

## 表層地盤の強度調査法

## Strength survey methods for surface subsoil

太田英将 Hidemasa OHTA / 有限会社太田ジオリサーチ Ohta Geo Research Co., Ltd.

## 1. はじめに

大雨が降ると崖崩れが起きる、というのは多くの人が常識として知っています。崖崩れ災害のニュースは毎年梅雨から台風時期にかけて何度も報道されますので、珍しい災害ではないことも知られています。

崖崩れは、一般に表層部の未固結土砂層が移動土塊となる「表層崩壊」です。表層崩壊は、土砂災害の約8割を占め、どちらかというトポピュラーな災害です。規模の小さい現象が多いですが、小さくても人的被害等を発生させるには十分な規模であることが多いです。

今年(2020年)の2月には、逗子で道路脇の土砂災害警戒区域(イエローゾーン)に指定された斜面が突然崩壊し、女子高生が亡くなるという痛ましい事故がありました。2019年度末で、全国の土砂災害警戒区域の指定も、概ね完了してきており、被害が大きくなる恐れのある箇所については、合理的な予防対策が求められています。

一方、表層崩壊を発生させる崖は民地であることが多く、原則的には土地所有者が責任をもって安全に管理しなければなりません。管理者が予防対策するためには、合理的で、安価で効果的な対策工法を開発するための技術開発や、危険度評価方法の確立が求められています。

現時点では技術者が目視観察により定性的に評価していますが、実際に大雨で起きた崩壊箇所の内、6割が対策不要と判定された箇所及び点検対象外の箇所となっており、技術者の定性評価と表層崩壊発生箇所の相関はあまり良いとは言えません<sup>1)</sup>。

表層崩壊現象は、土質工学の教科書に書かれているように、土のせん断破壊現象です。せん断破壊現象は、安定計算によって再現でき、また予測もできるはずですが、現時点では正直言ってできていません。

その理由は、表層土砂の厚さ分布や、土層強度が十分に計測されておらず、科学的な検証が行われていないからです。表層土砂層は、砂質土系の土質で未固結なものが多く、サンプリングが難しいことが強度計測が行われなかった一つの理由でした。

未固結の表層土砂の強度を計測する機器としては、宅地調査でよく用いられるスウェーデン式サウンディング試験、土木研究所が山地斜面の計測用に開発し、広く普及した簡易動的コーン貫入試験、表層崩壊すべり面や樹

木根系発達状況の判定用途で開発されたSH型貫入試験、および土木研究所地質チームが表層土砂の簡易地盤強度計測用に開発した土層強度検査棒などがあります。

スウェーデン式サウンディング試験は、宅地調査では標準的な調査法ですが、合計100kgの重りを用いるので斜面調査用には重すぎて斜面の表層地盤調査で利用されることはあまりありません。ここでは、傾斜地の表層地盤調査で最もよく使われている簡易動的コーン貫入試験<sup>2)</sup>と、粘着力 $c$ 、内部摩擦角 $\phi$ が簡易に計測できる土層強度検査棒<sup>3)</sup>を紹介します。

## 2. 室内土質試験とサウンディングの違い

室内土質試験は、土の強度を計測することを目的として開発された装置(例えば写真-1の一面せん断試験装置など)を使って土質強度が計測されます。したがって、計測された値は、計測誤差等を含んでいるとはいえ真の値に近いものと言えます。

一方、サウンディングは乱れの少ない土質試料をサンプリングして、室内に持ち帰り土質試験をする労力を簡略化するために、動的抵抗力や、トルクを計測して、土質試験結果との相関関係を利用して土質強度を間接的に推定する方法です。したがって、原理的にサウンディング



写真-1 「土質強度」を測定するための装置例(一面せん断試験機)

グで求められた値が、土質試験の値の精度を上回ることはありません。精度よりも、数・量を重要視したものがサウンディングと理解するのが良いでしょう。

室内土質試験の目的は、真の土質強度の測定であり、サウンディングは何らかの目的を達成するため、その手段として、実務上必要な精度で現場計測するものという理解で良いでしょう。

### 3. 斜面安定度評価の現状と課題

これまでの斜面对策は、崩壊した斜面を迅速に復旧することが主でした。その目的のため、土質強度を精度高く計測しなくても設計できる方法が開発され活用されてきました。具体的には、崩壊時の安全率を仮定し、逆解析により土質強度を算出し、「経験的に」設定された計画安全率まで引き上げるための対策工を設計する手法により、迅速な復旧対応を行ってきました。

土砂災害警戒区域等が設定された現在、求められているのは「順解析による予防」に関するものが多くなります。壊れたものを迅速に直す時代から、まだ壊れていないものの安定度を評価し、評価結果に基づいて予防措置を講ずる時代への変化の中で、現場で簡易かつ目的に対して十分な精度で土質強度を計測できる装置が必要になってきました。

予防において重要なのは、現状の斜面の安定度の評価と、対策工を施工するかどうかの意思決定の方法論です。まずは、「まだ崩壊していない斜面の安定度を評価する」ことが必要です。

その目的を具現化するための手段として、表層地盤強度調査があります。もちろん究極の精度は室内土質試験並みの計測精度ですが、そこまでの精度が無くても目的を達することができるのであれば、精度の追求はある程度までとし、余力を簡易さに向けることで、現場から数多くのデータが得られるメリットが生まれます。

計測精度と計測箇所数（コスト）は、トレードオフの関係にありますから、目的達成のためのちょうどよい精度の見極めは、実務者にとって重要なことの一つです。

### 4. 簡易動的コーン貫入試験

簡易動的コーン貫入試験機は、路床の調査・施工管理で用いられていた土研型貫入試験機を、傾斜地での調査に適するように小型軽量化された装置です。土木研究所の急傾斜地、砂防分野の研究室で1970年頃に開発されました。表層崩壊の防止を目的とした現地調査をする技術者のほとんどが経験しているサウンディング手法で、正式名称よりも「簡易貫入試験」という略称で呼ばれることが多いものです。

この装置は、図-1に示すような構成で、5kgのハンマーも含めて総重量が10kg~15kg程度と比較的軽量で、傾斜が急な斜面でも調査が可能です。計測は、写真-2のように5kgのハンマーを50cmの高さから自由落下さ

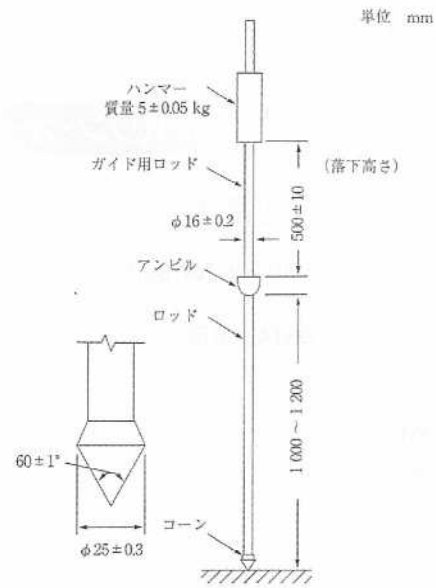


図-1 簡易動的コーン貫入試験装置図



写真-2 簡易動的コーン貫入試験状況

せ、10cm貫入するのに要する打撃回数をNd値としています。

この試験は、表層土砂層の厚さと締まりの程度を簡易に計測でき、表層土砂層の層厚確認に多く用いられています。4~5m程度の深度まで計測できます。表層崩壊深度は、2m程度以下が多いため、十分計測できます。

土質強度に換算する場合には、対象土質によって換算式が変わります。岡田<sup>9)</sup>は、Nd値とN値の関係式を次のように提案しています。

$Nd \leq 4$ のとき	$Nd > 4$ のとき
(礫質土) $N = 0.50Nd$	$N = 0.7 + 0.34Nd$
(砂質土) $N = 0.66Nd$	$N = 1.1 + 0.30Nd$
(粘性土) $N = 0.75Nd$	$N = 1.7 + 0.34Nd$

この試験は、打撃エネルギーもそこそこ大きく、表層崩壊を発生させる土層を、ほぼ漏れなく調査することができます。一方、弱点としては、N値とNd値の相関関係からN値への換算が行われるため、N値から推定する

ことができる土質強度の枠の中に留まらざるを得ないことが挙げられます。具体的には、砂質土・礫質土の場合には、内部摩擦角 $\phi$ のみへの換算、即ち粘着力 $c = 0 \text{ kN/m}^2$ が前提となります。逆に粘性土の場合には、粘着力 $c$ のみへの換算、即ち内部摩擦角 $\phi = 0^\circ$ が前提となります。

表層土砂には、現地風化で生成された比較的粗粒な物質や、風で飛ばされてきた細粒な物質が混在しており、一般に粘着力も内部摩擦角もあります。その一方のみの強度しか得られないことが、表層崩壊の評価を定量的に行うことを困難にしています。

### 5. 土層強度検査棒試験

土層強度検査棒（通称、土検棒）は21世紀初頭に土木研究所の地質チームが開発した装置です。表層崩壊に関する危険度予測を行うためには、土層の厚さ・締まりだけでなく、土質強度を得る必要があるという観点で創られました。

土層強度検査棒の試験方法は、土層厚を計測する限界貫入試験、貫入時の抵抗力からN値に換算できる土検棒貫入試験、及び垂直荷重と回転トルク計測を測定するベーンコーンせん断試験があります。前の2つは簡易動的コーン貫入試験など従来のサウンディング試験でも同様の値を得ることができましたが、最後の1つは土層強度検査棒独特のもので、かつ画期的な性能です。

土層強度検査棒は、図-2に示すような構成です。5m分のロッドを入れても4.5kgと非常に軽量です（この試験機を使い始めると、軽量と言われてきた簡易動的

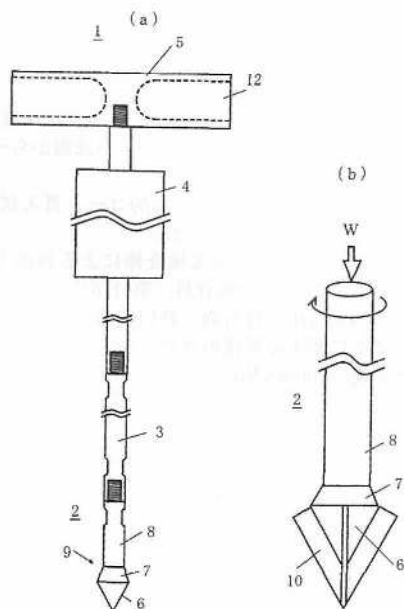


図-2 土層強度検査棒の装置図

- 1 土検棒貫入試験の構成, 2 ベーンコーン, 3 ロッド,
- 4 荷重計 (ベーンコーンせん断試験時はこの下部のロッドにトルクレンチを装着), 5 取っ手, 6 先端コーン (60°),
- 7 先端コーンの上部, 8 先端コーンとロッドの接続部,
- 9 先端コーンの最大径15mm 長さ50mm, 10 羽根(ベーン)

コーン貫入試験機が非常に重く感じられます)。

ここでは、ベーンコーンせん断試験によって得られる情報について説明します。

土層強度検査棒ベーンコーンせん断試験は、写真-3に示すように荷重をかけながら、ロッドにトルクを与えて計測します。2人で計測すると楽にできますが、1人でも計測可能です。セットした後の計測時間は、数分と短時間なので、同じ土層に対して数回の試験を行うと、平均強度や土質強度のばらつきも情報として得られます。試験結果は、図-3のように整理され、荷重とトルクの数値を入力すれば、現地で即座に土質強度を知ることができます。

一般に、斜面安定は、土塊の抵抗力と滑動力の比を安全率として評価しますが、抵抗力を算出するには、モール・クーロンの破壊基準では粘着力 $c$ と内部摩擦角 $\phi$ の両方が必要になります。

従来のサウンディング手法では、内部摩擦角 $\phi$ と粘着力 $c$ を同時に計測することができませんでした。このためこうして得られた土質強度では、順計算で行う安定計算ができません。



写真-3 土層強度検査棒ベーンコーンせん断試験試験状況

ベーンコーンせん断試験(経験式法 Ver.4.1)									
経験式による粘着力 $c(\text{kN/m}^2) = 11.241$		経験式による内部摩擦角 $\phi(\text{度}) = 32.4^\circ$		重力加速度		0.81(m/s <sup>2</sup> )			
試験の含水状態(測定前数日間の天候などを経済)等: $\phi = 50\text{mm}$ 径までハンドドリルで穴を明け試験実施。土質は、シルト、粘土はなく、粘粒微細。表層部にはガラス等の異物や、腐葉が存在するため留意し土の可能性があります。									
先頭コーンと450mmロッドの合計質量 $m_0$		0.320kg	3.237N	500mmロッド質量 $m_1$		0.320kg	3.136N		
ベーンコーンと羽根の質量 $m_2$		0.023	目標速度(分)		60	地下水位(GL-m)			
測定深度	$T_0$	$n$	$W_{0c}$	$T_{0c}$	$W_{1c}$	$T_{1c}$	$\sigma$	$\tau$	
(m)	(N/mm)	(本)	(N)	(N-m)	(N)	(N-m)	(kN/m <sup>2</sup> )	(kN/m <sup>2</sup> )	
0.50m	0.00	1	0	0.00	6.38	0.00	1.53	12.00	1
			25	1.10	31.38	1.10	7.53	18.50	2
			50	1.30	56.38	1.30	13.53	19.50	3
			75	1.60	81.38	1.60	19.53	24.00	4
			100	1.80	106.38	1.80	25.53	27.00	5
			125	2.10	131.38	2.10	31.53	31.50	6

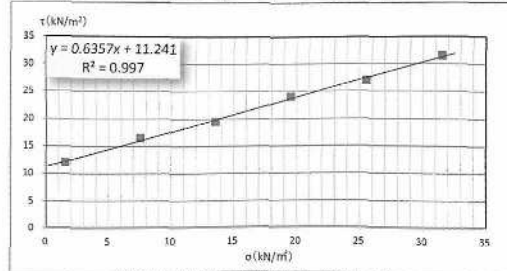


図-3 土層強度検査棒ベーンコーンせん断試験結果



土層強度検査棒ベーンコーンせん断試験の最大の長所は、粘着力 $c$ と内部摩擦角 $\phi$ を同時に得ることができることです。ただし、それらの強度は、室内土質試験結果との相関関係で関連付けたものなので、土の種類によって相関関係が異なることもあり、精度が高いわけではありません。

斜面の安定計算は次の式で行われ、安全率 $F_s$ が計算されます。

$$F_s = \frac{(W \cos \theta - U) \tan \phi + cL}{W \sin \theta}$$

この計算に必要なパラメーターは、①土の単位体積重量 $\gamma$ （土塊重量 $W$ に必要）、②土の内部摩擦角 $\phi$ 、③土の粘着力 $c$ 、④間隙水圧 $U$ 、および⑤すべり面傾斜角 $\theta$ の5つです。このうち、①の単位体積重量と⑤のすべり面傾斜角は比較的容易に得られるパラメーターです。残る3つのパラメーターが、ひとつの安定解析式の分子の項（抵抗力）に入っていることとなります。変数が3つあって、式が一つしかないため、解を得ることができないのです。

土層強度検査棒では、この3つのパラメーターのうち、2つが実測できます。これで、一つの式の中の未知のパラメーターは、間隙水圧1つに絞られることになり、斜面の安定性を定量的に評価できるのです。

## 6. 活用方法

傾斜地での表層地盤強度調査法として、簡易動的コーン貫入試験と土層強度検査棒（主にベーンコーンせん断試験）を紹介しました。

土層厚を計測する場合や、表層土砂内の締まりの分布を把握する場合には、5kgのハンマー打撃で10cm挿入ごとの打撃回数を記録していく簡易動的コーン貫入試験の方が効果的です。土層強度検査棒は、基本的に人力で挿入するため、簡易動的コーン貫入試験に比べて礫等の異物の存在に弱く、また貫入できる地盤はN値10程度が限界です。パワーの点では簡易動的コーン貫入試験に分があります。

一方、土層強度検査棒ベーンコーンせん断試験で得られる内部摩擦角 $\phi$ と粘着力 $c$ の組み合わせは、表層崩壊問題の根本的解決に寄与するでしょう。

例えば、崩壊地での調査の際、崩壊したという事実は安全率が1.0を下回ったことを示しています。その安全率を仮に $F_s = 0.99$ とすれば、

$$F_s (= 0.99) = \frac{(W \cos \theta - U) \tan \phi + cL}{W \sin \theta}$$

となります。この式の中で未知数は、間隙水圧 $U$ のみになりますから、崩壊時に間隙水圧がどのような状態になっていたのかを知ることができます。崩壊地調査に行って、しばしば感じる「凄い水圧で土が吹き飛んだようだ」ということが正しいのかどうかも、実測と計算によって検証することが可能になります。これまで「・・・だろう」と曖昧にしてきたことを、一つ一つ明らかにしていくことができます。

予防工法開発においては、既存表層崩壊を数多く再現することによって、崩壊防止の「キモ」がわかり、安価で合理的な予防工法が開発できるものと思います。

また、「目的」の予防対策を考える上で、「手段」としての土層強度検査棒ベーンコーンせん断試験で得られる土質強度には、どの程度の計測精度が不可欠なのかも、既存の崩壊を再現することによって明らかになると思います。

なお、宅地谷埋め盛土のすべり面強度（多くの場合盛土底部）など深部の土層強度を計測するためには、人力での作業は困難なので、スウエーデン式サウンディングで弱部を探索しながら下穴を開け、そこに土層強度検査棒ベーンコーンを挿入して強度計測をするという方法もあります。

## 参考文献

- 1) 土木技術講座 (2015)：道路斜面のための点検手法（第1回）～道路斜面災害の実態、傾向と防災上の課題から～、土木技術資料57-5, pp. 49-50.
- 2) 地盤工学会 (2013)：第3章簡易動的コーン貫入試験、「地盤調査の方法と解説」、pp. 317-323.
- 3) 佐々木靖人 (2010)：土層強度検査棒による斜面上層調査マニュアル（案）、土木研究所資料、第4176号.
- 4) 岡田勝也・杉山友康・村石尚・野口達雄 (2007)：盛土表層部の土質強度に関する異種のサウンディング試験結果の相関性、土と基礎, vol. 40, No. 411, pp. 13-18.