

不連続変形法を用いたダム構造物への落石影響評価

RISK ASSESSMENT OF ARCH DAM DUE TO ROCK-FALLING BY MEANS OF DDA

秋山泰祐*, 宮下尚志**, 石井孝典**, 川北稔***, 櫻井春輔****

Yasuhiro AKIYAMA, Naoshi MIYASHITA, Takanori ISHII, Minoru KAWAKITA, Shunsuke 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)

** 工修 (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 (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 (財)建設工学研究所 (〒657-0011 神戸市灘区鶴甲1-3-10)

キーワード: 不連続変形法、落石、危険度評価

(Discontinuous deformation analysis, rock-falling, risk assessment)

1. はじめに

北海道札幌市内に位置する豊平峡ダムは、支笏洞爺国立公園第1種特別地域内にあり、道内では珍しいアーチ式コンクリートダムである。また、紅葉時期を中心に毎年約10万人の観光客が訪れる観光地でもある。

豊平峡ダム堤体左右岸の斜面は急崖を呈し、これまでの調査では多数の不安定岩体が指摘されているものの、ダム建設以来、有意な岩体の崩壊や落石等は確認されていない。しかし、これらが一旦発生した場合、ダム堤体や一般観光客への影響は明らかである。そのため、こうした岩体の安定度や影響度を評価し、今後の維持管理を適切に実施し、岩体の崩壊等による被災を未然に回避するための対策技術について検討を行うことを目的として、「豊平峡ダム斜面对策技術検討会」が設置された。

同委員会では様々な調査・解析を行い、各岩体の定量的な評価を可能とする手法を取り入れ、対策必要箇所のプライオリティの決定を試みた。また、国立公園内ということでの環境や重要な観光資源である景観に配慮したハード、およびソフト対策についても検討を加えた。

その結果、落石に対するダム構造物への十分な安全性確保が可能となる最低限の対策必要箇所が抽出され、景観の変化や環境への負荷が低減された。本論文では以上の取り組みのうち、不連続変形法を用いた落石影響評価に関して報告するものである。

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、細かな起伏には富むものの、勾配はほぼ一様な斜面となっている。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、次の3つのエリアに区分し、検討を行うものとした。

(1) エリアⅠ

- ・ダム堤体下流右岸側南向き(堤体向き)斜面
- ・幅50m、高さ80m、斜面勾配 $70\sim 80^\circ$
- ・保全対象 ダム堤体(観光客)、インクライン

(2) エリアⅡ

- ・ダム堤体下流右岸側西向き(減勢工向き)斜面
- ・幅50m、高さ140m、斜面勾配 $70\sim 90^\circ$
- ・保全対象 減勢工

(3) エリアⅢ

- ・左岸側東向き(減勢工向き、一部堤体向き)斜面
- ・幅70m、高さ140m、斜面勾配 $60\sim 80^\circ$
- ・保全対象 ダム堤体、減勢工

図-1に各エリアⅠ～Ⅲとダム構造物との位置関係を示す。また、既往調査からエリア区分内において不安定要素をもつと指摘された岩体の平面位置を図-2に示す。

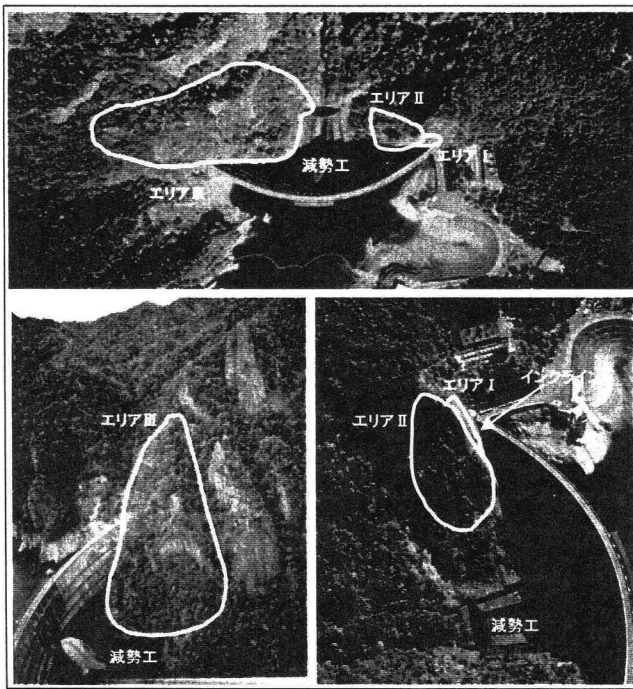


図-1 豊平峡ダム斜面状況

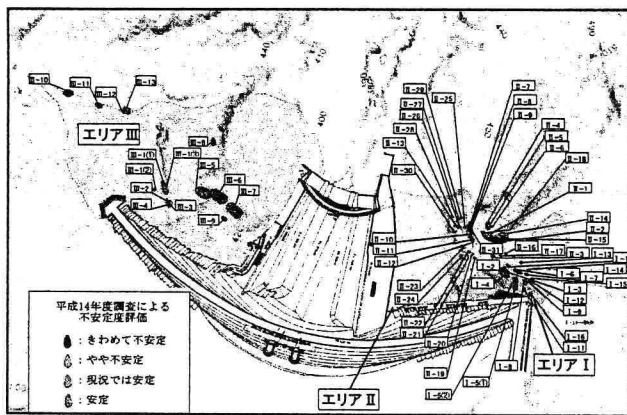


図-2 既往調査による不安定岩体平面図

3. 構造物への落石影響評価に関して

落石により構造物が影響を受けるのは、①落石発生時に対象とする構造物へ到達し、②その構造物に重大な破損、被害が発生するような衝撃力が加わる、ことが前提である。そのため、岩体が極めて不安定であり、崩壊、落石の危険性が高い場合でも、構造物へ到達しない、また到達してもその被害が極めて軽微であれば、その岩体の対策実施の必要性は低下すると考えられる。よって、効果的な斜面安全対策を行う場合、岩体の安定評価に加え、高い精度での落石影響評価を行い、両者を総合的に判断する必要がある。

3.1 既往調査での落石影響評価の課題

既往調査における対策必要箇所を選定結果を表-1に示す。これらの結果は、図-2で示した不安定岩体評価に、落石影響評価も加えた総合評価として選定され

ている。既往調査における落石影響評価方法を以下に示す。

- ①構造物への到達に関しては、観察や地質調査結果による主観的・定性的に判断
- ②衝撃力を換算落下高や落石質量を用いて推定し、構造物への影響を評価

しかし、これらの手法は簡易的な判定が可能であるものの、当該地域のようなダム構造物周辺という限定された範囲では、斜面高等に明確な差異が発生しない。また、構造物に与える影響も実際と比較して過大に評価される可能性があるため、対策必要岩体の抽出においては過度に安定性評価に依存してしまい、不安定岩体と評価されたほとんどの箇所が対策必要と判断される結果となっている。そこで、適切な対策必要箇所を選定するには、落石の挙動を高い精度で定量的に判定できる手法を採用し、可能な限り実態を反映した影響評価を行う必要があると考えられる。

表-1 既往調査における対策必要箇所数

総合評価	右岸斜面		左岸斜面	計 (箇所)
	エリアI	エリアII	エリアIII	
緊急対策が必要	12	6	6	24
対策が必要	2	9	0	11
対策が望ましい	0	7	2	9
計	14	22	8	44

3.2 落石シミュレーションを用いたの落石影響評価

各岩体の形状や位置を反映し、定量的な落石影響評価を行うため、落石シミュレーションを用いた落石影響評価の導入を試みた。現在、落石シミュレーションの手法は多種多様であるが、基本的には質点系と非質点系の2点に大別できる。以下に各手法の概要を示す。

(1) 質点系の落石シミュレーション

落石を質点、または円柱・球体等の単純な形状剛体、斜面を線上の剛壁と仮定し、ニュートンの運動方程式を解くことで落石の運動を求める手法である。

(2) 非質点系の落石シミュレーション

落石、および斜面を大きさ・形状をもったブロックとしてモデル化する手法である。

落石影響評価の対象となる不安定岩体は、その大きさや形状が全て異なっており、また明瞭な亀裂によって分離されていることが明らかとなっている(図-3)。これらの要因は落石挙動の結果に大きく作用すると考えられるため、ここでは不連続変形法を導入するものとした。

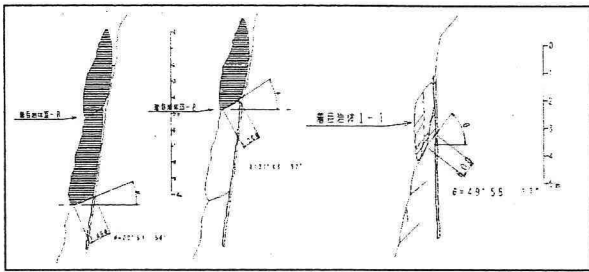


図-3 不安定岩体での明瞭な亀裂

4. 不連続変形法による落石影響評価

不連続変形法による落石影響評価を以下に示す。

4.1 解析モデルの作成

落石挙動のシミュレーション結果の信頼性を高めるためには、岩体や斜面の詳細な形状や、岩体と構造物との正確な位置関係等を反映した、地形精度の高い解析モデルの作成が望まれる。そこで、ラジコンヘリコプターを用いた、ダムを含む斜面全体の写真測量と、高解像度の地上型 3 次元レーザプロファイラーの結果を合成することで、ダム周辺の詳細な 3 次元地形データを作成した。これら 3 次元データから、断面図を作成することで、容易に全ての解析対象岩体に対する詳細な解析モデルを得ることが可能となった。図-4、5 に 3 次元データの出力図と、抽出された解析断面図を示す(最急勾配で落下すると仮定)。

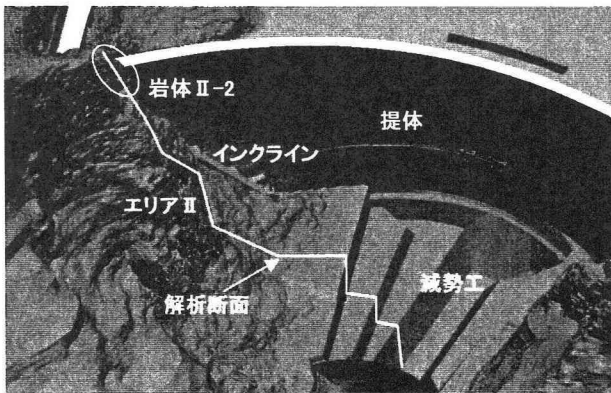


図-4 ラジヘリ写真測量と 3D レーザプロファイラーを合成した 3 次元データ出力図

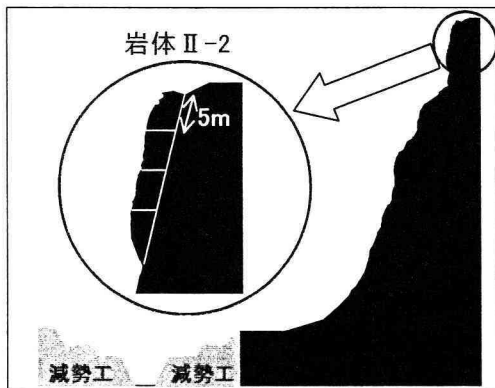


図-5 岩体II-2 解析断面図例

4.2 不連続変形法による解析

不連続変形法により適切な解を得るためには、パラメータの設定が重要である。特に不連続変形法による落石運動の解析結果に大きな影響を与えるパラメータとして粘性係数がある。通常、粘性係数等のパラメータは実際の落石事例等に対し、逆解析を行って設定する。しかし、当該地域での適当な落石事例がなく、また落石防止金網による落石の減衰効果等を考慮すると、適切な粘性係数を設定することが困難であった。そのため、粘性係数は 0.1 から 0.4 までの各ケースにて解析を行った。以下に代表的な解析事例を示す。

(1) ダム構造物への到達域に関する検討

エリア I は既往調査から対策必要箇所が計 14 箇所挙げられている。これは、エリア I がダム提体、およびインクラインに近接していることから、落石によりダム構造物への影響が確実なためである。特に、ダム提体天端への落石は、観光客への被害が懸念されるため、岩体規模に関わらず、早急な対応が必要となる。そのため、図-6 に示す断面上にある不安定岩体が崩壊した場合のダム提体天端への到達可否を検討した。その結果、断面③上の岩体は安全側にみても、崩壊発生において提体天端までは到達しないとの結果を得た。図-7 に断面③最上部岩体の落石最大到達地点解析結果を示す。

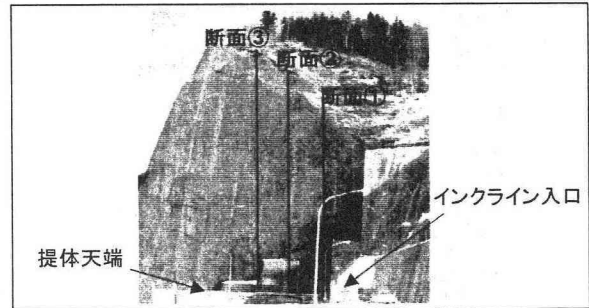


図-6 エリア I の全景

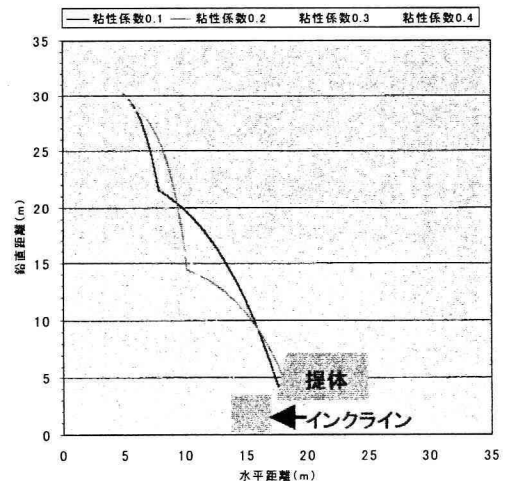


図-7 断面③最上部岩体での粘性係数を変化させた場合の落石最大到達地点結果(軌跡のみ)

(2) ダム構造物への衝撃力に関する検討

エリアⅡに存在する不安定岩体が崩壊した場合、減勢工への影響が懸念される。エリアⅡと減勢工は高低差が大きい位置関係にあることから(図-8)、既往調査では不安定岩体の大部分が減勢工へ到達、その影響も大きいと評価されている。そのため、エリアⅡの岩体に対する検討は、減勢工への到達可否、および衝突時の速度に関し検討を行った。

図-9に粘性係数0.1とした場合の岩体Ⅱ-2の重心速度変化図を示す。岩体Ⅱ-2はエリアⅡ内で最も高い位置にあり、岩体規模も最大である。減勢工到達までの速度変化は、斜面上部から跳躍、自由落下したのち、減勢工手前の暖斜面に衝突し大きく減速しているのが確認できる。各ブロックの減勢工衝突時の速度は約27m/s～15m/sである。これらの結果をもとに換算落下高と衝撃力を算出し、既往調査との値と比較すると、衝撃力の評価が約1/2まで低下した。

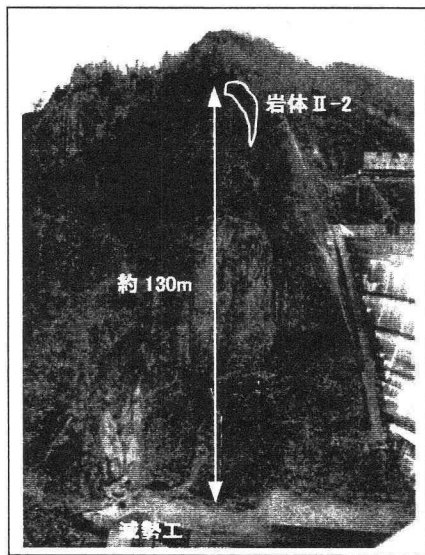


図-8 エリアⅡ全景

— 岩体No.1 — 岩体No.2 岩体No.3 岩体No.4

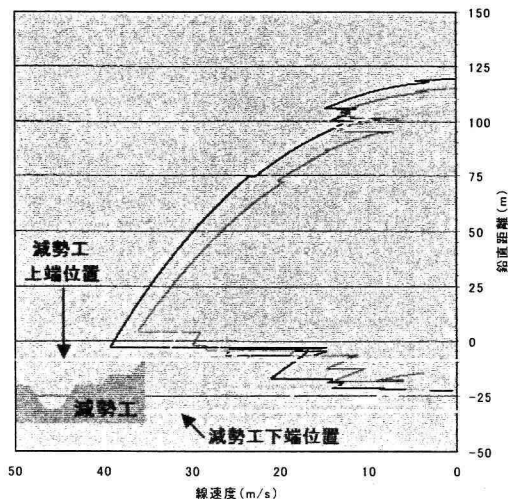


図-9 岩体Ⅱ-2の重心速度変化(粘性係数0.1)

4.3 落石影響評価結果を考慮した対策必要箇所選定

不連続変形法を用いたダム構造物への影響評価と、別途詳細に実施した岩体の安定度の検討から、最終的な対策必要箇所の評価結果を表-2に示す。既往調査結果と比較し、対策必要箇所数が全体で75%、緊急対策必要との比較でも60%以上削減された。これら、評価結果が大きく異なるのは、エリアⅡ、Ⅲからの落石による減勢工への影響が深刻なものではなく、早急な対策は必要ないと判断したことがあげられる。

表-2 落石影響評価結果を考慮した対策必要箇所選定結果

総合評価	右岸斜面		左岸斜面	計
	エリアⅠ	エリアⅡ	エリアⅢ	
対策が必要	8	2	1	11
対策必要箇所 減少比率(当初比)	43%	87%	83%	60%

5 おわりに

本報告では非質点系落石シミュレーションの1つである不連続変形法を用いての落石影響評価を行った。エリアⅠでは最近になってロックネットの隙間からの小規模な落石が発生し、予想範囲で停止していることが確認されている。これは、提案の落石影響評価法の妥当性が示された、一例であると判断される。また、岩体の対策優先度における総合評価の一環としてのこのような取り組みの有効性を示しているものと考えられる。

また、影響評価結果の精度を高めるために、今回得られた地形に関する3次元情報を十分に活用し、より詳細な落石挙動の解析が可能である非質点系の3次元落石シミュレーションの実施についても取り組みたいと考えている。

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
- 2) 社団法人日本道路協会：落石対策便覧に関する参考資料－落石シミュレーション手法の調査研究資料－，2002
- 3) 社団法人日本道路協会：落石対策便覧，2000
- 4) 細谷 昭悟，岩間，倫秀，中根 昌士，伊藤 大輔，氏平 増之：落石の三次元数値シミュレーションに関する研究－数値解析の方法と直線型斜面へ適用した場合－，応用地質，第44巻，第1号，pp,25～35，2003