

受付 No.

台帳 No. RL420000

■ □ ■ □ ■ □ ■ □ ■ □ ■ □ ■ □ ■ □ ■ □

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) 1000 mm
内 高(H) 700 mm
長 さ(L) 2000 mm

○設計条件 : 荷 重 T' 荷重 (横断)

土被り H1= 0.200 m
H2= 3.000 m

千 葉 窯 業 株 式 会 社

1 設 計 条 件

1.1 一般条件

| | |
|-------|--------------------------------------|
| 構造形式 | : 一径間ボックスラーメン |
| 内空寸法 | : (B) 1000 × (H) 700 × (L) 2000 [mm] |
| 土被り | : H1 = 0.200 ~ H2 = 3.000 [m] |
| 道路舗装厚 | : t = 0.200 [m] |
| 路盤厚 | : t b = 0.000 [m] |

1.2 単位容積重量

| | |
|--------------|---|
| 舗 装 材 | : $\gamma a = 22.5$ [kN/m ³] |
| 路盤材 (地下水位以上) | : $\gamma b = 19.0$ [kN/m ³] |
| 路盤材 (地下水位以下) | : $\gamma bw = 10.0$ [kN/m ³] |
| 鉄筋コンクリート | : $\gamma c = 24.5$ [kN/m ³] |
| 土 (地下水位以上) | : $\gamma s = 18.0$ [kN/m ³] |
| 土 (地下水位以下) | : $\gamma w = 9.0$ [kN/m ³] |

| | |
|-----------------|--------------------|
| 1.3 土圧係数 (水 平) | : $Ka = 0.500$ |
| (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 |
|----------|-------------|

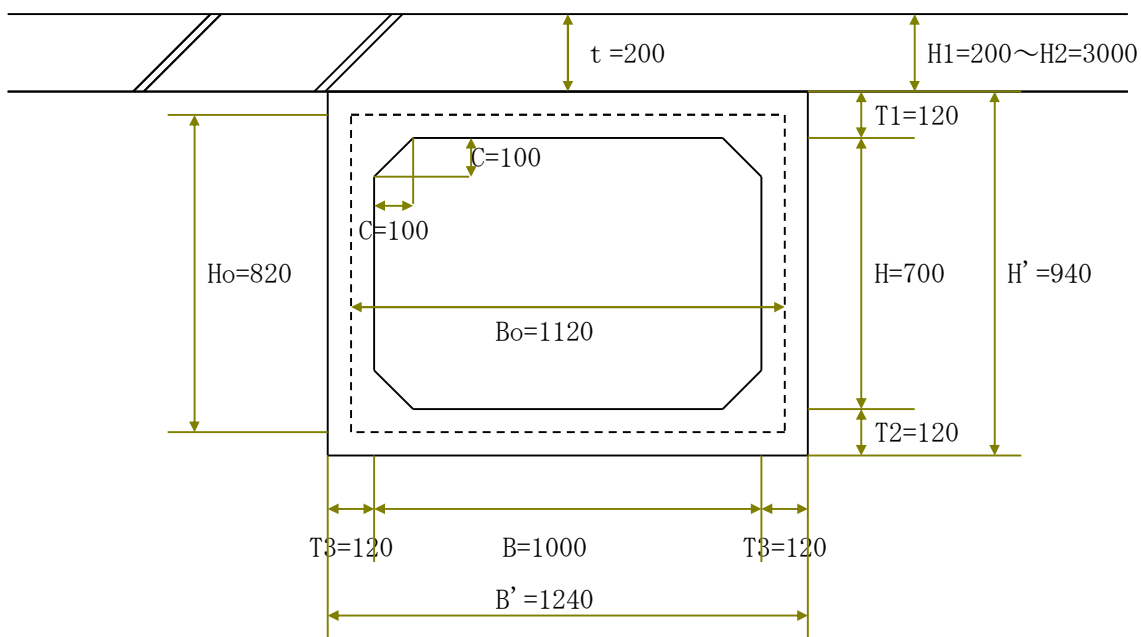
| | |
|-----------|--------------------------|
| 1.6 鉄筋かぶり | : 頂 版 底 版 側 壁 |
| | : (内側) 35 mm 35 mm 35 mm |
| | : (外側) 35 mm 35 mm 35 mm |

| | |
|----------------------|-----------------|
| 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 | : $\sigma ck = 40.0$ [N/mm ²] |
| 曲げ圧縮応力度 | : $\sigma ca = 14.0$ [N/mm ²] |
| せん断応力度 | : $\tau a = 0.270$ [N/mm ²] |

1.9 標準断面図



[単位:mm]

1.10 荷重の組合せ



[荷重 CASE]

CASE 1, 3, 5, 7 は、荷重がカルバート上載の場合

CASE 2, 4, 6, 8 は、荷重がカルバート側載の場合

また

CASE 1, 2, 5, 6 は、土被り H1 の場合

CASE 3, 4, 7, 8 は、土被り H2 の場合

また

CASE 1, 2, 3, 4 は、地下水の影響が無い場合

CASE 5, 6, 7, 8 は、地下水の影響が有る場合

■ 本設計書は、CASE-1, 2, 3, 4 について行う。

2 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

ハッチにある場合の部材断面の高さは、ハッ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

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

(2) 土圧

① 鉛直土圧

$$P_{vd2} = \alpha \times \{ \gamma_s \times (H1 - t - t_b) + \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b \} = 4.500 \text{ kN/m}^2$$

② 水平土圧

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

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

(3) 活荷重

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

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

(4) 底版反力

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + \{ P_{v1} \times u + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) \} / B_o = 88.157 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 0.732$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 0.732$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 2.732, \quad N_2 = 2 + \beta = 2.732$$

② 荷 重 項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 9.215 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBC = \{2 \times (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^3 + P_{v1} \times u \times (3 \times B_o^2 - u^2)\} / (24 \times B_o) = 11.551 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd1} + 3 \times P_{hd2}) / 60 = 0.404 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd2} + 3 \times P_{hd1}) / 60 = 0.322 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -5.461 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 6.109 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -5.217 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 5.217 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 7.078 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -7.078 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.1.3 各部材の断面力 (CASE - 1)

(1) 頂版

① せん断力

$$S_{XBC} = \{(P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o + P_{v1} \times u\} / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2}) \times x = 45.447 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{\max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times u \times (B_o / 2 - u / 4) / 2 + M_{BC} = 11.532 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 34.381 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{\max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 8.606 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側壁

① せん断力

$$S_{XAB} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = -0.708 \text{ kN}$$

$$S_{XBA} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = -3.818 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

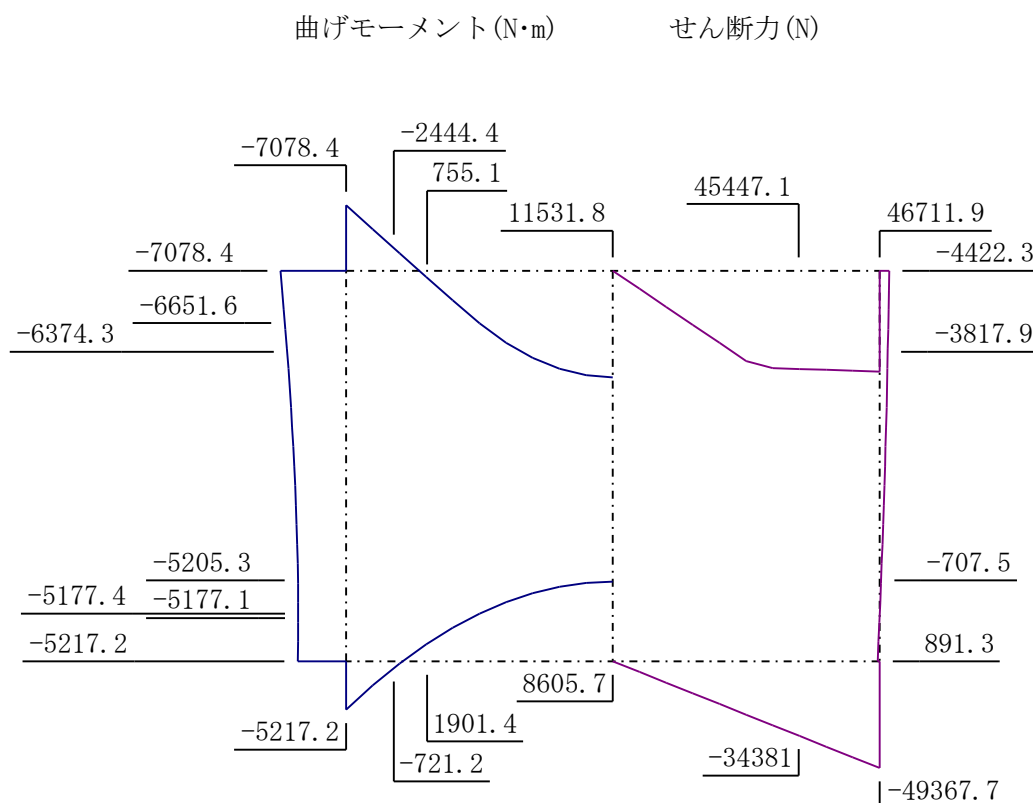
接点間の極値は、せん断力が0となる地点に生じる。

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

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 0.091 \text{ m}$$

$$M_{\max} = S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} = -5.177 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

| | | [/ 単位長] | | | |
|----|------------|--------------|--------------------|---------------|--------------|
| 部材 | 照査点 | 距 離 x (m) | 曲げモーメント M (N*m) | せん断力 S (N) | 軸 力 N (N) |
| 頂版 | 3, S3 端 部 | 0.060 | -7078 | 46712 | 4422 |
| | 2 ハチ始点 | 0.160 | -2444 | ***** | 4422 |
| | S2 τ 点 | 0.170 | 755 | 45447 | 4422 |
| | 1 中 央 | 0.560 | 11532 | 0 | 4422 |
| 底版 | 9, S9 端 部 | 0.060 | -5217 | 49368 | 891 |
| | 10 ハチ始点 | 0.160 | -721 | ***** | 891 |
| | S10 τ 点 | 0.170 | 1901 | 34381 | 891 |
| | 11 中 央 | 0.560 | 8606 | 0 | 891 |
| 側壁 | 4, S4 上 端部 | 0.760 | -7078 | -4422 | 46712 |
| | 5 上ハチ点 | 0.660 | -6652 | ***** | 47036 |
| | S5 上 τ 点 | 0.650 | -6374 | -3818 | 47262 |
| | 6 中 間 | 0.091 | -5177 | 0 | 49073 |
| | S7 下 τ 点 | 0.170 | -5205 | -708 | 48817 |
| | 7 下ハチ点 | 0.160 | -5177 | ***** | 49044 |
| | 8, S8 下 端部 | 0.060 | -5217 | 891 | 49368 |



2.2.1 設 計 荷 重 (CASE - 2)

(1) 頂版自重

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

(2) 土圧

① 鉛直土圧

$$P_{vd2} = \alpha \times \{ \gamma_s \times (H1 - t - t_b) + \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b \} = 4.500 \text{ kN/m}^2$$

② 水平土圧

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

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

ここに、 P_q はカルバート側面に作用する活荷重による水平土圧で
 $P_q = K_a \times 10.0 = 5.0 \text{ kN/m}^2$ とする。

(3) 活荷重

$$P_{v1} = 0$$

(4) 底版反力

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 12.182 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 0.732$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 0.732$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 2.732, \quad N_2 = 2 + \beta = 2.732$$

② 荷重項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 1.273 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 0.778 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

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

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

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -0.276 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 0.165 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -1.071 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 1.071 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 0.657 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -0.657 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.2.3 各部材の断面力 (CASE - 2)

(1) 頂 版

① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 2.902 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + M_{BC} = 0.510 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底 版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = -2.242 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 0.839 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側 壁

① せん断力

$$\begin{aligned} S_{XAB} &= P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ &\quad - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ &\quad - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = 3.268 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} S_{XBA} &= P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ &\quad - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ &\quad - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = -2.242 \text{ kN}$$

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。

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

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 0.432 \text{ m}$$

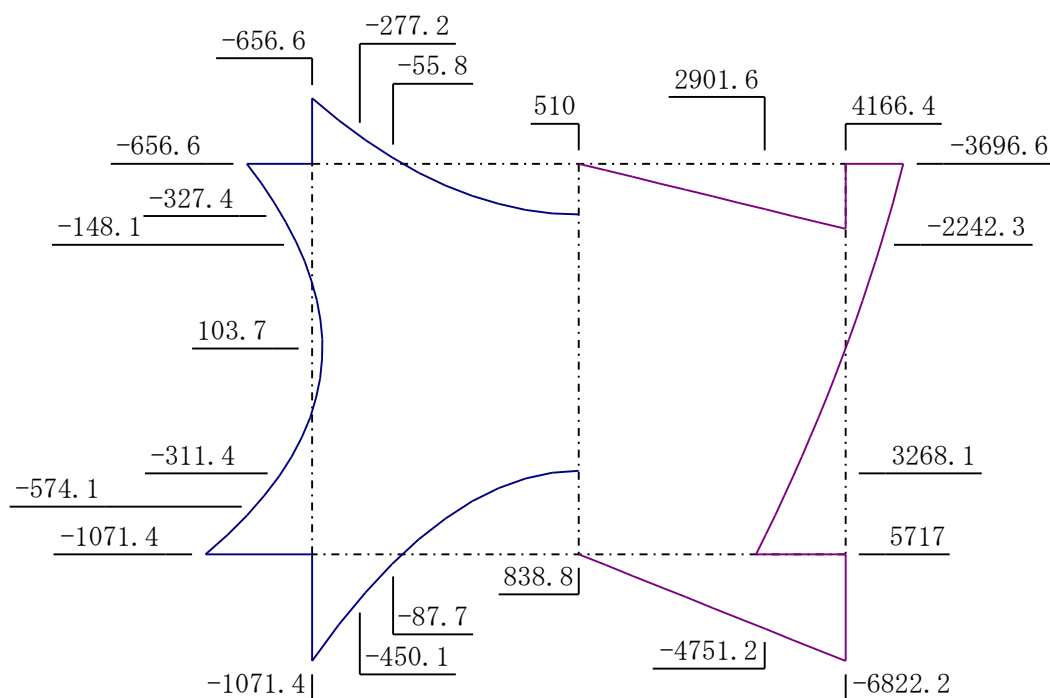
$$\begin{aligned} M_{max} &= S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 \\ &\quad - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} \end{aligned} = 0.104 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[/ 単位長]

| 部材 | 照査点 | 距 離 x (m) | 曲げモーメント M (N*m) | せん断力 S (N) | 軸 力 N (N) |
|----|------------|--------------|--------------------|---------------|--------------|
| 頂版 | 3, S3 端 部 | 0.060 | -657 | 4166 | 3697 |
| | 2 ハチ始点 | 0.160 | -277 | ***** | 3697 |
| | S2 τ 点 | 0.170 | -56 | 2902 | 3697 |
| | 1 中 央 | 0.560 | 510 | 0 | 3697 |
| 底版 | 9, S9 端 部 | 0.060 | -1071 | 6822 | 5717 |
| | 10 ハチ始点 | 0.160 | -450 | ***** | 5717 |
| | S10 τ 点 | 0.170 | -88 | 4751 | 5717 |
| | 11 中 央 | 0.560 | 839 | 0 | 5717 |
| 側壁 | 4, S4 上 端部 | 0.760 | -657 | -3697 | 4166 |
| | 5 上ハチ点 | 0.660 | -327 | ***** | 4490 |
| | S5 上 τ 点 | 0.650 | -148 | -2242 | 4717 |
| | 6 中 間 | 0.432 | 104 | 0 | 5423 |
| | S7 下 τ 点 | 0.170 | -311 | 3268 | 6272 |
| | 7 下ハチ点 | 0.160 | -574 | ***** | 6498 |
| | 8, S8 下 端部 | 0.060 | -1071 | 5717 | 6822 |

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

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

(2) 土圧

① 鉛直土圧

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

② 水平土圧

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

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

(3) 活荷重

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

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

(4) 底版反力

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 76.307 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 0.732$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 0.732$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 2.732, \quad N_2 = 2 + \beta = 2.732$$

② 荷 重 項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 7.977 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 7.481 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times Phd1 + 3 \times Phd2) / 60 = 1.816 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times Phd2 + 3 \times Phd1) / 60 = 1.734 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -3.492 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 3.382 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -5.420 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 5.420 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 5.005 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -5.005 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.3.3 各部材の断面力 (CASE - 3)

(1) 頂 版

① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 27.910 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + M_{BC} = 6.216 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底 版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 29.760 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 6.545 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側 壁

① せん断力

$$\begin{aligned} S_{XAB} = & P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ & - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ & - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = 8.116 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} S_{XBA} = & P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ & - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ & - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = -7.090 \text{ kN}$$

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。

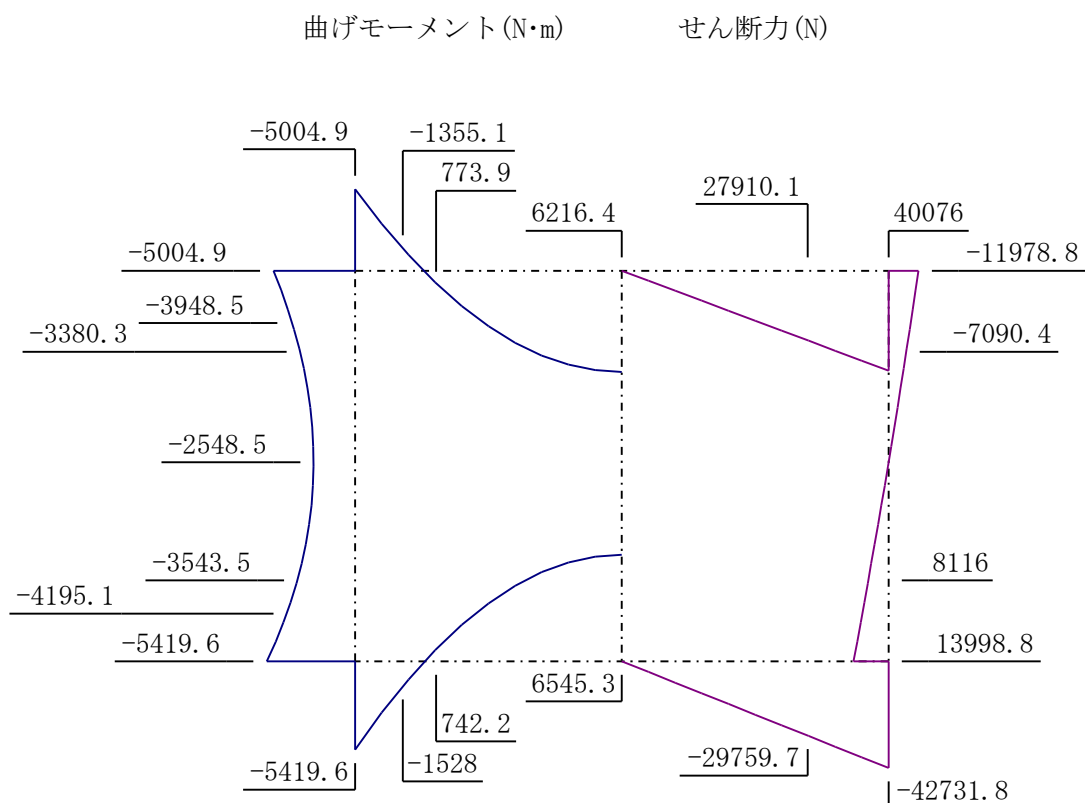
$$S_x = S_{AB} - P_{hd2} \times x - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 0$$

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 0.418 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} M_{max} = & S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 \\ & - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} \end{aligned} = -2.549 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[/ 単位長]

| 部材 | 照査点 | 距 離 x (m) | 曲げモーメント M (N*m) | せん断力 S (N) | 軸 力 N (N) |
|----|------------|--------------|--------------------|---------------|--------------|
| 頂版 | 3, S3 端 部 | 0.060 | -5005 | 40076 | 11979 |
| | 2 ハッチ始点 | 0.160 | -1355 | ***** | 11979 |
| | S2 τ 点 | 0.170 | 774 | 27910 | 11979 |
| | 1 中 央 | 0.560 | 6216 | 0 | 11979 |
| 底板 | 9, S9 端 部 | 0.060 | -5420 | 42732 | 13999 |
| | 10 ハッチ始点 | 0.160 | -1528 | ***** | 13999 |
| | S10 τ 点 | 0.170 | 742 | 29760 | 13999 |
| | 11 中 央 | 0.560 | 6545 | 0 | 13999 |
| 側壁 | 4, S4 上 端部 | 0.760 | -5005 | -11979 | 40076 |
| | 5 上ハッチ点 | 0.660 | -3949 | ***** | 40400 |
| | S5 上 τ 点 | 0.650 | -3380 | -7090 | 40627 |
| | 6 中 間 | 0.418 | -2549 | 0 | 41378 |
| | S7 下 τ 点 | 0.170 | -3544 | 8116 | 42181 |
| | 7 下ハッチ点 | 0.160 | -4195 | ***** | 42408 |
| | 8, S8 下 端部 | 0.060 | -5420 | 13999 | 42732 |



2.4.1 設 計 荷 重 (CASE - 4)

(1) 頂版自重

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

(2) 土圧

① 鉛直土圧

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

② 水平土圧

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

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

ここに、 P_q はカルバート側面に作用する活荷重による水平土圧で
 $P_q = K_a \times 10.0 = 5.0 \text{ kN/m}^2$ とする。

(3) 活荷重

$$P_{v1} = 0$$

(4) 底版反力

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 62.582 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 0.732$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 0.732$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 2.732, \quad N_2 = 2 + \beta = 2.732$$

② 荷 重 項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 6.542 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 6.046 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd1} + 3 \times P_{hd2}) / 60 = 2.097 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd2} + 3 \times P_{hd1}) / 60 = 2.014 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -2.502 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 2.392 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -4.710 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 4.710 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 4.295 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -4.295 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.4.3 各部材の断面力 (CASE - 4)

(1) 頂 版

① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 22.558 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + M_{BC} = 4.774 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底 版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 24.407 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 5.103 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側 壁

① せん断力

$$\begin{aligned} S_{XAB} = & P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ & - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ & - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = 9.316 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} S_{XBA} = & P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ & - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ & - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = -8.290 \text{ kN}$$

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。

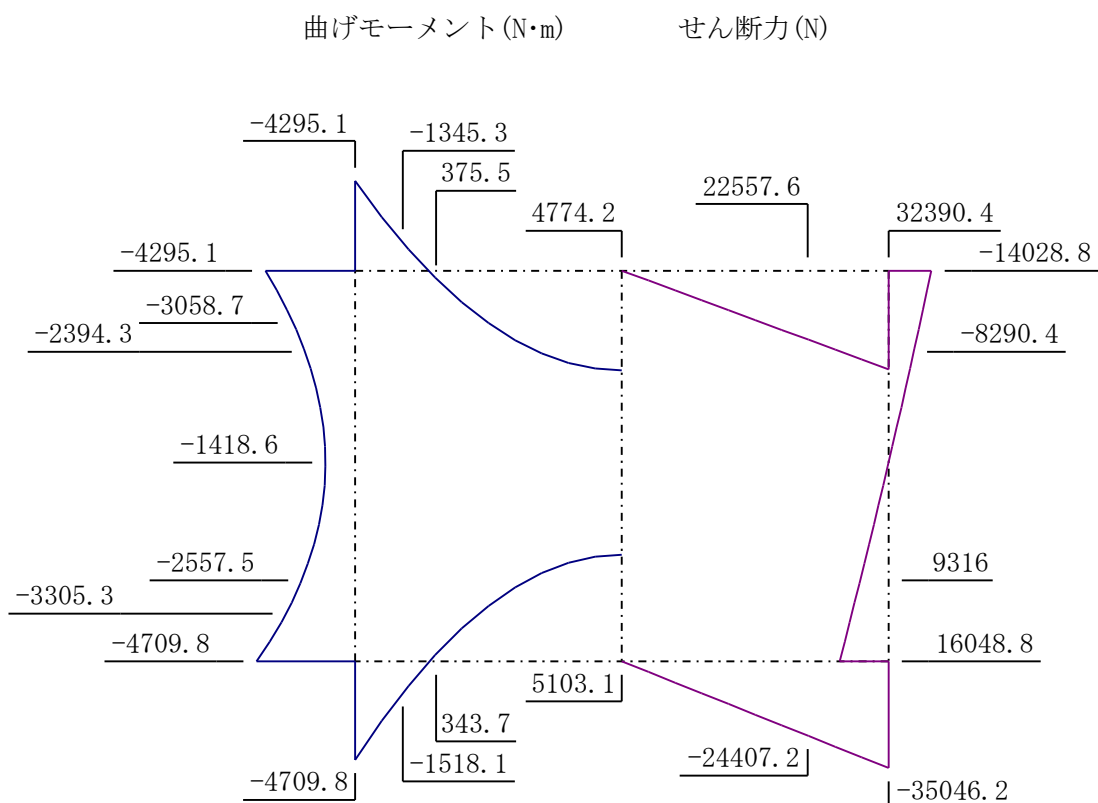
$$S_x = S_{AB} - P_{hd2} \times x - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 0$$

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 0.417 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} M_{max} = & S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 \\ & - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} \end{aligned} = -1.419 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[/単位長]

| 部材 | 照査点 | 距 離 x (m) | 曲げモーメント M (N*m) | せん断力 S (N) | 軸 力 N (N) |
|----|------------|--------------|--------------------|---------------|--------------|
| 頂版 | 3, S3 端 部 | 0.060 | -4295 | 32390 | 14029 |
| | 2 ハチ始点 | 0.160 | -1345 | ***** | 14029 |
| | S2 τ 点 | 0.170 | 376 | 22558 | 14029 |
| | 1 中 央 | 0.560 | 4774 | 0 | 14029 |
| 底版 | 9, S9 端 部 | 0.060 | -4710 | 35046 | 16049 |
| | 10 ハチ始点 | 0.160 | -1518 | ***** | 16049 |
| | S10 τ 点 | 0.170 | 344 | 24407 | 16049 |
| | 11 中 央 | 0.560 | 5103 | 0 | 16049 |
| 側壁 | 4, S4 上 端部 | 0.760 | -4295 | -14029 | 32390 |
| | 5 上ハチ点 | 0.660 | -3059 | ***** | 32714 |
| | S5 上 τ 点 | 0.650 | -2394 | -8290 | 32941 |
| | 6 中 間 | 0.417 | -1419 | 0 | 33696 |
| | S7 下 τ 点 | 0.170 | -2558 | 9316 | 34496 |
| | 7 下ハチ点 | 0.160 | -3305 | ***** | 34722 |
| | 8, S8 下 端部 | 0.060 | -4710 | 16049 | 35046 |



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 | -7.078 | 4.422 | 160.06 | 4.17 | 7.263 | 1 |
| 頂版 | ハチ始点 | -2.444 | 4.422 | 55.27 | 2.50 | 2.555 | 1 |
| | 中 央 | 11.532 | 4.422 | 260.76 | 2.50 | 11.642 | 1 |
| | 端 部 | -5.217 | 0.891 | 585.35 | 4.17 | 5.254 | 1 |
| 底版 | ハチ始点 | -1.528 | 13.999 | 10.92 | 2.50 | 1.878 | 3 |
| | 中 央 | 8.606 | 0.891 | 965.52 | 2.50 | 8.628 | 1 |
| | 上端部 | -7.078 | 46.712 | 15.15 | 4.17 | 9.025 | 1 |
| | 上ハチ点 | -6.652 | 47.036 | 14.14 | 2.50 | 7.827 | 1 |
| 側壁 | 中 間 | -5.177 | 49.073 | 10.55 | 2.50 | 6.404 | 1 |
| | 下ハチ点 | -5.177 | 49.044 | 10.56 | 2.50 | 6.403 | 1 |
| | 下端部 | -5.420 | 42.732 | 12.68 | 4.17 | 7.200 | 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 | 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 | 7.263 | 4.75 | 8.25 | 15.33 | 3.951 |
| 頂版 | ハチ始点 | 2.555 | 2.82 | 6.32 | 12.00 | 1.762 |
| | 中 央 | 11.642 | 6.01 | 9.51 | 12.00 | 9.771 |
| | 端 部 | 5.254 | 4.04 | 7.54 | 15.33 | 2.962 |
| 底版 | ハチ始点 | 1.878 | 2.41 | 5.91 | 12.00 | 0.607 |
| | 中 央 | 8.628 | 5.18 | 8.68 | 12.00 | 7.250 |
| | 上端部 | 9.025 | 5.29 | 8.79 | 15.33 | 2.388 |
| | 上ハチ点 | 7.827 | 4.93 | 8.43 | 12.00 | 3.650 |
| 側壁 | 中 間 | 6.404 | 4.46 | 7.96 | 12.00 | 2.263 |
| | 下ハチ点 | 6.403 | 4.46 | 7.96 | 12.00 | 2.265 |
| | 下端部 | 7.200 | 4.73 | 8.23 | 15.33 | 1.519 |
| $d + d' < T$ | | | | | | CHECK OK |

5 配筋及び実応力度

実応力度は、次式により計算する。

5.1 コンクリート及び鉄筋

$$\sigma_c = N / \{ b \times x / 2 - n \times A_s / x (c + T / 2 - x) \}$$

$$\sigma_s = n \times \sigma_c / x \times (c + T / 2 - x)$$

ここに、
 N : 軸力 (kN)
 b : 部材幅 (cm)
 T : 部材厚 (cm)
 c : 部材中心軸と鉄筋間距離 (cm)
 A_s : 主鉄筋断面積 (cm²/m)
 x : 中心軸。次の3次元方程式より求める。 (cm)

$$x^3 - 3 \times (T / 2 - e) \times x^2 + 6 \times n \times A_s / b \times (e + c) \times x - 6 \times n \times A_s / b \times (c + T / 2) \times (e + c) = 0$$

 e : 偏位量 (M / N) (cm)

配筋(製品当り)

| 頂版内側 | 頂版外側 | 底版内側 | 底版外側 | 側壁内側 | 側壁外側 |
|-----------|-----------|----------|-----------|---------|-----------|
| D 13 - 16 | D 10 - 16 | D 13 - 8 | D 10 - 16 | D-0 - 0 | 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 _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 | 5.706 | 3.827 | 3.59 | 112.8 | 0.0 |
| | ハチ始点 | 100.00 | 5.706 | 3.220 | 2.14 | 52.5 | 0.0 |
| | 中 央 | 100.00 | 10.136 | 3.824 | 8.43 | 154.6 | 0.0 |
| 底版 | 端 部 | 100.00 | 5.706 | 3.753 | 2.65 | 85.4 | 0.0 |
| | ハチ始点 | 100.00 | 5.706 | 4.043 | 1.30 | 21.5 | 0.0 |
| | 中 央 | 100.00 | 7.921 | 3.470 | 6.77 | 147.2 | 0.0 |
| 側壁 | 上端部 | 100.00 | 5.706 | 4.979 | 3.56 | 73.6 | 0.0 |
| | 上ハチ点 | 100.00 | 5.706 | 3.781 | 5.72 | 107.0 | 0.0 |
| | 中 間 | 100.00 | 5.706 | 4.085 | 4.39 | 71.2 | 0.0 |
| | 下ハチ点 | 100.00 | 5.706 | 4.084 | 4.39 | 71.2 | 0.0 |
| | 下端部 | 100.00 | 5.706 | 5.281 | 2.71 | 50.4 | 0.0 |
| $\sigma_c < \sigma_{ca}$ $\sigma_s < \sigma_{sa}$ | | | | | 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 | 45.447 | 2.902 | 27.910 | 22.558 | | | | |
| | M | 0.755 | | | | | | | |
| | N | 4.422 | | | | | | | |
| | 最大 | ○ | | | | | | | |
| 底版 τ点 | S | 34.381 | 4.751 | 29.760 | 24.407 | | | | |
| | M | 1.901 | | | | | | | |
| | N | 0.891 | | | | | | | |
| | 最大 | ○ | | | | | | | |
| 側壁上 τ点 | S | -3.818 | -2.242 | -7.090 | -8.290 | | | | |
| | M | | | | -2.394 | | | | |
| | N | | | | 32.941 | | | | |
| | 最大 | | | | ○ | | | | |
| 側壁下 τ点 | S | -0.708 | 3.268 | 8.116 | 9.316 | | | | |
| | M | | | | -2.558 | | | | |
| | N | | | | 34.496 | | | | |
| | 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(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 | 0.120 | 0.035 | 0.085000 | 1.400 | D13-8 | 10.136 | 1.192 | 1.500 |
| 底版 τ 点 | 0.120 | 0.035 | 0.085000 | 1.400 | D13-4 D10-4 | 7.921 | 0.932 | 1.459 |
| 側壁上 τ 点 | 0.120 | 0.035 | 0.085000 | 1.400 | D10-8 | 5.706 | 0.671 | 1.303 |
| 側壁下 τ 点 | 0.120 | 0.035 | 0.085000 | 1.400 | D10-8 | 5.706 | 0.671 | 1.303 |

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 | 0.755 | 4.422 | 0.12000 | 0.000144 | 0.06000 | 0.088 | 1.117 |
| 底版 τ 点 | 1.901 | 0.891 | 0.12000 | 0.000144 | 0.06000 | 0.018 | 1.009 |
| 側壁上 τ 点 | -2.394 | 32.941 | 0.12000 | 0.000144 | 0.06000 | 0.659 | 1.275 |
| 側壁下 τ 点 | -2.558 | 34.496 | 0.12000 | 0.000144 | 0.06000 | 0.690 | 1.270 |

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 | 0.270 | 1.400 | 1.500 | 1.117 | 0.633 |
| 底版 τ 点 | 0.270 | 1.400 | 1.459 | 1.009 | 0.557 |
| 側壁上 τ 点 | 0.270 | 1.400 | 1.303 | 1.275 | 0.628 |
| 側壁下 τ 点 | 0.270 | 1.400 | 1.303 | 1.270 | 0.625 |

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 | 45.447 | 0.535 | 0.633 | OK |
| 底版 τ 点 | 34.381 | 0.404 | 0.557 | OK |
| 側壁上 τ 点 | 8.290 | 0.098 | 0.628 | OK |
| 側壁下 τ 点 | 9.316 | 0.110 | 0.625 | OK |

以 上