

海水交換機能を有する透過型スリットケーソンの水理特性

塩崎 禎郎*・磯崎 総一郎**・中村 滋***・堀内 博****

1. はじめに

防波堤は港湾内の静穏性確保に重点を置いて設置されるため、防波堤によって囲まれた水域は閉鎖性が強く、水質悪化が問題となることがある。そのため、港内外の海水交換促進を目的とした研究に、多くの機関が取り組んできた。高ら（1973）は、Crenellated Breakwaterの拡散性について検討し、松本ら（1976）は、直立消波透過型防波堤を取り上げ、通水機能を明らかにしている。この透過型構造は、潮汐・潮流による流れの疎通や、波浪による混合拡散により海水交換を期待するものである。ただし、この構造は流れの方向を制御できないため、条件によっては十分に海水交換が行われないことが懸念されていた。そこで最近では流れの方向を制御するため、波浪のエネルギーを流れに変換して、一方向に導水が可能な構造の研究が中心となってきた。例えば、山本ら（1987）による潜堤付き孔あき防波堤、柳瀬ら（1991）による消波ブロック被覆型有孔堤、佐藤ら（1994）による遊水部付き有孔堤などが挙げられ、実際に建設されている。特に、志賀島漁港に設置された潜堤付き孔あき防波堤は、山本ら（1994, 1995）により現地調査が行われ、水質環境改善効果が報告されており注目される。

さて、最近の港湾整備では、水深が深い場所に防波堤が設置される機会が増える傾向にある。上記の構造は、いずれも二重の構造であるため、水深が深くなった場合、建設コストの増加が懸念される。そこで、筆者らは、比較的水深の深い場所においても、ケーソン単体で一方向に導水が可能な構造の開発に取り組んだ。その結果、図-1に示すような透過型ケーソンの遊水室内部に鉛直版を設けた新構造を見出した。ここでは、新構造ケーソンの水理特性を把握するために行った2次元水槽実験の結果を報告する。

2. 実験概要

実験は、2次元造波水路（高さ0.8m×幅0.9m×長さ13.5m、吸引式造波装置付き）に想定縮尺率を1/30としたアクリル製の模型を設置して行った（図-2参照）。模型は底面を5mmかさ上げして、模型背後への流入水を還流させた。図-3に実験に用いた模型の断面図を、表-1に実験波（規則波）、実験ケースの諸元を示す。模

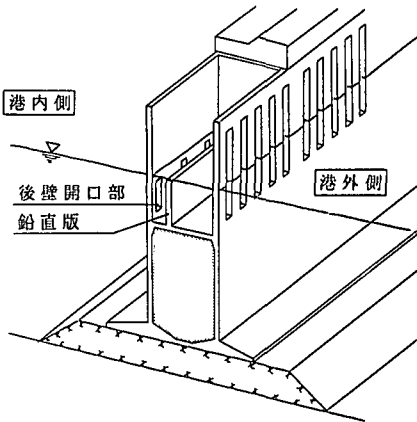


図-1 新構造ケーソンの概念図

表-1 実験波、実験ケースの諸元

水深: h	57.4 cm		
波高: H	2.5~6.7 cm		
周期: T	0.73~1.46 sec		
Model	d/h_1	h_1/l	ε_2
Model-1	—	—	0.030
Model-2	1.00	0.23	0.030
Model-3 a	0.78	0.23	0.030
Model-3 b	0.62	0.23	0.030
Model-4 a	1.00	0.13	0.030
Model-4 b	1.00	0.35	0.030
Model-4 c	1.00	0.46	0.030
Model-5 a	1.00	0.23	0.045
Model-5 b	1.00	0.23	0.060

* 正会員 工修 NKK 基盤技術研究所都市工学研究部
** 正会員 工修 NKK 基盤技術研究所都市工学研究部 主査
*** 正会員 工修 NKK 橋梁・港湾建設部土木・港湾計画室 主査
**** 正会員 工修 NKK 橋梁・港湾建設部土木・港湾計画室 統括スタッフ

型は、Model-2の新構造ケーソンを基本形状として、鉛直版のない透過型ケーソンをModel-1、さらに、新構造ケーソンの構造パラメーター（鉛直版高さ、鉛直版設置位置、後壁開口率）の影響を把握するため、それぞれModel-3～5を用意した。計測項目と計測方法は以下のとおりである。

- 後壁開口部での流速：Model-1～3bは計測点 $V_{m1} \sim V_{m5}$ の5点で計測し、造波開始後、波が定常状態になった後の5波の平均流速を算出（流速は港内方向を正とした）。Model-4a～5bは $V_{i1} \sim V_{i3}$ を計測し、事前に求めておいた $V_{m1} \sim V_{m5}$ との関係から換算して平均流速を算出。なお、波が定常状態になるまでの時間は、高山ら（1976）の理論により定めた。
- 遊水室内水位：計測点 H_3 で容量式波高計により計測。
- 波高伝達率：計測点 S_1 でサーボ式波高計により計測。
- 反射率：計測点 H_1, H_2 で容量式波高計により計測。

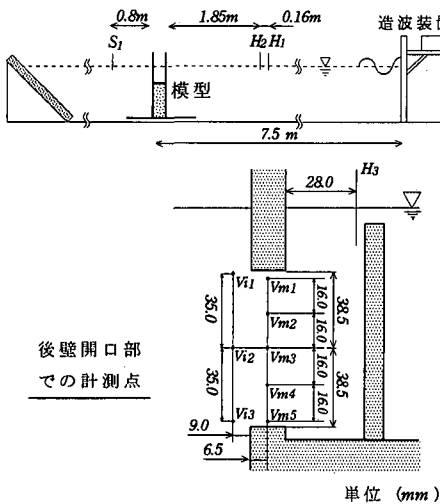


図-2 実験水槽および計測点

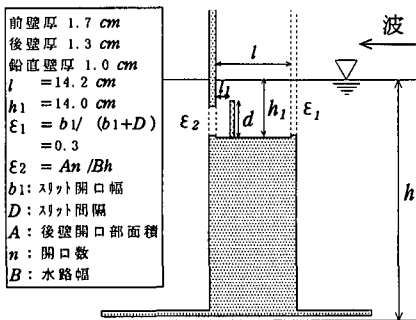


図-3 模型断面図

測し、合田ら（1976）による入・反射波分離法で算出。

e) 流況：色素を水中に投入し、連続写真撮影、ビデオ撮影により流況を把握。

流速、波高データはサンプリング周波数を 40 Hz として、AD 変換後パソコンの HD に記録し、解析を行った。

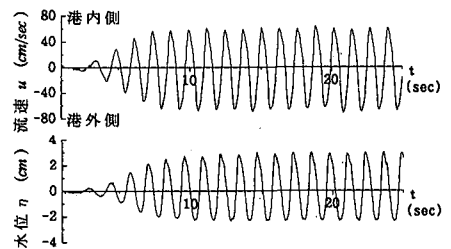
3. 実験結果および考察

3.1 導水特性

a) 透過型ケーソンと新構造ケーソンの比較

透過型ケーソン (Model-1) と新構造ケーソン (Model-2) の後壁開口部中央（計測点 V_{m3} ）での流速波形と水面波形を図-4 に、流況のスケッチを図-5 に示す。両ケーソンとも、押し波時には遊水室の水位が上昇し、港内側との水位差により、港内方向への流れが生じている。一方、引き波時には、透過型ケーソンでは遊水室の水位低下により、港外方向への流れが生じるのに対し、新構造ケーソンでは、鉛直版によって後壁側の水位低下が抑え

透過型ケーソン (Model-1)



新構造ケーソン (Model-2)

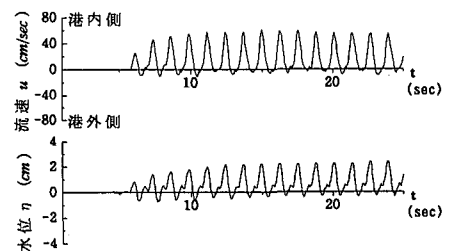


図-4 流速波形、水面波形 ($H=3.3$ cm, $T=1.28$ sec)

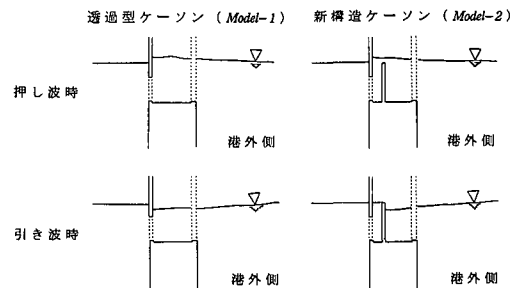


図-5 流況のスケッチ ($H=3.3$ cm, $T=1.28$ sec)

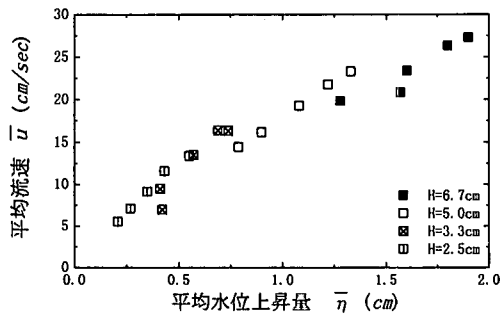


図-6 平均水位上昇量と平均流速の関係

られるため、ほとんど港外方向への流れは生じていない。すなわち、透過型ケーソンでは、ネットの流量がほぼ 0 となるのに対して、新構造ケーソンでは、ネットの流量が港内側へ確保されていることがわかる。

図-6 に鉛直版背後(計測点 \$H_3\$)の平均水位上昇量 \$\bar{\eta}\$ と、後壁開口部の平均流速との関係を示す。港内側への導水は、後壁内外での水位差によって生じており、平均水位上昇量が大きいほど、平均流速が大きく、導水量が多くなることがわかる。

b) 新構造ケーソンの波浪影響

後壁開口部の平均流速と入射波周期の関係を図-7 に、入射波高との関係を図-8 に示す。平均流速は、周期、波高の両方に強く依存しており、周期が長いほど、波高が高いほど大きな値となる。単位時間単位幅当たりの導水量 \$q\$ (cm³/sec/cm) (\$q=A\bar{n}\bar{u}/B\$; \$A\$: 後壁開口部面積; \$n\$: 開口数; \$\bar{u}\$: 平均流速; \$B\$: 水路幅)を越波の指標として用いられる \$\sqrt{2gH^3}\$ (\$g\$: 重力加速度; \$H\$: 入射波高)で無次元化し、波の諸特性との関係を調べた。その結果、無次元導水量 \$q/\sqrt{2gH^3}\$ は、\$H/L\$ (\$L\$: 入射波波長)に強く依存していることがわかった(図-9 参照)。

c) 新構造ケーソンの構造パラメーター影響

新構造ケーソンの構造諸元を変化させて、導水量に及ぼす影響を調べた。無次元導水量と構造パラメーターの関係を図-10~12 に示す。なお、図-10 以降は、入射波が微小振幅波領域のデータのみを表示している。

i) 鉛直版高さ

Model-2, 3 a, 3 b を用いて検討した結果を図-10 に示す。図より鉛直版天端が水面と一致したとき、導水量が最大となることがわかる。逆に \$d/h_1\$ が 0.6 程度では、導水量はほとんど 0 で、鉛直版のない透過型ケーソンと変わらない。これは、新構造ケーソンでは、引き波時に鉛直版天端が水面上に出るときに、戻り流れを効果的に抑制し、港内側への流れを卓越させることになるからである。

ii) 鉛直版設置位置

Model-2, 4 a, 4 b, 4 c を用いて検討した結果を図-11

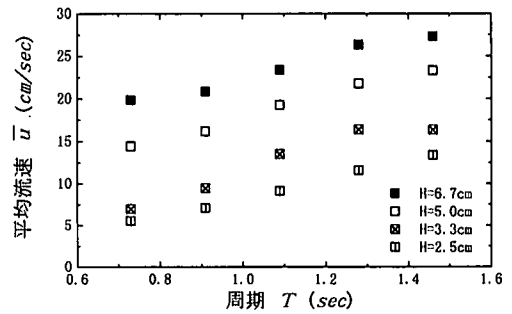


図-7 入射波周期と平均流速の関係

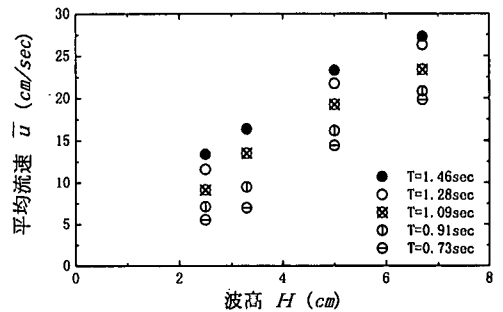


図-8 入射波高と平均流速の関係

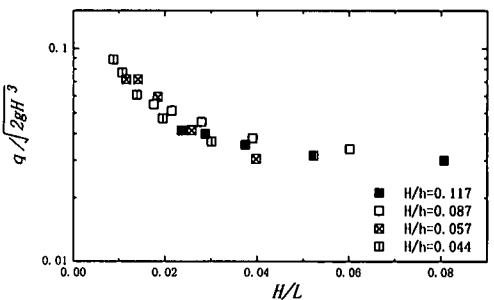


図-9 波形勾配と無次元導水量の関係

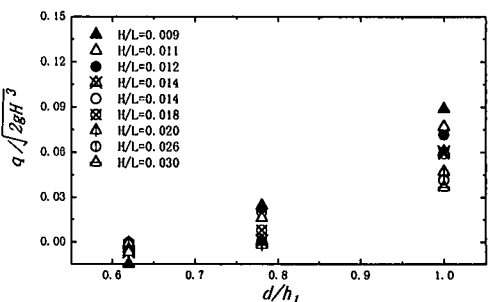


図-10 鉛直版高さで無次元導水量の関係

に示す。図より、\$d/h_1=0.23\$ のとき導水量がピークを示す分布となることがわかる。この理由として次の 2 点が考えられる。すなわち、1) 鉛直版の設置位置が港外側にな

るにつれて、打ち上げ高さが低下し、鉛直版を越波する水量が減少する。2) 鉛直版が後壁に極めて近いときには、越波した水量を十分貯水できず、港内側への戻り流れが生じている。

iii) 後壁開口率

Model-2, 5 a, 5 b を用いて検討した結果を図-12 に示す。図より、 $\varepsilon_2=0.03$ に比べ $\varepsilon_2=0.045, 0.06$ の方が導水量が多くなることがわかる。ただし、 $\varepsilon_2=0.045, 0.06$ の差はほとんどない。これは、 $\varepsilon_2=0.03$ のときには、鉛直版を越波した水量が、全て後壁開口部から港内側へ流れるのではなく、一部が鉛直版から港外側への戻り流れとなるのに対し、 $\varepsilon_2=0.045, 0.06$ では、越波水量のほとんどが港内側へ流れるためである。

3.2 消波特性 (波高伝達率)

a) 透過型ケーソンと新構造ケーソンの比較

図-13 に透過型ケーソンと、新構造ケーソンの波高伝達率 K_T を示す。透過型ケーソンに比べ、新構造ケーソンでは、 K_T の値がおおよそ 1/2 程度まで抑えられている。これは、後壁開口部での流速の変動振幅を比較すれば明らかであるが (図-4 参照)、鉛直版が入射波エネルギーの港内側への伝達を抑える役割を果たしているためである。横軸は L/l で、波の周期で決まる量であり、 K_T の周期依存性が小さいことがわかる。また、両ケーソンとも波高が高いほど、 K_T が小さな値となることがわかる。これは、入射波は、後壁開口部のみから港内側へ伝達するため、開口部の通水能力に大きく影響されるためである。

b) 新構造ケーソンの構造パラメーター影響

ここでは、波高伝達率に与える影響が顕著である鉛直版高さ、後壁開口率を変化させた場合の K_T を、それぞれ図-14、図-15 に示す。図-14 より、 d/h_1 が 1 に近づくにつれ、急激に K_T が低下することがわかる。また、 $d/h_1=0.8$ 程度までは、鉛直版のない場合とほとんど変わらず、鉛直版による波高伝達の抑制効果は期待できない。図-15 より、 ε_2 が増加するにつれ、 K_T もほぼ線形に増加する様子がわかる。すなわち、港内側への入射波エネルギーの伝達は、開口総断面積に強く影響されることがわかる。

3.3 消波特性 (反射率)

a) 透過型ケーソンと新構造ケーソンの比較

図-16 に透過型ケーソンと新構造ケーソンの反射率 K_R を示す。短周期領域の一部を除いて、新構造ケーソンの K_R が高くなっている。これは、消波性能に影響を及ぼす遊水室幅が、鉛直版によって実質狭くなっているためである。実線は、谷本ら (1982) による理論を用いて、前壁から鉛直版までを遊水室幅として求めた理論値である。実験値が理論値より小さな値を示すのは、鉛直版を越波することによるエネルギー損失や、後壁からの反射

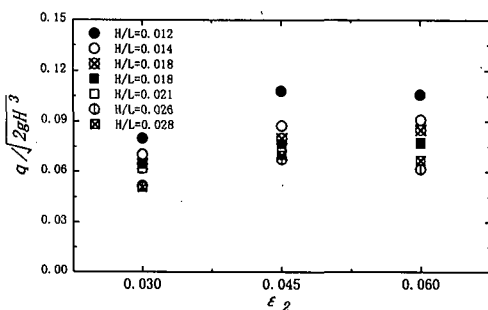


図-11 鉛直版設置位置と無次元導水量の関係

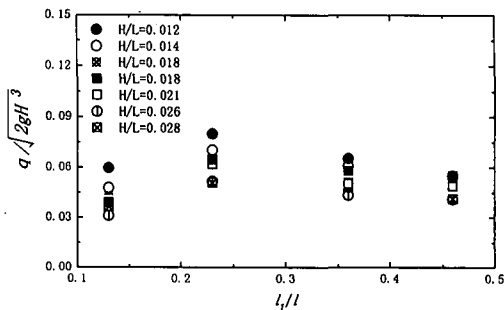


図-12 後壁開口率と無次元導水量の関係

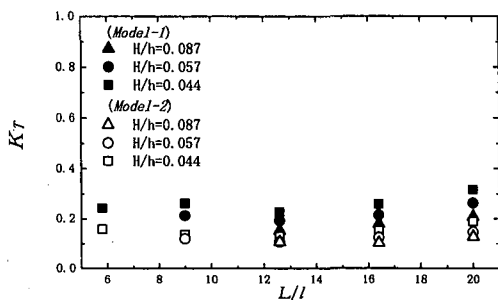


図-13 透過型ケーソンと新構造ケーソンの波高伝達率

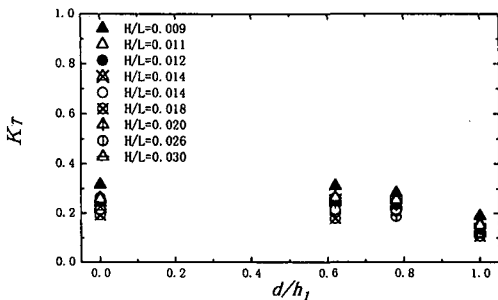


図-14 波高伝達率 (鉛直版高さの影響)

波による位相干渉などの影響が考えられる。

b) 新構造ケーソンの構造パラメーター影響

ここでは、反射率に与える影響が顕著である鉛直版高

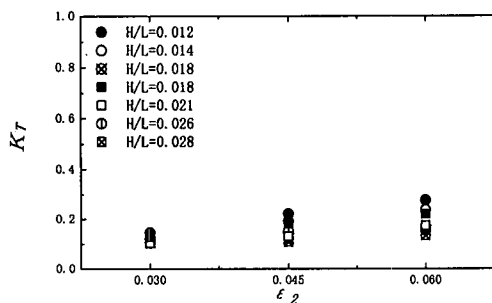


図-15 波高伝達率 (後壁開口率の影響)

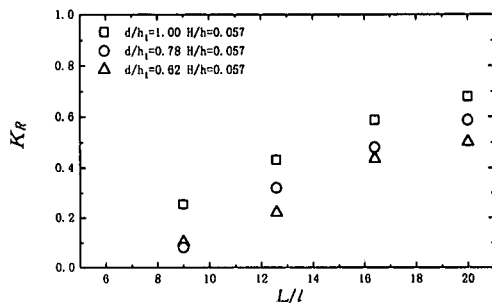


図-17 反射率 (鉛直版高さの影響)

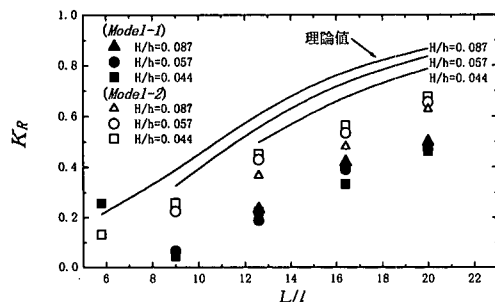


図-16 透過型ケーソンと新構造ケーソンの反射率

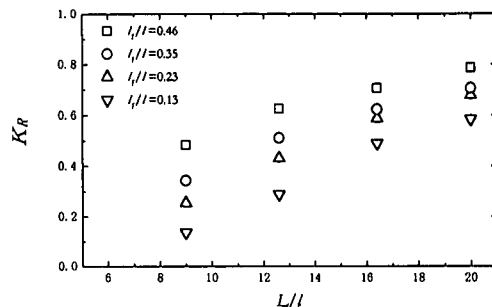


図-18 反射率 (鉛直版設置位置の影響)

と、鉛直版設置位置を変化させた場合の K_R を、それぞれ図-17、図-18 に示す。図-17 より、 d/h_1 が小さくなるほど、 K_R が低下することがわかる。さらに、 $d/h_1 = 0.62$ では、透過型ケーソンと同程度の K_R を示す。これは、鉛直版が没水した場合、鉛直版上端での渦生成によるエネルギー損失が影響しているものと考えられる。図-18 より、 l_1/l が小さいほど、 K_R が低下することがわかる。これは、 l_1/l が小さくなることは、実質の遊水室幅が広がることであり、消波効果を高める方向に働くためである。

4. おわりに

比較的水深の深い場所においても、港内側への導水がケーソン単体で行える新構造ケーソンを検討し、水理特性を把握するため2次元水槽実験を行った。その結果、新構造ケーソンは以下の特長を有することがわかった。

- (1) 透過型ケーソンの遊水室に鉛直版を設置することにより、港内側への一方の導水が行える。
- (2) 鉛直版により港内側への波高伝達が抑えられるため、港内の静穏性を確保できる。

最後に、本研究を進めるにあたって、貴重なご助言を頂いた、水産庁水産工学研究所漁港水理研究室 中山哲蔵室長、山本 潤 前技官、運輸省港湾技術研究所耐波研究室 高橋重雄 室長に深謝致します。

参考文献

- 高 隆二・田川昌宏 (1973): Crenellated Breakwater の拡散性, 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 233-238.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池 治 (1976): 不規則波実験における入・反射波分離推定法, 港湾技研資料, No. 248.
- 佐藤 仁・明田定満・谷野賢二・小柳一利・宮部秀一・神瀬 哲 (1994): 遊水部付き有孔堤の海水交換機能について, 海洋開発論文集 Vol. 10, pp. 103-106.
- 高山知司・神山 豊 (1976): 実験水路における波の伝播について, 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 381-385.
- 谷本勝利・吉本靖俊 (1982): 直立消波ケーソンの反射率に関する理論及び実験的研究, 港湾技研報告, 第21巻, 第3号.
- 松本輝寿・永井康平・武智雅敏 (1976): 直立消波透過型防波堤の波浪および通水特性に関する実験的研究, 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 112-116.
- 柳瀬知之・谷野賢二・水野雄三・梅沢信敏・桑原伸司 (1991): 有孔堤の海水交換機能に関する研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 856-860.
- 山本 潤・武内智行・中山哲蔵・田畑真一 (1995): 漁港内に於ける溶存酸素濃度の変動機構の解明のための現地調査, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 1186-1190.
- 山本 潤・武内智行・中山哲蔵・田畑真一・池田正信 (1994): 志賀島漁港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.
- 山本正昭・中泉昌光・間辺本文 (1987): 潜堤付防波堤による海水交流工法の開発, 第34回海岸工学講演会論文, pp. 675-679.