

2D-3D Hybrid 流動モデルと河床変動モデルの融合に向けた基礎的検討

東京理科大学大学院 学生会員 ○鎌田 直樹, 井上 隆
東京理科大学 正会員 柏田 仁, 二瓶 泰雄

1. はじめに

近年, 大規模出水に伴って, 護岸や橋梁などの河川構造物の被災が頻発している. 例えば, 令和元年東日本台風により, 長野県千曲川に架かる上田電鉄における河川橋梁(別所橋)の左岸側橋台基礎が侵食されて落橋し(図-1), 復旧に約1年5か月を要した. 橋梁付近には, 洪水前では右岸側には滞筋, 左岸側に砂州があったが, 洪水中に砂州が下流側へ半波長程度移動し, 左岸橋台が水衝部となり, 落橋に至った¹⁾. この被害の特徴の一つは, 落橋がピーク流量時(10/12 21時)から10時間40分後の減水期(10/13 7:40頃)に発生したことである. このように減水期の砂州の移動が顕著となると報告されているが²⁾, 洪水中における砂州移動プロセスについては不明な点が多い. そのため, 河川橋梁被災を適切に評価・予測する上では, 砂州移動を伴う大規模な河床変動を再現可能な河川流・河床変動解析モデルの開発が必要となる. これまでの河床変動解析は, 平面二次元流動解析とのカップリングが一般的である³⁾. しかしながら, 河道の湾曲・蛇行に伴う二次流特性や砂州周辺の複雑な流況を考慮すると, 三次元流動解析の適用は不可欠であるが, その適用例は多くない⁴⁾.

本研究では, 著者らの開発している効率性の高い三次元流動モデル(2D-3D Hybrid モデル)⁵⁾と河床変動解析法をカップリングすることを目標として, そのための基礎的検討を行うことを目的とする. 具体的には, 1) 平面二次元流動モデルと河床変動モデルを上記の千曲川洪水に適用し, 洪水時における砂州の移動特性を再現し, その解析モデルの課題を整理する. 次に, 2) 2D-3D Hybrid 流動モデルと河床変動解析モデルの融合のための改良やアルゴリズムの構築を行う. 以下では計算結果は1)のみとし(2章), 2)はモデル構成のみ記述する(3章).

2. 平面二次元流動・河床変動モデルの千曲川洪水流・河床変動解析への適用

(1) 使用モデルの概要: 流動解析には直交曲線(s, n)座標系の平面二次元モデルを用い, 水深平均の運動方程式と連続式を基礎式とする. 二次元河床変動解析では, 掃流砂のみを対象とし, 流砂の連続式(Exner 式)より河床高 z_b を求める. 直交曲線座標系の連続式は以下ようになる.

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{bs}}{\partial s} + \frac{\partial q_{bn}}{\partial n} \right) = 0 \quad (1)$$

ここで, λ は空隙率で($=0.40$), q_{bs} と q_{bn} は s, n 方向の掃流砂量である. 流れ方向の掃流砂量 q_b は一様粒径とした Meyer-Peter and Muller (MPM) の式より与え, 各方向の掃流砂量 q_{bs} と q_{bn} は次式より求める.

$$q_{bs} = \frac{U_{s*}^2}{U_{s*}^2 + U_{n*}^2} q_b, \quad q_{bn} = \frac{U_{n*}^2}{U_{s*}^2 + U_{n*}^2} q_b \quad (2)$$

ここで U_{s*} , U_{n*} は s, n 方向の摩擦速度であり, 三次元流動解析を念頭に摩擦速度で掃流砂量を各方向に分配する.

(2) 計算条件: 計算条件を表-1に示す. 計算区間は落橋箇所を含む千曲川 102~108kp とし, 計算期間は 2019/10/12 9:00 から 24 時間である. 境界条件には上流端は観測流量

(生田観測所), 下流端は設定水位(上流端水位(生田観測所)から河床勾配と下流端までの距離の積を差し引いたもの)を与えた. 土砂粒径は対象区間の 50%粒径より単一の 64mm とした. また河床データとして, 低水路と堤防には洪水前に行われた定期横断測量データ(0.5km 間隔)を内挿し, 高水敷には DEM を与えた.

(3) 結果と考察: 得られた河床変動解析結果より砂州移動状況を把握するため, 出水前後における滞筋の観測値及び解析値を図-2に示す. ここでの解析結果は, 出水前(2019/10/12 9:00, 同図(b1))とピーク流量時(同日 21:00, b2), 減水期(10/13 3:00, b3), 出水後(同日 9:00, b4)の水深コンターと水深平均流速ベクトルを表示する. まず,



図-1 令和元年東日本台風による千曲川・上田電鉄別所橋落橋の様子(撮影日: 2019/10/13 9:31)

表-1 計算条件(平面二次元解析)

計算区間	千曲川 102kp~108kp
計算期間	2019/10/12 9:00~10/13 9:00
格子幅	s方向30m×n方向15m
粒径	64mm (単一粒径)
粗度係数	0.03m ^{-1/3} s

キーワード: 橋梁被災, 3D 流動モデル, 河床変動, 砂州, 千曲川

連絡先: 〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641 東京理科大学 5 号館 3 階水理研究室 TEL: 04-7124-1501 (内線 4072)

出水前では滞筋は河道中央付近で蛇行し、滞筋に沿う流れが見られるが、ピーク流量時では、流下方向への直線的な流れが卓越し、滞筋は大きく形を変えずに流下方向へ移動している。その後、減水期では、水位低下に伴って滞筋沿いの流れに戻ると共に、滞筋の頂部が左岸、右岸に近づき、滞筋の振幅が大きくなっている。出水後と共に、落橋地点（図中×印）では、滞筋が接近していることや、別所橋橋梁下流の流れが二手に分かれる状況が確認できるなど（図-2(b3)）、実現象に近い砂州移動特性が確認された。ただし、流下方向への砂州移動量は、実際には蛇行波長の半分程度であったが、本解析では1/4波長程度と小さく、定量的な再現性に問題が見られる。この要因は、MPM式の適用性や横断方向掃流砂量式の設定、粒径分布の取り扱いに加えて、流れの三次元性を考慮できておらず、河床変動解析の根幹である掃流力評価精度が不十分であるためと考えられる。

3. 2D-3D Hybrid モデルへの河床変動モデルの導入

前節の課題の一つを解消するために、二次元河床変動解析モデルを計算効率性の高い2D-3D Hybrid 流動モデルに組み込む。このモデル（図-3）では、全計算ステップにおいて2D計算を行う一方、3D計算を数十～数百ステップに一回実施し、3D特有の計算負荷を減らしつつ、3D計算結果を2D計算に反映することで3Dと同程度の計算精度を担保するものである⁵⁾。本モデルに二次元河床変動モデルを導入する際のポイントは、①底面摩擦力 τ_0 （もしくは摩擦速度 U_* ）の評価と②2D計算のみを行う時の τ_0 や U_* の取り扱いである。①としては、2D計算における U_* は水深平均流速 U を用いて次式より求める。

$$U_* = gn^2/h^{1/3} \times U \quad (3)$$

一方、三次元流れが卓越する場では、水深平均流速と底面流速の向きが異なる可能性があり、式(3)は適用できない。そのため U_* は対数分布則を用いて次式より算出する。

$$U_* = u_b / \{ \ln(z_b/k_s) / \kappa + A_r \} \quad (4)$$

ここで u_b は河床近傍（高さ z_b ）の流速、 k_s は相当粗度、 κ はカルマン定数（=0.41）、 A_r は定数（=8.5）である。

ポイント②では、3D計算を行っていない計算ステップにて簡易的に3D計算で求めた U_* を一定として与えた。ただし、時々刻々更新する2D計算結果を反映する必要があり、今後の課題である

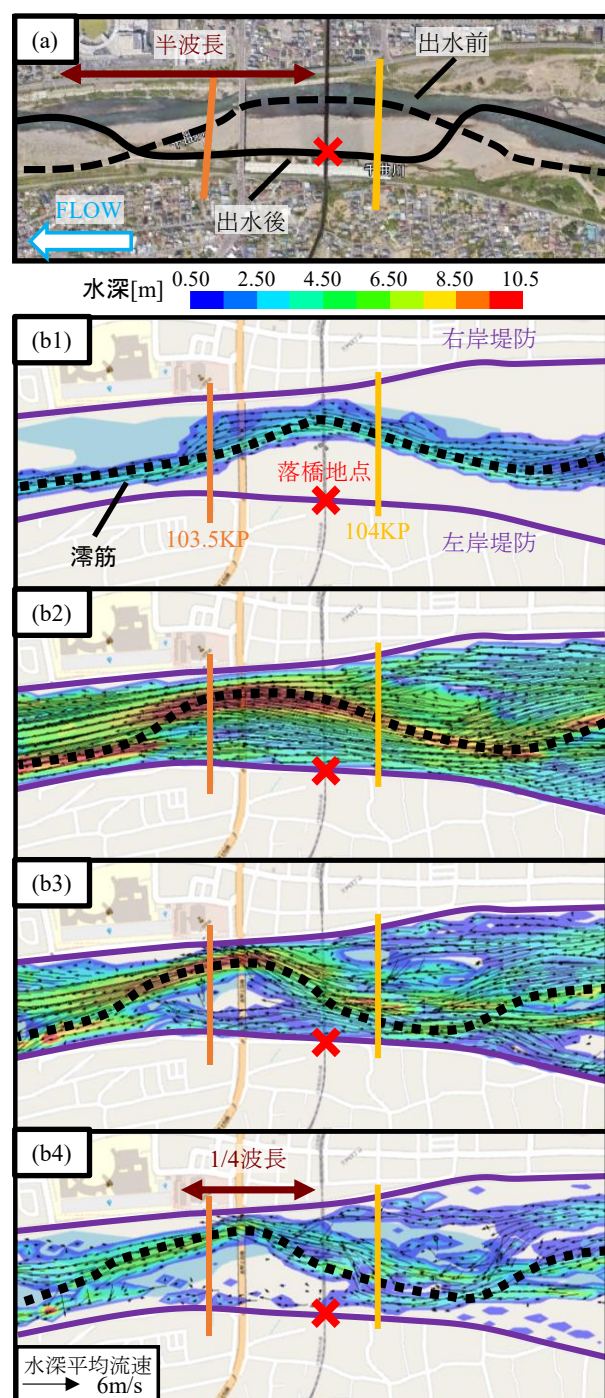


図-2 出水前後の滞筋変化の観測値 (a) と解析値 (b1)-(b4) (解析結果は水深コンターと水深平均流速ベクトル)

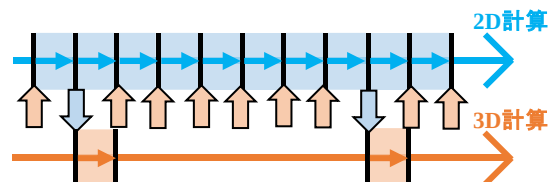


図-3 2D-3D Hybrid 流動モデルの計算手順の概要

謝辞：千曲川の横断面測量データは国交省北陸地整よりご提供頂いた。本研究の一部は、科学研究費補助金（21H04577）により行われた、ここに記して謝意を表します。

参考文献：1) 千曲川堤防調査委員会，千曲川堤防調査委員会報告書，2020. <https://www.hrr.mlit.go.jp/river/chikumagawateibouchousa/chikuma-houkokusyo-issshiki.pdf> 2) 永多ら：土木学会論文集 B1（水工学），Vol.69, No.4, I_1099-I_1104, 2013, 3) 西本ら：土木学会論文集，No. 456, II-21, 11-20, 1992, 4) 田端ら：河川技術論文集 Vol.27, pp.597-602, 2021, 5) 二瓶ら，土木学会論文集，No. 803, II-73, 115-131, 2005