

受付 No.

台帳 No. RL407000



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) 700 mm
内 高(H) 700 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) 700 × (H) 700 × (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
----------	-------------

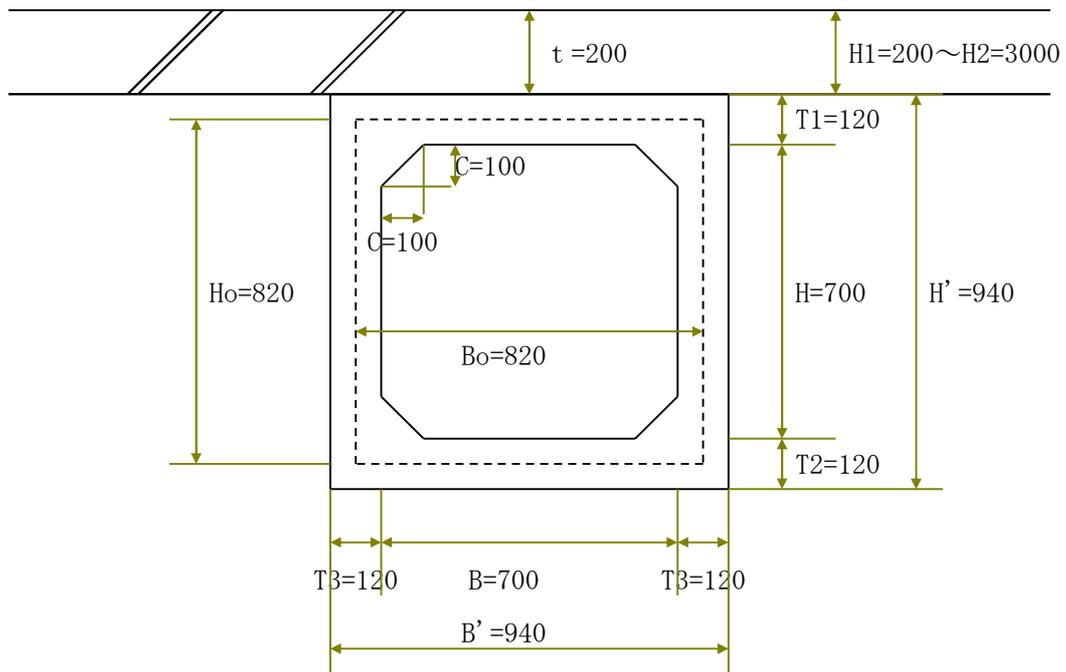
1.6 鉄筋かぶり	: 頂版 底版 側壁
	: (内側) 35 mm 35 mm 35 mm
	: (外側) 35 mm 35 mm 35 mm

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

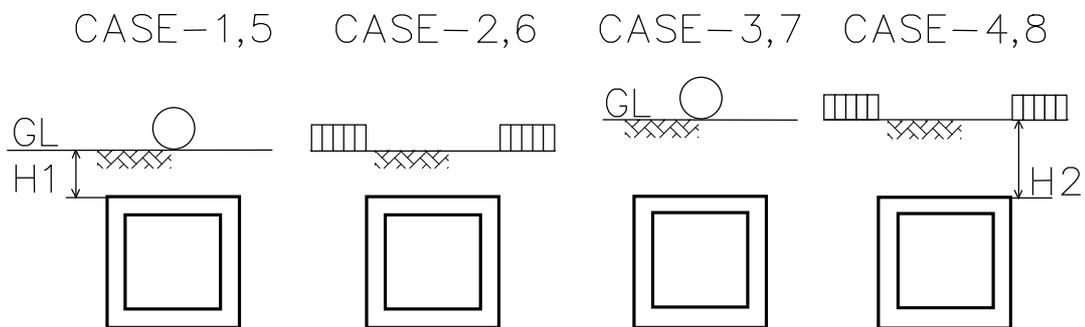
鉄筋引張応力度	: $\sigma_{sa} = 160$ [N/mm ²]
鉄筋降伏点応力度	: $\sigma_{sy} = 295$ [N/mm ²]
コンクリート	
設計基準強度	: $\sigma_{ck} = 40.0$ [N/mm ²]
曲げ圧縮応力度	: $\sigma_{ca} = 14.0$ [N/mm ²]
せん断応力度	: $\tau_a = 0.270$ [N/mm ²]

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。

2.1.1 設計荷重 (CASE - 1)

(1) 頂版自重

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 2.940 \text{ kN/m}^2$$

(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

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2) \} = 2.790 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} = 10.170 \text{ kN/m}^2$$

(3) 活荷重

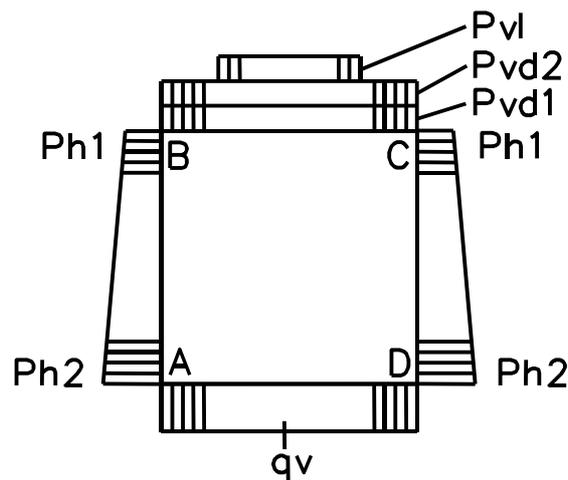
① 輪分布幅 $u = a + 2 \times H1 = 0.600 \text{ m}$
 $v = b + 2 \times H1 = 0.900 \text{ m}$

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

(4) 底版反力

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + \{ P_{v1} \times u + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) \} / B_o = 117.687 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_0 \times T_1^3) / (B_0 \times T_3^3) = 1.000$$

$$\beta = (H_0 \times T_2^3) / (B_0 \times T_3^3) = 1.000$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 3.000, \quad N_2 = 2 + \beta = 3.000$$

② 荷重項

$$CAD = q_v \times B_0^2 / 12 = 6.594 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBC = \{2 \times (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_0^3 + P_{v1} \times u \times (3 \times B_0^2 - u^2)\} / (24 \times B_0) = 7.582 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CAB = (H_0^2) \times (2 \times Phd1 + 3 \times Phd2) / 60 = 0.404 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBA = (H_0^2) \times (2 \times Phd2 + 3 \times Phd1) / 60 = 0.322 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -3.229 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 3.496 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -3.366 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 3.366 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 4.086 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -4.086 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.1.3 各部材の断面力 (CASE - 1)

(1) 頂版

① せん断力

$$S_{XBC} = \{(P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o + P_{v1} \times u\} / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x + P_{v1} = 35.822 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times u \times (B_o / 2 - u / 4) / 2 + M_{BC} = 7.601 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 28.245 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 6.526 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側壁

① せん断力

$$S_{XAB} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 0.684 \text{ kN}$$

$$S_{XBA} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = -2.426 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

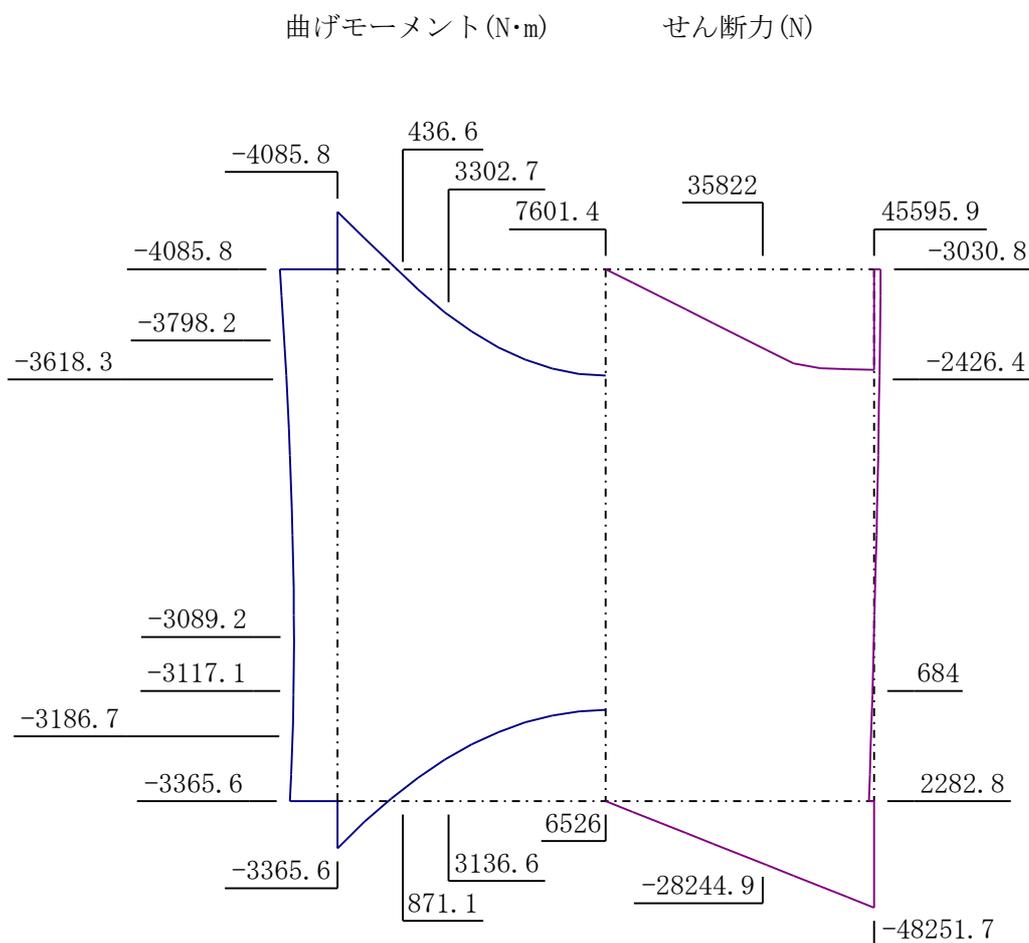
接点間の極値は、せん断力が0となる地点に生じる。

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

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。 } x = 0.253 \text{ m}$$

$$M_{max} = S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} = -3.089 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

		[/ 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	-4086	45596	3031
	2 ハチ始点	0.160	437	*****	3031
	S2 τ点	0.170	3303	35822	3031
	1 中央	0.410	7601	0	3031
底版	9, S9 端部	0.060	-3366	48252	2283
	10 ハチ始点	0.160	871	*****	2283
	S10 τ点	0.170	3137	28245	2283
	11 中央	0.410	6526	0	2283
側壁	4, S4 上端部	0.760	-4086	-3031	45596
	5 上ハチ点	0.660	-3798	*****	45920
	S5 上τ点	0.650	-3618	-2426	46146
	6 中間	0.253	-3089	0	47432
	S7 下τ点	0.170	-3117	684	47701
	7 下ハチ点	0.160	-3187	*****	47928
	8, S8 下端部	0.060	-3366	2283	48252



2.2.1 設計荷重 (CASE - 2)

(1) 頂版自重

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 2.940 \text{ kN/m}^2$$

(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

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2) \} + P_q = 7.790 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} + P_q = 15.170 \text{ kN/m}^2$$

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

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 13.918 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.000$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.000$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 3.000, \quad N_2 = 2 + \beta = 3.000$$

② 荷重項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 0.780 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 0.417 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times Phd1 + 3 \times Phd2) / 60 = 0.685 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times Phd2 + 3 \times Phd1) / 60 = 0.602 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -0.013 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -0.057 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -0.767 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 0.767 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 0.474 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -0.474 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.2.3 各部材の断面力 (CASE - 2)

(1) 頂版

① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 1.786 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + M_{BC} = 0.151 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = -2.391 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 0.403 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側壁

① せん断力

$$\begin{aligned} S_{XAB} &= P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ &\quad - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ &\quad - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 3.119 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{XBA} &= P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ &\quad - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ &\quad - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = -2.391 \text{ kN} \end{aligned}$$

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。

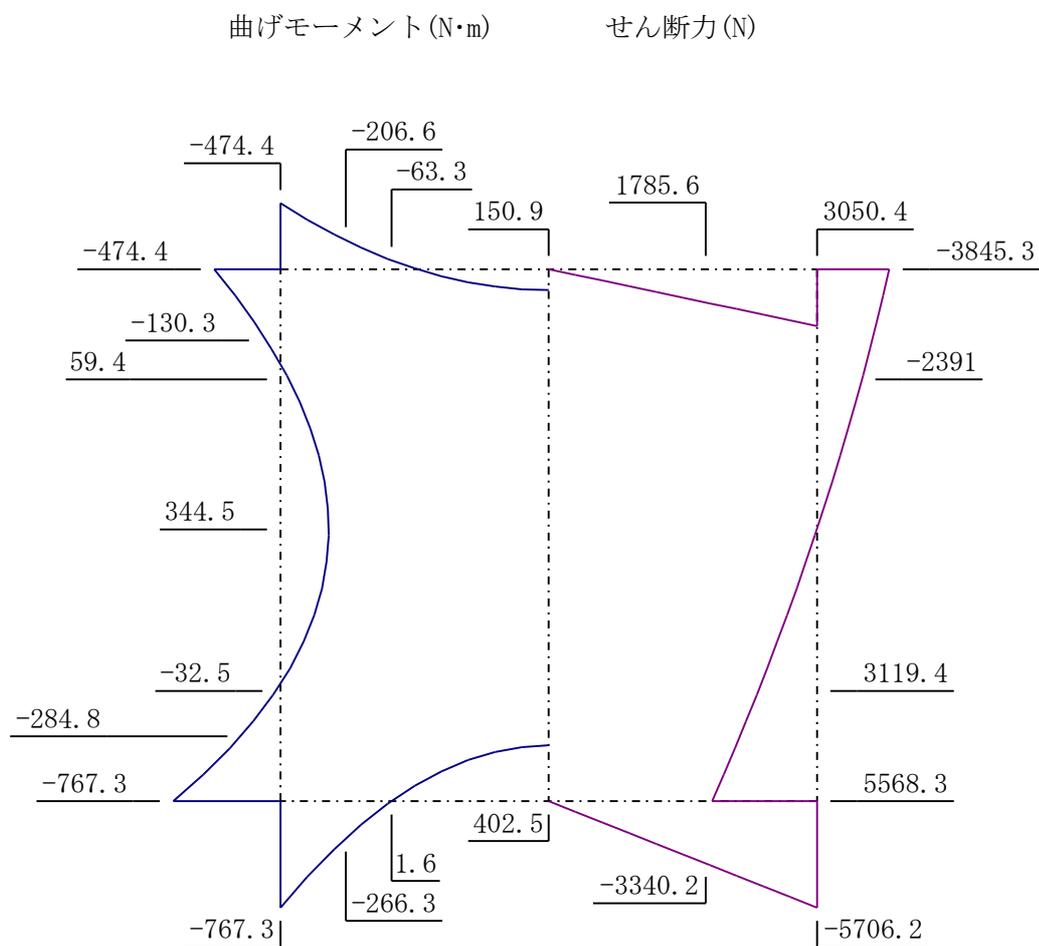
$$S_x = S_{AB} - P_{hd2} \times x - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 0$$

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 0.419 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} M_{max} &= S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 \\ &\quad - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} = 0.344 \text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

[/ 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	-474	3050	3845
	2 ハチ始点	0.160	-207	*****	3845
	S2 τ点	0.170	-63	1786	3845
	1 中央	0.410	151	0	3845
底板	9, S9 端部	0.060	-767	5706	5568
	10 ハチ始点	0.160	-266	*****	5568
	S10 τ点	0.170	2	3340	5568
	11 中央	0.410	403	0	5568
側壁	4, S4 上端部	0.760	-474	-3845	3050
	5 上ハチ点	0.660	-130	*****	3374
	S5 上τ点	0.650	59	-2391	3601
	6 中間	0.419	345	0	4349
	S7 下τ点	0.170	-33	3119	5156
	7 下ハチ点	0.160	-285	*****	5382
	8, S8 下端部	0.060	-767	5568	5706



2.3.1 設計荷重 (CASE - 3)

(1) 頂版自重

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 2.940 \text{ kN/m}^2$$

(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

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2) \} = 27.990 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} = 35.370 \text{ kN/m}^2$$

(3) 活荷重

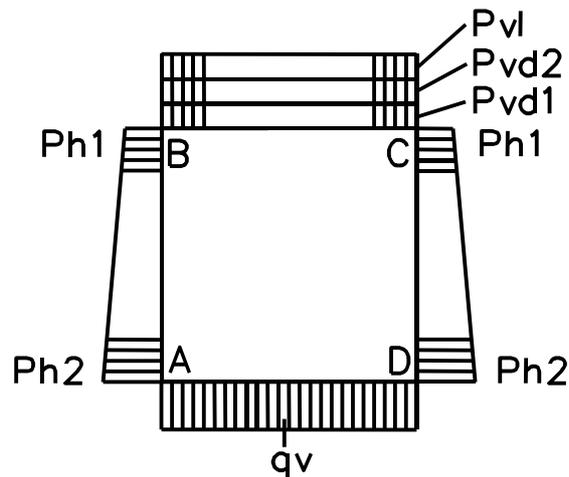
$$\begin{aligned} \text{① 輪分布幅 } u &= a + 2 \times H2 = 6.200 \text{ m} \\ v &= b + 2 \times H2 = 6.500 \text{ m} \end{aligned}$$

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

(4) 底板反力

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 78.042 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.000$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.000$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 3.000, \quad N_2 = 2 + \beta = 3.000$$

② 荷重項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 4.373 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 4.010 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd1} + 3 \times P_{hd2}) / 60 = 1.816 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd2} + 3 \times P_{hd1}) / 60 = 1.734 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -1.243 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 1.173 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -3.130 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 3.130 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 2.837 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -2.837 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.3.3 各部材の断面力 (CASE - 3)

(1) 頂版

① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 17.175 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + M_{BC} = 3.178 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

(2) 底版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 18.730 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 3.430 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

(3) 側壁

① せん断力

$$S_{XAB} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 7.967 \text{ kN}$$

$$S_{XBA} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = -7.239 \text{ kN}$$

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。

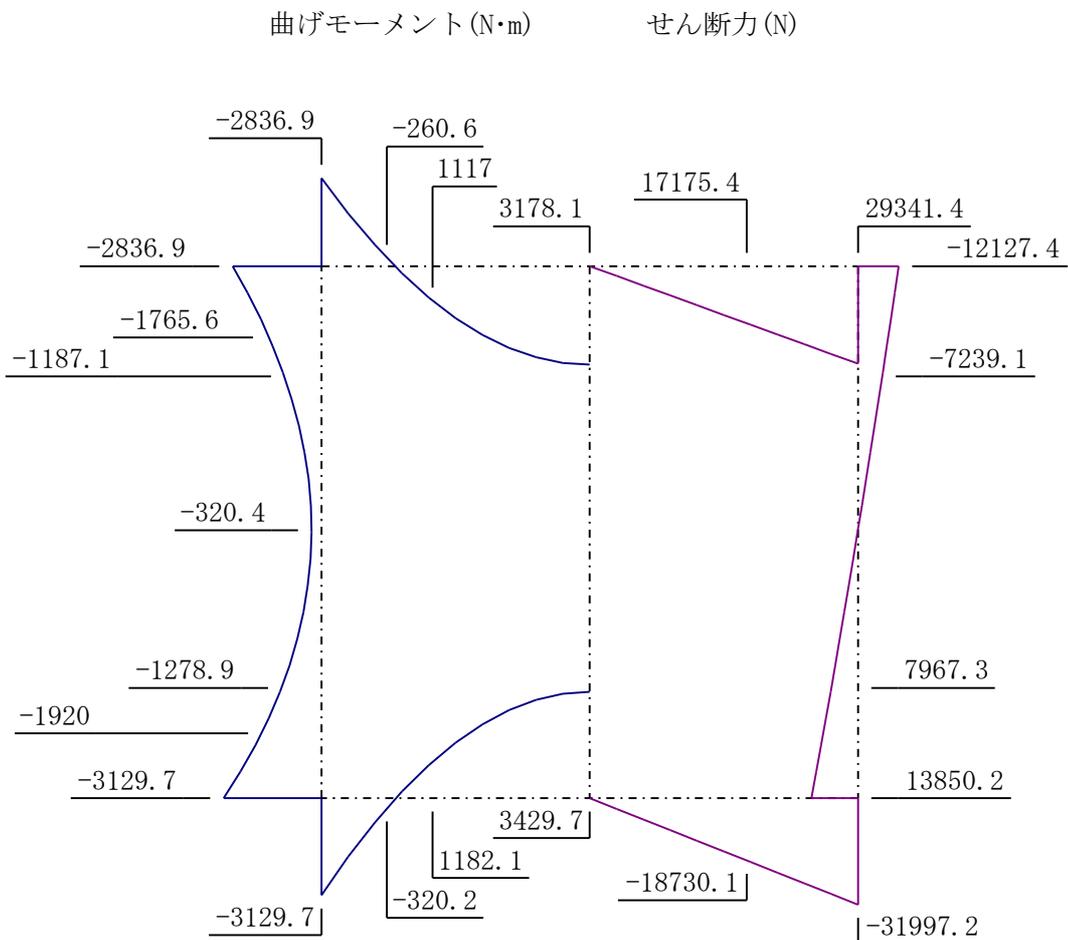
$$S_x = S_{AB} - P_{hd2} \times x - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 0$$

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 0.413 \text{ m}$$

$$M_{max} = S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} = -0.320 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

[/ 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	-2837	29341	12127
	2 ハチ始点	0.160	-261	*****	12127
	S2 τ点	0.170	1117	17175	12127
	1 中央	0.410	3178	0	12127
底板	9, S9 端部	0.060	-3130	31997	13850
	10 ハチ始点	0.160	-320	*****	13850
	S10 τ点	0.170	1182	18730	13850
	11 中央	0.410	3430	0	13850
側壁	4, S4 上端部	0.760	-2837	-12127	29341
	5 上ハチ点	0.660	-1766	*****	29665
	S5 上τ点	0.650	-1187	-7239	29892
	6 中間	0.413	-320	0	30660
	S7 下τ点	0.170	-1279	7967	31447
	7 下ハチ点	0.160	-1920	*****	31673
	8, S8 下端部	0.060	-3130	13850	31997



2.4.1 設計荷重 (CASE - 4)

(1) 頂版自重

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 2.940 \text{ kN/m}^2$$

(2) 土圧

① 鉛直土圧

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

② 水平土圧

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times tb + \gamma_s \times (H2 - t - tb + T1/2) \} + P_q = 32.990 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times tb + \gamma_s \times (H2 - t - tb + T1/2 + H_o) \} + P_q = 40.370 \text{ kN/m}^2$$

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。

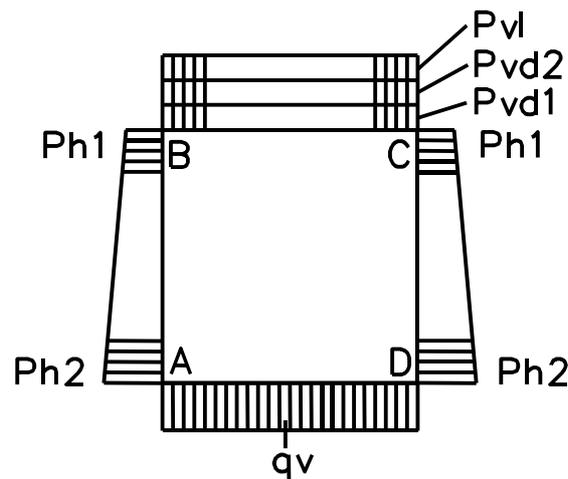
(3) 活荷重

$$P_{v1} = 0$$

(4) 底版反力

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 64.318 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.000$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.000$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 3.000, \quad N_2 = 2 + \beta = 3.000$$

② 荷重項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 3.604 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 3.241 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times Phd1 + 3 \times Phd2) / 60 = 2.097 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times Phd2 + 3 \times Phd1) / 60 = 2.014 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -0.719 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 0.649 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -2.885 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 2.885 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 2.592 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -2.592 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.4.3 各部材の断面力 (CASE - 4)

(1) 頂版

① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 13.882 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + MBC = 2.269 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 15.436 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - MAD = 2.521 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側壁

① せん断力

$$S_{XAB} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (MAB + MBA) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 9.167 \text{ kN}$$

$$S_{XBA} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (MAB + MBA) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = -8.439 \text{ kN}$$

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。

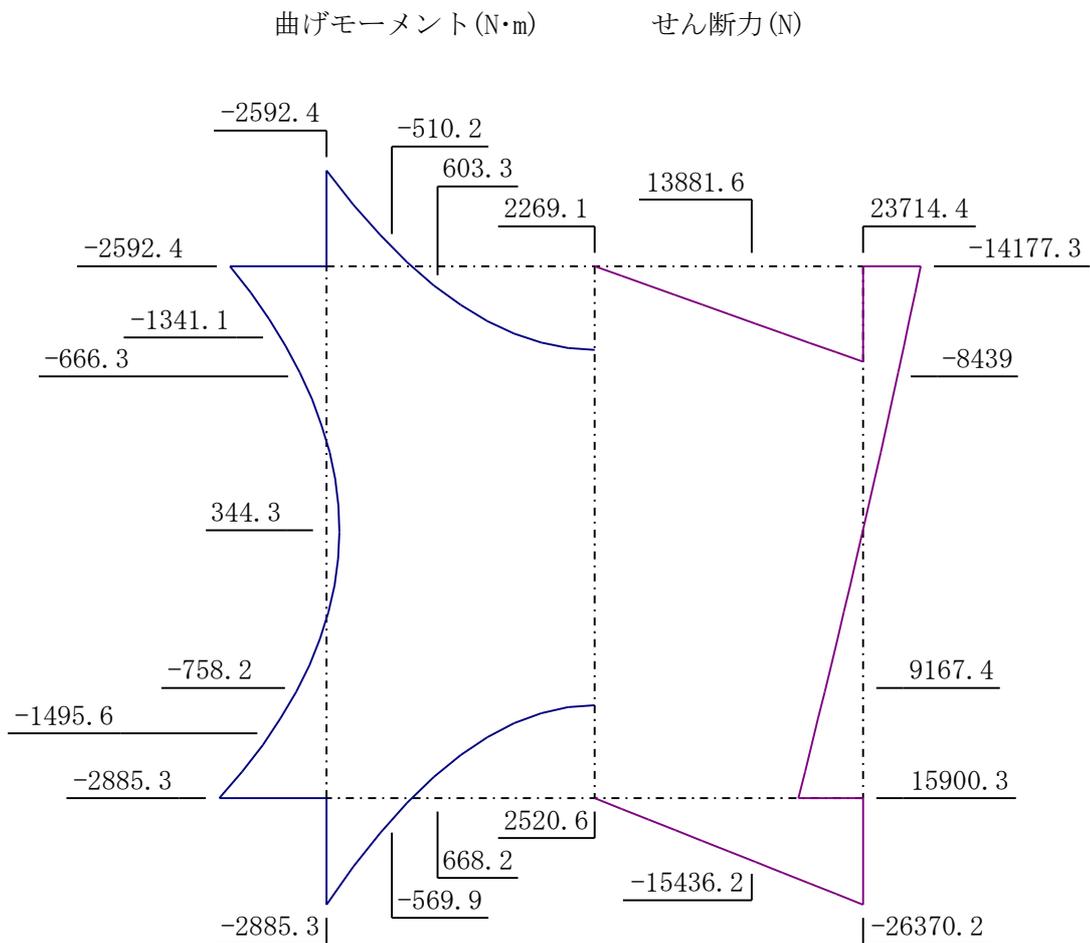
$$S_x = S_{AB} - P_{hd2} \times x - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 0$$

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 0.413 \text{ m}$$

$$M_{max} = S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + MAB = 0.344 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[/ 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	-2592	23714	14177
	2 ハチ始点	0.160	-510	*****	14177
	S2 τ点	0.170	603	13882	14177
	1 中央	0.410	2269	0	14177
底板	9, S9 端部	0.060	-2885	26370	15900
	10 ハチ始点	0.160	-570	*****	15900
	S10 τ点	0.170	668	15436	15900
	11 中央	0.410	2521	0	15900
側壁	4, S4 上端部	0.760	-2592	-14177	23714
	5 上ハチ点	0.660	-1341	*****	24038
	S5 上τ点	0.650	-666	-8439	24265
	6 中間	0.413	344	0	25033
	S7 下τ点	0.170	-758	9167	25820
	7 下ハチ点	0.160	-1496	*****	26046
	8, S8 下端部	0.060	-2885	15900	26370



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	-4.086	3.031	134.81	4.17	4.212	1
頂版	ハチ始点	0.437	3.031	14.41	2.50	0.512	1
	中央	7.601	3.031	250.81	2.50	7.677	1
	端部	-3.366	2.283	147.43	4.17	3.461	1
底版	ハチ始点	0.871	2.283	38.16	2.50	0.928	1
	中央	6.526	2.283	285.88	2.50	6.583	1
	上端部	-4.086	45.596	8.96	4.17	5.986	1
	上ハチ点	-3.798	45.920	8.27	2.50	4.946	1
側壁	中間	-3.089	47.432	6.51	2.50	4.275	1
	下ハチ点	-3.187	47.928	6.65	2.50	4.385	1
	下端部	-2.885	26.370	10.94	4.17	3.984	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	4.212	3.62	7.12	15.33	2.210
頂版	ハチ始点	0.512	1.26	4.76	12.00	0.202
	中央	7.677	4.88	8.38	12.00	6.266
	端部	3.461	3.28	6.78	15.33	1.815
底版	ハチ始点	0.928	1.70	5.20	12.00	0.575
	中央	6.583	4.52	8.02	12.00	5.345
	上端部	5.986	4.31	7.81	15.33	0.606
	上ハチ点	4.946	3.92	7.42	12.00	1.192
側壁	中間	4.275	3.64	7.14	12.00	0.521
	下ハチ点	4.385	3.69	7.19	12.00	0.584
	下端部	3.984	3.52	7.02	15.33	0.617
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 13 - 12	D 10 - 12	D 13 - 6	D 10 - 12	D-0 - 0	D 10 - 12
D 0 - 0	D 0 - 0	D 10 - 6	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	4.280	3.421	2.30	85.0	0.0
	ハチ始点	100.00	7.602	4.143	0.35	5.5	0.0
	中 央	100.00	7.602	3.446	6.06	133.4	0.0
底版	端 部	100.00	4.280	3.411	1.90	70.3	0.0
	ハチ始点	100.00	5.941	3.349	0.75	17.3	0.0
	中 央	100.00	5.941	3.133	5.64	144.8	0.0
側壁	上端部	100.00	4.280	5.694	2.12	34.2	0.0
	上ハチ点	100.00	4.280	4.094	3.39	54.7	0.0
	中 間	100.00	4.280	4.649	2.65	32.9	0.0
	下ハチ点	100.00	4.280	4.591	2.74	35.0	0.0
	下端部	100.00	4.280	5.115	1.54	30.3	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	35.822	1.786	17.175	13.882				
	M	3.303							
	N	3.031							
	最大	○							
底版 τ点	S	28.245	3.340	18.730	15.436				
	M	3.137							
	N	2.283							
	最大	○							
側壁上 τ点	S	-2.426	-2.391	-7.239	-8.439				
	M				-0.666				
	N				24.265				
	最大				○				
側壁下 τ点	S	0.684	3.119	7.967	9.167				
	M				-0.758				
	N				25.820				
	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

Mo：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)

Ic：図心軸に関する断面二次モーメント(m⁴)

Ac：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)	Ce	引張鉄筋		鉄筋比 Pt (%)	Cpt
					径-本数	As (cm ²)		
頂版 τ 点	0.120	0.035	0.085000	1.400	D13-6	7.602	0.894	1.436
底版 τ 点	0.120	0.035	0.085000	1.400	D13-3 D10-3	5.941	0.699	1.319
側壁上 τ 点	0.120	0.035	0.085000	1.400	D10-6	4.280	0.504	1.202
側壁下 τ 点	0.120	0.035	0.085000	1.400	D10-6	4.280	0.504	1.202

補正係数③を求める。

照査位置	M (kN・m)	N (kN)	Ac (m ²)	Ic (m ⁴)	y (m)	Mo (kN・m)	Cn
頂版 τ 点	3.303	3.031	0.12000	0.000144	0.06000	0.061	1.018
底版 τ 点	3.137	2.283	0.12000	0.000144	0.06000	0.046	1.015
側壁上 τ 点	-0.666	24.265	0.12000	0.000144	0.06000	0.485	1.729
側壁下 τ 点	-0.758	25.820	0.12000	0.000144	0.06000	0.516	1.681

補正した許容せん断応力度

照査位置	τa	補正係数			補正 τa
		Ce	Cpt	Cn	
頂版 τ 点	0.270	1.400	1.436	1.018	0.553
底版 τ 点	0.270	1.400	1.319	1.015	0.506
側壁上 τ 点	0.270	1.400	1.202	1.729	0.785
側壁下 τ 点	0.270	1.400	1.202	1.681	0.764

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	35.822	0.421	0.553	OK
底版 τ 点	28.245	0.332	0.506	OK
側壁上 τ 点	8.439	0.099	0.785	OK
側壁下 τ 点	9.167	0.108	0.764	OK

以上