

礫の凸凹を考慮した個別要素法による鋼製透過型砂防堰堤の 土石流捕捉解析

(株)防災技術コンサルタント 館澤寛,
(一財)砂防・地すべり技術センター
砂防鋼構造物研究会 石川信隆,

防衛大学校 香月智, 堀口俊行
嶋丈示, (株)建設技術研究所 松原智生
京都大学大学院 水山高久

1 緒言

鋼製透過型砂防堰堤の土石流捕捉の再現解析を行うため、昨年度¹⁾は、土石流モデルで用いられた礫材を球形要素と仮定することで、個別要素法による鋼製透過型砂防堰堤の土石流捕捉解析を行った。しかし、本来の礫径より大きくしないと実験の捕捉率を再現できないことがわかった。そこで、本研究では、礫の凸凹を表現した集合体要素²⁾を用いて、礫相互の噛み合わせ効果およびアーチアクションの効果により、同じ礫径でも捕捉率を上げるための土石流捕捉解析を行った。

2 礫の凸凹を考慮した集合体要素

礫の凸凹を考慮するため、個別要素法の要素形状を図-1に示すような六等球径対称配列集合体要素を用いた²⁾。重複していない長さ D_n が球の直径 D に対する比(D_n/D)を凸度 β とし礫の凸凹を表現した。この β 値はまず図-2のような安息角実験(アクリル製の四角い箱に礫を流し込む落下法)から安息角 $\theta_s=34^\circ$ を求め、次に図-3のような関係式²⁾を用いて $\beta=0.43$ と求めた。

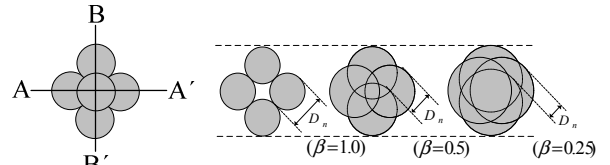


図-1 礫の凸凹を考慮した集合体要素

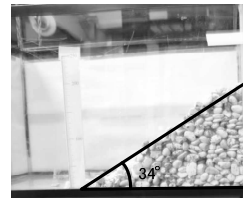


図-2 安息角実験

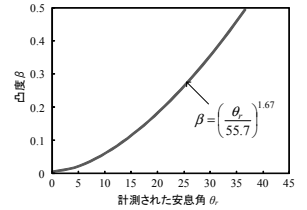


図-3 凸度 β 決定法²⁾

3 土石流モデル捕捉実験

解析に先立ち、鋼製透過型砂防堰堤モデルの土石流捕捉モデル実験を写真-1のように行った。実験水路(水路幅20cm, 水路勾配 18°)を用いて、土石流モデルの礫(礫径1.0cm以上:1cmのマス目の篩に残った礫)7760個を長さ1.85m, 高さ5.0cmにわたって敷き詰め、上流から毎秒3.0Lの水を流して、下流5.0mに位置する鋼製透過型堰堤モデル(鋼管間隔D95x1.5倍:1.5cm, 鋼管径1.0cm, 鋼管の高さ15cm)の礫捕捉状況を調べた。

3.1 モデル実験による捕捉率

写真-2,3は、鋼管間隔D95x1.5倍:1.5cm間隔の場合の礫捕捉状況を示したものである。その結果、流出した礫の個数は60個、捕捉率は99.2%(流出率0.8%)であった。なお、流速は1.40m/sであった。

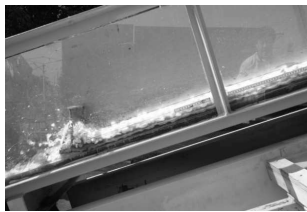


写真-1 土石流捕捉モデル



写真-2 礫捕捉状況(正面)



写真-3 礫捕捉状況(側面)

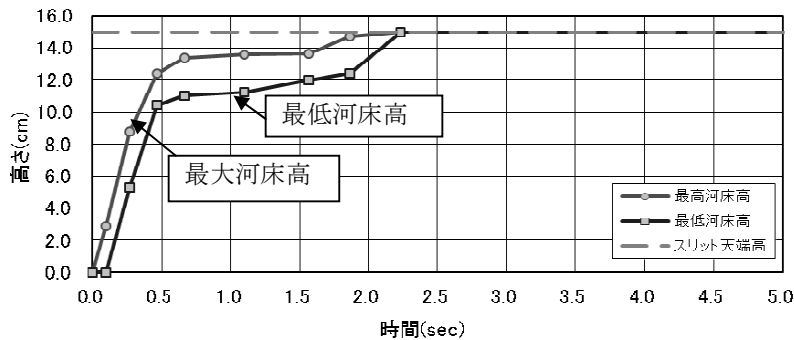


図-4 河床高さ-時間曲線(実験)

3.2 モデル実験における河床高さの時間的变化

図-4は、実験における河床高さ-時間曲線を示したもので、堰堤地点における最大と最低の河床高さを示している。これより0.5secで既に最大12cm, 最低10cmに達しており、段波形状が形成されていることがわかる。

4 礫の凸凹を考慮した個別要素法による土石流捕捉解析

渋谷ら^{3),4)}が開発した土石流捕捉シミュレーションプログラムを用いて、礫を図-1のような凸凹を考慮した集合体要素に表現し、流速分布を図-5に示すように底面に対して鉛直方向に線形に変化するモデルとして計算した。

すなわち、水面上の流速を U_s で与え、底面上の流速を実験観察からその 8 割となるようにした。また実験観察から水流は礫の先頭から 10cm 後方の領域にのみ存在するものと仮定した。

4.1 計算条件

礫の敷き厚は 5.0cm とし、水路底面および水路側面を計 3 枚の平面要素により表現して、透過型砂防堰堤モデルを図-6 のように描写した。また、流速は 1.4m/sec、水深は 15cm とし、再現計算時間は 10s、計算間隔時間 10^{-6} s、礫の接触ばね定数は、法線方向 $K_n=10^9$ N/m、接線方向 $K_s=1.5 \times 10^5$ N/m、減衰定数は $h = 0.20$ 、摩擦係数 $\tan \phi = 0.404$ である。

4.2 計算結果

(1) 河床高さの時間的変化と最終捕捉状況

礫による砂防堰堤の捕捉状況を時系列で把握するため、堰堤地点における最大河床高の時間的変化を調べ、これを図-7 に、また最終捕捉状況を図-8 に示した。Case 1 は球形要素、Case2 は集合体要素の場合を示す。Case 2 の集合体要素の方が遅く捕捉される結果となっているが、これは礫間の摩擦が大きいため、流下する速度が比較的遅く、またあとから流れてきた礫が、既に捕捉されている礫の上に乗上げる前に止まってしまうためと考えられる。一方、Case 1 の球形要素では比較的摩擦が少ないため、既に捕捉されている礫の上に乗上げやすいため、早い時間から捕捉が始まり、最大河床高さも大きくなるためと考えられる。また実験に比べ Case 1, 2 とも捕捉開始が遅れているが、これは段波が形成されないため、今後、棧粗度の影響などを考慮することによって段波形成を検討する予定である。

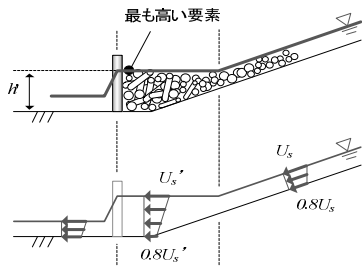


図-5 解析モデルの流速分布

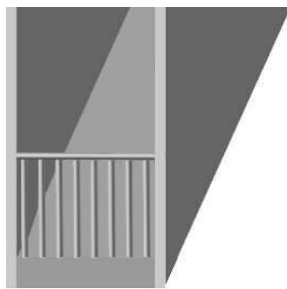


図-6 砂防透過型堰堤モデル

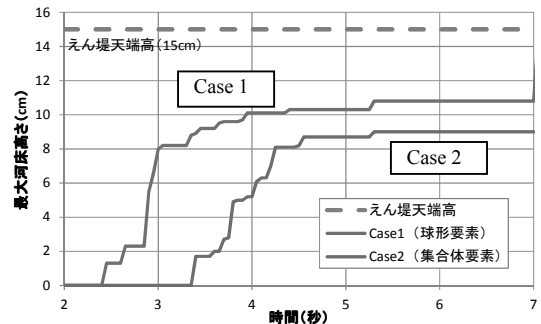


図-7 河床高さ-時間曲線 (計算)

(2) 捕捉率と流出率

表-1 は、要素の違いによる捕捉率（捕捉個数/礫の総個数）と流出率（流出個数/礫の総個数）を比較したものである。これより、球形要素の捕捉率は、89%であったのに対し、集合体要素による捕捉率は 97%となり、凹凸効果が大きいことがわかった。また、流出個数を比べると球形要素は 857 個あったが、集合体要素では 211 個と 1/4 程度であった。これは、球形要素に比べ集合体要素の方が凸凹の効果で絡みやすくなり、透過部の間隙をアーチアクションにより閉塞しやすいためと考えられる。

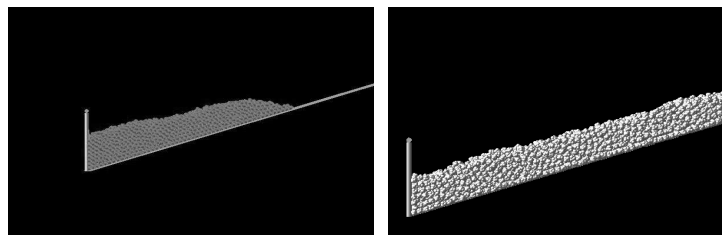
5 結言

本研究は、実物の礫形状を表現するため、凸凹を考慮した集合体要素を用いた個別要素法を開発して、土石流モデル実験と比較した。これより以下のことがわかった。

- (1) 同じ直径の球形要素に比べ捕捉率が上昇し、流出率も減少することが確認された。
- (2) 礫捕捉による河床高さの時間的変化もシミュレーションできることが確認された。しかし、実験と比較して捕捉開始が遅れることや河床高さが低いことなど、今後改善すべき点(例えば、段波形成のために棧粗度の影響を考慮するなど)があることが認められた。

参考文献

- 1) 石川信隆, 嶋丈示, 松原智生, 館澤寛, 香月智, 水山高久: 鋼製透過型堰堤モデルの土石流捕捉シミュレーション解析, 平成 25 年度砂防学会研究発表会概要集, B-164, 平成 25 年 5 月。
- 2) 堀口俊行, 澁谷一, 香月智, 田附正文: 集合体要素の形状特性が安息角に及ぼす影響に関する解析的検討, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.1095-1104, 2012.3
- 3) 澁谷一・原木大輔・香月智: 3次元個別要素法による透過型砂防堰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, 平成 21 年 8 月。
- 4) 澁谷一・香月智・大隅久・石川信隆, 3D-DEM による流木捕捉シミュレーション解析, 砂防学会誌, Vol.63, No.6, pp.13-22, 平成 23 年 3 月。



(a) Case 1: 球形要素の場合 (b) Case 2: 集合体要素の場合

図-8 計算による礫捕捉状況

表-1 要素の違いによる捕捉率

項目	実験結果	球形要素 1.0cm	集合体要素 1.0cm
礫の総個数	7760 個	7760 個	7760 個
捕捉個数	7700 個	6903 個	7549 個
流出個数	60 個	857 個	211 個
捕捉率	99.2%	89.0%	97.3%
流出率	0.8%	11.0%	2.7%