

受付 No.

台帳 No. RL472000



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) 2300 mm
内 高(H) 1500 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) 2300 × (H) 1500 × (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)	: $Ka = 0.500$
(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
----------	-------------

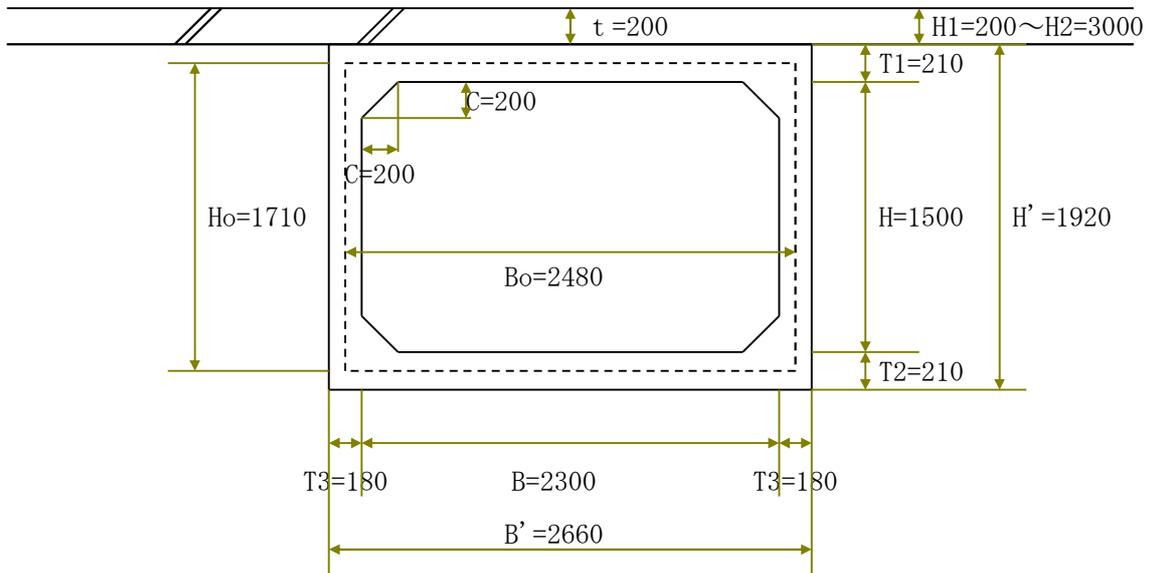
1.6 鉄筋かぶり	: 頂版 底版 側壁
	: (内側) 40 mm 40 mm 40 mm
	: (外側) 40 mm 40 mm 40 mm

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

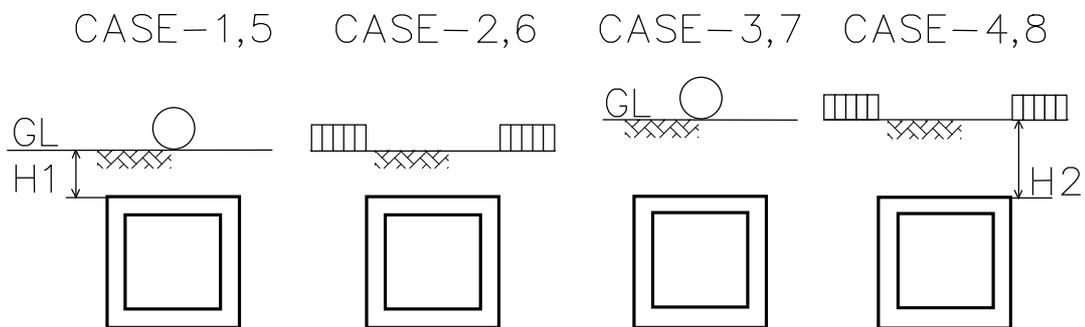
鉄筋引張応力度	: $\sigma sa = 160$ [N/mm ²]
鉄筋降伏点応力度	: $\sigma sy = 295$ [N/mm ²]
コンクリート	
設計基準強度	: $\sigma ck = 35.0$ [N/mm ²]
曲げ圧縮応力度	: $\sigma ca = 11.7$ [N/mm ²]
せん断応力度	: $\tau a = 0.260$ [N/mm ²]

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

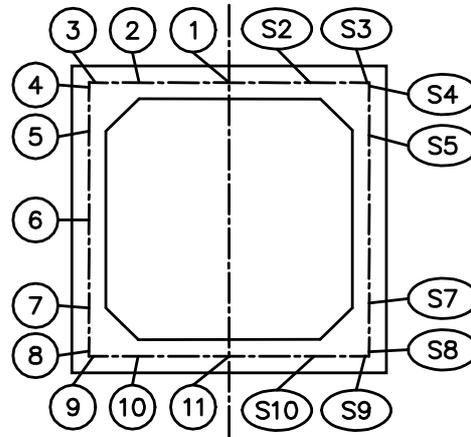
■ 本設計書は、CASE-1, 2, 3, 4 について行う。

2 断面力計算

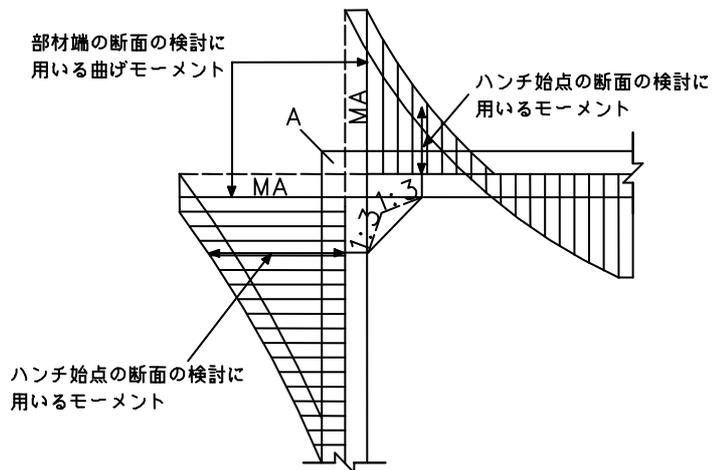
ボックスカルバートの曲げモーメント及びせん断力照査位置

曲げモーメント

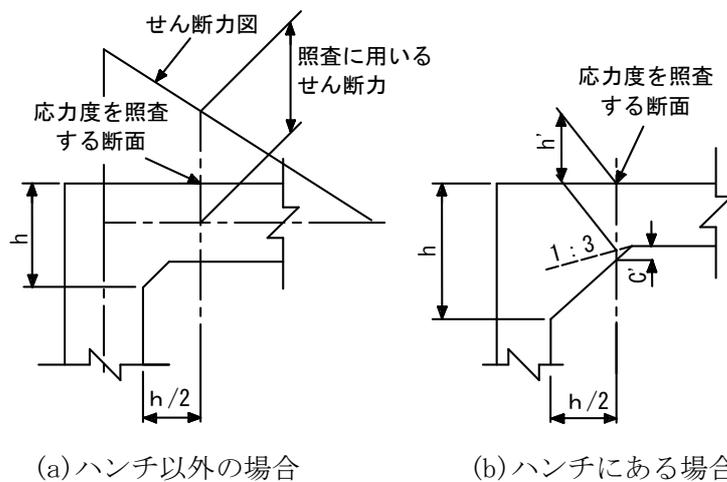
せん断力



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

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 5.145 \text{ kN/m}^2$$

(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

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times tb + \gamma_s \times (H1 - t - tb + T1/2) \} = 3.195 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times tb + \gamma_s \times (H1 - t - tb + T1/2 + H_o) \} = 18.585 \text{ kN/m}^2$$

(3) 活荷重

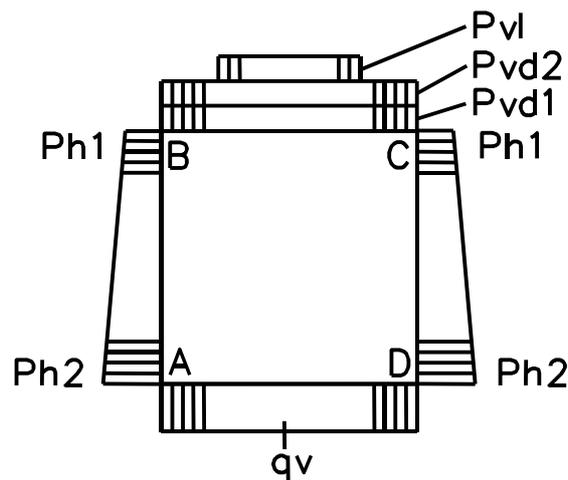
$$\text{① 輪分布幅 } \begin{aligned} u &= a + 2 \times H1 = 0.600 \text{ m} \\ v &= b + 2 \times H1 = 0.900 \text{ m} \end{aligned}$$

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

(4) 底版反力

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + \{ P_{v1} \times u + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) \} / B_o = 50.828 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_0 \times T_1^3) / (B_0 \times T_3^3) = 1.095$$

$$\beta = (H_0 \times T_2^3) / (B_0 \times T_3^3) = 1.095$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 3.095, \quad N_2 = 2 + \beta = 3.095$$

② 荷重項

$$CAD = q_v \times B_0^2 / 12 = 26.051 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBC = \{2 \times (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_0^3 + P_{v1} \times u \times (3 \times B_0^2 - u^2)\} / (24 \times B_0) = 30.807 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CAB = (H_0^2) \times (2 \times Phd1 + 3 \times Phd2) / 60 = 3.029 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBA = (H_0^2) \times (2 \times Phd2 + 3 \times Phd1) / 60 = 2.279 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -11.631 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 12.976 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -13.315 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 13.315 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 16.599 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -16.599 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.1.3 各部材の断面力 (CASE - 1)

(1) 頂版

① せん断力

$$S_{XBC} = \{(P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o + P_{v1} \times u\} / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2}) \times x = 51.660 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{\max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times u \times (B_o / 2 - u / 4) / 2 + M_{BC} = 37.190 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 48.032 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{\max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 25.761 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側壁

① せん断力

$$S_{XAB} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 4.493 \text{ kN}$$

$$S_{XBA} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = -7.704 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

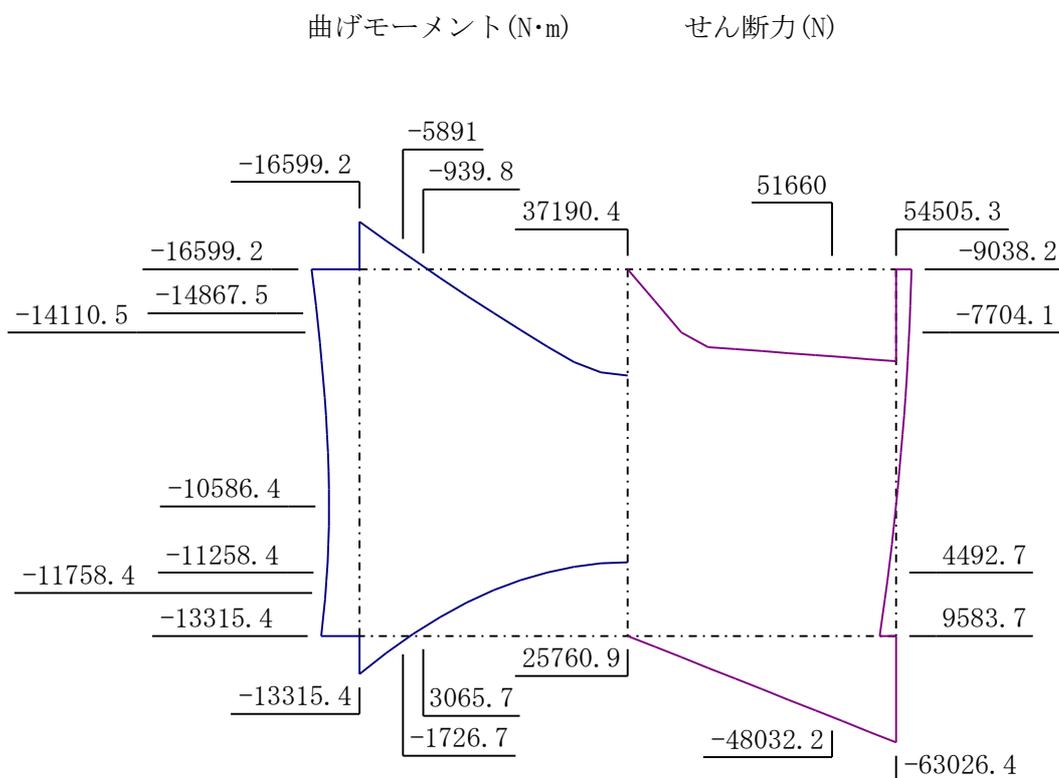
接点間の極値は、せん断力が0となる地点に生じる。

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

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。 } x = 0.604 \text{ m}$$

$$M_{\max} = S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} = -10.586 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

		[/ 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	0.090	-16599	54505	9038
	2 ハチ始点	0.290	-5891	*****	9038
	S2 τ点	0.295	-940	51660	9038
	1 中央	1.240	37190	0	9038
底版	9, S9 端部	0.090	-13315	63026	9584
	10 ハチ始点	0.290	-1727	*****	9584
	S10 τ点	0.295	3066	48032	9584
	11 中央	1.240	25761	0	9584
側壁	4, S4 上端部	1.605	-16599	-9038	54505
	5 上ハチ点	1.405	-14868	*****	55502
	S5 上τ点	1.415	-14111	-7704	55975
	6 中間	0.604	-10586	0	60017
	S7 下τ点	0.295	-11258	4493	61556
	7 下ハチ点	0.305	-11758	*****	62030
	8, S8 下端部	0.105	-13315	9584	63026



2.2.1 設計荷重 (CASE - 2)

(1) 頂版自重

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 5.145 \text{ kN/m}^2$$

(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

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2) \} + P_q = 8.195 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} + P_q = 23.585 \text{ kN/m}^2$$

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

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 16.517 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.095$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.095$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 3.095, \quad N_2 = 2 + \beta = 3.095$$

② 荷重項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 8.465 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 4.943 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times Phd_1 + 3 \times Phd_2) / 60 = 4.247 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times Phd_2 + 3 \times Phd_1) / 60 = 3.497 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -1.691 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 1.014 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -6.614 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 6.614 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 3.834 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -3.834 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.2.3 各部材の断面力 (CASE - 2)

(1) 頂版

① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 9.114 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + M_{BC} = 3.582 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = -6.957 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 6.084 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側壁

① せん断力

$$\begin{aligned} S_{XAB} &= P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ &\quad - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ &\quad - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 10.839 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{XBA} &= P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ &\quad - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ &\quad - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = -6.957 \text{ kN} \end{aligned}$$

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。

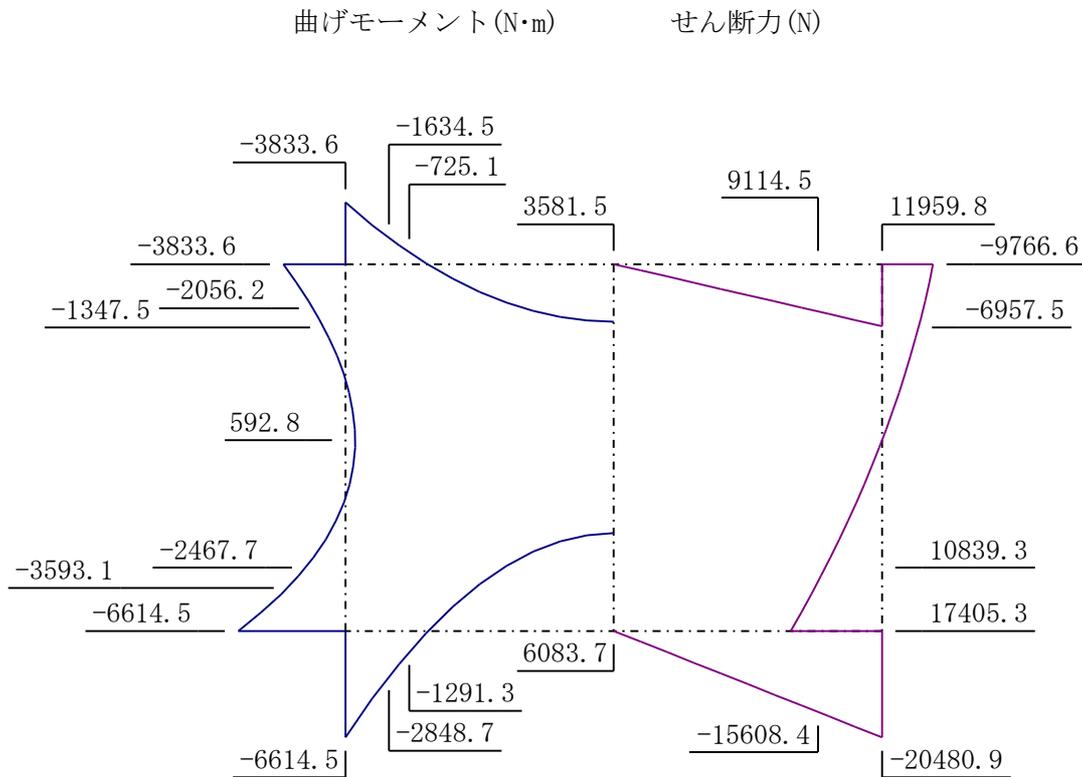
$$S_x = S_{AB} - P_{hd2} \times x - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 0$$

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 0.889 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} M_{max} &= S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 \\ &\quad - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} = 0.593 \text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

[/ 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	0.090	-3834	11960	9767
	2 ハチ始点	0.290	-1635	*****	9767
	S2 τ点	0.295	-725	9115	9767
	1 中央	1.240	3582	0	9767
底版	9, S9 端部	0.090	-6615	20481	17405
	10 ハチ始点	0.290	-2849	*****	17405
	S10 τ点	0.295	-1291	15608	17405
	11 中央	1.240	6084	0	17405
側壁	4, S4 上端部	1.605	-3834	-9767	11960
	5 上ハチ点	1.405	-2056	*****	12956
	S5 上τ点	1.415	-1348	-6958	13430
	6 中間	0.889	593	0	16051
	S7 下τ点	0.295	-2468	10839	19011
	7 下ハチ点	0.305	-3593	*****	19484
	8, S8 下端部	0.105	-6615	17405	20481



2.3.1 設計荷重 (CASE - 3)

(1) 頂版自重

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 5.145 \text{ kN/m}^2$$

(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

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2) \} = 28.395 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} = 43.785 \text{ kN/m}^2$$

(3) 活荷重

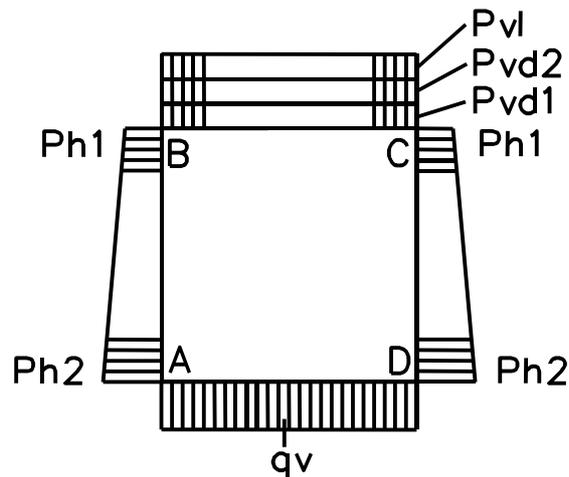
$$\begin{aligned} \text{① 輪分布幅 } u &= a + 2 \times H2 = 6.200 \text{ m} \\ v &= b + 2 \times H2 = 6.500 \text{ m} \end{aligned}$$

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

(4) 底板反力

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 80.641 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.095$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.095$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 3.095, \quad N_2 = 2 + \beta = 3.095$$

② 荷重項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 41.331 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 37.809 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times Phd_1 + 3 \times Phd_2) / 60 = 9.169 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times Phd_2 + 3 \times Phd_1) / 60 = 8.419 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -15.029 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 14.352 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -24.875 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 24.875 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 22.095 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -22.095 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.3.3 各部材の断面力 (CASE - 3)

(1) 頂版

① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 69.712 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + M_{BC} = 34.619 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 76.206 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 37.122 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側壁

① せん断力

$$S_{XAB} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 22.151 \text{ kN}$$

$$S_{XBA} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = -18.270 \text{ kN}$$

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。

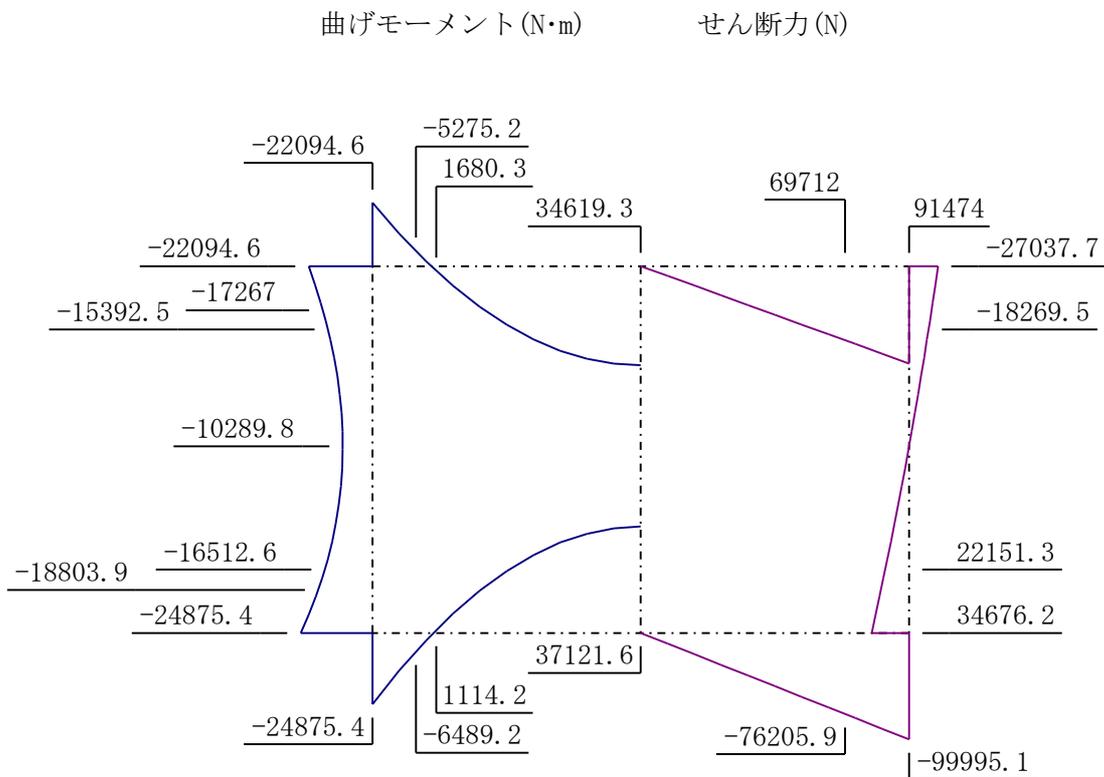
$$S_x = S_{AB} - P_{hd2} \times x - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 0$$

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 0.870 \text{ m}$$

$$M_{max} = S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} = -10.290 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[/ 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	0.090	-22095	91474	27038
	2 ハチ始点	0.290	-5275	*****	27038
	S2 τ点	0.295	1680	69712	27038
	1 中央	1.240	34619	0	27038
底版	9, S9 端部	0.090	-24875	99995	34676
	10 ハチ始点	0.290	-6489	*****	34676
	S10 τ点	0.295	1114	76206	34676
	11 中央	1.240	37122	0	34676
側壁	4, S4 上端部	1.605	-22095	-27038	91474
	5 上ハチ点	1.405	-17267	*****	92471
	S5 上τ点	1.415	-15393	-18270	92944
	6 中間	0.870	-10290	0	95660
	S7 下τ点	0.295	-16513	22151	98525
	7 下ハチ点	0.305	-18804	*****	98999
	8, S8 下端部	0.105	-24875	34676	99995



2.4.1 設計荷重 (CASE - 4)

(1) 頂版自重

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 5.145 \text{ kN/m}^2$$

(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

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2) \} + P_q = 33.395 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} + P_q = 48.785 \text{ kN/m}^2$$

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。

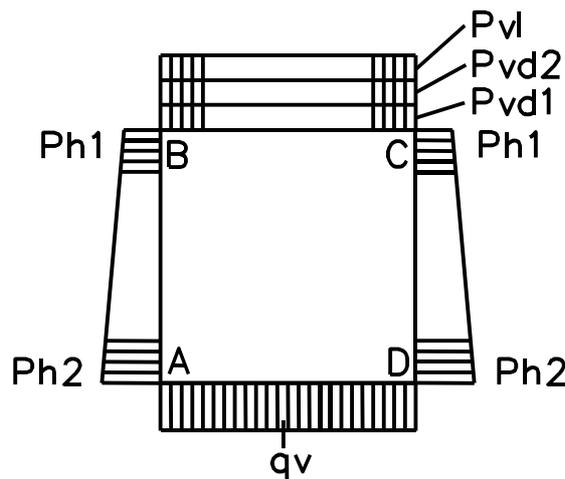
(3) 活荷重

$$P_{v1} = 0$$

(4) 底版反力

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 66.917 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.095$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.095$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 3.095, \quad N_2 = 2 + \beta = 3.095$$

② 荷重項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 34.297 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 30.775 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd1} + 3 \times P_{hd2}) / 60 = 10.388 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd2} + 3 \times P_{hd1}) / 60 = 9.638 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -11.090 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 10.413 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -22.154 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 22.154 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 19.374 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -19.374 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.4.3 各部材の断面力 (CASE - 4)

(1) 頂版

① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 56.742 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + MBC = 26.789 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 63.236 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - MAD = 29.291 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側壁

① せん断力

$$S_{XAB} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (MAB + MBA) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 24.951 \text{ kN}$$

$$S_{XBA} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (MAB + MBA) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = -21.070 \text{ kN}$$

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。

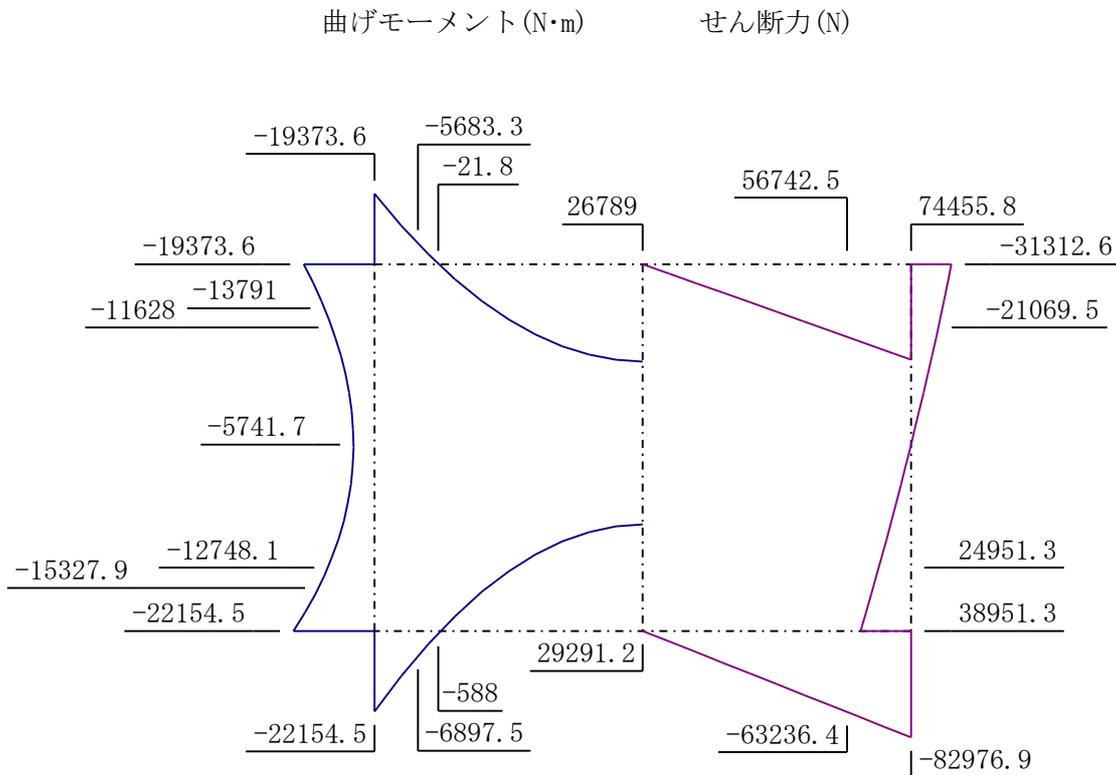
$$S_x = S_{AB} - P_{hd2} \times x - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 0$$

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。 } x = 0.868 \text{ m}$$

$$M_{max} = S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + MAB = -5.742 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[/ 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	0.090	-19374	74456	31313
	2 ハチ始点	0.290	-5683	*****	31313
	S2 τ点	0.295	-22	56743	31313
	1 中央	1.240	26789	0	31313
底版	9, S9 端部	0.090	-22155	82977	38951
	10 ハチ始点	0.290	-6898	*****	38951
	S10 τ点	0.295	-588	63236	38951
	11 中央	1.240	29291	0	38951
側壁	4, S4 上端部	1.605	-19374	-31313	74456
	5 上ハチ点	1.405	-13791	*****	75452
	S5 上τ点	1.415	-11628	-21070	75926
	6 中間	0.868	-5742	0	78652
	S7 下τ点	0.295	-12748	24951	81507
	7 下ハチ点	0.305	-15328	*****	81980
	8, S8 下端部	0.105	-22155	38951	82977



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	-22.095	27.038	81.72	9.83	24.753	3
頂版	ハチ始点	-5.891	9.038	65.18	6.50	6.478	1
	中央	37.190	9.038	411.48	6.50	37.778	1
	端部	-24.875	34.676	71.74	9.83	28.285	3
底版	ハチ始点	-6.897	38.951	17.71	6.50	9.429	4
	中央	37.122	34.676	107.05	6.50	39.376	3
	上端部	-22.095	91.474	24.15	8.33	29.718	3
	上ハチ点	-14.867	55.502	26.79	5.00	17.643	1
側壁	中間	-10.586	60.017	17.64	5.00	13.587	1
	下ハチ点	-18.804	98.999	18.99	5.00	23.754	3
	下端部	-24.875	99.995	24.88	8.33	33.208	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

$$k = n \times \sigma_{ca} / (n \times \sigma_{ca} + \sigma_{sa}) = 0.523$$

$$c1 = \sqrt{[6 / \sigma_{ca} / (3 - k) / k]} = 0.629$$

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

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	24.753	9.90	13.90	27.67	5.465
頂版	ハチ始点	6.478	5.06	9.06	21.00	1.978
	中央	37.778	12.23	16.23	21.00	15.519
	端部	28.285	10.58	14.58	27.67	6.056
底版	ハチ始点	9.429	6.11	10.11	21.00	1.315
	中央	39.376	12.48	16.48	21.00	14.640
	上端部	29.718	10.85	14.85	24.67	4.327
	上ハチ点	17.643	8.36	12.36	18.00	5.454
側壁	中間	13.587	7.33	11.33	18.00	3.027
	下ハチ点	23.754	9.70	13.70	18.00	6.036
	下端部	33.208	11.46	15.46	24.67	5.039
					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 13 - 7	D 19 - 7	D 13 - 7	D-0 - 0	D 13 - 7
D 16 - 7	D 10 - 7	D 16 - 7	D 10 - 7	D 0 - 0	D 10 - 7

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	6.931	6.772	3.41	127.8	0.0
	ハチ始点	100.00	6.931	5.506	1.55	48.6	0.0
	中 央	100.00	16.979	7.194	7.19	147.1	0.0
底版	端 部	100.00	6.931	6.878	3.85	140.9	0.0
	ハチ始点	100.00	6.931	7.177	1.80	36.9	0.0
	中 央	100.00	16.979	7.463	7.27	139.4	0.0
側壁	上端部	100.00	6.931	7.774	4.23	105.2	0.0
	上ハチ点	100.00	6.931	5.390	5.36	128.5	0.0
	中 間	100.00	6.931	5.966	3.79	76.6	0.0
	下ハチ点	100.00	6.931	5.839	6.75	141.5	0.0
	下端部	100.00	6.931	7.699	4.77	120.4	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	51.660	9.114	69.712	56.742				
	M			1.680					
	N			27.038					
	最大			○					
底版 τ点	S	48.032	15.608	76.206	63.236				
	M			1.114					
	N			34.676					
	最大			○					
側壁上 τ点	S	-7.704	-6.957	-18.270	-21.070				
	M				-11.628				
	N				75.926				
	最大				○				
側壁下 τ点	S	4.493	10.839	22.151	24.951				
	M				-12.748				
	N				81.507				
	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	0.210	0.040	0.170000	1.400	D19-3.5 D16-3.5	16.979	0.999	1.499
底版 τ 点	0.210	0.040	0.170000	1.400	D19-3.5 D16-3.5	16.979	0.999	1.499
側壁上 τ 点	0.183	0.040	0.143333	1.400	D13-3.5 D10-3.5	6.931	0.484	1.184
側壁下 τ 点	0.183	0.040	0.143333	1.400	D13-3.5 D10-3.5	6.931	0.484	1.184

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	1.680	27.038	0.21000	0.000772	0.10500	0.947	1.563
底版 τ 点	1.114	34.676	0.21000	0.000772	0.10500	1.214	2.000
側壁上 τ 点	-11.628	75.926	0.18300	0.000511	0.09150	2.317	1.199
側壁下 τ 点	-12.748	81.507	0.18300	0.000511	0.09150	2.487	1.195

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	0.260	1.400	1.499	1.563	0.853
底版 τ 点	0.260	1.400	1.499	2.000	1.091
側壁上 τ 点	0.260	1.400	1.184	1.199	0.517
側壁下 τ 点	0.260	1.400	1.184	1.195	0.515

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	69.712	0.410	0.853	OK
底版 τ 点	76.206	0.448	1.091	OK
側壁上 τ 点	21.070	0.147	0.517	OK
側壁下 τ 点	24.951	0.174	0.515	OK

以上