



การออกแบบโครงสร้าง ดอนกรีตเสริมเหล็ก

โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน

**REINFORCED CONCRETE DESIGN
(Working Stress Design : WSD)**

ศาสตราจารย์ ดร. วนิต ช่อวิเชียร

ผู้แต่ง และ จัดทำโดย

ศาสตราจารย์ ดร. วินิต ช่อวีเชียร

การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน **REINFORCED CONCRETE DESIGN**
(Working Stress Design : WSD) 365 หน้า

ISBN (978-616-608-093-3)

ราคา **350** บาท

สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติการพิมพ์

ห้ามผู้ใดคัดลอก ทำซ้ำ ดัดแปลง หรือนำส่วนใดส่วนหนึ่งไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของผลงาน

การออกแบบโครงสร้าง ดวนกริตเสริมเหล็ก

โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน

REINFORCED CONCRETE DESIGN
(Working Stress Design : WSD)

โดย

ศาสตราจารย์ ดร. วนิต ชั่ววีเชียร

วศ.บ. (เกียรตินิยม), M.S.C.E., Ph.D. (Purdue)

คำนำ

การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นวิชาบังคับวิชาหนึ่งในหลักสูตรการศึกษาของสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา โดยมีวัตถุประสงค์ให้ทราบถึงหลักเกณฑ์และวิธีการคำนวณออกแบบส่วนต่างๆของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยคำนึงถึงความมั่นคงแข็งแรง ปลอดภัย และประหยัด

การคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีทั้งการใช้วิธีหน่วยแรงใช้งาน (Working Stress Design : WSD) และวิธีกำลัง (Strength Design : SD) การคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งานเป็นวิธีที่คุ้นเคยกันมานานตั้งแต่ศตวรรษที่ 19 โดยพิจารณาออกแบบให้ส่วนโครงสร้างรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานซึ่งหน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในส่วนของโครงสร้างต้องมีค่าไม่เกินกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ที่ได้จากการทอนหน่วยแรงประลัยสูงสุดด้วยอัตราส่วนความปลอดภัยที่เหมาะสม วิธีนี้ให้ผลเป็นที่น่าพอใจทั้งในด้านกำลัง ความทนทานและในสภาวะการใช้งานแม้ว่าจะไม่ประหยัดไปบ้างเมื่อเทียบกับการคำนวณออกแบบโดยวิธีกำลัง

หนังสือเล่มนี้เรียบเรียงขึ้นโดยอาศัยมาตรฐานการคำนวณออกแบบของ ACI 318-69 และของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) เป็นเกณฑ์ เนื้อหาของแต่ละบทที่เกี่ยวกับการคำนวณออกแบบประกอบด้วย คำอธิบายพฤติกรรมและลักษณะการวิบัติของส่วนโครงสร้าง เกณฑ์กำหนดมาตรฐาน รายละเอียดของการเสริมเหล็ก และตัวอย่างการคำนวณออกแบบเพื่อนำไปใช้ปฏิบัติงาน ส่วนข้อมูลต่างๆสำหรับการคำนวณออกแบบได้จัดไว้ในภาคผนวกท้ายเล่ม

หวังเป็นอย่างยิ่งว่าหนังสือเล่มนี้จะเป็นประโยชน์พอสมควรแก่ นิสิต นักศึกษา วิศวกร และผู้สนใจทั่วไป ตามที่ได้ตั้งใจไว้

วินิต ช่อวีเชียร

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

บทที่ 1 ดวอนกรีต เหล็กเสริม และดวอนกรีตเสริมเหล็ก 1 - 16

- 1.1 บทนำ-1
- 1.2 คอนกรีต-1
- 1.3 วัสดุสำหรับคอนกรีต-1
- 1.4 การเลือกส่วนผสมคอนกรีต-2
- 1.5 การทำคอนกรีต-3
- 1.6 คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว-4
- 1.7 คอนกรีตผสมเสร็จ-10
- 1.8 เหล็กเสริม-11
- 1.9 คุณสมบัติของเหล็กเสริม-12
- 1.10 คอนกรีตเสริมเหล็ก-15

บทที่ 2 การวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง 17 - 46

- 2.1 บทนำ-17
- 2.2 น้ำหนักบรรทุก-17
- 2.3 วิธีการวิเคราะห์โครงสร้าง-21
- 2.4 การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก-32
- 2.5 รายละเอียดเกี่ยวกับการเสริมเหล็ก-37

บทที่ 3 ดานดวอนกรีตเสริมเหล็ก - ความต้านทานโมเมนต์ดัด 47 - 90

- 3.1 บทนำ-47
- 3.2 พฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัด-49
- 3.3 ข้อกำหนดเกี่ยวกับคาน คสล.-51
- 3.4 คานรูปดัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าเสริมเหล็กรับแรงดัดอย่างเดียว-52
- 3.5 คานรูปดัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าเสริมเหล็กรับแรงอัด-65
- 3.6 คานรูปดัดตัวที-76
- 3.7 คานต่อเนื่อง-85
- 3.8 การเสริมเหล็กกับโมเมนต์ดัดในคาน คสล.-88
- แบบฝึกหัด-89

บทที่ 4 แรงเฉือน แรงยึดเหนี่ยว และแรงบิด 91 - 138

- 4.1 บทนำ-91
- 4.2 แรงเฉือนและแรงดัดทแยงในคาน-9
- 4.3 แรงเฉือนและแรงดัดทแยงในแผ่นพื้นและฐานราก-103
- 4.4 แรงยึดเหนี่ยวและระยะฝังยึดเหล็กเสริม-104
- 4.5 ตำแหน่งของการหยุด ตัด หรือตัดเหล็กเสริมในคาน-112
- 4.6 การออกแบบคานรับโมเมนต์ดัด แรงเฉือน และแรงยึดเหนี่ยว-116
- 4.7 แรงบิด-128
- แบบฝึกหัด-137

บทที่ 5 การโก่งตัวของส่วนโครงสร้างที่เสริมเหล็กทางเดียว 139 - 146

- 5.1 บทนำ-139
- 5.2 หลักการคำนวณหาการโก่งตัว-139
- 5.3 การคำนวณหาการโก่งตัวตามมาตรฐานกำหนด-141
- แบบฝึกหัด-146

บทที่ 6 พื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก 147 - 202

- 6.1 บทนำ-147
- 6.2 พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทางเดียว-149
- 6.3 พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสองทางแบบมีคานรองรับทั้งสองด้าน-155
- 6.4 แผ่นพื้นระบอบตง-167
- 6.5 แผ่นพื้นไร้คาน-173
- 6.6 ช่องเปิดในแผ่นพื้น-187
- แบบฝึกหัด-201

บทที่ 7 บันไดคอนกรีตเสริมเหล็ก 203 - 217

- 7.1 บทนำ-203
- 7.2 บันไดแบบพาดทางช่วงกว้าง-204
- 7.3 บันไดแบบพาดทางช่วงยาว-205
- 7.4 บันไดแบบยื่นจากคานชิดกำแพง-209
- 7.5 บันไดเวียน-213

บทที่ 8 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก 218 - 260

- 8.1 บทนำ-218
- 8.2 แรงอัดและโมเมนต์ดัดในเสา-219
- 8.3 พฤติกรรมการรับแรงอัดของเสาสั้น-220

(จ)

- 8.4 ข้อกำหนดเกี่ยวกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก-227
- 8.5 การออกแบบเสารับแรงอัดตามแนวแกน-229
- 8.6 การออกแบบเสารับแรงอัดและโมเมนต์ดัดร่วมกัน-235
- 8.7 เสายาว-251
- 8.8 การออกแบบเสายาว-254
- แบบฝึกหัด-260

บทที่ 9 ฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก 261 – 298

- 9.1 บทนำ-261
- 9.2 แบบของฐานราก-261
- 9.3 หน่วยแรงใต้ฐานราก-263
- 9.4 พฤติกรรมและการวิบัติของฐานราก-267
- 9.5 หน้าที่ตักวัดสำหรับโมเมนต์ดัด แรงเฉือนและแรงยึดเหนี่ยว-269
- 9.6 ความต้านทานโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนของคอนกรีตในฐานราก-272
- 9.7 การเสริมเหล็กกับโมเมนต์ดัดในฐานราก-273
- 9.8 การถ่ายแรงจากเสาต่อม่อ หรือผนังกำแพงสู่ฐานราก-274
- 9.9 ฐานรากคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก-275
- 9.10 คอนกรีตหยาบกันหลุมฐานราก-275
- 9.11 ขั้นตอนการคำนวณออกแบบฐานราก-275
- 9.12 การออกแบบฐานรากได้กำแพง-276
- 9.13 การออกแบบฐานรากเดี่ยวรับแรงร่วมศูนย์-278
- 9.14 การออกแบบฐานรากเดี่ยวรับแรงเยื้องศูนย์-283
- 9.15 การออกแบบฐานรากร่วม-287

บทที่ 10 กำแพงคอนกรีตเสริมเหล็ก 299 – 320

- 10.1 บทนำ-299
- 10.2 ข้อกำหนดเกี่ยวกับกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็ก-300
- 10.3 เชื้อนก้นดิน-301
- 10.4 การออกแบบเชื้อนก้นดินแบบยื่นรูปตัวที-305
- 10.5 การออกแบบกำแพง คสล. รับน้ำหนักในแนวตั้งหรือแรงเฉือน-314
- 10.6 การพิจารณาออกแบบกำแพงห้องใต้ดิน-319

บทที่ 11 ส่วนโครงสร้างเชิงประกอบ 321 – 330

- 11.1 บทนำ-321
- 11.2 คานคอนกรีตเชิงประกอบ-322

11.3 การออกแบบคานคอนกรีตเชิงประกอบ-323

ภาคผนวก ก สัญลักษณ์ 331-334**ภาคผนวก ข ตารางข้อมูลแบบ 335 - 360**

- ตารางที่ ผ1 หน่วยแรงใช้งานที่ยอมให้ของคอนกรีต-335
- ตารางที่ ผ2 ขนาดและเนื้อที่หน้าตัดของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต-336
- ตารางที่ ผ3 เนื้อที่หน้าตัดของเหล็กเสริมตามจำนวนเส้น-337
- ตารางที่ ผ4 เนื้อที่หน้าตัดของเหล็กเสริมในแผ่นพื้นกว้างหนึ่งเมตร-337
- ตารางที่ ผ5 ค่า k_j สำหรับการวิเคราะห์พื้นและคานรูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า-338
- ตารางที่ ผ6 ค่า $k_j R$ และ p_b สำหรับการออกแบบพื้นและคานรูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า-339
- ตารางที่ ผ7 โมเมนต์ต้านทานโดยคอนกรีตของพื้นรูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า-340
- ตารางที่ ผ8 ความต้านทานโมเมนต์และแรงเฉือนของคานรูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า-341
- ตารางที่ ผ9 ค่าสัมประสิทธิ์ R' ของคานที่มีเหล็กรับแรงอัด-345
- ตารางที่ ผ10 ค่า K สำหรับการคำนวณเหล็กเสริมรับแรงอัด-347
- ตารางที่ ผ11 ค่า k_j และ R/f_c ของคานรูปตัดตัวที่จริง-348
- ตารางที่ ผ12 ความต้านทานแรงเฉือนของเหล็กลูกตั้ง (2 ขา) ในคาน-349
- ตารางที่ ผ13 หน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่ยอมให้-350
- ตารางที่ ผ14 ระยะฝังยึดของเหล็กเสริมรับแรงดึง-351
- ตารางที่ ผ15 จำนวนมากที่สุดของเหล็กเสริมในหนึ่งแถวตามความกว้างของคาน-352
- ตารางที่ ผ16 กำลังรับแรงอัดตามแกนของเสา คสล. ปลอกเดี่ยว-353
- ตารางที่ ผ17 กำลังรับแรงอัดตามแกนของเหล็กยื่นในเสา คสล. ปลอกเดี่ยว-354
- ตารางที่ ผ18 กำลังรับแรงอัดตามแกนของเสา คสล. ปลอกเกลียว-355
- ตารางที่ ผ19 กำลังรับแรงอัดตามแกนของเหล็กยื่นในเสา คสล. ปลอกเกลียว-356
- รูปที่ ผ.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนของคานต่อเนื่อง (BS Codes)-357
- รูปที่ ผ.2 ไดอะแกรมของแรงเฉือน โมเมนต์ดัด โมเมนต์บิด-358
- รูปที่ ผ.3 ตำแหน่งของจุดที่จะดัดหรือตัดเหล็กเสริมในคานช่วงเดียวที่รับน้ำหนักแผ่-359
- รูปที่ ผ.4 ตำแหน่งของจุดที่จะดัดหรือตัดเหล็กเสริมในคานต่อเนื่องที่รับน้ำหนักแผ่-360

ภาคผนวก ค แบบรายการคำนวณ 361 - 364**บรรณานุกรม 365**

บทที่ 1

คอนกรีต เหล็กเสริม และคอนกรีตเสริมเหล็ก

1.1 บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่พบเห็นทั่วไป ได้แก่ พื้น คาน และ เสาของอาคาร พื้นถนน สะพาน ท่อระบายน้ำ อัจฉริยะดื่อกีฬา หลังคาที่คลุมพื้นที่กว้างๆ ไม่มีเสาเกาะเกาะในลักษณะคอนกรีตเปลือกบาง และ เชื้อนก้นน้ำหรือดิน เป็นต้น โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กต่างๆข้างต้นได้จากการนำเหล็กเส้นมาหล่อรวมกับคอนกรีตในแบบหล่อคอนกรีตในลักษณะที่ทำให้ได้ส่วนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีพฤติกรรมร่วมกันรับน้ำหนักบรรทุก โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความแข็งแรง ทนทาน ต่อสภาวะดินฟ้าอากาศได้ดีกว่าโครงสร้างประเภทอื่น สามารถต้านทานเพลิงไหม้ได้ดีเมื่อมีคอนกรีตหุ้มหนา และเสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาน้อยกว่า อย่างไรก็ตาม โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีน้ำหนักของตัวโครงสร้างเองมากกว่าโครงสร้างประเภทอื่น

ในบทนี้ จะกล่าวเกี่ยวกับคุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีต และเหล็กเสริม เพื่อนำไปใช้ในการพิจารณาคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กต่อไป

1.2 คอนกรีต

คอนกรีต เป็นวัสดุเปรียบเสมือนหินที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้าง มีขนาดและรูปร่างต่างๆตามที่ต้องการโดยไม่ถูกจำกัดเหมือนวัสดุอื่น (เช่น ไม้ หรือเหล็ก) คอนกรีตได้จากการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทราย หินหรือกรวดซึ่งเรียกว่าวัสดุผสม (aggregates) และน้ำ แต่ในบางครั้งอาจมีสารผสมเพิ่ม (admixture) เพื่อปรับปรุงให้คอนกรีตมีคุณสมบัติอื่นที่ต้องการ ซีเมนต์เพสต์ที่ได้จากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจะเป็นตัวประสาน แทรกและเคลือบหรือหุ้มเม็ดทราย และหินทั้งหมดให้เกาะรวมตัวจับกันเป็นก้อน คอนกรีตจะแข็งตัวเมื่ออายุประมาณ 24 ชั่วโมง และเมื่อได้รับการบ่มชื้นอย่างต่อเนื่องจะมีกำลังรับแรงอัดได้ดีขึ้นเรื่อยๆ ตามอายุ ทั้งนี้ความแข็งแรงและความทนทานของคอนกรีตขึ้นกับสัดส่วนผสมที่ใช้และวิธีการทำคอนกรีต

1.3 วัสดุสำหรับคอนกรีต

1.3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญที่สุดในการก่อสร้างทางวิศวกรรมปัจจุบัน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่จะนำมาใช้งานต้องมีคุณภาพตามเกณฑ์ของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 15) คือเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) ที่เมื่อผสมกับน้ำตามส่วนแล้วสามารถก่อตัวและแข็งตัวในน้ำได้ อัตราการก่อตัวและแข็งตัวตลอดจนปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นกับความละเอียดและส่วนประกอบของผงปูน

ในงานก่อสร้างทั่วไปที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษเหนือกว่าธรรมดา จะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง (Ordinary Portland Cement) ซึ่งได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้าง ตราพญานาคส์

2 การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

เขียวและตราเพชรเม็ดเดียว โดยใช้ปริมาณปูนซีเมนต์อย่างน้อย 300 กก. ต่อคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตร แต่ในงานก่อสร้างที่ต้องการใช้งานเร็ว หรือรีบแบบเร็ว จะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสาม (High-early Strength Portland Cement) หรือที่เรียกว่าซูเปอร์ซีเมนต์ ซึ่งได้แก่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราเอราวัณ ตราพญานาคสีแดง และตราสามเพชร ส่วนในงานก่อสร้างที่อยู่ในที่ที่มีการกระทำของซัลเฟตรุนแรง เช่น โครงสร้างในทะเล จะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทห้า (Sulfate-Resistant Portland Cement) ซึ่งความต้านทานซัลเฟตสูงกว่าปูนซีเมนต์ประเภทอื่นๆ ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราช้างฟ้า ตราปลาฉลาม

1.3.2 วัสดุผสม (Aggregates) ที่ใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีต ได้แก่ หินย่อย กรวด และทราย ต้องมีความแข็งแรง ทนทาน สามารถรับแรงอัดได้ดี ไม่ขยายตัวมาก และสะอาดไม่มีสารเคมีเจือปน คราบดินหรือฝุ่นผงที่เกาะอยู่จะเป็นเหตุให้คอนกรีตเสื่อมคุณภาพ นอกจากนี้วัสดุผสมต้องมีขนาดใหญ่-เล็กคละกัันดี (well graded) เพื่อช่วยให้ได้คอนกรีตที่มีเนื้อแน่นสม่ำเสมอ มีช่องว่างระหว่างก้อนน้อย ทำให้เปลืองซีเมนต์เฟสที่น้อยลงและราคาของคอนกรีตก็ถูกลง

ขนาดโตสุดของหินที่จะนำมาใช้งานต้องไม่โตกว่าเศษหนึ่งส่วนห้าของด้านในที่แคบที่สุดของแบบหล่อ หรือเศษหนึ่งส่วนสามของความหนาของแผ่นพื้น หรือเศษสามส่วนสี่ของระยะช่องว่างที่น้อยที่สุดระหว่างเหล็กเสริมแต่ละเส้นหรือแต่ละมัด

1.3.3 น้ำ น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต ต้องสะอาด มีความขุ่นไม่เกิน 2,000 ppm. (ส่วนในล้าน) ปราศจากกรด ด่าง น้ำมันและสารอินทรีย์อื่น ๆ ในปริมาณที่จะเป็นอันตรายต่อคอนกรีตหรือเหล็กเสริม ปกติน้ำประปาและน้ำจืดตามธรรมชาติส่วนใหญ่ที่สามารถบริโภคได้ ถือว่ามีคุณภาพดีพอสำหรับงานคอนกรีต

ในการผสมทำคอนกรีตต้องใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ (water/cement ratio) ให้พอเหมาะพอดีกับงานที่ต้องการ เนื่องจากมีผลกระทบต่อความสามารถเทได้ของคอนกรีตสด และกำลังความแข็งแรงตลอดจนความทนทานเมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้ว

1.3.4 สารผสมเพิ่ม (admixture) บางครั้งอาจต้องใช้สารผสมเพิ่มในส่วนผสมของคอนกรีต เพื่อปรับปรุงให้คอนกรีตสดหรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วมีคุณสมบัติอื่นที่ต้องการ เช่น ให้คอนกรีตสดมีความสามารถเทได้ดีขึ้นหรือก่อตัวช้าลง เป็นต้น ประเภทของสารผสมเพิ่มได้แก่ ก) สารเพิ่มฟองอากาศ (air-entraining admixture) ข) สารเคมีผสมเพิ่ม (chemical admixture) เช่น สารลดปริมาณน้ำ สารหน่วงหรือเร่งการก่อตัว ค) สารผสมเพิ่มแบบแร่ธาตุ (mineral admixture) เช่น เถ้าลอย วัสดุปอซโซลาน และซิลิกาฟูม

ในการใช้สารผสมเพิ่ม ควรศึกษาถึงอัตราส่วนที่ต้องใช้โดยละเอียดตามคำแนะนำของผู้ผลิต เพราะสารเหล่านี้จะให้ผลดีเมื่อใช้ในอัตราส่วนที่เหมาะสมเท่านั้น

1.4 การเลือกส่วนผสมของคอนกรีต

วัตถุประสงค์หลักในการเลือกส่วนผสมของคอนกรีต คือ

ก) เพื่อให้ได้คอนกรีตมีความชื้นเหลว (consistency) และสะดวกต่อการทำงาน (workability) สามารถไหลลงแบบหล่อและหุ้มห่อเหล็กเสริมได้ดีโดยไม่เกิดการแยกตัวหรือคายน้ำมากเกินไป

ข) เพื่อให้ได้คอนกรีตมีความทนทาน (durability) ต่อการใช้งานในสภาวะพิเศษอื่น (special exposure) เช่น คอนกรีตต้องสัมผัสกับสารละลายหรือดินที่มีซัลเฟต หรือที่ต้องสัมผัสกับน้ำกร่อยหรือน้ำทะเล เป็นต้น

ค) เพื่อให้ได้คอนกรีตมีกำลัง (strength) รับแรงได้ตามต้องการ ในราคาประหยัด

สำหรับงานก่อสร้างขนาดเล็กที่ไม่ต้องการความทนทานของคอนกรีตเป็นพิเศษ อาจเลือกใช้ส่วนผสมของคอนกรีตโดยอาศัยข้อมูลหรือสถิติต่างๆในอดีตที่ได้เคยปฏิบัติมาแล้วซึ่งให้ผลดีเป็นเกณฑ์ ดังตารางที่ 1.1 เช่น ใช้คอนกรีต 1: 2 : 4 โดยปริมาตร สำหรับงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ซึ่งหมายถึงใช้ปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ทราย 2 ส่วน และ หิน 4 ส่วน เป็นต้น และใช้น้ำประมาณ 25-30 ลิตร ต่อปูนซีเมนต์หนึ่งถุง

ตารางที่ 1.1 ส่วนผสมของคอนกรีตสำหรับงานก่อสร้างขนาดเล็ก

สัดส่วนการผสมโดยปริมาตร	ประเภท
1 : 1½ : 3	สำหรับเสาและโครงสร้างที่ต้องการความทึบน้ำหรือที่อยู่ในภาวะอากาศรุนแรง
1 : 2 : 4	สำหรับงานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ได้แก่ พื้น คาน เสา
1 : 2½ : 4	สำหรับงานพื้น ถนน เชือกั้นดิน ตอม่อ ผนังตึก ฐานราก ทางเท้า
1 : 3 : 5	สำหรับงานคอนกรีตขนาดใหญ่ ผนังหนั ฐานรากใหญ่

สำหรับงานก่อสร้างขนาดใหญ่ที่สำคัญ ควรพิจารณาออกแบบหาปริมาณส่วนผสมของคอนกรีตที่จะต้องใช้ตามสภาพของงานนั้น โดยอาจคำนวณตามวิธีการที่สถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกาได้เสนอแนะไว้ใน "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete" (ACI 211.1) และใน "Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete" (ACI 211.2) ซึ่งให้ข้อพิจารณาทั้งในด้านความทนทานและกำลังของคอนกรีตที่ต้องการ ตามที่ได้กล่าวไว้ในหนังสือคอนกรีตเทคโนโลยีโดยผู้เขียน ในการเลือกส่วนผสมของคอนกรีตต้องพิจารณาเพื่อกำลังอัดไว้ด้วยโดยที่กำลังอัดเฉลี่ย (average strength) ที่ต้องการผลิตต้องมีค่าสูงกว่ากำลังอัดสูงสุด (f'_c) ที่กำหนดโดยวิศวกรผู้ออกแบบ แล้วทำการตรวจสอบส่วนผสมที่คำนวณได้โดยวิธีทดลองผสม (trial mixes) เพื่อให้ได้ส่วนผสมที่ประหยัด มีความชื้นเหลว และมีกำลังอัดของแท่งคอนกรีตมาตรฐาน (ขนาด ϕ 15x30 ซม.) ที่อายุ 28 วันหรือตามอายุที่กำหนด ได้ตามต้องการ

1.5 การทำคอนกรีต

แม้ว่าจะใช้สัดส่วนการผสมของคอนกรีตให้ดีเพียงใด หากวิธีการทำคอนกรีต เช่น การผสม (mixing) การลำเลียง (conveying) การเท (placing) การทำให้คอนกรีตแน่นตัว (compacting) ตลอดจนการบ่มคอนกรีต (curing) ทำได้ไม่ดีพอแล้ว ก็จะได้คอนกรีตที่มีคุณภาพตามที่ต้องการ

4 การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

การผสมคอนกรีต ต้องผสมให้ทั่วพอที่จะกระจายวัสดุต่างๆอย่างสม่ำเสมอ และกระจายซีเมนต์เพสต์ไปบนผิวของวัสดุผสมโดยทั่วถึง การผสมด้วยเครื่องผสมควรใช้เวลาอย่างน้อย $1-1\frac{1}{2}$ นาทีต่อคอนกรีตไม่เกิน 1 ลูกบาศก์หลาหรือ 0.76 ลูกบาศก์เมตร และเพิ่มเวลาผสมขึ้นอีก 15 วินาทีต่อคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น $1/2$ ลูกบาศก์หลาหรือ 0.38 ลูกบาศก์เมตร สำหรับบริเวณงานก่อสร้างที่คับแคบก็ควรพิจารณาใช้คอนกรีตผสมเสร็จ คอนกรีตสดที่ผสมได้ต้องมีความชื้นเหลวสม่ำเสมอ มีความสามารถเทได้ดี ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยการวัดหาค่าความยุบตัว (slump test)

การลำเลียง การเท และการสั่นหรือเขย่าคอนกรีต ต้องพยายามป้องกันไม่ให้คอนกรีตสดเกิดการแยกตัวเพราะจะมีผลกระทบต่อกำลังและความทนทานของคอนกรีต ในการสั่นหรือเขย่าคอนกรีตควรทำให้ทั่วถึงเพื่อทำให้คอนกรีตไหลลงไปเต็มทุกส่วนของแบบหล่อ เพื่อขับไล่ฟองอากาศ และเพื่อไม่ให้หินรวมกันเป็นกระจุกซึ่งจะมีผลให้การยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมหรือคอนกรีตใกล้เคียงดีขึ้น

การบ่มหรือบำรุงคอนกรีต ต้องกระทำอย่างต่อเนื่องให้นานที่สุดเท่าที่จะนานได้ (อย่างน้อย 7 วันนับจากวันที่เทคอนกรีต แต่คอนกรีตที่ให้กำลังสูงเร็วให้ใช้เวลาอย่างน้อย 3 วัน เว้นแต่จะบ่มด้วยไอน้ำ) ซึ่งจะทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงมากขึ้นเรื่อยๆตามอายุ

ในวันที่มีอากาศร้อนจัด ต้องระมัดระวังเรื่องส่วนผสม การผลิต การลำเลียง การเท ตลอดจนการบ่ม เพื่อป้องกันมิให้คอนกรีตร้อนจัด หรือน้ำระเหยออกมากเกินไปซึ่งจะทำให้ส่วนโครงสร้างเกิดการสูญเสียกำลังที่ต้องการได้

1.6 คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

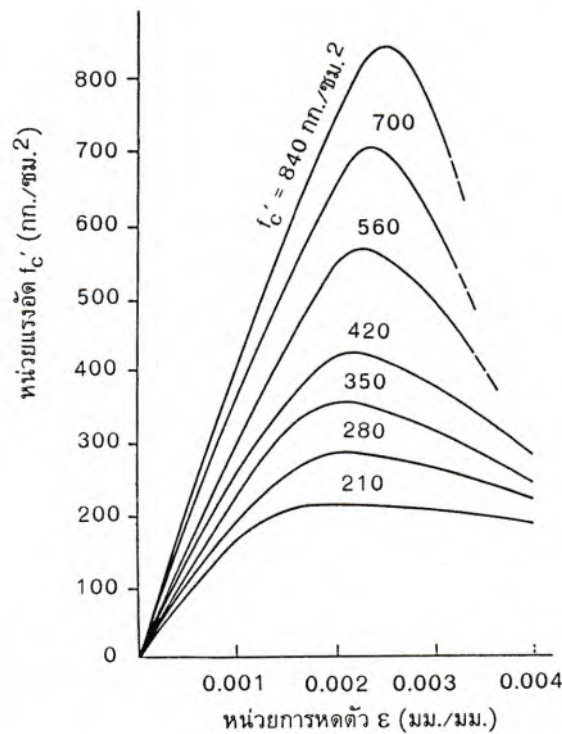
1.6.1 กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต

กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต (Compressive Strength) เป็นคุณสมบัติของคอนกรีตเมื่อแข็งตัวแล้วที่ต้องการมากที่สุดในงานคอนกรีตล้วนหรือคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากพบว่ากำลังต้านทานของคอนกรีตต่อแรงกระทำแบบอื่น เช่น กำลังต้านทานแรงดึง กำลังต้านทานแรงดัด กำลังต้านทานแรงเฉือนและกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม หรือแม้แต่ความทนทานและการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ล้วนเป็นสัดส่วนเทียบได้กับกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตทั้งสิ้น นั่นหมายความว่า เมื่อคอนกรีตมีกำลังต้านทานแรงอัดสูง กำลังต้านทานแรงอย่างอื่นหรือความทนทานจะสูงตามไปด้วย

การทดสอบหาลำกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตให้ปฏิบัติตามวิธีของ ASTM C39 โดยการกดหรืออัดแรงตามแนวแกนของแท่งทดสอบมาตรฐานอย่างช้าๆด้วยเครื่องทดสอบ จนกระทั่งคอนกรีตถูกอัดแตก เมื่อหารน้ำหนักกดหรืออัดสูงสุดที่ได้ด้วยเนื้อที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่างที่รับแรงกระทำ จะเป็นค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดของแท่งคอนกรีตนั้น

กำลังอัดของคอนกรีตจะถือเป็นที่ยอมรับได้เมื่อผลเฉลี่ยกำลังอัดของการทดสอบ 3 ครั้ง ต่อเนื่องกันให้ค่าเท่ากับหรือมากกว่าค่า f_c' ที่กำหนด โดยที่กำลังอัดของการทดสอบแต่ละครั้ง (แท่งทดสอบ 2 แท่ง) อาจให้ค่าต่ำกว่าค่า f_c' ได้ไม่เกิน 35 กก./ซม.²

รูปที่ 1.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัวของแท่งคอนกรีตมาตรฐานที่มีกำลังต้านทานแรงอัดต่างกันเมื่อรับแรงกดอัดตามแนวแกนอย่างเดียว (uniaxial stress) จนกระทั่งแท่งคอนกรีตตัวอย่างถูกอัดแตก จะเห็นว่าจากจุดเริ่มต้นที่รับน้ำหนักจนถึงระดับของหน่วยแรงอัดประมาณ 40 ถึง 50% ของกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุด f_c' ซึ่งเป็นช่วงที่ส่วนโครงสร้าง คสล. รับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน (working range) ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเป็นเส้นโค้งเล็กน้อยซึ่งดูเหมือนเป็นเส้นตรง ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่ไม่ยืดหยุ่น (non-elastic material) นั่นเอง อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ เมื่อคอนกรีตรับน้ำหนักในช่วงใช้งานและกระทำในช่วงระยะเวลาสั้น (short-time loading) จะสมมุติว่าคอนกรีตมีหน่วยการหดตัวเป็นสัดส่วนโดยตรงกับหน่วยแรงอัดที่กระทำ

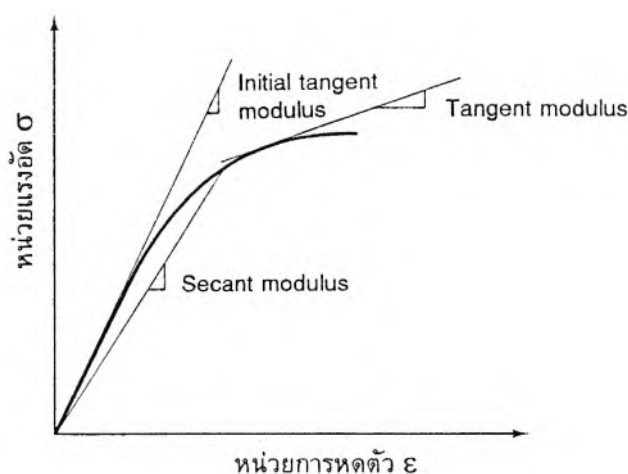


รูปที่ 1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัวของคอนกรีต

เมื่อหน่วยแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเป็นเส้นโค้งคล้ายโค้งพาราโบลา ซึ่งพบว่าที่หน่วยแรงอัดสูงสุดคอนกรีตจะมีหน่วยการหดตัวประมาณ 0.002 มม./มม. และแท่งคอนกรีตยังสามารถต้านแรงอัดต่อไปได้ในขณะที่หน่วยการหดตัวมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่หน่วยแรงอัดจะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งวิบัติที่หน่วยการหดตัวสูงสุดประมาณ 0.003-0.004 มม./มม. ทั้งนี้ขึ้นกับกำลังต้านทานของคอนกรีตสังเกตจากรูปที่ 1.1 จะเห็นว่า คอนกรีตที่มีกำลังต้านทานแรงอัดสูง หน่วยแรงอัดจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเลยจากหน่วยแรงอัดสูงสุดแล้ว แต่คอนกรีตที่มีกำลังต้านทานแรงอัดต่ำกว่าหน่วยแรงอัดจะลดลงอย่างช้าๆ และมีค่าหน่วยการหดตัวสูงสุดมากกว่า นั่นแสดงว่าคอนกรีตที่มีกำลังต่ำกว่าจะมีความเหนียว (ductility) มากกว่าคอนกรีตที่มีกำลังสูงกว่า

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (E_c) :

โมดูลัสยืดหยุ่นเป็นตัวบ่งชี้หรือแสดงถึงความต้านทานต่อการเสียรูป (deformation) ของวัสดุเมื่อรับน้ำหนักบรรทุก ผลจากการทดลองพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตขึ้นกับกำลังของคอนกรีต หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ตลอดจนขนาดและระยะเวลาที่รับน้ำหนักบรรทุก เมื่อคอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุกในช่วงใช้งานและกระทำในช่วงระยะเวลาสั้นๆ อาจสมมุติว่าคอนกรีตเป็นวัสดุยืดหยุ่น (elastic material) โดยมีหน่วยการหดตัว (elastic strain) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับหน่วยแรงอัด ที่กระทำ แต่เมื่อคอนกรีตรับน้ำหนักบรรทุกค้างเป็นเวลานาน (long-term loading) หรือเมื่อต้องรับน้ำหนักหรือแรงกระทำซ้ำๆ (repeated loading) เป็นวัฏจักร ต้องพิจารณารวมหน่วยการหดตัวแบบพลาสติก (plastic strain) หรือที่เรียกกันว่าหน่วยการล้าของคอนกรีต (creep strain) ด้วย เพราะโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจะลดน้อยลงตามลำดับ ทำให้คอนกรีตเกิดการเสียรูปมากขึ้น และจะมีการเสียรูปอย่างถาวรเมื่อลดน้ำหนักหรือแรงกระทำ



รูปที่ 1.2 การหาโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตหาได้จากอัตราส่วนของหน่วยแรงอัดต่อหน่วยการหดตัวของเส้นสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบหาลำดับต้านทานแรงอัดของคอนกรีต ซึ่งโดยทั่วไปเส้นสัมพันธ์นี้มีลักษณะเป็นรูปโค้งพาราโบลา แต่สามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตได้ตามวิธีการต่าง ๆ ดังนี้

ก. Initial Tangent Modulus คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นสัมผัสซึ่งได้จากการลากเส้นจากจุดเริ่มต้นให้สัมผัสกับเส้นสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัวที่จุดเริ่มต้นนั้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่หาโดยวิธีการนี้เป็นค่าที่สมมุติว่าคอนกรีตเสมือนหนึ่งเป็นวัสดุยืดหยุ่น (elastic) เช่นเดียวกับเหล็ก โดยคิดว่าไม่มีการเสียรูปอย่างถาวรเมื่อลดน้ำหนักหรือแรงกระทำ นั่นคือไม่คิดการหดตัวแบบพลาสติกหรือการล้าของคอนกรีต

ข. Secant Modulus คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นที่ลากจากจุดเริ่มต้นกับจุดใดๆ ที่ต้องการหา (ซึ่งมักพิจารณาที่จุดซึ่งมีหน่วยแรงอัดเท่ากับ 40 หรือ 50 % ของหน่วยแรงอัดสูงสุด) บนเส้นสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัว มาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท. ถือว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่

หาโดยวิธีการนี้เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่แท้จริงของคอนกรีตในช่วงใช้งาน เพราะเป็นค่าที่ได้รวมถึงการหดตัวแบบพลาสติกหรือการล้าของคอนกรีต

ค. Tangent Modulus คำนวณจากความลาดเอียงของเส้นสัมผัสกับจุดใดๆ บนเส้นสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัวของคอนกรีต ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่หาได้โดยวิธีการนี้เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่แท้จริงของคอนกรีตทุกระดับของหน่วยแรงอัด

มาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท. กำหนดสูตรสำหรับหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตโดยให้ขึ้นกับกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดและหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ดังต่อไปนี้

$$E_c = w^{1.5} 4270 \sqrt{f'_c} \text{ กก./ชม.}^2$$

ในเมื่อ E_c = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต กก./ชม.²

w = หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ตัน/ลบ. เมตร

f'_c = กำลังอัดสูงสุดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานเมื่ออายุ 28 วัน กก./ชม.²

ฉะนั้น สำหรับคอนกรีตธรรมดา (หน่วยน้ำหนัก $w = 2.323$ ตัน/ลบ. เมตร) จะได้

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต : $E_c = 15120 \sqrt{f'_c} \text{ กก./ชม.}^2$

อัตราส่วนปัวซองของคอนกรีต

อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างหน่วยการยืดหดตัวทางด้านข้างต่อหน่วยการยืดหดตัวตามแนวแกนที่รับน้ำหนัก จากการทดสอบหากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกพบว่า เมื่อคอนกรีตรับแรงอัดตามแกนสูงมากขึ้น คอนกรีตจะขยายตัวออกทางด้านข้างมากและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทั้งนี้เนื่องจากการแตกร้าวภายในเนื้อคอนกรีตในแนวที่ขนานกับแรงที่กระทำ คอนกรีตธรรมดามีค่าปัวซองส์เรโซอยู่ระหว่าง 0.15 - 0.25 และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.17 เมื่อคอนกรีตมีกำลังสูงขึ้นค่าปัวซองส์เรโซจะน้อยลง นั่นคือ เมื่อคอนกรีตมีกำลังสูงมากขึ้นความเหนียวของคอนกรีตจะลดน้อยลง

1.6.2 กำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต

คอนกรีตมีกำลังต้านทานแรงดึงต่ำมาก เฉลี่ยประมาณ 10% ของกำลังต้านทานแรงอัดเท่านั้น นั่นคือ คอนกรีตมีคุณสมบัติเปราะง่ายเมื่อรับแรงดึง ดังนั้น ในการคำนวณออกแบบโครงสร้าง คสล. จึงไม่นำกำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีตมาพิจารณา อย่างไรก็ดี จะนำกำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีตมาใช้เพื่อคำนวณเกี่ยวกับการเกิดรอยร้าวในคอนกรีต ซึ่งค่ากำลังต้านทานแรงดึงได้จากการทดสอบคานตัวอย่างที่ทำด้วยคอนกรีตล้วน ขนาดหน้าตัด 15 x 15 ซม. ยาว 75 ซม. เมื่อขนาดโตสุดของหินไม่เกิน 40 มม. และให้น้ำหนักกระทำที่จุดแบ่งสามบนช่วงคานยาว 60 ซม. ค่าหน่วยแรงดึงสูงสุดตรงจุดที่คอนกรีตเกิดรอยแตกร้าวเรียกว่าโมดูลัสของการแตกร้าว (Modulus of Rupture : f_r) ซึ่งคำนวณจากสูตรแรงดัด $f_r = 6M/bh^2$ ในเมื่อ M เป็นโมเมนต์ดัดที่กระทำ b และ h เป็นความกว้างและความลึกของคานตัวอย่าง ตามลำดับ มาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท. ประมาณกำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีตโดยให้เป็นสัดส่วนกับสมการที่สองของกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต โดยกำหนดให้ ค่าโมดูลัสของการแตกร้าว : $f_r = 2.0 \sqrt{f'_c} \text{ กก./ชม.}^2$

1.6.3 กำลังต้านทานของคอนกรีตเมื่อรับแรงกระทำหลายแกน

กำลังต้านทานของคอนกรีตที่กล่าวข้างต้น เป็นกำลังของคอนกรีตที่รับแรงกระทำเพียงแกนเดียวเท่านั้น (uniaxial stress) แต่ในส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คอนกรีตอาจต้องรับแรงกระทำประเภทต่างๆ พร้อมกัน และแรงกระทำนั้นอาจไม่อยู่ในระนาบเดียวกันก็ได้ อย่างไรก็ตาม สามารถหากำลังต้านทานสูงสุดของคอนกรีตได้เมื่อมีแรงกระทำต่างๆ ในหลายทิศทาง โดยอาศัยการเขียนวงกลมของ Mohr ในหลักวิชากำลังวัสดุ (Strength of Materials) และพิจารณาประกอบกับผลการทดสอบ ซึ่งจะพบว่า

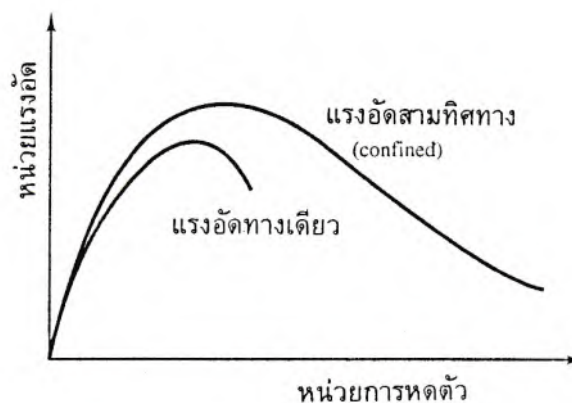
เมื่อคอนกรีตรับแรงสองทิศทาง (biaxial stress) ที่ตั้งฉากกัน :

- เมื่อแรงทั้งสองเป็นแรงอัด กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตจะมีค่าสูงขึ้นมากกว่าเมื่อคอนกรีตรับแรงอัดแกนเดียวและมีความเหนียวมากขึ้น กล่าวคือ เมื่อแรงอัดที่กระทำในแต่ละทิศทางมีค่าเท่ากันจะได้กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 16% ของกำลังที่ได้เมื่อคอนกรีตรับแรงอัดแกนเดียว และเมื่อแรงอัดที่กระทำในแต่ละทิศทางมีอัตราส่วนเท่ากับ 0.6 จะได้กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 27% ของกำลังที่ได้เมื่อคอนกรีตรับแรงอัดแกนเดียว

- เมื่อแรงทั้งสองเป็นแรงดึง กำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีตไม่เปลี่ยนแปลง และมีค่าเท่ากับกำลังต้านทานของคอนกรีตที่รับแรงดึงแกนเดียว

- เมื่อแรงหนึ่งเป็นแรงอัดและอีกแรงหนึ่งเป็นแรงดึง กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตจะมีค่าลดลงต่ำกว่าเมื่อคอนกรีตรับแรงอัดแกนเดียว โดยมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดึงที่กระทำ

เมื่อคอนกรีตรับแรงอัดสามทิศทาง (triaxial stress) ที่ตั้งฉากกันและกระทำพร้อมกัน พบว่าคอนกรีตมีความเหนียวและกำลังต้านทานมากขึ้นมากจากการที่คอนกรีตรับแรงอัดแกนเดียว (รูปที่ 1.3) ทั้งนี้เพราะแรงอัดหรือแรงดันรอบข้างมีส่วนช่วยลดการแตกร้าวในเนื้อคอนกรีตและช่วยกำจัดการเพิ่มปริมาตรของคอนกรีตก่อนที่จะแตกคอนกรีตจะเกิดการวิบัติ



รูปที่ 1.3 กำลังและความเหนียวของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีแรงดันรอบข้าง
กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตในกรณีนี้ หาได้จากสมการ

$$f_c^* = f_c' + 4.1f_h$$

ในเมื่อ f_c^* = กำลังต้านทานแรงอัดตามแกนของคอนกรีต เมื่อมีแรงดันรอบข้าง

f_c' = กำลังต้านทานแรงอัดตามแกนของคอนกรีต เมื่อไม่มีแรงดันรอบข้าง

f_h = แรงดันรอบข้างที่กระทำ

ในทางปฏิบัติ แรงดันรอบข้างคอนกรีตจะได้จากการใช้เหล็กเสริมทางขวาง (transverse reinforcement) เช่น เหล็กปลอกเดี่ยว หรือเหล็กปลอกเกลียวในเสา คสล. กล่าวคือ เมื่อคอนกรีตในเสา รับแรงอัดสูงมากจนเกินกำลังของคอนกรีตแล้ว คอนกรีตจะขยายตัวหรือระเบิดออกทางข้างจากการ แตกร้าวยภายในเนื้อคอนกรีต อย่างไรก็ดี เหล็กปลอกที่นำมาใช้นี้จะเข้ามาทำหน้าที่โอบรัดคอนกรีตนั้นไว้ ทำให้เสาคอนกรีตมีความเหนียวมากขึ้นก่อนจะเกิดการวิบัติ และมีความสามารถรับแรงกระทำเพิ่มขึ้นอีก บ้างเล็กน้อย จากการทดลองพบว่า เหล็กปลอกเกลียวมีประสิทธิภาพมากกว่าเหล็กปลอกเดี่ยว

1.6.4 การล้าและการยืด-หดตัวของคอนกรีต

การล้าของคอนกรีต (Creep) เป็นคุณสมบัติหนึ่งของคอนกรีตที่มีส่วนทำให้โครงสร้างเกิดการเสียรูป (deformation) มากขึ้น เช่น คานโก่งตัวมากขึ้น เนื่องจากคอนกรีตจะหดตัวเพิ่มมากขึ้น ภายใต้น้ำหนักหรือแรงอัดที่กระทำคงที่แต่บรรทุกค้างไว้เป็นเวลานาน อัตราการล้าของคอนกรีตจะค่อยๆ ช้าลงเมื่อระยะเวลาที่รับน้ำหนักบรรทุกค้างเพิ่มมากขึ้นเป็นลำดับ พบว่าประมาณ 75% ของการล้า จะเกิดขึ้นภายในเวลา 6 เดือน และประมาณ 90% ของการล้าจะเกิดขึ้นภายในเวลา 1 ปี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกำลังของคอนกรีตและปัจจัยอื่น เช่น ความชื้นสัมพัทธ์ โดยหน่วยการหดตัวทั้งหมดที่เกิดจากการล้าจะมีค่าประมาณ 1.5 ถึง 4 เท่าของหน่วยการหดตัวทันที การล้าของคอนกรีตจะหยุดเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 2-5 ปี

ผลของการล้าของคอนกรีตทำให้เกิดการถ่ายแรงจากคอนกรีตให้กับเหล็กเสริมในโครงสร้าง คสล. ลดแรงดึงในลวดเหล็กของคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรง เปลี่ยนจุดดัดกลับในคานต่อเนื่อง แต่เพิ่มการโก่งหรือแอ่นตัวของโครงสร้างเนื่องจากโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าลดลง นอกจากนี้ พบว่าเมื่อน้ำหนักบรรทุกค้างไว้บนแท่งคอนกรีตล้วนเป็นเวลามากกว่าหนึ่งปี การล้าจะทำให้กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตลดลงเหลือเพียงร้อยละ 75 ถึง 85 เท่านั้น อย่างไรก็ดี การล้าของคอนกรีตจะมีผลต่อพฤติกรรมของส่วนโครงสร้าง คสล. ในสภาวะที่รับน้ำหนักใช้งานเท่านั้น และถ้าเสริมเหล็กกับแรงอัดบนหน้าตัดจะช่วยลดการโก่งตัวเนื่องจากการล้าของคอนกรีตให้น้อยลง

การยืด-หดตัวของคอนกรีตเนื่องจากการสูญเสียความชื้น (Shrinkage) เป็นคุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งที่ทำให้ส่วนของโครงสร้างเกิดการเสียรูปมากขึ้นตามกาลเวลาคัลยกับการล้าของคอนกรีต แต่มีได้เกิดจากน้ำหนักที่กระทำ การหดตัวของคอนกรีตในลักษณะนี้เกิดจากการสูญเสียความชื้นเนื่องจากการระเหยของน้ำที่มีอยู่ในเนื้อคอนกรีตภายใต้อุณหภูมิที่คงที่ทำให้ปริมาตรของคอนกรีตลดน้อยลง แต่เมื่อคอนกรีตที่หดตัวนี้ได้รับความชื้นเพิ่มขึ้นก็จะพองหรือยืดตัวออกและมีปริมาตรเกือบเท่าเดิม ฉะนั้นในสภาวะแวดล้อมที่มีการแห้งและเปียกสลับกัน ปริมาตรของคอนกรีตจะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

10 การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

อัตราการยิด-หดตัวของคอนกรีตในลักษณะนี้จะลดน้อยลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ขึ้นกับความแตกต่างของอุณหภูมิ ความชื้นและชนิดของวัสดุผสมที่ใช้ สำหรับคอนกรีตทั่วไปหน่วยการยิด-หดตัวมีค่าประมาณ 0.0002 ถึง 0.0006 มม./มม. และอาจมีค่าสูงถึง 0.0010 มม./มม.

ผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากการยิด-ตัวในส่วนโครงสร้าง คสล. ที่เกิดจากการสูญเสียความชื้น ทำให้ผิวคอนกรีตด้านนอกที่สัมผัสกับดินฟ้าอากาศเกิดการยิดหรือหดตัวมากกว่าส่วนที่อยู่ภายในถัดเข้ามา ฉะนั้น เมื่อผิวของคอนกรีตนั้นไม่สามารถต้านทานหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นได้ (โดยเฉพาะคอนกรีตที่เพิ่งแข็งตัวใหม่ๆ) ผิวคอนกรีตจึงเกิดรอยแตกร้าวและสูญเสียคุณภาพในการหุ้มเหล็กเสริม ทำให้ส่วนโครงสร้าง คสล. เกิดการแอ่นหรือโก่งตัวมากขึ้นและเหล็กเสริมในคอนกรีตก็จะเป็นสนิมและถูกกัดกร่อนเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (temperature change) สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคอนกรีตเช่นกัน กล่าวคือ คอนกรีตจะขยายตัวออกเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และคอนกรีตจะหดตัวเมื่ออุณหภูมิลดลง ทำให้ผิวคอนกรีตเกิดรอยแตกร้าวเช่นเดียวกัน

ดังนั้น เพื่อป้องกันการยิดหดตัวของคอนกรีตที่อาจเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการสูญเสียความชื้น มาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท. จึงกำหนดให้ใช้เหล็กเสริมด้านการยิดหดด้วยซึ่งบางครั้งก็เรียกว่าเหล็กเสริมกันร้าว อย่างไรก็ตาม หากบ่มคอนกรีตให้ชื้นต่อเนื่องในระยะแรกที่เทคอนกรีตจะสามารถลดปัญหาของรอยร้าวที่ผิวคอนกรีตดังที่กล่าวข้างต้นได้

1.7 คอนกรีตผสมเสร็จ (Ready - mixed Concrete)

คอนกรีตผสมเสร็จ คือส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุผสม กับน้ำ และอาจมีหรือไม่มีสารผสมเพิ่มก็ได้ ซึ่งผลิตขึ้นจากโรงงานและส่งไปใช้งาน ณ ที่ก่อสร้างที่ต้องการ ในสภาพที่พร้อมจะใช้งานได้ โดยรถยนต์ขนส่ง การใช้คอนกรีตผสมเสร็จดีกว่าคอนกรีตที่ผสมกับที่ เพราะสามารถควบคุมอัตราส่วนผสมได้คงที่แน่นอน ซึ่งปัจจุบันกำลังเป็นที่นิยมใช้มากขึ้น โดยเฉพาะงานก่อสร้างขนาดใหญ่หรือที่ต้องการกำลังคอนกรีตสูงหรือบริเวณก่อสร้างคับแคบ

ตารางที่ 1.2 ชั้นคุณภาพของคอนกรีตผสมเสร็จ

ชั้นคุณภาพ	กำลังต้านแรงอัดเมื่ออายุ 28 วัน, กก./ชม. ² ไม่น้อยกว่า	
	รูปลูกบาศก์ 15x15x15 ซม.	รูปทรงกระบอก ϕ 15x30 ซม.
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

การขนส่งคอนกรีตจากที่ผสมไปยังหน่วยงาน โดยรถกวนหรือรถผสมจะต้องถ่ายคอนกรีตออกจากโมให้หมดภายในระยะเวลาไม่เกิน $1\frac{1}{2}$ ชั่วโมง นับจากเวลาที่ใส่น้ำทั้งหมดเข้าไปสู่ส่วนผสม ในกรณี queผสมจนเสร็จแล้วขนส่งโดยรถจะต้องถ่ายคอนกรีตออกให้หมดภายในเวลา 30 นาทีหลังจากเริ่มผสม อย่างไรก็ตาม เวลาที่ได้กำหนดไว้นี้ไม่ใช้กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทสาม

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 213-2520) กำหนดชั้นคุณภาพของคอนกรีตผสมเสร็จ ดังตารางที่ 1.2

1.8 เหล็กเสริม

เหล็กเสริม (Reinforcing bars หรือเรียกสั้นๆว่า Rebars) ซึ่งใช้ในงานก่อสร้างทั่วไปเป็นเหล็กกล้าละมุน (Mild Steel) มีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ต่ำ (ประมาณ 0-0.3%) ผลิตขึ้นแบบรีดร้อน (hot rolled) โดยการหลอมเหลวเหล็กแท่งแล้วรีดออกมาด้วยลูกกลิ้งให้มีขนาดและรูปร่างตามต้องการ เหล็กเสริมคอนกรีตมีทั้งแบบหน้าตัดกลมเรียบซึ่งเรียกว่า เหล็กกลมแบบผิวเรียบ และแบบหน้าตัดกลมแต่มีบั้งหรือปล้องหรือครีบกเกลียวที่ผิวตามแนวความยาวของเหล็กซึ่งเรียกว่า เหล็กกลมแบบข้ออ้อย เหล็กเส้นที่ผลิตออกมาหนักประมาณ 7850 กก./ม.³ มีความยาวมาตรฐาน 10 และ 12 เมตร เหล็กทุกเส้นจะมีหมายเลขขนาด ชื่อย่อ และเครื่องหมายการค้าของบริษัทผู้ผลิต หล่อเป็นตัวนูนติดกับผิวเหล็ก เหล็กเส้นจะถูกลำเลียงมายังหน่วยงานก่อสร้างเป็นมัดๆ และผูกป้ายแสดงเครื่องหมาย

นอกจากเหล็กเสริมที่กล่าวแล้ว ยังอาจใช้ลวดเหล็ก (steel wires) หรือลวดตะแกรงเหล็กเชื่อม (welded wire fabric) เสริมคอนกรีต ซึ่งมีทั้งแบบกลมผิวเรียบและแบบกลมข้ออ้อย ลวดเหล็กจะใช้เป็นเหล็กปลอกเกลียวในเสาปลอกเกลียว ส่วนลวดตะแกรงเหล็กเชื่อมจะใช้เสริมในแผ่นพื้น ถนน หรือในโครงสร้างเปลือกบาง เพราะระยะห่างระหว่างลวดเหล็กจะสม่ำเสมอเนื่องจากลวดตะแกรงเหล็กเชื่อมทำมาจากโรงงานโดยเรียงลวดเหล็กให้ตั้งฉากกันคล้ายตะแกรงหรือตาข่ายแล้วยึดติดกันโดยการเชื่อมตรงจุดตัดของลวดเหล็กนั้น

เหล็กกลมแบบผิวเรียบ (Round Bars) เป็นเหล็กเส้นที่มีหน้าตัดกลม มีผิวเรียบตลอดความยาวของเหล็ก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 6 มม. ถึง 25 มม. มาตรฐาน มอก. 20 กำหนดให้เหล็กกลมแบบผิวเรียบมีชั้นคุณภาพเดียว คือ SR24 ซึ่งหมายถึงมีกำลังต้านทานต่อแรงดึงที่จุดครากของเหล็กไม่น้อยกว่า 2400 กก./ซม.² ส่วนการเรียกชื่อขนาดให้ใช้สัญลักษณ์ RB (ตัวย่อจาก Round Bar) แล้วตามด้วยตัวเลขแสดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเป็น มม. เหล็กเส้นชนิดนี้เหมาะสำหรับใช้ในงานก่อสร้างขนาดเล็กและขนาดกลาง เพราะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตไม่ดีเท่าที่ควร เมื่อนำไปใช้งานควรขอข้อที่ปลายเหล็กเสริมนั้น

เหล็กกลมแบบข้ออ้อย (Deformed Bars) เป็นเหล็กเส้นที่มีหน้าตัดกลม แต่ที่ผิวตามแนวความยาวของเหล็กมีลักษณะเป็นบั้งหรือปล้องหรือครีบกเกลียวซึ่งผลิตตามที่มาตรฐานกำหนด เหล็กกลมแบบข้ออ้อยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 10 มม. ถึง 32 มม. มาตรฐาน มอก. 24 กำหนดให้เหล็กข้ออ้อยมี 3 ชั้นคุณภาพ คือ SD30 SD40 และ SD50 ซึ่งหมายถึงมีกำลังต้านทานต่อแรงดึงที่จุดครากของเหล็กมีค่าไม่น้อยกว่า 3000 4000 และ 5000 กก./ซม.² ตามลำดับ ส่วนการเรียกชื่อขนาดให้ใช้

12 การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

สัญลักษณ์ DB (ตัวย่อจาก Deformed Bar) แล้วตามด้วยตัวเลขแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น มม. เหล็กเส้นชนิดนี้เหมาะสำหรับใช้ในงานก่อสร้างอาคาร คสล. ที่ต้องการความแข็งแรงเป็นพิเศษ เนื่องจากมีกำลังต้านทานต่อแรงดึงที่จุดครากสูงมากขึ้น และให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมดีขึ้นมากถึงสองเท่าของเหล็กกลมแบบผิวเรียบ

อนึ่ง การผูกเหล็กเสริมคอนกรีตเพื่อกันรวนหรือเสียรูปขณะที่จะเทคอนกรีตจะใช้ลวดเหล็กไม่เคลือบสังกะสี ที่เรียกว่า ลวดผูกเหล็ก ลวดผูกเหล็กได้จากการนำเหล็กขนาดเล็กไปอบให้อ่อนตัว (Annealing) แล้วดึงให้มีขนาดเล็กลงจนถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต้องการ ลวดผูกเหล็กที่ใช้ในงานคอนกรีตเสริมเหล็กมีขนาดเดียวเท่านั้น คือ เบอร์ 18 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.24 มิลลิเมตร ลวดผูกเหล็กสามารถต้านทานแรงดึงสูงสุดได้ถึง 3000 กก./ซม.² และทนการบิดได้อย่างน้อย 75 รอบ

1.9 คุณสมบัติของเหล็กเสริม

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 20-2527 และ มอก. 24 - 2527 ให้ข้อกำหนดที่ต้องการทางด้านคุณสมบัติทางกลและส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกลมแบบผิวเรียบและแบบข้ออ้อยตามชั้นคุณภาพต่างๆ ดังตารางที่ 1.3 และตารางที่ 1.4

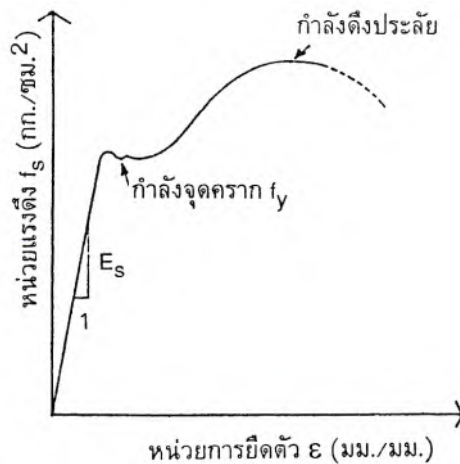
ในการคำนวณออกแบบจะต้องพิจารณาเลือกใช้เหล็กเสริมตามชั้นคุณภาพที่มีจำหน่ายโดยผู้ผลิต และเมื่อจะนำเหล็กเสริมหรือลวดเหล็กมาใช้งานควรทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางกลด้วยว่าเหล็กเสริมหรือลวดเหล็กนั้นมีคุณสมบัติถูกต้องตรงตามที่ได้กำหนดไว้ในแบบรูปหรือในรายการก่อสร้างหรือไม่ คุณสมบัติทางกลที่ควรตรวจสอบได้แก่ (ก) โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity หรือ Young's Modulus : E_s) (ข) กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก หรือ จุดยืดยึด (Yield Strength : f_y) ตลอดจนความยืดตัว (Elongation) และ (ค) กำลังรับแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength : f_u) จำนวนตัวอย่างที่ใช้อย่างน้อยขนาดละ 3 ท่อน ยาวท่อนละ 90 เซนติเมตร นำมาวัดหาขนาดเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลาง และทำการทดสอบหากำลังต้านทานแรงดึงของเหล็กเสริมตามวิธีการมาตรฐานโดยการดึงอย่างต่อเนื่องครั้งเดียวจนถึงจุดวิบัติ ซึ่งจะช่วยให้ทราบคุณสมบัติต่างๆที่ต้องการ

ตารางที่ 1.3 คุณสมบัติทางกลของเหล็กเสริม

ชนิดของเหล็กเสริม	ชั้นคุณภาพ	กำลังจุดคราก กก./ซม. ² ไม่น้อยกว่า	กำลังดึงประลัย กก./ซม. ² ไม่น้อยกว่า	ความยืด % ไม่น้อยกว่า	การทดสอบการดัดโค้งเย็น	
					มุมดัดโค้งเย็น องศา	φภายในส่วนโค้ง ของφของเหล็ก
เหล็กกลมเรียบ	SR 24	2400	3900	21	180	1.5 เท่า
เหล็กข้ออ้อย	SD 30	3000	4900	17	180	4 เท่า
	SD 40	4000	5700	15	180	5 เท่า
	SD 50	5000	6300	13	90	5 เท่า

ตารางที่ 1.4 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กเสริม

ชนิดของเหล็กเสริม	ชั้นคุณภาพ	ส่วนประกอบทางเคมี ไม่เกิน % (โดยน้ำหนัก)				
		ถ่าน	แมงกานีส	ฟอสฟอรัส	กำมะถัน	ถ่าน+(แมงกานีส/6)
เหล็กกลมเรียบ	SR 24	0.28	-	0.058	0.058	-
เหล็กข้ออ้อย	SD 30	0.28	-	0.058	0.058	0.45
	SD 40	-	1.80	0.058	0.058	0.55
	SD 50	-	1.80	0.058	0.058	0.60



รูปที่ 1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและหน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริม

เมื่อนำผลการทดสอบที่ได้มาเขียนเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับหน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริม จะได้ดังที่แสดงในรูปที่ 1.4 จะเห็นว่า ขณะที่หน่วยแรงดึงยังอยู่ในช่วงอิลาสติก หรือ ช่วงยืดหยุ่นของเหล็กเสริม หน่วยแรงดึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับหน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริม การยืดตัวของเหล็กเสริมในช่วงยืดหยุ่นนี้ค่อนข้างน้อยและสามารถหดตัวกลับลงมาตามแนวเดิมได้หากเลิกดึง แต่เมื่อแรงดึงกระทำมากขึ้นจนกระทั่งถึงหน่วยแรงที่เหล็กเสริมเริ่มครากซึ่งเป็นจุดสิ้นสุดของช่วงอิลาสติก เหล็กเสริมจะเริ่มถูกดึงยืดออกขณะที่แรงดึงกระทำมีค่าค่อนข้างคงที่ เรียกหน่วยแรง ณ จุดนี้ว่า หน่วยแรงที่จุดคราก (yield strength : f_y) หรือ จุดยัด ซึ่งในบางครั้งอาจพบว่ามีทั้งจุดครากบน (upper yield point) และจุดครากล่าง (lower yield point) ตำแหน่งของจุดครากบนไม่แน่นอนขึ้นกับอัตราเร่งของแรงดึงและขนาดหน้าตัดของเหล็กเสริม ปกติถือว่าจุดครากล่างเป็นหน่วยแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมที่แท้จริง ช่วงที่หน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริมเพิ่มมากขึ้นขณะที่หน่วยแรงดึงมีค่าค่อนข้างคงที่ เรียกว่าช่วงพลาสติก การยืดตัวของเหล็กเสริมในช่วงนี้แสดงถึงความเหนียว (ductility) ของเหล็กเสริมซึ่งปกติมีค่าประมาณ 10-12 เท่าของหน่วยการยืดตัวที่จุดคราก แต่เมื่อเหล็กเสริมมีกำลังที่จุดครากสูงขึ้น การยืดตัวในช่วงนี้จะลดน้อยลงตามลำดับ ถัดจากช่วงนี้เหล็กเสริมจะมีพฤติกรรมใหม่ซึ่งสามารถรับแรงดึงเพิ่มได้อีกและมีการยืดตัวเพิ่มขึ้นแต่หน่วยแรงดึงและหน่วยการยืดตัวไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงเหมือนกับ

ในช่วงอีลาสติก เรียกช่วงนี้ว่าช่วงการแข็งตัวเพิ่ม (strain hardening) เมื่อเหล็กเสริมรับแรงดึงจนกระทั่งถึงกำลังสูงสุดของเหล็กเสริมนั้น (ultimate tensile strength) หน่วยแรงดึงจะค่อยๆ ลดลงและหน้าตัดของเหล็กเสริมเริ่มมีคอคอดเกิดขึ้นและเล็กลงตามลำดับซึ่งสังเกตได้ค่อนข้างชัดเจน จนกระทั่งถึงจุดที่เหล็กเสริมถูกดึงและขาดออกจากกัน เรียกหน่วยแรงที่จุดนี้ว่า หน่วยแรงดึงที่จุดขาดของเหล็กเสริม

ค่าความชันของเส้นสัมพันธ์หรืออัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงดึงต่อหน่วยการยืดตัวในช่วงอีลาสติกกำหนดให้เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) หรือโมดูลัสของยังก์ (Young's Modulus) ของเหล็กเสริม และใช้สัญลักษณ์เป็น E_s สำหรับเหล็กเสริมทุกชั้นคุณภาพจะมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น E_s ค่อนข้างคงที่เท่ากับ 2.04×10^6 กก./ชม.² อนึ่ง เมื่อเหล็กเสริมต้องรับแรงอัดจะถือว่าเหล็กเสริมมีกำลังต้านทานแรงอัดเท่ากับกำลังต้านทานแรงดึง โดยมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเมื่อรับแรงอัดเท่ากับค่าที่รับแรงดึง

เมื่อเหล็กเสริมมีกำลังจุดครากสูงมากและเกินกว่า 4000 กก./ชม.² ตำแหน่งของจุดครากอาจไม่ปรากฏชัดเจน มาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท. กำหนดให้พิจารณาหาหน่วยแรงที่จุดครากของเหล็กเสริมนั้นจากจุดที่หน่วยการยืดตัวเท่ากับ 0.0035 มม./มม. (เรียกว่า 0.35% off-set) นั่นคือตรงจุดที่หน่วยการยืดตัวมีค่าเท่ากับ 0.0035 มม./มม. ให้ลากเส้นขนานกับความชันขึ้นไปตัดกับเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับหน่วยการยืดตัว จุดตัดที่ได้ถือเป็นหน่วยแรงที่จุดครากของเหล็กเสริม

อนึ่ง ในกรณีที่ดึงเหล็กเสริมให้เลยหน่วยแรงที่จุดครากของเหล็กเสริมโดยที่การยืดตัวยังอยู่ในช่วงพลาสติกแล้วค่อยๆ ลดแรงกระทำลง หน่วยแรงดึงและหน่วยการยืดตัวก็จะลดลงโดยมีความชันเท่ากับ E_s ซึ่งทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวร และเมื่อให้แรงดึงกระทำกลับไปที่ใหม่ อัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงดึงและหน่วยการยืดตัวก็จะมีค่าเท่ากับ E_s นั่นคือแนวหรือเส้นของการลดหน่วยแรงกับการเพิ่มหน่วยแรงเป็นแนวหรือเส้นเดียวกันจนกระทั่งไปบรรจบกับเส้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับหน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริมที่รับแรงดึงครั้งเดียว จากนั้นจะมีพฤติกรรมเหมือนกันกับที่เหล็กเสริมที่รับแรงดึงครั้งเดียวจนกระทั่งถึงจุดวิบัติ แต่เหล็กเสริมในลักษณะนี้มีการยืดตัวน้อยลงกว่าเดิม และอาจไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นเหล็กเสริมคอนกรีต

การยืดตัว (elongation) ของเหล็กเสริมก่อนเกิดการวิบัติ เป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องการ โดยเฉพาะเมื่อนำเหล็กเสริมมาใช้ร่วมกับคอนกรีต เหล็กเสริมต้องสามารถยืดตัวได้มากหรือมีความเหนียว (ductility) มากพอก่อนที่ส่วนโครงสร้าง คสล. จะเกิดการวิบัติ ถ้าสมมุติให้ระยะวัดการยืดตัวหรือที่เรียกว่า ความยาวพิกัด (gage length) ของเหล็กเสริมก่อนรับแรงดึงมีค่าเป็น L_0 (มาตรฐานทั่วไปกำหนดให้ใช้ประมาณ 5 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริม) และให้ L_f เป็นความยาวระหว่างจุดพิกัดที่เพิ่มขึ้นเมื่อเหล็กเสริมถูกดึงจนขาด ทั้งนี้จุดขาดต้องอยู่ในช่วงของความยาวพิกัด ดังนั้นค่าร้อยละของการยืดตัว (elongation) ของเหล็กเสริมก่อนที่จะขาดมีค่าเท่ากับ $\frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100$

1.10 คอนกรีตเสริมเหล็ก

จากคุณสมบัติของคอนกรีตและเหล็กเสริมที่กล่าวข้างต้น พบว่ากำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีตมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต ดังนั้น หากนำคอนกรีตเพียงอย่างเดียวมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างที่ต้องรับทั้งแรงดึงและแรงอัดก็จะรับน้ำหนักบรรทุกได้ไม่มากนัก เพราะคอนกรีตจะแตกร้าเสียก่อนเนื่องจากคอนกรีตไม่สามารถรับแรงดึงได้สูงนั่นเอง แต่โดยเหตุที่เหล็กเสริมเป็นวัสดุที่สามารถต้านทานต่อแรงดึงและแรงอัดได้ดีเท่าๆกัน และพบว่าเหล็กเสริมมีค่าสัมประสิทธิ์ของการยืดหดตัวใกล้เคียงกับของคอนกรีต ทำให้ไม่เกิดปัญหาเมื่อคอนกรีตมีการยืดหดตัว ดังนั้นการนำเหล็กเส้นหรือเหล็กท่อนหรือเหล็กตะแกรงมาใช้ร่วมกับคอนกรีตโดยหล่ออยู่ในเนื้อคอนกรีตในลักษณะที่กำหนดให้คอนกรีตทำหน้าที่รับแรงอัดและเหล็กเสริมทำหน้าที่รับแรงดึงจึงทำให้หน้าตัดมีประสิทธิภาพมากขึ้น สามารถลดขนาดและน้ำหนักของส่วนโครงสร้างลงได้มาก การใช้เหล็กเสริมร่วมกับคอนกรีตในลักษณะดังกล่าวเรียกว่า คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete) เรียกย่อๆ ว่า คสล. ซึ่งมีหน่วยน้ำหนักประมาณ 2400 กก./เมตร³ อนึ่ง เหล็กเสริมต้องมีคอนกรีตห่อหุ้มหนาพอเพื่อให้เหล็กเสริมมีกำลังรับแรงดึงได้เต็มที่ อีกทั้งยังช่วยให้เหล็กเสริมนั้นทนทานต่อเพลิงไหม้และการเป็นสนิมผุกร่อนได้ดี

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน มีทั้งชนิดที่หล่อในที่ (cast in situ) ซึ่งใช้กันไม่น้อยกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ และชนิดที่หล่อสำเร็จ ซึ่งอาจเป็นคอนกรีตหล่อสำเร็จ (precast concrete) แบบเสริมเหล็กธรรมดา หรือแบบเสริมเหล็กอัดแรงที่เรียกว่าคอนกรีตอัดแรง (prestressed concrete) คอนกรีตหล่อสำเร็จจะผลิตจากโรงงานก่อน แล้วจึงนำมาประกอบหรือใช้ในสถานที่ที่ก่อสร้าง เช่น ระบบพื้นอาคาร พื้นสะพาน ผนัง เสาเข็มคอนกรีตสำหรับฐานราก เป็นต้น

ประเภทของส่วนโครงสร้าง คสล. มีทั้งส่วนโครงสร้างที่รับแรงตามแนวแกน (axially loaded members) เช่น เสา ส่วนโครงสร้างที่รับโมเมนต์ดัด (flexural members) เช่น คาน พื้น ส่วนโครงสร้างที่รับแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดร่วมกัน (beam-columns) เช่น เสาที่รับแรงเยื้องศูนย์ ส่วนโครงสร้างที่รับแรงบิด (torsional members) เช่น คานขอบที่รองรับพื้นยื่น นอกจากนี้ ส่วนโครงสร้างคสล. ยังต้องรับแรงเฉือนตลอดจนแรงยึดเหนี่ยวเพื่อให้เหล็กเสริมมีกำลังรับแรงได้ตามต้องการ

รูปที่ 1.5 แสดงส่วนประกอบของโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ซึ่งจะเห็นว่าประกอบด้วยส่วนของโครงสร้างต่างๆ ต่อไปนี้

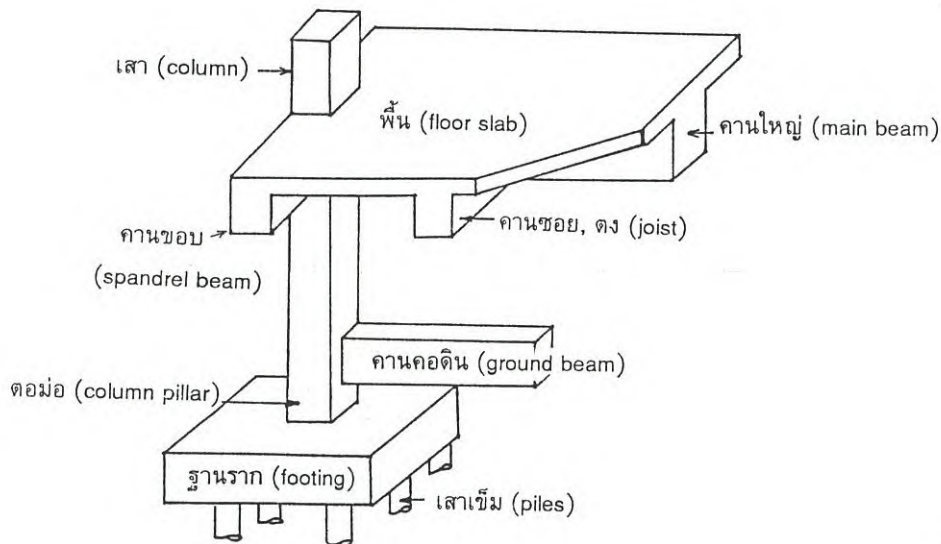
1. แผ่นพื้น คสล. ทำหน้าที่รับน้ำหนักบรรทุกจรและน้ำหนักบรรทุกคงที่ของแผ่นพื้นแล้วถ่ายน้ำหนักนั้นให้กับที่รองรับ แผ่นพื้น คสล. อาจเป็นแบบเสริมเหล็กทางเดียว (one-way slabs) โดยมีคานรองรับอย่างน้อยสองด้าน หรือเสริมเหล็กสองทาง (two-way slabs) โดยมีคานรองรับทั้งสี่ด้าน หรือเป็นแผ่นพื้นแบบไม่มีคานรองรับที่เรียกว่าแผ่นพื้นไร้คาน (flat slabs หรือ flat plates) ซึ่งแผ่นพื้นไร้คานจะถ่ายน้ำหนักบรรทุกต่างๆ ให้กับเสาที่รองรับโดยตรง (ดูวิธีคำนวณออกแบบในบทที่ 6)

2. คานชอยหรือตง (floor joist) ทำหน้าที่รับน้ำหนักจากแผ่นพื้น แล้วถ่ายน้ำหนักนั้น (ซึ่งรวมทั้งน้ำหนักบรรทุกคงที่ของคานชอยและผนัง กำแพง) ให้กับคานใหญ่อีกทีหนึ่ง คานชอยอาจมีรูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular section) หรือรูปตัวที (T-section) (ดูวิธีคำนวณออกแบบในบทที่ 3 และ 4)

3. คานใหญ่ (Girder) ใช้น้ำหนักที่ถ่ายมาจากคานชอยอีกทีหนึ่งโดยมีลักษณะกระทำของน้ำหนักแบบเป็นจุด รูปตัดของคานใหญ่อาจเป็นรูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือรูปตัวทีเช่นเดียวกับคานชอย ซึ่งคานใหญ่นี้จะถ่ายน้ำหนัก (ซึ่งรวมทั้งน้ำหนักบรรทุกคงที่ของคานใหญ่และผนัง กำแพง) ต่อไปยังเสา คสล. ที่รองรับ (ดูวิธีคำนวณออกแบบในบทที่ 3 และ 4)

4. เสาและตอม่อ คสล. ทำหน้าที่รับน้ำหนักที่ถ่ายมาจากคานใหญ่ของชั้นต่างๆและคานคอดิน แล้วถ่ายน้ำหนักต่อไปยังฐานราก คสล. เสาและตอม่ออาจมีรูปตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือรูปตัดกลม เสาที่มีเหล็กเสริมทางช้างแบบพันต่อเนื่องรอบเหล็กยื่นเรียกว่าเสาปลอกเกลียว (spiral column) ส่วนเสาที่มีเหล็กเสริมทางช้างชนิดปลอกเดี่ยวพันรอบเหล็กยื่นและเว้นเป็นระยะๆเรียกว่าเสาปลอกเดี่ยว (tied column) (ดูวิธีคำนวณออกแบบในบทที่ 8)

5. ฐานราก คสล. ทำหน้าที่ถ่ายน้ำหนักบรรทุกรวมทั้งน้ำหนักบรรทุกคงที่ของฐานรากและดินถม (ถ้ามี) ต่อไปยังชั้นหินหรือดินที่รองรับในลักษณะฐานรากแบบแผ่ (spread footing) หรือฐานรากแบบวางบนเสาเข็ม (pile footing) โดยพยายามให้มีการทรุดตัวน้อยที่สุด (ดูวิธีคำนวณออกแบบในบทที่ 9)



รูปที่ 1.5 ส่วนประกอบของอาคาร คสล.

สำหรับรายละเอียดเกี่ยวกับการเสริมเหล็กตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท. เช่น การจัดวางเหล็กเสริม ระยะคอนกรีตหุ้ม การดัดงอเหล็กเสริม ฯลฯ เพื่อให้ส่วนโครงสร้าง คสล. ทำหน้าที่ได้ตามต้องการ ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.5 ของบทที่ 2

บทที่ 2

การวิเคราะห์และการออกแบบโครงสร้าง

2.1 บทนำ

ปกติ ก่อนดำเนินการคำนวณและออกแบบ ผู้ออกแบบจะต้องศึกษาแบบรูปทางสถาปัตยกรรม รวมถึงการจัดระบบของโครงสร้างเพื่อให้เป็นไปตามรูปแบบที่ต้องการ หลังจากนั้นจึงเริ่มดำเนินการต่อไปนี้ คือ ก) จำลองรูปแบบโครงสร้างสามมิติทางสถาปัตยกรรมให้เป็นโครงเฟรมสองมิติทางวิศวกรรม ทั้งนี้เพื่อความสะดวกต่อการวิเคราะห์และออกแบบ ข) จัดทำแปลนหรือผัง พื้น คาน-เสาของชั้นต่างๆ รวมถึงแปลนหรือผังของฐานราก ซึ่งจะให้เห็นส่วนประกอบต่างๆของโครงสร้างโดยรวมทั้งหมดหรือในแต่ละชั้น ตลอดจนตำแหน่งของที่รองรับที่ควรจะมีเพื่อช่วยในการพิจารณาเกี่ยวกับการรับและถ่ายน้ำหนักบรรทุกลงสู่ฐานราก ในขั้นตอนนี้จะสังเกตเห็นว่าโครงสร้าง คสล. ส่วนใหญ่มีลักษณะต่อเนื่องกันตลอด ฉะนั้น เมื่อพิจารณาให้รายละเอียดเกี่ยวกับการเสริมเหล็กจะต้องทำให้เกิดความต่อเนื่องนั้นด้วย ค) กำหนดชื่อ ปริมาณขนาดรูปตัดของส่วนโครงสร้าง หาตำแหน่งของที่รองรับโดยพิจารณาจากผังคาน-เสาและหาน้ำหนักบรรทุกทุกชิ้นงานที่กระทำต่อโครงสร้างส่วนนั้น ง) วิเคราะห์โครงสร้างเพื่อหาแรงปฏิกิริยา แรงเฉือน แรงตามแนวแกน แรงบิดและโมเมนต์ดัดสูงสุดที่หน้าตัดวิกฤตนั้นต้องรับหรือต้านทาน จ) ออกแบบโครงสร้างส่วนนั้นเพื่อหาขนาดรูปตัดและปริมาณเหล็กเสริมที่เหมาะสม และ ฉ) เขียนแบบแสดงรายละเอียดการเสริมเหล็กให้ตรงตามสมมุติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐาน เพื่อนำไปใช้สำหรับการก่อสร้างต่อไป

ดังนั้น จะเห็นว่าการคำนวณออกแบบโครงสร้างประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ การวิเคราะห์โครงสร้าง (Structural Analysis) เพื่อหาแรงกระทำต่างๆ ที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร และการออกแบบโครงสร้าง (Structural Design) เพื่อดำเนินการแรงกระทำต่างๆ ที่หาได้จากการวิเคราะห์โครงสร้าง ซึ่งส่วนโครงสร้างที่ได้ต้องมีความแข็งแรง ทนทาน ปลอดภัย (strength) และเหมาะสมในสภาวะใช้งาน (serviceability)

ในบทนี้จะกล่าวถึงน้ำหนักบรรทุกที่ใช้คำนวณออกแบบ การรับ-ถ่ายน้ำหนักบรรทุก แนวทางของการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง คสล. รวมถึงข้อพิจารณาในการให้รายละเอียดทั่วไปของการเสริมเหล็กตามข้อกำหนดมาตรฐานของ ACI หรือ ว.ส.ท.

2.2 น้ำหนักบรรทุก

ในการคำนวณออกแบบส่วนของโครงสร้างใดๆ ต้องพิจารณาออกแบบให้ส่วนของโครงสร้างนั้นมีความแข็งแรงทนทานเพียงพอสามารถรับน้ำหนักบรรทุกต่างๆ ได้อย่างปลอดภัยตลอดอายุของการใช้งาน น้ำหนักบรรทุกที่ต้องพิจารณาประกอบด้วยน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load) น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) ตลอดจนแรงกระทำ (ถ้ามี)

2.2.1 น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load) หมายถึง น้ำหนักบรรทุกที่มีตำแหน่งของการกระทำคงที่หรือถาวรตลอดเวลาและไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของน้ำหนัก เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก ดังนั้นจึงมีแนวแรงกระทำอยู่ในแนวดิ่งหรือแนวตั้งเสมอ น้ำหนักบรรทุกแบบนี้ได้แก่ น้ำหนักของส่วนโครงสร้างเองที่ประกอบรวมกันเป็นโครงอาคารประเภทต่างๆ เช่น น้ำหนักของแผ่นพื้น วัสดุปูพื้น ส่วนที่แขวนห้อย ผนัง คาน เสา ฯลฯ ซึ่งขึ้นกับขนาดและชนิดของวัสดุที่ผู้ออกแบบกำหนดขึ้นหรือเลือกใช้ ค่าโดยประมาณของน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งานที่ใช้ในการคำนวณออกแบบทั่วไป ได้แก่

คอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา	1600-2400	กก. ต่อ ลูกบาศก์เมตร
เหล็ก	7850	กก. ต่อ ลูกบาศก์เมตร
ไม้	480	กก. ต่อ ลูกบาศก์เมตร
อิฐ	1900	กก. ต่อ ลูกบาศก์เมตร
วัสดุถมหลังคา	5-18	กก. ต่อ ตารางเมตร
แป้ไม้	5	กก. ต่อ ตารางเมตร
โครงหลังคาไม้	10-20	กก. ต่อ ตารางเมตร
ฝ้าเพดาน	14-26	กก. ต่อ ตารางเมตร
กำแพงอิฐมวลเบา	180-350	กก. ต่อ ตารางเมตร
กำแพงอิฐบล็อก	100-200	กก. ต่อ ตารางเมตร
กำแพงคอนกรีตบล็อก	100-240	กก. ต่อ ตารางเมตร
ฝ้าไม้ ไม้อัด รวมเคร่า	12-30	กก. ต่อ ตารางเมตร
พื้นไม้ รวมตง	30	กก. ต่อ ตารางเมตร

ปกติจะสมมติให้น้ำหนักบรรทุกคงที่เป็นน้ำหนักแผ่สม่ำเสมอกระทำบนส่วนโครงสร้าง ซึ่งอาจมีหน่วยเป็น กก. ต่อ ตารางเมตร สำหรับการคำนวณออกแบบแผ่นพื้น หรือ มีหน่วยเป็น กก. ต่อ เมตร สำหรับการคำนวณออกแบบคาน

2.2.2 น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) หมายถึง น้ำหนักบรรทุกที่กระทำชั่วคราวและอาจเปลี่ยนแปลงขนาดของน้ำหนักได้ ประกอบด้วยน้ำหนักบรรทุกที่กระทำในแนวดิ่ง และน้ำหนักบรรทุกจรที่กระทำทางด้านข้างของอาคาร

น้ำหนักบรรทุกจรที่กระทำในแนวดิ่ง ได้แก่ น้ำหนักของผู้ใช้อาคาร น้ำหนักของเครื่องเรือน เครื่องจักร หรือสิ่งของและสินค้าต่างๆ เช่น หนังสือ อุปกรณ์สำนักงาน วัสดุก่อสร้าง ฯลฯ นอกจากนี้ยังรวมถึง น้ำหนักของรถยนต์นั่ง รถยนต์บรรทุก รถไฟ ซึ่งเป็นน้ำหนักบรรทุกจรที่เคลื่อนที่ได้และทำให้เกิดการกระแทก

น้ำหนักบรรทุกจรที่กระทำทางด้านข้างของอาคาร ได้แก่ แรงลม แรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว แรงดันของดินหรือของไหล เป็นต้น

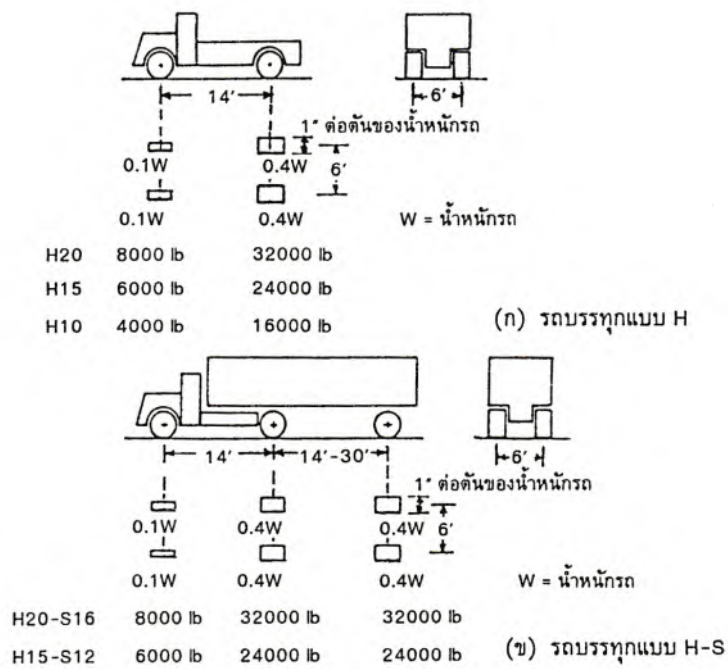
ในแต่ละประเทศจะให้ข้อบัญญัติเกี่ยวกับน้ำหนักบรรทุกจรขั้นต่ำที่ต้องพิจารณาใช้สำหรับการคำนวณออกแบบโดยขึ้นกับประเภทและการใช้สอยของอาคารนั้น สำหรับการคำนวณออกแบบใน

กรุงเทพมหานคร กรุงเทพมหานครได้ออกข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2522 โดยกำหนดน้ำหนักบรรทุกจรสำหรับใช้คำนวณออกแบบโครงสร้างประเภทต่างๆ ซึ่งต้องมีค่าไม่น้อยกว่าอัตราที่กำหนดต่อไปนี้ เช่น

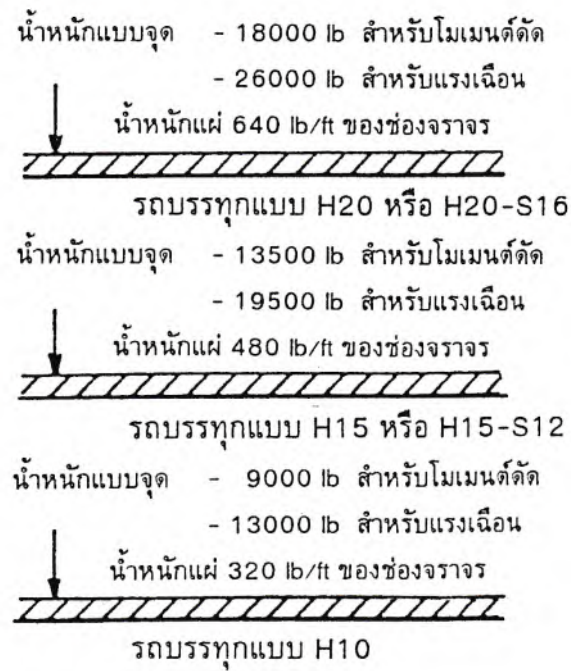
หลังคา	50	กก. ต่อ ตารางเมตร
กันสาด หรือ หลังคาคอนกรีต	100	กก. ต่อ ตารางเมตร
ที่พักอาศัย โรงเรียนอนุบาล ห้องน้ำ ห้องส้วม	150	กก. ต่อ ตารางเมตร
อาคารชุด หอพัก โรงแรม	200	กก. ต่อ ตารางเมตร
สำนักงาน ธนาคาร	250	กก. ต่อ ตารางเมตร
อาคารพาณิชย์ มหาวิทยาลัย วิทยาลัย โรงเรียน	300	กก. ต่อ ตารางเมตร
ห้องโถง บันได ทางเดินของอาคารชุด หอพัก โรงแรม		
โรงพยาบาล สำนักงาน และธนาคาร	300	กก. ต่อ ตารางเมตร
ห้างสรรพสินค้า โรงมหรสพ หอประชุม ภัตตาคาร		
ที่จอดรถหรือเก็บรถยนต์นั่ง	400	กก. ต่อ ตารางเมตร
ห้องโถง บันได ทางเดินของอาคารพาณิชย์		
มหาวิทยาลัย วิทยาลัย และโรงเรียน	400	กก. ต่อ ตารางเมตร
คลังสินค้า พิพิธภัณฑ์ อิมจันทร์ โรงงานอุตสาหกรรม		
โรงพิมพ์ ห้องเก็บเอกสารและพัสดุ	500	กก. ต่อ ตารางเมตร
ห้องโถง บันได ทางเดินของห้างสรรพสินค้า โรงมหรสพ		
หอประชุม ภัตตาคาร และหอสมุด	500	กก. ต่อ ตารางเมตร
ห้องเก็บหนังสือของหอสมุด	600	กก. ต่อ ตารางเมตร
ที่จอดรถหรือเก็บรถยนต์บรรทุกเปล่าและรถอื่น	800	กก. ต่อ ตารางเมตร
แรงลมสำหรับส่วนของอาคาร		
- ที่สูงไม่เกิน 10 เมตร	50	กก. ต่อ ตารางเมตร
- ที่สูงกว่า 10 เมตร แต่ไม่เกิน 20 เมตร	80	กก. ต่อ ตารางเมตร
- ที่สูงกว่า 20 เมตร แต่ไม่เกิน 40 เมตร	120	กก. ต่อ ตารางเมตร
- ที่สูงกว่า 40 เมตร	160	กก. ต่อ ตารางเมตร

มาตรฐานทางหลวงของอเมริกา กำหนดน้ำหนักของรถบรรทุกเพื่อใช้ออกแบบถนน หรือ สะพาน โดยแบ่งน้ำหนักของรถบรรทุกออกเป็นสองพวก คือ รถบรรทุกคันเดียวที่เรียกว่าแบบ H และ รถบรรทุกแบบพ่วงที่เรียกว่าแบบ HS ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงน้ำหนักที่กระทำลงล้อหน้าและล้อหลัง ช่วงกว้าง ช่วงยาวระหว่างล้อรถบรรทุกทั้งสองแบบ

อย่างไรก็ตาม ในการวิเคราะห์เพื่อหาโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่ส่วนโครงสร้างนั้นต้องรับหรือ ต้านทาน จะพิจารณาแปลงน้ำหนักของรถบรรทุกแต่ละแบบให้เป็นน้ำหนักแบบแผ่รวมกับน้ำหนักแบบ จุดที่จะทำให้เกิดโมเมนต์ดัดหรือแรงเฉือนสูงสุด ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1



รูปที่ 2.2

2.2.3 น้ำหนักบรรทุกทุกระแทก เกิดจากน้ำหนักบรรทุกจรแบบเคลื่อนที่ได้ที่กระแทกหรือกระทำต่อส่วนโครงสร้างอย่างทันทีทันใด เช่น เมื่อรถยนต์แล่นขึ้นบนคอสสะพาน เป็นต้น ดังนั้น ในการพิจารณาออกแบบส่วนโครงสร้าง ให้เพิ่มค่าน้ำหนักบรรทุกจรถ้นอีกตามจำนวนเปอร์เซ็นต์ที่กำหนด เช่น

$$I = \frac{50}{L+125} \times 100\% \text{ แต่ไม่เกิน } 30\%$$

ในเมื่อ I = เศษส่วนของน้ำหนักบรรทุกจร เป็น เปอร์เซ็นต์

L = ช่วงความยาวของสะพาน เป็น ฟุต

2.2.4 การลดน้ำหนักบรรทุก

ในการคำนวณหาน้ำหนักที่ถ่ายลงเสาหรือฐานรากของอาคาร อาจพิจารณาลดส่วนของน้ำหนักบรรทุกจรได้บ้างตามจำนวนชั้นของอาคาร หรือในกรณีที่มีเนื้อที่ใช้สอยกว้างมาก เนื่องจากโอกาสที่จะมีน้ำหนักบรรทุกจรกระทำเต็มเนื้อที่จะน้อยลง อย่างไรก็ตาม ในการคำนวณออกแบบในชั้นต่างๆจะไม่คิดลดน้ำหนักบรรทุกจร

ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2522 กำหนดว่าในการคำนวณน้ำหนักที่ถ่ายลงเสาหรือฐานราก ให้ใช้น้ำหนักบรรทุกคงที่ของโครงสร้างเต็มอัตรา แต่ยอมให้พิจารณาลดส่วนของน้ำหนักบรรทุกจรบนพื้นแต่ละชั้นลงตามชั้นของอาคารที่ถัดจากหลังคาหรือดาดฟ้า ดังนี้

หลังคาหรือดาดฟ้า	ลดได้ร้อยละ	0
ชั้นที่หนึ่งถัดจากหลังคาหรือดาดฟ้า	ลดได้ร้อยละ	0
ชั้นที่สองถัดจากหลังคาหรือดาดฟ้า	ลดได้ร้อยละ	0
ชั้นที่สามถัดจากหลังคาหรือดาดฟ้า	ลดได้ร้อยละ	10
ชั้นที่สี่ถัดจากหลังคาหรือดาดฟ้า	ลดได้ร้อยละ	20
ชั้นที่ห้าถัดจากหลังคาหรือดาดฟ้า	ลดได้ร้อยละ	30
ชั้นที่หกถัดจากหลังคาหรือดาดฟ้า	ลดได้ร้อยละ	40
ชั้นที่เจ็ดถัดจากหลังคาหรือดาดฟ้า และชั้นต่อไป	ลดได้ร้อยละ	50

แต่สำหรับโรงมหรสพ หอประชุม หอสมุด พิพิธภัณฑ์ อิมจินทร์ คลังสินค้า โรงงานอุตสาหกรรม อาคารจอดรถยนต์หรือเก็บรถยนต์ ให้คือน้ำหนักบรรทุกจรเต็มอัตราทุกชั้น

2.3 วิธีการวิเคราะห์โครงสร้าง

การวิเคราะห์โครงสร้างจัดเป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญของการคำนวณออกแบบโครงสร้าง เพราะผลการวิเคราะห์ที่ไม่ถูกต้องจะเป็นสาเหตุให้การออกแบบผิดพลาดซึ่งนับว่าเป็นอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สินอย่างยิ่ง สิ่งสำคัญที่สุดก่อนทำการวิเคราะห์คือ ต้องพิจารณาน้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนส่วนโครงสร้างให้ถูกต้องซึ่งได้จากการรับและถ่ายทอดน้ำหนักบรรทุกระหว่างส่วนของโครงสร้าง และต้องไม่ลืมรวมน้ำหนักของส่วนโครงสร้างเองด้วย ซึ่งในกรณีที่ยังไม่ทราบขนาดที่แท้จริงของส่วนโครงสร้างนั้นให้พิจารณาสมมุติขึ้นมาก่อนโดยอาจอาศัยข้อเสนอแนะจากมาตรฐานกำหนดหรือจากการวิเคราะห์

โดยประมาณหรือจากประสบการณ์ นอกจากนี้ต้องพิจารณาหาตำแหน่งและลักษณะของที่รองรับเพื่อให้ส่วนโครงสร้างมีความมั่นคง (stability) ในการรับและถ่ายทอดน้ำหนักบรรทุกต่อไปได้ เมื่อทำการวิเคราะห์และออกแบบแล้วให้ตรวจสอบขนาดของส่วนโครงสร้างที่สมมุติขึ้นว่าใช้ได้หรือไม่ อนึ่ง ในการวิเคราะห์โครงสร้าง คสล. ให้พิจารณาใช้ความยาวช่วงดังนี้

ก) ความยาวช่วงสำหรับส่วนของโครงสร้างที่มีได้หล่อเป็นเนื้อเดียวกันกับที่รองรับ ให้ใช้เท่ากับระยะช่วงว่างบวกกับความลึกของส่วนโครงสร้างที่พิจารณา แต่ทั้งนี้ต้องไม่ยาวกว่าระยะศูนย์ถึงศูนย์ของที่รองรับ

ข) ความยาวช่วงสำหรับคำนวณส่วนโครงสร้างที่มีความต่อเนื่อง ให้ใช้เท่ากับระยะศูนย์ถึงศูนย์ของที่รองรับ แต่ในการคำนวณออกแบบคานอาจใช้ค่าโมเมนต์ดัดที่ขอบของที่รองรับ

ค) ความยาวช่วงสำหรับแผ่นพื้นตันเรียบ หรือแผ่นพื้นตงถี่ ที่ต่อเนื่อง ซึ่งมีระยะช่วงว่างไม่เกิน 3.00 เมตรและหล่อเป็นเนื้อเดียวกันกับที่รองรับ ให้ใช้เท่ากับระยะช่องว่างของแผ่นพื้นนั้นโดยไม่จำเป็นต้องคิดความกว้างของคาน (นั่นคือ ให้คานรองรับเสมือนเป็นแบบคม่มีด)

2.3.1 การรับและถ่ายทอดน้ำหนักบรรทุก

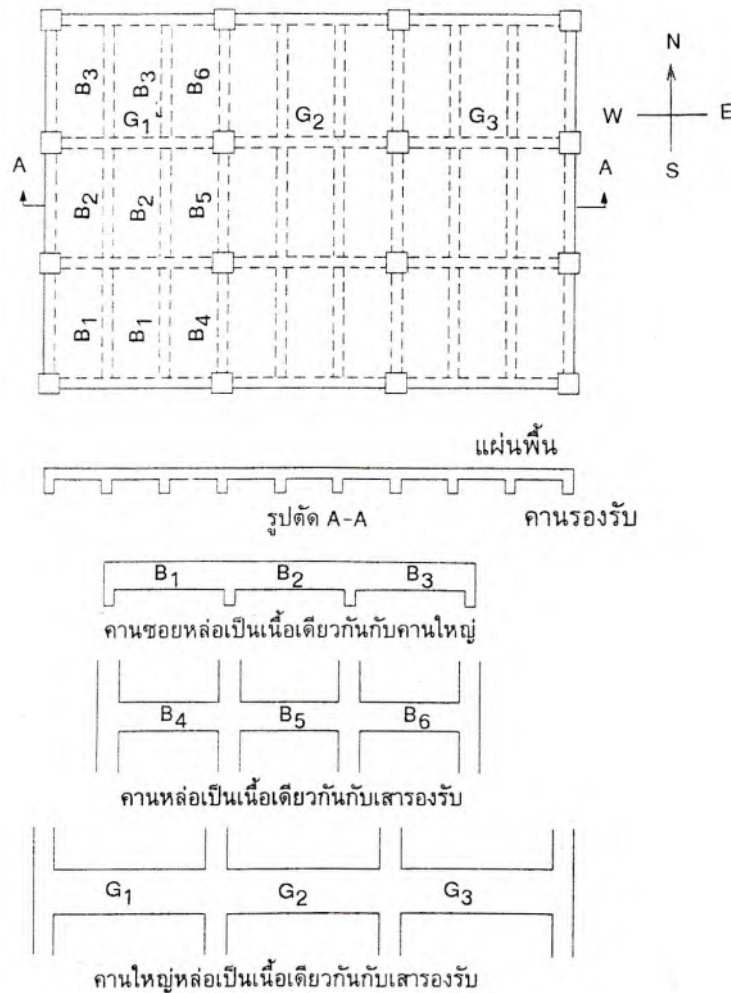
การรับและถ่ายทอดน้ำหนักบรรทุกขึ้นอยู่กับการจัดระบบของโครงสร้าง ถ้าระบบโครงสร้างประกอบด้วยคาน-เสา ที่รองรับแผ่นพื้นที่หล่อในที่ ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นรูปแปลนหรือผังพื้น คาน-เสาของอาคารชั้นหนึ่ง จะเห็นว่า แผ่นพื้นถูกรับด้วยคานทั้งสี่ด้าน ดังนั้นน้ำหนักบรรทุกที่แผ่นพื้นต้องรับจะถ่ายให้กับคานที่รองรับก่อน และคานที่รองรับนี้จะถ่ายน้ำหนักต่อไปให้กับที่รองรับตัวอื่นจนกระทั่งน้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ ลงสู่เสาที่รองรับ

ถ้าแผ่นพื้นมีด้านยาวยาวกว่าสองเท่าของด้านสั้น จะพิจารณาออกแบบให้เป็นแผ่นพื้นที่เสริมเหล็กทางเดียว (one-way slabs) โดยเรียงเหล็กเสริมให้ขนานกับด้านสั้นของแผ่นพื้น นั่นคือเรียงเหล็กเสริมไปตามแนวยาวในทิศทาง E-W หรือตามรูปตัด A-A ที่แสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งสังเกตว่าแผ่นพื้นนี้มีลักษณะต่อเนื่องโดยมีคานขอยเป็นที่รองรับสองด้าน แต่ถ้าแผ่นพื้นมีด้านยาวไม่เกินสองเท่าของด้านสั้น จะพิจารณาออกแบบให้เป็นแผ่นพื้นที่ต้องเสริมเหล็กสองทาง (two-way slabs) โดยมีคานรองรับทั้งสี่ด้าน น้ำหนักบรรทุกทุกแผ่นที่กระทำรวมกับน้ำหนักของแผ่นพื้นจะถ่ายให้กับคานรองรับทั้งสี่ด้านนั้นซึ่งขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างด้านสั้นต่อด้านยาวของแผ่นพื้น (ดูบทที่ 6)

การคำนวณออกแบบแผ่นพื้นทางเดียว ดังรูปตัด A-A จะพิจารณาว่า แผ่นพื้นเป็นคานต่อเนื่อง โดยมีความกว้างเท่ากับ 1 เมตร และรับน้ำหนักบรรทุกที่ประกอบด้วยน้ำหนักบรรทุกจรและน้ำหนักของแผ่นพื้นเอง หน่วยเป็น กก./ตารางเมตร ซึ่งเมื่อคูณด้วยความกว้างของพื้น 1 เมตร จะได้น้ำหนักแผ่ตามความยาวในทิศ E-W เป็น กก./เมตร แล้วจึงทำการวิเคราะห์หาแรงภายในต่างๆ รวมถึงแรงปฏิกิริยาที่กระทำต่อคานขอยที่รองรับ

ส่วนการออกแบบคานขอยที่รองรับ เช่น คานขอย B₁ B₂ และ B₃ ซึ่งต้องรับน้ำหนักบรรทุกที่ถ่ายมาจากแผ่นพื้นในแต่ละซีกของคานขอย รวมถึงน้ำหนักของคานขอยเอง และน้ำหนักแผ่จากผนังกำแพง (ถ้ามี) ให้คิดเป็นน้ำหนักแผ่ กก./เมตร ตามแนวยาวของคาน โดยมีคานหลัก (girder) เช่น G₁ เป็นที่รองรับ สังเกตว่า ต้องออกแบบคานขอย B₁ B₂ และ B₃ ให้เป็นคานต่อเนื่อง ดังรูป เพราะหล่อเป็น

เนื้อเดียวกันกับคานใหญ่ที่รองรับ แต่สำหรับคานชอย B₄ B₅ และ B₆ ซึ่งถ่ายน้ำหนักให้กับเสาโดยตรง จะเป็นคานต่อเนื่องเช่นกันแต่สังเกตว่าคานดังกล่าวหล่อเป็นเนื้อเดียวกันกับเสาคานและเสาสูงที่รองรับ คานนั้น ดังนั้น จึงควรพิจารณาออกแบบเป็นแบบโครงเฟรม (rigid frame) โดยให้ปลายเสาที่อยู่ในด้านตรงข้ามมีสภาพเป็นแบบยึดแน่น (fixed end) คล้ายกับที่แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.3

แรงปฏิกิริยาที่จตุรรองรับของคานชอย B₁ B₂ และ B₃ จะพิจารณาถ่ายไปให้คานใหญ่ที่รองรับต่อไป โดยอาจคิดเป็นน้ำหนักแบบจุดหรือเฉลี่ยเป็นน้ำหนักแผ่ที่กระทำบนคานใหญ่ และเมื่อรวมกับน้ำหนักของคานใหญ่เองตลอดจนน้ำหนักแผ่จากผนังกำแพง (ถ้ามี) จะเป็นน้ำหนักทั้งหมดที่คานใหญ่ต้องรับหรือต้านทาน ซึ่งคานใหญ่ G₁ G₂ และ G₃ นี้จะเป็นคานต่อเนื่องที่ถ่ายน้ำหนักต่อไปยังเสาที่รองรับ และอาจพิจารณาออกแบบเป็นแบบโครงเฟรมเช่นเดียวกับการออกแบบคานชอย

อนึ่งสังเกตว่าคานขอบในทิศ N-S หรือ E-W ที่รองรับคานชอย B₁ หรือ B₃ ควรมีสติฟเนสมากพอ เพราะนอกจากจะต้องรับแรงปฏิกิริยาที่กระทำแล้วยังต้องรับแรงบิดจากการยึดรั้งระหว่างแผ่นพื้นกับ

คานขบหรือระหว่างคานขบกับคานขบที่รองรับด้วย ทำนองเดียวกัน เสาที่รองรับจะต้องรับโมเมนต์ ตัดด้วยนอกเหนือจากแรงหรือน้ำหนักที่กระทำตามแนวกั้นโดยเฉพาะที่เสาดันริมหรือเสามุม

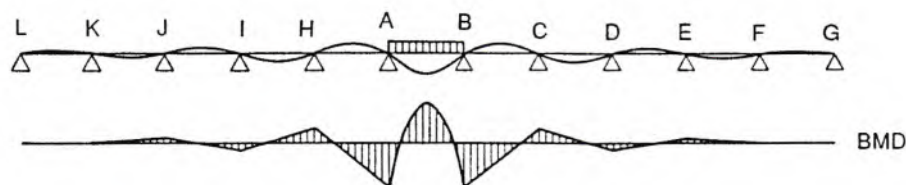
2.3.2 วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างอย่างละเอียด

วิธีวิเคราะห์โครงสร้าง คสล. เพื่อหาแรงปฏิกิริยา แรงเฉือน แรงตามแนวกั้น แรงบิดและ โมเมนต์ดัดสูงสุด เพื่อนำไปคำนวณออกแบบหาขนาดรูปตัดและเหล็กเสริมโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (Working Stress Design) หรือวิธีกำลัง (Strength Design) ให้ใช้ทฤษฎีอิลาสติกตามที่กล่าวในหนังสือ ทฤษฎีโครงสร้างหรือการวิเคราะห์โครงสร้าง โดยผู้เขียน

สำหรับการวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีอิลาสติก ถ้าส่วนโครงสร้างที่พิจารณาเป็นแบบดีเทอร์มิเนต (statically determinate structures) เช่น คานช่วงเดียว หรือ คานยื่น จะสามารถวิเคราะห์หาแรงภายใน ต่างๆ ได้ทันทีโดยอาศัยสมการของการสมดุลเพียงอย่างเดียว ($\sum F_x = 0$, $\sum F_y = 0$ และ $\sum M = 0$) อย่างไรก็ตาม จะพบว่าโครงสร้าง คสล. ส่วนใหญ่ (ดังรูปที่ 2.3) เป็นแบบอินดีเทอร์มิเนต (statically indeterminate structures) ซึ่งต้องวิเคราะห์หาแรงภายในต่างๆ โดยอาศัยวิธีการกระจายโมเมนต์ (Moment Distribution Method) หรือใช้สมการของมุมและการโก่งตัว (Slope-Deflection Equation) หรือใช้วิธีเมตริกซ์ ซึ่งเป็นวิธีวิเคราะห์โครงสร้างที่ให้ผลลัพธ์อย่างละเอียดแท้จริง (exact analysis)

การจัดวางน้ำหนักบรรทุกจร :

ในการวิเคราะห์โครงสร้างอย่างละเอียด ต้องพิจารณาจัดวางน้ำหนักบรรทุกจรนอกเหนือจาก น้ำหนักบรรทุกคงที่ที่กระทำบนส่วนโครงสร้างเพื่อให้ได้ค่าสูงสุดของโมเมนต์ดัดชนิดบวกที่บริเวณกลาง ช่วงและโมเมนต์ดัดชนิดลบที่ตรงจุดต่อ รวมถึงค่าสูงสุดของแรงเฉือน สำหรับใช้ออกแบบส่วนโครงสร้าง นั้น แนวทางในการจัดวางน้ำหนักบรรทุกจรสามารถพิจารณาได้จากเส้น Influence Line ของโมเมนต์ หรือการโก่งตัว ดังนี้

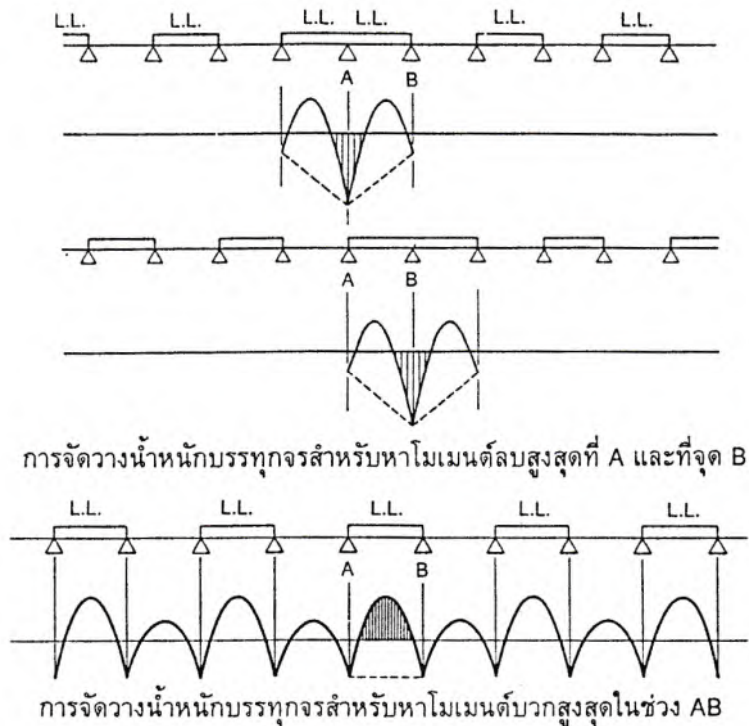


รูปที่ 2.4 ผลของโมเมนต์ดัดในคานต่อเนื่องที่รับน้ำหนักบรรทุกเพียงช่วงเดียว

พิจารณาคานต่อเนื่องที่แสดงในรูปที่ 2.4 ถ้ามีน้ำหนักบรรทุกจรแบบแผ่นกระทำบนช่วง AB จะเห็นว่าคานช่วง AB จะโก่งตัวลงซึ่งส่งผลกระทบให้เกิดการโก่งตัวขึ้นและโก่งตัวลงในช่วงคานถัดมาทั้งสองด้านของจุด A และจุด B ทำนองเดียวกันโมเมนต์ดัดในช่วงคาน AB ก็ส่งผลกระทบให้เกิดการกระจายโมเมนต์ดัดออกไปทั้งสองด้านของจุด A และจุด B โดยมีทั้งโมเมนต์ลบและโมเมนต์บวกสลับกันไปมาอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกจรแบบแผ่นไปกระทำบนช่วง CD หรือ IH เพิ่มอีกก็จะมีผลให้โมเมนต์บวกในช่วงคาน AB มีค่าเพิ่มมากขึ้น ฉะนั้น จึงสรุปการจัดน้ำหนักบรรทุกจรได้ดังนี้

ก) ตรงจุดต่อใดที่ต้องการหาค่าโมเมนต์ลบสูงสุด ให้จัดวางน้ำหนักบรรทุกจรให้เต็มช่วงในสองช่วงที่ข้างเคียงกันตรงจุดต่อนั้น และให้มีน้ำหนักบรรทุกจรเต็มช่วงเว้นช่วงถัดมา นั่นคือช่วงใดมีน้ำหนักบรรทุกจรกระทำแล้วให้เว้นไปช่วงหนึ่งและในช่วงถัดไปให้มีน้ำหนักบรรทุกจรกระทำเต็มช่วงอีกทีหนึ่ง สลับกันไปมาตลอดความยาวของส่วนโครงสร้างนั้น

ข) ที่กลางช่วงใดที่ต้องการหาค่าโมเมนต์บวกสูงสุด ให้จัดวางน้ำหนักบรรทุกจรให้เต็มช่วงนั้น และเมื่อเว้นไปช่วงหนึ่งก็ให้มีน้ำหนักบรรทุกจรกระทำเต็มช่วงอีกสลับกันไปมาตลอดความยาวของส่วนโครงสร้างนั้น



รูปที่ 2.5 ลักษณะการจัดวางน้ำหนักบรรทุกจร

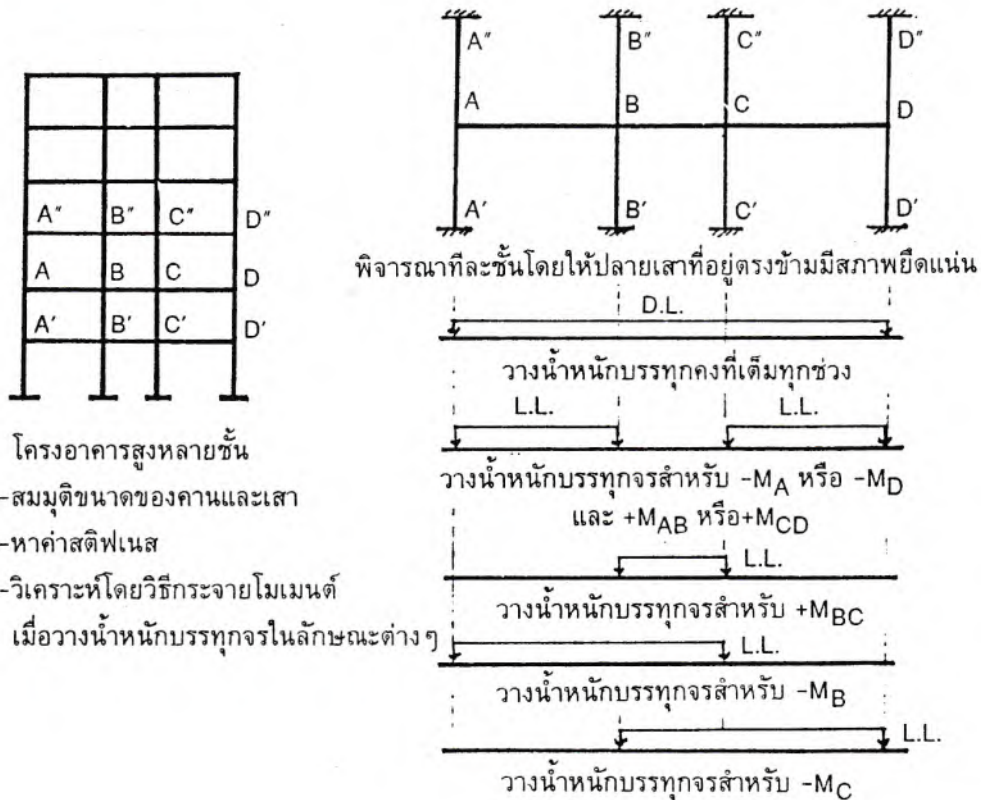
การวิเคราะห์โครงเฟรมที่รับแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก :

สำหรับโครงเฟรมที่ต้องพิจารณาให้รับแรงกระทำจากแรงโน้มถ่วงของโลก (gravity loads) มาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท. ยอมให้แบ่งโครงเฟรมทั้งหมดออกเป็นโครงย่อย (subframe) ของแต่ละชั้น ซึ่งโครงย่อยจะประกอบด้วยแถวของคานต่อเนื่องหนึ่งแถวและเสาบน-ล่างตรงจุดต่อของคาน และให้ปลายเสาต้านไกลที่อยู่ตรงข้ามกับปลายที่ติดกับชั้นนั้นมีสภาพเป็นแบบยึดแน่น แต่อย่างไรก็ดีที่ปลายเสาชั้นล่างของโครงอาคารอาจเป็นแบบรองรับธรรมดา (hinge) ถ้าฐานรากมีความต้านทานต่อการหมุนน้อย (flexible) ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดฐานรากและชนิดของดินที่รองรับ หากใช้ฐานรากแบบวางบนเสาเข็ม และหล่อหัวเข็มอยู่ในฐานรากก็พิจารณาให้ปลายเสาเป็นแบบยึดแน่นได้ ดังนั้น ในการวิเคราะห์โครงเฟรมที่รับแรงกระทำในแนวดิ่งจะพิจารณาไปที่ละชั้นตั้งแต่พื้นชั้นดาดฟ้าหรือหลังคาไปโดยให้มี

น้ำหนักบรรทุกคงที่กระทำเต็มทุกช่วงในชั้นนั้นและจัดวางน้ำหนักบรรทุกจรดังที่กล่าวข้างต้นเพื่อให้ได้ค่าสูงสุดของโมเมนต์ดัดชันบิดบวกและลบ และทำการวิเคราะห์โดยทฤษฎีอิลาสติกซึ่งจะถือว่าโครงเฟรมไม่มีการเซ (no sidesway) โดยให้ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาที่รองรับเป็นความยาวช่วง หนึ่ง ในกรณีที่อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักบรรทุกจรใช้งานต่อน้ำหนักบรรทุกคงที่ใช้งานมีค่าไม่เกิน $3/4$ อาจพิจารณารวมน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักจรและให้กระทำเต็มทุกช่วงสำหรับการวิเคราะห์หาค่าสูงสุดของโมเมนต์ดัดชันบิดบวกและลบก็ได้

สำหรับค่าของโมเมนต์อินเนอร์เซียของคานและเสาที่ต้องใช้ในการหาค่าสติฟเนสแฟกเตอร์ (EI/L) เพื่อนำไปวิเคราะห์อย่างละเอียด ให้พิจารณารวมผลของคอนกรีตราวและการเสริมเหล็กในคานดังต่อไปนี้

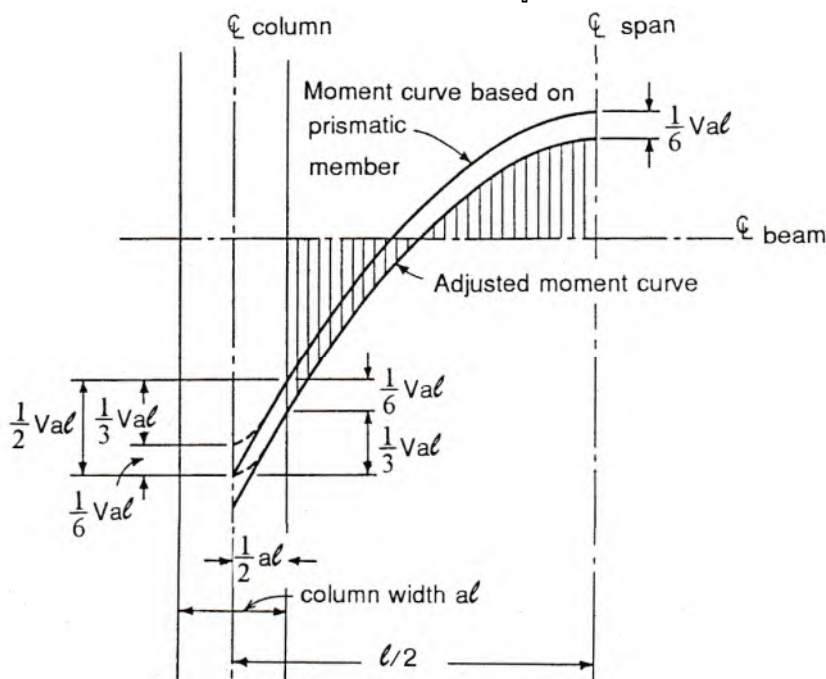
- โมเมนต์อินเนอร์เซียของเสาให้พิจารณาจากเนื้อที่หน้าตัดคอนกรีตทั้งหมดของเสานั้น
- โมเมนต์อินเนอร์เซียของคานรูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าให้ใช้ค่าครึ่งหนึ่งของค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียที่พิจารณาจากเนื้อที่หน้าตัดคอนกรีตทั้งหมดของคานนั้น
- โมเมนต์อินเนอร์เซียของคานรูปตัดแบบตัวทีให้ใช้ค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียที่พิจารณาจากเนื้อที่หน้าตัด $b_w h$ ในเมื่อ b_w เป็นความกว้างของตัวคาน และ h เป็นความลึกทั้งหมดของคาน



รูปที่ 2.6 การวิเคราะห์โครงเฟรมเมื่อรับแรงโน้มถ่วงของโลก (DL+LL)

โมเมนต์ดัดสำหรับใช้ออกแบบคาน :

การวิเคราะห์โครงเฟรมข้างต้นพิจารณาโดยใช้ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาที่รองรับเป็นความยาวของช่วงคาน และพิจารณาให้คานมีสติฟเนส EI คงที่ ดังนั้นค่าโมเมนต์ดัดที่วิเคราะห์ได้จึงเป็นโมเมนต์ดัดที่ศูนย์กลาง เสา อย่างไรก็ตามในการคำนวณออกแบบคานจะพิจารณาใช้ค่าโมเมนต์ดัดที่ขอบเสา ซึ่งถ้าศูนย์กลางเสาที่รองรับมีลักษณะคล้ายคมมีด (knife edge supports) จะเห็นว่าค่าโมเมนต์ดัดที่ขอบเสาควรมีค่าน้อยกว่าค่าโมเมนต์ดัดที่ศูนย์กลางเสาที่รองรับอยู่เท่ากับ $Val/2$ ในเมื่อ ความกว้างของหน้าเสา $c = al$ และแรงเฉือน $V = wl/2$ แต่เนื่องจากเสามีความกว้างทำให้ที่รองรับจริงมิได้เป็นแบบคมมีด จึงทำให้การกระจายของแรงเฉือนระหว่างศูนย์กลางเสาถึงหน้าเสาเป็นไปตามแนวเส้นประดังที่แสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งทำให้โมเมนต์ดัดที่ขอบเสามีค่าน้อยกว่าที่ศูนย์กลางเสาประมาณ $Val/3$ (สำหรับความกว้างของเสา c ไม่เกิน 15-20% ของความยาวของช่วงคาน) โดยการกระจายของโมเมนต์ที่ใกล้กับศูนย์กลางเสาจะเป็นไปตามแนวเส้นประดังที่แสดงซึ่งจะเห็นว่าค่าโมเมนต์ดัดที่วิเคราะห์ได้ตรงศูนย์กลางเสาจะมีค่าลดลงเท่ากับ $Val/6$



รูปที่ 2.7 การปรับลดค่าโมเมนต์ลบและโมเมนต์บวกในคานของโครงเฟรม

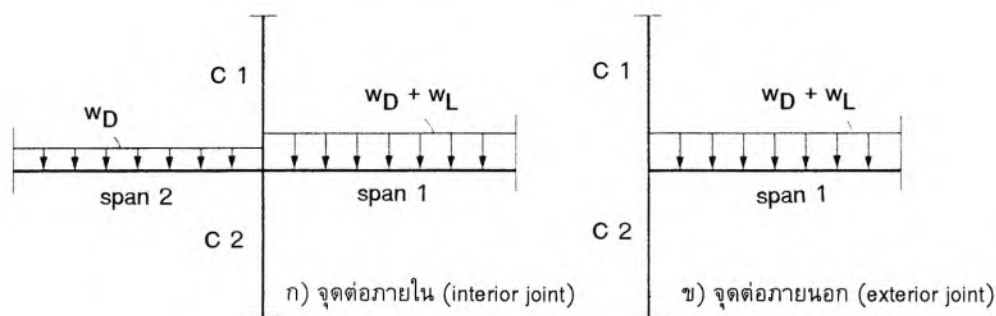
อย่างไรก็ตาม ยังมีผลกระทบเนื่องจากค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียของคานในส่วนที่อยู่ภายในเสาอีกด้วย กล่าวคือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของคานในส่วนนี้จะมีค่ามากกว่าส่วนของคานที่อยู่ระหว่างเสา เนื่องจากคานที่อยู่ในเสามีความลึกมากกว่านั่นเอง ผลก็คือทำให้โมเมนต์ลบมีค่าเพิ่มขึ้นและโมเมนต์บวกมีค่าลดลงซึ่งค่าที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงมีค่าเท่ากับ $Val/6$ ดังนั้น เมื่อรวมผลกระทบของขนาดเสาและขนาดของคานดังกล่าวจะได้ค่าโมเมนต์ลบที่ขอบเสาที่ต้องการเพื่อใช้คำนวณออกแบบจะมีค่าน้อยกว่าค่าโมเมนต์ที่ศูนย์กลางเสาที่วิเคราะห์ได้ประมาณ $Val/3$ หรือ $wl^2a/6$ เท่านั้น ในเมื่อ w เป็นน้ำหนักบรรทุกแบบแผ่นคาน

ทำนองเดียวกันโมเมนต์บวกที่ต้องการเพื่อใช้คำนวณออกแบบจะมีค่าน้อยกว่าค่าโมเมนต์บวกที่กึ่งกลางคานที่วิเคราะห์หามาได้เท่ากับ $Va/6$ หรือ $wL^2a/12$ (แต่โดยปกติมักจะไม่นับลดค่าของโมเมนต์บวก)

สำหรับคานต่อเนื่องที่รองรับด้วยคานใหญ่ซึ่งมีความลึกเท่าๆกัน ให้พิจารณาออกแบบเหล็กเสริมรับโมเมนต์ลบโดยใช้ค่าโมเมนต์ลบตรงศูนย์กลางของคานใหญ่ นั่นคือไม่ต้องปรับลดค่าโมเมนต์ลบจากที่วิเคราะห์ได้

โมเมนต์ดัดในเสา :

มาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท. กำหนดให้ออกแบบเสาให้สามารถรับแรงตามแกนที่ถ่ายมาจากพื้นชั้นบนทั้งหมดรวมกับโมเมนต์สูงสุดที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกทุกในช่วงที่ติดกับเสาเพียงช่วงเดียวในชั้นที่พิจารณา นอกจากนี้ต้องจัดน้ำหนักบรรทุกให้เกิดอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ต่อแรงตามแกนให้มีค่าสูงสุดและให้พิจารณาน้ำหนักบรรทุกของพื้นที่ไม่สมดุลที่มีผลต่อเสาดันริมและเสาดันใน รวมถึงผลของน้ำหนักเยื้องศูนย์กลางที่เกิดจากเหตุอื่นๆ สำหรับการหาโมเมนต์ดัดในเสาเนื่องจากน้ำหนักในแนวตั้งให้พิจารณาปลายเสาด้านไกลที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกันมีสภาพเป็นแบบยึดแน่น



รูปที่ 2.8

การวิเคราะห์โครงเฟรมที่รับแรงกระทำทางข้าง :

สำหรับโครงอาคารที่ต้องรับแรงกระทำด้านข้างที่ตรงจุดต่อให้ทำการวิเคราะห์อย่างละเอียดทีเดียวทั้งโครงโดยใช้ทฤษฎีอิลาสติกซึ่งอาจวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

2.3.3 วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีประมาณ

แม้ว่าวิธีการวิเคราะห์ข้างต้นจะให้ผลลัพธ์ที่ละเอียดแม่นยำก็จริงแต่ต้องเสียเวลาในการคำนวณ ดังนั้น มาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท. จึงอนุญาตให้ทำการวิเคราะห์โครงสร้าง คสล. โดยวิธีประมาณได้ (approximate analysis) สำหรับโครงอาคารแบบธรรมดาที่มีความยาวช่วงอย่างต่อเนื่องและความสูงของชั้นเป็นแบบทั่วไปภายใต้ข้อบ่งชี้หรือเงื่อนไขที่กำหนดซึ่งจะช่วยประหยัดเวลาและทำให้งานวิเคราะห์โครงสร้างง่ายขึ้นมาก นอกจากนี้ยังสามารถนำวิธีโดยประมาณไปใช้ตรวจสอบผลการวิเคราะห์จริงที่ได้จากเครื่องคอมพิวเตอร์เพราะบางครั้งอาจเกิดข้อผิดพลาดจากการป้อนข้อมูล อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์

โดยประมาณจะทำให้ได้ขนาดของส่วนโครงสร้างใหญ่กว่าที่ควร ฉะนั้น ถ้าสามารถวิเคราะห์อย่างละเอียด ได้ก็ควรหลีกเลี่ยงการใช้วิธีวิเคราะห์อย่างประมาณ

การวิเคราะห์คานหรือแผ่นพื้น คสล. เสริมเหล็กทางเดียวที่ต่อเนื่อง :

เพื่อให้การวิเคราะห์คานหรือแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทางเดียวที่ต่อเนื่องง่ายขึ้น มาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท. ให้พิจารณาหาค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนสูงสุดโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์ดัดและแรงเฉือน ดังรูปที่ 2.9 ภายใต้ข้อจำกัดต่อไปนี้คือ

โมเมนต์บวก -ปลายที่ไม่ต่อเนื่องไม่ยึดรั้งกับที่รองรับ..... -ปลายที่ไม่ต่อเนื่องหล่อเป็นเนื้อเดียวกันกับที่รองรับ....	ช่วงนอก $\frac{1}{11} w l_n^2$ ช่วงใน $\frac{1}{16} w l_n^2$
โมเมนต์ลบ ที่ขอบนอกของที่รองรับตัวในแรก : -เมื่อมีช่วงต่อเนื่อง 2 ช่วง -เมื่อมีช่วงต่อเนื่องมากกว่า 2 ช่วง ที่ขอบรองรับทุกแห่ง : สำหรับแผ่นพื้นที่มีช่วงยาวไม่เกิน 3.0 เมตร หรือ คานที่มี $\sum K_c / \sum K_b$ ที่มาบรรจบกันและมีค่า > 8 ที่ขอบในของที่รองรับตัวริมเมื่อหล่อขึ้นส่วนเป็นเนื้อเดียวกันกับที่รองรับ : -เมื่อที่รองรับเป็นคานขอบ (spandrel beam) -เมื่อที่รองรับเป็นเสา	 $\frac{1}{9} w l_n^2$ $\frac{1}{10} w l_n^2$ $\frac{1}{11} w l_n^2$ $\frac{1}{12} w l_n^2$ ที่ขอบรองรับทุกแห่ง $\frac{1}{24} w l_n^2$ $\frac{1}{16} w l_n^2$
แรงเฉือน -ที่ขอบของที่รองรับตัวในแรก -ที่ขอบของที่รองรับตัวอื่นๆ	$\frac{1.15}{2} w l_n$ $\frac{1}{2} w l_n$

รูปที่ 2.9 ค่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์และแรงเฉือนสำหรับคานต่อเนื่อง

1. ส่วนโครงสร้างมีหน้าตัดคงที่ตลอดความยาว (EI มีค่าคงที่)
2. มีช่วงต่อเนื่องตั้งแต่ 2 ช่วงขึ้นไป