

傾斜堤を透過する浮遊砂の濃度評価への数値計算モデルの適用

榊山 勉* ・伊藤 裕**・小林正典***
板井雅之****・小林英次*****

傾斜堤を透過、越波する波動運動に伴う浮遊砂の移流拡散現象について、断面 2 次元の支配方程式を適用して数値計算を行った。傾斜堤内では、流速が著しく減少するために浮遊砂が堆積する。堆積した砂を計算体系から除外するために消滅項を導入した。水理実験で得られた濃度分布の 1 ケースを再現できる浮遊砂の巻上量や傾斜堤外部ならびに内部の拡散係数、消滅係数を同定し、他の 3 条件について適用した。港外側の浮遊砂濃度の鉛直分布は妥当な一致を示し、傾斜堤前面の断面平均濃度の計算結果は実験結果の 0.7 倍から 1.3 倍、透過浮遊砂の断面平均濃度の計算結果は実験結果の 0.5 倍から 1.9 倍となった。巻上係数、拡散係数、消滅係数などの設定により改善が期待できる。

1. 緒 言

東北電力東通原子力発電所専用港湾において、捨石式傾斜堤（以下、単に傾斜堤）を透過あるいは越波して港内に流入する漂砂を防止するための透過防止工の必要性を検討することになった。そこで、板井ら（2004）は、傾斜堤を透過、越波する漂砂に関する水理実験を行い、透過、越波漂砂量の算定式を求め、3 次元海浜変形モデルに導入し、港内堆砂予測手法を構築した。この結果を現地観測データにより検証し、透過防止工の要否の検討を行った。

上記モデルは平面 2 次元現象に基づくモデルで構築されている。近年、消波ブロック被覆工や捨石マウンドなどの透過性構造物の効果を扱える断面 2 次元数値解析コードが様々な現象に適用されるようになってきたが（榊山・香山, 1997; 榊山・鈴木, 1998）、透過性構造物を含む領域の物質の移流拡散現象への適用例はこれまでにない。

そこで、本研究は断面 2 次元現象を対象に、透過性構造物内の移流拡散現象に関する数値解析モデルの適用性を検討する。傾斜堤内の浮遊砂の現象は、従来の碎波帯内の浮遊砂の現象とは異なり濃度勾配が大きくなり堆積し易いことが明らかになった。このような現象に対して、導入したモデルの係数や拡散係数などの感度解析を行い、水理実験で得られた結果の再現性を検討した。

2. 浮遊砂濃度の支配方程式と境界条件

本研究で対象とする現象を図-1 に示す。従来多くの研究で対象としてきた浮遊砂の巻き上げ、移流、拡散、沈降に加えて、本研究では、傾斜堤内の浮遊砂の透過（移流、拡散、沈降）ならびに越波による港内への浮遊砂の輸送を対象とする。

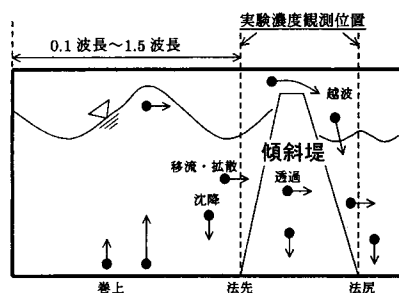


図-1 移流拡散方程式の計算領域と対象とする現象

傾斜堤内の浮遊砂の移流、拡散現象を対象とするために、物質の移流拡散方程式として式（1）を適用した。空隙率や開口率などを考慮することにより透過性構造物内の現象に適用でき、空隙率や開口率を 1.0 に設定すれば透過性構造物のない領域にも適用できる。

$$\begin{aligned} \gamma_v \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\gamma_x u C) + \frac{\partial}{\partial z}(\gamma_z w C) \\ = w_s \frac{\partial}{\partial z}(\gamma_z C) + \frac{\partial}{\partial x}(\gamma_x K_x \frac{\partial C}{\partial x}) \\ + \frac{\partial}{\partial z}(\gamma_z K_z \frac{\partial C}{\partial z}) - \lambda \gamma_v C \quad \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

ここに、 C : 濃度, u, w : 流速の水平・鉛直成分, γ_x, γ_z : 開口率の水平、鉛直成分, γ_v : 空隙率, w_s : 沈降速度, K_x, K_z : 拡散係数の水平、鉛直成分, γ : 消滅係数である。消滅項（ $-\lambda \gamma_v C$ ）の物理的な意味については後述する。

底面における境界条件で浮遊砂の巻上量 p を与える。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial p}{\partial z} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 p は漂砂フラックスの鉛直成分で、式（2）に示すように、底面での水平成分（掃流砂）は考慮していない。実験結果の浮遊砂濃度を再現するように巻上量 p を与えることにより掃流砂の浮遊砂濃度への寄与を巻上量 p に含ませることにした。

波浪場の透過境界では、通常、放射境界条件が課せられるが、今回の移流拡散方程式を対象とする透過境界で

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所
** 正会員 東北電力(株) 土木建設部
*** 正会員 工修 東北電力(株) 土木建設部
**** 正会員 工修 東北電力(株) 土木建設部
***** 正会員 工修 (株)JP ビジネスサービス

は内外の勾配を一定とし、式(3)で与えた。

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \text{constant} \quad \dots\dots\dots (3)$$

底面や不透透構造物の境界では、流速の法線成分が0で浮遊砂の移流、拡散がないので濃度勾配を0とした。

$$\frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad \text{on 鉛直壁} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad \text{on 水平壁, 底面} \quad \dots\dots\dots (5)$$

3. 計算条件

計算の対象は、板井ら(2004)の水理実験(模型縮尺1/25)の条件に一致させた。傾斜堤の断面形状を図-2と図-3に示す。図-2は東北電力東通原子力発電所専用港湾の東防波堤、図-3は南防波堤である。東防波堤は主防波堤であり、模型値で水深0.40 m、上部コンクリートの天端高さ0.22 mである。被覆ブロックにアクロポッド(質量2.3 kg、空隙率0.54)、フィルター層にガンマエル(質量0.58 kg、空隙率0.48)を使用し、本体は捨石(空隙率0.49)からなる。一方、南防波堤は副防波堤で、東防波堤より水深は浅く、水深0.24 m、上部コンクリートの天端高さ0.20 mで、被覆ブロックにはアクロポッド(質量0.93 kg、空隙率0.54)を用いている。

計算条件を表-1に示す。規則波を用い、東防波堤、南防波堤ともそれぞれ、非越波と越波の波浪条件を設定した。

水理実験は、長さ51 m、幅0.9 m、深さ1.2 mの2次元造波水路を用いて行った。使用した砂の中央粒径は0.083 mmで、 $w_s = 0.0049$ m/sである。実験で砂の移動限界を観察し、このときの波浪、水深などの条件から移動限界シールズ数 ϕ_c として $\phi_c = 0.05$ を得ている。

図-1に示すように、防波堤の法先、法尻で波高と浮遊砂濃度(鉛直方向に11点)を測定している。表-1に示す

条件を含めて全15ケースの実験を行っている。詳細については板井ら(2004)に記載されているのでここでは省略する。

表-1 計算条件(模型値、縮尺1/25)

case no.	防波堤	水深 h (m)	波高 H (m)	周期 T (s)	備考
1	東防波堤	0.40	0.196	1.6	非越波
2			0.284	2.0	越波
3	南防波堤	0.24	0.112	1.6	非越波
4			0.114	2.0	越波

4. 計算方法

計算は、1) 進行波の検定用の計算、2) 傾斜堤がある場合の波動場の計算、3) 浮遊砂の濃度に関する移流拡散の計算からなる。

1) と2) の波動場の計算には、榊山・香山(1997)の数値解析コード(PS-WAVE)を用いた。計算領域は水平方向に48 m、鉛直方向に1.16 mで、格子サイズは水平が0.02 m、鉛直が0.01 mである(格子数2400×116=278400)。計算時間間隔は $T/1600$ である。進行波検定用の計算で水理実験の進行波高と一致する造波条件を選出した。

次に傾斜堤がある場合について傾斜堤の慣性力係数 C_M と抗力係数 C_D を既往の計算例(榊山, 1998; 榊山・鈴木, 1998)を参考にして数種類設定して計算した結果、透過率が概ね一致する場合の $C_M = 1.2$ 、 $C_D = 1.0$ を採用した。傾斜堤がある場合の計算時間間隔は、非越波のcase 1とcase 3では $T/1600$ 、越波が生じるcase 2とcase 4では $T/4000$ と小さくした。これは、越波時に計算が発散しないようにするためである。

図-1に浮遊砂の移流拡散の計算領域を示した。波と浮遊砂の移流拡散では計算時間が異なる。波動運動は定常後の数波分が得られれば良く、計算時間は20波程度になるのに対して、浮遊砂濃度が定常になるまでには100波程度の計算時間を要する。このため、計算領域全体を対象に波動運動と移流拡散を計算するには膨大な時間を要する。

そこで、今回は移流拡散計算に必要な物理量を、波動運動の計算時に必要な計算領域について保存し、その後に移流拡散計算のみを行うことにした。しかし、計算領域の取り方により濃度の計算結果が異なった。原理的には砂の移動限界水深までの範囲の計算領域を設定すればよい。ここでは、港外側の断面平均濃度の計算結果と計算領域との関係を調べて決定した。

図-4に計算範囲と断面平均濃度との関係を示す。横軸は東防波堤の設置水深 h での波長 L で無次元化した法先から沖側への計算領域の範囲 l_x/L を示す。 $l_x/L = 0.1$ から1.0とした場合には、断面平均濃度が増加している。

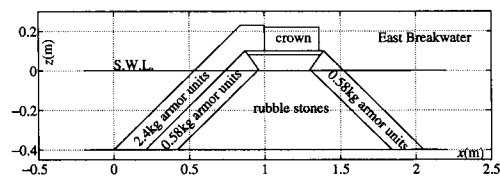


図-2 東防波堤(水深0.40 m、座標軸は模型値、縮尺1/25)

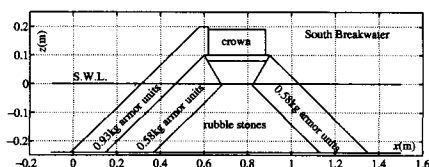


図-3 南防波堤(水深0.24 m、座標軸は模型値、縮尺1/25)

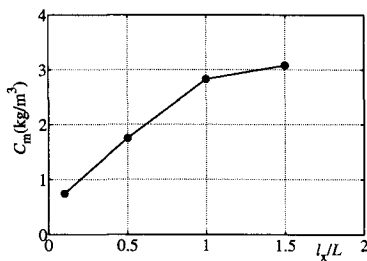


図-4 断面平均濃度と計算領域との関係

これは、底面から巻き上げられる浮遊砂の量が増えるためである。計算領域 $l_x/L=1.0$ と $l_x/L=1.5$ との比較では顕著な変化は見られないので計算領域を $l_x/L=1.5$ とした。波動運動のデータ量は約 6 GB で、移流拡散の計算時に PC への読み込み時間も無視できない程の量となった。

5. 計算における検討事項

式 (1) の移流拡散方程式には種々の係数が含まれている。これらの係数をあらかじめ設定するために、case 1 の条件について実験結果を再現するように感度解析を行った。その結果を他のケースに適用することにした。検証データとして、傾斜堤の港外法先と港内法尻で測定した浮遊砂の時間平均濃度分布を用いることにした。

浮遊砂の巻上モデルは、式 (6) に示す池野・清水 (1997) の方法を採用した。

$$p(t) = \alpha_s w_s \rho_s (\psi_i - \psi_c)^{1.5} \delta(t - t_i) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $p(t)$: 巻上量、 α_s : 無次元係数、 ρ_s : 砂の密度、 ψ_i : シールズ数、 ψ_c : 限界シールズ数、 $\delta(t)$: ディラックのデルタ関数である。式 (6) は、底面での水平流速が反転する位相 t_i で巻き上げを生じるモデルとなっている。無次元係数 α_s の値については、感度解析を行い実験結果を再現する値として $\alpha_s=2.5$ とした。

拡散係数は、防波堤外部および内部の拡散係数の水平、鉛直成分を設定する必要がある。そこで、既往の研究から拡散係数のオーダーを推定した。Nielsen (1988) は式 (7) を提案している。

$$\varepsilon_s = w_s \zeta [1.24 \exp\{-40(w_s/\bar{u})^2\} + 0.2] \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 ε_s : 拡散係数、 ζ : 砂漣高さ、 $\bar{u}$: 底面流速振幅である。砂漣高さは実験結果からの代表値として $\zeta=0.02$ m、底面流速振幅は case 1 から case 4 の条件で $\bar{u}=0.3$ m/s から 0.7 m/s を用いると、 $\varepsilon_s=1.1 \times 10^{-4}$ から 1.5×10^{-4} m²/s を得る。

本岡・山下 (1989) は粒径 0.16 mm の砂を用いた碎波帯内での浮遊砂濃度を調べた拡散係数として 1×10^{-4} から 1×10^{-2} m²/s のオーダーを得ている。佐藤ら (1993) は中央粒径 0.18 mm の標準砂を用いた不規則波実験で、碎波

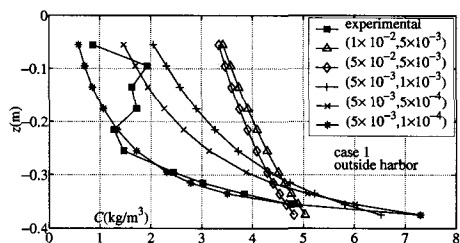


図-5 時間平均濃度の鉛直分布に及ぼす拡散係数の影響

帯内の拡散係数として 1×10^{-3} m²/s のオーダーを得ている。

以上の値を参考に試算を繰り返した。図-5 に拡散係数 (K_x , K_z) による港外の時間平均濃度の鉛直分布の変化を示す。拡散係数の水平成分が $K_x=0$ (10^{-3} m²/s) では、濃度の鉛直分布が一様に近く、実験結果とかけ離れた。図-5 の結果では (K_x , K_z) = (5×10^{-3} , 1×10^{-4}) m²/s の鉛直分布が実験結果の $z < -0.2$ の範囲でよく一致しているが、最終的には、後述するように消滅係数の影響も考慮して傾斜堤外の拡散係数を (K_x , K_z) = (5×10^{-3} , 5×10^{-4}) m²/s で与え、水平と鉛直成分の比を $K_x:K_z=10:1$ とした。

長岡 (1991) は傾斜堤内の拡散係数を塩水トレーサーを用いて推定している。水深 $h=0.24$ m、周期 $T=1.4$ s で実験を行い、波高 $H=0.098$ m で、拡散係数が 1×10^{-3} m²/s のオーダーを得ている。この値は上記の碎波帯内の値より 10 倍大きい。

試算の結果、傾斜堤内の拡散係数は傾斜堤外の拡散係数の水平、鉛直成分のそれぞれの 1/10 とした。

浮遊砂が傾斜堤を透過する過程で、傾斜堤の空隙内に沈降し、底面や捨石上に堆積する。数値計算では傾斜堤内の底面での浮遊砂濃度が非常に高くなるため、逆に底面の濃度の高い場所から港内へ拡散した。また、傾斜堤内の流速は小さく巻き上げは実験では認められなかった。数値計算では堆積した砂を浮遊砂濃度の計算の対象外として表現できていないので計算の体系から除外するために式 (1) 中に示す消滅項を導入した。消滅係数 λ は、単位体積内の浮遊砂濃度が単位時間に消滅する割合を表し単位は [T^{-1}] である。したがって、傾斜堤内で浮遊砂が底面に堆積したことによる海底地形の変化は考慮できていない。傾斜堤内の消滅係数の設定領域を底面から水深の 1/3 の範囲とした場合に case 1 の実験結果の傾向をよりよく再現できた。

図-6 に、消滅係数 λ による港内の時間平均濃度の鉛直分布の変化を示す。傾斜堤内に消滅項を設定するので、主として港内の濃度に影響を与えるが、港外側の傾斜堤法面近傍の濃度勾配も変化するので港外の濃度の鉛直分

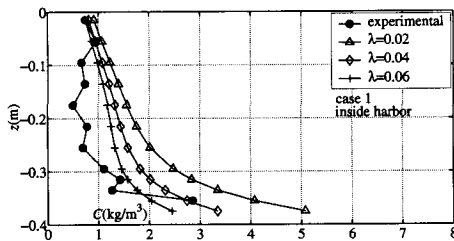


図-6 時間平均濃度の鉛直分布に及ぼす消滅係数の影響

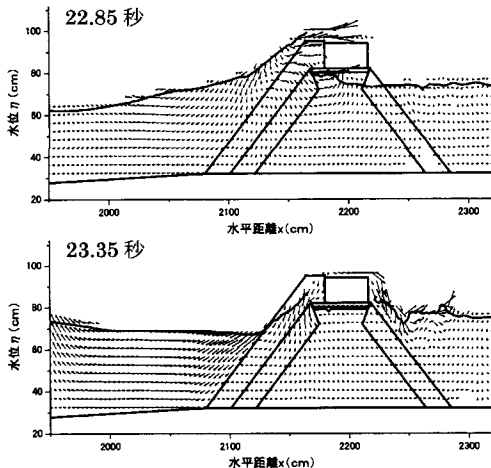


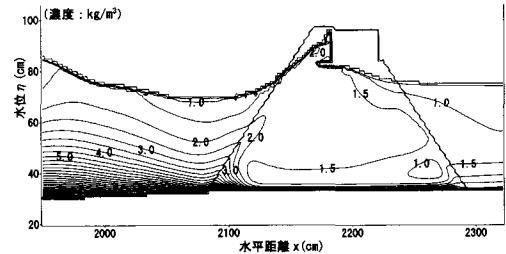
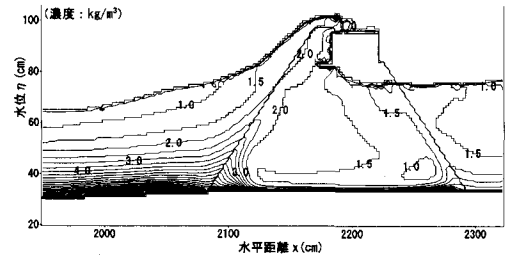
図-7 波動運動の計算結果の例 (東防波堤, case-2)

布も僅かに影響を受ける。

図-7に、PS-WAVEによる波動場の計算結果からcase 2の東防波堤の越波がある条件の流速ベクトルを示した。越波による港内への伝達波の発生が計算されている。このときの水面波形はもはや規則的な変動を示すことはなく擾乱波となって伝達していく現象が実験結果と一致した。

図-8に濃度分布の計算結果の1例を示す。傾斜堤の沖側法面に沿って濃度が高くなり、遡上波の先端で高濃度の値 (2 kg/m^3) が示されている。傾斜堤の沖側法先の底面から巻き上げられた砂が遡上波により傾斜堤内部に輸送されることは実験の観察結果と一致した。図-8(b)では越波により港内側の水面近傍の濃度が高くなっている。傾斜堤堤体内の水平方向に大きな濃度勾配がついており、堤体内の浮遊砂が堆積することを意味している。この傾向は水理実験で観察されている。

図-9に東防波堤、図-10に南防波堤について、断面平均濃度に関する計算結果と実験結果との比較を、港外と港内の全4ケースについて示した。case 1は、各係数の感度解析の対象とした結果で最も再現性が高いものである。それらの結果を他の3ケースに適用した。case 1とcase 2の東防波堤の実験の観察によると、傾斜堤法先で

(a) case-1 (非越波の条件, $H=0.196 \text{ m}$, $T=1.6 \text{ s}$)(b) case-2 (越波の条件, $H=0.284 \text{ m}$, $T=2.0 \text{ s}$)図-8 濃度分布の計算結果, 東防波堤 ($h=0.24 \text{ m}$)

巻き上げられた浮遊砂が遡上波に含まれ、遡上と流下を繰り返すことにより図-9(a)にみられる鉛直方向に複雑な分布を示すことが明らかになった。計算結果は実験結果の平均的な鉛直分布と一致している。

東防波堤と南防波堤の実験結果を比較すると水深が深い東防波堤の港内の濃度分布は鉛直方向にほぼ一様になっているのに対して、水深が浅い南防波堤では底面近傍の濃度が高い。計算結果は、南防波堤の方が値は一致していないが、この鉛直分布の傾向をよく再現している。

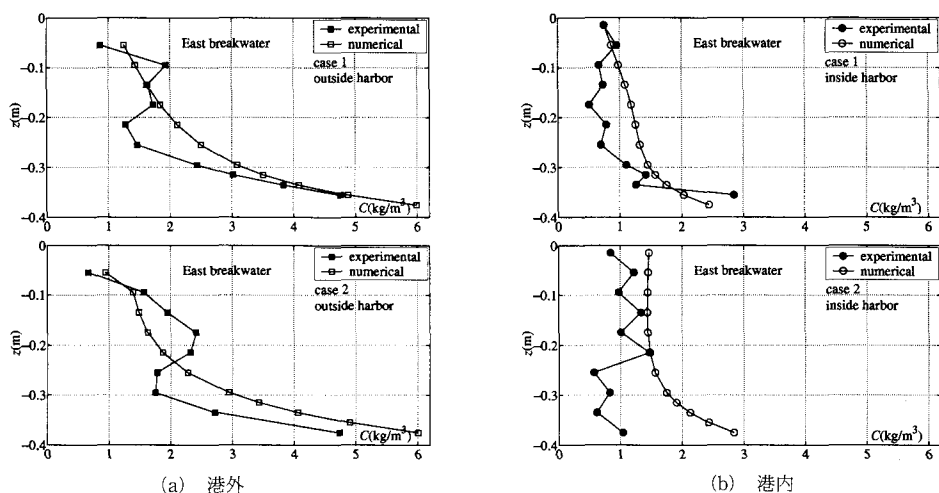
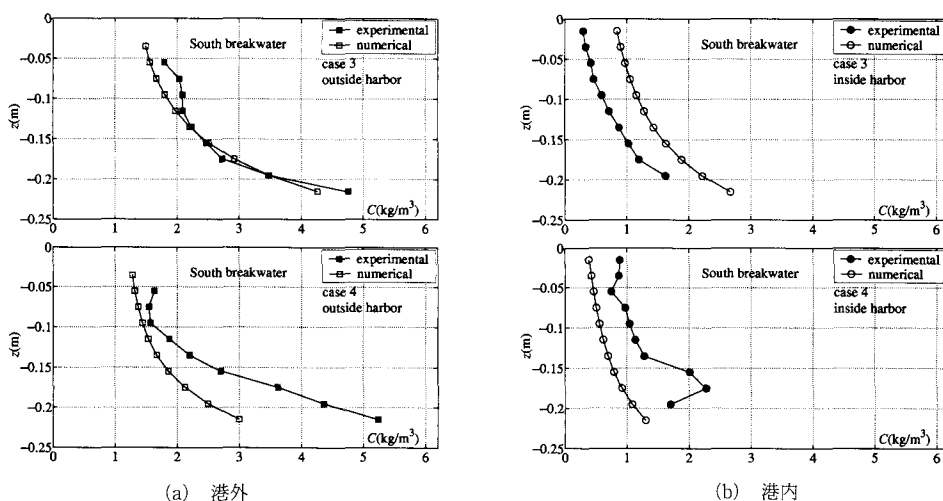
表-2に図-9と図-10の結果の計算と実験結果の断面平均濃度比をまとめた。各係数を同定したcase 1の結果は港外と港内ともに計算と実験結果との比は1.3で一致した。巻上係数の設定に改善の余地がある。港外の断面濃度比が東防波堤と南防波堤で差があることから、巻上係数が異なるものと思われる。南防波堤の港内の濃度比がcase 3で過大、case 4で過小となっている。case 4では越波が十分に再現できていないためである。

6. 結 言

本研究では、透過性防波堤内部を含む浮遊砂の移流拡散現象を断面2次元の場を対象に数値解析コードの適用

表-2 計算結果と実験結果の断面平均濃度比

ケース	港外法先	港内法尻
case 1	1.3	1.3
case 2	1.3	1.8
case 3	0.9	1.9
case 4	0.7	0.5

図-9 時間平均濃度の鉛直分布の実験結果と計算結果との比較, 東防波堤 ($h=0.40$ m)図-10 時間平均濃度の鉛直分布の実験結果と計算結果との比較, 南防波堤 ($h=0.24$ m)

性を検討した。移流拡散方程式に含まれる各種の係数を実験結果を再現するように同定した。実験条件によっては係数が変化することが示唆されるとともに、計算方法の妥当性及び有用性が確認できた。

今後は、傾斜堤前面での巻上量から洗掘量を算定することや傾斜堤体内の堆積などを考慮するなど海底地形の変化を取り入れることで防波堤法先近傍の局所洗掘の予測などへ本手法を適用していくことが可能である。

謝辞: 本研究を進めるに当たり、(財)電力中央研究所清水隆夫氏、池野正明氏から有益な助言を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

池野正明・清水隆夫 (1997): 不規則砕波帯内における浮遊砂フラックスの特性とこれを考慮した2次元海浜変形モデルの提案, 電力中央研究所報告, 研究報告, U 96037, pp. 26-29.

- 板井雅之・伊藤 裕・小林正典・池野正明・清水隆夫・櫛山 勉 (2004): 捨石式傾斜堤からの越波・透過漂砂量を考慮した港内堆砂予測手法について, 海洋開発論文集, pp. 491-496.
- 櫛山 勉・香山真祐 (1997): 砕波をとらう消波護岸への越波に数値計算, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 741-745.
- 櫛山 勉 (1998): 消波護岸の越波に関する数値計算モデルの開発, 電力中央研究所報告, 研究報告, U 97103, 27 p.
- 櫛山 勉・鈴木一宏 (1998): 数値波動水路による放水口ケーソンマウンド内の底質の吸い出し評価, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 566-570.
- 佐藤慎司・島谷 学・志村豊彦 (1993): 不規則砕波帯における浮遊砂輸送量の解析法, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 321-325.
- 高橋彰俊・佐藤慎司 (1994): ビデオ画像解析による浮遊砂濃度, 第49回年次学術講演会, pp. 728-729.
- 長岡 浩 (1991): 透過性防波堤内部における拡散係数の選定, 土木学会第46回年次学術講演会, pp. 818-819.
- 本岡 龍・山下俊彦 (1989): 砕波帯の浮遊砂濃度と拡散係数に関する実験的研究, 第44回年次学術講演会, pp. 766-767.
- Nielsen, P. (1988): Three simple models of wave sediment transport, Coastal Engineering, Vol. 12, pp. 43-62.