特殊土からなる急傾斜斜面に適用可能な原位置試験法の開発と

その実証試験

山本健太郎¹、永川勝久²、平瑞樹³、田中龍児⁴

1西日本工業大学、2基礎地盤コンサルタンツ(株)、3鹿児島大学、4第一工業大学

本研究では、より実務的な斜面安定性評価や安定解析の実施のために、現場にて地盤強度パラメータ を許容できる精度で速やかに求めることができる現場せん断試験の開発を実施した。そして、鹿児島 県垂水市に位置する火山灰・降下軽石被覆斜面の表層崩壊跡地において、その現場への適用性を確認 した。

1. はじめに

日本は森林が国土の約70%を占め、斜面崩壊 の大半は表層崩壊で、誘因である降雨の影響が かなり大きい。しかし、崩壊現場においては表 層崩壊が生じた斜面と生じなかった斜面があり、 斜面そのものの素因(植生(森林)生育状況や 地盤特性)を調べることが重要であると考えて いる。また、一般的な斜面安定解析においては 植生の遷移に伴う根系効果、表層土層や浸透能 特性が反映されていない。

そこで、我が国において、真っ先に亜熱帯化 が懸念される九州地方の最南端に位置する鹿児 島県において、森林生態学的と地盤工学的観点 から、火山灰・降下軽石被覆斜面の表層崩壊跡 地において現地調査並びに原位置試験を行い、 自然斜面の安定性を調査してきた^{1),2),3)}。そして、 より実務的な斜面安定性評価や安定解析の実施 には、現場にて地盤強度パラメータ(粘着力と 内部摩擦角)を工学的に許容できる精度で求め ることができる現場せん断試験の開発が精度、 時間、コスト面でも重要であると再認識した。 さらに、全国的に見ても、斜面崩壊の危険性を 有する対象斜面の数が多い。そのため、原位置

(現場)で地盤強度パラメータを工学的に許容 できる精度の範囲で、簡便(迅速)に測定する ことが求められている。

本研究ではこれまでの成果を踏まえ、新たに 特殊土であるしらす斜面等の急傾斜斜面に適用 可能な現場一面せん断試験装置の開発を実施し た。山間部でも持ち運びが困難でなく、試験の 実施がシンプルとなるコンパクトな設計を目指 した。試験装置の開発後は、テストフィールド にて現場一面せん断試験を実施し、地盤強度パ ラメータである粘着力(c)と内部摩擦角(φ)を現 場にて即座に求めることが可能となった。

2. 現地調査

テストフィールドを鹿児島県垂水市に位置す る鹿児島大学農学部附属高隅演習林に設定した (図-1参照)。テストフィールドは演習林記録、 空中写真や現地調査を基に表層崩壊の発生年が 同定されたものを選定し、2013年度時点で表層 崩壊発生後の経過年数は8~58年の範囲となっ た。現在、近隣区域内でかつ、北向き、ほぼ同 じ標高(約520 m)の6地点のしらす自然斜面 を表-1に示すように設定した。表層崩壊跡地は 35~40度程度の急傾斜を成し、表層崩壊面積は 29~114m²の範囲である。



図-1 テストフィールド地点 (国土地理院地形図より作成)

表-1 テストフィールドでの表層崩壊特性

テストフィールド	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
表層崩壊発生後の経過 年数(年)	12	22	40	58	28	8
斜面平均傾斜(°)	38	41	40	39	37	42
崩壊地の面積 (m ²)	36	29	61	114	34	42

写真-1にはテストフィールドでの現地写真の 一例を示す(No.4,5)。No.4では経過年数と崩壊 地面積が最も大きい。これを見ると、(a) No.4で は大きな樹木である常緑広葉樹が多く見られた。 樹高1m以上では、アラカシ、スダジイ、タブノ キなどの常緑性高木や、常緑性小高木のヒサカ キ、ネズミモチが優占していた。樹高5m以上を 構成する樹種は常緑性高木のアラカシ、スダジ イ、ヤブニッケイ、タブノキ、ヤブツバキ、ク ロキであり、樹高10m以上を構成する樹種はア ラカシ、スダジイ、タブノキ、クロキであった。 樹高1m未満では、イズセンリョウ、イヌビワな どが多く出現していた。なお、最大樹高を示し た樹種はアラカシで、その樹高は13.6mであった。

一方、No.5 は経過年数が No.4 の約半分であ り、崩壊地面積は No.4 の半分以下となっている。 (b) No.5 の樹高 1m 以上では、落葉広葉樹に加え て、アラカシ、タブノキなどの後継樹種が侵入 していた。樹高 5m 以上を構成する樹種は落葉 広葉樹のアカメガシワ、常緑性高木のアラカシ、 タブノキ、クロキであった。樹高 1m 未満では、 イズセンリョウ、イヌビワなどが出現していた。 最大樹高を示した樹種はアラカシで、その樹高 は 7.5m であった。

これまでの現地調査により、崩壊跡地への森 林の侵入は、森林の回復に伴う根系の発達や森 林による有機物の供給を通じて土壌化を促し、 これらの作用は比較的土壌の表層から進行して いくことがわかった。また、全般的には、表層 崩壊発生後の経過年数が大きくなるほど、さら に地表面に近いほど細粒化が進行している傾向 があることが観察された。

3. 現場一面せん断試験の開発

写真-2には、今回製作した現場一面せん断試 験装置^{4),5)}を示す。現地調査や原位置試験と並 行して、現場に手軽に運べ、その場で一面せん 断試験ができるように設計、製作した。試料の 寸法は、20cm×20cm×10cm(せん断面下(上) から5cm、断面積400 cm²、下部可動型)の4000 cm³と大きくした。現場の不撹乱試料を採取し て、軽石や礫、ひげ根などの根系を含んだ試験 が可能である。ちなみに、室内一面せん断試験 装置の供試体寸法は直径6cm、高さ2cmの断面 積28.27 cm²、体積56.55 cm³である。せん断荷 重は、手動スクリュージャッキ方式で負荷し、 垂直荷重は垂直応力載荷装置を用いて、手動ハ ンドルにより載荷する。両方の力計ともに2kN である。せん断速度は、ストップウォッチで計 測しながら、1 mm/min のゆっくりとしたスピー ドで、せん断変位が 30mm まで実施した (50mm まで実施可能)。せん断変位の測定にはスケール 直読と、1 周が 1 mm のダイヤルゲージを用いた。 そして、1 mm 毎にプルービングリングを目視し た。なお、軽量化を図るために、主としてステ ンレス製とし、強度や剛性が要求される箇所に おいてはステンレス製としていない。

4. 現場一面せん断試験

写真-3,4には、テストフィールドからの試料 採取の状況を示す。試料採取はまず、スコップ で斜面土層の切り出しを行う。そして、せん断 箱を埋め込み、せん断箱の端をハンドスコップ で掘り、せん断箱をゆっくりと掘り下げていく ことにより、試料採取を実施した。なお、試料 採取の深さは地表面から 30cm 程度と設定した。 写真-3(b)には、せん断箱の端をハンドスコップ で掘り出している様子がわかる。また、写真-4(a)、 (b)を見ると、斜面上部が斜面下部に比べて、ひ げ根などの根系の存在が多いことが観察された。



(a) No.4



(b) No.5

写真-1 テストフィールドの現地写真 (試験実施後)



面 (b) 側面 写真-2 現場一面せん断試験装置





(a) No.1 斜面下部(b) No.1 斜面上部写真-3 テストフィールドの試料採取



(a) No.4 斜面下部



(b) No.4 斜面上部

写真-4 テストフィールドの試料採取



(a) 整形中 写真-5 試料の整形(No.5 斜面下部)



(b) 整形後

写真-5 には、試料採取後の試料の整形状況を 示す。現地斜面からはスコップを用いて、底部 からの掘り出しを行った。写真-5(a)はストレー トエッジを使って、整形中の写真で、写真-5(b) は整形後のものである。

本報告では、図-1 で示されるテストフィール ド No.1, 2,5の現場一面せん断試験結果を主と して述べる。図-2,3には現場一面せん断試験結 果のNo.2 斜面下部に対するせん断変位とせん 断応力の関係と、垂直応力とせん断強さの関係 を示す。垂直応力は層厚が 2-3m 程度の表層崩壊 現象を想定しているため、4.02 kN/m², 9.02 kN/m², 19.02 kN/m²の3 通りと設定した。まず、 図-2を見ると、せん断応力がせん断変位の増加 並びに垂直応力の増加とともに大きくなってい ることがわかる。図-2 では、せん断変位が 30mm までであるが、50mm まで実施可能であり、 30mm まで実施すると、せん断応力の最大値で あるせん断強さが得られることを確認している。 図-3 は図-2 から得られた、せん断応力の最大値 であるせん断強さと垂直応力の関係である3つ のプロットをまとめ、回帰直線とその決定係数 (\mathbf{R}^2) を示したものである。これを見ると、垂 直応力の増大とともにせん断強さが大きくなっ ており(拘束圧依存)、相関があることがわかる。

回帰直線から切片と傾きで表される粘着力(c)と 内部摩擦角(ϕ)を求めると、それぞれ、c=4.3 kN/m², ϕ =17.4°となった。このケースにおいて は、R²=0.74 であり、あまり良い相関とはなっ ていない。なお、No.2 斜面下部においては、 乾燥密度 0.77 g/m³、湿潤密度 1.16 g/m³であった。

同様に、図-4~9には現場一面せん断試験結果 の No.2 斜面上部と No.5 斜面下部と上部に 対するせん断変位とせん断応力の関係と、垂直 応力とせん断強さの関係を示す。これらを見る と、図-2.3と同様な試験結果の傾向が見られた。 また、垂直応力とせん断強さの関係(図-5,7,9) において、決定係数は図-3よりもかなり良好な 結果が得られた。表-2にはテストフィールドに おける斜面上部と下部での湿潤密度と乾燥密度 をまとめたものを示す。なお、試料採取の深さ はせん断箱と同様に、地表面から 30cm 程度と 設定した。これを見ると、湿潤密度、乾燥密度 ともに斜面上部が下部よりも大きくなった。ま た、斜面下部、上部ともに表層崩壊発生後の経 過年数の増加とともに徐々に小さくなる傾向を 得た。当然ではあるが、湿潤密度が乾燥密度よ りも大きく、試料採取時の含水比は、No.1 斜 面下部と上部でそれぞれ、45.0%と33.9%、No.2 斜面下部と上部でそれぞれ、50.6%と 42.9%、 No.5 斜面下部と上部でそれぞれ、44.7%と 54.5%であった。

次に、表-3には現場一面せん断試験と土層強 度検査棒(ベーンコーンせん断試験)の試験結 果²⁾から得られた地盤強度パラメータの比較を 示す。これを見ると、現場一面せん断試験結果 では、粘着力に関しては斜面下部が上部よりも 少し大きくなった。一方、内部摩擦角に関して は斜面上部が下部よりも少し大きい傾向を示し た。一般的には、斜面傾斜によるゆるみの影響 などにより、斜面下部の粘着力は上部よりも少 し大きくなると考えられる。また、同表におい て、現場一面せん断試験から求められた地盤強 度パラメータを土層強度検査棒の試験結果²⁾か ら得られたc, ϕ と比較すると、c は調和的であ るが、 φはそれなりに大きい値となった。これ は土層強度検査棒では人力で垂直応力を与えて いるため、それほど大きな垂直応力を与えるこ とができず、土層強度検査棒では拘束圧依存性 を小さめに評価せざるを得ないことに起因して いるものと考えられる。

5. おわりに

今回、現地調査や原位置試験と並行して、現 場に手軽に運べ、その場で一面せん断試験が実 施可能な現場一面せん断試験装置を製作した。 現場一面せん断試験では室内試験に比べ、より 不撹乱の状態で素早く現場の不撹乱試料を採取 して、軽石や礫、ひげ根などの根系も含んだ試 験が可能である。ただ、現場でのせん断箱を用 いた試料採取は簡単ではない。

そして、特殊土からなる急傾斜斜面である火 山灰・降下軽石被覆斜面の表層崩壊跡地の斜面 上部と下部において、現場一面せん断試験を実 施し、現場において地盤強度パラメータである 粘着力(c)と内部摩擦角(ø)を即座に求めるこ とができた。これにより、土検棒の試験結果か ら地盤強度パラメータを求める際の換算式の検 証や改善が可能になると考えられる。今回、得 られたパラメータは、これまでの土層強度検査 棒の試験結果²⁾と比較して、粘着力に関しては 比較的良好であった。ただ、本報告では試験結 果も限られており、妥当性の検証や考察も十分 ではない。

今後は、降雨時での地盤強度パラメータを現 場で推測するために、より水分を含ませた状態 での現場一面せん断試験の実施などを行う。ま た、異なる地盤条件での新たなテストフィール





図-9 垂直応力とせん断強さとの関係 (No.5 斜面上部)

垂直応力(kN/m²)

テストフ	ィールド	No.1	No.2	No.5
経過年数		12	22	28
湿潤密度 (g/cm ³)	斜面下部	1.27	1.16	1.08
	斜面上部	1.34	1.27	1.23
乾燥密度 (g/cm ³)	斜面下部	0.88	0.77	0.74
	斜面上部	1.00	0.89	0.80

表-2 テストフィールドから得られた斜面上部と下部での湿潤密度と乾燥密度

表-3	現場-	-面せん	し断試験と	:土層強度	検査棒が	いら得られ	れた地	監強度 /	ペラ.	メー	タの)比	較
-----	-----	------	-------	-------	------	-------	-----	--------------	-----	----	----	----	---

	現場一面も	せん断試験	土層強度検査棒(ベーンコーンせん断試験)				
アストノイールト	粘着力 c (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ(°)	粘着力 c (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ(°)			
No.1 斜面下部	5.2	16.8	7.7	7.7			
No.1 斜面上部	4.9	16.8	7.9	8.3			
No.2 斜面下部	4.3	17.4	7.3	7.1			
No.2 斜面上部	4.2	20.6	7.1	6.9			
No.5 斜面下部	6.0	15.2	5.8	6.5			
No.5 斜面上部	5.6	16.9	4.4	6.3			

ドを鹿児島県以外の九州地方の斜面にも設定し、 現地調査や現場一面せん断試験の実施を予定し ている。そして、より簡便な原位置試験である 土層強度検査棒の試験結果との比較検討も数多 く実施する。また、生態系を考慮した植生によ る斜面安定性評価や樹木根系が斜面安定効果に 与える影響や効果を定量的に評価していきたい と考えているところである。

参考文献

1) 寺本行芳,山本健太郎,岡勝,下川悦郎:火 山灰・降下軽石被覆斜面の表層崩壊跡地におけ る森林の回復が土壌の発達と浸透能に及ぼす影 響, Journal of Rainwater Catchment Systems Vol. 20, No. 1, pp.63-69, 2014.

2) 山本健太郎, 寺本行芳, 永川勝久, 平瑞樹, 伊藤泰隆: 火山灰・降下軽石被覆斜面の表層崩 壊跡地における植生回復と表層土の発達につい て, 第 11 回環境地盤工学シンポジウム論文集, pp.33-40, 2015.7.

3) 永川勝久,山本健太郎,平瑞樹,寺本行芳:火 山灰・降下軽石被覆斜面における表層崩壊予測 の現地調査と斜面崩壊リスクの低減,斜面災害 における予知と対策技術の最前線に関するシン ポジウム 福岡 2015 論文集, pp.113-118, 2015.12.

4)海堀正博,佐々恭二:砂防調査用現場—面せん断試験機の試作と崩壊調査への適用,京大農学部演習林報告,No. 53, pp. 144-151, 1981.
5)山本健太郎、寺本行芳、永川勝久、平瑞樹、

田中龍児:火山灰・降下軽石被覆斜面の表層崩 壊跡地における現地調査と現場一面せん断試験, 第8回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.97-102, 2016.9.