

平成 22 年 5 月 31 日現在

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19310121

研究課題名 (和文) 山地斜面の強震動予測と力学特性計測に基づく地震・豪雨複合斜面災害危険度評価の研究

研究課題名 (英文) A study on risk evaluation of landslides induced by combined effects of earthquake and rainfall, based on geotechnical testing as well as strong ground motion assessment in the mountain slopes

研究代表者

福岡 浩 (FUKUOKA HIROSHI)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：40252522

研究成果の概要 (和文)：本研では地震時地すべりを再現する最新技術、地盤調査法、強震動予測等を併せ地震・豪雨の複合作用による斜面災害の危険度評価法を検討した。2008年岩手宮城内陸地震等で発生した国内外の地すべり地で地盤調査を行い、採取した土試料等を用い地下水や斜面の条件と高速長距離運動を起こす「すべり面液状化」発生可能性を調べた。不飽和でも強震動時に見られる一定以上の変位で高流動性崩壊の危険が高い、等の地震前後の降雨条件を考慮した実用的な地すべりハザードマップ作成にとって新しい重要な知見が得られた。

研究成果の概要 (英文)：This study aims to promote new methodology of risk evaluation of landslides induced by combined effects of earthquake and rainfall, based on geotechnical testing which can reproduce any sliding surface condition as well as recent advanced strong ground motion assessment prediction in the slopes. We conducted field investigation in various landslide sites in Japan and other countries including the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake. Sampled soils were subjected to testing for examining the effects of ground water and other slope conditions on the Sliding-Surface Liquefaction (SSL) potential. SSL is the key mechanism of landslide rapid and long run-out movements. The achievements includes those new findings including that, significant extremely high mobility could be expected even in unsaturated ground material under strong ground motion causing certain shear displacement. Those shall contribute to new methodologies of practical hazard mapping of landslides affected by combined effects of earthquake events and rainfall / ground water conditions.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	10,700,000	3,210,000	13,910,000
2008年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
総計	15,500,000	4,650,000	20,150,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード：地すべり, すべり面液状化, 強震動予測, 流動化ポテンシャル, ハザードマップ, 三次クリープ, 不飽和土

## 1. 研究開始当初の背景

地震時には再活動タイプの地すべりはほとんど移動しないと考えられていたが、中越地震災害により、再活動地すべり地でも地震時に高速地すべりが発生することがわかった。一方、研究代表者が関わった平成13～15年度科学技術振興調整費「地震豪雨時の高速長距離土砂流動現象の解明」(APERIFプロジェクト、研究代表者：本申請の連携研究者である佐々)において京都大学防災研究所が開発した可視型地震時地すべり再現試験機を用いた研究により、流動化地すべりの発生・運動メカニズムとしての「すべり面液状化」が実証されたことにより発生場所が特定された場合における地すべり災害予測の実用レベルの技術開発が視野に入るようになった。

また、平成16年新潟県中越地震時に広範囲に多数の高速長距離地すべりが発生した原因に、直前に降った豪雨の影響が挙げられている。降雨後あるいは降雨中に地震が発生した場合、すべり面において過剰間隙水圧が発生し破壊しやすいためであるが、降雨あるいは地下水条件の相違、すなわち飽和度の違いにより地震時地すべりの挙動を予測する研究は従来皆無であった。

## 2. 研究の目的

本研究は、最先端の強震動予測技術と地震時地すべり災害予測技術を統合・発展させ、都市域に適用できる降雨後あるいは降雨中の地震による斜面災害危険度予測法およびハザードマップ作成法を確立することを目指す。地震時斜面災害予測技術は、首都圏直下地震、南海・東南海地震、東海地震が目前まで迫っていることが懸念されている現在、喫緊の課題である。

本研究の目的は、近年地震学の分野で発達した強震動予測の成果と地震時地すべりのすべり面の状態を再現できる最新の土質試験技術を併せて、地震・豪雨の複合作用の解明に焦点を絞った斜面災害の危険度評価を実施するものであり、従来の方法を用いて比較的浅い山地斜面における地震・降雨複合作用の解明を目指すものである。

## 3. 研究の方法

### (1) 地震・降雨複合斜面災害のケーススタディーの研究

地震時における危険斜面抽出手法並びに危険度評価手法を構築するため、国内外の地震豪雨高速地すべり発生地域において基礎資料の収集、土砂試料の採取を行った。

(2) レーダー、GPS等を用いた地盤調査法  
本研究費で購入した地中レーダー、孔内傾斜計等の地盤調査ツール、RTK-GPS等の地盤変位計測システムを用いて地震時、地震後の地盤調査を行い、地下水と地盤の地震時流動性との関係を調べた。

### (3) 粒度、土質と「すべり面液状化」ポテンシャルの関係

リングせん断試験機を用いて、混合粒径の珪砂や珪砂と低塑性粘土の混合材料について、山地斜面に相当する応力条件下ですべり面液状化を起こすための繰り返し載荷試験を実施し、低塑性粘性土の塑性指数と流動ポテンシャルの関係を調べた。

### (4) 飽和度と「すべり面液状化」ポテンシャルの関係

従来の研究では完全飽和(間隙水圧係数  $B_d$  値が 0.95 以上の非常に高い飽和度)条件で地震時地すべりの再現試験を実施し、ほとんどの材料で、一定以上のせん断距離を経ると「すべり面液状化」が発生しうることがわかった、 $B_d$  値が高くない条件でせん断した場合の挙動を調べた。

## 4. 研究成果

(1) 平成16年新潟県中越沖地震、平成19年中越沖地震の地盤変動域、昭和59年長野県西部地震による御岳高原地すべり、平成20年岩手宮城内陸地震による荒砥沢地すべり

(図1)他の土砂災害、鹿児島・宮崎県のシラス地域の地すべり地の現地調査を行った。また、海外の地震豪雨複合斜面災害の事例収集調査では、2001年エルサルバドル沖地震によるラスコリナス地すべり地と地震後の豪雨で多発した地すべり・崩壊誘起土石流、韓国の江原道の地すべり多発地域における微小地震による地すべり、ベトナムの開発地域で多発し始めている複合型地すべりの他、特に2008年中国四川省・四川(Wenchuan)地震によって震央域で本震と地震後の豪雨で極めて多数の地すべり・土石流が発生したが、合計3回の調査を行い、現地採取した土砂について発生メカニズムを検討した。2009年インドネシア・パダン地震による地すべり多発地帯、都市域近傍の山地斜面で発生した大規模な斜面災害についても資料収集を行い、現地調査を実施した。

(2) 中越沖地震後に移動した砂地盤の地すべり地において、本研究費で購入した地中レーダー等を用いて3m深までの地盤構造、特に盛土等の人工地盤、地下水位、コンクリート等の地下構造物を探索し、GPSを用いた本

震後長期にわたるクリープによる累積移動観測を実施した。地震後1年半に渡る地盤変位計測の結果、一部の地盤では継続して変位を示すことを初めて明らかにした。変位を起こした地盤の一部で地中レーダー計測、ボーリングコア観察、孔内傾斜計観測結果を併せて検討したところ、浅い地下水位の地盤がクリープ変位を起こしていたことがわかった。

(3) 地震時地すべり再現試験機を用いて「すべり面液状化」の発生可能性の評価を行った。特に、低塑性粘性土の塑性指数と流動ポテンシャルの関係を調べた。特に、斜面勾配  $10^\circ$  以上の場合、土砂の流動性を表す定常状態時の見かけの摩擦係数は  $PI=5\%$  付近で低下し極小値を示す領域があること (図2)、試験終了時のせん断距離も無制限の変位が起こりうる状態となった。この結果は、実際の地すべりの場合には  $PI=5\%$  前後で高速長距離運動がより発生しやすくなることを意味する。この低い見かけの摩擦係数が特定の  $PI$  で発現するメカニズムとしては混合砂中の粘土分が増えるにつれ、珪砂粒子同士の接触点が少なくなることにより珪砂の粒子構造が繰り返し載荷時に壊れやすく、過剰間隙水圧が発生しやすいためと推定した。



図1 岩手宮城内陸地震による荒砥沢地すべりの全景 (福岡撮影)

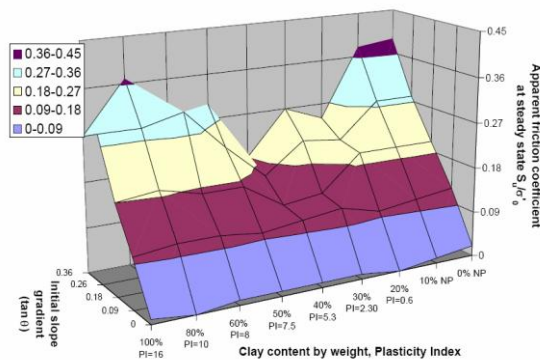


図2 斜面傾斜と粘土含有分と発揮される見かけの摩擦係数の関係。中央付近に高い流動性を示す領域が発見された。

(4) 「すべり面液状化」は研究代表と分担者の佐々らが開発した地震時地すべり再現試

験機による研究で発見された現象で、せん断時に粒子が破碎し体積収縮傾向となった場合に急激に有効応力とせん断抵抗が低下するために高速地すべりが現れる現象である。不飽和条件下で飽和度とすべり面液状化が発生する条件について京都大学防災研究所で開発した地震時地すべり再現試験機を用いて実験を繰り返し、飽和度約90%以上で一定のせん断が進行した段階で発現することがわかった (図3, 図4)。せん断時に粒子が破碎し体積収縮傾向となった場合に急激に有効応力とせん断抵抗が低下するために高速地すべりが現れる現象である。また、間隙圧を上昇させて三次クリープ過程を再現する実験を実施し、加圧密比、斜面傾斜、混合粘土の種類等による速度～加速度関係の係数の関係を見出した。上記研究成果を現地調査を実施した事例に適用するため、特に岩手・宮城内陸地震による荒砥沢地すべりは見かけの摩擦角が1度程度と従来の地すべりと比べても異常に低いことが研究者の間で謎となっていたが、このほぼ水平なすべり面で高速運動が発生したメカニズムについて現地採取した二種類の試料について飽和、不飽和試料を用いて実験的に調べた。その結果、現地の地震計で観測された地震動波形を用いて推定した強震動条件を与えたところ完全飽和試料でも高速長距離運動は発生し得ないが、ある程度不飽和条件でも速度制御試験における定常状態時のせん断抵抗が相当程度低下すること、および定常状態のせん断抵抗は一般に初期垂直応力に依存しないことから、荒砥沢地すべりのすべり面深度では見かけの摩擦角が1度以下になること、大規模地すべりでは相当な長距離運動しうることを見いだした (図5)。

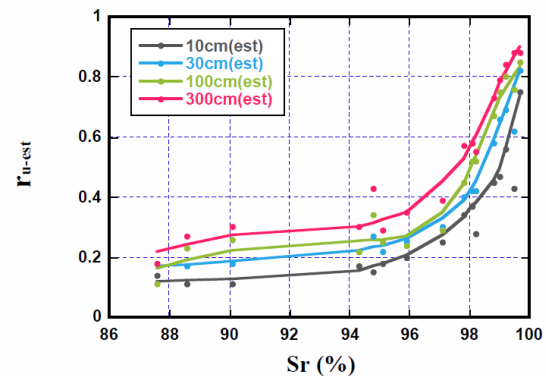


図3 砂の飽和度とリングせん断試験機による長距離せん断時に発生する過剰間隙圧係数の関係。概ね飽和度96%程度以上であれば不飽和試料でも、1m以上のせん断で約0.2～0.9までの間隙圧が発生することがわかった。

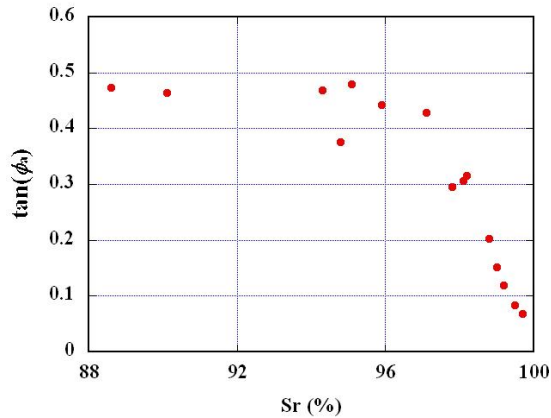


図4 実験中に計測した飽和度(Sr)と見かけの摩擦係数( $\tan \phi_a$ )の変化。96%以上で見かけの摩擦係数は急激に小さくなった。

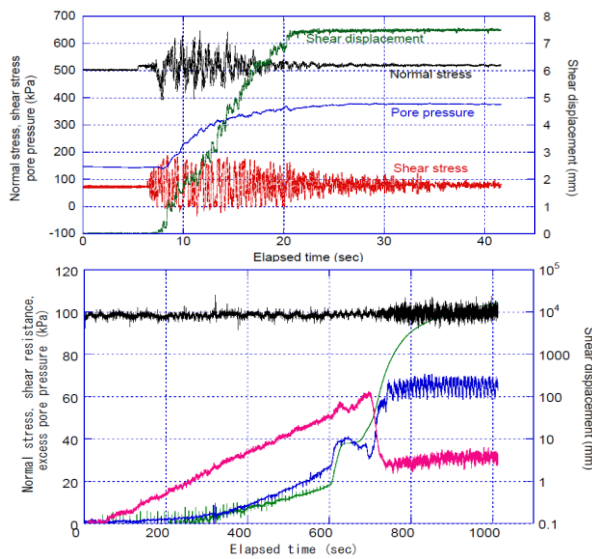


図5 岩手・宮城内陸地震による荒砥沢地すべりの不飽和試料の試験結果。波形载荷(上)では限定的な変位だったが、単調载荷(下)では定常状態のせん断抵抗は相当程度減少し、荒砥沢地すべりの深部すべり面の高い流動性を初めて説明することができた。

(5) 研究成果は論文としては Landslides 等の学術雑誌で公表した。発表は 2009 年と 2010 年の欧州地球科学連合(EGU)総会、2009 年の米国地球物理学連合秋季大会(AGU-FM)でセッションコンピナーと発表者として口頭発表、ポスター発表で公表した。その他、(社)日本地すべり学会研究発表会、土砂災害の予知・軽減新技術に関するアジア・太平洋シンポジウムで発表し、フランス・パリ(11月)で開催された国際斜面災害研究機構(ICL)の会議においても紹介した。2010年AGU-FMと2011年10月にローマで開催予定のWorld Landslide Forum においても関連セッション

を提案しており成果を公表する予定である。  
5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 19 件)

- ① Hiroshi Fukuoka, Gonghui Wang, Toyohiko Miyagi, Peng Cui, Ogbonnaya Igwe, and Ekaterina Georgieva (2010): Long runout mechanism of recent earthquake-triggered landslides in Japan and China. EGU (European Geosciences Union) General Assembly 2010, Geophysical Research Abstracts, Vol.12, EGU2010-6596.
- ② Hiroshi Fukuoka, Dwikorita Karnawati, Wahyu Wilopo, and Ign. Sudarno (2010): Mechanism of Landslide in response to the West Sumatra Earthquake of September 30, 2009. EGU (European Geosciences Union) General Assembly 2010, Geophysical Research Abstracts, Vol.12, EGU2010-14491.
- ③ Fukuoka, H. (2009) Ring shear test on progressive failure in rainfall-induced landslides. 日本地球惑星科学連合 2009 年大会予稿集. Y167-P006
- ④ Georgieva, E., Fukuoka, H. (2009): Ring shear test on creep in soils in help to the early warning on rainfall induced landslides. Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU2009-13719, European Geophysical Union General Assembly 2009.
- ⑤ 福岡 浩・佐藤一敏・松浦友紀 (2009): RTK-GPS を用いた斜面定期健康診断構想. (社)日本地すべり学会関西支部シンポジウム「斜面健康診断の可能性」, pp. 31-53.
- ⑥ 福岡 浩 (2009): 地震時地すべり再現試験機と高速長距離地すべり発生機構. 自然災害科学, Vol. 27, No.3, pp. 264-268.
- ⑦ 福岡 浩・宮城豊彦・王功輝 (2009): 平成20年岩手・宮城内陸地震による荒砥沢地すべりとすべり面液状化. (社)日本地すべり学会第48回研究発表会講演集, pp.158-159.
- ⑧ 福岡 浩, Peng CUI, Yang HONG (2009): 中国四川地震による大規模地すべりと地震後豪雨による土石流. (社)日本地すべり学会第48回研究発表会講演集, pp.105.
- ⑨ 汪發武・孫兵・小長井一男・福岡 浩 (2009): 四川大地震による長距離高速運動地すべりの発生・運動機構—東河口地すべりを例として—. (社)日本地すべり学会第48回研究発表会講演集, pp.176-177.
- ⑩ 福岡 浩 (2008): 地すべり調査における物理探査の役割と期待. 最新の物理探査摘要事例集, 社団法人物理探査学会創立60周年記念事業実行委員会, pp.97-103.
- ⑪ 古林竜治・福岡 浩・釜井俊孝 (2008): 珪砂における間隙水圧計数 BD と応力制御



- 非排水せん断挙動について。(社)日本地すべり学会第47回研究発表会講演集, pp.125-126.
- ⑫ 福岡 浩・釜井俊孝・佐藤一敏・松浦友紀 (2008): 平成19年中越沖地震後の宅地の地盤変動の計測。(社)日本地すべり学会第47回研究発表会講演集, pp.329-332.
- ⑬ Georgieva, E., Fukuoka, H., Wang, G., Wang, F. (2008): Experimental study on pre-failure creep in soils induced by the gradual generation of pore water pressure by means of ring-shear test. (社)日本地すべり学会第47回研究発表会講演集, pp.387-390.
- ⑭ Jurko, J., Sassa, K., Fukuoka, H. (2008): Study on seismic behavior of nonplastic silt by means of ring-shear apparatus. Landslides, Vol.5, No.2, pp.189-201.
- ⑮ Igwe, O., Fukuoka, H. (2008): Field and Laboratory Investigation of Soils Affected by the 2007 Chuetsuoki Earthquake. Proc. the First Landslide Forum, Parallel Session Volume, pp.285-288.
- ⑯ Teuku Faisal Fathani, Dwikorita Karnawati, Sassa, K., Fukuoka, H., Honda, K. (2008): Development of Landslide Monitoring and Early Warning System in Indonesia. Proc. the First Landslide Forum, Parallel Session Volume, pp.195-198.
- ⑰ Georgieva, E. Fukuoka, H. (2008): Experimental Study on Pre-failure Creep in Soils Induced by the Generation of Pore Water Pressure by Means of Ring Shear Test. Proc. The First Landslide Forum, Poster Session Volume, pp.29-32.
- ⑱ 福岡 浩・福井 理・佐々恭二・汪 発武 (2007): 個別要素法を用いた飽和・非排水リングせん断試験における粒子破碎と過剰間隙水圧の発生過程の再現. 第46回地すべり学会研究発表会講演集, pp.113-114.
- ⑲ 戸敷英史・王 功輝・福岡 浩・佐々恭二 (2007): リングせん断試験による「シラス」のせん断特性. 第46回地すべり学会研究発表会講演集, pp.119-120.
- [学会発表] (計11件)
- ① Hiroshi Fukuoka: Long runout mechanism of recent earthquake-triggered landslides in Japan and China. EGU (European Geosciences Union) General Assembly 2010, Geophysical Research Abstracts, Vol.12, EGU2010-6596, 2010年5月7日, オーストリア国, ウィーン国際センター.
- ② Hiroshi Fukuoka: Mechanism of Landslide in response to the West Sumatra Earthquake of September 30, 2009. EGU (European Geosciences Union) General Assembly 2010, Geophysical Research Abstracts, Vol.12, EGU2010-14491, 2010年5月7日, オーストリア国, ウィーン国際センター.
- ③ Fukuoka, H.: Mechanism of rapid and long runout landslides. First West-Africa Workshop on Landslides and Other Natural Disasters, 2010年3月24日, ナイジェリア国, ナイジェリア大学 Nsukka キャンパス.
- ④ 福岡 浩: 中国四川地震による大規模地すべりと地震後豪雨による土石流. (社)日本地すべり学会第48回研究発表会, 2009年8月27日, 新潟市・新潟大学.
- ⑤ 福岡 浩: 平成20年岩手・宮城内陸地震による荒砥沢地すべりとすべり面液状化. (社)日本地すべり学会第48回研究発表会, 2009年8月26日, 新潟市・新潟大学..
- ⑥ 福岡 浩: RTK-GPSを用いた斜面定期健康診断構想.(社)日本地すべり学会関西支部シンポジウム「斜面健康診断の可能性」、2009年6月10日, 大阪市, 建設交流館.
- ⑦ Fukuoka, H.: Ring shear test on progressive failure in rainfall-induced landslides. 日本地球惑星科学連合2009年大会, 2009年5月19日, 千葉、幕張メッセ
- ⑧ Fukuoka, H.: Ring shear test on creep in soils in help to the early warning on rainfall induced landslides. European Geophysical Union General Assembly 2009, 2009年4月23日, オーストラリア国・ウィーン国際センター
- ⑨ 福岡 浩: 地すべり調査における物理探査の役割と期待. 最新の物理探査摘要事例集, 社団法人物理探査学会創立60周年記念シンポジウム「社会に貢献する物理探査」、2008年10月21日, 東京、タワーホール船堀.
- ⑩ 福岡 浩: 平成19年中越沖地震後の宅地の地盤変動の計測. (社)日本地すべり学会第47回研究発表会, 2008年8月27日, 神奈川県, 湯本富士屋ホテル.
- ⑪ 福岡 浩: 個別要素法を用いた飽和・非排水リングせん断試験における粒子破碎と過剰間隙水圧の発生過程の再現. 第46回地すべり学会研究発表会, 2007年8月.
- [図書] (計3件)
- ① 福岡 浩(2009): Saas-GISによる土砂災害ハザードマップ事例. 京大・NTTリジリエンス共同研究グループ著, 「しなやかな社会の創造」, 日経BP企画, pp.152-157.
- ② Sassa, K., Nagai, O., Fukuoka, H., Wang, F.W., (eds.) (2008): Proceedings of the First World Landslide Forum, Poster Session Volume, 122 pages.
- ③ Sassa, K., Fukuoka, H., Nagai, O., et al. (eds.) (2008): Proceedings of the First World Landslide Forum, Parallel Session Volume, 708 pages.

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他] ホームページ等 なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

福岡 浩 (FUKUOKA HIROSHI)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：40252522

### (3) 連携研究者

落合 博貴 (OCHIAI HIROTAKA)

独立行政法人・森林総合研究所・領域長

研究者番号：20353633

佐々 恭二 (SASSA KYOJI)

特定非営利活動法人アイシーエル・理事長

研究者番号：30086061

王 功輝 (WANG GONGHUI)

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号：50372553

古村 孝志 (FURUMURA TAKASHI)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：80241404