

2方向偏心荷重を受けるケーソン基礎の耐震安定計算

本州四国連絡橋公団 多田浩彦

〇山下理雄

1. 概要

地中に埋入れされたケーソン基礎の耐震安定計算では、従来橋軸及び橋軸直角方向からそれぞれ別個に照査しているだけである。しかし、外力の方向の任意性や地盤条件の不均等性を考慮したり、吊橋アンカーピアのように常に1方向から強力な水平力が作用しているような基礎などでは、2方向偏心の影響は無視できないものと考えられる。ここでは、既に発表している基礎構造の静的耐震安定計算法を、ケーソン基礎について任意方向荷重に適用できるように拡張することを試みたものである。

2. 計算式

(1) 計算上の仮定

a. 基礎は剛体とみなし弾性変形を無視する。 b. 基礎周辺地盤は弾性状態を保持しているものとし図-1のようなばねを仮定する。また、水平ばね定数は地表面で0として三角形分布をしているものとする。 c. 基礎は矩形断面とする。 d. 安定計算式は、外力及び体積力と地盤のばねによる抵抗力の釣合を考える。

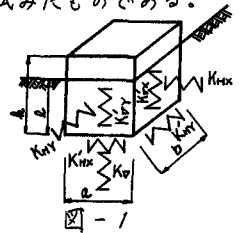


図-1

(2) 記号の説明

外力、反力、ばね定数、変位、寸法、等の記号を図-1及び図-2に示す。

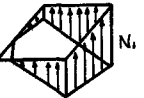
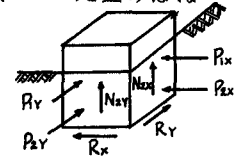
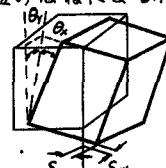


図-2 地盤反力及び変位

(3) 計算式

a. 底面が全面支持状態の場合、

鉛直力について

$$\left. \begin{aligned} N_{1x} &= -a b K_V \delta_V & N_{2x} &= -\frac{1}{2} b l K'_{Vx} \left( \delta_V + \frac{1}{2} a \theta_x \right) \\ N_{2y} &= -\frac{1}{2} a l K'_{Vy} \left( \delta_V + \frac{1}{2} b \theta_y \right) \end{aligned} \right\} \text{----- (1)}$$

水平力について

$$\left. \begin{aligned} P_{1x} &= -\frac{1}{6} b l^2 K_{Hx} \theta_x & P_{1y} &= -\frac{1}{6} a l^2 K_{Hy} \theta_y \\ P_{2x} &= -\frac{1}{2} b l K_{Hx} \delta_{Hx} & P_{2y} &= -\frac{1}{2} a l K_{Hy} \delta_{Hy} \\ R_x &= -a b K'_{Hx} \delta_{Hx} & R_y &= -a b K'_{Hy} \delta_{Hy} \end{aligned} \right\} \text{----- (2)}$$

モーメントについて

$$\left. \begin{aligned} M_{N1x} &= -\frac{1}{12} a^3 b K_V \theta_x & M_{N1y} &= -\frac{1}{12} a b^3 K_V \theta_x \\ M_{N2x} &= -\frac{1}{4} a b l K'_{Vx} \left( \delta_V + \frac{1}{2} a \theta_x \right) & M_{N2y} &= -\frac{1}{4} a b l K'_{Vy} \left( \delta_V + \frac{1}{2} b \theta_y \right) \\ M_{P1x} &= -\frac{1}{12} b l^3 K_{Hx} \theta_x & M_{P1y} &= -\frac{1}{12} a l^3 K_{Hy} \theta_y \\ M_{P2x} &= -\frac{1}{6} b l^2 K_{Hx} \delta_{Hx} & M_{P2y} &= -\frac{1}{6} a l^2 K_{Hy} \delta_{Hy} \end{aligned} \right\} \text{----- (3)}$$

したがって全体の力の釣合から次の連立方程式が得られる。

$$\text{ここで、 } A_1 = a K_V + \frac{1}{2} (a K'_{Vy} + b K'_{Vx}) l \quad B_1 = \frac{1}{4} a b l K'_{Vx} \quad C_1 = \frac{1}{4} a b l K'_{Vy}$$

$$D_1 = \frac{1}{6} b l^2 K_{HX} \quad E_1 = \frac{1}{2} b l K_{HX} + a b K'_{HX} \quad F_1 = \frac{1}{6} a l^2 K_{HY}$$

$$G_1 = \frac{1}{2} a l K_{HY} + a b K_{HY} \quad H_1 = \frac{1}{12} a^3 b K_{\nabla X} + \frac{1}{8} a^2 l K'_{\nabla X} + \frac{1}{12} a l^3 K_{HX}$$

$$I_1 = \frac{1}{12} a b^3 K_{\nabla Y} + \frac{1}{8} a b^2 l K'_{\nabla Y} + \frac{1}{12} b l^3 K_{HY}$$

$$A_1 \delta_{\nabla} + B_1 \theta_X + C_1 \theta_Y = N \quad \text{----- (4)} \quad D_1 \theta_X + E_1 \delta_{HX} = H_X \quad \text{----- (5)} \quad F_1 \theta_Y + G_1 \delta_{HY} = H_Y \quad \text{----- (6)}$$

$$B_1 \delta_{\nabla} + H_1 \theta_X + D_1 \delta_{HX} = M_X \quad \text{----- (7)} \quad C_1 \delta_{\nabla} + I_1 \theta_Y + F_1 \delta_{HY} = M_Y \quad \text{----- (8)}$$

b 底面に三角形の浮上りを生ずる場合

鉛直力について

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= -\frac{1}{6y} (x^2 y^2 + 3 a b^2 x - 6 a b x y + 3 a^2 b y) K_{\nabla} \theta_X \\ N_{2x} &= -\frac{1}{2y} (b x - 2 x y + 2 a y) b l K'_{\nabla X} \theta_X \\ N_{2y} &= -\frac{1}{2y} (2 b x - 2 x y + a y) a l K'_{\nabla Y} \theta_X \end{aligned} \right\} \text{----- (9)}$$

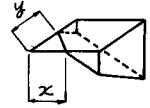


図-4

水平力について

$$\left. \begin{aligned} P_{1x} &= -\frac{1}{6} b l^2 K_{HX} \theta_X & P_{1y} &= -\frac{1}{6y} a l^2 K_{HY} \theta_X \\ P_{2x} &= -\frac{1}{2} b l K_{HX} \delta_{HX} & P_{2y} &= -\frac{1}{2} a l K_{HY} \delta_{HY} \\ R_x &= -(a b - \frac{1}{2} x y) K'_{\nabla X} \delta_{HX} & R_y &= -(a b - \frac{1}{2} x y) K_{HY} \delta_{HY} \end{aligned} \right\} \text{----- (10)}$$

モーメントについて

$$\left. \begin{aligned} M_{N1x} &= -\frac{1}{24} (x^3 y - 2 a x^2 y + 2 a^3 b) K_{\nabla} \theta_X & M_{N1y} &= -\frac{1}{24y} (x^2 y^3 - 2 b x^2 y^2 + 2 a b^3 x) K_{\nabla} \theta_X \\ M_{N2x} &= -\frac{1}{4y} (b x - 2 x y + 2 a y) a b l K'_{\nabla X} \theta_X & M_{N2y} &= -\frac{1}{4y} (2 b x - 2 x y + a y) a b l K'_{\nabla Y} \theta_X \\ M_{P1x} &= -\frac{1}{12} b l^3 K_{HX} \theta_X & M_{P1y} &= -\frac{1}{12y} a l^3 x K_{HY} \theta_X \\ M_{P2x} &= -\frac{1}{6} b l^2 K_{HX} \delta_{HX} & M_{P2y} &= -\frac{1}{6} a l^2 K_{HY} \delta_{HY} \end{aligned} \right\} \text{----- (11)}$$

したがって全体の力の釣合から、 $x, y$  について次の方程式が得られる。

$$\left\{ G_2 J_2 x^4 + (G_2 K_2 + A_2 G_2 \beta_1) x^2 \right\} y^3 + \left\{ F_2 J_2 x^3 + (F_2 K_2 + G_2 L_2 + A_2 E_2 \alpha_1 + A_2 F_2 \beta_1 + C_2 G_2 \beta_1) x^2 \right. \\ \left. + (G_2 O_2 + D_2 G_2 \beta_1) x \right\} y^2 + \left\{ (G_2 M_2 + B_2 G_2 \beta_1) x^2 + (F_2 L_2 + C_2 E_2 \alpha_1 + C_2 F_2 \beta_1) x + (F_2 O_2 + E_2^2 \right. \\ \left. + D_2 E_2 \alpha_1 + D_2 F_2 \beta_1) \right\} y + \left\{ (F_2 M_2 + B_2 E_2 \alpha_1 + B_2 F_2 \beta_1) x \right\} = 0 \quad \text{----- (12)}$$

$$\left\{ J_2 T_2 y^4 + (P_2 T_2 + A_2 T_2 \beta_2) y^3 \right\} x^3 + \left\{ I_2 J_2 y^3 + (I_2 P_2 + Q_2 T_2 + A_2 H_2 \alpha_2 + A_2 I_2 \beta_2 + C_2 T_2 \beta_2) y^2 \right. \\ \left. + (S_2 T_2 + B_2 T_2 \beta_2) y \right\} x^2 + \left\{ (R_2 T_2 + D_2 T_2 \beta_2) y^2 + (I_2 Q_2 + C_2 H_2 \alpha_2 + C_2 I_2 \beta_2) y + (I_2 S_2 + H_2^2 \right. \\ \left. + B_2 H_2 \alpha_2 + B_2 I_2 \beta_2) \right\} x + \left\{ (I_2 R_2 + D_2 H_2 \alpha_2 + D_2 I_2 \beta_2) y \right\} = 0 \quad \text{----- (13)}$$

$$\begin{aligned} \text{ここで、} \quad A_2 &= \frac{1}{6} K_{\nabla} & B_2 &= \frac{1}{2} a b^2 K_{\nabla} + \frac{1}{2} b^2 l K'_{\nabla X} + a b l K'_{\nabla Y} & C_2 &= -(a b K_{\nabla} + b l K'_{\nabla X} + a l K'_{\nabla Y}) \\ D_2 &= \frac{1}{2} a^2 b K_{\nabla} + a b l K'_{\nabla X} + \frac{1}{2} a^2 l K'_{\nabla Y} & E_2 &= -\frac{1}{6} b l^2 K_{HX} & F_2 &= \frac{1}{2} b l K_{HX} + a b K'_{HX} \\ G_2 &= -\frac{1}{2} K'_{HX} & H_2 &= -\frac{1}{6} a l^2 K_{HY} & I_2 &= \frac{1}{2} a l K_{HY} + a b K'_{HY} \\ J_2 &= \frac{1}{24} K_{\nabla} & K_2 &= \frac{1}{12} a K_{\nabla} & L_2 &= \frac{1}{2} a b l K'_{\nabla X} \\ M_2 &= -\frac{1}{4} a b^2 l K'_{\nabla X} & O_2 &= -\frac{1}{2} a^2 b l K'_{\nabla X} - \frac{1}{12} a^3 b K_{\nabla} - \frac{1}{12} b l^3 K'_{\nabla X} & P_2 &= \frac{1}{12} b K_{\nabla} \\ Q_2 &= \frac{1}{2} a b l K'_{\nabla Y} & R_2 &= -\frac{1}{4} a^2 b l K'_{\nabla Y} & S_2 &= -\frac{1}{12} a l^3 K_{HY} - \frac{1}{2} a b^3 K'_{\nabla Y} - \frac{1}{12} a b l^3 K'_{\nabla Y} \\ T_2 &= -\frac{1}{2} K'_{HY} & \alpha_1 &= H_X / N & \alpha_2 &= H_Y / N & \beta_1 &= M_X / N & \beta_2 &= M_Y / N \end{aligned}$$

又、 $x, y$  から  $\theta_X, \theta_Y, \delta_{HX}, \delta_{HY}$ 、及び底面最大地盤反力  $q_{max}$  は次の式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} \theta_X &= N y / (A_2 x^2 y^2 + B_2 x + C_2 x y + D_2 y) & \theta_Y &= x \theta_X / y \\ \delta_{HX} &= (H_X + E_2 \theta_X) / (F_2 + G_2 x y) & \delta_{HY} &= (H_Y y - H_2 x \theta_X) / (I_2 y + T_2 x y^2) \end{aligned} \right\} \text{----- (13)}$$

$$g_{max} = \{ (a - x) \theta_x + b \theta_y \} K \nabla$$

C 底面に台形の浮上りも生じる場合

鉛直力について

$$N_{1x} = -\left(\frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{6}y^2\right) b K \nabla \theta_x \quad N_{2x} = -blx K \nabla \theta$$

$$N_{2y} = -\left(x + y - \frac{1}{2}a\right) a l K \nabla \theta_x$$

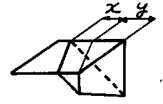


図 - 5

水平力について

$$\left. \begin{aligned} P_{1x} &= -\frac{1}{6}bl^2 K_{HX} \theta_x & P_{1y} &= -\frac{1}{3b}al^2 K_{HY} \theta_x \\ P_{2x} &= -\frac{1}{2}bl K_{HX} \delta_{HX} & P_{2y} &= -\frac{1}{2}al K_{HY} \delta_{HY} \\ R_x &= -bx K \nabla \theta_x & R_y &= -by K \nabla \theta_y \end{aligned} \right\} \text{----- (14)}$$

モーメントについて

$$\left. \begin{aligned} M_{N1x} &= -\frac{1}{6}\left(\frac{3}{2}ax^2 + \frac{1}{2}ay^2 - x^3 - xy^2\right) b K \nabla \theta_x & M_{N1y} &= -\frac{1}{6}b^2xy K \nabla \theta_x \\ M_{N2x} &= -\frac{1}{2}abl x K \nabla \theta_x & M_{N2y} &= -\frac{1}{2}(x + y - \frac{1}{2}a) ab l K \nabla \theta_x \\ M_{P1x} &= -\frac{1}{12}bl^3 K_{HX} \theta_x & M_{P1y} &= -\frac{1}{6b}al^3 y K_{HY} \theta_x \\ M_{P2x} &= -\frac{1}{6}bl^2 K_{HX} \delta_{HX} & M_{P2y} &= -\frac{1}{6}al^2 K_{HY} \delta_{HY} \end{aligned} \right\} \text{----- (15)}$$

したがって、全体の釣合から  $x, y$  について次の方程式が得られる。

$$\left\{ C_3 G_3 x^2 + (G_3 O_3 + C_3 H_3 + C_3 G_3 \beta_1) x^2 + (H_3 O_3 + C_3 F_3 \alpha_1 + C_3 H_3 \beta_1) \right\} y^2 + \left\{ D_3 G_3 \beta_1 x + (D_3 F_3 \alpha_1 + D_3 H_3 \beta_1) \right\} y + \left\{ C_3 G_3 x^2 + (G_3 L_3 + C_3 H_3 + A_3 G_3 \beta_1) x^2 + (G_3 M_3 + H_3 L_3 + A_3 F_3 \alpha_1 + B_3 G_3 \beta_1 + A_3 H_3 \beta_1) x^2 + (G_3 P_3 + H_3 M_3 + B_3 F_3 \alpha_1 + G_3 E_3 \beta_1 + B_3 H_3 \beta_1) x + (H_3 P_3 + F_3^2 + E_3 F_3 \alpha_1 + E_3 H_3 \beta_1) \right\} = 0 \text{----- (16)}$$

$$\left\{ A_3 J_3 \beta_2 x^2 + \left\{ J_3 Q_3 y + (J_3 R_3 + A_3 U_3 \alpha_2 + B_3 J_3 \beta_2 + A_3 K_3 \beta_2) \right\} x^2 + \left\{ C_3 J_3 \beta_2 y^2 + (J_3 S_3 + K_3 O_3 + D_3 J_3 \beta_2) y + (J_3 T_3 + K_3 R_3 + B_3 U_3 \alpha_2 + E_3 J_3 \beta_2 + B_3 K_3 \beta_2) \right\} x + \left\{ (C_3 U_3 \alpha_2 + C_3 K_3 \beta_2) y^2 + (K_3 S_3 + I_3 U_3 + D_3 U_3 \alpha_2 + D_3 K_3 \beta_2) y + (K_3 T_3 + E_3 U_3 \alpha_2 + E_3 K_3 \beta_2) \right\} \right\} = 0 \text{----- (17)}$$

ここで、

$A_3 = \frac{1}{2}bK \nabla$	$B_3 = (aK \nabla y + bK \nabla x)l$	$C_3 = \frac{1}{6}bK \nabla$
$D_3 = alK \nabla y$	$E_3 = -\frac{1}{2}a^2lK \nabla y$	$F_3 = -\frac{1}{6}bl^2K_{HX}$
$G_3 = bK_{HX}$	$H_3 = \frac{1}{2}blK_{HX}$	$I_3 = -\frac{1}{3b}al^2K_{HY}$
$J_3 = bK_{HY}$	$K_3 = \frac{1}{2}alK_{HY}$	$L_3 = -\frac{1}{4}abK \nabla$
$M_3 = -\frac{1}{2}ablK \nabla x$	$O_3 = -\frac{1}{2}abK \nabla$	$P_3 = -\frac{1}{12}bl^3K_{HX}$
$Q_3 = -\frac{1}{6}b^2K \nabla$	$R_3 = -\frac{1}{2}ablK \nabla y$	$S_3 = -\frac{1}{2}ablK \nabla y - \frac{1}{6b}al^3K_{HY}$
$T_3 = \frac{1}{4}a^2blK \nabla y$	$U_3 = -\frac{1}{6}a^2l^2K_{HY}$	

また、 $x, y$  が求まると、 $\theta_x, \theta_y, \delta_{HX}, \delta_{HY}$ 、及び底面最大地盤反力は次の式で求まる。

$$\left. \begin{aligned} \theta_x &= N / (A_3 x^2 + B_3 x + C_3 y^2 + D_3 y + E_3) & \theta_y &= 2y \theta_x / b \\ \delta_{HX} &= (H_x + F_3 \theta_x) / (G_3 x + H) & \delta_{HY} &= (H_y + I_3 y \theta_x) / (J_3 x + K) \\ g_{max} &= (x + y) K \nabla \theta_x \end{aligned} \right\} \text{----- (18)}$$

### 3 数値計算

「2」で導いた計算式を用いて本州四国連絡橋基礎構造に例をとり数値計算を行なってみた。数値計算の対象としたのは図-6に示す吊橋アンカー基礎である。

(1) 吊橋中央径間 780m アンカー基礎

(2) ケーブル水平力  $43 \times 10^3 t$

(3) 地盤ばね係数 (橋軸方向を X 軸とする)

$$K_V = 10.000 t/m^3$$

$$K_{HX} = 1.800 t/m^3$$

$$K_{HY} = 1.400 t/m^3$$

$$K'_{HX} = 5.000 t/m^3$$

$$K'_{HY} = 5.000 t/m^3$$

$$K'_{VX} = 900 t/m^3$$

$$K'_{VY} = 700 t/m^3$$

(4) 基礎自重  $280 \times 10^3 t$

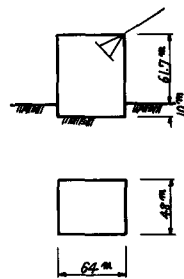


図-6

計算結果

底面地盤反力について、図-7~図-13に示す。

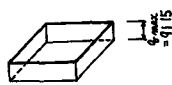


図-7

基礎完成時



図-8

ケーブル架設時

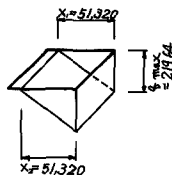


図-9

地震時 (橋軸方向  $K_G=0.3$ )

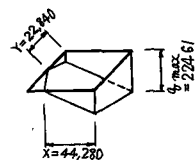


図-10

地震時 (橋軸直角方向  $K_G=0.3$ )

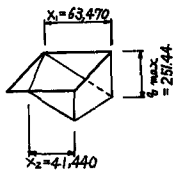


図-11

地震時 (45°方向  $K_G=0.3$ )

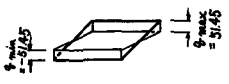


図-12

地震力のみの場合 (橋軸直角方向)



図-13

地震時反力の合成 (橋軸直角方向)

#### 4. 結語

例えば吊橋アンカー基礎の耐震安定計算は、従来、図-12、図-13に示すように橋軸方向又は橋軸直角方向についてそれぞれ別個に行っていた。ここで導いたように任意方向の荷重を同時に評価することのできる計算法を用いると、それらとはかなり異った結果となることが明らかとなった。また、地震入力を3方向から作用させて計算したところ特に45°方向の地震入力の場合、地盤反力変位が大きくなってきている。ここで行った計算では、これらがみな危険側の結果となっている点に留意すべきであると思われる。その他、この計算法を用いると基礎周辺地盤の不均等性の影響も考慮することができる。

ここでは静的耐震安定についてのみ考慮したが、今後さらに動的状態の解析へと計算法を発展させて行きたいと考えている。

#### 参考文献

1. 「本州四国連絡橋下部構造の耐震安定計算」

道路 42.2 多田