

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

(一財) 砂防・地すべり技術センター ○井上隆太、香月智、志水宏行、三上幸三、栗原淳一
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振舞うとの仮定に基づき、不透過型コンクリート堰堤の設計手法¹⁾を準用している。しかし、この仮定の妥当性について十分に検討した資料は見当たらない。そこで著者らは、コンクリートブロック砂防堰堤の安定性照査法の検討を進めている。ここでは砂防堰堤の滑動・転倒安定性について、個別要素法を用いて、現行設計モデルとブロック積み堰堤モデルとの比較検討に取り組んだ結果について報告する。

2. 解析要領

2.1 照査項目

照査すべき堤体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適用されているもので、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、特にその高さを維持することをいう。

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	層間のズレ変形
		ブロック塊の分離

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) 個別ブロック要素モデル

個々のコンクリートブロックの解析モデルは、図-1 に示すように上下面を4枚の三角形平面要素で、側面を20個の円柱形要素で、端部を20個の球形要素で構成する。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る。その上で、後述する堰堤モデル形状に対応して3段に積層する。なお、個々のブロックの質量は、相当形状のコンクリートブロックの質量に対応させた。

表-2 個別ブロック要素の外形と重量

幅 ℓ_e (m)	奥行 b_e (m)	高さ h_e (m)	重量(kN)
1.0	1.0	0.5	11

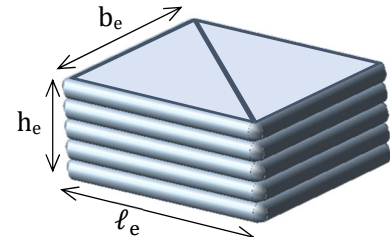


図-1 個別ブロックモデル模式図

(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 $1:1.5$ の非対称台形とし、奥行きは設計計算と同様に二次元化して $1.0\text{m}(b_e)$ とした。個々のブロックが独立して動ける個別ブロック堰堤モデルと、比較対象としてブロックの相互の位置関係が変化しない剛体堰堤モデルを用いる。また、底面と堤体、もしくは層間のズレ変形を抑制するモデルとして、図-3 に示すように各段の下流端ブロックの下流端に、その下部ブロックの上面に突起を設け、堰堤モデルが滑動しないモデルを用いた。なお、これらの剛体堰堤モデルは現行設計に基づく土石流水深 0.5m 、流速 7.0m/s の設計荷重に対して剛体安定の3条件を満足している。

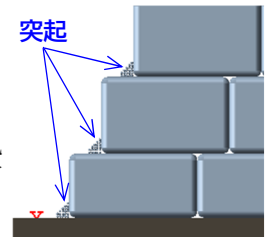
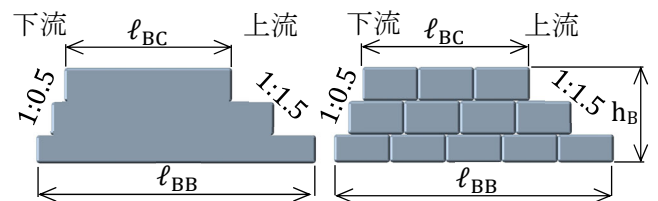


図-3 突起の模式図

表-3 堰堤モデルの形状諸元

底面幅 ℓ_{BB} (m)	上面幅 ℓ_{BC} (m)	堤体高 h_B (m)	下流勾配(S)	上流勾配(S)	ブロック個数	総重量(kN)
5.0	3.0	1.5	1:0.5	1:1.5	12	132.0



(左：剛体モデル、右：個別ブロックモデル)

図-2 堰堤モデル模式図

(3) 接触バネモデル

要素間には、図-4 に示すように鉛直方向、およびせん断方向の接触ばねを設定した。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。

表-4 バネモデル設定値

		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 (N/m)		1.00E+07	1.00E+07
せん断バネ	バネ係数 K_s (N/m)	1.50E+05	1.50E+05
	粘着力 (C) (N)	0.00E+00	0.00E+00
	摩擦係数 ($\tan \phi$)	0.55E+00	0.70E+00

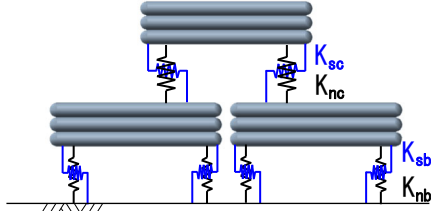


図-4 個別ブロック間および底面との接触バネモデル

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、土石流水深を 0.5m とした上で、流速を $U=4.0 \sim 12.0$ m/s まで変化させ、堰堤モデルの最上段に作用させた。表-5 に解析ケースを示す。流速を 9 種類、堰堤モデルとして剛体堰堤モデルと個別ブロック堰堤モデル、滑動を抑止する突起の有無 2 種類を組合せて $9 \times 2 \times 2 = 36$ ケースとなった。

表-5 解析ケース一覧

土石流流速 (m/s)	一体性	底面突起
4.0～12.0、1.0m/s 毎	剛体・個別	有・無

3. 解析結果と考察

堰堤モデルごとの表-1 の照査結果(支持力安定を除く)を、表-6 に示す。

現行の設計に用いられる剛体堰堤モデルの底面突起が無いケースでは、流速 8.0m/s で堰堤底面が滑動した。底面に滑動防止の突起を設けると流速 12.0m/s でミドルサード条件に違反する。参考までに、流速 15.0m/s で堤体は回転して転倒する。一方、個別ブロック堰堤モデルは、流速 5.0m/s になると図-5 に示すように最上段のブロック 3 個が滑動し、形状保持性を失う。これに対して底面および各層に滑動防止のための突起を設けると、流速 7.0m/s で、図-6 に示すように最上段の 3 個と 1、2 段目の下流端 2 個の合計 5 個のブロックが塊となって、他のブロックを置き去りにして回転運動する。つまり形状保持性が失われる。

以上を要約すると、表-1 の全ての照査項目を満足できる流速の大きい順に並べると、①剛体モデル(突起有り)、②剛体モデル(突起無し)、③個別ブロックモデル(突起有り)、④個別ブロックモデル(突起無し)、となる。

表-6 解析照査結果一覧

堤体形状	剛体(突起：無)			剛体(突起：有)		
照査項目	滑動	転倒	形状保持	滑動	転倒	形状保持
$U=4.0 \sim 7.0$ m/s	○	○	○	○	○	○
$U=8.0 \sim 11.0$ m/s	×	○	○	○	○	○
$U=12.0$ m/s	×	○	○	○	×	○
堤体形状	個別(突起：無)			個別(突起：有)		
照査項目	滑動	転倒	形状保持	滑動	転倒	形状保持
$U=4.0$ m/s	○	○	○	○	○	○
$U=5.0 \sim 6.0$ m/s	○	○	×	○	○	○
$U=7.0$ m/s	○	○	×	○	○	×

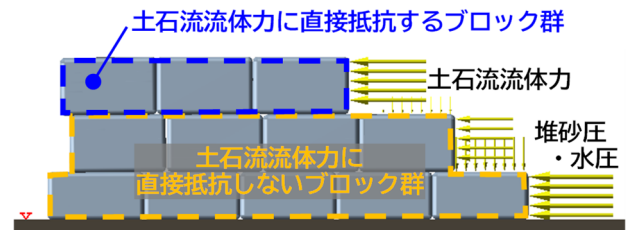


図-5 個別ブロック(突起：無)の変形状況 ($U=5.0$ m/s)

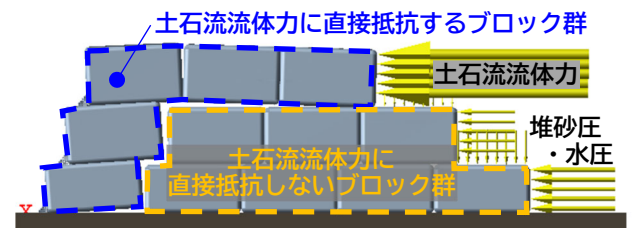


図-6 個別ブロック(突起：有)の変形状況 ($U=7.0$ m/s)

4. 結言

本検討の成果は、以下のように要約される。

- (1) 総じて、個別ブロック堰堤モデルの限界流速は、剛体堰堤モデルより小さくなった。
- (2) 概して、滑動安定性が転倒安定に先行して失われ、設計の支配要因となる。特に個別ブロック堰堤モデルでは、層間の滑動が生じ、形状保持性が失われる。
- (3) 下流端に突起等の滑動防止構造を設けることは、有効である。ただし、個別ブロック堰堤モデルで層間滑動を下流端突起で防止すると、堤体が二つの塊に分離する堤体形状保持の限界が現れる。

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) 社団法人全国治水砂防協会：改訂版砂防設計公式集(マニュアル), 1986