

受付 No.

台帳 No. RM408000

■ □ ■ □ ■ □ ■ □ ■ □ ■ □ ■ □ ■ □ ■ □

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) 1800 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) 1800 × (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 |
|----------|-------------|

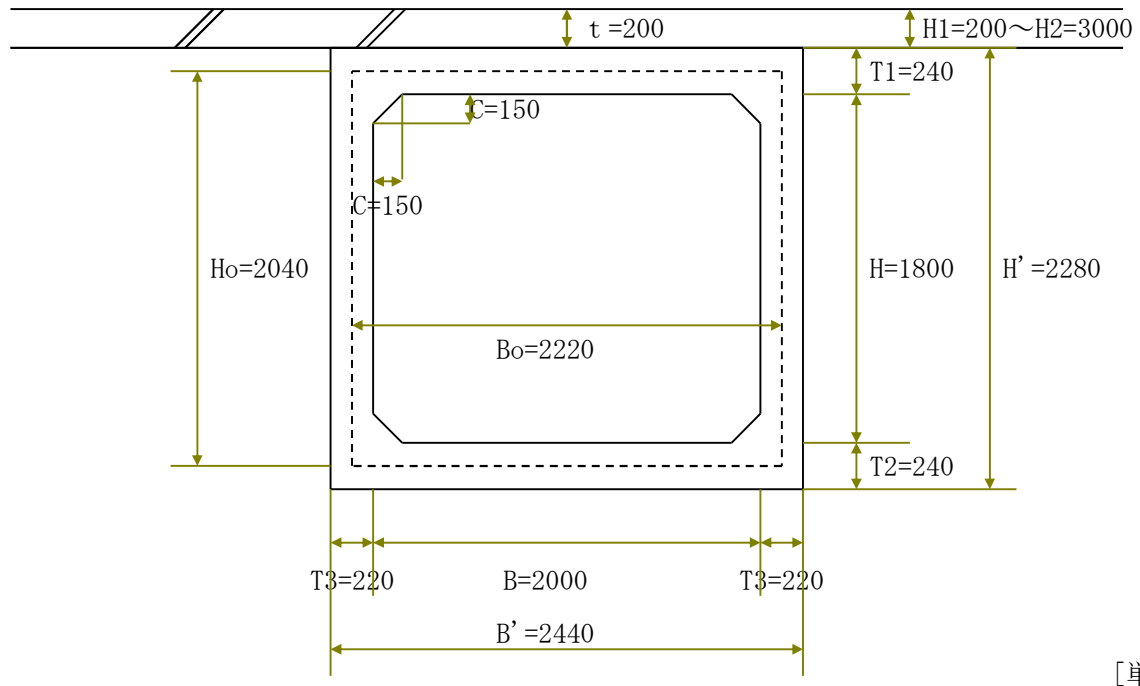
| | |
|-----------|--------------------------|
| 1.6 鉄筋かぶり | : 頂 版 底 版 側 壁 |
| | : (内側) 35 mm 35 mm 35 mm |
| | : (外側) 35 mm 35 mm 35 mm |

| | |
|----------------------|-----------------|
| 1.7 断面力低減係数 (土被り H1) | : $\beta = 0.9$ |
| (土被り H2) | : $\beta = 0.9$ |

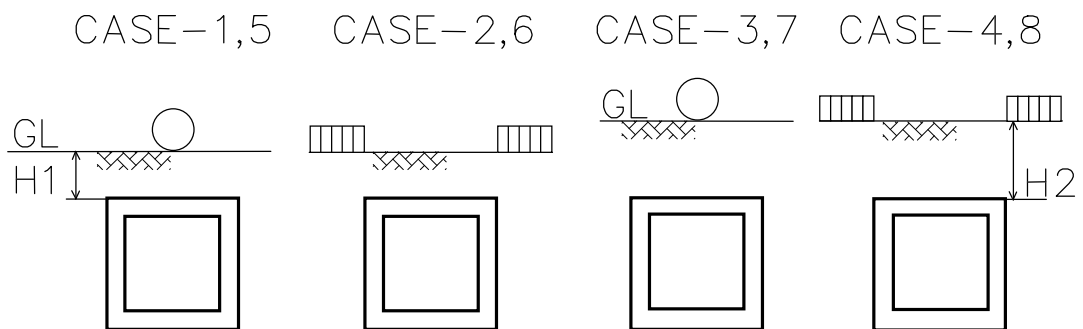
1.8 許容応力度

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



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

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 5.880 \text{ kN/m}^2$$

(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

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2) \} = 3.330 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} = 21.690 \text{ kN/m}^2$$

(3) 活荷重

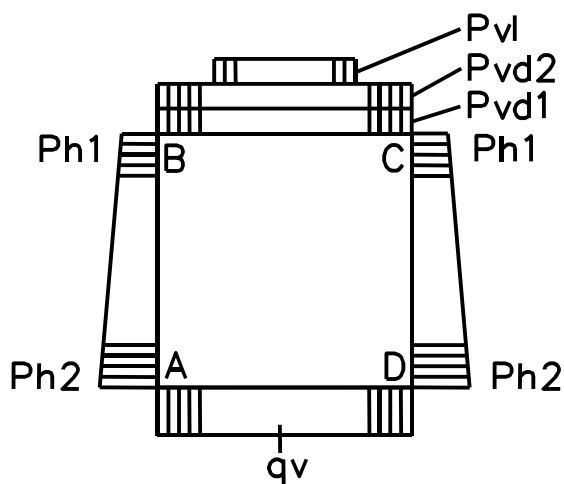
$$\begin{aligned} \text{① 輪分布幅 } u &= a + 2 \times H1 = 0.600 \text{ m} \\ v &= b + 2 \times H1 = 0.900 \text{ m} \end{aligned}$$

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

(4) 底版反力

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + \{ P_{v1} \times u + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) \} / B_o = 59.112 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.193$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.193$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 3.193, \quad N_2 = 2 + \beta = 3.193$$

② 荷 重 項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 24.277 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBC = \{2 \times (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^3 + P_{v1} \times u \times (3 \times B_o^2 - u^2)\} / (24 \times B_o) = 27.301 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd1} + 3 \times P_{hd2}) / 60 = 4.975 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd2} + 3 \times P_{hd1}) / 60 = 3.702 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -9.269 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 10.294 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -13.219 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 13.219 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 15.020 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -15.020 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.1.3 各部材の断面力 (CASE - 1)

(1) 頂 版

① せん断力

$$S_{XBC} = \{(P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o + P_{v1} \times u\} / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2}) \times x = 50.901 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{\max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times u \times (B_o / 2 - u / 4) / 2 + M_{BC} = 32.218 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底 版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 47.585 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{\max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 23.197 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側 壁

① せん断力

$$S_{XAB} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 8.802 \text{ kN}$$

$$S_{XBA} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = -9.088 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

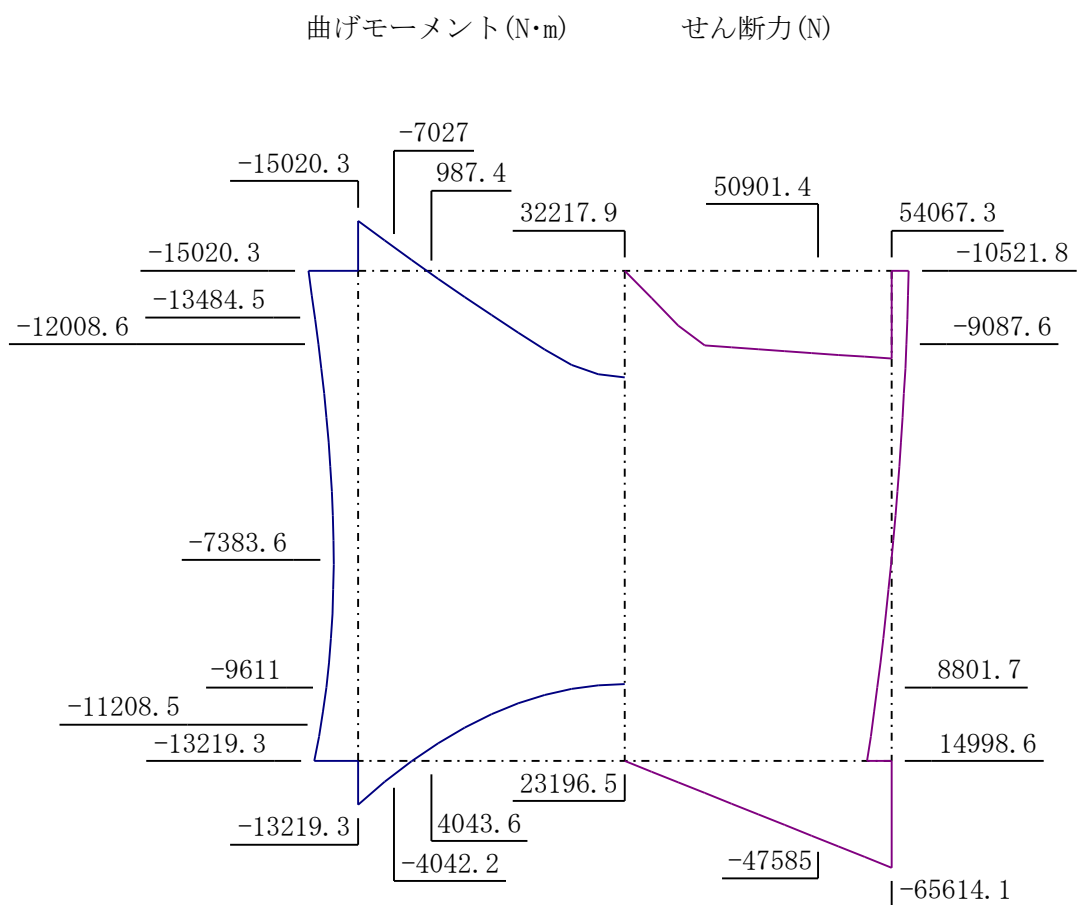
接点間の極値は、せん断力が 0 となる地点に生じる。

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

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 0.837 \text{ m}$$

$$M_{\max} = S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} = -7.384 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

| | | [/ 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 | 0.110 | -15020 | 54067 | 10522 |
| | 2 ハチ始点 | 0.260 | -7027 | ***** | 10522 |
| | S2 τ 点 | 0.305 | 987 | 50901 | 10522 |
| | 1 中 央 | 1.110 | 32218 | 0 | 10522 |
| 底版 | 9, S9 端 部 | 0.110 | -13219 | 65614 | 14999 |
| | 10 ハチ始点 | 0.260 | -4042 | ***** | 14999 |
| | S10 τ 点 | 0.305 | 4044 | 47585 | 14999 |
| | 11 中 央 | 1.110 | 23197 | 0 | 14999 |
| 側壁 | 4, S4 上 端部 | 1.920 | -15020 | -10522 | 54067 |
| | 5 上ハチ点 | 1.770 | -13485 | ***** | 54916 |
| | S5 上 τ 点 | 1.735 | -12009 | -9088 | 55794 |
| | 6 中 間 | 0.837 | -7384 | 0 | 60877 |
| | S7 下 τ 点 | 0.305 | -9611 | 8802 | 63888 |
| | 7 下ハチ点 | 0.270 | -11209 | ***** | 64765 |
| | 8, S8 下 端部 | 0.120 | -13219 | 14999 | 65614 |



2.2.1 設 計 荷 重 (CASE - 2)

(1) 頂版自重

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 5.880 \text{ kN/m}^2$$

(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

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2) \} + P_q = 8.330 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} + P_q = 26.690 \text{ kN/m}^2$$

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

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 20.783 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.193$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.193$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 3.193, \quad N_2 = 2 + \beta = 3.193$$

② 荷重項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 8.535 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 4.263 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times Phd1 + 3 \times Phd2) / 60 = 6.709 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times Phd2 + 3 \times Phd1) / 60 = 5.436 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -0.507 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -0.209 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -7.931 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 7.931 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 4.512 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -4.512 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.2.3 各部材の断面力 (CASE - 2)

(1) 頂 版

① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 8.356 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + M_{BC} = 1.883 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底 版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = -10.104 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 4.872 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側 壁

① せん断力

$$\begin{aligned} S_{XAB} &= P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ &\quad - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ &\quad - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = 14.936 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} S_{XBA} &= P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ &\quad - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ &\quad - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = -10.104 \text{ kN}$$

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。

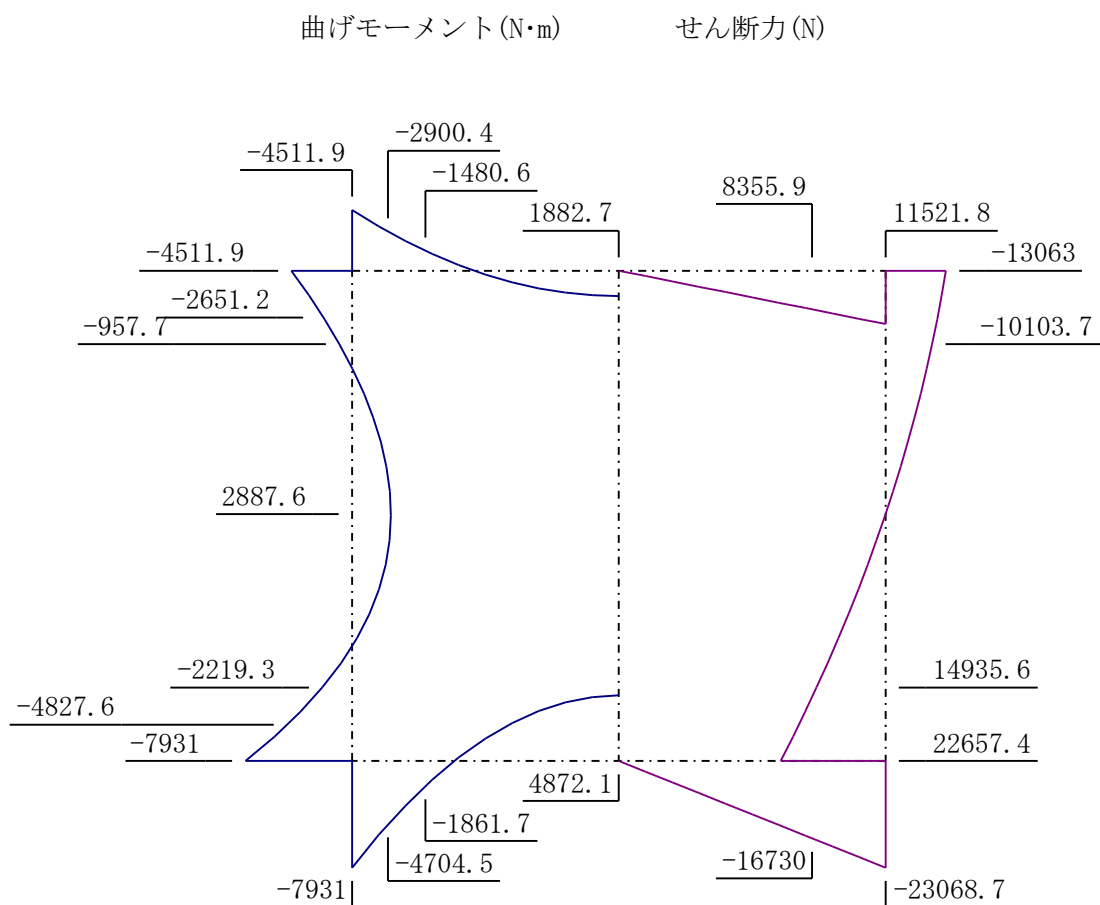
$$S_x = S_{AB} - P_{hd2} \times x - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 0$$

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 1.027 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} M_{max} &= S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 \\ &\quad - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} \end{aligned} = 2.888 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[/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 | 0.110 | -4512 | 11522 | 13063 |
| | 2 ハチ始点 | 0.260 | -2900 | ***** | 13063 |
| | S2 τ 点 | 0.305 | -1481 | 8356 | 13063 |
| | 1 中 央 | 1.110 | 1883 | 0 | 13063 |
| 底版 | 9, S9 端 部 | 0.110 | -7931 | 23069 | 22657 |
| | 10 ハチ始点 | 0.260 | -4705 | ***** | 22657 |
| | S10 τ 点 | 0.305 | -1862 | 16730 | 22657 |
| | 11 中 央 | 1.110 | 4872 | 0 | 22657 |
| 側壁 | 4, S4 上 端部 | 1.920 | -4512 | -13063 | 11522 |
| | 5 上ハチ点 | 1.770 | -2651 | ***** | 12371 |
| | S5 上 τ 点 | 1.735 | -958 | -10104 | 13248 |
| | 6 中 間 | 1.027 | 2888 | 0 | 17256 |
| | S7 下 τ 点 | 0.305 | -2219 | 14936 | 21342 |
| | 7 下ハチ点 | 0.270 | -4828 | ***** | 22220 |
| | 8, S8 下 端部 | 0.120 | -7931 | 22657 | 23069 |



2.3.1 設 計 荷 重 (CASE - 3)

(1) 頂版自重

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 5.880 \text{ kN/m}^2$$

(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

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2) \} = 28.530 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} = 46.890 \text{ kN/m}^2$$

(3) 活荷重

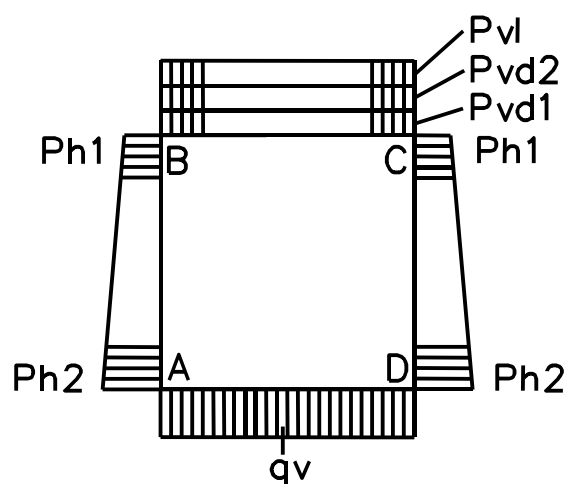
$$\begin{aligned} \text{① 輪分布幅} \quad u &= a + 2 \times H2 = 6.200 \text{ m} \\ v &= b + 2 \times H2 = 6.500 \text{ m} \end{aligned}$$

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

(4) 底版反力

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 84.907 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.193$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.193$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 3.193, \quad N_2 = 2 + \beta = 3.193$$

② 荷 重 項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 34.871 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 30.599 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times Phd1 + 3 \times Phd2) / 60 = 13.715 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times Phd2 + 3 \times Phd1) / 60 = 12.441 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -9.321 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 8.606 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -23.751 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 23.751 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 20.332 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -20.332 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.3.3 各部材の断面力 (CASE - 3)

(1) 頂 版

① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 59.976 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + M_{BC} = 25.567 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底 版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 68.350 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 28.556 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側 壁

① せん断力

$$\begin{aligned} S_{XAB} = & P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ & - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ & - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = 29.379 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} S_{XBA} = & P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ & - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ & - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = -24.547 \text{ kN}$$

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。

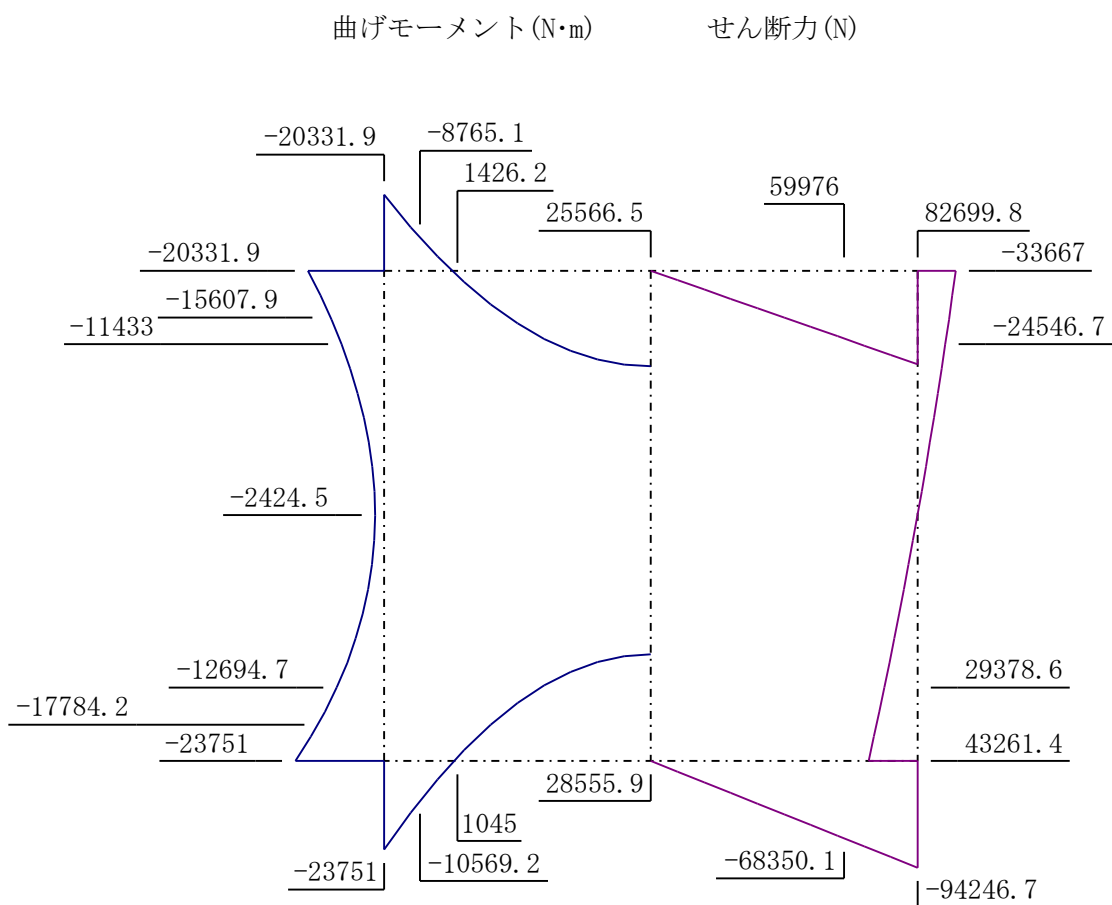
$$S_x = S_{AB} - P_{hd2} \times x - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 0$$

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 1.023 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} M_{max} = & S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 \\ & - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} \end{aligned} = -2.425 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[/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 | 0.110 | -20332 | 82700 | 33667 |
| | 2 ハチ始点 | 0.260 | -8765 | ***** | 33667 |
| | S2 τ 点 | 0.305 | 1426 | 59976 | 33667 |
| | 1 中 央 | 1.110 | 25567 | 0 | 33667 |
| 底版 | 9, S9 端 部 | 0.110 | -23751 | 94247 | 43261 |
| | 10 ハチ始点 | 0.260 | -10569 | ***** | 43261 |
| | S10 τ 点 | 0.305 | 1045 | 68350 | 43261 |
| | 11 中 央 | 1.110 | 28556 | 0 | 43261 |
| 側壁 | 4, S4 上 端部 | 1.920 | -20332 | -33667 | 82700 |
| | 5 上ハチ点 | 1.770 | -15608 | ***** | 83549 |
| | S5 上 τ 点 | 1.735 | -11433 | -24547 | 84426 |
| | 6 中 間 | 1.023 | -2425 | 0 | 88456 |
| | S7 下 τ 点 | 0.305 | -12695 | 29379 | 92520 |
| | 7 下ハチ点 | 0.270 | -17784 | ***** | 93398 |
| | 8, S8 下 端部 | 0.120 | -23751 | 43261 | 94247 |



2.4.1 設 計 荷 重 (CASE - 4)

(1) 頂版自重

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 5.880 \text{ kN/m}^2$$

(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

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2) \} + P_q = 33.530 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} + P_q = 51.890 \text{ kN/m}^2$$

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

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 71.183 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.193$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.193$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 3.193, \quad N_2 = 2 + \beta = 3.193$$

② 荷 重 項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 29.235 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 24.962 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd1} + 3 \times P_{hd2}) / 60 = 15.449 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd2} + 3 \times P_{hd1}) / 60 = 14.175 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -5.960 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 5.245 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -22.124 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 22.124 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 18.705 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -18.705 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.4.3 各部材の断面力 (CASE - 4)

(1) 頂 版

① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 48.928 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + M_{BC} = 18.738 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底 版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 57.302 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 21.728 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側 壁

① せん断力

$$\begin{aligned} S_{XAB} = & P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ & - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ & - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = 32.953 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} S_{XBA} = & P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ & - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ & - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = -28.122 \text{ kN}$$

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。

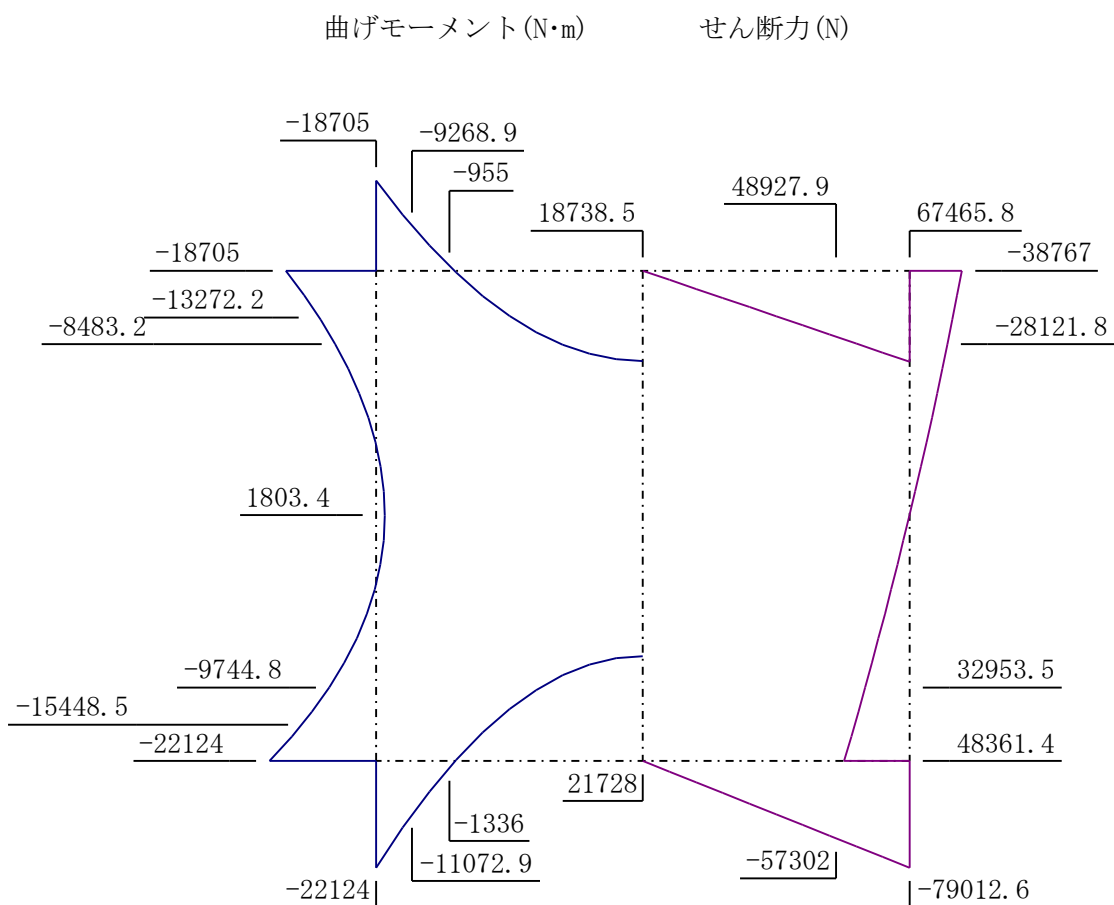
$$S_x = S_{AB} - P_{hd2} \times x - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 0$$

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 1.023 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} M_{max} = & S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 \\ & - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} \end{aligned} = 1.803 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[/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 | 0.110 | -18705 | 67466 | 38767 |
| | 2 ハチ始点 | 0.260 | -9269 | ***** | 38767 |
| | S2 τ 点 | 0.305 | -955 | 48928 | 38767 |
| | 1 中 央 | 1.110 | 18739 | 0 | 38767 |
| 底版 | 9, S9 端 部 | 0.110 | -22124 | 79013 | 48361 |
| | 10 ハチ始点 | 0.260 | -11073 | ***** | 48361 |
| | S10 τ 点 | 0.305 | -1336 | 57302 | 48361 |
| | 11 中 央 | 1.110 | 21728 | 0 | 48361 |
| 側壁 | 4, S4 上 端部 | 1.920 | -18705 | -38767 | 67466 |
| | 5 上ハチ点 | 1.770 | -13272 | ***** | 68315 |
| | S5 上 τ 点 | 1.735 | -8483 | -28122 | 69192 |
| | 6 中 間 | 1.023 | 1803 | 0 | 73222 |
| | S7 下 τ 点 | 0.305 | -9745 | 32954 | 77286 |
| | 7 下ハチ点 | 0.270 | -15449 | ***** | 78164 |
| | 8, S8 下 端部 | 0.120 | -22124 | 48361 | 79013 |



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 | -20.332 | 33.667 | 60.39 | 11.00 | 24.035 | 3 |
| 頂版 | ハチ始点 | -7.027 | 10.522 | 66.79 | 8.50 | 7.921 | 1 |
| | 中 央 | 32.218 | 10.522 | 306.20 | 8.50 | 33.112 | 1 |
| | 端 部 | -23.751 | 43.261 | 54.90 | 11.00 | 28.510 | 3 |
| 底版 | ハチ始点 | -11.073 | 48.361 | 22.90 | 8.50 | 15.184 | 4 |
| | 中 央 | 28.556 | 43.261 | 66.01 | 8.50 | 32.233 | 3 |
| | 上端部 | -20.332 | 82.700 | 24.59 | 10.00 | 28.602 | 3 |
| | 上ハチ点 | -13.485 | 54.916 | 24.55 | 7.50 | 17.603 | 1 |
| 側壁 | 中 間 | -7.384 | 60.877 | 12.13 | 7.50 | 11.949 | 1 |
| | 下ハチ点 | -17.784 | 93.398 | 19.04 | 7.50 | 24.789 | 3 |
| | 下端部 | -23.751 | 94.247 | 25.20 | 10.00 | 33.176 | 3 |

注1) CASEのMは、曲げモーメント抽出ケースを示す。

4 必要有効高および必要鉄筋量

4.1 必要有効高

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

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

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

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

4.2 必要鉄筋量

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

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

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

上式を解いて σ_c を求める。また $da = T - d'$ とする。

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

| 部材 | 点 | Ms (kN・m/m) | 必要有効高 d (cm) | 必要部材厚 d+d' (cm) | 部材厚 T (cm) | 必要鉄筋量 As (cm ² /m) |
|------------|------|----------------|-----------------|--------------------|---------------|----------------------------------|
| | 端 部 | 24.035 | 9.75 | 13.25 | 29.00 | 4.298 |
| 頂版 | ハチ始点 | 7.921 | 5.60 | 9.10 | 24.00 | 1.908 |
| | 中 央 | 33.112 | 11.45 | 14.95 | 24.00 | 10.698 |
| | 端 部 | 28.510 | 10.62 | 14.12 | 29.00 | 4.942 |
| 底版 | ハチ始点 | 15.184 | 7.75 | 11.25 | 24.00 | 2.003 |
| | 中 央 | 32.233 | 11.30 | 14.80 | 24.00 | 8.335 |
| | 上端部 | 28.602 | 10.64 | 14.14 | 27.00 | 3.215 |
| | 上ハチ点 | 17.603 | 8.35 | 11.85 | 22.00 | 3.120 |
| 側壁 | 中 間 | 11.949 | 6.88 | 10.38 | 22.00 | 0.573 |
| | 下ハチ点 | 24.789 | 9.91 | 13.41 | 22.00 | 3.542 |
| | 下端部 | 33.176 | 11.46 | 14.96 | 27.00 | 3.901 |
| 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 - 14 | D 10 - 14 | D 13 - 7 | D 10 - 14 | D-0 - 0 | D 10 - 14 |
| D 0 - 0 | D 0 - 0 | D 10 - 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 | 7.323 | 2.85 | 106.0 | 0.0 |
| | ハチ始点 | 100.00 | 6.657 | 6.159 | 1.39 | 48.7 | 0.0 |
| | 中 央 | 100.00 | 11.825 | 7.102 | 5.14 | 145.5 | 0.0 |
| 底版 | 端 部 | 100.00 | 6.657 | 7.444 | 3.33 | 121.1 | 0.0 |
| | ハチ始点 | 100.00 | 6.657 | 7.715 | 2.20 | 54.6 | 0.0 |
| | 中 央 | 100.00 | 9.241 | 7.028 | 5.05 | 145.3 | 0.0 |
| 側壁 | 上端部 | 100.00 | 6.657 | 8.592 | 3.23 | 84.0 | 0.0 |
| | 上ハチ点 | 100.00 | 6.657 | 6.859 | 3.17 | 80.6 | 0.0 |
| | 中 間 | 100.00 | 6.657 | 9.265 | 1.67 | 25.0 | 0.0 |
| | 下ハチ点 | 100.00 | 6.657 | 7.457 | 4.15 | 92.2 | 0.0 |
| | 下端部 | 100.00 | 6.657 | 8.513 | 3.77 | 99.6 | 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 | 50.901 | 8.356 | 59.976 | 48.928 | | | | |
| | M | | | 1.426 | | | | | |
| | N | | | 33.667 | | | | | |
| | 最大 | | | ○ | | | | | |
| 底版 τ点 | S | 47.585 | 16.730 | 68.350 | 57.302 | | | | |
| | M | | | 1.045 | | | | | |
| | N | | | 43.261 | | | | | |
| | 最大 | | | ○ | | | | | |
| 側壁上 τ点 | S | -9.088 | -10.104 | -24.547 | -28.122 | | | | |
| | M | | | | -8.483 | | | | |
| | N | | | | 69.192 | | | | |
| | 最大 | | | | ○ | | | | |
| 側壁下 τ点 | S | 8.802 | 14.936 | 29.379 | 32.953 | | | | |
| | M | | | | -9.745 | | | | |
| | N | | | | 77.286 | | | | |
| | 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 | 0.240 | 0.035 | 0.205000 | 1.400 | D13-9.3 | 11.825 | 0.577 | 1.246 |
| 底版 τ 点 | 0.240 | 0.035 | 0.205000 | 1.400 | D13-4.7 D10-4.7 | 9.241 | 0.451 | 1.151 |
| 側壁上 τ 点 | 0.220 | 0.035 | 0.185000 | 1.400 | D10-9.3 | 6.657 | 0.360 | 1.060 |
| 側壁下 τ 点 | 0.220 | 0.035 | 0.185000 | 1.400 | D10-9.3 | 6.657 | 0.360 | 1.060 |

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 | 1.426 | 33.667 | 0.24000 | 0.001152 | 0.12000 | 1.347 | 1.944 |
| 底版 τ 点 | 1.045 | 43.261 | 0.24000 | 0.001152 | 0.12000 | 1.730 | 2.000 |
| 側壁上 τ 点 | -8.483 | 69.192 | 0.22000 | 0.000887 | 0.11000 | 2.536 | 1.299 |
| 側壁下 τ 点 | -9.745 | 77.286 | 0.22000 | 0.000887 | 0.11000 | 2.833 | 1.291 |

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 | 1.246 | 1.944 | 0.882 |
| 底版 τ 点 | 0.260 | 1.400 | 1.151 | 2.000 | 0.838 |
| 側壁上 τ 点 | 0.260 | 1.400 | 1.060 | 1.299 | 0.501 |
| 側壁下 τ 点 | 0.260 | 1.400 | 1.060 | 1.291 | 0.498 |

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 | 59.976 | 0.293 | 0.882 | OK |
| 底版 τ 点 | 68.350 | 0.333 | 0.838 | OK |
| 側壁上 τ 点 | 28.122 | 0.152 | 0.501 | OK |
| 側壁下 τ 点 | 32.954 | 0.178 | 0.498 | OK |

以 上