

OWIA GEO

# 安定解析

有限会社太田ジオリサーチ 太田英将

2011年11月7日

## 抜 粋

1

OWIA GEO

## 1. 安定解析の目的

- 現在の斜面の安定度の(絶対・相対)的評価目的  
困難! (2次元ならより困難)
- 地形変更後の安定度の(絶対・相対)的評価目的  
ある程度可能
- 構造物を作るための設計上の目的  
比較的容易
- 現在の技術で可能なのはどれか?

2

2次元法で演繹的安定計算ができるという幻想は捨てた方が良い。原理的にできないのだから。

OWIA GEO

## 安定解析の目的

- 現在の斜面の安定度の(絶対・相対)的評価目的  
...この斜面は今危険なのか? 安全なのか?
- 地形変更後の安定度の(絶対・相対)的評価目的  
...この斜面の地形を変えて構造物(例えば道路)を作っても大丈夫か?
- 構造物を作るための設計上の目的  
...この土の上に構造物を造った時に斜面は大丈夫か? 崩れないか?

3

OWIA GEO

## 現在の技術でできるのは?

- モデルが適切で、地盤強度が精度良く得られれば、すべて理論的には安全率算出可能。

↓

現実には、実務では逆算法(等価地盤強度パラメータが土質強度)が多用されるため、あまり使われていない。

4

逆算法で用いる土質強度は、「調整済み土質パラメータ」なので、土質試験で得られる土質強度とは本質的に異なる。

OWIA GEO

## 2. 安定解析の手法

- アウトプットは「安全率」  
変形量での評価は斜面問題ではごく一部
- 極限平衡法(2次元・3次元、地震時)  
最もポピュラー。地震力は静的に与える。  
3次元法は、土質試験とリンクできる。
- 数値解析(2次元・3次元、地震時)  
CPUの発達とともに利用頻度増加
- 順算法・逆算法  
初生崩壊・滑りは順算法...困難!  
再活動地すべりは逆算法...容易!

5

OWIA GEO

## 極限平衡法と数値解析法

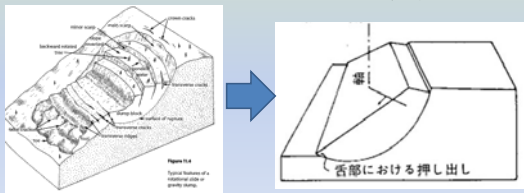
- 極限平衡法  
安全率(抵抗力÷滑動力)を算出する方法(条件)  
1.土は飽和している  
2.体積変化はしない  
3.間隙水圧の消失は生じない
- 数値解析法(FEM)=変形解析  
全体安全率はSSR法(せん断強度低減法)  
ただし、もともとは変形解析なので変形量がアウトプット

安定性評価のアウトプットは安全率

6

### 2次元法は単純モデル化

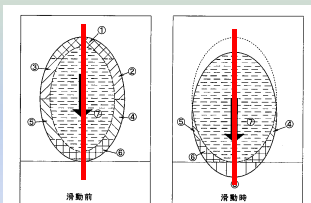
実際の地すべり 2次元にモデル化された地すべり



舌部における押し出し

単純化  
無限の幅  
剛体としての形状維持

### 2次元法で抜け落ちる強度



滑動前 滑動時

場所により摩擦強度は異なる。  
①頂部、②③未増強投資壁部、④⑤未増強崩壊面、⑥未増強、  
⑦底部（滑動時、強度回復時に縮み）、⑧岸上切削部

地すべり・崩壊におけるすべり面強度の区分

側部のみ切土などは2次元法では評価不能

## 2次元法で安全率が計算できない理由

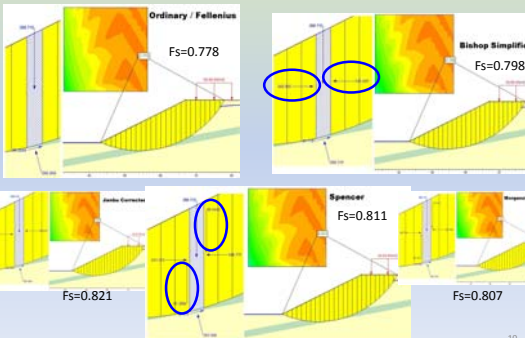
### 2次元極限平衡法

Method

- Ordinary / Fellenius
- Bishop Simplified
- Janbu Corrected
- Spencer
- Morgenstern-Price

計算に必要な物性値  
 $\gamma \cdot c \cdot \phi$

### Methodによる違い(スライス間力・安全率)



Ordinary / Fellenius  $F_s=0.778$

Bishop Simplified  $F_s=0.798$

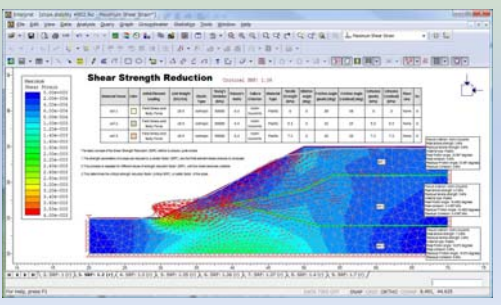
Janbu Corrected  $F_s=0.821$

Spencer  $F_s=0.811$

$F_s=0.807$

手法の違いは、2次元法では五十歩百歩なのであまり議論する意味はないが、講義なのでとりあえず説明。難しい計算方法であっても、現在はソフトのチェックボックスにチェックするだけでできる。安定計算法を研究テーマにしている人以外は、気にすることは無い。

### 数値解析(2次元FEM)

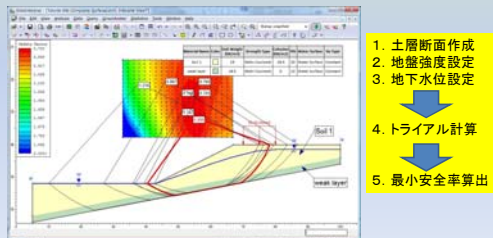


Shear Strength Reduction

極限平衡法の地盤定数+(ヤング率、ポアソン比、etc.)

### 順算法(絶対評価法)

- 初生崩壊・地すべりに用いる→絶対的評価
- [解析モデル構築]→[最小安全率算出]

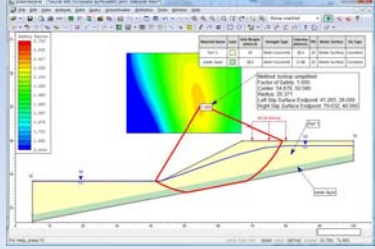


1. 土層断面作成
2. 地盤強度設定
3. 地下水位設定
4. トライアル計算
5. 最小安全率算出

数値解析を順算法で使うのは、必要な土質情報が多いので絶望的。逆算法的に利用して、相対的変化を知るには効果が大きい。

### 逆算法 (相対評価法)

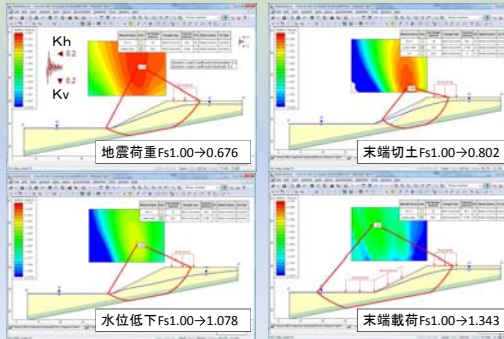
- 「今の安全率」を先に決める
- 地盤強度はキャリブレーションで求める



- 土層断面作成
- 地下水位設定
- 安全率仮定
- トライアル計算 (キャリブレーション)
- 地盤強度算出

「先に安全率を決める」という邪道が  
実務では一番利用されている方法

### 相対安全率の変化 逆算法による対策工設計に用いられる



- 地震荷重  $Fs_{1.00} \rightarrow 0.676$
- 末端切土  $Fs_{1.00} \rightarrow 0.802$
- 水位低下  $Fs_{1.00} \rightarrow 1.078$
- 末端載荷  $Fs_{1.00} \rightarrow 1.343$

条件の変化で安定度がどう変化するか、ということには極めて有用。

### 3. 安定解析に必要な要素

- 滑り土塊の物性値 (単位体積重量、ヤング率、ポアソン係数)
  - 極限平衡法では  $\gamma$  のみ
- 滑り面の有無
  - 初生滑りは「無」
  - 再活動滑りは「有」
- 滑り面の物性値 (ピーク強度・完全軟化強度・残留強度)
  - 初生滑りは「ピークor完全軟化強度」
  - 再活動滑りは「残留強度」
- 計画 (目標) 安全率という概念
  - 日本独特の概念
  - 効率的な社会資本整備に有益だった

計画安全率からの卒業、を実現できなければ  
地すべりは永遠に科学にはならない

### 滑り面の有無

- 滑り面有り → 固定された同じ滑り面で何度も滑る
  - 大変形しているの、「残留強度」になっている
- 滑り面無し → 初めて滑り面 (崩壊面) ができて滑る
  - 初めて滑る (崩壊する) ので最小安全率となる形状 or 滑動力が抵抗力を上回る形状となる
  - 初めてなので「ピーク強度」で破壊する

### 計画 (目標) 安全率の概念

- 対策工設計の目安
  - 対策前の  $F_s$  を、 $F_{sp}$  まで向上させる
- 経験値 ( $F_{sp} = 1.2$  or  $1.5$ , etc.)
  - 昭和40年前後にできた模様 (詳細不明)
    - 事業予算に最も影響与えるが根拠が不明確
  - ダム の地すべりで円滑な予算執行のため
    - 対策しては滑らし... の歴史
  - 2次元フェレニウス法の逆算法との組み合わせ
    - それ以外の組み合わせでの経験値は無い

計画安全率の生い立ちを知れば、これが  
2次元Spencer法や3次元法で適用できないものだということがわかる。  
「便宜上の計画安全率」をさらに「便宜上」  
で上塗りして使うという手も工学だから有り  
だが。

### 4. 土質試験値を使えば斜面の安全率を正しく計算できるか？

- 2次元法で可能か？
  - 無限幅を持つのと同等の条件以外では、  
原理的に困難！
- 3次元法では可能か？
  - 滑り面内の地質に対応した強度を使えば、  
原理的に可能！ 実際かなりイイ線いく。

2次元法は相対評価に使うもの、ということ  
をここらではっきりさせた方が良い。

### 2次元解析は無限の奥行きを仮定

側部不飽和帯及び側部強度を無視

舌部における押し出し

2次元解析を3次元モデルにすると

2次元法はあり得ない形状を想定

### 土上における地すべり側部の切土解析

Roller Slider Theory

地すべりは、側部の摩擦で踏ん張っている！

側部せん断強度 C=14.6kPa φ=47°

すべり面強度 C=14.6kPa φ=45°

側部摩擦あり

側部摩擦なし

全ての地すべりは3次元ローラーライダー型

### サイドフリクションを考慮した安定解析例 U型横断形状

この深さ程度で地すべり発生！

安全率

深さ (m)

1.42

1.38

1.00

0.83

0.71

1.0

1.0

1.10

1.12

1.14

側部摩擦 φ=12°, c=0

基礎面摩擦 φ=12°, c=0

ローラーライダーモデルで横断形状は特に重要

### 3次元法ではうまくいく

複数すべり面強度  $F_s = 1.01$  ... それらしい

すべり面強度設定

断面	安全率	φ (°)	c (kPa)
①中央部のすべり面 (標準強度)	0.60	11.0	0
②側部 (完全軟化強度)	3.53	34.4	36.8
③側部 (ゼロ強度)	1.81	34.8	14.7
④末端部SR2 (ゼロ強度)	1.01	34.8	14.7
⑤末端部SR1+SR (ゼロ強度)	1.01	34.8	14.7

断面①: 中央部のすべり面 (標準強度)

断面②: 側部 (完全軟化強度)

断面③: 側部 (ゼロ強度)

断面④: 末端部SR2 (ゼロ強度)

断面⑤: 末端部SR1+SR (ゼロ強度)

よわ～い滑り面強度は、大きな面積を占めるが、抵抗力分担分は、半分程度。周縁部は面積が小さいが、抵抗力は大きい。

### 側部抵抗の簡単な実験

- ダンブトラック荷台から砂をすべり落とす実験  
安息角は35°くらい

角度 35.0°

角度 36.5°

この2次元断面を標準とする

### 側部抵抗の簡単な実験

2次元断面形状はみんないっしょ

- 砂の中にせん断面ができるとなかなか落ちない

角度 47.0°

角度 44.0°

47°

44°

2次元解析をすれば、すべて同じ形状の断面になるが、抵抗力はまるで違う  
動画だが、pdfなので動かない



### 側部抵抗の簡単な実験

- 2次元断面は全ての実験で同じ



角度 61° (65.0°)

61° (これ以上ダンブが傾かない)



角度 60°

末端閉塞60°

25

### 5. 新しい問題

- 地震時には常時とは違うことが起きる。
- 地震時に発生する過剰間隙水圧

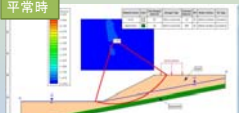


26

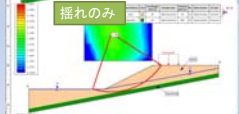
動画だが、pdfなので動かない

### 造成地盛土の滑動崩落 (本来は3次元問題)

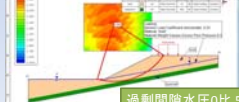
平常時



揺れのみ



過剰間隙水圧0比.5



Material Name	Color	Unit Weight [kN/m <sup>3</sup> ]	Strength Type	Cohesion [kN/m <sup>2</sup> ]	Phi
Soil2		20	Mohr-Coulomb	10	35
basement		20	Mohr-Coulomb	500	35

- 平常時  $F_s=1.875$  極めて安定
- 地震時  $kh=0.25$  (大地震)  $F_s=1.136$  それでも安定、崩壊はしないはず
- 地下水に強震動で過剰間隙水圧が発生した場合 ; 過剰間隙水圧比0.5とすると  $F_s=0.606$

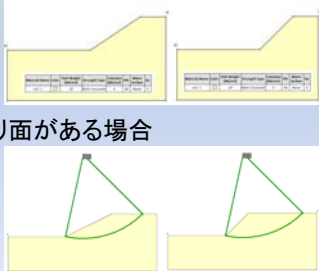
崩落

27

2次元問題で論じるべきではないが、原理の説明くらいなら2次元でもよからうと思う。

### 6. 課題; 安定度の高いのはどちら? (安定解析が理解できているかどうか)

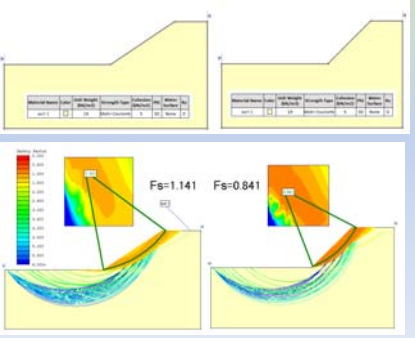
- 滑り面が無い場合
- 滑り面がある場合



28

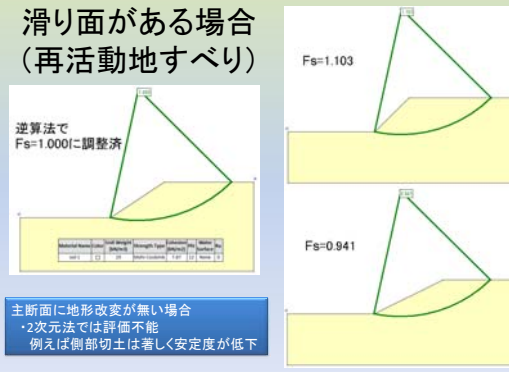
再活動型と初生型は、法面勾配と安定度の関係が逆になる。これがわからずに末端部の山を良かれと思って除荷して滑らした例はたくさんある。

### 滑り面が無い場合 (初生滑り)



29

### 滑り面がある場合 (再活動地すべり)



30

これが理解できていれば、実務で使う安定解析の8割は制したも同様

# 地すべり対策工

有限会社太田ジオリサーチ 太田英将

2011年11月7日

## 抜 粋

### 1. 地すべり対策工は何をするための工法か

- 斜面を計画(目標)安全率まで向上させる
 

地すべり対策工は  
「安定計算を現地で実現させる」  
ために行うもの
- 計画(目標)安全率と必要抑止力
 

計画(目標)安全率まで向上させる  
ために「付加する」ために必要な力

### 計画(目標)安全率

- 昭和30年代の対策工では計画安全率の考え方が基本的に明快に定まっていたわけではないので、この時期の工事記録には、二瀬ダムでの試行錯誤的な安定解析の繰り返しと、対策工事の追加で処理している様子が窺える。(中略)抑止工が実際に数多く適用されるようになった昭和40年代後半から計画安全率として経験的に抑止工によって1.20を保持すれば地すべりの安定が確保できることが知られて以来、無暗な安全率による膨大な防止工を計画する必要がなくなり、**ほぼ1.2を上限とする抑止工の計画で予算に見合った計画安全率の策定が可能となっている。**(藤田, 1991, p44より引用)

ダム建設時の予算措置として登場

### 現状安全率→計画安全率の方法

- 現状の安全率
 
$$Fs = \frac{\text{抵抗力}}{\text{滑動力}} = \frac{\sum (N - U) \tan \phi' + c' \cdot l}{\sum T}$$
- 対策後の安全率
 
$$\text{計画安全率 } F_{sp} = \frac{\text{抵抗力} + \text{付加抵抗力}}{\text{滑動力}} = \frac{\sum \{(N + \Delta N - U + \Delta U) \tan \phi' + c' \cdot l\} + Pr}{\sum T - \Delta T}$$

T: 接線力(滑動力)  
 N: 法線力(垂直力)  
 U: 間隙水圧(Nを減じるもの)  
 Pr: 付加する力

安全率を向上させるためには**添字**の機能を実現すればよい

### 2. + Nの工法

$$Fs = \frac{\sum \{(N + \Delta N - U + \Delta U) \tan \phi' + c' \cdot l\} + Pr}{\sum T - \Delta T}$$

説明のためのモデル: 逆解析で現状の安全率Fs=1.000に調整済

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kN/m2)	Phi	Water Surface	Hu Type
soil 1	□	19	Mohr-Coulomb	7.95	13	Water Surface	Constant

### 押え盛土工

$$Fs = \frac{\sum \{(N + \Delta N - U + \Delta U) \tan \phi' + c' \cdot l\} + Pr}{\sum T - \Delta T}$$

**末端部押え盛土工**

(注) 滑動力の大きな頂部に盛土するのは逆効果

**地すべり対策工は、安定解析のどこをイジルかによって工法が異なる**

### 押え盛土工

土工だけで対処できるため緊急対策としても使われる



押え盛土で応急的に仮止めしておいてから本復旧...もっともオールドックス



37

### 排土工

$$\frac{\sum \{(N - \Delta N) U + \Delta U\} \tan \phi' + c' \cdot l}{\sum T - \Delta T} + Pr$$

Nは負の値になる

#### 頭部排土工




Fs=1.000--->1.141 Cutting

末端部を排土したら不安定側にシフトする


38

### 頭部排土工

規模の大きな地すべりでよく用いられる



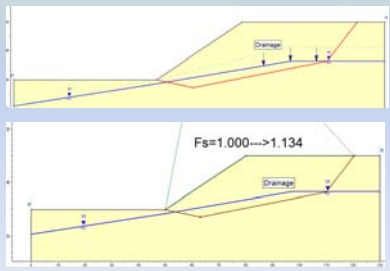
排土工



排土

### 3. + Uの工法 -(U- U)

#### 地下水排除工

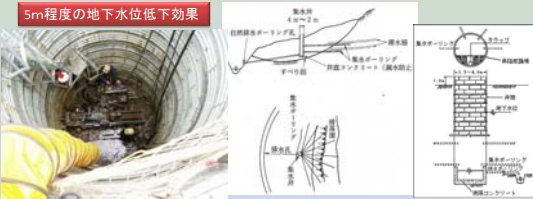
$$\frac{\sum \{(N + \Delta N - U + \Delta U) \tan \phi' + c' \cdot l\} + Pr}{\sum T - \Delta T}$$


Fs=1.000--->1.134 Drainage

40

### 地下水排除工ー集水井工

5m程度の地下水位低下効果




### 地下水排除工ー排水トンネル

8m程度の地下水位低下効果




排水トンネル (勾配: 1/100~1/500)

42

### 4. +Prの工法

$$\frac{\sum [(N + \Delta N - U + \Delta U) \tan \phi' + c' \cdot \delta] + Pr}{\sum T - \Delta T}$$

- 抵抗力(分子)を増やすことによりFs向上

**抑止工**

**グラウンドアンカー工**

43

### 抑止杭工

- 滑り面を貫いて、剛性の高い鋼管杭を挿入する
- 滑り方向に対して直交するように配置する

Support Pile  
Support Type: Micro-Pile  
Out-of-Plane Spacing: 2 m  
Pile Shear Strength: 1000 kN

Fs=1.000---->1.150

44

### 抑止杭工

中詰めコンクリート充填      溶接      杭の建込み

45

### シャフト工(抑止杭)

抑止力が巨大な場合には、大口径の鉄筋コンクリート杭を用いることがある

46

### グラウンドアンカー工

Support: Ground Anchor  
Support Type: Grouted Tieback (with friction)  
Force Application: Passive  
Bond length: 3.000 m  
Out-of-Plane Spacing: 2 m  
Tensile Capacity: 1000 kN  
Plate Capacity: 1000 kN  
Shear Strength Model: Linear  
Grout Diameter: 0.1 m

Fs=1.000---->1.096

Passive Support is included in the Slide analysis as in Eqn.2.

$$P = \frac{\text{resisting force} + T_N \tan \phi + T_S}{\text{driving force}} \quad \text{Eqn.2}$$

where  $T_N$  is the normal component and  $T_S$  is the shear component of the force applied to the base of a slice, by the support.

$T_N \cdot \tan \phi$ : 締付け効果 (法線力の増加効果)  
 $T_S$ : 引止め効果 (接線力の減少効果)

47

### アンカー工

削孔(φ100mm前後)      テンション挿入

グラウト注入      緊張(100kN~1000kN)

48

Tsを分子に加えるということをして日本ではやっているが、これは世界の趨勢とは異なる。



### 不安定岩盤を固定する(アンカー)

49

### その他の抑止工

- 法面保護工(表層崩壊防止・風化防止)
  - モルタル吹付工
  - 法枠工
  - 鉄筋挿入工

50

### 吹付け法枠工

緑色のところは植生工(侵食防止)

大きく網をかぶせて、小さな崩壊を周りの法枠工が支える

51

### 鉄筋補強土工(法枠付き)

施工足場

法枠工と鉄筋補強土工の併用は多い

鉄筋のヘッドキャップが出ている

鉄筋の引抜抵抗で補強。2m程度までの小崩壊対策として用いられる。

52

### 滑り面がまだ無い斜面の設計

#### 鉄筋補強土工などの設計

#### 表層崩壊の防止工法

53

地震時の宅地盛土補強の計算書

### 5. - Tの工法

$$\frac{\sum \{(N + \Delta N - U + \Delta U) \tan \phi' + c' \cdot l\} + Pr}{\sum T - \Delta T}$$

Support: Ground Anchor  
Support Type: Grouted Tieback (with friction)  
Force Application: Active  
Bond length: 3.000 m  
Out-of-Plane Spacing: 2 m  
Tensile Capacity: 1000 kN  
Plate Capacity: 1000 kN  
Shear Strength Model: Linear  
Grout Diameter: 0.1 m

Active Support is included in the Slide analysis as in Eqn.1.

Eqn.1

where  $N^s$  is the normal component and  $T_s^s$  is the shear component of the force applied to the base of a slice, by the support.

$T_n \cdot \tan \phi$ : 締付け効果 (法線力の増加効果)  
 $T_s$ : 引止め効果 (接線力の減少効果)

54

分母からTsを引く、この式が正しい。

原理的には — Tが正しい

Active式  

$$F = \frac{\{\Sigma(W \cos \theta - U) + P \cos(\alpha - \theta)\} \tan \phi + \Sigma c}{\Sigma W \sin \theta - P \sin(\alpha - \theta)}$$

Passive式  

$$F = \frac{\{\Sigma(W \cos \theta - U) + P \cos(\alpha - \theta)\} \tan \phi + P \sin(\alpha - \theta) + \Sigma c}{\Sigma W \sin \theta}$$

実際の地すべり対策工は  
様々な工法が併用されている

動画だが、pdfなので動かない

7. 人工地盤の地震時地すべりと対策工

動いたのはどっち？

兵庫県南部地震の被災記録  
(京大防災研 釜井先生の資料より)

奥の宅地が動いた。電柱と道路は動いていない。

予測方法

阪神間データセット → データは盛土形状のみ！

② 数量化 類解析法 [小数による点数法] (変動確率)

③ 側方抵抗モデル [力学モデルの体裁] (安全率)

学習効果 → 柏崎・長岡データセット → 事例が増えれば増えるほど賢くなる

側部抵抗を考慮した3次元法の超簡略版で計算するのが合理的(事前に得られる情報は限られているので)

予測結果

地点	安定度	変動確率	側方抵抗モデル
1 緑ヶ丘3丁目上	4.1	2.0	1.15
2 緑ヶ丘3丁目中	2.5	2.0	0.88
3 緑ヶ丘3丁目下	0.85	0.25	0.81
4 緑ヶ丘4丁目	1.0	—	—
5 緑ヶ丘5丁目	1.0	0.41	1.11
6 緑ヶ丘6丁目	0.9	1.0	1.00
7 緑ヶ丘7丁目	1.0	1.25	1.01
8 緑ヶ丘8丁目	2.2	0.45	0.86
9 緑ヶ丘9丁目	—	—	—
10 緑ヶ丘10丁目	—	—	—
11 緑ヶ丘11丁目	7.1	1.25	1.15
12 緑ヶ丘12丁目	4.1	0.25	0.84
13 緑ヶ丘13丁目	7.1	0.21	1.12
14 緑ヶ丘14丁目	2.5	0.21	2.07
15 緑ヶ丘15丁目	4.1	0.25	1.08
16 緑ヶ丘16丁目	7.1	0.21	1.20
17 緑ヶ丘17丁目	7.1	0.20	1.10
18 緑ヶ丘18丁目	1.0	0.20	1.50

① ガイドライン点数法 (変動確率) ほとんど当たらない

② 数量化解析法 (変動確率) あまり当たらない

③ 側方抵抗モデル (安全率・変動指数) よく当たる

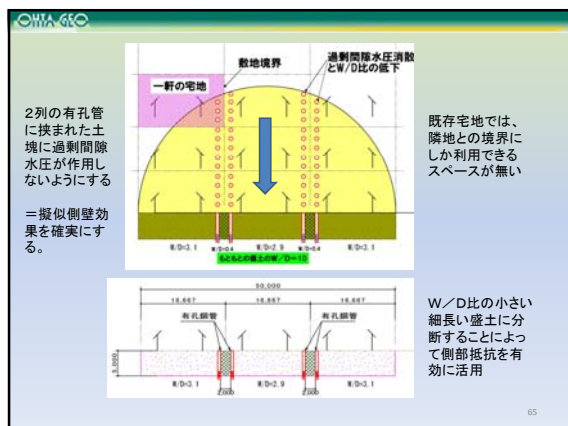
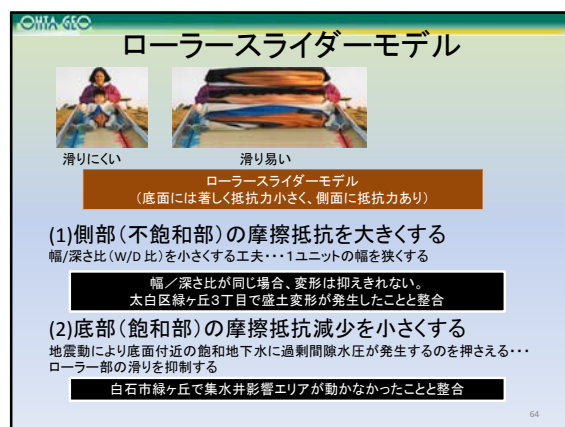
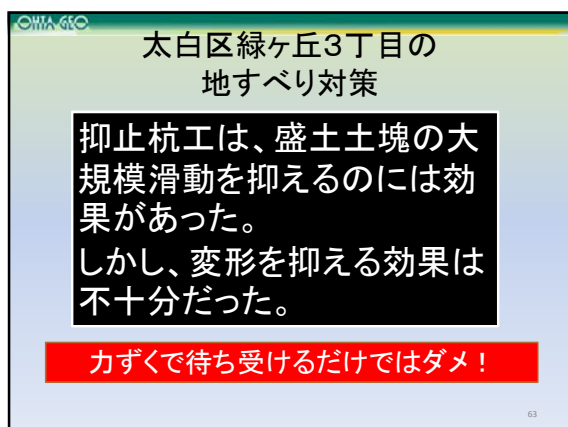
仙台市太白区周辺で、3/11の地震の「前」に試行的に予測されていた安定度。側方抵抗モデルはよく当てている。

太白区緑ヶ丘3丁目の地すべり対策

1978年地震後、これ以上ないというレベルの「地すべり対策工」が行われたが、変形は止められず、家屋は破壊された。



従来から用いられてきた待ち受け型の「地すべり対策工」では宅地盛土の対策工としては不十分なことが、明確に証明された。いろいろなところから出ている報告書は全面的に書きなおしが必要。



従来の「地すべり対策工」にローラーライダーモデルの考え方は一切入っていない。なぜならこれは簡単な考え方だが「3次元法」だから。これまでの地すべり学では、2次元法ですべてが解決するというあり得ない仮定を検証せずに利用してきた。

滑りを止めるのではなく、滑らない・変形もしない盛土に「体質改善する」という発想が必要。それには、「滑動しなかった盛土のようにする」という発想が必要。