

消波ブロック被覆型有孔堤の海水交換特性に関する研究

猿 川 弦* ・ 水 野 雄 三** ・ 笹 島 隆 彦***
木 村 克 俊*** ・ 高 橋 哲 美****

1. ま え が き

近年港湾に対しては、物流や生産の拠点という本来の機能に加えて、一般市民のための快適な水辺空間の創出、あるいは水産業との協調といった新たな要請が強まっている。港内の静穏海域はこうした利用の適地である反面、閉鎖性が高い場合が多く、高質な利用を図るための水質保全が必要で、このための海水交換を促進できる港湾構造物の開発が求められている。

海水交換手法については様々なアイディアが提案されているが、有孔堤は防波堤ケーソンに孔を開けた比較的单純な構造であり、従来の設計手法、施工法が摘要できるなどの利点がある。有孔堤による海水交換機能を高めるためには、波浪により生じる通水管内の流れの方向を制御し、一方向流を発生させる必要がある。流向制御の方法としては、通水管の構造形式を工夫する方法と堤体前面に水位上昇を生じさせる方法が考えられる。前者としては、岡本ら（1985）による弁方式、中村（1977）による孔口の形状効果を利用する方法、道下ら（1988）による鉛直管の固有振動を利用する方法などが提案されている。一方、後者の水位上昇を発生させる方法として、山本ら（1987, 1991）は流入孔の前面に潜堤を設ける二重堤を提案している。

本研究は、波が作用したときの消波ブロック被覆堤のブロック内の水位上昇に着目し、この外力を利用して堤体に設けた通水孔内に一方向流を発生させて海水交換機能を高める消波ブロック被覆型有孔堤（以下消波型有孔堤という）を開発したもので、基本となる有孔堤及び消波型有孔堤について管内流況特性及び海水交換特性を数値モデル、模型実験並びに現地観測により明らかにする。

2. 実験及び現地観測の方法

（1）断面実験の方法

実験は2次元水路（長さ15 m, 幅0.8 m, 高さ1 m）を用い、水路床勾配を1/100とした。水路は平面水槽の一

部を仕切り、両端を開放することによって、堤体背後の水位上昇を避けた。

堤体模型は図-1に示す消波ブロック被覆堤で、直立部の天端は越波による背後水域の擾乱を防ぐために、通常より高くした。有孔堤は消波ブロックのない構造で孔口形状を2種類、被覆幅 B_c 、防波堤の幅 B 、通水孔の開孔率をそれぞれ3種類とした。また、潜堤つき有孔堤は、消波工を図-1の点線の潜堤にかえた構造である。

実験は不規則波を基本とし、一部定性的な検討を目的として規則波実験を行っている。ブロック内の水位測定は、消波ブロックと堤体壁面との間に直径5 cm程度の空隙を設け、この中にサーボ式波高計を設置して水位変化を測定した。

（2）平面実験の方法

実験は大型平面水槽（長さ28.0 m, 幅23.0 m, 深さ1.0 m）において模型の平面配置をかえることにより、入射角度 β を 0° , 45° および 60° の3種類に変化させて実施した。実験は不規則波で行い、周期を4種類に変化させた。防波堤の法線方向の長さは、波長の3～5倍程度である。消波ブロック内の水位上昇量は、法線方向におよそ70 cm間隔で測定した。

（3）現地観測の方法

現地観測は図-2に示す瀬棚港東外防波堤で1989年10月3日から21日まで実施した。当該防波堤の構造は図-3のとおりであり、ケーソン側面に切り欠きを設け、2函設置することにより有孔堤の形状となるような構造である。観測は、延長180 mの防波堤の端から60 mの地点において、港内外で通水孔内の流速を、また堤体側面の水圧をそれぞれ測定した。また、外力の測定のため、港外で波高及び波向きを、港内で波高をそれぞれ観測した。測定は、4時間おきにサンプリング間隔0.5 sec.で連続10分間行った。なお、水圧と流速を同期させ観測した。

3. 有孔堤の管内流速の特性

（1）数値計算による管内流速の特性

外力として波動による管口圧力 p の時間変化を微小振幅波理論で与え、港内への波高伝達波は微小と仮定し、港内側の管口圧力は一定とすると、長さ l の管路内の非

* 正会員 北海道開発局港湾部長
** 正会員 工博 北海道開発局開発土木研究所港湾研究室長
*** 正会員 北海道開発局開発土木研究所港湾研究室
**** 正会員 北海道開発局苫小牧港湾建設事務所

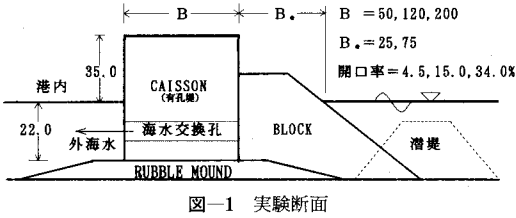


図-1 実験断面

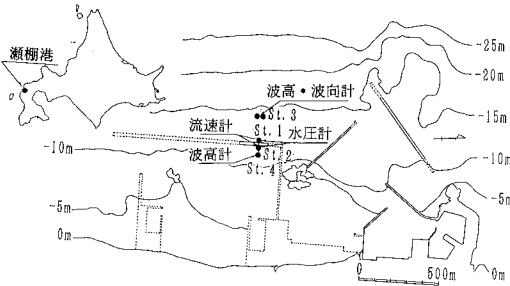


図-2 現地調査位置

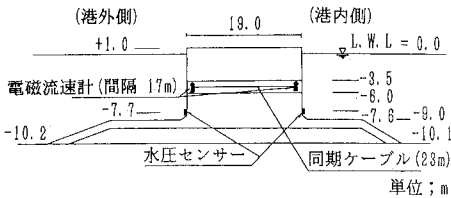


図-3 断面図及び計測箇所

定常流の基礎式は以下のように表わされる。

$$\frac{1}{g} \frac{du}{dt} dx + (1 + f_T) \frac{u^2}{2g} + p = 0 \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 u は管内流速、 g は重力加速度、 p は流体の圧力、 ρ は流体の単位体積重量、 f_T は系全体の損失係数であり、以下のように定義される。

$$f_T = f \frac{l}{4R} + f_e \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 f は Darcy-Weisbach の管内の摩擦損失係数、 f_e は管の出入口での損失係数、 R は径深である。

この式によって、管口圧力の振幅 p_{peak} と管内発生流速のピーク値 u_{peak} の関係についてパラメーターを波の周期、極値として定常流 ($T \rightarrow \infty$) として求めると図-4 のようになる。この図から、波の周期が短くなるにつれて発生流速が減少する傾向がわかる。壁面に働く波圧は水深が増すほど減少することから、通水孔の設置位置が深い方が流速振幅は減少することが推測できる。図-5 は管内流速の振幅に対する損失係数 f_T の影響を示している。周期が同じ条件では、損失が大きいほど管内流速の振幅が小さくなることがわかる。

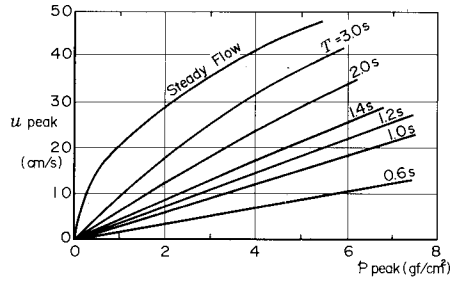


図-4 管内圧力と流速振幅の関係

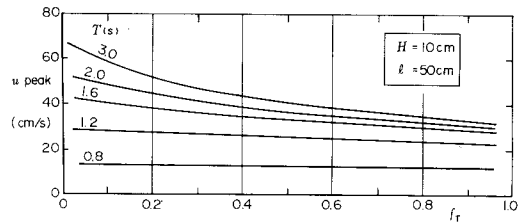


図-5 管内流速の振幅と損失係数の関係

(2) 現地観測結果

図-6 は、実線で系全体の損失 f_T をパラメーターとして、位相差の周波数応答を示している。またプロットは、瀬棚港における現地観測結果である。これによると現地の総損失はおおよそ2~8の間とみられる。したがって、全損失を適切に選ぶことによって、現地の管内流速を数値モデルで予測し得ることがわかった。

4. 消波型有孔堤

(1) 水位差による影響

堤体前面に水位上昇が生じると、上昇高さに応じた定常流が管内に発生する。その場合波動による流速波形振動はこの定常流速に上乘せられる。定常流に上乘せられた正側の流速は負側より損失が大きいので、流速振幅が大きい場合には、平均流速が水位上昇に相当する定常流

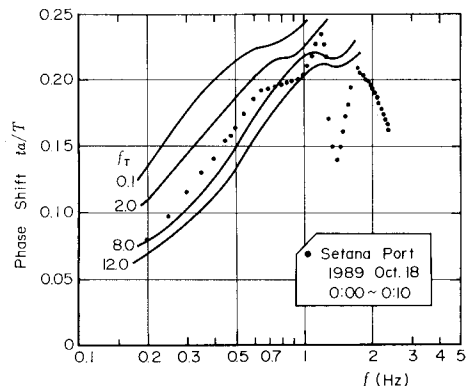


図-6 位相差の周波数応答

速よりも小さくなる。図-7は、一周期分の平均流速 $\bar{u}$ と波動による正の流速振幅(u_{peak}^+)の関係を、水位上昇量 η をパラメータとして計算したものである。同一の波高でも流速振幅(u_{peak}^+)が大きい周期の長い場合には、水位上昇による一方向流速が減衰することがわかる。

(2) 波高の影響

図-8は周期をパラメータとして、波高と消波ブロック内の水位上昇の関係を示している。波高とともに水位上昇は大きくなり、周期による差は小さいことがわかる。

(3) 波向きの影響

図-9は、端部からの散乱波の影響が少ない位置とされている堤体前面の重複波高 $H_{s1/3}$ が $(1+K_R)H_{1/3}$ にほぼ等しい位置にある測点について平均水位上昇量の直入射時に対する比と波向きの関係を示したものである。同図によると水位上昇量は、 $\beta=60^\circ$ で周期の違いによらずほぼ直入射時の1/2となっている。

(4) 消波ブロック被覆幅の影響

消波ブロック被覆堤の反射率は、被覆幅 B_e と波長 L の比によって変動することが知られている。図-10は、規則波実験による平均水位上昇量と B_e/L の関係である。なお、波浪条件は H/L がほぼ0.03に等しい条件のケースのみをプロットしている。これによると h/L によって傾向が若干異なるが、消波ブロックの静水面位置での被覆幅が波長の0.1~0.3倍程度の時、平均水位上昇量が大きいことがわかる。通常の消波ブロック被覆堤では、消波工の天端幅はブロック2個並びであり、この場合の静水面位置での被覆幅の範囲とほぼ一致している。これは、被覆幅が増すほど、また h/L が小さい(周期の長い)ほど、消波効果が高く、反射率が小さくなる。消波性能が高いことは、波動のエネルギーが減衰することを意味し、その結果水位上昇を生じさせることによるものと考えられる。

(5) 管の長さの影響

図-11には、管の長さが平均流速に及ぼす影響を示している。実験は4種類の波浪条件について行い、これに合わせた計算結果を示している。定常流の計算結果では管路長が増すことにより損失が大きくなり、平均流速の減少が顕著となる。

これに対して、波浪の場合には管路長が増すとともに振動する流体の容積が増え、管内摩擦損失も増大し、流速振幅が小さくなる。このため平均流速を高める効果が働き、結果として管内平均流速の変化が小さくなっていくものと推測される。

(6) 開口率の影響

図-12は、周期をパラメータとして、開口率 ε と総流入量 Q (中央部の流速に開口部の断面積を乗じて算定)の関係を、また図-13は伝達波高の関係を示したもので

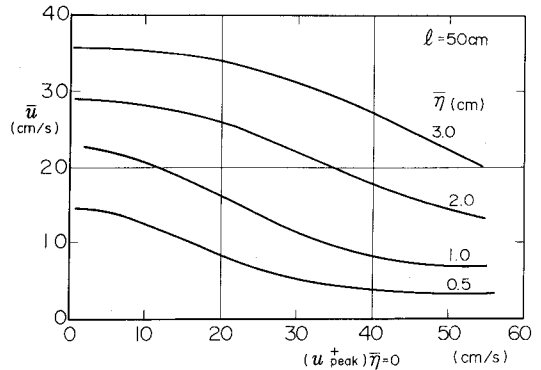


図-7 流速振幅と平均流速の関係

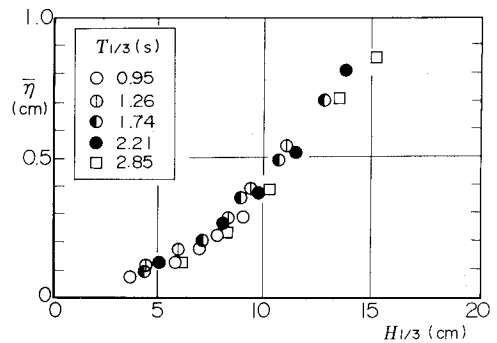


図-8 波高と平均水位上昇量の関係

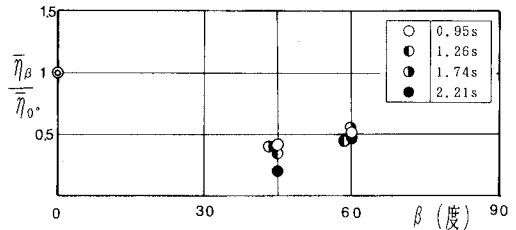


図-9 平均水位上昇量の波向きによる影響 ($H=8.0$ cm)

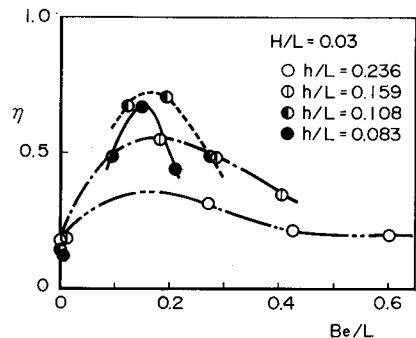


図-10 消波ブロック被覆幅の影響

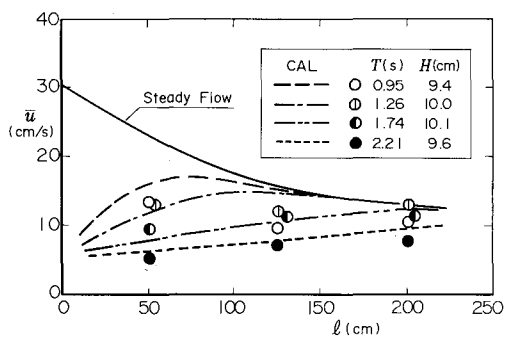


図-11 管の長さ平均流速の関係

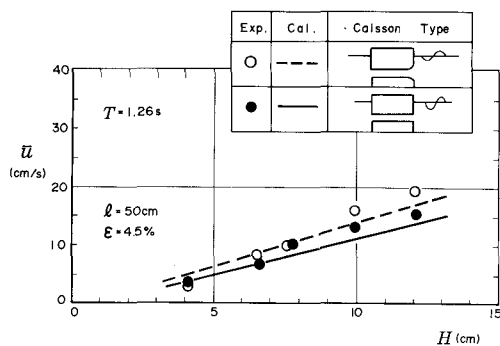


図-14 孔口形状が平均流速に及ぼす影響

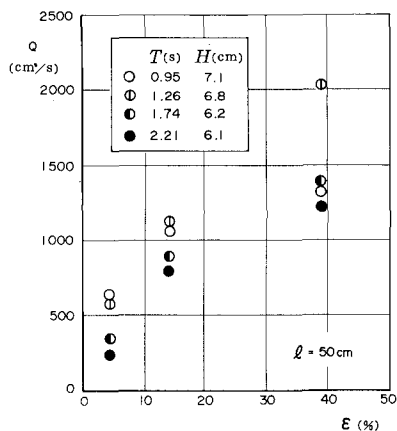


図-12 開口率と総流量の関係

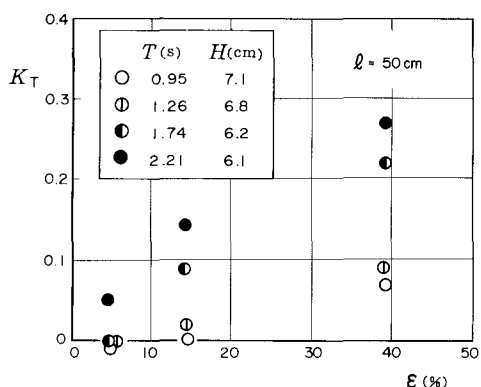


図-13 開口率と伝達波高の関係

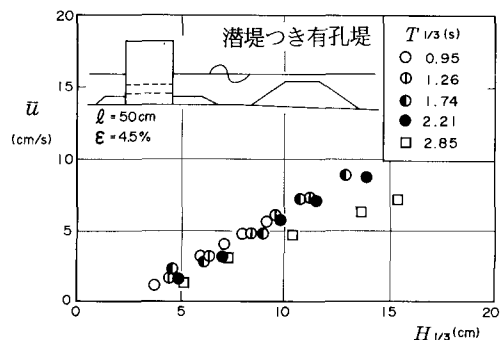


図-15 潜堤つき有孔堤の管内平均流速

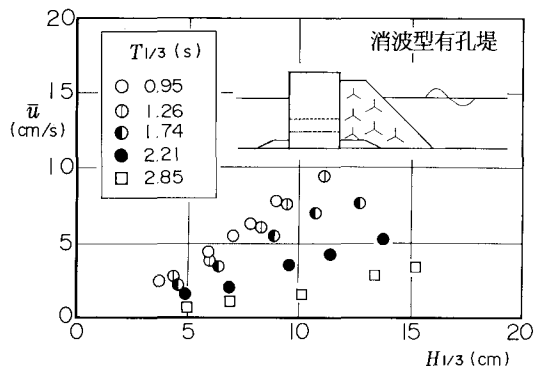


図-16 消波ブロック被覆型有孔堤の平均流速

(7) 孔口形状が平均流速に及ぼす影響

孔口の形状により流入損失係数が変化する。図-14は波高と平均流速の関係を示している。両端が角の場合に比べて港外側を隅切りした方が、港内側への流入量が大きくなっていることがわかる。とくにその傾向は、周期の長い場合に顕著となっている。図中には該当する条件に対する計算結果を示したが、実験値と良好な一致を示していることがわかる。

ある。同一の波高でも周期が短いほど総流入量は大きくなる傾向がある。一方、周期が長いほど、また、開口率が大きい位ほど波高伝達率が大きくなることがわかる。したがって、海水交換を促進するためには、開口率を高めることが良いが、防波堤本来の機能として港内の静穏度を高めるためには、港内側の利用状況を勘案して伝達率を低くするつまり、開口率を小さくする必要がある。

5. 潜堤つき有孔堤との性能比較

(1) 波高と平均流速の関係

図-15 および図-16 は、それぞれ潜堤つき有孔堤および消波ブロック被覆型有孔堤を対象として、波高と平均流速の関係をプロットしたものである。消波ブロック被覆型は潜堤つきに比べて周期の影響が大きいものの、1.74 s より短周期側で潜堤つき有孔堤の平均流速より大きな平均流速が発生していることがわかる。実際の海域では、海水交換効果を期待する頻度の多い常時波浪は、比較的周期が短いため、消波ブロック被覆型有孔堤は海水交換特性が実用的であることがわかった。

6. 結 論

有孔堤および消波ブロック被覆型有孔堤の水理特性を明らかにするとともに、後者の構造形式が海水交換型構造物に適していることを示した。

主要な結論は以下のとおりである。

①数値モデル等により、有孔堤の管内流速の基本特性として、波高が大きいほど、周期が短いほど、また、管内の損失が大きいほど流速振幅は小さくなる。一方、水位差を一定とした場合は、流速振幅が小さいほど管内平均流速が大きくなる。

②現地観測から、全損失を適切に選ぶことにより、現地の管内流速を数値モデルで予測できる。

③消波ブロック内での水位上昇量は、波高に比例するが周期の違いによる差は小さい。波向きの影響については、直入射のとき平均水位上昇量が一番大きく入射角度が大きくなるにともない減少するが、入射角が 60° でも

直入射波の 50 % 程度の水位上昇量が得られる。

④消波ブロックの静水面での被覆幅が、堤体前面での波長の 0.1~0.3 倍程度のときに平均水位上昇量が大きい。この幅は、通常の消波ブロック被覆堤の天端 2 個並びの場合の範囲とほぼ一致しているため、海水交換を高めるための特別な考慮は必要ないことがわかった。

⑤管路長の影響は、管路長が増加するにともない摩擦損失が増加するが、逆に損失が増えることにより流速振幅の減少が生じるので相殺され、管内平均流速は管路長にさほど影響を受けない。このため、防波堤のみならず管路が長くなる防波護岸にも適用し得る。

⑥潜堤付き有孔堤と比較しても、消波型有孔堤の管内平均流速は、ほぼ周期 1.74 s 以下の短周期の範囲で大きくなっており、発生頻度の多い中~短周期側の波に対する海水交換性能が高い実用的な構造物であることがわかった。

⑦開口率を大きくすると海水交換量は大きくなるが、港内伝達波も大きくなるため、港内の利用を考慮し、適切な開口率を選択する必要がある。

参 考 文 献

- 岡本 博・森下敏夫 (1985): 海水交換機能を持つ弁式有孔堤について, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 540-544.
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.
中村 充 (1977): 水産土木工学—漁場造成・海洋環境・エンジニアリング—, 工業時事通信社, pp. 69-70.
山本正昭, 中泉昌光, 間返本文, 森口朗彦 (1991): 海水導入を目的とした潜堤付孔空き防波堤の開発, 海洋開発論文集 Vol. 7, pp. 137-142.