

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2014

課題番号：22360187

研究課題名(和文) 山口県防府地区で発生した土石流災害の発生メカニズムに対する地盤工学的解明

研究課題名(英文) Geotechnical investigation of possible outbreak mechanism on debris flows in Hofu, Yamaguchi in 2009

研究代表者

中田 幸男 (Nakata, Yukio)

山口大学・理工学研究科・教授

研究者番号：90274183

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：平成21年7月におきた山口県防府市の土石流災害では、表層地質が花崗岩で覆われた地域において土石流が発生した。そのため、花崗岩の風化残積土であるまさ土の土石流発生メカニズムの解明が、今後の防災・減災のために必要となった。

このようなことから一連の検討を行った。その結果、(1)大規模な土石流の発生の誘因に、雨水による地下水位の上昇だけでなく、基盤からの地下水の流入も寄与していると考えられること、(2)地下水の流入が想定される地形に、リニアメントによって特徴づけられる場所があること、(3)このような場所では、降雨中及び降雨後の長期に渡って地下水位の高い状況がつづくこと、を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The debris disaster occurred in Hofu city, Yamaguchi in July, 2009. The surface geology of the area which occurred was covered mainly with a granite. So, the explication of the debris flow generating mechanism of decomposed granite soil was needed for future disaster prevention and reduction.

Therefore a series of research works were carried out. The following things were understood. (1) It was thought that the cause of large-scale debris flow had not only the rise of the groundwater level by rain water but inflow of groundwater from the stratum. (2) The geographical feature inflowing groundwater was presumed to be a place characterized by lineament. (3) At such a place, the higher level of the groundwater continued over the long period of time in rain and after rain.

研究分野：地盤工学

キーワード：土石流 まさ土

1. 研究開始当初の背景

平成 21 年 7 月 21 日に山口県防府市で大規模かつ広域で土石流が発生し、災害をもたらした。土石流による被害が大きかった地域は、国道 262 号線沿いの勝坂や下右田、また、佐波川の右岸に位置する真尾や石原であった。

勝坂では剣川流域を主溪流として土石流が発生した。葉脈状に土石流の痕跡があり、広域にかつ多数の源頭が存在している。そこから流出した土砂が、さらに溪流沿いを削剥しながら流下したため、土砂量は膨大となった。国道 262 号沿線の下右田では、西側の西目山東斜面、東側の右田ヶ岳西斜面の沢部から土石流が発生した。巨石などの流出により人家や自動車が被災し、4 名の方がなくなった。真尾では、老人ホームが被災し、死者 7 名となった。ここでは、2km におよぶ主溪流に 4 つの支溪流が流れ込んでいた。石原では、矢筈ヶ岳北斜面で 2 つの 1km をこえる土石流(石原 A、B)が発生した。これにより、下流の住宅地が被災し、2 名の死者がでた。石原 A は、一つの溪流で、石原 B は二つの溪流が一つに合流する土石流となっている。石原 B の西側の支流の中流域には、風化層が深さ 5~10m にもおよぶ流域が 200m 程度続いていた。

このように、7.21 の災害では予想を上回る広域かつ多数の源頭をもつ土石流が発生した。このような土石流の発生メカニズムを地盤工学的に解明することは、今後の防災・減災のために重要といえる。

2. 研究の目的

平成 21 年 7 月におきた山口県防府市の土石流災害では、表層地質が花崗岩で覆われた地域において、予想を上回る広域から土石流が発生し、想定以上の砂が流出し、多くの犠牲が生じることとなった。そのため、花崗岩の風化残積土であるまさ土の土石流発生メカニズムとくに、土石流源頭での発生メカニズム、斜面崩壊から土石流への遷移メカニズムの解明が、今後の防災・減災のために必要である。本研究では、まさ土の土石流発生メカニズムの解明に関する一連の検討を行うものである。

3. 研究の方法

本研究では、まさ土の土石流の発生メカニズムの解明に対する基礎的な研究を行う。ここでは、

- (1) 乱さないまさ土の力学特性の把握
- (2) 土石流発生地における降雨量と地下水挙動の把握
- (3) 模型まさ土斜面に対する斜面崩壊の再現と土砂移動の把握
- (4) 安定解析による斜面崩壊の評価
- (5) (1)から(4)に基づく発生メカニズムの解明を行った。

4. 研究成果

(1) 乱さないまさ土の力学特性の把握

① 開発した低圧単純せん断試験機の概要



写真-1.1 低圧単純せん断試験機

写真-1.1 に本研究で開発した低圧単純せん断試験機を示す。試験機の特徴は、せん断箱がローラーの組み込まれた 9 枚の積層板から構成されている点である。このため、せん断時に各積層板が独立してせん断方向に変位し、供試体に単純せん断変形を与えることができる。供試体寸法は直径 60mm、高さ 22.6mm の円柱状である。また、供試体にメンブレンを装着することで不飽和状態、供試体上部から間隙空気圧を与えることで任意のサクシオン状態、通水することで飽和状態の試験が可能である。なお、本試験機では低圧条件下でせん断試験を行うため、メンブレン張力補正式の算出を行った。さらに、初期サクシオンの測定も可能となっている。

② 現場試料を用いたサクシオン制御低圧単純せん断試験

試験に用いた試料は、現場計測箇所である上馬屋地区の斜面表層から採取したまさ土を用いた。図-1.1 に示すように、垂直応力 $\bar{\sigma} = 30\text{kN/m}^2$ において、供試体初期状態 $s_u = 0.85\text{kN/m}^2$ である不飽和条件において発揮されるせん断応力は、 $s_u = 5, 10\text{kN/m}^2$ のせん断応力より小さく、 $s_u = 0.5\text{kN/m}^2$ より大きいことがわかる。また、サクシオンが大きいくほどより膨張傾向を示すことがわかる。図-1.2 より、サクシオンが増加するとせん断強度は増加し、線形関係を示している。また、図に示す近似線は各垂直応力における近似線の傾きを平均したものである。図-1.3 に Fredlund の不飽和せん断強度式を適用して求めた破壊線と、実験値を示す。この結果より、破壊線は概ね実験値を捉え、また、サクシオンが増加すると粘着力が増加している。このことから、Fredlund の不飽和せん断強度式は本研究で開発した低圧単純せん断試験機を用いてサクシオン制御せん断試験による不飽和強度定数を求める上で有効であると考えられる。

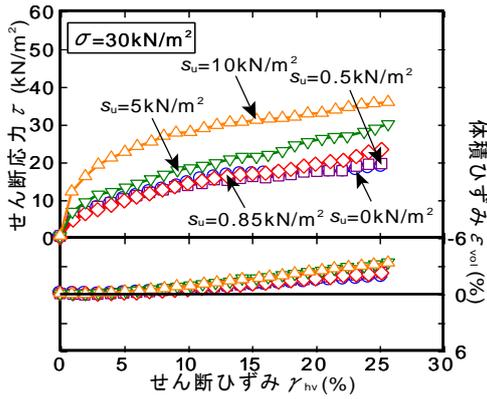


図-1.1 せん断応力および体積ひずみとせん断ひずみの関係

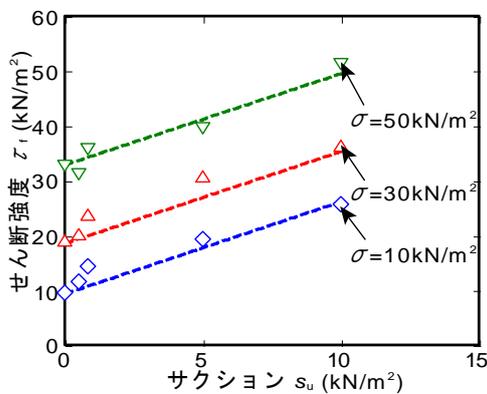


図-1.2 せん断強度とサクションの関係

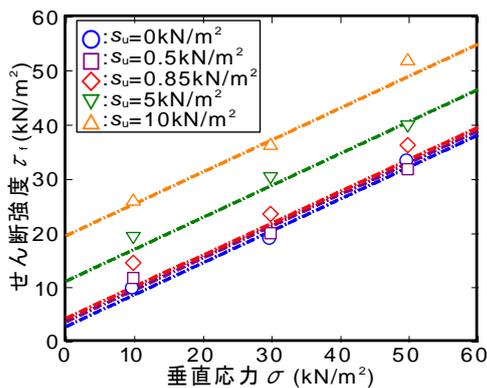


図-1.3 せん断強度と垂直応力の関係

(2) 土石流発生地における降雨量と地下水挙動の把握—リニアメントに着目した現場計測

① 現場計測概要

測定箇所は、土砂災害特別警戒区域に指定されている山口県周南市上馬屋地区で1箇所、「平成21年中国・九州北部豪雨」において土石流が発生した山口県防府市松ヶ谷地区で2箇所である。図-2.1に示す上馬屋地区の平面図のように、全ての現場で斜面に対し直行するようにリニアメントが存在している。各測

定箇所で間隙水圧計は、図に示すようにリニアメント(断層)を挟むように上流側に3基、下流側に3基設置している。また、設置した間隙水圧計は斜面の下流側からNo.1, 2, 3, 4, 5, 6とする。間隙水圧計によって測定された間隙水圧は水の単位体積重量で除算することにより水頭として記録される。10分おきに計測されたデータは通信集約機器を介してサーバに転送され、逐次計測データが更新される。間隙水圧の観測井は、設置時に観測された水位以深となるよう掘削された。観測井内部は、集水のためにストレーナー加工された1~4mの有孔管と、その上部の2~4mの無孔管によって保護されている。この有孔管部分に間隙水圧計が設置された。また、有孔管と観測井の間には礫を詰めており、目詰まりを防止している。

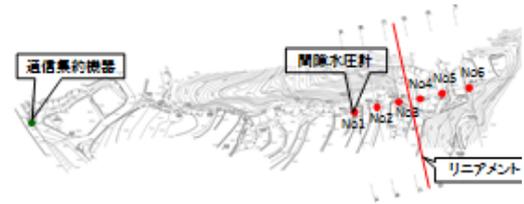


図-2.1 上馬屋地区における現場計測箇所

② 現場斜面の地下水圧の変動

図-2.2に上馬屋における2012年8月の日雨量と水頭の測定結果を示す。11日と14日にそれぞれ185mmと87mmの日雨量の降雨があり、水頭の顕著な増加が見られる。15日以降は10日以上降雨のない日が続き、水頭の減少が計測された。注目すべきは、リニアメント下流側で計測された水頭変化と、リニアメント上流側での計測された水頭変化に、特徴的な違いがあるという点である。上流側での水頭記録では、降雨終了後3日間で増加した水頭の大部分が減少し水頭が一定量となっている。一方で、下流側で測定された水頭は、降雨の無い期間が10日以上となった後も水頭の減少が続いている。加えて、最下流で計測された水頭(No.1)は、降雨のない期間であっても小さな増減が記録されている。なお、6日および7日については、北西に位置する和田観測所で10mm程度の降雨が記録されている。

図-2.3は、図-2.2に示している8月11日の時間雨量と水頭の変化を示す。降雨の発生した4時以前から最下流の水頭に変化が見られていることである。このとき、上述した和田観測所では3時20分から降雨の記録があり、対象箇所周辺域の降雨状況にも左右されていることが示唆される。また、下流側のNo.3の計測記録では、降雨開始とともに水頭上昇が見られ、最大時間雨量が発生しておよそ1時間後に水頭の最大値を示している。さらに、リニアメント上流側の水頭が降雨終了後から

明確な水頭の減少を示していることに対し、リニアメント下流側の水頭は、上流ほどの水頭の減少が見られていない。

図-2.4に、図-2.3で示した降雨に関連した降雨終了後の水頭とリニアメントからの距離の関係を示している。上馬屋では、リニアメントの下流側 No. 1, 3 と上流側 No. 4, 5, 6 で水頭変化の測定でき、No. 2 の応答は計測中に得られなかった。時間経過とともにリニアメント上流側と下流側で水頭の減少が見られるが、リニアメント上流側の水頭は降雨終了から 24 時間後には増加した水頭の 50% が減少した。一方、リニアメント下流側の水頭は、降雨終了から 24 時間経過後も大きな変化はなく、48 時間後でも増加した水頭の 30% 程度しか減少していなかった。

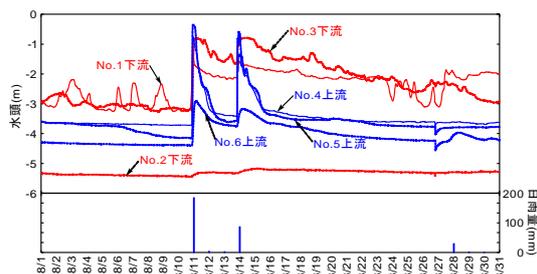


図-2.2 2012年8月の上馬屋の日雨量と水頭

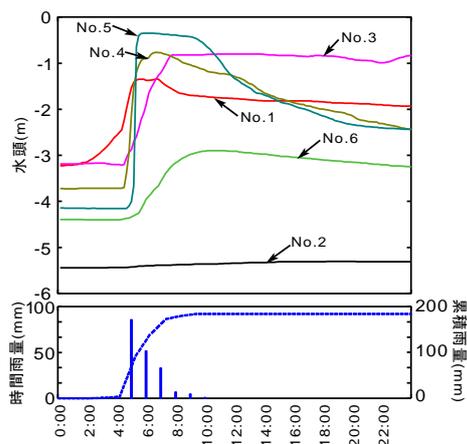


図-2.3 図-2.4における8月11日の結果

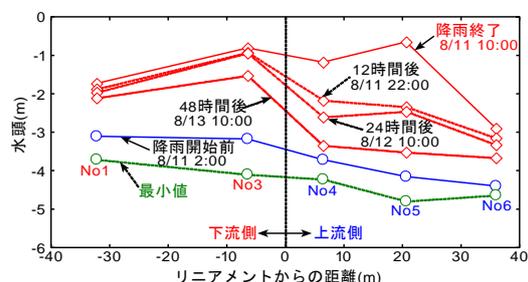


図-2.4 8月11日の水頭とリニアメントからの距離との関係

(3) まさ土斜面に対する斜面崩壊の再現と土砂移動の把握

① 実験装置と実験条件

実験装置は図-3.1に示すように模型土槽と降雨装置から構成される。模型土槽は長さ

52.0cm, 幅 30cm, 傾斜 20 度の緩斜面部と, 長さ 58.5cm, 幅 30cm, 傾斜 40 度の急斜面部からなる。傾斜角度は 2009 年 7 月中国・九州北部豪雨で甚大な被害を受けた山口県防府市の土砂災害現場を参考に決定した。また既往の模型斜面を用いた実験で 2 つの異なる勾配を持つものが少なく, さらに実際の崩壊場所の角度は一樣でないため, 今回の研究では 20 度と 40 度の 2 つの勾配を持つ模型土槽を用いた。緩斜面部左端は目の細かい網が設置されており, 自然に発生する地下水の流出が可能である。なお地下水の流出は土槽側面や土槽底部など他の箇所からは行われない。模型土槽の底面はアクリル板であり摩擦が小さいため, 網目を持つプラスチックのシートを引くことで, すべりが土と土の間で発生するようにしている。

実験に用いた試料は宇部まさ土であり, 斜面崩壊挙動への細粒分含有率の影響を明らかにするため細粒分含有率 5, 10, 15, 20, 25% の 5 種類の試料を用いた。地盤の条件は山口県防府市の土砂災害現場で採取した試料 22) を参考に, 初期含水比を 10%, 乾燥密度を 1.45g/cm^3 とした。模型斜面は傾斜 40 度の急斜面部の層厚が底に垂直に 10cm となるように試料を締め固めた。中国・九州北部豪雨では防府市で観測史上 1 位の 1 時間降水量 72.5mm/hr が記録されたため, 降雨強度 70mm/hr 条件下で 5 種類の細粒分含有率の試料を用いた実験を行った。また降雨強度が斜面崩壊挙動に与える影響を明らかにするため, 細粒分含有率 5% のケースで降雨強度 90mm/hr , 細粒分含有率 20% のケースで降雨強度 60mm/hr の条件での実験を行った。

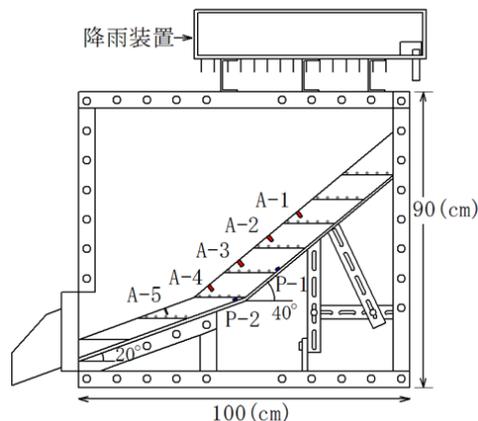


図-3.1 模型土槽と降雨装置

② 斜面崩壊挙動

本研究では細粒分含有率を 5, 10, 15, 20, 25% とした 5 種類のまさ土を用いて, 模型斜面を用いた実験を行い降雨による斜面崩壊を発生させた。図-3.2 に各条件におけるガラスビーズの移動距離および崩壊領域割合の経時変化を示す。ここでのガラスビーズ移動距離とは, 斜面上部から 4 つ目の層境界に設置したもので最も表層に近いガラスビーズの移動距離を指し, このガラスビーズをガラスビーズ 4.1 とする。また崩壊領域割合とは斜面に設置し

たガラスビーズのうち崩壊によって移動した数の割合により算出している。細粒分含有率20%、降雨強度60mm/hrのケースでは降雨による斜面崩壊が発生したものの、主に斜面表面に変状がみられたため、斜面側面から崩壊領域割合と移動距離を算出することができなかった。図-3.2から細粒分含有率や降雨強度の条件によって移動距離や崩壊規模が急激に大きくなるものや時間をかけて徐々に大きくなっていくものなど挙動に違いがみられる。

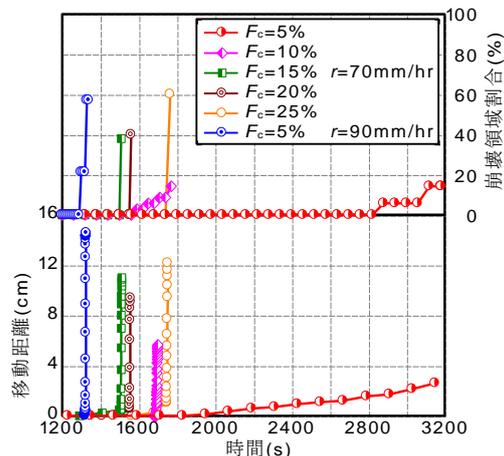


図-3.2 移動距離と崩壊領域割合の経時変化

異なる細粒分含有率と降雨強度の条件による実験から、斜面勾配変化部付近からの土砂流出により崩壊が広がるケースと大きな土砂移動を伴う円弧すべりが発生するケースという異なる2つのケースがみられた。一つは、大きな崩壊規模となった円弧すべりが生じたケースに見られた崩壊形態を“すべり崩壊”とした。これは降雨に伴う地下水位の上昇による間隙水圧の上昇、これに伴うせん断変形と過剰間隙水圧の発生、これによる有効応力の低下がせん断強度の低下を招き、これによりせん断応力との均衡状態がくずれ、崩壊に至ったものと考えられる。このようにせん断による過剰間隙水圧の発生がすべり崩壊のメカニズムである。もう一つは、土砂流出による崩壊が徐々に後退するケースに見られた崩壊形態を“浸透崩壊”とした。この土砂の流出は、飽和化した部分への浸透流により、有効応力が0になりクイックサンドのような状態になることにより生じたものと考えられる。

(4) 解析による斜面崩壊の評価—現場計測値を適用した斜面安定性評価

① 解析条件

現場計測およびせん断試験によって得た強度定数を修正フェレニウス法に用いることで現場斜面の安定性評価を行った。解析のモデル地盤は、現場計測箇所である上馬屋地区とし、現場斜面の傾斜角 17.9° をモデル地盤の傾斜角とした。図-4.1に示すように、モデル地盤を6分割することで、No.1~No.6の地下水圧を水位として適用し、水位線より上の地

盤を不飽和状態、下の地盤を飽和状態とし、表-1.1, 1.2に示す強度定数を適用した。また、②で示すように、リニアメントの存在によって、降雨開始前の水頭に違いが発生するため、現場計測期間中における最小水頭を降雨開始前の水頭とした。この最小水頭に各降雨中における水頭の増加量を適用することで、安定計算を行った。

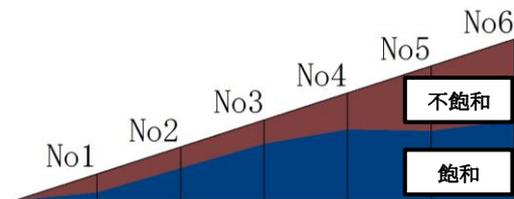


図-4.1 モデル地盤

② 斜面安定性評価

図-4.2に2014年7月2日23時~3日19時にかけて発生した連続雨量206mm、最大時間雨量37.5mmの降雨中の最小安全率におよぼす細粒分含有率の影響を示す。この結果より、細粒分含有率が増加するに従い、降雨中の最小安全率の低下が顕著となっていることがわかる。このことから、細粒分含有率は降雨中における斜面の安定性に影響をおよぼすことがわかった。

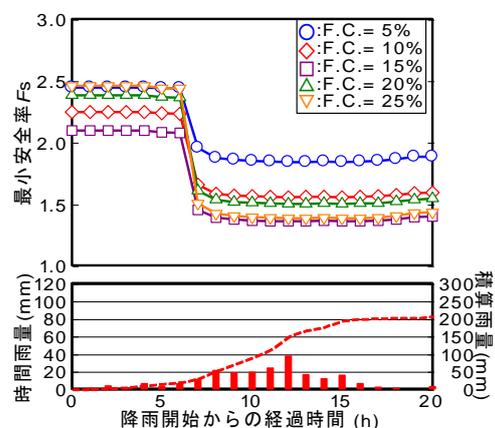


図-4.2 最小安全率におよぼす細粒分含有率の影響 (降雨中: 2014年7月2日23時~3日19時)

(5) まとめ

土石流発生条件には、流出する土砂の存在と、流出される十分な水が必要である。図-5.1は、本研究を通し想定された、断層を含む地下構造と土砂災害の災害を模式的に表している。このような災害の発生を推定するためには、降雨などの誘因に加えて、地質、地形、地下構造を含めた広域の空間情報の理解が必要である。その上で、飽和度の上昇や間隙水圧の上昇、せん断強度の低下といった土の力学的評価、および斜面安定性の検討、さらには、土石流における流出挙動の評価が必

要である。

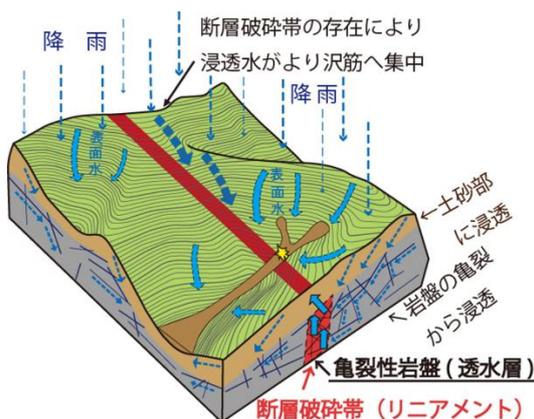


図-5.1 想定される地下構造と土砂災害

参考文献

1)地盤工学会 2009年7月豪雨による山口県土砂災害緊急調査団：2009年7月21日豪雨による山口県防府地区での斜面災害，地盤工学会誌，第57巻，第12号，pp39-42，2009

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0件)

[学会発表] (計9件)

①中田幸男・村上豊和・下野宗彦・中本昌希，土石流危険渓流での地下水圧の現場計測，第50回地盤工学研究発表会，2015年9月1日～9月3日，北海道工業大学（北海道札幌市）

②濱沖俊史・下野宗彦・中田幸男・村上豊和，2014年8月広島豪雨災害における土石流とリニアメントの関係，第50回地盤工学研究発表会，2015年9月1日～9月3日，北海道工業大学（北海道札幌市）

③吉岡杏子・中本昌希・中田幸男・兵動正幸・下野宗彦・村上豊和，上馬屋渓流における降雨時の地下水圧変動に対する現地調査，土木学会中国支部研究発表会，2014年5月31日，松江工業高等専門学校（島根県松江市）

④中村優作・中田幸男・兵動正幸，斜面崩壊に及ぼす降雨履歴の影響，土木学会中国支部研究発表会，2014年5月31日，松江工業高等専門学校（島根県松江市）

⑤伊藤彰悟・中本昌希・中田幸男・兵動正幸・竹國一也，砂質土に対する低圧単純せん断試験機の開発，土木学会中国支部研究発表会，2014年5月31日，松江工業高等専門学校（島根県松江市）

⑥中本昌希・中田幸男，危険渓流における雨量と地価水圧の現地計測，平成25年度土木学会中国支部研究発表会，2013年5月25日，鳥取大学工学部（鳥取県鳥取市）

⑦久田裕史・中田幸男，過剰間隙水圧を考慮した崩壊土の運動に対する斜面安定解析手法

の提案，平成25年度土木学会中国支部研究発表会，2013年5月25日，鳥取大学工学部（鳥取県鳥取市）

⑧久田裕史・中田幸男，降雨による模型斜面の崩壊挙動に与える細粒分含有率の影響，第48回地盤工学研究発表会，2013年7月23日～7月25日，富山県民会館（富山県富山市）

⑨Y Nakata, Collapse behavior of slope due to change in pore water pressure, Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013年9月2日～9月6日，パリ（フランス）

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中田 幸男 (NAKATA, Yukio)
山口大学・理工学研究科・教授
研究者番号：90274183

(2) 研究分担者

兵動 正幸 (HYOUDOU, Masayuki)
山口大学・理工学研究科・教授
研究者番号：40130091

鈴木 素之 (SUZUKI, Motoyuki)
山口大学・理工学研究科・准教授
研究者番号：00304494

吉本 憲正 (YOSHIMOTO, Norimasa)
山口大学・理工学研究科・助教
研究者番号：00325242