข้างมาก การกำหนดชั้นคุณภาพ หรือกำลังคอนกรีตที่เหมาะสมสำหรับอาคาร หรือองค์อาคารอาจกำหนดจากขนาดขององค์อาคารนั่นเอง โดยเฉพาะในกรณีที่รูปแบบทางสถาปัตยกรรมจำเป็นจะต้องคงมิติ หรือขนาดขององค์อาคาร เช่น ความลึกคาน หรือหน้าตัดเสา ผู้คำนวณออกแบบ ควรใช้วิธีประมาณโดยสมมติฐานว่า หากคงมิติ หรือขนาดขององค์อาคารดังกล่าว เพื่อกำหนดกำลังของคอนกรีตที่เหมาะสมจะทำให้องค์อาคารแข็งแรงและประหยัด อาทิเช่น กำลังของคอนกรีตพอดีที่จะทำให้คานส่วนใหญ่เสริมเฉพาะเหล็กต้านทานแรงดึง หรือกำลังของคอนกรีตพอดีที่จะทำให้เสาเสริมเหล็กไม่มากนัก อย่างไรก็ตาม การกำหนดชั้นคุณภาพ หรือกำลังของคอนกรีต เป็นกระบวนที่ต้องทำควบคู่กับการออกแบบ

องค์อาคารเบื้องต้น ดังที่ได้กล่าวข้างต้น เนื่องจากกระบวนตรวจสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีต กระทำโดยการสุ่มเก็บตัวอย่างจากคอนกรีตที่ใช้งานจริง และถือเอากำลังอัดประลัยของ

แท่งคอนกรีตตัวอย่างที่อายุการบ่ม 28 วัน เป็นสำคัญ (ว.ส.ท. 3101 ง กล่าวว่า ถ้าไม่กำหนดเป็นอย่างอื่น ให้ถือผลการทดสอบที่ 28 วันเป็นเกณฑ์ สำหรับคอนกรีตแข็งตัวเร็วให้ใช้เวลาที่กำหนดไว้ในแบบหรือรายการ) ในทางปฏิบัติรายการก่อสร้าง หรือข้อกำหนด (Specification) มักระบุปริมาณหรือน้ำหนักร้อยละต่ำสุดของซีเมนต์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีต (เช่น กิโลกรัมต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตรของคอนกรีต)ควบคู่ไปกับการระบุกำลังอัดประลัยของคอนกรีต การระบุดังกล่าวคล้ายจะซ้ำซ้อน และทำให้ต้นทุนของคอนกรีต และค่าก่อสร้างสูงขึ้น แต่น่าจะเป็นทางเลือกปฏิบัติที่ลดทอนความเสี่ยงหรือความไม่แน่นอน ทำให้ผู้ผลิตคอนกรีต ผู้ก่อสร้าง และผู้เกี่ยวข้องอื่น ๆ มั่นใจในคุณภาพ และกำลังอัดประลัยของคอนกรีตในเบื้องต้น แทนที่จะต้องรอคอยผลทดสอบกำลังอัดของแท่งคอนกรีตตัวอย่างที่อายุการบ่ม 28 วัน แต่เพียงอย่างเดียว

กลสมบัติของคอนกรีตหมายถึง คุณสมบัติที่เกี่ยวแก่การต้านทานแรง รวมถึงพฤติกรรมต่าง ๆ ภายใต้การกระทำกลสมบัติดังกล่าว ได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด-ความเค้น โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, *Ec*) กำลังอัดหรือกำลังอัดประลัย (Ultimate compressive strength, f_c') โมดูลัสแตกร้าว (Modulus of rupture, *fr*) อัตราส่วนปัวซองส์(Poisson's ratio) โมดูลัสยืดหยุ่นแสดงความต้านทานการเปลี่ยนรูปของวัสดุคือความลาดชันของเส้นความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด-ความเค้น เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง ความเครียด-ความเค้น ของคอนกรีตชั้นคุณภาพต่าง ๆ (รูปที่ 31)เห็นได้ว่า รูปความสัมพันธ์เปลี่ยนแปลง หรือแตกต่างกันไปตามชั้นคุณภาพของคอนกรีต (f_c') ทุกเส้นความสัมพันธ์แทบไม่ปรากฏส่วนใดที่เป็นเส้นตรง ณ ตำแหน่งที่มีกำลังอัดสูงสุด (Characteristic strength, *fcu*) ของคอนกรีตทุกชั้นคุณภาพสอดคล้องกับความเครียดประมาณ *0.002* ณ จุดพัง (Rupture strength, *fult*) ค่าความเครียดแปรผันระหว่าง *0.003* ถึง0.004 เว้นแต่ในกรณีคอนกรีตพิเศษค่าความเครียดอาจสูงถึง *0.008* (ACI R10.2.3; 1995) ดังนั้นในการหาความสัมพันธ์ภายใต้การดัดขององค์อาคารต้านทานแรงดัด (Flexural Members) จึงกำหนดค่าความเครียดของหน่วยแรงอัดที่ 0.003 (ว.ส.ท. 2534; ACI 10.2.3; 1995; AASHTO 8.16.2.3; 1994) หรือ 0.0035 (BS5400; BS8110)



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความความเครียด–ความเค้น ของคอนกรีตชั้นคุณภาพต่าง ๆ

เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุเปราะ จึงไม่ปรากฏจุดคราก (Yield Point) ดังนั้นสิ่งที่จะได้จากการทดสอบคือ กำลังอัดประลัย (Ultimate Compressive Strength) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด-ความเค้น ในระหว่างทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด หากกำลังอัดไม่เกินร้อยละ *30* ของกำลังอัดประลัย รอยแตกเล็กๆ (Micro cracks) ที่ปรากฏในคอนกรีตก่อนการทดสอบยังคงสภาพ ไม่ขยายตัว ที่กำลังอัดระหว่างร้อยละ *30* ถึง *50* ของกำลังอัดประลัยจะเกิด Bond cracks เนื่องจาก Stress concentration (หรือ Confinement) ที่บริเวณปลายรอยแตก(Crack tip) รอยแตกจะขยายและมีความยาวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แม้แรง หรือความเค้นจะเพิ่มขึ้น ที่ค่ากำลังอัด ระหว่างร้อยละ *50* ถึง *75* ของกำลังอัดประลัย Bond crack ขยายตัวต่อเนื่องและเกิดรอยแตกในมอร์ต้า แรง หรือความเค้นจะไม่เพิ่มขึ้น รอยแตกจะยังขยายอย่างต่อเนื่องในอัตราที่ช้าลง ที่ค่ากำลังอัดสูงกว่าร้อยละรอยแตกในคอนกรีตขยายตัวจนไม่เสถียร (Unstable) ความเค้นลดลงอย่างรวดเร็วจนวิบัติ หรือถูกอัดจนแตก (Crush failure) ที่ $fc \geq 0.85 f'c$ โดยประมาณในทางปฏิบัติ มาตรฐานออกแบบจึงมักกำหนดให้ประมาณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจากกำลังอัดประลัยดังแสดงในตารางที่ 2.5

สมการ Empirical ที่แสดงในตารางได้จากผลทดสอบคอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนัก หรือความหนาแน่นระหว่าง 90 –155 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต (1.443 - 2.485 ตันต่อลูกบาศก์เมตร) ในช่วงเวลาสั้น ๆ ค่าที่คำนวณได้จะใกล้เคียงกับ Secant Modulus ณ ตำแหน่งที่คอนกรีตมีกำลังอัดประมาณร้อยละ 45 (หรือ ระหว่างร้อยละ 45 - 50) ของกำลังอัดประลัย ($0.45\ fc - 0.50\ f$) และ ณ ค่ากำลังอัดนี้ ค่า Initial Tangent Modulus จะสูงกว่าค่าที่คำนวณตามสมการดังกล่าว หรือค่า Secant Modulus ประมาณร้อยละ *10* (MacGregor, 1997) สำหรับกรณีคอนกรีตกำลังสูงหรือ คอนกรีตคุณภาพสูง (High Strength or High Performance Concrete, HSC or HPC) โมดูลัสยืดหยุ่นมีแนวโน้มสูงขึ้น จึงควรประมาณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นโดยวิธีอื่น เช่น ใช้ความสัมพันธ์ ที่ได้จากผลทดสอบและวิจัย หรือ แม้แต่ตามคำแนะนำของ ACI

ตารางที่ 2.5 โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตประมาณจากกำลังอัดประลัย

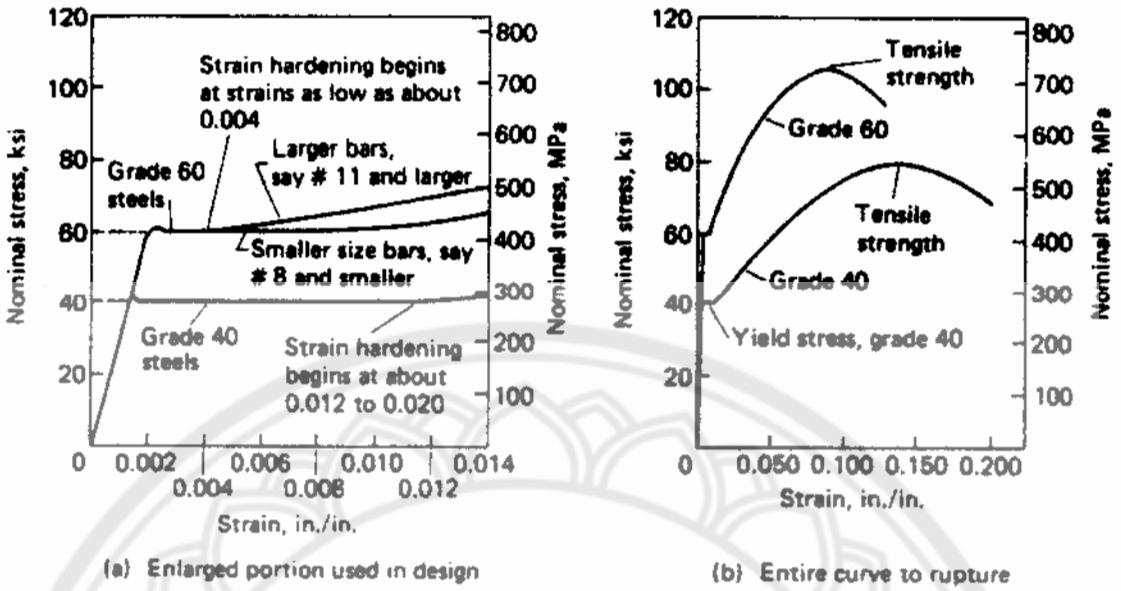
มาตรฐาน	โมดูลัสความยืดหยุ่น	หน่วย		
	Ec	ω ที่ใช้ในสมการ	fc' (*)	*Ec*
ว.ส.ท. 4105(ก)	$4.270*\omega\ 1.5 * fc'$ หรือ $15,210* fc'$	*1.45 – 2.48 ton / m3* *2.33 ton / m3*	*ksc*	*ksc*
ACI 8.5.1 ; 1999	$0.043*\omega\ 1.5* fc'$ หรือ $4,700 * fc'$	*1,500 – 2,500 kg / m3*	*MPa*	*MPa*
AASHTO 8.7.1	$0.0428*\omega\ 1.5 * fc'$ หรือ $4,729.77 * fc'$	*1.45 – 2.48 ton / m3* *2.33 ton / m3*	*MPa*	*MPa*
BS 8110	$9500 \cdot (fcu+8)^{0.33}$	-	*MPa*	*MPa*

2.4.6 เหล็กเสริม

เหล็กเส้นที่ใช้กับองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นเหล็กกล้าละมุน (Mild steel) ซึ่งได้จากกระบวนการผลิตแบบรีดร้อน (Hot-rolled process) คือ ขึ้นรูป หรือรีดเหล็กเป็นเส้นในขณะที่เหล็กยังมีอุณหภูมิสูงมาก โดยวิธีนี้เหล็กจะไม่มีความเค้นคงค้าง (Residual stress) ภายในจึงเหมาะที่ จะเสริมในองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเฉพาะเพื่อต้านทานแรงดึง แรงอัด แรงเฉือน และแรงยึดหน่วง

มาตรฐานทดสอบกลสมบัติ และเกณฑ์กำหนดสำหรับเหล็กเส้น ประกอบด้วยคุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางกล คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ องค์ประกอบและสัดส่วนของธาตุต่าง ๆ ในเนื้อเหล็กโดยเฉพาะคาร์บอน กำมะถัน แมงกานีส และฟอสฟอรัส ซึ่งทำให้เหล็กมีกลสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น เหนียว เปราะ เป็นต้นส่วนคุณสมบัติทางกลได้แก่ โมดูลัสความยืดหยุ่น ความเค้นดึงสูงสุด ความเค้นที่จุดคราก ความยืด การดัดโค้งเย็น และมุมดัดโค้งเย็น มาตรฐานที่ใช้ควบคุมคุณภาพของเหล็กเส้นในประเทศไทย คือ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.)ประกอบด้วย มอก. 20 – 2543 (เหล็กเส้นกลมผิวเรียบ) และ มอก. 24 – 2536 (เหล็กข้ออ้อย) และนอกจากนั้นยังนิยมอ้างอิงมาตรฐาน ASTM เพราะนอกเหนือจากเหล็กเส้นกลมผิวเรียบและเหล็กข้ออ้อยแล้ว ยังกล่าวถึงลวดเหล็ก (Wire) และลวดตะแกรงเหล็ก (Welded Wire Fabric) ซึ่งมีทั้งแบบผิวเรียบ และผิวไม่เรียบ มอก. 20 และ 24 กำหนดปริมาณธาตุเจือปนหลักที่มักพบสมบัติของเหล็กเสริมตาม ม.อ.ก) และ ASTM ปะปนในเหล็กกล้าละมุนอันได้แก่ คาร์บอน แมงกานีส ฟอสฟอรัส และ กำมะถัน รวมทั้งกำหนดคุณสมบัติ และกลสมบัติของเหล็กเสริมตาม ม.อ.ก) และ ASTM

การทดสอบแรงดึงของเหล็กมีวัตถุประสงค์เพื่อหากลสมบัติ ที่จะใช้กำหนดพารามิเตอร์ออกแบบ กลสมบัติดังกล่าวได้แก่ ขีดปฏิภาค (Proportional limit) กำลังคราก (Yield strength) กำลังประลัย (Ultimate strength) ระยะยืด(Elongation) ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและความเครียดของเหล็กกล้าละมุน ปกติจะปรากฏจุดคราก บนและล่าง(Upper and lower yield) ทำให้ประมาณกำลังครากคลาดเคลื่อนได้ มาตรฐานทดสอบส่วนใหญ่ จึงกำหนดให้หากำลังครากโดยใช้ความเครียดที่ร้อยละ *0.2* หรือระยะเยื้อง (Offset =*0.002*เพื่อลากเส้นตรงขนานกับส่วนที่แสดง **คุณสมบัติยืดหยุ่นไปตัดกับรูปความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและความเครียด ความลาดชันของเส้นดังกล่าว ปกติจะหมายถึงโมดูลัสความยืดหยุ่นของเหล็กนั่นเอง (รูปที่ 2.28)**



ก. ส่วนขยายที่ใช้คำนวณออกแบบ ข. ณ ภาวะที่พังภายใต้แรงดึง

รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึง ระยะยืด และกลสมบัติของเหล็กกล้าละมุน (Nawy, 1997)

เนื่องจากเหล็กกล้าละมุนสามารถควบคุมมาตรฐานการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กกล้าละมุน (*Es*) จึงไม่ผันแปรมากนัก มาตรฐานออกแบบจึงมักกำหนดให้ โมดูลัสยืดหยุ่นเป็นค่าคงที่ ว.ส.ท. 4105(ข), ว.ส.ท. 6000 และ ว.ส.ท. 6203 กำหนด *Es = 2,040,000* กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ACI 8.5.2, AASHTO 8.7.2 และ BS 8110 กำหนด *Es = 200,000* เมกะปาสคาล หน่วยแรงที่ยอมให้ หรือกำลังใช้งาน (Allowable or working strength, *fs*)ของเหล็กเสริมขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็ก (ชั้นคุณภาพ) กำลังต้านทานแรง หรือหน่วยแรง (ว.ส.ท. 6103 ก-ค) สำหรับอัตราส่วนโมดูลัส (Modular ratio; *n*) ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนระหว่างโมดูลัสความยืดหยุ่นของเหล็กต่อคอนกรีต($n = Es / Ec$) เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ ว.ส.ท. 6001 กำหนดให้คำนวณอัตราส่วนโมดูลัสจาก

$$n = \frac{2040000}{w^{1.5} \cdot 4270 \cdot \sqrt{f'_c}}$$

สำหรับคอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนัก (w) 2.323 ตันต่อลูกบาศก์เมตร (ดู ว.ส.ท. 6200) จะได้

$$n = \frac{2040000}{15120 \cdot \sqrt{f'_c}}$$

นอกจากนั้นยังกำหนดเพื่อเติมว่า ค่าอัตราส่วนโมดูลัสจะต้องไม่น้อยกว่า 6 และจะต้องเป็นจำนวนเต็ม (กรณีมีเศษให้ปัดเป็นจำนวนเต็มที่ใกล้เคียง)

2.5 การประเมินราคา

2.5.1 องค์ประกอบของราคา

โดยทั่วไปแล้วค่าใช้จ่ายในการทำโครงการก่อสร้างของผู้รับเหมาประกอบไปด้วยค่าใช้จ่ายทางตรง ค่าใช้จ่ายทางอ้อม ค่าเผื่อ และกำไร

ค่าใช้จ่ายทางตรง

เป็นค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวกับการทำงานในโครงการโดยตรง เช่น ราคาวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในโครงการ เช่น คอนกรีตเหล็กเสริมคอนกรีต แบบหล่อคอนกรีต เสาเข็ม เป็นต้น ค่าแรงงานต่างๆ เช่น กรรมกร และช่างฝีมือต่างๆ ที่ใช้ในการก่อสร้างงานนั้นโดยตรง เครื่องจักรที่ใช้ในการทำงานนั้นๆ โดยเฉพาะ เช่น ปั้นจั่นตอกเสาเข็ม รถขุดดิน ปั้นจั่นเจาะเสาเข็ม ผู้รับเหมาช่วงต่างๆ เช่น ผู้รับเหมาค่าแรง ผู้รับเหมางาน ประปา ผู้รับแหมางานไฟฟ้า ผู้รับเหมาปูกระเบื้อง โดยทั่วไปแล้วค่าใช้จ่ายทางตรงมักมีอัตราส่วนสูงสุด

ค่าใช้จ่ายทางอ้อม

ได้แก่ค่าใช้จ่ายที่ไม่สามารถคิดได้โดยตรงงานใดงานหนึ่ง ในโครงการโดยเฉพาะ ค่าใช้จ่ายทางอ้อม สามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท ได้แก่ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของสำนักงานใหญ่ เช่น ค่าน้ำ ค่าไฟฟ้า ค่าโทรศัพท์ โทรสาร ค่าสำเนาเอกสาร ค่าใช้จ่ายในส่วนที่เป็นเงินเดือนของบุคลากรในสำนักงานใหญ่ ภาษี ค่าธรรมเนียมในการประกันต่างๆ ทางอ้อมมักสูงรองจากค่าใช้จ่ายทางตรง

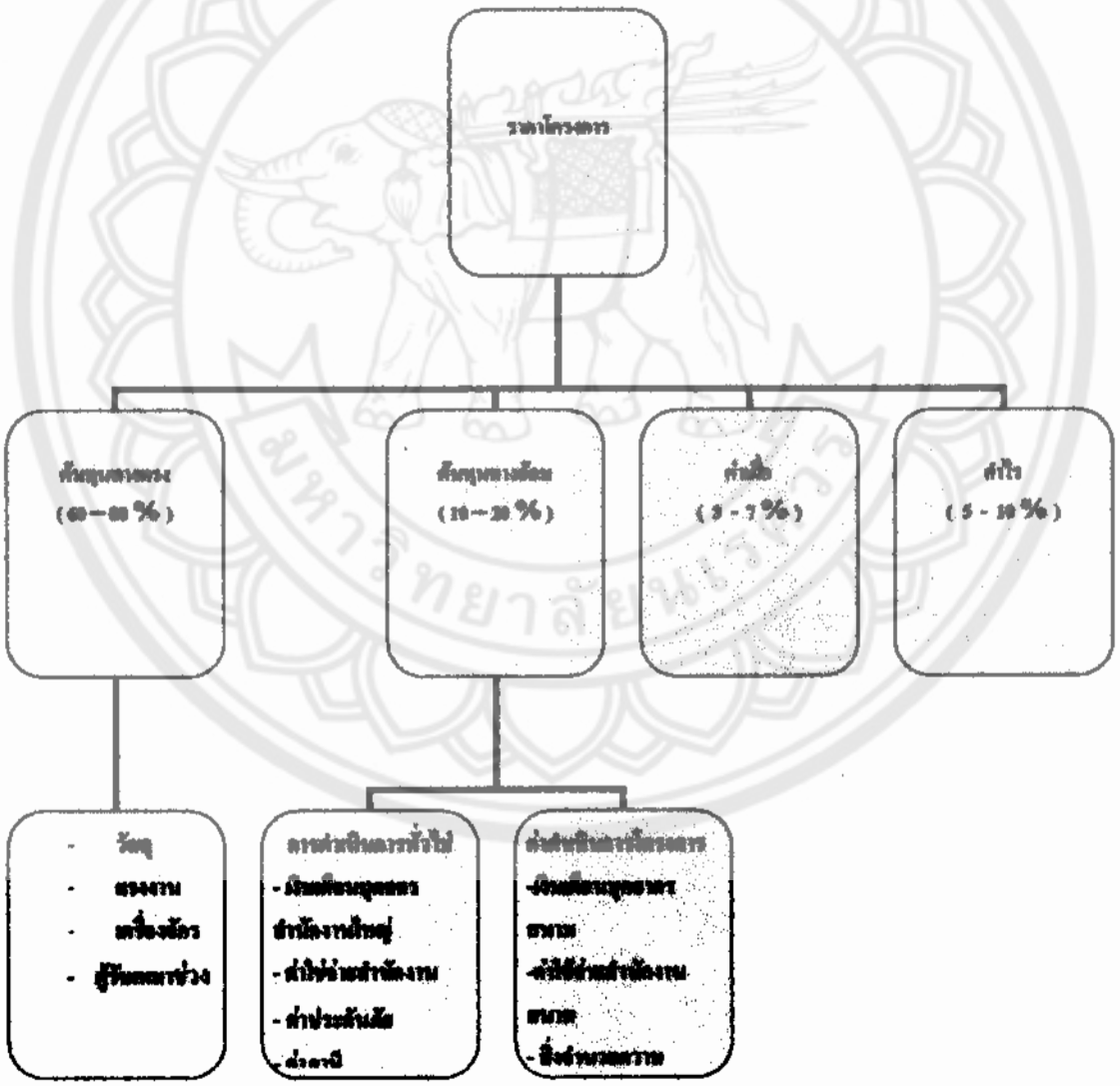
ค่าเผื่อ

มีไว้สำรองเผื่อความไม่แน่นอน เช่น อาจมีสิ่งที่ไม่ได้ประมาณการหรือคาดการณ์ไว้ เช่น การขึ้นราคาของวัสดุ การทำงานโดยวิธีปกติไม่ได้ต้องใช้วิธีพิเศษ ซึ่งมักมีค่าใช่จ่ายที่เพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้วงานที่เผื่อค่าใช้จ่ายงานทางวิศวกรรมโยธา เนื่องจากมักจะเกี่ยวกับงานดิน หรือหิน

ซึ่งทำอยู่ใต้ดินทำให้การประมาณการที่แม่นยำได้ยาก ผิดกับงานก่อสร้างอาคาร ซึ่งมักจะมีค่าเผื่อที่ต่ำกว่าเพราะงานส่วนใหญ่อยู่เหนือพื้นดินและไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากนัก

กำไร

เป็นส่วนที่ผู้รับเหมาบวกเข้ากับค่าใช้จ่ายต่างๆ เปอร์เซ็นต์ กำไรขึ้นอยู่กับความพอใจของผู้รับเหมา อย่างไรก็ตามถ้าตัวเลขสูงเกินไปอาจทำให้ผู้รับเหมาไม่สามารถประมูลงานได้ เนื่องจากว่าต้องแข่งขันกับผู้รับเหมารายอื่นๆ ถ้าตัวเลขต่ำไปก็อาจเสี่ยงที่จะขาดทุนหรือไม่อยากทำงานเพราะไม่คุ้มค่าเหนื่อยโดยทั่วไปแล้วโครงการที่มีราคาสูงมักมีเปอร์เซ็นต์กำไรต่ำ ส่วนโครงการที่มีราคาต่ำมักมีเปอร์เซ็นต์กำไรสูงกว่า



รูปที่ 2.11 องค์ประกอบราคาค่าก่อสร้างโครงการ

2.5.2การประมาณราคาค่าก่อสร้างชนิดต่างๆ

การประมาณราคาค่าก่อสร้างโครงการมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ขึ้นอยู่กับหลายๆ ปัจจัยด้วยกัน เช่น ช่วงที่ทากรประมาณราคามีรายละเอียดของงานมากน้อยเพียงไร ความละเอียดของการประมาณราคาที่ต้องการ เช่น ใช้ตั้งงบประมาณเบื้องต้น ซึ่งมักจะทำโดยฝ่ายเจ้าของงาน หรือใช้ เป็นราคากลางเพื่อควบคุมการประมูลของผู้รับเหมา ซึ่งปกติจะจัดทำจากผู้ออกแบบ หรือเพื่อประมูลผู้รับเหมา หารประมาณราคาไม่ว่าวิธีใดก็ตามไม่สามรถควบคุมให้ได้ความถูกต้อง 100% เพราะเป็นการประมาณตัวเลข ซึ่งบางรายได้มาจากวิจารณญาณและประสบการณ์ของผู้ประมาณราคาเอง และขึ้นอยู่กับว่าราคากับแหล่งข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือมากน้อยเพียงไร

ชนิดของการประมาณราคา เริ่มตั้งแต่การเดาอย่างมีหลักการโดยที่ยังไม่มีแม้กระทั่งแบบร่างไปจนถึงการประมาณราคาอย่างละเอียด ซึ่งต้องใช้แบบรายละเอียด และรายการก่อสร้างที่สมบูรณ์เพื่อคิดปริมาณงาน อีกทั้งต้องใช้ข้อมูลเกี่ยวกับราคาต่อหน่วยของงาน ที่ผ่านมาเพื่อคำนวณราคาของโครงการโดยเฉพาะการประมาณราคาของโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ และโครงการที่เกี่ยวข้องกับหระบวนการผลิตในการประมาณราคานอกเหนือจากงานที่ต้องทำตามแบบรายละเอียดและรายการก่อสร้างแล้วยังต้องทำการประมาณราคาก่อสร้าง เช่น แบบหล่อคอนกรีต สำนักงานสนาม ถนน น้ำ ไฟฟ้าชั่วคราว ผู้ประมาณราคายังต้องคิดทางเลือกของวิธีการก่อสร้างต่างๆ และทรัพยากรที่จำเป็นต้องใช้ในแต่ละวิธีประเมินผลิตภาพ และค่าใช้จ่ายของแต่ละวิธีเพื่อเปรียบเทียบกันแล้วจึงเลือกวิธีการที่ดีที่สุด ซึ่งได้แก่การทำโครงการให้เสร็จภายในระยะเวลาที่กำหนดด้วยค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุด

การประมาณราคาแบ่งออกเป็น 3 ประเภท

1. การประมาณราคาโดยราคาต่อหน่วยพื้นที่

การประมาณราคาค่าก่อสร้างวิธีนี้มีความถูกต้องและใกล้เคียงความจริงมากกว่าวิธีการประมาณราคาต่อหน่วยการใช้ โดยจะมีความคลาดเคลื่อนประมาณ (15 – 20 %) ทั้งนี้งานการ**ออกแบบต้องดำเนินการจนได้รับแบบร่างแล้ว แต่ยังไม่จำเป็นต้องทำรายละเอียด อย่างน้อยควรมีแปลนสถาปัตยกรรม รูปด้าน รูปตัด และข้อกำหนดงานก่อสร้างขั้นต้นแล้ว ซึ่งสามารถนำใช้คำนวณพื้นที่ใช้สอยได้ โดยคำนวณพื้นที่ใช้สอยในแต่ละชั้น โดยใช้ข้อมูลจากแบบร่างในงานก่อสร้างแล้วคูณด้วยราคาต่อตารางเมตร ซึ่งผู้ประมาณราคาจะต้องพิจารณาให้ครอบคลุมในทุกๆ**

ส่วนของการดำเนินโครงการนอกเหนือจากค่าก่อสร้าง เช่น ค่างานตกแต่งภายใน ค่าใช้จ่ายในการบริหารช่วงก่อนเปิดดำเนินงาน

2. การปริมาณราคาโดยราคาประกอบต่อหน่วย

การประมาณราคาวิธีนี้ จะใช้ประมาณวัสดุคูณกับราคาต่อหน่วย และค่าแรงจะใช้แบบปริมาณวัสดุคูณกับค่าแรงต่อหน่วย โดยจะแบ่งออกเป็นหมวดใหญ่แล้วแยกออกเป็นหมวดย่อยๆ เช่น งานฐานราก จะประกอบด้วยงานขุดดิน งานคอนกรีต ไม้แบบ เหล็กเสริม เป็นต้น

3.การประมาณราคาอย่างละเอียด

การประมาณราคาอย่างละเอียด เป็นการคิดราคาจากปริมาณงานที่คำนวณได้จากการแบบรายละเอียดและรายการก่อสร้าง โดยการคูณ ปริมาณงาน แต่ละรายการกับราคาต่อหน่วยของงานนั้นๆ ได้ราคาโดยตรงออกมา เมื่อบวกค่าใช้จ่ายทาอ้อมต่างๆ ค่าเผื่อ จะได้ราคารวมออกมา การประมาณราคาอย่างละเอียด โดยฝ่ายเจ้าของหรือผู้ออกแบบ เป็นการประมาณราคาโดยใช้ชุดเดียวกับทางผู้รับเหมา ใช้ในการประเมินการประมูลของผู้รับเหมา และใช้ในการควบคุมการจ่ายเงินงวดแก่ผู้รับเหมา ผู้ออกแบบบางรายกำหนดให้ผู้รับเหมากรอกรายละเอียดในเอกสารรายละเอียดของงาน เพื่อสะดวกในการตรวจสอบการคิดค่าใช้จ่ายของผู้รับเหมา ถ้าจัดทำลายละเอียดสามารถใช้ควบคุมการจ่ายเงินงวดของผู้รับเหมาได้

การประมาณเพื่อการประมูลของผู้รับเหมา เป็นการประมาณราคาโดยผู้รับเหมาแต่ละรายโดยงานบางส่วนอาจจะใช้ผู้รับเหมาย่อยหลายๆ ราย เสนอราคาพร้อมรายละเอียดมา ทางผู้รับเหมาหลักจะรวมราคาของผู้รับเหมาย่อยแต่ละส่วนกับเข้าที่ทำเอง เป็นราคาต้นทุนทางตรง แล้วจึงบวกค่าดำเนินการต่างๆ ค่าเผื่อ และกำไรที่ต้องการ เพื่อให้ได้ราคารวมของโครงการ