

単純支持パイプビームの設計

1) 設計条件

呼び径		80 mm		
管外径		89 mm		
管厚		4.0 mm	SUS304 20S	
最大（保温筒）外径		140 mm		
支 間		5.4 m		
使用鋼材		SUS304or316		
許容応力度	「水管橋設計基準（日本水道鋼管協会）に基づく」			
許容応力度の割増	風荷重のみの場合の応力に対して			20 %
	主荷重と風荷重の合成応力に対して			25 %
	主荷重と地震荷重の合成応力に対して			50 %
	リングサポート部の合成応力に対して			35 %
許容たわみ率		1 / 350		
風荷重	円筒	2,000 N/mm ²	平板	3,000 N/mm ²
地震荷重、設計水平震度	kh=	0.2		
積雪荷重	0.3 m	144 N/m		
設計内圧（水撃圧含む）	P =	1.0 MPa		
温度変化	-	10 ~ +	40 °C	

2) 管円周方向応力

2)-1 内圧による引っ張り応力

$$h = \frac{P \cdot r_i}{t}$$

$$= \frac{1 \times 40.55}{4} = 10 \text{ N/mm}^2 < t_a \dots \text{O.K}$$

ここで

P :	設計内圧	=	1.0 MPa
r _i :	管内半径	=	40.55 mm
t :	管厚	=	4.0 mm
t _a :	許容引張応力	=	140 × 1.5 = 210 N/mm ²

2)-2 半充水時に対する検討

$$\max = \frac{0.445 \cdot r_i^3}{t^2} \times 10^{-5}$$

$$= \frac{0.445 \times 40.55^3}{4^2} \times 10^{-5} = 0.019 \text{ N/mm}^2 < t_a \dots \text{O.K}$$

3) 管の座屈に対する検討

3)-1 管内空虚時の限界座屈荷重

$$P_k = \frac{2E \cdot t^3}{1 - \nu^2} \cdot \left(\frac{1}{D_0} \right)^3$$

$$= \frac{2 \times 2.1 \times 10^5}{1 - 0.3^2} \times \left(\frac{4.0}{89} \right)^3 = 41.8 \text{ N/mm}^2$$

ここで P_k : 限界座屈荷重 (N/mm²)

$$\begin{aligned}
 E : \text{ヤング係数} &= 2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2 \\
 &: \text{ポアソン比} &= 0.3 \\
 D0 : \text{管外径} &= 89 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

4) 荷重

4)-1 鉛直荷重

管の自重							85 N/m	
管内水の重量							49 N/m	
積雪荷重							144 N/m	
歩廊通行荷重							0 N/m	
その他荷重							0 N/m	
	+	+	+	+	=	W_v	=	278 N/m 鉛直荷重計
	+				=	W_v'	=	85 N/m 管内空虚時

4)-2 水平荷重

風荷重

円筒	2,000	×	0.14	×	1	=	280 N/m
平板	3,000	×	0	×	0	=	0 N/m
					W_w	=	280 N/m

地震荷重

$$W_k = W_v \times 0.2 = 278 \times 0.2 = 56 \text{ N/m}$$

$$W_w / 1.2 = 233 \text{ N/m} \dots$$

$$W_k / 1.5 = 37 \text{ N/m} \dots$$

> より水平荷重としては風荷重 をとり、

$$W_H = 280 \text{ N/m} \text{ とする。}$$

5) 管ビームの断面諸数および許容応力度

5)-1 断面諸数

使用材	外径	89	×	4.0 t	SUS304or316
A =	$\frac{(D0^2 - d^2)}{4}$	=	1,069 mm ²	=	10.7 cm ²
I =	$\frac{(D0^4 - d^4)}{64}$		·rm ³ ·t	=	9.7E+05 mm ⁴ = 97 cm ⁴
Z =	$\frac{(D0^4 - d^4)}{32 \cdot D}$		·rm·ri·t	=	2.2E+04 mm ³ = 22 cm ³
r =	$\frac{(D0^2 - d^2)}{4}$		$\frac{I}{A}$	=	30 mm = 3.0 cm
ここで	d : 管内径	=	D0 - 2t	=	81 mm = 8.1 cm
	rm : 管厚中心半径	=	(D0 - t) / 2	=	43 mm = 4.3 cm = 0.043 m

5)-2 許容応力度

許容曲げ応力度

許容曲げ引張応力度 bta = 120 N/mm²

許容曲げ圧縮応力度

$$R = \frac{44.55}{1.2 \times 4.0} = 9.3 \quad 75$$

$$R = D0/2 = 44.55 \text{ mm}$$

(軸力の影響が小さいため純曲げのみと仮定して =1.2)

$$bca = 120 \text{ N/mm}^2$$

許容軸方向圧縮応力度

$$R \cdot t = \frac{44.55}{1.0 \times 4} = 11.1 \quad 75$$

(安全側として純圧縮を仮定して $\gamma = 1.0$)

$$ca = 120 \text{ N/mm}^2$$

許容せん断応力度

等分布荷重を受ける梁のせん断座屈長さは支間の $1/2$ とする。

$$l = 5,400 / 2 = 2,700 \text{ mm}$$

$$a1 = \frac{0.733}{F} \cdot E \cdot \left(\frac{t}{R} \right)^{5/4} \cdot \left(\frac{R}{l} \right)^{1/2}$$

$$= \frac{0.733}{3.0} \times 2.1 \times 10^5 \times \left(\frac{4}{44.55} \right)^{5/4} \times \left(\frac{44.55}{2,700} \right)^{1/2}$$

$$= 324 \text{ N/mm}^2$$

$$a2 = 70 \text{ N/mm}^2$$

$$a = a2 = 70 \text{ N/mm}^2$$

6) 管軸方向応力

6)-1 鉛直荷重による梁としての反力、曲げモーメントおよび応力

反力

$$RA = RB = \frac{Wv \cdot l}{2} = \frac{278}{2} \times \frac{5.4}{2} = 750 \text{ N}$$

最大曲げモーメント

$$Mv \text{ max} = \frac{Wv \cdot l^2}{8} = \frac{277.8}{8} \times \frac{5.4^2}{8} = 1,013 \text{ N}$$

応力

$$\sigma = \frac{Mv \text{ max}}{Z} = \frac{1,013}{21,682} \times 10^3 = 47 \text{ N/mm}^2$$

6)-2 曲げモーメントに対する管の抵抗モーメント

$$Mr = a \cdot Z \cdot \sigma$$

$$= 140 \times 2.168E+04 \times 0.9 / 10^6 = 2,732 \text{ N} \cdot \text{m}$$

ここで Mr : 抵抗モーメント

$$a : \text{許容応力度} = 140 \text{ N/mm}^2$$

$$Z : \text{断面係数} = 21,682 \text{ mm}^3$$

$$\sigma : \text{溶接効率} \quad \text{工場溶接} \quad 1.0 \quad \text{現場溶接} \quad 0.9$$

6)-3 管軸方向推力

伸縮時、沓の摩擦による推力

$$P1 = R \cdot f$$

$$= 750 \times 0.25 = 188 \text{ N}$$

$$\text{ここで } R : \text{支点反力 } RA = RB = 750 \text{ N}$$

$$f : \text{プレート沓の摩擦係数} = 0.25$$

伸縮時、伸縮継手の摩擦による推力

$$P2 = f' \cdot D0$$

$$= 7 \times 89 = 1,959 \text{ N}$$

ここで f' : 伸縮継手の摩擦力 = 7 N/mm

$D0$: 管外径 = 89 mm

伸縮継手部に内圧により生ずる推力

$$P3 = P \cdot Dm \cdot t$$

$$= 1.0 \times 85 \times 4.0 = 1,069 \text{ N}$$

ここで P : 設計内圧 = 1.0 Mpa

Dm : 軸力作用面の中心径 = $D0 - t = 85 \text{ mm}$

管方向推力の集計

$$P = P1 + P2 + P3$$

$$= 188 + 1,959 + 1,069 = 3,216 \text{ N}$$

管軸方向推力による応力度

$$p = \frac{P}{A} = \frac{3,216}{1,069} = 3.0 \text{ N/mm}^2$$

6)-4 リングサポートの拘束による曲げ応力

$$pr = 1.82 \left(\frac{Ar - B0 \cdot t}{Ar} \right) \cdot \frac{P \cdot ri}{t}$$

$$= 1.82 \left(\frac{280 - 25 \times 4.0}{280} \right) \times \frac{1.0 \times 40.55}{4.0} = 12 \text{ N/mm}^2$$

ここで p_r : 管体の曲げ応力

d : リング高さ = 40 mm

t_1 : リング板厚 = 4.5 mm 枚数 1

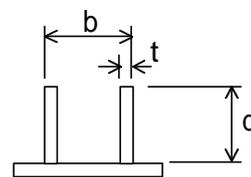
P : 設計内圧 = 1.0 Mpa

t : 鋼管厚 = 4.0 mm

b : リング幅 = 5 mm

B_0 : 鋼管有効幅 = $b + 1.56 (r m \cdot t) = 25$ mm

A_r : リング有効断面積 = $1 t_1 \cdot d + B_0 \cdot t = 280$ mm²



6)-5 管軸方向応力の計算

支点部

$$\begin{array}{rcl}
 c = p = & 3 \text{ N/mm}^2 & bc = pr = 12 \text{ N/mm}^2 \\
 c & bc & 3 \quad 12 \\
 + & = & + \\
 ca & ba & 120 \quad 120 \\
 & & = 0.13 < 1.0 \\
 & & \dots \text{ O.K}
 \end{array}$$

支間中央

$$\begin{array}{rcl}
 c = p = & 3 \text{ N/mm}^2 & bc = 47 \text{ N/mm}^2 \\
 c & bc & 3 \quad 47 \\
 + & = & + \\
 ca & ba & 120 \quad 120 \\
 & & = 0.41 < 1.0 \\
 & & \dots \text{ O.K} \\
 c + bc & = & 3 + 47 = 50 \text{ N/mm}^2
 \end{array}$$

6)-6 水平荷重に対する検討、および水平荷重と鉛直荷重の曲げ応力の合成

水平荷重に対する検討

鉛直荷重と水平荷重の荷重比

$$n = 280 / 278 = 1.01$$

最大曲げ応力（支間中央）

$$\begin{aligned}
 H_{\max} &= n \cdot v_{\max} \\
 &= 1.01 \times 47 \\
 &= 47 < 120 \times 1.2 = 144 \text{ N/mm}^2 \\
 &\dots \text{ O.K}
 \end{aligned}$$

水平荷重と鉛直荷重の曲げ応力合成

$$\begin{aligned}
 T &= \left(H_{\max}^2 + V_{\max}^2 \right) \\
 &= \left(47^2 + 47^2 \right) \\
 &= 66 < 120 \times 1.25 = 150 \text{ N/mm}^2 \dots \text{ O.K}
 \end{aligned}$$

7) せん断力に対する検討

$$\begin{aligned}
 Q_{\max} = R_A = R_B &= 750 \text{ N} \\
 \frac{2 \cdot Q_{\max}}{A} &= \frac{2 \times 750.0}{1,069} = 1.4 < 70 \text{ N/mm}^2 \\
 &\dots \text{ O.K}
 \end{aligned}$$

8) たわみに対する検討

8)-1 鉛直荷重によるたわみ

たわみ

$$\begin{aligned}
 V_{\max} &= \frac{5 \cdot W_v \cdot l^4}{384 \cdot E \cdot I} \\
 &= \frac{5 \times 0.2778 \times 5,400^4}{384 \times 2.1 \times 10^5 \times 0.001 \times 10^9} = 15 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

たわみ度

$$\begin{aligned}
 \frac{V_{\max}}{l} &= \frac{15}{5,400} = \frac{1}{360} < \frac{1}{350} \dots \text{ O.K}
 \end{aligned}$$

8)-2 水平荷重によるたわみ

たわみ

$$\begin{aligned} H_{\max} &= n \cdot V_{\max} \\ &= 1.01 \times 15 = 15 \text{ mm} \end{aligned}$$

たわみ度

$$\begin{aligned} \frac{H_{\max}}{l} &= \frac{15}{5,400} = \frac{1}{360} < \frac{1}{350} \quad \dots \text{O.K} \end{aligned}$$

9) 温度変化による伸縮量

管内空虚時において直射日光を受けた場合、管表面最高温度は

$$\begin{aligned} T_{\max} &= 4 + \frac{27}{19} \cdot t_{\max} \\ &= 4 + \frac{27}{19} \times 40 = 61 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

よって、最大温度差は

$$T = 10 + 61 = 71 \text{ } ^\circ\text{C}$$

故に伸縮量は

$$\begin{aligned} l &= s \cdot T \cdot l \\ &= 1.2 \times 10^{-5} \times 71 \times 5,400 = 5 \text{ mm} \end{aligned}$$

ここで l : 伸縮量 (mm)

s : 線膨張係数 = 1.2×10^{-5}

T : 最高温度差 ($^\circ\text{C}$)

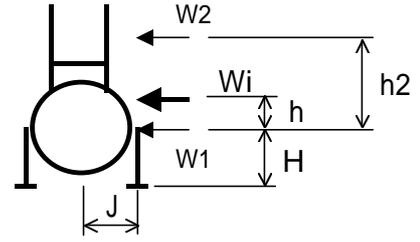
l : 支間長 (伸縮距離) (mm)

10) リングサポートの計算

10)-1 水平荷重に対する安定性

・ 水平荷重合力の作用位置

$$h = \frac{\sum (W_{wi} \cdot h_i)}{\sum W_{wi}} = \frac{0}{280} = 0.00 \text{ m}$$



$$H' = H + h = 0.09 \text{ m}$$

・ 管内空虚時支点反力

$$Q' = Q \cdot \frac{W_{v'}}{W_v} = 750 \times \frac{85}{278} = 229 \text{ N}$$

・ 水平荷重による支点反力

$$Q_H = Q \cdot \frac{W_H}{W_v} = 750 \times \frac{280}{278} = 756 \text{ N}$$

・ 転倒モーメント

$$M_t = Q_H \cdot H' = 756 \times 90 \div 1,000 = 68 \text{ N} \cdot \text{m}$$

・ 抵抗モーメント

$$M_r = Q' \cdot J = 229 \times 133 \div 1,000 = 30 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_r < M_t$$

故に、アンカーボルトには引き抜き力が作用する。

・ アンカーボルトの引き抜き力

$$F = \frac{M_t - M_r}{2 \cdot J \cdot 1000} = \frac{68 - 30}{2 \times 133 \times 1,000} = 143 \text{ N}$$

10)-2 リング断面

部 材 寸 法	A (cm ²)	y (cm)	A・y (cm ³)	A・y ² (cm ⁴)	i=b・h ³ /12 (cm ⁴)
ウエブ 1 - PL 4.5 × 40	1.8	2.40	4.3	10.4	2.4
鋼管フランジ有効部 1 - PL 4 × 25	1.0	0.20	0.2	0.0	0.0
=	2.8		4.5	10.4	2.4

$$i = \frac{A \cdot y}{A} = \frac{5}{2.8} = 1.6 \text{ cm} = 16 \text{ mm}$$

$$o = 4.4 - 1.6 = 2.8 \text{ cm} = 28 \text{ mm}$$

・断面二次モーメント

$$I = A \cdot y^2 + i^2 \cdot A$$

$$= 10 + 2 - 1.6^2 \times 2.8 = 5.632 \text{ cm}^4 = 56,320 \text{ mm}^2$$

・断面係数

$$Z_i = \frac{I}{i} = \frac{6}{1.6} = 3.520 \text{ cm}^3 = 3,520 \text{ mm}^3$$

$$Z_o = \frac{I}{o} = \frac{6}{2.8} = 2.011 \text{ cm}^3 = 2,011 \text{ mm}^3$$

10)-3 リングサポートの応力

管中心に nQ なる水平荷重を考慮したとき、リングサポートの応力は管の側面 ($\theta = 90^\circ$ および 270°) において最大となり、この点における鉛直荷重 Q と水平荷重 nQ による応力は概略次のようになる。

記号

A :	組合せリングの断面積			280	mm^2
I :	組合せリングの断面二次モーメント			56,320	mm^4
T :	リングの軸力 (引張を正)				
M :	リングの曲げモーメント (内部引張を正)				
N :	内圧による軸力 (引張を正)				
S :	リングのせん断力				
R :	組合せリングの中立軸半	$= r_i + i$	$=$	57	$\text{mm} = 0.0566 \text{ m}$
X :	柱と中立軸間距離	$= J - R$	$=$	76	$\text{mm} = 0.0765 \text{ m}$

H : 柱の高さ 90 mm = 0.090 m
 l : 支間 5,400 mm
 Q : 全せん断力 750 N
 : ポアソン比 0.3
 n : 鉛直荷重との荷重比 1.01

T・M・Nの計算

” T ”

満水時

90 ° (-), 270 ° (+) : T = -0.25 Q

90 ° (+), 270 ° (-) : T = 0.25 Q

水平荷重付加時

$$\begin{aligned}
 90^\circ (\pm) : T &= n \cdot Q \left\{ 0.0796 - 0.318 \frac{rm}{R} + \frac{\cdot H}{4 R} \right\} \\
 &= n \cdot Q \left\{ 0.0796 - 0.318 \frac{0.043}{0.057} + \frac{\times 0.090}{4 \times 0.057} \right\} \\
 &= -0.5572 n \cdot Q
 \end{aligned}$$

270 ° (±) : T = 0.5572 n · Q

	T / Q	T (N)
90 ° (-)	-0.25 - 0.5572 n	-609
90 ° (+)	0.25 - 0.5572 n	-234
270 ° (-)	0.25 + 0.5572 n	609
270 ° (+)	-0.25 + 0.5572 n	234

” M ”

満水時

$$90^\circ (-), 270^\circ (+) \quad : T = 0.25 X \cdot Q$$

$$90^\circ (+), 270^\circ (-) \quad : T = -0.25 X \cdot Q$$

水平荷重付加時

$$\begin{aligned} 90^\circ (-) : M &= n \cdot Q (0.0796 R - 0.25 H) \\ &= n \cdot Q (0.0796 \times 0.057 - 0.25 \times 0.090) \\ &= -0.018 n \cdot Q \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 90^\circ (+) : M &= n \cdot Q (0.0796 R + 0.25 H) \\ &= 0.027 n \cdot Q \end{aligned}$$

$$270^\circ (-) : M = -0.027 n \cdot Q$$

$$270^\circ (+) : M = 0.018 n \cdot Q$$

	M / Q	M (N·m)
90° (-)	0.25 X - 0.018 n	1
90° (+)	-0.25 X + 0.027 n	6
270° (-)	-0.25 X - 0.027 n	-35
270° (+)	0.25 X + 0.018 n	28

” N ”

$$\begin{aligned} N &= P \cdot r_i \{ b + 1.56 (1 - \lambda^2) (r_m \cdot t) \} \\ &= 1.0 \times 40.55 \\ &\quad \times \{ 4.5 + 1.56 \times (1 - 0.3^2) \times (42.6 \times 4.0) \} \\ &= 933 \text{ N} \end{aligned}$$

応力

$$= \frac{T}{A} + \frac{M}{Z} + \frac{N}{A}$$

内縁 $A = 280 \text{ mm}^2$ $Z_i = 3,520 \text{ mm}^3$

	T (N/mm ²)	M (N/mm ²)	n (N/mm ²)	= I (N/mm ²)
90° (-)	-2	0	3	1
90° (+)	-1	2	3	4
270° (-)	2	-10	3	-4
270° (+)	1	8	3	12

外縁 $A = 280 \text{ mm}^2$ $Z_o = 2,011 \text{ mm}^3$

	T (N/mm ²)	M (N/mm ²)	n (N/mm ²)	= I (N/mm ²)
90° (-)	-2	0	3	1
90° (+)	-1	-3	3	-1
270° (-)	2	17	3	23
270° (+)	1	-14	3	-10

11) リングサポート部の合成応力

$$g = \left(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + 3 \sigma_3^2 \right)$$

ここで g : 合成応力

1: 円周方向応力

2: 管軸方向応力

: 管軸垂直方向のせん断応力

支点 A, B において ($\theta = 90^\circ$)

$$\sigma_1 = 12 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{リングサポートの内縁応力})$$

$$\sigma_2 = pr + p$$

$$= -12 - 3 = -15 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau = 1 \text{ N/mm}^2$$

$$g = \left\{ 12^2 + (-15)^2 - 12 \times (-15) + 3 \times 1^2 \right\}$$

$$= 24 \text{ N/mm}^2 < 1.35 a = 162 \text{ N/mm}^2 \quad \dots \text{ O.K}$$

ここで a : 許容応力度 = 120 N/mm²