特集:数値シミュレーションとその活用

久*4

修正 MPS 法による土石流段波モデルのシミュレーション解析

Numerical simulation of debris flow model by using modified MPS method with solid and liquid particles

水山高

別府万寿博*1 井上隆太*2 Masuhiro BEPPU Ryuta INOUE 長谷川祐治*3 Yuji HASEGAWA Takahisa MIZUYAMA

石川信隆*2 Nobutaka ISHIKAWA

Abstract

This paper presents a numerical simulation of debris flow model by using modified Moving Particle Semi-implicit (MPS) method with solid and liquid particles. The modified MPS method is the Lagrangian model of solid-liquid flow phase and is proposed by combining the MPS method which was proposed by Koshizuka to simulate fluid dynamics with the Distinct Element Method (DEM). Herein, the contact between solid particles and the friction between solid particles and floor are taken into account. First, outline of the modified MPS method is described. Then, flow water simulation is compared with test result by using the original MPS method. After that, the effects of parameters in the modified MPS method are examined by comparing with the MPS method. Finally, the modified MPS method is applied to simulate the test result of debris flow model with pumice stone. The proposed method could reproduce the surge formation of debris flow model and load time history.

Key words : modified MPS method, debris flow model, Distinct Element Method

1. はじめに

近年、地球温暖化や気候変動の影響を受け、大規模か つ局地的な降雨が増加傾向にあり、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"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。また、石礫型 土石流の場合には、先頭部において表層から落下した巨 礫と床面の摩擦が巨礫の集積機構に影響を与えることが 考えられる。このような効果を、土石流を均質材料とみ なした支配方程式の中で詳細に考慮することは困難である。

さて近年,数値流体力学の分野において,飛沫や表面 の不連続性を表現する手法として MPS⁴⁾ (Moving Particle Semi-implicit) 法 や SPH⁵⁾ (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法が提案されている。例えば, 越塚ら⁴⁾ は MPS 法を用いてダムブレイクのシミュレーションを 行い, MPS 法の妥当性を検証している。後藤らは, MPS 法と DEM を結合した MPS-DEM 法の開発⁶⁰や流木の捕 捉シミュレーションⁿを行っている。陸田ら⁸は,SPH 法を用いて流体と粘弾性体との連成シミュレーションを 行っている。Maeda et al.⁹は, SPH 法を用いて, 固気液 の3相連成シミュレーションを行っており、各相が複雑 に相互作用する問題に対する適用性を示している。この ように、粒子法を用いて、これまでに解決できなかった 問題が精力的に取り組まれている。

本研究は、剛体および流体粒子を用いた MPS 法によ 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。改良した MPS 法の効果を、オリジナルの MPS 法による解析結果と比較して検討した。また、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

^{*1} 正会員 防衛大学校 建設環境工学科 Member, Civil and environmental Engineering, National Defense Academy (beppu@nda.ac.jp) *2 正会員 砂防鋼構造物研究会 Member, Research Association for steel Sabo Structures *3 正会員 財団法人 建設技術研究所 Member, Civil Engineering Research Laboratory *4 正会員 京都大学大学院農学研究科 Member, Graduate School of Agriculture, Kyoto University

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. 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 MPS 法の開発

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種であり, 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。

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + v \nabla^2 u + g \cdots (2)$$

ここに, *ρ* は密度, *P* は圧力, *u* は速度, *v* は動粘性係数, *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。時刻 *t* における速度と位置を u(*t*)および r(*t*) とする。式(2)の粘性項と重力を考慮して,仮の粒子速度 u*と位置 r*を求める。

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

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。

ここに、 n° 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_{\circ} 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。

2.2 剛体一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}_{s} ,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 めた後,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}_{s} 、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 říを求める。

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 **r**_i[′]を求める。

$$\mathbf{r}_{i}' = \mathbf{r}_{g}' + \begin{bmatrix} \cos\theta' - 1 & \sin\theta' \\ -\sin\theta' & \cos\theta' - 1 \end{bmatrix} (\mathbf{r}_{i}(t) - \mathbf{r}_{g}(t + \Delta t)) \dots (13)$$

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

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。

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + v \nabla^2 u + g + f_{col} + f_{fric} \qquad (16)$$

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

2.3.1 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⁶。ただし,接触力による剛 体の回転は考慮していない。

剛体粒子間の相互作用は次式で表される。



$$d_{s_col}(t + \Delta t) = c_{s_col} \frac{ds_{col}}{\Delta t}$$
(20 b)

ここに, f_{colx} , f_{coly} は, 粒子間衝突によって生じる x, y 方向の外力, $f_{n.col}$, $f_{\underline{s.col}}$ は粒子間の法線および接線方向の 作用力, α_{ij} は粒子 i, j間の接触角, $k_{n.col}$, $k_{\underline{s.col}}$ は法線お よび接線方向バネのバネ係数, $c_{n.col}$, $c_{\underline{s.col}}$ は法線および 接線方向バネの減衰係数, $e_{n.col}$, $e_{\underline{s.col}}$ はバネによる抵抗 力, $d_{n.col}$, $d_{\underline{s.col}}$ は減衰力による抵抗力, μ は摩擦係数, dn_{col} , ds_{col} は時間増分間に生じる増分変位を示す。

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 法の1回の時間増分の中 を,100回に分割して解析を行った。

2.3.2 剛体粒子と床面の摩擦

剛体と床との相互作用は、図−2および次式で表される。

$$f_{fric,x} = \sum_{j} \left(-f_{n,fric} \sin \theta + f_{s,fric} \cos \theta \right) \dots (21 \text{ a})$$
$$f_{fric,y} = \sum_{j} \left(f_{n,fric} \cos \theta + f_{s,fric} \sin \theta \right) \dots (21 \text{ b})$$



図-2 剛体と床面との摩擦モデル Fig.2 Friction model between a particle and floor

 $f_{n_{fric}}(t + \Delta t) = e_{n_{fric}}(t + \Delta t) + d_{n_{fric}}(t + \Delta t) \cdots \cdots \cdots \cdots (22 a)$

$$f_{s_{fric}}(t + \Delta t) = e_{s_{fric}}(t + \Delta t) + d_{s_{fric}}(t + \Delta t) \cdots (22 b)$$

$$e_{n_{fric}}(t + \Delta t) = e_{n_{fric}}(t) + k_{n_{fric}} \cdot dn_{fric} \cdot \dots \cdot (23 \text{ a})$$

ここに、 f_{fricx} , f_{fricy} は、剛体と床との摩擦によって生じる x、y方向の外力、 θ は斜面の角度、 $f_{n,fric}$ は床に垂直な方 向の抵抗力、 $f_{s,fric}$ は床の接線方向の抵抗力、 $k_{n,fric}$, $k_{s,fric}$ は法線および接線方向バネのバネ係数、 $c_{n,fric}$, $c_{s,fric}$ は法 線および接線方向バネの減衰係数、 $e_{n,fric}$, $e_{s,fric}$ はバネに よる抵抗力、 $d_{n,fric}$, $d_{s,fric}$ は減衰力による抵抗力、 dn_{fric} , ds_{fric} は時間増分間に生じる増分変位を示す。

なおここでも, MPS 法の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 法特有の局部的な高周波振動¹⁰⁰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。

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¹¹¹の解析を行う。 実験では,8度の斜面上に堪水した清水を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



図-3 解析のフローチャート Fig.3 Flowchart of the proposed MPS method

に高さ15 cm の三角形状に湛水して流下させた。粒子の 直径は7.0 mm 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5.0×10⁻²mm²/ms として解析を行った。分 力計をモデル化した壁に清水が衝突する際に生じる荷重 は,壁粒子に生じた圧力に直径7.0 mm と実験の水路幅 100 mm 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-7は,壁に衝突した時点を原点として,解析で得 られた荷重~時間関係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,解析結果は衝突直後の荷重をあまり再現でき なかったが,最大荷重および最終的な収束荷重は比較的 よく再現されていることがわかる。



図ー4 清水の解析モデル Fig.4 Analytical model of flow water

図ー5 清水の流下状況 Fig.5 Numerical result of flow water



(a) 実験



図一6 清水の流下状況の比較 Fig.6 Comparison of behavior of flow water between numerical analysis and test result

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¹²⁾のシミュレーションを行う。ボ ラの平均粒径は 20.7 mm,密度は 1.14 g/cm³ である。 土石流モデルの石礫としてボラを選定した理由は,ボラ は密度が小さいため水路勾配が緩くても段波土石流にな りやすく,また流動深も大きくなるためである。ただし, ボラを用いた土石流モデルは,一般的な石礫型土石流と 流動機構が大きく異なると考えられるため,段波発生の メカニズムや荷重特性は今後も詳細に検討する必要があ 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。 高速度ビデオカメラで撮影した,土石流モデルの段波形 成状況を図-9に示す。これより,分力計に衝突する直 前に段波が明瞭に形成されていることがわかる。分力計







図-8 実験概要図 Fig.8 Experimental setup

に衝突した後は,ボラは分力計に堆積あるいは上流側へ 戻っていることがわかる。

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-10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7.0 mm なので、剛体1個の直径は21.0 mmとなる。本解析は 2次元解析であり、実験のように剛体を台形型に設置し た場合は、上流から流下する水粒子が剛体の間を通過す ることができないため、以下の要領で解析モデルを作成 した。

まず,図-11に示すように,実験と同じ角度の斜面 に水を湛水する。次に,湛水の上から,あらかじめ設定 した範囲で剛体粒子をランダムに発生させて自由落下さ せる。初期の堪水量は,堆積した剛体が水面下になるよ うに設定している。剛体の個数については,実験におけ るボラの初期堆積の断面積(図-8の台形の断面積)と 解析モデルで用いる剛体粒子の面積が等しくなるように, 剛体数を 80 個に設定した。剛体 80 個が自由落下し安定 した状態を一度保存し,これを図-12に示すように壁



図-9 ボラ混じり土石流モデルの段波形成状況 Fig.9 Serge formation of debris flow model



図ー10 剛体 1 個の構成 Fig.10 Structure of a rigid body

から 5,000 mm 離した位置に移動して流下初期のモデル を作成した。なお壁の取り扱いについては、摩擦は考慮 せず境界条件としてモデル化している。

4.2 通常の剛体一流体連成法による流動解析

通常の剛体 - 流体連成解析法を用いて,土石流モデル のシミュレーション解析を行う。剛体粒子の密度は,実 験時のボラの密度と同じ1.14g/cm³とした。図-13に, 解析による流動過程を示す。これより,通常の剛体 - 流 体連成法による解析では,清水の場合と同じように土石 流モデル先頭部はくさび状の形状で流下していることが わかる。ただし、5個の剛体粒子で構成された個々の剛 体は形状を維持したまま流下している。図-14に、荷 重~時間関係を示す。図中の荷重は、解析データを区間 11個の移動平均法により平滑化しており、以降に示す 荷重~時間関係も同様である。図から、土石流モデルが 分力計に到達した後、荷重は次第に大きくなっているが、 実験と比較すると立ち上がり時間が長く最大荷重も約 20 N と小さいことがわかる。

4.3 剛体間の衝突・摩擦のみを考慮した解析

通常の剛体 – 流体連成解析手法に, 剛体間の衝突を考 慮した解析を行う。粒子間衝突を考慮した場合の粒子間 バネ係数は,以下の要領で決定した。法線および接線方 向のバネ係数については,1~1000 N/mmの範囲で解析 を行ったが流れの挙動にあまり明瞭な相違がなかった。 また, MPS 解析では DEM 解析に比べて時間ステップが



図-11 土石流モデルの作成要領 Fig.11 Making process of input data

大きいが, DEM 解析ではバネ剛性が大きくなるとかな り小さな時間ステップを必要する。すなわち,提案した 方法では MPS 解析を1ステップ行う間に DEM 解析を 100 回行っており計算時間が非常に長くなる。そこで,



図-13 通常の剛体 - 流体連成解析法による土石流モデルの 流下状況





図-14 通常の剛体-流体連成解析法による荷重~時間関係 Fig.14 Load time history by original rigid-liquid coupling method



図-12 剛体混じり土石流モデル Fig.12 Numerical model of debris flow model with rigid bodies

計算の安定性を優先して法線および接線方向ともにバネ 係数を1N/mmとした。摩擦係数は、ボラを水路床上で 滑動させる実験から0.5~1.0程度であることがわかっ たので、解析では0.5と設定した。また、ボラ同士を衝 突させる実験から反発係数を概算したところ、0.2以下 とかなり小さいことがわかったので、次式¹³⁾を用いて法 線方向の反発係数から法線方向の減衰定数hを決定した。

$$h = \sqrt{\frac{(\ln e)^2}{\pi^2 + (\ln e)^2}}$$
(25)

法線方向の減衰定数が求まれば、減衰係数cはc=2h $\sqrt{mk_{n,col}}$ (m は粒子の質量)として求められる。接線方 向の減衰定数は 0.1 とした。

図-15に、分力計直前における土石流モデルの流下 状況を示す。剛体同士の衝突力や摩擦を考慮することに よって、土石流内の流れが乱されるため、清水のような くさび状の流れではなく剛体がばらけるように流下して いることがわかる。また、流体粒子も跳ね上がっている。 図-16に、荷重~時間関係を示す。これより、荷重は 徐々に増加して最大荷重約20Nを示すことがわかる。

4.4 剛体と床面との摩擦のみを考慮した解析

通常の剛体 – 流体連成解析手法に、剛体と床面との摩 擦を考慮した解析を行う。この場合の解析定数は、剛体 と床面とのバネ係数と摩擦係数である。実験では、土石 流段波が発生すると床と接しているボラの上には多くの ボラが積載されるが、このような状況での摩擦係数は不 明な点が多い。また、水分を含んだ床面とボラとのバネ 係数についても不明である。ここでは、バネ係数を剛体 間の衝突・摩擦を考慮した場合と同じ1N/mmとした上 で、摩擦係数を10.0とした。剛体と床面とのバネ係数 および摩擦係数の決定法については、今後も検討する必 要がある。

図-17 に,分力計に到達する直前の流下状況を示す。 これより,剛体と床面との摩擦を考慮すると,流体粒子 がやや先行して流下し,その後,段波状になった土石流 モデルが流下していることがわかる。図-18 に,荷重 ~時間関係を示す。これより,流体粒子が先行する間は なだらかに荷重が増加するが,段波状の塊が衝突すると 荷重は急激に上昇していることがわかる。

4.5 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,図-19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。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 との摩擦の両方が影響していると考えられる。また衝突 後は,流れの方向を上方に変えながら,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。しかし,



図-15 粒子間の衝突・摩擦のみを考慮した場合の流下状況 Fig. 15 Numerical result by the method considering the impact and friction between particles





Fig.16 Load time history by the method considering the impact and friction between particles

剛体は壁に衝突した後に上方向に跳ね上がり,実験のようにボラが壁に堆積する挙動を再現することはできなかった。この理由は、本解析は2次元解析であり剛体粒子間を流体粒子が通過できないため、実験と比較して剛体粒子が流体粒子とともに移動しやすいことが影響していると考えられる。図-20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。清水のシミュレーションと同様に、衝突直後の挙動を十分に再現していないが、最大荷重および収束荷重は比較的良



図-17 床との摩擦を考慮した場合の流下状況 Fig.17 Numerical result of the method considering the friction between a particle and floor



図-18 床面との摩擦を考慮した場合の荷重~時間関係 Fig.18 Load time history by the method considering the friction between a particle and floor

好に再現できていることがわかる。三好ら¹⁴が指摘して いるように,荷重~時間関係の特性は土石流段波の先頭 部および後続流の形状や速度によって変化すると考えら れる。また先に述べたように,ボラが壁に衝突した後に 堆積する挙動を再現できなかったため,堆砂圧が荷重に 与える影響が適切に反映されていないことが考えられる。 今後は3次元化を含めた解析モデルの検討を行って,剛 体と壁との衝突や堆砂圧の影響など検討する必要がある。

なお以上の内容は、本研究で設定した解析パラメータ で得られた解析結果に対する考察であるため、今後はパ



- 図-19 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
- Fig. 19 Numerical results by the method considering both the impact / friction between particles and the frictionbetween a particle and floor

ラメータの設定法を含めて解析の高度化や精度,信頼性 の向上が必要である。

4.6 剛体個数の影響

剛体の数が土石流モデルの流れに与える影響を考察す るため、剛体の数が20個および100個の土石流モデル を作成した。図-21に解析モデルを示す。剛体の数が 20個の場合は、図-22に示すように剛体の位置が分散 し流動深が小さい状態で流下していることがわかる。図 -23に示す剛体が100個の場合には、流下後約3mの 時点で図-23(a)に示すように明瞭な段波を形成したが、 その後段波が崩れてしまった。このため、分力計の直前 では、図-23(b)に示すように段波形状がやや崩れた形で 流下していることがわかる。図-24に、剛体20個、80 個および100個の場合の荷重~時間関係の比較を示す。 これより、剛体20個の場合は、剛体80個に比べて荷重



図-20 剛体間の衝突・摩擦および床面との摩擦を考慮した 場合の荷重~時間関係

Fig.20 Load time history by the method considering both the impact/friction between particles and the friction between a particle and floor



図-22 剛体 20 個の場合の流下状況 Fig. 22 Numerical result of 20 rigid bodies



合は,段波が途中で崩れて流体粒子が先行して流下した ため,荷重が立ち上がるまでに0.5 s 程度の時間が経過 していることがわかる。荷重の最大値については,剛体 80 個がもっとも大きく,20 個,100 個の順に小さくな った。剛体100 個の荷重が小さくなった理由は,段波が 途中で崩れ,流動深や流速がやや小さくなったためと考 えられる。段波が形成された後に崩れる現象は,実際の 実験においても確認しているが,どのような状況で発生 するのかは整理されておらず,メカニズムも未解明であ り,今後の検討が必要である。

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)提案した手法の特徴を検討するため、剛体同士の衝突・摩擦や剛体と床面との摩擦が解析結果へ与える影響を考察した。その結果、剛体同士の衝突・摩擦および床面との摩擦のみでは明瞭な段波は形成されなかった。一方、両者を考慮した場合は、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の両方が影響していると考えられる。
- (4) 剛体の数が土石流モデルの先頭部の段波および荷重 特性に与える影響を調べた。その結果,剛体の個数 が少ない場合は先頭部の段波は形成されないことが わかった。解析結果から,土石流先頭部および後続 流の形状や流速が荷重~時間関係に影響するものと 考えられる。

今後の検討課題としては、粒子直径が解析結果に与え る影響の把握,DEMモデルにおけるバネ定数や減衰係 数および床面との摩擦係数の決定法の検討が必要である。 また、礫衝突のモデル化や堆砂圧が荷重に与える影響も 検討する必要がある。

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,432 pp.,2004
- 2) 水野秀明・水山高久・南哲行・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, p. 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, p.278-279, 2010
- 4) 越塚誠一:粒子法, 丸善, 144 pp., 2005
- 5) Liu G. R. and Liu M. B.: Smoothed Particle Hydrodynamics, World Scientific, 449 pp., 2003
- 6)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, p.547-552,2003
- 7)後藤仁志・酒井哲郎・林稔:粒子法による流木群の堰止 め過程のLagrange 解析,水工学論文集,第45巻, p. 919 - 924,2001
- 8)陸田秀実・清水雄・土井康明:SPH法による流力弾性 解析法と水面衝撃問題への適用,土木学会論文集B, Vol. 65, No. 2, p. 70-80, 2009
- 9) Maeda K., Sakai H. and Sakai M. : Development of seepage failure analysis method of ground with smoothed particle hydrodynamics, Journal of structural and earthquake engineering, JSCE, Vol. 23, No. 2, p. 307 – 319, 2006
- Kondo M. and Koshizuka S.: Improvement of stability in moving particle semi-implicit method, Int. J. Numer. Meth. Fluids, 2010
- 11) Ishikawa N., Inoue R., Beppu M., Hasegawa Y. and Mizuyama T.: Impulsive loading test of debris flow model, 8 th International Conference on Shock & Impact Loads on Structures, p. 53-62, 2009
- 12) 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, p. 290-291, 2008
- 13) 大町達夫・荒井靖博:個別要素法で用いる要素定数の決め方について,構造工学論文集, Vol. 32 A,p. 715-723, 1986
- 14) 三好岩生・鈴木雅一:土石流の衝撃力に関する実験的研 究,新砂防, Vol.43, No.2, p.11-19, 1990

(Received 31 August 2010 ; Accepted 25 January 2011)