

移動床水理模型実験と粒子法による 河床低下に伴う床止めの破壊現象の把握

UNDERSTANDING OF THE FAILURE CAUSED BY THE RIVER-BED
DEGRADATION USING MOVABLE BED HYDRAULIC MODEL EXPERIMENT
AND PARTICLE METHOD

樋口敬芳¹・北野和徳²・片山直哉³・須藤達美⁴・斎藤隆泰⁵・清水義彦⁶
Takayoshi HIGUCHI, Kazunori KITANO, Naoya KATAYAMA, Tatsumi SUTOH,
Takahiro SAITOH and Yoshihiko SHIMIZU

¹正会員 修(工) 群馬大学大学院 理工学府理工学専攻博士後期課程(〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)
兼 パシフィックコンサルタンツ(株)(〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22)

²非会員 修(工) パシフィックコンサルタンツ(株)(〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22)

³非会員 修(工) パシフィックコンサルタンツ(株)(〒300-4204 茨城県つくば市作谷642-1)

⁴フェロー会員 博(工) パシフィックコンサルタンツ(株)(〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22)

⁵正会員 博(工) 群馬大学大学院准教授 理工学府環境創生部門(〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

⁶正会員 博(工) 群馬大学大学院教授 理工学府環境創生部門(〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

In this study, the phenomenon that bed protection works are washed away from the downstream end is confirmed by movable bed hydraulic model experiment and numerical analysis, and the failure factor is extracted. A fluid-rigid body coupled model corresponding to the experiment is developed taking into account the interaction between flow conditions and a bed protection work. The E-MPS (Explicit Moving Particle Simulation), which is one of the particle methods, is implemented for the developed model. The numerical and experimental results show that the failure of bed protection works can be reproduced using the E-MPS. In addition, their failure limits are evaluated using several combinations of unit width flow rate and riverbed reduction amount for the developed model.

Key Words : *ground sill, bed protection work, river-bed degradation, local scour,
movable bed hydraulic model experiment, particle method, E-MPS*

1. はじめに

近年、上流からの土砂供給の減少等により河床低下が進行している河川は少なくない。堰や床止めなどの段落ち部を有する河川横断構造物は、河床低下が進行すると建設時に想定していた水叩き・護床工区間での流水の減勢が起きなくなり、護床工上の流速増大による護床工の劣化・損傷や護床工下流の河床低下が進行する。そのような状態で洪水が流下すると、護床工下流で段落ち流れが発生して局所洗掘が生じ、護床工が一気に流出するなどの急激な破壊が危惧される。河川横断構造物の破壊により堤防の損傷が決壊まで拡大すると、堤内地に大きな被害を及ぼす懸念があることから、河川横断構造物の破壊限界の評価は防災上非常に重要な課題である。

河川横断構造物下流の河床低下に起因する破壊現象の把握として、山本ら¹⁾により、屈とう性構造の被覆ブロック形式床止めを対象に移動床水理模型実験が実施されており、床止めの破壊発生状況等と水理条件の関係を単位幅流量と下流水位のマトリックスとして整理してい

る。床止めの破壊状況として、例えばその実験条件下における単位幅流量 $1,750\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ のケースでは、下流水位の低下により床止め下流の洗掘孔の拡大・河床低下が進行し、護床工下流端のふとんかごの流出をきっかけに上流側のふとんかごの流出が次々に伝播し、破壊が急激に進行していく現象が報告されている。また、内田ら²⁾は、護床ブロック群の下流端ブロックの移動限界時の流体力の特性を力学的に検討している。そこでは、下流端水位が低下すると、下流端ブロック周辺で水面勾配が大きくなるため、下流端ブロックは他のブロックより大きな流体力を受けて流出し、破壊は下流から上流へ進行することが報告されている。その他の護床工の破壊現象として、中川ら³⁾による「護床ブロックの間隙からの砂の吸い出し」、「パイピング」、「落水や転石の直接衝撃」等が挙げられる。しかしながら、山本ら¹⁾の報告にあるように、堰や床止めの下流側の河床低下が進行し、上下流水位差が大きくなる状況下で発生する下流側からの護床工の急な破壊は、堰や床止めの破壊現象として最も破局的であると考えられる。よって、その破壊限界の検討は重

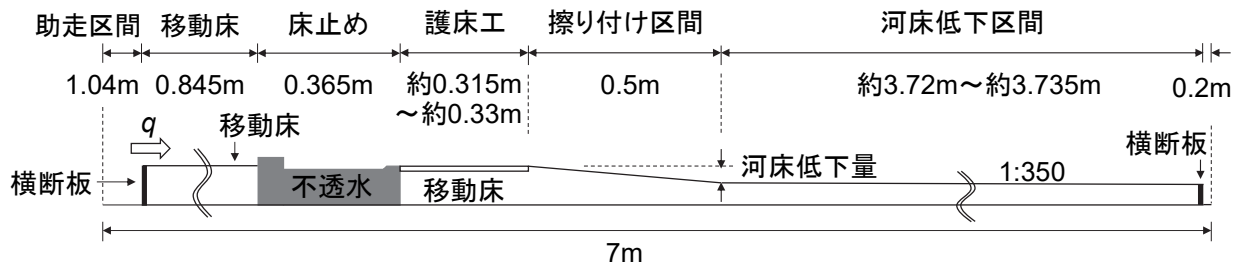


図-1 実験水路

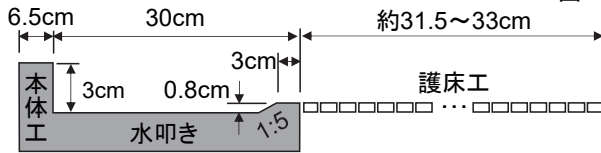


図-2 床止めの諸元

表-1 実験ケース

CASE	単位幅 流量 q (L/s/m)	河床 勾配 I	粒径 d_{60} (mm)	河床 低下量 (cm)	護床ブロック 配置間隔 (mm)
1	6	1/350	0.76	2	5 程度
2				4	0.5 程度
3					

要な課題であろう。そのような破壊の限界を評価するために、その都度、模型実験を行うことは時間と労力を要する。そのため、破壊現象を予測・評価できる数値解析モデルの構築も望まれる。しかしながら、堰や床止めの破壊現象は、流況、河床、さらに護床工が動的に相互作用しあうため、従来利用されてきたEuler的な数値流体解析法では対応が難しい点もある。

そこで、本研究では河床低下に伴い護床工の破壊が下流端から急激に進行していく破壊現象を把握するために、移動床水理模型実験と数値解析の両面から、その破壊要因の抽出と評価を行う。本研究では数値流体解析手法としてLagrange的な手法である粒子法^{4, 5, 6)}に着目する。粒子法の代表的なものとしてMPS (Moving Particle Simulation) 法があり、本研究ではE-MPS (Explicit MPS) 法⁷⁾を用いる。粒子法は、現状、圧力の評価にやや課題^{6, 8)}があるものの、格子を必要としないため、著者らが対象とする段落ち部における局所洗掘現象や護床工の流出に追従した流況計算が可能となる利点がある。また、剛体である護床工の運動は越塚⁹⁾による弱連成解析の手法を用いる。以下では、まず移動床水理模型実験による破壊現象について説明する。次に、護床工の破壊現象が把握可能な数値解析モデルの構築の一步として、E-MPS法と越塚⁹⁾の手法を用いた流況と護床工の相互作用を考慮した流体・剛体連成モデルを構築し、実験における護床工の破壊現象との比較を行う。さらに、護床工の破壊限界を評価する方法として、構築したモデルを用いて単位幅流量と河床低下量の複数の組み合わせで数値解析を行い、護床工の破壊限界の評価を試みることを行う。

2. 移動床水理模型実験による破壊現象の把握

(1) 実験方法

「床止めの構造設計手引き」⁹⁾において一般的な構造形式とされているコンクリート構造の一体式構造の床止めを対象に移動床水理模型実験を実施した。実験は長さ7m、高さ0.5m、幅0.4mの水路に、図-1に示すように床止めを設置した。床止めの諸元は図-2に示すように縦断方向に本体工6.5cm、水叩き30cmである。実験は表-1に示すとおり3ケース行い、下流端は越流する条件とした。また、護床ブロック配置間隔は縦断および横断方向の配置間隔を示している。護床工は、CASE1は約31.5cm、CASE2およびCASE3は約33cmである。本体工と水叩きの下部は不透水とした。護床ブロックは長さ1.9cm、幅

2.5cm、高さ1.3cm、密度2300kg/m³、質量14.2gの矩形ブロックを用いており、縦断方向にCASE1は13列、CASE2およびCASE3は16列とし、横断方向は水路幅全体に敷き詰めた。水路の流入部に約1mの助走区間を設け、床止め上流に0.845m、水叩き下流端から下流に約4.55mの移動床区間を設けた。なお、給砂は行っていない。河床低下量は擦り付け区間下流からの河床の低下量を表しており、擦り付け区間は護床工下流端から0.5mとした。通水時間は5分とした。

(2) 実験結果と考察

CASE1の通水5分後の河床、護床工状況を図-3(a)に示す。CASE1は護床工下流端付近から護床工下部の土砂の流出が進行し、護床ブロックが沈下するものの、大きな流出は生じなかった。また、護床工下流端に土砂が供給されるため、護床工下流で洗堀孔は発生しなかった。CASE1は護床ブロック間隙が粒径 d_{60} より広いため、水叩き部で加速された流れが護床工部に流れ込むことにより、護床ブロック間隙からの土砂の掃流砂量が多かったためであると考えられる。すなわち、中川ら³⁾が挙げている「護床工ブロックの間隙からの砂の吸い出し」にあたると思われる。

CASE2の通水5分後の河床、護床工状況を図-3(b)に示す。CASE2は護床工下流で洗堀孔の拡大が進行するものの、護床ブロックは流出しなかった。通水5分後の洗堀孔形状は洗堀孔長 $L=19$ cm、洗堀孔深 $Z_d=6.4$ cmであり、護床工下流端で潜り噴流が発生している状況であった。護床工下流端の露出深 Z_b は護床ブロックの高さ1.3cmに対して0.8cmであり、護床ブロック高の半分程度が河床に埋まっている状態であった。

CASE3の河床、護床工状況を図-3(c)～(f)に示す。CASE3はCASE2より洗堀孔拡大の進行が早く、図-3(c)の通水54秒後の洗堀形状は洗堀孔長 $L=10$ cm、洗堀孔深 $Z_d=5$ cmであり、護床工下流端で潜り噴流が発生している状況であった。護床工下流端の露出深 Z_b は護床ブロックの高さと同じ1.3cmであり、下流端の護床ブロックの下流面が河床から全て露出する状態となった。この状態となった直後、通水55秒後に下流端の護床ブロックが流出し、洗堀孔が上流側に拡大した(図-3(d))。下流端の護床ブロックの流出をきっかけに、洗堀孔の上流側への拡大を伴いながら上流側の護床ブロックの流出が次々と進行し、通水63秒後の時点で下流端から1～4列目まで

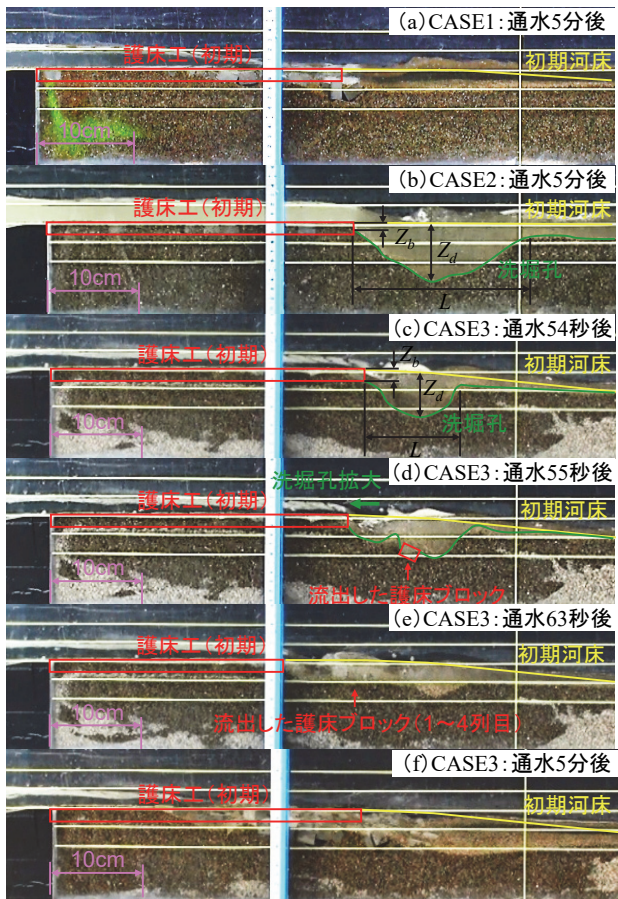


図-3 移動床水理模型実験 河床・護床工の状況

の護床ブロックが流出した(図-3(e))。その後、護床ブロックの流出は緩やかとなり、通水125秒後まで護床ブロックの流出は生じなかった。これは、常住ら¹⁰⁾による中小規模出水でみられる傾斜進行型の破壊現象であり、洗堀孔の上流側への拡大が洗堀孔に滞留する護床ブロックにより抑制された状態であると考えられる。CASE3は図-3(f)で示した通水5分後の時点で下流端から1~10列目の護床ブロックが流出し、全てが洗堀孔内に残存する結果となった。常住らの知見を参考にすると、大規模出水時には局所洗堀進行型となることから、より急速に破壊が進行することが推測される。

CASE3では、護床工下流端の護床ブロックの流出をきっかけに上流側の護床ブロックの流出が次々と進行した。そのため、下流端護床ブロックの流出要因を抽出しておくことが重要である。実際、図-3(c)の状況を確認すると、護床工下流に形成された洗堀孔のため段落ち流れとなり、潜り噴流が発生している。これにより、下流端護床ブロックの周囲は流速が速くなるとともに、流れが下向きに変化するため流体力の作用面積が大きくなり、他の護床ブロックより大きな流体力を受ける状態となっている。次に、護床ブロックが流出しなかったCASE2(図-3(b))とCASE3(図-3(c))の違いを比較する。護床工下流端の露出深 Z_b は護床ブロックの高さ1.3cmに対して、CASE2は0.8cm、CASE3は下流端護床ブロックの下流面が全て河床から露出する状態であった。つまり、CASE2の下流端護床ブロックは流出方向に対して河床からの抵抗があったが、CASE3の下流端護床ブロックは流出方向に対して河床からの抵抗がなく流出しやすい状態であったといえる。よって、CASE3における下流端の護

床ブロック流出は、下流端護床ブロックの周囲で潜り噴流が生じるため大きな流体力を受け、かつ、下流端護床ブロックの下流面が河床から全露出するに至る洗堀孔が形成されたことが要因であったと考えられる。また、護床ブロックが下流に僅かに流出すると、護床ブロック上流面に作用する流体力が増加するため、一気に流出しやすい状態になる。

以上より、本研究で対象とする「河床低下に起因して護床工の破壊が下流側から急激に進行していく現象」を評価するためには、流量や河床低下量等に応じた洗堀孔形状を把握し、その地形条件に応じた流況を把握することが重要となる。そこで、以下ではCASE2とCASE3を対象に護床工破壊現象の二次元再現解析を行う。

3. 護床工破壊現象の再現解析

(1) 流体・剛体連成モデルの構築

本研究は粒子法的一种であるE-MPS法を用いて鉛直二次元数値解析を行う。E-MPS法の詳細は例えば文献⁷⁾等を参照されたい。流体の支配方程式は次式に示す連続の式とナビエ・ストークス方程式である。

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g} \quad (2)$$

ここで、 ρ 、 t 、 $\mathbf{u}$ 、 P 、 ν 、 $\mathbf{g}$ は、それぞれ密度、時間、流速、圧力、動粘性係数および重力加速度である。なお、E-MPS法の波状跳水および潜り噴流への適用性は著者ら¹¹⁾により示されている。剛体の支配方程式は次式に示す並進、回転についての運動方程式である。

$$M \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \mathbf{F} - \mathbf{f} \quad (3)$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = N \quad (4)$$

ここで、 M 、 I 、 $\mathbf{V}$ 、 ω はそれぞれ剛体の質量、慣性テンソル、剛体重心の並進速度、回転速度である。また、 $\mathbf{F}$ 、 N はそれぞれ剛体に作用する外力とトルク、 $\mathbf{f}$ は底面から剛体に作用する摩擦力である。流体中の剛体と流体の相互作用は越塚⁹⁾による弱連成解析の手法を用いる。本手法では剛体を複数の粒子で表現し、流体との相互作用は次の方法で計算する。初めに、剛体粒子を密度の異なる流体粒子と見なして、流体粒子と同様に非圧縮性流体計算により各粒子の運動量、角運動量を計算する。次に、剛体粒子の相対位置を変化させないように、剛体全体として並進運動量と角運動量が保たれるよう各剛体粒子の速度と座標を修正し、剛体に作用する外力 $\mathbf{F}$ とトルク N を次式で求める。

$$\mathbf{F} = \sum_i^{\text{rigid}} m_{ri} \frac{\hat{\mathbf{v}}_i^{k+1} - \mathbf{v}_i^k}{\Delta t} \quad (5)$$

$$N = \sum_i^{\text{rigid}} \left\{ \left(\mathbf{r}_{ix}^k - \mathbf{r}_{gx}^k \right) \left(m_{ri} \frac{\hat{\mathbf{v}}_{iy}^{k+1} - \mathbf{v}_{iy}^k}{\Delta t} \right) - \left(\mathbf{r}_{iy}^k - \mathbf{r}_{gy}^k \right) \left(m_{ri} \frac{\hat{\mathbf{v}}_{ix}^{k+1} - \mathbf{v}_{ix}^k}{\Delta t} \right) \right\} \quad (6)$$

ここで、 m_{ri} は剛体粒子の質量、 $\mathbf{v}_i^k = (\mathbf{v}_{ix}^k, \mathbf{v}_{iy}^k)$ は計算前の剛体粒子速度、 $\hat{\mathbf{v}}_i^{k+1} = (\hat{\mathbf{v}}_{ix}^{k+1}, \hat{\mathbf{v}}_{iy}^{k+1})$ は計算後の仮の剛体

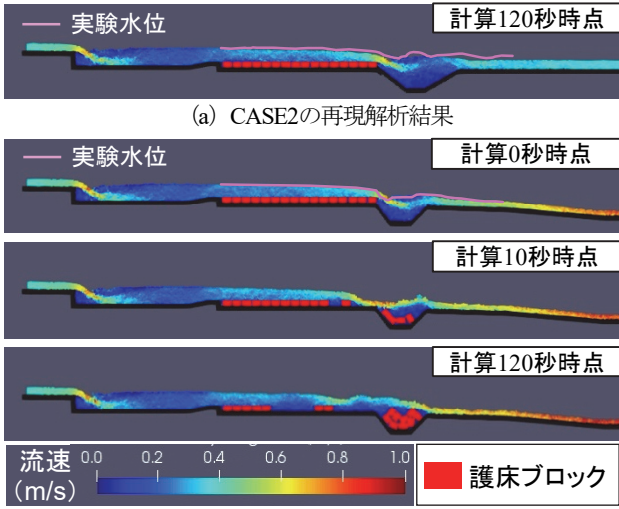


図-4 護床工破壊現象の再現解析結果

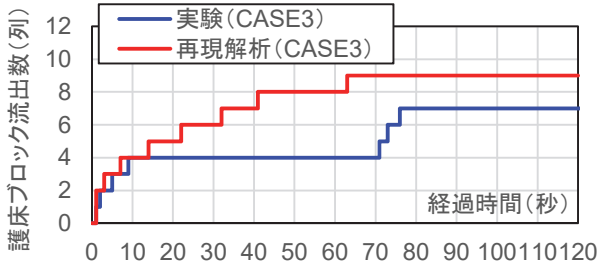


図-5 護床ブロック流出数 (列) の時間変化

粒子速度であり、 $\mathbf{r}_i^k = (r_{ix}^k, r_{iy}^k)$ 、 $\mathbf{r}_g^k = (r_{gx}^k, r_{gy}^k)$ 、 Δt はそれぞれ計算前の剛体粒子座標、剛体重心座標、時間刻み幅である。摩擦力 $\mathbf{f}$ は以下の通り計算する。

$$\mathbf{f} = \begin{cases} \mu W_w \cos \theta_b & (\text{停止時}) \\ \mu' W_w \cos \theta_b & (\text{滑動時}) \\ 0 & (\text{浮遊時}) \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 μ 、 μ' はそれぞれ静止摩擦係数、動摩擦係数、 W_w は剛体の水中重量、 θ_b は底面の傾きである。剛体に作用する垂直抗力は、剛体が流体から作用を受ける流体力を考慮すべきであるが、圧力攪乱の課題^{6, 8)}があるため、本研究では簡便に式(7)で摩擦力を算定する。式(5)、(6)、(7)を式(3)、(4)に与えることで、剛体の並進速度 $\mathbf{V}^{k+1}$ 、回転速度 ω^{k+1} が求まる。剛体の座標 $\mathbf{r}_i^{k+1}$ は並進運動と回転運動に分離し、回転行列 $\mathbf{R}$ を用いて次のとおり計算する。

$$\mathbf{r}_i^{k+1} = \mathbf{r}_i^k + \mathbf{r}_i^{\text{trans}} + \mathbf{r}_i^{\text{rot}} \quad (8)$$

$$\mathbf{r}_i^{\text{trans}} = \mathbf{V}^{k+1} \Delta t \quad (9)$$

$$\mathbf{r}_i^{\text{rot}} = \mathbf{R}(\mathbf{r}_i^k - \mathbf{r}_g^k) \quad (10)$$

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\theta = \omega \Delta t \quad (12)$$

ここで、 $\mathbf{r}_i^{\text{trans}}$ 、 $\mathbf{r}_i^{\text{rot}}$ は並進運動による剛体粒子の移動量、回転運動による剛体粒子の移動量、 θ は回転角である。

(2) 解析条件

移動床水理模型実験のCASE2およびCASE3を対象に再現解析を行う。計算範囲は流下方向に2.0mとし、下流端は越流する条件とした。地形条件は、CASE2は図-

3(b)に対応する5分時点の地形、CASE3は図-3(c)に対応する下流端護床ブロックの流出直前地形である54秒時点の地形とした。ただし、護床ブロックは長さ1.75cm、高さ1.25cmの矩形とし、これらを縦断方向に16列配置した。また、護床ブロックの縦断間隔は0.25cmとし、その隙間に流体粒子を配置した。実験では護床ブロックの縦断間隔は0.05cm程度であるが、解析は粒子径による空間解像度の制約のため0.25cmとしている。そのため、護床ブロックの上流面において流体からの作用力が過大に評価される可能性があり、微小な剛体配置に課題が残る。一方、粒子法における解析パラメータ⁹⁾である、粒子径 d 、影響半径 r_e 、音速 c は、それぞれ $d = 2.5 \times 10^{-3}\text{m}$ 、 $r_e = 5.25 \times 10^{-3}\text{m}$ 、 $c = 10.0\text{m/s}$ とした。また、動粘性係数 $\nu = 1.0 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ 、時間刻み幅 $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}\text{sec}$ とし、水の密度 $\rho_w = 1000\text{kg/m}^3$ 、護床ブロックの密度 $\rho_r = 2597\text{kg/m}^3$ とした。護床ブロックの密度 ρ_r は実験と同じブロック重量となるように $\rho_r = 2597\text{kg/m}^3$ とした。単位幅流量 $q = 6.0\text{L/s/m}$ 、静止摩擦係数 $\mu = 0.6$ 、動摩擦係数 $\mu' = 0.6$ とした。静止摩擦係数 μ と動摩擦係数 μ' は「港湾の施設の技術上の基準・同解説 (H19.7)」¹²⁾のケーソンとマウントの設計基準を参照した。また、壁面境界条件として、粒子法計算において一般的に使用される固定型の壁粒子を配置した。壁粒子の圧力は、壁面境界における圧力勾配をゼロとするため、壁面境界に面する水粒子の圧力を与えた。計算時間は、流れを定常にするため護床ブロックを固定した状態で助走計算を60秒行い、その後、本計算を120秒行った。

(3) 解析結果

CASE2およびCASE3の再現解析結果をそれぞれ図-4(a)、(b)に示す。ただし、本計算開始の時点を経過時間0秒としている。図-4(a)の計算120秒時点と図-4(b)の計算0秒時点の薄紅色の実線は、実験動画から読み取った護床ブロック流出前における護床工から洗堀孔区間の水位を示している。これより、CASE2およびCASE3の再現解析は実験時の水位を良好に再現していることが確認できる。

CASE2の再現解析は図-4(a)より、護床ブロックは流出せず、実験と同じ結果となった。次に、CASE3の再現解析は図-4(b)より、下流端の護床ブロックが流出し、下流端護床ブロックの流出をきっかけに、下流側から護床ブロックが次々と流出する実験と同様な現象を再現できた。また、図-5にCASE3における実験と再現解析における護床ブロックの流出数の時間変化を示す。実験は下流端護床ブロックの流出直前である通水54秒時点を経過時間0秒、再現解析は本計算開始時点を経過時間0秒として整理している。図-5より、実験は経過時間10秒までに下流端1列目から4列目までの護床ブロックが次々と流出している。また、経過時間10秒後においては、護床ブロックの流出が緩やかとなり、約1分間、護床ブロックの流出が生じなかった。しかし、再現解析では護床ブロックの流出が進行した。これは、実験では、洗堀孔に滞留する護床ブロックにより洗堀孔の拡大が抑制され、護床ブロックの流出が緩やかとなったが、再現解析は固定床条件で実施しているためであると考えられる。また、2列目以降の護床ブロックの流出現象は洗堀孔の上流側への拡大を伴いながら進行していく現象であるため、固定床条件での解析の場合、その流出現象の再現性に課題が残る。ただし、護床ブロック流出に伴う段落ち流れの遡上は捉えられており、上流側の護床ブロックの流体力

表-2 洗堀孔形状の整理に用いた実験ケース

単位幅流量 q (L/s/m)	河床低下量 H (cm)	河床 勾配 I	粒径 d_{60} (mm)	護床工 の有無
12	0	1/350	0.76	無
12	2			無
12	4			無
6	2			有

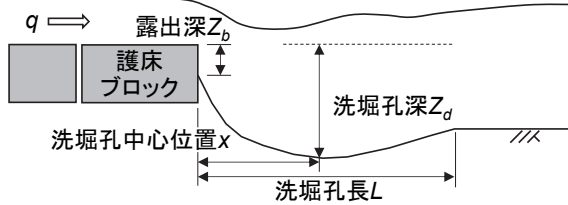


図-6 洗堀形状モデルの設定方法

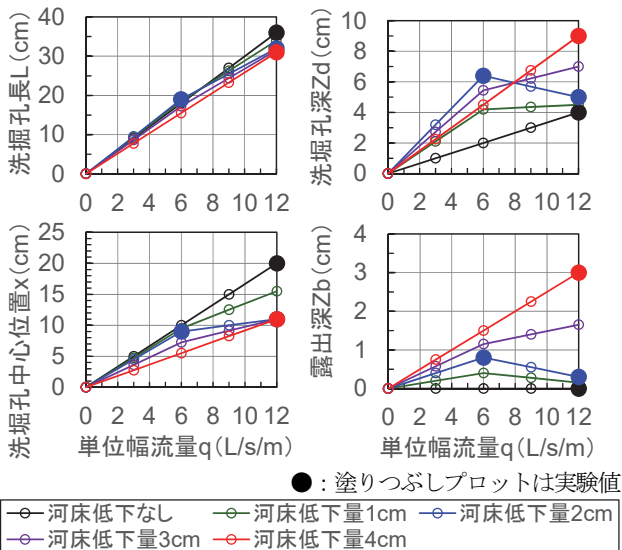


図-7 洗堀形状モデル

増加という点で一定の評価はできると考えられる。なお、実験CASE3は流量が比較的小さく、常住ら¹⁰⁾による中小規模出水でみられる傾斜進行型の破壊現象にあたる。そのため、再現解析における護床ブロックの流出は実験と比較して過大となった。常住らによると、大規模出水時でみられる局所洗堀進行型の場合、流出した護床ブロックを下流遠方に流出させながら洗堀孔は急速に上流に進行し大規模化していくことから、固定床条件での解析の場合、そのような破壊現象は過小評価されると考えられる。

以上より、再現解析により実験CASE2およびCASE3の護床ブロック流出の有無を再現した。また、CASE3について、下流端の護床ブロックが流出し、下流端護床ブロックの流出をきっかけに、下流側から護床ブロックが次々と流出していく現象を再現した。さらに、護床ブロックの流出が生じた実験CASE3について、再現解析により、洗堀孔変化の影響が比較的小さい経過時間10秒までの護床ブロック流出の進行状況を再現した。ただし、護床工の破壊現象は常住らによる傾斜進行型や局所洗堀進行型のように洗堀孔変化の影響を大きく受けることから、護床工の破壊過程をより精度よく把握するためには洗堀孔の変化を考慮したモデルの構築が必要である。また、様々な護床ブロック形状や実河川の地形形状を考慮すると、護床工の破壊現象を把握していく上で横断方向を考慮した三次元解析への拡張も有用であるといえる。

4. 数値解析を用いた護床工破壊限界評価の試み

(1) 検討方法

山本ら¹⁾は、床止め設置後に河床低下が進行していく状況を想定し、床止めが変状・破壊する水理条件として単位幅流量 q と下流端水位 h_t の組み合わせで移動床水理模型実験を実施し、各組み合わせにおける変状・破壊の状況をマトリックスとして整理している。なお、下流端水位 h_t は河床低下が進行していく状況を想定したものであり、下流端水位 h_t の低下は床止め下流の河床低下量 H と置き換えることができる。山本らのマトリックスによると、単位幅流量 q の増加および下流端水位 h_t の低下に伴い、床止めの急激な破壊進行、つまり、破壊限界となる局面になることが報告されている。また、本研究における実験CASE2とCASE3の結果より、本研究の実験条件下では、単位幅流量 $q=6$ L/s/mの場合、河床低下量 H が2cmから4cmに低下することにより、護床工が破壊しない水理条件から破壊する水理条件に移行することが確認された。

以上より、堰や床止めの下流側の河床低下が進行し、護床工が下流側から急激に破壊が進行していく現象は単位幅流量 q と河床低下量 H の関係から、その破壊限界を評価できると考えられる。よって、以下では表-3に示す単位幅流量 q と河床低下量 H の組み合わせ、計9ケースの数値解析を実施し、護床工の破壊限界の評価を試みる。

(2) 解析条件

解析条件は前章と同様である。また、前章に記述したとおり、護床ブロックの流出を評価するためには単位幅流量 q と河床低下量 H に応じた洗堀孔形状の把握が重要となる。そこで、本研究では、解析に先立ち、著者らが過去に前章の実験と同条件で実施した表-2に示す実験ケースから、単位幅流量 q と河床低下量 H に対する洗堀孔形状を、図-6に示すような洗堀孔長 L 、洗堀孔深 Z_d 、洗堀中心位置 x 、露出深 Z_b で表現する洗堀形状モデルを設定した。その洗堀形状モデルを図-7に示す。洗堀孔形状モデルにおいて、表-2に示す単位幅流量 q と河床低下量 H の組み合わせ以外のものは線形補間で設定している。本解析では単位幅流量 q と河床低下量 H に応じた洗堀孔形状を固定型の壁粒子を配置することで再現する。ここで設定した洗堀形状モデルは洗堀形状を得た実験に限りがあるため、その精度に課題があり、より正確な単位幅流量 q と河床低下量 H に応じた洗堀孔形状を把握するためには、より多くの洗堀孔形状把握のための実験を実施する必要があることに留意されたい。

(3) 検討結果

単位幅流量 q と河床低下量 H の組み合わせで数値解析を実施し、護床工の破壊限界を把握した結果を表-3に示す。ここでは本計算開始10秒後の計算結果を示している。本検討の条件下では、いずれの単位幅流量 q においても、河床低下量 H が2cmから3cmに低下すると護床工の破壊が生じることから、河床低下量 $H=3$ cmが破壊限界として評価できる。いずれの単位幅流量 q においても、河床低下量 H が2cmの場合、洗堀孔形状は下流端護床ブロックの下流面は河床から全露出していない状態となる。そのため、護床ブロックの流出に対して河床の抵抗が生じるため、護床工の破壊は生じない結果となった。また、図-8に破壊が生じた組み合わせを対象とした護床ブロックの流出数の時間変化を示す。経過時間の整理方法は前章と同様である。図-8より、単位幅流量 $q=6$ L/s/m、河床低

表-3 数値解析による単位幅流量・河床低下量に応じた護床工の破壊発生状況

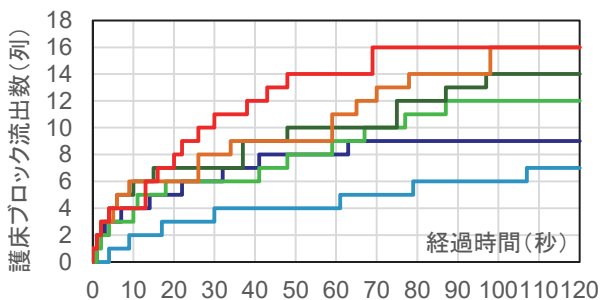
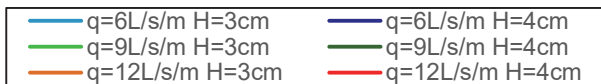
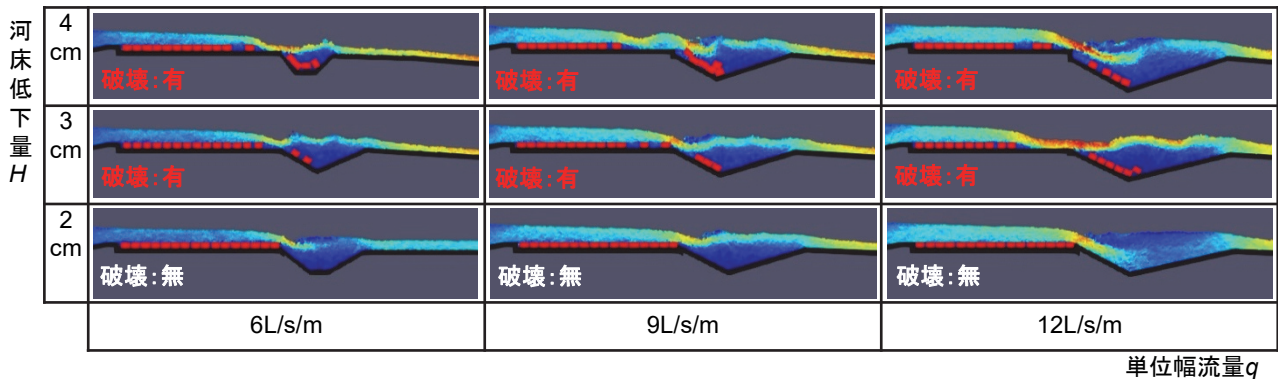


図-8 単位幅流量・河床低下量に応じた護床ブロック流出数(列)の時間変化

下量 $H=3\text{cm}$ の組み合わせを除いて、いずれの組み合わせの場合でも経過時間10秒程度までは護床ブロックの流出数に大きな差はない。経過時間10～20秒後以降は単位幅流量 q が大きく、河床低下量 H が大きいほど護床ブロックの流出が早くなる傾向が確認された。

以上より、実験等により洗堀形状を設定することにより、固定床条件の流体・剛体連成モデルを用いて、単位幅流量 q と河床低下量 H に応じた護床工の破壊限界について一定の評価が可能であることを示した。

5. おわりに

本研究の主な結果を以下に示す。

- 1) 本研究の実験条件下では、単位幅流量 q が6L/s/mの場合、河床低下量 H が2cmから4cmに低下すると、下流端の護床ブロックの流出をきっかけに、洗堀孔の上流側への拡大を伴いながら上流側の護床ブロックの流出が次々と進行していく現象となった。
- 2) 護床工下流端の護床ブロック下流面が河床から全て露出すると、流出に対して河床の抵抗がなくなるため流出しやすい状態となる。護床工の急激な破壊は下流端護床ブロックの流出をきっかけに生じるため、流量と河床低下量等に応じた洗堀孔形状を把握することが重要である。
- 3) 粒子法(E-MPS法)を用いて流況と護床工の相互作用を考慮した固定床条件での流体・剛体連成モデルを構築した。実験の再現解析により、実験CASE2およびCASE3の護床ブロック流出の有無を再現した。また、CASE3について、下流端の護床ブロックが流出し、下流端護床ブロックの流出をきっかけに、下流側から護

床ブロックが次々と流出していく現象を再現した。

- 4) 単位幅流量 q と河床低下量 H の複数の組み合わせで数値解析を実施し、護床工の破壊限界の評価を試みた。実験等から洗堀形状を設定することにより、固定床条件の流体・剛体連成モデルを用いて、単位幅流量 q と河床低下量 H に応じた護床工の破壊限界について一定の評価が可能であることを示した。
- 5) 護床工の破壊は洗堀孔変化の影響を大きく受ける現象である。そのため、護床工の破壊過程をより精度よく把握するためには洗堀孔の変化を考慮した数値解析手法の確立および適切な解析モデルの設定が必要である。

謝辞：本研究の一部は、国土交通省の河川砂防技術研究開発公募（研究代表者：清水義彦）により行われた。

参考文献

- 1) 山本陽子, 中村良二, 諏訪義雄: 被覆ブロック形式床止め工の変状水理実験から整理された研究課題, 河川技術論文集, 第24巻, pp.143-148, 2018.
- 2) 内田龍彦, 田中幸志, 福岡捷二: 護床工最下流粗度要素の移動限界と破壊の実験, 水工学論文集, 第48巻, pp.841-846, 2004.
- 3) 中川博次, 辻本哲郎, 清水義彦, 村上正吾: 堰の一被災機構としての護床工からの砂のぬけ出しによる空洞化の進行過程, 第31回水理講演会論文集, pp.359-364, 1987.
- 4) 日本計算工学会編, 越塚誠一: 粒子法, 丸善出版, 2005.
- 5) 越塚誠一, 柴田和也, 室谷浩平: 粒子法入門 流体シミュレーションの基礎から並列計算と可視化まで, 丸善出版株式会社, 2014.
- 6) 後藤仁志: 粒子法 連続体・混相流・粒状体のための計算科学, 森北出版株式会社, 2018.
- 7) 大地雅俊, 越塚誠一, 酒井幹夫: 自由表面流れ解析のためのMPS陽的アルゴリズムの開発, 日本計算工学会論文集, Paper No.20100013, 2010.
- 8) 大地雅俊, 山田祥徳, 越塚誠一, 酒井幹夫: MPS陽解法における圧力計算の検証, 日本計算工学会論文集, Paper No.20110002, 2011.
- 9) (財) 国土開発技術研究センター編: 床止めの構造設計手引き, 山海堂, 1998.
- 10) 常住直人, 高木強治, 島崎昌彦, 吉永育生: 農業取水堰下流の河床変動状況と洪水時護床変形に関する実験的検討, 河川技術論文集, 第20巻, pp.301-306, 2014.
- 11) 樋口敬芳, 片山直哉, 野口豪気, 斎藤隆泰, 清水義彦: 粒子法を用いた段落ち部における波状跳水・潜り噴流のシミュレーションと実験による検証, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.5, pp. I 661- I 666, 2018.
- 12) 国土交通省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上・下), 社団法人 日本港湾協会, 2007.

(2019. 4. 2受付)