

6.1 岩盤・斜面崩壊の評価・点検の高度化に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：防災地質チーム

研究担当者：伊東佳彦、馬場道隆、日下部祐基、
日外勝仁、宍戸政仁、坂本多朗

【要旨】

北海道では、平成 13 年の北見北陽崩落、平成 16 年のえりも町での大規模斜面崩壊など、岩盤・斜面崩壊等は依然頻発しており、安全な道路環境の維持・保全のため、より精度の高い斜面の調査・評価・点検等の防災システムの構築が急務となっている。本研究は、このような防災システムを構築することを目的に、地球科学的観点から平成 18 年から 22 年の 5 年間にわたり岩盤・斜面の研究を行うものである。平成 18～19 年度は、既存資料・事例の整理分析の一環として、過去 40 年間の岩盤・斜面崩壊の整理・検討および 4 大災害の総括を行った。また、岩盤斜面の安全性評価法の提案の一環として、遠心模型斜面評価法の検討を実施した。また、広域調査・監視技術の適用性検討の一環として、北海道における道路防災点検箇所のスクリーニング方法（案）を作成し、北海道開発局に提案した。さらに点検・調査・監視手法の素案作成の一環として、デジタル写真を活用した斜面点検高度化の検討を行った。

キーワード：大規模岩盤崩壊、道路防災点検

1. はじめに

北海道では、平成 8 年の豊浜トンネル崩落事故、平成 9 年の第 2 白糸トンネル崩落事故以降も、平成 13 年の北見北陽崩落や平成 16 年のえりも町斜面崩壊など大規模な岩盤・斜面崩壊が依然発生している。また、道路防災点検等により点検対象外あるいは対策不要とされた箇所でも岩盤・斜面崩壊が多数発生している。このような岩盤・斜面災害は、国民の生命・財産を奪い道路の不通等で利用者に不便を強いるとともに、道路の復旧や防災対策などに多額の費用がかかるなど、社会的課題となっている。このため、安全な道路交通環境の維持・保全のために岩盤斜面評価のより一層の精度向上をはかることが求められている。

本研究は、地形・地質や岩盤風化などの地球科学的

観点から岩盤斜面の研究を行い、岩盤・斜面崩壊の評価・点検方法のより一層の精度向上を図るものである。重点プロジェクトの初～2 年次（平成 18～19 年度）の研究成果の概要について以下に報告する。

2. 年次計画と研究方法

本研究の年次計画を表 1 に示す。18～19 年度は、資料・事例の整理・分析、岩盤斜面の安全性評価法の提案、広域調査・監視技術の適用性検討および点検・調査・監視手法の素案作成の 4 つの項目について研究を実施した。各項目の研究方法は以下の通りである。

2. 1 資料・事例の整理・分析

2.1.1 過去 40 年間の岩盤・斜面崩壊の整理・検討

比較的大規模な岩盤・斜面崩壊（崩壊量 1,000m³

表 1 年次計画

	項目	H18	H19	H20	H21	H22	備考
1	資料・事例の整理・分析	○					
2	岩盤斜面の安全性評価法の提案	○	○	○			
3	広域調査・監視技術の適用性検討	○	○	○			
4	点検・調査・監視手法の素案作成		○	○	○		
5	点検・調査・監視手法の現地斜面への適用性検証			○	○	○	
6	道路斜面の調査・評価・点検手法等のとりまとめ					○	

以上) について既存の文献・資料等を収集し、地球科学的な観点から整理した。

2.1.2 4大災害の総括

国道が破壊された4つの大規模岩盤・斜面崩壊(豊浜トンネル、第2白糸トンネル、北見北陽、えりも、以下、4大災害と呼ぶ)^{1), 2), 3), 4), 5), 6)}について地球科学的な観点から整理した。

2.2 岩盤斜面の安全性評価法の提案

標記検討の一環として、岩盤崩壊の要因である背面亀裂に着目した評価法である遠心模型斜面評価法(以下、遠心評価法)について検討⁷⁾した。遠心評価法は、切欠き(実斜面の背面亀裂に相当)を入れた岩盤斜面の模型を大型遠心力载荷装置により破壊し、破壊時のデータ等から当該岩盤斜面の安全率を評価する方法である。

遠心評価法は、①3次元レーザ測量による高精度の地形デジタルデータ取得、②コンピュータ自動切削装置による地形模型の作製、③現地岩盤の強度特性をシミュレートするモルタル配合技術、④当所所有の大型遠心力载荷装置による模型実験、の4つのノウハウを組合せて実斜面の安全率を求める方法である(現在、特許出願中;登録番号 2006-196517)。実験に用いる大型遠心力载荷装置は、有効回転半径 3.5m, 最大遠心加速度 100G, 最大搭載質量 2500kg(最大加速度時)の装置である(写真 1)。同法の検討手順は以下の通りである。

- (1) 基本原理の整理
- (2) 評価フロー案の構築
- (3) モデル地の選定とデータ収集
- (4) 大型遠心力载荷装置による実験と考察

2.3 広域調査・監視技術の適用性検討

第9回の道路防災点検(平成8~9年)から約10年が経過し、岩盤・斜面調査技術が進歩・改良されるとともに、新しい地球科学的知見も蓄積されている。平成18年度から実施される道路防災点検では、これらの技術や知見の点検への反映が期待された。

標記検討の一環として、道路防災点検箇所のスクリーニング方法について検討した。まず、現状の道路防災点検の概要を整理して課題を抽出するとともに、新しい道路防災点検箇所のスクリーニング方法(案)を構築し、北海道開発局に提案した。

2.4 点検・調査・監視手法の素案作成

日常の道路斜面点検は斜面の専門家でなくても実施が可能で、簡便かつ経済的な方法が理想的である。近年、写真分野におけるデジタル化技術の進展が著しく斜面点検でもこれらの進展を取りこむことにより経済的な点検システムの構築できることが期待される。

標記検討の一環として、写真計測技術を用いた道路斜面点検手法(以下、写真点検手法)について検討した。検討手順は以下の通りである。

- (1) 課題の抽出と条件の設定
- (2) 条件の選定と課題の整理
- (3) 検証実験と考察



写真 1 遠心力载荷装置

3. 研究結果

3.1 資料・事例の整理・分析

3.1.1 過去40年間の岩盤・斜面崩壊の検討

過去40年間の崩壊土量 $1,000\text{m}^3$ 以上の岩盤・斜面崩壊の分布を図1に示す。該当する岩盤・斜面崩壊は

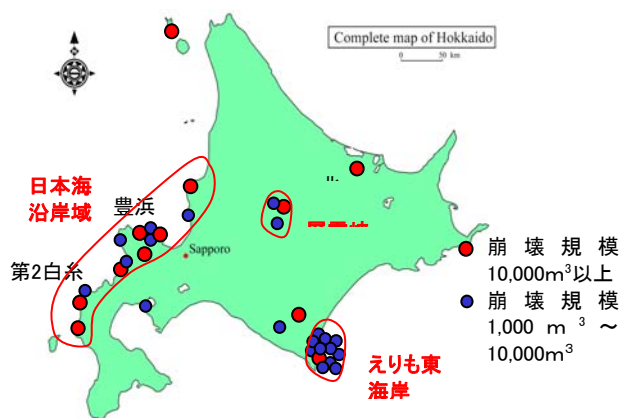


図1 北海道における過去40年間の岩盤・斜面崩壊の分布(崩壊量 $1,000\text{m}^3$ 以上)

表2 4大災害（豊浜トンネル、第2白糸トンネル、北陽、えりも）の概要

	豊浜トンネル崩落	第2白糸トンネル崩落	北陽土砂崩落	えりも町斜面崩壊
場所	一般国道229号(古平町)	一般国道229号(島牧村)	一般国道333号(北見市)	一般国道336号(えりも町)
崩壊年月日	平成8年2月10日	1回目:平成9年8月25日 2回目:平成9年8月28日	平成13年10月4日	平成16年1月13日
崩壊規模	体積11,000m ³	1回目:体積42,000m ³ 2回目:体積14,000m ³	体積24,000m ³	体積42,000m ³
被災状況	岩盤が豊浜トンネル上に崩落し、トンネル約44m区間が被災、バス1台と乗用車1台が下敷きになり、死者20名	1回目:瀬棚側の巻出部114m、擁壁部12mの計126mが破壊 2回目:構造物の被災なし	崩壊土砂が対岸の川(ルクシニコロ川)に達し、走行中の乗用車を巻き込み2名死亡。	崩積土は宇遠別第一覆道広尾側入口を覆い、岩塊は海岸に達している。死者1名、負傷者1名。
地質	新第三紀中新世尾根内層安山岩質の水冷破砕岩を含む同質火砕岩類	新第三紀鮮新世のオコツナイ層で軽石凝灰岩、凝灰質砂岩・礫岩、角閃石安山岩質水冷破砕岩および凝灰岩からなる。	中生代ジュラ紀～白亜紀仁頃層群の火山性碎屑岩、石灰岩・チャート互層、チャート、赤色含礫泥岩等	ホルンフェルス
崩壊原因	岩盤に内在する不連続な亀裂が、地形・地質の生成過程とその後の環境変化によって生じた岩石の特性、地下水の影響および自重・地下水圧・氷結圧等によって進展し、互いに連続することによって発生した。	岩相の不規則性、岩体背面に内在する亀裂や高角度の流れ盤亀裂の存在および崩落岩体下部の変質ゾーンの存在という複雑な地質環境下において、地下水によるスメクタイトを含む変質ゾーンの岩盤劣化の進行、岩体の自重、地下水、凍結融解あるいは地震等の影響による亀裂の長期的な進展等が複合的に作用して発生した。	・斜面上部に分布する石灰岩・チャート互層等に内在する高角度の開口亀裂と付加体形成以降の変動によって作られた鏡肌をともなう亀裂等が自重や地下水等の作用によって長時間をかけて劣化・進展した。 ・約3週間前と直前までの記録的な豪雨時に斜面上部の岩盤内に浸透して水圧が働いた。	・複数の亀裂系が深部まで構築され、1つの流れ盤系、2つの高角受け盤として顕在化、溶脱しやすい白色鉱物脈の存在等で潜在的弱面となった。 ・自重および地震等が亀裂の進展を促進 ・融雪水および当日の朝の地震等で岩石・岩盤の抵抗力の減少が加速された。
備考(前兆など)	崩落の1時間前と30分前に異常(音響あるいは土砂落下等)の報告あり			大崩壊の数日前および十数時間前に、小崩壊発生(規模100～300m ³ 程度)
文献	1	2	3	4

全部で33件である(規模不明のものは記載等から推定)。分布を見ると、えりも東海岸の狭い地域で12例と多数発生している。また雄冬岬～積丹半島～渡島半島にかけての日本海沿岸域でも13例が目立つ。崩壊規模については12例が10,000m³を越えており、えりも東海岸では一例を除き、規模は10,000m³以下であるのに対し、日本海沿岸火砕岩地域では規模10,000m³以上の崩壊が多く発生している。

地質別には日本海沿岸域の13例に加え、室蘭本線清水の例の合計14例が火砕岩・火山岩類である。また、えりも東海岸地域では12例のうち7例がホルンフェルス、残りの5例が付加体堆積物(砂岩・泥岩、粘板岩等)である。層雲峡～天人峡の3例ではいずれも柱状節理の発達した熔結凝灰岩である。火砕岩・火山岩地域の岩盤崩壊では、より亀裂の少ない火砕岩地域では大規模な崩壊が、亀裂の多い熔岩・貫入岩地域では小規模な崩壊が多い傾向が指摘されている⁵⁾。

岩盤・斜面崩壊発生誘因のうち、地震については

北海道では過去40年間に根室半島沖地震(1973)、釧路沖地震(1993)、北海道南西沖地震(1993)、北海道東方沖地震(1994)、十勝沖地震(2003)などが発生している。

これらが崩壊に直接関係したと考えられるものが8件認められる。このほか地震から5日後の最初の降雨で崩壊した例が1件(静内ダム湖斜面)、震度4以上を経験後、半年以内に崩壊したものは2件(ワッカケ岬および2006年の宇遠別第1覆道)である。

3.1.2 4大災害の総括

4大災害の概要を表2に示す。4大災害の崩壊要因は様々だが、豪雨や氷結など水の作用(岩石・岩盤自体の劣化や強度低下、あるいは亀裂の強度低下など)が大きな要因を占めていると推定される。また、崩落監視および危険の回避という観点からは前兆現象の把握が重要であり、前兆現象の事例は少ないが、今後、整理・検討を進めていく必要がある。

3.2 岩盤斜面の安全性評価法の提案（遠心模型斜面評価法（遠心評価法）の検討）

3.2.1 基本原理

遠心評価法の基本原理は、図2に示す極限つりあい式の破壊条件である。崩落危険岩体の起動モーメント M_D と、亀裂が進展する面に作用する抵抗モーメント M_R は、以下のように求められる。

$$M_D = \frac{\gamma B h^2}{2} \quad (1)$$

$$M_R = \frac{\sigma (B - L)^2}{6} \quad (2)$$

ここに、 σ ：岩体の引張強度 (N/m^2)、 B ：崩落危険岩体の高さ(m)、 L ：既存切欠きの深さ(m)、 γ ：岩体の単位体積重量 (N/m^3)、 h ：崩落危険岩体の幅(m)
実斜面の安全率 F_p は、以下の式で求められる。

$$F_p = \frac{M_R}{M_D} = \frac{\sigma (B - L)^2}{3\gamma B h^2} \quad (3)$$

いっぽう実斜面と同じ材料からなる縮尺 $1/n$ の相似模型の安全率 F_m (以下、模型斜面の安全率) は、以下の式になる。

$$F_m = \frac{\sigma (B/n - L/n)^2}{3\gamma B/n (h/n)^2} = n \frac{\sigma (B - L)^2}{3\gamma B h^2} = n F_p \quad (4)$$

重力場 (1 G 場： G は重力加速度) では模型斜面の安全率は実物の n 倍となり、この模型を重力場の n 倍の遠心力場に置くと岩盤の単位体積重量 γ が n 倍(分母が $n \cdot \gamma$) となり $F_m = F_p$ となる。しかし、この関係だけでは重力場の n 倍の遠心力場に達したときに模型が破壊したときの実斜面のすべり安全率 $F_p = 1.0$ であることは分かるが、その前後の安全率は不明である。そこで、模型の破壊加速度 $n_f G$ に注目する。 $1/n$ 模型斜面が $n_f G$ の遠心力場で破壊したときの模型斜面の安全率 F_m は 1.0 になる (式5)。

$$\begin{aligned} F_m &= 1.0 \\ &= \frac{\sigma (B/n - L/n)^2}{3(n_f \gamma) B/n (h/n)^2} = \frac{n}{n_f} F_p \end{aligned} \quad (5)$$

上式より次のように実斜面の安全率 F_p が求められる。

$$F_p = \frac{n_f}{n} \quad (6)$$

従って実斜面の安全率 F_p は、破壊加速度 $n_f G$ と模型縮尺の分母 n の比として求められることになる。

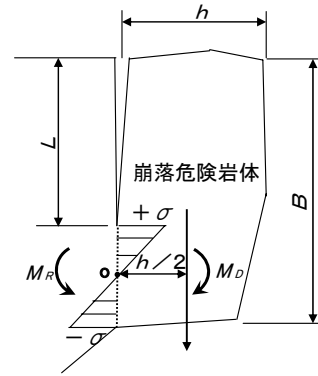


図2 極限つりあい式の破壊条件図

3.2.2 評価フローの構築

遠心評価法では、最初に対象岩体の3次元レーザ測量(写真2)を行ってデジタル地形データを取得する。また、それと並行して地質調査を行い、岩体の物理・力学特性を把握する。次にデジタル地形データを3次元画像にし、それをもとに実験の基本条件である危険岩体の範囲および背面切欠き(実斜面の背面亀裂に相当)の深さと位置を想定する。この際、概略の数値計算により予想破壊加速度を求め、実験ケースとして切欠き深さやオーバーハング深さなどを数種類決定する。そして地形データを模型用に加工して、図3に示すコンピュータ自動切削装置により高精度地形模型を作製し、それを基にFRP(繊維強化プラスチック)の型枠と塩化ビニール板の模型用切欠きを作製する。

地質調査等で求めた対象岩体の物理力学特性は、模型材料としてのモルタル物性の目標値として配合決定に用いる。配合決定されたモルタルを組み立てた型枠内に打設して、3次元模型を作製する。この模型を必要日数養生し、切欠き付近にひずみゲージを貼付して遠心力载荷装置に設置し、遠心力模型実験を行う。

遠心力模型実験では、供試体が破壊するまで遠心力



写真2 3次元レーザ・スキャナーと測量状況

を載荷して破壊加速度や発生ひずみを計測し、対象斜面の安全率を評価する。以上の流れを整理し、安全率評価法のフロー（図4）としてとりまとめた。

3.2.3 モデル地の選定とデータ収集

3次元モデル実験の対象として、写真3に示す北海道島牧村地区の水冷破碎岩等から構成される岩盤斜面

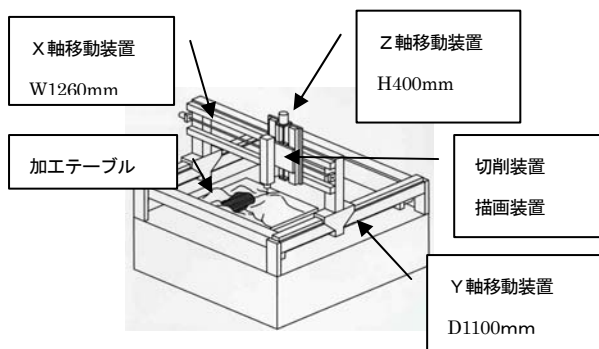


図3 コンピュータ自動切削装置概念図

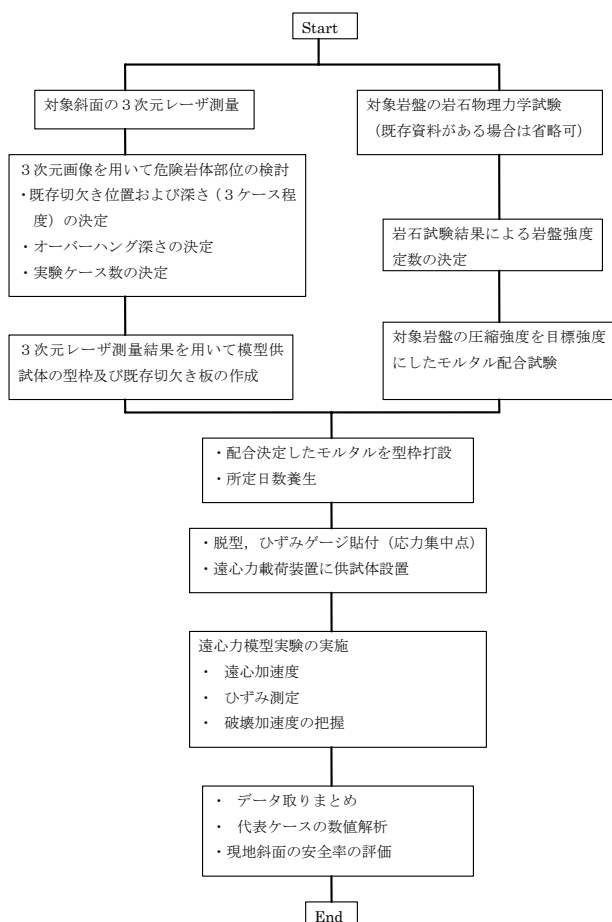


図4 安全率評価法フロー図

を選定した。同斜面を模した縮尺 1/20 の供試体を 3 次元レーザ測量で得たデジタル地形データを用いて作成した(写真4)。供試体の強度は岩石の一軸圧縮強度 20MN/m^2 を目標とし、材料モルタルの配合を決定した。

図5,6に供試体の形状寸法と実験パラメータを示す。遠心力模型実験では、次項の表3に示す切欠き面交角と固定端長の異なる5個の供試体を作成した。ここで切欠き面交角とは切欠き面が2面になる場合の交角であり、固定端長とは遠心力方向の実験供試体を支える鋼板の高さを示す。また、今回の実験ではパラメータにしていないが、切欠き深さとは想定した危険岩体背面亀裂の岩体天端からの深さを示す。

No.1～3 は、固定端長を一定とし切欠き面交角を 0° 、 30° 、 45° と変えたケースである。切欠き面交角が小さくなると崩壊力となる岩体体積が増加し、抵抗力が働く亀裂進展面積が減少するため、安全率は低下すると推測される。No.3～5 は、切欠き面交角を一定とし固定端長を 2m、3m、4m と変えたケースである。固定端長が小さいほどオーバーハング深さが大きくなり、安全率は低下すると推測される。実験ケースはこれらの傾向を確認するために設定した。

実験では、遠心載荷の過程で供試体に生じるひずみをひずみゲージで計測するとともに、CCD カメラにより亀裂の進展性状を確認した。遠心力の載荷方法は、想定破壊加速度の 70%までは 10G ステップ、それ以後は 5G ステップを基本として段階的に増加させ、クリープの影響を考慮して1ステップ5分間以上維持した。また、ひずみの発生量が急増した場合には、遠心力を一定に保ってひずみがクリープ的に増加しないことを確認したのち、次の加速度段階に移行した。実験後、供試体からコア試料を採取して一軸圧縮試験、圧裂引張試験および一部供試体で三軸圧縮試験を実施して力学特性を求めた。

3.2.4 実験結果と評価法の適用例

実験結果を表3に示す。各実験供試体のモルタル強度に若干のばらつきが見られるため、供試体の実測引張強度 σ_t と目標引張強度 σ_s ($=qu/10=2.0\text{N/mm}^2$) の比を α ($=\sigma_t/\sigma_s$) として、式(5)を用いて以下のように補正した。なお、引張強度は一軸圧縮強度の 1/10 と仮定した。

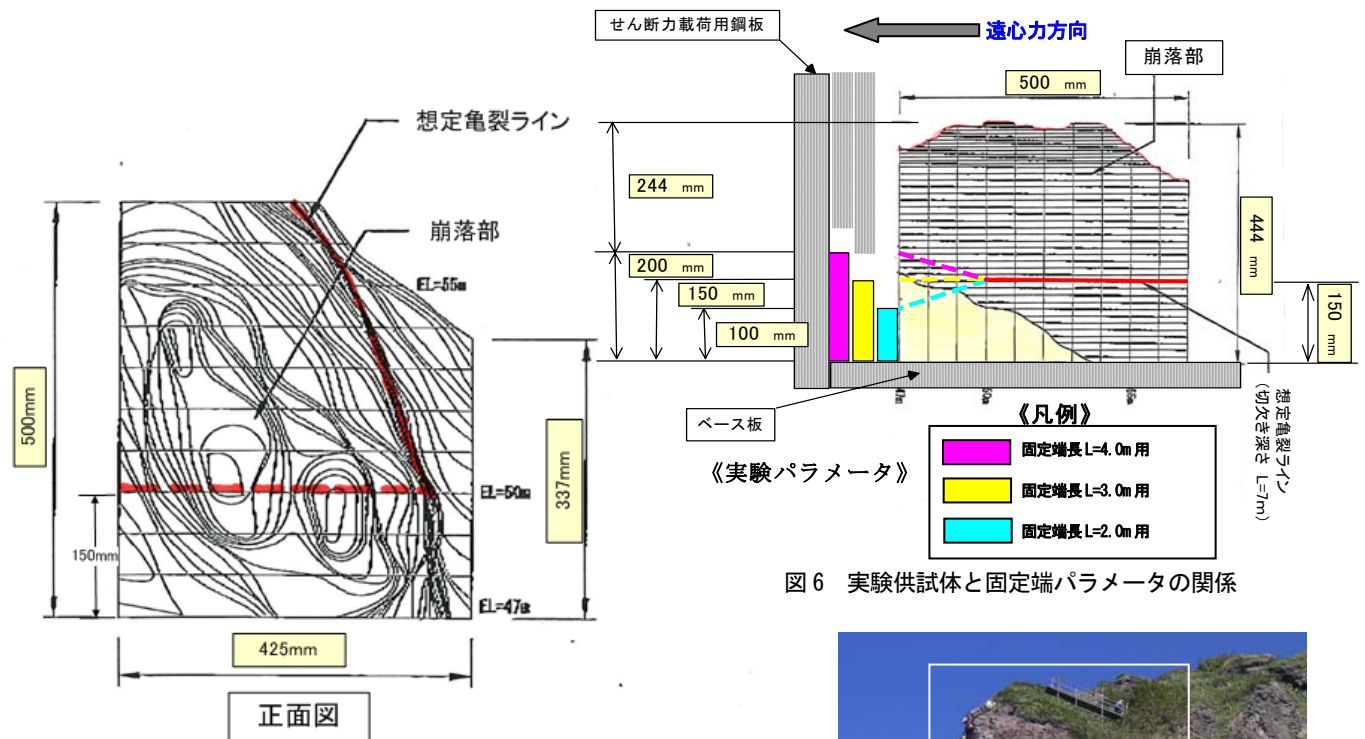


図6 実験供試体と固定端パラメータの関係

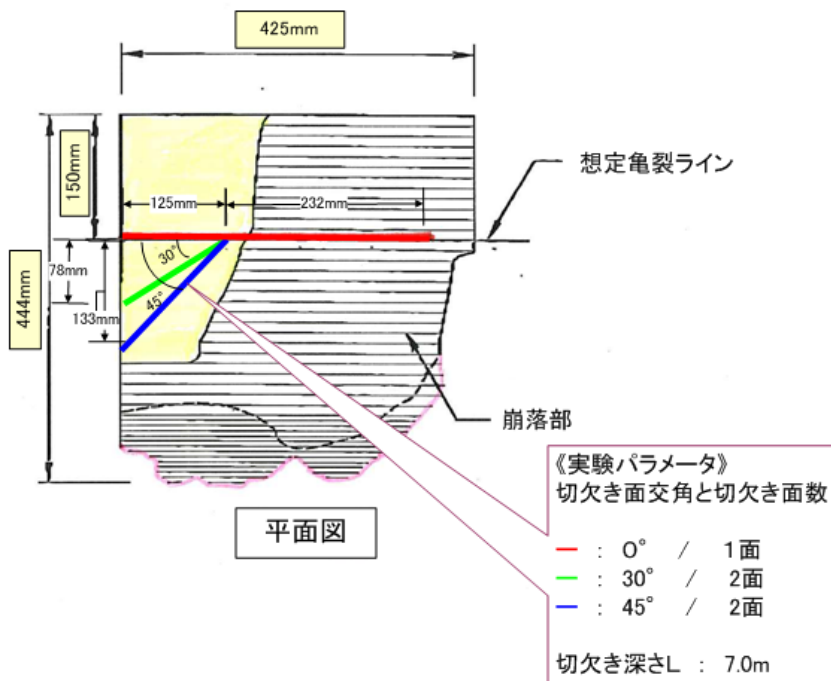


図5 遠心载荷供試体の形状および寸法



写真3 島牧村実斜面



写真4 切削3次元模型

$$\begin{aligned}
 F_{mt} &= 1.0 \\
 &= \frac{\sigma_t (B/n - L/n)^2}{3(n_f \gamma) B/n (h/n)^2} \\
 &= \frac{\alpha \sigma_s (B/n - L/n)^2}{3(n_f \gamma) B/n (h/n)^2} = \frac{\alpha \cdot n}{n_f} F_{ps} \quad (7)
 \end{aligned}$$

ここに、 F_{mt} ：模型斜面が引張強度 σ_t の場合の安全率、 F_{ps} ：実斜面が引張強度 σ_s の場合の安全率

上式より実斜面の安全率 F_{ps} が以下のように求められる。

$$F_{ps} = \frac{n_f}{\alpha \cdot n} \quad (8)$$

ここに、 α ：供試体の実測引張強度 σ_t と目標引張強度 σ_s の比 ($= \sigma_t / \sigma_s$ 、各ケースの引張強度には、一軸圧縮強度の 1/10 を採用)、 n ：模型縮尺、 n_f ：破壊加速度

実験結果は、上式により岩盤斜面安全率を求めて各種パラメータとの関係を検討した。図 7 に固定端長 3.0m の場合の切欠き面交角と安全率の関係を示す。安全率は、切欠き面交角が小さいほど減少し、切欠き面

交角 4° 以下で安全率が 1.0 以下になる結果となり、前項で推測された傾向と一致する。

図8に切欠き面交角30° における固定端長と安全率の関係を示す。安全率は固定端長が小さくなるほど減少し、固定端長2.3m以下で安全率が1.0以下となる結果になり、前述の実験パラメータの結果と同様に推測された傾向と一致する。さらにこの結果では、固定端が切欠き面より前面にある実験No.5で安全率が急激に増加することがわかる。

これらは、実験条件から推測された各種パラメータと安全率の関係が実験結果と一致し、さらに実験結果からこれらの関係を定量的に求められることを示しており、本評価法の有効性が示唆されたものとする。

表 3 実験供試体条件と実験結果

実験番号	固定端長 L (m)	切欠き深さ L (m)	切欠き面数	切欠き面交角 X (°)	破壊加速度 実測値 n f (G)	実験後抜き取り試料								圧縮・引 張強度比	安全率 Fps
						湿潤密度 ρ t (t/m ³)	一軸強度 q u (MN/m ²)	破壊ひずみ ε f (%)	静弾性係数 E _{sos} (MN/m ²)	ポアソン比 ν	引張強度 σ t (MN/m ²)	強度定数			
												C _{uu} (MN/m ²)	φ _{uu} (度)		
No. 1	3.0	7.0	1	0°	30	2.27	31.2	0.27	1.70×10 ⁴	0.216	2.82	—	—	11.06	0.96
No. 2	3.0	7.0	2	30°	30	2.20	23.3	0.26	1.39×10 ⁴	0.210	2.23	6.38	33.5	10.45	1.29
No. 3	3.0	7.0	2	45°	44	2.23	27.4	0.31	1.41×10 ⁴	0.213	2.61	—	—	10.49	1.61
No. 4	2.0	7.0	2	30°	26	2.21	28.3	0.29	1.46×10 ⁴	0.216	2.80	—	—	10.11	0.92
No.5	4.0	7.0	2	30°	62	2.19	24.5	0.31	1.28×10 ⁴	0.219	2.35	—	—	10.43	2.53

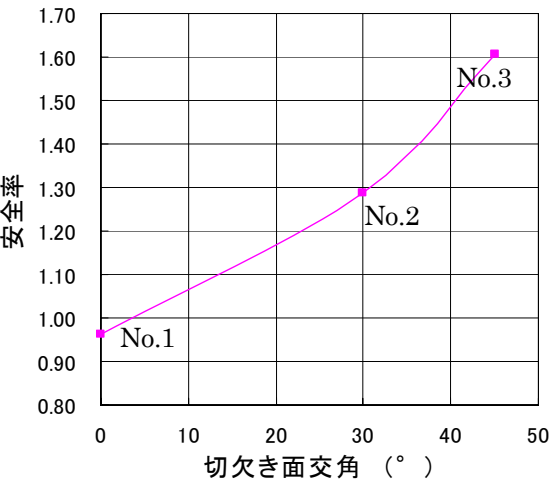


図 7 切欠き面交角と安全率の関係

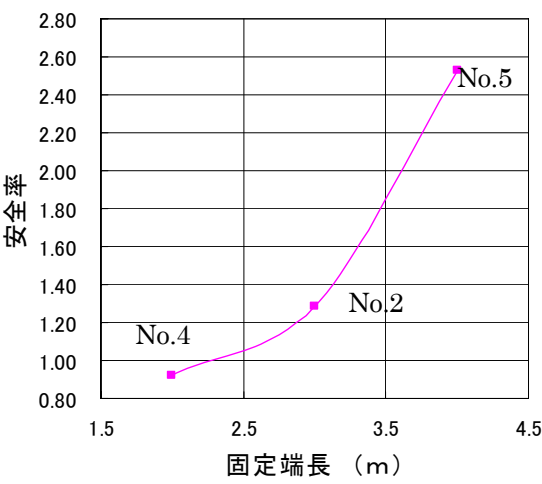


図 8 固定端長と安全率の関係

3.3 広域調査・監視技術の適用性検討

3.3.1 現状の道路防災点検の課題の整理

直轄国道被災履歴データベースをもとに、平成8年～16年の北海道での道路斜面災害発生状況を整理した（表4）。発生件数は208件のうち表層崩壊が147件で全体の約7割を占め、以下、落石、路面異常、地すべり、土石流、岩盤崩壊の順となる。また、全体の3割にあたる72件が道路防災点検対象外の場所で発生している。

表4 北海道における道路斜面災害発生状況

防災点検	土石流	地すべり	岩盤崩壊	落石	路面異常	表層崩壊	合計
対象	3	8	3	23	11	88	136
対象外	3	3	1	1	5	59	72
合計	6	11	4	24	16	147	208

以上のことから、防災点検における主要な課題として下記のように整理した。

- 課題① 想定した斜面災害形態と異なる災害の発生
- 課題② 災害想定地点以外での災害の発生
- 課題③ 災害危険度が低いとした地点での災害

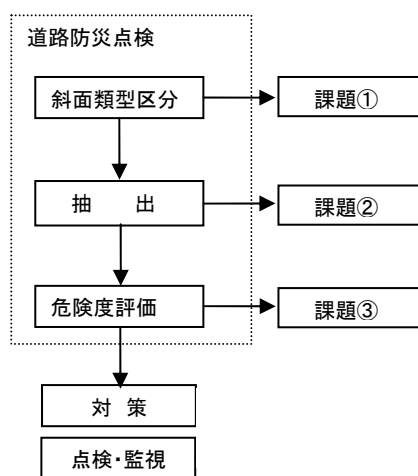


図9 道路防災点検における課題

前回の道路防災点検も当時の最新の知見・技術を反映させているが、その後10年以上が経過しており地震や風化・劣化など斜面の状態は変化している。また、デジタル地形図やラジヘリによる斜面撮影等の技術、付加体岩盤についての地質工学的知見など新たな技術・知見が蓄積されている。これらを踏まえた点検を実施することで、より一層の精度向上を図ることが必要となっている。

3.3.2 新しい広域調査・監視技術手法の検討

広域調査・監視技術手法の検討の一環として、道路防災点検箇所のスクリーニング方法について検討した。検討結果を以下に示す。

管理対象道路の中から安定度調査箇所を選定するために、第1絞込み、第2絞込みを実施する（図10）。

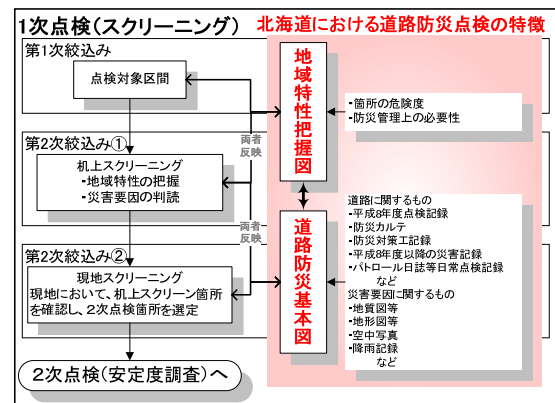


図10 一次点検（スクリーニング）の概要

第1絞込みは、安定度調査の候補箇所を含む区間（以下「点検対象区間」という）を選定するもので、管理対象道路の中から災害発生履歴等を踏まえた箇所の危険度、防災管理上の必要性等に基づいて実施する。第2絞込みは、選定した点検対象区間から安定度調査箇所を選定するもので、机上調査等による「地域特性の把握及び災害要因の判読」と、それを現地で確認する「現地確認」からなる。これらの絞込みにあたっては、地域特性把握図や道路防災基本図を作成し、情報の整理・把握に十分に活用することとする。

地域特性把握図の作成例を図11に示す。北海道においては各開発建設部毎に同図を作成し、各地域の岩盤・斜面災害について俯瞰し管理することとする。道路防災基本図は図12に示す。同図は地形図・空中写真等の図面類と、その他の文字情報をまとめた防災関連情報により構成される。

3.3.3 現場への反映

道路防災点検箇所のスクリーニング方法を新たに構築し、北海道開発局に提案した。なお北海道開発局では提案に基づき、新たな道路防災点検を実施された。

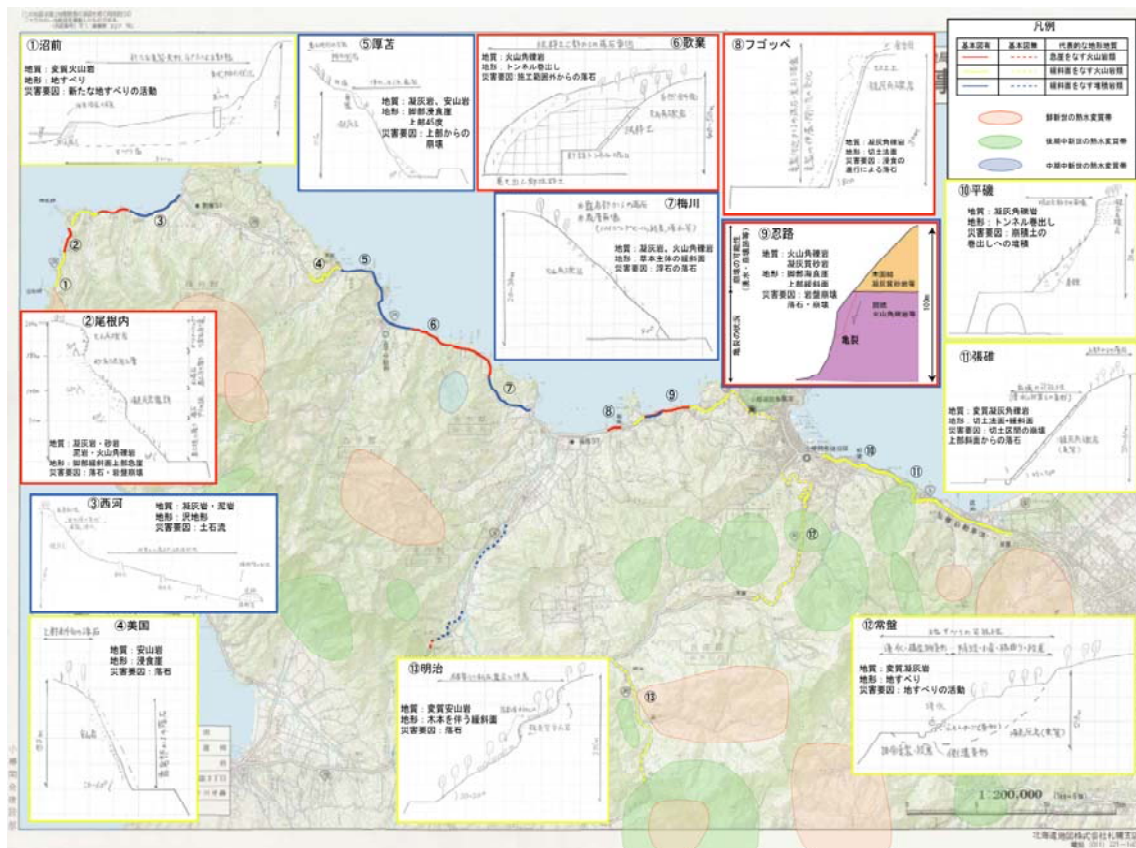


図 11 地域特性把握図の作成例

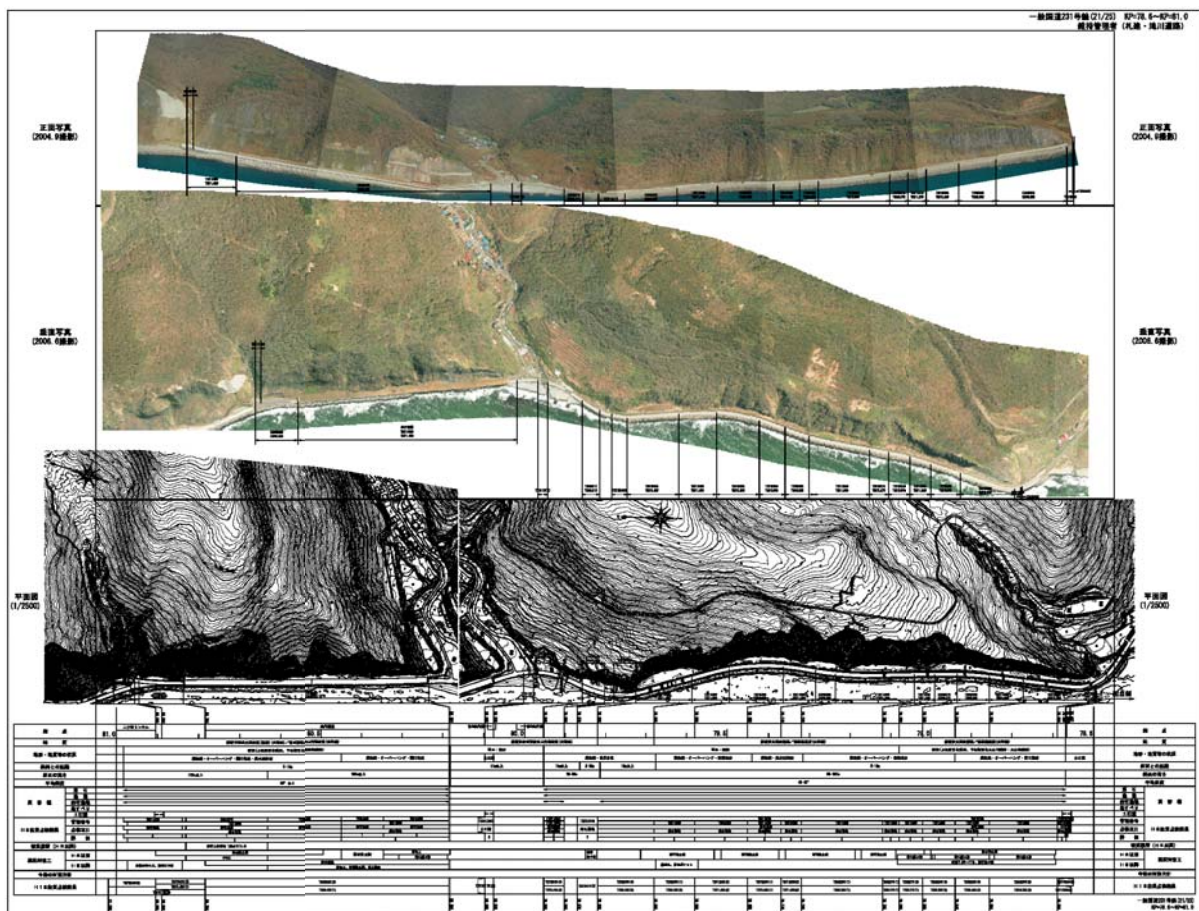


図 12 道路防災基本図の作成例

3. 4 点検・調査・監視手法の素案作成

3.4.1 デジタル写真を活用した斜面点検高度化の検討

点検等で、新しい落石や崩積土等の変状が確認されると、崩壊箇所の確認や大規模崩壊等の前兆の可能性などの検討が行われる。このとき重要となるのが、崩壊前の斜面状況が記録されたスケッチや写真である。しかし、予期せぬ箇所で崩壊が発生し、以前の情報が少ない場合、おおよその崩壊箇所は推察できるものの、崩壊前の岩体の正確な形状(及び亀裂分布状況等)の把握は困難となる。仮に崩壊前に写真が撮影されていたとしても、アングル及び撮影条件がある程度対比可能でなければ、正確で十分な変化情報を得ることは難しい。また、北海道などの積雪寒冷地においては、冬期に発生した崩壊が積雪に覆われるなどし、雪融け後の点検・調査までその崩壊の発生自体を確認できない場合があり、崩壊発生から調査までの時間の経過により、正確な崩壊発生時期だけではなく崩壊諸元の推定すら困難となることも考えられる。

今回検討する写真計測技術を用いた道路斜面点検手法は、点検調査時に撮影する写真資料を有効活用し、斜面の経年変化を考慮に入れた安定度評価に向けた基礎資料を得るだけではなく、予期せぬ崩壊が発生した後からでも、正確な崩壊状況を遡って推定できること、また、画像変化を機械的に抽出することで、人の目による見落としをなくし、的確かつ客観的に変状の有無を捉えられることの2点が大きな特徴といえる。

3.4.2 背景差分法による変化箇所の抽出方法検討

今回、変化箇所の抽出手法として検討する「背景差分法」とは、ITV 等の固定カメラで撮影された動画から、「製品の品質検査」「侵入者検知」「移動物体



図 13 背景差分法による変化箇所抽出の概念図

検知」「交通量解析」等を行う技術であり、背景となる画像と観測した画像との輝度の差分を画素単位で計測することにより、変化箇所を抽出する手法である(図13)。本研究は、日常的に実施されている斜面点検の高度化を目的としているため、以下の点に留意した。

- ① 高価な資機材を必要としない手法であること
- ② 高度な技術や経験を必要としない手法であること
- ③ 特許等で特定事業者には縛られない手法であること
- ④ 現場作業時間が著しく増加しない手法であること

アンケート調査結果をみると、カルテ点検では大半がデジタルカメラを用いて斜面を撮影していることから、写真点検に際しては以下の方向性で検討を進めることとした。

- ① 2名以内の人員で実施可能であること
- ② デジタルカメラの利用を前提とすること
- ③ 撮影箇所のマーキングを前提とすること
- ④ 1台のカメラで実施可能であること
- ⑤ 点検毎に同一のカメラの使用を推奨すること
- ⑥ コンパクト・一眼レフの両タイプのカメラに適用可能であること
- ⑦ 撮影時の諸条件について明記すること

本来、背景差分法がITV等の固定されたカメラで撮影された動画変化を検知する手法であるのに対し、携帯型のデジタルカメラによる写真画像を素材とする斜面点検に適用する場合、以下の課題が想定される。

- ① 気象条件による差異(明るさ・影)

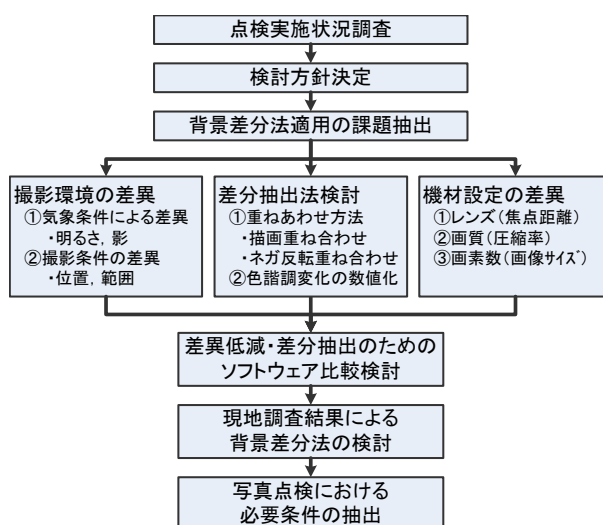


図 14-3 背景差分法検討フロー

②撮影画像の差異(撮影位置・撮影範囲)

③デジタルカメラの機種・設定による差異(レンズ[焦点距離]・画質[圧縮率]・画素数[画像サイズ])

入手容易な一般的な画像処理ソフトウェアで、撮影画像の差異の低減と背景差分法のための画像処理が可能かどうかを図14に示すフローに従って検討した。

ソフトウェアの検討では、天候による色調・明暗・影の有無等による画像間の差異低減のための「画像色調整」(図15)を行った上、撮影位置やカメラの差による画像間の差異低減のために「画像正規化」(図16)処理後、変化箇所の「差分抽出」(図17)を実施した。

3.4.3 斜面画像による背景差分抽出例

時期(日付・時間)及び撮影範囲の異なる2枚の点検写真を用いて、背景差分が可能かどうかを検討した。

撮影時期が1日しか異ならず斜面状況がほぼ同じと判断される2枚の写真において、撮影位置(写真構図)と撮影時間(影の入り方)の違いをいかに補正できるかを検討した結果を図18に示す。両写真とも正規化を行い、差分の抽出は演算機能(差の絶対値)を使用した。図では輝度の差が大きい場合に白く、差が小さい場合に黒くなるように表現した。

色調整を行わない場合では、全体の明るさが異なるため、全域が差分として白色に抽出されている。これに対し、近似した色に調整した結果、相当に改善され黒っぽく表示され、変化があまりないように示された。以上のことから、多少写真の構図がブレたり、明るさ・影等が異なる場合においても、正規化や色調整により写真の同一性は改善可能であることが確認できた。

また、実際に差分として抽出された変状例を基に変位量について考察する。被写体までの距離やカメラにより異なるため、画素数を基準に検証する。

距離: 62m
カメラ: D80(f=35mm)
画素数: 1,936×1,296(23.6×15.8mm 原色 CCD)
その他: 2006/11/14 と 2006/12/13 の比較
1画素の分解能=23.6×62÷35÷1936=0.0216(m)

$$A = (15 \times 0.0216) \times (30 \times 0.0216) = 0.2100\text{m}^2$$

$$B = (10 \times 0.0216) \times (10 \times 0.0216) = 0.0467\text{m}^2$$

主に差分が抽出されているのは、地面の雪、湧水箇所、植生変化、電線の弛みなどである。抽出可能量としては1画素でも抽出可能だが、実際の撮影条件により、正規化の誤差と色の違いも差分として抽出される

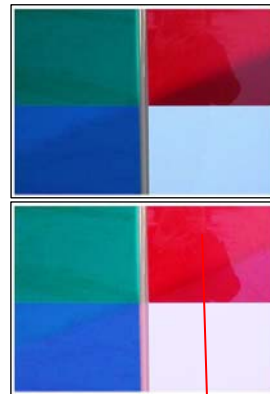


図15 色調補正

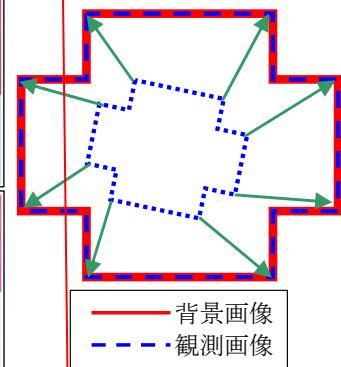


図16 画像正規化

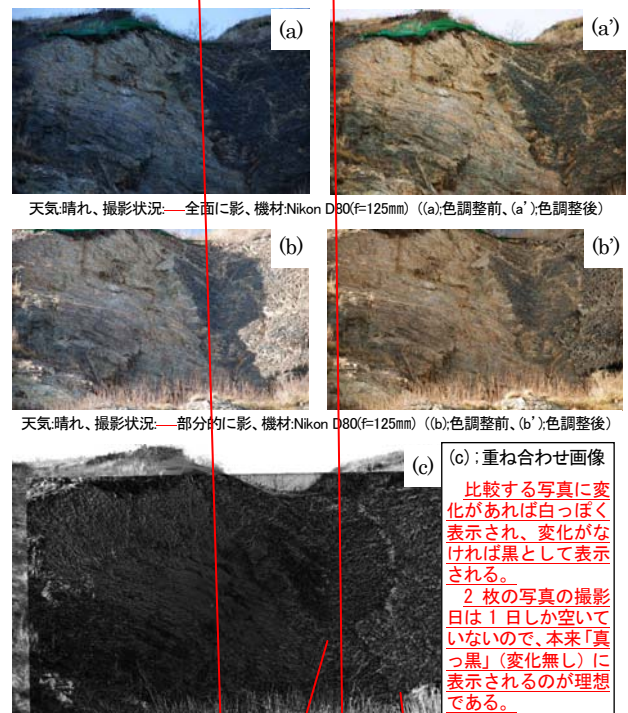


図17 背景差分法における色調整と差分抽出

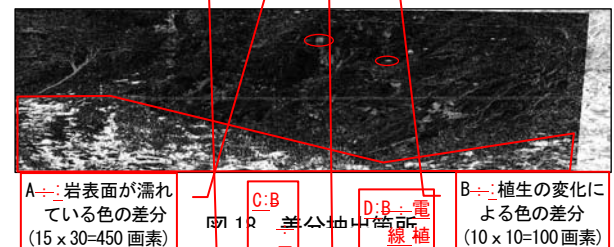


図18 差分抽出箇所

ため、変位による差分かどうか1画素で判読するのは困難である。実作業上、変異の判読には周囲の状況を含め10×10画素程度必要であると思われる。

3.4.4 写真点検における現場での必要条件

以上の検討をもとに、背景差分法を行う上で品質や作業効率へ影響を及ぼす撮影条件や差分抽出条件を表5にとりまとめた。斜面点検に背景差分法を適用するに当たり、特に重要な条件を以下に示す。

表5 条件と品質・作業効率への影響度及び重要度

分類	項目	条件	影響		重要度
			品質向上	作業効率	
撮影条件	画質	高画質であること	○	○	○
	画素数	画素数が大きいこと	◎	○	○
	撮影位置	同位置からの撮影であること (現地マーキングの設置)	◎	◎	◎
	撮影範囲	撮影中心を合わせること	◎	◎	◎
	明るさ・影	影の影響がないこと	◎	◎	◎
差分抽出	色調整	背景画像と観測画像の明るさは近似していること	◎	○	◎
	正規化	背景画像と観測画像の位置は一致していること	◎	○	◎
	判読範囲	差分判読範囲は誤差の少ない写真中央部で行うこと	○	△	○

・撮影条件に関するもの

- ① 撮影位置、範囲は背景画像撮影時と同じ場所で撮影中心を合わせる
- ② 被写体に影がかからない様な状況を選択する

・撮影機材に関するもの

- ③ デジタル一眼レフカメラだけでなくコンパクトデジタルカメラでも撮影可能なこと
- ④ 画素数が十分に多ければ、機材や撮影設定の差異による品質への影響は少ない

・差分抽出に関するもの

- ⑤ 背景画像と観測画像の明るさは近似させる
- ⑥ 背景画像と観測画像の位置は一致させる

3.4.5 写真点検のまとめ及び今後の課題

今回は、人間の経験や「カン」に頼らない、デジタル写真を用いた道路斜面を点検する手法について、デジタルカメラの種類や撮影設定方法による適合性検証、補正に用いるソフトウェアの適合性検証を行い、「背景

差分法を用いた斜面点検写真における変状箇所の抽出」の可能性を確認した。今後は、「実斜面画像による変状抽出および変状模擬試験検証」、「推奨撮影条件の標準化」等の検討を行い、最終的には道路斜面点検の実務において使用可能な実施要領として取りまとめていく予定である。

4. まとめ

本研究は、精度の高い斜面の調査・評価・点検等の防災システムを構築することを目的に、地形・地質や岩盤風化などの観点からの斜面の研究を実施するものである。平成18～19年度は、資料・事例の整理・分析、岩盤斜面の安全性評価法の提案、広域調査・監視技術の適用性検討および点検・調査・監視手法の素案作成の各項目について研究を実施した。得られた結果を以下に示す。

4.1 資料・事例の整理・分析

北海道における岩盤・斜面崩壊の事例について収集を行い、地球科学的観点から整理した。

過去40年間の岩盤・斜面崩壊を整理・検討した結果、崩壊土量1,000m³以上の岩盤・斜面崩壊事例は全部で33例あり、えりも東海岸及び日本海沿岸での崩壊が多いことが確認された。崩壊規模については、日本海沿岸域で10,000m³を越える事例が多く、えりも地域では10,000m³以下の事例がほとんどであることが確認された。地質との関係では、火砕岩とホルンフェルス～砂岩・泥岩での崩壊例が多いことが確認された。誘因については、11例が地震を誘因とする可能性があるなど、地震の関与が大きいことが示唆された。

4大災害（豊浜トンネル、第2白糸トンネル、北見北陽、えりも）について整理した結果、各災害の崩壊要因は様々だが、地下水の作用が大きな要因を占めていると推定された。また、崩落監視や危険の回避という観点から重要となる前兆現象について、整理・検討を進めていく必要があると考えられる。

4.2 岩盤斜面の安全性評価法の提案

遠心力模型実験を用いた岩盤斜面の安全率評価法（遠心評価法）を検討した。この評価法の適用性を検証するため、北海道の実岩盤斜面の遠心力模型実験を行い、各種パラメータによる岩盤斜面安全率の変化傾向を検討した。その結果、実験条件から推測された各種パラメータと安全率の関係が実験結果と一致し、さらに実験結果からこれらの関係を定量的に求められる

ことを示し、本評価法の有効性を確認した。

本評価法は想定した岩体の範囲や背面切欠き位置に対しての斜面安全率を求めるものであり、この安全率が現時点での実斜面安全率と必ず一致しているとは言えない。換言すると、遠心力模型実験で求められた斜面安全率は仮定した条件での値であり、これに対して実斜面の現状、あるいは今後の経年変化を想定して実斜面に適用することになる。このことから、今後は実斜面の背面亀裂や強度などを把握する精度の高い調査手法が求められる。

4. 3 広域調査・監視技術の適用性検討

検討に先立ち、過去の道路防災点検における課題を整理した。

- 課題① 防災点検で想定した斜面災害形態と異なる災害の発生
- 課題② 防災点検で災害を想定した地点以外（点検対象外地域）における災害の発生
- 課題③ 防災点検で災害危険度が低いとした地点（対策不要地域など）での災害

このような課題を改善・解決するためには前回の道路防災点検以降の斜面状態の変化や、新たに蓄積されつつある技術・知見を踏まえた点検を実施する必要がある。

以上を踏まえ、新しい道路防災点検箇所のスクリーニング方法を構築した。

管理対象道路の中から安定度調査箇所を選定するための絞込みは第1および第2絞込みの2段階で実施する。第1絞込みでは、管理対象道路の防災レベルを概括的に把握して「点検対象区間」を選定する。第2絞込みでは、選定された点検対象区間について災害要因を抽出し、「安定度調査箇所」を選定する。このとき「地域特性把握図」や「道路防災基本図」を作成しつつ情報の整理・把握に十分に利活用する。

構築したスクリーニング方法は北海道開発局に提案済みであり、北海道開発局ではこれに基づき、新たな道路防災点検を実施中である。

4. 4 点検・調査・監視手法の素案作成

検討の一環として、近年進展が著しい写真分野におけるデジタル化技術を取りこんだ道路斜面の点検調査システムについて検討した。具体的には、同一斜面を異なる時期にデジタル写真で記録し、その差分から斜面の変状を抽出する方法（背景差分法）について、その現地適用性を整理した。特に重要な条件は以下のと

おりである。

- ① 撮影位置、範囲は背景画像撮影時と同じ場所で撮影中心を合わせる
- ② 被写体に影がかからない様な状況を選択する
- ③ デジタル一眼レフカメラだけでなくコンパクトデジタルカメラでも撮影可能なこと
- ④ 画素数が十分に多ければ、機材や撮影設定の差異による品質への影響は少ない
- ⑤ 背景画像と観測画像の明るさは近似させる
- ⑥ 背景画像と観測画像の位置は一致させる

4. 5 今後に向けて

道路斜面防災は、斜面の調査から始まり、評価、対策へと進む。具体的には、危険斜面の抽出から始まり、点検や斜面変状の観測・監視へと進み、斜面の直接的な対策、あるいはトンネルなどによる迂回などの対策を実施する。スクリーニングでは確実性を向上させることにより「見落とし」をなくすと共に、その逆の「オオカミ少年」となることを回避することが望まれる。スクリーニングの次のステップである安定度調査では、斜面を精度良く評価し適切な対策への橋渡しとなることが期待される。以上のためには、斜面の調査・評価・対策の個々の技術において最新の知見・技術を取り込むと共に、三者をバランス良く実施していくことが重要である。そして、このためには、微地形と地質との関係、岩相や地質構造、岩石や鉱物特性、岩石の風化・劣化など地質学的アプローチと、岩石・岩盤の工学特性の計測・評価など工学的アプローチが重要である。当研究チームは両者を連携させ、岩盤斜面の崩壊機構について解明を進めることを通じ、道路防災に寄与していきたいと考える。

参考文献

- 1) 豊浜トンネル崩落事故調査委員会：豊浜トンネル崩落事故調査報告書、1-1～8-4、1996.
- 2) 第2白糸トンネル崩落事故調査委員会：第2白糸トンネル崩落事故調査報告書、1-1～7-7、1998.
- 3) 一般国道 333 号北陽土砂崩落調査委員会：一般国道 333 号北陽土砂崩落調査報告書、1-1～8-3、2002.
- 4) 一般国道 336 号えりも町斜面崩壊調査委員会：一般国道 336 号えりも町斜面崩壊調査報告書（2004）.
- 5) 北海道日本海沿岸における大規模岩盤崩落検討委員会：北海道日本海沿岸における大規模岩盤崩落検討委員会報告書（2000）.
- 6) 北海道での岩盤計測に関する調査技術検討委員会：北海

道での岩盤計測に関する調査技術検討委員会報告書
(2006).

- 7) 日下部祐基・三浦均也・石川博之・伊東佳彦・國松博一
(2005)：切欠きを有する三次元岩盤の遠心力場における
崩落実験，地盤工学会，第 50 回地盤工学会シンポジウム
論文集，pp. 355-362.

RESEARCH FOR UPGRADING OF ESTIMATION AND EXAMINATION OF ROCK AND SLOPE FAILURE

Abstract : Since the collapse of Toyohama Tunnel in 1996, there have been several other large-scale slope failure in Hokkaido, such as those in Daini-Shiraito Tunnel in 1997, in Kitami-Hokuyo in 2001 and in Erimo in 2004. For keeping road safety from slope failure, construction of more precise system for research, estimation, check and countermeasure of slope along road are needed.

This study aims to keep road safety and upgrade of estimation and examination of rock and slope failure. Then, analysis of recent records of slope failure, proposal of estimation plan for rock slope failure, study for application of survey and watch technique of wide area, plan making of new system of research, watch and check of slope failure and check of its applicability for actual slope, summarization by putting together the above mentioned study, are needed to carry out. From 2006 to 2007, records in these 40 years of slope failure in Hokkaido were analyzed and reports for four big slope failure was summarized from geological, geographical and technological points of view as a part of analysis of recent records of slope failure. Safety factor assessment method for rock slopes using centrifuge model test was studied as a part of proposal of estimation plan for rock slope failure. A new screening method for slope failure along national road was proposed as a part of study for application of survey and watch technique of wide area. Slope check method with digital camera was studied as a part of plan making of new system of research, watch and check of slope failure.

Key words : large-scale rock slope failure, road disaster prevention inspection