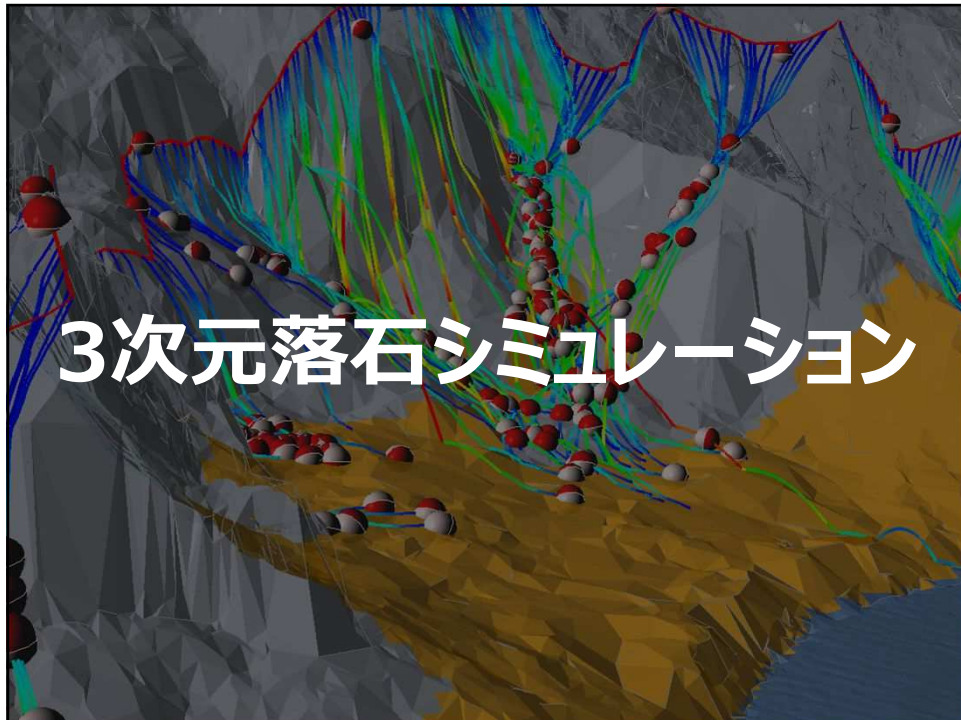


3次元落石シミュレーション 及び 3次元安定解析

(有) 太田ジオリサーチ 美馬 健二

1



2

そもそも落石シミュレーションはどのような時に用いられているのか？

落石シミュレーションは、落石対策の検討に用いられる。落石対策には、落石の経路、跳躍高、衝撃力等の評価が必要である。落石経路によっては、落石対策工を要し、跳躍高や衝撃力に応じて、工法の規格が選定される。

実務では、これらを経験則で求めることもあるが、例えば複雑な地形であったりすると、経験則が妥当ではないことも多い。このような場合に、落石シミュレーションが適用される。



待ち受け型の落石対策工

3

なぜ「3次元」落石シミュレーションを用いるのか？

従来の落石シミュレーションといえば、2次元落石シミュレーションである。

しかし、落石シミュレーションで得られる跳躍高や衝撃力は、地形の凹凸等の影響を受けやすく、複雑な地形の場合は、2次元落石シミュレーションで正確な結果を導くことは困難であった。

落石が懸念されるような自然斜面は、複雑な地形を呈していることが多く、落石現象を再現させるには、「3次元落石シミュレーション」を行う方が合理的である。

近年、測量技術が急速に向上しており、数cmといった高密度で凹凸を表現できる3次元地形点群データを取得できるようになった。

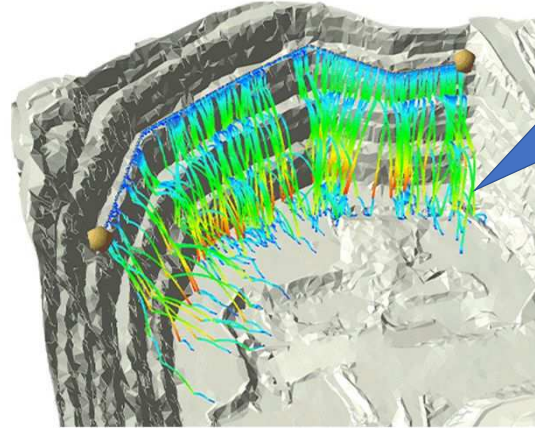


実測の高密度な3次元点群データを用いて3次元落石シミュレーションを実施できるようになった。

4

3次元落石シミュレーションの概要

3次元落石シミュレーションソフト: Rocscience社の「RocFall3」



膨大な数の落石を一気にシミュレーションできる。

3次元落石シミュレーション例

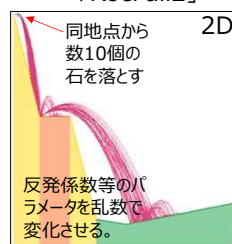
- ① 落石到達地点
- ② 落石の衝撃力の大きい箇所
- ③ 落石の跳躍高が高い箇所

簡単に可視化できる。

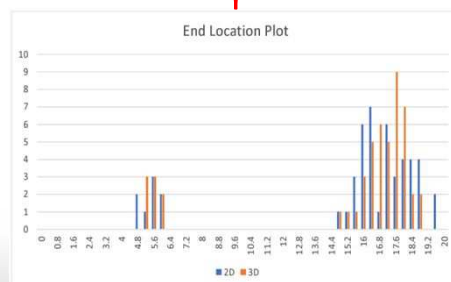
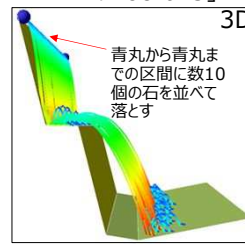
5

2次元と3次元落石シミュレーションの違い

2次元落石シミュレーションソフト
「RocFall2」



3次元落石シミュレーションソフト
「RocFall3」

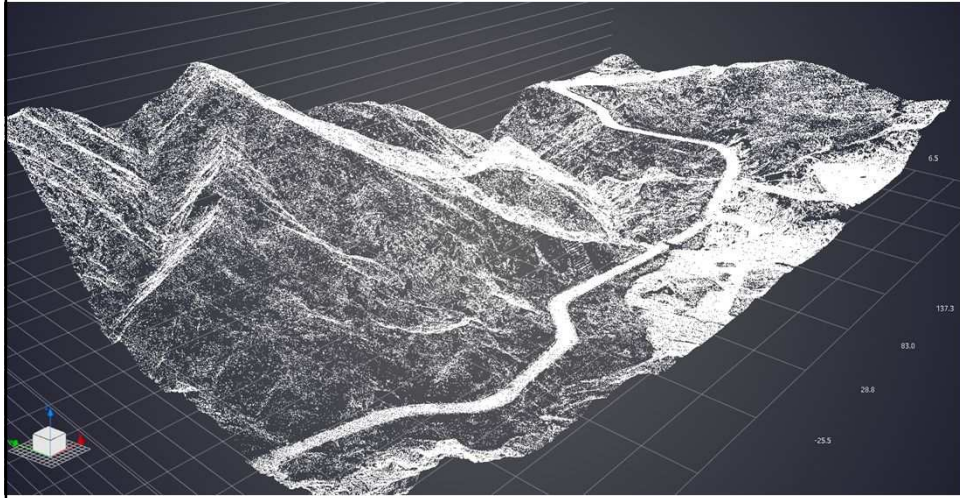


統計にすると、
2次元も3次元も落石の到達地点の頻度分布はほぼ同じ

2次元と3次元落石シミュレーション落石の到達地点の比較

6

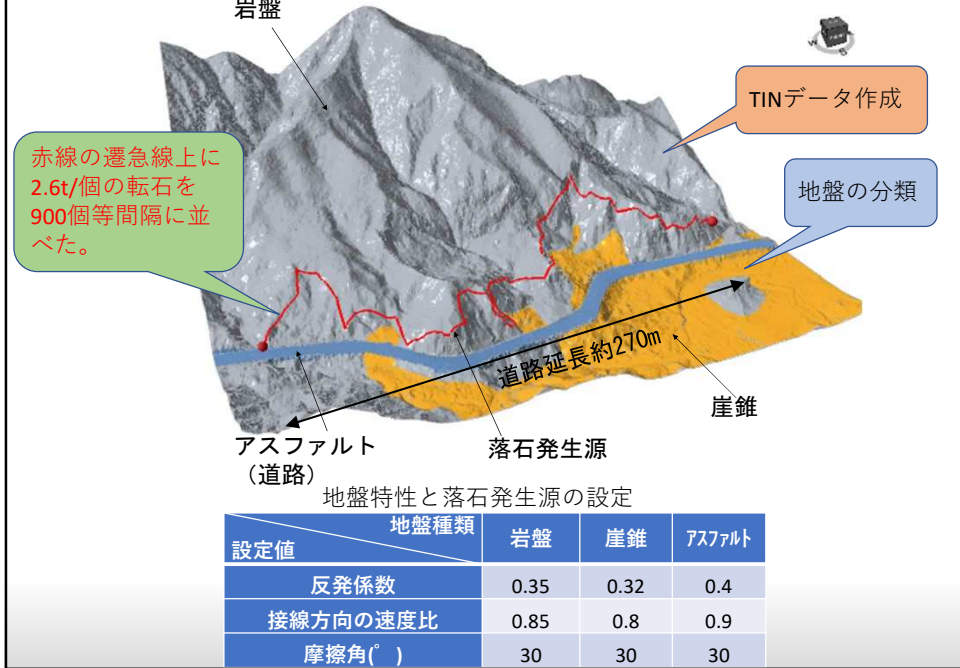
3次元落石シミュレーションに用いた実測の点群データ (保全対象を道路とした事例)



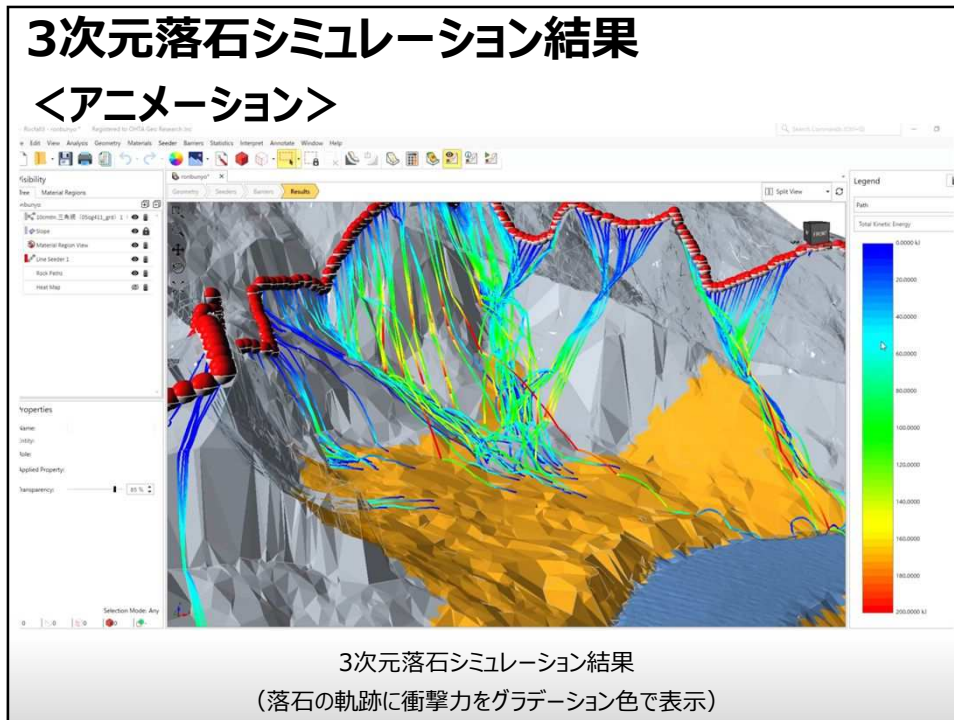
LPで取得した0.1~4.0m間隔の点群 (DEM) データ

7

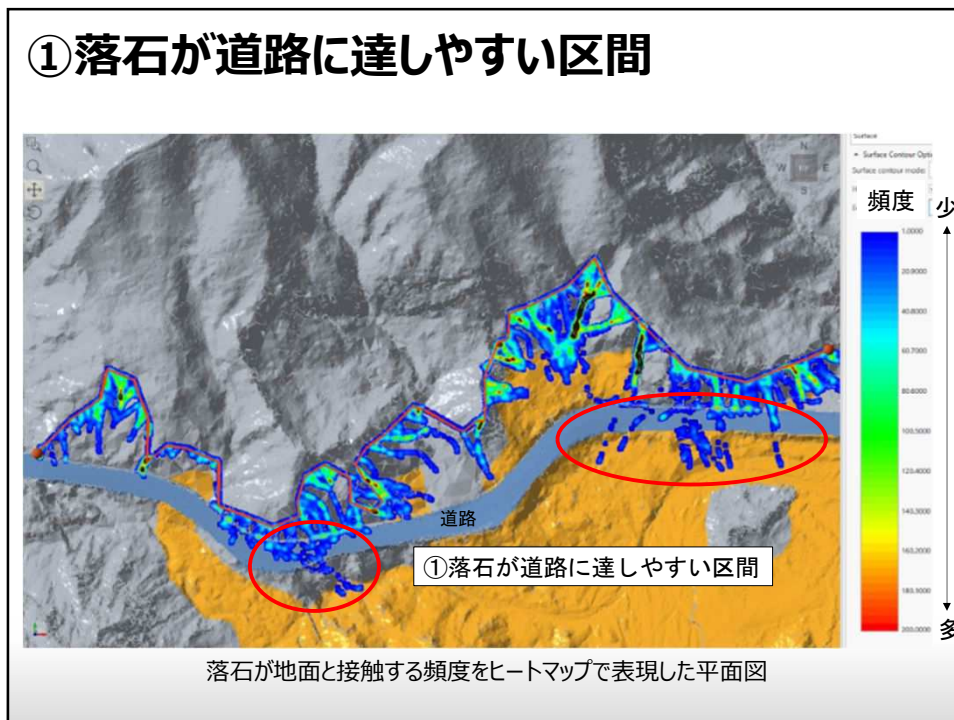
3次元落石シミュレーションの設定



8

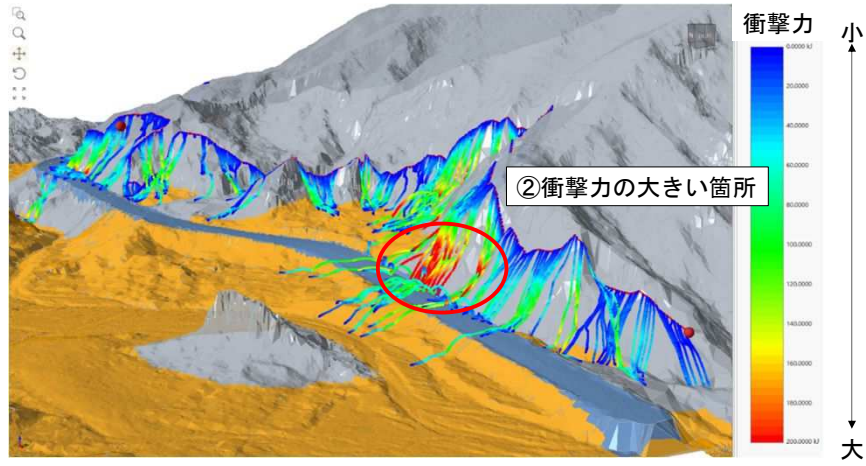


9



10

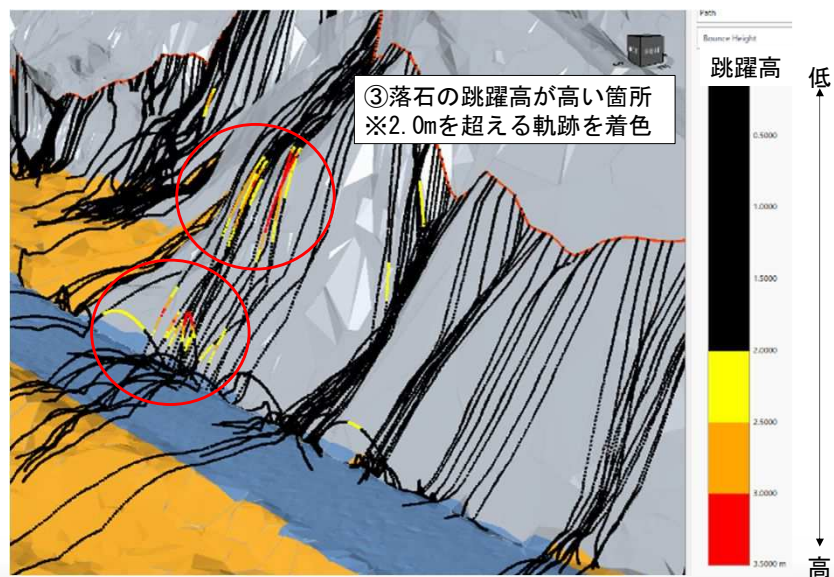
② 落石の衝撃力



落石の軌跡に衝撃力をグラデーション色で表示

11

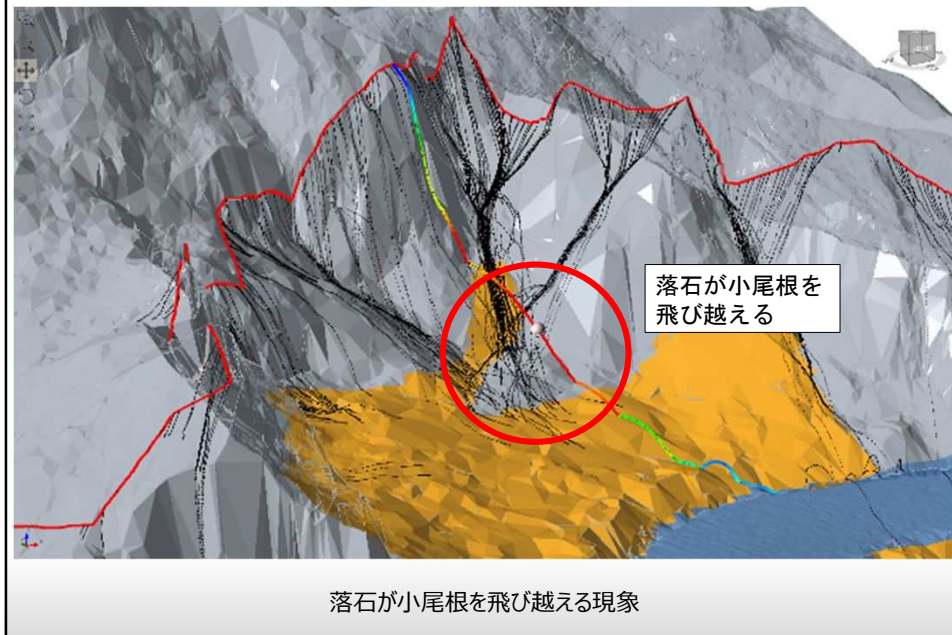
③ 落石の跳躍高



落石の軌跡に衝撃力をグラデーション色で表示

12

④複雑な地形での解析

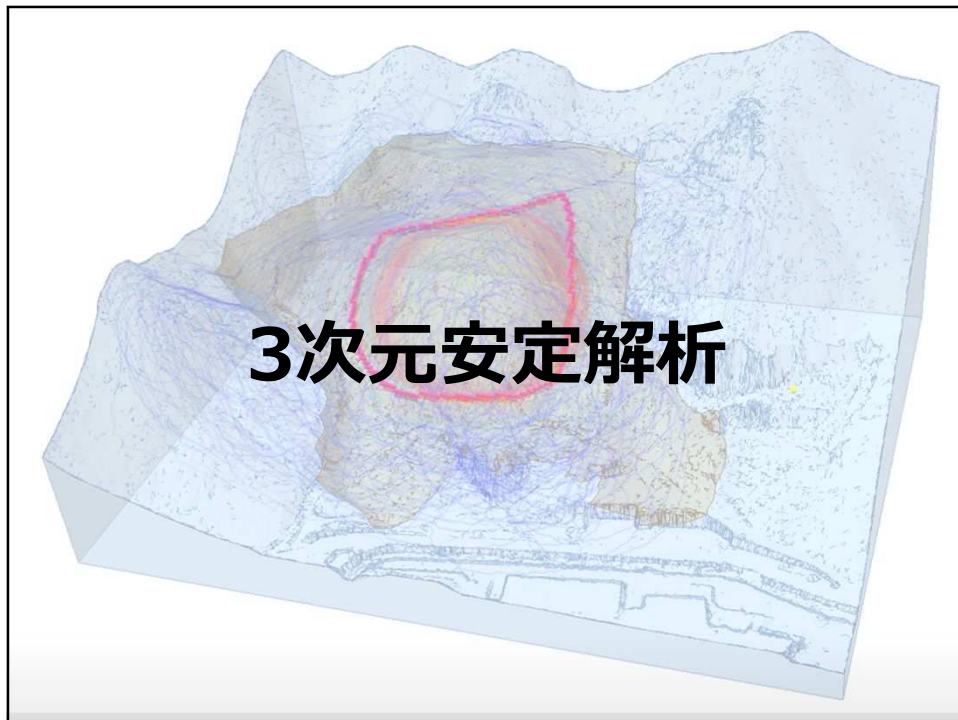


13

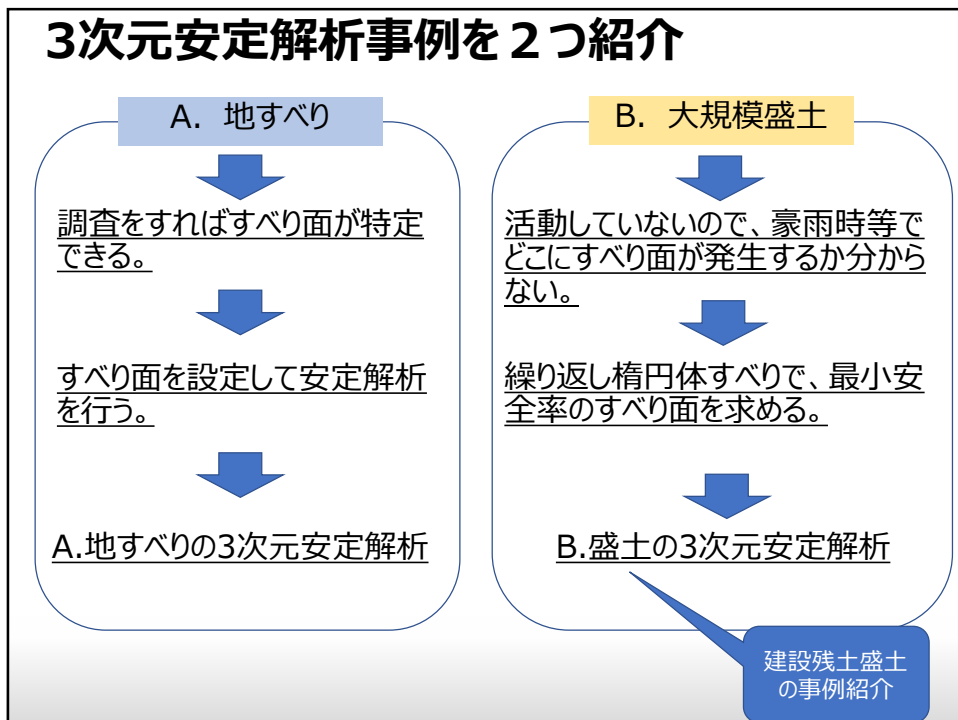
3次元落石シミュレーションのまとめ

- ・3次元落石シミュレーションは、2次元落石シミュレーションでは適用困難な複雑な地形に対応できる。
- ・点群データを用いることで、3次元落石シミュレーションの精度が高められる。
- ・3次元落石シミュレーションは、膨大な数の落石シミュレーションが簡単にできる。
- ・3次元落石シミュレーションで、下記を可視化することができる。
 - ①落石が道路に達しやすい区間
 - ②落石の衝撃力の大きい箇所
 - ③落石の跳躍高が高い箇所
- ・落石対策の必要な範囲及び規格を合理的に選定することができる。

14



15



16

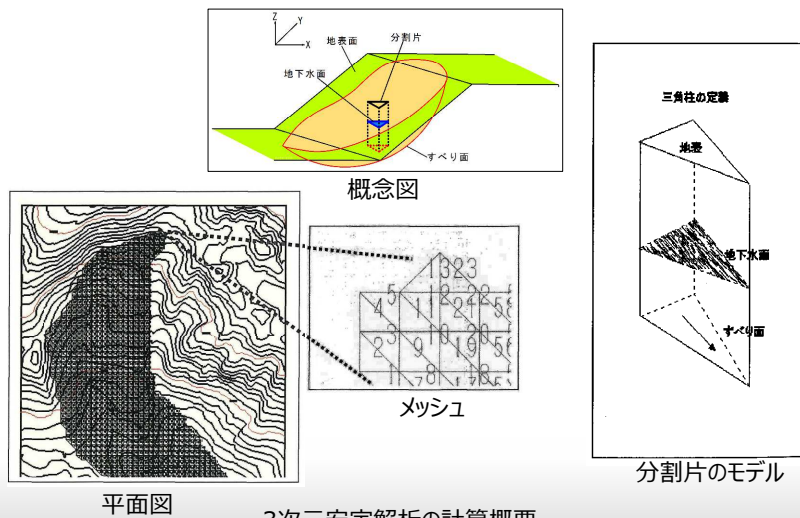
A. 地すべりの3次元安定解析

17

3次元安定解析の計算

3次元安定解析は、1977年にH.John.Hovlandにより考案され、我が国では1985年頃から3次元安定解析が事例として報告されるようになった。

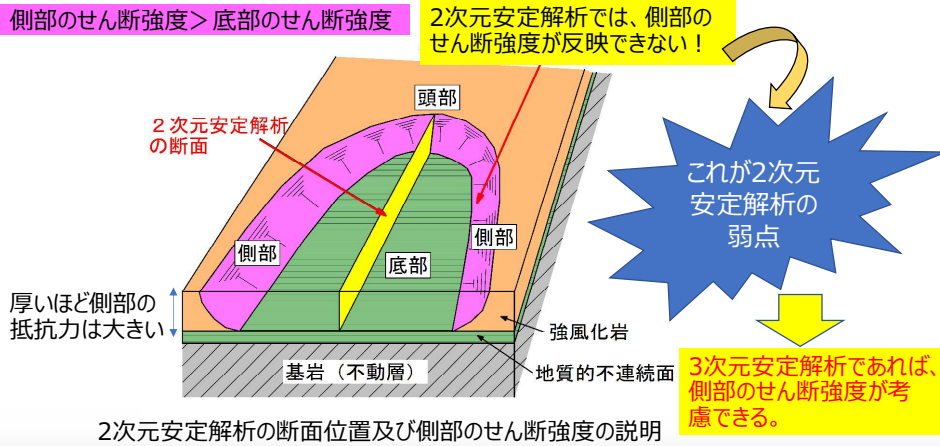
そして、2000年頃から、実測の土質試験値を用いた3次元安定解析が報告されるようになった。



18

3次元安定解析の特徴

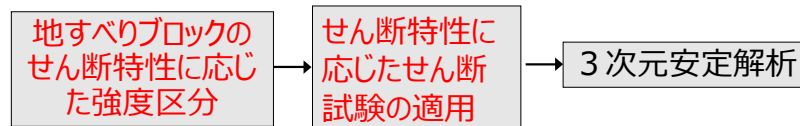
なぜ、3次元安定解析を必要とするのか？



19

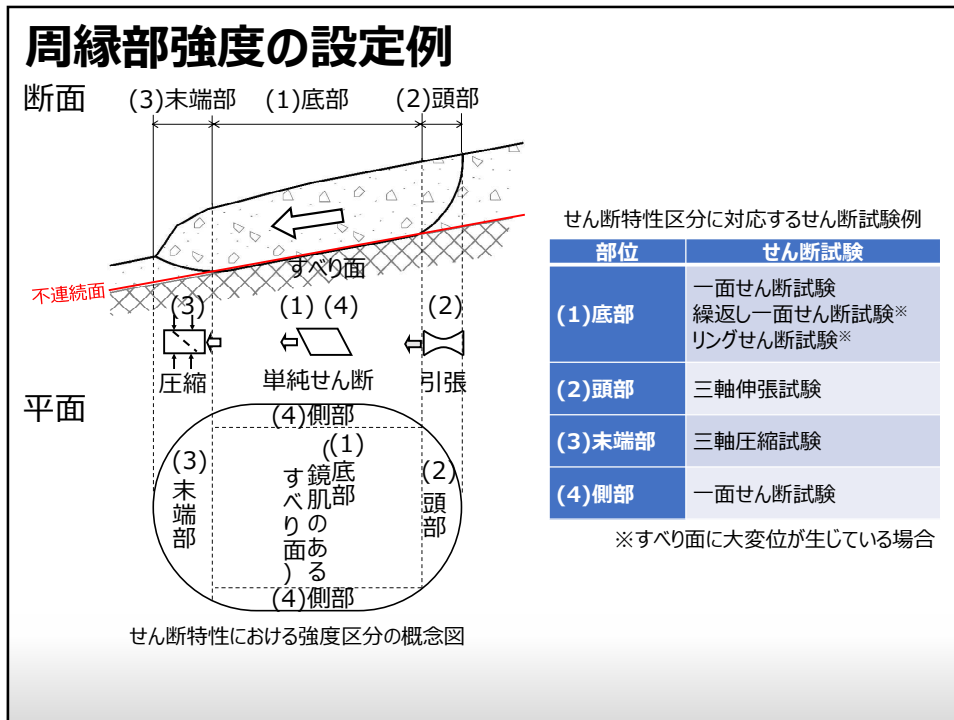
3次元安定解析適用の留意点

周縁部（側部+頭部）のせん断強度を考慮することが重要。

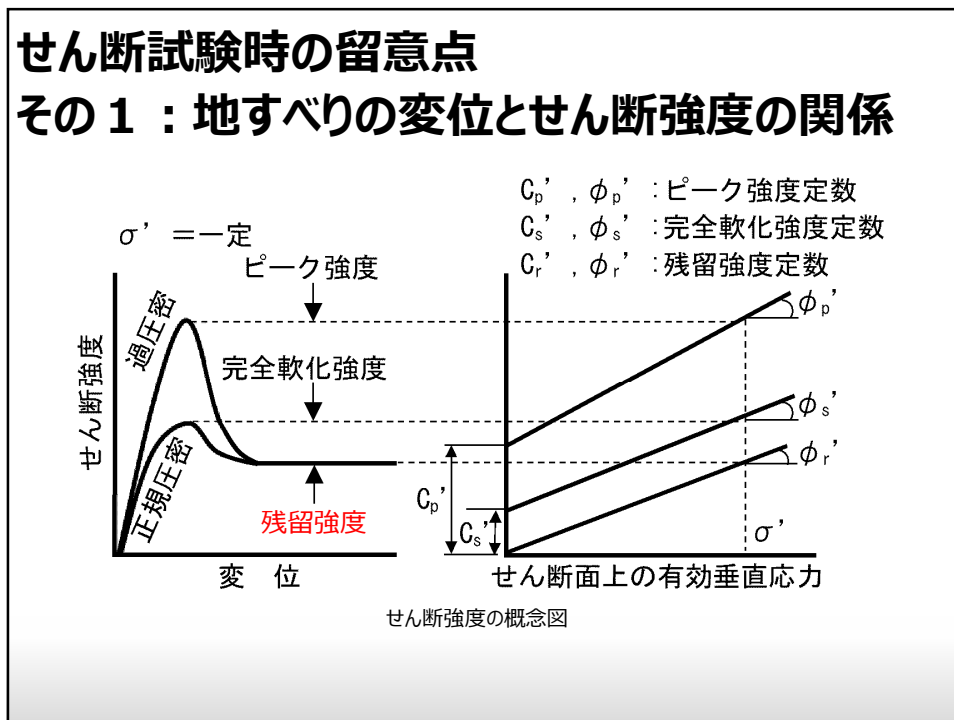


実際の地すべりで実施した結果を報告

20



21



22

せん断試験時の留意点 その2：排水条件

圧密と排水条件

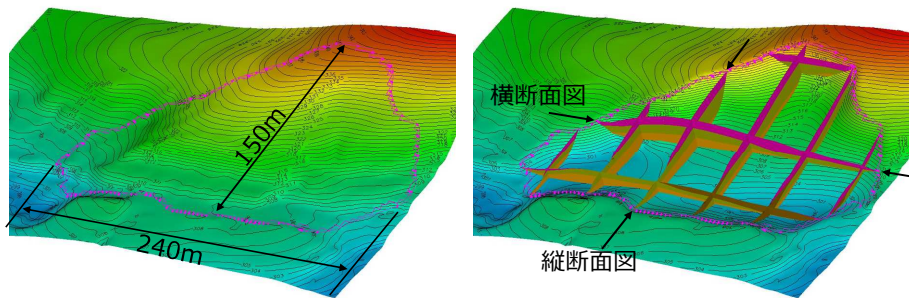
圧密・排水条件
非圧密非排水 (UU) 条件
圧密非排水 (CU・ \overline{CU}) 条件
圧密排水 (CD) 条件

地すべりの場合、通常どちらかを適用

一般に地すべりの移動速度は遅いため、排水条件で設定する場合が多い。

23

対象地すべり



地表面 (左) と地すべり土塊断面 (右)

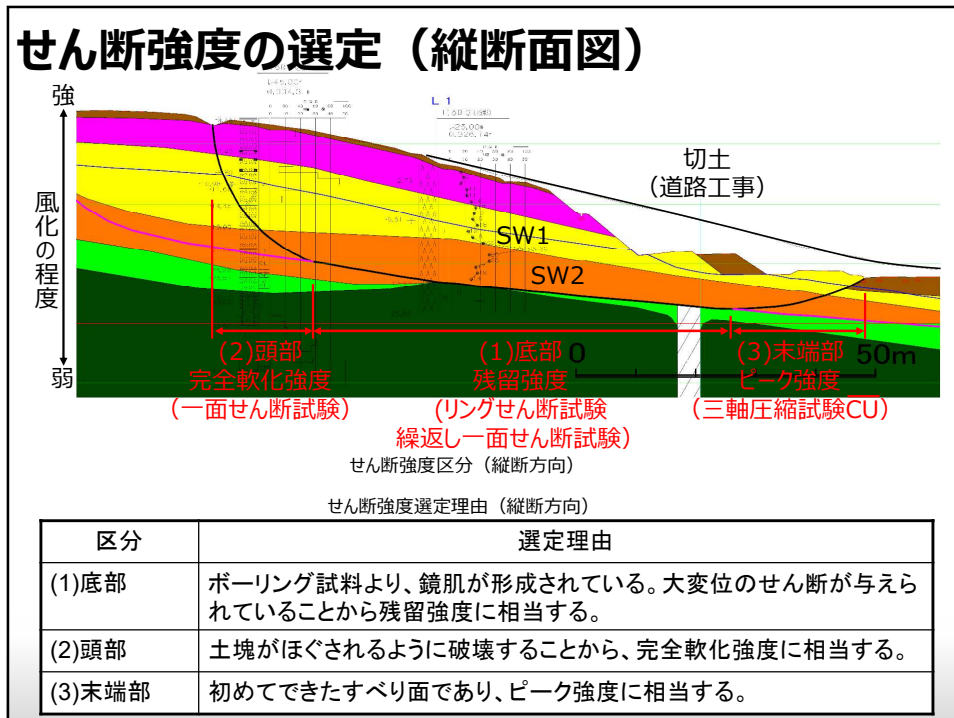
対象地すべりの概要

地質	安山岩
地すべり規模	幅: 約240m 長さ: 約150m 最大厚さ: 約20m
地すべり形態	縦・横断方向ともに船底型

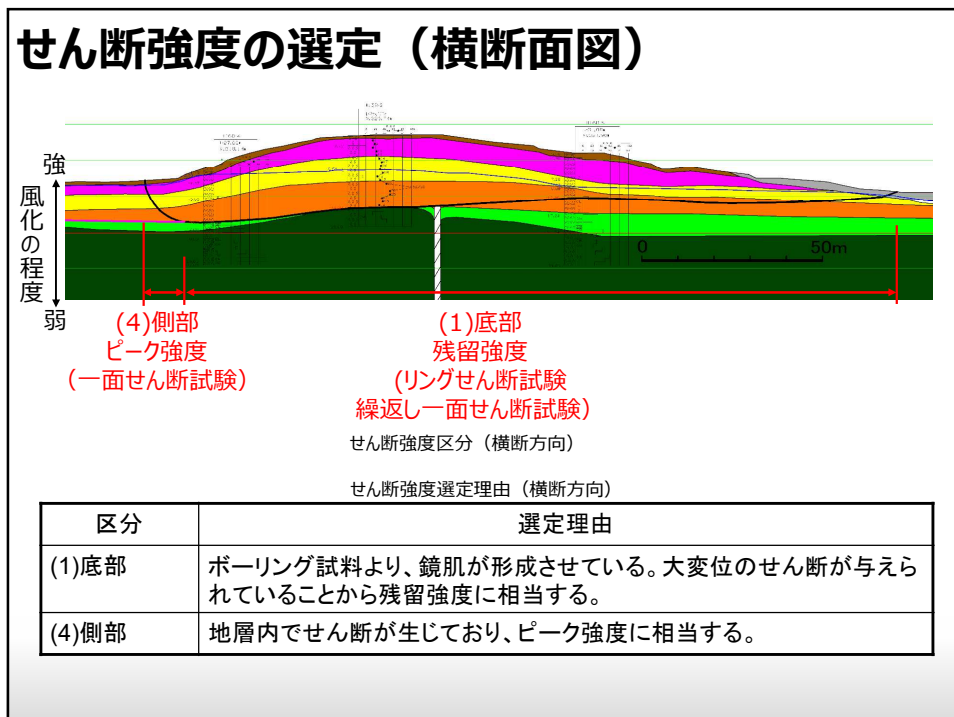
融雪期に数mm滑動

安全率 \approx 1.0

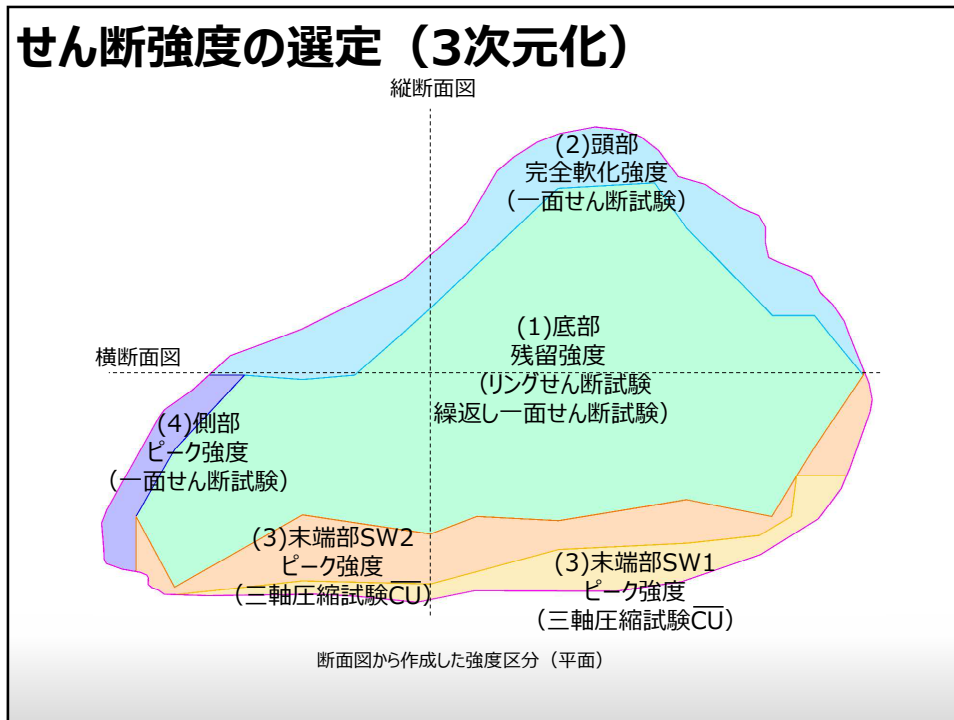
24



25



26



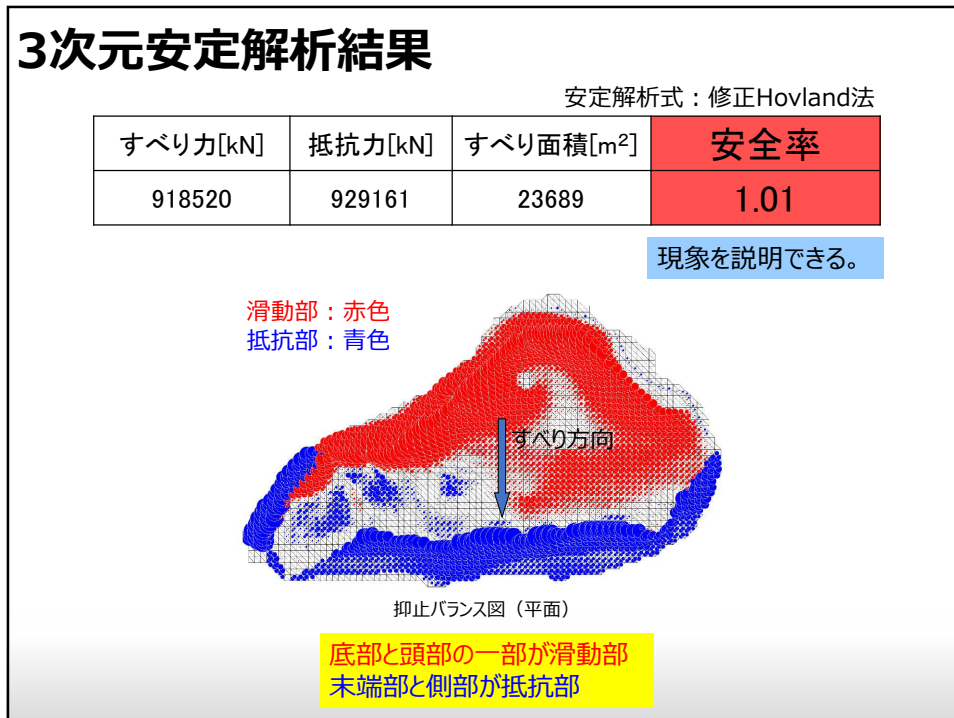
27

せん断試験結果

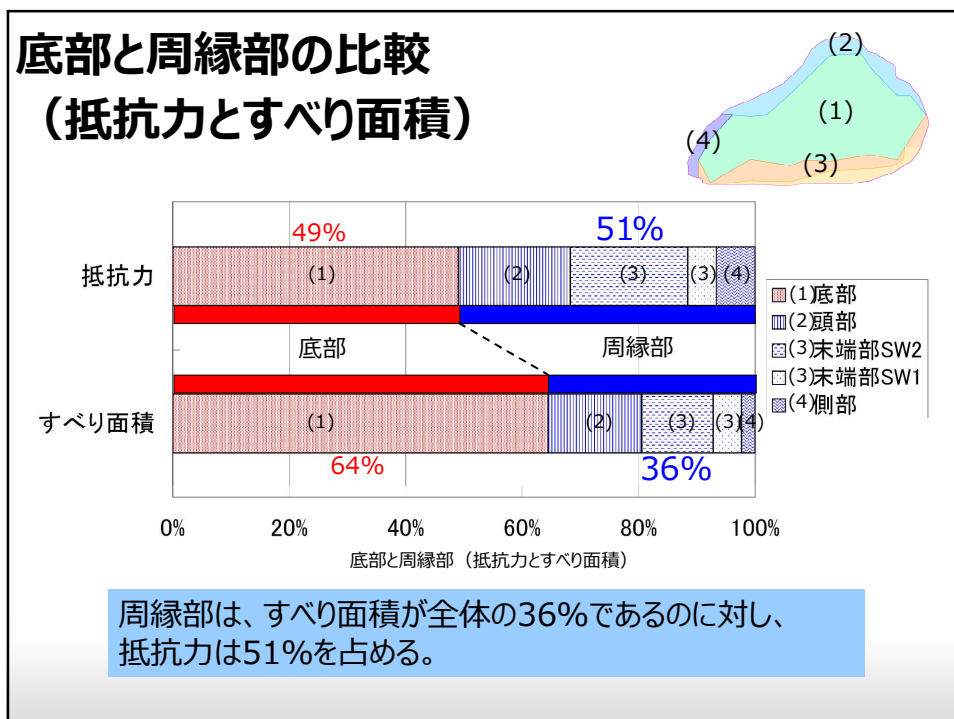
区分と土質試験結果

区分	土質試験	せん断強度	ϕ [°]	c[kPa]
(1) 底部	一面せん断試験 リングせん断試験	残留強度	10.56	0.0
(2) 頭部	一面せん断試験	完全軟化強度	24.77	14.7
(3) 末端部(SW2)	三軸圧縮試験 $\bar{C}U$	ピーク強度	35.35	23.3
(3) 末端部(SW1)	三軸圧縮試験 $\bar{C}U$	ピーク強度	31.95	15.0
(4) 側部	一面せん断試験	ピーク強度	18.42	96.8

28



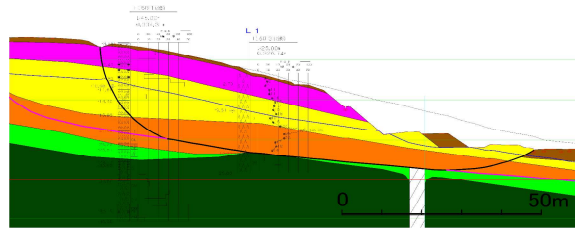
29



30

仮に2次元安定解析をすると、

安全率 $F_s \approx 1.0$ になるはずだが、



2次元モデル

2次元安定解析結果

強度定数	ピーク強度	完全軟化強度	残留強度
安全率	3.32	1.89	0.65

過大

過大

過小

現象を説明できない。

31

地すべりの3次元安定解析のまとめ

- ・順算の2次元安定解析では、現象を説明できる安全率を得られない。
- ・周縁部強度を考慮して3次元安定解析を行えば、現象を説明できる安全率 (=1.01) を得ることができた。
- ・周縁部は、すべり面積が全体の1/3程度であるのに対し、抵抗力は約半分占めており、影響力は大きい。
- ・土質力学（せん断試験）の知識が必要。

32

B. 盛土の3次元安定解析

33

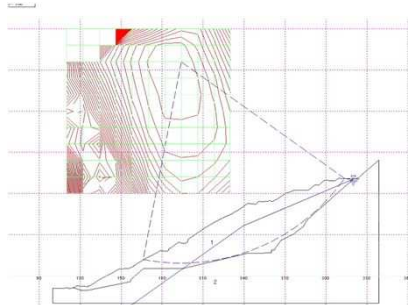
すべり面の探索

盛土の場合、普段は滑動していないので、豪雨時にはどこがすべり面になるのかが分からない。



このような場合は、

繰り返し円弧すべり法で、滑りやすいすべり面形状を求めることが多い。



2次元安定解析による繰り返し円弧すべり法

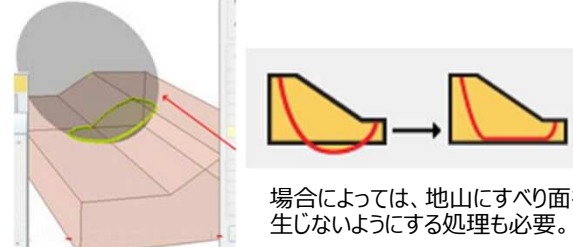
すべり面は3次元形状なのに、2次元のすべり面で最終的に評価して良いのでしょうか？

円弧1つずつ安定計算を行い、最小安全率となる円弧すべり面を最も滑りやすいすべり面形状として、最終的な斜面の安定度評価に用いられることがある。

34

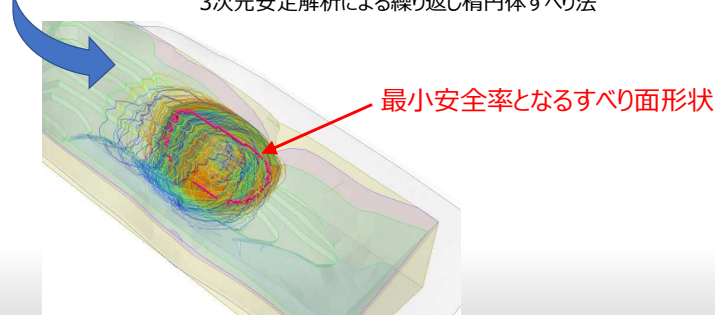
3次元すべり面の探索

3次元安定解析の場合は、球や楕円体ですべり面を探索する。



場合によっては、地山にすべり面を生じないようにする処理も必要。

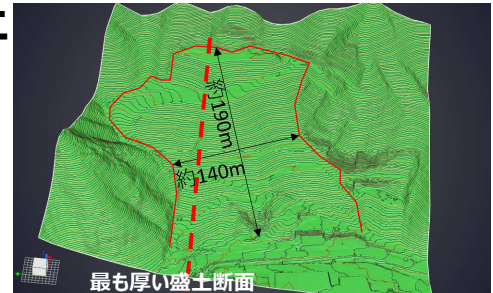
3次元安定解析による繰り返し楕円体すべり法



最小安全率となるすべり面形状

35

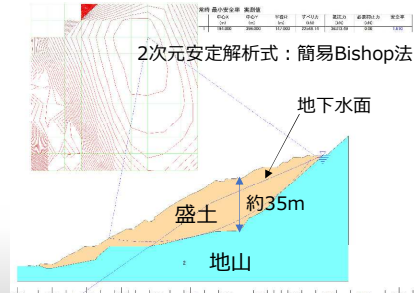
対象盛土



最も厚い盛土断面

LPによる点群データで地形面を作成

盛土の土質	礫質土
土の湿潤単位体積重量 γ (kN/m ³)	19.16
土の飽和単位体積重量 γ_{sat} (kN/m ³)	20.01
粘着力 c (kN/m ²)	25
せん断抵抗角 ϕ (°)	24.9



2次元安定解析式：簡易Bishop法

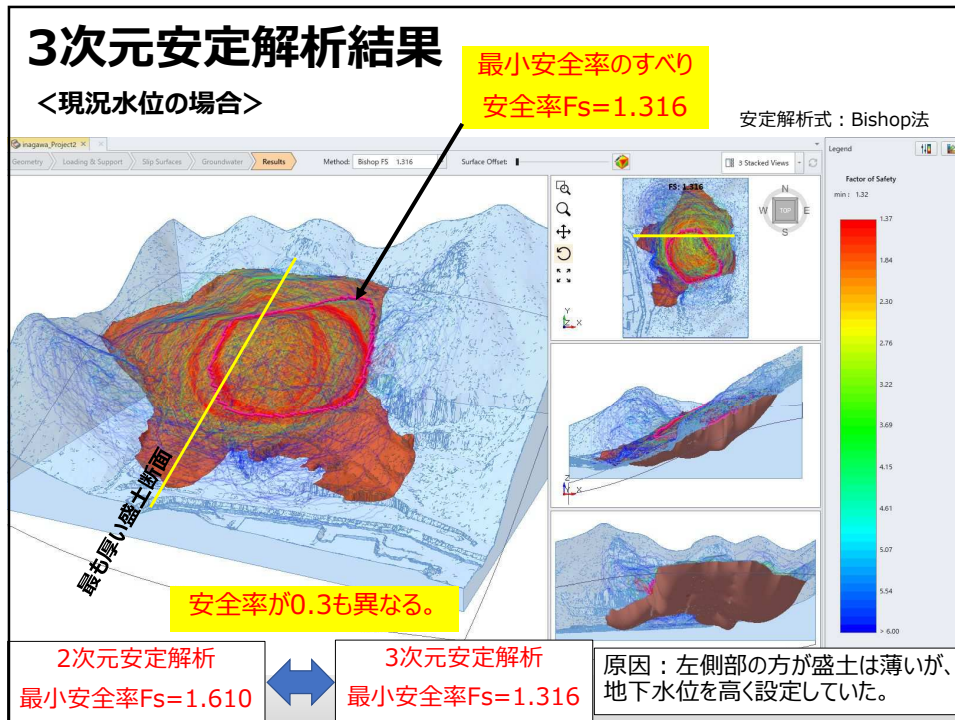
地下水面

盛土 約35m

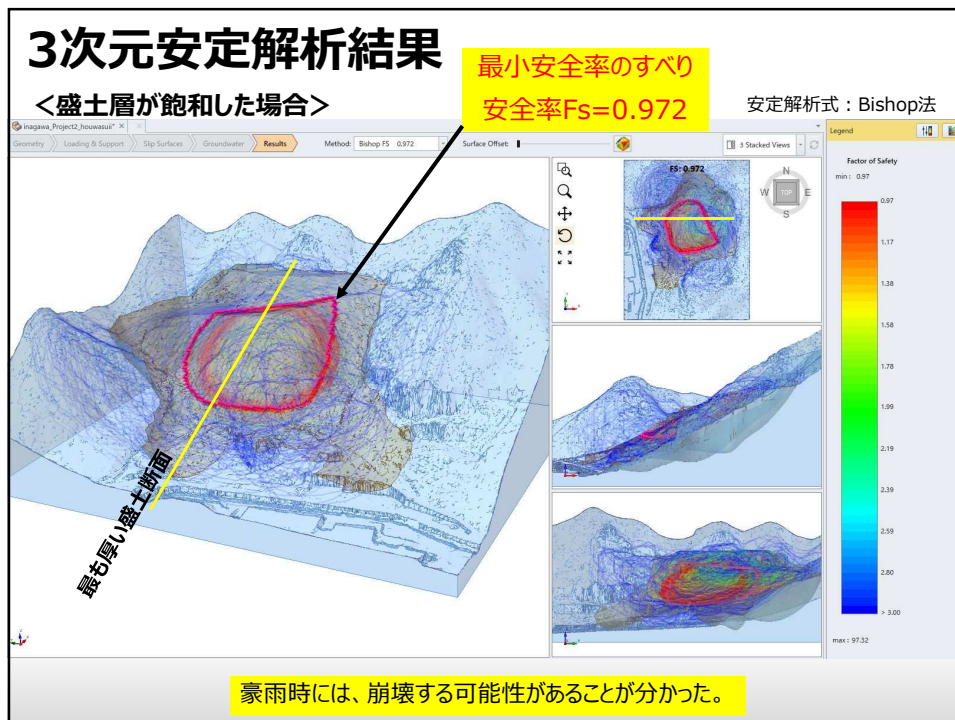
地山

※ c, ϕ は、三軸圧縮(CU)試験の結果
 <参考>
 現況地下水位での2次元安定解析結果
 安全率 $F_s = 1.610$

36



37



38

大規模盛土の3次元安定解析のまとめ

- ・繰り返し楕円体すべりによる3次元安定解析で、盛土内の不安定な部分を抽出することができる。
- ・3次元安定解析の最小安全率が、2次元安定解析の最小安全率より小さくなる場合があることが分かった。原因は、2次元安定解析の断面位置を、地下水位を考慮せず、盛土厚が最も厚い箇所にしてたためである（盛土厚が薄く、地下水位が高い箇所が安全率が小さくなる）。
- ・大規模盛土は、豪雨で飽和状態になると、安全率1.00を下回る場合がある。