

受付 No.

台帳 No. RM406000

■ □ ■ □ ■ □ ■ □ ■ □ ■ □ ■ □ ■ □ ■ □

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) 2000 mm
内 高(H) 1600 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) 2000 × (H) 1600 × (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)	: $Ka = 0.500$
(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
----------	-------------

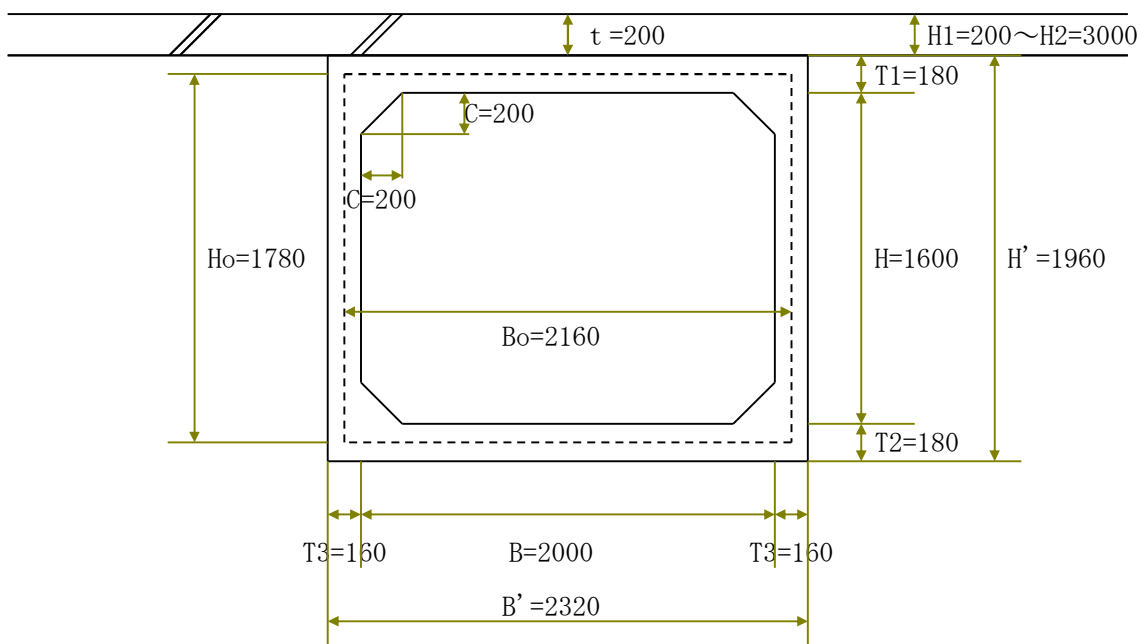
1.6 鉄筋かぶり	:	頂 版	底 版	側 壁
	: (内側)	35 mm	35 mm	35 mm
	: (外側)	35 mm	35 mm	35 mm

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	: $\sigma ck = 35.0$ [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



(a) ハンチ以外の場合

(b) ハンチにある場合

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

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 4.410 \text{ kN/m}^2$$

(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

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2) \} = 3.060 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} = 19.080 \text{ kN/m}^2$$

(3) 活荷重

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

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

(4) 底版反力

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + \{ P_{v1} \times u + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) \} / B_o = 55.672 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.173$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.173$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 3.173, \quad N_2 = 2 + \beta = 3.173$$

② 荷重項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 21.645 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBC = \{2 \times (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^3 + P_{v1} \times u \times (3 \times B_o^2 - u^2)\} / (24 \times B_o) = 25.848 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd1} + 3 \times P_{hd2}) / 60 = 3.346 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd2} + 3 \times P_{hd1}) / 60 = 2.500 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -8.977 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 10.186 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -11.113 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 11.113 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 13.896 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -13.896 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.1.3 各部材の断面力 (CASE - 1)

(1) 頂 版

① せん断力

$$S_{XBC} = \{(P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o + P_{v1} \times u\} / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2}) \times x = 49.763 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{\max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times u \times (B_o / 2 - u / 4) / 2 + M_{BC} = 30.868 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底 版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 45.094 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{\max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 21.355 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側 壁

① せん断力

$$S_{XAB} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 5.841 \text{ kN}$$

$$S_{XBA} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = -7.885 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

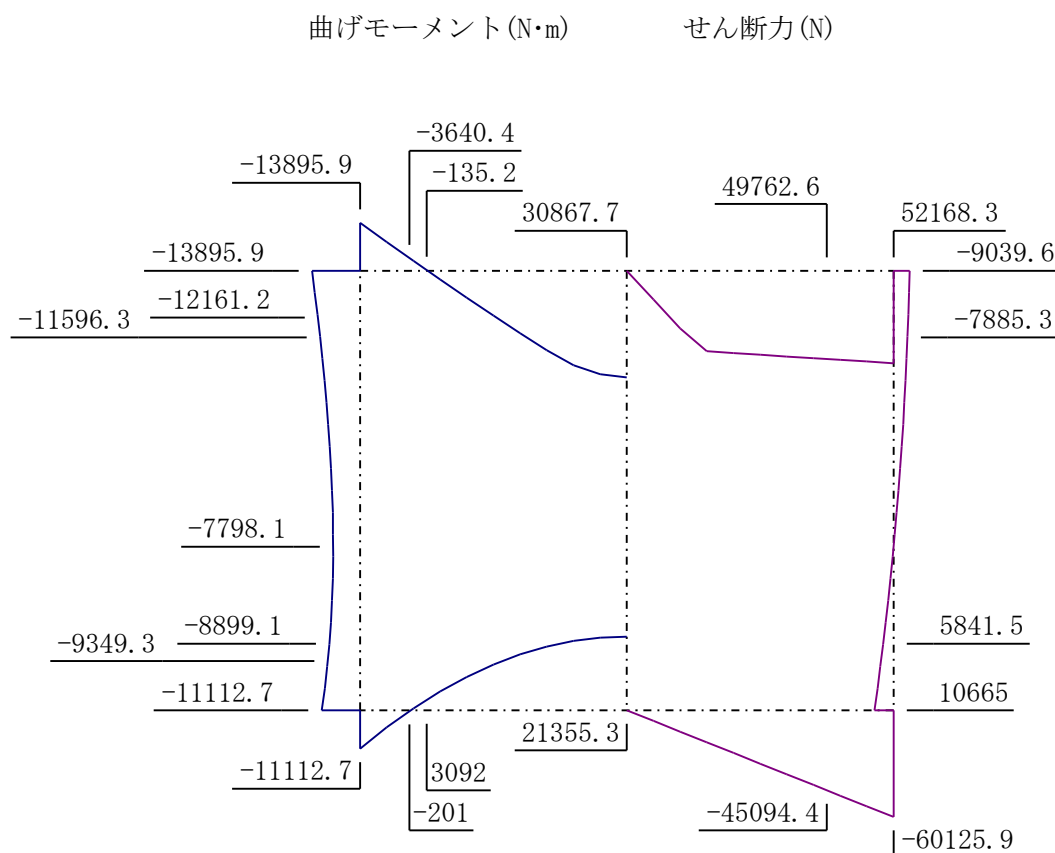
接点間の極値は、せん断力が 0 となる地点に生じる。

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

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 0.662 \text{ m}$$

$$M_{\max} = S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} = -7.798 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

		[/ 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	0.080	-13896	52168	9040
	2 ハチ始点	0.280	-3640	*****	9040
	S2 τ 点	0.270	-135	49763	9040
	1 中 央	1.080	30868	0	9040
底版	9, S9 端 部	0.080	-11113	60126	10665
	10 ハチ始点	0.280	-201	*****	10665
	S10 τ 点	0.270	3092	45094	10665
	11 中 央	1.080	21355	0	10665
側壁	4, S4 上 端部	1.690	-13896	-9040	52168
	5 上ハチ点	1.490	-12161	*****	53062
	S5 上 τ 点	1.510	-11596	-7885	53375
	6 中 間	0.662	-7798	0	57166
	S7 下 τ 点	0.270	-8899	5842	58919
	7 下ハチ点	0.290	-9349	*****	59232
	8, S8 下 端部	0.090	-11113	10665	60126



2.2.1 設 計 荷 重 (CASE - 2)

(1) 頂版自重

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 4.410 \text{ kN/m}^2$$

(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

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2) \} + P_q = 8.060 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} + P_q = 24.080 \text{ kN/m}^2$$

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。

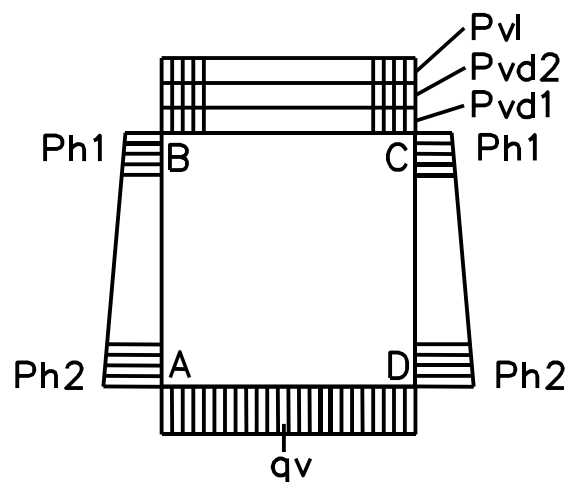
(3) 活荷重

$$P_{v1} = 0$$

(4) 底版反力

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 16.278 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.173$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.173$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 3.173, \quad N_2 = 2 + \beta = 3.173$$

② 荷 重 項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 6.329 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 3.464 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times Phd1 + 3 \times Phd2) / 60 = 4.666 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times Phd2 + 3 \times Phd1) / 60 = 3.820 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -0.543 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 0.059 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -5.692 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 5.692 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 3.395 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -3.395 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.2.3 各部材の断面力 (CASE - 2)

(1) 頂 版

① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 7.217 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + M_{BC} = 1.801 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底 版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = -8.131 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 3.801 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側 壁

① せん断力

$$\begin{aligned} S_{XAB} &= P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ &\quad - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ &\quad - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = 11.796 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} S_{XBA} &= P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ &\quad - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ &\quad - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = -8.131 \text{ kN}$$

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。

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

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 0.896 \text{ m}$$

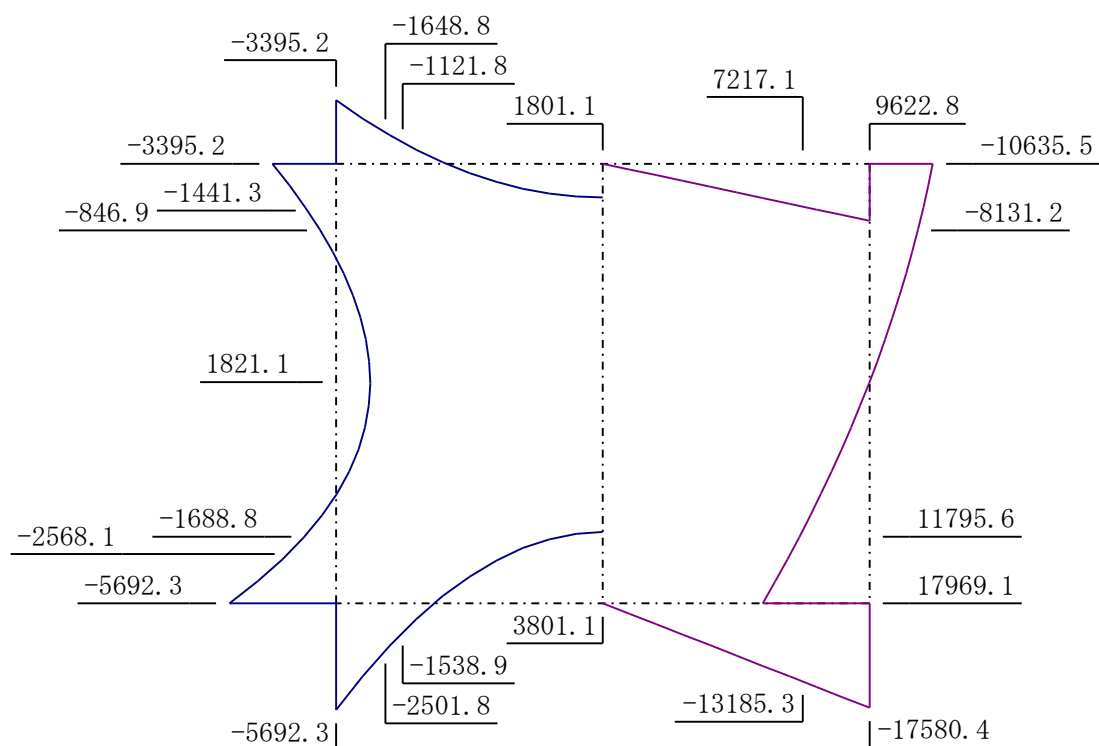
$$\begin{aligned} M_{max} &= S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 \\ &\quad - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} \end{aligned} = 1.821 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[/ 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	0.080	-3395	9623	10636
	2 ハッチ始点	0.280	-1649	*****	10636
	S2 τ 点	0.270	-1122	7217	10636
	1 中 央	1.080	1801	0	10636
底版	9, S9 端 部	0.080	-5692	17580	17969
	10 ハッチ始点	0.280	-2502	*****	17969
	S10 τ 点	0.270	-1539	13185	17969
	11 中 央	1.080	3801	0	17969
側壁	4, S4 上 端部	1.690	-3395	-10636	9623
	5 上ハッチ点	1.490	-1441	*****	10517
	S5 上 τ 点	1.510	-847	-8131	10830
	6 中 間	0.896	1821	0	13575
	S7 下 τ 点	0.270	-1689	11796	16373
	7 下ハッチ点	0.290	-2568	*****	16686
	8, S8 下 端部	0.090	-5692	17969	17580

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

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 4.410 \text{ kN/m}^2$$

(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

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2) \} = 28.260 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} = 44.280 \text{ kN/m}^2$$

(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

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 80.402 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.173$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.173$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 3.173, \quad N_2 = 2 + \beta = 3.173$$

② 荷 重 項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 31.260 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 28.396 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times Phd1 + 3 \times Phd2) / 60 = 9.999 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times Phd2 + 3 \times Phd1) / 60 = 9.154 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -9.560 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 9.076 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -20.043 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 20.043 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 17.746 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -17.746 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.3.3 各部材の断面力 (CASE - 3)

(1) 頂版

① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 59.158 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + M_{BC} = 24.848 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 65.126 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 26.847 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側壁

① せん断力

$$\begin{aligned} S_{XAB} = & P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ & - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ & - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = 24.320 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} S_{XBA} = & P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ & - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ & - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = -20.655 \text{ kN}$$

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。

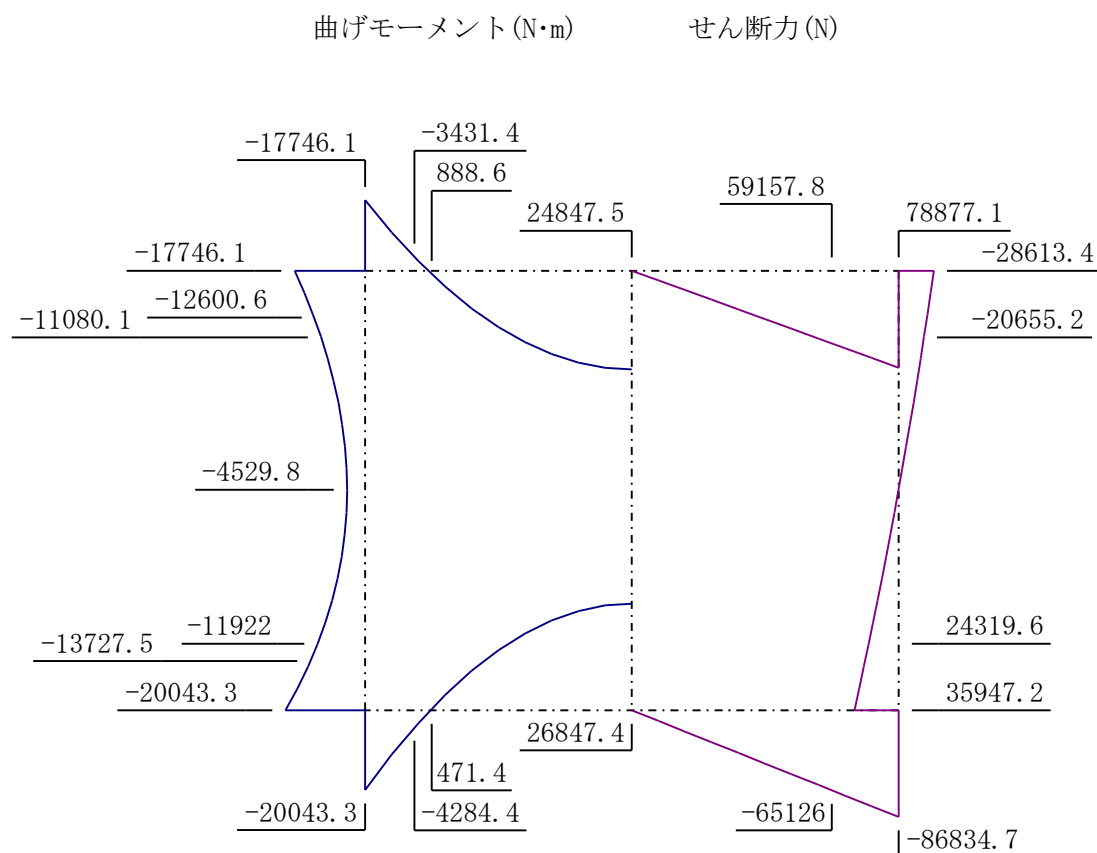
$$S_x = S_{AB} - P_{hd2} \times x - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 0$$

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 0.893 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} M_{max} = & S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 \\ & - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} \end{aligned} = -4.530 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[/ 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	0.080	-17746	78877	28613
	2 ハッチ始点	0.280	-3431	*****	28613
	S2 τ 点	0.270	889	59158	28613
	1 中 央	1.080	24848	0	28613
底板	9, S9 端 部	0.080	-20043	86835	35947
	10 ハッチ始点	0.280	-4284	*****	35947
	S10 τ 点	0.270	471	65126	35947
	11 中 央	1.080	26847	0	35947
側壁	4, S4 上 端部	1.690	-17746	-28613	78877
	5 上ハッチ点	1.490	-12601	*****	79771
	S5 上 τ 点	1.510	-11080	-20655	80084
	6 中 間	0.893	-4530	0	82843
	S7 下 τ 点	0.270	-11922	24320	85628
	7 下ハッチ点	0.290	-13728	*****	85941
	8, S8 下 端部	0.090	-20043	35947	86835



2.4.1 設 計 荷 重 (CASE - 4)

(1) 頂版自重

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 4.410 \text{ kN/m}^2$$

(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

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2) \} + P_q = 33.260 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} + P_q = 49.280 \text{ kN/m}^2$$

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

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 66.678 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.173$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.173$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 3.173, \quad N_2 = 2 + \beta = 3.173$$

② 荷 重 項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 25.924 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 23.060 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd1} + 3 \times P_{hd2}) / 60 = 11.320 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd2} + 3 \times P_{hd1}) / 60 = 10.474 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -6.497 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 6.014 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -18.301 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 18.301 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 16.004 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -16.004 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.4.3 各部材の断面力 (CASE - 4)

(1) 頂 版

① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 48.041 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + M_{BC} = 18.586 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底 版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 54.009 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 20.586 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側 壁

① せん断力

$$\begin{aligned} S_{XAB} = & P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ & - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ & - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = 27.420 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} S_{XBA} = & P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ & - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ & - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = -23.755 \text{ kN}$$

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。

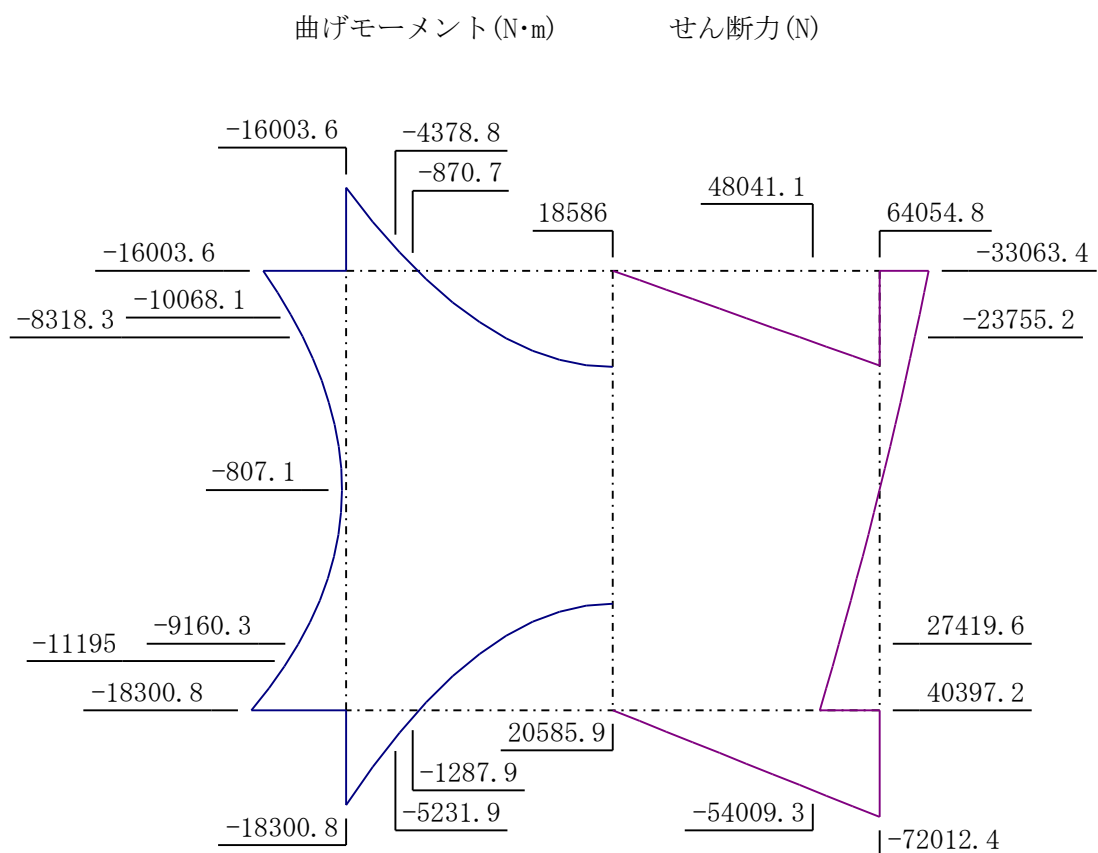
$$S_x = S_{AB} - P_{hd2} \times x - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 0$$

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 0.892 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} M_{max} = & S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 \\ & - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} \end{aligned} = -0.807 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[/ 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	0.080	-16004	64055	33063
	2 ハッチ始点	0.280	-4379	*****	33063
	S2 τ 点	0.270	-871	48041	33063
	1 中 央	1.080	18586	0	33063
底版	9, S9 端 部	0.080	-18301	72012	40397
	10 ハッチ始点	0.280	-5232	*****	40397
	S10 τ 点	0.270	-1288	54009	40397
	11 中 央	1.080	20586	0	40397
側壁	4, S4 上 端部	1.690	-16004	-33063	64055
	5 上ハッチ点	1.490	-10068	*****	64949
	S5 上 τ 点	1.510	-8318	-23755	65262
	6 中 間	0.892	-807	0	68025
	S7 下 τ 点	0.270	-9160	27420	70805
	7 下ハッチ点	0.290	-11195	*****	71118
	8, S8 下 端部	0.090	-18301	40397	72012



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	-17.746	28.613	62.02	8.83	20.274	3
頂版	ハチ始点	-3.640	9.040	40.27	5.50	4.138	1
	中 央	30.868	9.040	341.47	5.50	31.365	1
	端 部	-20.043	35.947	55.76	8.83	23.219	3
底版	ハチ始点	-5.232	40.397	12.95	5.50	7.454	4
	中 央	26.847	35.947	74.69	5.50	28.824	3
	上端部	-17.746	78.877	22.50	7.83	23.925	3
	上ハチ点	-12.161	53.062	22.92	4.50	14.549	1
側壁	中 間	-7.798	57.166	13.64	4.50	10.371	1
	下ハチ点	-13.727	85.941	15.97	4.50	17.595	3
	下端部	-20.043	86.835	23.08	7.83	26.845	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	M_s (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 A_s (cm ² /m)
	端 部	20.274	8.96	12.46	24.67	4.771
頂版	ハチ始点	4.138	4.05	7.55	18.00	1.332
	中 央	31.365	11.14	14.64	18.00	15.223
	端 部	23.219	9.59	13.09	24.67	5.310
底版	ハチ始点	7.454	5.43	8.93	18.00	0.961
	中 央	28.824	10.68	14.18	18.00	12.184
	上端部	23.925	9.73	13.23	22.67	3.761
	上ハチ点	14.549	7.59	11.09	16.00	4.941
側壁	中 間	10.371	6.41	9.91	16.00	2.209
	下ハチ点	17.595	8.35	11.85	16.00	4.724
	下端部	26.845	10.31	13.81	22.67	4.381
				$d + d' < T$	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 - 14	D 10 - 14	D 16 - 7	D 10 - 14	D-0 - 0	D 10 - 14
D 0 - 0	D 0 - 0	D 13 - 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	6.657	6.360	3.35	116.9	0.0
	ハチ始点	100.00	6.657	5.104	1.27	35.0	0.0
	中 央	100.00	18.536	6.704	7.63	133.1	0.0
底版	端 部	100.00	6.657	6.453	3.78	129.4	0.0
	ハチ始点	100.00	6.657	6.772	1.80	30.8	0.0
	中 央	100.00	15.181	6.543	7.15	130.5	0.0
側壁	上端部	100.00	6.657	7.279	3.93	96.2	0.0
	上ハチ点	100.00	6.657	4.983	5.39	121.9	0.0
	中 間	100.00	6.657	5.710	3.43	61.1	0.0
	下ハチ点	100.00	6.657	5.434	6.06	118.2	0.0
	下端部	100.00	6.657	7.219	4.44	110.2	0.0
$\sigma_c < \sigma_{ca}$ $\sigma_s < \sigma_{sa}$					CHECK OK		

6 セン断力に対する検討

6.1 セン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	49.763	7.217	59.158	48.041				
	M			0.889					
	N			28.613					
	最大			○					
底版 τ点	S	45.094	13.185	65.126	54.009				
	M			0.471					
	N			35.947					
	最大			○					
側壁上 τ点	S	-7.885	-8.131	-20.655	-23.755				
	M				-8.318				
	N				65.262				
	最大				○				
側壁下 τ点	S	5.841	11.796	24.320	27.420				
	M				-9.160				
	N				70.805				
	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 セン断応力度の照査

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 : セン断力 (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(C_n)を τ_a に乘じる。

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

ここに、 C_n ：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($\text{kN} \cdot \text{m}$)

M ：断面に作用する曲げモーメント($\text{kN} \cdot \text{m}$)

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(m^4)

A_c ：部材断面積(m^2)

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	0.180	0.035	0.148333	1.400	D16-9.3	18.536	1.250	1.500
底版 τ 点	0.180	0.035	0.148333	1.400	D16-4.7 D13-4.7	15.181	1.023	1.500
側壁上 τ 点	0.167	0.035	0.131667	1.400	D10-9.3	6.657	0.506	1.204
側壁下 τ 点	0.167	0.035	0.131667	1.400	D10-9.3	6.657	0.506	1.204

補正係数③を求める。

照査位置	M ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	N (kN)	A_c (m^2)	I_c (m^4)	y (m)	M_o ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	C_n
頂版 τ 点	0.889	28.613	0.18000	0.000486	0.09000	0.858	1.966
底版 τ 点	0.471	35.947	0.18000	0.000486	0.09000	1.078	2.000
側壁上 τ 点	-8.318	65.262	0.16700	0.000388	0.08350	1.816	1.218
側壁下 τ 点	-9.160	70.805	0.16700	0.000388	0.08350	1.970	1.215

補正した許容せん断応力度

照査位置	τ_a	補正係数			補正 τ_a
		Ce	Cpt	C_n	
頂版 τ 点	0.260	1.400	1.500	1.966	1.073
底版 τ 点	0.260	1.400	1.500	2.000	1.092
側壁上 τ 点	0.260	1.400	1.204	1.218	0.534
側壁下 τ 点	0.260	1.400	1.204	1.215	0.533

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 τ_a (N/mm^2)	判定
頂版 τ 点	59.158	0.399	1.073	OK
底版 τ 点	65.126	0.439	1.092	OK
側壁上 τ 点	23.755	0.180	0.534	OK
側壁下 τ 点	27.420	0.208	0.533	OK

以 上