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 荘一²・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^{例えば 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砕されて 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

月の長崎県雲仙普賢岳での斜面崩壊時に離隔距離約 1.5kmの非常に近接した観測局で1~20Hzの広い周 波数帯で地盤振動が発生していたことを報告してい る.地盤振動の減衰は高周波成分ほど大きくなるた め、崩壊箇所から離れた観測点では高周波成分が観 測できないと考えられるが、地盤振動の距離減衰に ついて明らかにし、その周波数特性を明らかにする ことは地盤振動による斜面崩壊の検知において重要 である.

上記のように地盤振動により大規模土砂移動を検 知し、その発生箇所の推定やその移動プロセスもあ る程度推測できることが示されているが、地震のよ うな自然現象、発破や交通振動のノイズ等の人工的 な現象も地盤振動を発生させることから、大規模土 砂移動のみを正確に検知できる十分な知見は得られ ていない.しかし、大規模土砂移動の発生頻度は低 く、発生場所が事前に特定できないことから、映像 によりその過程を詳細に捉えることは非常に困難で ある.そのため、土砂移動による地盤振動を室内の 水路実験で発生させ、これまで観測観察でのみ検討 されてきた実現象時の地盤振動の主要な特徴との比 較や、地盤振動の距離減衰について考察を行った.



実験の概要

模型実験による振動,変位などの相似則を検討し た事例^{例えば9)}はあるが、今回の水路実験では土砂移動 の規模に限界があり起振力が限られたものとなる. 検討対象とする実現象が深層崩壊ということもあり、 現地の崩壊と実験では力の縮尺が極めて小さな値に なること,伝播する地盤も現地では表層が土砂,深層 が岩盤、実験では表層がコンクリート、下部は土砂 地盤と媒体が異なること,また現地観測では発生箇 所と観測局の距離が遠方のため実体波となるが,室 内実験では振動発生箇所からの距離が近く表面波と なる等その環境は大きく異なる.振幅等の特定の要 因に着目した相似則を満たしていないことには注意 が必要であるが、 定性的な振動特性の確認はできる と考えている. なお崩壊規模の振幅を求めるには, 媒体の影響を含めて検討できる数値解析の方が有利 と考えられる.

実験用水路は図-1 に示すように斜面に見立てた 斜路および河床に相当する水平水路である. 縮尺規 模は実現象の200分の1程度で、土砂が水路移動時 に発生する振動を直接床に伝えるため、水路の基礎 はコンクリートブロックを階段状に積み、その上に アクリル製水路を設置し、水路とブロックの間はモ ルタルを充填して水路全体を基礎と密着させた.水 路勾配は 30 度,斜路の長さは 2.0m,水平水路の長 さは 3.2m である. 斜路の上流に仕切板を設置し, 仕 切り板を引き抜くことで、斜路を流下するようにし た. 対岸への土砂の衝突を想定しコンクリート壁の 設置の有無等を変化させて計測を行った.土砂は直 径 5~10cm の礫と直径 1cm 程度の礫を混合し、これ に土砂の移動を促すため水を混ぜ合わせたものを使 用した.水の重量 20kg は水路幅,角度から予備実験 により決定した.比重の同じものでは小規模の水路 を流下させるには限界があり、起振力を大きくする ため, 直径 10cm, 重量 5kg の鉄球 3 個を加えた条件 も設定した.実験ケースは対岸の壁の有無,土砂の 重量を変化させるとともに鉄球を加え**表-1** に示す 合計8ケースを実施した.

± 1	中的 夕 川
オート	手腕尖性
-1-2	

Case	実験条件	礫	使用材料 礫	(kg) 鉄球	水
		(5~10cm)	(1cm)		
1	壁なし	10	10	0	20
2		20	20	0	20
3		30	30	0	20
4		30	30	15	20
5	壁あり	10	10	0	20
6		20	20	0	20
7		30	30	0	20
8		30	30	15	20



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.

2

2

結果と考察

2.0

1.5

1.0

0.5

0.0

-0.5

2.0

1.5

1.0

0.5

0.0

-0.5

0

加速度[cm/s²]

0

加速度[cm/s²]

(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.

4

4

Case 8 UD

(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



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

図-8 case8の経過時間毎のビデオカメラ画像.

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,



(b) 経過時間 1.8 秒 (a) 経過時間 1.3 秒 (b) 経過時間 1.8 秒

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.

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

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, フォ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.

 $u = B(r/r_0)^{-0.5} e^{-\beta r} e^{i\omega(t-z/V_S)}$ (2) ここに r, r₀ 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-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 工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

 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一小 谷村蒲原沢土石流一,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)