

## 遠隔非接触振動計測による岩盤斜面の安定性評価法

村田 修\* 上半 文昭\*\*  
 齋藤 秀樹\*\*\* 馬 貴臣#

**Fundamental Study on the Evaluation Method of Mechanical Stability  
 of Rock Blocks by Remote Vibration Measurement**

Osamu MURATA Fumiaki UEHAN  
 Hideki SAITO Guichen MA

Some techniques for rock slope evaluation by means of vibration measurements have been developed. Those techniques apply the vibration characteristics of rock block such as predominant frequency as a risk assessment index of rock block falling. The authors executed some physical model tests and numerical analyses using concrete blocks bonded to the concrete base with different contact conditions, and found that a predominant frequency varied with the stability of the concrete block. We will continue to research for obtaining the quantitative relationship between vibration characteristics and mechanical stability of rock blocks.

キーワード：岩盤斜面，不安定岩塊，安定性評価，非接触計測，Uドップラー

## 1. はじめに

これまで岩盤や浮石の安定性評価は地表踏査による目視観察で行われてきたが、近年、写真測量や物理探査などの非破壊検査手法の適用が試みられるようになった。中でも地震計を設置して岩塊の振動特性を調べる手法は、定量的な安定性評価手法として期待されている。

これらの手法は、定量的な評価手法として有望であるが、危険な急崖斜面上での作業量が多い点が課題である。場合によっては、ロックライミングなどで不安定な岩塊に地震計を設置する必要があり、作業の安全性や効率面の問題があり、相当のコストも発生する。そこで、振動計測による岩盤斜面評価手法の効率化、安全化を目的として、著者らが開発したUドップラー（非接触振動計測システム、図1）を用いた遠隔非接触振動計測技術<sup>1) 2)</sup>の同手法への適用を検討することにした。今回、模型実験、数値解析および現場試験により岩塊の不安定性と振動特性との関係を求める基本的検討を行ったのでここに報告する。

## 2. Uドップラーによる精度確認試験

まず、岩盤斜面の常時微動計測に用いられる地震計（ジオフォン）に代えてUドップラーを用いることができるかどうかを確認するために、岩塊を模擬したコンクリートブロックの常時微動計測実験を実施した。その結果ジオフォンとUドップラーによる計測結果はよく一致しており、両者は同レベルの測定性能を有していることが確認できた<sup>1)</sup>。また、目視観察により不安定であることが確認され、除去が予定されている岩塊を対象として常時微動の現地計測実験を実施した。ジオフォンとUドップラーによる同時計測結果を比較したところ両者はよく一致し、Uドップラーを用いて岩塊の常時微動の卓越周波数を推定できることが確認された<sup>1), 2)</sup>。



図1 Uドップラーの外観概要

\* 構造物技術研究部  
 \*\* 鉄道力学研究部（構造力学）  
 \*\*\* 応用地質 技術研究所  
 # 岐阜大学 社会基盤工学科

特集：構造物技術

3. 岩塊模型の振動計測試験

模型実験はコンクリートブロックを岩塊にみたて、接着剤あるいは石膏を用いてき裂を模擬して、不安定性と振動特性の相関を求めることとした。

3.1 接着剤（DK ボンド）を用いた底面接着および背面接着の実験

岩塊の不安定性と振動特性の関係を求めることにより、落石の危険度を評価する判断指標を得るための基礎的実験を、不安定岩塊を模擬した模型を用いて行うこととした。

図2に示すように、接着材の接着面積を変化させてコンクリートブロックの不安定性を変化させた模型を作成した。これらの振動特性を、図3に示すように、コンクリート台座に設置した地震計および30m離れた位置に設置したUドップラーを用いて模型の常時微動を計測し、振動特性を推定した。

接着材として、DK ボンドを用いたが、接着材の強度が大きく、図2に示す Case-6Q, CASE-3Q のように最も不安定と考えられるケースにおいても他と比べて卓越周波数に大きな変化が見られず、受け台と一体となって振動していると推定された。

そこで、Case-6Qの接着材を前面側からコンクリートドリルによって、順次削除した。接着部の長さが7.5cm, 6.0cm, 5.0cm, 3.0cmのときに振動計測を行ったが、3.0cmよりさらに切除しようとしたところ、接着面が破壊した。計測された卓越周波数を接着部長さに別々に図4に示す。接着部の長さが短く、不安定性が増すほど、卓越周波数が低下する傾向が見られる。このことから、不安定性を評価するのに、振動特性の利用の可能性があることが分かった。

3.2 石膏を用いた底面接着および背面接着の実験

DK ボンドに代えて、接着力の弱いA級石膏を用いて、底面および背面の接着面積を少しずつ変化させた実験を行った。DK ボンドより接着力が弱いことから、きれつが進展していて、残された部分の劣化も進んでいることを模擬していることとなると考えられる。

底面接着の場合の実験結果を図5に示す。

接着剤をDK ボンドにした場合と同様に、接着面積が減少する、すなわち、不安定性の大きいほど卓越周波数は減少する傾向にある。接着剤の長さが8cmのとき接着面が剥離した。

背面接着の場合の実験結果を図6に示す。表中、卓越周波数の欄で（-）マークとなっている箇所は、卓越周波数が観測されなかったところである。

接着部の長さが7cmのときに接着面が剥離した。

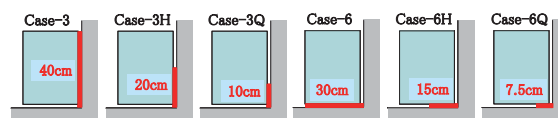


図2 模型実験のケース

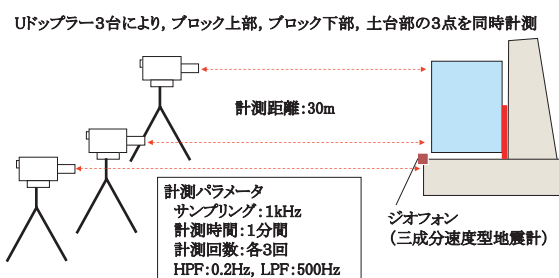


図3 計測状況

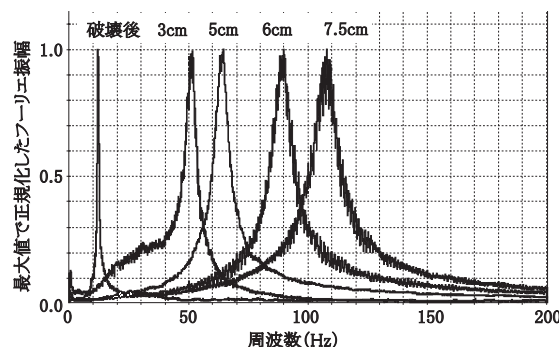


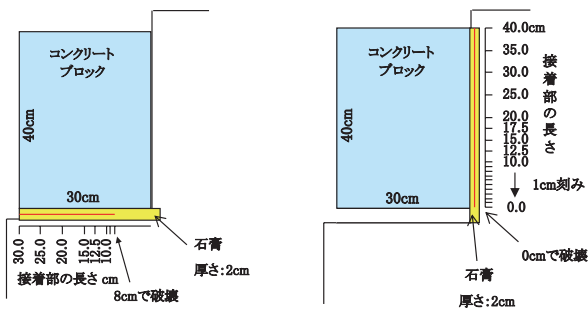
図4 接着部の長さ卓越周波数の関係

この場合も、接着面積が減少する、すなわち、不安定性の大きいほど卓越周波数は減少する傾向にある。

3.3 傾斜面で接着剤なしの実験

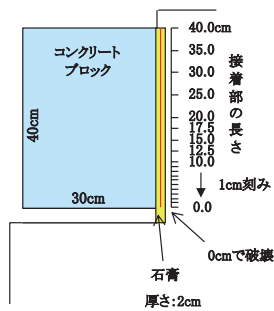
図7に示すように傾斜斜面を設け、滑動および転倒のモードが生じるようにして、接着剤のない場合の実験を行った。

図8に計測結果を示す。傾斜面はできるだけ凹凸のないように仕上げたが、多少の凹凸は残り、ブロックがスムーズに滑動できない状態であった。傾斜角の大きいほど、すなわち、不安定性の大きいほど卓越周波数は低くなる傾向が見られる。事前の実験では、28°の傾斜角ですべり出す結果となったが、凹凸面があるためか傾斜角28°より傾斜させてもすべり出さなかった。



接着部の長さ cm	卓越周波数 Hz
30.0	420
25.0	350
20.0	270
15.0	180
12.5	150
10.0	110
9.0	90
8.0	切断中に 接着面剥離

図5 石膏を底面接着した場合の実験結果



接着部の長さ cm	卓越周波数 Hz
40	-
35	-
30	-
25	-
20	310
17.5	250
15	220
12.5	180
10	130
9	110
8	92
7	切断中に 接着面剥離

図6 石膏を背面接着した場合の実験結果

### 3.4 傾斜面で石膏による接着の実験

傾斜面において、石膏を用いて、底面および背面の接着面積を少しずつ変化させた実験を行った。この実験においては、滑動モードと転倒モードのどちらかが起きる条件で実験を行っていることとなる。実際の落石の現象もこの場合が多いと考えられる。

底面接着の場合の実験結果を図9に示す。傾斜面の角度は32°である。接着剤の長さ10cmのときに剥離している。この場合も不安定性が増すほど、卓越周波数は低下している。

背面接着の場合の実験結果を図10に示す。傾斜面の角度は32°である。接着剤の長さ10cmのときに剥離している。この場合も不安定性が増すほど卓越周波数が低下している。

## 4. 数値解析による安定性の検討

数値解析による検討を、接着剤（DK ボンド）を用いた模型実験に対応させて実施した。また、スケール効果についても検討した。

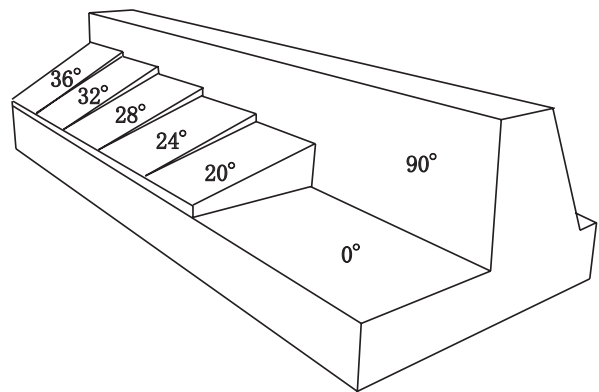


図7 傾斜面模型実験の概要

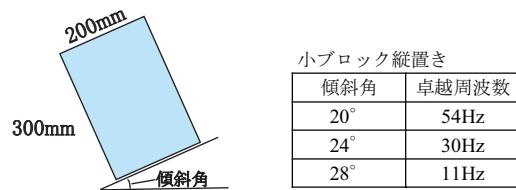


図8 滑動モードの場合の実験結果

小ブロック縦置き	
傾斜角	卓越周波数
20°	54Hz
24°	30Hz
28°	11Hz

### 4.1 数値解析の概要

実施した模型実験に対して、既往開発したDEMソフトによる予備解析および市販ソフトSoilPlusによる本解析を実施した。予備解析では、数値解析のモデル作成手法、入力振動波形を検討し、これを基にして、本解析を実施した。本解析は、6ケースの模型実験及び転倒崩壊直前ケースに対して実施した。さらに、接着剤弾性係数の影響についても検討した。以下に示すケース名は模型実験のケース名と同一である。

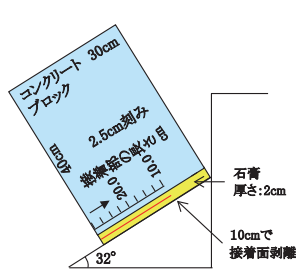
図11に本解析の解析モデルの例（Case-6Q）を示す。図中、左側は実際の模型実験の模型写真であり、右側は解析モデルである。実験では、コンクリート台座は数cm地面に埋め込んだ状態で実験を実施したことから、解析モデルの境界として台座の底部は固定とした。

本解析では、断面方向に対し地盤にサンプル間隔0.001sのホワイトノイズで加振した動的解析を実施した。解析はブロック及び台座を弾性材料とし、接着剤の物性値をコンクリートと同一とし、線形弾性解析で実施した。

### 4.2 数値解析結果

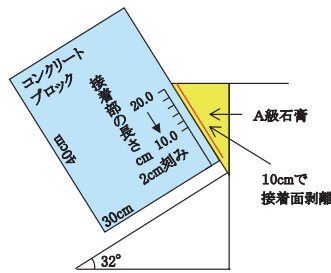
表1に模型実験結果と解析結果を比較した結果を示す。卓越周波数は、背面接着の場合はCase3, 3H, 3Qの順で、底面接着の場合はCase6, 6H, 6Qの順で小さくなり、模型実験と概ね一致する傾向を示す。

特集：構造物技術



接着部の長さ cm	卓越周波数 Hz
30	—
25	360
22.5	320
20	260
17.5	220
15	220
12.5	170
10	切断後に 接着面剥離

図9 傾斜面における底面接着の場合の実験結果



接着部の長さ cm	卓越周波数 Hz
20	180
20	180
18	175
16	165
14	155
12	135
11	120
10	切断後に 接着面剥離

発泡スチロール有り  
発泡スチロール除去

図10 傾斜面における背面接着の場合の実験結果

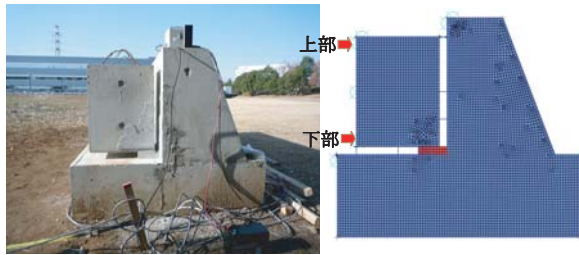


図11 本解析の解析モデル例 (Case6Q)

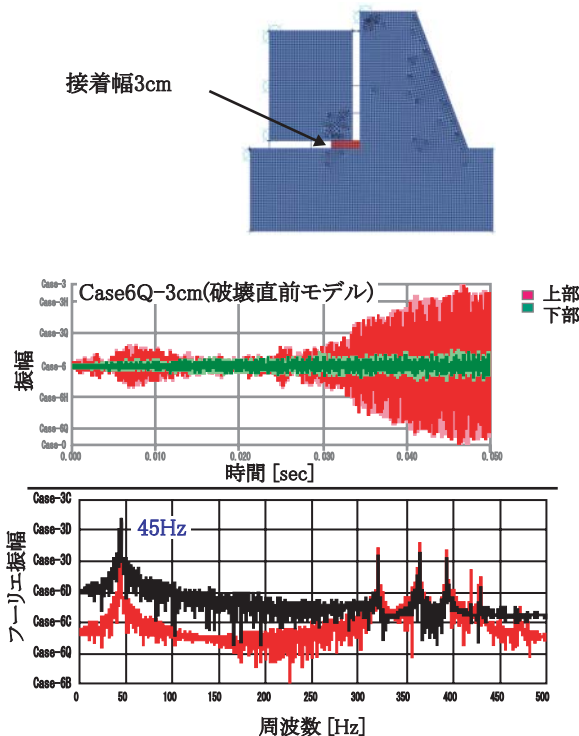


図12 接着長さ3cmの場合の解析結果

表1 模型実験と数値解析による卓越周波数の比較

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

転倒破壊の不安定状態を模擬するため、ブロックの底面接着面積 (Case6Q) をさらに小さくしたケースについても解析を実施した。解析に用いたモデルは、ブロックの底面と台座の接着面積 (幅) は3cmである。図12に示すように、ブロックの卓越周波数はさらに低くなり、45Hzとなった。この値は実際の実験で得られたブロックの卓越周波数約50Hzと概ね一致した。

4.3 スケール効果の検討

模型実験では、寸法30cm×40cm×20cmの比較的小型のものを用いているが、実際の落石では数mのものもある。そこで、数値解析によりスケール効果 (寸法による振動特性の変化) を調べることにした。

解析はCase6Qで接着部の長さ3cm (転倒崩壊直前) の2次元モデルを用い、モデルの寸法を5倍、10倍としたケースを実施した。

数値解析により、当初モデルで得られたブロックの卓越周波数は約45Hzで、5倍モデルの場合で約9.0Hz、10倍モデルの場合は約4.2Hzが得られた。これにより、模型実験のモデルに対して、ブロックの卓越周波数は、ブロックの寸法と逆比例 (1/L) の関係を持つことが確認された。

5. 岩塊模型の安定性の評価

以上示した、模型実験および数値解析により岩盤斜面の安定性の程度と振動特性に関係があることが分かり、特に、卓越周波数との相関が高いことが分かる。また、この相関は、スケールの影響を受ける。

まず、DKボンドで底面接着した模型実験の結果に対して、不安定性の程度を安全率で表わし、卓越周波数との関係を整理することとした。

ブロックの重量をM、接着部の引っ張り抵抗力をTと

する。また、重心とブロック端部との距離を  $L$ 、接着部の長さを  $\ell$ 、接着部前端を支点  $O$  とすると図 13 より、支点  $O$  周りの転倒モーメントおよび抵抗モーメントはそれぞれ、以下のように表わされる。

$$\text{転倒モーメント} = M \cdot (L - \ell) \quad (1)$$

$$\text{抵抗モーメント} = T \cdot \ell / 2 \quad (2)$$

接着部の長さが 3cm のとき、転倒したことから、転倒モーメント = 抵抗モーメントとして、 $L = 15\text{cm}$ 、 $\ell = 3\text{cm}$  とすると  $T = 8M$  となる。

接着部の引っ張り抵抗力は接着部の長さに比例すると考えて、接着部の長さが 5cm、6cm、7.5cm のときのそれぞれの転倒安全率 = 抵抗モーメント / 転倒モーメントを求める。これから、5cm、6cm、7.5cm のときの転倒安全率はそれぞれ 3.3、5.3、9.3 となる。

これと、図 4 より、転倒安全率と卓越周波数の関係が求められ、図 14 のようになる。

この実験条件では、安全率を 3 程度確保するには、卓越振動数が 60 Hz 以上必要ということとなる。このようにして卓越振動数により安定性の程度を評価することの可能性が見出される。

次に、石膏を接着剤とした平坦面での底面接着の実験の結果を同様に安全率と卓越周波数の関係で示すと図 15 となる。接着剤が DK ボンドの場合と比較して同じ安全率で高い卓越周波数となっている。

次に、平坦面で背面を石膏で接着した場合の実験の結果を安全率と卓越周波数の関係で示す。

図 16 から、転倒安全率は、支点  $O$  周りのモーメントより、

$$\text{転倒安全率} = (T \cdot \ell / 2) / (M \cdot L) \quad (3)$$

接着長さ 7cm で剥離したことから、そのときの転倒安全率を 1 とし、 $L = 15\text{cm}$ 、 $\ell = 7\text{cm}$  とすると

$$T = 30/7 M \quad (4)$$

これから、接着部の長さごとに、転倒安全率が計算され、それと図 6 より、転倒安全率と卓越周波数の関係は図 17 となる。

最後に、接着剤なしの場合の傾斜面での実験の結果を安全率と卓越周波数の関係で示す。滑動の安全率を  $\tan$  (傾斜角) の比とし、傾斜角  $28^\circ$  で滑り出したことから、

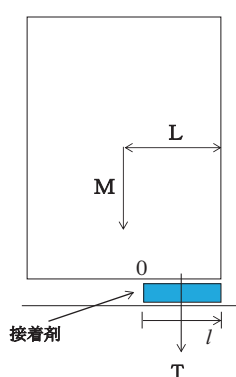


図 13 支点  $O$  回りのモーメント (底面接着)

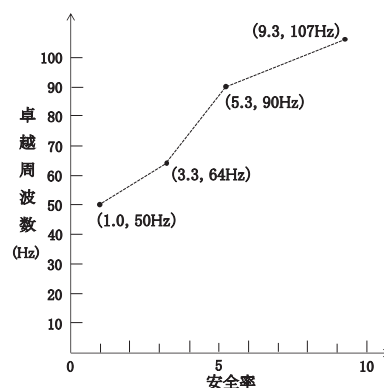


図 14 転倒安全率と卓越周波数の関係 (DK ボンド、底面接着)

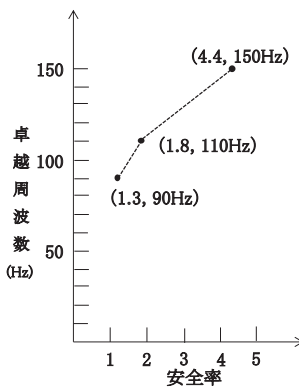


図 15 転倒安全率と卓越周波数の関係 (石膏、底面接着)

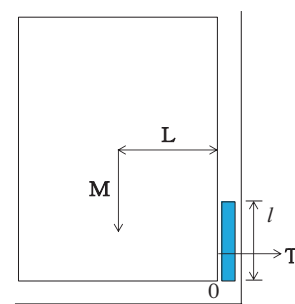


図 16 支点  $O$  回りのモーメント (背面接着)

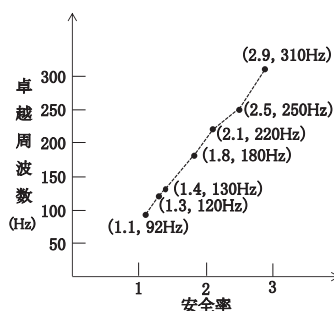


図 17 転倒安全率と卓越周波数の関係 (石膏、背面接着)

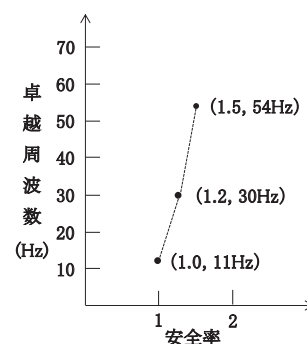


図 18 滑動安全率と卓越周波数の関係

このときを安全率 1 とすると、傾斜角  $24^\circ$  では、滑動の安全率は  $\tan 28^\circ / \tan 24^\circ$  で約 1.20、傾斜角  $20^\circ$  では同様に約 1.46 となる。図 8 から、安全率と卓越周波数の関係は図 18 となる。

以上のように、転倒または滑動の安全率と卓越周波数の関係で整理してみたが、安全率が小さいほど、卓越周波数は低くなると言えるが、同一の安全率でも、卓越周波数にはばらつきが見られ、安全性の指標を統一的な卓

特集：構造物技術

卓越周波数で表現することはできなかった。ただし、この程度の模型の寸法においては、概ね100～150 Hz程度以下の卓越周波数では不安定性が高いと言える。

今後は、模型実験を補完するため、数値解析を数多く実施し、その結果をもとに、安定性を評価する卓越周波数の絞り込みを行っていきたいと考えている。

6. 現場計測試験

模型実験で得られた安定性の評価に対して、現場での実証試験を行った。

播但線長谷駅付近の斜面に存在する岩盤ブロックを対象とした。JR西日本が、既往技術（地震計を岩塊に設置する方法）によって、不安定岩塊の抽出を実施した箇所であり、対象とする岩塊が不安定化していることがわかっているものである。

実験は、Uドップラーによる遠隔非接触計測とあわせてジオフォンを設置しての計測も同時に行い、両者の比較データを取得した。常時微動の計測も行ったが、実験現場は静かで暗振動が少なかったため、岩盤斜面近傍で研究員が足踏みすることによって振動を起し、岩塊に振動を励起することとした。

図19に実験現場の計測対象岩塊を示す。図20には、振動計測によって求めた岩塊の加速度フーリエスペクトルを示す。

これによれば、ジオフォンとUドップラーの計測結果がほぼ同様であること、また、卓越周波数が30Hz程度と低い値であることが分かる。

今後、現場実証試験は、既往の斜面安定性評価手法によって、判定がなされている岩塊を対象として実施し、結果の比較から本手法の適用性を判断する。条件の異なる多くのケースで実験する必要があるため、今後も候補地を選定し、実験を実施していく必要がある。

7. まとめ及び今後の課題

Uドップラーを用いて、岩塊を遠隔非接触で振動計測をして、その不安定性を評価するという画期的な手法の開発を進めている。

Uドップラーにより遠隔非接触で計測される値のうち、卓越周波数に着目して、岩塊の安定性を評価することを試みた。実施した模型実験から、安全率と卓越周波数の関係を整理したが、安全率が小さいほど、卓越周波数は低くなる傾向はつかめたが、定量的な関係を求めるには



図19 現場実証試験における計測対象岩塊

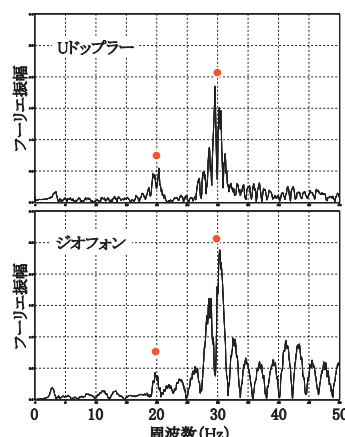


図20 岩塊の加速度フーリエスペクトル解析結果（上下動成分）

至っていない。現状では、安定性と不安定性の境界の閾値は多少幅を持ったものとせざるを得ない。今後、数値解析を数多く実施し、模型実験を補完するとともに、現場計測のデータを蓄積することにより、閾値の精度をより高めていくことを考えている。

また、卓越周波数を閾値とする場合、スケールの効果を考慮する必要があり、今後、スケールの効果についてより詳細に検討していく予定である。

なお、本研究は、鉄道・運輸機構の「運輸分野における基礎的研究推進制度」の公募型研究によるものである。

文献

- 1) 上半文昭, 村田修, 斎藤秀樹, 大塚康範: 岩盤斜面評価用非接触振動計測システムに関する基礎的検討, 鉄道総研報告, Vol.24, No.4, pp.5-10, 2010.4
- 2) 村田修, 上半文昭, 小島謙一, 斎藤秀樹: 遠隔非接触振動計測による岩盤斜面評価法, 地盤工学会誌, Vol.58, No.8, pp.30-33, 2010.8