

個別要素法を用いた捨石堰の破壊シミュレーション

岡山大学大学院
岡山大学大学院
岡山大学環境理工学部

学生会員
学生会員
正会員

○加瀬 瑛斗
菊池 慶太
前野 詩朗

1.はじめに

本研究は、従来の研究で得られた、堰内および堰周辺の流況解析結果をもとに、定常流下において石礫に作用する抗力と浸透力を計算し、個別要素法を用いて石礫の移動によって堰が破壊する過程のシミュレーションを行い、捨石堰の破壊機構を明らかにすることを目的として行う。

2.解析モデル 2.1 計算手法：本研究では、不連続要素の集合体の解析手法である個別要素法を用いた。堰を構成する捨石を円形と仮定し、以下の計算を行う。

個別要素法では、接触する多数の要素間の作用力を図-1のようなモデルを用いて表し、個々の要素ごとに以下に示す並進および回転の運動方程式を立てて逐次計算していく。

$$[F_{xi}]_t = \sum_j \left\{ -[f_n]_t \sin \alpha_{ij} - [f_s]_t \cos \alpha_{ij} \right\} + f_{Dx} + f_{Px}$$
$$[F_{yi}]_t = \sum_j \left\{ -[f_n]_t \cos \alpha_{ij} + [f_s]_t \sin \alpha_{ij} \right\} - m_i g + f_{Dy} + f_{Py}$$
$$[M_i]_t = r_i \cdot \sum_j \{ [f_s]_t \}$$

ここに、 f_n 、 f_s ：法線、接線方向の作用力、 α_{ij} ：要素*i*、*j*の接触角、 m_i ：要素の質量、 f_{Dx} 、 f_{Dy} ：*x*、*y*方向の抗力、 f_{Px} 、 f_{Py} ：*x*、*y*方向の浸透力、 g ：重力加速度、 r_i ：要素の半径である。

また、捨石間の接触判定は次式で表される。

$$r_i + r_j \geq R_{ij}$$

ここに、 (x_i, y_i) 、 (x_j, y_j) ：要素*i*、*j*の座標、 r_i 、 r_j ：要素*i*、*j*の半径、 R_{ij} ：要素*i*、*j*間の距離である。

捨石が接触した際の捨石間の作用力は弾性ばねと粘性ダッシュポットの並列配置で表現され、ばね定数(k_n 、 k_s)と減衰係数(η_n 、 η_s)は一般的に用いられる値を用いた。添え字の*n*、*s*はそれぞれ法線方向と接線方向を表す。

2.2 計算モデル：本研究では、流量が一定まで変化した場合の、ごく短時間の堰の初期破壊のみを扱うこととして、定常流下のある時刻における流速および浸透力を作用させ続けた。なお、浸透力については、粒子位置の変化によって力が作用しなくなるので、力を作用させる時

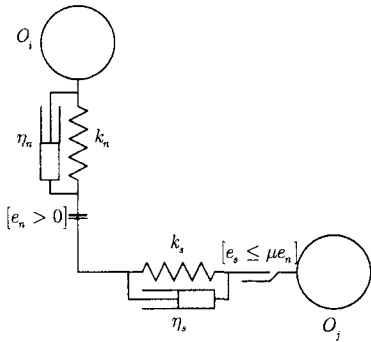


図-1 粒子間作用力モデル

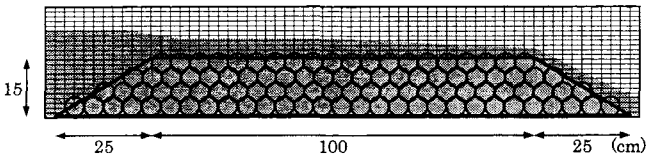


図-2 解析モデル

表-1 解析条件

ケース	粒径(cm)	流量(l/s)	備考
Case1-a	3.2	1.33	破壊せず
Case1-b		4.51	第1段階の破壊
Case1-c		5.91	第2段階の破壊
Case1-d		5.91	Case1-bから継続計算
Case1-e		5.91	初期配列を変化させた
Case2-a	4.8	9.00	破壊せず
Case2-b		15.09	第2段階の破壊

間を調整して計算を行った。抗力については、破壊の始まる部分では粒子の移動による流速の変化が少ないので計算終了まで作用させた。

図-2に解析に用いた堰のモデルを示す。設定した解析領域の*x*方向に2.5cm、*z*方向に1.25cm間隔のメッシュを設定した。解析は、まず、パッキング終了時の粒子の中心座標から粒子中心がどのセルにあるか計算し、それを基準に粒子に働く抗力と浸透力を以下のように求め、粒子中心に作用させた。(1)抗力の計算：流れの計算結果から、各セル境界における水平方向および鉛直方向の

流速を読み取り、各々平均して各セルの4隅における流速を計算する（図-3 参照）。粒子が位置するセルの4隅の節点の流速をもとに、セル内における粒子位置を考慮して重み付き平均によって、粒子に作用する流速を算出する。ここで求められた流速を用い、以下の式から抗力を計算する。

$$f_{Dx} = \frac{1}{2} \rho C_D \frac{\pi d^2}{4} |u| u, \quad f_{Dy} = \frac{1}{2} \rho C_D \frac{\pi d^2}{4} |v| v$$

ここに、 $C_D (= 0.5)$ は抗力係数、 u 、 v は水平、鉛直方向の流速、 d は粒径である。

(2) 浸透力の計算：流れの計算結果から、各セルにおける圧力を読み込み、水平および鉛直方向に各々平均をとって、セル境界上（メッシュ境界）の圧力を計算する。任意のセルの両側の境界上の圧力差を、セルの長さで除して圧力勾配を算出する（図-4 参照）。以下に示す通り、粒子が位置するセルの圧力勾配に粒子の体積を乗じて、粒子に作用する浸透力を計算する。

$$f_{Px} = P_{Gx} \frac{\pi d^3}{6}, \quad f_{Py} = P_{Gy} \frac{\pi d^3}{6}$$

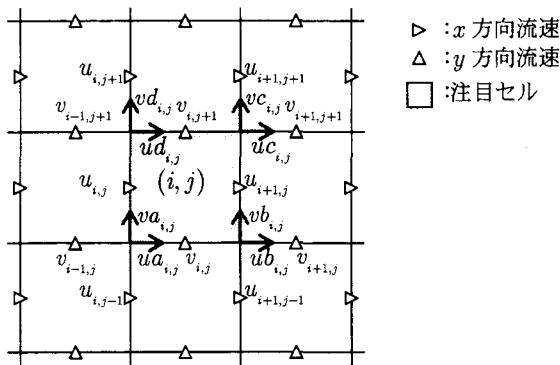


図-3 作用流速計算

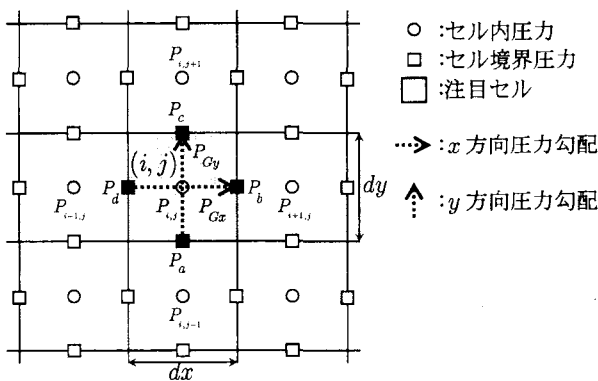


図-4 作用浸透力計算

ここに、 P_{Gx} 、 P_{Gy} は水平、鉛直方向の圧力勾配である。なお、解析条件は粒径、流量、初期条件を変化させた計7ケースで、表-1 に示した通りである。

3. 解析結果 図-5 は Case2-b における破壊過程を示したものである。堰に作用する流体力によって粒子が移動する様子が見てとれる。浸透力に注目すると、下流側法面中央付近の2~3の粒子に法面鉛直方向の大きな力が作用していることが分かった。また、抗力のみを作用させた場合、粒子の大幅な移動はみられなかった。これより、本研究の範囲内においては、粒子の移動は浸透力によって起こされるものと考えられる。粒子の積み方（粒子間接触角）を変えたケースでは、粒子の移動が大きく異なっていた。これは、法面表層の粒子が上側の粒子による移動制限を受けることなく自由に移動できること、また、個々の粒子が近傍の粒子に依存することなく安定性を保っているため、抜け出しによる連鎖的な破壊が起こらないことに起因するものと考えられる。

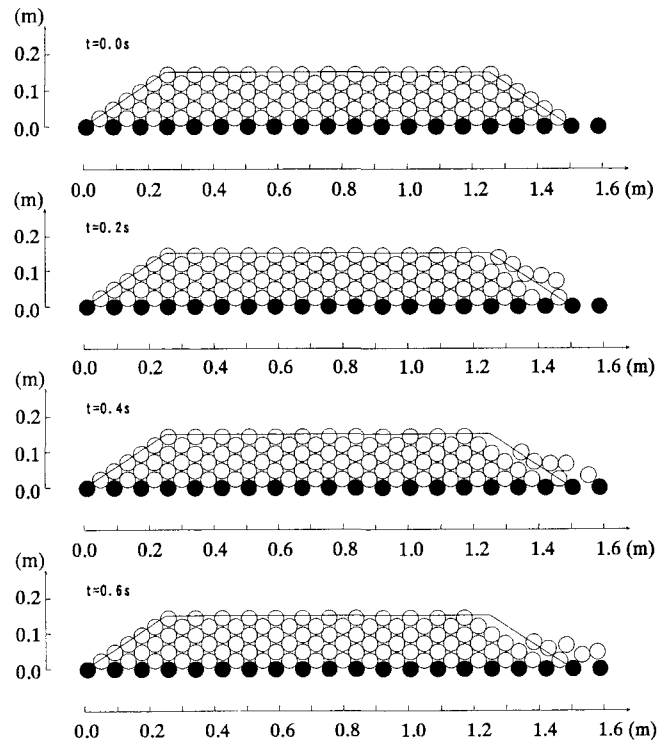


図-5 破壊過程 (Case2-b)

4. 結論

本研究より、以下のような結論が導かれた。①個別要素法を用いた数値解析によって、粒子が流れの作用で移動し、堰が破壊する様子を再現できた。②粒子の安定性は積み上げ方に依存する。また、今後の課題として、①堰の勾配を変化させた場合の解析、②混合粒径モデルでの解析などが挙げられる。