

012 3次元個別要素法による鋼製オープン型砂防ダム機能評価法に関する研究

防衛大学校 建設環境工学科 ○深和岳人 香月 智 石川信隆

1. 緒言

近年、上下流一貫した「流砂系」管理が重要視されるようになり、鋼製オープン型砂防ダムが数多く建設されるようになってきた。このオープン型砂防ダムの閉塞性能は、格子間隔の大きさにより決定されるが、この評価方法は従来実験によるものが主であった。一方著者ら¹⁾は、水野ら²⁾の研究を応用して、2次元の個別要素法を用いたランダムシミュレーションおよび確率過程に基づく評価手法を提案した。本研究は、3次元構造を有する鋼製オープン型砂防ダム間隙部の閉塞が、複数粒子による3次元的なかみ合わせによることに着目し、3次元個別要素法によるシミュレーション法の開発を試み、別途行った実験との比較を行ったものである。

2. 閉塞効果確認実験

実験は、図-1に示すような実験装置を用いて行った。粒径が約2.0, 1.5, 1.0, 0.5 cmの4種類の粒子をそれぞれ概ね100個, 200個, 500個, 2200個ずつ混合させた砂礫塊を作り、これを水路最上流部に配置する。そのうえで、流量約3.0 l/sを与え、土石流モデルをつくり、最下流部に最大粒径 d_{max} と横梁の格子間隔 l の比を $l/d_{max}=1.5, 2.0, 2.5$ および横梁なしと変化した砂防ダムモデルを配置し、捕捉状況を観察した。写真-1は砂礫群が流れ出し、ダム衝突直前から $l/d_{max}=1.5$ の捕捉状況を示したものである。流体力により押し流された砂礫群は、先頭部がやや盛り上がった状態で流下し、ダムの衝突直前にはさらに盛り上がった状態になり、ダムに衝突する。その後、砂防ダム模型により砂礫群がせきあげられ、ダムの間隙部を閉塞する。写真-2は中間梁を取り除いた場合の捕捉状況を示したものである。 $l/d_{max}=1.5$ の時と同様に塞き上げられた砂礫群は一時的に間隙部が閉塞するかのような挙動を示すが、その後後続流により押し流され、最終的には全ての粒子が通過してしまっている。写真-3は $l/d_{max}=1.5$ のときの捕捉最終状況を正面および側面から写したものである。格子ダムの間隙部の閉塞は、粒径2.0, 1.5cmの粒子を中心に複数要素のかみ合わせによりなされていることがわかる。

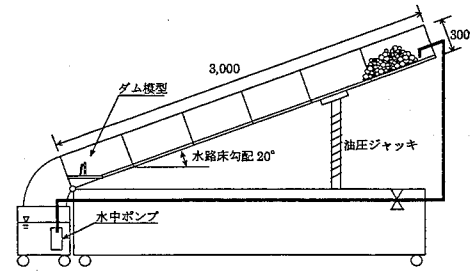


図-1 実験装置

3. 3次元個別要素法を用いたシミュレーション解析

実験で行った各砂礫の挙動を追跡するために、砂礫要素を球要素にモデル化した3次元個別要素法を用いる。図-2に示す j 要素が接触する i 要素の6自由度を有する並進、回転方向の運動方程式は、図中 γ, β により法線方向 n 、卓越滑り方向 s に局所座標変換された図-3の接触モデル図に示す接触力を用いて次式で示される。

$$m_i \ddot{\mathbf{x}} = \sum_{j=1}^n (\mathbf{T}_{ij}^n f_{ij}^n + \mathbf{T}_{ij}^s f_{ij}^s) + \mathbf{f}_w + m_i \mathbf{g} \quad (1)$$

$$I_i \ddot{\boldsymbol{\omega}} = \sum_{j=1}^n r_i \mathbf{T}_{ij}^r f_{ij}^s \quad (2)$$

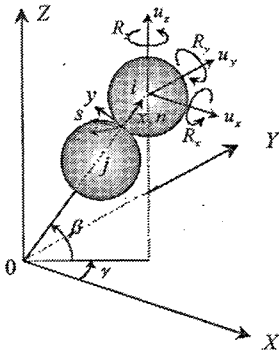


図-2 全体座標系から局所座標系への変換

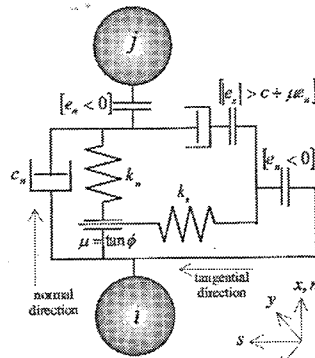


図-3 局所座標系における接触モデル図

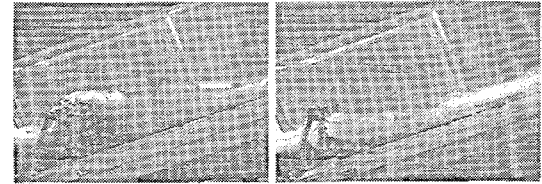
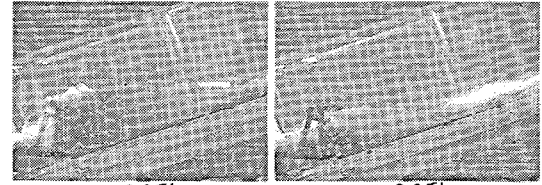
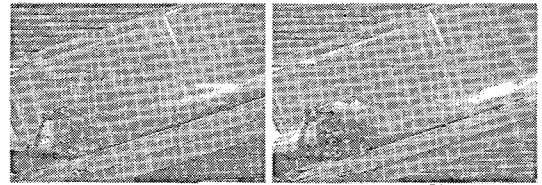
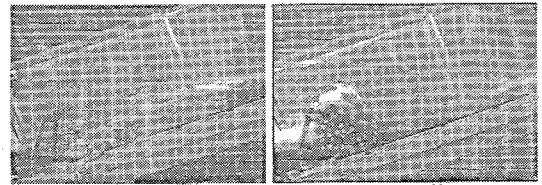


写真-1 流れ状況 ($l/d_{max}=1.5$)

写真-2 流れ状況 (横梁なし)

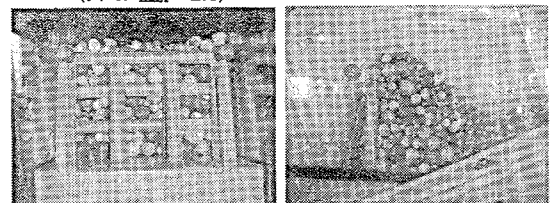


写真-3 捕捉状況図 ($l/d_{max}=1.5$)

ただし、 m_i : 質量、 f^n : 法線方向に働く力、 f^s : せん断方向に働く力、 f_w : 流体力、 I_i : 慣性モーメント、 r_i : 要素の半径、 $\ddot{\mathbf{x}}$ 、 i 要素の加速度、 $\ddot{\omega}$: i 要素の角加速度、 $\mathbf{T}_{ij}^n, \mathbf{T}_{ij}^s, \mathbf{T}_{ij}^r$ 、それぞれ法線方向、卓越滑り方向、回転方向バネ力の全体座標系への座標変換マトリクス、 n : i 要素に接触する要素数である。

局所座標系における粒子間、粒子と河床面間、粒子とダム要素間における接触力、および流体力は次式により求まる。

$$f_{ij}^n = k_n \delta_n + c_n \dot{\delta}_n \quad (3)$$

$$f_{ij}^s = k_s \delta_s + c_s \dot{\delta}_s \quad (4)$$

$$\mathbf{f}_w = \frac{1}{2} \rho_w C_D A_i |\mathbf{v}_w - \mathbf{v}| (\mathbf{v}_w - \mathbf{v}) \quad (5)$$

ここで、 k_n : 法線方向のバネ定数、 k_s : 接線方向のバネ定数、 c_n : 法線方向の減衰定数、 c_s : 接線方向の減衰定数、 δ_n : 法線方向のバネ変形量、 δ_s : 接線方向のバネ変形量、 $\dot{\delta}_n$: 法線方向の速度、 $\dot{\delta}_s$: 接線方向の速度、 ρ_w : 水の密度、 C_D : 抗力係数、 A_i : 要素の水平方向の投影面積、 \mathbf{v} : 要素の移動速度、 \mathbf{v}_w : 流速である。なお、河床面は三角形要素、砂防ダム格子部は円柱要素によりモデル化し、これらは動かないものとした。以上を全粒子において時間方向にオイラー積分することにより各粒子の挙動を追うことができる。

4. 解析結果

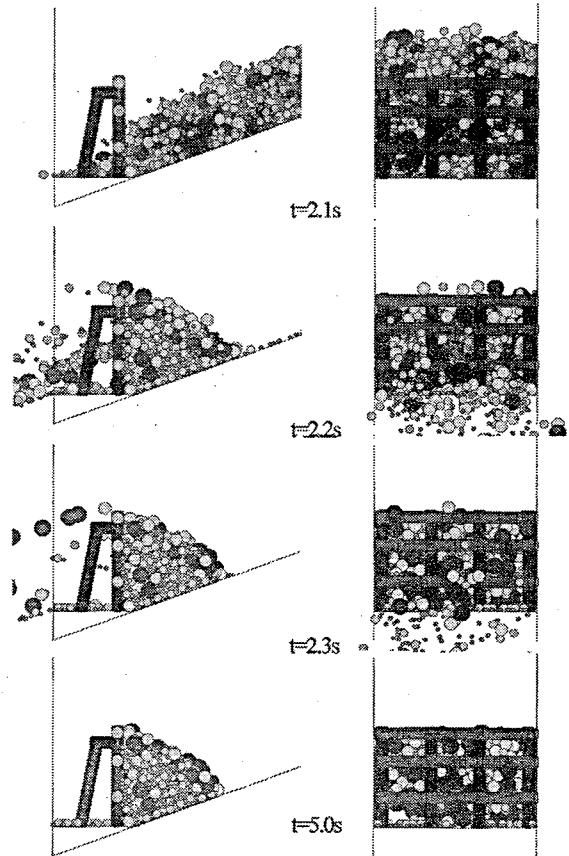
解析は、まず流下過程から行った。その結果、初期配置から砂礫群は後方の粒子が前方の粒子を巻き込むような挙動を示しながら一塊となって流下する。その後、解析開始後 1.9 秒後には砂礫群は初期配置から約 200cm 移動し砂防ダム間際に近づく。図-5 は横梁間隔 $l/d_{\max} = 1.5$ 、縦梁間隔 $l/d_{\max} = 2.25$ の場合における、砂礫群の捕捉過程を側面、正面図として示したものである。2.1 秒後に先頭部の粒子が間隙最下段部を通過し始める。2.3 秒後には砂礫群は最上段部に到達し、閉塞に向かいつつある。その後 5.0 秒後には完全に閉塞している。また最終捕捉状況を正面から見ると、実験と同様に粒径 2.0、1.5cm の粒子を中心にして複数粒子のかみ合わせにより間隙部が最上段部まで閉塞していることがわかる。図-6 は横梁なし（最上段のみ）、縦梁間隔 $l/d_{\max} = 2.25$ の場合における捕捉過程を示したものである。2.2 秒後には相当数の粒子が通過しているものの、一部の粒子が一時的に塞き上げられているような挙動を示す。しかし、2.3~5.0 秒後にはほぼ全ての粒子が通過してしまっていることがわかる。以上のシミュレーション結果は、両者ともに実験結果を概ね良好に再現できていると言える。

5. 結言

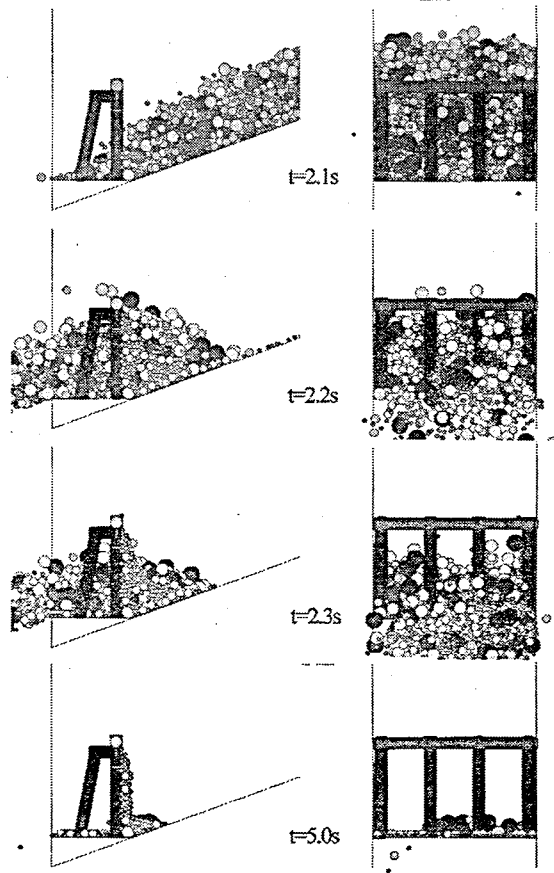
本研究は、3次元個別要素法を用いて鋼製オープン型砂防ダムの土石流捕捉効果解析を行ったものである。本手法により、実験時における砂礫群の捕捉状況を格子間隔に応じて、概ね良好にトレースできることが認められた。

謝辞：本研究のうち、実験については(財)建設技術研究所、小田晃氏のお世話になった。記して感謝の意を表す。

参考文献：1) 深和、香月、石川：個別要素法によるオープン型砂防ダムの巨礫せき止め効果解析、土木学会第 56 回年次学術講演会概要集、pp150~151,2001. 2) 水野、水山、南、倉岡：個別要素法を用いた鋼管製透過型砂防ダムの土石流捕捉効果に関するシミュレーション解析、砂防学会誌、vol.52, No.6, pp.4-11, 2000.



側面図 正面図
図-5 捕捉状況図 (横梁間隔 $l/d_{\max} = 1.5$)



側面図 正面図
図-6 捕捉状況図 (横梁なし)