

## 28. 透過型砂防堰堤の土石流捕捉性能に関する研究

合田 明弘<sup>1\*</sup>・小石 一字<sup>1</sup>・山田 正<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中央大学大学院 理工学研究科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

\* E-mail: a14.nh6h@g.chuo-u.ac.jp

透過型砂防堰堤の開口部間隔を設計するために、実験や解析が行われてきた。これらの既往研究から開口部間隔と巨礫の最大粒径の比が1.5以下の場合に巨礫を高い確率で捕捉できることが明らかになっている。一方で、実現象には巨礫捕捉時の巨礫の到着タイミングのずれや砂防堰堤の計画に使用した最大粒径が分布していることなどの“不確実性”が内在しており、開口部において土石流の閉塞が確率的に生じることが知られている。そこで本研究は、3次元土石流捕捉解析において、礫要素の初期位置と粒径をランダムに変化させて、設定した砂防堰堤の構造でそれぞれアンサンブル計算を行った結果、高い確率で土石流を捕捉する堰堤構造の特徴と捕捉率の上下限値の開きが大きい堰堤構造の特徴を示すことができた。

**Key Words :** Debris Flow, Permeable Sabo Dam, Open Space, Distinct Element Method, Uncertainty

### 1. 緒言

透過型砂防堰堤（以下、透過型）は、土石流先端部に巨礫が集中する性質を利用して巨礫群を開口部で閉塞させ土石流全体を捕捉する施設であり、土石流・流木の対策施設として位置づけられている。透過型の開口部の設計するために、実験<sup>2)</sup>や解析<sup>3)</sup>が行われており、これらの既往研究から、透過型の開口部間隔 $l$ と土石流中の巨礫の最大粒径 $d_{max}$ の比 $\beta (=l/d_{max})$ が1.5以下の場合に巨礫を高い確率で捕捉できることが明らかになっている。一方で、実現象には、巨礫の到着タイミングのずれや砂防堰堤の計画に使用した最大粒径が分布していることなどの巨礫捕捉に対する“不確実性”が内在しており、開口部において土石流の閉塞が確率的に生じることが知られている<sup>4)</sup>。そこで著者ら<sup>5)</sup>は2次元個別要素法を用いて透過型砂防堰堤の土石流捕捉解析を行い土石流の捕捉率を計算した結果、 $\beta=2.0$ のときに、捕捉率が広く分布しており、捕捉率の上下限値の開きが大きい堰堤構造であることが分かった。さらに透過型の開口部において3次元的な巨礫の絡み合いを考慮した解析を行うために、本研究では、3次元個別要素法を用いた土石流捕捉解析を行った。本解析では、礫要素の初期位置と粒径をランダムに変化させて、設定した砂防堰堤の構造でそれぞれアンサンブル計算を行い、透過型砂防堰堤の土石流捕捉性能を高める堰堤構造を明らかにすることを目的とする。

### 2. 解析概要

本研究では、3次元個別要素法を用いて巨礫捕捉解析を行った。本解析の運動方程式の解法は文献3)のとおりである。図-1は解析モデルである。解析に用いた斜面は、

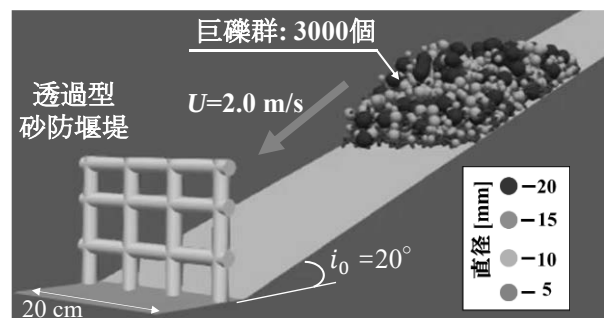


図-1 解析モデル

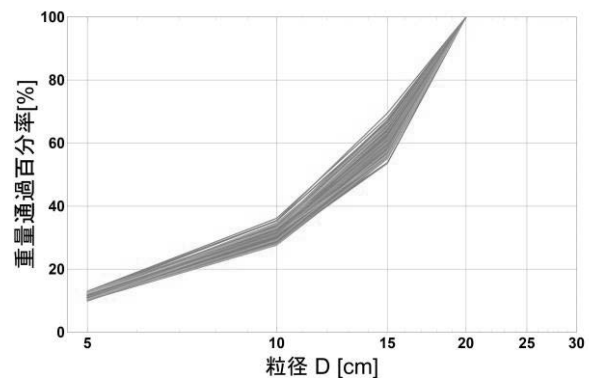


図-2 計算に使用した粒径加積曲線

今後、室内模型実験を行うことを想定して、斜面長200 cm、幅20 cm、勾配20°と模型実験のサイズに設定されている。礫要素群は球として表現しており、透過型砂防堰堤の上流側100 cm地点よりも上流側に配置されている。礫要素群は3000個であり、粒径は20、15、10、5 mmの4種類に設定した。図-2は、解析に用いた粒径加積曲線である。何本も曲線が引かれているのは、計算ごとに各粒径の含まれる個数をランダムに変化させているためである。土石流は自重作用と水から受ける流体力によって流動するものとする。水の流速 $U$ は一樣流速を仮定し、2.0 m/sを与えた。表-1は文献(3)を参考に設定した解析基本値である。粒子の物理的な性質を表すために物理的にばね定数を求めることが望ましいが、解析時間を短くし、アンサンブル計算することを優先して $\Delta t=1.0 \times 10^{-5}$  sで計算が発散ないようにパラメータの設定を行った。表-2は透過型砂防堰堤の諸元であり、堰堤構造は9種類に設定し計算を行った。堰堤構造は透過型砂防堰堤の指針の変遷<sup>1)</sup>を参考に、水平開口部間隔比 $\beta_H$  (=水平開口部間隔 $l_H$  / 最大粒径 $d_{max}$ ) を1.0、1.5、2.25の3種類、鉛直開口部間隔 $\beta_V$  (=鉛直開口部間隔 $l_V$  / 最大粒径 $d_{max}$ ) 1.0、1.5、2.0の3種類に設定した。捕捉率の分布について考察するために、礫要素の初期位置と各粒径をランダムに変更して、アンサンブル計算を行った。

### 3. 結果・考察

透過型砂防堰堤の土石流捕捉効果の評価は、以下の(1)式で表される捕捉率 $P$ で行う。

$$P = \frac{V_T - V_{pass}}{V_T} \times 100 \quad (1)$$

ここに、 $P$ :捕捉率[%]、 $V_T$ :全礫要素の体積、 $V_{pass}$ :通過した礫要素の体積である。捕捉率が大きいほど、透過型砂防堰堤の土石流捕捉効果が高いことを表している。

図-3は表-2のTYPE-8 ( $\beta_V=1.5, \beta_H=2.25$ )の砂防堰堤で行った数値実験の一例であり、礫要素を捕捉した様子を示している。図-3(a)のように、最大粒径の礫要素のかみ合わせによって開口部が閉塞しており、図-3(b)に示す通り、後続の礫要素も捕捉できていることがわかる。この計算では、礫要素が砂防堰堤上部を乗り越えたり、粒径5 mmを中心とした小さな礫要素が捕捉された礫要素の間から抜け出たりしたことから、捕捉率 $P=72.2\%$ であった。図-4は礫要素の最大粒径と開口部間隔比 $\beta$ ごとの捕捉率のヒストグラムである。図中に平均値 $\mu$ 、標準偏差 $\sigma$ 、変動係数 $C.V.$ も示している。 $\beta_H$ を一定(同じ行)で見ると、 $\beta_V$ が大きくなる(右の図)ほど、捕捉率の平均値が小さくなり、変動係数が大きくなることがわかる。 $\beta_V$ を一定(同じ列)で見ると、 $\beta_H$ が大きくなる(下の図)ほど、捕捉率の平均値が小さくなり、変動係数が大きくなること

表-1 解析基本値

| 項目              | 値                                 |
|-----------------|-----------------------------------|
| 単位体積重量 $\rho$   | $2.45 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ |
| ばね定数(法線) $k_n$  | $1.0 \times 10^3 \text{ kN/cm}$   |
| ばね定数(接線) $k_s$  | $4.0 \times 10^2 \text{ kN/cm}$   |
| 減衰定数 $h$        | 0.2                               |
| 粘着力 $c$         | 0 kN                              |
| 摩擦角 $\tan\phi$  | 0.404                             |
| 抗力係数 $C_D$      | 0.49                              |
| 時間刻み $\Delta t$ | $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}$    |

表-2 透過型砂防堰堤の計算ケース

| 堰堤モデル  | 水平開口部間隔比 $\beta_H$ | 鉛直開口部間隔比 $\beta_V$ | 計算回数[回] |
|--------|--------------------|--------------------|---------|
| TYPE-1 | 1.05               | 1.00               | 500     |
| TYPE-2 |                    | 1.50               | 500     |
| TYPE-3 |                    | 2.00               | 500     |
| TYPE-4 | 1.50               | 1.00               | 500     |
| TYPE-5 |                    | 1.50               | 500     |
| TYPE-6 |                    | 2.00               | 500     |
| TYPE-7 | 2.25               | 1.00               | 500     |
| TYPE-8 |                    | 1.50               | 500     |
| TYPE-9 |                    | 2.00               | 500     |

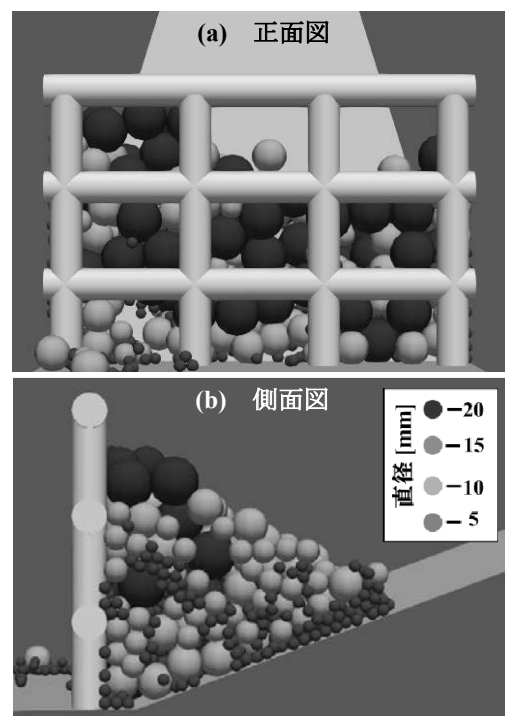


図-3 透過型砂防堰堤の巨礫捕捉の様子

がわかる。高い確率で土石流を捕捉しているケースを①平均値が75%以上②変動係数が10%以下、と定義すると、これらの満たす堰堤構造は、以下の2つの特徴に分ける

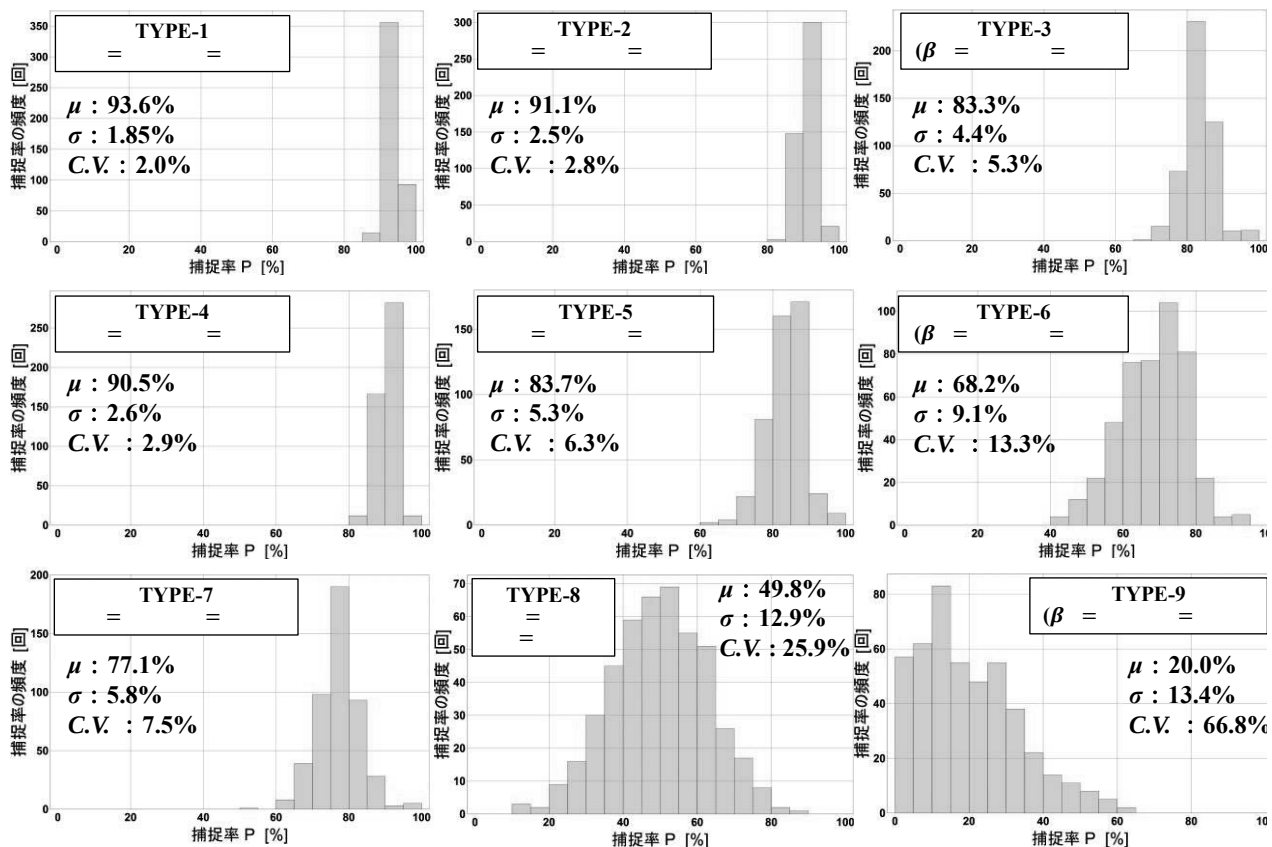


図-4 礫要素の最大粒径と開口部間隔の比 $\beta$ ごとの捕捉率のヒストグラム

TYPE-1,2,3,4,5,7:  $\mu$ が75%以上, C.V.が10%未満であり, 高い確率で土石流を捕捉する構造  
 TYPE-8: 平均値を軸中心に左右対称に捕捉率が分布しており, 土石流の捕捉率の上下限値の開きが大きい構造

ことができる。

- [1] TYPE-1,2,3,4,7:  $\beta_H$ と $\beta_V$ の両方または一方が1.0である  
 [2] TYPE-5:  $\beta_H$ と $\beta_V$ の両方が1.5である  
 これらのケースでは, 最大粒径の礫要素を確実に開口部で捕捉し, 土石流を捕捉することができる構造であると言える。TYPE-6は, 平均値が70%以上に近いが, 最低捕捉率が60%以下の頻度も多いため, 高い確率で土石流を捕捉できる構造であるとは言えない。また, TYPE-8では, 平均値が約50%であり, 左右対称に捕捉率が綺麗に分布している。つまり, 土石流の捕捉率の上下限値の開きが大きい堰堤構造であり, このような施設にならないように留意する必要があることを示唆する結果となっている。

#### 4. まとめ

本研究では, 透過型砂防堰堤の土石流捕捉効果の不確実性を評価するために, 礫要素の初期位置を変化させて, 各堰堤構造ごとにアンサンブル計算を行い, それぞれの捕捉率を算出した。各堰堤構造ごとの捕捉率のヒストグラム, 平均値, 変動係数の結果から, 土石流を高い確率で捕捉する堰堤構造は, ①水平開口部間隔比 $\beta_H$ と鉛直開

口部間隔 $\beta_V$ の両方が1.0であること② $\beta_H$ と $\beta_V$ の両方が1.5であること, 以上2つの特徴を持つことがわかった。またTYPE-8のように, 計算条件によっては, 土石流の捕捉率の上下限値の開きが大きい構造もあることがわかった。透過型の開口部設計の際には, このような施設とならないように留意する必要があることを示唆する結果であり, 開口部設計の際の一助となる成果である。

#### 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, p.47-51, 2010.
- 2) 例えば, 水山高久, 鈴木宏, 及川義朗, 森田明宏: 透過型砂防ダムに関する実験的研究, 砂防学会誌(新砂防), Vol.41, No.2, pp.21-25, 1988.
- 3) 例えば, 深和岳人, 香月智, 石川信隆, 山田正: 3次元個別要素法によるオープン型鋼製砂防堰堤の土石流捕捉効果解析, 土木学会論文集, No.738, 2002.
- 4) 高橋保, 中川一, 里深好文: 格子ダムの閉塞モデル, 京都大学防災研究所年報第43号B-2, pp.287-294, 2000.
- 5) 合田明弘, 小石一字, 柿沼太貴, 山田正: 透過型砂防堰堤の巨礫捕捉効果に関する不確実性, 土木学会第74回年次学術講演会, II-130, 2019.