

振動特性を利用した落石危険度の判定

緒方健治¹・松山裕幸²・天野淨行³

¹正会員 日本道路公団試験研究所 (〒194-8508 町田市忠生1-4-1)

²正会員 同上

³正会員 同上

本論文では転石や浮石の振動特性に着目し、定量的・客観的評価が行える落石危険度の判定法を提案する。この方法は、調査対象の転石や浮石とそれを支える地盤に振動計を設置し、両者の振動特性の違いから危険度の判定を行うものである。まず初めに、現地実験結果を用いて模擬実験との相関を確認し、危険度判定図を作成した。さらに、現場で行った亀裂調査と危険度判定との結果を比較し、本手法の信頼性を確認した。

Key Words : *boulder stone, unsteady stone, potential danger for rockfalls, characteristic of vibration, predominant frequency,*

1. まえがき

高速道路の斜面上に点在する転石や浮石（以下「浮石部」という）が落下する危険性の有無を事前に把握することは、防災対策上非常に重要なことである。浮石部の落石危険度判定については、落石対策便覧¹⁾等²⁾に具体的な例として、安定度調査表を用いた方法が示されている。この調査表は、地形、土質・地質・構造、表層の状況等の項目毎に配点するようになっており、例えば表層の状況を例にとると、表土および浮石・転石の状況を不安定（12点）・やや不安定（6点）・安定（0点）に評点区分し配点している。どの評点区分に該当するかは、地形地質踏査、地形図や空中写真を用いた地形判読等の調査結果を用いて決定される。このようにして調査項目毎に点数付けを行い、加点式により危険度判定を実施している。しかし、これらの手法は判定者の主観的判断に依存することが多く、判定者によっては、調査結果に違いが生じることが問題とされている。

また、落石の危険度を判定するための補足調査として、岩盤内部の亀裂の状況や転石の根入れを調査する技術も研究されている。亀裂や根入れ状況の把握には、ボーリング調査が適しているが、費用が高いため経済性の面で課題がある。このため、調査手法としては、物理探査やエアートレーサー試験³⁾などが考えられている。

物理探査では、弾性波反射法⁴⁾、高周波衝撃弾性

波法⁵⁾、地下レーダー法^{6) 7)}、電気探査^{8), 9)}などの手法があるが、精度、探査に適する深度、急傾斜地での作業性などに課題が残されている。また、エアートレーサー試験は、空気の拡散性を利用した岩盤内部の亀裂の調査方法で、トレーサー（煙など）を混合した空気を送風機で亀裂に挿入し、トレーサーの流出地点と移動速度から亀裂の分布、連続性を推定する方法である。風穴などの大規模な開口亀裂の連続性を推定するには有効な方法であるが、地表付近に多数ある亀裂の連続性推定には、困難な面があるものと考えられる。

一方、落石の危険度を定量的に評価する研究は、奥園他（1980）¹⁰⁾や熊谷他（1983）¹¹⁾により行われている。これらは浮石部の振動特性に着目したもので、奥園らの研究では、浮石部の下部から伝播してくる弾性波の振幅、加速度、振動数などの振動特性が異なることに着目し、その振動特性を明らかにすることにより、落石の危険度を判定することが可能であると考え、模擬試験および自然斜面での実験を行っている。これにより、落石の危険度の判定には、衝撃振動による加速度比が有望であり、鉛直方向の加速度比は落石発生の危険度と明確な関連を持つことが判ったが定量的・客観的な判定手法の開発には至らなかった。

熊谷らは、浮石部の安定性の評価について振幅、振動数、減衰性および波形観察等の振動特性のうち何によって評価できるか見極めようとして模型実験および現場実験を試みた。模型実験では、模擬落

石としてコンクリートブロックを作成している。不安定化状態の模擬には、支持地盤が侵食されることによって経時的に安定性が失われていくものと考え、支持条件を3点支持とし、支持点を移動することで不安定化状況を模擬した。また、起振機を振動源として振動を発生させた。現場実験では、浮石部周囲を段階的に掘削し支持条件を変化させることで不安定化させ、振動源には、通行列車の振動を用いた。結果として、模型実験と現場実験の振動特性結果を結びつけることはできなかった。原因としては、浮石部は岩塊および土砂により支持されており、土砂がバネの役目をしているが、模型実験ではこのバネの影響を考慮できなかったこと、また、用いた振動源も違っていたためと考えられている。

また、近年では、竹内他(1997)¹²⁾等^{13), 14), 15), 16), 17)}の研究があるが、いずれも振動特性を利用して危険度判定を行える可能性を示唆しているものの、落石危険度の判断基準を示すまでには至っていない。

こうした中、筆者らは模擬転石を用いた実験および現地計測データとの比較を行い、定量的・客観的な落石危険度判定が行える手法を提案する。

本手法の特徴は、以下の三点である。

- 1) RMS速度振幅比、卓越周波数および減衰定数の三つの振動特性を用いて危険度判定を行う。
- 2) 振動源として道路交通振動などの雑振動を用いる。
- 3) 振動計が軽量でコンパクトであるため、設置が容易である。

また本論文では、現場で行った岩盤内部の亀裂調査と本手法による危険度判定結果との比較についても述べている。

2. 落石危険度判定の基本原則と振動分析方法

(1) 基本原則

本手法は、浮石部の振動特性と直近の安定した岩盤または地盤(以下「基盤部」という)の振動特性を比較し、浮石部の落石危険度を評価するものである。振動源は近傍の道路交通振動等の雑振動である。

地盤上の転石や浮石を図-1に示すように、浮石部を剛体とし地盤がスプリングと粘性減衰からなるモデルで表現する。このモデルを連性なしの1質点、1自由度と考えれば、剛体の卓越周波数 f は、式(1)のように表される。

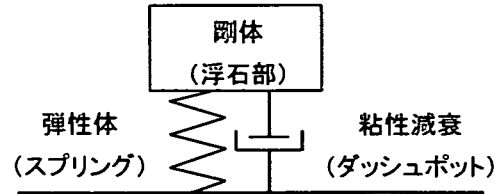


図-1 1質点自由度モデル

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M} - \frac{C^2}{4M^2}} \quad (1)$$

ここで、 f : 剛体の卓越周波数(Hz)

K : バネ定数(N/m)

M : 剛体の重量(N)

C : 減衰定数

式(1)から卓越周波数は浮石部の重量と地盤のバネ定数および減衰定数に影響されることがわかる。実際の浮石部では、石の重量や地盤との接合性等について不明な点が多いが、次に示すような周波数分析を行うことにより、浮石部の振動特性を捉えることができる。

本手法は図-2に示すとおり、浮石部と基盤部に振動計を設置して振動波形を測定する。このときの基盤部の振動測定記録 $X_1(\omega)$ と、浮石部の振動測定記録 $X_2(\omega)$ は、次のように表すことができる。

$$X_1(\omega) = S(\omega) \cdot I_1(\omega) \quad (2)$$

$$X_2(\omega) = S(\omega) \cdot U(\omega) \cdot I_2(\omega) \quad (3)$$

ここで、 $S(\omega)$: 地盤に入射する振動スペクトル

$U(\omega)$: 浮石部の振動特性スペクトル

$I_1(\omega)$: 基盤部の振動測定機器系統の応答特性スペクトル

$I_2(\omega)$: 浮石部の振動測定機器系統の応答特性スペクトル

式(3)を式(2)で除算すると $S(\omega)$ が消去される。さらに測定機器系統が同一($I_1(\omega) = I_2(\omega)$)であれば、それも相殺されて、浮石部の振動特性スペクトル $U(\omega)$ は式(4)となる。

$$U(\omega) = X_2(\omega) / X_1(\omega) \quad (4)$$

式(4)は浮石部の振動特性を、浮石部の振動測定記録と基盤部の振動測定記録の比で表すことができることを示している。本手法は、この基本原則を応用したものである。

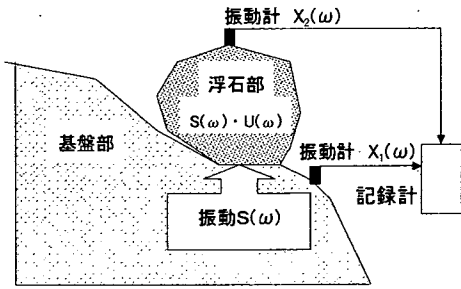


図-2 振動波形の測定概要

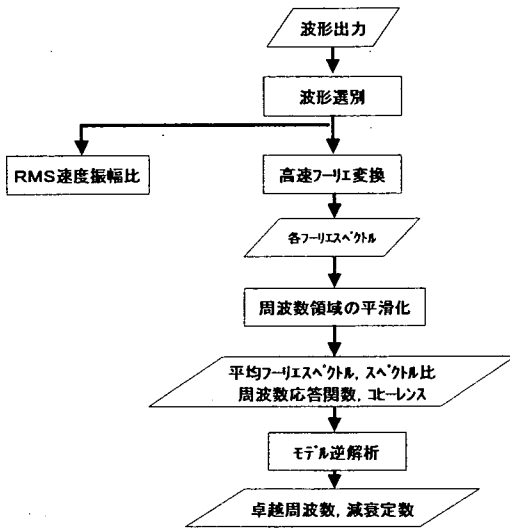


図-3 振動波形の分析処理の流れ

(2) 振動分析方法

計測によって得られた振動波形について、図-3のような分析処理を行う。

a) 波形の分析

計測した振動記録に電氣的なノイズや風雨の影響など特殊な波形が含まれていないことを判断し、分析する波形を抽出する。

b) RMS速度振幅比

RMS速度振幅比は、浮石部の振動記録と基盤部の振動記録のうち、振幅の大きさをRMS平均(Root Mean Square:二乗した平均の平方根)し、比率で評価した値である。つまり式(5)に示すとおり、浮石部と基盤部の各々についてRMS速度振幅を求め、それらを除して比を求めたものである。サンプリング周波数を500Hzに設定して20秒間の連続記録を行うため、サンプリング個数は10,000個となる。さらに、この計測を10回以上実施し、データ数を増やすことにより精度を向上させてい

$$R = \sqrt{\sum_{i=1}^n Y_i^2 / n} \bigg/ \sqrt{\sum_{i=1}^n X_i^2 / n} \quad (5)$$

ここで、 R ; RMS速度振幅比

X ; 基盤部における振幅の振動記録の時系列

Y ; 浮石部における振幅の振動記録の時系列

n ; サンプリング個数

る。

振動記録には様々な方向から到来した波が含まれており、浮石部と基盤部の振動ひとつひとつを対応させることは困難であるが、RMS速度振幅比により、一定時間内の振動の全体的な傾向を統計量として表現できる。また、RMS速度振幅比は、振動の振幅特性を統計的に表す量であり、浮石の振動特性を評価するうえで、最大振幅よりも信頼性の高い指標となると考えられる。例えばRMS速度振幅比が1であれば、基盤部と浮石部は同じ振幅で揺れているが、RMS速度振幅比が大きな値を示せば、その値だけ浮石部が基盤部より大きな振幅で揺れていることになる。

c) 卓越周波数および減衰定数

卓越周波数および減衰定数の分析は、まず、抽出された波形を用い、フーリエ成分を高速フーリエ変換法により計算する。このフーリエ成分を元に周波数応答関数を計算するが、計算時には、ハニングウィンドウを用いて平滑化を実施している。計算された周波数応答関数をグラフ化したものが図-4である。

この周波数応答関数は、ほぼ単一のピークを持つ形状を示す。これを説明するモデルとして考えられるのは、1質点1自由度系の振動モデルである。1質点1自由度系モデルで、減衰をもつ簡単なバネ-質点系の運動方程式は式(6)で表される。

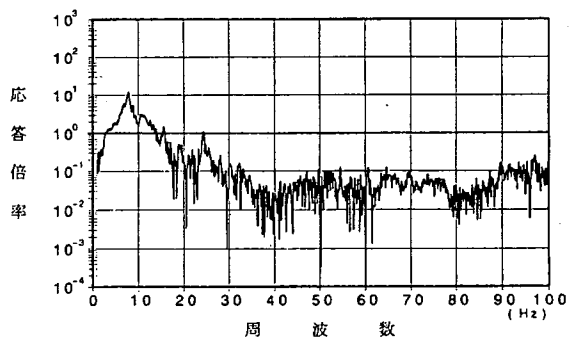


図-4 周波数応答関数の出力例

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2k \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \frac{F}{m} \cos \omega t \quad (6)$$

ここで、 k ; ばね定数

F ; 摩擦力

m ; 質量

ω ; 角周波数

ω_0 ; 固有周波数

この式は、速さに比例する抵抗を受けて減衰振動をする振動子に、 $F \cos \omega t$ で表される周期的な外力が作用した場合の運動方程式である。定常状態に達したときの振幅応答特性は式(7) で表される。

$$D = \frac{1}{\sqrt{\left[\left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 - 1 \right]^2 + 4h^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2}} \quad (7)$$

ここで、 D ; 動的応答倍率

h ; 減衰定数

式(7)は、周波数0の部分で1になり、固有周波数のところにピークを持ち、それより周波数が高くなるにつれて小さな値となる。減衰定数が小さいほどピークの形状は鋭くなり、減衰定数が大きいほどピークの形状は緩やかになって、やがては過減衰になりピークを持たない形状になる。

図-5に減衰定数のモデル図を示す。振動測定により得られた周波数応答関数は大きなひとつのピークを持つ形が多く、1質点1自由度系の応答に近似される傾向を示している。そこで、測定された応答曲線に式(7)をモデルとしてあてはめて、固有周波数 ω_0 と減衰定数 h を逆解析により求める。

図-6は、モデル逆解析によって得られた理論的な応答曲線を、測定データの分析結果の周波数応答関数に重ねたものである。図の例では、モデル逆解析により、卓越周波数=12.1Hz、減衰定数=0.15が求められている。

3. 模擬実験

本手法は、浮石部と基盤部との揺れ易さ、ゆれの大きさ、ゆれの収まり易さを比較することで危険性を判断するものである。しかし、よく揺れる石は必ずしも落石の危険性が高いとは言い難い。落石が起こるか否かは、浮石部と基盤部との接合力(以下「抵抗力」という)に大きく影響されるため、抵抗力と振動特性との関係を明らかにすることを目的に模

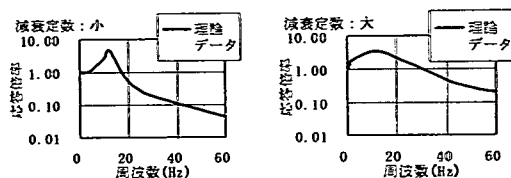


図-5 減衰定数のモデル図

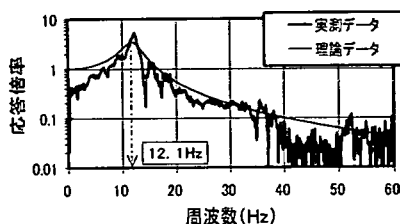


図-6 モデル逆解析結果の例 (細線)

擬実験を行った。

(1) 実験方法

図-7に実験の模式図を示す。実験は転石型落石を想定し、砂で作製した模擬地盤上コンクリート製の模擬転石を設置した。地盤材料に砂を使用したのは、地盤強度が締固め度に比較的影響されにくいいためである。模擬地盤の傾斜および模擬転石の根入れ深さを変えることにより、様々な抵抗力状態を作成した。各々の状態で模擬地盤と模擬転石の振動特性を測定するとともに模擬転石を斜面方向へジャッキで静的に引張り、荷重計を用いて最大抵抗力を測定した。振動特性の測定は竹内他¹²⁾と同様で、浮石部と基盤部に速度型3成分振動計を設置し、雑振動(主に近傍の道路交通振動)を振動源として振動測定を行った。表-1に使用した測定機器の主な仕様を示す。

振動計は、速度型振動エレメント3個を互いに直角するように組み合わせ、塩化ビニール管に防水処理して収納した外径50mm高さ150mm重量400gの小型機器である。この振動計を模擬転石には石碁で固定し、砂地盤には土中埋込みによって設置した。振動計の信号は、測定近傍に置いたプリアンプを通して増幅とインピーダンス変換を行い、延長ケーブルを介して測定本部の主増幅器でさらに増幅し、メモリレコーダとデータレコーダに収録した。

実験は表-2に示す条件で33ケース行った。使用した模擬転石は直方体である。根入れ深さは、地表に載せた状態のものから、高さ方向に半分以上が埋まり、安定した状態のものまで0から50cmの範囲で変化させた。地盤傾斜は0°から30°まで変

化させ実験を行った。模擬実験状況を図-8に示す。

4. 実験結果

図-9に模擬転石の単位質量あたりの抵抗力とRMS速度振幅比の関係を示す。図中には、抵抗力と根入れの関係がわかるように、根入れ深さによる区分を行っている。根入れの浅いケースや単位質量あたりの抵抗力が小さいケースでは、RMS速度振

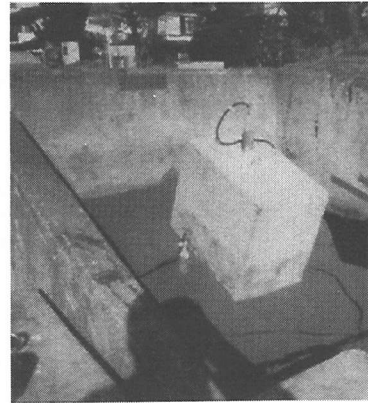


図-8 実験状況

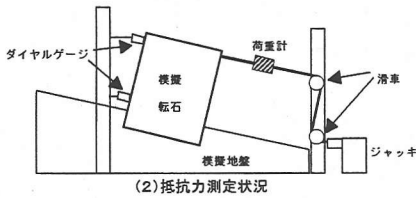
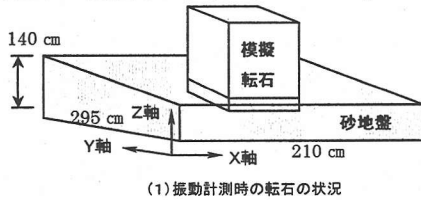


図-7 模擬実験の模式図

表-1 使用機器の様様

機器種別	主要な性能
速度型3成分振動計	固有周波数: 14Hz 測定方向: 3方向(水平2, 上下1) 減衰定数: 0.6
前置増幅器	周波数特性: DC~5kHz(1kΩ負荷) 増幅度: 0dB(×1), 20dB(×10), 40dB(×100), 60dB(×1000)
主増幅器	周波数特性: DC~50kHz(+1, -3dB) 増幅度: 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000

表-2 実験ケース

模擬転石サイズ (Xm×Ym×Zm)	地盤傾斜角度(°)	ケース数
0.4×0.6×0.8	0	6
	10	4
	20	5
	30	3
0.6×0.4×0.8	0, 10, 20, 30	各1ケース
0.8×0.4×0.6	20	1
0.4×0.6×0.7	20	3
0.4×0.6×0.6	20	3
0.3×0.45×0.6	20	2
0.2×0.3×0.4	20	2

幅比は大きな値を示している。RMS速度振幅比は、浮石部が基盤部に対してどれくらい揺れているかを示す指標であることから、抵抗力が小さく落石危険度が大きな領域では、浮石部は揺れ易い状態にあるといえる。また、単位質量あたりの抵抗力が3N/kgより大きくなると、RMS速度振幅比は一定の値を示し、安定していることがわかる。

模擬転石の単位質量あたりの抵抗力と卓越周波数の関係を図-10に示す。両者の関係は比較的良好な直線性を示している。根入れが小さいケースや単位質量あたりの抵抗力が小さいケースは、卓越周波

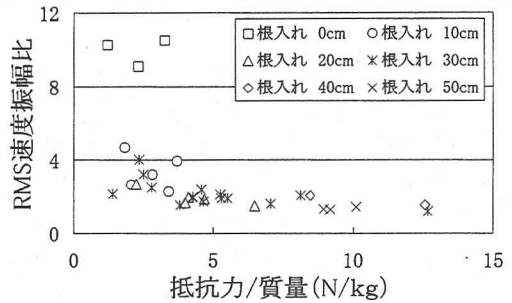


図-9 単位質量あたりの抵抗力とRMS速度振幅比の関係

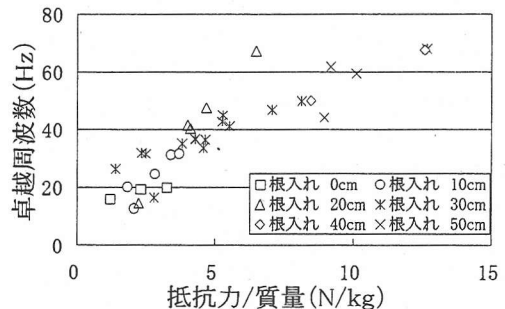


図-10 単位質量あたりの抵抗力と卓越周波数の関係

数は低い値となり、抵抗力が大きい、つまり落石危険度が小さくなるにつれて卓越周波数も大きくなる事が分かる。すなわち、抵抗力が小さく危険な状態では、浮石部は小刻みに揺れており、低い卓越周波数が計測されるものと思われる。

図-11 に模擬転石の単位質量あたりの抵抗力と減衰定数の関係を示す。単位質量あたりの抵抗力が小さいケースでは、減衰定数は低い値を取り、安定な領域に行くにつれて減衰定数も高い値を示している。減衰定数は揺れの収まり易さを示す指標であることから、抵抗力が小さく危険な浮石部は揺れが収まり難い状態にあるといえる。

以上の結果からR S M速度振幅比、卓越周波数および減衰定数が落石の危険度を測る指標として有用なことがわかったが、現地の浮石部については抵抗力を直接測定することができない。このため、振動計測と周波数分析により求めることができる三つの指標だけで危険度を評価する方法を検討した。

図-12 にRMS速度振幅比と卓越周波数の関係を示す。図中には、抵抗力が3N/kg以下のケースを危険度a、抵抗力が3N/kgより大きいケースを危険度bとして区分している。3N/kgで区分したのは、図-9において、この値以上だとRMS速度振幅比が一定の値となっており、浮石部は安定している状態であると判断したからである。図-12 から、危険度aと危険度bは楕円で囲んだ二つのグループに分けることができる事がわかる。RMS速度振幅比が大きく卓越周波数が小さい領域に危険度aが、RMS速度振幅比が小さく卓越周波数が大きい領域に危険度bがそれぞれプロットされており、RMS速度振幅比と卓越周波数により、抵抗力の違いすなわち落石危険度を判定することができると思われる。抵抗力3N/kg以下を危険な領域とすると、RMS速度振幅比が約2以上、卓越周波数が約30以下の領域が危険領域と考えられる。

図-13 にRMS速度振幅比と減衰定数の関係を示す。一部混在が見られるものの、図-12と同様に抵抗力が3N/kg以下の危険度aと3N/kgより大きい領域の危険度bの2グループに分けることができ、RMS速度振幅比と減衰定数によっても、抵抗力の違いすなわち落石危険度を判定することができると思われる。抵抗力3N/kg以下を危険な領域とすると、RMS速度振幅比が約2以上、減衰定数が約0.1以下の領域が危険領域と考えられる。

図-14 に卓越周波数と減衰定数の関係を示す。多少のばらつきはあるが、抵抗力が小さい危険度aは卓越周波数が低く減衰定数が小さい領域に、抵抗力が大きい危険度bは卓越周波数が高く減衰定数

が大きい領域に分類することができる事がわかる。

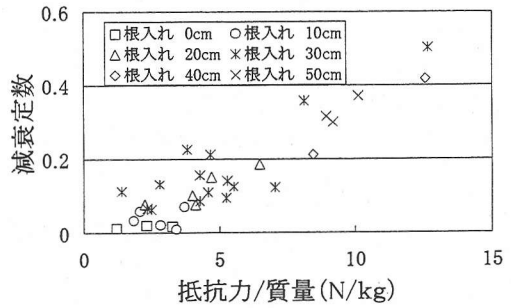


図-11 単位質量あたりの抵抗力と減衰定数の関係

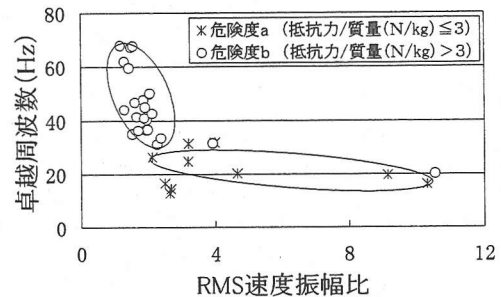


図-12 模擬実験におけるRMS速度振幅比と卓越周波数の関係

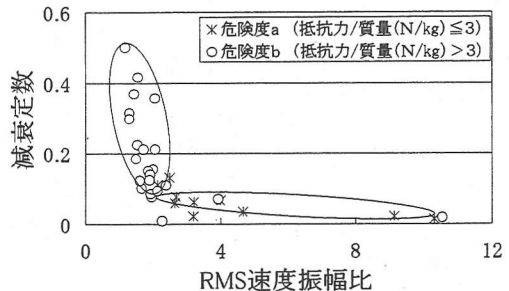


図-13 模擬実験におけるRMS速度振幅比と減衰定数の関係

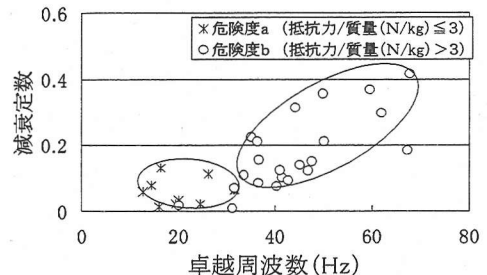


図-14 模擬実験における卓越周波数と減衰定数の関係

5. 現地計測データとの比較

模擬実験は均一な材料で比較的小さな模擬転石を作製して行ったが、現地の浮石部は形態、大きさ、地盤条件などが様々である。このような諸条件の異なる浮石部の危険度を前述の手法で定量化できるかが問題となるため、現場実験を行い、模擬実験と現地計測データとの比較を行った。現地計測を実施した浮石部の諸元を表-3に、計測状況の一例を図-15に示す。現地計測データは7地区29箇所、岩種は礫岩や砂岩、花崗岩などからなり、大きさも様々である。また、落石タイプも浮石型と転石型の両者が存在する。

図-16に模擬実験と現地計測におけるRMS速度振幅比と卓越周波数の関係を、図-17に模擬実験と現地計測におけるRMS速度振幅比と減衰定数の関係を示す。両図とも、現地計測（浮石型、転石型）データは、模擬実験（転石型）データの傾向と類似しており、浮石型、転石型のタイプに係らず、現地においてもRMS速度振幅比と卓越周波数および減衰定数により危険度判定を行うことができると思われる。

表-3 現地計測を実施した浮石部の諸元

地区名	岩種	タイプ	箇所数
A地区	花崗岩	浮石型	2
B地区	礫岩, 砂岩, 泥岩	転石型	4
C地区	礫岩, 安山岩	浮石型	5
		転石型	1
D地区	千枚岩, 粘板岩	浮石型	4
E地区	泥質片岩	浮石型	4
F地区	安山岩	浮石型	2
		転石型	3
G地区	砂質片岩	浮石型	4

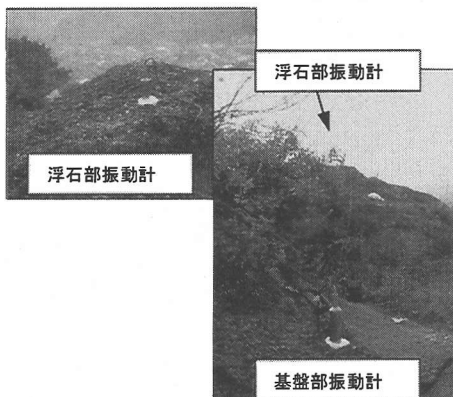


図-15 現地の計測状況の一例

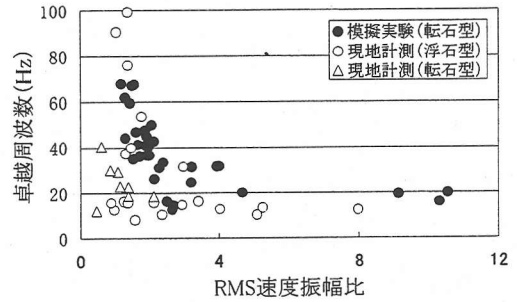


図-16 RMS速度振幅比と卓越周波数の関係

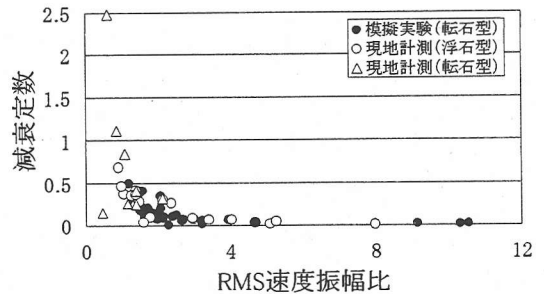


図-17 RMS速度振幅比と減衰定数の関係

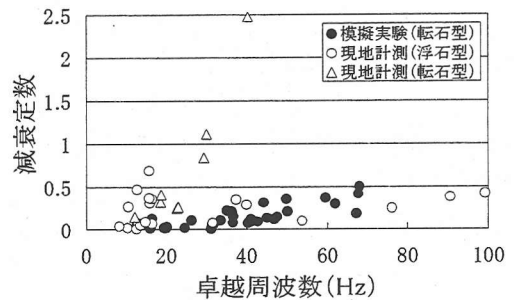


図-18 卓越周波数と減衰定数の関係

図-18に模擬実験と現地計測における卓越周波数と減衰定数の関係を示す。現地計測のデータは二つの直線に近似する傾向が見られ、そのうち一つは模擬実験結果と類似した傾向を示した。卓越周波数と減衰定数は、地盤と浮石部との接合部の状態（バネ定数と粘性減衰）を示す指標であるため、模擬実験結果は一つの地盤の接合状況を反映したものと考えられる。したがって、地盤状況によっては卓越周波数と減衰定数とは相関性が低くなり、両者のみで危険度判定をするのは難しいと思われる。

次に、現地計測データと落石対策便覧に基づいて行われた加点的危険度判定の結果について比較を行った。図-19に現地計測データのRMS速度振

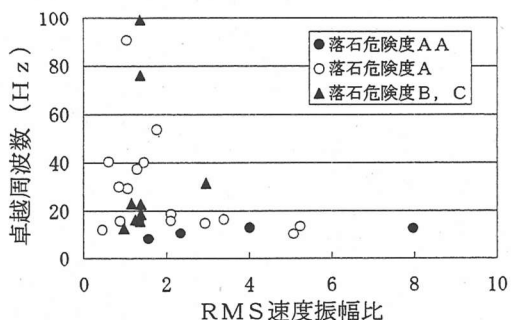


図-19 現地計測データにおけるRMS速度振幅比と卓越周波数の関係

幅比と卓越周波数との関係を落石対策便覧による加點式危険度判定結果で区分して示す。落石対策便覧による危険度判定は、落石危険度 AA が最も危険で、落石危険度 A から落石危険度 B, C になるにつれて安全側となる。落石危険度 AA はRMS速度振幅比が2付近から8までの間に、卓越周波数が20Hz以下に分布しており、その分布領域には、落石危険度 B, C が存在しないことが特徴的である。

また、落石危険度 B, C は主にRMS速度振幅比が2以下に分布している。

本来、落石対策便覧の危険度判定は、特定地区内での危険度判定を行うものであり、他地区との比較は意味を持たない場合が多い。また、便覧による判定には落石が起こるか否かの要因の他に、路線の環境や落石防護施設の有無のような落石被害の大小に関する要因も含まれている。以上のことから、異なる地区で、例えば危険度判定 A 同士の浮石部は、危険度が同一であると判断できず、目安程度でしかない。しかし、危険度 AA については落石の危険性が非常に高いと判断されたものであり、他地域のものでも危険度としてはほぼ等しいと判断できる。

そこで、従来の加點式危険度判定で危険度 AA と判断された領域についても、振動特性による危険度判定図を検討する際の目安とした。

6. 落石危険度の判定方法

模擬実験結果と現地計測結果から総合的に判断し、現時点における落石の危険度判定方法を提案した。判定方法を以下に示す。

(1) 危険度判定図

図-20 はRMS速度振幅比と卓越周波数を用いた危険度判定図である。第4章および5章の結果か

ら、RMS速度振幅比が2以上、卓越周波数が30以上の領域を浮石部が不安定な領域、2未満を安定領域と分類した。また、不安定領域の中でもRMS速度振幅比が大きな値を取るものほどより危険と考えられる。

もう一つの危険度判定図として、図-21 にRMS速度振幅比と減衰定数の関係を示す。図-20と同様に、RMS速度振幅比が2以上、減衰定数が0.2以下を不安定領域と分類した。

実際の判定にあたっては、両図について安定領域および不安定領域から逸脱するものがないか確認し、逸脱する場合は他の手法による再調査する必要があると思われる。

(2) 適用範囲

本手法は浮石部と基盤部に振動計を設置してその振動の差異から浮石部の状態を推定しようとするものである。測定記録には測定毎に様々な振動が混入している場合が多く、浮石部の記録と基盤部の記録の相関性が低い場合には、真の応答特性を反映していない可能性がある。そこで、コヒーレンスを判断基準として本手法の適用範囲を検討した。コヒーレンスは、同一振動源に対する浮石部および基盤部の応答特性としての信頼性を表す指標であり、次の式で表される。

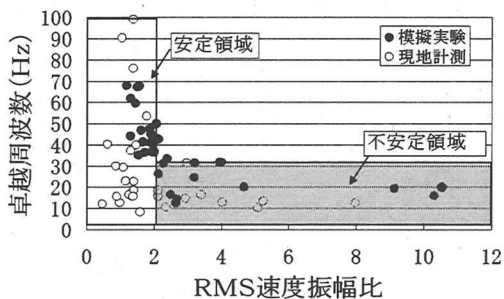


図-20 RMS速度振幅比と卓越周波数を用いた危険度判定図

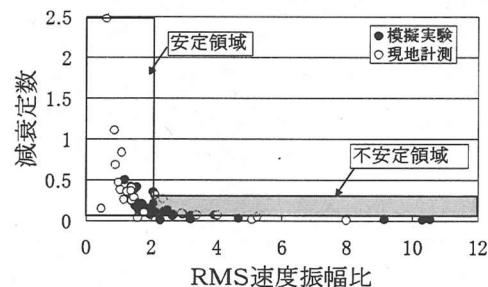


図-21 RMS速度振幅比と減衰定数を用いた危険度判定図

$$\gamma_{xy} = \frac{\sqrt{|G_{xy}|}}{\sqrt{G_x G_y}} \quad (8)$$

ここで、 γ_{xy} ; コヒーレンス
 G_{xy} ; 基盤部と浮石部の相互スペクトル
 G_x ; 基盤部のパワースペクトル
 G_y ; 浮石部のパワースペクトル

図-22 にコヒーレンスの例を示す。図-22(a) はコヒーレンスが高い場合で本手法が有効と判断される例、図-22(b) はコヒーレンスが低く本調査法では落石危険度判定が困難と判断される例である。振動記録の相関性は、基盤部の速度振幅の値が小さいとき、および浮石部と基盤部の振動計間の距離が大きいときに低くなると考えられる。それは、基盤部の振動が小さいときには、外力としての振動が浮石部を揺らすまでのパワーがなく、浮石部の振動特性を抽出することが難しく、振動計間の距離が大きいときには、浮石部と基盤部の共通の振動成分が少なくなるためである。そこで、現地の試験計測において、次の4ランクに分類して本調査の適用性を検討した。

- ① 相関性大 (コヒーレンスが 0.8 以上でその周波数帯域が広い)
- ② 相関性中 (コヒーレンスが 0.8 以上でその周波数帯域が狭い)

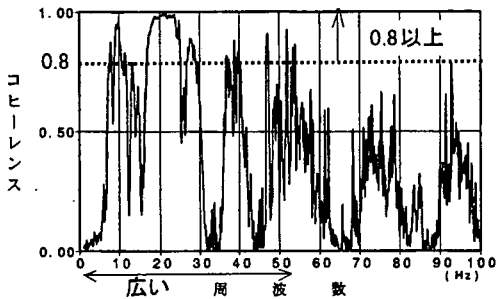


図-22(a) 相関性大 (コヒーレンスが 0.8 以上周波数帯域が広い)

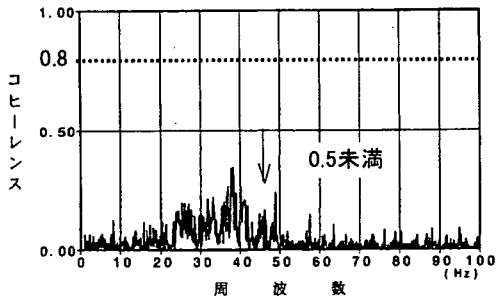


図-22(b) 相関性無 (コヒーレンスが 0.5 未満)

- ③ 相関性小 (コヒーレンスが 0.5 以上 0.8 未満)
- ④ 相関性無 (コヒーレンスが 0.5 未満)

図-23 に検討結果を示す。横軸は浮石部と基盤部に設置した振動計間の距離、縦軸は基盤部の最大速度振幅で、コヒーレンスでランク分けして示したものである。図-23 から最大振幅 $0.1 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 以下で、コヒーレンスが低くなっていることがわかる。また、測点間が 10m を超えるとコヒーレンスが低くなる傾向にある。このことから本手法の適用範囲は表-4 に示すように、振幅が $0.1 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 以上の大きな振動環境下や測点間が 10m 以内となる箇所であると判断した。

7. 現地亀裂調査との比較

これまででは本手法による危険度判定について論述してきた。ここでは、現地での適用例を用いて、現地亀裂調査との比較を行い、本手法の信頼性を検証した結果について以下に示す。当該現場(以下「H 地区」)では、効果的な落石対策工の検討を行うことを目的とし、地表踏査、ボーリング調査およびボアホールカメラを用いた亀裂調査を実施し、さらに、本手法を用いた危険度判定を行い、それらの結果から落石対策工の検討を行っている。これらの亀裂調査の結果と、本手法による判定が類似の傾向、つまり、亀裂調査で亀裂が多い岩塊は、本手法での危険度判定も高い結果となれば、本手法による危険度判定法の信頼性は高いものであるといえる。

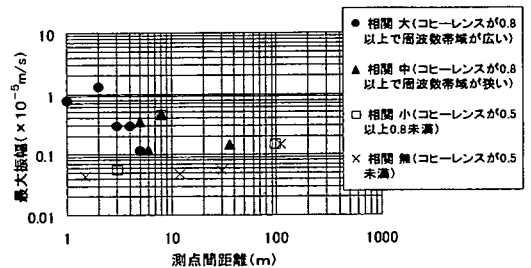


図-23 適用限界図

表-4 適用範囲

項目	適用範囲
基盤部の最大速度振幅	$0.1 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 以上
測定間の距離	10 m 以内

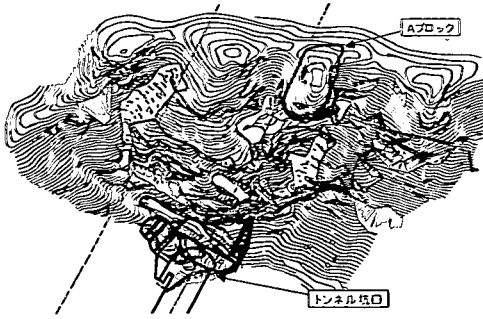


図-24 平面図

(1) H地区の概要

H地区には、トンネル施工予定の坑口上に落石の危険性のある不安定岩塊（以下「Aブロック」）が存在する。このため、Aブロックに対しての落石対策工について検討を行うため調査を実施したものである。平面図を図-24に示す。トンネル坑口からAブロックまでの距離は約65m、高低差約90mである。当該地の地質は主に黒色片岩から構成され、岩質は泥質な部分とやや硅質部分が混在し、剥離性の強い地山である。

(2) 現地調査内容

現地調査内容を表-5に示す。地表踏査からAブロックの亀裂位置を調査し、その後、岩塊内部の状況を確認するためボーリング調査を実施した。これらの調査から落石の可能性のある岩塊を推定（以下、「推定岩塊」）し、推定岩塊の落石危険度を本手法で実施した。ボーリングは図-25に示すように2本行い、B-1は、岩塊の頂上から垂直に30m、B-2は推定岩塊の上部から下方方向に30°の角度で約31m実施した。

(3) 調査結果

地表踏査からAブロックのオーバーハング部は全体に明瞭な開口亀裂が発達しており、非常に緩んだ状態であることがわかった。また、ボーリング調査結果から以下のことがわかった。

調査項目	目的
地表踏査	亀裂状況
ボーリング調査 ポアホールカメラ観察	地質・弱面の観察 岩盤の緩み状況 開口亀裂の方向
亀裂データ解析 (シュミットネット投影法)	崩壊規模の推定 主要な崩壊方向の推定
落石危険度振動調査	岩塊の落石危険度

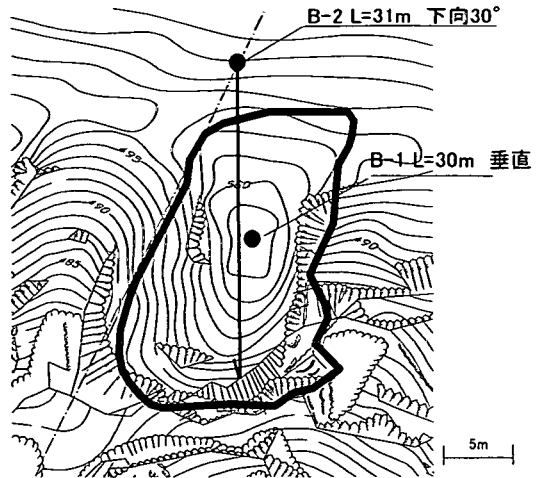


図-25 ボーリング調査箇所

- 1) 亀裂本数はB-1、B-2とも250本程度であった。
- 2) 開口量については、B-1は全体的に少なく、B-2では崖面付近で非常に多い。
- 3) 潜在的な亀裂が全体に多数分布している。
- 4) 潜在的な亀裂は地山内部では密着しているが、崖面から10mの範囲では開口しているものが多い。

さらに、調査結果をシュミットネット投影法により分析した結果、南北方向の片理構造が集中して分布していることがわかった。また、亀裂（節理）は、南北および東西方向に卓越していた。

これらの調査結果を基に開口亀裂に着目し、不安定ブロックを抽出した。開口クラックの位置を図-26に、抽出した不安定ブロックの断面図を図-27に示す。

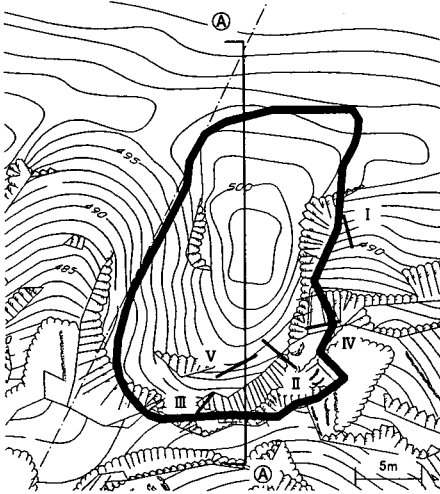
- ① 図-27より、N11°W90（亀裂番号Ⅲ）の開口亀裂より前面部分が非常に緩んだ状態であることがわかる。
- ② N77°W60°N（亀裂番号Ⅰ）の開口亀裂は不安定岩塊を形成する方向に対して流れ盤方向に分布しており、やや不安定なブロックであると判断される。
- ③ 壁面左岩部は局所的にオーバーハング状、浮石となる部位はあるものの、連続的な開口亀裂は見られず、比較的安定した状態であると判断される。

これらのことから、崖面右側については不安定ブロックであり、崖面左側については、右側に比べると比較的安定した状態であることがわかったが、これらのブロックが落石となって落下する危険性が

あるのかないのかについては不明であった。

そこで、本手法により危険度判定を行った。振動計の設置箇所を図-28 に示す。崖面の右側と左側に分け、振動計をそれぞれ3箇所づつ設置した。なお、図中の○は浮石部、△は基盤部に設置した振動計である。

落石危険度判定図にプロットした結果を図-29 および図-30 に示す。A-2, A-3, A-5, A-9が不安定領域にプロットされ、A-7, A-8は安定領域にプロットされている。不安定領域にプロットされた箇所は、崖面右側で、現地調査において、



亀裂番号	走向傾斜	代表的な亀裂の状態
I	N77W60N	幅 10 mm
II	N81E89N	破砕帯介在
III	N11W90	幅 50 mm
IV	N20E50W	幅 300 mm最大
V	N7E76W	破砕帯介在

図-26 不安定ブロック抽出 (平面図)

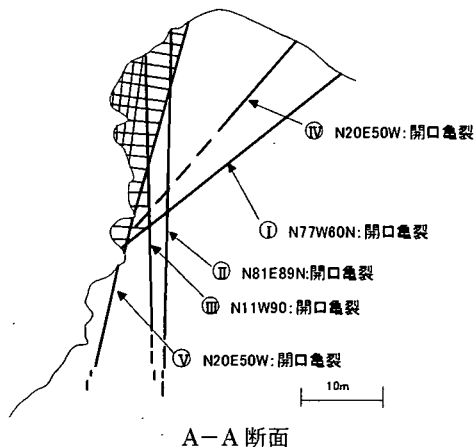


図-27 不安定ブロック抽出

亀裂が多く非常にゆるんだ状態と判断された部分であり、本調査法の結果においても類似した判定を示した。A-9は、崖面の左側に位置しているが、局部的にオーバーハングしている箇所であり、地表踏査等の調査結果からも、浮石状態であったことから不安定領域にプロットされたものと思われる。

一方、安定領域にプロットされたA-7, A-8は、崖面左側に位置しており、現地調査においても、比較的安定した状態と判断された箇所である。

以上をまとめると、

- 1) 亀裂調査の結果、Aブロック右側部は亀裂が多く不安定なのに対して、左側はやや安定であった。
- 2) Aブロックを左右、2つの岩塊に分け、本調査法による危険度判定を実施した結果、右側部は不安定領域、左側部は安定領域と判定された。
- 3) 亀裂調査、本判定法が類似の結果を得た。

このことから、本手法による危険度判定は、落石の危険度を正確に反映しており、信頼性は高く、落石の危険度を定量的に判定する手法として、十分精度のよい判定手法であるといえる。

本手法を用いることによって、崖面の一部が落石の危険性が高い岩塊であると判定できたため、その部分を重点に落石対策工を行うといった合理的な設計が可能である。また、対策工として根固め工を採用した場合には、対策工の効果の検証を本手法により行うことも可能である。さらに、対策工を実施しない箇所についても経時的な変化をとらえることによって、危険度の進行状況を把握することも可能であると思われる。

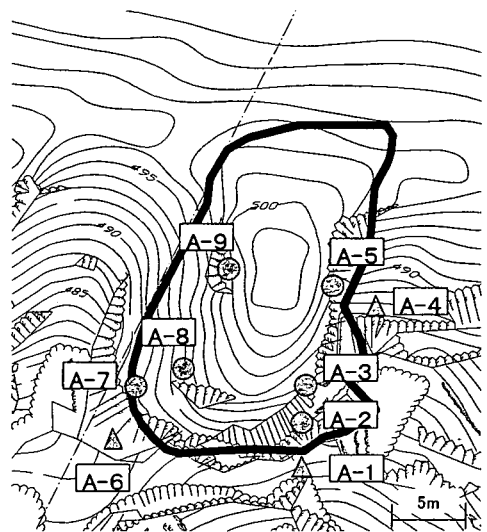


図-28 振動計設置平面図

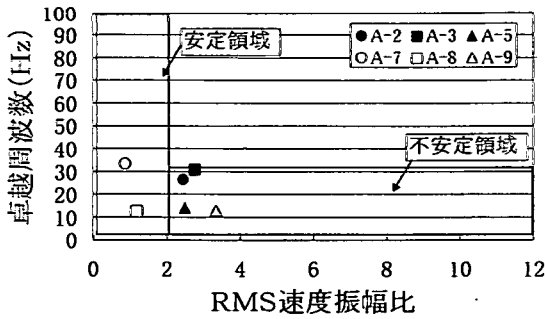


図-29 RMS 速度振幅比と卓越周波数の関係

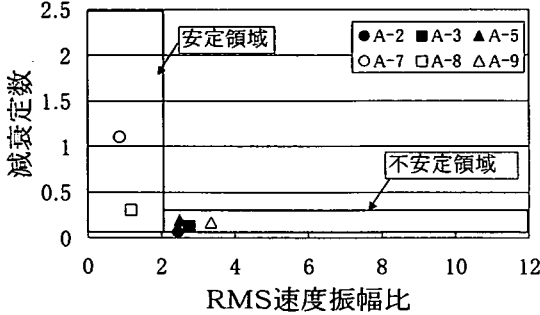


図-30 RMS 速度振幅比と減衰定数の関係

8. まとめ

本調査法は、落石の危険度を定量的・客観的に評価ができる手法である。模擬実験、現地実験から落石の危険度判定図を作成し、さらに信頼性を高めるため現地の亀裂調査結果との比較を行った。結果を以下にまとめる。

- 1) 模擬実験より、RMS速度振幅比、卓越周波数、減衰定数の三つの振動特性は、落石の危険度を測る指標として有用なことがわかった。
- 2) 現地実験より、RMS速度振幅比と卓越周波数の関係およびRMS速度振幅比と減衰定数の関係は模擬実験と類似した傾向を示し、危険度判定の指標になることが判った。
- 3) 模擬実験、現地実験を通して、落石危険度判定図を作成し、安定領域、不安定領域に区分することができた。
- 4) 岩盤内部の亀裂調査結果と本手法の危険度判定の結果が類似の結果を示したことより、本手法は岩塊の不安定性を正確に反映するものであり、信頼性も高いものであることがわかった。

今後は、さらに現地計測データの蓄積を行い、危険度判定の精度向上を図る予定である。

謝辞：現場やデータの提供をして頂いた関係諸氏の方々に、末筆ながら、ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：落石対策便覧，2000。
- 2) (財)鉄道総合技術研究所：落石対策技術マニュアル，2001。
- 3) 大谷知生，佐々木靖人，脇坂安彦：空気の流動性を活用したトレーサー試験の開発と岩盤斜面の亀裂の調査，第23回日本道路会議一般論文集，pp. 40-41，1999。
- 4) 海野忠行，今村敦夫：弾性波反射法を利用した転石等根入れ深度探査手法の開発，全地連フォーラム98予稿集，1998。
- 5) 塩月隆久，孫建生，古川浩平：高周波衝撃弾性波法による転石根入れ長さ探査，土木学会論文集，No. 680/III-55，141-153，2001。
- 6) 新田邦弘，笹原克夫，土田庸夫，利岡徹馬：地下レーダーによる岩盤内部の割れ目調査例，物理探査学会学術講演論文集，pp. 321-325，1995。
- 7) 笹原克夫，山本浩也，土田庸夫：地下レーダーによる岩盤斜面内の亀裂探査に関する実験，物理探査学会学術講演論文集，pp. 6-10，1995。
- 8) 栗林栄一，萩原良二，原徹夫：電気探査法による橋脚根入深度の判定法，物理探査学会学術講演会論文集，73-74，1963。
- 9) 吉住永三郎，柏井義夫，門谷毅，佐々木泰夫，鈴木徹，久保田亮： $\rho_a-\rho_u$ 探査法による探査例—埋設物調査への応用—，物理探査学会学術講演会論文集，pp. 201-203，1989。
- 10) 奥園誠之，岩竹喜久磨，池田和彦，酒井紀士夫：振動による落石危険度判定，応用地質，Vol. 21，No. 3，pp. 119-122，1980。
- 11) 熊谷兼雄，木谷日出男，吉岡修：鉄道技術研究所速報，pp. 1-17，1983。
- 12) 竹内孝光，原田初男，三塚隆：落石危険度判定のための振動測定，物理探査学会第97回学術講演論文集，pp. 64-67，1997。
- 13) 永吉哲哉，田山聡，緒方健治：振動特性による落石危険度調査法の試み，第34回地盤工学研究発表会，pp. 361-362，1999。
- 14) 永吉哲哉，田山聡，緒方健治：振動特性を用いた落石危険度判定調査法の検討，土木学会第54回年次学術講演会，pp. 456-457，1999。
- 15) 竹本将，田山聡，緒方健治：振動特性を利用した落石危険度調査法に関する模型実験，第35回地盤工学研究発表会，pp. 2495-2496，2000。

- 16) 竹本将, 松山裕幸, 緒方健治: 振動特性を利用した落石調査手法の模擬実験と現地計測について, 土木学会第 56 回年次学術講演会, pp. 362-363, 2001. (2003. 2. 14 受付)
- 17) 竹本将, 松山裕幸, 緒方健治: 振動特性を利用した落石の危険度調査手法の検討 (模擬実験と現地計測の評価), 日本道路公団試験所報告 vol. 38, pp. 9-15, 2001.

EVALUATION OF THE ROCKFALL POTENTIAL UTILIZING THE CHARACTERISTICS OF VIBRATION

Kenji OGATA, Hiroyuki MATSUYAMA and Kiyoyuki AMANO

This paper proposes a method of assessment that focuses on the vibration characteristics of the boulder or the unsteady stone, and enables the evaluation of the potential danger for rockfalls in a quantifiable and objective manner. This method places vibrometers on both the boulder or the unsteady stone to be investigated and the supporting ground, and seeks to evaluate the potential danger by the difference in their vibration characteristics. First, the correlation between the results of field tests to the experiments using models was confirmed, and a diagram for evaluating the potential danger for rockfalls was produced. Moreover, comparisons were made between the results of field investigations of cracks and the results of evaluations of potential danger, and the reliability of the proposed method was validated.