

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

PREDICTION METHOD FOR HARBOR SEDIMENTATION CONSIDERING SAND TRANSPORT BY OVERTOPPING AND TRANSMITTED WAVES THROUGH RUBBLE- MOUND BREAKWATER

板井雅之¹・伊藤裕²・小林正典¹・池野正明³・清水隆夫⁴・榊山勉³

Masayuki ITAI, Yutaka ITO, Masanori KOBAYASHI, Masaaki IKENO, Takao SHIMIZU
and Tsutomu SAKAKIYAMA

¹正会員 工修 東北電力株式会社 (〒980-8550 仙台市青葉区本町 1-7-1)

²正会員 東北電力株式会社 (〒980-8550 仙台市青葉区本町 1-7-1)

³正会員 工博 財団法人電力中央研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

⁴正会員 工修 財団法人電力中央研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

Rubble mound breakwater is permeable to wave, current and sediment sand. In order to reduce inflow of sediment sand through a rubble mound breakwater, impermeable countermeasures such as sheet piles etc. have been occasionally constructed behind the breakwater inside harbors at thermal or nuclear power plant sites. For evaluation on the workability of such countermeasures against transmitted sediment sand, it is necessary to elucidate transmission mechanism of sand sediment through rubble mound breakwater. In this paper, at first, characteristics of overtopping and transmitted sediment sand through rubble mound breakwater caused by waves, is investigated in detail experimentally. Based on experimental results, rates of overtopping and transmitted sediment sand are modeled. Next, these sediment models are introduced into 3-D beach deformation numerical model. This new numerical model is applied to a field area of the sea around the harbor at the Higashidori nuclear power plant site and verified by field data.

Key Words : *Rubble-mound breakwater, wave-overtopping, wave-transmission, three dimensional beach deformation model, prediction method for harbor sedimentation*

1. はじめに

火力・原子力発電所専用港湾では、捨石式傾斜堤体から透過する漂砂、波浪の侵入等による冷却水の取水機能、港内堆砂、港内静穏度等への悪影響が懸念される場合には、透過防止工として、矢板等からなる不透層を港内側に設ける対策案がある。このうち港内堆砂への効果の観点からは透過防止工の設置の可否を判断するために数値予測モデルを用いることが有効である。しかしながら、従来の三次元海浜変形モデルでは、透過性構造物内を透過する漂砂量を考慮できないのが現状である。また、捨石式傾斜堤体からの漂砂の透過メカニズムには不明な点が多いため、現象を詳細に把握する必要がある。そこで、本研究では、まず、捨石式傾斜堤における波浪の越波・透過により港内に流入する漂砂量の特性について水理模型実験より詳細に検討した。実験に基づき、越波・透過漂砂量モデルを検討し、これらを

三次元海浜変形モデルに新たに導入することにより、港内堆砂予測手法を改良し、これを用いて東北電力(株)東通原子力発電所専用港湾における現地適用性について検討を行った。

2. 検討方法

図-1 に本研究の検討フローを示す。まず、捨石式傾斜堤における透過波、流れ、港外浮遊砂濃度と越波・透過漂砂量との関係を詳細に把握するために水理模型実験を実施した。実験に基づき越波・透過漂砂量の算定モデルの検討を行った。この際、PS-WAVE を用いた二次元数値解析¹⁾を援用し、堤体からの透過波を再現できるように、三次元海浜変形モデル中で堤体を模擬するためのエネルギー減衰係数(後述)を同定した。次に、堤体からの越波・透過漂砂量モデルを付加した三次元海浜変形モデルを用いて港内堆砂予測を行い、図-2 に示す東通原子

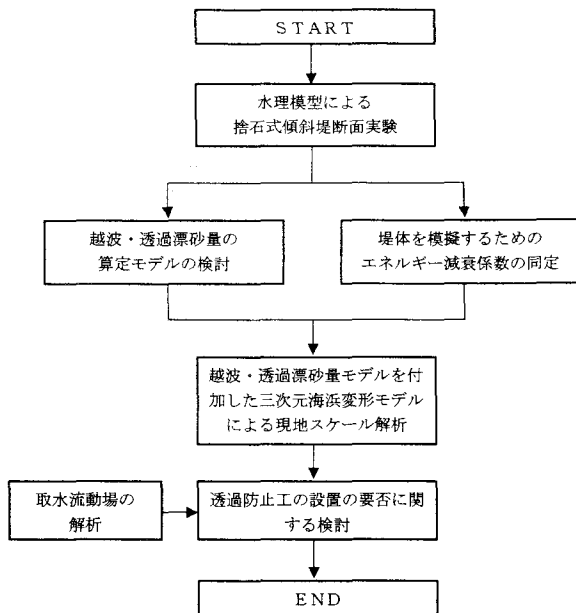


図-1 本研究の検討フロー

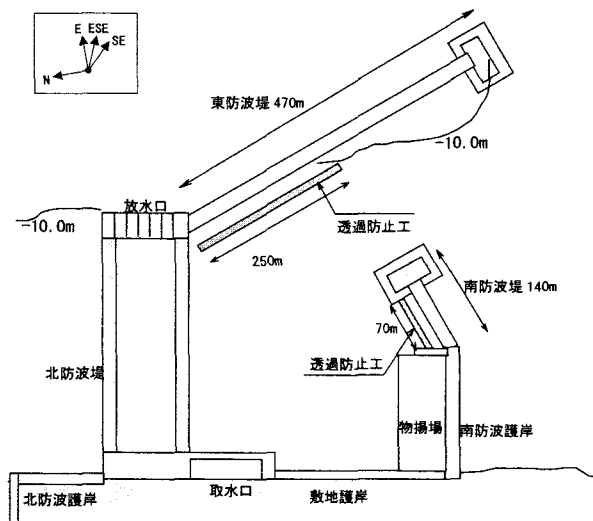


図-2 東通原子力発電所専用港湾平面図

力発電所専用港湾における透過防止工の設置要否の検討を行った。

3. 水理模型実験による捨石式傾斜堤からの越波・透過漂砂量の検討

捨石式傾斜堤の越波・透過漂砂メカニズムを検討するために水理模型実験を行った。

実験に採用した捨石式傾斜堤（東防波堤）の断面を図-3に、実験装置と測定機器の配置を図-4に示す。なお、実験では透過防止工は設置していない。傾斜堤断面模型は2次元造波水路内の可変海底勾配装置上に設置した。模型縮尺は1/25とし、捨石式傾斜堤前面は0.083mmの砂(模型値)を用いた厚さ16cm(模型値)、勾配1/50の斜面に均した移動床とした。水路下部には水路内の循環流を発生させるためのポンプと管路があり、上部コンクリート上を越

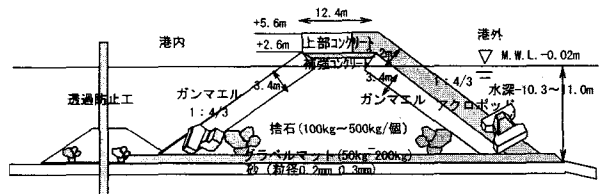


図-3 捨石式傾斜堤の断面図（東防波堤）

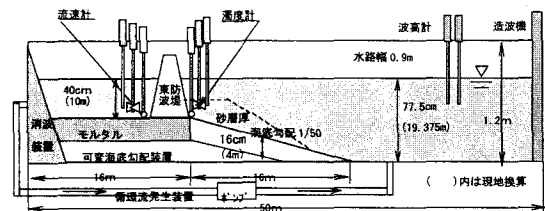


図-4 実験装置と測定機器の配置（東防波堤）

波して流入する水を港外側に排出させた。傾斜堤を境とする港内外の浮遊砂濃度と流速は港内外の法先位置に濁度計と流速計を設置し、鉛直方向に移動しながら約1mピッチで測定した。また、上部コンクリート上を通過する越波量は越波升で、越波に含まれる浮遊砂は越波升中に取り付けてあるプランクトンネットにトラップされた砂を回収し、乾燥後その重量を測定した。

なお、実験は東・南防波堤それぞれについて波高、周期、波浪の種類を変化させた表-1のケースについて行った。

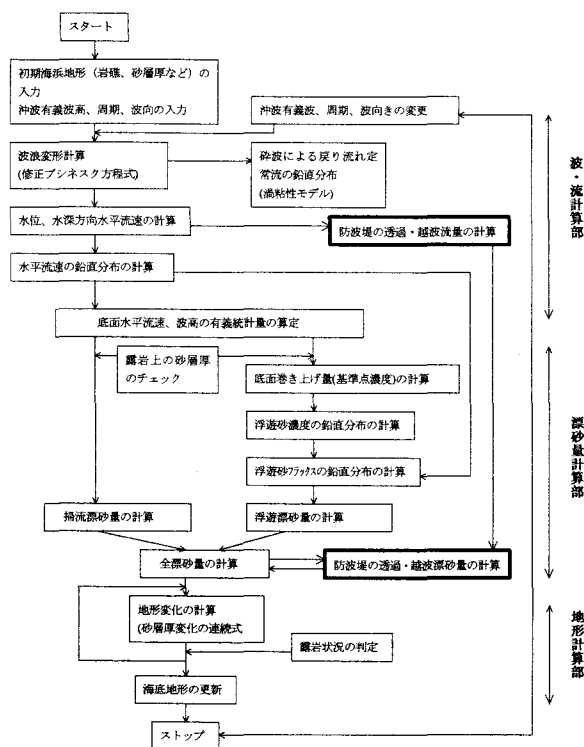
表-1 実験ケース

実験ケース	防波堤	波浪の種類	越波・非越波	波高(m)	周期(s)	港外側前面水深(m)
C-1	東防波堤	規則波	非越波	4.9	8.0	-10.0
C-2	東防波堤	規則波	非越波	4.9	10.0	-10.0
C-3	東防波堤	規則波	越波	7.1	10.0	-10.0
C-4	東防波堤	規則波	非越波	2.8	8.0	-10.0
C-5	東防波堤	不規則波	非越波	4.0※	8.0	-10.0
C-6	東防波堤	不規則波	非越波	4.0※	8.0	-5.0
C-7	東防波堤	規則波	越波	5.5	10.0	-10.0
C-11	南防波堤	規則波	非越波	2.8	8.0	-6.0
C-12	南防波堤	規則波	非越波	2.2	8.0	-6.0
C-13	南防波堤	規則波	越波	2.9	10.0	-6.0
C-14	南防波堤	規則波	非越波	1.0	8.0	-4.0
C-15	南防波堤	規則波	非越波	2.2	8.0	-4.0

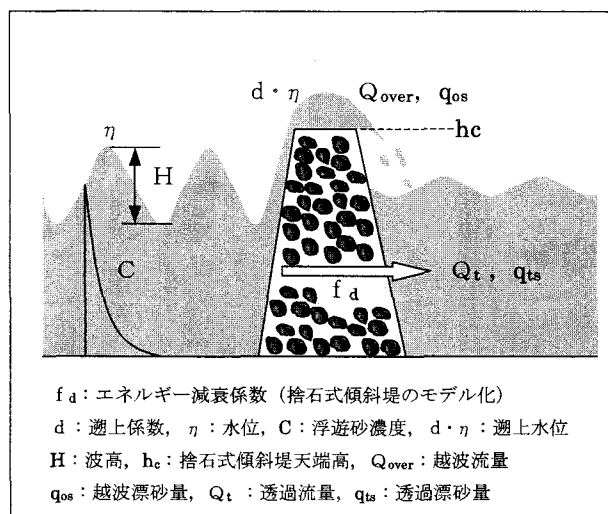
※不規則波の波高4.0mは規則波換算で波高2.8mに相当する。

4. 捨石式傾斜堤の越波・透過漂砂量を考慮した港内堆砂予測モデル

池野らは、東通地点において1999年6月～2000年5月の1年間を対象に三次元海浜変形モデルの検証計算を行い、観測値と良好な一致を確認している²⁾。そこで、池野らの三次元海浜変形予測モデルに越波・透過漂砂量モデルを導入し、捨石式傾斜堤からの越波・透過漂砂量を付加した。三次元海浜変形モデルの全体構成を図-5に示す。このうち、太枠で囲んだ部分が、本研究で新たに付加した部分である。なお、捨石式傾斜堤からの越波・透過漂砂量モデルの記号の定義を図-6に示す。



図－5 三次元海浜変形モデルの全体構成

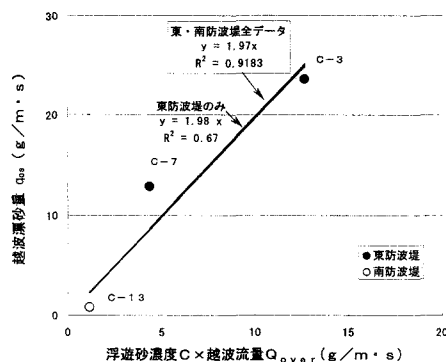


図－6 捨石式傾斜堤の越波・透過漂砂モデルの記号の定義図

(1) 捨石式傾斜堤のエネルギー減衰係数

三次元海浜変形モデルにおける波浪変形計算では、捨石式傾斜堤からの透過波をエネルギー減衰係数でモデル化した。東・南防波堤のエネルギー減衰係数は、PS-WAVE による断面実験の現地スケール解析を援用¹⁾して、捨石式傾斜堤背面の波高分布から波高伝達率を設定し、この伝達率を再現するように三次元海浜変形モデルにおける捨石式傾斜堤のエネルギー減衰係数を決定した。

(2) 越波漂砂量モデル



図－7 浮遊砂濃度×越波流量と越波漂砂量の関係

a) 越波流量算定式

越波流量 Q_{over} は森屋・水口(1996)³⁾ にならい以下の算定式を用いた。

$$\begin{cases} Q_{over}(t) = \frac{2\sqrt{2g}}{3} \cdot m_1 (d \cdot \eta(t) - h_c)^{3/2} & d \cdot \eta(t) \geq h_c \\ Q_{over}(t) = 0.0 & d \cdot \eta(t) < h_c \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 d は遡上係数、 h_c は捨石式傾斜堤天端高、 m_1 は越流パラメータである。

三次元海浜変形モデルでは、波が捨石式傾斜堤の斜面に沿って競り上がり、捨石式傾斜堤天端高 h_c を越えていく様子を模擬できない。そこで遡上係数 d (海岸施設設計便覧 2000 年版⁴⁾) を導入して、遡上水位 $d \cdot \eta$ を求め、越波流量 Q_{over} を算定する。

遡上係数 d は実験に基づき、東防波堤で 1.71、南防波堤で 2.39 とした。

東・南防波堤における(1)式の越流パラメータ m_1 は、実験に基づき 2.0 とした。

b) 越波漂砂量係数

越波では防波堤前面の水が直接防波堤の内側に運ばれるため、越波漂砂濃度は港外側防波堤前面の浮遊砂濃度 C と越波流量 Q_{over} に依存する。また、浮遊砂濃度 C は波高のほか砂の粒径や水深にも依存するため、越波漂砂量 q_{os} を次式で表現すれば、砂の粒径や水深の影響も陰的に反映できる。

$$q_{os} = \alpha C \cdot \overline{Q_{over}} \quad (2)$$

ここで、 α は越波漂砂量係数、 $\overline{Q_{over}}$ は時間平均越波流量である。

図－7 に水理模型実験より得られた $C \cdot \overline{Q_{over}}$ と越波漂砂量 q_{os} の関係（模型値）を示す。

ここでは、東防波堤および南防波堤の結果を合わせて示し、越波流量と越波漂砂量の比例係数 α は 1.97 と定められる。 α は無次元係数のため、現地スケール計算にも同じ値を用いる。

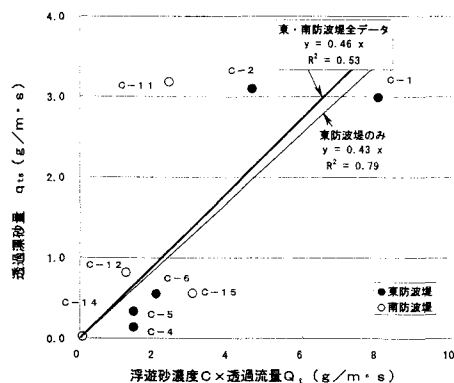


図-8 浮遊砂濃度×透過流量と透過漂砂量の関係

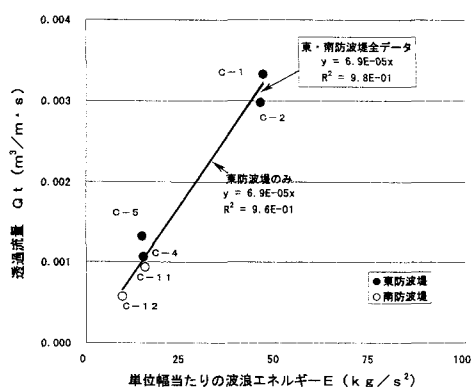


図-9 単位幅当たりの波浪エネルギーと透過流量の関係

(3) 透過漂砂量モデル

a) 透過流量と透過漂砂量

透過漂砂量は捨石式傾斜堤の透過流量 Q_t と港外側の防波堤前面の浮遊砂濃度 C に依存する。このため、透過漂砂量 q_{ts} は次式により表すことにする。

$$q_{ts} = \beta_1 \cdot C \cdot Q_t \quad (3)$$

ここで β_1 は透過漂砂パラメータである。図-8に東防波堤及び南防波堤の水理模型実験より得られた $C \cdot Q_t$ と透過漂砂量 q_{ts} の関係を示す。この図より β_1 は0.46となる。

b) 波のエネルギーと透過流量

しかしながら、三次元海浜変形モデルは、捨石式傾斜堤の透過流量と港口から入ってくる波の流れを分離して区別することができない。すなわち透過流量 Q_t を直接求めることができない。一方、港外側の波のエネルギーと透過流量 Q_t とは以下の関係がある。

$$Q_t = \beta_2 \cdot E \quad (4)$$

ここで、 β_2 は防波堤前面の波のエネルギー E と透過流量 Q_t との比例係数である。また、波のエネルギー E は次のように表される。

$$E = \frac{1}{8} \rho \cdot g \cdot H^2 \quad (5)$$

ここで、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 H は防波堤への入射波高である。図-9に水理模型実験結果より得られた波のエネルギー E と透過流量 Q_t の関係を示す。この図より β_2 は 6.9×10^{-5} と定められる。

c) 港内透過漂砂量

以上より、透過漂砂量係数を $\beta = \beta_1 \cdot \beta_2$ として透過漂砂量を求めると次のようになる。

$$q_{ts} = \beta \cdot C \cdot E \quad (6)$$



図-10 港内堆砂比較計算結果

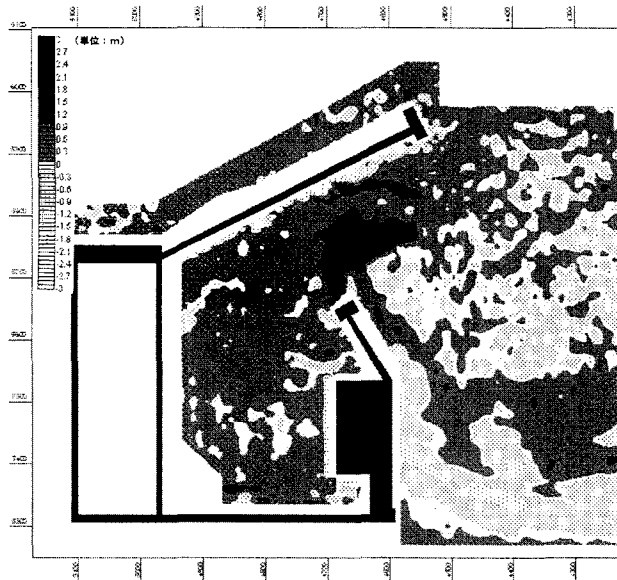


図-11 港内堆砂実測

ここで β は 0.0000317 となる。なお、現地計算での β は有次元係数のため、現地スケール換算 (1/5 倍) した β ($=6.35 \times 10^{-6}$) を用いる。

5. 現地スケール計算の検証

上記の越波・透過漂砂量を考慮した港内堆砂予測手法を用いて東通地点の港内堆砂予測計算を行った結果を図-10 に示す。現地の砂の粒径は 0.25mm である。計算期間は 2002 年 12 月から 1 年とした。波浪条件は、東通地点の 2000~2002 年波浪統計値より、E, ESE, SE の 1 年間の平均的な値を用いた。また、時化モデルは 2002 年に観測された時化数、時化順番に従って作成した。

これに対し、2002 年 6 月~12 月までの堆砂量の実測値を図-11 に示す。港内浚渫した時期を避けたため、比較対象時期が異なっているが計算値と比較すると、南防波堤先端部における堆砂、海浜部の侵食状況が同様の傾向を示している。また、捨石式傾斜堤からの透過を考慮したことにより、防波堤背面の砂が港内側に移動している状況も再現されており、本手法が港内堆砂予測に適用可能であることがわかった。

なお、上記港内堆砂予測手法における越波・透過漂砂量モデルの現地適用性については、PS-WAVE による現地スケール計算結果によりクロスチェックした¹⁾。

6. 透過防止工の設置効果に関する検討

次に上記港内堆砂予測手法を用いて、東通地点における透過防止工の要否に関する検討を行った。

(1) 初期地形・波浪条件

初期地形として 1999 年 6 月に測量された、水深、砂層厚、汀線位置データを元に地形データを作成した。

池野ら²⁾ が上記波浪統計データをもとに時化モデルを作成していることから、本検討ではこの時化モデルを用いた。

時化モデルでは、1999 年 6 月~2000 年 5 月の 1

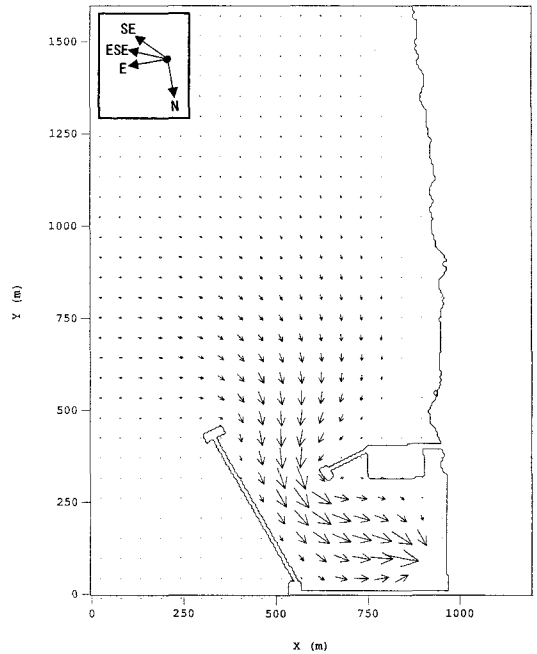
表-2 入力波浪モデル(1999 年 6 月~2000 年 5 月 観測値)

入力波浪モデル	波向	波高	周期	出現度数	再現時間
WAVE1	ESE	2.5m	8s	147	294 時間
WAVE2	ESE	4.0m	9s	40	80 時間
WAVE3	E	2.5m	8s	115.5	231 時間
WAVE4	E	4.0m	8s	51.5	103 時間
WAVE5	SE	2.5m	8s	53	106 時間

表-3 時化モデル(1999 年 6 月~2000 年 5 月)

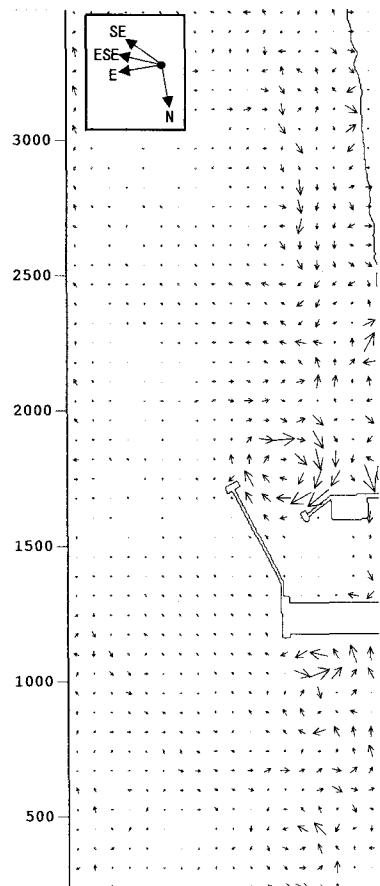
時化モデル	波向	入力波浪モデルの組み合わせと作用時間	時化回数
①	ESE	WAVE1 (24.5h)+WAVE2 (13.3h)+ WAVE1 (24.5h):2.6day	6 回
②	E	WAVE3 (28.9h)+WAVE4 (25.8h)+ WAVE3 (28.9h):3.5day	4 回
③	SE	WAVE5 (33.5h):2.2day	2 回

年間に来襲した波浪データのうち、有義波高 2m 以上のデータのみを抽出し、表-2 に示す入力波浪モ



スケール： → 0.1m/s

図-12 取水流動場の計算結果



スケール： → 0.1m/s

図-13 WAVE1 による波浪流動場の計算結果

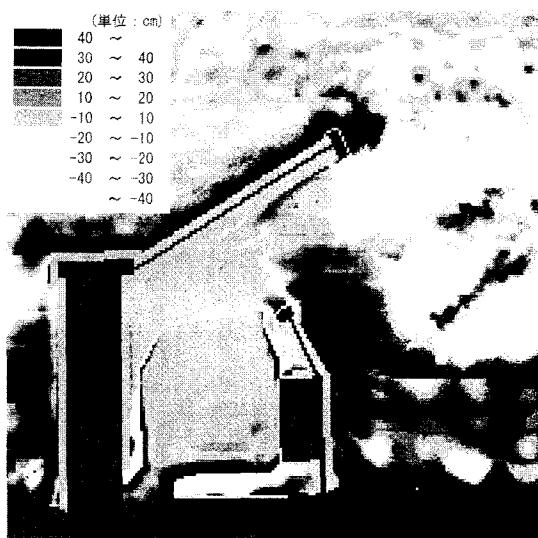


図-14 港内堆砂予測結果（透過防止工なし）

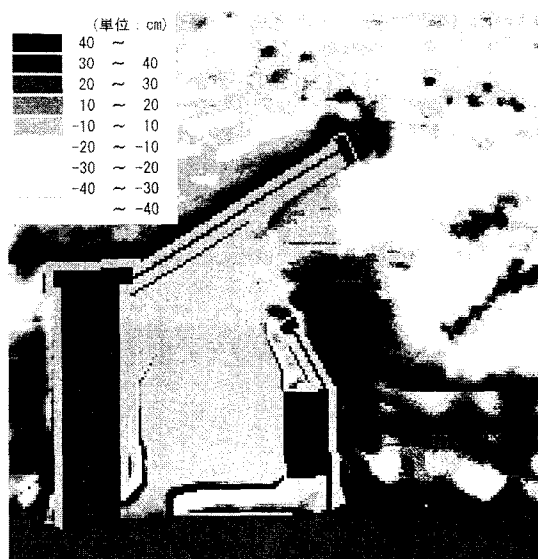


図-15 港内堆砂予測結果（透過防止工あり）

デルを作成し、波向別に表-3 に示す時化モデルを作成した。時化モデルの作用順番は観測の波向き順に従い、以下のようにした。

①→③→②→①→①→①→②→②→②→①→③→①

(2) 流動場の計算

取水は東通原子力発電所 1 号機のみが定格運転した条件である $80\text{m}^3/\text{s}$ とした。取水流動場の算定は、長波方程式を基本式とした平面二次元流れ解析モデルにより定常流動場を求め、入力波浪モデル WAVE 1～WAVE5 で得られた海浜流場に重ね合わせを行った。取水流動場の計算結果を図-12 に、海浜流場の一例として WAVE1 で得られた透過防止工なしの場合の計算結果を図-13 に示す。

(3) 港内堆砂量計算

図-14, 15 は透過防止工を設置した場合と設置しない場合の 1 年後の堆砂量を予測した計算値を示

したものである。解析の結果、両者の港内堆砂量の差は約 500m^3 で、港口部からの流入量が 7～8 割と支配的であるため、対策工による堆砂低減効果が顕著に現れないことがわかった。

7. おわりに

本研究の主要な結論を以下に示す。

- 1) 水理模型実験により捨石式傾斜堤内における越波・透過漂砂量と港外浮遊漂砂フラックスの関係を明らかにし、その係数を同定した。
- 2) 実験に基づき越波・透過漂砂量モデルを構築し、これを三次元海浜変形モデルに導入して、港内堆砂予測手法を改良した。現地観測データとの比較により本手法の現地適用性を検証した。
- 3) 本手法により東通地点における透過防止工の要否の検討を行った。その結果、港内への堆砂の流入は港口からの流入が支配的であり、透過防止工による堆砂低減効果が顕著に現れないことを明らかにした。

今後は港内堆砂量を最小化する最適浚渫形状の検討等、東通原子力発電所専用港湾の維持管理コスト低減に向け、本手法を十分に活用したい。

謝辞：水理模型実験については株式会社セレスの長谷川寛氏、数値解析については株式会社 P ビジネスサービスの小林英次氏に多大なるご協力を得ました。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 榊山勉、伊藤裕、小林正典、板井雅之、小林英次：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、海岸工学論文集、第 51 巻（投稿中）
- 2) 池野正明・清水隆夫・小林英次・石井敏雅・斉藤知秀：露岩域を有する砂浜海岸に港湾を建設する場合の 3 次元海浜変形数値予測モデルの適用、海岸工学論文集、第 48 巻、pp. 561-565, 2001.
- 3) 森屋陽一、水口優：回折散乱波を考慮した越波問題、海岸工学論文集、第 43 巻、pp. 711-715, 1996.
- 4) 土木学会：海岸施設設計便覧 2000 年版、pp. 312, 2000.
- 5) 榊山勉・阿部宣行・鹿島遼一：ポーラスモデルによる透過性構造物周辺の非線形波動解析手法の開発、海岸工学論文集、第 37 巻、pp. 554-558, 1990.
- 6) 池野正明・清水隆夫：不規則波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 U96037、pp. 26-29, 1997.
- 7) 斉藤知秀、内海博、清水隆夫、池野正明：捨石式傾斜堤内の砂の透過性に関する実験的研究、第 58 回土木学会年次学術講演会、pp. 657-658, 2003.