

不連続性岩盤からなる急傾斜斜面の安定性評価

九州大学工学部 正会員 江崎哲郎 蔣 宇静
 学生員 後藤直人○岡内正樹
 九州電力(株) 正会員 溝上 建 野崎明人

1. はじめに

自然・人工の岩盤斜面に不連続面(節理, 層理など)が存在する場合, 岩盤斜面の安定性は土質斜面とは異なり, 不連続面の幾何学特性(分布密度や傾斜角)と力学的特性(内部摩擦角やせん断剛性など)に大きく依存する. 特に斜面の中に垂直方向の不連続面が卓越している場合, トップリング破壊が起きやすい. 斜面の安定性評価として従来から有限要素法(FEM)や境界要素法(BEM)が使用されてきたが, 不連続面の卓越した岩盤斜面の場合に対して, その安定機構を解明することは非常に困難である.

著者らは, 他の解析方法や実験法と比較して, 不連続面を考慮した個別要素法(DEM)について, トップリング破壊のような不連続体の挙動をよく再現できる方法であると確認した¹⁾. 次に, それを用いて, 不連続面の幾何学的特性と力学的特性が岩盤斜面安定に及ぼす影響について詳細な検討を行った上で, 岩盤斜面のための調査評価・設計システムの構築を進めてきている²⁾.

本研究では, この構築したシステムに従って, すぐ上流にダム堤体が設けられている急傾斜斜面(以下, 滝)を対象として, 現場調査結果に基づいてモデル化した上で, 安定性評価と補強対策を行う.

2. 現地調査とモデリング

この滝に流れ込む河川の上流両岸は, 比較的緩傾斜の斜面が広がり, 河川沿いに谷底平野が発達している. しかし, 滝から下流側の両岸は, 溶結凝灰岩の崖が連続し, 河川に沿う地形は急峻である. ダム建設時に滝はかなり下流側に位置していたが, 長い間浸食, 崩壊を繰り返し現在の位置にまで後退してきた. 数年前に起きた洪水により, 鉛直方向の節理の発達している岩盤の崩壊がさらに進行した. 不連続面の開口状況からトップリング破壊が拡大し, 今後も洪水などの影響を受けるとダム堤体の安定を脅かすと予想されるため, 適切な崩壊防止対策が求められている.

モデリングにあたり, 現地調査におけるボーリングコアの観察から, 水平方向の不連続面が特に集中している部分が3ヶ所確認できた. 鉛直方向の不連続面はほぼ垂直に1.5m間隔で切り立っており, また, 魚道の観察から滝前面に近づくに従って不連続面の間隔が0.5mと狭くなっていた.

これらの観察結果から, ダムの中心軸付近を取ってFig.1のような安定評価のための2次元解析モデルを作成した.

3. 不連続面の力学的特性の実験的評価

解析で用いる不連続面の力学的物性値を決定するために, ボーリングで現場から採取された不連続面の直接せん断試験を実施した.

実験は, 垂直荷重を0.1MPaから0.5MPaまで0.1MPaずつ

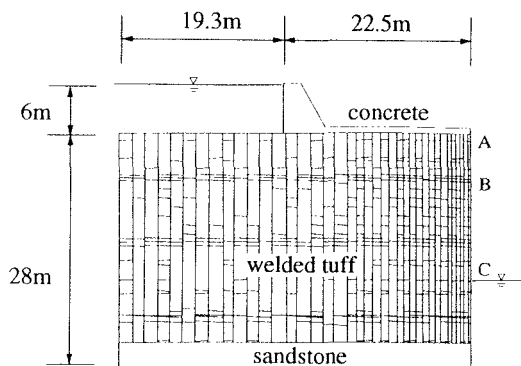


Fig.1 Geometry of analysis model.

Table1 Joint properties obtained from direct shear test.

Type of material Properties (unit)	Welded tuff			
	Horizontal joints		Vertical joints	
	Above waterlevel	Below waterlevel	Above waterlevel	Below waterlevel
Shear stiffness (MPa/m)	10800	9880	8670	11000
Normal stiffness (MPa/m)	2880	1090	444	481
Joint cohesion (MPa)	14.3	14.3	14.3	14.3
Joint friction angle (°)	50	33	54	30

つ増加し, 最大変位8mmまでせん断を行った. せん断過程では, せん断応力と不連続面のダイレーション(垂直変位)を測定した.

せん断試験結果に基づく特性値の算出として, 不連続面の垂直剛性は, 垂直変位の増分に対する垂直応力の増分の比から求め, また, せん断変位とせん断応力の関係より不連続面の粘着力と摩擦角およびせん断剛性を求めた. ダイレーション角は, せん断変位の増分と垂直応力の増分の比から求めた.

垂直剛性とせん断剛性は水平方向と鉛直方向のジョイントで差が生じた. さらに, 不連続面の摩擦角は地下水面の上部と下部で値が異なったため, 解析ではジョイントの方向および地下水面の上と下で入力物性値を分けることにした.

以上の結果から, 解析物性値を Table1 に示す.

4. 解析概要

Table2 Rock properties used in DEM analysis.

Type of material Properties (unit)	Welded tuff	Concrete	Sandstone
Density (N/m ³)	23000	20800	25600
Bulk modulus (MPa)	26600	8360	12500
Shear modulus (MPa)	10000	7160	9375
Cohesion (MPa)	14.43	3.031	5.2
Friction angle (°)	30	40	30
Tensile strength (MPa)	17	1.3	6
Joint permeability (1/Pa · sec)	1400	14	14

今回対象とする急傾斜斜面の安定性に影響する要素としては、多数の不連続面、ダムから浸透する水、地下水による基礎岩盤層の強度の低下等があり、また、洪水時や地震等の影響により基礎岩盤全体が不安定性を増していると考えられる。ここでは、1つ目のケースとして、ダム基礎岩盤の安定に対する洪水の影響を考慮した。2つ目のケースでは、ダム基礎岩盤にロックボルトを打設し、擁壁を設置した場合の補強効果についての解析的評価を行う。洪水時は、ダム貯水池内の水深が12mになるため、その分の水圧をかけ、ダムエプロン部には掃流力を、滝前面部には水位が上昇した時の水圧と負圧を加える。

不連続面の物性値はTable1に示したが、基礎岩盤の物性も室内試験の結果を使用する(Table2)。また、補強対策として用いたグラウティッドボルトの物性値はTable3に示す³⁾。

5. 解析結果と考察

まず、無補強の状態で洪水が発生したケースをFig.2に示す。鉛直方向の不連続面に0.2~2cm程度の開口が見られ、特に滝前方の図中のC点では水平方向に0.42cmの変位しか発生していないのに対し、B点で2.0cm、A点では約12cmもの変位が生じている。頂上部にいくほど水平変位が大きくなっており、これはトップリング破壊を起こすケースでよく見られる形式であり、過去の崩壊形式と同様の傾向を示した。またこの解析は、時間ステップごとの増分形式で計算されており、計算ステップを増やせば、最前部の岩柱全体がトップリング破壊に至ると考えられる。

次に補強工事を行ったケースをFig.3に示す。補強は、前面部でC点より下の部分はコンクリートによる擁壁により固定し、トップリング破壊の可能性のある滝頂上部付近は長さ5mのロックボルトを3mの間隔で打設したケースについて解析を行った。

ロックボルトにより滝前面部を固定すると、変位量が顕著に抑制された。無補強状態では大きな変位が出ていたA点での変位は7mmにまで著しく抑制された。つまり、この現場に生じるトップリング破壊に対しては、ロックボルトによる補強が効果的であることがわかる。

6. おわりに

本研究において実際の現地調査に基づく一連の安定性評価を行い、洪水時にトップリング崩壊する危険のあることが予測された。しかし、その補強対策が崩壊抑制に効果的であることが解析によりわかった。今回は洪水時

Table3 Bolt and grout properties for reinforcement analysis.

Items	Properties	Value (unit)
Bolt	Cross-sectional area	500 (mm ²)
	Mass density	78456 (N/m ³)
	Elastic modulus	210000 (MPa)
	Tensile yield force	0.184 (MN)
Grout	Grout thickness	10 (mm)
	Bond shear strength	830 (MN/m)
	Bond shear stiffness	10700 (MN/m ²)

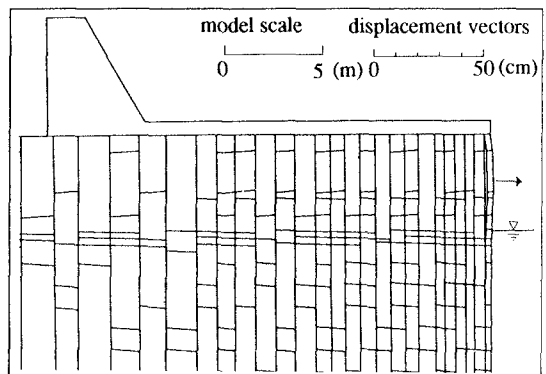


Fig.2 Deformational behavior of steep slope caused by heavy flood.

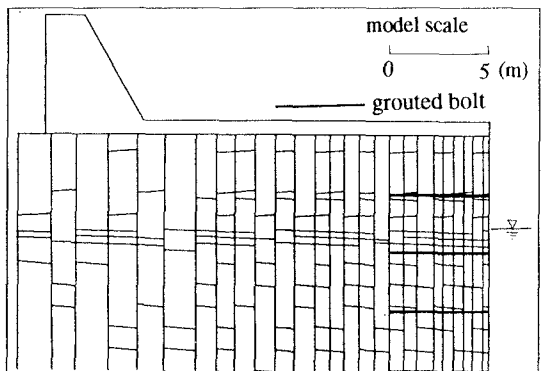


Fig.3 Deformational behavior of steep slope reinforced by rockbolts.

の安定性評価について論じたが、今後は、地震時における安定性評価とその補強対策についても検討する予定である。

<参考文献>

- 1) 江崎哲郎他(1997):不連続性岩盤斜面に生じる転倒崩壊機構に関する基礎的研究, 資源素材学会 (印刷中)。
- 2) 九州大学環境システム工学研究センター(1996):不連続性岩盤の評価に関する研究 (共同研究A中間報告)。
- 3) 土木学会編(1986):トンネル標準示方書 (山岳編) 同解説, pp.47-64。