

(I-51) 個別要素法による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

防衛大学校 学生員○菅原 安宏 防衛大学校 正員 深和 岳人 防衛大学校 正員 香月 智

1. 緒言

近年、河床低下の問題が顕在化したことを踏まえて、砂防ダムに開口部を設けることにより、通常の流水時には流砂を下流へ流すように設計されるようになってきた。一方で土石流時には流下を阻止して災害を防止する必要があるため、この開口部の設計は慎重に行われなければならない。現状では、1/100 程度の水理模型実験によって機能確認しているが、手間のかかる方法であるため、シミュレーション法の確立が望まれる。そこで本研究は、個別要素法を用いてオープン型砂防ダムの土石流捕捉効果のシミュレーション解析を行う方法の開発を試みたものである。

2. 解析基本式

土石流中に含まれる粒径の大きな礫成分を図-1に示すような円形2次元要素にモデル化できるものと仮定し、1つの要素(i)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。この時の要素の力の釣り合いは次式ようになる。

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

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

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

ここで、 m_i :要素の質量、 I_i :慣性モーメント、 ω_i :回転角、 θ_{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、 ρ_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、 θ_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。

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

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

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

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、 δ^N 、 δ^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、 ρ_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次元の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本までパラメトリックに変えるものとし、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)で矩形状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、1/36とした。礫塊の総個数は1000個であり、粒径分布は平均値0.77(m)、標準偏差0.29(m)の対数正規分布¹⁾に従うものとし、最大礫径は1.3(m)である。表-2に礫塊の条件を示す。

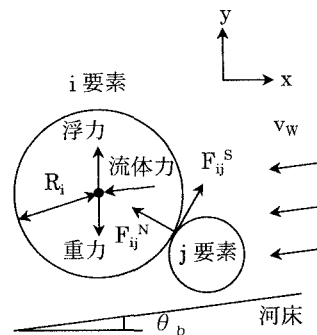


図-1 要素に働く力

表-1 ダム模型の諸元

ダムモデル	最上段の高さ	スリット幅 (G)	鋼管本数	鋼管直径	G/d _{max}
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 解析に使用した砂礫の諸元

粒径	個数	密度	バネ係数	減衰係数
130cm	100	2.62 (g/cm ³)	4 × 10 ¹⁰ (g/s ²)	3.5 × 10 ⁶ (g/s)
110cm	140			
90cm	200			
70cm	240			
50cm	220			
30cm	100			

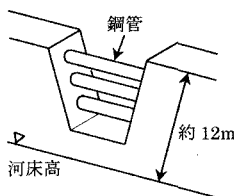


図-2 想定スリットダム

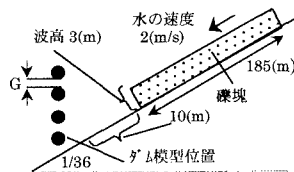


図-3 解析初期状態

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 神奈川県横浜須賀野走水 1-10-20 防衛大学校建設環境工学科 TEL(0468)41-3810 FAX(0468)44-5913

3.2 結果と考察

図-4 に最大礫径スリット幅比 (G/d_{max}) が 1.5 における土石流塊の移動とスリット Δ 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 Δ に到達し、10 秒後には先頭部分が塞き止められて、急造 Δ を形成し始めている。この際一部の小礫径の粒子は下部の隙間から抜け出していることも観察される。その後 20 秒、30 秒と Δ は形成され、河床勾配とほぼ平行する傾斜角をもつ急造 Δ がほぼ形成完了しているこ

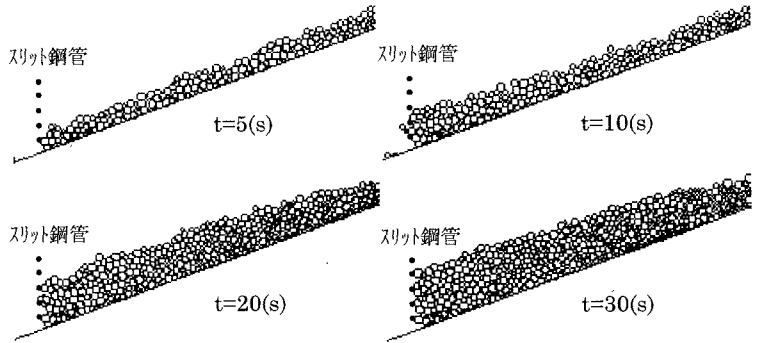


図-4 礫の移動と捕捉状況

とがわかる。この結果は、約 1/100 の σ - μ 関係にあるが水野²⁾らが行った模型実験結果および個別要素法解析の結果と良く一致している。

図-5 に G/d_{max} を変化させた場合の 30 秒後(閉塞をほぼ完了する時間)の状況を示す。 $G/d_{max}=1.0$ では、 Δ 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。 $G/d_{max}=2.0$ では、最上部から1段下のスリット鋼管まで礫塊が溜まって $G/d_{max}=1.5$ と同様に閉塞している。この最上段に隙間ができるのは、この部分から一部の土石要素が抜け出すためである。一方、 $G/d_{max}=2.5$ では土石流が抜け出してしまい、閉塞できないことがわかる。

図-6 には、土石流捕捉率 $\sim G/d_{max}$ 関係を示す。ここで、捕捉率とは次式によるものである。

$$P = \frac{N_T - N_{pass}}{N_T} \times 100 \quad (5)$$

ここで、 P_T :捕捉確率、 N_T :全要素数、 N_{pass} :透過した要素数。

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 6 通りずつ計算した結果を表している。これより、 $G/d_{max}=1.5$ 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。これは、水山³⁾らの水理実験の結果と良く一致している。

4. 結言

本研究は、個別要素法を用いてオープン型砂防 Δ 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ることが示された。

参考文献

- 1) 伊藤一雄 他:土石流衝突を受ける礫中詰め型砂防 Δ の抵抗能力評価と設計への応用に関する研究, 東京工業大学学位論文, pp.104-106, 1998年4月。
- 2) 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 Δ 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。
- 3) 水山高久, 小橋澄治, 水野秀明:格子型 Δ のピーク流砂量減少率に関する研究, 砂防学会誌, Vol.47, No.5, pp.8-13, 1995年1月。

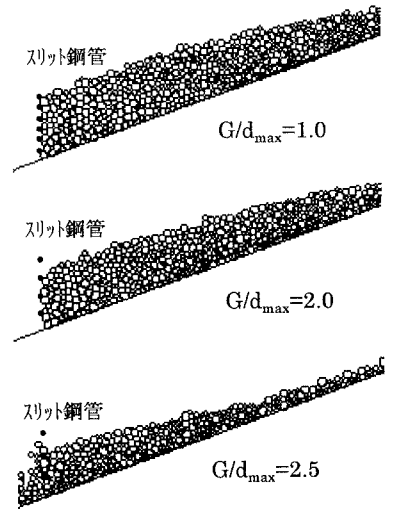


図-5 G/d_{max} と捕捉状況

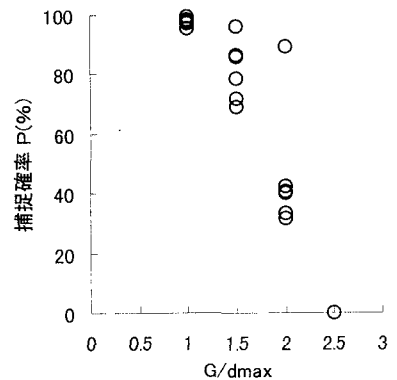


図-6 捕捉率 $\sim G/d_{max}$