

ขนาดของโครงสร้าง

อ. ปราโมทย์ ธาราศักดิ์

1. บทนำ

ผู้ที่จะเริ่มทำงานออกแบบหรือสถาปนิกทั่วไป มักจะประสบปัญหาทางโครงสร้างคล้าย ๆ กัน คือเรื่องขนาดที่เหมาะสมของโครงสร้าง เพราะจะเป็นองค์ประกอบอย่างหนึ่งที่ทำให้การออกแบบตะกุกตะกัก หาจุดที่ลงตัวลำบาก สถาปนิกที่ทำงานมีประสบการณ์มากหน่อยอาจจะมีปัญหาเรื่องนี้น้อย อย่างไรก็ตามหากจำเป็นต้องใช้โครงสร้างแบบแปลก ๆ พิเศษไปจากที่เคยใช้เป็นปกติ ก็จะประสบปัญหาเช่นเดียวกัน โครงสร้างที่ใช้กันมาก คือระบบโครงสร้างพื้น คาน และเสา ปัญหาที่วิศวกรถูกถามบ่อย ๆ คือขนาดและความลึกของคาน และขนาดความใหญ่โตของเสา คำตอบจากวิศวกรบางท่านก็บอกว่า ขอให้สถาปนิกกำหนดมาเลยว่าจะเอาเท่าไร วิศวกรทำให้ได้ทั้งนั้น ซึ่งคงจะเป็นคำตอบที่ถูกต้อส่วนหนึ่ง แต่ไม่ถูกต้องทั้งหมด เพราะทางออกที่ดีแล้ว ควรจะให้คำตอบซึ่งเมื่อนำไปปฏิบัติแล้ว จะได้โครงสร้างที่เหมาะสม ทั้งในแง่ตรงจุดประสงค์ของผู้ออกแบบ และในแง่ของราคาค่าก่อสร้าง ดังนั้นบทความนี้จะแนะนำทางเลือกและเกณฑ์ทั่วไปซึ่งอาจนำไปปฏิบัติในการเลือกขนาดของโครงสร้างโดยผู้เลือกจะต้องใช้วิจารณญาณของตนเองประกอบด้วย

2. องค์ประกอบที่มีผลต่อขนาดของโครงสร้าง

ขนาดของโครงสร้างอาจจะแตกต่างกันมาก ทั้ง ๆ ที่บางทีดู ๆ ด้วยตาแล้วไม่น่าจะผิดกัน ทั้งนี้เป็นเพราะองค์ประกอบต่าง ๆ ซึ่งองค์ประกอบตัวใหญ่ ๆ ก็สามารถใช้สามัญสำนึกพิจารณาเปรียบเทียบแนวโน้มของขนาดของโครงสร้างได้ องค์ประกอบต่าง ๆ มีดังต่อไปนี้

2.1 ช่วงการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้าง

ในกรณีของคาน ขนาดของคานจะแปรผันโดยตรงกับความยาวของช่วงคาน หรือพูดอย่างกว้าง ๆ ก็คือ ถ้าช่วงคานยิ่งเพิ่มขึ้นมากเท่าใด ขนาดของคานก็จะเพิ่มตามไปด้วย อัตราการเพิ่มขนาดของคานจะวิเคราะห์ได้จากสูตรทางวิเคราะห์โครงสร้าง ซึ่งจะไม่กล่าวถึงในที่นี้

ในกรณีของเสาก็เช่นเดียวกัน ความสูงของเสาจะทำให้กำลังความสามารถในการรับน้ำหนักลดลง ดังนั้นถ้าเปรียบเทียบเสาสองต้นที่ต้องรับน้ำหนักเท่ากัน เสาต้นที่มีความสูงมากกว่ามักจะมีความใหญ่กว่าเสาต้นที่มีความสูงน้อยกว่า

2.2 น้ำหนักบรรทุกจร

โครงสร้างเมื่อแบ่งตามลักษณะการใช้งาน จะรับน้ำหนักบรรทุกจรไม่เท่ากัน อัตราการรับน้ำหนักบรรทุกจรของโครงสร้างประเภทต่างจะระบุไว้ในข้อบัญญัติ (Code) ต่าง ๆ ซึ่งก็ยังคงมีความแตกต่างในตัวเองระหว่างพื้นที่แต่ละแห่ง ดังนั้นผู้ออกแบบควรจะมีความรู้เรื่องน้ำหนักบรรทุกจรเป็นความรู้เบื้องต้นเสียก่อน จึงจะสามารถพูดจาเข้าใจกันได้กับวิศวกร

น้ำหนักบรรทุกจรมักจะกำหนดไว้สำหรับอาคารหลายประเภท เริ่มตั้งแต่อาคารพักอาศัยส่วนบุคคล จนถึงอาคารสาธารณะ โดยจะกำหนดค่าน้ำหนักบรรทุกจรเป็นน้ำหนักกิโลกรัมต่อตารางเมตรของพื้นที่ที่จะรับน้ำหนักนั้น ๆ เช่นอาคารพักอาศัยกำหนดให้พื้นที่รับน้ำหนักบรรทุกจรเท่ากับ 150 กิโลกรัมต่อตารางเมตร หรืออาคารสำนักงานเท่ากับ 300 กิโลกรัมต่อตารางเมตร เป็นต้น¹ ดังนั้นอาคารที่มีลักษณะคล้ายกันทุกอย่าง เช่นอาคารพักอาศัยแบบบ้านแถวและอาคารตึกแถวที่ใช้เพื่อการพาณิชย์ ซึ่งโดยปกติมักจะมียะช่วงคานเท่า ๆ กัน แต่ขนาดของโครงสร้างจะแตกต่างกัน คือขนาดของโครงสร้างที่ใช้ในอาคารตึกแถวที่ใช้เพื่อการพาณิชย์จะมีขนาดใหญ่กว่า ทั้งนี้เพราะต้องรับน้ำหนักบรรทุกจรตามข้อบัญญัติสูงกว่า

ดังนั้นข้อสรุปในเรื่องนี้คือขนาดของโครงสร้างของอาคารที่รับน้ำหนักบรรทุกจรสูงจะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของโครงสร้างของอาคารที่รับน้ำหนักบรรทุกจรต่ำกว่า

2.3 กำลังของวัสดุที่ใช้เป็นโครงสร้าง

วัสดุที่ใช้งานกันมากคือคอนกรีตและเหล็ก โดยเฉพาะโครงสร้างที่ก่อสร้างกันแพร่หลายคือโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คุณภาพหรือกำลังความสามารถในการรับน้ำหนักของวัสดุทั้งสองขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ คุณสมบัติของคอนกรีตอาจจะปรับปรุงให้รับน้ำหนักเพิ่มขึ้นได้ตั้งสาม-สี่เท่า ในขณะที่เหล็กก็มีอยู่หลายชนิด ซึ่งกำลังรับน้ำหนักแตกต่างกันเป็นสองหรือสามเท่า (ดูภาคผนวก ก.) ดังนั้นถ้าวิศวกรสามารถเลือกใช้วัสดุเช่นคอนกรีตหรือเหล็กที่สามารถรับกำลังสูง ๆ ได้ ก็สามารถลดขนาดของโครงสร้างลงได้เช่นกัน หรือสรุปอย่างคร่าว ๆ คือขนาดของโครงสร้างจะแปรผกผันกับกำลังของวัสดุที่ใช้ ถ้าใช้วัสดุที่มีกำลังรับน้ำหนักต่ำ ขนาดของโครงสร้างย่อมจะใหญ่กว่า ถ้าเลือกใช้วัสดุที่มีกำลังรับน้ำหนักได้สูงขึ้น อย่างไรก็ตามการออกแบบโดยใช้กำลังของวัสดุค่อนข้างสูง จะต้องใช้วิจรรย์ญาณพอสมควร เพราะตัวเลขในการออกแบบนั้นจะปรับให้มีค่าสูงเท่าไรก็ได้ แต่ตัวเลขที่สามารถควบคุมและทำได้ในสนามจริง ๆ นั้นอาจจะต่ำกว่าที่คาดคิดไว้ใน การออกแบบจนทำให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้างได้

2.4 การสมมุติโครงสร้างในการวิเคราะห์

สมมุติฐานที่แตกต่างกันในการวิเคราะห์โครงสร้าง ย่อมให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันในกรณี ที่พิจารณาเฉพาะโครงสร้างชิ้นใดชิ้นหนึ่งอย่างอิสระ แต่ถ้าพิจารณาโครงสร้างทั้งระบบ จะพบว่า การเปลี่ยนแปลงที่โครงสร้างชิ้นใดชิ้นหนึ่ง ย่อมกระทบกับโครงสร้างชิ้นอื่นในระบบเดียวกันไม่ทาง ตรงก็ทางอ้อม ถ้าเปรียบเทียบโครงสร้างเป็นลูกโป่ง การบีบส่วนใดส่วนหนึ่งของลูกโป่งให้เล็กลง ย่อมจะส่งผลกระทบให้ลูกโป่งส่วนอื่นขยายตัวขึ้น จะยกตัวอย่างให้เห็นในกรณีของการออกแบบ คานกับเสา ถ้าออกแบบคานให้วางอยู่บนหัวเสาโดยออกแบบคานเป็นแบบคานสามัญ (Simple Beam) ขนาดของคานย่อมจะใหญ่ แต่ขนาดของเสาจะเล็ก ถ้าจะบีบขนาดของคานให้เล็กลง โดย การออกแบบคานเป็นแบบคานยึดแน่นที่ปลายคาน (Fixed End Beam) กับเสาทั้งสองข้าง จะ ทำให้ขนาดของคานเล็กลง แต่ขนาดของเสาก็ต้องใหญ่ขึ้น เพื่อทำหน้าที่ยึดคานไว้ให้แน่นขึ้น ดังนั้นผู้ออกแบบ ย่อมมีโอกาสเลือกที่จะปรับปรุงขนาดของโครงสร้างให้พอเหมาะกับความต้องการ โดยการใช้วิจารณ์ญาณในการตั้งสมมุติฐานของโครงสร้างให้ถูกต้องซึ่งจะต้องใช้สำนึกทางวิศวกรรม (Engineering Sense) พอสมควรในการวิเคราะห์ปัญหา

2.5 การยึดโยงหรือค้ำยันระหว่างชิ้นส่วนโครงสร้าง

โครงสร้างที่มีการยึดโยงหรือค้ำยัน (Bracing) ระหว่างชิ้นส่วนโครงสร้างด้วยกันเอง จะ มีความแข็งแรง (Rigidity) ค่อนข้างสูง การยึดโยงที่ดีควรจะอยู่ในรูปแบบของสามเหลี่ยมโครง- กรอง (Triangular Rigid Frame) การยึดโยงที่ถูกต้องจะช่วยทำให้ไม่ต้องเพิ่มขนาดของโครงสร้าง โครงสร้างที่ปราศจากการยึดโยงอาจจะพังโดยการโก่งงอ (Buckling) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มขนาด ให้ใหญ่ขึ้น อย่างไรก็ตามการยึดโยงที่ไม่ถูกต้องตามหลักวิชา ก็อาจจะทำให้โครงสร้างทั้งระบบพัง ลงมาก็ได้

2.6 รูปร่างหน้าตัดของชิ้นส่วนโครงสร้าง

รูปร่างของหน้าตัดของโครงสร้างมีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของชิ้นส่วนนั้น ๆ ลองเปรียบเทียบคานเหล็กรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า กับรูปตัวไอ ถ้าให้พื้นที่หน้าตัดของคานทั้งสองมีขนาด เท่ากันและมีความลึกเท่ากัน คานรูปตัวไอจะสามารถรับน้ำหนักได้สูงกว่าคานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทั้ง นี้เพราะคานรูปตัวไอมีค่าโมเมนต์ของอินเนอร์เซียสูงกว่าคานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังนั้นหลักในการ เลือกชิ้นส่วนโครงสร้างคือ พยายามเลือกใช้ชิ้นส่วนให้มีลักษณะที่ให้ค่าโมเมนต์ของอินเนอร์เซีย สูงไว้ก่อน จะทำให้ลดขนาดของโครงสร้างลงได้ส่วนหนึ่ง

เท่าที่กล่าวมาทั้งหมดจากข้อ 2.1 ถึงข้อ 2.6 นี้ เป็นข้อพิจารณาสำหรับการออกแบบโดยทั่วไป หากเป็นโครงสร้างที่พิเศษออกไป ก็จะต้องพิจารณาเรื่องอื่น ๆ เพิ่มเติมอีกมาก ขั้นตอนต่อไปหลังจากพิจารณาดีแล้ว ก็จะต้องทดลองเลือกขนาดของโครงสร้างขึ้นมาเป็นตัวอย่างและทดลองหาค่าแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเพื่อดูว่าขนาดที่เลือกมาอยู่ในเกณฑ์ที่พอไปได้ไหม หากยังห่างไกลกับตัวเลขที่วิเคราะห์ ก็จะต้องทดลองเปลี่ยนดูหลาย ๆ ครั้ง ก็จะได้คำตอบที่ใกล้เคียงกับสถานการณ์ที่เป็นจริงมากขึ้นตามลำดับ

3. การหาขนาดของโครงสร้างโดยแผนภูมิหรือตาราง

เพื่อให้สะดวกมากยิ่งขึ้นกับการเริ่มต้นออกแบบ ได้มีผู้ออกแบบบางรายทำแผนภูมิหรือตารางไว้ใช้ แผนภูมิหรือตารางเหล่านี้จะพบได้ในหนังสือคู่มือการออกแบบทั่วไป ในที่นี้จะยกตัวอย่างการหาขนาดโครงสร้างด้วยแผนภูมิให้ดูสัก 2-3 ตัวอย่าง

3.1 การหาสัดส่วนของความลึกของคานหรือพนกับความยาวของช่วง (Depth-Span Ratio)²

รูปที่ 1, 2 และ 3 เป็นแผนภูมิแสดงการหาสัดส่วนของความลึกของคาน (หรือพื้น) กับความยาวของช่วง (Depth - Span Ratio) ของคานหรือพื้นแบบสามัญ (Simply Supported) โดยแกนนอนแสดงความกว้างของชิ้นส่วน แกนตั้งแสดงน้ำหนักทั้งหมดต่อความยาวช่วง 1 หน่วย เส้นทะแยงมุมในแผนภูมิคือสัดส่วนของความลึกของชิ้นส่วนกับช่วง ซึ่งมีหลายค่า แผนภูมินี้วิเคราะห์ โดยให้ k^* มีค่าประมาณ $\frac{3}{8}$ แผนภูมिरูปที่ 1, 2 และ 3 ต่างกันที่ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต (Ultimate Compressive Strength) และเปอร์เซ็นต์การเสริมเหล็กต่อเนื้อที่หน้าตัดของชิ้นส่วนในที่นี้สัดส่วนของความลึกต่อช่วงของคานจะมีค่าระหว่าง $\frac{1}{10} - \frac{1}{20}$ ในขณะที่สัดส่วนนี้อาจจะต่ำลงไปถึง $\frac{1}{30}$ ในกรณีของพื้น

วิธีการใช้แผนภูมินี้ก็ค่อนข้างง่ายและสะดวก เมื่อผู้ใช้ทราบค่าโดยประมาณของน้ำหนักต่อช่วง (w) และกำหนดค่าความกว้างของชิ้นส่วนให้เหมาะสม หลังจากนั้นก็ลากเส้นตั้งและเส้นนอนตามแกนทั้งสอง จุดตัดกันจะให้ค่าที่เหมาะสมของสัดส่วนดังกล่าว

* k คือค่าสัมประสิทธิ์ของความลึกของ Concrete Stress Block ปรากฏทั่วไปในหนังสือคอนกรีตเสริมเหล็ก

เนื่องจากแผนภูมิทั้งสามรูปวิเคราะห์มาจากการรองรับแบบสามัญ (Simple Support) หากสถานภาพของการรองรับเปลี่ยนไป เช่น เป็นแบบยื่นหรือแบบยึดปลาย ฯลฯ แผนภูมินี้ก็ยังนำมาใช้ได้ โดยให้หาช่วงความยาวสุทธิ ($L_e = \text{Effective Length}$) แทนช่วงในแผนภูมิโดยกำหนดให้

$$L_e = 0.58L \quad \text{สำหรับคานยึดปลายสองข้าง}$$

$$L_e = 2L \quad \text{สำหรับคานยื่น}$$

$$L_e = 0.75L \quad \text{สำหรับคานโมเมนต์ขบหรือ}$$

$$= 1.00L \quad \text{สำหรับคานโมเมนต์ลบ ของ}$$

คานยึดปลายข้างหนึ่งส่วนอีกข้างหนึ่งเป็นแบบสามัญ

(Fixed-Simply Supported Beams)

3.2 การหาความลึกของคานโดยแผนภูมิ³

แผนภูมิในรูปที่ 4 เป็นแผนภูมิอีกแบบหนึ่งที่สามารถประมาณค่าความลึกของคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้ทันทีเมื่อรู้ความยาวของช่วงคาน การใช้แผนภูมิแบบนี้ค่อนข้างจะสะดวกมากสำหรับผู้เริ่มต้นออกแบบ แต่ก็ควรระวังในการใช้ อย่าได้ยึดถือแผนภูมิแบบนี้เป็นกฎตายตัวสำหรับปัญหาทุกปัญหา เพราะในบางกรณีค่าประมาณที่หามาจากแผนภูมิแบบนี้อาจมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นเท่าตัวก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ ดังที่อธิบายมาแล้วในข้อ 2 นอกจากนี้แผนภูมิของคานคอนกรีตเสริมเหล็กนี้แล้วยังมีแผนภูมิสำหรับโครงสร้างแบบอื่นๆ อีกหลายประเภทซึ่งผู้สนใจอาจหาอ่านได้จากหนังสือเล่มเดียวกัน

3.3 ความลึกที่น้อยที่สุดของคานที่กำหนดโดย ACI Code *

ในบางกรณี เช่น ช่วงคานสั้นหรือคานที่รับน้ำหนักน้อย ๆ การประมาณค่าความลึกของคานจากข้อ 3.1 หรือ 3.2 จะให้ค่าความลึกที่ค่อนข้างน้อย เนื่องจากเวลาที่คานรับแรงกระทำภายนอก คานจะเกิดการแอ่นตัว จะทำให้เกิดการแตกร้าวได้ ดังนั้นสมาคมคอนกรีตของอเมริกา (ACI) จึงกำหนดข้อพึงปฏิบัติ (Code) ซึ่งถือเป็นเกณฑ์ขั้นต่ำสุดในการออกแบบคานและพื้น⁴ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 1 ดังนั้นถ้าค่าที่ประมาณโดยวิธี 3.1 และ 3.2 มีค่าน้อยกว่าค่าที่ประมาณได้จาก ตารางที่ 1 ก็ให้ใช้ค่าที่ได้จากตารางที่ 1 เป็นเกณฑ์ขั้นต่ำสุดในการออกแบบ

* ACI Code คือข้อพึงปฏิบัติในการออกแบบ ซึ่งกำหนดโดย American Concrete Institute

4. บทสรุป

เกณฑ์ต่าง ๆ ที่ให้ไว้ในข้อที่ 3 เป็นเพียงแนวทางอย่างกว้าง ๆ ทั่ว ๆ ไป ซึ่งผู้ใช้จะต้องใช้ด้วยความระมัดระวัง อย่าได้ถือเกณฑ์ต่าง ๆ เหล่านั้นเป็นกฎตายตัวสำหรับการออกแบบ ผู้ใช้ควรคำนึงถึงองค์ประกอบต่าง ๆ ในข้อที่ 2 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปรับขนาดของโครงสร้างให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง ทั้งนี้ย่อมขึ้นอยู่กับการศึกษาของแต่ละคนซึ่งไม่เหมือนกัน

ภาคผนวก ก.

1. กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้กันมีค่าตั้งแต่ 100 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ถึง 350–400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยปกติสำหรับอาคารพักอาศัยจะใช้ประมาณ 100–150 กก/ชม² อาคารสำนักงานใช้สูงขึ้นมาอาจจะตั้งแต่ 150–250 กก/ชม² ส่วนคอนกรีตกำลังสูง ๆ มักจะใช้ในการผลิตชิ้นส่วนโครงสร้างสำเร็จรูป เช่น คาน หรือเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง

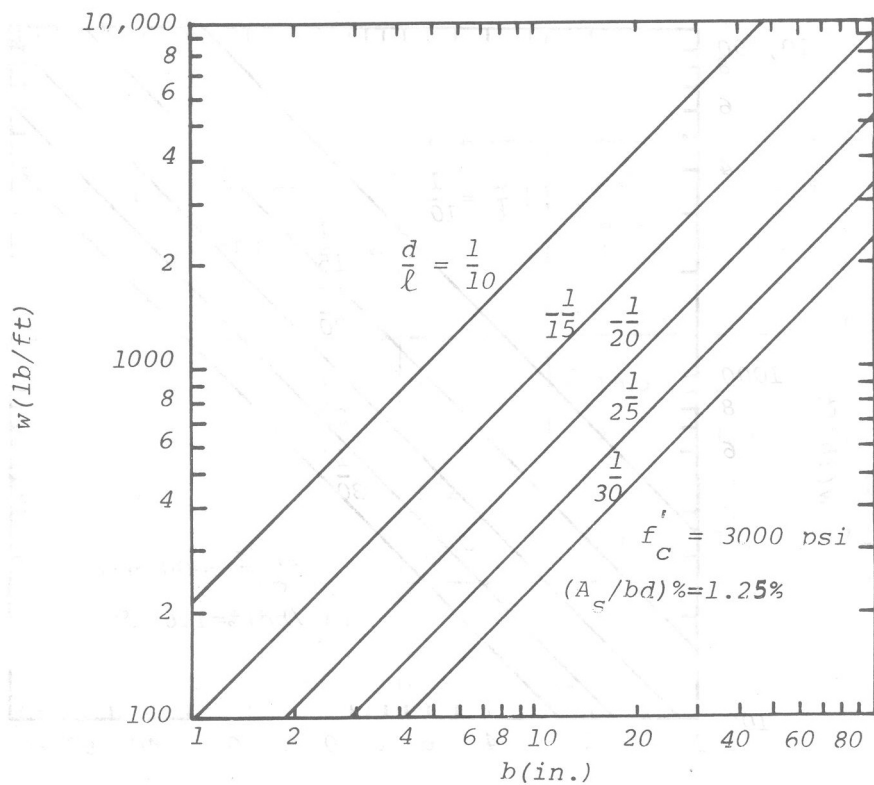
2. กำลังคลากของเหล็กมีค่าแตกต่างกันตามตารางข้างล่างนี้

ชนิดเหล็ก	เหล็กเส้นกลม	เหล็กเส้นข้ออ้อย		
	SR 24	SD 30	SD 35	SD 40
กำลังคลาก กก/ชม ²	2400	3000	3500	4000

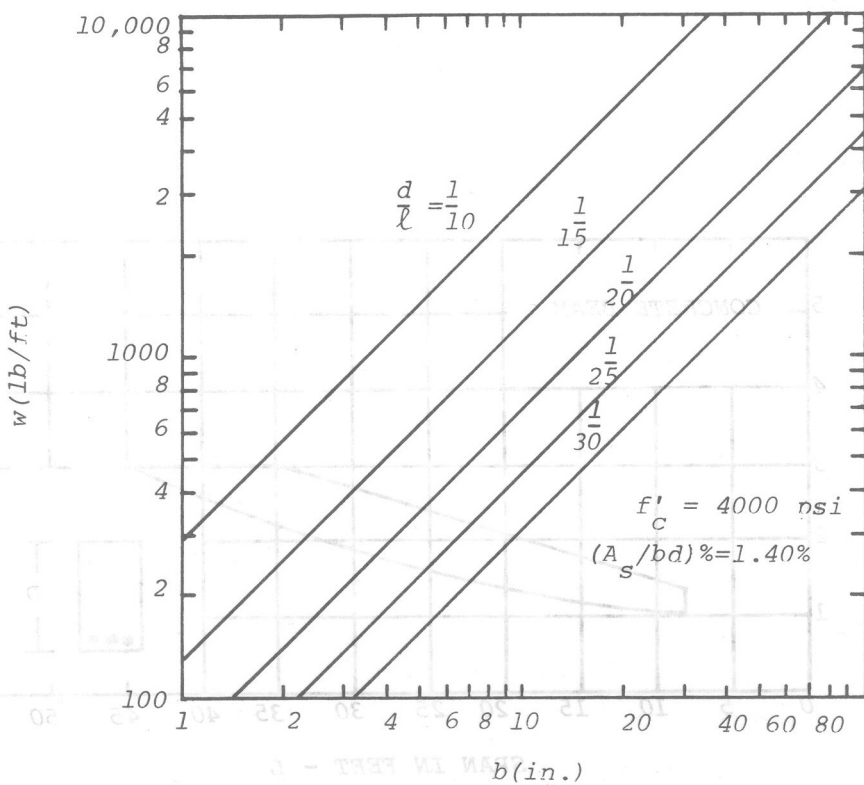
3. ตัวเลขข้างล่างนี้ใช้สำหรับการเปลี่ยนตารางวัดคือ

$$1 \text{ นิ้ว} = 2.54 \text{ ซม.}$$

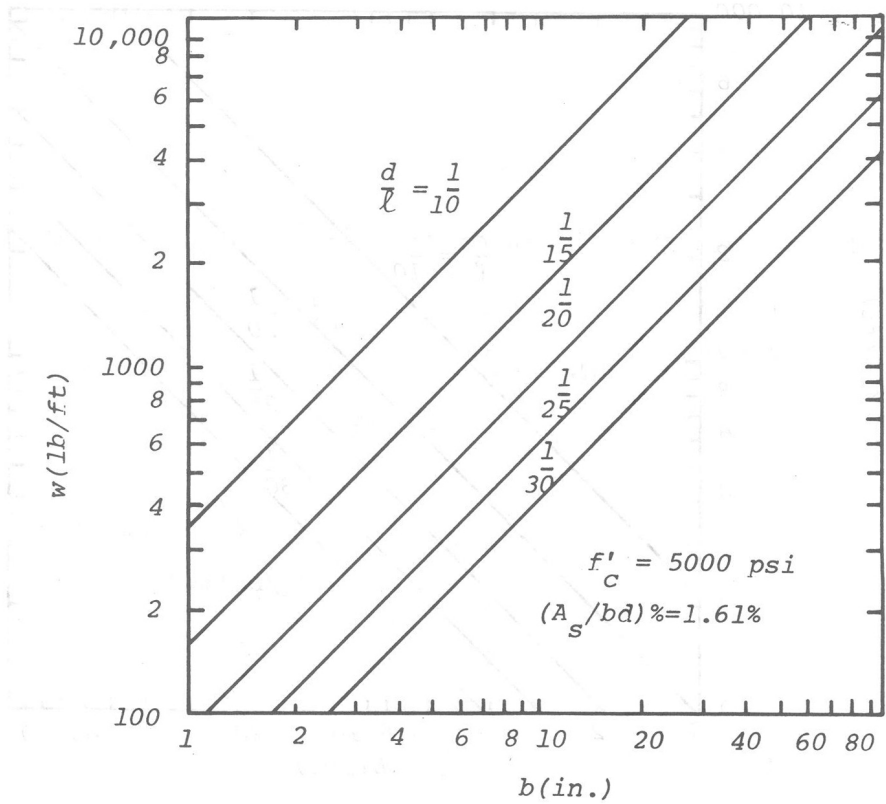
$$1 \text{ ปอนด์/ตร.นิ้ว} = 0.07 \text{ กก/ตร.ซม}$$



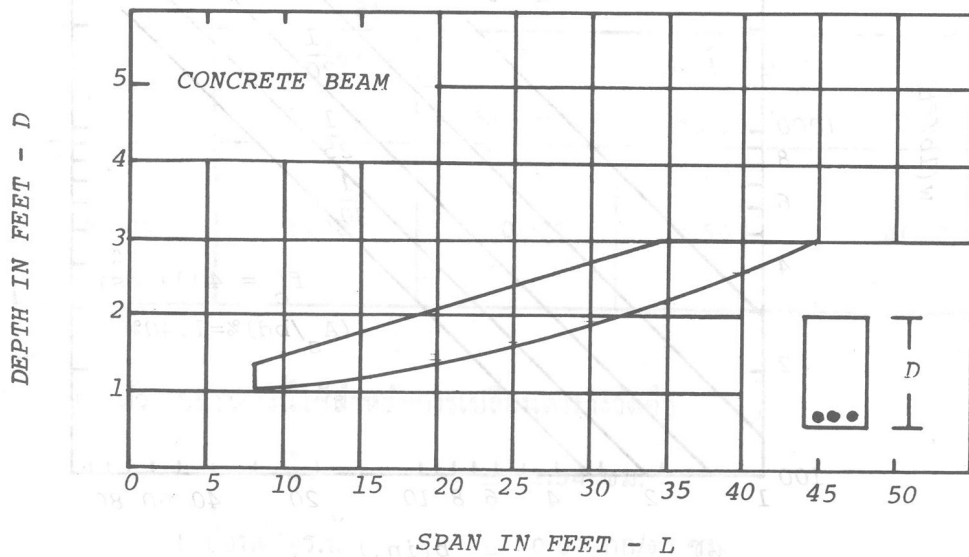
รูปที่ 1



รูปที่ 2



รูปที่ 3



รูปที่ 4

ชนิดของโครงการสร้าง	ค่าหน่วยแรง คลากของเหล็กเสริม ปอนด์/ตร.นิ้ว	แบบสามัญ	ต่อเนื่อง หนึ่งข้าง	ต่อเนื่อง สองข้าง	แบบยื่น
คาน	60,000	L/16	L/18.5	L/21	L/8
	40,000 ¹	L/20	L/23	L/26	L/10
พื้นช่วงทางเดียว	60,000	L/20	L/24	L/28	L/10
	40,000	L/25	L/30	L/35	L/12.5

ตารางที่ 1 ค่าความลึกที่น้อยที่สุดของคานหรือพื้นช่วงทางเดียว

(จาก ACI-Table 9.5 a)

เชิงอรรถ

1. ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร เรื่อง ควบคุมการก่อสร้างอาคาร พ.ศ. 2522 โรงพิมพ์นิติเวช, หน้า 23
2. M.Savadori & M.Levy. *Structural Design in Architecture*. Prentice -Hall, Inc., 1967 (pp. 58-60)
3. H.J.Cowan. *Architectural Structures*. American Elsevier Publishing Company, Inc., 1971 (pp. 366)
4. C.K.Wang & C.G. Salmon. *Reinforced Concrete Design (2 ed)*. New York and London : Intext Educational Publishers: 1973 (pp. 537)

บรรณานุกรม

1. มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก พิมพ์ครั้งที่ 2 พ.ศ. 2519 วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์
2. P.M.Ferguson. *Reinforced Concrete Fundamentals*. (4 th ed.) John Wiley & Sons. 1961.
3. H.Parker. *Simplified Engineering for Architects & Builders*. (4th. ed.) John Wiley & Sons.
4. L.C.Urquhart, C.E.O'Rourke, G.Winter & A.H.Nilson. *Design of Concrete Structures*
5. C.E. Reynolds & J.C.Steedman. *Reinforced Concrete Designer's Handbool*. (8th. ed.) A Viewpoint Publication. 1974.