

琉球大学学術リポジトリ

地すべり土の残留強度と残留状態からの強度の回復に関する研究

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学農学部 公開日: 2008-02-14 キーワード (Ja): 回復強度, 再圧密, 残留摩擦係数, 垂直応力, 粘土鉱物, リングせん断 キーワード (En): recovered strength, re-consolidation, residual friction coefficient, normal stress, clay mineral, ring shear 作成者: 中村, 真也, Nakamura, Shinya メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/3624

地すべり土の残留強度と残留状態からの 強度の回復に関する研究

中 村 真 也*

Shinya NAKAMURA : Studies on Residual Strength and
Strength Recovery from Residual State for Landslide Soils

キーワード : 回復強度, 再圧密, 残留摩擦係数, 垂直応力, 粘土鉱物,
リングせん断

Key words : recovered strength, re-consolidation, residual friction
coefficient, normal stress, clay mineral, ring shear

Summary

The reactivated landslide has been subjected to repeated sliding and recession since the geological age. The shear strength of the shear zone is reduced to the residual state during sliding, but could be recovered to some extent during the recession period. This study describes the residual strength characteristics and the strength recovery from the residual state by means of a ring-shear test, for landslide soils which showed a considerable variation in physical and mineralogical composition.

1. The appropriate relation was obtained in the whole range between the residual strength parameter ϕ_r and the total of the contents of preferred-oriented clay minerals (smectite, vermiculite, chlorite mica) in the $<420\mu\text{m}$ soil samples. The relationship between them was expressed as a chair-shaped curve and the transitional region in which control of ϕ_r changed from the non-preferred-oriented minerals to the preferred-oriented clay minerals was clearly observed. It is indicated that the parameter of ϕ_r could be estimated based on the relationship ϕ_r and the total contents of preferred-oriented clay minerals in the $<420\mu\text{m}$ soil samples.
2. Based on the relationship between the residual friction coefficient and effective normal stress, the curvilinear residual strength envelope was divided into two parts which are the lower half and the higher half of the effective normal stress. The residual strength parameters were determined at each part, c_r was not zero at the lower half of the effective normal stress while it was zero at the higher half, and ϕ_r was greater at the lower half than that at the higher half.
3. The recovery of the shear strength of the samples contained high amount of sand particles subjected to large-displacement shear by re-consolidation was clearly detected at the effective normal stresses below 150 kPa. The recovery rate increased with the decreasing normal stress but the strength did not recover to the level of the fully-softened strength.

* 琉球大学農学部生産環境学科

Furthermore, for the samples contained high amount of clay particles, the rate of decrease in the strength against the peak strength was great but the recovery rate was negligible at the whole normal stress. The differences between the recovered strength and the residual strength were 1° - 4° for the samples contained high amount of sand.

4. Landslide soils containing high amount of silt and sand and dominating with quartz and feldspars showed a strong recovery of strength at effective normal stresses until 400kPa, due to the re-consolidation effect on the disturbed thin-layer still existing on the shear surface in the residual state. In landslide soils dominating with quartz and feldspars but containing considerable amounts of mica and chlorite, the recovery of strength was noticed at lower normal stresses but hardly seen at higher normal stresses. This is ascribable to the formation of residual shear surface due to the presence of preferred-oriented minerals at higher normal stresses. The recovery of strength was not essentially recognized in landslide soils dominated by preferred-oriented minerals such as smectite, due to the development of residual shear surface to make slickenside.

目 次

Summary	97
第1章 序論	100
第1節 研究の背景	100
第2節 既往の研究	100
1 残留強度と物理的・鉱物学的性質との関係に関する研究	101
2 残留強度包絡線の湾曲化に関する研究	102
3 回復強度に関する研究	102
第3節 残留強度と回復強度	102
1 残留強度とその測定	102
2 回復強度とその意義	103
第4節 本論文の目的と構成	104
第1章 参考文献	107
第2章 残留強度と物理的・鉱物学的性質との関係	109
第1節 はじめに	109
第2節 検討に用いたデータと試験方法	109
第3節 ϕ_r と物理的・鉱物学的因子との関係	110
第4節 ϕ_r の支配因子としての配向性粘土鉱物総量	115
第5節 まとめ	115
第2章 参考文献	116
第3章 残留強度包絡線の湾曲化と強度定数決定手法	117
第1節 はじめに	117
第2節 残留強度の工学的意味	117
第3節 残留強度定数の決定	118
1 基本的考え方	118
2 試験に供した試料とその物性	118
3 大変位せん断挙動と残留せん断面の状況	119

4 強度定数の決定手法	121
第4節 まとめ	123
第3章 参考文献	123
第4章 回復強度に及ぼす垂直応力の影響	125
第1節 はじめに	125
第2節 試料と試験方法	125
1 試験に供した試料	125
2 回復強度測定試験	125
第3節 試験結果と考察	125
1 物理的性質	125
2 大変位せん断後の再圧密に伴う強度の回復	126
3 強度の低下率と回復率	128
4 回復および残留強度定数に及ぼす有効垂直応力の影響	129
第4節 まとめ	131
第4章 参考文献	131
第5章 回復強度と鉱物組成の関係	132
第1節 はじめに	132
第2節 試料と試験方法	132
第3節 結果および考察	132
1 粒度組成と鉱物組成	132
2 せん断強度と強度の回復	133
3 回復強度と含有粘土鉱物との関係	135
4 強度回復に及ぼすシキソトロピーの影響	138
第4節 まとめ	138
第5章 参考文献	139
第6章 総括	140
謝 辞	141

第1章 序 論

第1節 研究の背景

地すべりは、山腹あるいは谷壁斜面等の地塊の一部が均衡を失い、すべりによって安定しようとする現象である。地すべり発生の原因としては、地層・地質・地質構造・土質のような内的要因と、融雪期、台風時の雨水の浸透による地下水位の上昇や地震、切土や盛土等の外的要因が挙げられる。地すべり災害による人的・物的損失は甚大であり、土地環境の保全の面からも地すべりの予知・対策は重要課題となっている。地すべり予知・対策のための安定度評価・安定解析の精度を高めるには、適正なせん断試験方法によって測定された土の強度定数を適切に活用する必要がある。そのためにはすべり面あるいはすべり面付近の状態を把握し、地すべりと土質・地質・構造との関係を知ることが重要である。

地すべり発生の最大要因は土質であり、せん断強度が直接的に関与する。土のせん断強度は、土の種類によって異なるだけでなく、土の状態によってピーク強度、完全軟化強度および残留強度と変化する。残留強度という概念は、過圧密粘土斜面の長期安定問題に関して、Skempton (1964) により提示された。残留強度は、せん断面の最終的な粒子配向面において発揮される最小の排水強度で、滑動・停止を繰り返す移動量の大きい再活動型地すべりおよび地質不連続面を潜在すべり面とする初生型地すべりの安定度評価において必要不可欠な工学的指標である (宜保ら, 1986, 1990)。

しかし、残留強度の測定試験は、完全配向面形成のための大変位せん断と排水条件を満たす必要があり、長時間を要するため、せん断試験によらずに残留強度定数 ϕ_r を推定する方法も検討されている。 ϕ_r ($c_r = 0$) と土の物理的・鉱物学的因子との関係については、Skempton (1964) がロンドン粘土等の ϕ_r は粘土含有量CFの増加に伴って減少することを示して以来、多くの研究がなされてきた。代表的なものとして、Lupini et al. (1981), Skempton (1985), Gibo et al. (1987), 宜保ら (1992) の研究があるが、これらのほとんどはスメクタイトStを多く含有する土について検討したものである。しかし、地すべり土には、Stをほとんど含有しないものの ϕ_r が小さいものや、非配向性鉱物を主とし ϕ_r が大きいものも少なくない。配向性鉱物としてパーミキュライト (Vt), 緑泥石 (Ch), 雲母 (Mc) 等、非配向性として石英 (Qr), 長石 (Fd) 等が考えられ、それら鉱物の含有量と ϕ_r との関係を明らかにすることが重要である。また、残留強度は再活動型地すべりおよび初生型地すべりの安定度評価において必要不可欠で、その定数の妥当性が斜面安定度評価、対策工法の選定等に大きく影響するため (鶴飼ら, 1996), 強度定数決定が極めて重要となる。しかし、残留強度包絡線に湾曲化現象がみられるため、強度定数が一義的に決まらないという問題がある (Gibo, 1985; Hawkins & Privett, 1985; Maksimovic, 1989)。残留強度包絡線の湾曲化は、土の種類および垂直応力のレベルによって異なることが報告されており (Gibo et al., 1987), 両者の関係を把握し、より合理的な強度定数の決定手法を確立する必要がある。

滑動・停止を繰り返す移動量の大きい地すべりでは、すべり面の平均強度として残留強度を適用する場合が多いが (高速道路調査会, 1985; 農業土木学会, 1989), 残留強度のみでの対応では地すべりの現状を説明できないことがある。特に、浅層地すべりや深い地すべりの末端部の比較的浅いすべり面領域に攪乱薄層が存在する場合、攪乱土が静止時に土かぶり圧による再圧密により強度を回復し、すべり抵抗を微増させることが考えられる。地すべり土の回復強度特性を明確にすることは、再活動型地すべりの発生機構の解明や安定解析に用いるべき土質強度定数の考え方の進展に大きく寄与するもので、合理的で精度の高い安定解析を実現する上で重要である。

第2節 既往の研究

本論文の内容に関する既往の研究を次のように区分し、整理した。

- ① 残留強度と物理的・鉱物学的性質との関係に関する研究

- ② 残留強度包絡線の湾曲化と強度決定手法に関する研究
- ③ 回復強度に関する研究

1 残留強度と物理的・鉱物学的性質との関係に関する研究

残留強度定数 ϕ_r ($c_r = 0$) と物理的・鉱物学的因子との関係については、Skempton (1964) をはじめとして多くの研究がある。

Kanji (1974) は ϕ_r と塑性指数 I_p の間に相関があることを認め、関係式を得ている。Lupini et al. (1981) は、砂-ベントナイト混合土の残留時におけるせん断挙動を sliding shear, transitional (shear) および turbulent shear の 3 shear mode に区分した (Fig. 1.1)。Skempton (1985) は、地すべり土の大変位せん断において、粘土含有量 $CF > 40\%$ の試料の場合に粒子配向が起こり、ピーク (完全軟化) 強度から残留強度へと大きく低下すること、 $CF < 20\%$ の場合には強度低下がほとんど起こらないことを指摘した (Fig. 1.2)。Gibo et al. (1987) は、残留強度を決定づけるのは残留せん断面の形成・発達の数値であるとして、スメクタイト (St) 粒子の配向指数が高いほど ϕ_r が小さくなる関係を定量的に示した。また、宜保ら (1992) は、St を多く含む試料では CF 、 ϕ_r と St 含有量、および ϕ_r と塑性指数 I_p の関係が良いことも指摘している。一方、矢田部ら (1991) は、破碎帯地すべり粘性土では、 ϕ_r と CF の間による関係は認められないことを示した。丸山・吉田 (1994) も地すべり土の ϕ_r と CF および I_p の間に明瞭な関係は認められないとの見解を示し、多変量解析により関係式 $\phi_r = 15.29420 - 0.15313 w_L + 0.81527 w_p$ (w_L : 液性限界, w_p : 塑性限界) を得ている。Collotta et al. (1989) は、 ϕ_r との相関の良い指標として CALIP (= $CF^2 \cdot w_L \cdot I_p \cdot 10^{-5}$) を提案した。

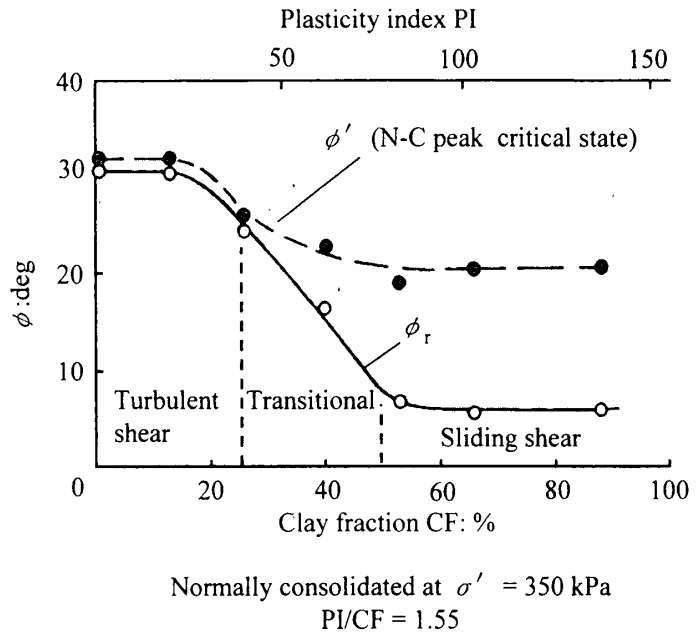


Fig. 1.1 砂-ベントナイト混合土のリングせん断試験
Ring shear tests on sand-bentonite mixtures
(Skempton 1985 after Lupini et al. 1981)

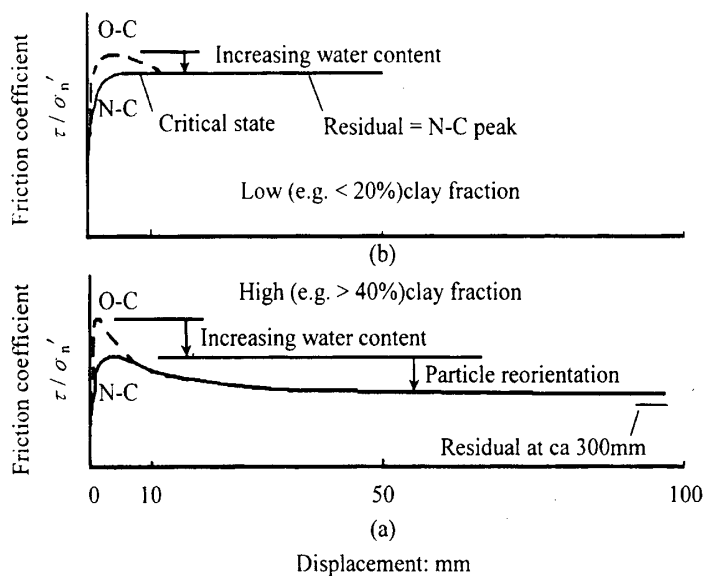


Fig. 1.2 一定の有効垂直応力下での応力～変位曲線
Diagrammatic stress-displacement curves at constant σ'_n
(Skempton, 1985)

鈴木 (1998) は、既報のデータを整理して ϕ_r と影響因子との関係について検討し、関係式を示した。他に、Voight (1973), Chandler (1983), 紀平 (1990), Moore (1991), 矢田部ら (1996), Tika et al. (1996) 等の研究がある。

2 残留強度包絡線の湾曲化に関する研究

残留強度包絡線の湾曲化現象は多くの研究者が指摘しており (Skempton, 1964; Bishop et al., 1971; Noble, 1973; 宜保, 1978, 1983; Bromhead, 1978; 古谷, 1983a), 強度定数が一義的に決まらないことが問題となっている (Gibo, 1985; Hawkins & Privett, 1985; Maksimovic, 1989)。Fig. 1.3は、Hawkins & Privett (1985) が残留強度 τ_r および残留摩擦係数 τ_r / σ'_n と有効垂直応力 σ'_n の関係をまとめたものである。 $\tau_r / \sigma'_n \sim \sigma'_n$ 関係は、高い垂直応力レベルでは $\tau_r / \sigma'_n = \text{const.}$ とな

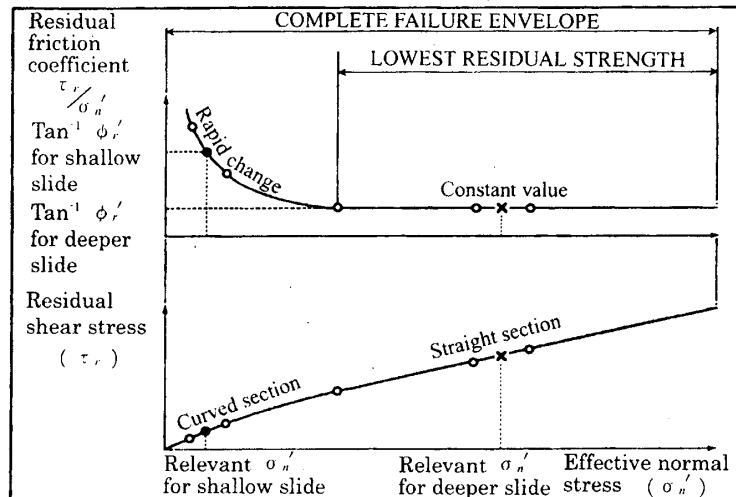


Fig. 1.3 残留強度包絡線と定義
Residual shear strength envelopes and definitions
(Hawkins & Privett, 1985)

り、低い垂直応力レベルでは垂直応力が低くなるほど τ_r / σ'_n が大きくなって左上がりの曲線 ($\tau_r / \sigma'_n \neq \text{const.}$) となる。残留強度包絡線も低い垂直応力レベル下で湾曲化する。湾曲化により一義的に強度定数が決まらないため、Skempton (1964) は、残留強度が一種の正規圧密強度であることから、残留粘着力を $c_r = 0$ として残留せん断抵抗角 ϕ_r を与えた。Bishop et al. (1971) も高塑性土の残留強度は摩擦成分だけからなるとし、 $c_r = 0$ として σ'_n の大きさによって複数の強度線を描き、それぞれの ϕ_r を求めた。一方、宜保 (1987) は、 $\tau_r / \sigma'_n \sim \sigma'_n$ 関係と残留せん断面の状態に注目し、 c_r の存在を認め、 ϕ_r を求めた。このように、実験結果を如何に評価し強度包絡線を描くかによって定数が大きく異なるため、合理的な強度定数の決定手法を確立することが重要である。

3 回復強度に関する研究

残留せん断状態に至ったせん断面の強度回復に関する研究は非常に少ない。Chandler (1977) は、室内実験において攪乱した残留せん断面の再圧密効果による強度回復を認めたが、調査した地すべり事例では盛土工中に数mm程度の再滑動があったため、回復強度はわずかな移動で失われたとして安定解析に加味しなかった。これを受けて我が国では、回復強度を安定解析に考慮することについては消極的である。しかし、宜保ら (1997) および周ら (1997) も、低い垂直応力レベルにおいて回復強度の発現を認めており、残留せん断面の状況と強度の回復特性について明確にする必要がある。

第3節 残留強度と回復強度

1 残留強度とその測定

土のせん断強度の基本的要素である粘着力は、せん断の初期からピークに至るまでに発揮されるもので、大変位せん断に至ってはほとんど関与しないとされ、最終的なせん断抵抗 (残留強度) の要素は土粒子相互の干渉作用からなる摩擦成分のみであると言われている (Lambe, 1960; 中村, 1979)。残留

強度は粘土粒子の最終的な配向面に沿って発揮されるせん断強度であり (Gibo et al., 1987), 粘土の物理性と鉱物組成および垂直応力の大きさによって決まる。非配向性粘土鉱物が卓越する試料, もしくはシルトや細砂を多く含有する試料では, 大変位後も粘土粒子の配向が不十分なため, 残留せん断面は線的せん断面となっていない (Gibo et al., 1987; 宜保・江頭, 1992; 宜保ら, 1992, 1993)。これは, 残留せん断時においても摩擦成分以外の要素, すなわち粘着力成分の存在を示唆するものであり (Bishop et al., 1971; Noble, 1973; 宜保, 1983), 土質工学的観点からその存在を検証し, 明らかにする必要がある。

残留強度の測定には, リングせん断試験機および直接せん断試験機が使用されている (農林水産省構造改善局, 1989)。残留強度は, 含有粘土鉱物の種類とせん断面における粘土粒子の配向状態に支配され, 粘土粒子の完全配向には大変位せん断が必要とされるため, 変位が十分でない場合に高めに得られる (宜保, 1987; Gibo et al., 1987)。直接せん断試験では, 繰り返しせん断によって大変位を与えており, 配向面の形成が十分でないために, 残留強度が幾分高くなる傾向にある (古谷, 1983a, 1983b)。それに対し, リングせん断試験は, 試験中せん断面が不変で, 一定垂直応力下で連続的にしかも一定方向に大変位せん断が行えるので, 強度の低下および残留強度を得るのに有効である (Bishop et al., 1971; Lupini et al., 1981; Gibo et al., 1987)。代表的なリングせん断試験機として, Bishop et al. (1971) が開発した型式があるが, ①リングせん断機構固有の回転盤のブレに起因して応力が周期的に変動する, ②①と同じ原因により上・下拘束リングのエッジ間から試料が漏出する, ③周辺摩擦の影響によりせん断面に作用する真の垂直荷重が検出できない, ④機械構造が複雑で操作性が悪いといった問題点があった。宜保 (1994) は, 新型の定体積・定圧兼用リングせん断試験機を開発し, これらの問題を大幅に改善してその有効性を検証した。宜保型リングせん断試験機の機能と特徴を以下に整理する。①回転機構の高精度化により回転盤のブレを解消, ②①により応力変動およびエッジ間からの試料漏出を防止, ③載荷部に加えて受荷部に垂直荷重検出器を取り付けたことにより, せん断面に作用する実荷重の測定が可能, ④シンプルな機械構造としたため, 操作性が向上, ⑤定体積せん断および定圧せん断が可能。Fig. 1.4に宜保型リングせん断試験機の全容と構造を示す (宜保, 1994)。

2 回復強度とその意義

地すべり土を一定の有効垂直応力の下で大変位せん断すると, せん断応力はピーク (完全軟化) 強度を示した後漸減しつつ残留強度に到達する。その後, せん断を停止して垂直応力を保ったまま2日間再圧密し, 再びせん断を行うとせん断強度が幾分回復するものがある (Fig. 1.5)。

地すべりの安定解析において, 残留強度のみでの対応ではすべりの現状を説明できないことがある。特に, 浅層地すべりや深い地すべりの末端部の比較的浅いすべり面領域に攪乱薄層が存在する場合, 攪乱土が停止時に土かぶり圧による再圧密により強度を回復し, すべり抵抗を微増させることが考えられる。ここで, Fig. 1.6に示すような地すべりを想定し, 移動量が大きく, 停止直後のすべり面強度は全域で残留強度にまで低下した後停止したと仮定する。“大変位せん断-再圧密-再せん断”試験においては, $\sigma'_n \leq 100\text{kPa}$ の低い垂直応力の下で再圧密による強度の回復が認められ, Fig. 1.7のような結果が得られたとする。Fig. 1.6におけるスライス①~⑥およびスライス⑩~⑬では, 有効土かぶり圧が $\sigma'_n \leq 100\text{kPa}$ 相当であるので, すべり面強度として回復強度の関与を, スライス⑦~⑨では定数については, $\sigma'_n > 100\text{kPa}$ 相当であるので残留強度の関与を考えた。まず, 残留強度定数および回復強度定数を簡便式に代入し, 繰り返し計算によって再発生時 (安全率 $F_s = 1.00$) の地下水位を確定した。すべり面の平均強度定数は, 「残留係数を導入した安定解析法」 (宜保, 1987, 1996) によって求め, $\bar{c}' = 1.69\text{kPa} \cdot \bar{\phi}' = 26.3^\circ$ を得た。一方, すべり面の平均強度として残留強度のみが関与しているとして解析を行った場合, $F_s = 0.91$ となり, 斜面の安定度を過小に評価してしまう。

回復強度は, 再活動型地すべりの発生機構の解明および合理的で精度の高い安定解析手法の確立に,

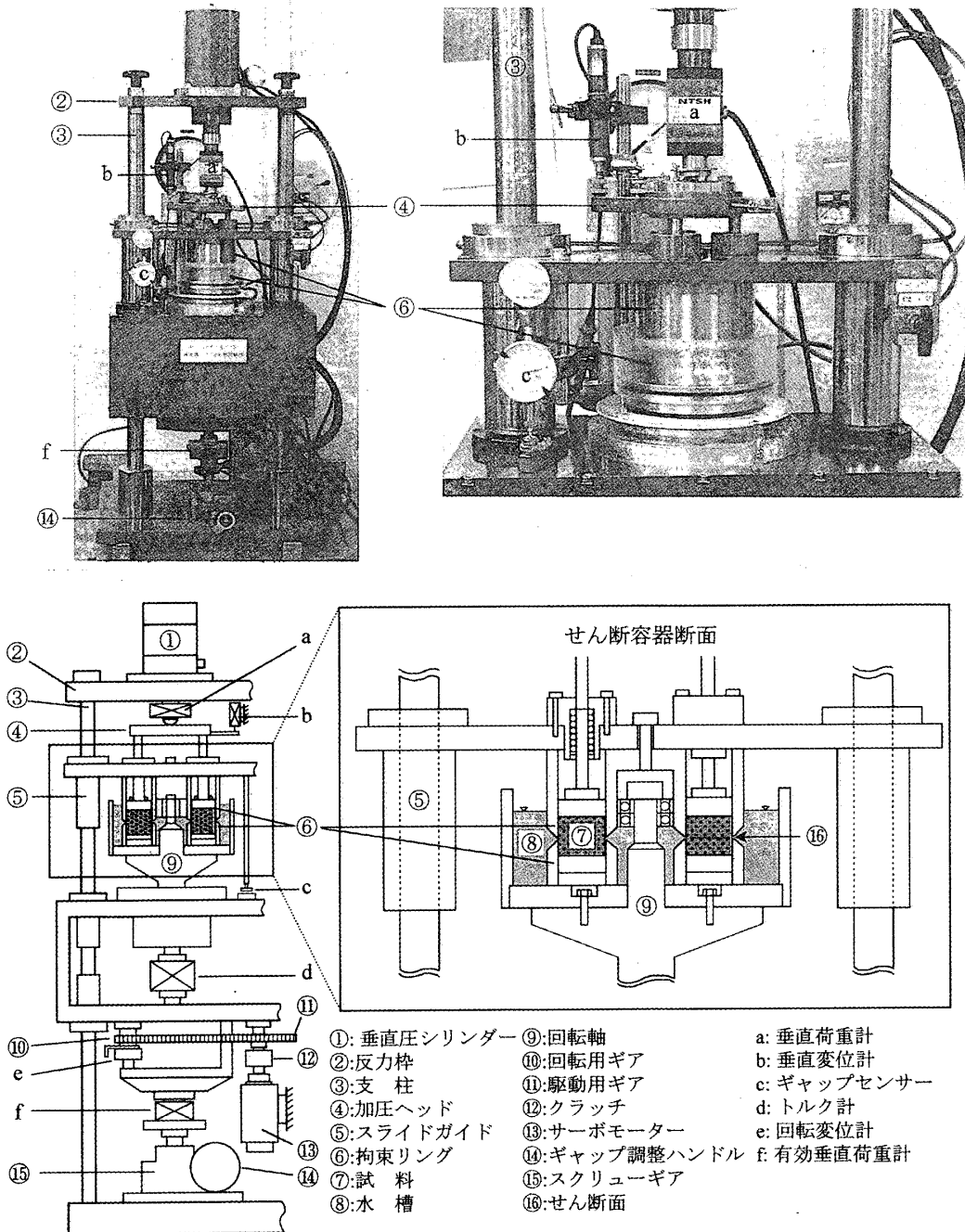


Fig. 1.4 宜保型リングせん断試験機とその構造 (宜保、1994)
Principles of operation of ring shear apparatus designed by Gibo

残留強度と共に必要不可欠なものであり、回復強度特性を明確にすることは重要である。

第4節 本論文の目的と構成

地すべりの発生・再発生の最大素因は土質であり、せん断強度が直接的に関与する。特に、残留強度および回復強度は地すべり再発生機構に大きく関わるもので、それらの強度特性を明確にすることは重要である。

本研究では、地すべり土の残留強度と物理的・鉱物学的性質をより明確にし、残留強度特性を活用し

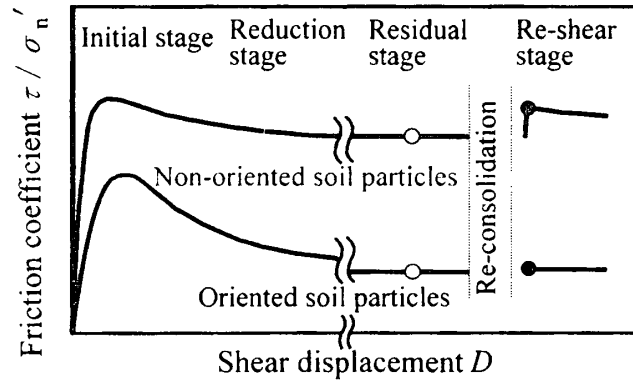


Fig. 1.5 低い垂直応力の下における地すべり土の再せん断特性

Diagrammatic re-shear characteristics of landslide soils subjected to the lower effective normal stress

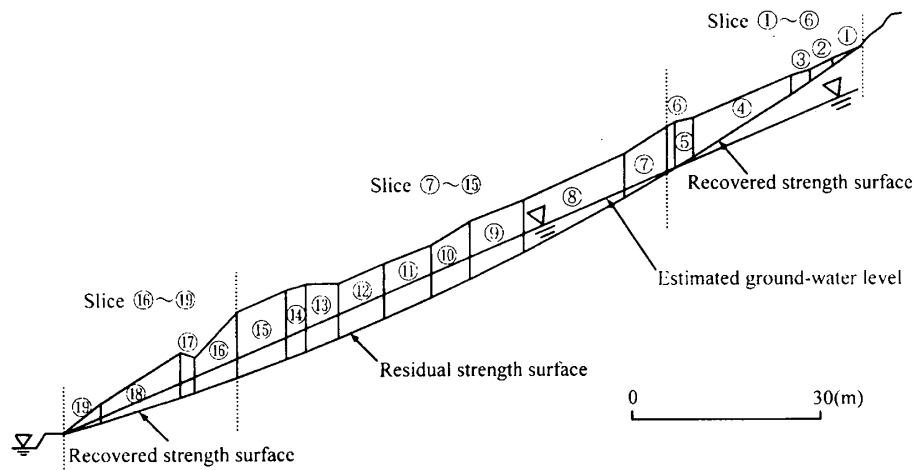


Fig. 1.6 モデル斜面の安定解析断面図

Cross-sectional diagram for stability analysis of a model slope

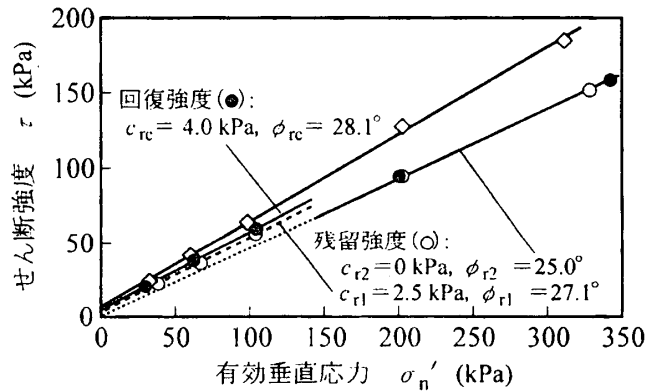


Fig. 1.7 回復強度および残留強度定数

Parameters of recovered strength and residual strength

た合理的な残留強度決定手法の確立を試みる。また、リングせん断試験機を用いて“大変位せん断-再圧密-再せん断”試験を行い、残留状態からの強度の回復について検討し、回復強度と物理的・鉱物学的性質との関係についても明確にする。

本論文は、次の6つの章から構成されている。

第1章 序論

第2章 残留強度と物理的・鉱物学的性質との関係

第3章 残留強度包絡線の湾曲化と強度定数決定手法

第4章 回復強度に及ぼす垂直応力の影響

第5章 回復強度と鉱物組成との関係

第6章 総括

各章の内容を要約すると以下の通りである。

第1章では、本論文の研究の背景とその目的について述べ、本論文の内容に関する既往の研究を整理し、それらの未解明点・問題点を指摘し、本論文の位置づけを明確にする。

第2章では、地質・土質、物理的・鉱物学的性質およびせん断強度を異にする多くの地すべり土について、物理的・鉱物学的性質、特に、 $<420\mu\text{m}$ 試料全体の配向性粘土鉱物 (St, Vt, Ch, Mc) 総量、および Q_r および F_d の総量に注目し、 ϕ_r との関係进行を明らかにする (宜保ら, 2000)。

第3章では、物理的・鉱物学的性質を異にする試料を用いて残留強度測定試験を行い、 $\tau_r / \sigma'_n \sim \sigma'_n$ 関係および残留せん断面の状況に注目して残留強度包絡線と垂直応力レベルの関係を明らかにし、残留強度定数の決定手法の確立を試みる (中村ら, 1999)。

第4章では、地すべりの滑動・停止・再発を想定した“大変位せん断-再圧密-再せん断”試験結果に基づき、残留強度にまで低下したせん断面の再圧密による強度回復について検討し、回復強度と試料の物理的性質および有効垂直応力との関係を明らかにする (中村ら, 2000)。

第5章では、残留せん断面の形成・発達が生ずる試料の物理的・鉱物学的性質、特に含有粘土鉱物の種類に支配されることから、試料の鉱物組成が強度の回復に大きく関与するとの推論に基づき、回復強度と粒度組成および鉱物組成との関係を明確にする (中村ら, 2000)。

第6章は総括であり、各章で得られた成果を要約して本論文の結論とする。

本論文の構成と各章の相互関係は Fig. 1.8 に示す通りである。

地すべり土の残留強度と残留状態からの強度の回復に関する研究

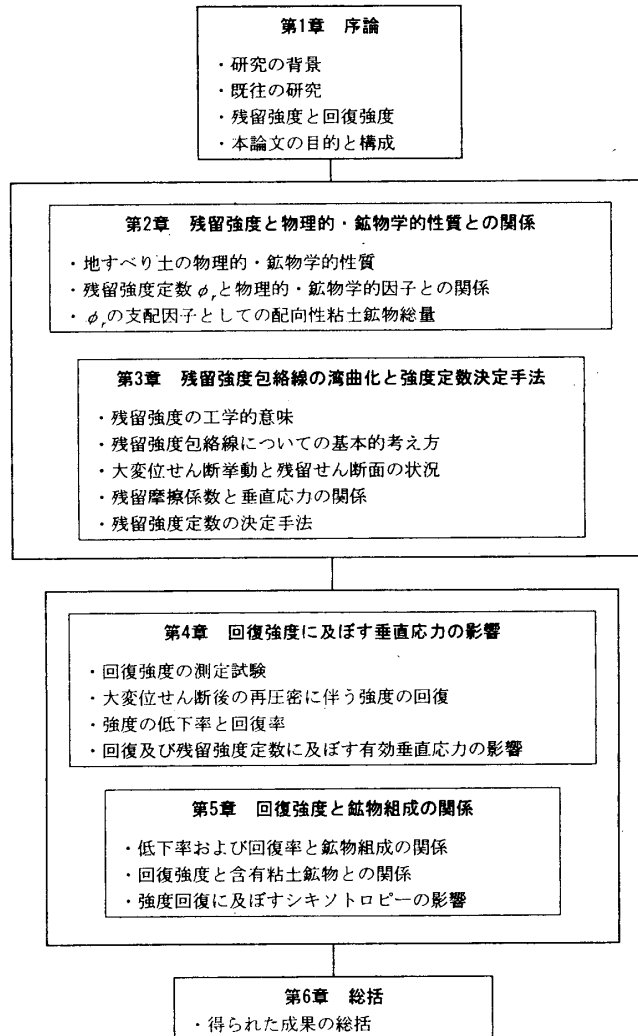


Fig. 1.8 本論文の構成
Outline of the dissertation

第1章 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, *Géotechnique*, **21** (4) : 273 - 328
2. Bromhead, E.N. 1978 Large landslide in London clay at Hence bay, Kent, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, **11** : 291 - 304
3. Chandler, R.J. 1977 Back analysis techniques for slope stabilization works:a case record, *Géotechnique*, **27** (4) : 479 - 495
4. Chandler, R.J. 1983 Recent European experience of landslides in overconsolidated clays and soft rocks, Proc.of 4th Int. Symp. Landslides, Tronto, Canada : 61 - 81
5. Collotta, T., Cantoni, R., Pavesi, U., Ruberl, E. and Moretti, P. C. 1989 A correlation between residual friction angle, gradation and the index properties of cohesive soils, *Géotechnique*, **39** (2) : 343 - 346
6. 古谷保 1983a 残留強度の性質とその測定法について, *地すべり*, **20** (1) : 21-27
7. 古谷保 1983b 一面せん断試験を中心とした地すべり粘土の強度測定, *農業土木試験場技報*, **C** (23) : 31 - 54
8. 宜保清一 1978 島尻層軟化泥岩の残留強度について, *琉球大学農学部学術報告*, **25** : 265 - 281
9. 宜保清一 1983 島尻層泥岩の残留強度測定と結果の解釈—地すべり・崩積土の残留強度特性 (I) —, *農業土木学会論文集*, **104** : 61 - 68
10. Gibo, S. 1985 The ring shear behaviour and residual strength, Proc. 4th Int. Conf. and Field Workshop on Landslides, Tokyo : 283 - 288
11. 宜保清一 1987 地すべり斜面の安定性評価に用いる強度定数の考え方, *土と基礎*, **35** (11) : 27 - 32
12. 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精度, *地すべり*, **31** (3) : 24 - 30
13. 宜保清一 1996 残留係数を導入した安定解析法—沖縄県島尻層群泥岩地すべりへの適用—, *地すべり*, **33** (2) : 46 - 50
14. 宜保清一, 陳信雄, 江頭和彦, 林義隆, 周亜明 1997 台湾, 中部横貫公路地すべり土の残留および回復強度特性, *地すべり*, **34** (2) : 50 - 56
15. 宜保清一, 江頭和彦 1992 沖縄, 島尻層群泥岩試料の残留強度と粘土粒子配向の関係, *農業土木学会論文集*, **161** : 19 - 24
16. 宜保清一, 江頭和彦, 仲村哲 1993 崩積土すべり土の土質と残留強さ, *地すべり*, **30** (2) : 25 - 29
17. 宜保清一, 江頭和彦, 佐々木慶三, 吉沢光三 1990 地すべり土塊のせん断強度と斜面安定度評価—新潟県安塚町牧野地すべりを例として—, *土と基礎*, **38** (12) : 35 - 40
18. 宜保清一, 中村真也, 江頭和彦 2000 地すべり土の残留強度と物理的・鉱物学的性質との関係, *農業土木学会論文集*, **210** : 69 - 74
19. 宜保清一, 佐々木慶三, 吉沢光三, 伊田茂 1986 沖縄, 北丘ハイツ地内泥岩すべりにおける地質構造規制とすべり面強度パラメータの算定, *地すべり*, **23** (3) : 15 - 20
20. Gibo, S., Egashira, K. and Ohtsubo, M. 1987 Residual strength of smectite-dominated soils from the Kamenose landslide in Japan, *Canadian Geotechnical Journal*, **24** (3) : 456 - 462
21. 宜保清一, 江頭和彦, 林義隆 1992 地すべり土の残留強度の大変位せん断試験による測定法と物理的・鉱物学的性質による類推法, *農業土木学会論文集*, **159** : 57 - 63
22. Hawkins, A.W. & Privett, K.D. 1985 Discussion on the residual strength of cohesive soils, *Ground Engineering*, **18** (8) : 22 - 29

23. Kanji, M.A. 1974 The relationship between drained friction angles and Atterberg limits of natural soils, *Géotechnique*, **24** (4) : 671 - 674
24. 紀平潔秀 1990 すべり面土の物理的・力学的特性, *地すべり*, **27** (2) : 1 - 8
25. (財)高速道路調査会 1985 地すべり地形の安定度評価に関する研究報告書, 日本道路公団 : 169 - 172
26. Lambe, T. W. 1960 "A mechanistic picture of shear strength in clay," Proc. ASCE Research Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils : 437
27. Lupini, J.F., Skinner, A.E. and Vaughan, P. R. 1981 The drained residual strength of cohesive soils, *Géotechnique*, **31** (2) : 181 - 213
28. Maksimovic, M. 1989 On the residual shearing strength of clays, *Géotechnique*, **39** (2) : 347 - 351
29. 丸山清輝, 吉田克美 1994 再活動型地すべりの移動機構, *地すべり*, **30** (4) : 12 - 19
30. Moore, R. 1991 The chemical and mineralogical controls upon the residual strength of pure and natural clays, *Géotechnique*, **41** (1) : 35 - 47
31. 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) : 404 - 409
32. 中村真也, 宜保清一 2000 地すべり土の回復強度と垂直応力の影響, *地すべり*, **37** (3) : 18 - 24
33. 中村真也, 宜保清一, 江頭和彦, 吉永安俊 2000 地すべり土の回復強度と鉱物組成との関係, *地すべり*, **37** (3) : 10 - 17
34. 中村真也, 宜保清一, 周亜明, 江頭和彦 1999 地すべり土の残留強度包絡線の湾曲化と強度定数決定手法, *地すべり*, **36** (1) : 28 - 34
35. Noble, H.L. 1973 Residual strength and landslides in clay and shale, Proc. ASCE, 99 (SM9) : 705 - 719
36. (社)農業土木学会 1989 農林水産省構造改善局, 土地改良事業計画設計基準—農地地すべり防止対策—, (社)農業土木学会 : 34, 165 - 166
37. Skempton, A. W. 1964 Long-term stability of clay slopes, *Géotechnique*, **14** (2) : 77 - 101
38. Skempton, A. W. 1985 Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory, *Géotechnique*, **35** (1) : 3 - 18
39. 鈴木素之 1998 リングせん断試験による土の残留強度に関する基礎的研究, 学位論文, 信州大学 : 17 - 40
40. Tika, T.E., Vaughan, P.R. and Lemos, L.J. 1996 Fast shearing of pre-existing shear zones in soil, *Géotechnique*, **46** (2) : 197 - 233.
41. 鶴飼恵三, 干玉貞, 若井明彦, 榎戸源則 1996 斜面安定工の効果と強度定数 c' , ϕ' との関係, *地すべり*, **33** (2) : 35 - 39
42. Voight, B. 1973 Correlation between Atterberg plasticity limits and residual shear strength of natural soils, *Géotechnique*, **23** (2) : 265 - 267
43. 矢田部龍一, 八木則男, 榎木明潔 1991 破碎帯地すべり土のリングせん断特性, *土木学会論文集*, **436**/Ⅲ - 16 : 93 - 101
44. 矢田部龍一, 八木則男, 向谷光彦, 榎木明潔 1996 土の残留強度に与える試験法ならびにすべり面の拘束条件の影響, *土木学会論文集*, **554**/Ⅲ - 37 : 139 - 146
45. 周亜明, 宜保清一, 江頭和彦, 藤本昌宜 1997 中国, 岷江および支流雑谷脳河流域の地すべり土の物理的・鉱物学的性質とせん断強度特性, *農業土木学会論文集*, **187** : 23 - 29

第2章 残留強度と物理的・鉱物学的性質との関係

第1節 はじめに

第1章で述べたように、土の物理的・鉱物学的因子と残留強度定数 ϕ_r ($c_r = 0$)との関係については、Skempton (1964) がロンドン粘土等の ϕ_r は粘土含有量CFの増加に伴って減少することを示して以来、多くの研究がなされてきた（例えば、Lupini et al., 1981; Skempton, 1985; Gibo et al., 1987; 宜保ら, 1992）。それらの報告は主にスメクタイトStを多く含有する土について検討したものである。しかし、地すべり土には、Stをほとんど含有しないものの ϕ_r が小さいものや、非配向性鉱物を主とし ϕ_r が大きいものも少なくない。前者に関係する鉱物としてパーミキュライト (Vt)、緑泥石 (Ch)、雲母 (Mc) 等の配向性鉱物、後者においては石英 (Qr)、長石 (Fd) 等の非配向性鉱物が考えられ、それら鉱物の含有量と ϕ_r との関係を明らかにすることが重要である。また、これまで、 $< 2\mu\text{m}$ 粘土含有量CFが残留強度を支配するとの認識から、 $< 2\mu\text{m}$ 粘土中のSt含有量と ϕ_r との関係が示されてきているが、 ϕ_r は一般に $< 420\mu\text{m}$ フルイ通過再調整試料を用いて測定されるので、 $< 420\mu\text{m}$ 試料全体の鉱物含有量と ϕ_r との関係について論じるのがより適切である。

本章は、地質・土質、物理的・鉱物学的性質およびせん断強度を異にする多くの地すべり土について、 $< 420\mu\text{m}$ 試料全体の配向性粘土鉱物 (St, Vt, Ch, Mc) 総量、およびQrおよびFdの総量に注目し、リングせん断試験によって測定した ϕ_r との関係を明らかにしたものである。

第2節 検討に用いたデータと試験方法

Table 2.1は、地すべり土の物理試験、鉱物分析および残留強度測定の結果である。

粒度試験は、JIS A 1204法 (①法と称す) と音波処理反復法 (吉永ら, 1984) (②法) によった。①法では粘土粒子が完全には分散されないことが指摘されており (宜保ら, 1992)、このことは、Table 2.1に示した試料のうち仲順試料を除くすべてにおいて②法による値が①法より大きくなっていることから明らかである。そのため、 ϕ_r とCFの関係の検討には②法で求めた値のみを用いた。②法では、せん断試験後の試料を過酸化水素水で処理して有機物を除去し、水洗後、水酸化ナトリウムを添加してpH10に調整し、音波処理による分散-沈定-サイホンによる採取を繰返して粘土 ($< 2\mu\text{m}$) を分離した。続いて、シルト (2-20 μm)、細砂 (20-200 μm)、粗砂 (200-420 μm) を分離し、定量した。

鉱物組成は、粒度試験で分離した画分を用いて、X線回折法 (和田, 1966) により同定した。粘土画分 ($< 2\mu\text{m}$) では、Mg飽和、グリセロール処理試料 (定方位試料) のピーク強度を基に、各鉱物の相対含量を計算した。その際、それぞれ次のピークを用いた。スメクタイト, 18.0Å; 雲母, 10.0Å; カオリナイトと緑泥石, 7.1Å; 緑泥石とパーミキュライト, 14.2Å; 雲母/緑泥石混合層鉱物, 11.0Å; 滑石, 9.3Å; 角セン石, 8.4Å; 石英, 4.25Å; 長石, 3.19Åと3.24Å; 蛇紋石, 7.28Å。カオリナイトと緑泥石の相対含量は、3.57Åと3.53Åのピーク強度比から見積もった。ピーク強度と鉱物含量は1:1には対応しないので、補正係数を用いた。シルト (2-20 μm)、細砂 (20-200 μm)、粗砂 (200-420 μm) 画分では、乱方位試料 (シルト、細砂、粗砂をメノウの乳鉢と乳棒で粉碎後、アルミニウムホルダーに充填して調整した試料) のピーク強度を基に計算した。その際、スメクタイト, 18.0Å; 雲母, 10.0Å; 緑泥石とカオリナイト, 7.1Å; パーミキュライトと緑泥石, 14.2Å; 雲母/緑泥石混合層鉱物, 10.8Å; 滑石, 9.3Å; 角セン石, 8.4Å; 沸石, 9.03Å; 石英, 4.25Å; 長石, 3.19Åと3.24Å; 方解石, 3.03Å; 苦灰石, 2.89Åのピークを用いた。ピーク強度と鉱物含量は1:1に対応するとみなした。ただし、石英の4.25Åのピーク強度を3倍して3.34Åのピーク強度に換算した。 $< 420\mu\text{m}$ 試料全体の鉱物組成は、各画分の含有量とその鉱物組成から計算した (Table 2.2)。

Table 2.1 試料の残留強度定数および物理的・鉱物学的性質
Residual strength parameter, and physical and mineralogical properties of soil samples

試料	残留強度定数 ϕ_r (°) ($c_r = 0$)	スメクタイト含有量		粒度組成				塑性指数 I_p
		St (%)		clay (%)		silt (%)	sand (%)	
		<2 μ m	<420 μ m	<2 μ m	2-20 μ m	20-420 μ m		
				①法 ¹⁾	②法 ²⁾	②法	②法	
島尻層群泥岩								
仲順 ^{a)}	9.3	13	6	52.1	50.0	45.2	4.8	57.1
北丘1 ^{a)}	12.4	21	12	34.0	56.0	—	—	44.0
北丘2 ^{a)}	14.0	19	10	39.0	52.0	—	—	33.0
中山1 ^{b)}	16.2	21	11	—	50.7	42.0	7.3	24.4
中山2 ^{b)}	22.1	18	8	—	44.2	46.6	9.2	—
中山3 ^{b)}	27.2	27	10	—	37.4	39.1	23.5	—
佐世保層群泥岩								
石倉1 ^{a)}	8.0	54	30	—	54.5	35.3	10.2	33.6
長田代 ^{a)}	7.9	—	20	18.0	44.0	—	—	31.0
椎谷層群泥岩								
牧野 ^{a)}	9.5	64	37	47.0	54.0	—	—	57.0
凝灰岩								
石倉2	6.0	98	90	—	87.6	8.5	3.9	—
凝灰質礫質土								
亀の瀬・峠	7.5	98	77	34.0	73.2	17.8	9.0	64.0
亀の瀬・稲葉	5.5	—	76	34.0	62.0	—	—	53.0
亀の瀬・清水谷 ^{a)}	8.2	—	59	26.0	54.0	—	—	69.0
珪化頁岩由来断層粘土								
大所1 ^{a)}	9.8	7	4	—	50.8	20.7	28.5	—
砂質頁岩								
台湾 ^{b)}	25.4	0	0	17.2	35.3	31.4	33.3	10.8
蛇紋岩								
大所2	27.0	0	0	4.4	17.8	15	68	26.7
黒色千枚岩								
雁門	20.0	0.5	0	—	16.6	20.9	62.5	14.8
沙埧	36.0	0.5	0	—	9.3	34.3	56.4	7.7
馬蘭黄土								
廟湾	32.2	3	1	13.8	18.7	30.9	50.4	12.5
ベントナイト	5.3	100	100	70.0	100.0	0	0	206.0

1) JIS A 1204法 2) 音波処理反復法 a) およびb) Fig.2.1におけるグループaおよびb

残留強度測定には宜保型リングせん断試験機 (宜保, 1994) を使用した (Fig. 1.4)。420 μ mフルイ通過スラリー試料について、水浸下で所定の垂直応力 σ_n (30kPa, 50kPa, 60kPa, 100kPa, 150kPa, 200kPa, 300kPa, 400kPa) により正規圧密した後、一段階载荷による定応力せん断を行った (但し、石倉試料 $\sigma'_n = 200$ kPaについては、 $\sigma'_n = 400$ kPaからの多段階载荷によった)。なお、完全軟化強度および残留強度は排水強度であるので、せん断は排水条件を満たす変位速度 (通常、 <0.01 mm/min) とした (Bishop et al., 1971)。したがって、所定の垂直応力 σ_n は有効垂直応力 σ'_n とみなすことができる。残留強度定数は同一試料でも垂直応力レベルの大小によって異なるので (第3章にて詳述)、 $c_r = 0$ となる高い垂直応力レベルの ϕ_r 値を用いた。

第3節 ϕ_r と物理的・鉱物学的因子との関係

Fig. 2.1は、 ϕ_r と $<2\mu$ m粘土含有量 CF の関係を示したものである。図中の N はデータ数、実線は Fig. 1.1に示した Lupini et al. (1981) による砂-ベントナイト混合土の ϕ_r -CF 関係である。 ϕ_r は

Table 2.2 <420 μ m 試料の鉱物組成 (%)
Mineralogical composition (%) of <420 μ m soil samples

試料	St	Vt	Ch	Mc	Sp	Qr	Fd	Others
島尻層群泥岩								
仲順 ^{c)}	6	0	15	27	0	34	12	6
中山1 ^{d)}	11	0	10	25	0	39	9	6
中山2 ^{d)}	8	0	11	26	0	39	8	8
中山3 ^{d)}	10	0	7	18	0	42	14	9
佐世保層群泥岩								
石倉1 ^{c)}	30	0	3	10	0	43	5	9
凝灰岩								
石倉2	90	0	0	0	0	3	1	6
凝灰質礫質土								
亀の瀬・峠	77	0	0	2	0	14	3	4
亀の瀬・清水谷	59	0	0	4	0	21	5	11
珪化頁岩由来断層粘土								
大所1	4	41	24	0	0	7	5	19
砂質頁岩								
台湾 ^{d)}	0	0	13	23	0	52	12	0
蛇紋岩								
大所2	0	0	0	0	99	0	0	1
黒色千枚岩								
雁門 ^{d)}	0	0	15	24	0	39	5	17
沙埧	0	0	18	14	0	42	11	15
馬蘭黄土								
廟湾	1	0	6	15	0	56	21	1

St:スメクタイト, Vt:バーミキュライト, Ch:緑泥石, Mc:雲母, Sp:蛇紋石, Qr:石英, Fd:長石, Others (Kt:カオリナイト, Dol:苦灰石, Tc:滑石等)

c)およびd) Fig.2.6におけるグループcおよびd

全体としてCFの増加に伴って低下する傾向を示し、ベントナイトの $\phi_r = 5.3^\circ$ に収斂する。60% \leq CF \leq 100%においては、凝灰岩(石倉2試料)および凝灰質礫質土(亀の瀬・峠試料)が実線にフィットしている。これらの試料は配向性のスメクタイト(St)を多く含む。CF<20%の領域に位置する馬蘭黄土(廟湾試料)、黒色千枚岩(沙埧試料)には、シルト・砂分が多く、非配向性の石英(Qr)が多く含有される。Skempton(1985)により指摘された強度低下の著しいCF=40%の近傍においては、島尻層群泥岩(中山2試料)、砂質頁岩(台湾試料)等の試料群が $10^\circ \leq \phi_r \leq 30^\circ$ の範囲に広く分布しており、CFと ϕ_r との間に一義的な関係は認められない。 $10^\circ \leq \phi_r \leq 15^\circ$ のグループaでは配向性粘土鉱物等の粒子配向を促す因子が、 $15^\circ \leq \phi_r \leq 30^\circ$ のグループbでは砂粒子や非配向性鉱物といった粒子配向を妨げる因子が支配的であると考えられる。ここで、配向性粘土鉱物は残留せん断面の鏡肌形成で支配因子となるSt、Vt等を、非配向性鉱物は粒子配向を妨げるQr、Fd等を指す。

Fig. 2.2は、 ϕ_r と<2 μ m粘土中のSt含有量の関係を示したものである。粘土鉱物のうち高膨潤性と高配向性を有するStは、強度低下に寄与し(Kenney, 1967)、 ϕ_r との関係が良い(宜保ら, 1992)ことが報告されている。しかし、St<30%の領域におけるプロットのばらつきは、<2 μ mCFが低い場合、St含有量が残留強度の支配因子にはなり得ないことを示唆している。Fig. 2.3は、 ϕ_r と<420 μ m

試料全体の St 含有量との関係を示したもので、Fig. 2.2 よりもばらつきが小さい。しかし、 $St < 20\%$ の領域では試料が $9.3^\circ \leq \phi_r \leq 36.0^\circ$ の範囲に広く分布し、明瞭な関係が認められない。この領域に位置する珪化頁岩由来断層粘土（大所1試料）および島尻層群泥岩（仲順試料）は、St 含有量が前者で4%、後者で6%と低いにもかかわらず、 ϕ_r がそれぞれ 9.8° 、 9.3° と小さい。 ϕ_r の小さい試料では、パーミキュライト (Vt) 等の St 以外の配向性粘土鉱物が、 ϕ_r の低下に寄与していることが考えられる。

そこで、 ϕ_r と $< 420\mu\text{m}$ 試料全体の配向性粘土鉱物、すなわち St、Vt、Ch および Mc の総量との関係を調べ、結果を Fig. 2.4 に示した。Vt は、2:1 型層状ケイ酸塩鉱物で、St と同じく薄板状かつ膨張性で、構造単位中の層荷電が St との境界の 0.6 から膨張性を失う 0.9 まで及ぶ（日本粘土学会，1987）。残留せん断面における粒子配向とのかかわりでは、St に類似するものから全く異なるものまで多様であることが推測される。Ch と Mc も 2:1 型層状ケイ酸塩鉱物であるが、St、Vt と異なり非膨張性である（日本粘土学会，1987）。Fig. 2.4 に見られるように、 ϕ_r と配向性粘土鉱物総量との関係はかなり良い。珪化頁岩由来断層粘土（大所1試料）および島尻層群泥岩（仲順試料）は、共に配向性粘土鉱物総

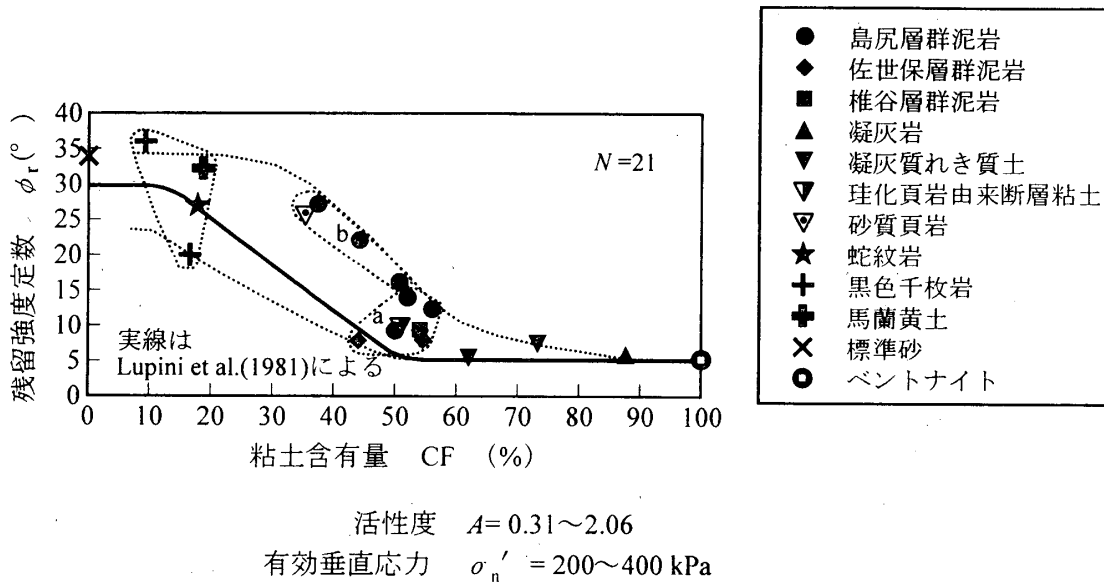


Fig. 2.1 残留強度定数 ϕ_r と $< 2\mu\text{m}$ 粘土含有量 CF の関係
Relationship between residual strength parameter ϕ_r and $< 2\mu\text{m}$ clay content CF

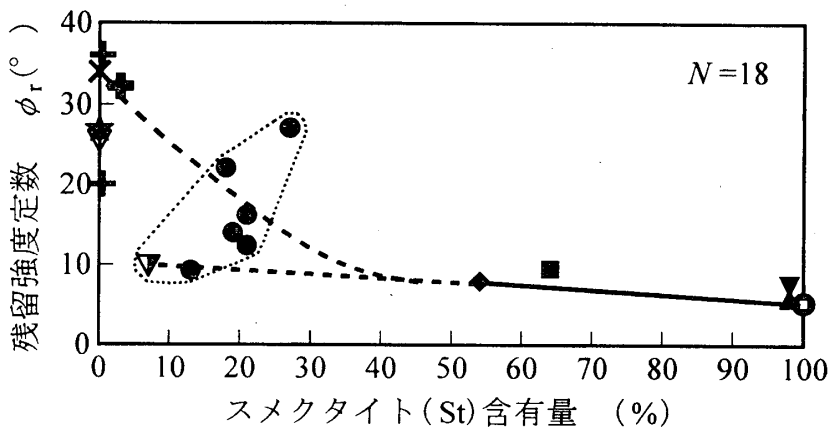


Fig. 2.2 残留強度定数 ϕ_r と $< 2\mu\text{m}$ 粘土中のスメクタイト (St) 含有量との関係
Relationship between residual strength parameter ϕ_r and smectite (St) content in $< 2\mu\text{m}$ clay

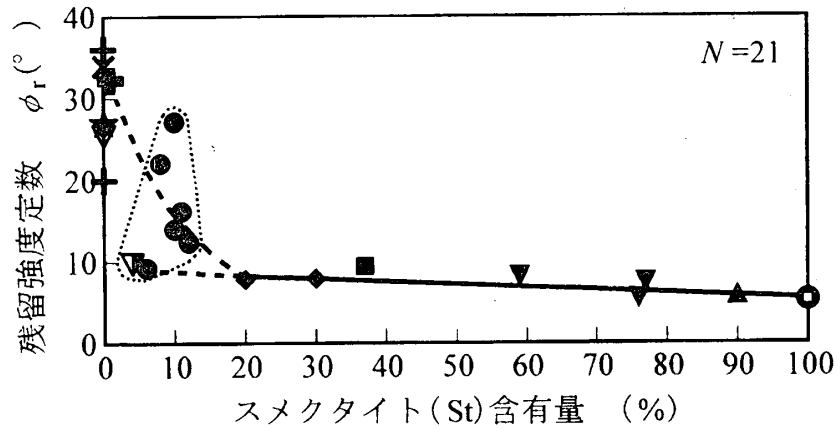


Fig. 2.3 残留強度定数 ϕ_r と $<420\mu\text{m}$ 試料中のスメクタイト (St) 含有量の関係
Relationship between residual strength parameter ϕ_r and smectite (St) content in $<420\mu\text{m}$ soil samples

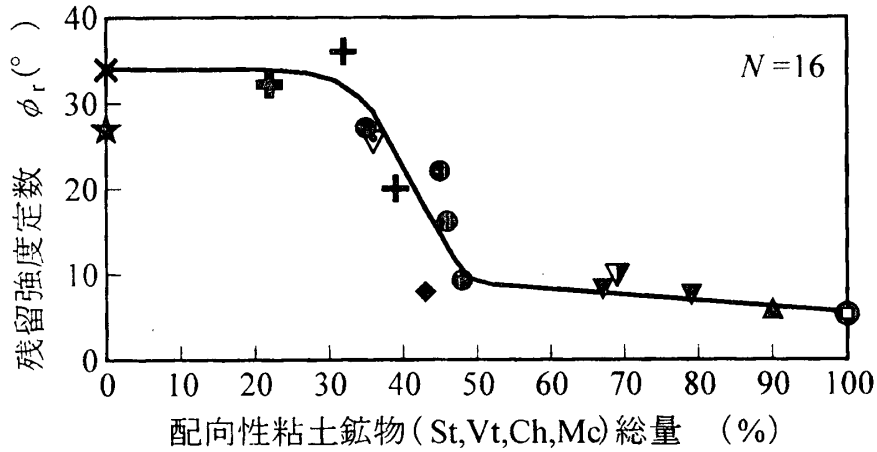


Fig. 2.4 残留強度定数 ϕ_r と $<420\mu\text{m}$ 試料中の配向性粘土鉱物 (St, Vt, Ch, Mc) 総量の関係

Relationship between residual strength parameter ϕ_r and total contents of preferred-oriented clay minerals (St, Vt, Ch, Mc) in $<420\mu\text{m}$ soil samples

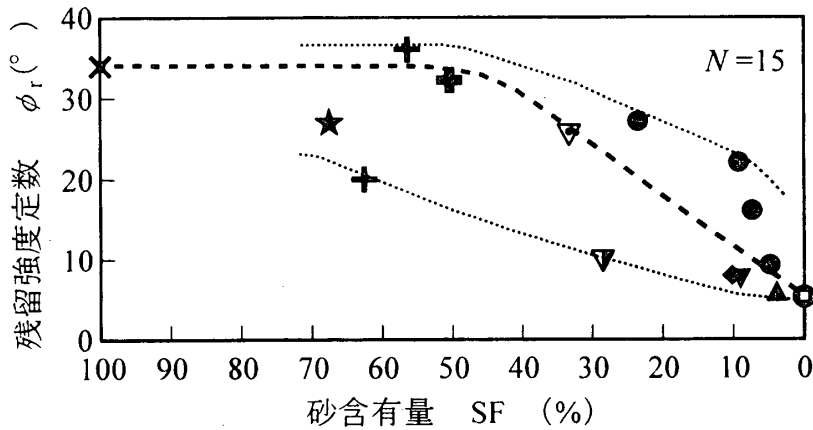


Fig. 2.5 残留強度定数 ϕ_r と砂 (20-420 μm) 含有量 SF の関係
Relationship between residual strength parameter ϕ_r and sand (20-420 μm) content SF

量が大きいことから、低い ϕ_r を有していることが説明できる。 ϕ_r -St含有量の関係図 (Fig. 2.3) の $St < 20\%$ の領域における試料群は、Fig. 2.4においては配向性粘土鉱物総量30%~50%の領域に納まっており、総量の増加に伴って ϕ_r が小さくなる関係が鮮明に認められる。この配向性粘土鉱物総量30%~50%の領域は、 ϕ_r の支配因子が非配向性鉱物から配向性鉱物へと交代する遷移域であり、 ϕ_r が総量の増加とともに30°前後から10°前後へと急減する。 ϕ_r と配向性粘土鉱物総量との関係では、用いた試料の大部分が、全域にわたって椅子型状曲線の近傍にプロットされる。

Fig. 2.5は、 ϕ_r と砂 (20~420 μm) 含有量 SF の関係を示したものである。Fig. 2.1との対比を考え、横軸の SF を100→0%の降順で示した。 ϕ_r は SF の減少に伴って低下する傾向を示すが、Fig. 2.1と同様、プロットの分布にばらつきが見られる。珪化頁岩由来断層粘土 (大所1試料) においては、SFが28.5%であるにもかかわらず $\phi_r = 9.8^\circ$ と小さい。一方、島尻層群泥岩の2試料 (中山1および中山2試料) は、低いSFにもかかわらず比較的高い $\phi_r \geq 16^\circ$ となっている。

Fig. 2.6では、 ϕ_r に対して<420 μm 試料全体の Qr および Fd の総量を降順にプロットしている。 ϕ_r は Qr および Fd の総量の減少に伴って小さくなる傾向にあり、全体として両者の関係は良い。Qr および Fd は非配向性であり、これらが卓越する試料では、残留せん断面の形成・発達を抑えられるために強度の低下が小さく、 ϕ_r が高い。Qr および Fd の総量が30%以上において、 $\phi_r \leq 15^\circ$ のグループ c では ϕ_r の低下に寄与する配向性粘土鉱物の影響がみられるのに対して、 $\phi_r > 15^\circ$ のグループ d では Qr および Fd が大きく影響しているようである。Qr および Fd の総量が30%以下において、 $\phi_r \leq 15^\circ$ の試料では Qr および Fd の影響はほとんどみられない。蛇紋岩 (大所2試料) は、Qr および Fd が含有されないものの、 $\phi_r = 27.0^\circ$ と高い。これは、高い SF 含有量と99%を占める非配向性の蛇紋石 Sp の影響によるものである。

Fig. 2.7は、 ϕ_r と塑性指数 I_p の関係を示したものである。 ϕ_r は I_p が大きくなるに伴って減少し、 $I_p \geq 50\%$ に対して $\phi_r \leq 9.5^\circ$ となるが、プロットの多くは、 $20 \leq I_p < 50$ の領域で $7.9^\circ \leq \phi_r \leq 27^\circ$ 、 $5 \leq I_p \leq 15$ に対して $20^\circ \leq \phi_r \leq 36^\circ$ とばらついている。地すべり土の多くが $I_p \leq 50$ であるという事実 (Voight, 1973; Kanji, 1974; Lupini et al., 1981; 紀平, 1990; 矢田部ら, 1991a, 1991b; 宜保ら, 1992; 横田ら, 1995; Tika et al., 1996) を踏まえると、 ϕ_r と I_p との間に高い相関は認め難い。

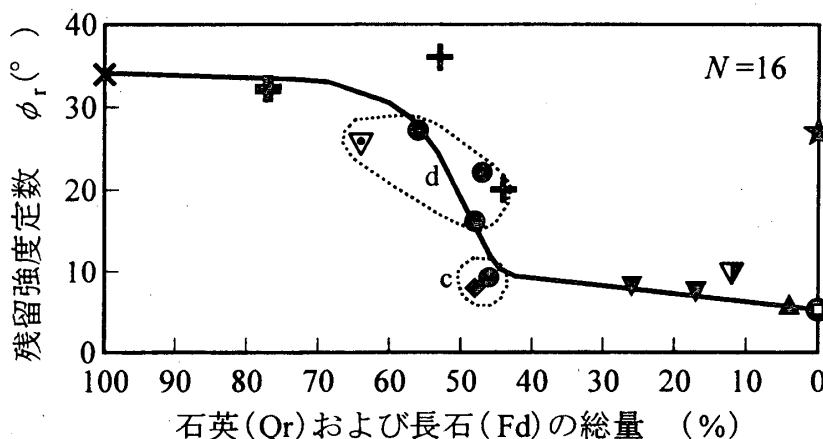


Fig. 2.6 残留強度定数 ϕ_r と<420 μm 試料中の石英 (Qr) および長石 (Fd) の総量の関係
Relationship between residual strength parameter ϕ_r and total contents of quartz (Qr) and feldspers (Fd) in <420 μm soil samples

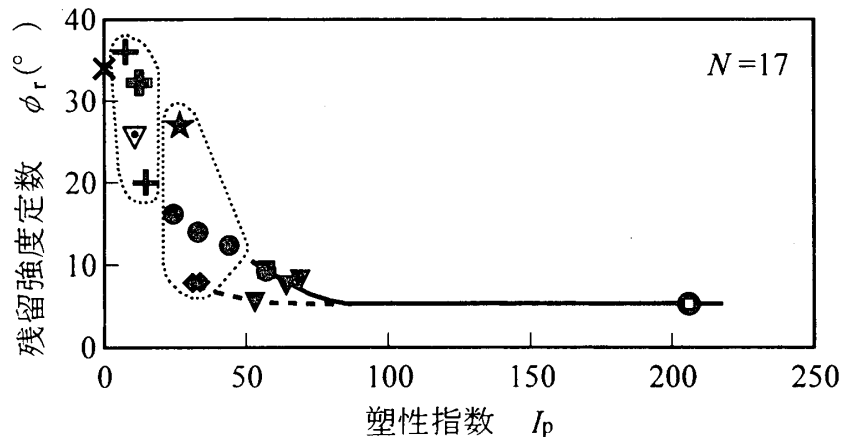


Fig. 2.7 残留強度定数 ϕ_r と塑性指数 I_p の関係
Relationship between residual strength parameter ϕ_r and plasticity index I_p .

第4節 ϕ_r の支配因子としての配向性粘土鉱物総量

ϕ_r と $<420\mu\text{m}$ 試料全体の配向性粘土鉱物 St, Vt, Ch および Mc の総量との関係は椅子型状曲線で示され、鉱物総量の少ない試料群もその曲線近傍にプロットされている (Fig. 2.4)。Fig. 2.3において、 ϕ_r と St 含有量の間には明瞭な関係が認められなかった St $<20\%$ 領域の試料についても、配向性粘土鉱物総量の増加に伴う ϕ_r の低下傾向が明らかに認められる。従来、地すべり土の ϕ_r は、CF, I_p , St 含有量との関係で論じられてきたが、Fig. 2.4のように配向性粘土鉱物総量を用いれば、地質・土質、物理的・鉱物学的性質、せん断強度を異にする、広い範囲の地すべり土試料に対して、 ϕ_r の違いがよりよく説明できる。例えば、珪化頁岩由来断層粘土 (大所1 試料) および砂質頁岩 (台湾試料) は双方で SF 含有量が多いが、前者の $\phi_r = 9.8^\circ$ は配向性粘土鉱物総量が69%であること、後者の $\phi_r = 25.5^\circ$ は総量が36%であることによるものである。これらの関係は ϕ_r と Qr および Fd の総量の関係図によっても説明できる。

このことは、 ϕ_r と配向性粘土鉱物総量の関係図および ϕ_r と Qr および Fd の総量の関係図を活用することにより、リングせん断試験によらない ϕ_r の類推が可能であることを示唆するものである。なお、今回検討に用いた試料には滑石 (Tc) がほとんど含有されていないため考慮していないが、Tc が主である試料では ϕ_r が 8.9° と小さいことが報告されており (横田ら, 1995), Tc も配向性粘土鉱物総量に加味される。

第5節 まとめ

既報のデータを用いて、地すべり土の残留強度定数 ϕ_r と物理的・鉱物学的性質との関係について検討し、以下の結果を得た。

- (1) ϕ_r と $<2\mu\text{m}$ 粘土含有量 CF および塑性指数 I_p の間の相関は希薄であり、 ϕ_r とスメクタイト (St) 含有量 ($<420\mu\text{m}$ 試料) との関係も St $<20\%$ 領域では明瞭でない。
- (2) ϕ_r と配向性粘土鉱物 (St, Vt, Ch, Mc) 総量との関係は全体としてかなり良好である。その関係は椅子型状曲線で示され、 ϕ_r の支配因子が非配向性鉱物から配向性鉱物へと交代する遷移域が鮮明に認められる。
- (3) ϕ_r と配向性粘土鉱物総量の関係図および ϕ_r と Qr および Fd の総量の関係図を活用することにより、リングせん断試験によらない ϕ_r の類推が可能であることが示唆される。

第2章 参考文献

1. Gibo, S., Egashira, K. and Ohtsubo, M. 1987 Residual strength of smectite-dominated soils from the Kamenose landslide in Japan, *Canadian Geotechnical Journal*, **24** (3) : 456 - 462
2. 宜保清一, 江頭和彦, 林義隆 1992 地すべり土の残留強度の大変位せん断試験による測定法と物理的・鉱物学的性質による類推法, *農業土木学会論文集*, **159** : 57 - 63
3. Kanji, M. A. 1974 The relationship between drained friction angles and Atterberg limits of natural soils, *Géotechnique*, **24** (4) : 671 - 674
4. Kenny, T. C. 1967 The influence of mineral composition on the residual strength of natural soils, Proc. Geotechnical Conference, Oslo, **1** : 123 - 129.
5. 紀平潔秀 1990 すべり面土の物理的・力学的特性, *地すべり*, **27** (2) : 1 - 8
6. Lupini, J.F., Skinner, A.E. and Vaughan, P.R. 1981 The drained residual strength of cohesive soils, *Géotechnique*, **31** (2) : 181 - 213
7. 日本粘土学会 1987 粘土ハンドブック (第2版), 技報堂出版 : 46, 54 - 55, 133
8. Skempton, A.W. 1964 Long - term stability of clay slopes, *Géotechnique*, **14** (2) : 77 - 101
9. Skempton, A.W. 1985 Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory, *Géotechnique*, **35** (1) : 3 - 18
10. Tika, T.E., Vaughan, P.R. and Lemos, L.J. 1996 Fast shearing of pre - existing shear zones in soil, *Géotechnique*, **46** (2) : 197 - 233
11. Voight, B. 1973 Correlation between Atterberg plasticity limits and residual shear strength of natural soils, *Géotechnique*, **23** (2) : 265 - 267
12. 和田光史 1966 粘土鉱物の同定および定量法, *日本土壤肥科学雑誌*, **37** (1) : 9 - 17
13. 矢田部龍一, 八木則男, 榎木明潔 1991a 破碎帯地すべり土のリングせん断特性, *土木学会論文集*, **436** / III - 16 : 93 - 101
14. 矢田部龍一, 八木則男, 榎木明潔, 中森克己 1991b 地すべり粘性土の強度特性, *地すべり*, **28** / 1 : 9 - 16.
15. 横田公忠, 矢田部龍一, 八木則男 1995 蛇紋岩の風化粘性土の強度特性, *土木学会論文集*, **529** / III - 33 : 155 - 163
16. 吉永長則, 江頭和彦, 中井信 1984 黒ボク土の粒径分析法, *日本土壤肥科学雑誌*, **55** (3) : 248 - 256

第3章 残留強度包絡線の湾曲化と強度定数決定手法

第1節 はじめに

残留強度は、粘土粒子の配向面において発揮される最小の排水強度であり、再活動型地すべりおよび地質構造弱面を潜在すべり面とする初生型地すべりの安定度評価において必要不可欠である（宜保ら、1986, 1990）。そのため、強度定数の妥当性が斜面安定度評価、対策工法の選定等に大きく影響し（鶴飼ら、1996）、強度定数決定が極めて重要となるが、第1章で述べたように、残留強度包絡線に湾曲化現象がみられるため、強度定数が一義的に決まらない（Gibo, 1985; Hawkins & Privett, 1985; Maksimovic, 1989）。残留強度包絡線の湾曲化は、土の種類および垂直応力のレベルによって異なるので（Gibo et al., 1987）、両者の関係を把握し、強度定数の決定手法を確立することが重要である。

本章では、粒度組成および鉱物組成の異なる試料を用いて行った残留強度測定試験、残留強度包絡線と垂直応力レベルの関係および残留強度定数の決定手法の確立について述べる。

第2節 残留強度の工学的意味

残留強度包絡線の湾曲化により一義的に強度定数が決まらないため、Skempton (1964) は、残留強度が一種の正規圧密強度であることから、残留粘着力 c_r を零として残留せん断抵抗角 ϕ_r を与えた。Bishop et al. (1971) も高塑性土の残留強度は摩擦成分だけからなるとし、 $c_r = 0$ として σ'_n の大きさによって複数の強度線を描き、それぞれの ϕ_r を求めた。一方、宜保 (1987) は、 $\tau_r / \sigma'_n \sim \sigma'_n$ 関係と残留せん断面の状態に注目し、 c_r の存在を認め、 ϕ_r を求めた。このように、実験結果を如何に評価し強度包絡線を描くかによって定数が大きく異なる。

強度包絡線の引き方によって定数が異なるが、その差が地すべりの安定度評価にどのように影響するかを示す。地すべりの安全率は、通常、次の二次元解析の簡便法を用いて算定している。

$$\text{安全率} = \frac{\text{滑動に抵抗する粘着力成分と摩擦成分による力}}{\text{滑動力}}$$

安全率に対して、すべり面の長い層すべりにおいては粘着力成分が支配的であり、相対的にすべり面の深い地すべりでは摩擦成分が支配的となる。ここで、Fig. 3.1の a 図に示すようなすべり面の長い層すべり的な地すべりを想定し、移動量が大きく、停止直後のすべり面強度は全域で残留強度にまで低下したと仮定する。残留強度定数 c_r 、 ϕ_r について、残留強度包絡線が低い垂直応力レベルで湾曲する Fig. 3.2 のような実験結果が得られたとして、 $c_r = 10 \text{ kPa} \cdot \phi_r = 25.0^\circ$ と、 $c_r = 0 \text{ kPa} \cdot \phi_r = 27.0^\circ$ の二つを考える。前者は最小自乗法を適用して求めた強度定数であり、後者は粘着力成分を零と

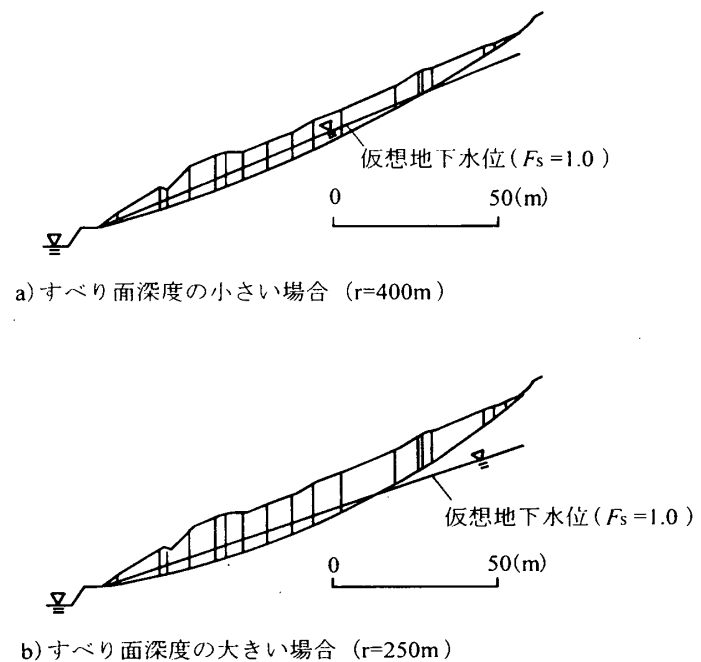


Fig. 3.1 モデル斜面の安定解析断面図
Cross-sectional diagram for stability analysis of a model slope

して求めた強度定数である。このような前提を基に安定解析を行い、まず、現況安全率を $F_s = 1.00$ として、前者の強度定数を適用し地下水位を決める。同一地下水位に対して後者の強度定数を適用した場合、 $F_s = 0.88$ と計算され、安全率の差違が12%と大きい。一方、Fig. 3.1のb図のようにすべり面形状を半径250mの圆弧とし、すべり面の長さの割にすべり面深度の大きい地すべりを想定して同様な計算を行った場合、強度定数の違いによる安全率の差違は約2%となり、層すべり的な地すべりに比べて影響が大きくない。

第3節 残留強度定数の決定

1 基本的考え方

Fig. 3.3は、Gibo et al. (1987)が残留摩擦係数 τ_r / σ'_n およびせん断面におけるスメクタイトの配向指数と垂直応力の関係をまとめたものである。 τ_r / σ'_n はスメクタイトの配向指数が小さいほど大きく、その傾向は垂直応力 $\sigma'_n = 100\text{kPa}$ 以下でより顕著である。また、先に示したFig. 1.3からも明らかなように、 $\tau_r \sim \sigma'_n$ 関係の湾曲化は $\tau_r / \sigma'_n \sim \sigma'_n$ 関係に鮮明に現れている。そこで、 $\tau_r = c_r + \sigma'_n \cdot \tan \phi_r$ を変形して $\tau_r / \sigma'_n = c_r / \sigma'_n + \tan \phi_r$ とし、 σ'_n の大小による τ_r / σ'_n の変化をみる。 $\tau_r / \sigma'_n = \text{const.}$ である高い垂直応力レベルでは、 τ_r / σ'_n が $\tan \phi_r$ と等しく、 $c_r / \sigma'_n = 0$ となり、 $\sigma'_n \neq 0$ なので、 $c_r = 0$ となる。一方、低い垂直応力レベルでは $\tau_r / \sigma'_n \neq \text{const.}$ であり、 $c_r / \sigma'_n \neq 0$ 、すなわち $c_r \neq 0$ となる。

このように、垂直応力の大小によって残留せん断面の配向度が異なり、低い垂直応力レベル下では残留粘着力が存在すると考え、検討を進めた。なお、残留強度測定試験の詳細は第2章第2節を参照されたい。

2 試験に供した試料とその物性

試験は、石倉地すべり (長崎県北振興局林業部治山課, 1992)、亀の瀬地すべり (村田, 1980; Gibo et al., 1987; Hayashi et al., 1992)、台湾中部横貫公路地すべり (宜保ら, 1997) および中国四川省薛城鎮地すべり (宜保ら, 1996; 周ら, 1997) からの採取試料を用いて行った。試料は、石倉地すべりおよび亀の瀬地すべりでは、それぞれ集水井とボーリングによって採取したすべり面粘土薄層であり、台湾地すべりおよび薛城鎮地すべりでは、地すべり末端部の露出したすべり面からの採取土であ

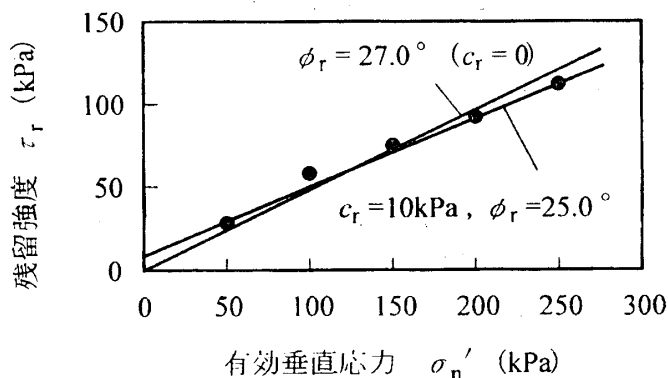


Fig. 3.2 二つの包絡線と残留強度定数
Two residual shear strength envelopes and strength parameters determined by different methods

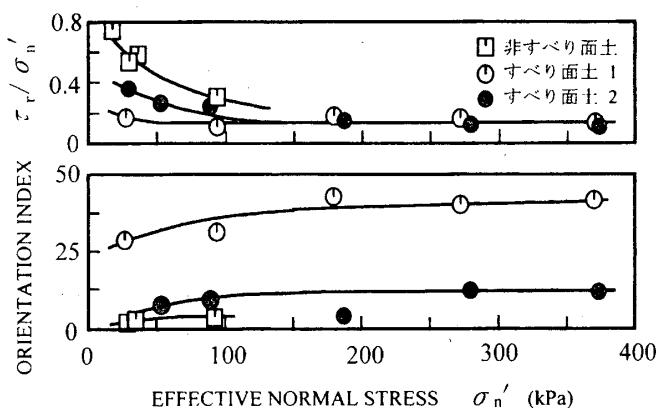


Fig. 3.3 残留摩擦係数およびせん断面におけるスメクタイトの配向指数と有効垂直応力の関係
Residual friction coefficients and orientation indices of smectite on the shear surface as a function of effective normal stress (Gibo et al., 1987)

Table 3.1 <420 μ m 試料の物理的性質
Physical properties of <420 μ m soil samples

試料	w_L (%)	w_p (%)	I_p	粘土 (%) (<2 μ m)	シルト (%) (2 ~ 20 μ m)	細砂 (%) (20 ~ 200 μ m)	粗砂 (%) (200 ~ 420 μ m)
台湾	26.5	15.7	10.8	35.3	31.4	28.7	4.6
薛城鎮	31.7	17.5	14.2	9.7	52.3	29.6	8.4
石倉	61.3	27.7	33.6	54.5	35.3	9.0	1.2
亀の瀬	114.0	50.0	64.0	73.2	17.8	5.0	4.0

Table 3.2 <420 μ m 試料の鉱物組成 (%)
Mineralogical composition (%) of <420 μ m soil samples

試料	St	Mc	Kt	Ch	Qr	Fd	Cal	Others
台湾	0	23	0	13	52	12	0	0
薛城鎮	0	30	0	25	33	11	0	1
石倉	30	10	9	3	43	5	0	0
亀の瀬	77	2	1	0	14	3	0	3

St:スメクタイト, Mc:雲母, Kt:カオリナイト, Ch:緑泥石, Qr:石英, Fd:長石, Cal:方解石, Others:(Kl:カオリン 鉱物, Dol:苦灰石等)

る。これらの地すべりは、いずれも移動量が大きく、滑動を繰り返している再活動型地すべりであり、すべり面では残留強度が発揮されているとみなされている。

Table 3.1に各試料の物理的性質を示す。塑性指数 I_p は、亀の瀬試料が64.0、石倉試料が33.6であるのに対して、台湾試料と薛城鎮試料はそれぞれ10.8、14.2である。2 μ m以下の粘土含有量は、亀の瀬試料、石倉試料ではそれぞれ73.2%、54.5%と高いが、台湾試料、薛城鎮試料ではそれぞれ35.3%、9.7%で、シルトと細砂分が主である。

Table 3.2に420 μ mフルイ通過試料の鉱物組成を示す。鉱物学的特徴として、石倉試料はスメクタイト (St) と石英 (Qr) が卓越し、雲母 (Mc)、カオリナイト (Kt) 等を含有する。亀の瀬試料はStが77%と多く、Qr (14%) の他、長石 (Fd)、Mc、カオリン鉱物 (Kl) を含有している。Stは、薄板状を呈する層状ケイ酸塩粘土鉱物で、高膨潤性と配向性を有し (江頭, 1993)、残留強度の低下に寄与するため、石倉および亀の瀬両試料においては低い残留強度が予想される。一方、台湾試料は、Qr、Fdを主としているため、高い残留強度が予想される。

3 大変位せん断挙動と残留せん断面の状況

Fig. 3.4は各試料の大変位せん断挙動で、せん断変位 D に対する τ / σ'_n の変化を示したものである。せん断応力はピーク後に漸減しつつ大変位を経て残留強度に至った。台湾試料では、 $D_r = 345$ mmの大変位で残留せん断域に至ったが、高めの残留強度を示し、ピーク強度から残留強度への通減の様相も有効垂直応力の大小によってかなり異なった。 $\sigma'_n = 50$ kPa の下でのせん断挙動は大変位に至っても定常状態となっていない。それは、試料が主としてシルトと細砂からなり、低い垂直応力の場合には拘束圧が弱く、土粒子相互の干渉作用が活発となり、残留せん断面付近の土粒子が配向しないことに起因したものと考えられる。薛城鎮試料は、 $D_r = 70 \sim 100$ mmで残留せん断状態に至ったが、低い垂直応力レベルではせん断面に約1mm厚の攪乱薄層が形成され、せん断面の開離は容易でなく、台湾試料と同様高めの残

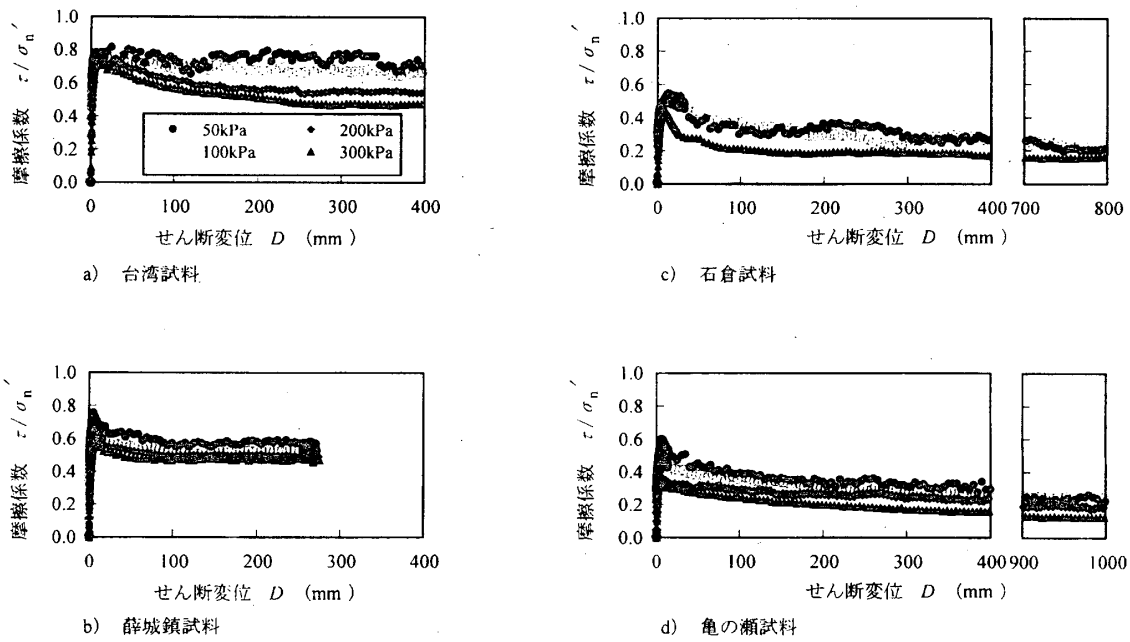


Fig. 3.4 各試料の大変位せん断試験結果
Behavior of soil samples subjected to large-displacement shear

留強度を示した。配向性粘土鉱物総量が55%であるにも関わらず高い残留強度となったが、これは、McおよびChの大部分がシルト大の大きさにあるため、配向面形成への寄与が小さく、QrおよびFdの影響が顕在化したことに起因する。一方、石倉試料と亀の瀬試料では、かなり小さい τ_r / σ'_n の値となった。せん断に伴う漸減現象は $D_r = 1,000\text{mm}$ 付近まで続き、各垂直応力においてせん断面は開離できたが、高い垂直応力下で鏡肌が形成されたのに対して、低い垂直応力下ではせん断面の発達が悪かった。

このように、残留強度は、土粒子の配向性、非配向性を問わず低い垂直応力レベルでは、高い垂直応力レベルに比べせん断に伴う粒子配向が良好でなく、高めの値となった。残留強度への到達変位量については、台湾試料および薛城镇試料は非配向性のQrおよびFdの影響により、強度逓減が比較的小さく、早い時点で残留状態に至ったが、せん断面の粒子配向は十分でなく鏡肌も認められなかった。それに対し

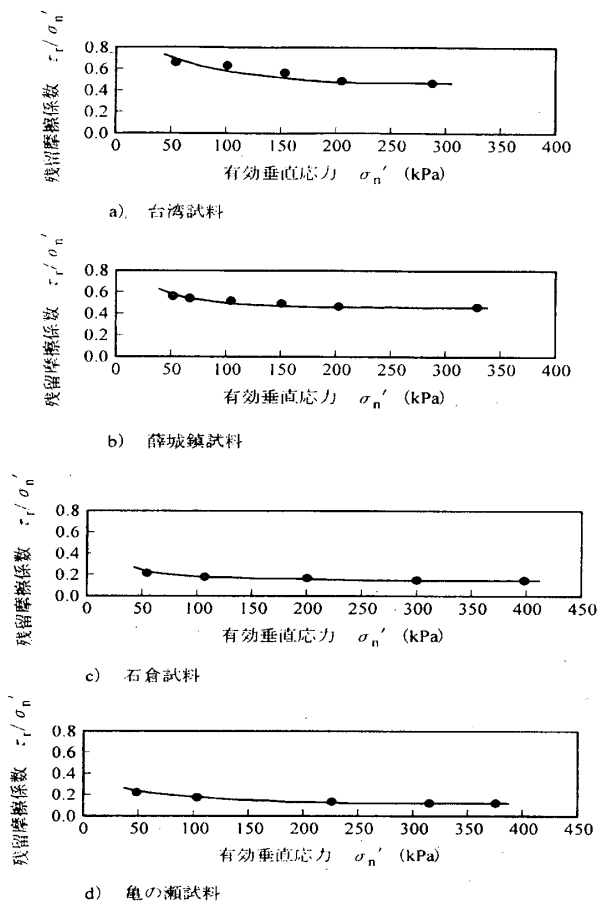


Fig. 3.5 試料の残留摩擦係数と有効垂直応力の関係
Relationship between residual friction coefficient and effective normal stress for the Taiwan, Xuechengzhen, Ishikura and Kamenose soil samples

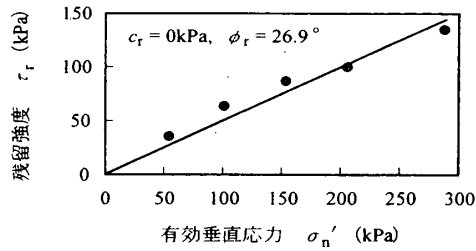
て、配向性の St 粒子が多く含有される石倉試料および亀の瀬試料は、せん断変位に伴って粒子配向は進むが、強度遞減過程の初～中期では含有シルトおよび細砂粒子によるせん断挙動支配が優勢でせん断面の形成・発達が遅れ、完全配向（鏡肌形成）に至るまでに大変位を要した。

4 強度定数の決定手法

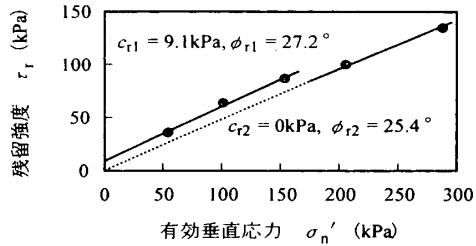
低い垂直応力レベル下において、せん断面における土粒子の配向の悪さに起因して残留強度、残留摩擦係数が高く得られ、強度包絡線が湾曲化することから、大小の垂直応力レベル別に残留強度定数を決定することが合理的であり、実際的であると考える。

そこで、Fig. 3.5に示すように、各試料について $\tau_r / \sigma'_n \sim \sigma'_n$ 関係を整理した。 τ_r / σ'_n 値は、シルトと細砂分を多く含む台湾試料と薛城鎮試料で大きく、粘土分を多く含む、残留せん断面の発達が良好な石倉試料と亀の瀬試料で小さい。しかし、 $\tau_r / \sigma'_n \sim \sigma'_n$ 関係は、すべての試料において、高い垂直応力レベルではほぼ一定となり、低い垂直応力レベルでは垂直応力が小さくなるほど増大し、左上がりの曲線となった。

Fig. 3.6aの台湾試料の $\tau_r \sim \sigma'_n$ 図は、Skempton (1964) にならって $c_r = 0$ として作図し、 $\phi_r = 26.9^\circ$ を得たものであるが、低い垂直応力レベルに対する強度は包絡線より上側に位置した。Fig. 3.6bは、垂直応力を大小二つのレベルに分けて強度包絡線を描き、低い垂直応力レベルに対しては $c_r \neq 0$ として作図したものである。大小の垂直応力レベルの設定は、 $\tau_r / \sigma'_n \sim \sigma'_n$ 関係が直線から曲線へと移行する変曲点に注目し、対応する垂直応力を境界点とした。台湾試料では、50～150kPa の低垂直応力レベルと200

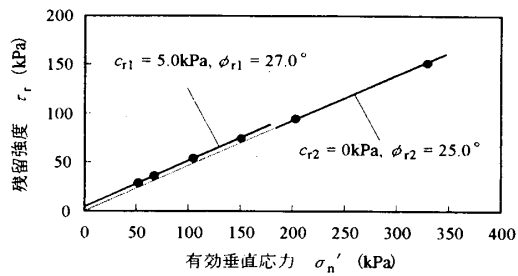


a) $c_r = 0$ として描いた場合

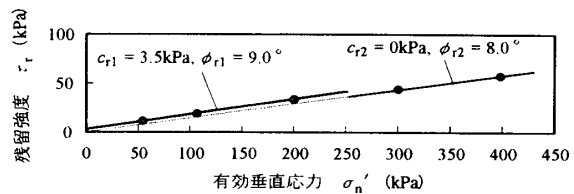


b) 大小の垂直応力レベルに分けて整理した場合

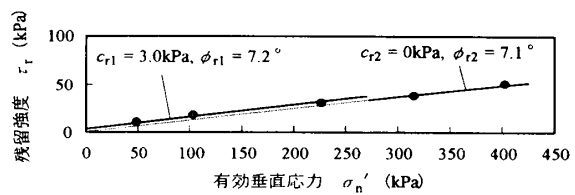
Fig. 3.6 台湾試料の残留強度包絡線と定数
Residual shear strength envelopes and strength parameters for the Taiwan soil sample



a) 薛城鎮試料



b) 石倉試料



c) 亀の瀬試料

Fig. 3.7 各試料の残留強度包絡線と定数
Residual strength envelopes and strength parameters for the Xuechengzhen, Ishikura and Kamenose soil samples

Table 3.3 <420 μ m 試料の残留強度定数
Residual strength parameters of <420 μ m soil samples

試料	有効垂直応力 σ'_n (kPa)	残留強度 τ_r (kPa)	残留摩擦係数 τ_r / σ'_n	残留強度定数			
				$\phi_r^a)$ ($c_r = 0$)	$\phi_r^b)$ ($c_r = 0$)	c_r (kPa)	ϕ_r
台湾	54.27	35.68	0.6575	33.3°	26.9°	9.1	27.2°
	101.06	63.75	0.6309	32.2°		($\sigma'_n = 50 \sim 150$ kPa)	
	153.64	87.00	0.5662	29.5°		0	25.4°
	205.60	100.05	0.4866	25.9°		($\sigma'_n \geq 200$ kPa)	
	287.83	134.76	0.4682	25.1°			
薛城鎮	51.65	29.00	0.5616	29.3°	26.0°	5.0	27.0°
	67.06	36.23	0.5403	28.4°		($\sigma'_n = 50 \sim 150$ kPa)	
	104.64	54.16	0.5176	27.4°		0	25.0°
	150.61	74.50	0.4947	26.3°		($\sigma'_n \geq 200$ kPa)	
	202.77	94.55	0.4663	25.0°			
石倉	329.02	151.54	0.4606	24.7°			
	54.45	11.65	0.2140	12.1°	8.5°	3.5	9.0°
	106.82	19.01	0.1780	10.1°		($\sigma'_n = 50 \sim 200$ kPa)	
	200.36	33.53	0.1673	9.5°		0	8.0°
	300.00	44.30	0.1477	8.4°		($\sigma'_n \geq 300$ kPa)	
亀の瀬	398.21	57.84	0.1452	8.3°			
	48.25	10.70	0.2218	12.5°	7.4°	3.0	7.2°
	103.28	18.12	0.1755	10.0°		($\sigma'_n = 50 \sim 200$ kPa)	
	226.26	30.50	0.1348	7.7°		0	7.1°
	315.06	38.10	0.1209	6.9°		($\sigma'_n \geq 300$ kPa)	
	402.49	51.33	0.1275	7.3°			

a) $\phi_r = \tan^{-1}(\tau_r / \sigma'_n)$ (Bishop et al., 1971)

b) $c_r = 0$ とした ϕ_r (Skempton, 1964)

kPa 以上の垂直応力レベルに分け、50~150kPa で $c_{r1} = 9.1$ kPa $\cdot \phi_{r1} = 27.2^\circ$ 、200kPa 以上で $c_{r2} = 0$ kPa $\cdot \phi_{r2} = 25.4^\circ$ を得た。

Fig. 3.7に他の3試料の $\tau_r \sim \sigma'_n$ 関係を整理して示す。薛城鎮試料は、50~150kPa で $c_{r1} = 5.0$ kPa $\cdot \phi_{r1} = 27.0^\circ$ 、200kPa 以上で $c_{r2} = 0$ kPa $\cdot \phi_{r2} = 25.0^\circ$ 、石倉試料は、50~200kPa で $c_{r1} = 3.5$ kPa $\cdot \phi_{r1} = 9.0^\circ$ 、200kPa 以上で $c_{r2} = 0$ kPa $\cdot \phi_{r2} = 8.0^\circ$ 、亀の瀬試料は、50~200kPa で $c_{r1} = 3.0$ kPa $\cdot \phi_{r1} = 7.2^\circ$ 、200kPa 以上で $c_{r2} = 0$ kPa $\cdot \phi_{r2} = 7.1^\circ$ となった。シルト・砂粒子を多く含有し、石英が卓越する台湾試料および薛城鎮試料では、低い垂直応力レベルにおいて、せん断中の土粒子相互の干渉作用が活発で粒子配向が起こらないため強度定数 ($c_r \cdot \phi_r$) が高い。St 粒子を多く含有する石倉試料および亀の瀬試料においても、低垂直応力レベルでは粒子配向が悪く鏡肌が形成されずに、 $c_r \neq 0$ となった。

「第2節 残留強度の工学的意味」で示したように、 c_r の有無はもちろん、 ϕ_r の僅かな差も大きな意味を持つので、強度定数を正確に把握することは重要である。また、今回用いた試料では、垂直応力の大小レベルの境界点は100kPaと200kPaの範囲で変動した。このことは、実際の地すべりにおいて、土かぶり圧の大小によってすべり面の発達状況が異なり、動員される残留強度定数が異なることを示唆するものである。

Table 3.3は、上記の定数と共に、Bishop et al. (1971) にならい、 $\tan^{-1}(\tau_r / \sigma'_n) = \phi_r$ として求めた値と、 $c_r = 0$ とする手法 (Skempton, 1964) による値を整理したものである。大小垂直応力レベル別の決定手法による結果と他の2手法のそれとの間には明らかな差がある。Bishop et al. (1971)の手法は σ'_n ごとに ϕ_r が異なるため、安定度評価が煩雑であり、実際のでない。Skempton (1964)の手法は簡便ではあるが、包絡線の湾曲化や、低い垂直応力下での残留粘着力の存在が考慮されておらず、

強度を過小評価してしまう可能性が大きい。本章で提案した手法は、 $\tau_r \sim \sigma'_v$ 関係、 $\tau_r / \sigma'_v \sim \sigma'_v$ 関係、残留せん断面の発達状況などの垂直応力に依存する残留強度特性をうまく活用したのもので、合理的かつ実地的であると言える。

第4節 まとめ

得られた結果を要約すると次のようになる。

- (1) 残留強度包絡線は低い垂直応力レベルにおいて湾曲化するため、その定数は決定方法によって異なり、安定解析に大きく影響する。
- (2) 残留摩擦係数は、高い垂直応力レベルではほぼ一定となり、低い垂直応力レベルでは垂直応力が小さくなるほど増大し、左上がりの曲線となった。
- (3) この残留摩擦係数変化を基に有効垂直応力を大小二つのレベルに分け、残留強度包絡線を描いて強度定数を決定することを考え、高い垂直応力レベルにおいて $c_r = 0$ 、低い垂直応力レベルでは $c_r \neq 0$ であること、および ϕ_r が高い垂直応力レベルより低い垂直応力レベルで幾分か大きくなることを明らかにした。
- (4) この手法は、垂直応力に依存する残留強度特性を活用し強度定数を決定しようとした合理的なものである。

第3章 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, *Géotechnique*, **21** (4) : 273 - 328
2. 江頭和彦 1993 有明粘土の粘土鉱物, 有明粘土に関する最近の話題, 平成5年度農業土木学会九州支部シンポジウム : 11 - 28
3. Gibo, S. 1985 The ring shear behaviour and residual strength, Proc. 4th Int. Conf. and Field Workshop on Landslides, Tokyo : 283 - 288
4. 宜保清一 1987 地すべり斜面の安定性評価に用いる強度定数の考え方, *土と基礎*, **35** (11) : 27 - 32
5. 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精度, *地すべり*, **31** (3) : 24 - 30
6. 宜保清一, 陳信雄, 江頭和彦, 林義隆, 周亜明 1997 台湾, 中部横貫公路地すべり土の残留および回復強度特性, *地すべり*, **34** (2) : 50 - 56
7. Gibo, S., Egashira, K. and Ohtsubo, M. 1987 Residual strength of smectite-dominated soils from the Kamenose landslide in Japan, *Canadian Geotechnical Journal*, **24** (3) : 456 - 462
8. 宜保清一, 江頭和彦, 佐々木慶三, 吉沢光三 1990 地すべり土塊のせん断強度と斜面安定度評価 - 新潟県安塚町牧野地すべりを例として -, *土と基礎*, **38** (12) : 35 - 40
9. 宜保清一, 佐々木慶三, 吉沢光三, 伊田茂 1986 沖縄, 北丘ハイツ地内泥岩すべりにおける地質構造規制とすべり面強度パラメータの算定, *地すべり*, **23** (3) : 15 - 20
10. 宜保清一, 佐々木慶三, 周亜明, 江頭和彦 1996 中国, 岷江および右支雑谷脳河流域の地すべり, *地すべり*, **32** (4) : 41 - 48
11. Hawkins, A.W. & Privett, K.D. 1985 Discussion on the residual strength of cohesive soils, *Ground Engineering*, **18** (8) : 22 - 29
12. Hayashi, Y., Higaki, D. and Ishizuka, T. 1992 Structure of slip surface formed by rock block slide, Proc. 6th Int. Symp. on Landslides, Christchurch : 127 - 132
13. Maksimovic, M. 1989 On the residual shearing strength of clays, *Géotechnique*, **39** (2) : 347 -

351

14. 村田行雄 1980 亀の瀬地すべり, *地すべり*, 16 (4): 25 - 39.
15. 長崎県北振興局林業部治山課 1992 平成2年発生石倉地すべり概要, *地すべり*, 29 (3): 41 - 49.
16. Skempton, A.W. 1964 Long-term stability of clay slopes, *Géotechnique*, 14 (2): 77 - 101
17. 鶴飼恵三, 干玉貞, 若井明彦, 榎戸源則 1996 斜面安定工の効果と強度定数 c' , ϕ' との関係, *地すべり*, 33 (2): 35 - 39
18. 周亜明, 宜保清一, 江頭和彦, 藤本昌宜 1997 中国, 岷江および支流雑谷脳河流域の地すべり土の物理的・鉱物学的性質とせん断強度特性, *農業土木学会論文集*, 187: 23 - 29

第4章 回復強度に及ぼす垂直応力の影響

第1節 はじめに

Chandler (1977) は、室内実験において攪乱した残留せん断面の再圧密効果による強度回復を認め、宜保ら (1997) および周ら (1997) も、低い垂直応力レベルにおける回復強度の発現を報告している。低い垂直応力レベルにおいては、残留強度包絡線の湾曲化現象が知られており、第3章で論じたように、残留強度定数は $c_r \neq 0$ で、かつ ϕ_r が高い垂直応力レベルにおけるより幾分大きくなる。これは、低い垂直応力レベルにおいては、残留せん断面の粒子配向が良好でないこと、および再圧密効果による強度の回復の可能性と影響因子としての有効垂直応力の重要性を示唆するものである。

本章は、物理的性質の異なる地すべり土について、地すべりの滑動・停止・再発を想定した“大変位せん断-再圧密-再せん断”試験を行い、再圧密による強度回復について検討したものである。

第2節 試料と試験方法

1 試験に供した試料

試料として台湾・中部横貫公路地すべり、中国・薛城镇地すべり、大阪・亀の瀬地すべりおよび沖縄・仲順地すべり (宜保ら, 2000) からの採取土を使用した。台湾試料および薛城镇試料は地すべり末端部あるいは滑落崖の露出したすべり面土で、前者は砂質頁岩風化土、後者は黒色千枚岩由来の礫混じりシルトである。亀の瀬試料および仲順試料はそれぞれ集水井、ボーリングにより採取したすべり面粘土で、前者は凝灰質礫質土、後者は島尻層群泥岩である。試料は風乾後、 $420\mu\text{m}$ フルイを通過させ、スラリー状にして強度測定に供した。

2 回復強度測定試験

宜保型リングせん断試験機 (宜保, 1994) を使用し、試料を水浸下で所定の垂直応力 σ_n (30kPa, 50kPa, 60kPa, 100kPa, 150kPa, 200kPa, 300kPa, 400kPa) により正規圧密し、その後に変位速度 $0.01\text{mm}/\text{min}$ を行った (垂直応力 σ_n は有効垂直応力 σ'_n となる)。地すべりの滑動・停止・再発を想定し、完全軟化強度および残留強度を求めた後、せん断を停止して垂直応力を保ったまま2日間再圧密し、再びせん断を行って回復強度を測定した。

第3節 試験結果と考察

1 物理的性質

Table 4.1に各試料の液性限界 w_L 、塑性限界 w_p 、塑性指数 I_p および粒度組成を示す。 w_L は、亀の瀬試料および仲順試料でそれぞれ114.0%、80.0%と高く、台湾試料および薛城镇試料ではそれぞれ26.5%、31.7%と小さい。 I_p は、亀の瀬試料および仲順試料がそれぞれ64.0、57.1であるのに対して、台湾試料および薛城镇試料がそれぞれ10.8、14.2と小さく、前者の1/3程度である。 $2\mu\text{m}$ 以下の粘土分含有

Table 4.1 $420\mu\text{m}$ 試料の物理的性質
Physical properties of $420\mu\text{m}$ soil samples

試料	w_L (%)	w_p (%)	I_p	粘土分 (%) ($<2\mu\text{m}$)	シルト分 (%) ($2 \sim 20\mu\text{m}$)	細砂分 (%) ($20 \sim 200\mu\text{m}$)	粗砂分 (%) ($200 \sim 420\mu\text{m}$)
台湾	26.5	15.7	10.8	35.3	31.4	28.7	4.6
薛城镇	31.7	17.5	14.2	9.7	52.3	29.6	8.4
亀の瀬	114.0	50.0	64.0	73.2	17.8	5.0	4.0
仲順	80.0	22.9	57.1	50.0	45.2	4.8	0.0

量は、亀の瀬試料で73.2%、仲順試料で50.0%と高いが、台湾試料および薛城镇試料ではそれぞれ35.3%、9.7%である。また、20~420 μ mの砂（細砂分および粗砂分）含有量は、亀の瀬試料および仲順試料では10%未満と少なく、台湾試料および薛城镇試料ではそれぞれ33.3%、38.0%となっている。

2 大変位せん断後の再圧密に伴う強度の回復

各試料を一定の有効垂直応力 σ'_n の下で大変位せん断すると、せん断応力は完全軟化強度 τ_{sf} を示した後漸減しつつ残留強度 τ_r に到達する。せん断停止後に再圧密し再びせん断すると、回復強度 τ_{rc} を発現するものがある。

Fig. 4.1~4.4は、“大変位せん断-再圧密-再せん断”の試験結果を有効垂直応力 σ'_n 別に示したものである。 σ'_n はせん断に伴う土粒子の挙動の影響によりわずかながら変動する（宜保, 1994）。残留強度を測定したときの変位量 D_r は、台湾試料で $D_r = 350$ mm, 薛城镇試料で $D_r = 70\sim 100$ mm, 亀の瀬試料で $D_r = 1000$ mm, 仲順試料では $D_r = 150\sim 300$ mmであった（中村ら, 1999; 宜保ら, 2000）。摩擦係数 τ / σ'_n とせん断変位 D の関係を、 τ_{sf} を中心とした初期せん断段階、残留せん断段階および再せん断段階に分け整理することによって強度の低下および回復の様相が鮮明になる。 τ_{rc} から τ_r への低下率を $(\tau_{rc} / \sigma'_n - \tau_r / \sigma'_n) / (\tau_{rc} / \sigma'_n) \cdot 100$ (%)で、 τ_r から τ_{rc} への回復率を $(\tau_{rc} / \sigma'_n -$

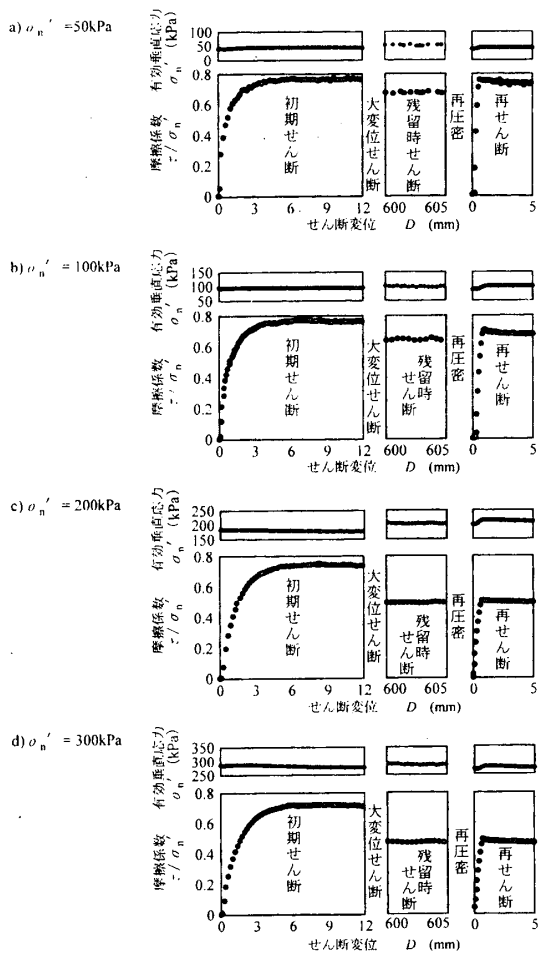


Fig. 4.1 台湾試料の初期せん断、残留せん断および再せん断段階における摩擦係数および有効垂直応力の変化

Shear characteristics of the initial, residual and re-shear stages for the Taiwan soil sample

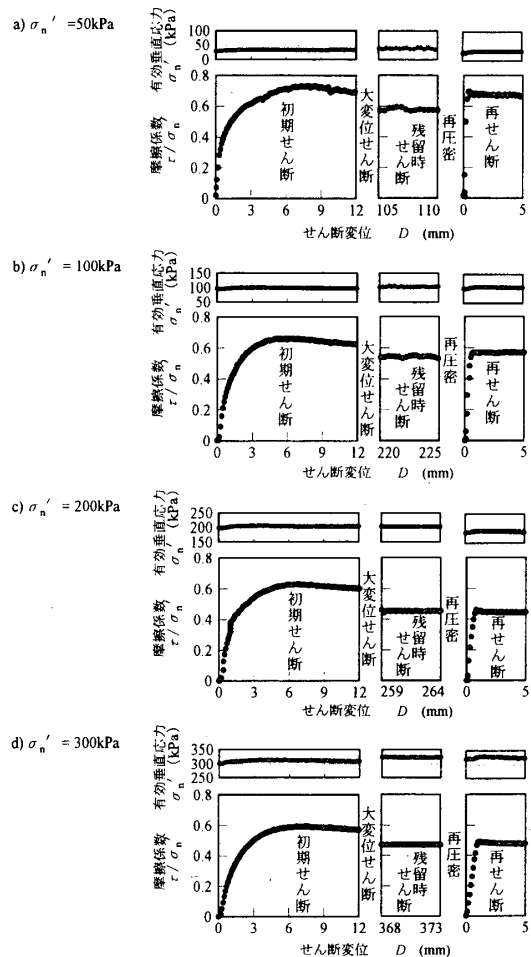


Fig. 4.2 薛城镇試料の初期せん断、残留せん断および再せん断段階における摩擦係数および有効垂直応力の変化

Shear characteristics of the initial, residual and re-shear stages for the Xuechengzhen soil sample

$\tau_r / \sigma'_n) / (\tau_{rc} / \sigma'_n - \tau_r / \sigma'_n) \cdot 100 (\%)$ で示す。

台湾試料は、 τ / σ'_n が全体的に高めで、低下率および回復率が σ'_n の大きさによって異なった (Fig. 4.1)。 $\sigma'_n = 50\text{kPa}$ の下では、低下率が16.2%と小さい。 τ_r / σ'_n まで一旦低下した強度は、再せん断変位 $D_{rc} = 0.6\text{mm}$ において回復率91.1%の τ_{rc} / σ'_n を示し、 τ_{sf} / σ'_n 近くにまで回復した。 $\sigma'_n = 100\text{kPa}$ の下では、低下率が19.2%で、回復率は $D_{rc} = 1.0\text{mm}$ で50.3%となった。 $\sigma'_n = 150\text{kPa}$ の下でも同様な傾向がみられ、低下率および回復率がそれぞれ20.9%、49.0%となった。一方、 $\sigma'_n = 200\text{kPa}$ の下では、低下率は35.3%と大きい、回復率は3.2%と小さく、強度の回復はほとんど認められない。同様に、 $\sigma'_n = 300\text{kPa}$ の下でも低下率は35.2%と大きく、回復率は1.1%と小さい。薛城鎮試料は、Fig. 4.2のように台湾試料と同様のせん断挙動を示した。 $\sigma'_n = 30 \sim 150\text{kPa}$ では、低下率が18.0%~21.9%、回復率が11.8%~70.7%で、 τ_{rc} は $D_{rc} = 0.5 \sim 0.9\text{mm}$ で発現した。これに対して、 $\sigma'_n = 200\text{kPa}$ 以上では、低下率は大きい、回復率は3%未満と小さい。亀の瀬試料においては、低下率が54.0%~64.3%と大きく、 τ_{rc} がかなり小さい (Fig. 4.3)。その回復率は、 $\sigma'_n = 50\text{kPa}$ で5.7%、 $\sigma'_n = 100\text{kPa}$ で8.0%、 $\sigma'_n = 200\text{kPa}$ で6.7%と比較的小さく、 $\sigma'_n = 300\text{kPa}$ および $\sigma'_n = 400\text{kPa}$ のような高い垂直応力においてはそれぞれ1.6%、0.3%と無視できる程度であった。仲順試料では、低下率が62.6%~71.3%と極めて大きく、回復率は0.7%~1.6%と極めて小さい (Fig. 4.4)。

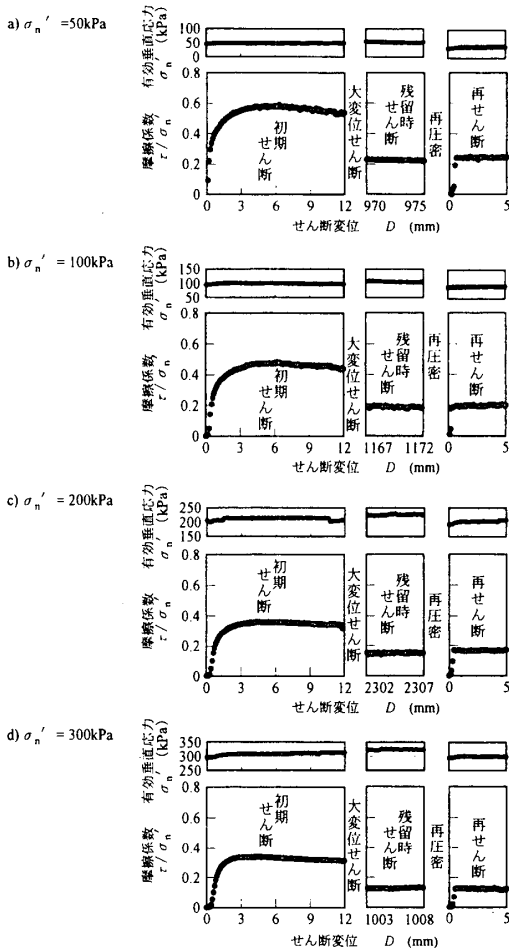


Fig. 4.3 亀の瀬試料の初期せん断、残留せん断および再せん断段階における摩擦係数および有効垂直応力の変化
Shear characteristics of the initial, residual and re-shear stages for the Kamenose soil sample

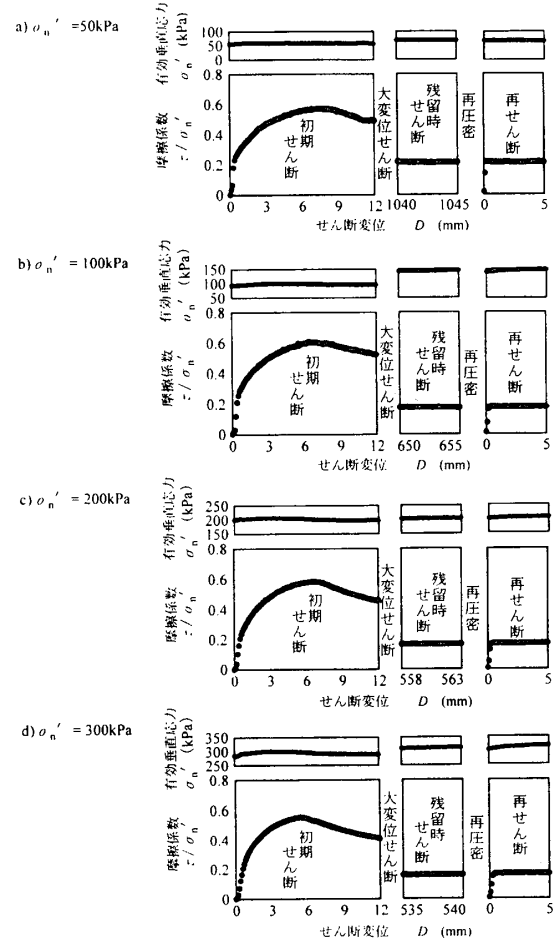


Fig. 4.4 仲順試料の初期せん断、残留せん断および再せん断段階における摩擦係数および有効垂直応力の変化
Shear characteristics of the initial, residual and re-shear stages for the Tyunjun soil sample

残留せん断面の状況は試料および垂直応力の大小によって異なった。砂分の多い台湾試料および薛城鎮試料では、 $\sigma'_n \geq 200$ kPaの高い垂直応力レベルにおいてはせん断面が開離できたものの、 $\sigma'_n = 30 \sim 150$ kPaの低い垂直応力レベルにおいては残留せん断面（領域）に1 mm程度の攪乱薄層が形成され、せん断面の開離が不可であった。一方、亀の瀬試料および仲順試料では、すべての垂直応力においてせん断面が開離できたが、それぞれ $\sigma'_n \geq 300$ kPa、 $\sigma'_n \geq 200$ kPaの高い垂直応力レベルで鏡肌が形成されたのに対して、低い垂直応力レベルではせん断面の発達が悪かった。

3 強度の低下率と回復率

Fig. 4.5は、各試料の強度の低下率および回復率を残留強度発揮時の有効垂直応力 σ'_n に対してプロットしたものである。低下率については、台湾試料および薛城鎮試料では σ'_n が小さくなる程低下率も小さくなるが、これは、拘束力の弱い低い垂直応力において残留せん断面付近の砂粒子がインターロッキングの影響により配向に至らず、強度がほとんど低下しないことに起因したものである。一方、低下率は粘土分含量の多い亀の瀬試料および仲順試料ではすべての σ'_n に対して高い値を示した。これは、低い垂直応力レベルにおいても残留せん断面の発達が比較的良好であるためである。回復率については、台湾試料および薛城鎮試料では、低い σ'_n ほど増大傾向を示した。これは、低い σ'_n のせん断面で攪乱状態になっていた残留せん断面領域が再圧密により粒子が再配列して安定化したことに因るものである。一方、高い σ'_n の場合は、再圧密効果がないために回復強度の発現もないと考える。このように、低下率および回復率は残留せん断面の状況を反映したものであり、粒子配向がより進み強度が大きく低下したもののほど回復率もより小さくなる。

Fig. 4.6は、大変位せん断後の再圧密段階を示したもので、台湾試料および仲順試料の $\sigma'_n = 50$ kPaに対する垂直変位 $\Delta h \sim$ 再圧密時間 $\log t$ 関係である。圧密は、台湾試料が約300分で、仲順試料が約250分で終了した。砂分を多く含有する台湾試料では、残留せん断面に形成された1 mm程度の攪乱薄層が実質再圧密されるので、その垂直変位量は、鏡肌面となっている粘土分の多い仲順試料の場合より大きくなる。同一試料においては、高い σ'_n の方が低い σ'_n より残留せん断面の形成・発達が良好となるため、垂直変位量が小さくなる傾向にある。

一旦低下した強度が圧密により幾分回復

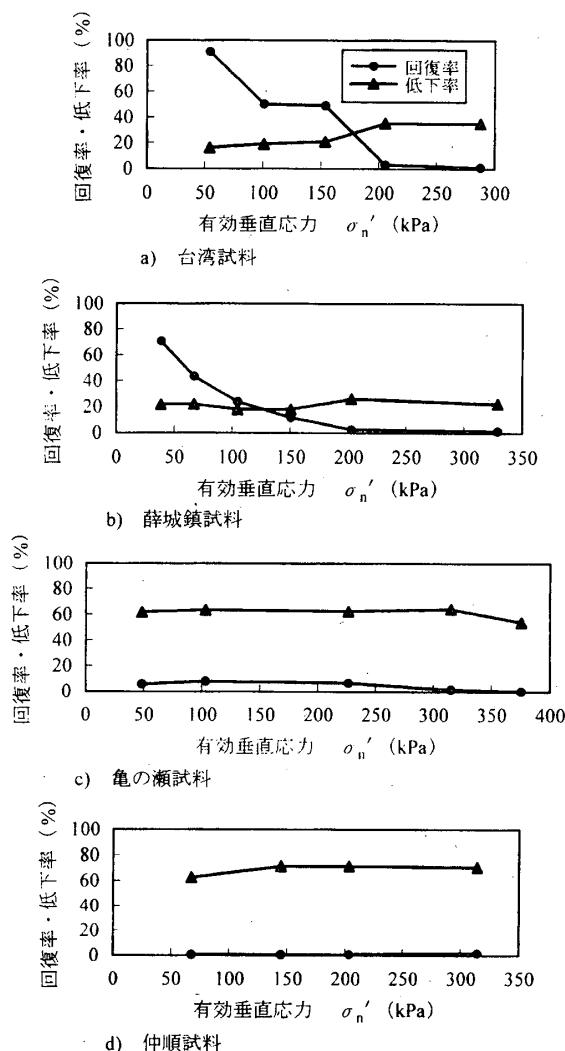


Fig. 4.5 各試料における回復率および低下率と有効垂直応力の関係

Strength recovery rate and strength decrease rate in strength as a function of effective normal stress for the Taiwan, Xuechengzhen, Kamenose and Tyunjun sail samples

し、わずかな変位ですぐに失われるとの指摘があったが (Chandler, 1977), 台湾や薛城鎮のような砂分の多い試料は、低い垂直応力レベルにおいて発現した回復強度が再び残留強度に低下するのに10mm程度のせん断変位が必要とされた。地すべりは滑動力がすべり面の抵抗力を超えた時点で発生するもので、最大の抵抗力が問題となるので、回復強度を再活動地すべりの解析に活用することは一考に値する。

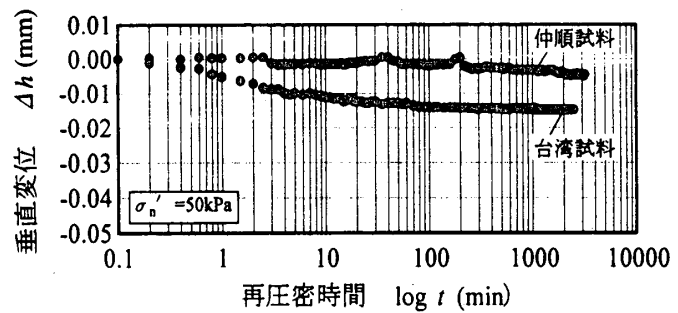


Fig. 4.6 台湾試料および仲順試料の垂直変位 Δh ~ 再圧密時間 $\log t$ 関係 ($\sigma'_n = 50\text{kPa}$)

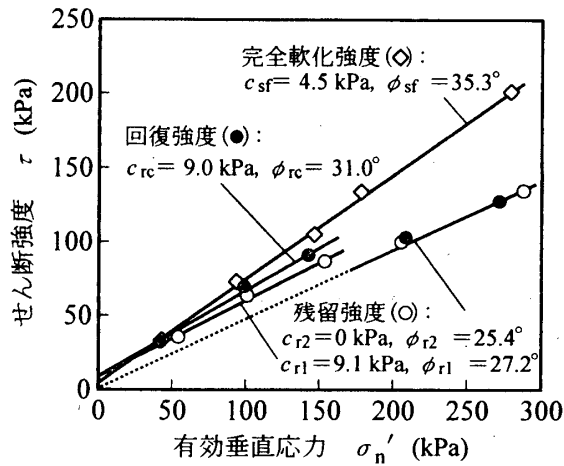
Vertical displacement Δh - re-consolidation duration $\log t$ for the Taiwan and Tyunjun soil samples ($\sigma'_n = 50\text{kPa}$)

4 回復および残留強度定数に及ぼす有効垂直応力の影響

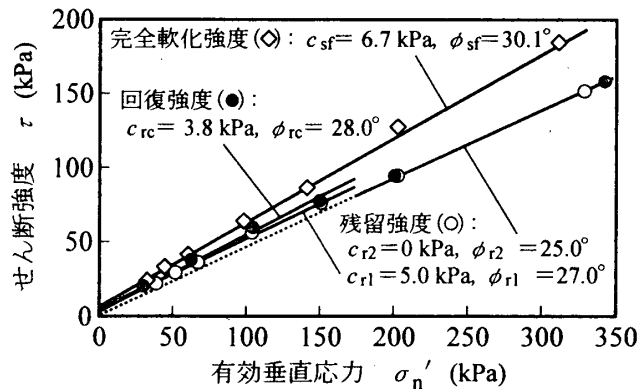
Fig. 4.7は、各試料について残留強度 τ_r 、完全軟化強度 τ_{sf} および回復強度 τ_{rc} を有効垂直応力 σ'_n に対して整理したものである。回復強度については、顕著な回復が認められた低い垂直応力レベルに対して包絡線を描いた。図中、残留強度および完全軟化強度に対して、回復強度の位置づけが鮮明である。台湾試料では、完全軟化強度定数は $c_{sf} = 4.5\text{kPa} \cdot \phi_{sf} = 35.3^\circ$ となった。残留強度は低い垂直応力レベルと高い垂直応力レベルに分けて整理でき、その定数は、 $\sigma'_n = 50 \sim 150\text{kPa}$ で $c_{r1} = 9.0\text{kPa} \cdot \phi_{r1} = 28.0^\circ$ 、 $\sigma'_n \geq 200\text{kPa}$ で $c_{r2} = 0\text{kPa} \cdot \phi_{r2} = 25.5^\circ$ となった。回復強度定数は、 $\sigma'_n = 50 \sim 150\text{kPa}$ で $c_{rc} = 9.0\text{kPa} \cdot \phi_{rc} = 31.0^\circ$ となり、 $\sigma'_n \geq 200\text{kPa}$ では $c_{r2} \cdot \phi_{r2}$ とほぼ同値となった。 ϕ_{rc} と ϕ_{r1} との差は 3° と大きい。これは、低い垂直応力レベルでは残留せん断面付近の砂粒子が再圧密により再配列し、再せん断時にインターロッキング作用により強度増加を生じるためである。薛城鎮試料では、完全軟化強度定数は $c_{sf} = 6.7\text{kPa} \cdot \phi_{sf} = 30.1^\circ$ 、残留強度定数は $c_{r1} = 5.0\text{kPa} \cdot \phi_{r1} = 27.0^\circ$ ($\sigma'_n = 30 \sim 150\text{kPa}$) および $c_{r2} = 0\text{kPa} \cdot \phi_{r2} = 25.0^\circ$ ($\sigma'_n \geq 200\text{kPa}$) である。回復強度定数は、 $\sigma'_n = 50 \sim 150\text{kPa}$ において $c_{rc} = 3.8\text{kPa} \cdot \phi_{rc} = 28.0^\circ$ となり、 $\sigma'_n \geq 200\text{kPa}$ では台湾試料と同様回復が認められなかった。亀の瀬試料では、完全軟化強度定数は $c_{sf} = 21.4\text{kPa} \cdot \phi_{sf} = 13.9^\circ$ 、残留強度定数は $c_{r1} = 3.0\text{kPa} \cdot \phi_{r1} = 7.2^\circ$ ($\sigma'_n = 50 \sim 200\text{kPa}$)、 $c_{r2} = 0\text{kPa} \cdot \phi_{r2} = 7.1^\circ$ ($\sigma'_n \geq 300\text{kPa}$) である。回復強度定数は、 $\sigma'_n = 50 \sim 200\text{kPa}$ で $c_{rc} = 4.0\text{kPa} \cdot \phi_{rc} = 7.7^\circ$ となり、 $c_{r1} \cdot \phi_{r1}$ との間ほとんど差がない。仲順試料では、完全軟化強度定数は $c_{sf} = 4.4\text{kPa} \cdot \phi_{sf} = 31.3^\circ$ 、残留強度定数は $c_{r1} = 2.0\text{kPa} \cdot \phi_{r1} = 9.5^\circ$ ($\sigma'_n = 50 \sim 100\text{kPa}$)、 $c_{r2} = 0\text{kPa} \cdot \phi_{r2} = 9.3^\circ$ ($\sigma'_n \geq 200\text{kPa}$) となった。回復強度定数は、 $\sigma'_n = 50 \sim 100\text{kPa}$ で $c_{rc} = 2.2\text{kPa} \cdot \phi_{rc} = 9.5^\circ$ であり、亀の瀬試料と同様、 $c_{r1} \cdot \phi_{r1}$ とほぼ同値となった。回復強度定数 ϕ_{rc} は、残留強度定数 c_{r1} が零とならない低い垂直応力レベルにおいて卓越し、残留強度定数 ϕ_{r1} との差は砂分を多く含有する試料において大きい。

残留せん断面粘土粒子の配向度は低い垂直応力レベルにおいて小さくなることから (Gibo et al., 1987), 回復強度は、再せん断前の再圧密効果があって発現するものであり、残留せん断面の状態に大きく依存することが分かる。残留せん断面の発達要因としては有効垂直応力の大小および試料の物理的・鉱物学的性質が重要であり、回復強度特性をより鮮明にするためには含有鉱物組成の影響についても検討が必要である。

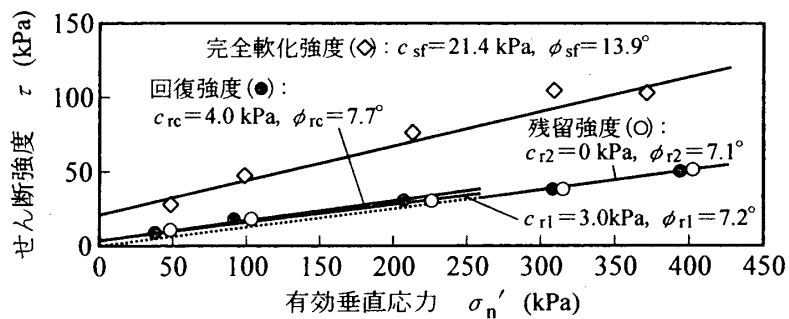
a) 台湾試料



b) 薛城鎮試料



c) 龜の瀬試料



d) 仲順試料

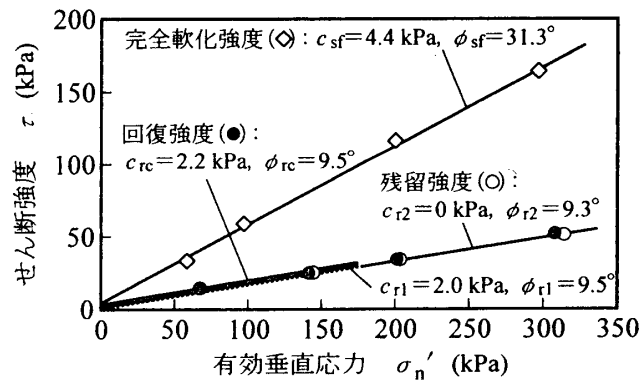


Fig. 4.7 各試料の回復強度、残留強度および完全軟化強度
 Recovered, residual and fully softened strengths for the Taiwan, Xuechengzhen, Kamenose and Tyunjun soil samples

第4節 まとめ

地すべり土の再圧密による強度回復について検討し、以下の結果を得た。

- (1) 砂分を多く含有する試料の残留せん断面では、低い有効垂直応力レベルにおいて強度の回復が顕著であり、それが消失し再び残留強度にまで低下するのに10mm程度の変位が必要とされた。回復率は低い有効垂直応力ほど増大傾向にあったが、完全軟化強度にまでは至らなかった。
- (2) 粘土分を多く含有する試料では、すべての有効垂直応力に対して高い低下率が示され、回復率は小さく、強度回復は無視できる。
- (3) 回復強度定数 ϕ_{rc} と残留強度定数 ϕ_{ri} との差違は砂分を多く含有する試料において $1 \sim 4^\circ$ となった。

回復強度は再せん断前の再圧密効果により発現するもので、残留せん断面の状態および有効垂直応力の大きさに依存することが明らかになった。

第4章 参考文献

1. Chandler, R. J. 1977 Back analysis techniques for slope stabilization works: a case record, *Géotechnique*, 27 (4): 479 - 495.
2. Gibo, S., Egashira, K. and Ohtsubo, M. 1987 Residual strength of smectite-dominated soils from the Kamenose landslide in Japan, *Canadian Geotechnical Journal*, 24 (3): 456 - 462
3. 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精度, *地すべり*, 31 (3): 24 - 30
4. 宜保清一, 陳信雄, 江頭和彦, 林義隆, 周亜明 1997 台湾, 中部横貫公路地すべり土の残留および回復強度特性, *地すべり*, 34 (2): 50 - 56
5. 宜保清一, 中村真也, 周亜明 2000 移動量の大きい泥岩地すべりにおけるすべり面の強度 - 沖縄, 仲順地すべりを事例として -, *土と基礎*, 48 (8): 9 - 12
6. 財高速道路調査会 1985 地すべり地形の安定度評価に関する研究報告書, 日本道路公団: 169 - 172
7. 中村真也, 宜保清一, 周亜明, 江頭和彦 1999 地すべり土の残留強度包絡線の湾曲化と強度定数決定手法, *地すべり*, 36 (1): 28 - 34
8. (社)農業土木学会 1989 農林水産省構造改善局, 土地改良事業計画設計基準 - 農地地すべり防止対策 -, (社)農業土木学会: 165 - 166
9. 周亜明, 宜保清一, 江頭和彦, 藤本昌宜 1997 中国, 岷江および支流雑谷脳河流域の地すべり土の物理的・鉱物学的性質とせん断強度特性, *農業土木学会論文集*, 187: 23 - 29

第5章 回復強度と鉱物組成の関係

第1節 はじめに

回復強度は、再圧密効果により発現するもので、有効垂直応力の大きさに依存し、直接的には残留せん断面の状態が反映される。残留せん断面の発達状態（配向性粘土鉱物の配向度）は残留強度の支配要因であり（Fig. 2.3, Fig. 2.4, Fig. 3.3）、第3章で論じたように、低い垂直応力レベルでは、配向度の悪さに起因して、残留強度定数が高い垂直応力におけるより幾分大きくなる。また、残留せん断面の形成・発達は、試料の物理的・鉱物学的性質、特に $2\mu\text{m}$ 以下粘土含有量や含有粘土鉱物の種類に支配される（Skempton, 1985; Gibo et al., 1987; 宜保・江頭, 1992; 宜保ら, 1992）。これらのことは、残留せん断面の形成・発達の主要因である試料の鉱物組成が強度の回復に大きく関与することを示唆するものである。

本章は、上記の推論に基づいて、回復強度と鉱物組成との関係を明確にしようとしたものである。

第2節 試料と試験方法

第4章で用いた試料（台湾、薛城鎮、亀の瀬、仲順）に、新たに中国・黄土高原^{びょうわん}廟湾地すべり（宜保ら, 1998a, 1998b）および新潟^{おおどころ}・大所地すべり（新潟県土木部砂防課, 1999）からの採取土を試料として加えた。廟湾試料は滑落崖の露出したすべり面土で、第四系の馬蘭黄土である。大所試料はボーリングにより採取したすべり面粘土で、蛇紋岩および珪化頁岩由来の断層粘土である。試料は風乾して $420\mu\text{m}$ フルイを通過させ、各試験に供した。回復強度の測定方法は第4章第2節2に準ずる。粒度試験および鉱物分析は、それぞれ音波処理反復法（吉永ら, 1984）、X線回折法（和田, 1966）によった。両試験方法の詳細については第2章第2節を参照されたい。

第3節 結果および考察

1 粒度組成と鉱物組成

Table 5.1に各試料の粒度組成を示す。 $<2\mu\text{m}$ 粘土含有量CFは、大所試料、亀の瀬試料および仲順試料ではそれぞれ50.8%、73.2%、50.0%と高い。廟湾試料および薛城鎮試料ではそれぞれ18.7%、9.7%と低く、シルト分および細砂分が主である。廟湾試料、台湾試料および薛城鎮試料では砂分が30%以上を占める。

各試料の試料全体（ $<420\mu\text{m}$ ）および $<2\mu\text{m}$ 粘土画分中の鉱物組成をそれぞれTable 5.2, Table 5.3に示す。廟湾試料は、 $<420\mu\text{m}$ 試料中の石英Qrおよび長石Fdの含有量がそれぞれ56%、21%と高く、雲母Mcおよび緑泥石Chの含有量がそれぞれ15%、6%である。薛城鎮試料は、 $<2\mu\text{m}$ 粘土画分中ではMcが74%と卓越し、試料全体では、Mc（30%）、Ch（25%）、Qr（33%）が多く、スメクタイト

Table 5.1 $<420\mu\text{m}$ 試料の粒度組成 (%)
Grain size distribution (%) of $<420\mu\text{m}$ soil samples

試料	土・岩の種類	粘土分 ($<2\mu\text{m}$)	シルト分 ($2\sim 20\mu\text{m}$)	細砂分 ($20\sim 200\mu\text{m}$)	粗砂分 ($200\sim 420\mu\text{m}$)
廟湾	馬蘭黄土	18.7	30.9	50.4	0.0
薛城鎮	黒色千枚岩	9.7	52.3	29.6	8.4
台湾	砂質頁岩	35.3	31.4	28.7	4.6
大所	断層粘土*	50.8	20.7	22.6	5.9
亀の瀬	凝灰質礫質土	73.2	17.8	5.0	4.0
仲順	泥岩	50.0	45.2	4.8	0.0

*蛇紋岩および珪化頁岩由来

St を含有しない。台湾試料の鉱物組成は薛城鎮試料と類似している。< 2 μm 粘土画分中では Mc (58%) と Ch (27%) が多く、St, パーミキュライト Vt, カオリナイト Kt は含まれない。試料全体としては Qr (52%) を主に、Mc (23%), Ch (13%), Fd (12%) から成る。大所試料は、蛇紋岩および珪化頁岩由来の断層粘土で、Vt と Ch が主で、< 2 μm 粘土画分中では前者が 47%, 後者が 31%, 試料全体ではそれぞれ 41%, 34% と多い。Vt および少量含まれる St は緑泥石からの変質鉱物と推測される。亀の瀬試料は、< 2 μm 粘土画分中の 98% を St が占め、試料全体でも St が 77% と卓越し、Qr, Fd, Mc を少量含有する。仲順試料は、< 2 μm 粘土画分中では Mc (44%) が主で、St (13%), Ch (18%), Kt (10%) を含み、試料全体では Qr と Mc が主で、Fd, St, Ch, Kt を随伴する。

2 せん断強度と強度の回復

Fig. 5.1 (a, b) は、試料の“大変位せん断-再圧密-再せん断”試験結果を、廟湾試料と大所試料を例に、完全軟化強度 τ_{sf} 中心とした初期せん断段階、残留強度 τ_r を中心とした残留せん断段階、回復強度 τ_{rc} を中心とした再せん断段階に分けて、有効垂直応力 $\sigma'_v = 100\text{kPa}$ について示したものである。Fig. 5.2 (a, b) に両試料の強度包絡線を示し、Table 5.4 に全試料について整理したものを示す。

廟湾試料、薛城鎮試料および台湾試料は、摩擦係数 τ / σ'_v が全体的に高めで、強度の低下率

Table 5.2 <420 μm 試料の鉱物組成 (%)
Mineralogical composition (%) of <420 μm soil samples

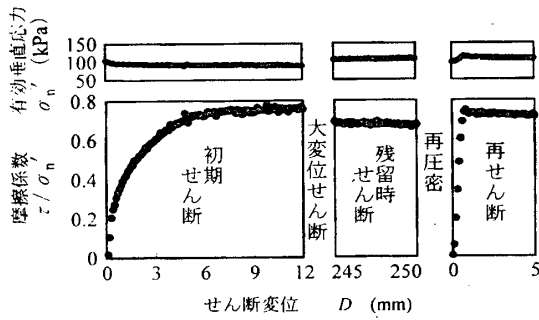
試料	St	Vt	Ch	Mc	Tc	Kt	Zt	Am	Qr	Fd	Others
廟湾	1	0	6	15	0	1	0	0	56	21	0
薛城鎮	0	0	25	30	0	0	0	0	33	11	1
台湾	0	0	13	23	0	0	0	0	52	12	0
大所	4	41	24	0	6	0	2	11	7	5	0
亀の瀬	77	0	0	2	0	1*	0	0	14	3	3
仲順	6	0	15	27	0	6	0	0	34	12	0

St:スメクタイト, Vt:パーミキュライト, Ch:緑泥石, Mc:雲母, Tc:滑石, Kt:カオリナイト, Zt:沸石, Am:角せん石, Qr:石英, Fd:長石, Others:クリストパル石, 苦灰石, 角せん石と(あるいは)磁鉄鉱, *Kl:カオリン鉱物

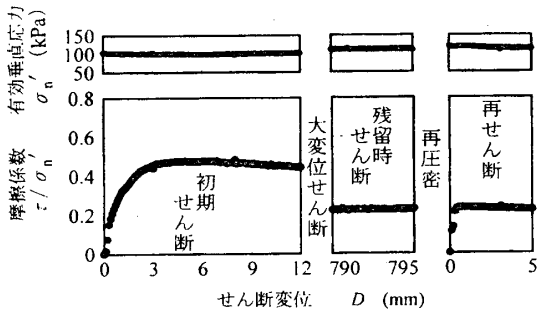
Table 5.3 < 2 μm 粘土画分の鉱物組成 (%)
Mineralogical composition (%) of the <2 μm clay fraction of soil samples

試料	St	Vt	Ch	Mc	Mc/Ch	Tc	Kt	Am	Qr	Fd	Gt
廟湾	3	0	14	65	0	0	6	0	9	3	0
薛城鎮	0	0	16	74	1	0	0	0	3	3	3
台湾	0	0	27	58	0	0	0	0	11	4	0
大所	7	47	31	0	0	9	0	6	0	0	0
亀の瀬	98	0	0	1	0	0	1*	0	0	0	0
仲順	13	0	18	44	0	0	10	0	12	3	0

St:スメクタイト, Vt:パーミキュライト, Ch:緑泥石, Mc:雲母, Mc/Ch:雲母/緑泥石混合層鉱物, Tc:滑石, Kt:カオリナイト, Am:角せん石, Qr:石英, Fd:長石, Gt:ゲーサイト, *Kl:カオリン鉱物



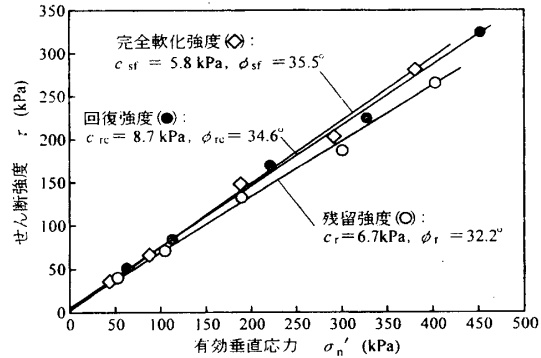
a) 廟湾試料 ($\sigma'_n = 100\text{kPa}$)



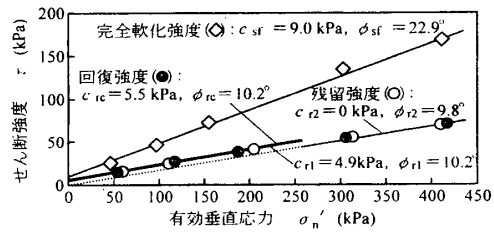
b) 大所試料 ($\sigma'_n = 100\text{kPa}$)

Fig. 5.1 廟湾および大所試料の初期せん断、残留時せん断および再せん断段階における有効垂直応力および摩擦係数

Effective normal stresses and friction coefficients in the initial, residual and re-shear stages of the Miaowan O'dokoro soil samples



a) 廟湾試料



b) 大所試料

Fig. 5.2 廟湾および大所試料の回復強度、残留強度および完全軟化強度

Recovered, residual and fully-softened strengths of the Miaowan and O'dokoro soil samples

$[(\tau_{sf}/\sigma'_n - \tau_r/\sigma'_n) / \tau_{sf}/\sigma'_n] \cdot 100 (\%)$ がそれぞれ、6.5%~11.7%, 18.0%~26.1%, 16.2%~35.3%と低い。回復強度の発現の様相は、廟湾試料ではすべての σ'_n において強度が回復し、回復率 $[(\tau_{rc}/\sigma'_n - \tau_r/\sigma'_n) / (\tau_{sf}/\sigma'_n - \tau_r/\sigma'_n)] \cdot 100 (\%)$ は、 $\sigma'_n = 300\text{kPa}$ で82.5%, $\sigma'_n = 400\text{kPa}$ で73.2%であった。薛城鎮試料および台湾試料では、強度の回復は低い垂直応力レベルで顕著であり、高い垂直応力レベルではわずかであった。廟湾試料、薛城鎮試料および台湾試料のようにシルト・砂粒子が多く、非配向性の Qr や Fd が卓越する試料では、特に低い垂直応力レベルの下で、残留時のせん断領域に攪乱薄層が形成され、再圧密により強度を回復する。廟湾試料は、高い垂直応力レベルの下でも強度を回復するが、これは、砂分が50.4%と多く、Qr が56%と卓越して、配向性の Mc, Ch が少なく、せん断面の土粒子配向が良好でないことに起因したものであると考えられる。薛城鎮試料および台湾試料は、高い垂直応力レベルでは回復率がほとんど零であり、配向性の Mc, Ch の影響が伺える。

大所試料は、 τ_r/σ'_n が小さく、低下率が52.8%~60.3%と大きく、回復率が $\sigma'_n = 50\sim 200\text{kPa}$ で1.0~4.8%, $\sigma'_n = 300\text{kPa}$ および $\sigma'_n = 400\text{kPa}$ でそれぞれ0.6%, 0.8%と低い。亀の瀬および仲順試料においても、低下率が大きく、回復率は無視できる程度である。これらの試料は、粘土含有量が高く、St等の配向性粘土鉱物を含有し、すべての σ'_n の下で残留せん断面が形成・発達するために、再圧密効果がほとんどなく、強度の回復もみられない。

回復強度定数は、Fig. 5.2から、廟湾試料では、 $\sigma'_n = 50\sim 400\text{kPa}$ で $c_{rc} = 8.7\text{kPa} \cdot \phi_{rc} = 34.6^\circ$ と完全軟化強度定数に近い値となり、残留強度定数 ϕ_r との差が2.4°と大きい。大所試料では、 $\sigma'_n = 50\sim 200\text{kPa}$ に対して $c_{rc} = 5.5\text{kPa} \cdot \phi_{rc} = 10.2^\circ$ となり、ほぼ残留強度定数と一致した (Table 5.4)。

Table 5.4 <420 μ m 試料の回復率, 低下率およびせん断強度定数
Recovery rate, reduction rate and strength parameters of <420 μ m soil samples

試料	残留強度発揮時の有効垂直応力 (kPa)	低下率 (%)	回復率 (%)	完全軟化強度定数		残留強度定数		回復強度定数		
				c_{sf} (kPa)	ϕ_{sf}	c_r (kPa)	ϕ_r	c_{rc} (kPa)	ϕ_{rc}	
廟湾	52.4	6.5	98.5	5.8	35.5°	6.7	32.2°	8.7	34.6°	
	105.1	11.7	82.7							$(\sigma'_n = 50 \sim 400\text{kPa})$
	189.5	11.0	81.1							
	300.5	11.2	82.5							
	403.0	10.9	73.2							
薛城镇	38.4	21.7	70.7	6.7	30.1°	5.0	27.0°	3.8	28.0°	
	67.1	21.9	43.4							$(\sigma'_n = 50 \sim 150\text{kPa})$
	104.6	18.0	24.0							
	150.6	18.1	11.8							
	202.8	26.1	2.6							
	329.0	22.3	1.5							
台湾	54.3	16.2	91.1	4.5	35.3°	9.1	27.2°	9.0	31.0°	
	101.1	19.2	50.3							$(\sigma'_n = 50 \sim 150\text{kPa})$
	153.6	21.0	49.0							
	205.6	35.3	3.2							
	287.8	35.2	1.1							
大所	59.2	52.8	2.9	9.0	22.9°	4.9	10.2°	5.5	10.2°	
	110.7	54.0	4.8							$(\sigma'_n = 50 \sim 200\text{kPa})$
	204.4	56.9	1.0							
	313.9	60.3	0.6							
	410.4	59.0	0.8							
亀の瀬	48.3	61.8	5.7	21.4	13.9°	4.0	7.7°	3.0	7.2°	
	103.3	63.5	8.0							$(\sigma'_n = 30 \sim 200\text{kPa})$
	226.3	62.5	6.7							
	315.1	64.3	1.6							
	402.5	54.0	0.3							
仲順	67.5	62.6	0.7	4.4	31.3°	2.0	9.5°	2.2	9.5°	
	144.6	71.3	0.7							$(\sigma'_n = 50 \sim 200\text{kPa})$
	203.4	71.3	0.8							
	314.3	70.7	1.6							

3 回復強度と含有粘土鉱物との関係

強度の低下率と回復率は, Table 5.4に示すように, 相互に関係し, 試料によって大きく異なる。Fig. 5.3は, 各試料の $\sigma'_n = 100\text{kPa}$ と 300kPa における回復率と低下率の関係を示したものである。非配向性鉱物を多く含有する廟湾試料および台湾試料は, 強度の低下率が小さい反面, 回復率が高い。一方, 残留せん断面の発達が良い大所試料, 亀の瀬試料および仲順試料は, 低下率が50~70%と高く, 回復率が極端に低い。Fig. 5.4に, すべての垂直応力における回復率/低下率比と低下率の関係を示す。回復率を低下率で除して無次元化することにより, 強度の低下・回復の関係がより鮮明になり, 異なる試料・異なる垂直応力に対する回復の様相の比較が容易になる。回復率/低下率比は, 低下率が25%より大きい場合にはほとんど零であり, 25%以下においてはその低下とともに増大する傾向を示す。

これらの強度回復特性は, 試料の粒度組成・鉱物組成の違いに起因すると考えられるので, 次に, 試料の砂 (20~420 μ m) 含有量 SF, 粘土 (< 2 μ m) 含有量 CF, 石英 Qr 含有量および配向性粘土鉱物 (St, Vt, Ch, Mc) 総量との関係を示す。

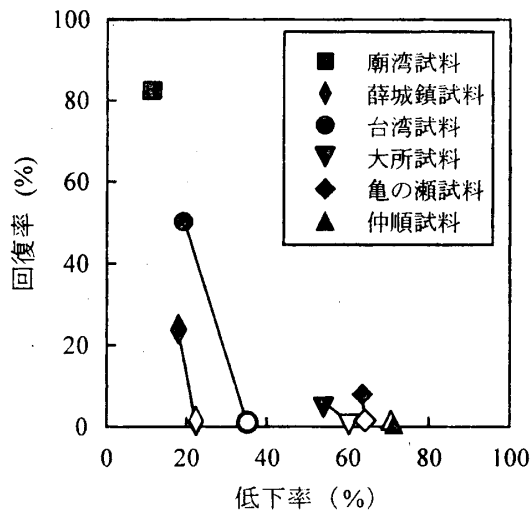


Fig. 5.3 有効垂直応力 $\sigma'_n=100\text{kPa}$ (黒塗り) および $\sigma'_n=300\text{kPa}$ (中抜き) における回復率と低下率の関係

Plot of the recovery rate against the reduction rate at effective normal stress of $\sigma'_n=100\text{kPa}$ (solid symbols) and $\sigma'_n=300\text{kPa}$ (open symbols)

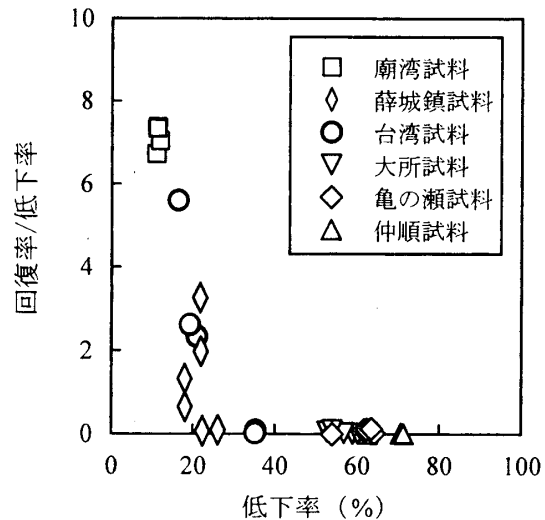


Fig. 5.4 すべての有効垂直応力における回復率/低下率比と低下率の関係

Relationship between the ratio of recovered-rate/reduction-rate and the reduction rate at all effective normal stresses examined

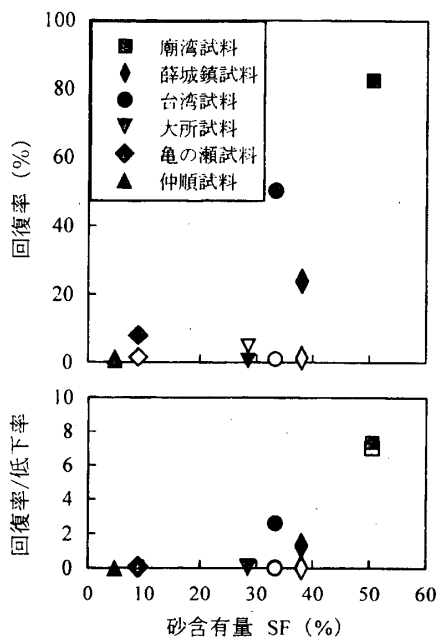


Fig. 5.5 $\sigma'_n=100\text{kPa}$ (黒塗り) および 300kPa (中抜き) における回復率および回復率/低下率比と砂 (20-420 μm) 含有量 SF の関係

Relationship of the recovery rate and the ratio of recovery-rate/reduction-rate to the 20-420 μm sand content SF at $\sigma'_n=100\text{kPa}$ (solid symbols) and $=300\text{kPa}$ (open symbols)

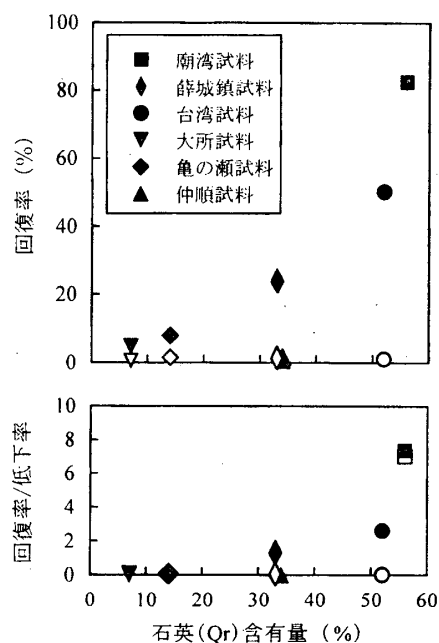


Fig. 5.6 $\sigma'_n=100\text{kPa}$ (黒塗り) および 300kPa (中抜き) における回復率および回復率/低下率比と $<420\mu\text{m}$ 試料中の石英 (Qr) 含有量 (%) の関係

Relationship of the recovery rate and the ratio of recovery-rate/reduction-rate to the quartz content Qr in $<420\mu\text{m}$ soil samples at $\sigma'_n=100\text{kPa}$ (solid symbols) and $=300\text{kPa}$ (open symbols)

Fig. 5.5は、各試料について、砂 (20~420 μm) 含有量 SF に対する回復率および回復率/低下率比の関係を示したものである。SF の高い試料では砂粒子がせん断面での粒子配向を妨げるので、回復率/低下率比は SF の増加に伴って増大する傾向を示す。しかし、大所試料のように、砂分および配向性粘土鉱物の両者を含有し、残留せん断面が形成される場合、前者よりも後者の多少が残留せん断面の形成・発達を支配するようである。Fig. 5.6は、試料 (<420 μm) 中の石英 (Qr) 含有量に対する関係を示したものである。Qr は、粒子そのものに割れ目がなく、摩擦に対してきわめて抵抗力があり、風化に対してもかなり安定しており、非配向性である (関, 1976)。せん断においては Qr 粒子が先に反応し、せん断抵抗を増大させる (橋本, 1987; 周ら, 1997)。Qr が卓越する廟湾試料では、残留せん断面の形成・発達が十分でないために、強度の低下率が低く、再圧密効果により強度が大きく回復する。薛城镇試料と仲順試料の Qr 含有量は前者で33%, 後者で34%とほぼ同じであるが、強度回復の様相は著しく異なる。このことは、仲順試料が薛城镇試料に比べて約5倍の CF を含有していることで説明できる (Table 5.1)。

Fig. 5.7に<2 μm 粘土含有量 CF に対する関係を示す。Skempton (1985) は、CF (<2 μm) > 40%の試料においてピーク強度から残留強度への低下が著しいことを示し、強度の低下の要因として CF を挙げている。回復率/低下率比は、全体として、CF が低下するにつれて大きくなる傾向にある。薛城镇試料は、CF が最も少ないにもかかわらず、廟湾試料よりも回復率が低い。これは、含まれる粘土鉱物種の違いによると考えられ、Fig. 5.8に、<420 μm 試料中の配向性粘土鉱物 St, Vt, Ch および Mc の総量に対する関係を示す。残留強度が比較的高めである薛城镇および台湾試料では、回復率は $\sigma'_v = 100\text{kPa}$ の下でそれぞれ24%, 50%となるが、300kPaのような高い垂直応力に対してはほとんど零であり、配向性粘土鉱物の影響が伺える。

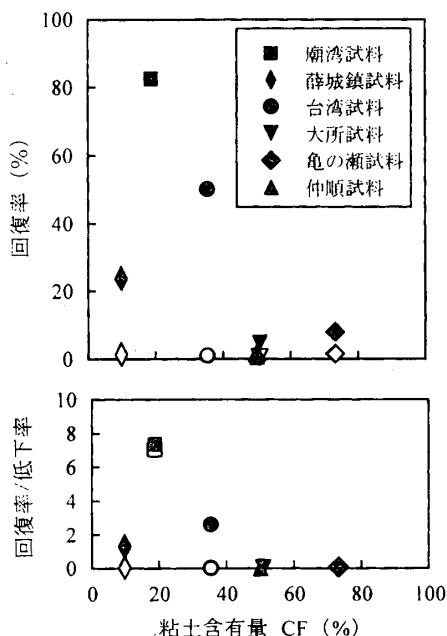


Fig. 5.7 $\sigma'_v = 100\text{kPa}$ (黒塗り) および 300kPa (中抜き) における回復率および回復率/低下率比と <2 μm 粘土含有量 CF の関係

Relationship of the recovery rate and the ratio of recovery-rate/reduction-rate to the <2 μm clay fraction content CF in soil samples at $\sigma'_v = 100\text{kPa}$ (solid symbols) and $=300\text{kPa}$ (open symbols)

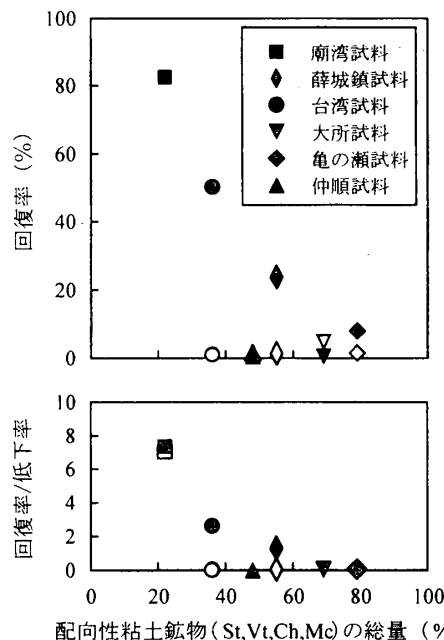


Fig. 5.8 $\sigma'_v = 100\text{kPa}$ (黒塗り) および 300kPa (中抜き) における回復率および回復率/低下率比と <420 μm 試料中の配向性粘土鉱物 (St, Vt, Ch, Mc) 総量 (%) の関係

Relationship of the recovery rate and the ratio of recovery-rate/reduction-rate to the total contents of preferred-oriented clay minerals (St, Vt, Ch, Mc) in <420 μm soil samples at $\sigma'_v = 100\text{kPa}$ (solid symbols) and $=300\text{kPa}$ (open symbols)

Fig. 5.9は、(回復強度定数 ϕ_{rc} - 残留強度定数 ϕ_{r1}) とSF, Qr 含有量, CF および配向性粘土鉱物総量との関係を示したものである。
 ($\phi_{rc} - \phi_{r1}$) は、Qr 含有量の増加とともに大きくなり、反対に配向性粘土鉱物総量の増加とともに小さくなる。

以上のことから、回復強度の発現は、試料 (<420 μ m) 中の St 等の配向性粘土鉱物が少ないことが必要条件で、強度回復の大小は、せん断面の形成・発達を妨げる Qr および砂 (20~420 μ m) の含有量に依存するといえる。なお、強度回復の大小と <2 μ m 粘土分中の粘土鉱物量との間には明瞭な関係が認められなかった。これは、<2 μ m 粘土含有量が低い場合、低粘土鉱物量自体が試料のせん断挙動を支配する主要因となり得ないためである。

4 強度回復に及ぼすシキソトロピーの影響

シキソトロピーは、乱された粒子が含水比不変のまま時間の経過とともに再配列し、自由水が非自由化して強度を回復する現象であり、それによる強度回復は粘土の初期構造に依存し、ランダム構造の場合に発現する(土質工学会, 1985, 1986)。しかし、St 等の配向性粘土鉱物を多く含むような土では、大変位せん断後の残留せん断面は鏡肌を呈するほどに発達し、再圧密効果がほとんど認められない。そのような残留せん断面ではシキソトロピーの起こる可能性は低く、それによる強度回復もほとんどないと考えられる。

第4節 まとめ

地すべり土の回復強度の発現と鉱物学的性質との関係について検討し、次の結果を得た。

- (1) シルト・砂分が多く、石英、長石を主要鉱物とする試料では、400kPaまでの有効垂直応力の下で顕著な強度回復を示した。
- (2) シルト・砂分が多く、石英、長石が主で、配向性の雲母、緑泥石等をかなりの量含む試料では、低い垂直応力レベルにおいて強度の回復がみられたが、高い垂直応力レベルにおいては強度の回復はわずかであった。このことは、配向性鉱物の存在により、高い垂直応力の下で残留せん断面が形成されることに起因する。
- (3) St 等の配向性粘土鉱物が卓越する試料では、鏡肌を呈する程の残留せん断面の発達により、再圧密効果がなく、強度の回復は本質的には認められなかった。

地すべりが上記(1), (2)のようなすべり面を有する場合、安定解析に回復強度を勘案することにより解析精度の向上が図られる。

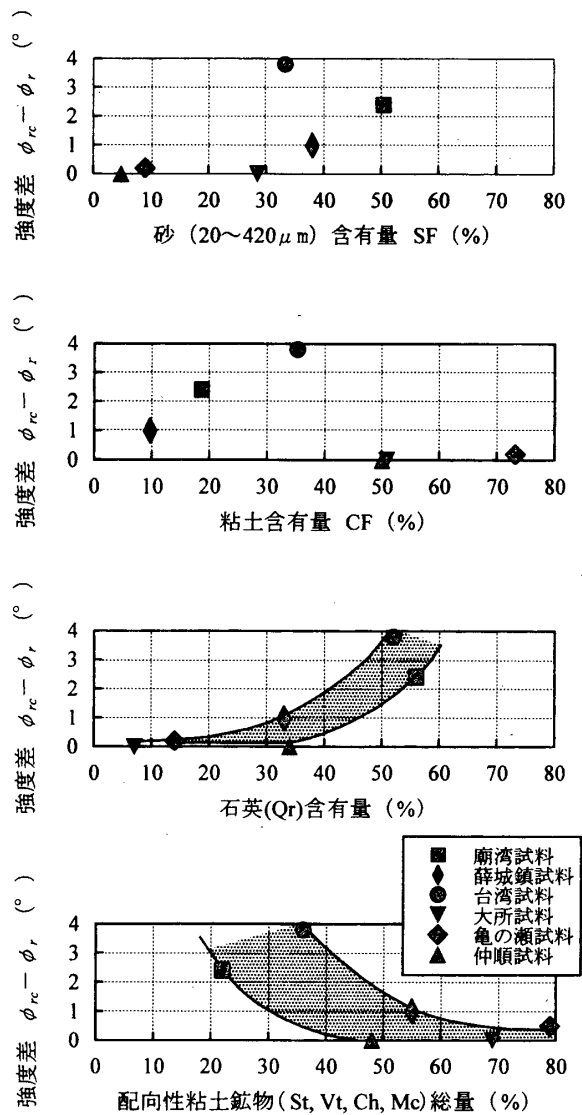


Fig. 5.9 強度差(回復強度定数-残留強度定数)と <420 μ m試料の粒度組成および鉱物組成の関係
 Relationship of the strength difference to the grain size distribution and the mineralogical composition of <420 μ m soil samples

なお、本章における実験の一部は松尾浩一君（九州大学農学部4年生）に負う。記して謝意を表す。

第5章 参考文献

1. ㈱土質工学会 1985 土質工学用語辞典, ㈱土質工学会: 38
2. ㈱土質工学会 1986 粘土の不思議, ㈱土質工学会: 69 - 74
3. 宜保清一, 江頭和彦 1992 沖縄, 島尻層群泥岩試料の残留強度と粘土粒子配向の関係, *農業土木学会論文集*, 161: 19 - 24
4. Gibo, S., Egashira, K. and Ohtsubo, M. 1987 Residual strength of smectite-dominated soils from the Kamenose landslide in Japan, *Canadian Geotechnical Journal*, 24 (3): 456 - 462
5. 宜保清一, 江頭和彦, 林義隆 1992 地すべり土の残留強度の大変位せん断試験による測定法と物理的・鉱物学的性質による類推法, *農業土木学会論文集*, 159: 57 - 63
6. 宜保清一, 孫保平, 趙廷寧, 佐々木慶三, 江頭和彦, 中村真也 1998a 1996年7月に発生した黄土高原固原地区の廟湾地すべり, 第37回地すべり学会研究発表講演集, 新潟: 101 - 102.
7. 宜保清一, 孫保平, 趙廷寧, 佐々木慶三, 江頭和彦, 中村真也 1998b 黄土高原固原地区の廟湾 (Miaowan) 地すべりについて, 第79回農業土木学会九州支部講演集, 長崎: 243 - 246
8. 橋本光男 1987 日本の変成岩, 岩波書店: 4, 56
9. 新潟県土木部砂防課 1999 大所地すべり—大規模な破碎帯地すべりの機構と対策について—, 地すべり学会新潟支部
10. Skempton, A. W. 1985 Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory, *Géotechnique*, 35 (1): 3 - 18
11. 関陽太郎 1976 建設技術者のための岩石学, 共立出版(株): 92 - 93
12. 和田光史 1966 粘土鉱物の同定および定量法, *日本土壤肥料学雑誌*, 37 (1): 9 - 17
13. 吉永長則, 江頭和彦, 中井信 1984 黒ボク土の粒径分析法, *日本土壤肥料学雑誌*, 55 (3): 248 - 256
14. 周亜明, 宜保清一, 江頭和彦, 藤本昌宜 1997 中国, 岷江および支流雜谷腦河流域の地すべり土の物理的・鉱物学的性質とせん断強度特性, *農業土木学会論文集*, 187: 23 - 29

第6章 総 括

滑動・停止を繰り返す再活動型地すべりでは、すべり面の強度は残留強度にまで低下するが、静止時に土かぶり圧による再圧密により強度を回復し、すべり抵抗を微増させることが考えられる。本研究では、物理的・鉱物学的性質の異なる地すべり土について、地すべりの滑動・停止・再滑動を想定したリングせん断試験を行って残留強度特性および強度回復特性を明らかにした。得られた成果は、以下の通りである。

第1章では、本論文の研究の背景とその目的について述べ、本論文の内容に関する既往の研究を整理し、それらの未解明点・問題点を指摘し、本論文の位置づけを明確にした。本論文の内容と構成について、各章の相互関係を示し、その概略を紹介した。

第2章では、 $<420\mu\text{m}$ 試料全体の配向性粘土鉱物 (St, Vt, Ch, Mc) 総量、および Q_r および F_d の総量に注目し、 ϕ_r との関係を示した。得られた結果は次の通りである。

- (1) ϕ_r と $<2\mu\text{m}$ 粘土含有量 CF および塑性指数 I_p の間の相関は希薄であり、 ϕ_r とスメクタイト (St) 含有量 ($<420\mu\text{m}$ 試料) との関係も $\text{St} < 20\%$ 領域では明瞭でない。
- (2) ϕ_r と配向性粘土鉱物 (St, Vt, Ch, Mc) 総量との関係は全体としてかなり良好である。その関係は椅子型状曲線で示され、 ϕ_r の支配因子が非配向性鉱物から配向性鉱物へと交代する遷移域が鮮明に認められる。
- (3) ϕ_r と配向性粘土鉱物総量の関係図および ϕ_r と Q_r および F_d の総量との関係図を活用することにより、リングせん断試験によらない ϕ_r の類推が可能であることが示唆される。

第3章では、残留摩擦係数 τ_r / σ'_n ～有効垂直応力 σ'_n 関係および残留せん断面の状態に注目して残留強度包絡線と垂直応力レベルの関係を明らかにし、残留強度定数の決定手法の確立を試みた。得られた結果を要約すると次のようになる。

- (1) 残留強度包絡線は低い垂直応力レベルにおいて湾曲化するため、その定数は決定方法によって異なり、安定解析に大きく影響する。
- (2) 残留摩擦係数は、高い垂直応力レベルでほぼ一定となり、低い垂直応力レベルでは垂直応力が小さくなるほど増大し、左上がりの曲線となった。
- (3) この残留摩擦係数変化を基に有効垂直応力を大小二つのレベルに分け、残留強度包絡線を描いて強度定数を決定することを考え、高い垂直応力レベルにおいて $c_r = 0$ 、低い垂直応力レベルでは $c_r \neq 0$ であること、および ϕ_r が高い垂直応力レベルより低い垂直応力レベルで幾分大きくなることを明らかにした。
- (4) この手法は、垂直応力に依存する残留強度特性を活用し強度定数を決定しようとした合理的なものである。

第4章では、再圧密による強度回復と試料の物理的性質および有効垂直応力との関係について検討し、次の結果を得た。

- (1) 砂分を多く含有する試料の残留せん断面では、低い有効垂直応力レベルにおいて強度の回復が顕著であり、それが消失し再び残留強度にまで低下するのに10mm程度の変位が必要とされた。回復率は低い有効垂直応力ほど増大傾向にあったが、完全軟化強度にまでは至らなかった。
- (2) 粘土分を多く含有する試料では、すべての有効垂直応力に対して高い低下率が示され、回復率は小さく、強度回復は無視できる。
- (3) 回復強度定数 ϕ_{rc} と残留強度定数 ϕ_{r1} との差は砂分を多く含有する試料において $1 \sim 4^\circ$ となった。

回復強度は再せん断前の再圧密効果により発現するもので、残留せん断面の状態および有効垂直応力の大きさに依存することが明らかになった。

第5章では、回復強度の発現と鉱物学的性質との関係について検討し、次の結果を得た。

- (1) シルト・砂分が多く、石英、長石を主要鉱物とする試料では、400kPaまでの有効垂直応力の下で顕著な強度回復を示した。
- (2) シルト・砂分が多く、石英、長石が主で、配向性の雲母、緑泥石等をかなりの量含む試料では、低い垂直応力レベルにおいて強度の回復がみられたが、高い垂直応力レベルにおいては強度の回復はわずかであった。このことは、配向性鉱物の存在により、高い垂直応力の下で残留せん断面が形成されることに起因する。
- (3) St等の配向性粘土鉱物が卓越する試料では、鏡肌を呈する程の残留せん断面の発達により、再圧密効果がなく、強度の回復は本質的には認められなかった。

地すべりが上記(1)、(2)のようなすべり面を有する場合、安定解析に回復強度を勘案することにより解析精度の向上が図られる。

謝 辞

本論文は、琉球大学教授 宜保清一先生の御指導のもとに、著者が琉球大学大学院農学研究科修士課程および鹿児島大学大学院連合農学研究科博士課程に在学中の研究成果をまとめたものです。研究を遂行し論文をまとめるにあたり、多くの方々から御指導と御支援をいただきました。ここに記して深甚なる感謝の意を表す次第です。

宜保清一先生には著者が研究室に配属されてから終始変わらぬ温かい御指導と御鞭撻を賜りました。未熟で不届きな点の多い著者に対し、根気強く接して下さり、丁寧かつ熱心な指導をいただきました。また、研究のみならず人生に対する姿勢や考え方において多くの御教示を与えていただきました。それらは今後の人生において範とするところであります。琉球大学教授 吉永安俊先生、佐賀大学教授 藤本昌宣先生、佐賀大学教授 甲本達也先生および鹿児島大学教授 三輪晃一先生には、本論文をまとめるにあたり、貴重な御指導と御討議を賜りました。また、日頃より温かい励ましの御言葉も頂戴しました。九州大学教授 江頭和彦先生には、研究を遂行するにあたり懇切丁寧な御指導と御鞭撻を賜りました。著者の投稿論文について校閲して下さい、貴重な御討議および御指導を賜りました。特に、粘土鉱物に関しては多大な御教示をいただきました。また、本論文をまとめるにあたり格別の御配慮と御指導をいただきました。利根コンサルタント(株)常務取締役 佐々木慶三氏および同技術課長 周亜明氏には、日頃より御指導と御支援を賜りました。周氏は、研究室の先輩であり、基礎的な多くのことを御指導いただくとともに、公私にわたる良き相談相手になっていただきました。進学を決意したのも氏の助言によるものです。(株)清光研究所代表取締役 吉沢光三氏には、地すべり・崩壊に関する業務について多くの御教示とせん断試験および試験装置に関して多くの御指導を賜りました。また、日頃より温かい励ましの御言葉をいただき、公私ともに大変お世話になりました。(株)マルイ九州営業所所長 北川洋幸氏には、せん断試験および試験装置に関して多くの御指導を賜りました。また、日頃より温かい励ましの御言葉をいただきました。信州大学名誉教授 川上浩先生、同助教授 梅崎健夫先生、同助手 河村隆先生、山口大学助手 鈴木素之先生には、研究に関して貴重な御討議をいただくとともに、論文作成について多くの助言を賜りました。学会で先生方にお会いすることが著者の大きな楽しみでありました。中国、北京林業大学教授 孫保平先生、同教授 張洪江先生、同助教授 趙廷寧先生には、地すべり調査および試料採取にあたり御協力をいただきました。特に、趙廷寧先生(元 琉球大学客員研究員)には、黄土に関して有益な御教示をいただくとともに、公私にわたり御世話になりました。また、宜保先生研究室の先輩、後輩の方々には実験に関する御協力や御支援をいただきました。特に、辛島光彦氏(現 大分県)および井上英将氏(現 利根コンサルタント(株))には、基礎的なことを御指導いただくとともに、公私にわたり大変お世話になりました。比嘉優氏、金城志保氏および佐々倉玲於氏には、論文作成にあたり

多大な御協力をいただきました。その他、次に記す方々に多くの御支援と御協力を賜りました。琉球大学教授 翁長謙良先生（現 名誉教授）をはじめとする琉球大学農学部の先生方、梶谷エンジニア(株)南西支店主任 新城三雄氏（現 昭和地下工業(株)）、(株)協和建設コンサルタント取締役土質課長 仲村起三郎氏、(株)京和土建常務取締役 嘉手納烈氏、(株)南城技術開発代表取締役 城間敏夫氏。最後に、著者を暖かく支援して下さった、宜保先生夫人 いつ子様、伯父の旭建設(株)社長 翁長松信様および沖縄県畜産試験場室長 玉城政信様、および父、母、弟に深く感謝し、結びといたします。