

車両走行振動による岩盤斜面の振動特性

森 伸一郎¹・佐古 昇大²

¹フェロー 愛媛大学 大学院理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町 3)
E-mail: mori@chime-u.ac.jp.

²学生会員 愛媛大学 大学院理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町 3)
E-mail: sako.shota.15@cee.chime-u.jp

岩盤斜面の脆弱性評価は踏査や目視などの定性的な評価が主であるため、定量的な評価手法が求められる。筆者ら¹⁾は道路に面した岩盤斜面の固有振動特性に着目し、愛媛県のある斜面を対象に微小地震観測を行い、その適用性の観点から、調査法としての有効性を提案している。地質が均一であれば道路を走行する車両の振動が斜面上方に伝播すると考えられるが、岩盤斜面の場合必ずしもそうならない可能性がある。しかし、重量が同じ車両が一定の速度で走行すれば、斜面上方では同一のエネルギーとして相対的に振動特性を評価できる可能性がある。本論文では、岩盤斜面において車両走行振動測定を行い、時刻歴波形とフーリエスペクトルから再現性を検討した。

Key Words: rock slope, vibration measurement, vehicle running vibration, anisotropy

1. はじめに

日本の急傾斜の道路斜面は災害が多発するため、点検要領²⁾に則った防災点検が実施される。しかし、それらは主に定性的な評価であるため、定量的に脆弱性を評価する手法が求められる。森・佐古³⁾は、対策優先度をつけるための定量的な脆弱性評価を目的として、2018年に実際の岩盤斜面を対象に微小地震観測を実施した。それによると、測定による評価結果と実際の崩壊事態が整合したため、微小地震観測が調査法として有効であることを提案している。

斜面問題に振動測定を利用した既往研究には、深田ら³⁾の落石危険度判定に関する研究があり、また独立行政法人土木研究所⁴⁾は岩盤斜面において振動測定を実施し、振動波形、振動粒子軌跡、フーリエスペクトル等で総合的に不安定岩盤ブロックを抽出する方法を提案している。

道路に面する岩盤斜面の場合、走行車両の振動は岩盤の地質と道路の線形に大きく支配されると考えられる。つまり、地質が均一であれば道路を走行する車両と斜面上方の測定位置との距離が最短で振動が最大となるが、不均質で異方性のある岩盤の場合には必ずしもそうならないことが考えられる。しかし、車両の重量と走行速度が一定であれば、斜面上方の振動に対する振動源として同一性が保たれると考えられる。

本論文では森・佐古³⁾が微小地震観測を実施した岩盤

斜面において、走行車両を振動源とした車両走行振動測定を実施し、調査法としての適用可能性を裏付けるために再現性を検討した。

2. 調査対象と測定方法

(1) 対象とする岩盤斜面

車両走行振動測定を実施した岩盤斜面は愛媛県南予地方の海岸線近くを通る主要道路沿いの急傾斜の道路斜面である。仏像構造線近傍の石灰岩、チャート、砂岩、泥岩よりなり、チャートが露出する急崖斜面である。

図-1に調査対象斜面の地形図と振動測定の測線(A~F)および測点を示す。AからFの6測線を設け、それぞれの測点に速度計を設置し測定を実施した。図-2に、独自に測定したUAVによる測線ごとの断面図を示す。斜面の高さはおおよそ30~70mである。

(2) 測定方法

車両走行振動測定の調査方法を以下に記す。写真-1に車両走行振動測定状況を示す。斜面下方道路に総重量6.7tの測定用トラックを時速30kmでAからFの区間を往復走行させ、発生・伝播した振動を各測線の道路面

(R)および斜面上方の各測点で2点同時測定した。測定の前夜でトラック以外の車両が走行していない理想的

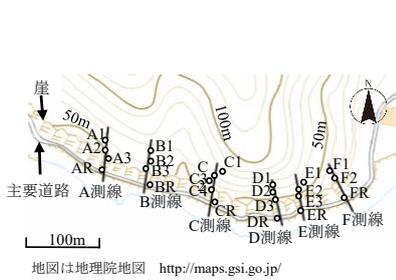


図-1 調査対象斜面の地形図と測線および測点

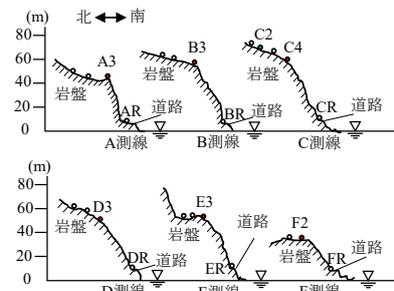
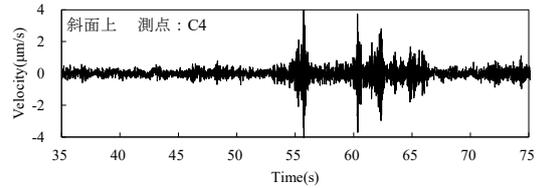
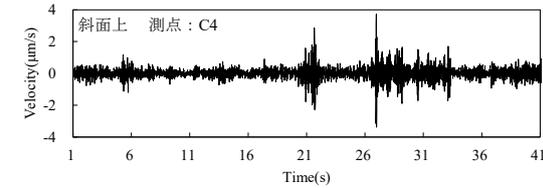


図-2 独自に測定した UAV による各測線の断面図



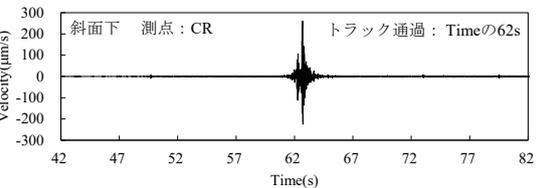
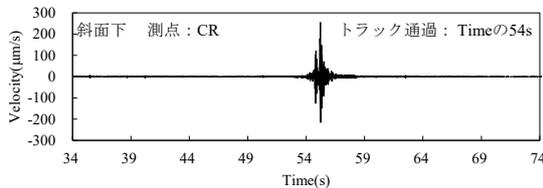
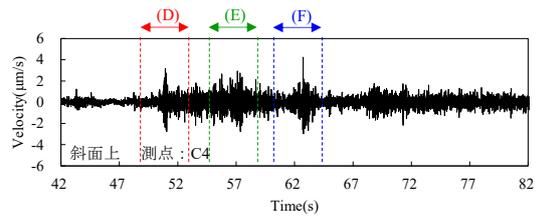
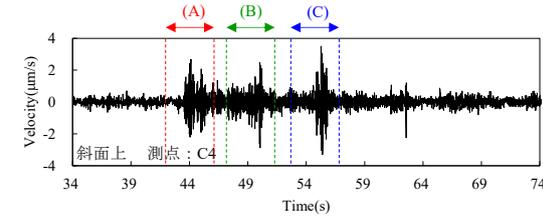
写真-1 車両走行振動測定状況



(a) 西行きトラック測定 1

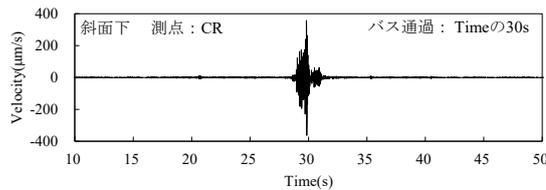
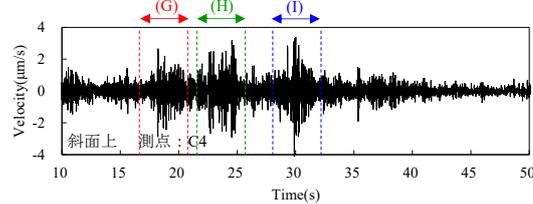
(b) 西行きトラック測定 2

図-3 測点 C4 と CR における西行きトラック通過前後 20 秒間の速度時刻歴



(a) 東行きトラック測定 1

(b) 東行きトラック測定 2



(c) 東行きバス測定

図-4 測点 C4 と CR における西行きトラックおよびバス通過前後 20 秒間の速度時刻歴

な状態である。測定用トラックは西行きと東行きを交互に走行させ、各測点で少なくとも 3 回の測定を行った。

また、当該道路では時おり民間事業者が運行する路線バスが走行していたため、バス通過時の振動も測定対象と

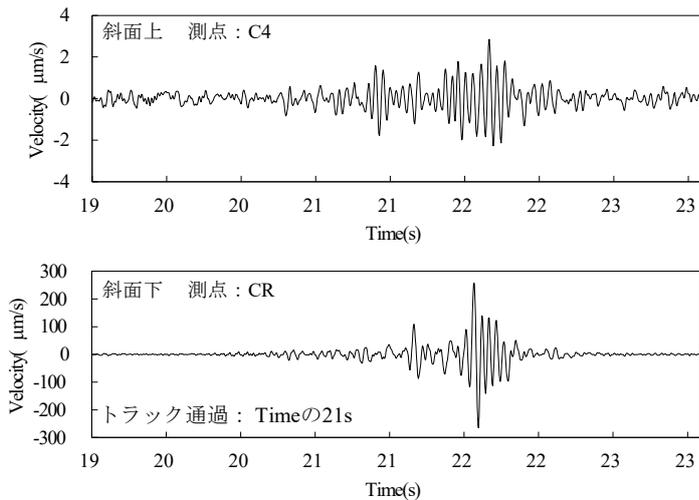


図-5 相互相関係数の計算範囲例
(測点 C4 と CR における西行きトラック速度時刻歴)

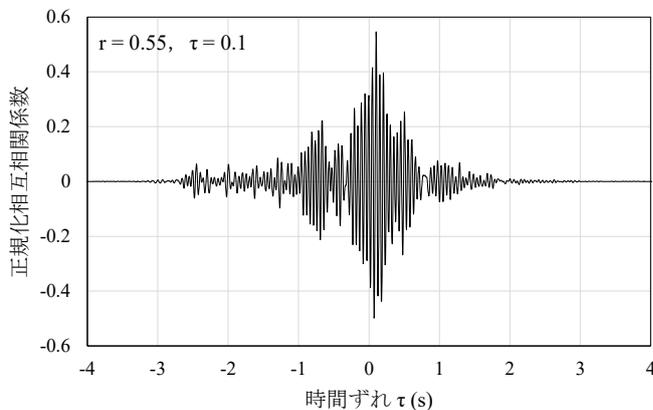


図-6 相互相関係数と時間ずれ (図-5 の速度時刻歴より算出)

表-1 CR と C4 の最大相互相関係数一覧

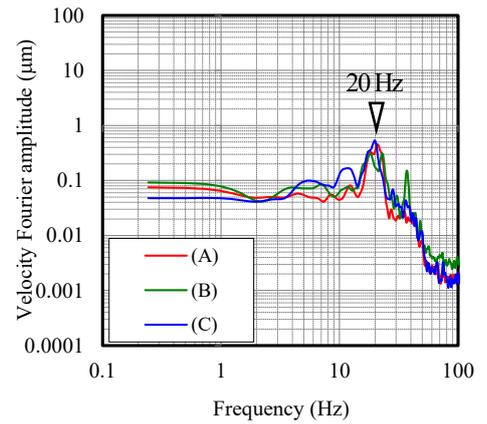
	最大相互相関係数	時間ずれ (秒)
西行きトラック測定1	0.55	0.100
西行きトラック測定2	0.63	0.100
東行きトラック測定1	0.52	0.104
東行きトラック測定2	0.49	0.104
東行きバス	0.42	0.188

した。測定には固有振動数が 2.0 Hz の 3 成分動コイル型の速度計 KVS-300 (近計システム) であり、固有振動数が 2 Hz で、コンデンサシャントにより広い振動数領域で平坦な利得を有する。また、データロガーは乾電池駆動の EDR-X7000 (近計システム) を用いた。サンプリング振動数は 250 Hz である。

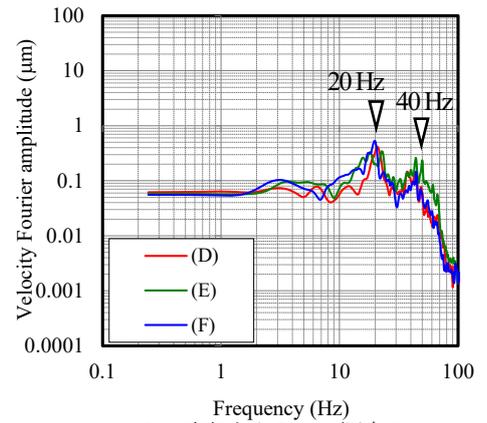
3. 速度時刻歴およびフーリエスペクトルによる検討

(1) 速度時刻歴波形による検討

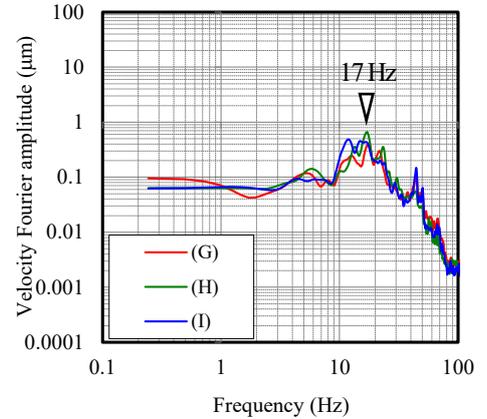
車両走行振動による走行方向ごとの再現性を速度時刻歴波形により検討する。森・佐古⁹⁾が観測および分析に採用したのは各測線で最も崖側の点と基準点として定めた測点 C2 であるが、紙面の都合上、本論文では測点 C4 のみを検討する。図-3 に、斜面上方の測点 C4 および道路面の測点 CR で測定した西行きトラック通過前後 20 秒間の速度時刻歴 (NS 成分) を示す。斜面下方 CR に設置した速度計の直前を測定用トラックが通過する前後の 20 秒間を抽出している。トラック通過時間は現地調査時のメモによる記録である。図-3 (a) より、CR の直前をトラッ



(a) 東行きトラック測定 1



(b) 東行きトラック測定 2



(c) 東行きバス測定

図-7 測点 C4 における東行きトラックおよびバス振動によるフーリエスペクトル比較

クが通過した 21 秒において、斜面上方の C4 でもほとんど同じ時間に振幅が増幅しており、道路面から斜面上方へ振動が伝達していることが分かる。また、トラックが通過した 6 秒後から 12 秒後の間 (Time の 27~33 秒) で再び振幅が増幅している。これらの斜面上方の振幅の増幅は、**図-3(b)**でも同様な傾向がみられる。

図-4 に斜面上方の測点 C4 および道路面の測点 CR で測定した東行きトラックおよびバス通過前後 20 秒間の速度時刻歴 (NS 成分) を示す。(a)と(b)は東行きトラックで、(c)は民間バスによる速度時刻歴である。**図-4** より西行き測定同様、車両が CR の前を通過した時とほとんど同時刻で、斜面上方の C4 で振幅が増幅している。また**図-4(a)**の破線で示した区間(A)、(B)のように、CR を通過するおおよそ 6 秒前と 12 秒前にも振幅の卓越が見られる。**図-4(b)**、(c)でも同様に、複数の卓越がある。

図-3 と **図-4** より、西行きと東行きの速度時刻歴を比較すると、西行きでは車両通過時と後で振幅の卓越が出現し、東行きでは車両通過時と前で複数の卓越が出現しており、両者はおおよそ非対称である。ここでは測点 C4 のみで検討しているが、他の一部の測点においても西行きと東行きで形状が異なる傾向が見られた。岩盤斜面の地質構造の違いから、車両の走行方向により斜面下方から上方への振動の伝播経路が異なっていると推測できる。

(2) 斜面上と下方における速度時刻歴の相互相関

前節では速度時刻歴の形状により、斜面下方の振動が上方に伝達している様相を確認したが、あくまで定性的な判断であった。よって定量的に類似度を判断するため、下方と上方の車両走行速度時刻歴の相互相関係数を算出した。

図-5 に一例として相互相関係数を計算するために抽出した速度時刻歴を示す。**図-3(a)**で示した西行きトラックによる速度時刻歴の時間軸を拡大したものである。CR と C4 の振動の相互相関係数を求める際、車両が CR を通過した時刻の 2 秒前から 4.096 秒間を抽出し、計算を行った。また、**図-6** に一例として**図-5** から求めた相互相関係数と時間ずれのグラフを示す。この場合、時間ずれが 0.1 の時に相互相関係数は 0.55 で最大となった。上記の方法で、**図-3(b)**、**図-4(a)**、(b)、(c)に示した速度時刻歴から相互相関係数を算出した。**表-1**に、CR と C4 の最大相互相関係数一覧を示す。西行き 2 測定の最大相互相関係数は 0.55~0.63、東行き 3 測定では 0.42~0.52 であり、時間ずれはおおむね 0.1 秒であった。西行き、東行きともにやや強い相関があった。西行きは東行きに比べてわずかだが相関が強い。以上の結果より、車両が CR を通過した際の時刻歴波形と、同時刻の C4 の時刻歴波形はある程度類似しているため、斜面上方/道路面の

伝達特性として成り立つ可能性があるが、道路面の舗装状況や斜面の地質・地形が異なると、評価は難しい。

(3) フーリエスペクトルによる再現性

図-4 に示す東行きトラックおよびバスの速度時刻歴では、破線で示した区間(A)~(I)のように、斜面上方測点 C4 において複数の振幅の卓越が確認できる。これら全ての卓越が果たして車両走行振動によるものかを確認するため、(A)~(I)の区間でそれぞれフーリエスペクトルを算出し、スペクトルの形状と卓越振動数による検証を行った。それぞれの区間を 4.096 秒とし、1 セグメントでオーバーラップなしでフーリエ解析を行い、フーリエスペクトルを求めた。また、Parzen ウィンドウのバンド幅 2.0 Hz で平滑化を行った。

図-7 に測点 C4 における東行きトラックおよびバスの振動によるフーリエスペクトルの比較を示す。**図-4** の各測定における区間(A)~(C)、(D)~(F)、(G)~(I)によるフーリエスペクトルをそれぞれ重ねて示している。**図-7(a)**より、(A)~(C)のフーリエスペクトルの形状はほとんど同じで、卓越振動数は 20 Hz であった。**図-7(b)**についても(D)~(F)のスペクトルの形状はほとんど変わらないが、おおよそ 20 Hz と 40 Hz で 2 つの卓越が確認できる。**図-7(c)**についても、(G)~(I)の 3 つのスペクトルの形状は同じであるが、卓越振動数は 17 Hz であり、他の 2 測定よりも低かった。測定用トラックとバスの走行速度の違いにより、卓越振動数が変化したのかもしれない。

各測定において(A)~(C)、(D)~(F)、(G)~(I)のそれぞれのフーリエスペクトルはほとんど相似であったことから、測定の再現性を示すことができた。

4. 結論

本研究では以下のことがわかった。

- (1) 車両の走行方向が違くと速度時刻歴波形の形状も異なることから、伝播経路は岩盤の地質構造に依存する。
- (2) 斜面下方 CR と上方 C4 の車両走行速度時刻歴から相互相関係数を算出した結果、両者の波形はほとんど相似であり、斜面上方/道路面の伝達特性が成り立つ可能性を示した。
- (3) 斜面上方 C4 において、東行き車両走行の振動が複数にわたり卓越しており、フーリエ解析の結果、測定の再現性を示すことができた。

謝辞：本研究の一部は、愛媛県の業務で愛媛建設コンサルタントと連携して実施したものであり、調査の実施に大変協力していただきました。記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 森伸一郎, 佐古昇大: 微小地震観測による岩盤斜面の脆弱性評価, 第 39 回地震工学研究発表会講演論文集 CD-ROM, 地盤と構造物 2, 2019.
- 2) 国土交通省: 点検要領, 平成 18 年 9 月 29 日付け事務連絡, 参考資料, 2006.
- 3) 深田 隆弘, 谷口 達彦, 渋谷 啓: 振動測定に基づく斜面上転石の落石危険度評価方法の提案, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.69, No.1, p.140-151, 2013.
- 4) 独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム: 不安定岩盤ブロック抽出のための岩盤斜面振動計測マニュアル (案), 土木研究所資料第 4051 号, 2007, 7.

VIBRATION CHARACTERISTICS OF ROCK SLOPE BY VEHICLE RUNNING

Shinichiro MORI and Shota SAKO

The vulnerability of rock slopes has been mainly evaluated qualitatively by trenching and visual inspection, and a quantitative evaluation method is required. In this study, focusing on the natural vibration characteristics of a rock slope facing a road, we propose that microseismic observations are effective as a survey method in terms of applicability to a certain slope in Ehime Prefecture. If the geology is homogeneous, the vibration of a vehicle traveling on the road is expected to propagate along the slope, but this is not always the case on a rocky slope. However, if vehicles of the same weight are traveling at a constant speed, the relative vibration characteristics may be evaluated as the same energy on the slope. In this paper, we have measured vehicle driving vibrations on a rock slope and studied their reproducibility based on the time history and Fourier spectra.