

擬水滴要素個別要素法による石礫中詰型堰堤

に対する土石流衝撃力解析の試み

Fundamental analysis of debris flow impact load to steel frame check dam using DEM applied water model

堀口俊行*, 香月智**

Toshiyuki Horiguchi, Satoshi Katsuki

*防衛大学校理工学研究科学生, 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

**工博, 防衛大学校教授, 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

Key Words: debris flow, steel frame check dam, DEM, spherical water model

キーワード: 土石流, 鋼製枠堰堤, 個別要素法, 擬水滴要素

1. 緒言

近年の局地的な豪雨や台風により, 土石流やがけ崩れが頻発している¹⁾. そのため, 我々の生活を脅かす自然災害に対して多くの対策工が建設されている. その一つとして写真-1 に示すような鋼製枠堰堤が建設されている. この鋼製枠堰堤は, 枠の中に現地発生礫材を詰めることで鋼製枠と礫材の2つの相互作用により抵抗力を発揮する構造となっている. これは, 現地での資材を利用するため自然環境に優れ早期施工にも役立っている. しかし, 礫材の間隙を水が抜けるような複雑な構造物が受ける土石流の衝撃力を計測することは難しいので, 正確に推定する手法が不明確なまま建設されている.

これにより, モデル化された模型としてコンクリート堰堤に対する土石流の衝撃力を推定する手法は多く研究されている^{2), 3)}. 池谷ら⁴⁾は, 土石流の種類を大きく2つに分け, 流体理論による土石流荷重と固体理論における土石流荷重に分けることで, 衝撃力の体系化を整理した. また, 水山⁵⁾は砂防堰堤に対する土石流衝撃力の分類の2つをそれぞれの特性に合わせ, コンクリート製砂防堰堤に対する衝撃力を算定する方法を検討した.

その中で, 巨礫の衝突による荷重に着目し, 衝突時における局所的な破壊によるエネルギーも算出している. 大同ら⁶⁾は, 土石流を非圧縮性流体または圧縮性流体とみなすことでそれぞれの衝撃圧の発生機構を考察し, 現行設計法の基礎となっている⁷⁾.

一方, 土石流に関する数値解析の一つとして個別要素法を用いた研究が見受けられる^{8), 9)}. 個別要素法は, 離散体手法であるので土石流のような現象に適していることから, 巨礫を剛体要素としてモデル化している. た



写真-1 鋼製枠堰堤

だし, 巨礫に対する流体力は場の諸元をもとに, 要素に直接与えていることが多い¹⁰⁾. 浅井ら¹¹⁾は, 設計時の流体力評価の援用として, 数値流体シミュレーションの比較をするため, 粒子型解析法の特徴を整理し, それぞれの適用性およびその精度を検証した. また, 別府¹²⁾らは, 礫と水の連成解析のために個別要素法と粒子法を連成解析している. そこでは, 水を粒子法により連続的に解き, 礫を個別要素法で解析するモデルを提案した. しかし, 個々の間での複雑な計算の中で不連続な剛体を陽的に解いている個別要素法に, 本来連続体が前提としている粒子法が場の中で混じることで, その境界条件の取り扱いについて検討の余地が残されている.

そこで本研究は, 実験で行った礫中詰材を使用した堰堤に作用する土石流の衝撃荷重実験を対象に提案手法である個別要素法を応用した擬水滴要素を用いて再現解析を行い, その適用性を試みたものである.

2. 擬水滴要素モデル

2.1 混相流のモデル化

土石流は, 固体の巨礫, 礫および土砂と水との混合流であるが, 従来の個別要素法による解析では, この固体

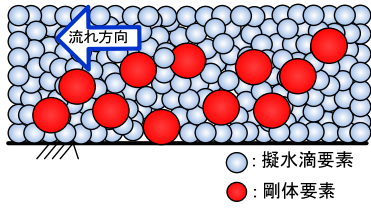


図-1 混相流モデル

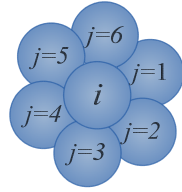
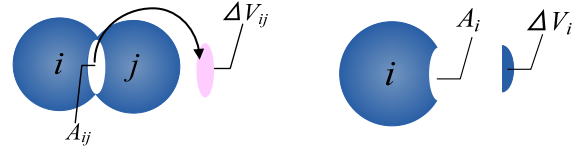


図-2 接触している要素



(a) 擬水滴要素の2体問題

(b) 接触面積

図-3 擬水滴要素の接触処理

部分をP.A Cundallの提案した剛体要素にモデル化して解いている．本研究では、水の領域を図-1のような球形の水滴を模したモデルの集まりとして解くものとする．以下に、個別要素法の解析法に照らしながら、擬水滴要素の解法について述べる．

2.2 質量と体積

擬水滴要素 i の体積および質量は、球形を仮定しているので次式によって与える．

$$V_{wi} = \frac{4}{3}\pi r_{wi}^3, \quad m_{wi} = \frac{4}{3}\rho_{we}\pi r_{wi}^3 \quad (1)$$

ここで、 V_{wi} : 擬水滴要素 i の体積、 r_{wi} : 擬水滴要素 i の半径、 m_{wi} : 擬水滴要素 i の質量、 ρ_{we} : 擬水滴要素 i の比重である．

ただし、水の密度 ρ_w については球形要素の表現すべき領域を立方体と考え、その質量を同じになるように与えると仮定し、以下のようにして用いている．

$$\rho_{we} = \frac{8r_{wi}^3}{4/3\pi r_{wi}^3}\rho_w = \frac{6}{\pi}\rho_w \quad (2)$$

ここで、 ρ_w : 水の密度 (10^3 kg/m^3)．

なお、後述する等価領域の重なりが全領域の質量表現において現実の水の質量と矛盾する場合には、初期配列時に整合するように決定する．

2.3 運動量保存則

流体解析においてNavier-Stokesの式は、次のように表される．

$$\frac{D\mathbf{w}}{Dt} = \mathbf{F} - \frac{1}{\rho}\text{grad}\mathbf{p} + \nu\Delta^2\mathbf{w} \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{w} : 流水の速度ベクトルを表し、右辺の第1項は外力、第2項は圧力、第3項は粘性力を表している．

仮に、擬水滴要素の個別要素内において密度が一定であるとして、個々の要素 i において運動量保存則を要素の運動方程式として表す．その際、減衰管理を比例減衰モデルとし、減衰係数 α 、 β で管理する．

$$\mathbf{M}_{wi}\ddot{\mathbf{u}}_{wi}(t) + (\alpha\mathbf{M}_{wi} + \beta\mathbf{K}_{wi})\dot{\mathbf{u}}_{wi}(t) + \mathbf{K}_{wi}\mathbf{u}_{wi}(t) = \mathbf{f}_{ex}(t) \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{M}_{wi} : 質量マトリクス、 \mathbf{K}_{wi} : 擬水滴要素の剛性マトリクス、 \mathbf{f}_{ex} : 外力ベクトル、 \mathbf{u}_{wi} : 擬水滴要素 i の変位ベクトルである．

次に、要素の位置と変位は、次のように表す．

$$\mathbf{L}_{wi} = \mathbf{L}_{wi}^0 + \mathbf{u}_{wi} \quad (5)$$

ここで、 \mathbf{L}_{wi} : 擬水滴要素 i の重心の全体座標系に対する位置ベクトル、 \mathbf{L}_{wi}^0 : 擬水滴要素 i の初期の位置ベクトルである．また、擬水滴要素は回転方向成分を持たないので位置ベクトル、変位ベクトルともに3成分である．

また、運動方程式を中心差分法を用いて解く．ただし、速度項は後進差分とした．

$$\ddot{\mathbf{u}}_{wi}(t) = \frac{\mathbf{u}_{wi}(t + \Delta t) - 2\mathbf{u}_{wi}(t) + \mathbf{u}_{wi}(t - \Delta t)}{\Delta t^2} \quad (6)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_{wi}(t) = \frac{\mathbf{u}_{wi}(t) - \mathbf{u}_{wi}(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (7)$$

以上より、時間 $(t + \Delta t)$ における変位 $\mathbf{u}_{wi}(t + \Delta t)$ は次式により求まる．

$$\mathbf{u}_{wi}(t + \Delta t) = \mathbf{M}_{wi}^{-1}(\mathbf{f}_{ex} - (1 + (\beta/\Delta t))\mathbf{f}_{Kij} - (\beta/\Delta t)\mathbf{f}_{Kij})(\Delta t)^2 + (2 - \alpha\Delta t)\mathbf{u}_{wi}(t) - (1 - \alpha\Delta t)\mathbf{u}_{wi}(t - \Delta t) \quad (8)$$

ここで、 \mathbf{f}_{Kij} : 要素 i と隣接する要素 j とに働く圧力勾配による力ベクトルである．なお、本解析では減衰管理は β のみで扱っている．

2.4 圧力勾配による力

水中にある擬水滴要素 i は、図-2に示すようにいくつかの要素 j によって囲まれているものと考えられる．この要素間では、法線方向ばねの接触力に相当する水圧勾配力ベクトル \mathbf{f}_{pij} を設ける．この圧力勾配力については、圧力と接触面積を乗じて求めるものとする．

$$\mathbf{f}_{pij} = A_{cij}\mathbf{p}_{ij} \quad (9)$$

ここで、 \mathbf{f}_{pij} : 要素 i, j 間の圧力勾配による水圧力ベクトル、 \mathbf{p}_{ij} : 要素 i, j 間の圧力ベクトル、 A_{cij} : 要素 i, j 間の接触面積ある．

なお、 A_{cij} は次式によって与える．

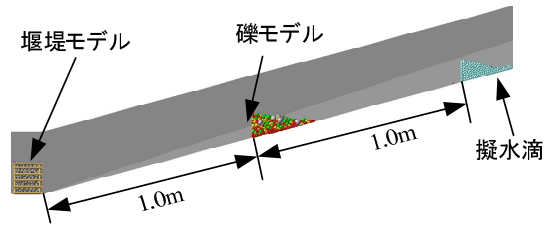
$$A_{cij} = \frac{A_{ci} + A_{cj}}{2} \quad (10)$$

また、 p_{ij} は、要素 i と j の内圧 p_i 、 p_j の平均値を用いるものとする．

$$p_{ij} = \frac{p_i + p_j}{2} \quad (11)$$

表-2 供試体の諸元

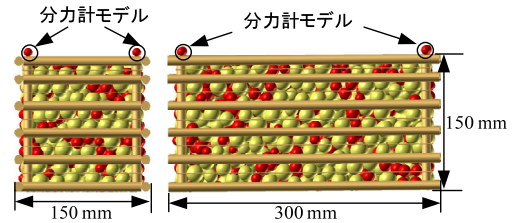
項目	状態	流量 (ℓ)	位置(m)	備考
1	水のみ	4.5	2.0	全ケース 5回ずつ
		5.5	3.5	
		6.5		
2	礫混じり	4.5	2.0	
		5.5		



(a) 初期位置

表-3 最大衝撃力

項目	パターン	流量(ℓ)	距離 2.0m	距離 3.5m
水のみ	水抜け有	4.5	12.3N	15.8 N
		5.5	20.3 N	21.0 N
		6.5	22.2 N	24.9 N
礫混じり	水抜け有	4.5	51.5	
		5.5	54.6	



(b) 堰堤モデル

図-5 解析モデル

また、堰堤の衝撃力を直接分圧計に伝えるために、水路に固定するために設置している固定具に上から吊るす機構となっている。

土石流モデルは、澁谷ら¹⁰⁾の実験を参考に決定した。表-1, 写真-3 に4種類の土石流中の巨礫モデルである固化石炭灰の粒径範囲を示している。また、平均粒径 30 mm を灰色, 20 mm を緑色, 15 mm を黄色, 10 mm を赤色とした。それを混合することで土石流モデルとした。

3.2 実験結果

表-2 に示す実験ケースは、いずれのケースも5回ずつ行い、再現性を確認した。

表-3 に、実験で得られた最大衝撃力の解析結果を示す。結果は、流量と初期位置によって衝撃力が異なる。ただし、本研究では解析対象として流下位置を 2.0 m とした条件において、水のみと礫混じりのケースの再現性を検討する。

4. 解析結果

4.1 解析モデル

図-5(a), (b)に、解析開始時点での礫要素および擬水滴要素の配置と堰堤モデルを示している。解析モデルの水路の側面、底面は、三角形平面要素を用いてモデル化した。堰堤モデルは、枠は円柱形要素を用いて再現した。実験では、礫の露出防止のために金網を張っている。そのため、枠との間に、円柱形要素を置くことで露出防止の代用とした。実験では、堰堤の底面においてベニヤ板を引いているものの、実験の堰堤モデルは軽く浮くように吊られており、摩擦が生じないので、詰めた礫要素と堰堤の底面にある三角形要素との摩擦は無いものとした。次に、衝撃力を計測値に対応させるため分力計は、図-5(b)に示している4つの球形要素と円柱形要素の連

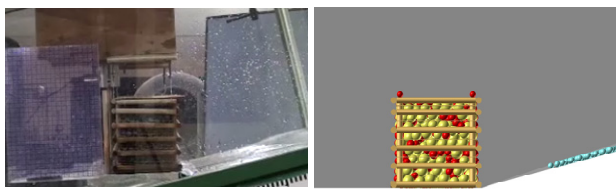
表-4 解析基本値

項目	値	
礫要素	比重 ρ_g	1.8
	要素数	3070
擬水滴要素	比重 ρ_w	1.0
	要素数 (直径 $r_w=1.0$)	4500~6500
斜路	3 三角形平面要素	3
堰堤部	中詰材要素	1514
	円柱形要素	49
	3 三角形平面要素	2
分力計	球形要素	4
	円柱形要素	4
要素間ばね	法線方向 k_n (N/m)	1.0×10^6
	接線方向 k_s (N/m)	3.5×10^5
水ばね	法線方向 E_w (N/m ²)	2.25×10^9
	擬水滴-礫間 C_{s-w}	0.04
	抗力係数 c_D	0.49
減衰係数	礫間および擬水滴間 β_C	0.0062
時間条件	時間刻み Δt	1.0×10^{-7}

結ばねでモデル化することとした。土石流モデルの初期配置の要領は、礫要素と擬水滴要素は、初期位置にそれぞれ落下法を用いて堆積させそこからそのまま流し込み土石流モデルとして流下させることとした。

4.2 解析基本値

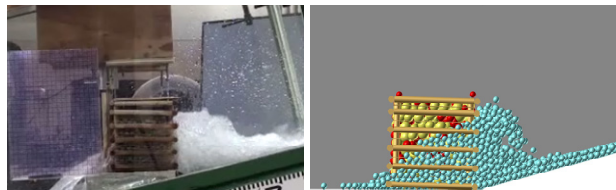
表-4 に、解析で用いた解析基本値を示す。礫要素の数は、実験と同数とした、擬水滴要素は、実験で使用した流量が 4.5 ℓ~6.5 ℓに一致するように要素数と一要素体積とした。要素間ばねは、文献 10)を参考に決定した。水と礫間の粘性係数、抗力係数は別途行った透水試験をもとに決定した。



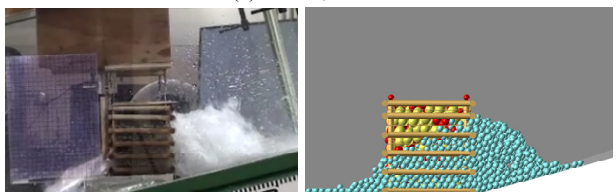
(a) $t = t_0$



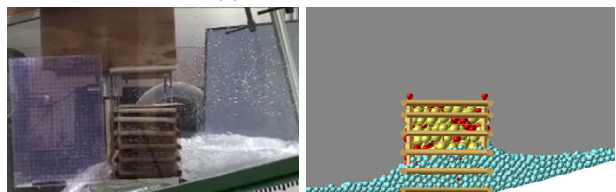
(b) $t = t_0 + 0.3 \text{ s}$



(c) $t = t_0 + 0.6 \text{ s}$



(d) $t = t_0 + 0.9 \text{ s}$



(e) $t = t_0 + 1.2 \text{ s}$

図-6 実験と解析の時系列 (清水のみ)

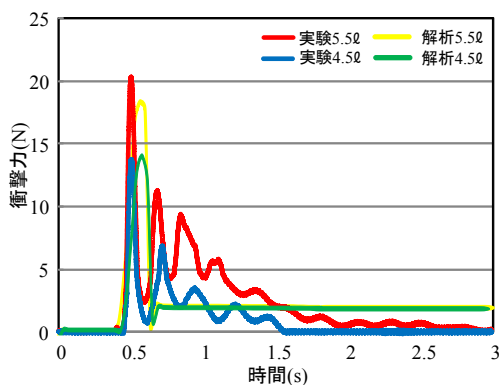


図-7 衝撃力～時間関係 (清水のみ)



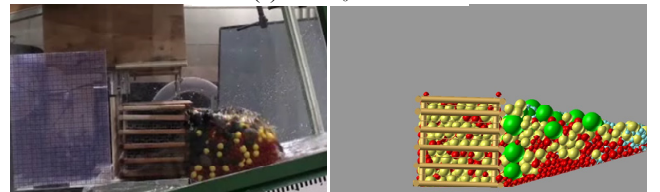
(a) $t = t_0$



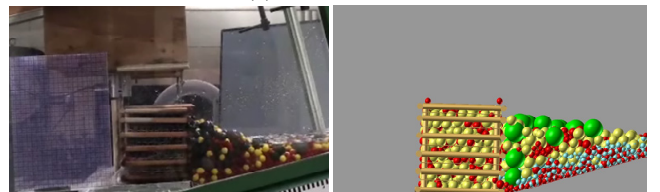
(b) $t = t_0 + 0.3 \text{ s}$



(c) $t = t_0 + 0.6 \text{ s}$



(d) $t = t_0 + 0.9 \text{ s}$



(e) $t = t_0 + 1.2 \text{ s}$

図-8 実験と解析の時系列 (礫混じり)

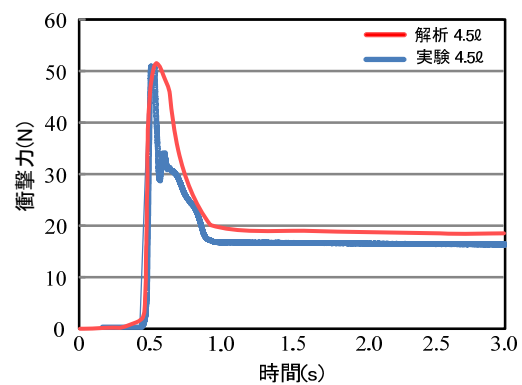


図-9 衝撃力～時間関係 (礫混じり)

4.3 衝撃水圧～時間関係

4.3.1 清水のみの解析

図-6(a)~(e)は、実験と解析の運動形態を時刻歴を比較したものである。まず、図-6(a)は、 $t=t_0$ における初期位置を決定したものであり水が堰堤の手前 20 cm 付近の時刻である。図-6(b)は、 $t=t_0+0.3 \text{ s}$ 時の水が衝突して最

も水飛沫が上がったときである。実験に比べて解析はやや遅れていることがわかる。図-6(c)は、 $t=t_0+0.6 \text{ s}$ 時の水が衝突し、泡が全体の水と混合しながら後続に流れてくる水と混じり合うときである。解析では、泡を再現していないのでやや様子が異なるように見受けられるが、擬水滴群の上がった高さや堰堤間を流れる水の様子は定性的には再現できている。図-6(d)の $t=t_0+0.9 \text{ s}$ 時では、

堰堤から衝突した水が最も暴れ出している様子を表している。図-6(e)の $t=t_0+1.2$ s時では、残った水が堰堤に貯まっている状態である。残っている水深を比較すると実験と解析において再現できている。

図-7は、4.5 0時と 5.5 0時の実験と解析の衝撃力～時間関係を示したものである。いずれのケースにおいても衝突までの立ち上がりは再現できているが、その後の水が抜けた後の荷重については過少評価となっている。また、瞬間的に生じる衝突力がやや異なるように見える。しかし、最大衝撃荷重は再現できている。

4.3.2 礫混じりの解析

図-8(a)～(e)は、礫混じりの実験と解析の運動形態を時刻歴を比較したものである。まず、図-8(a)は、 $t=t_0$ における初期位置を決定したものであり礫が堰堤に衝突した時刻とした。図-8(b)の $t=t_0+0.3$ s時では、礫混じりが塊として衝突する先頭部を示しているが、実験と解析で少しずれていることがわかる。図-8(c)の $t=t_0+0.6$ s時では、礫が堰堤に衝突したときに最も衝撃力が生じている状態であり、堰堤に礫が乗りかかっている状態でもある。実験では、水との混合から流体的な動きとなっている。一方、解析ではやや固体的な振る舞いとなっている。図-8(d)の $t=t_0+0.9$ s時では、水が押し寄せている様子である。実験では、水が礫を押し込んでいるが、解析ではその振る舞いが再現できていない。図-8(e)の $t=t_0+1.2$ s時では、礫と残った水が堰堤に貯まっている状態である。実験も解析でも水が流れている様子が再現できている。

図-9は、4.5 0時の礫混じりの実験と解析の衝撃力～時間関係を示したものである。いずれのケースにおいても衝突までの立ち上がりは再現できているが、その後の水が抜けた後の荷重が再現できていない。しかし、最大衝撃力を再現できていることやその後の礫だけが残った時の荷重も近いものとなっている。

5. 結 言

本研究は、実験で得られた鋼製枠堰堤モデルで計測した衝撃力～時間関係を提案手法である擬水滴要素を用いて衝撃力推定の適用性を検討したものである。以下にその成果を示す。

1) 水の実験における堰堤に衝突する水の振る舞いと擬水滴要素の解析における定性的な振る舞いを表現できた。

2) 最大衝撃力については、礫混じりも清水のみも実験値を概ね再現できる。

しかし、衝突後の水抜けに関連する流体荷重については改善すべきことが多い。

参考文献

- 1) 一般社団法人 砂防・地すべり技術センター：土砂災害の実態 平成 25 年度版, pp.1-28, 2013.7.
- 2) 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 (169), pp.11-19, 1990.7.
- 3) 山本彰, 山本修一, 鳥井原誠, 平間邦興：砂防ダムに作用する土石流の衝撃力に関する研究, 砂防学会誌, Vol.51, No.2, pp.22-30, 1998.12.
- 4) 池谷浩：土石流の分類, 土木技術資料 20-3, pp.44-49, 1987.
- 5) 水山高久：砂防ダムに対する土石流衝撃力算定とその問題点, 新砂防, Vol.112, pp.40-43, 1979.8.
- 6) 大同淳之, 吉栖雅人, 中嶋健太：土石流による衝撃力, 水工学論文集, 第 38 巻, pp.557-562, 1994.2.
- 7) 砂防・地すべり技術センター鋼製砂防構造物委員会：平成 21 年版 鋼製砂防構造物設計便覧, 2010.9.
- 8) 福間雅俊, 前田健一, 湯浅知英：石礫流れ中の分級と跳返りのメカニズムに関する考察, 実務利用を目指すマイクロジオメカニクスに関するシンポジウム, pp.1-6, 2008.11.
- 9) 前田健一, 舘井恵, 福間雅俊：個別要素法を用いた粒子流れの構造と大粒径の浮き上がりのマイクロメカニクス, 砂防学会誌, Vol.64, No.4, pp.3-14, 2011.6.
- 10) 渋谷一, 原木大輔, 香月智：3 元個別要素法による透過型砂防えん堤の流木混じり土石流の捕捉シミュレーション, 応用力学論文集, Vol.12, pp.449-460, 2009.8.
- 11) 浅井光輝, 別府万寿博, 石川信隆, 眞鍋慶生, 齋藤展, 丹羽一邦：数値流体シミュレーションによる流体衝撃力評価に関する基礎的研究, 構造工学論文集 Vol.58A, pp.1021-1028, 2012.3.
- 12) 別府万寿博, 井上隆太, 石川信隆, 長谷川祐治, 水山高久：修正 MPS による土石流段波モデルのシミュレーション解析, 砂防学会誌, Vol.63, No.6, pp.32-42, 2011.3.
- 13) G.R.Liu, M.B.Liu : Smoothed Particle Hydrodynamics : a meshfree Particle method , World Scientific, 2003.