

# 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

防衛大学校 正会員 深和岳人 香月 智 フェロー 石川信隆

## 1. 緒言

近年、流砂系管理において「流す砂防」が注目され、災害性の小さい土砂は流下させ、土石流中の砂礫を塞ぎ止めるオープン型砂防ダムが建設されるようになってきた。このオープン部の幅は中小出水(洪水)時の粒径の細かい土砂は流下させ、土石流発生時には砂礫の最大粒径が捕捉され急造ダムが構築されるという2つの条件を満たすように設定される必要がある。本研究は、土石流に含まれる砂礫の挙動を個別要素法により表現し、オープン部の閉塞過程について検討した後、ランダムシミュレーションにより捕捉確率について調べ、待ち行列理論による理論値との比較を行ったものである。

## 2. 解析基本式

土石流中に含まれる砂礫要素を図-1のように2次元の円形要素にモデル化できるもの仮定し、着目する*i*要素に働く力を自重、浮力、流体力及び他要素との接触力とに分類できるものとする。この時、*x*, *y* 方向及び回転の運動方程式は次式のようになる。

$$m_i \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = \sum_{j=1}^{n_{ij}} (-F_{ij}^N \cdot \sin\theta_{ij} + F_{ij}^S \cdot \cos\theta_{ij}) - F_w \cdot \cos\theta_b \quad (1a)$$

$$m_i \cdot \frac{d^2y}{dt^2} = \sum_{j=1}^{n_{ij}} (F_{ij}^N \cdot \cos\theta_{ij} + F_{ij}^S \cdot \sin\theta_{ij}) - F_w \cdot \sin\theta_b - m_i \cdot g + \rho_w \cdot V_i \cdot g \quad (1b)$$

$$I_i \cdot \frac{d^2\omega_i}{dt^2} = \sum_{j=1}^{n_{ij}} R_i \cdot F_{ij}^S \quad (1c)$$

ここで、 $m_i$ :要素の質量、 $I_i$ :慣性モーメント、 $\omega_i$ :回転角、 $\theta_{ij}$ :全体座標系と要素*i*と*j*の中心点を結んだ線とのなす角度、 $\rho_w$ :水の密度、 $V_i$ :要素の体積、 $F_{ij}^N$ ,  $F_{ij}^S$ :それぞれ半径方向及び接線方向に生ずる*j*要素との接触力、 $F_w$ :流体力、 $\theta_b$ :河床勾配、 $g$ :重力加速度、 $R_i$ :要素半径。

さらに、接触力および流体力は次式によって求まる。

$$F_{ij}^N = k^N \cdot \delta^N + C^N \cdot \dot{\delta}^N \quad (2) \quad F_{ij}^S = k^S \cdot \delta^S + C^S \cdot \dot{\delta}^S \quad (3)$$

$$F_w = C_D \cdot \rho_w \cdot A_S \cdot (v_w - v_x \cdot \cos\theta_b - v_y \cdot \sin\theta_b)^2 \quad (4)$$

ここで、 $k^N$ ,  $k^S$ :それぞれ半径方向及び接線方向の接触バネ係数、 $\delta^N$ ,  $\delta^S$ :それぞれ半径方向及び接線方向のバネ変形量、 $\dot{\delta}^N$ ,  $\dot{\delta}^S$ :それぞれ半径方向及び接線方向のバネ変形速度、 $C_D$ :抗力係数、 $A_S$ :斜面方向へ投影した要素の面積、 $\rho_w$ :水の密度、 $v_w$ :水の水速、 $v_x$ ,  $v_y$ :要素の*x*, *y* 方向の水速。

## 3. 解析例

### 3.1 解析条件

解析で想定したダム形状は、図-2に示すようなスリット型のダムの開口部に横方向に鋼管のスリット棒を設置したものである。開口部の3次元的形状や大きさにより、混相流体の挙動が異なるが、ここでは無視できるものとした。この開口部に設置する鋼管の本数を3本から6本までバリエーションに変えるものとし、表-1に示す4ケースについて計算する。解析開始の初期状態は、図-3に示すようなスリットダムの後方10(m)に高さ3(m)で矩形に成形された礫塊が平均流速2(m/s)の流水に押し流されるように迫っている状態を想定した。なお河床勾配は、20°とした。砂礫の総個数は1000個であり、粒径分布は過去の研究により対数正規分布に従うものとし、最大礫径は1.3(m)、平均値0.77(m)、標準偏差0.29(m)とする分布形状を与えた。表-2に砂礫の諸元を示す。

キーワード : 個別要素法, 捕捉確率, 土石流, オープン型砂防ダム

連絡先 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20 電話(0468)41-3810 FAX(0468)44-5913

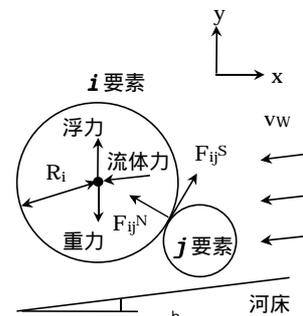


図-1 座標系と砂礫に働く外力

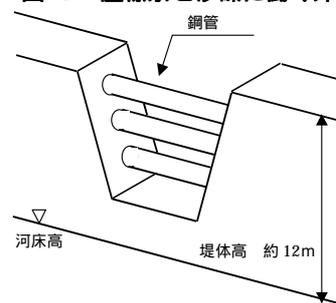


図-2 想定したダム形状

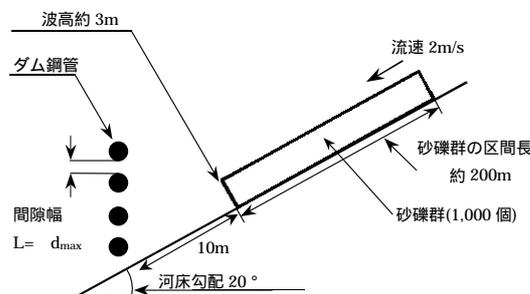


図-3 解析モデル

表-1 想定ダムの諸元

ダムモデル	最上段の高さ	スリット幅 (L)	鋼管本数	鋼管直径	L/d <sub>max</sub>
Type-1	11.4m	1.3m	6	0.6m	1.0
Type-2	13.0m	2.0m	5		1.5
Type-3	12.8m	2.6m	4		2.0
Type-4	11.7m	3.3m	3		2.5

表-2 砂礫の諸元

粒径	個数	密度	バネ係数	減衰係数		
1.3m	100	2.62 (g/cm <sup>3</sup> )	法線方向 400 (KN/cm)	法線方向 3.5 (KN·sec/s)		
1.1m	140					
0.9m	200					
0.7m	240				接線方向 133 (KN/cm)	接線方向 2.0 (KN·sec/s)
0.5m	220					
0.3m	100					

3.2 解析結果と考察

図-4 に最大礫径・鋼管間隙比(L/d<sub>max</sub>)が 2.0 における土石流塊の移動とスリットダムによる捕捉状況の時刻歴変化を示す. 5 秒後に土石流の先頭部がダムに到達し一時的に塞き上げられるが, いずれの間隙も閉塞することなく通過してしまう. 35 秒後には間隙最下段部が一次閉塞するものの, 不安定な状態であったため, 後続の砂礫の衝突により架橋構造は崩れ再度砂礫は通過する(50 秒). その後,

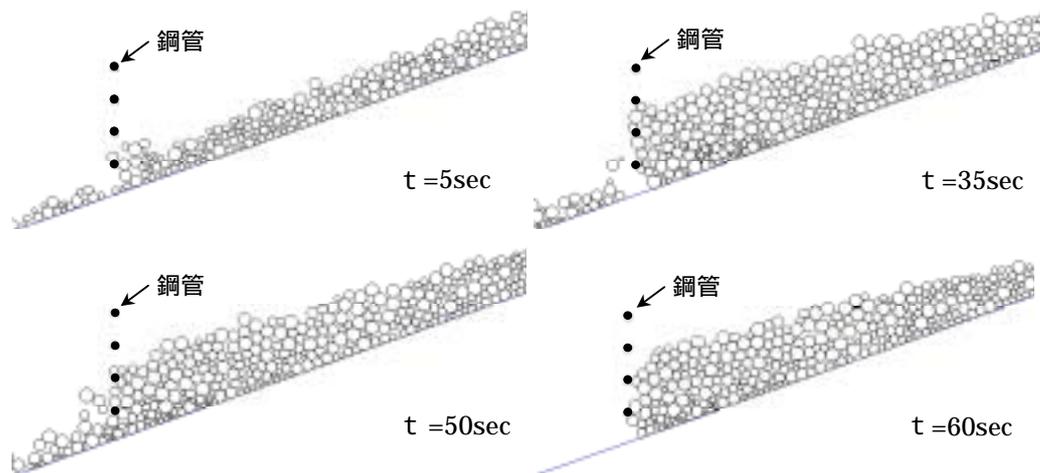


図4 スリット閉塞過程の時間変化 (L/d<sub>max</sub> = 2.0)

60 秒後には最下段と 2 段目の間隙が複数の砂礫による架橋構造により閉塞し後続流を塞ぎ止めた. このとき捕捉個数は 409 個 (捕捉確率 41%) であり, 半数以上は通過したことになる.

図-5 に L/d<sub>max</sub> を変化させた場合の捕捉状況の最終形状の一例を示す. L/d<sub>max</sub>=1.0 では, ダム最上段のスリット鋼管まで土石流塊が溜まって完全に閉塞されていることがわかる. L/d<sub>max</sub>=1.5 では, 3 段目の鋼管まで礫塊が溜まり閉塞している事がわかる. L/d<sub>max</sub>=2.0 の他の例では, 1 段目のみが閉塞し捕捉量が少ないことがわかる.

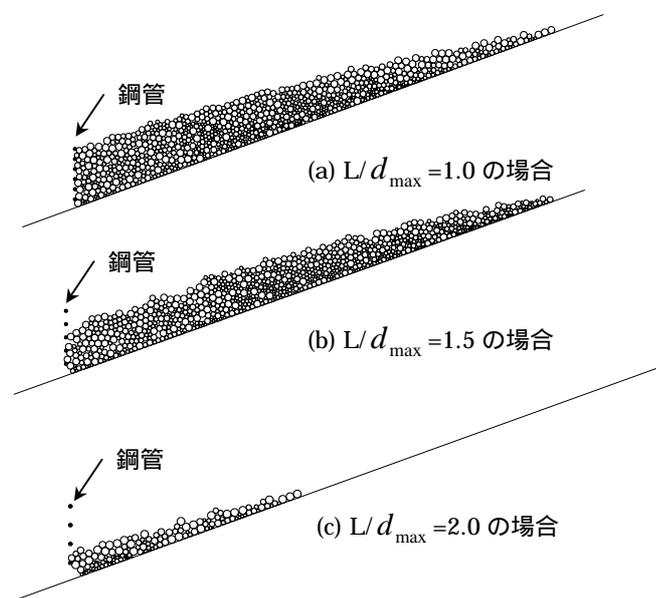


図-5 捕捉状況の最終形状

次に初期配列のばらつきの影響をみるために同一条件で配列を変更して, 各ケース 20 通りずつ計算した. 図-6 は土石流捕捉率 ~ L/d<sub>max</sub> 関係として各ケース 20 回分の捕捉確率をプロットしたものである. これより, L/d<sub>max</sub>=1.5 までは概ね 80% 以上の捕捉率を期待できるものの, 2.0 では 40% 近くまで確率が低下し, 2.5 では 0% となり, 全く捕捉を期待できないことがわかる.

ところで, 間隙の閉塞が確率過程に従うものとする, 2 個要素による間隙の閉塞確率から求められる, 間隙を通過する個数 n<sub>p</sub> の期待値 E と分散 V は待ち行列理論<sup>2)</sup>により次式で示される.

$$E(n_p) = n_p = \frac{1 - P_s}{P_s} \quad (5) \quad V(n_p) = \sigma_{n_p}^2 = \frac{1 - P_s}{P_s^2} \quad (6)$$

ここで, P<sub>s</sub> : 連続して到着する 2 個要素による閉塞確率.

この通過期待値を 1000 個要素に対する割合で示したものが, 図-6 に実線で示される平均値と ± 1 である. これより理論値はシミュレーション結果を概ね説明できることがわかる.

4. 結言

本研究は, 個別要素法を用いてオープン型砂防ダムの土石流捕捉シミュレーション解析を試みたものである. 提案手法によって従来の水理実験で得られていた知見がほぼ追跡できるとともに捕捉率をも評価でき, 待ち行列理論による理論値とも概ね一致することがわかった.

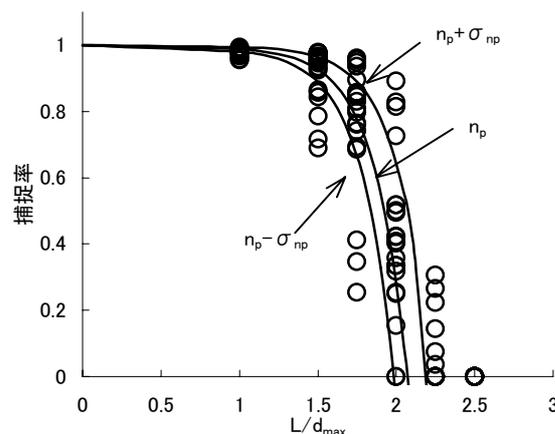


図-6 捕捉確率の理論解との比較

参考文献 1) 水野秀明, 水山高久, 南哲行, 倉岡千郎: 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 年 3 月.

2) 東京大学教養学部統計学教室編: 統計学入門, 東京大学出版会, pp.116-119, 1991.