

# การคำนวณออกแบบขนาด ของ Expansion Loops ให้เป็นไปตาม A.S.M.E. B31.1



ศาสตราจารย์กิตติคุณ ดร.วริทธิ์ อึ้งภากรณ์

## คำนำ

ในการที่จะสามารถคำนวณหาผลที่เกิดจากการขยายตัวของท่ออันเนื่องมาจากความร้อนตลอดจนแรงและความเค้นที่เกิดขึ้นภายในระบบท่อได้เราจำเป็นต้องรู้:

1. เราจะใช้เกณฑ์กำหนด (Code) ใดกับระบบท่อ
2. อุณหภูมิและความดันที่ออกแบบ
3. Specification ของวัสดุท่อ
4. ขนาดของท่อและความหนา (Pipe schedule) ของแต่ละส่วนของท่อในระบบท่อทั้งหมด
5. Piping layout ของระบบท่อ รวมถึงมิติต่างๆ และการเคลื่อนไหวใดๆ ที่ terminal points เมื่อระบบท่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น เช่น ไม่มีการเคลื่อนไหวใดๆ ระหว่างจุดยึดแน่น (anchor points) หรือมีการเคลื่อนไหวได้บางส่วน ณ ตำแหน่งที่ต่อเข้ากับหน้าแปลนของอุปกรณ์ที่รับไอน้ำ
6. ข้อจำกัดของ end reactions อันได้แก่ แรงและโมเมนต์ต่างๆ ที่กระทำต่อ terminal points ตามที่ผู้ผลิตอุปกรณ์ไอน้ำนั้นกำหนดไว้ เช่น ขนาดของแรงและโมเมนต์ที่กระทำต่อหน้าแปลนที่ส่งไอน้ำเข้าสู่กังหันไอน้ำ เป็นต้น

หลังจากที่ได้กำหนดพื้นฐานของปัญหาแล้ว เราจึงจะเลือก Code ที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาใช้เป็นเกณฑ์กำหนดในการออกแบบเพื่อให้ได้ความปลอดภัยขั้นต่ำกับระบบท่อและอุปกรณ์ ณ อุณหภูมิและความดันออกแบบ บาง Code อาจจะระบุถึง thermal expansion factors รวมถึงสูตรต่างๆ เพื่อใช้ในการคำนวณหา flexibility factors (ตัวประกอบความยืดหยุ่น) และ stress intensification factors (ตัวประกอบจุดรวมความเค้นหรือ stress concentration factor) สำหรับแต่ละ piping components ของท่อเอาไว้ด้วย นอกเหนือจากนี้แล้ว Code ทั้งหลายจะไม่บังคับถึงวิธีการที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความเค้นและแรงที่เกิดขึ้นในระบบท่อ อย่างไรก็ตาม Code ทั้งหลายมักจะระบุไว้ว่า ในการคำนวณหา flexibility (ความสามารถในการยืดหยุ่น) ของระบบท่อใดๆ ที่อยู่ระหว่าง anchor points เราจะต้องคำนึงถึงระบบท่อทั้งหมดระหว่าง anchor points ร่วมกัน และให้คำนึงถึงความสำคัญของทุกชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องกับเส้นท่อด้วย เช่น แบบของ pipe hangers และวิธีการรองรับ การวางตำแหน่งและชนิดของ pipe guides เป็นต้น นอกจากนี้แล้ว Code ยังกำหนดให้ต้องรวมเอา stress intensification factors เข้าไว้ในการคำนวณท่อส่วนที่โค้งด้วย

A.S.M.E. Boiler and Pressure Vessel Code ได้เป็นผู้จัดพิมพ์มาตรฐานต่างๆ ซึ่งถูกนำไปอ้างอิงในสหรัฐอเมริกาและประเทศอื่นๆ อย่างกว้างขวาง ตัวอย่างเช่น

1. A.S.M.E. B31.1-2001 - Power Piping
2. A.S.M.E. B31.2-1968 - Fuel Gas Piping
3. A.S.M.E. B31.3-2002 - Process Piping
4. A.S.M.E. B31.4-2002 - Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids
5. A.S.M.E. B31.5-2001 - Refrigeration Piping and Heat Transfer Components
6. A.S.M.E. B31.8-2003 - Gas Transmission and Distribution Piping Systems

เนื่องจาก Piping Code มักจะได้รับการทบทวน อยู่เสมอ ดังนั้นข้อกำหนด ข้อมูลและสูตรต่างๆ ที่จะกล่าวถึงในที่นี้จึงอาจจะถูกปรับปรุง เปลี่ยนแปลงไปได้ ซึ่งเป็นภาระของผู้อ่านที่จะต้องแสวงหา Code ของ A.S.M.E. ตาม edition ที่ใหม่กว่าด้วย

A.S.M.E. B31.1 (เดิมคือ ANSI B31.1) สำหรับ Power Piping กล่าวไว้ว่า ถ้ามีข้อสงสัยว่าความหยุ่นตัวของระบบท่อจะพอเพียงหรือไม่ ให้ผู้ออกแบบทำ formal calculations หรือทำการทดสอบแบบจำลอง สำหรับระบบท่อที่มี anchor points อยู่ 2 ตำแหน่ง เราไม่จำเป็นต้องทำ formal stress analysis เมื่อระบบท่อเป็นไปตามเกณฑ์ดังนี้ คือ:

$$\frac{D_n Y}{(L-U)^2} \leq 0.03 \quad (1)$$

เมื่อ  $D_n$  = nominal pipe size เป็น นิ้ว

$Y$  = การขยายตัวรวมของท่อ

$U$  = anchor distance (ระยะที่จับยึดแน่น) ซึ่งหมายถึงระยะทางเป็นเส้นตรงที่วัดระหว่าง anchor point ทั้งสอง เป็นฟุต

$L$  = developed length (ความยาวคลี่) ของแนวเส้นแกนท่อ เป็นฟุต

### ตารางข้อมูลเพื่อการคำนวณหาความเค้นและแรงในระบบท่อ

ต่อไปนี้เป็นตารางข้อมูลเพื่อใช้ประกอบในการคำนวณหาแรงและความเค้นที่เกิดขึ้นในระบบท่อที่ขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนในขณะที่ปลายทั้งสองถูกจับยึดให้อยู่กับที่

• ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของท่อเหล็กซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางและระดับความหนาของผนังต่างๆ ข้อมูลประกอบด้วย เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ( $D$ ) nominal diameter ( $D_n$ ) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ( $d$ ) ความหนาของผนังท่อ ( $t$ ) พื้นที่หน้าตัดภายในท่อ ( $A_i$ ) พื้นที่เนื้อโลหะของหน้าตัดท่อ ( $A_m$ ) polar moment of inertia ของหน้าตัดท่อ ( $I_p$ ) และ section modulus ของหน้าตัดท่อ ( $S_m$ )

• ตารางที่ 2 แสดงค่า modulus of elasticity ( $E$ ) และ torsional rigidity หรือ shear modulus ( $G$ ) สำหรับเหล็กประเภทต่างๆ ที่อุณหภูมิต่างๆ กันไปจนถึง  $1,200^\circ\text{F}$

• ตารางที่ 3 แสดงข้อมูลการขยายตัวของท่อโลหะต่างๆ เมื่อได้รับความร้อน โดยให้ใช้อุณหภูมิ  $70^\circ\text{F}$  เป็นอุณหภูมิอ้างอิง ไปจนถึงอุณหภูมิ  $1,200^\circ\text{F}$  ในตารางประกอบด้วย สัมประสิทธิ์การขยายตัวของโลหะ ( $\alpha$ ) หน่วยเป็น นิ้ว/ นิ้ว/  $^\circ\text{F}$  และค่าการขยายตัวหน่วยเป็นนิ้วต่อความยาวของท่อ 100 ฟุต ( $\beta$ ) นั่นคือ  $\beta = (\alpha) \cdot (100 \text{ ฟุต}) \cdot (12 \text{ นิ้ว}) \cdot (t-70)$

• ตารางที่ 4 แสดงถึงค่า expansion factor ( $c$ ) ของวัสดุท่อต่างๆ กัน ณ อุณหภูมิต่างๆ กันไปจนถึง  $1,150^\circ\text{F}$  โดยให้ใช้อุณหภูมิ  $70^\circ\text{F}$  เป็นอุณหภูมิอ้างอิง

• ตารางที่ 5 ซึ่งมีตั้งแต่ ตารางที่ 5.1 ไปจนถึง 5.11 แสดงข้อมูลสำหรับการคำนวณหาแรงที่กระทำ ณ anchor point (anchor forces,  $F_x$  และ  $F_y$ ) และค่า max. bending stress ( $S_b$ ) max. torsional shear stress ( $S_t$ ) พร้อมกับสูตรที่ใช้สำหรับคำนวณ ในตารางนี้ได้ถูกจัดทำขึ้นเฉพาะการคำนวณ Expansion loops ที่มีรูปร่างอย่างง่ายที่อาจพบได้เสมอๆ ในการออกแบบระบบท่อเท่านั้น ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็น loop ที่อยู่ในระนาบเดียว ยกเว้น loop ในตารางที่ 5.10 และ 5.11 เท่านั้นที่ระบบท่ออยู่ใน 2 ระนาบ ข้อมูลเหล่านี้ช่วยให้เราสามารถคำนวณหา Thermal expansion stresses และ anchor forces ได้อย่างง่ายดาย ซึ่งจะเห็นจากตัวอย่างต่างๆ ในภายหลัง ค่าที่ไม่ตรงกับค่าที่มีอยู่ในตารางสามารถใช้การประมาณค่าแบบ interpolation ได้โดยที่ยังคงความแม่นยำในการคำนวณอยู่

**ความเค้นในท่อ**

ส่วนใดๆ ของท่อซึ่งรับความดันภายในและมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิในขณะติดตั้งจะถูกแรงกระทำให้เกิดความเค้นได้ 4 components ซึ่งบาง component ก็ไม่มีความสำคัญมากพอที่จะต้องนำมาคิดในการวิเคราะห์เกี่ยวกับ piping flexibility ความเค้นต่างๆ มีดังนี้ คือ:

- Longitudinal stress,  $S_L$  (ความเค้นตามแนวยาวของท่อ)
- Circumferential หรือ hoop stress,  $S_C$  (ความเค้นตามแนวเส้นรอบวงของท่อ)
- Radial stress,  $S_R$  (ความเค้นตามแนวรัศมีของท่อ)
- Torsional shear stress,  $S_T$  (ความเค้นเฉือนเนื่องจากแรงบิด)

**Longitudinal stress,  $S_L$**

ความเค้นตามแนวยาวของท่อ ประกอบด้วยผลรวมของ 3 components ของ stress คือ:

(1) Bending stress อันเนื่องมาจากการขยายตัวของท่อตรงที่เป็น loop คือ

$$S_B = \frac{M}{S_m} \tag{2}$$

หรือ Bending stress อันเนื่องมาจากการขยายตัวของท่อโค้ง คือ

$$S_B = \frac{M}{S_m} i \tag{3}$$

เมื่อ M คือ bending moment และ i คือ stress concentration factor ของท่อโค้ง ซึ่งถ้ารัศมีโค้งมีขนาดโตเมื่อเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อแล้ว ( $R \geq 5 D_n$ ) ค่า i จะเข้าใกล้ 1 ส่วนค่า maximum bending stress  $S_B$  หาได้โดยอาศัยตารางที่ 5.1 ถึง 5.11

(2) Bending stress อันเนื่องมาจากน้ำหนักของตัวท่อเอง ถ้าระบบท่อได้รับการออกแบบชนิดของที่รองรับ (แขวน) ท่ออย่างเหมาะสมแล้วค่าความเค้นในส่วนนี้จะน้อยมากและไม่จำเป็นต้องนำมาใช้ในการคำนวณใดๆ

(3) ความเค้นตามแนวยาวของท่ออันเนื่องมาจากความดันของไอน้ำหรือของไหลที่อยู่ภายในท่อ คือ

$$S_P = \frac{PA_I}{A_M} \tag{4}$$

โดยที่ P คือความดันภายในท่อเป็น psi ดังนั้น

$$S_L = S_B + S_P \tag{5}$$

**Circumferential หรือ hoop stress,  $S_C$**

ความเค้นส่วนนี้เนื่องมาจากความดันของไหลที่อยู่ภายในท่อ คือ

$$S_C = P \left( \frac{D-t}{2t} \right) \tag{6}$$

**Radial stress,  $S_R$**

ทิศทางของความเค้นส่วนนี้ตั้งฉากกับผนังท่อเป็นความเค้นที่เกิดจากความดันที่กระทำต่อผนังท่อโดยตรง แต่ขนาดของความเค้นมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ component อื่นๆ จึงไม่จำเป็นต้องนำมาคำนวณ

**Torsional shear stress,  $S_T$**

ความเค้นเฉือนเนื่องจากแรงบิด เกิดจากการขยายตัวของระบบท่อที่เดินอยู่ในสองระนาบซึ่งจะสร้างโมเมนต์บิด T มากระทำต่อท่อ คือ

$$S_T = \frac{T}{2S_m} \tag{7}$$

**Combined stress (ความเค้นรวม)**

ในการคำนวณที่เกี่ยวกับ piping flexibility เกณฑ์กำหนดของ A.S.M.E. B31.1 Power Piping ยอมให้คิดเฉพาะแรงที่เกิดจากการขยายตัวอันเนื่องมาจากอุณหภูมิเท่านั้นได้ โดยไม่ต้องนำความเค้นที่เกิดจากความดันของของไหลภายในท่อและน้ำหนักท่อมาคิดด้วย โดยให้นำความเค้นตัดและความเค้นเฉือนที่เกิดจากการที่ท่อถูกบิดมารวมกันตามทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด (Max. shear theory) ตามสูตร

$$S_E = \sqrt{(S_B)^2 + 4(S_T)^2} \tag{8}$$

มาตรฐาน A.S.M.E. B31.1 ให้ชื่อเรียกความเค้นรวมนี้ว่า Expansion stress ซึ่งจะต้องมีค่าไม่เกินค่าความเค้นที่อนุญาตสำหรับแต่ละวัสดุที่อุณหภูมินั้นๆ  $S_A$  (Allowable stress) สำหรับค่า  $S_E$  ที่ถูกต้องจะต้องคำนวณจากตำแหน่งที่เกิด max.  $S_B$  (ซึ่งอาจจะ

ไม่ตรงกับค่า  $\max. S_T$ ) หรือจากตำแหน่งที่เกิดค่า  $\max. S_T$  (ซึ่งอาจจะไม่ตรงกับค่า  $\max. S_B$ ) แล้วให้ เลือกใช้ค่า  $S_E$  ที่สูงกว่า โดยปกติของงานระบบท่อ ค่า  $S_T$  จะมีค่าน้อยกว่า  $S_B$  มาก ฉะนั้นถ้าค่า  $\max. S_T$  ไม่ได้เกิด ณ ที่เดียวกันการคำนวณจะยึดถือค่า  $S_B$  เป็นหลัก

ดังนั้น สำหรับระบบท่อในสองระนาบ เงื่อนไข ของ Piping flexibility ที่ A.S.M.E. B31.1 ยอมรับ ก็คือ

$$S_E \leq S_A \quad (9)$$

และสำหรับระบบท่อในระนาบเดียว

$$S_B \leq S_A \quad (10)$$

ในการใช้งานระบบท่อจะยึดและหดตัวอยู่ในช่วง อุณหภูมิหนึ่งเป็นวัฏจักร ซึ่งความเค้นที่อนุญาต ณ อุณหภูมิสูงจะน้อยกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้น A.S.M.E. B31.1 จึงกำหนดให้

$$S_A = f(1.25S_c + 0.25S_h) \quad (11)$$

เมื่อ  $S_c$  = Allowable stress ของวัสดุท่อ ในขณะที่เย็น

$S_h$  = Allowable stress ของวัสดุท่อ ในขณะที่ร้อน

$f$  = Fatigue factor (ตัวประกอบความล้า) อันเนื่องมาจาก cyclic condition ซึ่งมีค่าดังนี้ คือ

ตารางที่ 6 ค่า Fatigue factor

| จำนวนครั้งในการขยาย-หดตัว ของท่อตลอดอายุใช้งาน | ค่า $f$ |
|--|---------|
| $\leq 7,000$                                   | 1.0     |
| $\leq 14,000$                                  | 0.9     |
| $\leq 22,000$                                  | 0.8     |
| $\leq 45,000$                                  | 0.7     |
| $\leq 100,000$                                 | 0.6     |
| $\geq 250,000$                                 | 0.5     |

สำหรับ Allowable expansion stress สำหรับ ท่อเหล็กบางชนิด ณ อุณหภูมิต่างๆ แสดงอยู่ในตาราง ที่ 7

ตัวอย่างที่ 1

ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว ตาม ASTM A106 Grade B นำไปใช้งานที่ 750°F และมี cyclic loading น้อยกว่า 7,000 ครั้ง จงหา allowable stress จากตารางที่ 7

$$S_c = 15,000 \text{ psi}, S_h = 12,900 \text{ psi}$$

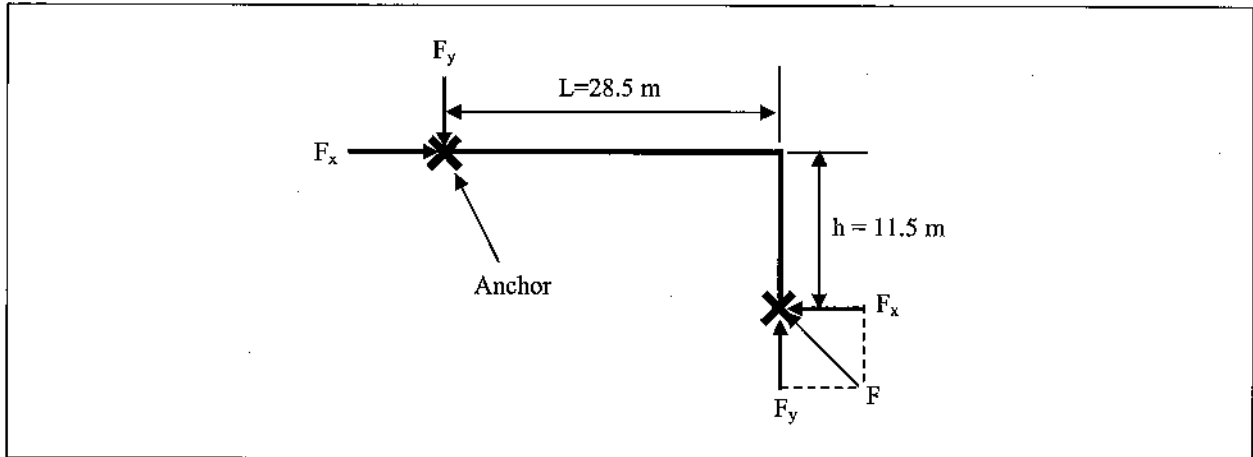
$$\begin{aligned} S_A &= f(1.25S_c + 0.25S_h) \\ &= (1)(1.25 \times 15,000 + 0.25 \times 12,900) \\ &= 21,975 \text{ psi} \end{aligned}$$

ตารางที่ 7 Allowable expansion stress ณ อุณหภูมิต่างๆ

| Seamless carbon steel pipe to ASTM A53 Grade A                    |                  |        |        |        |
|---|------------------|--------|--------|--------|
| อุณหภูมิ °F   | -20 ถึง 650      | 700    | 750    | 775    |
| ความเค้นที่อนุญาต, psi  | 12,000 ( $S_c$ ) | 11,700 | 10,700 | 9,850  |
| Seamless carbon steel pipe to ASTM A53 Grade B, ASTM A106 Grade B |                  |        |        |        |
| อุณหภูมิ °F   | -20 ถึง 650      | 700    | 750    | 775    |
| ความเค้นที่อนุญาต, psi  | 15,000 ( $S_c$ ) | 14,300 | 12,900 | 11,850 |
| Seamless carbon steel pipe to ASTM A106 Grade C                   |                  |        |        |        |
| อุณหภูมิ °F   | -20 ถึง 650      | 700    | 750    | 775    |
| ความเค้นที่อนุญาต, psi  | 17,500 ( $S_c$ ) | 16,600 | 14,700 | 13,350 |

ตัวอย่างที่ 2

ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว Sch. 40 ตาม ASTM A106 Grade B มี loop 90° Turn ความยาวดังแสดงในรูปที่ 1 นำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงสุด 750°F และมี cyclic loading น้อยกว่า 7,000 ครั้ง จงตรวจสอบว่า loop นี้เป็นไปตามข้อกำหนดของ A.S.M.E. B31.1 หรือไม่



รูปที่ 1

จากตารางที่ 1

$$D = 8.625 \text{ นิ้ว}$$

$$I_p = 72.5 \text{ inch}^4$$

จากตารางที่ 4

$$c = 996$$

$$\frac{L}{h} = \frac{28.5}{11.5} = 2.48$$

จากตารางที่ 5.1

$$k_x = \frac{84.4 + 103}{2} = 93.7$$

$$k_y = \frac{19.2 + 20.6}{2} = 19.9$$

$$k_b = \frac{140 + 161}{2} = 150.5$$

$$S_B = k_b \cdot c \cdot \frac{D}{L} = 150.5 \cdot 996 \cdot \frac{8.625}{28.5 \times 3.33} = 13,622.8 \text{ psi}$$

ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 21,975 psi ดังนั้น จึงได้ตามเกณฑ์ของ A.S.M.E. B31.1

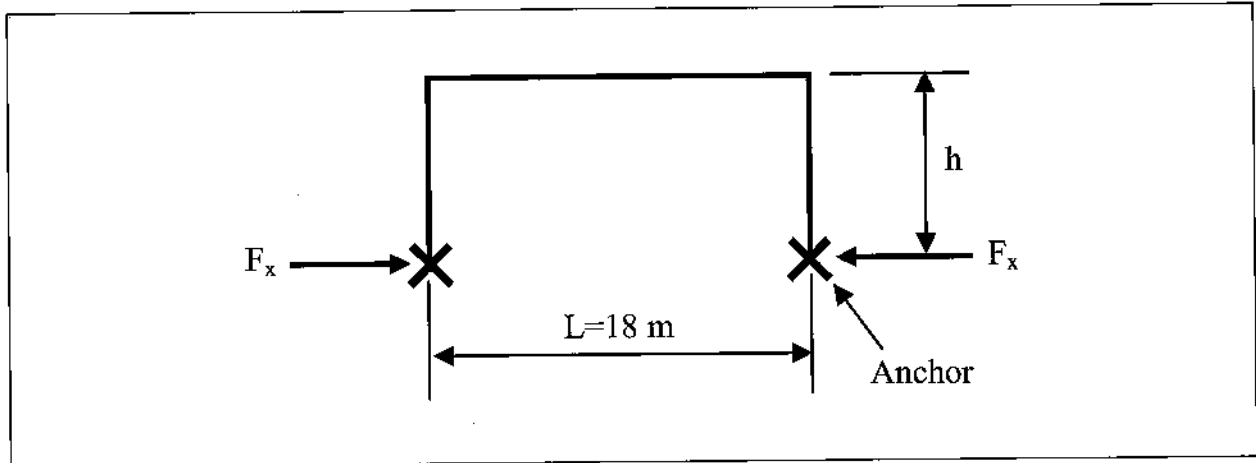
$$F_x = k_x \cdot c \cdot \frac{I_p}{L^2} = 93.7 \cdot 996 \cdot \frac{72.5}{(28.5 \cdot 3.33)^2} = 751.2 \text{ lb}$$

$$F_y = k_y \cdot c \cdot \frac{I_p}{L^2} = 19.9 \cdot 996 \cdot \frac{72.5}{(28.5 \cdot 3.33)^2} = 159.5 \text{ lb}$$

และแรงลัพธ์คือ  $F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{(751.2)^2 + (159.5)^2} = 767.9 \text{ lb}$

ตัวอย่างที่ 3

ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นิ้ว Sch. 40 ตาม ASTM A106 Grade A ถูกนำมาสร้างเป็น loop U-Shape ชนิดไม่มีขา ดังแสดงในรูปที่ 2 อุณหภูมิใช้งานสูงสุดเท่ากับ 600°F ถ้ากำหนดให้ค่าของ bending stress จะต้องไม่มากกว่า 18,000 psi จงหาค่า h ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไข



รูปที่ 2

จากตารางที่ 1

$$D = 10.75 \text{ นิ้ว}$$

$$I_p = 160.8 \text{ inch}^4$$

จากตารางที่ 4

$$c = 743$$

จาก

$$S_b = k_b \cdot c \cdot \frac{D}{L}, \quad k_b = \frac{S_b L}{c D} = \frac{18,000 \cdot 18 \cdot 3.33}{743 \cdot 10.75} = 135$$

จากตารางที่ 5.9

$$\frac{L}{h} = 3.6, \quad k_b = 130.8, \quad k_x = 95.6$$

$$\frac{L}{h} = 3.8, \quad k_b = 138.4, \quad k_x = 111$$

ดังนั้นถ้า

$$k_b = 135, \quad \frac{L}{h} = 3.6 + (3.8 - 3.6) \left( \frac{135 - 130.8}{138.4 - 130.8} \right) = 3.71$$

และ

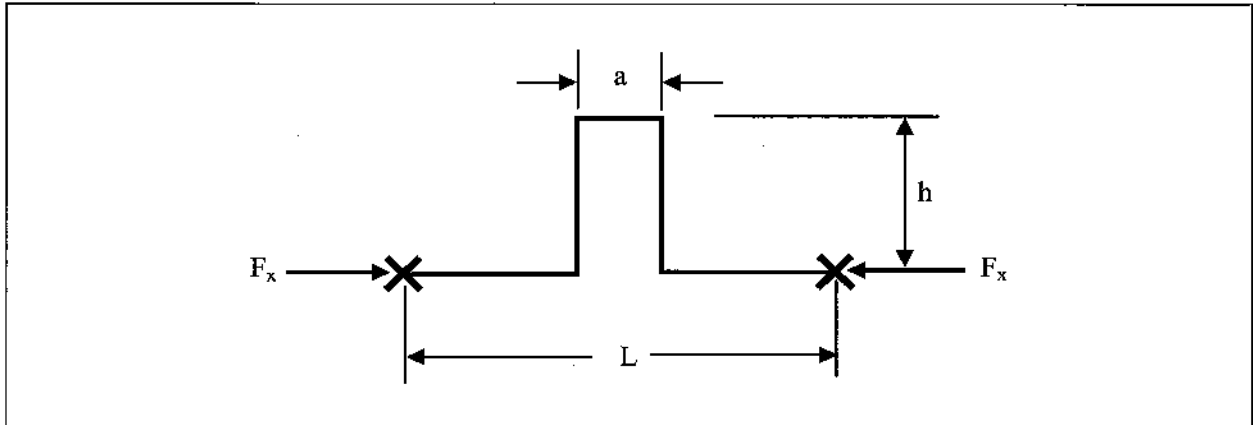
$$h = \frac{18}{3.71} = 4.85 \text{ m} = 16.2 \text{ ft}$$

$$k_x = 95.6 + (111 - 95.6) \left( \frac{3.71 - 3.6}{3.8 - 3.6} \right) = 104$$

$$F_x = k_x \frac{c I_p}{L^2} = 104 \times \frac{743 \times 160.8}{(18 \times 3.33)^2} = 3,458 \text{ lb}$$

ตัวอย่างที่ 4

ระบบท่อมี Loop U Shape ที่มีขนาดเท่ากันดังในรูปที่ 3 ทำจากท่อ Sch. 40 ตาม ASTM A106 Grade B มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 นิ้ว อุณหภูมิใช้งานสูงสุดเท่ากับ 700°F ตลอดอายุใช้งานมี cyclic loading ประมาณ 20,000 ครั้ง ถ้าระยะ  $L = 100$  ฟุต และกำหนดให้  $a = 20$  ฟุต Loop จะต้องมีความสูง  $h$  เท่าใด เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดของ A.S.M.E. B31.1



รูปที่ 3

จากตารางที่ 1

$$D = 12.75 \text{ นิ้ว}$$

$$I_p = 300.3 \text{ inch}^4$$

จากตารางที่ 4

$$c = 909$$

$$\frac{L}{a} = \frac{100}{20} = 5$$

จากตารางที่ 6

$$f = 0.8$$

จากตารางที่ 7

$$S_c = 15,000 \text{ psi}, \quad S_h = 14,300 \text{ psi}$$

ดังนั้น

$$S_A = f(1.25S_c + 0.25S_h) = (0.8)(1.25 \times 15000 + 0.25 \times 14300) = 17,860 \text{ psi}$$

แต่

$$S_A = S_B = k_b \cdot c \cdot \frac{D}{L}, \quad k_b = \frac{s_A L}{cD}$$

$$k_b = \frac{17860 \times 100}{909 \times 12.75} = 153.6$$

จากตารางที่ 5.4:

$$\frac{L}{h} = 7.0, \quad k_b = 151.1, \quad k_x = 240.7$$

$$\frac{L}{h} = 7.2, \quad k_b = 156.6, \quad k_x = 256$$

ถ้า

$$k_b = 153.6, \quad \frac{L}{h} = 7.0 + (7.2 - 7.0) \left( \frac{153.6 - 151.1}{156.6 - 151.1} \right) = 7.09$$

ดังนั้น

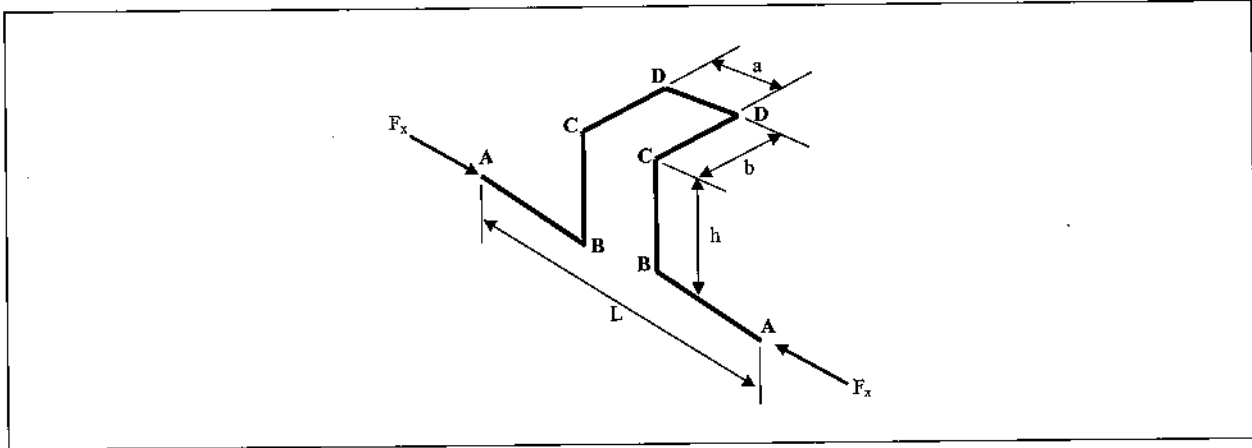
$$h = \frac{100}{7.09} = 14.1 \text{ ft}$$

$$k_x = 240.7 + (256 - 240.7) \left( \frac{7.09 - 7.0}{7.2 - 7.0} \right) = 247.6$$

$$F_x = k_x \cdot c \cdot \frac{I_p}{L^2} = 247.6 \times 909 \times \frac{300.3}{100^2} = 6,759 \text{ lb}$$

ตัวอย่างที่ 5

ระบบท่อมี Loop แบบ U Shape ชนิด 2 ระบาย ที่มีขนาดเท่ากันดังในรูปที่ 4 ทำจากท่อ Sch. 30 ตาม ASTM A106 Grade B มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 นิ้ว อุณหภูมิใช้งานสูงสุดเท่ากับ 680°F ตลอดอายุใช้งานมี cyclic loading น้อยกว่า 7,000 ครั้ง ถ้าระยะ  $L = 15$  เมตร  $a = 2.5$  เมตร  $b = 5$  เมตร  $h = 1.5$  เมตร แบบของ Loop นี้เป็นไปตามข้อกำหนดของ A.S.M.E. B31.1 หรือไม่



รูปที่ 4

จากตารางที่ 1

$$D = 20 \text{ นิ้ว}$$

$$I_p = 1,457 \text{ inch}^4$$

ASTM A106 Grade B จากตารางที่ 7:  $S_{650} = 15,000 \text{ psi}$ ,  $S_{700} = 14,300 \text{ psi}$

ดังนั้น 
$$S_h = S_{680} = 14,300 + (15,000 - 14,300) \left( \frac{700 - 680}{700 - 650} \right) = 14,580 \text{ psi}$$

$$S_A = (1)(1.25 \times 15,000 + 0.25 \times 14,580) = 22,395 \text{ psi}$$

จากตารางที่ 4 ที่ 650°F,  $c = 827$ , ที่ 700°F,  $c = 909$

ดังนั้น ที่ 680°F 
$$c = 827 + (909 - 827) \left( \frac{680 - 650}{700 - 650} \right) = 876.2$$

$$\frac{L}{a} = \frac{15}{2.5} = 6, \quad \frac{L}{h} = \frac{15}{1.5} = 10, \quad \frac{a}{b} = \frac{2.5}{5} = 0.5$$

จากตารางที่ 5.11

$$k_x = 29.8, \quad k_b = 44.2, \quad k_t = 4.02$$

$$F_x = k_x \cdot c \cdot \frac{I_p}{L^2} = 29.8 \times 876.2 \times \frac{1457}{(15 \times 3.33)^2} = 15,248 \text{ lb}$$

$$S_B = k_b \cdot c \cdot \frac{D}{L} = 44.2 \times 876.2 \times \frac{20}{15 \times 3.33} = 15,506 \text{ psi}$$

$$S_T = k_t \cdot c \cdot \frac{D}{L} = 4.02 \times 876.2 \times \frac{20}{15 \times 3.33} = 1,410 \text{ psi}$$

เนื่องจาก max. bending moment และ max. torsional shear stress เกิดที่ตำแหน่งเดียวกัน ดังนั้น

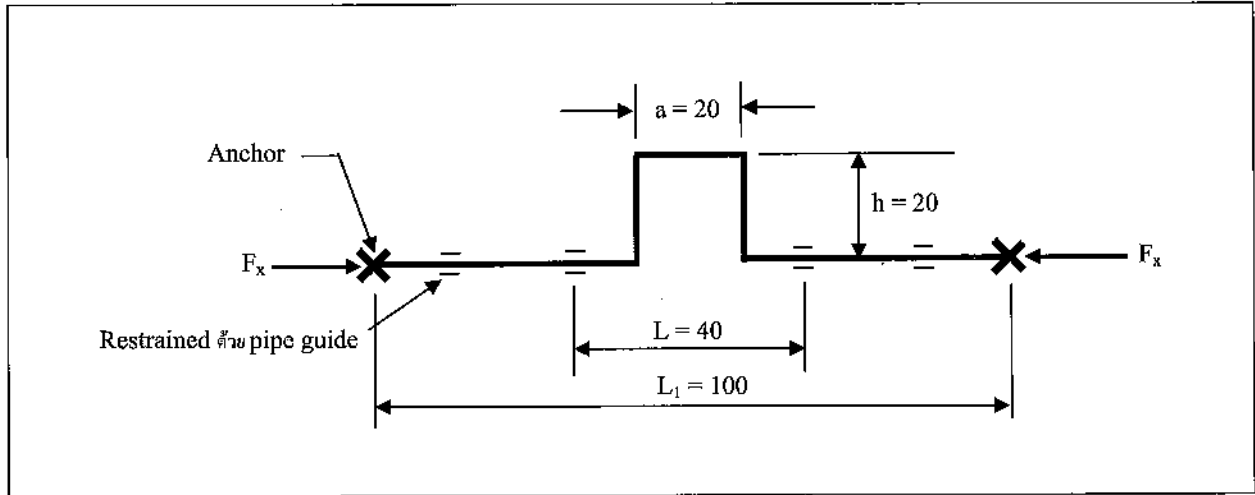
$$S_E = \sqrt{(S_B)^2 + 4(S_T)^2} = \sqrt{(15,506)^2 + 4(1,410)^2} = 15,570 \text{ psi}$$

เนื่องจาก  $S_E < S_A$  ดังนั้นจึงเป็นไปตามข้อกำหนดของ A.S.M.E. B31.1



ตัวอย่างที่ 6

ท่อ Sch. 40 ตาม ASTM A106 Grade B ตัวอย่างที่ 4 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 นิ้ว ถ้าเป็นกรณีจุดปลายทั้งสองด้านถูกยึดแน่นแต่ในระหว่างกลางมี pipe guide เป็นระยะๆ ดังรูปที่ 5 และให้ความสูง  $h = 20$  ฟุต จงหาแรงและ stress ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 5

จากตารางที่ 1

$$D = 12.75 \text{ นิ้ว}$$

$$I_p = 300.3 \text{ inch}^4$$

จากตารางที่ 4

$$c = 909$$

$$\frac{L}{a} = \frac{40}{20} = 2, \quad \frac{L}{h} = \frac{40}{20} = 2$$

จากตารางที่ 5.4:

$$k_x = 12, \quad k_b = 18$$

ดังนั้น

$$F_x = k_x \cdot c \cdot \frac{I_p}{L^2} \left( \frac{L_1}{L} \right) = 12 \times 909 \times \frac{300.3}{(40)^2} \times \left( \frac{100}{40} \right) = 5,118 \text{ lb}$$

$$S_b = k_b \cdot c \cdot \frac{D}{L} \left( \frac{L_1}{L} \right) = 18 \times 909 \times \frac{12.75}{40} \times \left( \frac{100}{40} \right) = 13,038 \text{ lb}$$

ซึ่งน้อยกว่า  $S_A = 17,860 \text{ psi}$

บรรณานุกรม

1. ITT Grinnell Industrial Piping, Inc., Piping Design and Engineering. 1981.
2. Victor Helguero M., Piping Stress Handbook. Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1986.
3. Littleton, C.T., Industrial Piping. Mc-Graw Hill, New York, 1962.

**Table 1 Properties of Pipes**

$D_n$  = Nominal pipe size  
 $t$  = Wall thickness

$D$  = Outside diameter  
 $d$  = inside diameter =  $D - 2t$

Inside area, 
$$A_I = \frac{\pi d^2}{4}$$

Metal area, 
$$A_M = \pi t(D - t)$$

Moment of inertia, 
$$I_P = 0.0491(D^4 - d^4) = 0.0625A_M(D^2 + d^2)$$

Section modulus, 
$$S_m = \frac{2I_P}{D}$$

**Properties of Pipes (1)**

| Nominal and outside diameters, $D_n$ , (D), inch. | Sch. No. | Nominal wall | d                      | t                     | $A_I$                           | $A_M$                          | $I_P$                                 | $S_m$                               |
|---|----------|--------------|------------------------|-----------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
|   |          |              | Inside diameter inches | Wall thickness inches | Inside area inches <sup>2</sup> | Metal area inches <sup>2</sup> | Moment of inertia inches <sup>4</sup> | Section modulus inches <sup>3</sup> |
| 1<br>(1.315)                                      | 40       | Std.         | 1.049                  | 0.133                 | 0.864                           | 0.494                          | 0.0874                                | 0.133                               |
|   | 80       | XS           | 0.957                  | 0.179                 | 0.719                           | 0.639                          | 0.1056                                | 0.161                               |
|   | 160      |              | 0.815                  | 0.250                 | 0.522                           | 0.836                          | 0.1252                                | 0.190                               |
|   |          | XXS          | 0.599                  | 0.358                 | 0.282                           | 1.076                          | 0.1405                                | 0.214                               |
| 1 1/4 (1.660)                                     | 40       | Std.         | 1.380                  | 0.140                 | 1.496                           | 0.699                          | 0.1948                                | 0.235                               |
|   | 80       | XS           | 1.278                  | 0.191                 | 1.283                           | 0.881                          | 0.2418                                | 0.291                               |
|   | 160      |              | 1.160                  | 0.250                 | 1.057                           | 1.107                          | 0.2839                                | 0.342                               |
|   |          | XXS          | 0.896                  | 0.382                 | 0.631                           | 1.534                          | 0.3411                                | 0.411                               |
| 1 1/2<br>(1.900)                                  | 40       | Std.         | 1.610                  | 0.145                 | 2.036                           | 0.799                          | 0.3099                                | 0.326                               |
|   | 80       | XS           | 1.500                  | 0.200                 | 1.767                           | 1.068                          | 0.3912                                | 0.412                               |
|   | 160      |              | 1.338                  | 0.281                 | 1.406                           | 1.429                          | 0.4826                                | 0.508                               |
|   |          | XXS          | 1.100                  | 0.400                 | 0.950                           | 1.885                          | 0.5678                                | 0.598                               |
| 2<br>(2.375)                                      | 40       | Std.         | 2.067                  | 0.154                 | 3.356                           | 1.075                          | 0.6657                                | 0.561                               |
|   | 80       | XS           | 1.939                  | 0.218                 | 2.953                           | 1.477                          | 0.8679                                | 0.731                               |
|   | 160      |              | 1.689                  | 0.343                 | 2.240                           | 2.190                          | 1.1626                                | 0.979                               |
|   |          | XXS          | 1.503                  | 0.436                 | 1.774                           | 2.656                          | 1.3120                                | 1.104                               |
| 2 1/2<br>(2.875)                                  | 40       | Std.         | 2.469                  | 0.203                 | 4.788                           | 1.704                          | 1.530                                 | 1.064                               |
|   | 80       | XS           | 2.323                  | 0.276                 | 4.238                           | 2.254                          | 1.925                                 | 1.339                               |
|   | 160      |              | 2.125                  | 0.375                 | 3.547                           | 2.945                          | 2.353                                 | 1.637                               |
|   |          | XXS          | 1.771                  | 0.552                 | 2.464                           | 4.028                          | 2.872                                 | 1.988                               |
| 3<br>(3.500)                                      | 40       | Std.         | 3.068                  | 0.216                 | 7.393                           | 2.228                          | 3.017                                 | 1.724                               |
|   | 80       | XS           | 2.900                  | 0.300                 | 6.605                           | 3.016                          | 3.879                                 | 2.226                               |
|   | 160      |              | 2.626                  | 0.437                 | 5.416                           | 4.205                          | 5.033                                 | 2.876                               |
|   |          | XXS          | 2.300                  | 0.600                 | 4.155                           | 5.466                          | 5.993                                 | 3.425                               |
| 3 1/2<br>(4.000)                                  | 40       | Std.         | 3.548                  | 0.226                 | 9.89                            | 2.68                           | 4.788                                 | 2.390                               |
|   | 80       | XS           | 3.364                  | 0.318                 | 8.89                            | 3.68                           | 6.28                                  | 3.14                                |

Properties of Pipes (2)

| Nominal and outside diameters, $D_n$ , (D), inch. | Sch. No. | Nominal wall | d                      | t                      | $A_I$                           | $A_M$                          | $I_P$                                 | $S_m$                               |       |
|---|----------|--------------|------------------------|------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------|
|   |          |              | Inside diameter inches | Wall thickness. inches | Inside area inches <sup>2</sup> | Metal area inches <sup>2</sup> | Moment of inertia inches <sup>4</sup> | Section modulus inches <sup>3</sup> |       |
| 4<br>(4.500)                                      | 40       | Std.         | 4.026                  | 0.237                  | 12.73                           | 3.17                           | 7.23                                  | 3.21                                |       |
|   | 80       | XS           | 3.826                  | 0.337                  | 11.50                           | 4.41                           | 9.61                                  | 4.27                                |       |
|   | 120      |              | 3.626                  | 0.437                  | 10.33                           | 5.58                           | 11.65                                 | 5.18                                |       |
|   | 160      |              | 3.438                  | 0.531                  | 9.28                            | 6.62                           | 13.27                                 | 5.90                                |       |
|   |          | XXS          | 3.152                  | 0.674                  | 7.80                            | 8.10                           | 15.29                                 | 6.79                                |       |
| 5<br>(5.563)                                      | 40       | Std.         | 5.047                  | 0.258                  | 20.01                           | 4.30                           | 15.17                                 | 5.45                                |       |
|   | 80       | XS           | 4.813                  | 0.375                  | 18.19                           | 6.11                           | 20.68                                 | 7.43                                |       |
|   | 120      |              | 4.563                  | 0.500                  | 16.35                           | 7.95                           | 25.74                                 | 9.25                                |       |
|   | 160      |              | 4.313                  | 0.625                  | 14.61                           | 9.70                           | 30.03                                 | 10.80                               |       |
|   |          | XXS          | 4.063                  | 0.750                  | 12.97                           | 11.34                          | 33.64                                 | 12.10                               |       |
| 6<br>(6.625)                                      | 40       | Std.         | 6.065                  | 0.280                  | 28.89                           | 5.58                           | 28.14                                 | 8.50                                |       |
|   | 80       | XS           | 5.761                  | 0.432                  | 26.07                           | 8.40                           | 40.49                                 | 12.23                               |       |
|   | 120      |              | 5.501                  | 0.562                  | 23.77                           | 10.70                          | 49.61                                 | 14.98                               |       |
|   | 160      |              | 5.189                  | 0.718                  | 21.15                           | 13.33                          | 58.99                                 | 17.81                               |       |
|   |          | XXS          | 4.897                  | 0.864                  | 18.83                           | 15.64                          | 66.33                                 | 20.03                               |       |
| 8<br>(8.625)                                      | 20       |              | 8.125                  | 0.250                  | 51.8                            | 6.58                           | 57.7                                  | 13.39                               |       |
|   | 30       |              | 8.071                  | 0.277                  | 51.2                            | 7.26                           | 63.4                                  | 14.69                               |       |
|   | 40       | Std.         | 7.981                  | 0.322                  | 50.0                            | 8.40                           | 72.5                                  | 16.81                               |       |
|   | 60       |              | 7.813                  | 0.406                  | 47.9                            | 10.48                          | 88.8                                  | 20.58                               |       |
|   | 80       | XS           | 7.625                  | 0.500                  | 45.7                            | 12.76                          | 105.7                                 | 24.52                               |       |
|   | 100      |              | 7.439                  | 0.593                  | 43.5                            | 14.96                          | 121.4                                 | 28.14                               |       |
|   | 120      |              | 7.189                  | 0.718                  | 40.6                            | 17.84                          | 140.6                                 | 32.61                               |       |
|   | 140      |              | 7.001                  | 0.812                  | 38.5                            | 19.93                          | 153.8                                 | 35.65                               |       |
|   | 160      | XXS          | 6.875                  | 0.875                  | 37.1                            | 21.30                          | 162.0                                 | 37.56                               |       |
|   |          |              | 6.813                  | 0.906                  | 36.5                            | 21.97                          | 165.9                                 | 38.48                               |       |
| 10<br>(10.75)                                     | 20       |              | 10.250                 | 0.250                  | 82.5                            | 8.26                           | 113.7                                 | 21.16                               |       |
|   | 30       |              | 10.136                 | 0.307                  | 80.7                            | 10.07                          | 137.5                                 | 25.57                               |       |
|   | 40       | Std.         | 10.020                 | 0.365                  | 78.9                            | 11.91                          | 160.8                                 | 29.90                               |       |
|   | 60       | XS           | 9.750                  | 0.500                  | 74.7                            | 16.10                          | 212.0                                 | 39.43                               |       |
|   | 80       |              | 9.564                  | 0.593                  | 71.8                            | 18.92                          | 244.9                                 | 45.56                               |       |
|   | 100      |              | 9.314                  | 0.718                  | 68.1                            | 22.63                          | 286.2                                 | 53.25                               |       |
|   | 120      |              | 9.064                  | 0.843                  | 64.5                            | 26.24                          | 324.3                                 | 60.34                               |       |
|   | 140      |              | 8.750                  | 1.000                  | 60.1                            | 30.63                          | 367.8                                 | 68.43                               |       |
|   | 160      |              | 8.500                  | 1.125                  | 56.7                            | 34.01                          | 399.4                                 | 74.31                               |       |
| 12<br>(12.75)                                     | 20       |              | 12.250                 | 0.250                  | 117.9                           | 9.84                           | 191.9                                 | 30.1                                |       |
|   | 30       |              | 12.090                 | 0.330                  | 114.8                           | 12.88                          | 248.5                                 | 39.0                                |       |
|   | 40       | Std.         | 12.000                 | 0.375                  | 113.1                           | 14.58                          | 279.3                                 | 43.8                                |       |
|   | 60       | XS           | 11.938                 | 0.406                  | 111.9                           | 15.74                          | 300.3                                 | 47.1                                |       |
|   | 80       |              | 11.750                 | 0.500                  | 108.4                           | 19.24                          | 361.5                                 | 56.7                                |       |
|   | 100      |              | 11.626                 | 0.562                  | 106.2                           | 21.52                          | 400.5                                 | 62.8                                |       |
|   | 120      |              | 11.376                 | 0.687                  | 101.6                           | 26.04                          | 475.2                                 | 74.5                                |       |
|   | 140      |              | 11.064                 | 0.843                  | 96.1                            | 31.53                          | 561.8                                 | 88.1                                |       |
|   | 160      |              | 10.750                 | 1.000                  | 90.8                            | 36.91                          | 641.7                                 | 100.7                               |       |
|   |          |              |                        | 10.500                 | 1.125                           | 86.6                           | 41.08                                 | 700.7                               | 109.9 |
|   |          |              |                        | 10.126                 | 1.312                           | 80.5                           | 47.14                                 | 781.3                               | 122.6 |

Properties of Pipes (3)

| Nominal and outside diameters, $D_n$ , (D), inch. | Sch. No. | Nominal wall | d                      | t                     | $A_I$                           | $A_M$                          | $I_p$                                 | $S_m$                               |
|---|----------|--------------|------------------------|-----------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
|   |          |              | Inside diameter inches | Wall thickness inches | Inside area inches <sup>2</sup> | Metal area inches <sup>2</sup> | Moment of inertia inches <sup>4</sup> | Section modulus inches <sup>3</sup> |
| 14<br>(14.00)                                     | 10       | Std.         | 13.500                 | 0.250                 | 143.1                           | 10.80                          | 255.4                                 | 36.5                                |
|   | 20       |              | 13.376                 | 0.312                 | 140.5                           | 13.42                          | 314.3                                 | 44.9                                |
|   | 30       | XS           | 13.250                 | 0.375                 | 137.9                           | 16.05                          | 372.8                                 | 53.3                                |
|   | 40       |              | 13.126                 | 0.437                 | 135.3                           | 18.62                          | 429.1                                 | 61.2                                |
|   | 60       |              | 13.000                 | 0.500                 | 132.7                           | 21.21                          | 483.8                                 | 69.1                                |
|   | 80       |              | 12.814                 | 0.593                 | 129.0                           | 24.98                          | 562.4                                 | 80.3                                |
|   | 100      |              | 12.500                 | 0.750                 | 122.7                           | 31.22                          | 687.5                                 | 98.2                                |
|   | 120      |              | 12.126                 | 0.937                 | 115.5                           | 38.47                          | 824.5                                 | 117.8                               |
|   | 140      |              | 11.814                 | 1.093                 | 109.6                           | 44.32                          | 929.8                                 | 132.8                               |
|   | 160      |              | 11.500                 | 1.250                 | 103.9                           | 50.07                          | 1027.5                                | 146.8                               |
|   |          |              | 11.188                 | 1.406                 | 98.3                            | 55.63                          | 1116.9                                | 159.6                               |
| 16<br>(16.00)                                     | 10       | Std.         | 15.500                 | 0.250                 | 188.7                           | 12.37                          | 384.0                                 | 48.0                                |
|   | 20       |              | 15.376                 | 0.312                 | 185.7                           | 15.38                          | 473.0                                 | 59.2                                |
|   | 30       | XS           | 15.250                 | 0.375                 | 182.6                           | 18.41                          | 562.1                                 | 70.3                                |
|   | 40       |              | 15.000                 | 0.500                 | 176.7                           | 24.35                          | 731.9                                 | 91.5                                |
|   | 60       |              | 14.688                 | 0.656                 | 169.4                           | 31.62                          | 932.6                                 | 116.6                               |
|   | 80       |              | 14.314                 | 0.843                 | 160.9                           | 40.14                          | 1156.6                                | 144.6                               |
|   | 100      |              | 13.938                 | 1.031                 | 152.6                           | 48.48                          | 1365.0                                | 170.6                               |
|   | 120      |              | 13.564                 | 1.218                 | 144.5                           | 56.56                          | 1555.8                                | 194.5                               |
|   | 140      |              | 13.126                 | 1.437                 | 135.3                           | 65.75                          | 1760.3                                | 220.0                               |
|   | 160      |              | 12.814                 | 1.593                 | 129.0                           | 72.10                          | 1894.0                                | 236.7                               |
| 18<br>(18.00)                                     | 10       | Std.         | 17.500                 | 0.250                 | 240.5                           | 13.94                          | 549.0                                 | 61.0                                |
|   | 20       |              | 17.376                 | 0.312                 | 237.1                           | 17.34                          | 678.0                                 | 75.5                                |
|   | 30       | XS           | 17.250                 | 0.375                 | 233.7                           | 20.76                          | 806.6                                 | 89.6                                |
|   | 40       |              | 17.126                 | 0.437                 | 230.4                           | 24.11                          | 930.5                                 | 103.4                               |
|   | 60       |              | 17.000                 | 0.500                 | 227.0                           | 27.49                          | 1053.0                                | 117.0                               |
|   | 80       |              | 16.876                 | 0.562                 | 223.7                           | 30.79                          | 1172.0                                | 130.2                               |
|   | 100      |              | 16.500                 | 0.750                 | 213.8                           | 40.64                          | 1515.0                                | 168.3                               |
|   | 120      |              | 16.126                 | 0.937                 | 204.2                           | 50.23                          | 1833.9                                | 203.8                               |
|   | 140      |              | 15.688                 | 1.156                 | 193.3                           | 61.18                          | 2180.2                                | 242.2                               |
|   | 160      |              | 15.250                 | 1.375                 | 182.6                           | 71.81                          | 2498.8                                | 277.6                               |
|   |          |              | 14.876                 | 1.562                 | 173.8                           | 80.66                          | 2749.8                                | 305.5                               |
|   |          |              | 14.438                 | 1.781                 | 163.7                           | 90.74                          | 3020.6                                | 335.6                               |
| 20<br>(20.00)                                     | 10       | Std.         | 19.500                 | 0.250                 | 298.6                           | 15.51                          | 757                                   | 75.7                                |
|   | 20       |              | 19.250                 | 0.375                 | 291.0                           | 23.12                          | 1114                                  | 111.4                               |
|   | 30       | XS           | 19.000                 | 0.500                 | 283.5                           | 30.6                           | 1457                                  | 145.7                               |
|   | 40       |              | 18.814                 | 0.593                 | 178.0                           | 36.2                           | 1704                                  | 170.4                               |
|   | 60       |              | 18.376                 | 0.812                 | 265.2                           | 48.9                           | 2257                                  | 225.7                               |
|   | 80       |              | 17.938                 | 1.031                 | 252.7                           | 61.4                           | 2772                                  | 277.2                               |
|   | 100      |              | 17.438                 | 1.281                 | 238.8                           | 75.3                           | 3316                                  | 331.6                               |
|   | 120      |              | 17.000                 | 1.500                 | 227.0                           | 87.2                           | 3755                                  | 375.5                               |
|   | 140      |              | 16.500                 | 1.750                 | 213.8                           | 100.3                          | 4217                                  | 421.7                               |
|   | 160      |              | 16.064                 | 1.968                 | 202.7                           | 111.5                          | 4586                                  | 458.6                               |

**Table 2 Moduli of Elasticity and Torsional Rigidity for Ferrous Materials**  
 $E \times 10^{-6} \text{ psi}, G \times 10^{-6} \text{ psi}$

| Material  | Modulus | Temp. °F |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---|---------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|   |         | 70       | 200  | 300  | 400  | 500  | 600  | 700  | 800  | 900  | 1000 | 1100 | 1200 |
| Carbon steel, C ≤ 0.30 %  | E       | 27.9     | 27.7 | 27.4 | 27.0 | 26.4 | 25.7 | 24.8 | 23.4 | 18.5 | 15.4 | 13.0 | -    |
|   | G       | 10.8     | 10.7 | 10.6 | 10.4 | 10.2 | 9.9  | 9.6  | 9.0  | 7.1  | 5.9  | 5.0  | -    |
| Carbon steel, C > 0.30 %  | E       | 29.9     | 29.5 | 29.0 | 28.3 | 27.4 | 26.7 | 25.4 | 23.8 | 21.5 | 18.8 | 15.0 | 11.2 |
|   | G       | 11.6     | 11.4 | 11.2 | 10.9 | 10.7 | 10.3 | 9.8  | 9.2  | 8.3  | 7.2  | 5.7  | -    |
| Carbon-moly steel low chrome-moly steel through 3 % Cr                | E       | 29.9     | 29.5 | 29.0 | 28.6 | 28.0 | 27.4 | 26.6 | 25.7 | 24.5 | 23.0 | 20.4 | 15.6 |
|   | G       | 11.6     | 11.4 | 11.2 | 11.0 | 10.8 | 10.6 | 10.2 | 9.9  | 9.4  | 8.8  | 7.8  | 5.9  |
| Intermediate chrome-moly steel (5%-9% Cr), austenitic stainless steel | E       | 27.4     | 27.1 | 26.8 | 26.4 | 26.0 | 25.4 | 24.9 | 24.2 | 23.5 | 22.8 | 21.9 | 20.8 |
|   | G       | 10.6     | 10.4 | 10.3 | 10.1 | 9.9  | 9.7  | 9.5  | 9.2  | 8.9  | 8.6  | 8.3  | 7.8  |
| Straight Chromium stainless steel (12 Cr, 17 Cr, 27 Cr)               | E       | 29.2     | 28.7 | 28.3 | 27.7 | 27.0 | 26.0 | 24.8 | 23.1 | 21.1 | 18.6 | 15.6 | 12.2 |
|   | G       | 11.4     | 11.2 | 11.0 | 10.8 | 10.5 | 10.1 | 9.6  | 9.0  | 8.2  | 7.2  | 6.0  | 4.7  |
| Wrought iron  | E       | 29.5     | 28.6 | 28.2 | 27.7 | 27.0 | 26.5 | 25.8 | 23.0 | -    | -    | -    | -    |
|   | G       | 11.8     | 11.6 | 11.5 | 11.4 | 11.2 | 10.9 | 10.6 | 9.9  | -    | -    | -    | -    |
| Gray cast iron (ไม่ใส่ G)   | E       | 13.4     | 13.2 | 12.9 | 12.6 | 12.2 | 11.7 | 11.0 | 10.2 | -    | -    | -    | -    |
|   | G       | -        | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    |

**Table 3 Thermal Expansion Data**

Mean coefficient of thermal expansion  $\alpha \times 10^{-6}$  inch/inch/ $^{\circ}$ F

Linear thermal expansion  $\beta$  inch/100 ft, (คิดเริ่มต้นจาก  $70^{\circ}$ F ไปจนถึงอุณหภูมิที่ระบุในตาราง):  $\beta = \alpha(100 \text{ ft})(.12 \text{ inch})(t - 70)$

| Material  | Coefficient | Temp. $^{\circ}$ F |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---|-------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   |             | 70                 | 200   | 300   | 400   | 500   | 600   | 700   | 800   | 900   | 1000  | 1100  | 1200  |
| Carbon steel, carbon-moly steel;<br>low chrome steels (through 3% Cr) |             |                    | 6.38  | 6.60  | 6.82  | 7.02  | 7.23  | 7.44  | 7.65  | 7.84  | 7.97  | 8.12  | 8.19  |
|   | 0           | 0.99               | 1.82  | 2.70  | 3.62  | 4.60  | 5.63  | 6.70  | 7.81  | 8.89  | 10.04 | 11.10 |       |
| Intermediate alloy steels; (5 Cr-Mo<br>through 9 Cr-Mo)               |             |                    | 6.04  | 6.19  | 6.34  | 6.50  | 6.66  | 6.80  | 6.96  | 7.10  | 7.22  | 7.32  | 7.41  |
|   | 0           | 0.94               | 1.71  | 2.50  | 3.35  | 4.24  | 5.14  | 6.10  | 7.07  | 8.06  | 9.05  | 10.00 |       |
| Austenitic stainless steels   |             |                    | 9.34  | 9.47  | 9.59  | 9.70  | 9.82  | 9.92  | 10.05 | 10.16 | 10.29 | 10.39 | 10.48 |
|   | 0           | 1.46               | 2.61  | 3.80  | 5.01  | 6.24  | 7.50  | 8.80  | 10.12 | 11.48 | 12.84 | 14.20 |       |
| Straight chromium stainless steels;<br>12 Cr, 17 Cr and 27 Cr         |             |                    | 5.50  | 5.66  | 5.81  | 5.96  | 6.13  | 6.26  | 6.39  | 6.52  | 6.63  | 6.72  | 6.78  |
|   | 0           | 0.86               | 1.56  | 2.30  | 3.08  | 3.90  | 4.73  | 5.60  | 6.49  | 7.40  | 8.31  | 9.20  |       |
| 25 Cr-20 Ni   |             |                    | 7.76  | 7.92  | 8.08  | 8.22  | 8.38  | 8.52  | 8.68  | 8.81  | 8.92  | 9.00  | 9.08  |
|   | 0           | 1.21               | 2.18  | 3.20  | 4.24  | 5.33  | 6.44  | 7.60  | 8.78  | 9.95  | 11.12 | 12.31 |       |
| Monel<br>67 Ni-30 Cu  |             |                    | 7.84  | 8.02  | 8.20  | 8.40  | 8.58  | 8.78  | 8.96  | 9.16  | 9.34  | 9.52  | 9.70  |
|   | 0           | 1.22               | 2.21  | 3.25  | 4.33  | 5.46  | 6.64  | 7.85  | 9.12  | 10.42 | 11.77 | 13.15 |       |
| Wrought iron  |             |                    | 7.32  | 7.48  | 7.61  | 7.73  | 7.88  | 8.01  | 8.13  | 8.29  | 8.39  | -     | -     |
|   | 0           | 1.14               | 2.06  | 3.01  | 3.99  | 5.01  | 6.06  | 7.12  | 8.26  | 9.36  | -     | -     |       |
| Brass   |             |                    | 9.76  | 10.00 | 10.23 | 10.47 | 10.69 | 10.92 | 11.16 | 11.40 | 11.63 | 11.85 | 12.09 |
|   | 0           | 1.52               | 2.76  | 4.05  | 5.40  | 6.80  | 8.26  | 9.78  | 11.35 | 12.98 | 14.65 | 16.39 |       |
| Bronze  |             |                    | 10.03 | 10.12 | 10.23 | 10.32 | 10.44 | 10.52 | 10.62 | 10.72 | 10.80 | 10.90 | 11.00 |
|   | 0           | 1.56               | 2.79  | 4.05  | 5.33  | 6.64  | 7.95  | 9.30  | 10.68 | 12.05 | 13.47 | 14.92 |       |

Table 4 Expansion Factors, c

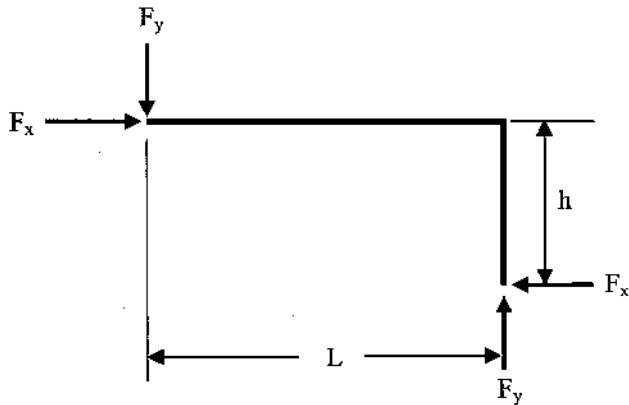
| Temp<br>°F | Carbon<br>steel,<br>C≤<br>.30% | Carbon<br>steel,<br>C><br>0.30% | Carbon-<br>moly<br>steel low<br>Cr-moly<br>Cr≤3% | Carbon-<br>moly<br>steel<br>5%-9%<br>Cr | Austenitic<br>stainless<br>steels | Chromium<br>stainless<br>steels (12<br>Cr, 17 Cr,<br>27 Cr) | 25 Cr-<br>20 Ni | Wrought<br>iron |
|------------|--------------------------------|---------------------------------|--|---|-----------------------------------|---|-----------------|-----------------|
| 70         | 0                              | 0                               | 0  | 0                                       | 0                                 | 0   | 0               | 0               |
| 100        | 37                             | 40                              | 40   | 35                                      | 54                                | 34  | 47              | 44              |
| 150        | 98                             | 106                             | 106  | 92                                      | 143                               | 90  | 125             | 120             |
| 200        | 160                            | 171                             | 171  | 149                                     | 232                               | 145   | 204             | 195             |
| 250        | 228                            | 244                             | 244  | 212                                     | 323                               | 204   | 287             | 273             |
| 300        | 294                            | 315                             | 315  | 271                                     | 414                               | 264   | 368             | 352             |
| 350        | 365                            | 391                             | 391  | 335                                     | 509                               | 326   | 455             | 434             |
| 400        | 436                            | 467                             | 467  | 396                                     | 603                               | 289   | 541             | 514             |
| 450        | 510                            | 547                             | 547  | 465                                     | 699                               | 455   | 629             | 598             |
| 500        | 584                            | 626                             | 626  | 531                                     | 794                               | 520   | 716             | 681             |
| 550        | 664                            | 711                             | 711  | 603                                     | 893                               | 590   | 809             | 768             |
| 600        | 743                            | 796                             | 796  | 672                                     | 989                               | 659   | 901             | 855             |
| 650        | 827                            | 886                             | 886  | 714                                     | 1089                              | 730   | 995             | 946             |
| 700        | 909                            | 974                             | 974  | 815                                     | 1189                              | 799   | 1088            | 1035            |
| 750        | 996                            | 1068                            | 1068   | 891                                     | 1292                              | 874   | 1186            | 1125            |
| 775        | 1038                           | 1113                            | 1113   | 929                                     | 1344                              | 909   | 1235            | 1171            |
| 800        | -                              | -                               | 1159   | 967                                     | 1395                              | 946   | 1284            | 1216            |
| 825        | -                              | -                               | 1208   | 1005                                    | 1448                              | 983   | 1335            | -               |
| 850        | -                              | -                               | 1256   | 1043                                    | 1500                              | 1022  | 1384            | -               |
| 875        | -                              | -                               | 1303   | 1081                                    | 1552                              | 1061  | 1435            | -               |
| 900        | -                              | -                               | 1351   | 1121                                    | 1605                              | 1097  | 1484            | -               |
| 925        | -                              | -                               | 1398   | 1161                                    | 1659                              | 1134  | 1533            | -               |
| 950        | -                              | -                               | 1445   | 1200                                    | 1713                              | 1174  | 1585            | -               |
| 975        | -                              | -                               | 1492   | 1240                                    | 1766                              | 1212  | 1634            | -               |
| 1000       | -                              | -                               | 1538   | 1278                                    | 1820                              | 1250  | 1681            | -               |
| 1050       | -                              | -                               | 1639   | 1357                                    | 1928                              | 1328  | 1781            | -               |
| 1100       | -                              | -                               | 1737   | 1435                                    | 2036                              | 1404  | 1879            | -               |
| 1150       | -                              | -                               | -  | 1511                                    | 2144                              | 1480  | 1980            | -               |

Note: Expansion factor  $c = \frac{\text{Expansion in inches per 100 ft.} \times E_{70^\circ F}}{1728 \times 100} = \frac{\beta \times E_{70^\circ F}}{1728 \times 100}$

**Table 5**  
**Table of Common Shapes**  
**for Calculation of Thermal Stresses and Anchor Forces**



Table 5.1 : 90° Turn



Reacting forces  $F_x = k_x \cdot c \cdot \frac{I_P}{L^2} \text{ lb}$

$F_y = k_y \cdot c \cdot \frac{I_P}{L^2} \text{ lb}$

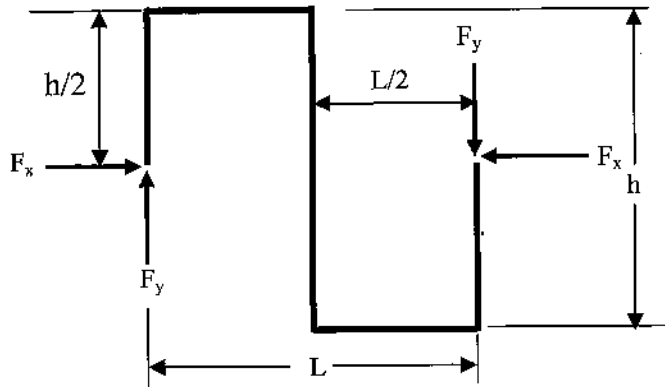
Max. bending stress

$S_B = k_b \cdot c \cdot \frac{D}{L} \text{ psi}$

L in feet, D in inches,  $I_P$  in inches<sup>4</sup>

| $\frac{L}{h}$ | $k_x$ | $k_y$ | $k_b$ |
|---------------|-------|-------|-------|
| 1.0           | 12.0  | 12.0  | 36    |
| 1.2           | 17.2  | 12.5  | 46    |
| 1.4           | 23.0  | 13.4  | 58    |
| 1.6           | 32.0  | 14.1  | 71    |
| 1.8           | 42.0  | 15.4  | 85    |
| 2.0           | 54.0  | 16.6  | 102   |
| 2.2           | 68.3  | 17.8  | 120   |
| 2.4           | 84.4  | 19.2  | 140   |
| 2.6           | 103   | 20.6  | 161   |
| 2.8           | 125   | 22.0  | 184   |
| 3.0           | 150   | 23.5  | 209   |
| 3.2           | 175   | 25.0  | 234   |
| 3.4           | 207   | 26.5  | 259   |
| 3.6           | 237   | 28.0  | 287   |
| 3.8           | 274   | 29.5  | 318   |
| 4.0           | 315   | 31.5  | 349   |
| 4.2           | 356   | 33.0  | 381   |
| 4.4           | 406   | 34.6  | 414   |
| 4.6           | 456   | 36.2  | 450   |
| 4.8           | 510   | 37.8  | 487   |
| 5.0           | 570   | 39.5  | 528   |
| 5.2           | 630   | 41.2  | 569   |
| 5.4           | 700   | 43.0  | 610   |
| 5.6           | 775   | 44.7  | 652   |
| 5.8           | 855   | 46.2  | 696   |
| 6.0           | 938   | 48.2  | 743   |
| 6.2           | 1020  | 49.8  | 790   |
| 6.4           | 1110  | 51.6  | 840   |
| 6.6           | 1212  | 53.4  | 892   |
| 6.8           | 1313  | 55.0  | 944   |
| 7.0           | 1426  | 56.8  | 997   |
| 7.2           | 1517  | 58.6  | 1050  |
| 7.4           | 1655  | 60.2  | 1104  |
| 7.6           | 1785  | 61.8  | 1159  |
| 7.8           | 1917  | 63.6  | 1219  |
| 8.0           | 2059  | 65.4  |       |

**Table 5.2 : Hooked Z Shape**



Reacting forces  $F_x = k_x \cdot c \cdot \frac{I_P}{L^2} \text{ lb}$

$F_y = k_y \cdot c \cdot \frac{I_P}{L^2} \text{ lb}$

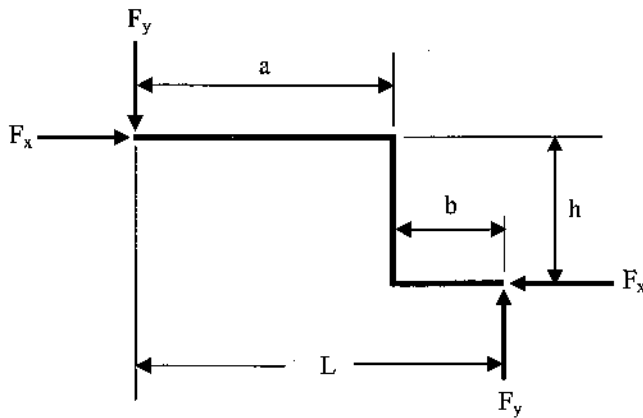
Max. bending stress

$S_B = k_b \cdot c \cdot \frac{D}{L} \text{ psi}$

L in feet, D in inches,  $I_P$  in inches<sup>4</sup>

| $\frac{L}{h}$ | $k_x$ | $k_y$ | $k_b$ |
|---------------|-------|-------|-------|
| 0.6           | 1.18  | 1.31  | 5.9   |
| 0.8           | 2.7   | 2.2   | 9.4   |
| 1.0           | 4.3   | 3.3   | 13.1  |
| 1.2           | 7.8   | 4.7   | 17.3  |
| 1.4           | 11.2  | 6.2   | 22.0  |
| 1.6           | 15.2  | 7.7   | 26.7  |
| 1.8           | 19.7  | 9.2   | 31.4  |
| 2.0           | 24.3  | 10.9  | 36.4  |
| 2.2           | 30.0  | 13.0  | 41.5  |
| 2.4           | 37.0  | 15.1  | 46.6  |
| 2.6           | 45.0  | 17.2  | 51.7  |
| 2.8           | 54.0  | 19.3  | 58.0  |
| 3.0           | 64.8  | 21.6  | 64.8  |
| 3.2           | 76.0  | 24.0  | 72.0  |
| 3.4           | 88.0  | 26.5  | 79.5  |
| 3.6           | 100.0 | 29.0  | 87.0  |
| 3.8           | 113.5 | 31.6  | 95.0  |
| 4.0           | 128.7 | 34.5  | 103   |
| 4.2           | 144   | 37.4  | 112   |
| 4.4           | 160   | 40.4  | 121   |
| 4.6           | 178   | 43.4  | 130   |
| 4.8           | 198   | 46.4  | 139   |
| 5.0           | 219   | 49.4  | 148   |
| 5.2           | 241   | 52.5  | 157   |
| 5.4           | 263   | 55.6  | 167   |
| 5.6           | 286   | 58.7  | 176   |
| 5.8           | 310   | 61.8  | 185   |
| 6.0           | 334   | 65.0  | 195   |
| 6.2           | 360   | 68.4  | 205   |
| 6.4           | 388   | 71.8  | 215   |
| 6.6           | 416   | 75.2  | 226   |
| 6.8           | 446   | 78.9  | 236   |
| 7.0           | 479   | 82.0  | 246   |
| 7.2           | 508   | 85.5  | 257   |
| 7.4           | 540   | 89.1  | 268   |
| 7.6           | 579   | 92.7  | 278   |
| 7.8           | 615   | 96.3  | 289   |
| 8.0           | 653   | 100.0 | 300   |

Table 5.3 : Z Shape



Reacting forces  $F_x = k_x \cdot c \cdot \frac{I_P}{L^2} \text{ lb}$

$F_y = k_y \cdot c \cdot \frac{I_P}{L^2} \text{ lb}$

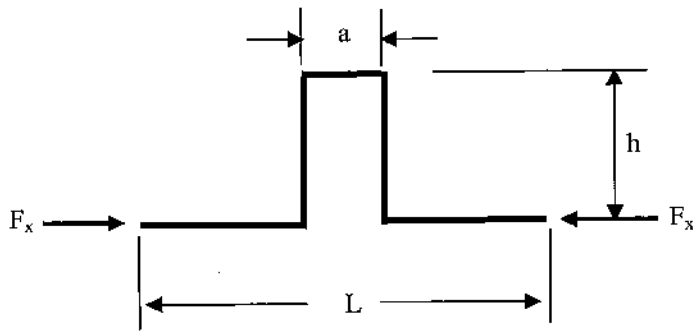
Max. bending stress

$S_B = k_b \cdot c \cdot \frac{D}{L} \text{ psi}$

L in feet, D in inches,  $I_P$  in inches<sup>4</sup>

| a/b → | 1     |       |       | 1.5   |       |       | 2     |       |       | 3     |       |       | 4     |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| L/h   | $k_x$ | $k_y$ | $k_b$ | $k_x$ | $k_y$ | $k_b$ | $k_x$ | $k_y$ | $k_b$ | $k_x$ | $k_y$ | $k_b$ | $k_x$ | $k_y$ | $k_b$ |
| 0.6   | 9.25  | 43.0  | 83.8  | 8.5   | 38    | 91    | 7.3   | 32    | 85    | 6.5   | 25    | 73    | 6.0   | 22    | 66    |
| 0.8   | 12.8  | 39.0  | 69.0  | 11.8  | 35    | 76    | 10.5  | 29    | 71    | 9.2   | 23    | 62    | 8.5   | 20    | 56    |
| 1.0   | 17.2  | 37.9  | 61.9  | 15.9  | 34    | 69    | 14.4  | 29    | 66    | 12.6  | 22    | 52    | 11.8  | 19    | 50    |
| 1.2   | 22.5  | 37.8  | 57.8  | 21.0  | 35    | 69    | 18    | 29    | 66    | 16.0  | 23    | 53    | 14    | 20    | 51    |
| 1.4   | 28.3  | 37.7  | 60.6  | 27    | 36    | 69    | 22    | 30    | 67    | 20    | 24    | 55    | 19    | 21    | 52    |
| 1.6   | 35.4  | 42.1  | 66.3  | 34    | 37    | 71    | 30    | 32    | 69    | 27    | 25    | 57    | 24    | 21    | 55    |
| 1.8   | 43.0  | 43.2  | 72.0  | 41    | 39    | 75    | 38    | 33    | 71    | 34    | 26    | 60    | 30    | 22    | 58    |
| 2.0   | 52.8  | 45.7  | 79.3  | 50    | 41    | 81    | 46    | 35    | 76    | 42    | 27    | 67    | 40    | 24    | 63    |
| 2.2   | 63.0  | 48.0  | 86.5  | 60    | 43    | 88    | 57    | 38    | 83    | 51    | 29    | 73    | 48    | 25    | 68    |
| 2.4   | 76.0  | 51.0  | 93.8  | 71    | 46    | 96    | 68    | 40    | 90    | 61    | 31    | 80    | 58    | 27    | 74    |
| 2.6   | 89.0  | 54.5  | 101.2 | 83    | 49    | 102   | 79    | 43    | 97    | 71    | 33    | 86    | 69    | 29    | 80    |
| 2.8   | 102   | 58.2  | 109.0 | 96    | 53    | 110   | 91    | 46    | 105   | 82    | 35    | 92    | 80    | 30    | 87    |
| 3.0   | 116   | 62.2  | 116.1 | 110   | 56    | 118   | 104   | 49    | 115   | 92    | 37    | 99    | 90    | 32    | 93    |
| 3.2   | 132   | 66.0  | 124.5 | 124   | 59    | 126   | 118   | 51    | 121   | 106   | 39    | 107   | 104   | 34    | 99    |
| 3.4   | 149   | 70.0  | 133.0 | 140   | 63    | 134   | 133   | 54    | 128   | 121   | 41    | 114   | 118   | 36    | 105   |
| 3.6   | 168   | 74.0  | 141.0 | 168   | 66    | 143   | 149   | 57    | 135   | 136   | 44    | 120   | 132   | 38    | 111   |
| 3.8   | 188   | 78.0  | 149.0 | 177   | 70    | 151   | 165   | 60    | 142   | 151   | 46    | 127   | 147   | 40    | 117   |
| 4.0   | 210   | 82.0  | 157.8 | 197   | 73    | 159   | 181   | 63    | 150   | 166   | 49    | 133   | 163   | 42    | 124   |
| 4.2   | 235   | 86.4  | 166.0 | 219   | 77    | 168   | 201   | 66    | 157   | 185   | 51    | 140   | 182   | 44    | 130   |
| 4.4   | 260   | 90.6  | 174.5 | 241   | 81    | 177   | 221   | 69    | 164   | 204   | 53    | 147   | 201   | 46    | 137   |
| 4.6   | 285   | 94.8  | 183.0 | 263   | 85    | 186   | 241   | 72    | 173   | 223   | 56    | 154   | 220   | 48    | 143   |
| 4.8   | 310   | 99.0  | 192.0 | 287   | 88    | 194   | 263   | 75    | 182   | 243   | 58    | 161   | 239   | 50    | 150   |
| 5.0   | 336   | 103.2 | 201.4 | 314   | 92    | 203   | 288   | 78    | 190   | 264   | 61    | 168   | 260   | 52    | 156   |
| 5.2   | 364   | 107.6 | 210.0 | 341   | 96    | 212   | 313   | 81    | 198   | 286   | 63    | 175   | 281   | 54    | 163   |
| 5.4   | 393   | 111.8 | 219.5 | 370   | 100   | 221   | 339   | 85    | 206   | 310   | 66    | 182   | 304   | 56    | 169   |
| 5.6   | 425   | 116.2 | 228.0 | 399   | 104   | 230   | 365   | 88    | 214   | 335   | 68    | 189   | 329   | 58    | 176   |
| 5.8   | 457   | 120.5 | 237.5 | 430   | 108   | 239   | 392   | 92    | 223   | 360   | 71    | 197   | 355   | 61    | 182   |
| 6.0   | 491   | 124.8 | 245.5 | 461   | 112   | 248   | 422   | 95    | 232   | 386   | 73    | 205   | 381   | 63    | 190   |
| 6.2   | 526   | 129.4 | 254.5 | 493   | 116   | 258   | 450   | 98    | 240   | 414   | 76    | 212   | 408   | 65    | 196   |
| 6.4   | 562   | 133.8 | 263.5 | 526   | 120   | 267   | 478   | 102   | 248   | 443   | 79    | 219   | 436   | 67    | 203   |
| 6.6   | 598   | 138.2 | 273.0 | 561   | 124   | 276   | 506   | 105   | 256   | 472   | 81    | 227   | 465   | 69    | 210   |
| 6.8   | 633   | 142.6 | 282.0 | 598   | 128   | 285   | 535   | 108   | 265   | 502   | 84    | 234   | 495   | 72    | 217   |
| 7.0   | 670   | 145.0 | 287.0 | 636   | 132   | 294   | 565   | 111   | 274   | 533   | 86    | 242   | 526   | 74    | 224   |
| 7.2   | 715   | 152.0 | 300.0 | 674   | 136   | 303   | 601   | 115   | 282   | 565   | 89    | 248   | 557   | 76    | 230   |
| 7.4   | 758   | 156.5 | 309.0 | 714   | 140   | 312   | 639   | 118   | 290   | 599   | 92    | 256   | 588   | 78    | 237   |
| 7.6   | 803   | 161.0 | 319.0 | 756   | 143   | 321   | 680   | 122   | 299   | 633   | 94    | 263   | 620   | 81    | 244   |
| 7.8   | 850   | 165.5 | 328.0 | 798   | 148   | 330   | 724   | 125   | 308   | 668   | 97    | 270   | 655   | 83    | 250   |
| 8.0   | 898   | 170.0 | 337.0 | 840   | 152   | 340   | 770   | 129   | 317   | 703   | 99    | 279   | 694   | 85    | 257   |

Table 5.4 : U Shape ที่มีขายาวเท่ากัน (1)



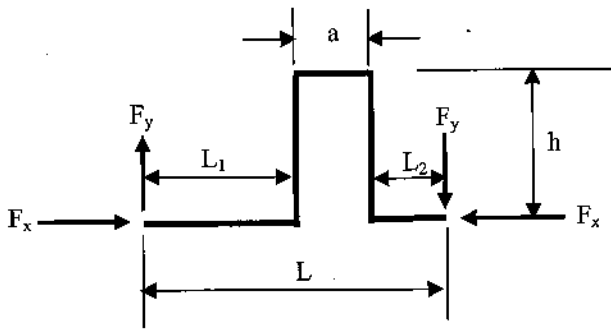
Reacting forces  $F_x = k_x \cdot c \cdot \frac{I_P}{L^2} \text{ lb}$   
 Max. bending stress  
 $S_B = k_b \cdot c \cdot \frac{D}{L} \text{ psi}$   
 L in feet, D in inches,  $I_P$  in inches<sup>4</sup>

| L/a → | 2     |       | 3     |       | 4     |       | 5     |       | 6     |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| L/h   | $k_x$ | $k_b$ | $k_x$ | $k_b$ | $k_x$ | $k_b$ | $k_x$ | $k_b$ | $k_x$ | $k_b$ |
| 1.0   | 2.40  | 7.20  | 2.46  | 8.2   | 2.52  | 8.82  | 2.58  | 9.29  | 2.64  | 9.69  |
| 1.2   | 3.70  | 9.25  | 4.46  | 10.9  | 6.65  | 12.0  | 4.78  | 12.8  | 4.84  | 13.3  |
| 1.4   | 5.31  | 11.37 | 6.46  | 13.6  | 6.79  | 15.2  | 6.98  | 16.3  | 7.1   | 17.0  |
| 1.6   | 7.22  | 13.53 | 8.46  | 16.3  | 8.93  | 18.4  | 9.20  | 19.8  | 9.5   | 20.8  |
| 1.8   | 9.45  | 15.75 | 10.48 | 19.0  | 11.08 | 21.6  | 11.42 | 23.4  | 11.9  | 24.7  |
| 2.0   | 12.00 | 18.00 | 12.5  | 21.8  | 13.24 | 24.8  | 13.87 | 27.1  | 14.4  | 28.8  |
| 2.2   | 14.85 | 20.25 | 15.8  | 24.9  | 16.6  | 28.5  | 16.9  | 31.0  | 17.5  | 33.4  |
| 2.4   | 18.00 | 22.50 | 19.6  | 28.0  | 20.4  | 32.2  | 20.8  | 35.3  | 21.3  | 38.0  |
| 2.6   | 21.52 | 24.83 | 23.4  | 31.1  | 24.4  | 35.9  | 25.5  | 39.7  | 26.2  | 42.7  |
| 2.8   | 25.32 | 27.10 | 27.3  | 34.2  | 28.9  | 39.7  | 30.6  | 44.0  | 31.7  | 47.5  |
| 3.0   | 29.45 | 29.45 | 31.2  | 37.4  | 33.6  | 43.7  | 35.8  | 48.3  | 37.7  | 52.7  |
| 3.2   | 33.9  | 31.8  | 35.6  | 40.6  | 39.0  | 47.6  | 41.2  | 53.7  | 43.7  | 58.0  |
| 3.4   | 38.7  | 34.1  | 40.0  | 43.8  | 44.5  | 51.6  | 46.9  | 58.0  | 49.5  | 63.3  |
| 3.6   | 43.7  | 36.5  | 46.1  | 47.0  | 50.3  | 55.6  | 53.0  | 62.8  | 57.5  | 68.7  |
| 3.8   | 49.1  | 38.8  | 52.3  | 50.2  | 57.0  | 59.8  | 60.2  | 67.6  | 65.5  | 74.1  |
| 4.0   | 54.9  | 41.1  | 58.5  | 53.6  | 64.0  | 64.0  | 69.1  | 72.5  | 73.6  | 79.7  |
| 4.2   | 60.8  | 43.4  | 64.7  | 57.0  | 71.1  | 68.2  | 78.1  | 77.5  | 82.0  | 85.2  |
| 4.4   | 67.3  | 45.9  | 71.0  | 60.4  | 78.9  | 72.4  | 87.2  | 82.5  | 91.0  | 90.8  |
| 4.6   | 73.9  | 48.2  | 79.1  | 63.8  | 87.0  | 76.6  | 96.3  | 87.5  | 101.7 | 96.3  |
| 4.8   | 81.0  | 50.6  | 87.2  | 67.3  | 95.8  | 80.8  | 105.4 | 92.5  | 112.4 | 101.9 |
| 5.0   | 88.2  | 52.9  | 95.3  | 70.8  | 104.6 | 85.2  | 114.7 | 97.8  | 122.5 | 107.5 |
| 5.2   | 95.9  | 55.3  | 104.4 | 74.3  | 114.0 | 89.5  | 125.0 | 103.0 | 134.0 | 113.7 |
| 5.4   | 103.8 | 57.7  | 113.5 | 77.8  | 123.6 | 93.9  | 136.3 | 108.3 | 146.0 | 120.0 |
| 5.6   | 112.1 | 60.1  | 122.6 | 81.3  | 134.0 | 98.3  | 147.6 | 113.5 | 159.0 | 126.2 |
| 5.8   | 120.7 | 62.4  | 132.0 | 84.8  | 144.6 | 102.7 | 159.0 | 118.8 | 172.0 | 132.5 |
| 6.0   | 129.6 | 64.8  | 141.6 | 88.4  | 155.8 | 107.0 | 171.3 | 124.1 | 185.2 | 138.8 |
| 6.2   | 138.8 | 67.2  | 152.4 | 91.9  | 167.2 | 111.5 | 184.0 | 129.5 | 199.0 | 145.1 |
| 6.4   | 148.4 | 69.6  | 163.3 | 95.4  | 179.1 | 116.0 | 198.0 | 134.9 | 213.0 | 151.4 |
| 6.6   | 158.2 | 71.9  | 174.2 | 98.9  | 191.0 | 120.5 | 212.2 | 140.3 | 228.0 | 157.7 |
| 6.8   | 168.4 | 74.3  | 185.2 | 102.4 | 204.0 | 125.0 | 226.4 | 145.7 | 244.2 | 164.0 |
| 7.0   | 178.9 | 76.7  | 196.3 | 106.0 | 217.0 | 129.4 | 240.7 | 151.1 | 261.8 | 170.3 |
| 7.2   | 189.8 | 79.1  | 209.1 | 109.5 | 230.5 | 133.9 | 256.0 | 156.6 | 279.8 | 176.7 |
| 7.4   | 200.9 | 81.5  | 221.9 | 113.0 | 244.2 | 138.4 | 271.5 | 162.1 | 297.8 | 183.1 |
| 7.6   | 312.4 | 83.8  | 234.7 | 116.5 | 259.2 | 142.9 | 287.5 | 167.6 | 316   | 189.5 |
| 7.8   | 224.2 | 86.2  | 247.6 | 120.0 | 274.5 | 147.4 | 304.3 | 173.1 | 334   | 195.9 |
| 8.0   | 236.2 | 88.6  | 260.7 | 123.5 | 289.8 | 152.0 | 322   | 178.6 | 352   | 202.4 |
| 8.2   | 248.7 | 91.0  | 275.0 | 127.0 | 305   | 156.6 | 340   | 184.1 | 372   | 208.9 |
| 8.4   | 261.5 | 93.4  | 289.3 | 130.5 | 320   | 161.2 | 358   | 189.7 | 392   | 215.4 |
| 8.6   | 274.6 | 95.8  | 304   | 134.0 | 336   | 165.8 | 377   | 195.3 | 413   | 221.9 |
| 8.8   | 287.9 | 98.2  | 318   | 137.5 | 351   | 170.4 | 395   | 200.9 | 434   | 228.4 |
| 9.0   | 302   | 100.5 | 332   | 141.0 | 367   | 175.0 | 416   | 206.6 | 456   | 235.0 |
| 9.2   | 316   | 102.9 | 348   | 144.5 | 384   | 179.6 | 437   | 212.4 | 479   | 241.6 |
| 9.4   | 330   | 105.4 | 365   | 148.0 | 402   | 184.2 | 458   | 218.2 | 503   | 248.2 |
| 9.6   | 345   | 107.7 | 381   | 151.5 | 422   | 188.8 | 480   | 224.0 | 527   | 254.8 |
| 9.8   | 360   | 110.1 | 397   | 155.0 | 443   | 193.4 | 502   | 229.8 | 551   | 261.4 |
| 10.0  | 375   | 112.5 | 414   | 158.7 | 466   | 198.1 | 525   | 236.1 | 575   | 268.2 |

Table 5.4 : U Shape ที่มีขายาวเท่ากัน (2)

| L/a → | 7     |       | 8     |       | 9     |       | 10    |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| L/h   | $k_x$ | $k_b$ | $k_x$ | $k_b$ | $k_x$ | $k_b$ | $k_x$ | $k_b$ |
| 1.0   | 2.67  | 9.92  | 2.70  | 10.1  | 2.73  | 10.3  | 2.75  | 10.45 |
| 1.2   | 5.0   | 13.9  | 5.2   | 14.0  | 5.29  | 14.1  | 5.35  | 14.9  |
| 1.4   | 7.4   | 17.9  | 7.7   | 18.1  | 7.85  | 18.6  | 7.95  | 19.4  |
| 1.6   | 9.8   | 22.0  | 10.2  | 22.3  | 10.41 | 22.9  | 10.55 | 23.9  |
| 1.8   | 12.3  | 26.1  | 12.7  | 26.7  | 12.97 | 27.4  | 13.15 | 28.5  |
| 2.0   | 14.9  | 30.2  | 15.3  | 31.2  | 15.53 | 32.3  | 15.79 | 33.2  |
| 2.2   | 18.0  | 34.8  | 18.6  | 36.2  | 20.0  | 38.0  | 21.0  | 38.6  |
| 2.4   | 22.5  | 40.0  | 23.8  | 41.7  | 25.2  | 43.7  | 26.3  | 44.4  |
| 2.6   | 27.5  | 45.3  | 29.0  | 47.3  | 30.7  | 49.5  | 31.7  | 50.5  |
| 2.8   | 33.0  | 50.7  | 34.7  | 53.0  | 36.3  | 55.4  | 37.2  | 56.9  |
| 3.0   | 39.3  | 56.2  | 40.7  | 59.0  | 41.9  | 61.5  | 43.0  | 63.6  |
| 3.2   | 45.7  | 61.7  | 48.0  | 65.1  | 50.0  | 67.8  | 50.8  | 70.6  |
| 3.4   | 52.2  | 67.3  | 55.5  | 71.3  | 58.3  | 74.2  | 59.2  | 77.7  |
| 3.6   | 59.5  | 73.0  | 63.2  | 77.7  | 66.7  | 80.7  | 68.0  | 84.9  |
| 3.8   | 68.5  | 79.4  | 71.5  | 84.2  | 75.2  | 87.3  | 77.1  | 92.2  |
| 4.0   | 77.5  | 85.8  | 80.9  | 91.0  | 84.2  | 94.4  | 86.6  | 99.5  |
| 4.2   | 87.0  | 92.2  | 90.4  | 97.8  | 95.0  | 102.0 | 97.0  | 107.0 |
| 4.4   | 96.5  | 98.6  | 100.5 | 104.7 | 106.2 | 109.6 | 108.0 | 114.7 |
| 4.6   | 106.5 | 105.0 | 112.0 | 111.7 | 117.8 | 117.2 | 120.0 | 122.8 |
| 4.8   | 118.0 | 111.4 | 124.2 | 118.7 | 129.8 | 125.0 | 133.3 | 131.0 |
| 5.0   | 130.0 | 117.8 | 136.7 | 125.9 | 142.5 | 133.0 | 147.9 | 139.4 |
| 5.2   | 142.0 | 124.5 | 149.4 | 133.2 | 157.5 | 141.0 | 163.0 | 147.9 |
| 5.4   | 155.0 | 131.3 | 162.4 | 140.6 | 172.6 | 149.0 | 178.5 | 156.5 |
| 5.6   | 169.0 | 138.1 | 177.0 | 148.1 | 187.0 | 157.1 | 194.5 | 165.2 |
| 5.8   | 183.0 | 144.9 | 192.6 | 155.6 | 202.7 | 165.2 | 211.0 | 173.9 |
| 6.0   | 197.8 | 151.8 | 209.0 | 163.3 | 219.2 | 173.5 | 228.3 | 182.6 |
| 6.2   | 213.0 | 158.8 | 225.0 | 171.0 | 236.0 | 181.8 | 245.8 | 191.4 |
| 6.4   | 228.5 | 165.8 | 241.8 | 178.8 | 253.0 | 190.2 | 263.8 | 200.2 |
| 6.6   | 245.0 | 172.9 | 259.5 | 186.6 | 271.0 | 198.7 | 282.8 | 209.1 |
| 6.8   | 262.5 | 180.0 | 279.0 | 194.5 | 292.0 | 207.2 | 305   | 218.0 |
| 7.0   | 280.7 | 187.1 | 298.7 | 202.5 | 314   | 216.0 | 328   | 227.1 |
| 7.2   | 299.5 | 194.3 | 319   | 210.5 | 336   | 224.7 | 351   | 236.6 |
| 7.4   | 319.0 | 201.6 | 339   | 218.5 | 358   | 233.5 | 374   | 246.3 |
| 7.6   | 339.0 | 208.9 | 359   | 226.5 | 381   | 242.3 | 398   | 256.0 |
| 7.8   | 359.0 | 216.2 | 381   | 234.6 | 404   | 251.1 | 422   | 265.8 |
| 8.0   | 379   | 223.5 | 405   | 242.7 | 427   | 260.0 | 448   | 275.6 |
| 8.2   | 400   | 231.0 | 429   | 250.9 | 451   | 268.9 | 475   | 285.5 |
| 8.4   | 422   | 238.5 | 455   | 259.2 | 476   | 277.8 | 502   | 295.4 |
| 8.6   | 445   | 246.0 | 480   | 267.5 | 502   | 286.7 | 530   | 305   |
| 8.8   | 470   | 253.5 | 505   | 275.8 | 529   | 295.7 | 560   | 315   |
| 9.0   | 495   | 261.0 | 530   | 284.1 | 559   | 305   | 590   | 325   |
| 9.2   | 520   | 268.6 | 556   | 292.4 | 589   | 314   | 620   | 335   |
| 9.4   | 545   | 276.2 | 584   | 301   | 618   | 323   | 651   | 345   |
| 9.6   | 570   | 283.8 | 611   | 309   | 648   | 332   | 684   | 355   |
| 9.8   | 596   | 291.4 | 639   | 317   | 680   | 342   | 717   | 365   |
| 10.0  | 624   | 299.0 | 666   | 326   | 711   | 351   | 750   | 375   |

Table 5.5 : U Shape ที่มีขายาวไม่เท่ากัน  $\frac{L_1}{L_2} = 2$



Reacting forces  $F_x = k_x \cdot c \cdot \frac{I_P}{L^2} \text{ lb}$

$F_y = k_y \cdot c \cdot \frac{I_P}{L^2} \text{ lb}$

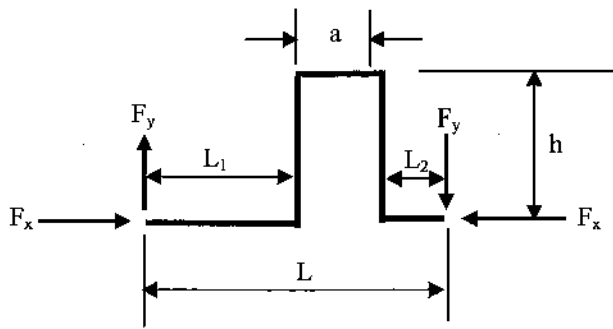
Max. bending stress

$S_B = k_b \cdot c \cdot \frac{D}{L} \text{ psi}$

L in feet, D in inches,  $I_P$  in inches<sup>4</sup>

| L/a → | 2     |       |       | 4     |       |       | 6     |       |       | 8     |       |       | 10    |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| L/h   | $k_x$ | $k_y$ | $k_b$ | $k_x$ | $k_y$ | $k_b$ | $k_x$ | $k_y$ | $k_b$ | $k_x$ | $k_y$ | $k_b$ | $k_x$ | $k_y$ | $k_b$ |
| 1.0   | 2.5   | 0.5   | 8.7   | 2.7   | 1.1   | 9.9   | 2.8   | 1.4   | 10.7  | 2.9   | 1.5   | 10.9  | 3.0   | 1.6   | 11.4  |
| 1.2   | 4.4   | 0.7   | 11.7  | 5.3   | 1.6   | 12.5  | 5.0   | 1.8   | 14.6  | 5.5   | 2.0   | 15.5  | 5.5   | 2.1   | 16.2  |
| 1.4   | 6.4   | 1.0   | 14.6  | 8.0   | 2.1   | 15.1  | 7.6   | 2.2   | 18.8  | 8.2   | 2.5   | 20.1  | 8.2   | 2.6   | 21.0  |
| 1.6   | 8.4   | 1.2   | 17.5  | 10.8  | 2.6   | 17.1  | 10.2  | 2.7   | 23.0  | 10.9  | 2.9   | 24.8  | 11.0  | 3.0   | 25.8  |
| 1.8   | 10.4  | 1.5   | 20.7  | 13.6  | 3.1   | 20.4  | 12.9  | 3.1   | 27.2  | 13.6  | 3.4   | 29.5  | 14.0  | 3.5   | 30.6  |
| 2.0   | 12.4  | 1.7   | 23.3  | 16.5  | 3.6   | 23.3  | 15.6  | 3.6   | 31.5  | 16.5  | 3.8   | 34.2  | 17.2  | 4.0   | 35.5  |
| 2.2   | 16.0  | 2.0   | 26.6  | 20.3  | 3.9   | 28.3  | 20.6  | 4.0   | 36.6  | 20.0  | 4.2   | 39.0  | 21.5  | 4.5   | 41.8  |
| 2.4   | 19.7  | 2.3   | 29.9  | 24.1  | 4.3   | 33.4  | 25.6  | 4.5   | 41.7  | 24.0  | 4.7   | 44.0  | 27.5  | 4.9   | 48.2  |
| 2.6   | 23.4  | 2.7   | 33.2  | 28.0  | 4.6   | 38.5  | 30.6  | 4.9   | 46.8  | 28.0  | 5.1   | 49.1  | 33.5  | 5.5   | 54.6  |
| 2.8   | 27.1  | 3.0   | 36.5  | 32.0  | 4.9   | 43.6  | 35.6  | 5.4   | 51.9  | 33.0  | 5.6   | 54.6  | 39.5  | 6.0   | 61.0  |
| 3.0   | 30.9  | 3.3   | 40.1  | 36.1  | 5.3   | 48.7  | 40.7  | 5.9   | 57.0  | 40.8  | 6.0   | 59.6  | 46.5  | 6.5   | 67.0  |
| 3.2   | 36.3  | 3.7   | 43.7  | 41.0  | 5.7   | 53.2  | 48.0  | 6.3   | 62.8  | 47.0  | 6.5   | 68.0  | 54.0  | 6.9   | 74.0  |
| 3.4   | 41.7  | 4.0   | 47.3  | 47.0  | 6.2   | 57.7  | 56.0  | 6.8   | 69.0  | 55.0  | 7.0   | 75.0  | 62.0  | 7.4   | 81.0  |
| 3.6   | 46.1  | 4.4   | 50.9  | 53.0  | 6.6   | 62.0  | 64.0  | 7.3   | 74.0  | 65.0  | 7.4   | 83.0  | 71.0  | 7.8   | 88.0  |
| 3.8   | 51.5  | 4.8   | 54.5  | 60.0  | 7.1   | 67.0  | 72.0  | 7.8   | 80.0  | 76.0  | 7.9   | 91.0  | 81.1  | 8.3   | 95.0  |
| 4.0   | 58.0  | 5.2   | 58.0  | 69.0  | 7.5   | 71.0  | 80.0  | 8.2   | 86.0  | 87.0  | 8.4   | 100   | 92.0  | 8.8   | 103   |
| 4.2   | 65.0  | 5.5   | 62.0  | 77.0  | 8.0   | 76.0  | 90.0  | 8.7   | 92.0  | 98.0  | 8.9   | 107   | 105   | 9.3   | 111   |
| 4.4   | 72.0  | 5.9   | 65.0  | 86.0  | 8.4   | 80.0  | 100   | 9.1   | 99.0  | 109   | 9.4   | 115   | 118   | 9.8   | 120   |
| 4.6   | 79.0  | 6.3   | 69.0  | 95.0  | 8.8   | 85.0  | 111   | 9.5   | 105   | 120   | 9.8   | 122   | 132   | 10.3  | 128   |
| 4.8   | 86.0  | 6.7   | 72.0  | 104   | 9.0   | 89.0  | 122   | 9.9   | 111   | 133   | 10.3  | 130   | 145   | 10.8  | 137   |
| 5.0   | 94.0  | 7.0   | 76.0  | 113   | 9.6   | 94.0  | 132   | 10.4  | 116   | 147   | 10.8  | 138   | 159   | 11.3  | 146   |
| 5.2   | 103   | 7.5   | 80.0  | 124   | 10.0  | 99.0  | 145   | 10.9  | 122   | 158   | 11.3  | 146   | 172   | 11.7  | 154   |
| 5.4   | 112   | 7.9   | 84.0  | 135   | 10.5  | 104   | 158   | 11.3  | 128   | 173   | 11.7  | 154   | 188   | 12.1  | 163   |
| 5.6   | 121   | 8.3   | 88.0  | 146   | 10.9  | 108   | 172   | 11.8  | 134   | 189   | 12.2  | 162   | 206   | 12.6  | 171   |
| 5.8   | 131   | 8.7   | 92.0  | 157   | 11.4  | 113   | 185   | 12.3  | 140   | 206   | 12.6  | 171   | 223   | 13.0  | 180   |
| 6.0   | 140   | 9.2   | 96.0  | 168   | 11.8  | 118   | 199   | 12.7  | 146   | 224   | 13.1  | 179   | 242   | 13.5  | 188   |
| 6.2   | 150   | 9.5   | 99.0  | 180   | 12.3  | 123   | 216   | 13.2  | 153   | 241   | 13.6  | 186   | 261   | 14.0  | 198   |
| 6.4   | 161   | 9.9   | 103   | 193   | 12.7  | 127   | 232   | 13.6  | 160   | 258   | 14.1  | 193   | 283   | 14.5  | 208   |
| 6.6   | 171   | 10.3  | 107   | 206   | 13.1  | 132   | 248   | 14.1  | 166   | 275   | 14.5  | 201   | 306   | 15.0  | 218   |
| 6.8   | 182   | 10.7  | 110   | 220   | 13.6  | 137   | 264   | 14.5  | 173   | 292   | 15.0  | 208   | 329   | 15.5  | 228   |
| 7.0   | 192   | 11.1  | 114   | 234   | 14.0  | 142   | 280   | 14.9  | 180   | 310   | 15.5  | 215   | 352   | 16.0  | 238   |
| 7.2   | 204   | 11.5  | 117   | 249   | 14.4  | 147   | 299   | 15.4  | 186   | 329   | 15.9  | 222   | 375   | 16.4  | 247   |
| 7.4   | 216   | 11.9  | 121   | 264   | 14.8  | 152   | 319   | 15.8  | 192   | 348   | 16.3  | 229   | 399   | 16.8  | 256   |
| 7.6   | 228   | 12.3  | 125   | 279   | 15.2  | 157   | 338   | 16.2  | 198   | 367   | 16.7  | 236   | 425   | 17.2  | 265   |
| 7.8   | 240   | 12.7  | 128   | 295   | 15.6  | 162   | 357   | 16.6  | 204   | 386   | 17.1  | 243   | 450   | 17.7  | 274   |
| 8.0   | 252   | 13.1  | 132   | 312   | 16.1  | 167   | 377   | 17.1  | 211   | 408   | 17.5  | 251   | 476   | 18.2  | 283   |
| 8.2   | 266   | 13.5  | 136   | 330   | 16.6  | 172   | 398   | 17.5  | 217   | 430   | 17.9  | 259   | 502   | 18.6  | 293   |
| 8.4   | 280   | 13.9  | 140   | 348   | 17.0  | 176   | 420   | 18.0  | 224   | 453   | 18.4  | 268   | 530   | 19.0  | 303   |
| 8.6   | 295   | 14.3  | 143   | 366   | 17.5  | 181   | 442   | 18.4  | 231   | 476   | 18.9  | 277   | 561   | 19.5  | 313   |
| 8.8   | 309   | 14.7  | 147   | 384   | 18.0  | 186   | 465   | 18.9  | 237   | 503   | 19.3  | 286   | 592   | 20.0  | 324   |
| 9.0   | 323   | 15.2  | 151   | 402   | 18.4  | 191   | 487   | 19.4  | 244   | 531   | 19.8  | 295   | 624   | 20.6  | 335   |
| 9.2   | 339   | 15.6  | 156   | 421   | 18.8  | 196   | 512   | 19.7  | 251   | 560   | 20.2  | 304   | 657   | 21.0  | 345   |
| 9.4   | 355   | 16.0  | 160   | 440   | 19.2  | 201   | 537   | 20.1  | 257   | 588   | 20.7  | 312   | 689   | 21.4  | 354   |
| 9.6   | 371   | 16.4  | 165   | 460   | 19.6  | 205   | 562   | 20.5  | 264   | 618   | 21.1  | 320   | 722   | 21.8  | 364   |
| 9.8   | 387   | 16.8  | 169   | 480   | 20.0  | 210   | 587   | 20.9  | 270   | 646   | 21.6  | 329   | 754   | 22.2  | 374   |
| 10.0  | 403   | 17.3  | 175   | 500   | 20.4  | 215   | 613   | 21.3  | 277   | 675   | 22.0  | 337   | 787   | 22.7  | 384   |

Table 5.6 : U Shape ที่มีขายาวไม่เท่ากัน  $\frac{L_1}{L_2} = 3$



Reacting forces  $F_x = k_x \cdot c \cdot \frac{I_P}{L^2} \text{ lb}$

$F_y = k_y \cdot c \cdot \frac{I_P}{L^2} \text{ lb}$

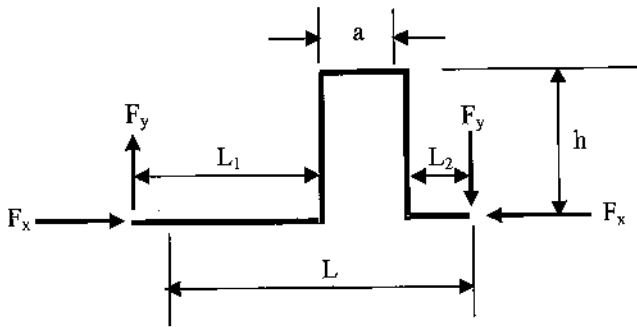
Max. bending stress

$S_B = k_b \cdot c \cdot \frac{D}{L} \text{ psi}$

L in feet, D in inches,  $I_P$  in inches<sup>4</sup>

| L/a → | 2     |       |       | 4     |       |       | 6     |       |       | 8     |       |       | 10    |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| L/h   | $k_x$ | $k_y$ | $k_b$ | $k_x$ | $k_y$ | $k_b$ | $k_x$ | $k_y$ | $k_b$ | $k_x$ | $k_y$ | $k_b$ | $k_x$ | $k_y$ | $k_b$ |
| 1.0   | 2.5   | 0.7   | 9.3   | 2.8   | 1.4   | 10.2  | 3.1   | 2.0   | 11.4  | 3.2   | 2.1   | 11.8  | 3.3   | 2.2   | 12    |
| 1.2   | 4.0   | 1.1   | 12.7  | 4.0   | 1.9   | 15    | 4.0   | 2.6   | 15.6  | 5.8   | 2.8   | 16.6  | 6.0   | 2.9   | 17    |
| 1.4   | 6.0   | 1.5   | 16.1  | 6.0   | 2.4   | 20    | 7.0   | 3.3   | 20    | 8.4   | 3.5   | 21.4  | 9.0   | 3.6   | 22    |
| 1.6   | 8.0   | 1.8   | 19.5  | 9.0   | 2.9   | 25    | 10    | 3.9   | 25    | 11    | 4.2   | 26    | 11    | 4.3   | 27    |
| 1.8   | 10    | 2.2   | 23    | 12    | 3.5   | 30    | 13    | 4.6   | 29    | 14    | 4.9   | 31    | 14    | 5.0   | 32    |
| 2.0   | 13    | 2.6   | 26    | 15    | 4.0   | 35    | 17    | 5.3   | 33    | 18    | 5.6   | 36    | 19    | 5.8   | 37    |
| 2.2   | 16    | 3.1   | 30    | 18    | 4.6   | 38    | 21    | 5.6   | 39    | 22    | 6.3   | 40    | 22    | 6.6   | 44    |
| 2.4   | 20    | 3.6   | 34    | 21    | 5.2   | 41    | 26    | 5.9   | 44    | 26    | 7.1   | 46    | 28    | 7.4   | 50    |
| 2.6   | 24    | 4.2   | 39    | 26    | 5.8   | 44    | 31    | 6.2   | 49    | 31    | 7.8   | 52    | 34    | 8.2   | 57    |
| 2.8   | 28    | 4.7   | 43    | 31    | 6.4   | 47    | 37    | 6.5   | 54    | 39    | 8.6   | 59    | 43    | 9.0   | 64    |
| 3.0   | 33    | 5.2   | 47    | 38    | 7.0   | 50    | 45    | 7.0   | 60    | 48    | 9.3   | 66    | 52    | 9.8   | 71    |
| 3.2   | 39    | 5.8   | 51    | 44    | 7.6   | 55    | 51    | 7.9   | 66    | 57    | 10.0  | 72    | 60    | 10.5  | 78    |
| 3.4   | 44    | 6.3   | 55    | 51    | 8.2   | 59    | 59    | 9.0   | 72    | 65    | 10.7  | 79    | 70    | 11.1  | 86    |
| 3.6   | 50    | 6.9   | 59    | 59    | 8.8   | 64    | 68    | 10.0  | 78    | 74    | 11.5  | 86    | 80    | 11.8  | 93    |
| 3.8   | 56    | 7.5   | 64    | 67    | 9.4   | 69    | 77    | 11.2  | 83    | 84    | 12.2  | 93    | 90    | 12.4  | 100   |
| 4.0   | 62    | 8.1   | 68    | 73    | 10.0  | 73    | 87    | 12.4  | 89    | 95    | 12.8  | 100   | 101   | 13.1  | 109   |
| 4.2   | 69    | 8.7   | 73    | 82    | 10.6  | 78    | 96    | 13.1  | 95    | 107   | 13.6  | 108   | 115   | 13.8  | 117   |
| 4.4   | 76    | 9.3   | 78    | 92    | 11.3  | 83    | 107   | 13.8  | 101   | 119   | 14.3  | 115   | 129   | 14.5  | 125   |
| 4.6   | 84    | 9.9   | 82    | 102   | 11.9  | 88    | 118   | 14.5  | 108   | 132   | 15.1  | 122   | 143   | 15.3  | 134   |
| 4.8   | 92    | 10.6  | 87    | 111   | 12.6  | 93    | 130   | 15.2  | 115   | 145   | 15.8  | 130   | 157   | 16.0  | 142   |
| 5.0   | 101   | 11.2  | 92    | 120   | 13.2  | 97    | 144   | 16.0  | 122   | 160   | 16.5  | 138   | 172   | 16.7  | 152   |
| 5.2   | 110   | 11.8  | 96    | 131   | 13.9  | 102   | 157   | 16.7  | 128   | 174   | 17.2  | 145   | 188   | 17.4  | 161   |
| 5.4   | 119   | 12.4  | 100   | 142   | 14.5  | 107   | 170   | 17.4  | 134   | 190   | 17.9  | 153   | 205   | 18.1  | 170   |
| 5.6   | 129   | 13.0  | 105   | 154   | 15.2  | 112   | 184   | 18.1  | 141   | 208   | 18.7  | 161   | 222   | 18.8  | 178   |
| 5.8   | 139   | 13.6  | 109   | 166   | 15.8  | 117   | 199   | 18.8  | 148   | 226   | 19.4  | 169   | 241   | 19.6  | 187   |
| 6.0   | 148   | 14.2  | 114   | 179   | 16.5  | 121   | 216   | 19.7  | 155   | 244   | 20.1  | 178   | 262   | 20.3  | 196   |
| 6.2   | 159   | 14.9  | 119   | 191   | 17.1  | 127   | 231   | 20.3  | 161   | 262   | 20.7  | 185   | 283   | 21.0  | 205   |
| 6.4   | 170   | 15.7  | 124   | 204   | 17.8  | 132   | 249   | 21.0  | 167   | 280   | 21.4  | 193   | 305   | 21.8  | 215   |
| 6.6   | 181   | 16.4  | 129   | 219   | 18.5  | 137   | 267   | 21.6  | 174   | 300   | 22.1  | 201   | 330   | 22.6  | 224   |
| 6.8   | 194   | 17.1  | 134   | 234   | 19.1  | 142   | 285   | 22.3  | 181   | 321   | 22.9  | 209   | 353   | 23.4  | 233   |
| 7.0   | 208   | 17.8  | 139   | 250   | 19.8  | 147   | 304   | 23.0  | 187   | 344   | 23.6  | 219   | 376   | 24.2  | 243   |
| 7.2   | 220   | 18.5  | 144   | 266   | 20.5  | 152   | 323   | 23.7  | 194   | 367   | 24.2  | 227   | 403   | 24.9  | 253   |
| 7.4   | 232   | 19.1  | 149   | 282   | 21.2  | 157   | 344   | 24.4  | 201   | 390   | 24.8  | 235   | 430   | 25.6  | 263   |
| 7.6   | 246   | 19.8  | 155   | 299   | 21.8  | 162   | 365   | 25.1  | 208   | 413   | 25.5  | 242   | 457   | 26.2  | 273   |
| 7.8   | 260   | 20.4  | 159   | 317   | 22.5  | 167   | 387   | 25.8  | 215   | 438   | 26.1  | 251   | 485   | 26.9  | 283   |
| 8.0   | 276   | 21.1  | 163   | 335   | 23.2  | 172   | 410   | 26.5  | 222   | 464   | 26.7  | 260   | 513   | 27.6  | 294   |
| 8.2   | 290   | 21.8  | 168   | 354   | 23.9  | 177   | 432   | 27.2  | 230   | 490   | 27.5  | 268   | 542   | 28.3  | 303   |
| 8.4   | 305   | 22.5  | 173   | 373   | 24.6  | 182   | 455   | 27.9  | 237   | 518   | 28.2  | 277   | 573   | 29.0  | 313   |
| 8.6   | 321   | 23.2  | 178   | 392   | 25.2  | 187   | 480   | 28.6  | 244   | 546   | 29.0  | 286   | 605   | 29.7  | 323   |
| 8.8   | 338   | 23.9  | 183   | 411   | 25.9  | 192   | 506   | 29.3  | 251   | 574   | 29.7  | 294   | 637   | 30.4  | 333   |
| 9.0   | 355   | 24.6  | 188   | 430   | 26.6  | 197   | 532   | 30.2  | 258   | 604   | 30.5  | 303   | 669   | 31.1  | 343   |
| 9.2   | 372   | 25.3  | 192   | 450   | 27.3  | 203   | 560   | 31.1  | 265   | 634   | 31.2  | 312   | 703   | 31.7  | 353   |
| 9.4   | 389   | 25.9  | 197   | 470   | 27.9  | 209   | 588   | 31.8  | 273   | 665   | 32.0  | 321   | 738   | 32.4  | 363   |
| 9.6   | 406   | 26.6  | 202   | 491   | 28.6  | 214   | 619   | 32.6  | 281   | 697   | 32.7  | 330   | 774   | 33.0  | 373   |
| 9.8   | 423   | 27.2  | 207   | 513   | 29.3  | 219   | 649   | 33.4  | 289   | 730   | 33.4  | 339   | 810   | 33.7  | 383   |
| 10.0  | 440   | 27.9  | 212   | 538   | 30.   | 224   | 680   | 34.2  | 298   | 765   | 34.2  | 348   | 845   | 34.3  | 395   |

Table 5.7 : U Shape ที่มีขายาวไม่เท่ากัน  $\frac{L_1}{L_2} = 4$



Reacting forces  $F_x = k_x \cdot c \cdot \frac{I_P}{L^2} \text{ lb}$

$F_y = k_y \cdot c \cdot \frac{I_P}{L^2} \text{ lb}$

Max. bending stress

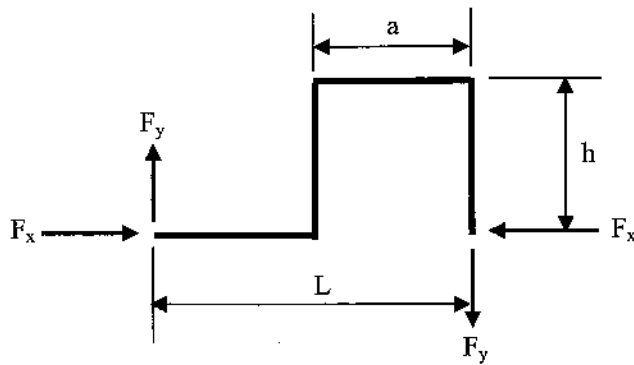
$S_B = k_b \cdot c \cdot \frac{D}{L} \text{ psi}$

L in feet, D in inches,  $I_P$  in inches<sup>4</sup>

| L/a → | 2     |       |       | 4     |       |       | 6     |       |       | 8     |       |       | 10    |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | $k_x$ | $k_y$ | $k_b$ | $k_x$ | $k_y$ | $k_b$ | $k_x$ | $k_y$ | $k_b$ | $k_x$ | $k_y$ | $k_b$ | $k_x$ | $k_y$ | $k_b$ |
| 1.0   | 2.6   | 0.8   | 9.7   | 2.9   | 1.85  | 10.8  | 3.2   | 2.3   | 11.8  | 3.4   | 2.4   | 12.2  | 3.5   | 2.5   | 12.5  |
| 1.2   | 4.5   | 1.3   | 11.0  | 5.0   | 2.5   | 15    | 5.2   | 3.1   | 16.4  | 6     | 3.2   | 17.1  | 6.2   | 3.4   | 17.6  |
| 1.4   | 6.7   | 1.8   | 15.0  | 7.7   | 3.3   | 19    | 8     | 3.9   | 20.9  | 9     | 4.0   | 22.1  | 9     | 4.2   | 22.8  |
| 1.6   | 8.9   | 2.3   | 19.0  | 10.5  | 4.0   | 23    | 11    | 4.7   | 25.5  | 12    | 4.8   | 27.1  | 12    | 5.0   | 28.0  |
| 1.8   | 11.2  | 2.7   | 23.0  | 13.3  | 4.7   | 27    | 14    | 5.4   | 30    | 15    | 5.6   | 32    | 16    | 5.8   | 33.2  |
| 2.0   | 13.5  | 3.2   | 28.5  | 16.3  | 5.4   | 31    | 18    | 6.2   | 35    | 19    | 6.5   | 37    | 20    | 6.7   | 38.6  |
| 2.2   | 17.5  | 3.8   | 33.0  | 20    | 6.3   | 35    | 22    | 7.0   | 40    | 23    | 7.4   | 43    | 24    | 7.6   | 45.2  |
| 2.4   | 21.5  | 4.5   | 37.5  | 25    | 7.2   | 40    | 27    | 7.9   | 46    | 29    | 8.3   | 49    | 30    | 8.4   | 52    |
| 2.6   | 25.5  | 5.1   | 42.0  | 30    | 8.0   | 45    | 33    | 8.8   | 51    | 36    | 9.1   | 56    | 37    | 9.3   | 58    |
| 2.8   | 29.7  | 5.8   | 46.5  | 36    | 8.9   | 50    | 40    | 9.6   | 57    | 43    | 10.0  | 62    | 45    | 10.2  | 65    |
| 3.0   | 34.2  | 6.4   | 51    | 43    | 9.8   | 55    | 48    | 10.5  | 63    | 52    | 10.9  | 68    | 54    | 11.0  | 72    |
| 3.2   | 40.4  | 7.1   | 56    | 49    | 10.6  | 59    | 56    | 11.4  | 69    | 60    | 11.8  | 75    | 63    | 11.9  | 80    |
| 3.4   | 47    | 7.8   | 61    | 56    | 11.5  | 64    | 65    | 12.3  | 75    | 70    | 12.7  | 82    | 72    | 12.8  | 88    |
| 3.6   | 52    | 8.5   | 66    | 64    | 12.3  | 69    | 74    | 13.1  | 81    | 80    | 13.6  | 89    | 82    | 13.7  | 96    |
| 3.8   | 59    | 9.2   | 71    | 72    | 13.2  | 74    | 83    | 14.0  | 87    | 90    | 14.5  | 96    | 94    | 14.6  | 104   |
| 4.0   | 66    | 10.0  | 76    | 81    | 14.1  | 79    | 93    | 15.0  | 93    | 102   | 15.5  | 104   | 108   | 15.7  | 112   |
| 4.2   | 72    | 10.8  | 81    | 90    | 15.0  | 84    | 104   | 15.8  | 99    | 113   | 16.4  | 111   | 123   | 16.5  | 121   |
| 4.4   | 80    | 11.6  | 86    | 100   | 15.9  | 89    | 116   | 16.7  | 106   | 126   | 17.2  | 118   | 138   | 17.4  | 130   |
| 4.6   | 88    | 12.4  | 91    | 111   | 16.8  | 94    | 128   | 17.6  | 112   | 140   | 18.1  | 126   | 153   | 18.3  | 138   |
| 4.8   | 97    | 13.2  | 96    | 122   | 17.7  | 99    | 141   | 18.5  | 118   | 155   | 18.9  | 133   | 168   | 19.2  | 147   |
| 5.0   | 107   | 14.0  | 102   | 133   | 18.5  | 104   | 154   | 19.4  | 125   | 170   | 19.8  | 142   | 183   | 20.1  | 155   |
| 5.2   | 117   | 14.8  | 107   | 144   | 19.4  | 109   | 168   | 20.3  | 132   | 185   | 20.7  | 150   | 200   | 21.0  | 164   |
| 5.4   | 127   | 15.6  | 112   | 157   | 20.3  | 114   | 183   | 21.2  | 139   | 201   | 21.6  | 158   | 218   | 21.9  | 173   |
| 5.6   | 137   | 16.4  | 117   | 171   | 21.1  | 119   | 200   | 22.2  | 146   | 219   | 22.4  | 166   | 236   | 22.8  | 182   |
| 5.8   | 148   | 17.2  | 123   | 185   | 22.0  | 125   | 217   | 23.1  | 153   | 238   | 23.3  | 174   | 257   | 23.7  | 191   |
| 6.0   | 159   | 18.0  | 129   | 199   | 22.9  | 131   | 234   | 24.0  | 160   | 258   | 24.2  | 182   | 278   | 24.5  | 200   |
| 6.2   | 170   | 18.9  | 135   | 215   | 23.8  | 136   | 251   | 24.9  | 167   | 277   | 25.1  | 191   | 299   | 25.5  | 209   |
| 6.4   | 181   | 19.7  | 140   | 230   | 24.7  | 141   | 269   | 25.9  | 174   | 296   | 26.0  | 199   | 321   | 26.4  | 219   |
| 6.6   | 194   | 20.6  | 146   | 245   | 25.5  | 146   | 288   | 26.8  | 181   | 316   | 26.9  | 208   | 346   | 27.3  | 229   |
| 6.8   | 208   | 21.5  | 152   | 260   | 26.4  | 151   | 309   | 27.8  | 188   | 340   | 27.9  | 216   | 371   | 28.2  | 239   |
| 7.0   | 222   | 22.4  | 158   | 276   | 27.4  | 156   | 330   | 28.7  | 195   | 367   | 28.8  | 225   | 399   | 29.2  | 249   |
| 7.2   | 236   | 23.2  | 163   | 293   | 28.3  | 161   | 351   | 29.4  | 202   | 389   | 29.6  | 233   | 427   | 30.0  | 259   |
| 7.4   | 250   | 24.2  | 169   | 311   | 29.2  | 166   | 372   | 30.2  | 208   | 412   | 30.4  | 241   | 455   | 30.9  | 269   |
| 7.6   | 264   | 25.1  | 175   | 330   | 30.1  | 171   | 393   | 31.0  | 215   | 436   | 31.2  | 249   | 483   | 31.7  | 279   |
| 7.8   | 279   | 26.0  | 181   | 350   | 31.0  | 177   | 415   | 31.8  | 221   | 463   | 32.0  | 257   | 511   | 32.6  | 289   |
| 8.0   | 296   | 27.0  | 187   | 370   | 32.0  | 184   | 437   | 32.7  | 228   | 490   | 32.8  | 265   | 540   | 33.4  | 299   |
| 8.2   | 313   | 27.9  | 192   | 390   | 32.8  | 189   | 460   | 33.4  | 235   | 519   | 33.7  | 274   | 570   | 34.3  | 309   |
| 8.4   | 330   | 28.8  | 198   | 410   | 33.7  | 194   | 484   | 34.3  | 241   | 548   | 34.6  | 283   | 603   | 35.2  | 319   |
| 8.6   | 347   | 29.7  | 204   | 430   | 34.6  | 199   | 510   | 35.1  | 248   | 578   | 35.5  | 292   | 637   | 36.0  | 330   |
| 8.8   | 364   | 30.6  | 210   | 451   | 35.5  | 204   | 536   | 36.0  | 255   | 608   | 36.4  | 301   | 673   | 36.9  | 341   |
| 9.0   | 382   | 31.4  | 216   | 473   | 36.3  | 209   | 562   | 37.0  | 262   | 640   | 37.4  | 310   | 710   | 37.8  | 352   |
| 9.2   | 400   | 32.3  | 222   | 496   | 37.2  | 214   | 590   | 37.8  | 268   | 672   | 38.1  | 318   | 747   | 38.6  | 362   |
| 9.4   | 419   | 33.2  | 228   | 519   | 38.1  | 219   | 615   | 38.7  | 275   | 704   | 38.9  | 326   | 784   | 39.5  | 372   |
| 9.6   | 438   | 34.1  | 234   | 542   | 39.0  | 224   | 645   | 39.6  | 282   | 736   | 39.7  | 334   | 821   | 40.3  | 382   |
| 9.8   | 457   | 35.0  | 240   | 566   | 40.0  | 229   | 680   | 40.4  | 288   | 768   | 40.5  | 342   | 858   | 41.2  | 392   |
| 10.0  | 476   | 36.0  | 246   | 590   | 41.0  | 235   | 710   | 41.3  | 296   | 800   | 41.3  | 351   | 896   | 42.0  | 403   |



Table 5.8 : U Shape ที่มีขาเดียว



Reacting forces  $F_x = k_x \cdot c \cdot \frac{I_P}{L^2} \text{ lb}$

$F_y = k_y \cdot c \cdot \frac{I_P}{L^2} \text{ lb}$

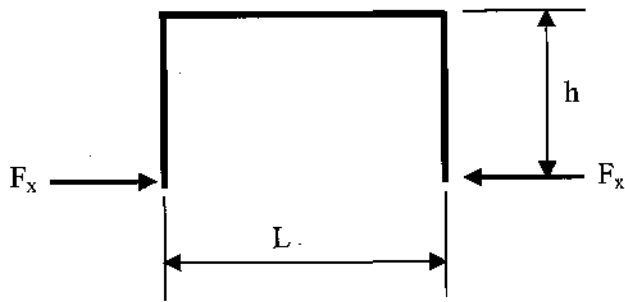
Max. bending stress

$S_B = k_b \cdot c \cdot \frac{D}{L} \text{ psi}$

L in feet, D in inches,  $I_P$  in inches<sup>4</sup>

| L/a → | 1.5   |       |       | 2     |       |       | 3     |       |       | 4     |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| L/h   | $k_x$ | $k_y$ | $k_b$ | $k_x$ | $k_y$ | $k_b$ | $k_x$ | $k_y$ | $k_b$ | $k_x$ | $k_y$ | $k_b$ |
| 1.0   | 2.63  | 0.75  | 10.5  | 2.8   | 1.41  | 11.3  | 3.3   | 2.3   | 12.5  | 3.6   | 2.7   | 13.0  |
| 1.2   | 4.0   | 1.27  | 15.0  | 4.8   | 2.28  | 15    | 6     | 3.5   | 18.3  | 6.0   | 3.9   | 18.4  |
| 1.4   | 6.0   | 1.79  | 19.5  | 7     | 3.15  | 20    | 9     | 4.8   | 24.1  | 9.0   | 5.1   | 23.8  |
| 1.6   | 8.0   | 2.31  | 24.0  | 9     | 4.0   | 25    | 12    | 6.0   | 30    | 12.0  | 6.3   | 29.2  |
| 1.8   | 11.0  | 2.83  | 28.5  | 12    | 4.9   | 30    | 16    | 7.2   | 36    | 16.5  | 7.5   | 34.6  |
| 2.0   | 14.5  | 3.4   | 33.6  | 16    | 5.8   | 28    | 20    | 8.4   | 42    | 21.3  | 8.8   | 40    |
| 2.2   | 18    | 4.2   | 39    | 20    | 7.1   | 44    | 25    | 10.0  | 49    | 28    | 10.5  | 48    |
| 2.4   | 22    | 5.0   | 46    | 24    | 8.4   | 50    | 30    | 11.5  | 56    | 34    | 12.1  | 55    |
| 2.6   | 26    | 5.9   | 53    | 30    | 9.8   | 58    | 36    | 13.0  | 63    | 40    | 13.8  | 62    |
| 2.8   | 32    | 6.8   | 60    | 37    | 11.0  | 66    | 44    | 14.5  | 70    | 49    | 15.5  | 69    |
| 3.0   | 39    | 7.7   | 67    | 45    | 12.4  | 75    | 53    | 16    | 77    | 59    | 17.2  | 77    |
| 3.2   | 45    | 8.8   | 74    | 52    | 14.1  | 82    | 62    | 18    | 87    | 69    | 19.0  | 85    |
| 3.4   | 51    | 9.9   | 81    | 60    | 15.8  | 90    | 71    | 20    | 96    | 80    | 21.0  | 93    |
| 3.6   | 59    | 11.0  | 89    | 70    | 17.5  | 99    | 81    | 22    | 105   | 91    | 23.0  | 101   |
| 3.8   | 69    | 12.0  | 98    | 80    | 19    | 109   | 94    | 24    | 114   | 103   | 24.6  | 110   |
| 4.0   | 79    | 13.5  | 108   | 91    | 21    | 120   | 108   | 26    | 124   | 117   | 26.5  | 118   |
| 4.2   | 89    | 15.0  | 118   | 102   | 23    | 130   | 121   | 28    | 134   | 131   | 29    | 127   |
| 4.4   | 100   | 16.5  | 128   | 114   | 25    | 140   | 135   | 30    | 144   | 147   | 31    | 136   |
| 4.6   | 111   | 18.0  | 138   | 128   | 27    | 151   | 150   | 33    | 154   | 164   | 33    | 145   |
| 4.8   | 124   | 19.9  | 148   | 142   | 29    | 162   | 167   | 35    | 164   | 181   | 35    | 154   |
| 5.0   | 139   | 21.8  | 159   | 156   | 31    | 173   | 185   | 37    | 174   | 198   | 37    | 163   |
| 5.2   | 152   | 23.1  | 169   | 171   | 33    | 185   | 203   | 39    | 183   | 218   | 39    | 173   |
| 5.4   | 165   | 24.4  | 179   | 188   | 36    | 197   | 221   | 41    | 193   | 238   | 41    | 182   |
| 5.6   | 179   | 25.7  | 189   | 206   | 38    | 209   | 240   | 43    | 203   | 259   | 43    | 192   |
| 5.8   | 193   | 27.0  | 199   | 225   | 40    | 221   | 260   | 45    | 213   | 280   | 46    | 201   |
| 6.0   | 209   | 28.5  | 209   | 244   | 43    | 233   | 280   | 47    | 223   | 302   | 48    | 211   |
| 6.2   | 225   | 30.2  | 220   | 263   | 45    | 246   | 305   | 50    | 236   | 324   | 51    | 220   |
| 6.4   | 242   | 31.9  | 231   | 283   | 48    | 259   | 330   | 53    | 249   | 347   | 52    | 229   |
| 6.6   | 261   | 33.6  | 242   | 305   | 50    | 272   | 355   | 56    | 262   | 371   | 54    | 238   |
| 6.8   | 281   | 35.4  | 253   | 329   | 53    | 285   | 380   | 59    | 275   | 397   | 56    | 247   |
| 7.0   | 302   | 37.3  | 266   | 355   | 55    | 299   | 406   | 62    | 286   | 425   | 58    | 257   |
| 7.2   | 322   | 39.2  | 277   | 378   | 58    | 313   | 435   | 65    | 299   | 453   | 61    | 267   |
| 7.4   | 342   | 41.1  | 289   | 403   | 60    | 327   | 464   | 67    | 311   | 481   | 63    | 277   |
| 7.6   | 364   | 43.0  | 301   | 430   | 63    | 341   | 493   | 70    | 323   | 510   | 65    | 287   |
| 7.8   | 387   | 45.0  | 313   | 460   | 66    | 355   | 523   | 72    | 335   | 541   | 68    | 297   |
| 8.0   | 411   | 46.8  | 326   | 491   | 69    | 370   | 553   | 75    | 347   | 574   | 70    | 308   |
| 8.2   | 439   | 49.0  | 340   | 520   | 71    | 383   | 587   | 78    | 359   | 609   | 73    | 318   |
| 8.4   | 468   | 51.2  | 355   | 550   | 74    | 396   | 621   | 80    | 371   | 644   | 75    | 329   |
| 8.6   | 497   | 53    | 370   | 580   | 77    | 409   | 656   | 83    | 383   | 679   | 77    | 341   |
| 8.8   | 526   | 55    | 384   | 610   | 79    | 422   | 691   | 85    | 395   | 714   | 80    | 350   |
| 9.0   | 555   | 58    | 398   | 640   | 82    | 435   | 726   | 88    | 409   | 750   | 82    | 361   |
| 9.2   | 586   | 60    | 412   | 679   | 85    | 451   | 765   | 91    | 421   | 788   | 85    | 371   |
| 9.4   | 617   | 63    | 426   | 718   | 88    | 468   | 805   | 94    | 434   | 826   | 87    | 381   |
| 9.6   | 649   | 65    | 440   | 757   | 92    | 485   | 845   | 97    | 447   | 864   | 89    | 391   |
| 9.8   | 681   | 67    | 455   | 797   | 95    | 502   | 885   | 100   | 461   | 902   | 92    | 401   |
| 10.0  | 714   | 70    | 47    | 837   | 99    | 522   | 925   | 103   | 476   | 940   | 94    | 411   |

**Table 5.9 : U Shape ชนิดไม่มีขา**



Reacting forces  $F_x = k_x \cdot c \cdot \frac{I_P}{L^2} \text{ lb}$

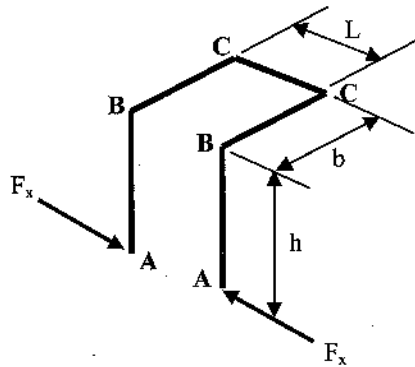
Max. bending stress

$$S_B = k_b \cdot c \cdot \frac{D}{L} \text{ psi}$$

L in feet, D in inches,  $I_P$  in inches<sup>4</sup>

| L/h | $k_x$  | $k_b$ |
|-----|--------|-------|
| 0.2 | 0.0377 | 0.617 |
| 0.3 | 0.2265 | 1.308 |
| 0.4 | 0.256  | 2.232 |
| 0.5 | 0.469  | 3.370 |
| 0.6 | 0.765  | 4.580 |
| 0.7 | 1.191  | 6.430 |
| 0.8 | 1.68   | 8.110 |
| 0.9 | 2.38   | 10.39 |
| 1.0 | 3.00   | 12.00 |
| 1.2 | 4.88   | 16.74 |
| 1.4 | 7.37   | 22.26 |
| 1.6 | 10.55  | 28.56 |
| 1.8 | 14.48  | 35.52 |
| 2.0 | 19.2   | 43.20 |
| 2.2 | 24.6   | 52.32 |
| 2.4 | 31.4   | 60.72 |
| 2.6 | 39.2   | 70.56 |
| 2.8 | 48.0   | 81.24 |
| 3.0 | 57.8   | 92.64 |
| 3.2 | 69.1   | 104.5 |
| 3.4 | 82.2   | 118.2 |
| 3.6 | 95.6   | 130.8 |
| 3.8 | 111.0  | 138.4 |
| 4.0 | 128.1  | 160.0 |
| 4.2 | 147.0  | 176.1 |
| 4.4 | 166.6  | 192.0 |
| 4.6 | 189.0  | 208.8 |
| 4.8 | 213.0  | 227.4 |
| 5.0 | 239.0  | 246.0 |
| 5.2 | 266.0  | 264.0 |

Table 5.10 : U Shape ชนิด 2 ระบาย ไม่มีขา



Reacting forces  $F_x = k_x \cdot c \cdot \frac{I_P}{L^2} \text{ lb}$

Max. bending stress  $S_B = k_b \cdot c \cdot \frac{D}{L} \text{ psi}$

Torsional stress  $S_T = k_t \cdot c \cdot \frac{D}{L} \text{ psi}$

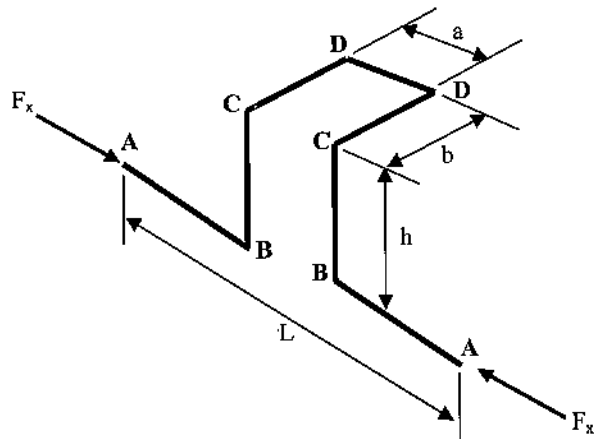
L in feet, D in inches,  $I_P$  in inches<sup>4</sup>

หมายเหตุ

1. ในกรณีที่ไม่มีค่าของ  $k_t$  อยู่ในตารางแสดงว่า torsional shear stress มีค่าน้อยมาก
2. ตัวอักษรในวงเล็บแสดงถึงตำแหน่งที่เกิด maximum bending stress และ maximum torsional shear stress
3. ให้ตรวจสอบความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นโดยวิธีของ combined stress ที่ตำแหน่งเหล่านี้ตามสมการที่ (8)

| L/b → | 0.25   |           | 0.50  |          | 1     |          |          | 2     |          |       | 3     |          |          | 4     |          |          |
|-------|--------|-----------|-------|----------|-------|----------|----------|-------|----------|-------|-------|----------|----------|-------|----------|----------|
|       | $k_x$  | $k_b$     | $k_x$ | $k_b$    | $k_x$ | $k_b$    | $k_t$    | $k_x$ | $k_b$    | $k_t$ | $k_x$ | $k_b$    | $k_t$    | $k_x$ | $k_b$    | $k_t$    |
| 1     | 0.040  | 0.55 (C)  | 0.195 | 1.42 (C) | 0.70  | 3.43 (A) | 0.75 (A) | 1.54  | 7.09 (A) | 0.75  | 2.05  | 9.12 (A) | 0.65 (A) | 2.26  | 9.8 (A)  | 0.52 (A) |
| 2     | 0.050  | 0.62 (C)  | 0.27  | 1.75 (C) | 1.24  | 3.31 (A) | 1.73 (A) | 4.40  | 11.2 (A) | 3.0   | 7.65  | 18.9 (A) | 3.4 (A)  | 11.0  | 24.8 (A) | 3.4 (A)  |
| 3     | 0.055  | 0.67 (B)  | 0.31  | 1.90 (B) | 1.53  | 4.75 (B) | -        | 6.36  | 11.3 (A) | 4.9   | 12.9  | 22.4 (A) | 6.8 (A)  | 19.5  | 33.4 (A) | 7.8 (A)  |
| 4     | 0.058  | 0.72 (B)  | 0.34  | 2.14 (B) | 1.72  | 5.65 (B) | -        | 7.70  | 10.5 (A) | 6.5   | 16.6  | 22.2 (A) | 9.7 (A)  | 27.7  | 36.7 (A) | 12.0 (A) |
| 5     | 0.060  | 0.76 (B)  | 0.36  | 2.32 (B) | 1.86  | 6.34 (B) | -        | 8.74  | 15.6 (B) | -     | 20.0  | 22.0 (A) | 12.2 (A) | 34.5  | 37.2 (A) | 16.0 (A) |
| 6     | 0.061  | 0.78 (B)  | 0.37  | 2.40 (B) | 1.99  | 6.95 (B) | -        | 9.55  | 17.6 (B) | -     | 22.4  | 28.4 (B) | -        | 40.0  | 44.6 (B) | -        |
| 7     | 0.063  | 0.80 (B)  | 0.38  | 2.55 (B) | 2.08  | 7.40 (B) | -        | 10.2  | 19.3 (B) | -     | 24.5  | 32.0 (B) | -        | 44.7  | 44.9 (B) | -        |
| 8     | 0.0635 | 0.81 (B)  | 0.39  | 2.63 (B) | 2.16  | 7.80 (B) | -        | 10.9  | 21.0 (B) | -     | 26.5  | 35.4 (B) | -        | 49.0  | 51.4 (B) | -        |
| 9     | 0.064  | 0.825 (B) | 0.396 | 2.69 (B) | 2.22  | 8.10 (B) | -        | 11.4  | 22.2 (B) | -     | 28.0  | 37.6 (B) | -        | 52.4  | 56.0 (B) | -        |
| 10    | 0.0647 | 0.84 (B)  | 0.40  | 2.74 (B) | 2.28  | 8.40 (B) | -        | 11.8  | 23.4 (B) | -     | 29.5  | 40.6 (B) | -        | 55.6  | 59.3 (B) | -        |

Table 5.11 : U Shape ชนิด 2 ระบายมีขนาดยาวเท่ากัน



Reacting forces  $F_x = k_x \cdot c \cdot \frac{I_P}{L^2} \text{ lb}$   
 Max. bending stress  $S_B = k_b \cdot c \cdot \frac{D}{L} \text{ psi}$   
 Torsional stress  $S_T = k_t \cdot c \cdot \frac{D}{L} \text{ psi}$   
 L in feet, D in inches,  $I_P$  in inches<sup>4</sup>

หมายเหตุ

1. ในกรณีที่ไม่มีค่าของ  $k_t$  อยู่ในตารางแสดงว่า torsional shear stress มีค่าน้อยมาก
2. ตัวอักษรในวงเล็บแสดงถึงตำแหน่งที่เกิด maximum bending stress และ maximum torsional shear stress
3. ให้ตรวจสอบความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นโดยวิธีของ Combined stress ที่ตำแหน่งเหล่านี้ตามสมการที่ (8)

| $L/a = 2$ |       |          |          |       |          |          |       |          |          |       |          |          |       |          |          |
|-----------|-------|----------|----------|-------|----------|----------|-------|----------|----------|-------|----------|----------|-------|----------|----------|
| a/b →     | 0.50  |          |          | 1     |          |          | 2     |          |          | 3     |          |          | 4     |          |          |
| L/h       | $k_x$ | $k_b$    | $k_t$    | $k_x$ | $k_b$    | $k_t$    | $k_x$ | $k_b$    | $k_t$    | $k_x$ | $k_b$    | $k_t$    | $k_x$ | $k_b$    | $k_t$    |
| 1         | 0.64  | 2.79 (D) | 0.51 (D) | 1.26  | 2.96 (D) | 1.31 (D) | 1.89  | 6.5 (A)  | -        | 1.91  | 6.6 (A)  | -        | 2.0   | 6.7 (A)  | -        |
| 2         | 1.23  | 4.81 (D) | 0.43 (D) | 3.77  | 7.94 (D) | 1.72 (D) | 6.95  | 13.0 (A) | 1.40 (A) | 8.45  | 15.0 (A) | 1.07 (A) | 9.3   | 16.0 (A) | -        |
| 3         | 1.53  | 5.62 (D) | 0.30 (D) | 5.70  | 10.6 (D) | 1.54 (D) | 13.3  | 17.0 (D) | 3.15 (A) | 18.2  | 22.0 (A) | 2.76 (A) | 21.0  | 24.5 (A) | 2.32 (A) |
| 4         | 1.70  | 6.00 (D) | -        | 7.00  | 13.0 (D) | 1.41 (D) | 19.6  | 19.7 (D) | 5.15 (D) | 28.8  | 26.4 (A) | 4.86 (A) | 35.6  | 31.4 (A) | 4.40 (A) |
| 5         | 1.81  | 6.25 (D) | -        | 7.86  | 14.3 (D) | -        | 24.4  | 23.0 (D) | 4.97 (D) | 40.0  | 29.6 (A) | 7.20 (A) | 51.0  | 36.5 (A) | 6.76 (A) |
| 6         | 1.89  | 6.40 (D) | -        | 8.50  | 15.0 (D) | -        | 28.5  | 26.2 (D) | 4.77 (D) | 50.7  | 31.6 (A) | 9.58 (A) | 66.7  | 40.0 (A) | 9.28 (A) |
| 7         | 1.95  | 6.50 (D) | -        | 8.96  | 15.6 (D) | -        | 31.6  | 28.5 (D) | 4.48 (D) | 59.0  | 35.4 (D) | 9.38 (D) | 81.8  | 42.2 (A) | 11.8 (A) |
| 8         | 2.00  | 6.60 (D) | -        | 9.30  | 15.9 (D) | -        | 34.2  | 30.4 (D) | 4.21 (D) | 66.6  | 40.0 (D) | 9.20 (D) | 95.5  | 43.2 (A) | 14.2 (A) |
| 9         | 2.04  | 6.65 (D) | -        | 9.58  | 16.0 (D) | -        | 36.3  | 31.6 (D) | 3.94 (D) | 73.4  | 43.1 (D) | 9.00 (D) | 108   | 48.1 (D) | 14.3 (D) |
| 10        | 2.08  | 6.75 (D) | -        | 9.80  | 16.3 (D) | -        | 38.0  | 32.6 (D) | 3.70 (D) | 79.0  | 45.9 (D) | 8.70 (D) | 119   | 52.5 (D) | 14.1 (D) |

**L/a = 4**

| a/b → | 0.50  |          |          | 1     |          |          | 2     |          |          | 3     |          |          | 4     |          |          |
|-------|-------|----------|----------|-------|----------|----------|-------|----------|----------|-------|----------|----------|-------|----------|----------|
| L/h   | $k_x$ | $k_b$    | $k_t$    | $k_x$ | $k_b$    | $k_t$    | $k_x$ | $k_b$    | $k_t$    | $k_x$ | $k_b$    | $k_t$    | $k_x$ | $k_b$    | $k_t$    |
| 1     | 1.22  | 4.35 (A) | 0.30 (A) | 1.67  | 5.2 (A)  | 0.15 (A) | 2.0   | 6.3 (C)  | -        | 2.15  | 7.0 (C)  | -        | 2.23  | 7.4 (C)  | -        |
| 2     | 4.30  | 9.96 (D) | 2.45 (D) | 6.96  | 11.0 (A) | -        | 9.3   | 15.0 (C) | -        | 10.5  | 17.7 (C) | -        | 11.0  | 19.0 (C) | -        |
| 3     | 6.23  | 13.8 (D) | 2.28 (D) | 14.0  | 16.5 (D) | 6.55 (D) | 21.2  | 24.0 (C) | -        | 24.2  | 28.5 (C) | -        | 26.6  | 31.6 (C) | -        |
| 4     | 7.84  | 16.9 (D) | 2.09 (D) | 21.3  | 24.5 (D) | 7.40 (D) | 36.2  | 30.0 (C) | -        | 44.5  | 39.5 (C) | -        | 48.5  | 44.0 (C) | -        |
| 5     | 8.94  | 18.8 (D) | 1.89 (D) | 27.8  | 31.4 (D) | 7.75 (D) | 52.6  | 31.0 (D) | 17.3 (D) | 68.4  | 49.0 (C) | -        | 76.3  | 56.0 (C) | -        |
| 6     | 9.72  | 20.2 (D) | 1.69 (D) | 33.3  | 37.0 (D) | 7.70 (D) | 69.5  | 40.5 (D) | 19.2 (D) | 95.5  | 56.0 (C) | -        | 109   | 67.0 (C) | -        |
| 7     | 10.3  | 21.1 (D) | -        | 37.8  | 41.6 (D) | 7.70 (D) | 85.7  | 49.4 (D) | 20.3 (D) | 125   | 63.6 (D) | 6.75 (D) | 145   | 76.6 (C) | 5.66 (C) |
| 8     | 10.7  | 21.7 (D) | -        | 41.4  | 45.0 (D) | 7.14 (D) | 100   | 57.1 (D) | 20.8 (D) | 155   | 60.2 (D) | 34.5 (D) | 184   | 85.4 (C) | 7.42 (C) |
| 9     | 11.0  | 22.2 (D) | -        | 44.4  | 48.6 (D) | 6.80 (D) | 113   | 64.0 (D) | 21.3 (D) | 186   | 71.0 (D) | 36.8 (D) | 226   | 93.5 (C) | 9.35 (C) |
| 10    | 11.3  | 22.6 (D) | -        | 46.8  | 50.6 (D) | 6.45 (D) | 127   | 71.5 (D) | 21.3 (D) | 215   | 82.2 (D) | 38.8 (D) | 269   | 101 (C)  | 11.7 (C) |

**L/a = 6**

| a/b → | 0.50  |          |          | 1     |          |           | 2     |           |           | 3     |           |         | 4     |           |         |
|-------|-------|----------|----------|-------|----------|-----------|-------|-----------|-----------|-------|-----------|---------|-------|-----------|---------|
| L/h   | $k_x$ | $k_b$    | $k_t$    | $k_x$ | $k_b$    | $k_t$     | $k_x$ | $k_b$     | $k_t$     | $k_x$ | $k_b$     | $k_t$   | $k_x$ | $k_b$     | $k_t$   |
| 1     | 1.5   | 4.7 (A)  | -        | 1.90  | 6.1 (C)  | -         | 2.2   | 7.5 (C)   | -         | 2.32  | 8.1 (C)   | -       | 2.38  | 8.5 (C)   | -       |
| 2     | 5.86  | 9.7 (D)  | 4.10 (D) | 8.65  | 14.3 (C) | -         | 10.7  | 19. (C)5  | -         | 11.8  | 22.0 (C)  | -       | 12.35 | 26.0 (C)  | -       |
| 3     | 11.15 | 18.5 (D) | 5.12 (D) | 19.3  | 16.4 (D) | 10.7 (D)  | 26.1  | 32.2 (C)  | -         | 29.3  | 37.7 (C)  | -       | 30.8  | 43.0 (C)  | -       |
| 4     | 15.95 | 25.0 (D) | 5.45 (D) | 32.6  | 27.0 (D) | 13.7 (D)  | 47.4  | 45.0 (C)  | -         | 54.2  | 53.7 (C)  | -       | 60.0  | 60.0 (C)  | -       |
| 5     | 19.9  | 33.0 (D) | 5.44 (D) | 46.7  | 38.1 (D) | 15.7 (D)  | 73.9  | 56.7 (C)  | -         | 85.0  | 68.6 (C)  | -       | 94.4  | 77.5 (C)  | -       |
| 6     | 23.0  | 35.0 (D) | 5.18 (D) | 60.9  | 49.3 (D) | 17.0 (D)  | 104   | 68.0 (C)  | -         | 125   | 84.0 (C)  | -       | 138   | 95.0 (C)  | -       |
| 7     | 25.4  | 38.3 (D) | 4.87 (D) | 74.0  | 59.5 (D) | 18.0 (D)  | 137   | 77.0 (C)  | -         | 174   | 100 (C)   | -       | 189   | 113 (C)   | -       |
| 8     | 27.3  | 40.8 (D) | 4.59 (D) | 86.0  | 68.6 (D) | 18.3 (D)  | 173   | 72.0 (D)  | 42.50 (D) | 220   | 114 (C)   | -       | 248   | 131 (C)   | -       |
| 9     | 28.6  | 42.5 (D) | 4.29 (D) | 96.6  | 76.5 (D) | 18.2 (D)5 | 209   | 86.5 (D)  | 45.75 (D) | 274   | 128 (C)   | -       | 312   | 148 (C)   | -       |
| 10    | 29.8  | 44.2 (D) | 4.02 (D) | 106   | 84.0 (D) | 18.15 (D) | 244   | 100.5 (D) | 48.25 (D) | 330   | 137.5 (C) | 8.9 (C) | 382   | 163.5 (C) | 7.4 (C) |

$L/a = 8$

| a/b → | 0.50  |             |             | 1     |                          |             | 2     |             |       | 3     |            |       | 4     |             |       |
|-------|-------|-------------|-------------|-------|--------------------------|-------------|-------|-------------|-------|-------|------------|-------|-------|-------------|-------|
| L/h   | $k_x$ | $k_b$       | $k_t$       | $k_x$ | $k_b$                    | $k_t$       | $k_x$ | $k_b$       | $k_t$ | $k_x$ | $k_b$      | $k_t$ | $k_x$ | $k_b$       | $k_t$ |
| 1     | 1.69  | 5.20<br>(C) |             | 1.8   | 6.3<br>(C)               | -           | 2.32  | 8.3<br>(C)  | -     | 2.44  | 8.8<br>(C) | -     | 2.5   | 9.0<br>(C)  | -     |
| 2     | 7.2   | 9.36<br>(D) | 5.60<br>(D) | 9.9   | 17.5<br>(C)              | -           | 11.9  | 24.5<br>(C) | -     | 12.8  | 28<br>(C)  | -     | 13.3  | 31.5<br>(C) | -     |
| 3     | 15.1  | 19.0<br>(D) | 7.84<br>(D) | 23.2  | 28.4<br>(C)              | -           | 29.6  | 40.5<br>(C) | -     | 32.6  | 47<br>(C)  | -     | 34.3  | 53<br>(C)   | -     |
| 4     | 23.4  | 29.0<br>(D) | 9.2<br>(D)  | 40.9  | 39.0<br>(D)              | -           | 55.5  | 57.0<br>(C) | -     | 60.0  | 67<br>(C)  | -     | 65.9  | 75<br>(C)   | -     |
| 5     | 31.6  | 38.6<br>(D) | 9.7<br>(D)  | 61.8  | 39.6<br>(D)              | 23.0<br>(D) | 88.8  | 73.0<br>(C) | -     | 101   | 86<br>(C)  | -     | 108   | 96<br>(C)   | -     |
| 6     | 38.7  | 46.8<br>(D) | 10.1<br>(D) | 84.0  | 53.5<br>(D)              | 36.3<br>(D) | 128   | 89.0<br>(C) | -     | 149.5 | 107<br>(C) | -     | 161   | 118<br>(C)  | -     |
| 7     | 45.0  | 54.0<br>(D) | 10.1<br>(D) | 107   | 67.2<br>(D)              | 28.9<br>(D) | 174   | 104<br>(C)  | -     | 206   | 129<br>(C) | -     | 225   | 143<br>(C)  | -     |
| 8     | 50.0  | 59.6<br>(D) | 9.8<br>(D)  | 130   | 82.1<br>(D)              | 31.2<br>(D) | 225   | 119<br>(C)  | -     | 270   | 140<br>(C) | -     | 299   | 168<br>(C)  | -     |
| 9     | 54.0  | 64.0<br>(D) | 9.4<br>(D)  | 152   | 95.5<br>(D)              | 31.9<br>(D) | 279   | 133<br>(C)  | -     | 342   | 168<br>(C) | -     | 390   | 194<br>(C)  | -     |
| 10    | 57.3  | 67.5<br>(D) | 9.05<br>(D) | 175   | 109.<br>(D) <sup>5</sup> | 33.6<br>(D) | 335   | 145<br>(C)  | -     | 406   | 184<br>(C) | -     | 475   | 218<br>(C)  | -     |