

1 緒言

近年、大型の台風や集中豪雨により土石流の発生が増加傾向にある。中でも、先頭部に巨礫が集中する石礫型土石流はその衝撃力によって構造物を破壊することがある。よって、土石流に対して構造物が受ける荷重を評価することが望まれている。

一方、解析手法として粒状体の解析を行う上で剛体である球形や円柱形を用いて運動形態を再現する手法として個別要素法が用いられている。筆者ら¹⁾は、透過型砂防堰堤における捕捉効果確認解析のために流木混じり土石流の再現解析を行っている。

そこで本研究は、実験室規模の土石流実験から得られた衝撃力荷重を個別要素法解析で評価する再現シミュレーションについて検討するものである。

2 解析手法

2.1 個別要素法解析¹⁾

個別要素法は、剛体の運動解析を基本としているが、その特徴は、各要素が接触状態の判定を行うことにある。接触したならば要素間に設定した接触ばねの接触力を算定し、そうでなければ単なる剛体として、その運動方程式を時々刻々解くことにより変位・回転を求め、個々の要素の運動を追跡するものである。

2.2 堰堤に作用する衝撃力評価

個別要素法は、図-1(a)に示すような要素間同士のばね力によって接触力を求めることができる。よって、図-1(b)に示すように衝突しているときに複数の要素にこれらを積算すれば、ある円柱形要素 j に働く力は、以下のように計算できる。

$$P_j = \sum_{i=1}^n p_{ki} \quad (1)$$

ここで、 P_j : 円柱形要素 j に作用する力、 p_{ki} : i 礫要素が j 要素に及ぼすばね力。

しかし、礫要素は必ずしも直交する力だけではなく滑り方向の力も発生する。この直交成分は、連結ばねのせん断ばね力と静的であれば図-1(b)のように次式が成立する。

$$P_{sj} = S_{1j} - S_{2j} \quad (2)$$

ここで、 P_{sj} : j 円柱形要素に働く直交方向の荷重、 S_{1j} 、 S_{2j} : j 要素端部のせん断ばね力。

次いで、接触力の軸力成分も求められる。

$$P_{Nj} = N_{1j} - N_{2j} \quad (3)$$

ここで、 P_{Nj} : j 要素の軸力方向に及ぼすばね力、 N_{1j} : j 要素端部に働く軸力。

同様に、この考え方を構造全体に應用すると、図-2 のように正面から受ける P_T は、

$$P_T = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n S_{Bi} \quad (4)$$

ここで、 P_T : 構造全体に作用する水平荷重、 P_i : 構造各部分に作用する礫の接触力、 S_{Bi} : 構造底部要素に生ずるせん断力。

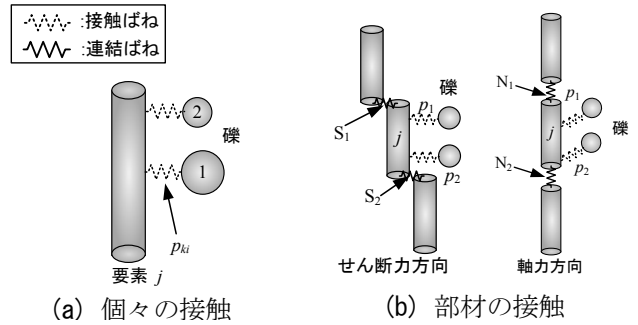


図-1 荷重評価 (部材)

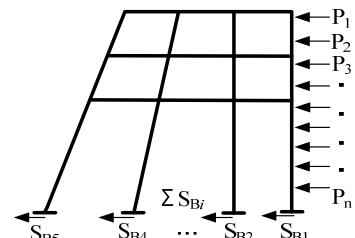


図-2 構造物の荷重評価

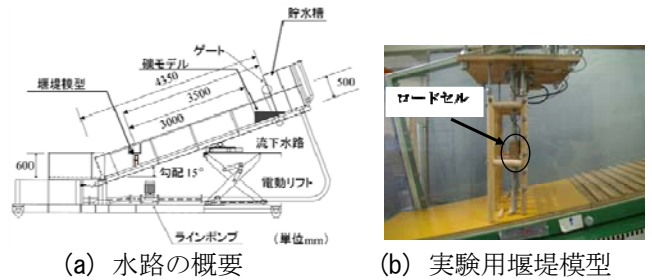


図-3 実験水路の概要

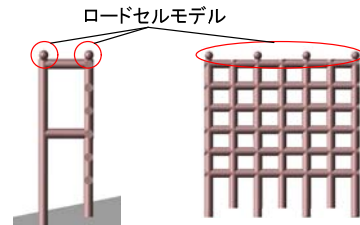


図-4 解析用堰堤モデル

なお、この考え方は実験における計測にも應用できるので解析と実験の比較が容易である。

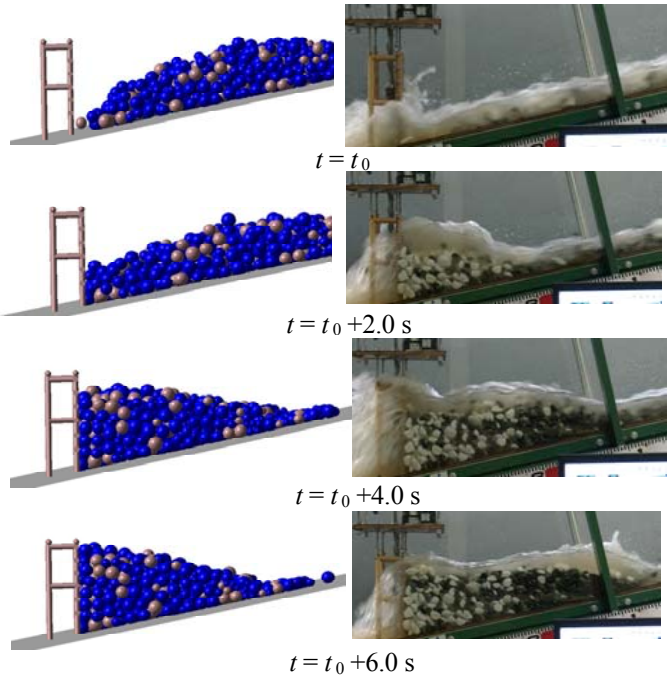
3 実験スケールでの再現解析

3.1 事前実験の概要

図-3(a)に、実験で用いた直線水路を示す。水路は、水路長 4.5 m、水路幅 30 cm、高さ 50 cm であり、水路勾配を 0~25°まで変化できる。なお、水路床には底面粗度を配置している。また、堰堤模型は礫材の位置から 3.0 m 下方に設置している。堰堤模型は、一般的な格子型の鋼製透過型砂防堰堤の 1/40 スケールとした。ここでは、礫衝突前の正面に生じる衝撃荷重を評価するため図-3(b)に示すような形状とした。堰堤模型は、高さ 260 mm、横幅 270 mm、奥行き 90 mm である。堰堤模型の素材は、円管にした木材と鋼材 (直径 15 mm) を用いた。堰堤模型は、計測架台から吊るし、堰堤模型に作用した荷重が分力計に直接伝達する構造になっている。なお、使用し

表-1 解析初期値

項目		値	
流水	初期流速 (m/s)	2.0	
	初期水深 (cm)	10	
	抗力係数	0.49	
堰堤モデル	円柱形要素	119	
	球形要素	8	
水路	平面要素	3	
	円柱形要素	26	
礫モデル	球形要素 (個)	1000	
要素間ばね	ばね定数	法線方向 K_n (N/m)	1.0×10^6
		接線方向 K_s (N/m)	3.5×10^5
	減衰定数 h		0.8
	粘着力 C (N)		0
	摩擦係数 $\tan\phi$		0.466
計算条件	時間刻み Δt (s)		1.0×10^{-6}



(a) 解析 (b) 実験
図-5 礫の堆積形状の比較 (時系列)

た礫材には、30~40 mm の玉砂利を用いている。堰堤後方に堆積している礫材に水を一気に流すことで、土石流を発生させて流下させる。そのうえで、堰堤に生じる衝突荷重を計測する。

3.2 解析結果

3.2.1 解析モデル

図-4 に、解析モデルを示す。堰堤の部材モデルには円柱形要素を組み合わせることで1列目と2列目をモデル化し、ロードセルにあたる部分を円柱形要素と球形要素で結ぶ連結ばねを使用してモデル化した。ここで得られた接触力を衝撃荷重として評価する。表-1 に、実験に合わせてパラメータを設定した解析初期値を示す。

3.2.2 荷重～時間関係

図-5 に、礫の堆積形状の解析と実験の時系列を示す。土石流の先端が堰堤に衝突した時間を初期時間 ($t = t_0$) とした。図-5 の $t = t_0 + 2.0$ s では、礫が衝突しており、堰堤に対して衝撃力荷重を受けていることが分かる。図-5 の $t = t_0 + 4.0$ s では、時間とともに堆積している過程であり、安定形状に移ろうとしている。よって、図-5 の $t = t_0 + 6.0$ s では、礫材が堆積している。図-6 に、堰堤が受けた荷重～時間関係の実験結果と解析結果を示している。土石流モデルの先端が衝突してから1.0s程度で最大荷重付近ま

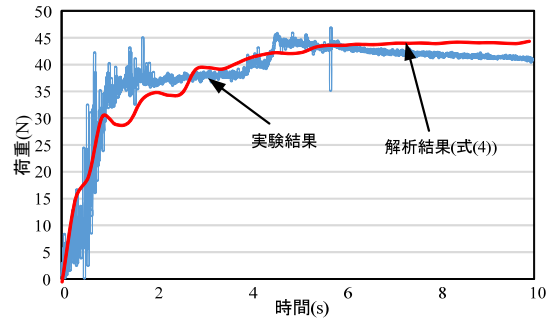


図-6 荷重～時間関係

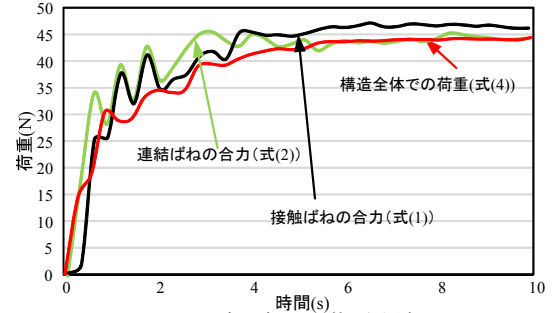


図-7 各ばねの荷重評価

で上がり徐々に荷重が一定になる過程をほぼ再現できている。すなわち、最大荷重はやや解析の方が大きくなっているが、実験値は衝突後わずかな時間で最大値まで荷重が到達していることわかる。これより、実験規模における最大荷重を評価することが期待できる。

3.2.3 荷重評価における検討

図-7 に、解析における式(1)、(2)および(4)によって評価された荷重～時間関係を示す。まず、式(1)による堰堤と礫材との接触力における力の総和では、0.3 sほど遅れて立ち上がるが波打ちながら荷重が上がっており48 Nに収束する。次に式(2)による堰堤の部材による評価は、急激に34 Nまで立ち上がり、その後、振動しながら増加し続け3.0 sあたりで48 Nに収束している。最後に、堰堤全体における固定端での抵抗力(式(4))から評価した場合には他の2つよりも振動が小さく上昇し、礫衝突と同じ45 Nに収束している。それぞれのばね力の評価によって荷重がやや異なることがわかる。

なお、以下に示す指針²⁾の堆砂圧と比較すると、

$$P_g = \frac{1}{2} C_e \gamma_e h^2 B \quad (5)$$

ここで、 P_g : 堆砂圧、 C_e : 土圧係数 ($\phi=35$ とする。) γ_e : 土石流の単位体積重量 (15.9 kN/m^3)、 h : 堆砂面からの高さ、 B : 水路幅である。

よって、 P_g は 34 N を示すことから、本実験における堆砂圧が約 1.3 倍大きいことがわかる。

4 結言

本研究では、3次元個別要素法を用いて鋼製透過型砂防堰堤に生じる土石流の衝突荷重を評価する手法を述べた。そこでは、実験スケールにおける個別要素法解析から荷重評価方法について示した。

参考文献

- 1) 香月智, 渋谷一, 大隅久, 國領ひろし, 石川信隆: 個別要素法による透過型砂防堰堤の流木混じり土石流捕捉解析, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.69, No.1, pp.16-29, 2013.2.
- 2) 国土交通省 国土技術政策総合研究所: 土石流流木対策設計技術指針解説, 2016.4