

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成30年 6月19日現在

機関番号：16401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K12855

研究課題名(和文) 多次元方向の変位計測に基づく斜面崩壊発生予測

研究課題名(英文) Time-prediction of an onset of landslide based on the measurement of multi-directional displacement

研究代表者

笹原 克夫 (Sasahara, Katsuo)

高知大学・教育研究部自然科学系農学部門・教授

研究者番号：90391622

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：変位計測に基づき、掘削中の斜面の崩壊危険度を評価するために、実大規模の模型斜面及び遠心場での小型斜面模型を作製し、掘削により生ずる2次元方向の変位を計測した。実大規模模型実験では斜面方向及びそれに垂直な方向の変位を計測し、小型模型実験では斜面内のせん断ひずみと鉛直方向の変位を異なる深さで計測した。その結果前者では両変位の増加量の比が一定になると斜面は崩壊し、後者ではせん断ひずみ増加量に対する鉛直ひずみ増加量が一定値になると崩壊した。後者の結果も前者と同様な意味を持つと解釈でき、せん断変位増加量に対する、それに垂直な方向の変位量の増加量の比が斜面不安定度の指標になることが考えられる。

研究成果の概要(英文)：Displacements in 2-D direction were measured on different scale model slopes to evaluate the instability of slopes under excavation based on the measurement of displacements. Displacements parallel and vertical to slope surface, shear strains and vertical displacements were measured in large scale model and small scale model respectively. The ratio of the increase of displacement parallel to the slope to that of displacement vertical to the slope converged to unique value before the failure of large scale model slope, while the ratio of the increase of vertical strain to that of shear strain also converged to constant value before the failure of the small scale model slope. These facts suggest that the ratio of the increase of displacement vertical to the direction of the shear of the slope to that of shear displacement might be able to indicate the instability of the slope under excavation.

研究分野：降雨及び土工による斜面崩壊の発生予測。斜面防災工学。地盤工学。

キーワード：斜面崩壊 掘削 模型実験 モニタリング 変位

1. 研究開始当初の背景

斜面崩壊の発生を検知するために、IT 技術の進展に伴って、様々な斜面の変形を計測するセンサーの開発が進み、従来のような一次元方向の変位のみならず、多次元方向の変位の計測も簡便に行えるようになってきている。しかし計測結果に基づく崩壊発生予測手法は十分に進歩しておらず、未だに土の一定応力条件下の時間依存性の変位を経験的にモデル化した、クリープ理論に基づいた予測が行われている。力学的な根拠を有する予測手法の確立が必要である。

また計測結果を用いた崩壊予測として、崩壊発生時刻の予測のみが考えられているが、すべり面の形状や深さなども推定できれば、より変位計測の用途が広がることになる。

2. 研究の目的

模型斜面における、2次元方向の変位計測データを用いて、両方向の変位量より、模型斜面の不安定度の評価と、すべり面の形状を推定する手法を提案する。

3. 研究の方法

上記の目的のために、2通りの模型実験を実施した。

(1) 実大規模模型斜面の掘削実験

実大規模模型斜面を作製し、ドラグショベルによる掘削実験を実施した。模型斜面は高さ 3.5 m、幅 4 m、勾配 30 度とし、長さ 1.7 m の天端を与えた(図-1)。試料は関東ロームを用い、盛土作製直後の含水比は 88%、湿潤密度 0.98 g/cm³であった。図-1 に計測機器の設置位置を示す。計測機器は地中ひずみ計を 4 点、傾斜計を 12 点、変位計を、地表面の方向及び地表面に垂直方向に 6 箇所計 12 点、伸縮計を 2 点設置した。法面下部から

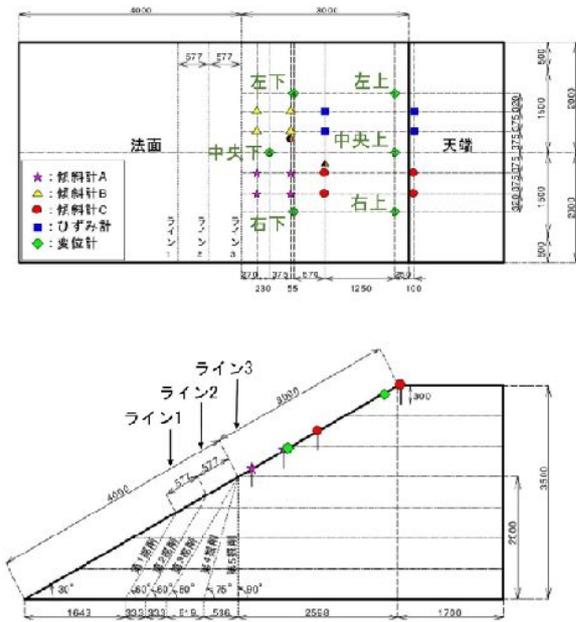


図-1 実大規模模型斜面の平面図と断面図

4m 斜面高さ 2m ラインを掘削時の崩壊予測線とし、3 段階の掘削ラインを設けた。掘削はライン 1 から 60 度(第 1 掘削)、ライン 2 から 60 度(第 2 掘削)、ライン 3 から 60 度(第 3 掘削)、ライン 3 から 75 度(第 4 掘削)、ライン 3 から 90 度(第 5 掘削)の 5 回を実施した。なお、第 5 掘削後、斜面法肩から斜面方向 2.07m 下方で崩壊が発生した。本実験ではさらに崩積土を掘削した場合についても計測を実施し、その後の 3 段階、計 8 段階の掘削を実施した。なお、ドラグショベルのバケット幅が 1.8m であったため、1 段階の掘削に対し、中央、左、右の 3 度の掘削を実施した。また、各段階の掘削終了から次の掘削段階の開始には最低 30 分のインターバルを設け、計器に反応がみられた第 3 掘削と第 4 掘削間は 60 分、第 4 掘削と第 5 掘削間は 90 分の間隔を設けた。

(2) 遠心場における小型模型実験

実験は、労働安全衛生総合研究所所有の遠心模型実験装置を使用した¹⁾。実験土槽は幅 450mm × 高さ 270mm × 奥行き 150mm のアルミ製土槽であり、土槽の側面は強化ガラス面によって内部の様子を観察できる。作製した模型地盤の形状は、高さ 125mm、勾配 60 度の斜面であり、試料は利根川水系の川砂 ($\rho_s=2.762\text{g/cm}^3$ 、最大粒径 9.5mm、 $U_c=2.98$) を使用した。この川砂を初期含水比 9.0% となるように調整し、伊藤らが用いた方法²⁾と同様に地盤内の鉛直変位と傾斜を把握するための層別沈下計のロッドと加速度計を埋設するために地盤を 8 層に分割し、それぞれ

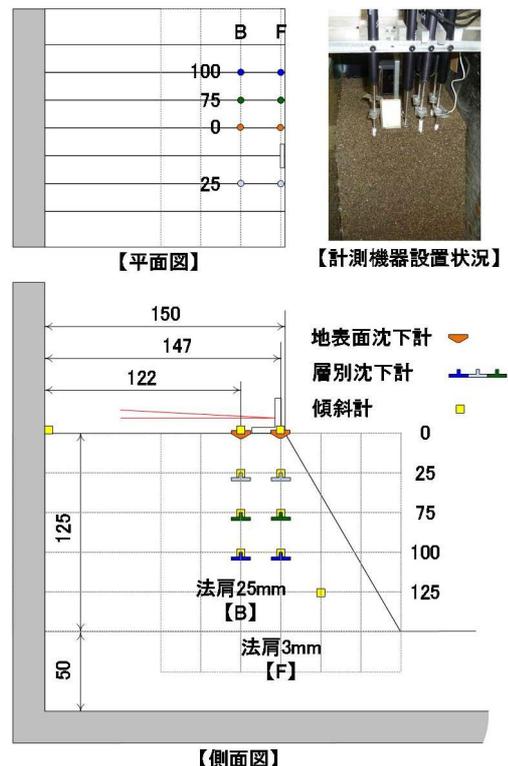


図-2 計測機器設置位置

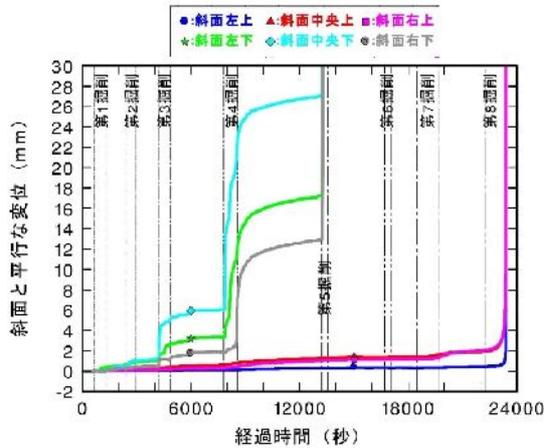


図-3 斜面方向の変位の経時変化

側方からの静的締固めによって作製した湿潤単位体積重量は 1.58g/cm^3 (締固め度 $D_c=88$) とした。模型地盤は法面高さ 2.5m の斜面を $1/20$ 縮尺モデルとして作製した。本実験では遠心力载荷時に地盤を掘削することが可能な遠心場掘削シミュレーター²⁾を使用した。掘削除荷過程は、法面にあらかじめ設置した乾燥砂(カウンターウェイト)を掘削シミュレーターによって段階的に除去することでこれを再現した。1回の切取り高さは 12.5mm (実地盤換算で 0.25m) とし、掘削が完了した段階で約2分間放置した。これを崩壊するまで繰り返し、法面高さ 87.5mm (実地盤換算で 1.75m) となるまで掘削を行った。計測項目としては図-2に示す位置に半導体ひずみゲージ型の加速度計(□)を埋設し、アルミロッドを介して法肩部に接触型変位計(△), 法肩部の水平変位をレーザ変位計によって計測している。なお、地盤内に埋設したロッドは2重管構造としており摩擦を除去することで一般的な層別沈下計と同じ構造である。また、土槽正面にはPIV解析用のHDVビデオカメラ(1280pixel×720pixel)を設置して、掘削過程の地盤変形を撮影している。

4. 研究成果

4.1 実験結果

(1) 実大規模模型斜面の掘削実験

実験結果として地表面方向の変位の経時変化を図-3に示す。斜面下方の変位は第3掘削および第4掘削の最中に大きく増加し、その後もクリープ的に増加する。そして第5掘削中に崩壊による急増を示した。斜面上部の変位は第4掘削中から微増を開始し、その後徐々に増加する。そして第8掘削により急増を開始し、第8掘削後クリープ的な変形が加速的に増加し、崩壊に至った。その他の実験結果については平岡ら³⁾を参照されたい。

(2) 遠心場における小型模型実験

以下の結果は実地盤換算で示す。図-4に法

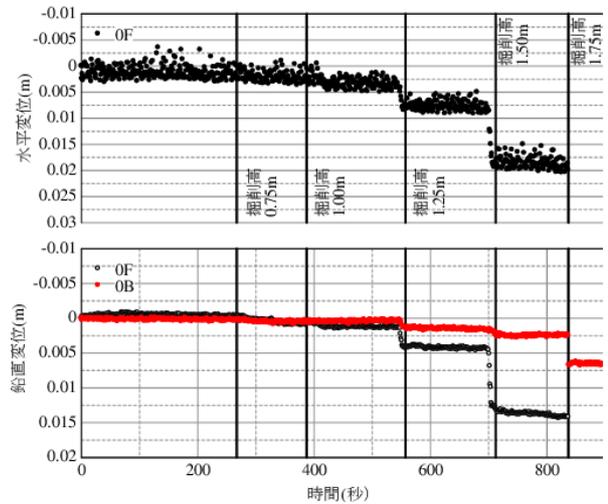


図-4 地表面変形の経時変化

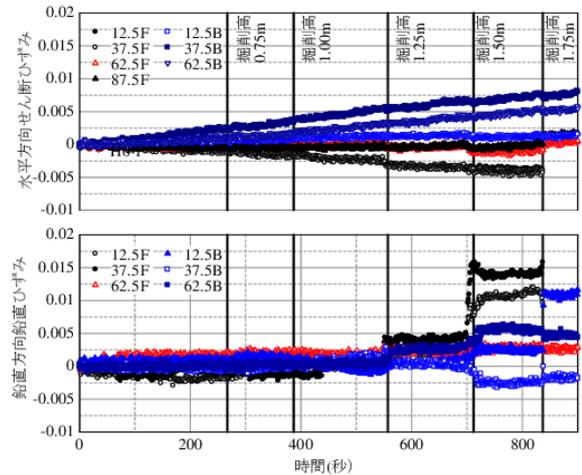


図-5 せん断ひずみと鉛直ひずみの経時変化

肩部に設置した水平変位と鉛直変位の経時変化を示す。ここで、凡例について説明すると0や25.0のような数字は深度を、FやBのような英字は法肩からの距離を示している(F:法肩から3mm, B:法肩から25mm)。各掘削段階によって沈下量が増加し、最終的に掘削高さ 1.75m にて崩壊した。図-5は水平方向せん断ひずみと鉛直方向鉛直ひずみの経時変化を示す。水平方向せん断ひずみは、加速度計から傾斜角度を算定してせん断ひずみを算出しており、鉛直方向鉛直ひずみは、層別沈下計での各沈下量の差分と設置位置から鉛直ひずみを算出している。地表面の変形挙動と同様に、掘削が進む毎にひずみが増加するが、特に掘削高さ 1.25m から大きな圧縮方向の鉛直ひずみが生じていることが分かる。

4.2 考察

(1) 実大規模模型斜面の掘削実験

考察については斜面上部の変位のみを対象とする。図-6に地表面方向の変位とそれに垂直な方向の変位の関係を示す。斜面右上と斜面中央上では地表面方向の変位が増加す

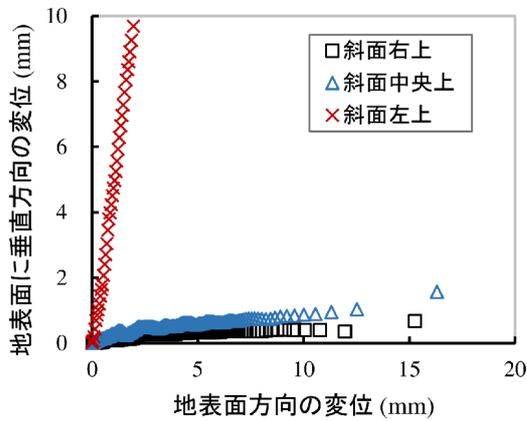


図-6 地表面方向の変位と垂直方向の変位の関係

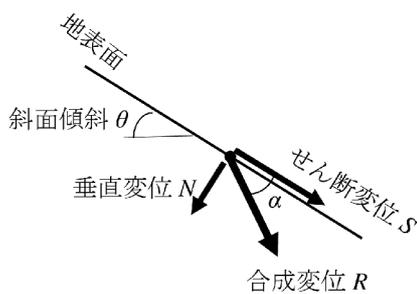


図-7 合成変位の定義

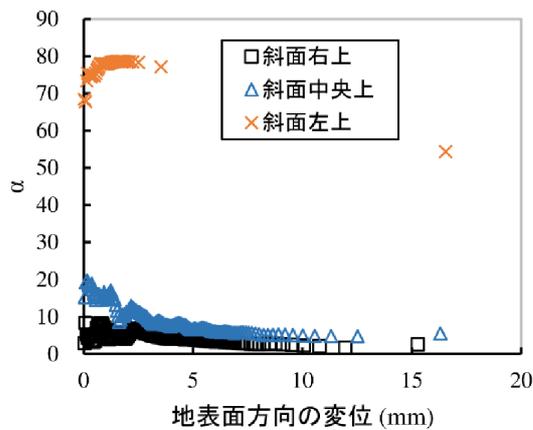


図-8 地表面変位と合成変位の方向の関係

るに連れて、垂直方向の変位も増加するが、増加量が徐々に減少し、一定値に近づくように見える。それに対して斜面左上では地表面方向の変位の増加に比例してそれに垂直な方向の変位が増加する一方で、一定値に収束しない。

ここで地表面方向の変位とそれに垂直な変位の合成変位を図-7のように定義し、合成変位の方向 α に注目する。図-8に地表面方向の変位の増加に伴う合成変位の方向 α の方向を示す。斜面右上及び中央上では変位増加に伴い α は減少し、やがて一定値をとる。また斜面左上では変位増加に伴い α は増加して、一定値に至る。つまり合成変位の方向 α は斜

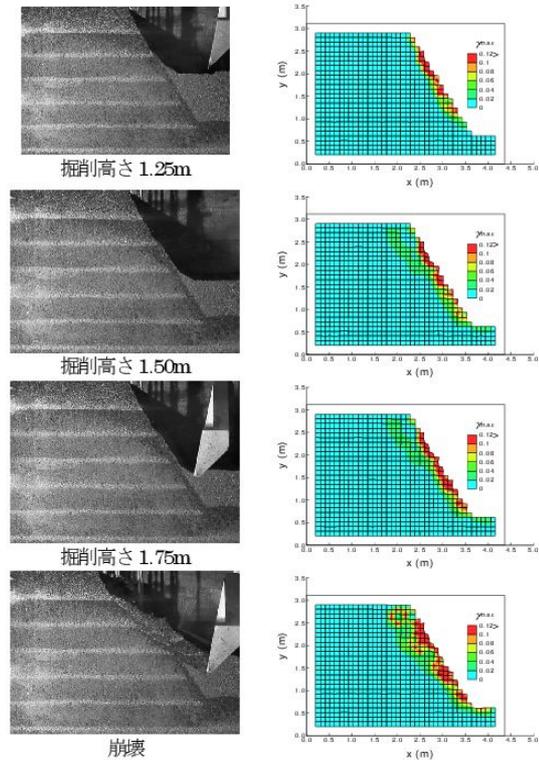


図-9 最大せん断ひずみ分布の推移

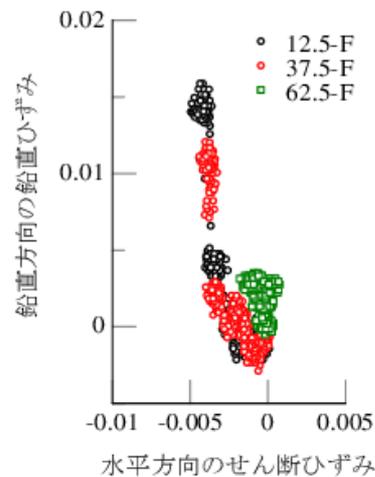


図-10 法肩から3mmの位置におけるせん断ひずみ～鉛直ひずみ関係

面方向の変位の増加と共にその変化量は減少し、斜面の破壊に向けて一定値に収束する。斜面下部の変位についても同様な関係が得られた。この斜面の破壊に向けて合成変位の方向が一定値に近づいていく事実を用いると、斜面の崩壊にどれだけ近い状態であるかを推定することができる可能性がある。

(2) 遠心場における小型模型実験

図-9は、掘削による各掘削高さでの写真(左側)とPIV画像解析⁴⁾による最大せん断ひずみ分布(右側)を示したものである。掘削高さ1.50m付近から地盤内部に最大せん断ひずみが卓越し始め、直線すべりのような形状を呈していることが確認できる。

図-10は、法肩から3mmの位置における

変位計や加速度計から算出した水平方向せん断ひずみと鉛直方向鉛直ひずみの関係を、示したものである。笹原・伊藤⁵⁾は崩壊に至らない比較的変形の小さい領域にて同様の実験を行い、切土掘削による斜面変形は水平方向せん断ひずみと鉛直方向鉛直ひずみの間には線形関係が成立することを確認している。今回の実験結果でも、法肩部に最も近くすべり土塊内にある12.5Fと37.5Fの水平方向せん断ひずみと鉛直方向鉛直ひずみの関係は掘削高さ1.50mまでは彼らと同様に線形的であったが、それ以降は鉛直ひずみが卓越するような挙動を呈していることが確認された。

今後は計測データから崩壊土塊範囲を推定する方法などについて検討したい。

参考文献

- 1) 伊藤和也他：新遠心模型実験装置(NIIS-Mark II Centrifuge)の開発，産業安全研究所研究報告，NIIS-RR-2005(2006)，pp.57-74，2006。
- 2) 伊藤和也他：遠心場掘削シミュレーターを使用した簡易な斜面補強工法の斜面安定効果に関する遠心模型実験，第47回地盤工学研究発表会，pp.779-780，2012。
- 3) 平岡伸隆他：実大模型斜面を用いた斜面掘削工事による崩壊形態に関する研究，土木学会第71回年講，III-347，pp.693-694，2016。
- 4) 例えば，吉川直孝：画像解析による局所変形計測法を用いた砂質土の浅い基礎の支持力発現機構に関する研究，山口大学博士論文，pp.27-52，2007。
- 5) 笹原克夫・伊藤和也：土のダイレイタンスに着目した切土施工時の斜面安定度評価の試み，第52回日本地すべり学会研究発表会，pp.118-119，2013。

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9件)

笹原克夫，岩田直樹，吉川直孝，平岡伸隆，伊藤和也：実大規模模型斜面の多段階掘削に伴う崩壊時刻の予測 - 福園式を用いた検討 - ，地盤工学ジャーナル，Vol.13，No.1，pp.13-25，2018。
<https://doi.org/10.3208/jgs.13.13> 査読有。

平岡伸隆，吉川直孝，伊藤和也，笹原克夫：斜面掘削中の動態モニタリングによる退避判定の検討，土木学会論文集C(地圏工学)，Vol.73，No.4，pp.355-367，2017。
<https://doi.org/10.2208/jscejge.73.355> 査読有。

NOBUTAKA HIRAOKA，NAOTAKA KIKKAWA，KATSUO SASAHARA，and KAZUYA ITOH: FULL-SCALE MODEL TEST FOR PREDICTING COLLAPSE USING INVERSE OF VELOCITY OF SLOPE SURFACE DURING EXCAVATION, Resilient Structures and Sustainable Construction; Edited by Pellicer, E., Adam, J.

M., Yepes, V., Singh, A., and Yazdani, S., 2017 ISCE Press, ISBN: 978-0-9960437-4-8, 2017. 査読有。

Naoki Iwata，Katsuo Sasahara，and Satoshi Watanabe: Improvement of Fukuzono's Model for Time Prediction of an Onset of a Rainfall-induced Landslide, M. Mikos et al. (eds.), Advancing Culture of Living with Landslides, Vol.3 Advances in Landslide Technology, pp.103-110, DOI10.1007/978-3-319-53487-9_11, 2017. 査読有。

Nobutaka Hiraoka，Naotaka Kikkawa，Katsuo Sasahara，Kazuya Itoh，and Satoshi Tamate: A Full-Scale Model Test for Predicting Collapse Time Using Displacement of Slope Surface During Slope Cutting Work, M. Mikos et al. (eds.), Advancing Culture of Living with Landslides, Vol.3 Advances in Landslide Technology, pp.111-121, DOI

10.1007/978-3-319-53487-9_12, 2017. 査読有。
笹原克夫，伊藤和也，吉川直孝，平岡伸隆，土佐信一，大類光平，板山達至：多数点に設置したMEMS傾斜計を用いた地すべり土塊の移動状況の詳細な計測，防災科学技術研究所研究資料第411号，pp.51~60，2017. 査読無。

[学会発表](計16件)

渡邊聡，岩田直樹，中井真司，笹原克夫：まさ土模型斜面における崩壊検知のための計測精度について(その1) - 変位計測間隔の検討 - ，第56回日本地すべり学会研究発表会，平成29年8月22~25日，長野市

笹原克夫，吉川直孝，平岡伸隆，伊藤和也：二次元方向の変位計測に基づく実大規模模型斜面の掘削時の不安定度評価，第56回日本地すべり学会研究発表会，平成29年8月22~25日，長野市

岩田直樹，渡邊聡，笹原克夫，荒木義則：砂質模型斜面位における崩壊検知のための計測時間間隔について，第52回地盤工学研究発表会，平成29年7月12~14日，名古屋市

平岡伸隆，吉川直孝，笹原克夫，伊藤和也：実大規模斜面の多段階掘削における地表面変位の逆速度による退避基準の検討，第52回地盤工学研究発表会，平成29年7月12~14日，名古屋市

笹原克夫，吉川直孝，平岡伸隆，伊藤和也：切土施工中での変位計測に基づく斜面の不安定度の評価法，Kansai Geo-Symposium 2016 - 地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム - ，平成28年11月18日，大阪市

岩田直樹，笹原克夫，渡邊聡，荒木義則：福園式を用いた砂質模型斜面の崩壊発生時刻予測手法，第51回地盤工学研究発表会，平成28年9月13~15日，岡山市

平岡伸隆，吉川直孝，伊藤和也，笹原克夫：実大模型斜面の多段階掘削における斜面不安定度の予測に関する検討，第 55 回日本地すべり学会研究発表会，平成 28 年 8 月 22～25 日，高知市

笹原克夫，吉川直孝，平岡伸隆，伊藤和也：実大規模模型斜面の多段階掘削過程における変位計測に基づく斜面不安定度の評価法，第 55 回日本地すべり学会研究発表会，平成 28 年 8 月 22～25 日，高知市
渡邊聡，笹原克夫，岩田直樹，中井真司：砂質模型斜面における崩壊検知のための変位の計測精度について，第 55 回日本地すべり学会研究発表会，平成 28 年 8 月 22～25 日，高知市

6．研究組織

(1)研究代表者

笹原 克夫 (SASAHARA, Katsuo)

高知大学・教育研究部自然科学系農学部門・教授

研究者番号：90391622

(2)研究分担者

吉川直孝 (KIKKAWA, Naotaka)

独立行政法人労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所・建設安全研究グループ・主任研究員

研究者番号：60575140

伊藤和也 (ITOH, Kazuya)

東京都市大学・工学部・准教授

研究者番号：80371095