

波浪によるパイプ式透過堤の海水導入特性

小田 一 紀*・真栄平宜之**・中西 昭 人***・田 中 彬 夫****

1. 緒 言

近年、港内などの閉鎖性水域の水質環境の改善や保全を行なう観点から透過性防波堤の海水導入機能が注目され、様々な堤体構造の水理特性が研究されている。

岡本ら（1985）は、堤体下部に設けられた通水孔の港内側端に整流弁を取り付けて、港外の海水を波浪や潮沙のエネルギーを利用して一方向に導入する弁式有孔堤の水理特性を、また道下ら（1988）は、鉛直管の水面振動を利用した海水交換防波堤の水理特性を研究している。また最近では猿川ら（1993）が、有孔堤の前面に消波ブロックを設置し、波が作用したときのブロック層内の水位上昇を利用することで海水交換性を高める消波ブロック被覆型有孔堤の研究をしている。さらに、山本ら（1994）は現地で潜堤付き孔空き防波堤の海水導入機能を、八尋ら（1994）は前面に消波工のある有孔堤の海水交換機能について研究を行っている。

波による水粒子の運動は水面付近が最も大きいので、波エネルギーを効率よく利用するには流入口と流出口とともに水面付近に設けるのが最も効率的である。前述の既往の研究は透過波を最小限に抑えるためすべて流出口が水中にある堤体を対象としているが、筆者らは、上記の観点から敢えて堤体の水面付近に円管を水平に通した構造のパイプ式透過堤に着目した。

本研究では、水理模型実験によって、波による堤体背後の流速場を測定し、堤体背後の流況および導入流量を把握し、波浪条件およびパイプ敷設条件と海水導入特性との基礎的関係を明らかにする。

2. 実験設備と実験方法

2.1 実験水槽と堤体諸元

実験に用いた水槽と模型をそれぞれ図-1 および図-2 に示す。実験は、長さ 50 m、幅 2.5 m、深さ 1.5 m の 2 次元造波水槽を隔壁で 1.0 m に仕切った部分で行った。

堤体模型の縮尺は 1/10 とし、幅 0.5 m、高さ 1.5 m の矩形断面の鋼製模型を水路幅一杯に設置した。パイプ模型は内径 10 cm（一定）の鉄製の円管を用い、水平方向には水路壁を鏡面と考えたときに等間隔配置になるような位置に、また鉛直方向にはその中心が静水面と一致する位置に設けた。またパイプ間隔による海水導入特性の変化を把握するため、パイプ直径を D 、パイプ間隔を d としたときに、相対パイプ間隔 $d/D=2, 3.3, 10$ となるようにパイプ間隔を 3 種類に設定した。

入射波の条件は、表-1 に示すように周期 T を 1.26、

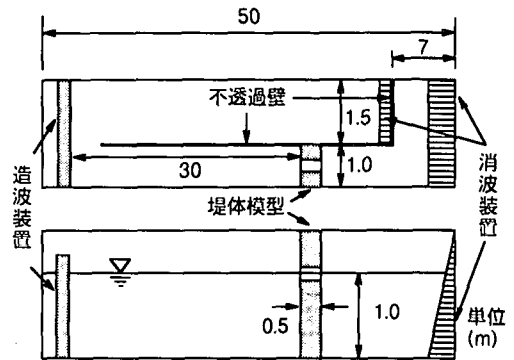


図-1 実験水槽

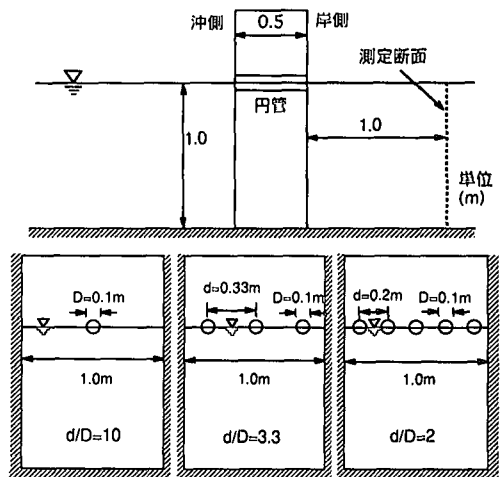


図-2 堤体模型

* 正 会 員 工 博 大阪市立大学工学部教授
 ** 学生会員 大阪市立大学工学研究科
 *** 東亜建設工業株式会社 横浜支店
 **** 株式会社 クボタ 鉄管研究部

表-1 入射波条件

周期 T (s)	波高 H_i (cm)		
1.26	—	10.0	15.0
1.90	5.0	10.0	15.0
2.53	5.0	10.0	15.0

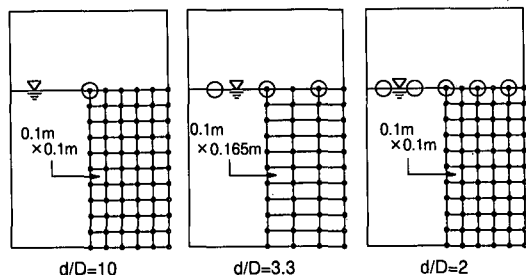


図-3 流速測定点メッシュ

1.90, 2.53 s, 入射波高 H_i を 5, 10, 15 cm に変化させ、水深は一樣・一定で 1.0 m とした。

2.2 流量測定方法

堤体から岸側への導入流量は堤体背後の流速測定によって求めた。流速は、図-2 に示すように堤体から岸側へ 1 m はなれた位置における水槽横断面を図-3 に示すような 10 cm 四方のメッシュに分割し、水平 2 成分電磁流速計 1 台を用いて、各格子点における流速の時間変化を測定した。

なお、 $d/D=3.3$ の場合は 10 cm × 16.5 cm のメッシュに分割した。また予備実験によって流速を測定した結果、堤体中央のパイプ中心線に対してその空間分布は対称であったので、流速測定は水路の片側半分でのみ行った。水面および底面直近の流速は水面下および底面上 1.5 cm の位置で、側壁直近の流速は側壁から 2 cm の位置で測定した。

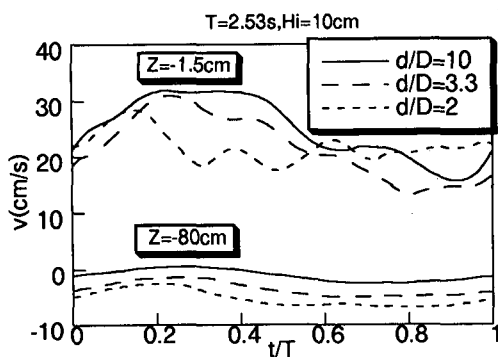


図-4 流速の経時変化

3. 実験結果

3.1 流速と流量の経時変化

図-4 は、入射波が $T=2.53$ s, $H_i=10$ cm の場合について、堤体中央のパイプ中心線上 ($y=0$) の、水面下 $z=-1.5$ cm と $z=-80$ cm (水底上 20 cm) の位置における流速の経時変化を d/D をパラメータとして表した

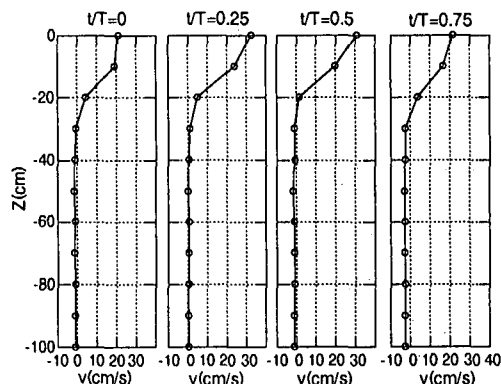
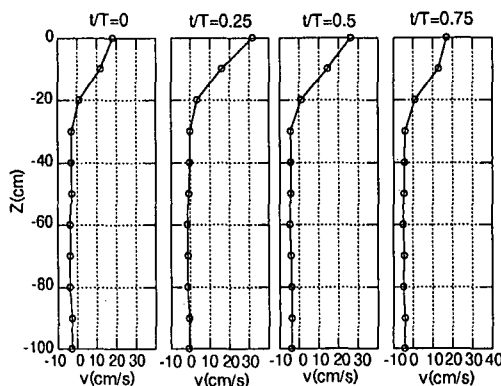
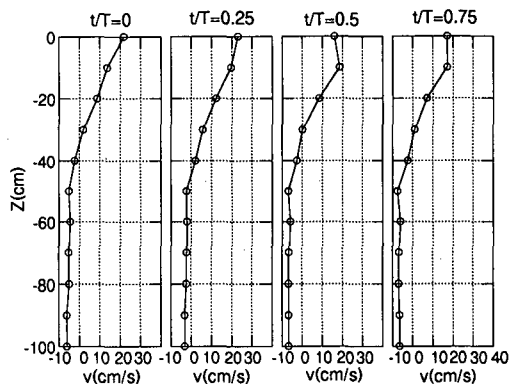
(a) $d/D=10$ (b) $d/D=3.3$ (c) $d/D=2$

図-5 各位相毎の流速の鉛直分布

ものである。また、図-5(a)～(c) はこれに対応した各時間位相毎の流速の鉛直分布を示している。

図-4によると、一般に水面付近の流速波形には、基本周波成分に水面の擾乱波のものとみられる周期 $T/5 \sim T/4$ 程度の高周波成分が重なっているのが見られるが、水底付近のそれには高周波成分は減衰してしまい明瞭には見られない。この高周波成分の振幅はパイプ間隔が小さくなるほど大きく、周波数も高くなる傾向が見られるが、各パイプの出口から発生する擾乱波の影響が重なるためではないかと考えられる。

図-5(a)を見ると、一般に流速の鉛直分布には、静水面 ($z=0$) の位置に岸向きへの最大流速が現れ、水底に向かって急激に減少する噴流型の流速分布が形成されることがわかる。静水面下 20～30 cm ($= (2 \sim 3)D$) 程度で深では沖向きの弱い流れが認められ、堤体背後水域には弱い鉛直循環流が存在することがうかがえる。各時間位相毎の流速分布には僅かな変動が見られるが、全体的には大きな相違は見られない。このような傾向はパイプ中心間隔が変わっても基本的には変わらないが、図-5(a)～(c) を比較すると、パイプの中心間隔が狭くなるほど静水面付近の流速は減少するが、岸向き流速の範囲がより下方にまで拡がり、且つそれより下方の沖向き流速が増大することがわかる。

一方、各測定点における流速にメッシュ面積をかけた要素流量の累積値として求めた水路幅全体での流量 Q (cm^3/s) を水路幅 B (cm) で除した、堤体単位長さ当たりの流量 $q = Q/B$ ($\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$) の経時変化を相対パイプ間隔 d/D をパラメータとして表すと図-6のごとくである。

図-6の流量波形と図-4の流速波形とを比較すると明らかなように、流量波形には2倍周波数成分は見られるものの、それより高周波の成分は見られなくなり、かなり滑らかになっていることがわかる。これは各流速測定点における高周波成分のピーク発生位相が必ずしも同じではないため流量算定段階で平滑化されるためである

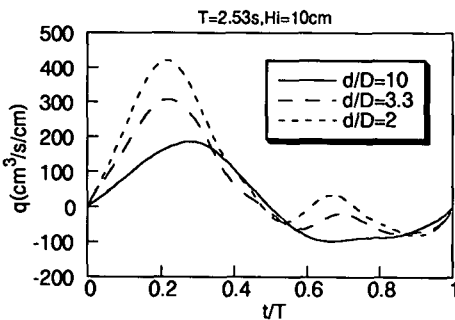


図-6 堤体単位長さ当たりの流量 q の経時変化

と考えられる。

流量波形には2つのピークが発生しているが、その発生原因として堤体沖側壁面に働く重複波波圧の2倍周波数特性が関係していると考えられる。両ピークともパイプ間隔が狭くなるほど、その生起位相は早まり、ピーク流量は大きくなる傾向が見られる。

3.2 一周期平均流の流速と流量

各測定点における流速の経時変化を波の一周期にわたって平均した一周期平均流速 $\bar{v}$ (質量輸送速度) の水平分布と鉛直分布を $d/D=10$, 3.3 および 2 の場合について表すと、それぞれ図-7, 図-8 および 図-9 のごとくである。なお入射波条件は $T=2.53$ s, $H_i=10$ cm である。水平分布については水面下の位置別に、鉛直分布については堤体中央のパイプの中心からの距離別に表した。

図-7によれば、 $d/D=10$ の場合の一周期平均流速の水平分布および鉛直分布は、ともに堤体中央のパイプ中心線上で極大となり、中心から離れるにしたがって急激に減少する分布特性を示しており、前述の経時変化流速場と同様に平均流速場も噴流型の分布構造を有していることがわかる。

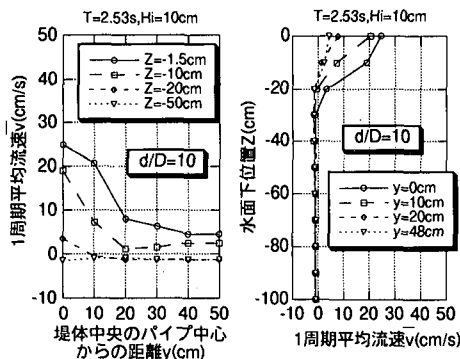
3.1 で述べたように、水面から約 20 cm ($=2D$) より下方では、僅かに沖向きの流れが生じており、堤体背後の上層部での速い岸向きの噴流を補うための弱い鉛直循環流が発生していることが平均流速場でも認められる。

図-8 および 図-9 との比較からわかるように、パイプの中心間隔が狭くなるとともに平均流速の水平分布は水路幅全体にわたって一様化する傾向が見られ、鉛直分布も水路幅方向に一様化する傾向が認められる。また、パイプの中心間隔が狭くなるとともに鉛直分布における岸向き流速の生起範囲が下方に拡がっていき、それより下層に生じる沖向き流速も大きくなる傾向が見られる。なお、図-8(a) および 図-9(a) の流速の水平分布図によると $y=40 \sim 50$ cm 付近の流速が大きめにしているが、これは水槽側壁の影響によるものと考えられる。

3.3 一周期平均流量

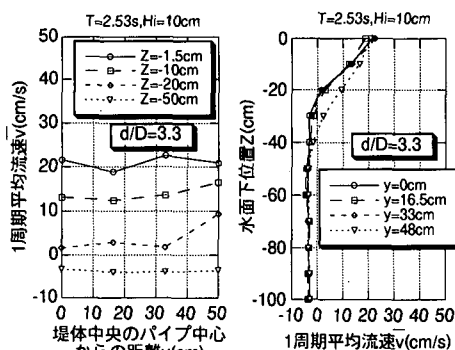
前述の一周期平均流速 $\bar{v}$ の空間分布から流速とメッシュ面積の積の累積値として水路幅全体での一周期平均流量 $\bar{Q}$ (cm^3/s) が求まり、これを水路幅 B (cm) で除した堤体単位長さ当たりの一周期平均流量 $\bar{q} = \bar{Q}/B$ ($\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$) を取り上げ、これと波浪諸元との関連を調べてみる。

図-10 は、 $\bar{q}$ と入射波高 H_i との関係を相対パイプ間隔 d/D をパラメータとして、 $T=2.53$ s の場合について表したものである。図-10によると、何れのパイプ中心間隔の場合も、一般に $\bar{q}$ は入射波高 H_i に比例して線形的に増大するが、波高がほぼ $H_i > 10$ cm ($=D$) 以上になると波高に対する $\bar{q}$ の増加率が若干減少する傾向が見



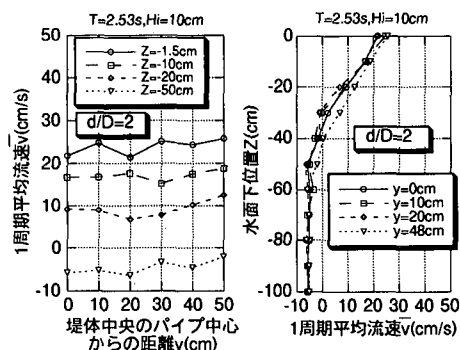
(a) 水平分布

(b) 鉛直分布

 図-7 一周期平均流速 $\bar{v}$ の空間分布 ($d/D=10$)


(a) 水平分布

(b) 鉛直分布

 図-8 一周期平均流速 $\bar{v}$ の空間分布 ($d/D=3.3$)


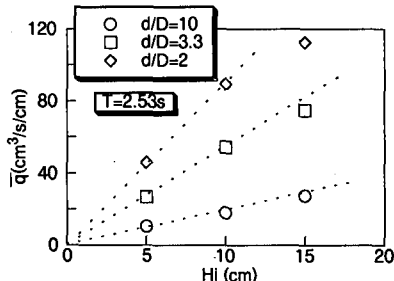
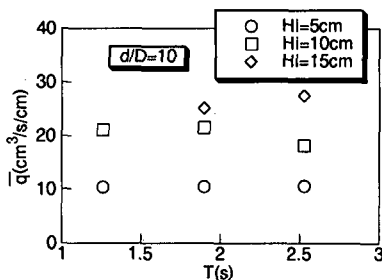
(a) 水平分布

(b) 鉛直分布

 図-9 一周期平均流速 $\bar{v}$ の空間分布 ($d/D=2$)

られる。さらに図-10は、パイプ間隔が狭くなるほど $\bar{q}$ は増大することを示している。

一方、図-11は、 $d/D=10$ の場合について、 $\bar{q}$ に対する波周期 T の影響を調べたものであるが、この図から一


 図-10 堤体単位長さ当たりの一周期平均流量 $\bar{q}$ と H_i の関係

 図-11 堤体単位長さ当たりの一周期平均流量 $\bar{q}$ と T の関係

定波高の下では $\bar{q}$ は T によってあまり変わらず、 $\bar{q}$ に及ぼす波周期の影響は概ね小さいといえる。

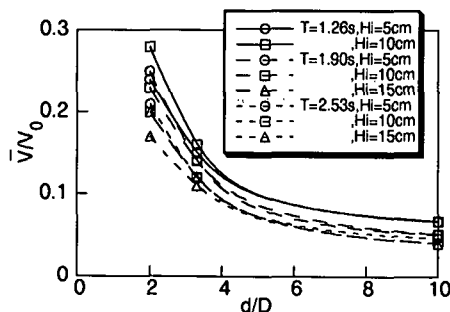
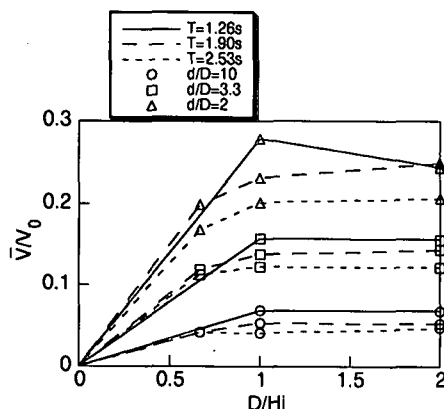
3.4 海水導入効率

前節で、パイプ式透過堤の堤体単位長さ当たりの一周期平均流量 $\bar{q}$ ($\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$) は主として入射波高 H_i とパイプ間隔 d に支配されることがわかった。ここでは波周期の影響も考慮したパイプ式透過堤の総合的な海水導入効率について検討してみる。

ここでは、道下ら (1988) が用いた単位長さ当たりの入射波の山の部分の総水量 $V_0 = LH_i/2\pi$ を一周期間の海水導入に寄与する基準水量として採用し、これに対してパイプ式透過堤によって港内側に導入される一周期間の全導入水量 $V = \bar{q}T$ の比 $V/V_0 = (2\pi\bar{q}T/LH_i)$ を海水導入効率と定義する。

まず、海水導入効率 V/V_0 と無次元パイプ間隔 d/D との関係を調べてみる。図-12は波浪特性をパラメータにして V/V_0 と d/D の関係を描いたものである。この図から実験条件の範囲内ではパイプ式透過堤の海水導入効率は、 $d/D=2$ のときに最大で、 $V/V_0=0.17\sim0.28$ の値を有し、相対パイプ間隔がそれより増大するとともに急激に減少し、 $d/D=10$ のときは $V/V_0=0.04\sim0.07$ 程度の値となることがわかる。また、波浪特性の影響は、周期が短いほど効率が高くなる傾向が見られる。

次に、図-13に示す海水導入効率 V/V_0 と相対パイプ

図-12 V/V_0 と d/D の関係図-13 V/V_0 と D/H_i の関係

径 D/H_i の関係を見ると、一般に海水導入効率は、相対パイプ径が増大するとともに大きくなるが、ほぼ $D/H_i > 1$ になると D/H_i の値にあまり関係なくほぼ一定になることがわかる。さらに、この図からも相対パイプ間隔が小さくなるほど、また波周期が短いほど導入効率は大きくなるがわかる。

以上を総合すると、海水導入効率を上げるには相対パイプ間隔 d/D をできるだけ小さくすること、またパイプ直径 D は対象とする入射波高 H_i と同程度にするのが望ましいといえる。

4. 結 論

本研究によって得られた主な知見は以下のように要約される。

1) パイプ式透過堤背後の流れ場は、パイプ間隔が大きいときは水平、鉛直方向ともに噴流型の流速分布を示す。パイプ間隔が小さくなると、流速分布は水平方向には一様化するが、鉛直方向にはパイプ間隔が大きい場合と同様に噴流型となる。また、水面付近の速い岸向き流れを補うため中層から下層にかけて弱い沖向き流れが発生し、鉛直循環流を形成する。

2) 水面付近の流速波形には基本周波数成分以外に水面の擾乱により生じる高周波成分が含まれる。しかし、流量波形には2倍周波数成分は見られるが、それ以上の高周波成分は見られなくなる。この2倍周波数成分の出現には堤体沖側壁面に働く重複波波圧の2倍周波数特性が関係しているものと考えられる。

3) パイプ式透過堤の堤体単位長さ当たりの一周期平均流量 $\bar{q}$ は、主として入射波高およびパイプ間隔に支配される。 $\bar{q}$ は入射波高に比例してほぼ線形的に増大するが波高がパイプ径より大きくなるとその増加率は若干減少する。またパイプ間隔が狭くなるほど $\bar{q}$ は増大する。

4) パイプ式透過堤の海水導入効率を堤体単位長さ当たりの一周期間の全導入水量 V と入射波の山の部分の総水量 V_0 との比として表すと、パイプ間隔が小さいほどその効率は大きく、 $d/D=2$ ときには $V/V_0=0.17 \sim 0.28$ になる。また相対パイプ径 $D/H_i=1$ のときに導水効率は最大になり、 D/H_i をそれ以上にしても導水効率は大きくならない。すなわち、与えられた波浪条件に対して導水効率を最大にするにはパイプ径を対象波の波高程度とし、またパイプ間隔はできるだけ小さくすることが望ましい。

参 考 文 献

- 岡本 博・森下敏夫 (1985): 海水交換機能を持つ弁式有効堤について, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 540-544.
- 猿川 弦・水野雄三・笹島隆彦・木村克俊・高橋哲英 (1993): 消波ブロック被覆型有効堤の海水交換特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 971-975.
- 道下 勲・国栖広志・葛原 徹 (1988): 鉛直管の水面固有振動を利用した海水交換防波堤の水理特性, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 577-581.
- 八尋順司・石崎崇志・倉田克彦 (1994): 有効堤の海水交換機能に関する実験, 関西支部年報, pp. II-99-1-2.
- 山本 潤・武内智行・中山哲蔵・田畑真一・池田正信 (1994): 志賀島外港の導水工による環境改善効果に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 1096-1100.