

岩盤斜面における岩塊の安定性に関する評価手法

川越 健* 石原 朋和**
浦越 拓野** 太田 岳洋**

Evaluation Methods of Rock Lump Stability on Rock Slopes

Takeshi KAWAGOE Tomokazu ISHIHARA
Takuya URAKOSHI Takehiro OHTA

In this paper, we described a quantitative evaluation method for the stability of falling rock based on the conventional methods. At first, we made a nomogram predicting the largest size of rocks maintained at a slope by the density and the tensile strength of the rock. Furthermore, we clarified that the stability of rock was evaluated from the largest amplitude and the frequency by a sound pressure wave pattern of slapping sound using a hammer. In addition, we indicated an application condition of those methods.

キーワード：剥落型落石，岩盤斜面，岩塊，安定性評価，風化，打音測定

1. はじめに

落石は地形、地質、気象条件などの多くの要因が複雑に関与することから、その発生機構は未解明な部分が多い。鉄道沿線でも毎年数十件の落石が発生しており、事業者は落石災害を防止するために斜面管理図などに記載された情報をもとに目視などによる定期的な点検を行い、その結果に応じて危険度を判定し¹⁾、種々の対策を実施している。しかし、落石の安定性の判定や対策工の選定は専門技術者の定性的な判断による場合が多い。そのため、より効率的な検査を実施するために、現場技術者が実施可能な定量的な落石安定性評価手法の確立が求められている。落石は大きく剥落型と転落型に分けられる²⁾。このうち、剥落型落石は主に岩盤中に分布する割れ目が伸展したり、割れ目を含まない岩盤中に新たに割れ目が形成されたりすることで不安定化し、岩塊が剥落する現象である。そのため、岩塊が斜面から剥離する部分（以後、剥離面と呼ぶ）の強度を把握することが、割れ目の分布を把握することと同様に落石発生の危険性を評価するうえで重要である。既往の研究^{3, 4, 5)}で、剥離面の引張強さが岩塊の安定性の指標の一つとなることが示されている。しかし、剥離面の引張強さを現地で試験により直接得ることは困難である。また、一般に風化の進行により岩石の力学的強度は低下することから、剥離面の強度を把握するためには風化の程度を考慮する必要がある。さらに剥離面中には岩塊を岩盤に力学的に保持している領域があり、その領域の面積が岩塊の安定性

に影響している^{4, 5)}。岩盤斜面中の岩塊の安定性は従来、目視観察や岩石ハンマーの打撃による状態確認に基づき定性的に判定されている。そこで、本報告では、剥落型落石を対象として前述した評価方法を基礎とした岩塊の安定性を定量的に評価する手法を検討した結果を示す。

2. 目視観察による落下岩塊の大きさの推定と安定性評価

2.1 剥離面の風化程度に応じた強度の低下程度

剥離面の風化程度が強度の低下に与える影響は、割れ目の有無によって以下のように異なると考えられる。

- ①既存の割れ目が剥離面となる場合は、割れ目とその周辺の風化程度や割れ目の開口の有無で強度が異なる。
- ②割れ目を含まない岩石の場合は、岩石そのものの風化程度により強度が異なる。

そこで、剥落型落石が多く発生する斜面で岩石試料を採取して、点荷試験や直接引張試験により引張強さを求めた^{3, 4, 5)}。そして、風化程度（表1）や割れ目の開口の有無などによる引張強さの違いを検討した。まず、引張強さを低下させる要因を明らかにするために、新鮮な塊状の岩塊と風化程度の異なる上記①、②に相当する岩塊の引張強さを求め、それらの比（以下、風化による引張強さの低下程度と称する、式(1)）と現地調査の評価項目²⁾との関係を数量化I類により検討した。その結果、岩塊の風化程度に比べて、開口した割れ目の有無、割れ目の風化程度が引張強さの低下程度に影響を与えることがわかった（表2）。これは、岩盤斜面における岩塊の安定性を評価する上では、割れ目の開口の有無とその部分の

* 前 防災技術研究部 地質研究室（現 国土交通省）

** 防災技術研究部 地質研究室

特集：防災技術

風化程度が相対的に重要であることを示すと考えられる。

$$\frac{\text{風化程度ごとの剥離すると想定される部分の引張強さ}}{\text{新鮮な岩塊の引張強さ}} \quad (1)$$

次に、風化による引張強さの低下程度を割れ目の有無などの岩塊の状態ごとに整理した(図1)。弱風化した岩石では、割れ目を含まない岩塊、密着した割れ目を含む部分と比べて開口した割れ目を含む部分の強度の低下程度(比)が著しく小さい。また、得られたデータの範囲においては中風化、強風化した岩石では岩塊の状態によらず同程度の低下程度となっている。全体の平均で見ると、新鮮岩の引張強さに対して弱風化した岩石では平均で0.4程度、中風化した岩石では0.2程度、強風化した岩石では0.1以下となっている。

2.2 落石発生様式のモデル化とノモグラムの作成

ここでは、柱状節理などが発達する岩盤斜面において宙ぶりの状態で分布している岩塊のように、主に引張強さにより岩塊が岩盤斜面に保持されている場合の安定性評価手法を検討する。

まず、鉛直に岩塊が落下する場合のモデルを図2に示す。断面積 A の岩塊の上面の引張強さを S_t とすると、岩塊の自重 W と引張強さとの関係は(2)式で表せる⁵⁾。

$$S_t \times A \leq W \quad (2)$$

上式で左辺が右辺より大きければ岩塊は落下せず、小さければ落下すると考えることができる。岩塊の長さを L 、密度を ρ 、重力加速度を g とすると自重 W は(3)式で表せる。

$$W = \rho \times g \times A \times L \quad (3)$$

(2)式と(3)式から岩盤が支持出来る岩塊の規模(「推定される落下岩塊の最大の長さ」 L_a)は(4)式のように表せる。

$$L_a = S_t / (\rho \times g) \quad (4)$$

次に、傾斜した斜面上の岩塊がその背面で岩盤と付着し、すべり面には岩塊の自重のみが作用し、すべり面上の摩擦を考慮しない場合のモデルを図3に示す。割れ目と水平面との角度を θ とすると、岩塊の自重と引張強さとの関係は(5)式で表せる。この場合の L_a は(6)式ようになる⁵⁾。なお、(4)式は(6)式において $\theta = 90^\circ$ の場合である。また、図3のモデルでは岩塊の背面と斜面との間に生じる摩擦力は考慮していないため、(6)式で得られる L_a は安全側の値と考えることができる。

$$S_t \times A \leq W \times \sin \theta \quad (5)$$

$$L_a = S_t / ((\rho \times g) \times \sin \theta) \quad (6)$$

(4)式と(6)式は「推定される落下岩塊の最大の長さ(L_a)」が岩石の密度、引張強さから求められることを示している。そこで、岩石の密度、引張強さから「推定される落下岩塊の最大の長さ(L_a)」を求めるノモグラムを図4に示す。岩塊の安定性は図4で求めた「推定される落下岩塊の最大の長さ(L_a)」と、例えば図5に示すように現地で観察される岩塊の長さ(L_b)を比較して評価する。なお、剥離が想定される面は周辺の割れ目の分布や風化程度の差などの目視観察により推定することができると考えられる。

表1 風化の程度の区分

観察する箇所	風化程度		
	弱風化	中風化	強風化
割れ目を含む部分	新鮮もしくはわずかに変色	割れ目に沿って変色	割れ目周辺の岩石にまで変色が及ぶ
岩石を構成する鉱物の色(岩盤表面の色相)	鉱物がわずかに変色している	鉱物が変色している	鉱物が著しく変色している
	(岩石ハンマーの打撃でやや濁った音を発する)	(岩石ハンマーの打撃で濁った音を発する)	(岩石ハンマーの打撃で著しく濁った音を発する)

表2 現地調査項目と風化による引張強さの低下程度との関係

現地調査項目	引張強さの低下程度との単相関係数
開口した割れ目の有無	0.536
割れ目の風化程度	0.512
岩塊の風化程度	0.285

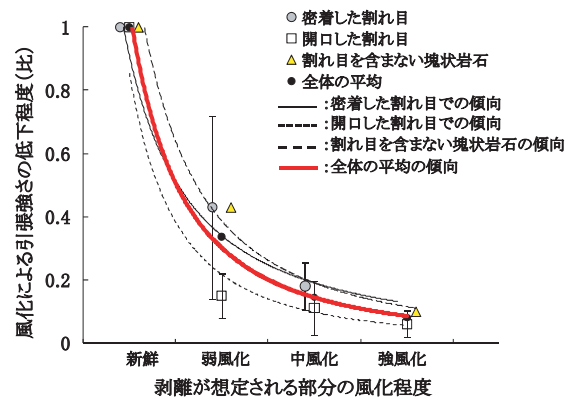


図1 風化による引張強さの低下程度

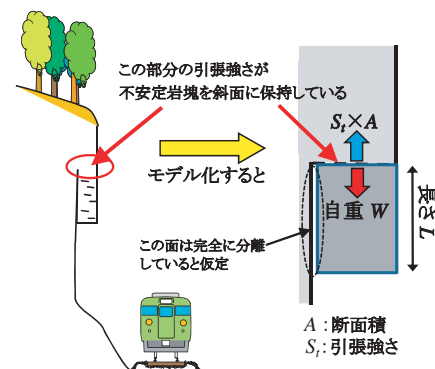


図2 鉛直に岩塊が落下する場合の岩塊の安定性モデル

2.3 適用性の検討

落石発生源となる露岩の傾斜がほぼ垂直 ($\theta=90^\circ$) の溶結凝灰岩からなる2箇所の斜面で、その下方に分布する落下岩塊の大きさを測定した。調査した溶結凝灰岩からなる岩盤斜面には、図5に示すような鉛直方向に伸びる割れ目によりオーバーハングを呈する柱状の不安定岩塊が多数認められる。また、鉛直方向に伸びる割れ目とそれと直交するレンズ状に伸びた軽石（以下、パミスレンズと呼ぶ）が多く認められる。

それぞれの斜面において、落下岩塊の堆積域を横断する方向に長さ25～40mの測線を設置し（合計3測線）、その測線上に分布する落下岩塊の大きさ（パミスレンズの伸びる面に直交する辺の長さ）を測定した。図6に測定結果を示す。落下岩塊の最大の長さはおおむね0.5～7.5mの範囲にある。図7は、測定した落下岩塊の長さの最大値（約7.5m）と室内試験により求めた当該斜面周辺の岩石の引張強さの値を図4(a)のノモグラム上に示した図である。図中の引張強さのうち、1MN/m²以上の値は主に新鮮な岩石試料の値である。この値を用いると L_a は60m程度となる。ここで、風化による引張強さの低下（図1）を考慮すると、新鮮な岩石に対して弱風化した岩石で40%程度、中風化した岩石で20%程度、強風化した岩石で10%程度まで引張強さが低下する。したがって、当該斜面における岩石の引張強さと L_a は、弱風化した岩石ではそれぞれ0.4MN/m²、30m程度、中風化した岩石では0.2MN/m²、10m程度、そして強風化した岩石では0.1MN/m²、6m程度と推定される。新鮮な岩石の引張強さ（1MN/m²）から得られる L_a に対して現地で確認できた転石の長さは1/10程度の長さであり、風化による引張強さの低下を考慮すると、おおむね妥当な長さをノモグラムから得ることができたと考えられる。

L_b/L_a を安全率と見なし、しきい値を設定することで岩塊の危険度の判定区分に適用することが可能であると考えられる。また、図4のノモグラムにより推定される落下岩塊の最大の大きさを対策工の設計へ反映させることができると考えられる。なお、図3に示したモデルですべり面での摩擦力や凹凸による噛み合わせが岩塊の安定性に大きく影響すると考えられる場合には、本方法で求めた L_a は安全側の値となる可能性があるため、他の手法を用いることを検討する必要があると考えられる。

3. 打音調査による安定性評価

剥落型落石の安定性は岩塊の大きさの他に、岩塊が斜面に力学的に保持されている部分の面積や単位面積あたりの強さ（ここでは引張強さ（ S_t ））などが関係している。2.1節で割れ目の有無などと風化程度から引張強さが推定できることを明らかにしたが、より精度良く岩塊の安

定性を評価するには岩塊と岩盤の付着領域の面積、岩盤と岩塊の間の挟在物の有無や種類などを明らかにする必要がある。しかし、それらを非破壊で明らかにするのは

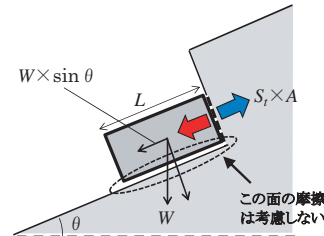


図3 傾斜した斜面上の岩塊の安定性モデル

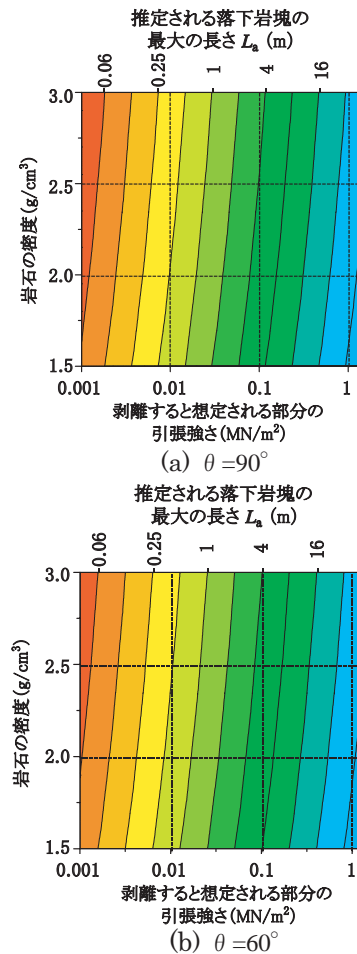


図4 落下岩塊の最大長さ (L_a) の推定

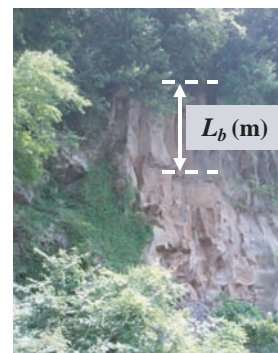


図5 現地での岩塊の長さ (L_b) の例

特集：防災技術

現状では困難である。岩塊の安定性を確認する方法の一つに、岩石ハンマーなどによる打撃音に基づく定性的な評価方法がある。打撃により対象物表面から放射される音はその位置での振動と等価である⁶⁾。また、打撃で得られる対象物の振動数がその対象物の打撃箇所の厚さを反映していることが明らかにされている⁷⁾。これらの知見に基づきハンマーなどの打撃音によるコンクリート構造物の健全度の評価が実用化されている。一方、岩塊は不安定なほど岩石ハンマーでの打撃により大きく振動する、また風化した岩塊ほど鈍い音を発するなどの経験則がある。岩石ハンマーなどの打撃により得られる音には岩塊の密度や大きさ、岩塊と岩盤の付着面積や挟在物などの情報が含まれていると期待される。そこで、諸条件を単純化した供試体を用いて岩塊と岩盤との付着面積の違いに着目した打音測定に関する実験を行い、付着面積と打音測定から得られる卓越周波数やその振幅との関係を明らかにした。この実験結果を踏まえ、岩盤斜面上で測定を行い、打音測定による岩塊の安定性評価方法を検討した。

3.1 供試体実験

3.1.1 供試体

供試体はモルタルを用いて均質な材質となるように作製した。供試体の概観を図8に、各部の寸法を表3に示す。岩塊を模擬した上部ブロックと岩盤を模擬した下部ブロックからなり、上部ブロックと下部ブロックの間にくびれた部分を設け、岩盤と岩塊が力学的に付着する部分に相当させた。供試体No.1は岩塊と岩盤が完全に付着している状態を模擬するために上部ブロックと下部ブロックを一回の打設で製作した。供試体No.2～No.5は岩塊と岩盤の付着面積を変化させるために、くびれた部分の幅 (f : 図8参照) の値を350～80mmの間で変化させた(図8(a))。さらに、上部ブロックと下部ブロックを完全に分離させ、岩塊が岩盤斜面から完全に浮いた状態を模擬した供試体No.6 ($f=0$ mm) を作製した。この供試体では、岩塊背面の挟在物の有無や種類による打音の相異を検討するために上部ブロックと下部ブロックの間に挟在物(表4)を設置した測定を行った(図8(b))。

3.1.2 測定方法

測定には集音マイクの音響特性が把握されている総研式打音検査装置⁸⁾(図9)を用いた。打撃には総研式打音検査装置の打撃装置と岩石ハンマーを用いた。打撃箇所を図10に示す。測定に先立ち、予備測定を行って打撃箇所とマイク設置位置の関係、打撃方法などの測定条件や解析方法を決定した。

打撃装置、岩石ハンマーそれぞれの打撃により得られた音圧波形をフーリエ変換し、そのフーリエスペクトルの最大振幅とその周波数(以後、それぞれを単に振幅、卓越周波数と呼ぶ)を比較した結果、同じ供試体であれば

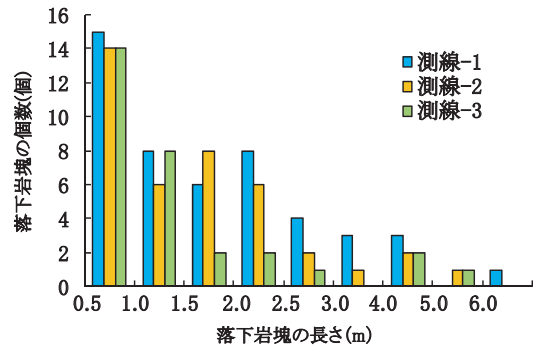


図6 落下岩塊の長さ

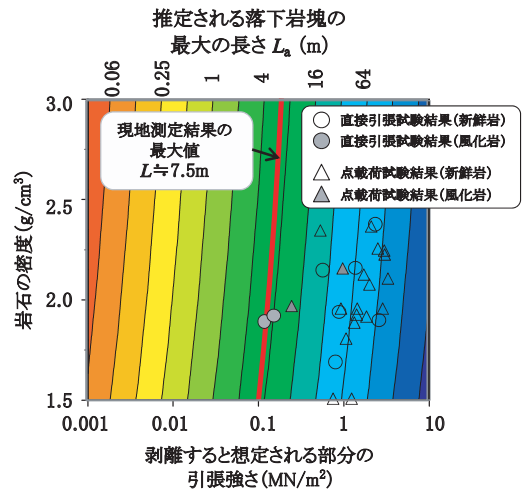


図7 落下岩塊の大きさと引張強さの実測値

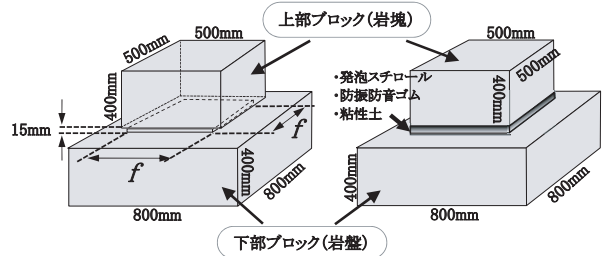


図8 供試体の概略

表3 供試体一覧

供試体 No.	f (mm)	付着面積比率 (%) *	上部と下部ブロックの関係
1	500	100	完全に一体化
2	350	49	一部で接合
3	250	25	
4	170	11.6	
5	80	2.6	完全に分離
6	0	0	

* 供試体 No.1 の付着面積を 100% とした時の各供試体の付着面積の比率

表4 実験に用いた挟在物

供試体 No.	試験パターン	実岩盤でのイメージ	挟在物	
			種類	仕様
1	密着した割れ目	なし	(表3中の供試体 No.6)	
6	開口した割れ目 (1)	発泡スチロール	EPS: 5% 圧縮強さ 140kN/m ² 相当	松原産業(株)製発泡スチロール加工品
	開口した割れ目 (2)	防振・防音ゴム	クロロブレンゴム, ゴム硬さ 80H., 引張強さ 21MPa,	(株)十川ゴム製
	粘土で充填された割れ目	粘性土	西東京市産関東ローム, 含水比 111.1%	

打撃箇所ごとの卓越周波数は打撃装置、岩石ハンマーともほぼ同じで、振幅の大きさは打撃装置で再現性がよく、岩石ハンマーでややばらつくことが分かった。これは打撃装置による打撃力が一定であるのに対して、岩石ハンマーでは打撃ごとに打撃力が異なるためと考えられる。そこで、本報告中では打撃装置により打撃した結果を示す。

マイク設置位置は打撃箇所と約50mm離れた同一面内とした。打撃回数は1測点につき3回とし、それぞれの測定ごとに音圧波形を記録した。

3.1.3 実験結果

供試体ごとの卓越周波数、振幅の平均値を上部ブロックと下部ブロックの間にくびれない供試体 No.1 の卓越周波数と振幅により正規化した結果を図11に示す。付着領域の面積が小さくなるほど卓越周波数が低く、振幅が大きくなる。また、上部、下部ブロックが完全に分離した場合（供試体 No.6 の試験パターン1～4）、挟在物の有無や種類によらず、全て接合した供試体 No.1 と比べて低い卓越周波数を示す。また、挟在物があると振幅がやや小さい値となっている。

以上の結果から上部、下部ブロックの付着領域の大きさの相違や挟在物の有無を卓越周波数と振幅により評価できることが分かった。上部ブロックの安定性は付着領域の面積の影響を受けることから、打音測定で得られた波形をフーリエ変換して得られる卓越周波数とその振幅を用いて岩盤斜面における岩塊の安定性を評価できると考えられる。

3.2 岩盤斜面での打音測定

前節の供試体を用いた実験の結果を踏まえ、剥落型落石が発生する岩盤斜面で現地測定を行い、打音測定による岩塊の安定性に関する定量的な評価方法を検討した。

3.2.1 測定箇所と測定方法

測定は約10年前に採石を終了した採石場の新第三紀の安山岩からなる斜面で実施した。割れ目の分布状況から下方に自然落下することが想定される岩塊を対象とし、それらを目視観察や岩石ハンマーによる打音調査などの従来方法による経験則から不安定岩塊（図12 (a)）、安定岩塊（図12 (b)）に分類した。計測した不安定岩塊は26個、安定岩塊は8個である。また、前節の供試体実験において割れ目に相当するくびれのない供試体 No.1 と同様の条件と考えられる「新鮮で割れ目を含まない岩盤」（図12 (c)）：以下、基盤岩）2箇所でも打音を測定した。打撃は打撃装置を用い、岩塊ごとに数点～十数点の測点を設けた。

3.2.2 測定結果

基盤岩の卓越周波数、振幅の平均値で各岩塊の測定値を正規化した結果を図13に示す。基盤岩に対して、安定岩塊では振幅の大きさは同程度で卓越周波数が半分程度以下の値を示す。また、不安定岩塊の振幅は安定岩塊のそれより大きく、基盤岩に対して3倍以上の値である。こ

の結果から、卓越周波数が基盤岩と比べて小さく（安定岩塊と同程度以下）、振幅が著しく大きい場合は不安定岩塊と判断できると考えられる。



図9 総研式打音検査装置

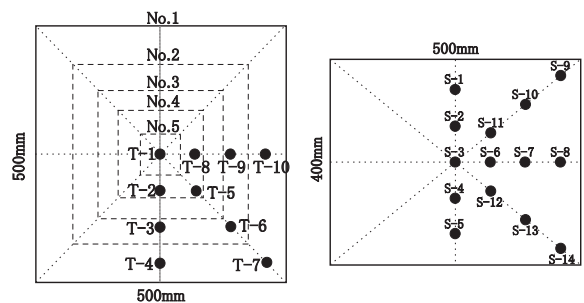


図10 打撃箇所

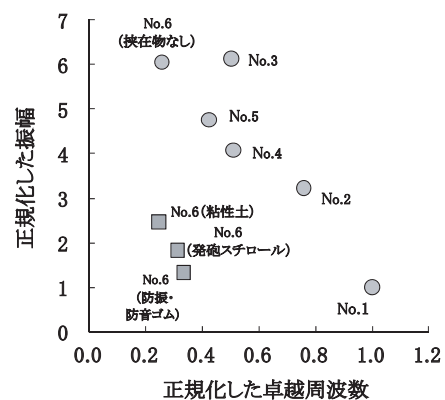


図11 供試体の打音測定結果



(a)不安定岩塊 (b)安定岩塊



(c)基盤岩

図12 計測した岩塊の例

特集：防災技術

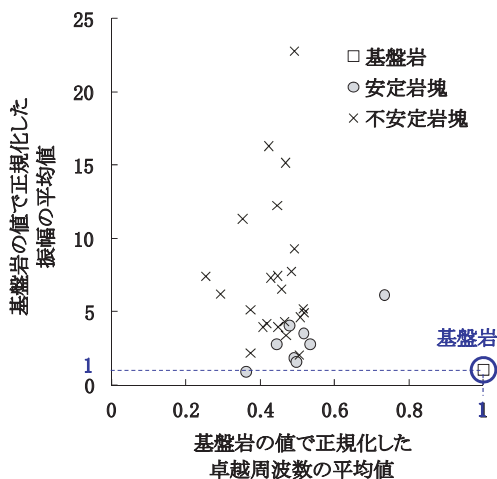


図13 岩盤斜面での打音測定結果

4. 各評価法の適用性の検討

岩盤斜面に分布する岩塊の規模や形態、また斜面の周辺環境は様々である。そのためそれらの条件を考慮し、適切な評価方法を選択することで、より効率的な調査が実施できると考えられる。本報告で示した2種類の調査方法の適用性を表5にまとめる。

5. まとめ

本報告では、従来行われている方法を基礎とした岩盤斜面中の岩塊の安定性を定量的に評価する手法について述べた。得られた結果を以下にまとめる。

①剥離面の引張強さの推定

塊状の岩石や割れ目を含む岩石について、風化程度と引張強さの関係を明らかにした。風化するとそれらの引張強さが低下し、特に割れ目が開口している場合は低下程度が著しく大きいことがわかった。

②落下岩塊の大きさの推定による岩塊の安定性評価方法

岩塊の密度と風化程度を考慮して推定される引張強さから、斜面で保持される岩塊の最大の大きさを予測するノモグラムを作成し、その安定性を判定する手法を開発した。

③打音測定による岩塊の安定性評価方法

打音測定で得られる音圧波形の解析により求まる卓越周波数とその振幅の関係から岩塊の安定性を判定できることを明らかにした。

④安定性評価法の適用性

本研究で示した落下岩塊の大きさの推定による方法および打音測定による方法の適用性について検討し、手法選定の考え方を示した。

表5 提案した評価法の適用性

項目	評価方法	落下岩塊の大きさの推定による方法	
		推定による方法	打音測定による方法
発生源への接近の可否	可能	○	○
	困難	○	×
発生源での割れ目の多寡	多い	×	○
	ない・少ない	○	△
評価対象とする岩塊の大きさ	小さい(1.0m角程度以下)	△	○
	大きい	○	×
専門的知識の有無		不要	不要
現地調査に要する時間		従来方法(目視観察)と同程度	従来方法(ハンマーでの打音調査)と同程度
調査機器の必要性		不要 (場合により、投さを測定する用具が必要)	測定機器が必要
調査結果の取り扱い		定量的	定量的
留意点		剥離面の凹凸や摩擦力などを考慮する場合は他の方法を用いること	

岩盤斜面中の岩塊の安定性は割れ目の分布や挟在物の有無、風化の程度、岩塊の大きさなど様々な要因が複雑に関係している。そのため、今後より多くのデータを取得したうえで、危険度に応じたしきい値の設定方法を検討していくことが必要である。

文献

- 1) (財) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編土構造)-土構造物(盛土・切土)，丸善，133p，2007
- 2) 鉄道総合技術研究所：落石対策技術マニュアル，154p，1999
- 3) 川越健・浦越拓野・太田岳洋・榎本秀明：岩盤斜面の安定性に係わる不連続面の引張強度に関する検討，鉄道総研報告，Vol.21，No.1，pp.49-54，2007
- 4) 川越健・浦越拓野・太田岳洋・長谷川淳・木谷日出男：落石発生時に剥離する面の引張強さに関する検討，第12回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.347-352，2008
- 5) 浦越拓野・川越健・太田岳洋・石原朋和：岩石の引張強さに着目した落下岩塊の大きさの推定，第40回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.335-338，2011
- 6) 伊藤良浩・魚本健人：コンクリート打撃音の振幅の評価に関する1考察，土木学会年次学術講演会講演概要集第5部，pp.416-417，1995
- 7) たとえば，鈴木文大・榎本秀明・稲川敏春・松林弘智・千鳥雅由：トンネル覆工コンクリートを対象とした打音評価法，物理探査，Vol.54，No.6，pp.374-387，2001
- 8) 榎本秀明・稲川敏春・横山秀史：トンネル覆工コンクリートを対象とした打音検査装置の最適仕様の検討，土木学会論文集No.784/VI-66，pp.87-97，2005