

鉄道沿線の軟岩斜面の安定性評価手法

野口達雄¹・岡田勝也²・杉山友康³・木谷日出男³・土田泰弘⁴

¹正会員 博(工) (財) 鉄道総合技術研究所 事業推進室 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

²正会員 工博 国士館大学 工学部 都市システム工学科 (〒154-8515 東京都世田谷区世田谷4-28-1)

³正会員 博(工) (財) 鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

⁴修(工) 前・国士館大学大学院 工学研究科 (〒154-8515 東京都世田谷区世田谷4-28-1)

従来用いられている落石や岩盤崩壊に対する評価は、専門技術者の持つ技術やノウハウを最大限に駆使し、その思考プロセスに基づいている部分が多いと考えられる。ここでは、鉄道沿線(KK線)の軟岩斜面を取り上げ、専門家による判断基準を要因別に数量化し、この結果を組み込んだ安定性評価手法を提案した。その構築には、まず、軟岩斜面の剥落型落石・岩盤崩壊に着目し、現場データの収集とそれを用いた数量化解析を実行した。その結果に基づいて、落石や岩盤崩壊の発生に直接寄与し、これにより斜面が明らかに不安定であると判断できる要因(決定的因素: C P C)を抽出し、現在・過去・将来の安定性を評価するための要因を求め、新しい安定性評価手法を提案した。

Key Words : soft rock, slope, stability evaluation, multivariate analysis

1. まえがき

日本の斜面の多くは、地形、地質が複雑でもろく、かつ雨や雪も多いという過酷な自然条件に曝されている。このため、毎年各地で様々な斜面災害にみまわれており、国土全域に敷設された鉄道もその例外ではなく、安全・安定輸送を確保するために斜面災害を防止することが古くからの重要な課題となっている。

この斜面災害を未然に防止するためには、まず斜面個々の安定性を評価することが重要であり、この安定性評価を的確に行えれば、その結果に基づき、合理的、経済的な対策を施すことができる。

線状構造物である鉄道では、評価の対象となる沿線斜面の数が膨大であるので、多くの斜面を迅速かつ簡易に評価できる経験的・統計的手法による評価基準が実務に供されている。

この評価基準は地質工学と土木工学の総合的な知見に基づいて作成されているが、中でも特に落石や岩盤崩壊に対する評価基準は、専門技術者の持つ技術やノウハウを最大限に駆使し、個々の斜面の特性に応じた判断に基づくものが多い。すなわち、その基礎には専門技術者としての思考プロセスがあると考えられる。これらの具体的な内容は、一種のブラックボックスとなっており、既存の評価基準には十分に表現されていない。そこで専門家による判断基準を要因別に数量化することを試み、この結果を組み込んだ安定性評価手法を構築できれば、

現場の技術者による評価の精度向上に大きく寄与できると考えられる。

このような背景のもとで、軟岩斜面の剥落型落石・岩盤崩壊に着目し、現場データの解析結果に加えて、従来の技術的知見や思考プロセスを再構築し、その結果を反映した形で、より精度が高く、簡便な安定性評価手法を提案する。

2. 岩石斜面の安定性評価法に関する過去の研究経過

斜面崩壊に関する研究のうち土砂斜面の崩壊や地すべりについては精力的な研究が進められ、鉄道関係では、例えば斎藤¹⁾による地表面のひず速度から崩壊発生を予測する手法、久保村・武井²⁾の統計的手法などを基礎とする土木建造物取替の考え方³⁾に示されたされたのり面採点表、あるいは森野⁴⁾の研究、最近では筆者らによる限界雨量による手法^{5), 6), 7), 8)}等があり、実際に現場で活用されている。一方、岩石斜面(岩盤で構成される斜面のほか、転石が存在する斜面も含め、ここでは岩石斜面と言う)については、崩壊発生メカニズムの複雑さゆえに土砂斜面に比べ、研究の進捗は遅れているといえる。

岩石斜面の安定性評価を対象とした研究のうち、経験的・統計的な安定性評価手法については、鉄道では、

1974 年に国鉄が作成した土木建造物取替の考え方に関する評価表が評価法の嚆矢といえる。ただし、土砂斜面の採点表は統計解析結果に基づき、詳細な検討を経て作成されたものであるのに対して、岩石斜面の採点表は専門技術者の経験と技術的判断に依ったごく簡単なものであった。これは、岩石斜面の安定性評価の技術的困難さとともに、重点が降雨に伴う土砂斜面の崩壊にあつたことを示唆している。

その後、1977 年 3 月に発生した上越線津久田・岩本間の落石による列車脱線事故を契機として、1978 年に落石対策の手引⁹⁾が作成された。これは落石のみを対象としたもので、安定性評価については採点形式ではなく、多くの評価項目について評価の目安が詳細に示されている。

この考え方を基本に、松岡・佐々木¹⁰⁾および小野寺・上妻¹¹⁾は現地調査のデータをもとに具体的な採点形式による評価手法を提案している。

この落石対策の手引は、1996 年 6 月の高山線の落石災害を契機にして、鉄道総研により改訂が行われ、1999 年に落石対策技術マニュアル¹²⁾として発刊されている。

一方、道路では、1968 年 8 月の岐阜県一般国道 43 号飛騨川バス転落事故を契機として道路防災総点検要領¹³⁾が作成され、続いて 1974 年には高速道路調査会が落石防護施設の設置に関する調査研究報告書¹⁴⁾の中でそれぞれ評価点による落石評価手法を示している。

その後、1983 年には日本道路協会により落石対策便覧¹⁵⁾が作成され、この中で国鉄の落石対策の手引と同様な評価手法が示されている（なお、落石対策便覧は 2000 年に改訂されている¹⁶⁾）。飯田・越野¹⁷⁾は、落石対策便覧を参考として、中央自動車道を対象にした採点形式による評価手法を提案している。

また、1989 年 7 月の福井県一般国道 305 号越前海岸の岩石崩壊事故を契機として、道路防災総点検要領に点検対象として岩石崩壊が追加され、点数により評価する方法が導入されている。この要領は、その後の兵庫県南部地震や豊浜トンネル岩盤崩落事故の発生を受けて、1996 年に内容が見直されている¹⁸⁾。

研究的な手法については、山梨県内の斜面調査に基づく箭内¹⁹⁾、村上・箭内²⁰⁾による評価手法、ステレオネットを用いた多田²¹⁾による判定手法、国内の岩盤すべりの事例の解析に基づく角田他²²⁾による評価手法などがあり、外国では、C. W. Duncan²³⁾、M. J. Selby²⁴⁾により評価手法が提案されいる。

3. 軟岩斜面の調査データ

(1) 解析に用いたデータ

岩盤で構成される斜面の崩壊の分類については、M. J. Selby²⁵⁾は Fall, Slide と Creep に大別しており、それぞれのタイプについて特徴や発生条件等を示した。土木学会^{26), 27)}では、岩盤崩壊の形態を大きく、崩落、滑動（すべり）、トッピング、バックリングに区分し、崩落やトッピングには比較的小規模（崩壊土量 10^4m^3 オーダー以下）な事例が多く、滑動タイプでは小規模なものから大規模なもの（崩壊土量 10^6m^3 オーダー以上）まで様々な事例があるとしている。

落石は斜面表層から岩塊が落下する現象であり、発生源での運動形態から、転落型落石（道路では抜け落ち型または転石型と称している）と剥落型落石（同様にく離型または浮石型）に分けられる。このうち、剥落型落石と一部の転落型落石は岩盤崩壊の中の崩落の一種であるともいえる。

このように種々の区分があるが、本論文では線状構造物の鉄道の保守の実態も考慮して、落石および 1000m^3 程度までの比較的小規模な岩盤崩壊を対象とし、崩壊形態によって、剥落型落石・岩盤崩壊（両者は規模が異なるが、発生機構はほぼ同様と考えられることから一括して扱う）と転落型落石の 2 つに分類することとした。

ここでは、このような分類に基づいて、鉄道沿線の軟岩斜面のデータを収集することにした。対象とした路線は KK 線で、その総延長は支線も含めて約 75km である。

この KK 線は、急勾配の自然斜面や人工的な切取が続く路線で、1997 年 4 月に線路側方の斜面が崩壊、普通電車が崩壊岩塊に乗り上げ脱線するという災害が発生した。線路に近接した軟岩で構成される切取および自然斜面の現地調査を行い、それぞれの斜面の評価を行った。ここでは、落石・岩盤崩壊が発生するかどうか、すなわち発生源での安定性評価の具体的方法を見出すことを目的として現地調査を行い、データを収集した。

(2) 調査地域の地形・地質特性

KK 線は起点から約 30km 地点までは、主に沖積低地（一部はローム台地上）に設置され、それ以南は M 半島を構成する丘陵地を縫って走っている。丘陵地には、起伏に富む丘陵に刻まれた谷戸と呼ばれる谷地形が分布しており、この路線は谷部は盛土、丘陵部は切取あるいは自然斜面という構造になっている。

調査地域の地質分布を図-1 に示す。当地域には新第三紀から第四紀の地層が分布し、下位より、葉山層群（前期～中期中新世）、三浦層群（中期中新世～前期鮮

表-1 頻度分布を求めた要因と区分

要因等	区分等
形態	斜面型 「尾根型」「直線」「谷型」 斜面種別 「自然斜面」「切取りのり面」
諸元	斜面高さ 対象斜面の遷移線までの高さ 斜面勾配 平均勾配(斜面の代表勾配)
地質・地質構造	岩質 「泥岩」「砂質泥岩」「砂岩泥岩互層」「その他」 風化度 「I」「II」「III」「IV」 割目の有無 「有」「無」 割目の性状 「サイコロ状」「板状」「ブロック状」「無」 割目の開口状況 「大きく開口」「やや開口」「密着」「無」 割目の方向性 「流れ盤」「受け盤」「水平」 浮き石の量 「多」「中」「少」「無」 浮き石 「不安定」「やや不安定」「安定」「浮き石無」 の安定性
水	集水条件 「集水」「平行流入」「平坦」「非集水」 集水範囲 「大」「小」 乾湿・湧水 「湧水」「湿润」「乾燥」
表層	表層被覆 「無」「不均一」「均一」 立木・植生 「裸地」「草本」「灌木」「高木」 崩壊歴の有無 「有」「無」

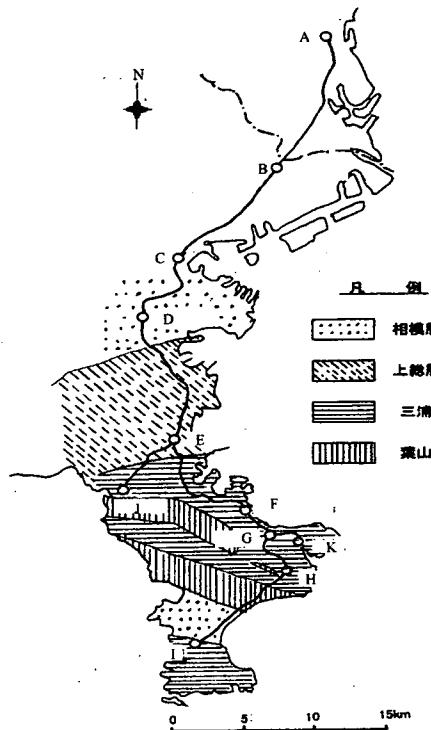


図-1 KK線の地質分布（ただし、図中のA～Kは駅の所在を示す）

新世）、上総層群（後期鮮新世～中期更新世）および相模層群（中期～後期更新世）で構成され、その多くが関東ロームに被覆されている²⁰⁾。

調査対象斜面のうち、岩石斜面の80%以上が三浦層群で構成されている。沿線斜面の三浦層群はNW-SEの走向で東に傾斜する単斜構造となっているため、地層の走向とほぼ同方向に設置されたKK線の斜面は、起点を背にして右側（山側）では流れ盤、左側（海側）では受け盤となる状況となっている。

なお、調査地域は急傾斜地や地すべり地が多く存在し、近年の宅地造成に伴う丘陵地の切取りなどの環境変化の影響もあり、斜面災害が頻繁に発生している。

(3) 現地調査と解析対象斜面

現地調査に先立ち、地形図および空中写真により沿線の周辺状況や地形的特徴の把握（地形区分、リニアメントや不安定地形の抽出等）を行った。

現地調査では、それぞれの斜面に対して、地形・地質的条件や周辺環境条件の詳細を把握し、浮き石・転石の状況、湧水状況、その他安定性に係わる状況および防護設備・排水設備の状況の確認を行った。

調査対象斜面数は81地点、132斜面である。なお、調査地点と斜面数が一致していないのは、1つの斜面であっても、上部がロームが被覆した土砂斜面、下部が岩石斜面というように複合斜面になっているからである。

しかし、ここでは落石・岩盤崩壊を対象にしているので、132の調査斜面のうち、表層土のまったく無い岩石斜面および表層土は分布するが、厚さが非常に薄いか分布が部分的で岩盤が露出している斜面のあわせて60斜面を解析対象とした。

解析対象斜面のうち、大部分は三浦層群で構成され、残りは葉山層群と上総層群から成っている。

なお、この60斜面には転落型落石が懸念される箇所はなかったため、剥落型落石・岩盤崩壊を対象とする解析とした。

4. 数量化II類による解析

(1) 要因の抽出

現地調査を行った専門技術者の安定性評価結果を目的変数とする数量化II類による判別解析を行うことにした。

剥落型落石・岩盤崩壊に関連すると考えられる要因の特徴を調べ、解析に使用するデータに基づいて要因を抽出した。表-1は、斜面の形態、斜面諸元、地質とその構造、水、表層の状況、ならびに崩壊歴の有無を要因と考えて、選択したものである。

この表のうち、斜面型は鉛木²⁰の分類によったが、ここでは水平断面形による、尾根型、直線、谷型の3区分とした。

風化度は目視とハンマー打撃による変化をもとに区分した。

割れ目の性状は、サイクロ状（主に方状に発達する共役節理）、板状（岩壁に平行な割れ目、板状節理やシーティング節理等）およびブロック状（特に方向性を示さない間隔の大きい割れ目）に区分した。

割れ目の開口状況は、3cm以上の開口については大きく開口、数mm～2cm程度の開口はやや開口、ヘア・クラックはあるが開口していないものを密着とした。

割れ目の方向性は最も卓越した方向の割れ目に着目して、流れ盤と受け盤を区分したが、ほぼ水平に近い割れ目のみが存在する斜面もあるため、水平を加えた。

浮き石の量は、浮き石の個数を限定できる斜面も多いことから、区分を細分化し、浮き石が1個の場合を少、2～3個の場合を中、それ以上の場合を多とした。

浮き石の安定性は、浮き石の状況により、変位が確認される、あるいは浮きが大きい場合を不安定、表面部が浮き石化している場合をやや不安定、浮きがほとんど無い場合を安定・浮き石無とした。

表層の被覆状況は、表層土に覆われている斜面が多いことから、表層土の分布からみた視点で、ほぼ全体が覆われている場合を均一、部分的な場合を不均一、無い場合を無とした。

集水範囲については、斜面背後の集水面積が1,000m²以上を大、これ未満を小とした。

(2) 目的変数の区分

目的変数である斜面の安定性評価結果は、筆者らを含む地質と土木の専門技術者の評価に基づき、不安定度を「大」、「中」、「小」の3段階に区分した。区分した結果は、不安定度「大」は14斜面、不安定度「中」は20斜面、不安定度「小」は26斜面である。なお、ここでの評価はあくまで発生源での不安定度であり、1997年の災害以降、特に不安定度が高い斜面から各種の防護設備が整備され、列車の安全確保が図られていることはもちろんである。

解析の単純化を図るために2群判別によることとし、解析のステップとしては、不安定度「大」と「中・小」の判別解析（L・M・S判別解析と称す）と不安定度「大・中」と「小」の判別解析（L・M・S判別解析と称す）をまず行い、その後、不安定度「大」と「中」の判別解析（L・M判別解析と称す）を実施することとした。

L・M・S判別解析は、斜面が安定か不安定かを判断している要因のうち、不安定と評価する際に大きな影響を

表-2 各要因の時間軸での整理

過去の 安定性	現在の 安定性	将来の 安定性
斜面型 崩壊歴の有無	斜面種別 斜面勾配 岩質 風化度 割れ目の有無 割れ目の性状 割れ目の開口状況 割れ目の方向性 浮き石の量 浮き石の安定性	斜面型 斜面の高さ 岩質 風化度 割れ目の有無 集水条件 集水範囲 乾湿・湧水 表層被覆状況 立木・植生

及ぼす要因を抽出することを目的とした。

また、LM・S判別解析は安定と評価する際にウェイトの高い要因を抽出するために実施した。

さらに、L・M判別解析は、不安定と判断される斜面について、その程度を評価するための目安を得るために解析を考えた。特に、この解析では、表-1に示す要因を、斜面の過去、現在および将来の時間の流れの中で安定性にどのように係わるかについて着目して分類することにし、表-2のように時間軸で整理し、それについて判別解析を行うことにした。

(3) L・MS判別解析

予備解析を実施してアイテムとカテゴリー区分を整理した。特に単相関係数が相互に高いものやカテゴリーのデータが少ないものなどを、削除・統合した。なお、「浮き石の安定性」は、剥落型落石の発生に直接結びつく要因であるが、ここでの安定性の程度は評価者が浮き石の分布や割れ目の状態に基づいて判定しているものであり、関係するアイテムが他にあることを考慮して、解析の最初から除いている。

以上に基づいて判別解析を実行した。その結果に対してレンジの小さいアイテムを除く操作を実施した。3回目の解析結果を、表-3に示した。

「斜面型」は尾根型が不安定側、「岩質」は互層系統が不安定側、「割れ目の性状」は板状・ブロック状が不安定側となっており、技術的な知見とも一致した結果となった。また、「割れ目の開口状況」、「浮き石の量」および「集水条件」のカテゴリーの傾向は技術的知見と一致している。レンジは「割れ目の開口状況」が他のアイテムに比べ突出しており、解析目的はほぼ達したと考え、解析を終了した。

(4) LM・S判別解析

まず前述のL・M・S判別解析と同様の処理を行った後、予備解析を実施した結果からレンジの小さいアイテムを除外し本格的な判別解析を進めた。解析は3回実施した。

第3回目の判別解析結果を表-4に示す。各アイテムと

もカテゴリースコアの傾向は技術的知見と一致している。レンジは「割れ目の開口状況」が他のアイテムを断然引き離して大きく、解析目的は達したと考え、解析を終了した。

(5) L・M判別解析

L・M判別解析では、上述の(2)に示した時間軸で解析した。すなわち、表-2に示した過去、現在および将来の安定性に係わる要因それぞれについて実施した。なお、解析の処理は前述の解析の場合と同様である。

a) 過去の安定性に係わる要因の解析

関係する要因が2つであり、解析を行ったものの、判別の率は67.6%、相関比は0.1247と精度が著しく低かった。

b) 現在の安定性に係わる要因の解析

関係する要因のうち、「割れ目の開口状況」は、後述するように、L・MS判別解析およびLM・S判別解析結果から評価が定まっており、説明変数からは除いて解析した。最終である第3回目の解析結果を表-5に示す。各アイテムとも妥当なカテゴリースコアの傾向となっていることが判る。

c) 将来の安定性に係わる要因の解析

第3回目の判別解析結果を表-6に示す。「風化度」については、風化が進んだものほど不安定という結果であった。これは現在の安定性の解析結果と逆となっているが、この他のアイテムは、カテゴリースコアはほぼ妥当であった。

5. 解析結果に基づく安定性評価の考え方

前述の判別解析結果から、各アイテムのレンジとこれに基づく寄与度の順位をまとめたものが表-7である。この表の各アイテムは、表-2に示した時間軸で整理した形で示した。また、L・M判別解析における過去の安定性に係わる要因の解析結果は、精度が低いため除いた。これらにもとづいて、安定性評価の考え方をまとめると次のようになる。

(1) L・MSとLM・S判別解析から得られた結果

斜面が不安定あるいは安定であると判断する際の要因を抽出するために行ったL・MS判別解析とLM・S判別解析の結果によれば、「割れ目の開口状況」が際立った高いレンジ比率を占めた。すなわち、L・MS判別解析では52.7%、LM・S判別解析では41.2%に達しており、両者とも他のアイテムの2倍以上となっている。このことは、「割れ目の開口状況」により、不安定度の高

い斜面あるいは安定度の高い斜面をふるいわけることが可能であることを示唆しているものと考えられる。

すなわち、割れ目が大きく開口している斜面は17斜面であるが、このうち、不安定度「大」と評価されているのが13斜面、不安定度「中」が4斜面である。

これから、大きく開口した割れ目の存在を、剥落型落石・岩盤崩壊の発生に直接寄与し、これにより斜面が明らかに不安定であると判断できる要因（決定的要因：CPC(Critical Primary Cause)）とし、このような斜面は無条件に不安定度が高いと判断することとする。この考え方では、不安定度「中」の斜面も不安定度が高いと割り切ってしまうが、評価結果としては安全側となる。

一方、割れ目が無い斜面は14斜面、割れ目が密着している斜面は5斜面であり、これら19斜面はすべて不安定度「小」と評価されている。従って、割れ目が無いあるいは密着している斜面は無条件に安定度が高いと判断できる。

なお、不安定度「小」と評価されている斜面は全体で26斜面であることから、残った7斜面は必然的に割れ目がやや開口している斜面となる。これらについて、LM・S判別解析で「割れ目の開口状況」に続きレンジ比率が約20%と高い「斜面勾配」と「浮き石の量」でみてみると、4斜面が「斜面勾配」が50°以下かつ「浮き石の量」が少ないか無い場合である。

以上より、安定度が高い斜面は、割れ目が無いか密着している斜面か、割れ目がやや開口している斜面のうち、斜面勾配が緩くかつ浮き石の量が少ない斜面であるといえる。

(2) L・M判別解析から得られた結果

L・M判別解析は、不安定な斜面についてその程度を評価する目安を得るために実施したものである。前述のL・MS判別解析とLM・S判別解析による評価において、割れ目が大きく開口している斜面はCPCにより無条件に不安定度が高いと判断された。割れ目が無いか密着している斜面は無条件に安定度が高いと評価されるところから、「割れ目の開口状況」は解析から除いている。

この解析結果を示す表-7によれば、L・M判別解析（現在の安定性）において、浮き石の量は他のアイテムに比べ際立って大きなレンジ比率を示した。しかも、このアイテムは、前述のLM・SあるいはL・MSでも大きなレンジ比率を示していることがわかる。

なお、LM・S判別解析とL・MS判別解析による評価において、無条件に安定とした斜面については、現在は安定と評価できるものの、将来の安定性については担保されていない。そこで、これらについては、将来の安定性に関する評価を行うことにする。

表-3 L・MS判別解析結果

アイテム	カテゴリー	データ数	カテゴリー スコア	レンジ	順位	偏相関係 数	順位
斜面型	尾根型 直線・谷型	20 40	0.1235 -0.0617	0.1852	3	0.1676	5
岩質	泥岩・砂質泥岩 砂岩泥岩互層・その他	30 30	-0.0152 0.0152	0.0304	6	0.3272	2
割れ目の性状	サイコロ状・無 板状・ブロック状	29 31	-0.0890 0.0833	0.1723	4	0.1411	6
割れ目の開口状況	大きく開口 やや開口・密着・無	17 43	0.6505 -0.2572	0.9076	1	0.5972	1
浮き石の量	多 中・少・無	19 41	0.2586 -0.1199	0.3785	2	0.3109	3
集水条件	集水・平行流入 平坦・非集水	15 45	0.0361 -0.0120	0.0481	5	0.2367	4

表-4 LM・S判別解析結果

アイテム	カテゴリー	データ数	カテゴリー スコア	レンジ	順位	偏相関係 数	順位
斜面型	尾根型 直線・谷型	20 40	0.0756 -0.0378	0.1134	6	0.1363	5
斜面勾配	G>50° 50°≥G	37 23	0.1299 -0.2090	0.3389	3	0.3648	3
風化度	I II III・IV	5 27 28	-0.0809 0.0707 -0.0537	0.1516	4	0.1602	4
割れ目の開口状況	大きく開口・やや開口 密着・無	41 19	0.2567 -0.5539	0.8105	1	0.6156	1
浮き石の量	多・中 少・無	34 26	0.1894 -0.2476	0.4370	2	0.4147	2
立木・植生	裸地・草本 灌木・高木	34 26	-0.0503 0.0658	0.1161	5	0.1347	6

表-5 L・M判別解析結果 [現在の安定性]

アイテム	カテゴリー	データ数	カテゴリー スコア	レンジ	順位	偏相関係 数	順位
岩質	泥岩・砂質泥岩 砂岩泥岩互層 その他	20 8 6	-0.0223 0.1444 -0.1182	0.2627	2	0.1595	2
風化度	I・II III・IV	21 13	-0.0121 0.0196	0.0317	4	0.0273	4
割れ目の性状	サイコロ状 板状・ブロック状	11 23	-0.1297 0.0620	0.1917	3	0.1571	3
浮き石の量	多 中・少	18 16	0.4616 -0.5193	0.9809	1	0.6715	1

表-6 L・M判別解析結果 [将来の安定性]

アイテム	カテゴリー	データ数	カテゴリー スコア	レンジ	順位	偏相関係 数	順位
斜面の高さ	H>6m 6m≥H	23 11	0.4132 -0.8639	1.2771	1	0.4660	1
風化度	I・II III・IV	21 13	0.0876 -0.1416	0.2292	4	0.2775	3
集水条件	集水・平行流入 平坦・非集水	7 27	0.3323 -0.0862	0.4185	3	0.1577	4
表層の被覆状況	無・不均一 均一	20 14	0.3619 -0.5170	0.8788	2	0.3334	2

表-7 解析結果による各アイテムのレンジ比率とこれに基づく寄与度の順位 (KK線)

過去	アイテム	アイテムのレンジ比率とこれに基づく寄与度の順位					
		L・MS 解析		LM・S 解析		L・M解析(現在・将来)	
		**	*	**	*	**	*
斜面型	10.8	3	5.8	6	—	—	—
斜面勾配	—	—	17.2	3	—	—	—
岩質	1.8	6	—	—	17.9	2	—
風化度	—	—	7.7	4	2.2	4	—
割れ目の性状	10.1	4	—	—	13.1	3	—
割れ目開口	52.7	1	41.2	1	—	—	—
浮き石の量	22.0	2	22.2	2	66.9	1	—
斜面型	10.8	3	5.8	6	—	—	—
斜面高さ	—	—	—	—	45.6	1	—
岩質	1.8	6	—	—	—	—	—
風化度	—	—	7.7	4	8.2	4	—
集水条件	2.8	5	—	—	14.9	3	—
表層被覆状況	—	—	—	—	31.3	2	—
立木・植生	—	—	5.8	5	—	—	—
解 析 精 度	判別的中率	93.3%	93.3%	現在: 85.3% 将来: 73.3%	現在: 0.478 将来: 0.202	—	—
	相関比	0.655	0.731	—	—	—	—

* : アイテムの寄与度の順位

** : レンジ比率 (%)

6. 安定性評価法の提案

(1) 安定性評価法の構築

前章の軟岩斜面の剥落型落石・岩石崩壊に関する数量化II類による解析結果をベースにして、具体的な評価手法を提案する。

安全性評価手法の導出のアルゴリズムとしては、次のような①～⑤のステップで表すことができる。

- ①鉄道沿線における岩石斜面の安定性評価データの収集。
- ②岩石斜面の安定性に関わる要因の抽出。
- ③安定性評価ランクと要因との関係の数量化II類による解析の実行と要因の寄与度の明確化。
- ④安定性に大きな影響を及ぼす寄与度を有する要因について、CPCになり得るかどうかの考察の実施。
- ⑤特定したCPCと数量化II類による解析結果を総合した安定性評価手法の作成。

このアルゴリズムをKK線の軟岩斜面の剥落型落石・岩盤崩壊に適用し、5. の解析結果とCPCの評価要因を考えて、図-2のような流れ図を作成した。すなわち、

- ①大きく開口した割れ目のアイテムをCPCと考え、

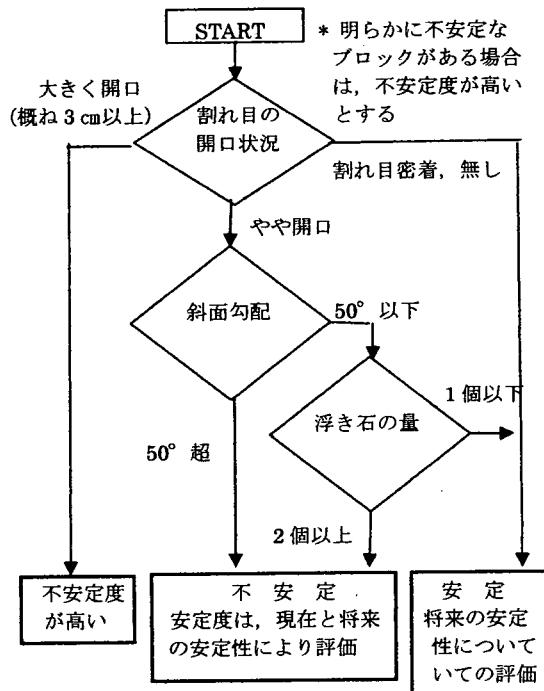


図-2 KK線の軟岩斜面の安定性評価の流れ図

これを有する斜面は不安定度が高い。具体的な判定基準は、対象とする区間の地質特性等にもよるが、割れ目の開口については、概ね3cm以上とした。

- ②割れ目が無いか密着している斜面は現状では安定である。
- ③割れ目がやや開口している斜面は、斜面勾配が50°以下かつ浮き石が無いか少ない場合は安定であり、その他は不安定である。
- ④不安定とされた斜面の不安定度は、L・M判別解析の結果に基づき、現在の安定性(表-8)および将来の安定性(表-9)の両者で評価する。
- ⑤安定とされた斜面についても、将来の安定性(表-9)については評価する。

(2) KK線の安定性の再評価

前述の(1)で提案した鉄道沿線の軟岩斜面に対する新しい安定性評価手法を用いて、KK線の再評価を行う。提案した手法は、CPCなる概念を導入して安定度を求め、現在・将来の安定性を評価するもので、数量化解析結果をそのまま用いてはいない。そこで、ここでは改めて新しい評価手法の妥当性を確認することは意味があると考えた。

表-8 現在の安定性に関する評価法

評価項目	評価点		
浮き石の量	多	中・少	
	0.46	-0.52	
岩質	泥岩・砂質泥岩	砂岩 泥岩互層	その他
	-0.02	0.14	-0.12
割れ目の性状	サイクロ状	板状・ ブロック状	
	-0.13	0.06	

*点数が大きいほど不安定度が高いとする。最大値は0.66、最小値は-0.77である。

表-9 将來の安定性に関する評価法

評価項目	評価点	
斜面の高さ	H>6m	6m≥H
	0.41	-0.86
表層の被覆状況	無・不均一	均一
	0.36	-0.52
集水条件	集水・平行流入	平坦・非集水
	0.33	-0.09

*点数が大きいほど不安定度が高いとする。最大値は1.10、最小値は-1.47である。

表-10 現地調査（KK線）の不安定度と新しい評価手法による評価結果との関係

現地調査による 不安定度	新しい評価手法による評価結果			
	不安定度が 高い	不安定	安定	計
大	件数	13	1	0
	%	92.9	8.1	0.0
中	件数	4	15	1
	%	20.0	75.0	5.0
小	件数	0	3	23
	%	0.0	11.5	88.5
計		17	19	24
				60

検証に使用したデータはKK線の60件である。現地調査による不安定度の評価結果と新しい評価手法により評価した結果との関係を示したものが表-10である。

現地調査で不安定度「大」とされた斜面は、新しい手法による評価では、1例を除いては、CPCによってすべて「不安定度が高い」となった。

不安定度「中」の斜面は、3/4はCPCが存在しないため「不安定」と評価された。CPCにより「不安定度が高い」と判断されたものが20%あるが、これは安全側の評価である。

不安定度「小」の斜面については、「不安定」と評価されたものが11.5%あるが、「安定」と評価された斜面は88.5%に達する。

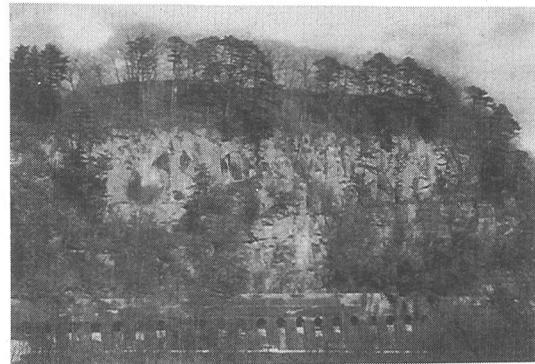


図-3 熔結凝灰岩直崖の全景

表-11 新しい評価手法の他の鉄道沿線斜面（検証例 [1]）への適用結果

	評価項目	状況	評価
流れ図	割目開口状況	大きく開口	不安定度が高い
現在の	浮き石の量	多	0.46
安定性	岩質	その他	-0.12
	割れ目の性状	ブロック状	0.06
	合計点		0.40
将来の	斜面の高さ	H>6m	0.41
安定性	表層被覆状況	不均一	0.36
	集水条件	平行流入	0.33
	合計点		1.10

* 図-2の流れ図により「不安定度が高い」と評価される。この表では現在と将来の安定性の評価点は参考として示した。

したがって、新しい安定性評価手法を用いることによって、専門家の評価とほぼ同様な結果を得ることができると考えられる。

(3) 他の鉄道沿線斜面への適用例

既に専門家により安定性評価がなされている他の鉄道沿線の軟岩斜面について、(1)で提案した新しい安定性評価手法を用いて評価し、両者を比較することにより妥当性を検証する。具体的には、まず、図-2により不安定度を評価し、この評価で不安定度が高いとされたもの以外については、表-8と表-9を用いて、その程度を更に評価する。

a) 検証例 [1]

河岸段丘崖下に線路が設置されており、コンクリート製の落石覆で防護されている箇所である。

高さ30~40mのほぼ直崖で、熔結度が比較的低い第四紀の熔結凝灰岩から構成され、熔結凝灰岩に特有の柱状節理が1~2m間隔で発達し、水平方向にも数本の明瞭な割れ目が連続的に存在している。また、割れ目が大きく

開口している部分があり、ここから岩盤崩壊が発生する懸念が高い。図-3に示すこの斜面に対して、専門家による判断では当該箇所の発生源の評価は不安定度が極めて大きい（JR評価でAAあるいはA₁ランク）とされている。

提案した手法により評価した結果を表-11に示す。大きく開口した割れ目というCPCの存在により、図-2の流れ図によって「不安定度が高い」という評価となった。したがって、提案した手法による評価は、専門家によるランク付け結果を反映しているといえる。

b) 検証例 [2]

海に面した丘陵地の斜面であり、地質は新第三紀の砂岩・泥岩互層および礫岩から構成されている。泥岩は風化の進行に伴うスレーリングが著しく、砂岩は層理面に直交する割れ目が発達し、一部は浮き石状態となっている。また、礫岩は斜面上部で低角度の断層により砂岩・泥岩互層に接しており、塊状の岩体をなし、一部はオーバーハングしている。これらの状況から、互層部やオーバーハング部からの剥落型落石が懸念され、専門家の判断では、やや不安定（JR評価でA₂ランク）と評価されている。

提案した手法による評価結果を表-12に示す。この斜面についてはCPCがないため、図-2の流れ図にしたがって不安定と判断される。このとき、不安定度は表-8と表-9によって、現在は-0.51、将来は0.68となる。現在の安定性を示す-0.51は、表-8でとり得る点数の最小値-0.77に近いため不安定度は低く、一方、将来の安定性を示す0.68は、表-9のとり得る点数の平均値0.05と最大値1.10のほぼ中間に位置しており不安定度が高いといえる。すなわち、不安定な斜面であるが、現状ではその程度が低いが、将来は高くなると評価されたことになる。

したがって、提案した手法は専門家のランク付けをほぼ表現していると言える。

7. 結論

従来用いられている落石や岩盤崩壊に対する評価は、専門技術者の持つ技術やノウハウを最大限に駆使し、その思考プロセスに基づいている部分が多いと考えられる。そこで、専門家による判断基準を要因別に数量化することを試みた。ここでは鉄道沿線（KK線）の軟岩斜面を取り上げ、数量化理論による結果をベースに安定性評価手法を提案したものである。

その構築には、まず、軟岩斜面の剥落型落石・岩盤に対する安定性に着目し、現場データの収集とそれを用

表-12 新しい評価手法の他の鉄道沿線斜面（検証例 [2]）への適用結果

	評価項目	状況	評価
流れ図	割目の開口状況	やや開口	不安定
	斜面勾配	50°超	
現在の 安定性	浮き石の量	中	-0.52
	岩質	砂岩泥岩互層	0.14
	割れ目の性状	サイコロ状	-0.13
将来の 安定性	合計点		-0.51
	斜面の高さ	H>6m	0.41
	表層被覆状況	不均一	0.36
	集水条件	平坦	-0.09
	合計点		0.68

いた数量化解析を実行した。その結果に基づいて、決定的素因（CPC）を抽出するとともに、現在・過去・将来の安定性に関する要因の抽出を行った。

それらの結果をもとに、新しい安定性評価手法を提案した。これを用いて、データ解析に用いた軟岩斜面の再評価と他の線区の斜面評価に適用したところ、専門家による判断によるランク付けをほぼ再現できる評価を得ることができた。

この評価の考え方は比較的岩質が均質で地質構造が単純な軟岩地域に敷設された鉄道沿線斜面の解析から導かれたものである。他の線区への適応もほぼ妥当な結果が得られたが、より汎用性の高いものにすべく、今後、当論文で提案した安定性評価手法のアルゴリズムを他の岩種、他の崩壊パターンにも発展させ、現場の技術者による落石や岩盤崩壊の評価の精度向上に寄与したいと考えている。

参考文献

- 1) 斎藤迪孝：斜面崩壊発生時期の予知に関する研究、鉄道技術研究所報告、No.626、1968.
- 2) 久保村圭助、武井昌博：数量化による切取のり面の安定度解析、土木学会論文集、No.191、1971.
- 3) 日本国鉄道施設局土木課：土木建造物取替の考え方、日本鉄道施設協会、1974.
- 4) 森野亮宏：斜面の災害危険度と崩壊の予測に関する研究、鉄道技術研究報告、No.1292、1985.
- 5) 岡田勝也、杉山友康、村石尚、野口達雄：統計的手法による鉄道盛土の降雨災害危険度の評価法、土木学会論文集、No.448/III-19、1992.
- 6) Okada, K., Sugiyama, T., Muraishi, H. and Noguchi, T.: Statistical Risk Estimating Method for Rainfall on Surface Collapse of a Cut Slope, *Soils and Foundations*, Vol. 34, No. 3, 1994.
- 7) Sugiyama, T., Okada, K., Muraishi, H. and Noguchi, T.: Statistical Rain-fall Risk Estimating Method for a Deep Collapse of a Cut Slope, *Soils and Foundations*, Vol. 35, No. 4, 1995.

- 8) 杉山友康：降雨時の鉄道斜面災害防止のための危険度評価手法に関する研究，鉄道総研報告，特別No.19，1997。
- 9) 日本国鉄道施設局土木課：落石対策の手引，日本鉄道施設協会，1978。
- 10) 松岡等，佐々木清司：落石斜面に関する健全判定の一考察，鉄道土木，Vol.22，No.7，pp.41~48，1980。
- 11) 小野寺章三郎，上妻茂：落石斜面に関する採点表及び判定，鉄道土木，Vol.26，No.1，pp.47~51，1984。
- 12) 鉄道総合技術研究所：落石対策技術マニュアル，1999。
- 13) 道路保全技術センター：道路防災総点検要領，1983。
- 14) 高速道路調査会：落石防護施設の設置に関する調査研究報告書，1974。
- 15) 日本道路協会：落石対策便覧，丸善，1983。
- 16) 日本道路協会：落石対策便覧〔改訂版〕，丸善，2000。
- 17) 飯田忠，越野洋一：道路区域外の点検管理について，日本道路公団技術情報，Vol.75，pp.94~102，1984。
- 18) 道路保全技術センター：道路防災総点検要領（平成8年度）〔豪雨・豪雪等〕，1996。
- 19) 箭内寛治：落石の調査と対策，地質と調査，1987年第3号，pp.39~46，1987。
- 20) 村上幸利，箭内寛治：数量化法に基づく転落型落石の危険度評価基準について，土木学会論文集，Vol.415/VI-12，pp.155~161，1990。
- 21) 多田元彦：岩盤斜面の崩壊危険度のステレオネットを用いた簡易判別法について，応用地質，Vol.31，No.1，pp.19~28，1990。
- 22) 角田隆彦，本島熱，野崎隆司：評点法による岩盤斜面の安定度診断の試み，応用地質，Vol.38，No.1，pp.2~12，1997。
- 23) Duncan, C.: Rock slope Inventory/Maintenance Programs, *Rockfall Mitigation Seminar*, 13th Northwest Geotechnical Workshop, 1987.
- 24) Selby, M.: *Hillslope Materials and Processes*, Oxford University Press, 1993.
- 25) 土木学会：岩盤斜面の安定解析と計測，1994。
- 26) 土木学会：大規模岩盤崩壊に関する技術検討委員会報告書，1997。
- 27) 日本の地質編集委員会編：日本の地質3関東地方，共立出版，1986。
- 28) 鈴木隆介：建設技術者のための地形図読図入門第1巻読図の基礎，古今書院，1997。

(2002.12.2受付)

STABILITY EVALUATION METHOD OF SOFT ROCK SLOPES ALONG RAILWAY

Tatsuo NOGUCHI, Katsuya OKADA, Tomoyasu SUGIYAMA,
Hideo KIYA and Yasuhiro TSUCHIDA

Many conventional stability evaluation methods are based on techniques and knowhow of specialist of geology and civil engineering. This paper deals with a new stability evaluation method in which the black box of the judgements by the specialists is solved and is opened. At first, the site-investigations and inspections are exceeded in object to separation-type rock fall and rock collapse at soft rock slopes along railways. Some quantification analyses using the data are also exceeded. On the base of the results, we extract a critical primary cause(CPC), which is fundamental factor in relation to slope collapses, and distill instability factors for past, presence and future. At last we present a new stability evaluation method for soft rock slopes in consideration with the above conclusions.