

自然斜面の安定問題における土の強度試験活用の現状と課題

Present Scenario of Application of Soil Strength Tests in Natural Slope Stability Issues and the Challenges Ahead

矢田部 龍一 (やたべ りゅういち)
愛媛大学大学院教授 理工学研究科

岡村 未対 (おかむら みつ)
愛媛大学大学院助教授 理工学研究科

稲垣 秀輝 (いながき ひでき)
佛環境地質 代表取締役

ネトラ・バンダリー (ねとら ばんだりー)
愛媛大学大学院助手 理工学研究科

1. まえがき

沖積地盤に関連した安定・支持力問題では、 N 値や一軸圧縮試験結果などを用いて設計がされる。一方、自然斜面では岩級区分に基づいて切土勾配が決められる。また、地すべりではすべり深さに比例して c を定め、安全率を決めることによりせん断抵抗角 ϕ を逆算している。切土斜面や地すべりの設計に際して土の強度特性が調査されることはほとんどない。このように土質力学とはほど遠い形で設計が行われており、結果として自然斜面の安定に用いる土の強度特性に関する研究は非常に遅れているというか、取り残されている課題である。

本報告では、自然斜面の安定問題に用いる土の強度試験について、現状と課題を述べる。なお、誌面の制約上、課題についての対応策の詳細に触れることはできない。

2. 地盤工学からみた自然斜面の安定性検討に際しての問題点

土の強度から見たときに自然斜面の問題は大きく二つに分類される。一つは風化した表層土層の比較的小きな土塊の崩壊であり、もう一つはすべり面の深い比較的大規模な土塊の地すべりである。これらは傾斜地盤の土塊の移動という意味では同じ現象であるが、発生機構から見ると少し異なっている。そこで、自然斜面の設計にすべり面の土の強度が用いられない理由を表層崩壊と地すべりに分けて考えてみる。

表層崩壊では斜面の土の不均一性、不攪乱試料での試験が実務的に可能か、低圧下でのせん断試験が可能か(表層崩壊の崩壊深は多くの場合1m前後と浅い)、不飽和時に有する見かけの粘着力 c の評価が可能か、根茎による土の補強効果の定量的評価が可能か、などの問題点があり、土質試験結果を用いた安定性検討は行われない。一方、地すべりでは不攪乱状態での土の強度定数の把握が可能か、その試験結果を実務に用いることが可能か、他に当然、試料のばらつきなどの問題点もあり、やはり実務ベースではせん断試験結果を用いた設計は行われていない。

自然斜面の土は風化過程にある。風化は一樣に進むわけではなく、そのため土の各種特性は不均一である。こ

の不均一さは大河川や海での分級作用を経て、砂質土層や粘性土層などとして堆積している沖積地盤とは比べものにならない。このような不均一な土で構成されている自然斜面の強度特性を数点の試験結果で代表して評価することには当然疑問が残る。不攪乱試料の採取に関しては、沖積地盤と比べると手間はかかるが、実務的に可能なレベルにある。低圧下でのせん断試験法の開発は北村ら^{1)~4)}によりかなり熱心に行われている。しかし、数十cm~1m強といった土被り度で上載荷重があまりに小さく、まだ十分実用に耐える成果が上げられているとはいえない。不飽和状態で土が有する c 成分に関しては研究が進みつつある。この件に関しては後述する。表層斜面の安定に根茎の補強効果の影響は大きい。根茎の定量的評価についても後述する。

地すべりのすべり面粘性土の不攪乱状態でのサンプリングは難しい。図-1に地すべり地のすべり面よりブロックサンプリングした不攪乱粘性土と、それを攪乱した試料の三軸圧縮試験結果を示す⁵⁾。これから ϕ' に関しては乱れの影響は少ないことが分かる。地すべり地の安定を検討する上で必要であれば乱した試料を用いても、得られる ϕ' に関して意味はある。地すべり地の安定を検討する上で、すべり面の土の強度特性が必要なのは、全く滑動していない地すべり地を対象とする場合である。滑動していれば、 c を深さにより決め、 F_s を仮定することにより ϕ を逆算しても、そんなに大きくはずれるケースは珍しい。しかし、動いていなければ、 F_s の仮定により ϕ は大きく変わる。このような場合は、せん断試験をするより他に方法はない。

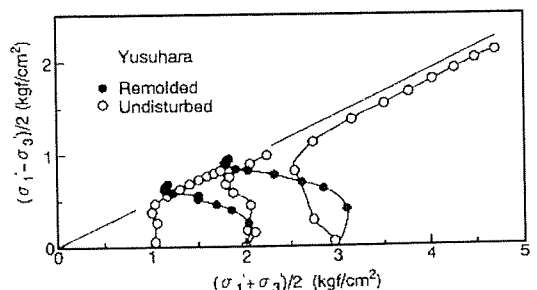


図-1 不攪乱供試体と攪乱供試体に対する三軸圧縮試験による有効応力経路

砂質土斜面の表層崩壊と地すべりの違いは、規模、移動速度、すべり面の土性（表層崩壊は砂質土、地すべりは粘性土）等である。土の強度定数を用いた正攻法での設計がより容易なのは地すべり問題である。それは、地すべりのすべり面深度が深いので ϕ の影響が大きくなるが、 c と比べて ϕ の方が比較的精度良く求められるからである。 c は、サクシオンや根茎の影響が大きく、特に表層崩壊ではわずかの c の大小が崩壊を支配する。表層斜面の安定を考える上で最も取り扱いにくい問題の一つである。

3. 強度特性に関する 2, 3 の検討

3.1 不飽和土の見かけの粘着力

不飽和土の強度に関しては Bishop による有効応力式の提案以降、多くの研究が行われてきている。軽部ら⁶⁾、また加藤ら⁷⁾は水分特性曲線に基づいたサクシオンとサクシオン応力の推定式を提案している。図-2 に示すように、そこそこの成果は得られている。

水分特性曲線からサクシオン応力や次式で示される c_{net} -サクシオン関係がある程度推定可能となっており、不飽和土のせん断強度の推定が可能になりつつある。

有効応力基準によるせん断強度式に Bishop の有効応力式を代入すると次式になる。

$$\tau = (\sigma - u_a) \cdot \tan \phi' + c' + \chi(u_a - u_w) \cdot \tan \phi' \dots\dots\dots (1)$$

不飽和状態と飽和状態とでは有効応力基準によるせん断抵抗角はほぼ変わらないので、 $\phi' = \phi_{net}$ としてよい。すると不飽和土の粘着力は次式となる。

$$c_{net} = c' + \chi(u_a - u_w) \cdot \tan \phi' \dots\dots\dots (2)$$

Vanapalli らは図-3 に示すような非線形のサクシオン~粘着力関係を、水分特性曲線を用いて、求める手法を提案している⁸⁾。

3.2 根茎の評価

根茎による表層崩壊防止効果は根系による地盤の緊縛効果と杭効果がある。この中で、緊縛効果については、表流水などによる侵食防止に効果が高く、従来の植生工などの侵食防止作用として、定性的に促えればよい。

次に、杭効果であるが、これについては土壌層と基岩層の境界面のせん断破壊に対する抵抗力として促えることができる。このような、根によるせん断抵抗力の補強メカニズムについては、Waldron⁹⁾が根を含んだ土のせん断強度を粘着力の増加として説明したモデル(3)式がある。

$$S_t = c + \Delta S + \sigma \tan \phi \dots\dots\dots (3)$$

[ただし S_t : 根を含んだ土のせん断強度, c : 土の粘着力, ΔS : 根による土のせん断補強, ϕ : 土の内部摩擦角である]

この Waldron のモデルは大変有用であるが、現地での試験結果を利用するにはパラメータが多く、その値を入手するために手間がかかる。そこで、稲垣¹⁰⁾は根茎を含んだ地盤全体のせん断強度を求めるために、粘着力だけの計算に簡略化した「粘着力合算法」と呼ぶ(4)式を提案している。

$$C_3 = C_1 + C_2 \dots\dots\dots (4)$$

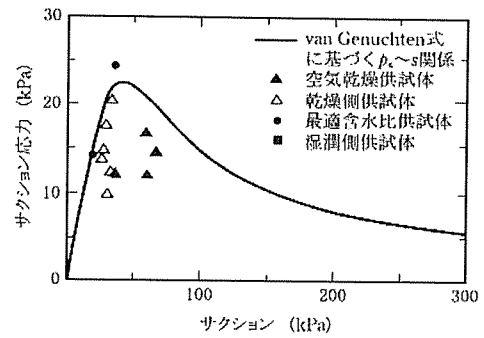


図-2 サクシオンとサクシオン応力に関する実験結果と予測値の比較

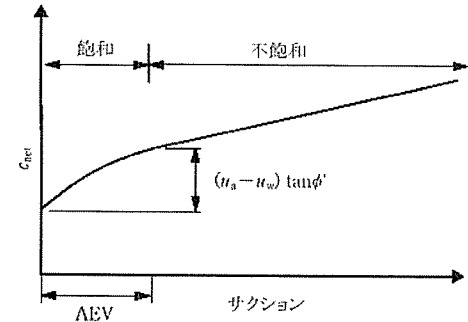


図-3 サクシオンと粘着力の関係の模式図

まず、斜面安定にかかわる根茎の力学的強度 (C_1) として、八木ら¹¹⁾などが室内試験や原位置試験を行っているように、含根率による地盤の粘着力の増加として評価する。その際、含根率の算出はトレンチなどによる根系のスケッチにより、深度毎に行う。次に、土質の強度 (C_2) は 5 cm ピッチで実施する動的簡易貫入試験の N_c 値から深度毎に求める。これによると、根茎を考慮した斜面表層のすべりに対する安定性を深度毎に算出し、斜面表層の安定性を C_3 によって評価することができる。(4)式の考え方を概念的に示すと図-4 のとおりであり、稲垣¹²⁾が示した根系の深度方向の発達が悪化された根系層崩壊地盤では、せん断強度の低下するすべり面が岩盤直上に出現するため、表層崩壊が生じることがわかる。

試みとして、福島県白河地区の根系層崩壊箇所¹³⁾での動的簡易貫入試験結果とその付近の根系のスケッチによる含根率から、地盤全体のせん断強度 (C_3) を求めてみた。その結果は、図-5 に示したとおりであり、根系層の直下に地盤のせん断強度 (C_3) の低下箇所が発生している。

また、植生根系の異方性に着目し、根茎を使用した室内大型一面せん断試験を行うことにより根系の根の張り方による斜面安定効果を求めた¹⁴⁾。試験結果は表-1 のように根系層崩壊の発生機構を支持する結果を得ている。

3.3 地すべり地のすべり面粘性土の残留強度

土の残留強度¹⁵⁾は大変形状態でのせん断強度であり、ある拘束圧下の排水条件で土が取り得る最も小さなせん断強度である。せん断試験法としては繰り返し一面せん断試験とリングせん断試験とがあるが、一般的にはリン

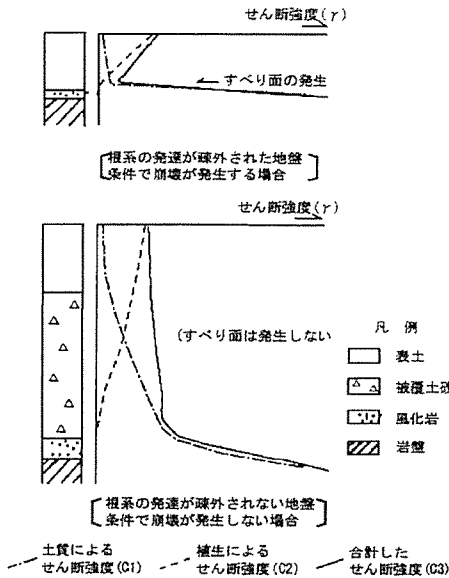


図-4 粘着力合算法による地盤強度

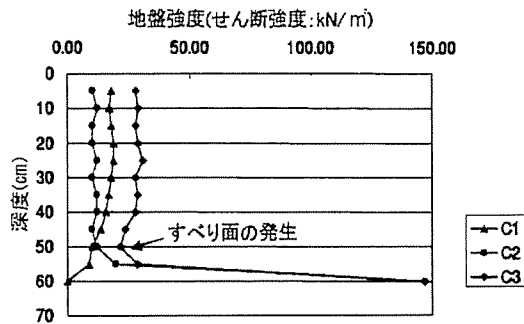


図-5 根系を考慮した地盤強度図 (白川地区の根系層崩壊地点)

表-1 根系の異方性を考慮した一面せん断試験結果一覧表

項目	根茎がすべり面に平行	根茎なし	根茎がすべり面に垂直
ϕ (°)	32.0	30.4	38.0
c (kN/m ²)	11.8	13.8	17.6
備考	根系層崩壊を想定	根系を無視した場合	根系の杭効果を期待した場合

グせん断試験により求められることが多い¹⁶⁾。

地すべり地は数 m、時には数十 m も滑動していることが多い。そのため、すべり面の土は大変形を受けている。したがって、あえて不攪乱乱状態にこだわる必要もないので、設計に際してすべり面の土の残留強度がせん断試験により求められることが増えている。そして、大変形をしている地すべり地では、せん断試験結果を用いて安定性をかなりの確に評価できるという事例が多く報告されている¹⁷⁾。今後、地すべり地の安定問題に、すべり面粘性土のせん断試験が積極的に活用されることが期待される。そのためには、せん断試験を活用した設計法のマニュアル検討も必要である。

4. あとがき

自然斜面では種々の問題により、安定性の検討に際してせん断試験が活用される事例は極めて少ない。そのため、学問的にも残された課題の多い分野であるが、施工事例が多く、工学的には重要な分野であるので、実務設計に際してせん断試験が実施されることを期待する。

参考文献

- 1) 北村良介・入来秀徳・阿部廣史・山田満秀：低拘束圧下における不飽和土の三軸圧縮試験，第32回地盤工学研究発表会，pp. 659~660, 1997.
- 2) 北村良介・山田満秀・入来秀徳：斜面安定解析における粘着成分に関する一考察，第32回地盤工学研究発表会，pp. 1855~1856, 1997.
- 3) 久澤 瞳・川畑 誠・北村良介：低拘束圧下での含水比と見かけの粘着成分の関係に関する一考察，平成13年度土木学会西部支部研究発表会，pp. A-178~179, 2002.
- 4) 横山真之・川畑 誠・久澤 瞳・北村良介：一面せん断試験装置を用いた不飽和土の力学特性に関する一考察，第37回地盤工学研究発表会，pp. 913~914, 2002.
- 5) 横田公忠・矢田部龍一・八木則男：蛇紋岩の風化粘性土の強度特性，土木学会論文集，No. 529/Ⅲ-33，pp. 155~163, 1995.
- 6) 軽部大蔵・加藤正司・浜田耕一・本田道織：不飽和土の間隙水の状態と土塊の力学挙動の関係について，土木学会論文集，No. 535/Ⅲ-34，pp. 83~92, 1996.
- 7) 加藤正司・吉村優治・河合克之・寸田 亘：不飽和土の一軸圧縮試験時の強度特性に及ぼすサクシヨンの影響，土木学会論文集，No. 596/Ⅲ-56，pp. 201~218, 2001.
- 8) Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, M. D. and Clifton, A. W.: Model for prediction of shear strength with respect to soil suction, Canadian Geotech. Jour., Vol. 33, No. 3, pp. 379~392, 1996.
- 9) Waldron, L. J.: The shear resistance of root permeated homogeneous and stratified soil, Soil Science Society of American Journal, Vol. 41, pp. 843~849, 1977.
- 10) 稲垣秀輝：表層斜面崩壊に対する根系の効果と工学的取扱い，地盤工学における生態系を考慮した環境評価に関する第3回フォーラム発表論文集，pp. 35~42, 2000.
- 11) 八木則男・二神 治・塩田耕司・榎 明潔・大塚修二・小堀慈久：根系により補強された土の現地せん断特性，第28回土質工学研究発表会講演集，pp. 2119~2120, 1993.
- 12) 稲垣秀輝：根系層崩壊，土と基礎，Vol. 50, No. 5, pp. 5~7, 2002.
- 13) 稲垣秀輝：1998年台風4号による福島県白河地方での表層崩壊の特徴，応用地質，Vol. 40, No. 5, pp. 306~315, 1999.
- 14) 稲垣秀輝・浅木佑允・山崎一進・矢田部龍一：根系分布の異方性が斜面の安定性に及ぼす影響，豪雨時の斜面安定のメカニズムおよび危険度予測に関するシンポジウム論文集，pp. 137~142, 2003.
- 15) Skempton, A. W.: Long-term stability of clay slopes, Geotechnique, No. 2, pp. 77~102, 1964.
- 16) 矢田部龍一・八木則男・榎 明潔：破碎帯地すべり地の粘性土のリングせん断特性，土木学会論文集，No. 436/Ⅲ-16，pp. 93~101, 1991.
- 17) 横田公忠・八木則男・矢田部龍一・砂子 一：蛇紋岩の風化粘性土に起因した切土のり面の崩壊に関する一考察，土木学会論文集，No. 541/Ⅲ-35，pp. 57~65, 1996.

(原稿受理 2006.7.25)