

局所洗掘数値解析手法の 発電所放水口前面への適用性

APPLICATION OF COMPUTATIONAL METHOD FOR LOCAL SCOURING TO SAND BED IN FRONT OF POWER PLANTS

牛島 省¹・清水 隆夫²・保坂 稔³

Satoru USHIJIMA, Takao SHIMIZU and Minoru HOSAKA

¹正会員 工博 (財)電力中央研究所 水理部 (〒270-11 我孫子市我孫子1646)

²正会員 工修 (財)電力中央研究所 水理部 (〒270-11 我孫子市我孫子1646)

³正会員 東北電力株式会社 研究開発センター (〒981 仙台市青葉区中山7-2-1)

A refined computational method has been developed to predict local scour on a sand bed due to cooling-water jets discharged from power plants. The amount of sand particles detached from a sand bed is evaluated with a pick-up rate model proposed in the non-equilibrium conditions. The transportation of the picked up sands is calculated with an advection-diffusion equation with turbulent diffusivity and settling velocity. In order to increase the applicability to actual field, friction force caused by wave motions and various bottom boundary conditions are taken into account in the refined method.

The computational method is applied to an actual field in front of power stations, where sand bed profiles are surveyed. As a result of computation, while the predicted width of the scoured area is narrower than the measured results, it is shown that the vertical profiles on the center line, where the sand bed is most deeply scoured, are satisfactorily predicted with the present method.

Key Words: local scouring, warmed cooling-water discharge, numerical prediction, turbulence model, arbitrary Lagrangian-Eulerian, Boundary-fitted coordinate, surveyed sand-bed profile

1. はじめに

火力・原子力発電所から水中放流される温排水により、放水口前面の海底砂面が局所的に洗掘される事例が報告されている。このような局所洗掘が発生すると、海岸に面した各種の構造物の安定性に影響が生ずる可能性もあるため、事前に洗掘される砂面形状を正確に把握するとともに、必要であれば洗掘防止対策を施しておくことが重要となる。さらに、これらの評価を経て設計された洗掘防止対策工の効果を確認するためには、対策工を含む条件での局所洗掘現象の予測が可能であることが望まれる。

温排水が水中放流される、ある発電所地点（以下X地点）では、放水口前面に局所洗掘現象の発生が予測されたため、建設時にコンクリートブロックの敷設とSPAC工法（洗掘が予想される砂面を捨石と目つぶし石で置換する工法^{1),2)}）がなされた。このX地点では、放水口前面の海底地形のモニタリング調査を発電所稼働前から継続的に実施しており、放流量の増加による局所洗掘の進行状況やSPAC工法の有効性などが確認されている。

本研究では、著者らがこれまで開発を進めてきた局所洗掘現象の数値解析手法^{3),4)}を用いて対策工が施されたX地点の海底面形状の数値解析を行い、実測結果との比較を通じて適用性を検討する。

2. 数値解析手法

(1) ALE法による砂面形状の取り扱い

非定常的に変形する砂面形状を数値計算において適切に考慮するため、前報^{3),4)}と同様にALE法⁵⁾に基づき、移動境界に適合する座標系を所定の時刻ごとに生成する手法をとった。利用した座標系は3次元の境界適合座標系であり、物理空間と写像空間の座標成分（ x_i および ξ_m ）は、次式のポアソン方程式で関係づけられる⁶⁾。

$$\frac{\partial^2 \xi_m}{\partial x_i^2} = P_m \quad (1)$$

ここで、 P_m は計算点間隔の粗密を制御する関数である。

(2) 非等温乱流に対する基礎方程式

発電所からの放流水は、環境水よりも高い温度を有するので、流れ場を数値解析するために非等温場の乱流モデルを利用した。主な基礎方程式は以下のように表される。

・運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{D u_i}{D t} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \xi_m} \frac{\partial \xi_m}{\partial x_i} - [1 - \beta(T - T_s)] g_i \\ & + (\varepsilon_M + \nu) \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial \xi_m \partial \xi_n} \frac{\partial \xi_m}{\partial x_j} \frac{\partial \xi_n}{\partial x_j} + P_m \frac{\partial u_i}{\partial \xi_m} \right) \\ & + \frac{\partial \varepsilon_M}{\partial \xi_m} \frac{\partial \xi_m}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial \xi_n} \frac{\partial \xi_n}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial \xi_n} \frac{\partial \xi_n}{\partial x_i} \right) - \frac{3}{2} \frac{\partial k}{\partial \xi_m} \frac{\partial \xi_m}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (2)$$

・温度 T の方程式

$$\begin{aligned} \frac{D T}{D t} = & (\varepsilon_H + \alpha) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \xi_m \partial \xi_n} \frac{\partial \xi_m}{\partial x_j} \frac{\partial \xi_n}{\partial x_j} + P_m \frac{\partial T}{\partial \xi_m} \right) \\ & + \frac{\partial \varepsilon_H}{\partial \xi_m} \frac{\partial \xi_m}{\partial x_j} \frac{\partial T}{\partial \xi_n} \frac{\partial \xi_n}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (3)$$

・乱れの運動エネルギー k の方程式

$$\begin{aligned} \frac{D k}{D t} = & \varepsilon_M \left(\frac{\partial u_i}{\partial \xi_n} \frac{\partial \xi_n}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial \xi_n} \frac{\partial \xi_n}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial \xi_m} \frac{\partial \xi_m}{\partial x_j} \\ & - \beta g \varepsilon_H \frac{\partial T}{\partial \xi_m} \frac{\partial \xi_m}{\partial x_3} \\ & + \left(\frac{C_k}{C_v} \varepsilon_M + \nu \right) \left(\frac{\partial^2 k}{\partial \xi_m \partial \xi_n} \frac{\partial \xi_m}{\partial x_j} \frac{\partial \xi_n}{\partial x_j} + P_m \frac{\partial k}{\partial \xi_m} \right) \\ & + \frac{C_k}{C_v} \frac{\partial \varepsilon_M}{\partial \xi_m} \frac{\partial \xi_m}{\partial x_j} \frac{\partial k}{\partial \xi_n} \frac{\partial \xi_n}{\partial x_j} - \varepsilon \end{aligned} \quad (4)$$

・乱れの運動エネルギーの散逸率 ε の方程式

$$\begin{aligned} \frac{D \varepsilon}{D t} = & C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \varepsilon_M \left(\frac{\partial u_i}{\partial \xi_n} \frac{\partial \xi_n}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial \xi_n} \frac{\partial \xi_n}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial \xi_m} \frac{\partial \xi_m}{\partial x_j} \\ & + \left(\frac{C_\varepsilon}{C_v} \varepsilon_M + \nu \right) \left(\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial \xi_m \partial \xi_n} \frac{\partial \xi_m}{\partial x_j} \frac{\partial \xi_n}{\partial x_j} + P_m \frac{\partial \varepsilon}{\partial \xi_m} \right) \\ & + \frac{C_\varepsilon}{C_v} \frac{\partial \varepsilon_M}{\partial \xi_m} \frac{\partial \xi_m}{\partial x_j} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \xi_n} \frac{\partial \xi_n}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (5)$$

上記の方程式中で、 u_i は x_i 方向の平均流速成分、 ε_M と ε_H は、それぞれ渦動粘性係数と乱流熱拡散係数であり、両者は k と ε 、乱流プラントル数 P_{rt} を用いて表現される。乱流プラントル数は、成層度の影響を受けるので、その効果を考慮したモデルを利用した⁷⁾。他の記号は、 ρ 、 p 、 g_i 、 β 、 T_s 、 ν 、 α がそれぞれ流体の密度、圧力、重力加速度、熱膨張係数、基準温度、動粘性係数、熱拡散係数である。なお、

乱流モデルの係数値は、標準的な値である、 $C_k = C_v = 0.09$ 、 $C_\varepsilon = 0.075$ 、 $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ 、 $C_{\varepsilon 2} = 1.90$ を用いた。

砂面変形に伴い計算点の移動が生ずるが、この効果を考慮して、基礎方程式の左辺のLagrange微分オペレータは、以下のように表される。

$$\frac{D}{D t} = \frac{\partial}{\partial \tau} + \left(u_i \frac{\partial \xi_m}{\partial x_i} - \frac{\partial x_i}{\partial \tau} \frac{\partial \xi_m}{\partial x_i} \right) \frac{\partial}{\partial \xi_m} \quad (6)$$

ここで t と τ は、それぞれ物理空間と写像空間における時間であるが、両者は等しいものとしている。上記の各基礎方程式は、Lagrangeスキーム上で離散化される⁸⁾。移流項の計算には、3次元局所スプライン内挿法⁸⁾を利用し、3次精度で解析がなされるものとした。

また、計算速度を向上させるため、写像空間中における圧力の行列解法には、前処理付きの双共役勾配安定法 (PCG法) を利用するものとした⁹⁾。

(3) 移動砂量の計算方法

前報^{3),4)}では、砂粒子の移動形態として、掃流移動と浮遊移動という区分を設け、それぞれに対して提案されたモデルを利用して評価を行い、全体の移動砂量を求めた。一方、Olsen and Melaaen¹⁰⁾は、構造物回りの砂面の局所洗掘現象を数値解析する際に、砂の移動形態が全て浮遊移動であるとしたモデリングを行い、実験結果との良好な一致を見ている。Olsenらの砂移動のモデリングに関しては、適用性に関する詳細な検討が必要であると考えられるが、数値解析上は掃流移動と浮遊移動を別個に評価する手法よりも扱いが極めて容易であるため、本研究でもOlsenらと同様の手法を用いることとした。

本研究では、底面での砂粒子濃度は、非平衡状態の移動砂に対して提案されたpick-up rate¹¹⁾ (p_S) から計算されるものとした。 p_S を用いれば、単位時間内に単位面積の砂面から離脱する砂粒子の質量 dW は以下の関係から求められる。

$$\begin{aligned} dW = & p_S \left(\frac{A_3}{A_2} d \right) \sigma \\ = & 0.03 \tau_* (1 - 0.035 / \tau_*) \left[\frac{d}{(\sigma / \rho - 1) g} \right]^{-0.5} \left(\frac{A_3}{A_2} d \right) \sigma \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、 A_2 と A_3 は形状係数¹¹⁾、 d と σ は砂粒子の粒径と密度、 τ_* は無次元掃流力である。この dW を用いて、底面に接する計算セル内の砂粒子の濃度分

布を求める。底面から離脱した流体中の砂粒子の濃度 C は、次式の移流拡散方程式により評価される。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial \tau} + (U_m^* - U_{0m}) \frac{\partial C}{\partial \xi_m} \\ &= (\lambda + \varepsilon_s) \left(\frac{\partial^2 C}{\partial \xi_m^2} \frac{\partial \xi_m}{\partial x_j} \frac{\partial \xi_n}{\partial x_j} + P_m \frac{\partial C}{\partial \xi_m} \right) \\ & \quad + \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial \xi_m} \frac{\partial \xi_m}{\partial x_j} \frac{\partial C}{\partial \xi_n} \frac{\partial \xi_n}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 λ と ε_s は砂粒子の濃度に対する分子拡散係数および乱流拡散係数である。また、 U_m^* と U_{0m} はそれぞれ砂粒子濃度の移流速度と移動境界に追従するための計算点の移動速度の反変成分であり、特に U_m^* は沈降速度 w_0 を考慮して次式で与えられる。

$$U_m^* = (u_j - w_0 \delta_{3j}) \frac{\partial \xi_m}{\partial x_j} \quad (9)$$

δ_{3j} はクロネッカーのデルタであり、鉛直方向 (x_3 方向) に対してのみ、沈降速度が考慮されることを示している。

なお、発電所前面においては、放流水と波浪により生ずる底面せん断力が海底砂面に作用すると考えられる。波と流れが共存する場における底面せん断力の評価は容易でないため、ここでは砂面に作用するせん断力 τ_b が、放流水によるせん断力 τ_f と波によるせん断力 τ_{wm} の和であると考えた。 τ_f は粗面対数則から計算され、 τ_{wm} は Jonsson¹²⁾ の評価式を利用して、現地観測された有義波から求めるものとした。

(4) 砂面形状の計算方法

(8) 式の移流拡散方程式を解析することにより、流体中の砂粒子の濃度分布が求められる。この砂粒子濃度に各位置での流速成分を乗じて鉛直方向に積分することにより、その方向へ輸送される移動砂量が計算される。水平方向 x_i ($i=1,2$) の移動砂量を q_{si} とすれば、砂面高さ B は次式から求められる。

$$(1-\gamma) \frac{\partial B}{\partial t} + \frac{\partial q_{si}}{\partial x_i} = 0 \quad (10)$$

ここに γ は砂の空隙率である。この砂の連続式も他の基礎方程式と同様に写像空間上で解析される。

(5) 洗掘防止対策工のモデル

水中放流を行う放水口前面には、一般にコンクリートブロックなどの洗掘防止対策工が施される。洗掘

防止対策工がなされた状態での海底砂面の洗掘状況を予測するためには、砂面や固定床面などが共存する条件下で計算を進めることが必要となる。

洗掘防止対策のための有効な工法として、SPAC工法が提案されている^{1),2)}。このSPACが施された領域は完全な固定床面ではなく、沖側の砂面が洗掘されることにより、上流側の捨石が自然に洗掘斜面を覆うように展開していく。計算ではSPACの低下は、沖側の底面低下量がSPACの安息角を越えた場合にのみ生ずるものとした。また、コンクリートブロックが敷かれた領域は、砂の堆積は生じうが、初期位置からの低下がない固定床面として扱うものとした。

3. 現地実測結果との比較

(1) 発電所現地での実測の概要

温排水が水中放流されるX地点において、発電所稼働前から継続的に海底面形状のモニタリングが行われている。モニタリング調査は1992年から1997年まで毎年1回ずつ実施されており、1995年以前の調査では精密音響測深機を用い、1996年以降の実測ではより高精度の計測を行うため、マルチビーム測深ソナーを利用した。

X地点における放水口前面の初期の底面条件は、図-1に示すとおりである。放水口前面にはコンクリートブロックが設置されており、途中で高低差約1.3mの下り勾配がある。コンクリートブロック周辺にはSPACが配置され、その周辺部が海底砂面に接続している。放水口は中心間隔5mで3管あり、各管の放流平均流速は約5m/sである。

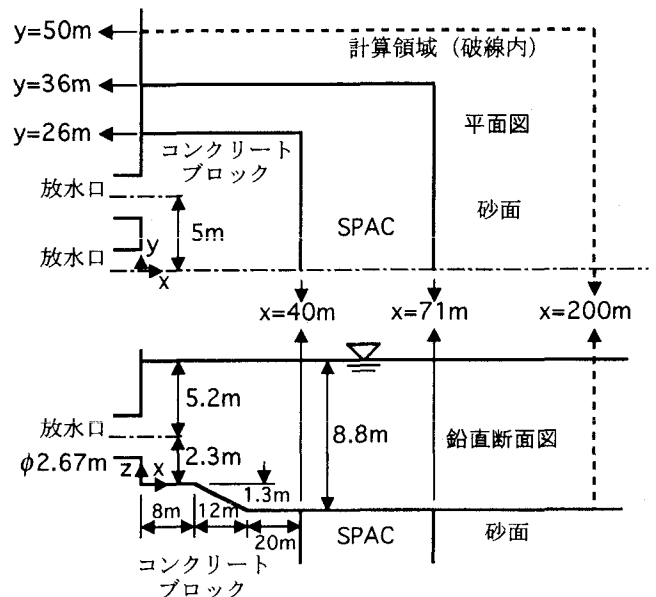


図-1 放水口前面の底面条件

X地点では発電所建設の進行に伴い、まず1管の放水口のみからの水中放流が約1年半続けられた。その後、2管からの放流が1997年7月の時点で約2年半続けられた。なお、これまでの実測期間中では3管での放流は行われていない。本報で計算結果との比較に用いる実測値は、1管放流開始から約1年半後の1994年の実測結果、また2管放流開始から約1年半および約2年半経過した時点の1996年および1997年の実測結果である。

(2) 現地局所洗掘現象の計算条件

X地点現地を対象とした数値解析では、図-1に示したように、流下方向200m、護岸方向に50mまでの中心軸に対称な片側の領域を計算対象とした。水深は、LWL時の値を用いて、放水口前面で7.5mとした。解析対象領域中で設定された解析格子点数は、 $\xi_1 \times \xi_2 \times \xi_3 = 51 \times 35 \times 15 = 26,775$ である。

自由液面はまさつが作用しない固定面として扱い、下流端断面および側面は自由流出入境界とした。中心軸を含む対称面では対称条件を適用した。底面および放水口部分を除く上流端断面では粗面对数則から定められるまさつ力が作用するものとした。

現地の海底砂は、実測結果に基づき、粒径0.2mmの均一な砂であるとした。波浪条件は、X地点で実測された有義波のデータに基づき、波高0.7m、波長35m、周期5秒とした。温度条件は、放流水を27°C、環境水を20°Cとし、温度差を7°Cとした。

(3) 実測結果と計算結果の比較

計算は、上述したX地点での放流条件の時間的な変化を考慮して、まず1管放流時の砂面形状を計算した。次に、1管放流の条件で得られた砂面形状を初期値として、2管放流時の局所洗掘計算を開始し、定常な砂面形状を求めた。

1管放流時の局所洗掘計算を行った結果、約350日が経過した時点で最大洗掘深が一定の値、3.04mとなった。砂面形状が定常となった時の鉛直断面内の流速ベクトルと等温線の分布を図-2に示した。計算ではSPACの沖側の砂面が最も深く洗掘されており、SPAC先端部もわずかに低下している。

2管放流時の局所洗掘計算では、計算開始から約400日後に最大洗掘深が4.56mなる一定値となった。最終的に得られた流速ベクトルと等温線の分布を図-3に示した。この結果に示されるように、放流条件を1管放流から2管放流とした場合には、SPAC前面の局所洗掘がさらに進行した。

図-4および図-5は、砂面の実測結果と解析結果を等高線表示で比較したものである。これらの図において、実測結果と計算結果を比較すると、数値計算により得られた洗掘領域の幅は、1管放流および2管放流のどちらにおいても、実測結果より狭く予測されている。この原因としては、冬季や荒天時の高波浪により周辺の砂面が大きく変形したか、あるいは波浪や恒流成分の影響などで放流水の流軸がy方向に変動していることが考えられる。

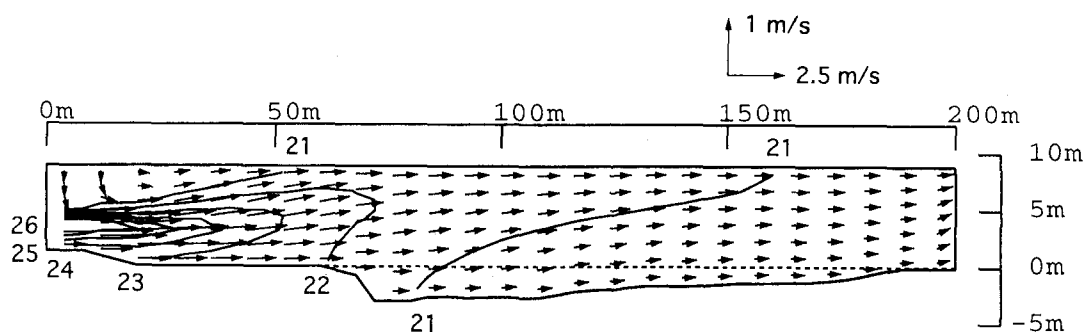


図-2 1管放流時の定常な砂面上における流速ベクトルと等温線の計算結果（中心軸を含む対称面）

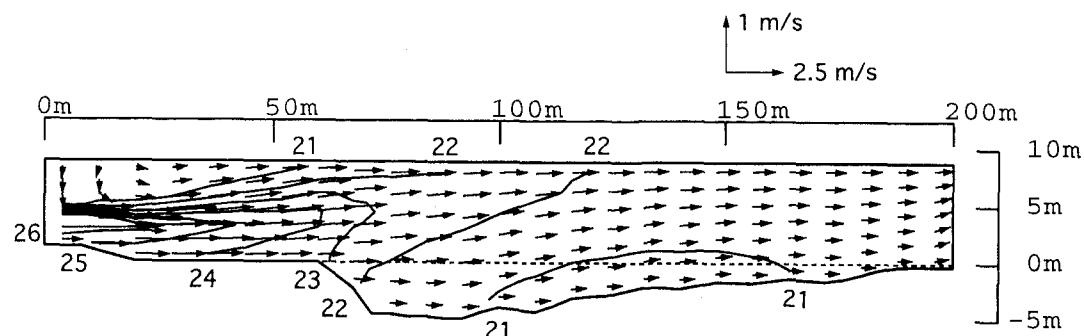


図-3 2管放流時の定常な砂面上における流速ベクトルと等温線の計算結果（中心軸を含む対称面）

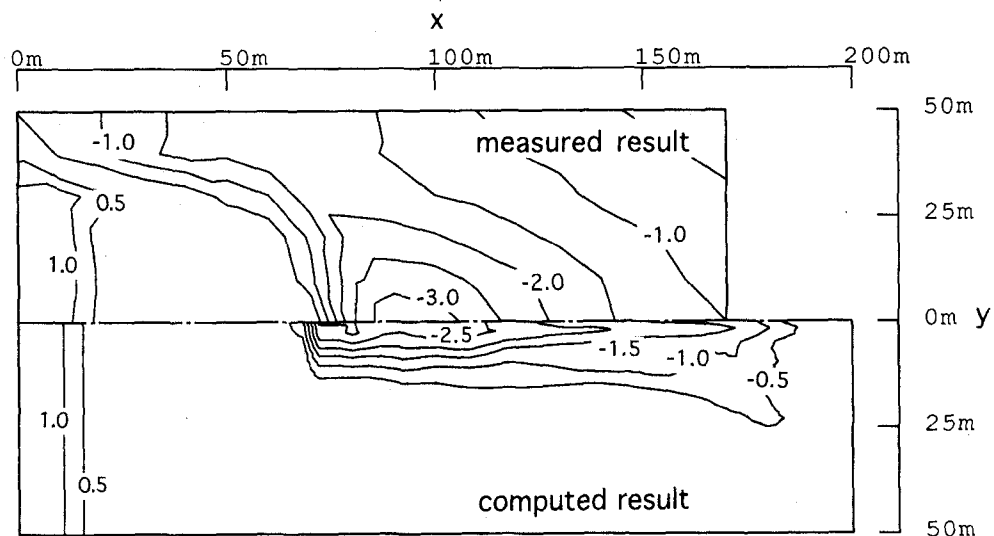


図-4 1管放流時の砂面形状の比較（実測値は1994年）

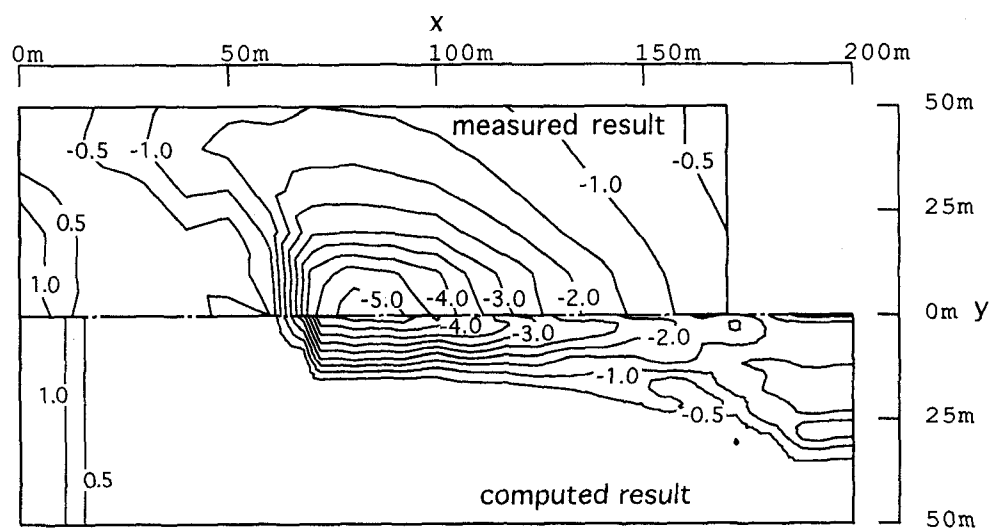


図-5 2管放流時の砂面形状の比較（実測値は1997年）

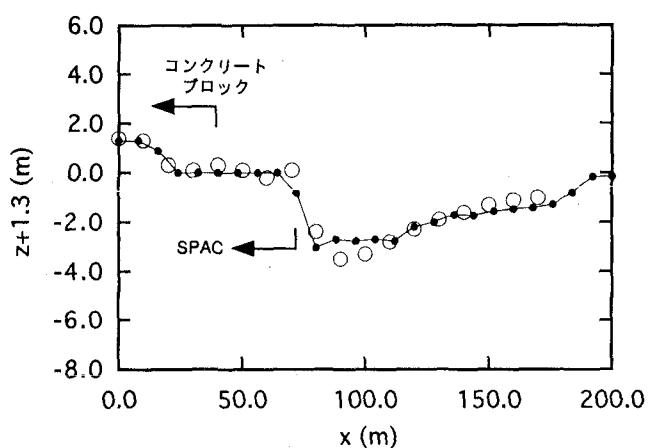


図-6 1管放流時の中心断面内の砂面形状の比較（○は1994年の実測値、●は計算結果）

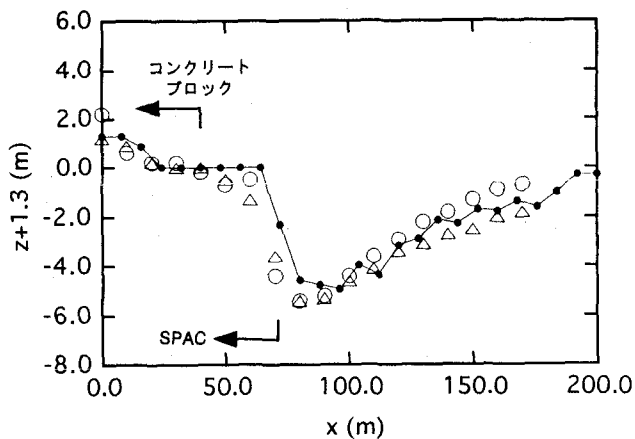


図-7 2管放流時の中心断面内の砂面形状の比較（△は1996年の実測値、○は1997年の実測値、●は計算結果）

1 管放流および 2 管放流時の計算で得られた砂面形状は、y 方向には中心軸、また x 方向には SPAC 下流部分で洗掘深が大きくなったが、X 地点現地の砂面実測結果でも同様の傾向が見られた。このため、中心軸を含む鉛直断面で両者の結果を比較したのが、図-6、7 である。これらの図では、初期の砂面高さが 0 となるように、縦軸を $z+1.3$ (m) としている。図-6 は 1 管放流時の砂面形状を比較したもので、両者はほぼ一致している。また、図-7 は 2 管放流時の結果を比較したものであり、砂面形状はよく一致しているが、SPAC が低下している領域で、若干の相違が見られる。数値解析で SPAC の低下が小さくなったのは、流下方向の解析メッシュ間隔が 4.0m とやや粗かったことが 1 つの原因であると考えられる。なお、図-7 中には、1996 年と 1997 年の砂面実測形状を合わせて示している。これらは、2 管放流開始からそれぞれ約 1 年半および 2 年半経過した時点の実測結果であるが、両者の相違は十分小さいことから、荒天時の波浪等により多少の変動が生ずる可能性はあるものの、すでに放流開始から約 1 年半後の実測時点で放流水による洗掘砂面形状はほぼ定常状態に達していたと考えられる。

以上のように、数値解析により洗掘領域の幅は実測結果よりも狭く予測されたが、最大洗掘深が発生する中心軸上においては実測結果とほぼ一致する砂面形状が予測可能であることが示された。今後は洗掘領域幅の相違をもたらした原因を解明するとともに、その効果を解析手法に取り入れるなどの検討が必要であるが、洗掘防止対策工である SPAC の設計においては、当面は恒流成分の実測結果等に基づき、沿岸方向に余裕幅を持たせることで対応可能であると考えられる。

なお、実測が行われた X 地点においては、まだ展開を開始していない SPAC の捨て石部分にかなりの余裕があり、局所洗掘の放水口構造物への影響は生じていない。

4. おわりに

本研究では、発電所現地で実際に生ずる局所洗掘現象を精度よく評価するため、移動砂量の評価方法の改良を行い、波浪の影響や洗掘防止対策工などの底面境界条件を考慮できるものとした。

この計算手法を発電所現地へ適用した結果、数値解析による洗掘領域の幅は実測結果よりも狭いものとなったが、洗掘が最も進行した中心軸を含んだ鉛直断面内の砂面形状は、1 管および 2 管放流時の両方の条件下において、実測結果とほぼ一致すること

が示された。

今後は洗掘領域幅の相違をもたらした原因の解明や波と流れが共存する場での流体解析手法の開発などを進めたいと考える。

参考文献

- 1) 清水隆夫, 池野正明, 氏家久芳, 山内一晃: 波と水中放流による洗掘対策工法の提案 (その 1) - SPAC (Spreading Armor Coat) 工法の断面設計法 -, 電中研研究報告: U93060, 平成 6 年.
- 2) 清水隆夫, 池野正明, 氏家久芳, 山内一晃: 波と水中放流による洗掘対策工法の提案 (その 2) - SPAC (Spreading Armor Coat) 工法の平面設計法 -, 電中研研究報告: U93061, 平成 6 年.
- 3) 牛島 省, 田中伸和: 3 次元境界適合座標系を用いた局所洗掘現象の数値解析, 水工学論文集, 第 39 巻, pp.683-688, 1995.
- 4) Ushijima, S.: Arbitrary Lagrangian-Eulerian numerical prediction for local scour caused by turbulent flows, Journal of Computational Physics, 125, pp.71-82, 1996.
- 5) Hirt, C. W., Amsden, A. A. and Cook, J. L.: An arbitrary Lagrangian-Eulerian computing method for all flow speeds, Journal of Computational Physics, 14, pp.227-253, 1974.
- 6) Thompson, J. F., Warsi, Z. U. A. and Mastin, C. W.: Numerical Grid Generation, Elsevier Science, New York, 1985.
- 7) Ushijima, S., Moriya, S. and Tanaka, N.: Internal standing waves in a cylindrical vessel and their near-wall features, ASME, J. Heat Transfer, Vol.115, pp.613-620, 1993.
- 8) Ushijima, S.: Prediction of thermal stratification in a curved duct with 3D body-fitted coordinates", International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol.19, pp.647-665, 1994.
- 9) 小国力編著: 行列計算ソフトウェア, 丸善株式会社, 平成 5 年.
- 10) Nils R. B. Olsen and Morten C. Melaaen: Three-dimensional calculation of scour around cylinders, ASCE Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 119, No. 9, pp.1048-1054, 1993.
- 11) Nakagawa, H. and Tsujimoto, T.: Sand bed instability due to bed load motion, Proc. ASCE, Journal of the Hydraulics Division, 106, HY 12, pp.2029-2051, 1980.
- 12) Jonsson, I. G.: Wave boundary layers and friction factors, Proc. 10th Conf. on Coastal Eng., pp.127-148, 1966.

(1997. 9. 30 受付)