

浅水流モデルを用いた射流場における 橋脚周辺の局所洗掘解析

梶川 勇樹¹⁾・久寿米木 郁也²⁾

¹⁾鳥取大学学術研究院工学系部門, ²⁾鳥取大学工学部社会システム土木系学科

1. はじめに

河道内に設置された橋脚周辺では、橋脚前面での馬蹄形渦に代表される局所流により局所洗掘現象が発生する。局所洗掘現象は当構造物の安定性を低下させる恐れがあるため、安定性の評価あるいは洗掘対策の検討のためにも、その洗掘現象を十分理解し、予測精度を向上させることは極めて重要である。そのため、従来から橋脚周辺の流れや局所洗掘に関する研究は、実験的にも数値解析的にも非常に数多く行われてきた。しかしながら、従来の研究ではフルード数（以下、Fr）が1未満の常流場を対象とした検討が殆どであり、Frが1以上の射流場を対象とした検討は少ない¹⁾。また、局所洗掘現象の再現・予測計算では、通常、局所流を再現する必要性からも三次元モデルが用いられる場合が多いものの、三次元モデルは計算コストがかかるため、未だ実務での利用は難しい状況にある。

そこで本研究では、著者らが過去に行った射流場における橋脚周辺の局所洗掘現象に関する水理模型実験²⁾を対象に、実用面で有利な二次元浅水流モデルによる再現計算を試みた。ここでは、橋脚周辺での馬蹄形渦の形成に伴う掃流力の増加を考慮するため、流線方向の圧力勾配を用いて掃流力を修正する手法を本数値計算モデルに導入した。

2. 数値計算モデル

本研究では、流れ場の数値計算に二次元浅水流モデルを使用した³⁾。流砂には一様粒径の掃流砂のみを考慮し、掃流砂量の算定には以下に示す芦田・道上式を使用した。

$$q_b = 17(\tau_*' - K_c \tau_{*c}) \left(\sqrt{\tau_*'} - \sqrt{K_c \tau_{*c}} \right) \sqrt{sgd^3} \quad (1)$$

ここに、 q_b は単位幅掃流砂量、 τ_*' は次に示す無次元掃流力、 τ_{*c} は無次元限界掃流力、 K_c は局所河床勾配の影響による τ_{*c} の補正係数、 s は粒子の水中比重（=1.65）、 g は重力加速度、 d は粒径である。

橋脚周辺で発生する局所洗掘現象は、馬蹄形渦のような三次元的な流況によって形成されるため、通常、二次元モデルでの再現は難しい。そこで、Wu and Wang (2002)は、流線方向の圧力勾配を用いた掃流力の修正方法を提案し、二次元モデルの枠組みにおいてもある程度の精度で最大洗掘深を再現できることを示している⁴⁾。そこで本数値モデルにも、Wu and Wang (2002)の手法を導入した。

$$\tau_*' = \frac{1}{sgd\rho} \max \left(\tau_b, -\alpha_r \frac{\pi}{6} fgd\rho \frac{\partial H}{\partial \xi} \right) \quad (2)$$

$$f = \begin{cases} 3.4D_*^{-0.3} f_s & D_* < 50 \\ 52.5D_*^{-1} f_s & D_* \geq 50 \end{cases} \quad (3)$$

ここに、 ρ は流体の密度、 τ_b は Manning 式より求まる底面せん断応力、 α_r は乱流強度の影響を考慮した

係数, H は水位, ζ は流線の方向, $D_* = d(\rho g/h^2)^{1/3}$, ν は流体の動粘性係数, $f_s = c/(ab)^{1/2}$, (a, b, c)はそれぞれ粒子の長径, 中径, 短径であり, 本研究では礫粒子を球形と想定しているため $f_s = 1$ となる.

数値計算法として, 計算格子にはレギュラー格子を採用し, 浅水流方程式の移流項の差分化には 5 次精度 WENO 法を, 圧力項および粘性項にはそれぞれ 6 次精度および 2 次精度の中央差分法を適用した. 時間積分には 3 次精度 TVD Runge-Kutta 法を適用した⁴⁾. 流砂の連続式の差分化には, 空間微分項を有限体積法により離散化し, 時間積分には 1 次精度 Euler 法を適用した.

3. 対象実験の概要と計算条件

本研究では, 著者らが過去に実施した水理模型実験を対象とした³⁾. 本実験では, 水路長 7 m, 水路幅 0.4 m, 深さ 0.4 m の勾配可変直線水路を使用し, 水路中間部に図-1(a)に示すような長さ 4 m, 深さ 0.15 m の移動床区間を設置した. 移動床区間には図-1(b)に示されるような, 粒径がほぼ一様な礫 (平均粒径 $d = 5.21$ mm) を深さ 0.15 m で平坦となるように敷詰めた. 移動床区間の上流端から 3 m の水路中央位置に円形断面の橋脚模型を 1 本設置した.

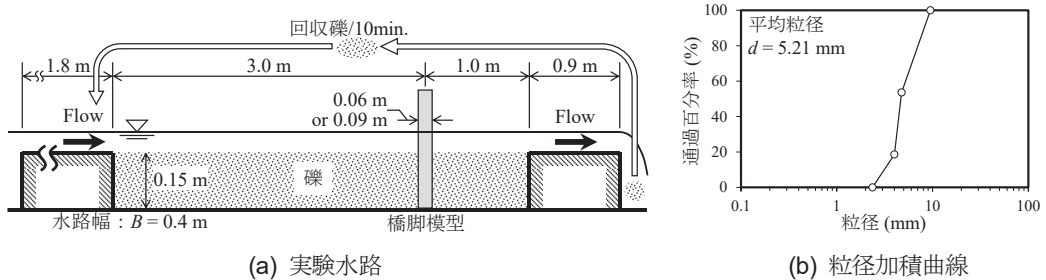


図-1 水理模型実験の概要

実験では, 流量 Q を $0.0165 \text{ m}^3/\text{s}$ の一定とし, 橋脚直径 D を 0.06m と 0.09m の 2 種類, 水路勾配 I を $1/50$, $1/75$, および $1/100$ の 3 種類として, これらを系統的に変化させた. フルード数は $\text{Fr} = 0.92 \sim 1.21$ の範囲であった. 通水時間は, 水路勾配 $I = 1/50$ および $I = 1/75$ の場合には 90 分, $I = 1/100$ では 120 分とした. 以下の数値計算では, 橋脚直径 $D = 0.06 \text{ m}$ のみを対象とした.

計算条件として, 計算時間間隔 $\Delta t = 0.002 \text{ s}$, 格子間隔 $\Delta x = \Delta y = 0.005 \text{ m}$ とした. 計算領域は, 実験の移動床区間に合わせて流下 (x) 方向に 4 m, 横断 (y) 方向に 0.4 m とした. 河床変動計算は上流端から所定の流量を与えると同時に開始した. また, 上流端では平衡流砂量を与え, 下流端では流量・流砂とも自由流出とした. また, 式(2)の係数 α_i については, 予備計算の結果から $\alpha_i = 1.2$ とした.

4. 結果と考察

実験結果と計算結果の比較として, 図-2 に(a)勾配 $I = 1/50$, (b) $I = 1/75$, および(c) $I = 1/100$ における最終河床形状を示す. まず, 左図の実験結果より, Fr が大きくなるほど洗掘深および洗掘孔が小さく表れている. また, Fr が大きくなるほど橋脚下流での堆積域が大きく表れており, その堆積域は, Fr が大きくなるほど橋脚近傍にまで及んでいる. 一方, 右図の計算結果を見ると, 浅水流モデルではあるものの, 橋脚周辺の局所洗掘現象を再現できていることが分かる. 実験結果と比較すると, 洗掘孔形状に違いはあるものの, Fr が大きくなるほど洗掘深および洗掘孔が小さくなる様子を再現できている. ただし, 橋脚下流の堆積域は十分に再現できていない.

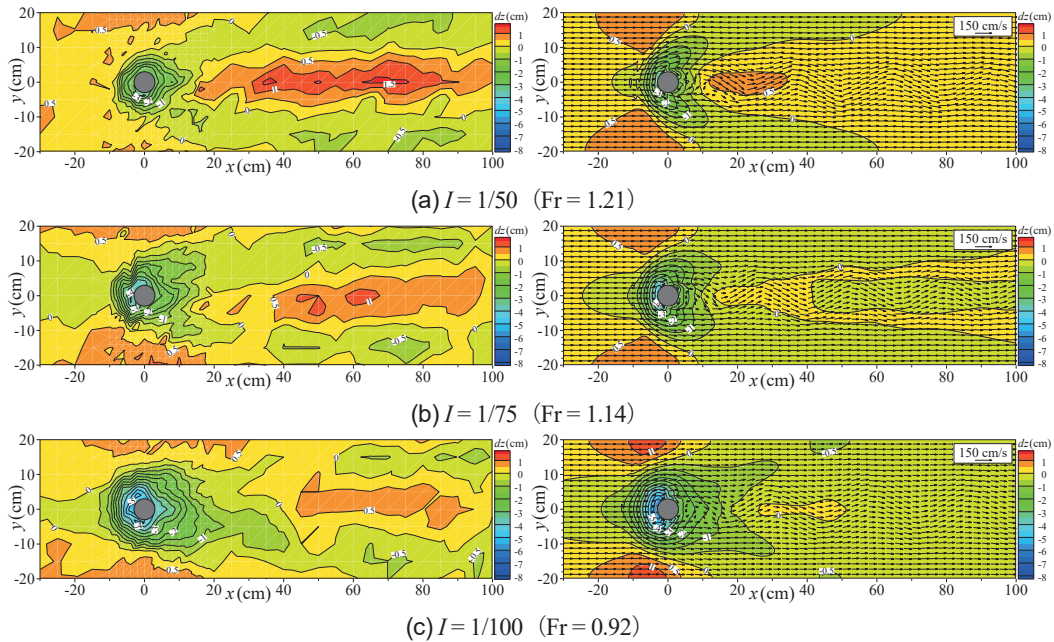


図-2 最終河床形状に関する実験結果と計算結果の比較 (左：実験値, 右：計算値)

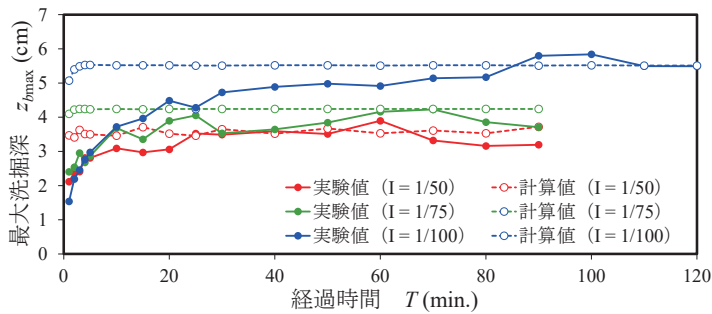


図-3 最大洗掘深の時間変化の比較

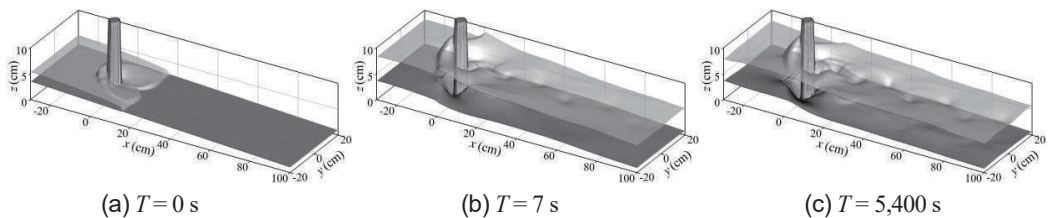


図-4 数値計算による橋脚周辺の水面形と河床形状の時間変化 ($I = 1/50$)

図-3は、各勾配 ($I = 1/50$, $1/75$, および $1/100$) における最大洗掘深の時間変化を示している。実験結果と計算結果を比較すると、平衡状態における最大洗掘深はほぼ一致していることが分かる。一方、洗掘深の時間的変化を見ると、実験では勾配が小さくなるにつれ、最大洗掘深は時間的に緩やかに平衡状態に達しているのに対し、計算では最大洗掘深はほぼ通水初期に平衡状態に達している。

本数値モデルは浅水流モデルであり、橋脚前面での馬蹄形渦の発達過程を直接解いているわけでは

なく、式(2)により流線方向の圧力勾配に応じて掃流力を増加させている。そのため、圧力勾配に影響する水面形が早期に平衡状態に到達すれば、掃流力もそれに伴って増加する。その結果、洗掘深の平衡状態への到達時間も短くなる。図-4に勾配 $I = 1/50$ における通水初期 ($T = 0 \text{ s}$, 7 s) および通水終了時 ($T = 5,400 \text{ s}$) における水面形および河床形状の鳥瞰図を示す。図から分かるように、通水初期 ($T = 7 \text{ s}$) には既に橋脚前面で跳水が発生しており、同時に局所洗掘も進行している。そして、その水面形および河床形状は通水終了時まで維持されていることが分かる。すなわち、通水初期にはその水面形の影響により大きな掃流力が算定され、結果、最大洗掘深も極めて早期に平衡状態に到達したことが分かる。

以上のように、本数値モデルでは、射流場における橋脚下流部の堆積域や最大洗掘深の時間変化を十分に再現することはできなかったものの、 Fr の変化に応じた洗掘深・洗掘孔の違いや、平衡状態における最大洗掘深を再現することができた。

5. おわりに

本研究では、射流場における橋脚周辺の局所洗掘現象に対し、二次元浅水流モデルによる再現を試みた。数値モデルには、Wu and Wang (2002) によって提案された流線方向の圧力勾配を用いて掃流力を修正する手法を導入した。その結果、浅水流モデルであっても、橋脚周辺の局所洗掘現象をある程度の精度で再現できることが示された。特に、フルード数が大きくなるほど、洗掘深や洗掘孔が小さくなる傾向を本数値モデルにより再現できた。しかしながら、橋脚背後の堆積状況や最大洗掘深の時間変化については十分再現することはできなかった。また、式(2)における係数 α_r も試行錯誤的に決定したものである。今後は α_r の検討も含めた現象の更なる再現性向上が課題である。

参考文献

- 1) 中山恵介, 堀川康志, 三上卓也: 射流場におかれた円柱周辺の流れの解析, 水工学論文集, 第 43 巻, pp.365-370, 1999.
- 2) Link, O., Mignot, E., Roux, S., Camenen, B., Escauriaza, C., Chauchat, J., Brevis, W., and Manfreda, S.: Scour at bridge foundations in supercritical flows: An analysis of knowledge gaps, *Water*, 11, 1656, 2019.
- 3) 山田雄太, 梶川勇樹, 天川丈: 射流場における円柱橋脚周辺の局所洗掘に関する水理模型実験, 土木学会中国支部第 69 回研究発表会講演概要集, pp.155-156, 2017.
- 4) 梶川勇樹, 檜谷治: WENO 法を用いた平面 2 次元浅水流モデルの開発, 土木学会論文集 B1 (水工学), 69 巻, 4 号, I_631-I_636, 2013.
- 5) Wu, W.-M., and Wang, S.S.Y.: Prediction of local scour of non-cohesive sediment around bridge piers using FVM-based CCHE2D Model. *Proc., 1st Int. Conf. on Scour of Foundations*, H.-C. Chen and J.-L. Briaud, eds., Texas A&M University, College Station, TX, 1176–1180, 2002.