

水流中の3次元的な土砂の移動に基づいた 河川橋脚周りの局所洗掘解析手法

石井 秀憲* 室谷 浩平* 中出 孝次*

Numerical Analysis of Local Scour Around Pier
Based on 3D Movements of Sediment Particles

Hidenori ISHII Kohei MUROTANI Koji NAKADE

This paper describes a numerical model developed to simulate the flow and scour around a bridge pier. The flow is modeled by large eddy simulation. The morphological change of riverbeds is calculated by coupling sediment transport with models for sediment pick-up and deposition. The sediment transport is calculated by 3D momentum equations of sediment particle. Sediment pick-up and deposition are modeled by stochastic models for the purpose of reducing computational demand. The numerical model was applied to the local scour around a vertical cylinder pile under clear water condition. The results agreed well with experimental data, except shape of downstream riverbed. It is concluded that this model can evaluate a local scour on the upstream side considering 3D movements of sediment particles.

キーワード：局所洗掘，河川橋脚，洗掘解析，連成解析，LES

1. はじめに

近年の地球規模の気象条件の変化に伴う降雨の激甚化により、大規模な洪水氾濫が頻発している。このような大規模な洪水により、河川橋梁の橋脚周辺が洗掘され、橋脚が沈下・傾斜する被害が発生している¹⁾²⁾。鉄道の河川橋梁は戦前・戦後頃に建設された旧式のものも多く、今後も鉄道の河川橋梁の被害が予想されることから、合理的な洗掘深予測方法や洗掘防止対策の開発が求められている。

水理構造物周りの河床変動解析は、その防災上の重要性から多くの研究がなされてきた。近年では、3次元的な流体計算を用いた河床変動解析の開発が進められている。

Roulundら³⁾は、乱流モデルに $k-\omega$ SSTモデルを用いて流れ場を計算し、河床勾配の影響を考慮した掃流砂量式と流砂の連続式による河床変動モデルを用いて円柱周辺の河床変動解析を行った。Baykalら⁴⁾は、Roulundら³⁾のモデルに浮遊砂の移動モデルを組み込んだモデルを用いて、円柱周辺の河床変動解析を行った。その結果、浮遊砂の移動を考慮したモデルの方が洗掘深が2倍程度大きくなったことを報告している。

Nagataら⁵⁾は2次元の運動方程式を用いた掃流砂の移動計算と土砂の離脱・堆積に関する確率モデルを組み合わせた河床変動解析手法を提案した。Nagataら⁵⁾はこの手法を用いて円柱周辺の河床変動を解析し、実験で

得られた洗掘孔形状の特徴を再現した。Otaら⁶⁾はNagataら⁵⁾の解析手法に掃流砂から浮遊砂への遷移過程に関する確率モデルを組み込むことで、浮遊砂への土砂巻き上げを考慮した河床変動解析手法を提案し、河川横断構造物上流における洗掘に適用した。解析結果は、洗掘形状の特徴を概ね再現したものの、最大洗掘深を過小評価する傾向となった。Otaら⁶⁾は最大洗掘深の過小評価について、浮遊砂への遷移モデルの係数設定に局所流の影響を考慮する必要があるとしている。

上述の河床変動解析^{3)~6)}は、河床変動に関わる土砂の移動を掃流砂と浮遊砂に分けて取り扱っていることが特徴である。掃流砂の移動は河床面付近の薄い層内での2次元的な運動として取り扱われ、浮遊砂の移動は無視されるか移流拡散現象として取り扱われる。

一方で、関根ら⁷⁾は掃流砂と浮遊砂の運動を一括して3次元の運動方程式で計算し、その特性について系統的な評価を行う研究を行った。その結果、掃流力の範囲によっては、従来の分類とは異なる形式の運動が存在することが明らかになり、従来の理論に限界があることが示された。

本研究で構築する河床変動解析は、将来的に複数構造物が影響する条件や根固めブロックなどの洗掘対策工が存在する条件での洗掘解析も解析対象とすることを目標としている。このような条件下では、土砂の移動がより3次元的な運動となり、掃流砂と浮遊砂を頻繁に遷移するような移動になることが予想される。従来の掃流砂と浮遊砂の移動を区別した計算では、このような移動形態

* 鉄道力学研究部 計算力学研究室

が頻繁に遷移する3次元的な土砂移動を十分に表現できるとは言い難い。そこで本研究では、流れの計算に水流中の非定常な渦構造を再現することに優れたLES乱流モデルを採用し、関根ら⁷⁾と同様に掃流砂と浮遊砂の移動を一括して3次元の運動方程式で計算する河床変動解析手法を構築した。土砂の離脱・堆積に関しては、Nagataら⁵⁾と同様に確率モデルを採用することで計算コストを抑え、長時間の現象を現実的な計算時間で解析できる手法とした。本手法により、橋脚周りなどの3次元的な流れ場に適用可能な計算量で、粗視化手法を用いない実粒径スケールの土砂の運動を河床変動計算に反映できることが期待される。本手法の妥当性検証の第一段階として、橋脚上流側の非攪乱域で土砂移動がない静的洗掘条件下で行われた単一円柱周りの洗掘実験⁸⁾の再現解析を行った。

2. 解析手法

本研究では、LES乱流モデルを用いた流体計算と土砂の3次元的な移動に基づく河床変動計算を連成した河床変動解析手法を構築した。本章では、流体計算と河床変動計算の手法についてそれぞれ詳述する。

2.1 流体計算

流体計算には、鉄道総研で開発を進めている不等間隔直交格子に対する有限差分法を採用した空気流シミュレータ⁹⁾を用いた。基礎式は非圧縮性流体に対するナビエ・ストークスの式である。座標系は3次元の直交座標系とし、 x 方向を流下方向、 y 方向を河川横断方向、 z 方向を鉛直方向とした。乱流計算はLESにより実施した。代表速度 U 、代表長さ L 、水の密度 ρ_1 、動粘性係数 ν 、レイノルズ数 $Re=UL/\nu$ としたとき、無次元化されたLESの基礎式は以下の式(1)、式(2)のようになる。

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\tau_{ij}}{\partial x_j} + G_i \quad (2)$$

ここで、 $u_i=(u, v, w)$ は無次元化されたグリッドスケールの速度、 p は無次元化された圧力、 G_i は無次元化した重力加速度項である。 τ_{ij} は空間フィルターによって粗視化された流れにおける残余の応力であり、LESの計算においてはモデル化(サブグリッドスケールモデル(SGSモデル))される。SGSモデルは、コヒーレント構造スマゴリンスキーモデルを用いた。時間進行は、3次精度のアダムス・バッシュフォース法を、空間差分は2次精

度の中心差分法を用いた。円柱や河床形状の表現は計算格子単位で流体と固体を判別するボクセル法とした。再現解析対象のフルード数 Fr が0.143(平均流速 $U_0=0.171\text{m/s}$ 、平均水深 $h_0=0.146\text{m}$ より算出)と小さいため、水位差の影響が小さいとし、水面はRigid lid条件を適用した。解析領域の側方はすべり条件、固体壁面はすべりなし条件とした。また、再現解析対象の河床材料の粒径が小さく、無次元粗度高さが滑面として取り扱える範囲のため、河床面は滑面のすべりなし条件とした。

2.2 河床変動計算

本研究の河床変動計算は、土砂の移動を3次元の質点の運動方程式によって計算し、これと掃流砂の離脱・堆積に関する確率モデルを組み合わせることで、河床変動量を算出する。

2.2.1 土砂の離脱

土砂の離脱量は、pick-up rate p_s を用いて、次式により計算する。

$$V_p = \frac{A_3 d}{A_2} p_s S_p \quad (3)$$

ここで、 V_p は計算格子から単位時間当たりに離脱する土砂体積、 d は河床材料の粒径、 A_2 、 A_3 は粒径の2次元、3次元の形状係数($=\pi/4$ 、 $\pi/6$)、 S_p は離脱地点の計算格子の面積である。pick-up rate p_s は無次元掃流力と局所河床勾配を用いた離脱確率式である中川・辻本・村上の式¹⁰⁾により計算した。

河床底面の無次元掃流力 τ_* については、動圧勾配が河床の土砂に圧力勾配力をもたらすことを考慮し、Marsooliら¹¹⁾を参考に、河床近傍の動圧勾配を用いて次式で算出した。

$$\tau_* = \frac{|\tau_b|}{(\rho_s - \rho_1)gd} \quad (4a)$$

$$\tau_{b,j} = \mu \frac{u_{b,j}}{dz} - \frac{A_3 d}{A_2} \frac{\partial p_d}{\partial \vec{e}_{b,j}} \quad (4b)$$

ここで、 τ_* は無次元掃流力、 ρ_s は土粒子の密度、 $\vec{e}_{b,j}$ は $x-z$ 平面上と $y-z$ 平面上において局所河床面と平行な単位ベクトル、 $\tau_{b,j}$ は j 方向において修正された掃流力、 $u_{b,j}$ は河床最近傍セルの流速評価点における局所河床面に平行な流速の j 方向成分、 μ は粘性係数、 dz は河床面から河床最近傍セルまでの距離、 p_d は河床最近傍セルでの動圧である。

2.2.2 土砂の移動

計算セルの河床面に離脱量の情報を持たせた追跡粒子

を生成し、移動経路を計算する。Nagataら⁵⁾およびOtaら⁶⁾の手法では、2次元の運動方程式を用いて追跡粒子の移動経路計算を行い、掃流砂の移動経路を河床変動解析に反映させた。一方で、本手法では追跡粒子の移動を3次元の運動として計算することで、掃流砂に加えて浮遊砂の移動経路も河床変動解析に反映させることができるようにした。追跡粒子の運動方程式は関根ら⁷⁾と同様に以下の式を用いた。

$$\begin{aligned} \rho_1 \left(\frac{\rho_s}{\rho_1} + C_M \right) A_3 d^3 \frac{d\vec{u}_p}{dt} &= \rho_1 \left(\frac{\rho_s}{\rho_1} - 1 \right) A_3 d^3 \vec{g} \\ &+ \frac{1}{2} \rho_1 C_D A_2 d^2 |\vec{u} - \vec{u}_p| (\vec{u} - \vec{u}_p) \\ &+ \rho_1 (1 + C_M) A_3 d^3 \frac{d\vec{u}}{dt} \\ &+ \frac{1}{2} \rho_1 C_L A_2 d^2 [|\vec{u}_{r,xy}|_T^2 - |\vec{u}_{r,xy}|_B^2] \vec{e} \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 $\vec{u}_p = (u_p, v_p, w_p)$ は追跡粒子の移動速度ベクトル、 $\vec{u} = (u, v, w)$ は水の流れ速度ベクトル、 $\vec{u}_r = (u_r, v_r, w_r)$ は両者の相対速度ベクトル、 \vec{g} は重力加速度ベクトル、 \vec{e} は成分 $(0, 0, 1)$ の単位ベクトル、 C_M は付加質量係数 ($=0.5$)、 C_D は抗力係数、 C_L は揚力係数 ($=0.2$) である。抗力係数 C_D は粒子レイノルズ数 $Re_p = |\vec{u}_r| d/\nu$ を用いて次式で評価した。

$$C_D = \frac{24}{Re_p} + \frac{3}{\sqrt{Re_p}} + 0.34 \quad (6)$$

式(5)右辺第4項は砂粒子周囲の速度勾配による揚力を示す項であり、 $\vec{u}_{r,xy}$ は鉛直方向成分を除いた相対速度ベクトル ($\vec{u}_{r,xy} = (u_r, v_r, 0)$)、添え字の T, B は球体の上縁点 (Top) および下縁点 (Bottom) を意味する。

追跡粒子が河床面付近に接近した場合は、追跡粒子の移動経路上の河床に模擬河床粒子を配置し、追跡粒子と河床粒子が衝突した際には非弾性衝突過程を計算し、衝突後の追跡粒子の速度を算出した。模擬河床粒子を配置する際には、関根・吉川¹²⁾の検討を参考に、平均河床面まわりの模擬河床粒子の高さ方向の分布が標準偏差 $\sigma_z = d/3$ の正規分布に従うように模擬河床粒子の配置を行った。

移動経路計算には追跡粒子間の干渉や各種係数への土砂濃度の影響は考慮されていない。解析対象の現象に対して、これらがどの程度結果に影響を及ぼすかは議論の余地があることをここに示す。

2.2.3 浮遊砂への遷移判定

Otaら⁶⁾は、確率モデルに基づいて掃流砂から浮遊砂への遷移判定を行った。一方で、本手法ではSekineら¹³⁾の掃流砂の最大跳躍高さに関する検討から掃流砂

層厚を定義し、追跡粒子の3次元運動に基づいた掃流砂から浮遊砂への遷移判定を行った。掃流砂の最大跳躍高さから求まる掃流砂層厚 T は次式で計算した。

$$T = (1 + h_s) d, \quad h_s = A_b \left(\frac{\tau_*}{\tau_{*c}} - 1 \right)^m \quad (7a, b)$$

ここで、 τ_{*c} は無次元限界掃流力である。また、 A_b , m は定数でありSekineら¹³⁾により提案された値である1.42と0.64を採用した。

追跡粒子が掃流砂層の外側へと移動したときに、浮遊砂へと遷移したと判定する。浮遊砂に遷移した追跡粒子については、次項の掃流砂の堆積確率モデルによる堆積計算を行わない。浮遊砂へと遷移した後も前項の運動方程式による計算を継続し、河床面に再付着した時点でその地点に全量が堆積するものとした。

2.2.4 掃流砂の堆積量計算

計算点 j での砂粒の離脱量を $V_{p(j)}$ としたときこの点から出発した追跡粒子の、出発から n ステップ後の位置における単位時間あたりの堆積量 $V_{d(j,n)}$ は、次式で求められる。

$$V_{d(j,n)} = V_{p(j)} f_s(S_{(n)}) \Delta s \quad (8a)$$

$$f_s(S_{(n)}) = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{S_{(n)}}{\lambda}\right) \quad (8b)$$

$$S_{(n)} = \sum_{i=0}^n \Delta t |\vec{u}_{p(i)}| \quad (8c)$$

ここに、 $V_{p(j)}$ は離脱量 (初期体積)、 $f_s(S_{(n)})$ は step length の確率密度関数、 $S_{(n)}$ は粒子の累計移動距離、 λ は平均 step length、 $\vec{u}_{p(i)}$ は i ステップ目での追跡粒子の速度ベクトル、 Δt は時間刻み幅である。平均 step length λ は揚力の変動を考慮した Einstein 式¹⁴⁾で算出する。

本手法では、追跡粒子の移動経路上で堆積量を計算するため、堆積量の算定位置と計算格子点は一致しない。そこで、追跡粒子の近傍の計算格子中心点に対して、距離による重みづけを行い土砂堆積量を分配した。

式(8)で評価した単位時間あたりの堆積量 $V_{d(j,n)}$ および追跡粒子の土砂体積が河床材料の砂粒1つ分の体積 ($= \pi d^3/6$) を下回った際には、追跡を打ち切った。

2.2.5 河床高の変動計算

河床高の時間変化は、単位時間あたりの土砂の離脱量、堆積量を用いて次式により求める。

$$\frac{\partial Z_b}{\partial t} = \frac{A_1 A_2}{A_3} \frac{(V_d - V_p - V_s)}{S_d} \quad (9)$$

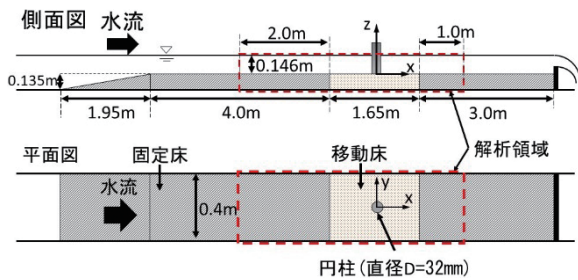


図1 実験概要図

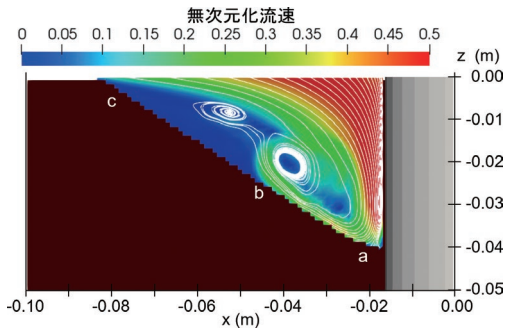


図2 通水 600 分時点の円柱上流の縦断面の流速分布と流線

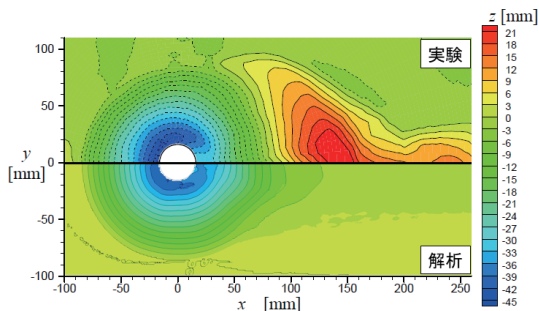


図3 通水 620 分後の河床面変位の実験結果⁸⁾ (上側)と解析結果 (下側) の比較

ここに、 Z_b は河床高、 A_1 は 1 次元の砂粒の形状係数 (=1.0)、 V_s はスライドによる移動量、 S_d は計算格子の鉛直方向投影面積である。

構造物近傍の局所洗掘現象においては、構造物近傍の洗掘の進行に伴って、急な河床勾配を有する斜面が洗掘孔内に形成される。局所的な河床勾配 θ_b が、限界勾配角 θ_{bc} 以上となると、河床斜面土砂のすべり崩壊（いわゆるスライド）が生じる。そこで、本研究では関根の斜面崩落モデル¹⁵⁾を用いて、 $\theta_b > \theta_{bc}$ となった場合の土砂移動量 V_s を算出した。 θ_{bc} には土砂の水中安息角を用いた。スライドによる土砂の移動は瞬時に行われるものと仮定し、スライドが生じた計算格子の pick-up 量 V_p にスライドによる土砂移動量 V_s を付加した。

3. 解析手法の適用

3.1 計算ケース

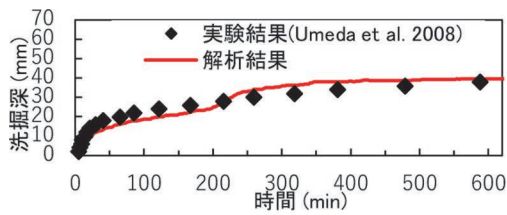
本手法の妥当性検証として、Umeda ら⁸⁾の円柱周りの洗掘実験を対象に再現解析を行った。図1に、Umeda ら⁸⁾の実験の概要図を示す。実験は長さ 12m、幅 0.4m、深さ 0.4m、勾配 1/1000 の水路で行われた。水路途中に長さ 1.65m の移動床部分が設けられ、砂が 0.135m の厚さで敷き詰められた。移動床部分の前後は砂面と同じ高さになるようアクリル板で底上げされた。移動床部分の中央部に直径 $D=32\text{mm}$ のビニール製円柱模型が設置された。移動床部分の砂には $d_{50}=0.139\text{mm}$ 、 $d_{60}/d_{10}=1.78$ 、比重 2.65 のものが使用された。上流側から水が $Q=9.985\text{L/s}$ で流入され、平均水深 h_0 は 0.146m、平均流速 U_0 は 0.171m/s であった。フルード数 Fr は 0.143 であり、円柱直径に対するレイノルズ数 Re_c は 4560 であった。非擾乱域で土砂移動はなく、静的洗掘条件であった。通水は 620 分間にわたって行われた。

次に解析条件を示す。流入および流出境界の位置が流れの計算に大きな影響を与えないことを確認した上で、図1中に赤枠で示した長さ 4.65m、幅 0.4m、高さ 0.281m の領域を解析対象とした。円柱近傍の河床面付近での最小格子を辺長 1.0mm の立方体とし、 x 方向（流下方向）750 格子、 y 方向（横断方向）260 格子、 z 方向（鉛直方向）128 格子の不等間隔格子を使用した。 $x-y$ 座標の原点は円柱模型中心の位置とし、初期河床面を $z=0.0\text{m}$ とした。流入境界を $U_0=0.171\text{m/s}$ に固定し、流出境界を対流流出条件とした。時間刻みは無次元時間間隔 $\Delta t=0.0002$ （実時間換算 $\Delta t_{\text{real}}=0.00117\text{s}$ ）とした。はじめに初期値を一様流とした状態から流体計算のみを行い、流れが十分に発達したのちに、流体計算と河床変動計算の連成計算を開始した。移動床を構成する砂は $d=0.139\text{mm}$ の均一粒径とし、無次元限界掃流力 τ_{*c} は岩垣の実験式¹⁶⁾で算出した。Umeda ら⁸⁾の論文内には水中安息角の情報が記載されていないため、実験後の洗掘孔の形状から水中安息角を 32° と推定し解析条件に反映させた。

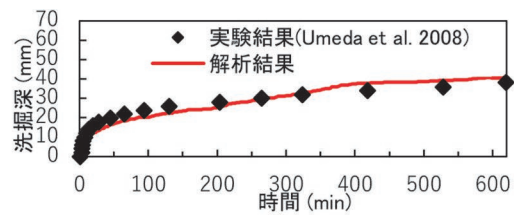
本手法を用いて、全てのステップで追跡粒子を生成して追跡を行うことは、計算時間や計算機のメモリの制約上、非常に困難である。そこで、本研究では 100 ステップごと（実時間換算 0.117s ごと）に追跡粒子を生成することとした。追跡粒子の移動・堆積および河床変動計算については、毎ステップ流体計算と交互に行った。追跡粒子が図1中の移動床領域の外に出た場合は追跡を終了し、粒子を削除した。

3.2 計算結果

図2に通水 600 分時点の円柱上流側の縦断面（水路

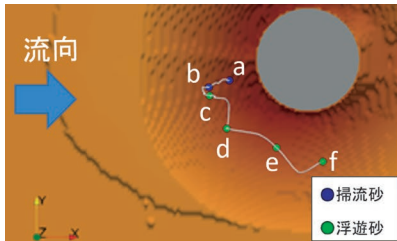


(a) 円柱上流側前面 ($x = -0.017\text{m}$, $y = 0.000\text{m}$)

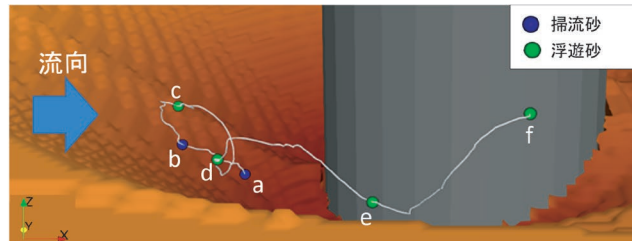


(b) 円柱上流側肩部 ($x = -0.012\text{m}$, $y = 0.012\text{m}$)

図4 洗掘深の時間変化

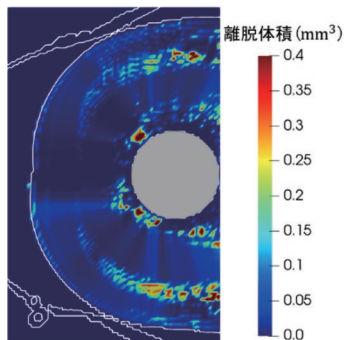


(a) 円柱上方側から

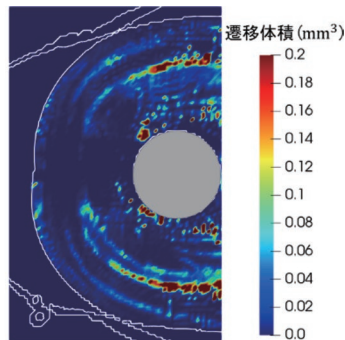


(b) 円柱側面側から

図5 円柱前面で離脱した追跡粒子の軌跡



(a) 土砂の離脱量



(b) 浮遊砂遷移量

図6 土砂の離脱量・浮遊砂遷移量 (累積値)

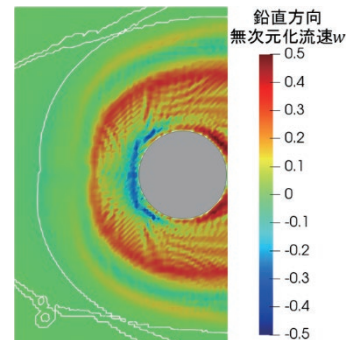


図7 洗掘深の時間変化河床最近傍セルでの無次元化流速の鉛直方向成分 (時間平均値)

中心線上)の流速分布と流線の解析結果を示す。流速分布のカラーコンターは上流側の平均流速 0.171m/s で無次元化している。図2中の a-b にかけては、馬蹄形渦が形成され河床面での流速が大きくなっており、この領域で pick-up が多く見られた。一方で、図2中の b-c は河床面での流速が小さいため pick-up は少なく、洗掘孔の拡大とともに、水中安息角に従ってスライドする様子が確認された。

図3に通水620分後の河床面変位の実験結果と解析結果の比較を示す。図3の上側半分が実験結果、下側半分が解析結果である。また、図3の左側が上流側、右側が下流側である。解析結果の洗掘孔は Umeda ら⁸⁾の実験結果と同様に逆円錐型の形状となり、円柱上流側の肩部から円柱前面付近で洗掘深が最大となった。円柱上流側の洗掘範囲についても、解析結果は実験結果とよく一致した。一方で、洗掘孔の下流側においては、一時的に堆積域が形成されることはあるものの、円柱背後の乱れた流

れにより砂粒が離脱して下流側に移動することで、結果として実験で見られるような堆積領域は再現されなかった。この原因としては、円柱後流の流れ場に対する再現性の不足が考えられる。また、堆積モデル中の平均 step length の式に構造物周辺の乱流場の影響が考慮されていないことも誤差の要因として考えられる。加えて、土砂の移動経路計算において追跡粒子間の干渉や土砂濃度の影響が考慮されていないことも要因として考えられる。しかしながら、堆積領域は再現されないものの、橋脚の安定計算で重要となる洗掘範囲については良好に再現されており、本手法により有益な結果が得られたと考える。

図4に洗掘深の時間変化を示す。(a)に円柱前面での洗掘深、(b)に円柱上流側肩部での洗掘深を示す。黒色の四角が実験結果、赤線が解析結果を示している。解析結果は、円柱前面・肩部ともに洗掘深の増加傾向をよく

再現しており、通水 600 分付近での洗掘深の誤差は前面・肩部ともに 10% 以内であった。

図 5 に通水 100 分時点で円柱前面 (図 5 中 a の位置) で離脱した追跡粒子の 5 秒間の軌跡を示す。追跡粒子が掃流砂の状態を青、浮遊砂の状態を緑で示す。円柱前面で離脱した追跡粒子は河床との接触を繰り返しながら、上流側に向かって移動した (図 5 中 a-b)。上流側斜面の中腹で馬蹄形渦の上昇流によって持ち上げられることで浮遊砂へと遷移し (図 5 中 b-c)、遷移した位置から水流の影響を受けながら、浮遊砂として下流側に移動した (図 5 中 c-f)。このような、円柱前面での土砂の移動は Umeda ら⁸⁾ の実験においても報告されており、本手法によって、実験で観測された 3 次元的な土砂の移動の特徴を再現できることが確認された。

図 6 (a) に通水 100 分時点から 10 分間の土砂の離脱量 (累積値)、(b) に浮遊砂への遷移量 (累積値)、図 7 に河床最近傍セルでの無次元化流速の鉛直方向成分 (時間平均値) を示す。図 6、図 7 中において河床面が $z=0.0\text{m}$ となる位置を白線で示している。図 6 (a) から円柱の上流側肩部と洗掘孔中腹で土砂離脱が多くみられた。放射状の分布はスライドモデルによる土砂離脱であると考えられる。図 6 (b) から円柱の上流側肩部から側方にかけて多くの遷移がみられる。また、洗掘孔中腹から外縁にかけて、同心円状に遷移体積が多い領域が分布している。図 5 の粒子軌跡および図 7 の鉛直方向流速の分布を考慮すると、洗掘孔斜面上を移動する砂粒子が底面付近の上昇流によって持ち上げられ浮遊砂へと遷移していることが予想される。

4. 結論

本研究では、掃流砂と浮遊砂の移動を一括して 3 次元の運動方程式で計算する河床変動解析手法を構築した。本手法の妥当性検証の第一段階として円柱周りの洗掘実験⁸⁾ の再現解析を行った。

解析結果の河床変位は、実験結果と比較して洗掘孔下流側の堆積領域が現れないという違いはあるものの、洗掘孔の形状や洗掘範囲について実験とよく一致した。洗掘深の時間変化については、洗掘深の増加傾向を精度よく再現した。円柱前面での砂粒子の移動についても、本手法によって実験で観測された 3 次元的な土砂の移動が再現できることを定性的に確認した。以上の結果から、本手法によって 3 次元的な土砂の移動を考慮した局所洗掘の評価を行えると結論付けた。これにより、洗掘対策工が存在する場合などのより複雑な条件へ適用できることが期待される。今後は、円柱後流の流れ場の再現性確認および堆積モデルの精緻化が課題であると考えられる。

なお、本論文は文献 17 を再構成したものである。

文献

- 1) 運輸安全委員会：南海電気鉄道株式会社，南海本線，列車脱線事故 (H29 年 10 月 22 日発生)，鉄道事故調査報告書説明資料，<http://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/p-pdf/RA2019-1-2-p.pdf> (参照日：2022 年 4 月 28 日)
- 2) 日野市：令和元年台風 19 号の対応概要報告 (最終報告)，https://www.city.hino.lg.jp/_res/projects/default_project/_page/_001/015/018/syuseigaiyou.pdf (参照日：2022 年 4 月 28 日)
- 3) Roulund, A., Sumer, B.M., Fredsøe, J., and Michelsen, J., "Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile.," *J. Fluid Mech.*, Vol. 534, pp.351-401, 2005.
- 4) Baykal, C., Sumer, B.M., Fuhrman, D.R., Jacobsen, N.G. and Fredsøe, J., "Numerical investigation of flow and scour around a vertical circular cylinder," *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, Vol.373, Issue 2033, article no.20140104, 2015.
- 5) Nagata, N., Hosoda, T., Nakato, T., and Muramoto, Y., "Three-dimensional numerical model for flow and bed deformation around river hydraulic structures," *J. Hydraul. Eng.*, Vol.131(12), pp.1074-1087, 2005.
- 6) Ota, K., Sato, T., and Nakagawa, H., "3D numerical model of sediment transport considering transition from bed-load motion to suspension—Application to a scour upstream of a cross-river structure—," *J. JSCE*, Vol.4, pp.173-180, 2016. pp.23-32, 1996.
- 7) 関根正人，小川田大吉，佐竹宣憲：Bed material load の流送機構に関する研究，土木学会論文集，No.545/II-36，pp.23-32，1996
- 8) Umeda, S., Yamazaki, T., and Ishida, H., "Time evolution of scour and deposition around a cylindrical pier in steady flow," *Proc. of 4 th Int. Conf. on Scour and Erosion*, pp.140-146, 2008.
- 9) 中出孝次，井門敦志，梶島岳夫：台車を含む鉄道車両モデルにおける車両床下の蛇行流れ (実形状の鉄道車両モデルにおける大規模流れ構造の LES)，日本機械学会論文集，第 87 巻，894 号，2021
- 10) 中川博次，辻本哲郎，村上正吾：側岸における非平衡流砂過程，第 29 回水理講演会論文集，pp.561-566，1985
- 11) Marsooli, R. and Wu W., "Three-dimensional numerical modeling of dam-break flows with sediment transport over movable beds," *J. Hydraul. Eng.*, Vol.141(1), 04014066, 2015.
- 12) 関根正人，吉川秀夫：掃流砂の停止機構に関する研究，土木学会論文集，No.399/II-10，pp.105-112，1988
- 13) Sekine, M. and Kikkawa, H., "Mechanics of saltating grains," *J. Hydraul. Engng ASCE* 118, pp.536-558, 1992.

- 14) Einstein, H.A: Formulas for the transportation of bed load, Trans. ASCE., No.2140, pp.561-597, 1942.
- 15) 関根正人：斜面崩落モデルを用いた網状流路の形成過程シミュレーション，水工学論文集，第47号，pp.637-642, 2003
- 16) 岩垣雄一：限界掃流力に関する基礎的研究(I)限界掃流力の流体力学的研究，土木学会論文集，第41号，pp.1-21, 1956
- 17) 石井秀憲，室谷浩平，中出孝次：水流中の土砂の3次元的な移動に基づいた円柱周りの局所洗掘解析，土木学会論文集B1（水工学），Vol.78，No.2，pp. I _1021- I _1026, 2022