

防衛大学校建設環境工学科 ○学生員 宮川 千尋 正 員 深和 岳人 正 員 香月 智

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、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。オープン型砂防ダムは、平常時は小さな石礫を通し、土石流が発生した場合のみ土粒子等でその間隙を閉塞し、砂防ダムとしての役目を果たすものである。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。本研究は、間隙部の閉塞が複数要素の粒子による3次元的なかみ合わせによることに着目し、間隙部の閉塞について3次元個別要素法¹⁾²⁾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, 2000個ずつ混合させた砂礫モデル塊を作り、これを水路最上流部にセットする。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_1 の比を $L/d_{max}=1.5, 2.0, 2.5$ および横梁なしと変化させた砂防ダムモデルを置き、捕捉状況を確認した。写真-1は砂礫群が流れ出してから中間部およびダム衝突直前、捕捉過程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、水路中央部で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で、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 $L/d_{max}=1.5$ 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, 1.5 cm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。

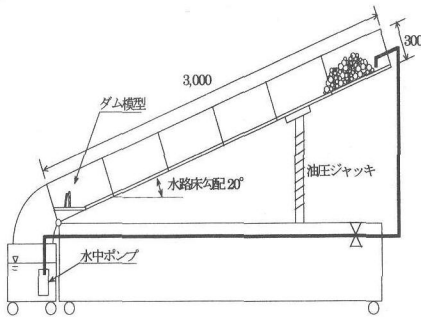


図-1 実験装置

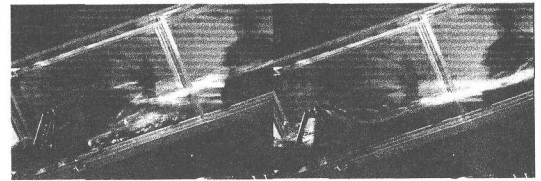
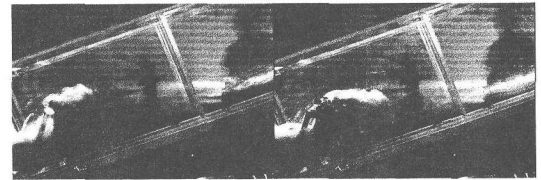
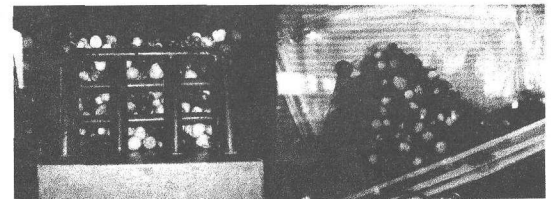
(a) $t=2.0$ 秒 (b) $t=2.3$ 秒(c) $t=2.5$ 秒 (d) $t=2.8$ 秒

写真-1 流れ状況



(a) 正面図 (b) 側面図

写真-2 捕捉状況図 ($L/d_{max}=1.5$)

3. 3次元個別要素法を用いたシミュレーション解析

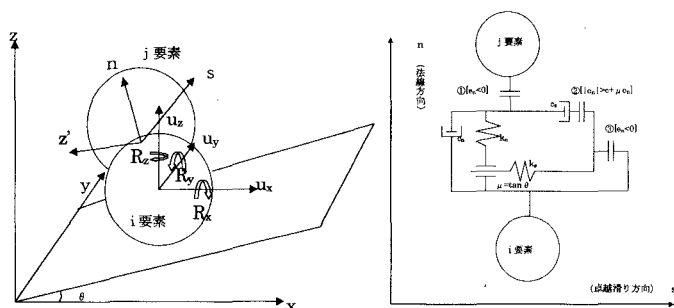
実験で行った礫要素各個の挙動を追跡するために、礫を球形要素にモデル化した3次元個別要素法を用いる。図-2(a)に示す6自由度を有する要素の並進および回転に関する運動方程式は図-2(b)に示す接触点ごとの局部座標系（法線方向を x 、卓越滑り方向を s とする）での接触力を用いて、次式で示される。

$$m_i \ddot{x} = \sum_{j=1}^n (T_{ij}^n f_{ij}^n + T_{ij}^s f_{ij}^s) + f_w + m_i g \quad (1)$$

$$I_i \ddot{\omega} = \sum_{j=1}^n r_{ij} T_{ij}^s f_{ij}^s \quad (2)$$

キーワード：砂防ダム，3次元個別要素法，土石流

連絡先：〒239-8686 神奈川県横浜須賀町走水1-10-20 防衛大学校建設環境工学科 TEL(0468)41-3810 FAX(0468)44-5913



(a) 全体座標系

(b) 局部座標系における
接触モデル図

図-2 個別要素モデル

ただし、 m_i :質量、 f^n :鉛直方向に働く力、 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、 $\ddot{x}$:要素の加速度、 $\ddot{\omega}$:角加速度、 $T_j^n, T_j^s, T_{b_j}^s$: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の座標変換マトリックス、 n :要素数

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。

$$f^n = k^n \delta^n + c^n \dot{\delta}^n \quad (3)$$

$$f_j^s = k_j^s \delta_j^s + c_j^s \dot{\delta}_j^s \quad (4)$$

$$f_w = \frac{1}{2} \rho_w c_d A_i |v_w - v| (v_w - v) \quad (5)$$

ただし、 k_n :接線方向のバネ定数、 k_s :法線方向のバネ定数

c_n :接線方向の減衰係数、 c_s :法線方向の減衰係数、

δ_n :接線方向のバネ変形量、 δ_s :法線方向のバネ変形量、

$\dot{\delta}_n$:接線方向の速度、 $\dot{\delta}_s$:法線方向の速度、 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、 v :要素の

移動速度、 v_w :流速

これをオイラー積分して個別要素解析する。

4. 解析結果

図-3 は格子間隔を $L/d_{max}=1.5$ とした場合の砂礫要素の流動状況および捕捉状況の時刻歴変化を示したものである。初期配置された砂礫群は水路床面と平行に作用する $v=2.0m/s$ に相当する流体力と重力により押し流される。その後砂礫群は一塊りになって流下し、2秒後には初期配置から約240cm移動し、砂防ダム模型に迫っている。この際、先頭部には大きめの粒子が集中している。その後、2.5秒後には砂礫群は砂防ダムに到達した後せきあげられ、3.0秒後には粒子同士の衝突を繰り返しながら、1段目と2段目の間隙部が閉塞に向かいつつある様子がわかる。3.5秒後には漏れ出していた少数の粒子もなくなり、閉塞が完了していることがわかる。図-4は最終の閉塞状況を拡大して示したものである。写真-2と比較すると上部の形状がやや異なっているが、概ね実験結果をトレース出来ていることがわかる。

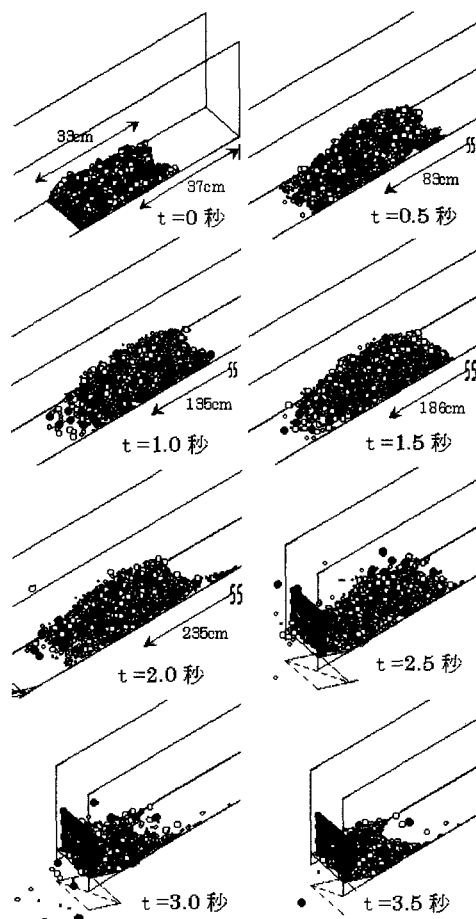
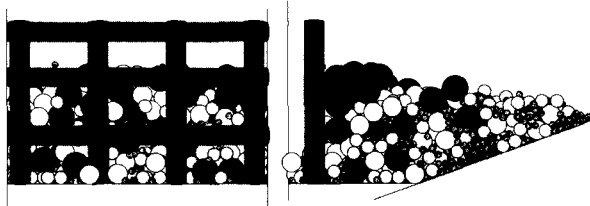


図-3 $L/d_{max}=1.5$ における要素の変位



(a) 正面図

(b) 側面図

図-4 解析による捕捉状況 ($L/d_{max}=1.5$)

5. 結 言

本研究は3次元個別要素法を用いてオープン型砂防ダムの土石流捕捉効果シミュレーション解析を試みたものである。本手法により、実験結果を概ねシミュレート出来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) Cundall, P.A.: A Computer Model for Simulating Progressive, Large Scale Movements in Blocky Rock System, Symp. ISRM, Nancy, France, Proc. Vol.2, pp.129~136, 1971.
- 2) 伯野 元彦: 破壊のシミュレーション, 森北出版, pp. 25~38, 1997.