

非球形および球形を用いた場合の土石流荷重評価の比較検討

防衛大学校 ○齋藤 和樹
堀口 俊行

1. 緒言

近年、土石流の対策構造物として透過型砂防堰堤（じ後、透過型）の設置が進められている。しかしながら、豪雨時の複数の土砂崩壊地から連続的な土砂流出など、外力条件が多様化・複雑化している現状において、設計ピーク外力を下回る荷重条件下でも構造物が損傷する事例が報告されている¹⁾。

透過型の特徴として、礫を直接捕捉するために上流側に堆積礫が形成されず、土石流の先端部が直接堰堤上流側に衝突する。このため、堰堤高さ方向の衝突部には大きな動的荷重が作用すると考えられる。これまで、筆者ら²⁾は移動床を有する直線水路実験により堰堤高さ方向に作用する土石流荷重の計測を行い、礫を球形要素としてモデル化した個別要素法を用いて土石流荷重の再現解析を行ってきた。しかし、球形要素を用いると実験の荷重よりも大きな値を示すことや荷重を合わせようとすると衝突時における土石流先端部の形状が実験と異なることが分かっている。そのため、表面形状に凹凸を有することで、実際の衝突現象へ近づける工夫が必要である。

そこで本研究は、移動床を配置した直線水路実験で計測した土石流荷重データに基づき、非球形および球形を用いた個別要素法シミュレーションを実施し、荷重評価の再現性について比較検討する。

2. 実験の概要

図-1に、実験で使用した水路の諸元を示す。水路は、水路長4.5 m、水路幅300 mm、水路高さ500 mmの直線水路であり、水路底面は木材を敷き、礫を配置させている。水路上部にタンクを配置しており、ゲートの開閉によって水を流下させる仕組みを有する。写真-1に、堰堤モデルを示す。写真-1(a)に示すように、堰堤モデルは高さ280 mm、幅300 mmであり、木材と鋼材を用いて作成した。各段に作用する土石流荷重を計測するため、鋼材で作成した梁から受けた荷重計測部を7段設置している。写真-1(b)では、ロードセル（LMB-A-500 N）を受圧部の下流側に各段の堰堤前面左右に1つつ計14個配置している。この堰堤モデルを水路上流のゲートから3.9 m下流側に配置した。礫モデルは比重2.6であり、3種類の粒径（大：60-40 mm、中：40-24 mm、小：24-15 mm）の礫材を混合して用いた。表-1に、礫モデルの礫量を示す。また、移動床として礫モデルを水路底面に配置した。礫投入についてはダムブレイク方式を用いて流下させた。実験は5回ずつ行い、得られた土石流荷重を整理し、おおむね再現性の近い結果となった。

図-2に、各段高さ方向の荷重を合計した総荷重～時間関係の代表例を示す。荷重の立ち上がりの1秒前を0 sとした。最大荷重は $t = t_0 + 1.12$ sで296 Nであり、各段荷重は土石流の先端部が衝突する1～3段に荷重が集中して作用している。また、堰堤上部になるほど、各段

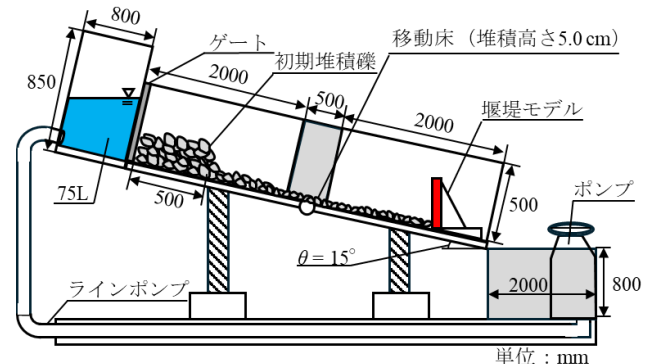
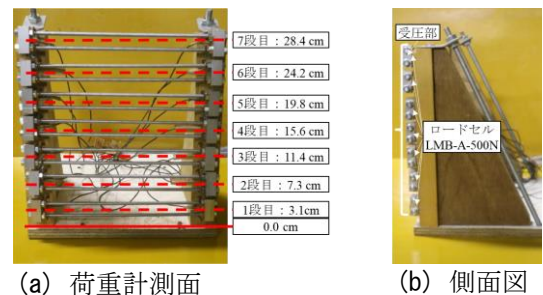


図-1 水路諸元



(a) 荷重計測面

(b) 側面図

写真-1 荷重計測装置

表-1 礫モデルの礫量

礫径 (mm)	土石流礫量 (kg)	移動床礫量 (kg)
40~60	25.5	10.2
24~40	31.5	12.6
15~24	18.0	7.2

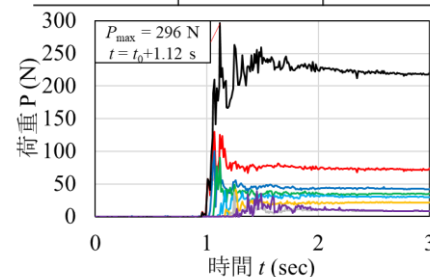


図-2 各段の荷重と総荷重～時間関係

に作用する局所的な荷重は低減する。これは、堰堤に捕捉された礫と後続の礫が細かい衝突を繰り返すとともに、捕捉された礫の勾配が上向きになることで、礫速度が低下したことによると推測される。

3. 解析条件

図-3は、平面要素を用いた水路モデルについて示す。初期条件は、実験時と同様に堰堤の河床に礫モデルを配置し、水路上流側に堰堤から上流側2.8 mの位置を礫塊の先端として落下法を用いて礫モデルを配置した。

図-4に示すように、堰堤モデルは高さ280 mm、幅300 mmの円柱形要素を剛結した集合体要素を用いたものである。堰堤モデルの後方に固定された円柱形要素を配置し、連結ばねのばね力を荷重として評価した。図-5

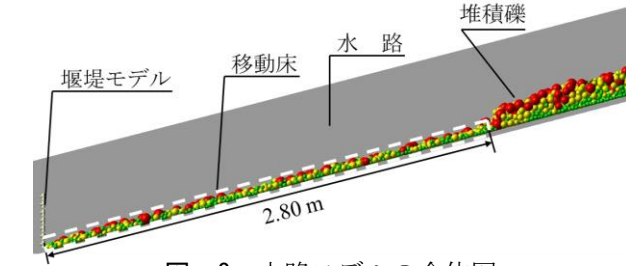
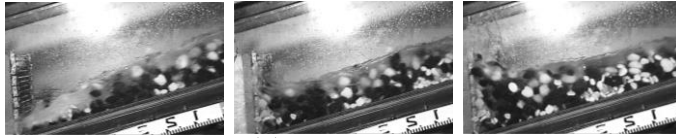


図-3 水路モデルの全体図



(a) $t = t_0 + 1.00$ s (b) $t = t_0 + 1.21$ s (c) $t = t_0 + 1.43$ s

図-6 実験の流下状況

に示すように、使用した礫モデルは、球形要素2つを直径の0.5倍分重なるように配置して集合体要素とした。また、礫モデルは、礫径分布に基づき、3種類の粒径をランダムに配置した。礫径は実験と近似するように調整し、合計重量は実験と同じになるように設定した。礫モデルに与える流体力は、既往研究²⁾の流速分布モデルを用いた。

4. 解析結果

図-6, 7 に実験結果と解析結果（非球形）の流下状況を示す。解析結果は、実験に比べてやや早期に堰堤が満砂する傾向であるが、概ね流下状況を再現できている。さらに、最終的な堆積形状についても再現できている。比較検証として、作用荷重を合わせた時の球形要素の解析結果を図-8 に示す。非球形要素と同様に礫速度を実験値に一致するように流速分布モデルのパラメータを設定すると、球形要素においても最大荷重と荷重の立ち上がりが概ね一致する。しかし、球形要素では、流下時の礫の盛り上がりや堰堤とのインタラクション時の先端形状については、実験とは大きく異なる。このことから、礫の流下速度が球形要素ではやや過大となることや礫の凹凸がないため礫同士の乗り上げが見られる。

図-9 には、実験結果と解析（非球形・球形）の総荷重～時間関係を示す。図-9(a) に示す非球形要素では、赤色の破線で示す解析結果を見ると、黒色の実線で示す実験時の最大荷重と荷重の立ち上がりが一致することが分かる。さらに、最大荷重についても概ね近い値となっている。図-9(b) に示す球形要素においても荷重の部分を見ると荷重を再現できていることが分かる。一方で、堆積後の荷重は非球形に比べると小さく評価される。

5. 結 言

本研究の主要な成果は、以下の通りである。

- (1) 流速分布モデルを利用した個別要素法解析において、非球形の礫モデルを用いることで、実験で観測された流下状況と最大荷重を良好に再現可能であることを示した。
- (2) 礫速度を実験値に適合されることで、球形・非球形

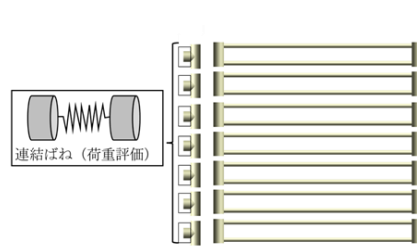


図-4 堰堤モデル

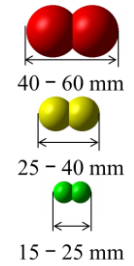
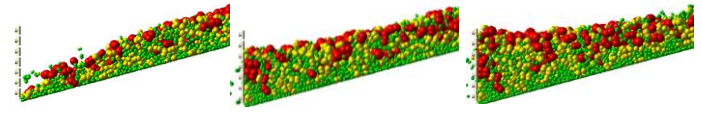
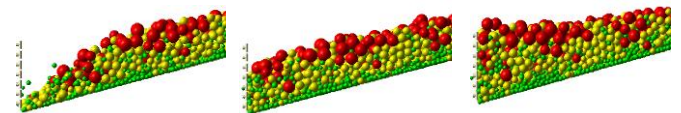


図-5 礫モデル



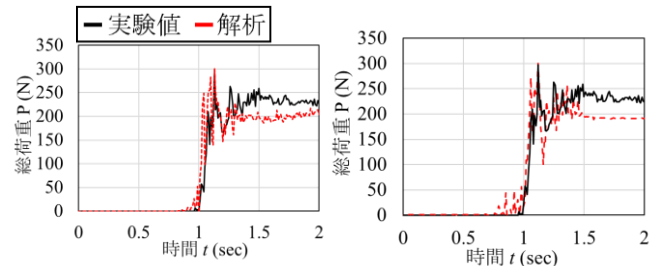
(a) $t = t_0 + 1.00$ s (b) $t = t_0 + 1.21$ s (c) $t = t_0 + 1.43$ s

図-7 解析の流下状況（非球形）



(a) $t = t_0 + 1.00$ s (b) $t = t_0 + 1.11$ s (c) $t = t_0 + 1.21$ s

図-8 解析の流下状況（球形）



(a) 非球形要素

(b) 球形要素

図-9 実験と解析の総荷重～時間関係

要素いずれの場合も最大荷重と荷重の立ち上がり挙動を再現可能であることを確認した。しかし、非球形要素の方が流下時における再現性は適合している。

(3) 非球形要素を使用すると、重心点回りの角運動量が正負双方に作用し、運動の自由度が球形要素よりも増加する特性が示唆された。

今後の課題として、非球形要素に作用する力学的メカニズムの解明が挙げられる。これにより、透過型の耐衝撃設計に対するより精緻な評価手法の確立が期待される。

謝辞

本研究は、令和6年度における（一財）砂防地すべりセンターからの助成を受けて行われたものである。ここに記して謝意とする。

参考文献

- 1) 新潟県土木部砂防課：根知川第10砂防堰堤対策検討会，第3回討議資料，2018。
- 2) 齋藤和樹，堀口俊行：移動床および先行堆積礫を配置した直線水路を用いた土石流荷重推定法に関する研究，土木学会論文集特集号（応用力学 Vol.27），Vol.81, No.15, 24-15026, 2025。