

非定常流量に対する堰上流の局所洗掘推定モデル -静的・動的洗掘条件を包括した 常微分方程式型モデルの導出-

MODELING OF LOCAL SCOUR UPSTREAM OF A WEIR : ORDINARY-DIFFERENTIAL EQUATION BASED MODEL INTEGRATING CLEAR-WATER SCOUR AND LIVE-BED SCOUR CONDITIONS

太田一行¹・佐藤隆宏¹・新井涼允¹・中川一²

Kazuyuki OTA, Takahiro SATO, Ryosuke ARAI and Hajime NAKAGAWA

¹正会員 修(工) (一財)電力中央研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

²フェロー 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

This study presents a practical model for time-varying scouring around a weir under the condition of clear-water scour and live-bed scour for an unsteady flow rate. The model is based on the continuity law of sediment transport and empirical formula for dimensionless scour rate, resulting in a non-linear ordinary differential equation (ODE) of a scoured volume. The model also allows for predicting a maximum depth and horizontal geometric parameters in a scour hole. The present model was validated in scour tests for an unsteady flow rate. The scour topographies for computation and experiment agreed very well. The present model was also compared to a 3D simulation model of sediment transport. The accuracy of the present model was found to be comparable with the 3D simulation model. The validation results implies that the ODE-based model is able to accurately predict long term scour phenomena which are quite difficult to be predict with 3D simulations due to computational costs.

Key Words : Local scour, weir, ordinary-differential equation, three-dimensional simulation

1. はじめに

図-1に示すような開口部を有する堰の上流では、強い掃流力を伴う三次元流れによって局所洗掘が生じる。この局所洗掘の評価が河川管理において重要となる局面として、ダム改造工事あるいは撤去工事に伴う堤体・仮締め切り工の洗掘リスクが挙げられる。また、ダムゲート周辺の局所洗掘を利用して、水力発電用の取水口周辺の堆砂を除去する「部分排砂」も行われており、排砂量および排砂濃度の時間変化を精度よく評価する必要がある。従って、ダムの改造・撤去、さらには排砂・通砂といった今後特に重要となる河川事業において、堰上流の局所洗掘の予測・評価は極めて重要な研究課題である。

構造物周りの局所洗掘の予測に関しては、三次元あるいは準三次元の解析モデルの発展が目覚ましく、局所洗掘現象を精度良く解析できるモデルが過去10年間で開発されてきた¹⁾。しかしながら、中小規模を含める全ての

河川・ダムにおいて、多次元の数値解析を適用することは作業量的に現実的ではない。また、数年に渡るような局所洗掘の予測を行うことも計算量的に困難である。このため、著者らは非線形常微分方程式に基づいて、非定常流量に対する局所洗掘の時間変化を推定するモデルを考案した²⁾³⁾。本推定モデルは原理的に一次元不定流解析よりも小さな計算量で済むことから、長期に渡る局所洗掘の予測を簡便に行うことが可能である、しかし、モデルの適用範囲が静的洗掘条件(構造物の上流において土砂が移動しない条件)に留まっており、上流から土砂流入のある動的洗掘条件へのモデル拡張が課題であった。

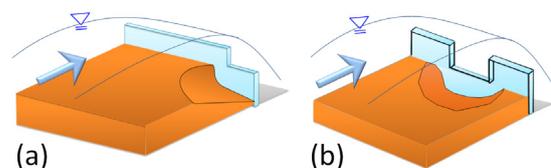


図-1 開口部を有する堰上流の局所洗掘

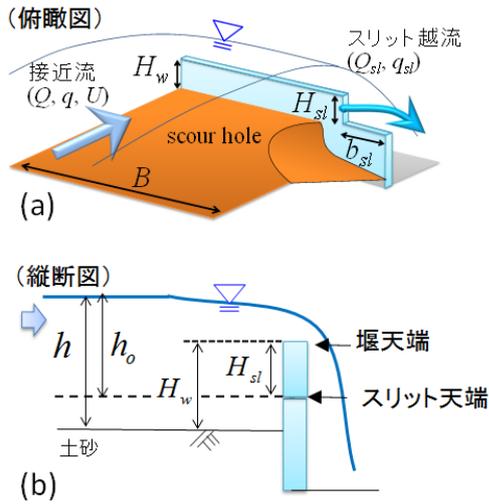


図-2 スリット堰周辺の水理量

そこで、本研究では静的・動的洗掘条件を包括した常微分方程式型の局所洗掘推定モデルの開発を行う。そして、非定常流量に対する局所洗掘の実験データを用いて、モデルの検証を行う。また、著者ら⁴⁾⁵⁾が別途開発を進めてきた三次元河床変動解析モデルとの対比により、本研究で提案する常微分方程式型モデルの性能を考察する。

2. 局所洗掘の常微分方程式型モデル

(1) 常微分方程式型モデルのフレームワーク

著者らは、流砂の連続式ならびに洗掘孔からの単位時間あたりの土砂流出量に基づいて、洗掘体積量の時間変化に関する非線形常微分方程式を導出し、洗掘の経時変化を時間積分により計算する手法を提示した²⁾³⁾。洗掘孔内における流砂の連続式は以下ようになる。

$$(1-\lambda)\frac{dV_s}{dt} = E_{sc} - Q_{b,in} \quad (1)$$

ここに、 t ：時間、 V_s ：洗掘体積量、 λ ：空隙率、 E_{sc} ：単位時間あたりに洗掘孔から流出する実質の洗掘体積量であり、本稿では便宜上「洗掘率」と定義する。 $Q_{b,in}$ ：単位時間あたりに堰上流部から洗掘孔内に流入する掃流砂量である。 $Q_{b,in}$ は、堰上流部の河床変動解析に基づいて評価することができる。従って、式(1)を実用するためには、洗掘率 E_{sc} を如何にモデル化するかが重要となる。本研究では、図-2に示す河岸にスリットを持つ堰を考えた、次節において E_{sc} のモデル化を行う。

(2) 無次元洗掘率 $E_{*,sc}$ の評価式

洗掘率 E_{sc} のモデル化にあたって、 E_{sc} を以下のように無次元化する²⁾³⁾。

$$E_{*,sc} = \frac{E_{sc}}{\sqrt{sgd} S_{ref}} \quad (2)$$

ここに、 $E_{*,sc}$ ：洗掘率 E_{sc} の無次元量、 s ：粒子の水中比重、 g ：重量加速度、 d ：粒径、 B ：水路幅、 S_{ref} ：スリット周辺における局所流の空間的なスケールを意味するパラメータであり、以下のように表される³⁾。

$$S_{ref} = Bh_o \frac{q_{sl}}{q} \quad (3)$$

ここに、 h_o ：スリット天端標高を基準とした越流水深（図-2(b)参照）、 q ：上流部における単位幅流量、 q_{sl} ：スリットを越流する流れの単位幅流量である。 S_{ref} は越流水深 h_o が大きく、スリットにおける縮流の程度を表す q_{sl}/q が大きいほど、局所流の空間スケールが大きくなることを意味している。 S_{ref} の妥当性については別論文³⁾にて議論しており、紙面の都合上、ここでは割愛する。

本節ではこれ以降、無次元洗掘率 $E_{*,sc}$ のモデル化について詳述する。まず、局所洗掘のポテンシャル（言い換えれば、堰周辺の平坦河床に作用する巨視的な掃流力）を意味する無次元量 K_U を導入する。また、洗掘孔の拡大によって、流積が拡大するため洗掘孔内の掃流力は低下し、静的洗掘の場合では静的平衡状態に近づく。言い換えると、洗掘の進行過程は洗掘孔の大きさの影響を受ける。この効果を表す無次元量 K_F を導入する。これら2つの特徴を踏まえて、無次元洗掘率 $E_{*,sc}$ に関して以下の無次元量の関係を仮定する。

$$\log_{10} E_{*,sc} = a + b \log_{10} K_U + c (\log_{10} K_F)^n \quad (4)$$

ここに、 a, b, c, n ：定数、 K_U ：局所洗掘のポテンシャルを表す無次元量、 K_F ：洗掘孔の大きさの影響を表す無次元量である。著者らの過去の検討²⁾³⁾では K_F 項を線形項($n=1$)としたが、本研究では局所洗掘の経時変化をより良好に表すために非線形項を用いる。この効果は4章にて議論する。 K_U, K_F に関しては以下に詳述する。

局所洗掘のポテンシャルを表す無次元量 K_U については、局所洗掘の実験的研究でよく用いられる「洗掘の発生限界流速」の概念⁷⁾を利用して、以下の関係を仮定する。

$$K_U = \frac{U}{U_c} \left(\frac{U}{U_c} - \frac{U_{c,sc}}{U_c} \right) \quad \text{for} \quad \frac{U}{U_c} > \frac{U_{c,sc}}{U_c} \quad (5)$$

ここに、 U ：堰上流の接近流の流速、 U_c ：等流における河床砂の移動限界（言い換えれば、限界掃流力）を断面平均流速で表したものである。 U_c には幾つかの評価式が提案されているが、本研究ではHager and Oliveto式⁷⁾を用いる。 $U_{c,sc}$ は、洗掘の発生限界時における接近流の流速である。著者ら²⁾³⁾は、構造物周辺の局所流のパラメータを用いて、以下の $U_{c,sc}/U_c$ の評価式を提案した。

$$\frac{U_{c,sc}}{U_c} = \begin{cases} 0.85(1 - \zeta^{0.314}) & \text{for } h_o < h \\ 0 & \text{for } h_o > h \end{cases} \quad (6)$$

$$\zeta = \left(\frac{h_o}{h} \right)^2 \left(\frac{b_{sl}}{B} \right) \left(\frac{q_{sl}}{q} - 1 \right) \quad (7)$$

ここに、 h ：堰上流部における水深、 b_{sl} ：スリットの幅である。なお、堰上流からスリットにかけて縮流が形成されるため、常に $q_{sl}/q > 1$ となる。式(6)により算出される $U_{c,sc}$ に対して、上流部の流速が $U > U_{c,sc}$ になれば、洗掘が発生する判定となり、式(5)において $K_U > 0$ となる。なお、 U を評価する位置は、堰付近の局所流の影響を受けずに等流と見なせて、なるべく堰に近い位置が望ましい。

式(4)における洗掘孔の影響を表す無次元量 K_F は、以下のように導出される²³⁾。

$$K_F = f\left(\frac{h_o}{h}, \frac{t_{sc}}{t_R}\right) \quad (8)$$

$$\text{with, } t_{sc} = \frac{V_s}{E_{sc}} \quad t_R = \sqrt{\frac{d}{sg}}$$

ここに、 t_{sc}/t_R 比は洗掘の時間的な段階を示す無次元量となる。平坦河床($V_s=0$)では $t_{sc}/t_R=0$ であり、洗掘孔の拡大とともに t_{sc}/t_R は増加する。また、初期河床位が高い場合（特に、スリット天端よりも高い場合）、洗掘初期において瞬間的に多量の土砂が洗掘されるため、 K_F は h_o/h の影響を受ける。式(8)において、平坦河床($V_s=0$)のときに $K_F=1$ となる拘束条件を課し、 $\log_{10} K_F > 0$ の範囲をとるように K_F を定式化すると、以下ようになる。

$$K_F = \sqrt{\frac{sg}{d}} \frac{h_o}{h} \frac{V_s}{E_{sc}} + 1 \quad (9)$$

K_F の導入によって、無次元洗掘率 E_{*sc} の評価式に V_s が入るため、洗掘孔内における流砂の連続式（式(1)）は非線形常微分方程式に帰着する。

上述の無次元量 K_U 、 K_F を用いた式(4)により無次元洗掘率 E_{*sc} を評価するが、式(4)の定数 a, b, c, n は既往の実測データに基づいて経験的に決定することができる。著者らは数年に渡り、定常流量における静的洗掘ならびに動的洗掘を対象として、非平衡状態における洗掘形状を時間毎に計測する基礎実験（静的洗掘条件35ケース、動的

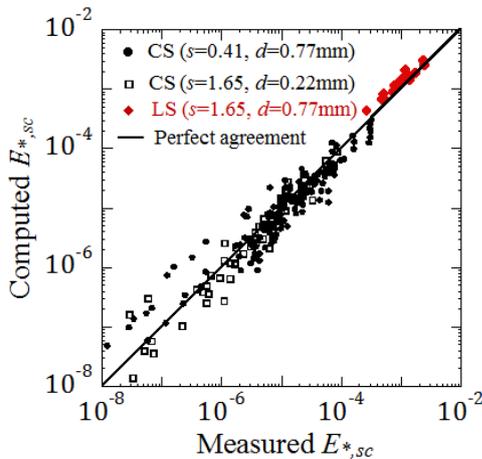


図-3 E_{*sc} の計算値と実測値の比較。凡例のCSは静的洗掘，LSは動的洗掘である。

的洗掘条件4ケース）を行ってきた³⁾⁶⁾。実験で得られた洗掘体積量の時間変化量 $\Delta V_s / \Delta t$ を式(1)左辺に適用することで、 E_{*sc} の実測値とした。ここで、式(1)における $Q_{b,in}$ については、静的洗掘条件では $Q_{b,in} = 0$ となり、動的洗掘条件では捕砂箱により別途計測した単位幅掃流砂量 $q_{b,in}$ を水路幅 B で乗じた $Q_{b,in} (=q_{b,in}B)$ により評価した。目的変数を E_{*sc} とし、説明変数を K_U と K_F とする非線形重回帰分析により各定数を決定すると、式(4)は最終的に以下ようになる。

$$\log_{10} E_{*sc} = -2.66 + 1.83 \log_{10} K_U - 9.68 \times 10^{-3} (\log_{10} K_F)^{2.71} \quad (10)$$

図-3は上式により算出した E_{*sc} を実測値と比較したものである。粒子別かつ洗掘条件別(静的洗掘：CS，動的洗掘：LS)に示している。重回帰分析における $\log_{10} E_{*sc}$ の残差の標準偏差は0.30である。全体としてバイアスもなく、図-3に示される E_{*sc} が6桁に渡る幅広いオーダーを持つ変数であることを踏まえると、 E_{*sc} の評価式として式(10)は良く適合している。

(3) 洗掘形状の幾何学的パラメータのモデル化

局所洗掘形状の幾何学的なパラメータとしては、最大洗掘深 d_s が代表的である。著者ら³⁾は、 d_s が洗掘体積量の1/3乗に比例し、 b_{sl}/B と負の相関があることを考慮して、以下の式を提案している。

$$\frac{d_s}{V_s^{1/3}} = 0.390 \left(\frac{b_{sl}}{B}\right)^{-0.383} \quad (11)$$

本稿では d_s の評価式に加えて、図-4で定義される洗掘

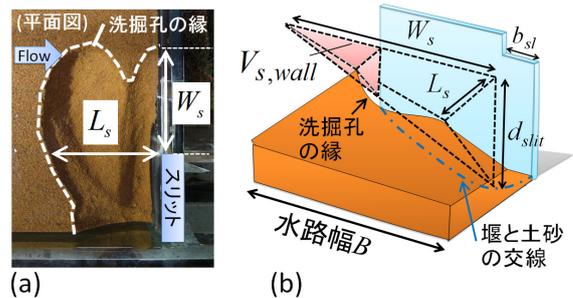


図-4 洗掘孔の特徴量。(a)洗掘長 L_s と洗掘幅 W_s の定義、(b)側岸を超過する仮想的な洗掘体積量 $V_{s,wall}$ の定義

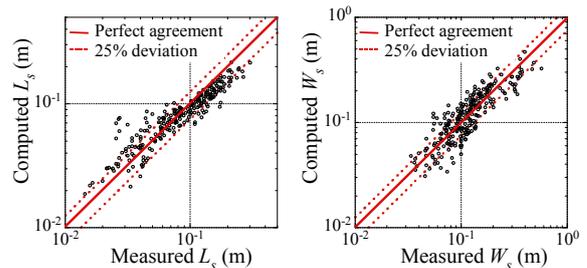


図-5 洗掘形状に関する計算値と実測値の比較。(左)：洗掘長 L_s ，(右)：洗掘幅 W_s 。

孔の縁における洗掘長 L_s 、洗掘幅 W_s の定式化を行う。著者らの既往研究⁶⁾において、スリットにおける縮流の程度が大きいほど、横断方向に洗掘孔が伸びる傾向が示されている。このため、 q_{sl}/q 比を用いた回帰分析により以下のように定式化する。

$$\frac{L_s}{V_s^{1/3}} = 1.03 \left(\frac{q_{sl}}{q} - 1 \right)^{0.129} \quad (12)$$

$$\frac{W_s}{V_s^{1/3}} = 2.52 \left(\frac{q_{sl}}{q} - 1 \right)^{-0.422} \quad (13)$$

図-5は L_s ならびに W_s に関する実測値と計算値の比較であり、概ね良好に適合していることが分かる。なお、式(10)-(13)は定常流量の実験に基づいて導出されたが、式を実用するときには数値的に時間積分（後述）を行うため、非定常流量への式の適用も可能である。

(4) 側岸を超過する仮想的な体積量

図-4(b)に示されるように、洗掘が大きく進行すると、洗掘孔の縁がスリットの対岸側の側岸に到達する。しかし、式(10)の無次元洗掘率 E_{*sc} は、スリット対岸側の側岸の影響が考慮されておらず、スリット対岸側に無限遠に伸びることが仮定されている。このため、側岸の存在により阻害される体積量を用いて、 V_s を補正する必要がある。側岸を超過する仮想的な洗掘領域に4面体形状（図-4(b)参照）を仮定すると、側岸を超過する分の体積量 $V_{s,wall}$ は幾何学的に以下ようになる。

$$V_{s,wall} = \frac{L_s d_{slit}}{6W_s^2} (W_s - B + b_s)^3 \quad \text{for } W_s > B - b_s \quad (14)$$

$$d_{slit} = 0.75d_s \quad (15)$$

ここに、 d_{slit} は堰近傍におけるスリット部と非スリット部の境界位置における洗掘深であり、最大洗掘深 d_s を用いて実験的に式(15)の関係をj得ている。なお、式(10)-(13)における定数決定のための回帰分析では、 V_s で側岸に到達しているデータを $V_s + V_{s,wall}$ として補正している。即ち、式(10)-(13)における V_s はスリット対岸側の側壁を考えない仮想的な洗掘体積量と言える。

(5) 数値解法

式(1)と式(10)を組み合わせると、1階の非線形常微分方程式に帰着し、数値的に解くことができる。本研究では、5階のRunge-Kutta法により V_s の時間変化を計算する。そして、微小時間 Δt における V_s の時間変化量 $\Delta(V_s)$ を用いて、式(11)-(13)により幾何学的パラメータの時間変化量 $(\Delta d_s, \Delta L_s, \Delta W_s)$ を算出し、数値的に積分する。洗掘がスリットの対岸側の側岸に到達した場合（即ち、 $W_s > B - b_s$ ）、式(14)により算出される側岸を超過する仮想的体積量 $V_{s,wall}$ を用いて、側岸を考慮した現実の洗掘

体積量 $V_s - V_{s,wall}$ を算出する

3. 実験によるモデルの検証

(1) 非定常流量を用いた実験との比較

前章において導出した局所洗掘推定モデルの検証のため、非定常流量の条件下における洗掘実験を行い、実験の再現計算を行った。実験は長さ10.5m、水路幅 $B=0.5$ mの水路で行われた。水路の中央部にスリット堰を設置し、堰の上流側に土砂（水中比重 $\rho_s=0.41$ 、粒径 $d=0.77$ mm）を敷き詰めた。実験ケースは、静的洗掘と動的洗掘に大別され、各々2通りの実験が行われている。表-1に実験条件を示し、図-6に流量波形を示す。静的洗掘の2ケースは凸型の階段状の流量波形が用いられており、 b_{sl}/B 比（=0.1, 0.2）のみが異なる。動的洗掘の2ケースは、流量波形が凸型と凹型で異なっており、他の設定条件は同一である。また、堰上流における単位幅掃流砂量 $q_{b,in}$ を捕砂箱により計測する予備実験を行い、流量波形における各流量 Q に対する洗掘孔への流入流砂量 $Q_{b,in}$ （ $=q_{b,in}B$ ）の関係を図-7のようにj得ている。これは、解析において $Q_{b,in}$ の実測値を用いて、流砂の連続式を解くためである。なお、比較的短い通水時間の実験であることから、全てのケースにおいて上流端からの給砂は行っていない。

表-1 非定常流量を用いた実験の条件

洗掘条件	流量波形	H_w (cm)	H_{sl} (cm)	b_{sl}/B (-)
静的洗掘	凸型	5.0	5.0	0.1, 0.2
動的洗掘	凸型, 凹型	5.0	5.0	0.2

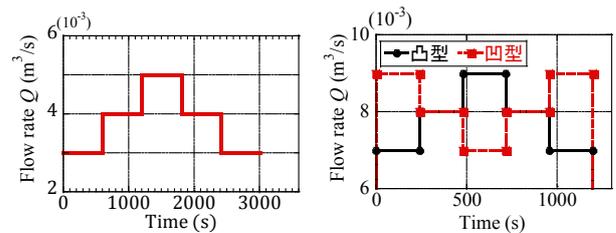


図-6 検証実験に用いた流量波形。(左): 静的洗掘条件、(右): 動的洗掘条件

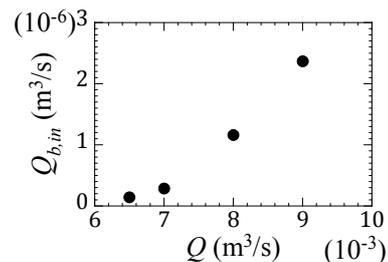


図-7 動的洗掘条件における流入流量 Q と流入掃流砂量 $Q_{b,in}(=q_{b,in}B)$ の実測値

図-8に洗掘体積量、最大洗掘深 d_s 、洗掘長 L_s 、洗掘幅 W_s に関する実験値と計算値の比較を示す。一部において20~30%の乖離があるものの、全体として良好に整合している。図-8(左)に示される静的洗掘は、実験・解析ともに増水期（ヒドログラフ前半）に加速的に洗掘が進行しており、減水期（ヒドログラフ後半）に減速している。洗掘体積量、洗掘長 L_s 、洗掘幅 W_s に関しては、 $b_{sl}/B=0.2$ の方が $b_{sl}/B=0.1$ よりも大きい方が、最大洗掘深 d_s についてのみ b_{sl}/B 比の違いによらず同程度となっている。これは式(11)で考慮されているように、 b_{sl}/B が小さいほどスリット全面において縦渦の影響が大きくなり、 d_s が洗掘体積量に対して大きくなるためである。

図-8(右)に示される動的洗掘条件では、流量波形の違いによって洗掘体積量の時間変化の特徴が大きく異なる。通水した水の総量（即ち、図-6(右)の流量波形を時間積分した値）は凹型の方が大きいにもかかわらず、実験・解析の両方において最終的な洗掘体積量と最大洗掘深 d_s は凸型の方が大きい結果となった。これは、凹型の場合では、洗掘初期に大きく洗掘されたために減水期におい

て洗掘孔内の掃流力が弱まり、上流から洗掘孔内に流入する掃流砂の量が相対的に大きくなったためである。洗掘長 L_s の実験値は、時間とともに単調増加しておらず、減少する時間帯がある。これは河床波の峰が洗掘孔内に流入し、洗掘孔の縁が堰側に戻されることを意味している。本検討では、予備実験により計測した流入流砂量 $Q_{b,in}$ を解析に用いたが、河床波の非定常的な進行速度までは考慮されていないため、洗掘長 L_s については実験と解析で乖離が生じている。動的洗掘条件における洗掘幅 W_s に関しては、実験・解析ともに凸型・凹型の両方において、ヒドログラフの前半でスリット対岸側の側壁に達した（即ち、 $W_s > B - b_s$ ）。従って、動的洗掘条件における洗掘体積量は、 $V_s - V_{s,wall}$ として側壁の影響分が補正されたものとなっている。以上の考察から、河床波の非定常的な進行が洗掘長 L_s に与える影響を除けば、すべての結果について解析と実験は良好に一致し、本モデルの妥当性が確認された。

(2) 三次元河床変動解析との比較

著者らは掃流砂-浮遊砂間の遷移過程を考慮した三次元河床変動解析モデルを別途開発し、堰周辺の流砂形態ならびに河床変動を精度良く解析できることを検証した⁴⁵⁾。ここでは、三次元河床変動解析モデルとの対比により常微分方程式型モデルの性能を考察することを意図して、過去に三次元河床変動解析の計算対象とした2ケー

表-2 三次元河床変動解析との対比のための実験条件

河床粒子	s (-)	d (mm)	Q (m^3/s)	H_w (cm)	H_{sl} (cm)	b_{sl}/B (-)
軽量粒子	0.41	0.77	4.0×10^{-3}	6.0	5.0	0.2
細砂	1.65	0.22	4.0×10^{-3}	6.0	5.0	0.2

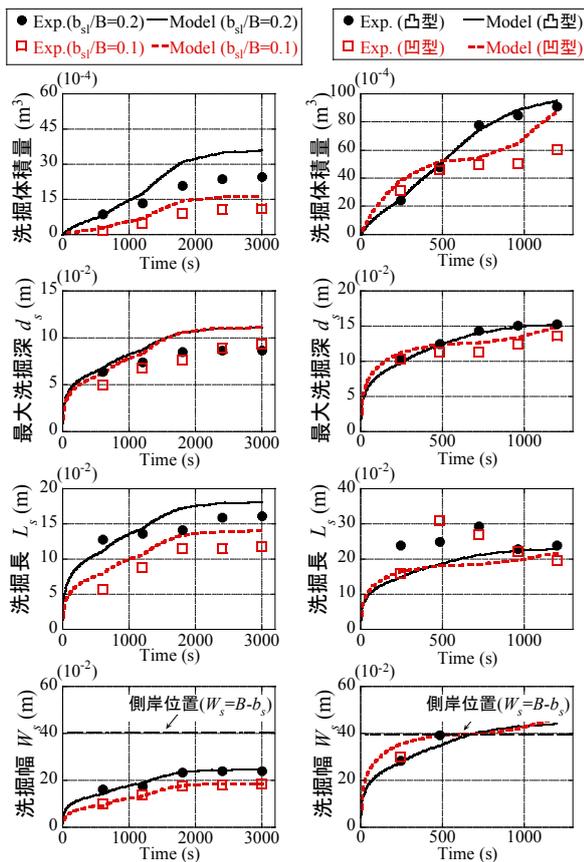


図-8 非定常流量に対する洗掘体積量、最大洗掘深 d_s 、洗掘長 L_s 、洗掘幅 W_s に関する実験値と計算値の比較。(左)：静的洗掘条件、(右)：動的洗掘条件。凡例は図の最上部に示されている。洗掘体積量は、側岸を超過する仮定の体積量 $V_{s,wall}$ により補正した $V_s - V_{s,wall}$ として示されている。

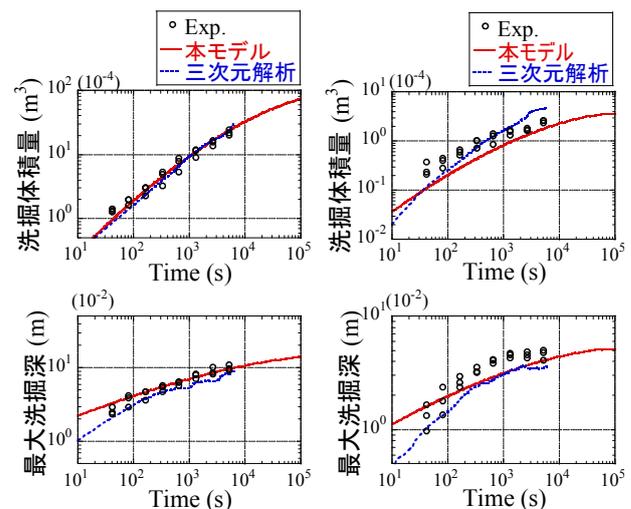


図-9 常微分方程式型モデル（本モデル）と三次元河床変動解析における洗掘体積量と最大洗掘深に関する比較。(左)：軽量粒子ケース、(右)：細砂ケース。

スの実験に常微分方程式型モデルを適用した。対象とする実験条件を表-2に示す。定常流量かつ静的洗掘条件であり、粒子の種類（軽量粒子、細砂）のみ異なる2ケースである。なお、各ケースにおいて同条件の実験が3回繰り返されている。図-9に洗掘体積量ならびに最大洗掘深の経時変化の比較を示す。全ての結果において、三次元河床変動解析と常微分方程式型モデルはいずれも実験値を良好に再現している。図-9のような定常流量の静的局所洗掘では、長い時間をかけて静的平衡状態に漸近するため、洗掘体積量と最大洗掘深は時間の対数軸に対して上に凸の曲線となり、平衡状態に近づくことが知られている⁸⁾。本モデルも時間の対数軸に対して、上に凸の曲線を適切に表している。これは、無次元洗掘率の関数形（式(4)）において K_F 項を非線形項とした効果である。 K_F 項を線形項($n=1$)とした場合には、図-9のような上に凸の曲線を表せないことを確認している²³⁾。従って、本研究のように K_F 項を非線形項とした常微分方程式型モデルにより、長期に渡る静的洗掘過程の評価も可能である。

本検討における三次元河床変動解析は約40万個の計算格子を有し、電力中央研究所内のスパコンSGI ICE Xにおいて1ヶ月の計算所要時間で行われた⁵⁾。一方、常微分方程式型モデルは汎用的なPCを用いて1分以内で計算を終えた。常微分方程式型モデルは原理的に次元不定流計算よりも計算量が小さく、多次元の解析では困難な数年に渡る長期計算も実務において可能になることが示唆される。

4. 実河川へのモデルの適用範囲

本研究では、動的洗掘条件において実測に基づいて流入掃流砂量 $Q_{b,in}$ を評価したが、本モデルを実河川に適用するときは、各種の河床変動解析により $Q_{b,in}$ を評価する必要がある。また、本モデルの一部は、洗掘実験に基づく経験式が導入されている。実験の行われた無次元数の範囲は、 $0.1 < b_{sl}/B < 0.4$, $1.8 < q_{sl}/q < 8.7$, $0.4 < U/U_c < 1.6$ である。本研究では図-1(a)のように河岸側に開口部がある場合の実験結果を基にモデル化を行った。なお、図-1(b)のように中央に開口部がある堰型式については、図-1(a)におけるスリット側河岸を対称面として幅方向に折り返して、本モデルの設定条件である水路幅・スリット幅・流量を2倍に設定することで原理的には適用できると考えられるが、今後の検証が必要である。

5. おわりに

本研究では、堰上流の局所洗掘形状を解析するための常微分方程式型モデルを提案した。非定常流量における静的洗掘・動的洗掘の実験に本モデルを適用し、洗掘形

状を良好に再現できることが示された。また、三次元河床変動解析との対比により、常微分方程式型モデルが三次元解析と遜色のない精度で洗掘形状を再現できることが示された。本解析モデルは、ダムの改造あるいは撤去に伴う堤体・仮締め切り工周辺の洗掘リスク評価、利水用取水口の埋没防止のためのゲート排砂に関する評価（排砂効率、排砂濃度）など、今後の河川管理において極めて重要となる土砂水理現象の評価に活用できるものである。特に、三次元解析を適用することが実務的に困難な中小河川・中小水力ダムにおいて、有力なツールとして期待される。

本研究では堰上流の局所洗掘を対象としたが、流砂の連続式と無次元洗掘率に基づく常微分方程式型モデルのフレームワークは橋脚・水制・ダム下流等の局所洗掘現象にも応用が可能である。このフレームワークは、従来の河床変動解析では困難であった数年規模の局所洗掘の進行予測を可能にする手法としても有望と考える。

謝辞：実験にあたり後藤吉範氏((株)セレス)の協力を頂いた。ここに記し、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 例えば、Roulund, A., Sumer, B. M., Fredsøe, J., Michelsen, J.: Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile, *J. Fluid Mech.*, Vol.534, pp.351-401, 2005
- 2) 太田一行, 佐藤隆宏, 新井涼允, 中川一: 河川横断構造物上流における局所洗掘形状の簡易推定モデル, 平成 27 年度砂防学会研究発表会, B-64, 2015
- 3) Ota, K., Sato, T., Arai, R., Nakagawa, H.: Local scour upstream of a slit weir: ordinary-differential-equation based model for scouring under steady and unsteady flow conditions, *J. Hydraul. Eng.*, 2016. (in submitting)
- 4) 太田一行, 佐藤隆宏, 中川一: 掃流から浮遊への遷移を考慮した三次元河床変動解析手法 -河川横断構造物上流の局所洗掘現象への適用-, 水工学論文集, Vol. 59, No. 4, pp.I_883-I_888, 2015
- 5) Ota, K., Sato, T., Nakagawa, H. and Kawaike, K.: Three-dimensional simulation of local scour around a weir-type structure: hybrid Euler-Lagrange model for bed-material load, *J. Hydraul. Eng.*, 2016. (in submitting)
- 6) 太田一行, 佐藤隆宏: ダムゲート直上流におけるフリーフロー型局所洗掘の経時変化, 水工学論文集, Vol.69, No.4, pp.I_1201-I_1206, 2013.
- 7) Hager, W. H., Oliveto, G.: Shields' entrainment criterion in bridge hydraulics, *J. Hydraul. Eng.* Vol.128, No.5, pp.538-542, 2002
- 8) Guo, J.: Semi-analytical model for temporal clear-water scour at prototype piers, *J. Hydraul. Res.*, Vol.52, No.3, pp.366-374, 2014

(2016.4.4受付)