

- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

音と振動を利用して不安定な岩を見つける

鉄道や道路などの沿線には岩盤が露出した斜面が多くあります。それらの斜面には不安定な状態で岩の塊である岩塊が存在していることがあります。これらの不安定な岩塊の状態を適切に評価し、必要な対策をとることは斜面防災上とても重要です。状態を判断する方法の一つとして、技術者がハンマーで岩塊をたたいた時に発する音や岩の振動をもとに経験的に判断する方法があります。ここでは、この音や振動を定量化して不安定さの目安を定量的に取得する方法を紹介します。



川越 健
Takeshi Kawagoe
防災技術研究部
地質研究室
室長
【専門分野】 土地質、
水文地質、道床碎石の
物理的性質



横山 秀史
Hidefumi Yokoyama
防災技術研究部
地質研究室
主任研究員
【専門分野】 地盤振動

落石

日本の国土の約7割は山地などの急しゅんな地形が占めています。そのため、鉄道や道路などは斜面に沿った箇所が多くあります。そのような斜面の中には岩盤が露出している斜面や、岩塊を含んだ土砂が堆積している斜面などがあります。斜面にある不安定な岩塊が斜面下方へ落下すると、それに列車が接触したりするなど災害となる可能性があります。落下する岩塊や岩塊が落下する事象そのものを一般的には落石といいます¹⁾。落石には地形、地質、気象条件などの多くの要因が複雑に関係することから、落石による災害はその発生箇所や発生時期を予測することが難しい災害の一つです。落石の形態は大きく二つに分けることができます。一つは、岩盤が露出した斜面に、浮き石と呼ばれる斜面から浮き出すような岩塊や剥離しかかっている岩塊がある場合です。またもう一つは、斜面中にある岩塊の周囲の土砂が浸食されて、不安定な

状態となっている岩塊がある場合です。これらが落下すると、それぞれ剥落型落石、転落型落石と呼ばれます(図1)。

不安定な岩塊の調査

落石災害を防止するために、現状では定期的に行われる検査で不安定な岩塊の有無や不安定さの程度を調べ、その結果に応じた対策が実施されています。この時の検査項目は定性的なものが主であるため、検査者の経験や専門性に依存しない簡便で定量的な検査の方法が求められています。現在の検査では不安定な岩塊の状態を把握するために、岩石ハンマーで対象とする岩塊

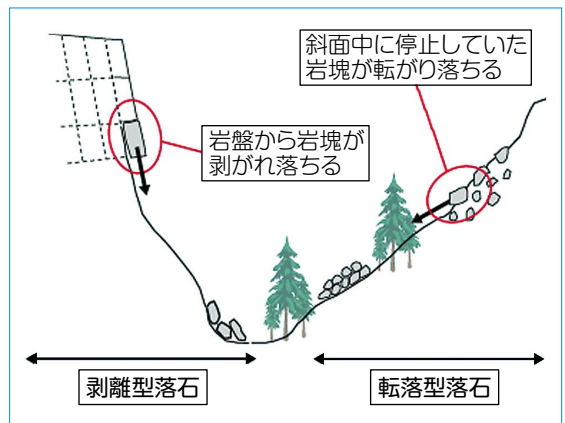


図1 落石の形態

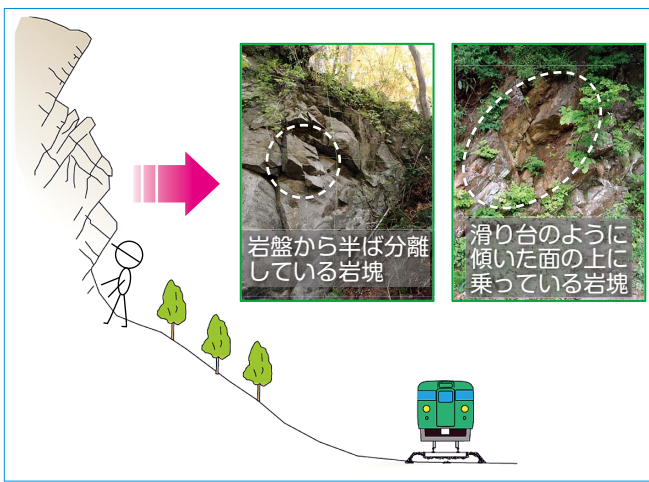


図2 剥落型落石

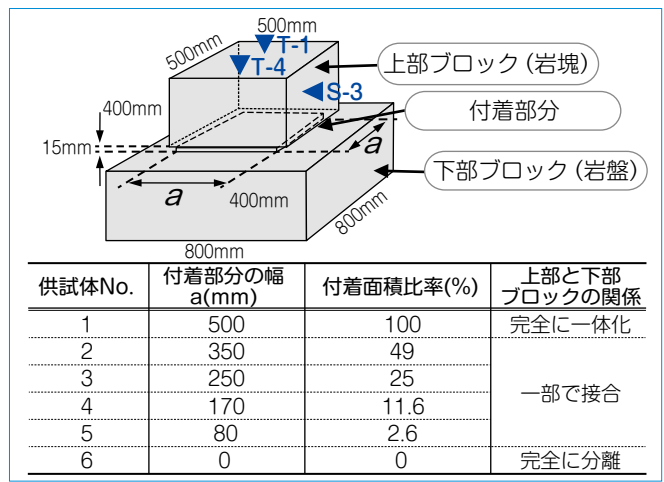


図4 実験に用いた供試体の概要



図3 総研式打音検査装置を用いた測定状況

をたたいたときの音や手に伝わる振動を重要な情報の一つとして用いています。たとえば、対象とする岩塊の大きさにもよりますが、岩盤斜面において安定した岩塊をたたくと澄んだ高い音を発し、不安定な岩塊をたたくと鈍い音を発するといった特徴があります。このような定性的な結果をもとに経験的に安定か不安定か、また不安定な場合はその不安定さを判断しています。この時の音や振動を定量化できれば、通常の検査の時に岩塊の安定性を評価する一助となることが期待できます。

打音測定による岩塊の安定性評価法の開発

鉄道総研では剥落型落石(図2)を対

象として、岩塊を打撃したときに岩塊の表面の音圧を測定できれば、岩塊の安定性に関わる岩塊の振動を得ることができると考えられます。そこで、トンネル覆工の健全度を判定するために鉄道総研が開発した総研式打音検査装置⁴⁾(図3)を用いた打音測定による岩塊の安定性評価法の開発を行ってきました。総研式打音検査装置は対象物に対して一定の打撃力を加えられる「打撃装置」と、打撃した際の対象物から発せられる音圧を収録する「集音マイク」、そして得られた打音の音圧波形を保存し、解析するノートパソコンから構成されています。現地での測定状況を図3に示します。

これまでに、岩盤斜面に存在する岩

塊を模擬した供試体実験や現地での計測などの結果、音圧波形のフーリエ解析から求まる卓越周波数とその卓越周波数での音圧の最大値(以下、「最大振幅」と呼びます)が岩の不安定さと関係していること²⁾、また安定した基盤岩と対象とする岩塊の最大振幅を比較することで不安定な岩塊を見つけ出せること^{2),3)}などがわかりました。

打音測定で得られた対象物の挙動

ここでは、浮き石を模擬した供試体実験の結果から、供試体の振動の様子と打撃時の音との関係を解析により明らかにし、打音測定による岩塊の安定性評価法の妥当性について検証した結果を紹介します。

浮き石を模擬した供試体を図4に示します。供試体は浮き石を模擬した上部ブロックと斜面を模擬した下部ブロックからなります。これらが付着している部分(図中の付着部分)の面積を変えて、上部ブロックの不安定さを変化させています。なお、供試体はモルタル製で、上部ブロックと下部ブロックは付着部分を含めて一回の打設で製作しています。上部ブロックと下部ブロックの付着部分の面積が小さいほど上部ブロック、つまり岩塊は不安定な状態にあるといえます。

この供試体を対象にした打音測定で

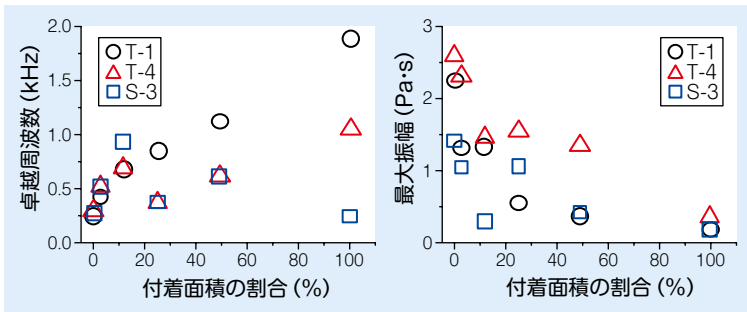


図5 打音測定結果(凡例の位置は図4を参照)

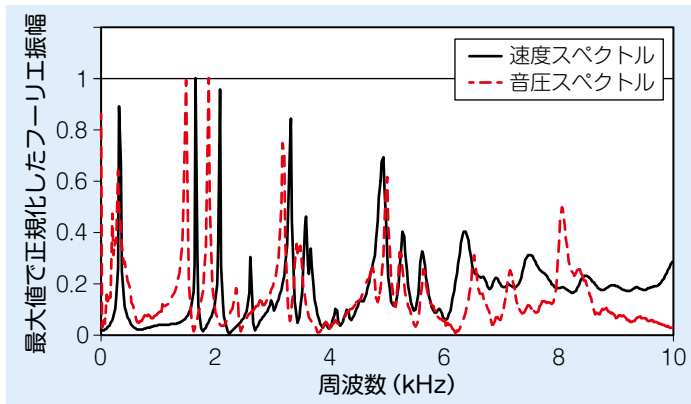


図6 スペクトルの比較例(供試体No.1, T-1 打撃時)

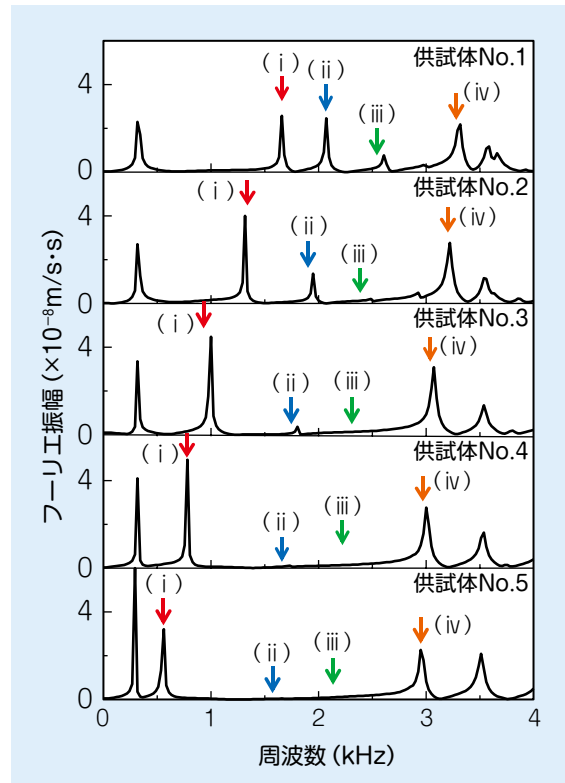


図7 速度スペクトル(解析値)

得られた卓越周波数および最大振幅と、上部ブロックと下部ブロックの付着部分の面積との関係を図5に示します。図をみると、付着部分の面積が小さいほど卓越周波数が低くなり、また最大振幅が大きくなる傾向にあることがわかります。打音測定法の有効性を確かめるためには、このような傾向が供試体のどのような振動を反映しているのかを確認する必要があります。そこで、有限要素法によるモード解析で得られるモード形状により検証しました⁵⁾。

まず、解析モデルを作成し、過渡応答解析(☞参照)で得られた表面の振動速度スペクトルと供試体を打撃したときの同じ位置の音圧スペクトルを比較しました(図6)。両者のスペクトルがおおむね同様であることから、解析モデルが妥当であると判断しました。ま

☞ 過渡応答解析

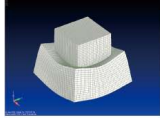
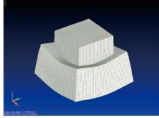
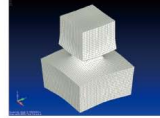
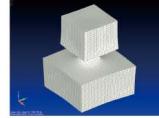
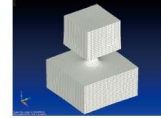
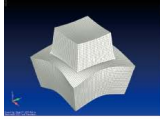
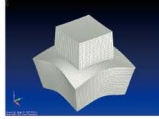
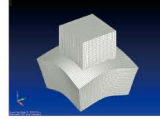
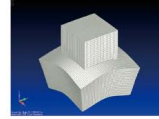
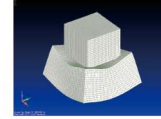
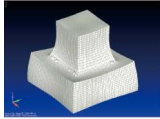
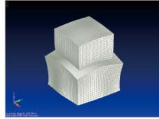
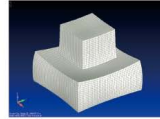
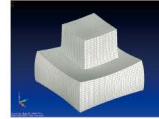
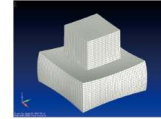
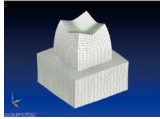
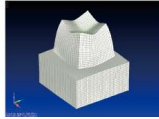
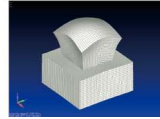
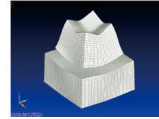
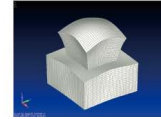
時間により変化する入力に対する対象物の応答をみるための解析の一つ。

た、音圧スペクトルが振動速度スペクトルを反映していることが確かめられました。次に、過渡応答解析により得られた速度スペクトルとモード解析により得られたモード形状をあわせて見てみます。速度スペクトルを図7に、モード形状を図8に示します。ここでは、供試体を上から見たときに上部ブロックの中央(図4中のT-1)を打撃したときに相当する結果を例として示しています。

図7をみると、いずれの供試体でも0.3kHzに卓越するピークがあり、次に高いピークの周波数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ことがわかります。各供試体に共通する0.3kHz付近のピークは、打撃したときの衝撃により供試体全体が上下に振動するモードです。ピーク(i)は上部ブロックと下部ブロックの付着部分の面積が小さくなるとともに周波数が低くなり、フーリエ

振幅は大きくなる傾向があります。この時のモード形状(図8)から、付着部分がばねのように動いて上部ブロックが上下に振動していることがわかります。また、この時のモード形状は付着部分の面積が小さいほど、付着部分のばねの固さが小さくなり、ピークが生じる周波数が低くなると考えられます。図7中のピーク(ii)や(iii)も付着部分の面積が小さくなるにしたがってフーリエ振幅が小さくなっていることがわかります。モード形状をみると、これらは下部ブロックの曲げなどが主体の振動と考えられます。また、付着部分の面積が大きい供試体No.1とNo.2では、下部ブロックに変形が生じやすいのに対して、付着部分の面積が相対的に小さい供試体では下部ブロックの変形が小さいなど、付着部分の面積によって振動の性状が変わることもわかります。

ピーク(iv)の矢印で示すピークに着目すると、付着部分の面積の大きさ

	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
図7(i)の矢印で示した箇所	 1.6kHz	 1.3kHz	 1.0kHz	 0.8kHz	 0.6kHz
図7(ii)の矢印で示した箇所	 2.1kHz	 2.0kHz	 1.8kHz	 1.7kHz	 1.7kHz
図7(iii)の矢印で示した箇所	 2.7kHz	 2.5kHz	 2.5kHz	 2.5kHz	 2.5kHz
図7(iv)の矢印で示した箇所	 3.4kHz	 3.3kHz	 3.1kHz	 3.1kHz	 3.0kHz

注) 変位を強調して示している。

図8 最大変位時の供試体の振動の様子(モード形状)

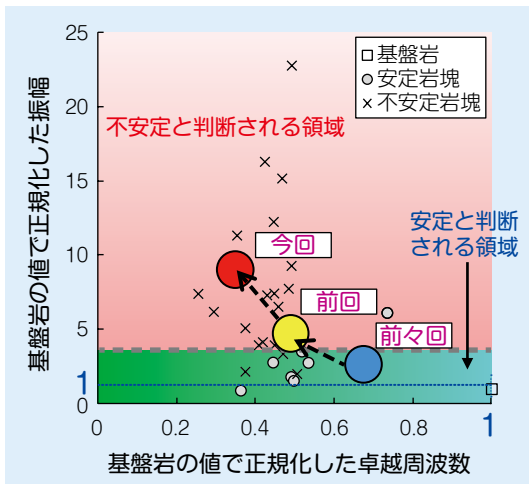


図9 利用方法のイメージ(岩塊のモニタリング)

にかかわらずフーリエ振幅が一定となるモード形状があることがわかります。この時のモード形状は上部ブロックの曲げ振動と考えられます。

このように打音測定で得られたスペクトルには、対象とする岩塊の不安定さにかかわる情報が含まれていることがわかりました。それらの状態の変化によって音圧スペクトルが変化するため、打音測定によって岩盤斜面中の不安定な岩塊を見つけられることが確認できました。

打音測定による岩塊の安定性評価法の利用方法として、一つの斜面中から相対的により不安定な岩塊を見つけるために利用することが考えられます。また、特定の岩塊を対象として経時的にデータを取得することで、例えば安定な状態から不安定な状態へと移行する兆候を把握するモニタリングなどができると考えています(図9)。

おわりに

落石による災害を防ぐためには、膨

利用方法

これまで述べてきたように、岩塊をたたいたときに得られる音を利用して、岩塊の振動の様子を含む情報が得られます。この振動の様子は斜面中での岩塊の安定性により変化します。そのため打音を測定することで岩盤斜面中にある岩塊のなかから相対的に不安定な岩塊を見つけ出すことができます。

大なる数の斜面の中から、不安定な岩塊の有無やその程度をより適切かつ効率良く把握することが必要であり、またその不安定さの変化を把握することが望まれます。ここで紹介した音と振動を利用した評価方法がその一助となれば幸いです。RRR

文献

- (財) 鉄道総合技術研究所：落石対策技術マニュアル，(財) 鉄道総合技術研究所，p.154，2000
- 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法，鉄道総研報告，Vol.25，No.7，pp.31-36，2011
- 石原朋和，太田岳洋，蒲原章裕，横山秀史，上半文昭，斎藤秀樹：打音測定による岩塊の定量的な安定性評価，応用地質，Vol.55，No.1，pp.2-16，2014
- 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測定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
- 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に関する解析的検討，鉄道総研報告，Vol.27，No.11，pp.47-52，2013