

擬水滴個別要素法モデルを用いた透過型砂防堰堤の捕捉解析

防衛大学校 学生会員 ○宮城充宏 堀口俊行 正会員 香月 智

1 緒言

従来、写真-1に示すような透過型砂防堰堤を主流とする我が国の災害対策は、局地的な豪雨や地殻変動により重要性を増している。この構造は、土石流の流下過程において先頭部に巨礫が集中し捕捉されることを前提に設計されている。このため筆者ら¹⁾は、土石流の捕捉形態を予測する方法として個別要素法を用いることを提案している。しかし、流体との連成解析を行っていないため、流体の運動を正確に解いていない。

そこで本研究は、透過型砂防堰堤を用いて巨礫捕捉の予測解析を行うために、擬水滴要素を提案したうえで、基礎的段階として先行実験¹⁾を再現解析し、その適用性を検討するものである。

2 実験の概要¹⁾

文献1)より、流下距離3.5mから礫と水を流し、円柱を等間隔に並べた堰堤モデルで捕捉状況を調べた。

3 解析手法²⁾

3.1 擬水滴要素

提案手法は、水の挙動を模した擬水滴要素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。この要素は、以下のような基本機能を期待するものである。

- 1) 基本形状は球形であるが、礫要素の間隙の形状にかかわらず、擬水滴要素がすり抜ける運動をする。
- 2) 礫要素との相対速度に基づく力を及ぼす。
- 3) その要素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。

このような性質を表現するために、働く力の処理を次のようにモデル化した。

擬水滴要素間の力は、図-1に示す*i*要素の周辺にくっつかの擬水滴要素が存在しているとき、その*j*要素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} ：擬水滴要素*i*と*j*との間に働く接触力、 A_{ij} ：擬水滴要素*i*と*j*との間の接触面積、 p_{wi} 、 p_{wj} ：それぞれ要素*i*と*j*の持つ水圧である。

図-1に示すような接触面積については、2要素間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、要素の体積変化に比例するものとして、次式によって与える。



写真-1 透過型砂防堰堤

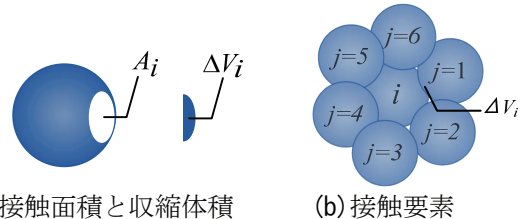


図-1 擬水滴要素

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

ここで、 E_v ：体積変化の圧力係数、 V_{i0} ：要素の本来の体積、 ΔV_i ：収縮体積である。図-1に示すような場合は、接触点ごとの体積収縮 ΔV_{ij} の総量で与える。

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

また、擬水滴要素間には減衰管理のために個別要素法で用いられる要素間のダッシュボットに相当する減衰力（水圧）を、法線方向 f_{wdij}^n および接線方向 f_{wdij}^s に与える。

$$f_{wdij}^n = \eta_w A_{dw} (v_i^n - v_j^n)^2 \quad (6)$$

ここで、 ρ ：水の比重、 η_w ：擬水滴要素間の減衰係数、 A_{dw} ：接触点の代表面積、 v_i 、 v_j ：*i*、*j*要素の流速、 n ：法線方向を示す。また、以下に要素間の接触力について示す。

1) 擬水滴要素と壁面の接触力

壁面との接触については、擬水滴要素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、要素の水圧を代入して用いる。

2) 擬水滴要素と球形・円柱形要素の接触力

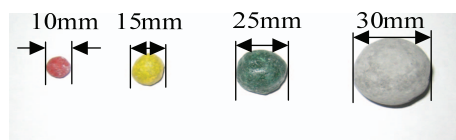
球形要素や円柱形要素群は、間隙を有するので水による抗力とした。

3.2 土石流モデル

図-2に、土石流モデルの供試体を示す。その際、礫の粒径分布は、文献1)の実験と同じものを使用した。なお、球形要素での解析についても同様の粒径分布とする。また、集合体要素モデルの凸度は、文献3)より固化石灰炭の安息角を基に決定した。

3.3 透過型砂防堰堤モデル

図-3に、透過型砂防堰堤モデルと解析時の初期位置

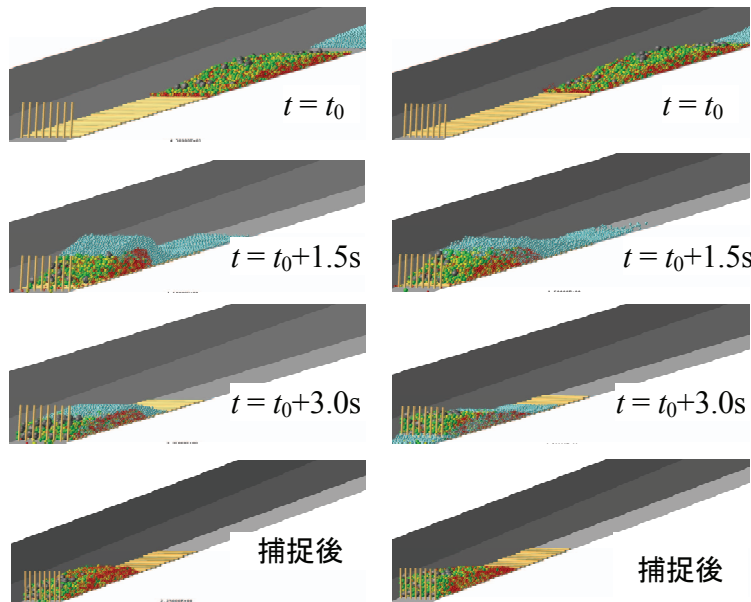


(a) 固化石炭灰 (実験)



(b) 礫モデル

図-2 供試体



(a) 集合体要素

(b) 球形要素

図-4 流下状況

を示す。捕捉工の長さ 150 mm, 捕捉工間隔 27 mm である。

4 解析結果

4.1 流下過程

図-4 に、礫と清水の流下過程を示す。まず、礫要素の後方から擬水滴要素が流れだし、礫要素と混合する。その後、擬水滴要素は礫間に入り込みつつ礫要素間を様々な方向に流れている。続いて、流下とともに大粒径の礫要素は浮き上がり、先頭部に集中している。1.5 秒後では、礫塊に擬水滴要素が後ろから乗り上げるような振る舞いとなり、捕捉工に到達している。図-4 (b) は比較のために行った球形要素を用いた解析結果であるが、表面凹凸がないので礫塊が滑らかに流下し水流に押し込まれる。また、集合体要素と比べて高い山盛りになっている。

4.2 捕捉状況

図-5 に、流出方向からの捕捉状態を示している。図-5 (a) の集合体要素では、大粒径要素 (灰色) が前面に捕捉されているだけでなく、その間に中粒径要素 (緑色) や小粒径 (黄, 赤色) 要素も絡みながら詰まっている。これに対して球形要素では、大粒径要素 (灰色) が閉塞部に存在し中粒径要素 (緑) も見られるが小粒径 (黄, 赤色) はあまり存在せず絡み合っていないことがわかる。

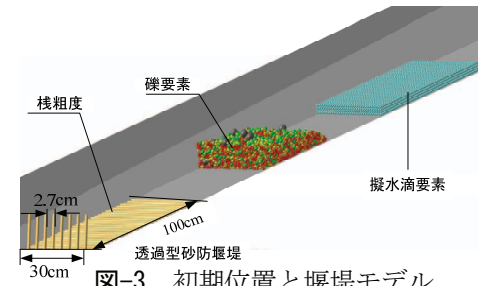
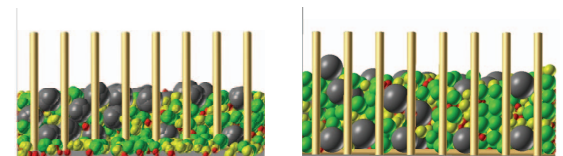


図-3 初期位置と堰堤モデル



(a) 集合体要素

(b) 球形要素

図-5 捕捉状況

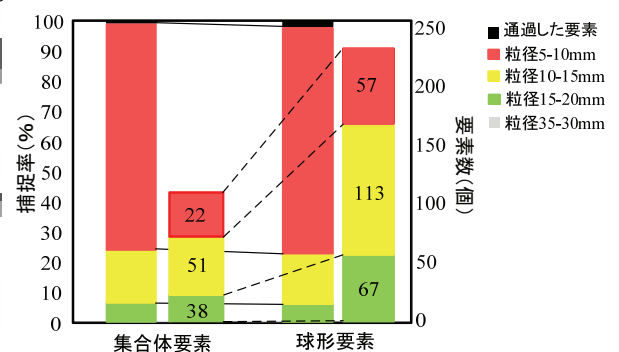


図-6 捕捉率

図-6 には、解析ごとの捕捉率と捕捉されなかった要素数を示す。これにより捕捉率を比較すると、集合体要素 99%, 球形要素 97% で大きく変わらないが、捕捉されなかった要素数で比較すると、集合体要素は、球形要素の数に対して、1/2 程度しか流れていない。よって、集合体要素の方が捕捉されやすいことがわかる。

5 結 言

本研究は、透過型砂防堰堤を用いて提案手法である擬水滴要素の適用性を検討したものである。

- 1) 擬水滴要素が、透過型砂防堰堤の捕捉における礫間の水の流れや流水の複雑な振る舞いを表現できる。
- 2) 捕捉状態を比較すると、捕捉されなかった要素数において球形要素に対して集合体要素は 1/2 程度の数になった。

参考文献

- 1) 香月智, 澁谷一, 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.16-29, 2012.2
- 2) 堀口俊行, 香月智, 石川信隆, 水山高久: 水粒子モデルを考慮した個別要素法による土石流捕捉解析に関する一考察, 平成 25 年度砂防学会研究発表会, B154-155, 2013.5
- 3) 堀口俊行, 澁谷一, 香月智, 田附正文: 集合体要素の形状特性が安息角に及ぼす影響に関する解析的検討, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.1095-1104, 2012.3