

崩壊時の地盤振動特性に着目した 大規模土砂移動の検知に関する研究

THE RELATIONSHIP BETWEEN SEISMIC CHARACTERISTICS AND LARGE-SCALE SEDIMENT MOVEMENT

木下篤彦¹・海原荘一²・山路広明³
廣瀬昌宏³・只熊典子⁴・浅原裕³

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）

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非会員 農修 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） 株式会社かなめ技術開発（〒111-0054 東京都台東区鳥越2丁目7-4）

It is possible to detect large-scale sediment movement, such as deep-seated landslides, through a sensitive seismic stations network. The purpose of this study was to present the relationship between seismic characteristics and the type of sediment movement for recognition of various phenomena as they occur. By focusing on the inclination of amplitude enlargement, duration of the seismic wave, and the dominant frequency, we were able to predict the sediment movement type. In many cases, the duration of the seismic wave was lower than 7 Hz.

Key Words : *Large-scale sediment movement, Sediment movement types, Seismometer analysis*

1. はじめに

数百万m³規模といった大規模な深層崩壊が発生した場合には、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等の観測局間距離が20km程度の地震観測網で地盤振動を検知可能であることが知られており、大規模な土砂災害の発生位置や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。従来の深層崩壊と地盤振動に関する研究の多くは、深層崩壊事例の個々の災害について振動波形を解析した事例研究であり、周波数特性や距離減衰等の地盤振動特性に関するもの^{1)~4)}である。

深層崩壊で最も注意しなければならないのは、天然ダムを形成するケースであり、特に流域面積の大きい天然ダムの場合は越流決壊しやすく、下流に甚大な洪水被害を及ぼす可能性がある。深層崩壊が発生しても土石流のように長い距離を流下・停止し、天然ダムを形成しないものもある。また、豪雨災害時には交通網自体が災害によって機能しないため、現地の状況が確認しにくい状況

となっている可能性も高いことから、常時遠隔でデータを受信できる地震観測網のデータから洪水災害の発生しやすさを把握することはリスク管理上有益である。

そこで、本研究では過去に発生した多数の深層崩壊時の地盤振動波形を解析するとともに、天然ダムの形成の有無や土砂移動形態と地盤振動特性の関係を整理し、河道閉塞発生予測技術を開発するための基礎的な研究を行った。まず、深層崩壊時の土砂移動現象と振動特性が詳細に調査されている2014年の奈良県赤谷地区の崩壊時の振動波形のデータを用いて、バンドパスフィルタの違いによる振動継続時間の算定結果への影響度を検討した。次に、その結果を踏まえて過去の深層崩壊事例の地盤振動を収集し、崩壊による地盤振動の有無を確認するとともに、波形の立ち上がりの勾配、卓越周波数、振動継続等を整理し、天然ダムの形成・非形成及び流下形態との関係を把握した。

2. 深層崩壊時の地盤振動解析におけるバンドパスフィルタの違いと振動継続時間の算定結果への影響

高感度地震観測網で観測される地盤振動は、さまざまな周波数成分が含まれており、この中から深層崩壊による地盤振動を抽出するため、バンドパスフィルタによる処理が必要となる。このバンドパスフィルタの帯域の違いにより、ノイズの除去効果が異なるため、振動継続時間や波形の立ち上がり勾配等に影響が生じることとなる。

2011年台風12号で約900万m³規模の深層崩壊の発生した⁵⁾奈良県五條市大塔町赤谷地区では、2014年台風11号でさらに崩壊斜面内で約76万m³の再崩壊が生じた⁶⁾。この崩壊で斜面を土砂が滑落して対岸に土砂が衝突する様子はビデオカメラにより記録されており、概ねの崩土の移動時間が把握できている。また、周辺の高感度地震観測網のデータでも、崩壊に伴う地盤振動が確認できている⁷⁾。

そこで、土砂移動プロセスの映像と地盤振動データの両方が存在する2014年台風11号の赤谷地区の再崩壊のデータで、フィルタの帯域の違いによる振動継続時間を確認することとした。具体的には、1~7Hz、1~10Hz、1~20Hz、1~30Hzと4種類の帯域の異なるバンドパスフィルタで処理した場合の振動継続時間への影響を確認した。

結果としては、図-1に示すようにどの帯域のフィルタでも、ほとんどの観測局の振動継続時間は10%程度の違いであり、フィルタの帯域の違いは振動継続時間に大きな影響がないことが確認できた。また、各観測局の振動継続時間は、ビデオにおける崩土が河床から対岸に衝突している20数秒⁷⁾とほぼ同程度の振動継続時間であることが確認できた。

森脇ら¹⁾の事例研究によると、深層崩壊時の地盤振動の卓越周波数は1~2Hzの低周波域が卓越していること、本事例ではあまり影響がなかったが、10 Hz以上では交通等の人工振動の影響がある場合があることから、次章に示す46事例の深層崩壊の地盤振動解析では低い周波数帯域、かつ、きりの良い1~10Hzを適用することとした。

3. 検討対象の深層崩壊事例と振動解析の内容

(1) 検討対象とした深層崩壊事例におけるデータの収集

過去の深層崩壊発生事例における地盤振動解析は、2010年以前は国立研究開発法人土木研究所で公開されている過去の深層崩壊発生事例のリストから、2010年以降のものについては災害調査資料⁷⁻⁹⁾から抽出した降雨による深層崩壊(再崩壊を含む)の中から、高感度地震観測網の整備された2004年以降の46イベントを検討対象とした。地盤振動データとしては、深層崩壊発生箇所周辺の高感度地震観測網等の連続観測記録を収集した。

天然ダムの形成・非形成については災害報告等から区分を行った。また、形成・非形成とは別に、流下距離が崩壊幅の5倍以上を流下型、それ以下を衝突型として、流下距離による分類を行った。

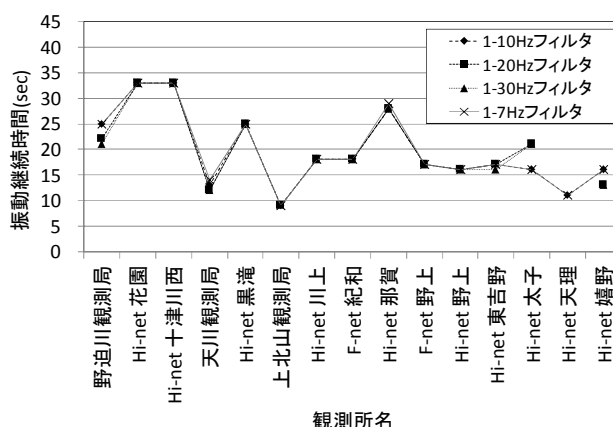


図-1 2014年台風11号による赤谷地区再崩壊時のバンドパスフィルタの違いによる周辺の観測局の振動継続時間の違い

(2) 深層崩壊に伴う地盤振動の検知の条件

深層崩壊が発生しても規模が小さい、または、観測局までの距離が遠い等の理由により、周辺の高感度地震観測網の観測局で地盤振動を捉えることができない場合もある。本研究で地盤振動による深層崩壊の検知については、既存の研究事例²⁾に準じて、以下に示す長短2つの振幅の指標とトリガ条件を設定して行った。

地盤振動の大きさを表す指標として、高感度地震観測網の100HzサンプリングのUD成分速度値から、式(1)に示す二乗平均平方根(RMS : Root Mean Square)で表現するものとした。

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

ここに、 $y(n)$: n サンプル目の波形データ、 N : データ個数である。

ここでは、深層崩壊時の地盤振動の振幅の増大を表現する短期振幅の平均値として、2秒間のRMS平均値(STA : Short Time Average)を、各観測局のノイズレベルを表現する長期振幅の平均値として60秒間のRMSの平均値(LTA : Long Time Average)を求め、トリガ条件としてSTAがLTAの2.0倍以上を2秒間以上超過した場合に、深層崩壊による振動があったものとし、また、4観測局以上でトリガ超過した深層崩壊事例について取り扱った。

(3) 深層崩壊による地盤振動波形の立ち上がり勾配算定方法

深層崩壊による地盤振動の波形形状の違いを表現する指標として、立ち上がりの緩急を定量評価するため、図-2に示すトリガ超過時点の振幅とピーク振幅、それらの時刻差から1 μ kine/sec以上を境界として急であるとし、それ未満を緩いと区分した。なお、この波形の立ち上がり勾配については、深層崩壊発生箇所から最も近い観測局のデータを用いた。

(4) 深層崩壊による地盤振動の継続時間の算定方法

深層崩壊による地盤振動の継続時間は、起点はSTA/LTAが2.0倍を2秒連続で超える時点とし、終点はトリガ基点前の振幅に近いレベルまで下がった時点として、STA/LTAが1.2倍を3秒連続で下回る時点とし、起終点間の時間を振動継続時間として算定した。

(5) 深層崩壊による地盤振動の卓越周波数の算定方法

周波数解析は、まず、土砂移動に伴う地盤振動(シグナル)の範囲と土砂移動発生前(バックグラウンドノイズ)のそれぞれのデータで、高速フーリエ変換(FFT: Fast Fourier Transform)により周波数スペクトルを計算し、0.5~1Hz、1~2Hz、2~3Hzという具体的に1Hzごとに20Hzまで、シグナルとバックグラウンドノイズの平均値と比率を求め、最も比率の大きいところを卓越周波数とした。なお、シグナルの周波数解析の計算対象データ長はノイズの影響を受けにくいように、振動継続時間に応じて2のn乗のデータ数となる10.24秒、20.48秒、40.96秒を使い分けした。

4. 天然ダムの形成・非形成及び土砂移動形態と振動特性の関係

前述の解析条件で過去の46の深層崩壊事例における検討結果を表-1と図-3~8に示す。天然ダムの形成・非形成と検知・非検知の関係については、天然ダムを形成した深層崩壊事例のほとんどを検知しているのに対し、非形成の場合は半分以下の検知数となっている(図-4)。このように天然ダムを形成する深層崩壊事例の方が検知しやすい結果となっているのは、天然ダム形成を形成している事例の方が崩壊規模の大きいものが多いことがその理由である可能性がある。

土砂移動形態と波形の立ち上がり勾配の関係については、流下距離の長い、流下タイプには立ち上がり勾配が急なものもなかった(図-4)。

高原らの研究では⁷⁾、2014年の赤谷地区の再崩壊時の地盤振動と土砂移動プロセスの関係は、河床に崩壊土砂が到達した時点から振幅が増大し始め、対岸に崩壊土砂が衝突しているタイミングで、振幅は最初のピークを迎えている。また、表-1に示すように2014年赤谷地区の再崩壊の事例では立ち上がり勾配が急となっている

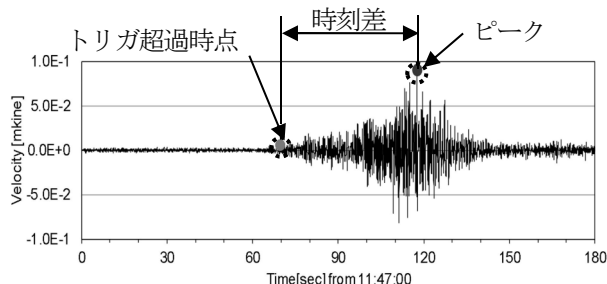


図-2 地盤振動の立ち上がり勾配の定義

ことを踏まえると、対岸に崩土が衝突するような大きな衝撃力が生じる場合に、立ち上がり勾配が急になるのではないかと考えられる。

反対に、対岸斜面への衝突が生じない流下型の地盤振動は、崩土の流動自体によるものと考えられ、衝突型に対して衝撃力が小さいため、立ち上がり勾配が緩くなっているものと推察される。

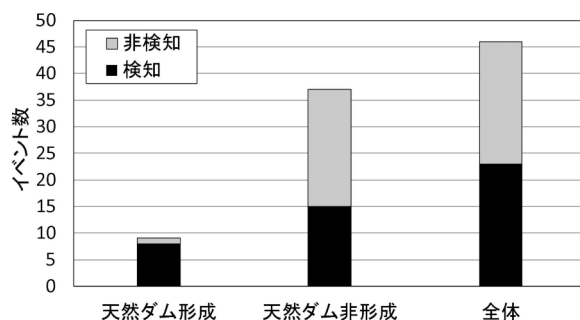


図-3 天然ダムの形成・非形成と検知状況の関係

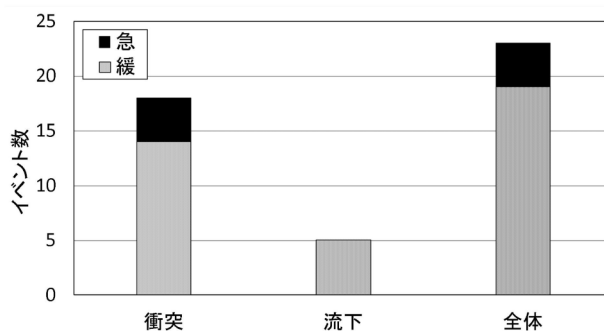


図-4 深層崩壊土砂の移動形態と波形の立ち上がり勾配の関係

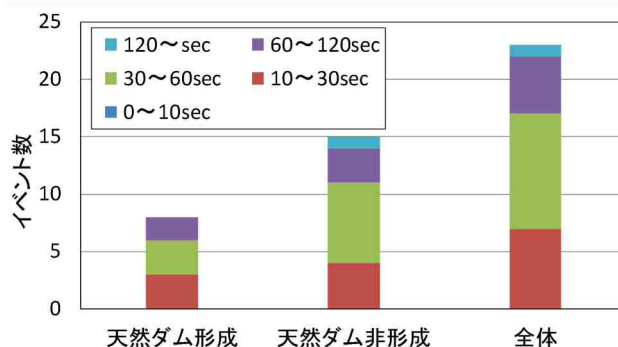


図-5 天然ダムの形成・非形成と振動継続時間の関係

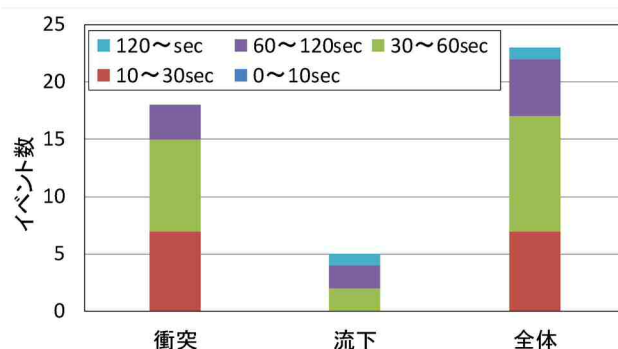


図-6 深層崩壊の土砂移動形態と振動継続時間の関係

以上のことは、地盤振動の立ち上がり勾配に着目することで、対岸への衝突が生じている可能性を判断できることを示している。

振動継続時間については、天然ダム非形成及び流下型にのみ120秒を超える深層崩壊事例があるのに対し、天然ダム形成、衝突型の多くは60秒未満の深層崩壊事例がほとんどを占めていることがわかる(図-5、図-6)。これは、単純に崩土の流下距離が振動継続時間を左右しているものと考えられ、振動継続時間に着目することで土砂

の移動距離等を把握できる可能性がある。

卓越周波数と天然ダム形成・土砂移動形態との関係については、図-7に示すように、天然ダムを形成している深層崩壊事例では、0.5～1Hz、1～2Hzのように低い周波数が卓越周波数となっている深層崩壊事例が多いのに対し、4Hzを超える卓越周波数の深層崩壊事例は、天然ダム非形成にしかないという結果となった。天然ダム非形成にしか4Hzを超えるイベントがない理由については、詳細に各事例の地形等を確認する必要があり、今後の課

表-1 各深層崩壊事例の振動諸元一覧表

番号	年	災害場所	天然ダム 形成・非形成	土砂 移動 形式	波形の 立ち上 り形状	継続時間 (最近観測所) (sec)	観測所 検知観測局数			崩壊規模 (万m ³)
							検知	非検知	合計	
1	2004	山梨県南巨摩郡早川町間ノ岳	非形成	流下	緩	174	42	72	114	50
2	2004	石川県白山市(別当谷)	非形成	流下	緩	105	2	12	14	8
3	2004	新潟県三島町(中永地区)	非形成	流下				3	3	不明
4	2004	徳島県那賀郡那賀町阪州(大用知地区)	非形成	流下	緩	52	7	11	18	65
5	2004	徳島県那賀郡那賀町掛盤(加州地区)	非形成	流下				18	18	6
6	2004	徳島県那賀郡那賀町阿津江(阿津江)	非形成	流下	緩	34	4	14	18	24
7	2004	奈良県五條市大塔町宇井(R168斜面)	非形成	衝突	緩	17	3	23	26	20
8	2004	三重県多気郡大台町滝谷(滝谷地区)	非形成	衝突				5	5	不明
9	2004	愛媛県新居浜市大生院	非形成	衝突				5	5	0.6
10	2004	愛媛県西条市荒川(河ヶ平)	非形成	衝突	急	46	1	4	5	14
11	2005	宮城県北諸県郡三股町(天神山)	非形成	衝突				4	4	480
12	2005	宮城県都城市(旧北諸県郡山之口町)	非形成	衝突				4	4	不明
13	2005	宮城県宮崎市別府田野町甲(別府田野川)	非形成	流下				7	7	46
14	2005	宮城県宮崎市別府田野町甲(別府田野川)	非形成	衝突				7	7	46
15	2005	宮城県宮崎市別府田野町甲(別府田野川)	非形成	衝突				7	7	46
16	2005	宮城県宮崎市別府田野町甲(別府田野川)	非形成	衝突				7	7	46
17	2005	宮城県宮崎市別府田野町乙(片井野川)	非形成	流下				7	7	54
18	2005	宮城県宮崎市別府田野町甲(境川)	非形成	流下				7	7	73
19	2005	宮城県東白杵郡美郷町西郷山三ヶ(野々尾)	形成	衝突	緩	33	11	31	42	330
20	2005	宮城県東白杵郡椎葉村松尾(松尾新橋)	非形成	衝突				7	7	128
21	2005	宮城県東白杵郡椎葉村松尾(畑北)	非形成	衝突				7	7	113
22	2005	宮城県日南市北郷町北河内(旧南那珂郡北郷村)	非形成	衝突				3	3	480
23	2005	宮城県東白杵郡椎葉村大河内(大河内地区)	非形成	衝突				5	5	630
24	2006	岐阜県揖斐郡揖斐川町東横山(1)	非形成	衝突	急	14	3	19	22	4
25	2006	岐阜県揖斐郡揖斐川町東横山(2)	非形成	衝突	緩	15	3	19	22	4
26	2006	熊本県球磨村皆伐跡地(権現山)	非形成	流下				4	4	不明
27	2007	鹿児島県南大隅町(船石川)	非形成	流下				5	5	1.9
28	2010	鹿児島県南大隅町(船石川)	非形成	衝突	緩	49	6	29	35	11
29	2011	高知県安芸郡北川村平鍋(平鍋地区)	非形成	流下	緩	81	1	6	7	19
30	2011	高知県安芸郡北川村小島(小島地区)	非形成	流下				7	7	不明
31	2011	高知県安芸郡北川村和田(和田地区)	非形成	流下				7	7	不明
32	2011	奈良県五條市大塔町清水(川原樋川)	形成	衝突	緩	23	3	33	36	606
33	2011	奈良県五條市大塔町清水(川原樋川)【2波目】	形成	衝突	緩	18	5	31	36	-
34	2011	奈良県吉野郡十津川村宇宮原(濁谷川)	非形成	衝突	緩	37	2	33	35	277
35	2011	和歌山県田辺市熊野(熊野地区)	形成	衝突	緩	96	6	28	34	410
36	2011	奈良県吉野郡十津川村内原(栗平地区)	形成	衝突				34	34	2500
37	2011	奈良県吉野郡十津川村内原(栗平地区)【2波目】	形成	衝突	緩	13	3	31	34	-
38	2011	奈良県吉野郡十津川村長殿(長殿地区)	形成	衝突	緩	49	18	16	34	634
39	2011	奈良県五條市大塔町清水(赤谷地区)	形成	衝突	急	89	22	12	34	936
40	2011	奈良県吉野郡川上村迫(迫地区_西谷川)	非形成	衝突	緩	16	1	33	34	0.8
41	2011	三重県多気郡大台町桧原(東又谷)	非形成	衝突	緩	71	8	26	34	不明
42	2011	三重県多気郡大台町桧原(持山川)	非形成	流下				34	34	不明
43	2011	静岡県浜松市天竜区水窪町地頭方(水窪)	形成	衝突	緩	42	41	62	103	150
44	2013	静岡県浜松市天竜区春野町杉(門島地区)	非形成	衝突				10	10	7
45	2013	奈良県五條市大塔町清水(赤谷地区 H25)	非形成	衝突	緩	40	12			42
46	2014	奈良県五條市大塔町清水(赤谷地区 H26)	非形成	衝突	急	33	15			76

注) 灰色に着色部は検知したイベント、着色していないものは非検知イベント

題とするが、卓越周波数に着目することで、天然ダムの非形成を判断できる場合があることを示している。なお、ここでは卓越周波数については、各イベントにおいて、複数の観測局でトリガ超過している場合には、最頻となる周波数を、トリガ超過した最頻となる周波数がない場合は、分布範囲の中間となる周波数と定義している。

5. 深層崩壊による地盤振動の卓越周波数

本研究における全46事例の深層崩壊時の各観測局の卓越周波数及びSTA/LTAが2.0以上となる周波数帯を整理した結果を表-2に示す。

卓越周波数に関しては最も多い周波数は1～2Hzと概ね低い周波数に分布しており、観測局数の構成割合で低い周波数からの90%となる周波数は5Hz、95%は7Hzであった。また、この卓越周波数の整理結果から、深層崩壊による地盤振動のバンドパスフィルタの帯域は、第2章に示した1～10Hzの採用が妥当であったと言える。

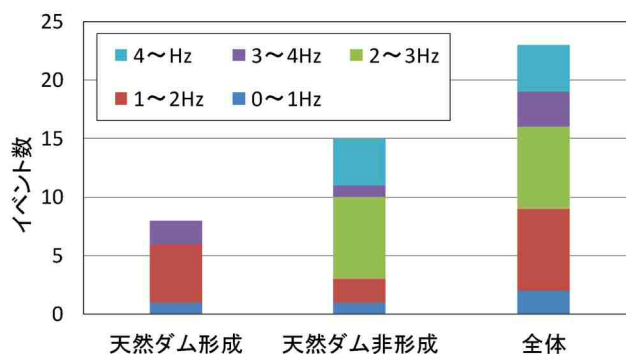


図-7 天然ダムの形成・非形成と卓越周波数の関係

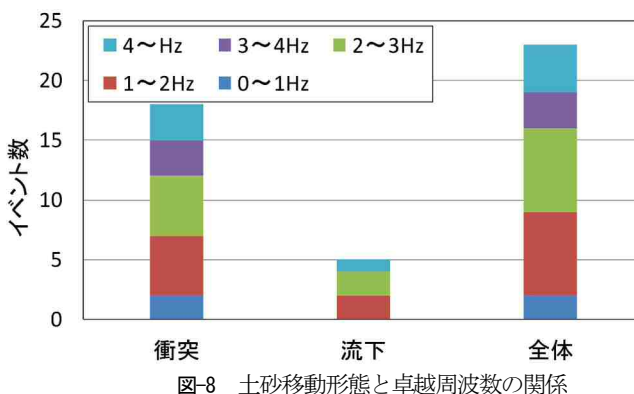


図-8 土砂移動形態と卓越周波数の関係

表-2 各深層崩壊事例における各観測局の卓越周波数の集計事例

番号	災害場所	周波数(Hz)																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	間ノ岳		28	6	1	1	2		2			1	1								
2	別当谷							1				1									
4	大用知地区			6	1																
6	阿津江		1	2					1												
7	宇井 R168斜面		1	1		1															
10	河ヶ平							1													
19	野々尾	2	7	1																	
24	東横山(1)			1																	
25	東横山(2)		1								1										
28	船石川 第3波								1												
28	船石川 第4波			2			1														
28	船石川 第7波		1		1																
29	平鍋地区		1																		
32	川原樋川		1		2																
33	川原樋川 2波目	1	1		2	1															
34	濁谷川			1				1													
35	熊野地区		6																		
37	栗平地区 2波目	2	1																		
38	長殿地区	8	8	1																	
39	赤谷地区	4	10	4	1	2	1														
40	迫地区 西谷川	1																			
41	東又谷		3	4	1																
43	水窪	13	23	5																	
45	赤谷地区 H25	1	2	7	1		1														
46	赤谷地区 H26		4	5	4	1															
累積卓越周波数(%)		15	61	83	89	92	94	96	98	98	98	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100

■ 該当する卓越周波数を卓越周波数としている観測局数

■ STA/LTAが2以上の周波数

6. まとめ

本研究では、深層崩壊における天然ダムの形成・非形成や土砂移動形態と地盤振動の関係を検討した。深層崩壊発生時の波形の立ち上がり勾配、振動継続時間、卓越周波数等に注目することで、地盤振動から土砂移動形態をある程度把握できる可能性があることが明らかとなった。このことを利用して、災害発生時によるリスクの大小や影響等を把握する等、天然ダム等に対する危機管理に役立てることが可能と考えられる。

また、深層崩壊に伴う地盤振動の卓越周波数はほとんどが7Hz以下に含まれることが明らかとなり、そのことが地盤振動による深層崩壊の検知における生活ノイズ等の除去に役立つと考えられる。

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，pp.267-277，2005.
- 3) 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.

- 4) 大角恒雄・海原莊一・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，pp.32-37，2016..
- 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・海原莊一・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) 高原晃宙・木下篤彦・水野秀明・長谷川真英・梅田ハルミ・海原莊一・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,Vol.22, pp.43-48，2016.
- 8) 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人土木研究所，平成23年(2011年)紀伊半島台風12号土砂災害調査報告，国土技術政策総合研究所資料第728号，土木研究所第4260号，pp.213，2013.
- 9) 桜井亘・酒井良・後藤彦幸・小川内良人・龍見栄臣・海原莊一・宇都忠和・藤原康正：平成25年9月台風18号後に深層崩壊斜面で発生した大規模な再崩壊について，Vol. 67，No. 3，pp. 29-35，2014.

(2017. 4. 3受付)