

防衛大学校 ○堀口俊行, 香月 智
鋼製砂防構造物研究会 石川 信隆, 京都大学大学院 水山 高久

1 緒 言

水系における流砂を一貫して管理するために、砂防堰堤を透過型にすることが基本とされるようになってきた¹⁾。このため、写真-1に示すような多様な形状の鋼製透過型堰堤や流木捕捉工などが開発されている。各々の透過型砂防堰堤の土石流もしくは流木混じり土石流の捕捉性能は、事前実験によって確認されるものである。近年では、高度な数値解析手法が開発され、事前解析も行われるようになってきた。このような観点から、著者ら²⁾は、個別要素法による流木、土石流もしくは流木混じり土石流の鋼製透過型砂防堰堤による捕捉解析法を開発している。しかし、この解析モデルは、礫や流木の周辺にある流水については、礫塊の状態に応じて相対位置の関数として流速分布を与えるものであった。すなわち、要素の相対位置によって流速分布を与えて外力を変化させることで流体力を生じさせるように考慮した。しかし、本来の流体力は、流れの場で均一に力が生じることはないことから流体の渦やうねり等を表現する必要がある。

そこで本研究は、礫の間隙をすり抜ける水の効果を擬似的に表現できる水粒子のモデルを個別要素法で提案し、基礎的な表現力について検討したものである。すなわち、図-1に示すように水粒子モデル要素として与えることで、生じる流体力を要素とみなし外力として生じさせることが期待できる。

2 個別要素法解析における水粒子モデル

提案する解析手法は、水粒子モデルを用いて透過型砂防堰堤による土石流の捕捉解析を行うものである。ここでは、透過型砂防堰堤に接近し、捕捉されつつある礫要素（固体）の間隙に水粒子が存在しており、その間隙を抜けるように運動している。このような解析において水粒子に求められる性質は、以下ようになる。

- 1) 基本形状は球形であるが、固体要素の間隙の形状にかかわらず、水粒子がすり抜ける運動をする。
- 2) 水粒子は、礫要素との相対速度に基づく力を及ぼす。
- 3) 水粒子は、その粒子の有する内圧に依存して異方性のない圧力を周囲に与えるものである。このような性質を表現するために、水粒子に働く力の処理を次のようにモデル化した。



写真-1 透過型砂防堰堤

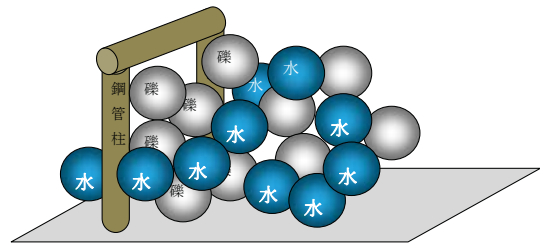


図-1 水粒子を含む個別要素の集合

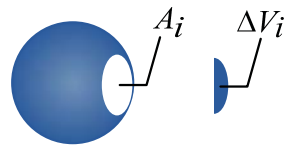


図-2 水粒子の接触面積と収縮体積

水粒子間の力は、粒子 i の周辺にいくつかの水粒子が存在しているとき、その粒子 j との間に働く力を次のように与える。

$$f_{wij} = A_{ij} \left(\frac{p_{wi} + p_{wj}}{2} \right) \quad (1)$$

ここで、 f_{wij} : 水粒子 i と j との間に働く水圧力による接触力、 A_{ij} : 粒子 i と j との間の接触面積、 p_{wi} 、 p_{wj} : それぞれ水粒子 i と j の持つ水圧（内圧）。

また接触面積については、図-2に示すように、2要素の重複領域の断面積を次式で与えるものとした。

$$A_{ij} = \frac{A_{wi} + A_{wj}}{2} \quad (2)$$

ここで、

$$A_{wi} = \pi r_i^2 \left(-0.935 \left(\frac{\delta_i}{r_i} \right)^2 + 1.935 \left(\frac{\delta_i}{r_i} \right) \right) \quad (3)$$

また、各々の水圧は、水粒子の体積変化に比例す

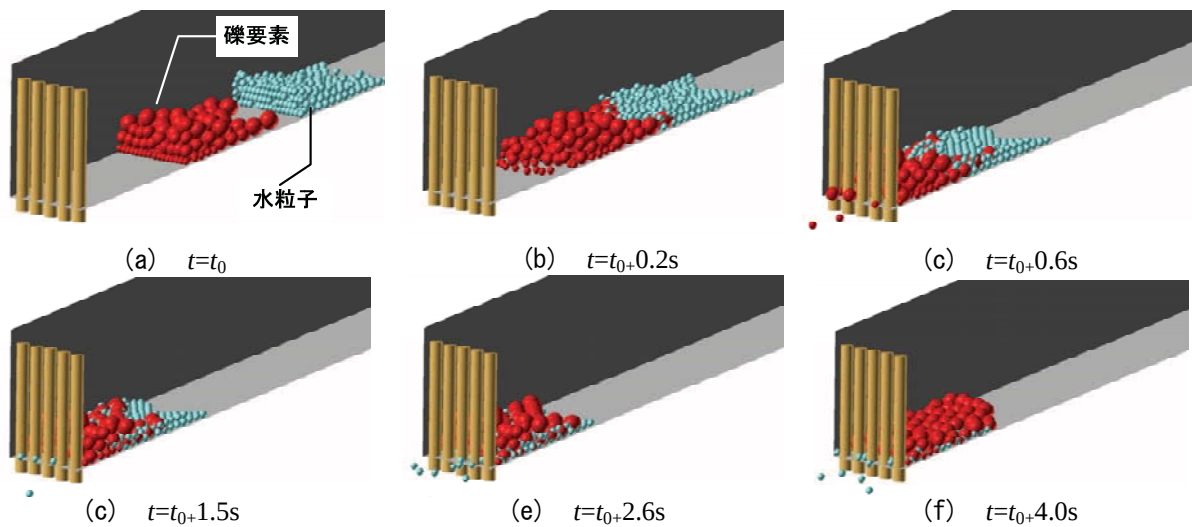


図-3 解析結果

るものとして、次式によって与える。

$$p_{wi} = E_v \frac{\Delta V_i}{V_{i0}} \quad (4)$$

ここで、 E_w ：水の圧力係数 ($E_w=2.25 \times 10^9 \text{ N/m}^2$)， V_{i0} ：要素の本来の体積， ΔV_i ：収縮体積であり，接触している点ごとの体積収縮 ΔV_{ij} の総量で与え，以下の式のようにになる。

$$\Delta V_i = \sum_j \Delta V_{ij} \quad (5)$$

$$\Delta V_{ij} = A_{wi} q_i \quad (6)$$

ここで、 q_i ：水粒子 i, j 間の重なり量。

また、水粒子間には減衰のために個別要素法で用いられる要素間のダッシュポットに相当する減衰力を法線方向 f_{wdij}^n に与える。

$$f_{wdij}^n = \eta_w A_{dw} (v_i^n - v_j^n) \quad (6)$$

ここで、 ρ ：水の比重， η_w ：水粒子間の減衰係数， A_{dw} ：ダッシュポットを算定する代表面積（水粒子の最大断面積を用いた）， v_i, v_j は、 i, j 要素の流速，肩字の n は法線方向を示す。

1) 水粒子と壁面の力

壁面との接触については、水粒子間の接触力と同様に計算する。ただし、式(1)において相手側の水圧が存在しないので、水粒子の水圧を代入して用いる。

2) 水粒子と球形・円柱形要素の力

球形粒子や円柱形粒子群は間隙を有するため、接触力は、水による抗力に代表させるものとした。よって、式(7)に変えて、次式を用いた。

$$f_{gdij}^n = 0.5 \eta_g \rho A_{dw} (v_i^n - v_j^n) |v_i^n - v_j^n| \quad (7)$$

以上のような周辺からの力を受ける個々の水粒子の運動方程式は次式のように定義され、個別要素法の運動解析の枠組みで解くことができる。

$$m\alpha + \sum_j T_j f_{gj} + \sum_j T_j f_{wj} = f_b \quad (8)$$

ここで、 m ：水粒子の質量， α ：加速度ベクトル， T_j ：水粒子 j との接触方向からの座標変換マトリクス， f_b ：水粒子の自重ベクトル。

3 解析例

図-3 に、透過型砂防堰堤の仮想実験のシミュレーション結果を示す。ここでは、間隔 10 mm で配列した直径 10mm の透過型堰堤の直上流に礫要素 120 個（粒径 14mm, 10mm, 6mm の 3 種類を各 30 個）を配置し、さらにその上流に水要素 450 個（礫要素：粒径 6mm）を配置する。その後、重力を作用させダムブレイクさせる。まず、図-3(a)～(c) よりダムブレイクした水粒子は、礫塊に追いついた後、礫塊の中に入り込みながら混じり合っている。図-3(d)～(e) では、先端の礫が堰堤に捕捉されると水粒子が礫要素の間隙を抜けて流れ、捕捉された礫要素の前方へ流出している。図-3(f) では、後続の水粒子が無くなると、礫要素は球形であるため安息角を形成できずに平滑化している。つまり、それ以前には水粒子の流体力によって盛り上がった礫塊形状が作られていたことがわかる。

4 結 言

本研究では、礫要素の間隙をすり抜けて水粒子が透過することを表現できた。今後は、礫要素と水要素における内力の関係や流水における体積変化について検討する。

参考文献

- 1) 田畑茂清, 守山浩史：鋼製透過型えん堤工法・設計法の変遷と課題, 砂防学会誌, Vol.64, No.6, pp.47-51, 2010.3.
- 2) 香月智, 渋谷一, 大隅久, 國領ひろし, 石川信隆：個別要素法による透過型砂防堰堤の流木混じり土石流捕捉解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.69, No.1, pp.16-19, 2013.2.