



## 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) 1000 × (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 <sub>b</sub> = 0.000 [m]

## 1.2 単位容積重量

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

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 <sup>2</sup> ]

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

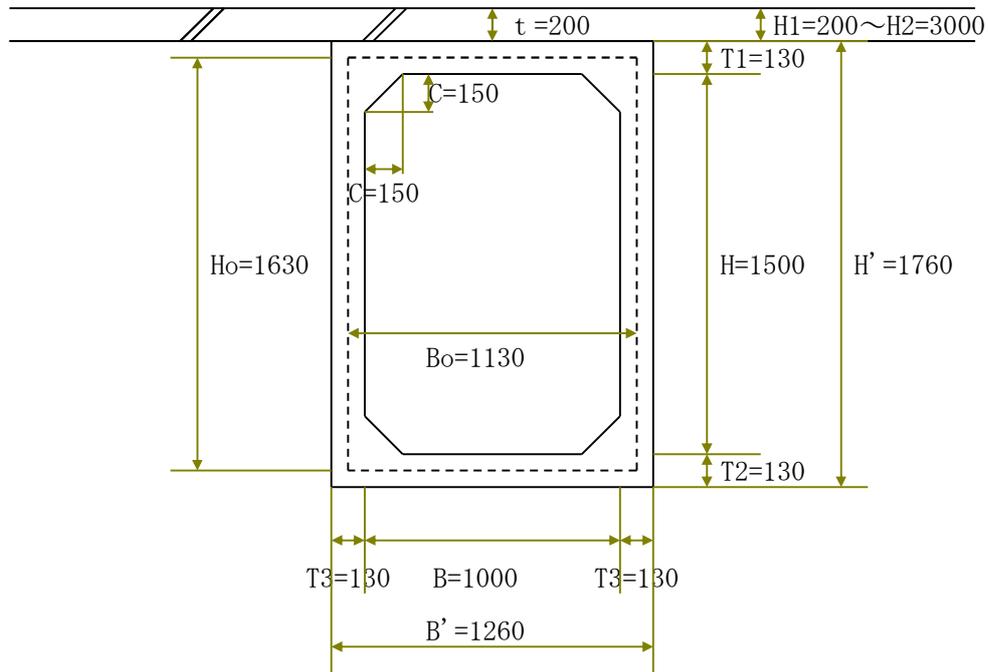
1.6 鉄筋かぶり	: 頂版 底版 側壁
	: (内側) 35 mm 35 mm 35 mm
	: (外側) 35 mm 35 mm 35 mm

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

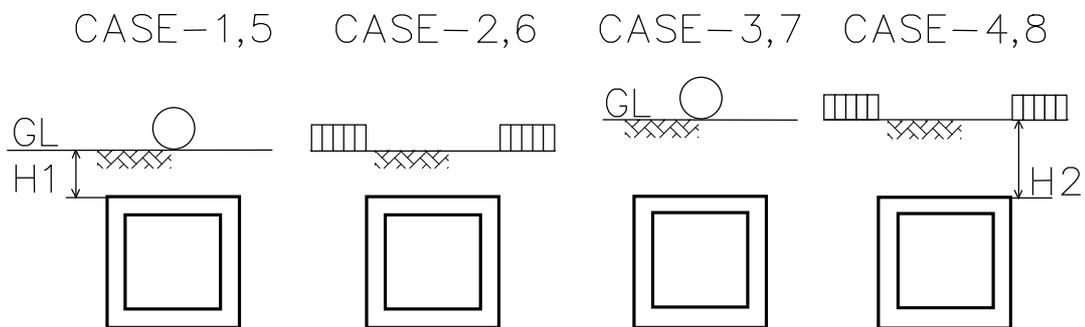
鉄筋引張応力度	: $\sigma_{sa} = 160$ [N/mm <sup>2</sup> ]
鉄筋降伏点応力度	: $\sigma_{sy} = 295$ [N/mm <sup>2</sup> ]
コンクリート	
設計基準強度	: $\sigma_{ck} = 35.0$ [N/mm <sup>2</sup> ]
曲げ圧縮応力度	: $\sigma_{ca} = 11.7$ [N/mm <sup>2</sup> ]
せん断応力度	: $\tau_a = 0.260$ [N/mm <sup>2</sup> ]

## 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

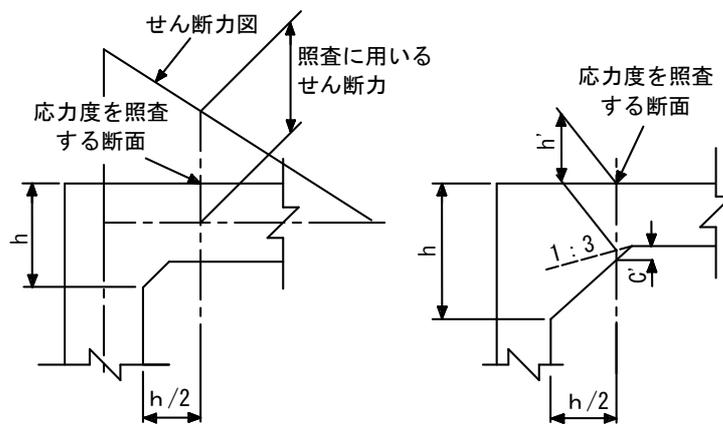
せん断力



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

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 3.185 \text{ kN/m}^2$$

## (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

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2) \} = 2.835 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} = 17.505 \text{ kN/m}^2$$

## (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

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + \{ P_{v1} \times u + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) \} / B_o = 93.151 \text{ kN/m}^2$$

[ 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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.442$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.442$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 3.442, \quad N_2 = 2 + \beta = 3.442$$

## ② 荷重項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 9.912 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBC = \{2 \times (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^3 + P_{v1} \times u \times (3 \times B_o^2 - u^2)\} / (24 \times B_o) = 11.707 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd1} + 3 \times P_{hd2}) / 60 = 2.577 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd2} + 3 \times P_{hd1}) / 60 = 1.927 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

## ③ たわみ角

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

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 3.779 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

## ④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -5.255 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 5.255 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 6.256 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -6.256 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

## 2.1.3 各部材の断面力 (CASE - 1)

## (1) 頂版

## ① せん断力

$$S_{XBC} = \{(P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o + P_{v1} \times u\} / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2}) \times x = 45.312 \text{ kN}$$

## ② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times u \times (B_o / 2 - u / 4) / 2 + MBC = 12.627 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

## (2) 底版

## ① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 33.534 \text{ kN}$$

## ② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - MAD = 9.613 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

## (3) 側壁

## ① せん断力

$$S_{XAB} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (MAB + MBA) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 6.268 \text{ kN}$$

$$S_{XBA} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (MAB + MBA) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = -6.140 \text{ kN}$$

## 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。

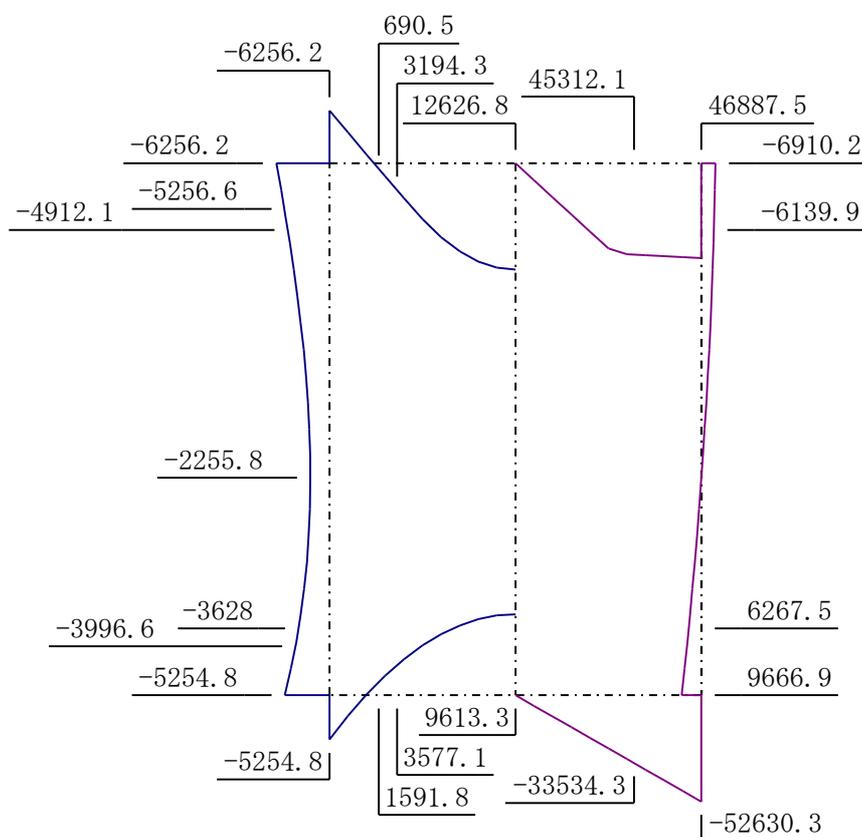
$$S_x = S_{AB} - P_{hd2} \times x - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 0$$

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。 } x = 0.666 \text{ m}$$

$$M_{max} = S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + MAB = -2.256 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

部材	照査点	距離 x (m)	[ / 単位長]		軸力 N (N)
			曲げモーメント M (N*m)	せん断力 S (N)	
頂版	3, S3 端部	0.065	-6256	46888	6910
	2 ハチ始点	0.215	691	*****	6910
	S2 τ点	0.205	3194	45312	6910
	1 中央	0.565	12627	0	6910
底版	9, S9 端部	0.065	-5255	52630	9667
	10 ハチ始点	0.215	1592	*****	9667
	S10 τ点	0.205	3577	33534	9667
	11 中央	0.565	9613	0	9667
側壁	4, S4 上端部	1.565	-6256	-6910	46888
	5 上ハチ点	1.415	-5257	*****	47416
	S5 上τ点	1.425	-4912	-6140	47610
	6 中間	0.666	-2256	0	50284
	S7 下τ点	0.205	-3628	6268	51908
	7 下ハチ点	0.215	-3997	*****	52102
	8, S8 下端部	0.065	-5255	9667	52630

曲げモーメント (N・m)    せん断力 (N)



## 2.2.1 設計荷重 (CASE - 2)

## (1) 頂版自重

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 3.185 \text{ kN/m}^2$$

## (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

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2) \} + P_q = 7.835 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} + P_q = 22.505 \text{ kN/m}^2$$

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

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 17.849 \text{ kN/m}^2$$

[ 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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.442$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.442$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 3.442, \quad N_2 = 2 + \beta = 3.442$$

## ② 荷重項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 1.899 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 0.818 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times Phd_1 + 3 \times Phd_2) / 60 = 3.684 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times Phd_2 + 3 \times Phd_1) / 60 = 3.034 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

## ③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 0.770 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -0.868 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

## ④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -3.010 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 3.010 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 2.069 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -2.069 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

## 2.2.3 各部材の断面力 (CASE - 2)

## (1) 頂版

## ① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 2.767 \text{ kN}$$

## ② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + M_{BC} = -0.843 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

## (2) 底版

## ① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = -7.998 \text{ kN}$$

## ② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = -0.162 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

## (3) 側壁

## ① せん断力

$$\begin{aligned} S_{XAB} &= P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ &\quad - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ &\quad - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 10.509 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{XBA} &= P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ &\quad - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ &\quad - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = -7.998 \text{ kN} \end{aligned}$$

## 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。

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

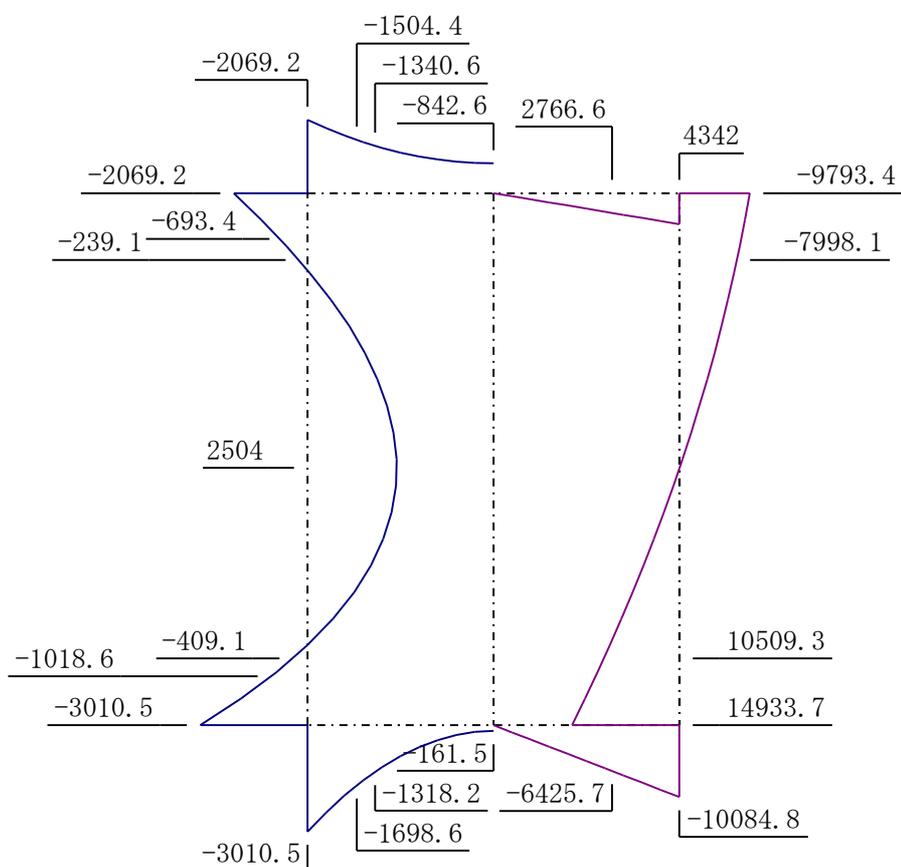
$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 0.788 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} M_{max} &= S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 \\ &\quad - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} = 2.504 \text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

[ / 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	0.065	-2069	4342	9793
	2 ハッチ始点	0.215	-1504	*****	9793
	S2 τ点	0.205	-1341	2767	9793
	1 中央	0.565	-843	0	9793
底版	9, S9 端部	0.065	-3011	10085	14934
	10 ハッチ始点	0.215	-1699	*****	14934
	S10 τ点	0.205	-1318	6426	14934
	11 中央	0.565	-162	0	14934
側壁	4, S4 上端部	1.565	-2069	-9793	4342
	5 上ハッチ点	1.415	-693	*****	4871
	S5 上τ点	1.425	-239	-7998	5064
	6 中間	0.788	2504	0	7309
	S7 下τ点	0.205	-409	10509	9363
	7 下ハッチ点	0.215	-1019	*****	9556
	8, S8 下端部	0.065	-3011	14934	10085

曲げモーメント (N・m)    せん断力 (N)



## 2.3.1 設計荷重 (CASE - 3)

## (1) 頂版自重

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 3.185 \text{ kN/m}^2$$

## (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

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2) \} = 28.035 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} = 42.705 \text{ kN/m}^2$$

## (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

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 81.974 \text{ kN/m}^2$$

[ 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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.442$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.442$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 3.442, \quad N_2 = 2 + \beta = 3.442$$

## ② 荷重項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 8.723 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 7.641 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times Phd_1 + 3 \times Phd_2) / 60 = 8.156 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times Phd_2 + 3 \times Phd_1) / 60 = 7.506 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

## ③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -0.192 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 0.095 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

## ④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -8.445 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 8.445 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 7.504 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -7.504 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

## 2.3.3 各部材の断面力 (CASE - 3)

## (1) 頂版

## ① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 25.851 \text{ kN}$$

## ② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + M_{BC} = 3.958 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

## (2) 底版

## ① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 29.511 \text{ kN}$$

## ② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 4.639 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

## (3) 側壁

## ① せん断力

$$S_{XAB} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 22.831 \text{ kN}$$

$$S_{XBA} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = -20.320 \text{ kN}$$

## 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。

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

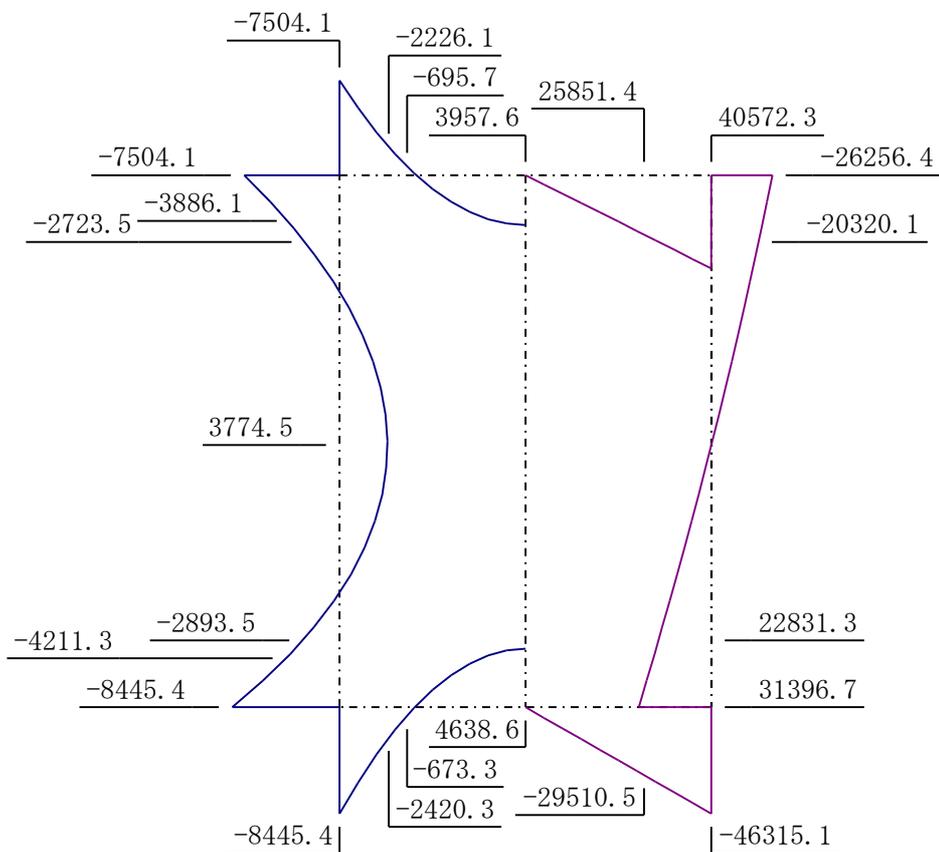
$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 0.803 \text{ m}$$

$$M_{max} = S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} = 3.775 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[ / 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	0.065	-7504	40572	26256
	2 ハッチ始点	0.215	-2226	*****	26256
	S2 τ点	0.205	-696	25851	26256
	1 中央	0.565	3958	0	26256
底版	9, S9 端部	0.065	-8445	46315	31397
	10 ハッチ始点	0.215	-2420	*****	31397
	S10 τ点	0.205	-673	29511	31397
	11 中央	0.565	4639	0	31397
側壁	4, S4 上端部	1.565	-7504	-26256	40572
	5 上ハッチ点	1.415	-3886	*****	41101
	S5 上τ点	1.425	-2724	-20320	41295
	6 中間	0.803	3775	0	43486
	S7 下τ点	0.205	-2894	22831	45593
	7 下ハッチ点	0.215	-4211	*****	45787
	8, S8 下端部	0.065	-8445	31397	46315

曲げモーメント (N・m)    せん断力 (N)



## 2.4.1 設計荷重 (CASE - 4)

## (1) 頂版自重

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 3.185 \text{ kN/m}^2$$

## (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

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2) \} + P_q = 33.035 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} + P_q = 47.705 \text{ kN/m}^2$$

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

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 68.249 \text{ kN/m}^2$$

[ 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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.442$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.442$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 3.442, \quad N_2 = 2 + \beta = 3.442$$

## ② 荷重項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 7.262 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 6.181 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd1} + 3 \times P_{hd2}) / 60 = 9.263 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd2} + 3 \times P_{hd1}) / 60 = 8.613 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

## ③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 0.859 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -0.956 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

## ④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -8.501 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 8.501 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 7.560 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -7.560 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

## 2.4.3 各部材の断面力 (CASE - 4)

## (1) 頂版

## ① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 20.911 \text{ kN}$$

## ② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + MBC = 1.711 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

## (2) 底板

## ① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 24.570 \text{ kN}$$

## ② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - MAD = 2.392 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

## (3) 側壁

## ① せん断力

$$\begin{aligned} S_{XAB} = & P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ & - (MAB + MBA) / H_o \\ & - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = 25.881 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} S_{XBA} = & P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ & - (MAB + MBA) / H_o \\ & - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = -23.370 \text{ kN}$$

## 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。

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

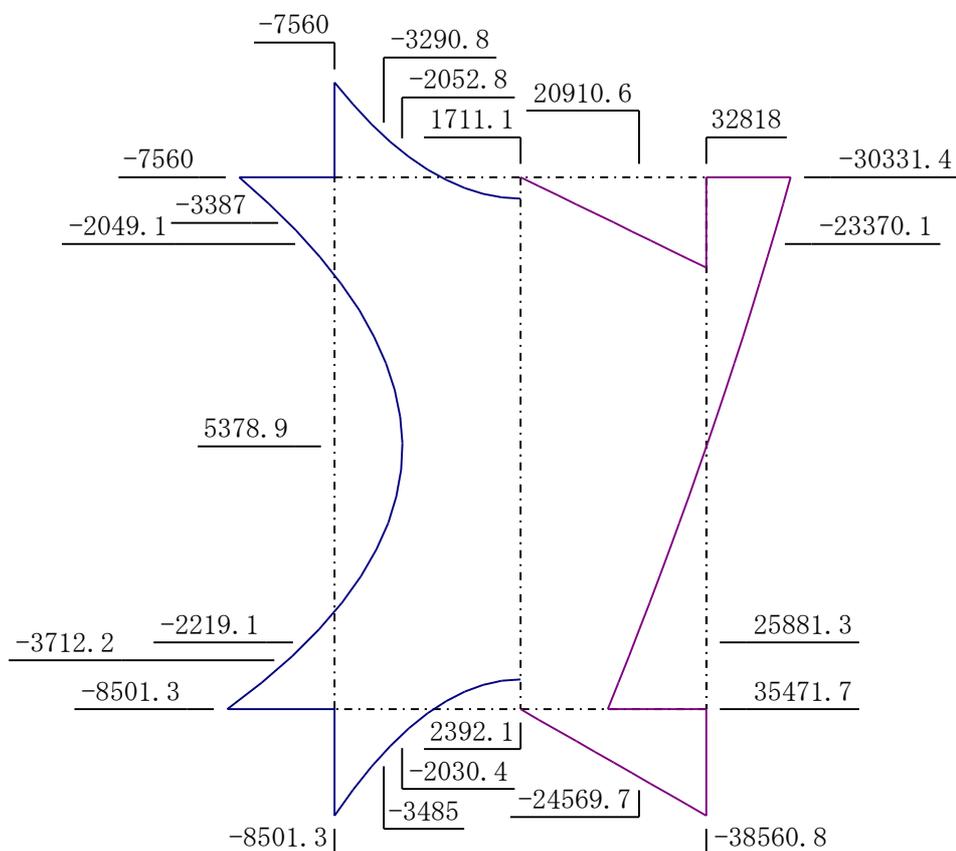
$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 0.805 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} M_{max} = & S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 \\ & - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + MAB \end{aligned} = 5.379 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

[ / 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	0.065	-7560	32818	30331
	2 ハッチ始点	0.215	-3291	*****	30331
	S2 τ点	0.205	-2053	20911	30331
	1 中央	0.565	1711	0	30331
底版	9, S9 端部	0.065	-8501	38561	35472
	10 ハッチ始点	0.215	-3485	*****	35472
	S10 τ点	0.205	-2030	24570	35472
	11 中央	0.565	2392	0	35472
側壁	4, S4 上端部	1.565	-7560	-30331	32818
	5 上ハッチ点	1.415	-3387	*****	33347
	S5 上τ点	1.425	-2049	-23370	33540
	6 中間	0.805	5379	0	35725
	S7 下τ点	0.205	-2219	25881	37839
	7 下ハッチ点	0.215	-3712	*****	38032
	8, S8 下端部	0.065	-8501	35472	38561

曲げモーメント (N・m) せん断力 (N)



## 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	-6.256	6.910	90.54	5.50	6.636	1
頂版	ハチ始点	-3.291	30.331	10.85	3.00	4.201	4
	中央	12.627	6.910	182.73	3.00	12.834	1
	端部	-8.445	31.397	26.90	5.50	10.172	3
底版	ハチ始点	-3.485	35.472	9.82	3.00	4.549	4
	中央	9.613	9.667	99.45	3.00	9.903	1
	上端部	-7.560	32.818	23.04	5.50	9.365	4
	上ハチ点	-5.257	47.416	11.09	3.00	6.679	1
側壁	中間	5.379	35.725	15.06	3.00	6.451	4
	下ハチ点	-4.211	45.787	9.20	3.00	5.585	3
	下端部	-8.501	38.561	22.05	5.50	10.622	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

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

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

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

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( $\sigma_{sa}$ )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  $\sigma_c$  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 <sup>2</sup> /m)
	端部	6.636	5.13	8.63	18.00	2.658
頂版	ハチ始点	4.201	4.08	7.58	13.00	1.136
	中央	12.834	7.13	10.63	13.00	9.398
	端部	10.172	6.35	9.85	18.00	2.856
底版	ハチ始点	4.549	4.24	7.74	13.00	1.077
	中央	9.903	6.26	9.76	13.00	6.861
	上端部	9.365	6.09	9.59	18.00	2.369
	上ハチ点	6.679	5.14	8.64	13.00	1.963
側壁	中間	6.451	5.05	8.55	13.00	2.517
	下ハチ点	5.585	4.70	8.20	13.00	1.221
	下端部	10.622	6.48	9.98	18.00	2.631
					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<sub>s</sub> : 主鉄筋断面積 (cm<sup>2</sup>/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 - 16	D 10 - 16	D 13 - 8	D 10 - 16	D 10 - 16	D 10 - 16
D 0 - 0	D 0 - 0	D 10 - 8	D 0 - 0	D 0 - 0	D 0 - 0

部材	点	部材幅 b (cm)	使用鉄筋量 A <sub>s</sub> (cm <sup>2</sup> /m)	x (cm)	実 応 力 度 (N/mm <sup>2</sup> )	σ <sub>c</sub>	σ <sub>s</sub>	σ <sub>s</sub> '
頂版	端 部	100.00	5.706	4.459	2.29	77.3	0.0	
	ハチ始点	100.00	5.706	4.501	2.33	38.9	0.0	
	中 央	100.00	10.136	4.132	7.65	149.1	0.0	
底版	端 部	100.00	5.706	5.144	3.09	84.4	0.0	
	ハチ始点	100.00	5.706	4.664	2.46	38.2	0.0	
	中 央	100.00	7.921	3.828	6.29	139.8	0.0	
側壁	上端部	100.00	5.706	5.324	2.76	71.5	0.0	
	上ハチ点	100.00	5.706	4.469	3.73	63.0	0.0	
	中 間	100.00	5.706	4.101	3.87	76.4	0.0	
	下ハチ点	100.00	5.706	4.787	2.95	43.6	0.0	
	下端部	100.00	5.706	5.383	3.11	78.9	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	45.312	2.767	25.851	20.911				
	M	3.194							
	N	6.910							
	最大	○							
底版 τ点	S	33.534	6.426	29.511	24.570				
	M	3.577							
	N	9.667							
	最大	○							
側壁上 τ点	S	-6.140	-7.998	-20.320	-23.370				
	M				-2.049				
	N				33.540				
	最大				○				
側壁下 τ点	S	6.268	10.509	22.831	25.881				
	M				-2.219				
	N				37.839				
	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 $\tau a$ に乗じる。

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

ここに、Cn：軸方向力による補正係数

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

M：断面に作用する曲げモーメント(kN・m)

N：断面に作用する軸方向圧縮力(kN)

I<sub>c</sub>：図心軸に関する断面二次モーメント(m<sup>4</sup>)

A<sub>c</sub>：部材断面積(m<sup>2</sup>)

y：断面図心より引張縁までの距離(m)

補正係数①、②を求める。

照査位置	部材厚 T (m)	かぶり d' (m)	有効高 d (m)	C <sub>e</sub>	引張鉄筋		鉄筋比 P <sub>t</sub> (%)	C <sub>pt</sub>
					径-本数	A <sub>s</sub> (cm <sup>2</sup> )		
頂版 $\tau$ 点	0.130	0.035	0.098333	1.400	D13-8	10.136	1.031	1.500
底版 $\tau$ 点	0.130	0.035	0.098333	1.400	D13-4 D10-4	7.921	0.806	1.384
側壁上 $\tau$ 点	0.133	0.035	0.098333	1.400	D10-8	5.706	0.580	1.248
側壁下 $\tau$ 点	0.133	0.035	0.098333	1.400	D10-8	5.706	0.580	1.248

補正係数③を求める。

照査位置	M (kN・m)	N (kN)	A <sub>c</sub> (m <sup>2</sup> )	I <sub>c</sub> (m <sup>4</sup> )	y (m)	M <sub>o</sub> (kN・m)	C <sub>n</sub>
頂版 $\tau$ 点	3.194	6.910	0.13000	0.000183	0.06500	0.150	1.047
底版 $\tau$ 点	3.577	9.667	0.13000	0.000183	0.06500	0.209	1.059
側壁上 $\tau$ 点	-2.049	33.540	0.13300	0.000196	0.06650	0.743	1.363
側壁下 $\tau$ 点	-2.219	37.839	0.13300	0.000196	0.06650	0.839	1.378

補正した許容せん断応力度

照査位置	$\tau a$	補正係数			補正 $\tau a$
		C <sub>e</sub>	C <sub>pt</sub>	C <sub>n</sub>	
頂版 $\tau$ 点	0.260	1.400	1.500	1.047	0.572
底版 $\tau$ 点	0.260	1.400	1.384	1.059	0.533
側壁上 $\tau$ 点	0.260	1.400	1.248	1.363	0.619
側壁下 $\tau$ 点	0.260	1.400	1.248	1.378	0.626

せん断応力度の照査

照査位置	せん断力 S (kN)	応力度 $\tau$ (N/mm <sup>2</sup> )	補正 $\tau a$ (N/mm <sup>2</sup> )	判定
頂版 $\tau$ 点	45.312	0.461	0.572	OK
底版 $\tau$ 点	33.534	0.341	0.533	OK
側壁上 $\tau$ 点	23.370	0.238	0.619	OK
側壁下 $\tau$ 点	25.881	0.263	0.626	OK

以上