

取水流の卓越する砂・シルト混合堆積域における 海底地形変化予測モデル

金山 進¹・植木一浩²・木村秀峰³

砂・シルトの混在, 露岩域を含む限定的な土砂堆積, 構造物による 3 次元的な流れといった解析上の課題を有する発電所取水路開渠内の地形変化予測モデルを構築した。地形変化の進行状況に応じて, 流れと地形変化の計算を繰り返して海底地形と流況場の相互干渉を考慮するものである。流れの計算には 3 次元モデル, シルトによる地形変化については巻き上げ項と沈降項を含む 3 次元の移流拡散モデル, 砂による地形変化については局所漂砂量モデルを基本に, 限定的な堆砂厚やシルトの混在による補正を加えたものであり, 実在のサイトへの適用によってその有用性について検討した。

1. はじめに

取水港湾方式の発電所における取水路開渠内の海底は, 砂とシルトが混在する領域であるとともに, 既往の漂砂量則がそのまま適用できるほどの十分な土砂堆積厚を有さず, 随所に露岩域を有する状態となっていることが多い。また, 取水路開渠内にカーテンウォール等の構造物が設置されている場合, これにより流況場も 3 次元的なものとなる場合が多い。

本研究では, このように多くの技術的課題が残されている取水路開渠内の海底地形変化予測モデルの構築を試みるとともに, 東京電力(株)福島第二原子力発電所の取水路開渠内の海底地形変化の解析に適用し, その有用性, 課題について検討した。

2. 砂・シルト混合域における海底地形変化予測モデル

(1) モデルの概要

海底地形変化の解析を精度良く行うためには, 海底形状の変化が波浪および流況に及ぼす影響を考慮することが重要であり, 可能であれば波浪・流況計算における時間ステップの更新にあわせて地形変化を逐次計算することが望ましい。しかしながら, 数ヶ月から数年という長い期間を対象にこれを行うことは計算所要時間の観点から現実的とはいえない。したがって, 今回のモデルにおいても長期間の予測に対して広く用いられているように, 外力場の更新は地形変化の逐次計算よりも粗い間隔で行うこととし, 図-1 に示す計算フローのように, 地形変化の進行や条件の変化に応じて外力場を算定しなおすことによって地形の変化が外力場に及ぼす影響をフィードバックさせる方法を採用した。多くの場合, 外力場の算

定は実スケールにして 2 時間程度, 地形変化の計算は数日から数十日という配分となる。

ただし, 地形変化の逐次計算においては外力場を算定した時点での線流量は次回の外力更新まで維持されるように流速場を調整するという操作を行った。したがって, 外力更新の間隔があまり長くなることは精度の観点から望ましくなく, 適切な更新間隔の設定が本モデルにおいても重要な要素となる。

(2) 外力場の計算モデル

波浪場および流速場の算定手法は, 対象とする問題の特性に応じて適切なものを選択する必要があるが, 流速場が卓越する条件を対象とする今回のモデルでは, 波浪場は予め算定された波高比分布に入射波高を随時乗ずることによって求め, 流速場のみ地形変化の進行や条件の変化に応じて算定し直すこととした。

取水路開渠内においてはカーテンウォール等の存在に

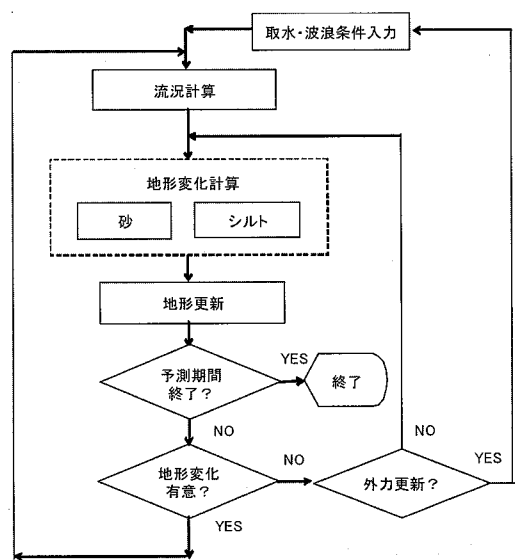


図-1 計算フロー

1 正会員 博(工) 五洋建設(株)技術研究所 課長
2 修(工) 東電設計(株)火力原子力土木部 グループマネージャー
3 東京電力(株)福島第二原子力発電所 主任

よって流況場の3次元性が無視できなくなる領域があることを想定して、流速場の計算には静水圧近似に基づく3次元モデルを用いた。前述の線流量保存のための補正は、スタガードメッシュの計算格子の流速定義線上を通過する流量、すなわち線流量が地形変化進行中でも最新の外力更新時と同じ値に維持されるように、全層の流速に同じ比率を乗じるという便宜的な方法を採用した。

(3) 砂層厚および砂・シルトの混在を考慮した漂砂モデル

砂による地形変化は、各地点における局所漂砂量フラックスの空間勾配とその地点の水深変化がバランスする漂砂の連続式(1)によって計算する。ただし、砂・シルトの混在比率や移動可能な砂の量が随時変化する効果を反映させるべく補正を施した。

$$\frac{\partial \eta_b}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

ここで、 η_b : 海底地盤高、 (q_x, q_y) : (x, y) 方向の漂砂量フラックスである。今回は、流れが卓越する場であるとともに波自体による漂砂が概ね相殺される長期予測であることから、流れによるもののみを評価することとし、漂砂量フラックスは、渡辺(1981)に基づき式(2)および式(3)によって算定した。

$$q_x = A_c \frac{1}{\rho g} (\tau_m - \tau_c) U \cdot \alpha \quad (2)$$

$$q_y = A_c \frac{1}{\rho g} (\tau_m - \tau_c) V \cdot \alpha \quad (3)$$

ここで、 τ_m は波・流れ共存場における底面せん断応力の最大値、 τ_c は限界掃流力、 (U, V) は (x, y) 方向の定常流速、 ρ : 海水の密度、 a は砂含有率や残存堆砂層厚に応じた漂砂量の補正係数である。 A_c は流れによる漂砂量係数であり、清水ら(1996)によれば波による漂砂量係数 A_w および B_w を用いて以下のように与えられる。

$$A_w = B_w w_0 \frac{\sqrt{0.5 f_w}}{(1-\lambda) s \sqrt{g D}} \quad (4)$$

$$A_c = 10 A_w \quad (5)$$

ここで、 w_0 は砂粒子の沈降速度、 f_w は摩擦係数、 λ は空隙率、 s は水中比重、 D は砂粒子の粒径である。摩擦係数 f_w は、田中・Sana(1996)の波・流れ共存場の摩擦則を用いて求める。

なお、今回は、波・流れ共存場の摩擦則を用いて底面せん断応力を算定する際の流速としては鉛直平均流速を用い、式(2)および式(3)に現われる流速 (U, V) としては3次元流況計算結果の最下層の流速を用いた。

次に、式(2)および式(3)における補正係数 α について整理する。前述の通り、残存堆砂層厚や砂含有

率に応じて漂砂量フラックスに補正を施すものであるが、 d_0 と d_1 の2つの未定係数を設定し、現地の地形変化に対する再現性が得られるように調整する。補正係数 α は残存堆砂層厚の効果 α_0 と砂含有率の効果 α_1 の積として以下のように表される。

$$\alpha = \alpha_0 \times \alpha_1 \quad (6)$$

既往の漂砂量則は、砂が十分に存在する場合を対象としたものであるが、今回のように地形変化とともに残存する砂が減少あるいは消失してしまう場合には漂砂量則通りの砂移動は発生しないと考えられるため、池野ら(2001)に倣い、基準となる堆砂厚 d_0 を設定し、地形変化の逐次計算の過程における各地点での残存堆砂厚 d_w との大小関係により α_0 を以下のように与えることとした。

①砂が十分に堆積 ($d_w > d_0$) $\rightarrow \alpha_0 = 1$

②砂が限定的に存在 ($0 < d_w < d_0$) $\rightarrow \alpha_0 = d_w / d_0$

③砂が存在しない ($d_w < 0$) $\rightarrow \alpha_0 = 0$

ここで、 d_0 は各格子点における砂が漂砂量則通りの移動を行うために必要な堆砂厚と考えることができる。池野ら(2001)においては、この厚さを砂漣高さの1/2と明確に規定しているが、流れが卓越する取水路開渠内の外力条件では必ずしも砂漣が形成されるとは限らないこともあり、今回のモデルでは基準堆砂厚 d_0 は未定係数として扱うこととした。

砂・シルト混在比率の効果 α_1 は、単純に対象地点での堆積土砂に含まれる砂成分の比率で表わされるものと仮定した。シルトの含有比率が高くなると粘性の効果などが無視できなくなるため、この仮定は問題を有するといわざるを得ないが、シルトの存在比率が高くなればその場所での漂砂フラックスが低減するという方向性自体には大きな問題はないと考え、今回はこの仮定を採用することとした。

計算開始以降の砂およびシルトの堆積量は逐次算定されるが、各格子点における砂・シルト混在比率を求めるためには計算開始前に堆積していた砂・シルトも考慮に入れる必要がある。この際に、計算開始時点での海底面からどの程度の厚さを考慮するかという問題が生じるが、この厚さを参照堆積厚 d_1 として定義し、これも未定係数として扱うこととした。

厳密には、各格子点における砂・シルトの堆積履歴を記憶し、地形変化の逐次計算の時間ステップ毎に移動する層厚分の砂・シルト混在比率を算定することも考えられるが、これは多大な記憶容量が必要となるとともに、初期条件として与える砂・シルト比率にも鉛直分布の情報が要求されることもあり、今回は、上記のような便宜的手法を採用した。

なお、砂・シルト混在域における基準堆砂厚 d_0 と残存堆砂厚 d_w は砂成分のみを対象に定義され、砂自体が十分に存在する場所であってもシルトが共存すればその比率に応じて漂砂フラックスが低減されるモデルとなっている。

(4) シルトによる地形変化モデル

シルトによる地形変化の計算には、沈降、堆積および巻き上げを考慮した3次元の移流拡散方程式を用いる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + (w - w_s) \frac{\partial C}{\partial z} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (7)$$

C は浮遊シルト濃度、 (u, v, w) および (K_x, K_y, K_z) はそれぞれ (x, y, z) 方向の流速および拡散係数、 w_s はシルトの沈降速度である。海底面 ($z = -h$) においては式 (8) のように、巻き上げフラックス E と沈降フラックス D が加わるが、今回は、それぞれ式 (9) および式 (10) によって与える。

$$K_z \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=-h} = E - D \dots\dots\dots (8)$$

$$E = \begin{cases} M(\tau/\tau_e - 1) & ; \tau \geq \tau_e \\ 0 & ; \tau < \tau_e \end{cases} \dots\dots\dots (9)$$

$$D = \begin{cases} w_s C_b (1 - \tau/\tau_d) & ; \tau \leq \tau_d \\ 0 & ; \tau > \tau_d \end{cases} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 τ は海底面せん断応力、 τ_e は巻き上げ限界掃流力、 M は巻き上げ定数、 τ_d は沈降限界掃流力、 C_b は海底面直上における浮遊シルト濃度である。

なお、以上の移流拡散モデルは、地形変化の逐次計算の全期間を通じて駆動するのではなく、外力場更新時に

合わせて濃度分布が平衡状態に落ち着くまでの時間のみ逐次計算が行われ、シルトによる地形変化は、基本的には、平衡状態における巻き上げ・沈降フラックスの平面分布を逐次重ね合わせることによって求める。地形変化の進行に伴う底面せん断応力 τ の変化は、式 (9) および式 (10) によって巻き上げフラックスおよび沈降フラックスに反映させることができるが、沈降フラックスに含まれる底面濃度 C_b については、移流拡散計算によって濃度場を更新しない限り地形変化進行の効果を反映させることはできない。この点からも頻繁に外力場を更新することが望ましく、計算効率との兼ね合いから適切な外力場更新間隔を設定することが重要である。

(5) 試 計 算

以上のように、本モデルに施された補正の効果が十分に発揮されるためには、流況場の更新をできるだけ短い間隔で行う必要があるが、取水路開渠の場合、主たる外力が取水流であるため、一般の海浜変形シミュレーションでよく行われるように、ある程度以上の高波浪時のみを対象にすることは適切とは考えられず、予測期間中の全時間帯を対象としなければならない。したがって、地形変化と流況場の相互干渉が十分に反映される範囲で計算効率を損なわない適切な外力場更新間隔を設定することが重要である。

図-2 は露岩状態の水路の上流部に設置されたパッチ状の堆砂域が流れによって下流に移動する様子を本モデルによって表現したものである。実際の発電所と同程度の $300 \text{ m}^3/\text{s}$ の取水流量で半月毎に流況場を更新しつつ1年間の計算を行った結果であるが、パッチ状の堆砂域が露岩域を移動する様子が表現されている。この結果に基づき、後述する現地への適用に際しては、流況場の更新は基本的に半月間隔で行い、加えて取水状況が変化する場合には流況場の更新を行うこととした。

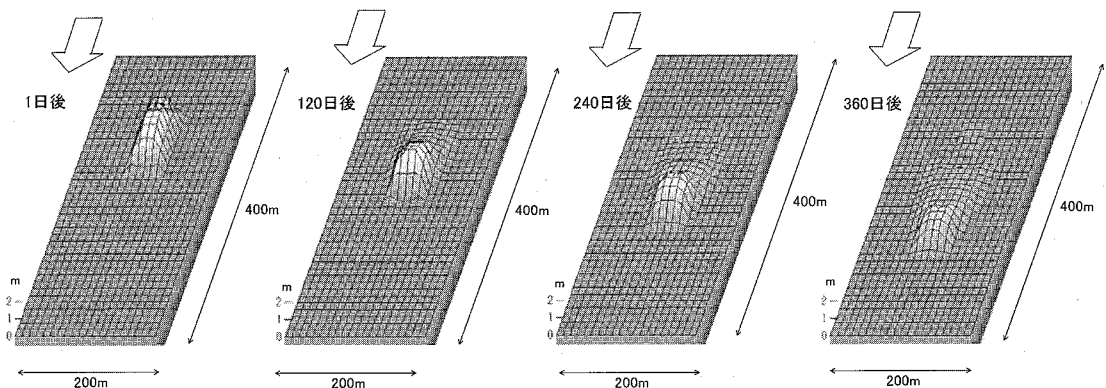


図-2 岩盤上のパッチ状堆砂の移動に関する試計算結果

3. 発電所取水路開渠内の海底地形変化解析への適用

(1) 対象サイトの概要

本研究において構築された海底地形変化予測モデルを用いて東京電力（株）福島第二原子力発電所の取水路開渠内海底地形変化の解析を行った。当地点の専用港湾および取水路開渠の配置概要を図-3に示す。太平洋に面して立地する専用港湾の奥に4つの取水口を控えた南北方向約500mの取水路開渠が設けられている。当地点では、平成15年から平成16年にかけて、港内航路領域へのシルトの堆積土量を低減する目的で取水経路を変更する港湾改造工事が実施されており、当初は取水路開渠の北側から流入していた取水流が南東側から流入することとなった。地形変化の再現計算は平成16年8月から平成17年8月の一年間を対象としたものであり、上記の取水経路変更によって取水路開渠内の海底土砂の再配置が起こった期間に対応していると考えられる。

(2) 流速場の再現性

静水圧近似の3次元計算により取水路開渠内での流速場がどの程度の精度で評価できるかを把握するため、実測流速と計算結果の比較を行った。計算格子は、水平方向に10m×10m、鉛直方向には0.5m間隔で分割した。最深部の水深は潮位を含めて約7.5mであり、15層の多層モデルとなる。

実測結果と計算結果を比較したものが図-4である。細い矢印が計算流速、太い矢印が実測流速であり、平成16年8月に直読式の電磁流速計で測定されたものである。上流側での流向、特に底層部に不整合が認められるものの全般的な整合性は良好と判断し、地形変化の再現においては、この格子設定による流況計算を地形変化の進捗や取水条件の変化に応じて繰り返した。

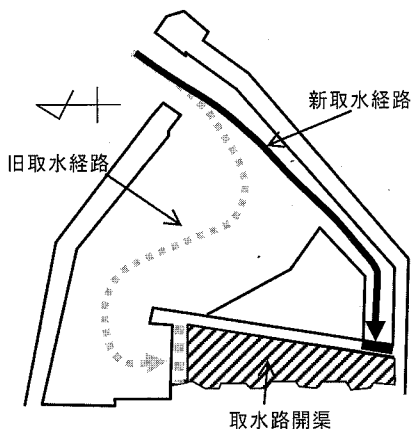


図-3 対象サイトの概要

(3) 地形変化の再現計算

地形変化の再現計算は、平成16年8月から平成17年8月までの約1年間を対象とした。前述の試算計算結果を参考に、流速場の更新は、半月毎を基本としながらも4基の取水ポンプの運転状況が変化した際には必ず行うこととし、都合24回の更新を行った。波浪場については、この24回の各ステップ間の実測入射波高のエネルギー平均値に予め回折反射計算によって算定されている波高比を乗じて算定した。

平成16年8月の深浅測量結果を初期水深とし、この

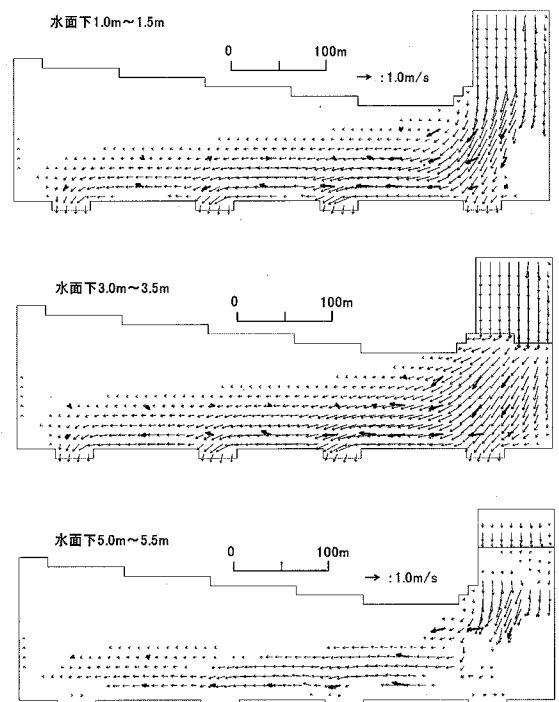


図-4 流速場の再現結果

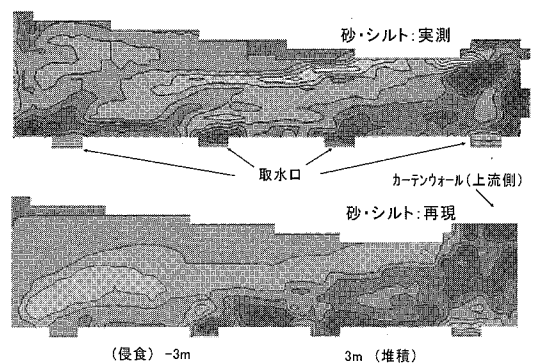


図-5 地形変化の再現結果

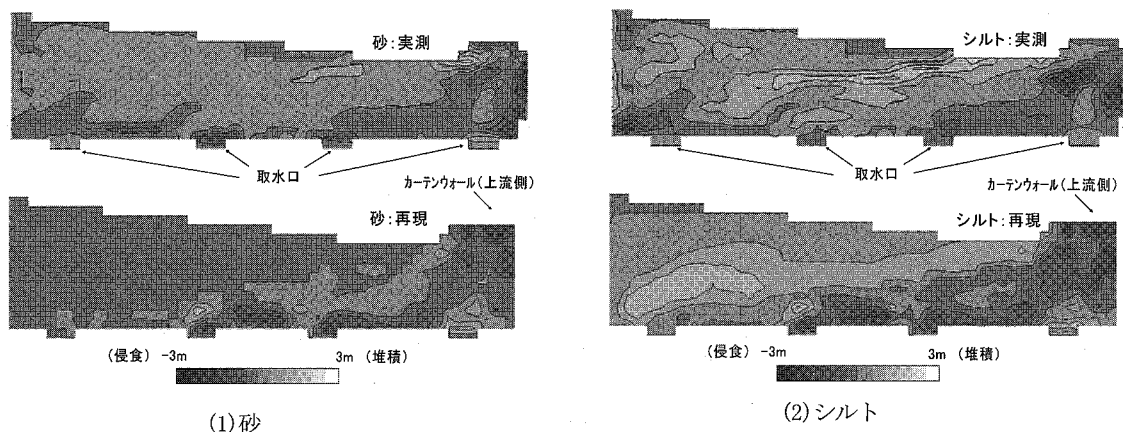


図-6 砂・シルト別の地形変化再現結果

際に実施された底質粒度分析の結果に基づいて各格子の砂・シルト混在比率を与えた。

パラメタスタディに基づき、式(4)の清水ら(1996)のモデルにおける係数 B_w は4.0、巻き上げフラックスを表す式(9)における τ_e は0.3 Pa、 M を $1.0 \text{ kg/m}^2/\text{s}$ 、沈降フラックスを表す式(10)における τ_d は0.15 Paとした。シルトの沈降速度 w_s については、粒径を $30 \mu\text{m}$ 、比重を2.65としてStokesの式で算定した。

限定的な堆砂厚による漂砂フラックスの低減を規定する基準堆砂厚 d_0 および砂・シルト含有率の混在比率を逐次算定する際に考慮する既存土砂の量を規定する参照堆積厚 d_1 は、やはりパラメタスタディの結果、それぞれ1 mおよび2 mと設定した。また、シルトの計算においては計算領域の上流側の濃度を境界条件として与える必要があるが、近藤ら(1987)を参考に入射波高の関数として与えた。

図-5および図-6に実測の地形変化と計算によるものを比較した。カーテンウォールから各取水口へかけての滯筋状地形の形成、その側壁にあたる領域へのシルトを中心とした堆積といった基本的地形変化と随所にみられる特徴的な地形変化も再現されている。

4. おわりに

砂・シルトの混在、露岩域を含む限定的な土砂堆積、構造物による3次元的な流れといった技術的課題を有する発電所取水路開渠内の地形変化予測モデルを構築し、実在のサイトへの適用によってその有用性を検証した。

参考文献

- 池野正明・清水隆夫・小林英次・石井敏雅・齊藤知秀(2001)：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.
- 近藤浩右・清水琢三・金山進・鈴木義和・丸山康樹・鹿島遼一(1987)：取水港湾におけるシルテーションについて, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 332-336.
- 清水琢三・山田晶子・渡辺晃(1996)：沿岸漂砂量の岸沖分布と漂砂量係数, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 571-575.
- 田中仁・Ahmad Sana(1996)：交差する波と流れによる抵抗側の検討, 土木学会論文集, No. 533/II-34, pp. 273-277.
- 渡辺晃(1981)：海浜流と海浜変形の数値シミュレーション, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 285-289.