

(18) 粒子法を用いた土石流段波モデルのシミュレーション

Numerical simulation of debris flow model using modified MPS method

別府万寿博*, 井上隆太**, 石川信隆***, 長谷川祐治****, 水山高久*****
Masuhiro Beppu, Ryuta Inoue, Nobutaka Ishikawa, Yuji Hasegawa and Takahisa Mizuyama

*博(工), 防衛大学校准教授, 建設環境工学科(〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)

**共生機構(株), (砂防鋼構造物研究会研究員)(〒160-0022 新宿区新宿1-23-1)

***工博, 防衛大学校名誉教授, (砂防鋼構造物研究会研究顧問)(〒102-0093 千代田区平河町2-7-5)

****(財)建設技術研究所研究員(〒300-2633 つくば市遠東904-1)

*****農博, 京都大学大学院教授, 農学研究科(〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

Key Words: particle method, debris flow model, MPS method, impulsive load

キーワード: 粒子法, 土石流モデル, MPS法, 衝撃的荷重

1. はじめに

近年, 大規模かつ局地的な豪雨が増加する傾向にあり, 斜面崩壊や土石流が頻繁に発生している. 今後もこのような土砂災害が増加すると予測されており, ソフト・ハード両面からの対策が急務である. 特に, 土石流内部に大小の礫や岩を含んでいる石礫型土石流は, 地形や粒度組成によっては土石流先頭部に石礫が集まり段波を形成し, 衝撃的な荷重を発生させる可能性がある. したがって, 石礫型土石流に対して砂防えん堤を安全かつ合理的に設計するためには, 石礫型土石流の段波発生を予測し, 砂防えん堤に作用する荷重を適切に評価する手法の確立が必要である.

石礫型土石流に関する既往の実験研究を概観すると, 堆積・浸食などの流動過程¹⁾や鋼製砂防えん堤による礫の捕捉効果²⁾に関する研究などがあるが, 土石流によって生じる荷重に着目した研究は少ない. また, 理論・解析的な研究では, 主として差分法による流動シミュレーションが行われており, 近年では土石流内部の礫移動を考慮したシミュレータ³⁾も開発されている. しかし, 土石流内部の流動特性は, Bagnoldの分散圧力説で説明されるように, 土石流内部における粒子・礫間の衝突や摩擦による圧力が影響すると言われている.

本研究は, 剛体および流体粒子を用いたMPS法^{4), 5)}により, 石礫型土石流モデルの段波形成および荷重評価を試みたものである. このため, 従来のMPS法を, 剛体間の衝突・摩擦および剛体と床と

の摩擦を考慮できるように改良した. 提案した方法を用いて水と軽石を混ぜた土石流モデル実験のシミュレーション解析を行い, 提案手法の妥当性を検証した.

2. 改良MPS法の概要

2.1 MPS法の概要

MPS法は, 粒子個々の運動から流体の速度, 圧力を求めるメッシュレス法の一つであり, 飛沫など不連続な挙動を比較的容易に再現できる利点がある. 非圧縮性流れの支配方程式は, 以下に示す質量保存則と運動量保存則である.

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (1)$$

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

ここに, ρ は密度, P は圧力, \mathbf{u} は速度, ν は動粘性係数, \mathbf{g} は重力加速度を示す.

MPS法では, 式(1), (2)を陽的および陰的な部分に分けて解く. 式中の微分演算子は, MPS法の粒子間相互作用モデルを用いて離散化される⁴⁾. まず, 式(2)の粘性項と重力を考慮して, 仮の粒子速度 \mathbf{u}^* と位置 \mathbf{r}^* を求める.

$$\mathbf{u}^* = \mathbf{u}(t) + \Delta t[\nu\nabla^2\mathbf{u}(t) + \mathbf{g}] \quad (3)$$

$$\mathbf{r}^* = \mathbf{r}(t) + \Delta t\mathbf{u}^* \quad (4)$$

この時点での速度場と密度は、質量保存則と運動量保存則を満足していないので、粒子数密度一定の条件を満足するように圧力のポアソン方程式を解く。

$$\nabla^2 P(t+\Delta t) = -\frac{\rho_0}{\Delta t^2} \frac{n^* - n^0}{n^0} \quad (5)$$

ここに、 n^0 は初期の粒子数密度、 n^* は陽的パートで求めた解による粒子数密度、 ρ_0 は初期密度を示す、 Δt は時間ステップを示す。

式(5)で得られた圧力から、速度の修正量 \mathbf{u}' を求め、新しい時刻 $t+\Delta t$ の速度と位置ベクトルを更新する。

$$\mathbf{u}' = -\frac{\Delta t}{\rho_0} \nabla P(t+\Delta t) \quad (6)$$

$$\mathbf{u}(t+\Delta t) = \mathbf{u}^* + \mathbf{u}' \quad (7)$$

$$\mathbf{r}(t+\Delta t) = \mathbf{r}^* + \Delta t \mathbf{u}' \quad (8)$$

2.2 剛体-流体相互作用解析法

MPS 法では、流体と剛体との相互作用を解析する手法が提案されている⁴⁾。この剛体-流体相互作用解析において、剛体は1個あるいは複数個の剛体粒子で構成される。このとき、N個の粒子で表された剛体の重心座標を \mathbf{r}_g 、慣性モーメントを I とする。計算手順としては、まず剛体粒子を流体粒子と同じように計算する。次に、新しい時刻 $t+\Delta t$ の速度 $\hat{\mathbf{u}}_i(t+\Delta t)$ と座標 $\hat{\mathbf{r}}_i(t+\Delta t)$ を求める際に、剛体粒子間の相対位置関係を元の形状に戻す。このとき、剛体の重心の座標変化量 \mathbf{r}_g' と、回転角変化量 θ' が保たれるように、以下の手順で計算する。

まず、各粒子の座標変化量 $\hat{\mathbf{r}}_i'$ を求める。

$$\hat{\mathbf{r}}_i' = \hat{\mathbf{r}}_i(t+\Delta t) - \hat{\mathbf{r}}_i(t) \quad (9)$$

次に、時刻 $t+\Delta t$ における重心位置 $\mathbf{r}_g(t+\Delta t)$ および重心座標の変化量 \mathbf{r}_g' を求める。角運動量が保存されるように、剛体回転角 θ' を求め、剛体中心の座標変化量、および剛体回転角から、各粒子の移動量 \mathbf{r}_i' を求める。

$$\theta' = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^N m \mathbf{r}_i' \times (\mathbf{r}_i(t) - \mathbf{r}_g(t+\Delta t)) \quad (10)$$

$$\mathbf{r}_i' = \mathbf{r}_g' + \begin{bmatrix} \cos \theta' & \sin \theta' \\ -\sin \theta' & \cos \theta' - 1 \end{bmatrix} (\mathbf{r}_i(t) - \mathbf{r}_g(t+\Delta t)) \quad (11)$$

最後に、速度 $\mathbf{u}_i(t+\Delta t)$ と位置 $\mathbf{r}_i(t+\Delta t)$ を求める。

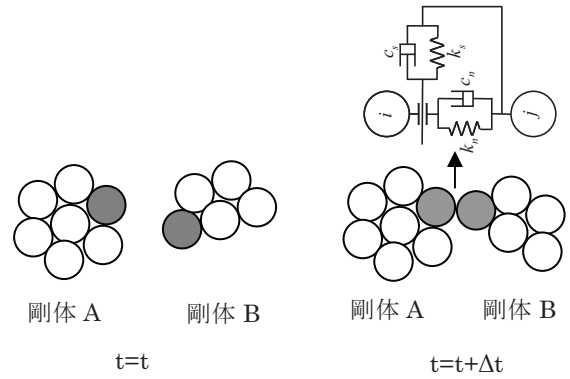


図-1 剛体同士の接触モデル

$$\mathbf{u}_i(t+\Delta t) = \frac{\mathbf{r}_i'}{\Delta t} \quad (12)$$

$$\mathbf{r}_i(t+\Delta t) = \mathbf{r}_i(t) + \mathbf{r}_i' \quad (13)$$

2.3 剛体間の衝突・摩擦および剛体と床面との摩擦を考慮した解析法

本研究では、石礫型土石流モデルのシミュレーションを行うため、剛体間の衝突・摩擦および剛体と床面との摩擦をモデル化する必要がある。そこで、MPS法の運動量保存則を次のように修正した。

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g} + \mathbf{f}_{col} + \mathbf{f}_{fric} \quad (14)$$

ここに、 \mathbf{f}_{col} は剛体同士の衝突によって生じる外力、 \mathbf{f}_{fric} は剛体と床面の摩擦によって生じる外力を示す。

(1) 剛体粒子間の衝突・摩擦

複数の粒子で構成されている剛体同士が接触した場合、図-1 に示すように粒子間に個別要素法と同様にバネを配置し、接触力を評価した⁵⁾。ただし、接触力による剛体の回転は考慮していない。なお、DEM解析は陽解法であり、小さな時間増分が好ましい。そのため、MPSの1回の時間増分の中を、100回に分割して解析を行った。

(2) 剛体粒子と床面の摩擦

剛体と床との相互作用は、図-2 のモデルを用いた。ここでも、MPSの1回の時間増分の中を、100回に分割して解析を行った。図-3 に提案したMPS法のフローチャートを示す。なお、提案する手法では、MPS法特有の局所的な高周波振動⁶⁾やDEM解析に起因して生じる高周波加速度が生じる。そこで、局所的に大きな加速度が生じた場合には、加速度の最大値を10Gに制限して解析を行った。

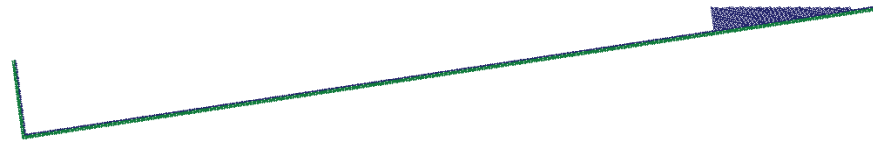


図-4 清水の解析モデル

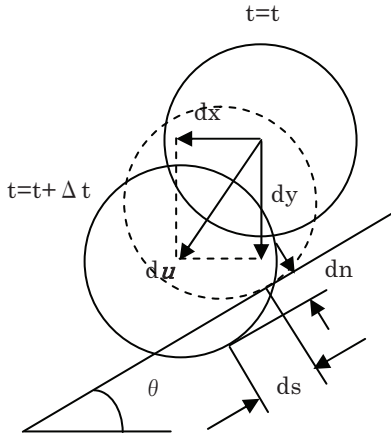


図-2 剛体と床面との摩擦モデル

3. 清水のシミュレーション解析

MPS法を用いて、清水の斜面流下実験⁷⁾の解析を行う。実験では、8度の斜面上に湛水した清水を5m流下させた。図-4に、解析モデルを示す。清水は、実験と同様に高さ15cmの三角形に湛水して流下させた。粒子の直径は7.0mmとした。粘性項を全く考慮しない場合には、表面の粒子がやや乱れる挙動を示したため、水の動粘性係数を $5.0 \times 10^{-2} \text{ mm}^2/\text{ms}$ として解析を行った。清水が、分力計をモデル化した壁に衝突する際に生じる荷重は、壁粒子に生じた圧力に直径7.0mmと実験の水路幅100mmを乗じて求めた。

図-5に、先頭部の粒子が壁に衝突する直前の流れ全体の状況を示す。これより、解析による流れの先頭部は、実験結果と同じように流動深が小さいくさび状の流れを示しており、粒子法によって清水の流れを良好に再現できることがわかる。図-6は、清水先頭部が壁に衝突した後の挙動を時刻歴で示している。これより、壁に衝突する直前では、実験、解析ともに清水の先頭部はくさび状に流下していることがわかる。また、壁に衝突した後は、清水が壁に沿って上方へと方向を変化しながら跳ね返る様子や、跳ね返った清水が後続流と合流して複雑な挙動を示しながら最終的な湛水状態へと移行する過程も比較的良好に再現できている。

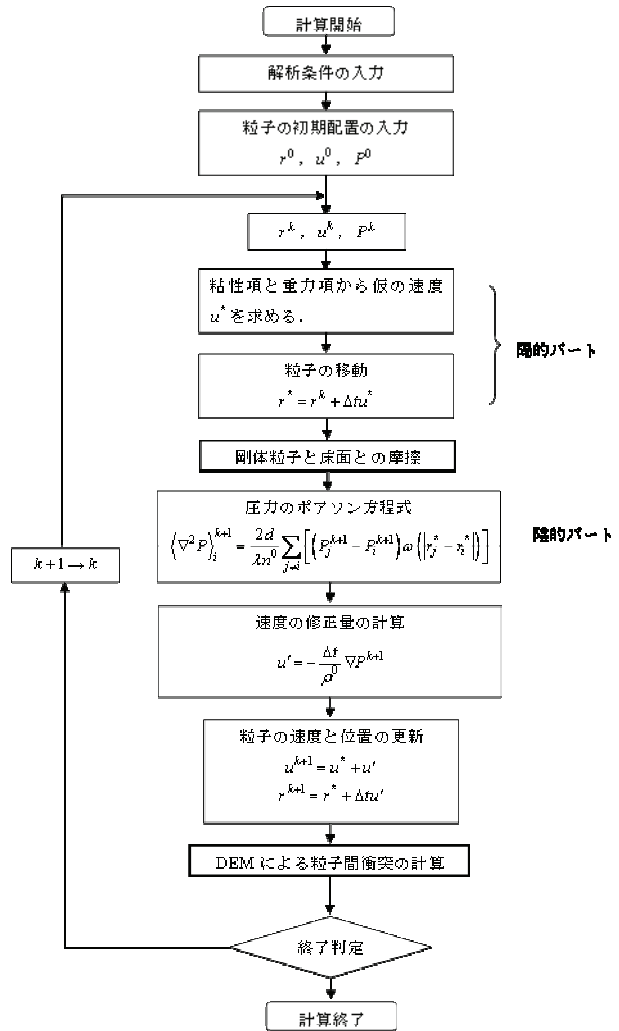


図-3 解析のフローチャート

図-7は、壁に衝突した時点を実験と比較したものである。粒子法では、圧力波形に高周波振動が生じるため、図は解析結果に対してデータ11区間の移動平均処理を行って平滑化したデータを示している。解析結果をみると、清水が分力計に衝突した後は、約1.8s後に最大衝突荷重16Nに達している。最大荷重後は、増減を繰り返しながら最終的に湛水時の荷重である10Nに収束している。これより、最大荷重までの波形にやや違いはあるが、解析によって最大荷重および最終的な収束荷重が比較的よく再現できていることがわかる。

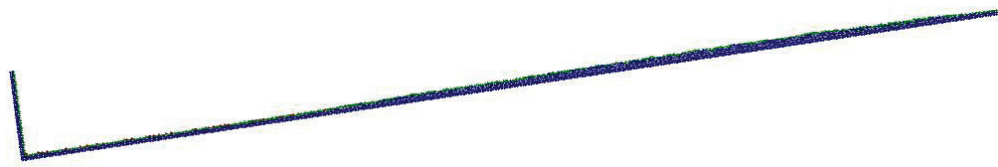
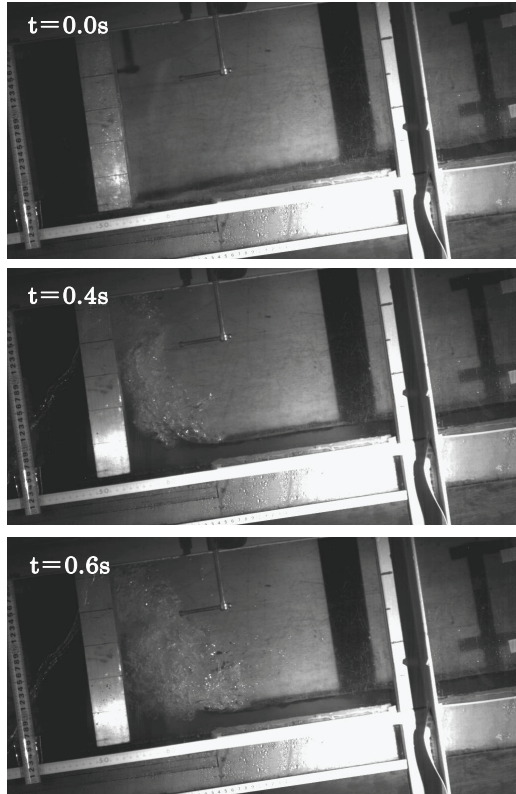
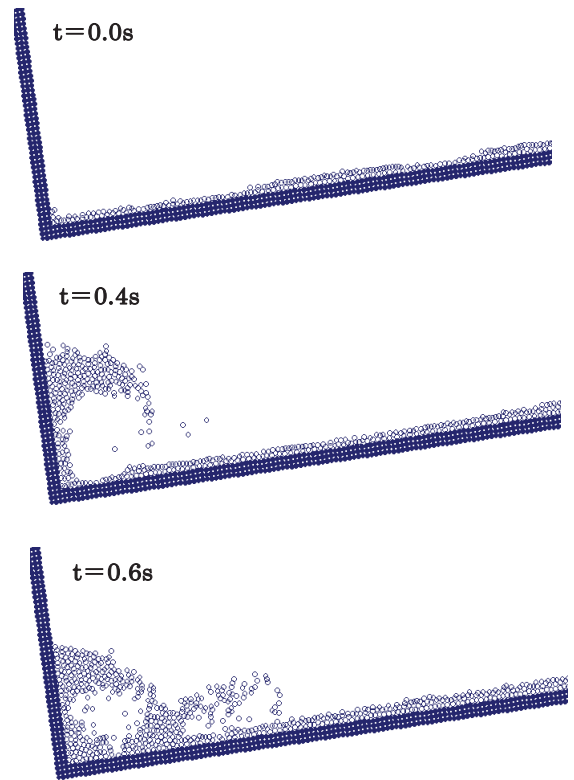


図-5 清水の流下状況



(a) 実験



(b) 解析

図-6 清水の流下状況の比較

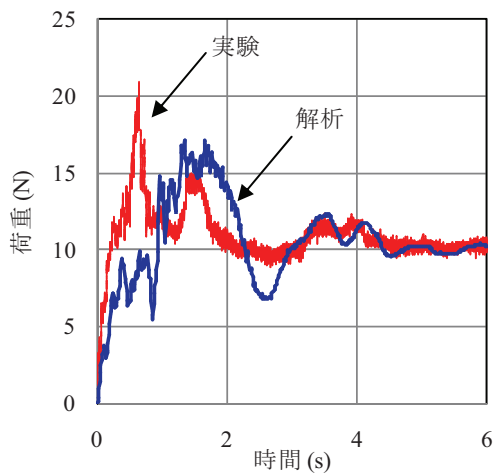


図-7 清水の場合の荷重～時間関係

4. 提案 MPS 法を用いた土石流段波シミュレーション

4.1 解析モデル

提案した MPS 法を用いて、水と桜島産軽石（ボラ）を混ぜた土石流段波実験⁸⁾のシミュレーションを行う。ボラを用いた理由は、ボラの密度は小さいため斜面の勾配が緩やかでも土石流になりやすく、流動深も大きくなるためである。実験では、図-8に示すように台形型にボラを設置したうえで、上流側から清水を流し土石流を発生させた。さて、剛体と流体粒子を用いた連成解析においては、剛体と流体を区別することなく解析した後で剛体移動を行うので、剛体粒子と流体粒子の大きさが等しい方が解析の精度が高い。このため、剛体-流体連成解析では、同じ直径をもつ複数個の剛体粒子を組合せて、1つの剛体を形成する。この利点として、複数の剛

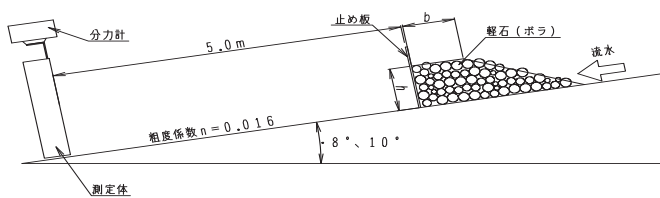


図-8 実験概要図

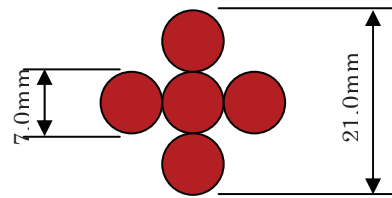


図-9 剛体1個の構成

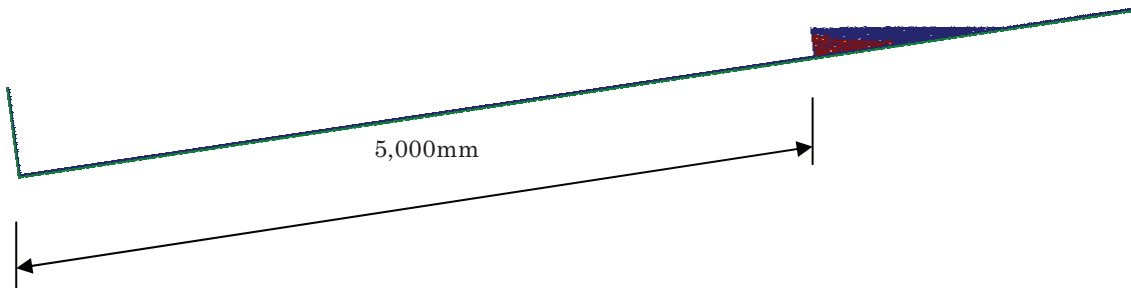
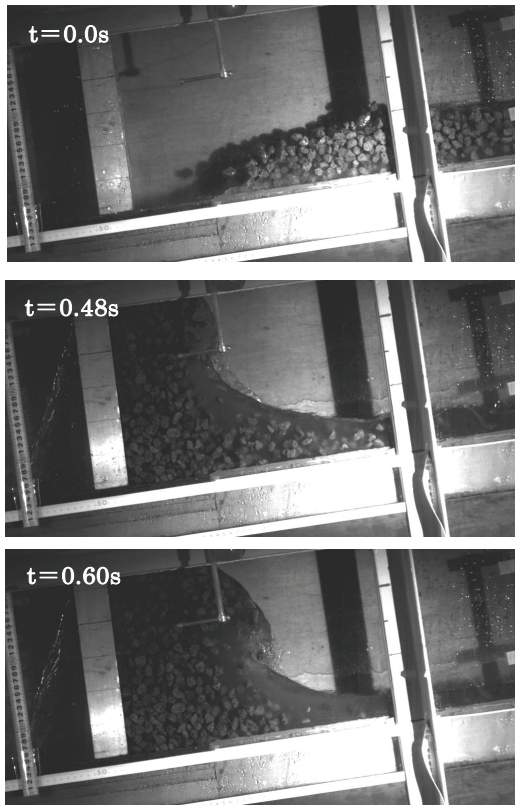
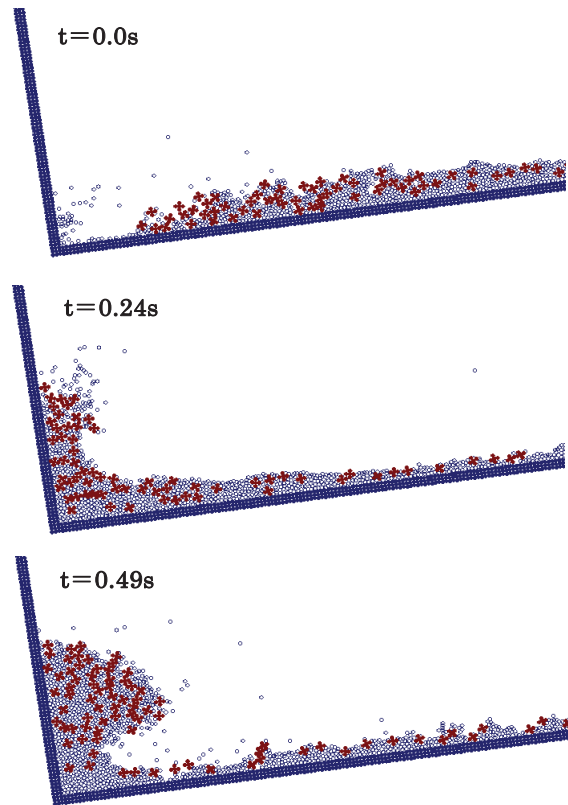


図-10 剛体混じり土石流モデル



(a) 実験



(b) 解析

図-11 剛体粒子間の衝突・摩擦および剛体と床面との摩擦を考慮した場合の流下状況

体粒子を用いることで、剛体の形状を自由にモデル化することができる。本解析では、図-9に示すように5個の粒子を用いて1つの剛体を作成した。粒子1個の直径は7.0mmなので、剛体1個の直径は21mmとなる。図-10に示すように壁から5,000mm離れた位置に、剛体80個を用いて流下初期のモデルを作成した。

4.2 剛体間衝突・摩擦および剛体と床面との摩擦を考慮した解析

剛体間衝突・摩擦および剛体と床面との摩擦を考慮した解析を行う。解析で得られた壁に衝突する前後の土石流モデルの流動状況を、実験と比較して図-11に示す。これより、壁に衝突する直前において実験と同じような形状の段波が形成されていることがわかる。また衝突後は、流れの方向を上方に変

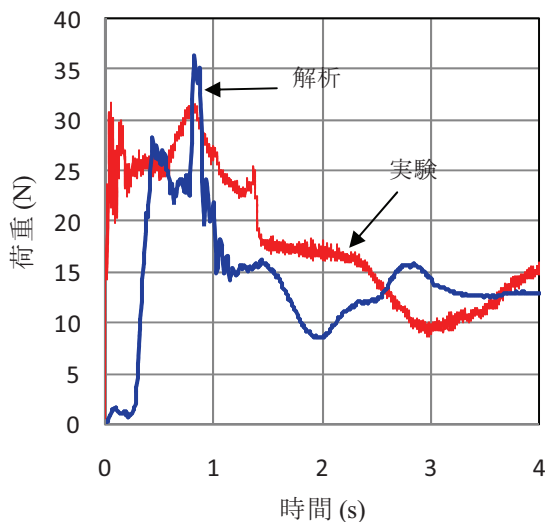


図-12 荷重～時間関係

えながら、剛体（ボラ）を巻き込みつつ跳ね返る様子も再現できている。図-12に、解析で得られた荷重～時間関係を実験と比較して示す。これより、解析では、先頭部の段波が衝突する前に先行したいくつかの流体粒子によって小さな荷重が発生するが、剛体間の衝突や床面との摩擦によって形成された段波が分力計に衝突することで大きな荷重が瞬時に立ち上がることがわかる。また、荷重波形も比較的良好に再現できていることがわかる。

5. 結言

本研究は、剛体粒子と流体粒子を用いた MPS 法を用いて石礫型土石流のシミュレーション解析法を開発し、土石流モデルの段波形成および土石流モデルにより発生する荷重を評価したものである。本研究の成果を以下に要約する。

(1) MPS 粒子法による通常の剛体－流体連成解析に、剛体同士の衝突・摩擦および剛体と礫と床面との摩擦を考慮したモデルを開発した。

(2) 通常の MPS 法を用いた清水のシミュレーション解析により、分力計への衝突前後における清水の複雑な挙動および荷重～時間関係を比較的良好に再現できることがわかった。

(3) 提案した手法により、土石流段波実験で得られた先頭部の段波を再現することができた。すなわち、土石流段波の形成要因としては、剛体同士の衝突・摩擦と剛体と床面との摩擦が影響していると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、砂防・地すべり技術センターおよび科研費(21560512)の助成を受けて行われたものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 高橋保, 土石流の機構と対策, 近未来社, 2004
- 2) 水野秀明, 南哲行, 水山高久, 倉岡千郎: 個別要素法を用いた鋼管製透過型砂防ダムの土石流捕捉効果に関するシミュレーション解析, 砂防学会誌, Vol.52, No.6, pp.4-11, 2000
- 3) 中谷加奈, 水山高久, 松本直樹, 和田孝志, 里深好文: 混合粒径に対応した汎用土石流 1 次元・2 次元シミュレータの開発と適用, 平成 22 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.278-279, 2010
- 4) 越塚誠一, 粒子法, 丸善, 2005
- 5) 後藤仁志, 林稔, 安藤怜, 酒井哲郎: 固液混相流解析のための DEM-MPS 法の構築, 水工学論文集, 第 47 巻, pp.547-552, 2003
- 6) Masahiro Kondo and Seiichi Koshizuka : Improvement of stability in moving particle semi-implicit method, Int. J. Numer. Meth. Fluids, 2010
- 7) Ishikawa N., Inoue R., Beppu M., Hasegawa Y. and Mizuyama T. : Impulsive loading test of debris flow model, 8th International Conference on Shock & Impact Loads on Structures, pp.53-62, 2009
- 8) 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