

拡大崩壊発生に伴う地震動計測 —紀伊山地田長瀬の事例—

Seismic Observations during a Retrogressive Failure Case Study at Tanagase in the Kii Mountains

荒井紀之・土井一生

Noriyuki ARAI and Isei DOI

Synopsis

To investigate slow to fast phenomena of landslide, a monitoring of slope deformation by extensometer and seismic observation by a seismometer set at the vicinity of a retrogressive failure were performed. The area is underlain by broken formation and mixed rock belonging to the Shimanto Belt. The retrogressive failure occurred in 2020 by rainfall where a deep-seated catastrophic landslide had occurred in 2011 by heavy rainfall. As a result, the displacement before and during the failure, the ground motion and its Fourier spectrum were obtained. The spectrum had dominant frequency from 3 to 8 Hz. One of the Fukuzono's equation parameters α approached 1.85 last 24 hours.

キーワード: 地震動計測, 拡大崩壊, 付加体, 伸縮計, フーリエスペクトル

Keywords: seismic observation, retrogressive failure, accretionary complex, extensometer, Fourier spectrum

1. はじめに

斜面に亀裂等の変状が生じた場合, その斜面が今後, 崩壊に至るのか, その場合崩壊はいつ発生するのかを予測することは, 防災上重要な問題である. 崩壊発生時期を予測する研究として, 斎藤 (1968) は旧国鉄の路線沿いで生じた斜面崩壊を対象として, 伸縮計の変位データを分析することにより崩壊直前の 3 次クリープ段階にある変位曲線の形態から崩壊時間を予測する式を提案した. 誘因の影響や, 適用可能な地質条件が明確ではないが, 実務で広く使われている. 福岡 (1985) は, 関東ローム層と砂層からなる大型土槽実験を行い, 崩壊が発生するまで一定降水量を与えて, その変位速度と変位加速度の関係を定式化するとともに, 変位速度の逆数から崩壊時間を予測する方法を提案した.

崩壊発生に伴い位置エネルギーの一部が波動エネルギーに変換され実体波や表面波として周囲に放射される. これらによる地震動は, 崩壊の発生場所や

規模, 崩壊メカニズムに関連する情報を含んでいると考えられる (Yamada et al., 2013; Suwa et al., 2010). 崩壊発生に伴い発生する地震動の内, 高周波成分は距離とともに急速に減衰するため, その観測のためには地震計を崩壊源近傍に設置する必要があるが, このような観測事例は土井ら (2024), Provost et al. (2018) の他は極めて少ない.

本研究の目的は, 付加体からなる山地斜面で生じた降雨による拡大崩壊 (崩壊深さ ~20m) を対象として, 降水量や崩壊に至るまでの斜面変位を, 現地に設置した雨量計や事前に崩壊崖を跨いで設置した伸縮計により計測するとともに, 崩壊発生時の地震動を, 崩壊斜面の近傍に設置した地震計により観測し, これらのデータから崩壊発生に至るまでの変形特性や崩壊時の地震動の特性を基礎的に明らかにすることである.

2. 地形地質概要

2.1 2011年の深層崩壊とその後の拡大崩壊の発生

対象斜面（荒井，2023）は，紀伊山地中央部（田長瀬）の十津川左岸に位置する北西向き斜面である．Fig. 1に位置図を示す．この斜面では，2011年の台風12号による紀伊山地災害時に，中規模の深層崩壊が発生している．

本論で対象としている拡大崩壊は，2011年の崩壊部に隣接する南西側斜面で，梅雨に伴う降雨により2020年7月9日に発生した．

2.2 地形概要

研究域の十津川河床の標高は約330m，尾根の標高は600mから730mであり，270mから400mの比高がある．

尾根沿いに1条の線状凹地，2011年の崩壊斜面上部と南西側の側方崖に複数の小崖が認められる．前述の拡大崩壊は，側方崖から派生する小崖の一つが次第に段差と長さを増し発生したものである．

2.3 地質概要

周辺には，四万十付加体の美山コンプレックスに属する破断層や混在岩が分布する（Kumon et al., 1988; 紀州四万十帯団体研究グループ, 2012）．Fig. 2に，対象斜面周辺の著者による地質図を，Fig. 3に地質断面図を示す．

地質構造は，北から北西傾斜の流れ盤構造をなし，十津川沿いの連続露頭観察結果や既設調査ボーリング結果より，非固結の断層岩を伴う衝上断層帯が斜面内を横断していると推定される．付録A.1にボーリング柱状図とコア写真を掲載した．

3. 方法

Fig. 2中に計測機器配置を，Table 1に計測機器の仕様を示す．

3.1 崩壊体積の算定

拡大崩壊前のDEMとして，国土交通省近畿地方整備局紀伊山系砂防事務所が2012年6月28日から8月18日に実施したLiDARにより得られた1m DEMを使用した．

拡大崩壊発生後の斜面形状を把握するために，ドローンによる画像撮影を2020年11月30日に行い，画像処理ソフト（メタシェイプ）により3次元点群データを得た．ドローン画像の撮影において，鉛直成分の精度向上のために，斜め往復画像を取得した．

評定点測量をGPS測量により行おうとしたが衛星

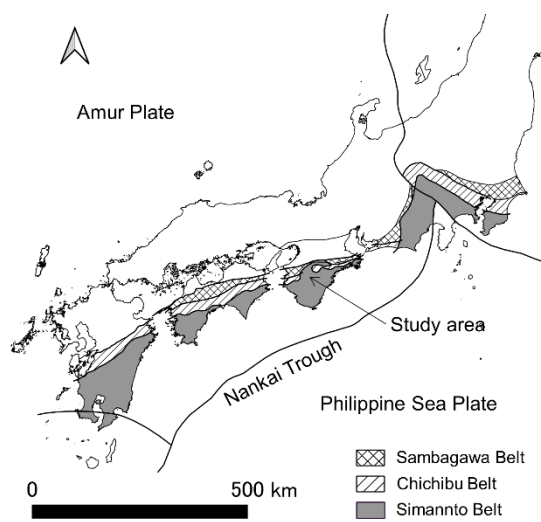


Fig. 1 Location map of the study area. Regional geological structure of the Outer Zone of Southwest Japan (simplified from Taira et al., 2016)

電波の補足条件が悪く座標データを得ることができなかった．そのため，画像撮影範囲の中から不動点と思われる点を抽出し，前述の1mDEMから対応点の3次元座標を設定した．

拡大崩壊の体積は，崩壊堆積物が崩壊発生域からほとんど流出しているため，崩壊前後のDEMの差分より算出した．

3.2 雨量

雨量計として転倒ます型雨量計を，Fig. 2に示すように，拡大崩壊部から約300m離れた旧県道沿いに設置し，パルスローガーにより5分毎の転倒回数を計測し，雨量に変換した．ただし，拡大崩壊発生時の雨量データは，雨量計のトラブルによりデータが欠損したため，奈良県が上野地（研究域の南南西2.6kmに位置する）で観測している1時間ごとの雨量データを参考値として使用した．データの欠損期間は，2020年6月13日18時から2020年7月29日9時である．

3.3 伸縮計

拡大崩壊に伴う斜面変形を計測するために，Fig. 2中のS-2において，側方崖から派生する小崖を挟んで伸縮計を設置し，10分間隔で伸縮量を計測した．

3.4 地震動計測

速度型3成分地震計を，Fig. 2に示すように，拡大崩壊発生部から西に約120m離れた斜面中腹に1台設置した．サンプリング間隔は0.01秒である．

計測で得られた速度波形データを用いて，2.5秒お

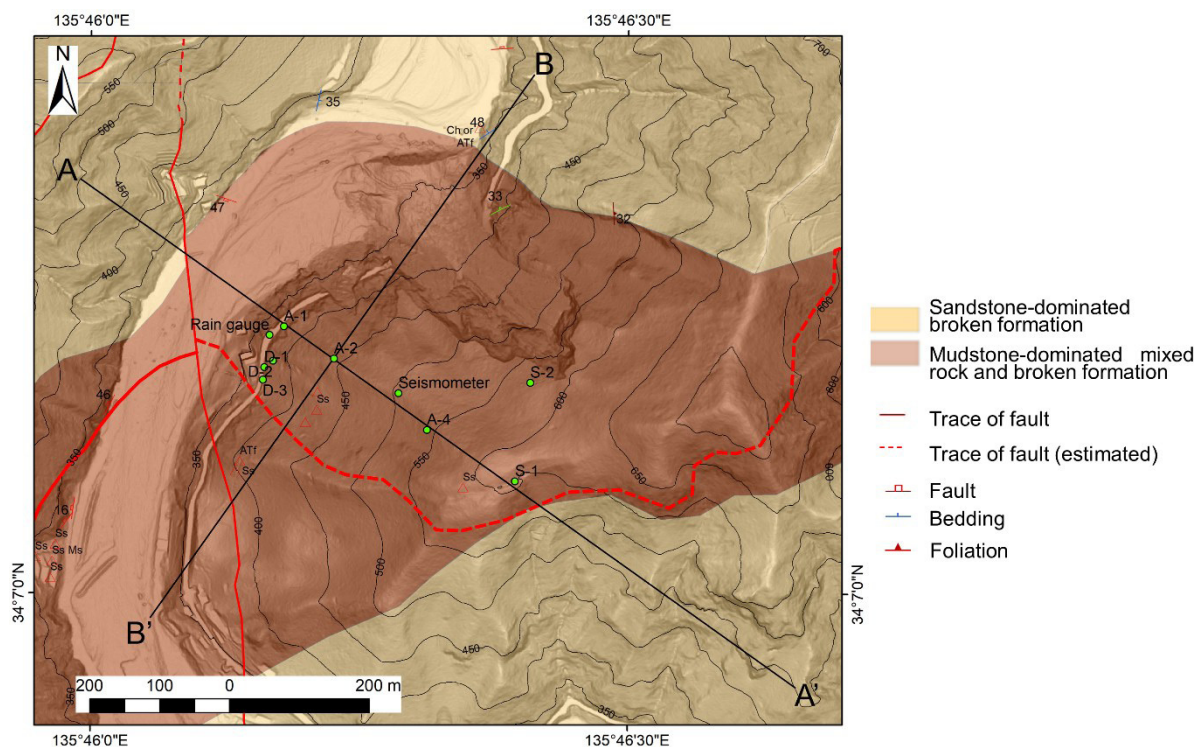


Fig. 2 Geological map of the study area. Solid lines (A–B) indicate the locations of geological cross-sections shown in Figure 3. Green circles show the location of measurement apparatuses. S-1 and S-2 are invar wire extensometers. A-1 ~ A-4 and D1 ~ D3 are drillholes.

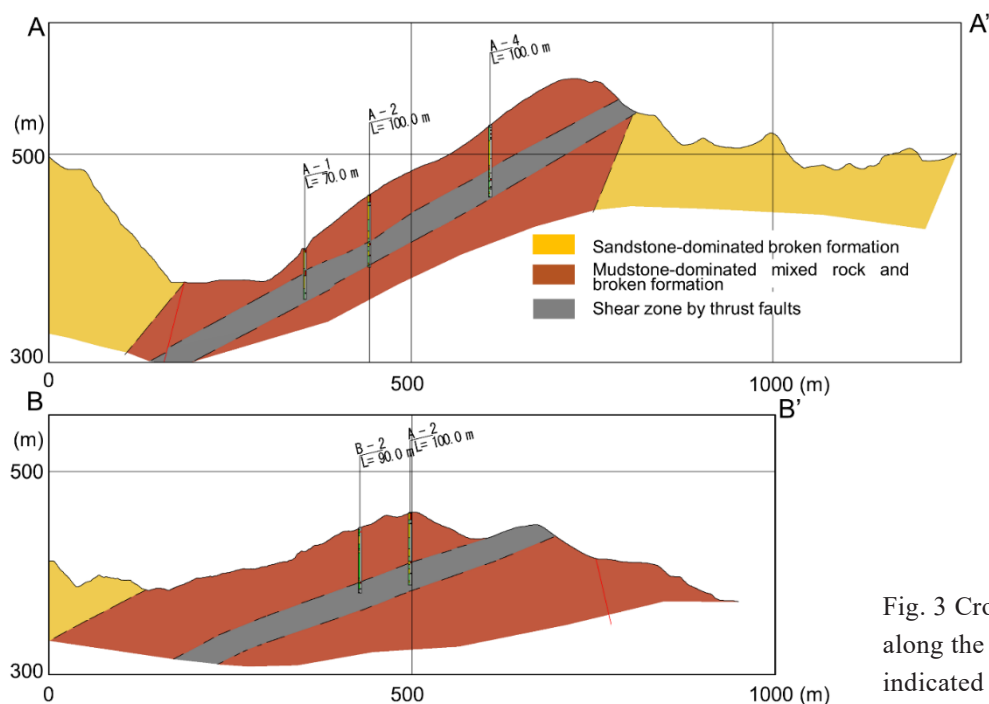


Fig. 3 Cross-sections along the transects indicated in Fig. 2.

きに5.12秒間のデータを対象に、高速フーリエ変換 (FFT)を用いてランニングスペクトルを計算した。この際、大崎順吉博士作成のFFT計算プログラムと、ラグウィンドウによるスペクトルの平滑化サブルーチン (LWIN) を使用した。

4. 結果

4.1 崩壊体積

Fig. 4に、拡大崩壊発生後の3次元画像を示す。Fig. 4 (b)中に青い破線で囲った領域が、対象とした拡大崩壊発生部である。Fig. 4 (a)中の赤点は、不動点とし

Table 1 Specifications of measuring instruments

Measuring instrument	Remarks	Maker Model number
Tipping bucket type Rain gauge	Accuracy $\leq 2\%$ (100mm/hr)	Ota keiki Seisakusho Co., Ltd. No.34-T
Three component velocity seismometer	Natural frequency 2Hz	Kinkei System Co., Ltd. VS-300-01
Invar wire extensometer	Measurement range 1000 mm Resolution 0.1 mm, linearity $\pm 0.4\text{mm}/200\text{ mm}$	OSASI Technos Inc. NetLG-001

て設定した地点に対応する。崩壊体積は約 $45,000(\pm 5,000)\text{ m}^3$ である。

4.2 雨量

Fig. 5に伸縮計の計測を開始した2019年7月26日からの累積雨量を示す。崩壊発生前の降雨条件は、時間雨量12mmから28mmの強雨が約14日間断続的に発生し、この間の累積雨量は753mmに達した。

4.3 伸縮計

Fig. 5にS-2地点に設置した伸縮計の拡大崩壊発生直前までの伸び変位の推移を示す。

伸縮計の計測開始から2020年1月中旬までの期間では、まとまった降雨に伴い伸び変形が始まり降雨量の減少に伴い変位量が漸減し、上に凸型の形状を

示した。その後、2020年4月末までは、ほぼ一定の変位速度で推移し、2020年7月以後は降雨量の増大と伴に変位も増大し下に凸型の形状を示し、その後、崩壊に至った。拡大崩壊の発生時刻は、伸縮計の計測結果から、2020年7月9日23時30分と推定される。

4.4 地震動計測

(1) 速度波形

Fig. 6に、拡大崩壊発生時の速度波形を示す。横軸は、2020年7月9日23時10分50秒からの経過時間を示す。1,490秒から1,530秒にかけて、紡錘形の波形が認められ、上下成分に比べて水平成分が大きい傾向がある。1,460秒から1,490秒にかけても微弱な波形が含まれる。波形にはスパイク状のノイズが多数含まれているが、これらが何に起因するものかは特定でき

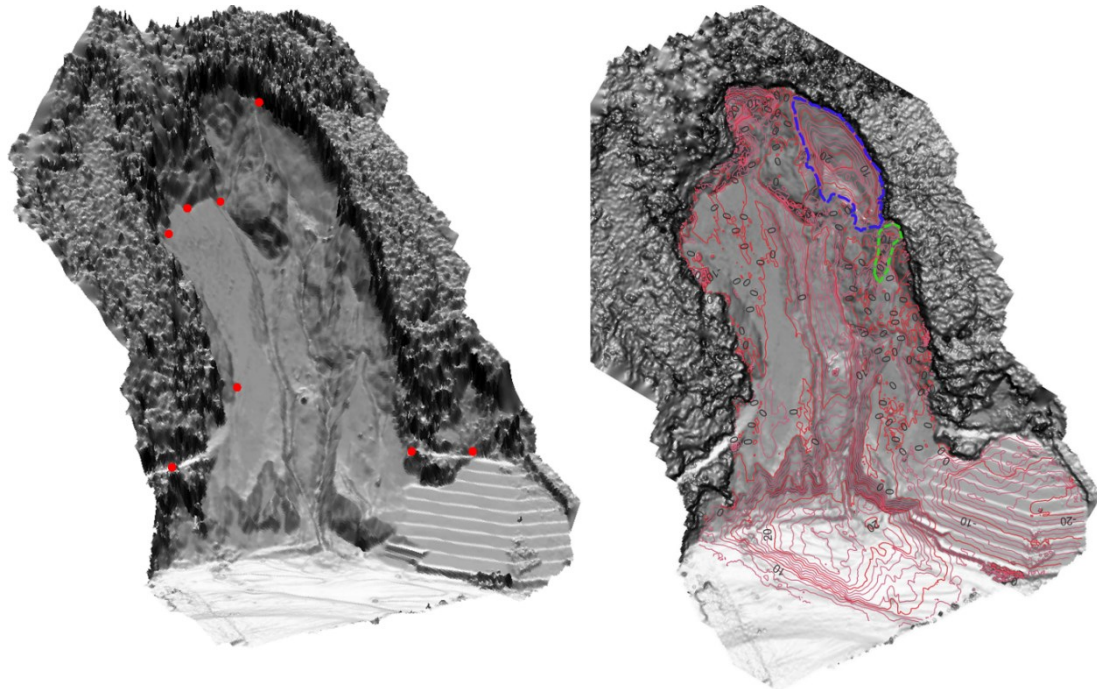


Fig. 4 (a) Elevated views of the study site. Red points are ground control points. (b) Red lines are isobathmic lines at intervals of 2 m from the elevation difference data; 2012/6–2020/11. Blue and green dashed lines indicate the retrogressive failure occurred in 2020, 2019, respectively.

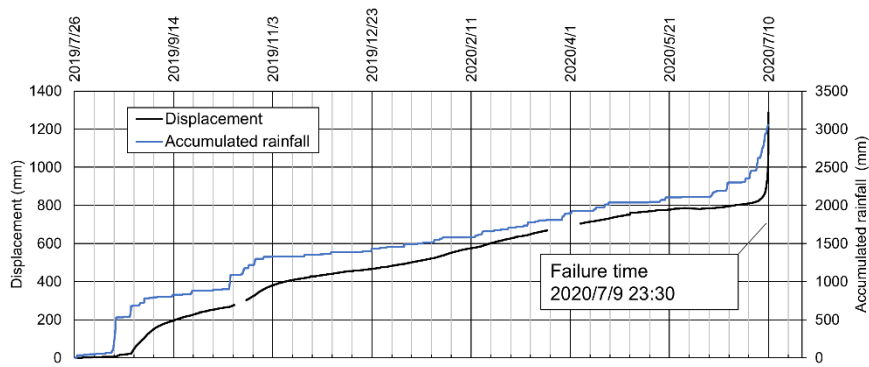


Fig. 5 Displacement of extensometer S-2 versus date curve (black) and accumulated rainfall versus date curve (blue).

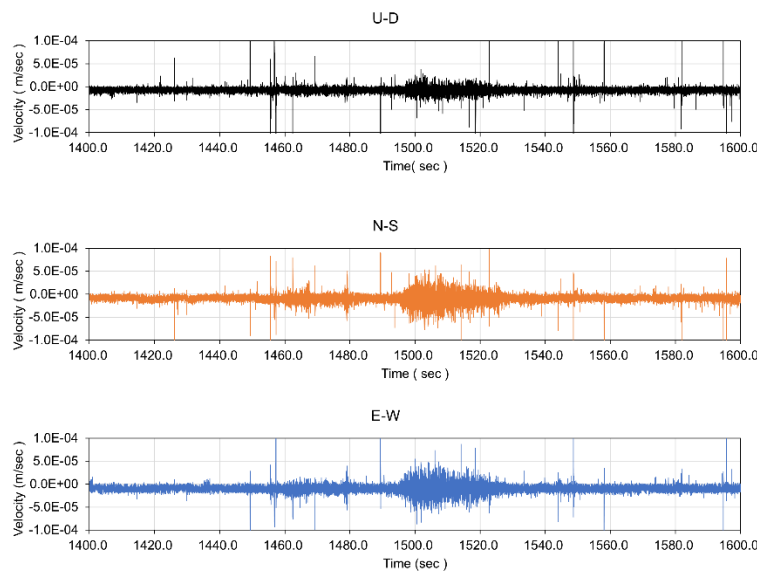


Fig. 6 Waveforms of the retrogressive failure (origin time is 2020/7/9 23:10:50).

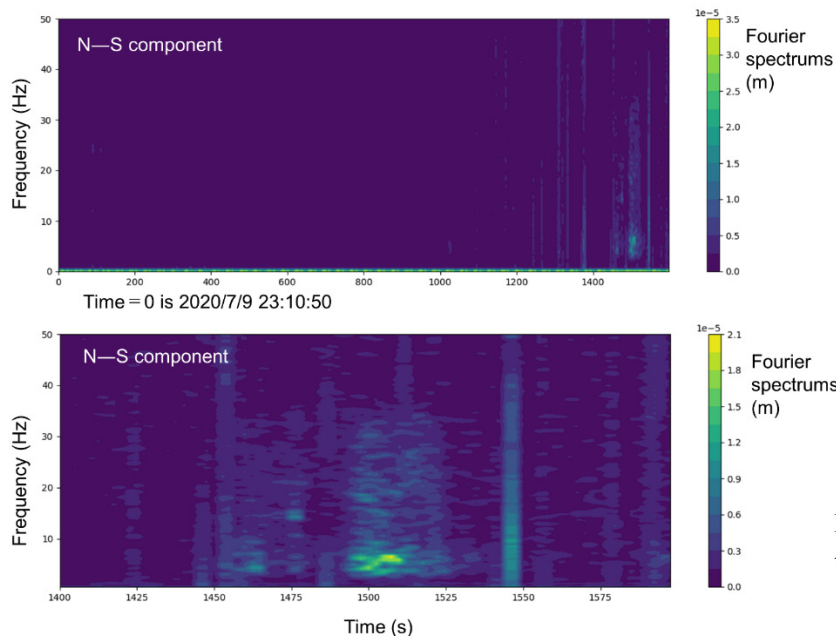


Fig. 7 Running spectrum of the retrogressive failure.

ていないが、樹木からの雨だれの影響が考えられる。

(2) ランニングスペクトル

Fig. 7に、N-S成分のランニングスペクトルを示す。

横軸は、2020年7月9日23時10分50秒からの経過時間を示す。1,490秒から1,530秒にかけて、10Hz以下の周波数帯においてスペクトルの大きな領域が認められ

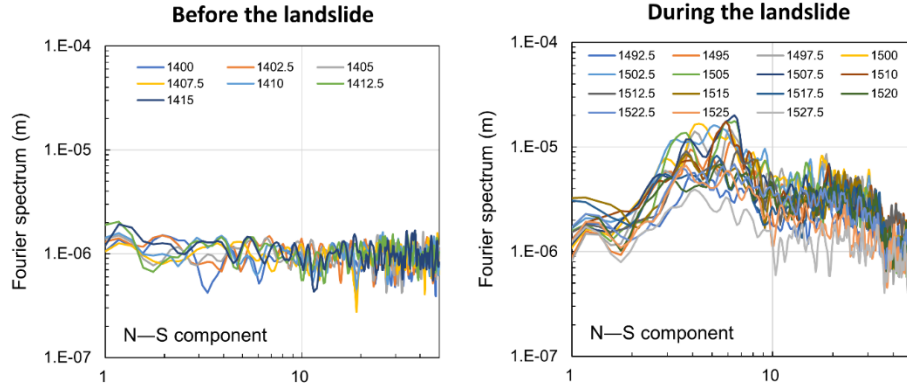


Fig. 8 Fourier spectrum before and during the retrogressive failure. The numbers in legend show the elapsed time measured in seconds from 2020/7/9 23:10:50.

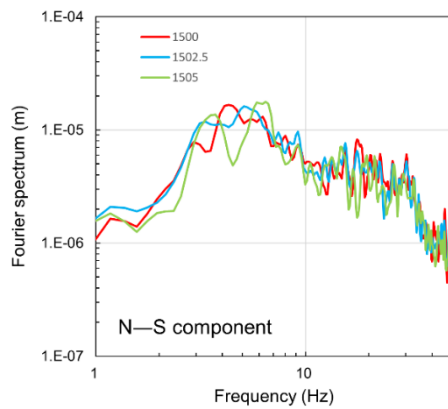


Fig. 9 Fourier spectrum during the retrogressive failure. The peak of Fourier spectrum shifts toward higher frequency. The numbers in legend show the elapsed time measured in seconds from 2020/7/9 23:10:50.

る。

Fig. 8に、拡大崩壊発生前の静穏時と、拡大崩壊発生中のフーリエスペクトル（N-S成分）を示す。拡大崩壊発生中は、3–8Hzに卓越周波数が認められ、10Hz以上の周波数成分も含まれている。

Fig. 9に、拡大崩壊発生中の1,500秒、1,502.5秒、1,505秒のフーリエスペクトル（N-S成分）を示す。ピーク周波数が4.3Hz、5.1Hz、6.4Hzと高周波数側へシフトしている。

5. 考察

5.1 土壌雨量指数の推移

土壌雨量指数は、花崗岩地域の3段のタンクモデル（Ishihara and Kobayashi, 1979）に、レーダー・アメダス解析雨量を入力降雨量として、各タンク内の水

位を合計した値であり、地盤表層に貯留された水量を表している（岡田, 2002）。

中村・日置（2023）は、2011年に紀伊山地の四万十帯北帯で発生した深層崩壊を対象として、遺伝的アルゴリズムによりIshihara and Kobayashi（1979）の3段タンクモデルのパラメータの最適化を行い、第3タンクの水位のピーク時刻が深層崩壊発生時間にほぼ一致するパラメータを見出した。Fig. 10に、中村・日置（2023）のパラメータを使用し、現場に設置した雨量計により計測された値を入力降雨量として計算した第3タンクの水位を示す。

第3タンク水位のピーク値に着目すると、2019年8月16日11時に171mm、2020年7月9日20時に119mmのピークを示している。後者のピーク値の約3時間半後に、本論で対象としている拡大崩壊が発生した。地震計の記録から、前者のピークの約1時間後に小規模な拡大崩壊が発生していた（Fig. 10中の橙色の破線部）。中村・日置は、第3タンク水位が250mmを超えると深層崩壊が発生する傾向が認められるとしているが、本研究では拡大崩壊発生の閾値として、第3タンク水位が概ね100mm以上が目安になる可能性がある。

5.2 福園方程式のパラメータ

福園は、関東ローム層と砂層からなる大型斜面土槽を用いて連続降雨による崩壊実験を行い、変位速度と変位加速度の関係を分析し以下の式を提案した（福園, 1985）。

$$\frac{d^2x}{dt^2} = a \left(\frac{dx}{dt} \right)^\alpha \quad (1)$$

ここに a と α は、定数である。Voight（1988）は、この方程式を、火山噴火現象等に拡大適用し、噴火時

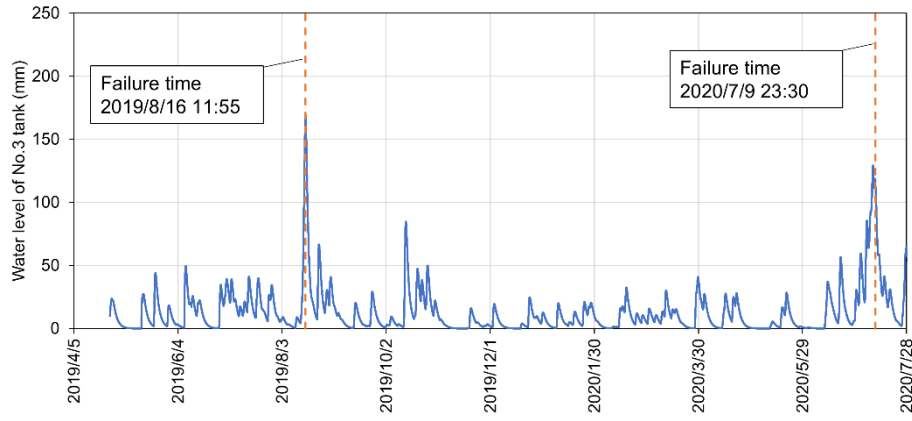


Fig. 10 Simulated water level of No.3 tank versus date curve (2019/4/5—2020/7/28). Two dashed lines show the timing of the appearance of retrogressive failures.

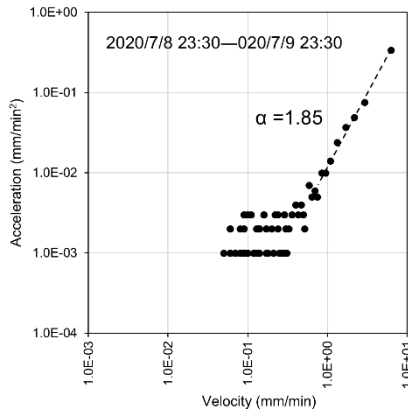


Fig. 11 Acceleration-velocity scatter-diagram of the S-2 extensometer last 24 hours before the retrogressive failure on 2020/7/9.

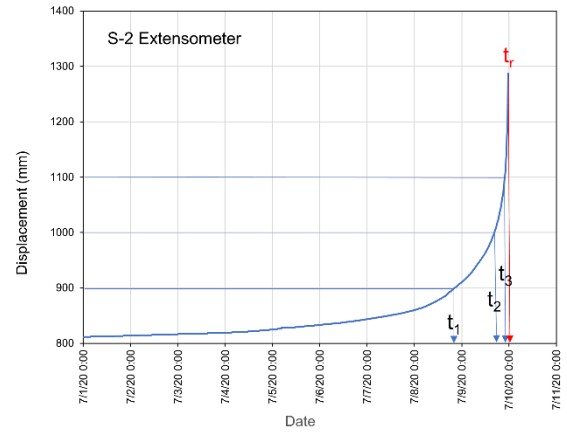


Fig. 12 Displacement versus date curve of S-2 extensometer last nine days before the retrogressive failure on 2020/7/9.

刻の推定に用いた。

伸縮計の伸び変位を使用して、変位速度と変位加速度の関係を両対数グラフにプロットした結果を Fig. 11 に示す。拡大崩壊発生の24時間前から崩壊発生直前までのデータをプロットした結果、崩壊発生の90分前から $\alpha=1.85$ で推移している結果が得られた。

Chang and Wang (2022) は、粘性土を用いたリングせん断試験を行い、福岡方程式のパラメータ a と α について分析を行い、間隙水圧を制御したせん断試験において、3次クリープ段階で α の値が1.110–1.388から1.388–2.164へ増大する結果を報告している。そして、この現象とせん断面の成長を考察し、粒子の再配列により幅広いせん断帯から局所化したせん断面への移行を示唆した。

5.3 崩壊時刻の予測

斎藤 (1968) は、3次クリープ段階のクリープ曲線

から斜面崩壊時間 t_r を予測する方法を提案した。

$$t_r - t_1 = \frac{\frac{1}{2}(t_2 - t_1)^2}{(t_2 - t_1) - \frac{1}{2}(t_3 - t_1)} \quad (2)$$

ここに、 t_1 , t_2 , t_3 は3次クリープ曲線上で、相対変位間隔が等しくなるようにしたときの経過時間である。

福岡 (1985) は、 $\alpha \approx 2.0$ の場合に斎藤の方法が成立することを示した。本研究でも拡大崩壊発生の24時間前から α が1.85に近づき約90分前から1.85の一定値を取る結果が得られた。Fig. 12に斎藤の方法を適用して崩壊時刻を予測した結果を示す。崩壊発生時刻の約7時間前の値を使用して崩壊時刻を計算したところ、崩壊発生時刻を約70分遅れで予測できた。さらに、約1時間40分前の値を使用して崩壊時刻を計算し、崩壊発生時刻を約16分遅れで予測できた。した

がって、崩壊深度が20m以浅の降雨による小規模な拡大崩壊にも斎藤の方法が実務的な意味で適用可能なことが示された。

より崩壊深度の大きな大規模な深層崩壊の崩壊時刻予測に斎藤の方法が適用できるのか、 α の値はどのように推移するのかが実測データの蓄積、分析が望まれる。

5.4 斜面変形速度と地震動

伸縮計の伸び変位速度は、Fig. 5に示したように、崩壊発生の1日前で0.05mm/minから崩壊の直前で6.3mm/minに加速している。一方、地震動は崩壊直前の23:10においても、高周波(> 1 Hz)成分は検出されておらず(Fig.7)、とても滑らかに変形が進行していることが示唆される。この高周波成分が検出されるのは、高速地すべりとなった時間帯だけである。

6. まとめ

2011年紀伊山豪雨災害で深層崩壊が発生した斜面において、その後の降雨により発生した体積約45,000m³の拡大崩壊を対象として伸縮計による変位計測と、高感度速度型地震計による地震観測を行い、以下に記す拡大崩壊に至るまでの変形特性と、崩壊に伴う地震動特性が得られた。

- ・拡大崩壊発生の24時間前から崩壊直前までの変位データから福園方程式のパラメータ α を求め、崩壊発生の24時間前から α は1.85に近づき90分前からほぼ1.85の一定値を取ることがわかった。

- ・斎藤の3次クリープによる方法を適用して崩壊時刻を予測した結果、崩壊発生の7時間前の値を使用した場合約70分遅れで、約1時間40分前の値を使用した場合約16分遅れで崩壊時刻を予測できた。

- ・拡大崩壊発生に伴う地盤振動は、3–8 Hzに卓越周波数を持ち、時間の経過とともに高周波側へピーク値が推移する傾向が認められた。また、中規模の深層崩壊であってもごく近傍であれば数十Hzの地震動が含まれていることが確認できた。

謝 辞

本研究は文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画(第2次)」の支援を受けた。令和5年度京都大学防災研究所拠点研究

「Slow-to-fast斜面変動現象の総合的解明及び崩落時刻予測の高度化」研究代表者王功輝教授の予算の一部を使用した。国土交通省近畿整備局紀伊山系砂防事務所からは1m DEMデータの提供を受けた。奈良県五條土木事務所には、宇宮原地区地すべり観測業

務に関する報告書の入手、計測器の借用、上野地の雨量観測データ入手でお世話になった。更谷元氏には、山林への立入りを許可していただいた。防災研究所技術室山崎友也氏、中本幹大氏には伸縮計の設置において支援を受けた。ここに、謝意を申し上げます。

参考文献

- 荒井紀之(2023):2011年紀伊半島大水害で発生した宇宮原深層崩壊の地質・地形学的背景について、京都大学防災研究所年報, 66B, pp.127–139.
- 岡田憲治(2002):土壌雨量指数, 測候時報, 第69巻, 5号, pp.67–100.
- 紀州四万十帯団体研究グループ(2012c):美山付加コンプレックスの再定義ーチュローニアンー下部マーストリヒチアンの付加体-, 地学団体研究会専報, 第59巻, pp.35–41.
- 斎藤迫孝(1968)第3次クリープによる斜面崩壊時期の予知. 地すべり, 第4巻, 3号, pp.1–8.
- 土井一生・釜井俊孝・片尾浩・三浦勉(2024):極至近距離に設置された地震計によって捉えられた表層崩壊, 地すべり学会誌, 受理済み.
- 中村聡司・日置和昭(2023):豪雨時土砂災害発生予測に用いる3段直列タンクモデルのパラメータについて, 地すべり, 第60巻, 1号, pp.1–15.
- 福園輝旗(1985):表面移動速度の逆数を用いた降雨による斜面崩壊発生時刻の予測法, 地すべり, 第22巻, 2号, pp.8–13.
- Chang, C. and Wang, G., (2022): Creep of clayey soil induced by elevated pore-water pressure: Implication for forecasting the time of failure of rainfall-triggered landslides, Engineering Geology, Vol.296, 106461.
- Ishihara, Y. and Kobatake, S. (1979): Runoff Model for Flood Forecasting, Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Vol.29, No.1, pp.27–43.
- Kumon, F., Suzuki, H., Nakazawa, K., Tokuoka, T., Harata, T., Kimura, K., . . . Nakamura, K. (1988): Shimanto belt in the Kii peninsula, southwest Japan. Modern geology, Vol.12, pp.71–96.
- Provost, F., Malet, J. P., Hibert, C., Helmstetter, A., Radiguet, M., Amitrano, D., . . . Vial, B. (2018): Towards a standard typology of endogenous landslide seismic sources, Earth Surface Dynamics, Vol.6, no. 4, pp.1059–1088.
- Suwa, H., Mizuno, T. and Ishii, T. (2010): Prediction of a landslide and analysis of slide motion with reference to the 2004 Ohto slide in Nara, Japan, Geomorphology,

- Vol.124, No.3, pp.157–163.
- Taira, A., Ohara, Y., Wallis, S. R., Ishiwatari, A. and Iryu, Y. (2016): Geological evolution of Japan: an overview. In Moreno, T., Wallis, S., Kojima, T., and Gibbons, W. (Eds.), The Geology of Japan. London: The Geological Society of London.
- Voight, B., (1988): A method for prediction of volcanic eruptions, *Nature*, Vol.332, No.6160, pp.125–130.
- Yamada, M., Kumagai, H., Matsushi, Y. and Matsuzawa, T. (2013): Dynamic landslide processes revealed by broadband seismic records, *Geophysical research letters*, Vol.40, No.12, pp.2998–3002.

付 録

A.1 ボーリング柱状図とコア写真

(論文受理日：2024年8月31日)