

## 浅層崩壊の安定性評価のための調査法と対策法

Investigation and measures methods of Shallow Landslide Stability

太田英将\*, 美馬健二, 林 義隆(太田ジオリサーチ)

Hidemasa OHTA, Kenji MIMA, Yoshitaka HAYASHI (Ohta Geo Research Co., LTD)

キーワード：浅層崩壊, 土層強度検査棒, 崩壊確率, 間隙水圧

Keywords: Shallow Landslide, Soil Strength Probe(SSP), Probability of Failure, Pore Pressure

### 1. はじめに

浅層崩壊(表層崩壊)は、斜面災害の8割を占める。定期的に行われている道路防災点検でも数多くの道路法面・斜面が目視調査を中心として調査・評価されている。それにもかかわらず、豪雨に伴う崩壊箇所を占める「要対策箇所」や「カルテ対応箇所」の割合は決して高くない。

本発表では、目視調査を中心とした現調査法の限界を示し、新たに土層強度検査棒(SSP: Soil Strength Probe)を用い、演繹的な安定計算と、崩壊確率計算に基づく方法論を紹介する。

### 2. 目視中心の調査法の限界

目視中心の調査法では、地表面にある崩壊跡や湧水箇所の収集が主にならざるを得ない。崩壊跡や湧水箇所の写真が多く収集された斜面は、調査票では「安定度が低い」という対応関係で評価がなされがちである。しかし、実際に発生した全崩壊箇所を占める「安定度が低いと評価された斜面」の割合が低いので、その対応関係は必ずしも正しくない。

土木研究所が、直轄国道の道路防災点検結果ランクと実際に災害が発生した箇所の割合集計したところ、要対策箇所が全体の16%、カルテ対応箇所が全体の21%で、両方合わせても37%と「正答率」が低いことが明らかになっている。

### 3. 土層強度検査棒(SSP)の活用

土層強度検査棒(SSP)は、土木研究所が2002年に開発した(特許申請時期;特許第3613591)、簡易に(1)土層厚と(2)土の締め程度と(3)土相の強度( $c \cdot \phi$ )を計測できる装置である。総重量5kg未満と軽量なので急峻な斜面でも常時携帯することが可能であることや、計測時間が短いことから数多くの箇所で計測できるという画期的な利点がある。

これまで、斜面安定問題の解決において、未固結の土の強度を計測するためには、ブロックサンプリングを採取し、室内試験(三軸圧縮試験など)を実施することが必要だったが、目視調査と比較すると費用がけた外れに大きくなるため、実施されてこなかった。土層強度検査棒は、解析上のボトルネッ

クを解消できるツールである。

### 4. 斜面安定評価法

#### 4.1 従来の安全率 $F_s$ を用いた評価法

斜面の安定性を評価するひとつの指標は、安全率( $F_s$ )である。 $F_s \geq 1.0$ で滑らない、 $F_s < 1.0$ で滑ると評価される。しかし、 $F_s = 1.0$ 付近の評価は、計測誤差や解析誤差の影響を受け、「滑らない・滑る」の二値問題として扱いにくい。 $F_s = 1.02$ が安全で、 $F_s = 0.98$ が危険と言えるほどの解析精度を持ち得ないからである。

#### 4.2 崩壊確率 PF を用いた評価法

土層強度検査棒(SSP)は計測が簡易なので、バラツキを統計処理できるだけの実測値を得ることができる。ばらつきが得られると、確率的な計算が可能となり、パラメーターを正規分布にばらつかせて計算された数多くの安全率結果の中から、 $F_s < 1.0$ となる頻度を崩壊確率 PF(Probability of Failure)として定義して評価することができる。

評価結果を説明する場合、経験的に崩壊確率 PFの方が、確定論的安全率  $F_s$  よりは理解されやすい。

### 5. 実施例

ある行政の公園用地の一部が土砂災害警戒区域・特別警戒区域に指定され公表された。市議会では、この行政管理地の斜面の安全性について評価しているのか、という質問があり調査依頼が来た。

「この斜面は安全なのか?それとも危険なのか?」という、素朴だが最も難しい調査依頼である。調査費用は、従来の道路法面防災点検と同等程度で実施しなければならないという制約付である。

#### 5.1 SSP を活用した地表踏査

地表踏査においては、土層強度検査棒のロッドを携帯して行い、土層厚と土質(手の感触で)を知ることができる。砂質土の場合、30kgの圧力でN値=10程度の締めなので、その範囲を浅層崩壊の可能性のある深さと考えることができる。

湧水点は、自然の地下水排除工と安定側に考えることもできるし、地下水が集中する箇所として危険側に考えることもできる。小崩壊跡も一種の湧水点

である（崩壊時に水が吹いた跡）。

### 5.2 必要な情報の実測

主断面は、踏査した技術者が判断して決定し、ノンプリズムレーザー測距儀などを用いて簡易に断面を計測する。その中で土質特性を得るべき個所を選定し、(1)土層強度検査棒のベーンコーン試験により内部摩擦角 $\phi$ と粘着力 $c$ を、少なくとも3回以上実測する（統計処理をするためである）、(2)単位体積重量は、試料円筒を用いて現場で実測する。

この調査だけで、間隙水圧 $u$ を除くパラメータはすべて実測できる。

### 5.3 確率論的安定計算

解析主断面の地形形状および表層土層厚（場合によっては地質構造も）をモデル化し、それぞれの地盤の特性値 $c \cdot \phi \cdot \gamma$ 及びそれぞれの標準偏差 $\sigma$ を適用する。正規分布では平均値から $3\sigma$ の幅の間に99%以上の値が入るので、通常は $3\sigma$ の幅で正規分布の確率でばらつかせる（図1a参照）。

安定計算するケースは、(1)地下水位が表層土砂内に無い「平常時」、(2)地下水位が無い条件で大地震（ $kh=0.25$ ）が作用した「大地震時」、(3)大雨で表層土砂内が満水状態（地下水位が地表面と一致）の状態の「大雨時」（図1b）、及び(4)平均安全率 $F_s=0.99$ となる「記録的大雨時」の4ケースである。

(1)で平均安全率 $F_s < 1.0$ となれば地盤モデルが誤っていることになる。一般にこのケースの $F_s$ はかなり大きい。(2)で崩壊確率 $PF > 0\%$ となれば、大地震時には何らかの動きがある（被害がある）可能性があるとして評価する。(3)で平均安全率 $F_s < 1.0$ となれば、かなり不安定な斜面と評価されるが、これまでの経験では40度以上の急斜面でない限り $F_s \geq 1.0$ となる（ただし $PF > 0\%$ となることはある；図1c参照）。(4)記録的大雨時とは、その地域の土壤雨量指数履歴順位第一位相当の雨を想定している。すなわち、その地域で崩壊が発生する環境を再現する計算である。その際に操作可能なパラメータは間隙水圧（地下水位） $u$ である。これまでの経験では、通常の斜面では地下水位線は地表面よりも高い位置に無いと平均安全率 $F_s$ が1.0を下回りはなかった。この計算は、実際に崩壊が発生した斜面を復元して、崩壊時の間隙水圧を逆算することにも活用できる。

### 6. おわりに

現行の目視に過度に頼った斜面調査法は、思い込みや、小さな変状の存在がバイアスとなって適切な評価となっていないことが、実際に起きた現象との対比で明らかになっている。どこかに間違いがある

ということである。

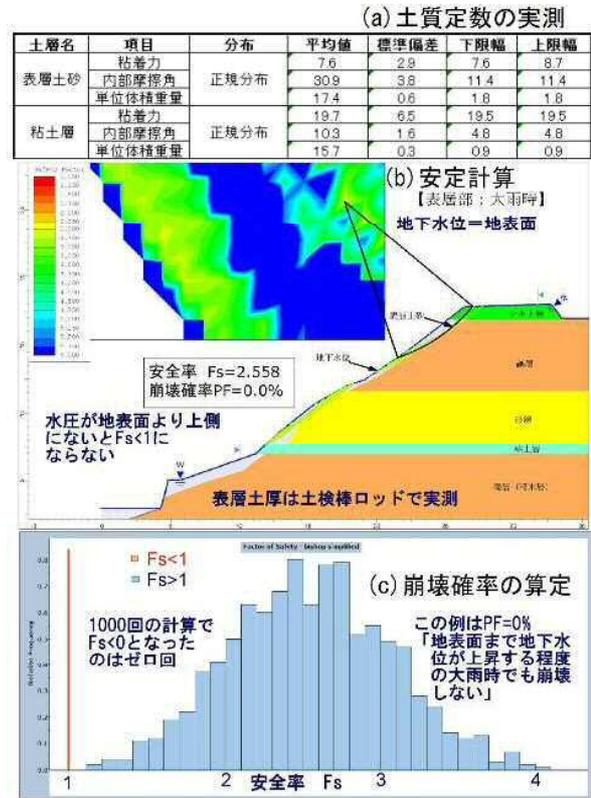


図1 安定計算による斜面の安定度評価事例 (a)土層定数の実測値と標準偏差、(b)大雨時(地下水位は地表面と一致)の解析モデル(土層深は土検棒ロッドによる実測、地層は土検棒ロッドによる触診も活用、地質構造は地質的判断)、(c)崩壊確率の計算(この事例は $PF=0\%$ )

斜面の安定問題は、実測値を用いて検証してはじめてその発生メカニズムを理解することができる。しかし、未固結土の地盤強度測定の高難度で、浅層崩壊の調査としてはほとんど実施されてこなかったことが、その間違いを長い間正せなかった主たる原因であろう。

現場で簡易に実測値を得ることができる土層強度検査棒(SSP)を用いることによって、合理的な計算が可能となった。多くの斜面では地表面より高い地下水位(過剰間隙水圧 or 被圧水圧)時に崩壊が発生することがわかった。崩壊の瞬間の間隙水圧については、これまで、概念的に想像はできていても、検証されていなかった課題だった。

このような水圧が崩壊の根本原因であることがわかると、対策の方針として「地表面よりも高い水圧となることを防ぐこと⇨地下水位を地表面までに留めること」と明確化できる。水圧消散効果の有効性は、排水補強パイプを打設した斜面や、フトン籠が設置された斜面が、極めて崩壊しにくかったという事実ともよく整合する。

この特別警戒区域の斜面は、安全ですか？危険ですか？  
その問いに応えられますか？

# 浅層崩壊の安定性評価のための 調査法と対策法

太田英将\*, 美馬健二, 林 義隆  
(太田ジオリサーチ)

キーワード: 浅層崩壊, 土層強度検査棒, 崩壊確率, 間隙水圧



## 背景・トレンド

1. 日本独特の斜面解析技術が海外で受け入れられない
  - ・逆算法・・・斜面の安定度評価を回避している
  - ・計画安全率・・・科学技術的根拠が示されていない
    - ・必要抑止力・・・計画安全率に付随する概念なので根拠がない
  - ・標準勾配(安定?勾配)・・・地質・気象条件等が異なる

→世界に通用する合理的な方法論が必要になってきた
2. 記録的大雨時でも崩壊率は決して高くない(全面はげ山化するわけではない)
  - ・崩壊個所ではSomething Specialなことが起きているかも

→Something Specialを解明し、それを除去すれば対策になる

→経験に基づく非論理的アプローチでは解明不能

## 依頼者の要求に応えられていない

- 土砂災害防止法の警戒区域指定によって、一般市民の中に湧き出てきた疑問

**「この斜面は安全ですか？危険ですか？」**

市議会で議員さんが質問しました・・・調べて後日回答します、と担当者

- [現行の方法論] え～っと、いま崩れていないのだから、**現状安全率**を1.05として、**地盤定数を逆算**して、**計画安全率**1.20になる対策を設計しますよ。。。。

**どれくらい安全か、どれくらい危険かを、  
まったく判断していない  
即ち、答えになっていない！**

## 斜面が「安全」とはどういうことか？

- 論理的判断基準: 大雨や大地震でも安全率 $F_s$ が1.0を下回らないこと

→ [必要条件] 地形・土層厚・土層強度等の実測値があること

→ [制約条件] 調査解析費用が安価であること (SSP活用)

→ では、 $F_s=1.02$ は安全で $F_s=0.98$ は危険といえるか？

→  $F_s < 1.00$ となる確率が0%なら安全といえるか？

→  $F_s < 1.00$ となる確率が50%なら危険といえるか？

※SSP; Soil Strength Probe 土層強度検査棒  
(土木研究所2002年開発; 特許第3613591号土のせん断強度測定方法及び装置)

# 従来方法はヘンだと国内からも

「土工構造物の性能向上技術普及研究会」(H27~)

切土の場合

現場状況の設計 (標準勾配) と施工との乖離  
(設計と施工のリスクコミュニケーション、施工中のすべり出し事例)

現場状況の設計 (特殊な安定計算) と施工との乖離  
(設計と施工のリスクコミュニケーション、施工中のすべり出し事例)

現地形 (動いていない)

アンカーの設計の例:

原地形 (動いていない)

安全率1.05を仮定 地盤定数を逆算 霧°安全率:0.9 アンカー対策安全率:1.2

安全率 1.05 を仮定

地盤定数を逆算

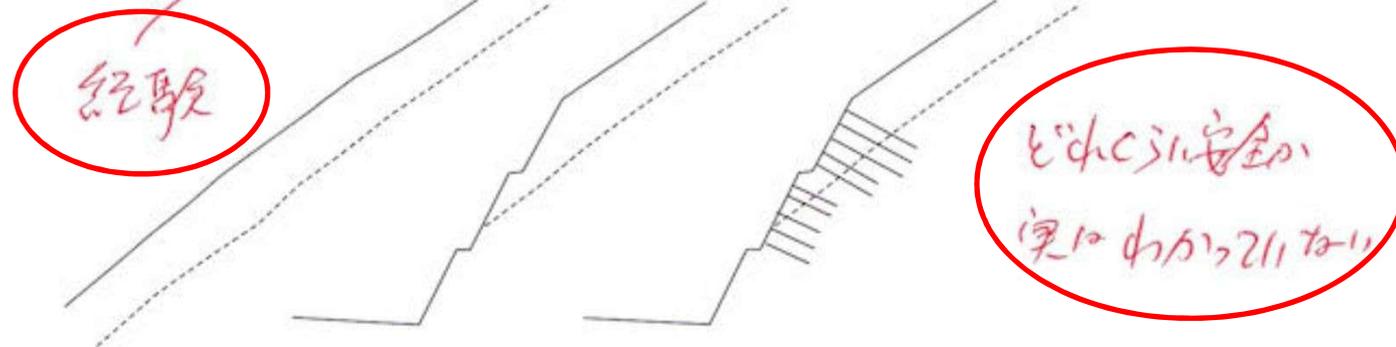
切土安全率: 0.9

アンカー対策安全率: 1.2

経験則は前提条件が  
同じでないと使えない。

↓  
地質や気候条件が違う  
外国が拒絶する理由

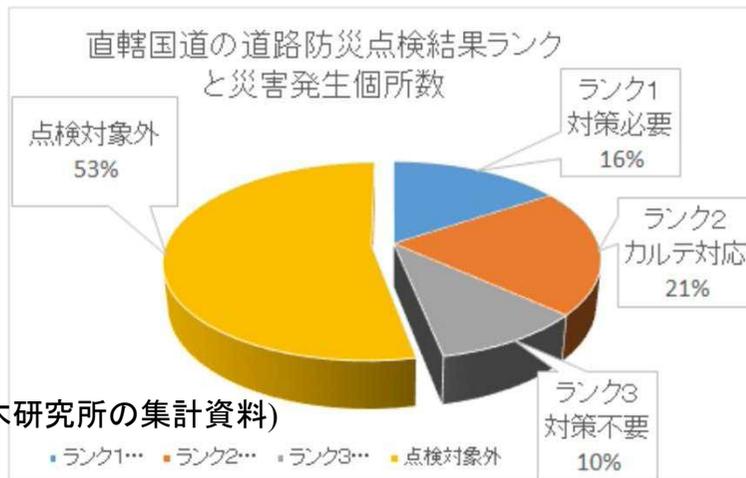
経験則であっても  
エビデンスは必要  
だが、それが無い



「土工構造物の防災を考える技術セミナー講演資料」(岐阜大学 原隆史先生の資料)  
(2016.7.5,土木研究センター,災害科学研究所)

# 目視のみの調査・評価は不適切 というエビデンスは蓄積されている

評価	集計年度				合計	
	H9~16		H20~22		発生率	箇所数
	発生率	箇所数	発生率	箇所数		
ランク1 対策必要	16%	74	15%	11	85	15.8%
ランク2 カルテ対応	21%	98	19%	14	112	20.8%
ランク3 対策不要	9%	42	18%	13	55	10.2%
点検対象外	54%	252	48%	35	287	53.2%
総数	466	466	73	73	539	100.0%



- 目視だけで実施される道路防災点検結果が、実際に発生した崩壊現象と整合しているかどうかの集計結果(エビデンス)
- 崩壊箇所全体の16%がランク1(対策必要箇所)、21%がランク2(カルテ対応箇所)。正答率が低いエビデンス
- 災害申請のため「遑って危険評価をする事例」もあるらしいので、この正答率ですら過大かも(2つの政令市でヒアリングしたところ、いずれもランク1+2で全崩壊箇所の20%未満とのこと)

## 事例の紹介

- 自治体が管理する公園用地内の斜面が土砂災害警戒区域(一部特別警戒区域)に指定され公開された
- 市議会で、公園管理の部署は、その指定された斜面の安全性について議員さんから質問された

素朴だけれど、とても難しい質問

素人さんにもわかる論理性が必要

- 担当部署は、「早急に調べて回答します」と返答。でも、そんな調査費を予算化していないし、そんな調査の経験もない

安価な費用で素人にもわかる論理的回答が必要

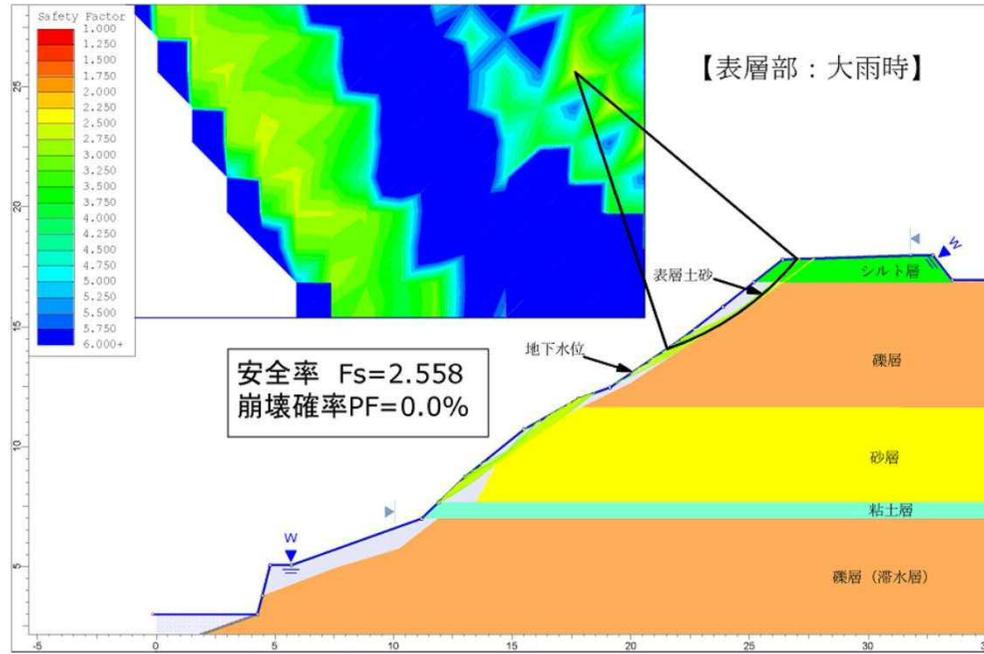
## 調査方法

1. 地形計測：ノンプリズムレーザー測距儀
2. 土層深計測：SSP貫入試験  
(踏査しながらN値 $\div$ 10の境界がわかる、土質もある程度わかる; N値 $\div$ 押し込み力(kN) $\div$ 33)
3. 土層強度計測：SSPベーン試験、 $c \cdot \phi$ がわかる
4. 単位体積重量計測：試料円筒計測、 $\gamma$ がわかる



貫入コーン

# SSPで計測された強度で安定計算

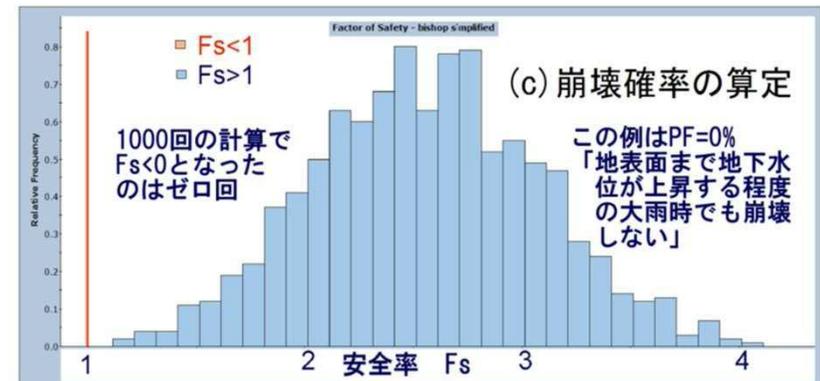


(a) 土質定数の実測

土層名	項目	分布	平均値	標準偏差	下限幅	上限幅
表層土砂	粘着力	正規分布	7.6	2.9	7.6	8.7
	内部摩擦角		30.9	3.8	11.4	11.4
	単位体積重量		17.4	0.6	1.8	1.8
粘土層	粘着力	正規分布	19.7	6.5	19.5	19.5
	内部摩擦角		10.3	1.6	4.8	4.8
	単位体積重量		15.7	0.3	0.9	0.9

土質強度等は、平均値 $\pm 3\sigma$ (標準偏差)を正規分布すると仮定

1. SSP貫入試験で土層深と、触診による土質がわかる
2. SSPベーン試験・単位体積重量試験で、地盤定数とバラツキがわかる
3. 地表面に水位がある条件で安定計算を行い崩壊確率を計算する ( $F_s > 1.0$ 、PF=0%のことが多い)



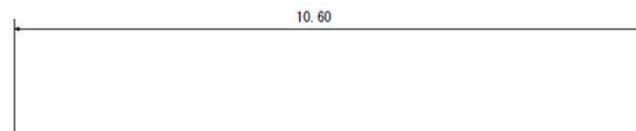
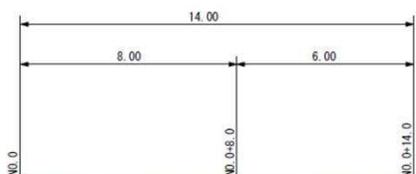
$F_s > 1.0$ 、 $PF = 0\%$ (水位=地表面)なら安全？

そもそも「崩れない斜面」は実在するか？

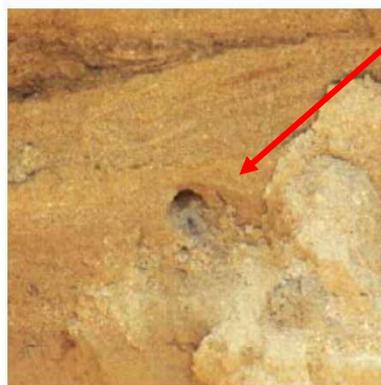
Something Specialな崩壊条件があるのでは？

- 安定計算の中で変化できるパラメーターは水圧のみ
- 「特別な水圧」が存在すれば、すべての斜面に崩壊のチャンスがある→侵食作用の義務を果たせる
- 「特別な水圧」とは、地表面より高い水頭を持つ水圧のこと＝被圧水圧or過剰間隙水圧
- 「特別な水圧」が発生するのは、ソイルパイプ(みずみち)が飽和したときに違いない！

# Something Specialの証拠のひとつ 2015年8月 西六甲ドライブウェイ



崩壊土砂が石積み擁壁に穴をあけて流れ出している。  
道路面位置まで水位が上がったくらいで起きる現象ではなく、  
高い被圧水圧が発生した証拠といえる。



ソイルパイプ

(神戸市建設局道路部のご提供)

## 災害記録に書かれた異常水圧

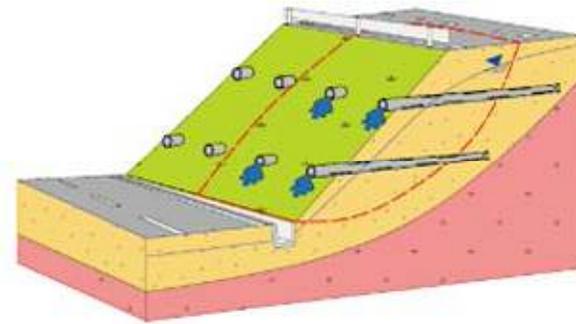


昭和47年7月豪雨  
死者 59名

- <町水道課長>  
「後方で大きな音がしたので振り向くと、**空高く水柱が上がり**、国鉄線路側に赤土色の黄色い煙か霧のようなものが立ち込めていた」
- <町建設課長補佐>  
「走りながら瞬間的に振り向いたところが、**頂上のほうでパーッと水しぶきが上がった**」

# Something Specialを除去するのが賢い対策

Something Special = 特別の水圧



上信越自動車道でのモニタリング結果  
 「平常時で1mの水位低下、集中豪雨時には一時的に地表面まで水位が上昇するが、その後速やかに水位低下」→被圧水化は避けられる

上信越自動車道切土のり面における浅層すべり対策

—排水パイプを利用した浅層すべり対策—

東京第三管理局 佐久管理事務所 吉田 一宏  
 佐久管理事務所 吉田 浩二  
 保全部 保全第一課 清水 章一

5. 効果の検証

排水パイプの効果を検証するため、施工箇所に間隙水圧計を設置し、継続的に測定した。  
 観測結果からは、設置前と設置後では、平常時で約1mの水位低下がみられ、集中豪雨時には、一時的に地表面まで水位が上昇しているが、その後速やかに水位低下していることがわかる。  
 また、現地の排水パイプからの流量を測定した結果、降雨終了直後の測定で約2割の流量が観測されており、平成12年度においては、排水パイプの施工箇所において表層すべりは、一切発生していないことから、間隙水圧の低減に効果があることが確認できた。

## 人工的なソイルパイプの築造



## ま と め

1. 海外技術移転や、「道路土工構造物技術基準」ができた今が、斜面安定性評価の方法を、論理的なグローバルスタンダードに変える千載一遇のチャンス！
2. 実測値を用いた合理的方法論で評価すれば、計画安全率・逆算・必要抑止力などの「ガラパゴスの手法」と、ようやくお別れできる。
3. 合理的評価手法は、合理的対策に直結する。逆に非合理的評価手法は非合理的対策に導く。