

# 粒子法による砂礫を用いた土石流モデルの荷重解析

砂防鋼構造物研究会 ○井上 隆太 防衛大学校 別府万寿博 砂防鋼構造物研究会 石川 信隆  
(財)建設技術研究所 長谷川祐治 京都大学大学院 水山 高久

## 1. はじめに

土石流を受ける砂防堰堤の設計に当っては土石流荷重が必要であるが、特に土石流段波荷重については未だ十分に解明されているとはいえない現状にある<sup>1), 2)</sup>。そこで著者ら<sup>3)</sup>は、粒度分布を変化させた6種類の石礫型土石流モデルを作成し、土石流モデルの粒度分布が段波の発生および荷重特性に及ぼす影響について実験的な検討を行った。本研究は、この実験<sup>3)</sup>を解析で再現すべく、粒子法により砂礫を含んだ土石流モデルの流動シミュレーション解析および荷重評価を行ったものである。

## 2. 実験の概要<sup>3)</sup>

### 2.1 実験方法および計測要領

実験は、図-1に示す急勾配水路実験で行った。粒度分布が異なる6種類の石礫型土石流モデルを止め板で天然ダム形状に堆積させ、流水の越流と共に止め板をはずして流下させる方法(天然ダム決壊型)を採用して、水路幅10cm、水路勾配18°の条件で流動実験を行った。天然ダムは、図-1に示すような台形状に形成させ、ダムの高さ $h=15\text{cm}$ 、上幅 $a=30\text{cm}$ 、下幅 $b=35\text{cm}$ とした。なお、水路床は棧粗度とした。荷重は天然ダムから5m下流に設置した分力計を用いて計測した。

図-2に土石流モデルの粒度分布(粒径加積曲線)を示す。タイプAは実際の土石流を模擬したもので、タイプCとEは、礫と土砂(2mm以下)の質量比をそれぞれ7:3と3:7としたものである。

### 2.2 先頭部の流動状況

高速ビデオ撮影の一例として、写真-1に段波が形成されたタイプCと形成されなかったタイプEの先頭部の流動状況を示す。これよりタイプCでは先頭部が盛り上がり、またタイプEでは先頭部の盛り上がりが砕けている様子が確認できる。

### 2.3 実験結果

基準としたタイプAは、準段波となり、タイプC(礫7:砂3)が段波、タイプE(礫3:砂7)では段波は発生しなかった。すなわち、土石流モデルの粒径分布を変化させた範囲内で、段波が発生しやすい礫と土砂の質量比が存在することが確認された。すなわち、礫間に存在する土砂分も段波形成に寄与していると考えられる。

## 3. 粒子法によるシミュレーション解析<sup>4)</sup>

### 3.1 解析の概要

本研究では、粒子法としてMPS法(Moving Particle Semi-implicit Method)を用いた。MPS法では、微分演算子に対応する粒子間相互作用モデルを用いて、次に示す連続の式とナビエーストークス方程式を解くものである。

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (1) \quad \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\nabla^2\mathbf{u} + \mathbf{g} \quad (2)$$

ここに、 $\rho$ は密度、 $P$ は圧力、 $\mathbf{g}$ は重力加速度、 $\nu$ は動粘性係数である。

実験は砂礫と水の混相流であるが、本研究では基礎的段階として、大小2つ粒径の剛体粒子を作成して土石流をモデル化した。すなわち、図-3に示すように5mmの小径粒子と、剛体粒子5個を組合せた大径剛体を作成した。なお、剛体粒子1個と水粒子の直径は5mmである。解析では、剛体の体積がほぼ実験の礫砂と等しくなるように剛体の個数を設定した。実験のタイプCを再現すべく、図-4(a)に大径剛体と小径剛体を7:3の割合で清水

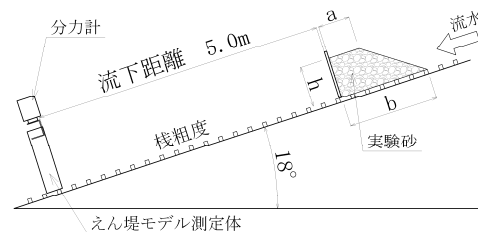


図-1 実験概要図

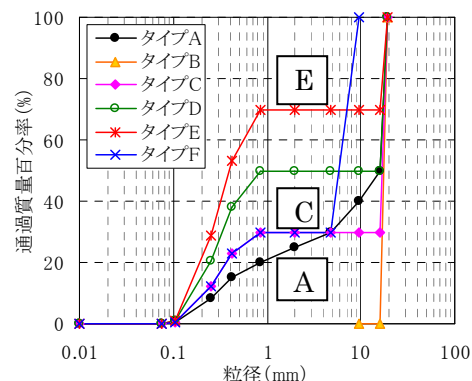
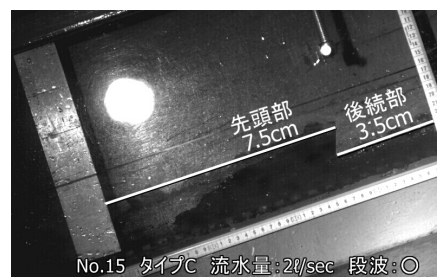


図-2 土石流モデルの粒度分布



(a) タイプC



(b) タイプE

写真-1 先頭部の流動状況  
(白い丸は撮影のための電光)

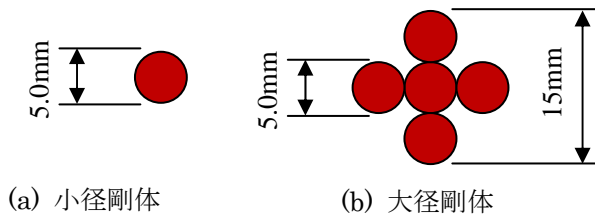


図-3 礫をモデル化した剛体粒子群の構成

内にランダムに配置した状況を示す。清水については、剛体が完全に浸水するようにやや多めに設定した。解析モデルの全体図を図-4(b)に示す。6.5mの床と50cmの壁を作成した上で土石流モデルを設置し、5m流下させた。剛体同士の接触・摩擦を考慮するために、剛体同士が接触していると判定された場合には、粒子間に法線および接線方向バネを設定して、反発力や摩擦力を考慮した<sup>4)</sup>。剛体と床および剛体間の法線・接線方向バネ定数は $1.0 \times 10^3 \text{N/mm}$ とし、法線方向および接線の減衰定数はそれぞれ0.4、0.1とした。剛体と床との摩擦係数は0.1、剛体間の摩擦係数は0.5である。土砂による粘性の影響を考慮するために、水粒子の動粘性係数を $0.1 \text{ mm}^2/\text{ms}$ に設定して解析した。

### 3.2 解析結果および考察

解析結果による先頭部の状況を図-5に示す。流下直後においては、土石流の先端は明瞭な段波を示すことがなかったが、図-5(a)に示すように壁の1.5m手前において先頭部に少しずつ剛体が集積された。壁の直前においては、図-5(b)に示すような明瞭な段波が形成された。その後は、図-5(c)のように壁上部まで跳ね上がった。実験では、壁に衝突した後は解析のように跳ね上がる挙動を示さなかったため、今後壁と剛体との衝突を考慮するなどの改良が必要である。解析で得られた荷重～時間関係を、実験結果と比較して図-6に示す。図から、解析による荷重は壁に衝突直後に最大55Nの最大荷重を示しており、実験とほぼ一致していることがわかる。しかし、その後大きな振動を伴った挙動を示している。これは、図-5(c)に示したように、土石流が壁に到達した後に、壁に跳ね上がった後に再度上流側へ戻るための影響であると考えられる。

### 4. 結論

本研究は、粒子法を用いて砂礫を含む土石流モデルの流動シミュレーションおよび荷重評価を行ったものである。礫と砂を2粒径の剛体粒子群でモデル化した。その結果、2粒径モデルにより段波が形成され、また荷重～時間関係の初期の応答をある程度再現することができた。

### 参考文献

- 1) 高橋 保：土石流の機構と対策、近未来社、2004.9.
- 2) 井上隆太、石川信隆、別府万寿博、長谷川祐治、水山高久：土石流段波モデルによる砂防えん堤モデルの荷重・変位計測と堆積状況の可視化実験、平成20年度砂防学会研究発表会概要集、pp.290-291、2008.5.
- 3) 井上隆太、石川信隆、別府万寿博、長谷川祐治、水山高久：粒径分布を変化させた石礫型土石流モデルの荷重測定実験、平成21年度砂防学会研究発表会概要集、pp.82-83、2009.5.
- 4) 別府万寿博、石川信隆、園田佳巨、長谷川祐治、水山高久：剛体・流体粒子による土石流モデルのシミュレーション解析、平成21年度砂防学会研究発表会概要集、pp.96-97、2008.5.

(a) 初期の剛体粒子の体積状況

(b) 全体図

図-4 解析モデル

(a) 壁の1.5m前

(b) 壁の直前

(c) 壁に到達後

図-5 土石流モデルの段波の状況

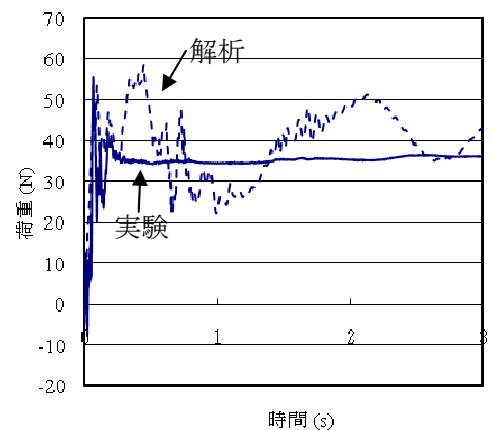


図-6 荷重～時間関係の比較