

受付 No.

台帳 No. RM424000



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) 3000 mm
内 高(H) 1000 mm
長 さ(L) 1500 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) 3000 × (H) 1000 × (L) 1500 [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

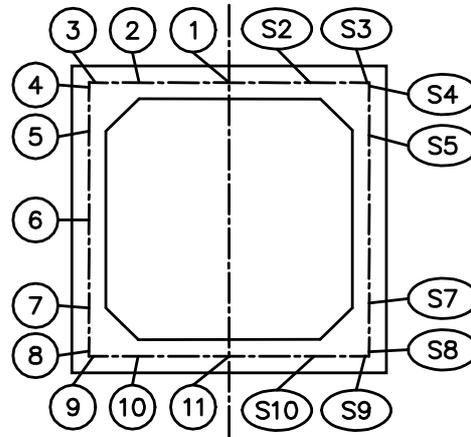
鉄筋引張応力度	: $\sigma_{sa} = 160$ [N/mm ²]
鉄筋降伏点応力度	: $\sigma_{sy} = 295$ [N/mm ²]
コンクリート	
設計基準強度	: $\sigma_{ck} = 40.0$ [N/mm ²]
曲げ圧縮応力度	: $\sigma_{ca} = 14.0$ [N/mm ²]
せん断応力度	: $\tau_a = 0.270$ [N/mm ²]

2 断面力計算

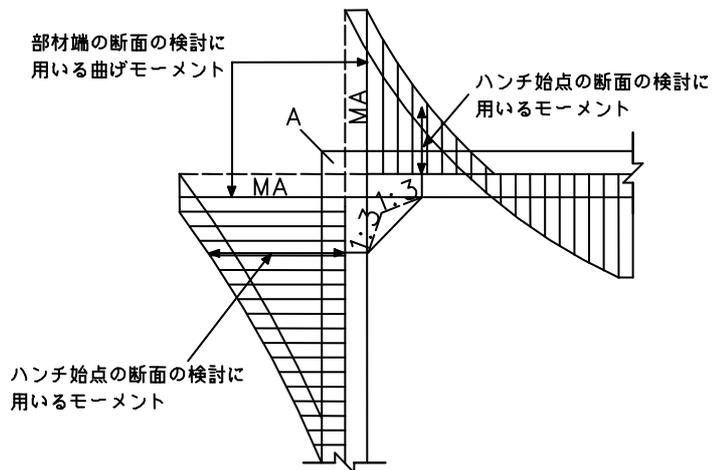
ボックスカルバートの曲げモーメント及びせん断力照査位置

曲げモーメント

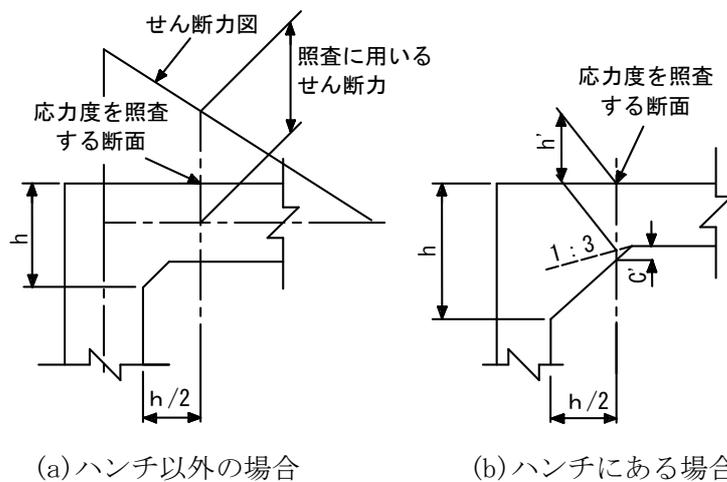
せん断力



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

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 5.390 \text{ kN/m}^2$$

(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

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2) \} = 3.240 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} = 14.220 \text{ kN/m}^2$$

(3) 活荷重

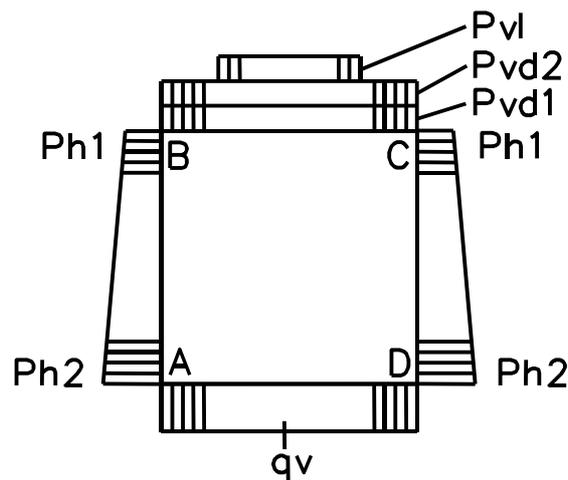
$$\text{① 輪分布幅 } \begin{aligned} u &= a + 2 \times H1 = 0.600 \text{ m} \\ v &= b + 2 \times H1 = 0.900 \text{ m} \end{aligned}$$

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

(4) 底版反力

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + \{ P_{v1} \times u + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) \} / B_o = 40.830 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_0 \times T_1^3) / (B_0 \times T_3^3) = 0.507$$

$$\beta = (H_0 \times T_2^3) / (B_0 \times T_3^3) = 0.507$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 2.507, \quad N_2 = 2 + \beta = 2.507$$

② 荷重項

$$CAD = q_v \times B_0^2 / 12 = 34.841 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBC = \{2 \times (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_0^3 + P_{v1} \times u \times (3 \times B_0^2 - u^2)\} / (24 \times B_0) = 42.077 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CAB = (H_0^2) \times (2 \times Phd1 + 3 \times Phd2) / 60 = 1.219 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBA = (H_0^2) \times (2 \times Phd2 + 3 \times Phd1) / 60 = 0.947 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -23.724 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 25.865 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -22.803 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 22.803 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 28.952 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -28.952 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.1.3 各部材の断面力 (CASE - 1)

(1) 頂版

① せん断力

$$S_{XBC} = \{(P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o + P_{v1} \times u\} / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2}) \times x = 55.304 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{\max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times u \times (B_o / 2 - u / 4) / 2 + M_{BC} = 45.398 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 52.670 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{\max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 29.459 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側壁

① せん断力

$$S_{XAB} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = -2.575 \text{ kN}$$

$$S_{XBA} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = -7.813 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

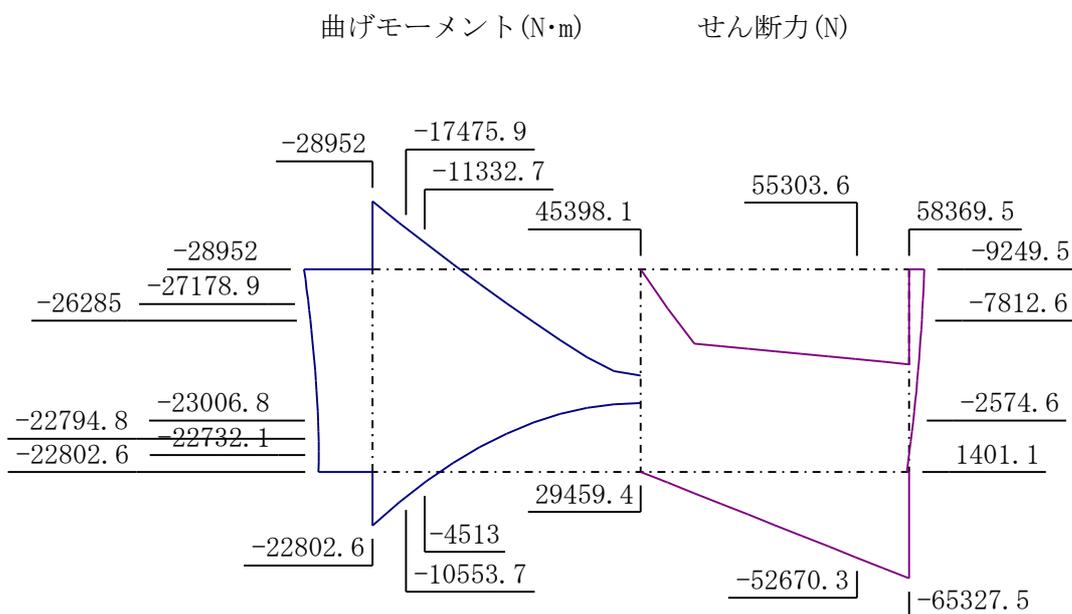
接点間の極値は、せん断力が0となる地点に生じる。

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

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。 } x = 0.102 \text{ m}$$

$$M_{\max} = S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} = -22.732 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

		[/ 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	0.100	-28952	58370	9250
	2 ハチ始点	0.300	-17476	*****	9250
	S2 τ点	0.310	-11333	55304	9250
	1 中央	1.600	45398	0	9250
底版	9, S9 端部	0.100	-22803	65328	1401
	10 ハチ始点	0.300	-10554	*****	1401
	S10 τ点	0.310	-4513	52670	1401
	11 中央	1.600	29459	0	1401
側壁	4, S4 上端部	1.110	-28952	-9250	58370
	5 上ハチ点	0.910	-27179	*****	59510
	S5 上τ点	0.910	-26285	-7813	60138
	6 中間	0.102	-22732	0	64746
	S7 下τ点	0.310	-23007	-2575	63559
	7 下ハチ点	0.310	-22795	*****	64187
	8, S8 下端部	0.110	-22803	1401	65328



2.2.1 設計荷重 (CASE - 2)

(1) 頂版自重

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 5.390 \text{ kN/m}^2$$

(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

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2) \} + P_q = 8.240 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} + P_q = 19.220 \text{ kN/m}^2$$

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

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 14.239 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 0.507$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 0.507$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 2.507, \quad N_2 = 2 + \beta = 2.507$$

② 荷 重 項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 12.150 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 8.439 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times Phd_1 + 3 \times Phd_2) / 60 = 1.839 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times Phd_2 + 3 \times Phd_1) / 60 = 1.567 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -6.190 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 5.210 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -9.009 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 9.009 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 5.796 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -5.796 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.2.3 各部材の断面力 (CASE - 2)

(1) 頂版

① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 12.758 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + M_{BC} = 6.863 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = -1.638 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 9.216 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側壁

① せん断力

$$\begin{aligned} S_{XAB} &= P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ &\quad - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ &\quad - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 6.600 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{XBA} &= P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ &\quad - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ &\quad - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = -1.638 \text{ kN} \end{aligned}$$

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。

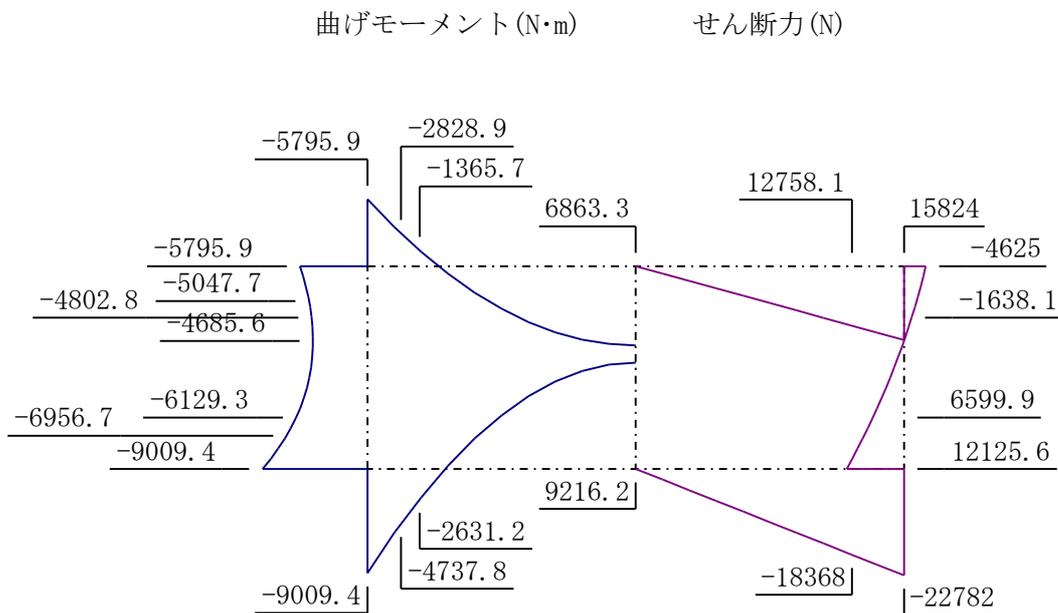
$$S_x = S_{AB} - P_{hd2} \times x - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 0$$

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 0.770 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} M_{max} &= S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 \\ &\quad - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} = -4.686 \text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

[/ 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	0.100	-5796	15824	4625
	2 ハッチ始点	0.300	-2829	*****	4625
	S2 τ点	0.310	-1366	12758	4625
	1 中央	1.600	6863	0	4625
底版	9, S9 端部	0.100	-9009	22782	12126
	10 ハッチ始点	0.300	-4738	*****	12126
	S10 τ点	0.310	-2631	18368	12126
	11 中央	1.600	9216	0	12126
側壁	4, S4 上端部	1.110	-5796	-4625	15824
	5 上ハッチ点	0.910	-5048	*****	16965
	S5 上τ点	0.910	-4803	-1638	17592
	6 中間	0.770	-4686	0	18391
	S7 下τ点	0.310	-6129	6600	21014
	7 下ハッチ点	0.310	-6957	*****	21641
	8, S8 下端部	0.110	-9009	12126	22782



2.3.1 設計荷重 (CASE - 3)

(1) 頂版自重

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 5.390 \text{ kN/m}^2$$

(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

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2) \} = 28.440 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} = 39.420 \text{ kN/m}^2$$

(3) 活荷重

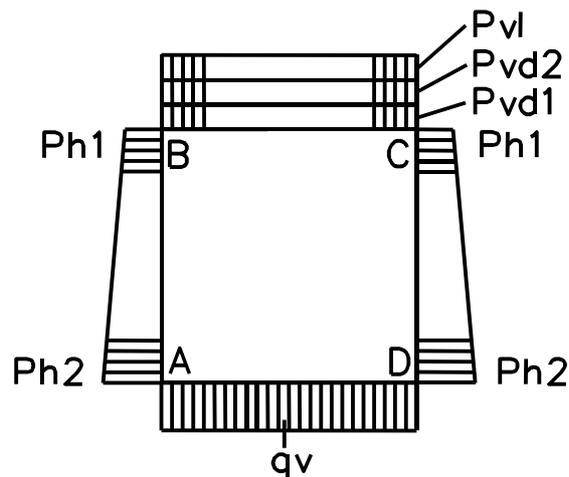
$$\begin{aligned} \text{① 輪分布幅} \quad u &= a + 2 \times H2 = 6.200 \text{ m} \\ v &= b + 2 \times H2 = 6.500 \text{ m} \end{aligned}$$

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

(4) 底版反力

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 78.363 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 0.507$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 0.507$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 2.507, \quad N_2 = 2 + \beta = 2.507$$

② 荷重項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 66.870 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 63.159 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times Phd1 + 3 \times Phd2) / 60 = 4.345 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times Phd2 + 3 \times Phd1) / 60 = 4.072 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -40.827 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 39.847 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -46.152 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 46.152 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 42.939 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -42.939 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.3.3 各部材の断面力 (CASE - 3)

(1) 頂版

① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 95.478 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + M_{BC} = 51.800 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

(2) 底版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 101.088 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 54.153 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

(3) 側壁

① せん断力

$$S_{XAB} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 12.660 \text{ kN}$$

$$S_{XBA} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = -7.698 \text{ kN}$$

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。

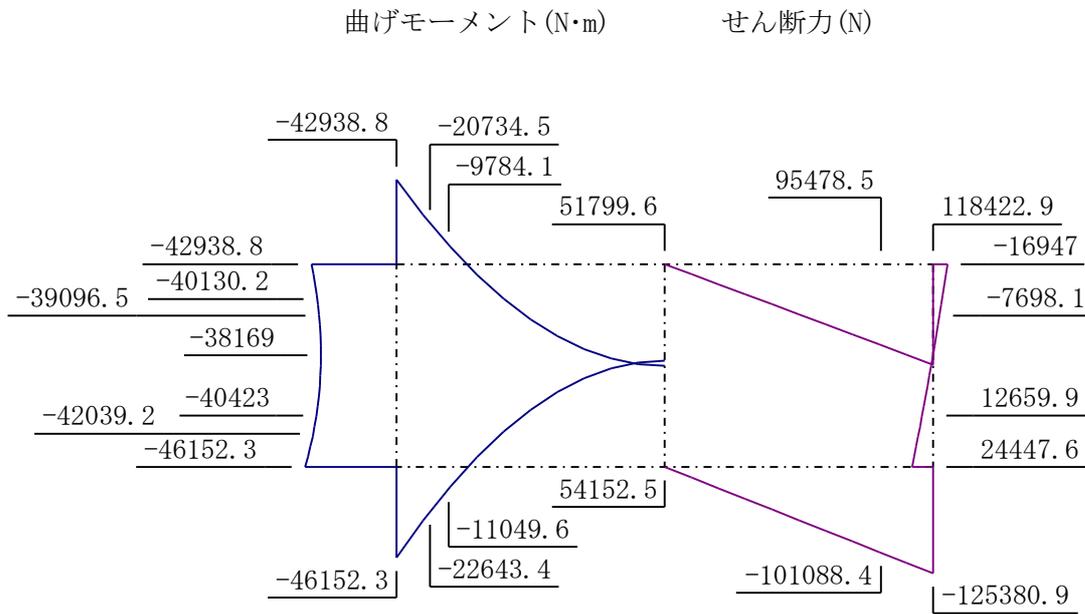
$$S_x = S_{AB} - P_{hd2} \times x - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 0$$

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 0.672 \text{ m}$$

$$M_{max} = S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} = -38.169 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

[/ 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	0.100	-42939	118423	16947
	2 ハチ始点	0.300	-20735	*****	16947
	S2 τ点	0.310	-9784	95479	16947
	1 中央	1.600	51800	0	16947
底版	9, S9 端部	0.100	-46152	125381	24448
	10 ハチ始点	0.300	-22643	*****	24448
	S10 τ点	0.310	-11050	101088	24448
	11 中央	1.600	54153	0	24448
側壁	4, S4 上端部	1.110	-42939	-16947	118423
	5 上ハチ点	0.910	-40130	*****	119564
	S5 上τ点	0.910	-39097	-7698	120191
	6 中間	0.672	-38169	0	121548
	S7 下τ点	0.310	-40423	12660	123613
	7 下ハチ点	0.310	-42039	*****	124240
	8, S8 下端部	0.110	-46152	24448	125381



2.4.1 設計荷重 (CASE - 4)

(1) 頂版自重

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 5.390 \text{ kN/m}^2$$

(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

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2) \} + P_q = 33.440 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} + P_q = 44.420 \text{ kN/m}^2$$

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。

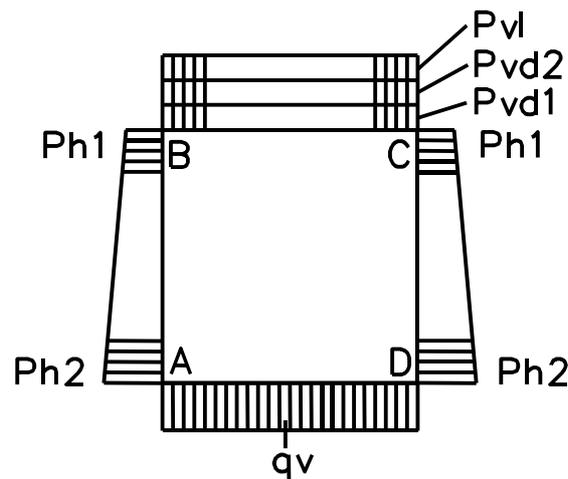
(3) 活荷重

$$P_{v1} = 0$$

(4) 底版反力

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 64.639 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 0.507$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 0.507$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 2.507, \quad N_2 = 2 + \beta = 2.507$$

② 荷重項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 55.158 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 51.447 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd1} + 3 \times P_{hd2}) / 60 = 4.965 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd2} + 3 \times P_{hd1}) / 60 = 4.692 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -32.647 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 31.666 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -38.592 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 38.592 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 35.379 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -35.379 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.4.3 各部材の断面力 (CASE - 4)

(1) 頂版

① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 77.774 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + MBC = 41.793 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

(2) 底板

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 83.384 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - MAD = 44.146 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

(3) 側壁

① せん断力

$$\begin{aligned} S_{XAB} = & P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ & - (MAB + MBA) / H_o \\ & - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = 14.160 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} S_{XBA} = & P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ & - (MAB + MBA) / H_o \\ & - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = -9.198 \text{ kN}$$

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。

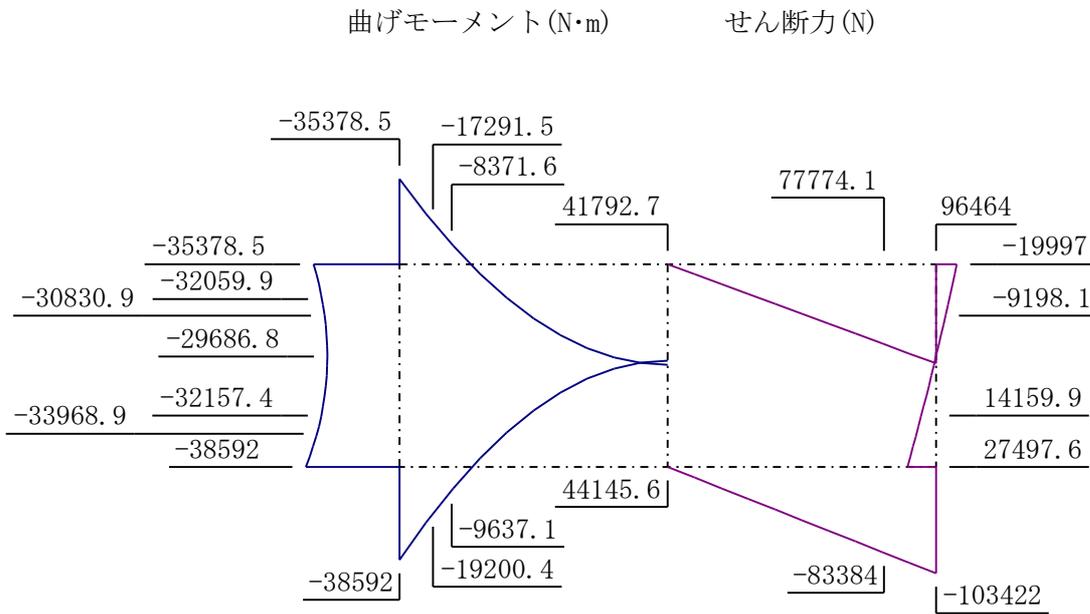
$$S_x = S_{AB} - P_{hd2} \times x - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 0$$

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 0.664 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} M_{max} = & S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 \\ & - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + MAB \end{aligned} = -29.687 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

[/ 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	0.100	-35379	96464	19997
	2 ハッチ始点	0.300	-17292	*****	19997
	S2 τ点	0.310	-8372	77774	19997
	1 中央	1.600	41793	0	19997
底版	9, S9 端部	0.100	-38592	103422	27498
	10 ハッチ始点	0.300	-19200	*****	27498
	S10 τ点	0.310	-9637	83384	27498
	11 中央	1.600	44146	0	27498
側壁	4, S4 上端部	1.110	-35379	-19997	96464
	5 上ハッチ点	0.910	-32060	*****	97605
	S5 上τ点	0.910	-30831	-9198	98232
	6 中間	0.664	-29687	0	99635
	S7 下τ点	0.310	-32157	14160	101654
	7 下ハッチ点	0.310	-33969	*****	102281
	8, S8 下端部	0.110	-38592	27498	103422



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	-42.939	16.947	253.37	10.83	44.775	3
頂版	ハチ始点	-20.735	16.947	122.35	7.50	22.006	3
	中央	51.800	16.947	305.66	7.50	53.071	3
	端部	-46.152	24.448	188.78	10.83	48.801	3
底版	ハチ始点	-22.643	24.448	92.62	7.50	24.477	3
	中央	54.153	24.448	221.50	7.50	55.986	3
	上端部	-42.939	118.423	36.26	9.83	54.584	3
	上ハチ点	-40.130	119.564	33.56	6.50	47.902	3
側壁	中間	-38.169	121.548	31.40	6.50	46.070	3
	下ハチ点	-42.039	124.240	33.84	6.50	50.115	3
	下端部	-46.152	125.381	36.81	9.83	58.482	3

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	44.775	11.79	15.29	28.67	11.379
頂版	ハチ始点	22.006	8.27	11.77	22.00	7.218
	中央	53.071	12.84	16.34	22.00	19.932
	端部	48.801	12.31	15.81	28.67	12.088
底版	ハチ始点	24.477	8.72	12.22	22.00	7.727
	中央	55.986	13.18	16.68	22.00	20.694
	上端部	54.584	13.02	16.52	26.67	9.397
	上ハチ点	47.902	12.19	15.69	20.00	13.950
側壁	中間	46.070	11.96	15.46	20.00	12.952
	下ハチ点	50.115	12.47	15.97	20.00	14.716
	下端部	58.482	13.47	16.97	26.67	10.234
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 19 - 7	D 16 - 14	D 19 - 7	D 16 - 14	D-0 - 0	D 16 - 14
D 16 - 7	D 0 - 0	D 16 - 7	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	18.536	9.688	4.21	101.0	0.0
	ハチ始点	100.00	18.536	8.110	3.44	66.0	0.0
	中 央	100.00	22.638	8.469	7.99	142.1	0.0
底版	端 部	100.00	18.536	9.798	4.55	107.0	0.0
	ハチ始点	100.00	18.536	8.232	3.77	70.6	0.0
	中 央	100.00	22.638	8.527	8.39	147.1	0.0
側壁	上端部	100.00	18.536	10.887	5.13	86.8	0.0
	上ハチ点	100.00	18.536	8.319	8.39	123.8	0.0
	中 間	100.00	18.536	8.399	8.01	115.8	0.0
	下ハチ点	100.00	18.536	8.310	8.79	129.9	0.0
	下端部	100.00	18.536	10.856	5.51	93.8	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	55.304	12.758	95.478	77.774				
	M			-9.784					
	N			16.947					
	最大			○					
底版 τ点	S	52.670	18.368	101.088	83.384				
	M			-11.050					
	N			24.448					
	最大			○					
側壁上 τ点	S	-7.813	-1.638	-7.698	-9.198				
	M				-30.831				
	N				98.232				
	最大				○				
側壁下 τ点	S	-2.575	6.600	12.660	14.160				
	M				-32.157				
	N				101.654				
	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	0.220	0.035	0.185000	1.400	D16-9.3	18.536	1.002	1.500
底版 τ 点	0.220	0.035	0.185000	1.400	D16-9.3	18.536	1.002	1.500
側壁上 τ 点	0.200	0.035	0.165000	1.400	D16-9.3	18.536	1.123	1.500
側壁下 τ 点	0.200	0.035	0.165000	1.400	D16-9.3	18.536	1.123	1.500

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	-9.784	16.947	0.22000	0.000887	0.11000	0.621	1.063
底版 τ 点	-11.050	24.448	0.22000	0.000887	0.11000	0.896	1.081
側壁上 τ 点	-30.831	98.232	0.20000	0.000667	0.10000	3.276	1.106
側壁下 τ 点	-32.157	101.654	0.20000	0.000667	0.10000	3.390	1.105

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	1.500	1.063	0.603
底版 τ 点	0.270	1.400	1.500	1.081	0.613
側壁上 τ 点	0.270	1.400	1.500	1.106	0.627
側壁下 τ 点	0.270	1.400	1.500	1.105	0.627

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	95.478	0.516	0.603	OK
底版 τ 点	101.088	0.546	0.613	OK
側壁上 τ 点	9.198	0.056	0.627	OK
側壁下 τ 点	14.160	0.086	0.627	OK

以上