

リスク評価のための調査の役割 (What, Where, Whom)

栃本 泰浩

正会員 川崎地質株式会社 西日本支社 (〒556-0015 大阪市浪速区敷津西2-1-12)
E-mail:tochimotoy@kge.co.jp

Key Words :rockslope, mechanism of rock mass failure, risk analysis, discontinuity in rock mass, geological survey

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. 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、斜面変動発生を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-1に岩盤崩壊のフローを示す。

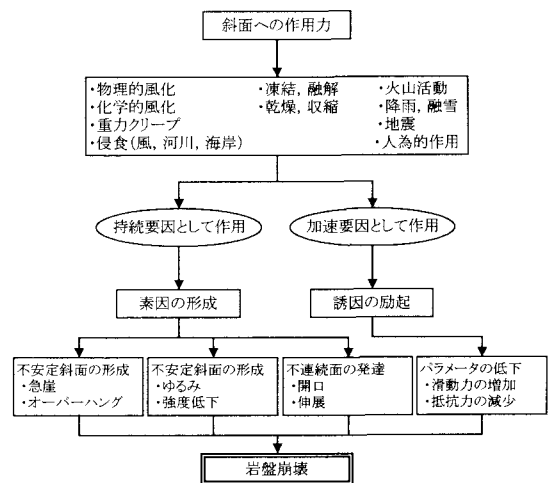


図-1 岩盤崩壊のフロー⁴⁾

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。

3. 概略調査

図-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。

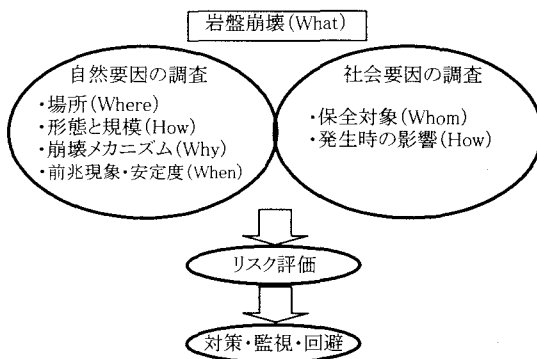


図-2 岩盤崩壊に対する調査と評価

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り、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、崩落高さ到達距離はおおよそ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章で述べたように、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

で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-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)

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。このような急峻斜面では、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、鳥瞰図や正立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-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が高い	手間がかかる。急峻部は測量困難。
空中レーザースキャン (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。急峻部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スキャン	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。

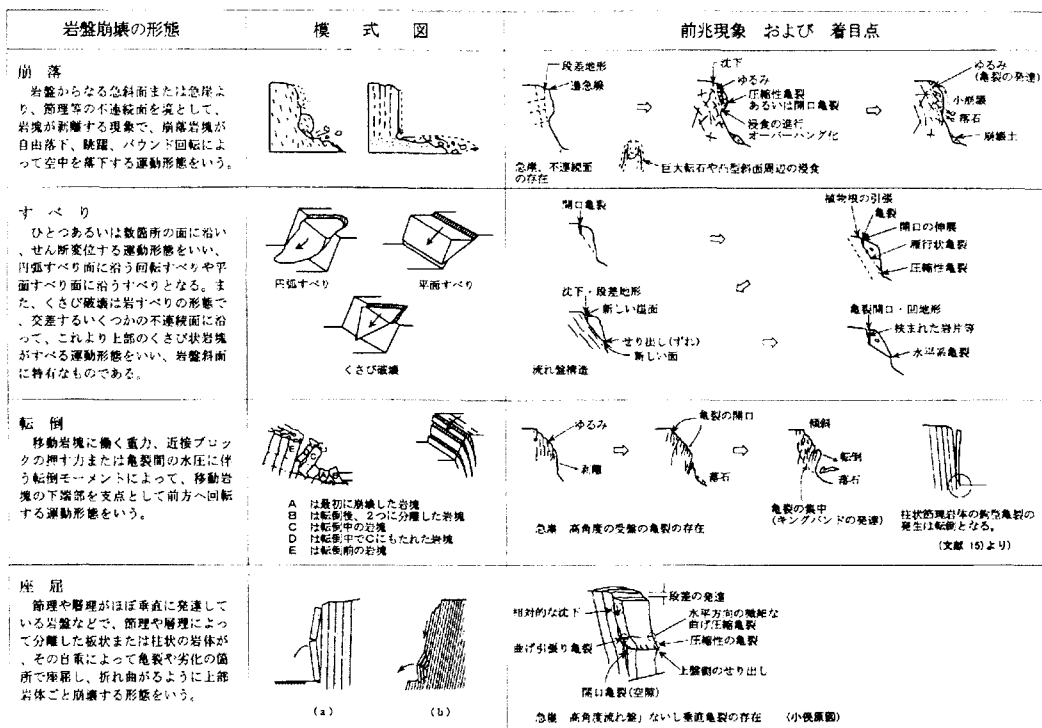


図-3 岩盤崩壊の形態と前兆現象⁴⁾

(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 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が判別困難。傾斜はわかるが走向はわからない。
ポ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箇所を観察。	不連続面の連続性の確認ができる。	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。現状ではポ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。

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, pp.31-41, 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, pp.135-144, 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, pp.199-208, 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）, pp.46-63, 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, pp.335-344, 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, pp.63-66, 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, pp.57-62, 2000.
- 15) 中井卓巳・島内哲哉：不連続面の調査と評価（その2）, 土と基礎, Vol.48, No.3, pp.55-60, 2000.

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