

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

A STUDY ON TIMING OF SEDIMENT TRANSPORT PHENOMENA
OCCURRENCE AND SEDIMENT TRANSPORT PROCESS USING
SEISMOMETER DATA

高原晃宙¹・木下篤彦¹・水野秀明²

長谷川真英³・梅田ハルミ³・海原荘一⁴・浅原裕⁵

Teruyoshi TAKAHARA¹, Atsuhiko KINOSHITA¹, Hideaki MIZUNO²

Masahide HASEGAWA³, Harumi UMETA³, Soichi KAIHARA⁴ and Hiroshi ASAHARA⁵

¹正会員 博士(農) 国立研究開発法人土木研究所(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²非会員 博士(農) 国立研究開発法人土木研究所(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

³非会員 国土交通省北陸地方整備局(〒950-8801 新潟県新潟市中央区美咲町1-1-1)

⁴正会員 博士(工) 株式会社エイト日本技術開発(〒700-8617 岡山市北区津島京町3丁目1-21)

⁵正会員 博士(工) 一般財団法人砂防・地すべり技術センター(〒102-0074 東京都千代田区九段南4-8-21)

There is a high possibility of occurrence natural dams when deep seated catastrophic landslide occur. Then, in that case, it increases the likelihood of attacks against upstream area and downstream area. Therefore, it is important to rapidly detect sediment disaster.

In this study, to clarify relationship of sediment transport or attacking bank and ground vibration, we analyzed ground vibration data of occurred deep seated catastrophic landslide. In this results, we understand that it bears a distinct relationship to ground vibration and sediment transport. Therefore, we determined that it may detect natural dams using seismometers.

Key Words : Seismometer Analysis, Deep-Seated Catastrophic Landslide , Sediment Transport

1. はじめに

数百万³規模といった大規模な深層崩壊が生じて河道閉塞が形成された場合、上流域の浸水被害や越流侵食による土砂や湛水の流出による河川流量の著しい増大によって下流域に浸水被害が生じる可能性がある。このため、河道閉塞形成の早期発見は、深層崩壊の警戒避難を考える上で重要であるが、2011年台風12号による紀伊半島大水害のように深層崩壊が複数箇所が発生するような大規模な豪雨災害では、交通網の遮断等により河道閉塞の発見までに時間を要する。

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や広帯域地震観測網F-net等の地震観測網は、観測点の間隔が20km程度と比較的離れていても大規模な深層崩壊であれば、深層崩壊時の地盤振動を捉えることができることが知られている^{1, 2)}。よって、振動センサ

は、大規模な土砂災害の発生位置、崩壊規模³⁾、発生時刻を知るための有効な手段として活用が期待されている。また、深層崩壊の地盤振動のうち、広帯域地震観測網F-netで得られた地盤振動データを処理して得られた0.01~0.1Hzの低周波地盤振動に基づく変位波形は土砂の移動方向を示す場合があることが知られている⁴⁾。

しかし、深層崩壊による土砂移動時の地盤振動の実態については検証できるデータが少なく、土砂移動のプロセスと地盤振動の挙動の関係は明らかになっていない。地盤振動による大規模な土砂移動の検知技術について研究開発を進める上で、また、地盤振動の減衰等の振動特性や検知の可否を考える上での基本的な知識として、土砂移動による地盤振動の起振メカニズムの解明は重要であると考えられる。

本研究では、まず、奈良県五條市大塔町赤谷地区における2014年台風11号による深層崩壊斜面の再崩壊の土砂移動プロセスを捉えたビデオ映像とその時の地盤振動

データを比較する。次に、この結果を基に、2011年台風11号時の深層崩壊時の地盤振動と広帯域地震観測網の0.01～0.1Hzの低周波地盤振動に基づく地盤変位から推定される土砂移動プロセスと高感度地震観測網の1～7Hzの地盤振動の挙動を比較することで、深層崩壊の土砂移動プロセスと地盤振動の起振メカニズムを把握する。

2. 2014年赤谷地区深層崩壊斜面の再崩壊による地盤振動と土砂移動プロセスの関係

(1) 検討対象とした奈良県五條市大塔町赤谷地区の概要

2011年9月の台風12号による豪雨により紀伊半島で約30もの深層崩壊が発生し、17箇所の河道閉塞が生じている。本研究の対象としたのは、奈良県五條市大塔町で標高1050mの尾根部から発生した長さ約800m、幅約200mの赤谷地区の深層崩壊⁵⁾である。

また、この赤谷地区の深層崩壊斜面は、2014年の台風11号による豪雨により、深層崩壊斜面内で約76万m³規模の再崩壊が生じている⁶⁾。

(2) 2014年赤谷地区の再崩壊の映像データと地盤振動データ

2014年台風14号による赤谷地区の再崩壊では、深層崩壊斜面の対岸に設置されている監視カメラにより、8月10日午前7時27分頃に再崩壊発生時の土砂移動の映像が記録されており、また、この映像には正確な時刻が記録されていた。深層崩壊斜面と監視カメラの位置関係を写真-1に示す。

一方、再崩壊の地盤振動データについては赤谷地区周辺の国土交通省の観測局及び国立研究開発法人防災科学技術研究所が設置している高感度地震観測網のHi-netと広帯域地震観測網F-netの振動センサのデータを用いた。これらの地震観測網の振動センサは加速度計よりも低周波域の感度が良好な速度計が採用されている。なお、振動データのサンプリング周波数は100Hz、南北方向（NS）、東西方向（EW）、上下方向（UD）の3成分が計測されている。

振動センサの観測局の位置を図-1に、観測局と赤谷地区の深層崩壊斜面との距離を表-1に示す。

(3) 2014年赤谷地区再崩壊時の地盤振動データ解析方法

深層崩壊発生時のHi-netの地盤振動データを用いた既存の研究事例^{1)～3)}では、その卓越周波数は1～3Hz程度と低いとされていることから、収集した崩壊箇所周辺の観測局の地盤振動データはノイズの除去のために既往研究と同様に1～7Hzのバンドパスフィルタ処理を行っている。

また、振幅については地盤振動データの速度値から式(1)に示す二乗平均平方根（RMS：Root Mean Square）の0.5秒間隔の値を算出した。

ここに、Nはサンプル数、y(j)はサンプリング数j番目



写真-1 赤谷地区深層崩壊斜面とビデオカメラの位置

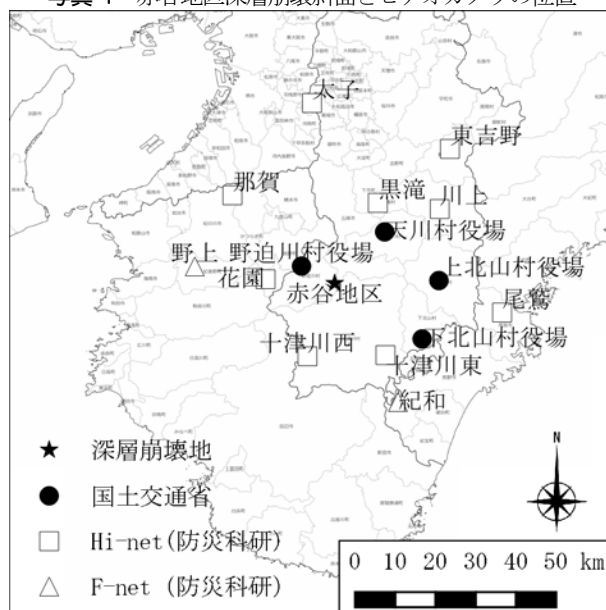


図-1 観測局位置図

表-1 解析に用いた振動データの観測局と赤谷からの距離

No.	観測局名	赤谷深層崩壊斜面からの距離(km)
1	野迫川村役場(国土交通省)	9.5
2	Hi-net花園	17.4
3	天川村役場(国土交通省)	17.5
4	Hi-net十津川西	19.0
5	Hi-net十津川東	21.3
6	Hi-net黒滝	22.5
7	下北山村役場(国土交通省)	25.3
8	上北山村役場(国土交通省)	25.4
9	Hi-net川上	31.5
10	F-net紀和	32.8
11	Hi-net那賀	33.5
12	F-net野上	35.1
13	Hi-net野上	37.0
14	Hi-net尾鷲	41.6
15	Hi-net東吉野	43.2
16	Hi-net太子	44.5

の振幅である。

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \{y(j)\}^2} \quad (1)$$

収集した各観測局の地盤振動データから求めたRMS値

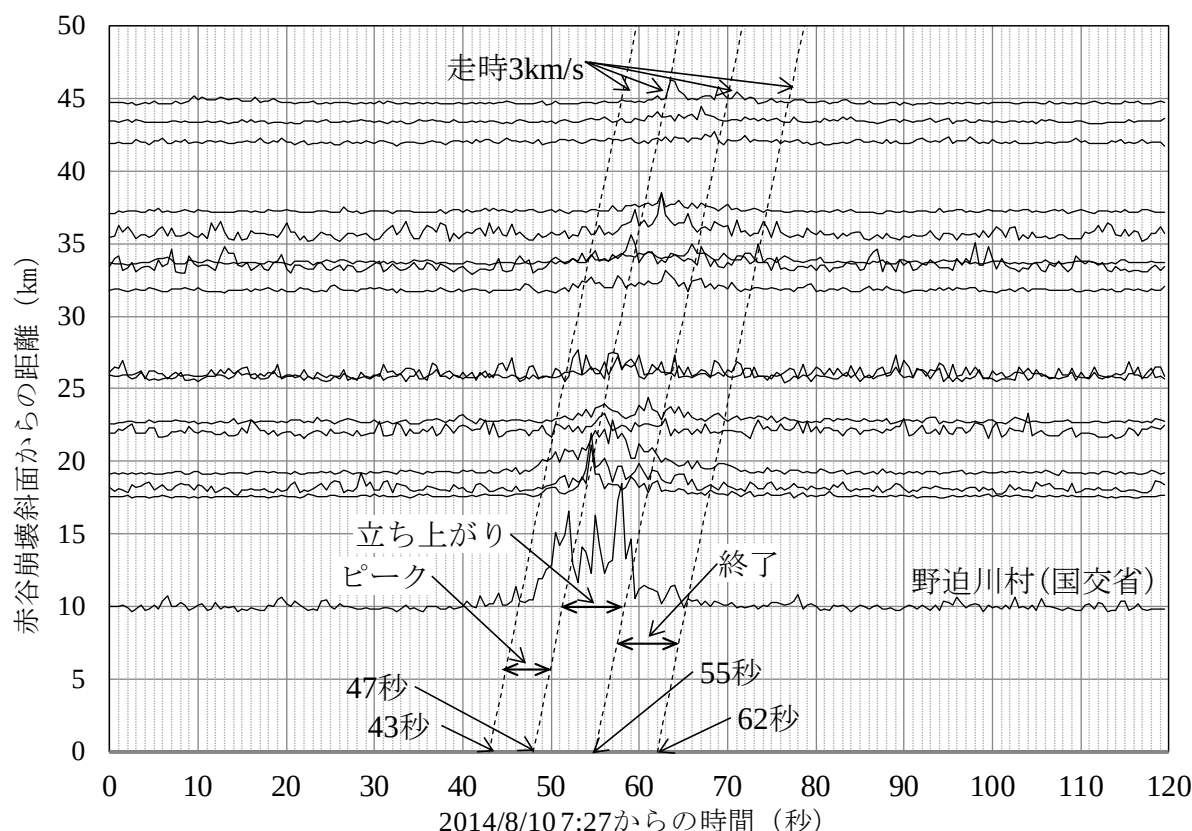


図-2 各観測局のRMS値の時間変化（図中の秒数は走時から推定した赤谷地区での振動の立ち上がり，ピーク，終了時刻）

のグラフを，赤谷地区からの距離の順に示した1～7Hzのバンドパスフィルタ処理した地盤振動波形のレコードセクションを図-2に示す。

(4) 2014年赤谷地区再崩壊時の1～7Hzの地盤振動の挙動と土砂移動プロセスの関係

図-2において，再崩壊による各観測局の波形の立ち上がり時刻を結ぶと概ね走時が3km/sであり，地震のS波と同程度であった。

ここでは，現地の崩壊の映像と地盤振動の波形の挙動と比較するため，これ以降の地盤振動の時刻は図-2の横軸に表示した走時を考慮した赤谷地区地点での時刻で表示している。地盤振動の赤谷地点での1～7Hzの地盤振動波形の挙動と監視カメラによる土砂移動プロセスの比較結果を以下に示す。

監視カメラの映像が雨滴等の影響で不鮮明であったことから再崩壊がはじまった瞬間を確認することはできなかったが，7時27分35秒～43秒頃までは再崩壊の崩土が斜面を流下していたことが確認できた。この時間帯には1～7Hzの地盤振動の波形の立ち上がりは見られなかった（図-3に監視カメラのキャプチャ画像を示す）。

レコードセクションでは7時27分43秒あたりから地盤振動波形が立ち上がり始めているが，この時刻の監視カメラの映像では，土砂移動プロセスとしては斜面から崩壊土砂が河床に到達していた。なお，監視カメラ映像では流下している土砂は流動性が高いとみられることから，



図-3 7時27分47秒頃のビデオカメラ画像

崩壊土砂は破碎が進んだ状態であることが推察される。なお，最も赤谷地区に近い国土交通省の野迫川村観測局の波形で最初のピークを迎える7時27分47秒では，対岸に土砂が衝突している状況であった。

2つ目のピークにあたる7時27分55秒では，崩壊土砂が対岸に駆け上がり，最高標高に到達している時点であったが，崩壊土砂が対岸に衝突したことが地盤振動波形の立ち上がりに関係していることを踏まえると，土砂が最高標高に到達したことが，地盤振動のピークの原因になっているのではなく，後続の高い標高から流下した崩壊土砂が対岸斜面下部に衝突していると推察される。

赤谷地区の地盤振動監視カメラと映像の比較によって

明らかとなった事実としては、1～7Hzのバンドパスフィルタで処理した地盤振動波形では、崩壊土砂が対岸に衝突し始めたときに波形の立ち上がりが始まり、対岸に土砂が衝突している期間は振幅が大きくなっていることが明らかとなった。また、崩壊土砂が斜面を流下しているときには振幅の増大がないということが明らかとなった。この2014年赤谷地区の再崩壊の1～7Hzの地盤振動波形と監視カメラ映像との比較で得られた知見を基に、2011年台風12号時に発生した赤谷地区での0.01～0.1Hzの低周波地盤振動の変位波形による深層崩壊の挙動と1～7Hzの波形を比較することとした。

3. 2011年台風12号での深層崩壊発生時の低周波地盤振動に基づく土砂移動の挙動と1～7Hzの地盤振動の波形の関係

(1) 2011年赤谷地区深層崩壊時低周波(0.01～0.1Hz)の地盤振動の変位波形による土砂移動の推定

2011年台風12号による赤谷地区の深層崩壊発生について、赤谷地区から35.1km離れたF-net野上の平面方向2成分、上下方向の計3成分の速度波形をフーリエ変換、積

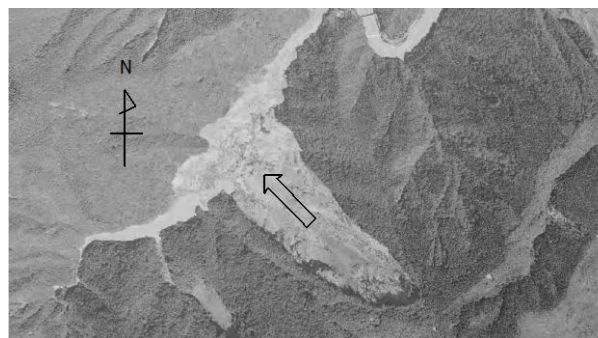


写真-2 赤谷地区の空中写真(矢印は斜面下方向)

分、逆フーリエ変換等の処理を行い、変位波形を求めたもののうち、上下成分を図-4に示す。また、上記の3成分の変位波形から平面方向及び斜面縦断方法の地盤変位を図-5及び図-6、赤谷地区の空中写真を写真-2に示す。

図-5の0.01～0.1Hzの低周波の変位方向と写真-2の崩壊地の土砂移動方向が一致していることがわかる。また、土砂移動プロセスの把握を目的として、平面及び縦断方向の変化の比較のために図-4の変位0μm時点及び極小、極大点時点を①～⑦として設定するとともに図-5及び図-6にも示した。

これらを基に、低周波変位波形から2011年赤谷地区の

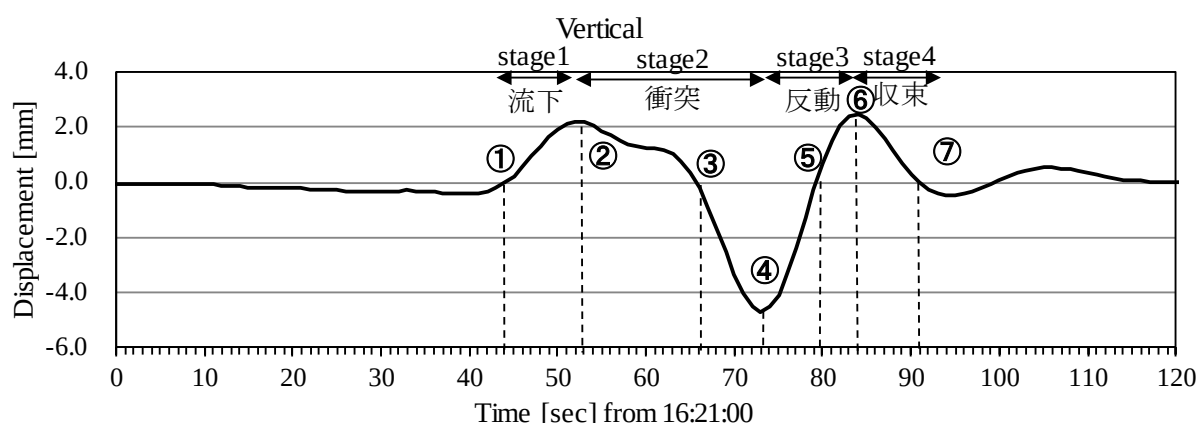


図-4 赤谷地区深層崩壊発生時の0.01～0.1Hzの変位波形

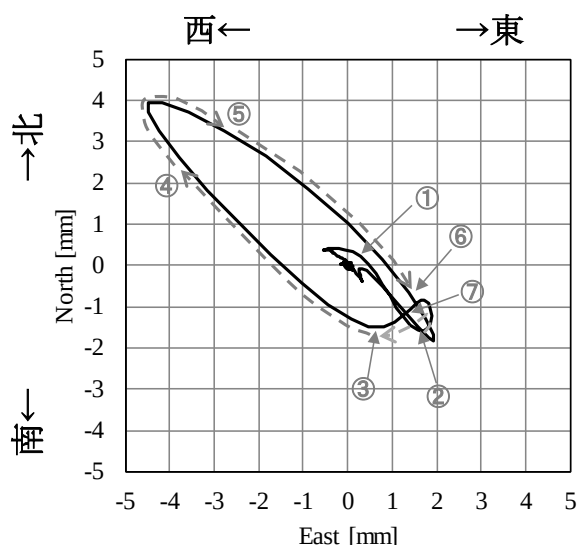


図-5 赤谷地区深層崩壊発生時に得られた変位 (平面方向)

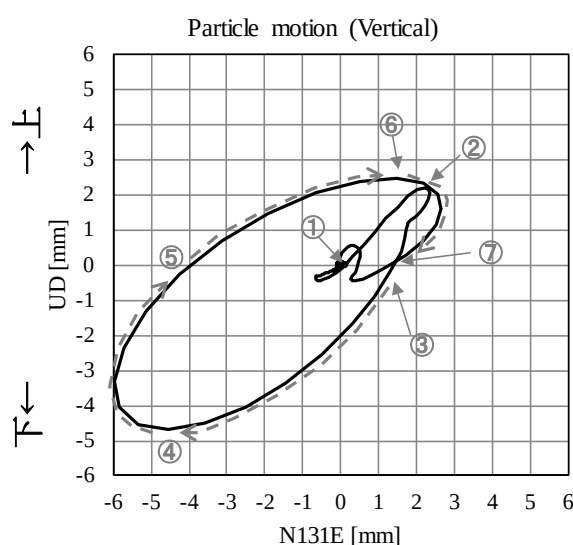


図-6 赤谷地区深層崩壊発生時に得られた変位 (縦断方向)

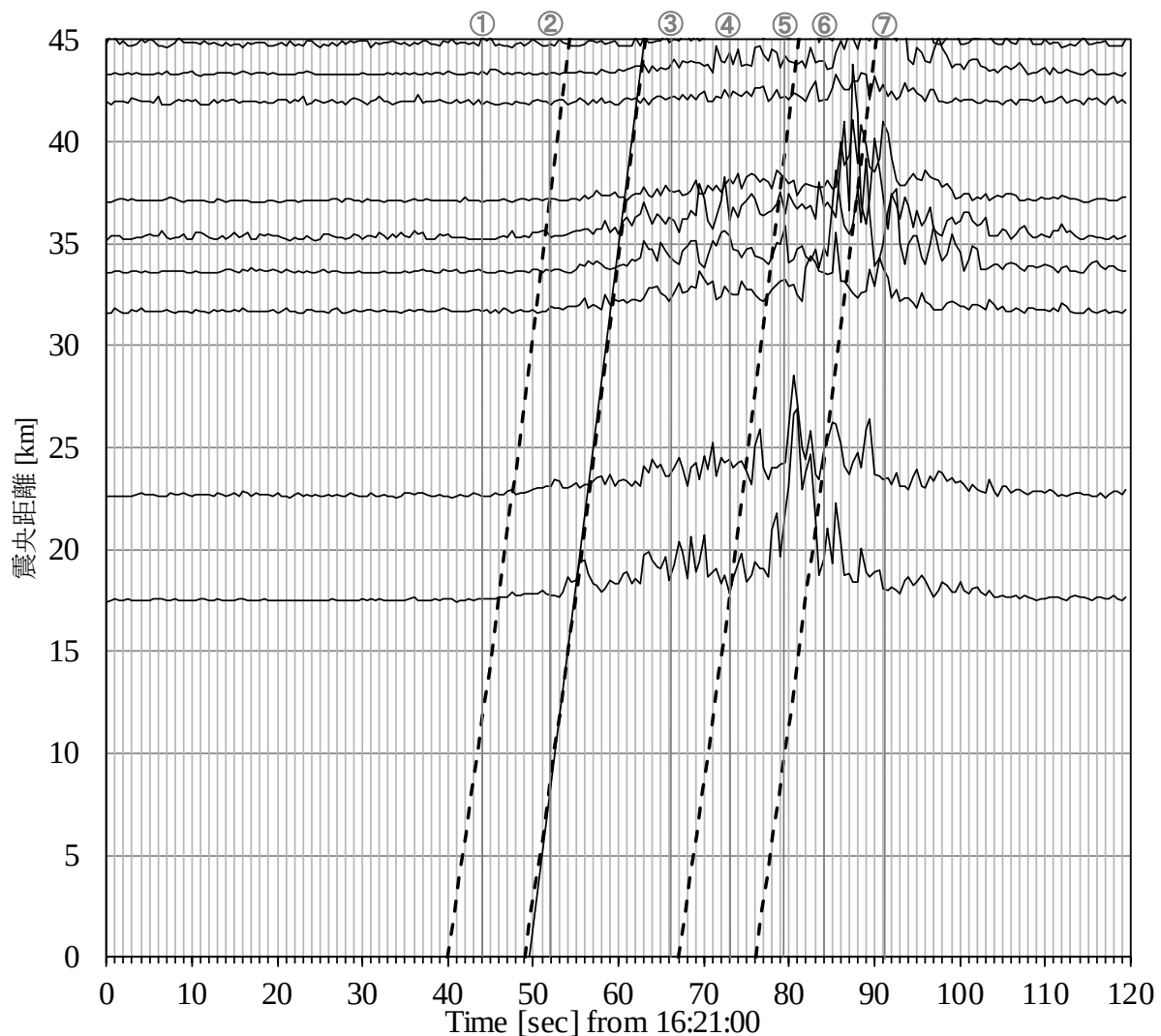


図-7 2011赤谷地区深層崩壊時のHi-net等の1~7Hzレコードセクション

深層崩壊時の土砂移動プロセスを推定した。

Stage1 (①~②) は、斜面の上向きの変位が生じていることから、崩土の流下に伴い崩土の下向きの摩擦力に対する反力によるものと考えられる。

続くStage2では、斜面下向きに変位しており、変位量もStage1よりも2倍以上も大きい（図-4）、下向きの大きな力が働いていると推定されることから、崩土が河床や斜面对岸に衝突している時間帯であると考えられる。Stage3では斜面上方向きの変位を示すが、Stage2の崩土の衝突の後は斜面上方の力を与える要因はないため、Stage3はStage2の反動であり、Stage4は変位量も小さいためStage3以降に生じる変位の収束期間であると考えられる。

(2) 低周波変位波形と1~7Hzピークの時間の遅れについて

0.01~0.1Hzの変位波形との比較を行うため、2011年赤谷地区の深層崩壊時の1~7Hzのバンドパスフィルタで処理したHi-netの地盤振動波形のレコードセクションを図-7に示す。

低周波の地盤振動波形と同じ振動データである図-7のF-net野上に着目すると、1~7Hzの波形の立ち上がりは②~④、0.01~0.1Hzの低周波では変位の収束した⑥~⑦あたりに1~7Hzのピークがある。つまり、1~7Hzの波形のピークは低周波のピークである④の時点から10数秒遅れていることがわかる。

以上の低周波の地盤変位と土砂移動の解釈、1~7Hzの波形の変動を表-2に整理した。

(3) 低周波変位波形と1~7Hz波形のピークのずれと土砂移動メカニズムに対する考察

この低周波変位波形と1~7Hzの波形のタイミングの不整合について、低周波による変位波形は大きな力が一方向に働いたことに対する応答であると仮定し、変位波形による土砂移動完了後に1~7Hz波形のピークが生じる原因について、以下のような仮説を立て考察した。

- ・仮説1：低周波変位波形は大きな岩塊が破碎されていない状態で対岸にぶつかる時の地盤の変位を示していると仮定する。
- ・仮説2：一方、1~7Hz波形は破碎した崩土が対岸に

表-2 低周波振動による変位と土砂移動の解釈及び1～7Hz波形の関係

Stage	時点	水平方向変位	縦断方向変位	時間	土砂移動の解釈	1～7Hz波形
Stage1	①-②	南西方向 ↘	斜面上向き ↗	8sec	移動岩塊の移動開始～対岸に到達	振幅増大なし
Stage2	②-④	北西方向 ↖	斜面下向き ↙	21sec	移動岩塊が対岸へ衝突開始～完了	波形が立ち上がり開始
Stage3	④-⑥	南西方向 ↘	斜面上向き ↗	9sec	変位の反動(破碎した崩土の流下継続)	立ち上がり中
Stage4	⑥-⑦	ほぼ変動なし	斜面下向き ↙	7sec	収束(破碎した崩土の流下)	ピーク

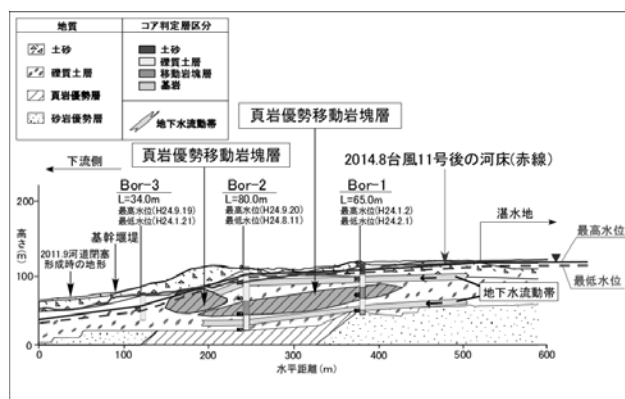


図-8 赤谷地区の河道閉塞部縦断図⁷⁾

衝突したときの地盤振動と仮定する。

赤谷地区の河道閉塞部の底部には図-8に示すように、あまり破碎されていない移動岩塊層が、その上部には破碎した崩土が堆積しており、崩壊プロセスとしては移動岩層が先に河床・対岸に衝突し、その後には破碎した土砂が堆積していることから、上記の仮説に矛盾しない。

また、2011年赤谷地区の深層崩壊では、低周波変位は先に収まった後に、1～7Hz波形はピークが生じており、先に移動岩塊層の動きは収束したが、斜面上部より長距離移動してきた破碎した崩土がその後も対岸に衝突し、その時のピークを捉えたのが1～7Hzのピークであると考えたと仮説に矛盾しない。

4. おわりに

本研究では、深層崩壊時の映像と1～7Hzの地盤振動波形の0.01～0.1Hzの変位波形の振動解析より、以下の検討結果を得た。

- 1) 1～7Hzの波形は比較的破碎した土砂が河床・対岸に衝突したことを示していると考えられる。
- 2) 深層崩壊の地盤振動に0.01～0.1Hzの低周波成分が含まれている場合、破碎されていない移動岩塊層の衝突が生じていると考えられる。

今後は本研究での仮説を検証するために低周波成分が確認できている他事例の河道閉塞部の内部の構造の確認を進めたい。

謝辞

本研究では、国研防災科学技術研究所のHi-net及びF-netのデータ及び国土交通省近畿地方整備局紀伊山地砂防事務所の地盤振動データ及び監視カメラ映像を使用した。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 森脇寛：崩壊型土石流の流下に伴う地盤の震動特性—小谷村蒲原沢土石流—，地すべり，第3号，第36巻，pp.99-107，1999。
- 2) 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.3，p.267-277，2005。
- 3) 大角恒雄・海原荘一・酒井良・桜井亘：深層崩壊等を検知するための振動センサーの地中化によるノイズ低減と紀伊半島における検知可能な崩壊規模の検討，砂防学会誌，Vol.68，No.5，p.32-37，2016。
- 4) Masumi Yamada, Hiroyuki Kumagai, Yuki matsushi, Takanori Matsuzawa: Dynamic Landslide Processes Revealed by Broadband Seismicrecords, geophysical research letters, Vol.40, No.12, pp.2998-3002, 2013。
- 5) 松村和樹・藤田正治・山田孝・権田豊・沼本晋也・堤大三・中谷加奈・今泉文寿・島田徹・海堀正博・鈴木浩二・徳永博・柏原佳明・長野英次・横山修・鈴木拓郎・武澤永純・大野亮一・長山孝彦・池島剛・土屋智：2011年9月台風12号による紀伊半島で発生した土砂災害，砂防学会誌，Vol.64，No.5，pp.43-53，2012。
- 6) 桜井亘・酒井良・奥山悠木・水山高久・池田暁彦・海原荘一・只熊典子・柏原佳明・吉野弘祐・小川内良人・龍見栄臣・島田徹：2014年8月台風11号時に河道閉塞で生じた侵食・土砂流出と対策への影響，砂防学会誌，Vol.68，No.6，pp.4-13，2016。
- 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・侵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。

(2016. 4. 4受付)