

6. DEM と AI を活用した表層崩壊危険斜面の抽出（長野県辰野町を事例として）

Extraction of slopes at risk of surface landslide using DEM and AI
 -Taking Tatsuno Town, Nagano Prefecture as an example-

斉藤泰久 Yasuhisa SAITOU (パシフィックコンサルタンツ (株))

DEM を活用して表層崩壊の危険性が高い斜面を抽出する手法について検討してきた。無限長斜面式による表層崩壊の安全率に影響する、表層土層の傾斜、層厚、豪雨時の地下水深に關係する斜面の地形的特徴を DEM の地形解析により判読するものである。2005 年以降に発生した多くの土砂災害を対象に本手法の適用性を検討し、一定の精度で表層崩壊危険斜面を抽出できると考えられた。そこで、本手法を容易に活用できるようにするため、経験を積んだ技術者の地形判読技術を AI モデルとして構築した。長野県辰野町地域で検証を行ったところ、地域の土砂災害特性の予察に活用できる可能性を確認した。

キーワード：DEM, 土砂災害, 表層崩壊, 土石流, AI, 防災マップ

1. はじめに

筆者は、2003 年 7 月に発生した九州水俣川の土石流災害以降、土石流を発生させる表層崩壊危険斜面を抽出する手法の検討に着手した。豪雨時に発生する表層崩壊は、無限長斜面の安定解析理論で崩壊危険度を安全率で説明できるものの、それを崩壊シミュレーションに適用すると、表層土層の内部摩擦角と粘着力などの土質特性より層厚が安全率や安全率の空間分布に大きく影響しうることを把握した¹⁾。また、航空レーザ計測による 1mDEM が実用化され始めたことから、GIS の地形解析で斜面の傾斜と曲率（凹凸）を組み合わせ、表層崩壊が発生した斜面と発生していない斜面を判読できる可能性に注目した。さらに、山地流域の水循環解析モデルの開発²⁾と針葉樹人工林の森林斜面における降雨流出過程を観測する過程で、表層土層の人工改変が豪雨時の表層土層に発生する飽和側方浸透流の形成・流動に影響を及ぼす³⁾ことなどを考察し、豪雨時に表層土層の地下水位を一時的に大きく上昇させる地形形態に着目する発想を得た。

以上のような過程を経て、次章に示す水文地形学の斜面の浸食メカニズムから表層崩壊を発生させるうる要因を規定し、その特徴を持つ斜面を表層崩壊危険斜面と定義して、DEM を用いて抽出する手法を構築し、2005 年以降、毎年のように発生した土砂災害に対し提案手法の適合度の確認と抽出手法の改善を図ってきた⁴⁾。そして、一定の精度で表層崩壊危険斜面を抽出できると判断したことから、本手法（筆者が実施した表層崩壊危険斜面の抽出結果）を AI に学習させることで、DEM と AI による表層崩壊危険斜面抽出システムを構築した⁵⁾。

本報告では、表層崩壊危険斜面抽出手法の基本的考え方とその適用事例、長野県辰野町で実施した DEM と AI による表層崩壊危険斜面の抽出結果を報告する。

2. 表層崩壊危険斜面の抽出方法

2.1 表層崩壊が発生する斜面の特徴

無限長斜面における斜面の安定性は、ホブランド式は図-1 となり、表層土層の内部摩擦角 ϕ 、粘着力 C 、鉛直応力 σ_0 (= 単位体積重量 \times 層厚)、表層土層に形成される地下水深 h により決まることが分かる。

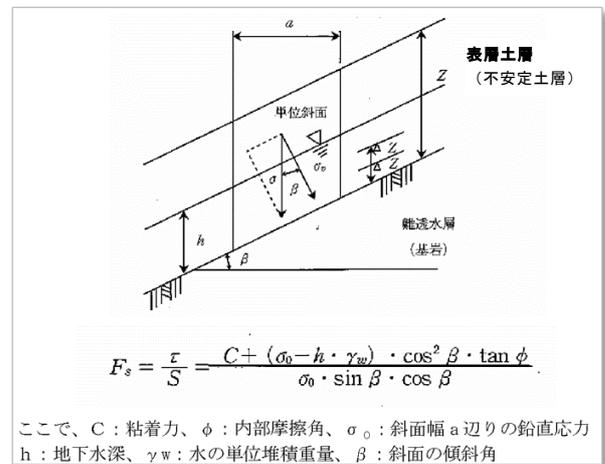


図-1 無限長斜面の斜面安定解析式（ホブランド式）¹⁾

山地斜面においては、地形、地質（土質）、植生、人工改変（降雨時の斜面への浸透や地表流発生に影響）などが斜面の不安定化に影響すると考えられる。DEM を用いる地形解析では、図-2 に示す地形形態に現れる 3 要素、斜面の傾斜（= 表層土層の内部摩擦角）、斜面（表層土層）の層厚、集水性（表層土層に形成される地下水深）に着目する。これら 3 要素が大きいほど、斜面は不安定化すると考えられる。

ここで、山地斜面の中で相対的に、斜面の層厚が厚い場所や集水性が高い場所の判読には、図-3 の水文地形学

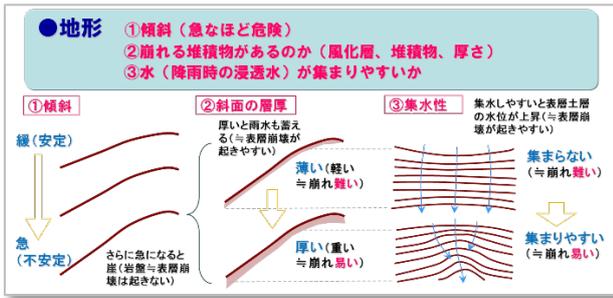


図-2 斜面安定に影響する地形判読の3要素

の考え方である、谷の形成に伴い山地斜面に形成される地形を判読するというものである。図-3のAとBの地形断面が分布し、遷急線や新遷急線の上方に尾根の平坦面や平坦な山腹斜面が分布する場合、その平坦面は豪雨時の雨水浸透と飽和側方浸透流の供給域となり、遷急線下方の表層土層が厚いと表層崩壊を発生させる危険斜面と判定することができる。と考える。

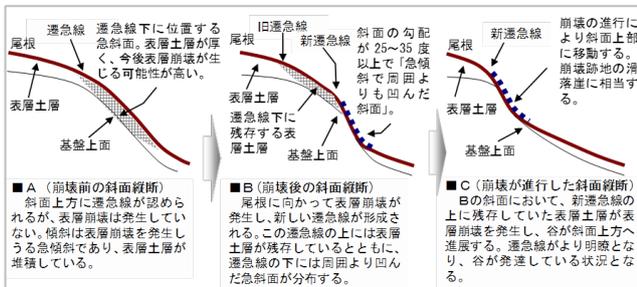


図-3 地形発達の見点に基づく表層崩壊の進展と現れる地形の特徴⁶⁾

2.2 DEMを用いた表層崩壊危険斜面の抽出方法

2.2.1 DEMの地形解析方法

図-4のとおり、DEMで尾根平坦面とその下方に分布する凹んだ斜面を地形解析(傾斜と曲率の組合せ)で読み取り、新遷急線と旧遷急線(尾根平坦面)で挟まれた斜面を「表層崩壊危険斜面」として抽出する。

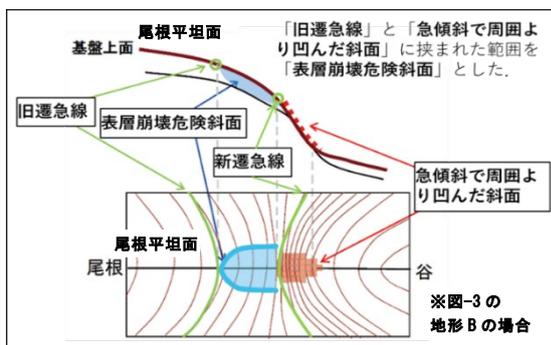


図-4 表層崩壊危険斜面の抽出方法の概念図⁶⁾

2.2.2 表層崩壊危険斜面抽出事例

長野県茅野市北山地区で平成24年7月に表層崩壊が発生した。表層崩壊発生箇所を空中写真などで確認する前に、国土地理院1/25,000の10mDEMとレーザ計測による5mDEM(データは1m解像度)を用いて表層崩壊危険斜面の抽出を行い、その後現地踏査を実施して実際の崩

壊箇所との比較、危険斜面として抽出できなかった要因、抽出していたが実際に崩壊しなかった要因などを検討した⁴⁾。この結果、地形だけでは把握しきれない表層土層の厚さや斜面の人工改変(道路や構造物、盛土、切土など)の状況を把握することで危険斜面の抽出精度を7割5分程度まで向上できる可能性を把握した。

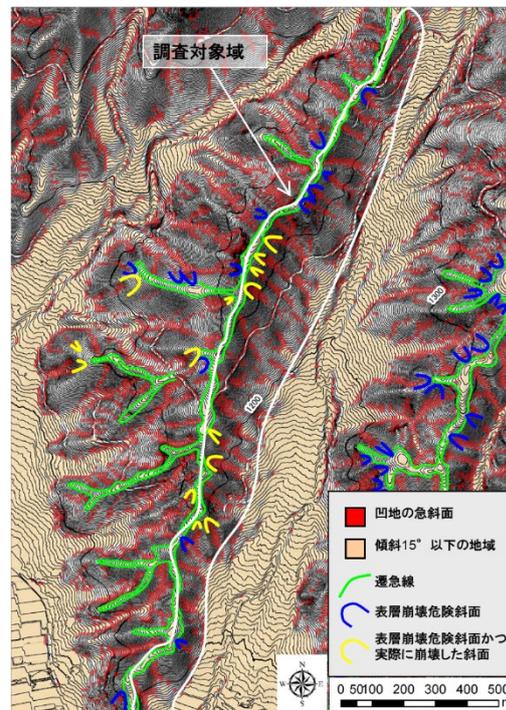
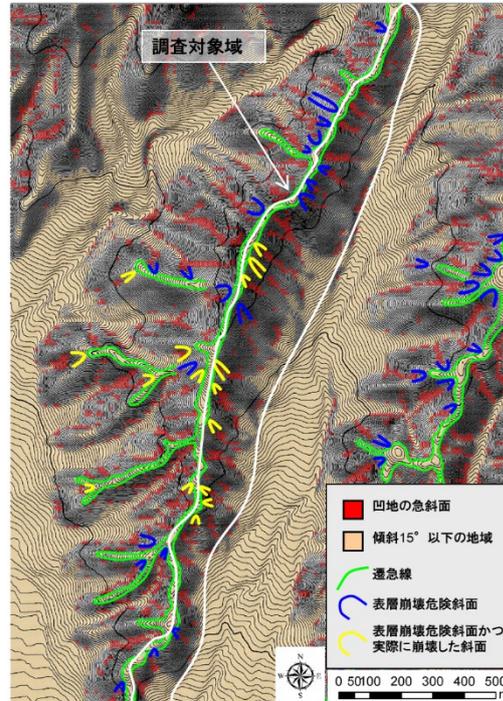


図-5 現地調査なしの表層崩壊危険斜面の抽出事例⁴⁾

3. DEMとAIを用いた表層崩壊危険斜面の抽出

3.1 GISによるDEMからの尾根平坦面と遷急線の抽出

筆者は、2005年9月の台風14号災害以降、毎年発生

する土石流災害に対し、土砂発生源となる表層崩壊危険斜面を抽出できるのかの確認を行ってきた。土砂災害が発生する前のレーザ計測による DEM データが整備されている事例は少なかったことから、国土地理院の 1/25,000 の 10mDEM を用いた。GIS で地域の地形を勘案して傾斜 25~30°、曲率を変化させて遷急線下方の凹地分布図を作成したあと、尾根平坦面と表層崩壊危険斜面の抽出を行う。この一連の作業にかかる時間は、1 図幅に対して経験豊富な地質技術者で 1~2 日程度が必要となり、図面とするにはさらにトレースの時間として 2~3 日が必要であり、結果的に 1 週間程度の時間を要する。また、地質技術者の経験差は個人差を生じさせることから、複数の地質技術者のチェックを経て作成することが必要である。

したがって、本手法を用いて全国の表層崩壊危険斜面を抽出しようとした場合、膨大な時間と労力が必要となる。また、技術者の経験やスキルによって結果に誤差が生じる可能性を想定できる。そこで、表層崩壊危険斜面の抽出を画一的に、かつ効率よく実施できるよう、AI を用いて作業を機械化する手法を検討した。

3.2 表層崩壊危険斜面自動抽出の流れ

表層崩壊危険斜面の自動抽出処理フローは図-6 とした。処理フローにおいて、GIS ソフト等で作成が困難な部分として、DEM データから遷急線を自動作成するツール（ツール①）と、筆者が抽出した表層崩壊危険斜面の分布図を教師データとしたタイル画像から表層崩壊危険斜面のあるメッシュを AI により自動抽出するツール（ツール②）の作成を行った。

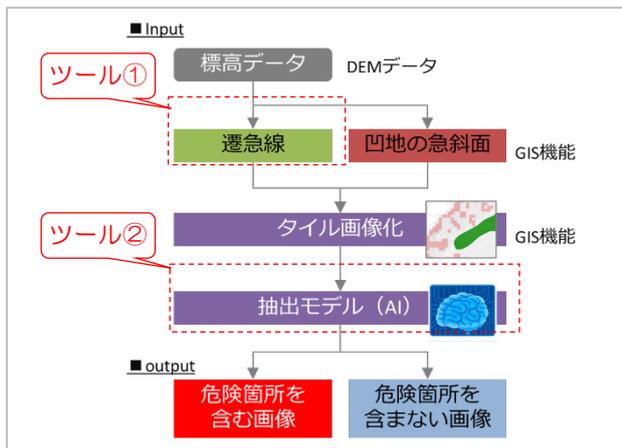


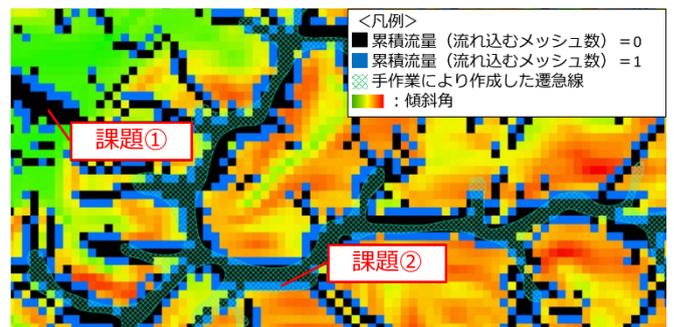
図-6 表層崩壊危険斜面の抽出処理フロー⁵⁾

3.3 ツールの作成

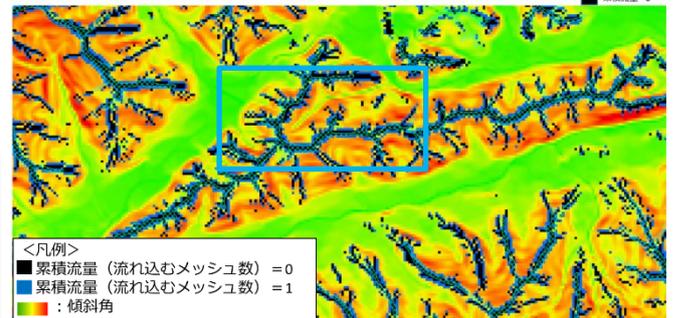
3.3.1 遷急線自動作成ツール

全国整備を目指した技術開発としたことから、使用する DEM データは基盤地図情報⁷⁾で公開されている数値標高モデル (10m メッシュ (標高)) とした (以下、「10mDEM」)。着目する遷急線は、尾根や山腹斜面の平坦面から斜面下方へ移行する地形部にあり、これら平坦面は地形的に降雨が集まりにくいと考えられる。そこで、

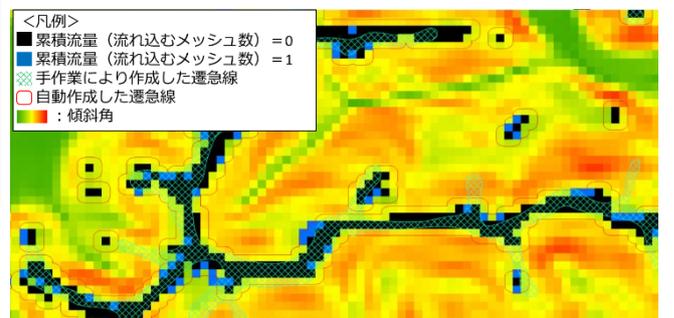
10mDEM を用いて GIS による落水線分析により、10mDEM で作る各メッシュの累積流量 (降雨が流れ込むメッシュ数の累積) を算出し、累積流量=0 のメッシュがこれら平坦面に該当すると仮定した。ここで、山地周辺の谷底平野のメッシュも平坦面に選定されてしまうため、曲率分析により尾根平坦面に該当しない凹地型 (曲率が 0 未満) のメッシュを除外するとともに、傾斜角分析により傾斜角と地形 (平野、山地など) の関係性から隣接するメッシュの傾斜角が 20°未満のメッシュを谷底平野部と判定して除外するした。また、手作業により判読した遷急線よりも抽出範囲が過小になる課題があったことから、累積流量 ≤ 1 に対して傾斜角 ≤ 20° のメッシュ (降雨が集まらない平らなメッシュ) を除外するとともに、隣接メッシュでパツファを考慮した結合を行うことで遷急線抽出の精度向上を図った。



(1) 補正なしの自動抽出した平坦面 (黒メッシュ)。薄緑メッシュは人力判読の平坦面。中段図の青枠内



(2) 谷底平野除去の補正後の自動抽出した遷急線 (赤線)、中段図の拡大



(3) 補正後の自動抽出した遷急線 (赤線)、中段図の青枠
図-7 遷急線自動作成ツール作成過程⁵⁾

3.3 AI による表層崩壊危険斜面の抽出

本稿の表層崩壊危険斜面は、遷急線 (平坦面) と凹地急斜面の位置関係が重要となっていることから、これらの位置関係を画像として判読でき、かつ対象領域検出を

得意とする AI モデル U-Net を使用した。

平成 29 年 7 月九州北部豪雨で表層崩壊が発生した福岡県朝倉市、広島県呉市（平成 30 年 7 月豪雨で表層崩壊発生）及び長野県辰野町（平成 18 年 7 月豪雨で表層崩壊発生）の計 3 地域の 10mDEM を用いて作成したタイル画像を教師データとして使用し、構築したモデルの精度検証を行った。検証は、AI モデルで使用する活性化関数の比較・検証、AI モデルの抽出結果として算出される Probability（画像内に危険斜面が含まれる確度）について最適な閾値を検討した。なお、精度検証の際、機械学習における評価指標である Accuracy（正解率）、Precision（適合率）、Recall（再現率）のうち、損失機会を失くすこと（表層崩壊の危険がある斜面をあまり危険であると評価すること）が重要であるため Recall を重視した AI モデル評価及びカスタマイズを行った。評価及びカスタマイズの結果、活性化関数に Swish を採用し、Probability の閾値を 0.69 以上とすることが最も精度良く表層崩壊危険斜面を抽出できることが分かった。

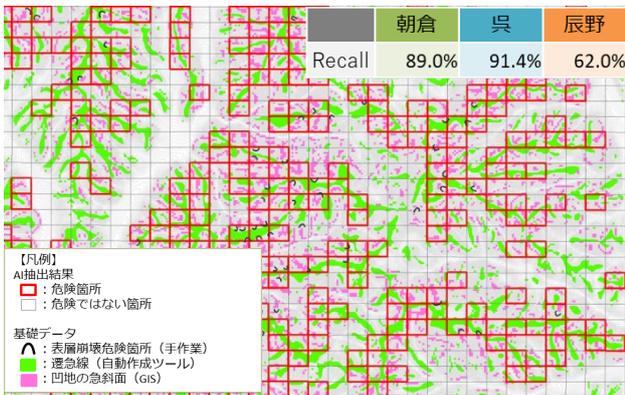


図-8 AI による抽出結果⁵⁾

4. おわりに

表層崩壊危険斜面抽出手法を AI モデル化したところ、6～9 割の精度（Recall）で自動抽出できた（図-8 中の表参照）。この精度は、人の抽出した箇所が AI モデルで抽出できなかった場合と、人の抽出しなかった場所が AI モデルで抽出された場合の誤りが含まれている。本モデルは前者の誤りをできる限り小さくする課題を有する。また、長野県茅野市の事例のとおり、簡易な現地調査をしない人の抽出は正解率 50%強で、行った場合でも正解率は 7 割 5 分であることから、元来、100%正しく抽出できるモデルではない。

一方、図-9 の令和 3 年 8 月の大雨による長野県岡谷市で発生した土砂災害発生個所の近傍斜面を危険斜面として自動抽出できており、本図の情報を活用して予察的に地域の表層崩壊危険斜面の存在状況を確認することで、行政と地域住民が土砂災害警戒避難や事前対策を推進できる可能性を考えられ、長野県辰野町では人の抽出による表層崩壊危険斜面を防災マップに標記している⁶⁾。

本図を基本とした詳細な表層崩壊危険斜面の抽出や土石流危険渓流の対策優先度検討など、地盤工学的詳細調

査や合理的で効果的な土砂災害対策の実現を期待する。

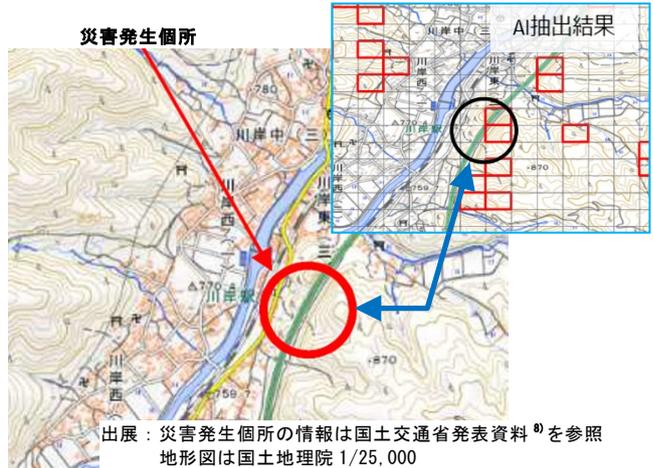


図-9 AI 抽出結果と実災害の発生箇所の比較⁵⁾ 一部修正

謝辞

長野県茅野市の事例は、国土交通省中部地方整備局天竜川上流河川事務所から DEM データを借用させていただきました。また、AI を用いた表層崩壊危険斜面抽出技術の開発は、長野県辰野町の防災マップ作成にあたり抽出した表層崩壊危険斜面のデータを活用しました。ここに、感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 桜井亘, 栗原淳一, 斉藤泰久他：広範囲を対象とした数値解析による土石流危険渓流の危険度評価手法の検討, 平成 19 年度砂防学会研究発表会, 2007.
- 2) 斉藤泰久, 鈴木章浩, 伊藤覚：準三次元地下水浸透流解析モデルを応用した分布型水循環モデル (WCAP) の構築, 土木学会論文集 B, Vol.62, No.1, p.1-15, 2006.
- 3) 伊藤覚, 斉藤泰久, 鈴木章浩, 湯浅岳史：ハイドログラフによる狩野川大仁上流域の水循環特性に関する一考察, 2005 年水文・水資源学会研究発表会
- 4) 上野紗綾子, 斉藤泰久, 新貝文昭, 山寺喜成：DEM データを用いた斜面安定評価と森林再生方法の検討(その 5), 平成 25 年度砂防学会研究発表会, 2013.
- 5) 小林隆洋, 斉藤泰久他：AI (ニューラルネットワーク) を用いた表層崩壊危険斜面の自動抽出に関する研究, 令和 4 年度砂防学会研究発表会, 2022.
- 6) 松澤真, 斉藤泰久他：土砂災害から命を守るための予防防災の取組 (I) ～長野県辰野町の土砂災害ハザードマップと住民参加型防災マップの作成～, (一社) 日本治山治水協会, 水利科学, No.382, pp.40-65, 2022.
- 7) 国土交通省 国土地理院：基盤地図情報, <https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>.
- 8) 国土交通省：「長野県岡谷市で発生した土砂災害に対して土砂災害専門家 (TEC-FORCE 高度技術指導班) を派遣します」, p2, (参照 2021-09-07) <https://www.mlit.go.jp/common/001419173.pdf>.

7. 斜面崩壊規模を予測するための崩壊土砂層厚の分布調査手法に関する研究

A Study on Distribution Survey Method of Collapse Sediment Layer Thickness to Predict Slope Failure Scale

井上 真 Makoto INOUE (株式会社ウエスコ)
 與那城稔 Minoru YONASHIRO (株式会社ウエスコ)

自然斜面内の崩壊に対して最も危険な弱部（風化層、潜在崩土層）の厚さの分布状況の推定は、斜面崩壊の規模の推定に対して最も重要な課題である。本研究では、山全体を俯瞰した「崩壊土砂量の推定」を効率的に行うことを目的として、ミニラムサウンディング試験機の仕様を基に、斜面における作業性と高い貫入能力を有する軽重量のサウンディング機器を開発した。

キーワード：斜面崩壊，土砂災害，崩壊層厚，サウンディング

1. はじめに

近年、我国の各地で短時間の雨量や累積雨量が観測史上最大となることがしばしばあり、これに伴う斜面崩壊の発生件数の増加および発生規模の大規模化が懸念される。また、近年の災害は過去に想定した外力を上回る可能性が指摘されている。斜面崩壊は、表層崩壊、深層崩壊、地すべり性崩壊に大別され、斜面崩壊全体の約95%が傾斜度30度以上の斜面で発生していると言われており、また、このうちの80%以上が表土や崩積土が崩落する表層崩壊に分類されている¹⁾。

2018年に発生した西日本豪雨災害でも土石流が、道路施設の管理区域外にある山の頂上付近からでも生じており、既設の対策施設や道路施設を乗り越えて破壊した事例や、土砂災害防止法に基づく急傾斜地崩壊危険箇所の定義外の20～30度程度の緩斜面においても表層崩壊が発生した事例が確認されている²⁾。写真-1は岡山大学北側に位置する傾斜26度程度の半田山で発生した斜面崩壊である。

また、2021年5月に福井市足羽川沿いでは、過去複数回の地すべりや崩壊が発生した斜面の隣接地で、想定していない大規模な斜面崩壊が発生し、河道閉塞により県道が冠水した事例がある³⁾。このように頻発する土砂災害に対して、崩壊危険箇所の特定と崩壊土砂量の推定精度の向上は喫緊の課題である。

2. 本研究の目的

本研究では、自然斜面崩壊においては、豪雨後に崩壊した斜面の対策を実施していた現状に対して、崩壊前に日本中の斜面の危険度をあらかじめ予測することを目的としている。また、その予測により、崩壊する前に自然斜面の安定化（治山）を提案して、安定化対策を実施す



写真-1 半田山の斜面崩壊（写真提供岡山大学鈴木茂之名誉教授）

る国土管理を目標としている。

その目的に対して、近年では、自然斜面の地山の表面の地形把握が、レーザー計測（LP）によって可能になっている。このような現状の技術を駆使して国土全体の地盤内の情報を統合して国民の安全と安心を構築することを究極の目的としている。

この自然斜面に対しての目的を達成するには、以下の事項の研究、技術開発が必要であると考えられる。

- (1) 自然斜面内の風化層の厚さの分布の推定
- (2) 斜面内の水径（ミズミチ）の分布の推定
- (3) 斜面崩壊，地すべり，落石の危険度の推定
- (4) 斜面崩壊対策（グラウンドアンカー，表面・地下排水施設等）の健全度診断

本研究では、このような多くの目的の中で、自然斜面の風化層の厚さの分布の推定を研究目的とした。

自然斜面内の崩壊に対して最も危険な弱部（風化層、潜在崩土層）の厚さの分布の推定は、斜面崩壊の規模の推定に対して最も重要な課題である。

このような斜面内の弱部の3次元的な分布に対しては、弾性波探査等の物理探査が有効である。しかし、現状で

は、この物理探査結果に対しての精度の確認が必要である。その確認手法として、ボーリング調査やサウンディング試験による補完が必須である。そこで、斜面における作業性と高い貫入能力を有する軽重量のサウンディング機器の開発、製作した結果について報告する。

3. 斜面調査の各種サウンディング機器

斜面における風化層厚を確認する主な調査手法には、簡易動的コーン貫入試験（以下、簡易貫入試験と称す、JGS1433）や標準貫入試験（JISA1219）、スクリーウエイト貫入試験（旧スウェーデン式サウンディング試験、JISA1221）がある⁴⁾。これらのサウンディング機器の性能を表-1に示す。ここで、簡易貫入試験とスクリーウエイト貫入試験は、玉石あるいは礫を含む土質では適用範囲外であり、礫打ちの影響を低減できる打撃エネルギーの大きなサウンディング機器の開発が課題である。

標準貫入試験は、あらゆる土質に適用可能である。しかし、ボーリング掘削と併用のため仮設が大掛かりであり、自然斜面の多数の地点で試験することは困難である。

4. 軽重量サウンディング試験機の開発

今回開発した軽重量サウンディング試験機（写真-2、以下、LWCPT（Light Weight Cone Penetration Test）と称す）は、高い貫入能力と斜面での運搬を考慮し、写真-3に示すミニラムサウンディング試験機（以下、ミニラムと称す、JGS1437-2014 動的コーン貫入試験方法の中型に相当）の仕様に基づき、表-2に示す改良を実施した。その主な特長は、30kgのハンマーを15kgずつ2個に分割し、試験時にボルトで一体化したことと（写真-4、5）、ハンマーの吊り上げ装置を電動ホイス（写真-6）にして動力を発電機としたことである。

吊り上げ装置と動力の改良により、機材の合計重量はミニラム（270kg）の3割程度の85.8kgに軽量化でき、分割すると現状のドローンでも運搬できるようにした。

5. LWCPTの試行

西日本豪雨災害時に、斜面崩壊が発生した岡山大学北側の半田山（標高152m）において、LWCPTを試行した。斜面崩壊時の規模は、幅45m、長さ170m、深さ2m程度であり、今回の試験箇所は、頭部滑落崖から20m程度下方の管理道沿いに位置し、表層には礫混り砂質土からなる崩積土が分布する。現在は、前述写真-2等の背景に写るように吹付砕工が施工済みである。

サウンディング試験は、推定N値30以上を確認できる深度まで実施した。

表-1 斜面調査用サウンディング機器性能比較表⁵⁾

項目	簡易貫入試験 (JGS1433)	標準貫入試験 (JISA1219)	スクリーウエイト貫入試験 (JISA1221)
ハンマー、おもり質量(kg)	5	63.5	100
落下高さ(mm)	500	760	—
先端コーン、シュー	先端角 60度、外径 25mm	シュー角度 19度 45' 外径 51mm	(スクリーポイント)
ロッド 外径(mm)	16	40.5	19
適用性	作業が簡易。礫、玉石含む地盤に不適。	あらゆる地質に適用。土層判定可能。ボーリング機械と併用。	軟弱地盤を対象に静的貫入抵抗測定。礫、玉石含む地盤に不適。

表-2 ミニラムとLWCPTの比較⁵⁾

項目	ミニラム	LWCPT
ハンマー質量	30kg 1体	30kg 運搬時2分割
落下高さ	35cm	35cm
ハンマー吊上方法	エンジン、油圧モーター、チェーン	発電機、電動ホイス、チェーン
先端コーン	先端角 90度、φ36.6mm	先端角 90度、φ36.6mm
脚	4本	3本(急斜面用予備1本)
ロッド	φ28mm、4.7kg	φ28mm、3.8kg(中空)
引抜き方法	油圧駆動引抜き装置	電動ホイス
運搬方法	本体の車輪で人力運搬	部品に細分し人力運搬
合計質量	270kg(本体のみ135kg) ロッド 4.7kg/本	85.8kg(発電機15kg含) ロッド 3.8kg/本



写真-2 LWCPT 全貌



写真-3 ミニラム全貌

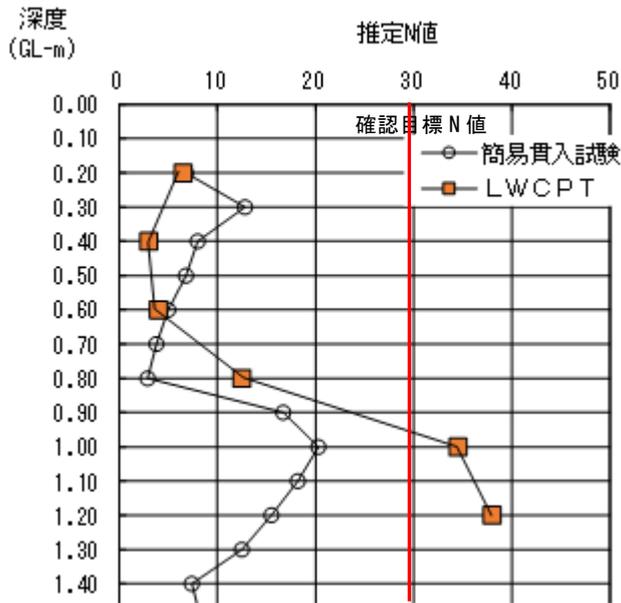


図-1 簡易貫入試験とLWCPTの推定N値比較図⁵⁾

LWCPTによる推定N値は、ミニラムと同様に式(1)により算出する⁶⁾

$$Nm/2 - 0.16Mv \quad (1)$$

ここで、Nmは貫入量20cm当たりの打撃回数、Mv(単位N・m)は貫入ロッドのトルクである。

図-1にLWCPTにより推定したN値と、当試験箇所の近傍で崩壊時に実施された簡易貫入試験による推定N値を示す。

簡易貫入試験による推定N値は、式(2)により算出する⁷⁾。

$$N=1.1+0.3 \cdot Nd \quad (Nd>4) \quad (2)$$

$$N=0.66 \cdot Nd \quad (Nd \leq 4)$$

ここで、Ndは簡易貫入試験の貫入量10cm当たりの打撃回数である。

今回の試験地点では、深度1mにおいて、推定N値35の地盤が確認されたが、簡易貫入試験地点のGL-1mでは推定N値20であり、それ以深推定N値が低くなる傾向であった。

二つの試験による推定N値の差異は、現場状況から、基盤岩の凹凸ではなく、不均一に混入する転石の影響と推察される。

単位面積当たりのコーン先端エネルギーは、LWCPTは97.9kJ/m²、簡易貫入試験は49.9kJ/m²であり、打撃のエネルギーは今回開発したLWCPTの方が大きい、礫の硬さや大きさにより高止まりしたと推察される。

斜面における潜在崩土層厚を把握するためのサウンディング試験では、礫や転石と基盤岩を区別することが重要である。



写真-4 開発したLWCPT 1式(発電機除く)



写真-5 分割したハンマー近景

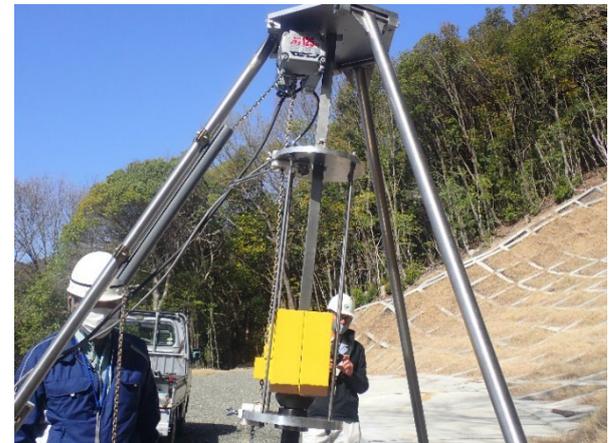


写真-6 電動ホイストとハンマー

6. まとめ

本研究により得られた結論を以下に列挙する。

- (1) ミニラムサウンディング試験機(ミニラム)の仕様に基づき、斜面での使用を考慮した軽重量サウンディング試験機(LWCPT)を開発した。
- (2) LWCPTは、30kgのハンマーを運搬時に2つに分割し、ハンマーの吊り上げを電動ホイストと発電機にすることで、全体質量を270kgから85.8kgに軽量化した。
- (3) LWCPTの試行の結果、推定N値35、38の地盤を確認した。

7. 今後の課題

本研究において斜面で人力運搬できる軽重量サウンディング試験機 (LWCPT) を開発した。しかし、潜在崩土層厚分布の推定には、最終調査深度が礫か基盤岩かを判断できる装置の追加等の改良が必要であることがわかった。

このような観点から、今後の課題として以下の事項が考えられる。

- (1) 浮石や転石の根入れ深さを振動計測により推定する手法を参考に⁸⁾、ハンマー打撃時に先端コーンから地盤に伝わる振動波形特性を解析し、転石と基盤岩を区分
- (2) 土層確認のために LWCPT 先端をサンプリング可能なコーンに交換できる仕様への改良 (写真-7, 8)。
- (3) LWCPT と 3 次元弾性波探査、常時微動アレー探査、空中電磁探査、DAS による振動計測等の物理探査結果の照合による潜在崩土層厚の推定精度向上
- (4) 電動補助装置 (パワースーツ) の改良による斜面上における LWCPT の運搬の効率化 (写真-9)
- (5) 潜在崩土分布地の 3 次元物性モデルの作成と 3 次元浸透流解析による豪雨時の崩壊土砂量の推定精度向上。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人高速道路調査会および公益財団法人ウエスコ学術振興財団、統合物性モデル技術研究組合 (IMTERA) より研究補助金支援を受けました。また、協同組合岡山県土質試験センター西村輝センター長にはサウンディング試験機の計画・製作に協力いただきました。岡山大学西村伸一教授には簡易貫入試験データを提供いただきました。岡山大学鈴木茂之名誉教授および地盤工学会中国支部岡山地域セミナー構成員の方々には、試験機の試行と改善に向けた助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 建設省河川局砂防部傾斜地保全課・建設省土木研究所砂防部急傾斜地崩壊研究室：がけ崩れ対策の実態，土木研究所資料，第 3651 号，pp.81-84，1999。
- 2) 木村隆行・笹井友司・井上真・西垣誠：激甚化する地盤災害の技術課題と展望，公益財団法人地盤工学会中国支部・論文報告集 地盤と建設，Vol.38，No.1,pp.9-18，2020。
- 3) 福井新聞 ONLINE：
<https://www.fukuishimbun.co.jp/articles/-/1314488> (2021.6 取得)。
- 4) 国土交通省水管理・国土保全局：国土交通省河川砂防技術基準調査編，p. 第 19 章第 4 節-4，2014.4。



写真-7 サンプリング可能な先端コーン試作



写真-8 試作コーンによる試料サンプリング状況



写真-9 開発中のパワースーツ

- 5) 西垣誠・井上真：斜面崩壊規模の予測のための軽重量サウンディング試験機 (LWCPT) の開発，高速道路と自動車，第 64 巻，第 11 号，2021 年 11 月号，pp.47-50,2021。
- 6) 菅原・鈴木・菅原：小型動的貫入試験機の開発とその利用，全地連・技術フォーラム'97 (名古屋)，pp.461-464,1997。
- 7) 公益財団法人地盤工学会：地盤調査の方法と解説—二分冊の 1—，p.322,2013。
- 8) 深田隆弘・谷口達彦・澁谷啓：振動計測に基づく斜面上転石の落石危険度評価方法の提案，土木学会論文集 C (地圏工学)，Vol.69, No.1, pp.140-151, 2013。

8. 傾斜 30 度未満の斜面崩壊に関する一考察

A Study on the Slope Failure with a Gradient of Less Than 30 Degrees

笹井友司 Yuji SASAI (中電技術コンサルタント(株))
 松井章弘 Akihiro MATSUI (中電技術コンサルタント(株))

傾斜 30 度、高さ 5m 以上の区域とその周辺区域からなる土砂災害警戒区域等（急傾斜地の崩壊）は、地形・地質や土地の利用状況等の基礎調査結果に基づき指定・公表される。2001 年 4 月に施行された土砂災害防止法に基づいてこの区域指定が進む中、岡山大学北側の半田山では、地表面の傾斜 24~29 度の斜面が 2018 年 7 月豪雨により崩壊した。

本論では、土砂災害警戒区域等（急傾斜地の崩壊）に指定されていなかったこの崩壊斜面を対象に、二次元浸透-応力連成解析（せん断強度低減法）による斜面安定性評価を行い、現地の崩壊状況を概ね再現できる可能性を示した。

キーワード：土砂災害，表層崩壊，降雨浸透，浸透応力連成

1. はじめに

近年、各地で観測史上最大の短時間降雨や 24 時間降雨等が頻発しており、これに伴う斜面崩壊の発生件数の増加や崩壊の大規模化が懸念される状況にある。

斜面崩壊は、表層崩壊、深層崩壊、地すべり性崩壊に大別され、斜面崩壊全体の約 95%が傾斜 30 度以上の斜面で発生するとされている。なお、このうちの 80%以上は、表土や崩積土の表層崩壊に分類されている¹⁾。また、土砂災害防止法に基づく急傾斜地崩壊危険箇所の定義は、傾斜 30 度以上である。こうした中、2018 年 7 月豪雨では、土砂災害ハザードマップで崩壊危険箇所に指定されていない傾斜 30 度未満の斜面でも崩壊が発生しており、崩壊危険箇所の指定精度向上が大きな課題と言える。

こうした状況を鑑み、本論では、2018 年 7 月の西日本豪雨により崩壊した岡山大学北側半田山の傾斜 30 度未満の自然斜面を対象に、降雨浸透を考慮した二次元浸透-応力連成解析（せん断強度低減法）による斜面安定性評価結果について報告する。

2. 半田山の崩壊概要

2.1 崩壊発生時の降雨状況

図-1 に示す崩壊地近傍の岡山地方気象台観測記録によると、時間最大雨量は、崩壊が発生したとされる 7 月 6 日 22 時直前の 22mm/hr であったものの、それまでの 72 時間雨量は 249mm と、1976 年 9 月の 325mm に次ぐ観測史上 2 位の長期降雨イベントであった²⁾。また、豪雨前 2 ヶ月間の先行雨量を加味すると、2018 年は約 530mm であり、1976 年の約 490mm に比べて多いことが特徴として挙げられる。

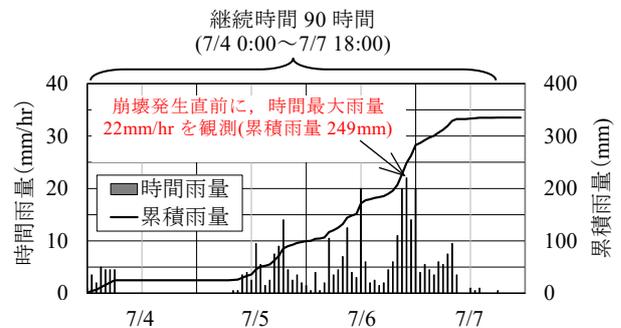


図-1 岡山地方気象台の雨量観測記録（2018 年 7 月）²⁾



図-2 半田山位置図(国土地理院³⁾に加筆, ○崩壊箇所)



写真-1 東側崩壊斜面の状況

2.2 斜面崩壊の状況

斜面崩壊は、図-2 に示す半田山南側斜面の東側と西側で発生したが、本論では東側の崩壊地を対象とする。

東側崩壊地の規模は、幅 20m、長さ 75m、深さ 2~3m 程度で、写真-1 のとおり斜面末端部に土砂が堆積しパイピング跡が確認されたが、人的・家屋の被害はなかった。

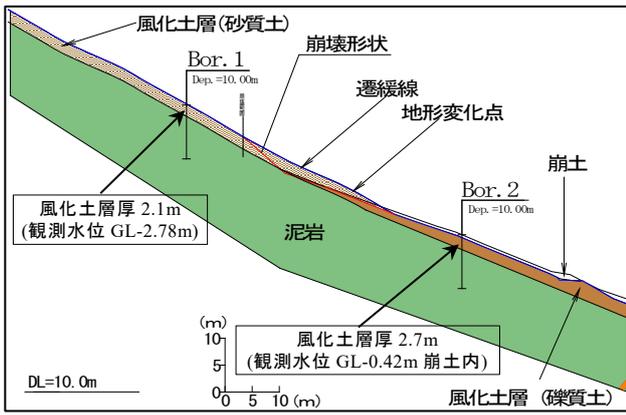
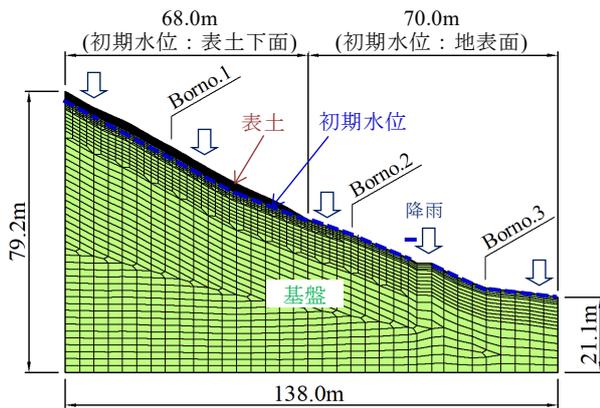
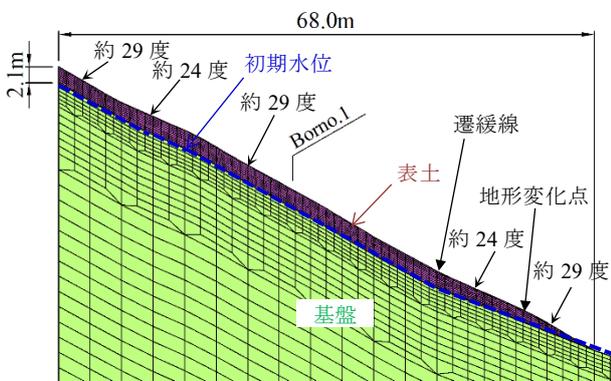


図-3 東側崩壊斜面推定地層断面図



(a) 全体図



(b) 拡大図

図-4 2次元 FEM 解析モデル

3. 二次元浸透流解析

3.1 解析方法および解析条件

二次元浸透流解析は、図-3の東側崩壊斜面の地質断面図に基づく図-4の解析モデルにより行った。なお、解析モデルでは、図-3の風化土層（砂質土）を表土、その他を基盤と定義している。

解析手法は、二次元 FEM 飽和・不飽和非定常浸透流解析⁴⁾とし、地表面を降雨浸透境界、側方下流側は地表面を水頭固定とした静水圧分布を与え、側方上流側とモデル底面は不透水境界とした。

表-1 土質試験結果一覧表

試料番号		東側	西側	
一般	土粒子の密度 ρ_s g/cm ³	2.651	2.634	
	自然含水比 w_n %	10.8	13.2	
	湿潤密度 ρ_r g/cm ³	1.767	—	
	飽和度 S_r %	41.3	—	
粒度	礫分 %	14	50	
	砂分 %	16	10	
	シルト分 %	36	27	
	粘土分 %	34	13	
	最大粒径 mm	26.50	19.00	
コンステン特性	液性限界 W_L %	34.4	38.5	
	塑性限界 W_P %	11.5	11.7	
	塑性指数 I_p	22.9	26.8	
地盤材料の分類名		砂礫質粘土	砂混り粘土質礫	
せん断	試験条件	CU-(三軸)	—	
	全応力	c kN/m ²	16	—
		ϕ °	16.0	—
	有効応力	c' kN/m ²	0	—
		ϕ' °	36.0	—
透水係数 k	m/s	1.08E-7	—	

表-2 解析用飽和透水係数

表土	1.0×10^{-7} m/s
基盤	1.0×10^{-9} m/s

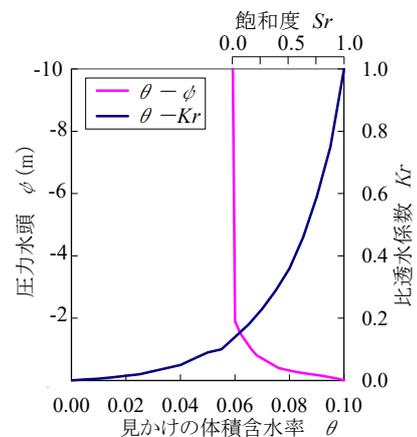


図-5 不飽和特性（粘性土）⁵⁾

初期水位は、図-3に示す2箇所のボーリング孔内観測水位を基に、地表面に表土が分布する斜面上方は表土下面、その他斜面下方は地表面に水頭固定した定常解析により設定した。また、降雨条件としては、図-1に示す崩壊地近傍の岡山地方気象台の2018年7月4日0時～7月7日18時までの観測雨量を考慮しており、蒸発散は考慮していない。

飽和透水係数は、表土については表-1に示す室内透水試験（変水位）の結果より設定し、基盤は表土より2オーダー下げた透水係数を表-2のとおり仮定した。また、不飽和特性は、表-2の飽和透水係数より、表土・基盤ともに難透水性の地盤に適用される、既往の試験結果に基づき設定された図-5⁵⁾を用いた。

3.2 解析結果

定常解析による初期の飽和度分布を図-6に、7月4日0時からの非定常解析による降雨開始30時間、60時間、90時間後の飽和度分布を図-7に示す。また、降雨開始90時間後の総雨量 336mm に相当する短期的な集中豪雨として、時間 85mm が4時間継続した場合の飽和度分布を図-8に示す。なお、飽和度 1.00 が地下水位面である。

図-6,7より、飽和域は表土の最下端から斜面上部に向けて徐々に拡がり、降雨開始60時間後(7月6日12時)には地形変化点よりも下部は飽和に至っている。また、当該斜面は、表土の飽和透水係数が $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ と小さく地中への降雨浸透速度が遅い。このため、地表面から下方に向けた飽和度の上昇は認められるものの、斜面中腹では2018年7月豪雨が完了した降雨開始90時間後(7月7日18時)においても、地表面からの浸透水が表土内の地下水位面に至っていない。さらに、図-7の降雨開始90時間後と図-8を比較すると、後者の飽和域は表土最下端付近のみに留まっている。このことは、透水性の低い斜面では、短期的な集中豪雨に比べて、今回のような長期降雨の方が地下水位上昇しやすいことを示唆している。

4. 斜面の安定性評価

4.1 解析方法

本章では、前章の浸透流解析結果と応力解析を連成させた弾塑性FEM解析によるせん断強度低減法^(6,7)を用いて、斜面のすべり安全率を算定する。せん断強度低減法では、下式のとおり、粘着力 C' と内部摩擦角 ϕ' による強度 $\tan \phi'$ を低減係数 F で割った C'_F と $\tan \phi'_F$ を用いる。

$$C'_F = \frac{C'}{F}, \tan \phi'_F = \frac{\tan \phi'}{F} \quad (1)$$

また、弾完全塑性構成式を用い、モール・クーロン式で土の破壊基準 f と塑性ポテンシャル g を定義している。

$$f = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} - C' \cdot \cos \phi' - \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \sin \phi' \quad (2)$$

$$g = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \sin \phi \quad (3)$$

ここで、 σ'_1 と σ'_3 は最大、最小有効主応力、 ϕ はダイレイタンシー角で既往の知見⁸⁾より $\phi = \phi'$ とする。

浸透流解析各時間ステップのせん断強度低減法の計算フローは、図-9に示すとおりで、式(1)の低減したせん断強度を用い、斜面の自重や浸透水圧を外力とした弾塑性計算が、所定の最大繰り返し回数内で収束する最大の低減係数 F を斜面の全体安全率と定義している。なお、浸透流解析結果の応力解析への反映として、自重によるベクトル f_b に不飽和域の飽和度の変化は考慮していない。また、水圧によるベクトル f_u には、不飽和域のサクションによる有効応力の増加も考慮している。

この手法では、すべり線の定義は不要であり、計算で

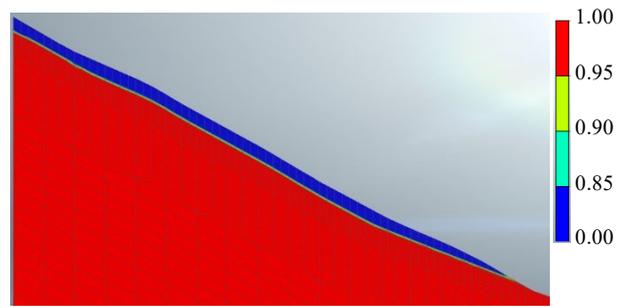


図-6 定常解析による初期の飽和度分布

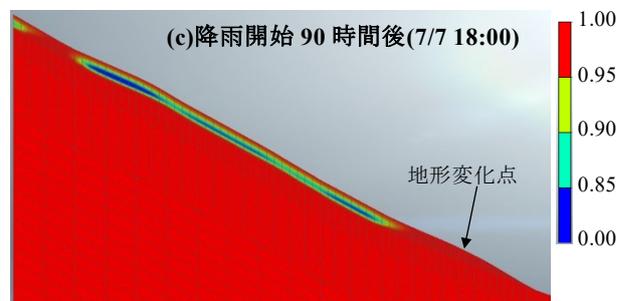
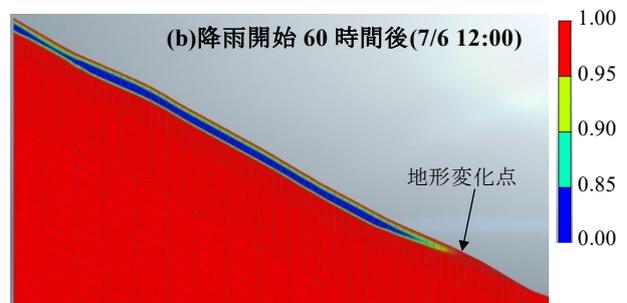
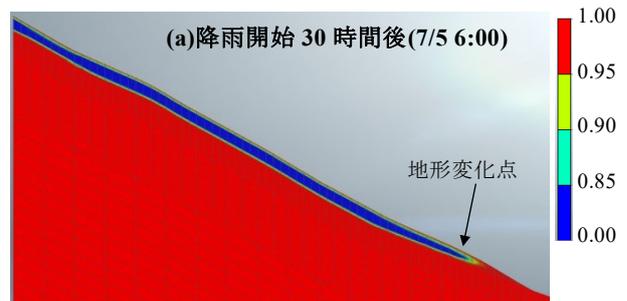


図-7 非定常解析による飽和度分布

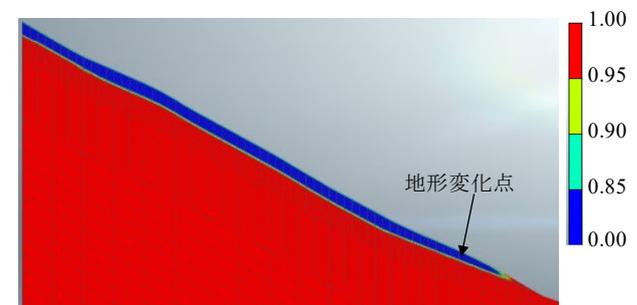


図-8 時間 85mm×4時間の集中豪雨を仮定した場合の非定常解析による飽和度分布

自動的に決定される。 F が小さな値の場合には、 C'_F と ϕ'_F が大きくなるため弾性応力状態となり、 F を段階的に大きくすると斜面に破壊が生じはじめてモール・クーロン式を満たすようになる。

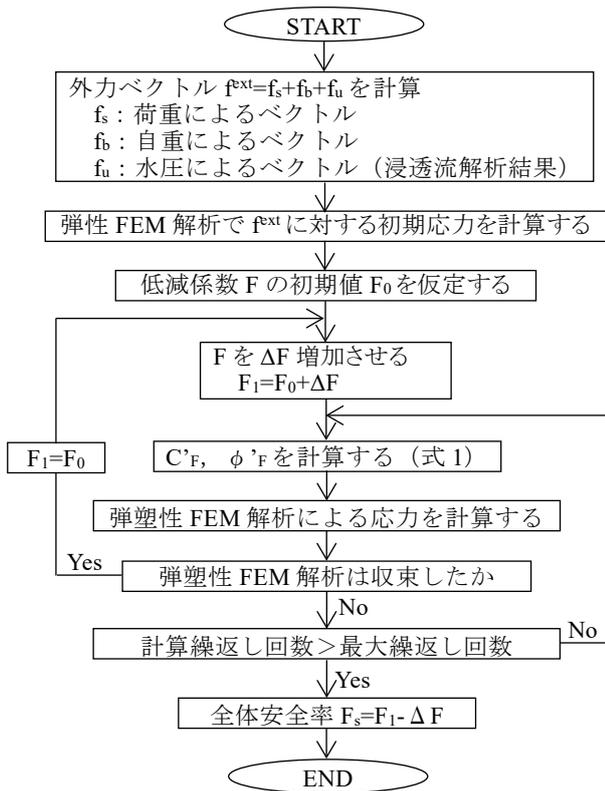


図-9 セン断強度低減法による応力解析フロー

4.2 解析条件

浸透-応力連成による斜面安定性評価の解析条件を表-3に示す。

まず、表土の物性値は、単位体積重量については表-1に示す当該崩壊斜面の試験結果に基づき設定した。また、強度特性については、表-1の三軸圧縮 CUBar 試験の有効応力によるせん断強度 $\phi=36^\circ$ に、既往研究による地層境界付近の平均強度低下率とされる 0.86^9 を考慮した内部摩擦角 $\phi=31^\circ$ を仮定した。なお、表土の N 値は、図-3に示す Bor.1 の標準貫入試験結果が $N=5, 18$ と小さいことから、表土全域の内部摩擦角が一様に前記 $\phi=31^\circ$ であるものと仮定した。弾性係数は、強度特性と整合するよう $2,800 \times N^{10}$ による $50,000 \text{ kN/m}^2$ を仮定し、ポアソン比は一般値 11 とした。

次に、基岩の単位体積重量と変形特性は硬岩相当の物性値 12 を、強度特性は表土に対して十分に大きな物性値を仮定した。

4.3 解析結果

せん断強度低減法による安全率の算定結果を図-10に、せん断強度低減法においてせん断ひずみの大きさにより表現される臨界すべり線を図-11に示す。なお、図-11には、参考として極限平衡法による最小すべり安全率とそのすべり線を併記している。ここで、極限平衡法は、地盤を剛体と仮定しモーメントのつり合いのみを考慮する簡便法であり、本検討では式(4)の円弧すべりを対象とした修正フェレニウス法を用いた 13 。

表-3 応力解析および安定解析条件

解析用物性値		表土	基盤
単位体積重量	湿潤	17.3kN/m ³	24.0kN/m ³
	飽和	19.6kN/m ³	25.0kN/m ³
強度特性	内部摩擦角	31°	45°
	粘着力	0kN/m ²	100kN/m ²
変形特性	弾性係数	50,000kN/m ²	1,000,000kN/m ²
	ポアソン比	0.3	0.2

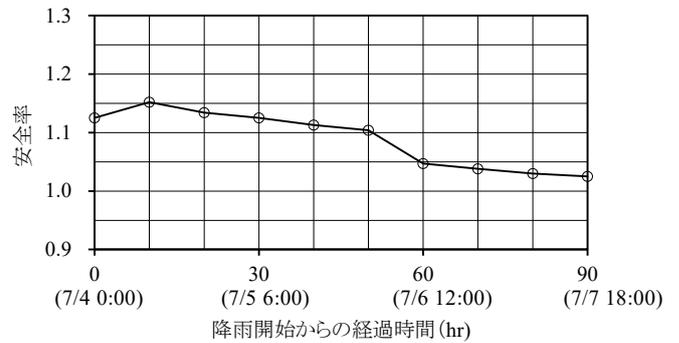


図-10 セン断強度低減法による安全率

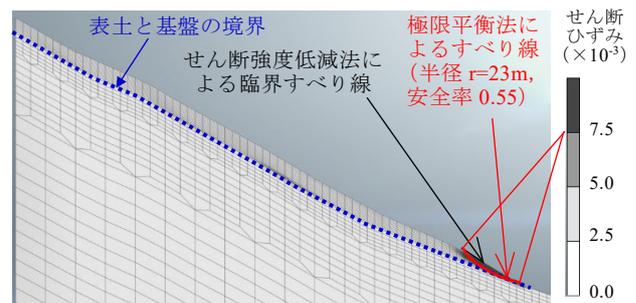


図-11 セン断強度低減法による臨界すべり線

$$F_s = \frac{\sum \{c' \cdot l + (W - U \cdot b) \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi'\}}{\sum W \cdot \sin \alpha} \quad (4)$$

ここに、 F_s : すべり安全率, c' : 粘着力,
 ϕ' : 内部摩擦角, l : すべり線長
 W : 土塊重量, U : 間隙水圧, b : 分割幅,
 α : 円弧中心とすべり線を結ぶ線の鉛直角

図-10より、せん断強度低減法による降雨開始時点(7月4日0時)の安全率は1.1を上回っており、地形変化点下部の表土内が飽和に至る降雨開始60時間後(7月6日12時)に、1.05程度まで大きく低下する。その後、安全率は崩壊発生時刻とされる降雨開始70時間後の7月6日22時の約1.04、降雨完了時点7月7日18時の1.03程度まで徐々に低下している。

次に、図-11より、せん断強度低減法による臨界すべり線は、地形変化点下方の表土内に認められ、参考に検討を実施した極限平衡法によるすべり線と整合することを確認した。また、極限平衡法による安全率は、地下水位上昇に伴う間隙水圧の作用によって0.55まで低下し、

せん断強度低減法の安全率と大きく異なる結果となった。

この結果について、まず極限平衡法の安全率は、通常有限要素法に比べて小さいとされている¹⁴⁾ことと整合している。次に両者の安全率の違いについて、せん断強度低減法では地盤の透水性の違いが考慮されるが、極限平衡法では考慮されない。本斜面は透水性が低く、図-9に示す水圧によるベクトル f_u が高透水性地盤に比べて小さいため、せん断強度低減法の安全率は大きく低下しなかったものと推察される。

以上のとおり、透水係数の試験個数、強度特性の推定精度や一様物性を仮定したこと、2次元解析であったことなどから、せん断強度低減法による浸透一応力連成解析結果は、安全率 1.0 を下回ることの完全再現には至っていない。しかし、地形変化点下部が全域飽和することで安全率が大きく低下し、崩壊もしくは崩壊に至る直前の状態になったことが確認できた。また、傾斜 30 度未満の斜面でも地形変化点の把握が重要であること、地形変化点下方が 1 次崩壊し、その後地形変化点上方の 2 次崩壊、3 次崩壊を誘発した可能性を示唆できたと考える。

4. まとめ

本研究により得られた結論を以下に列挙する。

- (1) 傾斜 30 度未満の斜面の崩壊要因の一つに、遷緩線や地形変化点がある。
- (2) 難透水性地盤では、短期間の集中豪雨よりも長期的な降雨特性の方が地下水位上昇量は大きく、崩壊に至り易いことを確認できた。
- (3) 浸透一応力連成解析による斜面の安定性評価結果は、解析用物性値の精度や 2 次元解析であったことから、安全率 1.0 を下回ることの完全再現には至らなかった。
- (4) 浸透一応力連成解析のせん断ひずみの大きさによって表現される臨界すべり線は、地形変化点下方の風化土層内に認められ、これが一次崩壊となって地形変化点上方の崩壊を誘発した可能性が示唆された。
- (5) 当該斜面は谷地形であり、3 次元浸透流解析によるより精度の高い地下水位上昇速度の把握と、これを考慮した斜面安定解析手法の簡易化が課題である。

謝辞

株式会社ウエスコの井上真氏には、崩壊前後の LP データに基づく傾斜量図から、崩壊箇所を横断する遷緩線と、遷緩線谷側の部分的な遷急線（地形変化点）の微地形を判読いただいた。また、協同組合岡山県土質試験センターには土質試験に協力いただき、株式会社エイト日本技術開発の木村隆行氏には、地層境界面付近のせん断強度の設定に関して貴重な助言をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 建設省河川局砂防部傾斜地保全課・建設省土木研究所砂防部急傾斜地崩壊研究室：がけ崩れ対策の実態，土木研究所資料，第 3651 号，pp.81-84，1999.
- 2) 気象庁 web：<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (入手日 2020.3.15).
- 3) 国土地理院：地図・空中写真閲覧サービス，<https://mapps.gsi.go.jp>，2020 年 3 月閲覧.
- 4) 赤井浩一，大西有三，西垣誠：有限要素法による飽和一不飽和浸透流の解析，土木学会論文報告集，第 264 号，pp.87-96，1977.
- 5) 一般財団法人国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き（改訂版），pp.42-68，2012.
- 6) Griffiths, D.V. and Lane, P.A. : Slope stability analysis by finite elements, *Geotechnique*, Vol.49, No.3, pp.387-403, 1999.
- 7) 蔡飛，鶴飼恵三：飽和・不飽和浸透流による降雨時斜面崩壊の予測可能性に関する考察，地盤工学会中国支部豪雨時の斜面崩壊のメカニズムと予測に関する論文集，pp.23-26，2001.
- 8) 鶴飼恵三，萩原敏行，井田寿朗：モデル化された切土斜面の 3 次元安定解析と留意点，地すべり，Vol.29, No.4, pp.18-24，1993.
- 9) 木村隆行，佐藤丈晴：境界面強度における強度低下率，平成 22 年度地盤工学会中国支部セミナー報告会，ポスター No22，2010.
- 10) 公益社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説，IV 下部構造編，pp.187-188，2017.
- 11) 社団法人地盤工学会：設計用地盤定数の決め方一土質編一，pp.104-105，2007.
- 12) 社団法人地盤工学会：設計用地盤定数の決め方一岩盤編一，pp.47-48，2007.
- 13) 社団法人日本道路協会，道路土工 切土工・斜面安定工指針（平成 21 年度版），pp.398-399，2009.
- 14) 蔡飛，鶴飼恵三，黄文峰：斜面安定性の評価一極限平衡法と弾塑性 FEM の比較，地すべり，Vol.39, No.4, pp.395-402，2003.

9. 衛星 SAR データによる地盤の変位解析方法と結果例

Ground Displacement Analysis Method and Results Examples using Satellite SAR Data

八野祐二 Yuji HACHINO (基礎地盤コンサルタンツ株)
吉川 猛 Takeshi YOSHIKAWA (基礎地盤コンサルタンツ株)

人工衛星を利用した地盤関連の適用としては、50年以上も前から、ランドサットなどの光学衛星による資源探査、植生調査、気象調査や、米国 GPS (現在は世界的には GNSS) 衛星による位置測定などが挙げられる。最近では、SAR 衛星による観測により、地盤の沈下や斜面の変位を解析される事例が多くなっている。本論文では、衛星 SAR データによる地盤の変位解析方法を説明し、実際の結果例について紹介する。

キーワード：リモートセンシング、地すべり、斜面、地盤沈下

1. はじめに

最近のデジタル化の流れの中で、地盤調査やインフラメンテナンス等にも、非破壊の調査や検査手法が多く用いられるようになってきている。例えば、道路下やトンネル壁面裏の空洞調査には地中レーダが使われ、斜面変位に対しては、GNSS (従来の GPS) によるモニタリングなどが実施されている。

本論文では、近年実施されるようになった衛星 SAR データによる地盤の変位解析方法と、その結果例について説明し、今後の展望を述べる。

バンド) のものが多い。都市部の高精度の解析では、C バンドなども使用される。

「時間分解能」は観測頻度に依存し、回帰日数の短い衛星は短期間での解析が可能である。ALOS-2 の干渉 SAR 解析に必要なデータを得るための全く同条件の観測間隔は、通常、3ヶ月~4ヶ月である。

表-1 運用中の代表的な商用 SAR 衛星¹⁾

衛星名	ALOS-2	COSMO-SkyMed [®]	TerraSAR-X (TanDEM-X)	RADARSAT-2
分解能	3m	3m	3m	8m
基数	1基	4基	2基	1基
波長帯 (波長の長さ)	Lバンド (23.5cm)	Xバンド (3.1cm)	Xバンド (3.1cm)	Cバンド (5.7cm)
観測幅	50km	40km	30km	50km
回帰日数	14日	16日	11日	24日
運用機関	JAXA (日本)	ASI (イタリア)	DLR (ドイツ)	MDA (カナダ)

2. 衛星 SAR データによる地盤の変位解析方法

2.1 衛星 SAR の概要

SAR とは Synthetic Aperture Rader の略で、日本語では合成開口レーダと言われている。SAR には、以下の3種類がある。

- (a) 人工衛星搭載型：衛星 SAR
- (b) 航空機搭載型：航空機 SAR (Pi-SAR：パイサー)
- (c) 地上設置型：地上設置型 SAR (GB-SAR：ジービーサー)

そして、衛星 SAR には表-1¹⁾に示すような種類があり、その特徴として、「空間分解能」、「変位分解能 (干渉 SAR 解析で波長の 1/10 程度)」、「時間分解能 (観測頻度)」の3つの分解能要素がある。

「空間分解能」は観測データの平面的な間隔 (タテ・ヨコ) である。

「変位分解能」は照射するレーダの波長によって決まるが、図-1 に示すように、波長によって、レーダの透過性も変わる。日本では都市部を除いて植生に覆われていることが多いので、山間部を対象とした衛星 SAR 解析に用いられるデータは、JAXA が運用している ALOS-2 (L

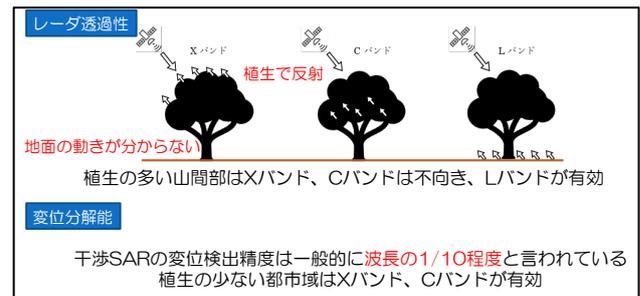


図-1 レーダ透過性と変位分解能

2.2 衛星 SAR の解析方法

衛星 SAR データによる解析では、図-2²⁾に示すように、基本的な原理として、1回目の観測データと2回目の観測データを干渉させ、位相差を取ることで、地盤の変位 (衛星と地表の距離変化) を得ることができる。ここで注意が必要なのは、衛星 SAR では、マイクロ波を地表に対して斜めに照射するため、解析によって得られる変位は衛星の視線方向 (斜め方向) の変位であるということである。この場合、1波長以上の変位に対しては、その見分けが付かないことにも注意が必要である。

また SAR 解析手法には、図-3 に示すように、多時期のデータを用いた時系列解析がある。時系列解析には 15～20 時期程度の多くのデータが必要になるが、干渉 SAR 解析の変位分解能と比べて、高精度の評価が可能となり、mm オーダーでの斜面や構造物の時系列変位を把握することができる。

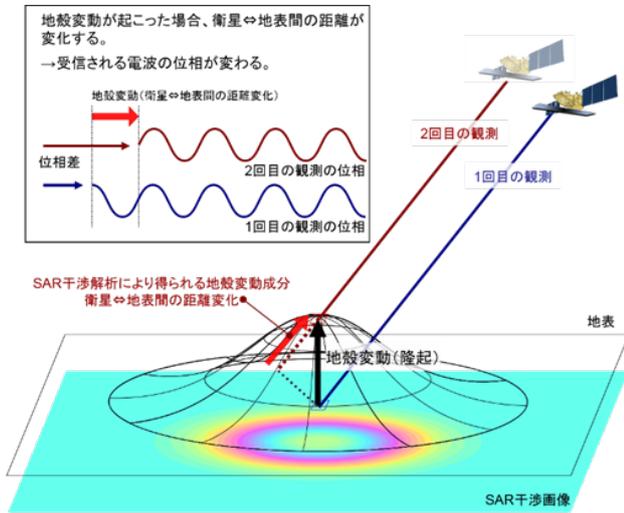


図-2 干渉 SAR 解析の原理²⁾

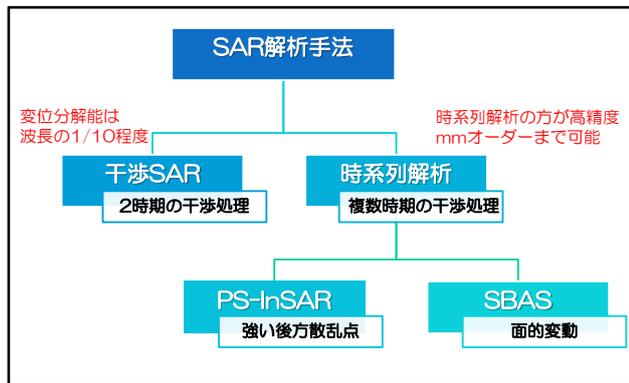


図-3 衛星 SAR 解析手法

3. 衛星 SAR データによる解析結果例

3.1 道路盛土の沈下例

時系列解析手法の一つである PS-InSAR で解析した道路盛土の沈下例を図-4³⁾に示す。

この結果では、150～153KP 付近の「粘性土および有機質土優勢区間（後背湿地）」³⁾などで沈下量が大きく、図-5³⁾に示す沈下量の実測値との比較でも整合的である。

3.2 道路法面の変状例

時系列解析手法の一つである SBAS で解析した道路法面の変状例を図-6⁴⁾に示す。

この結果では、赤枠で示した地表踏査により決められた変状範囲と、濃青色の SBAS 解析結果の変位が大きい部分とが整合的であり、図-7⁴⁾に示すように、時系列の変

位を比較しても、図-6⁴⁾の道路上測点が、ほぼ 0mm で一定であるのに対し、法面上測点は沈下傾向にある。



図-4 PS-InSAR 解析による道路盛土の沈下例³⁾

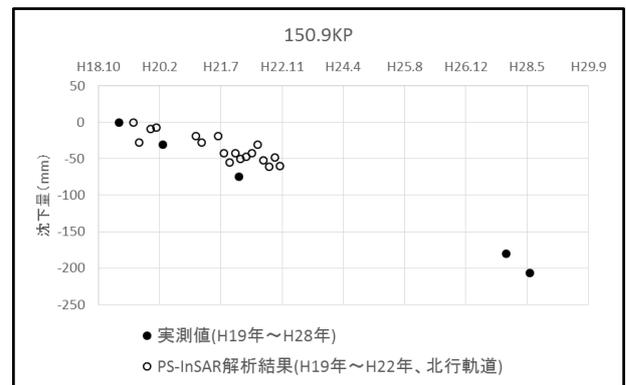


図-5 道路沈下量の経時変化の比較 (150.9KP)³⁾

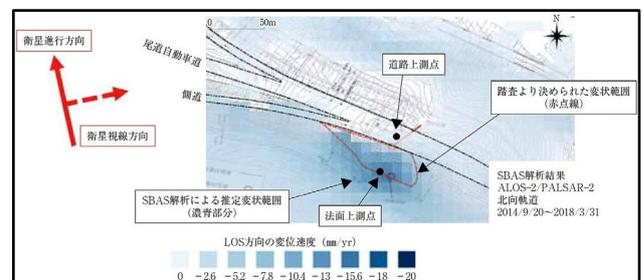


図-6 SBAS 解析による道路法面の変状例⁴⁾



図-7 道路上測点と法面上測点の SBAS 解析変位⁴⁾

3.3 活動的な地すべりの抽出例

既存の地すべり地形分布図に、干渉 SAR 解析結果を重ね合わせた図を図-8⁵⁾に示す。

この結果を見ると、多くの地すべりブロックの中で、

実際に変位が生じている地すべりブロックが、一目で分かる。

また既存の地すべり地形分布図が無い地域では、図-9⁵⁾に示すように、CS立体図⁶⁾によって地すべり地形を抽出することが考えられる。

いづれにしても、地すべり地形によって過去の斜面変動を把握し、衛星 SAR 解析によって現在の動きを把握することで、現在活動的な危険箇所を抽出することができる。

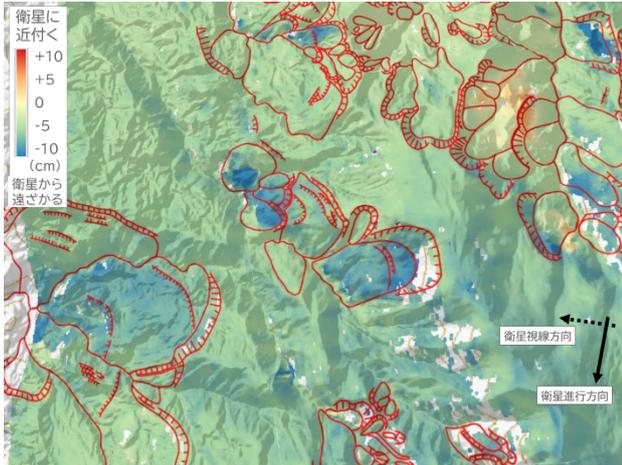


図-8 干渉 SAR 解析による活動的な地すべりブロックの抽出例⁵⁾ (図中の地すべりブロックは防災科学技術研究所の地すべり地形分布図を使用)

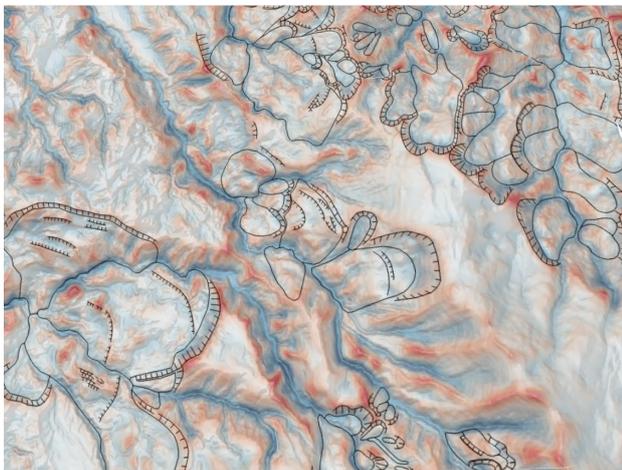


図-9 CS 立体図と地すべりブロックの表示例⁵⁾ (CS 立体図は国土地理院の数値標高モデルを使用。図中の地すべりブロックは防災科学技術研究所の地すべり地形分布図を使用)

4. まとめ

衛星 SAR データによる解析では、人工衛星が定期的に観測するデータを使用するため、現地に計測器等を設置する必要がない。また 1 データの観測範囲が約 50km 四方であり、一度に広範囲の観測が可能である。よって、道路や地すべりなどの広範囲に存在する調査対象に対して、低コストでの調査が可能なる。更に過去の観測データも使用できるので、災害発生箇所の変位履歴も分かる。

ただ現在、日本で運用されている JAXA の「ALOS-2」は、同条件での観測頻度が年 3 ~ 4 回程度であるため、時間分解能が悪い。また海外の SAR 衛星は、観測頻度が多く、分解能が高いものの、データ購入費が高い、データが無料で公開されているものの空間分解能が悪い、などの課題がある。

今後、打ち上げが予定されている「だいち 4 号 (ALOS-4)」では、同条件での観測間隔が 2 週間になる見込みで、時間分解能が飛躍的に向上する。また空間分解能は 3m で変わらず、観測幅が 50km から 200km に広がる予定である。

今後は、地盤調査やインフラメンテナンスにおいて、衛星 SAR による解析を、一層有効に活用して行きたい。

参考文献

- 1) 国土交通省 web : 災害時の人工衛星活用ガイドブック土砂災害版, <https://www.mlit.go.jp/common/001227722.pdf>
- 2) 国土地理院 web: 干渉 SAR の原理, https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar_mechanism.html
- 3) 古関潤一, 横田聖哉, 竹内渉, 吉川猛, 柳浦良行, 野口ゆい: 道路土構造物の維持管理の効率化のための干渉 SAR による変状調査方法, 地盤工学, 土と基礎, Vol66.(10), pp.22-25, 2018.
- 4) 吉川猛, 古関潤一, 清田隆, 竹内渉: 干渉 SAR を利用した法面変状の把握, 基礎工, 2021 年 1 月号, pp63-65, 2021.
- 5) 吉川猛, 三浦健一郎, 古関潤一: LP データ及び衛星 SAR の組合せによる斜面調査の効率化手法, 地盤工学会誌, Vol.70(1), pp31-35, 2022.
- 6) 戸田堅一郎: 曲率と傾斜による立体図法 (CS 立体図) を用いた地形判読, 農林立地, Vol.56(2), pp75-79, 2014.

10. 岡山県の風化残積率と地すべり地形分類の相関について

Correlation between the rate of weathered residual soils and landslide topography classification in Okayama prefecture

木村隆行 Takayuki KIMURA (エイト日本技術開発)

岡山には吉備高原面といわれる古い地形面が広く残留している。その頂部小起伏面にはD級風化帯が分布し、D級風化帯の剝離過程として風化残積率を定義し、地すべり地形との関係を整理した。その結果、遷急線を基準とした地すべり地形分類と、風化残積率や地すべり規模などに相関が認められた。地すべり冠頭部の発生位置から頂部型と開析型に区分し、データの分布から塑性型と崩壊型に区分でき、崩壊型は風化残積率がほぼ0.5以下に対応することが認められた。また、開析過程では塑性型から崩壊型に移行していくと考えられ、崩壊型は土石流発生の場合と一致すると考えられた。

キーワード：風化残積率、地すべり地形分類、開析斜面、遷急線

1. はじめに

岡山には古い地形面が広く残留しており、標高レベルでは、標高1000mの道後山面、標高400~600mの吉備高原面、標高400m以下の瀬戸内面といわれている。いずれも風化が進行した古い準平原であり、開析過程で様々な微地形が形成されている。地すべりもその開析過程のひとつの現象と考えられる。木村らは、この古い準平原に分布するD級風化帯の頂部の侵食・縮小過程として風化残積率を定義し、地すべり地形との関係を整理してきた¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。今回は追加データを加え、遷急線を基準とした地すべり地形分類と、風化残積率や地すべり規模の相関を再整理したので、報告するものである。

2. 調査の手順

本調査の対象地は、防災科学研究所の地すべり地形分布図の岡山県内の地すべりを対象として、国土地理院のWeb地形図の機能を用いて整理した。

図-1で示すように、地形形成はD級の頂部平坦面が開析されて頂部領域が縮小し、やがてC級岩盤主体の斜面になる開析過程と考えられる。そのなかの開析作用の一部として地すべり現象も発生する。頂部の風化残積率を、図-2で示すような遷急線と山頂と谷との距離比率で定義し、地すべりとの相関を検討した。また、図-3で示すように、地すべり起点(冠頭部)が頂部内にあるものを頂部型地すべりとし、開析斜面内に起点があるものを開析型地すべりと定義した。また、その地形形状から、大凸型、凸型、大凹型、凹型、谷凹型、複合型に区分した。頂部地すべりの凸型もしくは凹型で、残丘が認められるものは、図-4で示すように、その残丘が遷急線位置にあったと仮定して、その疑似斜距離を移動距離として整理した。この地すべり地形区分を図-5に示した。

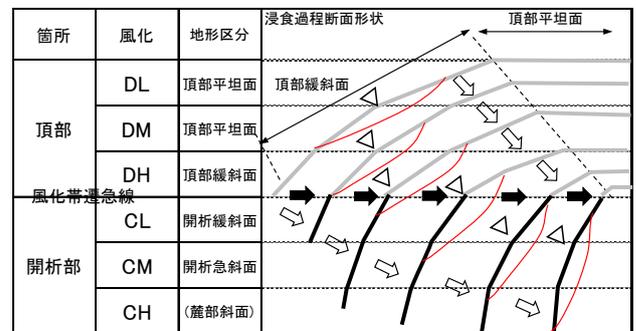


図-1 頂部平坦面の開析過程モデル図

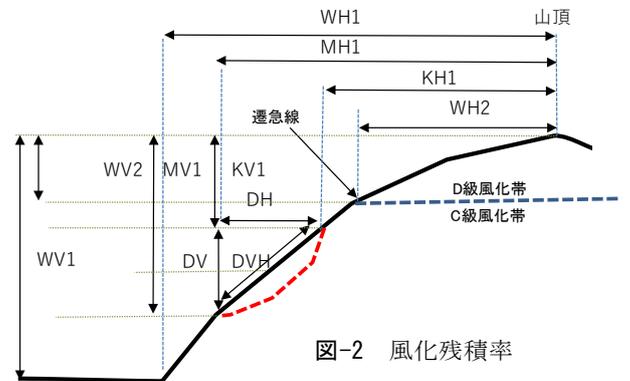


図-2 風化残積率

- ・鉛直風化残積率 $WV = WV2 / WV1$ (1)
- ・水平風化残積率 $WH = WH2 / WH1$ (2)
- ・断面風化残積率 $WVH = (WV + WH) / 2$ (3)
- ・崩壊起点遷急線鉛直比率 $RKV = KV1 / WV2$ (4)
- ・崩壊起点遷急線水平比率 $RKH = KH1 / WH2$ (5)
- ・崩壊起点遷急線断面比率 $RKVH = (RKV + RKH) / 2$ (6)
- ・崩壊終点遷急線鉛直比率 $RMV = MV1 / WV2$ (7)
- ・崩壊終点遷急線水平比率 $RMH = MH1 / WH2$ (8)
- ・崩壊終点遷急線断面比率 $RMVH = (RMV + RMH) / 2$ (9)

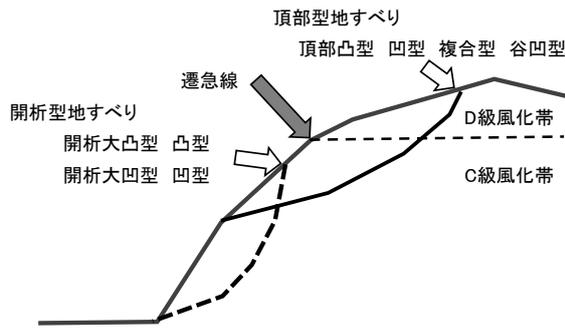


図-3 地形開析上の地すべり区分

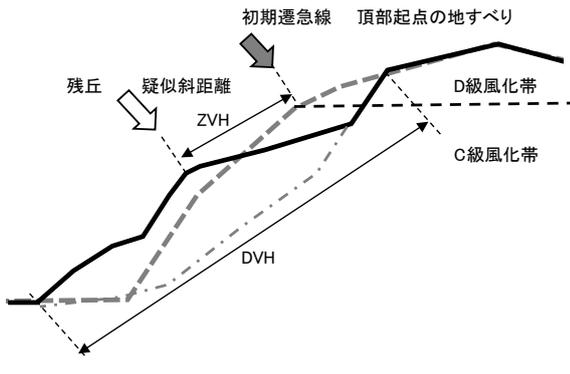


図-4 残丘型(凸型)の初期遷急線



図-5 地すべり地形区分

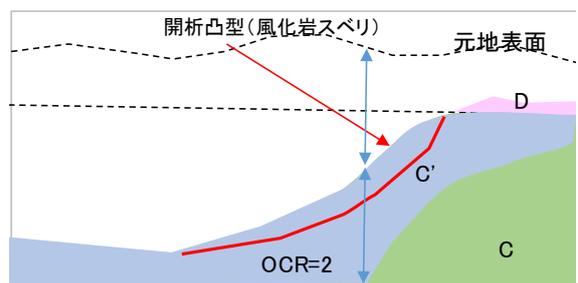
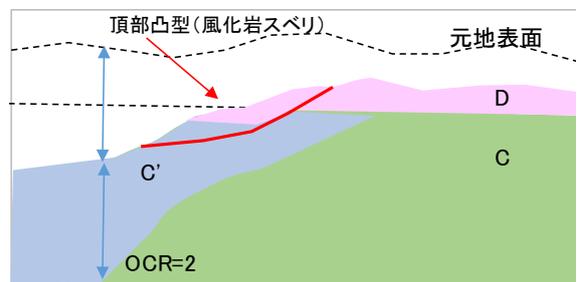
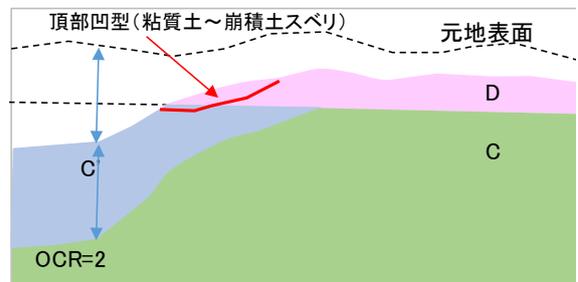
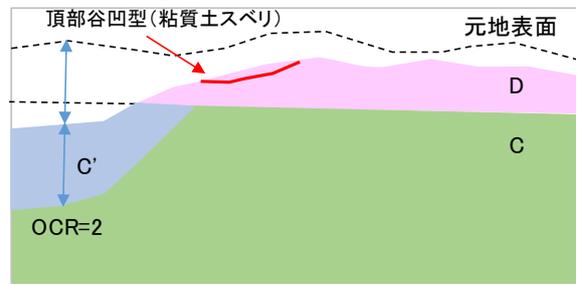
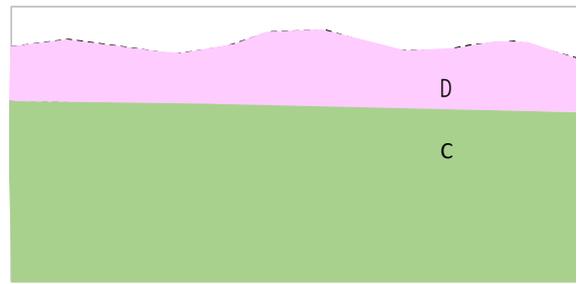


図-6 地形開析過程での地すべり発生箇所

また、地形開析過程での地すべり発生箇所の各段階を 図-6 に示した。D級風化帯の削剥とC級風化帯の削剥は、河川浸食などにより同時に発生していくが、削剥による応力開放によりC級岩盤の斜面周辺はキレツの多い劣化したC'級岩盤になっていくと考えられる。木村らの研究では、過圧密比（応力開放比）OCR=1.5以上がゆるみ範囲で、OCR=2以上ですべりが発生することが多い傾向を示している^{5) 6)}。

3. 地すべり地形区分と風化残積率の相関

図-7は、地すべり移動体の水平距離と鉛直距離の相関図で、紀伊半島の深層崩壊のデータを加えているが、一定の相関が認められる。図-8は参考に示す岡山や広島のと土石流移動体の水平距離と鉛直距離の相関図である。図-7において、開析型及び頂部凸型と、頂部凹型・複合型・谷凹型とは別のグループと考えられ、前者を崩壊型、後者を塑性型とすると、図-8の土石流は地すべりの崩壊型とほぼ一致する。

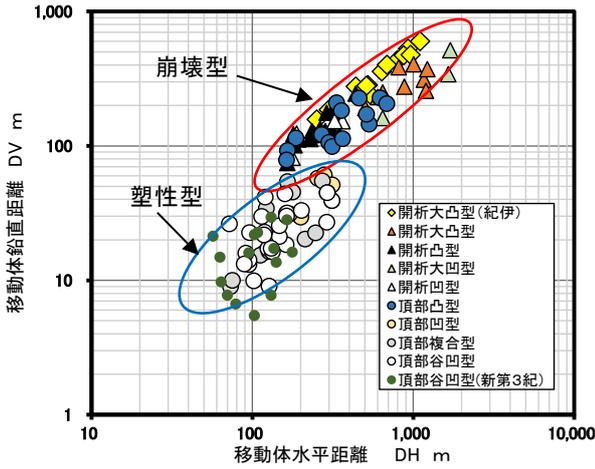


図-7 地すべり移動体の水平距離と鉛直距離の相関

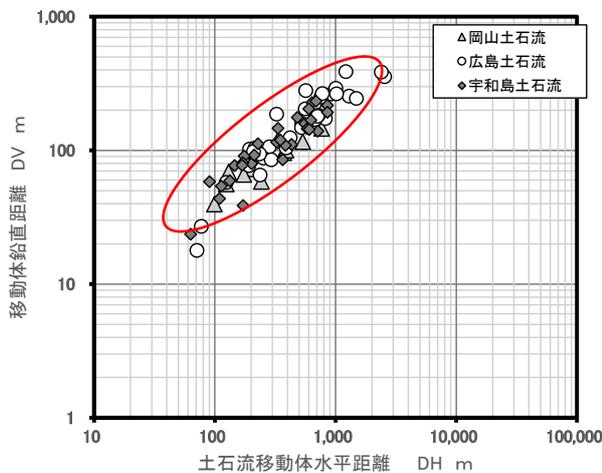


図-8 土石流移動体の水平距離と鉛直距離の相関

図-9は移動角度と地すべり移動体の斜距離の相関図で、同様のグループ化が認められ、移動角度が小さいほど地すべり規模が大きくなる傾向が認められた。

図-10は、断面風化残積率と地すべり移動体の斜距離の相関で、風化残積率が小さいほど移動距離が大きくなる傾向を示す。また、図-11は土石流における断面風化残積率と移動体斜距離の関係で、土石流は風化残積率0.5程度以下でないと生じていない。これは地すべりにおける崩壊型(頂部凸型～開析大凹型)の分布域とほぼ一致し、発生の方が共通していると考えられる。

つまり風化残積率が0.5以下で豪雨を吸収する風化帯

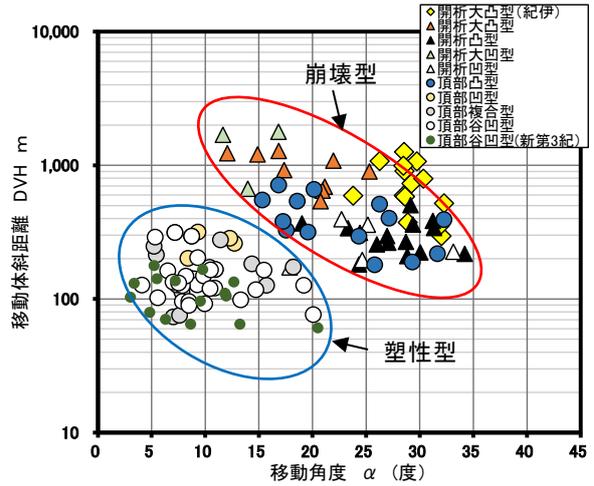


図-9 移動角度と移動体斜距離の相関

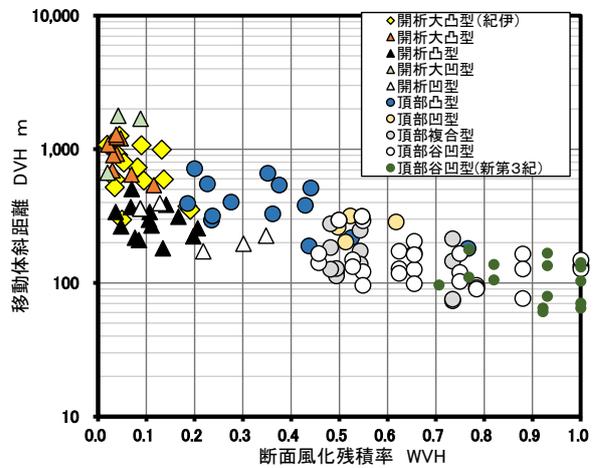


図-10 断面風化残積率と移動体斜距離の相関

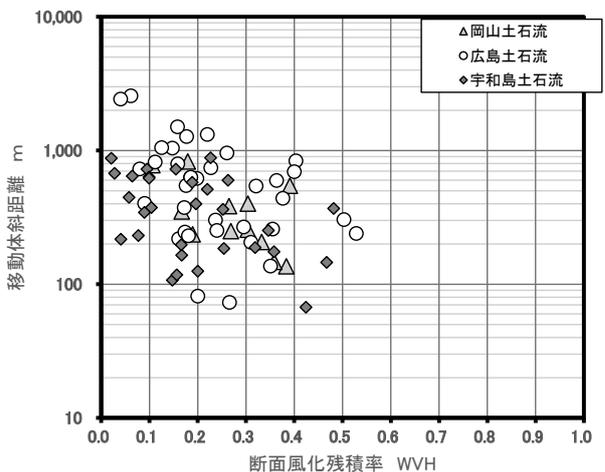


図-11 水平風化残積率と移動体水平距離の相関

が薄いと崩壊的な挙動になりやすいと考えられる。逆に風化土が厚い領域は、豪雨を吸収するので土石流は発生していない。

図-12は断面風化残積率と移動角度の相関を示す。頂部谷凹型～頂部凹型の塑性型スベリでは移動角度が小さく、スベリの終点が開析斜面内に及ぶ頂部凸型になって移動角度が大きくなり、巨大地すべり化した開析大凸型

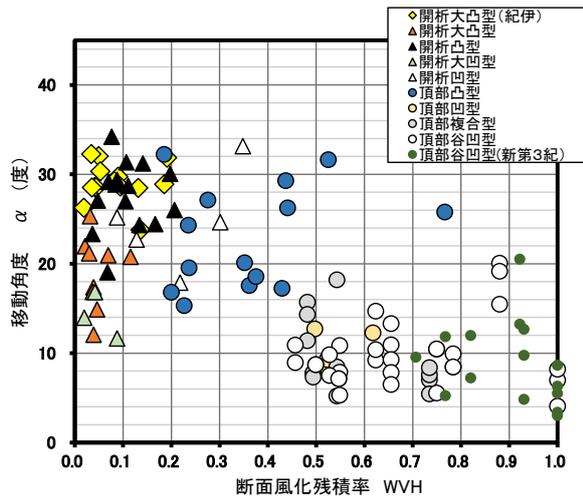


図-12 断面風化残積率と移動角度の相関

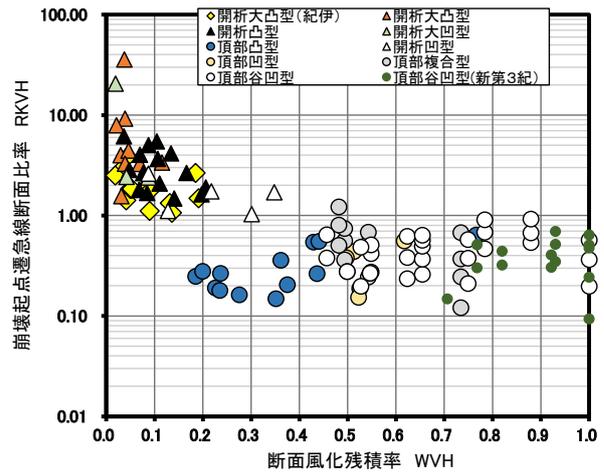


図-15 断面風化残積率と崩壊起点断面比率の相関

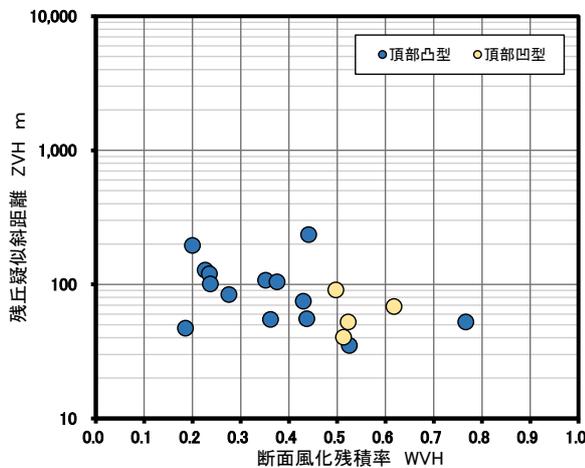


図-13 断面風化残積率と残丘移動距離の相関

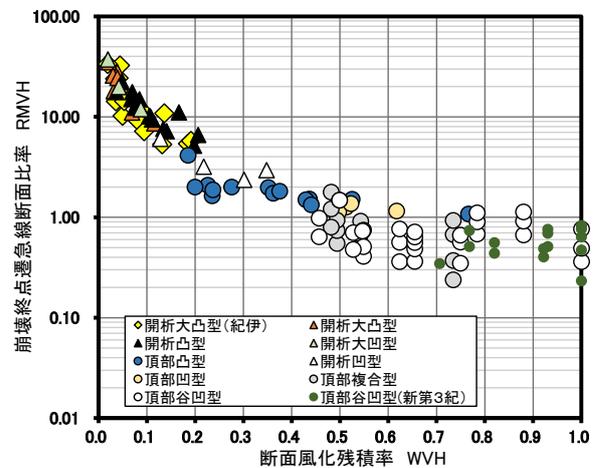


図-16 断面風化残積率と崩壊終点断面比率の相関

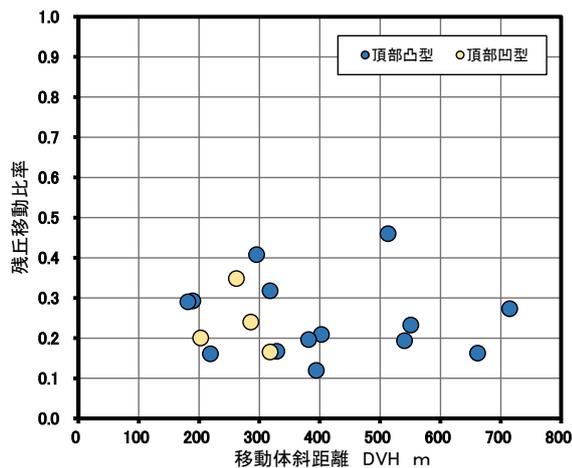


図-14 移動体斜距離と残丘斜距離の相関

や開析大凹型では逆に角度が小さくなるという変化を示す傾向がある。頂部凸型，開析凸型，開析凹型の崩壊型スベリの移動角度が急になっている。

図-13 は断面風化残積率と残丘の移動距離の相関で，風化残積率が小さいほど規模が大きくなるため，残丘移動量も大きくなる傾向を示す。ただ，データ数が少ない

のであまり明確ではない。

図-14 は，移動体斜距離と残丘移動比率の相関で，全体としては残丘移動比率は0.1~0.5程度に分布し，かなりバラついている。残丘移動比率が0.5以上がない理由としては，それ以上移動する場合は残丘が残っておらず認識されないことが要因と推定される。

図-15 は，断面風化残積率と崩壊起点遷急線断面比率の相関である。崩壊起点遷急線断面比率は移動体の移動起点が遷急線である場合が1で，1未満は山頂側にあることを意味している。この場合，スベリの起点が断面風化残積率が0.2程度まで，遷急線を巻き込んでスベリが発生しており，D級風化帯が減少しても，山頂付近から多くのスベリが発生している傾向が認められる。

図-16 は，断面風化残積率と崩壊終点遷急線断面比率の相関である。崩壊終点遷急線断面比率は移動体の舌端部が遷急線である場合が1で，1以上は開析斜面側に舌端部があることを意味している。この場合，断面風化残積率が0.5以下であると，スベリの舌端部が開析斜面にまでスベリが及んでいる傾向があり，断面風化残積率が0.5以上であると，スベリの舌端部がD級風化帯の中にあることが多い傾向を示している。

4. まとめ

図-6 で示すように、地形開析の過程で地すべり地形を考えると、スベリの発生場が変化し、塑性変形的挙動から脆性破壊的挙動に変化して、表-1 のように区分できる可能性がある。

つまり、風化残積率が小さくなるに従って、D 級風化帯が減少し、C 級風化帯の開析面周辺は応力開放などにより劣化したC級 (C' 級) が増大し、スベリの場合と破壊挙動が変化してくると考えられる。本来、D 級風化帯が厚ければ、貯水タンクとして機能し、豪雨を吸収できていた部分ができなくなり、崩壊型 (脆性破壊型) のスベリに移行していくことが考えられる。その閾値として風化残積率 0.5 があり、土石流は、ほぼ風化残積率 0.5 以下で生じていることと関連すると考えられる。風化残積率 0.2 以下の領域に、参考で示した紀伊半島の深層崩壊が分布し、開析大凸型や開析大凹型も風化残積率がほぼ 0.1 以下であった。このように、風化残積率に対応し、地すべり地形分類が区分できると考えられた。

表-1 地形開析の視点による地すべり地形分類

大別	細別	グループ	風化残積率		
			0	0.5	1
頂部型 開析初期	頂部谷凹型	塑性型 (塑性変形型・土砂型・粘質土型)	[Progressive bar from 0 to ~0.8]		
	頂部複合型		[Progressive bar from 0 to ~0.8]		
	頂部凹型	[Progressive bar from 0 to ~0.8]			
	頂部凸型	[Progressive bar from 0 to ~0.8]			
開析型 開析進行	開析凹型	崩壊型 (脆性破壊型・破砕型)	[Progressive bar from 0 to ~0.4]		
	開析凸型		[Progressive bar from 0 to ~0.4]		
	開析大凹型		[Progressive bar from 0 to ~0.4]		
	開析第凸型		[Progressive bar from 0 to ~0.4]		
(参考) 土石流			[Progressive bar from 0 to ~0.4]		

このような、検討結果をまとめると、以下のようになる。

- (1) 風化残積率と地すべり移動体の規模や傾斜角などには相関があり、地形開析の視点から表 1 のような地すべり地形分類が考えられる。
- (2) 風化残積率 0.5 程度により、「崩壊型」と「塑性型」に区分できる可能性がある。「崩壊型」は土石流発生領域と一致する。
- (3) 粘質土地すべりは地すべり開析初期の頂部谷凹型に対応する可能性があり、地形開析の視点からは、土砂タイプの塑性型から風化岩タイプの崩壊型に発生の場合が変化していくことが考えられる。

今後、他の地区を含めてデータ収集を進め、山地解体における地形開析の視点から定量的な地すべり区分を検証していきたい。

参考文献

- 1) 木村隆行, 沼知之, 二木重博, 工藤健雄, 與那城稔, 井上真: 岡山県での西日本豪雨における風化率と斜崩壊形態の相関, 日本応用地質学会, 平成 30 年 7 月豪雨災害 (西日本豪雨災害) 調査団報告書, pp81-86, 2019.
- 2) 木村隆行, 沼知之, 二木重博, 工藤健雄, 與那城稔, 井上真: 風化率と斜崩壊形態の相関, 日本応用地質学会, 令和元年度研究発表会講演論文集, pp171-172, 2019.
- 3) 木村隆行, 沼知之, 二木重博, 工藤健雄: 西日本豪雨における風化残積率と崩壊形態の相関, 日本応用地質学会中国四国支部, 令和 2 年度研究発表会講演論文集, pp15-20, 2020.
- 4) 木村隆行, 沼知之, 工藤健雄: 風化残積率による岡山の地すべり分類, 日本応用地質学会, 令和 3 年度研究発表会講演論文集, pp203-204, 2021.
- 5) 木村隆行, 橋尾宣弘: 応力開放比によるすべり面形状の評価, 第 52 回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp246-247, 2013.
- 6) 木村隆行, 橋尾宣弘, 今田真治, 西垣誠: 切土における応力開放に伴う風化残積土の強度低下, 第 56 回地盤工学研究発表会講演集, 13-1-4-01, 2021.

総合討論

1. 河川災害 WG 確実に堤防強化を図る上での課題
○新村卓也(パシフィックコンサルタンツ)
2. 河川災害 WG 河川堤体における不飽和土の水分計測での課題
○片山輝彦(アサノ大成基礎エンジニアリング)
3. 河川災害 WG の提言
○館川逸朗(パシフィックコンサルタンツ)
4. 地震災害 WG 来る大地震に備えて
○末富岩雄(エイト日本技術開発)
5. 地震災害 WG S波速度構造モデル作成の課題
○杉本芳博(ダイヤコンサルタント)
6. 地震災害 WG 地震動・液状化ハザードマップの高精度化に向けて
○王寺秀介(中央開発)
7. 土砂災害 WG 土砂災害対策推進上の課題
○齊藤泰久(パシフィックコンサルタンツ)
8. 土砂災害 WG 崩壊土砂量の推定精度向上の課題
○井上真(ウエスコ)
9. 土砂災害 WG 土砂災害警戒区域等指定精度向上の課題
○笹井友司(中電技術コンサルタント)
10. 土砂災害 WG 衛星 SAR の今後の課題
○八野祐二(基礎地盤コンサルタンツ)
11. 土砂災害 WG 山地解体過程における地すべりや斜面安定評価の課題
○木村隆行(エイト日本技術開発)
12. 土砂災害 WG の提言
○與那城稔(ウエスコ)

総合討論

討論参加者

西垣誠(統合物性モデル技術研究組合理事長), 片山輝彦(アサノ大成基礎エンジニアリング), 與那城稔, 井上真(ウエスコ) 木村隆行, 末富岩雄(エイト日本技術開発), 八野祐二(基礎地盤コンサルタンツ), 杉本芳博(ダイヤコンサルタンツ), 橋本和佳, 王寺秀介(中央開発), 笹井友司(中電技術コンサルタンツ), 斉藤泰久, 館川逸朗, 新村卓也(パシフィックコンサルタンツ)

1. 河川災害WG 確実に堤防強化を図る上での課題 (新村卓也)

気候変動による災害の激甚化・頻発化に伴い「流域治水」を推進し, 総合的かつ多層的な対策が求められる中, 堤防強化等の事前防災対策は, 図-1.1や図-1.2のようにこれまで以上に効果の確実性や, 効率性が求められる.

(1) 効果的・効率的に堤防強化を図るための事前調査の提案

本報では河川堤防の「耐浸透機能」に着眼し, 確実な対策工規模を効率的に設定する手法として, ①空気圧連通試験と高密度電気探査を組合せた新たな調査法による対策範囲の設定, ②高密度電気探査結果の二次微分評価による対策深度の設定, について報告した.

空気圧連通試験と高密度電気探査を組合せた新たな調査法は, 図-1.3のように河川堤防の弱点箇所となる「高透水性範囲」を把握する手法として有効であることが示唆された. また, 同範囲をもとに, 浸透対策工の実施区間を設定できると考える. また, 高密度電気探査結果の二次微分評価は, 図-1.4のように土層境界を把握する手法として有効であり, 浸透対策工としての遮水矢板の打設深度を設定するための基礎情報として活用できると考えられる.

(2) 今後の課題

今回紹介した調査手法は, 長大な河川堤防の中から弱点箇所を絞込・抽出する組合せ調査手法としても有効と考えられる. 今後は実用化に向けて, 以下の観点から実績を重ねたいと考える.

①実用的な調査手法の確立: 実用化に向け, 調査機器プロトタイプ改良を進める.

②三次元解析ソフト開発: 現地調査で得た計測データおよび地盤条件を入力条件に, 図-1.5で示すような堤体内の空気圧分布, および連続する水ミチ・高透水域が分布する可能性を判定可能なソフト開発を行うと共に, 調査・解析方法を示したマニュアルを作成し, 実用化を進める.

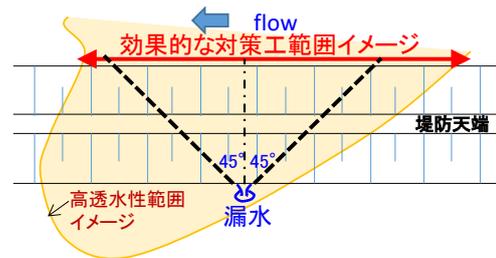


図-1.1 効果的な対策範囲イメージ

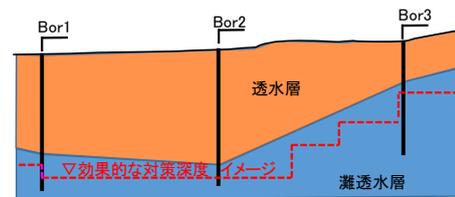


図-1.2 効果的な対策深度イメージ

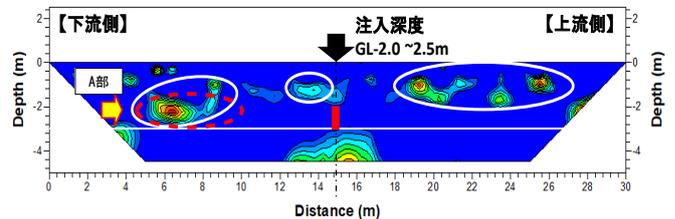


図-1.3 高透水性範囲の把握

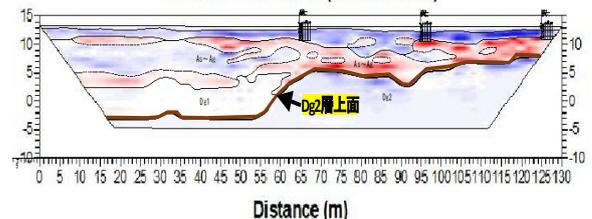


図-1.4 遮水矢板打設深度の設定目

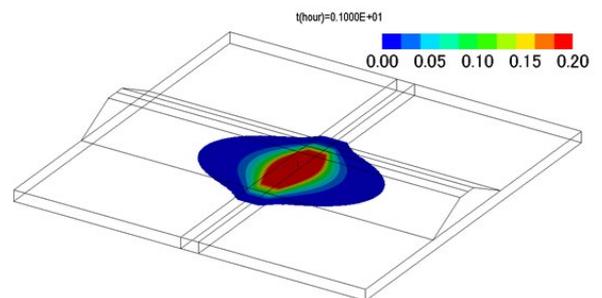


図-1.5 解析結果イメージ

2. 河川災害 WG 河川堤体における不飽和土の水分計測での課題 (片山輝彦)

2.1 研究成果の総括

(1) 堤内水位計測から明らかになったこと

高梁川左岸 10k200 の堤内水位の計測結果から、河川水位の上昇・下降の変化に比べ堤内の水位の変化が図-2.1 のように遅れて発生していることを確認した。この堤内水位の変化の遅れは以下の理由によるものと考えられる。

- ・堤体の不均質性による各地層の透水係数のばらつき
- ・堤体や基礎地盤の特性、降雨の影響などによる堤体内の状態のばらつき

このようなばらつきに起因すると考えられる堤内水位の変化の遅れが確認されたことは、河川水位のみで堤体の安定性を評価できないという貴重な知見の一つではないかと考えられる。

(2) 堤内に設置した土壤水分センサーによる飽和度計測から明らかになったこと

堤内水位と同時に飽和度計測を実施したことで、図-2.2 のように、「降雨量」「河川水位」「河川堤防内の不飽和部の飽和度」の関係を得ることができた。

2.2 今後に向けての課題

(1) 堤体全体の土壤水分(飽和度)の傾向を把握するために必要な不飽和部の面的な情報の収集方法の確立

堤内水位計測から明らかになったように、土質の不均質性による飽和度のバラつきに考慮する必要がある。そのため、図-2.3 に示すように同深度にセンサーを複数設置し、面的な計測データを把握することで計測精度の向上を図る必要がある。

また、大規模な掘削を行わずに堤体の安定性を損なわないような土壤水分センサーの設置方法(写真-2.1)を考える必要がある。

- (2) 降雨時の堤体の安定状況を明らかにする手法の確立
- (3) 河川堤防の安定性評価のために必要な評価基準・防災基準の設定
- (4) IoT 技術を活用した低コストで高精度な計測システムの活用

河川堤防の安定性評価のため、IoT 技術を活用した低コストで高精度な計測システムを開発することが今後の目指すべき技術であるとする。さらに、将来的には工学的メカニズムを背景にした AI による評価基準・防災基準をまとめたシステムの構築にも取り組んでいく必要があると考える。

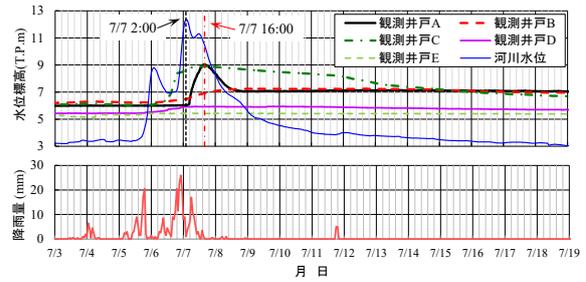


図-2.1 計測値の時刻歴 (2018/7/6~7/8)

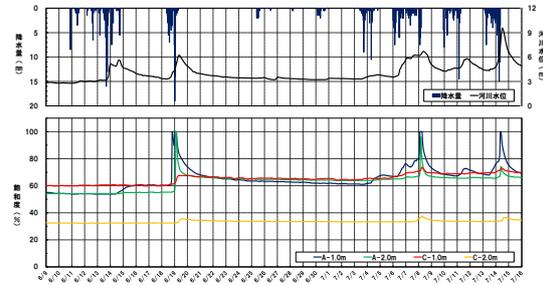


図-2.2 降雨量・河川水位と堤体内飽和度の時刻歴 (2020/6/9~7/16)

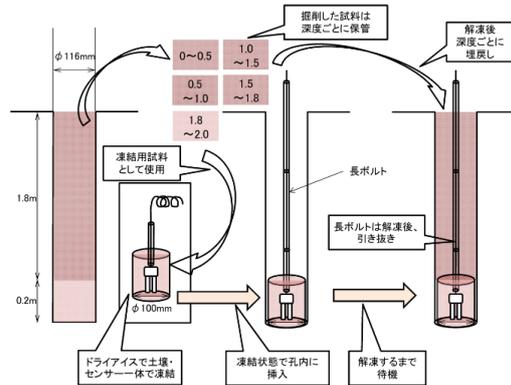


図-2.3 今回の研究で使用した土壤水分センサーの設置方法



写真-2.1 土壤水分センサーの設置状況

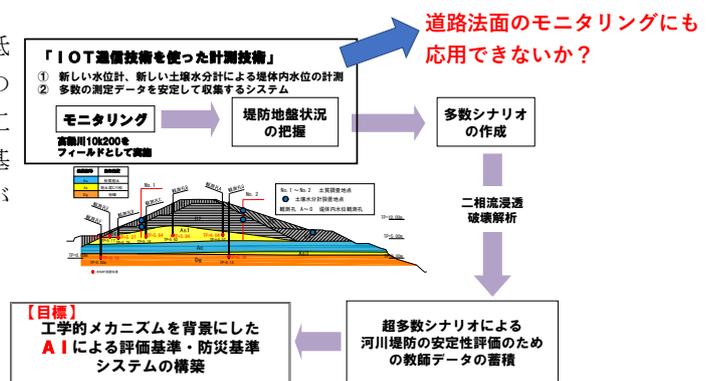


図-2.4 将来的な取り組み (案)

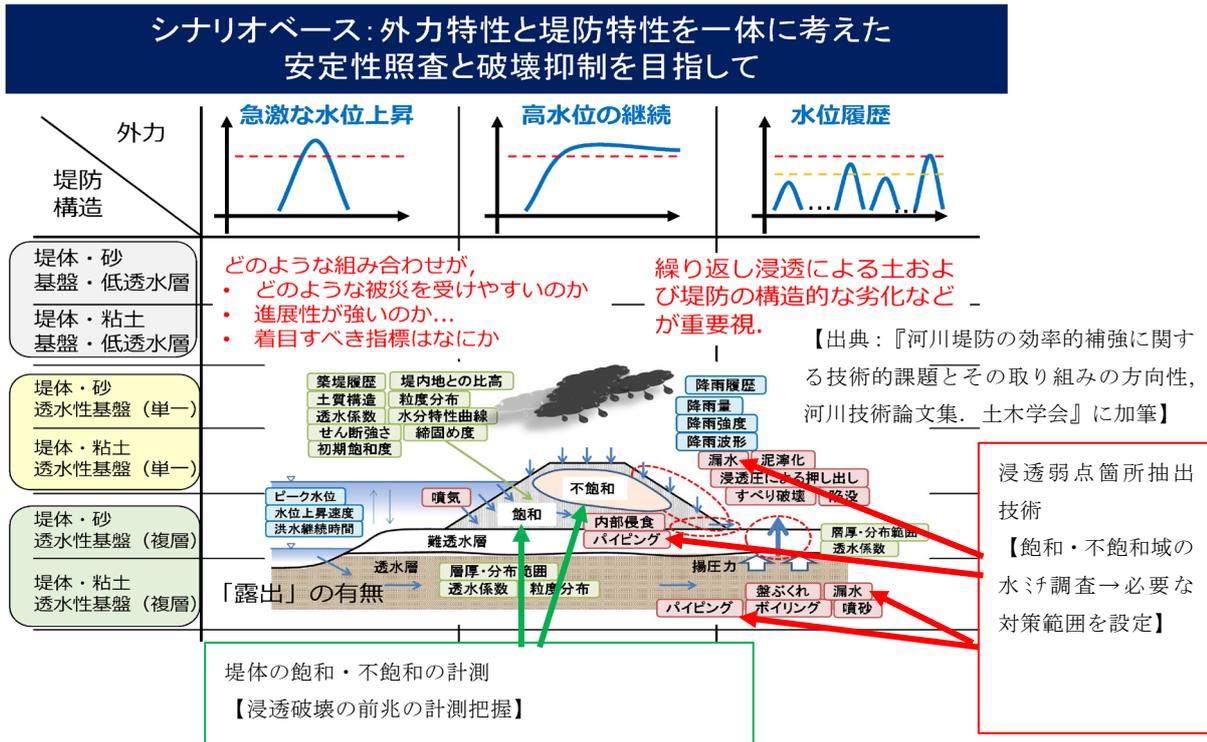
3. 河川災害 WG の提言 (館川逸朗)

3.1 WG の研究テーマの位置づけ

『河川堤防の効率的補強に関する技術的課題とその取り組みの方向性,河川技術論文集, 土木学会』の安全性照査と破壊抑制シナリオを示しており, これらの専門毎に目標時期を決め, 課題解決に向かっていく。本 WG の研究テーマは決壊メカニズムの解明とその対策の浸透安定に関わる部分を担い, 「浸透弱点箇所抽出技術」は“漏水”や“パイルング”に繋がる飽和・不飽和域の水び調査を対象とし, 「堤体の飽和・不飽和の計測」は“すべり破壊”や“パイルング”に繋がる破壊前兆の把握であった。

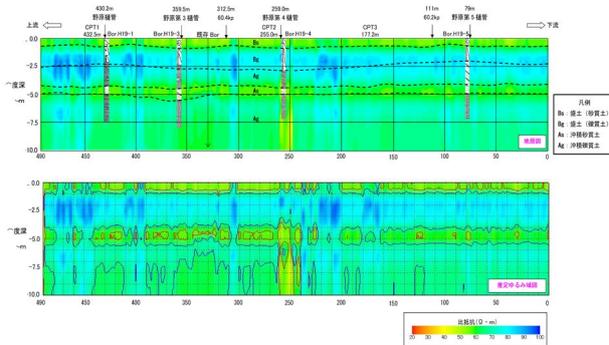
3.2 WG の究成果

「浸透弱点箇所抽出技術の開発」においては堤体と基礎地盤における飽和・不飽和域の水び調査を対象とし, 適切な物理探査・ボーリング・サンディング・土質試験結果 組合せを提案し, 3 次元的に“緩み”と“強度・透水性”といった工学指標を整理・設定までを進めてきた。このよう 本研究組合が目指す 3 次元統合物性モデル構築において一定の成果をあげてきた。



【出典: 『特殊堤の変状調査における FDEM 探査の適用事例, 2008.9, 第 63 回年次学術講演会概要集』】

物理探査・ボーリング・サンディング・土質試験結果 組合せて緩みと強度を設定した事例



電磁探査結果 (比抵抗値) からの推定土層 (上段)
と 相対密度 D_r (ゆるみ域) のコンターマップ (下段)

FDEM 探査・CPT・土質試験 (三軸 CUB) 結果 から土層毎に D_r から強度設定した整理例

緩みの状態	Mayerhofによる砂の N - D_r - ϕ の関係				今回調査による砂・砂礫		
	相対密度 D_r (%)	N 値	内部摩擦角 ϕ (度)	静的3軸支持力 q_c (kPa)	N 値	内部摩擦角 ϕ (度)	静的3軸支持力 q_c (kPa)
非常に緩い	<20	<4	<30	<1340	3~9 (6.5)	32.1	<2000
緩い	20~40	4~10	30~35	1340~ 3580	7~17 (11)	35.3~35.8	2000~ 3580
締まった	40~	10~	35~	3580~	15~	39.4~	3580~

図-3.1 河川堤防決壊と浸透弱点箇所抽出技術

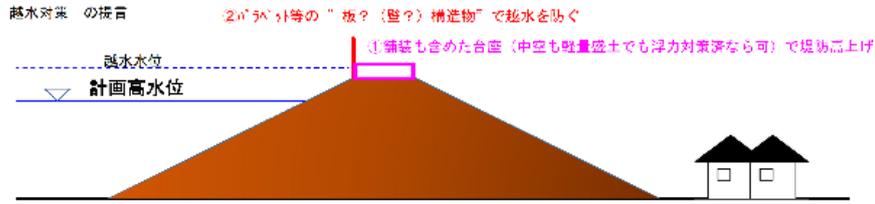


図-3.2 パラペットや嵩上げ道路

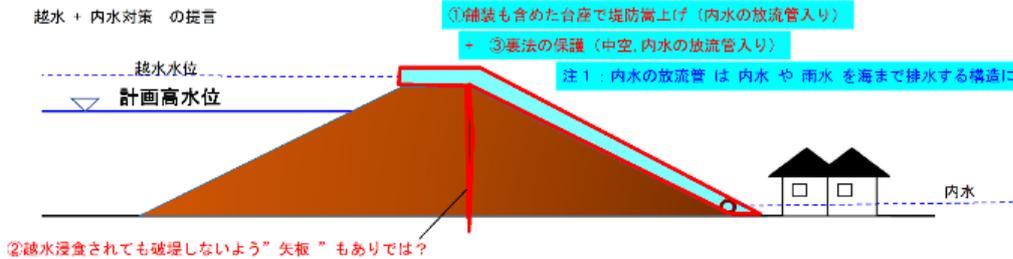


図-3.3 矢板と内水放流管

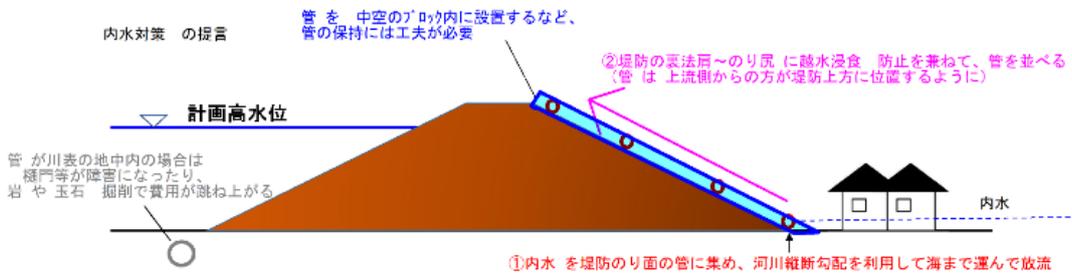


図-3.4 河床放流管と内水放流管

3.3 現行の性能規定の課題

気候変動に伴う外力特性の変化が著しく、と堤防特性を踏まえた照査-対策も含めた一般的な基準化までには道半ばといえる。最近では浸透安定よりも超過洪水や越水に起因する破堤が頻発しており、「流域治水」や「越水」に対する“粘り強い堤防構造”の検討が始まっている。

(3) 「内水排除」について

・最近の内水被害への対策として、集めた雨水・内水を管で海まで運んで放流する案が提案される(図-3.3)。
 ・放流管位置は堤防裏のり面(天端裏側も)とし河川縦断勾配を利用して海に放流する案に賛意が集まった(図-3.4)。

3.4 「流域治水」や「越水」等に対する意見

堤防は原として HWL 以下の洪水は対象としており、越水させない堤防等について示されて意見を整理する。

(1) 「流域治水」について

・土地利用状況から必要な容量確保が困難な場合や避難困難な住民に配慮した“輪中堤”は費用対効果が高い。
 ・毎年のように洪水被害が生じる中で、対策検討~諸機関の調整~実施までに期間が長く、その間に多くの財産が失われており、生命が助かっていても再建の気力もないだろう。

(2) 「越水」について

・被害(堤防機能喪失)箇所は矢板で、他は堤防天端にパラペットや嵩上げ道路等の緊急対策を望まれる(図-3.2)。しっかりした土堤は後々に整備していけばよいのでは。
 ・河川予算が付かないなら、道路側が壁を付けた実績もあるので、どの部署でも関係なく住民の財産を護るべき。

4. 地震災害 WG 来る大地震に備えて (末富岩雄)

本来は、ハザードマップよりも、南海トラフでの地震のような巨大災害を想定すれば、防災体制等、課題は山積みであり、それについても述べたいことは多い。しかしながら、ここでは、これまでの地震災害 WG の活動の中で、地震動・液状化ハザードマップの精度向上への寄与について考えてみた。

(1) 地震観測点の高密度化と分析

1995 年阪神・淡路大震災では、震災の帯と呼ばれるように複雑な震度分布であったと建物被害等から推測されているが、実際の観測記録は不足し、それを裏付ける根拠データは十分に得られなかった。また、地震発生からしばらくは、神戸海洋気象台の揺れが分からず、最も被害が大きかったエリアの揺れが不明であった。このような反省から、国内に数千点からなる地震観測網が整備された。これにより、地震発生後、速やかに気象庁や防災科研から推計震度分布が公表されるようになった。これにより、どの都市で大きな揺れがあったかは、ある程度把握できる。しかしながら、その中でも特に、どの辺りが危険なのか、岡山県南部で言えば、県庁や市役所のある中心部なのか、児島干拓地の辺りなのか、水島の工業地帯辺りなのか、北側の住宅地の辺りなのか、そのような精度での情報を得て初動判断に活用したいところである。そのニーズに応えられるかの精度が、気象庁や防災科研からの情報で担保できているかの検証はなされていない。ハザードマップについても同様である。

ハザードマップは、地震が起きた後で検証されるが、それでは人命や財産を守ることはできない。大きな地震が起きた時でないと検証できないという誤解があるためか、そのような事前に検証する努力はあまりなされていないのが現状である。特に、中国地方では地震観測データの分析は、2000 年鳥取県西部地震等、日本海側では鳥取大学を中心に取り組まれているが、瀬戸内側での取り組み事例は少ないようである。

(2) 観測記録の分析

簡単にできる分析としては、基準点に対する相対的な増幅度または距離減衰式に対する増幅度を地震ごとに算定し、各観測点で平均的な増幅度を算定すれば、どこが揺れやすいかは見えてくる。それと、地盤情報や地質と関連づけることで、似たような揺れとなる範囲は想定できるであろう。そして、強震時にどのような揺れになるかは、弱震記録の分析で地盤モデルを構築できれば、非線形特性については標準的なモデルでの計算にはなるが、ハザードマップ作成時よりは多くの情報に基づき、強震時の予測をすることが可能となる。

(3) 面的な精度の向上

現状の岡山県南部の地震計の配置はやや粗密に偏りがあるため、地点数に比べ、上記のような検討での効率が悪く、空白地帯と考えざるを得ないエリアが少なくない。面的な精度を向上していくには、簡易な地震計を利用した臨時観測により、数年間観測データを取得することが考えられる。最近の技術開発により、それは可能となっている。さらに、微動観測やボーリングデータ等で面的な情報を増やすことが望まれ、標準貫入試験より簡便なサウンディング等の活用でも平面的に変化する様子をとらえるには十分有用であろう。

(4) 液状化ハザードマップの課題

液状化ハザードマップについては、国土交通省が令和 3 年 2 月に「リスクコミュニケーションを取るための液状化ハザードマップ作成の手引き」が公表されている。液状化は、緩い砂地盤で地下水位が高いところで特に起こりやすいが、この手引きでも触れているように、人工改変地を如何にして捉えるかが、重要である。また、ボーリングデータは、道路や建物等の建設前に実施されるものであり、液状化や軟弱地盤対策として地盤改良等を行った場合でもその後の地盤情報は得られていないことが大半であり、工場等が多く立地する埋立地での液状化対策実施状況は不明であることが多い。予め全面的に液状化対策が行われていれば、大規模な液状化は起きないであろうし、工場敷地内でのみ行われていれば道路では液状化で大きな陥没が生じたりする可能性がある。岡山県に限ったことでなく、現状の液状化ハザードマップは概ねそういったものとなっているので、埋立地は真っ赤に塗られている。実際は上述のように、場所により異なっていることの方が多いのではと思われる。

過去に沼・池であったと旧地形図で確認できるところを反映した液状化ハザードマップとしては、横浜市のものがある。岡山県でも、1946 年の南海地震で液状化した箇所についての研究は行われているが、旧地形等から人工改変地を確認しておく必要があると思われる。

5. 地震災害 WG S 波速度構造モデル作成の課題 (杉本芳博)

岡山県南部に広がる干拓地は 1946 年昭和南海地震で甚大な被害を被った。浅部の軟弱層における地震波の増幅とこれに伴う液状化が被害を大きくしたが、最近のシミュレーション研究によると深部の地震基盤層（花崗岩層）の形状に起因するフォーカシング（地震エネルギーの集中）の影響も大きかったと考えられている（西村他、2019 等）。遠からず発生する次の東南海地震においても同様の被害が危ぶまれており、被害を最小限に抑えるためにも、浅部から地震基盤までの地盤状況の把握と適切な地震動予測が重要である。ここでは、岡山県南部の S 波速度構造モデル作成を通して見えてきたモデル作成の

課題について報告する。

(1) S波構造モデルの構築に使われるデータ

岡山県南部は活断層がないとされており直下型地震に対する重点的な調査は行われていない。これに伴って地震基盤までの深部に関する地質、地球物理学的情報も極めて限られている。現状において入手可能なデータはKuniJiban等の浅層部のボーリング、防災科研の地震観測網 K-net, KiK-net の観測点で実施された PS 検層、および既往文献で公開されている微動アレイ探査結果である。また、微動アレイデータや地震観測データから求めた H/V スペクトル（水平成分と鉛直成分のスペクトル比）をモデル作成用のデータとして使用した。これらに加えて令和3年度に県内の7地点で微動アレイ探査を実施した。これらのデータは観測点直下の弾性波速度分布の情報を与えるものであるが、モデルの対象範囲に比べてその数は限られている。このような“点”における情報を水平方向に内外挿して三次元モデルを作成するため、AVS30 やブーゲー異常データといった“面的”なデータを活用した。AVS30 は防災科学研究所から公開されている 250m 間隔のメッシュデータで地表から深さ 30m までの平均 S 波速度を与えている。微地形区分から経験的に推定した値のため信頼性が高いとは言えないがボーリングデータのない地点もカバーしている。またブーゲー異常データは産業総合研究所から 500m 間隔のメッシュデータとして公開されたものである。このデータは地震基盤を含む比較深部の情報を含んでおり、ボーリング地点の PS 検層や地層境界深度、微動アレイ探査地点の速度・深度情報を水平方向に内外挿する際の重要な役割を果たす。

(2) ジョイント・インバージョンによるデータの統合

今回使用したボーリングデータは 1752 孔あり、手作業で扱うには数が多すぎる。微動アレイやブーゲー異常データとの整合性を考えながら、最適モデルを作成するためには数多くの試行錯誤が必要であり、手戻りを余儀なくされることも多い。従来の総合解析のように熟練者の経験と勘に頼ったやりかたで数多くの多様なデータを統合してモデルを作成することは極めて困難である。我々はこれに対処するため、最小二乗原理に基づくジョイント・インバージョン解析プログラムを開発し、これを適用することによって本地域の三次元 S 波構造モデルを作成することができた。

(3) インバージョン解析における解の一意性の問題

インバージョン解析では複数の候補解が得られて、その中から一つに絞れないことが多い。解を一意的に決定できないことから“解の一意性”の問題として知られている。異なる種類のデータを同時に解析することによって解の一意性が改善される場合もあり、今回の検討でも H/V データの使用によってある程度の改善は認められた。

しかし中間層（1km～2.5km）の速度についてはパラメータの与え方に依存し異なる複数のモデルが得られた。解析残差（理論値と観測値の RMS 残差）で比較してもそれらのモデルの優劣を判定することはできなかった。これは中間層の速度に関する情報が足りないためと考えられる。これを解決するためには、地震基盤までの PS 検層や大深度反射法、大深度屈折法等の新たなデータの追加が必要である。

(4) 今後の課題

今回の検討では微動アレイ探査や地震観測の記録から算出した表面波の H/V スペクトルをインバージョンデータとして加えることにより、地盤の振動特性をより精度よく反映したモデルを作成した。微動の H/V スペクトル観測は比較的容易なため、広範囲でデータ取得することでモデルの精度を改善することができる。また、地震観測地点の H/V データとの比較から、地震観測点以外の地点の震度を精度よく推定できる可能性がある。

「おかやま全県統合型 GIS」では岡山県内のボーリングデータが PDF 資料として公開されている。しかしインバージョンの解析にはデジタルデータが必要なため今回のモデル作成では使用できなかった。過去のアナログデータのデジタル化も重要な課題として挙げられる。

上述のように“解の一意性”の問題は残されており新たなデータの追加によるモデルのブラッシュアップが必要である。また、この影響が地震動予測にどの程度影響するかを検討するため、地震動シミュレーションを行い、地震観測データとの比較によって検証していきたい。

ジョイント・インバージョン法は様々な物理探査データや地質データを統合するためのツールとして有効である。強震動検討のための S 波構造モデル作成に限らず一般の調査にも適用できる可能性がある。いろいろな対象への適用試験、そのためのプログラムのチューニングを進めるとともに、プログラムの扱いを含めて普及のための方策を検討する必要がある。

6. 地震災害 WG 地震動・液状化ハザードマップの高精度化に向けて（王寺秀介）

これまでの地震災害 WG の発表の中で、地震動・液状化ハザードマップの精度向上に寄与できることとして、①地震観測記録の充実、②地盤情報の充実、③地下水位データの充実（液状化危険度）が挙げられた。以下のその課題と今後の対応策案を記載する。

(1) 地震観測記録の充実

阪神・淡路大震災以降、地震観測網が整備されたことは周知の事実であるが、岡山県内を見ても最も揺れやすいとされている児島湖西地域には、まだ地震計が設置されていない。

この地震観測記録の充実に向けた対応として、中央開

発株式会社橋本氏らが開発している小型地震計の普及が効果的である。この小型地震計は、従来の地震計と比較して、費用は1/10程度に抑えられており、無線通信を装備しているため、設置も容易である。この小型地震計の普及により観測地点の拡充を比較的容易に実現することができる。また、より多くの地点の地震観測記録を収集・分析することで、地盤モデルの検証や修正に活用することができる。

(2) 地盤情報の充実

地震動・液状化ハザードマップの高精度化に向けてはその基礎となる地盤モデルの高精度化が不可欠であり、地盤モデルの高精度化に向けた最大の課題は、地盤情報の不足である。

地盤情報の不足に対する対応策の一つとして、ダイヤコンサルタントの杉本氏が開発したジョイントインバージョン法が有効である。この方法は、地盤情報が不足している場所に対して、物理探査、重力データや地層境界モデル等の多様な情報で補うことができることが大きな特徴である。

ボーリングデータを収集・共有・オープン化する動きも始まっている。2014年の横浜市マンション傾き問題や2016年福岡市地下鉄道路陥没事故等を受けて、国では地盤・地下水等に関する情報の共有化の重要性が認識され、「国土地盤情報データベース」を構築した。現在、国や一部の地方自治体・公益事業者で実施したボーリングデータが登録され、様々な用途で利用されている。

地盤情報不足を推定で補う方法も開発されている。三次元グリッドモデルは、地盤の特性を三次元のグリッドで表現するものであり、その属性値として土質区分とN値を持つ。これらの属性値は、ボーリングデータから抽出し、水平方向に距離の重み付けをした空間補間計算で算出する。三次元グリッドモデルの大きな特徴は沖積層基底面等の地層境界面モデルを作成することにより、グリッドの空間分布特性を制約した点にある。この機能は、境界面標高が上下に大きく変化する場合（地層の削り込み等）やボーリングデータが不足している場合での補間処理において特に有効である。

(3) 地下水位データの充実

地下水位データは、液状化危険度を判定する上で非常に重要なパラメータであるが、ほとんどの地域で整備されていない。また、ボーリング柱状図に地下水の記載はあるが、あくまで掘削時の孔内水位であるため、これを地下水位として利用することは避けた方がよい。

令和4年6月の水循環基本計画の一部見直しを受け、地下水マネジメントを一層推進するための取組みとして「地下水データベースの構築・普及・活用」が盛り込まれた。このデータベースは、地下水を適切に活用するための基礎資料として構築するものであるが、このデータが液状化検討にも活用できることを期待したい。

7. 土砂災害WG 土砂災害対策推進上の課題 (斉藤泰久)

長野県辰野町で実施したDEMとAIを活用した表層崩壊危険斜面の抽出事例を紹介し、技術的事項と土砂災害対策推進上の課題を提示した。

7.1 技術的事項

表層崩壊危険斜面の抽出については、過去10年程度の試行を蓄積し、一定程度の精度で抽出できる感触を得ているものの、以下の課題がある。

①異なるメカニズムの斜面崩壊の抽出

紹介したAIによる表層崩壊危険斜面の抽出では、2021年8月に発生した土砂災害発生箇所において、実際の崩壊斜面（緩傾斜の箱型谷底面で発生）ではなく、その崩壊斜面に面した急斜面を抽出していた。これは、本提案の抽出手法と異なる崩壊メカニズムの場合には、危険斜面を抽出できないことを示す一例と考えられる。

②提案する手法の適用範囲（適用限界）の明確化

地形のみの判読は、内科医の初見の問診・検診と同じであり、詳細な調査を経て最終的な診断へ至る過程を認識する必要がある。地形に基づく本提案手法の適用範囲（精度向上のための簡易現地調査手法を考慮した場合の適用範囲の拡大、精度向上など）を明確にして活用する必要がある。また、AIモデルは、教師データの人の判読誤差やAIモデルの再現性の誤差を含む。

③全国での1mDEMの整備

国土地理院10mDEMでは10m未満の崩壊は抽出できず、そもそも、微地形は判読できない。全国の1mDEMの整備が待たれる。

④人の判読による教師データの更なる蓄積とAIモデルの高度化

本提案手法を高度化させるには、多くの判読データとそれに基づく教師データの作成が必要である。上記①～③を考慮した上で、AIモデルの解析結果を活用するシーンを踏まえて、AIモデルを高度化させる必要がある。

7.2 土砂災害対策推進上の課題

表層崩壊危険斜面の抽出については、過去10年程度の試行を蓄積し、一定程度の精度で抽出できる感触を得ているものの、土砂災害対策の一環として活用するには、以下の課題がある。

①崩壊危険斜面对策のスクリーニング手法に位置付ける

一様でない山地斜面の表層崩壊発生危険斜面を100%の精度で予測抽出する方法の確立は難しい。そのため、一定程度の精度で危険斜面を抽出し、その結果に保全対象や崩壊発生時の影響程度などを勘案して対策優先度を検討することで、詳細調査やソフト・ハードの対策実施

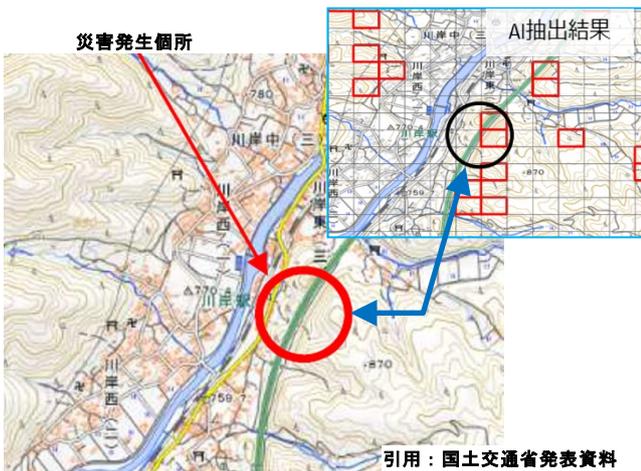


図-7.1 AI抽出結果と実災害の発生箇所との比較（再掲）

へと展開する考え方が重要で、これは、医療と同様の手順である。段階を踏んで危険斜面を抽出し適切な対応を図るといふ、スクリーニングの概念を導入することが必要である。なお、大規模盛土造成地の活動崩落対策にはスクリーニングの概念が導入されている。

②崩壊危険斜面に対策を導入するための詳細な地盤工学的調査・解析・設計手法を導入するための手法の手引化

表層崩壊危険斜面を高い精度で把握し、その崩壊危険度を評価するためには、少なくとも、表層土層の厚さや土質工学的特性の把握は必須である。そのための調査手法も課題である。例えば、DEMがあれば比較的容易に豪雨時の地下水位の上昇程度を予測検討できる C-SLIDER法という解析手法が国総研資料「表層崩壊に起因する土石流の発赤危険度評価マニュアル(案)」で提案されているが、調査手法全体が手引化されている状況にはないと認識している。現時点で完全な調査手法は無く、今なお技術開発がなされているが、現時点で体系化された資料が整備されることも期待したい。

③市民・行政が土砂災害の警戒避難に活用できる情報(例えば、防災マップ)のあり方と作り方、情報の周知の仕方などの蓄積と共有

長野県辰野町は、防災マップに本手法による表層崩壊危険斜面を標記し、マップ作成時には地域住民と抽出斜面の調査(土層強度検査棒や表層電磁探査による表層土層の層厚確認)などを行い、行政と市民が共同して、斜面の表層崩壊に対する危険性についての理解促進活動を行っている。地区防災計画や防災マップの整備に際し、地域を理解するためのツールとなるような防災マップの作成と、それを市民が活用する意識の醸成も併せて重要である。そして、一度作成したら終わりとするのではなく、必要に応じて見直していくことも重要であるとともに、こういった防災情報をIT・ICTツールを用いて行政と市民が共有して活用できる環境を整備することも必要であると考えられる。

8. 土砂災害 WG 崩壊土砂量の推定精度向上の課題(井上真)

8.1 研究の背景と目的

近年、各地で短時間の雨量や累積雨量が観測史上最大となることがしばしばあり、これに伴い、斜面災害の発生数増加や大規模化が懸念される。

自然斜面の崩壊における人的被害の低減を図るためには、崩壊する前に斜面の危険度と崩壊規模をあらかじめ予測することが重要である。

斜面の危険度予測の基となる山間部の地盤情報には、地形、地質、風化層の厚さ、地下水流動情報、物性値等がある。この内、地形については、航空レーザー計測(LP計測)によって、遷急線や遷緩線等の地形変化、ガリー浸食等の微地形の把握が可能になっている。本研究発表会においても、パシフィックコンサルタンツ株式会社の斎藤泰久氏は、航空レーザー計測データによるDEMを使用して表層崩壊危険斜面の抽出事例を発表された。

本研究では、さまざまな地盤情報の内、斜面崩壊規模の推定に重要な弱部(風化層、潜在崩土層)の厚さの分布の推定を研究目的とした。弱部の3次元的な分布に対しては、弾性波探査や表面波探査等の物理探査が有効であるが、現状ではこの探査結果の精度の確認が必要であり、斜面上で作業性の良い軽重量サウンディング機器LWCPT(Light Weight Cone Penetration Test)を開発、製作した。

8.2 研究の今後の課題

総合討論では、LWCPTを岡山大学北側に位置する半田山で試行した結果を踏まえ、今後の課題として、次の5つを提言した。

- (1) サウンディング最終深度が礫か基盤岩か区別
- (2) 物理探査と照合による潜在崩土層厚の推定精度向上
- (3) サンプリング可能な先端コーンに改良
- (4) 斜面上におけるLWCPTの運搬の効率化
- (5) 豪雨時の崩壊土砂量の推定精度向上

以下、各課題について会場からの質問回答も含めて述べる。

- (1) サウンディング最終深度が礫や転石により高止まりしたか基盤岩であるかの区別は、潜在崩土層厚を知るうえで重要な課題である。浮石や転石の根入れ深さを振動計測により推定する手法を参考に、LWCPTのハンマー打撃時に先端コーンから地盤に伝わる振動波形特性から礫と基盤の区分を考えている。本研究発表会で中央開発株式会社の橋本和佳氏が発表された小型加速度センサーを用いた振動計の試行も考えている。
- (2) 斜面に分布する潜在崩土層と基盤岩の境界を推定するには、物理探査結果とLWCPTを照合し、探査結果の精度確認が必要である。今年4月に半田山の

斜面上で、応用地質株式会社の根本雅夫氏により実施された常時微動探査の結果と LWCPT を照合し精度検証を予定している。なお、実施された常時微動探査の概要は、ケーブルレス（独立型）の地震探査装置を 2m 間隔に設置し、微動測定で得られた波形から地層の S 波速度構造を解析したものである。今後、試行したい物理探査手法に、光ファイバ内の光の位相変化からファイバの伸縮歪を計測し S 波速度解析する探査（DAS）がある。

- (3) 土層確認のために LWCPT 先端コーンをサンプリング可能な仕様へ改良した。会場から質問いただいたサンプリング装置の構造は、先端コーン部を地上から高圧（15MPa）の水圧で保持したまま所定の深度まで打ち込み、圧力を解放した後に再度打ち込んでサンプリングするものである。なお、サンプリング装置の外径はミニラムサウンディング試験機の先端コーン外径と同一であり、Nd 値の測定も可能である。
- (4) LWCPT の最も重い部品は半割れの 15kg のハンマーであり、斜面での人力による運搬の負担軽減のため、電動補助装置（パワースーツ）を試作し改良中である。会場から質問のあったハンマーの半割れを横割（水平）でなく縦割（垂直）とした理由は、現場で組み立てる際に、縦割であればスライド軸に抱き合わせて結合でき、組み立てが簡単にできるためである。結合する際はボルト締めのみで打撃面がフラットとなる加工精度で仕上げている。また、ハンマー落下時の摩擦影響の有無と、ロッド引き抜きについて質問いただいた。ハンマーとスライド軸の摩擦抵抗は多少あるが、摩擦低減対策としてハンマー側にベアリングを内蔵している。ロッドの引き抜きは、ハンマーの吊り上げに使用する電動ホイストを使用することで人力より簡単となった。
- (5) 後続の効果的な崩壊対策工の設計や、高精度のハザードマップの開発のためには、潜在崩土分布地の 3 次元物性モデルの作成と、3 次元浸透流解析による豪雨時の崩壊土砂量の精度よい推定が課題である。

8.3 おわりに

潜在崩土層の厚さを把握する軽重量サウンディング機 LWCPT を開発した。今後の課題に取り組み、土砂災害による人的被害の低減に向けて、「崩壊する前に」崩壊危険箇所の特定と崩壊土砂量を推定し、その予測による斜面安定化対策の実施を提案する。

9. 土砂災害 WG 土砂災害警戒区域等指定精度向上の課題（笹井友司）

9.1 土砂災害警戒区域等（急傾斜地の崩壊）の指定

土砂災害警戒区域等（急傾斜地の崩壊）の指定区域は、以下および図-9.1 に示す範囲である。

- ①傾斜度が 30 度以上で高さが 5m 以上の区域
- ②急傾斜地の上端から水平距離が 10m 以内の区域
- ③急傾斜地の下端から急傾斜地の高さの 2 倍（50m を超える場合は 50m）以内の区域

この斜面崩壊などにより被害を受けるおそれのある範囲としての区域指定は、地形・地質・土地の利用状況等の基礎調査結果に基づきなされ、公表される。また、地形や構造物の状態等に変化があった場合には、概ね 5 年毎に再度基礎調査ならびに区域指定（見直し）がなされる。

9.2 2018 年 7 月豪雨等で明らかになった課題

2018 年 7 月豪雨等により明らかとなった課題として、以下が挙げられる。

- ①詳細な地形データの活用により、土砂災害警戒区域として抽出可能であった崩壊箇所が存在すること
- ②土砂災害警戒区域等（急傾斜地の崩壊）に未指定の傾斜度 30 度未満の斜面でも崩壊が発生したこと

上記より、土砂災害警戒区域等の抽出精度向上が重要課題である。なお、2018 年 7 月の西日本豪雨災害等では、土砂災害警戒区域等（急傾斜地の崩壊）に指定されていない図-9.2 に示す斜面でも崩壊が発生しており、傾斜度 30 度未満の崩壊発生事例である。

9.3 課題に対する対応策とその活用

9.3.1 課題に対する対応策

今後は、前節で課題とした土砂災害警戒区域等の抽出精度向上に向け、以下の対応が望まれる。

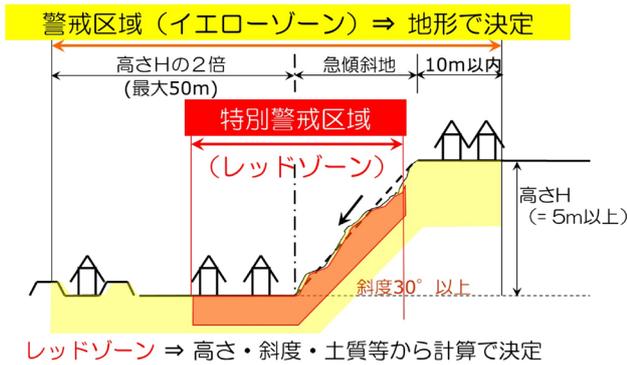
- ①基礎調査に用いる地形データの高度化（微地形判読）
- ②傾斜度 30 度未満の崩壊前微地形や地質調査結果に基づく崩壊の検証

9.3.2 対応策の活用

(1) 地形データの高度化

前項で 1 つ目の対応策として挙げた、地形データ高度化の活用法を以下に記載する。

- ①2017 年 8 月変更の土砂災害防止対策基本指針において、盛土等の地形的条件の変化や砂防堰堤等の整備がなされた場合に対し、区域解除の考え方・要件が明確化されたが、地形データの高度化を区域解除にも活用すべきと考える。
- ②住民が基礎調査の実施を申請できる仕組みも必要と考える。



【出典：東京都建設局 HP, 2022. 6. 5 閲覧】

図-9.1 土砂災害警戒区域等(急傾斜地の崩壊)の指定範囲



【出典：おかやま全県統合型 GIS, 2022. 8. 3 閲覧】

図-9.2 土砂災害警戒区域等の指定状況と崩壊地

(2) 崩壊検証成果の活用

2 つ目の対応策として挙げた、崩壊検証成果の活用方法を以下に記載する。

- ① 検証成果の蓄積・分析による他地点や基準への反映に活用すべきと考える。
- ② 傾斜度 30 度以上でも、安全な地形・地質を有する斜面の抽出へ応用すべきと考える。
- ③ 地下水位低下設備等の対策効果検証への応用が可能と考える。

9.4 まとめ

我が国では、2001 年 4 月に施行された土砂災害防止法に基づき、法施行前に造成された宅地においても冒頭に示した法指定要件に合致すれば、土砂災害警戒区域等(急傾斜地の崩壊)に指定されてきた。

それから約 20 年が経過し、至近年は益々地球温暖化に起因すると考えられる集中豪雨の多発や、台風経路の変化などによる降雨の地域性の薄れにより、全国各地で豪雨による斜面崩壊が頻発している。

このため、本論で示した土砂災害警戒区域等の抽出精度向上に向けた対応策の推進と活用は、これまで以上に重要になると考える。

10. 土砂災害 WG 衛星 SAR の課題 (八野祐二)

10.1 衛星 SAR の今後の課題

衛星 SAR の今後の課題としては、以下の 3 項目が挙げられる。

- ① 衛星 SAR 解析で得られる変位は、衛星視線方向のものである。地盤調査やインフラメンテナンスでは、任意方向の水平・鉛直変位を得る必要がある。
- ② 現在の ALOS-2 の同条件での観測頻度が、年 3 ~ 4 回であるので、リアルタイムの情報を得ることが出来ない。
- ③ 1 時期の衛星データが、ALOS-2 で、8 万円、海外の衛星だと、50~100 万円程度、掛かるものもある。

10.2 衛星 SAR の課題の解決策

10.1 で挙げた衛星 SAR の各課題に対する解決策としては、以下の事が考えられる。

- ① に関しては、衛星データは 2 倍必要になるが、同地域の逆方向の衛星データと合わせて解析することで、垂直方向の変位精度を向上させる事が出来る。ただ南北方向の変位については、衛星は南北方向に周回しているため、把握が難しい。
- ② に関しては、ALOS-4 が 2022 年度中にも打ち上げられる予定なので、2 週間程度の頻度での解析が可能となる。
- ③ に関しては、今後の衛星を運営する側の動向に注目して行く必要があり、無料利用のプラットフォームが充実する可能性もある。

11. 土砂災害 WG 山地解体過程における地すべりや斜面安定評価の課題 (木村隆行)

(1) 山地解体過程における地すべり分類

渡ら (1975) は地すべりを幼年型～老年型として進化による区分として岩盤地すべりから粘質土地すべりに至る地すべり分類を提示しており、地すべりの基本的概念とされてきた。そこには風化帯の形成と風化帯の削剥という視点はなく、岩盤地すべり後の風化による粘質土化という視点であった。しかし、多くの山地形成が 50 万年前からの 1000m におよぶ隆起の過程で、風化帯形成後に隆起してきた地形発達史があり、特に古い地形面を多く残留させている中国地方では、その風化帯の削剥と地すべり地形との関係が認められる。今回、その古い風化地形平坦面の山地解体の過程として、風化残積率を定義し、地すべり地形分類との相関を把握した。

ここで、興味深い点は土石流を発生する溪流と、崩壊型地すべりを発生する領域が、風化残積率が約 50% 未満であるという点である。風化帯が豪雨の貯水タンクとして機能する比率が 50% であったことになり、豪雨に対する耐力の閾値になっていると考えられる。

地すべりは風化残積率 50% を閾値として、崩壊型 (脆性破壊型) 地すべりと、塑性型 (塑性変形型) 地すべりに区分され、今後は強度特性や安定度評価への相関適応が重要になると考えられる。

(2) 山地解体過程における地すべり安定度評価

風化残積率は、地すべりの大きさや区分と相関があると考えられるが、直接的に安定度と関連するわけではない。しかし、大規模の地すべりや崩壊を生じやすいのは風化残積率が小さいほど大きいので、リスク評価の規模評価に使用できると考えられる。

図-11.1 で、分布の変化点として、風化残積率 $WVH=0.5$ と 0.15 が想定されるので、その場合表-11.1 のような規模区分が想定される。

また、安全率については奥園 (1985) による地すべり地形の安定度評価の多変量解析による安全率や、稲垣・長谷川(2005)による開析度による安全率評価があり、図-11.2 のように開析度が高いと安全率も高くなる相関になる。これは、奥園で谷型が逆に安全率が高くなること、開析を意味する場合に同じになる。

また北海道の地すべりでは AHP 評価手法も定義されているが、活性度が高いものが粘性土地すべりで、その定義が圧縮丘のある舌端部に着目されていることから、上記の開析度の概念とは多少異なると考えられる。

このような各種手法に加え、地形図から読みとれる評価として、リニアメント遭遇数、ポリゴン内段差地形数、沢ライン数、小ブロック数、ポリゴン明瞭度、滑落崖距離比 (滑落崖水平距離/地すべり全体距離)、末端開放度 (舌端部幅/中央部幅) など、様々な項目の数値データと、安定度の評価を、衛星 SAR データの変位なども含め、総

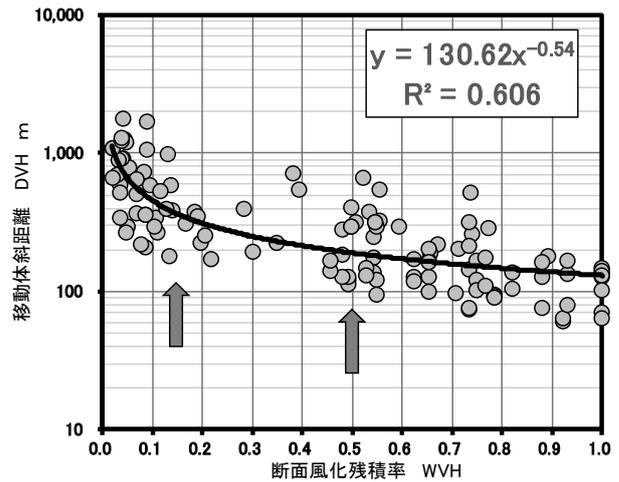


図-11.1 風化残積率と移動体斜距離

表-11.1 想定地すべり規模案

地すべり規模	風化残積率 WVH	移動体斜距離 m
大	0～0.15	360～
中	0.15～0.50	190～360
小	0.50～	～190

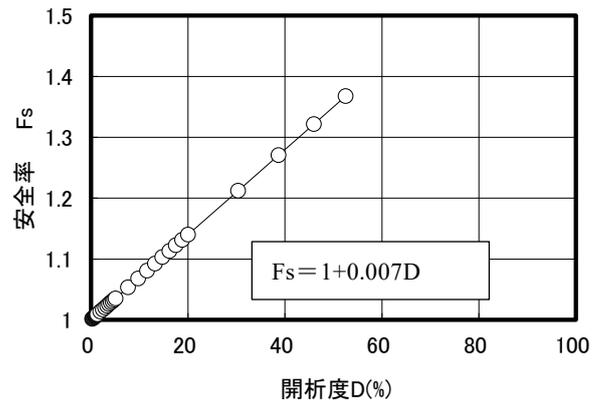


図-11.2 開析度と安全率

合評価検討し、より簡易で妥当な評価手法を確立していくことが今後の課題と考えられる。

12. 土砂災害 WG の提言（與那城稔）

12.1 今後の斜面防災の在り方

少子高齢化などの社会環境の変化に並行して地球温暖化などの自然環境の変化が進行している。それに伴って災害発生後に復旧工事を実施する従来の事後対策のやり方では、時間的、人的、財源的に対応し切れなくなる事態が迫りつつあると感じる。今後の斜面防災は、地形データなどから危険な個所を抽出して予め地下水排除を施す事前のリスク低減策や、住居を移転させるリスク回避策など、多面的な対策が実施できる仕組みに発展させていく必要があると考える。

12.2 自然環境の変化

温室効果ガスの増加などに起因すると言われる近年の地球温暖化の進行は、これまでと異なる気象環境をわれわれにもたらしつつある。

- ・ 平均気温の上昇
- ・ 海水温の上昇
- ・ 台風の大型化
 - （日本近海での台風の発生・発達・迷走・停滞）
- ・ 時間降雨強度の上昇
- ・ 短期間降水量の増大
- ・ いわゆるゲリラ豪雨の多発化

これに伴い斜面崩壊などの土砂災害の発生件数は増大する傾向にある。また災害の大規模化の兆しもある。同一エリアでの再度被災や複数エリアでの同時被災など、今後はさらに事態が深刻化することが懸念される。

12.3 社会環境の変化

少子高齢化に伴って特に地方では過疎化、高齢化が進行している。都市部でも高齢化、独居化が進んでおり、避難できずに自宅で被災するケースが増加している。住民が公共施設などへ一時避難する従来の方法だけでは対応し切れない状況が生じている。過疎化・高齢化が進むと地域の行動力が更に低下する恐れがある。また災害が少ないと言われたエリアでの被災事例も増えており、防災に不慣れた住民への意識づけも課題となっている。

一方で予算の制約もありハード対策の進展はなかなか捗らない状況にある。経年劣化による防災インフラの機能低下も課題である。

12.4 取組中の研究の概要

斜面防災に関する研究の流れを以下に示す。

- ①危険個所抽出に関して・・・齊藤氏，八野氏，木村氏
 - ②物性モデル作成に関して・・・井上氏
 - ③斜面安定度評価に関して・・・笹井氏
- ▽
- ④高精度ハザードマップ開発（危険度評価・被災想定）

▽

- ⑤地域住民の理解促進（住民参加型マップ・避難訓練）

▽

- ⑥防災対策の促進（抑制工を主体とした予防保全）

いずれの研究も予防保全の実現を目標に高精度ハザードマップの開発、普及を目指している。高精度ハザードマップの開発に必要な基礎データは次の3つである。

- ・ 高精度地形データ
- ・ 安定度評価に供する地盤データ
（崩壊土層の厚さ、土の強度、土の透水性）
- ・ 豪雨時の地下水位データ

昨今の高精度地形データの普及により危険個所の抽出や定性的な危険度区分が試行される段階になっている。

また高密度の気象観測データの普及により豪雨時の地下水変動をシミュレーションできる状況になってきた。あとは斜面上の崩壊土層の分布状況を的確に把握できれば物性モデルによる定量的な安定度評価が可能となる。

12.5 これからの課題

高精度ハザードマップの開発を受けて、地域住民の斜面防災への理解促進を支援する役割と利用しやすいハザードマップの継続的な改良の取組みがこれからの課題となる。ハザードマップをベースに地域内の巡視ウォーキングや避難訓練など住民参加の活動をサポートすることで防災意識を醸成させ、的確な避難行動を普及させることで地域の被災リスクの低減に繋げる。ソフト面での支援と合わせて、斜面の予防保全対策を実施することが必要である。研究開発した安価で手軽な調査手法による地盤データの集積と簡便なモデル解析手法による安定度評価を普及させることで国土強靱化を推進する。

われわれ技術者は専門分野の研究開発を担う者であると共に地域住民のアドバイザーとしての役割と責任を負っている。高精度ハザードマップの開発を始め、地域での防災知識の普及、予防保全対策の推進などはわれわれが技術力を発揮して解決すべき課題である。

生活のすぐ近くに山や崖がある日本では斜面崩壊などの被災リスクは避けがたい事象である。今後ますます厳しい環境に変化することも予想される中で、いかに適切なコストで効率的な作業で被災リスクを低減し、地域の生命と財産を守ることに繋げるかが求められている。

今より一歩進んで、予防保全の観点をもって国土の強靱化を推進していくことを提案する。

編集後記

コロナがピークをむかえて、全国のその日の感染者が 19 万人を超えている 8 月 26 日でしたが、感染対策をした会場では、定員 120 人のところ 33 人の参加で、十分に離隔をとった配置としました。Web 参加は 265 人で、合計 298 人の開催となりました。開催後の Web での CPD 申請登録者は 184 名でした。

当初は、継続討論会はアルコールも入る意見交換会方式を想定していましたが、コロナ感染爆発のため、研究発表会のスタイルのまま、そのまま継続討論としました。Web では、チャットで意見をいただきました。多くの全国からの建設コンサルタント会社から Web 参加をいただき、また国土交通省からも 13 人の Web 参加をいただきました。

河川災害、地震災害、土砂災害に対するさまざまな最新の技術動向を発表・議論し、今後のさらなる技術進展への足掛かりになる発表会となり、その記録を論文集としてまとめることができました。西垣理事長をはじめ、全国の第 1 戦で取り組まれている多忙な研究者・技術者ばかりですが、寄稿いただきありがとうございました。

(木村隆行)



研究発表会に参加・討論いただいた主な方々



西垣誠 理事長

河川災害 WG



館川逸朗
パシフィック C



新村卓也
パシフィック C



片山輝彦
アサノ大成基礎 E

地震災害 WG



橋本和佳
中央開発



王寺秀介
中央開発



末富岩雄
エイト日本技術開発



杉本芳博
ダイヤ C

土砂災害 WG



齋藤泰久
パシフィック C



與那城稔
ウエスコ



井上真
ウエスコ



笹井友司
中電技術 C



八野祐二
基礎地盤 C



木村隆行
エイト日本技術開発

国土交通大臣認可 統合物性モデル技術研究組合
令和4年度 研究発表会 講演集

発行日 令和4年8月24日 第1刷

令和5年2月15日 第2刷(改訂版)

編集 統合物性モデル技術研究組合 事務局

発行 統合物性モデル技術研究組合 理事長 西垣誠

〒700-0087 岡山市北区津島京町3丁目 1-21

TEL 086-214-3333 FAX 086-214-3339

<https://www.imtera.or.jp/>

助成 公益財団法人八雲環境科学振興財団(研究集会助成)

印刷 イシダ印刷