

水路実験による土砂移動時の地盤振動の スペクトルと距離減衰に関する考察

A MODEL STUDY ON SPECTRUM AND DISTANCE ATTENUATION OF GROUND
VIBRATION BY MOVEMENT OF A LARGE MASS

筒井 和男¹・坂口 隆紀¹・海原 莊一²・谷田 佑太²・木下 篤彦³・柴田 俊⁴
金澤 瑛⁵・中谷 洋明⁵・里深 好文⁶・藤本 将光⁶

Kazuo TSUTSUI, Takaki SAKAGUCHI, Soichi KAIHARA, Yuta TANIDA,
Atsuhiko KINOSHITA, Suguru SHIBATA, Akito KANAZAWA, Hiroaki NAKAYA,
Yoshifumi SATOFUKA and Masamitsu FUJIMOTO

¹和歌山県土砂災害啓発センター (〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027番6)

E-mail: tsutsui_k0002@pref.wakayama.lg.jp

²株式会社エイト日本技術開発 (〒700-8617 岡山県岡山市北区津島京町3丁目1-21)

³国土交通省国土技術政策総合研究所 (近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター)

(〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027番6)

⁴国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター

(〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027番6)

⁵国土交通省国土技術政策総合研究所 (〒6305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

⁶立命館大学理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-7-1)

Key Words: flume experiment, Seismic characteristics, fourier spectrum, distance attenuation

1. はじめに

山間部で発生する深層崩壊等の大規模土砂移動は、天然ダムを形成し、豪雨時には越流により下流で氾濫被害を生じる可能性があり、従来から検知手法が数多く考案されている。その中で準リアルタイムでの広域監視を対象としたものとして、斜面崩壊に伴い発生する地盤振動を高感度地震観測網で検知する手法がある。

国内には、人間に感じられない非常に小さな地震による揺れを観測するための高感度な地震観測網である防災科学技術研究所の Hi-net¹⁾や広帯域地震計による観測網 F-net²⁾、国土交通省の大規模土砂移動検知システムの観測網が整備されており、2001年3月に岡山県総社市の斜面崩壊で、この崩壊によると思われる地震動が Hi-net の観測点で記録されている³⁾。また、大角らの研究⁴⁾では Hi-net データを解析し2004年8月に奈良県大塔村で発生した斜面崩壊の発

生箇所をエンベロープ解析により推定できることが示されている。高原らの研究⁵⁾では2014年の赤谷地区再崩壊時の Hi-net と国土交通省の観測局のデータから1~7Hz帯の振動波形と監視カメラによる土砂移動プロセスとの比較を行い、崩壊土砂が斜面を流下する際の振幅の増大は小さく、崩壊土砂が対岸に衝突し始めたときに振幅が大きくなっていることが明らかとなっている。他にも土砂移動時の地盤振動特性に関する過去の研究では、土石流に起因する地盤振動では20~40Hzの高周波、深層崩壊に伴う土砂移動では1~3Hz程度の低周波が卓越して観測されることが報告されている^{例え6)}。高原らの研究⁵⁾では2011年の赤谷地区の崩壊土砂中に破碎されていない岩塊が含まれ⁷⁾、その岩塊層の移動により0.01~0.1Hzの低周波が発生し、土砂が対岸に衝突する際に1~7Hzの低周波成分が増大することが明らかになっているが、低周波成分の発生原因は十分には解明されていない。一方、海原ら⁸⁾は2016年11

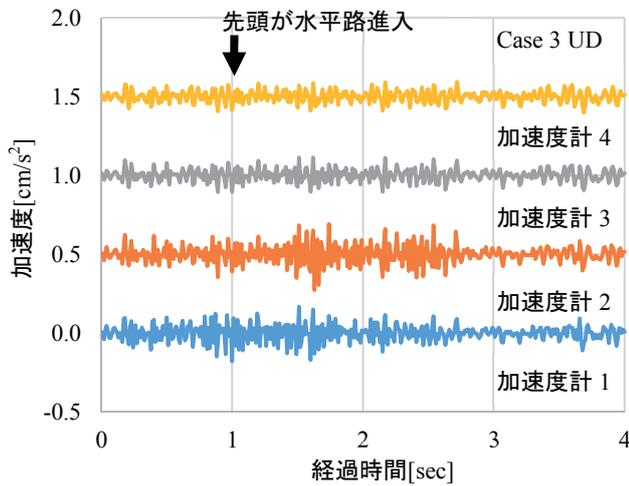


図-3 case3の加速度時刻歴 (UD成分)
0.5cm/s²ずつずらして表示

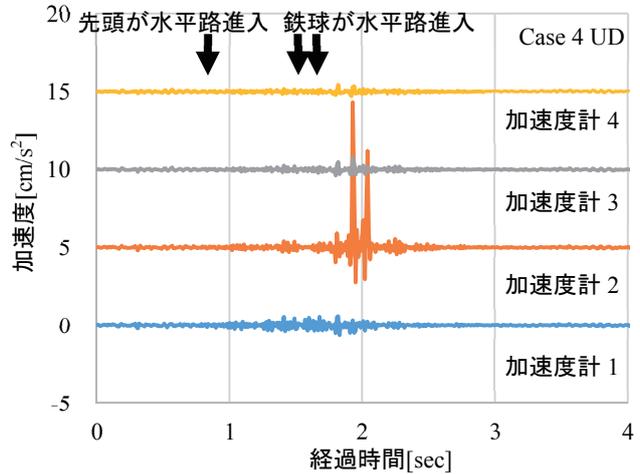


図-4 case4の加速度時刻歴 (UD成分)
5cm/s²ずつずらして表示

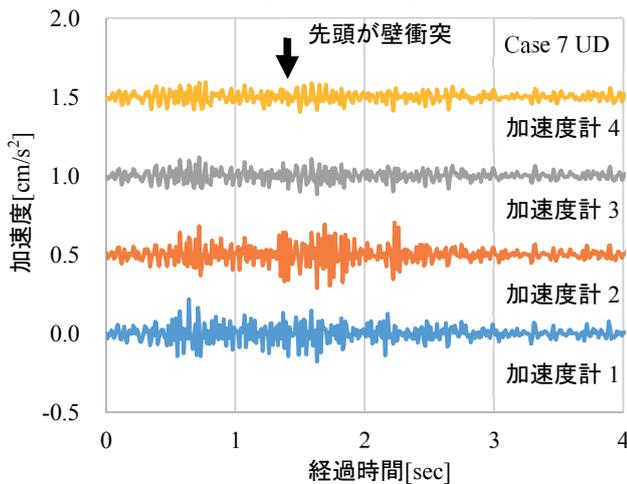


図-5 case7の加速度時刻歴 (UD成分)
0.5cm/s²ずつずらして表示

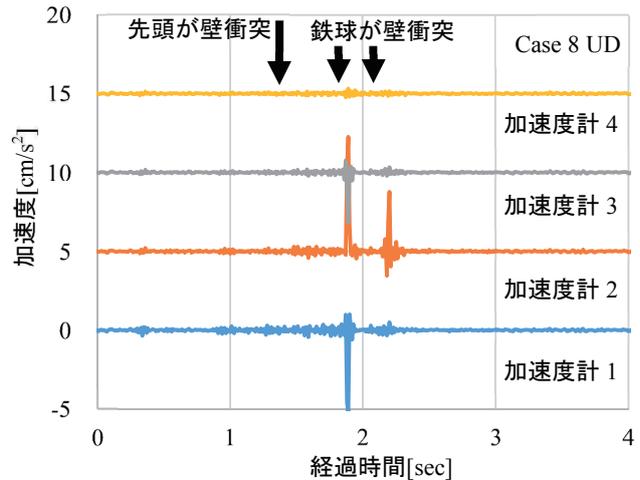


図-6 case8の加速度時刻歴 (UD成分)
5cm/s²ずつずらして表示

地盤振動の計測は白山工業社製サーボ型加速度計JU410を使用し、100Hzのサンプリングで3成分を計測した。加速度計の配置を図-2に示す。

3. 結果と考察

(1) 土砂移動プロセスと振幅増大のタイミングの関係

実験で得られた加速度計別の加速度時刻歴を、図-3~6にCase3, 4, 7, 8での上下方向成分を示す。グラフ横軸の経過時間0秒は土砂流下開始時刻である。流下土砂量が小さいケースでは計測された振幅が小さいことからCase1, 2, 5, 6の結果は割愛し、また鉄球の有無の比較と壁の有無の効果とを確認するため、Case3, 4, 7, 8のみを示す。土砂は4秒程度で流下した。鉄球を加えたCase4, 8で特に大きな振動が計測された。Case8では流下開始後1.89秒後に7.25cm/s²の最大振幅が発生した。

土砂の流下状況と振動との関係を検討するため、図-7, 8にcase4, 8のビデオカメラ画像を示す。ビデオカメラ画像の時刻は画像中の時計表示とフレー

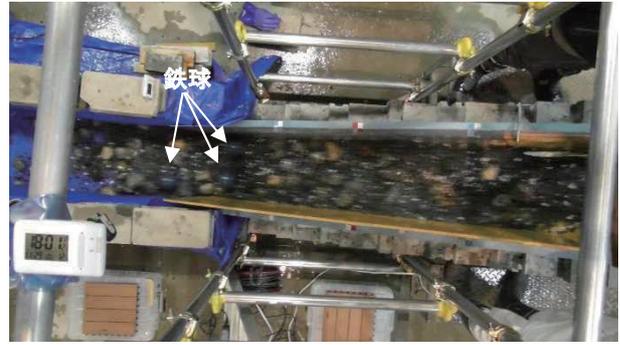
ム数(60FPS)による求めた。Case4では流下開始後0.8秒頃に土砂の先端が斜路から水平水路に進入し、1.5秒頃と1.6秒頃に鉄球が水平水路に到達した。斜路を土砂が移動している時間は振幅が増大せず、土砂が水平水路移動中の経過時間1秒付近から徐々に大きくなり、鉄球が水平水路を移動する1.8秒以降に特に大きくなっている。加速度計2の振幅は顕著に大きい。加速度計1は他の加速度計がピークに至るころには振幅は減少している。Case8では流下開始後1.3秒頃に斜路末端のコンクリート壁に土砂の先端が衝突した。鉄球は1.8秒頃と2.1秒頃に壁に衝突した。その直後に加速度計1, 2, 3において明瞭なピークを観測した。どの加速度計も振幅の増大タイミングが不明瞭なCase4と異なり加速度計1のピークの時間帯は同時刻であった。鉄球の水平水路進入および壁衝突時刻と波形ピーク時刻との差は目視による誤差の影響が大きいと考えられる。

(2) 土砂移動プロセスと周波数スペクトルの関係

土砂移動プロセスと振動の周波数スペクトルとの関係を調べるため、土砂の斜路移動時と水平水路移



(a) 経過時間 0.8 秒

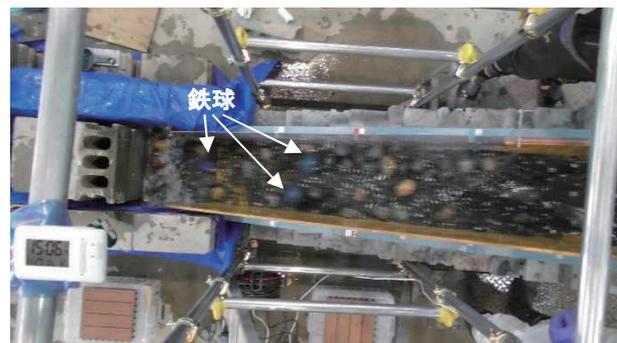


(b) 経過時間 1.5 秒

図-7 case4 の経過時間毎のビデオカメラ画像. (a)経過時間 0.8 秒 (b)経過時間 1.5 秒



(a) 経過時間 1.3 秒



(b) 経過時間 1.8 秒

図-8 case8 の経過時間毎のビデオカメラ画像. (a)経過時間 1.3 秒 (b)経過時間 1.8 秒

動時または壁衝突時のフーリエ振幅スペクトルを算出し、観測された振動には常時微動との比(S/N比)を求めた。その結果を図-9, 10 に示す。常時微動は各実験開始前の約10秒前の約2.5秒間の振動データを用いた。Case4では斜路移動時は20Hz以上の高周波成分が各センサーで大きくなっているが、水平水路移動時に加速度計2では3Hz以下の低周波成分が大きくなっている。Case8では斜路移動時にCase4と同様に高周波成分が大きくなっているが、壁衝突時に加速度計1, 2, 3の10Hz以下の低周波成分が大きくなっている。これは実現現象の観測で得られた結果において、大規模土砂移動時に崩壊土砂の河床や対岸への衝突時に1~7Hz低周波成分が増大していることが明らかとなっており、室内実験による結果とも調和的であると考えられる。

(3) 振動の距離減衰

観測した地盤振動の距離減衰を評価するため、加速度計2, 3, 4の波形で、Case3, 4では水平水路移動時、Case7, 8では壁衝突時の振幅の二乗平方平均根RMS (Root Mean Square) を求めた。RMS値と各加速度計の水路中央からの距離の関係を図-11に示す。Case3, 7で加速度計2のRMS値に対する比率を求めると、距離1.9mでそれぞれ0.58, 0.52, 距離2.9mでそれぞれ0.50, 0.45に減衰している。同様にCase4, 8では、距離1.9mでそれぞれ0.12, 0.35,

距離2.9mでいずれも0.08に減衰している。

本実験は発生した振動を近距離に設置した加速度計で測定しており、その振動は表面波を捉えていると想定し、ここで地盤材料を粘弾性体と仮定すると波動エネルギーが熱エネルギーに変換されて失われ、その平面波動式⁹⁾は式(1)で表される。

$$u = B e^{-\beta z} e^{i\omega(t-z/V_S)} \quad (1)$$

ここに u は変位、 B は振幅、 β は材料減衰に起因した距離減衰係数、 z は伝播方向座標、 i は虚数、 ω は円振動数、 t は時刻、 V_S はS波速度である。したがって $e^{-\beta z}$ で表される材料減衰による距離減衰が生じる。また距離減衰係数 β は粘性係数 ξ を用いて、フオークト粘弾性体では $\beta = \omega^2 \xi / (2\rho V_S^3)^2$ で表され、円振動数 ω の2乗に比例するため、高周波ほど早く減衰する。さらに波動が振動源から表面波として伝わる場合は円筒波伝播とみなせるので幾何減衰も生じる。エネルギーの総和が等しいと仮定すると式(1)は次のようになる。

$$u = B(r/r_0)^{-0.5} e^{-\beta r} e^{i\omega(t-z/V_S)} \quad (2)$$

ここに r , r_0 は距離である。これにより地盤振動は内部減衰と幾何減衰を合わせた距離減衰が生じる。時間微分を2回行った加速度においても同様の距離減衰が生じる。距離減衰係数 β は減衰定数 D を用いて $\beta = \omega D / V_S$ と表され、卓越周波数を30Hz、減衰定数を0.1、弾性波速度を200m/sと仮定すると、式(2)によれば距離0.9mの位置での値に対し距離1.9mで

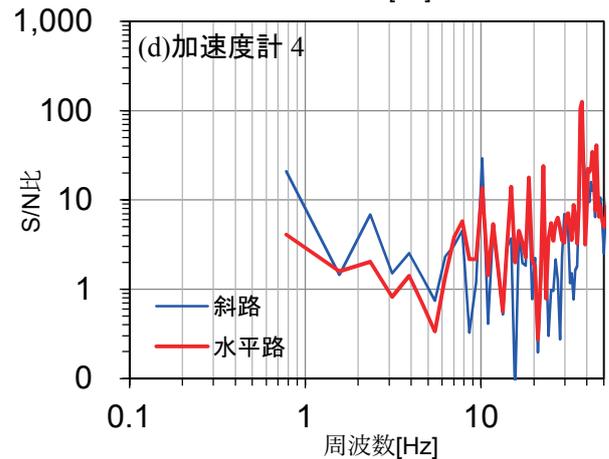
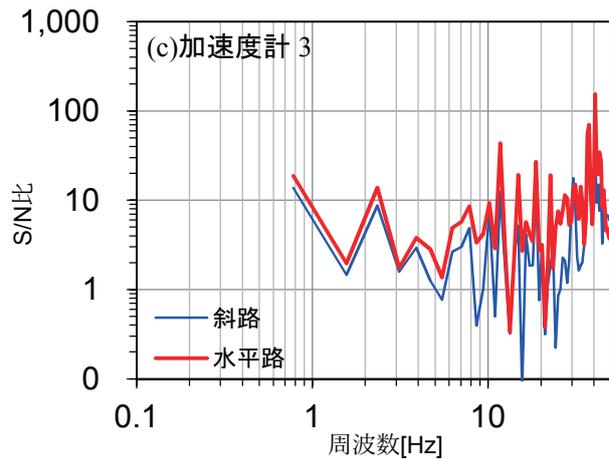
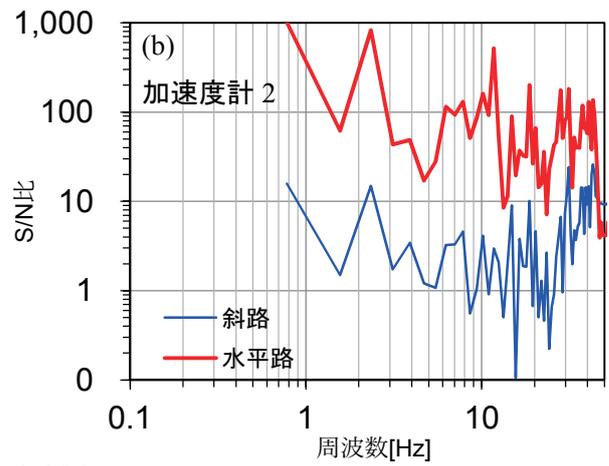
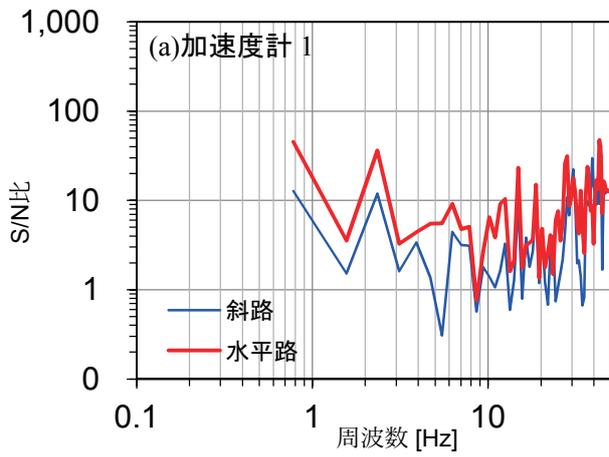


図-9 case4 の各加速度計 (UD 成分) のフーリエ振幅スペクトル比

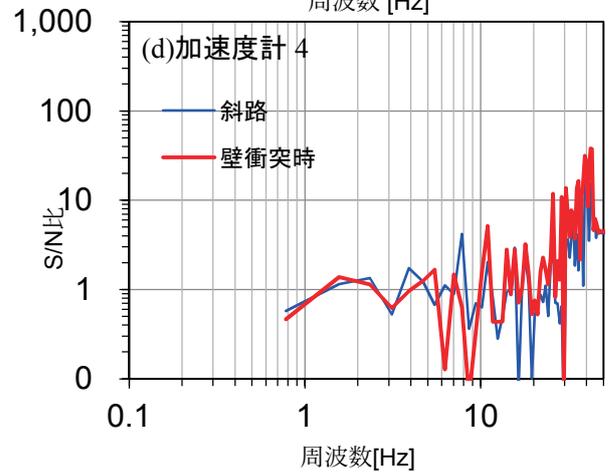
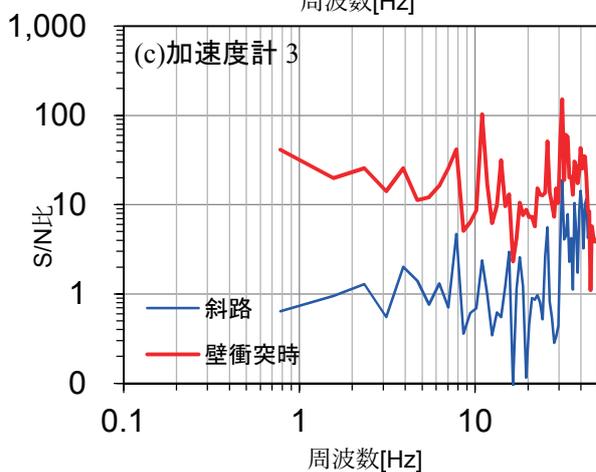
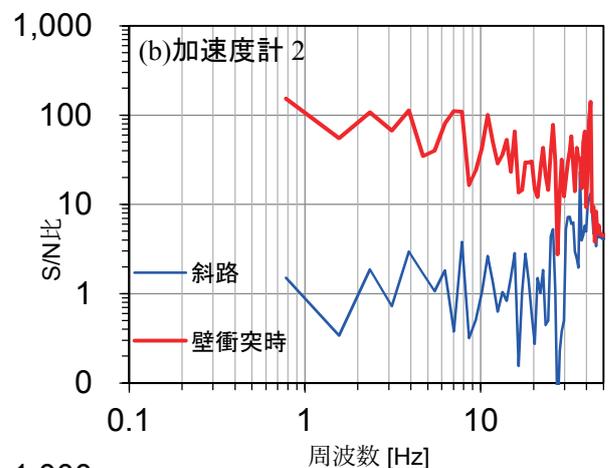
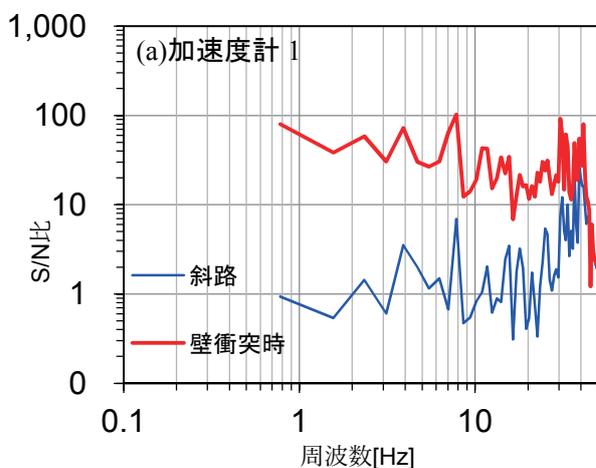


図-10 case8 の各加速度計 (UD 成分) のフーリエ振幅スペクトル比

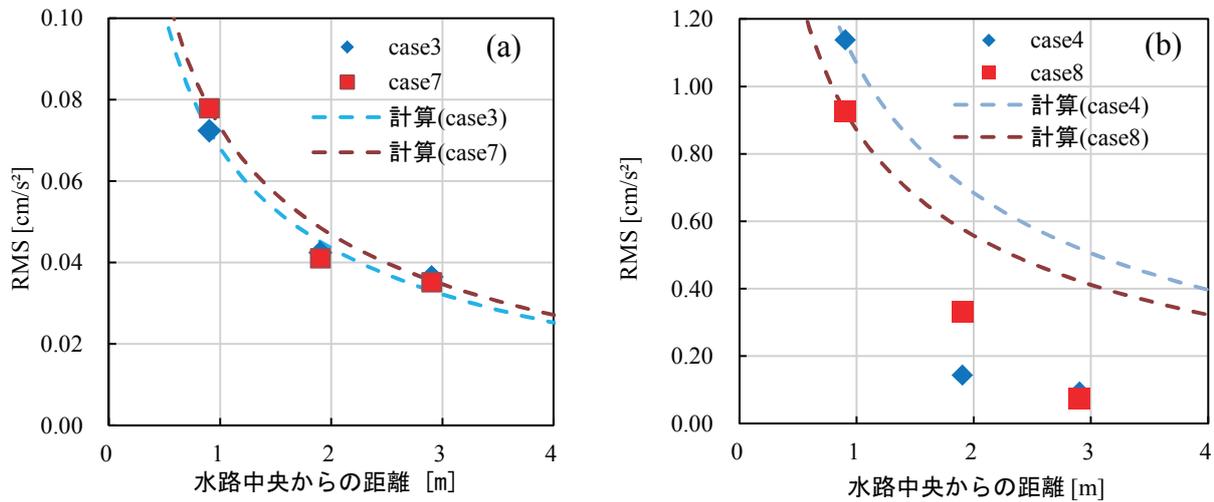


図-11 RMS 値 (UD 成分) と水路中央から加速度計までの距離との関係
(a) case3 と case7 (b) case4 と case8

0.62, 距離 2.9m で 0.45 に減衰することになる。Case3, 7 はこれと整合する減衰がみられるが, 弾性波速度等は今回計測していないこと, 実験室の地盤構造が不明であり低い弾性波速度を与えたため, あくまで簡易な評価である。Case4, 8 でより大きい減衰がみられ表面波より幾何減衰の大きい実体波が低周波成分に含まれていることも考えられる。距離減衰は媒体の特性や散乱による影響も大きいため, 実現象の観測を含めて今後知見を蓄積していく必要がある。

4. まとめ

斜面と河床に見立てた斜路と水平水路から構成する実験水路において土砂を流下させ発生した振動を計測し, 振動波形とビデオカメラ画像により確認した土砂移動プロセスとの比較を行った。斜路移動時の振幅に比べて, 水平水路移動時もしくは壁衝突時に振幅が増大すること, また, 移動過程毎にフーリエ振幅スペクトルを求めたところ, 低周波成分は鉄球を加えた場合の振幅と同様, 水平水路移動時もしくは壁衝突時に増大することが確認でき, 実現象で観察された現象と調和的な結果となった。地盤振動の距離減衰についても距離に応じ減衰することが確認できた。小規模な実験であるものの実現象で得られた知見の一部を再現できる可能性を示すと考えられる。

参考文献

1) 国立研究開発法人防災科学技術研究所: Hi-net 高感度地震観測網, <https://doi.org/10.17598/NIED.0003>, 参照 2020-4-22.
2) 国立研究開発法人防災科学技術研究所: F-net 高帯域地

震観測網, <https://doi.org/10.17598/NIED.0005>, 参照 2020-04-22.

3) 水野高志・伊藤潔・諏訪浩: 岡山県総社市における斜面崩壊にともなう地震動, 日本地震学会ニュースレター, Vol.13, No.1, pp.16-17, 2001.
4) 大角恒雄・浅原裕・下川悦郎: 2004年8月10日奈良県大塔村斜面土砂移動時の Hi-net データ解析—斜面土砂移動検知への応用—, 自然災害科学, Vol.24, No.23, pp.267-277, 2005.
5) 高原晃宙・木下篤彦・水野秀明・長谷川真英・梅田ハルミ・海原荘一・浅原裕: 振動センサデータによる大規模土砂移動現象発生タイミング及び移動プロセスの解明について, 河川技術論文集, 第22巻, pp.43-48, 2016.
6) 森脇寛: 崩壊型土石流の流下に伴う地盤の振動特性—小谷村蒲原沢土石流—, 地すべり, 第3号, 第36巻, pp.99-107, 1999.
7) 桜井亘・酒井良・奥山悠木・小川内良人・福田睦寿・佐藤美波・海原荘一・只熊典子・藤原康正: 河道閉塞の内部構造により生じる水文・浸食特性の違いと対策上の留意点, 砂防学会誌, Vol.68, No.3, pp.21-30, 2015.
8) 海原荘一・浅原裕・木下篤彦・田中健貴: 高感度地震観測網による土砂移動発生箇所近傍の地盤振動特性, 第9回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.197-200, 2018.
9) 香川崇章: 土構造物の模型振動実験における相似則, 土木学会論文報告集, Vol.275, pp.69-77, 1978.
10) 國生剛治: 地震地盤動力学の基礎エネルギー的視点を含めて, 鹿島出版会, pp.26-36, 2014.

(2020.7.1 受付)