

2. 豊平峡ダム周辺斜面の概要

豊平峡ダム堤体下流の左右両岸側に岩石崩壊・落石が懸念される斜面が位置する。ダム堤体下流右岸側斜面傾斜 $70 \sim 90^\circ$ (一部オーバーハング) のほぼ垂直に切り立った急崖斜面からなり、斜面に植生はほとんど無く比較的一様の勾配で起伏が少ない斜面となっている。一方、ダム堤体下流左岸側斜面は、傾斜 $60 \sim 90^\circ$ (一部オーバーハング) で右岸に対して起伏に富み、塔状を呈した岩体も認められる。また、斜面にはまばらながら草本～木本が見受けられる。これらダム堤体下流側斜面を、地形状況と保全対象とするダム構造物との位置関係から、3つのエリアに区分し、エリアⅠ、Ⅱ、Ⅲとして各種検討を進めてきた。図-2 に各エリアⅠ～Ⅲとダム構造物との位置関係を示す。これら斜面において、不安定化が懸念される岩体が数十箇所指摘されている。これらの岩体から、他の岩体と比較し不安定化が進行していると思われる岩体Ⅱ-10、11 (エリアⅡ) に対し、3次元FEMによる数値解析を行い、従来の定性的な評価とは別に、力学的な観点からの定量的な安定評価を試みた。

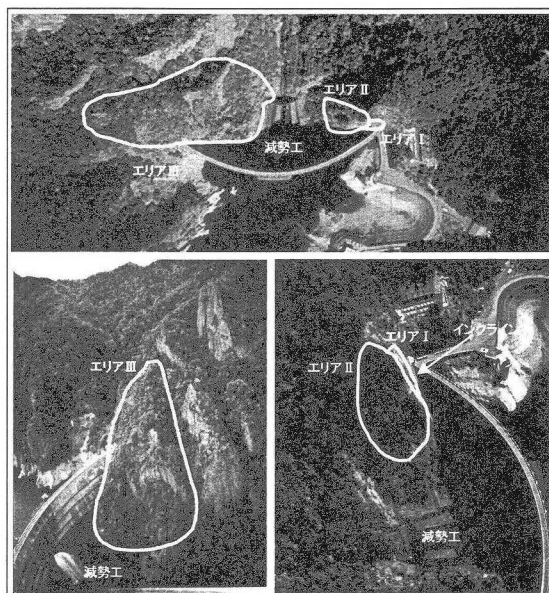


図-2 豊平峡ダム斜面状況

3. 岩体Ⅱ-10、11の安定性評価に関する概要

岩体Ⅱ-10は斜面エリアⅡ尾根部に分布するやや突出した板状ブロックである。また岩体Ⅱ-11も岩体Ⅱ-10の背後に分布する同様の板状ブロックである(図-3)。どちらもその左右背面に開口亀裂が確認され、岩体下部において密着節理面となっている。開口亀裂の幅は岩体Ⅱ-10と11間が約 $5 \sim 10\text{cm}$ であり、岩体頭部付近では最大 30cm にまで達している。岩体Ⅱ-11と地山間では約 $4 \sim 5\text{cm}$ の開口幅が岩体頭部まで連続している。これらの開口亀裂は左右両サイドとも

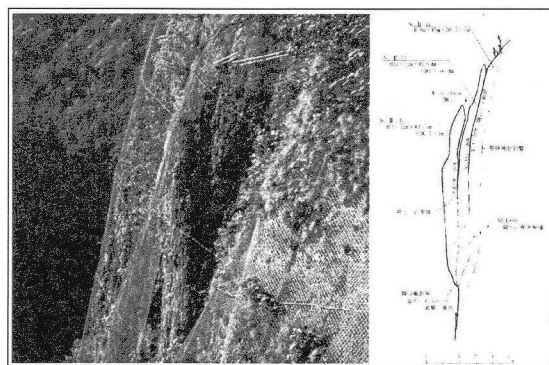


図-3 岩体Ⅱ-10、11の状況

初生的な面構造の差別侵食部であるが、各岩体ブロックの背面で連続している可能性が高いと考えられ、大規模な転倒、および平面すべりが予想された。また岩体Ⅱ-10は特に亀裂上部の開口幅も大きいため、これまでは緊急な対策が必要であると判断されていた。

4. 3次元FEMによる数値解析

岩体Ⅱ-10、11に関する3次元FEMによる安定性評価として、静的解析、および地震応答解析を実施し、各岩体において、①地震時を含めた現状での安定性、②開口亀裂の進展による影響について検討を行うこととした。解析モデルの作成においては、地形はレーザプロファイラによる計測データを使用するとともに、開口亀裂に関しては、登はん調査や高周波衝撃弾性波法探査の結果を反映させ、出来る限り現状に即して岩体を3次元的にモデル化した。

(1) 解析条件の設定

a) 解析範囲

岩体Ⅱ-10、11の規模は高さ15m、幅6m程度、厚さ(奥行き)は最大で2m程度である。そのため、解析範囲は高さ27m、幅20mとし、岩体規模の1.5倍以上の広さを持つ平面矩形領域とした。奥行き方向には10m程度の厚さを持つものとし、岩体の厚さに対して十分な奥行きを持つものとした。要素分割は、解析範囲の平面矩形領域のうち、岩体近傍の高さ16m、幅10mの範囲では0.2m×0.2mの四角形として格子状に分割し、8接点固体要素でモデル化した。その周辺は解析範囲縁辺に向かって徐々に粗くし、平面矩形領域の四隅では1m×1mの四角形として格子状に分割し、8接点固体要素でモデル化した。

地山と岩体Ⅱ-11および、岩体Ⅱ-11と岩体Ⅱ-10間の現状の亀裂状況はボーリング調査および、登攀調査の結果から推定し、地山と岩体Ⅱ-11の間では岩体下部および、下流側側部が、また岩体Ⅱ-11と岩体Ⅱ-10の間でも岩体下部が、それぞれ亀裂の進展はなく付着しているものと設定した。以下、解析モデル等において、開口した亀裂面を既存亀裂面、亀裂が進展していない部分を付着面とする。岩体Ⅱ-10、11の解析モデルを図-4、5に示す。

b) 境界条件

本数値解析では、解析範囲の側面、背面および底面における変形の拘束が、岩体部分の解析結果に大きな影響を及ぼさないようにするために、解析範囲の底面は完全拘束とし、側面および背面は法線方向のみを拘束することとした。

c) 物性値

主に安山岩溶岩からなる岩体を弾性体と仮定し数値解析を行うものとした。材料物性値に関しては、弾性係数は原位置試験結果、ポアソン比、密度に関しては室内試験結果をそれぞれ考慮し、決定した。表-1に使用した材料物性値を示す。

表-1 材料物性値一覧

地質区分	弾性係数 E(MPa)	ポアソン比 ν	密度 ρ (kg/m ³)
安山岩溶岩	4430	0.28	2.364×10^3

(2) 静的解析

静的解析は開口亀裂の現状、および亀裂が進展した場合における岩体の力学的特徴の評価を目的とする。自重を考慮した静的解析を実施することで、各岩体下部の付着面に作用する直応力およびせん断応力を求め、それらの分布性状を把握する。なお自重に対する応力は、スプリングバックを行うことにより、現地形状態に対して初期応力を導入する形で評価している。

a) 解析ケース

現状の状態を基本とした4種類の亀裂状態を仮定し、自重を考慮した静的解析を実施した。表-2に静的解析ケース一覧を示す。Case01は岩体Ⅱ-10、11ともに現状の開口亀裂状態における解析ケースである。本解析ケースにおける地山と岩体Ⅱ-11間の付着面積は35.83m²、岩体Ⅱ-11-岩体Ⅱ-10

表-2 静的解析ケース一覧

解析ケース	作用外力	地山-岩体Ⅱ-11	岩体Ⅱ-10-岩体Ⅱ-11
		付着面積 (m ²)	付着面積 (m ²)
Case01	自重	35.83	15.72
Case02	自重	24.31	15.72
Case03	自重	12.31	15.72
Case04	自重	35.83	8.26

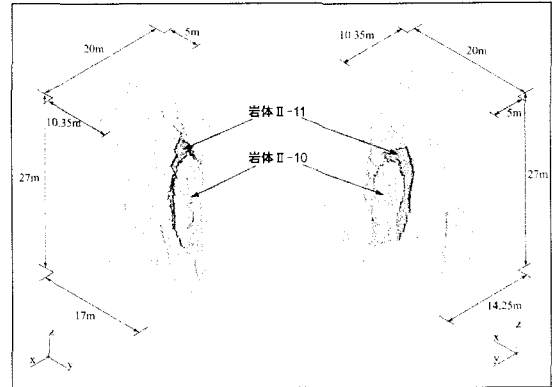


図-4 解析モデル全体図

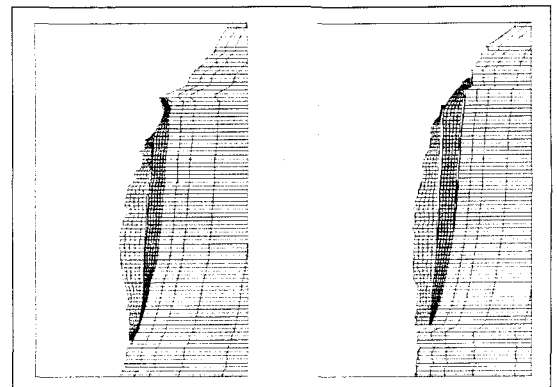


図-5 解析モデル鉛直方向要素分割状況

間の付着面積は 15.72 m² である。Case01 の解析モデルをもとに既存亀裂面が進展したことを想定し、地山と岩体Ⅱ-11間の付着面積を減少させた解析モデルを Case02、Case03 とし、同様に岩体Ⅱ-10 と岩体Ⅱ-11 間の付着面積を減少させた解析モデルを Case04 とした。図-6 に Case01 から Case03 への解析モデルでの付着面の変化を示す。

b) 解析結果

Case01 から Case04 の σ_y (山-谷方向の直応力) に関する応力分布図を図-7 に示す。

Case01 では地山や岩体Ⅱ-11 に引張応力はほとんど発生しておらず、最大で 0.11MPa であった。また、圧縮応力は、岩体Ⅱ-11 裏面の脚部に最大 -0.26MPa であった。それぞれの岩体の付着面に着目すると、付着面上部に圧縮方向の応力の集中が見られるが、引張応力に関しては Case01 と比較し、亀裂進展に伴う変化は微小なものであった。

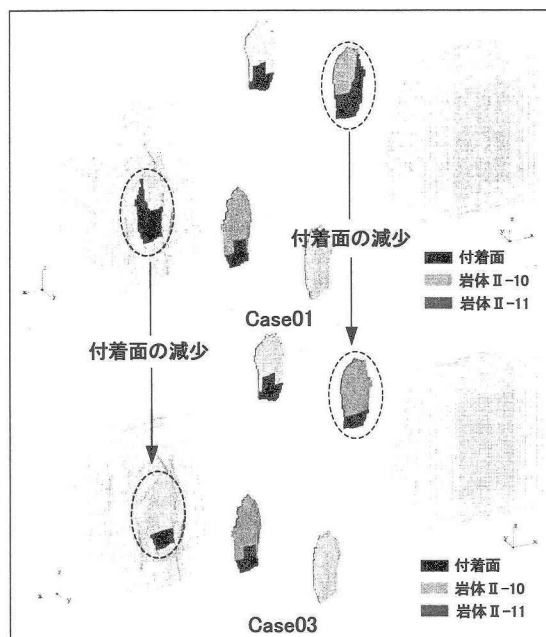


図-6 Case01 (上) と Case03 (下) の解析モデル

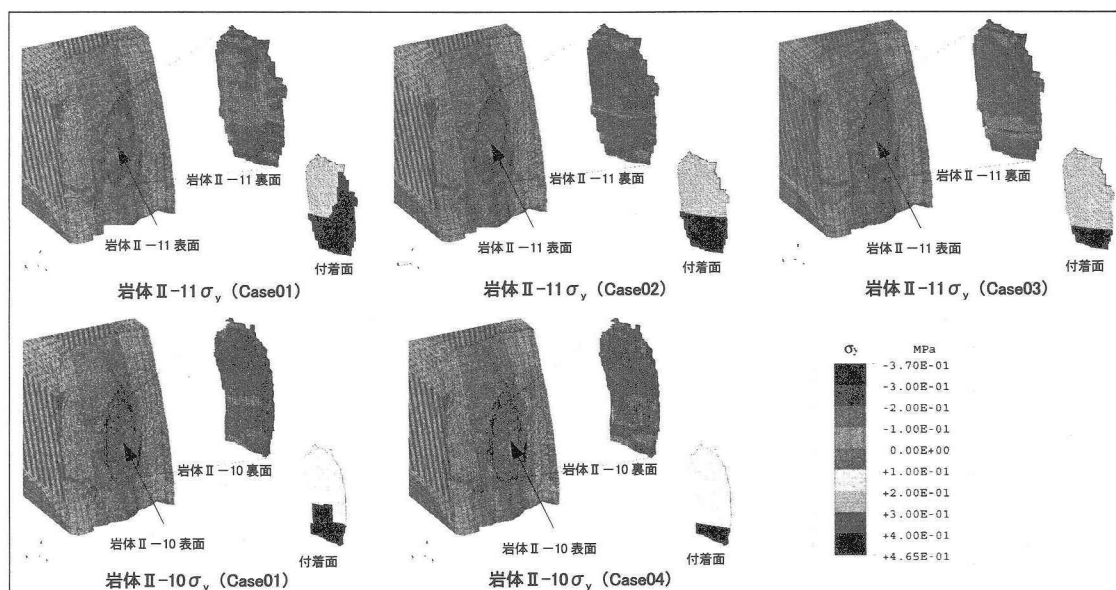


図-7 各解析ケースにおける σ_y 方向 (山-谷方向の直応力) の応力分布図

(2) 地震応答解析

現状での地震時における岩盤の安全性の確認を目的として、3次元 FEM を用いた地震応答解析を行う。本解析では、静的解析と同様、スプリングバック処理を施した自重解析を行った後、地震波形を物体力の形で入力し、最大加速度発生時、および最大変位発生時における付着面での応力を求める。地震波形の入力に関しては、豊平峡ダム堤体基部で観測された波形を、岩体Ⅱ-10、Ⅱ-11 を含むダム右岸部の地山を、高さ 143m の二次元せん断層と仮定したモデルに入力して岩体Ⅱ-10、Ⅱ-11 と同一高さにおける応答加速度波形を求め、その波形を入力地震波として用いることとした。

a) 解析ケース

地震応答解析では、現状の開口亀裂の状態を示す Case01 に関する解析モデルを使用した。また、入力地震波には、「平成 15 年十勝沖地震」における豊平峯ダム堤体基礎（観測標高 396 m）で得られた観測加速度波形を用いた。地震応答解析は次の手順で行った。

- ① 右岸側斜面エリアⅡ域をせん断層にモデル化して上述の地震波形を基部に入力した場合の地震応答解析を行う
 - ② 岩体Ⅱ-10、11 部に相当する標高における加速度応答波形を求める
 - ③ 得られた応答波形の最大加速度を含む 11～14 秒間の波形を Case01 モデルに物体力として入力する
- 減衰定数は最低次固有振動数に対して 5%とした。

図-8 に観測加速度波形から入力加速度波形抽出までのフローを示す。

b) 解析結果

図-9 に、応答解析における着目点 (A～D) を示している。(A)、および (C) 点はそれぞれ岩体Ⅱ-10、Ⅱ-11 の天端点であり、各岩体の応答加速度、および応答変位が最も卓越する位置であると考えられる。そこで、岩体Ⅱ-10 天端である (A) 点と (A) 点を投影した岩体Ⅱ-11 上の位置 (B) 点、および岩体Ⅱ-11 天端点である (C) 点と (C) 点を投影した地山部の (D) 点における応答加速度波形と応答変位波形を出力し、これらの位置で確認された最大加速度、および最大変位を岩体Ⅱ-10、Ⅱ-11 のそれぞれの最大加速度と最大変位とした。図-10 に岩体Ⅱ-11 の最大加速時、および最大変位時の σ_y 応力分布状況を示す。付着面での応力状態にほとんど変化ないことが確認できる。なお、応力の符号に関しては、静的解析の結果と同様である。

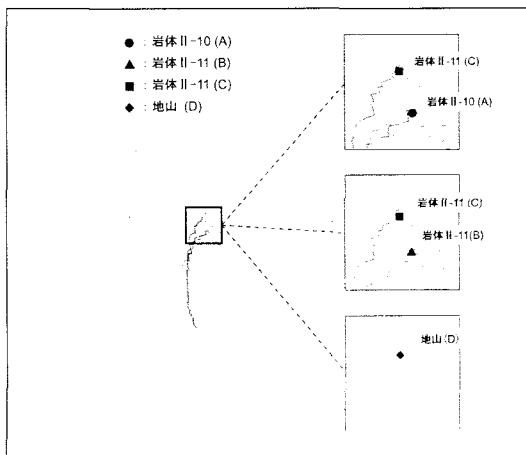


図-9 応答波形出力位置

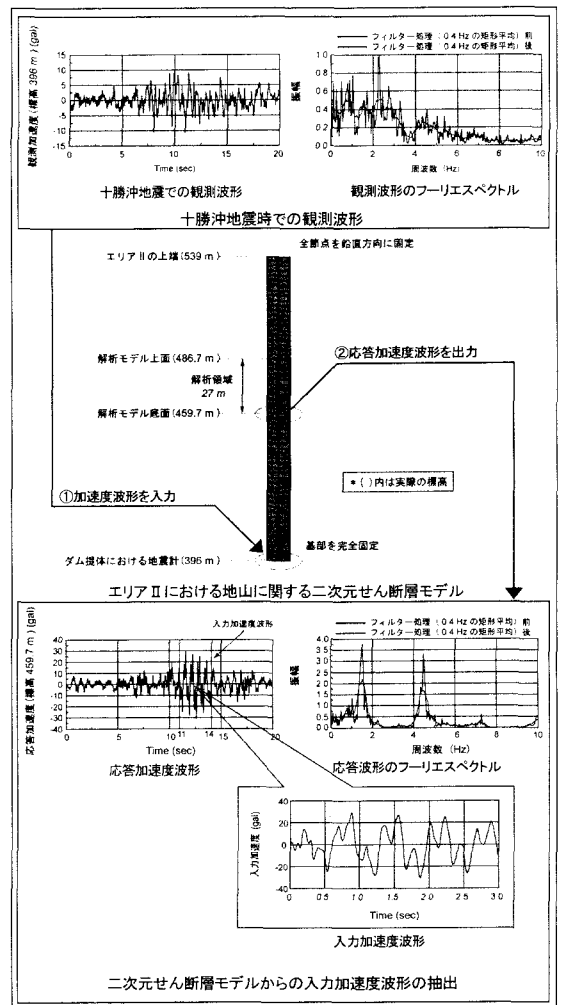


図-8 地震応答解析に使用する入力加速度抽出フロー

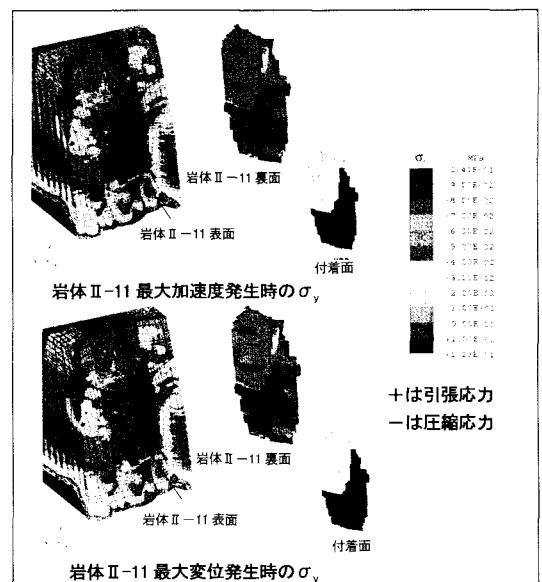


図-10 地震時における岩体Ⅱ-11 の応力分布状況

5. 岩体の安定性について

岩体の安定性を定量的に評価する試みとして、岩盤の圧縮強度、引張強度、およびせん断強度と、各解析結果から発生する応力から安全率の算出を行った。安全率算出に用いた強度は、別途材料試験で得られた最低値である（圧縮強度：5.2MPa、引張強度：0.58MPa、せん断強度：0.88MPa）。算出結果を表-2に示す。道路工事設計施工要領（北海道開発局建設部道路建設課監修）等で示されている重要構造物の計画安全率で最も安全側の状態である1.20を基準とすると、岩体Ⅱ-10、11の現状での安定性は高いものと判断される。また、地震の影響に関しても、十勝沖地震を想定した応答解析結果において、安全率が1.20を下回ることとはなく、現状の安全性に大きな変化はみられなかった。

亀裂進展ケースのうち、地山と岩体Ⅱ-11の付着部側方に亀裂を進展させたケース（Case02）では安全率は現状とは類似の結果が得られている。一方、下部の亀裂をさらに進展させたケース（Case03）では安全率は1を大きく下回る結果となった。また、岩体Ⅱ-10の場合においても下部の亀裂を進展させたケースで安全率が低下している。以上から、地山と岩体Ⅱ-11の付着部側方は岩体の安定性にはあまり寄与していないのに対して、岩体下部の付着部は岩体の安定性に大きく寄与していることが明らかになった。また、亀裂が下部に進展した場合には、岩体Ⅱ-10、11は安定性が損なわれ崩落に至る可能性のあることが示唆された。

表-3 発生応力の安全率算出結果

		岩体Ⅱ-10			岩体Ⅲ-11		
		安全率 (対 σ_c)	安全率 (対 σ_t)	安全率 (対 τ_{xy})	安全率 (対 σ_c)	安全率 (対 σ_t)	安全率 (対 τ_{xy})
Case01	引張側/正方向最大応力	11.60	8.29	6.77	14.50	5.27	9.78
	圧縮側/負方向最大応力	10.40	65.00	6.29	4.26	20.00	1.49
	引張側/正方向最大応力(地震時)	19.33	9.67	11.00	11.60	8.29	12.57
	圧縮側/負方向最大応力(地震時)	16.25	65.00	6.77	5.78	21.67	1.91
Case02	引張側/正方向最大応力				2.32	5.27	3.83
	圧縮側/負方向最大応力				4.33	20.00	1.54
Case03	引張側/正方向最大応力				0.77	1.23	1.16
	圧縮側/負方向最大応力				4.09	14.05	1.01
Case04	引張側/正方向最大応力	3.63	3.05	6.77			
	圧縮側/負方向最大応力	10.40	43.33	4.40			

6. おわりに

3次元FEMによる岩体の安定性を解析した結果を以下にまとめる。

- ① 岩体の安定性は付着面に大きく依存しており、亀裂の進展による付着面積の減少が、岩体の安定性を大きく低下させることが確認された。
- ② しかし、自重のみが作用する現状では岩体Ⅱ-10、11は安定しており、また想定した十勝沖地震（札幌震度4）による外力では、岩体の安定性に重大な影響を与えるまでには至らない結果となった。

謝辞

本論文を作成するにあたり、「豊平峡ダム斜面对策技術検討会」関連資料のご提供いただいた北海道開発局石狩川開発建設部の関係者各位に記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 豊平峡ダム斜面对策技術検討会： 豊平峡ダム斜面对策技術検討会報告書，2004