

## 流水中の破堤拡幅防止コンクリートブロックの移動限界予測に対する MPS 法の応用

土木研究所 寒地土木研究所 柿沼 孝治・阿部 孝章・○船木 淳悟・島田 友典・飛田 大輔  
北海道河川財団 山本 太郎

### 1. はじめに

洪水によって河岸侵食が発生し堤防が危険になった時、あるいは破堤して開口部が拡大していく時などに流水中へコンクリートブロックを投下して被害の拡大を防ぐことが行われる。このとき、ブロックが投下地点付近の河床に留まらなければ予期した効果は期待できない。このため、流水や河床の条件とブロック転動の関係を知ることが重要である。現状では平坦床に静置されたブロックの重量と流水の流速を関連づけて移動限界流速を求める手法が存在する<sup>1)</sup>。しかし、静置と投下ではブロックが転動する条件が異なると考えられるため、投下ブロックの転動に関する移動限界流速を知る必要がある。本研究では、流体と剛体の相互作用運動を容易に計算できる粒子法を用いて、投下ブロックの転動に関する計算手法を提案し、その適用性を検証するための数値実験を行った。

### 2. 計算手法

ここでは、Khayyer ら<sup>2)</sup>が提案した安定化 MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法の 1 種である CMPS-HS-HL-ECS 法を用いた。一般的な MPS 法の解法については越塚<sup>3)</sup>が詳しいのでここでは割愛する。

次に剛体モデルの考え方についてその概略を述べる。MPS 法において、剛体は相対配置が固定された粒子群によって表現される。 $N$ 個の粒子からなる剛体を構成する粒子  $k$  の位置ベクトルを  $\mathbf{r}_k$ 、剛体の重心座標を  $\mathbf{r}_g$ 、慣性モーメントを  $I$  とするとこれらの関係は(1)式のように表される。

$$\mathbf{r}_g = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{r}_k, \quad I = \sum_{k=1}^N |\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_g|^2 \quad (1)$$

$$\mathbf{T} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{u}_k, \quad \mathbf{R} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{u}_k \times (\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_g) \quad (2)$$

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{T} + (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_g) \times \mathbf{R} \quad (3)$$

まず各時間ステップにおいて、流体粒子と剛体構成粒子の区別をせず非圧縮性流れの計算を行う。この段階では剛体としての相対的な位置関係は崩れてしまう。ただし、計算時間間隔は十分小さいので、崩れた剛体粒子間の相対位置関係を元に戻す処理を行う。剛体の並進速度ベクトルと回転速度ベクトルは(2)式で表されるので、各剛体粒子の速度ベクトルを(3)式の剛体運動速度ベクトルに置き換えることで、時系列に剛体挙動の追跡を行う。

### 3. ブロック転動の計算手法

前章で用いた手法は、重心が回転中心になることを前提にしたもので、水中の剛体運動の計算に適している。しかし、床に接地後のブロックは図-1 に示すように流れの下流側(図の右方向)の接地点を中心に回転する(下の図)。また、筆者らの実験<sup>4)</sup>によれば、接地点の並進運動はゼロに近い。そこで、ブロック接地後は(2)式の  $\mathbf{r}_g$  を接地点に置き換え、さらに(5)式の  $\mathbf{T}$  をゼロとすれば概ね実験の結果と整合すると考えられた。

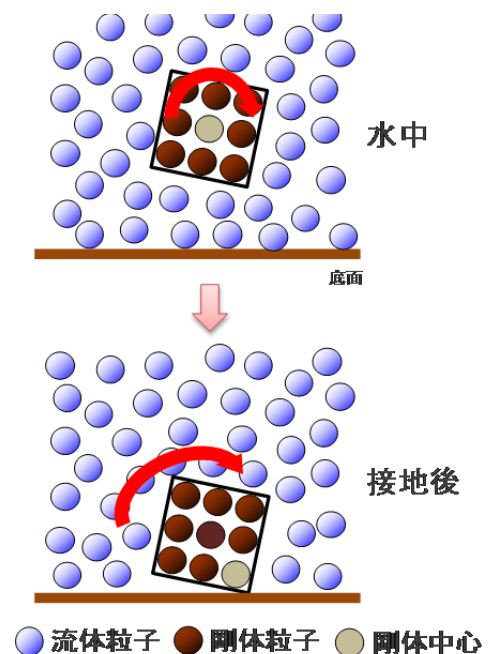


図-1 水中と接地後の回転運動のちがいを示す

キーワード 粒子法, コンクリートブロック, 流水投下, 転動

連絡先 〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3-1-34(国研)土木研究所 寒地土木研究所 TEL: 011-841-1639

#### 4. ブロック転動に関する数値実験

計算の粒子配列を図-2に示す。直径 0.2m の粒子を鉛直 2 次元に配列して水路（縦断方向 25m、高さ 3m）を表し、左端 4 列及び右端と下端の 3 列の粒子は水路躯体（移動しない個体粒子）とし、その他は水粒子とした。水路左端からは水粒子を水平右方向に流速 1.5m/s で次々発生させることで流入境界を再現した。また、水路右側底部の幅 4.4m の粒子を鉛直下向きに流速 5.0m/s で流出させることで、水路に流れを生じさせた。計算開始から 10 秒後に流れは概ね安定し、このとき流速は水路中央付近で約 3m/s となった。ブロック（剛体粒子）は始め水面上空に固定し、流れが安定する 10 秒後に落下させた。なお、水粒子は密度 1.0g/cm<sup>3</sup>、剛体粒子は密度 2.5g/cm<sup>3</sup>とした。



図-2 計算粒子の配列及び粒子の流入・流出箇所

図-3（左）は、たてよこ 1.2m の十字型ブロックを投下したときの計算結果である。なお、描画範囲はブロック投下位置の前後とし、ブロックの動きを追えるように同一箇所に赤点マーカを上書きした。最上段から下に向かって 0.5 秒間隔の計算結果を示している。投下後約 1 秒で接地するが、この間下流に流されつつ左回転しているのがわかる。接地後は右回転しながら下流へ転動している。

山本ら<sup>4)</sup>の実験では、十字ブロックに比べて扁平形状のブロックは転動しづらいことが確認された。この傾向が数値計算上も現れるか確かめるため、三角形ブロックを投下させた。計算結果は図-3（右）に示すように、落下して接地するまで徐々に下流に流されるが接地後に転動はしなかった。

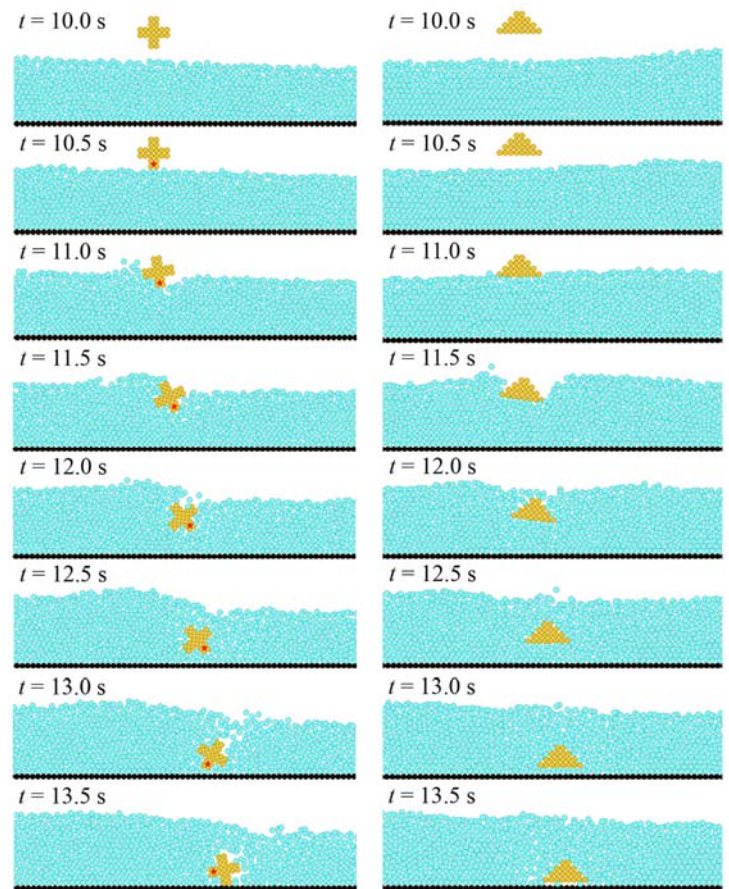


図-3 計ブロック投下の計算結果

(左：十字ブロック、右：三角ブロック)

#### 5. まとめ

本研究では、粒子法を用いて流水中のブロック転動の計算手法を検討し、ブロック形状による転動のしやすさを定性的に表現できることを示した。今後は実験結果との定量比較を行い計算精度を向上させることが必要である。その上で、今後鉛直流速分布を再現するための粗度、乱流（運動量交換）のモデル化、ブロック背面の負圧の導入、ブロック接地点の並進運動のモデル化等について今後検討を進めて行く予定である。

#### 参考文献

- 1) 国土技術研究センター，護岸の力学設計法，153 p., 2007.
- 2) Khayyer ほか，Enhancement of stability and accuracy of the moving particle semi-implicit method, *Journal of Computational Physics*, Vol. 230, Issue 8, pp. 3093-3118, 2011.
- 3) 越塚誠一，粒子法，計算力学レクチャーシリーズ 5，丸善，2005.
- 4) 山本太郎ほか，洪水の流水中にブロックを投入した際の転動しやすさに関する水理実験と力学的考察，土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.71(4), I\_517-I\_522, 2015.