

コンクリートブロック堰堤の礫衝突安定性に関する個別要素法による検討

(一財) 砂防・地すべり技術センター ○井上隆太, 香月智
九州大学大学院 工学研究院社会基盤部門 梶田幸秀

1. 緒言

コンクリートブロックによる仮設堰堤の設計は、全ブロックが剛結され一体として挙動するとの仮定のもと、不透過型コンクリート堰堤の設計手法りを準用している。しかし、ブロック構造物に対するこの仮定の妥当性について、十分に検討されているとは言い難い。そこで著者らは、ブロック砂防堰堤の合理的な安定性照査法の検討を進めている。ここでは砂防堰堤の巨礫衝突に対する構造安定性について、個別要素法を用いて検討する。

2. 解析要領

2.1 照査項目

既存の砂防堰堤の設計法との共通性を保つための安全性照査項目を表-1に示す。Iの剛体安定性は、通常の不透過型砂防堰堤に用いられるものである。IIの形状保持性とは、鋼製砂防堰堤においてIに加えて適用されるもので、あらゆる設計荷重状態に対して部材の連結を失うことなく初期形状、特に堰堤高を維持することを行う。

2.2 解析手法

個別要素法は、要素間の接触状態を判定し、接触点に要素間のくい込み量に応じた接触力を与えて、要素毎の運動方程式を解き、要素の変位を求める手法である。

2.3 解析モデル

(1) 個々のブロック要素モデル

個々のブロックモデルは、図-1(a)に示すように上下面を4枚の三角形平面要素、側面を4面×10段=40個の円柱形要素、端部を4隅×10段=40個の球形要素で構成し、外形と重量は表-2に示す。これらは、相互の位置関係が変化しない集合体要素モデルであり矩形ブロックモデルと呼ぶ。図-1(b)に示す突起ブロックモデルは、三角形平面要素を2枚、円柱形要素を4個、球形要素を4個で1段分として、最上段、最下段は下面か上面の2か所、中段は上下面に4か所配置して突起状に構成したものであり、突起段数は1~3段とした。なお、個々のブロックの質量は、形状によらず1.0tである。

(2) 堰堤モデル

個別ブロックモデルを積み上げて堰堤モデルを形成する。表-3及び図-2に示すように、側面平均勾配Sは、下流面1:0.5、上流面1:1.5の非対称台形状に3段積層し、奥行きは通常の不透過型砂防堰堤の設計計算と同様に二次元化して $b_e=1.0\text{m}$ とした。また、ブロック堰堤の滑動防止のため、基礎部の堰堤下流端に滑動防止の段差を設けた。

表-1 堰堤の安全照査項目

検討対象		照査項目
I	剛体安定性	支持力
		滑動
		転倒(ミドルサード)
II	形状保持性	層間のずれ変形
		ブロック塊の分離

表-2 個別ブロック要素の外形と重量

Type	幅 $\ell_e(\text{m})$	奥行 $b_e(\text{m})$	高さ $h_c(\text{m})$	重量 (ton)	突起形状	
					幅 $\ell_{ep}(\text{m})$	高さ $h_{ep}(\text{m})$
矩形	1.0	1.0	0.5	1.0		
突起1段	1.0	1.0	0.5	1.0	0.2	0.05
突起2段	1.0	1.0	0.5	1.0	0.2	0.10
突起3段	1.0	1.0	0.5	1.0	0.2	0.15

表-3 堰堤モデルの形状諸元

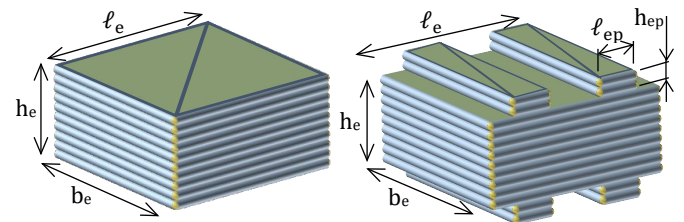
底面幅 $\ell_{BB}(\text{m})$	上面幅 $\ell_{BC}(\text{m})$	堤体高 $h_B(\text{m})$	下流 勾配(S)	上流 勾配(S)	ブロック 個数	総重量 (ton)
5.0	3.0	1.5	1:0.33	1:1.0	12	12.0

表-4 ばねモデル設定値

		個別ブロック間	個別ブロック-底面間
法線方向ばね係数 $K_n(\text{N/m})$		1.00E+07	1.00E+07
せん断ばね	ばね係数 $K_s(\text{N/m})$	1.50E+05	1.50E+05
	クーロン摩擦	粘着力 $C(\text{N})$	0.00E+00
	摩擦係数 $(\tan \phi)$	0.55E+00	0.70E+00

表-5 解析ケース

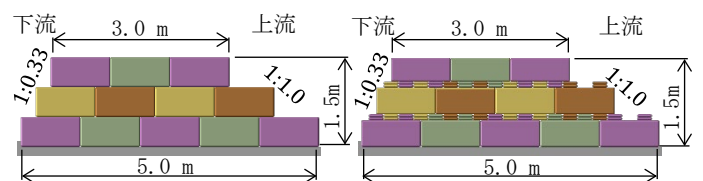
土石流流速(m/s)	ブロック突起	総数
3.0~5.0, 10.0~13.0	無・有(1~3段)	28 ケース



(a)矩形ブロックモデル (b)突起ブロックモデル

図-1 個別ブロックモデル

(緑色：三角形要素、灰色：円柱形要素、黄色：球形要素)



(a)矩形ブロックモデル (b)突起ブロックモデル

図-2 堰堤モデル

(3) 接触ばねモデル

要素間には、鉛直方向、およびせん断方向の接触ばねを設定した²⁾。表-4 に、個別ブロック要素間 (K_{nc} : 法線方向, K_{sc} : せん断方向), 個別ブロック-底面間 (K_{nb} : 法線方向, K_{sb} : せん断方向) のばね係数を示す。

(4) 作用荷重モデル

堰堤モデルに巨礫が衝突する場合をモデル化して、堰堤モデルの1, 2段目には鉛直方向の土重・水重と水平方向の土圧・水圧が作用するものとし、巨礫は流れと同じ速度で流下し、土石流と同じ速度で堰堤モデルの最上段に衝突するものとした。その際、巨礫が流体前面に先行しているものとして、巨礫の衝突だけを作用させるものとした。

2.4 解析ケース

解析ケースは土石流区間の砂防堰堤の外力条件を想定して、質量 1.0t の巨礫単体を衝突速度 $U=3.0\sim 5.0, 10.0\sim 13.0\text{m/s}$ の7種類に変化させた。表-5 に解析ケースを示す。抵抗モデルは、矩形ブロック堰堤モデル1種類と突起ブロック堰堤モデル3種類で計4種類の堰堤モデルであり、総計28ケースの解析を行った。

3. 解析結果と考察

3.1 堤体の変形応答

巨礫はブロック堰堤に衝突すると停止または上流側に離反し、ブロックは下流側への移動が生じる。本研究ではブロック幅 1.0m の10%である10cmのブロック間の相対変位が生じた場合を形状保持性能の限界とした。

図-3 に堰堤モデルの最上段ブロックに質量 1.0t の巨礫単体を速度 $U=10.0\text{m/s}$ で衝突させた場合の衝突後 $t=0.2$ 秒の矩形ブロック堰堤モデルの応答を示す。図-4 には、突起ブロック堰堤モデルの同じ $U=10.0\text{m/s}$, $t=0.2$ 秒後の変形状況を示す。矩形ブロックモデルでは、礫が衝突する最上段の3ブロックがそろって下流方向へ47cmも移動しており限界を超えている。一方、突起ブロックモデルでは、上段ブロックの突起が下段ブロックの突起と噛み合う構造となっているため、矩形ブロックのような最上段の滑動は生じてない。その代り、礫衝突の水平方向の荷重が突起を介して下段ブロックへ伝達される。その結果、図-4 に示すように9ブロックが一体となって抵抗する。以上のメカニズムを概観して、外力に対して一体として抵抗するブロック群を「抵抗躯体 (Resisting body)」と定義し、抵抗に寄与しないブロック群を「残置躯体 (Residual body)」と定義する。解析終了時の応答は、矩形ブロック堰堤モデルでは、抵抗躯体はその位置に停止するので最大変位量(滑動量)が維持される。一方、突起ブロック堰堤モデルでは、図-4 のように最大変位差を生じた後、巨礫が跳ね返されると、抵抗躯体はその重力によって概ね初期状態に近い形へ復帰する。

3.2 限界衝突速度

表-6 に、礫衝突によって移動するブロックの最大変

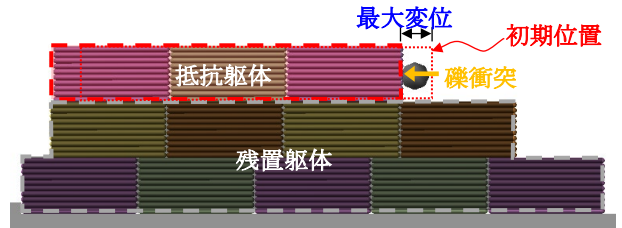


図-3 礫衝突によるブロック配置の移動状況 (矩形ブロック堰堤モデル, $U=10\text{m/s}$, $t=0.20\text{sec}$)

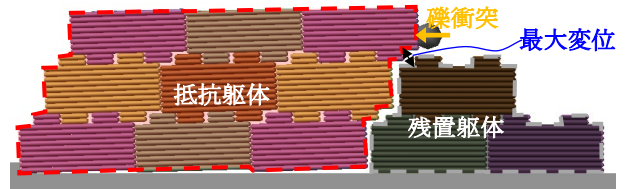


図-4 礫衝突によるブロック配置の移動状況 (突起ブロック堰堤モデル, $U=10\text{m/s}$, $t=0.20\text{sec}$)

表-6 礫衝突による最大変位

衝突速度 (U_i)	矩形ブロック	突起ブロック		
		1段 (0.05m)	2段 (0.10m)	3段 (0.15m)
3.0 m/s	0.061m	0.027m	0.027m	0.026m
4.0 m/s	0.106m	0.035m	0.034m	0.035m
5.0 m/s	0.165m	0.043m	0.044m	0.045m
10.0 m/s	0.472m	0.077m	0.089m	0.093m
11.0 m/s	0.570m	0.085m	0.099m	0.105m
12.0 m/s	0.667m	0.092m	0.110m	0.118m
13.0 m/s	0.777m	0.105m	0.129m	0.134m

位を示す。赤は、形状保持性能が限界を超過したものを示す。矩形ブロック堰堤モデルは、衝突速度 4m/s で形状保持性能が限界に達するが、突起ブロック堰堤モデルは11~13m/sまで形状保持性能が維持される。なお、突起高が高くなると限界衝突速度が小さくなる。これは上流端ブロックに生ずる回転モーメントが大きくなるためである。

4. 結言

本研究の成果を要約すると以下ようになる。

- 1) ブロック砂防堰堤モデルの最上段に礫が衝突した場合、礫衝突に抵抗するブロック群(抵抗躯体)と抵抗しないブロック群(残置躯体)に分かれる。
- 2) 突起ブロック堰堤の場合、突起により横方向の外力が下段のブロックに伝達するため、上下ブロック間の滑動破壊は生じない。よって、礫衝突に対する抵抗力が大きくなる。
- 3) ブロックの突起高が高くなると、必ずしも堤体の抵抗力が増すとは言えないケースがあり得る。この点は今後の検討が必要である。

参考文献

- 1) 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 No.905, 2016
- 2) 井上, 香月, 志水, 三上, 栗原, 梶田: コンクリートブロック堰堤モデルの滑動・転倒安定性に関する個別要素法による検討, 令和7年度砂防学会研究発表会概要集, p.217-218, 2025