

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) 2500 × (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)	: $K_a = 0.500$
(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 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]

2 断面力計算

ボックスカルバートの曲げモーメント及びせん断力照査位置

曲げモーメント

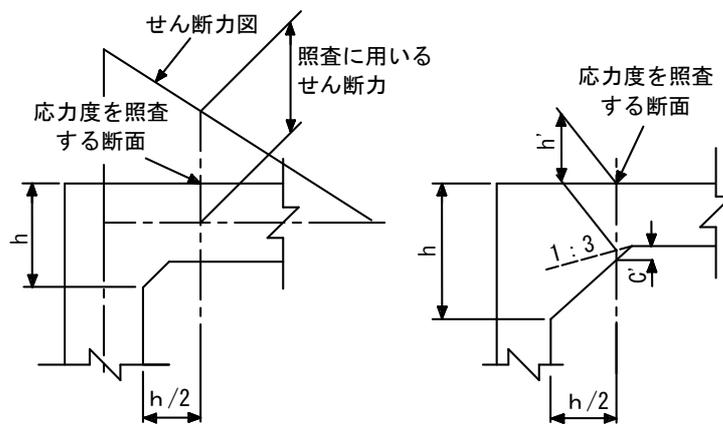
せん断力



1) 断面検討用曲げモーメント



2) せん断力に対する照査



(a) ハンチ以外の場合

(b) ハンチにある場合

b) について

ハンチにある場合の部材断面の高さは、ハンチにかかっている部分 C' の 1/3 まで大きくとります。

$$h' = T + C'/3$$

2.1.1 設計荷重 (CASE - 1)

(1) 頂版自重

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 4.655 \text{ kN/m}^2$$

(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

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2) \} = 3.105 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} = 27.315 \text{ kN/m}^2$$

(3) 活荷重

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

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

(4) 底版反力

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + \{ P_{v1} \times u + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) \} / B_o = 60.340 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.228$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.228$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 3.228, \quad N_2 = 2 + \beta = 3.228$$

② 荷重項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 24.116 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBC = \{2 \times (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^3 + P_{v1} \times u \times (3 \times B_o^2 - u^2)\} / (24 \times B_o) = 26.370 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd1} + 3 \times P_{hd2}) / 60 = 10.632 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd2} + 3 \times P_{hd1}) / 60 = 7.712 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -6.601 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 7.824 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -16.009 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 16.009 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 16.759 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -16.759 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.1.3 各部材の断面力 (CASE - 1)

(1) 頂版

① せん断力

$$S_{XBC} = \{(P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o + P_{v1} \times u\} / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2}) \times x = 49.915 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times u \times (B_o / 2 - u / 4) / 2 + M_{BC} = 28.935 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 48.574 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 20.166 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側壁

① せん断力

$$S_{XAB} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 18.063 \text{ kN}$$

$$S_{XBA} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = -14.030 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

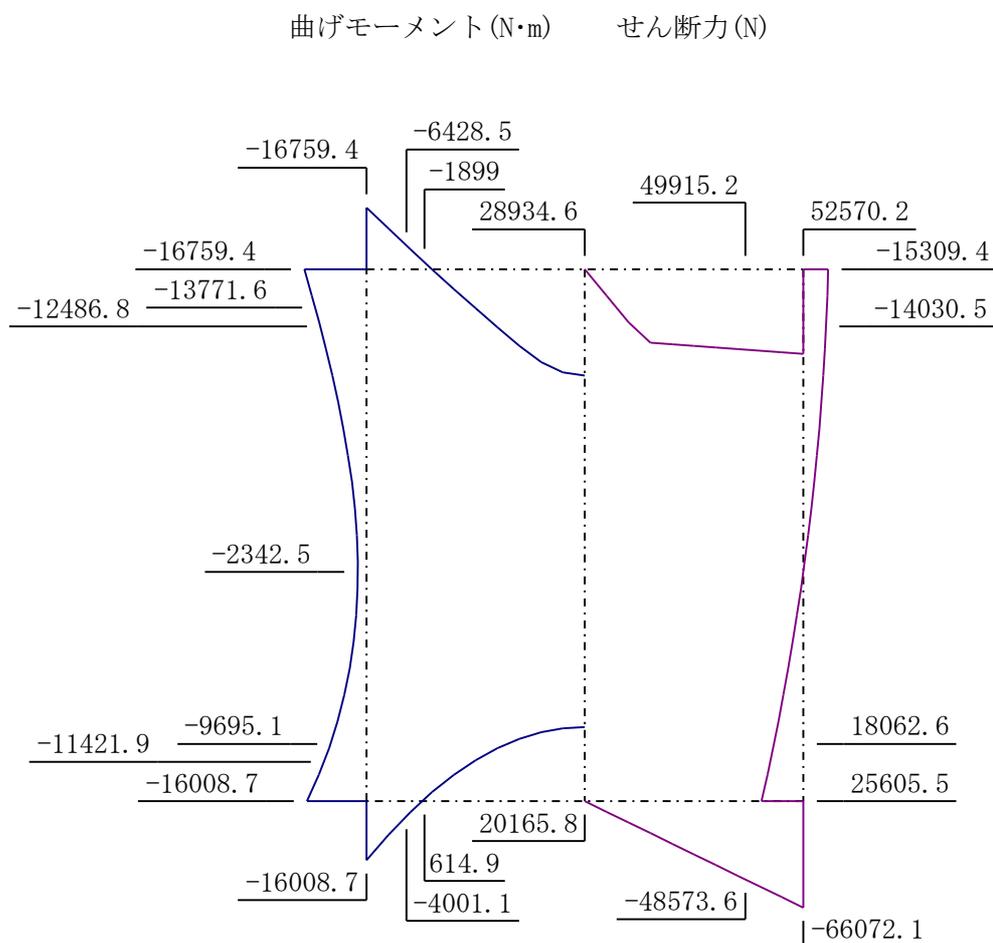
接点間の極値は、せん断力が0となる地点に生じる。

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

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。 } x = 1.159 \text{ m}$$

$$M_{max} = S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} = -2.342 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

		[/ 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	0.095	-16759	52570	15309
	2 ハチ始点	0.295	-6429	*****	15309
	S2 τ点	0.290	-1899	49915	15309
	1 中央	1.095	28935	0	15309
底版	9, S9 端部	0.095	-16009	66072	25606
	10 ハチ始点	0.295	-4001	*****	25606
	S10 τ点	0.290	615	48574	25606
	11 中央	1.095	20166	0	25606
側壁	4, S4 上端部	2.595	-16759	-15309	52570
	5 上ハチ点	2.395	-13772	*****	53574
	S5 上τ点	2.400	-12487	-14031	54026
	6 中間	1.159	-2343	0	60255
	S7 下τ点	0.290	-9695	18063	64617
	7 下ハチ点	0.295	-11422	*****	65068
	8, S8 下端部	0.095	-16009	25606	66072



2.2.1 設計荷重 (CASE - 2)

(1) 頂版自重

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 4.655 \text{ kN/m}^2$$

(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

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2) \} + P_q = 8.105 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H1 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} + P_q = 32.315 \text{ kN/m}^2$$

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。

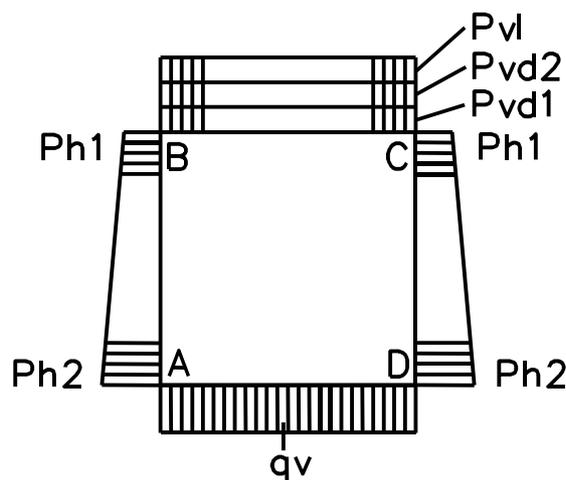
(3) 活荷重

$$P_{v1} = 0$$

(4) 底版反力

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 21.486 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.228$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.228$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 3.228, \quad N_2 = 2 + \beta = 3.228$$

② 荷重項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 8.587 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 3.659 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd1} + 3 \times P_{hd2}) / 60 = 13.647 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd2} + 3 \times P_{hd1}) / 60 = 10.727 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 2.484 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

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

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -11.638 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 11.638 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 7.293 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -7.293 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.2.3 各部材の断面力 (CASE - 2)

(1) 頂版

① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 7.370 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + M_{BC} = -1.805 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = -17.411 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 1.243 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側壁

① せん断力

$$\begin{aligned} S_{XAB} &= P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ &\quad - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ &\quad - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 25.232 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{XBA} &= P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ &\quad - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ &\quad - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = -17.411 \text{ kN} \end{aligned}$$

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。

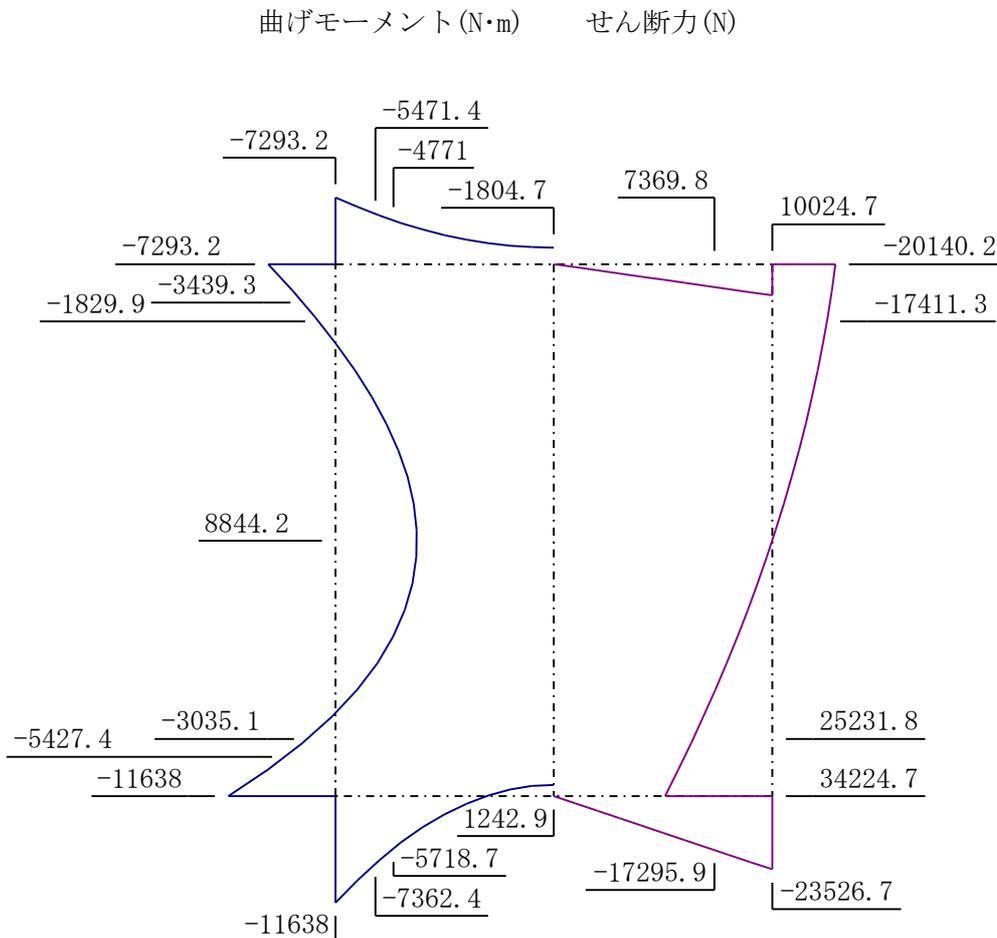
$$S_x = S_{AB} - P_{hd2} \times x - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 0$$

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 1.291 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} M_{max} &= S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 \\ &\quad - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} = 8.844 \text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

[/ 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	0.095	-7293	10025	20140
	2 ハチ始点	0.295	-5471	*****	20140
	S2 τ点	0.290	-4771	7370	20140
	1 中央	1.095	-1805	0	20140
底版	9, S9 端部	0.095	-11638	23527	34225
	10 ハチ始点	0.295	-7362	*****	34225
	S10 τ点	0.290	-5719	17296	34225
	11 中央	1.095	1243	0	34225
側壁	4, S4 上端部	2.595	-7293	-20140	10025
	5 上ハチ点	2.395	-3439	*****	11029
	S5 上τ点	2.400	-1830	-17411	11480
	6 中間	1.291	8844	0	17047
	S7 下τ点	0.290	-3035	25232	22071
	7 下ハチ点	0.295	-5427	*****	22523
	8, S8 下端部	0.095	-11638	34225	23527



2.3.1 設計荷重 (CASE - 3)

(1) 頂版自重

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 4.655 \text{ kN/m}^2$$

(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

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2) \} = 28.305 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} = 52.515 \text{ kN/m}^2$$

(3) 活荷重

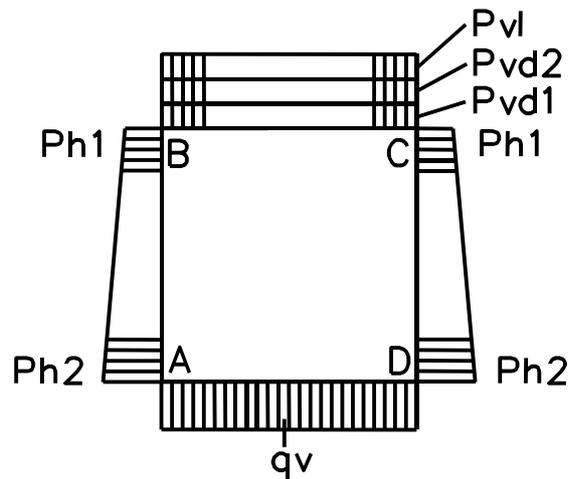
① 輪分布幅 $u = a + 2 \times H2 = 6.200 \text{ m}$
 $v = b + 2 \times H2 = 6.500 \text{ m}$

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

(4) 底版反力

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 85.610 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.228$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.228$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 3.228, \quad N_2 = 2 + \beta = 3.228$$

② 荷重項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 34.216 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 29.288 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times Phd_1 + 3 \times Phd_2) / 60 = 25.827 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times Phd_2 + 3 \times Phd_1) / 60 = 22.908 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -3.551 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 3.076 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -29.854 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 29.854 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 25.509 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -25.509 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.3.3 各部材の断面力 (CASE - 3)

(1) 頂版

① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 58.990 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + M_{BC} = 18.423 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

(2) 底版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 68.916 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 21.470 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

(3) 側壁

① せん断力

$$S_{XAB} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 46.543 \text{ kN}$$

$$S_{XBA} = P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) = -38.722 \text{ kN}$$

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。

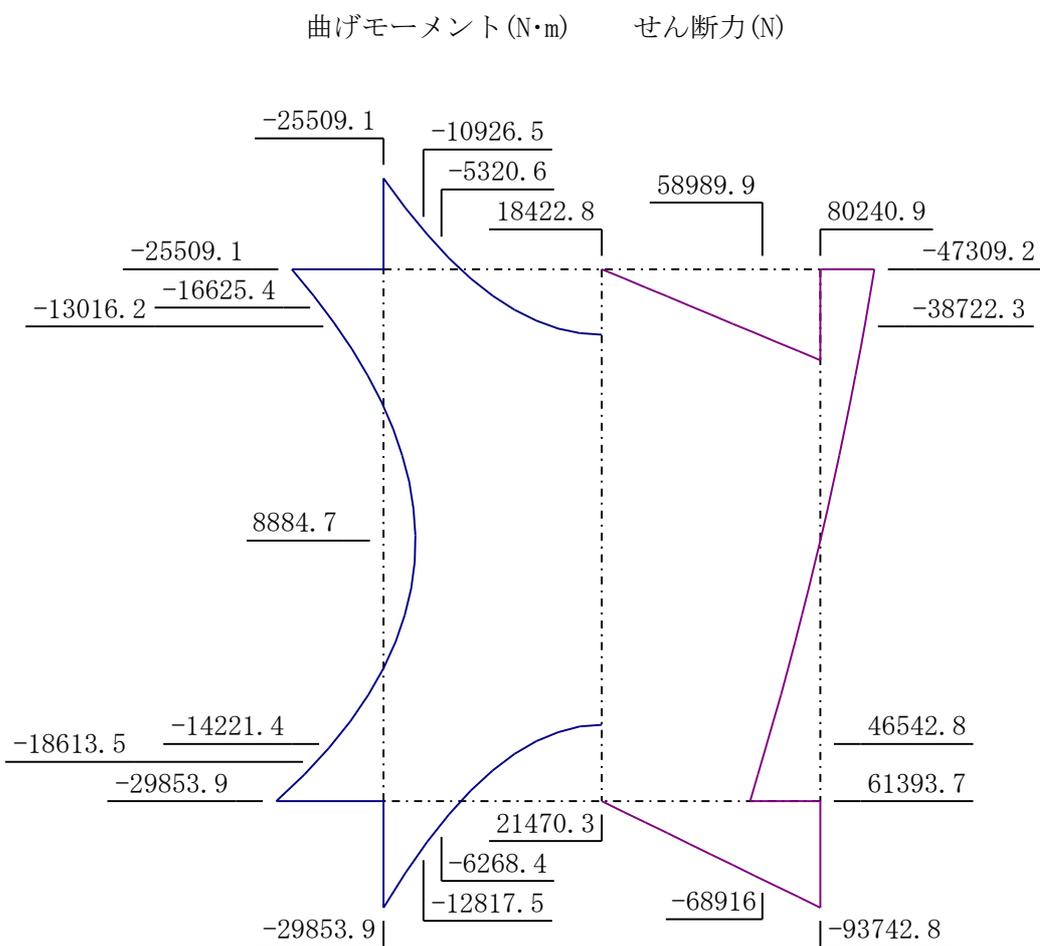
$$S_x = S_{AB} - P_{hd2} \times x - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 0$$

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 1.318 \text{ m}$$

$$M_{max} = S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} = 8.885 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

[/ 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	0.095	-25509	80241	47309
	2 ハチ始点	0.295	-10927	*****	47309
	S2 τ点	0.290	-5321	58990	47309
	1 中央	1.095	18423	0	47309
底版	9, S9 端部	0.095	-29854	93743	61394
	10 ハチ始点	0.295	-12818	*****	61394
	S10 τ点	0.290	-6268	68916	61394
	11 中央	1.095	21470	0	61394
側壁	4, S4 上端部	2.595	-25509	-47309	80241
	5 上ハチ点	2.395	-16625	*****	81245
	S5 上τ点	2.400	-13016	-38722	81697
	6 中間	1.318	8885	0	87127
	S7 下τ点	0.290	-14221	46543	92287
	7 下ハチ点	0.295	-18614	*****	92739
	8, S8 下端部	0.095	-29854	61394	93743



2.4.1 設計荷重 (CASE - 4)

(1) 頂版自重

$$P_{vd1} = \gamma_c \times T1 = 4.655 \text{ kN/m}^2$$

(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

$$P_{hd1} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2) \} + P_q = 33.305 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{hd2} = K_a \times \{ \gamma_a \times t + \gamma_b \times t_b + \gamma_s \times (H2 - t - t_b + T1/2 + H_o) \} + P_q = 57.515 \text{ kN/m}^2$$

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。

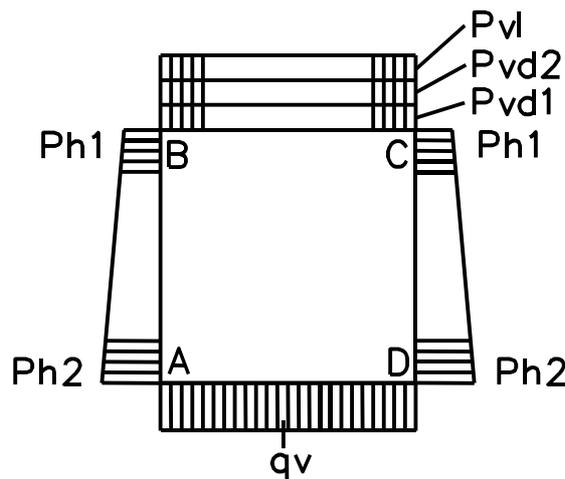
(3) 活荷重

$$P_{v1} = 0$$

(4) 底版反力

$$q_v = P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1} + \gamma_c \times (2 \times T3 \times H_o + 2 \times C^2) / B_o = 71.886 \text{ kN/m}^2$$

[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

$$\alpha = (H_o \times T_1^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.228$$

$$\beta = (H_o \times T_2^3) / (B_o \times T_3^3) = 1.228$$

$$N_1 = 2 + \alpha = 3.228, \quad N_2 = 2 + \beta = 3.228$$

② 荷重項

$$CAD = q_v \times B_o^2 / 12 = 28.731 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBC = \{(P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o^2\} / 12 = 23.803 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CAB = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd1} + 3 \times P_{hd2}) / 60 = 28.842 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$CBA = (H_o^2) \times (2 \times P_{hd2} + 3 \times P_{hd1}) / 60 = 25.923 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

③ たわみ角

$$\theta_A = \{N_1 \times (CAB - CAD) - (CBC - CBA)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = 0.263 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\theta_B = \{N_2 \times (CBC - CBA) - (CAB - CAD)\} / (N_1 \times N_2 - 1) = -0.738 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

④ 端モーメント

$$MAB = 2 \times \theta_A + \theta_B - CAB = -29.054 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAD = \beta \times \theta_A + CAD = 29.054 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBA = 2 \times \theta_B + \theta_A + CBA = 24.709 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MBC = \alpha \times \theta_B - CBC = -24.709 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$MAB + MAD = 0$$

$$MBA + MBC = 0$$

2.4.3 各部材の断面力 (CASE - 4)

(1) 頂版

① せん断力

$$S_{XBC} = (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times B_o / 2 - (P_{vd1} + P_{vd2} + P_{v1}) \times x = 47.942 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = (P_{vd1} + P_{vd2}) \times B_o^2 / 8 + P_{v1} \times B_o^2 / 8 + M_{BC} = 10.995 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 底版

① せん断力

$$S_{XAD} = q_v \times B_o / 2 - q_v \times x = 57.868 \text{ kN}$$

② 曲げモーメント

$$M_{max} = q_v \times B_o^2 / 8 - M_{AD} = 14.042 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(3) 側壁

① せん断力

$$\begin{aligned} S_{XAB} = & P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ & - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ & - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = 51.818 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} S_{XBA} = & P_{hd1} \times H_o / 2 + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times H_o / 3 \\ & - (M_{AB} + M_{BA}) / H_o \\ & - P_{hd2} \times x + (P_{hd2} - P_{hd1}) \times x^2 / (2 \times H_o) \end{aligned} = -43.997 \text{ kN}$$

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。

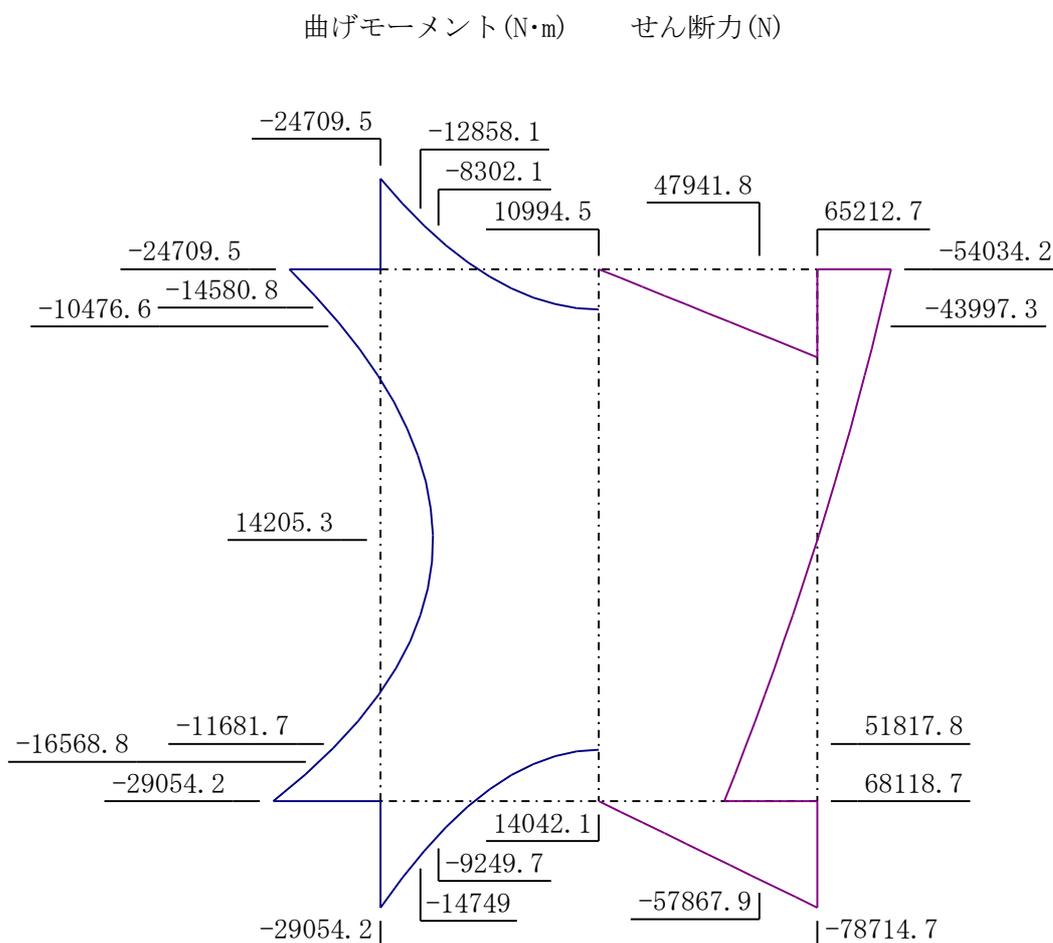
$$S_x = S_{AB} - P_{hd2} \times x - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^2 / (2 \times H_o) = 0$$

$$\text{上式を用いて } x \text{ を求めると。} \quad x = 1.321 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} M_{max} = & S_{AB} \times x - P_{hd2} \times x^2 / 2 \\ & - (P_{hd1} - P_{hd2}) \times x^3 / (6 \times H_o) + M_{AB} \end{aligned} = 14.205 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[/ 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	0.095	-24710	65213	54034
	2 ハチ始点	0.295	-12858	*****	54034
	S2 τ点	0.290	-8302	47942	54034
	1 中央	1.095	10995	0	54034
底版	9, S9 端部	0.095	-29054	78715	68119
	10 ハチ始点	0.295	-14749	*****	68119
	S10 τ点	0.290	-9250	57868	68119
	11 中央	1.095	14042	0	68119
側壁	4, S4 上端部	2.595	-24710	-54034	65213
	5 上ハチ点	2.395	-14581	*****	66217
	S5 上τ点	2.400	-10477	-43997	66668
	6 中間	1.321	14205	0	72084
	S7 下τ点	0.290	-11682	51818	77259
	7 下ハチ点	0.295	-16569	*****	77711
	8, S8 下端部	0.095	-29054	68119	78715



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	-25.509	47.309	53.92	9.33	29.925	3
頂版	ハチ始点	-12.858	54.034	23.80	6.00	16.100	4
	中央	28.935	15.309	189.00	6.00	29.853	1
	端部	-29.854	61.394	48.63	9.33	35.584	3
底版	ハチ始点	-14.749	68.119	21.65	6.00	18.836	4
	中央	20.166	25.605	78.76	6.00	21.702	1
	上端部	-24.709	65.213	37.89	9.33	30.796	4
	上ハチ点	-16.625	81.245	20.46	6.00	21.500	3
側壁	中間	14.205	72.084	19.71	6.00	18.530	4
	下ハチ点	-18.613	92.739	20.07	6.00	24.178	3
	下端部	-29.054	78.715	36.91	9.33	36.401	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(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	29.925	10.88	14.38	25.67	6.412
頂版	ハチ始点	16.100	7.98	11.48	19.00	3.865
	中央	29.853	10.87	14.37	19.00	12.940
	端部	35.584	11.87	15.37	25.67	7.399
底版	ハチ始点	18.836	8.63	12.13	19.00	4.284
	中央	21.702	9.27	12.77	19.00	8.316
	上端部	30.796	11.04	14.54	25.67	5.579
	上ハチ点	21.500	9.22	12.72	19.00	4.741
側壁	中間	18.530	8.56	12.06	19.00	3.890
	下ハチ点	24.178	9.78	13.28	19.00	5.318
	下端部	36.401	12.00	15.50	25.67	6.588
d + d' < T					CHECK OK	

5 配筋及び実応力度

実応力度は、次式により計算する。

5.1 コンクリート及び鉄筋

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

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

ここに、 N : 軸力 (kN)

b : 部材幅 (cm)

T : 部材厚 (cm)

c : 部材中心軸と鉄筋間距離 (cm)

A_s : 主鉄筋断面積 (cm²/m)

x : 中心軸。次の3次元方程式より求める。 (cm)

$$x^3 - 3 \times (T / 2 - e) \times x^2$$

$$+ 6 \times n \times A_s / b \times (e + c) \times x$$

$$- 6 \times n \times A_s / b \times (c + T / 2)$$

$$\times (e + c) = 0$$

e : 偏位量 (M / N) (cm)

配筋(製品当り)

頂版内側	頂版外側	底版内側	底版外側	側壁内側	側壁外側
D 16 - 14	D 13 - 14	D 16 - 7	D 13 - 14	D 10 - 14	D 13 - 14
D 0 - 0	D 0 - 0	D 13 - 7	D 0 - 0	D 0 - 0	D 0 - 0

部材	点	部材幅 b (cm)	使用鉄筋量 A _s (cm ² /m)	x (cm)	実 応 力 度 (N/mm ²) σ _c	σ _s	σ _s '
頂版	端 部	100.00	8.869	7.520	4.05	118.3	0.0
	ハチ始点	100.00	8.869	6.558	3.69	75.4	0.0
	中 央	100.00	13.902	6.388	6.99	149.6	0.0
底版	端 部	100.00	8.869	7.643	4.75	135.3	0.0
	ハチ始点	100.00	8.869	6.706	4.24	83.3	0.0
	中 央	100.00	11.385	6.158	5.24	119.3	0.0
側壁	上端部	100.00	8.869	8.010	3.94	104.6	0.0
	上ハチ点	100.00	8.869	6.803	4.78	91.6	0.0
	中 間	100.00	4.993	5.614	4.84	127.9	0.0
	下ハチ点	100.00	8.869	6.838	5.35	101.6	0.0
	下端部	100.00	8.869	8.055	4.64	121.9	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	49.915	7.370	58.990	47.942				
	M			-5.321					
	N			47.309					
	最大			○					
底版 τ点	S	48.574	17.296	68.916	57.868				
	M			-6.268					
	N			61.394					
	最大			○					
側壁上 τ点	S	-14.030	-17.411	-38.722	-43.997				
	M				-10.477				
	N				66.668				
	最大				○				
側壁下 τ点	S	18.063	25.232	46.543	51.818				
	M				-11.682				
	N				77.259				
	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 τa 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_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(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_c：図心軸に関する断面二次モーメント(m⁴)

A_c：部材断面積(m²)

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 _e	引張鉄筋		鉄筋比 P _t (%)	C _{pt}
					径-本数	As (cm ²)		
頂版 τ 点	0.192	0.035	0.156667	1.400	D13-7	8.869	0.566	1.240
底版 τ 点	0.192	0.035	0.156667	1.400	D13-7	8.869	0.566	1.240
側壁上 τ 点	0.192	0.035	0.156667	1.400	D13-7	8.869	0.566	1.240
側壁下 τ 点	0.192	0.035	0.156667	1.400	D13-7	8.869	0.566	1.240

補正係数③を求める。

照査位置	M (kN・m)	N (kN)	A _c (m ²)	I _c (m ⁴)	y (m)	M _o (kN・m)	C _n
頂版 τ 点	-5.321	47.309	0.19200	0.000590	0.09600	1.514	1.285
底版 τ 点	-6.268	61.394	0.19200	0.000590	0.09600	1.965	1.314
側壁上 τ 点	-10.477	66.668	0.19200	0.000590	0.09600	2.134	1.204
側壁下 τ 点	-11.682	77.259	0.19200	0.000590	0.09600	2.473	1.212

補正した許容せん断応力度

照査位置	τa	補正係数			補正 τa
		C _e	C _{pt}	C _n	
頂版 τ 点	0.260	1.400	1.240	1.285	0.580
底版 τ 点	0.260	1.400	1.240	1.314	0.593
側壁上 τ 点	0.260	1.400	1.240	1.204	0.543
側壁下 τ 点	0.260	1.400	1.240	1.212	0.547

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 τa (N/mm ²)	判定
頂版 τ 点	58.990	0.377	0.580	OK
底版 τ 点	68.916	0.440	0.593	OK
側壁上 τ 点	43.997	0.281	0.543	OK
側壁下 τ 点	51.818	0.331	0.547	OK

以上