

3 次元傾斜型透過堤の海水交換性能に関する実験と計算

池 末 俊 一* ・ 熊 本 直 樹* ・ 木 原 一 禎**
杉 泰 広*** ・ 高 山 知 司**** ・ 池 上 慎 司*****

本研究の対象とした海水交換堤は、越波によって生じる遊水部内の水位上昇を利用して外部海水を港内側へ自然流入させる構造形式である。この際、問題となるのは外部静水面上における遊水部の越流天端高 d と入射波高 H との比 d/H である。この比を適切に設定しないと十分な越波量を確保できない。このため、瀬戸内海のように潮位変動の大きい海域においては、この比が大きく変動し適切な断面を決めることが困難となる。そこで、著者らは大きな潮位変動に対しても有効な 3 次元傾斜型透過堤を開発し、海水交換性能の向上を図った。本研究では、この 3 次元傾斜型透過堤の海水交換性能について実験と計算による検討を行いその有効性を確認した。

1. はじめに

波浪を活用した海水交換堤は、越波によって生じる遊水部内の水位上昇を利用して外部海水を港内側へ自然流入させる構造形式である。この際、問題となるのは外部静水面上における遊水部の越流天端高 d と入射波高 H との比 d/H である。この比を適切に設定しないと十分な越波量を確保できない。このため、瀬戸内海のように潮位変動の大きい海域においては、この比が大きく変動するために適切な断面を決めることが困難である。

そこで、著者らは大きな潮位変動に対しても有効な 3 次元傾斜型透過堤を開発した。その透過堤形状を図-1 に示し、その特徴を以下に述べる。

- (a) 越流用傾斜面を堤体幅方向に多段に配置し、各傾斜面背後の遊水部が各々独立に港内側へ導水管にて接続している。
- (b) 越流用傾斜面が堤体の幅方向のみではなく堤体法線方向にも傾斜する 3 次元傾斜構造である。

この構造によって潮位や波高が変化しても、堤体法線方向には常に最適な d/H 比を得ることが可能になり海水交換性能が向上すると考えられる。

本研究では、この 3 次元傾斜型透過堤の海水交換性能

について実験と計算による検討を行った。

実験では、3 次元傾斜型透過堤を構成する越流傾斜壁に関して断面 2 次元実験を行い、導水性に優れる堤体幅方向の傾斜角について検討を行った。また、この結果をもとに、堤体法線方向に緩やかに傾斜する 3 次元傾斜型透過堤模型を製作し、その導水特性を調べるとともにモデル化を行った。

計算では、3 次元傾斜型透過堤の導水モデルを用いて海水交換解析を実施し、潮位変動の大きい海域においてその有用性を検証した。

2. 堤体幅方向傾斜角に関する断面 2 次元実験

本研究では、堤体幅方向の傾斜角による影響を把握するために断面 2 次元実験を行った。本実験では多段に配置した傾斜壁の一部に着目して、傾斜要素模型を用いて、導水量を計測した。

実験条件は、広島地域を対象として想定される常時波浪条件を参考に設定した。また、縮尺は 1/2 の大型模型を使用し、相似則にはフルード則を用いた。実験では、規則波を使用した。実験波の条件を表-1 に示す。

ここで、対象海域の波高は非常に小さく、模型縮尺は造波装置等の性能上での制約のためこれ以上小さくできなかった。また、水深は実験場の制約から 0.75 m とした。

試験模型を図-2 に示す。模型は傾斜要素と遊水部及び越流板からなる。傾斜要素は遊水部の前面に設置され、潮位差を考慮するための高さ調整台を有する。この傾斜要素を越流してきた水が遊水部に流れ込み、越流板背後の水位が上昇する。実験では、この上昇量を計測して導水量を計算した。

本実験では、傾斜板の勾配として 0.2, 0.3, 0.4, 0.667, 1.0 の 5 つを用い、傾斜角の影響を検討した。

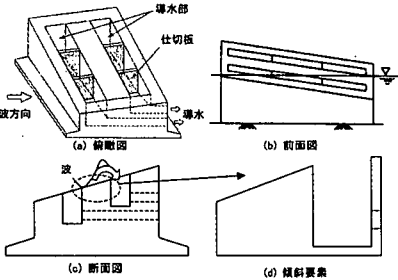


図-1 3 次元傾斜型透過堤

* 正 会 員 三菱重工業(株)技術本部広島研究所
** 正 会 員 三菱重工業(株)広島製作所
*** フェロー 三菱重工業(株)技術本部広島研究所
**** 工博 京都大学防災研究所水災害研究部門
***** 正 会 員 中電技術コンサルタント株式会社

表-1 実験での波条件

波高(m)	0.050	波周期: 0.80 s, 0.90 s, 1.03 s
	0.075	波周期: 0.83 s, 0.90 s, 0.98 s, 1.09 s, 1.26 s
	0.100	波周期: 0.96 s, 1.03 s, 1.13 s, 1.26 s, 1.46 s

図-3に、傾斜板上端部が水面に対して0.1m低い場合 ($d=-0.1\text{ m}$) の、単位時間当たり導水量を示す。試験結果より、導水量は波高を一定とした場合、波形勾配に反比例している。また、傾斜板勾配の影響については、勾配が大きくなるほど導水量が大きくなる傾向にあるものの、大きな差異は見られなかった。

傾斜板上端部が水面と一致する場合 ($d=0.0\text{ m}$) の、単位時間当たり導水量を図-4に示す。導水量は先ほどの結果と同様に波形勾配に反比例している。ただし、この傾向は波高が大きくなるにつれ弱まり、波高が高いほど、波形勾配によらず導水量が一定となる傾向が強くなっている。また、傾斜板勾配の影響については、勾配が大きくなるほど導水量が大きくなる傾向にあるものの、全体的に見れば勾配によらずほぼ同レベルの導水量であるといえる。

傾斜板上端部が水面に対して0.1m高い場合 ($d=0.1\text{ m}$) の、単位時間当たりの導水量を図-5に示す。傾斜板勾配1.0の場合には、波形勾配0.035程度で導水量がピークとなる。また、傾斜板勾配の影響については勾配0.4, 0.667がほぼ同程度の導水量となっており、傾斜勾配が0.4より小さくなると導水量も少なくなっている。また、傾斜勾配1.0の場合の導水量も、勾配0.667の場合

に比べ全体的に若干少なめの結果となっている。

これらの試験結果より、波形勾配が0.02~0.07程度の場合には、0.40から0.667の間に最適斜面勾配が存在するものと思われる。

ここで、斜面勾配0.40の傾斜要素模型にて、斜面天端高 d と導水量の関係についてより詳細な実験を実施した。また、実験結果を次式に示す無次元流量にて整理した。

$$q = 2\pi Q / (H \cdot L) \dots\dots\dots (1)$$

q は無次元導水量、 Q は1波当たりの導水量 (m^3/m)、 H は波高(m)、 L は波長(m)である。図-6に結果を示す。無次元導水量 q は、 d/H が0.3程度でピークとなっており、斜面の天端高が水面よりも若干高い場合に導水量が大きくなる。また、無次元流量 q の分布形は正規分

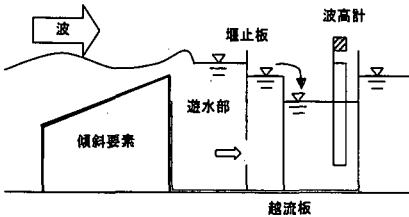


図-2 断面2次元越波実験

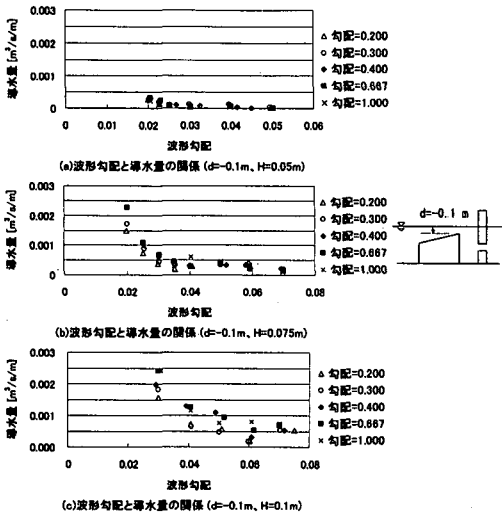


図-3 導水量計測結果 ($d = -0.1\text{ m}$)

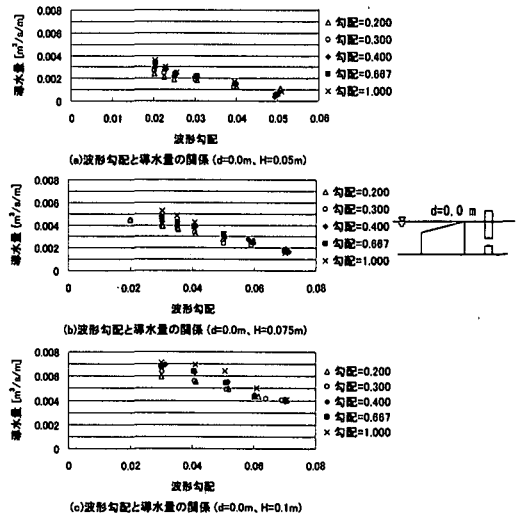


図-4 導水量計測結果 ($d = 0.0\text{ m}$)

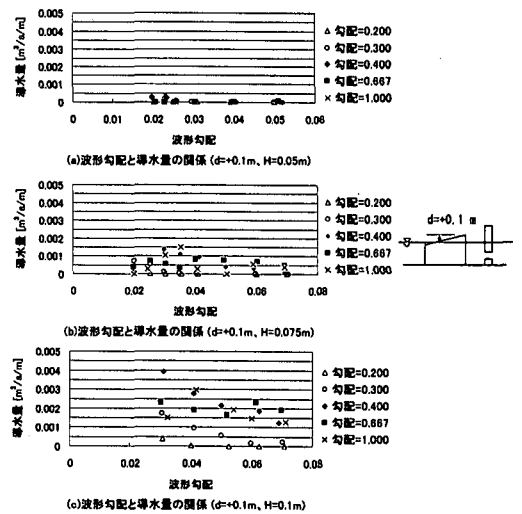


図-5 導水量計測結果 ($d = +0.1\text{ m}$)

布と似ており、以下の関数でモデル化を試みた。

$$q(d, H) = A_e \cdot \exp\left\{-0.5 \cdot \left(\frac{d/H - B_e}{C_e}\right)^2\right\} \dots (2)$$

式(2)中の A_e , B_e , C_e は堤体幅方向の傾斜勾配により決まる係数である。ここで、実験値に最も良く適合する係数を求めると以下になる。

$$A_e = 0.200, B_e = 0.333, C_e = 0.600 \dots (3)$$

これによる分布形状は、図-6の破線で示している。

3. VOF法を用いた傾斜要素の導水性能評価

VOF法は碎波等の非線形性の強い現象に対しても、安定性の高い流体計算法であり、沿岸構造物の分野でも適用例が多い。そこで、このVOF法を利用して、図-7に示すような傾斜要素の導水性能を評価する計算法を開発した。VOF法の詳細については、様々な文献にて述べられているため、ここでは省略する。本計算法では、VOF法により求まる流体の圧力場と次式の管路非定常流式を併用して、導水管内の流速を計算する。

$$\begin{cases} \frac{\beta}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha v^2}{2g} + z + \frac{P}{\rho g} \right) + \frac{\tau_0}{\rho g R} + \sum k \frac{v^2}{2g} / l_i = 0 \\ \frac{\partial}{\partial x} (vA) = 0 \end{cases} \dots (4)$$

ここで、 g ：重力加速度、 ρ ：流体密度、 v ：管内流速、 z ：位置水頭、 P ：圧力、 A ：管断面積、 α ：エネルギー係数、 β ：運動量補正係数、 k ：形状損失係数である。 l_i は管長である。また、 τ_0 , R はそれぞれ次式のように表される。

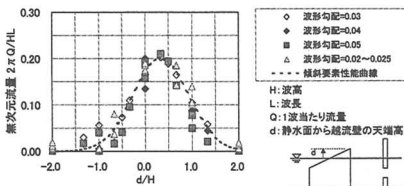


図-6 無次元流量実験結果 (傾斜勾配 0.4)

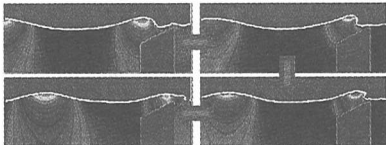


図-7 VOF法による導水量計算

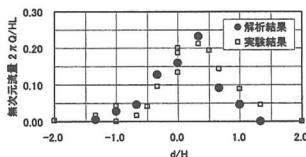


図-8 無次元導水量計算結果 (傾斜勾配 0.4)

$$\begin{cases} \frac{\tau_0}{\rho} = f \frac{v^2}{8} \\ R = \frac{A}{S} = \frac{\pi D^2/4}{\pi D} = \frac{D}{4} \end{cases} \dots (5)$$

f ：摩擦損失係数、 D ：管直径である。実用上 α , β は 1.0 の値が用いられることが多いため今回の計算でもこの値を用いると、(4), (5) 式より以下の式が導かれる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v^2}{2g} + z + \frac{P}{\rho g} \right) + f \frac{1}{D} \frac{v^2}{2g} \\ + \sum k \frac{v^2}{2g} / l_i = 0 \dots (6) \end{aligned}$$

ここで、圧力勾配に関しては管の波上側を VOF 法による圧力計算結果、波下側を静水圧とし計算する、式(6)を計算することにより次タイムステップの管内流速が求まる。この管内流速を、次タイムステップにおける VOF 法での等価な速度境界条件として用い計算が進められる。

この手法を用いて、傾斜要素の導水量について計算を行った。計算条件は傾斜勾配 0.4、波形勾配 0.04 とし、傾斜要素や遊水部の寸法については前述の実験と同様の条件を用いた。また、導水管については管の直径を 0.3 m とし、管長については実機の寸法を考慮して 0.5 m とした。形状損失係数は流入口を $k=0.5$ 、流出口を $k=1.0$ とし、摩擦損失係数については $f=0.06$ に設定した。

導水量の計算結果を、無次元流量として整理し、図-8に示す。ここで、計算される導水管内の流速は時刻暦で変動するため、導水開始後 3 周期分の平均流速から導水量を求めている。図より、越流壁天端が水面より低い場合 ($d/H < 0$) には、導水量の計算値が実験値と比較的一致している。ただし、越流壁天端が水面より高い場合には、全体として計算値が実験値に比べ低めの値となっている。これは、計算で斜面壁を階段状のメッシュで近似したために流体の遡上がスムーズに行われなかったことが原因であると考えられる。また、斜面が空气中に露出するような条件では、壁面と流体の境界条件をより工夫する必要がある、これが今後の課題であるといえる。

4. 3次元傾斜型模型による導水量計測実験及び導水量のモデル化

図-1に既に示したように、3次元傾斜型透過堤は堤体法線方向にも緩やかに傾斜している。この傾斜による導水性能への影響を調べモデル化するため、図-9に示すような3次元傾斜型模型による導水量計測試験を行った。

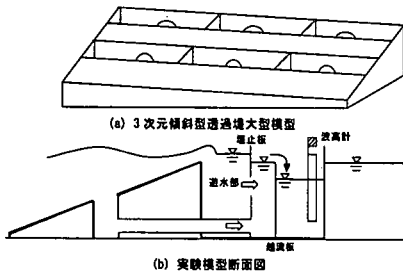
模型では、堤体法線方向に3つの遊水部を設け、全体の長さは 4.5 m (各遊水室の長さ 1.5 m × 3) とした。堤体幅方向の傾斜勾配は 0.5、堤体法線方向には 0.05 に設定した。また、傾斜越流部は前後に多段に配置され、各々

の傾斜部は幅が0.5 m、遊水部幅は0.25 mとなっている。実験では、規則波による造波を行い、水深も5段階に変化させた。導水量については、越流板背後の上昇量を計測することとした。

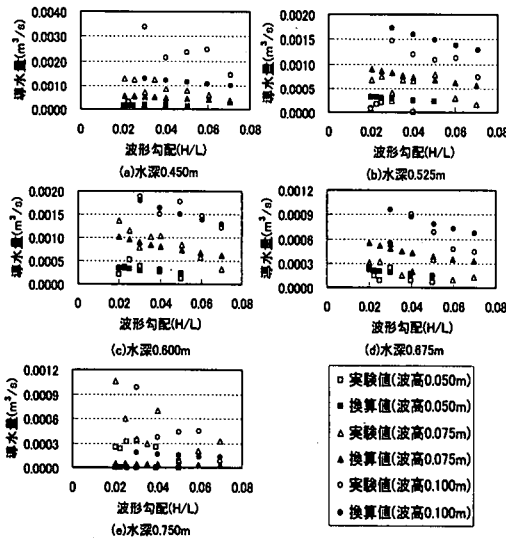
ここで、3次元傾斜型の導水量モデルについて考える。基本的には、堤体法線方向における各微小区間の断面傾斜要素に対する導水量を求め積分してゆくことで導水量が求まるはずである。既に述べたように幅方向の傾斜勾配0.4~0.667では導水量に大きな差はない。従って、傾斜勾配0.5の場合にも0.4でのモデルが適用でき、式(2)、(3)から3次元傾斜型の導水モデルは以下のように表せる。

$$Q = \int_0^l \frac{q(d(x), H) \cdot H \cdot L}{2\pi \cdot T} dx \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 x は堤体法線方向にとった座標、 Q は単位時間あたりの導水量(m^3/s)、 l は堤体長さ(m)、 H 、 L 、 T は波高(m)、波長(m)、波周期(s)である。ただし、3次元傾斜構造の場合、堤体法線方向の傾斜により導水性能の低下が発生する。よって、傾斜要素の無次元導水量 q に対して低減のための係数をかける必要があり、式(3)の



図—9 3次元傾斜傾斜型透過堤模型



図—10 導水量の実験結果及び換算値

A_e に対して次式の修正を加えた。

$$A_e = 0.200 / \exp(a_m \cdot H_m^{b_m}) \quad H_m = dh/H \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 dh は各遊水室越流天端高の堤体法線方向における高低差、 H は波高、 a_m 、 b_m は修正パラメータである。

実験結果および式(7)、(8)による導水量モデルによる計算結果を図—10に示す。ここで、式(8)における修正パラメータ a_m 、 b_m には2.50、0.175を用いた。図より、水深が0.525 m、0.600 m、0.675 mの場合には導水量が比較的精度よく推定されている。水深が干潮相当の0.450 m、満潮相当の0.750 mの場合では推定値がかなり低めの値となっている。ただし、この水深条件となる時間帯が潮汐周期に占める割合はわずかで、導水量の総量を評価する場合には実用上あまり問題とならないものと考えられる。

5. 海水交換計算法の開発と3次元傾斜型透過堤の設置効果に関する検討

3次元傾斜型の実際の設置効果を評価するには、対象海域での流況を含めて評価する必要がある。そこで、平面場の流況計算をベースとした海水交換計算法を開発した。本計算法では潮流の数値計算等に用いられる次式の2次元平面流れの基礎式を用いる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(h+\eta)U] + \frac{\partial}{\partial y}[(h+\eta)V] = 0 \dots\dots\dots (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \alpha U \frac{\partial U}{\partial x} + \alpha V \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{(\alpha-1)}{h+\eta} U \frac{\partial \eta}{\partial t} \\ + g \frac{\partial \eta}{\partial x} - f_c V \frac{g \sqrt{U^2 + V^2}}{C^2(h+\eta)} \\ = \frac{W_x}{\rho(h+\eta)} + A_h \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \alpha U \frac{\partial V}{\partial x} + \alpha V \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{(\alpha-1)}{h+\eta} V \frac{\partial \eta}{\partial t} \\ + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + f_c U \frac{g \sqrt{U^2 + V^2}}{C^2(h+\eta)} \\ = \frac{W_y}{\rho(h+\eta)} + A_h \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

ここに、 U 、 V ：鉛直平均水平方向流速、 f_c ：コリオリの係数、 α ：流速分布係数、 h ：水深、 η ：水位、 C ：シェーアの摩擦係数、 W_x 、 W_y ：風による表面応力、 A_h ：水平渦動粘性係数である。また、本計算法では海水残存率 F を用いた評価法を用いており、より定量的な海水交換評価が可能となる。 F は各セル毎に次式で計算される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial t} = - \left(\frac{\partial((h+\eta) \cdot U \cdot F)}{\partial x} + \frac{\partial((h+\eta) \cdot V \cdot F)}{\partial y} \right) / \\ \cdot (h+\eta) \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

計算初期では、この F の値を港外側計算セルで0、港内側計算セルで1とする。この F の値が小さくなるほど、

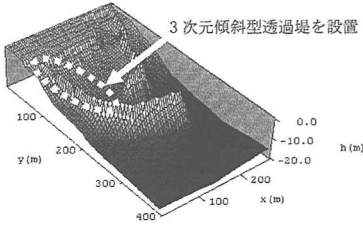


図-11 計算対象とした港の水深図

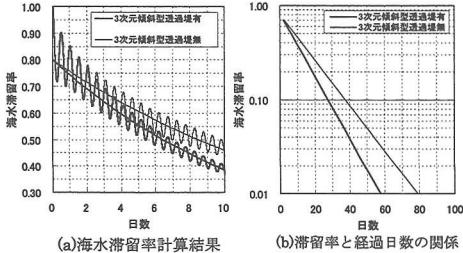


図-12 港の海水滞留率

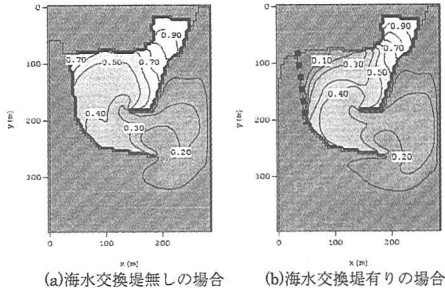


図-13 海水残存率分布 (10日後)

そのセルにおける海水交換が進んでいることになる。

本計算法を用いて、3次元傾斜型透過堤による海水交換改善効果の検討を行った。対象とした港の水深図を図-11に示す。ここでは、港を構成する防波堤の一部(総延長100m相当)を3次元傾斜型透過堤に置き換えた場合を想定した。堤体前面で有義波高0.3m、有義波周期2.00sの波浪が常に来襲するものとし、来襲波浪に応じた導水流量を式(7)、(8)にて計算した。その値を透過堤断面の平均流速に換算し、強制流速境界条件として与えた。

格子寸法は4.8×4.8m、潮汐については広島湾での大潮相当である振幅3.0m、周期は M_2 分潮相当の12時間とした。また、底面摩擦にはマニングの粗度係数 $n=0.0026$ を用い、各格子においてこれに等価なシェジャー係数を入力した。水平渦動粘性係数には0.01 m²/sの値を使用した。

港内の海水滞留率について、10日間の時刻暦計算結果を図-12(a)に示す。海水滞留率は次式で定義される。

$$R_P = V_{rm} / V_{all} \quad \text{..... (13)}$$

ここに、 V_{rm} は、計算初期ステップに港内に存在した海水の滞留分の体積であり、 V_{all} は港内海水の総体積である。ここで、 V_{rm} は、港内側計算セルにおける海水残存率 F にセル体積をかけたものの総和として計算できる。

図-12(a)より、3次元傾斜型透過堤を設置した場合の方が、そうでない場合に比べ海水滞留率の減少が早く、海水交換性の向上がみられる。また、海水滞留率の減少と経過日数の関係は指数関数で近似できる。その近似関数を用いて海水滞留率と経過日数の関係を推定したものが図-12(b)である。この図から、3次元傾斜型透過堤無しの場合には海水滞留率が1.0%になるまで78日程度である対し、有りの場合には57日程度となり、海水交換の効率が約27%向上している。図-13は10日後の海水残存率 F の分布であるが、透過堤を設置した付近を中心として港内の海水交換が進んでいることが分かる。ただし、港の奥については、海水の滞留がなかなか改善されづらい結果となっている。これについては、その付近に単純な孔空き堤を設置することで改善が見込めるものと思われ、3次元傾斜型透過堤と孔空き堤の最適な組み合わせ手法が今後の検討課題である。

6. ま と め

本研究では3次元傾斜型透過堤について実験および計算により検討を行った。得られた成果を以下に示す。

- (1) 実験により断面2次元での傾斜要素の導水特性を明らかにし、モデル化を行った。また、VOF法を用いて傾斜要素の導水性能推定ための計算法を開発し、実験との比較により高い精度で推定可能なことを確認した。
- (2) 3次元傾斜型透過堤の模型を製作し、実験を行った。実験の結果より、3次元傾斜型透過堤の導水量について、傾斜要素の導水モデルを修正・積分することにより精度の高いモデル化ができた。
- (3) 海水残存率を流況場にて移流させる海水交換計算法を開発した。それを用いて、実際の港を対象とした計算を行い、3次元傾斜型透過堤の海水交換改善効果を確認した。

参 考 文 献

- 国金博和・三橋宏次・鹿田正一・政所亮・三浦浩・高橋隆二 (1999): 秋田県金浦漁港における海水交換を目的とした防波堤の効果, 海洋開発論文集, 第15巻, pp. 445-450.
- 西守男雄・日比野忠史・鶴谷広一・石原弘一 (1999): 実海域における下部透過型防波堤の海水交換特性, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 1081-1085.
- 塩崎嶺朗・本田秀樹・堀内博・中村 宏 (2000): 海水交換機能を有する直立消波ケーソンの開発—高波浪域への適用に向けて—, 海洋開発論文集, 第16巻, pp. 481-486.
- 杉本達彦・島田 潔 (2000): 海水交換型防波堤ケーソンの研究開発, 三井造船技報, No. 171, pp. 1-7.