

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420486

研究課題名(和文)なぜ長大切土斜面が崩壊するのか—潜在弱面内の地下水流と地下水圧分布の影響—

研究課題名(英文)Mechanism of slope failure -Ground water flow through potential failure planes-

研究代表者

太田 秀樹(Ohta, Hideki)

中央大学・研究開発機構・機構教授

研究者番号：80026187

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：平成26年3月末に上信越自動車道香坂チェーンベースで発生した香坂CB斜面滑りと、平成26年8月20日未明に発生した広島県安佐北区・安佐南区における約50箇所の広島土石流災害を本研究の調査対象とした。その結果、香坂CB斜面滑りの現場では、山体内の潜在弱面に夾在する粘土シームの排水強度定数をもとめたうえで、すべり過程にある斜面の安全率を計算してすべりを止めるための対策工法の妥当性を確認した。広島土石流災害では豪雨によって発生した地下水の山体中における移動経路を推定し、また土石流の最大到達距離の経験的算定グラフ(等価摩擦係数)の作成に成功した。

研究成果の概要(英文)：The sites investigated were a slope failed in March, 2014 at the Kosaka chain base of Joshinetsu Expressway and about 50 bursting points of debris flows that hit residential areas in the northern part of Hiroshima on 20th August, 2014. The drained strength of the clay seam sampled from the rock discontinuity forming the potential slip plane lead to a reasonable result of stability of Kosaka slope. This justified the countermeasure of lowering the ground water level by placing drainage wells at the site. Established was an empirical graph showing the maximum possible distance of debris flow, i.e. the equivalent friction coefficient as a function of volume of collapsing rock mass, based on the data obtained from debris flows at Hiroshima. In-depth investigation of the flow route of the ground water in the body of the mountain was made.

研究分野：地盤工学会

キーワード：土質力学 浸透流解析 斜面崩壊 土石流

1. 研究開始当初の背景

- (1) 傾斜した板の上に剛体ブロックを乗せ、傾斜角をあげてゆくとやがて滑る。自重・水圧・摩擦角がキーワードである。世界の潮流は、Hoek & Bray(1974)の教科書<sup>1)</sup>(小野寺・吉中による翻訳<sup>2)</sup>あり)が作ったと思われる。岩盤地山内に潜在する亀裂等の弱面に沿って斜面がすべるというイメージは、Goodman<sup>3)</sup>(1989)らによって拡大され、ソフトウェア(例えば Kulatilake<sup>4)</sup> 1998)も開発された。我が国でも大西・長野・藤川<sup>5)</sup>(1985)、鵜飼・細堀<sup>6)</sup>(1989)、吉中・山辺・藤田<sup>7)</sup>(1990)による研究が活発に進展していた。
- (2) 一方亀裂に沿ったすべり抵抗の研究(例えば Barton<sup>8)</sup> 1973)も進み、亀裂内に夾在する薄い粘土シームに注目する研究(Kemp, Pearce and Oates<sup>9)</sup> 2003)も現れた。研究代表者ら(太田・大森・寺田<sup>10)</sup> 1990)も粘土シームに着目し、斜面安定解析ソフトウェアと粘土シームの強度試験法を開発した。多数の斜面崩壊の事例観察と粘土シームの強度試験から、事例研究を纏めあげたのが Ohta, Pipatpongsa, Heng, Yokota and Takemoto<sup>11)</sup>であるが、長大切土斜面に関しては新たな視点からの研究が必要であると感じていた。

参考文献

- 1) Hoek, E. and Bray, J.W.: Rock Slope Engineering, The Institution of Mining and Metallurgy, 1974
- 2) 小野寺透・吉中龍之進: フック・ブレイ岩盤斜面工学, 朝倉書店, 1979
- 3) Goodman, R. E.: Introduction to Rock Mechanics, 2nd Ed. John Wiley & Sons, New York, 1989
- 4) Kulatilake, P.H.S.W.: Software manual for FRACNTWK .A computer package to model discontinuity geometry in rock masses, University of Arizona, Tucson, 1998
- 5) 大西有三・長野恵一・藤田富夫: ブロック理論による不連続性岩盤掘削時の安定性評価について, 土木学会論文集, No. 364, 209-218, 1985
- 6) 鵜飼恵三・細堀建司: 任意形状の地形とすべり面を有する斜面の安定解析, 土木学会論文集, No. 412, 183-186, 1989
- 7) 吉中龍之進・山辺正・藤田朝雄: ブロック理論による不連続性岩盤斜面の安定性評価に関する基礎研究, 土木学会論文集, No. 418, 143-152, 1990
- 8) Barton, N.: Review of a new shear strength criterion for rock joints, *Engrg Geology* 7, 287-332, 1973
- 9) Kemp, S.J., Pearce, J.M. and Oates, D.: In-situ sampling of sediment-filled fractures, *Geotechnique* 53, No.7, 665-668,

2003

- 10) 太田秀樹・大森晃治・寺田武彦: 不連続性岩盤斜面におけるすべり岩体の特定と安定性の評価, 土木学会論文集, 第 424 号/III-14, 217-225, 1990
- 11) H. Ohta, T. Pipatpongsa, S. Heng, S. Yokota and M. Takemoto: Significance of saturated clays seams for the stability of rainfall-induced landslides, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 69, Issue 1, 査読有, 71-87, 2010

2. 研究の目的

- (1) 研究代表者が金沢大学に赴任した年(1985年)に北陸地方で梅雨前線豪雨があり、1週間で700mmの雨が降った。能登半島だけで2000カ所の斜面崩壊が発生し、赴任直後の研究代表者はその調査を命じられた。半年ほどの調査で見るとべき成果は得られなかったが、これが斜面崩壊に携わるキッカケになった。以来金沢大学で過ごした15年のあいだに、毎年のように発生する斜面崩壊の現場から、すべり面となった弱面に夾在している粘土シームをできるだけ不攪乱状態で採取した。粘土シームは10-20mm程度以下(ごく薄いものは1mm以下)の厚さであったから、一面せん断試験機で圧密-定体積試験に供した。粘土シームは現場では排水せん断されると考えられるので、定体積せん断から得られる  $c'$ 、 $\sigma'_d$  の代用とした。粘土シームが夾在する弱面のなかを、降雨時には地下水が定常浸透流として流れるものと仮定し、すべり岩体に作用する揚力 up-lift force と押し出し力 push-out force を計算した。これらの力とすべり岩体の自重の合力と、すべり面となった粘土シームの排水せん断抵抗を比べて安全率を計算したところ、実際に崩壊した現場の状況とほぼ整合する計算結果が出てくることが分かってきた。しかし最近増えている長大切土斜面の崩壊事例を説明するためには、すべり面となった弱面に供給される地下水の現場における実態を、現場計測等の新手法を用いて把握することが必要であると思うようになった。
- (2) 豪雨に伴う土石流災害が急増しているが、土石流を発生させる山体中の地下水の流れを把握することは、事実上不可能に近いとされてきた。研究代表者は土石流発生現場の調査から、土石流の発生源において直径数 cm から数十 cm 程度の水みちが存在し、そこから噴出した地下水が表土を突き破って土石流を惹起させていることを発見していた。しかし個々の現場によって多様な様相を呈することから、一般的な事実として把握するには至っていなかった。本研究の初年度の平成 26 年 8 月 20 日未明に広島県安佐北区・安

佐南区で約 50 箇所土石流が発生したため、現場調査を通じて土石流を引き起こした山体内の地下水流の実態を明らかにしたいと考えるに至った。

### 3. 研究の方法

- (1) 造山・浸食作用によって永年にわたる長期的な変動を続け、日常的に繰り返される短期的な天候変化に左右されながら、年月とともに季節とともに日時とともに変化し崩壊への道をたどり続けるのが山岳斜面である。山体内部を流れる地下水流がきわめて局所的かつ非定常的な特性をもつことから、豪雨などに起因して山体の一部に短期的ではあるが巨大な水圧が作用することも知られている。山体内部に伏在する潜在弱面内における地下水流が斜面崩壊の鍵をにぎる存在であるが、地下水流路の探索が難しく発生水圧の推定が困難であるため力学的な評価ができなかった。本研究では山岳崩壊の現場調査と地下水流の模型実験により、山体中を流れる地下水の力学的評価を試みた。
- (2) 平成 26 年 3 月末に上信越自動車道香坂チェーンベースで発生した香坂 CB 斜面滑りと、平成 26 年 8 月 20 日未明に発生した広島県安佐北区・安佐南区における約 50 箇所の広島土石流災害を本研究の調査対象とし、数度にわたる現地踏査(5回)・地下水流音響の現場計測(2回)・模型土槽実験(3シリーズ)を実施した。平成 28 年度には初年度・次年度に得られた結果を学会等で発表したが、平成 28 年度に上記の現場で新たな地盤の動きが発生したので更に追加的な調査・研究を進めた。

### 4. 研究成果

#### (1) 概要

香坂 CB 斜面滑りの現場では、山体内の潜在弱面に夾在する粘土シームの不攪乱試料を採取し、一面せん断試験器による定体積せん断を実施して排水強度定数をもとめたうえで、すべり過程にある斜面の安全率を計算してすべりを止めるための対策工法の妥当性を確認した。

広島土石流災害では豪雨によって発生した地下水の山体中における移動経路を推定し、また土石流の最大到達距離の経験的算定グラフ(等価摩擦係数)の作成に成功した。

#### (2) 香坂 CB 斜面滑り

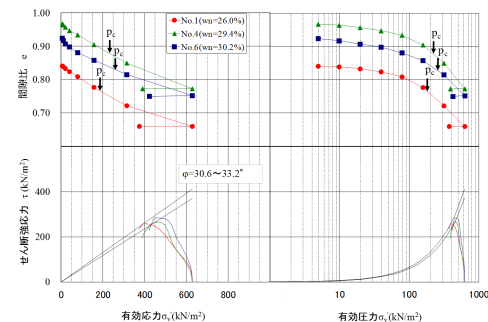
関東甲信越地方で、記録的な大雪となった 2014 年 2 月、その融雪水の影響により上信越自動車道の香坂地区では、高速道路の盛土を含む幅・長さ約 80m、高さ約 18m の規模の地すべりが発生した。すべり面は火山砕屑物の供給により堆積生成した基盤内に分布する薄層泥岩と

推定され、その末端の一部は河川方向へ潜り、すべり土塊の移動と共に河床の隆起がみられた。

当該斜面に分布する地質は、上位より盛土、崖錐堆積物、土石流堆積物、基盤岩である火山砕屑物(凝灰角礫岩や火山礫凝灰岩)と堆積岩類(泥岩、凝灰質砂岩)貫入岩であるデイサイト、安山岩が分布している。地すべりの末端では、香坂川上・下流側の側部に押し崩壊が認められ、上流側においては陥没帯形成に伴う地盤の剥がれ落ちなどがみられた。地すべり末端中央部では河床の隆起が確認されている。

解析は、地すべりブロックの断面の背面亀裂を通じて流れ込んだ地下水によって生じる背圧力と、それによってすべり面に生じる揚圧力を地すべり土塊に与え、すべり面に作用する滑動力と抑止力から安全率を算出するものである。使用する断面については、背面亀裂及びすべり面の不陸はないものとし、地下水は静水圧で算出した。

すべり面粘土については、香坂川上流側に発生した陥没帯の後方(地すべりブロックの外側)に露頭していた軟質な火山礫凝灰岩と泥岩の境界部でサンプリングし、圧密試験及び定体積一面せん断試験(CU)から得られた結果を用いた。試験により算出された圧密降伏応力( $p_c$ )は、200~220kPa でありサンプリング付近の現状地形および地すべり部の土被り厚から推定される値といえる。



地すべりが滑動を開始した時点の背面水位について、地すべり土塊に背圧力と揚圧力を作用させたモデルを用いて推定した。この手法によれば、その水位は地表面から 1~2m 程度の高さであったと推定できた。

#### (3) 広島土石流災害

地下水位の高さや地下水流動が、斜面崩壊の一要因と考えられる。崩壊跡斜面上部に地下水が優先して速く流動するトンネル状の水みちを確認した事例が太田らにより報告されている。太田らは、トンネル状の水みちを地下水が多量に

流下する場合、その流動に伴う音響を聞き取ることを目的として細鉄管製聴音棒と電子音聴器を製作した。地下水の流動時の音響が探知できれば、トンネル状水みちを探知することができる調査法である。

小型土槽内に、水みち内を優先的に水が流れる模型地盤を製作し、模型地盤が飽和状態での水の停止時と流動時の音響、および不飽和状態での水の流動時の音響を収録した。小型土槽は、模型地盤部分の寸法が、高さ 700mm、幅 800mm、奥行き 200mm、長手方向両側に貯水槽が付属している。土槽は地盤材料の充填・水の浸潤状況が目視できる透明のアクリル製である。模型地盤材料は、全体を市販されている川砂とし、水みちは粒径 20mm 程度の碎石とした。川砂は 1 層約 50mm の厚さで撒きだし、碎石部分以外の水みちとなる空隙が残らないように、木製の突き棒で突き固めた。川砂のみの土層を約 100mm 形成した上に川砂内に幅約 150mm 程度の溝を作り、その中に碎石を投入した。碎石は、土槽の前後面の壁面には接触させず、水の流動方向となる長手方向のステンレスメッシュ（貯水槽と地盤材料を透水境界板）に十分密着させた。碎石の厚さは約 70mm である。碎石内に聴音棒として細鉄棒を立て込んだ。碎石層の上部の高さは約 550mm とした。電子音聴器は、フジテコム製 FSD-9D を使用した。音響データはパソコンで録音した。Windows オーディオファイル (.wav) 形式で録音し、周波数分析を行った。

原位置試験は、斜面崩壊が発生した山地斜面で実施した。録音作業は、地盤に聴音棒を約 300mm 貫入し、土槽実験と同様に電子音聴器により地盤内の音響データを録音した。録音したデータは 10 データで、斜面崩壊が発生した山地内で、晴天時と雨天時に測定した。測定点は地下水の流動が期待される地点を選定し、掘抜き井戸跡付近で 2 点、崩壊斜面の滑落崖頂部付近で 4 点、特に滑落崖頂部付近の地下水位観測実施箇所 2 点、渓流沿いの礫質土堆積地盤内で 2 点である。

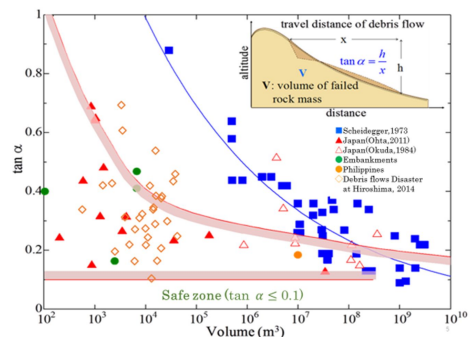
土槽実験と原位置試験で収録した 14 個の音響データを周波数分析した。原音の音響データの周波数と音量分布では、250Hz 以下の周波数帯は音量の分布形状はバラバラで種々の形状が見られる。同様に、3000Hz 以上の周波数帯の音量は、小さく、音量の分布特徴を認めにくい。したがって、有意な周波数の範囲は 250Hz から 3000Hz 程度までと考えられ、音響データに 250Hz 以下、および 3000Hz 以上にバンドパスフィルターを作用させ周波数～音量関係を検討した。土槽実験の音響データの分析結果から、

土槽の水みちを水が流れている場合、音響データの音量は -50dB 程度であった。土槽の水みちを水が流れていない場合、音響データの音量は -60dB 以下であった。

原位置試験の音響データの分析結果から、滑落崖近傍斜面の地下水位観測点、渓流沿い\_粗粒土砂の 1、渓流沿い\_粗粒土砂の 2 は、-50dB 以上の音量を示した。原位置試験のその他のデータは -60dB 以下の音量を示した。-60dB 以下の音量を示すデータを収録した状況は、地下水が地表近くを流動している可能性が低く、のデータを習得した地点は、地表近くを地下水が流動している可能性が高いと考えられる。また、土槽実験のデータ、原位置試験のデータでも、特異な狭い周波数帯の音量が大きい事象は認められなかった。

土槽実験と原位置試験のデータの分析結果をまとめて示すと、有意な音量変化の検討対象となる周波数帯は、250Hz から 3000Hz 程度と考えられる。地下水、水が流動していない状況の音響データの音量は -60dB 以下を示した。水みちを水、または、地下水が流動する場合の音響データは、-50dB 程度以上の音量を示す。水みちを水が流動する場合も特異な狭い周波数帯の音量が大きい事象は認められなかった。以上の検討結果から音響データの音量が大きくなる事象により、水みちを地下水が流動する現象を検知する可能性があると考えられる。

広島県安佐北区・安佐南区における約 50 箇所の広島土石流災害における数度にわたる現地踏査（5 回）のデータを取りまとめ、研究代表者らが従来から集積してきた斜面崩壊・土石流の現場データと合わせることで、土石流の最大到達距離の経験的算定グラフ（等価摩擦係数）の作成に成功した。



## 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 17 件)

太田秀樹：観測施工が原則，土木技術資料，査読有，59 巻 2 号，2017

松坂 敏博，森山 陽一，小笹 浩司，太田 秀樹，藤野 陽三，宮川 豊章，西村 和夫：高速道路の構造物における大規模更新および大規模修繕の導入と架台，土木学会論文集 F4(建設マネジメント)，査読有，Vol. 73, No. 1, 2017, 1-18

近藤省一・西尾 経・竹田敏彦・松岡大介・市川公彦・三浦正嗣・齋藤邦夫・高倉巧樹：地中障害物層の介在する地盤に適合した複合相対攪拌工法の概要と施工事例，北海道土木技術会「土質基礎に関する新しい地盤改良工法」報告集，査読有，2016, 15-23

H. Ohta: Settlement due to consolidation, Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, 査読有, Vol. 46, No. 1, 2015, 1-11, ISSN 0046-5828

平田昌史・吉田敬司・澤野幸輝・菊池慎司・加藤真司・太田秀樹：真空圧密工法を施工した超軟弱地盤の長期沈下予測 - 白竜湖地区試験盛土の FEM 解析 - ，地盤工学ジャーナル，査読有，Vol. 10, No.1, 2015, 93-112, DOI:http://doi.org/10.3208/jgs.10.93

K. Ozasa, K. Kumagai, H. Takahashi, M. Imashiro and H. Ohta: A simple device for trapping small-scaled debris flows, Geotechnics for Catastrophic Flooding Events, 査読有，2015, 547-553

T. Takeyama, A. Ikeda, E. Nakayama, M. Taya, I. Kobayashi, T. Pipatpongsa and H. Ohta: Microscopic image of meta-stability

of clays, Geomechanics from Micro to Macro, eded by K. Soga, K. Kumar, G. Biscontin and M. Kuo, 2015 Taylor & Francis Group, 査読有，Vol. 2, 2015, 727-732, ISBN 978-1-138-02707-7

加藤真司・佐々木徹・山田満秀・澤野幸輝・齋藤邦夫・太田秀樹：有機質土と粘性土および砂質土が互層状に堆積した軟弱地盤における真空圧密工法の適用性，土木学会論文集 C (地圏工学)，査読有，Vol. 71, No. 4, 2015, 335-351

Tomohide Takeyama, Seiya Yokota, Masumi Sueoka and Hideki Ohta : Estimate of the salt contamination sprayed on the highway pavement during the snowy winter, Japanese Geotechnical Society Special Publication (ONLINE ISSN: 2188-8027), 査読有，Vol.2, No.50, 2015, 1745-1748

Yoichi Watabe and Kunio Saitoh : Importance of sedimentation process for formation of microfabric in clay deposit, Soils and Foundations, 査読有，Vol.55, No.2, 2015, 276-283

石井武司・金田 淳・齋藤邦夫：列車走行に伴う地盤振動評価のための振動レベル計の数値模擬，中央大学理工学研究所論文集，査読有，第 21 号，2015, 15-17

太田秀樹：特別講演 補強材が夾在する地盤の力学特性評価に関する問題点，第 59 回地盤工学シンポジウム平成 26 年度論文集，査読有，2014, 15-22

森山陽一・藤岡一頼・木村勝・石垣勉・林雄介・飯塚敦・齋藤邦夫・太田秀樹：

東名牧の原盛土の崩壊時強度の推定と今後の維持管理への提言, 第 59 回地盤工学シンポジウム 平成 26 年度論文集, 査読有, 2014, 163-170

西尾 経・松岡大介・竹田敏彦・齋藤邦夫: 原土排土による排土抑制型低変位高圧噴射攪拌工法, 基礎工, 査読有, Vol.42, No.3, 2014, 62 - 65, ISSN 0285-5356

[学会発表](計 38 件)

K. Sawano, S. Kato, M. Hirata, T. Sasaki, T. Kosaka, K. Kaneta and H. Ohta : Three trial embankments placed on a soft foundation deeper than 100 metres, The 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017/9/17-22, Seoul

松岡永憲・荒井幸夫・深澤和行・小笹浩司・太田秀樹: 地下水流動(水みち)の音響計測による検出に関する基礎的検討, 第 52 回地盤工学研究発表会, 2017/7/12-14, 名古屋

松岡大介・西尾経・竹田敏彦・市川公彦・高倉功樹・齋藤邦夫: 最新の地盤改良技術と施工例, 第 15 回北海道土質基礎に関する技術報告会, 2017/2/3, 北見

谷口雄太・澤野幸輝・加藤真司・齋藤邦夫・太田秀樹: 白竜湖軟弱地盤に堆積する粘性土の応力解放にともなう力学特性, 第 13 回地盤工学会関東支部発表会, 2016/10/21, 東京

太田秀樹: 斜面崩壊の事例研究, 地盤工学会東北支部秋田地盤研究会, 2016/10/20, 秋田, 招待講演

本田道識・Hsu Wai Nyein・石井武司・齋藤邦夫: 0396 締固め土の圧縮曲線を用いた水浸沈下量の推定法, 第 51 回地盤工学研究発表会, 2016/9/15, 岡山

西村光司・丸山勝・久保竜志・安積淳一・木村勝・山田宏・長尾和之・松坂敏博・太田秀樹: 1029(E-06) 上信越自動車道香坂地区地すべりの安定化, 第 51 回地盤工学研究発表会(岡山), 2016/9/13, 岡山

H. Ohta : Geological structure and failure mechanism of soft rock slopes, Youngnam University, 2016/5/19, Youngnam, Korea, 招待講演

H. Ohta : How do we specify material parameters in soil/water coupled simulations of soil behaviour?, Korean Society of Civil Engineers, Busan-Ulsan-Gyeongnam Branch, 2016/5/18, Busan, Korea, 招待講演

Hideki Ohta : How do we specify material parameters in soil/water coupled simulations of soil behaviour?, Some Japanese achievements in Geotechnical Engineering, The University of Auckland, 2016/3/16, Auckland, New Zealand, 招待講演

[図書](計 1 件)

H. Ohta, T. Aoyama, T. Shimizu, S. Hamada, M. Nakamura : Springer, Developments in Earthquake Geotechnics, Chapter 8 Possibility of 4m-deepflooding in densely populated low-land area of Tokyo, 2017, 300, (in print)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

太田秀樹 (OHTA, Hideki)  
中央大学・研究開発機構・機構教授  
研究者番号: 80026187

(2) 研究分担者

齋藤邦夫 (SAITOH, Kunio)  
中央大学・理工学部・教授  
研究者番号: 00092552