I－20　地盤の変形を考慮した井筒の耐震設計について

国鉄　構造物設計事務所　正員　○田村浩一
福地喜明

1. はしがき

橋りよう基礎としての井筒は一般に地震によつてその根入長，断面，等が決定されるが，その際の計算方式としては物部博士の式，池原・横山両氏の式，土の抵抗を受動土圧と主動土圧の差と仮定した式，動的解析，等の方法が従来から用いられて来た。併しこれらの式は地震時に井筒周囲の土が井筒の動きに抵抗する考え方に基いており，沖積層，洪積層，等の比較的厚い軟弱層では井筒周囲の土自体が地震時に層の上下で変位の差を生じ，上部程変位が大きいことが認められている。従つて軟弱地層中の井筒は地震時には周囲の土の変形の影響も同時にうけるものと思われる。学会内の本四連絡橋に関する耐震設計小委員会では岡本小委員長の指導のもとに長大吊橋のケーソンに対し基礎下端の横移動はないものとして地盤の変形を考慮した地震時土圧の式を導いたが，本報文はこの考えを更に一般の井筒の設計に適用するために求めた計算式についての一提案である。

2. 井筒の設計計算式

地震時の土の変形は井筒下端で0，上端でΔの逆三角形，井筒側面の土は水平バネの働きをし，土はその動きを拘束されると変位に比例した水平力を生ずる。井筒底部には鉛直バネとせん断バネを考え，何れも変位に比例して反力及び抵抗力を生ずるものと仮定する。

2.1　井筒は剛体，地盤の水平抵抗係数一定で，底面に引張を生じない場合

$$p = k\left\{\Delta\left(1-\frac{x}{l}\right)-(h-x)\theta\right\} \quad \cdots\cdots(1)$$

$$q_1 = v\cdot\frac{a}{2}\cdot\theta \quad \cdots(2) \qquad F=(l-h)\theta SA \quad \cdots(3)$$

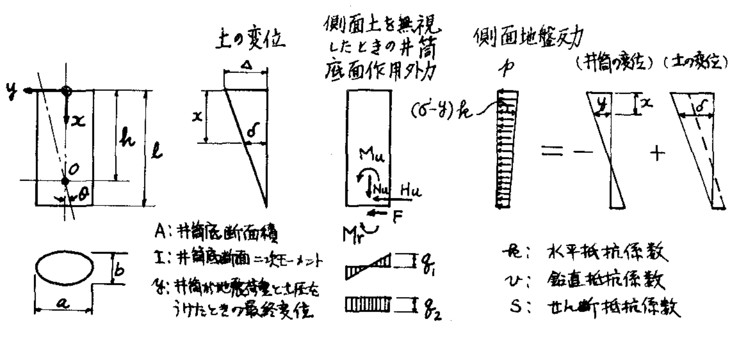
$$H_u + b\int_0^l p\cdot dx + F = 0 \quad \cdots\cdots(4)$$

$$\therefore\ h = \frac{2SA+bkl}{SA+bkl}\times\frac{l}{2} + \frac{H_u+\frac{bkl\Delta}{2}}{SA+bkl}\times\frac{va}{2q_1} \quad \cdots(5)$$

$$M_r = \frac{2q_1 I}{a} \quad \cdots\cdots(6)$$

$$M_u + b\int_0^l p(l-x)\,dx - M_r = 0 \quad \cdots\cdots(7)$$

$$\therefore\ q_1 = \frac{M_u+\frac{\Delta bkl^2}{3} - \frac{kbl^2\left(H_u+\frac{bkl\Delta}{2}\right)}{2(SA+bkl)}}{\frac{2I}{a}+\frac{bkl^3}{6va}\times\frac{4SA+bkl}{SA+bkl}} \quad \cdots(8)$$



(8), (5), (1) より底面反力，回転中心，側面反力が求められる。

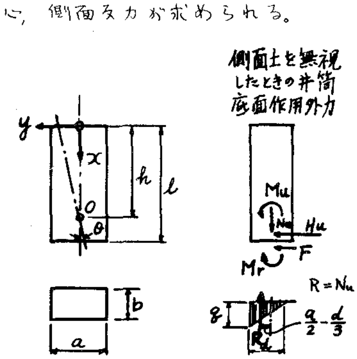
2.2　井筒は剛体，地盤の水平抵抗係数一定で，底面の一部に引張を生ずる場合

(a)　矩形断面

$$q = d\theta v \quad \cdots(9) \qquad F=(l-h)\theta Sbd \quad \cdots(10), \qquad N_u = \frac{1}{2}d^2 v b\theta \quad \cdots(11)$$

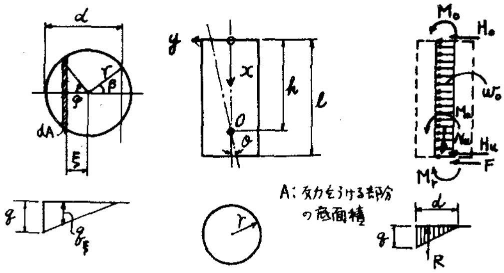
$$M_r = N_u\left(\frac{a}{2}-\frac{d}{3}\right) \quad \cdots(12) \qquad h = \frac{H_u+\frac{bkl\Delta}{2}}{\theta b(kl+Sd)} + \frac{\frac{kl^2}{2}+Sdl}{kl+Sd} \quad \cdots(13)$$

$$\theta = \frac{12(kl+Sd)\left\{M_u-N_u\left(\frac{a}{2}-\frac{d}{3}\right)+\frac{\Delta bkl^2}{3}\right\}}{bkl^3(4Sd+kl)} - \frac{6H_u+3bkl\Delta}{bl(4Sd+kl)} \quad \cdots(14)$$



(11), (14) から θ, d を求め，他に必要な諸数値を計算する。

(3) 円形断面



$\ldots = r(1+\cos\beta)\theta\nu \cdots (15)$, $\quad q_\xi = \dfrac{\cos\beta+\cos\varphi}{1+\cos\beta}\cdot q \cdots\cdots (16)$

$\ldots q_\xi \cdot dA = 2r^3\nu\theta\cdot m_1 = N_u \cdots\cdots (17)$

$$m_1 = \frac{1}{3}\sin^3\beta + \frac{1}{2}\sin\beta\cos^2\beta + \frac{1}{2}(\cos\beta)(\pi-\beta)$$

$\ldots \xi\, dR = r^4\theta\cdot\nu\cdot m_2$, $\quad m_2 = 2\left(\dfrac{\pi-\beta}{8} + \dfrac{\sin 4\beta}{32} + \dfrac{\sin^3\beta\cos\beta}{3}\right) \cdots (18)$

$\ldots dA = 2r^2 m_3$, $\quad m_3 = \dfrac{1}{2}(\cos\beta\sin\beta + \pi - \beta) \cdots\cdots (19)$

$$\ldots = \frac{H_u + r k_h \ell\Delta}{2r\theta(k_h\ell + Sr m_3)} + \frac{\ell(k_h\ell + 2Sr m_3)}{2(k_h\ell + Sr m_3)} \cdots\cdots (20)$$

$$\ldots = \frac{3M_u - \dfrac{3k_h\ell^2(H_u + r k_h\ell\Delta)}{2(k_h\ell + Sr m_3)} + 2r k_h \ell^2\Delta}{3r^4\nu m_2 + r k_h \ell^3 \times \dfrac{k_h\ell + 4Sr m_3}{2(k_h\ell + Sr m_3)}} \cdots (21)$$

を用い (17),(21) 式を満足する β, m_1, m_2, m_3 を

より求める。井筒剛体のモーメント M は

$\ldots -H_o x + \dfrac{w_o}{2}x^2 + r k_h x^2(\Delta - k_h\theta) + \dfrac{r k_h x^3}{3}\left(\theta - \dfrac{\Delta}{\ell}\right) \cdots\cdots (22)$

井筒は剛体，地盤の水平抵抗係数は深さに比例

底面に引張を生じない場合

$\ldots (23) \quad p = \dfrac{K}{\ell}\left(\dfrac{2q_1}{\nu a} - \dfrac{\Delta}{\ell}\right)x^2 + \dfrac{K}{\ell}\left(\Delta - \dfrac{2q_1 h}{\nu a}\right)x \cdots (24)$

$\ldots = \dfrac{\ldots + \frac{1}{3}kb\Delta\ell}{\frac{3}{\ldots}(kb\ell + 2SA)} + \dfrac{2\ell\left(\frac{kb\ell}{3} + SA\right)}{kb\ell + 2SA} \cdots (25)$ $\quad q_1 = \dfrac{M_u - \dfrac{kb\ell^2(H_u + \frac{kb\Delta\ell}{6})}{3(kb\ell + 2SA)} + \dfrac{kb\ell^2\Delta}{12}}{\dfrac{kb\ell^3}{\nu a}\cdot\dfrac{2SA + \frac{1}{3}kb\ell}{6(kb\ell + 2SA)} + \dfrac{2I}{a}} \cdots (26)$

底面に引張を生ずる場合（矩形断面）

$$\ldots = \frac{H_u + \frac{kb\ell}{6}(2\ell\theta + \Delta) + \ell\theta S b d}{\frac{b\theta}{2}(k\ell + 2Sd)} \cdots\cdots (27)$$

$$\ldots + \frac{kb\ell^2}{12}(\Delta + \ell\theta) - \frac{k\ell^2\{H_u + \frac{kb\ell}{6}(2\ell\theta + \Delta) + \ell\theta S b d\}}{3(k\ell + 2Sd)} - N_u\left(\frac{a}{2} - \frac{d}{3}\right) = 0 \cdots (28)$$

これから θ, d を求める。

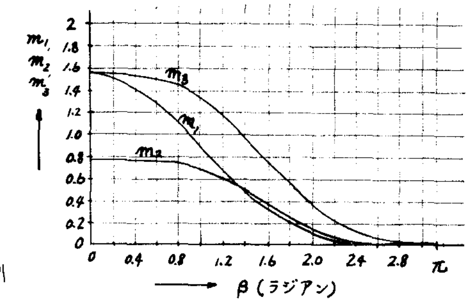
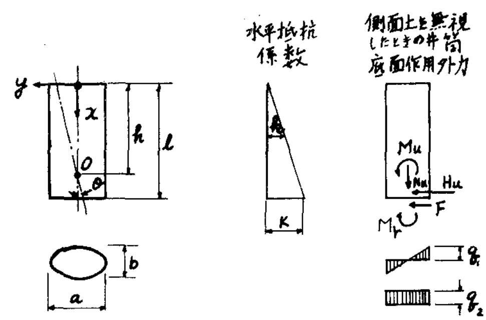


図-1 β と m_1, m_2, m_3 との関係



井筒は弾性体，地盤の水平抵抗係数一定で，

底面に引張を生じない場合

断力，G：せん断弾性係数，E：ヤング係数，K：せん断

最大値と平均値との比

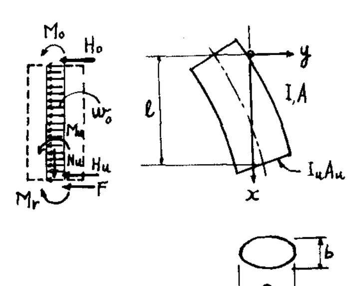
井筒に作用する荷重 $\quad w = w_o + bk_h\left(y - \Delta + \dfrac{x}{\ell}\Delta\right) \cdots\cdots (29)$

$\ldots -\dfrac{M}{EI} + \dfrac{K}{AG}\dfrac{dS}{dx}$ より $\quad \dfrac{d^4y}{dx^4} - \dfrac{Kbk_h}{AG}\dfrac{d^2y}{dx^2} + \dfrac{bk_h}{EI}y = \dfrac{bk_h\Delta - w_o}{EI} - \dfrac{bk_h\Delta x}{EI\ell} \cdots\cdots (30)$

$\ldots = e^{\gamma x}(C_1\cos\alpha x + C_2\sin\alpha x) + e^{-\gamma x}(C_3\cos\alpha x + C_4\sin\alpha x) - \dfrac{w_o}{bk_h} + \Delta - \dfrac{\Delta x}{\ell} \cdots\cdots (31)$

$\alpha = \sqrt{\beta^2 - \dfrac{Kbk_h}{4AG}}$, $\quad \beta = \sqrt[4]{\dfrac{bk_h}{4EI}}$, $\quad \gamma = \sqrt{\beta^2 + \dfrac{Kbk_h}{4AG}}$ $\quad$ 一般に，$\beta^2 - \dfrac{Kbk_h}{4AG} > 0$

$\ldots = -EI\left\{\dfrac{d^2y}{dx^2} - \dfrac{Kbk_h y}{AG} - \dfrac{Kbk_h\Delta x}{\ell AG} + \dfrac{(bk_h\Delta - w_o)K}{AG}\right\} \cdots (32)$, $\quad S = -EI\left\{\dfrac{d^3y}{dx^3} - \dfrac{Kbk_h}{AG}\dfrac{dy}{dx} - \dfrac{Kbk_h\Delta}{AG\ell}\right\} \cdots\cdots (33)$



$\ldots k_h\left(y - \Delta + \dfrac{x}{\ell}\Delta\right) \cdots\cdots (34)$, $\quad M_r = I_u\cdot\nu\left\{\left(\dfrac{dy}{dx}\right)_{x=\ell} - \dfrac{K(S)_{x=\ell}}{AG}\right\} \cdots\cdots (35)$ $\quad$ 境界条件として $x = 0$ で

$M = M_o$，$S = H_o$，$x = \ell$ で $M = M_r$，$S = -(y)_{x=\ell}\cdot A_u\cdot S$ $\quad$ これらの条件から C_1, C_2, C_3, C_4 が求められる。

むすび 以上の計算式には地震時の土の変位，土のバネ常数 等を含んでいるが，これらについては更に観測式は調査研究の結果に基き実情に合った設計計算法に近ずけたいと考えている。