

CIM時代の3D急傾斜地調査・解析方法

3D steep slope Survey / Analysis method in the CIM era

太田英将*, 美馬健二, 川浪聖志 (有限会社太田ジオリサーチ)

Hidemasa OHTA, Kenji MIMA, Seishi KAWANAMI (Ohta Geo Rsearch)

キーワード: CIM, 土層強度検査棒, 3次元調査, 3次元安定解析

Keywords: Construction Information Modeling, Soil Strength Probe, 3D survey, 3D slope stability analysis

1 はじめに

地盤調査も3次元地盤モデリング(CIM)が標準となる時代になってきている。しかし、現実の調査はいまだに「2次元代表断面」による手法が主流である。

その理由として、斜面調査・解析における「伝統的手法」の存在があげられる。すべり面形状を「仮定」し、斜面の現状安全率を「仮定」し、間隙水圧を「想定」し、すべり面強度を「逆算」し、所定の「計画安全率」になるための「必要抑止力」を算定する、といった一連の方法に慣れすぎていることがある。

3次元モデル化や3次元安定解析を拒絶する議論はほとんど存在しないが、「3次元安定解析には経験的に導かれた計画安全率がない」ということで否定されることがある。

しかし、時代はすべて3次元化に向かっており、これは確実に不可逆的なトレンドである。いつかすべてが3次元になるのなら、3次元物体である「重力移動地質体」¹⁾を扱う地すべり技術者が率先して新しい時代に踏み込むべきであろう。

本発表では、土砂災害警戒区域の指定によって、今後激増することが予測される民間所有地も含めた表層崩壊(崖崩れ)の調査・対策において、3次元地盤モデルを構築して3次元安定解析を行う手順を提案するものである。

2 急傾斜地地盤の3次元調査

急傾斜地調査(いわゆる崖地調査)では、地盤構成はかなり単純である。基盤層(不動層)と表層土砂層(被覆層)の二層構造であることが多い。また、表層土砂層の厚さも1~数mと浅いことが多い。

一方、表層土砂層の厚さは一様ではないことが多く、現実問題として複雑な3次元構造から「単純な2次元代表断面」を選択すること自体が容易ではない。わざわざこのような難題に挑戦しなくても、3次元構造を3次元構造のまま処理するのが合理的であるし、簡単だ。

2.1 少数精密調査から全域調査への評価軸の転換

3次元地盤モデルを作成する上では、ピンポイントで正確なボーリングよりも、広域の表層土層厚を面的に計測することが重要である。

ボーリング調査のような「単点の正確さ」から「広域を簡便に」への評価軸の転換²⁾をすれば、急傾斜地の2層地盤3次元モデル化が容易にできる。ツールとしては土層強度検査棒(SSP)³⁾を用いる。

【手順1】土層強度検査棒限界深度試験を用いて面的に土層深を計測し、土層深グリッドモデル(以下GMと略す)を作成する。地表面GM—土層深GMにより、基盤岩GMを計算する。これで2層構造の3次元地盤モデル(CIM)ができる(図1参照)。

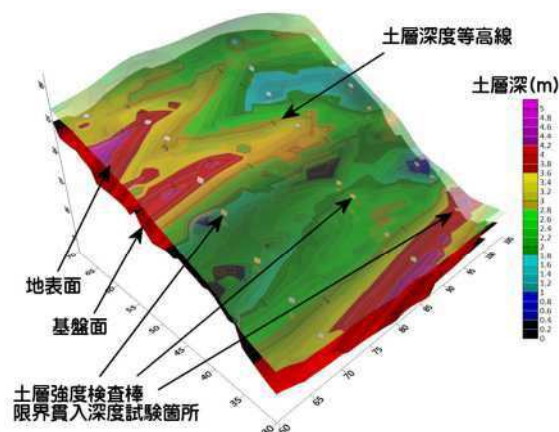


図1 土層深平面分布図と基盤岩形状

【手順2】同じ土質とみなせる場所で土層強度検査棒ベーンコーン強度試験を実施し、表層土砂層の地盤強度とバラツキ(標準偏差 σ)を得る。また、ステンレス円筒を用いて単位体積重量を計測し(湿潤重量)、その試料を水浸させて気相部分を水で満たし飽和重量を計測する。

以上のわずか2ステップで急傾斜地の3次元地盤モデル(土層構成と地盤定数モデル)を作成することができる。1~2点のボーリング調査による地盤モデル化と比べて、3次元的に詳細な地盤モデ

ルが構築できる。

3 繰り返し3次元(楕)円弧スベリ解析

3次元地盤モデルができたなら、わざわざ2次元断面法による安定計算をしなくても、3次元解析をするほうが合理的である。それが容易にできるツールも市販されていることから、徐々に地盤技術者も考え方を変わっていくべき時期に来ている。

3.1 地下水面の設定方法

地中でどのように間隙水圧が発生し作用しているのかは、崖崩れ対策ではかなりの部分を「想像」で行っているのが実態である。

筆者は、無降雨時は飽和地下水がほとんど存在していないことから、降雨時の浸透水が基盤岩から同じ厚さで飽和地下水面を形成すると仮定して、基盤岩 GM+水位上昇高で地下水水面 GM を作成している(図2参照)。

記録的豪雨時に発生する過剰間隙水圧を考慮する場合は、別途その水圧を設定する⁴⁾。

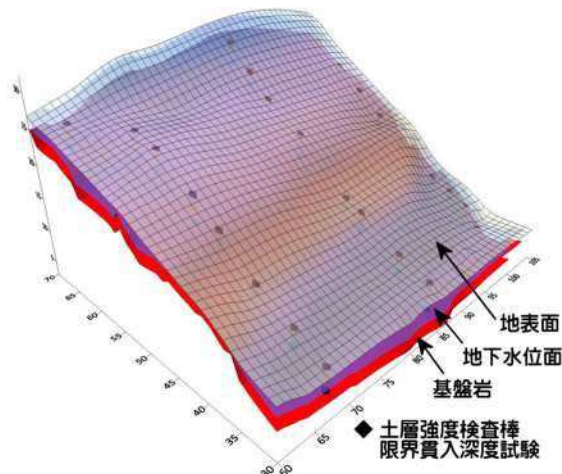


図2 地下水面の設定図

3.2 計画安全率から崩壊確率へ評価軸の転換

2次元の円弧スベリ計算と同様に、3次元の円弧(または楕円弧)スベリ計算も現在は市販ソフト(Rocscience社のSlide3など)があるので問題なく計算できるが、課題は3次元法には「日本固有」の計画安全率が存在しないことである。このため対策工の設計ができない。おそらくこれは永遠に解決できない問題なので、深追いせず評価軸を転換することが現実的だ。

新しい評価軸は、論理性に欠ける計画安全率を閾値とするのではなく、抵抗力と滑動力が拮抗する安全率1を閾値とすることである。安全率1は、

2次元も3次元も関係なく世界共通の閾値だ。

具体的には、土層強度検査棒で実測した地盤強度($c \cdot \phi$)が正規分布となると仮定し、値をばらつかせて計算し、安全率Fsが1.0を下回る頻度を「崩壊確率」とする(図3参照)。この崩壊確率と保全対象の重要度によって斜面对策規模を「さじ加減」するのである。

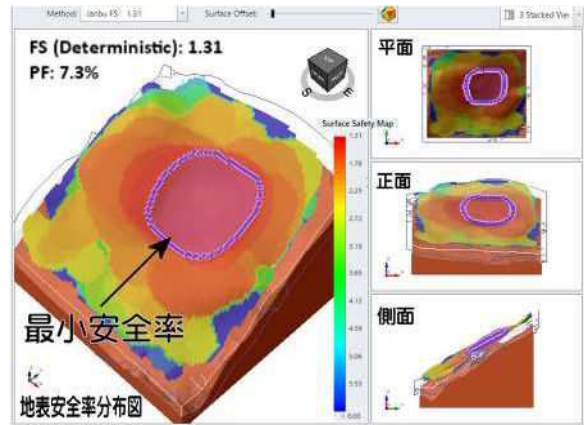


図3 3次元安定解析結果例

Fs:安全率(確定論的), PF:崩壊確率(%)

4 まとめ

地すべり分野でもCIMの活用は始まっているが、いまのところ災害箇所の写真鳥瞰図利用にとどまっているように感じられる。

CIMは地盤内をモデル化して初めてその大きな効果が発揮される。また、CIMを用いた解析は3次元解析を行って初めて値が出る。

表層崩壊を対象とした二層構造の地盤では、土層強度検査棒を用いれば、CIM化から3次元解析は容易に実現できる。斜面問題を専門としている日本地すべり学会会員の技術者が他に先駆けて取り組むことを望む。

参考文献

- 1) 日本地質学会地質基準委員会(2001),『地質基準』
- 2) 篠原信(2020),『思考の枠を超える 自分の「思い込み」の外にある「アイデア」を見つける方法』
- 3) 土木研究所(2010),“土層強度検査棒による斜面の土層調査マニュアル(案)”土木研究所資料第4176号
- 4) 太田英将・美馬健二(2018),“ソイルパイプの過剰間隙水圧を考慮した安定計算法”,日本地すべり学会平成29年度研究発表会

CIM時代の3D急傾斜地 調査・解析方法

太田英将*, 美馬健二, 川浪聖志(有限会社太田ジオリサーチ)

キーワード: CIM, 土層強度検査棒, 3次元調査, 3次元安定解析

少数精密調査から全域調査への評価軸の転換

- 現行の調査法(ボーリング調査・2次元調査)
代表断面を決めて(どういう指標で?), ボーリングをして(2m前後の表層土者の情報は少ない)、土質強度が得られないから逆算して(現状安全率 $F_s=1.00$ or 1.05)、豪雨時や地震時には「注意が必要である」とコメントする(それが知りたいんじゃないのか?)
- CIM時代の調査法(3次元調査)
表層土砂層の厚さ分布を3次元的に捉え、土質強度は実測値を使い、どこが不安定なのかを3次元解析で炙り出し、一番知りたい豪雨時や地震時の安定性を定量的に評価する

調査に必要なツールは、土層強度検査棒

土検棒の構成



- 土層深度を多点で計測
- 土層ごとに強度計測が多点でできる
- 順計算で安全率 F_s (崩壊確率PF)計算
- 豪雨時・記録的豪雨時・地震時の条件で順計算
- 対策工を入れて順計算

表層崩壊の危険箇所を絞り込む・土層分布を把握する
土層強度検査棒 土木研究所 地質・地盤研究グループ
https://www.pwri.go.jp/team/tishitsu/topics_dokenbo.htm

現地計測状況(多点計測を短時間で実施できる)



限界貫入深度試験
(ロッドが人力で挿入できる限界深度計測)



ベーンコーンせん断強度試験
(上載荷重を変化させ c, ϕ 強度計測)

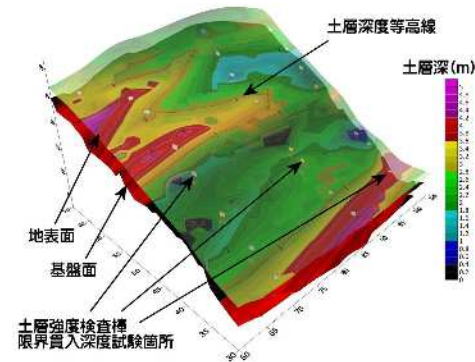
土の単位体積重量・実容量の計測

(順計算の魅力にハマると、すべてのパラメータに実測値が欲しくなる)



ステンレス円筒で試料採取・湿潤重量計測
(気相部を液相にした重量が飽和重量)

3次元地盤モデルの作成 (Surferでできる)

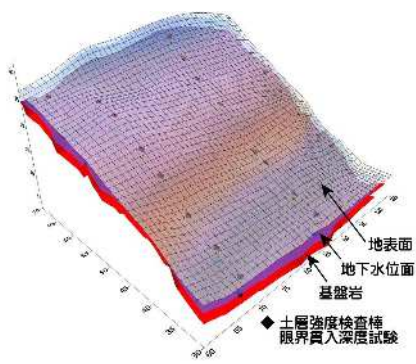


- 土層深分布をKrigingで作成
(斜面に平行なバイアスをつけるとうまくいく)
- 基盤面標高は計算で作る
基盤面標高 = 地表標高 - 土層深
- 地下水位面も計算で作る
地下水位面 = 基盤標高 + 水位上昇高
(地下水位が地表を超える場合には地表に一致させる条件文を入れる)

(SurferのMath機能で計算する)

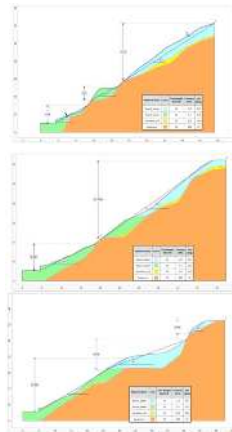
地形鳥瞰図上に、土層厚・厚線図を貼り付けたもの

3次元地盤モデルの完成



地表・地下水・基盤面鳥瞰図

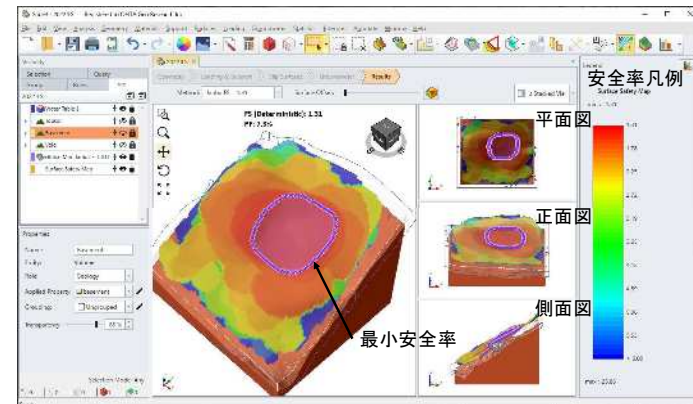
2次元断面での断面図



実測CIMのメリット

- 土層ごとの詳細な深度分布、凸凹の把握
- 土層ごとの強度分布および強度のばらつき(標準偏差)。確率解析が可能となる
- 地下水位の理由のある設定方法ができる(理由があれば修正しやすい)

3次元地盤モデル(CIM)を用いて3次元安定計算



最小安全率となる橋円弧と、安全率分布を表示。計算結果は安全率Fsと崩壊確率PF

(発表用に調整した架空の土質強度条件を入れていますが) <http://www.ohta-geo.co.jp>

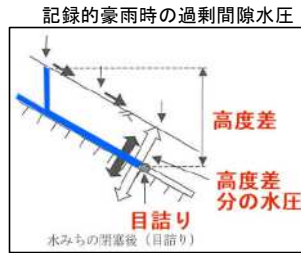
3次元解析のメリット

- 斜面全体に同じ密度の対策を配置しなくて良い(安定度の分布がわかるので)
- 代表断面決定という恣意的行為が不要
- 地すべり技術が進歩するきっかけになる(昭和の技術からの脱却)

3次元安定計算ソフト Rocsience社のSLIDE3

安定計算条件の種類

1. 現状(調査時の条件;崖地の場合水位なしが多い)
多くの場所で $F_s=2.0$ 程度ある。崩壊確率PF=0%
逆算法の初期安全率の設定法の曖昧さ・矛盾がわかる
2. 豪雨時(年に1度程度ある豪雨)
水位上昇し静水圧のみが作用する条件
これで容易に崩れていたら日本中崩壊だらけ
3. 大地震時(kh=0.25)
傾斜角30~40度程度ではあまり危険評価にならない
4. 記録的豪雨時(過剰間隙水圧発生)
ソイルパイプ(ミズミチ)が飽和して過剰間隙水圧が発生する場合、 $F_s < 1$ 、PF>50%となることが多い
土層強度を実測して順計算の安定計算をすると、静水圧だけではなく斜面上は崩壊しないことがわかる



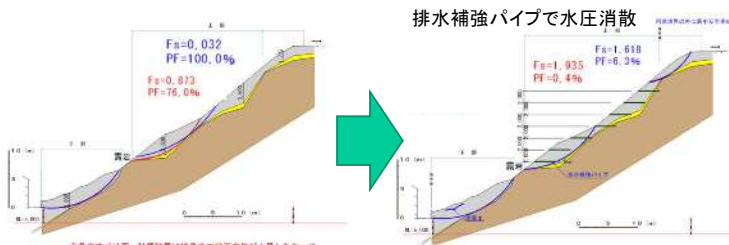
『技術者に必要な斜面崩壊の知識』飯田智之著(2012)より
ソイルパイプに過剰間隙水圧が発生するメカニズム。地下水の過剰供給でも起きる(土壌雨量指数履歴順位第一位以上のとき)

実測CIMで現状の斜面調査解析の問題点が浮かび上がる

1. ボーリング調査を行う「**主断面**」を表層崩壊対策で決定する情報が乏しい
2. 数少ないボーリングで得られる地盤は**過度に単純化**される(凸凹がなくなる)
3. N値から斜面安定解析に必要な情報が得られない(**c・φ同時**に換算できない)
4. 現状安全率を $F_s=1.00 \sim 1.05$ とすることが多いが、この設定は「**かなり過小**」
5. 現状安全率設定時の水圧条件が曖昧なので、**豪雨時・大地震時・記録的豪雨時の安定性評価**ができない(水位なしの条件で初期設定していると、少しでも雨が降って水位上昇があると $F_s < 1$ になる)
6. がけ崩れ調査では、調査時に水位がないのが普通なので、**降雨が崩壊の誘引なのに水圧消散対策をせず抑止工一辺倒**になる(実測値で計算すれば、水圧を消散するだけで表層崩壊は十分対策できることが容易にわかる。このため私がYZ・RZ対策で設計・施工するのは基本的に水圧消散工法)

がけ崩れ対策を水圧消散工で設計した事例(2次元設計)

水圧が誘引で崩壊するものは、水圧消散で対策するほうが合理的かつ効果的

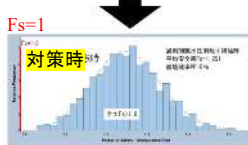


豪雨時 PF=76%($F_s=0.87$)が、水圧消散でPF=0.4%($F_s=1.94$)に低減
記録的豪雨時 PF=100%($F_s=0.03$)が、水圧消散でPF=6.3%($F_s=1.62$)に低減

➡ 対策工事をするかどうかはPFを提示し管理者の判断に委ねる

ちなみに、常時PF=0%($F_s=1.998$)、大地震時PF=2.2%($F_s=1.300$)

崩壊確率PFの変化



横軸F_s、縦軸頻度
赤線は閾値F_s=1
(左図とは異なる場所の事例)

まとめと課題

- 表層崩壊は単純な2層構造の場合が多いので、土層強度検査棒を用いた調査で、容易に「実測CIM」を作ることができる。
- 「実測CIM」はそのまま3次元安定計算に使うことができるので、起伏に富んだ基盤形状であっても、どこが一番安定度が低いかを「人が断面を決定しなくても」容易に計算することができる。
- 「実測CIM」だと順計算ができるので、平常時・豪雨時・大地震時・記録的豪雨時の安定度評価ができる。(YZ・RZ斜面評価に必須)
- 土層強度検査棒で計測した強度は多点で計測し、「ばらつき」が評価できるので、安全率 F_s だけでなく崩壊確率PFが計算できる。
- 3次元安定解析を拒絶する理由の一つとして「3次元解析には計画安全率がない」というものがあるが、閾値を $F_s=1.00$ においた崩壊確率PFで評価すれば、計画安全率は必要ない。
- 3次元形状を紙で表現しにくいので、報告書は2次元になる事がまだ多い。

END