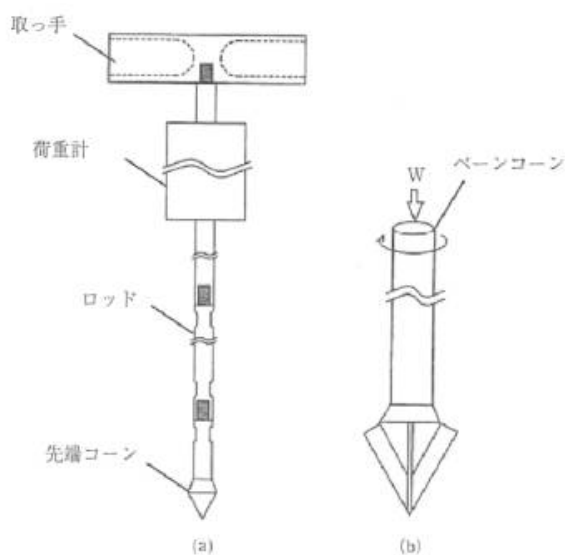


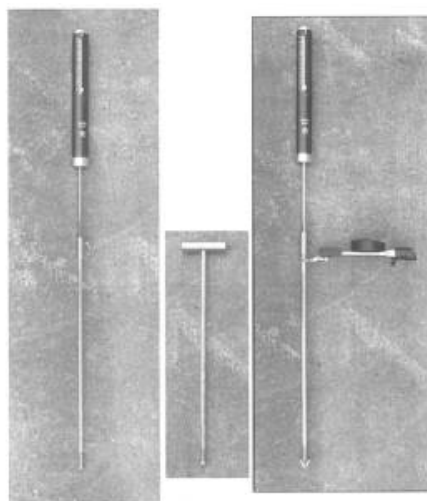
土層強度検査棒を用いた地盤強度調査方法

土層強度検査棒（Soil Strength Probe；以下、土検棒と略記）は、土層の深さや強度を簡易に測定する試験機である（下図参照）。試験方法は2種類あり、土検棒貫入試験及びベーンコーンせん断試験が可能である（『地盤調査の方法と解説』pp.467-468、平成25年、地盤工学会）。

斜面の安定計算上、土の強度（ c 、 ϕ ）の取得が不可欠であるが、表層土砂の不攪乱試験を簡易に取得することが困難であることから、室内力学試験を実施することが少なく、実測に基づく斜面安定計算ができないことが多かった。この解決方法として、土木研究所が開発した試験機が、土層強度検査棒である（特開2003-227786 土のせん断強度測定方法及び装置、『土層強度検査棒による斜面の土層調査マニュアル（案）』平成22年、土木研究所資料第4176号）。



土層強度検査棒の構成概要



左：土検棒貫入試験 - 標準法 中：同 - 簡易法
右：ベーンコーンせん断試験

各試験の外観



土層強度検査棒 ベーンコーンせん断試験の様子

c、φ計測にはベーンコーンせん断試験が用いられるため、以下にはその方法について記載する。

【土検棒ベーンコーンせん断試験】

土層検査棒ベーンせん断試験では、鉄棒の先にベーンコーン（羽状に開いている）を取り付け、鉄棒に荷重をかけながらベーンを回す。羽が回転するときのトルクを記録することによって、粘着力c及び内部摩擦角φを同時に求めることができる。

以下に土質定数の求め方を示す。

①算定方法の原理

土検棒により土質定数を求める方法（粘着力と内部摩擦角の算定方法）は、経験式による方法と、相関式による方法の2種類がある。前者は、本試験方法でこれまで行われたデータをもとに経験式が設定されており、その式にしたがって推定する方法である。後者は現地で測定するデータと、近くで得られた土質試験結果（一面せん断試験や三軸圧縮試験など）とを照合し、その相関式を作成する方法である。相関式法を用いることが原則であるが、土木研究所が開発時に行った相関式法の結果を用いる場合、「経験式法」を用いることができる。なお、土木研究所は、日本の自然斜面に存在する「普通の土」に対して試験を行い相関式が創られている。このため「普通の土」の強度を実測する場合には経験式法を用いることができるが、特殊土の計測をする場合には相関式法により、新たな相関式を導いて使う必要がある。

②経験式法

簡易にc、φを実測したい場合、特殊な土でない場合には経験式による土層強度換算法が用いられる。

経験式法では、下記の経験式を用いて垂直応力（σ）とせん断応力（τ）を求め、横軸を垂直応力、縦軸をせん断応力としたグラフを作成して測定点毎に直線回帰式を求め、「経験式による粘着力c」、「経験式による内部摩擦角φ」を求める。

$$\sigma \doteq 2.4 \times 10^{-2} W_{vc} \text{ (N/m}^2\text{)} \dots (1)$$

$$\tau \doteq 1.5 \times 10^{-4} T_{vc} \text{ (N/m}^2\text{)} \dots (2)$$

ここに、

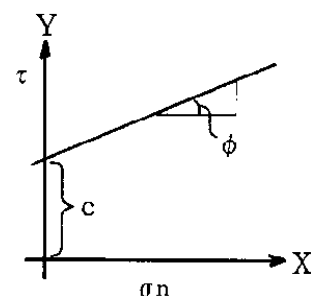
W_{vc} ：先端コーンにかかる鉛直荷重(N)

$$W_{vc} = W_N + (m_0 + n m_1) g$$

W_N ：荷重計の読み(N)

m_0 ：先端コーンと450mmロッドの合計質量(N)

n ：全ロッド数から最初のロッド(450mm)を除いた本数



横軸σ：荷重
縦軸τ：せん断応力
Y軸の切片：粘着力c
傾き：内部摩擦角φ

土層検査棒による土質強度の求め方

m_1 : 500mm ロッド質量 (N)

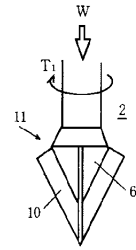
g : 標準重力加速度 9.81m/s²

T_{vc} : 先端コーンにかかるトルク (N・m)

$$T_{vc} = T_N - T_0$$

T_N : ベーンコーンで W_N の荷重の場合の最大回転トルク (N・m)

T_0 : 先端コーンで $W_c=0$ (荷重なし) の場合の最大回転トルク (ロッドと孔壁の摩擦) (N・m)



ベーンコーン形状

③土質定数の求め方

例えば、ある斜面で次のような試験結果が出たとする。計測深度は 1.5m とする。

表 1 試験結果例

	計測荷重 W_N (N)					
	0	25	50	75	100	125
	補正荷重 W_{vc} (N) ; (計測深度 1.5m、n=3)					
	12.65	37.65	62.65	87.65	112.65	137.65
計測トルク T_N (N・m)	0.70	0.85	0.95	1.10	1.25	1.40
補正トルク T_{vc} (N・m)	0.60	0.75	0.85	1.00	1.15	1.30

※ $T_0=0.1$ (N・m)

これらの値から土質定数を算定する。

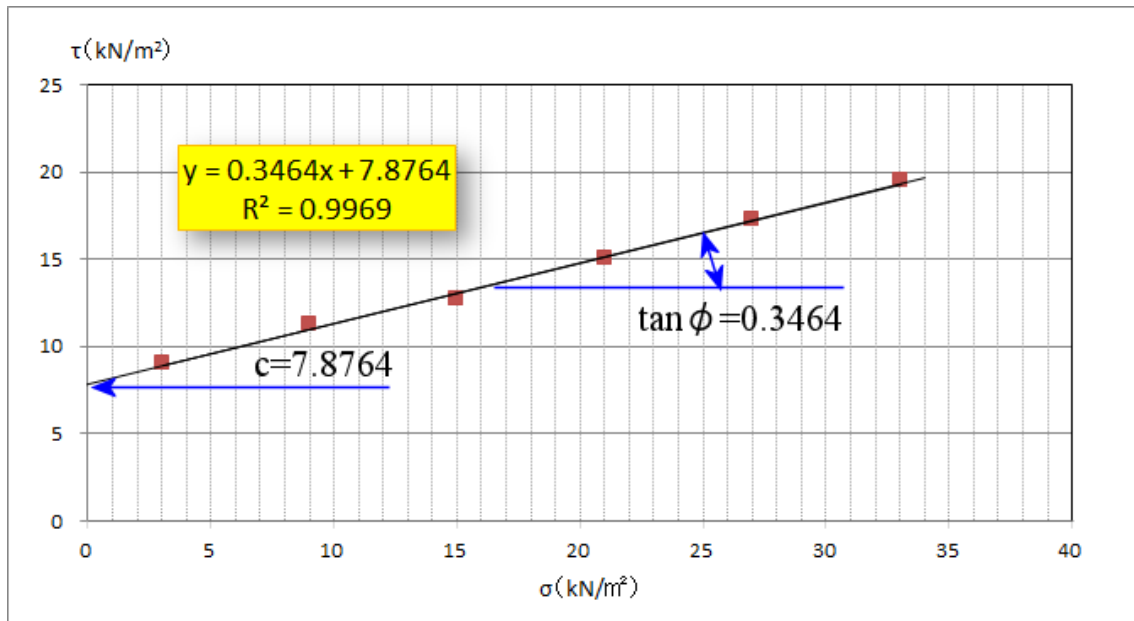
a) 前頁の式(1)および式(2)を用い、各荷重時の σ および τ を求める。

表 2 σ および τ の例

	0N	25N	50N	75N	100N	125N
$\sigma = 240 \times W_{vc}$ (N/m ²)	3,040	9,040	15,040	21,040	27,040	33,040
$\tau = 15000 \times T_{vc}$ (N/m ²)	9,000	11,250	12,750	15,000	17,250	19,500

b) 粘着力と内部摩擦角を求める

下図のような荷重-せん断力図を作成し、一次回帰直線を作成する。



上図では回帰式が $Y=0.3464X+7.8764$ となった。

Y軸の切片が粘着力 c 、傾きが内部摩擦角 ϕ となるので、

$$\tan \phi = 0.3464 \rightarrow \phi = 19.1^\circ$$

$$c = 7.8764 \text{ kN/m}^2 = 7.9 \text{ kN/m}^2$$

という土質強度を得ることができる。

なお、 R は相関係数である (R^2 は決定係数)。 $R > 0$ の時を正の相関、 $R < 0$ の時を負の相関と呼ぶ。ベーンコーンせん断試験では、正の相関が得られる。大まかには、 $0.7 < R \leq 0.9$ で「強い相関がある」、 $0.9 < R \leq 1.0$ で「極めて強い相関がある」と評価する。

上の例では、 $R^2 = 0.9969$ 、すなわち $R = 0.9984$ なので「極めて強い相関がある」と評価できる。

④安定計算への適用

ベーンコーンせん断試験により原位置不飽和土状態で計測した値が、経験式法では三軸圧縮試験（飽和、圧密非排水 CU 条件）の強度に対比されている。

崩壊が発生する際は、飽和条件・非排水状態と考えることができるので、経験式法を有効応力法の安定計算にそのまま用いることができる。

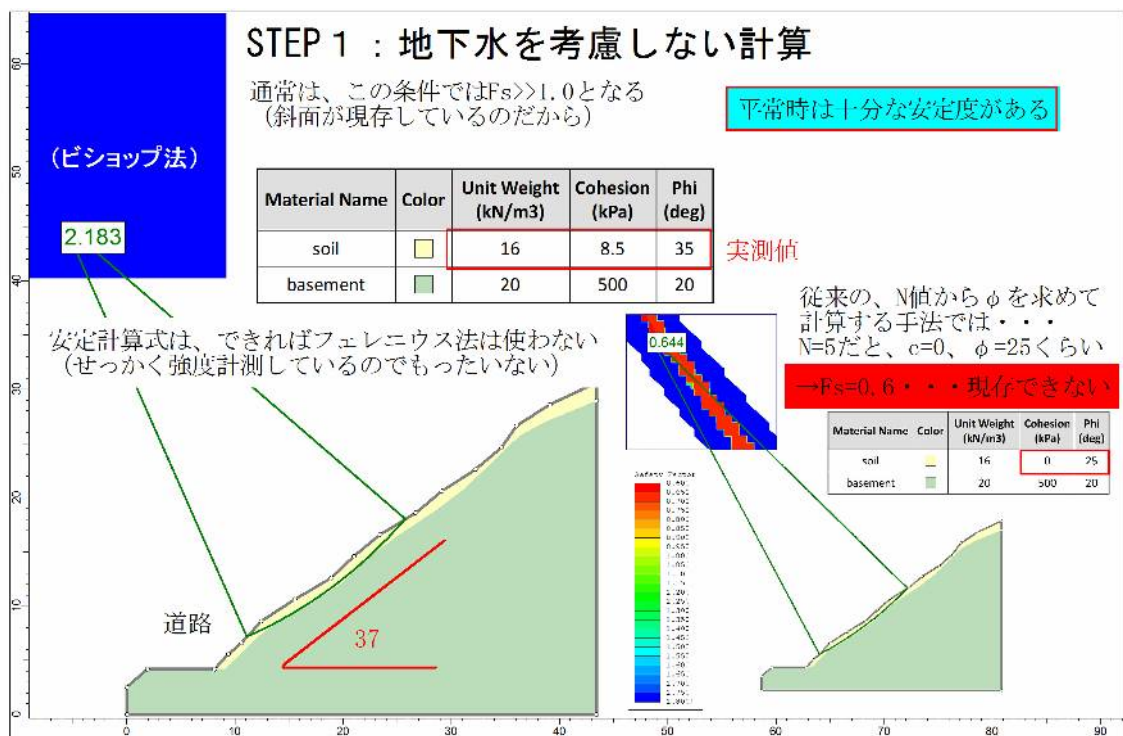
なお、得られた値には、三軸圧縮試験と土検棒ベーンせん断試験との間のバラツキ、土そのものがもつバラツキ、計測によるバラツキなどが含まれているため、複数回の計測により値のバラツキを把握したうえで安定計算等の解析を行うことが望ましい。

土層強度検査棒を用いた安定計算への活用方法の例を以下に示す。

a) 現状－無降雨時の安定計算

斜面が崩壊せず現存している場合には、安全率 $F_s \geq 1.0$ となるはずである。ところが、従来から用いられている換算 N 値から内部摩擦角 ϕ を推定して安定計算方法では、例えば $\phi = 30$ 度 ($c=0$) の場合、斜面の平均傾斜角が 30 度よりも急な場合、地下水が無い条件であっても $F_s < 1.0$ となる（斜面傾斜 $>$ 安息角 $= \phi$ のため）矛盾があった。

土層強度検査棒では、内部摩擦角 ϕ と同時に粘着力 c も計測できるため、土質力学（モール・クーロンの破壊規準）に基づく安定計算が可能である。有効応力法で地下水が無い状態の安全率 F_s は、一般に 1.0 よりも大きな値となる。なお、実測値を用いて安定計算する場合には、スライス間力を考慮した計算方法を用いることが望ましい（簡便法、フェレニウス法は計算誤差が多くなる）。



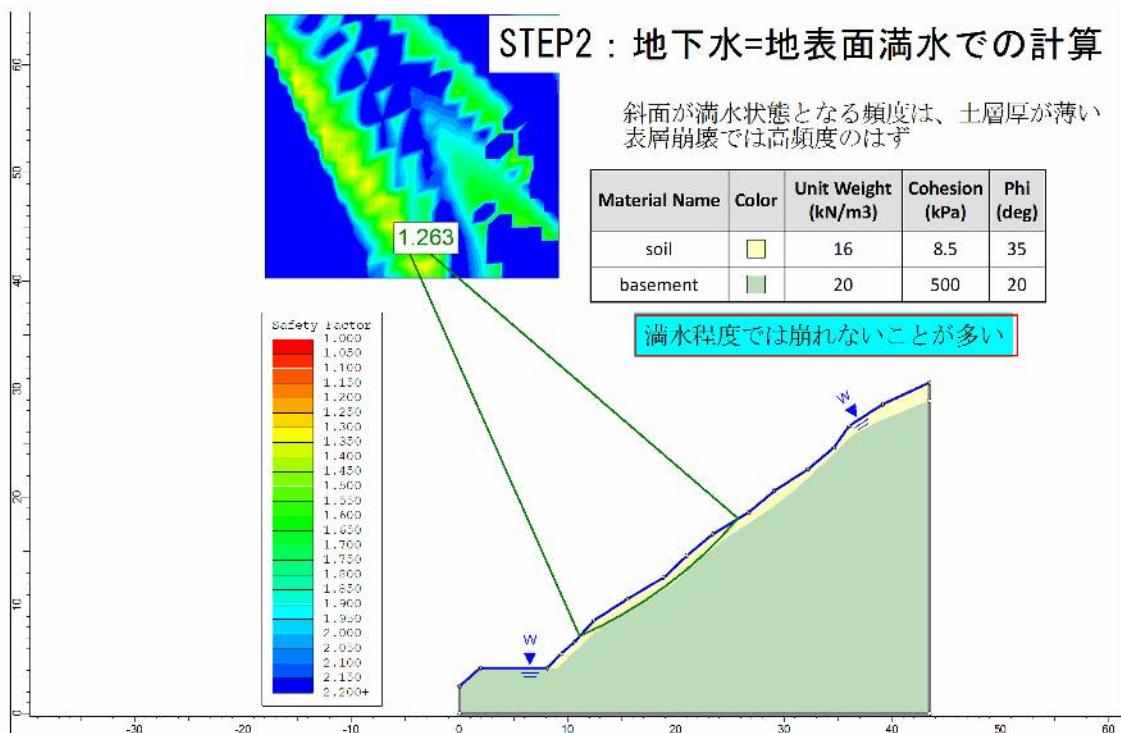
現状-無降雨時（地下水ナシ）での安定計算例

土層強度検査棒で実測した $c \cdot \phi$ を用いると、現状安全率 $F_s \gg 1.0$ となる（左図）。一方、 N 値から推定した ϕ ($c=0$) を用いると、 $F_s < 1.0$ となり（右図）「斜面が現存する」と矛盾する計算結果となることが多い。

b) 現状－地下水満水時（地表面と地下水位が一致）の安定計算

大雨の際には、土層厚が比較的薄い表層土砂では、地表面まで地下水が飽和する状態が形成される場合があると考えられる。そのような大雨は、一年に一度あるいは数年に一度程度あるはずだが、その場合にも斜面は崩壊しないことが多い。

安定計算では、その状態は、地下水位＝地表面の状態ですべて安全率 $F_s \geq 1.0$ となるはずである。土層厚が厚かったり、表層土砂の透水性が高かったり、地形勾配が急で排水性が高かったりする場合には、地表面まで地下水位が上昇すると $F_s < 1.0$ となる場合もある。



現状－地下水満水時（地表面と地下水位が一致）の安定計算例

表層土砂層の間隙が地下水で飽和され、地表面が圧力水頭ゼロとなる状態での計算事例。表層土層厚が比較的薄い場合には、このような状態となるケースは珍しくないと思われるが、それでも崩壊せず残存している場合が多くある。

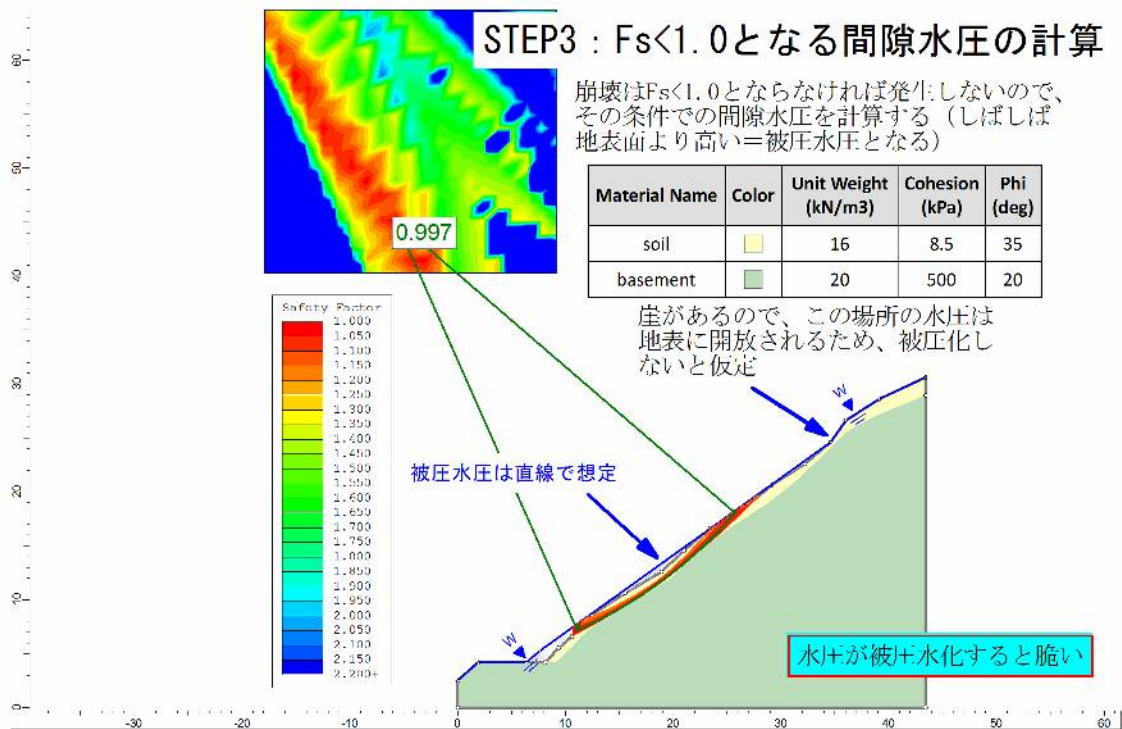
c)安全率 $F_s < 1.0$ 時の安定計算（崩壊時間隙水圧の逆計算）

斜面崩壊は、土質力学的に安全率 $F_s < 1.0$ とならなければ発生しない。このため、崩壊する瞬間の間隙水圧は、 $c \cdot \phi$ の実測値があれば安全率 $F_s = 0.99$ と仮定することによって、逆計算が可能である。（崩壊した箇所の地形を再現して崩壊時間隙水圧を推定することも可能である）

自然発生型の表層崩壊は、侵食作用の一形態であって、個別の場所においては数十年あるいは数百年に一度起きる低頻度現象である。樹木の伐採による裸地化や、地形改変等の人為的行為型の崩壊は、それよりも高頻度となる場合がある。

現在、その予測は「土壌雨量指数」の履歴順位第1位～3位程度となることを判断基準として行われている。土質力学的に解釈すると、そのような最上位順位の土壌雨量指数となる場合には、その場所の土の排水能力が限界を超える稀な集中豪雨の状態と言え、表層土砂内に被圧化が生じ崩壊を誘発するということである。

崩壊時間隙水圧が推定できると、崩壊の誘因が明確になるため、合理的な対策工を立案できるようになる。たとえば、崩壊時間隙水圧が地表面よりかなり高い位置にある場合には、表層土砂内は、急激な地下水供給により被圧水圧化が発生していると考えられることができるため、高透水性のフトン管（蛇籠）や、排水パイプの表層地盤内への挿入によって、表層土砂内の地下水の被圧化を防ぐことが有効な対策となる。



安全率 $F_s < 1.0$ 時の安定計算（崩壊時間隙水圧の逆計算）例

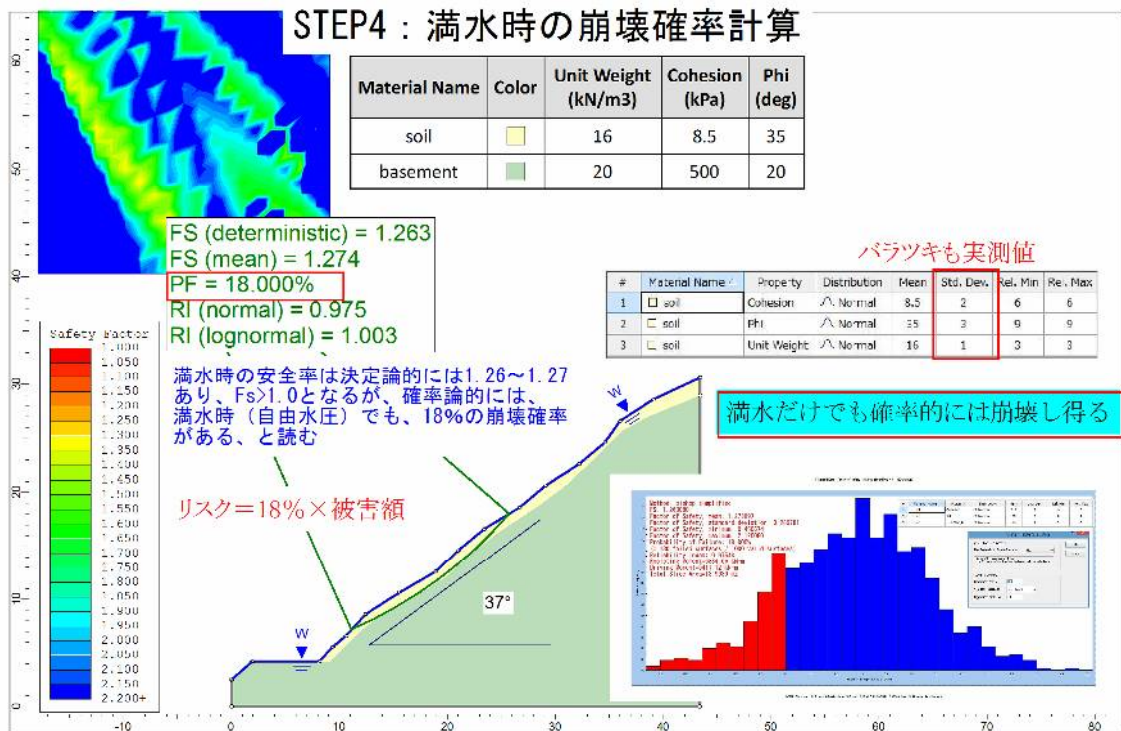
満水時で安全率 $F_s \geq 1.0$ の場合には、表層土砂内で飽和地下水の被圧化が生じる場合に安全率 $F_s < 1.0$ となり崩壊すると想定される。この状態は、その場所の地盤の排水能力が、地下水の供給に対応できなくなる場合であり、「土壌雨量指数」履歴順位第1～3位のような稀な豪雨時の状態と考えられる。

d) 地盤強度のバラツキを考慮した確率計算

地盤強度にはバラツキがあり、計測誤差によるバラツキ、計算誤差によるバラツキ等も存在する。このため、バラツキを考慮して確率的に斜面の安定度を評価する方法もある。

土層強度検査棒は、簡易な試験方法であるため同一現場で数多くの計測を行うことが可能である。その結果を統計処理し、平均値と標準偏差が得られたら、土質強度値が正規分布すると仮定して、値をばらつかせて計算し、安全率 $F_s < 1.0$ となる頻度を「崩壊確率」とすることができる。崩壊時間隙水圧と、満水時水位線とが大きく異なる場合には、確率的な計算をすると、満水時条件であっても崩壊確率 $> 0\%$ となる場合がある。

崩壊確率が得られると、 $\text{リスク} = \text{崩壊確率} \times \text{被害額}$ として数値的にリスクが管理できるようになるため、維持管理の観点から有効な対応が可能となる。具体的には、リスクが大きい方から順に優先順位をつけて対策を行う等の対応が可能となる。



地盤強度のバラツキを考慮した確率計算例

土層強度検査棒で3測定以上のデータがあれば、統計処理が可能となるため、確率的計算が可能となる。満水時での確率計算は、比較的頻度の高い大雨の際の崩壊確率と言え、 $\text{リスク} = \text{崩壊確率} \times \text{被害額}$ から管理者の維持管理上の目安や対策の優先順位の立案が容易になる利点がある。

土層強度検査棒を用いた地盤強度調査結果

箇所 No.	土質	計測土質強度・重量			記事
		内部摩擦角 ϕ (°)	粘着力 c (kN/m ²)	単位体積重量 γ (kN/m ³) ※	
平均値					
標準偏差					

※単位体積重量は、試料円筒などを用いて別途計測