

地すべり面付近の試料を用いた
リングせん断試験による残留強度定数

Residual strength parameters by the ring shear test using samples near slip surface of landslide

村尾英彦 澁谷達也
Hidehiko MURAO Tatsuya SHIBUYA



日本地すべり学会誌 第41巻 第4号 別刷

■地すべり面付近の試料を用いたリングせん断試験による残留強度定数

Residual strength parameters by the ring shear test using samples near slip surface of landslide

株式会社村尾地研/村尾英彦
Murao Chiken Co., Ltd./Hidehiko MURAO

富山県富山農地林務事務所/澁谷達也
Toyama Farmland & Forestry Affair Office/Tatsuya SHIBUYA

キーワード：地すべり，すべり面，残留強度，安定解析，極限平衡法

Key words : landslide, slip surface, residual strength, stability analysis, limit equilibrium method

1. はじめに

地すべりの安定解析を行う上で，強度定数の決定は重要な要素の一つである。筆者らは，強度定数をせん断試験より得たうえで，安定解析に適用すべく，リングせん断試験を導入した検討を行っている。

本稿はコアサンプル，およびデニソン型サンプラーにて採取した試料として用いたリングせん断試験を行い，すべり面の強度定数と安定解析手法についての検討結果を報告するものである。試験方法としてリングせん断試験を採用した主な理由は，

1. 再滑動型地すべり（以下，「地すべり」は再滑動型地すべりを指す）は大変形を受け，すべり面の強度は残留強度相当であり¹⁾，その状態を再現可能である
2. 実際のすべり面は，直接せん断的な変形構造を有している

ことである。

2. 試料について

通常，すべり面の強度定数をせん断試験より求めるためには，露頭や集水井の掘削時に，鏡肌，条線を確認し，すべり面と確定した箇所の粘土を試料として用いている。

ただし，現場においてすべり面が常に露頭しているとは限らず，試料採取のための大規模掘削は経費上の問題から困難な場合が多い。また，すべり面粘土を多量に採取可能な集水井（ただし，集水井底部をすべり面以深に貫入させる場合に限る）の掘削が行われるのは施工段階であり，安定解析は終了している。このように，すべり

面粘土の採取が困難であることは，せん断試験結果の実務への適用を阻んでいる一つの要因と言える。

そこで，ほとんどの地すべり現場において採取可能な，すべり面付近のコアサンプル，およびデニソン型サンプラーにて採取した試料を用いたリングせん断試験を行い，すべり面の強度定数を得ることができないかと考えた。

2.1 試料採取現場状況

試料を採取した，地すべり地周辺に分布する地質は，新第三系中新統砂岩泥岩互層で，10~30°傾斜の流れ盤構造の緩斜面である。

砂岩は凝灰質で，泥岩は緻密で固化している。また，新第三系泥岩が主体であることから風化耐性が低く，地すべり地周辺での露頭は風化して容易に剥落する状態になっている。

図-1に地すべり縦断面および試料採取箇所を示す。本事例においては現地踏査，地形判読，コア観察，地下水検層，および動態計測より， O_1 ~ O_3 の3つのすべり面が存在すると判定した。このうち O_2 すべりにおいては，孔内傾斜計（H7VB-1, 2）を用い，すべり面付近において調査開始年次に年間30mmの変位を，現在までに約50mmの累積変位を計測している。この間に対策工事として，地下水排除工を施工し，地すべり滑動は沈静化した。このことから，現在でも融雪時や多量の降雨後には1mm程度の変位の累積が計測されている。地すべり滑動は沈静化したものの，完全に停止していない。

今回は，この O_2 すべりに関しての検討を行った。 O_2 すべりでは，H7VB-1孔地点で深度15.9m，H7VB-2孔地点で深度10.0m地点にすべり面が存在すると判定した。

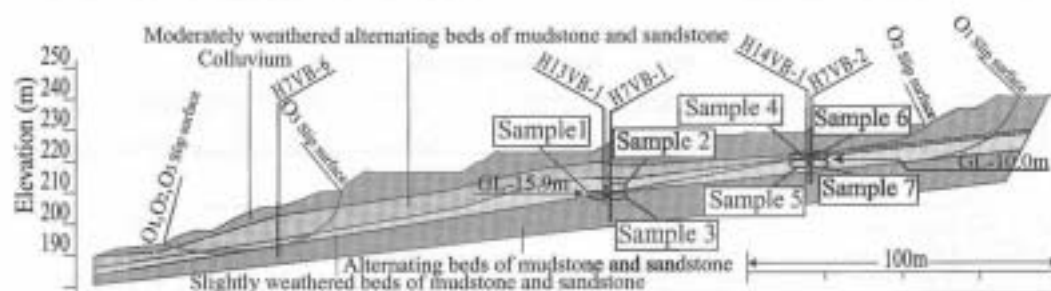


図-1 地すべり縦断面および試料採取箇所

すべり面深度が確定している事から、コアサンプル（試料直径50mm）および、デニソン型サンプラー（試料直径75mm）を用いてすべり面付近の試料を採取し、すべり面上部、すべり面下部、またはそれらを混合したものを、リングセン試験用の試料に用いた。

試料選定区間の模式図を図-2に示す。試料選定区間を30cmとした理由は、供試体の作成に充分な量を確保するため、実際はこの2/3程度の量があれば供試体を作成可能である。

また、採取した試料においては、写真-1（H13VB-1孔、GL-15.9m）、写真-2（H14VB-1孔、GL-10.0m）に示すような鏡肌、条線を伴うすべり面を確認している。

2.2 試料の物理的性質

各試料の物理的性質（ $2\mu\text{m}$ 粒径以下粘土含有率 P_c %, 液性限界 w_l %, 塑性限界 w_p %, 塑性指数 I_p %, 活性度 A ,

土粒子の密度 ρ_s (g/cm^3)をまとめたものを表-1に、粒径加積曲線を図-3に示す。

塑性指数については、試料1, 3, 5, 7が $I_p = 27 \sim 44$ と低塑性であるのに対し、試料2, 4, 6は $I_p = 54 \sim 58$ と比較的高塑性である。 $2\mu\text{m}$ 粒径以下の粘土含有率については、試料1, 3, 5, 7が $P_c = 14 \sim 24\%$ と低いのに対し、試料2, 4, 6は $P_c = 40 \sim 42\%$ と高い。活性度については、全ての試料が $A > 1.25$ となり活性粘土に分類された。

これらの結果より物理的性質から試料を分類すると、試料1, 3, 5, 7と、試料2, 4, 6の2つのグループに分けることができる。

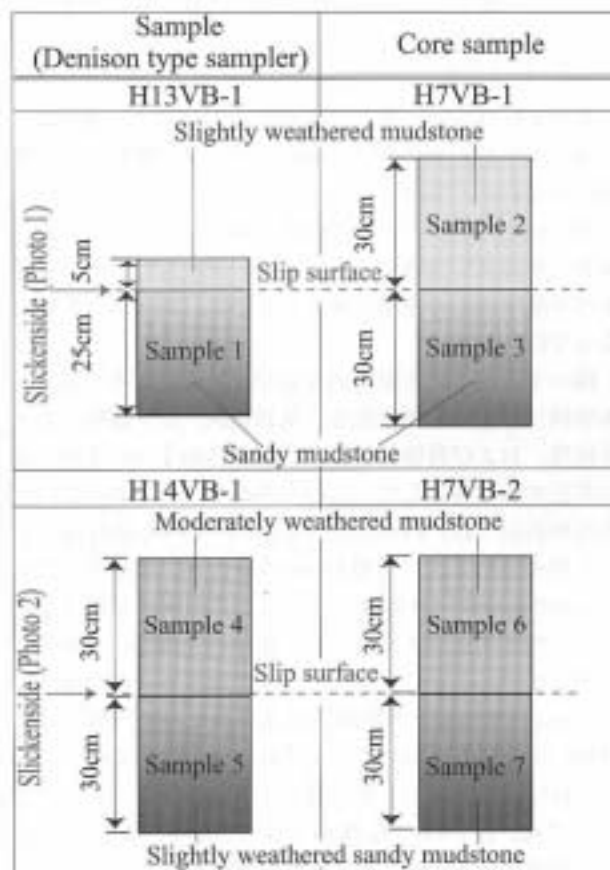


図-2 試料選定区間模式図

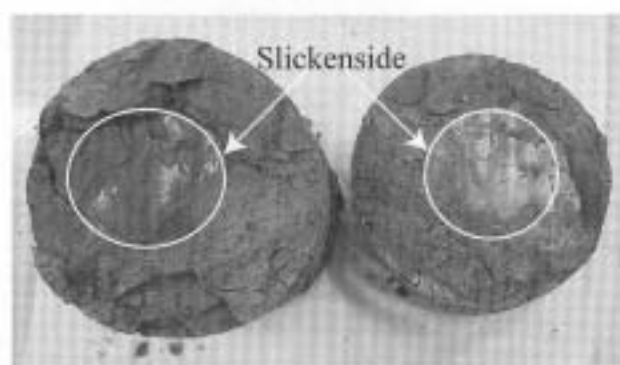


写真-1 すべり面写真 (H13VB-1孔、GL-15.9m)

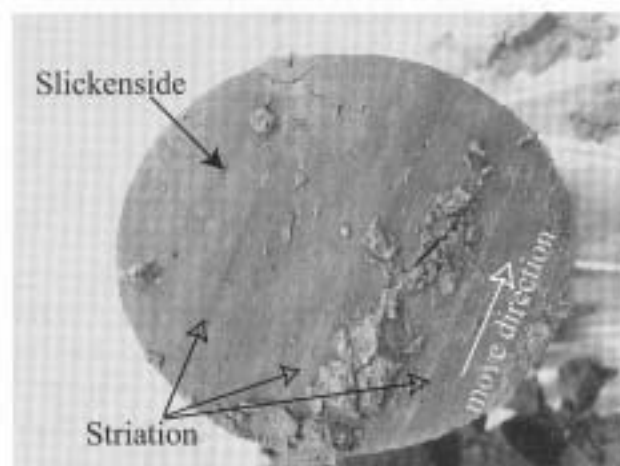


写真-2 すべり面写真 (H14VB-1孔、GL-10.0m)

表-1 各試料の物理的性質

	Clay part content ($2\mu\text{m}$) P_c (%)	Liquid limit w_l (%)	Plastic limit w_p (%)	Plasticity index I_p (%)	Activity A	Soil particle density ρ_s (g/cm^3)
Sample 1	23.5	64.9	32.2	32.7	1.39	2.69
Sample 2	40.0	95.6	40.9	54.7	1.37	2.62
Sample 3	14.0	65.5	37.6	27.9	1.99	2.65
Sample 4	40.0	98.4	41.6	56.8	1.42	2.60
Sample 5	17.5	61.8	31.4	30.4	1.74	2.68
Sample 6	42.0	96.6	39.2	57.4	1.37	2.63
Sample 7	23.0	76.6	33.2	43.4	1.89	2.64

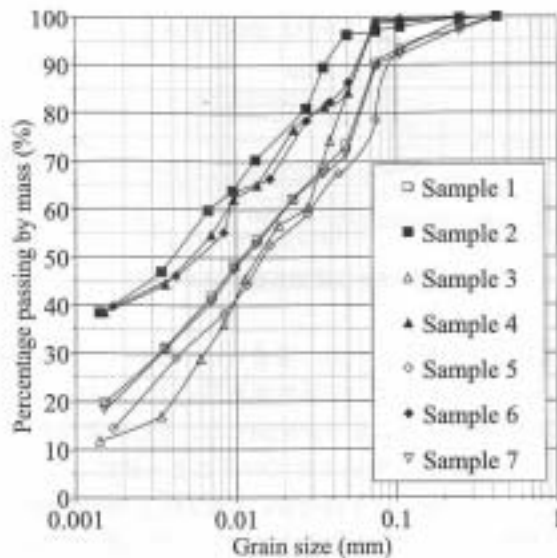


図-3 粒径加積曲線

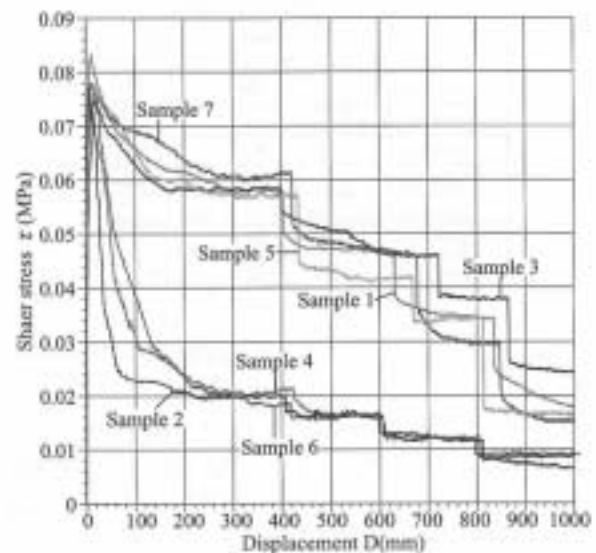


図-4 せん断応力～せん断変位関係

3. リングせん断試験より得られる強度定数

3.1 リングせん断試験条件

リングせん断試験機はビショップ型試験機¹⁾に改良を加えたものを新たに製作した²⁾。試験仕様は以下のとおりである。

- ・供試体寸法：外径150mm, 内径100mm, 高さ20mm
- ・試験荷重：0.02, 0.15, 0.10, 0.05MPa(垂直応力0.20MPaでせん断を開始し, せん断応力が残留強度に収束後, 垂直応力を段階的に除荷する段階除荷方式³⁾)
- ・荷重方式：ひずみ制御方式
- ・圧密条件：正規圧密～過圧密
- ・排水条件：圧密排水試験
- ・せん断速度：0.015mm/min
- ・最終せん断変位量：1000mm

3.2 供試体作成手順

コアサンプル, およびデニソン型サンプラーにて採取した試料より以下の手順で供試体を作成した。

1. 採取した試料を解きほぐす。
2. 解きほぐした試料に蒸留水を加えながら試験用網ふるい(425 μ m)で裏ごしを行う。
3. 含水比が200%以上となるまで蒸留水を加え, 電動ミキサーを用いて攪拌する。
4. 真空ポンプを用いて十分に脱気を行った後, 圧密装置を用いて, 圧密圧力0.2MPaの一次元圧密条件下で予圧密を行う。
5. 圧密完了後, 所定の大きさに整形し, 試験機にセットし, 再度圧密を行う。

粘土粒子の配向状態は, 圧密の進行に伴い不完全配向構造から, 完全配向構造に変化すると考えられている。しかし, 圧密終了時の構造異方性が, 残留強度に及ぼす影響に関しては明らかでない。よって, 試験開始前の圧

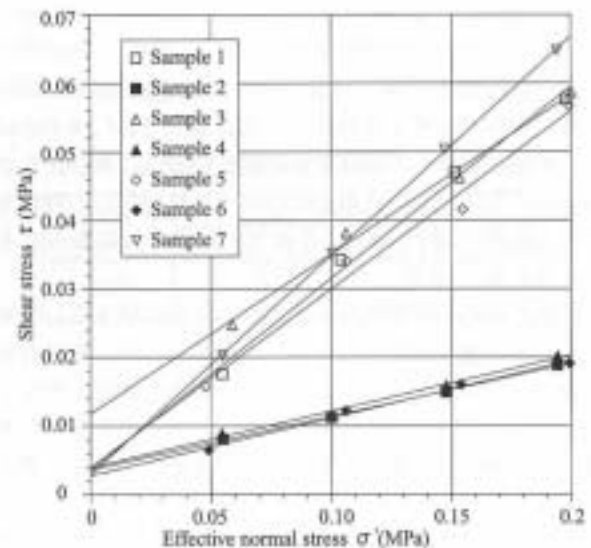


図-5 垂直応力～せん断応力関係

密打ち切り条件や, 配向方向とせん断方向が異なる場合の残留強度への影響に関しては, 今後の検討課題であるとする。今回は圧密が進行して, 24時間の垂直変位がゼロとなった段階で圧密終了とした。

3.3 リングせん断試験結果

各試験結果をせん断応力～せん断変位関係にまとめたものを図-4に, この結果得られる残留強度を, Coulombの破壊規準により整理したものを図-5に示す。残留状態の強度定数(以下, 残留強度定数: 残留内部摩擦角 ϕ , 残留粘着力 c と記す)を表-2に示す。ここで, 従来用いられてきたすべり面深さの関数として粘着力 c を決定し, 内部摩擦角 ϕ を逆算する手法(以下, 従来法と記す)より得られた強度定数は, $c=15.0\text{kPa}$, $\phi=6.91^\circ$ となる。すべり面の深さには, 場所ごとに違いが生じる。今回すべり面が最も深くなる箇所の深度より c を決定した理由は, 安定解析において, この組み合わせより地すべ

表-2 強度定数一覧

	c_r (kPa)	ϕ_r (°)
Sample 1	8.40	14.07
Sample 2	3.67	4.42
Sample 3	11.80	13.09
Sample 4	4.00	4.66
Sample 5	3.99	14.56
Sample 6	2.80	4.78
Sample 7	2.97	17.71

り滑動が完全に停止していない、現状に最も近い安全率が得られるからである。

図-4において、 $\sigma' = 0.20\text{MPa}$ でせん断中のいずれの試料も、正規圧密状態にあるが、著しいひずみ軟化傾向を示す。この要因は、リングせん断試験が鋪方への変形を強く拘束し、せん断面を限定する試験であることから、せん断面への応力集中が発生していることだと考える。

試料1, 3, 5, 7の ϕ は 15° 前後となり、残留強度としては比較的大きな値となる。これは、粒度分布の影響に加えて、 P_f が低く低塑性なすべり面下位の岩（風化砂質泥岩）の特性を反映した値（以下、 ϕ_{lower} と記す）が得られたからだと考えられる。一方、試料2, 4, 6の ϕ は 4.6° 前後と小さく、ほぼ一定の値となる。これは、 P_f が高く、高塑性なすべり面上位の岩（風化泥岩）の特性を反映した値（以下、 ϕ_{upper} と記す）が得られたからだと考えられる。

新第三系地すべりにおいて、すべり面は粘土化しやすい泥岩や、凝灰岩部分において形成され、粘土含有率が高く、高塑性な粘土により形成される、鏡肌を伴うことが知られている。このことから、すべり面となる箇所は、潜在的に粘土含有率が高く、高塑性であると考えられる。

すべり面上位の風化泥岩部分より採取した、試料2, 4, 6は、 P_f が40%以上と高く、高塑性であることに加えて、写真-1, 2のすべり面観察（色調、手ざわり等）よりすべり面粘土は、すべり面上位の風化泥岩が粘土化したものであると考えられる。

したがって、本事例においては、リングせん断試験よりすべり面の強度定数を得るための試料として、すべり面上位区間が妥当であるとした。

また、各内部摩擦角の大小関係は

$$\phi_{\text{upper}} < \phi < \phi_{\text{lower}}$$

となり、従来法による ϕ は ϕ_{upper} より $2 \sim 2.5^\circ$ 高く、地下水排除工の効果を過大に評価する危険側の値となる。

c_r はせん断面を構成する粘土粒子が再配向し、残留状態となった面の粘着力である²⁾ことから、 $c_r = 0$ であると考えられる。しかし、試料2, 4, 6において、 $c_r = 2.80 \sim 4.00\text{kPa}$ という値が得られた。

この要因としては、粘土粒子の配向が不十分であることや、試験中除荷を行った際に、せん断面に負圧が発生

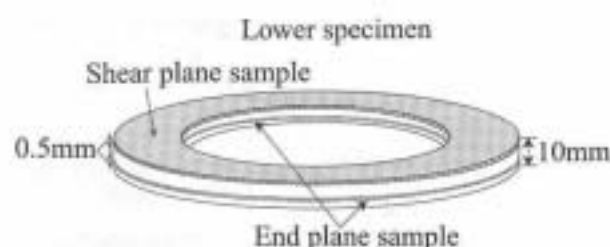


図-6 X線回折試料採取位置

すること等が考えられる。筆者らは、試料4の試験後せん断面付近において、走査性顕微鏡による観察を行い、せん断方向と平行に粒子が配向した、 $200\mu\text{m}$ 程度の厚みを持つせん断層が生成されていることを確認している⁴⁾。したがって、粘土粒子は十分に再配向し、せん断面は残留状態となっていると考えられる。一方、負圧の発生に関しては今後の検討を要するが、今回得られた c_r の値が小さいことから、試験誤差として扱い、 $c_r = 0$ とした。

4. X線回折による分析

試料4のリングせん断試験後供試体の、せん断面および供試体端部について、粉末法によるX線回折を行った。

4.1 X線回折仕様および試料作成方法

仕様は以下のとおりである。

- ・分析機器：理学電気社製ガイガーフレックス
- ・RAD-Xシステム
- ・検出器：シンチレーションカウンタ、対陰極：Cu
- ・解析条件：管電圧：30kV、管電流：20mA、
- ・湾曲結晶モノクロメータ使用、発散スリット： $1/2\text{deg}$ 、
- ・散乱スリット： $1/2\text{deg}$ 、
- ・受光スリット：0.15mm、
- ・走査範囲： $3 \sim 70^\circ (2\theta)$
- ・走査速度： $3^\circ/\text{min}$

試料は風乾後、めのう乳鉢と乳棒で粉砕後、アルミニウムホルダーに充填した。

4.2 X線回折結果

図-6に示すように、試料4の試験後供試体下部のせん断面を約0.5mm厚に削り取った試料のX線回折チャートを図-7に、下部供試体末端部を同様に削り取った試料のX線回折チャートを図-8に示す。この結果は、両方の試料に石英、長石等の造岩鉱物に加えて、主要粘土鉱物としてスメクタイトが含まれていることを示している。

スメクタイトを主要粘土鉱物とする、リングせん断試験後供試体において、X線回折より粘土鉱物含有量を定量的に評価すると、せん断面とその他の箇所のスメクタイト含有量に、差異が生ずることが報告されている⁵⁾。本事例においても、せん断面のスメクタイトによる回折線強度が端部に比べて強いことより、せん断面には端部に比べて、スメクタイトが多く含まれていることが定性的に明らかとなった。

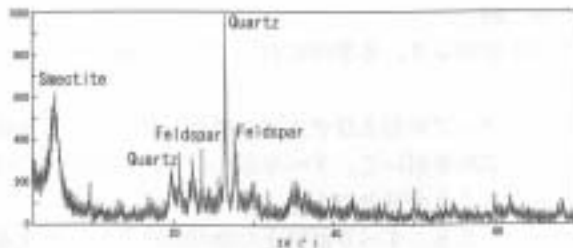


図-7 せん断面試料X線回折結果

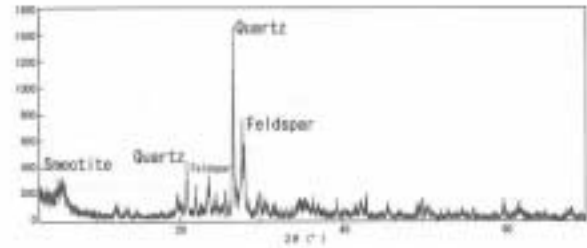


図-8 端部試料X線回折結果

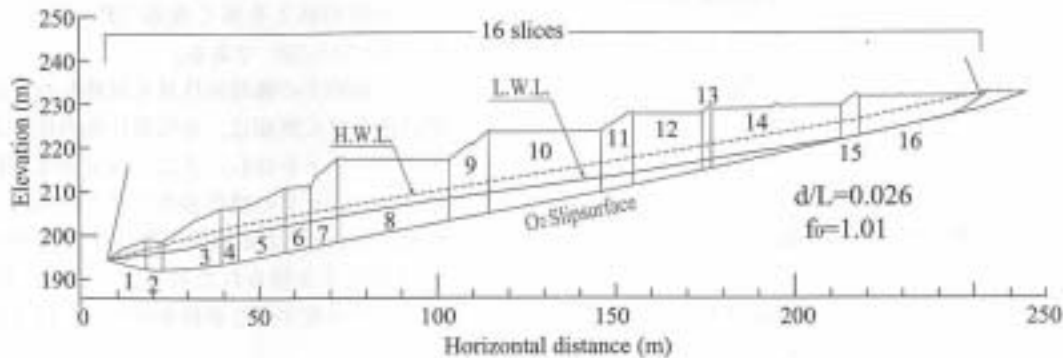


図-9 安定解析断面図(簡易Janbu法)

新第三系泥岩のように、元来スメクタイトが生成されやすい状況下のすべり面において、物理化学的作用により、スメクタイトの生成量が他の箇所比べて多くなる可能性は高い。このことから、すべり面の物理的性質を反映する試料を用いたリングせん断試験は、すべり面粘土の生成を再現し、強度定数を得るための、有効な手法であると考えられる。

また、リングせん断試験における、高純度スメクタイトの α は、約 4.0° であることが報告されている⁹⁾。X線回折を行った、試料4の α_{core} は 4.66° と、高純度スメクタイトの α に極めて近い値である。このことは、配向性粘土鉱物の含有量、生成量が、残留強度定数に大きな影響を与えることを示す結果であると考えられる。

5. 安定解析結果

O_2 すべり面に関して、リングせん断試験より得られた残留強度定数と、従来法より得られた強度定数を用いて、安定解析結果の比較検討を行った。解析手法は、簡易ヤング法による極限平衡法2次元解析である。

安定解析断面を図-9に示す。スライス数は16、 $d/L=0.026$ 、補正係数 $f_i=1.01$ である。また、間隙水圧にはボーリング孔内水位を用い、図中のH.W.L.は滑動時の、L.W.L.は停止時の孔内水位を示している。

5.1 試験結果より得られる値を用いた場合

従来法において設定した、滑動時、停止時の安全率および現状安全率と、同条件下において、残留強度定数を用いた場合に算出される、各状態の安全率を表-3に示す。なお計算には、試料2, 4, 6のほぼ中間値である試料4の残留強度定数 ($c=0.00\text{kPa}$ (補正值), $\alpha_{\text{core}}=$

表-3 従来法と残留強度定数を用いた際の安全率

Strength parameter	Safety factor		
	Slide	Stop	Present
c, ϕ	0.98	1.00	1.10
c', ϕ', γ	0.34	0.38	0.41

4.66°)を用いた。

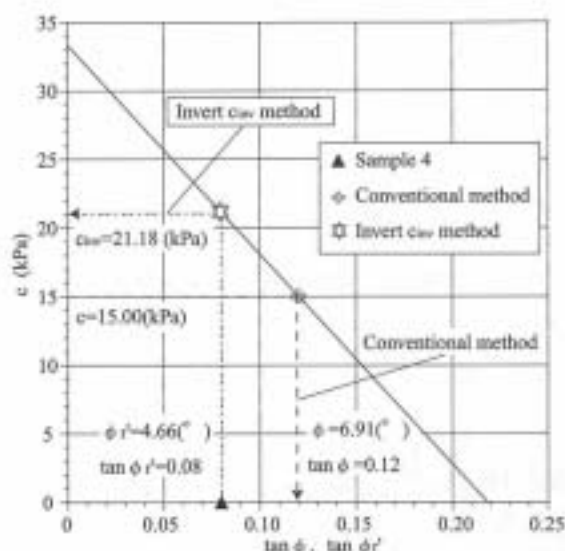
残留強度定数を用いた解析の結果、得られた安全率(滑動時: 0.34, 滑動停止時: 0.38, 現状: 0.41)は、実際の地すべり挙動から、大きく逸脱した値を示す結果となった。

5.2 残留強度定数を用いた極限平衡法2次元解析を行う際の問題点

表-3のような結果となった原因について以下に考察する。

実際の地すべりにおいては、すべり面のせん断抵抗力以外にも様々な抵抗力(地形自体が持つ抵抗力、地すべり頭部、側部による縁端効果¹⁰⁾、すべり面の凹凸による抵抗力等)が存在すると考えられる。しかし、極限平衡法2次元解析においては、それらの抵抗力を考慮することができない。よって、リングせん断試験より得られる、すべり面の残留強度定数(c, α_{core})を用いると、安全率が極端に小さくなったと考えられる。

現状では、上述の様々な抵抗力を定量的に評価することは困難である。しかし、リングせん断試験より得られる α は、上述した3.3の検討に加えて、応力履歴の影響を受けない¹¹⁾ことから、すべり面の内部摩擦角であるといえる。そこで、安全率を設定した上で、図-10のように $\tan \alpha$ から、すべり面以外の様々な抵抗力を含めた

図-10 $c'-\tan \phi'$ 図

パラメーター (以下, c_{∞} と記す) を算出する方法 (以下, c_{∞} 逆算法と記す) が考えられる。ここでの c_{∞} は, 土粒子と吸着水の物理化学的作用による, 一般的な粘着力とは根本的に異なり, 新たに定義した, 垂直応力によらないパラメータである。

また, c_{∞} 逆算法においては, 実際のすべり面の内部摩擦角 ϕ' を用いることより, 地下水排除工の工事効果を適切に評価することが可能となる。

従来法は, 上述の定量的に評価できない抵抗力を, 経験則をふまえ, 強度定数に付加した手法とも言える。しかし, 様々な指摘⁶⁾ にもあるように, 力学的な根拠に乏しく, 地すべりの力学的取り扱いを遅らせていることは否めない。

5.3 c_{∞} 逆算法より得られる値を用いた場合

c_{∞} 逆算法より得られる強度定数 ($c_{\infty} = 21.18 \text{ kPa}$, $\phi' = 4.66^\circ$) を用いて, 現状安全率を求めると 1.02 となった。2.1 で述べたように, 本事例において地すべり滑動は完全に沈静化しておらず, c_{∞} 逆算法より得られる現状安全率は, 従来法から得られる値 (1.10) に比べて, 実際の挙動により近い値を示している。したがって, 本事例のような地すべり安定解析において, c_{∞} 逆算法は, 従来法に比べて有効な手法であることが示された。

6. 結論

今回の検討より, 本事例において以下の事が明らかとなった。

1. コアサンプルおよびデニソン型サンプラーにて採取した試料を用いて, すべり面の残留内部摩擦角 (ϕ') を得ることが可能である。
このとき, すべり面粘土の物理的性質を反映する区間を試料として用いることが重要である。
2. すべり面粘土の物理的性質を反映した試料は, $2 \mu\text{m}$ 以下粒径の粘土を多く含み ($P = 40 \sim 42\%$), 高塑性 ($I_p = 54 \sim 58$) である。
3. すべり面粘土の物理的性質を反映した, 試験終了後供試体のせん断面は, 定性的に他の箇所より多くのスメクタイトを含む。また, 残留強度定数は, 高純度スメクタイトの残留強度定数と近似した値となる。
4. 簡易Janbu法による極限平衡法 2次元解析において, c_{∞} 逆算法より得られた現状安全率は, 従来法に比べて実際の地すべり挙動を反映した値となる。

参考文献

- 1) 村尾英彦, 淺谷達也 (2003): リングせん断試験による地すべり面強度定数決定のための試験条件に関する検討, 第38回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 227-228.
- 2) Skempton, A. W. (1964): Long-Term stability of clay slopes. *Geotechnique*, Vol. 14, No. 2, pp. 77-102.
- 3) Bishop, A.W., Green, G.E. et al. (1971): A New Ring Shear Apparatus and its Application to The Measurement of Residual Strength. *Geotechnique*, Vol. 21, No. 4, pp. 273-328.
- 4) 村尾英彦, 淺谷達也ほか (2003): リングせん断試験を用いた地すべり面強度定数決定のための基礎的検討 (その2), 第42回日本地すべり学会研究発表講演集, pp. 83-86.
- 5) Gibo, S., Egashira, K. and Ohtsubo, M. (1987): Residual strength of smectite-dominated soils from the Kamenose landslide in Japan. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 24, No. 3, pp. 456-462.
- 6) 山崎孝成, 貫弓孝之, 由田恵美 (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*, Vol. 37, No. 2, pp. 30-39.
- 7) 太田英将, 林義隆 (2001): 周縁部摩擦効果を考慮した地すべりの3次元安定解析. *地すべり*, Vol. 38, No. 3, pp. 95-100.
- 8) 八木剛男, 矢田郁雄一, 石井田紀, 榎明彦 (1995): 強度定数のばらつきを考慮した地すべり地の安定性の検討, 土木学会論文集, No. 523/Ⅲ-32, pp. 59-67.

(原稿受付2003年10月30日, 原稿受理2004年5月10日)