

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25560181

研究課題名(和文) 岩石のせん断破碎が巨大地すべり・地震断層すべりの高速運動を引き起こすか

研究課題名(英文) Does shear fracturing of rocks trigger high mobility movement of landslides and earth faults?

研究代表者

王 功輝 (Wang, Gonghui)

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号：50372553

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：より強い地震及び高速地すべりを引き起こす機構を解明するために、地震により発生した地すべりに対する現地調査・計測及び室内実験研究を行った。その結果を下記に纏める。1) 飽和砂層での液状化現象および乾燥した炭酸岩におけるせん断抵抗の負のせん断速度依存効果により、地すべり土塊が高速で移動しうる。2) 粒状体のせん断抵抗はその粒径およびせん断速度の変化に伴って変化し、スティックスリップ現象の発生に伴うせん断抵抗の低下は、せん断速度の増加に伴って小さくなる。3) 岩塩のせん断実験において、粒子破碎やせん断が著しい局所化に発生し、せん断履歴の増加に伴ってピーク強度から残留強度になるまでのせん断変位が小さくなる。

研究成果の概要(英文)：To understand the triggering mechanisms of stronger earthquake and landslides with high mobility, we performed field investigation of some coseismic landslides and also conducted shear tests on different granular materials. Some conclusions are made as follows. 1) Liquefaction of saturated sliding surface or negative shear rate dependence of shear strength of carbonate enabled the high mobility of post failure movement of landslide materials. 2) The shear strength of some granular materials depends on the size of grains and also on the shear rate. The reduction in shear strength due to the occurrence of stick slip depends on the shear rate and also grain size. 3) grain crushing and shearing are remarkably localized on the halite shear zone, and shear strength could be recovered quickly soon after the cease of shear, but the shear distance needed to drop from the peak to residual shear strength becomes shorter with increase of shear times.

研究分野：複合領域

キーワード：地盤災害 地震動 岩石 せん断破碎 高速運動 高周波数振動

1. 研究開始当初の背景

近年、地震や大規模地すべりなど岩石や土砂のせん断破壊による災害が相次いで生じている。例えば、H20年の岩手・宮城内陸地震により荒砥沢地域で発生した大規模地すべり(移動土砂:7千万 m^3)では、土塊が水平に近いすべり面に沿って約300mを高速で移動した。2008年の四川大地震時に大包光地域では、巨大地すべり(約11億 m^3)が発生し、高さ約580mの天然ダムが形成された。また、H23年の台風12号に伴った豪雨により紀伊半島では、数多くの大規模地すべりが発生し、天然ダムを形成し、地域に大きな被害をもたらした。これらの地すべりは、規模が大きいため、対策事業による土砂災害防止が事実上不可能である。したがって、大規模地すべりの災害軽減を検討するためには、これらの地すべりの発生・運動機構を解明し、より精度の高い災害ハザードマップの作成が不可欠と考えられる。一方、内陸の大地震の殆どは既存の活断層が繰り返し動いて発生することが一般的に理解されている。そのため、大地震が繰り返し発生するメカニズムの解明には、活断層帯のせん断特性を理解することが重要視されている。

2. 研究の目的

より強い地震および大規模地すべりの高速運動を引き起こす真相を探るため、本研究では、今まで解明されていない高圧・高速せん断条件下での岩石のせん断抵抗の変化機構を新たな切り口から調べて解明すると共に、以下の点を明らかにする。

- 1) 異なる応力・せん断速度下での岩石のせん断抵抗の変化特性を、せん断に伴う水圧の上昇や岩石・土粒子の破砕およびそれに伴う高周波数の振動から総合的に検討し、解明する。
- 2) アルパイン断層帯および中央構造線断層帯から採取した断層ガウジに対して、繰り返しせん断試験を実施し、断層帯強度の低下および回復特性を調べる。また、断層ガウジの繰り返しせん断における摩擦による熱エネルギーの変化をも調べる。

3. 研究の方法

本研究は京都大学防災研究所の実験室を中心に、国内外に発生した巨大地すべり、徳島県池田町にある中央構造線断層露頭およびニュージーランド南島に現れたアルパイン断層露頭をフィールドとして、下記の通りに研究活動を展開した。

(1) 巨大地すべりに対する現地調査・計測

2008年の四川大地震により発生した大包光地すべりに対して、詳細な現地調査を行い、地すべりの地質、地形、斜面土層状況および運動特性を調べ、すべり面付近から実験用の土砂・岩石試料を採取した。これらの試料に対して、リングせん断試験を実施し、異なるせん断応力およびせん断速度下におけるせん断挙動を調べた。また、2004年中越地震時に形成された東竹沢地すべりダムに対して、現地調査を実施し、地すべりの源頭部+ダム堤体において、連続地震観測を行い、斜面およびダム堤体の震動特性を調べた。

(2) 断層ガウジの採取

徳島県池田町にある京都大学防災研究所徳島地すべり観測所の近くで、道路工事により、新鮮な中央構造線の断層露頭が現れた。ニュージーランドの南島でも道路の建設によりアルパイン断層の露頭が現れた。これらの断層露頭に対して現地調査を行い、断層帯から繰り返しせん断実験用の試料(断層ガウジ)を採取することができた。

(3) リングせん断試験機を用いた実験研究

大包光地すべり地から採取した炭酸岩、人工砂(珪砂)および岩塩(高圧・高温状態での岩石の性質を再現するため)に対して、異なる圧力レベル・せん断速度下でのせん断試験を実施し、岩石の破砕特性、せん断履歴などがせん断抵抗の変化に及ぼす影響を調べた。また、せん断により形成されたすべり面を非破壊式SEM機で観測し、せん断抵抗の変化とそのすべり面における微小構造の形成との関係調べた。さらに、異なる粒径を持つガラスビーズを用いて、異なる垂直応力およびせん断速度でせん断実験を実施した。粒径や垂直応力およびせん断速度の変化によるせん断挙動への影響、せん断中における微小破壊(AE)とせん断抵抗の変化との関係などについて詳しく調べた。

断層ガウジを用いたせん断実験は現在進行中であるため、本報告書には断層ガウジを用いたせん断試験結果を報告しない。

4. 研究成果

(1) 東竹沢地すべり地における調査研究

東竹沢天然ダムに対して、高精度表面波探査と微動アレイ調査を実施し、ダム堤体のS波速度構造を調べた結果、次のことを分かった。

ダム堤体が風化した砂岩・シルト岩からなっているため、そのS波速度が全体として低い。また、異なるS波速度を持つ三つの土層構造が明瞭に認められ、下の土層の境界が斜面の下方側に向かって約8°傾斜している

(図 1)．これは、地すべり移動土塊が、源頭部のすべり面に沿って、移動していたことを示していると考えられる．また、この傾斜の傾向が微動アレイ調査よりも検証された．

液状化現象がすべり面付近に限られているいわゆるすべり面液状化現象が発生したため、すべり面上の地すべり土塊に大きな攪乱がなく、もとの構造を保持したまま高速で下方へ移動していたことが認められた．

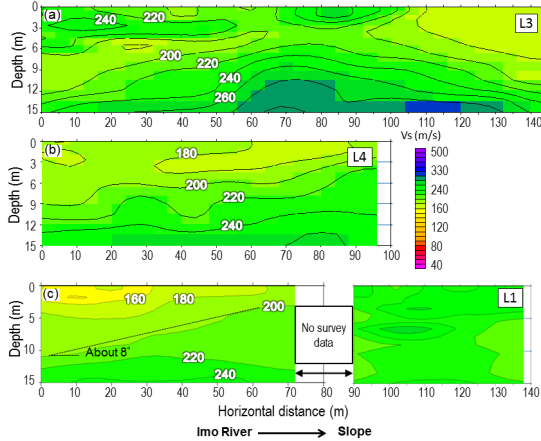


図 1 ダム堤体における高精度表面波探査結果

(2) 岩石のせん断挙動と高速地すべり

2008 年四川大地震により発生した大光包地すべり(崩壊面積:約 4km×2km; 崩壊土砂量:約 11 億立方メートル)を調査した結果、崩壊面の南半分は平滑な層理面であり、地すべり土塊がこの層理面に沿って移動し、層理面附近の岩盤が破碎されていることが分かった．これは、地すべり土塊の移動により発生したものだと考えられる．地すべりの高速移動機構を解明するために、この層理面より 60-80cm 深さの所から破碎された試料(苦灰岩)を採取し、リングせん断試験機を用いてそのせん断挙動を調べた．

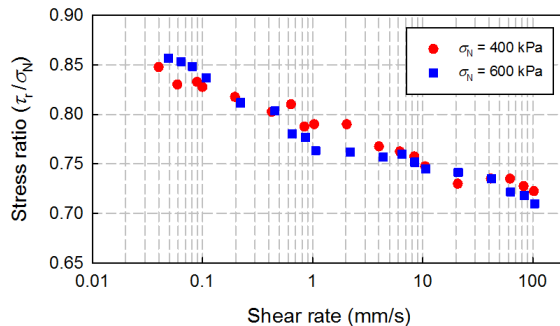


図 2 大光包地すべりのすべり面から採取した試料に対するせん断試験結果

現地から採取した試料に対して、400, 500, 600, 1000, 1500kPa 五つの垂直応力下でせん断試験を実施した．各垂直応力下でせん断

速度を変えて、せん断抵抗の変化を調べた．各垂直応力およびせん断速度下で求めた結果(せん断抵抗と垂直応力の比)を図 2 に示す．そこからせん断速度が大きくなると、せん断抵抗が大幅に低下する傾向を伺える．これは、地震により地すべりが発生した後に、地すべり土塊が斜面下方へ移動するとともに、移動速度が速くなることに従って、せん断抵抗が小さくなり、それにより地すべり土塊がさらなる加速して移動するといった斜面変動・加速過程を示唆している．

せん断抵抗の低下機構(速度依存性)を解明するため、実験後にせん断箱を開けて、試料のせん断様子を観察した．いずれの試験において、せん断ゾーンが形成され(図 3)、せん断ゾーンにおいて粒子発生が発生したことが分かった．炭酸岩に対するせん断実験におけるせん断速度の増加に伴うせん断抵抗の低下現象についての説明には、せん断摩擦によって、せん断面附近の温度が上昇し、炭酸岩の分解により CO₂ ガスが放出され、すべり面附近には高い気圧が発生し、有効応力が大幅に低下した説(Goren et al., 2010)と、放出された CO₂ ガスにより高い気圧が発生しがたく、ナノサイズまで粉碎された粒子が大きな粒子を孤立させて、ナノ粒子のせん断抵抗が極めて低いからとの説(Han et al., 2007)、があるが、定説はまだない．図 2 に示すリングせん断試験におけるせん断抵抗の速度効果の原因に関する詳しい検証はまだ進行中であるため、その結果を今後の論文で報告したい．



図 3 せん断により形成されたせん断ゾーン

(3) ガラスビーズを用いたせん断試験

粒状体の基本せん断挙動を解明するため、異なる粒径を持つガラスビーズに対して、リングせん断試験器を用いて、異なるせん断速度でせん断試験を実施した．

まず、粒径 0.106-0.15mm のガラスビーズに対して、せん断試験を実施した．一定の垂直応力で圧密された後に、試料が 0.1 mm/s のせん断速度でせん断され、せん断強度(ピー

クおよび残留)を求めた。その後、垂直応力を変えて、同じせん断速度で異なる垂直応力下のせん断強度を求めた。同じ方法で、粒径1.0-1.4mm および 2.0-2.5mm のガラスビーズのせん断強度をも求めた。ピーク強度により求められたガラスの内部摩擦角度が、粒径により異なる。粒径が小さくなると、その内部摩擦角度が大きくなる傾向にある。残留強度においても同じ傾向が見られる。すなわち、試料の材料が同じでも、粒径が異なると、内部摩擦角度が異なる。これは、粒径の小さい試料においては、試料の比表面積が大きくなり、単位体積における粒子同士の接触面積が大きくなることによるものだと考えられる。

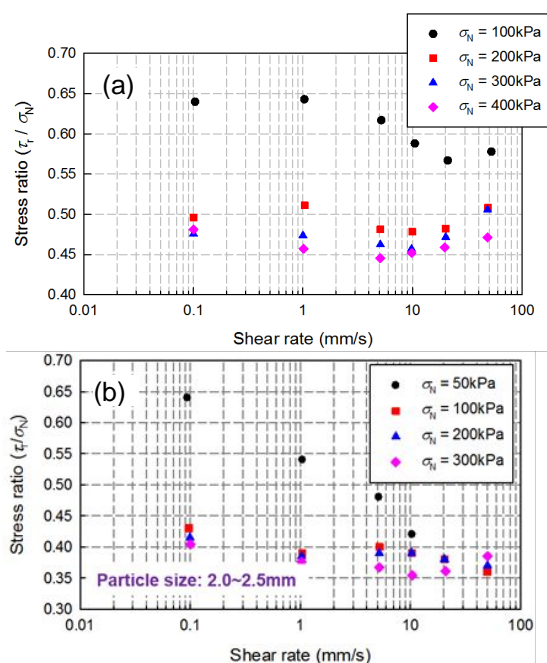


図4 異なるせん断速度での残留強度。(a) ガラスビーズの粒径: 0.106-0.15mm; (b) ガラスビーズの粒径: 2.0-2.5mm.

上述した異なる粒径のガラスビーズに対して、異なるせん断速度で求めた残留強度の結果を図4に示す。いずれの試料もせん断速度の増加に伴って残留強度が低下する傾向を示している。また、応力が低い場合には、残量強度の低下傾向が著しくなる。これは、せん断に伴って、弾性体であるガラスビーズの間で起こされた振動により生じた結果だと考えられる。

また、異なる速度で実施した実験において、スティックスリップ現象(図5)が観測された。同じせん断速度で実施されたせん断過程において、このスティックスリップ現象の発生時間間隔(Δt)およびせん断距離間隔(Δl)が同じである。しかし、これらの時間間隔および距離間隔がせん断速度の増加に伴って小

さくなる(図6)。スティックスリップ現象において発生するせん断抵抗の低下が、せん断速度の増加に伴って、小さくなるのが分かった(図5)。また、スティックスリップ現象における時系列データを詳しく分析した結果、AEが発生してからせん断抵抗が低下して行くことが分かった(図7)。これは、AEがせん断抵抗低下の前兆現象であることを示唆している。これらのスティックスリップ現象におけるAEの発生とせん断抵抗の変化との関係についてはまた不明な点が多く、この関係の解明を今後の研究にしたい。

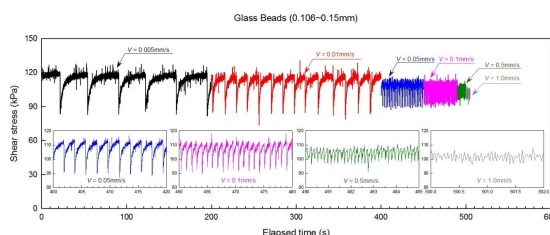


図5 異なるせん断速度でのせん断実験におけるスティックスリップ現象

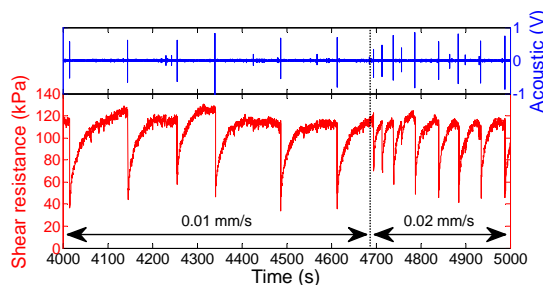


図6 異なるせん断速度下でのせん断抵抗とAE

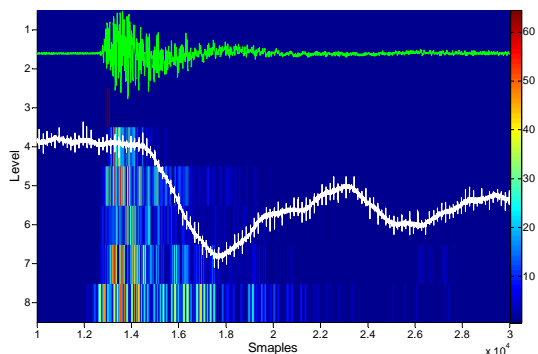


図7 AE記録と周波数スペクトルおよびせん断抵抗

岩塩を用いたせん断試験

岩塩の高速せん断挙動を調べるために、2.2m/sのせん断速度でせん断実験が実施できるリングせん断試験機6号機を用いた。200kPaの垂直応力で岩塩の試験供試体を圧密した後に、1m/sのせん断速度でせん断実験を実施した。せん断変位が約3mになった時に、垂直応力をかけたままで、せん断試験を止めることにした。5分後にもう一度同じせん断速度で供試体をせん断した。こういった

方法で、同じ供試体に対して、せん断実験を繰り返して計3回実施した。せん断試験終了後せん断箱を開けて、供試体を観察したところ、せん断ゾーン附近の試料においては、粒子破碎やせん断の局所化が著しく発生し、せん断によって形成されたすべり面においては鏡肌や条線（図8）がよく発達したことが分かった。

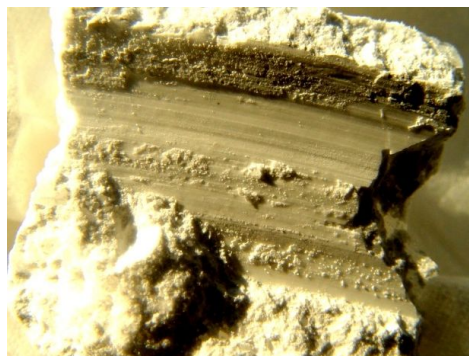


図8 すべり面において形成された鏡肌と条線

繰り返しせん断実験により得られたせん断強度（せん断抵抗 / 垂直応力）の変化（図9）から、1回目と2回目のせん断において、ピーク強度の後に、せん断抵抗が一時的に著しく低下し、さらなるのせん断に伴って、回復し、その後低下していくことが伺える。しかし、3回目の試験においては、ピーク強度に達した後に、せん断抵抗が素早く残留強度までに低下し、一時的な回復傾向が見られなかった。また、2回目と3回目の実験におけるピーク強度がほぼ同じであり、その値は一回目のせん断過程において発揮したピーク強度より大きいことと、せん断履歴の増加に伴って、ピーク強度から残留強度になるまでに発生したせん断変位が小さくなることが図9から認められる。ピーク強度から残留強度になるまでの距離が小さくなり、この間の摩擦により消耗するエネルギーが小さくなる。もし地震断層のガウジが図9に示すせん断挙動をする場合には、断層の繰り返し運動により引き起こす地震の規模が大きくなって行く可能性があると考えられる。

形成されたすべり面を走査型電子顕微鏡による観察を行った結果、すべり面が異なる粒径の岩塩粒子により形成され、密な構造となり、岩塩粒子が滑らかな表面を呈していることが分かった。また、形状測定レーザマイクロスコプを用いて、すべり面のトポグラフィーを測定した（図10）。そこから、すべり面の条線がせん断方向へ発達しているが、せん断面の横断方向には起伏があり、その差が203μmにも及ぶことが分かる。これらの条線の発達やすべり面の起伏によるせん断抵

抗への影響をこれからの研究より明らかにしたい。

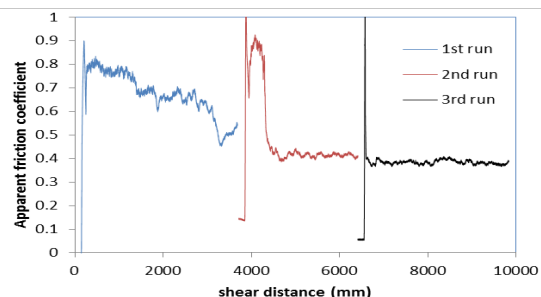


図9 繰り返しせん断によるせん断抵抗とせん断距離の関係図

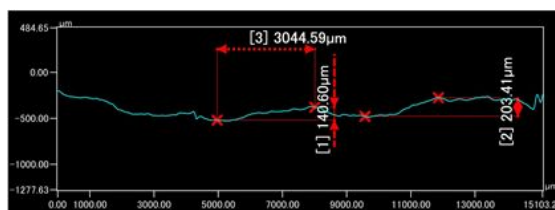
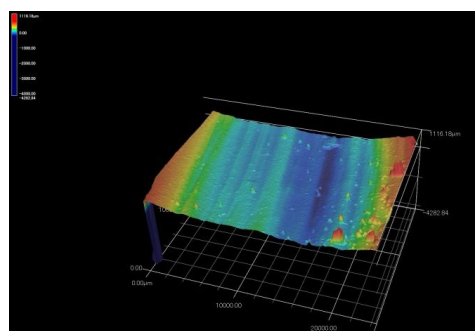


図10 (a) すべり面の3Dトポグラフィー；(b) すべり面の横断トポグラフィー

引用文献

- Goren, L., Aharonov, E. and Anders, M.H. (2010). The long runout of the Heart Mountain landslide: Heating, pressurization, and carbonate decomposition. *Journal of Geophysical Research* 115; doi: 10.1029/2009JB007113. issn: 0148-0227.
- Han, R. T., T. Shimamoto, T. Hirose, J. H. Ree, and J. Ando (2007), Ultralow friction of carbonate faults caused by thermal decomposition, *Science*, 316, 878–881, doi:10.1126/science.1139763.

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2件)

- Jiang, Y., Wang, G., and Kamai, T, 2015. Effect of particle size and shear velocity on frictional instability in locally sheared granular materials. *Journal of Geophysical*

Research, (under review), 査読有

王功輝・古谷元・土井一生・渡部直喜・若井明彦・丸井英明(2015): 表面波および微動アレイ探査を併用した東竹沢天然ダム堤体の内部構造調査．地すべり学会誌(掲載決定), 査読有

[学会発表](計 7 件)

Yao Jiang, Gonghui Wang, Toshitaka Kamai (2014): Fast shear behavior of granular materials and rapid landsliding phenomena. 平成 25 年度京都大学防災研究所研究発表講演会.

Jiang, Y., Wang, G., Kamai, T. (2014): Fast shear behaviour of granular material and rapid landsliding phenomena. H26 年度日本地球惑星科学連合大会, 横浜. 概要: HDS05-14 [学生優秀発表奨]

Jiang, Y., Wang, G., Kamai, T. (2014): Stick-slip instabilities in sheared granular materials. 日本地すべり学会第 53 回地すべり学会講演集, 概要: CD-ROM, 2-18 (p.84).

Jiang, Y., Wang, G., Kamai, T. (2015): Correlations between frictional instabilities and acoustic emissions of locally sheared granular materials. 日本地すべり学会第 54 回地すべり学会講演集(出版中)

Jiang, Y., Wang, G., Kamai, T. (2015): Frictional instability of locally sheared granular materials: does it depend on particle size? Annual Meeting of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University. Abstract: D09.

Jiang, Y., Wang, G., Kamai, T. (2015): Acoustic emissions preceding the stress drops in locally sheared granular materials. Japan Geoscience Union Annual Meeting, Abstract: HDS06-09, Chiba.

Jiang, Y., Wang, G., Kamai, T. (2015): Influence of particle size and shear velocity on the frictional properties and slip instabilities of sheared granular materials. Proceedings of the 10th Asian Regional Conference of IAEG. (submitted).

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

王功輝 (WANG GONGHUI)

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号: 50372553

(2)研究分担者

未峯 章 (SUEMINE AKIRA)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号: 00109092

(3)連携研究者

なし