

60. 既存斜面の安定性評価のための調査・解析手法の提案

Suggestion of investigation and analysis methods for the stability evaluation of existing slopes

○太田英将 (太田ジオリサーチ), 高馬太一 (西日本旅客鉄道), 金山幸司 (大鉄工業),
熊本 清 (レールテック), 杉山友康 (京都大学)

Hidemasa Ohta, Taichi Kouma, Kouji Kaneyama, Kiyoshi Kumamoto, Tomoyasu Sugiyama

1. はじめに

これまで、土で構成される土構造物斜面、あるいは自然斜面について、「素早く造る」「壊れたら素早く直す」ということを念頭に、主に経験知に基づいた調査・設計手法が発達してきた。維持管理が重要な時代になり、「造る」と「直す」の間にある「まだ壊れていない」ものの評価が重要となってきたが、これまで、時間的・コスト的・論理的な合理性を持った実現可能な具体的手法がなかった。

「造る」に使われてきた経験的手法(標準勾配や計画安全率)は、破壊の閾値を意識した確率的概念を用いたものであった。「直す」に使われてきた手法は、逆計算を用いた帰納的手法であった。

一方、「まだ壊れていない」斜面に対しては、土質力学に基づく演繹的手法を用い、不確定要素を考慮した確率的評価手法であることが必須である。

ここでは、土構造物の維持管理に適用でき、かつコスト的にも十分実現性のある調査・解析手法の提案と、その実施例を報告する。

2. 安定度評価に必要な情報

斜面の安定問題は、土のせん断破壊現象であるから、モール・クーロンの破壊基準に沿った安定計算式で評価するのが適切である。

安定解析式では、土の単位重量 γ 、土のせん断強度(粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ)、間隙水圧 U 、および地形形状・滑り面形状が既知となれば、評価が可能である。

この中でも特に個別箇所毎の値の違いが大きい、 $c \cdot \phi \cdot U$ を現場で、いかに効率的に取得する方法を選択するかが、安定度評価にとって重要なポイントとなる。

3. 安定度評価に必要な情報

本報告では、一つの斜面・法面(延長50m以内程度)を、1日の現地調査、1日の解析程度の作業量で評価することを想定する。膨大な量が存在する維持管理・点検が必要な「まだ壊れていない」土構造物の斜面に対して、行える調査・解析手法としては、この程度の簡易さが必要と考えたからである。

(1) 土層強度：土層強度検査棒試験¹⁾($c \cdot \phi$)

従来の調査手法としては、簡易動的コーン貫入試験などが用いられているが、これらは N 値に換算され、その後土質強度に換算される手法である。表層崩壊を

起こすような未固結土の場合、砂質土であれば $c=0$ 、粘性土であれば $\phi=0$ として換算式が用いられている。しかし、 c 、 ϕ の一方しか評価しない強度で安定計算を演繹的に行うと、安定計算が成り立たない。例えば、 $\phi=30^\circ$ ($c=0\text{kN/m}^2$)の砂質土であれば、傾斜角が30度の斜面では、間隙水圧が作用しない時に安全率 $F_s=1.0$ となるわけであるから、間隙水圧が作用した時の安全率は、当然 $F_s<1.0$ となり説明に窮することになる。

逆算法を用いず、演繹的に安定度を評価することが、既存斜面の安定度評価の原則であるから、土質強度としては、 $c \cdot \phi$ 両者の強度が得られる三軸圧縮試験のような試験を現位置で行うことが求められる。

原位置で $c \cdot \phi$ を同時に計測する簡易な装置として、(独)土木研究所が開発した土層強度検査棒がある。この装置は、表層崩壊を引き起こすような締りの緩い表層土砂を対象として、土層深計測と、せん断強度($c \cdot \phi$)を計測できるものである(図-1左)。

1計測あたり、10分未満と短時間であるため、数多くの計測を行うことができ、バラツキも把握できる。



図-1 土層強度検査棒試験(左)と浅層型原位置透水試験(右)の実施状況

(2) 透水性計測：原位置透水試験装置²⁾(K)

2013年に市販されるようになったこの装置は、マリオートサイホンを利用した定水位透水試験装置である。この装置を用いて、原位置で地盤の透水係数 K を計測する。

表層用は、地表に直径30cm、深さ30cmの穴を掘って計測する。浅層用(図-1右)では $\phi 100\text{mm}$ 程度の穴を約2m掘って計測する。計測時間は、10分程度と短

時間であるが、穴を掘って装置を設置する時間が別途必要である。

(3) 間隙水圧：浸透流解析 (U)

土層強度検査棒等で計測された土層深でモデル化された斜面に、原位置透水試験装置で得られた透水係数 K を用いて、浸透流解析を行うことにより斜面内に作用する間隙水圧 U を推定する。その際、想定降雨量(地下浸透分)を設定する必要がある。想定降雨量は、例えば道路の通行を遮断しない降雨量基準、などの目標値に対応する。

(4) その他の計測

現地で、迅速に計測できる調査手法としては、高精度表面波探査や、地中音計測がある。

高精度表面波探査では、土層構図を把握するために、 V_s ・換算 N 値の面的広がりを把握することができる。

地中音計測では、パイプ流(ミズミチ)の位置を把握することができる。

(5) 安定解析：極限平衡法 (F_s , PF)

表層崩壊の危険性を診断するための安定解析は、円弧滑りによる2次元極限平衡法を用いる。アウトプットは、抵抗力と滑動力の比である安全率 F_s である。ただし、スベリの安全率 F_s は、本来 $F_s < 1.0$ で不安定(滑動)、 $F_s > 1.0$ で安定(非滑動)の意味しかなく、その閾値以外の数値(例えば $F_s = 1.1, 1.2, 1.5 \dots$)で安定性を論じても、論理的意味が不明確である。

確定論的安全率 F_s と計画安全率 F_{sp} で、対策工の規模を決定することが一般的に用いられるが、計画安全率 F_{sp} は、もともと経験に基づき確率的概念である。

このため、本来の趣旨に立ち返り、安定性評価は、崩壊確率 PF (Probability of Failure)で評価するのが望ましい。

幸い、土層強度検査棒で、数多くの $c \cdot \phi$ 計測ができる。地盤強度の統計値から、値が正規分布すると仮定してランダムに変化させ、数多くの計算を行い、 $F_s < 1.0$ となる頻度を崩壊確率 PF として算出し、斜面の安定性評価の指標とすることができる。

4. 実施事例

鉄道廃線敷の盛土を利用し、前述の方法で調査・解析し、安定度評価を実施した。対象盛土は、昭和20年代に築造された盛土である。現在も存在し、顕著な変状が発生していないので、 $F_s > 1.0$ で、 PF はゼロではないにしても、あまり大きな値ではないことが想定される。安定計算は、Bishop法による順計算を用いた。

計算に用いた条件は、表-1に示すとおりである。地表面から浸透する単位時間当たりの浸透水は仮定値であるが、それ以外はすべて実測値である。すなわち、降雨により地表から 100mm/h の浸透水が地中に流入する際の安定性評価、の意味になる。

順計算による検討の結果(図-2)、平均安全率 $F_s = 1.26$ 、

崩壊確率 $PF = 13.0\%$ となった。半世紀以上豪雨に耐え、存在し続けた盛土法面の評価として、妥当な結果と考えられる。

表-1 安定計算条件と安定計算結果

土層名	layer1(上位)	layer2(下位)
粘着力 c	5.8 kN/m ²	
c の標準偏差	1.65	
内部摩擦角 ϕ	16.1 °	
ϕ の標準偏差	7.08	
透水係数 $K(\text{cm/s})$	7.8E-03cm/s	2.3E-03cm/s
降雨浸透量(mm/h)	100 mm/h	
平均安全率 F_s	1.26	
崩壊確率 $PF(\%)$	13.0 %	

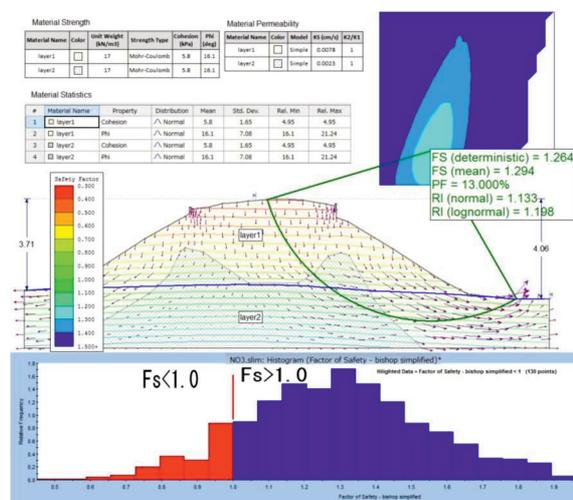


図-2 現場実測値 ($K \cdot c \cdot \phi$) を活用した斜面安定解析結果例

5. まとめ

土構造物の維持管理・点検・評価方法として、時間的・コスト的に実践可能なやり方で、斜面安定度評価を実施した。

逆算法を一切用いず、現場で計測した値を用い、演繹的な方法で安定度評価を試みた結果、妥当な平均安全率 F_s 、および崩壊確率 PF を算出できた。

この方法を用いれば、「まだ壊れていない」土構造物の、その時点での安定性評価を行うことが可能と考えられる。また、その結果を活用し、施設管理者が対策工の必要性の有無を意思決定するための客観的情報が提供できるものと考えられる。

文献

- 1) 地盤工学会(2013):『地盤調査の方法と解説』, pp.467-468
- 2) 能野一美, 古川修三, 久保慶徳, 向谷光彦, 乃村智子(2012): 締め固めた地盤の透水係数算定式に関する一考察, 第57回地盤工学シンポジウム, pp.175-180

OHTA-GEO

平成26年度 日本応用地質学会 研究発表会 (九州大学医学部 百年講堂)
第2日[10月30日(木)]第2会場[斜面・地すべり(1) 9:30~10:45]

60. 既存斜面の安定性評価 のための調査・解析手法の提案

太田英将(太田ジオリサーチ)*,高馬太一(西日本旅客鉄道),
金山幸司(大鉄工業), 熊本 清(レールテック),杉山友康(京都大学)

1
<http://www.ohta-geo.co.jp>

OHTA-GEO

『災害先行型』防災からの脱却 目標設定

- 被害が起きて、法律をいじり、基準をいじり、予算を上積みする「災害先行型」が、これまでの「防災」だった
- 事前に経済的に可能な調査・評価・予測を行い、事前に対策しておく「予防先行型」に移行したい

解決すべき課題は、手法とコスト

<http://www.ohta-geo.co.jp>

OHTA-GEO

これまでの手法

帰納的方法(経験に基づく確率的手法)

1. 「造る」モード
これまでの経験で、「壊れる・壊れない」の閾値がわかっており、それに基づいて設計する。
2. 「直す」モード
壊れたら、再度「造る」方法論で直す。

標準勾配・計画安全率・逆算法

「素早く造る」「素早く直す」ためには土質力学を使わない!

3
<http://www.ohta-geo.co.jp>

OHTA-GEO

予測のための手法

演繹的方法(土質力学に基づく手法)

3. 「現状を評価する」モード
Fs>1.0ははっきりしているが、どの程度1.0より上回っているのかを評価しなければならない。

安全率 = 抵抗力 ÷ 滑動力

安定計算

$$F_s = \frac{(W \cos \theta - U) \tan \varphi + c \cdot l}{W \cdot \sin \theta}$$

斜面は現存しているので必ずFs>1.0

「現状の評価」ためには土質力学を使わざるを得ない!

4
<http://www.ohta-geo.co.jp>

OHTA-GEO

Target 現地で知るべき情報

$$F_s = \frac{(W \cos \theta - U) \tan \varphi + c \cdot l}{W \cdot \sin \theta}$$

W: 断面積A × 単位体積重量γ … 概ねわかる
θ: すべり面角度、l: すべり面長 … 形状要素なのでわかる

わからないのは
土質強度のc・φと間隙水圧U

現在は、一つの方程式の中に3つ(Fsを入れると4つ)の未知数を入れて、超適当にやっている。逆算法で求めているのは、意味のないφ! (or c)

5
<http://www.ohta-geo.co.jp>

OHTA-GEO

c・φが現地計測できるとどうなるか？

- 未崩壊斜面の場合 (c・φ・U → Fs)
透水係数Kと設定降雨強度時の浸透流解析から間隙水圧Uを求め、安定性評価の**真のターゲット**である安全率Fsを求める。
- 崩壊斜面の場合 (c・φ・Fs → U)
崩壊の瞬間のFsは1.0を少し下回ったはずだから、c・φが既知なら、**崩壊時の間隙水圧Uを逆算**できる … 正しい逆算法

一つの方程式で一つの未知数だと真実に近づける

6
<http://www.ohta-geo.co.jp>

OHTA-GEO

($c \cdot \phi \cdot U \rightarrow Fs$)を
実際にやってみた(2日×3人)
調査位置平面図

地層調査

- 表面波探査測線
- 原位置透水試験(表層) + 土層強度検査棒試験
- 原位置透水試験(浅層)
- 簡易動的コーン貫入試験

引張試験

- Type-A
- Type-B
- Type-C

— 表面波探査測線

7
<http://www.ohta-geo.co.jp>

OHTA-GEO

2日でこれくらいできる

高精度表面波探査13測線L=217m

土層強度検査棒

3箇所
 × 3回
 = 9回

原位置透水試験(浅層2m 1箇所)

表層3箇所

これ以外に
 簡易測量
 簡易貫入試験2箇所

8
<http://www.ohta-geo.co.jp>

OHTA-GEO

2日間の実施数量

調査内容及び数量表

試験項目	単位	設計数量	実施数量	備考
簡易な調査法・設計法の検討				
高密度表面波探査	式	1 (L=40m)	L=217m	合計 13 測線
原位置透水試験	式	1 (3 箇所)	4 箇所	表層 3 箇所、浅層 (2m) 1 箇所
土層強度探査棒試験	式	1 (3 箇所)	3 箇所	各箇所で3回ずつ計測
土質試験 (後日実施)	式	1 (1 箇所)	4 箇所	土粒子の密度試験 4 箇所 土の粒度試験 (7μ分析) 4 箇所 土の粒度試験 (沈降分析) 1 箇所
簡易動的コーン貫入試験	式	—	2 箇所	

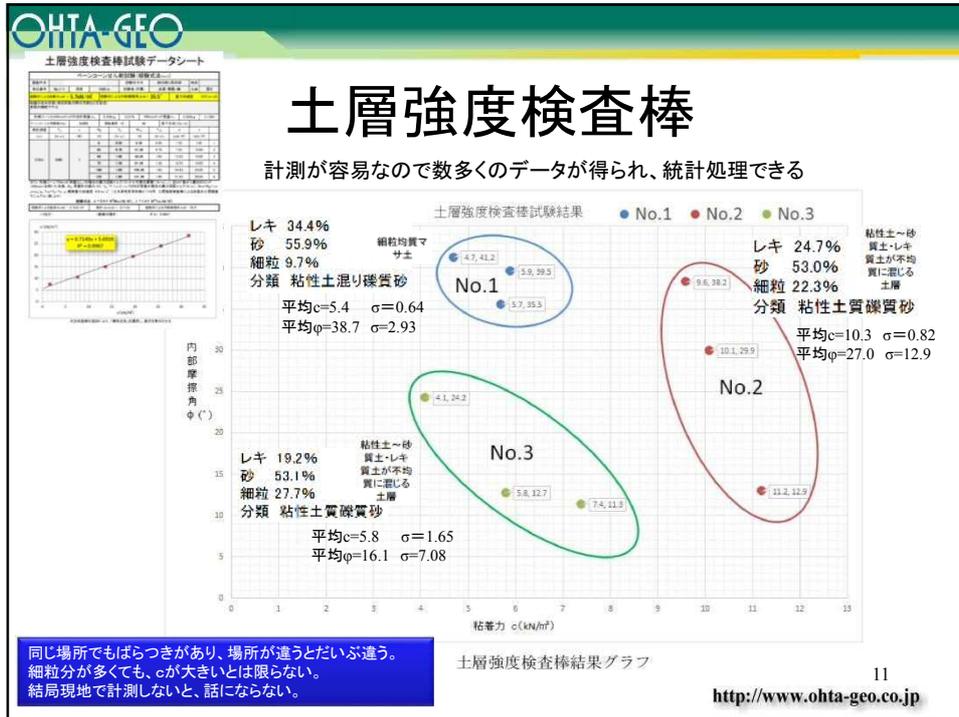
9
<http://www.ohita-geo.co.jp>

OHTA-GEO

高精度表面波探査




10
<http://www.ohita-geo.co.jp>



c・φ・K

地盤調査結果一覧表

番号	測点	位置	土質	マリオートサイホン式 原位透水試験結果		地盤強度 (土層強度検査棒試験)		土質試験
				透水係数K (cm/sec)		粘着力c (kN/m ²)	内部摩擦角 φ (deg)	
No.1	5m	東法面法	細粒均質マ ツ土	1.7E-02	No.1-1	5.7	35.5	土粒子密度 2.656g/cm ³ レキ 34.4% 砂 55.9% 細粒 9.7% 分類 粘性土混り礫質砂
					No.1-2	4.7	41.2	
					No.1-3	5.9	39.5	
					平均値	5.4	38.7	
					標準偏差	0.64	2.93	
No.2	20m	東法面法	粘性土~砂 質土・レキ 質土が不均 質に混じる 土層	1.2E-02	No.2-1	9.6	38.2	土粒子密度 2.627g/cm ³ レキ 19.2% 砂 53.1% 細粒 27.7% 分類 粘性土質礫質砂
					No.2-2	11.2	12.9	
					No.2-3	10.1	29.9	
					平均値	10.3	27.0	
					標準偏差	0.82	12.90	
No.3	40m	東法面法	粘性土~砂 質土・レキ 質土が不均 質に混じる 土層	7.8E-03	No.3-1	7.4	11.3	土粒子密度 2.675g/cm ³ レキ 24.7% 砂 53.0% 細粒 22.3% 分類 粘性土質礫質砂
					No.3-2	4.1	24.2	
					No.3-3	5.8	12.7	
					平均値	5.8	16.1	
	標準偏差	1.65	7.08					
	39.5m	東法面法	比較的均質 なマツ土	1.8E-03~2.7E-03	<原位透水試験結果の説明> 左の値は、自然地下水位が深い(Tu>3H;水深Hの3倍 より大きい)場合の値で、右の値は自然地下水位が近 い場合(孔底から150cm位置・水位面から400cm)で計 算した場合の値。	土粒子密度 2.675g/cm ³ レキ 11.4% 砂 58.2% 細粒 30.4% 分類 硬混り粘性土質砂		

12
<http://www.ohita-geo.co.jp>

原位置透水試験

表層用



浅層用 (2m)



現場透水試験 (水層表層用)				
調査地点: No.1 (敷地内) 調査層: 敷地裏1-1 (地底)				
試験項目		試験方法	試験日	試験者
1	試験層	表層		橋本
2	試験層	表層		橋本
3	試験層	表層		橋本
4	試験層	表層		橋本
5	試験層	表層		橋本
6	試験層	表層		橋本
7	試験層	表層		橋本
8	試験層	表層		橋本
9	試験層	表層		橋本
10	試験層	表層		橋本
11	試験層	表層		橋本
12	試験層	表層		橋本
13	試験層	表層		橋本
14	試験層	表層		橋本
15	試験層	表層		橋本
16	試験層	表層		橋本
17	試験層	表層		橋本
18	試験層	表層		橋本
19	試験層	表層		橋本
20	試験層	表層		橋本
21	試験層	表層		橋本
22	試験層	表層		橋本
23	試験層	表層		橋本
24	試験層	表層		橋本
25	試験層	表層		橋本
26	試験層	表層		橋本
27	試験層	表層		橋本
28	試験層	表層		橋本
29	試験層	表層		橋本
30	試験層	表層		橋本
31	試験層	表層		橋本
32	試験層	表層		橋本
33	試験層	表層		橋本
34	試験層	表層		橋本
35	試験層	表層		橋本
36	試験層	表層		橋本
37	試験層	表層		橋本
38	試験層	表層		橋本
39	試験層	表層		橋本
40	試験層	表層		橋本
41	試験層	表層		橋本
42	試験層	表層		橋本
43	試験層	表層		橋本
44	試験層	表層		橋本
45	試験層	表層		橋本
46	試験層	表層		橋本
47	試験層	表層		橋本
48	試験層	表層		橋本
49	試験層	表層		橋本
50	試験層	表層		橋本
51	試験層	表層		橋本
52	試験層	表層		橋本
53	試験層	表層		橋本
54	試験層	表層		橋本
55	試験層	表層		橋本
56	試験層	表層		橋本
57	試験層	表層		橋本
58	試験層	表層		橋本
59	試験層	表層		橋本
60	試験層	表層		橋本
61	試験層	表層		橋本
62	試験層	表層		橋本
63	試験層	表層		橋本
64	試験層	表層		橋本
65	試験層	表層		橋本
66	試験層	表層		橋本
67	試験層	表層		橋本
68	試験層	表層		橋本
69	試験層	表層		橋本
70	試験層	表層		橋本
71	試験層	表層		橋本
72	試験層	表層		橋本
73	試験層	表層		橋本
74	試験層	表層		橋本
75	試験層	表層		橋本
76	試験層	表層		橋本
77	試験層	表層		橋本
78	試験層	表層		橋本
79	試験層	表層		橋本
80	試験層	表層		橋本
81	試験層	表層		橋本
82	試験層	表層		橋本
83	試験層	表層		橋本
84	試験層	表層		橋本
85	試験層	表層		橋本
86	試験層	表層		橋本
87	試験層	表層		橋本
88	試験層	表層		橋本
89	試験層	表層		橋本
90	試験層	表層		橋本
91	試験層	表層		橋本
92	試験層	表層		橋本
93	試験層	表層		橋本
94	試験層	表層		橋本
95	試験層	表層		橋本
96	試験層	表層		橋本
97	試験層	表層		橋本
98	試験層	表層		橋本
99	試験層	表層		橋本
100	試験層	表層		橋本

13

<http://www.ohta-geo.co.jp>

透水係数

実測値 (No.1 表層)
 $K=1.7E-2cm/s$
 クレーガー
 $K=1.9E-2cm/s$
 レキ 34.4%
 砂 55.9%
 細粒 9.7%
 分類 粘性土混り礫質砂

盛土の場合、粒度からKを求める方法はアテにならない

実測値 (No.2 表層)
 $K=1.2E-2cm/s$
 クレーガー
 $K=4.0E-5cm/s$
 レキ 19.2%
 砂 53.1%
 細粒 27.7%
 分類 粘性土質礫質砂

実測値 (No.3 表層)
 $K=7.8E-3cm/s$
 クレーガー
 $K=3.4E-4cm/s$
 レキ 24.7%
 砂 53.0%
 細粒 22.3%
 分類 粘性土質礫質砂

実測値 (No.3-2m)
 $K=2.3E-3cm/s$
 クレーガー
 $K=3.5E-6cm/s$
 レキ 11.4%
 砂 58.2%
 細粒 30.4%
 分類 礫混り粘性土質砂

14

<http://www.ohta-geo.co.jp>

OHTA-GEO

安全率を計算できる条件が 整った

表-1 安定計算条件と安定計算結果

土 層 名	layer1(上位)	layer2(下位)
粘着力 c	5.8 kN/m ²	
c の標準偏差	1.65	
内部摩擦角 φ	16.1 °	
φ の標準偏差	7.08	
透水係数 K(cm/s)	7.8E-03 cm/s	2.3E-03 cm/s
降雨浸透量(mm/h)	100 mm/h	

15
<http://www.ohta-geo.co.jp>

OHTA-GEO

(c·φ·U→Fs) 安定計算結果 (Fs=1.26)

STRENGTH					
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)
layer1		17	Mohr-Coulomb	5.8	16.1
layer2		17	Mohr-Coulomb	5.8	16.1

PERMEABILITY			
Material Name	Color	Model	KS (cm/s)
layer1		Simple	0.0078
layer2		Simple	0.0023

STATISTICS

#	Material Name	Property	Distribution	Mean	Std. Dev.	Rel. Min	Rel. Max
1	layer1	Cohesion	^ Normal	5.8	1.65	4.95	4.95
2	layer1	Phi	^ Normal	16.1	7.08	16.1	21.24
3	layer2	Cohesion	^ Normal	5.8	1.65	4.95	4.95
4	layer2	Phi	^ Normal	16.1	7.08	16.1	21.24

FS (deterministic) = 1.264
 FS (mean) = 1.294
 PF = 13.000%
 RI (normal) = 1.133
 RI (lognormal) = 1.198

地表面からの浸透量
100mm/日を仮定

16
<http://www.ohta-geo.co.jp>

OHTA-GEO

安全率で防災投資への 意思決定ができるか？

$F_s = 1.26 > 1.0$ だがPF = 13% > 10%

いわゆる計画安全率以上あるが、崩壊確率がゼロではない

施設管理者(経営者)の防災投資判断

維持管理では「投資判断」ができる「合理的理由」が必要

17
<http://www.ohta-geo.co.jp>

OHTA-GEO

確率解析 崩壊確率PFの導入

Fs頻度分布

Weighted Data = Factor of Safety - bishop simplified < 1 (130 points)

SAMPLED: mean=1.294 s.d.=0.2592 min=0.4211 max=2.266 (PF=13.900% R=1.3261, best fit-normal distribution)

感度分析

Factor of Safety - Bishop simplified

Percent of Range (mean = 50%)

Fs=1.0ライン

Weyer1 Cohesion (kN/m2)
Weyer1 Phi (deg)
Weyer2 Cohesion (kN/m2)
Weyer2 Phi (deg)

φの分布

Weighted Data = Factor of Safety - bishop simplified < 1 (130 points)

SAMPLED: mean=16.25 s.d.=4.759 min=0.1468 max=26.90
NPDF: Normal(mean=16.5 s.d.=7.28 min=0 max=24)

Correlation Coefficient=0.8315474, alpha=5.72235, beta=0.0078248 (All Data)

18
<http://www.ohta-geo.co.jp>

OHTA-GEO

ま と め(1)

1. 土層強度検査棒と、マリOTTサイホン式透水試験を使えば、低コストで順算法に必要な土質パラメータが得られる。
2. $c \cdot \phi \cdot K$ の実測値を用いれば、現状の斜面安定度評価を演繹的に計算可能である。(それ以外の方法では困難である)
3. $c \cdot \phi$ の統計値を用いて確率的解析を行うと、より「防災投資判断」がしやすい「崩壊確率PF」を得ることができる。

19
<http://www.ohita-geo.co.jp>

OHTA-GEO

ま と め(2)

4. 崩壊地で $c \cdot \phi$ が既知となれば、崩壊時の間隙水圧 U を逆算できる(崩壊時の水圧のことは十分知られていない)

逆算すると水頭は地表面より上＝被圧水

20
<http://www.ohita-geo.co.jp>