

受付 No.

台帳 No. RL444000



C Y - S Y S T E M

パワーボックスカルバート

設 計 計 算 書



○内空寸法 : 内 幅(B) 1400 mm
内 高(H) 1200 mm
長 さ(L) 2000 mm

○設計条件 : 荷 重 T' 荷重 (横断)

土被り H1= 0.200 m
H2= 3.000 m

千 葉 窯 業 株 式 会 社

1 設計条件

1.1 一般条件

構造形式	: 一径間ボックスラーメン
内空寸法	: (B) 1400 × (H) 1200 × (L) 2000 [mm]
土被り	: H1 = 0.200 ~ H2 = 3.000 [m]
道路舗装厚	: t = 0.200 [m]
路盤厚	: t _b = 0.000 [m]

1.2 単位容積重量

舗装材	: $\gamma_a = 22.5$ [kN/m ³]
路盤材 (地下水位以上)	: $\gamma_b = 19.0$ [kN/m ³]
路盤材 (地下水位以下)	: $\gamma_{bw} = 10.0$ [kN/m ³]
鉄筋コンクリート	: $\gamma_c = 24.5$ [kN/m ³]
土 (地下水位以上)	: $\gamma_s = 18.0$ [kN/m ³]
土 (地下水位以下)	: $\gamma_w = 9.0$ [kN/m ³]

1.3 土圧係数 (水平)	: $K_a = 0.500$
(鉛直)	: $\alpha = 1.000$

1.4 活荷重 (上載)	: T' 荷重 横断通行 (輪接地幅 a = 0.20m b = 0.50m)
(側載)	: Q = 10.0 [kN/m ²]

1.5 衝撃係数	: i = 0.300
----------	-------------

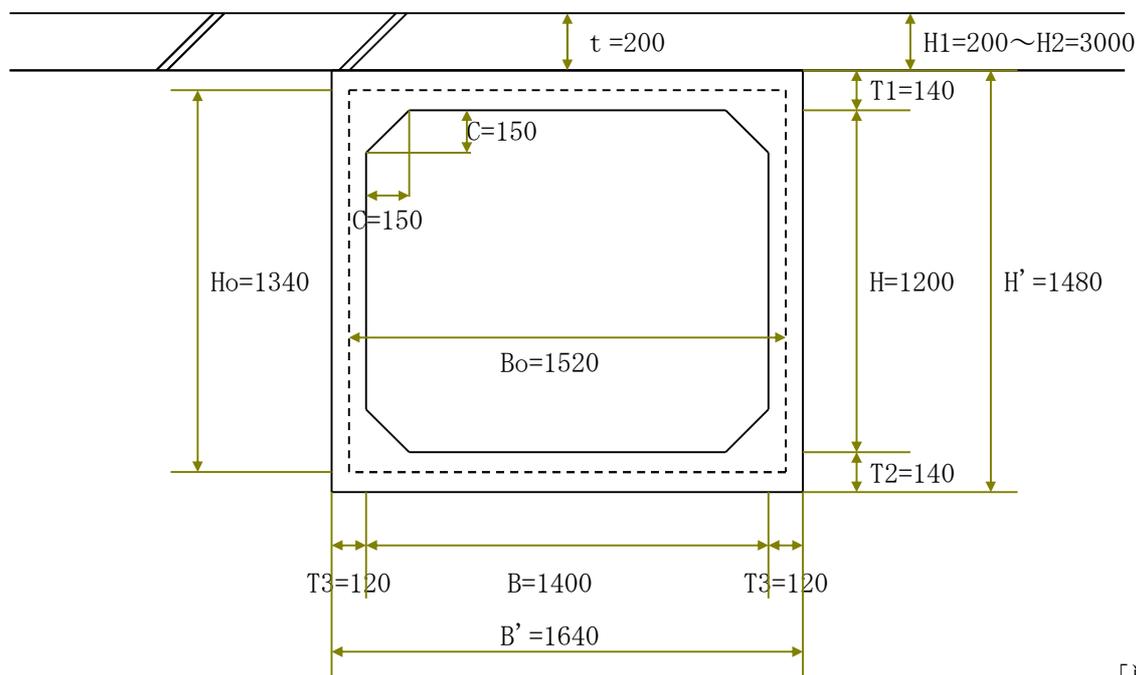
1.6 鉄筋かぶり	: 頂版 底版 側壁
	: (内側) 35 mm 35 mm 35 mm
	: (外側) 35 mm 35 mm 35 mm

1.7 断面力低減係数 (土被り H1)	: $\beta = 0.9$
(土被り H2)	: $\beta = 0.9$

1.8 許容応力度

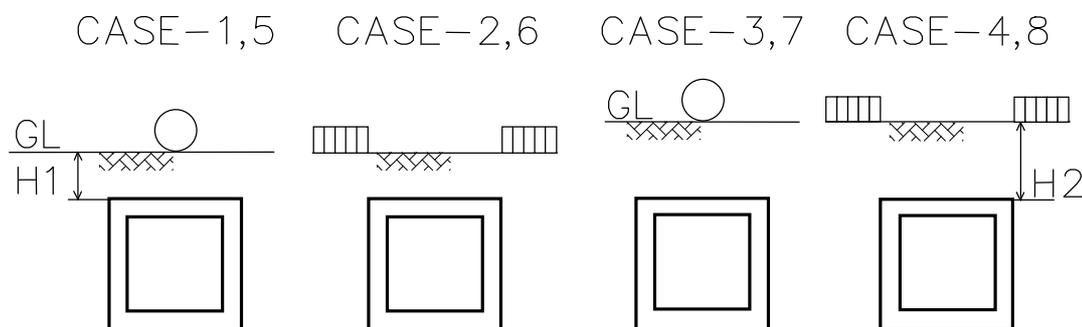
鉄筋引張応力度	: $\sigma_{sa} = 160$ [N/mm ²]
鉄筋降伏点応力度	: $\sigma_{sy} = 295$ [N/mm ²]
コンクリート	
設計基準強度	: $\sigma_{ck} = 40.0$ [N/mm ²]
曲げ圧縮応力度	: $\sigma_{ca} = 14.0$ [N/mm ²]
せん断応力度	: $\tau_a = 0.270$ [N/mm ²]

1.9 標準断面図



[単位:mm]

1.10 荷重の組合せ



[荷重 CASE]

CASE 1, 3, 5, 7は、荷重がカルバート上載の場合

CASE 2, 4, 6, 8は、荷重がカルバート側載の場合

また

CASE 1, 2, 5, 6は、土被りH1の場合

CASE 3, 4, 7, 8は、土被りH2の場合

また

CASE 1, 2, 3, 4は、地下水の影響が無い場合

CASE 5, 6, 7, 8は、地下水の影響が有る場合

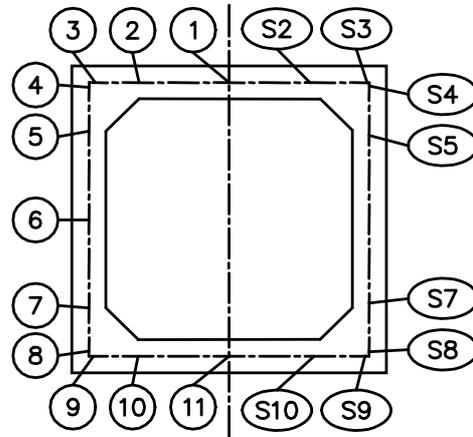
■ 本設計書は、CASE-1, 2, 3, 4 について行う。

2 断面力計算

ボックスカルバートの曲げモーメント及びせん断力照査位置

曲げモーメント

せん断力



1) 断面検討用曲げモーメント



2) せん断力に対する照査



b)について

ハンチにある場合の部材断面の高さは、ハンチにかかっている部分C'の1/3まで大きくとります。

$$h' = T + C'/3$$

2.1.1 設計荷重 (CASE - 1)

(1) 頂版自重

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 3.430 \text{ kN/m}^2$$

(2) 土圧

① 鉛直土圧

$$P_{vd2} = \alpha \times \{ \gamma_s \times (H1 - t - tb) + \gamma_a \times t + \gamma_b \times tb \} = 4.500 \text{ kN/m}^2$$

② 水平土圧

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times tb + \gamma_s \times (H1 - t - tb + T1/2) \} = 2.880 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times tb + \gamma_s \times (H1 - t - tb + T1/2 + H_o) \} = 14.940 \text{ kN/m}^2$$

(3) 活荷重

$$\text{① 輪分布幅 } \begin{aligned} u &= a + 2 \times H1 = 0.600 \text{ m} \\ v &= b + 2 \times H1 = 0.900 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\text{② 活荷重 } \begin{aligned} P1 &= 0.4 \times T \times (1 + i) \times \beta = 117.000 \text{ kN} \\ P_{v1} &= 2 \times P1 / 2.75 / u = 141.818 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

(4) 底版反力

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + \{ P_{v1} \times u + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) \} / B_o = 69.820 \text{ kN/m}^2$$

[荷重図]



2.1.2 構造解析 (CASE - 1)

ボックスカルバートの断面力の算定は、ラーメン構造として解析する。
 なお、ラーメン解析は、部材節点の剛域を考慮しないたわみ角法
 によって行う。

(1) ラーメン計算

① 係数

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.400$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.400$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 3.400, \quad N_2 = 2 + \beta = 3.400$$

② 荷重項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 13.443 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBC = \{2 \times (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^3 + P_{v1} \times u \times (3 \times B_o^2 - u^2)\} / (24 \times B_o) = 16.854 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd1} + 3 \times P_{hd2}) / 60 = 1.514 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd2} + 3 \times P_{hd1}) / 60 = 1.153 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -5.328 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 6.185 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -5.984 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 5.984 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 8.195 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -8.195 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.1.3 各部材の断面力 (CASE - 1)

(1) 頂版

① せん断力

$$S_{XBC} = \{(P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o + P_{v1} \times u\} / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2}) \times x = 46.947 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{\max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times u \times (B_o / 2 - u / 4) / 2 + M_{BC} = 20.047 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 38.750 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{\max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 14.180 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側壁

① せん断力

$$S_{XAB} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 2.792 \text{ kN}$$

$$S_{XBA} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = -5.494 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

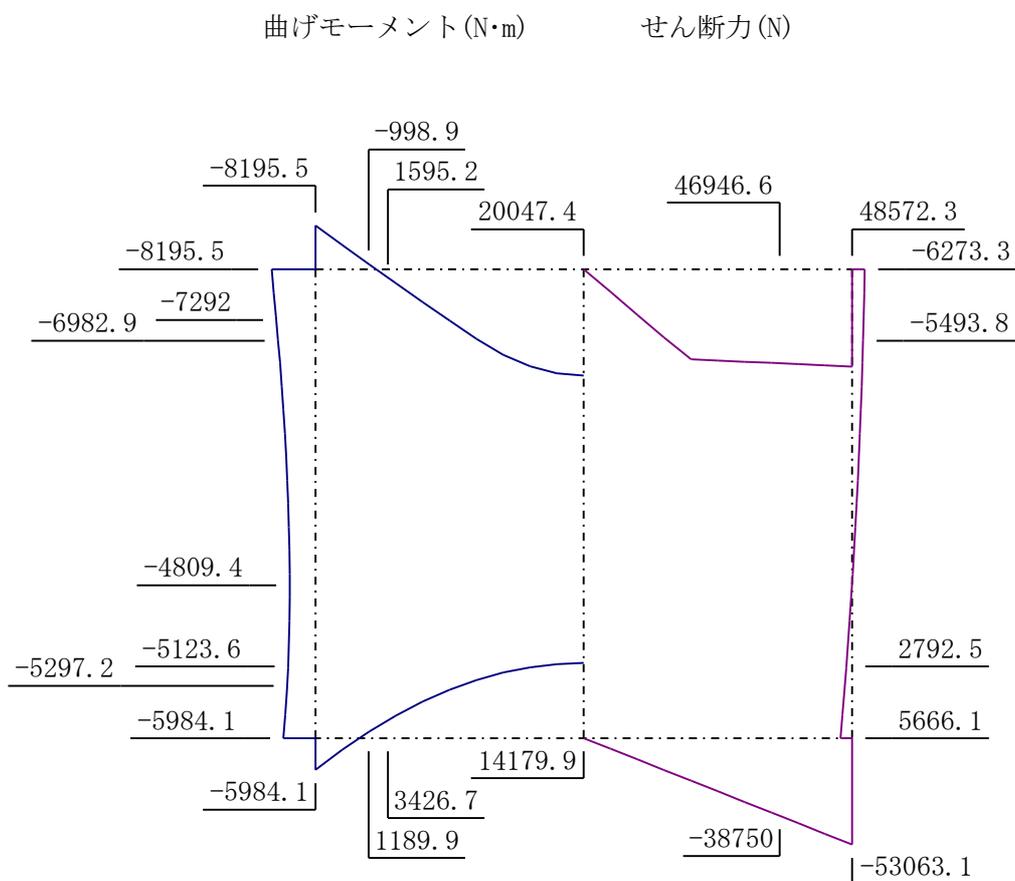
接点間の極値は、せん断力が0となる地点に生じる。

$$S_x = S_{AB} - P_{hd2} \times x - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 0$$

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。 } x = 0.437 \text{ m}$$

$$M_{\max} = S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} = -4.809 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

		[/ 単位長]			
部材	照査点	距離 x (m)	曲げモーメント M (N*m)	せん断力 S (N)	軸力 N (N)
頂版	3, S3 端部	0.060	-8196	48572	6273
	2 ハチ始点	0.210	-999	*****	6273
	S2 τ点	0.205	1595	46947	6273
	1 中央	0.760	20047	0	6273
底版	9, S9 端部	0.060	-5984	53063	5666
	10 ハチ始点	0.210	1190	*****	5666
	S10 τ点	0.205	3427	38750	5666
	11 中央	0.760	14180	0	5666
側壁	4, S4 上端部	1.270	-8196	-6273	48572
	5 上ハチ点	1.120	-7292	*****	49075
	S5 上τ点	1.135	-6983	-5494	49259
	6 中間	0.437	-4809	0	51599
	S7 下τ点	0.205	-5124	2793	52376
	7 下ハチ点	0.220	-5297	*****	52560
	8, S8 下端部	0.070	-5984	5666	53063



2.2.1 設計荷重 (CASE - 2)

(1) 頂版自重

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 3.430 \text{ kN/m}^2$$

(2) 土圧

① 鉛直土圧

$$P_{vd2} = \alpha \times \{ \gamma_s \times (H1 - t - t_b) + \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b \} = 4.500 \text{ kN/m}^2$$

② 水平土圧

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2) \} + P_q = 7.880 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} + P_q = 19.940 \text{ kN/m}^2$$

ここに、 P_q はカルバート側面に作用する活荷重による水平土圧で
 $P_q = K_a \times 10.0 = 5.0 \text{ kN/m}^2$ とする。

(3) 活荷重

$$P_{v1} = 0$$

(4) 底版反力

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 13.839 \text{ kN/m}^2$$

[荷重図]



2.2.2 構造解析 (CASE - 2)

ボックスカルバートの断面力の算定は、ラーメン構造として解析する。
 なお、ラーメン解析は、部材節点の剛域を考慮しないたわみ角法
 によって行う。

(1) ラーメン計算

① 係数

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.400$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.400$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 3.400, \quad N_2 = 2 + \beta = 3.400$$

② 荷重項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 2.664 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 1.527 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times Phd_1 + 3 \times Phd_2) / 60 = 2.262 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times Phd_2 + 3 \times Phd_1) / 60 = 1.901 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -0.094 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -0.082 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -2.533 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 2.533 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 1.642 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -1.642 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.2.3 各部材の断面力 (CASE - 2)

(1) 頂版

① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 4.401 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + M_{BC} = 0.648 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = -5.504 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 1.464 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側壁

① せん断力

$$\begin{aligned} S_{XAB} &= P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ &\quad - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ &\quad - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 7.432 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{XBA} &= P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ &\quad - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ &\quad - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = -5.504 \text{ kN} \end{aligned}$$

② 曲げモーメント

接点間の極値は、せん断力が0となる地点に生じる。

$$S_x = S_{AB} - P_{hd2} \times x - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 0$$

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 0.669 \text{ m}$$

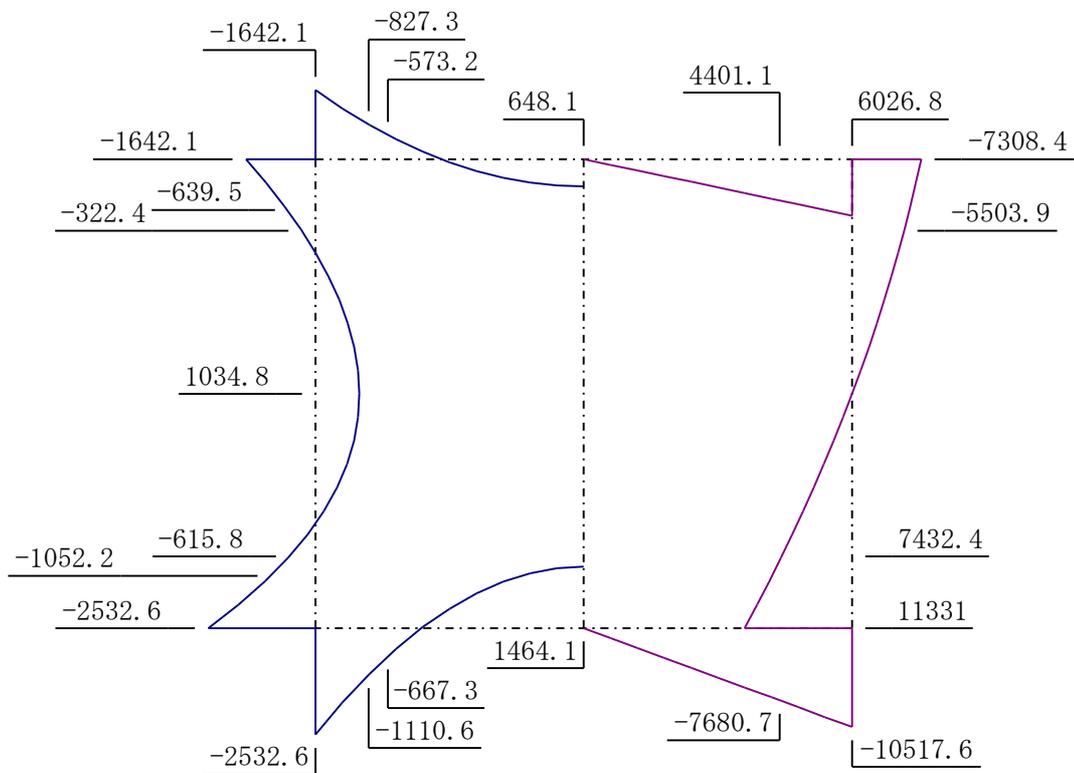
$$\begin{aligned} M_{max} &= S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 \\ &\quad - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} = 1.035 \text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

[/ 単位長]

部材	照査点	距離 x (m)	曲げモーメント M (N*m)	せん断力 S (N)	軸力 N (N)
頂版	3, S3 端部	0.060	-1642	6027	7308
	2 ハチ始点	0.210	-827	*****	7308
	S2 τ点	0.205	-573	4401	7308
	1 中央	0.760	648	0	7308
底版	9, S9 端部	0.060	-2533	10518	11331
	10 ハチ始点	0.210	-1111	*****	11331
	S10 τ点	0.205	-667	7681	11331
	11 中央	0.760	1464	0	11331
側壁	4, S4 上端部	1.270	-1642	-7308	6027
	5 上ハチ点	1.120	-640	*****	6530
	S5 上τ点	1.135	-322	-5504	6714
	6 中間	0.669	1035	0	8276
	S7 下τ点	0.205	-616	7432	9831
	7 下ハチ点	0.220	-1052	*****	10015
	8, S8 下端部	0.070	-2533	11331	10518

曲げモーメント (N・m)

せん断力 (N)



2.3.1 設計荷重 (CASE - 3)

(1) 頂版自重

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 3.430 \text{ kN/m}^2$$

(2) 土圧

① 鉛直土圧

$$P_{vd2} = \alpha \times \{ \gamma_s \times (H2 - t - t_b) + \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b \} = 54.900 \text{ kN/m}^2$$

② 水平土圧

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2) \} = 28.080 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} = 40.140 \text{ kN/m}^2$$

(3) 活荷重

$$\begin{aligned} \text{① 輪分布幅} \quad u &= a + 2 \times H2 = 6.200 \text{ m} \\ v &= b + 2 \times H2 = 6.500 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{② 活荷重} \quad P1 &= 0.4 \times T \times (1 + i) \times \beta = 117.000 \text{ kN} \\ P_{v1} &= 2 \times P1 / 2.75 / u = 13.724 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

(4) 底板反力

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 77.963 \text{ kN/m}^2$$

[荷重図]



2.3.2 構造解析 (CASE - 3)

ボックスカルバートの断面力の算定は、ラーメン構造として解析する。
 なお、ラーメン解析は、部材節点の剛域を考慮しないたわみ角法
 によって行う。

(1) ラーメン計算

① 係数

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.400$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.400$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 3.400, \quad N_2 = 2 + \beta = 3.400$$

② 荷重項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 15.011 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 13.873 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd1} + 3 \times P_{hd2}) / 60 = 5.284 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd2} + 3 \times P_{hd1}) / 60 = 4.924 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -3.979 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 3.803 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -9.440 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 9.440 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 8.550 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -8.550 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.3.3 各部材の断面力 (CASE - 3)

(1) 頂版

① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 39.990 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + M_{BC} = 12.260 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 43.270 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 13.076 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側壁

① せん断力

$$S_{XAB} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 16.825 \text{ kN}$$

$$S_{XBA} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = -14.897 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

接点間の極値は、せん断力が0となる地点に生じる。

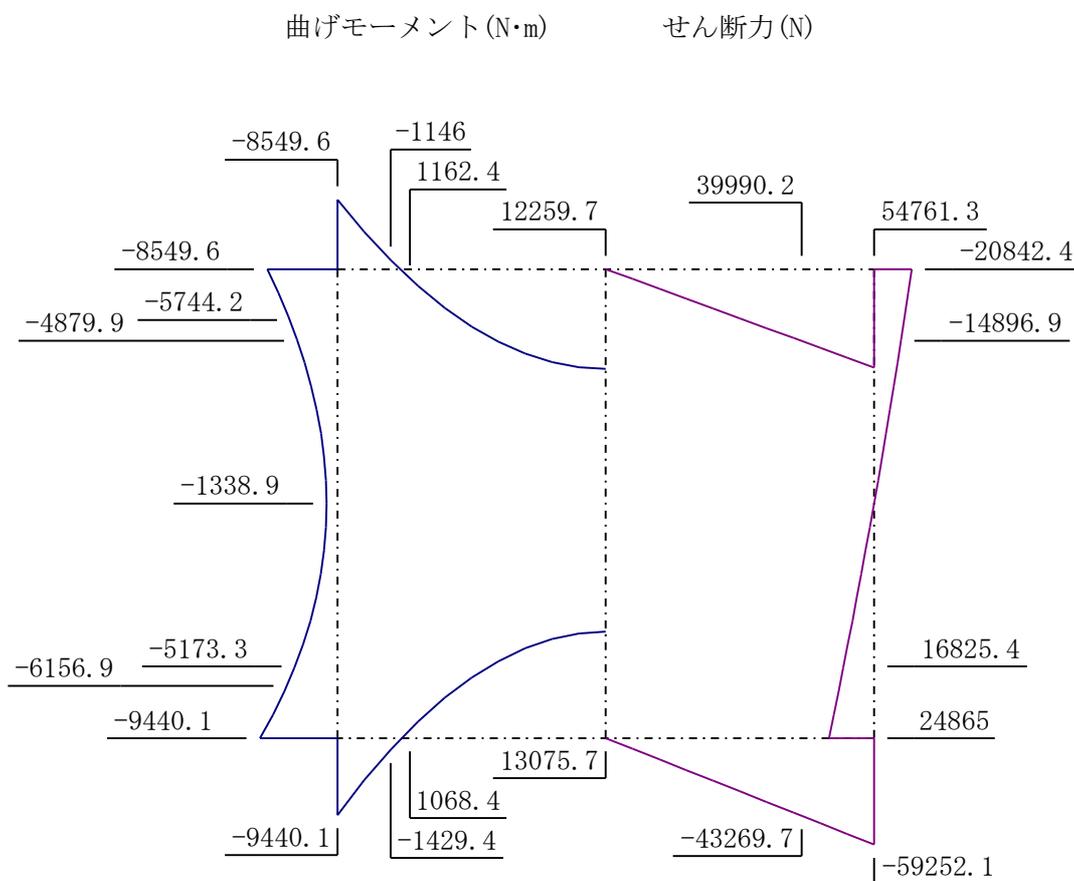
$$S_x = S_{AB} - P_{hd2} \times x - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 0$$

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 0.670 \text{ m}$$

$$M_{max} = S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} = -1.339 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[/ 単位長]

部材	照査点	距離 x (m)	曲げモーメント M (N*m)	せん断力 S (N)	軸力 N (N)
頂版	3, S3 端部	0.060	-8550	54761	20842
	2 ハチ始点	0.210	-1146	*****	20842
	S2 τ点	0.205	1162	39990	20842
	1 中央	0.760	12260	0	20842
底板	9, S9 端部	0.060	-9440	59252	24865
	10 ハチ始点	0.210	-1429	*****	24865
	S10 τ点	0.205	1068	43270	24865
	11 中央	0.760	13076	0	24865
側壁	4, S4 上端部	1.270	-8550	-20842	54761
	5 上ハチ点	1.120	-5744	*****	55264
	S5 上τ点	1.135	-4880	-14897	55448
	6 中間	0.670	-1339	0	57007
	S7 下τ点	0.205	-5173	16825	58565
	7 下ハチ点	0.220	-6157	*****	58749
	8, S8 下端部	0.070	-9440	24865	59252



2.4.1 設計荷重 (CASE - 4)

(1) 頂版自重

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 3.430 \text{ kN/m}^2$$

(2) 土圧

① 鉛直土圧

$$P_{vd2} = \alpha \times \{ \gamma_s \times (H2 - t - t_b) + \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b \} = 54.900 \text{ kN/m}^2$$

② 水平土圧

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2) \} + P_q = 33.080 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} + P_q = 45.140 \text{ kN/m}^2$$

ここに、 P_q はカルバート側面に作用する活荷重による水平土圧で
 $P_q = K_a \times 10.0 = 5.0 \text{ kN/m}^2$ とする。

(3) 活荷重

$$P_{v1} = 0$$

(4) 底版反力

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 64.239 \text{ kN/m}^2$$

[荷重図]



2.4.2 構造解析 (CASE - 4)

ボックスカルバートの断面力の算定は、ラーメン構造として解析する。
 なお、ラーメン解析は、部材節点の剛域を考慮しないたわみ角法
 によって行う。

(1) ラーメン計算

① 係数

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.400$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.400$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 3.400, \quad N_2 = 2 + \beta = 3.400$$

② 荷重項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 12.368 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 11.230 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd1} + 3 \times P_{hd2}) / 60 = 6.033 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd2} + 3 \times P_{hd1}) / 60 = 5.672 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -2.566 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 2.390 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -8.775 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 8.775 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 7.885 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -7.885 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.4.3 各部材の断面力 (CASE - 4)

(1) 頂版

① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 32.373 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + MBC = 8.961 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

(2) 底版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 35.653 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - MAD = 9.777 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

(3) 側壁

① せん断力

$$S_{XAB} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (MAB + MBA) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 19.150 \text{ kN}$$

$$S_{XBA} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (MAB + MBA) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = -17.222 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

接点間の極値は、せん断力が0となる地点に生じる。

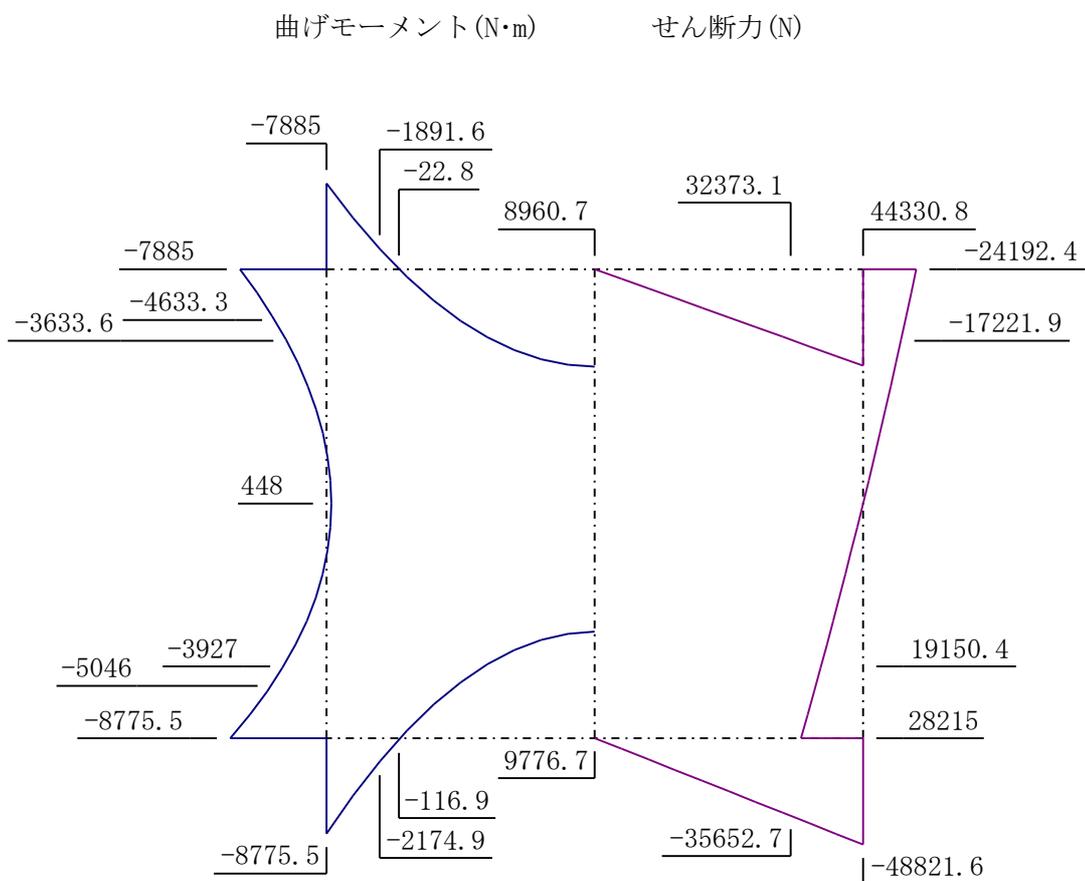
$$S_x = S_{AB} - P_{hd2} \times x - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 0$$

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。 } x = 0.670 \text{ m}$$

$$M_{max} = S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + MAB = 0.448 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

[/ 単位長]

部材	照査点	距離 x (m)	曲げモーメント M (N*m)	せん断力 S (N)	軸力 N (N)
頂版	3, S3 端部	0.060	-7885	44331	24192
	2 ハッチ始点	0.210	-1892	*****	24192
	S2 τ点	0.205	-23	32373	24192
	1 中央	0.760	8961	0	24192
底板	9, S9 端部	0.060	-8776	48822	28215
	10 ハッチ始点	0.210	-2175	*****	28215
	S10 τ点	0.205	-117	35653	28215
	11 中央	0.760	9777	0	28215
側壁	4, S4 上端部	1.270	-7885	-24192	44331
	5 上ハッチ点	1.120	-4633	*****	44834
	S5 上τ点	1.135	-3634	-17222	45018
	6 中間	0.670	448	0	46576
	S7 下τ点	0.205	-3927	19150	48135
	7 下ハッチ点	0.220	-5046	*****	48319
	8, S8 下端部	0.070	-8776	28215	48822



3 断面力集計表

各ケースより断面力の最大値を抽出する。

M	: 部材モーメント	(kN・m)
N	: 軸力	(kN)
e	: M/N 偏位量	(cm)
c	: 部材中心軸と鉄筋間距離	(cm)
Ms	: 軸力を考慮した曲げモーメント	(kN・m)

$$Ms = N \times (e + c) / 100 \quad (\text{kN}\cdot\text{m})$$

但し、軸力は

頂版端部軸力	=	側壁上端部せん断力
底版端部軸力	=	側壁下端部せん断力
側壁上端部軸力	=	頂版端部せん断力
側壁下端部軸力	=	底版端部せん断力

とし、側壁中間点の軸力は側壁自重による軸力を考慮する。

[/ 単位長]

部材	点	M (kN・m)	N (kN)	e (cm)	c (cm)	Ms (kN・m)	CASE M
	端部	-8.195	6.273	130.64	6.00	8.572	1
頂版	ハチ始点	-0.999	6.273	15.92	3.50	1.218	1
	中央	20.047	6.273	319.57	3.50	20.267	1
	端部	-9.440	24.865	37.97	6.00	10.932	3
底版	ハチ始点	1.190	5.666	21.00	3.50	1.388	1
	中央	14.180	5.666	250.26	3.50	14.378	1
	上端部	-8.195	48.572	16.87	5.00	10.624	1
	上ハチ点	-7.292	49.075	14.86	2.50	8.519	1
側壁	中間	-4.809	51.599	9.32	2.50	6.099	1
	下ハチ点	-6.157	58.749	10.48	2.50	7.626	3
	下端部	-8.775	48.822	17.97	5.00	11.217	4

注1) CASEのMは、曲げモーメント抽出ケースを示す。

4 必要有効高および必要鉄筋量

4.1 必要有効高

$$k = n \times \sigma_{ca} / (n \times \sigma_{ca} + \sigma_{sa}) = 0.568$$

$$c1 = \sqrt{[6 / \sigma_{ca} / (3 - k) / k]} = 0.557$$

$$d = c1 \times \sqrt{(Ms / b)} \quad h = d + d' < T$$

ここに、 M : 軸力を考慮した曲げモーメント (kN・m/m)
 b : 単位長 (cm)
 d' : 鉄筋かぶり (cm)
 h : 必要部材厚 (cm)
 n : ヤング係数比 (15)

4.2 必要鉄筋量

鉄筋の曲げ引張応力度が許容値(σ_{sa})に達する場合の必要鉄筋量(A_s)

$$A_s = [\sigma_c / 2 \times s - N / (b \times da)] / \sigma_{sa} \times b \times da$$

$$\begin{aligned} \therefore \sigma_c^3 + [3 \times \sigma_{sa} / (2 \times n) - 3 \times N \times (e + c) / (b \times da^2)] \times \sigma_c^2 \\ - 6 \times N \times (e + c) / (n \times b \times da^2) \times \sigma_{sa} \times \sigma_c \\ - 3 \times N \times (e + c) / (N^2 \times b \times da^2) \times \sigma_{sa}^2 = 0 \end{aligned}$$

上式を解いて σ_c を求める。また $da = T - d'$ とする。

$$\therefore s = n \times \sigma_c / (n \times \sigma_c \times \sigma_{sa})$$

部材	点	Ms (kN・m/m)	必要有効高 d (cm)	必要部材厚 d+d' (cm)	部材厚 T (cm)	必要鉄筋量 As (cm ² /m)
	端部	8.572	5.16	8.66	19.00	3.359
頂版	ハチ始点	1.218	1.94	5.44	14.00	0.368
	中央	20.267	7.93	11.43	14.00	13.893
	端部	10.932	5.83	9.33	19.00	3.277
底版	ハチ始点	1.388	2.08	5.58	14.00	0.514
	中央	14.378	6.68	10.18	14.00	9.556
	上端部	10.624	5.74	9.24	17.00	2.415
	上ハチ点	8.519	5.14	8.64	12.00	4.141
側壁	中間	6.099	4.35	7.85	12.00	1.838
	下ハチ点	7.626	4.87	8.37	12.00	2.738
	下端部	11.217	5.90	9.40	17.00	2.718
d + d' < T					CHECK OK	

5 配筋及び実応力度

実応力度は、次式により計算する。

5.1 コンクリート及び鉄筋

$$\sigma_c = N / \{ b \times x / 2 - n \times A_s / x (c + T / 2 - x) \}$$

$$\sigma_s = n \times \sigma_c / x \times (c + T / 2 - x)$$

ここに、 N : 軸力 (kN)

b : 部材幅 (cm)

T : 部材厚 (cm)

c : 部材中心軸と鉄筋間距離 (cm)

A_s : 主鉄筋断面積 (cm²/m)

x : 中心軸。次の3次元方程式より求める。 (cm)

$$x^3 - 3 \times (T / 2 - e) \times x^2$$

$$+ 6 \times n \times A_s / b \times (e + c) \times x$$

$$- 6 \times n \times A_s / b \times (c + T / 2)$$

$$\times (e + c) = 0$$

e : 偏位量 (M / N) (cm)

配筋(製品当り)

頂版内側	頂版外側	底版内側	底版外側	側壁内側	側壁外側
D 16 - 16	D 10 - 16	D 16 - 8	D 10 - 16	D-0 - 0	D 10 - 16
D 0 - 0	D 0 - 0	D 13 - 8	D 0 - 0	D 0 - 0	D 0 - 0

部材	点	部材幅 b (cm)	使用鉄筋量 A _s (cm ² /m)	x (cm)	実 応 力 度 (N/mm ²) σ _c	σ _s	σ _s '
頂版	端 部	100.00	5.706	4.566	2.69	96.5	0.0
	ハチ始点	100.00	5.706	4.413	0.61	12.7	0.0
	中 央	100.00	15.888	5.130	8.99	141.2	0.0
底版	端 部	100.00	5.706	5.095	3.11	95.2	0.0
	ハチ始点	100.00	13.012	5.497	0.58	8.0	0.0
	中 央	100.00	13.012	4.801	6.73	119.8	0.0
側壁	上端部	100.00	5.706	5.442	3.34	74.2	0.0
	上ハチ点	100.00	5.706	3.741	6.28	119.8	0.0
	中 間	100.00	5.706	4.257	4.05	60.5	0.0
	下ハチ点	100.00	5.706	4.093	5.22	84.3	0.0
	下端部	100.00	5.706	5.340	3.58	82.2	0.0

$$\sigma_c < \sigma_{ca} \quad \sigma_s < \sigma_{sa}$$

CHECK OK

6 せん断力に対する検討

6.1 せん断力照査点の断面力と最大値抽出

部材	断面力	CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5	CASE-6	CASE-7	CASE-8
頂版 τ点	S	46.947	4.401	39.990	32.373				
	M	1.595							
	N	6.273							
	最大	○							
底版 τ点	S	38.750	7.681	43.270	35.653				
	M			1.068					
	N			24.865					
	最大			○					
側壁上 τ点	S	-5.494	-5.504	-14.897	-17.222				
	M				-3.634				
	N				45.018				
	最大				○				
側壁下 τ点	S	2.792	7.432	16.825	19.150				
	M				-3.927				
	N				48.135				
	最大				○				

ここに、S：せん断力(kN)、M：モーメント(kN・m)、N：軸力(kN)を示す。

6.2 せん断応力度の照査

コンクリートのせん断応力度は、平均せん断応力度として算出する。

$$\tau = \frac{S}{b \cdot d} \times 10 < C_e \cdot C_{pt} \cdot C_N \cdot \tau_a$$

ここに、 S : せん断力 (kN)
d : 有効高さ (cm)
b : 部材幅 (cm)

各せん断応力度照査位置の許容せん断応力度は、以下の補正係数を乗じて求める。

① 部材断面の有効高 d の影響

次表に示す部材断面の有効高さに関する補正係数(Ce)をτaに乘じる。

有効高さ (m)	0.3 以下	1.0	3.0	5.0	10.0 以上
補正係数(Ce)	1.4	1.0	0.7	0.6	0.5

② 軸方向引張鉄筋比の影響

次表に示す軸方向引張鉄筋比に関する補正係数(Cpt)をτaに乘じる。

鉄筋比は中立軸よりも引張側にある軸方向鉄筋の断面積の総和をbdで除して求める。

引張鉄筋比 (%)	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0 以上
補正係数(Cpt)	0.7	0.9	1.0	1.2	1.5

③ 軸方向圧縮力の影響

軸方向圧縮力が大きな部材の場合、次式により計算される軸方向圧縮力による補正係数(Cn)を τa に乗じる。

$$C_n = 1 + M_o/M \quad M_o = N/A_c \cdot I_c/y \quad \text{ただし、} 1 \leq C_n \leq 2$$

ここに、Cn：軸方向力による補正係数

M_o：軸方向力によりコンクリートの応力度が引張縁で0となる曲げモーメント(kN・m)

M：断面に作用する曲げモーメント(kN・m)

N：断面に作用する軸方向圧縮力(kN)

I_c：図心軸に関する断面二次モーメント(m⁴)

A_c：部材断面積(m²)

y：断面図心より引張縁までの距離(m)

補正係数①、②を求める。

照査位置	部材厚 T (m)	かぶり d' (m)	有効高 d (m)	C _e	引張鉄筋		鉄筋比 P _t (%)	C _{pt}
					径-本数	A _s (cm ²)		
頂版 τ 点	0.140	0.035	0.106667	1.400	D16-8	15.888	1.489	1.500
底版 τ 点	0.140	0.035	0.106667	1.400	D16-4 D13-4	13.012	1.220	1.500
側壁上 τ 点	0.125	0.035	0.090000	1.400	D10-8	5.706	0.634	1.280
側壁下 τ 点	0.125	0.035	0.090000	1.400	D10-8	5.706	0.634	1.280

補正係数③を求める。

照査位置	M (kN・m)	N (kN)	A _c (m ²)	I _c (m ⁴)	y (m)	M _o (kN・m)	C _n
頂版 τ 点	1.595	6.273	0.14000	0.000229	0.07000	0.147	1.092
底版 τ 点	1.068	24.865	0.14000	0.000229	0.07000	0.581	1.544
側壁上 τ 点	-3.634	45.018	0.12500	0.000163	0.06250	0.939	1.258
側壁下 τ 点	-3.927	48.135	0.12500	0.000163	0.06250	1.004	1.256

補正した許容せん断応力度

照査位置	τa	補正係数			補正 τa
		C _e	C _{pt}	C _n	
頂版 τ 点	0.270	1.400	1.500	1.092	0.619
底版 τ 点	0.270	1.400	1.500	1.544	0.875
側壁上 τ 点	0.270	1.400	1.280	1.258	0.609
側壁下 τ 点	0.270	1.400	1.280	1.256	0.608

せん断応力度の照査

照査位置	せん断力 S (kN)	応力度 τ (N/mm ²)	補正 τa (N/mm ²)	判定
頂版 τ 点	46.947	0.440	0.619	OK
底版 τ 点	43.270	0.406	0.875	OK
側壁上 τ 点	17.222	0.191	0.609	OK
側壁下 τ 点	19.150	0.213	0.608	OK

以上