

岩盤崩壊のリスク評価に向けて
～リスク評価の現状と課題～

土木学会岩盤力学委員会
リスク評価研究小委員会

目 次

はじめに	進士 正人
1. 岩盤崩壊の特徴とリスク評価	小俣 新重郎
2. 岩盤崩壊のリスク評価のための検討項目の役割	
2.1 リスク評価のための調査の役割	栃本 泰浩
2.2 リスク評価のための解析の役割	西村 強
2.3 リスク評価のための計測の役割	川北 稔
3. 岩盤崩壊のリスク評価に向けた課題と展望	大西 有三
付録	
リスク用語集	小杉 昌幸

土木学会岩盤力学委員会 斜面リスク評価研究委員会 委員リスト

小委員長	大西 有三	京都大学
委員	伊東 孝	豊田工業高等専門学校
委員	大窪 克己	旧日本道路公団
委員	川北 稔	(株)ドーコン
委員	勘田 益男	(有)斜面防災研究所
委員	久慈 雅栄	前田建設工業(株)
委員	楠見 晴重	関西大学
委員	小俣 新重郎	日本工営(株)
委員	佐々木 靖人	(独)土木研究所
委員	島内 哲哉	明治コンサルタント(株)
委員	槌田 知一	(株)ダイヤコンサルタント
委員	栃本 泰浩	川崎地質(株)
委員	中井 卓巳	(株)アーステック東洋
委員	西村 強	鳥取大学
委員	萩原 育夫	サンコーコンサルタント(株)
委員	蓮井 昭則	(株)ハザマ
委員	三木 茂	基礎地盤コンサルタンツ(株)
委員	森 聡	(株)ニュージェック
委員	山下 祐一	(株)荒谷建設コンサルタント
幹事	小杉 昌幸	(独)産業技術総合研究所
幹事	進士 正人	山口大学
前委員	緒方 健治	旧日本道路公団
前委員	清水 泰弘	名城大学
前委員	西川 大亮	基礎地盤コンサルタンツ(株)

はじめに

土木学会岩盤力学委員会斜面リスク評価検討委員会は、平成15年8月から平成18年5月まで委員会活動をおこなった。活動内容は、岩盤斜面の安定性評価の中で特に岩盤崩落問題に着目し検討を行った。その検討の中で、岩盤崩落問題は岩盤斜面の不確実性を考慮するだけでなく対象とする保全物件の重要度も合わせて配慮し、工学的な判断を下す必要がある、そのためにはリスク評価が極めて有効であることがわかり、岩盤崩壊に関連するリスク評価に関する資料を収集し調査・検討を実施してきた。

委員会活動として調査検討を進めていく過程において、適切なリスク評価を行うにはリスクマネジメントに関する用語の定義をまず明確にする必要があることが明らかになった。そのため、最初に、岩盤斜面に関するリスクに関する用語集を作成した。併せて、保険・金融分野におけるリスクに関する研究動向も調査した。そして、岩盤崩壊に関するリスク管理システムを構築するためには、岩盤崩壊に関連するリスク評価特有のフラジリティーカーブ等のさまざまな検討・事例収集が必要となることや今後検討すべき課題が数多くあり、現有の委員会設置期間では、検討しきれないことが次第に明らかとなってきた。

そのため、本委員会としては、ひとまずこれまでの成果を平成18年1月に開催された第35回岩盤力学に関するシンポジウムにパネルディスカッション資料として取りまとめパネルディスカッションを実施した。

本報告書は、シンポジウムにおける委員会のパネルディスカッション資料を再構成し、リスクの用語集を添付し、今後の委員会活動資料としたものである。

1. 岩盤崩壊の特徴とリスク評価

日本工営(株) 小俣新重郎

1.1 岩盤崩壊の特徴

層雲峡(1987), 越前玉川(1989), 豊浜トンネル坑口(1996), 第二白糸トンネル(1998), 北見北陽のり面(2001), えりも覆工(2004), 中越地震妙見(2004)など, 近年相次いで大規模な岩盤崩壊が発生している。また重大災害に至らなくとも, 中小の岩盤崩壊や落石は地震や豪雨の後にしばしば起こり, その被害は全国的に発生している。

プレート沈み込み帯に位置する日本列島では, スラストが発達した付加体地質が広く分布するだけでなく, 構造運動や火山活動の影響を受け複雑かつ脆弱な岩盤が多いことから, 斜面には岩盤崩壊の素因となる地質的不連続面がよく発達している。また, 国土の3/4を占める山地は隆起が進行しているうえ, アジア大陸東側のモンスーン帯に位置し大気大循環に伴う台風, 梅雨, 降雪など降水量が多いことから河川の侵食は活発で, 岩盤崩壊の誘因となっている。さらに冬季の凍結融解, 多発する地震, 人為的な掘削なども岩盤崩壊の誘因となる。

岩盤崩壊は目に見えるような変位が現れてから最終的な崩壊までの時間が短いことが特徴であるが, 一方その不安定化は風化や長期間にわたる重力クリープで徐々に亀裂面が拡大伸展することによるため, 斜面の安定度や崩壊の発生時期を定量的に評価することが難しい現象でもある。また, 地質や地形条件によって崩壊の形態も滑動, 転倒, 崩落, 座屈などと様々である。

本パネルディスカッションでは, 軟岩から硬岩で構成された急崖部で発生し, その安定が斜面の構成岩の不連続面によって支配される岩盤崩壊を, 防災, 減災の視点から取り上げた。規模としては $1 \times 10^3 \text{m}^3$ の小規模岩塊から, $1 \times 10^6 \text{m}^3$ 程度までの崩壊を対象としている。

1.2. 岩盤崩壊においてリスクマネジメントが必要とされる背景

岩盤崩壊による災害は, 崩壊現象が社会にかかわることによって生ずるものであるが, 岩盤崩壊の発生や発生後の社会に与える影響には不確実性があるとともに, 災害の形態や規模も様々で, その予測は一般に困難である。一方, 昨今の経済環境においては, 災害を防止するための財源も限られており, また, 事業費のコスト削減に対する社会ニーズも高まっている。

このような背景のもと、確率論的技術とファイナンスとの統合手法でもあるリスクマネジメント（図1-1）には、以下の役割が期待されている。

- ① 自然現象の不確実性に対する評価手法
- ② 災害予防、事前対策として実施される技術
- ③ 財源の合理的、計画的な予算配分、事業の優先順位付けのための評価手法
- ④ 防災投資の妥当性に関する説明資料の構築

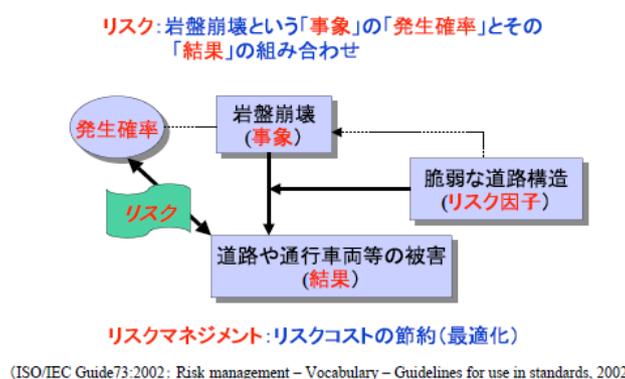


図1-1 リスクマネジメントの概念

ここでリスクとは、岩盤崩壊という「事象event」がある「発生確率probability」によって、被害を受ける可能性のある「リスク因子source」のもとで発生したとき、その被害を受けた「結果consequence」と「発生確率」とを組み合わせコストとして評価したものをいい、リスクマネジメントとは、そのリスクコストを節約（最適化）することをいう。

例えば、道路近傍で岩盤崩壊が発生することを想定すれば、岩盤崩壊に対する脆弱な道路構造をリスク因子として、道路や通行車両等へ被害（損壊、人的被害、経済損失など）が及ぶことが結果となり、この場合のリスクは被害額と発生確率とを乗じた値となる。

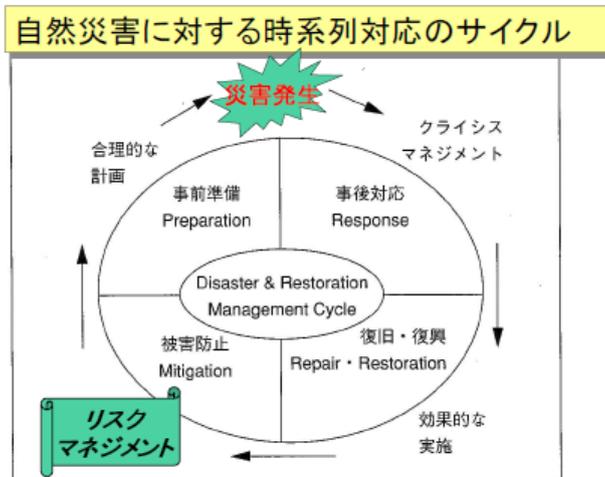


図1-2 リスクマネジメントの位置づけ¹⁾

また、リスクマネジメントは将来予想される被害を防止することを目的とするため、図1-2に示すように平常時に行われる意思決定や対策のための技術である。

1.3 リスクマネジメントの流れ

リスクマネジメントは、ISO^{2),3)}の定義に従えば、岩盤崩壊では図1-3に示すリスク分析、リスクアセスメント、リスクマネジメントの3つのプロセスからなり、5W2Hなどに関するシナリオを想定し、一連のプロセスでリスクの最小化、最適化を計るものである。シナリオは災害履歴、技術者の経験、ブレインストーミング法、KJ法、アンケートをベースにした方法などで不確実な将来を予測するものである。なお、本稿での用語定義はISO/IEC Guide73:2000, JIS TRQ0008:2003に準ずる。

5W2H についての予測は、岩盤崩壊(What)が発生したときに、

Where : どこで→災害の引き金となる岩盤崩壊の事象が対象地域のどこで発生し、どの範囲まで影響する可能性があるか(リスク要因となりうるか)を、経験的手法、数値シミュレーションなどによって予測する技術。災害の引き金となる岩盤崩壊の発生が予想されたとき、その発生源、影響範囲をハザードマップ(災害予測図)として表現し、これをリスク分析対象に設定する。

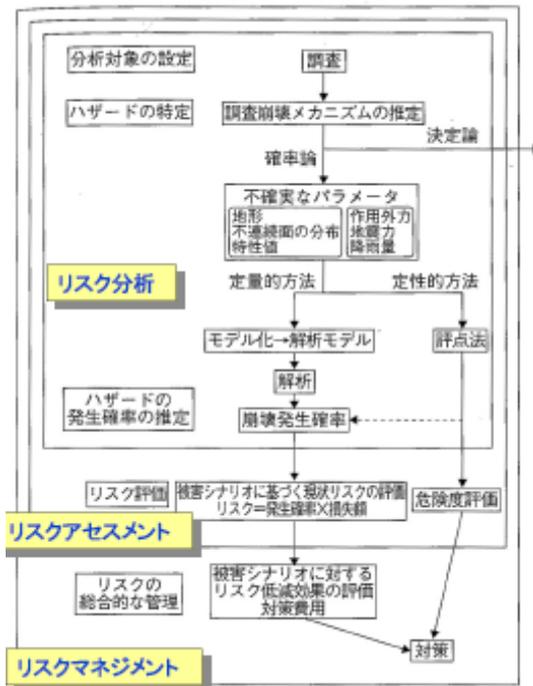


図1-3 岩盤崩壊におけるリスクマネジメント⁴⁾

When : いつ→岩盤崩壊の事象が発生する確率を推定する技術で、経験に基づく方法、発生時期を特定するためのモニタリングに基づく方法および不確実性を考慮に入れた確率論に基づく方法がある。

Whom : なにに→(例) : 道路, 住宅, 公共施設などに被害が及ぶかについて, 落石実験や数値シミュレーションにより推定し, リスクに影響を与えたりリスクの影響を受ける関係者であるステークホルダー**stakeholder**を特定する。ステークホルダーは, 例えば事業者, 管理者, 利用者, 国民, 政府, 社会全般などが相当する

Why : なぜ→(例) : 降雨に伴う飽和度, 間隙水圧, 岩盤強度などの変化, 地震による慣性力などの誘因に関する調査や数値解析によるパラメトリックスタディなどで, 岩盤崩壊の原因を推定する。

How : どのように→引き金となる事象の発生から災害発生に至る一連のシナリオを予測する技術で, 岩盤崩壊では例えば, 剥離崩落, 転倒, すべり, 座屈, 複合などの破壊形態についての解析を行い, イベントツリー解析 **event tree: ETA**, フォールトツリー解析 **fault tree: FTA**, ヒューマンエラー解析 **human error: HE** などの手法で, 被災事象の発生確率, 被災状況, 被災規模を想定する。

How much : 損害の程度の評価を行う技術で, **ETA, FTA** などを用いてえられた各被害シナリオの事象の発生確率に基づきリスクの算定を行う。

工学分野でのリスクは, 被害が想定される事象に対して, その事象の発生確率と事象の結果に伴う損失(被害額)を掛け合わせた損失期待値

expected loss ($R = \sum P_i \times C_i$)

として定義されることが一般的である。ここに、 R は損失期待値、 P_i は事象 i の発生確率、 C_i は事象 i が発生した場合の損失である。どの程度の被害額か（例：人身損失、物的損失、社会損失などの算定、岩盤崩壊対策の設計施工の費用）を算定する。

本パネルディスカッションでは以上の予測に関する調査、計測および解析のそれぞれの役割について、現状と課題を紹介する。

1.4 リスクマネジメントの各プロセス

(1) リスク分析 risk analysis

リスク分析は、利用可能な情報を系統的に用いてリスク因子 (**source:ハザード**)を抽出・特定し、リスクを算定するもので、岩盤崩壊の事象(**event:What**)がどこで(**source:Where**)発生し、どのような結果(**consequence**)になりうるのか一連の事象の発生確率(**probability:When**)はどの程度か、誰(**stakeholder:Whom**)に対しどのような損害や損傷(**harm:How**)がありうるか、さらに各リスクを算定(**risk estimation:How much**)するプロセスである。

(2) リスクアセスメント risk assessment

リスク分析からリスク評価までの全てのプロセスをいい、リスク分析で算定された各リスクを必要なリスク基準**risk criteria**と比較し、危害の重大さやリスクを総合的に評価**risk evaluation**する技術である。

リスク基準は、リスクの重大さを評価するために適用される尺度で、安全性、信頼性、関連する経費、法律及び法令による要求、社会経済及び環境に関する面、関係者の関心ならびにアセスメントに対する優先順位などを含む指標がある。例えば、安全性に関する指標では人身損失を最小にする、社会全体にとっての社会経済学的指標では費用便益分析（対策における必要な投資額 **Cost** と対策によってもたらされる損失の低減額 **Benefit** を比較する）に基づき費用対効果を最大にする、利用者にとっての信頼性・利便性指標では道路通行機能を最大にするなどの指標である。

リスク基準を設定する手法としては、過去に体験した危機に対する人々の行動パターンからの統計的な分析やアンケートによって許容リスクレベルを抽出する方法、自然災害や他の人為災害によるリスクと比べてある水準以下にリスクレベルを設定する方法などがある(図 1-4)。

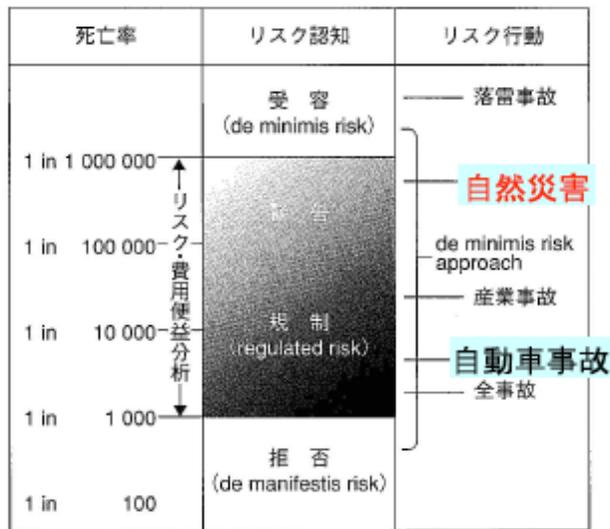


図1-4 リスクの社会的需要レベルによる経験的規制のアプローチ¹¹⁾

経済的な評価における費用便益分析はリスクマネジメントにおける各リスク対策について実施される。

リスクアセスメント手法の研究が進んでいる道路防災分野では以下の研究が行われている。すなわち、道路近接の斜面崩壊などに伴う損失について、災害履歴、降雨確率、防災点検の結果等を用いてフラジリティカーブ（降雨量と斜面の壊れやすさの関係曲線）を求め、これを崩壊規模や道路交通量から計算した人身損失や迂回損失等の被害額に反映させて想定被害額を算定し、リスクカーブ（想定被害額と発生確率の関係曲線）として表示するもので、対策工、通行規制、日常管理などの対応策の選定、対策工の優先順位や最適規制雨量値の設定などを目指している(図1-5)。これらの損失は人的・物的補償費、復旧費のような直接損失と、道路利用者が被災後に道路が復旧するまでの迂回走行することなどで被る間接損失とに分類され、迂回・走行時間損失がコストとして支配的であること、また、損失額は斜面の想定崩壊土量や人身損失額の違いによって大きな影響を受けることが知られた¹³⁾。

なお、災害による社会的損失の定量化は、「治水経済調査マニュアル（案）」などの各種防災事業の事業評価指針においても、災害の発生頻度と損失の大きさを掛け合わせた年平均損失額(年期待値)が指標とされているが、このほか社会的損失の平均値(期待値)からの乖離の程度を考慮した年間確率分布でリスクを定義する考え方もある。

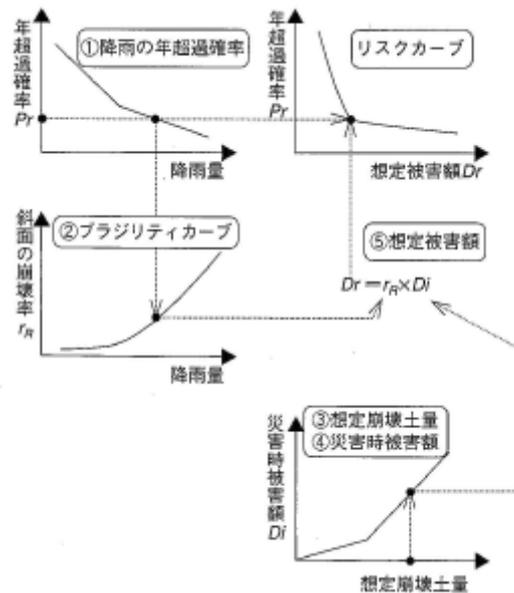


図1-5 リスクカーブ（想定被害総額）の作成手順¹²⁾

(3) リスクマネジメント risk management

リスクの最小化・最適化を目的として組織や事業を指揮・管理し、リスクを変更させるための対策 **risk treatment** を検討、選択、実施するすべてのプロセスをいい、リスクアセスメントにおける費用便益分析を参考にどのような事前の対策が合理的かについて、社会的な合意が得られるような対策を講じるための技術である。

また、社会的合意を得るための一連のリスクに関する情報の交換、共有を図るリスクコミュニケーション **risk communication** や防災教育、防災訓練などもリスクマネジメントに含まれる。

適切なリスクマネジメントを行うことによって、リスクを変更させ、社会資本の整備における費用対効果を最大化することが期待される。例えば近年、橋梁、トンネルなど土木構造物の計画・設計・施工・維持・補修・更新を通じたアセットマネジメントに、リスクマネジメントを適用することによって、構造物のライフサイクルコストを最適化する検討も行われるようになってきた。

リスクマネジメントにおける災害対策は、被害が出るのは避けられないが出来るだけ被害を少なくしようとする減災の試みである。一般に発生確率が高くともある程度の外力までは構造物によるハード対策で被害抑止を図ることが出来るので、これを防災の基本とし、一方、発生確率は低くとも外力が大きい場合には被害額が大きくなるからハザードマップによる避難などソフト対策で減災を図るものである(図 1-6)。

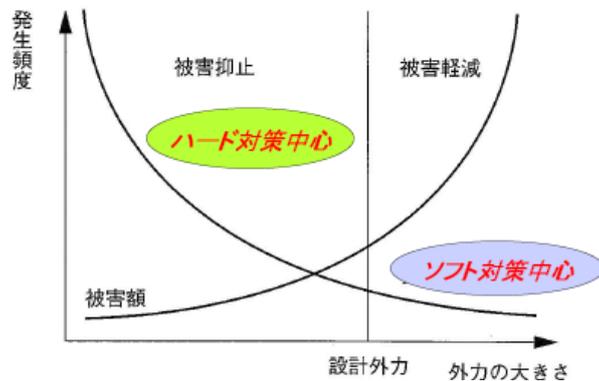


図 1-6 防災対策の概念図¹⁴⁾

リスク対応は一般に以下の 4 つに分類される。

① リスクの保有 **risk retention**/ 発生確率が低くリスクも小さい場合にはその損失を負担する，例えば，軽微な浸水や土砂災害による損失であれば受け入れるといった対応をいう。一般に岩盤崩壊では崩壊規模やエネルギーが大きくその被害も甚大であることから，リスクの保有は該当しない。

② リスクの最適化（低減） **risk optimization (reduction)**/ 特定のリスクの発生確率の低減や被害の減少を図る対応によって，リスクを最小化することをいう。

ハードな対策工による災害事象の発生防止，洪水氾濫被害の低減を目指した遊水地や浸水・豪雪被害を低減する高床式住居構造などの土地利用や住居様式の変更がこれに相当する。岩盤崩壊では発生源の予防工対策や崩壊の規模が小さな場合における防護工などの対策が相当する。

ハードな対策の設計にあたっては従来の安全率規範に代わり，機能設計の概念に基づき斜面の耐用年数・重要度も考慮したリスクを損失期待値として評価し，その値と対策工の工費の和を総コストとしてこれを最小化する斜面の設計法も研究されている(図 1-7)。

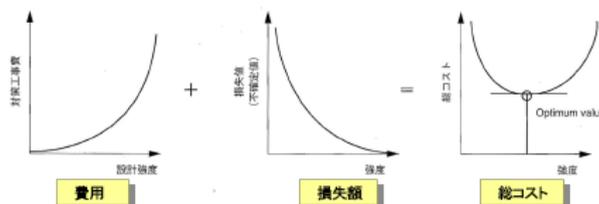


図 1-7 総コスト最小化原理¹⁾

③ リスクの回避 **risk avoidance**/ リスクのある状況に巻き込まれないようにする意思決定またはリスクのある状況から撤退する行動をいい，例えば道路防災では斜面モニタリング

による通行規制や降雨時通行規制，道路の付替えなどが，また，土砂災害警戒区域では家屋の移転が，さらに浸水や土砂被害が予想される区域では豪雨時の避難などが相当する。岩盤崩壊では，計測によるモニタリングでの通行規制がこれに該当するが，崩壊の形態によっては計測による発生時期の予測は，なかなか困難である。

④ リスクの移転 **risk transfer**/ 将来予想される損失の負担を他者と共有，すなわち保険や他の契約などで担保することが相当する。例えば，地震災害や火山災害など激甚な被害に対する災害保険で復旧・復興への備えにする制度をいう。

アメリカの災害救助法(スタフォード法 1988) では公的援助として，甚大な被害を受けた個人及びその家族に対して直接的な援助を行うことも，自然災害に対処する連邦政府の責務のひとつとされ，被害者の生活基盤を早急に回復させ，その後の自助努力を促進することが，その地域の経済復興のためにも合理的な政策と考えられている。

なお，このようなリスクの移転は新しいリスク（保険料の未徴収など）を創出したり既存のリスクを変化させる（耐震構造への補強未実施による倒壊可能性の増加など）場合があることから，法律または政府の規制によって，リスク移転は制限，禁止または命令されることがある。

しかしながら，わが国では，リスクの移転によって岩盤崩壊を含めた自然災害に対応することは歴史的，社会的に難しく，事例は少ない。

1.5 リスクコミュニケーション **risk communication**

リスクコミュニケーションは事業者や行政などの意志決定者と専門家や一般市民などの他の関係者との間におけるリスクに関する情報の交換または共有を目的として，情報の送り手・受け手・内容・媒体などを検討する技術で，社会的合意形成システムとして一連のリスクマネジメントでは不可欠である。

一般にリスクアセスメントで評価された確率・統計的な客観リスクと，個人的，社会的，文化的，環境的，時代的に恐ろしさ・未知性・災害規模・災害特性などからイメージされる主観リスクとにはずれ（認知バイアス）があることから，事象の持つ利便性と危険性を関係者が共有し，合意形成する必要がある。

また，現実に大きな災害が発生している対象についてリスクコミュニケーションを行うことは無意味であることから，対象の持つ客観的リスクそのものが低減されるすなわち，無災害・無事故の実績がリスクコミュニケーションの信頼性の前提となる。

1.6 課題

岩盤崩壊の防災面でリスクマネジメント手法を実用化するには，以下の課題がある。

① リスク分析では、リスク因子の特定手法（ハザードマップ・災害発生シナリオなど）に関する十分な客観性の確保が必要である。また、不確定量の確率・統計学的な表現・モデル化にあたり十分なデータの蓄積が必要である。すなわち、ETAやFTAで最終事象の発生確率を求める場合、関連する全ての基本事象における確率値が必要であるが、現状ではデータが不備で困難なことが多い。

さらにハザードの脆弱性曲線の算定の際、統計モデルを用いるには崩壊履歴などの多くのデータが必要であり、確率モデルを用いるには解析パラメータの確率密度関数が必要であるが、全国的にも特性が判明している岩盤崩壊の事例はまだ少ない。

なお、岩盤斜面では長時間の経過とともに岩盤クリープが進行し状況が変化することから、データを新しく入手し現況を反映したリアルタイムのリスク分析が逐次行われていくことが望まれよう。

② リスクアセスメントでは、安全性に関する目標や最低限確保すべき水準の設定手法、リスク基準に関する十分な客観性の確保が必要で、公衆のリスク受け入れる可能性を含め、これらの社会的合意も必要である。

③ 対策工の設計における従来の決定論的手法における安全率に対応するリスクマネジメントの指標は、確率・統計的に評価した災害発生確率値か損失期待値となる。

このうち、確率値に関してはアメリカの原子力委員会の例や土木学会の「構造物のライフタイムリスクの評価」などの研究例があるが、構造物の安全性を確保するための確率値がどの程度必要かを判断するのはきわめて困難であり、この的確な設定手法が必要である。

また、期待値で評価する場合は、構造物が破壊したときの被害額で評価することなどが考えられるが、減災を目指したリスクマネジメントでの構造物が破壊する可能性を含んで設計するいわゆる限界設計の考え方に、社会全般の共通認識が得られるようリスクコミュニケーションを深めなければならない。

④ リスクコミュニケーションを通じて、従来の安全率規範に代わるリスクマネジメント手法に関する社会的合意が得られることが必要である。

⑤ 最近、「道路のアセットマネジメント」など、公共の建設物の維持管理にアセットマネジメントの手法を取り入れる例が徐々に増えてきた。公共の建設物の場合は、国民の税金を原資としているため、安全性や利用者満足を確保しながら、いかに長期的な費用を低減するかがアセットマネジメントの重要なポイントである。国土交通省でも、「道路のアセットマネジメント」を「道路管理において、橋梁、トンネル、舗装等を道路資産と捉え、その損傷・劣化等を将来にわたり把握することにより最も費用対効果の高い維持管理を行う概念」と定義し、それを実現するためのマネジメントシステムの構築を進めている。

わが国の社会資本の多くは1960年代から1970年代初頭にかけて急速に整備された。今後は、高度成長期に整備されたこれらの多数の構造物が一斉に老朽化の時期を迎え、補修・補強対策や予算措置など維持管理問題が表面化する。岩盤崩壊対策としては斜面の不安定

化だけでなく、構造物のライフサイクルコストも考慮したリスクマネジメントの手法を取り入れてアセットマネジメントを行うような、公共の建設物管理の重要性はますます高まることが予想される

参考文献

- 1) 大津宏康：斜面災害に対するリスクの評価方法研究の現状，日本地すべり学会関西支部シンポジウム「斜面災害リスクの定量的評価」， pp.1-21, 2003.
- 2) ISO/IEC Guide 51 : Safty aspect - Guidelines for their inclusion in standards (安全分野でのリスクの定義) ， 1999.
- 3) ISO/IEC Guide 73 : Risk management - Vocabulary - Guidance for use in standards (ビジネス分野も考慮したリスクの定義) ， 2002.
- 4) 土木学会：岩盤崩壊の考え方—現状と将来展望—[実務者の手引き] (CD-ROM版)，第6章リスク評価と適用例，2004.
- 5) 松尾 稔，上野 誠：斜面崩落防止のための信頼性設計に関する研究，土木学会論文報告集，Vol..276， pp.77-87, 1978.
- 6) Hoek.E : Practical rock Engineering, 1998
- 7) 伊藤 洋，北原義浩：地盤物性のバラツキの評価法(その1)
地盤物性のバラツキの実態とその表示法，電力中央研究所報告，No.384025, 1985.
- 8) 伊藤 洋，北原義浩：地盤物性のバラツキの評価法(その2)
地盤物性のバラツキが地盤の安定性に及ぼす影響，電力中央研究所報告，No.384026, 1985.
- 9) 伊藤 洋：土質データのバラツキと設計，3. 地盤データの二次処理 (統計的処理手法と実際)，土と基礎，Vol.35, No.4, pp75-82, 1987.
- 10) (社)日本大ダム会議リスクアセスメント分科会：ダム分野におけるリスクアセスメントについて，大ダム，No.188, pp.8-60, 2004.
- 11) 池田三郎：環境リスク管理への政策科学—リスクの規制と選択について，日本リスク研究学会誌，Vol.8, No.1, p.84, 1997.
- 12) (独)土木研究所材料地盤研究グループ土質チーム：道路斜面災害のリスク分析・マネジメント支援マニュアル(案)，土木研究所資料，No.3926, 2004.
- 13) 恒岡伸幸，小橋秀俊：合理的なリスクマネジメント技術の開発，新道路技術五カ年計画(平成10-14年度)成果報告書，国交省国土技術開発総合研究所，(独)土木研究所，pp.190-195, 2003.
- 14) 河田恵昭：巨大な自然災害と防災工学，リスク学辞典，日本リスク研究学会，TBSブリタニカ，pp.129-131, 2000
- 15) 小俣新重郎：リスクマネジメントの技術—防災分野の予防・事前対策—，土木施工，Vol.45, NO.10, pp.16-22, 2004

2.1 リスク評価のための調査の役割

川崎地質株式会社 栃本 泰浩

2.1.1 はじめに

リスク評価において「What」はその対象を指し、本論では「岩盤崩壊」である。また、「Whom」はリスクに影響を与えたりリスクの影響を受ける関係者（ステークホルダー）を指し、保全対象が道路の場合には、斜面や道路を管理する事業者・管理者、道路利用者などが該当する。一方「Where」は岩盤崩壊が懸念される場所を指し、リスク評価においては災害の引き金となる岩盤崩壊の発生箇所、規模、発生メカニズムを推定し、その影響範囲を経験的手法や数値シミュレーションなどによって予測する必要がある。本文ではまず岩盤崩壊の発生メカニズムについて述べ、次にリスク分析のために必要な調査内容や役割を示す。

2.1.2 岩盤崩壊のメカニズム

一般に、斜面変動の根本的原因とみなされる因子群を「素因」といい、斜面変動発生の引き金となる直接的な因子を「誘因」という¹⁾。素因は斜面を構成する物質の性質およびその状態に該当し、地質的要因と地形的要因に大別され、植生条件なども含めて考える場合がある。誘因はこれら地質的要因や地形的要因に影響を及ぼす外的条件に関する因子群で、降雨・融雪・地震・火山活動・地形改変などが挙げられる。誘因は変動発生の直前だけでなく、それ以前から長期間にわたって地質体に作用し、素因を醸成する働きをしている。

岩盤崩壊の場合、一般に不連続面の発達や岩盤の劣化などが素因であるが、これらは非常に長期間に生じたものであり、斜面変動発達史との関連で崩壊メカニズムを論じることが重要で、第四紀地殻変動の活発な地域を素因を形成しやすい条件として挙げることもできる²⁾。付加体のようにその初生的な地質構成や地質構造自体が崩壊の素因としてなり得る場合もあれば、初生構造形成後のテクトニックな運動や侵食作用が地質体の劣化を促進し、素因を形成していく場合もある。このような劣化を促進し不安定化を増大させる因子を誘因と捉えることもでき、崩壊直前に作用した外的因子のみを取り上げると、岩盤崩壊メカニズムの多面性を見落とすことになりかねない。このため、岩盤崩壊を引き起こす要因を「持続要因」と「加速要因」に区分している場合がある³⁾。図2-1-1に岩盤崩壊のフローを示す。

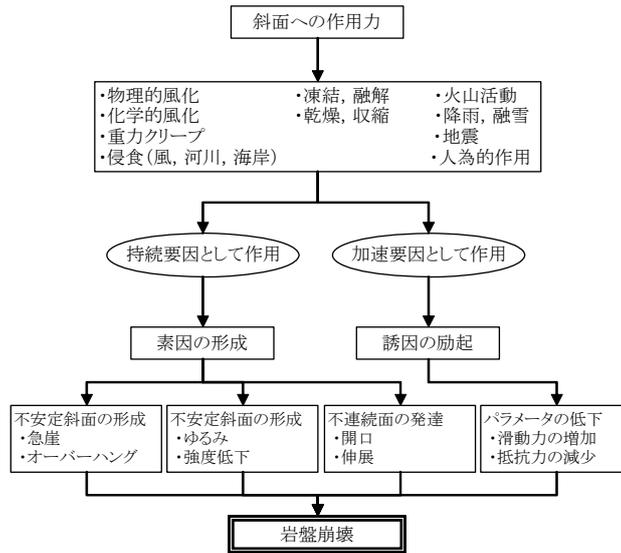


図2-1-1 岩盤崩壊のフロー⁴⁾

持続要因は岩盤に対して常に作用している要因で、斜面内に生じている引張力、せん断力、圧縮力や物理的・化学的風化などが該当し、不連続面を開口させたり岩盤を劣化させたりする作用力である。加速要因は崩壊の引き金となる要因であるが、基本的には前者と同様の作用力である場合が多い。岩盤に対する各種作用力が崩壊の素因を醸成し、やがて岩盤が変形や崩壊を始める直前の状態に達し、同様な作用力がさらに働いて力学的バランスを保つための変位・変形量のしきい値を超えたときに崩壊が発生するものと考えられる。このしきい値がどこにあるのかが、個々の現場で作用力あるいは変位・変形量の面から定量化できれば、崩壊の予知・予測の可能性が見えてくるのであろう。よって岩盤崩壊のリスク評価のためには、発生場所や形態・規模のほかに発生メカニズムを明らかにする必要がある。

2.1.3 概略調査

図2-1-2は岩盤崩壊に対する調査と評価を示すもので、調査の基本は現象の正確な把握という自然要因と影響範囲や影響度の想定という社会要因の2つの側面に集約される。リスク分析では、岩盤崩壊がどの程度の頻度（確率）で起こり、それが発生するとどの程度の影響を及ぼすのかを正確に把握（予測）することが重要となる。このためには危険斜面の抽出（Where）のみならず、崩壊形態と規模（How）や崩壊メカニズム（Why）、安定度（When）および保全対象（Whom）や影響範囲（How）についての評価が重要となる。

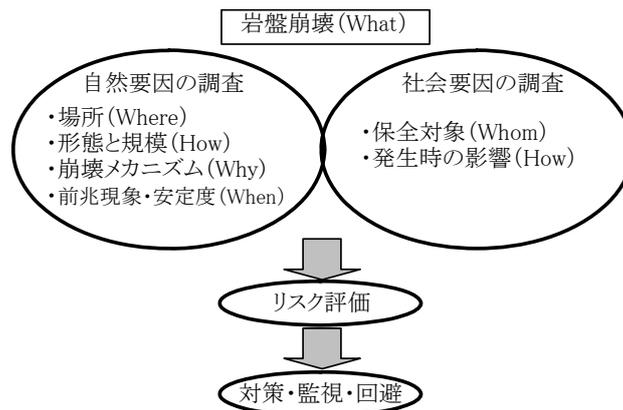


図2-1-2 岩盤崩壊に対する調査と評価

急崖を呈する岩盤斜面においては、従来の一般的な地質調査法の適用は困難であり、個々の岩盤斜面の実情に応じて、調査目的を明確にして段階的（概略調査と詳細調査）に調査検討が進められる。概略調査とは主に資料調査・目視観察・地表踏査をもとに岩盤崩壊の範囲・規模・可能性などに対する概略判定を行うもので、その見極めは重要である。一方、詳細調査は解析や対策検討を念頭に置いた調査である。

(1) 危険な岩盤斜面の抽出（Where）

リスク分析においては、危険な岩盤斜面の抽出が基本事項であり、概略調査段階では、岩盤斜面における危険要因の抽出や崩壊発生範囲の推定が主眼となる。これまでの岩盤崩壊事例からその発生位置に関して次のような知見が得られている⁴⁾。

- ・ 河川の源流・峡谷・攻撃斜面、海食崖などの侵食の著しい地形に該当する。
- ・ 崩壊斜面としてはやや緩傾斜で地すべり的な事例もあるが、傾斜 50 度以上の急崖斜面が多い。突出した岩体や引張亀裂および座屈が見られる岩体には要注意である。
- ・ 地質的には、新期の堆積岩や花崗岩をはじめとする深成岩に崩壊事例は少なく、火山岩、変成岩、および比較的古い時代の堆積岩に崩壊事例が多い。

資料調査等においては、これらの事項に着目して危険な岩盤斜面を抽出する必要がある、次のような調査手法を採用することが多い。

- ・ 地形図判読、地質図判読、空中写真判読、既往災害履歴調査、建物・道路などの現況構造物の調査

広範囲における危険斜面の抽出や絞り込みにおいては、地形判読や空中写真判読が従来から基本的な調査手法であるが、その判定根拠を明確にすることが重要である。最近では数値地形データを処理して、傾斜量図からのリニアメントの抽出など特徴的な地形を抽出することも可能となっている⁵⁾。

(2) 崩壊形態と規模および影響範囲の調査（How）

概略調査の段階では、崩壊発生場所の推定とともに、大局的な見地に立って、剥離、トップリング、滑動、座屈、あるいはそれらの複合といった区分を行い、地形・地質的観点からその規模を推定する。

一方、崩壊発生時の影響度の調査も必要で、崩落物質の到達範囲の予測や保全対象との位置関係を把握する。過去の事例分析によると、崩落高さと到達距離はおよそ1:1の関係にある⁶⁾。また地形要素や地質要素を説明変数とした数量化解析に基づく予測式より到達範囲を推定する方法もある^{7),8),9)}。この手法は広域的に得られる情報をもとに統計解析により崩壊時の影響を評価するもので、リスク評価において有用な手法と考えられる。

(3) 崩壊メカニズムの推定 (Why)

2.1.2で述べたように、持続要因および加速要因を抽出しその機構を推定する必要があり、崩壊形態によって前兆現象や発生場所が異なるので、メカニズムの推定は崩壊危険度の評価あるいは対策と監視においても重要となる。

(4) 安定度の簡易な判定法 (When)

一般に地すべり調査・解析では地質や運動タイプ別に現況安全率の目安が与えられているが、岩盤崩壊に対してはそのような目安を与えられるほど情報の集積や分析が進んでおらず、現状の安定度評価は一般に難しい。

現地踏査によって危険度を評価するには、岩盤崩壊の前兆現象を確認することが重要である。この際、図2-1-3に示すように、前兆現象は岩盤崩壊の形態によって種類や発生場所が異なることに留意する必要がある。

安定度の概略判定法としては、判定の根拠となるデータの有無を明確にして、簡易ではあるが極力定量的かつ客観的な評価に努めることが肝要であり、たとえば次のような評価方法が挙げられる。

- ・ 道路防災点検の安定度調査表¹⁰⁾
- ・ SSR法 (Slope Stability Rating System) ¹¹⁾
- ・ SMR法 (Slope Mass Rating) ¹²⁾
- ・ エキスパートの判定 (判定ルールの明確化が必要)

2.1.4 詳細調査

(1) 幾何形状調査 (三次元的表現)

岩盤崩壊の発生場所と影響範囲を詳細に評価するためには、発生源の背後斜面を含む斜面状況を三次元的に把握し、崩壊時の流下および堆積域の推定や保全対象への影響度評価を行う必要がある。

岩盤斜面状況を把握するためには、地質技術者による登攀調査が最も有効であるが、急

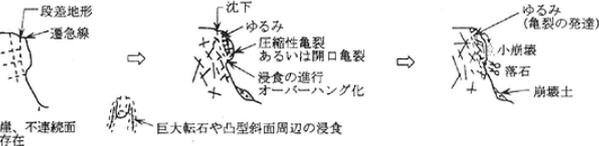
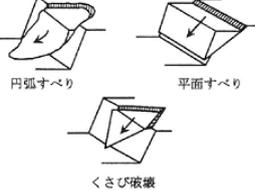
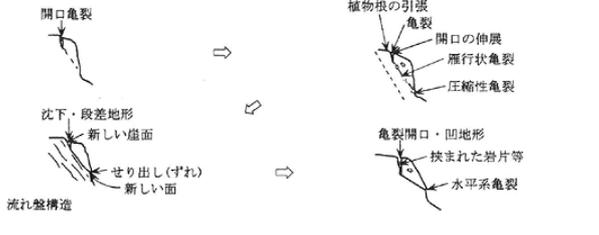
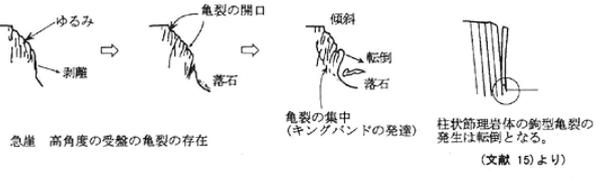
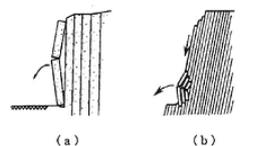
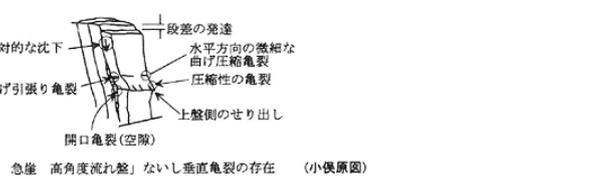
岩盤崩壊の形態	模 式 図	前兆現象 および 着目点
<p>崩 落</p> <p>岩盤からなる急斜面または急崖より、節理等の不連続面を境として、岩塊が剥離する現象で、崩落岩塊が自由落下、跳躍、バウンド回転によって空中を落下する運動形態をいう。</p>		
<p>す べ り</p> <p>ひとつあるいは数箇所面に沿い、せん断変位する運動形態をいい、円弧すべり面に沿う回転すべりや平面すべり面に沿うすべりとなる。また、くさび破壊は岩すべりの形態で、交差するいくつかの不連続面に沿って、これより上部のくさび状岩塊がすべる運動形態をいい、岩盤斜面に特有なものである。</p>		
<p>転 倒</p> <p>移動岩塊に働く重力、近接ブロックの押す力または亀裂間の水圧に伴う転倒モーメントによって、移動岩塊の下端部を支点として前方へ回転する運動形態をいう。</p>	 <p>A は最初に崩壊した岩塊 B は転倒後、2つに分離した岩塊 C は転倒中の岩塊 D は転倒中でCにもたれた岩塊 E は転倒前の岩塊</p>	 <p>急崖 高角度の受盤の亀裂の存在</p> <p>文献 15) より</p>
<p>座 屈</p> <p>節理や層理がほぼ垂直に発達している岩盤などで、節理や層理によって分離した板状または柱状の岩体が、その自重によって亀裂や劣化の箇所座屈し、折れ曲がるように上部岩体ごと崩壊する形態をいう。</p>		 <p>急崖 高角度流れ盤のない垂直亀裂の存在 (小俣原図)</p>

図 2-1-3 岩盤崩壊の形態と前兆現象⁴⁾

峻で比高差が大きい岩盤斜面では調査に対する制約条件は大きい。このような急崖斜面では、表-1に示すような観察支援技術の導入も重要である。これらの調査技術を利用して、一般に崖マークなどで表現されることの多いオーバーハングや岩塔状箇所など凹凸が激しい岩盤斜面の特徴を、鳥瞰図や正面図など幾何形状として表現し、さらに三次元数値データとして数値解析モデルに活用することも可能となる。

表2-1-1 幾何形状の調査方法⁴⁾

測量・計測・調査方法	可能な縮尺	利点	欠点
写真測量 (垂直空中写真)	1/2,500程度まで (樹木の影響のない場合より大縮尺可能)	広域的に測量できる。	樹木の陰となる部分やオーバーハング部の測量が不可能。
写真測量 (斜め空中写真)	1/100程度まで?	オーバーハング部にもある程度対応できる。	樹木の陰となる部分の測量が不可能。日陰も測量困難な場合がある。
写真測量 (地表から)	1/100程度まで?	同上(簡易なシステムあり)	同上
実地測量(地表測量)	任意の縮尺	測定点は正確で信頼性高い	手間がかかる。急崖部は測量困難。
空中レーザープロファイラー	1/1,000程度まで (測定誤差30cm~1m程度(樹木等の影響のない場合))	広域的面的に測量できる。多少葉がある場所でも地表を測量できる。図化に要する時間が少ない。	樹木の陰となる部分の測量が不可能。春~秋期は葉により精度が落ちる。急崖~オーバーハング部は測定困難(飛行方向による)
地表からの三次元レーザー測定	1/100程度まで? (測定誤差数cm程度(樹木等の影響のない場合))	面的に測量できる。オーバーハング部にも対応。図化に要する時間が少ない。	樹木の陰となる部分の測量が不可能。測定距離が200~300m以内に限られる。

(2) 不連続面調査

岩盤崩壊は特定の不連続面の分布に規制されて発生することが多く、不連続面の分布特性を把握することは重要である。不連続面情報をもとに岩盤斜面をモデル化し、数値解析の適用などにより崩壊メカニズムの推定が行われる。

不連続面の成因は、地質学的に岩石の生成過程、変成作用、造構応力の作用、地殻表層部での風化・侵食・重力作用に大別できる¹³⁾。よって不連続面調査は、構造地質学的手法や岩石学的手法による不連続面の成因や形成時期の把握からはじまり、応用地質学的手法による不連続面分布やその連続性の把握、岩盤工学的的手法による不連続面を含む岩盤物性の把握、および計測工学的的手法による不連続面を含む岩盤挙動の把握を行う。

不連続面調査には様々なものがあり、幾何情報と力学・透水性情報を得るために、現地条件に応じて適切な手法を選定し、その結果を岩盤斜面モデルに反映させる必要がある^{14),15)}。表2-1-2は幾何形状(不連続面の分布や連続性など)に関する調査方法を示す。不連続面分布調査においては、調査する壁面の方向やボーリング孔の掘進角度によって、得られるデータに偏りが生じる場合があるので、複数の手法を組合わせて適宜行う必要がある。

表2-1-2 不連続面分布や連続性の調査方法⁴⁾ (一部加筆)

調査方法	方法	利点	欠点
地表の目視観察	岩盤表面を直接目視で観察する。	面的かつ詳細に観察できる。走向傾斜がわかる。	岩盤内部の状況は不明。
ボーリングコア観察	鉛直、斜め、水平などの方向にボーリングを行い、コアを観察。	地表の目視観察と同様に直接手にとって観察できる。	開口亀裂が密着した不連続面か判別困難。傾斜はわかるが走向はわからない。
ボアホールテレビカメラ観察	ボーリング孔などにテレビカメラ、スキャナー、ファイバースコープなどを挿入して観察。	岩盤中の不連続面の開口量や走向傾斜を確認できる。	ボーリング孔周辺の状況しかわからない。
エアートレーサー試験	岩盤表面やボーリング孔などに煙などのトレーサーを挿入して流出個所を観察。	不連続面の連結性の確認ができる。	途中の経路は不明(別なボーリング孔で観察する方法あり)。
真空透気試験	ボーリング孔内から空気を吸引して漏れの程度からゆるみを測定。	ゆるみが定量的に測定できる。	ボーリング孔付近の状況しかわからない。
各種物理検層	弾性波速度や比抵抗を用いて孔壁を画像化する(各種方法あり)。	物性も同時に測定できる。	ボーリング孔付近の状況しかわからない。現状ではボアホールカメラ等より分解能低い。
物理探査	弾性波速度、比抵抗、重力などを用いて断面解析を行える。	面的に探査できる。	概略の傾向が把握できるが、詳細結果は難しく、他の調査手法との併用が必要。

2.1.5 リスク評価に向けて

近年大規模な岩盤崩壊があいついで発生した。中小規模の岩盤崩壊や落石まで含めると、地震や豪雨の後にしばしば発生し、その被害は全国的に及んでいる。構造運動や火山活動の影響が大きい地質分布地域では、岩盤崩壊は至るところで見られる地質学的現象である。

しかし発生条件やメカニズムなど未解明な事項も多く、その定量的な安定性の評価は困難であり研究段階にあるとされている。岩盤崩壊に対してリスク評価を適用していく上で、事例分析情報などをデータベース化して活用していくことが望まれる。

参考文献

- 1) 日本応用地質学会：斜面地質学—その研究動向と今後の展望—, 1999.
- 2) 土木学会：大規模岩盤崩落に関する技術検討委員会報告書, 1997.
- 3) 地盤工学会北海道支部：岩盤崩壊の発生機構と計測技術,2000.
- 4) 土木学会：岩盤崩壊の考え方—現状と将来展望—[実務者の手引き] (CD-ROM版), 2004.
- 5) 神谷泉・黒木貴一・田中耕平：傾斜量図を用いた地形・地質の判読,情報地質, Vol.11, No.1, pp.11-24, 2000.
- 6) 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.

- 7) 桑野健・佐々木靖人・脇坂安彦：多変量解析による岩盤崩壊物質の到達範囲の検討，応用地質，Vol.45，No.1，pp31-41，2004.
- 8) 桑野健・佐々木靖人：急崖岩盤斜面における崩土到達範囲確率予測の実斜面への適用，応用地質，Vol.45，No.3，pp135-144，2004.
- 9) 桑野健・阿南修司・佐々木靖人：岩盤崩壊の崩土到達範囲予測システムの開発，情報地質，Vol.16，No.3，pp199-208，2005.
- 10) (財)道路保全技術センター：平成8年度道路防災総点検要領（豪雨・豪雪等），pp46-63，1996.
- 11) Duncan C. Wyllie：Rock Slope Inventory/Maintenance Programs, Rockfall Mitigation Seminar, 13th Northwest Geotechnical Workshop, 1987.
- 12) Bieniawski：Engineering Classification of Jointed Rock Masses, *Trans.S.Afr.Inst.Civ.Eng.* 15, pp335-344, 1973.
- 13) 鍛冶義和：不連続面の地質学的成因と工学的評価，土と基礎，Vol.47，No.12，pp63-66，1999.
- 14) 中井卓巳・島内哲哉：不連続面の調査と評価（その1），土と基礎，Vol.48，No.1，pp57-62，2000.
- 15) 島内哲哉・中井卓巳：不連続面の調査と評価（その2），土と基礎，Vol.48，No.3，pp55-60，2000.

2.2 リスク評価のための解析の役割

鳥取大学 西村 強

2.2.1 はじめに

斜面安定解析は、道路などの構造物建設に伴う人工斜面の機能性や安定性の評価あるいは防災上の観点から自然斜面の安定性の確認などに日常的に実施されている。今日では、土砂斜面から岩盤斜面に至る斜面の性状の変化に対応して、多くの解析モデルがある。解析手法についてみれば、たとえば、極限平衡解析、有限要素法などの連続体力学に基づく方法あるいは剛体の力学を基本とする個別要素法などが良く用いられる。極限平衡解析では、平面すべりの仮定などの単純化、破壊誘因の確率モデルの導入など可能であるが、要素自体の変形やその進行性（クリープ）などの表現しにくい。一方、有限要素法では、そのようなことは表現できるが、不連続面の情報（方向、間隔など）をどのようにモデルするかこの点に議論がある。対象と目的に応じた選択が重要といえる。

昨今では、市販されている解析ソフトも豊富であり、また、コンピューター自体の高速・大容量とともに、可視化技術（あるいはソフト）の進歩により3次元動画で解析結果を表示することも当然のようにすらなっている。このような状況下においても、解析法の特徴の把握と（与えられた問題に適した）解析法の選定、解析に必要な定数の選択、さらには、解析結果の評価は、技術者の判断に委ねられることには変化はない。

今日では、リスクという時代キーワードに対応して、破壊機構のモデル化とともに、斜面の安定解析に求められている、もう一つの要求は、どの程度の頻度で、崩壊は発生するのか、発生したとすれば、どの程度の被害が想定されるかという観点から解析結果の表示

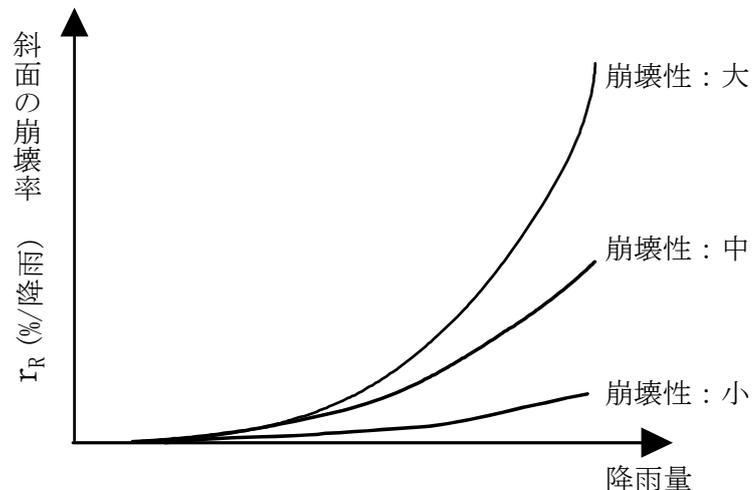


図 2-2-1 フラジリティカーブの模式図¹⁾

表 2-2-1 解析的手法の特徴

解析法	入力条件	長 所	短 所
極限解析法	<ul style="list-style-type: none"> すべり面, 不連続面 せん断強度 など 	<ul style="list-style-type: none"> 簡易 キーブロック判定 	<ul style="list-style-type: none"> 要素内の応力・ひずみの表現 不安定化後の挙動の予測
連続体解析 (例：有限要素法)	<ul style="list-style-type: none"> 地形 応力－ひずみ関係 初期応力, 強度 地下水 など 	<ul style="list-style-type: none"> 要素内変形が表現できる 解析ソフトが充実 様々の構成式の導入が可能 	<ul style="list-style-type: none"> 不連続性の高い岩盤では適用しにくい 崩壊後の表現
不連続体解析 (例：個別要素法)	<ul style="list-style-type: none"> 地形 不連続面の方向 変形特性, 強度 地下水 など 	<ul style="list-style-type: none"> 要素の分離が表現できる 安定－不安定－崩壊を表現できる. 	<ul style="list-style-type: none"> 不連続面の情報に依存しすぎる 解析定数の決定

と説明が求められている。本文では、リスク評価における解析の役割についてまとめることにする。

2.2.2 リスク評価における解析法の役割

斜面におけるリスク評価では、災害規模とその発生確率、それによる被害額を算定することになる。算定の第一段階では、崩壊規模とその発生確率を予測することが必要となる。これには、次のようなレベルがあるとされている¹⁾。

レベル 1：災害履歴の統計処理による簡易予測法

レベル 2：斜面特性に基づくフラジリティを反映した予測

レベル 3：GIS技術を活用した予測法

レベルが上がる（上の例では、数値が大きくなる）ほど、精度も高くなるが、必要とする情報量も多くなり、難易度も高くなるとされる。たとえば、レベル 1 の段階では、検討対象区間内の災害履歴を統計処理する生起確率法や降雨と災害の相関が高いと予想される区間において降雨履歴と災害履歴の関係の分析を利用する手法がある。いずれも、斜面の特性を加味する手法ではないことから、ここで取り扱う解析の役割は少なそうである。斜面特性（崩壊パターンや地形・地質特性等）に基づくフラジリティを反映した予測法では、素因に加え、誘因を考慮して、対象斜面の崩壊率を求める。たとえば、図-1のように、降

雨が誘因とされれば、降雨強度と崩壊率の関係式が必要となる。しかし、土砂斜面の例でも誘因が明らかではない場合が多い。ましてや、不連続面の影響が見逃せない岩盤斜面を対象とするときは、誘因の明確化および（明確にされたとして）誘因の年発生確率の算定等に解決すべき課題が存在していると考えられる。GISを活用したレベルは、レベル1，2を応用したレベルであり、今後の技術開発が期待されるレベルである²⁾。

解析の役割は、調査等によって明らかになった情報（What, Where, When）を元に素因・誘因（why）の明確化、さらに、どのように（How, たとえば、崩壊モードや崩壊規模）結果（consequence, たとえば、到達域やある地点における速度など）に至るか、さらに、その発生頻度を表現していくことが求められると言える。しかし、素因・誘因の特定、その発生頻度の把握が容易でない場合もある。そのような場合は、それらの簡易なモデル化を行い、起こりうる結果の表示が最低限の役割となる。

2.2.3 解析的方法の種類と目的

(1) 解析的方法の種類と事例

岩盤斜面の安定性を評価する（まずは、whyに対する解答を与える）ためには、解析が必要である。よく、経験的方法と解析的方法に大別されるが、本文では、過去の事例に基づいて、経験的な式等によるものを経験的な方法、たとえば、崩壊高さと到達域の事例評価から崩壊土量の到達域の予測を行えば、経験的手法に基づく解析と考える。一方、調査資料に基づき、何らかの力学原理を導入し、安定性や崩壊後の到達域などを評価する場合を解析的方法とする。本章では、後者に関する記述を行う。解析手法を大別すれば、極限平衡法や質点系解析法と数値解析法となるであろう。質点系の解析法は落石など岩塊の落下後の挙動を対象にする例が多い³⁾。さらに、数値解析法は連続体解析と不連続体解析に区別できる。これらの特徴をまとめると表-1のようになる。事例を紹介すると以下のようである。

鷲田ら³⁾は、落石の運動に関する予測手法を報告している。この手法は、質点系の解析法と言えるが、地表面と接するときは、円形の要素を用いて回転運動を表現している。落石に関する数値解析法は、例が多く、Descoedresら⁴⁾は、3次元空間での剛体の回転運動が表現できる3次元解析法EBOULを報告している。Spang⁵⁾は、ROCKFALLと呼ばれる解析法を提案している。これらの落石に対する解析法の目的は、運動を開始した岩塊の軌跡や運動エネルギーの表現にある。それは、防護工の設置位置や大きさの決定に資料となる。

斜面上に存在する岩塊の安定性あるいは斜面そのものの安定性を評価するには、剛体あるいは連続体等のモデル化が中心となる。キーブロック解析による不安定岩塊の抽出極限平衡解析を実施する例が多い。Bergaminら⁶⁾は、スイス国内の山岳道路の落石対策に関する解析を示しており、岩塊の安定のための設計抑止力を求める事例を報告している。有限要素法を用いる場合は、不連続面の影響を考慮するために、母岩としての変形・強度特性

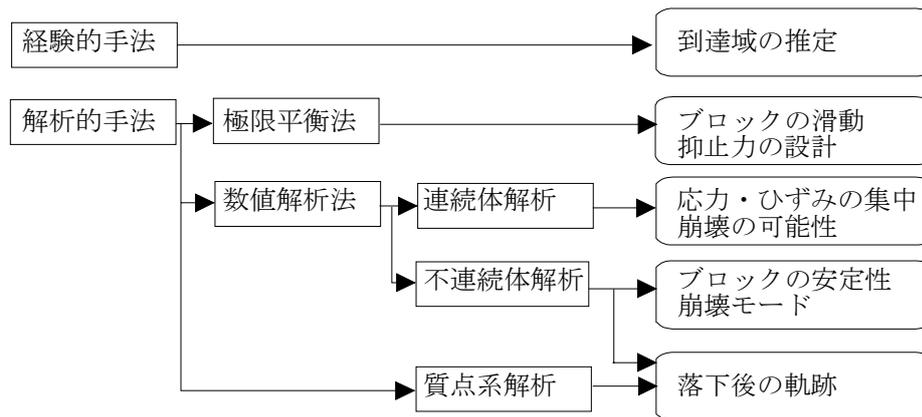


図 2-2-2 解析法の種類と目的（文献 21 の例を一部改変）

に加え、ジョイント要素を用いたり、あるいは、等価な力学特性を有する連続体に置き換えたりすることになる。平野ら⁷⁾は、新第三期火山砕屑岩におけるキャップロック型スラビング崩壊に関する検討を報告している。また、秋山ら⁸⁾は、不安定化が予測される岩体の3次元FEM解析を報告している。このような例からもわかるように、崩壊発生が予測される地点における岩体内の安定性やすべり面の推定などが、解析の目的となる事が多い。

不連続体解析については、個別要素法（DEM）⁹⁾、不連続変形法（DDA）¹⁰⁾や離散化極限解析法（RBSM）などがある¹¹⁾。川村¹²⁾らは、現場落石実験に基づいてDEMの入力パラメータの決定と斜面上の岩塊が落下した際の軌跡や到達距離の解析を実施し、落石対策工の設計に用いた例を報告している。次に、DDAを用いた例についてみると、大津ら¹³⁾は、実際の国道に隣接する岩盤斜面を検討対象とし、不連続面分布に関する幾何学的な不確実性を考慮した場合の、地震に起因する斜面崩壊により発生する損失に及ぼす影響について検討を加えている。その結果として、不連続面情報に起因する不確実性は、岩盤斜面の崩壊による社会的な損失に重大な影響を及ぼすことを明らかにしている。この解析は、二次元解析であるが、Wu J.H.ら¹⁴⁾は、要素が剛体回転を行うとき、要素サイズが大きくなるという（DDAの解析上の）問題点を解決する手法を提案し、併せて、3次元解析手法への発展を報告している。Hybridな手法の報告例もある。Eberhardt¹⁵⁾らは、有限要素法—個別要素法の結合したHybrid解析手法を用いて、岩盤斜面内のせん断変形と破断面の生成、そして、すべり面への進行的な破壊過程を解析している。また、崩壊土砂を流体と見立てて、崩壊後の到達域を取り扱った例もある¹⁶⁾。落石の軌跡解析法や斜面崩壊に伴う到達距離の予測に関する研究例を取りまとめた資料は文献にもある^{17),18)}。

(2) 解析の目的と手法の選択

以上、限られた例を挙げてきたが、解析の目的は、図-2のようにまとめられる。数値解析は、落石の軌跡や岩盤斜面の安定性を定量的に評価する目的で採用される。

このような目的を達成するためには、地表・地質踏査結果や調査計測データなどを総合的に検討して岩盤崩壊を評価する必要がある。岩盤内には、必ずといって良いほど不連続面が存

在する。岩盤を等方性と仮定した場合の連続体解析では、岩盤としての変形・強度特性のみで解析が可能であるが、このようなモデル化では、目的を達成できないことがある。そこで、ジョイント要素を導入する、等価な連続体を仮定する、あるいは、不連続体解析を用いることになるが、岩石と不連続面それぞれについて、変形・強度に関する物性値を用意しなければならないことになる。調査で明らかになる情報を如何に解析に生かすが、解析側のポイントになる。たとえば、主となる（であろう）破壊面が明瞭であり、その数も限られているとすれば、極限解析法による安定性の評価や不連続体解析法による崩壊後の挙動解析などが可能であろう。しかし、系統的に不連続面が観測されるとき、統計的手法の導入も必要であろう。大津ら¹³⁾が実施しているように、入力パラメーターの不確実性を考慮して結果を評価することが重要である。今後も、さまざまな崩壊形態に関する解析事例を増やし、モデル化の技術や物性に関する資料を蓄積していくことが解析精度の向上にとって不可欠なこととなる。

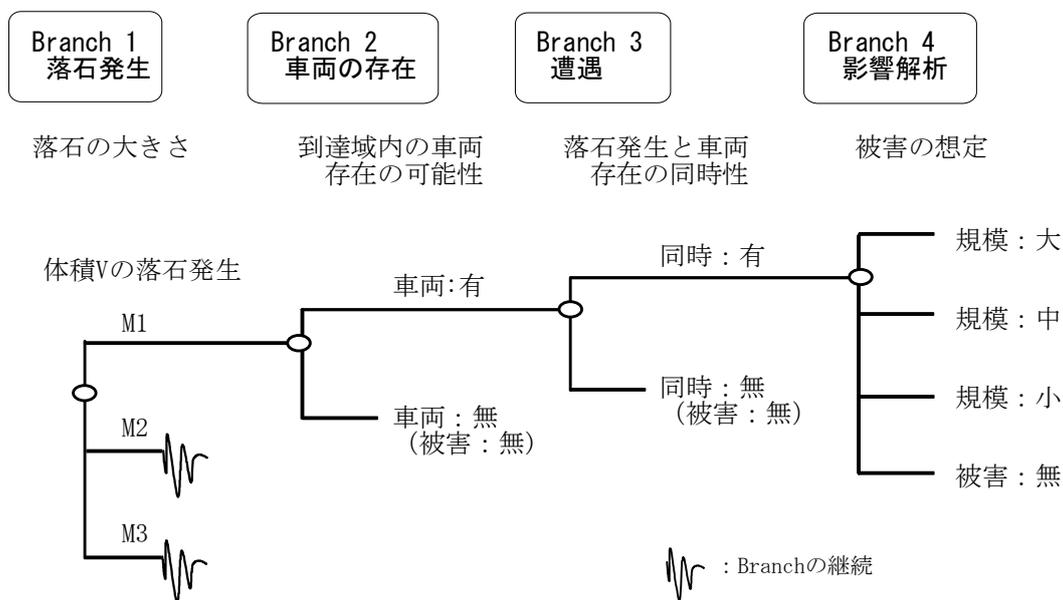


図 2-2-3 被害想定シナリオの一例（文献 23 の例を一部改変）

2.2.4 不確実性下のモデル化

(1) モンテカルロ法の導入

不連続性岩盤斜面や斜面上に存在する岩塊の安定性は、多くの物理的および力学的因子に依存する。たとえば、落石の場合、岩塊の形状、斜面の傾斜、接触面の粗さ、あるいは、その面の挟在物などである。これらの素因に、降雨や地震などの誘因が加わって、崩壊あるいは落石が発生する。前項にのべたように、岩盤斜面に関する解析は、強度などの力学的要因と不連続面や地形などの幾何学的要因に関する情報が不確実な状態下での解析となる。必要となる情報が全て既知となっているとは限らず、また、ある程度の分布を有するものとして与えられることもある。Dudt & Heidenreich¹⁹⁾は、落石の軌跡に関する解析に際して、入力値の不確実性は、必要となるパラメーター値が未知である場合とランダム性を有する場合の2種に区分分けできるとして、モンテカルロ法を適用して軌跡の予測を行っている。

また、モンテカルロ法を導入する場合、相当数の繰り返しを行なわねば、入力値の分布を反映した出力値の分布が得られない、さらに、複数の入力変数があるときは、それらの組み合わせも加わって、試行回数も増加することもある。効率的に入力値を組み合わせ、入力値群の特性を反映した出力を得ることが必要となる²⁰⁾。岩盤斜面の安定解析にも、このようなことに配慮した例があることが文献²¹⁾にまとめられている。また、他の工学的な分野にも解析例の報告がある²²⁾。いずれにせよ、単にモンテカルロ法を導入するばかりでなく、パラメーターの特性を理解した上で、解析に当たることが重要であろう。

(2) 素因・誘因と結果の利用

力学的および幾何学的な要因に関する検討に加え、斜面崩壊に関するリスク評価に際しては、それがいつ起きるのか、10年に一度おきるのか、それとも100年に一度おきることなのか、想定される被害が大きくても発生する可能性の低い事例と、さほど大きな被害はならないが頻繁に発生しかねない事例を比較することが必要になることもある。これは、強度劣化などの素因の進行とともに、降雨や地震などの誘因の発生確率に関係してくる。土砂斜面では、降雨がもっとも有力な誘因であるとして考える場合が多いが、降雨のみが有力なものとは言えない岩盤斜面では土砂斜面に比べ、誘因の発生確率の取り扱いは難しい。このような場合、まず、ある特定の誘因に絞って解答を示すのが一案であろう。たとえば、前述の大津ら¹³⁾の解析では、地震を優位な誘因として解析を行っている。そして、もう一案は、誘因の発生確率が把握しにくいとき、崩壊発生履歴等を勘案して想定される被害を算定するやり方である。この取り扱い方法では、脆弱性を評価する手順を素通りし、現象（崩壊、落石）の規模とその頻度の関係を崩壊発生履歴に依存するとともに、解析手法を利用して、結果（到達域など）を予測することになる。2.に述べたレベルからすれば、

レベル1に解析を付け加えたものになる。このような例の一つとして、Singh²³⁾らは、崩壊発生頻度と崩壊の大きさ（体積）の関係に、地震学で用いられるGutenberg-Richter式を用いている。彼らの解析が対象としているのは、カナダ西部であるが、崩壊頻度と大きさの履歴の蓄積があれば、リスク評価に十分利用できる考え方と思われる。Guzzettiの報告²⁴⁾には、イタリア国内で発生した地すべりや岩盤崩壊による災害事例を過去数世紀にもわたって調査した例をまとめている。

このように、過去の資料を基に、規模と頻度（frequency）に注目することも一案である。そのためには、データの管理・提供することが大事であると考えられる。この他にも斜面のリスク評価に関する事例は、文献²¹⁾にまとめられているので一読をお勧めしたい。

2.2.5 被害想定シナリオ作成と解析結果の利用

(1) 被害想定シナリオ作成

解析が（一応の）役割を果たした後、得られた解析結果をどのように被害想定に用いるか、および、その解析結果の利用の限界あるいは留意点は何かの2点について述べる。

崩壊が発生したとしても、道路や居住地域に崩壊岩塊（土砂）が至る可能性が認められなければ、対策を講じる必要はない。被害に至る可能性を探る手法として、イベントツリー（Event tree）法やフォルトツリー（Fault tree）法が用いられることがある。

図-3は、落石による道路通行車両への被害想定シナリオとしてイベントツリー法を用いた例である。これによれば、Branch 1において、崩壊の大きさ（落石の体積）と年発生頻度の資料、Branch 3で該地点の交通量に関する資料、そして、Branch 4において、通行車両などの財産に関する資料を加味すれば、被害の想定ができることになる。解析の役割は、Branch 2において、たとえば、落石が道路に至るかを示すことである。Branch 1において、誘因の発生確率と崩壊（落下）の資料があればよいが、それが存在しないとき、前述したように、過去の資料に基づき崩壊規模—発生頻度の推定結果を利用するのも一案となる。金ら²⁵⁾は、このようなシナリオに基づき、3次元個別要素解析²⁶⁾結果を用いた落石遭遇解析を報告している。

(2) 解析結果の利用と留意点

確率論的手法は、過去の統計量に基づいて将来の発生を予測することから、ある意味で推計的であると考えられる。素因・誘因の発生確率を簡略化して、斜面の崩壊履歴（頻度—規模）などの情報を用いる例を述べたが、一斜面の崩壊履歴が保存されている例は稀と考えられるので、斜面特性の共通する他の斜面の事例も資料として参照することも十分あり得る。この場合、想定できる結果は、推計的であるばかりでなく、次のようなことに留意すべきであると判断する。つまり、その想定される結果は、対象斜面の想定被害額の（計算上の）絶対値を与えるものではなく、相対的な比較に用いるべき値を与えていると考え

るべきである。留意点として次のことを挙げておきたい。

- 過去の資料に基づき、現時点で将来予測をしている。状況の変化（地形変化，外力や強度劣化など）があれば，その結果は変化する。
- その結果は，解析に用いる仮定やパラメーターの値や被害想定シナリオに依存する。とは言え，優先的に対策を施すべき地点の選定に有用なツールである事には変わらない。リスク評価に基づいた岩盤斜面の安定解析と設計に関する研究も報告されるようになってきている²⁷⁾。（与えられた問題に適した）解析法の選定，解析に必要な定数の選択，さらには，資料の蓄積と活用にと，さらなる研究開発が重要であることを述べて本章の結びとする。

参考文献

- 1) 土木研究所：道路斜面災害のリスク分析・マネジメント支援マニュアル（案）， pp.4-1 - 4-54， 2004.
- 2) Xie, M., Esaki, T., Zhou, G. and Mitani, Y. : Geographic Information Systems – Based three-dimensional critical slope stability analysis and landslide hazard assessment, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, ASCE, pp. 1109-1118, 2003.
- 3) 鷲田修三，古賀泰之，伊藤良弘：落石運動の予測手法について，第24回土質工学会研究発表会講演集，Vol.2, pp.1611-1614, 1989.
- 4) Descoedres, F. and Zimmermann, T. H.: Three dimensional dynamic calculation of rockfalls, *Proceedings of the 6th ISRM Congress (Montreal)*, Balkema. pp. 337-342, 1987.
- 5) Spang, R. M.: Optimized rockfall protection by ‘ROCKFALL’: *Proceedings of the 8th ISRM Congress (Tokyo)*, Balkema, pp.1233-1242, 1995.
- 6) Bergamin, S., Kirchhofer, P. and Filippini, R. : Rock mechanics investigations for the endangered Briston Road, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol.34, No.2, pp.83-98, 2001.
- 7) 平野勇，松岡俊文，山田泰広，石川慶彦：新第三期火山砕屑岩におけるキャップロック型スラビング崩壊に関する検討，第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，第34巻，pp.231-236， 2005.
 - 8) 秋山泰祐，伊藤和伯，宮下尚志，川北稔，岸徳光：不安定化が懸念される岩体の3次元FEMを用いた検討，第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，第34巻，pp. 249-255， 2005.
 - 21) 土木学会岩盤力学委員会・岩盤崩落問題研究小委員会編：岩盤崩壊の考え方，－現状と将来展望一，土木学会，CD-ROM， 2004.
 - 8) 秋山泰祐，伊藤和伯，宮下尚志，川北稔，岸徳光：不安定化が懸念される岩体の3次元FEMを用いた検討，第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，第34巻，pp. 249-255， 2005.
- 9) Cundall, P. A.: A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems. *Symposium on rock mechanics*. Nancy, Vol. 2, pp.129-136, 1971.
- 10) Shi, G.H. and Goodman, R.E. : Two dimensional discontinuous deformation analysis, *International Journal for Numerical and Analytical methods in Geomechanics*, Vol. 9, pp. 541-556, 1985.
- 11) 日本材料材料学会編：岩の力学，丸善， pp.477-479, 1993

- 12) 川村國夫, 西岡幹雄, 久保田勝彦, 現場落石実験による不連続性岩盤斜面の危険度評価, 土木学会論文集. No736/III-63, pp. 39-50, 2003.
- 13) 大津宏康, 大西有三, 伊藤利和, 竹山雄一郎, 西山哲: 不連続面情報の不確実性に着目した斜面崩壊による社会的損失の推定に関する研究, 土木学会論文集, No.736/III-63, pp. 231-248, 2003.
- 14) Wu, J. H., Ohnishi, Y. and Nishiyama, S. : A development of the discontinuous deformation analysis for rock fall analysis, *International Journal for Numerical and Analytical methods in Geomechanics*, Vol. 29, pp. 971-988, 2005.
- 15) Eberhardt, E., Stead, D. and Coggan, J. S. : Numerical analysis of initiation and progressive failure in natural rock slopes—the 1991 Randa rockslide, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 41, pp. 69-87, 2004.
- 16) Nakamura, H. and Fathani, T. F. : Numerical analysis of the movement distance and velocity of landslides, *Landslide risk management*, (Edited by Hungr, O., Fell, R., Couture, R. and Eberhardt, E.), Balkema, CD-ROM, 2005.
- 17) 枅谷浩, 佐々木哲也, 倉岡千郎, 古賀泰之, 三木茂: 落石対策(落石運動のメカニズムと予測 (その2)), 土と基礎, Vol.50, No.4, pp.48-53, 2002.
- 18) Hungr, O., Corominas, J. and Eberhardt, E. : Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity, *Landslide risk management*, (Edited by Hungr, O., Fell, R., Couture, R. and Eberhardt, E.), Balkema, pp. 99-128. 2005.
- 19) Dudt, J.P. and Heidenreich, B :Treatment of the uncertainty in a three-dimensional numerical simulation model for rock falls, *International conference on landslides*, Davos, pp. 507-514, 2001.
- 20) Mckay, M. D. and Conover, W. J. :A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, Vol.21, No. 2, pp.239-245, 1979.
- 21) 土木学会岩盤力学委員会・岩盤崩落問題研究小委員会編: 岩盤崩壊の考え方, ー現状と将来展望ー, 土木学会, CD-ROM, 2004.
- 22) 若杉圭一郎, 小尾繁, 牧野仁史: モンテカルロシミュレーションによる高レベル放射性廃棄物地層処分安全評価に対するデータ不確実性解析, 核燃料サイクル機構技報, No.14, pp.149-160, 2002.
- 23) Singh, N. K. and Vick, S. G. : Prognostic rockfall hazard assessment for roadways in mountainous terrain, 3rd *Canadian Conference on Geotechnique and Natural Hazard*, 2003.
- 24) Guzzetti, F. : Landslide fatalities and the evaluation of risk in Italy, *Engineering geology*, Vol. 58, pp. 89-107, 2000.
- 25) 金美錦, 西村強, 木山英郎, 谷口洋二: 3次元個別要素法を活用した確率論的落石遭遇解析, 第60回土木学会学術講演会概要集(CD-ROM), 2005.
- 26) Nishimura, T., Seiyama, T. Kiyama, H. and Taniguchi, Y. : A three-dimensional simulation model for rockfall using distinct element method. *Proceedings of the 3rd international symposium on rock stress*. RS Kumamoto 03, pp. 449-454, 2003.

27) Pine, R.J. and Roberds, W.J. : A risk-based approach for the design of rock slopes subjected to multiple failure modes – illustrated by a case study in Hong Kong, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 42, pp. 261-275, 2005.

2.3 リスク評価のための計測の役割

(株)ドーコン 川北 稔

2.3.1 はじめに

斜面崩壊において「When」という問題は、「What」、「Where」が事前にわかり、仮に「Why」や「How」がある程度想定されたとしても、そこにたどり着くのは容易ではない。しかも、不連続面を含み、複雑で不均質な岩盤斜面の場合には、現状では、極めて困難といわざるを得ない^{1),2)}。そういう意味で、岩盤斜面のリスク評価を「崩壊による災害の影響度（社会損失）評価」³⁾とするならば、「When」はあまり役割や意味を持たない。しかし、経年的な計測のなかで、加速要因となる地震や豪雨時の岩体挙動を確認しつつ、特異データが得られた時点でハード・ソフト対策を講ずるといふ、リスク管理のなかでは大きな役割を果たす可能性がある。

ここでは、まず、計測の視点に立った岩盤崩壊の特徴を述べ、次に計測の目的、計測の実際、データの評価、そしてリスク評価、リスク管理における計測の役割や課題などについて述べる。

2.3.2 岩盤崩壊の特徴 ～計測の視点から

例えば、地すべりの場合、滑動の形跡はブロック上部のクラックや段差、下部でのほらみ出しなどの変状が認められる場合が多い。ボーリングによってN値特性や粘土介在などからすべり面が推定できるのに加え、計器を埋設することですべり面が特定できることも多い。すなわち、すべりの規模もほぼ特定でき、変位速度も比較的遅く、計測器設置の面からもモニタリングがしやすい。

一方、岩盤崩壊の場合には、①斜面は全般に急峻で比高が大きく踏査に多大な労力を要し計器の設置自体が困難なことが多い、②崩壊が瞬時である、③仮に事前に変位が観測されても、安全率などの導入が難しいためその影響度が不明瞭である、④岩盤深部の不連続面の形態などが不明であり発生の規模や発生様式がさまざまである、などが指摘される。

2.3.3 岩盤計測の目的

前節までに述べたことから、計測の岩盤崩壊における位置づけとしては、「岩盤斜面の安

定性評価や崩壊の危険性認識のための支援システム」であり、「計測結果も参考にしうえで適切な対策をとることで、崩壊の未然防止，被害の最小化など，崩壊リスクを可能な限り軽減すること」が岩盤計測の目的といえる。

2.3.4 岩盤計測の実際

(1) 計測の区分

計測に際しては，危険と判断された岩体について特定は困難であるが崩壊規模や様式を想定し，必要に応じて数値解析などから着目箇所を選定する必要がある。

計測は，直接計測と間接計測に区分できる。(図2-3-1) 直接計測は，さらに岩盤表面に設置するものと内部に埋設するものに区分される。また，間接計測は，斜面が危険で近づけない場合などに利用される遠隔からの計測と斜面下方での待ちうけ計測に分類される。

(2) 直接計測

図2-3-1に示すように，表面設置では，伸縮計，亀裂変位計などが多用される。不安定と思われる岩盤の動態や亀裂間の変位を直接測るためデータとしては理解しやすいが，温度などの環境補正に留意が必要である。その点，GPSや地震計は補正はほとんど必要としない。最近では，対象岩体と母岩の双方に地震計としてサーボ型速度計を設置し，

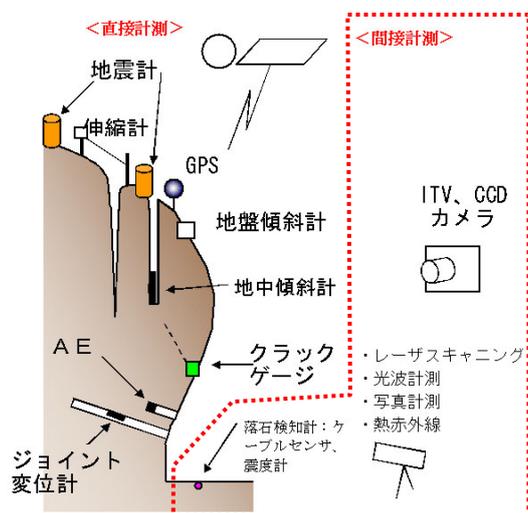


図2-3-1 岩盤計測の区分

地震時などの振動スペクトルなどの違いから安定性を評価する試みもされている⁴⁾。また、地中式の変位計や傾斜計も有効であるが、方式によっては外気温の影響を受け岩盤の挙動を反映しない場合もあるので注意が必要である⁵⁾。AEについては、岩盤によっては有用とする報告事例もあるが⁶⁾、岩盤では実用的適用には今後に期すところが多い。直接計測の事例を図2-3-2に示す。



図2-3-2 直接計測の設置例⁴⁾

(3) 間接計測

間接計測のうち遠隔計測は、前述したように落石や小崩壊が相次ぎ立ち入り困難な場合や国立公園など環境問題が厳しい時に実施される。その代表的な例として、測量によく使われる光波（レーザ）測距がある。精度を問題にすることもあるが、基準点の設置に留意すれば対象岩体の大きさによっては十分な精度を発現することが多く、経費の面でも有効性が高い⁴⁾。最近よく用いられるものとしてレーザスキャニングによって地形を精度よく計測し、定期的実施して面的な変化をとらえようとする方法がある。空中からの方法と地上からのものがある。垂直空中式はその原理から高低の精度や急崖斜面の計測に難点がある。それを補完する方法として斜め空中や地上式のレーザ計測が有効である（図-3）。さらに、ごく最近では地上型の合成開口レーダによる方法も提案されており、今後の研究に期待される。また、通常デジタルカメラを利用した精度の高い面的測定や肉眼では観察が難しい湧水や滲水箇所の測定にもちいられる熱赤外線表面温度測定はすでに実務的段階にある。

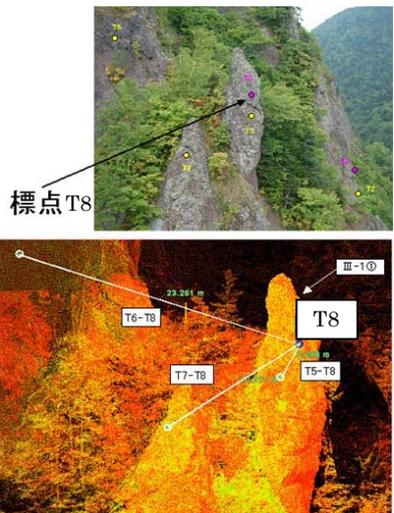


図2-3-3 3Dレーザプロファイラ計測画像例⁴⁾

一方、対象岩体の下方斜面に敷設し、落石や小崩壊を捉えようとする方法に加速度計を利用した落石検知計やケーブルセンサがある。ケーブルセンサは、格子状にケーブルを斜面に敷設することで斜面を通過する個数や経路を計測することが可能である⁷⁾。これまでの事例のなかには大規模崩壊まえの前兆的現象と思われる複数の落石などの事例も見られることから今後のリスク管理上有効となる可能性がある。(図2-3-4)

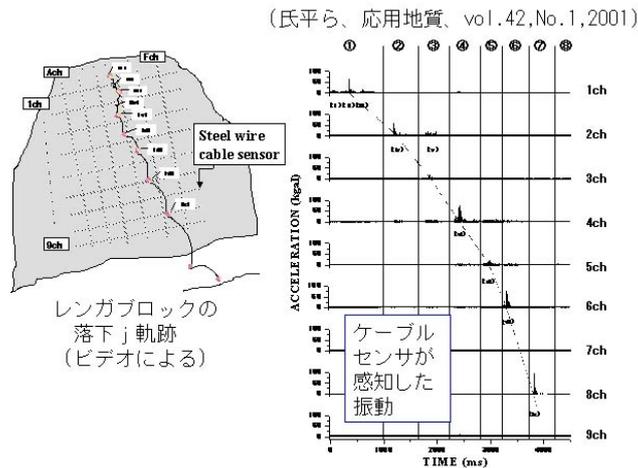


図2-3-4 ケーブルセンサによって検知された模擬落石例⁷⁾

2.3.5 計測データの評価

(1) 急変点および特異点の評価

計測データが、それ以前の値から予想される値（期待値）と異なったり、累積勾配が急上昇した場合を、‘急変’したとし、その時刻を急変点と取り扱い、また、急変点のなかで、岩盤の何らかの変動を捉えていると判定できるデータを‘特異’であるとし、その時刻を特異点と扱う方法が提案されている⁸⁾。この方法によれば、モニタリングは、『急変点、特異点を抽出し、特異点と確定された場合のデータ出力原因等を評価すること』が目的であると表現することもできる。

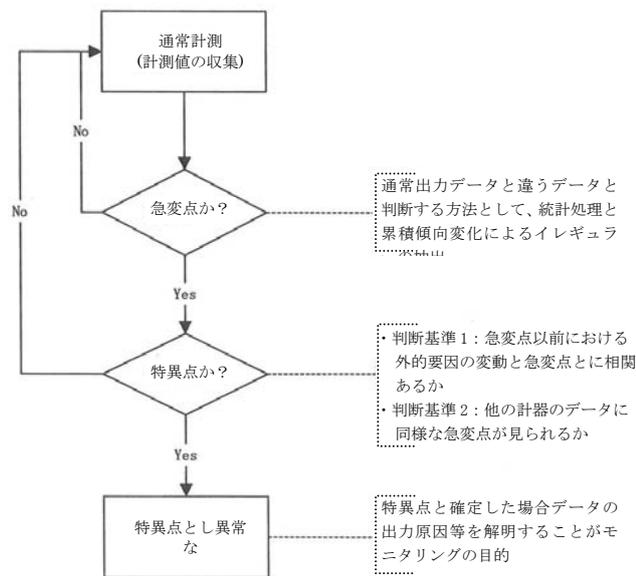


図 2-3-5 急変点、特異点の抽出フロー⁸⁾

しかし、実際の計測では、事前の地質調査等から最もセンシティブと思われる箇所に計測器を設置したとしても、以下のような問題点があるため、計測データから岩盤の変動に関する特異点を認識することは簡単ではない。

- 1) モニター箇所のデータは、岩体全体からみれば点としてのデータである。
- 2) データは、様々な要因によって影響を受けており、なかには、計測器自体の変動も含まれる。
- 3) 岩盤の場合、そのデータは土砂地山などと比べ微小であり、判断基準から特異点を認識し、さらに岩体全体の安定性（安全率）を評価するほどの技術的蓄積がない。

すなわち、点としてのデータのみで岩盤全体の挙動を評価することは、通常困難であり、分析フローで示した判断基準 1, 2 に加え、現地における地質、地形、あるいは湧水など、主要な要因の変化に着目した総合的な判断が必要な現状にある。しかも、岩盤崩壊が瞬時の現象であることを考慮すれば、ごく短時間でこれらの判断を下すことが求められる。

(2) データ評価の事例

斜面における最終破壊時期の予測については、これまで、地すべりなどを対象として地表面傾斜計や伸縮計を用いた取り組みが行われており、岩盤についても第三次クリープの考え方を適用した天鳥橋西地区の事例(図 2-3-6)⁹⁾などがある。天鳥橋の破壊様式は、トップリングであるが、破壊時間の図式解法の時間的起点をどこに設定するかなど、実際には試行錯誤せざるを得ない問題がある。こうした予測式の時間的起点を認識する意味においても、前節の急変点の抽出は重要である。

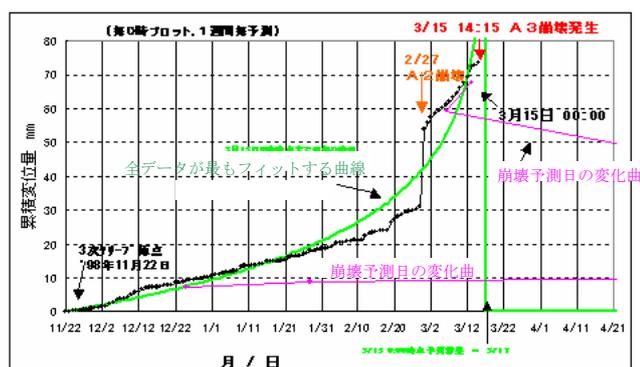


図 2-3-6 天鳥橋西地区のデータ評価事例⁹⁾

急変点の抽出には、統計処理による方法と累積値のグラフ化の方法などがある。統計処理による方法は、収集したデータを標準偏差により分析し、データの急変時刻を抽出する方法であるが、ここでは、生データを異なったグラフで見ること、管理基準を視野に入れた急変点の評価について述べることにする。

図 2-3-7 は、北海道における事例で、柱状節理が発達し岩塔状を呈した溶結凝灰岩の開口亀裂に設置された亀裂計の経年的な変動データである¹⁰⁾。亀裂計No.1 が、外気温と同様に周期的な挙動を示しているのに対し、No.2 は、明らかに不可逆的変位（累積変位）があることを示している。

そこで、縦軸に変位量、横軸に外気温をとって整理したのが図 2-3-8 (a), (b) である。No.1 の年変化は、冬に開口し夏に閉じる亀裂変位を繰り返す、累積変位はほとんど見られない。一方、累積がみとめられる No.2 の亀裂変位データについては、楕円ループは規則性はあるものの 1 年ごとに亀裂が閉じる方向に移動し、確実に変位が進行していることがわかる。

また、12月に急変点と思われる変動が見られるものの1月には楕円ループに復帰しているのが分かる。この傾向は、計測開始直後から読み取れ、管理上毎年12月のこの変動幅に注意することが示されている。ただし、両者とも変位の幅は1.0mm以内程度と小さい。

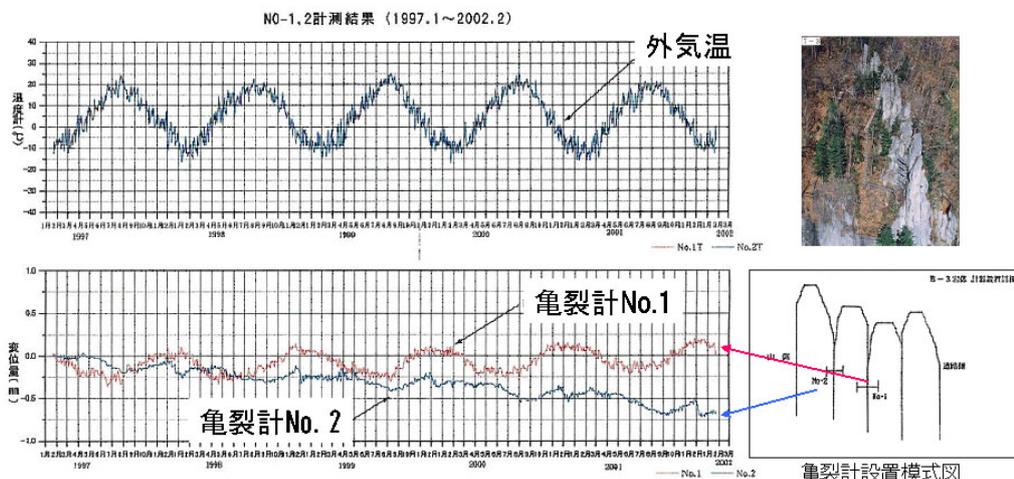


図 2-3-7 溶結凝灰岩開口亀裂の経年変動データ例¹⁰⁾

現地で詳細に観察しても明瞭な変化は認められず、こうした微小な累積が岩体の安定性に与える影響は、現段階では判然としていない。地震など動的な外力がかかった場合の応答を数値解析などで概略把握し、管理上の目安にするなどの取り組みも必要である。いずれにしても、これらの値を大きく上回る変位が収録された場合のみ緊急的措置が必要とする、などのリスク管理上の方針が見てとれる。

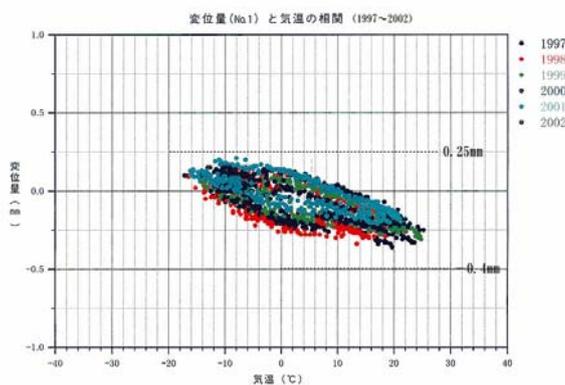


図 2-3-8(a) No.1 亀裂計 6 年間データ¹⁰⁾

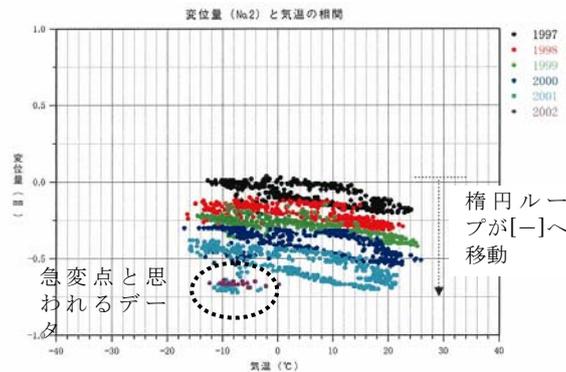


図 2-3-8 (b) No.2 亀裂計 6 年間データ¹⁰⁾

2.3.6 計測のリスク評価・管理における課題

冒頭でも述べたように、計測が、リスク管理上の「When」に寄与することはあっても、事前に社会損失を評価（リスク評価）するうえで必ずしも必要な項目とはいえない。リスク評価では特定箇所では一定規模の崩壊が起きうるといふ蓋然性の認識がまず必要だからである。計測は、むしろ、計器設置後の発生規模や発生様式の見直し、即ち、What や Why,How の修正に寄与する可能性がある。そのためには、得られたデータの解析、評価をどのように実施してゆくかが今後の課題といえる。

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報告書，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,1997
- 3) 萩原良二：道路斜面崩壊のリスクマネジメント技術，土木技術資料，45-9，pp22-23，2003
- 4) 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
- 5) 川北稔・石川博之・伊東佳彦：凍結膨張により発生する岩盤内ひずみの計測に関して,III-433,土木学会第60回年次学術講演概要集（CD-ROM）,2005
- 6) 根岸正充ら：層雲峡溶結凝灰岩の柱状節理におけるき裂進展とすべり機構,応用地質,Vol.34,No.2,pp1-11,1993
- 7) 氏平増之ら：スチールワイヤ型ケーブルセンサの感度に関する研究，応用地質，Vol.42，No.1，2001
- 8) 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中間報告書,2001
- 9) 門間敬一ら：岩盤モニタリング箇所での転倒崩壊に至るまでの変位挙動の計測例,地すべり,Vol.39,No1,pp62-69,2002
- 10) 真殿浩幸ら：更新世溶結凝灰岩の温度による亀裂の開口度による岩体の安定性-天人狭柱状節理の例-,土木学会年次学術講演概要集第3部,VOL.57,pp797-798,2002

3. 岩盤崩壊のリスク評価に向けた課題と展望

(5W2Hの理解とリスク評価の在り方)

京都大学 大西 有三

3.1 はじめに

我が国では過去にいくつかの大規模な岩盤崩落事故が発生しており、安全で安心できる社会生活を送るためにも維持管理も含めた岩盤崩落問題への取り組みが危急の課題となっている。自然の造物である岩盤の取り扱いが簡単ではないが、岩盤斜面を安全かつ効果的に維持管理するために、日々絶え間ない努力が払われている。そこで、最近注目されているのが、防災、減災への流れの中での岩盤崩壊リスクマネジメントである。

人とモノと環境に危険を及ぼさないための今後の施策に必要なリスクマネジメントは、リスクを分析しリスクを推定評価して、そのリスクの回避、軽減などの処置を行うまでの一連の作業あるいは管理をいうと定義されている。岩盤工学に関連する分野では、リスクマネジメントの導入が検討されているが、まだ萌芽的な段階でリスクそのものの定義も様々なものが使われているのが実態である。このパネルディスカッションでは、現在まで小委員会で検討してきた内容をベースに、岩盤斜面の崩壊に関わる用語の整理、リスクマネジメントを形作っている内容の検討、実務への適用性などを議論するものである。また、従来の研究テーマである岩盤斜面崩壊の予測・対策、管理・計測などを含めて、日頃の計測管理はリスクマネジメントの中でどうあるべきか、どのような方法が可能か等を議論している。

本研究小委員会で岩盤崩壊リスクマネジメントを検討する過程で、5W2Hの項目 (what, whom, when, why, how, how much) を明確にすると理解しやすいことがわかったのは、大きな収穫である。この考えを用いて、本シンポジウムのパネルディスカッションが組み立てられていることに注目していただきたい。

3.2 リスクマネジメントの必要性

一般に情報（ニュース）を伝達するときに、5W1H が必須といわれている。しかし、リスクマネジメントでは、内容を把握するには 5W2H が必要とされるが、そこには予算あるいはコスト（金額）が関係してくる点が特徴的である。

岩盤崩壊の発生や発生後の影響には不確実性があるとともに、災害の形態や規模も様々で、その予測が困難である。一方、昨今の経済環境においては、災害を防止するための財源も一限られており、また、事業費のコスト削減に対する社会ニーズも高まっている。こうした社会の関心事である安全性に関する不確実性とコストの組み合わせがリスクとして

評価され、この指標を用いて斜面の健全度や予算投入の順序などが推定できるので、リスクマネジメントの必要性が増してきている。

具体的には、岩盤崩壊の発生が予想された場合、岩盤崩壊におけるリスク因子（斜面の脆弱性や危険位置にある道路）が、結果として道路や通行車両等へ被害（損壊、人的被害、経済損失など）を及ぼすこととなるので、リスクは被害額と発生確率とを乗じた値とされる。要するに、リスクマネジメントとは、そのリスクコストを節約（最適化）することと言っても良い。また、リスクマネジメントは将来予想される被害を防止することを目的とするため、平常時に行われる意思決定や対策のための技術である。

3.3 課題

構造物の安全性評価に確率を使うことへの社会の抵抗は強い。従来は、道路のような社会基盤は常に 100% 安全であるという幻想がまかり通っていたし、またそのために最大限の努力が払われてきた。しかし、現実には、100% 安全であるという構造物はあり得ないし、それを目指す必要もない。リスクマネジメントの中にリスクコミュニケーションがあるが、これはどのようなリスクがあるかを社会に認知してもらう手法として捉えられる。現在のよう、社会基盤投資が制限を受ける中では、斜面に対する安全性確保についても、新しい考えを導入しなくてはならない。岩盤斜面には危険性が内在していることを公表し、その状態の基で何ができるかを考える必要があることは自明であろう。この点で、リスクマネジメントからアセットマネジメントに至る一連の手法は一つの大きな選択肢である。

しかし、岩盤崩壊の防災面でリスクマネジメント手法を実用化するには、いくつかの課題があり 5W2Hの個々の事項にもそれぞれに問題点があることは既に他の人たちにより説明されおり、本パネルディスカッションでも小俣氏が以下のようにまとめている。一部を改編し再掲すると、

1) リスク因子の特定に関する十分な客観性の確保

リスク分析では、リスク因子の特定手法（ハザードマップ・災害発生シナリオなど）に関する十分な客観性の確保が必要である。また、安全性に関する目標や最低限確保すべき水準の設定手法、リスク基準に関する十分な客観性の確保が必要で、一般社会での受け入れ可能性を含め、これらの社会的合意も必要である。

2) データの蓄積と信頼度

不確定量の確率・統計学的な表現・モデル化にあたり十分なデータの蓄積が必要である。すなわち、ETA や FTA で最終事象の発生確率を求める場合、関連する全ての基本事象における確率値が必要であるが、現状ではデータが不備で困難なことが多い。さらにハザードのフラジリティ曲線の算定の際、統計モデルを用いるには崩壊履歴などの多くのデータが必要であり、確率モデルを用いるには解析パラメータの確率密度関数が必要である。

さらに、状況が変化することから、現況を反映したリアルタイムのリスク分析が

逐次行われていくことが望まれよう。

更に必要なのは、得られたデータの信頼度をどのように評価するかである。計測器の質、過去のデータの信憑性、データが加工されたものか生なのか、実用化に当たって多くの課題が残されていると言っても過言ではない。

3) 安全性確保のための評価

対策工の設計における従来の安全率に対応するリスクマネジメントの指標は、確率・統計的に評価した災害発生確率値か損失期待値となる。一般には求めやすい期待値で評価するケースが多いが、その場合構造物が破壊したときの被害額で評価する。しかし、破壊の可能性を含む限界設計の考え方に、社会全般の共通認識が得られるようリスクコミュニケーションを深めなければならない。

4) コミュニケーションと崩壊の時期

リスクコミュニケーションを通じて、危険が内在していることを公表して予防をしてもらうというリスクマネジメント手法に関する社会的合意が得られることが必要である。この場合、注意が必要なのは、岩盤崩落の時期（上記の議論では、when）をどう伝えるかである。地震予知の場合と同じで、正確には難しいが、ある程度の危険度レベルを示すことはできる。しかし、このような確率論的な話が社会に受け入れられるかどうかの検討は、リスクコミュニケーションの範疇にはいる。

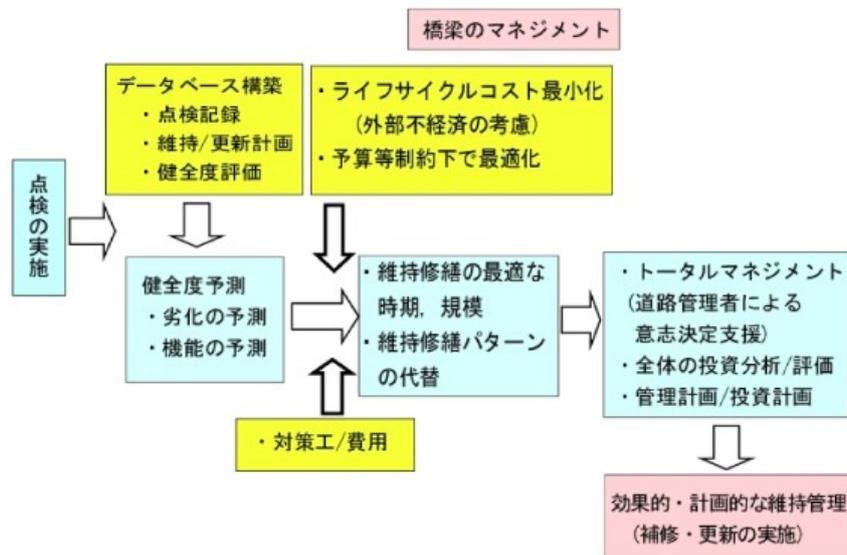


図3-1 戦略的道路資産マネジメント

(国土交通省 平成14年度道路政策のポイントより)

3.4 展望

図3-1 は国土交通省が今後道路を資産としてどのようにマネジメントしていくかを示したものである。この時点では橋梁のマネジメントが主体であったが、その後道路舗装、トンネルと続いている。しかし、斜面について少し事情が異なるので、議論が煮詰まっていない。

斜面は、直接の道路構造物ではなく、隣接したものであり、かつ主体が自然物なので評価の方法は橋梁などとは異なると考えられる。いずれにせよ、このマネジメントの中では、LCC（ライフサイクルコスト）を含めた資産への維持管理と投資の関係が議論されており、そのベースになるのは、リスクマネジメントがしっかりしているかどうかである。こうした現状を考えると、リスクマネジメントへの期待はますます高まるものと思われる。斜面調査時の地盤・岩盤特性の複雑さ、調査手法の限界、維持管理の時の斜面の耐用年数の評価、モニタリングの限界、不確定な時間依存挙動、突発的な剥落、などなど問題が山積する中、事業に対する説明責任や透明性など社会の要求は強くなるばかりであり、リスクマネジメント無しでは今後の合理的な維持管理が行えないと考える。斜面のリスク評価は、始まったばかりである。しかし、既に参考文献2)にあるように、着実な成果が報告されており、今後着実な発展を遂げるものと思われる。

参考文献

- 1) 小俣新重郎：「岩盤崩壊の特徴とリスク評価(5W2H)」土木学会岩盤力学シンポジウム：パネルディスカッション，2005.
- 2) 土木学会：岩盤崩壊の考え方ー現状と将来展望ー[実務者の手引き]（CD-ROM版），第6章リスク評価と適用例，2004.