打音測定法による岩塊の安定性評価の検討

蒲原 章裕¹・川越 健²・太田 岳洋³・
横山 秀史⁴・石原 朋和⁵・浦越 拓野⁶

¹正会員 東京都交通局 建設工務部 (〒175-0082 東京都板橋区高島平9-1-1)
(前) 公益財団法人鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: Akihiro_Kamohara@member.metro.tokyo.jp

²正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: kawagoe@rtri.or.jp

³正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: ohta@rtri.or.jp

⁴正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: yoko@rtri.or.jp

⁵正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: ishihara@rtri.or.jp

⁶非会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: urakoshi@rtri.or.jp

剥離型落石の発生源となる岩盤斜面内の岩塊の安定性を打音測定で評価することを目的に、岩盤斜面を模擬した供試体に対して打音測定実験を再現する有限要素モデルを作成した。実験で得た音圧スペクトルと過渡応答解析で得た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。次に、モード解析を行い、実験時の供試体の振動について考察した。その結果、打音測定法は岩塊の安定性にかかわる振動をとらえており、本手法により岩塊の安定性を定量的に評価できることを示した。さらに、大きさやヤング係数の異なる岩盤斜面に対して過渡応答解析を行うことで、岩盤斜面の大きさの違いが打音測定法に与える影響について検討した。最後に、現地での打音測定を行い、打音測定法が岩塊の安定性評価に適用できることを確認した。

Key Words : rockfall, hammering test, FEM, rock slope stability

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して発生する。そのため、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あり、毎年のように落石が発生している。検査者が斜面管理図などに記載された情報や目視などにより、岩盤斜面内の岩塊の落石発生の可能性を岩塊の安定性として評価し、検査の結果に応じた落石災害防止のための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⁾。転落型落石では転石の斜面表層土中への根入深さが安定性に寄与していると考えられていることから、地下レーダー探査や弾性波探査による根入れ深さ測定の方法とそれに基づいた安定性評価法が提案されている^{2),3)}。一方で、剥離型落石については、不安定岩塊の振動を岩塊に貼り付けたセンサー(例えば⁴⁾)やレーダー反射波のドップラー効果を利用した方法⁵⁾などが研究、実用化されている。しかし、これらは不安定岩塊が特定された場合のモニタリング的な使用方法であり、日常実施されている検査で使用されているハンマー打撃による方法の定量化についてはあまり提案されていない。

本研究では剥落型落石を対象に一般的な斜面の検査時

において不安定岩塊を抽出するための岩塊の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⁶⁾。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た定性的な評価手法である。著者らは、打音検査を定量化した検査法として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^{7,8,9)}。

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¹⁰⁾を用いた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^{7,8,9)}。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や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ということや、岩塊の大きさや物性に対する振動特性に対する知見は明らかでなかった。

本論文のフローチャート図を図-1に示す。本論文では、まず過去に岩塊の安定性評価の確立のために行った供試体実験^{7,8,9)}について簡単に記述した。次に、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。さらに、岩塊の大きさや物性が異なる場合の振動特性について検討した。最後に、実際の岩盤斜面で打音測定法による安定性評価を行い、実際の岩塊の安定性評価の可能性を検討した。これらの解析結果をもとに、打音測定法の岩塊の安定性評価への適用性を検討した。

2. 剥離型落石を模擬した供試体の打音測定実験

本章では、著者らがこれまで打音測定による岩塊の安定性評価の確立のために行った供試体実験^{7,8,9)}について、簡単に記述する。

図-1 本論文のフローチャート図

(1) 実験の概要^{7,8,9)}

剥落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-2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。上部ブロックの大きさは鉄道における落石災害事例の平均的な岩塊な大きさとした。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。

作製した供試体の付着部分の幅と上部ブロックの底面の付着の割合を表-1に示す。供試体 No.1 は岩塊が岩盤に完全に付着しており、新鮮で割れ目を含まない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-2) 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。No.6 を除く供試体は上下のブロックを専用の型枠を用いて1回の打設で作製し、くびれた部分に作製時の分離が形成されないようにした。ただし、No.5 については、No.4 のサイズを2個作製し、その内1個を所定の寸法まで、のこぎりなどによってくびれた部分を削り落として作製した。なお、実験は供試体の損傷を避けるために、それぞれ打設した箇所で行った。

作製した供試体の物性値を表-2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¹¹⁾。

図-2 剥落型落石を模擬した供試体の概観図

表-1 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	

写真-1 に収録時の状況を示す。打音測定実験では、500mm 四方程度の大きさにエネルギーを与えることができる総研式打音検査装置¹⁰⁾を用いて供試体の一点を打撃し、供試体が発した音を打撃した点と同一の平面上の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。収録は5回実施し、収録波形の算術平均を行い、平均化した波形を解析に用いた。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7箇所(T-1~T-7)、上部ブロックの側面に14箇所(S-1~S-14)を設定した(図-3)。

その後、測定した発生音の波形をフーリエ変換し、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。

さらに、供試体の底面を地表面に対して傾けて実験を行うことで、岩塊の付着面の傾斜角度による打音測定の卓越周波数や卓越周波数のフーリエ振幅の違いを検討した。実験では、供試体No.4を対象に傾斜角を0°~90°まで9パターンの傾斜で計測を行った。

(2) 実験結果

a) 岩塊の付着面積と打音の関係

各供試体の各打撃箇所を打撃した時に得られる卓越周波数の一覧を表-3に示す。表-3に示す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-4に示す。ここで、正規化とは各供試体の卓越周波数と卓越周波数のフーリエ振幅を供試体No.1の卓越周波数と卓越周波数のフーリエ振幅で除

表-2 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

写真-1 収録時の状況

図-4 供試体の打音測定結果

算することである。図-4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-5に付着面積と卓越周波数の関係を、図-6に付着面積と卓越周波数のフーリエ振幅の関係を示す。図-5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-6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。

図-3 打撃箇所

表-3 卓越周波数の一覧

打撃箇所	打撃した供試体No. (単位はkHz)						
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	
頂面	T-1	1.88	1.12	0.85	0.68	0.42	0.24
	T-2	1.88	1.12	0.85	0.68	0.42	0.24
	T-3	1.88	0.61	0.85	0.68	0.42	0.24
	T-4	1.05	0.61	0.37	0.68	0.51	0.29
	T-5	1.88	1.12	0.85	0.68	0.42	0.24
	T-6	1.88	0.61	0.37	0.68	0.51	0.32
	T-7	2.3	0.61	0.37	0.68	0.51	0.32
側面	S-1	1.05	0.61	0.37	0.22	0.34	0.29
	S-2	1.05	0.61	0.37	0.22	0.51	0.29
	S-3	0.24	0.61	0.37	0.93	0.51	0.27
	S-4	0.27	1.4	1.1	0.93	0.51	0.29
	S-5	0.27	1.4	1.1	0.93	0.51	0.29
	S-6	1.07	0.73	0.37	0.22	0.51	0.27
	S-7	1.1	0.73	0.44	0.27	0.51	0.27
	S-8	1.09	0.73	0.44	0.27	0.54	0.29
	S-9	1.09	0.61	0.37	0.27	0.24	0.29
	S-10	1.05	0.61	0.37	0.27	0.24	0.29
	S-11	1.05	0.61	0.37	0.22	0.51	0.29
	S-12	0.27	1.4	0.37	0.93	0.51	0.29
	S-13	0.24	0.73	0.44	0.93	0.51	0.29
	S-14	0.24	0.73	0.44	0.27	0.51	0.27

図-5 付着面積と卓越周波数の関係

図-6 付着面積と卓越周波数のフーリエ振幅の関係

写真-2 傾斜時の実験状況

図-7 傾斜角度の違いによる比較 (供試体 No.4, T-1)

b) 岩塊の傾斜角度と打音の関係

傾斜時の実験状況を写真-2に、各傾斜角度で供試体 No.4のT-1を打撃した際のフーリエスペクトルを図-7に示す。図-7から傾斜角度によらず概ね同様なフーリエスペクトルとなっていることがわかる。また、他の箇所を打撃した場合も概ね同様なスペクトルであった。以上のことから打音測定は岩塊の傾斜角度の影響を受けていないと考えられるため、以降の検討では傾斜角度 0° (水平)のケースを対象とした。

3. 有限要素法による振動特性の検討

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¹²⁾を実施し、得られた速度波形をフーリエ変換して、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

図-8 供試体の解析モデルの例(供試体 No.2)

ル¹⁰⁾を求め、得られた速度波形をフーリエ変換して、実験で得られた音圧スペクトルと比較した。過渡応答解析とは、時間的に変化する入力に対する応答を検討する解析であり、本検討では時間領域での直接積分 (直接法) により速度波形を求めた。

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¹³⁾。さらに、規模や物性の異なる岩塊に対して有限要素法による解析を行い、それらの影響について考察をした。

(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-8 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-2) 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¹⁴⁾。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、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 を 25mm に分割した。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。

(2) 解析結果

a) 過渡応答解析による実測との比較⁷⁾

加振は実験時の打撃点に対して、図-9 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、継続時間やパルスの形状は打撃装置にひずみゲージを接着して加振した際のひずみ波形をもとに決定した。

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-10 に示す。図-11 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-10 と図-11 ではそれぞれのスペクトルにおける絶対値の最大値を 1 として正規化した。過渡応答解析により、供試体 No.1 では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。他の供試体でも同様にスペクトルの基本的な特徴を再現していることが確認できた⁹⁾ことから、解析モデルは妥当であると考えた。

b) モード形状による振動状況に対する考察

音圧スペクトルや振動スペクトルのピークと実験時の供試体の振動状況の関係を考察するために、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-12 に、モード解析で確認できるモード形状を図-13 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-12 を基に図-13 の結果に対して考察を加え

(a)全体図

(b)1ms 付近の拡大図

図-10 解析で得られた速度波形の例
(供試体 No.1)

(a)T-1 を打撃した場合 (供試体 No.1)

(b) T-4 を打撃した場合 (供試体 No.1)

(c) S-3 を打撃した場合 (供試体 No.1)

図-11 解析で得られた速度スペクトル

(a)T-1 を打撃した場合

(b)T-4 を打撃した場合

(c)S-3 を打撃した場合

図-12 速度スペクトル

	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-13 モード形状

る。

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-12(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-13(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-13(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。

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、速度の大きさはほぼ一定であり、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面端部である T4 を打撃した際の振動状況について考察する。図-12(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 T4 打撃時にも複数生じることがわかる。ここでは、T4 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上部ブロックに発生する振動であることがわかる(図-13(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。この時の振動は上部ブロックの水平方向への振動によるものと考えられる。ピーク (vi) は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、速度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-13(c)で示すスペクトルを概観すると、図中の (v) の矢印で示すピークのように、T4 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-13(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 (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) があげられ、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。ピークとしてピーク (i) と (v) 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った。このことから、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。これらのことから、打音測定法は岩塊の安定性の違いによる振動の違いを捉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と考えられる。

また、今回の検討から、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を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。

(a)等角図 (b)平面図

図-14 下部ブロックの水平方向の幅を1.5倍とした解析モデル(供試体No.4)

図-15 下部ブロックの水平方向の幅が異なる場合の振動解析結果 (T-1 打撃時)

図-16 下部ブロックの水平方向の幅が異なる場合の振動解析結果 (S-3 打撃時)

c) 下部ブロックの大きさの影響の検討

本研究では、下部ブロックを岩塊の付着している岩盤と考えて検討を行っていたため、下部ブロックの大きさは結果に影響を与えない程度に十分大きい必要がある。実験では下部ブロックの大きさを変更することは困難であるため、供試体 No.4 を対象に下部ブロックの大きさを変更した場合の結果の違いを解析により検討した。

検討では、まず下部ブロックの水平方向の幅を 1.25 倍、1.5 倍とし(図-14 参照)、振動解析を行った。図-15 に打撃箇所を上面中央である T-1 とした場合の結果を示す。この図から、下部ブロックの水平方向の幅を大きくしても大きな違いは見られないことがわかる。図-16 に側面中央である S-3 を打撃した場合の結果を示す。T-1 を打撃した場合と同様に結果に大きな違いは見られない。

次に下部ブロックの厚さを 1.5 倍、2 倍とし(図-17 参照)、振動解析を行った。図-18、図-19 に打撃箇所をそれぞれ T-1、S-3 とした場合の結果を示す。この図から、下部ブロックの厚さを大きくしても大きな違いが見られないことがわかる。

以上のことから、下部ブロックの幅や厚さを大きくした場合、岩塊を模擬した上部ブロックの振動特性に大きな影響を与えることはないと考えられる。すなわち、実

験に用いた供試体の下部ブロックは岩塊を模擬した上部ブロックの安定性と打音の音圧特性との関係を検討する際に岩盤と見なすのに十分な大きさであったといえる。

d) 上部ブロックの大きさの違いによる比較

岩塊の大きさは多種多様であるので、上部ブロックに関しても大きさの異なる場合に対しての検討が必要である。下部ブロックと同様に、供試体 No.4 を対象に上部ブロックの厚さや幅の異なる条件で検討を行った。まず上部ブロックの水平方向の幅を 1.2 倍、1.4 倍とし(図-20 参照)、振動解析を行った。打撃箇所を T-1 とした場合の結果を図-21 に示す。この図から、上部ブロックの水平方向の幅が異なる場合、1kHz 以下にある 2 つのピークの周波数はほとんど変化していないのに対し、3 番目のピークは上部ブロックの水平方向の幅が大きくなるほど、周波数が低くなるといった特徴が見られる。次に、S-3 を打撃した場合の結果を図-22 に示す。この図から、T-1 を打撃した時と同様に上部ブロックの水平方向の幅が異なる場合、1kHz 以下にある 2 つのピークの周波数の変化は小さく、3 番目のピークの周波数は上部ブロックの水平方向の幅が大きくなるほど低くなるといった特徴が見られる。

図-17 下部ブロックの厚さを 1.5倍とした解析モデル(供試体No.4)

図-18 下部ブロックの厚さが異なる場合の振動解析結果 (T-1 打撃時)

図-19 下部ブロックの厚さが異なる場合の振動解析結果 (S-3 打撃時)

図-20 上部ブロックの水平方向の幅を 1.4倍とした解析モデル(供試体No.4)

図-21 上部ブロックの水平方向の幅が異なる場合の振動解析結果 (T-1 打撃時)

図-22 上部ブロックの水平方向の幅が異なる場合の振動解析結果 (側面中央打撃時)

(a)等角図 (b)平面図
図-23 上部ブロックの厚さを

1.5倍とした解析モデル(供試体No.4)

図-24 上部ブロックの厚さが異なる場合の
振動解析結果 (T-1 打撃時)

図-25 上部ブロックの厚さが異なる場合の
振動解析結果 (S-3 打撃時)

次に、上部ブロックの厚みを 1.5 倍、2 倍とし(図-23 参照)、T-1 と S-3 を打撃した場合の振動解析結果を図-24、図-25 に示す。厚さを変えた場合は、幅を大きくした場合と同様に 1kHz 以下にある 2 つのピークの周波数はほとんど変化していないのに対し、3 番目のピークの周波数は上部ブロックの厚さが厚くなるほど低くなるといった特徴が見られる。

すなわち、付着面積だけではなく、上部ブロックで模擬した岩塊の大きさで卓越周波数やその振幅が異なることがわかる。上部ブロックの水平方向の幅が大きくなり、上部ブロックがより不安定になったことが、スペクトルに反映されていると考えられる。

e) 物性値の違いによる比較

岩塊の物性値の違いによる振動特性への影響を検討するため、供試体 No.4 に対して上部ブロックの縦弾性係数を 1.2 倍、1.4 倍とし、打撃箇所は T-1 とした場合の振動解析を行った。結果を図-26 に示す。この図から、0.5kHz 以下の帯域では、ピークのあらわれる周波数やフーリエ振幅の大きさに変化は見られない。また、1kHz より大きな周波数では、岩塊の縦弾性係数が大きくなるほど、高い周波数で振動している。すなわち、現場では岩塊の剛性の違いによる影響を受けることが予測されるため、打音測定では岩種の違いを考慮する必要がある。

図-26 縦弾性係数を変化させた場合の振動解析結果

(a)T-4 (b)S-3
図-27 打撃箇所と観測点の位置関係

(a)T-4

(b)S-3

図-28 観測点の違いと応答スペクトル

あることがわかった。ただ、同じ物性の岩塊であれば安定性の違いの検討はできるため岩種ごとに安定・不安定を判定する条件を決めておけば、安定性評価は可能であると考えられる。

f) マイクの設置位置の違いによる比較

これまで、同一面上の打撃箇所から 80mm 離れた場所の応答という条件のみでの検討を行った。例えば、図-27(a)に示す打撃箇所 T-4 での応答観測点は(1)や(2)の場所など複数の応答観測点が考えられる。図-27(b)に示す S-3 についても同様に(1)~(3)などの複数の応答観測点が考えられる。同一面上には複数の観測位置が考えられるため、観測位置の違いによる解析結果への影響を検討した(図-28)。この図より観測点による違いはほとんど見られないことがわかる。

供試体の打音測定実験を始める前に、同一面上の打撃から同じ距離の場所であれば応答波形に大きな違いは見られないことを確認していたが、解析によっても打撃箇所から 80mm 離れた場所の応答に大きな違いがないことがわかった。

4. 現地測定による検討⁸⁾

供試体の打音測定実験と有限要素法による検討から打

音測定法が岩塊の安定性評価に有効であることがわかった。そこで、剥落型落石が発生する条件を有する岩盤斜面で現地測定を行い、打音測定法による岩塊の安定性評価の可能性を検討した。

(1) 測定対象

打音測定は約 10 年前に採掘を終了した採石場の新第三紀安山岩からなる斜面で実施した。割れ目の分布状況から下方に自然落下することが想定される岩塊を対象とし、それらを目視観察や岩石ハンマーによる打音調査などの従来方法により（表-4）、不安定岩塊（写真-3）、安定岩塊（写真-4）に分類した。計測した不安定岩塊は 26 個、安定岩塊は 8 個である。また、供試体実験において割れ目に相当するくびれのない供試体と同様の条件と考えられる「新鮮で割れ目を含まない岩盤」（以下、基盤岩）でも打音を測定した。岩塊ごとに数点～十数点の測点を設け、全ての測点の卓越周波数や卓越周波数のフーリエ振幅を平均化して比較した。平均化の目的は打撃箇所による結果の違いの影響を少なくするためであり、基盤岩を打撃した目的は基盤岩の結果で正規化することで岩種の違いの影響を除くためである。

(2) 現地測定結果

基盤岩の卓越周波数、振幅の平均値で各岩塊の測定値を正規化した結果を図-29 に示す。図-29 には供試体実験の結果も合わせて示す。安定岩塊の卓越周波数の振幅の大きさは基盤岩と同程度であり、卓越周波数は基盤岩の半分程度以下の値を示す。一方、不安定岩塊の卓越周波数の振幅の大きさは基盤岩や安定岩塊の振幅より大きく、卓越周波数は基盤岩の半分程度以下の値を示すことがわかる。これまでの供試体実験や有限要素法による解析結果と同様に、不安定岩塊は安定岩塊よりも卓越周波数のフーリエ振幅が大きく、卓越周波数が小さいという

結果であった。すなわち、複数の付着面や付着面の偏りが想定される現地でも供試体実験等と同様な考え方で打音測定法による岩塊の安定性評価が可能であると言える。

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振動解析を行い、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岩塊の安定性評価への適用性を検討した。また、現地測定による打音測定法の適用性の検討も行った。検討の結果、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は打音測定実験で得られた音圧スペクトルの形状と概ね一致しており、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. モード解析により、付着面積の減少にともなって発生しなくなるピークに対応するモード形状や、付着面積の減少にと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。このように、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を確認した。
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. 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があることがわかった。このモードに対応するピークを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上がると思われる。
5. 下部ブロックの厚みや幅を大きくしても応答のスペクトルの形状に大きな違いは見られなかった。このことから実験で用いた下部ブロックの大きさが岩塊の付着する岩盤とみなすのに十分な大きさであったと考えられる。

表-4 岩塊の定性的な安定性区分

割れ目の状態 岩石ハンマーによる打音	密着	開口、土砂や粘土 などの挟在物有り
清音～やや清音	安定岩塊	不安定岩塊
やや濁音～濁音	不安定岩塊	不安定岩塊

写真-3 不安定岩塊の例

写真-4 安定岩塊の例

図-29 打音測定の現地測定結果

6. 上部ブロックの幅や厚さを大きくし、上部ブロックをより不安定な状態にした振動解析の結果、上部ブロックの不安定さが応答スペクトルに影響することを確認した。
7. 岩塊の縦弾性係数を変えて振動解析を大きくした結果、岩塊の縦弾性係数を大きくするとピークの周波数が高周波にシフトすることがわかった。すなわち、岩塊の安定性評価には岩塊の物性を考慮する必要があることがわかった。
8. 振動解析の結果、同一面上の打撃箇所から80mm離れた応答観測点であれば、スペクトルに大きな違いがないことを確認できた。
9. 現地で打音測定法による岩塊の安定性評価への適用性を検討した。供試体実験や有限要素法による解析結果と同様に、不安定岩塊は、安定岩塊よりも卓越周波数のフーリエ振幅が大きく、卓越周波数が小さいという結果であった。すなわち、現地でも同様な着目で打音測定法による岩塊の安定性評価が可能であると考えられる。
- 4) 奥園誠之, 岩竹喜久麿, 池田和彦, 酒井紀士夫: 振動による落石危険度判定, 応用地質, Vol.21, No.3, pp.9-12, 1980.
- 5) 上半文昭, 太田岳洋, 石原朋和, 布川修, 斎藤秀樹, 深田隆弘: 非接触振動計測による岩塊崩落危険度の定量評価手法の検討, 鉄道総研報告, Vol.26, No.8, pp.47-52, 2012.
- 6) 田中治雄: 土木技術者のための地質学入門, 山海堂, 1964.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) (社)地盤工学会: 地盤工学ハンドブック, pp.217-218, 1999.
- 12) 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.
- 13) 蒲原章裕, 川越健, 太田岳洋, 石原朋和, 浦越拓野, 横山秀史: 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, 鉄道総研報告, Vol.27, No.11, pp.47-52, 2013.
- 14) 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.

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所: 落石対策技術マニュアル, 154p, 1999.
- 2) 内藤繁, 時任俊一, 舟橋秀麿, 曾根好徳, 山内政也: 浮石・転石の岩体安定度評価装置の開発, 土木学会第56回年次学術講演会, pp.506-507, 2001.
- 3) Kawamura, Y., Tsurushima, M., Mizutani, K., Ujihira, M., Aoshima, N. and Kuraoka, S.: Ultrasonic measurement system for detecting penetration of boulders by autocorrelation analysis, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 44, No. 6B, pp. 4364-4369, 2005.

(2014. 8. 4 受付)

STUDY ON THE ESTIMATION OF THE STABILITY OF ROCK BLOCKS BY HAMMERING METHOD

Akihiro KAMOHARA, Takeshi KAWAGOE, Takehiro OHTA,
Hidefumi YOKOYAMA, Tomokazu ISHIHARA and Takuya URAKOSHI

Finite element models of specimens which imitated rock slopes were made to validate applying the hammering method on the stability estimation of rock blocks. At first, transient response analysis was done. We confirmed validity of analysis models because the sound pressure spectrums were most of the same with the velocity spectrums. Next, modal analysis were done, we studied about the vibrating situation of the specimens in the experiment. As the result, it was shown that we could recognize vibrating situation that concerned the stability of the rock blocks by hammering method. And it was shown that we could apply hammering method on the quantitative stability estimation of rock blocks. In addition, transient response analysis was done for recognizing the influence on the difference of the size of the rock blocks and the modulus of direct elasticity. As the result, the difference of them influenced on the result of the hammering method, the result showed the difference of the stability of the rock blocks. In the end, we measured the sound pressure spectrums at the real rock slopes. We confirmed that it is possible to comprehend the rock stability by hammering method.