

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420479

研究課題名(和文)多機能型地盤調査ツールの開発と常時微動観測を組み合わせた地盤内情報化手法の構築

研究課題名(英文) Development of an in-situ soil testing tool and its application to geotechnical/geological modelling by combined use of a microtremor observation

研究代表者

小林 泰三 (Kobayashi, Taizo)

福井大学・学術研究院工学系部門・准教授

研究者番号：10380578

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、近年多発する地盤災害の予測・防災・減災に資することを目的に、斜面崩壊の危険度や谷埋め盛土宅地等の安定性を合理的に診断し、対応策の検討に貢献することのできる地盤調査手法を構築した。具体的には、1)小口径のボアホールを対象とした孔内直接せん断試験ツールを開発するとともに、2)面的な非破壊調査手法である「常時微動観測技術」によって潜在すべり面を推定する手法を提案した。

研究成果の概要(英文)：Geo-disasters such as landslides, slope failures and debris flows are becoming more frequent. In this study, we proposed two in-situ investigation techniques which could contribute to a rational evaluation of a slope/embankment stability. One is a small-diameter tool which provides in-situ soil strength parameters (cohesion and internal friction angle of soils). It is used in hand-dug boreholes and a Mohr-Coulomb failure line can be rapidly determined with respect to the borehole wall. The other is a method of the microtremor observation which estimates shape of a potential slip surface of a slope. Laboratory and field experiments were performed to assess the validity and usability of the techniques. The test results indicate that the proposed methods are promising tools for simple and rapid in-situ measurements of slope investigations.

研究分野：地盤工学

キーワード：斜面崩壊 地盤調査 せん断試験 常時微動観測

1. 研究開始当初の背景

近年、これまで想定してこなかったような地震や豪雨が多発する中、土砂災害のニュースは後を絶たず、その防災対策が大きな課題となっている。現象論としての土砂崩壊メカニズム解明や崩壊シミュレーション技術が発展する一方で、斜面の危険度予測の実態は、斜面形状による基準（土砂災害警戒区域等の指定）や雨量指標（危険雨量規準）に基づくものが多く、「崩壊・すべり」を支配する土の力学特性が合理的に反映される実用的予知手法は確立されていない。その主な原因のひとつとして、自然斜面や盛土等の傾斜地においても簡単に実施することができ、かつ、安定解析に合理的に取り込めるような力学的データ/地質構造を取得できる調査技術が確立されていないことが考えられる。

原位置調査法として標準貫入試験やコーン貫入試験などのサウンディングが行われることが多いが、試験が大掛かりになることが多く、また、土質パラメータを求めるという観点では、経験式や理論式を介した間接的推定値が得られるに過ぎない。また、近年では、斜面の動態をモニタリングする技術の開発も見られるが、これらはセンサー類の常設設置によって斜面の経時的変化（地盤内水分変化や亀裂の進行具合など）を捉えようとするものであり、斜面の潜在的危険性を診断しようとするものではない。このように、力学的な根拠に基づいた斜面危険度診断を合理的に行うことのできる斜面調査技術は発展途上の段階にあるのが現状と言える。自然外力変化や経年劣化による地盤災害リスクの増大、土構造物の大規模化・複雑化に伴う設計・維持管理技術の高度化などを背景に、今後、土質パラメータや地盤の内部構造を簡便に求めることのできる地盤調査技術のニーズは高まっていくと考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、近年多発する地盤災害の予測・防災・減災に資することを目的に、斜面崩壊の危険度や谷埋め盛土宅地等の安定性を合理的に診断し、対応策の検討に貢献することのできる地盤調査手法を構築することを目指す。具体的には、次の2つの要素技術を確立し、これらを組み合わせた地盤調査技術を提案する。

(1)孔内せん断試験ツールの開発：斜面や盛土の安定解析を行う上で必要となる地盤の強度定数（粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ ）を原位置で簡便に計測するための試験ツールを開発する。予めポータブルドリルや単管パイプの打ち込みで削孔した小口径のボアホールにせん断プローブを挿入し、孔壁に対してせん断部を所定の圧力で拡張・圧着した状態で引き上げ、孔壁で摩擦・せん断試験を行おうとするものである（図-1）。せん断面に作用する水平載荷応力とせん断応力を測定することによって地盤の強度定数を求める。

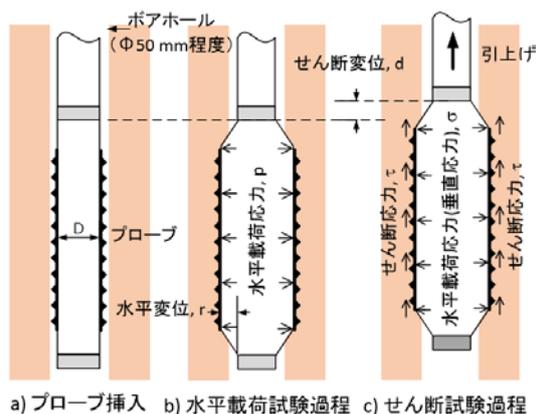


図-1 孔内せん断試験の原理・プロセス



図-2 開発した孔内せん断試験プローブ

(2)常時微動観測による潜在すべり面の推定手法の確立：すべり面の形状は斜面の安定性に大きく影響するが、それを簡便かつ正確に推定する手法は開発途上の段階にある。ここでは、面的な非破壊探査法の一つである常時微動観測に着目し、すべり面となる可能性の高い地質的不連続面（岩盤-風化層境界、岩盤-堆積物境界など）を検出する手法の確立を目指す。

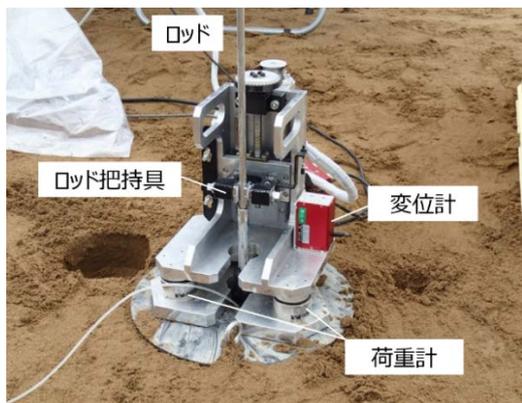
3. 研究の方法

本研究では、上述した2項目の要素技術の確立に向けて、以下に示す機器開発と実証実験等を行った。

(1)孔内せん断試験ツールの開発と実証実験

本研究では、図-2に示すせん断試験プローブ（以下、プローブと称す）を試作開発し、室内および実斜面において実証実験を実施した。試作したプローブの直径は50 mm（収縮時）、全長は588 mm（うち中央100 mm区間がせん断部）であり、せん断部には、ピッチ3 mmのネジ山加工が施されている。プローブの円筒鋼材には縦スリットが入っており、内部のゴム管を介して水圧で半径方向に拡張する仕組みとなっている。

試験の全体システムは、引上げ装置、プローブ加圧装置、引上げ制御装置、データ収録装置（データロガー、ノートPC）から構成



(a) 引上げ装置



(b) 計測・制御装置

図-3 試験システム

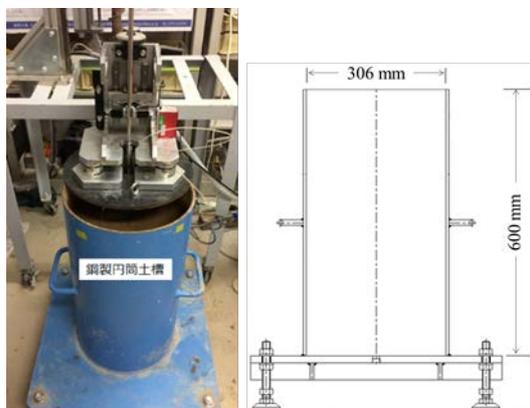


図-4 室内実験証鋼製円筒土槽

される(図-3)。図-3(a)に示す引上げ装置は、ロッドを強固に把持して一定速度で引上げる機能(電動駆動)を有しており、同装置に設置された荷重計と変位計によって引上げ力(せん断応力 τ に変換される)と引上げ変位量(せん断変位量 d に変換される)が計測される。プローブの拡張・収縮は、地上に設置した加圧装置(図(b))を用いて、チューブを通じて水を送り込むことによって実現する。加圧はピストン機構を手動制御する仕組みとし、同装置に設置された変位計と水圧計によってピストンの押し込み量(プローブ半径方向変位量 r に換算される)とピストン内圧

力(水平載荷圧応力 σ に換算される)を計測する。

本研究では、開発ツールのせん断試験装置としての機能や性能を評価するために、図-4に示す円筒土槽を用いた室内実証実験を行った。加えて、試験システムの実運用性を評価するために、福井市内の砂質盛土斜面を対象にした野外実証実験も行った。

破壊線を描いて強度定数(c 、 ϕ)を精度よく求めるためには、せん断試験を異なる載荷圧条件で複数回実施することが必要である。本研究では、1本のボアホールに対して、載荷・引上げを継続・連続的に行う試験(連続試験と呼ぶ)と、試験ごとにボアホールを削孔し、毎回フレッシュな孔壁面で試験を行う方法(単独試験と呼ぶ)の2種類の方法で実施した。連続試験は、単独試験に比べて削孔本数が少なく済み、また試験ポイントの土質の同一性が確保できるが、載荷・引き上げを同一の孔壁に対して連続的に行うため、先行するせん断による土の乱れの影響を受ける。一方、単独試験は土の乱れの影響がなくなるが、削孔本数が多くなるとともに、試験ポイントの土質の同一性を確保することが難しくなるというトレードオフが想定される。なお、本実験では、室内実験、野外実験ともにハンドドリルで削孔した直径54 mmのボアホールを対象に、地表面から約400 mmの深度で試験を実施した。今回は浅い深度で試験を実施したが、プローブのロッドを延長することでさらに深い深度での試験も可能となる。

(2) 常時微動観測による潜在すべり面の推定に関する現場実証実験

常時微動観測は、水平成層する地下構造の推定に多く用いられている探査法であるが、自然斜面や盛土のように地層構造が傾斜し、不整形でかつ比較的浅い構造の推定を試みた事例はあまり見られない。本研究では、表層崩壊の発生する危険性のある京都府内の急傾斜地を対象に、常時微動観測による潜在すべり面の推定を目的とした現場実証実験を実施した。表層崩壊では、表土層(風化層あるいは崩積土)と基岩層の境界面がすべり面になることが多い。本研究では、これを有力な潜在すべり面と考え、常時微動観測によって表土と基岩の境界面(断面形状)の推定を目指す。

本実験では、4台の地震計を用いて以下の流れで観測を行った。

- ① 直線アレイ観測に基づく表土層のS波速度推定：斜面中腹に4点の地震計を直線状に配置したアレイ観測を実施し、表土層のS波速度(斜面を構成する表土の代表値と考える)を推定する。アレイ半径は、0.5~2.37 mとした。
- ② 単点(多点)計測による表土層厚の推定：斜面の測線(直線)上に地震計を4点設置し、各点における表土の層厚(潜在す



図-5 斜面カップリング治具を取付けた地震計



図-6 多点観測の様子（盛土斜面）

べり面まですべり面までの深さ)を推定する。表層地盤の1次固有周期 f は次式に示す「1/4波長則」に従うことが知られている。

$$f = 4H/V_s \quad (1)$$

ここに、 H : 堆積層厚、 V_s : S波速度である。ここでは、①の直線アレイ観測で得られた V_s と②の単点計測で得られた卓越周期 f を用いて(1)式から H を求めた。

なお、傾斜面に地震計を水平に設置するにあたり、地震計にネジ式の調整治具を取りつけた(図-5)。ネジの先端を斜面に直接貫入させ、地盤と地震計のカップリングを確保した。図-6に単点(多点)計測を実施しているときの様子を捉えた写真を示す。

4. 研究成果

(1) 孔内せん断試験ツール

試作した孔内せん断試験ツールの実証実験結果の一例として、砂質試料(含水した珪砂)を対象とする室内実験で得られたせん断変位-せん断応力図を図-7に示す。この図より、小刻みな変動は認められるものの、一面せん断試験等と同等の試験データが取得できることが確認できる。

図-8は、孔内せん断試験と別途実施した一面せん断試験で得られた内部摩擦角を比較したものである。この図から、孔内せん断試験の結果と一面せん断試験の結果が良く一致していることが分かる。連続試験と単独試験を比較してみると、野外及び室内のいずれの試料についても大きな差異は見られな

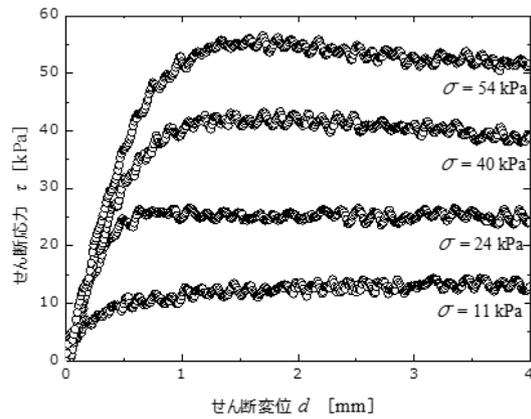


図-7 せん断変位-せん断応力図の一例

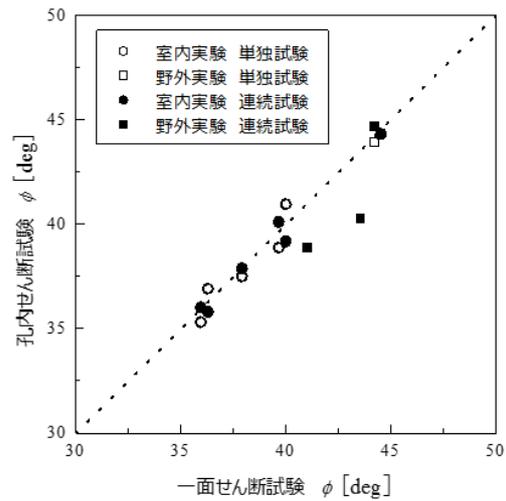


図-8 内部摩擦角 ϕ の比較

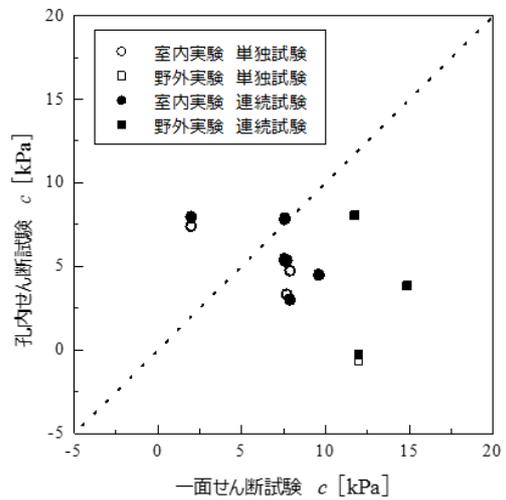


図-9 粘着力 c の比較

いようである。図-9は同様に、粘着力について比較したものである。この図では、孔内せん断試験は一面せん断試験に比べて粘着力を過小評価する傾向があり、良い一致が見られなかった。本実験では、砂質土を対象に試験を行ったが、削孔時の後壁の乱れなどが影響して見かけの粘着力成分が低下してしまった可能性がある。今後は、対象を粘性土地盤にも広げ、削孔法やせん断速度の影響を含めた検証データを蓄積していきたい。

(2) 常時微動観測

常時微動観測の実証実験結果の一例として、直線アレイ観測で得られた H/V スペクトル比を図-10 に示す。これは、過去の表層崩壊の崩積土によって腹付けされた盛土を対象に計測した結果である。この H/V スペクトル比に基づいて解析を行った結果、観測対象盛土（表土）の S 波速度は約 104 m/s となった。近傍で動的コーン貫入試験を実施したところ表土層は $N_d = 2$ 程度であった。 N_d と標準貫入試験の N 値が等価であると仮定して、道路橋示方書に定められている換算式： $V_s = 80 N^{1/3}$ （砂質土： $1 \leq N \leq 50$ ）で S 波速度を換算すると、 $V_s = 100.8 \text{ m/s}$ となり、常時微動観測で得られた値と良く一致した。

また、同現場において 4 点の単点計測を実施し、表土層（崩積土層）の層厚を推定した結果を図-11(a)に示す。同図(b)は、盛土のすぐ近傍の自然斜面を対象に同様の観測を行った結果である。図(a)の盛土では、法肩と中段では表土が 2 m 程度厚く堆積していることを示す結果を得た。図中に示すように、盛土の上方には、近年の表層崩壊によって基盤岩が露出していた。推定境界面が基盤岩の延長線上にほぼ一致することから、本推定に妥当性があることが推察される。図(b)の自然斜面においては、1~2 m 程度の表土が堆積していることを示す結果を得た。同斜面では、別途、簡易動的コーン貫入試験を行っており、地表から 0.5~2.75 m の深度範囲で基岩が分布していることが推察されている。常時微動観測と簡易動的コーン貫入試験の測点が必要しも一致しておらず、測点毎の正確な比較は困難であるが、両者の推定深度はおおよそ一致しており、常時微動観測による表土-基岩境界面の推定が可能となることを示す結果が得られたと考えている。

以上の通り、本研究では、簡便に原位置の強度定数を取得するためのポータブル式小型孔内せん断試験ツールを開発するとともに、すべり面となる可能性の高い地質的不連続面を検出するための常時微動観測技術を検証した。両者を組み合わせることにより、地質・地層構造と力学特性をリンクさせて評価することが可能となり、安定解析の合理化に大いに貢献できると考えている。今後は、フィールドにおけるデータ蓄積を進め、本研究で判明した課題の解決を図るとともに、提案手法を用いた斜面等の危険度診断システムの構築や盛土等の品質管理・維持管理手法の合理化に向けた応用研究を進めていきたいと考えている。

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）

〔学会発表〕（計 3 件）

① 志鷹伸太郎、小林泰三、平野圭都、佐々

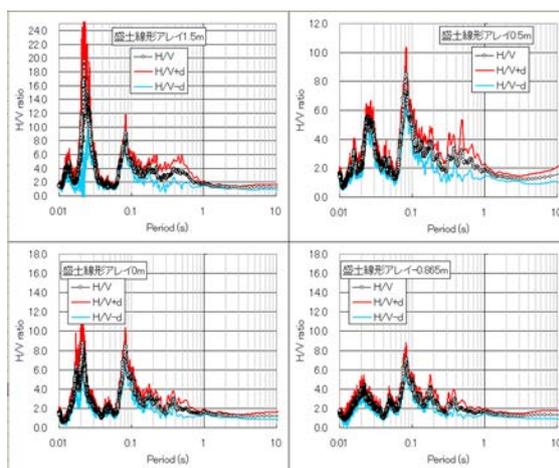


図-10 観測で得られた H/V スペクトル比

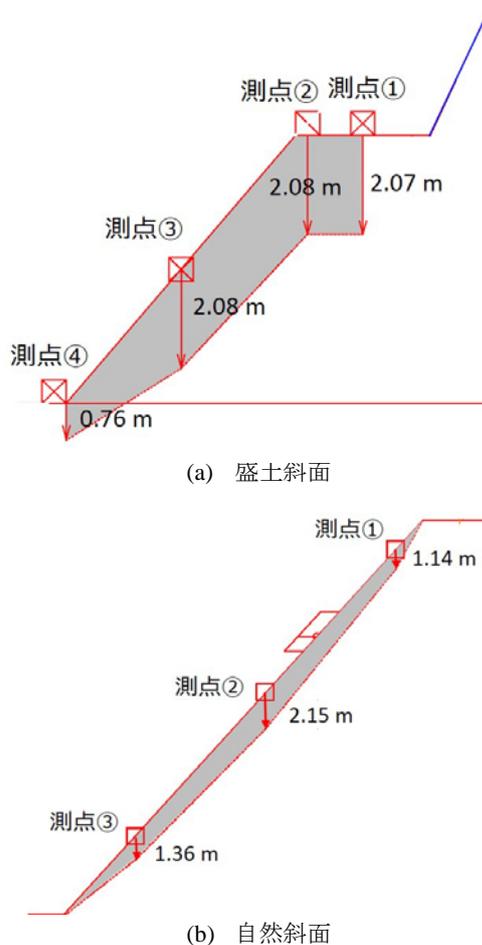


図-11 表土層厚（潜在すべり面）の推定図

木峻之、ポータブル式小型孔内せん断試験装置の開発、第 52 回地盤工学会発表会、2017 年 7 月、名古屋。

- ② 志鷹伸太郎、小林泰三、平野圭都、佐々木峻之、斜面や狭隘地でも利用できる小型孔内せん断試験装置の開発、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論文集、pp. 163-166、地盤工学会関西支部、2016 年、大阪。

③ 小林泰三、重本誉幸、安定解析に基づく

斜面崩壊メカニズムの検討、第 50 回地
盤工学会研究発表会、2015 年 9 月、札幌.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 泰三 (Kobayashi, Taizo)
福井大学・学術研究院工学系部門・准教授
研究者番号：10380578

(2) 連携研究者

小嶋 啓介 (Kojima, Keisuke)
福井大学・学術研究院工学系部門・教授
研究者番号：40205381