

個別要素法による捨石堰の破壊予測に関する研究

広島県庁 正会員 ○脇野 修平 岡山大学 正会員 前野 詩朗

1. はじめに

近年, 多自然型川づくりの工法の一つとして, 自然石を用いる捨石堰が注目されている. しかし, 捨石堰は未だ未解明な部分も多く, 明確な設計基準が無いのが現状である.

本研究では, 多孔質体周辺流れの解析手法として用いられる数値波動水路と, 多孔質体構造物の破壊予測に用いられる個別要素法を連成させることにより, 流量変化時に捨石堰が破壊していく過程のシミュレーションを行った.

2. 解析モデル

2.1 個別要素法(粒子の移動を追跡)

(1) 基礎式(運動方程式)

粒子 i における座標 (x_i, z_i) , 角速度 θ_i に関する基礎式は, 接触粒子を j とおくと以下のように表される.

$$(M_i + M'_i)\ddot{x}_i = \sum_j \{-f_n \cos \alpha_{ij} + f_s \sin \alpha_{ij}\}_j + F_x$$

$$(M_i + M'_i)\ddot{z}_i = \sum_j \{-f_n \sin \alpha_{ij} + f_s \cos \alpha_{ij}\}_j - (M_i - \rho_w V_i)g + F_z$$

$$I_i \ddot{\theta}_i = \frac{d_i}{2} \cdot \sum_j \{f_s\}_j$$

ここに, M_i : 粒子の質量, M'_i : 付加質量, α_{ij} : 粒子 i, j の接触角, f_n, f_s : 粒子 i, j 間の法線および接線方向の作用力, F_x, F_z : 粒子に作用する x 方向および z 方向の流体力, V_i : 粒子の体積, I_i : 粒子の慣性モーメント, d_i : 粒径, ρ_w : 水の密度であり, F_x, F_z についてはVOF法で計算し, 取得する.

(2) 粒子間作用力

任意の粒子要素 i, j 間の接触判定条件は時刻 t における i, j の座標をそれぞれ (x_i, z_i) および (x_j, z_j) , 半径をそれぞれ r_i および r_j とすると, 次式で与えられる.

図-1は粒子間の接触モデルである.

$$0 \leq (r_i + r_j) - R_{ij}$$

ただし, R_{ij} は粒子 i, j 間の距離であり

$$R_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$$

として表される. また接触角 α_{ij} は反時計回りを正とすれば, R_{ij} を用いて以下のように表すことができる.

$$\sin \alpha_{ij} = -\frac{z_i - z_j}{R_{ij}}, \quad \cos \alpha_{ij} = -\frac{x_i - x_j}{R_{ij}}$$

接触力は法線方向の圧縮力 f_n と, 接線方向のせん断力とに区別して考え, 以下の式で表される

$$f_n(t) = e_n(t) + d_n(t)$$

$$f_s(t) = e_s(t) + d_s(t)$$

$$e_n(t) = e_n(t - \Delta t) + k_n \cdot \Delta \xi_n$$

$$e_s(t) = e_s(t - \Delta t) + k_s \cdot \Delta \xi_s$$

$$d_n(t) = \eta_n \cdot \Delta \dot{\xi}_n, \quad d_s(t) = \eta_s \cdot \Delta \dot{\xi}_s$$

ここで, e_n, e_s : 法線方向および接線方向のバネによる抗力, d_n, d_s : 法線方向および接線方向のダッシュポットによる抗力, $\Delta \xi_n, \Delta \xi_s$: 時間 Δt 間の法線方向および接線方向変位, η_n, η_s : 法線方向および接線方向の粘性(減衰)係数とする.

2.2 VOF法(流れの解析)

VOF法では, Navier-Stokes方程式を基礎式とした計算を行う. ここで, 流体が多孔質体から受ける抗力項は空隙率に依存するものであるため, 粒子の移動に伴う空隙率の変化を考慮しなければならない.

個別要素法によって粒子の位置が追跡される. そこで, 粒子の存在するセルを中心にその周りのセルにも空隙率を持たせることで空隙率評価を行い, 空隙率の変化に伴う流れの変化を表現した.

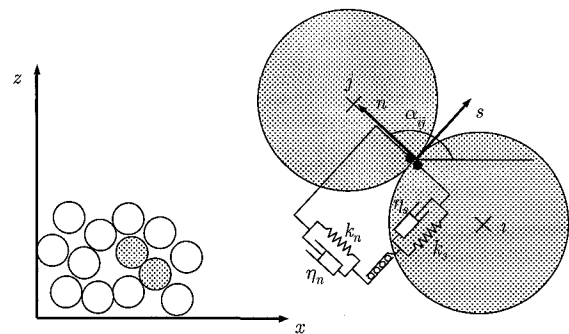


図-1 座標間接触モデル

2.3 計算モデル

パッキング(粒子の初期配列)は、過去の実験の形状に合わせ、粒径は4.8cmとした。VOF法の計算メッシュは、横に2.5cm、縦に1.0cmを採っている。また、連結石礫による捨石堰の破壊防止効果を検証するため、法面、法肩それぞれ3つつつ連結させた場合の解析も同時に行っている。

3. 解析結果

図-2は、流量約17(l/s)の時の堰下流側法面中央付近の粒子の抜け出し破壊過程である。法面粒子の抜け出しに伴い、法肩粒子も脱落していく様子が分かる。図-3は、流量約19(l/s)の時の天端部粒子の破壊過程である。天端部の粒子二つが浮き上がり、そのうちの一つが脱落していく。

また、図-4、図-5は、抜け出し破壊、天端部の破壊の直前の粒子に作用する圧力勾配による力の分布図である。これを見ても分かるように、法面粒子の抜け出し破壊、天端部粒子の破壊ともに、圧力勾配による力の影響が大きいことが分かる。さらに特徴的なのは、いずれも破壊粒子に作用する力に鉛直上向きの成分が含まれているということである。

法面粒子のみ連結させた場合と、法面と法肩粒子を連結させた場合の解析結果は、いずれも粒子の移動が大幅に制限されているが、連結石礫の抵抗力、外力の与え方などに課題が残る。

4. 結論

本研究により、以下のような結論が得られた。①本解析モデルにより、捨石堰の破壊過程が概ね再現できた。②捨石堰の破壊過程には、圧力勾配による力の影響が大きい。③連結石礫による捨石堰の破壊防止効果が、初期段階ではあるが確認された。

また、今後の課題としては、①流量の増やし方に変化をつけた解析。②堰の積み上げ方の変化をつけた解析。③実際に近い混合粒径による解析。④連結石礫設置を用いた捨石堰の破壊過程の解明などが挙げられる。

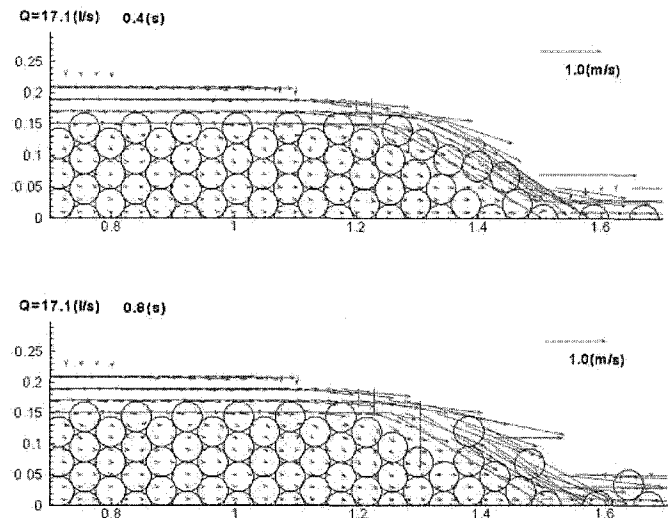


図-2 抜け出し破壊の様子

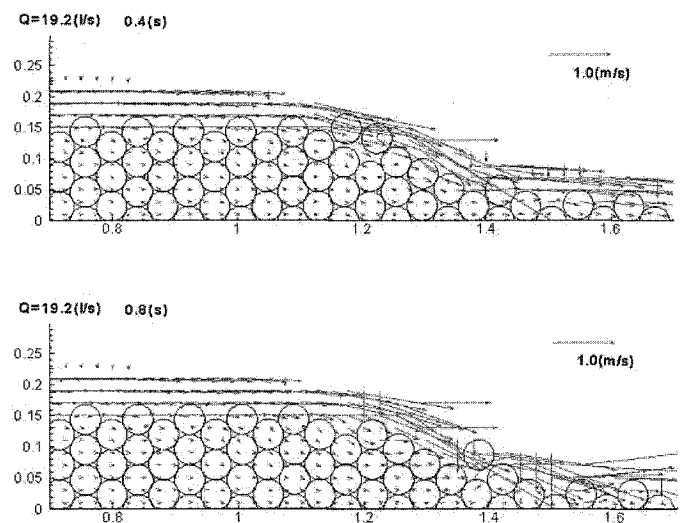


図-3 天端部破壊の様子

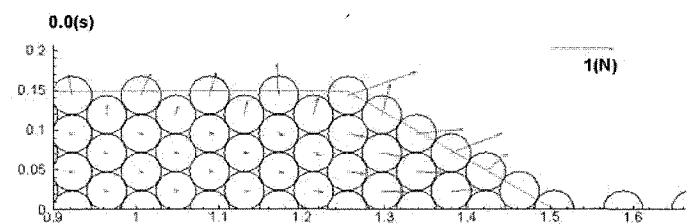


図-4 抜け出し破壊時の圧力勾配力分布

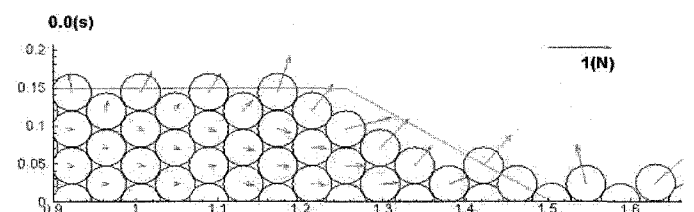


図-5 天端部破壊時の圧力勾配力