

Ⅱ-3-2 岩盤斜面の調査・計測・ハザード評価技術の調査(2)

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）
研究期間：平14～平17
担当チーム：地すべりチーム
研究担当者：藤澤和範（上席）、浅井健一

【要旨】

本研究では、振動計測による不安定岩盤ブロックの抽出手法の検討を以下に示す現地計測及び計測結果の解析により行った。①岩盤ブロックを人工的に不安定化させながら計測を行った結果、岩盤ブロックが不安定化すると振幅が大きくなることが示された。②実際の岩盤斜面において計測を行ったところ、安定ブロックと不安定ブロックを区別でき、その中でも特に不安定なブロックを抽出することができた。③また、計測結果に基づいて岩盤ブロックの亀裂を再観察した結果、岩盤ブロックがさらに小ブロックに分かれて振動していることを明らかにできた。④岩盤接着工が実施された斜面において計測を行った結果、岩盤接着工によって岩盤が安定化した状況が振動の変化によって捉えられた。これらの結果は岩盤斜面の振動計測が不安定岩盤ブロックの抽出に有効であるとともに、対策工の効果判定に有効な手法となりうることを示したものである。以上の結果をもとに、本手法の計測・解析の方法と留意点等を示すマニュアル（案）をとりまとめた。

キーワード：岩盤斜面、常時微動、振動

1. はじめに

岩盤崩壊は表層崩壊に比べて発生頻度は低いものの、崩壊が発生した場合には甚大な被害が生じうるため、岩盤斜面の対策や監視が必要である。しかしながら、広範囲に分布するすべての岩盤斜面で対策や監視を行うことは技術面でもコスト面でも困難である。したがって、不安定岩盤ブロックを効率的かつ精度良く抽出することが岩盤斜面对策と監視のコストの適正化を図る上で重要である。

通常、不安定岩盤ブロックは、地表踏査等によって亀裂の分布や開口度などを把握することにより抽出する。しかしながら、地中部分の亀裂分布や開口度等を正確に把握するのは難しいため、不安定なブロックを的確に抽出することは困難である。このような問題に対し、本研究では、岩盤斜面の不安定岩盤ブロック（要対策箇所）の的確な抽出手法の提案を達成目標とし、常時生じている岩盤ブロックの微動（常時微動）及び人工的な振動を与えたときの岩盤ブロックの振動を計測することによって不安定岩盤ブロックを精度良く抽出する手法の検討を行った¹⁾²⁾。

2. 研究方法

本研究では、実際の岩盤斜面に振動計を設置して岩盤ブロックの振動を計測して解析を行い、その結果を岩盤の亀裂等の状況と比較検討を行った。具体的には実斜面の岩盤ブロックを人工的に不安定化させながら振動計測を行い、岩盤の不安定性と振動状況の関係についての検討、実際の要対策岩盤斜面をモデルケース

として振動計測・解析を行い、不安定岩盤ブロックの抽出手法

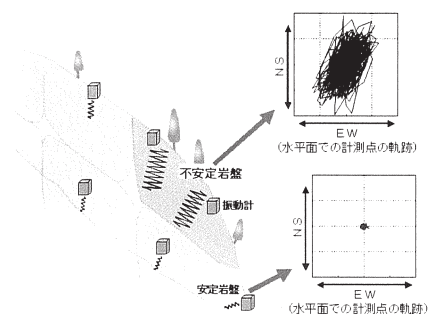


図-1 計測技術のイメージ

としての適用性についての検討、及び本手法の応用として岩盤接着工が施工された斜面における振動計測・解析を行い、岩盤接着工の効果判定についての検討を行った。

3. 計測技術の概要

本手法は、安定岩盤ブロックでは周囲の亀裂が密着していて基盤と一体となっているのに対し、不安定岩盤ブロックでは亀裂の開口・劣化が進んで基盤と分離しているため、不安定岩盤の方が安定岩盤よりも大きく振動するという考えに基づいている。

図-1に示すように、対象岩盤に複数の計測点を設けて振動計を取り付け、岩盤ブロックの常時微動及び人工的な振動を与えたときの振動を計測する。このとき、入力振動の大きさが常に同じではないことを考慮し、原則として計測点のうち1つを安定岩盤に設けて比較する必要がある。

解析処理の流れを図-2に示す。この中で、振動粒子軌跡の出力までが一般的な解析であるが、本研究では、岩盤ブロックの不安定性を判断する指標として、入力振動によって岩盤の計測点が一定時間内に実際に

動かされた軌跡の累積長さを求め、不安定性の判断材料としての適用性を検討している。

岩盤ブロックの振動は微小であるため、計測には微小な振動を捉えるのに適する速度型（振動を速度で捉える方式）の振動計を用いる。振動計の事例を写真-1に示す。本事例の機種は水平2方向及び上下方向の3成分を計測できるとともに、小型軽量に作られており、振動計の背面についてスパイク（大型の針）をドリルで削孔した穴に差し込み、周囲をパテで固める方法で容易に固定及び撤去できる。この機種は広い範囲の岩盤斜面を次々に計測していくのに適するように考案されたもので、設置作業はロックライミングによって、仮設の足場を構築することなく行うことができる（写真-2）が、パテによる固定のため同一計測点に振動計を長期間固定して計測し続けるのには適さない。

4. 研究結果

4.1 岩盤ブロックを不安定化させながら振動計測を行った実験的検討

実験計測を行った現場（A地区）は、転倒型の岩盤崩壊³⁾が報告された岩盤斜面である。本地区の岩盤ブロックの1つ（高さ約4m、幅約2.5m、厚さ約1mの硬質砂岩で背後に開口亀裂が発達）を対象として、岩盤ブロックの下部をエアバッグで破砕する等の方法で人工的に不安定化させたり、一時的に安定化させたりしながら、各段階で計測を行った⁴⁾。計測点配置は写真-3に示すように、対象ブロックの上下方向に2点、安定岩盤に1点を配置した。不安定化及び計測の過程を図-3に示す。用いた振動計は写真-1の機種で、固有振動数は8Hz、サンプリング間隔は5msec（200Hz）である。

得られた振動波形を図-4に示す。得られた波形はすべて車両走行等のない状態での計測結果である。不安定化開始前（a）に比べて不安定化させた状態（b）では対象岩盤ブロックの振幅が大きくなり、対象岩盤ブロックを山側へ押しつけて一時的に安定化させた状態（c）では振幅が小さくなっていることが明瞭に示

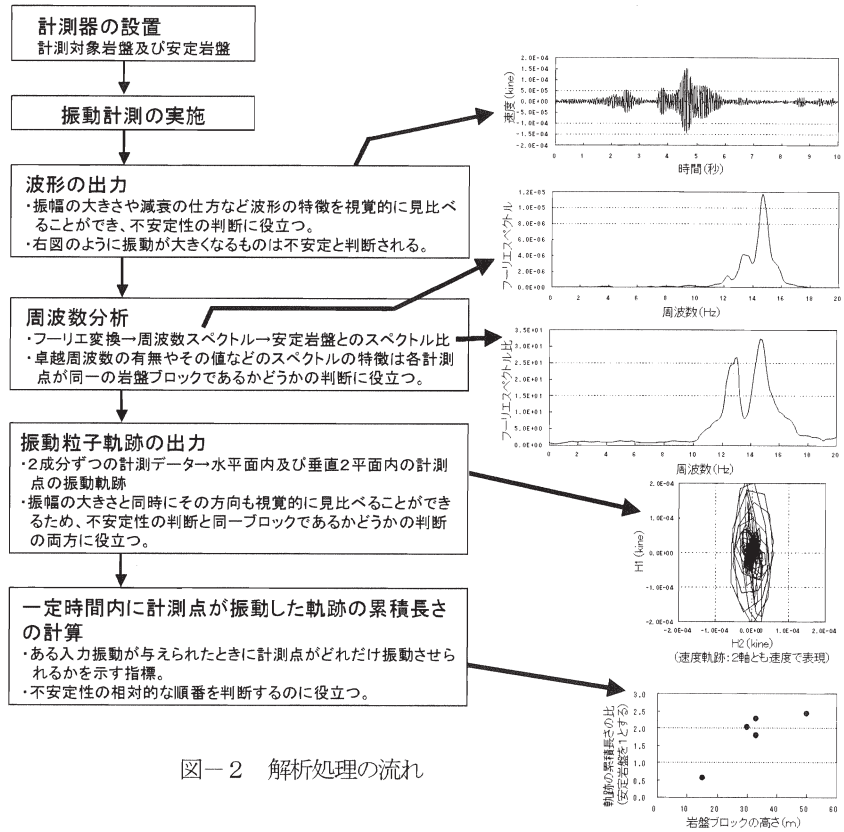


図-2 解析処理の流れ

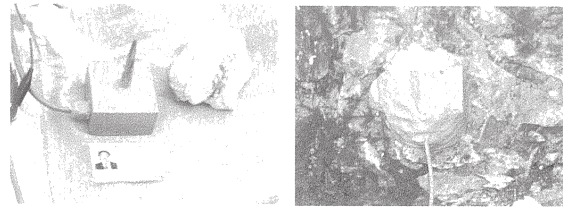


写真-1 振動計の事例（右は岩盤に設置した状況）



写真-2 岩盤斜面への振動計設置作業

された。また、山側への押しつけを解除して一晩放置すると再びbと同様の状態に戻った（d）。

これらのことから、岩盤ブロックが不安定な状態で

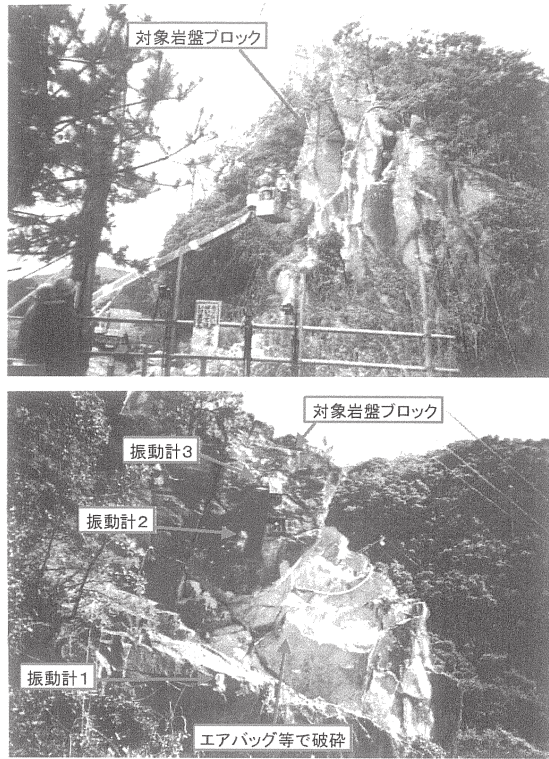
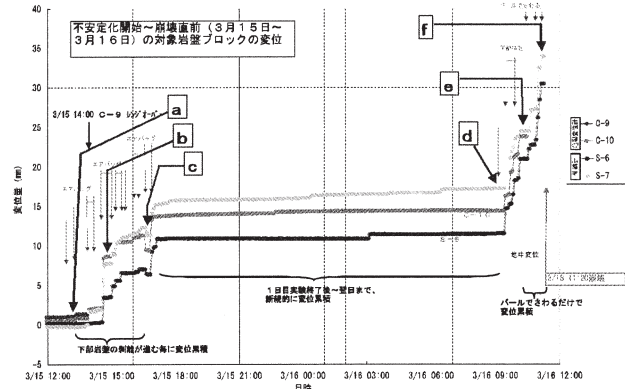


写真-3 A地区計測現場(上)及び計測点配置(下)
上は下写真に対して右側方から撮影。

は振幅も大きくなるといえる。その後さらにバールを用いて岩盤ブロックを崩壊に至るまで変位させていく段階(e及びf)においても安定状態(a及びc)に比べて振幅が大きい状態である。ただし、この段階の振幅はdに比べて振幅が若干小さくなっているが、岩盤ブロック自体は安定化に向かったとはいえないため、



測定段階	計測時の岩盤ブロックの特徴等	振動計配置
a	不安定化実験前の初期状態	振動計1: 安定岩盤部 振動計2: 岩盤ブロック下部 振動計3: 岩盤ブロック上部
b	エアバッグ等の不安定化により、一気に変位累積	
c	岩盤ブロックをエアバッグにより逆に山側に押し上げ、背面の岩盤と密着させる	
d	1日目実験終了後、夜間に断続的に変位が累積した状態で翌朝測定	
e	岩盤ブロックをバール等でさわるだけで変位累積	
f	崩壊寸前	

図-3 不安定化及び計測の過程

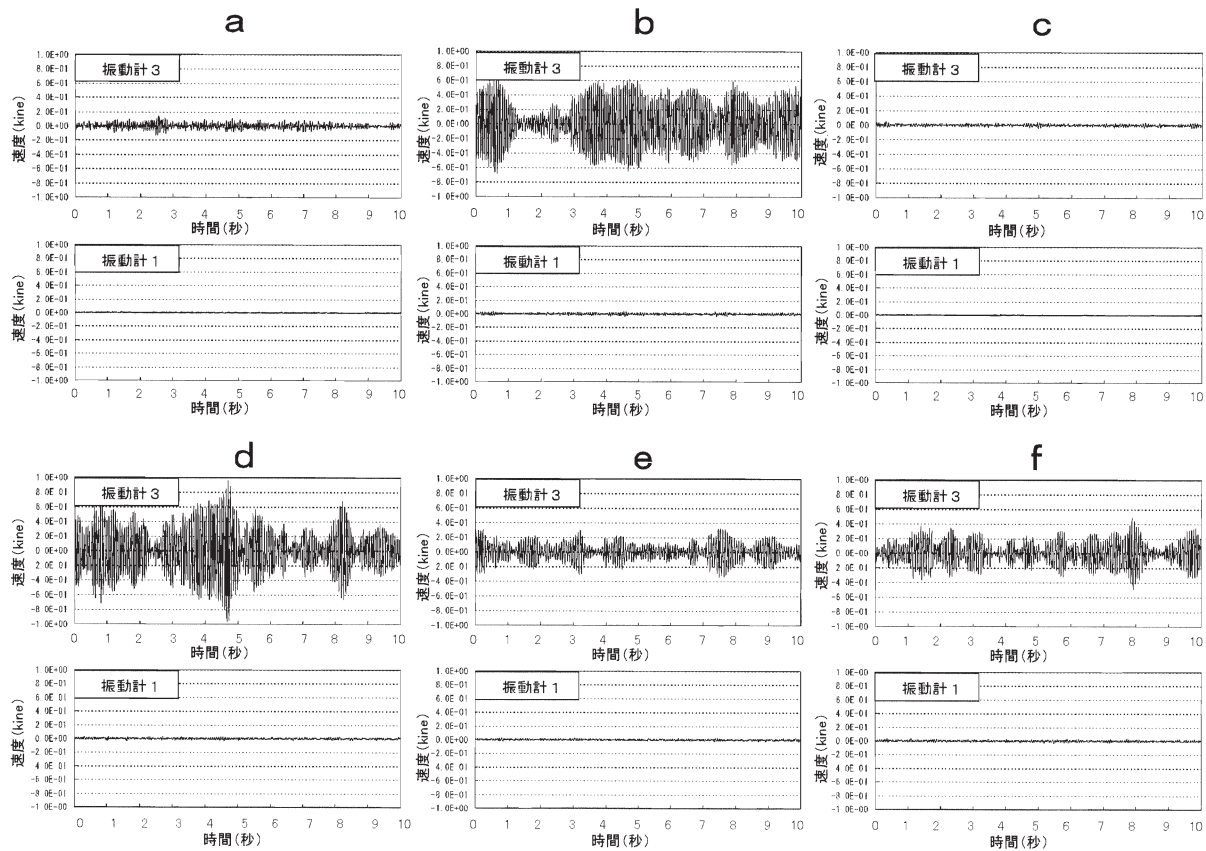


図-4 A地区における振動波形(車両走行等のない時)

岩盤ブロックが不安定になると振幅が大きくなる傾向は概略的なものであるといえる。

このほかの周波数、振動粒子軌跡等の解析結果についても振動波形の結果と調和的な傾向を示した⁴⁾。

4.2 要対策岩盤斜面をモデルケースとして計測・解析を行った事例(1)

計測を行った現場（B地区）は住宅地の近傍にある岩盤斜面で崩壊による住宅地への被害が懸念されることから、不安定岩盤ブロック抽出のモデルケースとなりうる現場である。亀裂は結晶片岩の片理面による水平方向の亀裂とそれに直交する垂直方向の亀裂が数多く発達し、これらの亀裂によって多数のブロックに分かれている。開口亀裂も多く、不安定岩盤ブロックが多いと想定される。計測点は主要な岩盤ブロックを網羅するよう、安定岩盤を含めて計13点設け、振動計4台を用いて4パターンの配置に分けて計測を行った⁵⁾⁶⁾。計測点配置について写真-4に示す。用いた振動計は写真-1の機種で、固有振動数は8Hz、サンプリング間隔は5msec（200Hz）である。

計測結果の代表例として、車両走行（2tトラック）によって人工的に振動が与えられたときの水平面内での一定時間内の振動粒子軌跡を図-5に、計測点の軌跡の累積長さ（安定岩盤(P-1)での値に対する比で表現）の分布を図-6に示す。

計測結果から、岩盤ブロックの不安定性を以下のように判断した。

- (1) P-5、P-9及びP-11は安定岩盤P-1と同様の振動を示し比較的安定していると判断される。
- (2) P-3、P-4、P-6、P-8、P-10、P-13は振幅や軌跡の累積長さの比が大きく、亀裂の分離が進んだ不安定ブロックと判断される。
- (3) P-7は上記P-3、P-4、P-6、P-8、P-10、P-13

よりは振幅や軌跡の累積長さの比が若干小さく、不安定度はやや小さいと判断される。

- (4) P-2はP-5、P-9、P-11に次いで軌跡の累積長さの比が小さいが振幅が若干大きい。また、P-12は振幅についてはP-5、P-9、P-11と同様に小さいが軌跡の累積長さの比が若干大きい。そのため、これら2点の不安定度はP-5、P-9及びP-11のグループとP-7と

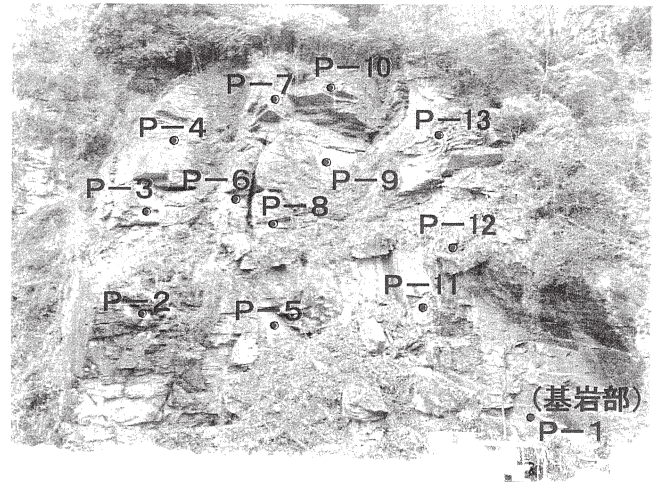


写真-4 B地区計測現場及び計測点配置

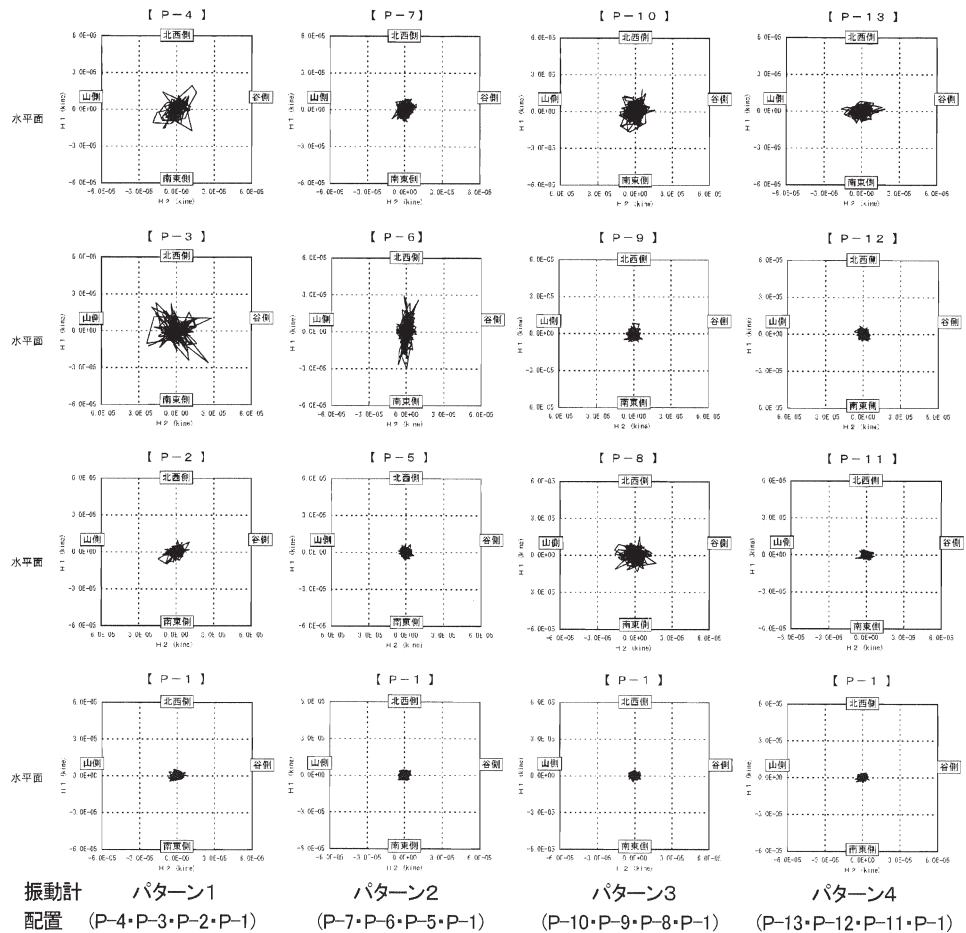


図-5 B地区における振動粒子軌跡（2tトラック走行時、水平面、4秒間）

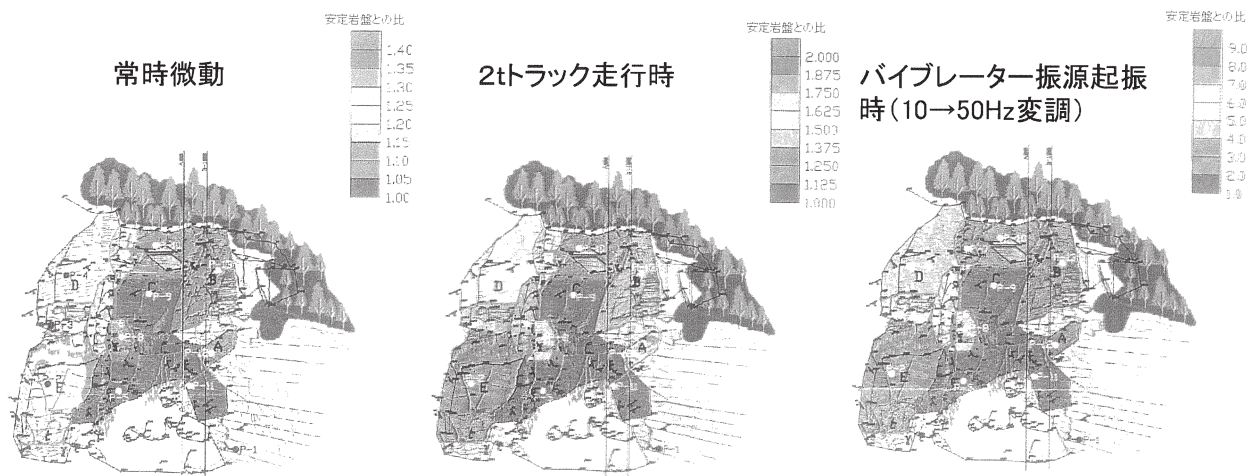


図-6 B地区における各種の振動源による軌跡の累積長さの比 (安定岩盤に対する比)
(ただし、常時微動の左側のブロックの計測点P-2、P-3、P-4は欠測)



写真-5 計測点P3及びP6設置ブロック側面

の間と判断される。

また、特徴的なこととして、斜面中部にあるP-3、P-6及びP-8の振幅や軌跡の累積長さの比は、これらより上部の計測点の振幅より大きく、さらにP-6の場合は振動の方向性も上部のP-7と異なっている。したがって、これらは上部とは別の分離したブロックとして振動しているためであると判断される。なぜならば、一体として振動しているのであれば、例えば岩盤ブロック下端を支点として上部ほど大きく振動する関係が成り立つとともに、振動の方向性が調和的でなければならないからである。実際の状態として、P-3及びP-6を設けた岩盤ブロックの周囲の亀裂を側面から見ると、写真-5に示すように正面から見た場合と同様に開口し、完全に基盤から分離したブロックであることから、上記の判断は妥当であって、これらは対策上特に注意を要するブロックと判断されるとともに、振動計測による不安定岩盤ブロック抽出の有効性を示したものとイえる。P-8は側面から見ることはできないが、振動の状況と正面から見た亀裂の開口度から判断すると、

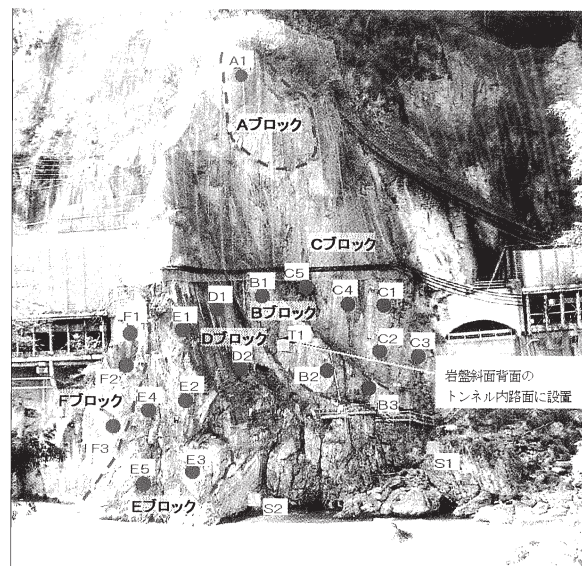


写真-6 C地区の岩盤の状況及び計測点配置

P-3及びP-6と同様、背後も含め完全に基盤から分離した状態と判断される。

このような振動の大きさの傾向は、常時微動では必ずしも明瞭ではないが、バイブレーター振源など他の人工的な振動源を用いた場合にはより明瞭に区別できた⁶⁾。また、軌跡の累積長さの解析では、常時微動の場合でも他の振動源の時と類似した傾向が示されており、この解析の有効性を示した結果といえる。

4.3 要対策岩盤斜面をモデルケースとして計測・解析を行った事例(2)

計測を行ったC地区は、亀裂が発達した岩盤斜面内を道路トンネルが通過しており、要対策とされている。

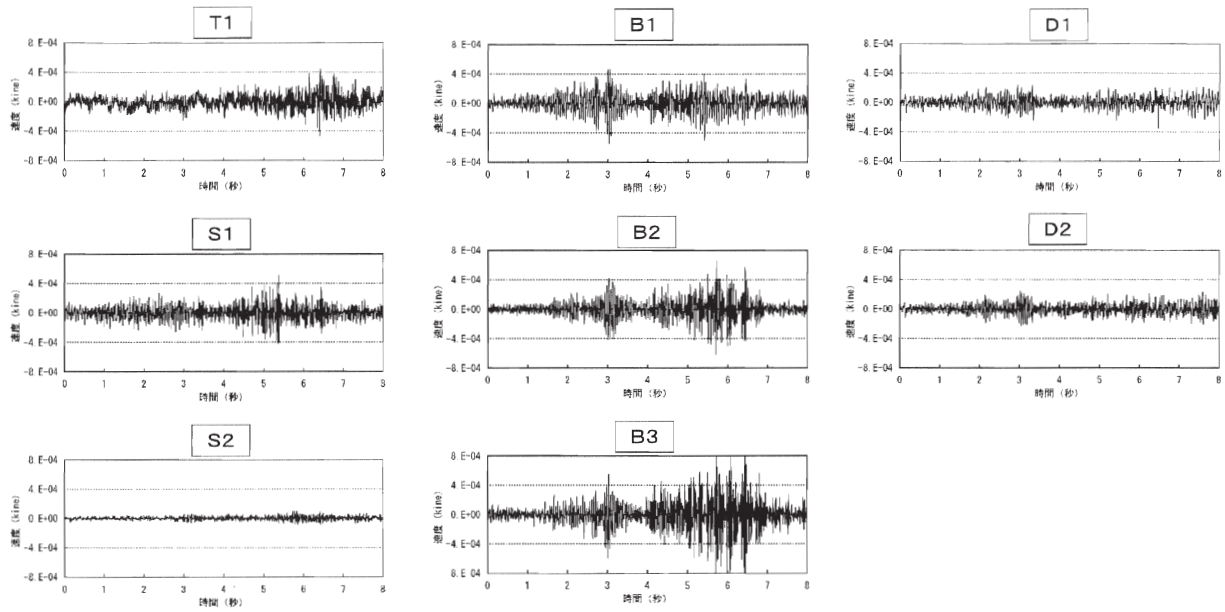


図-7 C地区における振動波形の例 (大型車両走行時、斜面縦断方向)

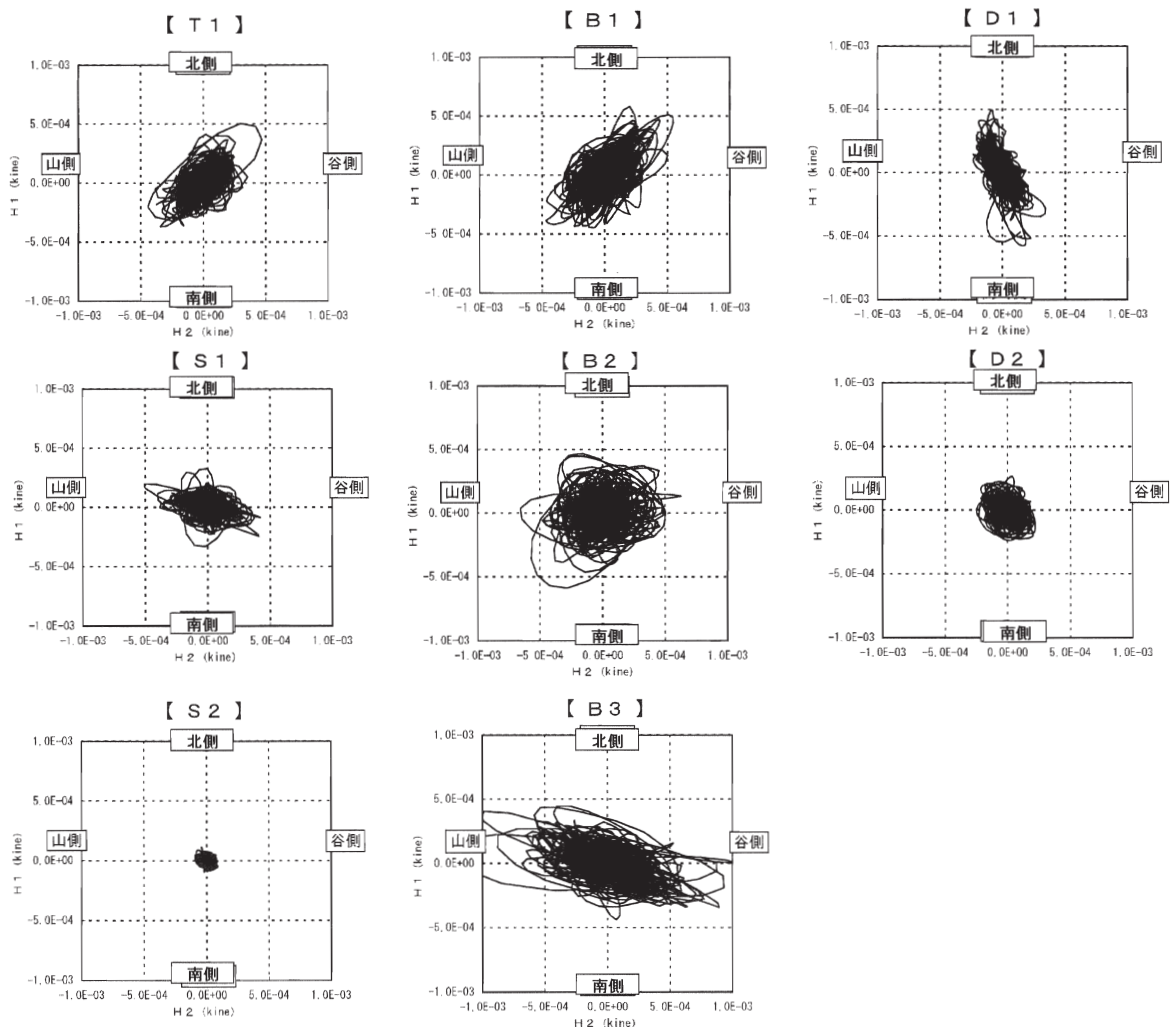


図-8 C地区における振動粒子軌跡の例 (大型車両走行時、水平面)

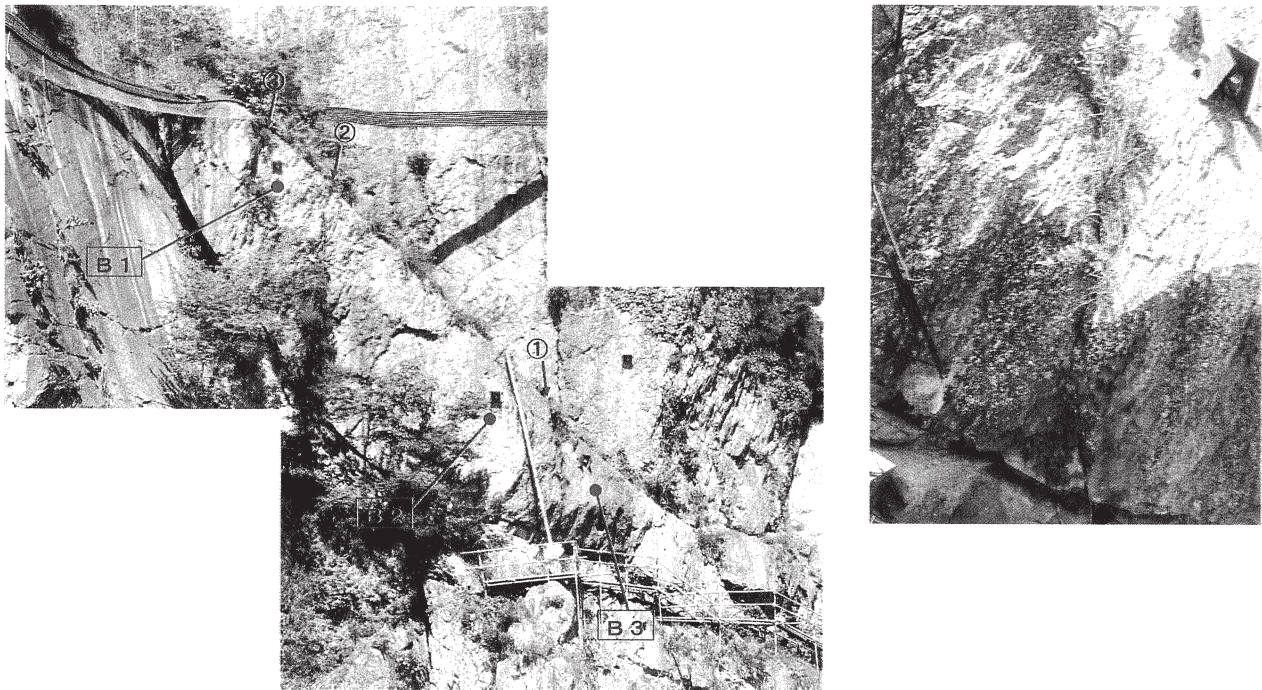


写真-7 Bブロック内の亀裂 (①②③)、右は亀裂①の拡大写真

岩盤の状況及び計測点配置を写真-6に示す。当地区の岩盤は主要な亀裂から写真-6に示すようなブロックに分けられているが、各ブロック内にも亀裂が見られ、小ブロックに細分しうる。この斜面の22点において計測を実施した。本地区では確実に安定岩盤と判断できる部分が見いだせなかったため、全22点のうち3点の計測点を候補として安定岩盤の可能性のある部分に設けた(写真-6のS1、S2及びT1(トンネル内))。振動計は写真-1の機種(固有振動数8Hz)を8台用い、5パターンの配置に分けてサンプリング間隔2msec(500Hz)で計測を行った。

計測結果の代表例として、振動計配置パターンB1、B2、B3、D1、D2、S1、S2、T1の時(写真-6に示すBブロック、Dブロックの範囲及び安定岩盤候補)の大型車両(4t車以上)走行時の振動波形を図-7に、振動粒子軌跡を図-8に示す。

S1、S2、T1の振動を見るとS2の振幅が最も小さく、安定岩盤の計測点として最も適している。これは、確実に安定岩盤の部分と判断できる部分が見いだしにくい場合は、候補として複数の計測点を設けて計測することにより、安定岩盤として適切な計測点を選び出すことができることを示している。

BブロックとDブロックを比較すると、Bブロックの方がより大きな振幅を示したことから、Bブロック

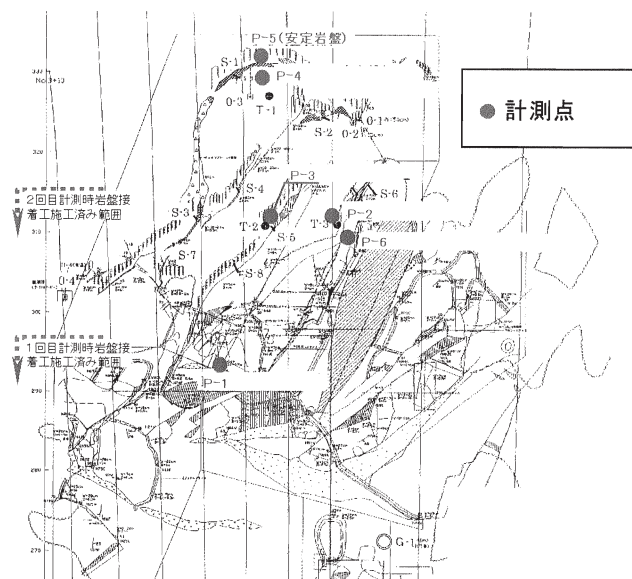


図-9 D地区計測点配置

の方が相対的に不安定であると判断される。Bブロックについてより詳細に見ると、B1、B2、B3で振動方向が異なり、振幅も上に行くほど大きいという関係にはない。これは同一ブロックとして振動しているのでは説明できず、小ブロックに分かれて振動している可能性を示している。この結果に基づき、Bブロックの亀裂について再観察すると、写真-7に示すように、Bブロックを分ける亀裂が観察されたことから、B1、B2、B3が小ブロックに分かれて振動してい

ると考えるのが妥当である。この結果は、振動計測の結果が亀裂の状況等の再検討のきっかけとなりうることを示し、岩盤斜面振動計測の有効性を示したものとイえる。なお、他のブロックの計測結果でも、ブロック内の亀裂で小ブロックに分かれて振動していると考えられる結果が部分的に見られた。

4.4 岩盤接着工施工前後に計測を行った事例

計測を行った現場（D地区）の岩盤斜面では対策として亀裂に接着剤を注入する岩盤接着工が岩盤下部から上部に向かって施工され、現在は所定の高さまで施工を完了している。この斜面の計測点6点について、岩盤接着工前後で計測し比較を行うことにより、岩盤接着工の効果判定を実施し、比較を行った⁷⁾。計測点配置を図-9に示す。1回目の計測時点では岩盤接着工の進捗は計測点P-1のやや上までで残りは未施工であったが、2回目の計測は、計測点P-3のやや上まで岩盤接着工が完了した時点で行った（図-9参照）。用いた振動計は写真-1の機種で、固有振動数は8Hz、サンプリング間隔は5msec（200Hz）である。

計測結果の代表例として、車両走行時の振動波形を図-10に示す。

1回目の計測では、計測時点で既に岩盤接着工が終了していた計測点P-1は非常に振幅が小さく、一方でP-2及びP-6はごくわずかではあるが振幅がややP-1より大きめとなり、P-3及びP-4は振幅がさらに大きめとなる結果が得られた。

これに対し、2回目の計測では、新たに岩盤接着工が施工された範囲にあるP-2、P-3及びP-6の振幅がP-1と同様に非常に小さい状況に変化し、一方で岩盤接着工施工範囲外のP-4については1回目と同様に振幅が大きい結果が得られた。これらの振幅の変化は岩

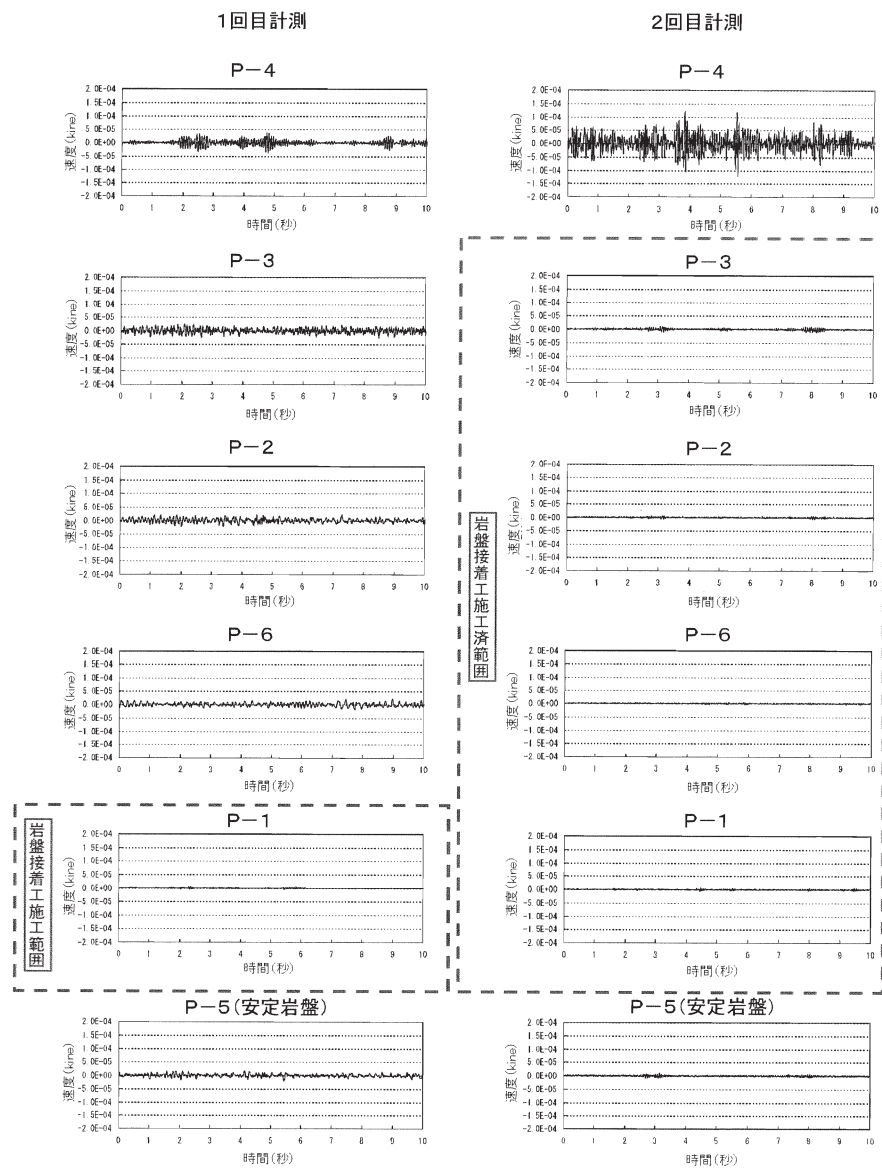


図-10 D地区における2回の計測の振動波形の比較
（斜面縦断方向、車両走行振動）

盤接着工の進捗と合っており、岩盤接着工による接着効果が現れていることが振動計測によって示された結果となった。

4.5 計測手法のマニュアル(案)

以上の結果をもとに、本手法の計測・解析の方法と留意点等を示すマニュアル(案)を作成した。目次構成を表-1に示す。第1章「総則」では、本マニュアル(案)の目的として、岩盤斜面の詳細調査の補助手段として本手法を位置づけ、その方法を解説したものであることを記述した。第2章「技術の概要」では、本手法の計測と解析の全体の流れを簡単に記述した。第3章「計測計画」では、計測計画を立案する上で必

表-1 計測手法のマニュアル(案)の目次構成

• 第1章 総則
• 第2章 技術の概要
• 第3章 計測計画
3-1 事前調査
3-2 計測点の配置
3-3 計測機器の選定及び岩盤への設置方法
3-4 振動源
• 第4章 計測の実施
• 第5章 計測結果の解析
5-1 解析の流れ
5-2 波形の出力
5-3 周波数分析
5-4 振動粒子軌跡
5-5 その他の計測方法
• 第6章 不安定性の判断

要な検討項目として、まず事前調査を行い亀裂の状況から不安定岩盤ブロックを想定することを記述した。続いて計測点の配置について、不安定岩盤ブロックが明瞭な場合、不明瞭な場合、計測対象のブロックが限定される場合に分けて配置事例を示しながら記述した。機器の選定については、計測する振動が速度レベルで $10^{-4} \sim 10^{-5}$ kine(常時微動の場合)、周波数帯域が1~50Hz程度であることを考慮して選定する必要があること、振動方向がわかり不安定性の判断と同一ブロックの判断の両方に役立つ振動粒子軌跡を得るために3成分の振動計が望ましいことを記述した。また、短期の計測のために振動計を岩盤に簡易に設置する方法として本研究で用いたスパイク及びパテによる固定方法を事例として示した。振動源については、人工的な振動源として車両走行振動が計測し難しい場合(道路から離れている場合等)には重錘落下等の打撃振動の利用を検討すること、ただし近い位置から振動を与えると本来の岩盤ブロックの振動方向と異なる振動を与える可能性があるためある程度離れた位置から振動を与えることが望ましいと考えられるがその距離等は検討事例がなくまだよくわかっていない(今後の課題)ことを記述した。第4章「計測の実施」では、計測すべき周波数が50Hz程度までであることを考慮し、サンプリング周波数は200Hz以上が望ましいこと、安定したスペクトル特性を得るために1点あたり合計3~5分程度の振動波形の収録が望ましいこと、振動源の大きさは岩盤ブロックの振動特性を明瞭に把握するためには大きい方が望ましいが車両走行振動の場合には振動の大小にかかわらず比較的安定した結果が得られることを記述した。第5章「解析」では、振動波形に関する一般的な解析である振動波形の出力、周波数分析によるスペクトル及びスペクトル比の出力、振動

粒子軌跡の出力について記述するとともに、新しい解析方法として本研究で検討した、入力振動によって岩盤の計測点が一定時間内に実際に動かされた軌跡の累積長さについて記述した。第6章「不安定性の判断」については、岩盤斜面の条件が現場で異なり、第5章で述べた各種の解析結果や亀裂状況等による総合的判断が必要であることから、事例に基づいて記述した。

5. まとめ

振動計測による岩盤斜面不安定ブロック抽出手法の検討を行った結果、

- ①岩盤ブロックを人工的に不安定化させて振動計測を行い、岩盤ブロックが不安定になると振幅が大きくなることを確認した。
- ②実岩盤斜面における振動計測によって岩盤ブロックの不安定性の相対的な違いを判断でき、特に周囲の亀裂が完全に開口した岩盤ブロックでは振幅が周囲より大きいことを確認した。また、振動計測の結果に基づいた再観察によって岩盤ブロックをさらに小ブロックに分ける亀裂を確認することができた。
- ③岩盤接着工施工前後の振動計測によって、岩盤接着工の接着効果が現れているところについては振幅が小さくなることを示すことができた。

これらの結果は岩盤斜面の不安定岩盤ブロックを振動計測によって抽出できることを示すものであり、達成目標を達成できたと判断している。以上の結果をもとに、本手法の計測・解析の方法と留意点等を示すマニュアル(案)をとりまとめた。

参考文献

- 1) 千田容嗣・寺田秀樹・辻雅規(2001): 常時微動による岩盤ブロックの安定度評価への適用性の検討, 平成13年度砂防学会研究発表会概要集, pp.382-383.
- 2) 浅井健一・藤澤和範・小山内信智・西本晴男(2005): 振動計測による岩盤斜面不安定ブロック抽出手法の検討, 土木技術資料, 第47巻第4号, pp.48-53.
- 3) 門間敏一・小野田敏・落合達也・新井健一・網木亮介・浅井健一(2002): 岩盤崩壊モニタリング箇所での転倒崩壊に至るまでの変位挙動の実事例, 地すべり, 第39巻第1号, pp.62-69.
- 4) 浅井健一・小山内信智・千田容嗣・仲野公章・寺田秀樹・辻雅規・小野田敏(2003): 岩盤ブロックの常時微動と不安定性の関係についての実験的検討, 第42回地すべり学会研究発表会講演集, pp.563-566.
- 5) 浅井健一・藤澤和範・小山内信智・辻雅規(2004): 振動

計測による岩盤斜面不安定ブロック抽出手法の検討, 平成 16 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.24-25.

6) 浅井健一・藤澤和範・小山内信智・辻雅規 (2004) : 岩盤斜面不安定ブロック抽出への振動計測の適用, 第 43 回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.527-530.

7) 辻雅規・斎藤秀樹・浅井健一・小山内信智・寺田秀樹 (2003) : 岩盤斜面の安定性評価を目的とした振動測定の実用例, 平成 15 年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集, pp.131-132.