

遠隔非接触振動計測及び数値解析による 岩盤安定性における寸法効果の検討

馬 貴臣^{1*}・沢田 和秀²・八嶋 厚³・上半 文昭⁴・村田 修⁴・斎藤 秀樹⁵

¹岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

²岐阜大学 流域圏科学研究センター (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

³岐阜大学 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

⁴(財)鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

⁵応用地質株式会社 エンジニアリング本部 (〒305-0841 茨城県つくば市御幸が丘43)

*E-mail: magc@gifu-u.ac.jp

岩盤斜面に地震計を設置して、常時微動や交通振動による振動特性から、岩盤の安定性を評価する技術が実用化されつつある。しかしながらこの手法は、計測に危険を伴い、手間も掛かり、費用も高額となる。また、振動特性の変化と岩塊の不安定化の間に定量的な関係が見出されていないことで、まだ十分に効果的な評価方法となっていない。本研究は、模型実験を実施し、遠隔非接触振動計測による岩盤斜面の安定性評価を安全かつ効率的に行うシステムを検討した。また、数値解析によって振動計測結果を再現し、異なる寸法モデルを用いた数値解析により、岩盤安定度振動調査法におけるスケール効果を検討した。

Key Words :slope stability,laser doppler vibrometer,numerical analysis,model experiment,scale effect

1. はじめに

岩盤斜面の安定性は一般的に岩塊に構成されている不連続面の分布状況やその強度に大きく左右され、不連続面の分布や強度は不確定的なものであるため、岩盤斜面の安定性を正確に評価するのは困難である¹⁾。近年では岩盤の振動計測、電気探査、写真測量など多くの簡易的な測定方法が提案され、実斜面への有効性が示されている。しかし、これまでの手法は、計測値と岩塊の不安定性の間に定量的な関係が見出されていないことで、まだ十分に効果的な評価方法となっていない。

これまでに落石危険度振動調査法^{2,3)}として、高精度地震計を直接に浮石部・転石部及び基盤に設置し、振動解析による浮石・転石の振動特性を把握することにより、浮石の危険度を評価する手法が開発されている。ところで、この手法は、計測に危険を伴い、手間もかかるため、費用も高額となる。

また、不連続性岩盤の場合には、問題としている岩盤の領域に応じて不連続性の影響が異なること、すなわちスケール・エフェクト(寸法効果)を考慮する必要があると指摘されている⁴⁾。これにより、岩盤斜面の安定性を検討する際、岩塊の寸法効果を考慮することは重要であると推察できる。しかしながら、前述した諸手法では、

この寸法効果を考慮していないのが現状である。

筆者らは、岩盤斜面における岩塊の安定性評価を安全かつ効率的に行うことを目的として、遠隔非接触振動計測による岩盤安定性評価法の開発を行っている⁵⁻⁸⁾。この研究は、橋梁など鉄道構造物の診断用に開発されたレーザードップラー振動計(U ドップラー⁹⁾)を用い、遠隔非接触で岩盤斜面の振動を計測し、振動特性から岩盤斜面の安定性を評価する方法を確立しようとするものである。U ドップラーはレーザ光を照射することによって構造物の振動速度を遠隔から非接触によって計測するシステムで、レーザードップラー振動計に微振動センサ(加速度計)を内蔵し、レーザードップラーセンサ自身の揺れと傾きを検知し、これをキャンセルする工夫を施したものである。この工夫により、U ドップラーは交通振動や風の影響を受けてセンサ自身に振動が発生しやすい屋外環境においても、振動波形を遠隔非接触で計測できる。

馬ら^{5,6)}は、土砂斜面をモデル化した斜面上に不安定岩塊(コンクリートブロック)を設置した模型実験を実施し、遠隔から正確な振動計測ができることを実証した。また、力学的安定性の異なる実験ケースの整理により、遠隔振動計測で得られたブロックの卓越周波数及び振幅はブロックの工学的な安定性と良好な整合性を示した。

筆者ら⁷⁸⁾は、不安定岩盤を想定し、コンクリートブロック台座上に不安定岩塊（コンクリートブロック）を設置した模型実験を実施し、Uドップラーが、レーザー光軸と同一成分の接触型地震計（ジオフォン）と同等の波形記録を遠隔非接触で計測できることを示した。また、数値解析により、振動特性の変化と岩塊の不安定さの関係を検討した。模型実験と数値解析とともに、ブロックの接着面積が小さいほど、ブロックの卓越周波数は小さくなることを明らかにした。これらは、ブロックの力学的安定度と良好な整合性を示す。本報では、これらの実験結果を基に、異なる寸法のモデルを用いた数値解析を実施し、岩盤安定度におけるスケール効果を検討する。

2. 土砂斜面の模型実験

(1) 実験概要

図-1に模式実験の模式図を示す。モデル斜面上に不安定岩塊（コンクリートブロック）を設置し、レーザードップラー計測器により、ブロックの微動を計測した。同時に、ブロックに設置した地震計を用いた既存の計測手法³⁾により安定性を調査し、両手法を比較した。モデル斜面は最大粒径0.5cm以下の河砂を用いた。

実験は、転石の大きさと状態、斜面の硬さと勾配等の転石安定度への影響を考慮し、これらの条件を組み合わせ計26ケースを実施した⁹⁾。

- ・ 斜面種類：モデル斜面と平坦地盤 2種類
- ・ 人工斜面の勾配：0°，20°，30° の3種類
- ・ ブロックの設置状態：自然に置く（縦置きと横置き）と埋め込む
- ・ ブロックの種類：大60×50×40cm（重さ285kg），小40×30×20cm（重さ57kg）の2種類
- ・ 測定距離：18.4m，29m，150m
- ・ 1つの実験ケースに対して、6回繰り返し計測

図-2は実験装置の配置である。レーザードップラーによる遠隔計測は、実験模型から18.4～150m離れたところにUドップラー⁹⁾を設置し、計測器から発射したレーザー光を模型に設置したブロック（事前に反射板や反射材を微動計測位置に貼る）に照射し、計測器のセンサー部は反射光を測定する。今回の実験はブロック上部付近の水平方向の振動速度を計測した。

(2) 実験結果

a) 遠隔計測の適用性について

図-3はUドップラーと地震計の比較をまとめたものである。ここでは、遠隔計測と従来方法との比較は実験で得られた波形記録（振動速度時刻歴）とスペクトルを用いた。図中、Uドップラーは150m離れた地点からの計測

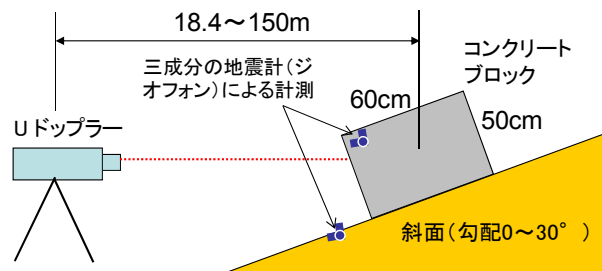


図-1 土砂斜面模型実験の模式図⁹⁾



図-2 土砂斜面模型実験の実験装置配置⁹⁾

データで、ジオフォンはブロックに設置した地震計で同時計測により得られたデータである。両方とも、水平方向（図-1に示す赤い点線の水平方向）の結果で、実験条件は、小ブロック、斜面角度20°である。図-3に示すように、遠隔振動計測と既存手法の波形記録およびスペクトルは、ほぼ同様な波形を示した。これより、遠隔から正確な振動計測ができることが明らかである。

b) 岩盤安定性評価への適用性について

遠隔振動計測の岩盤安定性評価への適用性を検討するため、ブロックの設置状況が異なる実験ケースを用いて、ブロックの卓越周波数及び応答振幅を検討した。図-4に検討に用いた実験ケースの写真を示す。検討には、LD15～18の4ケースの実験結果を用いた。この4ケースは、大ブロック、斜面勾配20°、Uドップラーと模型の距離18.4mの共通条件と、LD15は横置き（60×40cmの面を底面）、LD16は縦置き（50×40cmの面を底面）、LD17は縦置き20cm埋め込み、LD18は横置き20cm埋め込みのブロック状態のみ異なる条件で実施した。図-4に示すように、各ケースのブロックの力学的安定度の違いは明らかである。すなわち、ブロックの力学的安定度は、横置きの場合（LD15）は縦置き（LD16）より高く、20cm埋め込みの場合（LD17、LD18）は埋め込まない場合（LD15、LD16）より高いことが推察できる。一方、図-5にこの4ケースのUドップラーによる計測結果を示

す。図-5から、ブロックの振動特性は、実験番号LD16, LD17, LD15及びLD18の順序で、卓越周波数は大きくなり、卓越周波数における振幅は小さくなることが明らかである。これは、各実験ケースにおけるブロックの力学的安定性と良好な整合性を示すことが分かる。すなわち、力学的安定性が高いほど、卓越周波数が高くなり、振幅が小さくなる。これにより、遠隔計測で得られたブロックの卓越周波数及び振幅を用いて、ブロックの安定性を評価することができると考えられる。

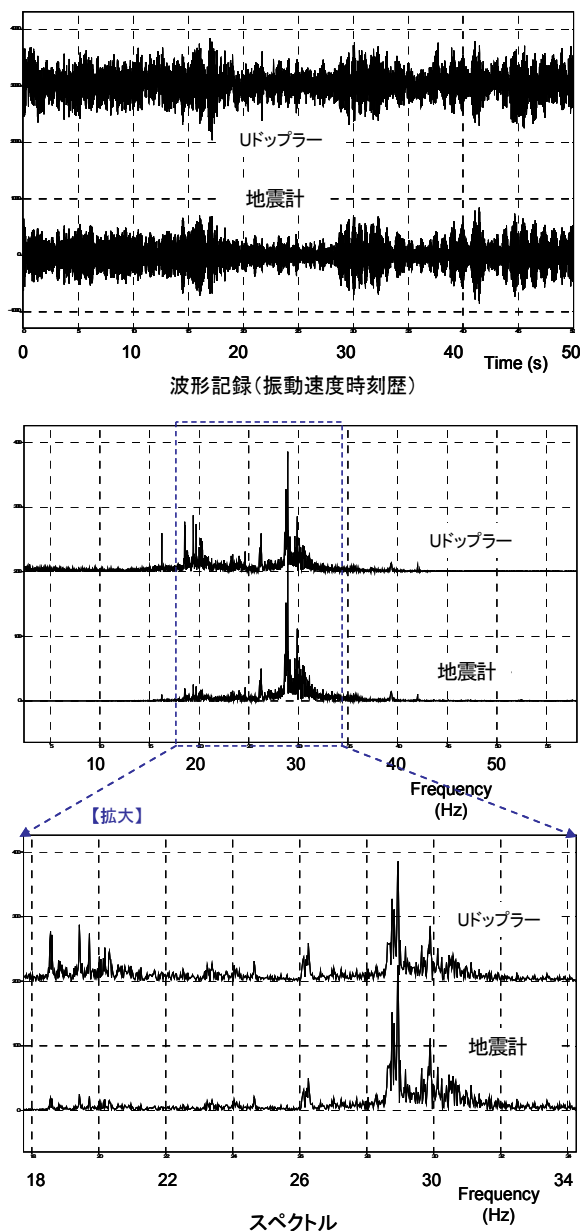


図-3 U Dopplerと地震計の比較⁵⁾
 U Doppler：150m地点からの計測データ
 地震計：コンクリートブロックに設置した固有周波数28Hz速度型地震計で得られた計測データ

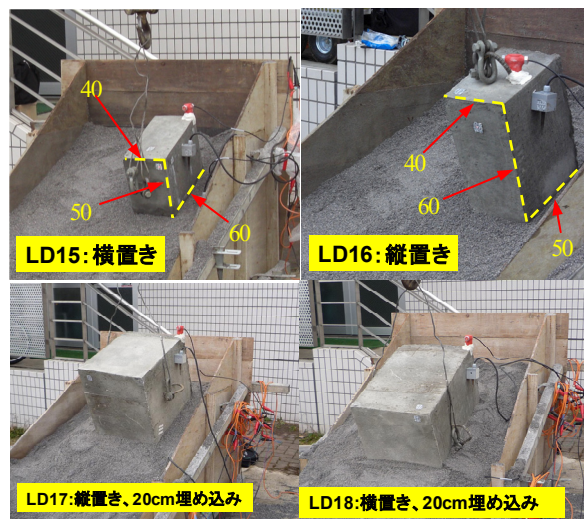


図-4 安定性検討に用いた実験ケースの写真

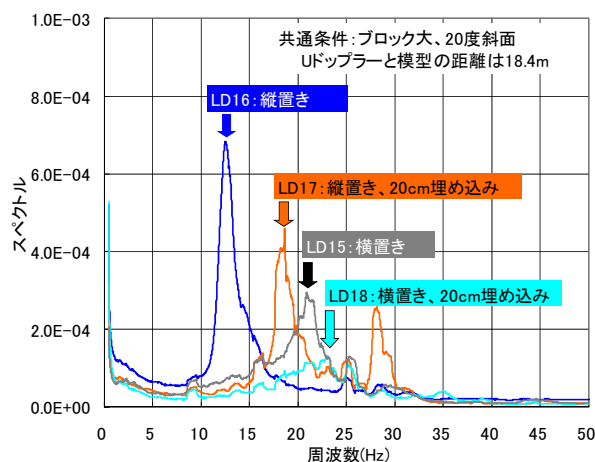


図-5 U Dopplerで得られたスペクトル⁵⁾

c) 寸法効果について

模型実験では、大と小の2種類ブロックを用いたことから、ブロックの大きさによるブロックの振動特性の差異及び安定性差異を考察してみる。

図-6は、ブロックの大きさのみ異なり、他の実験条件が共通の2ペアの実験結果を示したものである。ここに示す実験ケースは、前述のLD15とLD16以外に、LD13とLD14を用いた。LD13, LD14は共に小ブロックで、それぞれにLD16, LD15と同様に縦置きと横置きのペアである。すなわち、LD13とLD16のペアはブロックの大きさ以外に共通条件を持つ。LD14とLD15も同様である。

図-6に示すように、LD13とLD16の結果を比較すると、LD13の方が卓越周波数は高く、振幅は小さい。これをb)の検討結果を用いて考察すると、LD13はLD16より力学的安定性が高いと推察できる。さらに、LD13とLD16の実験条件の違いを考察すると、大きさの違い以外に、縦辺と横辺(斜面に接触し、斜面方向の辺)の「比」の差異もある。LD13の「比」は2(縦40cm/横20cm)であることに對して、LD16の「比」は1.5(縦60cm/横40cm、

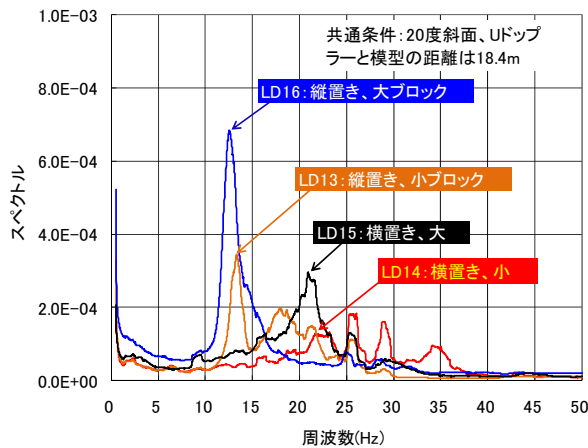


図-6 Uドップラーで得られたスペクトル（寸法効果）

図-4を参照）であり、LD13より小さい。力学的には、「比」が大きいほど、ブロックは不安定化することから、「比」の小さいLD16の方がより不安定となっている。このことから、ブロックの大きさ、すなわち、寸法の影響によりブロックは不安定化したと推察できる。

一方、LD14とLD15の結果を比較すると、卓越周波数と振幅はLD13とLD16のペアと同様の傾向を示す。しかし、LD15の「比」は0.83（縦50／横60、図-4を参照）で、LD14の「比」0.75（縦30／横40）より大きく、LD13とLD16のペアと逆関係を持つ。2ペアの「比」の関係は逆転していても、大きいブロックの方が卓越周波数が小さく、振幅が大きい。このことから、ブロックの大きさはブロックの安定性に影響していると推測できる。ブロックの寸法効果については、後述の数値解析を用いてさらに検討する。

3. コンクリート模型実験とその数値解析

(1) 模型実験概要

作製したコンクリート模型の外観とブロック模型⁸⁾を図-7に示す。L型コンクリート台座の水平面上に、40cm×30cm×20cmのコンクリートブロック（約57kg）を置き、モルタル系接着剤（DKボンド）によってブロックを台座に接着した。このとき、ブロックの安定度を変えるため、接着位置（底面30cm×20cm・背面40cm×20cm）と接着面積（底面または背面の全面・1/2・1/4）の異なる6ケースの模型を作製した。振動計測は、模型から約30m離れた地点にレーザードップラー振動計（Uドップラー-3）を3台設置し、ブロック上部、ブロック下部、台座部の3点を同時計測した。

振動計測によって求めた各ケースのブロックの卓越周波数を、数値解析結果（後述）と比較して表-1に示す。観測された卓越周波数は、数値解析結果と同様、接着面

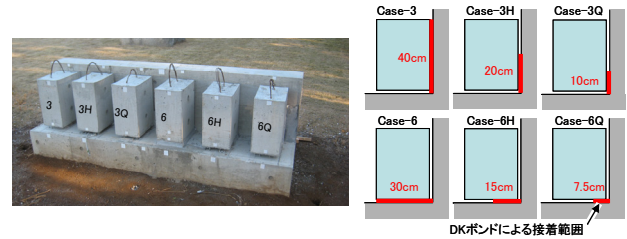


図-7 コンクリート模型実験の外観とブロック模型⁸⁾

表-1 模型実験と数値解析による卓越周波数の比較⁸⁾

模型のケース	模型実験結果	数値解析結果
Case-3	—	252Hz
Case-3H	400Hz	230Hz
Case-3Q	200Hz	147Hz
Case-6	455Hz	310Hz
Case-6H	275Hz	210Hz
Case-6Q	107Hz	111Hz

積が狭くなるにつれて低下することがわかる。接着面積の変化により卓越周波数が変化することは、岩塊の力学的安定性と振動特性に相関がある可能性を示している。

(2) 数値解析による検討

岩盤安定性評価手法の開発を行うため、模型実験の数値解析を実施し、ブロックの力学的安定度の変化による振動特性の変化を検討した。市販ソフトSoilPlusを用い、模型基盤にホワイトノイズを入力した線形動的解析を実施した。図-8は模型実験例の写真と解析モデル（Case6Q）を示したである。図中、解析結果の振動波形出力箇所を矢印で示し、ブロックの上部と下部のX方向振動を出力した。図-9に解析で得られたブロック振動波形例を示す。図にはCase6, 6H, 6Qの3ケースの解析結果を示し、左側は振動時刻歴図で、右側はスペクトル図である。また、図-9に示す解析には、接着材DKボンドとコンクリートを同様な物性値、弾性係数 $2.2E+7\text{ kN/m}^2$ 、ポアソン比0.2、密度 21 kN/m^3 を用いた。図-9から以下に示すことが分かる。

- 振動の時刻歴図から、全ケースはブロック上部が下部より大きく揺れる。
- スペクトル図から、各ケースは特定の周波数で卓越している。卓越周波数は、接着面積の減少順（Case6, 6H, 6Q）にしたがって小さくなる。ブロック背面接着の場合（Case3, 3H, 3Q）も同様な傾向を示す（表-1）。ブロックの卓越周波数の減少傾向はブロック接着面積の減少によるブロック力学的安

定度の低下と良好な整合性を示す。

c) 各ケースは、ブロック上部と下部は同様な卓越周波数を示す。

模型実験結果と数値解析結果の比較によれば、今回ブロックの接着に用いたDKボンドの弾性係数は、コンクリートと同程度かより高いことが推定され、本実験の接着面積ではブロックを不安定化させるには接着強度が強すぎたことがわかった。そこで、もっとも不安定と考えられるCase-6Qについて、接着面をコンクリートドリルで徐々に削除し、接着面積を減じながら振動計測を行った。実験では、接着幅（図-10を参照）を7.5cmから6cm, 5cm, 3cmと順次削除し、さらに3cm以下に削除しようとしたところ、接着面が破壊した。3cmの場合の卓越周波数を数値解析によって求めると45Hzとなり（図-10）、観測値（51Hz）⁸⁾と近い値であることがわかった。

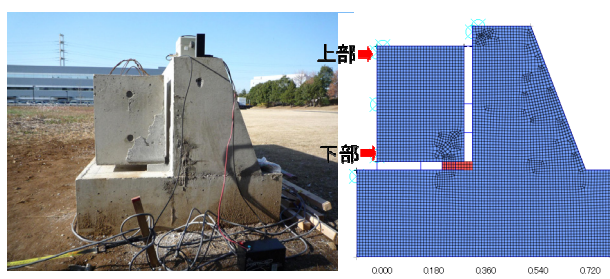


図-8 模型実験例の写真と解析モデル（Case6Q）⁷⁾

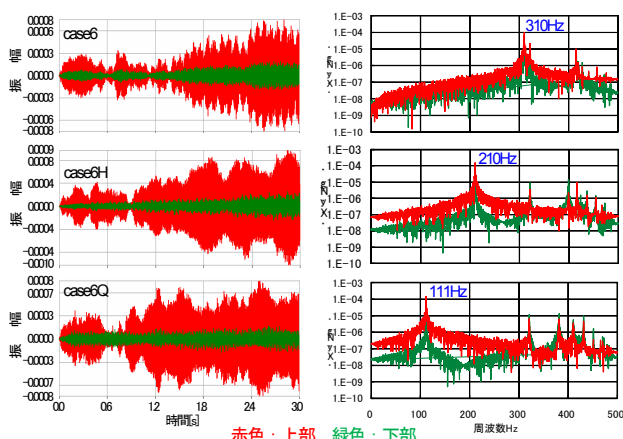


図-9 解析で得られたブロックの振動波形例⁷⁾

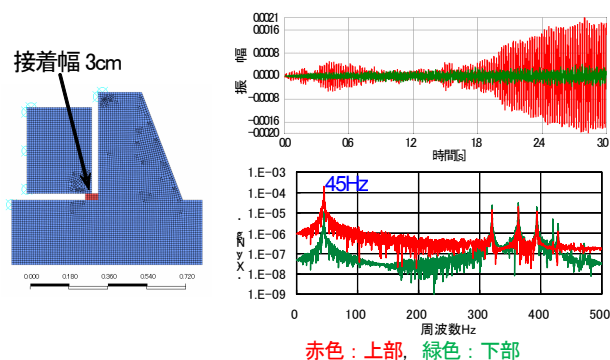


図-10 接着幅 3cm の場合の解析モデルとブロックの振動波形⁷⁾

4. 数値解析による寸法効果の検討

模型実験結果を実際の現場への適用性を検討するため、実験モデル（図-10）の5倍と10倍の大きさのモデルを用いた数値解析を実施した。ここでは、5倍、10倍モデルとは、図-10に示す解析モデルのすべての寸法をそれぞれに5倍、10倍にしたモデルである。

図-11に5倍モデルの解析結果を示す。5倍モデルで得られた卓越周波数は約9.0Hzで、1倍モデル（45Hz）より小さくなるのが分かる。同様に、10倍モデルの解析は卓越周波数約4.2Hzを得た。1倍、5倍、10倍モデルの解析結果から、ブロックの卓越周波数はブロックの寸法と逆比例関係を示すことが推察できる。

数値解析で得られた卓越振動数については、卓越振動数の相似則を用いて考察してみる。解析で用いたモデルをはりの曲げ振動¹⁰⁾と想定すると、ブロックの卓越振動数 f は、接着材の密度を ρ 、接着材の弾性係数を E 、接着面積を A 、弾性係数を E 、接着部の断面二次モーメントを I_0 、ブロックと接着部の高さを l とすると、

$$f = \frac{1}{2\pi} \times \left(\frac{EI_0}{\rho A} \right)^{1/2} \times \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 \quad (1)$$

となる、長さの次元を L で表わすと、

$$\begin{aligned} I_0 &\propto L^4 \\ A &\propto L^2 \\ l &\propto L \end{aligned} \quad (2)$$

となる、卓越振動数 f は

$$f \propto L^{-1} \quad (3)$$

したがって、数値解析で得られた卓越振動数は、卓越振動数の相似則と整合する。

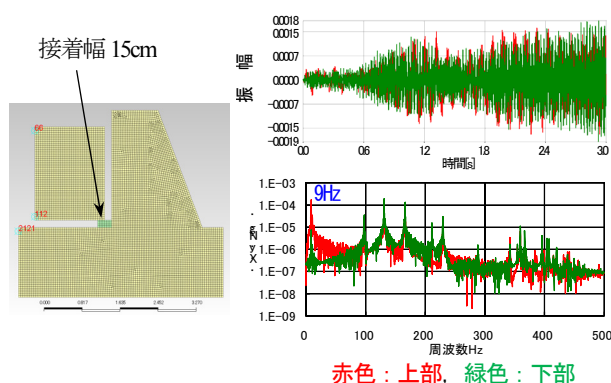


図-11 5倍モデルの解析モデルとブロックの振動波形

5. まとめ

遠隔振動計測による土砂斜面の模型実験、コンクリート模型実験を実施した。また、コンクリート模型実験の数値解析を実施し、岩塊の安定度変化による振動特性の変化及びブロックの寸法効果を検討した。以下に得られた知見をまとめる。

- a) 土砂斜面の模型実験から、遠隔振動計測は従来手法の地震計を用いた計測とほぼ同様な波形を得ることができ、遠隔から正確な振動計測ができることを実証した。また、力学的安定性が低いほど、ブロックの卓越周波数が小さく、振幅が大きくなり、遠隔計測で得られたブロックの卓越周波数及び振幅の変化はブロックの力学的安定性と良好な整合性を示した。このことから、遠隔計測で得られた岩塊の卓越周波数と振幅は岩盤安定性の評価に適用できることを示した。さらに、大きいブロックの方が比較的小さな卓越周波数と大きい振幅を示し、ブロックの大きさはブロックの安定性に影響していると推察した。
- b) コンクリート模型実験及びその数値解析から、土砂模型実験と同様に、岩塊の安定性と振動特性の相関性を確認できた。また、数値解析では実験と同様なブロック振動特性を得たことから、数値解析手法の妥当性を確認できた。さらに、同様な数値解析手法を用いて実施した異なる寸法モデルの数値解析から、岩塊の卓越周波数はブロックの寸法と逆比例関係を示すことが分かった。これは、実験に用いた模型をはりの曲げ振動と仮定した場合の卓越振動数の相似則と整合した。これにより、岩塊の卓越周波数を用いて岩塊の安定性評価を行う際、岩塊の寸法効果を考慮しなければならないことを明らかにした。

謝辞：土砂斜面の模型実験は、国土交通省「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」の援助をいただいた。また、コンクリート模型実験及び数値解析は、鉄道・運

輸機構「運輸分野における基礎的研究推進制度」の援助をいただいた。ここに記して深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) 門間敬一, 千田容嗣, 馬貴臣, 進士正人, 大西有三: 岩盤崩壊メカニズムを評価するための不連続変形法の適用に関する研究, 土木学会論文集, No.757/III-66, pp.45-55, 2004.
- 2) 緒方健治, 松山裕幸, 天野淨行: 振動特性を利用した落石危険度の判定, 土木学会論文集, No.749/VI-61, pp.123-135, 2003.
- 3) 勘田 益男, 宇賀田 登, 荒井克彦, 中野秀明: 落石危険度振動調査法による岩接着効果の評価に関する模型および現場実験, 日本地すべり学会誌, Vol.44, No.3, pp.175-184, 2007.
- 4) Cunha, A.P.: Scale effect in rock mechanics, *Proc. 1st Workshop on Scale Effect in Rock Masses*, Loen, Norway, p. 4, 1990.
- 5) 馬貴臣, 沢田和秀, 八嶋厚, 斎藤秀樹: 模型実験による岩盤安定性評価への遠隔計測手法の適用性に関する検討, 第 44 回地盤工学研究発表会(横浜), pp.1659-1660, 2009.
- 6) 馬貴臣, 沢田和秀, 八嶋厚, 斎藤秀樹: レーザー波干渉を利用した遠隔計測による岩塊安定性評価, 土木学会第 64 回年次学術講演回(福岡), pp.157-158, 2009.
- 7) 馬貴臣, 沢田和秀, 八嶋厚, 斎藤秀樹, 大塚康範, 上半文昭, 小島謙一, 村田修, 深田隆弘: 遠隔非接触振動計測による岩塊安定性評価法に関する模型実験 ーその 1: 数値解析による基礎検討, 第 45 回地盤工学研究発表会, 1801-1802, 2010.
- 8) 斎藤秀樹, 大塚康範, 馬貴臣, 沢田和秀, 八嶋厚, 上半文昭, 小島謙一, 村田修, 深田隆弘: 遠隔非接触振動計測による岩塊安定性評価法に関する模型実験 ーその 2: コンクリート模型を用いた計測実験, 第 45 回地盤工学研究発表会, 1801-1802, 2010.
- 9) 上半文昭: 構造物診断用非接触振動測定システム「Uドップラー」の開発, 鉄道総研報告, Vol.21, No.12, 17-22, 2007.
- 10) 安田仁彦著: 振動工学, 基礎編, (株)コロナ社出版, p.144, 2000.

STUDY ON SCALE EFFECT IN ROCK BLOCK STABILITY BY REMOTE VIBRATION MEASUREMENTS AND NUMERICAL EXPERIMENTS

Guichen MA, Kazuhide SAWADA, Atsushi YASHIMA, Fumiaki UEHAN,
Osamu MURATA and Hideki SAITO

Some method for making evaluation of the rock slope stability using seismometer with ground vibration has been developed and used. These methods using seismometer, however, have risk of installation of the sensors, cost much and need skill and man-hour. Furthermore, an analytical method for evaluation of slope stability cannot show the quantitative value clearly. From those back ground, some physical model tests and numerical analyses using a concrete block are carried out in this study. It is found that a predominant frequency varied with the stability of the concrete block. Finally, the scale effect of rock block stability have discussed based on the results of the physical model tests and numerical analyses.