

遠隔非接触振動計測による岩盤の安定性評価法 に関する検討

馬 貴臣^{1*}・沢田 和秀²・斎藤 秀樹³・大塚 康範³・上半 文昭⁴・村田 修⁴

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)

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)

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

岩盤斜面の岩塊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、岩塊の安定性を評価する技術が実用化されている。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、費用も高額となること、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方法となっていない。著者らは、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評価法の開発を行ってきた。本研究は、遠隔非接触振動計測によるコンクリートブロック模型実験及び数値解析を実施した。本文は、模型実験及び数値解析による得られた卓越周波数と岩塊の安定性の関係及び岩塊のスケール効果を取りまとめた成果を報告する。

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、これまでの岩盤斜面内の不安定岩塊の抽出や計測方法は、岩塊の安定性を定性的な検討に止まっていることが殆どである。抽出された不安定岩塊は力学的観点で本当に不安定であるか否かは殆ど検討されていない。

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。

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⁵⁻¹⁰⁾。

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。馬ら⁷⁾、斎藤ら⁸⁾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した。さらに、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た⁹⁾。その結果、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分かった。これは、実験に用いたモデル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。本報は、数値解析で検討した寸法効果を検証するため、異なる寸法のブロックを用いた実証実験を実施し、ブロックの卓越周波数、力学安定性及び寸法効果の関係を検討した結果を取りまとめた。

2. 寸法効果の実証実験

(1) 実験概要

図-1に模型実験の概略図¹⁰⁾を示す。L型コンクリート台座の水平面上に、コンクリートブロックを置き、石膏によってブロックを台座に接着した。ブロックの安定度によるブロックの振動特性の変化を検討するため、のこぎりで石膏（後述図2、赤色部分）を石膏の上部から切ることによって接着面積の異なる実験を実施した。振動計測は、模型から約10～30m離れた地点にレーザードップラー振動計（Uドップラー）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。実験は、接着材強度の影響を検討するため、強度の異なる2種類の石膏を用いた。表-1に模型実験に用いた石膏の種類と力学特性を示す。また、ブロックの寸法効果を検討するため、大きさの異なる大、中、小の3種類のブロックを用いた。なお、3種類のブロックの縦、横及び奥行き寸法倍率は、大/小は2倍、中/小は1.5倍である。図-2に模型実験に用いたブロックの寸法と重さ⁸⁾を示す。模型実験は、接着材とブロックの種類を組合せて計6ケースの実験を実施した。

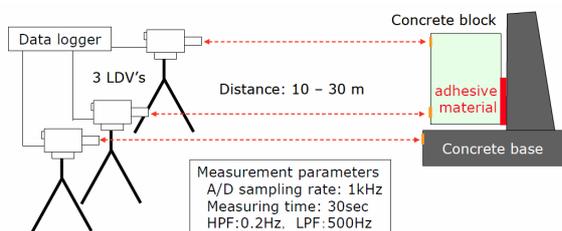


図-1 模型実験の概略図¹⁰⁾

表-1 模型実験に用いた石膏の種類と力学特性¹⁰⁾

plaster type	gypsum: water ratio	uniaxial compressive strength	Young's modulus	splitting tensile strength
			(MN/m ²)	
Grade A*	1:0.8	3.51	2,290	0.848
Hi-stone HLP*	1:0.4	17.3	7,870	2.91

* These are the product names of Yoshino Gypsum Co., Ltd.

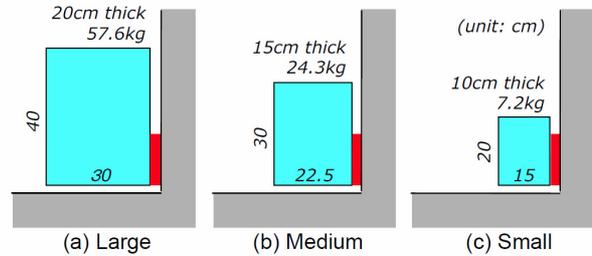


図-2 模型実験に用いたブロックの寸法と重さ⁸⁾

(2) 実験結果

図-3は模型実験で得られた接着長とブロックの卓越周波数の関係を取りまとめたものである。図中、共に6ケースの実験結果を示し、各ケースは7～13種類の接着長に対して計測したブロックの卓越周波数をプロットした。この図から、以下に示すことを明らかにした。

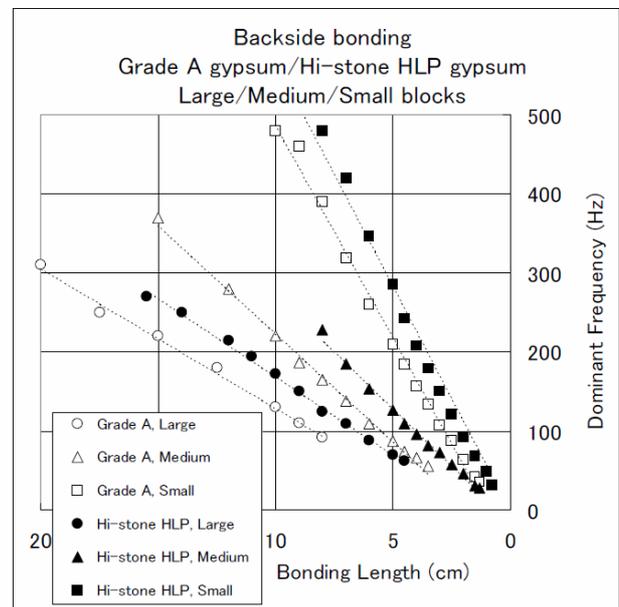


図-3 模型実験で得られた接着長とブロックの卓越周波数との関係¹⁰⁾

- 1) 各ケース共に、接着長とブロックの卓越周波数は線形関係を示す。接着長が長いほど、ブロックの卓越周波数は大きくなる。
- 2) ブロックの寸法による卓越周波数の違いを見ると、2グループ（A級石膏とハイストーン）のいずれも、

ブロックが大きくなるほど、接着長と卓越周波数の線形勾配は緩くなる。これは、ブロックが大きくなるほど、卓越周波数は小さくなるという数値解析の結果と整合していると推察できる。

- 3) 接着剤強度の影響を見ると、同じ大きさのブロックの実験結果では、強度の大きいハイストーンの方は接着長と卓越周波数の線形勾配は大きくなる。これにより、接着剤の強度が大きくなるほど、ブロックの卓越周波数は大きくなること分かる。これに関して、これまでに数値解析による検討結果⁹⁾と整合している。

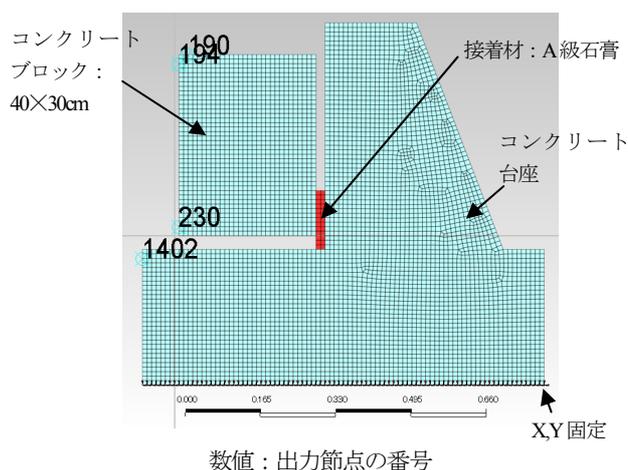


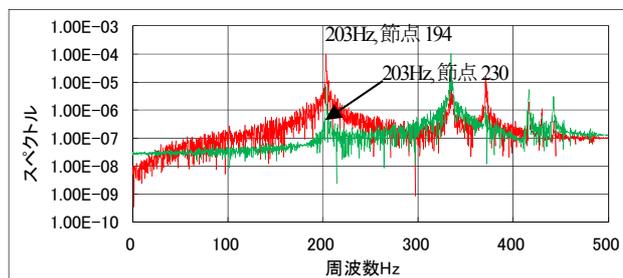
図-5 数値解析に用いた解析モデル

3. 数値解析による実証実験の検討

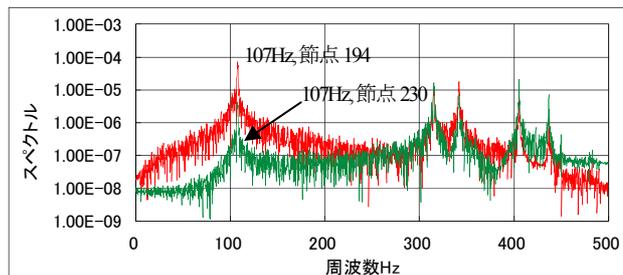
実証実験の妥当性を検討するため、模型実験の数値解析を実施し、接着長とブロックの卓越周波数の関係を検討した。解析は市販ソフトSoilPlusを用い、図-4に示すホワイトノイズ加速度波形を模型基盤の水平方向に入力した線形動的解析を実施した。

解析は、ブロック大(40×30×20cm)、A級石膏の模型実験を対象に実施した。解析に用いた物性値は、ブロックと台座はコンクリートの弾性係数22000MN/m²、ポアソン比0.2、単位体積重量21kN/m³、接着剤はA級石膏の材料試験で得られた弾性係数2290 MN/m²、ポアソン比0.33、単位体積重量11 kN/m³を用いた。図-5は数値解析に用いた解析モデルを示したものである。解析は、台座底面をX,Y固定し、自重解析で得られた応力を初期条件として線形動的解析を実施した。

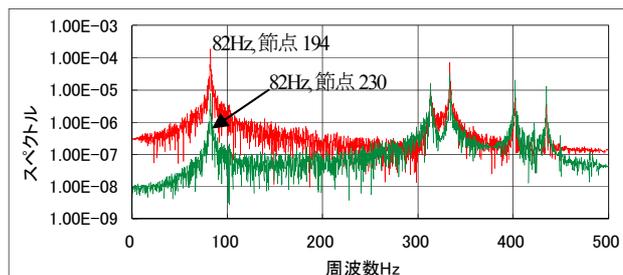
図-6に数値解析で得られたブロックの振動波形例を示す。図中、接着長20cm、10cm及び8cmのブロック上部と下部節点の水平方向振動スペクトルを纏めた。図から、ブロックの卓越周波数は明らかである。ブロックの卓越周波数は、接着長20cmの場合では203Hz、接着長10cmでは107Hz、接着長8cmでは82Hzである。接着長が短くなるほど、ブロックの卓越周波数は小さくなることは明らかである。



(a)接着長：20cm



(b)接着長：10cm



(c)接着長：8cm

図-6 数値解析で得られたブロックの振動波形例

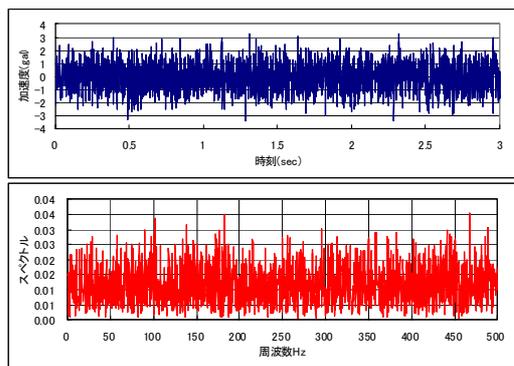


図-4 数値解析に用いたホワイトノイズ波形

図-7に数値解析と模型実験で得られた接着長と卓越周波数の関係の比較を示す。図に示すように、数値解析と模型実験と共に、接着長が長いほど、ブロックの卓越周波数は大きくなり、数値解析は模型実験と整合した結果を示す。なお、接着長毎の卓越周波数を比較すると、数値解析と模型実験の結果は大きな差異が認められる。これは、数値解析の解析モデルは模型実験の模型寸法を完全にモデル化していないことが原因であると考えられる。

接着長とブロックの卓越周波数の関係について、数値解析は模型実験と同様な傾向を得たことから、数値解析及び模型実験で得られた接着長と卓越周波数の関係は妥当であると推察できる。

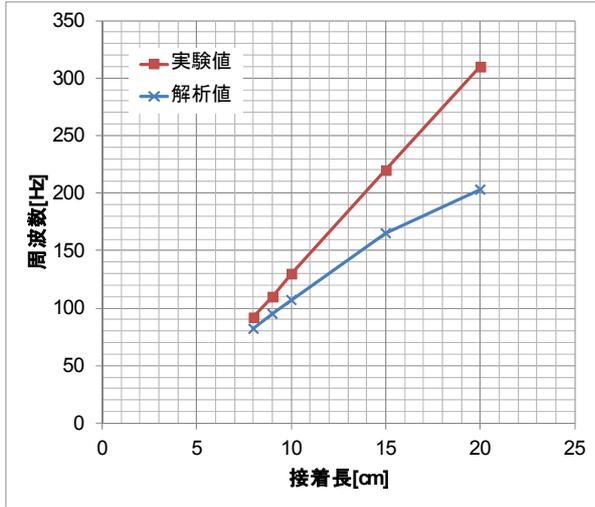


図-7 数値解析と模型実験で得られた接着長と卓越周波数の関係の比較

4. 考察

振動計測による岩盤の安定性評価法を確立するため、ブロックの卓越周波数、ブロックの安定性及び寸法効果の関係を明らかにすることは重要である。ここでは、ブロックの転倒安全率及びブロックの卓越周波数の相似率を用いて考察してみる。

ブロックの転倒安全率は、転倒モーメントと抵抗モーメントの比で定義できる。図-8にブロックのモーメントを示す。ブロックの崩壊モードを転倒崩壊と想定すると、転倒支点はOとなり、ブロックの重さを W 、ブロックの縦長を b 、横幅を a 、奥行き幅を c 、単位体積重量を接着剤の幅を l 、接着剤の引張強度を T とすると、

ブロックの転倒モーメント M_1 は

$$M_1 = W \cdot a/2 = \rho \cdot a \cdot b \cdot c \cdot a/2 \quad (1)$$

ブロックの抵抗モーメント M_2 は

$$M_2 = T \cdot c \cdot l \cdot (l/2) \quad (2)$$

となる。

ブロックの転倒安全率 F_s は下式で求められる。

$$F_s = \frac{M_2}{M_1} = \frac{T \cdot c \cdot l \cdot (l/2)}{\rho \cdot a \cdot b \cdot c \cdot a/2} \quad (3)$$

長さの次元を L で表わすと、

$$\begin{aligned} a &\propto L \\ b &\propto L \\ c &\propto L \\ l &\propto L \end{aligned} \quad (4)$$

ブロックの転倒安全率 F_s は、

$$F_s \propto L^{-1} \quad (5)$$

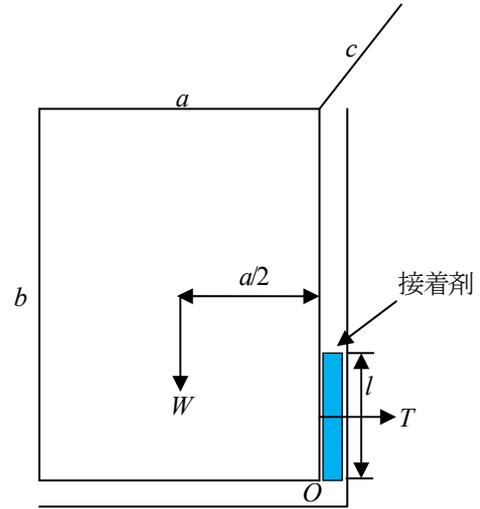


図-8 ブロックのモーメント

一方、ブロックの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されている⁹⁾。数値解析で用いたモデルをはりの曲げ振動¹¹⁾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、

$$f = \frac{1}{2\pi} \times \left(\frac{EI_0}{\rho A} \right)^{1/2} \times \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 \quad (6)$$

となる、長さの次元を L で表わすと、

$$\begin{aligned} I_0 &\propto L^4 \\ A &\propto L^2 \\ l &\propto L \end{aligned} \quad (7)$$

となる、卓越振動数 f は

$$f \propto L^{-1} \quad (8)$$

したがって、ブロックの転倒安全率と卓越周波数と共に、ブロックの大きさと逆比例関係を持つことが明らかである。これにより、ブロックの大きさはブロックの転倒安全率と卓越周波数の関係に影響を及ぼないと推察できる。

5. まとめ

遠隔振動計測によるコンクリートブロック模型実験及びその数値解析を実施した。ブロックの安定度、卓越周波数及び寸法効果の関係を検討し、以下に得られた知見をまとめる。

- a) 模型実験から、ブロックと台座の接着長とブロックの卓越周波数は線形関係を示す。接着長が長いほど、ブロックの卓越周波数は大きくなる。また、ブロックが大きくなるほど、接着長と卓越周波数の線形勾配は緩くなる。これにより、ブロックが大きくなるほど、卓越周波数は小さくなるというこれまでの数値解析結果を検証した。また、同じ大きさのブロックの実験結果では、接着強度の大きいハイストーンの方は接着長と卓越周波数の線形勾配は大きくなる。これにより、接着剤の強度が大きくなるほど、ブロックの卓越周波数は大きくなること分かる。
- b) 模型実験の数値解析は、模型実験で示された接着長と卓越周波数の線形関係と整合した結果を得た。これにより、模型実験及びその数値解析の結果は妥当性であると分かった。
- c) ブロックの転倒安全率と卓越周波数の相似則により、ブロックの転倒安全率と卓越周波数と共に、ブロックの大きさと逆比例関係を持つことを明らかにした。これにより、ブロックの大きさはブロックの転倒安全率と卓越周波数の関係に影響を及ぼないと推察できた。

謝辞：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。

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，天野浄行：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－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－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) 馬貴臣，沢田和秀，八嶋厚，上半文昭，村田修，斎藤秀樹：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，第 40 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，339-344，2011.1
- 10) Saito, H., Tsuji, M., Otsuka, Y., Uehan, F., Murata, O., Ma, G., Sawada, K., Yashima, A., and Fukata, T., 2011, A study on evaluating rock slope stability by remotely-positioned Laser Doppler Vibrometers, accepted to Proceedings of 10th SEGJ International Symposium, Nov. 2011, Kyoto, Japan.
- 11) 安田仁彦著：振動工学，基礎編，(株)コロナ社出版，p.144，2000.

EXAMINATION ABOUT THE STABILITY RATING SYSTEM OF ROCK BLOCK BY REMOTO VIBRATION MEASUREMENTS

Guichen MA, Kazuhide SAWADA, Hideki SAITO, Yasunori OOTSUKA
Fumiaki UEHAN and Osamu MURATA

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.