

令和 2 年 7 月 2 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K01325

研究課題名(和文)大規模地震発生後の土砂災害警戒避難基準雨量の設定と解除時期に関する実験的研究

研究課題名(英文) Study on the setting and cancellation timing of the reference rainfall for warning and evacuation after a large-scale earthquake

研究代表者

平松 晋也 (HIRAMATSU, Shinya)

信州大学・学術研究院農学系・教授

研究者番号：70294824

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：大規模地震により開口亀裂が形成されると、その下流の地下水深は急増し、開口亀裂の直下流部では崩壊発生限界雨量が最大で18%も低下するといった興味深い事実が明らかになった。また、地震時に作用する加速度の増加とともに斜面の安定性は低下し、北海道胆振東部地震と同等の2.2Gの加速度が作用すると、斜面の安定性は30%以上も低下する事実が明らかになった。また、0.85Gの加速度が作用した場合には1.0ヶ月～3.0ヶ月経過しても安全率の明瞭な回復傾向は認められなかったのに対し、3.0Gの加速度が作用した場合には、加振後3.0ヶ月が経過すると、加振前と同程度にまで回復するといった注目に値する結果となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震規模や地震発生後の時間経過と土質強度さらには斜面の安定性との関係を定量化しようとした点に学術的意義が認められる。

本研究により、地震の規模や地震後の時間経過に対応した斜面の安定性の変化や崩壊発生限界雨量が明らかになった。そして、本研究で得られた知見を活用する事により、土砂災害に対する警戒・避難基準雨量の引き下げ率とその解除時期が明らかになるため、大規模地震発生後の警戒・避難体制の策定に大いに貢献することになり社会的意義は大きい。さらに、本研究成果を活用し発展させていくことにより、大規模地震発生後の流域内での土砂災害危険度評価や望ましい流域管理手法の確立に大きく貢献することが確信される。

研究成果の概要(英文)：When an open crack is formed by a large-scale earthquake, the groundwater depth downstream of the open crack increases sharply, and the critical rainfall for landslides decreases by up to 18%.

It became clear that the stability of the slope declines with the increase of the acceleration acting during the earthquake, and the stability of the slope declines more than 30% when the acceleration of 2.2G acts. Furthermore, when 0.85G and 2.2G acceleration was applied to the hillside slope, no clear recovery of the safety factor was confirmed even after 1 to 3 months. On the other hand, when a 3.0 G acceleration was applied to the hillside slope, the safety factor of the slope recovered to the same level as before the earthquake, 3 months after the earthquake.

研究分野：砂防学

キーワード：大規模地震 警戒避難基準雨量 斜面安定 土質強度 地震後の経過時間 加速度

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地震を誘因とする斜面崩壊は、地震そのものの発生頻度が少ないため、地震発生時の土質強度の変化特性の把握や崩壊そのものの観測が困難であるというのが現状である。このため、斜面崩壊を対象とした研究の大部分は発生頻度の高い降雨を誘因とした現象に集中し(例えば、平松ほか(1990))、地震発生前・後の斜面の安定性の時間変化を議論し、その研究成果を大規模地震発生後の土砂災害に対するリスク管理問題へと展開しようとした研究事例はほとんど見当たらないというのが現状である。研究代表者である平松ら(1999)が実施した1995年の兵庫県南部地震を対象とした研究を遂行する中で、大規模地震発生後の土砂災害危険度を適正に評価するためには、「地震規模と土質強度との関係」の定量化が必要となることが強く指摘された。このような地震を誘因とする斜面崩壊に関する研究の現状を勘案し、執印ら(2012)は、広域における地震後の降雨が崩壊発生危険度に及ぼす影響を土質強度の面から評価する手法を検討し、地震後の有効粘着力の低下により、地震前には崩壊が発生しない規模の降雨量でも崩壊が発生する可能性があることを指摘しているものの、土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法の検討までには至っていない。平田ら(2014)は、地震時に作用する加速度が土質強度や斜面の安定性に及ぼす影響の定量化を試みた。しかしながら、地震発生直後の土質強度や斜面の安定性の低下状況の説明にとどまり、本研究を実施する中で、大規模地震発生後の災害リスク管理を適正かつ確実に実施していくためには、地震発生後の時間経過といった時間軸をも考慮した土質強度や斜面の安定性の変化を定量化することの必要性が強く指摘された。このように、地震発生後の時間経過と斜面安定性の回復について議論した研究事例は存在せず、地震発生後の土砂災害警戒避難基準雨量の引き下げの程度とその運用期間については、統一した手法や基準が確立されていないというのが現状である。

このような地震発生後の崩壊発生危険度に関する研究の現状を勘案すると、大規模地震発生後の警戒・避難体制や対策を適正に実施していくためには、地震の規模に応じた警戒・避難基準雨量の引き下げ率とその解除時期の設定手法を早急に確立する必要があるとの結論に至った。

### 【引用文献】

平松晋也・水山高久・石川芳治(1990): 雨水の浸透・流下過程を考慮した表層崩壊発生予測手法に関する研究, 砂防学会誌(新砂防) Vol.43, No.1, p.5-15

平松晋也・水山高久・石川芳治・小山内信智(1999): 地震により斜面上に形成された亀裂が土砂生産危険度に及ぼす影響, 地すべり(地すべり学会誌) Vol.36, No.2, p.3-12

平田和也・平松晋也・福山泰治郎(2014): 地震発生後の斜面安定性の変化に関する実験的研究, 平成25年度砂防学会研究発表会概要集

執印康裕・堀田紀文・鈴木雅一・小山内信智・岡本敦(2012): 地震後の崩壊発生降雨基準に関する一考察, 砂防学会誌, Vol.65, No.2, p16-22

### 2. 研究の目的

近年、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震をはじめとして、全国各地で大規模地震が相次いで発生し、地震に伴う土砂災害が多発するようになってきた。しかし、地震発生後の土砂災害に対する警戒・避難基準雨量については、経験的にその値の引き下げが行われているというのが現状であり、地震後の土質強度特性の変化を考慮した基準雨量の設定手法の確立までには至っていない。これらの現状を踏まえ、本研究は、地震時に山腹斜面に作用した衝撃(加速度)に伴う土質強度の変化特性を定量的に把握した上で、大規模地震発生後の警戒・避難基準雨量やその解除時期の設定方法を確立することにより、地震後の警戒避難体制の充実を図るとともにリスク評価手法の確立に資することを目的として実施したものである。

### 3. 研究の方法

現地流域より土質試験用不攪乱供試体(1,000cc サンプラー)を採取し、この供試体に対して【衝撃(加速度)試験】を実施した後、【せん断試験】を実施することにより、地震時に作用する加速度(地震規模)と土質強度との関係(地震発生直後)を定量的に把握・評価する(図-1)。

さらに、衝撃(加速度)試験実施後の供試体を所定の期間現地に埋設した後、埋設後の供試体を用いてせん断試験を実施することにより、衝撃を与えた後の経過時間、すなわち、地震発生後の経過時間と土質強度との関係を明らかにする。さらに、最終段階として、地震発生後の土質強度変化すなわち崩壊発生危険度の将来予測手法の確立といった研究面だけにとどまらず、「美しく、災害に強い国土」の創出を目指した「国土強靱化」に資することを目的として、大規模地震発生後の土砂災害警戒避難基準雨量の引き下げ率と、引き下げた基準雨量の解除時期の設定手法を確立する。

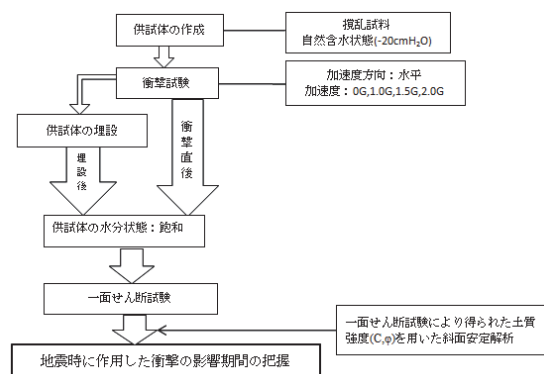


図-1 加速度試験とせん断試験の手順

研究方法の詳細を以下に示す。

(1) 供試体の採取および水分調整と室内試験

現地流域より土質試験用不攪乱供試体 (1,000cc サンプラー：要求設備) を採取するとともに実験室内で水分調整し、この供試体に対して【衝撃 (加速度) 試験】を実施した後、【せん断試験】を実施する。供試体に与える加速度の規模としては、近年の大規模地震の規模とその継続時間を勘案して 0.0~3.0G の範囲内で 3~4 ケース程度与える。

(2) 地震の規模が山腹斜面の構成材料の土質強度に及ぼす影響度評価

(1) で得られるせん断試験結果を基に、地震時に山腹斜面に作用する加速度と土質強度 (内部摩擦角、粘着力) との関係性を明らかにし、加速度を説明変数とした土質強度の変化モデルを構築する。さらに、同モデルを模式化した複数の斜面に対して適用することにより、地震時の加速度が斜面の安定性に及ぼす影響を定量化する。

(3) 大規模地震発生後の土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法の確立

斜面勾配や土層厚を種々変化させた複数のモデル斜面を設定し、前項までの検討により構築される「加速度を説明変数とした土質強度の変化モデル」を用いて、種々の加速度が斜面に作用した場合の「大規模地震発生後の土砂災害警戒避難基準雨量：大規模地震発生直後の基準雨量の逓減率」を設定するとともに、その設定手法を確立する。

(4) 地震発生後の時間経過に伴う土質強度の変化特性の把握

現地流域に埋設した供試体を掘り起こし、所定の期間埋設した供試体を用いてせん断試験を実施することにより、大規模地震時に山腹斜面に作用する加速度や大規模地震発生後の経過時間が土質強度に及ぼす影響を定量的に把握する。

(5) 地震時に作用する加速度が斜面の安定性や崩壊発生限界雨量に及ぼす影響度評価

斜面勾配や土層厚を種々変化させた複数のモデル斜面を設定し、地震の規模 (加速度) やその後の時間経過が斜面の安定性に及ぼす影響度評価を行う。さらに、降雨規模や降雨パターンを種々変化させた数値実験を実施し、任意の地震規模 (加速度) に対応した崩壊発生限界雨量を求め、土砂災害警戒・避難基準雨量の引き下げ率とその解除時期の設定手法を確立する。

#### 4. 研究成果

近年、我が国では平成 23 年東北地方太平洋沖地震などに代表される大規模地震が頻発するようになった。しかし、大規模地震発生前・後の斜面安定性の変化を議論した研究事例は少ない。大規模地震発生後の斜面安定性の変化は、図-2 に示す『地震時に斜面に作用した加速度による土質強度の変化』と『地震により発生した斜面変状』に起因して生じることが知られている。

本研究内容は、以下の 3 項目に大別される。

- ① 大規模地震により斜面上に発生した開口亀裂が斜面の安定性に及ぼす影響
- ② 大規模地震時に斜面に作用した加速度が斜面の安定性に及ぼす影響評価
- ③ 大規模地震により低下した斜面安定性の回復時期の定量化

具体的には、大規模地震の発生により生じた斜面変状の一つとして位置づけられる開口亀裂に着目し、平成 28 年熊本地震時に表層崩壊が多発した阿蘇地域を対象として、大規模地震により生じた開口亀裂の実態を明らかにするとともに、これらの開口亀裂が斜面の安定性や崩壊規模に及ぼす影響を定量的に把握した。さらに、平成 30 年北海道胆振東部地震により崩壊が多発した厚真川流域内より不攪乱状態で採取した供試体を用いた一面せん断試験結果を用いて、地震時に斜面に作用した加速度が斜面の安定性に及ぼす影響や低下した斜面の安定性の回復に要する期間を明らかにした。

(1) 大規模地震により斜面上に発生した開口亀裂が斜面の安定性に及ぼす影響

熊本地震により崩壊が多発した濁川流域を研究対象地とし、崩壊地周辺 50m の範囲に位置する亀裂の分布状況を把握した (図-3)。亀裂は崩壊地源頭部に集中してみられ、崩壊地周辺の限られた範囲であるにもかかわらず、61 箇所にも及ぶ亀裂の存在が確認された。亀裂幅の増加とともに亀裂深さも増加する傾向がみられるものの、亀裂幅が 30cm 以上になると亀裂深さは 60~100cm の範囲内で一定値を示すようになる事実が確認された。

大規模地震により発生した亀裂が周辺斜面の水移動や斜面の安定性に及ぼす影響を定量的に把握するため、地震発生後に観測された降雨イベント (気象庁阿蘇山観測所：2016 年 6 月 19 日 16 時 00 分~21 日 16 時 00 分、累加雨量 377.5mm) を入力条件として、二次元飽和・不飽和浸透流解析を実施した。解析対象範囲は、図-4 に示す高さ 16.5m、水平距離

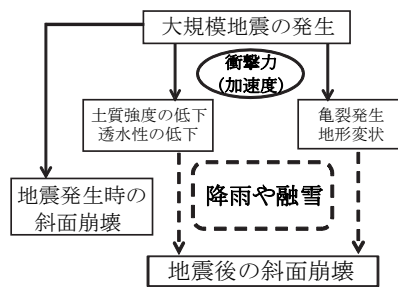


図-2 大規模地震発生後の斜面安定性

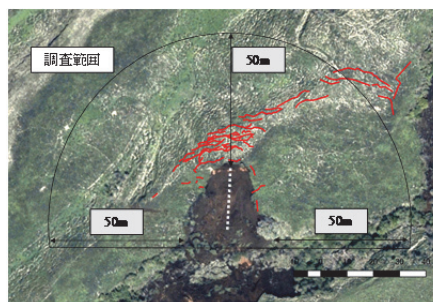


図-3 崩壊地周辺の亀裂の分布状況

22.0m 区間であり、図-3 中の崩壊地中央に点線で示した縦断側線の崩壊前後の標高データを用いて作成した。解析ケースは、①亀裂がないケース、②図-4 中の No17 に亀裂を設けたケース、③図-4 中の No12 に亀裂を設けたケースの計 3 ケースである。亀裂の規模としては、現地で確認された亀裂の最大規模を考慮して、幅 60cm、深さ 103cm と設定した。さらに、浸透流解析によって得られた地下水深や土壌水分状態を用いて斜面安定解析を実施した。安全率は、解析対象断面を水平距離 1m の間隔で図-4 に示す単位ブロックに分割し、分割した単位ブロックごとに修正フェレニウス法を用いて算出した。ケース①(亀裂なし)とケース③(No12 に亀裂を設定)の亀裂部周辺ブロックの安全率と地下水深の経時変化を示す図-5 より、亀裂の存在によりその下流部では地下水深と安全率が大きく変化し、亀裂下流 1m 地点(No11)の最大地下水深は 0.78m から 1.50m へと 92%も増加し、地下水深の変化に対応して最小安全率は 24%程度も低下するといった注目すべき事実が明らかになった。また、亀裂の下流 1~2m の範囲では最小安全率の出現時刻が 1 時間以上早くなるため、最小安全率出現時の累加雨量すなわち崩壊発生限界雨量が大きく減少する事実が明らかになった。亀裂部周辺ブロックの崩壊発生限界雨量とその引き下げ率の場所的変化を示す図-6 より、亀裂が崩壊発生限界雨量に与える影響は、No12 に亀裂を設けたケース③では亀裂の下流 1m 地点(No11)で崩壊発生限界雨量が 366mm から 307mm へと 16%程度低下する結果となった。このように、亀裂が存在することで亀裂の下流 1~2m の範囲では通常時の 2 割程度少ない雨量で斜面崩壊の危険性が高まるといった注目すべき事実が明らかになった。

(2) 大規模地震時に斜面に作用した加速度が

斜面の安定性に及ぼす影響評価

北海道胆振東部地方を震源として M6.7、最大震度 7 を記録した厚真川流域内より不攪乱供試体を採取し、加速度試験と一面せん断試験を実施した。

以上の結果得られた加速度と土質強度との関係を示す図-7 より、供試体に加速度を与えると内部摩擦角にはほとんど変化がみられないのに対し、粘着力は  $4.93\text{kN/m}^2$  (0G)  $\rightarrow$   $2.70\text{kN/m}^2$  (0.85G)  $\rightarrow$   $0.84\text{kN/m}^2$  (2.2G)  $\rightarrow$   $0\text{kN/m}^2$  (3.0G)へと大幅に低下する結果となった。

限長斜面に対する(1)式に示す斜面安定解析式を用いて、地震発生後の斜面安定性の変化について考察した。

$$F_s = C + (\sigma_0 - H \cdot \gamma_w) \cdot \cos 2\beta \cdot \tan \phi / (\sigma_0 \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta) \quad (1)$$

(1)式中の地下水深は、「簡易雨水浸透モデル」を用いて求め、入力条件となる降雨波形としては、2016年8月16日11時~24日0時に厚真町で観測された実績降雨波形(累加雨量 252.5 mm)を使用した。解析結果の一例として、斜面勾配  $\beta=25^\circ$  の場合の地下水深と加震前後の安全率の経時変化を図-8 に示す。解析開始から 162 時間後には、加速度を与えない場合(0G)には  $F_s=1.51$  を示し崩壊の発生に至っていないのに対し、加速度(2.2G)を与えた場合には安全率が 34.1%も低下し  $F_s=1.0$  を下回り、崩壊が発生する結果となった。加速度を与えた場合の安全率の低下は斜面勾配の増加とともに顕著となり、解析ケー

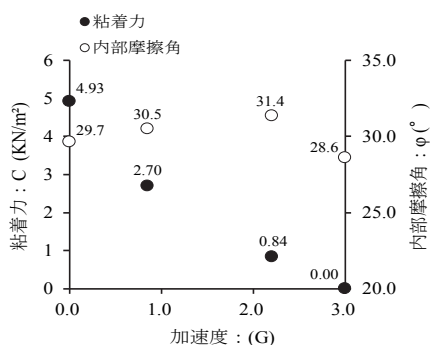


図-7 加速度による土質強度の変化

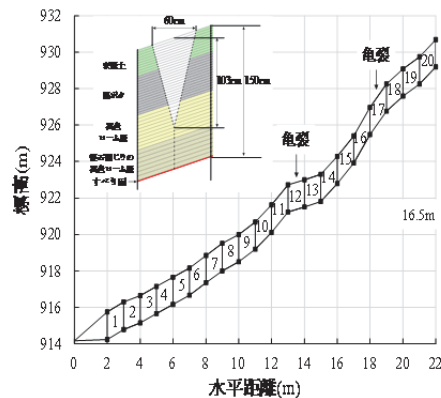


図-4 解析対象断面

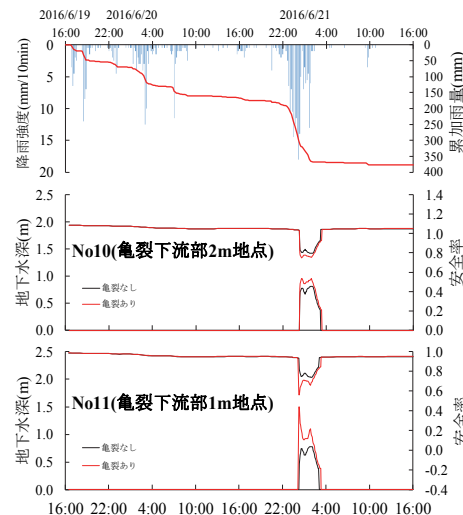


図-5 地下水深と安全率の経時変化

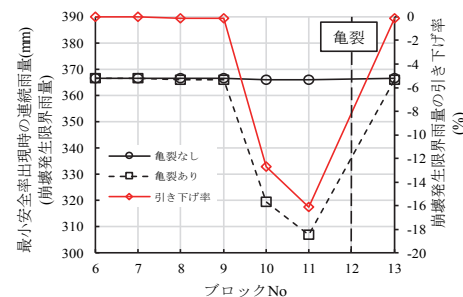


図-6 崩壊発生限界雨量の低下率 (ケース①とケース③との比較)

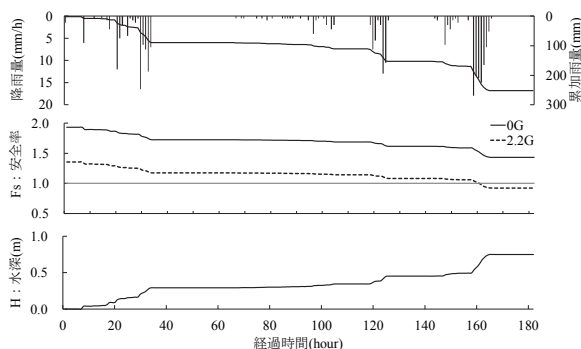


図-8 安全率の経時変化( $\beta=25^\circ$ )

ス内で最急勾配である  $\beta=35^\circ$  のときの最小安全率の低下率は 39.4% となった。さらに、大規模地震後の崩壊発生限界雨量の低下状況を把握するため、図-8 に示す実績降雨波形を中央集中型へと変形し、降雨強度を 1.5 倍(累加雨量 379mm)に引き延ばすことによって得られた降雨波形を入力降雨波形として安定計算を実施した結果、加速度(2.2G)を与えた場合のみ安全率が 1.0 を下回り、崩壊発生限界雨量は  $20^\circ$  斜面では 341mm(42 時間経過後)、 $25^\circ$  斜面では 220mm(34 時間経過後)と地震による加速度が作用する前の 30% 以上も低下するといった注目に値する結果が得られた。

### (3) 大規模地震により低下した斜面安定性の回復時期の定量化

地震発生後の時間経過にともなう土質強度の変化を示す図-9 より、加速度が増加しても内部摩擦角： $\phi$ には大きな変化は認められなかったものの、粘着力： $C$ は加速度の増加とともに大幅に減少する結果となった。とくに、北海道胆振東部地震で観測された最大加速度と同等の加速度(2.2G)を与えた場合には、加速度を与えない場合(0G)と比較して、加振直後には粘着力が 80% 以上も低下するといった注目に値する事実が明らかになった。

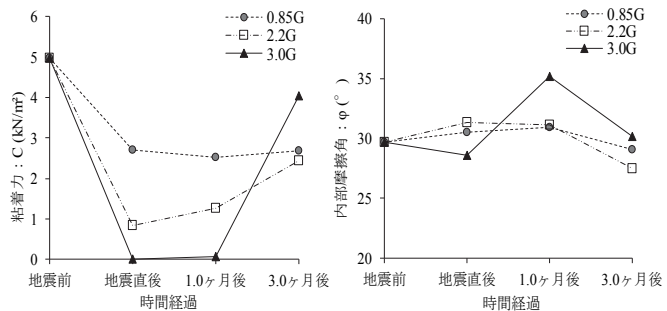


図-9 地震発生後の時間経過にともなう土質強度の変化

調査対象地の斜面勾配 ( $\beta=28^\circ$ ) と同様の斜面勾配  $\beta=25^\circ, 30^\circ$  とした場合の加振後の経過時間と最小安全率との関係を示す図-10 より、0.85G と 2.2G の加速度が作用した場合、加振後 1.0 ヶ月~3.0 ヶ月経過しても顕著な回復傾向がみられないのに対し、3.0G の加速度が作用した場合には加振後 3.0 ヶ月経過すると斜面勾配  $\beta=25^\circ$  の場合には最小安全率が  $F_s=1.08$  を示し、斜面の安定性が急激に回復する事実が明らかになった。

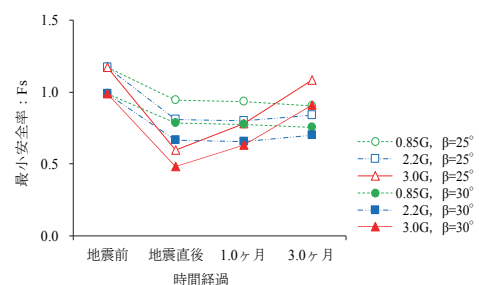


図-10 加振後の時間経過にともなう最小安全率の変化( $\beta=25^\circ, 30^\circ$ )

斜面安定解析において安全率が 1.0 を下回った時点での累加雨量を崩壊発生限界雨量と定義し、解析の結果得られた崩壊発生限界雨量を基に、地震発生前(0G)を基準とした崩壊発生限界雨量の低下率を求めた。

加振後の時間経過にともなう崩壊発生限界雨量の低下率の変化を示す図-11 より、勾配が  $\beta=25^\circ$  の斜面では加振直後の崩壊発生限界雨量の低下率は、加速度の増加とともに 8.9%(0.85G)  $\rightarrow$  -30.8%(2.2G)  $\rightarrow$  -72.8%(3.0G)へと大幅に低下することがわかる。また、0.85G と 2.2G の加速度が作用した場合には、加振後 1.0 ヶ月~3.0 ヶ月経過しても明瞭な回復傾向がみられないのに対し、3.0G の加速度が作用した場合の崩壊発生限界雨量の低下率は加振後 3.0 ヶ月が経過すると加振前(0G)と同程度(低下率: 0%)にまで大幅に回復する結果となった。この時間経過にともなう回復傾向(度合い)は、斜面勾配の増加とともに顕著に認められた。

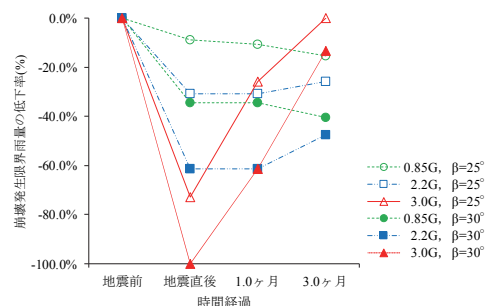


図-11 加振後の時間経過にともなう崩壊発生限界雨量の低下率の変化 ( $\beta=25^\circ, 30^\circ$ )

本研究により、火山地域において大規模地震により発生した開口亀裂の存在により地下水深が最大 92% 増加し、最小安全率は最大 24% も低下する事実が明らかになった。さらに、開口亀裂が存在するとその直下流部では崩壊発生限界雨量が最大で 18% 低下するといった興味深い事実が明らかになった。また、火山地域で大規模地震(2.2G)が発生すると、斜面を構成する土壌の土質強度が内部摩擦角では顕著な変化が見られないのに対し、粘着力は 81% も低下する事実が明らかになった。実績降雨波形(累加雨量 252.5mm)を与えた場合、勾配  $20^\circ \sim 35^\circ$  の斜面では加震前(0G)の安全率が 1.0 以上を示したのに対し、2.2G の加速度が作用すると、土質強度の低下に伴い安全率が大きく低下し、斜面勾配が  $25^\circ$  以上の斜面では崩壊が発生する結果となった。火山地域の斜面を構成する土壌に北海道胆振東部地震(最大加速度 1.83G, 震度 7)と同規模の加速度(2.2G)が勾配  $\beta=25^\circ$  の斜面に作用した場合の加振直後の崩壊発生限界雨量は、地震発生前と比較して 30% 以上も低下し、加振後 3.0 ヶ月経過しても低下率が 25.8% にとどまりわずかに回復する程度であった。「震度 5 強を観測した地域では 2 割、震度 6 弱以上を観測した地域では 3 割減ずる(国土交通省 HP)」とする運用方針と本研究で得られた  $\beta=25^\circ$  の場合の結果を比較すると、概ね妥当と判断されるものの(ただし、運用期間は 3 ヶ月以上必要)、斜面勾配の増加とともに限界雨量の低下率が増加することになるため、震度のみならず地形条件等を加味した基準の設定が必要となる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 平松晋也ほか	4. 巻 69
2. 論文標題 平成28年熊本地震後の降雨による二次土砂移動と二次土砂災害	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 砂防学会誌	6. 最初と最後の頁 25-36
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 桑澤昭雄，平松晋也，福山泰治郎
2. 発表標題 阿蘇山周辺斜面の土層構造と地下水深形成過程
3. 学会等名 砂防学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 桑澤昭雄，平松晋也，福山泰治郎
2. 発表標題 地震動が土質強度に及ぼす影響の定量的評価
3. 学会等名 日本地すべり学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 桑澤昭雄，平松晋也
2. 発表標題 大規模地震が表層崩壊の発生や崩壊規模に及ぼす影響
3. 学会等名 砂防学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 稲垣翔, 平松晋也
2. 発表標題 大規模地震が火山地域の斜面安定性に及ぼす影響
3. 学会等名 砂防学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 稲垣翔, 平松晋也
2. 発表標題 大規模地震動が火山地域の土質強度と崩壊発生限界雨量に及ぼす影響に関する一考察
3. 学会等名 日本地すべり学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平松 晋也, 福山 泰治郎, 桑澤 昭雄, 齋藤 悠樹
2. 発表標題 火山地域で発生する崩壊のタイミングとその規模に及ぼす樹木の影響
3. 学会等名 砂防学会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	小野 裕  (ONO Hiroshi)  (00231241)	信州大学・学術研究院農学系・助教    (13601)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	福山 泰治郎  (FUKUYAMA Taijiro)  (60462511)	信州大学・学術研究院農学系・助教    (13601)	