

海水交換機能を持つ弁式有孔堤について

岡 本 博\*・森 下 敏 夫\*\*

1. 緒 言

近年、沿岸域の利用の要請が高まる中で、次第に港湾・海岸を含む水域の環境整備、海水浄化の必要性が叫ばれるようになってきている。これに対して海水を浄化する工法としては、例えば汚泥の処理・処分、海域の自浄作用助長方法の開発、人工海浜、人工干潟の開発など、数多くの対策が研究されている。

本研究は、有孔堤<sup>1)~6)</sup>の一端に整流弁を取付けて、堤内外の海水を波浪や潮汐のエネルギーを利用して一方に流動させる「弁式有孔堤」について水理特性を把握するとともに、交換水量予測シミュレーション手法の開発を目的として実施したものである。

2. 流れ制御の理論

水深が一様な海中に設置されたフラッターバルブを有する有孔堤体の二次元モデルを考える。図-1 に模式的に示すように領域Ⅰから来襲した波浪は、堤体壁面で完全反射するが、波浪エネルギーの一部は有孔部(領域Ⅱ)をとおして領域Ⅲへ伝播する。

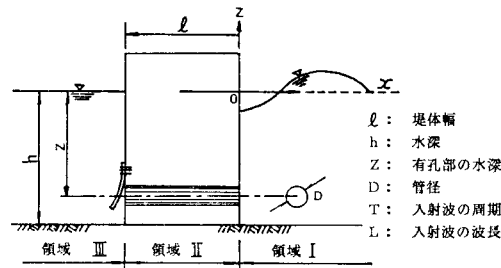


図-1 弁式有孔堤模式図

今、堤体幅を  $l$ 、水深を  $h$ 、有孔部の水深を  $-z$ 、管径を  $D$  とし、管路の非定常流としての取扱いによって管内の流れの運動方程式を求めると次のようになる。

まず管路の非定常流(乱流)のエネルギー方程式は、

$$\frac{\beta}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{u^2}{2g} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\Omega}{g} + \frac{P}{\rho g} \right)$$

$$+ \frac{d}{dx} \Delta h_L = 0 \dots\dots\dots (1)$$

となる。ただし、座標系は静水面に原点、水平に  $x$  軸、鉛直上方に  $z$  軸を取る、(1)式において、 $\alpha=1$ 、 $\beta=1$  とし、 $x=0 \sim l$  まで積分すると

$$\int_0^l \frac{1}{g} \frac{du}{dt} dx + \left[ \frac{u^2}{2g} + \frac{\Omega}{g} + \frac{P}{\rho g} \right]_0^l + \Delta h_L = 0$$

となり、上式に管内、管の出入口の損失を考えると、

$$\frac{l}{g} \frac{du}{dt} + f \frac{l}{D} \frac{u^2}{2g} + (1+f_e) \frac{u^2}{2g} + \Delta h_L = 0 \dots\dots\dots (2)$$

となる。次に、領域Ⅰと領域Ⅲの水位差が波動によって生じる場合、管の両端部における水圧差として取り扱う必要がある。今、波動として微小振幅波が壁面で完全反射する場合を考える。完全重複波の速度ポテンシャル  $\phi_T$  は式(3)で与えられる。

$$\phi_T = \frac{2ag}{\sigma} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(kB - \sigma t) \cdot \cos(kx - kB) \dots\dots\dots (3)$$

$x=B$  における速度ポテンシャル  $\phi_r$  は

$$\phi_r = \frac{2ag}{\sigma} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(kx - \sigma t)$$

となる。水面変動量  $\eta$  は、 $\phi_r$  を  $z=0$  において  $t$  で微分すれば求められる。すなわち

$$\eta = \frac{1}{g} \left[ \frac{\partial \phi}{\partial t} \right]_{z=0}$$
$$\frac{\partial \phi_r}{\partial t} = 2ag \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \sin(kx - \sigma t) \dots\dots\dots (4)$$

であるから、壁面の  $x$  座標を  $x=0$  にとると、水表面での水面形  $\eta$  は、

$$\eta(t) = -2a \sin \sigma t \dots\dots\dots (5)$$

次に、水深  $-z$  における静水圧を  $\eta_z(t)$  とすると、境界条件を  $t=0$  において  $\eta_z(t) = +\text{Max}$  となるように設定すれば、

$$\eta_z(t) = 2a \cos \sigma t \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \dots\dots\dots (6)$$

となる。式(2)の  $\Delta h_L$  に式(6)の  $\eta_z(t)$  を用いて整理すれば、

$$\frac{du}{dt} = \frac{g}{l} 2a \cos \sigma t \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh}$$

\* 正会員 (財)国際臨海開発研究センター  
\*\* 正会員 日本テトラポッド(株)札幌支店

$$-\left(1+f_e+f\frac{l}{D}\right)\frac{u|u|}{2l}\dots\dots\dots(7)$$

となり、管内の流れの運動方程式を示す。

次に、非定常流における弁の挙動を示す運動方程式は

$$I\frac{d^2\theta}{dt^2}+r\frac{1}{2}C_D\rho Ar^2\left|\frac{d\theta}{dt}\right|\frac{d\theta}{dt}+rM_2g\sin\theta+Kg\theta=\alpha\rho|u|uSr\dots\dots\dots(8)$$

で与えられる。式(8)において、左辺第1項は慣性力、第2項は抗力、第3項は弁の自重による復元力、第4項は弁のバネ効果による復元力である。また右辺第1項は管内の流れによる強制外力の項である。

つまり、式(7)、(8)の連立方程式を解くことによって解析解を得ることが可能になるが、実際には式の形が非線形であるため、数値解析によって解を求めることになる。

### 3. 2次元水理模型実験による検討

#### (1) 実験方法について

実験には、日本テトラポッド(株)応用水理研究所の二次元造波水路を使用した。水路の諸元を次に示す。

造波水路：長さ 49m、高さ 1.0m、幅 1.0m（水路を二分割）

造波機：フラップ型（油圧式任意波発生装置）

最大波高：25 cm（ $T=2.0$ sec の場合）

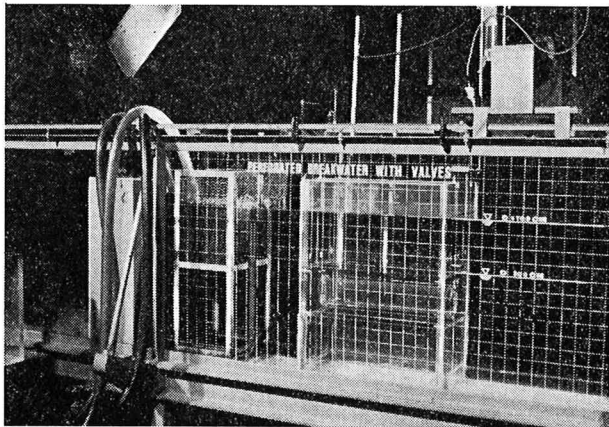
周 期：0.5～4.0sec

水理模型実験の主な目的は、実験条件の違いによる交換水量の変化、弁の挙動、管内の流れの様子などを調べて最適な弁構造を見出すことと、数値シミュレーション手法の妥当性を確認することにある。そこで観測を容易にするために、模型堤体は透明アクリル性とし、堤体の変更が簡単に行なえるように十分水密性を持たせたカセット形式とした。弁の挙動、管内の流れの様子などは、堤前面の水位変動量および管内における正逆流速測定と同時に 16m/m ハイスピードカメラによる撮影を行ない、フィルム分析によってその位相関係などを調べた。また交換水量の測定では、堤内側の水位上昇（低下）が実験結果に大きな影響を与えるので、V字型のセキヤサイホンを用いて水位が一定となるようにした。

実験はすべて有効測定時間内に行ない、これ以外の波の影響をなくすため、波浪によって弁が動くことのないよう押え棒で弁を押えておき、有効波の1波目が到達すると同時に押え棒を外し、有効波の最後の波が作用した直後に再び弁を押えた。

#### (2) 実験ケースについて

弁式有孔堤の交換効率を支配する要因としては、波浪



写真—1 水理模型実験の状況

諸元の他に管の大きさと設置水深、弁の形状や重量、堤体幅など多くの要因が考えられ現象も複雑である。そこで表—1に示すような堤体条件を適当に組合せてその効果を検討し、明らかな傾向を示すパラメーターを順次に固定して実験を進めた。表—1には、波浪諸元も同時に示している。

表—1 実験ケース（想定縮尺  $S=1/20$ ）

|      |       |                        |
|------|-------|------------------------|
| 波浪条件 | 水 深   | 50 cm, 70 cm           |
|      | 周 期   | 1.0 sec～2.4 sec (8 種類) |
|      | 波 高   | 3 cm～8 cm              |
| 堤体条件 | 堤 体 幅 | 30 cm, 60 cm           |
|      | 管 径   | 6 cm, 9 cm, 12 cm      |
|      | 管 数   | 1 本～4 本                |
|      | 管の位置  | 3 種類                   |
|      | 弁の形状  | 厚さ・支点距離・重量など約 30 種類    |
|      | 弁の位置  | 堤内側, 堤外側               |

#### (3) 実験結果と考察

ここでは、実験結果の中より顕著な傾向を示したもののについて考察する。図—2 は、管の数が交換水量におよぼす影響について示したもので、管の本数と相対交換水量 ( $Q/Q_0$ ) の関係を波浪条件をパラメーターとして表している。管の数が2倍、3倍となれば、 $Q/Q_0$  もそれに比例して2倍、3倍となっているのがわかる。この結果より、管が連続して存在する場合の交換水量を推定することができる。

いま、単位長さ当りに管径  $D$  の円形管が  $n$  個存在し、このときの相対交換水量が  $Q/Q_0$  で与えられるならば、管が連続して存在する場合の無次元交換水量  $Q_{NON}$  は

$$Q_{NON}=(2/nD\sqrt{\pi})(Q/Q_0)$$

として求められる。したがって  $Q/Q_0$  のかわりに  $Q_{NON}$  を用いれば、管の数に無関係に  $Q_{NON}$  は一定値となる。そこで以下に示す実験結果については、縦軸に  $Q_{NON}$  を

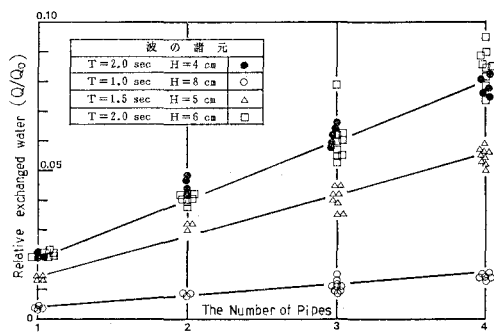


図-2 管の数と交換水量の関係 (管径 6 cm)

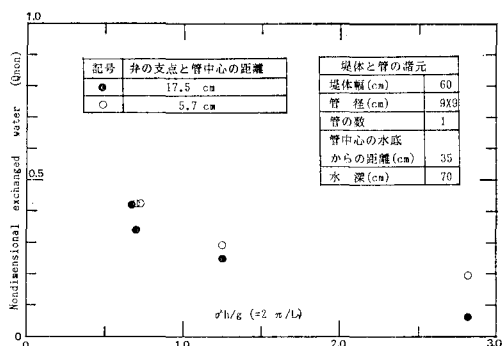


図-3 弁の支点位置による交換水量の相違

用いることにする。

つぎに弁の支点位置を変化させた場合の交換水量の変化を示したのが、図-3 であり横軸には相対水深 ( $\sigma^2 h/g = 2\pi/L$ ) を用いている。

実験における水深は一定なので、短周期の波浪に対する効果が長周期に比べて低下しているのがわかる。また弁の支点距離に着目すれば、短周期であっても支点距離が短いと交換効率が向上するのがわかる。

図-4 は、弁を堤外側に取付けた場合と堤内側に取付けた場合の交換水量を比較したものである。弁を堤内側に取付けても堤外側に取付けても交換水量は、ほとんど変化しないことがわかる。したがって三次元的に考えた場合、同一波浪条件に対しては堤体の配置によって任意

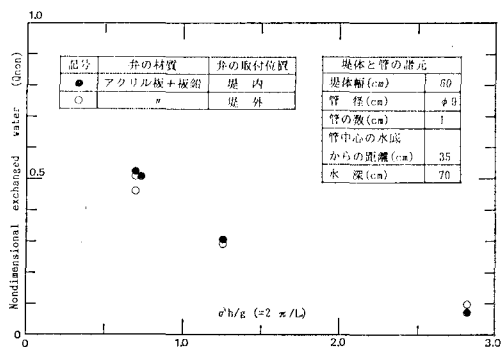


図-4 弁の取付方向による交換水量の相違

方向へ同量の水量を流動させることが可能となる。

図-5 は、相対水深と交換効率の関係を管の直径をパラメーターに図示したものである。管径が大きくなるほど交換効率が大きくなるという傾向を示しているが、( $\sigma^2 h/g$ ) が大きい場合 (短周期の波) には、その差は顕著ではない。また周期の長い波の場合でも交換効率の差は、管径に比例するほど顕著なものではない。つまり、同一断面積当りの交換効率は管径が小さいほど大きいことがわかる。

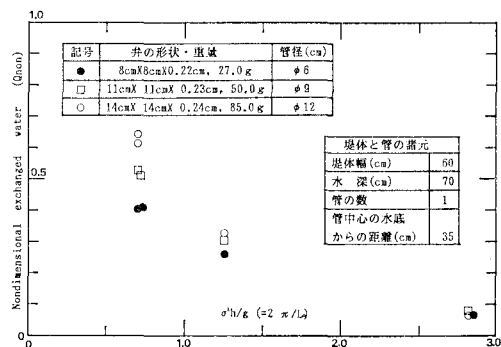


図-5 管径の違いによる交換水量の相違

堤体幅が交換水量におよぼす効果を図-6 に示す。

堤体幅は2通りと少ないが、狭い方が交換効率のよいことがわかる。このように堤体幅によって交換効率が異なる理由は、管内におけるエネルギー損失の相違によるものと考えられる。

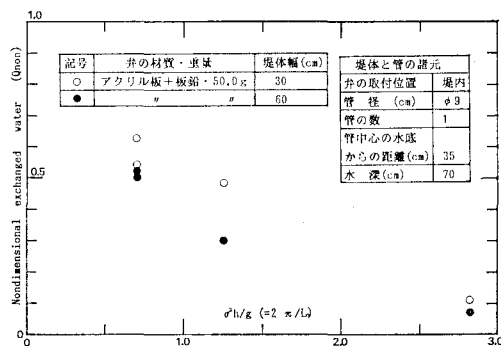


図-6 堤体幅の違いによる交換水量の相違

図-7 は相対水深と交換効率の関係を、管の位置をパラメーターに図示したものである。管の位置が水面に近くなるほど、交換効率が良くなるのがわかる。これは、交換水量を支配する管内流速が管両端部の水圧に依存しているので、水圧となる波浪外力が水表面に近いほど大きくなるためである。この交換水量の差は、圧力応答因子 ( $K_p$ ) の比で表現できると考えられる<sup>7)</sup>。

$$K_p = \cosh k(h+z) / \cosh kh \dots\dots\dots (9)$$

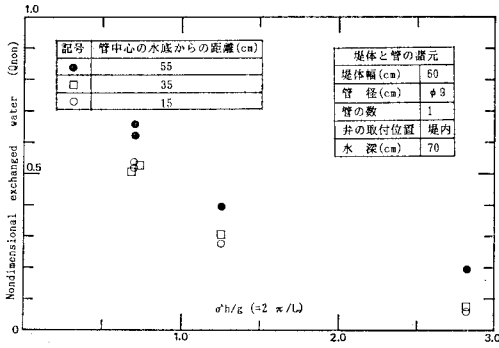


図-7 管の位置の違いによる交換水量の相違

#### 4. 数値シミュレーションによる検討

式 (7) および式 (8) による弁式有孔堤の基本式に、2次元水理模型実験で得た結果などを反映させた常微分連立方程式を作成し、電子計算機による数値計算を試みた。図-8 は、水理模型実験に用いた各諸元を入力した計算例で、(a) 壁面での水面形  $[\eta]$ 、(b) 管中心における水圧  $[\eta_z]$ 、(c) 管内平均流速  $[u]$ 、(d) 弁の角加速度  $[d\omega/dt]$ 、(e) 弁の角速度  $[\omega = d\theta/dt]$ 、(f) 弁の開角度  $[\theta]$ 、について時系列変動量を示したものである。

数値シミュレーション結果は、本報告には載せていないが、水理模型実験によるフィルム分析結果とよく一致している。

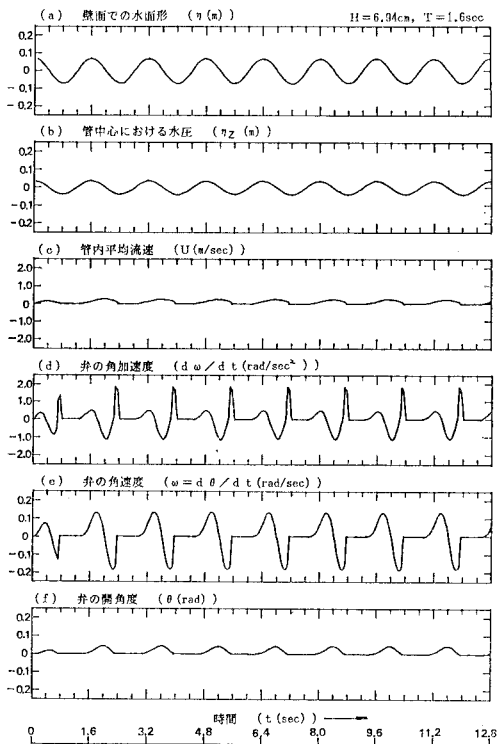


図-8 数値シミュレーションによる計算例

交換水量は、(c) の管内平均流速に管の断面積を乗じた値を積分すれば表現できる。この計算例には示していないが、効率の悪い弁構造の場合には負の流速が多く発生する。(e) に示す弁の角速度に現れている急激な変化は、弁が堤体によって強制的に動きを止められた結果であるが、(d) に示されるように、これに伴う弁の角加速度が大きすぎれば交換効率が良くなる反面、構造的な問題が発生する。このような複合的な事象に対しての総合的な判断が可能となる。

図-9 に交換水量予測シミュレーションプログラムの計算例を示す。図には波形勾配をパラメーターとした計算結果と、併せて水理模型実験結果も同時にプロットしている。このプログラムは、図-8 に計算例を示したプログラムを、相対水深  $(\sigma^2 h/g)$  と交換効率  $Q_{NON}$  で表示できるように再構成したものである。実験水路に制約があるため実験結果が片寄っていたり、水理模型実験結果において波形勾配による差違がそれほど顕著ではないものの、数値計算による曲線が水理模型実験結果を比較的よく表現しているといえる。したがって、このプログラムに堤体の基本的な諸元を入力することにより、任意の波浪条件における交換水量予測曲線図を求めることができる。

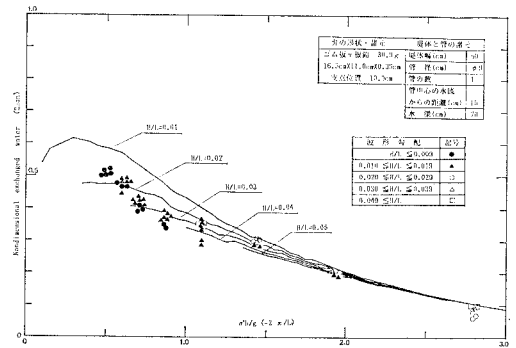


図-9 交換水量予測シミュレーションの計算例

#### 5. 結 言

海水交換機能を持つ弁式有孔堤の水理特性について、2次元水理模型実験および数値計算を行なった結果、およそ次のようなことが明らかになった。

- (1) 交換水量は管の数に比例する。したがって無次元交換水量 ( $Q_{NON}$ ) を用いれば、単位幅に対する交換水量を論じることが可能となる。(図-2)
- (2) 短周期の波浪に対する交換効率が長周期の場合に比較して劣る。しかし、弁の支点距離が短いと短周期の波浪であっても交換効率は向上する。(図-3)
- (3) 弁を堤外側に取付けても堤内側に取付けても、交換効率はほとんど変わらない。(図-4)
- (4) 管径を変化させた場合、同一断面面積当りの交換

効率は、管径が小さいほど大きくなる。(図-5)

(5) 堤体幅は狭い方が交換効率は良い。(図-6)

(6) 管の設置位置は、水面に近いほど交換効率が良くなる。(図-7)

(7) 今回開発した数値シミュレーションプログラムによって、管内流速、弁の開角度および角速度などが位相関係と同時に表現できる。(図-8)

(8) 交換水量予測プログラムによって、堤体の諸元を入力することにより、任意の波浪条件における交換水量予測曲線図が作成できる。(図-9)

最後に、この研究を進めるに当り何かと御助言をいただいた港湾技術研究所の合田次長、並びに水産工学研究所の中村部長、山本室長に謝意を表します。

本文に用いた記号の意味は、次のとおりである。

$\alpha$ : エネルギー補正係数 (Colioli),  $\beta$ : 運動量補正係数 (Boussinesq),  $g$ : 重力加速度,  $u$ : 管内流速,  $\rho$ : 流体の単位体積重量,  $P$ : 管内の水圧,  $\Omega$ : 力のポテンシャル,  $\Delta h_L$ : 領域 I と領域 III の水頭差,  $f$ : 粗度係数,  $f_e$ : 管の出入口での損失係数,  $a$ : 入射波の片振幅,  $\sigma$ :

入射波の角振動数,  $k$ : 入射波の波数 ( $2\pi/L$ ),  $I$ : 弁の可動部の慣性モーメント,  $r$ : 弁の支点から外力の作用点までの距離,  $C_D$ : 抗力係数,  $S$ : 管の断面積,  $\theta$ : 弁の開角度,  $M_2g$ : 弁の水中での重量,  $K$ : 弁のバネ定数,  $Q$ : 1 波当りの交換水量,  $Q_0$ : 1 波当りの移動水塊量 ( $HL/2\pi$ ),  $Q/Q_0$ : 無次元交換水量,  $Q_{\text{NON}}$ : 孔部が連続して存在する場合の無次元交換水量。

## 参 考 文 献

- 1) Jarlan, G. E.: A perforated vertical wall break-water, The Dock and Harbour Authority, No. 4, 1961, pp. 394~398.
- 2) 東京大学工学部土木工学科港湾研究室: 有孔防波堤水理模型実験報告書, 1966.
- 3) 近藤俊郎・藤間 聡: 透過性防波堤の水理特性, 第 17 回海岸工学講演会論文集, pp. 155~162, 1970.
- 4) 服部昌太郎: 多孔壁式防波堤の水理特性, 第 18 回海岸工学講演会論文集, pp. 115~120, 1971.
- 5) 小川達彦・時川和夫: 多孔型ケーソンタイプ消波防波堤の特性, 第 23 回海岸工学講演会論文集, pp. 106~111, 1976.
- 6) 堀口孝男・中道峰夫: 多孔壁式防波堤の消波機構と波力, 第 23 回海岸工学講演会論文集, pp. 89~94, 1976.
- 7) 岩垣雄一・榎木 亨: 海岸工学, 共立出版, pp. 22~29, 1979.