

九州大学 工学部 学生員 ○入江 達雄

九州工業大学 正 員 高西 照彦

九州大学 工学部 小坪 清真

## 1. まえがき

火力発電所・原子力発電所などは立地条件の困難性から、従来の強固な地盤から次第に海岸の軟弱地盤地帯への建設が余儀なくされているが、さらに近年においては内陸での建設に種々の問題を生じているため、海岸沖合に人工島を築造し、これに発電所を建設せざるを得ない方向にある。しかし、海洋埋立地では水深も深く、その護岸構造物の耐震性の確保には技術的に問題が多い。海洋埋立地における護岸構造物の特徴は、自己の慣性力の他に、腹背から動水圧をうけ、さらに土圧をうけて、その安定性およびやすみ外力が大きいことおよび基礎地盤の動的特性の把握が困難なことである。本研究は捨石上に築造された重力式護岸に働く動水圧を種々の基礎条件下および形状の下に解明し、護岸の耐震計算の基礎資料を得ようとするものである。

## 2. 模型実験

図-1に示すように、振動方向長さ2.5 m、巾1.5 m、深さ1 mの鋼製箱を振動台上に設置し、箱内に振動方向30 cm、深さ70 cmの鋼製模型護岸を固定した。護岸の前面5個所に動水圧計をとりつけた。動水圧計は直径2.3 cmのリングにはさんだ焼青銅板に直交ひずみゲージを貼りつけたもので、水圧変化をひずみに変換して測定した。なお、ひずみと水圧との関係は測定に先立ち、静水圧を加えて校正した。

実験は、砂層と硬層について行なった。図-2に砂層状態における護岸前面の動水圧の鉛直分布を示す。護岸基礎下に砂層がある場合には、底面が不透水層の場合とほぼ同じ動水圧を示している。護岸前面に砂層のある場合は、その動水圧は極端に小さな値を示している。

## 3. 砂層内直立壁に働く動水圧の理論

図-3に示すように、護岸の水深を $H$ 、直交座標を $x, z$ 、座標方向の水分子の変位を $u, w$ 、砂粒子の相対変位を $\bar{u}, \bar{w}$ 、水及び砂の単位体積重量を $\gamma_w, \gamma_s$ 、水の体積弾性率を $E_v$ 、砂層のヤング率、剛性率、ポアソン比、引張応力、せん断応力をそれぞれ $E, G, \nu, \sigma, \tau$ 、とし、重力加速度を $g$ 、地震の水平変位を $U_g$ 、水分子と砂層との相対速度に比例する抵抗係数を $C$ 、動水圧を $p$ 、時間を $t$ 、護岸の変形率を $\beta$ とする。

水分子及び地盤の運動方程式が(1)(2)及び(3)で表わされる。

$$\frac{\gamma_w}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\frac{\partial p}{\partial x} - C \frac{\partial}{\partial t} (u - \bar{u} - U_g) \quad \dots (1) \quad \frac{\gamma_w}{g} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = -\frac{\partial p}{\partial z} - C \frac{\partial w}{\partial t} \quad \dots (2) \quad \text{ここで } p = -E_v \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\gamma_s}{g} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial z} - \frac{\gamma_s}{g} \frac{\partial^2 U_g}{\partial t^2} \quad \dots (3)$$

(3)式を平面ひずみ理論を用いて次の境界条件の下で解けば(4)式が得られる。

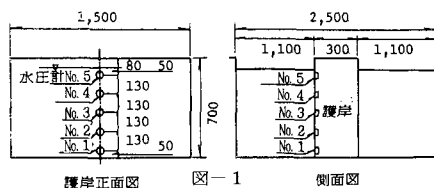


図-1 護岸正面図 側面図

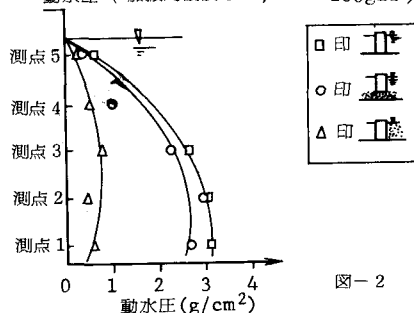


図-2

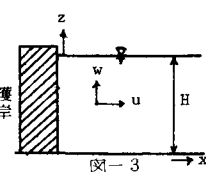


図-3

$$\begin{aligned} (\bar{u})_{z=0} &= 0 & (\bar{u})_{z=0} &= \frac{\alpha g}{\omega^2} \cdot \beta \cdot \frac{z}{H} \cdot \sin \omega t = \operatorname{Re} \left( -\frac{\alpha g}{\omega^2} \cdot \beta \cdot \frac{z}{H} \cdot i e^{i \omega t} \right) \\ (\bar{u})_{z=H} &= 0 \end{aligned}$$

$$\bar{u} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4 \alpha W_s}{\mu_m^2 E_m (2m-1) \pi} \left\{ 1 - e^{-\mu_m x} \right\} \sin \frac{(2m-1) \pi z}{2H} \cdot \sin \omega t + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\alpha g \beta \cdot 8 \cdot (-1)^{m-1}}{\omega^2 (2m-1)^2 \pi^2} \cdot e^{-\mu_m x} \cdot \sin \frac{(2m-1) \pi z}{2H} \cdot \sin \omega t \quad \dots (4)$$

(4)式第1項は護岸が変位しないときの値、第2項は護岸の変位による地盤変形である。

i) 護岸の変位がない場合

(4)式の第1項を(1)式に代入し、(1)(2)式をそれぞれ $x$ および $z$ で微分し加えると、 $P$ に関する偏微分方程式(5)が得られる。

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} - \frac{C}{E_v} \frac{\partial P}{\partial t} - \frac{W_0}{g E_v} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = \frac{4 \alpha W_s C \omega}{\mu_1 E_m \pi} \cdot e^{-\mu_1 x} \cdot \sin \frac{\pi z}{2H} \cdot \cos \omega t \quad \dots (5)$$

これを解くに当たっての境界条件は、地盤変位を $(\alpha g / \omega^2) \sin \omega t$ とすれば

$$\left( \frac{\partial P}{\partial z} \right)_{z=0} = 0, \quad (P)_{z=H} = 0 \quad \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right)_{x=0} = \alpha W_0 \sin \omega t = \operatorname{Re} (-\alpha W_0 i e^{i \omega t})$$

(5)式を上記条件の下に解けば壁面に動く動水圧が次のように求まる。

$$\begin{aligned} P = & \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4 \alpha W_0 H (-1)^{m-1} (a_m \sin \omega t - b_m \cos \omega t)}{(2m-1) \pi (a_m^2 + b_m^2)} \cdot \cos \frac{(2m-1) \pi z}{2H} \\ & - \frac{8 \alpha W_s C \omega H^3}{\pi^2 E_m} \sum_{m=1}^{\infty} f_m \cdot \cos \frac{(2m-1) \pi z}{2H} \times \left\{ \left[ \frac{C_m}{(c_m^2 + d_m^2) \mu_1 H} - \frac{a_m C_m - b_m d_m}{(a_m^2 + b_m^2)(C_m^2 + d_m^2)} \right] \sin \omega t \right. \\ & \left. - \left[ \frac{d_m}{(c_m^2 + d_m^2) \mu_1 H} - \frac{b_m C_m + a_m d_m}{(a_m^2 + b_m^2)(C_m^2 + d_m^2)} \right] \cos \omega t \right\} \quad \dots (6) \end{aligned}$$

$$\text{ここに } a_m = \sqrt{\frac{1 + \left\{ \frac{(2m-1) \pi}{2} \right\}^2}{2} + \sqrt{\left\{ \frac{(2m-1) \pi}{2} \right\}^4 + \left\{ \frac{C \omega H^2}{E_v} \right\}^2}}$$

$$b_m = \sqrt{-\frac{1 + \left\{ \frac{(2m-1) \pi}{2} \right\}^2}{2} + \sqrt{\left\{ \frac{(2m-1) \pi}{2} \right\}^4 + \left\{ \frac{C \omega H^2}{E_v} \right\}^2}}$$

$$C_m = \frac{C \omega H^2}{E_v}, \quad E_m = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad f_m = \begin{cases} \frac{1}{m} & m=1, 3, 5, \dots \\ -\frac{1}{m-1} & m=2, 4, 6, \dots \end{cases}$$

$$d_m = \mu_1^2 H^2 - \left\{ \frac{(2m-1) \pi}{2} \right\}^2 + \frac{W_0 \omega^2 H^2}{g E_v}$$

$$\mu_1^2 H^2 = \frac{(1-2\nu)\pi^2}{8(1-\nu)} - \frac{(1+\nu)(1-2\nu)W_s \omega^2 H^2}{(1-\nu)Eg}$$

(6)式において第1項は砂層が変形しないときの動水圧、第2項は砂層の変形による動水圧を示す。

ii) 護岸の変位がある場合

(5)の運動方程式が(7)のようになる

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} - \frac{C}{E_v} \frac{\partial P}{\partial t} - \frac{W_0}{g E_v} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} &= \frac{4 \alpha W_s C \omega}{\mu_1 E_m \pi} \cdot e^{-\mu_1 x} \cdot \sin \frac{\pi z}{2H} \cdot \cos \omega t \\ &- \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\alpha g \beta C \mu_m 8 \cdot (-1)^{m-1}}{\omega (2m-1)^2 \pi^2} \cdot e^{-\mu_m x} \sin \frac{(2m-1) \pi z}{2H} \cdot \cos \omega t \quad \dots (7) \end{aligned}$$

(7)式で右辺の第2項で初項のみとり整理すると

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} - \frac{C}{E_v} \frac{\partial P}{\partial t} - \frac{W_0}{g E_v} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} &= \left\{ \frac{C \omega H^2}{E_v} \right\} \cdot \left\{ \frac{4 \alpha W_s E_v}{\mu_1 E_m \pi H^2} \right\} \left\{ 1 - \beta \frac{2g E_m \mu_1^2 H^2}{\pi W_s \omega^2 H^2} \right\} e^{-\mu_1 x} \sin \frac{(2m-1) \pi z}{2H} \cos \omega t \\ &= \left\{ \frac{C \omega H^2}{E_v} \right\} \cdot \left\{ \frac{4 \alpha W_s E_v}{\mu_1 E_m \pi H^2} \right\} \left\{ 1 - \beta \frac{2g E_m \mu_1^2 H^2}{\pi W_s \omega^2 H^2} \right\} e^{-\mu_1 x} \sin \frac{(2m-1) \pi z}{2H} \cos \omega t \end{aligned}$$

$(4 \alpha W_s C \omega / \mu_1 E_m \pi)$ は護岸が変形しないときの右辺の係数で護岸の変形率 $\beta$ により動水圧に及ぼす影響が $\beta$ が $\beta$ が異なってくる。

$$\begin{aligned} H &= 0.6 \text{ m} & \nu &= 0.4 \\ E &= 56,000 \text{ t/m}^2 & f &= 3 \text{ Hz} \end{aligned}$$

壁体の変位  $\beta \frac{\alpha g}{\omega^2} \cdot \frac{z}{H}$  による動水圧の変化

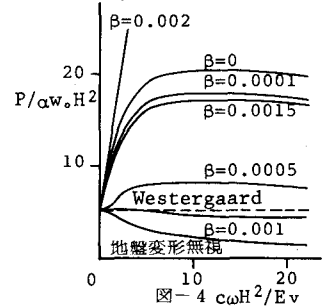


図-4  $c\omega H^2/E_v$

壁体の変位  $\beta \frac{\alpha g}{\omega^2} \cdot \frac{z}{H}$  による動水圧の位相おくれ

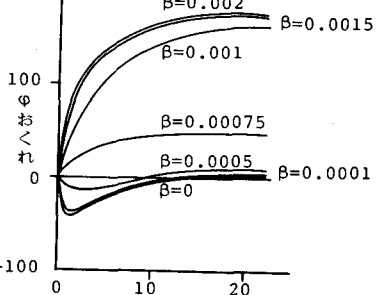


図-5  $c\omega H^2/E_v$

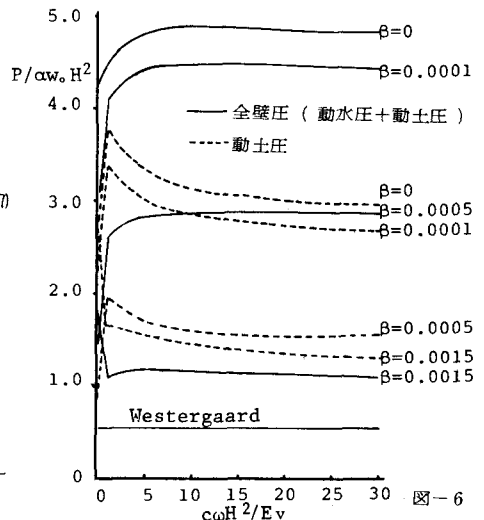


図-6  $c\omega H^2/2E_v$