

打音測定法の岩塊の安定性評価への 適用性に関する解析的検討

蒲原 章裕* 川越 健* 太田 岳洋**
石原 朋和* 浦越 拓野* 横山 秀史*

An Analytical Study on Applicability of
a Hammering Measurement Method to Rock Stability Evaluation

Akihiro KAMOHARA Takeshi KAWAGOE Takehiro OHTA
Tomokazu ISHIHARA Takuya URAKOSHI Hidehumi YOKOYAMA

We analyzed vibration of concrete blocks which simulate rocks on natural slopes with the finite element method. We compared the result of the finite element method with experimental results in order to check the validity of the analysis model. And, we examined the result of the modal analysis in order to study applicability of the hammering measurement method to the stability evaluation of rock blocks. Velocity spectra that we got using the finite element method were almost the same as the sound spectra in the experiment. As a result, the validity of the analysis model was confirmed. By the modal analysis, it was clarified that we could figure out the difference of stability of rock blocks using the hammering measurement method.

キーワード：剥落型落石，岩塊，安定性評価，有限要素法，打音測定

1. はじめに

落石は地形，地質，気象条件などの多くの要因が複雑に関与するため，その発生箇所や発生時期を予測することが困難な災害である。鉄道沿線斜面には落石の発生源となる露岩が多数認められ，毎年のように落石が発生している。落石災害を防止するために，現状では検査者が斜面管理図などに記載された情報をもとに目視などによる定期的な検査を行い，その結果に応じた対策が実施されている。主な検査の項目は専門的で，定性的なものであるため，検査結果は検査者の経験や専門性に依存することとなる。そのため，客観的にかつ検査者の経験，専門性に依存しない検査結果を得る方法が求められている。

落石は岩盤斜面から剥離した岩塊が落下する剥落型と斜面上に点在する転石が転がり落ちる転落型の2つに大きく分けられる¹⁾が，本研究では剥落型落石を対象に安定性評価手法について検討した。剥落型落石の安定性評価手法の一つに打音検査がある²⁾。この手法は，不安定な岩塊ほど打撃時に鈍い音を発するなどの経験に基づいて

おり，ハンマーなどによる打撃音を基にした定性的な評価手法である。著者らは，ハンマーなどの打撃装置で対象物を打撃し，発生音を収録・分析し，対象物の安定性を評価する方法を打音測定法とし，打音測定法による岩塊の定量的な安定性評価の可能性を検討してきた^{3) 4) 5)}。

過去に実施した一連の研究では，剥離型落石の発生源となる岩盤斜面を模擬した供試体を対象に，総研式打音検査装置⁶⁾を用いて打音測定法により岩塊の安定性の定量的な評価の可能性を検討した^{3) 4) 5)}。その結果，打撃した時の岩塊の発する音の周波数や大きさと岩塊の安定性には強い関係があることがわかった。しかしながら，打撃時の発生音がどのような振動性状に対応しているのかは明らかでなかった。

本報告では，まず，有限要素法による過渡応答解析を行い，実験で得られた音圧スペクトルと過渡応答解析から得られる速度スペクトルの形状が概ね一致することから，解析モデルが妥当であることを確認した。その後，モード解析を行い，モード形状から実験時の供試体の振動状況について考察し，発生音と岩塊の振動との対応を検討した。これらの解析結果をもとに，打音測定法の岩塊の定量的な安定性評価への適用性を検討した。

* 防災技術研究部 地質研究室

** 防災技術研究部

2. 剥離型落石を模擬した供試体の打音測定実験

2.1 実験の概要^{3) 4) 5)}

剥離型落石の発生源となる岩盤斜面と岩塊を模擬した供試体の概観図を図1に示す。供試体は岩塊を模擬した上部ブロックと岩盤を模擬した下部ブロックからなり、上部ブロックと下部ブロックの間に岩塊の一部が岩盤に付着することを模擬するためにくびれた部分を設けた。付着面積の異なる供試体をモルタルで6つ作製し、上部ブロックを安定性の異なる岩塊と考え、打音測定実験を行った。なお、下部ブロックの大きさは水平方向の幅を1.5倍程度に大きくしても、結果に大きな変化は見られないことを事前に行った有限要素法による解析により確認している⁵⁾。

作製した供試体の物性値を表1に示す。密度、縦波伝播速度、横波伝播速度は計測により求めた。動ポアソン比、動せん断弾性係数、動縦弾性係数は縦波伝播速度、横波伝播速度、密度から算出した⁷⁾。

作製した供試体の付着面積の幅と上部ブロックの底面の付着の割合を表2に示す。供試体 No.1 は岩塊が岩盤に完全に付着している状態を模擬するため、くびれを設けていない。供試体 No.2 ~ No.5 は岩塊と岩盤の付着面積を変化させるために、くびれた部分の幅 a (図1) の値を 350 ~ 80mm の間で変化させた。供試体 No.6 は岩塊が岩盤から完全に浮いた状態を模擬するため、上部ブロックを下部ブロック上に重ねただけの状態とした。供試体 No.1 ~ No.5 は一回で打設した。

打音測定実験では、総研式打音検査装置⁶⁾を用いて供試体を打撃し、供試体が発した音を打撃箇所から 80mm 程度離れた場所に設置したフード付マイクにより収録した。サンプリング周波数を 50kHz、収録するデータ点数を 2048 点とした。打撃箇所は上部ブロックの上面に 10 箇所、上部ブロックの側面に 14 箇所を設定した (図2)。

その後、測定した波形のフーリエ変換を行い、フーリエ振幅が最大となる周波数 (以下、卓越周波数と呼ぶ。) とその振幅 (以下、卓越周波数のフーリエ振幅と呼ぶ。) に着目し、付着面積との関係を整理した。

2.2 実験結果^{3) 4) 5)}

供試体ごとの卓越周波数と卓越周波数のフーリエ振幅の全打撃箇所の平均値を、上部ブロックと下部ブロックの間にくびれがない供試体 No.1 の卓越周波数と卓越周波数のフーリエ振幅により正規化した結果を図3に示す。図3から付着面積が小さくなるほど、卓越周波数が低くなり、卓越周波数のフーリエ振幅が大きくなる傾向があることがわかる。代表的な打撃箇所の結果として、上部ブロック中央 (T-1) と端部 (T-4)、側面中央 (S-3) を打撃した際の結果に着目し、図4に付着面積と卓越周波数の関係を、図5に付着面積と卓越周波数のフーリ

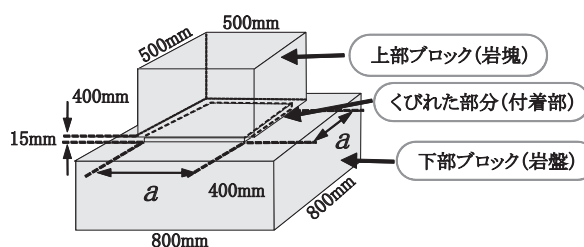


図1 剥離型落石を模擬した供試体の概観図

表1 供試体の物性値

物性値	単位	値	備考
密度 ρ	kg/m ³	1980	試験値
縦波伝播速度 v_p	m/s	4060	試験値
横波伝播速度 v_s	m/s	2380	試験値
動ポアソン比 ν	-	0.238	計算値
動せん断弾性係数 G_d	MN/m ²	1.12×10^4	計算値
動縦弾性係数 E_d	MN/m ²	2.77×10^4	計算値

表2 付着面積の寸法と割合

供試体 No.	付着部分の幅 a (mm)	付着面積比率 (%)	上部と下部ブロックの関係
1	500	100	完全に一体化
2	350	49	一部で接合
3	250	25	
4	170	11.6	
5	80	2.6	完全に分離
6	0	0	

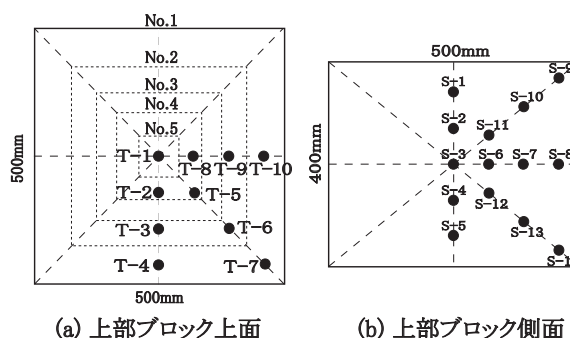


図2 打撃箇所

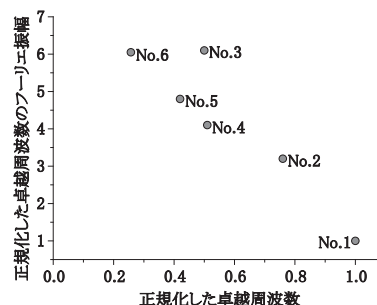


図3 供試体の打音測定結果

エ振幅の関係を示す。図4から、ばらつきはあるが、付着面積が小さくなるほど卓越周波数が低くなる傾向があることがわかる。また、図5から付着面積が小さいほど卓越周波数のフーリエ振幅が大きくなる傾向が認められる。これらのことから、本測定手法で求められる卓越周

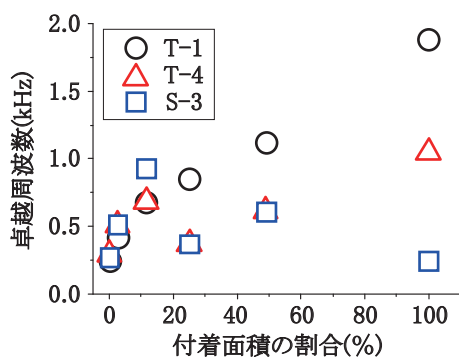


図4 付着面積と卓越周波数の関係

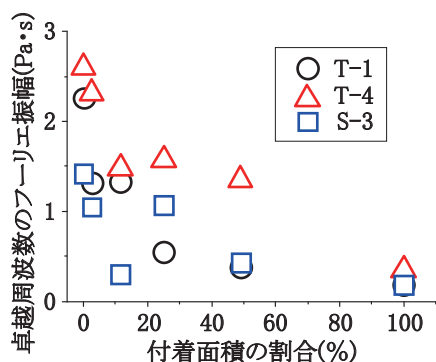


図5 付着面積と卓越周波数のフーリエ振幅の関係

波数やフーリエ振幅は上部ブロックと下部ブロックの付着面積と強い関係があり、これらの指標が岩塊の安定性と関係することが考えられる。

3. 有限要素法による解析的検討

打撃時の発生音と振動の対応を検討するために、NX Nastran を用いた有限要素法による解析を行った。まず解析モデルの妥当性を確認するために、過渡応答解析を実施し、音圧スペクトルと関係性の強い供試体表面の速度スペクトル⁸⁾を求め、得られた速度波形をフーリエ変換し、実験で得られた音圧スペクトルと比較した。その後、実験時の供試体の振動状況を考察するために、モード解析で得られたモード形状を確認した。

3.1 解析の概要

供試体 No.1 ~ No.5 について解析モデルを作成した。図6に供試体の解析モデルの例(供試体 No.2)を示す。材料物性値は、実験に用いた模擬岩盤の物性値(表1)をもとに、密度を 1.98t/m^3 、縦弾性係数を $2.5 \times 10^4\text{MN/m}^2$ 、ポアソン比を 0.238 と設定した。また、過渡応答解析においては、ソルバーの仕様上、等価粘性減衰(減衰係数と周波数の関係は原点を通る一次関数となる)を用いた⁹⁾。打音測定実験で得られた音圧スペクトルと振動解析で得られる速度スペクトルが $1 \sim 8\text{kHz}$ 程度の周波数で一致するような値として、 10kHz の周波

数では減衰係数が 0.02 である等価粘性減衰を設定した。また、解析モデルでは、高さ方向(z方向)には応力急変部分であるくびれの部分(上部ブロックと下部ブロックの間)を細かく4分割(3.75mm 間隔で分割)し、それ以外の場所は 25mm でメッシュ分割することを基本とした。水平方向は、下部ブロックとくびれの部分は 20mm でメッシュ分割し、上部ブロックは 20mm ずつ分割し、端部の 50mm ずつを 25mm で分割した。また、実験時の供試体の設置状況を模擬するため、供試体モデルの底面は各節点をいずれの方向に対しても完全拘束点とばね要素で接続した。このばね定数と減衰定数は複数の値で試算を行い、最も実測を再現できる値であるばね定数 1.87MN/m 、減衰定数 0.3 とした。

また、過渡応答解析における加振は実験時の打撃点に対して、図7に示す継続時間 $80\mu\text{s}$ の三角パルスを入力し、マイク設置位置に対応する節点の速度応答を出力した。なお、継続時間は打撃装置にひずみゲージを接着して加振させた際のひずみ波形をもとに決定した。

3.2 解析結果

3.2.1 過渡応答解析結果

解析モデルの妥当性を確認するために、過渡応答解析を実施した。供試体 No.1 の T-1 を打撃した場合の打撃箇所から約 80mm 離れた位置の速度波形を、実験で得られた音圧波形とあわせて図8に示す。図9に供試体 No.1 の T-1, T-4, S-3 を打撃した場合の打撃箇所から 80mm 離れた位置の速度スペクトルおよび、実験で得られた音圧スペクトルを示す。なお、図8, 図9ではそれぞれの測定における最大値を1として正規化した。図9より、いずれの打撃箇所でも主要なピークの周波数が一致するなど、スペクトルの基本的な特徴を再現していることを確認できる。この結果は、供試体 No.2 ~ No.5 でも同様である。以上のことから、解析モデルが妥当であると考えた。

3.2.2 モード形状による振動状況に対する考察

実験時の供試体の振動状況を考察するために、有限要素法によるモード解析を実施した。過渡応答解析で得られた速度スペクトルを図10に、モード解析で確認できるモード形状を図11にそれぞれ示す。速度スペクトルは打撃箇所から 80mm 離れた位置のスペクトルである。本節では、図10を基に図11の結果に対して考察を加える。

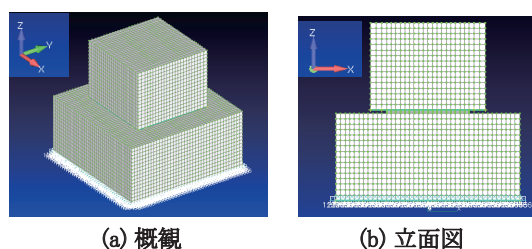


図6 供試体の解析モデルの例(供試体 No.2)

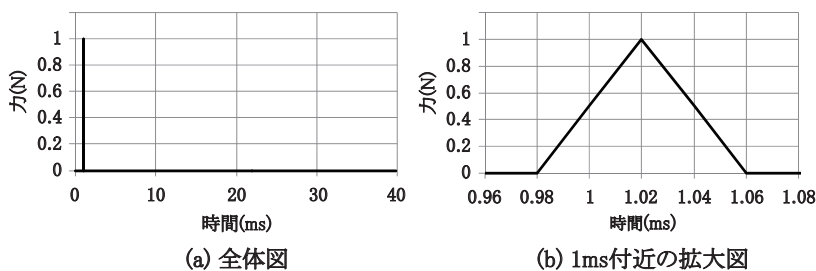


図7 入力波形

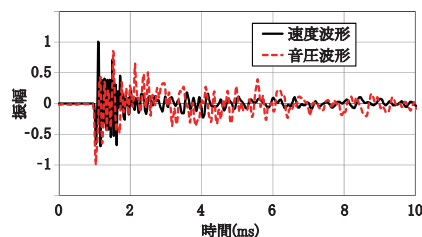


図8 解析で得られた速度波形の例 (供試体 No.1)

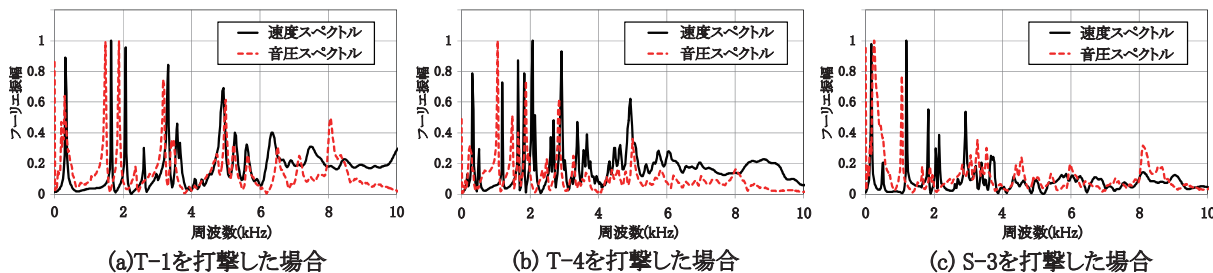


図9 解析で得られた速度スペクトルの例 (供試体 No.1)

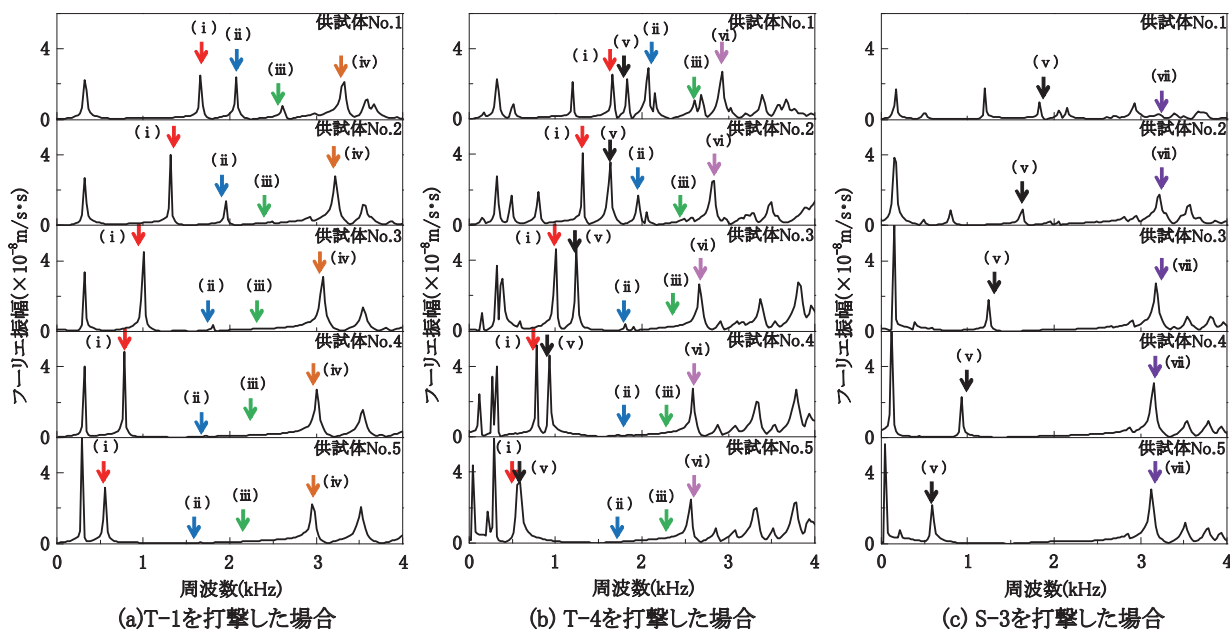
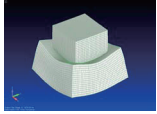
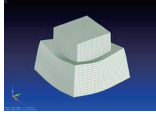
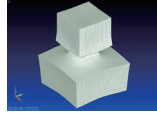
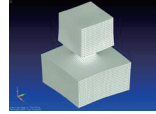
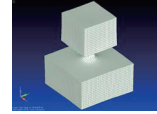
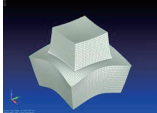
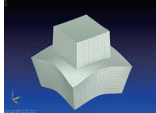
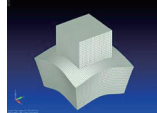
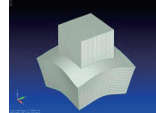
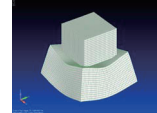
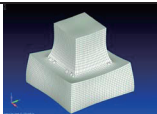
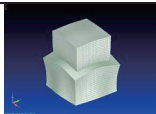
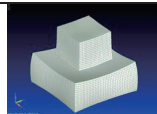
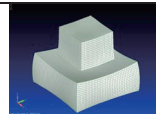
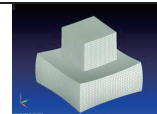
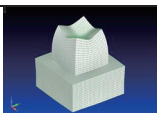
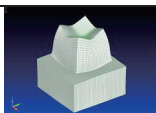
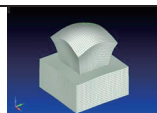
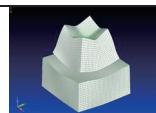
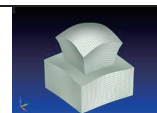


図10 速度スペクトル

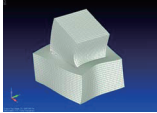
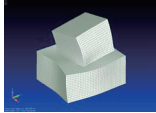
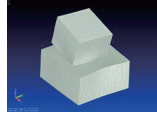
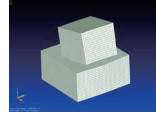
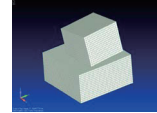
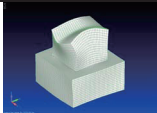
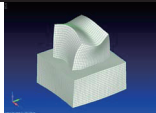
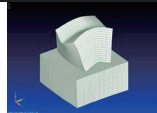
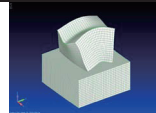
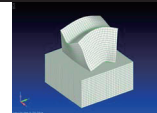
まず、各供試体の上面から見た時の中心である T-1 を打撃した際の振動状況について考察する。図 10 (a) に示すスペクトルを概観すると、いずれの供試体でも 0.3kHz に卓越する周波数のピークが認められる。次に高い周波数のピークとして、図中のピーク (i) のように供試体 No.1 で 1.6kHz、供試体 No.2 で 1.4kHz といったものがある。各供試体で 0.3kHz 付近に存在するピークは打撃の衝撃により供試体全体が上下に振動するモードである。ピーク (i) に着目すると、上部ブロックと下部ブロックの付着面積が小さくなるとともに周波数が低くなり、速度は大きくなる傾向が認められる。この時のモード形状 (図 11 (a)) から、くびれに相当する部分がばねのように働き、上部ブロックが上下に振動して

いることがわかる。また、この時のモード形状では、上部ブロックと下部ブロックの付着面積が小さいほど、付着部分のばね定数が小さくなり、その結果ピークが生じる周波数が低くなると考えられる。

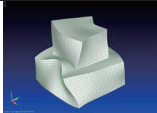
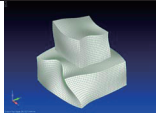
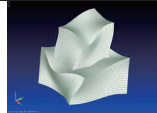
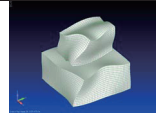
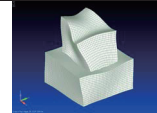
ピーク (ii) や (iii) に着目すると、上部ブロックと下部ブロックの付着面積が小さくなるとともに、速度が小さくなっている。図 11 (a) より、これらのモードは下部ブロックの曲げ等が主体の振動と考えられる。くびれ部の面積が大きい供試体 No.1 と供試体 No.2 では、下部ブロックに変形が生じやすい。一方、くびれ部の面積が小さい供試体 No.3 ~ No.5 では、下部ブロックの変形が小さいなど、くびれ部の面積で振動性状が変わることが確かめられた。

	供試体No.1	供試体No.2	供試体No.3	供試体No.4	供試体No.5
(i)の矢印で示した箇所	 1.6kHz	 1.3kHz	 1.0kHz	 0.8kHz	 0.6kHz
(ii)の矢印で示した箇所	 2.1kHz	 2.0kHz	 1.8kHz	 1.7kHz	 1.7kHz
(iii)の矢印で示した箇所	 2.7kHz	 2.5kHz	 2.5kHz	 2.5kHz	 2.5kHz
(iv)の矢印で示した箇所	 3.4kHz	 3.3kHz	 3.1kHz	 3.1kHz	 3.0kHz

(a) T-1を打撃した場合

	供試体No.1	供試体No.2	供試体No.3	供試体No.4	供試体No.5
(v)の矢印で示した箇所	 1.8kHz	 1.6kHz	 1.2kHz	 0.9kHz	 0.6kHz
(vi)の矢印で示した箇所	 3kHz	 2.9kHz	 2.7kHz	 2.6kHz	 2.6kHz

(b) T-4を打撃した場合

	供試体No.1	供試体No.2	供試体No.3	供試体No.4	供試体No.5
(vii)の矢印で示した箇所	 3.3kHz	 3.2kHz	 3.2kHz	 3.2kHz	 3.1kHz

(c) S-3を打撃した場合

図 11 モード形状

ピーク (iv) の矢印で示すピークに着目すると、付着面積の大きさによらず、速度の大きさは一定であり、上部ブロックと下部ブロックの付着面積によらず速度が一定となるモード形状があることがわかる。この時のモード形状は上部ブロックの曲げ振動によるものと考えられる。

次に、各供試体の上部ブロックの上端部である T-4 を打撃した際の振動状況について考察する。図 10 (b) に示すスペクトルを概観すると、T-1 を打撃した時の結果と比べるとピークの数が増えており、振動が複雑になっていることがわかる。ピーク (i) ~ (iii) は T-1 を打撃した際にも認められたピークであり、T-1 を打撃していた時にも発生していたピークが T-4 打撃時にも複数生じることがわかる。ここでは、T-4 を打撃した際に

特徴的に発生するピークに着目して考察する。ピーク (v) や (vi) は、モード形状から供試体を偏心加振したことにより発生する振動であることがわかる (図 11 (b))。また、ピーク (v) は上部ブロックと下部ブロックの付着面積が小さくなるとともに、周波数が低くなり、速度は大きくなる傾向が確認できる。ピーク (vi) は上部ブロックと下部ブロックの付着面積が小さくなるとともに、周波数は低くなるものの、振幅はあまり変化しない。この時の振動は上部ブロックの曲げ振動によるものと考えられる。

最後に、各供試体の上部ブロックの側面中央 (S-3) を打撃した際の振動状況について考察する。図 10 (c) で示すスペクトルを概観すると、図中の (v) の矢印で

特集：防災技術

示すピークのように、T-4を打撃した時と共通のピークがあることがわかる。S-3を打撃した時に特徴的に発生するピークとしては、ピーク(vii)がある。このピークは上部ブロックと下部ブロックの付着面積が小さくなるとともに速度は大きくなるが、周波数はあまり変化しない。図11(c)から、このモードは上部ブロックが大きく水平方向に振動するモードであり、付着面積の減少とともに振動が生じやすくなったためと考えられる。また、供試体No.1では、ピーク(vii)よりやや低い2.9kHz付近により大きなピークがあり、実際に打音測定を行った際にはピーク(vii)よりも2.9kHz付近のピークがより顕著に現れると考えられる。このモード形状は、前述したピーク(ii)やピーク(iii)と同様に下部ブロックの曲げ等が主体の振動であるため、上部ブロックと下部ブロックの付着面積が大きい場合に顕著に現れたと考えられる。

以上の考察から、上部ブロックと下部ブロックの付着面積の違いを顕著に表した速度スペクトルのピークとして、ピーク(i)、(ii)、(v)、(vii)があり、そのうち3つのピーク((i)上部ブロックの上下振動、(ii)下部ブロックの曲げ等の振動、(v)偏心加振時の上部ブロックの振動)は2kHz以下であった。これらのピークとなる周波数はそれぞれのモード形状に対応しており、これらのピークは岩塊の安定性の違いを反映したモードに対応していることがわかった。また、岩塊の安定性の違いによりピークとなる周波数や速度がほとんど変わらないモード形状があることがわかった。

4. 適用性の評価

本章では、有限要素法による振動解析の結果をもとに打音測定法の岩塊の安定性評価への適用性の評価を行う。

前章で示したモード形状に着目する。特定のモード形状は、付着面積が小さくなるとともに周波数が低くなり、かつ速度が大きくなる傾向があることから、打音測定法でとらえていた振動の変化は、特定のモード形状による卓越周波数や卓越周波数のフーリエ振幅の変化であると考えられる。すなわち、打音測定法は岩塊の安定性の違いによる振動の違いをとらえることができおり、打音測定法は岩塊の安定性評価に適用可能である。

また、有限要素法による解析から、付着面積の違いによる速度や周波数があまり変化しないモード形状があることがわかった。このモード形状における速度や周波数は安定性の評価の対象から除くことで、岩塊の安定性評価の精度があがると考えられる。

さらに、打撃箇所によりモード形状による卓越周波数や卓越周波数のフーリエ振幅の変化の見やすさが異なっていたので、複数の打撃箇所の結果を総合的に判断することで評価の精度向上につながると考えられる。

5. まとめ

安定性の異なる剥落型落石の発生源を模擬した供試体について有限要素法による解析を行い、既報の打音測定実験結果と比較することで打音測定法の適用性の検討を行った。有限要素法による解析から以下のことがわかった。

- (1) 有限要素法による過渡応答解析で得られた速度スペクトルと打音測定実験で得られた音圧スペクトルの形状が一致していたことから、有限要素法で用いる解析モデルが妥当であることを確認できた。
- (2) モード形状を確認することで、付着面積の減少にもなって発生しなくなるピークのモード形状や、付着面積の減少にもなって速度が大きくなるモード形状を確認することができた。打音測定法は岩塊の安定性による振動の違いを把握することができるため、打音測定法を用いて岩塊の安定性を評価することが可能なことが検証できた。
- (3) 岩塊の安定性の違いを反映したモードに対応している速度スペクトルのピークは主に2kHz以下にあることがわかった。
- (4) 打撃箇所によっては付着面積の違いにより速度や周波数のピークがほとんど変化しないモード形状があることがわかった。このモード形状は打音測定法の安定性評価の対象から除くことで岩塊の安定性評価の精度があがると考えられる。

文 献

- 1) 鉄道総合技術研究所：落石対策技術マニュアル，154p，1999
- 2) 田中治雄：土木技術者のための地質学入門，山海堂，1964
- 3) 川越健，石原朋和，浦越拓野，太田岳洋：岩盤斜面における岩塊の安定性に関する評価手法，鉄道総研報告，Vol.25，No.7，pp.31-36，2011
- 4) 石原朋和，太田岳洋，川越健，浦越拓野，蒲原章裕：打音測定による岩盤斜面中の岩塊の安定性評価手法に関する検討，第13回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.73-77，2013
- 5) 蒲原章裕，川越健，太田岳洋，石原朋和，浦越拓野，横山秀史：岩塊の打音測定に関する実験と振動解析，第13回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.811-816，2013
- 6) 榎本秀明，稲川敏春，横山秀史：トンネル覆工コンクリートを対象とした打音検査装置の最適仕様の検討，土木学会論文集 No.784/VI-66，pp.87-97，2005
- 7) (社)地盤工学会：地盤工学ハンドブック，pp.217-218，1999
- 8) 株式会社エヌ・ティー・エス：現場実務者と設計者のための実用 騒音・振動制御ハンドブック，pp.5-6，2000
- 9) 株式会社エヌ・エス・ティ：Femap with NX Nastran ユーザーズガイド，減衰について，2010