

鋼製セグメント(外径 3550mm)の設計

常時計算

1. 設計概要

1-1 荷重算定についての地盤の分類

セグメントの荷重算定における地盤の分類は、土質学上の土の分類とは異にし、原則的に次の区分によるものとする。

- ・土水一体地盤 : 土圧と水圧を一体として考える。
- ・土水分離地盤 : 土圧と水圧を分離して考える。

1-2 鉛直土圧の考え方

- ・土水一体地盤 : 全土被り重量
- ・土水分離地盤 : 土被りがセグメント外径 D_0 の2倍以下 ($2D_0 \geq H_0$) …… 全土被り重量
土被りがセグメント外径 D_0 の2倍を超える ($2D_0 < H_0$) …… Terzaghiの緩み土圧

但し、緩み土圧を緩み高さに換算したとき、これがセグメント外径の2倍以下の場合には、緩み高さは2倍以下になることはないものとし、2倍を下限とする。

1-1、1-2 共に社団法人日本下水道協会『シールド工用標準セグメント』第1章総説より抜粋。

1-3 設計条件

地盤種類	層厚 (H)	N値 (N)	内部 摩擦角 (ϕ)	粘着力 (C)	土の単位体積重量	
					水位以上 (γ)	水位以下 (γ')
土水一体	12.944	2	0	0	16.000	7.000

$H_0=12.944\text{m}$

$D_0=3.550\text{m}$

側部土質条件
土水一体
 $\gamma=16.000$
 $\gamma'=7.000$

1-4 側方土圧係数 及び地盤反力kの選定

側方土圧係数 及び地盤反力係数kについては、表 - 1に示す『シールド工事中標準セグメント』(日本下水道協会)に準じて揚げられた、kの組合せ表より選択する。

表 - 1 側方土圧係数()と地盤反力係数(k)との組合せ

土水分離地盤の場合					土水一体地盤の場合				
k (MN/m ³)	10	20	40	80	k (MN/m ³)	0	2.5	5.0	10
0.4					0.6				
0.5					0.7				
0.6					0.8				
0.7					0.9				

表 - 2 側方土圧係数()及び地盤反力係数(k)

地盤の分類	土の工学的分類		k (MN/m ³)	N値による目安
土水分離地盤	非常によく締まった砂質土	0.35 ~ 0.45	30 ~ 50	30 N
	締まった砂質土	0.45 ~ 0.55	10 ~ 30	15 N < 30
	ゆるい砂質土	0.50 ~ 0.60	0 ~ 10	N < 15
	固結した粘性土	0.35 ~ 0.45	30 ~ 50	25 N
	硬い粘性土	0.45 ~ 0.55	10 ~ 30	8 N < 25
	中位の粘性土	0.45 ~ 0.55	5 ~ 10	4 N < 8
土水一体地盤	中位の粘性土	0.55 ~ 0.65	5 ~ 10	4 N < 8
	軟らかい粘性土	0.65 ~ 0.75	0 ~ 5	2 N < 4
	非常に軟らかい粘性土	0.75 ~ 0.85	0	N < 2

原則的に下水道協会の『シールド工事中標準セグメント』では表 - 1の 印の組合せ数値で考えられている。

(表 - 2については土水の取扱いが明確でないため、参考値として示している。)

これより $\lambda = 0.80$

$k = 3 \text{ (MN/m}^3\text{)}$ とする。

2. 設計条件

2-1 セグメント形状

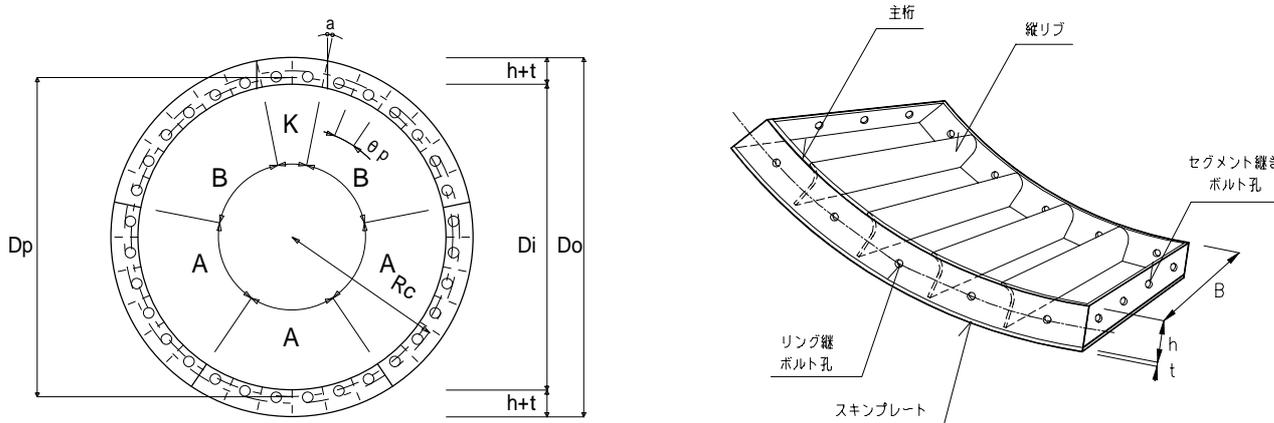


図-2.1.1 セグメント形状(2本主桁)

[セグメント番号 S50]

項目		単位	諸元値	備考
外 径	Do	mm	3550	
内 径	Di	mm	3294	1
幅	B	mm	1000	
主 桁 高	h	mm	125	
主 桁 厚	tr	mm	14	
図 心 半 径	Rc	mm	1716.8	2
継 手 角 度		°	14.5	
分 割 数	n _{sg}	分割	6	
セグメント自重	W _g	kN/m	10.80	

1 セグメント内径 : $Di = Do - 2 \cdot (h + t)$

$$= 3550 - 2 \times (125 + 3.0) = 3294 \text{ (mm)}$$

2 図心半径 : $Rc = Do / 2 - y_0$ より

$$y_0 = \frac{2 \cdot (tr \cdot h \cdot (t + h / 2) + 25 \cdot t^2 \cdot t / 2)}{2 \cdot (tr \cdot h + 25 \cdot t^2)}$$

$$= \frac{2 \times (14 \times 125 \times (3.0 + 125 / 2) + 25 \times 3.0^2 \times 3.0 / 2)}{2 \times (14 \times 125 + 25 \times 3.0^2)}$$

$$= 58.2 \text{ (mm)}$$

ここに y_0 : 主断面の外縁から中立軸までの距離 (4-2参照)

t : スキンプレート厚 3.0 (mm)

tr : 主桁厚 14 (mm)

$$Rc = 3550 / 2 - 58.2 = 1716.8 \text{ (mm)}$$

2-2 上載荷重

(1)活荷重

管にかかる活荷重 $W_0 = 0.000\text{KN/m}^2$ とする。

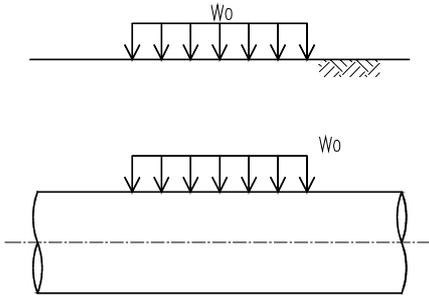


図-2.2.1 活荷重

(2)死荷重

管にかかる死荷重 $P_0 = 0.000$ (KN/m²) とする。

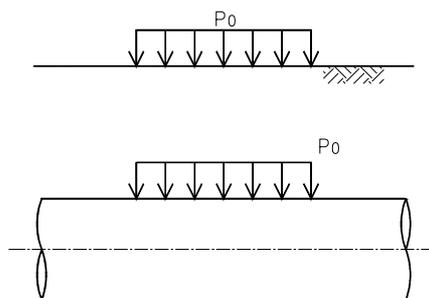


図-2.2.2 死荷重

2-3 シールド・ジャッキ総推力

$$\begin{aligned} P_j &= P_{j1} \cdot n_j \\ &= 1000 \times 10 \\ &= 10000 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

P_{j1} :	ジャッキ1本当り推力	1000 (kN/本)
n_j :	ジャッキ設置本数	10 (本)

3. 材料の許容応力度

3-1 鋼材

(1) ヤング係数 $E_s = 210 \times 10^3 \text{ (N/mm}^2\text{)}$

(2) 許容応力度

許容曲げ応力度 $\sigma_{ba} = 215 \text{ (N/mm}^2\text{)}$

許容純圧縮応力度(短期)

$0 < \lambda < 8$ のとき $\sigma_{ca} = 325$

$8 < \lambda < 115$ のとき $\sigma_{ca} = 325 - 1.42 \times (\lambda - 8) \times 1.50$

許容オイラー座屈応力度 $\sigma_{ea} = 1200000 / \lambda^2 \text{ (N/mm}^2\text{)}$

降伏点応力度 $\sigma_y = 325 \text{ (N/mm}^2\text{)}$

λ : 細長比

(『シールド工事中用標準セグメント』より)

3-2 ボルト

(1) 許容応力度

強度区分	4.6	6.8	8.8	10.9
許容応力度				
引張り(N/mm ²)	120	210	290	380
せん断(N/mm ²)	90	150	200	270

(2) 強度比較

強度区分	4.6	6.8	8.8	10.9
降伏点又は耐力(N/mm ²)	240	480	660	940
引張強度(N/mm ²)	400	600	830	1040

3-3 適用示方書

『トンネル標準示方書[シールド工法編・同解説]』土木学会編

『シールド工事中用標準セグメント』土木学会・日本下水道協会共編

4. 設計荷重の算定

4-1 鉛直土圧

鉛直土圧については、土水一体地盤であるため土のアーチング効果は期待できないと判別される。

よって、全土被り荷重として算定する。

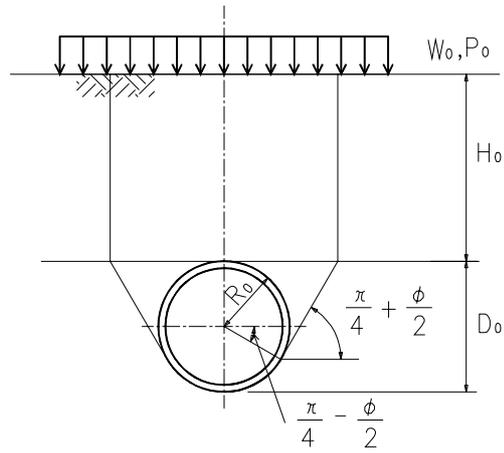


図-4.1.1 鉛直土圧

4-2 設計荷重の算定

(1) 鉛直荷重 : P_{V1}

$$\text{○上載荷重(活荷重)} : W_0 = 0.000 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$\text{○上載荷重(死荷重)} : P_0 = 0.000 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$\begin{aligned} \text{○土圧} & : P_{sv} = \gamma \cdot H_0 \\ & = 16.000 \times 12.944 \\ & = 207.104 \text{ (kN/m}^2\text{)} \end{aligned}$$

$$\text{○水圧} : P_{wv} = 0.000 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$\begin{aligned} P_{V1} &= W_0 + P_0 + P_{sv} + P_{wv} \\ &= 0.000 + 0.000 + 207.104 + 0.000 \\ &= 207.104 \text{ (kN/m}^2\text{)} \end{aligned}$$

(2) 頂部水平荷重 : P_{H1}

$$\text{○上載荷重(活荷重)} : W_H = \alpha \cdot W_0 = 0.80 \times 0.000 = 0.000 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$\text{○上載荷重(死荷重)} : P_H = \alpha \cdot P_0 = 0.80 \times 0.000 = 0.000 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$\begin{aligned} \text{○土圧} & : P_{sh1} = \alpha \cdot (P_{sv} + \gamma \cdot (D_0 / 2 - R_c)) \\ & = 0.80 \times (207.104 + 16.000 \times (3.550 / 2 - 1.7168)) = 166.428 \text{ (kN/m}^2\text{)} \end{aligned}$$

$$\text{○水圧} : P_{w1} = 0.000 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$\begin{aligned} P_{H1} &= W_H + P_H + P_{sh1} + P_{w1} \\ &= 0.000 + 0.000 + 166.428 + 0.000 = 166.428 \text{ (kN/m}^2\text{)} \end{aligned}$$

(3)底部水平荷重 : P_{H2}

$$\begin{aligned} \text{○土圧} \quad : P_{Sh2} &= \gamma \cdot (P_{sv} + \gamma \cdot (D_0 / 2 + R_c)) \\ &= 0.80 \times (207.104 + 16.000 \times (3.550 / 2 + 1.7168)) \\ &= 210.378 \text{ (kN/m}^2\text{)} \end{aligned}$$

$$\text{○水圧} \quad : P_{W2} = 0.000 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$\begin{aligned} P_{H2} &= W_H + P_H + P_{Sh2} + P_{W2} \\ &= 0.000 + 0.000 + 210.378 + 0.000 \\ &= 210.378 \text{ (kN/m}^2\text{)} \end{aligned}$$

(4) 自重による底部反力荷重 : P_g

セグメントの自重(1m当り) $w_g = 10.80 \text{ kN/m}$ (セグメント番号 S50)

したがって、セグメント円周単位当り重量 : W_g は、

$$W_g = \frac{w_g}{2 \cdot \pi \cdot R_c} = \frac{10.80}{2 \times \pi \times 1.7168} = 1.001 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$P_g = \gamma \cdot W_g = 3.145 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

(5) 地盤反力 : q

$$q = k \cdot \delta$$

ここに k : 地盤反力係数 = 3 (MN/m³)

(= 3000 (kN/m³))

δ : 抵抗土圧によるたわみ量 (m)

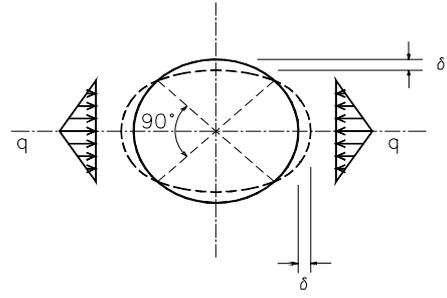


図-4.2.1 地盤反力

ここに、たわみ量 δ は

$$\delta = \frac{(2 \cdot Pv_1 - PH_1 - PH_2) \cdot Rc^4}{24 \cdot (\alpha \cdot Es \cdot Is + 0.0454 \cdot k \cdot Rc^4)}$$

但し α : 曲げ剛性の有効率 100 (%)

Es : 鋼材のヤング係数 = 210 (kN/mm²) = 210 × 10⁶ (kN/m²)

Is : 主断面の断面二次モーメント (m⁴/m)

a) 主断面の断面二次モーメント Is の算定

○主桁断面

セグメント番号 S50 より

t : スキンプレート厚 3.0 (mm)

h : 主桁高 125 (mm)

t_r : 主桁厚 14 (mm)

B : セグメント幅 1000 (mm)

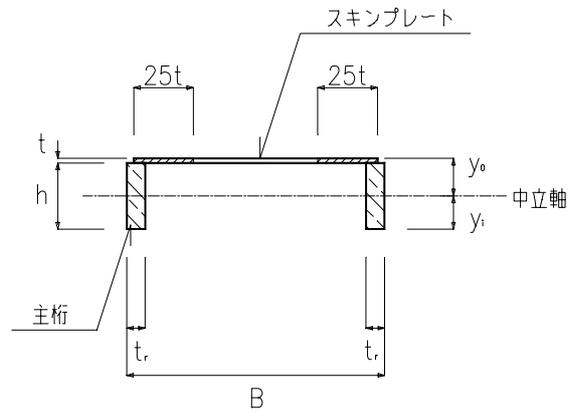


図-4.2.2 主桁断面

○中立軸の位置 : y_0 , y_i

$$y_0 = \frac{2 \cdot (tr \cdot h \cdot (t + h / 2) + 25 \cdot t^2 \cdot t / 2)}{2 \cdot (tr \cdot h + 25 \cdot t^2)}$$

$$= \frac{2 \times (14 \times 125 \times (3.0 + 125 / 2) + 25 \times 3.0^2 \times 3.0 / 2)}{2 \times (14 \times 125 + 25 \times 3.0^2)}$$

$$= 58.2 \text{ (mm)}$$

$$y_i = (h + t) - y_0 = (125 + 3.0) - 58.2 = 69.8 \text{ (mm)}$$

断面2次モーメント : I_s

$$I_s = \left(\frac{tr \cdot y_i^3}{3} + \frac{tr \cdot (y_0 - t)^3}{3} + 25 \cdot t^2 \cdot (y_0 - t / 2)^2 + \frac{25 \cdot t \cdot t^3}{12} \right) \cdot 2$$

$$= \left(\frac{14 \times 69.8^3}{3} + \frac{14 \times (58.2 - 3.0)^3}{3} + 25 \times 3.0^2 \times (58.2 - 3.0 / 2)^2 + \frac{25 \times 3.0 \times 3.0^3}{12} \right) \times 2$$

$$= 6190845 \text{ (mm}^4 \text{ / Ring)}$$

ゆえに単位長さ当り(1m)に換算すると

$$I_s = \frac{I_s(\text{mm}^4 \text{ / Ring})}{B(\text{m} \text{ / Ring})} = \frac{6190845}{1.00}$$

$$= 6190845 \text{ (mm}^4 \text{)} (= 6190845 \times 10^{-12} \text{ (m}^4 \text{)})$$

b)たわみ量 の算定

$$= \frac{(2 \cdot P_{V1} - P_{H1} - P_{H2}) \cdot Rc^4}{24 \cdot (Es \cdot I_s + 0.0454 \cdot k \cdot Rc^4)}$$

$$= \frac{(2 \times 207.104 - 166.428 - 210.378) \times 1.7168^4}{24 \times (1.0 \times 210 \times 10^6 \times 6190845 \times 10^{-12} + 0.0454 \times 3000 \times 1.7168^4)}$$

$$= 0.005452 \text{ (m)}$$

c)地盤反力の算定

$$q = k \cdot \delta = 3000 \times 0.005452 = 16.356 \text{ (kN/m}^2 \text{)}$$

以上セグメント設計荷重をまとめると次に示す作用荷重分布図のとおりとなる。

4-3 作用荷重分布図

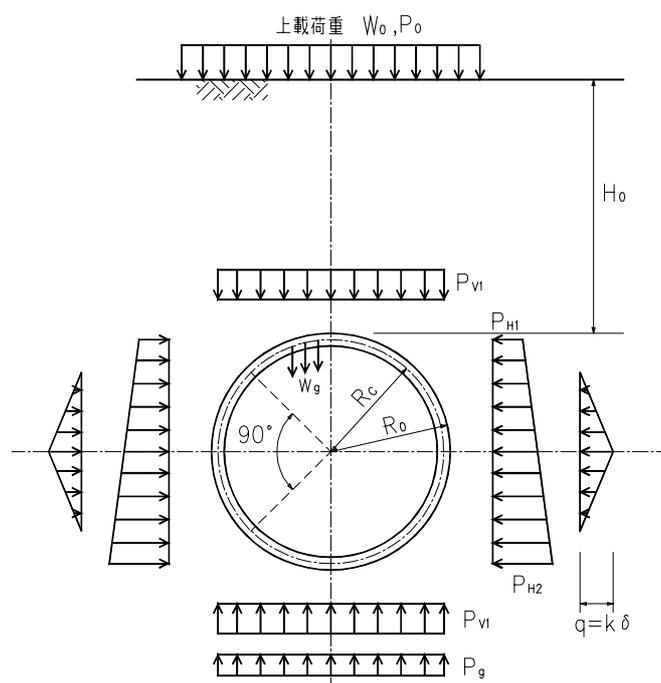


図-4.3 作用荷重分布図

作用荷重

項目		単位	荷重値
鉛直荷重	Pv1	kN/m ²	207.104
頂部水平荷重	PH1	kN/m ²	166.428
底部水平荷重	PH2	kN/m ²	210.378
セグメントの円周単位当り重量	Wg	kN/m ²	1.001
自重による下部反力荷重	Pg	kN/m ²	3.145
地盤反力	q	kN/m ²	16.356

計算諸元

項目		単位	諸元値
図心半径	Rc	m	1.7168
主断面の断面二次モーメント	Is	mm ⁴	6190845
地盤反力係数	k	kN/m ³	3000
ヤング係数	Es	kN/m ²	210 × 10 ⁶
曲げ剛性の有効率		%	100
曲げモーメント割増率		%	0
抵抗土圧によるたわみ量		m	5.452 × 10 ⁻³

5. 自重、土圧及び水圧による断面力の算定

5-1 断面力の算定

(1)鉛直等分布荷重

$$M_{V1} = \frac{1}{4} \cdot (1 - 2 \cdot \sin^2 \theta) \cdot P_{V1} \cdot R_c^2$$

$$N_{V1} = P_{V1} \cdot R_c \cdot \sin^2 \theta$$

$$Q_{V1} = - P_{V1} \cdot R_c \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta$$

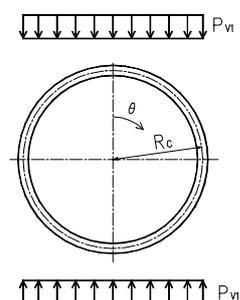


図-5.1.1 鉛直等分布荷重

鉛直等分布荷重

(°)	曲げモーメント M _{V1} (kN・m/m)	軸力 N _{V1} (kN/m)	せん断力 Q _{V1} (kN/m)
0	152.605	0.000	0.000
10	143.402	10.721	-60.804
20	116.902	41.592	-114.274
30	76.302	88.889	-153.960
40	26.500	146.907	-175.077
50	-26.500	208.649	-175.077
60	-76.302	266.667	-153.960
70	-116.902	313.964	-114.274
80	-143.402	344.835	-60.804
90	-152.605	355.556	0.000
100	-143.402	344.835	60.804
110	-116.902	313.964	114.274
120	-76.302	266.667	153.960
130	-26.500	208.649	175.077
140	26.500	146.907	175.077
150	76.302	88.889	153.960
160	116.902	41.592	114.274
170	143.402	10.721	60.804
180	152.605	0.000	0.000

(2)水平等分布荷重

$$M_{H1} = \frac{1}{4} \cdot (1 - 2 \cdot \cos^2 \theta) \cdot P_{H1} \cdot R_c^2$$

$$N_{H1} = P_{H1} \cdot R_c \cdot \cos^2 \theta$$

$$Q_{H1} = P_{H1} \cdot R_c \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta$$

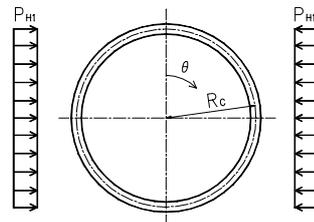


図-5.1.2 水平等分布荷重

水平等分布荷重

(°)	曲げモーメント M _{H1} (kN・m/m)	軸力 N _{H1} (kN/m)	せん断力 Q _{H1} (kN/m)
0	-122.633	285.724	0.000
10	-115.237	277.108	48.862
20	-93.942	252.300	91.830
30	-61.316	214.293	123.722
40	-21.295	167.669	140.691
50	21.295	118.054	140.691
60	61.316	71.431	123.722
70	93.942	33.423	91.830
80	115.237	8.616	48.862
90	122.633	0.000	0.000
100	115.237	8.616	-48.862
110	93.942	33.423	-91.830
120	61.316	71.431	-123.722
130	21.295	118.054	-140.691
140	-21.295	167.669	-140.691
150	-61.316	214.293	-123.722
160	-93.942	252.300	-91.830
170	-115.237	277.108	-48.862
180	-122.633	285.724	0.000

(3)水平等変分布荷重

$$M_{H0} = \frac{1}{48} \cdot (6 - 3 \cdot \cos \theta - 12 \cdot \cos^2 \theta + 4 \cdot \cos^3 \theta) \cdot (P_{H2} - P_{H1}) \cdot R_c^2$$

$$N_{H0} = \frac{1}{16} \cdot (\cos \theta + 8 \cdot \cos^2 \theta - 4 \cdot \cos^3 \theta) \cdot (P_{H2} - P_{H1}) \cdot R_c$$

$$Q_{H0} = \frac{1}{16} \cdot (\sin \theta + 8 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta - 4 \cdot \sin \theta \cdot \cos^2 \theta) \cdot (P_{H2} - P_{H1}) \cdot R_c$$

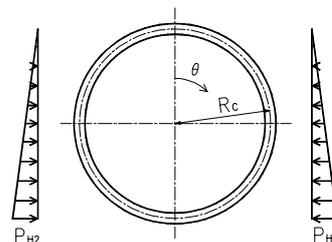


図-5.1.3 水平等変分布荷重

水平等変分布荷重

(°)	曲げモーメント M _{H0} (kN·m/m)	軸力 N _{H0} (kN/m)	せん断力 Q _{H0} (kN/m)
0	-13.494	23.579	0.000
10	-12.879	23.217	4.094
20	-11.055	22.093	8.041
30	-8.096	20.127	11.620
40	-4.161	17.272	14.493
50	0.475	13.609	16.219
60	5.397	9.432	16.336
70	10.067	5.271	14.483
80	13.866	1.858	10.536
90	16.192	0.000	4.716
100	16.565	0.417	-2.368
110	14.741	3.555	-9.767
120	10.795	9.432	-16.336
130	5.149	17.566	-20.935
140	-1.462	27.006	-22.661
150	-8.096	36.463	-21.052
160	-13.753	44.534	-16.209
170	-17.553	49.961	-8.810
180	-18.891	51.874	0.000

(4)抵抗土圧

0 45° の場合

$$M_q = (0.2346 - 0.3536 \cdot \cos \theta) \cdot q \cdot R_c^2$$

$$N_q = 0.3536 \cdot \cos \theta \cdot q \cdot R_c$$

$$Q_q = 0.3536 \cdot \sin \theta \cdot q \cdot R_c$$

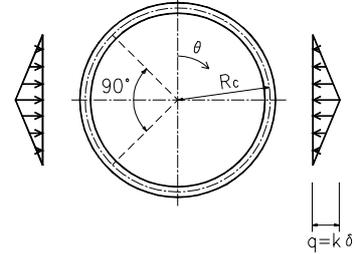


図-5.1.4 抵抗土圧

45° 90° の場合

$$M_q = (-0.3487 + 0.5 \cdot \sin^2 \theta + 0.2357 \cdot \cos^3 \theta) \cdot q \cdot R_c^2$$

$$N_q = (-0.7071 \cdot \cos \theta + \cos^2 \theta + 0.7071 \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos \theta) \cdot q \cdot R_c$$

$$Q_q = (\sin \theta \cdot \cos \theta - 0.7071 \cdot \cos^2 \theta \cdot \sin \theta) \cdot q \cdot R_c$$

抵抗土圧

(°)	曲げモーメント Mq(kN・m/m)	軸力 Nq(kN/m)	せん断力 Qq(kN/m)
0	-5.737	9.929	0.000
10	-5.478	9.778	1.724
20	-4.709	9.330	3.396
30	-3.453	8.599	4.965
40	-1.749	7.606	6.382
50	0.352	6.329	7.542
60	2.688	4.538	7.860
70	4.929	2.490	6.842
80	6.627	0.743	4.212
90	7.294	0.000	0.000
100	6.627	0.743	-4.212
110	4.929	2.490	-6.842
120	2.688	4.538	-7.860
130	0.352	6.329	-7.542
140	-1.749	7.606	-6.382
150	-3.453	8.599	-4.965
160	-4.709	9.330	-3.396
170	-5.478	9.778	-1.724
180	-5.737	9.929	0.000

90° 180° でのQqは 0 90° でのQqに絶対値は等しく符号は逆になる。

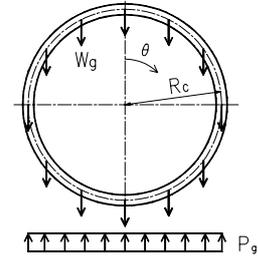
(5)自重

0° 90° の場合

$$M_g = \left(\frac{3}{8} \cdot \sin^2 \theta - \frac{5}{6} \cdot \cos^2 \theta \right) \cdot W_g \cdot R_c^2$$

$$N_g = \left(\frac{1}{6} \cdot \sin^2 \theta - \frac{1}{6} \cdot \cos^2 \theta \right) \cdot W_g \cdot R_c$$

$$Q_g = - \left(\frac{1}{6} \cdot \cos^2 \theta + \frac{1}{6} \cdot \sin^2 \theta \right) \cdot W_g \cdot R_c$$



90° 180° の場合

図-5.1.5 自重

$$M_g = \left(-\frac{1}{8} \cdot \sin^2 \theta + \left(\frac{1}{6} \cdot \sin^2 \theta - \frac{5}{6} \cdot \cos^2 \theta - \frac{1}{2} \cdot \sin^2 \theta \right) \right) \cdot W_g \cdot R_c^2$$

$$N_g = \left(-\frac{1}{6} \cdot \sin^2 \theta + \frac{1}{6} \cdot \sin^2 \theta + \frac{1}{6} \cdot \sin^2 \theta - \frac{1}{6} \cdot \cos^2 \theta \right) \cdot W_g \cdot R_c$$

$$Q_g = \left(\left(\frac{1}{6} \cdot \cos^2 \theta - \frac{1}{6} \cdot \sin^2 \theta \right) \cdot \cos \theta - \frac{1}{6} \cdot \sin \theta \right) \cdot W_g \cdot R_c$$

自重による断面力

(°)	曲げモーメント Mg(kN・m/m)	軸力 Ng(kN/m)	せん断力 Qg(kN/m)
0	1.017	-0.286	0.000
10	0.965	-0.230	-0.345
20	0.813	-0.064	-0.662
30	0.574	0.202	-0.922
40	0.268	0.552	-1.103
50	-0.077	0.965	-1.183
60	-0.429	1.415	-1.148
70	-0.752	1.875	-0.987
80	-1.008	2.313	-0.699
90	-1.159	2.699	-0.286
100	-1.169	2.923	0.225
110	-1.023	2.892	0.748
120	-0.729	2.634	1.190
130	-0.325	2.203	1.475
140	0.134	1.679	1.555
150	0.584	1.148	1.415
160	0.962	0.696	1.074
170	1.212	0.393	0.578
180	1.300	0.286	0.000

5-2 断面力の重ね合せ

(1)常時の断面力算定結果(単位m当り)

リングに作用する合成断面力は自重・土圧及び水圧により算出した断面力をもって下式で求める。

$$\text{曲げモーメント } M = M_{V1} + M_{H1} + M_{H0} + M_q + M_g$$

$$\text{軸力 } N = N_{V1} + N_{H1} + N_{H0} + N_q + N_g$$

$$\text{せん断力 } Q = Q_{V1} + Q_{H1} + Q_{H0} + Q_q + Q_g$$

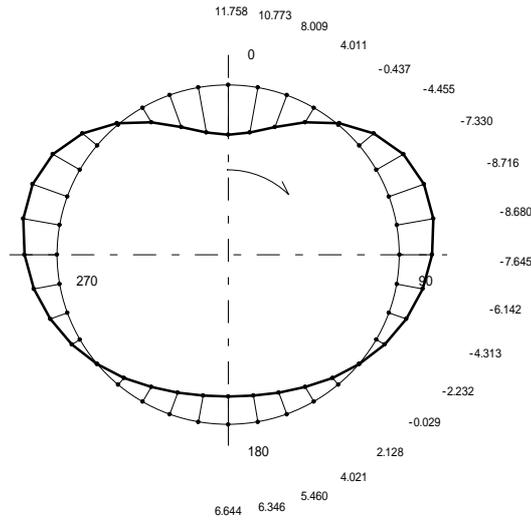
覆工頂点からの角度 (°)	曲げモーメント M(kN・m/m)	軸力 N(kN/m)	せん断力 Q(kN/m)
0	11.758	318.946	0.000
10	10.773	320.594	-6.469
20	8.009	325.251	-11.669
30	4.011	332.110	-14.575
40	-0.437	340.006	-14.614
50	-4.455	347.606	-11.808
60	-7.330	353.483	-7.190
70	-8.716	357.023	-2.106
80	-8.680	358.365	2.107
90	-7.645	358.255	4.430
100	-6.142	357.534	5.587
110	-4.313	356.324	6.583
120	-2.232	354.702	7.232
130	-0.029	352.801	7.384
140	2.128	350.867	6.898
150	4.021	349.392	5.636
160	5.460	348.452	3.913
170	6.346	347.961	1.986
180	6.644	347.813	0.000

(は右回り)

この断面力図を次に示す。

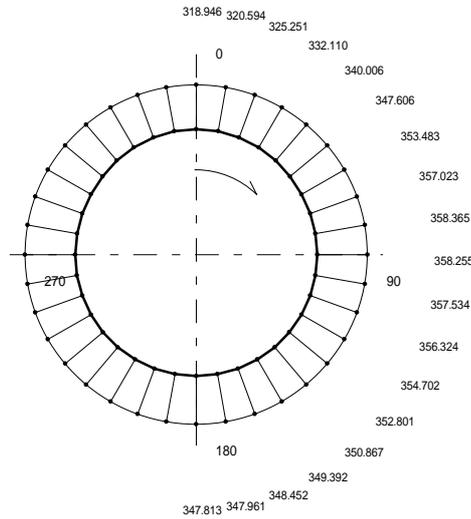
5-3 断面力図

(1) 曲げモーメント



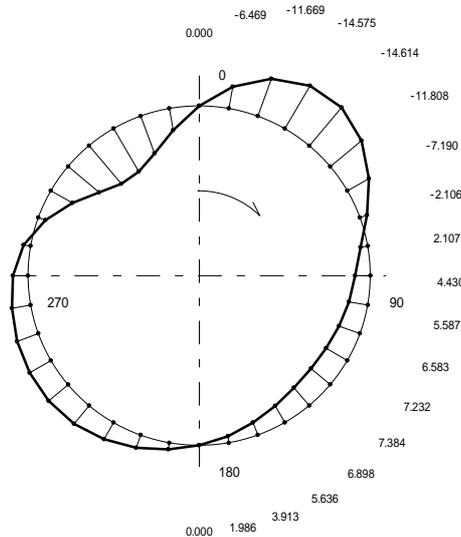
正最大曲げモーメント位置 = 0°
 正最大曲げモーメント = 11.758 (kN·m)
 負最大曲げモーメント位置 = 70°
 負最大曲げモーメント = -8.716 (kN·m)

(2) 軸力図



正最大軸力位置 = 80°
 正最大軸力 = 358.365 (kN)

(3) せん断力図



最大せん断力位置 = 40°
 最大せん断力 = -14.614 (kN)

6. 主桁の設計

6-1 主桁断面(セグメント番号 S50)

t	: スキンプレート厚	3.0 (mm)
h	: 主桁高	125 (mm)
tr	: 主桁厚	14 (mm)
B	: セグメント幅	1000 (mm)

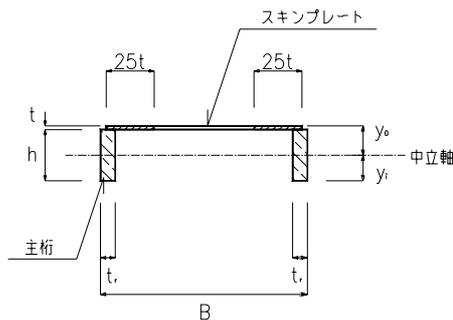


図-6.1.1 主桁断面

6-2 断面性能(単位幅1m当り)

(1) 中立軸の位置 (y_0 , y_i) 及び断面二次モーメント (I_s)

主桁の中立軸の位置 (y_0 , y_i) 及び断面二次モーメント (I_s) については4-2(5)の地盤反力算定に主断面の断面性能として示している。

ここに再度、計算結果を示すと

$$y_0 = 58.2 \text{ (mm) 外縁側}$$

$$y_i = 69.8 \text{ (mm) 内縁側}$$

$$I_s = 6190845 \text{ (mm}^4\text{)}$$

(2) 面積(A)

$$\begin{aligned} A &= 2 \cdot (tr \cdot h + 25 \cdot t^2) \cdot 1000 / B \\ &= 2 \times (14 \times 125 + 25 \times 3.0^2) \times 1000 / 1000 \\ &= 3950 \text{ (mm}^2\text{)} \end{aligned}$$

(3) 断面係数

外縁に対する断面係数:

$$Z_0 = \frac{I_s}{y_0} = \frac{6190845}{58.2} = 106372 \text{ (mm}^3\text{)}$$

内縁に対する断面係数:

$$Z_i = \frac{I_s}{y_i} = \frac{6190845}{69.8} = 88694 \text{ (mm}^3\text{)}$$

6-3 応力度の算定

$$\text{外縁応力度 } \sigma_o = N / A + M_o / Z_o \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$\text{内縁応力度 } \sigma_i = N / A - M_o / Z_i \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$M_o = (1 + \quad) \cdot M \quad (\quad : \text{曲げモーメント割増率} : 0\%)$$

	N/A	+(M _o /Z _o)	-(M _o /Z _i)	σ_o	σ_i
0	80.7	110.5	-132.6	191.2	-51.9
10	81.2	101.3	-121.5	182.5	-40.3
20	82.3	75.3	-90.3	157.6	-8.0
30	84.1	37.7	-45.2	121.8	38.9
40	86.1	-4.1	4.9	82.0	91.0
50	88.0	-41.9	50.2	46.1	138.2
60	89.5	-68.9	82.6	20.6	172.1
70	90.4	-81.9	98.3	8.5	188.7
80	90.7	-81.6	97.9	9.1	188.6
90	90.7	-71.9	86.2	18.8	176.9
100	90.5	-57.7	69.2	32.8	159.7
110	90.2	-40.5	48.6	49.7	138.8
120	89.8	-21.0	25.2	68.8	115.0
130	89.3	-0.3	0.3	89.0	89.6
140	88.8	20.0	-24.0	108.8	64.8
150	88.5	37.8	-45.3	126.3	43.2
160	88.2	51.3	-61.6	139.5	26.6
170	88.1	59.7	-71.5	147.8	16.6
180	88.1	62.5	-74.9	150.6	13.2

(+)は圧縮応力度を示し、(-)は引張応力度を示す。

$$\text{最大外縁応力度 } \sigma_{o\max} (\theta = 0^\circ) = 191.2 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad 215 \text{ (N/mm}^2\text{)} : \text{OK}$$

$$\text{最大内縁応力度 } \sigma_{i\max} (\theta = 70^\circ) = 188.7 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad 215 \text{ (N/mm}^2\text{)} : \text{OK}$$

M・Nの単位換算

M	kN・m/m	$\times 10^6 \text{N} \cdot \text{mm/m}$
N	kN/m	$\times 10^3 \text{N/m}$

(2)中立軸の位置 : y_0' 、 y_i'

セグメント外縁に関する断面1次モーメント : G

$$G = 40 \cdot t^2 \cdot \frac{t}{2} + \left(t + \frac{hs - R_2}{2} \right) \cdot ts \cdot (hs - R_2) \\ + \frac{(hs + t - R_2 + Y) \cdot (R_2^2 - R_1^2)}{4} + ts \cdot (bs - R_2) \cdot \left(hs + t - \frac{ts}{2} \right)$$

縦リブ扇形部重心位置 : Y

$$Y = \left(2 \cdot ts + \frac{ts}{24} \right) \cdot \frac{4}{4} \cdot \sin^2 \frac{9}{4}$$

これより

$$y_0' = \frac{G}{A_r}, \quad y_i' = t + hs - y_0'$$

上式より

$$Y = \left(2 \times 9 + \frac{9}{24} \right) \times \frac{4}{4} \times \sin^2 \frac{9}{4} = 11.7 \text{ (mm) より}$$

$$G = 40 \times 3.0^2 \times \frac{3.0}{2} + \left(3.0 + \frac{118 - 22.5}{2} \right) \times 9 \times (118 - 22.5) \\ + \frac{(118 + 3.0 - 22.5 + 11.7) \times (22.5^2 - 13.5^2)}{4} + 9 \times (89 - 22.5) \times (118 + 3.0 \\ - \frac{9}{2}) = 141927 \text{ (mm}^3)$$

$$y_0' = \frac{141927}{2072} = 68.5 \text{ (mm)}$$

$$y_i' = 3.0 + 118 - 68.5 = 52.5 \text{ (mm)}$$

(3)断面二次モーメント

$$I_R = 40 \cdot t^2 \cdot \left(y_0' - \frac{t}{2} \right)^2 + \frac{ts \cdot (y_0' - t)^3}{3} + \frac{ts \cdot (y_i' - R_2)^3}{3} + \frac{ts}{4} \cdot (R_2^2 - R_1^2) \\ \cdot \left(y_i' - R_2 + Y \right)^2 + ts \cdot (bs - R_2) \cdot \left(y_i' - \frac{ts}{2} \right)^2 + 0.055 \cdot (R_2^4 - R_1^4) \\ = 40 \times 3.0^2 \times \left(68.5 - \frac{3.0}{2} \right)^2 + \frac{9 \times (68.5 - 3.0)^3}{3} + \frac{9 \times (52.5 - 22.5)^3}{3} \\ + \frac{9}{4} \times (22.5^2 - 13.5^2) \times (52.5 - 22.5 + 11.7)^2 + 9 \times (89 - 22.5) \times (52.5 \\ - \frac{9}{2})^2 + 0.055 \times (22.5^4 - 13.5^4) = 4373781 \text{ (mm}^4)$$

(4)断面係数

$$\text{外縁に対する断面係数} \quad Z_0 = \frac{I_R}{y_0'} = \frac{4373781}{68.5} = 63851 \text{ (mm}^3)$$

$$\text{内縁に対する断面係数} \quad Z_i = \frac{I_R}{y_i'} = \frac{4373781}{52.5} = 83310 \text{ (mm}^3)$$

7-3 縦リブの応力算定

縦リブは、ジャッキ推力による偏心軸圧縮力を受ける部材として下記条件で安定性の判定を行う。
(日本下水道協会『シールド工用標準セグメント』参照)

$$\frac{c}{ca} + \frac{b}{ba(1 - c/ea)} = 1$$

ただし、局部座屈の検討として $hs / ts = 34.0$ (mm)の必要板厚を満足すること。

なお、ジャッキ重心とセグメント中心位置の偏心量 (ec) については上記基準書に示されている1cmとする。

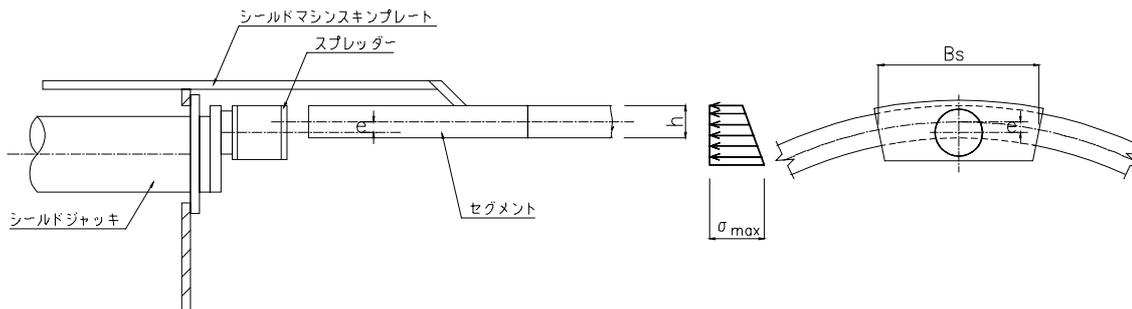


図-7.3.1 ジャッキ重心と、セグメント中心位置の偏心量

(1)ジャッキ推力による純圧縮応力度 : c

$$c = Nr / Ar$$

$$Nr = P_{j1} / 2 = 1000 / 2 = 500 \text{ (kN)} = 500 \times 10^3 \text{ (N)}$$

$$Ar = 2072 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$c = \frac{500 \times 10^3}{2072} = 241 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

(2)許容純圧縮応力度[短期] : ca

短期許容応力度は、降伏点とする。

$$0 < \lambda < 8 \text{ のとき} \quad ca = 325$$

$$8 < \lambda < 115 \text{ のとき} \quad ca = 325 - 1.42 \times (\lambda - 8) \times 1.50$$

$$\lambda : \text{細長比} = ls / r = 972 / 45.9 = 21.2$$

$$ls : \text{縦リブ支間長} = B - 2 \cdot tr = 1000 - 2 \times 14 = 972 \text{ (mm)}$$

$$r : \text{縦リブ断面二次半径} = \sqrt{I_r / Ar} = \sqrt{4373781 / 2072} = 45.9 \text{ (mm)}$$

これより

$$8 < \lambda = 115 \text{ のとき}$$

$$\sigma_{ca} = 325 - 1.42 \times (21.2 - 8) \times 1.50 = 297 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

(3) 曲げ圧縮応力度 : σ_b

$$\sigma_b = -e' \cdot N_r / Z_o$$

$$\sigma_b = e' \cdot N_r / Z_i$$

のうち、 σ_b が大きい値 (圧縮側) をとる。

$$e' = h / 2 + t + e_c - y_0'$$

$$= 125 / 2 + 3.0 + 10 - 68.5 = 7.0 \text{ (mm)}$$

$$\sigma_b = 7.0 \times 500 \times 10^3 / 83310 = 42.0 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

(4) 許容曲げ応力度 [短期] : σ_{ba}

$$\sigma_{ba} = 325 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

(5) Eulerの許容座屈応力度 : σ_{ea}

$$\sigma_{ea} = 1200000 / \lambda^2 = 1200000 / 21.2^2 = 2670 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

(6) 縦リブの応力度

以上の条件より

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{ca}} + \frac{\sigma_b}{\sigma_{ba} \left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{ea}} \right)} = \frac{241}{297} + \frac{42.0}{325 \times \left(1 - 241 / 2670 \right)}$$

$$= 1.0 \quad 1.0 \text{ OK}$$

また、局部座屈の検討として

$$h_s / t_s = 118 / 9 = 13.1 < 34.0 \text{ (mm) OK}$$

8. スキンプレートの設定

8-1 断面諸元

スキンプレートは相対2辺の縦リブで固定支持された矩形型の極限設計を用いて算定を行う。

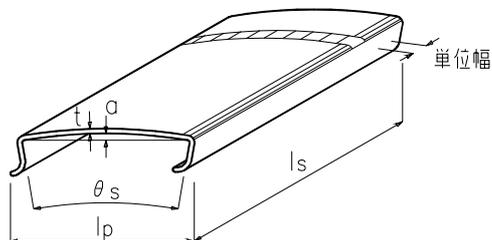


図-8.1.1 スキンプレート断面

すなわち、両端固定の単位幅あたりの梁が等分布荷重(土圧・水圧・裏込注入圧等)を受けると、荷重の増加に伴い塑性ヒンジが形成され、最終的には膜状態となる。

この極限荷重強度(降伏荷重) P_0 は、次式により求められる。

$$P_0 = 1.10 \cdot P_P \cdot \sqrt{F}$$

$$F = \frac{s_y \cdot t \cdot I_P^2}{4 \cdot E_s \cdot I_P / (1 - \nu^2)}$$

$$P_P = 4 \cdot (t / I_P)^2 \cdot s_y$$

$$I_P = 2 \cdot (D_0 / 2 - t / 2) \cdot \sin(s / 2)$$

項目		単位	諸元値
セグメント外径	D_0	mm	3550
スキンプレート厚	t	mm	3.0
縦リブ支間長	l_s	mm	972
縦リブ中心線角	s	°	11.250
鋼材のヤング係数	E_s	N/mm ²	210×10^3
ポアソン比			0.3
鋼材の降伏点応力度	s_y	N/mm ²	325

8-2 断面の検討

(1)スキンプレート単位幅当り断面二次モーメント： I_P

$$I_P = \frac{1.0 \cdot t^3}{12} = \frac{1.0 \times 3.0^3}{12} = 2.25 \text{ (mm}^3\text{)}$$

(2)スキンプレートのスパン : l_P

$$\begin{aligned} l_P &= 2 \cdot (D_0 / 2 - t / 2) \cdot \sin(\theta / 2) \\ &= 2 \times (3550 / 2 - 3.0 / 2) \times \sin(11.250^\circ / 2) \\ &= 347.7 \text{ (mm)} \end{aligned}$$

(3)極限荷重強度(降伏荷重) P_0 の算出

$$\begin{aligned} F &= \frac{\sigma_y \cdot t \cdot l_P^2}{4 \cdot E_s \cdot l_P / (1 - \nu^2)} \\ &= \frac{325 \times 3.0 \times 347.7^2}{4 \times 210 \times 10^3 \times 2.25 / (1 - 0.3^2)} \\ &= 56.754 \text{ (N/mm}^2\text{)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \circ P_P &= 4 \cdot (t / l_P)^2 \cdot \sigma_y \\ &= 4 \times (3.0 / 347.7)^2 \times 325 = 0.097 \text{ (N/mm}^2\text{)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_0 &= 1.10 \cdot P_P \cdot \sqrt{F} \\ &= 1.10 \times 0.097 \times \sqrt{56.754} \\ &= 0.804 \text{ (N/mm}^2\text{)} = 804 \text{ (kN/m}^2\text{)} \end{aligned}$$

(4)スキンプレート最大荷重 f に対する評価

スキンプレートにかかる最大荷重 f は、『セグメント設計荷重』に示した底部反力、側方荷重 (P_{H2})、地盤反力の最大点での荷重 ($(P_{H1} + P_{H2}) / 2 + q$) の中で大なるものを選択する。

すなわち

$$\begin{aligned} \circ P_{V1} + P_g &= 207.104 + 3.145 = 210.249 \text{ (kN/m}^2\text{)} \\ \circ P_{H2} &= 210.378 \text{ (kN/m}^2\text{)} \\ \circ (P_{H1} + P_{H2}) / 2 + q &= (166.428 + 210.378) / 2 + 16.356 = 204.759 \text{ (kN/m}^2\text{)} \end{aligned}$$

$$f = 210.378 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$\text{これより } f = 210.378 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad P_0 = 804 \text{ (kN/m}^2\text{)} \cdots \text{OK}$$

$$\text{裏込注入圧 } P_1 = 300 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad P_0 = 804 \text{ (kN/m}^2\text{)} \cdots \text{OK}$$

9. 継手ボルトの設計

9-1 ボルト諸元

使用ボルト

項目	単位	諸元値
ボルト径		M - 20
ボルト長	l _B	mm 55
有効断面積	A _n	mm ² 245
軸断面積	A _b	mm ² 314
ボルト本数 (Ring当り)	n _{sb}	本 4

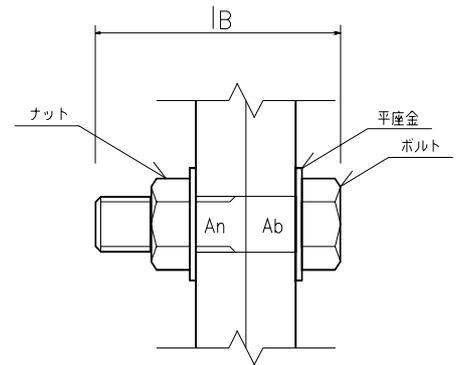


図-9.1.1 ボルト諸元

9-2 引張力に対する検討

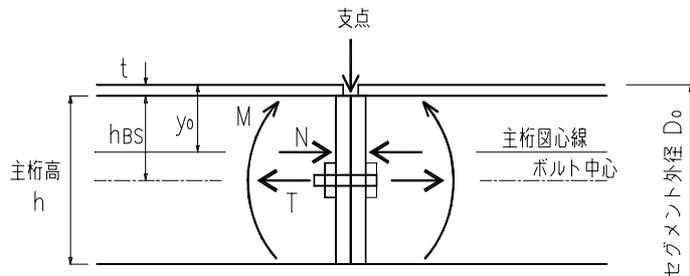


図-9.2.1 セグメント継ボルトに作用する引張力

セグメント継ぎボルトのリング当りの引張力は、上図に示すとおり、継ぎ手部に作用する正曲げモーメントMと軸力Nにより、継手板端部を支点として回転する場合を想定し、下式で求める。

$$T = \frac{(M \cdot (1 - \quad) - N \cdot (y_0 - t)) \cdot B}{n_{sb} \cdot h_{BS}}$$

ここに、 T	: ボルト1本当りに作用する引張力	(N/Ring)
y ₀	: 主桁外縁からセグメント断面図心までの距離	58.2 (mm)
t	: スキンプレート厚	3.0 (mm)
h _{BS}	: 主桁外縁からボルト位置までの距離	75 (mm)
B	: セグメント幅	1000 (mm)
	: 曲げモーメントの割増率	0 (%)

正曲げに対する引張力： T_1 ($\theta = 0^\circ$)

$$\text{最大曲げモーメント} \quad M = 11.758(\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}) \quad (= 11758 \text{ (N}\cdot\text{mm}/\text{mm}))$$

$$= 0^\circ \text{ 位置軸力} \quad N = 318.946(\text{kN}/\text{m}) \quad (= 318.946 \text{ (N}/\text{mm}))$$

・ボルトに発生する引張力

$$T_1 = \frac{(11758 \times (1 - 0.00) - 318.946 \times (58.2 - 3.0)) \times 1000}{4 \times 75}$$

$$= -19493 \text{ (N)}$$

$T_1 = 0$ なのでボルトに引張力は働かない。

・ボルトに発生する応力度

$$B_1 = \frac{T_1}{A_n} = \frac{-19493}{245} = -79.6 \text{ (N}/\text{mm}^2)$$

T_1 : 正曲げに対するボルトに発生する引張力 (kN)

B_1 : 正曲げに対するボルトに発生する応力度 (N/mm²)

9-3 せん断力に対する検討

(1) せん断力はK型セグメントの継手部について検討する。

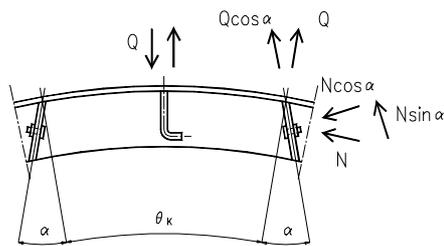


図-9.3.1 K型セグメント継手部に作用する応力

継手角度 = 14.5 °

せん断力 $Q_k = N \cdot (\sin \alpha - f' \cdot \cos \alpha) - Q \cdot (\cos \alpha + f' \cdot \sin \alpha)$

ただし、 $f' = 0.3$ (鋼の摩擦係数)

K型セグメントの継手位置は $\kappa = 0^\circ \sim 50^\circ$ の範囲内にあるので、この範囲に作用するせん断力 Q_k を求め検討する。

せん断力の計算結果

	軸力 N (kN/m)	せん断力 Q (kN/m)	$N \cdot (\sin \alpha - f' \cdot \cos \alpha)$	$Q \cdot (\cos \alpha + f' \cdot \sin \alpha)$	合計せん断力 Q_k (kN/m)
0	318.946	0.000	-12.778	0.000	-12.778
10	320.594	-6.469	-12.844	-6.749	-6.095
20	325.251	-11.669	-13.031	-12.174	-0.857
30	332.110	-14.575	-13.306	-15.206	1.900
40	340.006	-14.614	-13.622	-15.246	1.624
50	347.606	-11.808	-13.927	-12.319	-1.608

K型最大せん断力(Q_{kmax})

$$Q_{kmax} = 1.900 \text{ (kN/m)}$$

これを1Ring当りに換算すると

$$Q_{kmax} = Q_{kmax} \cdot B = 1.900 \times 1000 = 1900 \text{ (N/Ring)}$$

となり、これより使用ボルトのせん断応力度 σ_B を求める。

$$\begin{aligned} \sigma_B &= \frac{Q_{kmax}}{n_{sb} \cdot A_b} \\ &= \frac{1900}{4 \times 314} \\ &= 1.5 \text{ (N/mm}^2\text{)} \end{aligned}$$

(2) 最大せん断力

$$\text{最大せん断力 } Q_{\max} = -14.614 \text{ (kN)} = 40$$

$$\text{これをリング当りに換算すると } Q_{\max} = -14.614 \times 1000 = -14614 \text{ (N/Ring)}$$

となり、これにより使用ボルトのせん断応力度 B を求める。

$$B = \frac{Q_{\max}}{n_{sb} \cdot A_b} = \frac{14614}{4 \times 314}$$

$$= 11.6 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

以下に各応力度についての照査をしめす。

B1	: 正曲げに対する引張応力度	-79.6 (N/mm ²)
KB	: K型せん断応力度	1.5 (N/mm ²)
B	: 最大せん断力	11.6 (N/mm ²)

強度区分	許容引張応力度 baN/mm ²	許容せん断応力度 baN/mm ²	照査
4.6	120.0	90.0	OK
6.8	210.0	150.0	OK
8.8	290.0	200.0	OK
10.9	380.0	270.0	OK