

# リングせん断試験機による強度測定と 大規模地すべり土塊の安定解析

川本 治\*・山田康晴\*・古谷 保\*

## 目 次

I 緒言	49	4 正規圧密試料を用いた大変形試験	58
II リングせん断試験機を用いた強度測定	50	5 試験結果の比較	59
III 高精度リングせん断試験機の機構及び特性	51	V 大規模地すべり採取試料の測定と安定解析	60
1 試験機の機構	51	1 対象とした地すべりと採取試料	60
2 試験機の特長	54	2 採取試料の強度測定	61
IV 測定法の検討	56	3 安定解析	62
1 測定に用いた試料	56	VI 結言	63
2 プレカット試料を用いた残留強度測定	56	参考文献	63
3 過圧密試料を用いた大変形試験	58	Summary	65

## I 緒 言

豪雨等による農地災害の防止等安全な地域社会の構築は、重要な課題となっている。本報告は以下に述べる二つの観点から、農地地すべりにおける土の強度及び破壊後（ピーク強度通過後）挙動測定の高精度化を目的としたものである。

第一は、広域防災対策技術の高精度化の視点である。昭和63年に北陸地域で着工された板倉農地保全事業（細谷，1992）を初めとして直轄地すべり対策事業が各地で進展した。これらにより、中山間・傾斜地域農地における広域的かつ抜本的な農地防災対策が行われたことに加え、今後の農地防災対策の高度化を考える上で有用な地盤情報を蓄積し、農地防災施設に関わる現行の設計手法を高度化する契機が与えられている。この中で通常の人工の土構造物では考慮されない長期的（排水）条件での大変形領域の土の破壊挙動を加味した応力・変形解析手法の高度化も今後望まれることの一つであり、高精度のリングせん断試験機を用いた測定によって得られる応力・変形データはそのための有用な情報を与えるものと考えられる。

第二は、中山間・傾斜地における農地地すべりの災害予防・防災管理技術高度化の視点である。農地防災の効果を高めるためには、農地における変状の早期発見や発生初期の対策など、被害拡大を抑えるための予防保全行

為を迅速に行うことが重要である。その実施にあたっては情報収集及び初期対策を迅速に行うため農地と密接な関連を持つ農村集落の参加が不可欠である。また、直轄地すべり対策事業はいくつかの事業所で完工しており、地すべり防止施設が機能を保全して防止効果を発揮するための維持管理が重要となり、行政主体が管理を担うだけでなく農村集落の参画が不可欠となっている。これら予防保全・防災管理を行うために必要な地盤情報は現時点では十分とは言えず、今後も蓄積を続ける必要がある。我が国の多くの地すべりは過去の地すべりの再活動であり、大変形後の土の強さである残留強度が斜面安定性評価のための地盤情報として重要であることから、リングせん断試験機によって得られる高精度の残留強度データは、住民が地すべりの早期発見等のために重点的に注意を行うべき場所の概定を行う場合の重要な情報を与えると考えられる。

本報告では、我が国の地すべりで測定結果が殆ど示されていない、Bishopらによる設計原型の高精度リングせん断試験機を用い、1993年及び2006年に発生した農地地すべり現地で採取された試料の測定・解析結果を示す。

最初にリングせん断試験機を用いた強度測定に関する既往の研究について概観した後に、測定に用いた高精度リングせん断試験機の概要と基本特性を示す。次に現地採取土からプレカット試料を作成して残留強度測定を行った結果を提示する。その後正規圧密試料、過圧密試料を用いた大変形試験（せん断変位120～140mm）を行って応力・変位関係を測定し、プレカット試料を用いた試験結果との比較を行う。最後に、2006年4月に山形県で発生した大舟木地すべりでの採取試料を用いて

\*農村総合研究部広域防災研究チーム

平成19年3月14日受理

キーワード：リングせん断試験、残留強度、応力変位関係、地すべり、安定解析

試験を実施し、実測せん断強度を用いた安定解析の結果を示す。

本報告の取りまとめに際し、東北農政局荒川隆嗣地質官、山形県農林水産部農村計画課北川栄主幹・渡部一之主幹、基礎地盤コンサルタンツ橋本勝課長から山形県大舟木地すべりの現地調査に関する御助力を戴いた。また、大舟木地すべりの平面図、安定解析断面図は山形県から提供を受けた資料に基づいて作成した。高精度リングせん断試験機の整備に関しては、英国 Wykeham Farrance 社の John Lamond 氏から貴重な情報を、株式会社共和技研の勝矢治光取締役、瀬戸井健一氏から御助力を戴いた。これらの皆様に深く御礼申し上げる。御指導・御鞭撻を賜った仲野良紀元岐阜大学教授、田中忠次東京大学教授に深く感謝の意を表す。

## II リングせん断試験機を用いた強度測定

Bishop ら (1971) は、自らが開発したリングせん断試験機についての記述を行うにあたり、Hvorslev (1939) が示したせん断試験の以下の4つの目的について言及している。

- a) ピークせん断強度の測定
- b) クリープ特性 (土粒子結合の状態変化を含む、ピーク強度到達前の低速塑性流動の特性)
- c) 破壊後のせん断強度の一時的または永久的な低下量の測定
- d) せん断力に起因する体積変化特性と応力 - ひずみ関係の測定

上記 a), b), d) の3点を測定する最良の試験法は三軸圧縮試験であるとし、上記 c) の測定に関してはリングせん断試験が最良の測定手段であるとしている。土の局所化破壊による強度低下を許容する場合、又は強度低下が避けられない場合には、上記 c) に関わる高精度測定は、信頼性のある地盤の安定性評価・防災対策の立案・検討を行う上で重要となる。Hvorslev (1939) によるせん断試験に関する研究は1930年代に淵源するが、1960年代の Skempton (1964) による再評価を経て、今日に至るもその有効性は失われていない。

Bishop ら (1971) は、上部プレート・供試体とせん断上箱の周面に発生する摩擦力を考慮してせん断面に作用する垂直荷重を精度良く評価するとともに、上下せん断箱のエッジ間距離 (ギャップ) を小さくした状態で土のせん断強度を測定できる高精度のリングせん断試験機を開発している。Lupini ら (1981) は、Bishop らが開発した試験機を用いた排水状態残留強度の測定結果について総括している。

中村ら (1978) はすべり面におけるせん断強度決定のための土質試験法について示す中で、猿供養寺地すべりの不攪乱試料を用いたプレカット試験を行っており、垂直荷重及びせん断速度を多段階としたリングせん断試験

の結果を示している。仲野 (1979) は泥岩の基本的性質についての総説において、完全軟化強度や残留強度と地すべりの関係について述べている。宜保ら (1981) は那覇市真地団地内地すべり性崩壊において、採取泥岩試料のリングせん断試験結果を示し、残留・ピーク強度特性の発生要因等の検討の後に、平均せん断強度定数の決定法について示している。宜保らは1970年代の後半から今日に至るまで、一貫して広範な残留強度測定に関する研究を行っている (例えば宜保 1979, 宜保・中村・佐々木 2003)。古谷 (1981, 1983) は残留強度の性質とその測定法について考察し、低速試験における強度回復等についての見解を述べている。その際に三軸圧縮試験、プレカット試料を用いた一面せん断試験結果を示すとともに、Bishop らによるリングせん断試験機の有効性について言及している。紀平 (1990) は、すべり面粘土の物理的・力学的性質について示す際に、リングせん断試験に於けるせん断面近傍での含水比分布について検討を行い、測定された残留強度と粘土分含有率、塑性指数との関係について、Skempton (1985), Voight (1972), 宜保 (1987), 中村 (1979) の研究結果を踏まえた検討を行っている。

谷田部ら (1989) は、リングせん断試験機を用いて破碎帯地すべり粘土の力学特性について検討している。福岡ら (1990)・佐々ら (1993) は、高速リングせん断試験機を用いて、砂質土・粘性土のせん断特性について示している。山崎ら (2000) は、実際のすべり面粘土と対比するために、高純度粘土鉱物のリングせん断試験を実施し、Kenney (1977) の研究結果等を踏まえて、イライト、クロライト、セリサイト、モンモリロナイト及びこれらの混合試料の残留強度と変成岩や第三紀層の泥岩を起源とするすべり面粘土との残留強度の対応関係について検討している。中村ら (2000) は地すべり土の強度回復と鉱物組成との関係について示している。岡田ら (2002) はリングせん断試験機を用いたせん断ゾーンにおける過剰間隙水圧発生ポテンシャルについて示している。眞弓ら (2003) は、現地にて含すべり面不攪乱試料の採取を行い、開発したすべり面せん断試験機 (一面せん断試験機) によるせん断強度とリングせん断試験の結果を対比している。

以上、我が国でのリングせん断試験に関しては、Bishop 型試験機の使用も含めて広範な研究成果の蓄積が行われている。しかし、リングせん断試験機のうちで最も高精度のものの一つと考えられる、Bishop らによる設計原型の試験機を用いて我が国の地すべり粘土を測定した結果は殆ど公表されていない。強度設計を基本とした現行の地すべり防止対策から応力・変形解析法に基づいた防災技術の高度化が望まれている現在、先に述べた試験機を用いて強度特性のみならず大変形領域 (三軸圧縮試験・一面せん断試験等の通常測定法で、通常寸法の供試体を用いた場合の変位限界を超過する変形領域を

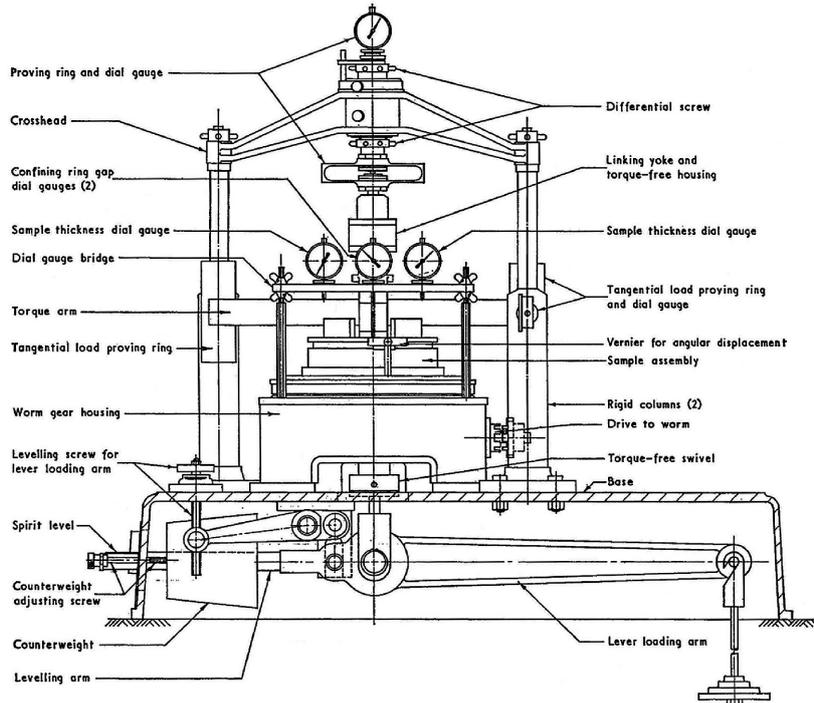


Fig.1 試験機の概要 (Bishopら原図)

General layout of ring shear apparatus (After Bishop et. al.)

本報告では大変形領域とし、変位量 30mm を超過する領域を言うものとする) における変形挙動を高精度に評価した結果を、我が国の農地地すべりで採取された試料を用いて示すことの意義は大きいと考える。

本報告では Bishop ら (1971) が開発した試験機原型をもとに、間隙水圧消散を加速させるために試料体厚さ設定を改良した高精度リング試験機を用い、Lupini ら (1981) の文献の中で Garga の方法として述べられている方法 (プレカット試料を用いた多段せん断速度測定) を基本とすることにより、得られた測定結果を通常試料 (過圧密試料・正規圧密試料) による大変形試験の結果と比較する。



Fig.2 リングせん断試験機全景

General view of a ring shear apparatus

### III 高精度リングせん断試験機の機構及び特性

#### 1 試験機の機構

試験機 (WF25800, Wykeham Farrance 社製) の概要は Fig.1.2 に示すとおりであり、基本枠 (台座・支柱・上部反力部材) に加えて 4 つの要素から構成される。第一は回転機構と回転台・ベースプレート、第二は垂直荷重載荷・伝達部、第三はせん断上箱とリンク機構、第四はせん断荷重測定部である。以下にそのそれぞれを概観する。

##### ○回転機構と回転台・ベースプレート

基本枠内の下部に収納されたモータの回転はウォームギアを介して伝達され、回転台を毎分  $0.0005^{\circ} \sim 50^{\circ}$  の速度で回転させる。回転台の上にはベースプレートを設

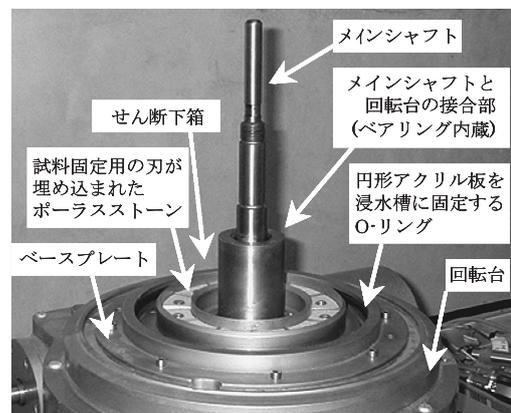


Fig.3 回転台に取付けられたベースプレート

Base plate attached to the rotating disc

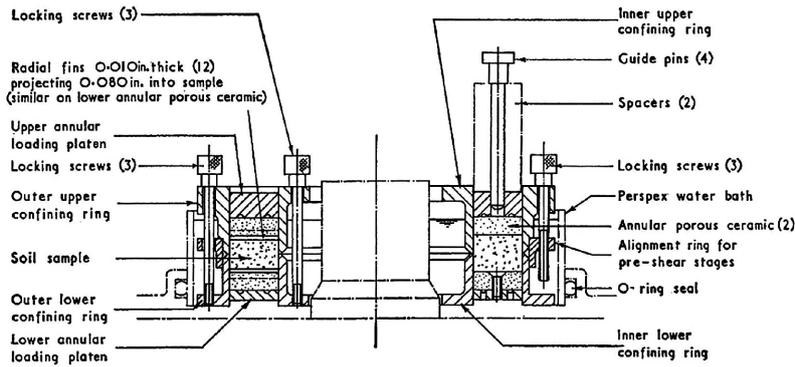


Fig.4 せん断箱の詳細 (Bishop 原図)

Details of lower and upper confining rings (After Bishop et. al.)

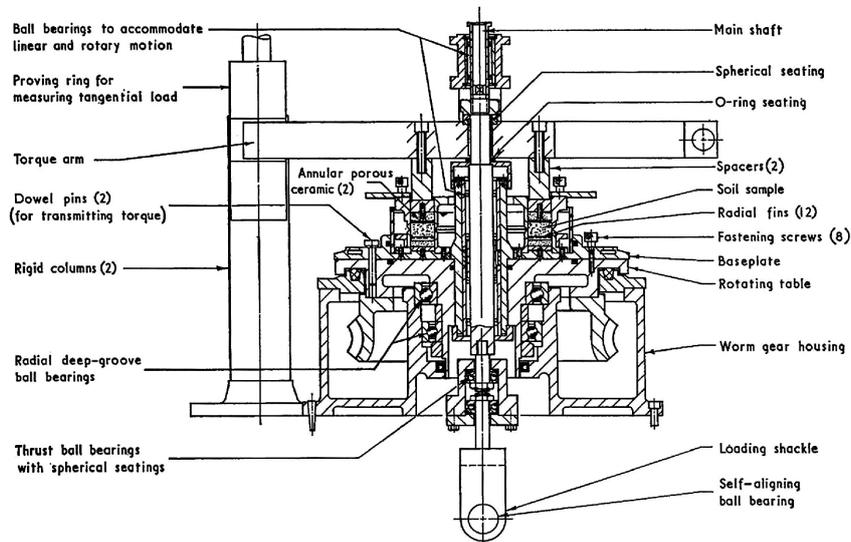


Fig.5 荷重伝達機構 (Bishop 原図)

Longitudinal section showing stress-transmission (After Bishop et. al.)

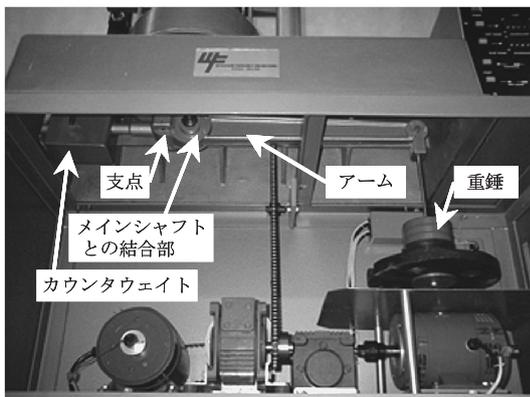


Fig.6 基本枠内側  
Inside the base frame

置し、ベースプレートの上側はせん断下箱であり、その外側にOリングを介し円筒アクリル板(水浸槽)を設置して供試体を水浸し、供試体の乾燥を防ぐ。供試体下面からの排水はポーラスストーンを通して水浸槽に排出さ

れ、ポーラスストーンには供試体接触面でのスリップを防ぐため12枚の刃が埋め込まれている (Fig.3)。せん断箱断面図は Fig.4 に示すとおりであり、せん断箱内の供試体内径(半径)は5.08cm、外径(半径)は7.62cmとなる。供試体の厚さ(供試体下面からせん断面までの高さ)は、Bishopらの設計では約1.0cmとなっているが、後述するプレカット試験での迅速測定を想定して、0.4、0.7、1.0cmの選択ができるように改良を行っている。

○垂直荷重・伝達部

垂直荷重・伝達部を Fig.5 に示す。基本枠内には重錘による固定荷重を10倍に拡大して供試体上面に作用させる支点とアームが収納されており (Fig.6)、メインシャフトの下部がアームに連結されている。メインシャフトは回転台の中央部を貫いて上方に伸びている。メインシャフトと回転台中央部は上下動及び回転自由のボールベアリングで接しており、せん断試験の際のせん断上箱の中心を設定するだけでなく、重錘荷重に対応して垂直方向に変位し、このシャフトにネジ止めされ

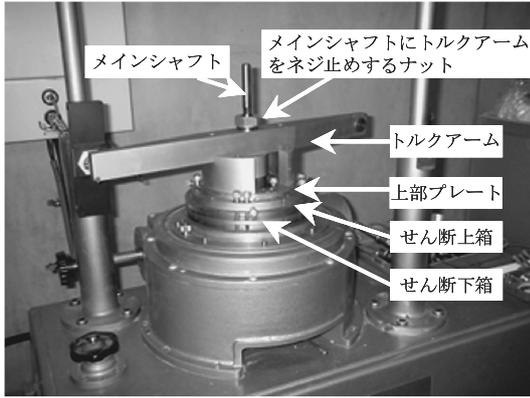


Fig.7 トルクアームで伝達される垂直荷重

Normal load transmitted by torque arm

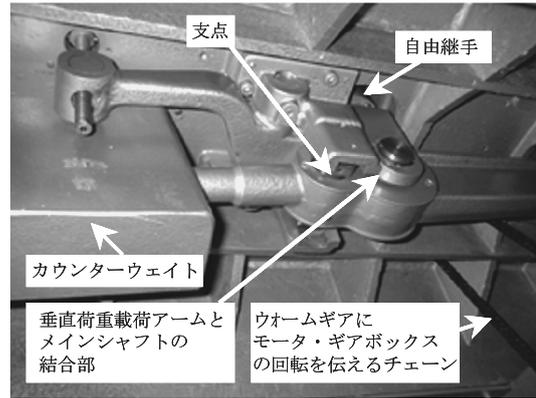


Fig.8 メインシャフト下方の自由継手

Torque-free swivel at the lower part of main shaft

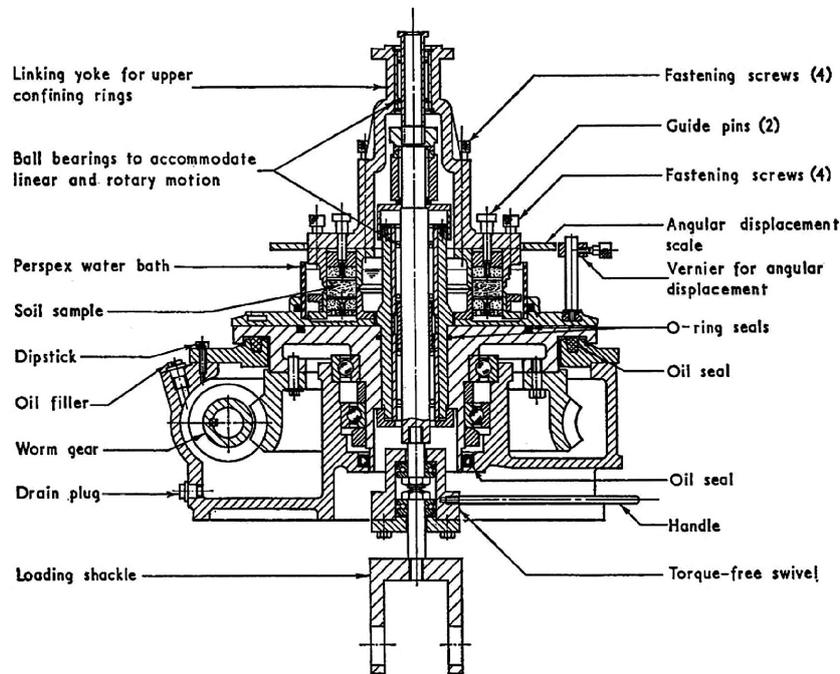


Fig.9 せん断上箱とリンク機構 (Bishopら原図)

Longitudinal section showing upper confining and linking yoke (After Bishop et. al.)

たトルクアームに垂直荷重を伝達する。トルクアームの下面は上部プレートに接しており、供試体上面に垂直荷重（圧密荷重）を伝える（Fig.7）。基本枠内部にあるアームとメインシャフトの結合部には自己調節型のボールベアリングに加えて自由継手（Fig.8）が使用されており、回転や曲げに起因する測定誤差を除去するよう配慮されている。

#### ○せん断上箱とリンク機構

本試験機は、供試体上面に垂直荷重（圧密荷重）を作用させるタイプであるため、供試体上面から加えられ、せん断面に作用する垂直荷重の評価が第一義的に重要になる。上部プレートの上面に作用する荷重のみでなく、上部プレート・供試体とせん断上箱の周面摩擦を考慮してせん断面に作用する垂直荷重を精度良く評価する必要

がある。そのため、せん断上箱の内輪と外輪はリンク機構（Linking yoke）にネジで結合され、回転及び上下動自由のボールベアリングを介してメインシャフトを内包する形式となっている（Fig.9）。リンク機構は、基本枠に設置された二本の支柱の上端に固定された上部反力部材（Rigid Crosshead）に結合され、せん断試験中は吊り状態に置かれる（Fig.10）。上部反力部材とリンク機構の間には荷重計が設置されて、上部反力部材に作用する垂直荷重が測定される。この垂直荷重を、重錘に起因する垂直荷重とその他の固定荷重との総和から差し引けば（負値の引張力を加えれば）、せん断面に作用する垂直荷重を精度良く評価できる（Fig.11）。

先に述べた基本枠内部のアームとメインシャフトの接合部と同様に、リンク機構・上部反力部材間に設置され

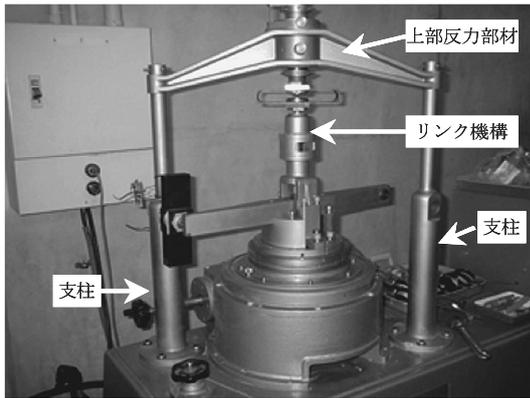


Fig.10 上部反力部材に結合されたリンク機構

Linking yoke connected to rigid crosshead

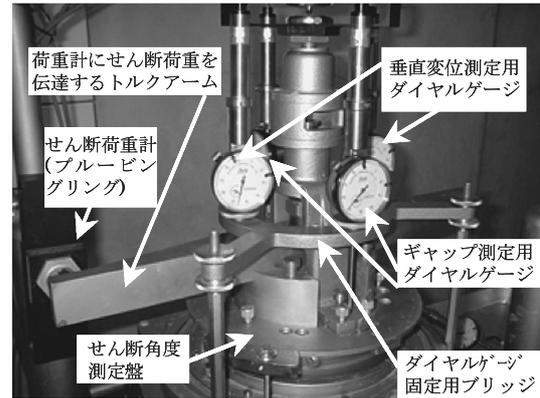


Fig.12 トルクアームで伝達されるせん断荷重

Shear load transmitted by torque arm

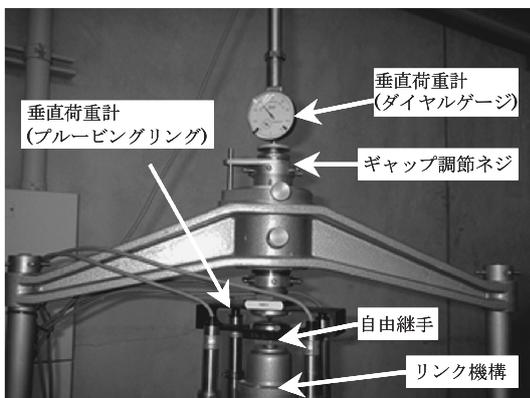


Fig.11 垂直荷重測定部

Component for normal load measurement

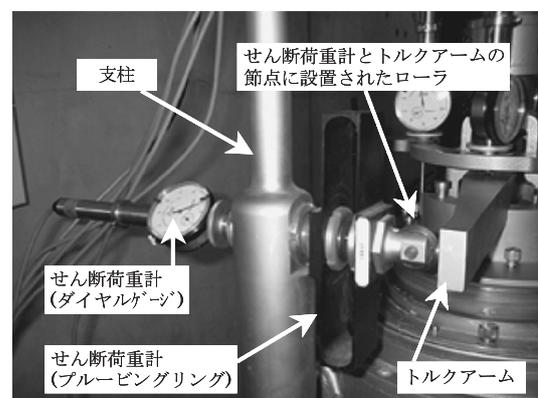


Fig.13 せん断荷重測定部

Component for shear load measurement

た垂直荷重計とリンク機構との結合部にも、自由継手が用いられており (Fig.11)、摩擦力に起因する測定誤差を除去するように細心の配慮が払われている。

リングせん断試験機を用いた残留強度測定の精度を良好なものとするためには、ギャップ (せん断上箱と下箱エッジ間の空隙) を小さくすることが重要であり、ギャップが大きく、土質試料の吹出し (試料細片が、せん断上箱と下箱の間からせん断箱外部に移動する現象) の著しい状態では残留強度測定の精度は保証されない。上部反力部材と垂直荷重計の接合部にあるギャップ調整ネジ (Differential screw) を調整することにより供試体上面に作用する垂直荷重だけでなく、せん断上箱と下箱のギャップを調整できる。基本枠の回転台隣接部にブリッジを設置して4個のダイヤルゲージを固定する (Fig.12) が、そのうちの2個はギャップを測定するものであり、せん断上箱と下箱エッジ間の空隙が閉合した状態でギャップを零としている。残りの2個は垂直変位測定用であり、それぞれ2個の平均値を測定値とする。

垂直荷重の初期値の設定には注意を要する。せん断の開始に先だって、上部反力部材の荷重計にリンク機構を装着し、その時点での垂直荷重計の指示値がリンク機構の重量と同等の負値 (引張力) となるように設定する。

その後リンク機構とせん断上箱をネジ止めて測定を開始する。

#### ○せん断荷重測定部

トルクアームは上部プレートに接する部分でピン結合され、基本枠の支柱に設置されたせん断荷重計にせん断荷重を伝達する (Fig.12)。荷重計受圧部とトルクアームの先端部との接合部は、供試体上面の変形により曲げや摩擦が生じないようにローラ接合されている (Fig.13)。

## 2 試験機の特徴

供試体に作用する垂直荷重を把握するため、せん断上箱の上面に、上部プレートに替えて薄型プレートを固定し、トルクアームを設置した状態で重錘を用いて载荷した。リンク機構をせん断上箱にネジ止めし、垂直荷重計に結合した状態で上下せん断箱のギャップを大きく取り、垂直荷重計で測定した荷重を Table 1 に示す。重錘を载荷する際には、アームの平衡をとるために、小型重錘1個 (9.807N) を使用するので、実際に用いた重錘重量から9.807Nを差引いた荷重を有効重錘荷重として表中に示している。測定された垂直荷重は重錘に起因する荷重と併せて、リンク機構・せん断上箱・薄型プレー

Table 1 垂直荷重

Normal load				
有効重錘重量(N)	荷重1 (N)	荷重2 (N)	荷重3 (N)	荷重4 (N)
19.61	226.2	110.0	199.6	250.1
29.42	325.9	209.6	299.1	350.1
39.23	425.4	309.1	398.7	449.1
49.03	524.9	408.6	498.3	549.2
58.84	624.5	508.3	597.8	648.2

注記1；荷重1は検定時の実測垂直荷重  
 注記2；荷重2は重錘に起因する正味垂直荷重であり、荷重1からせん断上箱・薄板プレート・トルクアーム・ネジ類の重量を減じた  
 注記3；荷重3は圧密時に作用する垂直荷重であり、荷重2に上部プレート・トルクアーム・ネジ類の重量を加えた  
 注記4；荷重4はせん断時に作用する垂直荷重であり、荷重2にリンク機構・上部プレート・トルクアーム・せん断角度測定盤・ピン・ネジ類の重量を加えた

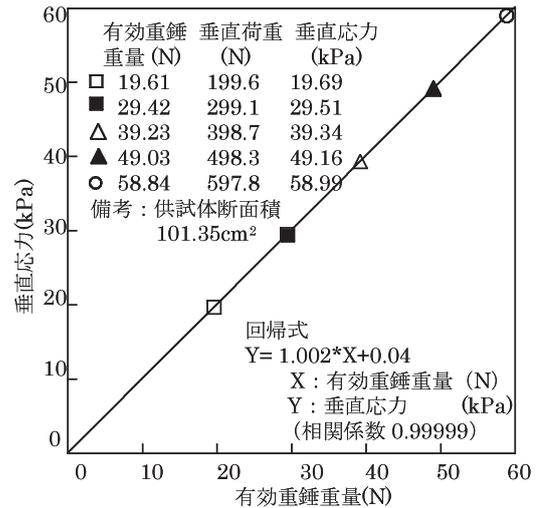


Fig.14 有効重錘重量と垂直応力の関係

Relationship between dead load and normal stress

ト・トルクアーム等の固定荷重を含んでいるため、これらの固定荷重を差し引いた重錘に起因する正味垂直荷重(荷重2)を表中に示している。供試体を圧密する際の垂直荷重は、重錘に起因する正味垂直荷重に加えてトルクアーム・上部プレート等の固定荷重が作用するのでこれらの総和を荷重3(圧密時垂直荷重)として表中に示している。この荷重は、上部プレートとせん断上箱周囲の摩擦を無視していることに注意する必要がある。せん断過程では、せん断上箱にせん断角度測定盤を設置し、上下せん断箱間の相対的な回転角度を測定するので、重錘に起因する正味垂直荷重に加えてリンク機構・トルクアーム・上部プレート・せん断上箱・せん断角度測定盤の重量等も固定荷重として考慮する必要があり、これら荷重の総計を荷重4(せん断時垂直荷重)として表中に示している。試験時には、せん断上箱に収納された土の重量も加えているが、水浸槽に注水した水の浮力は無視し得るものとして考慮していない。荷重4に上箱内の供試体重量を加え、垂直荷重計で計測された荷重を差し引いた(負値の引張力を加えた)結果が、周面摩擦を補正したせん断面での垂直荷重となる。圧密時垂直荷重をせん断面の面積で除した圧密時垂直応力の回帰直線をFig.14に示す。重錘荷重の十倍の比率で、高い相関が得られている。この検定では、薄板を上部せん断箱に固定して重錘荷重を作用させているので、上部プレートとせん断上箱の周面に発生する摩擦力が確定値(重錘に起因する正味垂直荷重に加え、トルクアーム・薄板プレート・ネジ類を加えた全荷重)となる場合に相当し、Fig.14の結果から、垂直荷重が正常に伝達されているだけでなく摩擦力が精度良く測定されていると考えられた。

ギャップを小さくした場合にせん断荷重計で検出されるトルクを測定するブランクテスト(重錘荷重29.4N)の結果をFig.15に示す。図中には、我が国で生産され

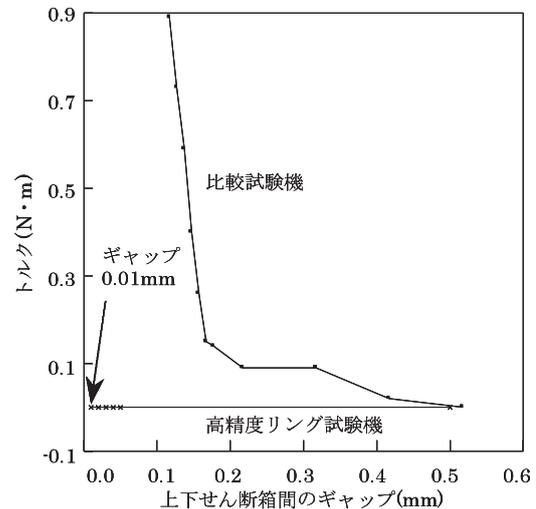


Fig.15 ブランクテストにおけるトルクとギャップの関係

Relationships between torque and gap in blank test

たリングせん断試験機(比較試験機 MIS-233-1-65型)でのブランクテスト(垂直荷重0kN)の結果も、比較のために示している。高精度リングせん断試験機では0.01mmまでギャップを小さくしてもブランクテスト時のトルクは零であり、明らかに荷重伝達機構における機械摩擦等に起因する誤差が適切に除去されている。

これに対し、比較試験機では、ギャップが0.2mmよりも小さくなるとブランクテスト時のトルクが急激に大きくなっており、高精度リングせん断試験機の特徴が優れていることが明らかである。ただし、比較試験機に関して、異なる測定の結果も示されている。宜保(1994)は、残留強度測定のための高精度のリングせん断試験機(本報告で用いた比較試験機はこれと同等の機構を有する)を示して、0.005mmのギャップでも摩擦が生じることなく、正常な測定が行われた事例を示しており、本報告での測定と異なる結果が得られている。この理由につい

ては不明であり、これについて検討する事は今後の課題である。

#### IV 測定法の検討

##### 1 測定に用いた試料

中国四国農政局神石高原農地保全事業（1995-2005）で対策の行われた農地地すべり（M地区）現地採取された試料を用いた。試料を採取した農地斜面は広島県神石郡神石高原町の仙養山（標高742.2m）周辺の標高500～650mの緩斜面に位置している。仙養山周辺の第四紀玄武岩類の下方に第三紀備北層群（泥岩・砂岩・礫岩互層）があり、キャップロック型地すべりが発生しやすい地質構造を持っている。

地すべりブロックを通過して道路を造成する際に、掘削面にてすべり面粘土に相当すると考えられる備北層群の風化泥岩が露頭した。この露頭試料を採取して乳鉢ですりつぶして加水し、作成したスラリーを高精度リングせん断試験機のせん断箱内で圧密してせん断試験を行った。採取した試料は、塑性指数39.8、液性限界75.5であり、粘土分39%、シルト分50%（粒径 $2\mu\text{m}$ 以下の粒子含有率は27.6%）であり、日本統一土質分類ではC'H（粘土）に分類される。後に示すとおり、ピーク強度から残留強度への強度低下が著しい試料である。

##### 2 プレカット試料を用いた残留強度測定

ここでは、精度の良い残留強度測定を迅速に行うため、以下の諸点を考慮したGargaの方法（Lupiniら、1981）を採用する。

- 圧密終了後、せん断に先立って人工的な分離面を作成した試料（プレカット試料）を用いる
  - 高速の先行載荷（予備せん断）を行った後に、緩速の本試験を行う
  - 供試体を圧密する際には、大きな垂直荷重を作用させる（過圧密比を大きくする）
  - 間隙水圧の消散を早めるため、プレカット面（せん断面）と供試体下面との距離を短く（0.4cm）する
- 高速先行載荷を行う速度は毎分0.25～0.26mmとした（以降の変位量は、供試体の回転に伴って供試体半径の平均値6.35cmで発生する変位量を平均変位として表示する）。緩速の本測定を行う速度は毎分0.00810～0.00830mmとした。

供試体の圧密時には、せん断箱にスラリー試料を充填し（Fig.16）、重錘荷重（有効重量588.4N）を作用させた。

圧密終了後は、上下せん断箱にギャップを与えた状態でベースプレートを回転台から取り外してワイヤソーを用いて人工的な分離面を作成した（Fig.17）。ワイヤソーを用いて、上下せん断箱の切断面表面を滑らかにした後、せん断下箱を回転台に再度固定し、せん断上箱を合わせ、重錘荷重（有効重量98.1N）を作用させてせん断試験を

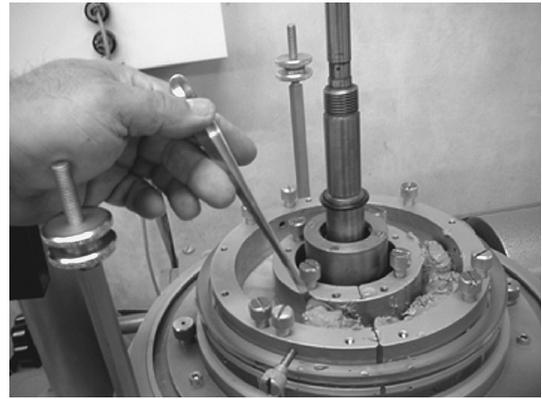


Fig.16 せん断箱へのスラリー試料充填

Setting slurry sample in the confining rings

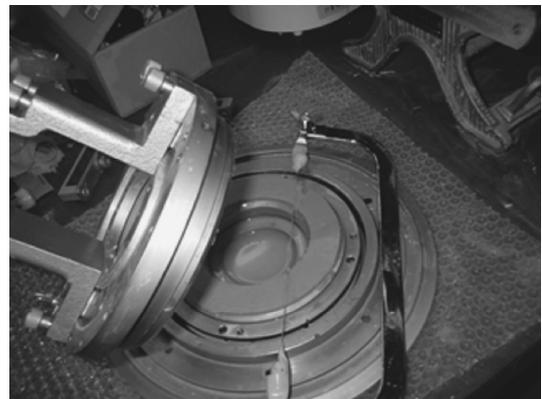
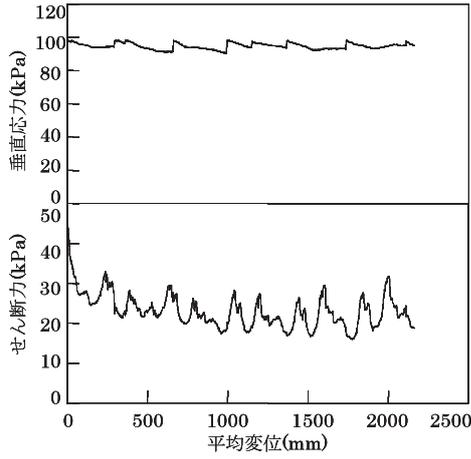


Fig.17 プレカット試料

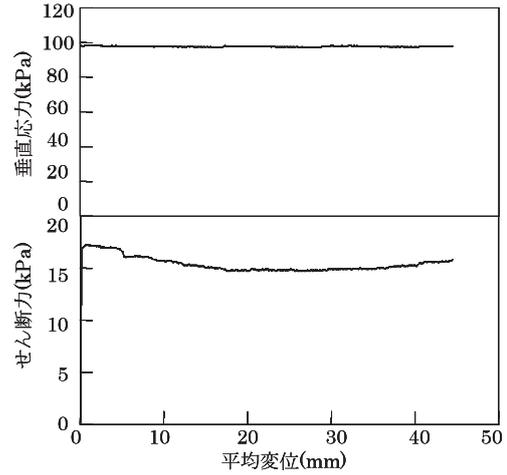
Pre-cut sample

行った。高速の先行載荷試験（載荷速度0.256mm/min）の結果としてFig.18に平均変位とせん断応力（ $\tau$ ）、垂直応力（ $\sigma$ ）の関係を、Fig.19に平均変位と $\tau/\sigma$ 、Fig.20に平均変位とギャップ、垂直変位の関係を示す。垂直変位（供試体上面の沈下）が大きく進行するとともに、ギャップは急速に減少している。一日に1～2回の頻度で、ギャップ調節ネジを用いて上下せん断箱のギャップを拡大し、測定誤差の低減を試みたが、せん断変位の進行に伴う上下せん断箱の閉合が周期的に生じ、それに対応して $\tau$ 、 $\sigma$ 、 $\tau/\sigma$ のそれぞれは大きく変動している。Fig.19の周期変動の谷にあたる部分に着目すれば、平均変位が2mに達するまでに強度の残留値に到達するものと考えられ、実用的には変形量1.5mに達した時点で、残留値を評価しても大きな誤差は生じないと考えられた。

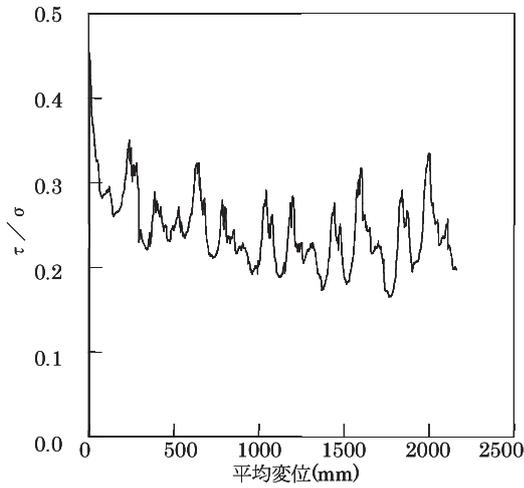
緩速の本せん断試験（載荷速度0.00814mm/min）の結果としてFig.21に平均変位とせん断応力（ $\tau$ ）、垂直応力（ $\sigma$ ）の関係を、Fig.22に平均変位と $\tau/\sigma$ 、Fig.23に平均変位とギャップ、垂直変位の関係を示す。垂直変位（供試体上面の沈下）は漸増し、せん断終了時（変位量約45mm）には垂直沈下量は約0.05mmに達している。また、上下せん断箱のギャップも0.1mmの周辺で漸減



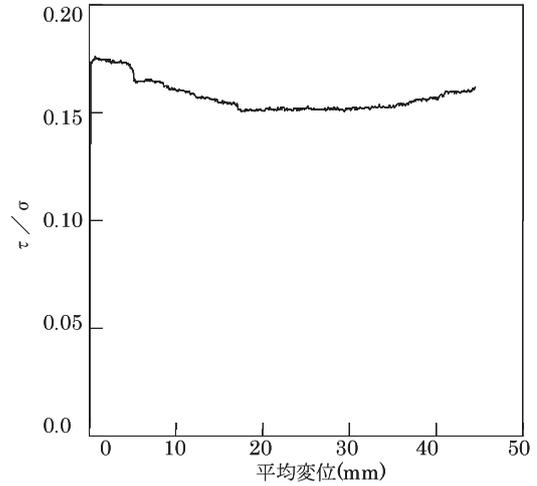
**Fig.18** 応力-変位関係 (プレカット試料, 先行載荷)  
Stress-displacement relationships (pre-cut sample, preliminary loading)



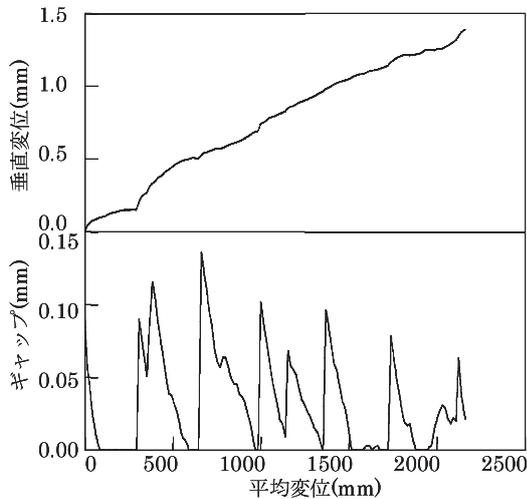
**Fig.21** 応力-変位関係 (プレカット試料)  
Stress-displacement relationships (pre-cut sample)



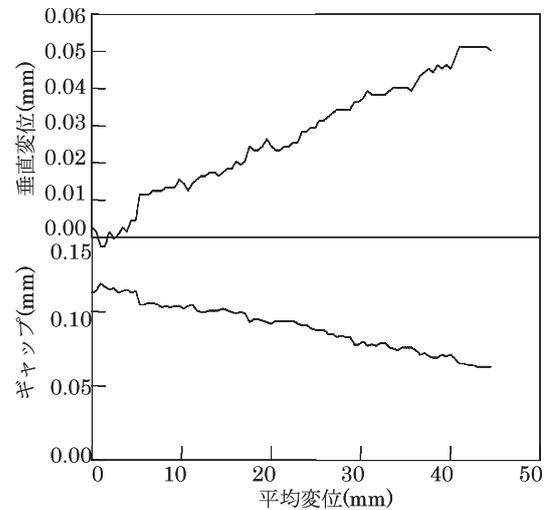
**Fig.19**  $\tau/\sigma$ -変位関係 (プレカット試料, 先行載荷)  
 $\tau/\sigma$ -displacement relationships (pre-cut sample, preliminary loading)



**Fig.22**  $\tau/\sigma$ -変位関係 (プレカット試料)  
 $\tau/\sigma$ -displacement relationships (pre-cut sample)



**Fig.20** 垂直変位及びギャップ (プレカット試料, 先行載荷)  
Vertical displacement and gap (pre-cut sample, preliminary loading)



**Fig.23** 垂直変位及びギャップ (プレカット試料)  
Vertical displacement and gap (pre-cut sample)

しているが、全体的に見た垂直変位・ギャップの変動は小さい。 $\tau$ 、 $\sigma$ 、 $\tau/\sigma$ のそれぞれも残留値の近傍にあり、変動は少ない。 $\tau/\sigma$ の残留値は、本測定の際の平均変位量17.6mm（先行载荷の変形量との総和は2229.9mm）で0.105に達している。 $\tau/\sigma$ は、 $c'$ （粘着力の有効応力成分）がゼロの場合の $\tan \phi'$ （ $\phi'$ は内部摩擦角の有効応力成分）に相当し、これから推定される内部摩擦角の残留値は $8.54^\circ$ である。この値は、後に示す正規圧密粘土、過圧密粘土のピーク値よりも大幅に小さい値であり、大変形に伴う粘土粒子の配向によって、せん断強度の著しい低下が生じており、その実測が適切に行われていると考えられる。

### 3 過圧密試料を用いた大変形試験

過圧密試料を用いた大変形試験でも、圧密荷重（有効重錘重量588.4N）とせん断時垂直荷重（有効重錘重量98.1N）をプレカット試験と同等（過圧密比は約6である）とし、分離面は作成せず、せん断速度は圧密排水試験での標準的な値として毎分0.00821mmの一定値とし、平均変位約140mmまでの大変形試験を行った。測定結果としてFig.24に平均変位とせん断応力（ $\tau$ ）、垂直応力（ $\sigma$ ）の関係を、Fig.25に平均変位と $\tau/\sigma$ 、Fig.26に平均変位とギャップ、垂直変位の関係を示している。せん断応力（ $\tau$ ）及び $\tau/\sigma$ はせん断開始後の初期にピーク値に達した後に急激な低下を示す。平均変位量が40mm前後に達すると若干の低下曲線の乱れが現れるが、全体としては平均変位40mm前後から緩やかな漸減傾向を示している。

ギャップ・垂直変位の傾向はプレカット試料の結果と大きく異なり、平均変位が50mm程度に達するまではギャップの拡大（開口）が進行するとともに、垂直変位は負値（体積膨張）の方向に進行する。この領域でのせん断応力（ $\tau$ ）及び $\tau/\sigma$ の急激な低下は、主として体積膨張に伴うひずみ軟化が寄与していると考えられる。平均変位が約50mmを超過する周辺からギャップの正值（閉口）及び垂直変位の負値（体積膨張）は縮小する方向となる。この領域でのせん断応力（ $\tau$ ）及び $\tau/\sigma$ の緩やかな低下は、主として、粘土粒子の配向に伴う強度低下が寄与していると考えられる。

$\tau/\sigma$ のピーク値は0.733（平均変位1.1mm）であり、最小値は0.232（平均変位140.6mm）である。プレカット試料で求められた残留値0.105（全変形量2229.9mm）に比して、全領域で過大な値である。

### 4 正規圧密試料を用いた大変形試験

正規圧密試料を用いた大変形試験では、せん断時垂直荷重（有効重錘重量98.1N）はプレカット試験・過圧密試料試験と同等とし、圧密荷重（有効重錘重量98.07N）をせん断時垂直荷重と同等としている。せん断速度は圧密排水試験での標準的な値として毎分0.00819mmの

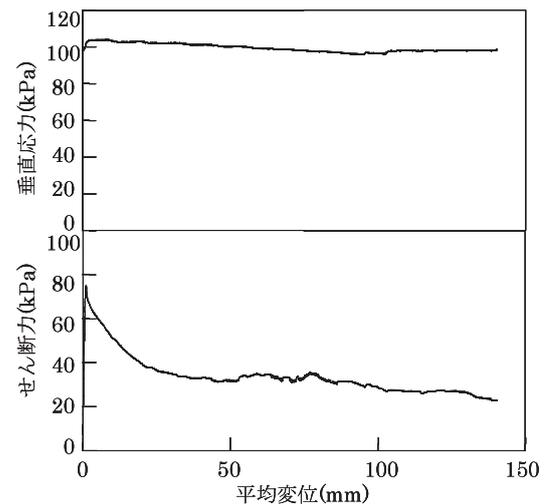


Fig.24 応力-変位関係（過圧密試料）

Stress-displacement relationships (overconsolidated sample)

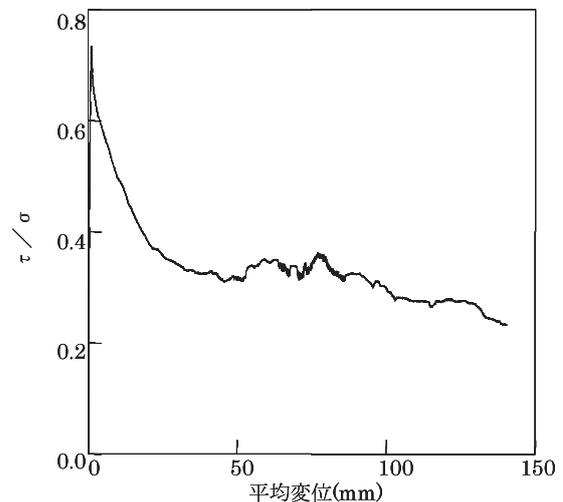


Fig.25  $\tau/\sigma$ -変位関係（過圧密試料）

$\tau/\sigma$ -displacement relationships (overconsolidated sample)

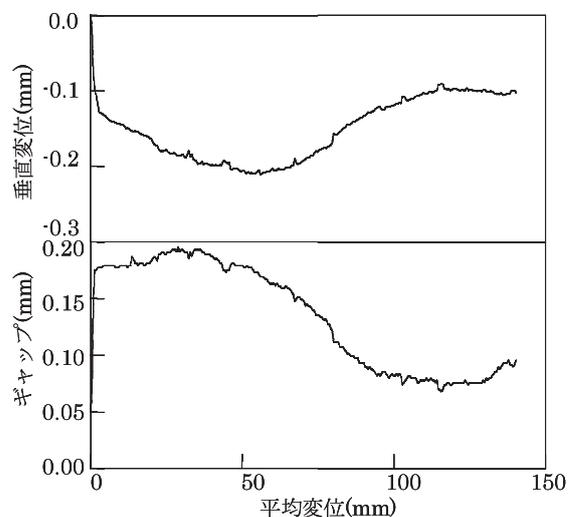


Fig.26 垂直変位及びギャップ（過圧密試料）

Vertical displacement and gap (overconsolidated sample)

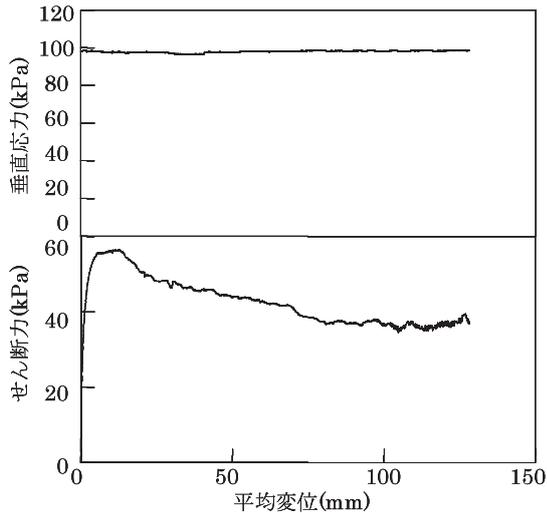


Fig.27 応力-変位関係 (正規圧密試料)

Stress-displacement relationships (normally consolidated sample)

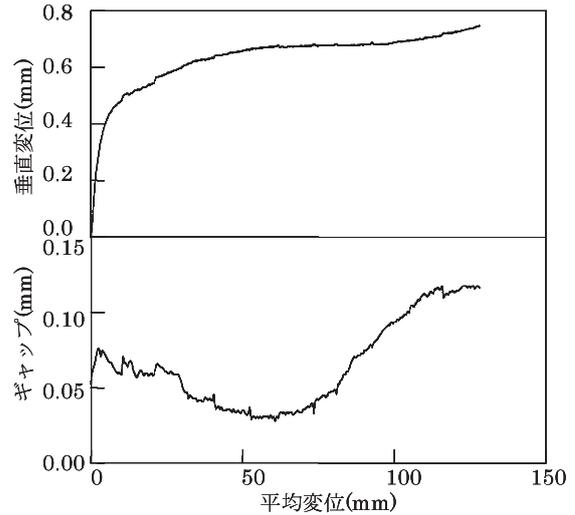
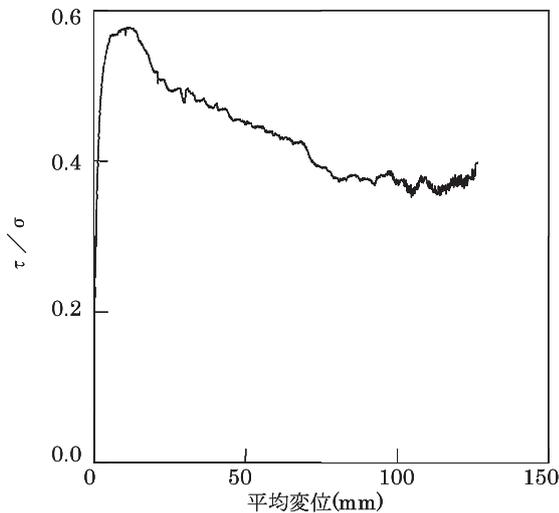


Fig.29 垂直変位及びギャップ (正規圧密試料)

Vertical displacement and gap (normally consolidated sample)

Fig.28  $\tau/\sigma$ -変位関係 (正規圧密試料) $\tau/\sigma$ -displacement relationships (normally consolidated sample)

一定値とし、平均変位 120mm を超過するまでの大変形試験を行った。測定結果として Fig.27 に平均変位とせん断応力 ( $\tau$ )、垂直応力 ( $\sigma$ ) の関係を、Fig.28 に平均変位と  $\tau/\sigma$ 、Fig.29 に平均変位とギャップ、垂直変位の関係を示している。せん断開始後、平均変位 11mm 近傍までは増加傾向を示し、それ以降は、過圧密試料に比して緩慢な減少を続ける。垂直変位はせん断応力 ( $\tau$ ) 及び  $\tau/\sigma$  がピーク値に達する平均変位 11mm 近傍までは急速な沈下 (体積圧縮) 傾向を示し、それ以降は沈下量の緩慢な増大が継続している。ギャップは平均変位が約 50mm に達するまでは漸減を続ける。この変位領域までは、垂直変位やせん断応力 ( $\tau$ ) 及び  $\tau/\sigma$  と整合した結果となっているが、平均変位約 50mm を超過した後にギャップが開口 (正値が増加) しているのは他の測定結果と整合しないので、測定計器の誤差等を今後検討する必要がある。以上、大

変形領域の測定値の一部に検討を要する部分があるが、全体としては、ピーク強度通過後に主として粘土粒子の配向に起因すると考えられるせん断応力 ( $\tau$ ) 及び  $\tau/\sigma$  の緩慢な低下が継続している。

$\tau/\sigma$  のピーク値は 0.577 (平均変位 11.2mm) であり、最小値は 0.352 (平均変位 104.8mm) である。プレカット試料で求められた残留値 0.105 (全変形量 2229.9mm) に比して、全領域で過大な値である。

## 5 試験結果の比較

プレカット試料を用いた測定結果と過圧密試料及び正規圧密試料による測定結果を比較する。プレカット試験は先行载荷及び本試験の合計で 14090 分 (約 9.8 日) を要している。過圧密試料 (せん断速度: 毎分 0.00821mm)、正規圧密試料 (せん断速度毎分 0.00819mm) と同様のせん断速度で総変位量 2229.9mm を与えるには、それぞれ 271607 分 (188.6 日)、272270 分 (189.1 日) を要する。したがって、残留強度までの変位量が全試験で同等と仮定するならば、プレカット試験は過圧密試料、正規圧密試料での測定に要する時間を 19.3 分の 1 程度に短縮でき、迅速な測定法であることが明らかである。Skempton は以下の残留係数  $R$  を定義している。

$$R = \frac{S_f - \bar{S}}{S_f - S_r}$$

$$S_f = c' + \sigma' \cdot \tan \phi'$$

$$S_r = c_r' + \sigma_r' \cdot \tan \phi_r'$$

ここに、 $S_f$ ; 土のピーク強度、 $\bar{S}$ ; 破壊時の土の平均せん断強度、 $S_r$ ; 土の残留強度である。また、 $c'$ 、 $\phi'$  はそれぞれ有効応力表示のピーク粘着力、ピーク内部摩擦角、 $c_r'$ 、 $\phi_r'$  はそれぞれ有効応力表示の粘着力残留値、内部摩擦角残留値であり、ピーク強度では残留係数 0.0、

残留強度では残留係数 1.0 であり、強度の低下割合を表している。先に述べたとおり、 $\tau/\sigma$  は粘着力がゼロ、垂直応力  $\sigma$  が 1.0 の場合のせん断強度 ( $\tan \phi$ ) に相当する。ここでは、正規圧密試料と過圧密試料の大変形領域における応力・変形関係を比較する定量指標として、 $\tau/\sigma$  を用いて次式で定義する等価残留係数  $R_{eq}$  を評価し、強度低下割合を比較する。

$$R_{eq} = \frac{(\tau/\sigma)_f - (\tau/\sigma)}{(\tau/\sigma)_f - (\tau/\sigma)_r}$$

ここに、 $(\tau/\sigma)_f$  は  $\tau/\sigma$  のピーク値であり、過圧密試料試験におけるピーク値 (0.733) としている。また、 $(\tau/\sigma)_r$  は  $\tau/\sigma$  の残留値であり、プレカット試験における残留値 (0.150) としている。 $(\tau/\sigma)$  は過圧密試料試験、正規圧密試験のピーク強度通過後の各段階での  $\tau/\sigma$  である。

過圧密試料試験と正規圧密試料のそれぞれでプレカット試験に要した時間と同等の試験時間内 (14090 分) に、ピーク強度通過後の各時刻でどの程度の等価残留係数が得られるかを評価した結果を Fig.30 に示す。通常試験法では、プレカット試料による迅速測定で求めた残留値までの強度低下が生じるためには膨大な時間が必要であり、通常試験法を用いた場合、同等時間内には正規圧密試料試験で約 6 割、過圧密試料試験では約 8 割の強度低下しか生じていない。過圧密試料の等価残留係数が正規圧密試料の等価残留係数をすべての時刻で上回っていることにも注目する必要がある。過圧密試料ではピーク強度までの到達時間が短く、ピーク強度通過以降の強度低下が急激に生ずるため、正規圧密試料でピーク強度に到達して等価残留強度を評価する時点では 4 割以上の強度低下がすでに終了している。以上より、過圧密比をここで採用した大きな値 (約 6) とすることは、迅速な測定

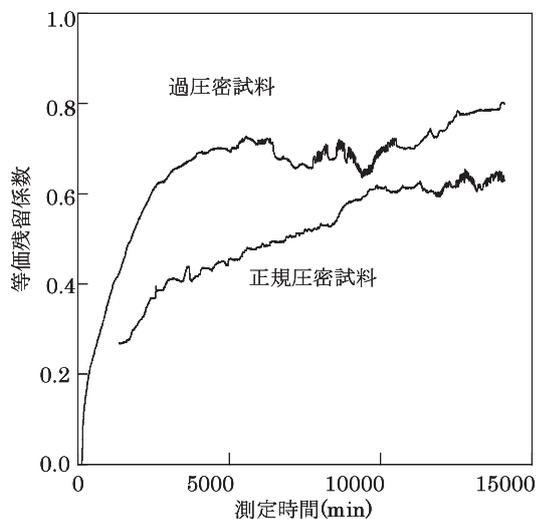


Fig.30 等価残留係数  
Equivalent residual factor

を行う上で有効であると考えられた。

## V 大規模地すべり採取試料の測定と安定解析

### 1 対象とした地すべりと採取試料

2006年4月に山形県内の最上川左岸「大舟木地すべり区域」で大規模な地すべりが発生した (Fig.31, 32)。この地すべりは、新第三系杉山層泥岩と上位の火砕流堆積物・崩土から成る測線 AA' 上のブロックのうち、最上川に面した延長約 150m、幅約 100m の領域が滑動したもので、調査・解析・緊急防止工事が実施されている。一方、測線 AA' に斜交する測線 BB' 沿いにも大規模な地すべりブロックが認められ、最末端は今回の活動領域に引き込まれるように、地表部の亀裂や段差地形を生じている。この測線 BB' 沿いブロックの安定度を検討するため、測線 BB' 末端付近に露出する泥岩層風化部の試料を採取した (Fig.31, 33)。採取試料の基本物性試験の結果を Table 2 に示す。日本統一土質分類によれば

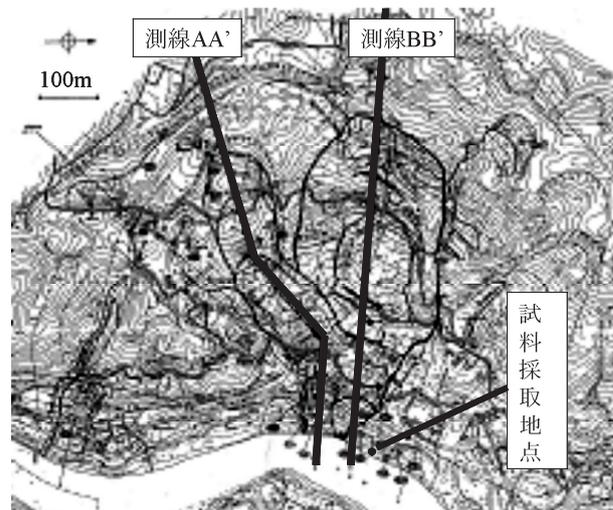


Fig.31 大舟木地すべり平面図  
Plan of Oofunaki landslide



Fig.32 大舟木地すべり  
Oofunaki landslide



Fig.33 試料採取

Sampling

Table 2 採取試料物性値

Soil properties

液性限界	63.2 %
塑性限界	30.0 %
塑性指数	33.2
細砂(粒径0.075-0.425mm)分	6 %
シルト(粒径0.005-0.075mm)分	43 %
粘土(粒径0.005mm以下)分	51 %
粒径0.002mm以下の粘土分含有率	23 %
日本統一土質分類法による分類名	CH(粘土)
含水比(%)	30.2
間隙比	0.937
土粒子の密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.593
湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.74
飽和密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.82

CH (粘土) に分類され、塑性指数 (Ip) が 33.2、粒径 2 μm 以下の粘土分含有率は 23% である。

## 2 採取試料の強度測定

採取試料の残留強度測定を前節で示した手法に準じて行った。最初にスラリー試料の圧密を有効重錘重量 588.4N で実施している。次に、プレカット試料の先行載荷を有効重錘重量 166.7N、変位速度 0.2557 mm/min で平均変位量が 1600.3mm に達するまで実施した。その後、有効重錘重量をそれぞれ 166.7N、127.5N、88.3N、49.0N に設定してそれぞれ 0.00812, 0.00813, 0.00814, 0.00818mm/min の低速で本試験を実施した。本試験における最大変位はそれぞれ、44.50, 44.80, 46.00, 49.48mm である。測定の結果は、Fig.34, Fig.35 に示すとおりであり、採取された風化泥岩の残留強度は粘着力 (Cr) 5.0kPa、内部摩擦角 (φr) 22.6° である。前節の結果から推定される残留強度 (前節で扱った試料では τ/σ の残留値 0.150 から、Cr=0 として、φr を推定すると 8.5° になる) よりも大幅に大きな値である。土地改良事業計画設

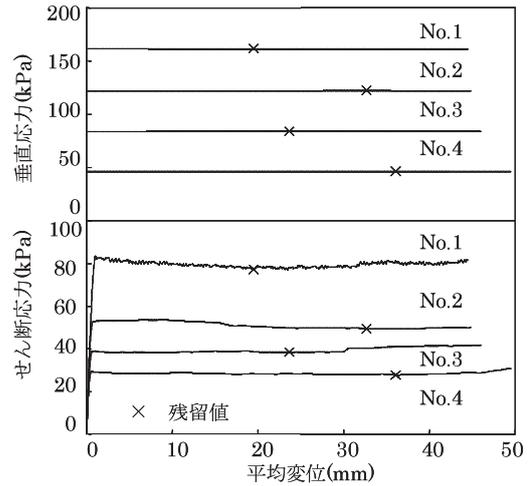


Fig.34 応力 - 変位関係 (大舟木)

Stress-displacement relationships (Oohunaki)

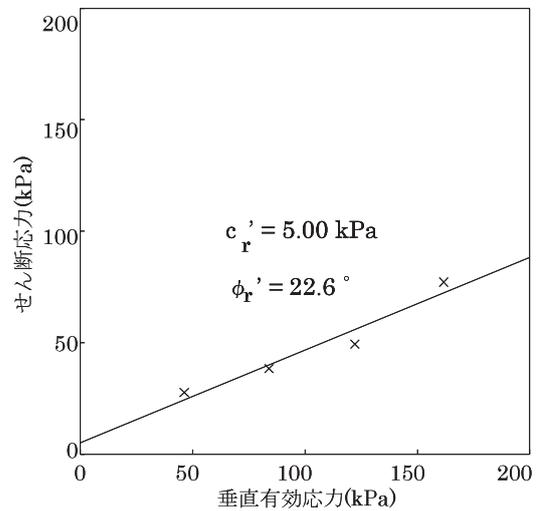


Fig.35 残留強度 (大舟木)

Strength-effective stress relationships (Oohunaki)

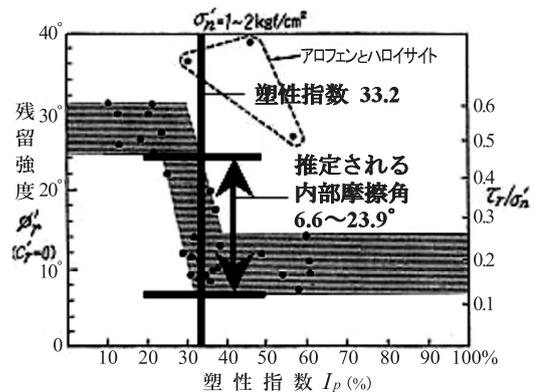
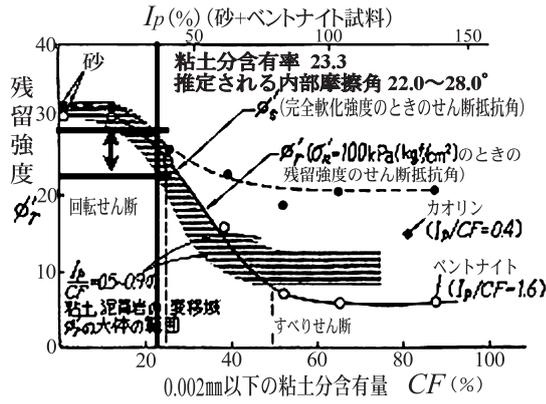


Fig.36 塑性指数と残留強度の関係

Relationships between plasticity index and residual strength

計基準「農地地すべり防止対策」(農林水産省農村振興局, 2004) には、Chandler (1983) 及び Skempton (1985) の



注) 1.  $\phi_r$  の値は実際の地すべりから逆算して求めた  $\phi_r$  の範囲。ただし、 $\phi_r$  と  $\phi_r'$  の関係は必ずしも  $\phi_r = \phi_r' - \sigma'_v$  (1 kgf/cm<sup>2</sup>) のときの  $\phi_r$  を示している。  
 2. 図の上の横軸の  $I_p$  は、砂とベントナイトの混合土についてのものである。

Fig.37 粘土分含有率と残留強度との関係

Relationships between clay fraction and residual strength

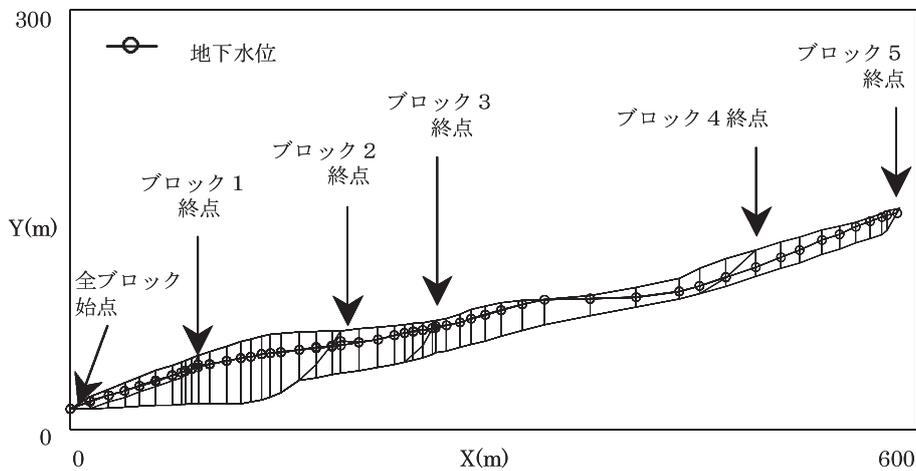


Fig.38 安定解析断面

Profile for slope stability analysis

結果に基づいて、試料の残留強度を塑性指数または  $2\mu\text{m}$  以下粘土分含有率から推定するためのデータが記述されている (農林水産省農村振興局, 2004)。この原図に大舟木地区でのデータを書き加えた結果として、塑性指数と残留強度 ( $\phi_r$ ) との関係について Fig.36 に、 $2\mu\text{m}$  以下の粘土分含有率と残留強度 ( $\phi_r$ ) との関係について Fig.37 に示す。両者から推定される残留強度 ( $\phi_r$ ) はそれぞれ  $6.6 \sim 23.9^\circ$ ,  $22.0 \sim 28.0^\circ$  である。測定された残留強度は大きめの値であるが、塑性指数及び  $2\mu\text{m}$  以下粘土分含有率から推定される値と整合している。

3 安定解析

Table 2 に示す物性値と高精度リングせん断試験機で測定された残留強度を用いて、大舟木地すべり BB' 測線に沿った断面の安定解析を川本 (1981) が示す方法で行った。現行の設計手法で採用されている簡便法と厳密法の両者の結果を Table 3 に示す。Fig.25 に示す大規模ブロック 2 ~ 5 では現行の簡便法による安全率は約 1.1

Table 3 安全率

	Safety factor	
	簡便法	Morgenstern-Price法
ブロック 1	0.927	0.955
ブロック 2	1.107	1.198
ブロック 3	1.307	1.353
ブロック 4	1.253	1.292
ブロック 5	1.208	1.241

~ 1.3 である。より精度の高い MP 法 (Morgenstern-Price 法) による安全率は約 1.2 ~ 1.35 であり、これら大規模ブロックは現状で安定していると考えられる (川本ら, 2006a)。

末端のブロック 1 に限っては、安全率が 0.927 (簡便法) ~ 0.955 (MP 法) という小さい値となった。このブロックは、急勾配をなす測線末端の表層部地すべりに相当し、活動領域に引き込まれるように亀裂や段差を生じ、かつ崩落し切らず不安定な状態で残存している領域である。したがって、この部分が相対的に低い安全率を示すことは、現地形とは矛盾しないといえる。

北川・河合 (2006a, 2006b) は当地区の地すべりの概要とともに、復旧工事の概要について示している。端部崩土の排土と併せて抑止杭工の施工が行われている (Fig.38 のブロック 1 相当部)。また、ブロック 2 相当部を含んで集水井の施工も行われている。ブロック 3 から上方の地すべり土塊については、当面防止対策の対象とはなっていない。下方末端及び後背部を含む大規模土塊

における復旧・対策は安定解析結果と整合した形で行われている。以上から、本報告での測定結果を用いた安定解析により、大規模地すべりの安定性を評価し、復旧・対策を行う上で有効な情報が得られると考えられた。

## VI 結 言

我が国の地すべりで測定結果が殆ど示されていない、Bishop らによる設計原型の高精度リングせん断試験機を用い、高精度リングせん断試験機の基本特性について明らかにした後に、採取試料を用いてプレカット試験による残留強度測定を行うとともに、通常の測定法（過圧密試料及び正規圧密試料）による大変形領域での高精度の応力・変位データを測定し、残留値への強度低下状況の比較・考察を行った。また、近年発生した大規模農地地すべりの現地地採取された試料の残留強度を測定し、安定解析を行った。その結果を以下に示す。

- 1) ここで用いたリングせん断試験機は、せん断面に作用する垂直荷重を精度良く評価できるとともに、せん断箱のギャップが非常に小さな状態で良好なせん断強度－変形特性の測定が可能であることを確認した。
- 2) プレカット試料測定で測定された残留強度を基準にした場合、通常の測定法による強度低下率は過圧密試料試験で約 80%，正規圧密試料で約 60% であり、プレカット試料による残留強度測定の有効性が確認できた。
- 3) 残留強度の迅速測定を行う上で、使用する試料の過圧密比を大きくすることが有効であり、過圧密試料と正規圧密試料の大変形領域における応力・変位関係をもとにして定量指標（等価残留係数）に基づいた定量データを示した。
- 4) 測定された残留強度を用いて、近年発生した大規模農地地すべり斜面の安定解析を行った結果は、地すべり土塊の安定性について検討する上で有効な情報を与えると考えられた。

ここで示した手法は、実用的には農地地すべりの広域防災対策を検討する上で有用であるのみでなく、提示された大変形領域での応力・変位関係のデータは、応力・変形解析手法（たとえば川本，2001，川本ら，2006b）に基づいた数値解析技術を高度化して行くための有効な情報を与えるものと考えられた。今後は、中山間・傾斜地における予防保全・防災管理を行うための技術、たとえば住民が地すべりの早期発見のために重点的に注意を行うべき場所の概定等に関して、ここで得られた結果を基にして技術の深化を行っていくことが課題である。

## 参考文献

- 1) Bishop, A.W., Green, G.E., Garga, V.K., Andresen, A. and Brown, J.D. (1971) : A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength. *Geotechnique* 21, No.4, 273-328
- 2) Chandler, R.J. (1983) : Recent European experience of landslides in overconsolidated clays and soft rocks, *Proc. 4th Int. Symp. Landslides, Tronto, Canada*, 61-81
- 3) 福岡 浩・佐々恭二・島 通保 (1990) : 高速高圧リングせん断試験機による砂質土、粘性土のせん断特性, 京都大学防災研究所年報第 33 号 B-1, 315-329
- 4) 古谷 保 (1981) : 奈良尾地すべり地区の第三紀層泥岩及び粘土のせん断強度と安定解析による強度常数の検討, *農土試技報*, C-22, 41-52
- 5) 古谷 保 (1983) : 残留強度とその測定法について, *地すべり*, 20 (1), 21-27
- 6) 宜保清一 (1979) : 粘土の残留強度測定に関する研究, *琉大農学報*, 26, 183-202
- 7) 宜保清一・小波蔵政良・吉沢光三 (1981) : 那覇市真地団地内地すべり性崩壊の発生要因と平均せん断強度定数の決定, *地すべり*, 18 (2), 11-18
- 8) Gibo, S., Egashira, K. and Ohtsubo, M. (1987) : Residual strength of Smectite-dominated soils from the Kamenose landslide in Japan. *Can. Geotech. J.* 24, 456-462
- 9) 宜保清一 (1994) : 残留強度測定のためのリングせん断試験装置とその測定精度, *地すべり*, 31 (3), 24-30
- 10) 宜保清一・中村真也・佐々木慶三 (2003) : 地すべり土のリングせん断挙動に及ぼす鉱物組成の影響, *地すべり*, 40 (4), 1-7
- 11) 細谷裕士 (1992) : 直轄地すべり対策事業板倉地区（農林水産省構造改善局所管）における地すべり抑止杭について, *地すべり*, 29 (1), 31-37
- 12) Hvorslev, M.J. (1939) : Torsion shear tests and their place in the determination of the shearing resistance of soils. *Proc. Am. Soc. Test. Mater.* 39, 999-1022
- 13) 川本 治 (1981) : スライス間力を考慮した極限平衡法の検討と地すべり安定解析への適用, *農土試技報*, C-22, 53-86
- 14) 川本 治 (2001) : 混合型すべりモデルによる地すべり斜面の安定解析, *地すべり*, 38 (3), 27-34
- 15) 川本 治・山田康晴・古谷 保 (2006a) : 高精度リングせん断試験機による強度測定と大規模地すべり土塊の安定解析, 第農業土木学会東北支部第 50 回研究発表会講演要旨集, 86-87
- 16) 川本 治・山田康晴・古谷 保 (2006b) : 混合型すべり有限要素解析の厳密化と地すべり個別ブロックの安定度評価, 第 3 回地盤工学会関東支部研究発表会発表講演集, 195-198
- 17) 北川 栄・河合洋和 (2006a) : 朝日町大舟木地区「地すべり災害の早期復旧に向けて」, 農業土木学会東北支部第 50 回研究発表会講演要旨集, 100-103
- 18) 北川 栄・河合洋和 (2006b) : 朝日町大舟木地区「地すべり災害の早期復旧に向けて」(復旧工事編), 農業土木学会東北支部第 50 回研究発表会講演要旨集, 104-105
- 19) Kenney, T.C. (1977) : Residual strength of mineral mixtures. *Proc. 9th I.C.S.M.F.E.*, 155-160

- 20) 紀平潔秀 (1990) : すべり面粘土の物理的・力学的性質, 地すべり, 27 (2), 1-8
- 21) Lupini, J.F., Skinner, A.E. and Vaughan, P.R. (1981) : The drained residual strength of cohesive soils. *Geotechnique* 31, No.2, 181-213
- 22) 眞弓孝之・柴崎達也・山崎孝成 (2003) : すべり面せん断試験によるすべり面のせん断強度評価, 地すべり, 40 (4), 15-7
- 23) 中村浩之 (1979) : 地すべりとすべり面の残留強度, 土木技術資料, 21 (8), 14-19
- 24) 中村浩之・清水清文 (1978) : すべり面におけるせん断強度決定のための土質試験法, 地すべり, 15 (2), 25-32
- 25) 中村真也・宜保清一・江頭和彦・吉永安俊 (2000) : 地すべり土の強度回復と鉱物組成との関係, 地すべり, 37 (3), 10-17
- 26) Nakano, R. (1979) : Geotechnical properties of mudstone of Neogene Tertiary in Japan with special reference to the mechanism of squeezing swelling rock pressure in tunneling. *Proc. Int. Symp. on Soil Mechs, Oaxaca, Mexico, Vol. I*, 80-91
- 27) 農林水産省農村振興局計画部資源課監修 (2004) : 土地改良事業計画設計基準「農地地すべり防止対策」基準書・技術書, 農業土木学会発行, 169
- 28) 岡田康彦・佐々恭二・福岡 浩 (2002) : リングせん断試験機を用いたせん断ゾーンにおける過剰間隙水圧発生ポテンシャル, 地すべり, 39 (3), 10-20
- 29) 佐々恭二・福岡 浩 (1993) : 高速リングせん断試験機による土砂の運動時の内部摩擦角の測定, 地すべり, 29 (4), 1-8
- 30) Skempton, A.W. (1964) : Fourth Rankine Lecture. Long-term stability of clay slopes. *Geotechnique* 14, No.2, 77-102
- 31) Skempton, A.W. (1985) : Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory. *Geotechnique* 35, No.1, 3-18
- 32) Voight, B. (1972) : Correlation between Atterberg plasticity limits and shear strength of natural soils. *Geotechnique* 23, No.2, 265-267
- 33) 山崎孝成・眞弓孝之 (2000) : 高純度粘土鉱物のリングせん断特性 - すべり面粘土との対比 -, 地すべり, 37 (2), 30-39
- 34) 谷田部龍一・八木則男・榎木明潔 (1989) : 破碎帯地すべり粘土の力学特性, 土木学会論文集, 406, 43-51

# Measurement of Shearing Strength Using a Ring Shear Apparatus and Stability Analysis of a Slope Including Large Scale Landslide

KAWAMOTO Osamu, YAMADA Yasuharu and FURUYA Tamotsu

## Summary

Shearing strengths were measured using a ring shear apparatus with sophisticated design originally presented by Bishop et. al. by which rare measurement was performed in previous work concerning landslides in Japan. After reconfirmation of refined capability to detect side friction and excellent gap properties between confining rings, shearing strengths of two types of soils sampled at landslides in Japanese farmlands were measured. Comparison among the testing results of normally consolidated, overconsolidated and pre-cut samples showed the efficiency of the testing procedure using the pre-cut sample and at the same time, datum about the stress-displacement relationships in large displacement range of normally consolidated and overconsolidated sample showed good information for numerical analysis considering stress-displacement relationships. In case of large scale landslide, it was supposed that safety factors obtained by the above-mentioned method would give available information for disaster reduction in hilly-area.

**Keywords:** ring shear test, residual strength, stress-displacement relationship, landslide, stability analysis