

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：16401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23658130

研究課題名（和文） 土のダイレイタンスに着目した斜面の動態監視と崩壊発生予測

研究課題名（英文） The monitoring of the deformation of the slope and the time prediction Based on the stress-dilatancy of the soil

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・教授

研究者番号：90391622

研究成果の概要（和文）：斜面内の応力変化を評価する指標としてひずみ増分比（＝圧縮ひずみ増分/せん断ひずみ増分）が使えるかどうかを検討するために、模型斜面の人工降雨および切土による崩壊実験を実施した。その結果人工降雨に伴う模型斜面のせん断変形の進行に伴い、すべり面付近の圧縮ひずみ増分が徐々に減少していき、崩壊直前には0になった。このことからせん断ひずみ増加に伴う圧縮ひずみ増分比が斜面の不安定化を評価する指標となることが示唆された。

研究成果の概要（英文）：

The measurement of the deformation of the sandy model slope under artificial rainfall or cutting were conducted to examine whether the strain increment ratio (=compression strain increment/shear strain increment ratio) can show the stress state in the slope before the failure. In the experiment with artificial rainfall, the compression strain increment at the bottom of the slope decreased with the increase of the shear strain and then became zero just before the failure of the slope. This fact shows the strain increment ratio can be an indicator of the instability of the slope.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：森林学・森林科学

キーワード：斜面崩壊，モニタリング，せん断ひずみ，ダイレイタンス

## 1. 研究開始当初の背景

斜面崩壊の発生時刻の予測手法として、地表面変位や地表面傾斜の計測結果を用いた斉藤<sup>1)</sup>や福園<sup>2)</sup>によるクリープ理論による予測式がある。しかしこれらは一定応力下の土の時間依存性のせん断変形の進行を、変位量～時間の関係として経験的に定式化したものであり、斜面内の応力条件を一切考慮しないため、例えば降雨の中断、斜面の切土・盛土による斜面内の応力変化に伴う変形を説明することができない。これを解決するためには、変位と時間の関係のみならず、応力と

変形の関係、つまり土の応力～ひずみ関係に基づく変形のモデル化が必要である。

## 2. 研究の目的

斜面内の応力を推定するために、土のダイレイタンス、つまり垂直ひずみ増分とせん断ひずみ増分の比（ひずみ増分比）を、斜面内の変形の計測に基づき定義し、それを使えないかと考えた。例えば直接せん断条件では、土のせん断ひずみと、圧縮・膨張に伴う垂直ひずみを計測し、垂直ひずみ増分とせん断ひずみ増分の比（ひずみ増分比）を取ると、そ

れは応力比と線形関係にあることが知られている。つまりひずみ増分比を求めることにより、応力が推定できることになる。これらの検討のために、砂質土を用いた模型斜面を人工降雨下で変形・破壊させる実験を行った。また切り土による斜面の変形過程も遠心載荷装置を用いた実斜面規模の応力レベルにおける模型実験により検討した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 人工降雨による模型斜面の変形・破壊

図-1に示すような模型斜面を作成した。まさ土 ( $D_{50}=1.3\text{mm}$ ,  $U_c=22.23$ ,  $\rho_s=2.675\text{g/cm}^3$ ) を水平方向に 20cm ずつ敷きならし、人力で踏み固めて模型斜面を作成した。斜面方向に 50~80cm ごとに土のサンプリングを行い、間隙比が 0.65~0.68 で含水比が 3.7~4.4% とほぼ一定であることを確認した。斜面の降雨浸透や圧縮・せん断変形挙動は図-1に示すような計測装置で計測した。このうち斜面のせん断変形については斜面下端から 250cm の位置に設置した内部歪計により、深さ 9.2cm 毎の傾斜変化のデータを使用した。なお内部歪計は長さ 9.2cm のプローブ内に傾斜計を設置したものを、ボルト・ナットで深さ方向に 6 個連結したものである。各プローブの傾斜変化を  $\theta$  とすると  $\tan \theta$  がせん断ひずみに等しいと考えた。また鉛直変位計の各深さの沈下板の沈下量から、それらの沈下板にはさまれた土層の圧縮量を求め、それより圧縮ひずみを求めた。ここで圧縮ひずみは、沈下板にはさまれた鉛直方向の初期厚さ 10cm の土層の圧縮量を、初期鉛直土層厚で除した値であり、鉛直方向のひずみである。以降はこれを垂直ひずみとみなすことにする。

#### (2) 切り土による砂質斜面変形実験

切り土による砂質斜面の変形・破壊を検討するために、実斜面応力レベルの模型実験を、(独)労働安全衛生総合研究所の所有する遠心載荷装置 JNIOSSH NIIS Mark II Centrifuge を用いて実施した。模型斜面は幅 45cm×高さ 27cm×奥行き 15cm のアルミ製土槽中に作製し、模型斜面内には内部のせん断変形と鉛直方向の圧縮変形を計測するための加速度計と変位計を設置した。模型斜面の典型的な形状と計測装置の配置を図-2に示す。実験は 1) 成田砂:斜面勾配 60° (遠心加速度 40G), 2) 成田砂:斜面勾配 75° (遠心加速度 40G), 3) 川砂:斜面勾配 60° (遠心加速度 20G) の 3 ケース実施し、3)のみ崩壊した。1)2)は崩壊には至らなかったが、変形挙動を計測できた。本報告では変形挙動が明瞭に計測できた 2)について報告する。

模型斜面の作製は、側方から締め固め圧力 50kPa で 8 層に分けて静的に締め固め、初期含水比 16.8% で湿潤単位体積重量 1.58g/cm<sup>3</sup> (締め固め度 0.865) の模型を作製した。40G

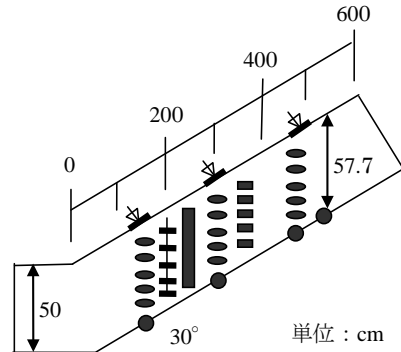
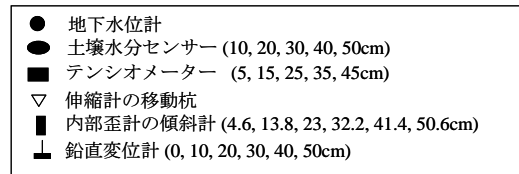


図-1 人工降雨実験用の斜面模型

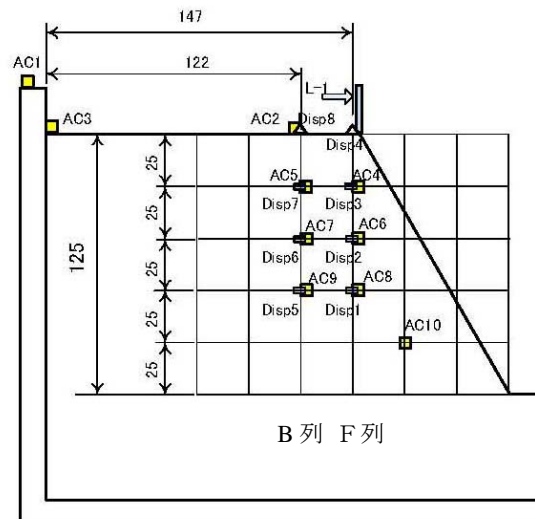
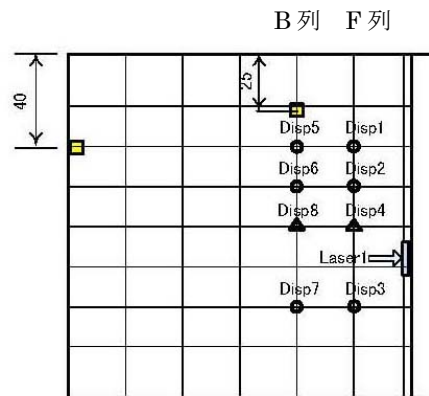


図-2 遠心載荷実験用の斜面模型 (単位:mm)

の遠心場における実験なので、模型高さ 125mm は実斜面高さ 5m に相当する。また掘削

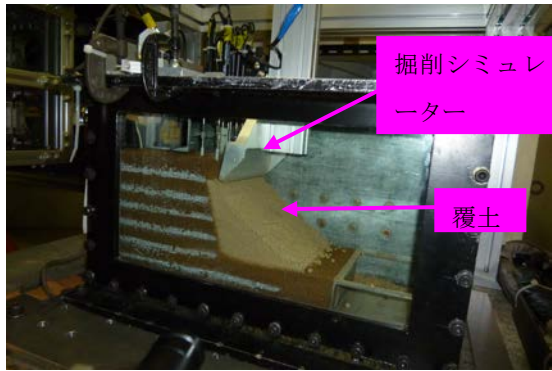


図-3 模型斜面の全景

については遠心場掘削シミュレーターを使用して行い、図-3のように模型斜面前面に乾燥成田砂の覆土を段階的に掘削することにより、掘削過程を再現する。1回の掘削高さは12.5mm（実地盤換算で0.2m）とし、掘削後は2分放置した。このような方法により、模型斜面の水平面の天端下25mmから125mmまでの覆土を合計8回で掘削した。加速度計と変位計により計測された値から、各々せん断ひずみと圧縮ひずみを求めるが、それらの定義は前述の通りである。

#### 4. 研究成果

##### (1) 人工降雨による模型斜面の変形・破壊

図-4は斜面内の異なる深さにおけるせん断ひずみと圧縮ひずみの経時変化である。せん断ひずみは13,000秒経過時から顕著に増加する。深い部位の方が早くせん断ひずみが増加する傾向が伺えるが、はっきりした傾向ではない。斜面内の圧縮ひずみも13,000秒頃から顕著に変化を始める。浅い部位の圧縮ひずみは負（膨張）の傾向であり、逆に深い部位の圧縮ひずみは正の方向に増加する。

図-5に斜面内の同じ深さにおけるせん断ひずみと圧縮ひずみの関係を示す。これを見ると浅い部位では当初は圧縮し、その後膨張していく。深さ15cmを除いて浅いほど膨張傾向が強い。逆に深い部位では圧縮ひずみは常に正であり、深いほど圧縮ひずみが大きく、圧縮傾向が強い。そして深さが大きくなり、すべり面に近づくとせん断の進行に伴って、圧縮ひずみ変化（増分）に対するせん断ひずみ増分が大きくなり、曲線の傾きが水平に近づく。つまりすべり面に近い深い箇所ほど、せん断の進行に伴って、圧縮ひずみ増分に対するせん断ひずみ増分が大きくなり、ひずみ増分比（＝圧縮ひずみ増分/せん断ひずみ増分）の値が0に近づくということである。このひずみ増分の値が応力を表す指標と見なせ、0に近づくほど崩壊に近いと言える。

つまりすべり面に対する圧縮ひずみとせん断ひずみを用いて定義したひずみ増分比

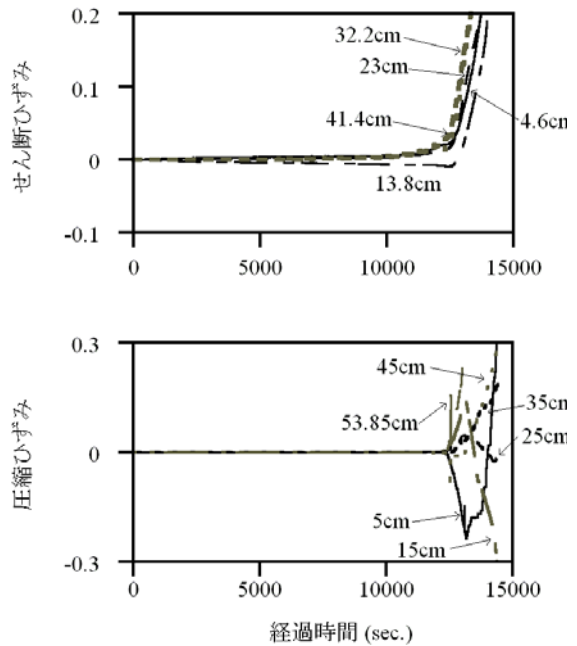


図-4 せん断ひずみと圧縮ひずみの経時変化

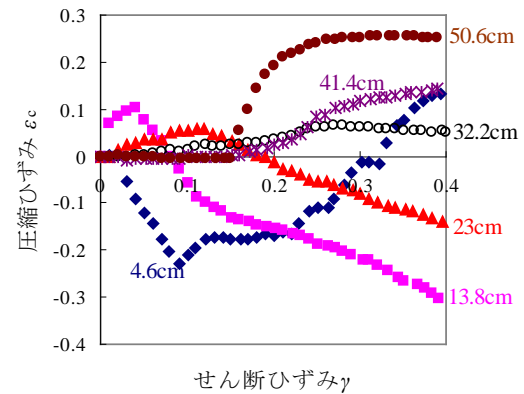


図-5 斜面内のせん断ひずみと圧縮ひずみ

は、斜面内の応力状態を表す指標となり、斜面崩壊の発生予測に用いることができることが示唆された。

##### (2) 切り土による砂質斜面変形実験

切り土中の模型斜面のせん断ひずみの経時変化を図-6に示す。図中の凡例の数値は深さ、その後のFは模型内の前列、Bは後列の意味である。つまり25mm-Fというとき模型斜面前列の深さ25mmという意味である。図中の矢印は切り土施工のタイミングである。これを見ると切り土施工時にせん断ひずみは増加するが、深い箇所ほどそれが著しい。しかし切り土施工時のみならず、切り土後もせん断ひずみが増加することもわかる。次に図-7に模型斜面中の鉛直方向の圧縮ひずみの経時変化を示す。こちらは切り土深さ100mm

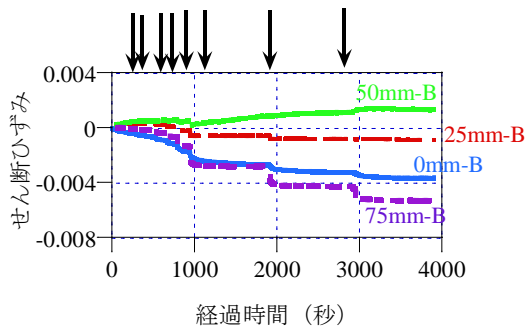
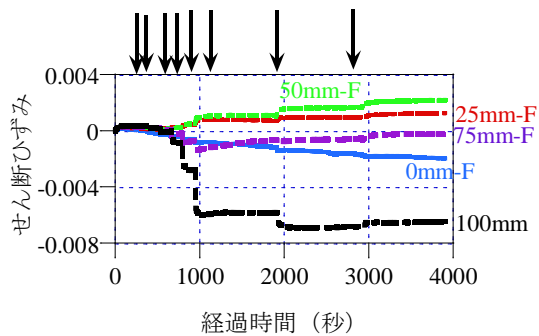


図-6 斜面内のせん断ひずみの経時変化

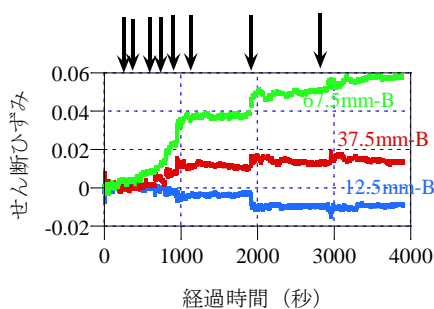
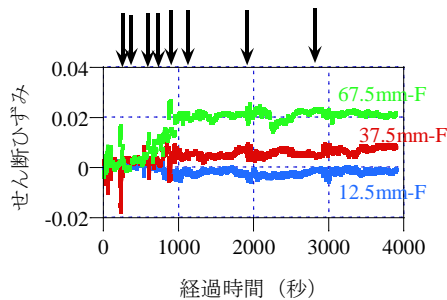


図-7 斜面内の圧縮ひずみの経時変化

(切り土回数6回目)までは大きく増加する。切り土時のみならずその後も増加する。そしてその後の変動はあるものの、圧縮ひずみの増加は小さい。ただし67.5m-Fのみは圧縮ひずみが漸増することがわかる。

最後に模型斜面内の後列の、同位置かつ同位置深度におけるせん断ひずみと圧縮ひず

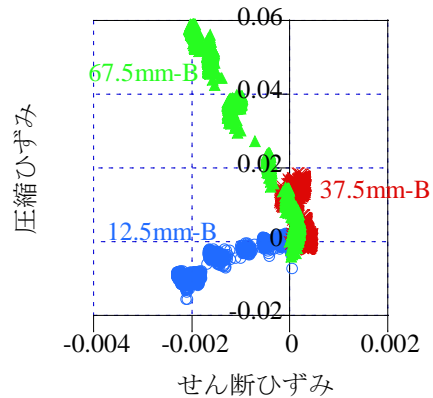


図-8 斜面内のせん断ひずみと圧縮ひずみの関係

みの関係を 図-8 に示す。深さ 37.5mm ではせん断および圧縮ひずみが小さくてそれらの関係は不明瞭であるが、12.5mm および 67.5mm では両者の間には線形関係が認められる。つまり切り土に伴う模型斜面の変形は、水平方向のせん断ひずみと鉛直方向の圧縮ひずみが線形に進行する、ということである。ただしこれはせん断ひずみが高々0.002 であり、変形の小さな領域での関係であることを忘れてはならない。破壊に近い大きな領域の変形、そして破壊直前の変形については今後、模型斜面を破壊させる実験条件の下での検討が必要である。

### 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9件)

① K.Sasahara & N.Sakai: Shear strain development and pore pressure distribution in sandy model slope under repeated rainfall, Advances in transportation Geotechnics II (PROCEEDINGS OF THE 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPORTATION GEOTECHNICS (2ND ICTG), HOKKAIDO, JAPAN, 10-12 SEPTEMBER 2012) - Miura et al. (eds), 査読有, 2012 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-62135-9, pp. 743~748, 2012.

② 笹原克夫, 酒井直樹: 不飽和砂質斜面の降雨浸透による吸水に伴うせん断変形, 日本地すべり学会誌, 査読有, Vol. 49, No. 4, pp. 25~33, 2012.

③ Sasahara K. and Sakai N.: Shear Deformation Development and the Increase of Pore Pressure due to Rainfall Infiltration in Sandy Model Slope under Different Inclination, Int. J. of GEOMAT,

査読有, Vol. 1, No. 1 (Sl. No. 1), pp., 64-70, Oct. 2011.

④ Naoki SAKAI, Katsuo SASAHARA, Tomohiro ISHIZAWA and Teruki FUKUZONO: Shear deformation mechanism of unsaturated soil during rainfall infiltration based on slope model test, Proceeding of International Symposium on Sediment Disasters under the Influence of Climate Chang and Tectonic Activity, 査読有, pp.18-19, 2011.

〔学会発表〕(計13件)

① Katsuo SASAHARA & Naoki SAKAI: Stress-strain relation for early warning system against rainfall-induced landslide, Proceeding of The 3rd International Workshop on Multimodal Sediment Disasters-Challenge to Huge Sediment Disaster Mitigation-, 2012年9月22~26日, 京都大学防災研究所穂高観測所(岐阜県高山市)

② 笹原克夫: 降雨の浸透に伴う斜面表層のせん断変形予測, (社)日本地すべり学会関西支部シンポジウム「表層崩壊予測の可能性」, 2012年4月16日, 大阪建設交流館(大阪市).

③ 伊藤和也他: 施工中の斜面崩壊による労働災害防止のためのモニタリングに関する実地観測, 平成24年度砂防学会研究発表会, 2012年5月23~24日. 高知県立県民文化ホール他(高知市)

④ 笹原克夫, 酒井直樹: 降雨浸透に伴う砂質模型斜面の吸水・排水過程におけるせん断変形, 第46回地盤工学研究発表会, 2011年7月5~7日, 神戸国際会議場(神戸市)

⑤ 石澤友浩, 笹原克夫, 酒井直樹, 福囿輝旗: 降雨履歴が湿潤線降下に伴う斜面変形挙動に与える影響, 平成23年度砂防学会研究発表会, 2011年5月18~19日, 神奈川県民文化ホール(横浜市).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

笹原 克夫 (KATSUO SASAHARA)  
高知大学・教育研究部自然科学系・教授  
研究者番号: 90391622

### (2) 研究分担者

酒井 直樹 (NAOKI SAKAI)  
独立行政法人防災科学技術研究所・観測・  
予測研究領域・主任研究員  
研究者番号: 40414990

伊藤 和也 (KAZUYA ITOH)  
独立行政法人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: 80371095