

鉄道沿線の硬岩斜面の安定性評価手法

野口達雄¹・杉山友康²・木谷日出男²・岡田勝也³

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

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

³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)

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。そこで筆者らは軟岩斜面について、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既に提案した。ここでは、硬岩斜面に着目し、軟岩斜面と同様な現場データの収集とそれを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素因(決定的素因:CPC)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 : *hard rock, slope, stability evaluation, multivariate analysis*

1. まえがき

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や道路では、評価の対象となる沿線斜面の数が膨大であることから、多くの斜面を迅速かつ簡易に評価できる評価基準が実務では望まれてきた。

斜面崩壊に関する研究のうち、土砂斜面については主として豪雨時の斜面の安定性評価手法として定着しているものがある^{1),2),3),4)}が、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定量的になっているものは少ない。

鉄道における岩石斜面の安定性評価手法については、1974年に国鉄が作成した土木建造物取替の考え方⁵⁾に示された採点表が、実務に供したマニュアルとしては最初である。その後、1977年の上越線落石事故を契機として作成された落石対策の手引⁶⁾、これを基本にした松岡・佐々木⁷⁾および小野寺・上妻⁸⁾による評価手法、1996年高山線の落石災害を契機にした落石対策技術マニュアル⁹⁾がある。

一方、道路では、1968年の飛騨川バス転落事故を契機とした道路防災総点検要領¹⁰⁾、高速道路調査会による

手法¹¹⁾、日本道路協会による落石対策便覧¹²⁾(改訂版¹³⁾、飯田・越野による中央自動車道の採点形式による評価手法¹⁴⁾、1989年の越前海岸の岩石崩壊事故を契機とした道路防災総点検要領への岩石崩壊の追加および豊浜トンネル岩盤崩落事故後の見直し¹⁵⁾などがある。また、研究的な手法については、箭内¹⁶⁾、村上・箭内¹⁷⁾、多田¹⁸⁾、角田他¹⁹⁾による評価手法などがあり、外国ではC.W.Duncan²⁰⁾、M.J.Selby²¹⁾による評価手法がある。

これらの評価基準の多くは、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、筆者らは、軟岩斜面に着目し、新しい評価手法を先に提案した²²⁾。この手法は、その存在により斜面が明らかに不安定であると判断できる素因を決定的素因(CPC: Critical Primary Cause)とするという新しい概念を用いたもので、評価手法の導出

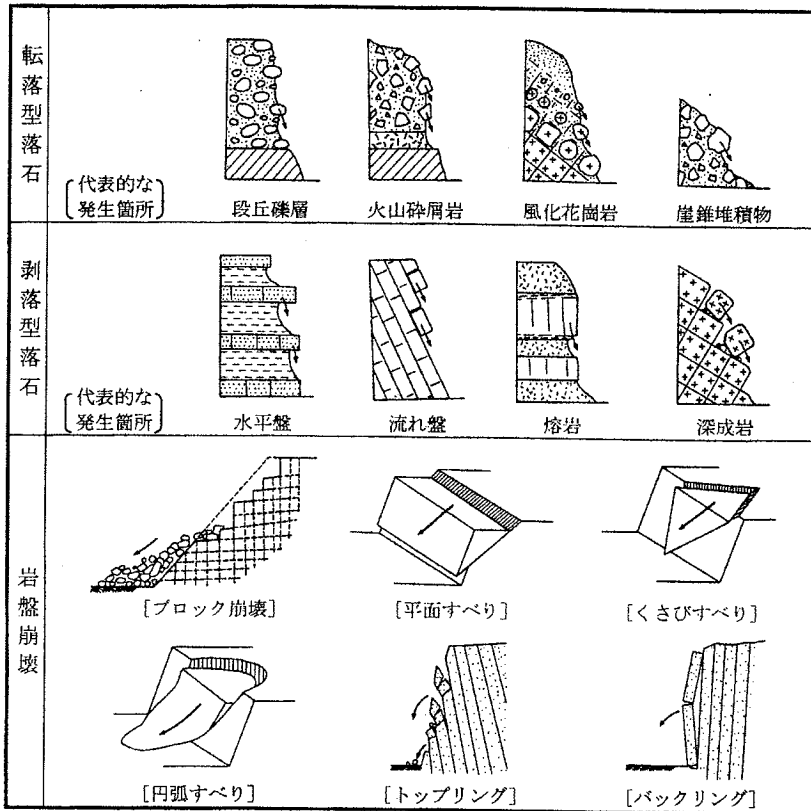


図-1 転落型落石、剥落型落石と岩盤崩壊の概念図 (文献23, 24)を基に作成

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にした。

- 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。

軟岩に対する上述の①～⑤のアルゴリズムを、硬岩斜面の評価手法に関する当論文でも採用することにし、硬岩地帯の鉄道沿線の斜面データの収集とその解析を実行することにし、より精度が高く、簡便で実用的な安定性評価手法を提案する。

2. 硬岩斜面の調査データ

(1) 解析に用いた基礎データ

岩石斜面からの落石や岩盤崩壊については、種々の区

分があるが、本論文では、軟岩斜面の場合と同様、線状構造物の鉄道の保守の実態も考慮して、落石(転落型落石と剥落型落石に区分される)および1,000m³程度までの岩盤崩壊(図-1にこれらの概念図を示す)を対象として、崩壊形態によって、剥落型落石・岩盤崩壊と転落型落石の2つに分類することにした。

この2つに分類した理由を示せば次のようである。すなわち、別途実施した落石・岩盤崩壊の素因に関する分析結果^{29),30)}によれば、剥落型落石・岩盤崩壊と転落型落石は発生メカニズムが異なるため関連する素因等に大きな違いがみられるが、剥落型落石と岩盤崩壊は規模が異なるものの、発生メカニズムは基本的には同様であり、素因等もほぼ同様であることが明らかになったことから、素因に基づく安定性評価手法の構築という目的に合わせた分類としたものである。

このような分類に基づいて、鉄道沿線の硬岩斜面のデータを収集することにした。取り上げた鉄道沿線は、JRのY線とI線で総延長は196.3kmの路線である。

この路線は、主に中・古生層および花崗岩類からなるK山地中央部に敷設されており、全国でも指折りの落石や岩盤崩壊による災害多発発露区である。この路線沿線斜面の現地調査を行い、落石や岩盤崩壊に対する評価を行

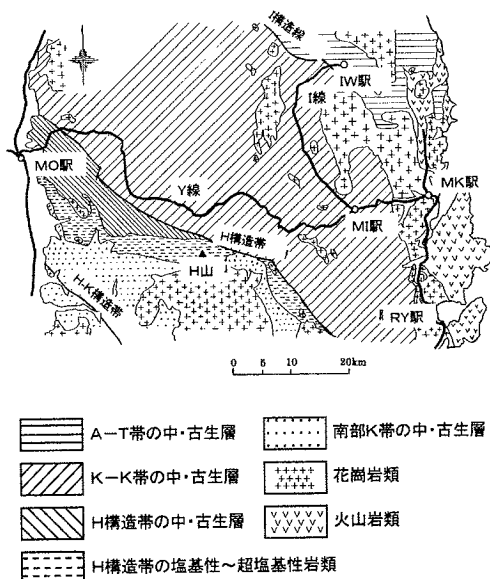


図-2 Y線・I線の線路略図と表層地質図

った。ここでは、安定性評価の基本となる、落石や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、現地調査データをもとに、硬質斜面の安定性に係わる素因と専門技術者による評価との関係を分析した。

(2) 調査地域の地形・地質特性^{27), 28)}

調査地域を図-2に示す。Y線は図の中央に位置する山地をほぼ東西に貫き、東端では海岸線を走る。また、I線は、Y線の途中から分岐して、この山地を北上する路線である。

この山地は比較的なだらかな山地であり、2つの隆起準平原面が認められる。1つは標高約1,000 m付近の高位隆起準平原面であり、もう1つは標高約500~700 m付近の低位隆起準平原面である。高位準平原面は最高峰H山(標高1,914 m)を中心とする中央山岳地帯にみられるが、調査地域はこのうちの中央山岳地帯に属しており、線路は河川が形成した溪谷に沿って敷設されている。

図-2に示す調査地域の地質分布によれば、当該の山地はほぼNW-SEに伸びるH構造帯をはさんで、南部と北部の山地に区分される。北部山地はI構造線を境に、西側のK-K帯と東側のA-T帯に分けられる。調査地域は一部にH構造帯を含むが、ほとんどがK-K帯に属している。このK-K帯を構成する地層は主に粘板岩、砂岩と粘板岩の互層、塩基性の火砕岩類からなり、しばしばチャートやレンズ状の石灰岩を挟み、これらを貫き花崗岩類、貫入岩類が分布している。地質構造は複雑で、一般的な走向はNNW-SSEであり、多くの断層により分断されている。地質年代は時代不祥の箇所もあるが、

古生代石炭紀から中生代と考えられている。

(3) 現地調査の方法

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。これらの調査結果をもとに、崩壊形態を剥落型落石・岩盤崩壊と転落型落石に区分して評価を行った。なお、調査対象斜面数は、剥落型落石・岩盤崩壊の67件と転落型落石の36件の合計103件である。

3. 解析に用いる要因の抽出と解析方法

(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。なお、数量化Ⅱ類は(Quantification Theory Type Ⅱ)は目的変数がある場合の解析法の一つであり、判別分析とよく似た手法の一つである。すなわち、判別分析では説明変数の形態が数量データであるのに対して、数量化Ⅱ類ではカテゴリーデータである点が判別分析と異なるものである。

表-1に数量化Ⅱ類解析における要因とその区分等を示す。主な要因の区分の目安としては次のとおりである。

a) 斜面型

鈴木²⁹⁾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。

b) 風化度

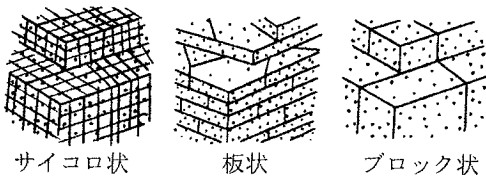
風化度は鉄道で従来用いられている区分(表-2)に従うことにし、風化の著しい場合を「I」、未風化を「IV」として4段階に区分した。

c) 割れ目

割れ目の多寡については、割れ目の平均的間隔(50cmを目安)により、密に発達している場合を多とし、疎の場合を少とした。

割れ目の性状は、サイコロ状(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、おおむね50cm以上)に区分した。サイコロ状、板状およびブロック状の割れ目の概念図を図-3に示した。

割れ目の開口状況については、3cm以上の開口は大きく開口、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。



サイコロ状 板状 ブロック状
図-3 サイコロ状、板状とブロック状の割れ目の概念図

表-1 解析に用いた要因と区分

要 因		区 分	対 象
斜面 形態	斜面型	「尾根型」「直線」「谷型」	*
	斜面種別	「自然斜面」「切取のり面」	*
斜面 諸元	斜面の長さ	対象斜面の遷急線までの長さ	*
	斜面勾配	平均勾配(斜面の代表勾配)	*
地 質 ・ 地 質 構 造	岩質	「砂岩・チャート」「粘板岩」「その他」	*
	風化度	「I」「II」「III」「IV」	*
	割れ目の多寡	「多」「少」	+
	割れ目の性状	「サイコロ状」「板状」「ブロック状」	+
	割れ目の開口状 況	「大きく開口」「やや開口」「密着」	+
	割れ目の方向性	「流れ盤」「受け盤」	+
	浮き石の量	「多」「少」「無」	+
	浮き石の安定性	「不安定」「やや不安定」「安定・浮き石無」	+
	転石の量	「多」「中」「少」	#
	転石の形状	「大岩塊」「サイコロ状」「板状」	#
転石の安定性	「不安定」「やや不安定」「安定」	#	
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」「湿潤」「乾燥」「全体湿潤」「部分的に湿潤」	+
表層	表層の状態	「全面露岩」「露岩点在」「露岩ほとんど無」「侵食顕著」「雨裂・凹凸」「安定」	+
		「裸地・草本」「灌木」	#
	立木・植生	「裸地・草本」「灌木」	*
不安定地形等	「崩壊地形」「直崖」「無」	+	
	「崩壊地形」「凸型斜面」「無」	#	
崩壊歴の有無	「有」「無」	*	

なお、表中の+は剥落型落石・岩盤崩壊、#は転落型落石、*は両者が対象であることを示す。

割れ目の方向性については、多方向の割れ目が発達した斜面がほとんどであるため、最も卓越した方向の割れ目で流れ盤と受け盤を区分した。

d) 浮き石

浮き石の量は、浮き石が斜面全体に分布している場合を多、部分的な場合を少とした。具体的には、評価対象

表-2 風化度の区分(文献5)を基に作成

風化 度	調 査 結 果 の 内 容	
	目視による状態	ハンマー打撃に 対する変化
I: 非常に 大	表面が完全に土壌化しており、原形は不明瞭、色は茶～茶褐色	ハンマーの先が突き刺さる。数cm以下の細片が剥落する。
II: 大～中	岩の形状を保っているが、表面に割れ目が多く、1cm以上に拡大している。また部分的に空隙化がみられ、割れ目が浮いている。崖錘状を示す。	ハンマー打撃で表面が、拳～レンガ大の岩片となって剥落する。剥落跡に崩土・蔓草の根が充填している。
III:小	表面には縦横の割れ目が発達している。割れ目は5mm以下で連続性がない。	ハンマー打撃で手応えがあり、部分的には拳大以下の岩片が剥落するが、岩質は硬い。
IV:安定	割れ目はほとんど認められず、表面の植生も極めて薄い。色は暗灰色の部分が多い。	ハンマー打撃で手が痺れる。層理面の確認に鑿使用。

表-3 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* 不安定地形等* 崩壊歴の有無*	斜面種別* 斜面勾配* 岩質* 風化度* 割れ目の多寡+ 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+ 転石の量# 浮き石の安定性+ 転石の安定性# 転石の形状# 集水条件# 集水範囲# 表層の状態# 不安定地形等*	斜面型* 斜面の高さ* 岩質* 風化度* 割れ目の多寡+ 集水条件* 集水範囲* 乾湿・湧水* 表層の状態* 立木・植生* 不安定地形等*

なお、表中の+は剥落型落石・岩盤崩壊、#は転落型落石、*は両者が対象であることを示す。

としている箇所の70%以上に分布している場合を多とし、これ以下を少とした。

浮き石の安定性については、浮き石の状況により、変位が確認される、あるいは浮き石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、浮き石がほとんど無い場合を安定・浮き石無とした。

e) 転石

転石の量は、転石が斜面全体に分布している場合を多、部分的な場合を中、局所的な場合を少とした。具体的

は、目安として評価対象としている箇所70%以上の場合を多とし、30%以下を少とし、その中間の分布を中とした。

転石の形状については、大きさが3~4m以上の場合を大岩塊とし、それ以下についてはサイコロ状と板状に区分した。

転石の安定性は、マトリックス内への埋没程度により不安定、やや不安定、安定に区分することにし、鉄道で使用されている落石対策の手引⁶⁾を参照に、斜面からの浮き出しが1/2程度以上を不安定、1/2~1/3をやや不安定、1/3程度以下を安定とした。

f) 集水

集水条件については斜面背後の条件により区分した。

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

g) その他

表層の状態に関しては、剥落型落石・岩盤崩壊では露岩の分布状況により、転落型落石ではマトリックスの状況により区分した。

不安定地形等については、剥落型落石・岩盤崩壊、転落型落石のそれぞれについて、発生に関連が深いと考えられる地形条件を区分した。なお、オーバーハングは崩壊地形に含めた。

崩壊歴の有無は、過去の記録や現地の形跡の有無により区分した。

(2) 要因の時間軸での区分

別途実施した落石・岩盤崩壊の素因についての筆者らの既往の解析^{20,20)}によれば、落石・岩盤崩壊の素因には、浮き石や転石の現時点での不安定性を示すもの(例えば、割れ目の開口状況、転石の安定性)と将来の安定性低下に係わるもの(例えば、集水条件、表層の状態)があり、これらを区分することは可能であることがわかった。これは、斜面の安定性を評価するためには、各素因の関与を時間の流れの中で評価する必要があることを示唆していると考えられる。また、過去の落石・岩盤崩壊発生の履歴は現在から将来にわたる安定性を評価するにあたっては重要な事項である。

このような観点から、過去から将来に至る時間の流れの中での各要因の関与を明確にするため、前節で抽出した要因を斜面の過去、現在および将来に係わるものとして時間軸で整理した。その結果を表-3に示す。

このうち、転落型落石については、降雨によるマトリックスの侵食が発生の直接的な引き金になる場合もあることから、これに係わる集水条件、集水範囲および表層の状態は、現在の安定性にも係わる要因として整理した。

表-4 数量化II類の解析ステップ

解析目的		目的変数の区分
L・MS 判別解析	不安定と評価する際に影響を及ぼす要因の抽出	不安定度「大」と「中・小」
LM・S 判別解析	安定と評価する際に影響を及ぼす要因の抽出	不安定度「大・中」と「小」
L・M 判別解析	過去の不安定性 現在の不安定性 将来の不安定性	左欄の時間軸ごとに、関係する要因のみを使用して、不安定性の程度を評価するための目安を得る 不安定度「大」と「中」

(3) 目的変数と解析のプロセス

目的変数である斜面の評価結果は、不安定度を「大」、「中」、「小」の3段階に区分した。これは、専門技術者が現地で評価した結果の平均値をとり、区分したものである。不安定度「大」は剥落型落石・岩盤崩壊で26斜面、転落型落石で9斜面、不安定度「中」は剥落型落石・岩盤崩壊で28斜面、転落型落石で16斜面、不安定度「小」は剥落型落石・岩盤崩壊で13斜面、転落型落石で11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、現地には各種の防護設備が設置され、列車の安全確保が図られている。

解析の単純化を図るために2群判別によることとした。解析プロセスとしては、不安定度「大」と「中・小」の判別解析(L・MS判別解析と称す)と不安定度「大・中」と「小」の判別解析(LM・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。

この解析ステップは表-4のようにまとめられる。このうち、L・MS判別解析とLM・S判別解析は、それぞれ斜面が安定か不安定かを判断できる要因を抽出するためのものであり、また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の解析である。

すなわち、L・MS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及ぼす素因を、LM・S判別解析は安定と評価する際にウエイトの高い素因を抽出するための解析である。また、L・M判別解析は、前節で示したように、時系列的な流れの中で要因を評価することの重要性に鑑み、過去、現在、将来のそれぞれについて安定性に関わる要因を抽出しようとする解析と考えることができる。このため、L・M判別解析は、すべての要因を一括して実施するのではなく、要因を表-3に示した形で過去、現在および将来の安定性に係わるものに区分し、それぞ

れについて別個に行なった。

4. 剥落型落石・岩盤崩壊の数量化Ⅱ類による解析結果

数量化Ⅱ類による解析については、まず予備解析を順次行い、ついでアイテムとカテゴリーの区分を整理し、結合と削除を実行した。さらに、目的変数への寄与度の低いアイテムを除き、本格的な解析を進めることにした。

この解析精度については、一般的には判別率や相関比によって判断でき、前者が100%に近ければ、後者は1.0に近いほど精度は良いとされる。しかし、実務の面からは、そのような数学的判断に加えて、アイテムのカテゴリースコアの値が実際の現象を説明できるのかという工学的な判断も必要である、ここでは、こうした判断も加えて総合的に解析精度を判定した。

なお、判別率の中率は、数量化Ⅱ類の解析における実績データ群と推定データ群の一致の度合いを示したもので、両群がそれぞれ一致したサンプル数を全サンプル数で除し、それを百分率(%)で表したものを言い、100%に近いほど判別精度が良い。また相関比は級間分散を全体分散で除した値で示され、求められたサンプルスコアを数量データ、実績データ群をカテゴリーデータとして求めるもので、1.0に近いほど分析精度が高いとされる。また、レンジ比率はアイテム毎のレンジが全アイテムの合計に占める割合を言い、レンジ比率が大きいほど目的変数に及ぼす影響が強いと言える。

(1) L・MS判別解析

L・MS判別解析については、まず予備解析を行い、アイテムとカテゴリーの区分を整理し、結合・削除を行い、さらに目的変数への寄与度の低いアイテムを除いたあと、本格的な解析を進めた。最終結果を表-5に示す。

「岩質」は砂岩・チャートが最も不安定側で、粘板岩が続き、その他(主に花崗岩類・貫入岩類)が最も安定となっているが、その他のアイテムの傾向は技術的知見と一致している。レンジは、上位の3つのアイテムがほぼ同様の高い値を示した。

(2) LM・S判別解析

L・MS判別解析と同様の考え方によって、LM・S判別解析を実施した。その結果を表-6に示す。

「岩質」は不安定側から砂岩・チャート、その他(主に花崗岩類・貫入岩類)、粘板岩となっている。しかし、「割れ目の性状」は、板状で不安定度が高く、次いでブロック状、サイコロ状となっており、「岩質」の結果から考えられる傾向との不一致がみられるものの、この他の

表-5 L・MS判別解析結果 [剥落型落石・岩盤崩壊]

アイテム	カテゴリー	カテゴリスコア	レンジ	偏相関
斜面型	尾根型	0.0280	0.0469	0.0488
	直線・谷型	-0.0189		
岩質	砂岩・チャート	0.0179	0.0763	0.0591
	粘板岩	-0.0162		
	その他	-0.0585		
風化度	I	-0.1044	0.1536	0.1458
	II	0.0342		
	III・IV	0.0492		
割れ目の開口状況	大きく開口	0.2804	0.4697	0.4071
	やや開口・密着	-0.1893		
浮き石の量	多	0.2855	0.6376	0.5218
	少・無	-0.3521		
立木・植生	裸地・草本	0.4453	0.5629	0.4340
	灌木	-0.1176		
崩壊歴の有無	有	0.0568	0.0793	0.0764
	無	-0.0225		

表-6 LM・S判別解析結果 [剥落型落石・岩盤崩壊]

アイテム	カテゴリー	カテゴリスコア	レンジ	偏相関
岩質	砂岩・チャート	0.1881	0.5832	0.2635
	粘板岩	-0.3951		
	その他	-0.2403		
風化度	I・II	-0.0397	0.0831	0.0484
	III・IV	0.0434		
割れ目の性状	サイコロ状	-0.2778	0.7521	0.3147
	板状	0.4743		
	ブロック状	-0.1159		
浮石の量	多	0.2746	0.6133	0.3418
	少・無	-0.3387		
表層の状態	全面露岩	0.0424	0.1580	0.0754
	露岩点在・無	-0.1155		

アイテムについての傾向は技術的知見と一致している。レンジは、上位の3つのアイテムが高い値を示しており、残りの2つはこれらに比べて低くなっている。ただし、判別率の中率73.1%、相関比0.249と解析精度自体は低い。

(3) L・M判別解析

L・M判別解析は不安定度「大」と「中」の2群判別であり、表-3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。解析データ件数は不安定度「小」に該当するサンプルを除外しているため54件である。

a) 過去の安定性に係わる要因の解析

判別率の中率は66.7%、相関比は0.132と解析精度は著しく低かった。これは、解析に用いた要因が3つと少ないためと考えられる。

b) 現在の安定性に係わる要因の解析

この解析結果を表-7に示す。「割れ目の方向性」で流れ盤が安定側となっているが、レンジもあまり小さくなく、割れ目が多く存在する斜面では割れ目の方向性が支

表-7 L・M判別解析結果(現在と将来の安定性) [剥落型落石・岩盤崩壊]

アイテム	カテゴリー	カテゴリスコア	レンジ	偏相関	
現在の安定性	斜面勾配	G>45°	0.0946	0.2044	0.2098
		45° ≥ G	-0.1098		
	割れ目の性状	サイコロ状	-0.0515	0.0685	0.1948
		板状 ブロック状	-0.0019 0.0170		
	割れ目の開口状況	大きく開口	0.2804	0.5222	0.3732
		やや開口・密着	-0.2417		
割れ目の方向	流れ盤	-0.0362	0.1303	0.1119	
	受け盤	0.0941			
浮き石の量	多	0.3106	0.8386	0.5535	
	少・無	-0.5280			
将来の安定性	斜面型	尾根型	0.1926	0.3151	0.4184
		直線・谷型	-0.1226		
	岩質	砂岩・チャート	-0.0036	0.2491	0.5981
		粘板岩	0.1018		
		その他	-0.1472		
	風化度	I	-0.2905	0.5070	0.6200
		II	0.2164		
		III・IV	0.0464		
	乾湿・湧水	湧水・湿潤	0.0556	0.1878	0.2020
		乾燥	-0.1321		
立木・植生	裸地・草本	0.4783	0.6299	0.7043	
	灌木	-0.1516			
不安定地形等	崩壊地形	0.2789	0.4071	0.5946	
	直崖・無	-0.1282			

配的な要因ではないと解釈できる。この他のアイテムは、ほぼ技術的知見に一致したカテゴリースコアの傾向となっている。

c) 将来の安定性に係わる要因の解析

この解析結果を表-7に示す。「風化度」は、強風化が最も安定側になっているが、この傾向は、別途実施した災害データの分析結果²⁰⁾により明らかになっている剥落型落石は強風化斜面よりもむしろ弱～中風化斜面での発生頻度が高いという傾向と矛盾はしていない。その他のアイテムのカテゴリースコアはほぼ技術的知見と一致している。

5. 転落型落石の数量化Ⅱ類による解析結果

(1) L・MS判別解析

転落型落石のデータ数は36斜面であるため、表-1に示した要因と区分をそのまま用いたのでは解析が出来ない。そこで、いくつかのアイテムを当初より除外した。まず、「斜面種別」と「斜面の高さ」は、転落型落石の発生域での不安定度への関与が小さいと考えられるため除外することとした。次に、「集水範囲」と「乾湿・湧水」はデータ数とカテゴリーの関係から除外した。これらを含めた整理・統合を行ったのちに、解析を実施した。

この解析結果を表-8に示す。「斜面勾配」は中間の勾

表-8 L・MS判別解析結果 [転落型落石]

アイテム	カテゴリー	カテゴリスコア	レンジ	偏相関
斜面勾配	G>50°	0.0769	0.1942	0.4535
	50° ≥ G>35°	-0.1119		
	35° ≥ G	0.0823		
転石の量	多	0.5979	0.8969	0.8108
	中・少	-0.2990		
転石の形状	大岩塊・サイコロ状	0.0876	0.1854	0.2541
	板状	-0.0979		
集水条件	集水	0.1434	0.1721	0.2304
	平行流入 他	-0.0287		
表層の状態	侵食顕著	0.2519	0.3627	0.4836
	雨裂・凹凸・安定	-0.1108		

表-9 LM・S判別解析結果 [転落型落石]

アイテム	カテゴリー	カテゴリスコア	レンジ	偏相関
斜面型	尾根型	0.0943	0.1649	0.0927
	直線	-0.0569		
	谷型	-0.0706		
斜面勾配	G>35°	-0.0221	0.0663	0.7836
	35° ≥ G	0.0442		
転石の量	多・中	0.2311	0.4160	0.7827
	少	-0.1849		
集水条件	集水	-0.1958	0.2711	0.5366
	平行流入 他	0.0753		
表層の状態	侵食顕著	0.2641	0.8645	0.8307
	雨裂・凹凸・安定	-0.6003		
立木・植生	裸地・草本・灌木	0.0046	0.0410	0.2457
	高木	-0.0364		

配が最も安定となっているが、その他のアイテムの傾向は妥当な結果となっている。レンジは、「転石の量」が他のアイテムと比べ突出している。

(2) LM・S判別解析

L・MS判別解析と同様な形でアイテムとカテゴリーの除外や整理を行い、解析を実施した。その解析結果を表-9に示す。

「斜面勾配」と「集水条件」のカテゴリースコアの傾向が技術的知見と逆になっている他は、妥当な結果である。レンジは、「表層の状態」が全体の半分近くの比率を占めた。

(3) L・M判別解析

この判別解析は不安定度「大」と「中」の2群判別であり、表-3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。解析データ数は不安定度「小」に該当するサンプルを除外しているため25斜面である。

a) 過去の安定性に係わる要因の解析

判別の中率は76.0%、相関比は0.410と解析精度は低かった。

表-10 L・M判別解析結果（現在と将来の安定性）〔転落型
落石〕

アイテム	カテゴリー	が ^o リスア	レンジ	偏相関	
現在の安定性	斜面勾配	G>50° 50°≧G	0.3279 -0.1036	0.4315	0.4169
	転石の形状	大岩塊 サイコロ状 板状	0.4626 -0.0511 -0.1288	0.5915	0.3308
	表層の状態	侵食顕著 雨裂・凹凸・安定	0.2865 -0.2251	0.5117	0.4266
	不安定地形等	崩壊地形・凸型斜面 無	0.1552 -0.1975	0.3527	0.3299
将来の安定性	風化度	I II III	0.0395 0.0127 -0.2396	0.2791	0.3308
	乾湿・湧水	全体的に湿潤 部分的に湿潤	-0.1430 0.1320	0.2750	0.4327
	表層の状態	侵食顕著 雨裂・凹凸 安定	0.3292 -0.2519 -0.2992	0.6284	0.7032
	不安定地形等	崩壊地形・凸型斜面 無	0.1927 -0.2453	0.4380	0.6055

b) 現在の安定性に係わる要因の解析

データ数が25斜面と少ないため、解析に当たっては、アイテムの除外やカテゴリーの統合を行う必要がある。まず、「転石の量」は、後述するように、L・MS判別解析とLM・S判別解析の結果から評価が定まっているので、除外した。また、「集水範囲」は大が1データのため除外した。この他、データ数が1~3個のカテゴリーについては、適宜、他のカテゴリーに統合した。

これによる解析結果を表-10に示す。各アイテムともほぼ技術的知見と一致する傾向となっている。

c) 将来の安定性に係わる要因の解析

関係する要因のうち、「集水範囲」については、大が1データのため除外した。また、「岩質」はその他のデータが1つのため、砂岩・チャートに統合した。

この解析結果を表-10に示す。「乾湿・湧水」で、全体的に湿潤が部分的に湿潤より安定側となっている以外はほぼ技術的知見と一致する傾向となっている。

6. 解析結果に基づく安定性評価の考え方

(1) 剥落型落石・岩盤崩壊の安定性評価の考え方

4. の解析結果から、各アイテムのレンジ比率とこれに基づく寄与度の順位をまとめたものを表-11に示す。

なお、この表は各要因を時間軸で整理しているが、L・M判別解析での過去の安定性に係わる要因の解析結果については解析精度が低かったため除いている。これにもとづいて安定性評価の方法について考察する。

a) L・MSとLM・S判別解析結果に関して

斜面の不安定性が大きいと評価する際に大きな影響を

表-11 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〔剥落型落石・岩盤崩壊〕

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)		
	**	*	**	*	**	*	
過去	斜面型	2.3	7	—	—	—	—
	崩壊歴の有無	3.9	5	—	—	—	—
現在	斜面勾配	—	—	—	—	11.6	3
	岩質	3.8	6	26.6	3	—	—
	風化度	7.6	4	3.8	5	—	—
	割れ目の性状	—	—	34.3	1	3.9	5
	割れ目の開口状況	23.2	3	—	—	29.6	2
	割れ目の方向性	—	—	—	—	7.4	4
	浮き石の量	31.5	1	28.0	2	47.5	1
将来	斜面型	2.3	7	—	—	13.7	4
	岩質	3.8	6	26.6	3	10.8	5
	風化度	7.6	4	3.8	5	22.1	2
	表層の状態	—	—	7.2	4	—	—
	乾湿・湧水	—	—	—	—	8.2	6
	立木・植生	27.8	2	—	—	27.4	1
	不安定地形等	—	—	—	—	17.7	3
解析精度	判別的中率	92.5%		73.1%		現在81.5% 将来83.3%	
	相関比	0.645		0.249		現在0.555 将来0.498	

** : レンジ比率 (%)

* : アイテムの寄与度の順位

及ぼす素因を抽出するためのL・MS判別解析では、表-11に示すように寄与度の大きなものとして、「浮き石の量」、「立木・植生」と「割れ目の開口状況」があげられ、これらを合わせるとレンジ比率が82.5%を占めている。このことは、これら3つの素因が大きな寄与度を示し、これらにより不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。

ただし、「立木・植生」は、これにより、即、不安定度を評価できるものではなく、岩塊落下の抑止効果あるいは根の侵入による割れ目の拡大という将来の不安定度の増加に係わる素因と考えるのが妥当である。

そこで、残りの「浮き石の量」と「割れ目の開口状況」について、具体的なデータにより検討することにする。

まず、浮き石の量が多い斜面は37斜面あり、このうち不安定度「大」である25斜面が含まれている。不安定度「大」の斜面の総数は26斜面であるため、仮に浮き石の量が多い斜面は不安定度が高いとすると、不安定度「大」の斜面はほぼ全部が抽出できるものの、不安定度「中」(9斜面)、不安定度「小」(3斜面)の斜面についても同時に抽出されてしまう。

また、割れ目が大きく開口している斜面は27斜面であり、このうち不安定度「大」の斜面は20斜面しか含

まれていない。加えて、残りの7斜面は、不安定度「中」が5斜面、不安定度「小」が2斜面である。

したがって、「浮き石の量」と「割れ目の開口状況」のそれぞれは不安定度の高い斜面を特定するための必要かつ十分な条件とはいえない。そこで、次に浮き石の量が多く、かつ割れ目が大きく開口しているという条件を検討する。

この条件に当てはまる斜面は23斜面であり、この内訳は、不安定度「大」が21斜面、不安定度「中」が2斜面、不安定度「小」は無しとなっている。これを判断の尺度とすると不安定度「中」の2斜面も不安定度が高いと判断してしまうことになるが、評価結果としては安全側となる。また、不安定度「大」の5斜面が落ちこぼれるが、これらの斜面はすべて浮き石の量が多い斜面であり、後述するL・M判別解析の結果により導かれる評価によって、不安定度が高いと評価されることになる。

以上より、浮き石の量が多くかつ割れ目が大きく開口している斜面は無条件に不安定度が高いと判断することは妥当であり、この両者を掛け合わせたものを決定的素因(CPC)とみてよいと考えられる。

次に、斜面を安定と評価する際にウエイトの高い素因を抽出するための解析であるLM・S判別解析について考察する。表-11に示すように寄与度の大きなものとして、「割れ目の性状」、「浮き石の量」および「岩質」が抽出された。しかし、解析そのものの精度が低かった上に、実際の現場調査データを検討した結果、これらの3つの素因により安定性の高い斜面を抽出することはできないことが分かった。

b) L・M判別解析結果に関して

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実施したものである。

過去の安定性については、解析精度が低かったことから評価対象とはならない。評価は、現在の安定性と将来の安定性に着目することとする。用いる素因としては、表-7に示したカテゴリースコアを目安に重み付けをすればよいと考えられる。

(2) 転落型落石の安定性評価の考え方

5.の解析結果から、各アイテムのレンジ比率とこれに基づく寄与度の順位をまとめたものを表-12に示す。なお、この表は剥落型落石・岩盤崩壊の場合と同様、各要因を時間軸で整理した形で作成したものであるが、過去の安定性の解析結果については除いている。これにもとづいて安定性評価の考え方を整理した。

a) L・MSとLM・S判別解析結果に関して

斜面の不安定性が大きいと評価する際に大きな影響を及ぼす素因を抽出するためのL・MS判別解析では、表

表-12 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 [転落型落石]

	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)	
		**	*	**	*	**	*
過去	斜面型	—	—	9.0	4	—	—
現在	斜面勾配	10.7	3	3.6	5	22.9	3
	転石の量	49.5	1	22.8	2	—	—
	転石の形状	10.2	4	—	—	31.3	1
	集水条件	9.5	5	14.9	3	—	—
	表層の状態	20.0	2	47.4	1	27.1	2
	不安定地形等	—	—	—	—	18.7	4
将来	斜面型	—	—	9.0	4	—	—
	風化度	—	—	—	—	17.2	3
	集水条件	9.5	5	14.9	3	—	—
	表層の状態	20.0	2	47.4	1	38.8	1
	乾湿・湧水	—	—	—	—	17.0	4
	立木・植生	—	—	2.2	6	—	—
	不安定地形等	—	—	—	—	27.0	2
解析精度	判別の中率	100.0%		88.9%		現在:88.0% 将来:84.0%	
	相関比	0.794		0.692		現在:0.572 将来:0.533	

** : レンジ比率 (%)

* : アイテムの寄与度の順位

-12に示すように「転石の量」が際立った寄与度を示している。このことは、「転石の量」により、不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。そこで具体的なデータにより検討することとする。

転石の量が多い斜面は11斜面あり、この中に不安定度「大」である9斜面がすべて含まれており、残りの2斜面は不安定度「中」の斜面である。そこで、ここでは転石の量が多いことを決定的素因(CPC)と考えることとする。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ことになるが、評価結果としては安全側になる。

次に、斜面を安定と評価する際にウエイトの高い素因を抽出するための解析であるLM・S判別解析については、表-12に示すように、「表層の状態」が大きな寄与度を示す。具体的なデータにより検討した結果、表層が安定している11斜面中、不安定度「小」は9斜面で、残りの2斜面は不安定度「中」である。今、表層が安定している斜面を不安定度が高いとしてしまうと、その中には不安定な斜面も含まれてしまうため、評価結果としては危険側となる。そこで、寄与度が2位の「転石の量」との組み合わせを考えることとすると、表層が安定しており、かつ転石の量が少ない斜面は9斜面あり、すべて不安定度「小」の斜面となる。この考え方では、不安定

度「小」の11斜面の中の2斜面が落ちこぼれるが、評価としては安全側となる。

以上より、転石の量の多い斜面は無条件に不安定性が大きいとし、転石の量が少なく、かつ斜面表層が安定している斜面を安定な斜面とする。

b) L・M判別解析結果に関して

この解析は、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判別解析の評価によると、「転石の量」は、多い場合はCPCと考えられ、すべて不安定度が高いとされ、また少ない場合は、すべてではないが、大半が安定とされる。したがって、L・M判別解析結果による評価に委ねられるのは、転石の量が中と少ない場合の一部のみとなる。このため、この判別解析のアイテムとしては、当初から「転石の量」を除いている。

評価は、現在の安定性と将来の安定性に分け、用いる素因としては、表-10示したカテゴリースコアを目安として重み付けをすればよいと考えられる。なお、過去の安定性については、剥落型落石・岩盤崩壊と同様、解析精度が低かったことから評価対象とはならない。

また、L・MS判別解析とLM・S判別解析の結果による評価で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は行うことになる。

7. 安定性評価手法の提案

(1) 安定性評価手法の構築

前述した解析結果に基づく安定性評価の考え方より、Y線・I線の硬岩斜面に対する安定性評価手法を提案する。

a) 剥落型落石・岩盤崩壊の評価手法

前述した剥落型落石・岩盤崩壊に関する発生源における安定性評価の考え方をまとめると次のようになる。

- ①浮き石の量が多く(斜面全体的に分布)、かつ割れ目が大きく開口しているものをCPCと考え、この場合は斜面の不安定度が高いとする。
- ②これ以外の斜面は、その安定度を現在および将来の安定性により評価する(LM・S判別解析の精度が低く、後述する転落型落石のように安定と評価するための素因が明確にならなかったため、不安定度の高い斜面以外は、すべて現在および将来の安定性の評価に委ねられる)。

これを流れ図に示すと図-4のようになる。現在の安

表-13 現在の安定性に関する評価 [剥落型落石・岩盤崩壊]

評価項目	評 価 点		
浮き石の量	多		少・無
	0.31	-0.53	
割れ目の開口状況	大きく開口		やや開口・密着
	0.28	-0.24	
斜面勾配	G>45°		45°≧G
	0.09	-0.11	
割れ目の方向性	流れ盤		受け盤
	-0.04	0.09	
割れ目の性状	サイコロ状	板状	ブロック状
	-0.05	0.00	0.02

*点数が大きいほど不安定度が高いとする。

最大値は0.79, 最小値は-0.97, 平均値は-0.09である。

表-14 将来の安定性に関する評価 [剥落型落石・岩盤崩壊]

評価項目	評 価 点		
立木・植生	裸地・草本		灌木・高木
	0.48	-0.15	
風化度	I	II	III・IV
	-0.29	0.22	0.05
	崩壊地形等		直崖・無
不安定地形等	0.28		-0.13
	斜面型		尾根型
岩質	砂岩・チャート		粘板岩
	-0.01	0.10	その他
乾湿・湧水	湧水・湿潤		乾燥
	0.06	-0.13	

*点数が大きいほど不安定度が高いとする。

最大値は1.33, 最小値は-0.97, 平均値は0.18である。

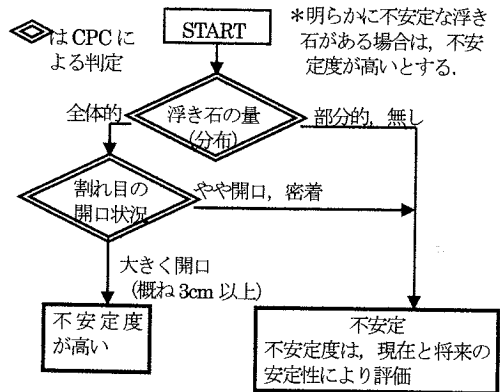


図-4 Y線・I線の硬岩斜面の安定性評価の流れ図 [剥落型落石・岩盤崩壊]

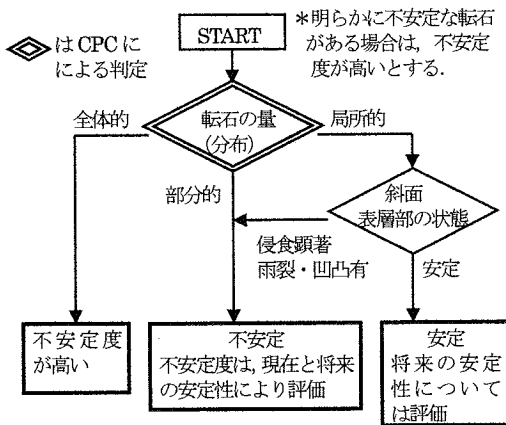


図-5 Y線・I線の硬岩斜面の安定性評価の流れ図 [転落型落石]

定性と将来の安定性については、表-13と表-14によって評価を行う。

b) 転落型落石の評価手法

転落型落石に関する発生源における安定性評価について、剥落型落石・岩盤崩壊と同様に考え方をまとめると次のようになる。

- ① 転石の量が多いこと(斜面全体的に分布)をCPCと考え、この場合は斜面の不安定度が高いとする。
- ② 転石の量が少なく(分布が局所的)かつ表層部が安定している場合は安定とし、その他は不安定とする。
- ③ 不安定とされた斜面の程度は、現在および将来の安定性の両者で評価する。
- ④ 安定とされた斜面についても、将来の安定性については評価する。

これを流れ図に示すと図-5のようになる。なお、不安定とされた斜面の不安定度については、現在の安定性と将来の安定性の評価を、また、安定とされた斜面については将来の安定性の評価を表-15と表-16によって行う。

(2) Y線・I線沿線斜面の安定性の再評価

前述(1)で提案した鉄道沿線の硬岩斜面に対する新しい安定性評価手法を用いて、Y線とI線の沿線斜面の再評価を行う。提案した手法は、CPCなる概念を導入して安定度を求め、現在と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。

a) 剥落型落石・岩盤崩壊

検証に使用したデータはY線・I線の67斜面である。表-17は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る評価結果との関係を示したものである。

表-15 現在の不安定性に関する評価 [転落型落石]

評価項目	評価点		
	大岩塊	サイコロ状	板状
転石の形状	0.46	-0.05	-0.13
表層の状態	侵食顕著	雨裂・凹凸	安定
	0.29		-0.23
斜面勾配	G>50°	50°≧G	
	0.33		-0.10
不安定地形等	崩壊地形・凸型斜面	無	
	0.16		-0.20

*点数が大きいほど不安定度が高いとする。最大値は1.24、最小値は-0.66、平均値は0.29である。

表-16 将来の不安定性に関する評価 [転落型落石]

評価項目	評価点		
	侵食顕著	雨裂・凹凸	安定
表層の状態	0.33	-0.25	-0.30
不安定地形等	崩壊地形・凸型斜面	無	
	0.19		-0.25
風化度	I	II	III
	0.04	0.01	-0.24
乾湿・湧水	全体湿潤	部分的に湿潤	
	-0.14		0.13

*点数が大きいほど不安定度が高いとする。最大値は0.69、最小値は-0.93、平均値は-0.12である。

表-17 現地調査(Y線・I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 [剥落型落石・岩盤崩壊]

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	斜面数	19	7	26
	%	73.1	26.9	100
中	斜面数	3	25	28
	%	10.7	89.3	100
小	斜面数	0	13	13
	%	0.0	100.0	100
計		22	45	67

まず、現地調査で不安定度「大」とされた26斜面は、新しい手法による評価手法の図-4で73.1%がCPCによって「不安定度が高い」となり、残りの26.9%は「不安定～安定」と評価された。このうち「不安定～安定」と評価された7斜面について、表-13による現在の安定性の評価点をみると6斜面が平均点の-0.09を上回っており、また、残りの1斜面は表-14による将来の安定性が0.40と大きな点数となっている。このことより、不安定な斜面であることがわかる。

つぎに現地調査で不安定度「中」とされた28斜面は、新しい手法のCPCにより「不安定度が高い」と評価されたものは10.7%、「不安定～安定」と評価されたものは89.3%であった。さらに現地調査で不安定度「小」とされた13斜面については、新しい手法のCPCにより

表-18 現地調査 (Y線・I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 [転落型落石]

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	斜面数	9	0	0	9
	%	100.0	0.0	0.0	100
中	斜面数	3	12	1	16
	%	18.8	75.0	6.2	100
小	斜面数	0	2	9	11
	%	0.0	18.2	81.8	100
計		12	14	10	36

「不安定度が高い」と判断されたものではなく、すべてが「不安定～安定」と評価された。なお、現在および将来の安定性の評価点については、この不安定度「中」と不安定度「小」のグループの間には有意な差はなかった。

これらのことより、提案した手法は、安定度の高い斜面を識別する点では不十分（これは、LM・S判別解析の精度が低かったことに起因している）ではあるが、専門家の評価をほぼ表現していると言える。なお、先に提案した軟岩斜面の安定性評価手法²⁰⁾では、安定度の高い斜面も精度よく識別されている。

b) 転落型落石

検証に使用したデータはY・I線の36斜面である。その結果を表-18に示した。

まず、現地調査で不安定度「大」とされた9斜面は、図-5に示す新しい評価手法のCPCによって、「不安定度が高い」と評価された。

つぎに現地調査で不安定度「中」とされた16斜面は、新しい手法では「不安定度が高い」と評価されたものは18.8%、「不安定」は75.0%、「安定」は6.2%であった。さらに現地調査で不安定度「小」とされた11斜面は、新しい手法では「不安定度が高い」と評価されたものではなく、「不安定」は18.2%、残りの81.8%は「安定」と評価された。

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硬岩斜面について、(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-4または図-5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-13と表-14または表-15と表-16を用いて、その程度を更に評価する。

表-19 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	浮き石の量	全体的	不安定度が高い
	割れ目の開口状況	大きく開口	
現在の安定性	浮き石の量	多	0.31
	割れ目の開口状況	大きく開口	0.28
	斜面勾配	G>45°	0.09
	割れ目の方向性	受け盤	0.09
	割れ目の性状	ブロック状	0.02
	合計点		0.79
将来の安定性	立木・植生	裸地・草本	0.48
	風化度	III・IV	0.05
	不安定地形等	崩壊地形	0.28
	斜面型	尾根型	0.19
	岩質	その他	-0.15
	乾湿・湧水	湧水・湿潤	0.06
	合計点		0.91

*図-4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。



写真-1 検証例1の状況

a) 検証例 [1]

海岸段丘部に建設されたトンネルの坑口部の斜面である。新第三紀の石英安山岩、流紋岩から構成され、一部は変質作用を受け変朽安山岩となっている。斜面の高さは数10mで、ほぼ直立した岩壁を形成している。全体的に数10cmの間隔で割れ目が発達し、不安定な浮き石が数多く存在している。大規模な岩石崩壊の発生の可能性は少ないが、数10cm大の剥落型落石の発生が懸念され、発生源の評価は不安定度が極めて大きい（JR評価でAA～Ai）とされている（写真-1）。

表-20 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	浮き石の量	部分的・無し	不安定～安定
現在の安定性	浮き石の量	少・無	-0.53
	割れ目の開口状況	やや開口・密着	-0.24
	斜面勾配	$G > 45^\circ$	0.09
	割れ目の方向性	流れ盤	-0.04
	割れ目の性状	板状	0.00
	合計点		-0.72
将来の安定性	立木・植生	裸地・草本	0.48
	風化度	I	-0.29
	不安定地形等	崩壊地形	0.28
	斜面型	尾根型	0.19
	岩質	砂岩・チャート	-0.01
	乾湿・湧水	乾燥	-0.13
	合計点		0.52



写真-2 検証例-2の状況

提案した手法により評価した結果を表-19に示す。大きく開口した割れ目というCPCの存在により、図-4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。

なお、当該箇所はコンクリート製の落石覆や落石止柵等の対策工が設置されており、かつ問題となる岩塊は落石覆を越えて海に落下することが推定されるため、線路等への影響度は小さいと評価される。

b) 検証例 [2]

古生層からなる山地の尾根部に設置されたトンネルの坑口部の斜面である。地質はチャートから構成されてい

表-21 新しい評価手法の他の鉄道沿線斜面（検証例 [3]）への適用結果

	評価項目	状況	評価
流れ図	転石の量	全体的	不安定度が高い
現在の安定性	転石の形状	大岩塊	0.46
	表層の状態	侵食顕著	0.29
	斜面勾配	$50^\circ \geq G$	-0.10
	不安定地形等	崩壊地形・凸型斜面	0.16
	合計点		0.81
将来の安定性	表層の状態	侵食顕著	0.33
	不安定地形等	崩壊地形・凸型斜面	0.19
	風化度	II	0.01
	乾湿・湧水	部分的に湿潤	0.13
	合計点		0.66

*図-5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。



写真-3 検証例-3の状況

る。岩盤全体として割れ目は少なく、大きなブロックの分離を促すような連続した割れ目も存在しないが、表層部には開口幅数mmの割れ目が発達し、岩体の芯部からの分離面となっている。この分離面からの剥落型落石が懸念されることから、発生源の評価は不安定度が大きい（JR評価でA₁）とされている（写真-2）。

提案した手法により評価した結果を表-20に示す。図-4による評価結果は、当該斜面にはCPCがないため、「不安定～安定」となった。したがって、表-13と表-14によって現在と将来の安定性を評価することになり、現在の安定性は-0.72、将来の安定性は0.52となった。現在の安定性は表-13でとり得る点数の最小値に近く問題ないが、将来の安定性は表-14での平均値を大きく上回っている。すなわち、当該斜面はさしあたり問題はないが、将来には不安定性が大きくなると評価したことになる。

専門家は、分離面が将来的には発達し剥落型落石を発生させる懸念が高いことから不安定と評価しており、提案した手法の評価とほぼ一致していると言える。

表-22 新しい評価手法の他の鉄道沿線斜面（検証例 [4]）への適用結果

	評価項目	状況	評価
流れ図	転石の量	部分的	不安定
	転石の形状	板状	-0.13
現在の安定性	表層の状態	侵食顕著	0.29
	斜面勾配	$G > 50^\circ$	0.33
	不安定地形等	崩壊地形・凸型斜面	0.16
	合計点		0.65
	将来の安定性	表層の状態	侵食顕著
不安定地形等		崩壊地形・凸型斜面	0.19
風化度		III	-0.24
乾湿・湧水		部分的に湿潤	0.13
合計点			0.41



写真-4 検証例-4の状況

c) 検証例 [3]

山間部の河川沿いに建設されたトンネルのほぼ中央部（覆工状の半開削構造物となっている）上部の沢状の斜面である。地質は細粒砂岩様の片麻岩からなり、沢部の両側には露岩とともに数 m 大にも及ぶ転石群がみられる。これら転石群の状況は非常に不安定であり、転落型落石の発生が懸念され、不安定度が大きい（JR 評価で A₁）という評価となっている（写真-3）。

提案した手法により評価した結果を表-21 に示す。図-5 の流れ図による評価は、明らかに不安定な転石が存在するとともに、転石が全体的に分布するという CPC により「不安定度が高い」という結果となった。

したがって、専門家による評価と提案した手法による評価は一致していると言える。

なお、当該箇所には発生源対策として落石防止網、斜面途中対策として数段の落石防止柵が計画されている。

d) 検証例 [4]

火山の外輪山の端部に位置する尾根状の斜面である。斜面上部には安山岩からなる高さ数 10m のほぼ直立した岩壁があり、その下には崖錐が形成されている。線路はこの崖錐地に建設されており、線路に接する斜面には上部の岩壁から落下した転石が分布している。転石の規模が大きく、マトリックスが火山灰であることから不安定度は比較的大きい（JR 評価で A₁~A₂）とされている（写真-4）。提案した手法により評価した結果を表-22

表-23 新しい評価手法の他の鉄道沿線斜面（検証例 [5]）への適用結果

	評価項目	状況	評価
流れ図	転石の量	局所的	安定
	斜面表層部	安定	
現在の安定性	転石の形状	サイコロ状	-0.05
	表層の状態	雨裂・凹凸・安定	-0.23
	斜面勾配	$50^\circ \geq G$	-0.10
	不安定地形等	無	-0.20
	合計点		-0.58
将来の安定性	表層の状態	安定	-0.30
	不安定地形等	無	-0.25
	風化度	II	0.01
	乾湿・湧水	全体湿潤	-0.14
	合計点		-0.68

*現在の安定性の評価点は参考として示した。



写真-5 検証例-5の状況

に示す。図-5 によれば、転石の規模は大きいものの、明らかに不安定なものではなく、分布も部分的であることから、CPC は無いと判断され、「不安定」と評価された。

この場合、不安定度は表-15 と表-16 によって現在と将来の安定性を評価することになり、それぞれ、0.65 と 0.41 となった。両者とも平均値を上回っており不安定度はかなり高いと評価される。

したがって、専門家による評価と提案した手法による評価は一致していると言える。

e) 検証例 [5]

河川に沿って建設された線路山側の斜面の一部であり、評価対象箇所は軽微な沢地形となっている。地質は中生代の砂岩頁岩の互層からなり、斜面表層は風化が進み土砂化しているが、安定している。その中に数 10cm 大の岩塊が散在している。転石の量は少なく、安定性も問題ないことから、安定（JR 評価で C 以下）と評価されている（写真-5）。

提案した手法により評価した結果を表-23 に示す。図-5 によれば、転石の量が局所的であり、斜面表層部は安定していると判断されるので、「安定」と評価される。この場合は、将来の安定性については表-16 により評価

することになる。その結果は-0.68となり、平均値に比べて小さく、将来的にも安定度は高いとされる。ちなみに、参考として示した現在の安定性の評価結果は-0.58であり、こちらの点数もとり得る点数の最小値に近く、安定であることを示している。

したがって、専門家による評価と提案した手法による評価は一致していると言える。

8. 結論

当論文は、硬岩斜面の落石や岩盤崩壊に着目し、現場調査データの解析結果をもとにして、簡便な安定性評価手法を提案したものである。この評価手法は、既報の論文²²⁾で提案した決定的素因(CPC: Critical Primary Cause)なる概念を硬岩斜面に対しても用いたもので、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、これをベースとして構築している。

安定性評価手法の構築には、まず、硬岩斜面の崩壊を剥落型落石・岩盤崩壊と転落型落石の2つに分類し、現場データの収集とこれを用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と評価を行って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硬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、専門家の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。

この評価手法は、硬岩地帯に敷設されたY線とI線の沿線斜面の解析から導かれたものであり、基本的にはこの線区に適用できるものであると考えているが、他の線区の斜面に適用したところ妥当な結果であったことから、この考え方が他の線区に適用できる可能性が大きいことが示されたと解釈し、より汎用性のあるものとするべく、今後も研究を進めていく所存である。

謝辞：本研究を進めるうえで、ご指導を賜った中央大学鈴木隆介教授、また、現場の調査の際にご協力頂いた関係鉄道会社の方々には深く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) Sugiyama, T., Okada, K., Muraishi, H. and Noguchi, T.: Statistical Rainfall Risk Estimating Method for a Deep Collapse of a Cut Slope, *Soils and Foundations*, Vol.35, No.4, 1995.
- 4) 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.
- 5) 日本国有鉄道施設局土木課: 土木建造物取替の考え方, 日本鉄道施設協会, 1974.
- 6) 日本国有鉄道施設局土木課: 落石対策の手引, 日本鉄道施設協会, 1978.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 鉄道総合技術研究所: 落石対策技術マニュアル, 1999.
- 10) 道路保全技術センター: 道路防災総点検要領, 1968.
- 11) 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.
- 12) 日本道路協会: 落石対策便覧, 丸善, 1983.
- 13) 日本道路協会: 落石対策便覧 [改訂版], 丸善, 2000.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 箭内寛治: 落石の調査と対策, 地質と調査, 1987年第3号, pp.38-46, 1987.
- 17) 村上幸利, 箭内寛治: 数理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.
- 18) 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.
- 19) 角田隆彦, 本島勲, 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.33, No.1, pp.2-12, 1997.
- 20) Duncan, C.W.: Rock slope Inventory/Maintenance Programs, *Rockfall Mitigation, Seminar, 13th Northwest Geotechnical Workshop*, 1987.
- 21) Selby, M.J.: A rock mass strength classification for geomorphic purpose: with tests from Antarctica and New Zealand, *Z. Geomorph., N.F.*, Vol.24, No.1, pp.31-51, 1980.
- 22) 野口達雄, 杉山友康, 木谷日出男, 岡田勝也: 鉄道沿線の軟岩斜面の安定性評価法, 土木学会論文集, No.742/VI-60, pp.149-158, 2003.
- 23) 鈴木隆介: 建設技術者のための地形図入門第3巻段丘・丘陵・山地, 古今書院, 2000.
- 24) 土木学会: 岩盤斜面の安定解析と計測, 1994.
- 25) 野口達雄, 杉山友康: 落石・岩盤崩壊にかかわる素因の分析(その1)-既存の安定性評価法で用いられている素因の分析-, 応用地質, Vol.42, No.1, pp.42-51, 2001.
- 26) 野口達雄, 杉山友康: 落石・岩盤崩壊にかかわる素因の分析(その2)-災害データによる素因の分析-, 応用地質,

Vol.42, No.2, pp.114-122, 2001.

27) 経済企画庁総合開発局：土地分類図（岩手県），1974.

28) 日本の地質編集委員会：日本の地質 2 東北地方,共立出版,
1989.

29) 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.

(2003. 7. 28 受付)

STABILITY EVALUATION METHOD OF HARD ROCK SLOPES ALONG RAILWAY

Tatsuo NOGUCHI, Tomoyasu SUGIYAMA, Hideo KIYA
and Katsuya OKADA

Many conventional stability evaluation methods are based on techniques and knowhows of specialist of geology and civil engineering. In this paper, we 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 both of downfall-type rock fall and separation-type rock fall/ rock collapse type at hard rock slopes along railways. Some quantification analyses using the data are also exceeded for each of the both types. On the base of the results, we extract a critical primary causes (CPCs), which are fundamental factors in relation to hard rock slope collapses, and distill instability factors for past, presence and future. At last we present a new stability evaluation method for hard rock slopes in consideration with the above conclusions.