

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560591

研究課題名(和文)地震地すべりにおける層理面の動力学特性評価と滑動変位算定法の開発

研究課題名(英文)Evaluation of dynamic mechanical property of bedding plane and development for estimating sliding displacement in earthquake-induced landslide

研究代表者

鈴木 素之(Suzuki, Motoyuki)

山口大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：00304494

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円、(間接経費) 1,080,000円

研究成果の概要(和文)：層理面で発生する地震地すべりを引き起こす強度不連続面の破壊プロセスやメカニズムは明らかになされていない。そこで、本研究は層理面のような強度不連続面を有す供試体の動的せん断挙動や強度特性の解明を目的とした。非固結土あるいは固結土の単層供試体、およびそれらを貼り合わせた二層供試体に対して圧密定体積繰返し載荷リングせん断試験を実施し、試験結果に基づいて破壊に至るまでの繰返しせん断挙動と強度特性を考察した。主要な結論として、貼り合わせ供試体が固結土あるいは非固結土の単層供試体よりも低い動的強度を示すことが分かった。

研究成果の概要(英文)：The failure process and mechanism of a bedding plane resulting from an earthquake-induced landslide have been not understood. This study aimed for clarifying dynamic behavior and strength property of specimen having a strength discontinuous plane such as bedding plane. The developed cyclic loading ring shear tests were carried out with mono layer specimens with either non-cemented or cemented samples, and with a laminated layer specimen consisting of non-cemented and cemented samples under a constant volume condition. The cyclic shear behavior and strength for these specimens to reach a failure state were examined based on the test results. As a result, the laminated layer specimen showed lower cyclic shear strength as compared with the other specimens.

研究分野：自然災害科学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：リングせん断 繰返し載荷 不連続面 繰返し載荷 残留強度 固結

1. 研究開始当初の背景

地震時に発生する地すべりは、降雨や融雪に起因する地すべりとは異なり、地震動が誘因となって地震動の継続中もしくは終了後に発生する地すべりである。地震時の地すべりは強度や透水性が不連続となる層理面をすべり面として発生するケースがある。

岩手・宮城内陸地震では、山間部で大規模な地すべりが発生した。荒砥沢地すべりでは、砂岩・シルト岩互層ですべりが発生し、土塊は一瞬のうちに 300m 移動し、貯水池に突入した。幸い人的被害は出なかったものの、地震時に発生する地すべりの規模や影響範囲の大きさが認識された。また、中越地震のときには、神沢川地すべりにおいて、砂岩・泥岩互層の基盤岩とその上層との境界面で初生的な大規模地すべりが発生した。

これらの崩壊の誘因としては、強度が異なる地層の境界面（層理面）で、地震動による繰返しせん断によって、強度の相対的に弱い地層が強度低下を生じ、滑動を開始したとみられる。したがって、地震地すべりの安定性は、粘土層の既存すべり面で発揮されるピーク強さや残留強さでは適切に評価することはできない。すなわち、砂岩・泥岩互層のような地層境界面でのピーク強さをを用いる必要があり、地震時あるいは地震後の滑動時の条件で決定した強度パラメータが重要となる。しかし、従来の研究では層理面の動的せん断挙動や強度特性はどのようなものであるかは全く明らかになっていない。

そこで、本研究では層理面の動力学特性の解明を主な目的として、単調および繰返し載荷式のリングせん断試験機を用いて、物性や強度が異なる土を貼り合わせた供試体に対して、繰返し載荷および急速せん断試験を実施し、層理面の破壊プロセスや動的強度特性を検討した。

本研究の意義として、上記の層理面の動力学特性が明らかになれば、地震時にすべりを起こす地層の力学的な条件が明確になり、地震地すべりの危険性を有す地層評価が可能になる。また、層理面の動的強度を明らかにできれば、ニューマーク法を用いて、地震時の滑動変位を算出し、崩壊到達距離の予測が行え、有効な防災対策の立案につながる。今後も、内陸部での地震は続く予想されることから、地震地すべりに関与する層理面の工学的評価について、早急に研究に着手する必要があると考えた。

2. 研究の目的

前述のように、地震で発生する地すべりは規模が大きく、しかも移動量と移動速度が大きい。地震地すべりは、降雨や融雪とは異なり、砂岩層と泥岩層が交互に重なり合うような、地層境界面で新規のすべり面を形成して発生したことから、地震時の層理面の工学的評価が非常に重要になっている。本研究では、層理面となる強度不連続面が動的載荷を受

けた時のせん断強さ特性を調べ、それをもとにニューマーク法による強度不連続面の滑動変位の計算方法を検討した。

3. 研究の方法

本研究では、新規開発した圧密定体積繰返し載荷リングせん断試験装置（写真-1）を用いて、層理面となる強度不連続面を模擬した固結強度が異なる粘土を貼り合わせた供試体を作成し、固結土と非固結土の貼り合せ供試体の繰返しせん断特性を調べた。そして、試験結果に基づいて、非固結土供試体、固結土供試体および貼り合わせた供試体の破壊に至るまでの繰返しせん断挙動、また破壊時のせん断応力比と破壊に至るまでの繰返し回数について考察した。また、別途実施した圧密定圧単調載荷リングせん断試験の結果に基づいて、単調せん断挙動と繰返しせん断挙動の関係を考察した。



写真-1 透視型繰返し載荷リングせん断試験装置

本研究で用いた試料はカオリンで、試料の物理的性質は土粒子の密度 $\rho_s=2.672\text{g}/\text{m}^3$ 、液性限界 $w_L=78.9\%$ 、塑性指数 37.5、粘土分含有率 90.2% である。非固結供試体の場合は、試料の含水比が液性限界の 2 倍となるように純水を加えて練り返し、予圧密した。予圧密終了後、カッターリングを用いて、トリミング法にて直径 15cm、高さ約 10cm の予圧密試料から外径 7cm、内径 4.2cm、高さ 2cm の環状供試体を切り出した。固結供試体の場合は、繰返し時にセメント系固化材を乾燥質量比率 2% 添加混合し、予圧密終了後 3 日間養生したもから供試体を切り出した。貼り合わせ供試体の場合は、非固結および固結土をそれぞれ外径 7cm、内径 4.2cm、高さ 1cm の環状に成形し、固結土を下部、非固結土を上部になるように貼り合わせて作成した。いずれの供試体も所定の圧密応力で 60 分間圧密した（3t 法により圧密の打切り時間を確認した）。圧密終了後、直ちに繰返しせん断を開始した。

本研究で開発した装置（写真-1）は、地震時の繰返し載荷を再現するため、リングせん断試験装置に定体積制御装置と繰返し載荷制御装置を追加したものであり、所定の圧密応力で圧密した後、定体積条件でせん断応力

を供試体の円周方向に所定の周波数で交互に反転させながら繰返しせん断を行うことができる。今回の実験では非固結供試体、固結供試体および貼り合わせ供試体に対して、垂直応力 $N=100、200、300\text{kPa}$ の下、載荷せん断応力を正弦波（周波数 0.5Hz ）で変化させた。

4. 研究成果

図-1 に固結、非固結および貼り合わせの各供試体のせん断応力、垂直応力 N 、せん断変位、垂直変位の時刻歴を示す。図中の A は載荷せん断応力の振幅である。 N_0 は初期垂直応力（圧密応力）である。各供試体はいずれも、せん断開始直後に負の領域で変動しているが、徐々に振幅が一定となっている。せん断中常に $0.01\sim 0.03\text{mm}$ であり、ほぼ定体積条件を保っている。また、 N はせん断の進行とともに漸減し、その後一定となっている。このことは、供試体は正規圧密状態にあることから、せん断に伴って供試体が負のダイレイタンスを示すことと整合する。 A の振幅はせん断中徐々に大きくなっており、その後一定となる。また、せん断は負の方向に進行しており、すべての供試体において同様の挙動が見られたが、その進行速度は供試体ごとに異なっていた。

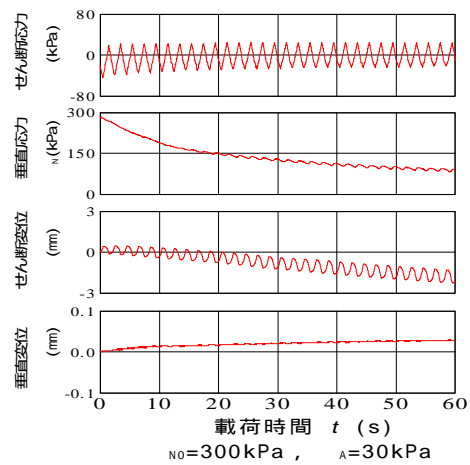


図-1 (上)非固結供試体、(中)固結供試体、(下)貼り合わせ供試体の定体積繰返しせん断挙動

図-2、図-3 にそれぞれ $N_0=300、200\text{kPa}$ における非固結、固結および貼り合わせの各供試体の繰返しせん断応力比 A/N と破壊時の繰返し回数 N_f の関係を示している。図-1 において $\Delta = -1\text{mm}$ （累積せん断変位が約 20mm に相当）において N の減少程度がほぼ一定となっていることから、本試験では $\Delta = -1\text{mm}$ に到達した時点をもせん断破壊と定義した（貼り合わせ供試体においても同様の基準を適用した）。両図から、貼り合わせ、非固結、固結供試体の順に、 $N_f \sim A/N$ 曲線は上方になることがわかる。このことから、同じ N_0 の条件では貼り合わせ供試体すなわち強度不連続面を有す供試体の繰返しせん断強度がもっとも低く、その次に非固結供試体、固結力を与えた固結供試体の順に繰返しせん断強度は大きくなり、同じ応力比では破壊に達する繰返し回数が長くなる結果となった。また、 N_0 が大きいほど繰返しせん断応力比 \sim 繰返し回数曲線は下位になり、繰返しせん断強度が低くなることもわかった。

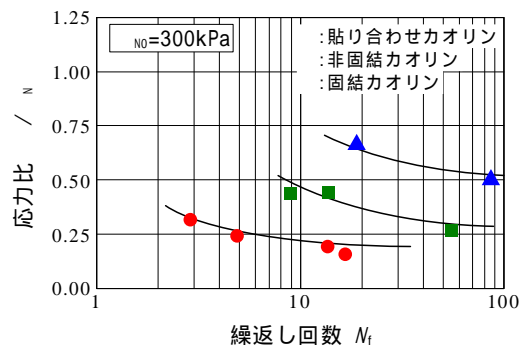
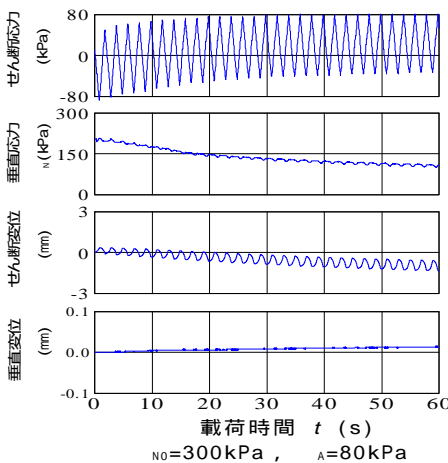
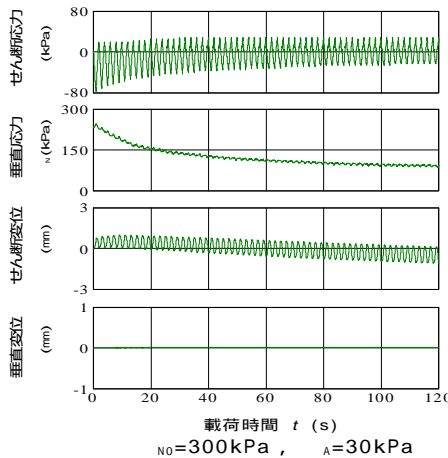


図-2 各試料のせん断応力比と破壊時の繰返し回数の関係 ($N_0=300\text{kPa}$)

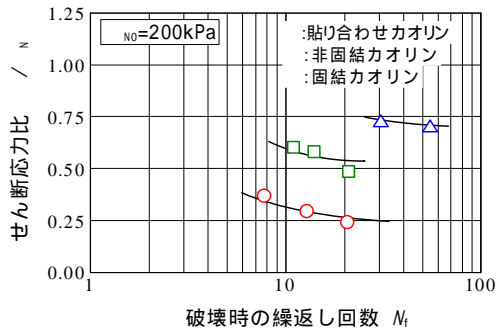


図-3 各試料のせん断応力比と破壊時の繰返し回数の関係 ($N_0=200\text{kPa}$)

図-4 に固結供試体の定体積繰返し載荷せん断試験から得られた応力経路と別途試験で決定したピーク時および残留状態強度線を示す。図中の矢印は各供試体の応力経路がピーク時強度線に達した時点を示している。固結土供試体の場合、応力経路は正と負の両領域のピーク時強度線に到達していることがわかる。ただし、 $N_0=300\text{kPa}$ ($N_f=85.7$) の供試体は僅かであるが、強度線に達していない。図示していないが、非固結土供試体の場合においても $N_0=300\text{kPa}$ および N_f の大きい供試体がピーク時破壊線に達しなかった。このことから、比較的小さい N_f で、長時間繰返し載荷されることにより、垂直応力が著しく減少し、 τ/σ がピーク時強度線に近づき破壊に至ったものと考えられる。また、供試体によっては破壊基準の N_f よりも早い段階でピーク時強度線に達しているものがある。これは、ピーク時強度線に達した後、その強度線を辿って τ/σ が低下していることから、ピーク時強度線に達した時点で供試体の一部にクラックが入り、そこから徐々にせん断面が形成されると同時に、発揮されるせん断力も小さくなり、供試体全体の破壊に進展したと考えられる。

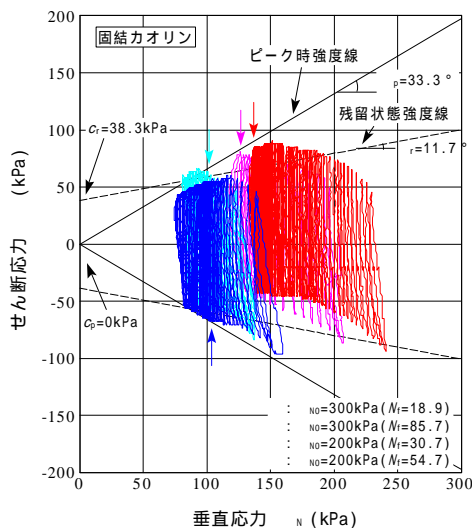


図-4 固結土供試体の応力経路と各強度線の関係

最後に本研究で得られた知見をまとめると、以下のとおりである。

(1) 各試料において、載荷せん断応力すなわち応力比の増加に伴い、破壊時の繰返し回数は小さくなる。

(2) 各試料において、初期垂直応力が大きい試料ほど繰返しせん断応力比～繰返し回数曲線は下位になり、繰返しせん断強度が低くなる。

(3) 貼り合わせ供試体、非固結土供試体、固結土供試体の順に繰返しせん断応力比～繰返し回数曲線は上方になり、同じ初期垂直応力条件では貼り合わせ供試体すなわち強度不連続面を有す試料の繰返しせん断強度は低く、破壊時の繰返し回数は小さくなる。

(4) 非固結および固結供試体の繰返しせん断時の応力経路は、別途実施したリングせん断試験から得られたピーク強度線に達して、繰返しせん断破壊が生じた。

(5) 上記の強度特性に基づくニューマーク法による不連続面の滑動変位の計算方法を考案することができた。

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 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

大谷直毅、鈴木素之、杉村尚樹、山本拓矢、層理面を模擬した強度不連続面の繰返しリングせん断挙動、第 49 回地盤工学会発表会、北九州国際会議場(北九州市)、2014 年 7 月 15 日(発表確定)

杉村尚樹、鈴木素之、透視型リングせん断試験装置の開発および砂と粘土のリングせん断特性、地盤工学会中国支部地盤工学セミナー報告会、岡山大学(岡山市)、2013 年 7 月 11 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 素之 (SUZUKI MOTOYUKI)

山口大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：00304494

(2) 研究分担者

梅崎 健夫 (UMEAKI TAKEO)

信州大学・工学部・准教授

研究者番号：50193933

梅村 順 (MEMURA JUN)

日本大学・工学部・講師

研究者番号：70256816