

折板理論によるボックスカルバートの解析

— 主として長手方向の地盤反力係数が異なる場合 —

北海道大学工学部 正員 能町 純雄

北海道開発コンサルタント “ 藤井不二也

“ “ 花田 真吉

§1. 概要

一般にボックスカルバートは、同一地盤反力係数を有する地盤上に設置される事が多いが、長手方向に地盤反力係数が急変する場合、長手方向に比較的大きな断面力が生じる。この断面力は、ボックス断面のラーメン作用の影響を受けるので、このラーメン作用を考慮した長手方向の断面力の解析を行ない、合せて棒理論としての弾性床土上の梁との比較を行った。又、カルバートの断面剛性及び地盤反力係数が種々異なる場合の断面力の1モグラムを作成し、地盤とカルバートの相対剛性係数と急変する地盤反力係数比により、断面力を求める例を示した。

§2. 微分方程式

カルバートを図-1の様な4枚の細長い板要素よりなっているものとする。頂板AD、側板AB、CDは曲げを受ける細長い板要素とし、底板BCは、弾性基礎上の細長い板要素とする。各要素の長端部における断面力と変位の関係(剛性マトリックス)を設定して図-1の構造を作り上げ、長手方向の力の変形と断面におけるラーメン作用を同時に解明する。計算仮定として、中立軸を仮定する曲げ理論に従うと考え、ラーメンABCDの軸長に変化はないものとする。

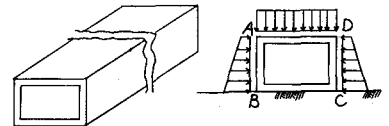
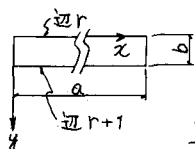


図-1

2-1 曲げのみを受ける板要素



座標を左図の様にとる。 $b \ll a$, たわみ w を次の様に仮定する。

$$w = w_{rx} \eta + w_r \times (1 - \eta) - b^2 K_r f(\eta) - b^2 K_{r+1} f(1 - \eta) \quad \text{--- (1)}$$

上式中 $\eta = y/b$, w_r, w_{r+1} ; 辺 $r, r+1$ におけるたわみ

$f(\eta) = \frac{1}{6} (1 - \eta)(2 - \eta)$, K_r, K_{r+1} ; 辺 $r, r+1$ における曲率

$$f(1 - \eta) = \frac{1}{6} \eta(1 - \eta) , \quad K_r = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \Big|_{y=0} \quad K_{r+1} = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \Big|_{y=b}$$

板の曲げの基本微分方程式は

$$N \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) - 8 \quad \text{--- (2)}$$

y 方向せん断力は

$$X_y = -N \left(\frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} \right) \quad \text{--- (3)}$$

であるから(2)式は

$$-\frac{\partial X_y}{\partial y} + N \left(\frac{\partial^2 \ddot{w}}{\partial y^2} + \ddot{w} \right) = 8 , \quad (\because \dot{w} = \frac{\partial w}{\partial x}) \quad \text{--- (4)}$$

この要素の剛性マトリックスを簡単にする為に Galerkin の方法を用いる。

(4)式に(1-η)を乗じて y について $0 \sim b$ まで積分する。

$$X_{r,r+1} + \frac{N}{b} (K_{r+1} - K_r) + \frac{2N}{b} (\ddot{w}_{r+1} - \ddot{w}_r) - N \ddot{O}_{r,r+1} + \frac{Nb}{6} (2\ddot{w}_r + \ddot{w}_{r+1}) - \frac{Nb^3}{360} (8K_r + 7K_{r+1}) - R_{r,r+1} = 0 \quad \text{--- (5)}$$

同様に η を乗じて y について $0 \sim b$ まで積分すれば

$$-X_{r+1,r} - \frac{N}{b}(K_{r+1} - K_r) - \frac{2N}{b}(\ddot{w}_{r+1} - \ddot{w}_r) + N\ddot{\theta}_{r+1} + \frac{Nb}{6}(2\ddot{w}_{r+1} + \ddot{w}_r) - \frac{Nb^3}{360}(8\ddot{K}_{r+1} + 7\ddot{K}_r) - R_{r+1,r} \quad \text{--- (6)}$$

$$\text{Slope は (1) 式より直接求める。} \quad \sigma_{r,r+1} = \frac{1}{b}(\omega_{r+1} - \omega_r) - \frac{b}{6}(2K_r + K_{r+1}) \quad \text{--- (7)}$$

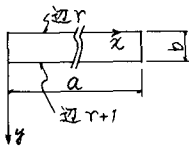
$$\sigma_{r+1,r} = \frac{1}{b}(\omega_{r+1} - \omega_r) + \frac{b}{6}(2K_{r+1} + K_r) \quad \text{--- (8)}$$

(7), (8) を (5), (6) に代入して

$$X_{r,r+1} = -\frac{N}{b}(K_{r+1} - K_r) - \frac{N}{b}(\ddot{w}_{r+1} - \ddot{w}_r) - \frac{Nb}{6}(2\ddot{K}_r + \ddot{K}_{r+1}) - \frac{Nb}{6}(2\ddot{w}_r + \ddot{w}_{r+1}) + \frac{Nb}{360}(8\ddot{K}_r + 7\ddot{K}_{r+1}) + R_{r,r+1} \quad \text{--- (9)}$$

$$X_{r+1,r} = -\frac{N}{b}(K_{r+1} - K_r) - \frac{N}{b}(\ddot{w}_{r+1} - \ddot{w}_r) + \frac{Nb}{6}(2\ddot{K}_{r+1} + \ddot{K}_r) + \frac{Nb}{6}(2\ddot{w}_{r+1} + \ddot{w}_r) - \frac{Nb^3}{360}(8\ddot{K}_{r+1} + 7\ddot{K}_r) - R_{r+1,r} \quad \text{--- (10)}$$

2-2 弾性基礎上の板要素



座標を左図の様にとる。地盤反力係数を K (kg/cm^2) とおく。
たわみを次の様に仮定する。

$$w = w_r \cdot Q(\eta) + w_{r+1} \cdot Q(1-\eta) - K_r \frac{P(\eta)}{2C^2} - K_{r+1} \frac{P(1-\eta)}{2C^2} \quad \text{--- (11)}$$

上式中 関数 $Q(\eta)$, $Q(1-\eta)$, $P(\eta)$, $P(1-\eta)$ は $\frac{d^4 F}{d\eta^4} + 4C^4 F = 0$ --- (12) を満足する解で

$$Q(0) = 1, Q(1) = 0, \frac{d^2 Q(\eta)}{d\eta^2} \Big|_{\eta=0} = 0, \frac{d^2 Q(\eta)}{d\eta^2} \Big|_{\eta=1} = 0, P(0) = 0, P(1) = 0, \frac{d^2 P(\eta)}{d\eta^2} \Big|_{\eta=0} = -2C^2, \frac{d^2 P(\eta)}{d\eta^2} \Big|_{\eta=1} = 0$$

を満足する様に選んだものである。すなわち

$$\begin{aligned} Q(\eta) &= \frac{\cosh\{C(2-\eta)\}\cosh C\eta - \cosh C\eta \cdot \cos\{C(2-\eta)\}}{\cosh 2C - \cos 2C} \\ P(\eta) &= \frac{\sinh\{C(2-\eta)\}\sin C\eta - \sinh C\eta \cdot \sin\{C(2-\eta)\}}{\cosh 2C - \cos 2C} \end{aligned} \quad \left[\begin{aligned} &4C^4 = \frac{12K(1-\nu^2)}{E \cdot t^3} - \frac{K}{N} \\ &E: \text{弾性係数}, t: \text{厚さ}, \nu: \text{ポアソン比} \\ &K: \text{地盤反力係数}, N: \text{板の曲げ剛性} \end{aligned} \right] \quad \text{--- (13)}$$

節線の回転角は、(11)式より

$$\sigma_{r,r+1} = -w_r \cdot B + w_{r+1} \cdot B' - \frac{K_r}{2C^2} \cdot A - \frac{K_{r+1}}{2C^2} \cdot A' \quad \left[\begin{aligned} &\left[\begin{array}{l} B \\ A \end{array} \right] = C \times \frac{\sinh 2C \pm \sin 2C}{\cosh 2C - \cos 2C} \\ &\left[\begin{array}{l} B' \\ A' \end{array} \right] = 2C \times \frac{\cosh C \cdot \sin C \pm \sinh C \cdot \cos C}{\cosh 2C - \cos 2C} \end{aligned} \right] \quad \text{--- (14)}$$

$$\sigma_{r+1,r} = -w_r \cdot B' + w_{r+1} \cdot B + \frac{K_r}{2C^2} \cdot A' + \frac{K_{r+1}}{2C^2} \cdot A \quad \text{--- (15)}$$

節線のせん断力 ($X_{r,r+1}$, $X_{r+1,r}$) は前回同様 Galerkin 法によって求める。

$$\text{弾性基礎上の釣り合い式は、} \quad N\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^2 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right) + K w = 8 \quad \text{--- (16)}$$

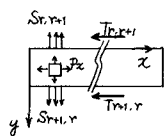
$$\text{これを書き換えて} \quad -\frac{\partial^4 X}{\partial y^4} + N\frac{\partial^2 \ddot{w}}{\partial y^2} + N\ddot{w} + K w = 8 \quad \text{--- (17)}$$

(17)式に $(1-\eta)$ を乗じて $0 \sim b$ まで積分し、(14)式を代入せば

$$\begin{aligned} X_{r,r+1} &= N\left\{BK_{r+1} - B'K_{r+1} - \frac{2}{b}(\ddot{w}_{r+1} - \ddot{w}_r) - B\ddot{w}_r + B'\ddot{w}_{r+1} - \frac{A}{2C^2}(\ddot{w}_r + \frac{K}{N}w_r + \ddot{K}_r)\right. \\ &\quad \left. - \frac{A'}{2C^2}(\ddot{w}_{r+1} + \frac{K}{N}w_{r+1} + \ddot{K}_{r+1}) + \frac{1}{4C^4}\left\{(B - \frac{1}{b})\ddot{K}_r + (\frac{1}{b} - B')\ddot{K}_{r+1}\right\}\right\} + R_{r,r+1} \quad \text{--- (18)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{同様に} \quad X_{r+1,r} &= N\left\{-BK_{r+1} + B'K_r - \frac{2}{b}(\ddot{w}_{r+1} - \ddot{w}_r) - B'\ddot{w}_r + B\ddot{w}_{r+1} + \frac{A'}{2C^2}(\ddot{w}_r + \frac{K}{N}w_r + \ddot{K}_r)\right. \\ &\quad \left. + \frac{A}{2C^2}(\ddot{w}_{r+1} + \frac{K}{N}w_{r+1} + \ddot{K}_{r+1}) + \frac{1}{4C^4}\left\{(B' - \frac{1}{b})\ddot{K}_r + (\frac{1}{b} - B)\ddot{K}_{r+1}\right\}\right\} - R_{r+1,r} \quad \text{--- (19)} \end{aligned}$$

2-3 平面応力



この場合も同じ座標を取って考える。析板は短軸方向の縮みを無視すると

$$x \text{ 方向の釣り合いは, } \frac{\partial P_x}{\partial x} + \frac{\partial P_{xy}}{\partial y} = 0 \quad \text{--- (20)}$$

$$P_x = E \cdot t \cdot u, \quad P_{xy} = G \cdot t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad \text{--- (21)}$$

u, v は x 方向, y 方向の変位である。今 $u = u_r(1-\eta) + u_{r+1} \cdot \eta$ と置けば

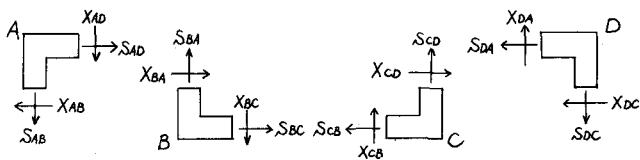
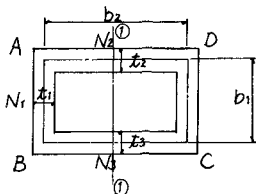
$$P_{xy} = -E \cdot t \cdot \ddot{u}_r \left(y - \frac{y^2}{2b} \right) - E \cdot t \cdot \ddot{u}_{r+1} \frac{y^2}{2b} - T_{r, r+1} \quad \text{--- (22)}$$

$$x, y \text{ 方向の釣り合いは, } \frac{\partial P_y}{\partial y} - \frac{\partial P_{xy}}{\partial x} = 0 \quad \text{--- (23)}$$

$$\left. \begin{aligned} (22) \text{ 式を } (23) \text{ 式に代入して } 0 \sim b \text{ まで積分すれば} \\ \text{全く同様に} \end{aligned} \right\} \quad \begin{aligned} T_{r, r+1} \cdot b &= -\frac{E \cdot t \cdot b^2}{6} (2\ddot{u}_r + \ddot{u}_{r+1}) - (S_{r, r+1} - S_{r+1, r}) \\ T_{r+1, r} \cdot b &= -\frac{E \cdot t \cdot b^2}{6} (2\ddot{u}_{r+1} + \ddot{u}_r) - (S_{r+1, r} - S_{r, r+1}) \end{aligned} \quad \text{--- (24)}$$

2-4 節点における力の釣り合い

箱型断面を下図の様に取っているから、各節点において断面力は次の様になる。



$$\left. \begin{array}{ll} \text{節点 A のまわりについて} & S_{AB} + X_{AD} = 0 \quad X_{AB} - S_{AD} = 0 \quad \dot{T}_{AB} + \dot{T}_{AD} = 0 \\ \text{・ B} & S_{BA} - X_{BC} = 0 \quad X_{BA} + S_{BC} = 0 \quad \dot{T}_{BA} + \dot{T}_{BC} = 0 \\ \text{・ C} & S_{CD} + X_{CB} = 0 \quad S_{CB} - X_{CD} = 0 \quad \dot{T}_{CB} + \dot{T}_{CD} = 0 \\ \text{・ D} & S_{DA} + X_{DC} = 0 \quad S_{DC} - X_{DA} = 0 \quad \dot{T}_{DA} + \dot{T}_{DC} = 0 \end{array} \right\} \quad \text{--- (25)}$$

中心線①-①に対して対称変形の場合 $S_{AD} = S_{DA}, S_{BC} = S_{CB}, \omega_A = \omega_B = \omega_C = \omega_D = \omega, \ddot{u}_A = \ddot{u}_D, \ddot{u}_B = \ddot{u}_C$

$$\dot{T}_{AB} + \dot{T}_{AD} = 0 \text{ より } \left(\frac{E \cdot t_1 \cdot b_1}{3} + \frac{E \cdot t_2 \cdot b_2}{2} \right) \ddot{u}_A + \frac{E \cdot t_1 \cdot b_1}{6} \ddot{u}_B + \frac{S_{AB} - S_{BA}}{b_1} + \frac{S_{AD} - S_{DA}}{b_2} = 0 \quad \text{--- (26)}$$

$$\dot{T}_{BA} + \dot{T}_{BC} = 0 \text{ より } \left(\frac{E \cdot t_1 \cdot b_1}{3} + \frac{E \cdot t_3 \cdot b_2}{2} \right) \ddot{u}_B + \frac{E \cdot t_1 \cdot b_1}{6} \ddot{u}_A + \frac{S_{BA} - S_{AB}}{b_1} + \frac{S_{BC} - S_{CB}}{b_2} = 0 \quad \text{--- (27)}$$

今 $-\ddot{u}_B + \ddot{u}_A = -\ddot{\omega} \cdot b_1, \ddot{u}_B + \ddot{u}_A = \ddot{u} \cdot b_1$ と置けば (26), (27) 式より

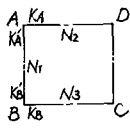
$$-\left\{ \frac{t_1 b_1 + 3 t_2 b_2}{12(t_1 b_1 + t_2 b_2)} + \frac{t_1 b_1 + 3 t_3 b_2}{12(t_1 b_1 + t_3 b_2)} \right\} \ddot{\omega} \cdot b_1 + \left(\frac{S_{AB} - S_{BA}}{b_1 E} \right) \left(\frac{1}{t_1 b_1 + t_2 b_2} + \frac{1}{t_1 b_1 + t_3 b_2} \right) = 0 \quad \text{--- (28)}$$

$$\begin{aligned} (10) \text{ 式より } S_{AB} = -X_{AD} &= \frac{N_3}{b_2} (K_A - K_D) + \frac{N_2}{b_2} (\ddot{u}_A - \ddot{u}_D) - \frac{N_2 b_2}{6} (2\ddot{K}_D + \ddot{K}_A) \\ &\quad - \frac{N_2 b_2}{6} (2\ddot{u}_A + \ddot{u}_D) + \frac{N_2 b_2^3}{360} (8\ddot{K}_A + 7\ddot{K}_D) + R_{AD} \end{aligned} \quad \text{--- (29)}$$

$$\begin{aligned} (19) \text{ 式より } S_{BA} = X_{BC} &= N_3 \left\{ -BK_B + B'K_C - \frac{2}{b_2} (\ddot{\omega}_B - \ddot{\omega}_C) + \ddot{\omega}_B \cdot B - \ddot{\omega}_C \cdot B' + \frac{A}{2C^2} (\ddot{\omega}_B + \frac{K}{N_3} \omega_B + \ddot{K}_B) \right. \\ &\quad \left. + \frac{A'}{2C^2} (\ddot{\omega}_C + \frac{K}{N_3} \omega_C + \ddot{K}_C) + \frac{1}{4C^2} \left\{ \left(\frac{1}{b_2} - B \right) \ddot{K}_B + \left(B' - \frac{1}{b} \right) \ddot{K}_C \right\} \right\} - R_{BC} \end{aligned} \quad \text{--- (30)}$$

上式中の R_{AD}, R_{BC} は上載荷重による A, B 点の反力である。

2-5 適合条件



$$\left. \begin{array}{l} A, B \text{ 点の各々の slope は等しい} \quad \theta_{AD} = \theta_{AB}, \theta_{BA} = \theta_{BC} \\ A, B \text{ 点の各々の曲げモーメントは等しい} \quad N_2 KA = N_1 KA', N_3 KB = N_1 KB' \end{array} \right\} \text{---(31)}$$

$$\text{今、} I_2 = \frac{N_2}{N_1}, I_3 = \frac{N_3}{N_1}, P_1 = \frac{1}{6} \left(\frac{P_2}{P_2} + \frac{P_3}{P_3} \right) \quad P_2 = 3b_2 + 2b_1 I_2, P_3 = b_1 I_2$$

$$P_4 = \frac{1}{6} \left(\frac{P_2}{P_2} + \frac{P_3}{P_3} \right) \quad P_5 = b_1 I_3, P_6 = -2b_1 I_3 + \frac{3}{C^2} (A + A')$$

と置けば(31)式より

$$KA = -\frac{B'-B}{P_4 P_6} \omega + \frac{1}{P_4} \left(\frac{\angle AD - \angle AB}{P_5} - \frac{\angle BC - \angle BA}{P_6} \right)$$

$$KB = \frac{B'-B}{P_1 P_3} \omega + \frac{1}{P_1} \left(\frac{\angle AD - \angle AB}{P_2} + \frac{\angle BC - \angle BA}{P_3} \right) \quad \text{となる。}$$

よって(29),(30)式より

$$\begin{aligned} S_{AB} - S_{BA} = & - \left\{ \frac{b_2 N_2}{2} + \frac{b_2^3 N_2 (B'-B)}{24 P_4 P_6} + \frac{N_3 (A+A')}{2 C^2} + \frac{N_3 (B'-B)^2}{4 C^2 P_1 P_3} \right\} \ddot{\omega} \\ & + \left\{ \frac{b_2 N_2 (B'-B)}{2 P_4 P_6} + N_3 (B'-B) - \frac{N_3 (A+A') (B'-B)}{2 C^2 P_1 P_3} \right\} \dot{\omega} - \left\{ \frac{N_3 (B'-B)^2}{P_1 P_3} + \frac{K(A+A')}{2 C^2} \right\} \omega \\ & + \frac{N_3 (B'-B')}{P_1} \left(\frac{\angle AD - \angle AB}{P_2} + \frac{\angle BC - \angle BA}{P_3} \right) + (R_{AD} + R_{BC}) \end{aligned} \quad \text{---(32)}$$

$$\text{又、(28)式は} \quad \frac{(t_1 b_1 + t_3 b_2)(t_1 b_1 + 3 t_2 b_2) + (t_1 b_1 + t_2 b_2)(t_1 b_1 + 3 t_3 b_2)}{12 (2 t_1 b_1 + t_2 b_2 + t_3 b_2)} \times b_1^2 E \ddot{\omega} + (S_{AB} - S_{BA}) = 0 \quad \text{---(33)}$$

よって(32),(33)式より ω についての微分方程式が得られる。

§3. 剛性マトリックス

$$\text{微分方程式を} \quad K_1\text{-Zone} \quad E I_1 \ddot{\omega} - E I_2 \ddot{\omega} + K_1 \omega = L_1$$

$$K_2\text{-Zone} \quad E I_1 \ddot{\omega} - E I_2 \ddot{\omega} + K_2 \omega = L_2$$

と置けば、解として

$$\omega_1 = e^{-\alpha_1 x} (A_1 \cos \beta_1 x + B_1 \sin \beta_1 x)$$

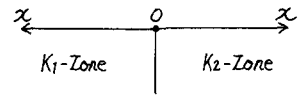
$$\omega_2 = e^{-\alpha_2 x} (A_2 \cos \beta_2 x + B_2 \sin \beta_2 x) \quad \text{として得られる。}$$

積分定数 A_1, B_1, A_2, B_2 は

$$x=0 \text{ で } \omega_1 = \omega_2, \frac{d\omega_1}{dx} + \frac{d\omega_2}{dx} = 0, \frac{d^2\omega_1}{dx^2} = \frac{d^2\omega_2}{dx^2}, \frac{d^3\omega_1}{dx^3} + \frac{d^3\omega_2}{dx^3} = 0 \quad \text{より求める。}$$

以上の結果より剛性マトリックスは次の様になる。

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ -\alpha_1 & \beta_1 & -\alpha_2 & \beta_2 \\ (\alpha_1^2 - \beta_1^2) & -2\alpha_1 \beta_1 & -(\alpha_2^2 - \beta_2^2) & 2\alpha_2 \beta_2 \\ \{-\alpha_1(\alpha_1^2 + 3\beta_1^2)\} & \{-\beta_1(\beta_1^2 - 3\alpha_1^2)\} & \{-\alpha_2(\alpha_2^2 - 3\beta_2^2)\} & \{-\beta_2(\beta_2^2 - 3\alpha_2^2)\} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \\ A_2 \\ B_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_2/K_2 - L_1/K_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$



§4. 数値計算

数値計算は下に示すケースについて行った。

- ① ①断面形状：幅及び高さはい) $B=5.0$, $H=2.5$
 ⅱ) $B=5.0$, $H=5.0$ ⅲ) $B=5.0$, $H=10.0$ の3断面について各々の部材厚(立壁 $t_1=R \cdot H$, 頂版及び底版 $t_2=R \cdot B$)を $R=0.01, 0.05, 0.15, 0.30$ と変化させた12断面について。

- ② 地盤反力係数: $K_1=2.0 \text{ } \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}$, $K_2=5.0 \text{ } \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}$

地盤反力係数比は $K_2/K_1=2.5$

- ③ 荷重: 頂版には過載荷重 $q=10 \text{ } \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$, 側壁には静止土圧(土圧係数 0.6)が作用する場合と、しない場合の2ケースについて。

その結果を図-2に示す。

- ② ②断面形状: 上記の内、 $R=0.05$ と 0.15 の場合について

- ④ 地盤反力係数: ⅰ) $K_1=0.5 \text{ } \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}$ $K_2=1.0 \text{ } \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}$ $K_2/K_1=2.0$

- ⅱ) $K_1=1.0 \text{ } \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}$ $K_2=2.0 \text{ } \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}$ $K_2/K_1=2.0$

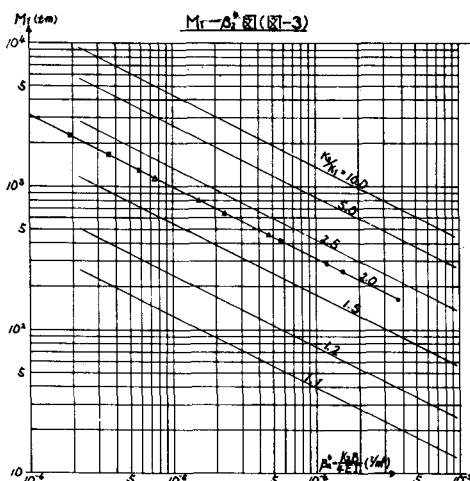
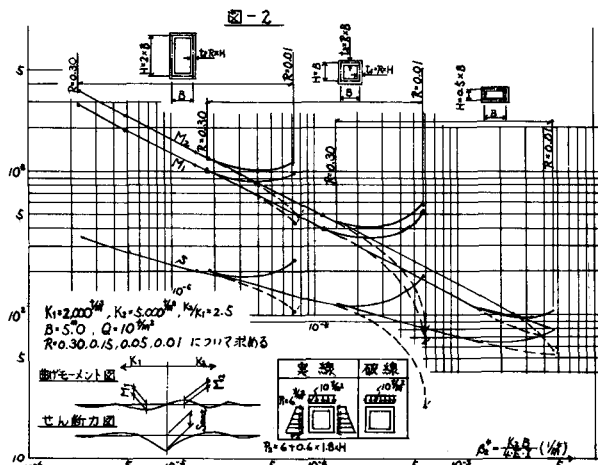
- ⑤ 荷重: 上記の内、静止土圧がある場合について

その結果を図-3, 4, 5に示す。前、同図には、地盤反力係数比が 10, 5, 2.5, 1.5, 1.2, 1.1 の場合についても同じく求め、) モグラムとして使用出来る様にした。

- ③ 上記の①と同じ条件で、棒理論による断面力を求め、①で求めた断面力との比を示したものが表-1である。前表中の(I)は棒理論、Ⅱ)は折板理論で側圧がある場合、Ⅲ)は折板理論で側圧が無い場合である。

- ④ ④断面形状: $B=5.0$, $H=5.0$, 部材厚比 $R=0.15$ の場合

- ⑥ 地盤反力係数比: 10, 5, 2.5, 1.5, 1.2, 1.1 について、各マカルバート長 $2L=20, 40, \dots, 200$ と変化させた場合の断面力と無限長梁とした時の断面力を棒理論により求め、無限長梁に対する有限長梁の断面力の比を求めたものが図-6, 7, 8である。



	H		
	2.5	5.0	10.0
(I)	○	△	□
(II)	●	▲	■

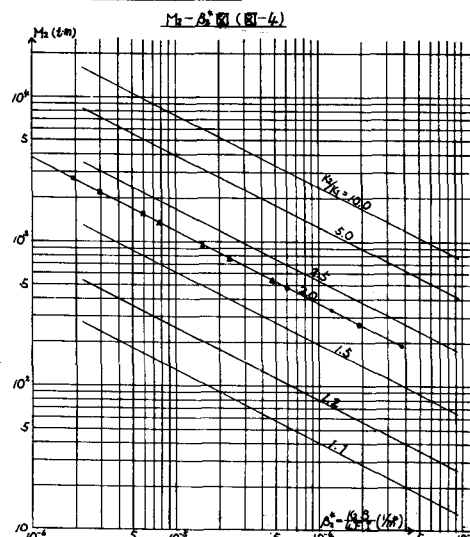


表-1

断面力比	M1		M2		S	
	Ⅱ/I	Ⅲ/I	Ⅱ/I	Ⅲ/I	Ⅱ/I	Ⅲ/I
B=5.0 H=2.5	0.01	1.69	1.16	1.08	0.74	1.59
	0.05	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01
	0.15	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
	0.30	1.03	1.03	1.03	1.05	1.05
B=5.0 H=5.0	0.01	1.3	1.03	2.85	0.35	2.25
	0.05	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98
	0.15	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
	0.30	1.03	1.03	1.03	1.05	1.05
B=5.0 H=10.0	0.01	1.98	0.88	1.85	0.82	1.72
	0.05	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	0.15	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
	0.30	1.04	1.04	1.04	1.06	1.06

§5. 考察

- ① 図-2より部材厚が薄い場合($R=0.01$)で側圧がある場合は、ラーメン作用が変形を拘束する為に断面力は大きくなり、側圧が無い場合は逆に小さくなる。

この断面力に与えるラーメン作用の影響度は、表-1より棒理論で求める断面力に比較して0.3~3.0倍にもなる。しかし部材厚比が $R=0.05\sim0.15$ の範囲では、この影響は無くなり、 $R=0.30$ になって再び現われるが、それは微小である。

- ②図-3.4,5より縦軸に断面力、横軸に $\beta^4(-\frac{KB}{4EI})$ を取り面対数目盛のグラフを使用する事によって、 $R=0.05\sim0.15$ の範囲では地盤反力係数が一定であれば、断面形状及び地盤反力係数にかかわらず断面力と β^4 は直線の関係にある事が判った。尚 $R>0.15$ の場合は、図より求められる値の5%増しても設計上は問題はない(表-1参照)。さらに同図より β^4 が一定の場合、地盤反力係数比が大きくなる程断面力は大きくなる事が判る。

- ③図-6,7,8より、地盤反力係数比 ≤ 2.5 の場合、 $\beta L \approx 3.5$ が有限長梁と無限長梁の境界値となる事と、地盤反力係数比 >5.0 の場合、 M_2 (負の最大曲げモーメント)は有限長梁の方が無限長梁よりも大きくなる事が判った。

§5. あとがき

地盤反力係数が急変する場合において、上載荷重が大きな場合の長手方向の断面力は非常に大きくなり、標準的な断面に於る配筋だけでは安全度の不足をきたす事となる。

例えば $B=5.0$, $H=4.0$ のカルバートの標準的な配筋による抵抗曲げモーメントは $1000 \text{ t}\cdot\text{m}$ 程度であるのに対し、 $2L=30\text{m}$, $\delta=40 \text{ t/m}^2$, $K_1=0.5 \text{ t/cm}^2$, $K_2=2.0 \text{ t/cm}^2$ の場合は、 $M_2=-3000 \text{ t}\cdot\text{m}$ の曲げモーメントが発生する事より明らかである。この事は、カルバート長が長い沈埋トンネルや、軟弱地盤に埋設される大口径の暗きょ等の長手方向の検討の重要性を示している。

尚本報告では、折板理論によるカルバートの解析を行なうと同時に、地盤反力係数比、 $\beta^4(-\frac{KB}{4EI})$ 、カルバート長($2L$)を変数としたノモグラムを作成し、設計に寄与したが、これが広く利用されれば幸いである。

最後に、本報告を作成するに当り、資料提供いただいた札幌千歳空港建設事務所谷口所長並びに所員の方々と、北海道開発コンサルタント(株)後藤孝春君に御協力いただいた事を付記し、謝意を表すると共に、機会があれば実測値との比較をも報告する所存である。

