

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656282

研究課題名(和文)降雨に先立つ干ばつの影響を考慮した斜面崩壊予測モデルの構築

研究課題名(英文)Effects of drought preceding rainfall on slaking-induced slope instability

研究代表者

清田 隆(Kiyota, Takashi)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：70431814

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円、(間接経費) 810,000円

研究成果の概要(和文)：自然斜面や河川堤防の材料にもなる堆積岩は、乾燥と湿潤の繰返しを受けて風化が促進(スレーキング)されるため、降雨による地盤災害についてはそれに先立つ干ばつの影響を受ける可能性が考えられる。本研究では、被災事例・降雨データの分析、および干ばつと降雨の繰返しを模擬した室内実験を実施した。その結果、雨季と乾季が明確に分かれる地域では、スレーキングの影響を受けたと考えられる斜面崩壊事例が確認された。また実験結果より、乾湿繰返しの度にスレーキングは進行し、せん断変形・体積変化が生じること、その変化量は応力比が大きいほど顕著に表れること、およびせん断強度が徐々に低下する傾向が示された。

研究成果の概要(英文)：This study investigates the effects of wetting and drying on the strength and deformation characteristics of mudstone, known as slaking. When rainfall-induced landslides occur, the intensity-duration of precipitation is often examined, but the drought conditions preceding the landslide-inducing rainfalls are not usually considered. The author proposed a hypothesis that such drought and rainfall cycles would accelerate slaking on the geo-materials. First, we undertook to collect landslide data from various sources in order to identify slaking-induced landslides. Second, a series of direct shear tests was conducted by simulating cyclic drying and wetting (D/W) under different stress condition. Considerable creep deformations on crushed mudstones were found during both D/W phase, and a gradual decrease of friction angle was observed with the increasing number of D/W. Higher slaking index, lower water content before wetting and lower initial density accelerate the slaking of geo-materials.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：スレーキング 斜面崩壊 一面せん断試験 地盤災害 泥岩 室内土質試験 干ばつ 豪雨

### 1. 研究開始当初の背景

一般的に知られている斜面崩壊のメカニズムは、降雨の浸透により斜面内の有効応力が低下することで発生すると説明される。しかし、このモデルのみでは説明できないケースもある。

例えば、筆者らが関わった事例に天然ダムの決壊がある。2005年パキスタン地震後に泥岩を主体とする巨大な天然ダムが形成され、筆者らは定期的なGPS測量によりその安定性をモニタリングしていた。天然ダムはモンスーン期の豪雨でも安定していたが、4年後の2010年2月、30mm/day程度の降雨で突然決壊し下流域に被害を与えた。この地域では前年秋から深刻な干ばつが生じていたため、決壊原因としてダム堤体のスレーキングの可能性が浮き上がった。スレーキングとは、主に泥岩などが乾湿繰返しを受けて風化が促進する現象である。降雨による土砂災害は発生時の降雨量のみが注目される傾向にあるため、このような事例は一般に認識されず、世界中に潜在している可能性がある。また、スレーキングと土砂災害について、その現象や斜面の応力状態までも実験で忠実に再現した系統的な研究はほとんど例がなく、その点に着目して実施された現場調査事例も少ない。

### 2. 研究の目的

世界中で多発している「干ばつと豪雨」は、気候変動が原因であるとも言われ、その被害は年々深刻になっている。豪雨に伴う洪水被害は山間部の斜面崩壊や河川堤防の崩壊によって拡大する。現状では、「干ばつ」と「豪雨」による被害と対策については別々に議論される傾向にあり、特に後者は降雨強度のみが注目されてきた。しかし、世界に広く分布し、自然斜面や河川堤防の材料にもなる堆積岩は、乾燥と湿潤の繰返しを受けて風化が促進されるため、降雨による地盤災害についてはそれに先立つ干ばつの影響を受ける可能性が考えられる。本研究では、原位置試料を用いた実験および被災事例・降雨データの分析により、干ばつと降雨の繰返しに起因する斜面崩壊メカニズムを解明し、災害予測モデル構築の基礎資料を得ることを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 事例調査

干ばつと豪雨の繰返しが堆積泥岩の崩壊に影響した可能性を検討するため、崩壊発生箇所や地盤条件等の基本的情報が抽出可能な300箇所の斜面崩壊事例（いずれも降雨による斜面崩壊）をまとめた。降雨量そのものが斜面崩壊の発生と必ずしも関連しない

ことが知られているため、気象衛星 TRMM を利用し、崩壊箇所の降雨量を崩壊発生から5年間遡って調べ、崩壊発生時の降雨量のレベル（順位）を検討した。

#### (2) 室内実験

実験は、図1に示す改良型一面せん断試験機（せん断箱寸法：縦200mm、横200mm、高さ91.4mm）を用いた。実験時の上下せん断箱の隙間は、使用した地盤材料の平均粒径を考慮し10mmとした。また、図2に示すように、せん断箱の側面に設置された水分計を用いて試験実施中の供試体内部の含水比を常時計測した。

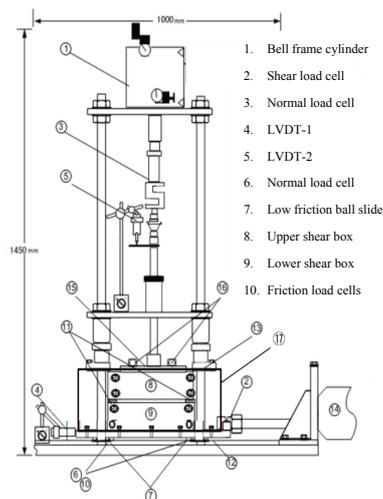


図1 改良型一面せん断試験機の概要

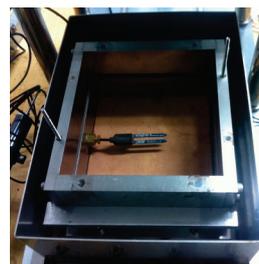


図2 せん断箱に設置した水分計

実験には試験機寸法を考慮して2mm～4.75mmに粒度調整された試料を用いた。主な実験試料は泥岩礫質土であり、一度炉乾燥した後、粒子破碎を起こさぬよう緩詰めで初期乾燥供試体を作成した（初期間隙比： $e_0 \approx 0.68$ ）。なお、同試料のスレーキング区分（JGS 2132）は1、スレーキング率（NEXCO-110、2006）は96.86%である。なお、上記泥岩礫質土との比較のため、スレーキング指数の異なる地盤材料でもいくつかの実験を実施している。

試験では、異なる3ケースの応力比  $R (= \tau / \sigma_v)$  において繰返し乾湿を与え、その際のスレーキング特性ならびに変形・強度特性を検討した。全ての試験では、①初期乾燥供試体に対して、所定の応力比 ( $R = 0.3, 0.5 \text{ \& } 0.7$ 、 $\sigma_v = 50\text{kPa}$ ) まで異方圧密を行い、応力比を一定に保ちながら、②供試体下方から蒸留水を注入することで湿潤過程、③せん断箱の下部から水を抜き、さらにせん断箱の周囲をシリカゲルで覆い、室温を  $30^\circ\text{C}$  に保つことで乾燥過程を与えた。そして、二度の湿潤→乾燥過程 (②、③) を与えた後、再度湿潤させた飽和試料を垂直応力一定 ( $\sigma_v = 50\text{kPa}$ )、せん断変位速度  $0.2\text{mm/sec}$  で単調せん断を行った。なお、全ての段階で垂直・せん断変形および含水比が落ち着いたのを確認した後、次の段階に移行した。また各試験終了後には、炉乾燥させた各供試体試料のふり分析を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 事例調査

図3に地すべりが発生した箇所の地盤種別を示すが、約4割の崩壊がスレーキングによる風化が生じやすい泥岩・頁岩系の地盤で生じている。また、泥岩・頁岩系の崩壊の誘因となった降雨量を図4に示す。日降雨量を基準に3段階に分類したが、 $60\text{mm/day}$  以下の降雨で生じた地すべりが約半数を占めている。

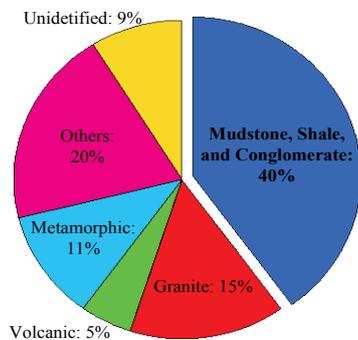


図3 降雨に起因する斜面崩壊の発生箇所の地盤種別

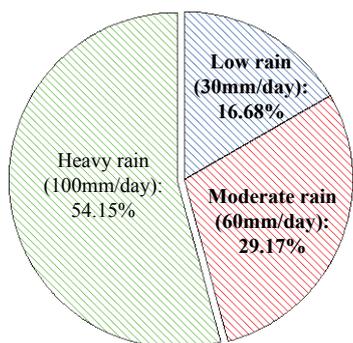


図4 斜面崩壊発生時の日降雨量 (泥岩)

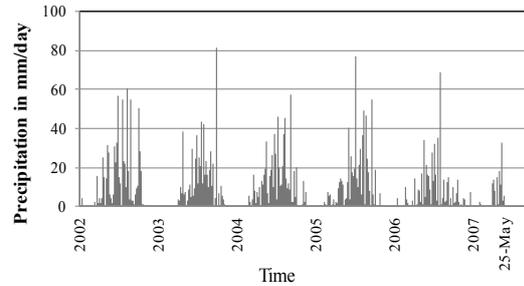


図5 中国で発生した崩壊箇所での崩壊前5年間の降雨量 (TRMM)

しかし、気象衛星 TRMM を利用し、崩壊箇所の降雨量を崩壊発生から5年間遡って抽出した結果、5年間の最大降雨により崩壊した箇所は40%程度に留まっていたことが判った。泥岩系の地盤では、過去の最大降雨では崩壊しなくとも、その後の乾湿繰返しによるスレーキングにより地盤強度が低下し、最終的に比較的少ない降雨量で崩壊した可能性を示唆している。例えば、図5に中国で2007年に発生した斜面崩壊箇所での崩壊以前5年間の降雨量を示すが、明瞭な乾季と雨季が交互に存在し、スレーキングを促進させた可能性を示している。

##### (2) 室内実験

###### ① クリープ挙動に及ぼす乾湿繰返しの影響

斜面の地盤内に常時作用する応力状態を考慮して実施した応力比一定のクリープ載荷試験結果について、ここでは乾湿繰返し時の変形特性を、 $R = 0.5$  の結果 (図6) を例に説明する。まず湿潤過程に関して、せん断変位が1回目の湿潤で大きく発生するが、その後2、3回目は相対的に小さくなっている。スレーキングは湿潤前の初期含水比が小さいほど、その後の湿潤過程で大きく変化することが既往の研究で明らかになっており、今回の実験でも湿潤前の初期含水比が最も低い1回目の湿潤過程で大きな変形を示したと考えられる。この傾向は、図7に示す乾湿繰返し回数と湿潤時のせん断変位の関係において、湿潤前の含水比の影響が定量的に示されている。

一方、垂直変位は全ての段階で体積膨張を示しているが、1回目の湿潤時ではその膨張量が相対的に小さくなっている。このとき (異方応力下での湿潤時) の体積変化は、吸水膨張とスレーキング起因のダイレイタンスの両者によって決定される。後述の図10の結果より、初期乾燥試料が単調せん断時に  $R = 0.5$  で負のダイレイタンスを示すことから、スレーキングによっても体積圧縮が生じると考えられる。そのため、1回目の湿潤では吸水膨張とともに (せん断変位と同様に) 比較的大きなスレーキング起因の負のダイレイタンスが生じるため、2、3回目の湿潤時に

比べて、体積膨張量が小さくなっている。

続いて、乾燥過程に関しては含水比が 2.5% 程度に達した時点から、せん断変位、体積圧縮を示す垂直変位がともに生じており、含水比が約 0.7% となった時点でこれらは定常化する。さらに、このような乾燥過程における変形特性は、二段階の曲線を描いていることが特徴的である。今回のような泥岩起源礫質土（粒子内に間隙を持つ地盤材料）の乾燥過程では、図 8 に示すように、はじめに粒子間（Macro pore）の間隙水が流出し、その後礫材自身の間隙（Micro pore）から排水すると考えられ、その際に粒子の体積収縮ならびに異方応力下ではせん断変形が生じると解釈できる。ただし、このときのスレーキングの発生有無などに関しては、より詳細な検討が必要であると考えられる。

図 9 に、全ての試験における乾湿繰返し時各段階でのせん断・垂直変位をまとめた。図より、上述の繰返し乾湿回数が増加に伴うせん断・垂直変位の減少を全てのケースで確認できる。また、せん断・垂直変位ともに応力比が高いほど大きくなっている。例えば、ここでは示していないが、応力比  $R = 0.8$  のケースでは湿潤過程でクリープ破壊が確認されている。

参考までに、非スレーキング材料で実施した同様の試験においても、1 回目の湿潤時にはクリープせん断変位が生じたが、その変位量は上記の泥岩試料と比較して非常に小さいものであった（図 10）。

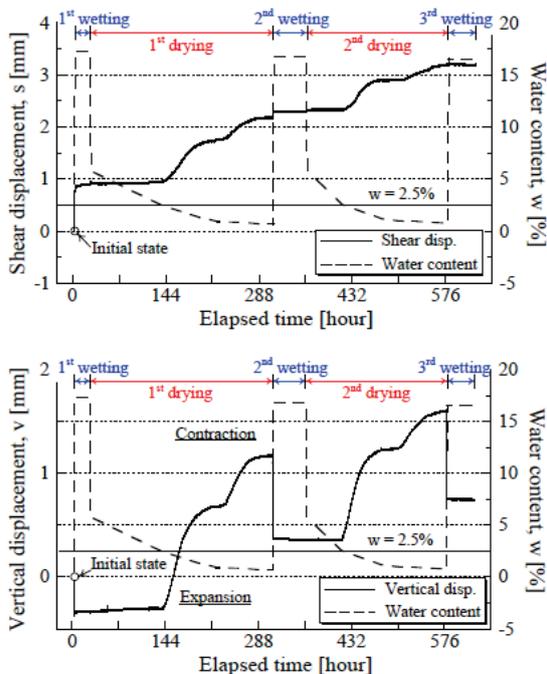


図 6 異方応力  $R = 0.5$  における乾湿繰返し時の含水比、せん断・垂直変位の時間変化

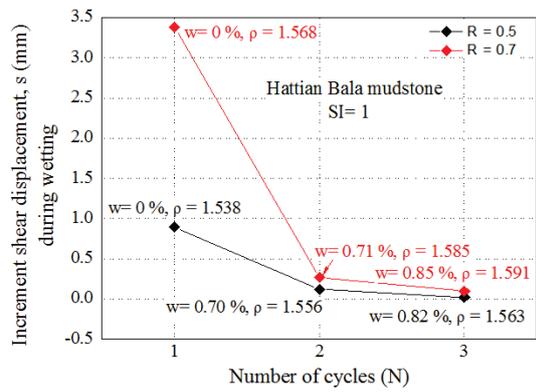


図 7 湿潤時のクリープせん断変位に及ぼす乾湿繰返し回数と含水比の影響

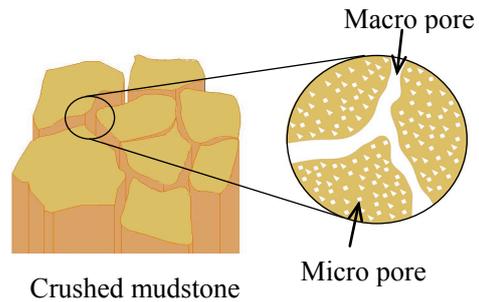


図 8 泥岩礫質土の間隙の概念

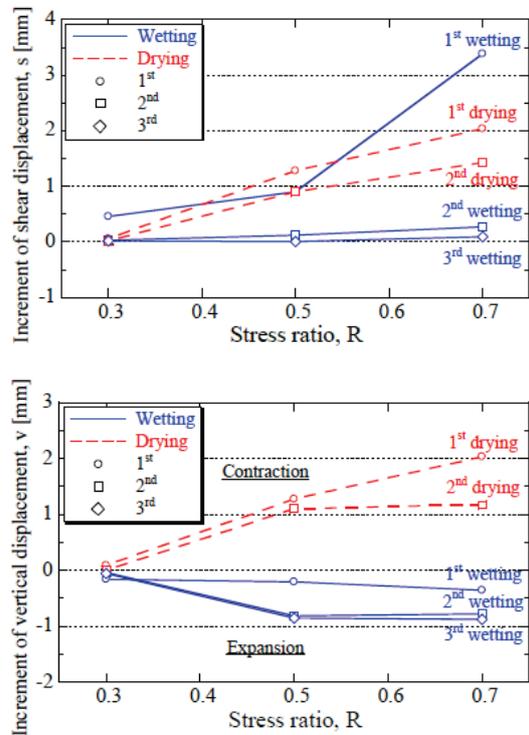


図 9 乾湿繰返し時のせん断・垂直変位と応力比関係

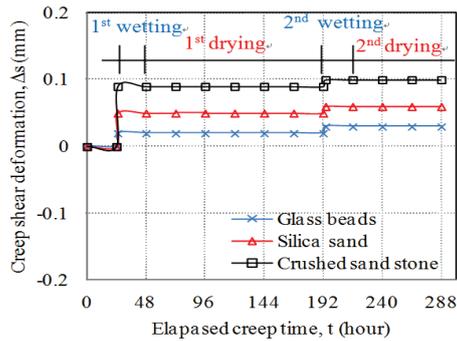


図 10 非スレーキング地盤材料の異方応力状態における乾湿繰り返し時のせん断変位の時間変化

### ② 単調せん断試験

単調せん断に関しては、乾湿繰り返し回数の影響を検討するため、上記で説明した  $R = 0.5$  で乾湿繰り返しを与えた試料、これと別途行われた初期乾燥試料、および乾燥状態から  $R = 0.5$  で一度だけ水浸させた飽和試料のせん断結果 ( $e_0 \cong 0.68$ ) を比較する。

図 11 の上図 (せん断変位 - 応力比関係) から、湿潤履歴を有する供試体では、湿潤時の密度化により初期剛性が大きくなっている様子が見て取れる。またピーク強度ならびに残留強度は、初期乾燥供試体に比べて飽和供試体では大きく低下しているが、ピーク強度に関しては乾湿繰り返し回数が多いほど、低いひずみレベルで明瞭なピークが現れていることが分かる。図 11 の下図 (せん断変位 - 垂直変位関係) より、乾燥試料よりも飽和試料、飽和試料でも繰り返し乾湿過程を与えたものほど、ダイレイタンスの程度は小さくなり、最終的に到達する限界状態が密になっている。

図 12 は、乾湿繰り返し回数が供試体の粒度分布に及ぼす影響を検討したものである。これは、図 11 で示した試験 ( $R = 0.5$ ) 後に実施した粒度試験結果である。図より、乾燥供試体の (せん断前) 初期状態に比べて、せん断後の粒度分布がせん断時の破碎によって広がっている。また、乾湿繰り返しを与えた試料ほど、その粒度分布が広がっていることから、乾湿過程においてスレーキングが起こっていることが分かる。

図 13 に、単調せん断試験結果について、乾湿繰り返し回数とピーク時のせん断抵抗角の関係を示す。今回用いた泥岩礫質土の一連の実験では、ピーク強度に及ぼす乾湿繰り返し回数の影響は明確には現れなかった。しかし、実験結果を詳細に分析すると、図 13 に示すように、僅かではあるがせん断抵抗角の値が乾湿繰り返し回数が増加とともに低下する傾向が確認された。

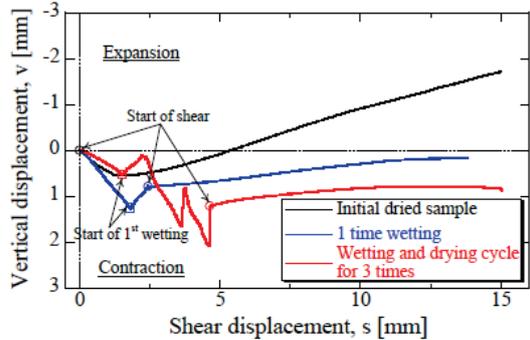
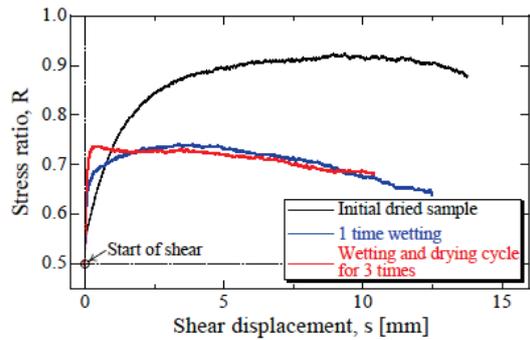


図 11 乾湿繰り返しを与えた泥岩礫質土の単調せん断挙動

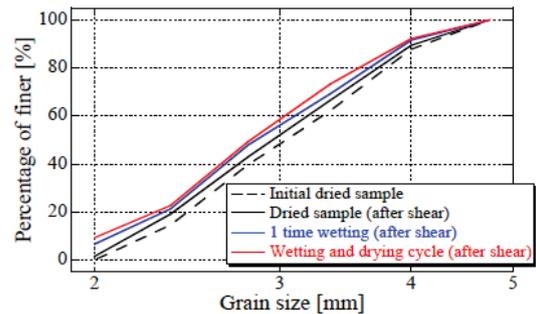


図 12 乾湿繰り返しを与えた泥岩礫質土の粒度分布

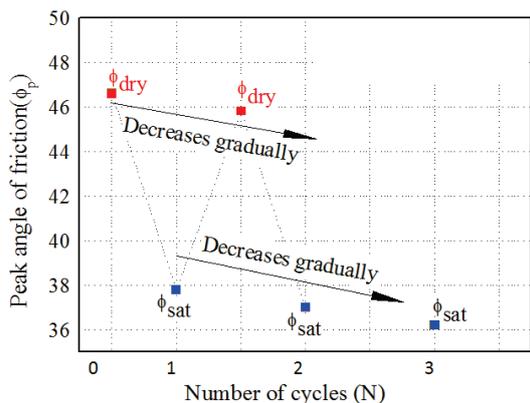


図 13 乾湿繰り返し回数と単調せん断試験によるせん断抵抗角の関係

### (3)まとめ

本研究は、降雨で発生する斜面崩壊が近年世界的な問題となっている豪雨と干ばつの繰返しの影響を受けている可能性があるとの仮説を設け、乾湿繰り返しによる風化（スレーキング）を受けやすい泥岩系地盤材料に着目して、事例分析と室内試験を実施したものである。主な結論を以下に示す。

① ランダムに抽出した300箇所の事例分析により、約4割の斜面崩壊が泥岩系のスレーキングし易い地盤で生じていた。また、誘因となった降雨量の多くは過去最大降雨ではなかった。

② 泥岩系の斜面で崩壊した箇所の過去の降雨パターンを見ると、明瞭な雨季と乾季が交互に発生しており、乾湿繰り返しによるスレーキングが促進されていた可能性が考えられる。

③ 改良型一面せん断試験機を用い、泥岩起源の礫質土に異方応力状態で乾湿繰り返し過程を与え、その際のスレーキング特性ならびに力学挙動に及ぼす影響を調べた。実験結果より、乾湿繰り返しの度にスレーキングは進行し、せん断変形・体積変化が生じること、その変化量は応力比が大きいほど顕著に表れることが示された。注目すべき点として、湿潤時だけでなく、乾燥過程においても比較的大きなせん断変位が生じることが確認された点が挙げられよう。

④ せん断挙動に関しては、スレーキングが大きく発生しているほど強度は低下し、限界状態がより密な状態に表れた。

以上のことから、これまで主に降雨のみで評価されていた斜面防災であるが、スレーキングし易い地盤では、降雨だけでなく乾湿繰り返し回数、降雨前の地盤の乾燥状態、乾燥時の挙動も考慮した力学挙動の変化を適切に評価する必要があると考える。

### 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 7 件)

- ① Sharma, K., Kiyota, T. and Kyokawa, H, A study on the slaking-induced creep deformation characteristics of crushed mudstones, *Geotechnique, Construction materials and Environment*, 査読あり, Vol. 3 (1), 2013, 107-112.
- ② Sharma, K., Kiyota, T. and Kyokawa, H, Effect of slaking on the engineering behaviour of the crushed mudstones, *Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center*, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 査読なし,

No. 46, 2013, 73-82.

- ③ Lee, J., Sharma, K., Kiyota, T., Kyokawa, H. and Takeuchi, W., Effects of drought preceding rainfall on slaking-induced instability, *Geotechnical Hazards from Large Earthquakes and Heavy Rainfall*, 査読なし, IV, 2012, 21-24.

[学会発表] (計 6 件)

- ① Sharma, K., Cyclic wetting and drying induced creep deformation of crushed mudstone in direct shear test, *Japan Society of Civil Engineers*, 9/5 2012, Nagoya.
- ② 京川裕之, 泥岩礫質土の力学特性に及ぼす乾湿繰り返しの影響, 地盤工学会, 7/14 2012, 八戸.

[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]

ホームページ等

[http://www.gdm.iis.u-tokyo.ac.jp/research\\_slaking.html](http://www.gdm.iis.u-tokyo.ac.jp/research_slaking.html)

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

清田 隆 (KIYOTA, Takashi)  
東京大学・生産技術研究所・准教授  
研究者番号: 70431814

#### (2) 研究分担者

なし

#### (3) 連携研究者

小長井 一男 (KONAGAI, Kazuo)  
横浜国立大学大学院・都市イノベーション  
学府・教授  
(申請時は東京大学・生産技術研究所・教授)  
研究者番号: 50126471