# บทที่ 2.

# คอนกรีตเสริมเหล็ก วิธีหน่วยแรงใช้งาน

คานเป็นโครงสร้างที่อยู่ในแนวระดับใช้สำหรับรับน้ำหนักบรรทุกที่มากระทำในแนวดิ่ง เช่น น้ำหนักแผ่จากพื้นอาคารหรือน้ำหนักที่กดเป็นจุดจากคานซอย โดยทำให้เกิดโมเมนต์ดัด และบางครั้งก็มีโมเมนต์บิดเกิดขึ้นด้วย เป็นผลให้เกิดหน่วยแรงต่างๆขึ้นในคานหรือหน่วยแรงดัด หน่วยแรงเฉือน หน่วยแรงดึงทแยง และหน่วยแรงยึดเหนี่ยว การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทฤษฎีอีลาสติก หมายถึงการคำนวณเพื่อเลือกขนาดรูปตัดของคานและขนาดเหล็กเสริมให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกที่ใช้งานได้ โดยมีหน่วยแรงต่างๆที่เกิดในคานมีค่าไม่เกินกว่าค่าหน่วยแรงที่ยอมให้แต่ละชนิดนั้นๆ สำหรับค่าแรงและโมเมนต์ต่างๆที่นำมาออกแบบนี้ได้มาจากการวิเคราะห์โดยวิธีอีลาสติก

## 2.1 หน่วยแรงที่ยอมให้

2.1.1 หน่วยแรงที่ยอมให้สำหรับคอนกรีต

หน่วยแรงที่ยอมให้ต่างๆนี้เทียบจากกำลังอัดประลัย $f'_c$ ของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกที่เส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. และเมื่ออายุ 28 วัน (ตารางที่ 1 ก ของภาคผนวก) ถ้าทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตก้อนลูกบาศก์ขนาด 15 ซม. ก็หาค่า $f'_c$ จาก

$f'_c$ = 0.885 เท่าของกำลังอัดประลัยของก้อนลูกบาศก์ขนาด 15 ซม. (ตารางที่ 1 ค ของภาคผนวก)

ค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ต่างๆ เมื่อ $f'_c$ = 100 กก./ซม$^2$.

สำหรับแรงดัด

หน่วยแรงอัดที่ผิว $f_c = 0.45 \quad f'_c = 45$ กก./ซม$^2$.

หน่วยแรงดึงที่ผิวในฐานรากและกำแพงคอนกรีตล้วน

$f_c = 0.42 \sqrt{f'_c} = 4.2$ กก./ซม$^2$.

**สำหรับแรงยึดเหนี่ยว**

หน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่ยอมให้ขึ้นอยู่กับค่า $f'_c$ ชนิดของเหล็กเสริม ขนาดของเหล็กเสริม และตำแหน่งของเหล็กเสริม (ตารางที่ 1 ข. ของภาคผนวก)

**สำหรับแรงเฉือน**

คานที่ไม่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือน $v_c = 0.29 \sqrt{f'_c} = 2.9$ กก./ซม$^2$.

ตงที่ไม่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือน $v_c = 0.32 \sqrt{f'_c} = 3.2$ กก./ซม$^2$.

คานที่เหล็กเสริมลูกตั้งหรือคอม้า หรือประกอบกันทั้ง 2 อย่าง

(แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคาน) $v_c = 1.32 \sqrt{f'_c} = 13.2$ กก./ซม$^2$.

พื้นและฐานราก (ตามเส้นขอบ) $v_c = 0.53 \sqrt{f'_c} = 5.3$ กก./ซม$^2$.

**สำหรับแรงกด**

รับน้ำหนักเต็มที่ $f_c = 0.25 \sqrt{f'_c} = 25.0$ กก./ซม$^2$.

รับไม่เกินหนึ่งในสามของเนื้อที่ $f_c = 0.37 \sqrt{f'_c} = 37.0$ กก./ซม$^2$.

ในกรณีที่มีการควบคุมไม่เข้มงวด ให้ใช้ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตเท่ากับ 5/6 ของ $f'_c$ ในการคำนวณหาค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ต่างๆ

2.1.2 หน่วยแรงที่ยอมให้เหล็กเสริม

เหล็กเส้นที่ใช้เสริมคอนกรีตจะต้องมีหน่วยแรงที่ยอมให้ $f_s$ ดังนี้

ก. รับแรงดึง

- เหล็กเส้นชนิดเหล็กโครงสร้าง (เมื่อไม่มีผลการทดลอง) ใช้ 1200 กก./ซม$^2$.
- เหล็กเสริมเอกมีขนาด 9 มม. หรือเล็กกว่า ในพื้นที่เสริมเหล็กทางเดียวที่ช่วงยาวไม่เกิน 3.00 ม. ให้ใช้ 0.50 เท่า ของกำลังครากต่ำสุดแต่ไม่เกิน 2100 กก./ซม$^2$.
- เหล็กข้ออ้อยที่มี $f_y$ สูงกว่า 3400 กก./ซม$^2$. ให้ใช้ 0.50 เท่า ของกำลังครากต่ำสุดแต่ไม่เกิน 1500 กก./ซม$^2$.
- เหล็กข้ออ้อยที่มี $f_y$ สูงกว่า 4200 กก./ซม$^2$. ใช้ได้ไม่เกิน 1700 กก./ซม$^2$.
- เหล็กขวั้นใช้ 0.50 เท่าขอกำลังพิสูจน์แต่ไม่เกิน 2400 กก./ซม$^2$.

ข. รับแรงอัดในเสา

เสาเหล็กปลอกเกลียว

ให้ใช้ 0.40 เท่าของกำลังครากต่ำสุด แต่ไม่เกิน 2100 กก./ซม$^2$.

เสาเหล็กปลอกเดี่ยว

ให้ใช้ 0.85 เท่าของค่าที่กำหนดในเสาปลอกเกลียว แต่ไม่เกิน1750 กก./ซม$^2$.

เสาที่มีเหล็กยืนเป็นเหล็กรูป ชนิด A 36 (ASTM) ใช้ 1250 กก./ซม.$^2$ และเหล็กรูป ชนิด A 7 (ASTM) ใช้ 1100 กก./ซม$^2$.

ค. รับแรงอัดในโครงสร้างที่รับแรงดัด ใช้ได้ไม่เกินหน่วยแรงดึงที่ยอมให้

ง. เหล็กปลอกเกลียว ใช้กำลังครากได้ไม่เกิน 2800 กก./ซม.$^2$

2.1.3 หน่วยแรงที่ยอมให้สำหรับแรงลมและแผ่นดินไหว

โครงสร้างที่ต้องออกแบบเพื่อต้านทานแรงลมและแผ่นดินไหวร่วมกับน้ำหนักบรรทุกอื่นๆ ยอมให้เพิ่มค่าหน่วยแรงต่างๆ ขึ้นอีกร้อยละ 30 จากค่าของหน่วยแรงที่กล่าวมาแล้ว แต่จะต้องไม่ทำให้ขนาดของโครงสร้างเล็กลงไปกว่าที่จะสามารถรับน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรได้

2.1.4 โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก $Es$

ค่าของโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กให้ใช้ 2.04 × 106 กก./ซม.$^2$

2.1.5 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต $E_C$

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ให้คำนวณได้ดังนี้

เมื่อน้ำหนักของคอนกรีต $w$ = 1.45 ถึง 2.48 ตัน/ ม.$^3$

$$E_C = w1.5\ 4270\sqrt{f_c'} \quad \text{กก./ ซม}^2$$

เมื่อน้ำหนักของคอนกรีตธรรมดา $w$ = 2.33 ตัน/ ม.$^3$

$$E_C = 15210\ \sqrt{f_c'} \ \text{กก./ ซม}^2$$

$f_c'$ = กำลังอัดประลัยของคอนกรีต, กก./ ซม$^2$

2.1.6 อัตราส่วนโมดูลัส

$n$ คืออัตราส่วนระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก $Es$ กับ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต $E_C$

$$n = \frac{E_s}{E_c}$$

ค่า $n$ อาจใช้เป็นเลขจำนวนเต็มที่ใกล้เคียงที่สุด แต่ต้องไม่น้อยกว่า 6

ค่า $n$ สำหรับคอนกรีตน้ำหนักเบา อาจสมมติให้เท่ากับค่า $n$ ของคอนกรีตธรรมดาซึ่งมีกำลังเท่ากัน ยกเว้นการคำนวณระยะโก่ง

อัตราส่วนโมดูลัสนี้ใช้ในการคำนวณหน่วยแรงในดาน และพื้น คสล. ที่ใช้เหล็กเสริมรับแรงอัดด้วย โดยแปลงเนื้อที่หน้าตัดเหล็กเสริมแรงอัดให้เป็นคอนกรีตที่มีเนื้อที่หน้าตัด $2n$ เท่าของเหล็กเสริม หน่วยแรงอัดในเหล็กเสริมที่คำนวณได้ต้องไม่เกินหน่วยแรงดึงที่ยอมให้

2.1.7 สมมติฐานในการคำนวณแรงดัด

ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก การคำนวณเกี่ยวกับแรงดัดโดยทฤษฎีอีลาสติก ใช้สมมติฐานดังต่อไปนี้

ก) หน่วยการยืดตัวของเหล็กและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่เกิดขึ้น มีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะจากแกนสะเทิน

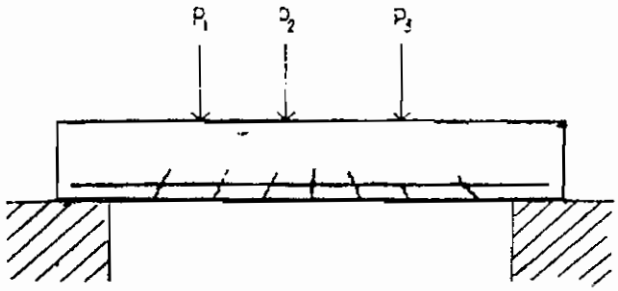
ข) พื้นที่หน้าตัดก่อนถูกแรงดัดยังคงรูปเดิมภายหลังถูกแรงดัด

ค) เส้นสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับหน่วยการหดตัวของคอนกรีตเป็นเส้นตรง ขณะที่บรรทุกน้ำหนักใช้งานภายในช่วงหน่วยแรงที่ยอมให้ หน่วยแรงมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะจากแกนสะเทินยกเว้นดานลึก

ง) ในการคำนวณ ให้แปลงเนื้อที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงดึง เป็นหน้าตัดคอนกรีต ซึ่งมีเนื้อที่ $n$ เท่าของเนื้อที่หน้าตัดเหล็กเสริมนั้น

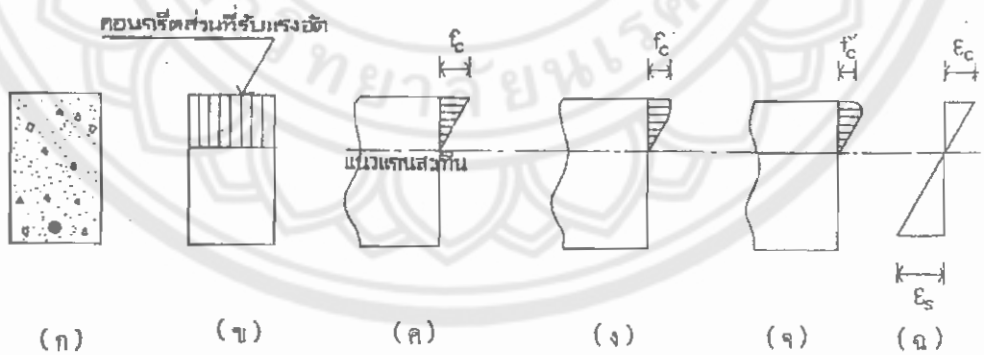
## 2.2 หน่วยแรงและหน่วยการยืดหดตัวในดาน คสล.

เมื่อดานมีโมเมนต์บวก เช่นดานช่วงเดียวมีแรงดัดกระทำไม่ว่าเป็นแบบบรรทุกแผ่ หรือกระทำเป็นจุดก็ตาม ทำให้ดานถูกดัดโก่งในลักษณะที่มีแรงดัดชนิดแรงอัดที่ผิวบนของดานลงมา มีแรงดัดชนิดแรงดึงที่ผิวล่างของดานขึ้นไป และแรงดัดมีค่าเป็นศูนย์ที่แนวแกนสะเทิน ฉะนั้นคอนกรีตทำหน้าที่ต้านทานแรงอัดซึ่งมีหน่วยแรงอัดมีค่าเป็นศูนย์ที่แนวแกนสะเทินและมีค่าเพิ่มขึ้นที่จุดห่างจากแนวแกนขึ้นไป โดยมีค่ามากที่สุดที่ผิวบนของดาน สำหรับส่วนล่างใต้แนวแกนสะเทินนั้นให้ถือว่าเหล็กเสริมทำหน้าที่ต้านทานแรงดึงไว้ทั้งหมด เนื่องจากคอนกรีตทนแรงดึงได้น้อยมาก ฉะนั้นเมื่อดานมีน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นๆ คอนกรีตที่ผิวล่างก็จะร้าวเป็นรอยที่ตั้งฉากกับความยาวของดานที่บริเวณกลางดาน และเป็นแนวเฉียงที่บริเวณปลายดาน ดังรูปที่ 2.1 ทำให้เหลือคอนกรีตใต้แนวแกนสะเทินเพียงเล็กน้อยซึ่งต้านทานแรงดึงได้น้อยมากและไม่แน่นอนด้วย ประกอบกับเพื่อความสะดวกในการคำนวณออกแบบ จึงตัดค่าต้านทานแรงดึงของคอนกรีตออกไม่นำมาคิดเลย




รูปที่ 2.1
แสดงน้ำหนักที่กระทำลงบนคาน
ที่มา : สนั่น เจริญเผ่า และ วินิต ช่อวิเชียร คอนกรีตเสริมเหล็ก

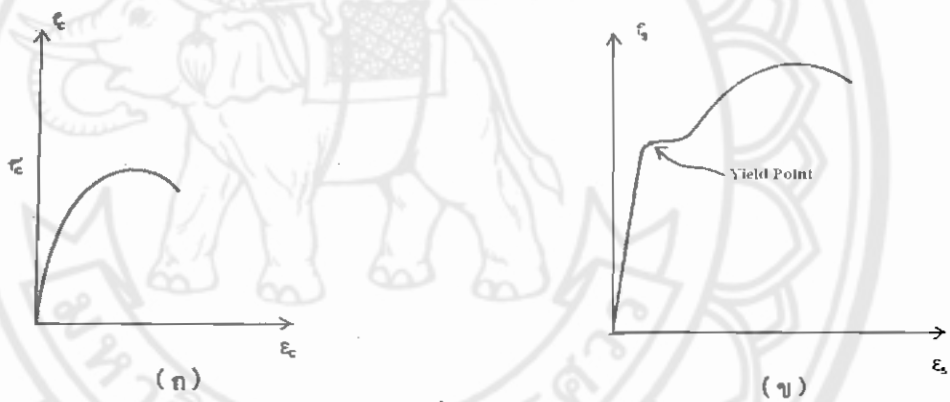
รูปที่ 2.2 (ก) และ (ข) แสดงรูปตัดคานคอนกรีตและคอนกรีตที่อยู่ด้านบนของแนวแกนสะเทินซึ่งรับแรงอัด ไดอะแกรมของหน่วยแรงอัดในช่วงหน่วยแรงอัดน้อยๆ มีลักษณะเป็นเส้นดังรูป 2.2 (ค) เมื่อมีโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้นจนหน่วยแรงอุดมีค่าเกินขีดความยืดหยุ่น ไดอะแกรมนี้จะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งแต่เพียงเล็กน้อยดังรูป 2.2 (ง) และจะเป็นเส้นโค้งมากที่สุดที่หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตดังรูป 2.2 (จ) ถ้าหากมีการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกหรือโมเมนต์ดัดให้กับคานต่อไปอีก สำหรับคานที่เสริมเหล็กเกินพอจะทำให้คานคอนกรีตถึงกับแตกหัก เป็นการชำรุดของคานอย่างทันทีไม่มีอาการแสดงที่จะเตือนให้ทราบล่วงหน้าจัดว่าเป็นอันตรายมาก




รูปที่ 2.2
แสดงรูปตัดคานคอนกรีต
ที่มา : สนั่น เจริญเผ่า และ วินิต ช่อวิเชียร คอนกรีตเสริมเหล็ก

สำหรับหน่วยการยืดหดตัวในเหล็กและคอนกรีตในจุดต่างๆ ตลอดความลึกของคานมีค่าตามระยะแนวแกนสะเทินดังรูป 2.2 (ฉ) ส่วนหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริม จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าของโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นจนถึงหน่วยแรงดึงที่ขีดคราก เหล็กเสริมจะยืดมากเมื่อเลยขีดคราก จะทำให้คอนกรีตร้าวมากขึ้นๆ เป็นเครื่องที่เสดงให้ทราบล่วงหน้าถึงการชำรุดของคาน ถ้าเอาน้ำหนักบรรทุกออกเสียบ้างก็จะช่วยไม่ให้คานถึงกับพังลงมาได้

รูปที่ 2.3 แสดงเส้นสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับหน่วยการหดตัวของคอนกรีตในรูป 2.3 (ก) และของเหล็กเสริมในรูป 2.3 (ข) สำหรับคอนกรีตเส้นสัมพันธ์นี้จะเป็นเส้นโค้งทั้งหมดในช่วงหน่วยแรงอัดต่ำๆ จะมีลักษณะใกล้เส้นตรงมากและหน่วยหดตัวมีน้อย เมื่อหน่วยแรงอัดสูงขึ้นถึงแรงประลัยของหน่วยการหดตัวจึงจะมีค่าสูงขึ้นมากประมาณ 0.003 ถึง 0.004 สำหรับเหล็กลักษณะเส้นสัมพันธ์เป็นเส้นตรงถึงขีดยืดหยุ่นและมีหน่วยการยืดดังน้อย เลยช่วงนี้ออกไปถึงจุดครากเหล็กจะยืดมากไม่เหมาะที่จะนำเอามาพิจารณาใช้ในการออกแบบ

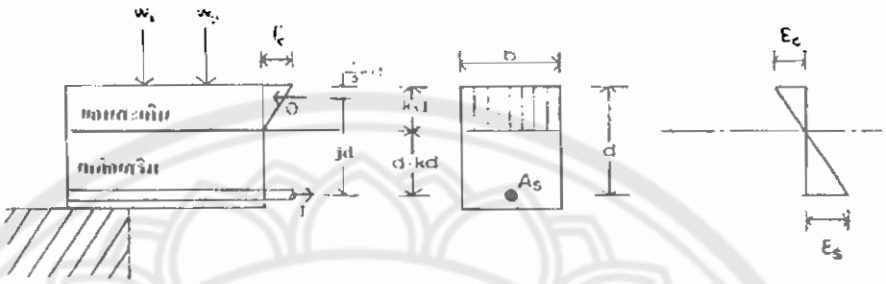



รูปที่ 2.3
แสดงเส้นสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับหน่วยการหดตัวของคอนกรีต
ที่มา : สนั่น เจริญเผ่า และ วินิต ช่อวิเชียร คอนกรีตเสริมเหล็ก

การออกแบบด้วยทฤษฎีอิลาสติกนี้ เป็นการออกแบบโดยการพิจารณาใช้หน่วยแรงที่ยอมให้ซึ่งมีส่วนปลอดภัยประมาณสองจากหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีต และจากหน่วยแรงที่จุดครากของเหล็กเสริม ซึ่งเป็นการนำเอาคอนกรีตและเหล็กมาใช้ในช่วยที่ปลอกภัยและมีหน่วยการยืดหดตัวต่ำด้วย

## 2.3 ความต้านทานต่อแรงดัด

### 2.3.1 คานรูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เสริมเฉพาะเหล็กรับแรงดึง




(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 2.4
แสดงไดอะแกรมของหน่วยแรงอัดในคอนกรีต
ที่มา : สนั่น เจริญเผ่า และ วินิต ช่อวิเชียร คอนกรีตเสริมเหล็ก

รูปที่ 2.4 (ก) แสดงไดอะแกรมของหน่วยแรงอัดของคอนกรีตและระยะต่างๆ รูปที่ 2.4 (ข) แสดงรูปตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปที่ 2.4 (ค) เป็นไดอะแกรมของหน่วยการหดตัว (Strain) ของคอนกรีต $\varepsilon_c$ และหน่วยการยืดตัว ( Strain) ของเหล็ก $\varepsilon_c$ ให้ $d$ = ความกว้างของคานคอนกรีต , ซม.

$b$ = ความลึกประสิทธิผลนับจากผิวบนของคานมายังจุกศูนย์ถ่วงของกลุ่มเหล็กเสริม , ซม.

$A_s$ = เนื้อที่หน้าตัดของเหล็กเสริม , ซม.$^2$

$P$ = $\frac{A_s}{bd}$ เปอร์เซ็นต์ของเหล็กเสริม

$\varepsilon_c$ = หน่วยแรงการหดตัวของคอนกรีต

$\varepsilon_s$ = หน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริม

$f_s$ = หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริม , กก./ ซม$^2$

$f_c$ = หน่วยแรงอัดที่ผิวบนของคาน , กก./ ซม$^2$

$T$ = แรงดึงทั้งหมดในเหล็กเสริม , กก.

$C$ = แรงอัดทั้งหมดในคอนกรีต , กก.

$k.d$ = ระยะระหว่างแนวแกนสะเทินกับผิวบนของคาน , ซม.

$j.d$ = ช่วงแขนของโมเมนต์ของแรงภายใน $C$ กับ $T$ , ซม.

$E_c$ = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต , กก./ซม$^2$

$E_s$ = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก , กก./ซม$^2$

$n$ = อัตราส่วนระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กต่อโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต = $E_s/E_c$

$M$ = โมเมนต์จากแรงภายนอกที่กระทำต่อคาน , กก.-ซม

$M_c$ = โมเมนต์ต้านทานโดยคอนกรีต , กก.-ซม

$M_s$ = โมเมนต์ต้านทานโดยเหล็กเสริม , กก.-ซม

$M_r$ = โมเมนต์ต้านทานโดยปลอดภัยของคาน , กก.-ซม

การหาตำแหน่งของแนวแกนสะเทิน

หน่วยการหดตัวของคอนกรีต : $\varepsilon_c = \dfrac{f_c}{E_c}$

หน่วยการยืดตัวของเหล็ก : $\varepsilon_s = \dfrac{f_s}{E_s}$

$$\therefore \quad \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_s} = \frac{f_c/E_c}{f_s/E_s} = \frac{f_c}{f_s} \cdot \frac{E_c}{E_s}$$

หรือ

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_s} = n \cdot \frac{f_c}{f_s}$$

จากรูปที่ 2.4 (ก) และ (ค)

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_s} = \frac{kd}{b-kd}$$

หรือ

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_s} = \frac{k}{1-k}$$

ดังนั้น

$$\frac{k}{1-k} = n \cdot \frac{f_c}{f_s}$$

$$\therefore \quad k \cdot f_s = n \cdot f_c(1-k)$$

$$k \cdot n \cdot f_c + k \cdot f_s = n \cdot f_c$$

$$k(n \cdot f_c + f_s) = n \cdot f_c$$

$$k = \frac{n \cdot f_c}{n \cdot f_c + f_s}$$

หรือ

$$k = \frac{1}{1 + f_s / n \cdot f_c} \qquad (2.3.1)$$

ค่า $k$ จากสมการ (2.4.1) ใช้สำหรับหาตำแหน่งแนวแกนสะเทิน เมื่อกำหนดค่า $f_s$ , $f_c$ และ $n$ มาให้ ใช้ในกรณีออกแบบคาน

จากรูปที่ 2.4 (ก) และ (ข)

แรงอัดทั้งหมดของคอนกรีต $C = \frac{1}{2} f_c \cdot b.k.d$ (2.3.2)

แรงดึงทั้งหมดของเหล็ก $T = A_s f_s = p \cdot b \cdot d \cdot f_s$ (2.3.3)

จากการสมดุลของแรงในแนวราบ

$$C = T$$

$$\frac{1}{2} f_c \cdot b.k.d = p \cdot b \cdot d \cdot f_s$$

หรือ

$$\frac{fs}{fc} = \frac{k}{2p}$$

แต่

$$\frac{f_s}{f_c} = \frac{n(1-k)}{k}$$

ดังนั้น

$$\frac{k}{2p} = \frac{n(1-k)}{k}$$

$$k^2 + 2npk = 2np$$

$$k2 + 2npk + (np^2) = 2np + (np^2)$$

$$(k + np^2) = 2np + (np^2)$$

$$k = \sqrt{2np + (np^2)} - np$$

(2.3.4)

ค่า $k$ จากสมการ (2.3.4) ใช้สำหรับหาค่าของตำแหน่งของแนวแกนสะเทิน เมื่อรู้ขนาดรูปตัดของคานและปริมาณเหล็กเสริม

จากรูปที่ 2.4 $d = jd + \frac{1}{3}kd$

หรือ $j = 1 - \frac{k}{3}$

(2.3.5)

ค่า $j$ จากสมการ (2.3.5) นำไปหาช่วงแขนของโมเมนต์ต่อไป

โมเมนต์ต้านทานโดยคอนกรีต $M_c = C \cdot jd$

$$= \frac{1}{2} f_c \cdot b \cdot kd \cdot jd$$

หรือ $M_c = \frac{1}{2} f_c \cdot k \cdot j \cdot bd^2$

(2.3.6)

หรือ $M_c = Rbd^2$

(2.3.7)

เมื่อ $R = \frac{1}{2} f_c \cdot k \cdot j$

(2.3.8)

ปกติค่า $R$ จะคงที่สำหรับค่า $f_s$ และ $f_c$ ที่กำหนดให้ การออกแบบเพื่อหาขนาดคาน $b$ และ $d$ ก็ใช้สมการ (2.3.7) กับ (2.3.8) และใช้ $M_c = M$ ส่วนสมการ (2.3.6) ใช้สำหรับหาโมเมนต์ต้านทานของคอนกรีตจากคานที่กำหนดขนาดมาให้และทราบตำแหน่งแนวแกนสะเทินแล้ว ( ดูค่า $k$ $j$ $R$ จากตารางที่ 2 ภาคผนวก )

โมเมนต์ต้านทานโดยเหล็กเสริม $M_s = T \cdot jd$

$$M_s = A_s \cdot f_s \cdot jd \qquad (2.3.9)$$

หรือ $M_s = f_s \cdot p \cdot j \cdot bd^2$

(2.3.10)

สมการ (2.3.9) ใช้สำหรับการหาค่าปริมาณเหล็กเสริมเมื่อให้ $M_s = M$ ส่วนสมการ (2.3.10) ใช้สำหรับการหาโมเมนต์ต้านทานเหล็กเสริมสำหรับคานที่ทราบขนาด ปริมาณของเหล็กเสริมและตำแหน่งของแนวแกนสะเทินแล้ว

การศึกษาความต้านทานต่อแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กนี้ มี 3 กรณี คือ

1) การตรวจสอบหาค่าหน่วยแรงอัดในคอนกรีตและหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมของคานที่กำหนดขนาดและปริมาณของเหล็กและโมเมนต์หรือน้ำหนักที่บรรทุกที่กำหนดให้

2) การตรวจสอบหาค่าโมเมนต์ต้านทานหรือน้ำหนักที่บรรทุกของคานที่กำหนดขนาดและปริมาณของเหล็กเสริม และกำหนดค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ทั้งเหล็กเสริมและคอนกรีตมาด้วย

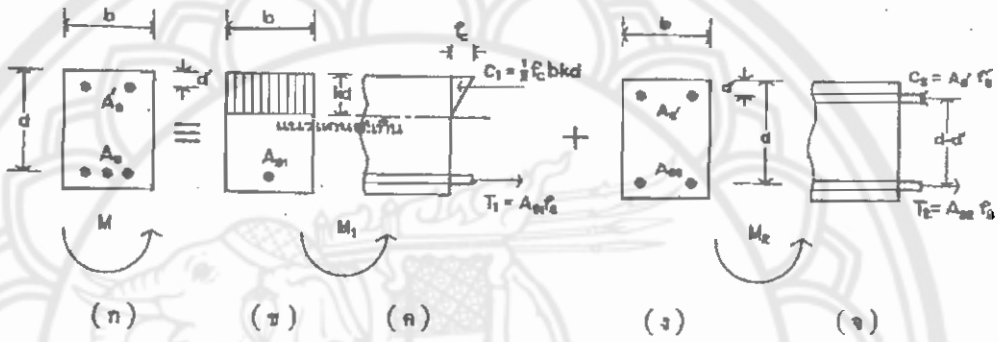
3) การออกแบบคานเพื่อรับน้ำหนักที่กำหนดให้และกำหนดแรงที่ยอมให้ทั้งเหล็กเสริมและคอนกรีตมาด้วย

## 2.4 คานรูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เสริมทั้งเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด

ตามปกติการออกแบบคาน คสล. ให้เหล็กเสริมรับแรงดึงและคอนกรีตรับแรงอัดทั้งหมดจะประหยัด แต่บางกรณีก็จำเป็นต้องจำกัดขนาดรูปตัดของคาน เพื่อผลทางสถาปัตยกรรม เช่น เพื่อมิให้ความสูงของเพดานซึ่งอยู่ที่ระดับท้องคานต่ำเกินไป นอกจากนี้คานรูปตัว T (T beam) ที่ต่อเนื่องหลายๆ ช่วง โมเมนต์ลบบริเวณเสามิอาจใช้ปีกคานซึ่งอยู่ตอนบนแรงอัดตอนล่างได้ จึงต้องพิจารณาแบบคานรูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าในแต่ละกรณีล้วนทำให้โมเมนต์ต้านทานของคอนกรีตไม่เพียงพอ จำเป็นต้องเสริมเหล็กรับแรงอัดด้วยเพื่อต้านทานโมเมนต์ส่วนที่เกินจากโมเมนต์ต้านทานของคอนกรีต

ในการพิจารณาคอนกรีตซึ่งต้านทานแรงอัดเหนือแนวแกนสะเทินกับเหล็กเสริมรับแรงอัดเมื่อหน่วยแรงในคอนกรีตและเหล็กอยู่ในช่วงอีลาสติก หน่วยแรงของเหล็กที่รับแรงอัด มีค่าเท่ากับ n เท่าของหน่วยรับแรงอัดของคอนกรีตที่ตำแหน่งเดียวกัน (ห่างจากแนวแกนสะเทินกัน) และหน่วยการหดตัวของเหล็กที่รับแรงอัดกับคอนกรีตข้างๆ จะมีค่าเท่ากัน ซึ่งจะช่วยให้คำนวณค่าของหน่วยแรงในเหล็กเสริมในการรับแรงอักได้ แต่ความจริงแล้วค่าของหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัวของคอนกรีตเป็นปฏิภาคกันในช่วงหน่วยแรงอัดต่ำๆ เท่านั้น ที่หน่วยแรงอัดสูงๆ หน่วยการหดตัวของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเร็วกว่าอัตราการเพิ่มของหน่วยแรงอัด ขากเส้น

สัมพันธ์ในรูปที่ 3 (ก) และประกอบคอนกรีตมีคุณสมบัติหดตัวเพิ่มกว่าปกติ ( minute flow) ตามช่วงเวลาภายใต้แรงอัดที่คงที่ แต่อย่างไรก็ตามหน่วยการหดตัวของเหล็กเสริมที่รับแรงอัดกับของคอนกรีตข้างๆ ต้องเท่ากัน ฉะนั้นเหล็กเสริมที่รับแรงอัดซึ่งต้องหดตัวมากกว่าคอนกรีตจึงมีหน่วยแรงอัดสูงกว่าที่คำนวณจากทฤษฎีอีลาสติก ในข้อกำหนดของ ว.ส.ท. ยอมให้เหล็กที่รับแรงอัดนี้มีค่าหน่วยรับแรงอัดเท่ากับสองเท่าของค่าที่คำนวณจากทฤษฎีอีลาสติก แต่ต้องไม่เกินกว่าหน่วยค่าแรงดึงที่ยอมให้เหล็กเสริมนั้น




รูปที่ 2.5

แสดงรูปตัดคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงและแรงอัด

ที่มา : สนั่น เจริญเผ่า และ วินิต ช่อวิเชียร คอนกรีตเสริมเหล็ก

รูปที่ 2.5 (ก) แสดงรูปตัดคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงและแรงอัด รูปที่ 2.5 (ข) และ (ค) แสดงรูปส่วนที่ต้านทานโมเมนต์เท่ากับโมเมนต์ต้านทานของคอนกรีต รูปที่ 2.5 (ง) และ (จ) แสดงรูปส่วนที่ต้านทานโมเมนต์โดยเหล็กเสริมแรงอัด

$M$ = โมเมนต์ต้านทานทั้งหมดของคาน , กก.-ซม.

$M_1$ = โมเมนต์ต้านทานโดยคอนกรีต , กก.-ซม.

$M_2$ = โมเมนต์ต้านทานโดยเหล็กเสรอมรับแรงอัด , กก.-ซม.

$A_{s1}$ = เนื้อที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงดึงสำหรับโมเมนต์ $M_1$, ซม.$^2$

$A_{s2}$ = เนื้อที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงดึงสำหรับโมเมนต์ $M_2$, ซม.$^2$

$A_s$ = เนื้อที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงดึงทั้งหมดสำหรับโมเมนต์ $M$, ซม.$^2$

= $A_{s1} + A_{s2}$ , ซม.$^2$

$A'_s$ = เนื้อที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงอัด , ซม.$^2$

$f_s$ = หน่วยแรงในเหล็กเสริมรับแรงดึง , กก./ซม.$^2$

$f'_s$ = หน่วยแรงในเหล็กเสริมรับแรงอัด , กก./ซม.$^2$

โมเมนต์ต้านทานโดยคอนกรีต $M_1$ มีค่าน้อยกว่าโมเมนต์ทั้งหมด $M$ เพราะการจำกัดขนาดคาน ฉะนั้น โมเมนต์ที่เหลือ $M_2$ จึงต้องใช้เหล็กเสริมรับแรงอัด $A'_s$ ทำหน้าที่ต้านทาน

โมเมนต์ต้านทานโดยคอนกรีต

$$M_1 = \frac{1}{2} f_c \cdot k \cdot j \cdot bd^2 \qquad (2.4.1)$$

หรือ $$M_1 = R \cdot bd^2 \qquad (2.4.2)$$

ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงสำหรับโมเมนต์ $M_1$

$$A_{s1} = \frac{M_1}{f_s \cdot jd} \qquad (2.4.3)$$

โมเมนต์ส่วนที่เหลือ $$M_2 = M - M_1 \qquad (2.4.4)$$

จากรูปที่ 2.5 (ง) และ (จ)

$$M_2 = A_{s2}\, f_s (d - d') \qquad (2.4.5)$$

ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงสำหรับโมเมนต์ $M_2$

$$A_{s2} = \frac{M_2}{f_s (d - d')} \qquad (2.4.6)$$

เหล็กเสริมรับแรงดึงทั้งหมด

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} \qquad (2.4.7)$$

$$A_s = \frac{M_1}{f_s \cdot jd} + \frac{M_2}{f_s (d - d')} \qquad (2.4.8)$$

จากการสมดุลของแรงในรูปที่ 2.5 (จ)

$$C_s = T_2$$

$$A'_s\, f'_s = A_{s2}\, f_s$$

และในช่วงอีลาสติก หน่วยแรงในเหล็กเสริมเป็นปฏิภาคกับระยะแนวแกนสะเทิน

$$\frac{f_s}{f'_s} = \frac{d - kd}{kd - d'}$$

หรือ $$f'_s = f_s \cdot \frac{kd - d'}{d - kd}$$

$$= f_s \cdot \frac{k - d'/d}{1 - k}$$

**จากข้อกำหนดที่ยอมให้ เหล็กเสริมรับแรงอัดมีหน่วยเป็น 2 เท่าของหน่วยแรงที่คำนวณ** ได้จากทฤษฎีอีลาสติก

ฉะนั้น $$f'_s = 2 f_s \frac{k - d'/d}{1 - k}$$

แทนค่า $f'_s$ ในสมการ $A'_s f'_s = A_s f_s$

$$2 A'_s f'_s \frac{k - d'/d}{1 - k} = A_{s2} f_s$$

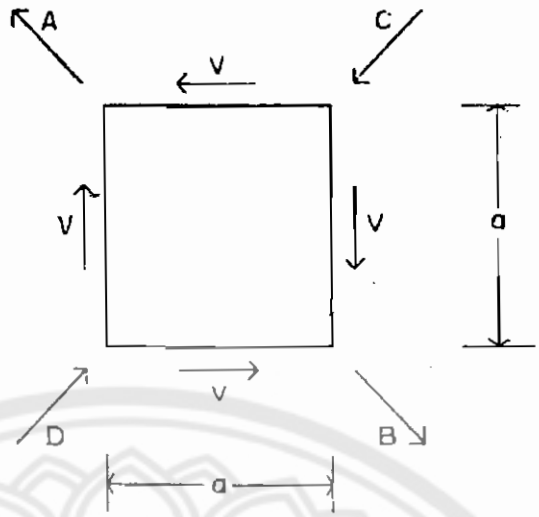
ฉะนั้น $$A'_s = \frac{1}{2} A_{s2} \frac{1 - k}{k - d'/d} = K.A_{s2} \qquad (2.4.9)$$

สมการ (2.4.19) ใช้เนื้อหาที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงอัด ( ดูค่า Kในตารางที่ 5 (ฉ) ของภาคผนวก )

## 2.5 แรงเฉือนและแรงดึงทแยงในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.5.1 หน่วยแรงดึงทแยง

พิจารณาสี่เหลี่ยมลูกบาศก์มีด้าน $a$ ซึ่งมีขนาดเล็กมากที่หน้าตัดใดๆ ในแนวแกนสะเทิน ที่ขอบของลูกบาศก์ก็มีแรงเฉือน 2 คู่ ในแนวดิ่งและแนวนอน แต่หน่วยแรงดัดเป็นศูนย์




รูปที่ 2.6

แสดงหน่วยแรงดึงทแยง

ที่มา : สนั่น เจริญเผ่า และ วินิต ช่อวิเชียร คอนกรีตเสริมเหล็ก

แรงเฉือนเหล่านี้จะรวมกัน แล้วให้ผลเป็นแรงดึงในแนว $AB$ และเป็นแรงอัดในแนว $CD$

$$\text{แรงดึงทแยง} = \sqrt{V^2 + V^2}$$

$$= V\sqrt{2}$$

$$= va^2\sqrt{2}$$

$$\text{เนื้อที่หน้าตัดทางด้านทแยง} = a^2\sqrt{2}$$

$$\text{หน่วยแรงดึงทแยง} = \frac{va\sqrt{2}}{a^2\sqrt{2}}$$

$$= v$$

ฉะนั้น หน่วยแรงดึงทแยงมีค่าเท่ากับหน่วยแรงเฉือนที่แนวแกนสะเทินและทำมุม 45 องศากับแนวแกนสะเทินด้วย

ในกรณีที่จุดพิจารณามิได้อยู่แนวแกนสะเทินก็ต้องพิจารณาแรงดัดเพิ่มเข้าไปด้วย

หน่วยแรงดึงทแยง

$$t = \frac{1}{2} f + \sqrt{4/f^2 + v^2} \qquad (2.5.1)$$

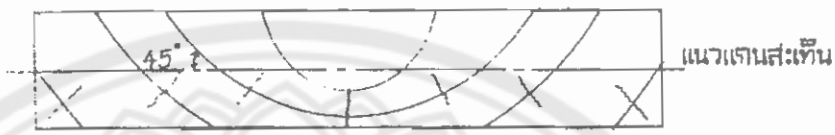
มีทิศทาง $\tan 2\alpha = 2\frac{v}{f}$ (2.5.2)

เมื่อ $f$ = หน่วยแรงดัด , กก./ซม.$^2$

$v$ = หน่วยแรงเฉือนในแนวดิ่ง , กก./ซม.$^2$

$\alpha$ = มุมที่หน่วยแรงดึงทแยงทำกับแนวราบ , องศา

หน่วยแรงดึงทแยงนี้ จะเป็นเหตุให้คานคอนกรีตร้าวเฉียงๆกับแนวราบโดยเฉพาะที่ใกล้ฐานรอง เนื่องจากคอนกรีตทนแรงดึงได้ต่ำ

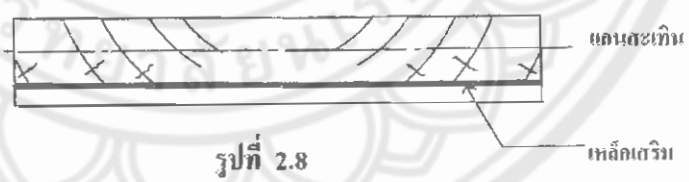



รูปที่ 2.7

แสดงคานคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเสริม

ที่มา : สนั่น เจริญเผ่า และ วินิต ช่อวิเชียร คอนกรีตเสริมเหล็ก

รูปที่ ( 2.7 ) แสดงคานคอนกรีตที่ไม่เสริมเหล็กซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายกับวัสดุที่มีเนื้อเดียวกันและยืดหยุ่น เส้นหนักและต่อเนื่องตามความยาวคาคือแนวแรงดึงในคาน มีแนวราบที่กลางคานทุกระดับของความลึกของคาน ใกล้ปลายคานหรือฐานรองเข้าไป ค่าของแรงดึงจากโมเมนต์ดัดคลงแรงเฉือนจะมีส่วนในการพิจารณาค่าของแรงดึงทแยงมากขึ้น ที่ฐานรองแรงดึงจากโมเมนต์ดัดเป็นศูนย์และมีแต่แรงเฉือน ฉะนั้นแรงดึงทแยงที่ฐานรองจึงเอียง 45 องศาทุกระดับความลึกของคาน เส้นหยักสั้นๆแสดงรอยร้าวของคอนกรีตตั้งฉากกับแนวแรงดึงทแยง




รูปที่ 2.8

รูปที่ 2.8

แสดงคานคอนกรีตที่มีเหล็กเสริม

ที่มา : สนั่น เจริญเผ่า และ วินิต ช่อวิเชียร คอนกรีตเสริมเหล็ก

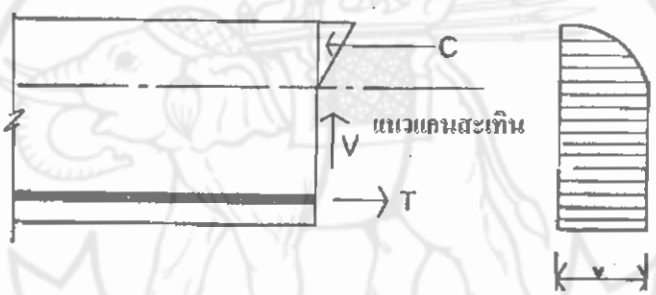
รูปที่ ( 2.8 ) แสดงคานคอนกรีตเสริมเหล็ก แนวแรงดึงในคานที่บริเวณกลางคานจะต่างไปเพราะเหล็กต้านทานแรงดึงไว้ และบริเวณปลายคานยังคงมีแนวแรงดึงทแยงคล้ายกับคานคอนกรีต

ไม่เสริมเหล็ก หน่วยแรงเฉือนในคอนกรีตที่อยู่เหนือเหล็กเส้นขึ้นไปมีค่าสูง ดังรูปที่ 2.8 เส้นหยักสั้นๆ แสดงรอยร้าวในคานคอนกรีดเนื่องจากแรงดึงทแยง ฉะนั้นการพิจารณาเสริมเหล็กให้ถูกต้องตามเป็นจริงแล้วควรจะเสริมเหล็กตามเส้นแสดงแนวของแรงดึงทแยง ซึ่งทำมุมประมาณ 45 องศาที่ปลายคาน และเอียงน้อยลงเมื่อห่างจากปลายคานหรือฐานรอง

2.5.2 หน่วยแรงเฉือน

เนื่องจากคอนกรีตเสริมเหล็กมิใช่วัสดุประเภทยืดหยุ่นและเป็นเนื้อเดียวอย่างแท้จริง ประกอบกับผลจากการทดลองแรงเฉือนของคอนกรีตก็มิได้สอดคล้องกับค่าที่คำนวณจากสมการ

$v = \frac{VQ}{Ib}$ ดังเช่นที่ใช้กับวัสดุอื่น เช่นไม้และเหล็กเลย




รูปที่ 2.9
แสดงรูปตัดทางข้างของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก
ที่มา : สนั่น เจริญเผ่า และ วินิต ช่อวิเชียร คอนกรีตเสริมเหล็ก

รูปที่ 2.9 แสดงรูปตัดทางข้างของคานคอนกรีตเสริมเหล็กและไดอะแกรมของหน่วยแรงเฉือน ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นโค้งเหนือแนวแกนสะเทิน และเป็นเส้นตรงมีค่าที่ได้แนวแกนสะเทินลงมา เนื่องจากไม่คำนึงถึงแรงดึงของคอนกรีตใต้แนวแกนสะเทิน หน่วยแรงเฉือนโดยลำพังแล้วมิอาจทำให้คานชำรุดได้ หากแต่มาในรูปของหน่วยแรงดึงทแยงอันเป็นเหตุให้คานชำรุดด้วยแรงดึงของคอนกรีต

สมการสำหรับหน่วยแรงเฉือนที่ใช้ในปัจจุบันเป็นแบบสมการสำเร็จที่ได้จากผลการทดลองขณะที่คอนกรีตเริ่มร้าว ซึ่งเป็นสมการสำหรับการออกแบบด้วยกำลังประลัย แต่เมื่อ

นำมาใช้กับการออกแบบด้วยทฤษฎีอีลาสติก ก็ใช้ส่วนปลอดภัยลดค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ลง ฉะนั้นปัจจุบันนี้จึงใช้สมการ (2.5.3) แล (2.5.4) หาค่าหน่วยแรงเฉือนเพื่อวัดค่าหน่วยแรงดึงทแยงในคานคอนกรีต

คานรูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า $v = \frac{V}{bd}$ (2.5.3)

เมื่อ $v$ = หน่วยแรงเฉือนที่ใช้วัดแรงดึงทแยง , กก./ซม.$^2$

$V$ = แรงเฉือนในคานคอนกรีตที่หน้าตัดใดๆ , กก.

$b$ = ความกว้างของคานคอนกรีต , ซม.

$d$ = ความลึกประสิทธิผลของคานคอนกรีต , ซม.

ในการออกแบบให้ถือว่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดเกิดที่หน้าตัดซึ่งห่างจากขอบฐานรองเป็นระยะ $d$

2.5.3 ความต้านทานแรงเฉือนของคานคอนกรีต

คานคอนกรีตเองก็มีส่วนต้านทานหน่วยแรงเฉือนด้วย หน่วยแรงเฉือนที่ต้านทานโดยคอนกรีตล้วนๆ ที่ตำแหน่งซึ่งห่างจากขอบฐานรองเป็นระยะ $d$ ต้องไม่เกิน

$$v_c = 0.29\sqrt{f'_c} \text{ กก./ซม.}^2 \quad (2.5.4)$$

หรือสำหรับการคำนวณที่ละเอียด

$$v_c = 0.265\sqrt{f'_c} + 91.5\ p_w \frac{V_d}{M} \text{ กก./ซม.}^2 \quad (2.5.5)$$

หน่วยแรงเฉือนของหน้าตัดที่อยู่ระหว่างระยะ $d$ จากขอบฐานรองไม่ถือว่าวิกฤติ

เมื่อ $v_c$ = หน่วยแรงเฉือนที่ต้านทานโดยคอนกรีต , กก./ซม.$^2$

$V$ = แรงเฉือนที่หน้าตัดนั้น , กก./ซม.$^2$

$M$ = โมเมนต์ที่หน้าตัดนั้นและมีค่าไม่น้อยกว่า $V_d$ , กก.-ม.

$p_w$ = $A_s / b'd$

$f'_c$ = กำลังอัดของคอนกรีตทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน , กก./ซม.$^2$

ค่า $v_c$ ที่ได้จากสมการ (2.5.6) จะต้องไม่เกิน $0.464\sqrt{f'_c}$ , กก./ซม.$^2$

**2.5.4 เหล็กเสริมรับแรงเฉือน**

**เมื่อคานคอนกรีตต้องต้านทานแรงเฉือนมากเกินกว่าที่คอนกรีตเองจะสามารถรับไว้ได้ ก็จำเป็นต้องใช้เหล็กเสริมรับแรงเฉือนส่วนที่เกิน**

$$V' = V - V_c \qquad (2.5.6)$$

$$V_c = v_c\, b\, d \qquad (2.5.7)$$

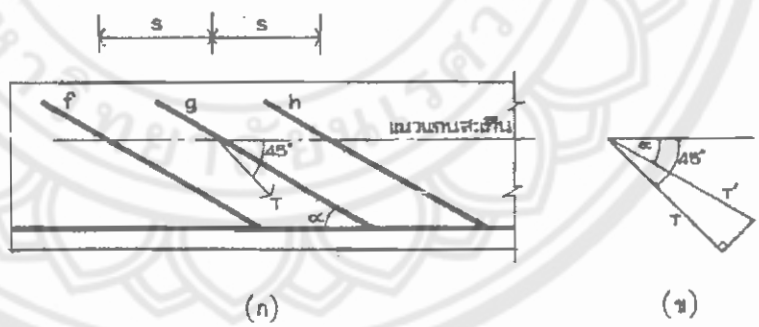
เมื่อ $V$ = แรงเฉือนที่คานต้องต้านทาน , กก.

$V_c$ = แรงเฉือนที่คอนกรีตรับไว้ได้ , กก.

$V'$ = แรงเฉือนต้านทานโดยเหล็กเสริมรับแรงเฉือน , กก.

เหล็กเสริมสำหรับต้านทานแรงเฉือนในคานคอนกรีตเสริมเหล็กนี้มีทั้งชนิดตั้งและชนิดเฉียงทำมุมกับแนวนอน

รูปที่ 2.10 แสดงเหล็กเสริมต้านทานแรงเฉือนทำมุม $\alpha$ กับแนวนอน เรียงห่างกันตามแนวนอนเป็นระยะ $s$ ดังได้กล่าวแล้วว่าบริเวณฐานรองแรงดึงทแยงมากที่สุดทำมุม 45 องศา กับแนวนอน T เป็นแรงกึงทแยงซึ่งทำมุม 45 องศา กับแนวนอนที่เหล็กเสริมรับแรงเฉือน $g$ ต้องต้านทาน




รูปที่ 2.10

**แสดงเหล็กเสริมต้านทานแรงเฉือน**

**ที่มา : สนั่น เจริญเผ่า และ วินิต ช่อวิเชียร คอนกรีตเสริมเหล็ก**

จากรูปที่ 2.10 (ก) $T = v\, b\, s \sin 45°$

จากรูปที่ 2.10 (ข) แรงในเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

$$T' = \frac{T}{\cos(45° - \alpha)}$$

$$= \frac{v'\,b.s\,\sin 45°}{\cos 45°.\cos\alpha + \sin 45°.\sin\alpha}$$

$$= \frac{v'\,b.s}{d(\sin\alpha + \cos\alpha)}$$

แต่ $T' = A_v f_v$

$$= \frac{v'.s}{d(\sin\alpha + \cos\alpha)}$$

$$s = A_v f_v\ d\ (\sin\ \alpha + \cos\ \alpha) \qquad (2.5.8)$$

สมการที่ (2.5.9) ใช้สำหรับการคำนวณระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่เอียงทำมุม $\alpha$ กับแกนนอน

ถ้า $\alpha = 45°$ : $s = \frac{A_v\ f_v\ d\ \sqrt{2}}{V'}$ (2.5.9)

สำหรับเหล็กเสริมรับแรงเฉือนแบบลูกตั้ง $\alpha = 90°$ : $s = \frac{A_v\ f_v\ d}{V'}$ (2.5.10)

2.5.5 มาตรฐานสำหรับเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

1. หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมรับแรงเฉือนให้ใช้ตามกำหนดเดียวกับเหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัด
2. หน่วยแรงเฉือน $v$ จะต้องไม่เกิน 1.32 $\sqrt{f'_c}$ กก./ซม.$^2$ สำหรับหน้าตัดที่มีแรงเสริมรับแรงเฉือน
3. บริเวณที่ต้องใช้เหล็กเสริมรับแรงเฉือน จะต้องจัดให้มีระยะเรียงไม่เกิน $\frac{d}{2}$ และเนื้อที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนต้องมากกว่า 0.0015 $bs$ ในเนื้อที่ $bs$ เมื่อหน่วยแรงแรงเฉือนเกินกว่า 0.795 $\sqrt{f'_c}$ กก./ซม.$^2$ ระยะเรียงต้องไม่เกิน $\frac{d}{4}$ เหล็กเสริมรับแรงเฉือนจะต้องเสริมให้เลยจุดที่ต้องการ ทางทฤษฎีออกไปอีกเป็นระยะ $d$
4. เหล็กคอม้าพิจารณารับแรงเฉือนได้เพียง $\frac{3}{4}$ ของช่วงกลางส่วนที่เอียง

5. เหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่เป็นเหล็กคอม้า เส้นเดียวหรือหลายเส้นที่ห่างจากฐานรองเท่ากัน รับแรงเฉือนได้ $V'$ โดยคำนวณจาก

$$V' = A_v f_v \sin\alpha \qquad (2.5.11)$$

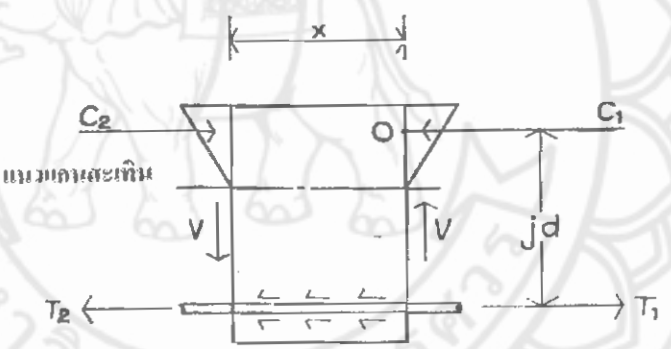
แต่ $V'$ จะต้องได้ไม่เกิน $0.398\ bd\sqrt{f'_c}$

6. ปากเหล็กรับแรงเฉือน จะต้องงอแต่ละปลายให้ดี เช่น งอเป็นมาตรฐานพันรอบเหล็กเสริมตามยาว 180 องศา เป็นต้น

## 2.6 แรงยึดเหนี่ยว

2.6.1 หน่วยแรงยึดเหนี่ยว

เหล็กเสริมตามยาวสำหรับโมเมนต์ดัดนี้ทำหน้าที่รับแรงดึง จึงจำเป็นต้องมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต เพื่อป้องกันมิให้เหล็กเสริมครูดออกจากคอนกรีตเมื่อรับแรงดึง




รูปที่ 2.11
แสดงรูปตัดทางยาวของคาน
ที่มา : สนั่น เจริญผ่า และ วินิต ช่อวิเชียร คอนกรีตเสริมเหล็ก

พิจารณาจากรูป 2.11 เป็นรูปตัดทางยาวของคาน ความยาวของรูปตัดนี้น้อยมากน้ำหนักจากภายนอกไม่มีผลในการพิจารณา และไม่คำนึงถึงแรงดึงในคอนกรีตใต้แนวสะเทิน แรงอัด $C_1$ และแรงดึง $T_1$ ทางซีกขวามากกว่า $C_2$ และ $T_2$ ทางซีกซ้าย แรงเฉือน $V$ ทางซีกขวาและทางซีกซ้ายถือว่าเท่ากัน เพราะไม่มีผลจากน้ำหนักภายนอก

โมเมนต์ดัดรอบจุด O $\quad (T_1 - T_2)jd = V_x$

แรง $T_1 - T_2$ ถูกต้านทานโดยแรงยึดเหนี่ยวไว้ทั้งหมด

$$T_1 - T_2 = (\sum_o) \times u$$

แทนค่า $T_1 - T_2$ : $(\sum_o) \times u\, jd = V_x$

$$u = \frac{V}{(\sum_o) j.d} \qquad (2.6.1)$$

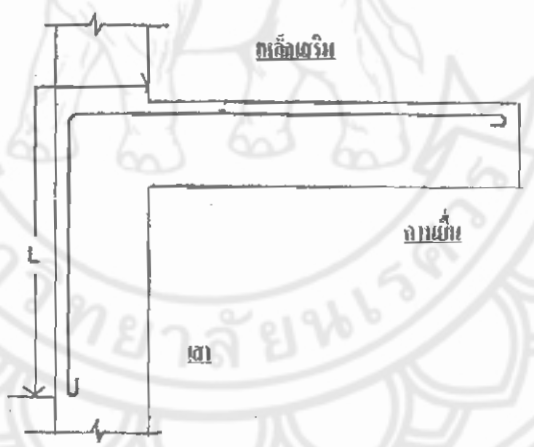
เมื่อ $u$ = หน่วยแรงยึดเหนี่ยว , กก. / ซม.$^2$

$\sum_o$ = ผลบวกของเส้นรอบวงของเหล็กเสริมตามยาว , ซม.$^2$

$jd$ = ระยะโมเมนต์ , ซม.$^2$

2.6.2 ระยะฝังของเหล็กเสริม

เหล็กเสริมตามความยาวของคานจำเป็นต้องระยะฝังที่มากพอ เช่น ในคานยื่น เพื่อป้องกันมิให้คานชำรุดด้วยสาเหตุแรงยึดเหนี่ยวไม่เพียงพอ




รูปที่ 2.12

แสดงระยะฝังของเหล็กเสริม

ที่มา : สนั่น เจริญผ่า และ วินิต ช่อวิเชียร คอนกรีตเสริมเหล็ก

สมมุติเหล็กเสริมในคานยื่นมีเนื้อที่หน้าตัด $A_s$ หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริม $f_s$ เส้นผ่าศูนย์กลาง $d$ มีหน่วยแรงยึดเหนี่ยว $u$ ระยะฝังของเหล็กเสริม $L$

ป TA
638
.2
ย๓๖๓
2544

25
สำนักหอสมุด
- 4 W.A. 2549
4840543

แรงดึงทั้งหมดในเหล็กเสริม = $A_s f_s$

แรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีต = $\pi d L u$

$$\pi d L u = A_s f_s$$

$$\pi d L u = \pi \frac{d^2}{4} f_s$$

ระยะฝังของเหล็กเสริม $L = \frac{d\, fs}{4}$ (2.6.2)

## 2.7 คานต่อเนื่อง

คาน คสล. ที่หล่อติดเป็นเนื้อเดียวกันตลอดโดยมีช่วงคานมากกว่าสองช่วงขึ้นไปเรียกว่า คานต่อเนื่อง การคำนวณหรือค่าของโมเมนต์แรงเฉือนเพื่อใช้ในการออกแบบหาขนาดรูปตัด อาจวิเคราะห์หาได้จากทฤษฎีอีลาสติก แต่เนื่องจากคานต่อเนื่องนี้เป็นโครงสร้างแบบอินดีเทอมีเนท ซึ่งมีวิธีวิเคราะห์ยุ่งยากซับซ้อน มาตรฐาน ว.ส.ท. จึงได้กำหนดค่าโดยประมาณโมเมนต์และแรงเฉือน เพื่อใช้สำหรับการออกแบบคานต่อเนื่องดังกล่าวข้างล่างนี้ ทั้งนี้ใช้สำหรับคานที่มีช่วงตั้งแต่สองช่วงนี้ขึ้นไป และช่วงคานเกือบเท่ากัน ความยาวที่ต่อเนื่องกันยาวกว่าช่วงสั้นไม่เกิน 1.2 เท่า มีน้ำหนักบรรทุกแผ่เท่ากันเต็มช่วงคาน และน้ำหนักบรรทุกจรมากกว่าน้ำหนักบรรทุกคงที่ ไม่เกิน 3 เท่า

โมเมนต์บวก

คานช่วงนอก

- ปลายไม่ยึดรั้งกับที่รองรับ ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... $1/11\, wL^2$
- ปลายหล่อเป็นเนื้อเดียวกันกับที่รองรับ ... ... ... ... ... ... ... .. $1/14\, wL^2$

คานช่วงนี้ ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... $1/16\, wL^2$

โมเมนต์ลบ

โมเมนต์ที่ขอบนอกของที่รองรับตัวในแรก

- เมื่อมีช่วงต่อเนื่องกัน 2 ช่วง ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... $1/9\, wL^2$
- เมื่อมีช่วงต่อเนื่องกันมากกว่า 2 ช่วง ... ... ... ... ... ... ... ... ... $1/10\, wL^2$

โมเมนต์ที่ขอบของที่รองรับตัวในอื่นๆ ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... $1/11\, wL^2$

โมเมนต์ที่ขอบของที่รองรับทุกแห่งสำหรับ

(ก) พื้นที่มีช่วงยาวไม่เกิน 3.00 ม. และ

(ข) คานที่อัตราส่วนผลรวมของสติฟเนสของเสาต่อคาน

ที่มาบรรจบรวมกันมากกว่า 8 ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... 1/12 $wL^2$

โมเมนต์ที่ขอบในของที่รองรับตัวตัวริมและตัวอาคารหล่อ

เป็นเนื้อเดียวกันกับที่รองรับ

- เมื่อที่รับเป็นคานขอบ ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... 1/24 $wL^2$
- เมื่อที่รับเป็นเสา ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... 1/16 $wL^2$

แรงเฉือน

แรงเฉือนที่ขอบของที่รองรับตัวในแรก ... ... ... ... ... ... ... ... 1.15 $wL^2/2$

แรงเฉือนที่ขอบของที่รองรับตัวอื่นๆ ... ... ... ... ... ... ... ... ... $wL^2/2$

## 2.8 ความต้านทานต่อแรงบิด

ในบางโอกาสคานคอนกรีตเสริมเหล็กอาจต้านทานโมเมนต์คัดและโมเมนต์บิดพร้อมๆ กัน เช่น คานในแนวกำแพงที่รับกันสาดที่ออกแบบเป็นพื้น คสล. ยื่นแบบหูช้าง คานกำแพงที่รับบันไดที่ออกแบบเป็นพื้นยื่น เป็นต้น

การออกแบบคาน คสล. แบบนี้ จะต้องเลือกขนาดรูปตัดคานให้มีขนาดเพียงพอที่จะต้านทานหน่วยแรงบิดได้ นอกจากนี้ยังต้องเสริมเหล็กให้ต้านทานโมเมนต์บิดได้อย่างเพียงพอด้วยเหล็กเสริมรับโมเมนต์บิด ได้แก่ เหล็กเสริมตามความยาวมุมทั้งสี่ของคานตัดรูปสี่เหลี่ยม ร่วมกับเหล็กลูกตั้งพันครบรอบรูปตัดคาน หรือปลอกเกลียว การออกแบบให้คำนวณหน่วยแรงบิด สูงสุดที่ระยะ $d$ จากจุดรองรับตามเกณฑ์ ดังนี้

ก) หน่วยแรงบิดสำหรับรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีค่าสูงสุดที่กึ่งกลางของแต่ละด้านของรูปตัด ค่าหน่วยแรงบิดของรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปตัว T และรูปตัด L หาได้จาก

$$v_t = \frac{3.5\, M_t}{\sum x^2\, y} \qquad (2.8.1)$$

เมื่อ $M_t$ = โมเมนต์บิด

$v_t$ = หน่วยแรงบิด

$x$ , $y$ = ด้านสั้นและด้านยาวของสี่เหลี่ยมผืนผ้าประกอบเป็นหน้าตัดนั้น

ข) ค่าหน่วยแรงบิดอย่างเดียวต้องมีค่าไม่เกิน $1.32\sqrt{f'_c}$ กก./ซม.$^2$

ค) ค่าหน่วยแรงบิดและหน่วยแรงเฉือนจากโมเมนต์คัดร่วมกันยอมให้ใช้ได้ไม่เกิน

$1.65\sqrt{f'_c}$ กก./ซม.$^2$

ง) เมื่อค่าหน่วยแรงบิด จากข้อ (ข) และ (ค) เกิดค่าหน่วยแรงเฉือนที่ต้านทานโดยคอนกรีด จะต้องเสริมเหล็กต้านทานหน่วยแรงเฉือนส่วนที่เกินนี้

จ) เหล็กเสริมชนิดเหล็กลูกตั้งที่พันครบรอบเพื่อต้านทานหน่วยแรงบิดเดียวกันพื้นที่หน้าตัดเพียงขาเดียวของแต่ละรอบที่พิจารณาให้ต้านทานหน่วยแรงบิด หาค่าได้จาก

$$A_v = \frac{M_1 s}{2 A_c f_v} \qquad (2.8.2)$$

ฉ) เหล็กเสริมชนิดปลอกเกลียวที่ต้านทานหน่วยแรงบิดอย่างเดียวให้หาเนื้อที่หน้าตัดปลอกเกลียวแต่ละรอบจาก

$$A_v = \frac{M_1 s}{2\sqrt{2 A_c f_v}} \qquad (2.8.3)$$

ช) เหล็กเสริมตามความยาวสำหรับต้านทานหน่วยแรงบิดอย่างเดียว ให้จัดไว้ตามมุมของหน้าตัดสี่เหลี่ยม เนื้อที่หน้าตัดของเหล็กเสริมตามความยาวแต่ละมุมหาได้จาก

$$A_v = \frac{M_1 z}{2 A_c f_s} \qquad (2.8.4)$$

เมื่อ $A_v$ = เนื้อที่หน้าตัดของเหล็กลูกตั้งหรือปลอกเกลียว

$A_s$ = เนื้อที่หน้าตัดของเหล็กเสริมตามความยาว

$A_v$ = เนื้อที่หน้าตัดของคอนกรีตภายในวงเหล็กลูกตั้งหรือปลอกเกลียว

$M_t$ = โมเมนต์บิด

$s$ = ค่าเฉลี่ยของระยะระหว่างเหล็กลูกตั้งหรือปลอกเกลียว

$z$ = ค่าเฉลี่ยของระยะระหว่างเหล็กเสริมตามความยาว

$f_v$ = หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของเหล็กลูกตั้งหรือปลอกเกลียว

$f_s$ = หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของเหล็กเสริมตามความยาว

## 2.9 คานแคบ

คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่วงยาวมากกว่า 30 เท่าของความกว้างให้ถือว่าเป็นคานแคบ ซึ่งต้องลดหน่วยค่าแรงดัดของคอนกรีตลง ความลึกที่ใช้คำนวณโมเมนต์ดัดไม่เกิน 8 เท่าของความกว้างคาน และต้องออกแบบให้เหล็กเสริมรับแรงเฉือนทั้งหมด

$$R_B = 1.75 - \frac{L}{40b} \qquad (2.9.1)$$

เมื่อ $R_B$ = ตัวคูณลดค่าหน่วยแรงดัด

$L$ = ช่วงความยาวของคาน

$b$ = ความกว้างของคาน

| $L/B$ | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
|---|---|---|---|---|---|
| $R_B$ | 1 | 0.87 | 0.75 | 0.63 | 0.50 |

## 2.10 การออกแบบเหล็กเสริมแบบคานเหล็ก

ในบางโอกาสคานคอนกรีตเสริมเหล็กถูกจำกัดความลึกมากๆ ทำให้ต้องใช้เหล็กรับแรงอัดมากเท่ากับ หรือมากกว่าเหล็กเสริมรับแรงดึง ดังนั้นจำเป็นต้องออกแบบคานที่เป็นแบบคานเหล็กโดยใช้เหล็กเสริมบนและล่างเท่ากัน และเหล็กลูกตั้งจะต้องห่างกันไม่เกิน 8 เท่าความกว้างคานเนื้อที่หน้าตัดเหล็กเสริมตามความยาวหาได้จาก

$$A_s = A'_s = \frac{M}{f_s(d-d')} \qquad (2.10.1)$$

เมื่อ $A_s$ , $A'_s$ = เนื้อที่หน้าตัดเหล็กเสริมบนและเหล็กเสริมล่าง

$M$ = โมเมนต์ดัด

$f_s$ = หน่วยแรงดึงที่ยอมให้เหล็กเสริมตามความยาว

$d$ = ความลึกของประสิทธิผล

$d'$ = ระยะหุ้มเหล็กบน