

大規模土砂移動発生時の地盤振動に関する振動特性と室内実験

筒井和男・金澤 瑛・木下篤彦・中谷洋明

1. はじめに

大規模な崩壊とそれに伴う河道閉塞の形成はその下流の甚大な被害発生につながるため、崩壊発生の早期検知が重要である。2011年紀伊半島大水害の際も、多数の深層崩壊とそれに伴う河道閉塞により甚大な被害が発生した。一方、大規模崩壊発生時には地震とは異なる特性の地盤振動が観測される事例が知られており、国土交通省では大規模土砂移動検知システムを構築し、リアルタイム検知を行っている。同システムは国立研究開発法人防災科学技術研究所の高感度地震観測網(Hi-net)と国土交通省の振動センサーを統合して用いている。

大規模土砂移動と地盤振動に関する研究は従来から行われており、崩壊検知のための方法や誤検知対策が検討されている。また、その振動特性から土砂移動形態を判断できる等、大規模土砂移動に伴う地盤振動の特性はある程度明らかになっているが、大規模崩壊自体が非常に稀な現象であるため、現地計測の機会は極めて限定的である。そこで、室内実験により大規模崩壊発生時の地盤振動を再現することができれば、実現象の希少性に制約されずに検知技術の改良が期待可能となる。そこで本稿では実現象の観測により得られた地盤振動特性に関する知見を概観し、同システムの改良に向けて実施した室内実験について報告する。

2. 大規模土砂移動発生時の地盤振動

2.1 観測される地盤振動の特性

地震と同様、大規模土砂移動発生時に生じる地盤振動は地震波として地盤を媒体として伝播する。地震波は地球内部を伝わる実体波と地表を境界条件として伝わる表面波に分けられる。さらに実体波は伝播方向への体積変化が伝わるP波(縦波)とせん断歪が伝わるS波(横波)に分けられる。

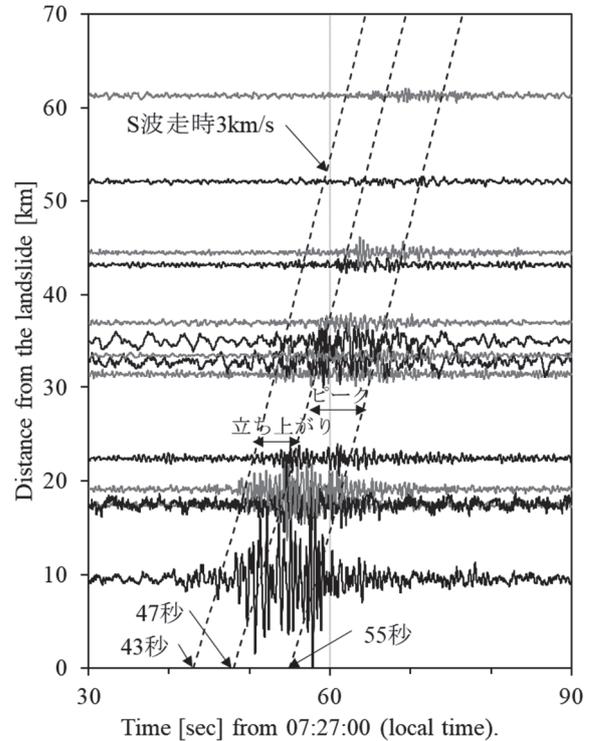


図-1 2014年奈良県五條市赤谷地区における崩壊時に観測された地盤振動波形(海原ら¹⁾参照)

2011年紀伊半島大水害で深層崩壊が発生した奈良県五條市赤谷地区において2014年に再崩壊が発生した際の地盤振動波形¹⁾を図-1に示す。この崩壊はビデオ映像が残されており、発生時刻とその崩壊の様子がわかる貴重な例である。この図は崩壊発生箇所からの距離で並べたレコードセクションと呼ばれ、ほぼS波の走時(約3km/s)に沿って地盤振動が発生している様子が確認できる。このことは約20km間隔で全国に1000点以上ある振動センサーを用いて大規模土砂移動発生時の地盤振動を検知できることを示している。

また、2010年以降の深層崩壊に伴う地盤振動を詳細に解析した研究から、卓越周波数は累積95%で7Hz以下とされている。このことから、低周波の発生に着目することで深層崩壊のような大規模土砂移動を検出できることを示唆している。

2.2 土砂移動プロセスと地盤振動の関係

Hi-net以外にも地震観測網が整備されており、

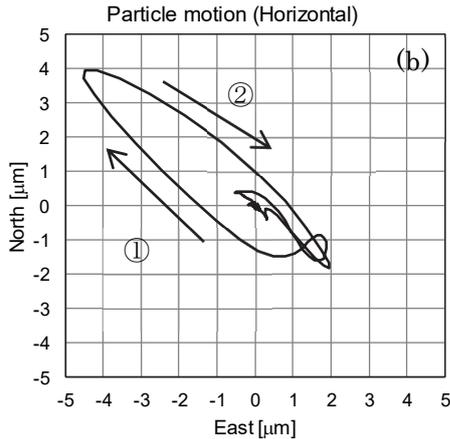


図-2 2011年奈良県五條市赤谷地区の(a)深層崩壊の空中写真、(b)35km離れたF-net野上における0.01～0.1Hz水平成分のパーティクルモーション(海原ら¹⁾参照)

防災科研の広帯域地震観測網 (F-net) を用いた地盤振動の解析事例¹⁾が報告されている。F-netでは0.01Hz～50Hzの幅広い帯域で観測可能であり、2011年の赤谷地区の崩壊による地盤振動が観測されている。低周波帯域の地盤振動は距離による減衰の影響を受けにくく、求めた変位波形には基盤面に働いた力の向きが反映されていると言われ、土砂の移動方向を示すことになる。図-2にその事例を示す。ここでは、F-net野上の0.01～0.1Hz帯の水平2成分のパーティクルモーションを示している。(a)の土砂移動方向(矢印)と(b)の変位方向(①矢印)が一致しており、これらは土砂の移動方向を示していると考えられる。

3. 地盤振動特性再現に向けた室内実験

3.1 室内実験の概要

室内実験では土砂を斜面上に移動させ、斜面下端の水平面もしくは対岸に見立てた壁に衝突させる。この土砂移動時及び衝突時に発生する地盤振動を観測し、実現象の観測で得られた地盤振動特性の再現の可否の確認を目的とした。

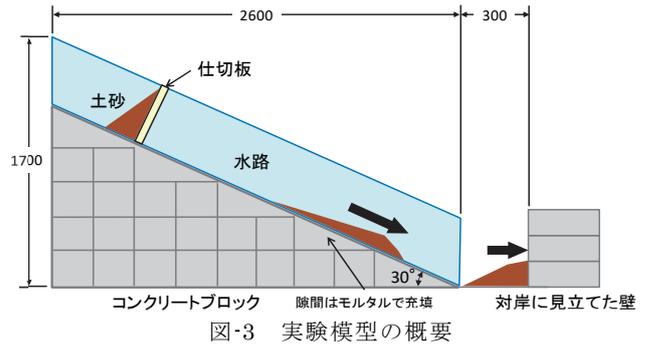


図-3 実験模型の概要



図-4 実験模型の外観

実験装置の概要を図-3に、外観を図-4に示す。階段状に積み上げたコンクリートブロックにアクリル製水路を置き、振動を直接床面に伝わるようモルタルで充填し密着させた。水路の上端の仕切板を引き抜くことで土砂や水が流下する。地盤振動は加速度計4台を用い、位置は実験ケースに応じて水路に平行方向または直角方向に配置した。

実験では直径5～10cmの礫(大礫)と1cm程度の礫(小礫)、また深層崩壊の巨大ブロックが破碎せずに衝突することを再現するため鉄球を含めて流下させる、対岸の壁の位置や水を加える等の条件を変化させて様々なケースを試行した。

3.2 実験結果と考察

実験で計測された振動の時刻歴波形の例を図-5に示す。また実験の状況を図-6に示す。(a)は重量5.24kgの鉄球を3個、(b)は大礫(重量15.06kg)を流下させた。流下開始時から地盤の振動が計測され、壁への衝突以降に振幅が大きくなっている。このように流下する材料の違いにより波形の形状やその立ち上がり、振幅ピーク等に違いが生じることがわかる。

3.2.1 波形の形状と土砂移動形態の関係

土砂移動形態と地盤振動の振幅波形の違いを表現する指標として波形の立ち上がり勾配の緩急を確認した。既往研究の定義に従い勾配は土砂移動

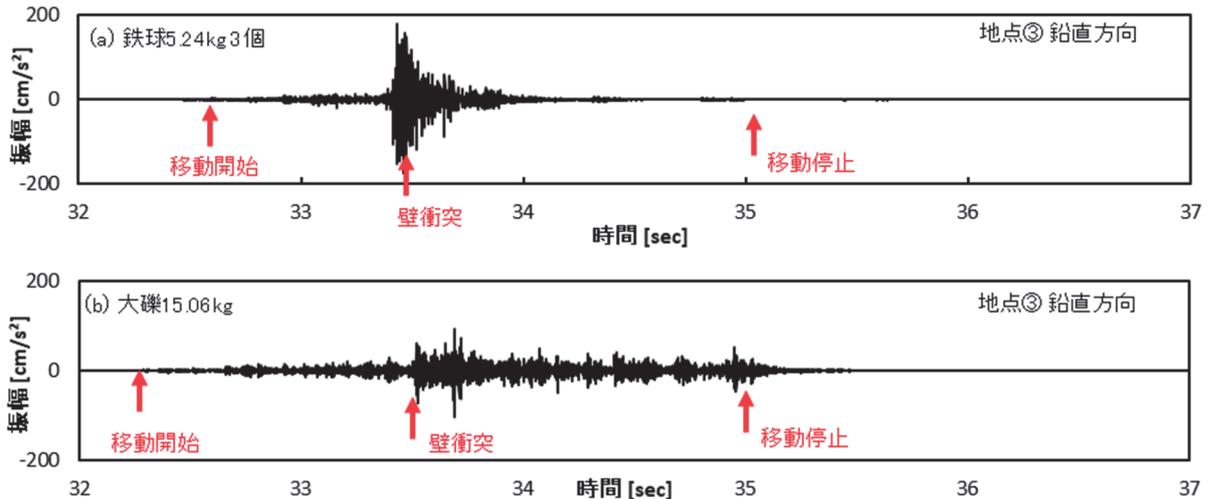


図-5 室内実験で計測された振動の時刻歴波形 (a)鉄球(5.24kg)を3個 (b)大礫(15.06kg)を流下させたもの

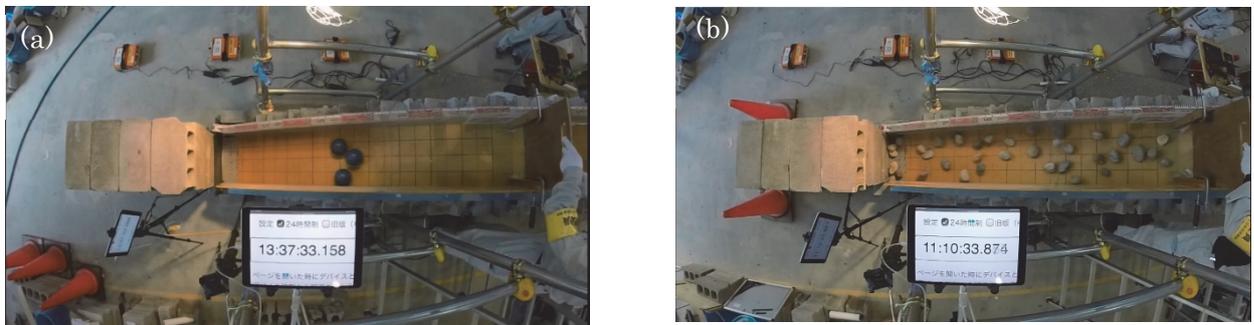


図-6 実験の様子。(a)鉄球(5.24kg)を3個 (b)大礫(15.06kg)を流下させたもの

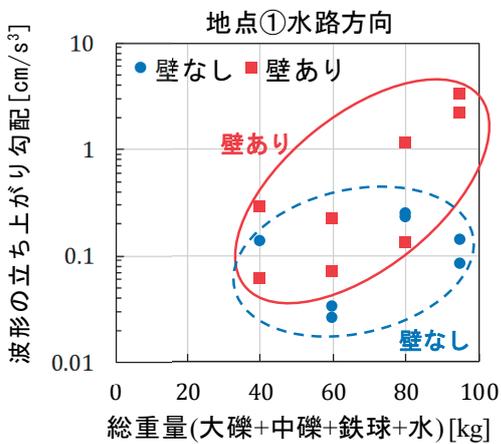


図-7 立ち上がり勾配と総重量の関係

開始時の振幅と最大振幅の差をその時刻差で割ったものとした。崩土が対岸に衝突しない場合より衝突する場合の方が波形の立ち上がり勾配が急になると言われている。実験の結果を図-7に示す。流下する材料の総重量が増えると立ち上がり勾配が急になる傾向が確認できる。

3.2.2 低周波成分の変化

流下させた土砂に鉄球を加えた場合と加えない

場合のフーリエ振幅スペクトルの違いを図-8に示す。鉄球を加えたケースで低周波成分が卓越することが確認できた²⁾。鉄球のバウンド等のパルス的な応力により、広い周波数で振動が発生している状況を反映していると考えられる。2.1で述べたとおり観測に基づく知見では、深層崩壊の土砂移動中の巨大ブロックが低周波を発生させる可能性がある¹⁾と推察されている。この推察と符合する振幅特性が確認できた。

3.2.3 変位波形と土砂移動方向との関係

変位波形と土砂移動方向との関係を把握するため、10~200Hzのバンドパスフィルターを通した振動波形を積分し、変位波形を求めた。重量7.16kgの鉄球2個を流下させた場合の変位波形を図-9に示す。横軸に水路方向、縦軸に鉛直方向の変位を表している。矢印に示すとおり、①→②の順番で変位が生じている。まず下方に変位後、上方に変位している。2.2で述べたとおり広帯域の地震計を用いた地盤振動データでは変位波形から土砂の移動方向を判別することができると分かっているが、すべての実験ケースで再現できていないものの、その可能性を示すことができた。

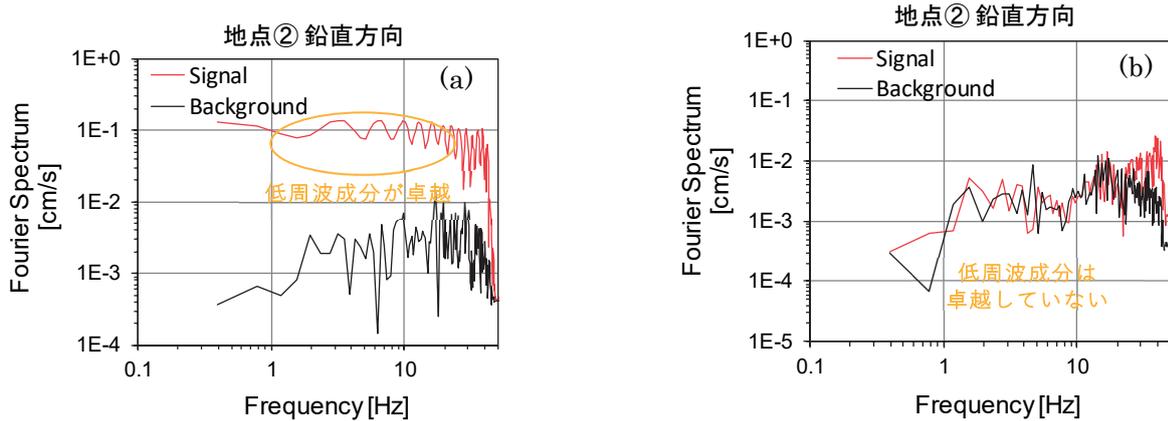


図-8 土砂移動時のフーリエ振幅スペクトル (a)鉄球を加えた場合 (b)鉄球を加えない場合

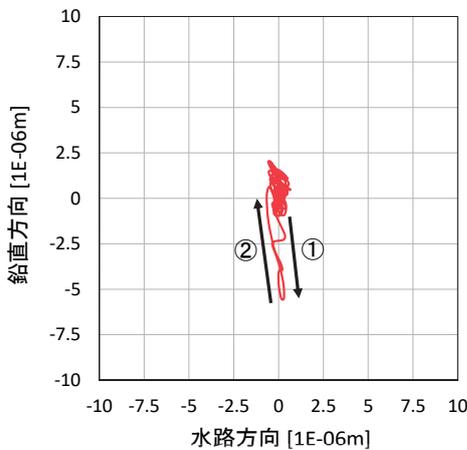


図-9 積分して求めた変位波形

能性も示すことができました。今後、数値実験等も行いつつ、小規模な実験室レベルでの再現により、発生 of 稀な大規模土砂移動事象の検知技術の改良・開発が早められるように、また併せて現象の素過程の解明が進むよう取り組んでいきたい。

謝 辞

国立研究開発法人防災科学技術研究所の地震観測網の観測データを利用させていただきました。また、室内実験は立命館大学にて行い、里深好文教授・藤本将光准教授に貴重なご助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

4. おわりに

実現現象の観測が困難な大規模土砂移動現象の室内実験で振動特性の再現を試みた。今回の実験は小型で物理的な相似則を満たしていないことに注意が必要である。しかし、移動土砂の重量の違い、対岸との衝突の有無等のケースで振動波形、岩塊の混入による周波数成分変化について、実現現象による知見と整合する結果を得ることができ、また変位波形から土砂の移動方向を判別できる可

参考文献

- 1) 海原 荘一、浅原 裕、木下 篤彦、中谷 洋明、田中 健貴：高感度地震観測網による大規模土砂移動発生時の地盤振動特性と検知、砂防学会誌、Vol.73、No.5、p.27-37、2021
- 2) 筒井 和男、坂口 隆紀、海原 荘一、谷田 佑太、木下 篤彦、柴田 俊、金澤 瑛、中谷 洋明、里深 好文、藤本 将光：土砂移動時の地盤振動の再現—模型実験からの考察—、砂防学会誌、Vol.73、No.5、p.49-52、2021

筒井和男



和歌山県土砂災害啓発センター 主査
TSUTSUI Kazuo

金澤 瑛



国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部土砂災害研究室 研究官
KANAZAWA Akito

木下篤彦



国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室 主任研究官、博士(農学)
Dr.KINOSHITA Atsuhiko

中谷洋明



国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部土砂災害研究室長、博士(農学)
Dr.NAKAYA Hiroaki