

## 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

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：防災地質チーム、寒地機械技術チーム

研究担当者：伊東佳彦、阿南修司、馬場道隆、日下部祐基、伊藤憲章、日外勝仁、宍戸政仁、坂本多朗、高橋幸継、柳沢雄二、国島英樹、佐々木憲弘、山崎貴志、堀田歩、岸寛人、井上豊基

### 【要旨】

北海道では、平成 8 年の豊浜トンネル崩落を契機に道路斜面の調査・対策が鋭意実施されてきた。しかし、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。本研究では、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・斜面の研究を行った。本報告では、これまでの研究成果を総合的に取りまとめたものである。

キーワード：大規模岩盤崩壊、道路防災点検、遠心力模型実験、微小電位観測、ラジコンヘリコプター

### 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。ここでは、重点プロジェクトの最終年次としてこれまでの研究で得られた成果概要について、以下に報告する。

### 2. 年次計画と研究方法

表-1 に本研究の年次計画で挙げた項目とそれに対応して実施した研究内容を示す。ここでは項目毎に研究方法の概要を示す。

#### 2.1 資料・事例の整理・検討

北海道における岩盤・斜面崩壊の事例について収集を

表-1 年次調査項目と実施した内容

項目	実施内容	成果など
1 資料・事例の整理・分析	① 過去40年間の岩盤・斜面崩壊の整理・検討 ② 4大災害の総括	① 岩盤・斜面崩壊と地質等との関係を整理 ② 原因、前兆現象等を整理
2 岩盤斜面の安全性評価法の提案	① 遠心模型斜面評価法の検討 ② 遠心模型実験結果を整理検討	① 背面亀裂に着目した遠心模型評価法による斜面安全性評価技術を構築・提案 ② 2次元及び3次元有限要素解析による崩壊斜面安定度評価法を構築して提案
3 広域調査・監視技術の適用性検討	① 道路防災点検におけるスクリーニング方法の検討 ② 広域調査調査を整理	① 新しいスクリーニング方法を構築し、開発局に提案 ② 「復旧凍結地における斜面点検ガイドライン(仮称)」として調査点検の追加補正項目の取りまとめ
4 点検・調査・監視手法の業務作成	① デジタル写真を用いた斜面点検高度化の検討 ② マニュアルの作成検討	① デジタル写真による点検手法の構築、について整理 ② 「写真計測技術を活用した斜面点検マニュアル(案)」を作成して提案
5 点検・調査・監視手法の現地斜面への適用性検証	① 崖状斜面において微小電位観測を実施	① 岩盤斜面監視手法として「斜面監視に用いる微小電位観測マニュアル(案)」を作成して提案
6 地域別の斜面調査・評価技術の開発	① 貴金属道路地区の急崖斜面調査を実施 ② ルート変更に伴う旧道調査を実施	① 貴金属道路急崖斜面の道路防災に関わる地質調査法「崩壊警報」を作成して提案 ② 北海道日本海側に位置する水沖破砕帯地域の点検・調査時の着目点を抽出整理
7 岩盤斜面災害時の緊急評価技術の開発	① 災害時の緊急評価手法として3次元写真計測について検討	① トータルステーションを用いて写真歪み補正を簡易的に行う手法を開発
8 道路斜面の調査・評価・点検手法のとりまとめ	① 各研究成果を総合的に検討	① 成果の分類整理

行い、地球科学的観点から整理した。整理の方法は以下の通りである。

#### 2.1.1 過去 40 年間の岩盤・斜面崩壊の整理・検討

記録の残っている比較的規模の大きな岩盤・斜面崩壊(崩壊土量 1,000m<sup>3</sup>以上)について、既存の文献・資料等に基づき収集・整理した。また、集めた崩壊事例について、分布、規模、地形・地質との関係、地震、降水あるいは融雪等の発生要因等について検討を行った。

#### 2.1.2 4大災害の総括

豊浜トンネル崩落以降の岩盤崩壊で、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：以下では4大災害と呼ぶ)については、事故調査委員会や技術検討委員会等に

よる詳細な調査・検討が行われている<sup>1)2)3)4)5)6)</sup>。これらの検討事例について整理・総括した。

## 2.2 岩盤斜面の安全性評価法の提案

### 2.2.1 遠心模型斜面評価法の検討

ここでは、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<sup>7)</sup>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載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当研究所所有の大型遠心力載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載荷装置は、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（図-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) 大型遠心力載荷装置による実験と考察

### 2.2.2 2次元および3次元極限平衡解析による岩盤斜面評価法の検討

遠心評価法による過年度の成果を元に、岩盤斜面安定性を解析評価する方法として、2次元極限平衡解析による簡易評価法および3次元極限平衡解析によるプログラムソフトを開発した。3次元解析ソフトは、想定亀裂面法と最小亀裂角法の2種類である。

## 2.3 広域調査・監視技術の適用性検討

### 2.3.1 道路防災点検におけるスクリーニング方法の検討

豊浜トンネル崩落を契機として平成 8～9 年に実施された道路防災点検（第 9 回）からは、現状 10 年以上経過している。その後の岩盤・斜面調査法は、技術的進歩や地球科学的知見の蓄積がなされているが、道路防災点検への反映は必ずしも十分とは言えない。

本研究では、新しい道路防災点検箇所のスクリーニング方法の提案にあたって、現状の道路防災点検の概要を整理し課題を抽出した。次に抽出された課題を念頭に置き、新しい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、北海道開発局に提案を行った。



図-1 遠心力載荷装置

## 2.4 点検・調査・監視手法の素案作成

### 2.4.1 デジタル写真を用い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。

今回検討した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。

斜面点検時のデジタル写真に対する背景差分法の適用条件と課題抽出<sup>8)</sup>、変化箇所抽出に必要とされる対象範囲の最低画素数と面積や体積の算出精度と解像度との関係<sup>9)</sup>をもとに、道路斜面の点検・管理の実務運用に向けた以下の課題について検討・整理した。

- ① 撮影位置の差による背景差分法への影響
- ② 撮影条件により抽出される差分
- ③ 斜面の変状により抽出される差分
- ④ 既存の画像を用いた背景差分の実現性

これらの成果を元にマニュアル案を作成するとともに、実斜面への検証として一般国道 229 号積丹地区を対象に作成したマニュアル（案）に基づく背景差分を試行し、適用にあたっての課題の抽出を行った。

## 2.5 点検・調査・監視手法の現地斜面への適用性検討

### 2.5.1 微小電位観測による変状斜面観測

地すべり活動中の斜面で地中電位を計測した。微小電位観測網は、図-2 に示すとおり変状斜面末端部を網羅するようにして地表電極を計 6 箇所設置した。また、同じ

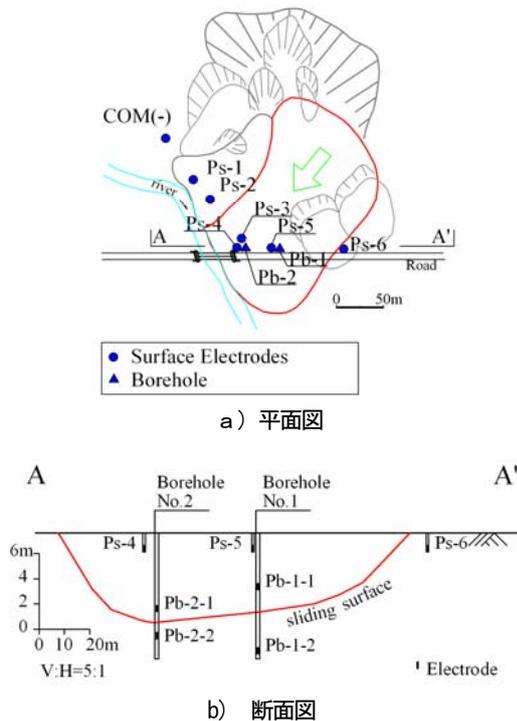


図-2 微小電位観測箇所

く変状斜面末端部にボーリング孔を2箇所設け、地中電極をすべり面以浅の変状土塊中に1箇所ずつ、すべり面以深の不動土塊中に1箇所ずつ設置した。

## 2.6 地域別の斜面調査・評価技術の開発

北海道における斜面災害多発地帯は後述の通り、えりもの黄金道路地域、日本海沿岸の火砕岩地域、および層雲峡等の熔結凝灰岩柱状節理地域の3箇所である。このうち熔結凝灰岩(地域)は、火砕岩の一種であることから日本海沿岸の火砕岩地域に包括できる。以上のことから、黄金道路地域と日本海沿岸火砕岩地域を対象に地域別の斜面調査・評価技術の開発を行うこととした。

### 2.6.1 黄金道路地域の急崖斜面調査法検討

国道336号の広尾町～えりも町間は、海岸沿いに急崖が連続し道路建設に多額の費用を要したことから黄金道路と呼ばれている。同区間では、平成15年9月の十勝沖地震に伴う岩盤崩壊、あるいは平成16年1月の体積42,000m<sup>3</sup>のえりも町斜面崩壊など、岩盤・斜面崩壊が多発している。これらの崩壊は、国民の生命・財産を奪うとともに通行止め等により、国民に不便を強いており、より合理的な斜面評価・対策方法の確立が急務となっている。本調査は、同地域において岩盤斜面の崩壊履歴を整理するとともに、詳細な地表地質踏査により岩相、地質構造、過去の崩壊跡などを調査し、崩壊特性について検討した。

### 2.6.2 日本海沿岸火砕岩地域の斜面点検・調査法検討

本調査は、主として供用を中止した旧道において、岩盤斜面における落石や湧水などの時系列的変化を把握し、地形・地質等の条件と変状との関係について検討して、調査点検における着目点を把握することを目的としている。調査対象として箇所は、火砕岩の一種である水冷破砕岩が主体の北海道日本海沿岸に位置する神岬とキナウシ(積丹地区R229旧道)および太島内地区(R231旧道)の3箇所である。

旧道調査の特長としては、旧道部は進入防止柵等により第三者の立ち入りが規制されているうえ維持管理・補修は通常は行われていないため、発生当時の状況が長く保存される傾向がある。また、ルート変更前に多くの点検や調査が実施されているため、これらの記録から地形、地質、変状の履歴、対策施設の設置時期など多くの情報を得ることが出来るこのなどが挙げられる。

## 2.7 岩盤斜面災害時の緊急評価技術の開発

### 2.7.1 災害時の緊急評価手法とした3次元写真計測の検討

岩盤斜面災害が発生した場合、迅速な災害復旧対策を行うために、崩落量の算出や斜面形状の計測が重要になると考えられる。しかし、斜面崩落により道路が分断されるなど観測方向が限られ、崩落箇所の全体像を把握できない状況になることがある。このような状況では迅速な崩落量の算出は難しく、2次災害の危険があり現場に近づくことができない状況などでは、崩落量の算出はさらに困難となる。

そこで、地上においては計測方向が限られている場合でも、空中の比較的自由的な位置より計測を行うことができるラジコンヘリコプターを計測のプラットフォームとし、3次元写真計測とレーザスキャニングについて検討した。研究では、空中移動体という不安定なプラットフォームからの計測精度が、緊急時の崩落量算出や斜面形状計測に対して十分なものを、地上計測との比較を行うことで検証した。

さらに、特殊な計測機器を用いない計測方法である「3次元写真計測」について、より一般的に利用できる計測方法とすることを目的に、トータルステーションを使用して3次元写真計測に必要な写真歪み補正を簡易的に行う方法を検討した。

表-2 達成目標と研究成果

達成目標	研究成果
1 大規模岩盤斜面崩壊等に関する斜面調査・評価法の提案	①北海道の岩盤・斜面崩壊の地球科学的特性を整理し、斜面調査・評価法提案に向けた基礎資料を作成 ②青函トンネルに着目した斜面評価法である連心模型斜面評価法を提案 ③広域調査法について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 ④2次元及び3次元有限要素解析による簡易斜面安定度評価法を構築して提案
2 北海道における岩盤斜面調査点検マニュアルの作成	①新たな斜面調査点検手法を検討して「写真計測技術を活用した斜面点検マニュアル(案)」を作成して提案 ②岩盤斜面監視手法として「斜面監視に用いる微小電位観測マニュアル(案)」を作成して提案
3 地域別の斜面調査・評価技術の開発	①地域別斜面調査・評価法として「黄金道路急崖斜面の道路防災に関する地質調査法 解説書」を作成して提案 ②旧調査結果をもとに北海道日本海側沿岸に位置する水砕破砕岩地域の点検・調査時の着目点を抽出整理
4 岩盤斜面災害時の緊急評価技術の開発	①災害時の緊急評価手法として3次元写真計測について検討し、計測精度を向上させるための写真歪み補正を簡易的に行う手法を開発

### 3. 達成目標と研究成果

表-2 に本研究の達成目標とそれに対応した研究成果を示した。ここでは達成項目毎に研究成果の概要を示す。

#### 3.1 大規模岩盤斜面崩壊等に関する斜面調査・評価法の提案

##### 3.1.1 北海道の岩盤・斜面崩壊の地球科学的特性の整理

###### 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1,000m<sup>3</sup>以上の岩盤・斜面崩壊の位置を図-3に示す。なお図では規模10,000m<sup>3</sup>以上と1,000~10,000m<sup>3</sup>に分けて表示した。該当する岩盤・斜面崩壊は全部で33件である。文献などで崩壊規模が表示されていないものについては、記載状況から規模が1,000m<sup>3</sup>以上と考えられるものについてリストに加えた。

分布を見ると、えりも東海岸(黄金道路)の狭い範囲で岩盤・斜面崩落発生件数が12例と多く発生しており、この他に雄冬岬から積丹半島を経由し渡島半島にかけての日本海沿岸域で13例と多数発生している。また、北海道中部の層雲峡から天人峡において3件の崩壊例が認められる。

崩壊規模についてみると、抽出した33例のうち12例が10,000m<sup>3</sup>を越える大きな崩壊となっている。また、えりも東海岸地域での崩壊は、一例を除き規模は10,000m<sup>3</sup>

以下であるのに対し日本海沿岸の火砕岩地域では、規模10,000m<sup>3</sup>以上の崩壊がかなりの頻度で発生している。

地形的にみると、33例中22例が海食崖で発生しており、北海道では海食作用による岩盤・斜面の削剥という視点が重要であることが分かる。これは海水準変動と斜面の関わりなどについての地史的な検討が重要であることを意味している。残りの多くは山岳部の峡谷で発生している。

地質別に見ると、太田天狗岳を除く日本海沿岸域の12例に加え、礼文島、室蘭本線清水の例の合計14例が火山角礫岩や熔岩などを中心とする火山砕屑岩類である。また、えりも地域の12例のうち5例が付加体堆積物である

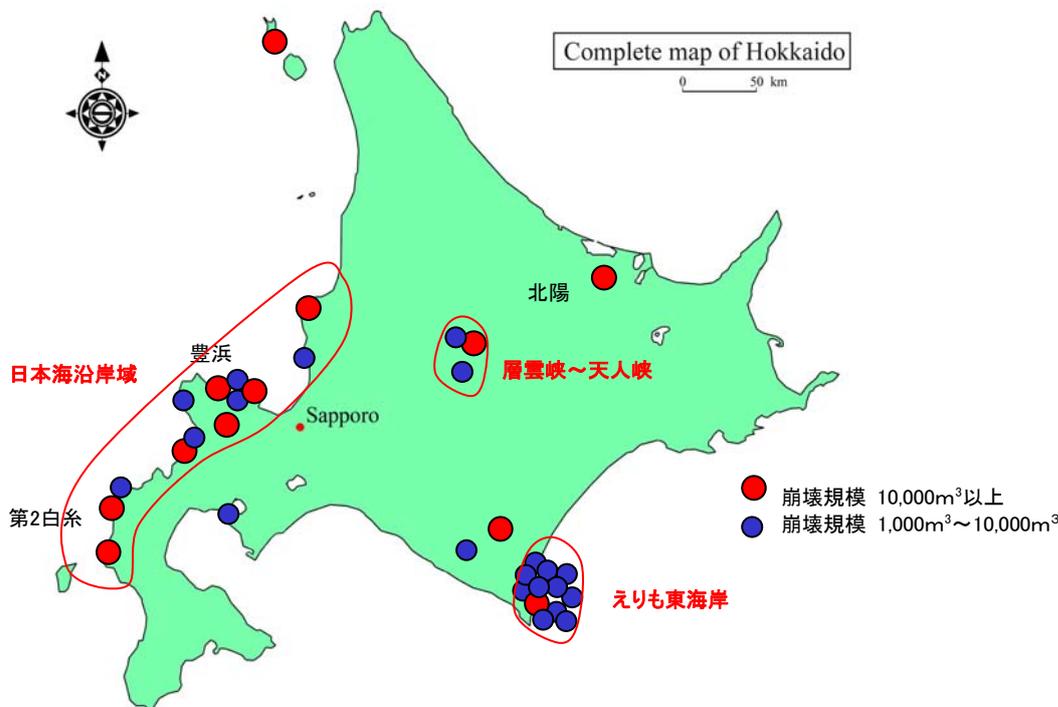


図-3 北海道における過去40年間の岩盤・斜面崩壊の分布(崩壊量1,000m<sup>3</sup>以上)

表-3 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号豊浜トンネル(古平町)	一般国道229号第2白糸トンネル(島牧村)	一般国道333号北陽斜面(北見市)	一般国道336号えりも町斜面(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 <sup>3</sup>	1回目:体積42,000m <sup>3</sup> 2回目:体積14,000m <sup>3</sup>	体積24,000m <sup>3</sup>	体積42,000m <sup>3</sup>
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14m、擁壁部12mの計126mが破壊 2回目:建造物の被災なし	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。
地形	・チャラツナイ岬とセタカミイ岩に挟まれた、河川の流入のない急崖斜面 ・急崖斜面高さは約100~200m	・約150mを有する塔状岩体 ・下部の緩斜面との境界には窪地地形が見られ、その上部斜面は一部オーバーハングを呈する。	・やや細長く張り出した尾根から、沢地形へ移行する斜面 ・崩壊斜面の上半部は自然斜面、下半部の大部分は切土斜面	・海岸線沿いに主尾根とそれに直行する小尾根地形が複数分布しており、崩壊箇所は細尾根地形突端部にあたる。 ・急崖斜面は比高100m以上、傾斜50°
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時間前および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 <sup>3</sup> 程度)
文献	1	2	3	4

砂岩・泥岩、粘板岩が分布しており、残りの7例ではそれらの岩石が熱変成を受けて形成されたホルンフェルスが分布している。層雲峡から天人峡の3例ではいずれも柱状節理の発達した第四紀層雲峡熔結凝灰岩が分布している。火砕岩・熔岩地域の岩盤崩壊については、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文献<sup>9)</sup>により明らかにされている。

岩盤・斜面崩壊発生の誘因としては地震、降雨および融雪が代表的である。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。これら地震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)であり、これらを含めると地震が関与した可能性のある例は11件と全体の1/3になる。

## 2) 4大災害の総括

4大災害の概要を表-3に示す。豊浜トンネル崩落事故は厳冬期の2月に発生した。急崖を構成していた火砕岩が軟質であることに加え、岩盤に内在する亀裂が地下水の影響および自重や氷結圧等によって進展し、互いが連続することにより発生したと考えられている<sup>1)</sup>。

第2白糸トンネル崩落は夏期の豪雨の後に、3日の間を置き2回に分かれて発生した。豊浜トンネル同様、地質は軟質な火砕岩であり、降雨による地下水の作用(スメクタイトを含む変質部での含水による岩石強度の低下や岩石劣化の進行など)が要因と想定される<sup>2)</sup>。

北陽の崩落は、連続雨量100mmを越える豪雨時に発生した。同斜面は、上部には亀裂の発達した石灰岩・チャート互層、下部には岩石劣化の進んだ火山性砕屑岩類や赤色含礫泥岩が分布し、かつ断層が認められるなど地質が複雑であった<sup>3)</sup>。地下水挙動も複雑であったと考えられ、複雑な地質分布及び水理地質が崩壊の要因となったと考えられる。えりもの崩壊は1月に発生した。地質はホルンフェルスであり岩石自体は比較的硬質であるが、白色脈が多く潜在および顕在亀裂も発達していた。降雨は認められたがそれほどの量ではなかった。4ヶ月前に十勝沖地震が発生したこと、および崩壊当日も比較的大きな地震があったことから、これらの地震により岩盤の緩みが限界近くまで達し、融雪水など様々な要因が重なって崩壊に至ったと考えられる<sup>4)</sup>。

前兆現象についてみると、豊浜トンネルでは崩落の1時間前にトンネル通行者により、ドーンという音とそのあとのパラパラと石が砕けるような音を聞いたことが、また30分前にはトンネル天井にクラックが発生しており砂が降ってきたことが報告されている。えりもでは、前述のとおり、大崩壊の数日前および十数時間前に小崩壊が確認されており、結果としてこれが前兆であったこととなる。

以上のように4大災害の崩壊要因は様々だが、豪雨や氷結など水に絡む崩壊が多く、地下水の作用(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

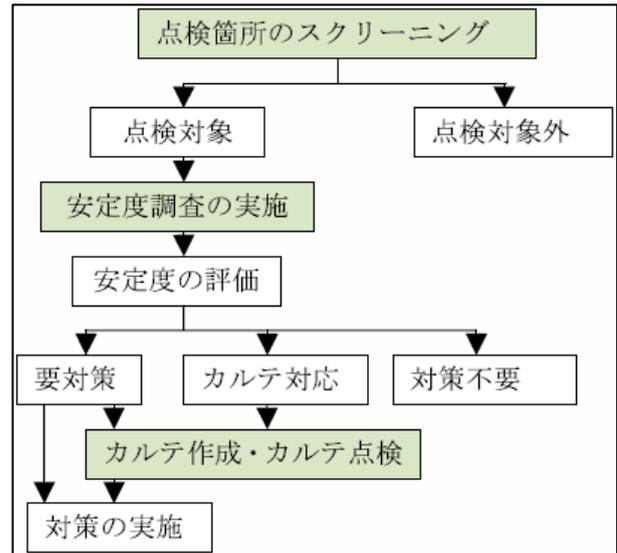


図-4 道路防災点検の流れ<sup>10)</sup>

兆現象の把握が重要である。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。

### 3.1.2 道路防災点検におけるスクリーニング方法の検討

#### 1) 現状の道路防災点検の検討

道路防災点検は、昭和43(1968)年の飛騨川バス転落事故を背景として、同年に全国一斉に最初の点検が実施された。以後、落石や斜面崩壊による災害からの知見や教訓を反映し、点検対象、評価方法を変更しつつ実施されてきた。直近の点検(第9回)は、豊浜トンネル崩落事故を契機に1996~1997年に実施された。同点検では岩盤斜面に関しては「落石・崩壊」と「岩石崩壊」の2項目が設けられている。道路防災点検はスクリーニング、安定度調査、カルテ点検に分けられる(図-4)<sup>10)</sup>。スクリーニングと安定度調査は1996~1997年に実施されている。スクリーニングでは斜面を「点検対象」と「点検対象外」に分け、点検対象箇所は安定度調査により「要対策」、「カルテ対応」及び「対策不要」箇所に分けられている。そして要対策箇所から順次対策が実施されている。なお、カルテ点検は現在も継続されている。

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



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について、災害要因を抽出し、安定度調査箇所を選定するものである。第2 絞込みは机上調査等による「地域特性の把握及び災害要因の判読」と、机上調査等の結果を現地で確認する「現地確認」からなる。本スクリーニング方法は、これらの絞込みにあたって後述する「地域特性把握図」などを作成しつつ情報の整理・把握に十分に活用するものである。

### 3) 地域特性把握図

地域特性把握図は、収集した資料に基づき、路線の特性を把握することを目的として作成する。地域特性把握図には以下の事項を記載することが望ましい。

- ・ 地形図
- ・ 地形・地質上の観点から整理した、代表的な箇所の地域特性（平成8年度点検スケッチ図、地形・地質上の特徴、想定される災害要因等）
- ・ 事前通行規制区間
- ・ 点検対象区間
- ・ 基本図の整備計画 など

地域特性把握図の作成例を図-6 に示す。

#### 3.1.3 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）

##### 1) 基本原理

遠心評価法の基本原理は、図-7 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、 $\sigma$ ：岩体の引張強度(N/m<sup>2</sup>)、 $B$ ：崩落危険岩体の高さ(m)、 $L$ ：既存切欠きの深さ(m)、 $\gamma$ ：岩体の単位体積重量 (N/m<sup>3</sup>)、 $h$ ：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。

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

一方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。

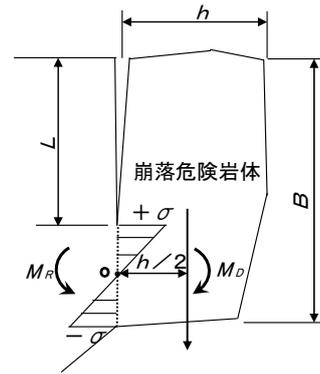


図-7 極限つりあい式の破壊条件図

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

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  $\gamma$  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)。

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

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。

##### 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、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

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を载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-8)としてとりまとめた。

### 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、図-9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(図-10)。供試体の強度は岩石の一軸圧縮強度20MN/m<sup>2</sup>を目標とし、材料モルタルの配合を決定した。

図-11, 12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-5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が、切欠き深さ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、遠心载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。遠心力の载荷方法は、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

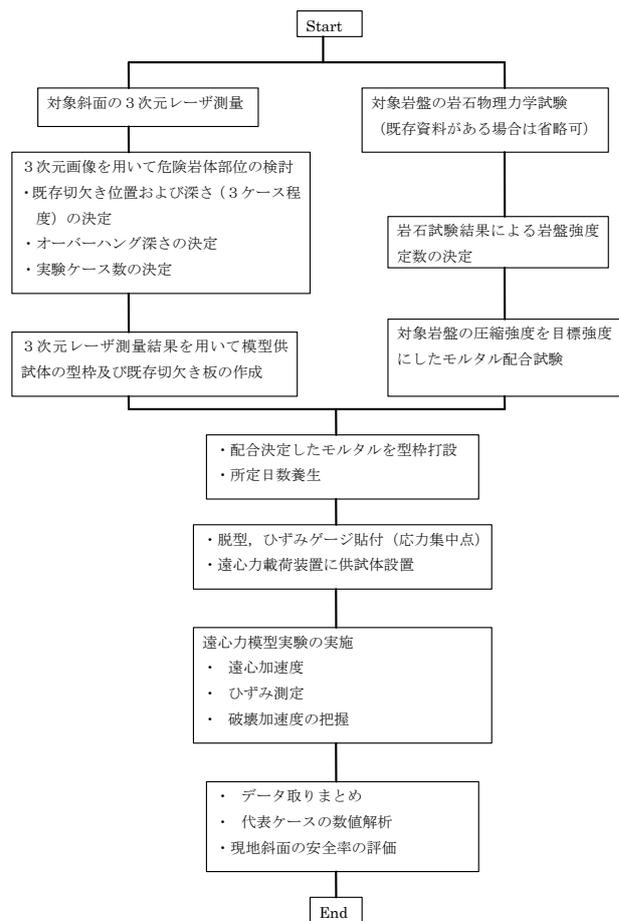


図-8 安全率評価法フロー図

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。

### 4) 実験結果と評価法の適用例

実験結果を表-5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 $\sigma_t$ と目標引張強度 $\sigma_s$ ( $=qu/10=2.0\text{N/mm}^2$ )の比を $\alpha$ ( $=\sigma_t/\sigma_s$ )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。

$$F_{mt} = 1.0$$

$$= \frac{\alpha \sigma_s (B/n - L/n)^2}{3(n_f \gamma) B/n (h/n)^2} = \frac{\alpha \cdot n}{n_f} F_{ps} \quad (7)$$

ここに、 $F_{mt}$ : 模型斜面が引張強度 $\sigma_t$ の場合の安全率、 $F_{ps}$ : 実斜面が引張強度 $\sigma_s$ 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。

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

6.1 岩盤・斜面崩壊の評価・点検の高度化に関する研究

ここに、 $\alpha$ ：供試体の実測引張強度  $\sigma_t$  と目標引張強度  $\sigma_s$  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-13 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。

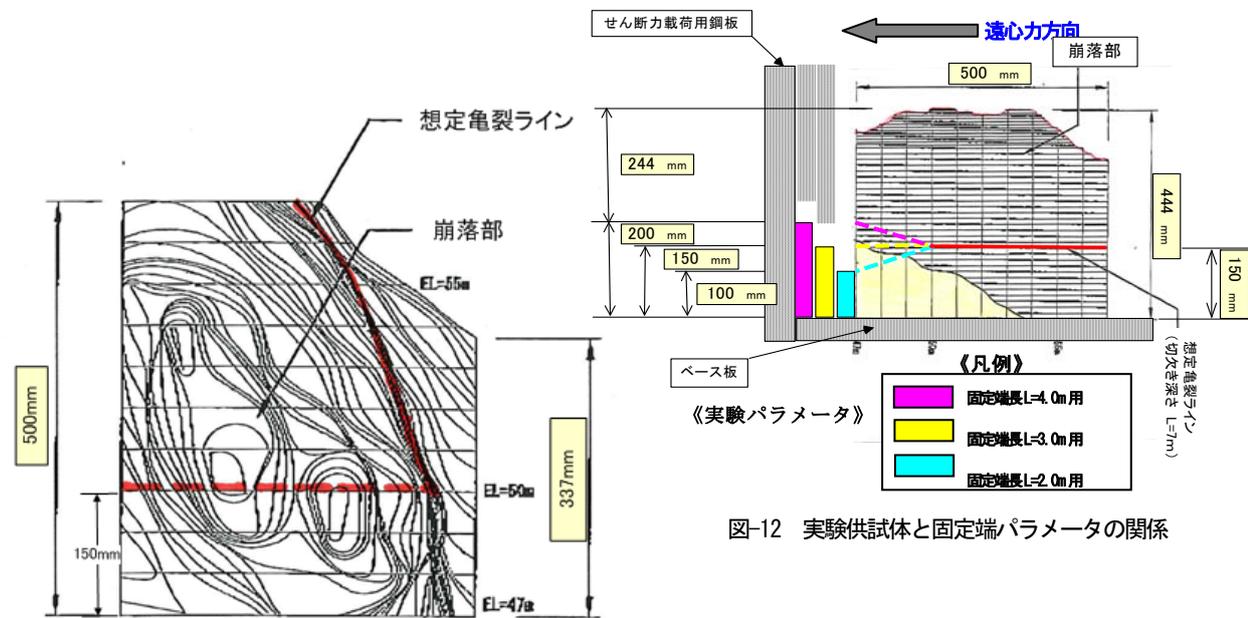


図-12 実験供試体と固定端パラメータの関係

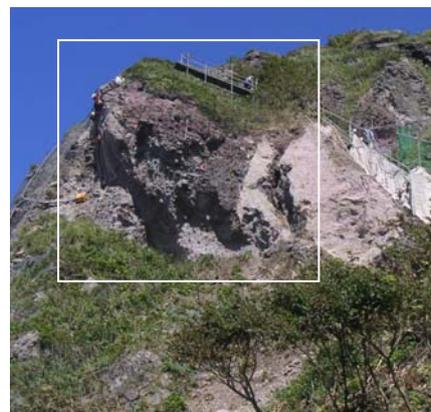


図-9 島牧村実斜面

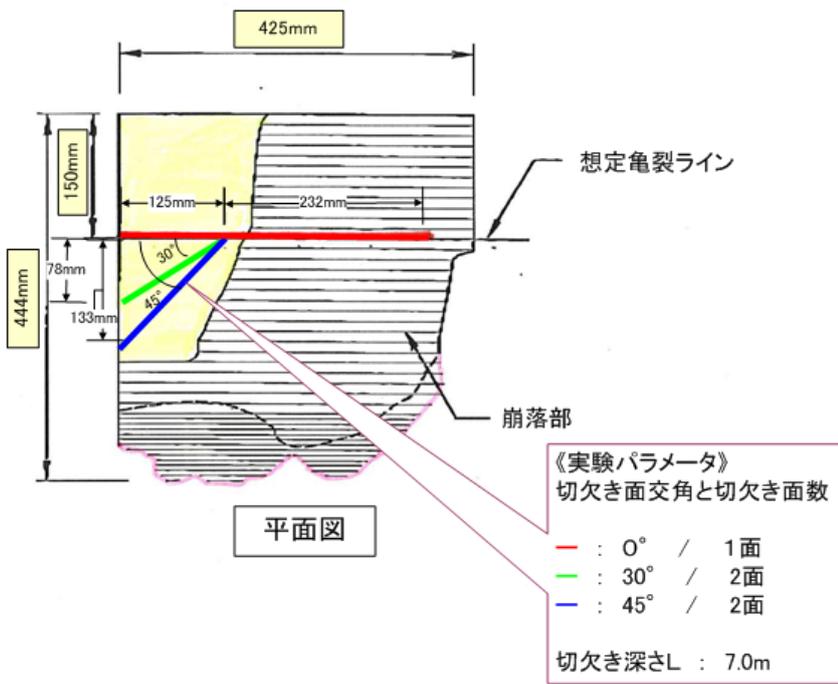


図-11 遠心载荷供試体の形状および寸法



図-10 切削3次元模型

図-14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考えられる。

### 3.1.4 3次元極限平衡解析による安定度評価法の構築

#### 1) 解析対象と実験条件

解析に用いたデータは、北海道の5岩盤斜面の遠心力模型実験データである。表-6に各岩盤斜面の代表的な構成岩石と崩落危険岩体高さ $H$ (最大高さ)、および遠心力模型実験で採用した模型縮尺を示す。

遠心力模型実験の実験ケースは、各岩盤斜面において切欠き高さ $H_c$ 、浸食深さ $Z$ および切欠き面交角 $\chi$ の異なる全23ケースである。ここで、切欠き高さ $H_c$ とは、斜

面底部に設定した基準面から切欠き先端までの高さである。切欠き面交角 $\chi$ とは切欠き面が2面になる場合の交角であり、浸食深さ $Z$ とは基準面から下部の岩体を表面から任意の厚さ削り取った長さである。

#### 2) 3次元極限平衡解析による安定度評価法<sup>11)</sup>

##### a. 解析法

3次元極限平衡解析は、図-15に示すように崩落危険岩体を切欠き面(切欠き面が2面以上の場合には両端を結んだ直線)に垂直に分割して、各ブロックの起動モーメント $M_d$ および抵抗モーメント $M_r$ を累計し、その比( $M_r/M_d$ )を岩盤安全率 $F_s$ とする回転モーメントのつり合いによる解析法を用いた。起動モーメント $M_d$ と抵抗モーメント $M_r$ を求める式を以下に示す。

$$M_d = W (X_g + \frac{2}{3} L_F \cdot \sin \theta) \quad (17)$$

$$M_r = \frac{L_F^2}{6} \sigma_t \quad (18)$$

ここに、 $W$ : 崩落岩体の重量(N)、 $\theta$ : 進展亀裂の鉛直方向からの角度、時計回りを正とする(°)、 $X_g$ : 切欠き先

表-5 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 $\chi$ (°)	破壊加速度 実測値 $n_f$ (G)	実験後抜き取り試料								安全率 $F_{ps}$	
						湿潤密度 $\rho_t$ ( $t/m^3$ )	一軸強度 $qu$ ( $MN/m^2$ )	破壊ひずみ $\epsilon_f$ (%)	静弾性係数 $E_{pos}$ ( $MN/m^2$ )	ポアソン比 $\nu$	引張強度 $\sigma_t$ ( $MN/m^2$ )	強度定数			圧縮・引張強度比
No.1	3.0	7.0	1	0°	30	2.27	31.2	0.27	$1.70 \times 10^4$	0.216	2.82	—	—	11.06	
No.2	3.0	7.0	2	30°	30	2.20	23.3	0.26	$1.39 \times 10^4$	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	$1.41 \times 10^4$	0.213	2.61	—	—	10.49	1.61
No.4	2.0	7.0	2	30°	26	2.21	28.3	0.29	$1.46 \times 10^4$	0.216	2.80	—	—	10.11	0.92
No.5	4.0	7.0	2	30°	62	2.19	24.5	0.31	$1.28 \times 10^4$	0.219	2.35	—	—	10.43	2.53

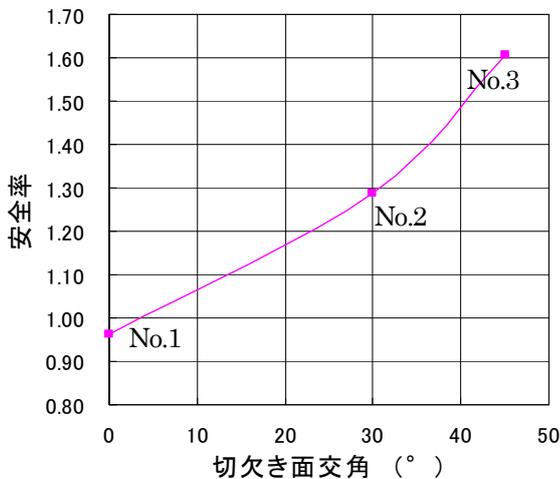


図-13 切欠き面交角と安全率の関係

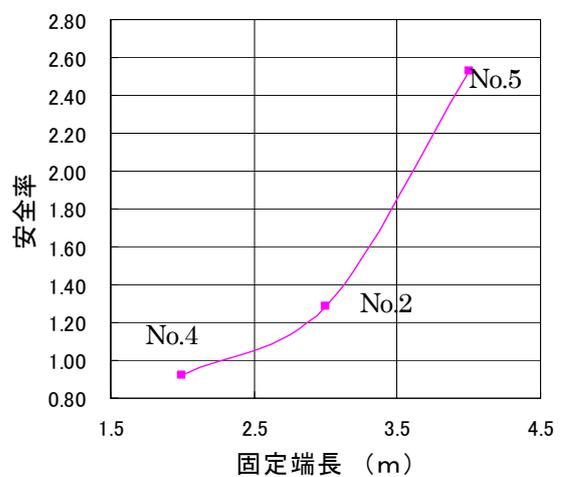


図-14 固定端長と安全率の関係

端の点 a から崩落岩体の重心までの距離(m),  $\sigma_t$ : 岩盤の引張強さ(N/m<sup>2</sup>),  $L_F$ : 進展亀裂面の長さ(m)

岩盤安全率の最小値を求める方法としては、以下の 2 種類の方法を用いた。

(1) 想定亀裂面法: 崩落面を切欠き先端の両端と崩落危険岩体表面の任意点を通る面として岩盤安全率を計算し、任意点を変化させて最小になる岩盤安全率を求める方法である。

(2) 最小亀裂角法: 崩落危険岩体を分割したときの分割断面毎に、切欠き先端から発生する亀裂の進展角度  $\theta$  を変化させて岩盤安全率を計算して、各分割断面の最小岩盤安全率になる起動モーメントと抵抗モーメントを求めて累計し、最小になる岩盤安全率を求める方法である。

### b.解析結果の検証

3次元極限平衡解析により遠心力模型実験で用いた条件の岩盤安全率を求め、実験結果と比較して岩盤斜面の安定度評価法を検証する。図-16に遠心力模型実験により求めた実測安全率と想定亀裂面法および最小亀裂角法から求めた計算安全率の関係を示す。想定亀裂面法よりも最小亀裂角法により相関がみられ、想定亀裂面法の岩盤安全率が大きく算出されている。最小亀裂角法により相関がみられた理由としては、遠心力模型実験で生じた岩盤模型の崩落面が、最小亀裂角法の計算条件に近似したことが考えられる。実用的には両方の計算安全率を求めて小さい方の安全率を採用することが妥当と考える。本解析法は、プログラムソフトを開発して現在マニュアルと一緒に当研究所防災地質チームの下記ホームページで公開中である。

<http://chishitsu.ceri.go.jp/>

## 3.2 北海道における岩盤斜面調査点検マニュアルの作成

### 3.2.1 「写真計測技術を活用した斜面点検マニュアル(案)」の提案

#### 1) 背景差分法による変化箇所の抽出方法<sup>12)</sup>

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-17)。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

表-6 対象岩盤斜面

斜面名	構成岩石	崩落危険岩体高さ H(m)	模型縮尺 1/n
K斜面	火砕岩	14.7	30
H斜面	〃	6.7	15
G斜面	〃	13.1	20
T斜面	〃	34.7	60
S斜面	〃	32.5	60

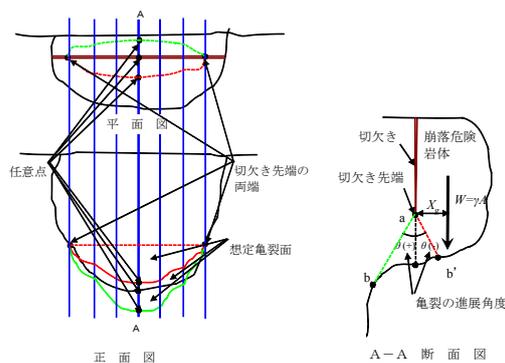


図-15 3次元極限平衡解析概念図

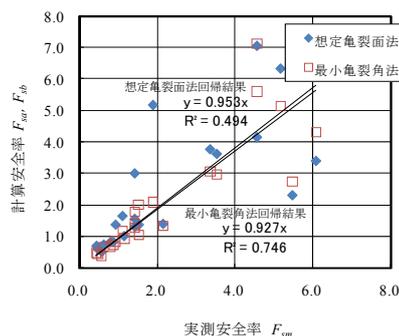


図-16 岩盤の実測安全率と計算安全率

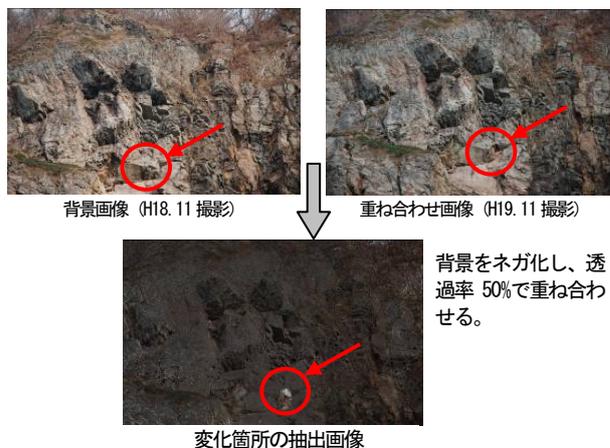


図 17 背景差分法による変化箇所抽出の概念図

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)
- 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-18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-19)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-20)処理後、変化箇所の[差分抽出](図-21)を実施した。

2) 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-22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

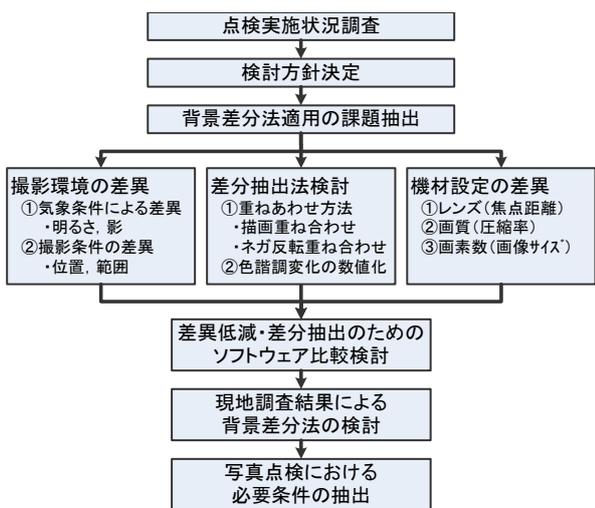


図-18 背景差分法検討フロー

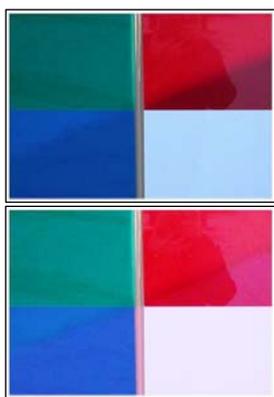


図-19 色調補正

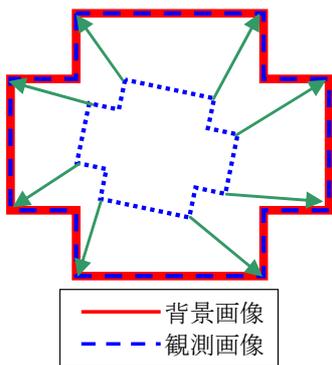


図-20 画像正規化

- 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
- 現場技術者にアンケート調査を行った結果、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

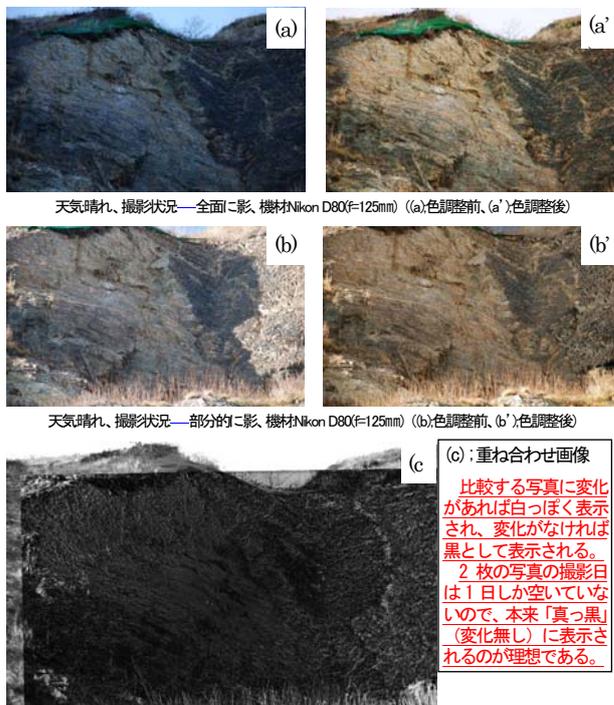


図-21 背景差分法における色調整と差分抽出

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、変位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) 撮影位置のズレによる影響

写真撮影の際はペンキや見出し杭による撮影位置のマーキングを行っているが、時間の経過に伴うペンキの薄れや消失、積雪・土砂の被覆により位置確認が困難となる事が予想されるため、意図的に定点から撮影位置を移動させ、許容範囲の検証を行った。検証対象としては撮影対象から水平移動が可能な箇所を選び、対象斜面との距離を約60mとし、撮影位置を5m(約5°)ずつ移動して撮影し、背景差分抽出への影響を確認した。20m以上移動した場合は補正が十分に行えず、画像の重ね合わせ自体が出来なかったが、5~10m程度の移動であれば背景差分法の実施は可能であった(図-23)。但し、移動距離に応じてノイズが多くなるため、抽出された差分が実変化なのか誤差なのか、元写真を見比べた個別判断が必要となる。

### 4) 写真計測マニュアル(案)

これらの研究成果を踏まえて、「写真計測技術を活用し

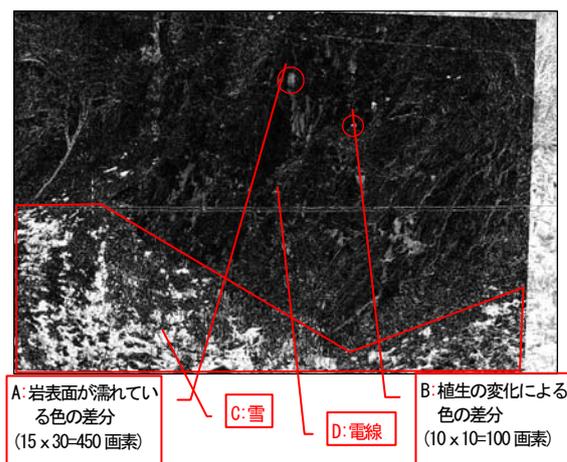


図-22 差分抽出箇所

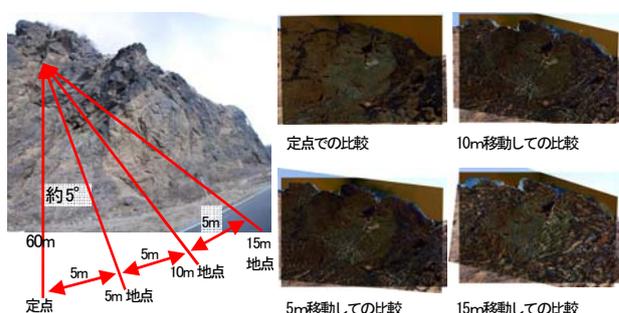


図-23 撮影位置の移動による差分抽出結果の違い

た斜面点検マニュアル(案)」を作成して提案した。本マニュアル(案)は4章から構成されており、第1章では「総則」としてマニュアルの目的と計測技術の概要を示し、第2章では「点検計画」として点検の箇所やポイントの選定について示した。第3章では「背景差分法実施方法」として背景差分法の特長や撮影方法、撮影地点の設定および変状箇所の抽出方法について示し、第4章では「変動量計測法」として計測法の流れと方法を示した。

### 3.2.2 「斜面監視に用いる微小電位観測マニュアル(案)」の提案

#### 1) 現地観測結果と考察<sup>13)</sup>

図-24 に地すべり斜面において、全電極が設置完了した2007年11月からの微小電位変動傾向を時系列で示す。図より各電極と地中電極間の電位差の絶対値は、夏季に大きく冬季に小さい傾向が認められ、季節変動が大きく現れている。斜面の変状で発生する微小電位を観測するためには、この季節変動を除去する必要がある。

斜面崩壊や岩盤崩落などの監視すべき範囲が限られた場では、季節的な降雨などの外的要因に起因する微小電位変動は観測フィールド全体ではほぼ一様に影響を受けると考えられるため、複数地点で微小電位計測をおこなうことにより、その影響を除去できる可能性がある。そこ

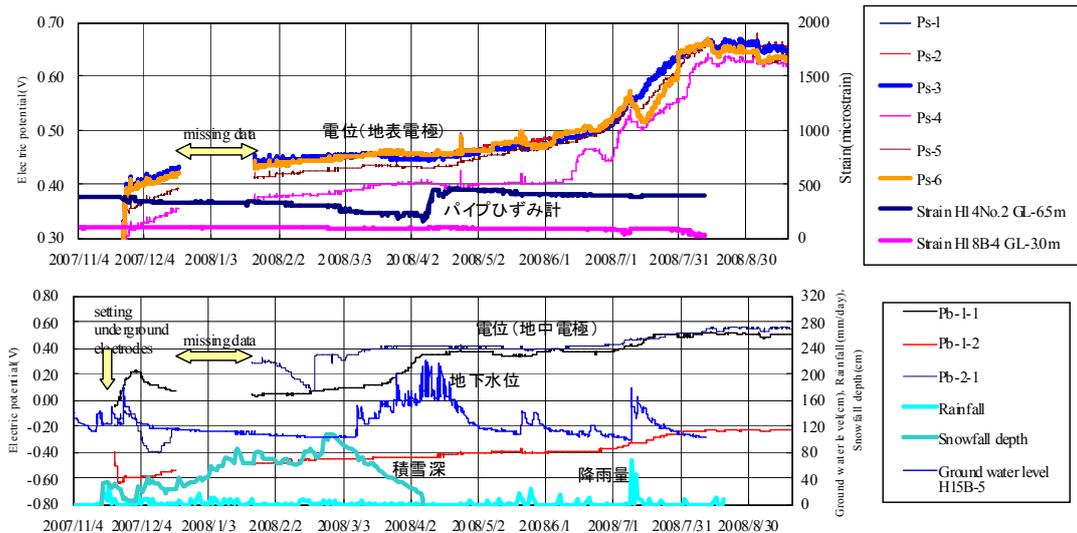


図-24 微小電位の年変動と地下水位 (各電極と地中電極 Pb-2-2 との電位差 : com(-):Pb-2-2)

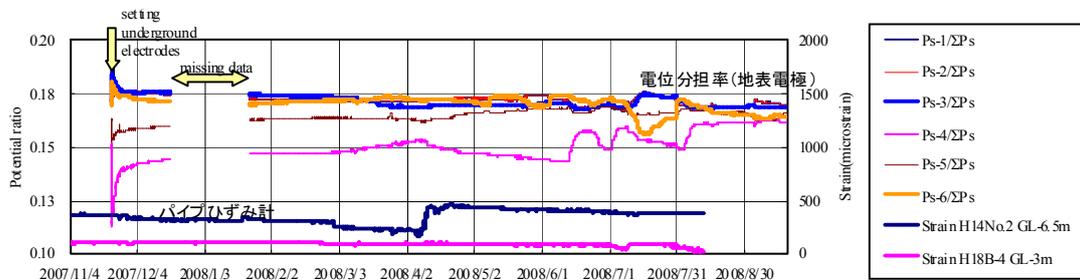


図-25 電位分担率の年変動 (com(-):Pb-2-2)

で各電極の分担率 (以下、電位分担率) に着目した。電位分担率(Potential ratio)とは、ある微小電位観測場全体が持つ電氣的ポテンシャルのうち、その地点がどれだけのポテンシャルを分担しているかをあらわす指標であり、さらに各電極の電位差を合計電位差で除算することで、一様に影響している外的要因を除去できる可能性がある値である。式(11)、式(12)に地表電極の電位分担率を示す。

$$R_n = Ps-n / \Sigma Ps \quad (11)$$

$$\Sigma Ps = Ps-1 + Ps-2 + Ps-3 + Ps-4 + Ps-5 + Ps-6 \quad (12)$$

ここに、 $R_n$  : 地表電極  $Ps-n$  の電位分担率

図-25 に地表電極の電位分担率の変動傾向を、時系列にまとめて示す。各地表電極の電位分担率では、電位差の絶対値の変動傾向にみられた夏季と冬季の違いによる変動を除去できていることが分かる。また、電位分担率の変動傾向は、12月ごろから3月上旬にかけて変動が少なく、3月上旬ごろから7月下旬にかけて変動が比較的

大きい。特にまとまった降雨のあった5月中旬および、7月上旬の変動が大きい結果となっている。電位分担率の変動があった時期に着目してパイプひずみ計の動きを見ると、5月中旬にはほとんど斜面変状が起こっていないが、7月上旬の豪雨時には若干の斜面変状が認められる。

識別され得る電位分担率の変動が、斜面変状に先行して確認されたことから、電位分担率が斜面不安定化に至る臨界状態を示す指標となる可能性が示唆される。

## 2) 微小電位観測マニュアル (案)

これら結果を取り入れて、「斜面監視に用いる微小電位観測マニュアル (案)」を作成して提案した。本マニュアル案は5章からなり、第1章では「微小電位観測概要」として微小電位観測の概要や観測フローなど、第2章では「観測計画と機器の設置」として観測領域の設定や電極の配置計画、計測機器やそれに付随する気象観測機器の選定と設置方法について示した。第3章では「微小電位観測」として観測頻度や観測機器のメンテナンスについて示し、第4章では「微小電位データの評価と運用」として現時点で確立されていないが評価運用方法を

示した。第5章では「今後の展望」として現状で考えられる予測精度向上の取り組みなどを示した。マニュアル案は北海道開発局主催の研究発表会<sup>14)</sup>で発表配布した。

### 3.3 地域別の斜面調査・評価技術の開発

#### 3.3.1 黄金道路急崖斜面調査から得られた知見

対象地域とした黄金道路急崖の調査から得られた知見として、本地域の変成岩・付加体が形成する急崖道路斜面の調査・点検における着目点について、以下に整理した。

##### (1) 急崖に膨らみとして残っている部分の変形構造と隣の崩壊跡の地形とを比較する

素因の連続性があれば、膨らみとして残っている部分も隣の崩壊跡と同じような形態と機構で崩壊する可能性が高いと考えられる。このため、急崖に膨らみとして残っている部分の変形構造の中から崩壊跡地形につながる変形構造を識別し、その成長度を徹底観察することが重要である。

##### (2) 張り出した急崖の裾部の変形構造を視る

崩壊の支配因子となる不連続面は低角度すべり面となる可能性が高いと考えられる。このため、張り出した急崖側壁の亀裂の先端が、急崖斜面下部で地表にそのまま抜けるような形態を示すのか、亀裂の先端が連結する低角度すべり面を伴うものかどうかの検討が重要である。

##### (3) 素因の性状変化に注目する

調査・点検において、素因を確認し、素因となる構造が、現在の急崖で、どのような配置で、どのような性状に変化して存在するのかが確認することは重要である。素因となる沸石脈は、1mm程度の薄さでも連続性がよく、流れ盤配置であれば、すべり面として崩壊に関与する可能性が考えられる。

##### (4) 節理か剪断帯かを識別する

不連続面の観察では、変動ブロックの識別という視点から、それがすべり成分をもたない節理であるのか、剪断面（すべり面）であるのかの特定が重要であり、不連続面に付随する変形構造から読み取る必要がある。

##### (5) 不連続面の運動像を読む

急崖の刻印する面構造が剪断面である場合には、急崖を形成する岩盤はその剪断面によりブロック化し変位していると考えられる。このため、不連続面の観察では、それが剪断面であるのかすべり成分をもたない節理かを検討し、不連続面に付随する変形構造から個々の不連続面の運動像を読み取ることが重要である。

##### (6) 岩塔では鞍部の変形構造を視る

本地域の急崖は岩塔の発達が特徴的であり、ほとんど

の岩塔背後の鞍部で剪断帯の発達と風化の進行が確認されている。急崖に立つ岩塔は不安定岩盤であると見做されることが多いが、背後の剪断帯の運動像を解析し、どのような性状のブロック岩盤であるのかを確認することが必須である。

##### (7) 可能な限り崖（側壁）の奥深くを調べ、不連続面の運動像を読む

本地域では、急崖斜面が複数の変動ブロックの集合体からなり、背後の地山を構成するブロックの変動と連動するようにして急崖前面のブロックの変動が起こっている場合がある。このため、背後ブロックの運動像を考慮した急崖前面の評価が必要な場合がある。

##### (8) 不連続面の成長度と成長方向を読む

斜面変動がもたらす不連続面の成長度は狭い範囲で激変することへの理解と、成長の方向を読み取ることが重要である。不連続面の成長は、肉眼でどのような性状変化として確認されるのか、成長度の決定に関わる眼の習得が必要である。

##### (9) 不連続面の運動像を節理から読む時、古い節理の構造に特に注意する

本地域の付加体と花崗岩には、節理は卓越した変形構造としてしばしば著しく狭い間隔で発達し、崩壊に至る変形現象における重要な情報といえる。しかし、沸石が安定で動的再結晶が起こる条件下で出現した古い節理の場合もあり、変形構造であるのか半別が重要である。ブロック区分確定のための不連続面の特定には、節理の示す構造の発生時期・再動時期の確定が必要である。

##### (10) 風化史にも注目する

急崖斜面を構成する岩盤の風化進行度は、一般に地表からの深度で一義的に決定される現象ではなく、急崖斜面形成の長い斜面変動の歴史を通して進行するため極めて複雑である。岩盤崩壊と風化現象との関連性は、一般に指摘されるとおり重要事項であり、本地域では変質史を考慮した検討も必要である。

#### 3.3.2 「黄金道路急崖斜面の道路防災に関わる地質調査法 解説書」の提案

前述の知見等を元に「黄金道路急崖の道路防災に関わる地質調査法 解説書」を作成して提案した。解説書は、3章からなり第1章が「はじめに」として黄金道路急崖の特性を示し、第2章では「斜面変動特性と規模と安定性評価」として斜面の変状素因と変動特性や変動規模、安定性の評価について示し、第3章では「地域特性を考慮した特別仕様の斜面調査」として黄金道路における斜面調査仕様（案）を示した。解説書は、北海道開発局の

対象地域道路管理者に解説配布した。

### 3.3.3 水冷破碎岩地域における点検・調査時の着目点抽出

ここでは、旧道調査の結果や既存の研究成果をもとに、水冷破碎岩地域における点検・調査時の着目点の抽出を行う。

#### 1) 地形について

調査対象地域の神岬・キナウシ・太島内での、地形区分別の 1km<sup>2</sup> あたりの変状発生件数を表-7 および図-26 に示す。図-26 からは、岩石崩壊・落石ともにオーバーハング部で発生する可能性が高く、落石に関しては急崖部からの発生割合が高い事が想定される。これらの地形は変状発生に着目点として設定されている事が多いが、崖錐地形に関しても落石・土砂流出の発生源として着目する必要がある。

表-7 地形別 1km<sup>2</sup> あたりの変状発生件数 (R229・R231)

	急崖	オーバーハング	脚部浸食	崖錐地形	その他
岩石崩壊	0	54	0	0	0
落石	85	127	0	45	7
表層崩壊	0	0	0	0	0
土砂流出	0	0	0	13	2
雪崩	4	0	0	0	0
計	89	182	0	57	10

変状発生箇所を、図-27 に示す。各発生箇所別の発生率は、図-28 に示すように斜面中部での変状発生率が高いものの、遷急線上からの変状発生も認められる。遷急線上からの変状は、転石の移動による落石や表層崩壊が多い。そのため、点検・調査の実施時には遷急線上の転石状況等の変状要因の有無を確認する必要がある。

#### 2) 地質について

表-8 地質別 1km<sup>2</sup> あたりの変状発生件数 (R229・R231)

	貫入岩	塊状火砕岩	堆積岩	崖錐	表土
岩石崩壊	0	9	0	0	0
落石	1147	79	895	45	3
土砂流出	0	3	0	13	0
雪崩	0	3	0	0	0
計	1147	95	895	58	3

調査対象地域の地質区分別の 1km<sup>2</sup> あたりの変状発生件数を表-8 および図-29 に示す。図-29 からは、貫入岩・

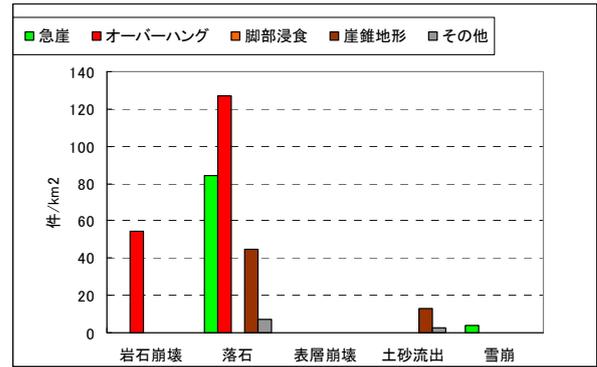


図-26 地形別 1km<sup>2</sup> あたりの変状発生件数 (R229・R231)

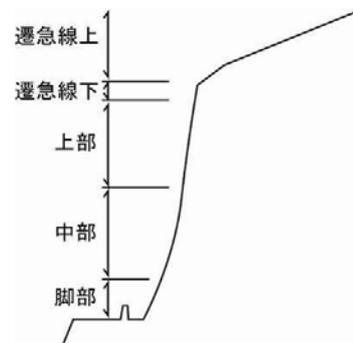


図-27 変状発生箇所分類

変状発生全箇所

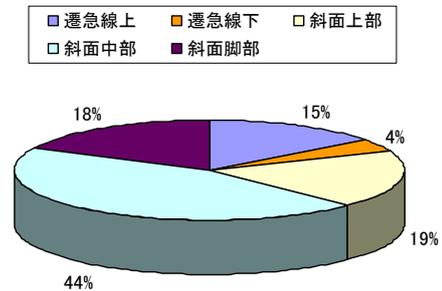


図-28 変状発生箇所別発生率

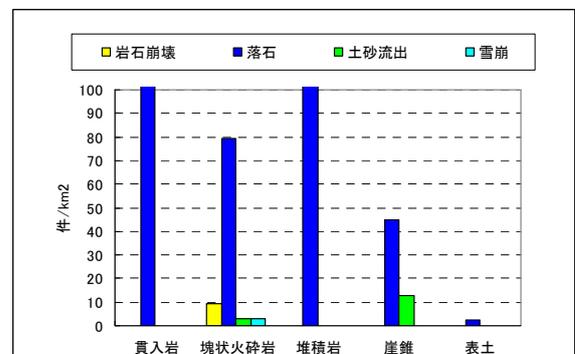


図-29 地質別 1km<sup>2</sup> あたりの変状発生件数 (R229・R231)

堆積岩からの変状発生が高い傾向が認められるが、両者ともに他の地質区分と比較すると1~2%の表面積しかないため高くなっているものと考えられる。

塊状火砕岩では全種別の変状が確認されるため、露岩部に関しては調査・点検時に着目点として設定する必要があると考えられる。

崖錐からは落石の発生が多いが、土砂流出の発生割合は他の地質区分よりも高くなっているため、点検・調査時には崖錐堆積物の分布地点の流水の有無等を確認する必要がある。

### 3. 4 岩盤斜面災害時の緊急評価技術の開発

#### 3.4.1 計測機器・計測方式

##### 1) ラジコンヘリコプター（以下、ラジヘリ）

計測のプラットフォームとしたラジヘリは、農業散布などで広く普及している産業用無人ヘリコプターYAMAHA製RMAX（図-30）とした。

##### 2) 3次元写真計測

3次元写真計測には種々の計測方法があるが、今回の計測では、1台のカメラでそれぞれ別の方向より撮影された複数枚の写真から3次元モデルを作成する方法を用いた。ラジヘリの防振架台上に設置されたデジタルカメラ（Nikon COOLPIX5700）により撮影した写真を用いて、計測用ソフトウェアである「クラヴェス」により3次元モデルを作成し、計測を行った。

##### 3) レーザスキャナ

レーザスキャナとは、機器から発射したレーザが計測対象に反射して帰ってくる時間から計測対象までの距離を計測し、そのときのレーザの角度情報と合わせることで、計測対象の3次元形状を計測する機器である。移動体からの計測が可能で、かつラジヘリに搭載可能なほど小型軽量化したレーザスキャナがSkEyes Unlimited社製MP-1であり、これを今回の計測に使用した。

精度比較のための地上計測で使用した地上設置型レーザスキャナは、計測座標精度±6mm（計測距離50m以内）の仕様を持つLeica Geosystems社製HDS3000とした。

#### 3.4.2 3次元写真計測の簡易写真歪み補正法の開発

ここでは3次元写真計測の精度向上を目的として、写真歪みの補正法を検討した。実験は、デジタルカメラ6機種（カメラA~F）について、撮影した写真の歪み計測を行った。トータルステーションにより特徴点として図-31に示すテストターゲットを設置して計測を行い、歪みを補正するための係数を算出した。

実験結果より算出した歪み係数を用いて、撮影したテ



図-30 ラジヘリの全容



図-31 テストターゲット

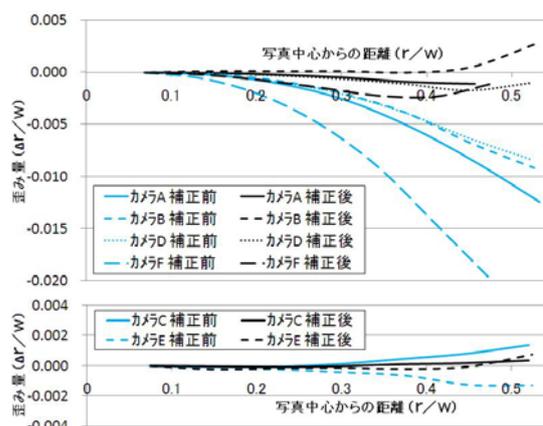


図-32 半径方向歪み量

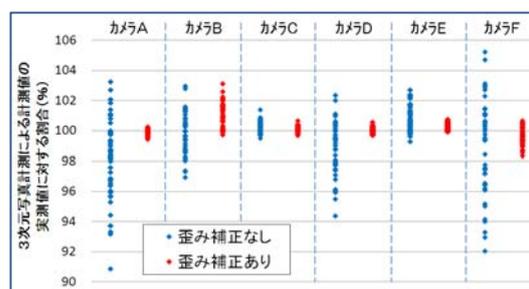


図-33 計測誤差比較

ストパターンの写真を補正した。各カメラで撮影した写真の歪み補正前後について、写真中心からの各方向における半径方向歪み量の平均値を図-32に示す。

図のように、写真の歪みが補正前に比べて減少していることがわかる。もともと歪みの少ない写真については

歪み量の減少はわずかであったが、補正によって歪み量が増大することは無かった。

このことから3次元写真計測を行う際に必要となる写真歪み補正を、トータルステーションを使用することにより簡易的に行える可能性を確認した。撮影したカメラが手元になくても写真の歪み補正を行うことができるため、災害現場などで写真だけしか入手できなかった場合においても、写真補正無しで行うより高い精度で3次元写真計測を行えると考えられる。

### 3.4.3 簡易写真歪み補正法の実斜面での検証<sup>15)</sup>

実斜面において本方法で補正を行った写真を用いて3次元写真計測を行った。その結果、実験に用いた6機種全てのカメラで計測精度の向上が見られ、歪み補正を行わなかった場合に比べ計測誤差は約65%減少した。(図-33)しかしながら、全ての写真に本方法を適用できるわけではなく、特徴点が写真全体から抽出できることなどの条件が必要であることがわかった。

## 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したものである。本研究から得られた成果をまとめると、以下のとおりである。

### 4.1 大規模岩盤斜面崩壊等に関わる斜面調査・評価法の提案

#### 4.1.1 北海道の岩盤・斜面崩壊の地球科学的特性の整理

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。整理の方法は(1)過去40年間の岩盤・斜面崩壊の整理・検討、および、(2)4大災害の総括、である。

前者では、崩壊土量1,000m<sup>3</sup>以上の岩盤・斜面崩壊事例を収集し、分布、規模、地形・地質との関係、誘因等について検討を加えた。この結果、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10,000m<sup>3</sup>を越える事例が多く、えりも地域では10,000m<sup>3</sup>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。

後者では、4大災害(豊浜トンネル、第2白糸トンネ

ル、北陽、えりも)について整理した。4大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。

#### 4.1.2 道路防災点検箇所のスクリーニング方法の構築

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。概要を以下に示す。

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。

なお、スクリーニング方法の構築にあたっては、北海道開発局の各建設部道路管理者および担当コンサルタントに対してアンケート調査を行い、実務者の要望をできるだけ取り入れたものとした。同スクリーニング方法は北海道開発局に提案済みであり、北海道開発局では提案されたスクリーニング方法に基づき、新たな道路防災点検が実施された。

#### 4.1.3 岩盤斜面の安全性評価法の提案

##### 1) 遠心模型斜面評価法の提案

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)を提案した。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当研究所所有の大型遠心力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める方法である。

##### 2) 2次元および3次元極限平衡解析による岩盤斜面評価法の構築

遠心評価法による過年度の成果を元に、岩盤斜面安定性を解析評価する方法として、2次元極限平衡解析による簡易評価法および3次元極限平衡解析によるプログラムソフトを構築した。解析ソフトの動作環境は、日本語版Windows XP(SP3)を基本OSとし、その他にMicrosoft Excel 2003のソフトウェアが必要である。プログラムソフトは、現在マニュアルと一緒に当研究所防災地質チームの下記

ホームページで公開中である。

<http://chishitsu.ceri.go.jp/>

## 4.2 北海道における岩盤斜面点検マニュアルの作成

### 4.2.1 写真計測マニュアル案

斜面点検時のデジタル写真に対する背景差分法の適用条件と課題抽出、変化箇所抽出に必要とされる対象範囲の最低画素数と面積や体積の算出精度と解像度との関係をもとに、道路斜面の点検・管理の実務運用に向けた課題について検討・整理した。これらの成果を元にマニュアル案を作成した。さらに本マニュアル(案)による現地試行調査を行い、確認された撮影時期やレンズ構成などの問題点と対応策を作成してマニュアル案に追記した。

### 4.2.2 微小電位観測マニュアル案

斜面監視に用いる微小電位観測の評価法として考案した電位分担率の変動が、斜面変状に先行して確認されたことから、電位分担率が斜面不安定化に至る臨界状態を示す指標となる可能性が示唆された。これらの成果を元にマニュアル案を作成した。

## 4.3 地域別の斜面調査・評価技術の開発

### 4.3.1 黄金道路地域の急崖斜面調査法の開発

国道336号の広尾町～えりも町間において岩盤斜面の崩壊履歴を整理するとともに、詳細な地表地質踏査により岩相、地質構造、過去の崩壊跡などを調査し、崩壊特性について検討して本地域の地質調査解説書(「黄金道路急崖斜面の道路防災に関わる地質調査法 解説書」)を作成、提案した。

### 4.3.2 日本海沿岸火砕岩地域の斜面点検・調査法の提案

北海道日本海沿岸の水冷破砕岩地域における旧道調査結果から、地形および地質による点検・調査時の着目点を抽出した。今後、調査を継続して解説書として取りまとめていく予定である。

## 4.4 岩盤斜面災害時の緊急評価技術の開発

研究では、ラジヘリを用いた3次元写真計測が、岩盤斜面災害時の緊急評価技術として利用可能であることを示した。さらに、3次元写真計測を行う際に必要となる写真歪み補正を、トータルステーションを使用することにより簡易的に行える手法を開発した。

## 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.
- 8) 日外勝仁，岡崎健治，伊東佳彦：写真計測技術を用いた道路斜面点検手法の高度化，平成19年度全国大会第62回年次学講演会講演概要集，pp.39-40，土木学会，2007.
- 9) 日外勝仁，日下部祐基，伊東佳彦：写真計測技術を用いた道路斜面点検手法の高度化(その2)，平成20年度全国大会第63回年次学講演会講演概要集，pp.291-292，土木学会，2008.
- 10) (社)地盤工学会：岩盤崩壊の発生機構と計測技術，18～24p，2000.
- 11) 日下部祐基，伊東佳彦，表真也，三浦均也：オーバーハングを有する岩盤斜面の安定性評価のための3次元極限平衡解析，平成22年度全国大会第65回年次学講演会講演概要集，pp.19-20，土木学会，2010.9.
- 12) 日外勝仁，宍戸政仁，伊東佳彦：道路斜面点検におけるデジタル写真活用の試み，寒地土木研究所月報No.677，pp17-24，2009.10.
- 13) 宍戸政仁，伊東佳彦，日下部祐基，村山秀幸，丹羽廣海：斜面監視を目的とした岩石の微小電位発生メカニズム，寒地土木研究所月報No.671，pp35-40，2009.4.
- 14) 宍戸政仁，日下部祐基，村山秀幸：斜面監視を目的とした微小電位観測手法，第54回(平成22年度)，北海道開発技術研究発表会，安4，2011.2.
- 15) 山崎貴志，国島英樹，岸寛人：3次元写真計測に使用する写真の簡易歪補正方法について，第54回(平成22年度)，北海道開発技術研究発表会，安8，2011.2.