

京都大学工学部 学生員 ○松藤 慶之
 京都大学工学研究科 正会員 後藤 仁志
 京都大学工学研究科 正会員 五十里 洋行

1. はじめに

放流による河床の洗掘はダムを支持する地盤に影響を与えるため、河床の局所洗掘解析は極めて重要である。そこで本研究では洗掘を再現するにあたり、分裂・合体のような複雑な条件下でも安定な解析が可能なMPS法を用いて、後述する複数の固相モデルを比較して、それらの再現性の検討を行う。

2. 数値解析手法

2.1 高精度粒子法

本研究ではポアソン方程式の生成項の粒子数密度の実質微分と、ラプラシアン項の数学的定義に着目して行った高精度化(MPS-HS-HL法)に加えて、MPS法で用いられる圧力勾配項を高精度化する高精度粒子法(MPS-GC法)を用いて計算を行う。

MPS-GC法では、従来型のMPS法の勾配モデルは、周囲の粒子配置が偏りなく均等に配置されている場合のみ厳密に正しいが、不規則な粒子配列でも圧力勾配項の計算1次精度が保障される以下のモデルを用いる。

$$\langle \nabla p \rangle_i = \frac{D_s}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{p_j - p_i}{r_{ij}^2} \mathbf{C}_{ij} \mathbf{r}_{ij} w(r_{ij}) \quad (1)$$

$$\mathbf{C}_{ij} = \begin{pmatrix} \sum_{ij} V_{ij} \frac{w_{ij} x_{ij}^2}{r_{ij}^2} & \sum_{ij} V_{ij} \frac{w_{ij} x_{ij} y_{ij}}{r_{ij}^2} \\ \sum_{ij} V_{ij} \frac{w_{ij} x_{ij} y_{ij}}{r_{ij}^2} & \sum_{ij} V_{ij} \frac{w_{ij} y_{ij}^2}{r_{ij}^2} \end{pmatrix}^{-1}; V_{ij} = \frac{1}{\sum_{j \neq i} w_{ij}} \quad (2)$$

ここに、 p : 圧力、 D_s : 次元数、 n_0 : 基準粒子数密度、 $\mathbf{r}_{ij} = (x_{ij}, y_{ij})$: 粒子 i, j 間の相対位置ベクトル、 w : 重み関数である。

2.2 固相モデル

2.2.1 固液二相流モデル¹⁾

固液二相流モデルでは、固相を砂と同じ密度を持つ流

体として液相と同様に連続式と運動方程式を解くことで固液混相流を解析する。

2.2.2 DEM カップリングモデル²⁾

固相・液相をそれぞれ別の離散化空間で解き、固相の密度、粘性係数と固相の回転を考慮した局所速度を液相に投影する。このとき体積占有率 ϕ を用いて混相粒子の物理量 θ (粘性係数、密度)は以下、

$$\bar{\theta} = \theta_l (1 - \sum \phi) + \sum \theta_s \phi \quad (3)$$

$$\bar{\mathbf{u}}_l = (\mathbf{u}_s + \mathbf{r}_{ls} \times \boldsymbol{\omega}_s) \phi + \mathbf{u}_l (1 - \phi) \quad ; \quad \mathbf{r}_{ls} = \mathbf{r}_l - \mathbf{r}_s \quad (4)$$

で示され、 $\mathbf{u}$: 速度ベクトル、 $\boldsymbol{\omega}_s$: 固相回転角速度ベクトル。添え字 l, s は液相および固相を示す。固相間の衝突力は、DEMと同様に計算される。

2.2.3 簡易侵食モデル³⁾

河床表層を固定壁として取り扱い、河床近傍流速に基づいて固定壁の位置を低下させることで、侵食過程を再現する。本研究では侵食過程として河床表層に平行な底面近傍流速によるせん断のみを考慮して侵食を模擬する。また侵食速度を加速するパラメーターにより、計算時間の短縮が可能である。

3. 河床洗掘シミュレーション

3.1 数値シミュレーション概要

本研究の初期条件を図-1に示す。模型縮尺は1/60である。本研究は図-1に示す断面二次元水路において、砂を敷き詰めた河床の洗掘過程をそれぞれ3つの数値シミュレーションモデルにて再現し、もっとも良好な再現性を示す数値モデルの検討を行う。なお、砂層直前の長さ0.61m部分がダム堤体部(ゲート全開)に相当する。表-1に計算条件を示す。DEMカップリングモデルで用いた砂粒子密度は計算時間を考慮して軽量化した。



図-1 初期条件

表-1 計算条件

水・砂粒子 粒径	流量（模型値）	固液二相流モデル 砂粒密度	DEM カップリングモデル 砂粒密度
0.01m	0.0133 m ³ /s/m	2600kg/m ³	1200kg/m ³

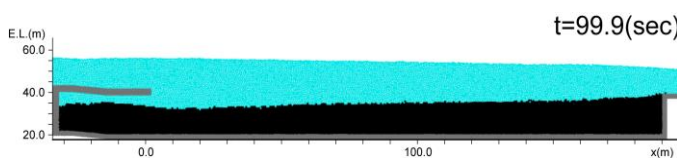


図-2 固液二相流モデルの計算結果

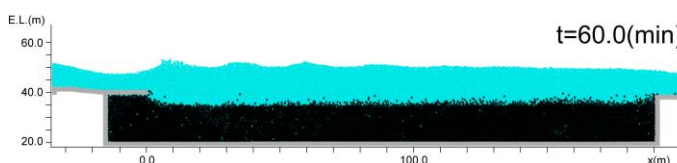


図-3 DEM カップリングモデルの計算結果

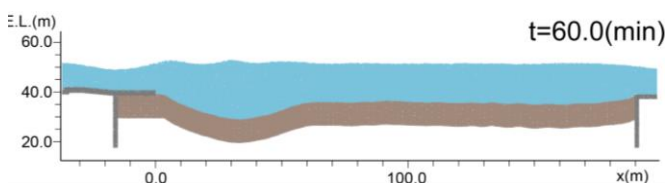


図-4 簡易侵食モデルの計算結果

3.2 数値シミュレーション結果

実験結果と計算結果の洗掘形状の比較を行う。図-2 に固液二相流モデルによる $t=99.9(s)$ における計算結果を示す。計算開始後、堤体部直下に空洞が発生した。これは堤体部先端で洗掘が進むが、固相を流体として解くために、固相は表層を水平に保とうとして、堤体部直下にあった固相が堤体部先端に流出し、代わりに液相が堤体部直下へ流れたためである。

図-3にDEMカップリングモデルによる $t=60.0(min)$ の洗掘の瞬間を示す。DEM カップリングモデルの場合、固液二相流モデルの時に見られた堤体部直下への洗掘の進行は見られることはなかったが、計算時間を考慮して軽量

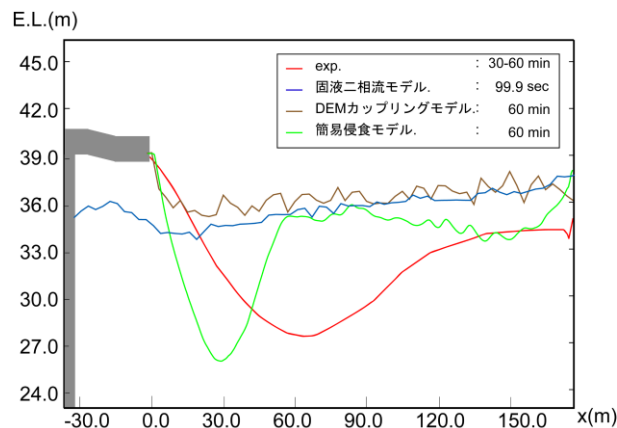


図-5 3つのモデルと実験結果の比較

化した砂粒子は、せん断力の小さい下流側でも洗掘され、浮遊している様子が確認された。

図-4 に簡易侵食モデルの $t=60.0(min)$ の瞬間像を示す。簡易侵食モデルの場合は洗掘深の最大となる位置は実験よりやや上流側になるものの、図-5 に示すとおり最大洗掘深は実験結果とほぼ同レベルに大きく進行した。洗掘形状も実験結果に最も近い。

4. おわりに

研究では高精度粒子法を用いて、洗掘を記述する 3 つの数値シミュレーションモデルで再現性を検討した。簡易侵食モデルは必ずしも十分とは言えないが最も高い再現性を示すことが確認できた。

謝辞：計算の検証に際して電源開発株式会社より実験データの提供を受けたことを記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 後藤仁志, 林稔, 酒井哲郎：固液二相流型粒子法による大規模土砂崩壊に伴う水面波の発生過程の数値解析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 第 49 巻, No.719, II-61, pp.31-45, 2002.
- 2) 鶴田修己, 後藤仁志, 五十里洋行, 原田英治：高精度 3D-DEM-MPS 法による多数粒子群定常沈降過程の計算力学的検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 第 59 巻, Vol.68, No.2, pp.851-855, 2012.
- 3) 後藤仁志, 五十里洋行, 谷岡弘邦, 山本和久：粒子法による河川堤防裏法侵食の数値シミュレーション, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.979-984, 2008