

受付 No.

台帳 No. RL426000

■ □ ■ □ ■ □ ■ □ ■ □ ■ □ ■ □ ■ □ ■ □

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) 1100 mm
内 高(H) 1000 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) 1100 × (H) 1000 × (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 |
|----------|-------------|

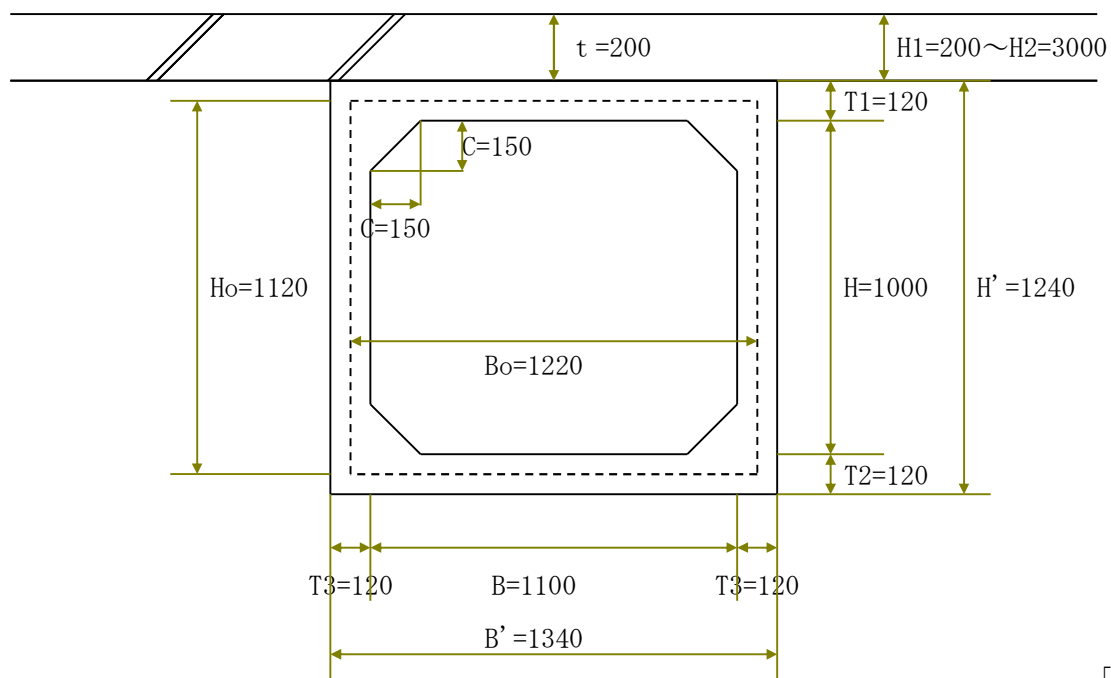
| | |
|-----------|--------------------------|
| 1.6 鉄筋かぶり | : 頂 版 底 版 側 壁 |
| | : (内側) 35 mm 35 mm 35 mm |
| | : (外側) 35 mm 35 mm 35 mm |

| | |
|----------------------|-----------------|
| 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

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

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} = 12.870 \text{ kN/m}^2$$

(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

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + \{ P_{v1} \times u + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) \} / B_o = 83.488 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 0.918$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 0.918$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 2.918, \quad N_2 = 2 + \beta = 2.918$$

② 荷 重 項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 10.355 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBC = \{2 \times (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^3 + P_{v1} \times u \times (3 \times B_o^2 - u^2)\} / (24 \times B_o) = 12.853 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd1} + 3 \times P_{hd2}) / 60 = 0.924 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd2} + 3 \times P_{hd1}) / 60 = 0.713 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -5.278 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 5.969 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -5.510 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 5.510 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 7.373 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -7.373 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.1.3 各部材の断面力 (CASE - 1)

(1) 頂版

① せん断力

$$S_{XBC} = \{(P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o + P_{v1} \times u\} / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2}) \times x = 45.633 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{\max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times u \times (B_o / 2 - u / 4) / 2 + M_{BC} = 13.582 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 34.648 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{\max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 10.023 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側壁

① せん断力

$$S_{XAB} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 1.324 \text{ kN}$$

$$S_{XBA} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = -4.392 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

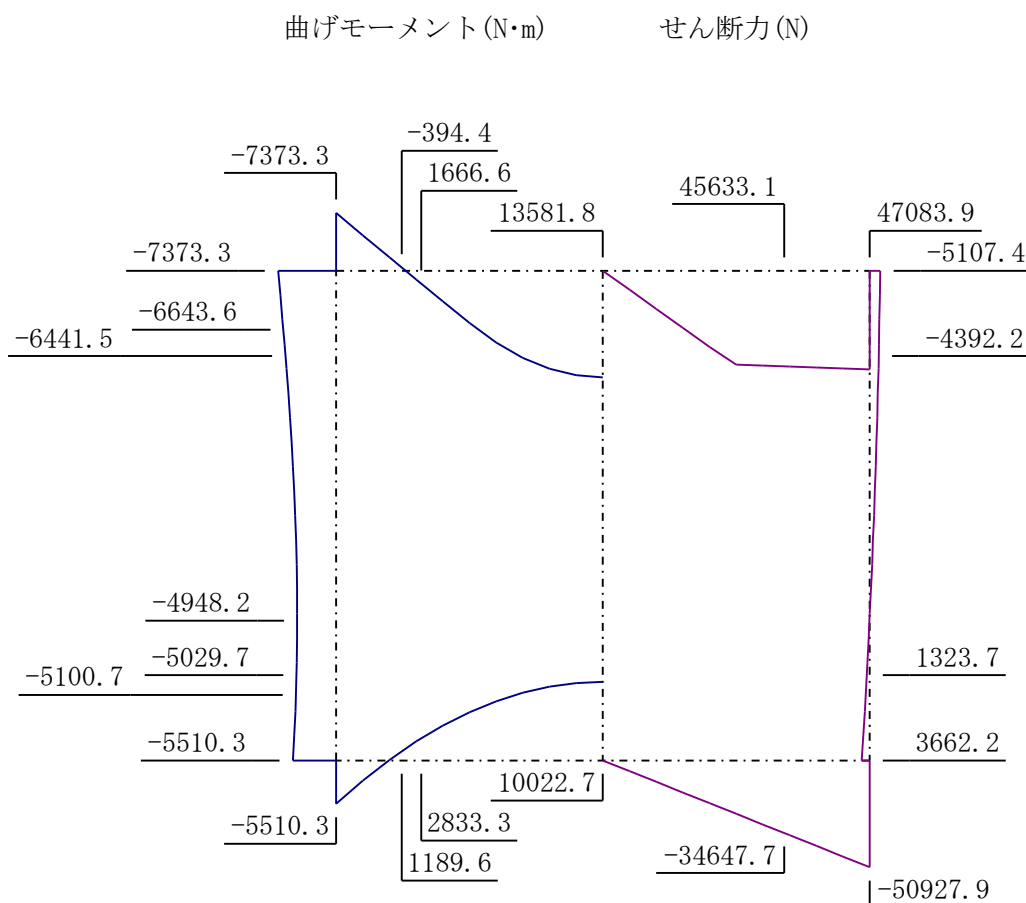
接点間の極値は、せん断力が0となる地点に生じる。

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

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 0.320 \text{ m}$$

$$M_{\max} = S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} = -4.948 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

| | | [/ 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 | -7373 | 47084 | 5107 |
| | 2 ハチ始点 | 0.210 | -394 | ***** | 5107 |
| | S2 τ 点 | 0.195 | 1667 | 45633 | 5107 |
| | 1 中 央 | 0.610 | 13582 | 0 | 5107 |
| 底版 | 9, S9 端 部 | 0.060 | -5510 | 50928 | 3662 |
| | 10 ハチ始点 | 0.210 | 1190 | ***** | 3662 |
| | S10 τ 点 | 0.195 | 2833 | 34648 | 3662 |
| | 11 中 央 | 0.610 | 10023 | 0 | 3662 |
| 側壁 | 4, S4 上 端部 | 1.060 | -7373 | -5107 | 47084 |
| | 5 上ハチ点 | 0.910 | -6644 | ***** | 47599 |
| | S5 上 τ 点 | 0.925 | -6442 | -4392 | 47753 |
| | 6 中 間 | 0.320 | -4948 | 0 | 49830 |
| | S7 下 τ 点 | 0.195 | -5030 | 1324 | 50259 |
| | 7 下ハチ点 | 0.210 | -5101 | ***** | 50413 |
| | 8, S8 下 端部 | 0.060 | -5510 | 3662 | 50928 |
| | | | | | |



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

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

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} + P_q = 17.870 \text{ kN/m}^2$$

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

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 13.742 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 0.918$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 0.918$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 2.918, \quad N_2 = 2 + \beta = 2.918$$

② 荷 重 項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 1.704 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 0.923 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times Phd1 + 3 \times Phd2) / 60 = 1.447 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times Phd2 + 3 \times Phd1) / 60 = 1.236 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -0.058 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -0.087 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -1.651 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 1.651 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 1.003 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -1.003 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.2.3 各部材の断面力 (CASE - 2)

(1) 頂版

① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 3.088 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + M_{BC} = 0.381 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底板

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = -3.975 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 0.906 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側壁

① せん断力

$$\begin{aligned} S_{XAB} &= P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ &\quad - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ &\quad - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = 5.391 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} S_{XBA} &= P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ &\quad - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ &\quad - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = -3.975 \text{ kN}$$

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。

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

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 0.568 \text{ m}$$

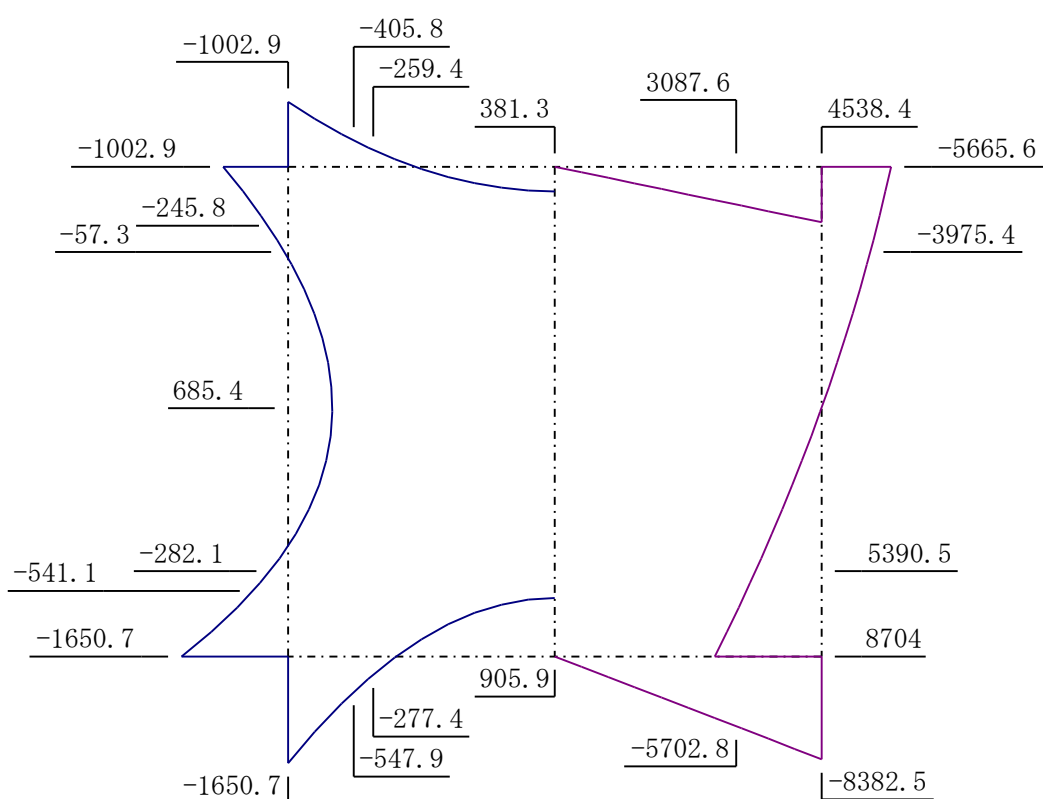
$$\begin{aligned} M_{max} &= S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 \\ &\quad - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} \end{aligned} = 0.685 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[/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 | -1003 | 4538 | 5666 |
| | 2 ハチ始点 | 0.210 | -406 | ***** | 5666 |
| | S2 τ 点 | 0.195 | -259 | 3088 | 5666 |
| | 1 中 央 | 0.610 | 381 | 0 | 5666 |
| 底版 | 9, S9 端 部 | 0.060 | -1651 | 8383 | 8704 |
| | 10 ハチ始点 | 0.210 | -548 | ***** | 8704 |
| | S10 τ 点 | 0.195 | -277 | 5703 | 8704 |
| | 11 中 央 | 0.610 | 906 | 0 | 8704 |
| 側壁 | 4, S4 上 端部 | 1.060 | -1003 | -5666 | 4538 |
| | 5 上ハチ点 | 0.910 | -246 | ***** | 5053 |
| | S5 上 τ 点 | 0.925 | -57 | -3975 | 5208 |
| | 6 中 間 | 0.568 | 685 | 0 | 6433 |
| | S7 下 τ 点 | 0.195 | -282 | 5391 | 7713 |
| | 7 下ハチ点 | 0.210 | -541 | ***** | 7868 |
| | 8, S8 下 端部 | 0.060 | -1651 | 8704 | 8383 |

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

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

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} = 38.070 \text{ kN/m}^2$$

(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

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 77.866 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 0.918$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 0.918$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 2.918, \quad N_2 = 2 + \beta = 2.918$$

② 荷重項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 9.658 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 8.876 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times Phd1 + 3 \times Phd2) / 60 = 3.558 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times Phd2 + 3 \times Phd1) / 60 = 3.347 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -3.104 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 2.959 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -6.808 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 6.808 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 6.160 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -6.160 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.3.3 各部材の断面力 (CASE - 3)

(1) 頂 版

① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 29.699 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + M_{BC} = 7.154 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底 版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 32.314 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 7.679 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側 壁

① せん断力

$$\begin{aligned} S_{XAB} = & P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ & - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ & - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = 12.764 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} S_{XBA} = & P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ & - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ & - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = -11.348 \text{ kN}$$

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。

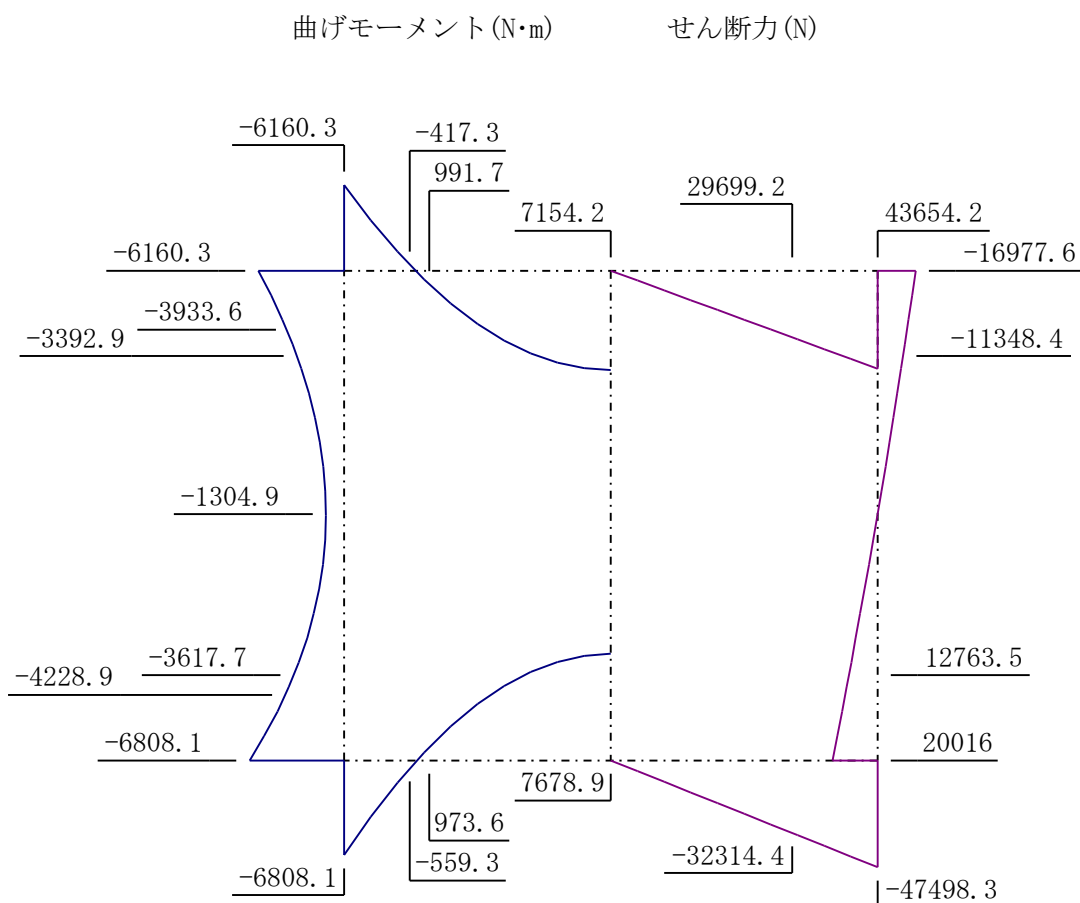
$$S_x = S_{AB} - P_{hd2} \times x - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 0$$

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 0.563 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} M_{max} = & S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 \\ & - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} \end{aligned} = -1.305 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[/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 | -6160 | 43654 | 16978 |
| | 2 ハチ始点 | 0.210 | -417 | ***** | 16978 |
| | S2 τ 点 | 0.195 | 992 | 29699 | 16978 |
| | 1 中 央 | 0.610 | 7154 | 0 | 16978 |
| 底版 | 9, S9 端 部 | 0.060 | -6808 | 47498 | 20016 |
| | 10 ハチ始点 | 0.210 | -559 | ***** | 20016 |
| | S10 τ 点 | 0.195 | 974 | 32314 | 20016 |
| | 11 中 央 | 0.610 | 7679 | 0 | 20016 |
| 側壁 | 4, S4 上 端部 | 1.060 | -6160 | -16978 | 43654 |
| | 5 上ハチ点 | 0.910 | -3934 | ***** | 44169 |
| | S5 上 τ 点 | 0.925 | -3393 | -11348 | 44324 |
| | 6 中 間 | 0.563 | -1305 | 0 | 45566 |
| | S7 下 τ 点 | 0.195 | -3618 | 12764 | 46829 |
| | 7 下ハチ点 | 0.210 | -4229 | ***** | 46984 |
| | 8, S8 下 端部 | 0.060 | -6808 | 20016 | 47498 |



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

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

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} + P_q = 43.070 \text{ kN/m}^2$$

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

(3) 活荷重

$$P_{v1} = 0$$

(4) 底版反力

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 64.142 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 0.918$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 0.918$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 2.918, \quad N_2 = 2 + \beta = 2.918$$

② 荷 重 項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 7.956 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 7.174 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd1} + 3 \times P_{hd2}) / 60 = 4.081 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd2} + 3 \times P_{hd1}) / 60 = 3.870 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -1.944 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 1.799 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -6.171 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 6.171 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 5.523 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -5.523 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.4.3 各部材の断面力 (CASE - 4)

(1) 頂 版

① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 24.004 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + M_{BC} = 5.238 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底 版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 26.619 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 5.763 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側 壁

① せん断力

$$\begin{aligned} S_{XAB} = & P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ & - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ & - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = 14.588 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} S_{XBA} = & P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ & - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ & - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = -13.173 \text{ kN}$$

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。

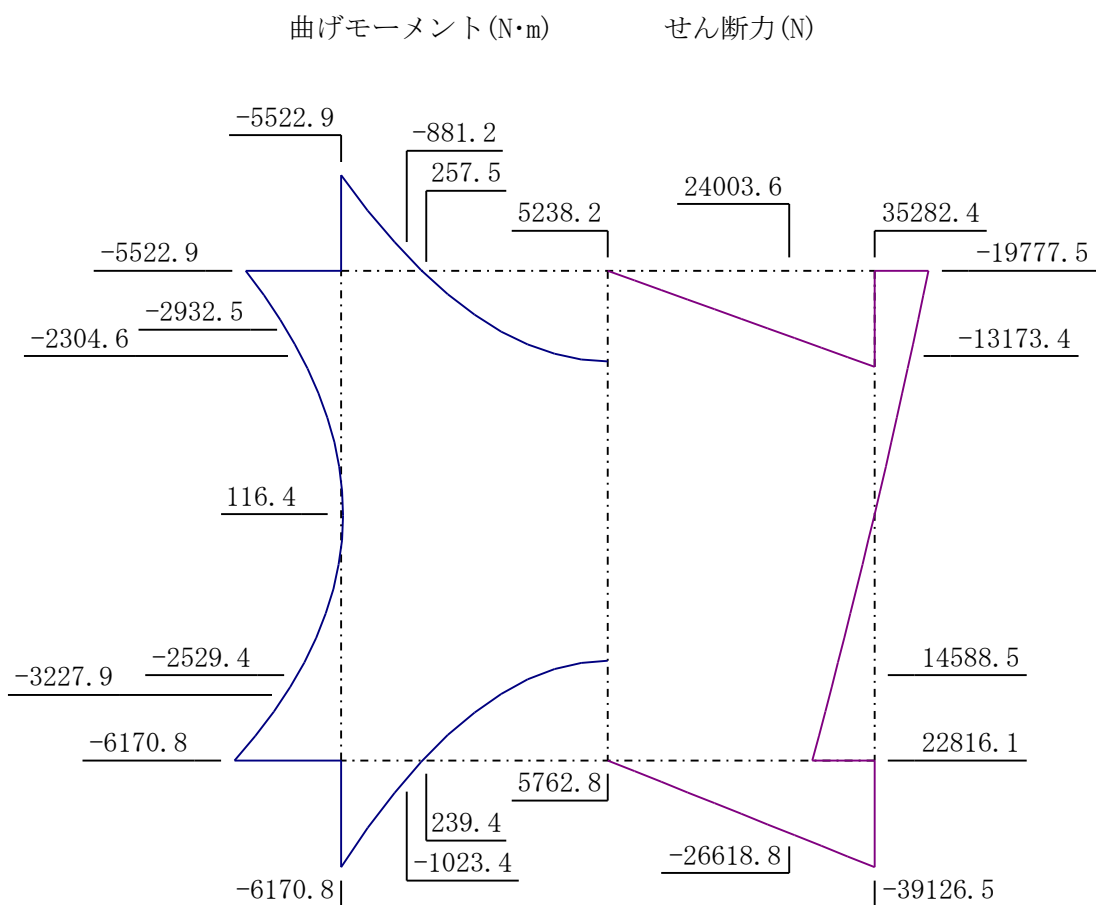
$$S_x = S_{AB} - P_{hd2} \times x - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 0$$

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 0.563 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} M_{max} = & S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 \\ & - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} \end{aligned} = 0.116 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[/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 | -5523 | 35282 | 19778 |
| | 2 ハチ始点 | 0.210 | -881 | ***** | 19778 |
| | S2 τ 点 | 0.195 | 258 | 24004 | 19778 |
| | 1 中 央 | 0.610 | 5238 | 0 | 19778 |
| 底版 | 9, S9 端 部 | 0.060 | -6171 | 39127 | 22816 |
| | 10 ハチ始点 | 0.210 | -1023 | ***** | 22816 |
| | S10 τ 点 | 0.195 | 239 | 26619 | 22816 |
| | 11 中 央 | 0.610 | 5763 | 0 | 22816 |
| 側壁 | 4, S4 上 端部 | 1.060 | -5523 | -19778 | 35282 |
| | 5 上ハチ点 | 0.910 | -2933 | ***** | 35797 |
| | S5 上 τ 点 | 0.925 | -2305 | -13173 | 35952 |
| | 6 中 間 | 0.563 | 116 | 0 | 37194 |
| | S7 下 τ 点 | 0.195 | -2529 | 14589 | 38457 |
| | 7 下ハチ点 | 0.210 | -3228 | ***** | 38612 |
| | 8, S8 下 端部 | 0.060 | -6171 | 22816 | 39127 |



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 | -7.373 | 5.107 | 144.37 | 5.00 | 7.629 | 1 |
| 頂版 | ハチ始点 | -0.394 | 5.107 | 7.72 | 2.50 | 0.522 | 1 |
| | 中 央 | 13.582 | 5.107 | 265.92 | 2.50 | 13.709 | 1 |
| | 端 部 | -6.808 | 20.016 | 34.01 | 5.00 | 7.809 | 3 |
| 底版 | ハチ始点 | 1.190 | 3.662 | 32.48 | 2.50 | 1.281 | 1 |
| | 中 央 | 10.023 | 3.662 | 273.68 | 2.50 | 10.114 | 1 |
| | 上端部 | -7.373 | 47.084 | 15.66 | 5.00 | 9.727 | 1 |
| | 上ハチ点 | -6.644 | 47.599 | 13.96 | 2.50 | 7.834 | 1 |
| 側壁 | 中 間 | -4.948 | 49.830 | 9.93 | 2.50 | 6.194 | 1 |
| | 下ハチ点 | -5.101 | 50.413 | 10.12 | 2.50 | 6.361 | 1 |
| | 下端部 | -6.808 | 47.498 | 14.33 | 5.00 | 9.183 | 3 |

注1) CASE のMは、曲げモーメント抽出ケースを示す。

4 必要有効高および必要鉄筋量

4.1 必要有効高

$$k = n \times \sigma_{ca} / (n \times \sigma_{ca} + \sigma_{sa}) = 0.568$$

$$c1 = \sqrt{[6 / \sigma_{ca} / (3 - k) / k]} = 0.557$$

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

ここに、
M : 軸力を考慮した曲げモーメント (kN・m/m)
b : 単位長 (cm)
d' : 鉄筋かぶり (cm)
h : 必要部材厚 (cm)
n : ヤング係数比 (15)

4.2 必要鉄筋量

鉄筋の曲げ引張応力度が許容値(σ_{sa})に達する場合の必要鉄筋量(A_s)

$$A_s = [\sigma_c / 2 \times s - N / (b \times da)] / \sigma_{sa} \times b \times da$$

$$\begin{aligned} \therefore \sigma_c^3 + [3 \times \sigma_{sa} / (2 \times n) - 3 \times N \times (e + c) / (b \times da^2)] \times \sigma_c^2 \\ - 6 \times N \times (e + c) / (n \times b \times da^2) \times \sigma_{sa} \times \sigma_c \\ - 3 \times N \times (e + c) / (N^2 \times b \times da^2) \times \sigma_{sa}^2 = 0 \end{aligned}$$

上式を解いて σ_c を求める。また $da = T - d'$ とする。

$$\therefore s = n \times \sigma_c / (n \times \sigma_c \times \sigma_{sa})$$

| 部材 | 点 | Ms (kN・m/m) | 必要有効高 d (cm) | 必要部材厚 d+d' (cm) | 部材厚 T (cm) | 必要鉄筋量 As (cm ² /m) |
|------------|------|----------------|-----------------|--------------------|---------------|----------------------------------|
| | 端 部 | 7.629 | 4.87 | 8.37 | 17.00 | 3.538 |
| 頂版 | ハチ始点 | 0.522 | 1.27 | 4.77 | 12.00 | 0.080 |
| | 中 央 | 13.709 | 6.52 | 10.02 | 12.00 | 11.644 |
| | 端 部 | 7.809 | 4.92 | 8.42 | 17.00 | 2.701 |
| 底版 | ハチ始点 | 1.281 | 1.99 | 5.49 | 12.00 | 0.770 |
| | 中 央 | 10.114 | 5.60 | 9.10 | 12.00 | 8.421 |
| | 上端部 | 9.727 | 5.50 | 9.00 | 17.00 | 2.027 |
| | 上ハチ点 | 7.834 | 4.93 | 8.43 | 12.00 | 3.620 |
| 側壁 | 中 間 | 6.194 | 4.38 | 7.88 | 12.00 | 2.032 |
| | 下ハチ点 | 6.361 | 4.44 | 7.94 | 12.00 | 2.142 |
| | 下端部 | 9.183 | 5.34 | 8.84 | 17.00 | 1.711 |
| 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 - 8 | D 10 - 16 | D 13 - 16 | D 10 - 16 | D-0 - 0 | D 10 - 16 |
| D 13 - 8 | D 0 - 0 | D 0 - 0 | 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 | 4.169 | 3.02 101.4 0.0 |
| | ハチ始点 | 100.00 | 5.706 | 4.588 | 0.33 4.2 0.0 |
| | 中 央 | 100.00 | 13.012 | 4.168 | 9.25 144.2 0.0 |
| 底版 | 端 部 | 100.00 | 5.706 | 4.668 | 2.80 79.5 0.0 |
| | ハチ始点 | 100.00 | 10.136 | 4.100 | 0.88 14.1 0.0 |
| | 中 央 | 100.00 | 10.136 | 3.822 | 7.32 134.5 0.0 |
| 側壁 | 上端部 | 100.00 | 5.706 | 5.575 | 3.00 63.9 0.0 |
| | 上ハチ点 | 100.00 | 5.706 | 3.792 | 5.71 106.3 0.0 |
| | 中 間 | 100.00 | 5.706 | 4.165 | 4.18 65.3 0.0 |
| | 下ハチ点 | 100.00 | 5.706 | 4.139 | 4.32 68.2 0.0 |
| | 下端部 | 100.00 | 5.706 | 5.752 | 2.76 55.7 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 | 45.633 | 3.088 | 29.699 | 24.004 | | | | |
| | M | 1.667 | | | | | | | |
| | N | 5.107 | | | | | | | |
| | 最大 | ○ | | | | | | | |
| 底版 τ点 | S | 34.648 | 5.703 | 32.314 | 26.619 | | | | |
| | M | 2.833 | | | | | | | |
| | N | 3.662 | | | | | | | |
| | 最大 | ○ | | | | | | | |
| 側壁上 τ点 | S | -4.392 | -3.975 | -11.348 | -13.173 | | | | |
| | M | | | | -2.305 | | | | |
| | N | | | | 35.952 | | | | |
| | 最大 | | | | ○ | | | | |
| 側壁下 τ点 | S | 1.324 | 5.391 | 12.764 | 14.588 | | | | |
| | M | | | | -2.529 | | | | |
| | N | | | | 38.457 | | | | |
| | 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 | 0.090000 | 1.400 | D16-4 D13-4 | 13.012 | 1.446 | 1.500 |
| 底版 τ 点 | 0.120 | 0.035 | 0.090000 | 1.400 | D13-8 | 10.136 | 1.126 | 1.500 |
| 側壁上 τ 点 | 0.125 | 0.035 | 0.090000 | 1.400 | D10-8 | 5.706 | 0.634 | 1.280 |
| 側壁下 τ 点 | 0.125 | 0.035 | 0.090000 | 1.400 | D10-8 | 5.706 | 0.634 | 1.280 |

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 | 1.667 | 5.107 | 0.12000 | 0.000144 | 0.06000 | 0.102 | 1.061 |
| 底版 τ 点 | 2.833 | 3.662 | 0.12000 | 0.000144 | 0.06000 | 0.073 | 1.026 |
| 側壁上 τ 点 | -2.305 | 35.952 | 0.12500 | 0.000163 | 0.06250 | 0.750 | 1.325 |
| 側壁下 τ 点 | -2.529 | 38.457 | 0.12500 | 0.000163 | 0.06250 | 0.802 | 1.317 |

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 | 1.061 | 0.602 |
| 底版 τ 点 | 0.270 | 1.400 | 1.500 | 1.026 | 0.582 |
| 側壁上 τ 点 | 0.270 | 1.400 | 1.280 | 1.325 | 0.641 |
| 側壁下 τ 点 | 0.270 | 1.400 | 1.280 | 1.317 | 0.637 |

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 | 45.633 | 0.507 | 0.602 | OK |
| 底版 τ 点 | 34.648 | 0.385 | 0.582 | OK |
| 側壁上 τ 点 | 13.173 | 0.146 | 0.641 | OK |
| 側壁下 τ 点 | 14.588 | 0.162 | 0.637 | OK |

以 上