

海水交換型スリットケーソンの3次元 数値計算による水理特性の評価

EVALUATION OF THE WATER-EXCHANGING SLIT CAISSON
BY USING 3-DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATION

中岡威博¹・片岡保人²・濱崎義弘³・竹鼻直人³・奥村昌好³

Takehiro NAKAOKA, Yasuto KATAOKA, Yoshihiro HAMAZAKI, Naoto TAKEHANA
and Masayoshi OKUMURA

¹工博 (株)神戸製鋼所 機械研究所 流熱技術研究室 (〒651-2271 神戸市西区高塚台1-5-5)

²正会員 工博 (株)神戸製鋼所 機械研究所 構造・加工研究室 (〒651-2271 神戸市西区高塚台1-5-5)

³正会員 工修 (株)神戸製鋼所 鋼構造センター 構造技術部 (〒657-0845 神戸市灘区岩屋中町4-2-15)

A water-exchanging slit caisson can exchange water inside of the harbors to reduce environmental pollution. In order to clarify the hydraulic characteristics of the water-exchanging slit caisson, three-dimensional numerical simulation was carried out, and quantities of exchanging water through the hole and wave transmitting coefficient were calculated. And the results were verified by using model experiments. It is confirmed that the quantities of exchanging water were related to the period of wave. So the numerical simulation is useful to predict the hydraulic characteristics of the caisson.

Key Words: Water-exchanging caisson, slit-type caisson, numerical simulation, free surface analysis, transmission wave, seawater exchange

1. はじめに

防波堤などに囲まれた港湾内部では波浪などによる海水の運動がほとんど生じないため海水が滞留し水質汚染の問題が発生している。そこでこのような水質汚染を防止するため、ケーソン内部に港外側と港内側を貫通する導水孔を設け、港外側の波の運動や潮汐を利用して積極的に港内部の海水を交換させる機構をもつ海水交換型ケーソンが研究されている¹⁾²⁾³⁾。また遊水室を持つスリットと導水孔を組み合わせ、消波と海水交換の両方の機能を持つケーソンも開発されている⁴⁾。

しかし海水交換量を増加させるため導水孔の径を増加させると、孔より吐出した海水により波が発生し港内の静穏性が妨げられる可能性や導水孔の位置と形状によっては十分に海水が交換できない場合がある。そのため、ケーソンの海水交換量、波の透過率等の水理特性に及ぼす導水孔の形状や設置位置、波浪の条件などの特性を把握する必要がある。

一方これら新形式構造物の水理特性評価にあたり、2次元の数値解析による評価方法の研究がなされている⁵⁾。しかしながら、スリットや導水孔周りの流動をより正確に評価する場合には3次元の数値計算

が必要である。そこで本研究では海水の運動に Navier-Stokes 方程式、波の2相流モデルにVOF法を用いた汎用の3次元流動解析プログラムを使用することにより、海水交換型スリットケーソンの導水孔を通過する海水流速および波の反射率、透過率を求め、海水交換型ケーソンの水理特性を明らかにすることを目的とした。また2次元造波水槽を用いた水理実験を実施し、解析結果の精度の評価を行なった。

2. 数値計算条件及び方法

(1) 計算条件

検討に用いた海水交換型スリットケーソンの形状を図-1に示す。ケーソン上部にはスリット部と遊水室を持ち、導水孔は遊水室側に1函あたり直径18mmの丸孔を8箇所、底部に長方形形状(高さ120mm、幅24mm)の孔を1箇所設けた。

解析には汎用流体解析コードであるFluent5.0を用いた。流体の解析には3次元非定常層流のNavier-Stokes方程式を、波の形状をあらわすため2相流モデルのVOF法⁶⁾を使用した。

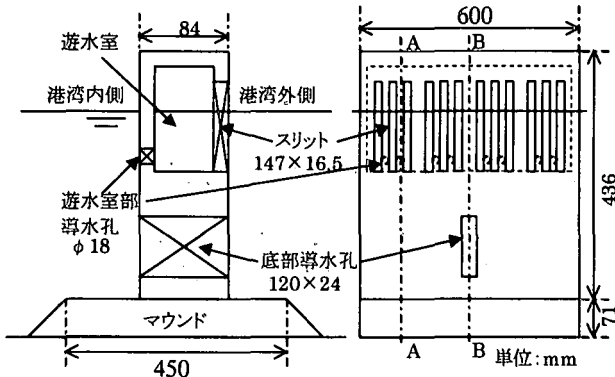


図-1 海水交換型スリットケーソンの概略図

解析領域として港内側はケーソン前面より2000mm、港外側は4000mmの長さを設定した。港外側は沖波造波条件として微小振幅波の式で表される進行波の速度成分と波高を港外側の境界に設定した。また港内側では波の反射を抑制するため多孔体要素を内側境界から200mmの間に配置した。表-1に物性値を示す。

表-1 物性値

	密度 ρ [Kg/m ³]	粘性係数 μ [Kg/m·s]
水	998.2	0.001003
空気	1.225	1.789×10^{-5}

図-2にケーソンの要素分割図を示す。全領域での要素分割数は約329000、最小要素サイズは深さ方向に10mmである。非定常計算での時間刻み Δt は0.02秒に設定した。計算は水深を2条件、波周期を3条件、また底部の導水孔の有無でこない、それらの影響を検討した。表-2に解析条件を示す。

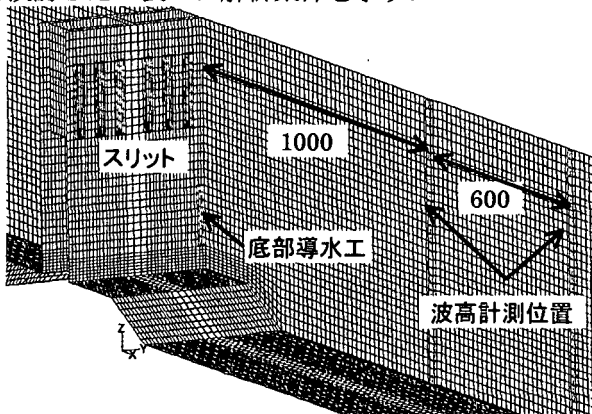


図-2 海水交換型スリットケーソンの要素分割図

表-2 解析条件

水深 h [mm]	436, 479
沖波波高 H [mm]	55
沖波周期 T [s]	0.6, 0.74, 1.0
底部導水孔	有り, 無し

(2) 計算方法

計算では水面が静止した状態から港外側の境界より規則波を発生させ、ケーソン周辺での波の形状が重複波になった10秒後から10秒間の導水孔流速の値を用いた。港外側と内側の護岸前面より1000mmおよび1600mmの位置での波高の時間変化の計算データより入反射分離をおこない反射率、透過率を求めた。

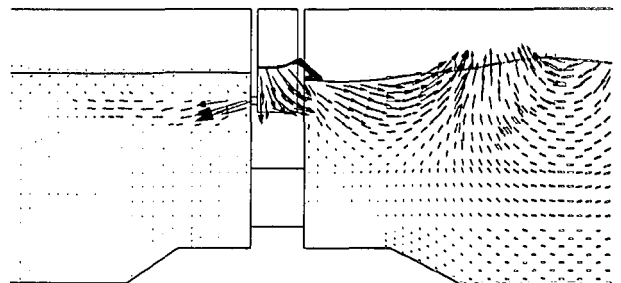
(3) 水槽実験

水槽実験は、2次元造波水槽（長さ30m、高さ1.2m、幅0.6m）中に解析で用いたケーソンと同じ形状の模型を設置しておこなった。導水孔の通過流量は電磁流量計を用いて流速の時間変化を計測し導水孔の面積を乗じるにより求めた。遊水室側の導水孔は孔径が小さく流速計の計測部が流れに与える影響が無視できないため、導水孔より15mm離れた位置の遊水室側と沖側の2ヶ所で計測をおこなった。計測位置の導水孔から吸込む流れは解析結果より流向が孔方向と大きく異なるため、各々の計測位置で孔からの吐出時の値を採用した。波高は解析と同じ位置で容量式波高計を用いて計測し、入反射分離をおこない反射率、透過率を求めた。

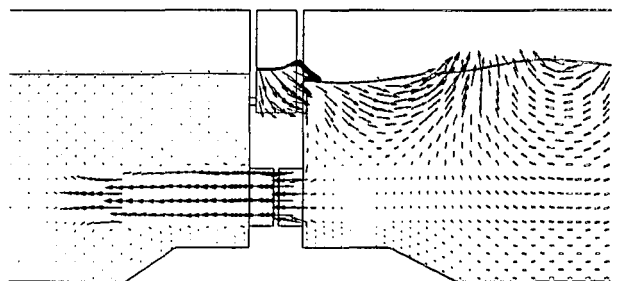
3. 結果と考察

(1) 導水孔の通過流量

沖波周期 $T=0.74$ 秒の条件で導水孔を通過する流速が極大値を示す時刻でのケーソン近傍での波の形状および速度ベクトルを図-3に示す。



a) A-A断面（遊水室導水孔面）



b) B-B断面（底部導水孔面）

図-3 導水孔断面での速度ベクトル図
(解析結果, $T=0.74$ 秒, $h=436$ mm)

図-3より遊水室の水面が港内側より高い場合に、圧力差によって港内側へ吐出していることが確認さ

れる。また港内側の吐出流が及ぶ流速の早い範囲はケーソン前面からほぼ垂直に約400mm程度に拡散せず伝わっており、その他の領域ではほぼ流速は0である。次に導水孔の通過流速の時間変化を図-4に示す。吐出流速の時間変化はsin関数形状でその周期は沖波周期と一致する。

ここで計算結果より通過流速の振幅の10秒間の値を平均して波周期ごとに整理し、片振幅として水槽実験の値と比較した結果を図-5に示す。図より通過流速の片振幅値は波の周期が長くなるに従って増加し、遊水室側導水孔の流速振幅値が底部導水孔と比較して大きいことが確認される。水理実験との比較では解析値が約10%程度高い値を示すが定性的には良い一致が確認される。水深が $h=479\text{mm}$ の場合と水深が $h=436\text{mm}$ の場合を比較すると大きな差異は確認されずほぼ同じ傾向を示す。

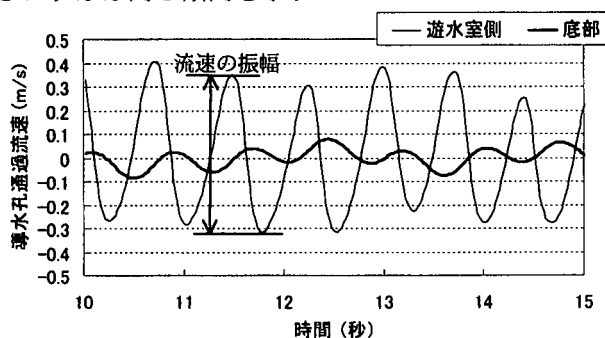
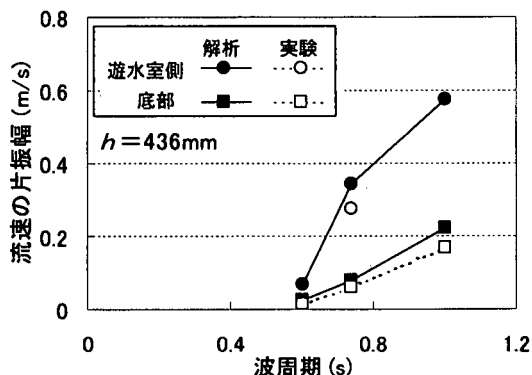
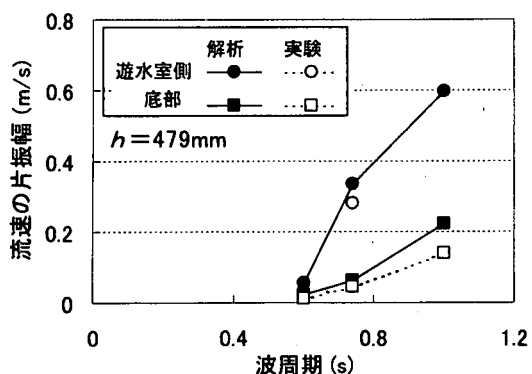


図-4 導水孔通過流速の時間変化 (解析結果, $T=0.74$ 秒, $h=436\text{mm}$)



a) 水深 $h=436\text{mm}$



b) 水深 $h=479\text{mm}$

図-5 導水孔通過流速の片振幅値の比較

導水孔の流れは港外側と港内側の海面の波高差によって生じると考えられることにより、波による圧力を用いて考察を行う。重複波の微小振幅波の理論を用いると港外側ケーソン前面の平均水面から深さ z の位置での圧力 P は次の式で表される。

$$P = -\rho gz + \alpha \rho g H \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(\omega t) \dots\dots(1)$$

ここで k は波数、 ω は角周波数である、 α は反射率による補正值(完全重複波で1.0, 進行波で0.5)。

港内側は後述する波高の計測結果より透過率は0.1以下であり波による圧力変動の影響を無視すると、導水孔の最大通過流速は式(1)の右辺第二の \cos 項の振幅値に比例することが考えられる。ここで補正值 α は波の反射率で異なるが底部はスリットの影響が少ないため $\alpha=1.0$ とした。これらの検討から底部導水孔の流速の片振幅値と圧力振動の振幅値 ΔPH (式(2))の関係を図-6に示す。

$$\Delta PH = \rho g H \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \dots\dots(2)$$

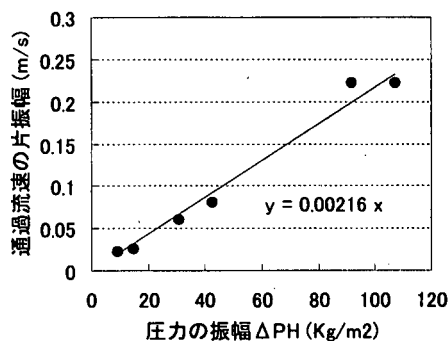


図-6 圧力振幅 ΔPH と通過流速の振幅の関係

図より底部導水孔を通過する通過流速の振幅は波による圧力振幅に比例することが確認される。以上の結果から波による圧力差が導水孔の流量を決めていることが主原因と考えられる。

次に導水孔による海水交換特性を示す指標としてケーソン1函を単位時間に通過する平均流量の絶対値を $Q_c[\text{m}^3/\text{s}]$ と定義する。

$$Q_c = N_c \cdot \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} |A \cdot v(t)| dt \dots\dots(3)$$

ここで N_c はケーソン1函あたりの導水孔の数、 T_1, T_2 は計測時刻、 A は導水孔の面積、 $v(t)$ は導水孔の通過流速の時間変化である。計算には $T_1=10$ 秒、 $T_2=20$ 秒の値を用いた。

図-7に水深 $h=436\text{mm}$ の場合の通過流量 Q_c を示す。今回のケーソン形状では1函あたりの通過流量は遊水室側が底部側の約2倍である。これは式(2)より海面に近いほど、波による圧力変動が増加することが原因であると考えられる。

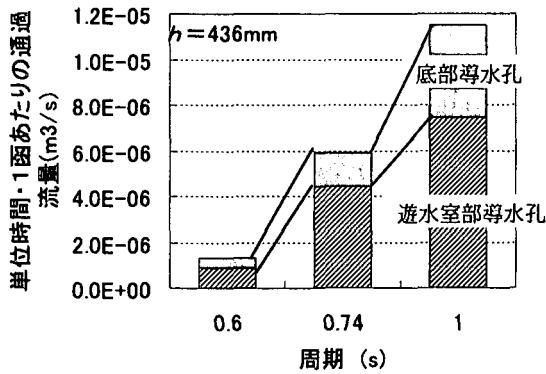


図-7 ケーソン1函あたりの通過流量 Q_c の比較 (解析結果, $h=436\text{mm}$)

(2) 波の反射率, 透過率

図-8に周期 $T=0.74$ 秒, 水深 $h=436\text{mm}$ の条件の港外側および内側の計測点での平均水面からの波高の変化の解析結果を示す。VOF法による2相流解析によつて規則波の伝播が正しく計算できていることが確認される。港内側での波高は小さく, 導水孔を設置したことにより, 高い波高の波が起っていないことが明らかになった。また港内側の波の周期は港外側と一致している。

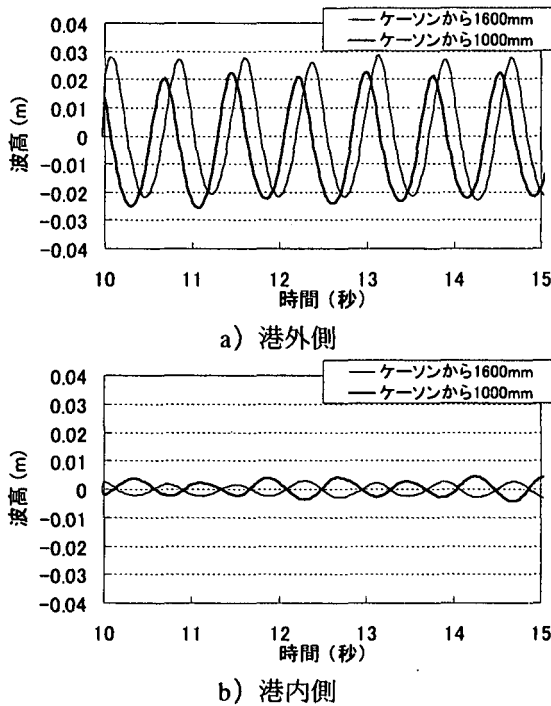


図-8 波高の時間変化 (解析結果, $T=0.74$ 秒, $h=436\text{mm}$)

次にこの波高の時間変化より入射分離を行い, ケーソンの反射率と透過率を求めた結果を図-9に示す。実験との比較では定性的な傾向は一致している。計算と解析の相違の原因として実験時の水槽幅方向のスロッピングや解析での要素分割数の不足などが考えられる。

透過率は波の周期によって変化するがいずれの場合も0.1以下の低い値である。反射率は周期 $T=0.6$ 秒

の場合に急激に増加するが, 波の波長が短く遊水室内での波の干渉による消波効果が起こりにくいことが原因と考えられる。本ケーソンでは周期 $T=0.6$ 秒以上で十分な消波効果が確認される。

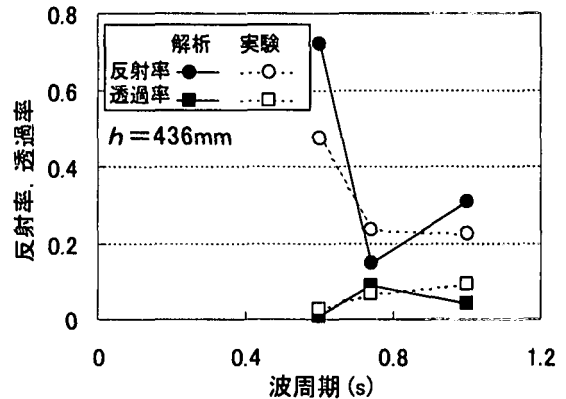


図-9 ケーソンの透過率と反射率の変化 ($h=436\text{mm}$)

(3) 底部導水孔の効果

遊水室部導水孔と底部導水孔の各々の海水交換特性を評価するため底部導水孔を塞いだ形状で解析を行い, 導水孔通過流量および波の反射率, 透過率の評価を行なった。図-10にケーソン1函あたりの単位時間あたりの通過流量を示す。底部導水孔を配置することにより遊水室部導水孔のみの場合に比べ, ケーソンを通過する流量が約30%増加すること分かる。

図-11にケーソンの波の反射率, 透過率を示すが, 底部導水孔の有無による変化は確認されない。この原因は図-5より底部導水孔を通過する流速が遊水室側と比べて遅く, 海底近傍から水平に吐出しているため, 波を起こすための流れが海面に伝わりにくいことが原因と考えられる。すなわち底部導水孔は透過率と反射率を変化させず, 交換流量の増加を行うことが可能である。

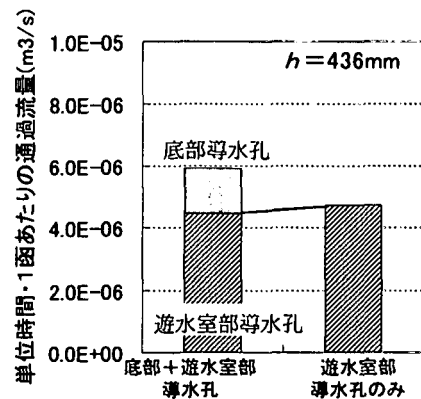


図-10 導水孔通過流量の相違 (解析結果, $T=0.74$ 秒, $h=436\text{mm}$)

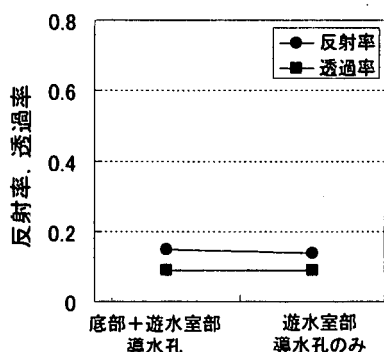


図-11 ケーソンの透過率と反射率の相違
(解析結果, $T=0.74$ 秒, $h=436$ mm)

4. まとめ

導水孔を設けたスリット型海水交換ケーソンについて3次元数値解析および水理実験を用いて, その特性を検討し以下の結果が明らかになった。

(1)数値解析による流速および波高の計算結果は水槽実験結果と定性的に一致し, ケーソンの水理特性を評価することが可能である。

(2)導水孔を通過する流量は波周期が長くなるに従って増加するが, これは波の圧力差の変動が原因である。また波の透過率は今回の条件では0.1以下である。

(3)ケーソン底部に導水孔を設けた場合には波の透過率はほとんど増加しない。また遊水室側の導水孔通過流量は変化しないが底部導水孔の通過流量が加算されるため, ケーソン全体を通過する海水量は増加する。

参考文献

- 1) 村上和男, 菅沼史典, 宮崎啓司, 山田邦明, 清水勝義: 潮汐エネルギーを利用した海水交換促進に関する水理模型実験, 水工学論文集第37巻, pp.411-418, 1993.
- 2) 西守男雄, 日比野忠史, 豊田政史, 細川恭史, 石原弘一, 森下正志, 鶴谷広一: 海水交換型防波堤の透過量評価手法の提案, 港湾技術研究所報告第38巻第2号, 1999.
- 3) 水野雄三, 谷野賢二, 木村克俊: 海水交換型防波堤に関する水理特性について, 第17回海洋開発シンポジウム, pp.253-258, 2000.
- 4) 島田潔, 吉村正, 杉本達彦, 五十嵐和之, 宮内勇児, 大野邦彦: 海水交換型ケーソンの導水流制御機構, 海洋開発論文集第17巻, pp.1-4, 2001.
- 5) 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会: 数値波動水路の研究・開発, (財)沿岸開発技術研究センター, 2001.
- 6) Fluent Inc: FLUENT 5 User's Guide Vol.3, Chapter 15, 1998.