

## 不安定化が懸念される岩体の3次元FEMを用いた安定性検討

DYNAMIC STABILITY ANALYSIS OF A ROCK BEING FEARFUL FOR TUMBLING BY MEANS OF 3-D FEM

秋山泰祐\*, 伊藤和伯\*\*, 宮下尚志\*\*\*, 岸 徳光\*\*\*\*, 櫻井春輔\*\*\*\*\*

Yasuhiro AKIYAMA, Kazuhiro-ITO, Hisashi MIYASHITA, Norimitsu KISHI and Syun-suke SAKURAI

\*北海道開発局室蘭開発建設部 治水課(〒051-8524 室蘭市入江町1番地14)

\*\* (独) 土木研究所 材料地盤研究グループ地質チーム(交流研究員)  
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

\*\*\* (株) ドーコン 防災保全部(〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4-1)

\*\*\*\* 工博 室蘭工業大学工学部建設システム工学科(〒050-8585 室蘭市水元町27番1号)

\*\*\*\*\* 博工(財) 建設工学研究所(〒657-0011 兵庫県神戸市灘区鶴甲1-3-10)

キーワード: 岩体の安定性, 3次元FEM, 動的解析

(stability of rocks, 3-D FEM, dynamic analysis)

## 1. はじめに

豊平峡ダムは、札幌市中心部から南西約25km、定山溪温泉街から南方約7kmの豊平川上流に位置する、堤高102.5m、堤頂長305.0mの洪水調節、水道利用への供給、水力発電を目的とした多目的のアーチ式コンクリートダムである。当ダムは昭和47年に完成し建設後30年以上経過しているため、経年変化によってダム周辺の斜面に不安定な岩体のあることが指摘されている。これらの岩体が崩壊した場合には、ダム本体および減勢工等の付帯構造物への被害や観光客への人的被害を与えることも想定される。このようなことから、北海道開発局は安定性を欠いていると想定される岩体の抽出、これらの岩体の安定性に関する詳細な検討、および対策優先度評価に関する検討を行っている。

本論文では、一連の検討の中でダム左岸側に位置し不安定化が懸念される1岩体に着目して、基部岩体が順次劣化する場合の挙動を3次元有限要素法を用いた動的解析を実施したので報告する。なお、数値解析には衝撃応答解析用汎用コードLS-DYNA (Version960)<sup>1)</sup>を用いている。

## 2. 対象岩体の概要

写真-1には、下流側上空から撮影された豊平峡ダム堤体と周辺地山を示している。本論文で対象と

した岩体は左岸側東向き斜面(左岸エリア☒)に位置し、目視調査によりきわめて不安定と判断された。図-1には、着目している岩体の正面および側面からのスケッチ図を示している。図より、当岩体は板状の岩体が完全に壁面から分離している状況が見とれる。また、背後には空洞があり、所々に転石や土砂が充填されている。さらに、基部岩体は亀裂密集帯となっており、上部岩体による圧縮亀裂の進展が危惧された。岩体は安山岩溶岩である。

## 3. 数値解析および仮定

## 3.1 解析モデル

数値解析モデルは、前述のように着目岩体と地山間に開口亀裂が存在することや、岩体と地山の構造が3次元的に複雑であること等により、地形はレーザープロファイラを用いて測定した結果を基に、また亀裂の分布は登坂調査の結果に基づいて、できる限り忠実に3次元的にモデル化を行った。数値解析は基部の亀裂密集部の1部が順次風化した場合を想定して行うこととし、3岩体の集合体とした。図-2には、地山部を含めた有限要素モデルを示している。図-2(a), (b)には有限要素モデルのそれぞれ側面図、斜視図を、図-2(c)には基部の亀裂密集帯岩体を分離して示している。

また、亀裂密集体に関しては着目岩体に接する1

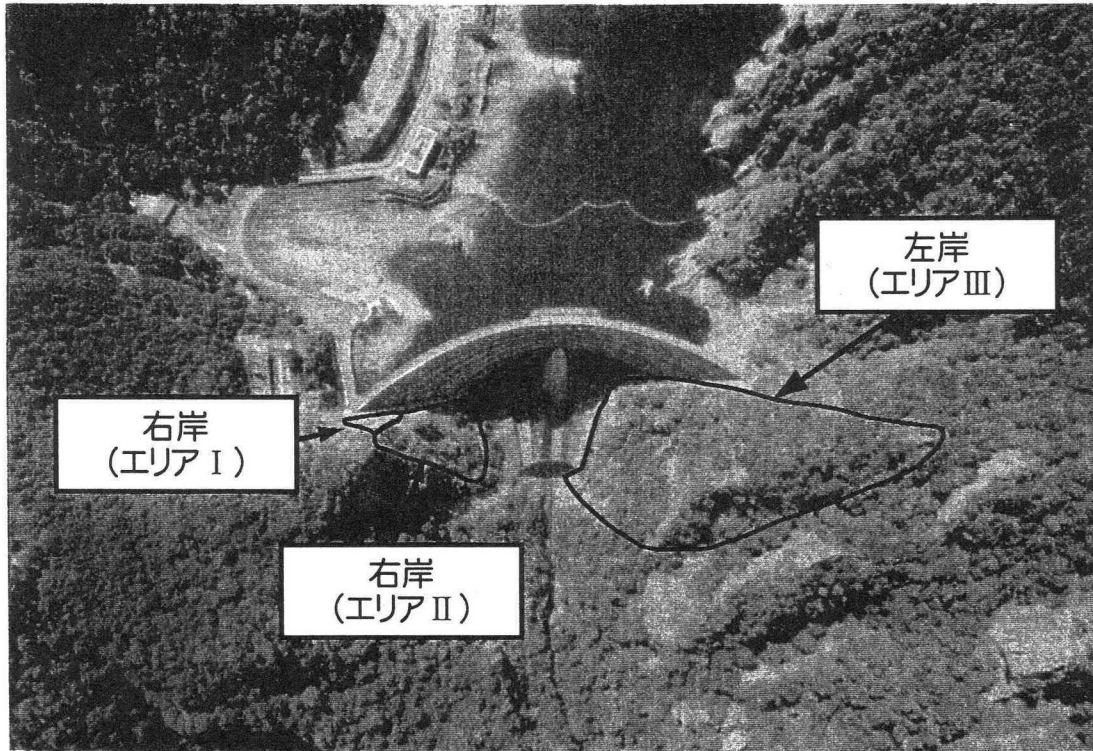


写真-1 豊平峡ダム周辺写真

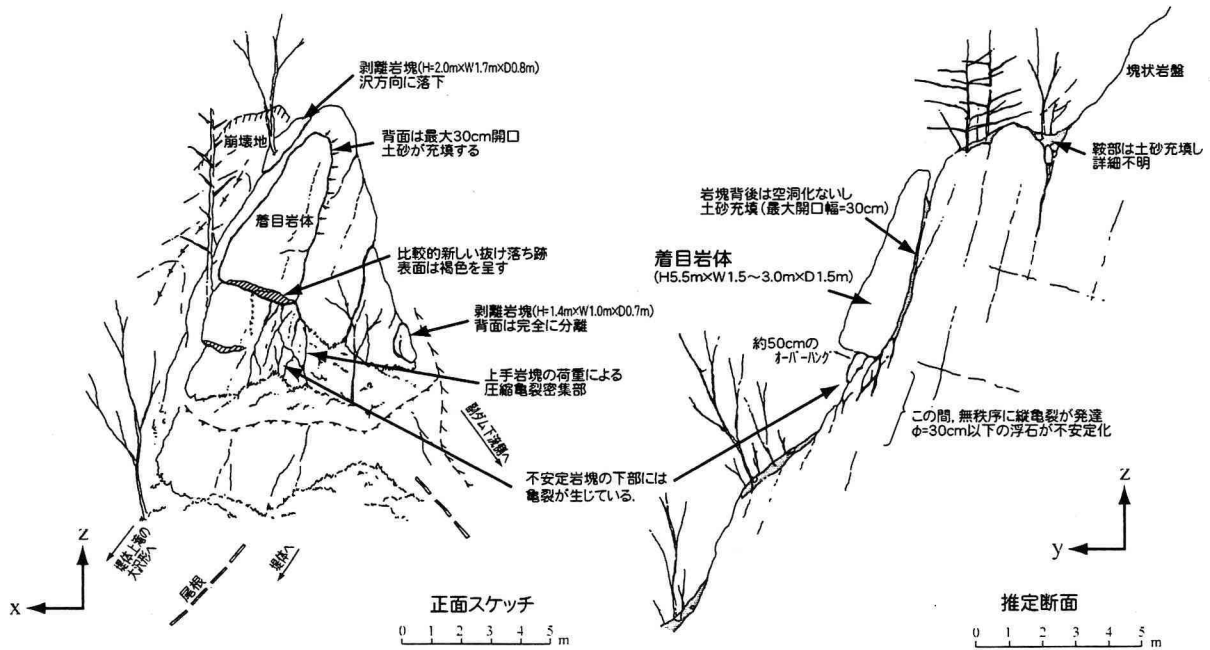


図-1 着目岩体周辺スケッチ図

層の要素のみを弾塑性体としてモデル化し、局所的な破壊を考慮している。

### 3.2 境界条件および物性値

境界条件は、着目岩体の周辺地山モデルの側面、背面および底面における変形の拘束が着目岩体の解析結果にできるだけ影響を与えないようにするため

に、地山底面を完全拘束とし、側面部および背面部は法線方向のみを拘束することとした。

各岩体の物性値は、岩石の材料実験結果をもとに表-1のように決定している。また、図-3には、弾塑性体要素の構成則モデルを示している。弾塑性体要素は、圧縮応力は伝達するが破壊圧力に達した

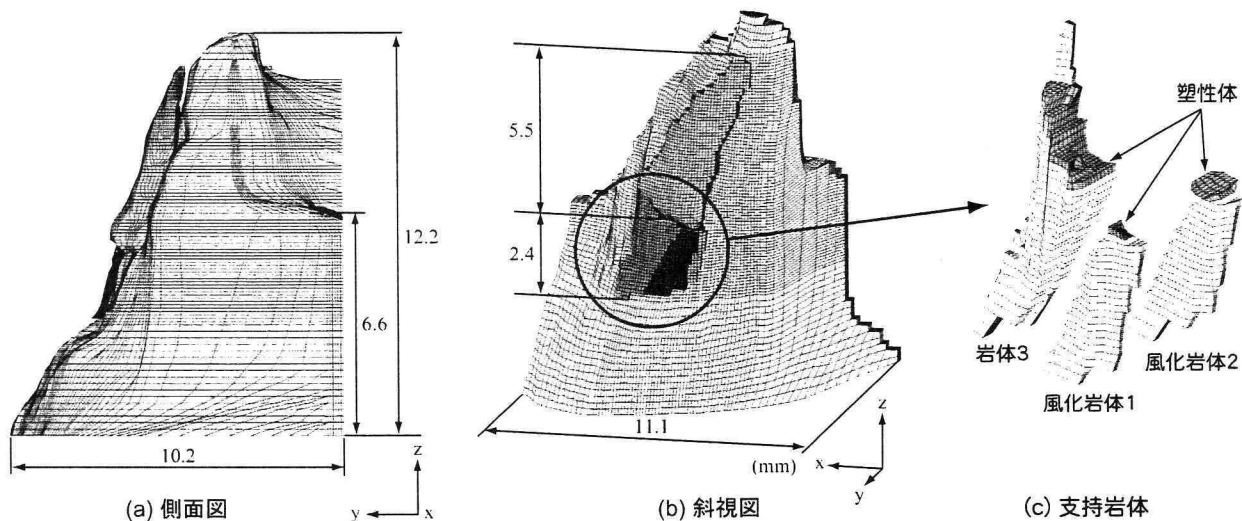


図-2 有限要素モデル

表-1 各岩体の物性値

地質区分	弾性係数 $E$ (Mpa)	ポアソン比 $\nu$	密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	圧縮強度 $\sigma_c$ (MPa)	引張強度 $\sigma_t$ (MPa)
安山岩溶岩	4.430	0.28	$2.364 \times 10^3$	20	9.58
自破碎状溶岩 亀裂質部	500	0.28	$2.140 \times 10^3$	2	0.958

表-2 各段階解析実施時間一覧

摩擦係数	解析時間 (sec)		
	全体モデル	岩体1 除去	岩体2 除去
0.27	1.2	1.0	2.0
0.80	1.0	0.5	2.0

段階で引張応力は伝達しない構成則を適用している (図-3)。

### 3.3 解析方法

本研究では、3段階に分けて以下のように連続的に自重解析を実施した。すなわち、1) 全体モデルに関して、着目岩体および基部風化岩体部のみに自重を作用させ解析を行う、2) 風化岩体1のみを除去し、着目岩体の安定性を確認する、3) もし、着目岩体が、安定の場合には続けて風化岩体2を除去し、着目岩体の安定性を確認する、である。また、着目岩体と風化岩体間の摩擦係数は2ケース設定した。すなわち、1) 風化岩体と着目岩体に関する一面せん断試験結果より得られた内部摩擦角  $\phi = 38^{\circ}16'$  に対応する摩擦係数 0.8 とする場合、2) NATM 地山等級 E パターンの内部摩擦角  $\phi = 15^{\circ}$  に対応する摩擦係数 0.27 とする場合である。

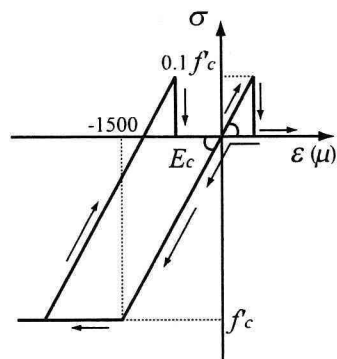


図-3 塑性体構成則

### 4. 数値解析結果

表-2には、各段階の解析実施時間一覧を示している。着目岩体と基部風化岩体に関する自重解析、岩体1除去後の自重解析は両摩擦係数を用いた場合とも崩落には至らず、安定状態となっていることから、x軸方向(上下流方向)の最大変位時を迎えた時点を表記している。また、岩体2除去後は、両ケースとも着目岩体が崩落に至っていることから、岩体2を除去後2秒まで動的解析を実施した。図-4には、摩擦係数を0.27と0.80に設定した場合の数値解析結果における着目岩体の推移状況図を示している。

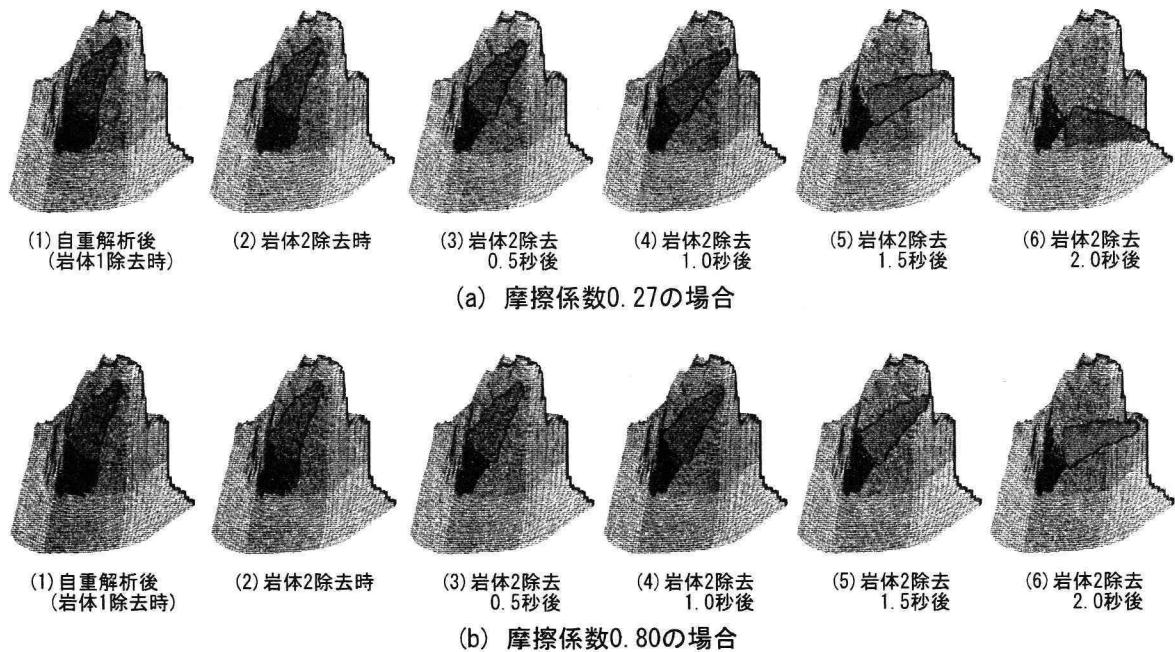


図-4 解析結果推移状況

#### 4.1 摩擦係数0.27の場合

着目岩体と基部風化岩体に関する自重解析後、および岩体1除去後の場合には、着目岩体は現況の状態と同様の状態を保持し、着目岩体は安定している。しかしながら、風化岩体2を除去して1秒後の場合には、着目岩体はx軸方向（上下流方向）に大きく傾き岩体3との接触部分を軸として回転しながら崩落を開始していることがわかる。風化岩体2除去から2秒経過後には、崩落はさらに進行している。

#### 4.2 摩擦係数0.8の場合

着目岩体と基部風化岩体に関する自重解析後および岩体1除去後の場合には、摩擦係数0.27の場合と同様に着目岩体は現況の状態と同様の状態を保持し、安定している。しかしながら、着目岩体が安定となるまでに要した時間は摩擦係数0.27の場合よりも短くなっている。また、岩体2除去後において、着目岩体は亀裂密集部との接触部分を軸として下流側に回転しながら崩落を始めており、岩体2除去から2秒経過後では、崩落がさらに進行している。ここでも摩擦係数0.27の場合に比べその進行が遅延していることがわかる。

以上のことから、現状では着目岩体は安定している。しかしながら、摩擦係数を0.27~0.80とした場合において、着目岩体を支えている亀裂密集部の一部が崩壊すると、着目岩体のバランスは崩れ、亀裂密集部との接触領域を軸として下流側に回転しながら

崩落することが明らかとなった。また、摩擦係数は崩壊の進行速度に対し影響を及ぼすが、摩擦係数0.27~0.80の範囲では、風化岩体2を除去した段階で、いずれの場合においても崩壊が発生することが明らかとなった。

#### 5. まとめ

本研究では、豊平峡ダム左岸側に位置する不安定化が懸念される岩体を対象として、基部亀裂密集岩体を段階的に除去する場合の安定性に関する検討を3次元有限要素法を用いた動的解析を実施し、検討を行った。数値解析は着目岩体とそれを支持している亀裂密集部間の摩擦係数を0.27, 0.80と設定して実施した。得られた結果を要約すると、

- 1) 現状では安定しているが、基部岩体の風化が進行し、岩体④、⑤まで完全に風化が進行し耐力を失った場合には、両ケース共に着目岩体は安定性を失い回転しながら崩壊に至る。
- 2) 摩擦係数の値は、崩壊の進行速度に影響を与えるが、崩壊の発生の有無までの影響を与えるには至っていない。

#### 参考文献

- 1) John O Hallquist : LS-DYNA User's Manual, LivermoreSoftware Technology Corporation, 2001.

## 正誤表

修正箇所	修正前	修正後
1頁右1行	左岸エリアⅡ	左岸エリアⅢ
4頁右15行	岩体Ⅱ, Ⅲまで	岩体Ⅰ, Ⅱまで