

6. 地盤統合モデルで解析する技術

6.1 高度化する地盤調査技術を活用するための調査解析手法の組み立てについて

1. はじめに

2025 年 1 月 28 日に埼玉県八潮市道路陥没事故が発生した。道路陥没を未然に防ぐため、1980 年代から路面下の地盤状況を把握するための地中レーダー探査が適用され始め、探査技術や探査結果解析技術の高度化が進み、現在では路面下空洞探査技術として一般化している。しかし、空洞や地盤の緩みなどの検出精度には、路面下土層の不均質さを踏まえた探査結果解析技術の高度化などの課題があり¹⁾、今後も更なる技術開発が求められる。また、豪雨により発生する土砂災害対策のため斜面崩壊の予測技術も 1980 年代から山地からの雨水や地下水流出に関する浸透流解析等のモデルと斜面安定解析を組み合わせた解析手法が提案され活用されてきたが、山地河川流域にこういった解析モデルを適用する場合には、入力条件となる表層土層厚や透水係数、土層の物理特性などの物性値の空間的ばらつきが大きく、それらのデータをどのように取得し解析モデルを構築するのが大きな課題であった²⁾。これに対し、(独)土木研究所は、一つの流域を対象として、地下水位を定常状態と仮定し、表層土層厚の空間分布を簡易貫入試験で取得しモデルへ入力する程度の簡易なモデルでも、表層崩壊の危険度評価を行える手法を提案している³⁾。しかしながら、山地に存在するどの流域がより相対的に表層崩壊の危険度が高いのかを合理的に判断する手法は開発されていない。

ここで例示した道路陥没や豪雨時の斜面崩壊の調査解析手法は、広域の中で発生する地盤変状の位置を予測することが求められ、いずれも地盤の特性（地質や層厚、土質性状、土の物理特性など）を空間的に、できれば高い精度で把握することが課題と認識され、近年では空間的データを取得できる高度な地盤調査技術として、各種の物理探査や SAR（合成開口レーダー）衛星データの解析（可視化）技術の高度化が進展している⁴⁾。また、地盤調査における最も基本的情報である地形については、国土地理院が日本全国の 1mDEM を活用できる環境を整備しつつあり、国立研究開発法人産業総合研究所地調査総合センターが提供する 20 万分の 1 日本シームレス地質図を合わせて広域の三次元斜面安定解析などが実施されている⁵⁾。

一方、土木・建築物の計画地や斜面安定対策工の実施箇所、地すべりの変位計測など、オンサイトでの地盤調査技術も高度化しているが⁶⁾、地盤変状を予測して事前対策を行うという文脈において、高度化した地盤調査技術を活用するためには、詳細調査や対策すべき箇所を合理的に抽出することが必要になる。

このような視座を背景とし、本稿では、福井県にある曹洞宗大本山永平寺の山地森林域における土砂災害の発生可能性を検討するために、広域から局所へと表層崩壊の危険性のある斜面を合理的に（説明力を持たせて）絞り込み、表層崩壊危険度の評価を行った事例⁷⁾を紹介する。この事例の実施からすでに 10 年を経過しているが、この間に数値標高データ（DEM）が全国整備され、地形解析ツールとなる GIS の性能も向上し、オンサイト調査手法も新たな方法が実用化されてきていることを踏まえると、今後の調査解析手法を組み立てる際の参考になり得るのではないかと考える。

2. 大本山永平寺における表層崩壊危険度評価

2.1 調査解析の契機

曹洞宗大本山永平寺は、およそ 700 年前に福井県永平寺町の永平寺流域の深山に開山されて以来、多くの修行僧が生活をしてきた修行の場であるが、平成 24 年 4 月に伽藍山門前に生育するスギ巨木が強風により幹折れし、鐘楼などの伽藍建築物が破損する事態が生じた。これを機に、永平寺では修行の場である伽藍の安全・安心を確認し維持していくことの必要性が認識され、土砂災害についても、永平寺川流域で平成 16 年福井豪雨と同じ規模の豪雨が発生したらどのような事態が生じるのかを把握し、土砂災害に対する理解と警戒避難といった対応について準備を行う必要性が認識された。



写真-1 大本山永平寺伽藍と周囲の森林・山地斜面

2.2 調査・解析の考え方と流れ

図-1 に調査・解析の流れを示す。まず、1/25,000 の 10mDEM を用いて永平寺が位置する越前中央山地北部地域の相対的崩壊危険度を評価した（図-1 (A)）。



図-1 調査・解析の流れ

この相対的崩壊危険度は、谷が山地を刻んで形成した水系の流域毎に高度分散量と重み付き横断面平均傾斜という二つの地形量を用いて危険度を指標化したものである⁸⁾。図-2 の概念のとおり、流域の山地斜面に同じ層厚の表層土層が分布していると仮定した場合に、表層崩壊の発生のし易さを相対的に示すものである。越前中央山地北部地域の流域間の相対的崩壊危険度を把握し、この傾向がより局所的な範囲の斜面に対しても同様の傾向を示すのかを確認するために、同じ手法で LP の 10mDEM (1mDEM から作成) を用いて永平寺伽藍周辺の山地斜面の相対的崩壊危険度を検討した。評価範囲のスケールを変えて検討することで評価手法の妥当性を確認するとともに、永平寺伽藍周囲の山地斜面に対し、今後侵食が進みやすいと考えられる斜面の抽出を行った。

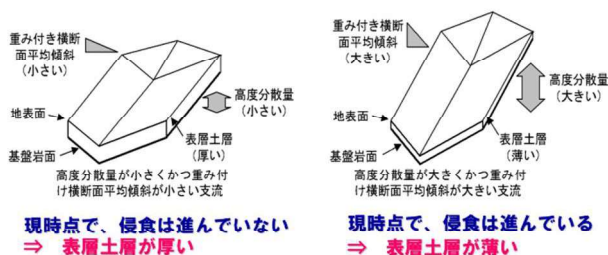


図-2 高度分散量と重み付き横断面平均傾斜を用いた斜面の地形発達状況の概念

次に、図-3 に示す考え方⁹⁾で LP の 10mDEM を用いて地形形態から表層崩壊が発生する可能性のある斜面を抽出した (図-1 (B))。そして、表層土層の層厚や土層の物理特性を仮定し、鉛直次元不飽和浸透流解析と準三

次元浸透流解析を組み合わせた表層土層地下水深の算出と、これを用いた無限長斜面の斜面安定計算による表層崩壊シミュレーションを実行し、平成 16 年福井豪雨が永平寺周辺に発生した場合の表層崩壊の可能性について解析を行い、豪雨時に表層崩壊が発生する可能性の高い斜面を抽出した (図-1 (C))。 (A) ~ (C) の結果から、永平寺伽藍周囲の山地斜面における相対的に表層崩壊の危険性が高い斜面を抽出した (図-1 (D))。

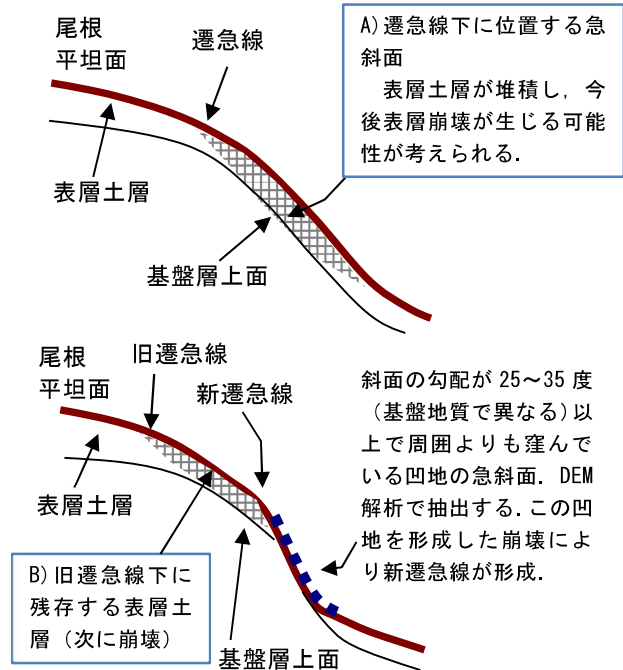


図-3 DEM 地形解析で抽出する崩壊危険斜面の模式横断 (谷の横断面イメージ, A), B) を抽出

抽出した斜面は、表層崩壊が発生した場合に崩壊土砂が伽藍を直撃する可能性のある位置であったことから、現地調査を行って表層崩壊の危険性をより詳細に把握することとした (図-1 (E))。現地調査は、表層崩壊の発生に影響する表層土層の厚さを把握するための調査を中心に実施した。そして、この調査結果を用いて再度の表層崩壊シミュレーションを行い (図-1 (F))、抽出した山地斜面の表層崩壊危険度について評価を行った (図-1 (G))。なお、現地調査では当該斜面に生育しているスギ巨木の根系の広がり把握のために、散水により変化する地盤の比抵抗を比抵抗モニター法 (同一測線での複数回の高密度電気探査) で探査し、スギ根系の広がりや深さの可視化と推定を行い、当該斜面のスギ等の根系と斜面の安定性について定性的な検討も行っている。

2.3 DEM 地形解析による相対的崩壊危険度評価結果

図-4 は越前中央山地北部地域の流域ごとに高度分散量と重み付き横断面平均傾斜を求め散布図としたものである。すべての支流において表層崩壊の発生源となる表層土層の層厚が同じであると仮定すると、高度分散量

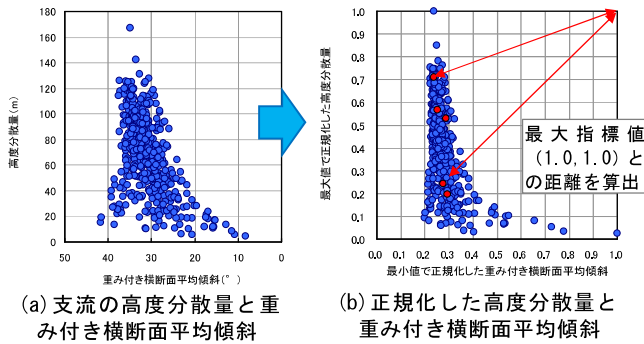


図-4 越前中央山地北部地域の支流の高度分散量と重み付き横断面平均傾斜

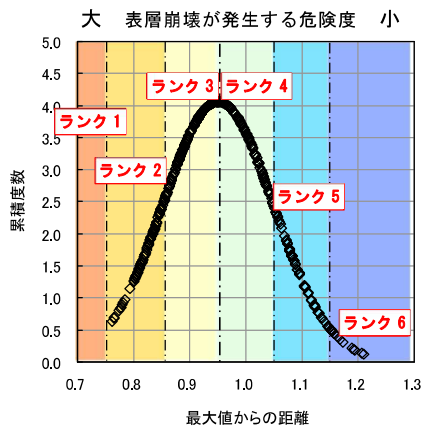


図-5 最大指標値と各支流の指標値の距離の分布

が大きく（起伏＝傾斜が大きい）重み付き横断面平均傾斜が小さい（谷が発達していない＝侵食が進んでいない）流域の斜面は、今後、相対的に侵食がより進行しやすい特徴を有していると考えられる。その度合いを評価するために、高度分散量の最大値と重み付き横断面の最小値を用いて正規化を行った。重み付き横断面平均傾斜は、傾斜が小さい方がより崩壊危険度を有する特性があると評価するために逆数を取り図-4のように正規化した。高度分散量と重み付き横断面平均傾斜の逆数が 1.0 の場合に最も相対的表層崩壊危険度が大きいと評価できることから、この最大値（1.0, 1.0）と各流域の指標がプロットされる点との距離を求めることで支流間の相対的危険度を数値化できる。これを図化したものは図-5 のとおり正規分布となったことから、平均値と標準偏差により相対的表層崩壊危険度を 6 ランクに区分して図化を行った。図-6 は越前中央山地北部地域、図-7 は永平寺伽藍周辺の山地斜面の相対的表層崩壊危険度である。

越前中央山地北部地域にはランク 1 の支流は存在せずランク 2 が広範に分布する結果となった。永平寺伽藍周辺の山地斜面はランク 2 とランク 3 となった。図-7 の解像度の高い LP10mDEM を用いると、1/25,000 の精度でランク 3 であった伽藍の上流域の支流にはランク 1 やランク 2 の支流が存在する結果となった。地形のフラクタル性を確認した結果であるが、越前中央山地北部の隆起浸食という地形発達状況を勘案して永平寺伽藍周辺の山地斜面の相対的崩壊危険度を把握できたと考える。

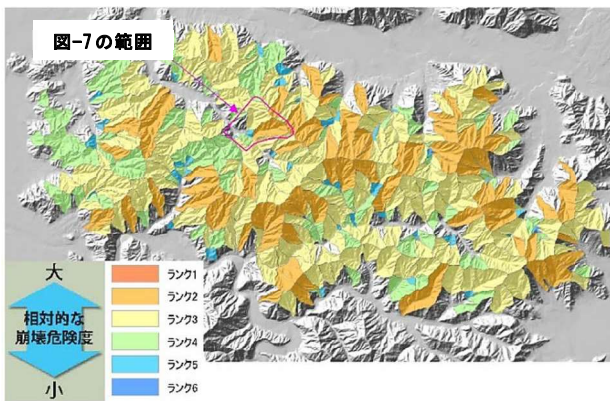


図-6 越前中央山地北部地域の相対的崩壊危険度

2.4 DEM 地形解析による表層崩壊危険斜面の抽出結果

図-8 に永平寺伽藍周辺の山地斜面に対して表層崩壊危険斜面を抽出した結果を示す。伽藍周辺の山地斜面は傾斜が大きく、尾根筋に残る平坦な地形面も小さい。すなわち、侵食が進んでいる山地斜面であると考えられ、斜面凹地の上方や下方に遷急線の分布は少ない。つまり、遷急線の上方に表層崩壊の発生源となる(図-3 の A, B)) 斜面の分布は比較的少ないと判読された。なお、現地踏査においてもその状況は確認された。

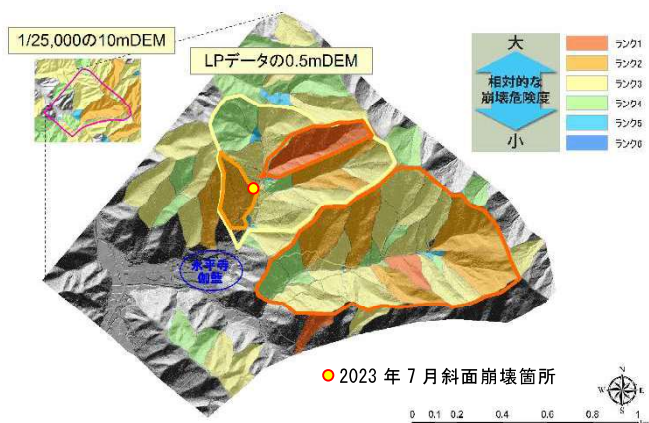


図-7 永平寺伽藍周辺山地斜面の相対的表層崩壊危険度

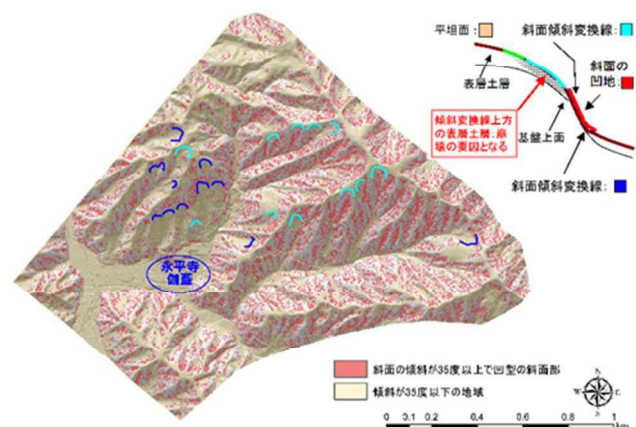


図-8 永平寺伽藍周辺の表層崩壊危険斜面の分布

2.5 表層崩壊シミュレーションによる危険斜面の抽出結果（1回目）

表層土層厚を 2m, 表層土層の内部摩擦角 35° , 粘着力 7.5kN/m^2 と仮定し, 平成 16 年福井豪雨の降雨が発生した場合の表層崩壊発生状況を計算した. 図-9 の計算結果のとおり, DEM 地形解析による相対的崩壊危険度がラン

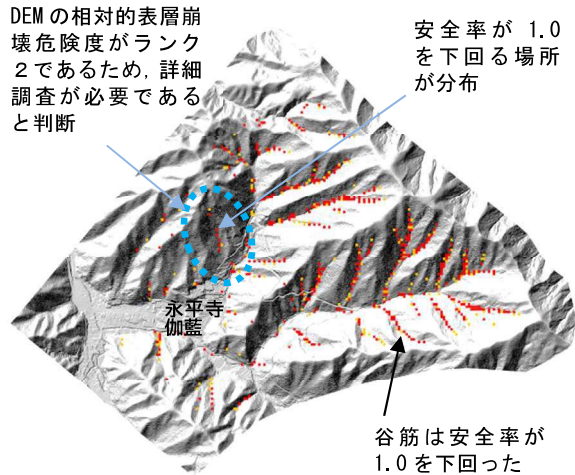


図-9 表層崩壊シミュレーション結果（1回目）

ク 2 と判定された伽藍直上の斜面に安全率が 1.0 を下回る領域が発生する結果となった. そこで, 設定した表層土層厚 2.0m が実際に分布するのを確認することにより表層崩壊の危険性を判断することとした. なお, 谷筋の斜面でも安全率 1.0 が下回っているが, 伽藍直上の支流には砂防ダムが数基建設されていることから現地調査は不要であると判断している.

2.5 現地調査結果

現地調査位置図を図-10 に示す. 表層土層厚は土層強度試験棒（どけん棒）による簡易貫入試験, 高密度電気探査, ボーリング調査で確認した.

簡易貫入試験の表層土層への最大貫入量は平均して 0.5m 程度で, 局所的に 0.7m~1.0m の貫入量が計測された. ボーリング調査では表層土層厚は 1.15m で簡易貫入試験と概ね同じであった. 表層土層は礫を少量含む粘性土主体の崖錘堆積物であり, 深度 0.15m~0.45m までの N 値は 2 で軟らかかった. 表層土層下位は深度 12.65m まで安山岩の強風化層で, 上部の深度 9m までは N 値が 6~17 を示す固結した礫混じりの粘性土であった. 強風化層の下位は安山岩が分布していた. 地下水位は, 深度 14m 付近に確認された. 掘削中に深度 3m 付近に孔内水位を確認したが, 下方への掘削で孔内水位が低下したことから, 強風化層の最上部にわずかに滞水していた宙水であると考えられた. 高密度電気探査では, 図-11 のように表層土層が礫質などで比抵抗値が高くなり, 深度 2m 付近に比抵抗値の境界が把握されたことから, 地質的境界は 1m 程度であると考えられた. また, スギの根本付近に深さ 5m~6m までの高比抵抗部が確認された. スギの根（直根）を捉えている可能性を考えられた.

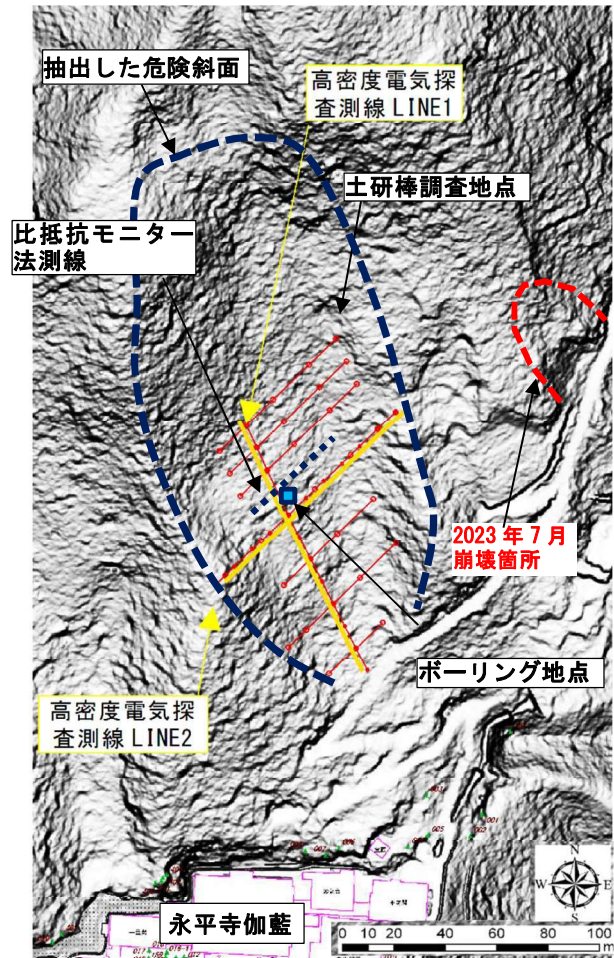


図-10 現地調査位置図

*背景は LP データによる陰影図

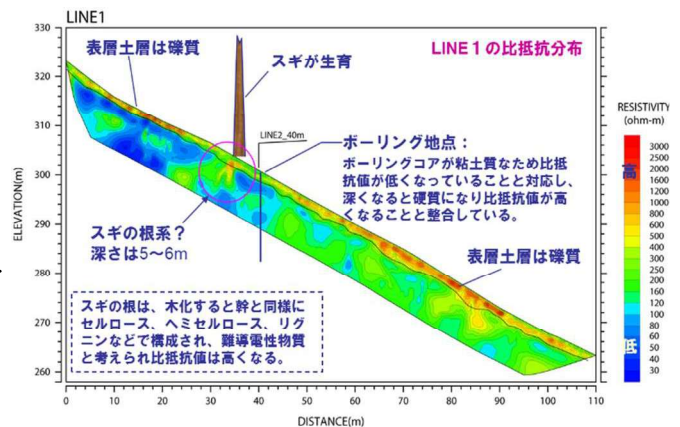


図-11 高密度電気探査結果（LINE1）

2.6 表層崩壊シミュレーション（2回目）と表層崩壊の危険性判定

現地調査に基づき表層土層厚を 1.0m とし, 他の条件は同じとして表層崩壊シミュレーションを行ったところ, 安全率は 1.0 を下回らない結果となった. したがって, DEM 地形解析による相対的表層崩壊危険度はランク 2 であるが, 表層崩壊危険斜面もほとんど存在しておらず表層土層厚が薄いことから, 伽藍にまで影響を及ぼすような土石流を発生させうる規模の表層崩壊は発生しないと結論づけた.

3. 考察

3.1 大本山永平寺の DEM 地形解析事例について

紹介した事例の検討から 10 数年の経過を経ている。この間、永平寺に近い気象庁美山観測所では、過去 10 年の日・月降水量や時間降水量が歴代 10 位以内に入る豪雨は複数回発生したものの、土石流は発生しなかった。しかし、2023 年 7 月 13 日に斜面崩壊が発生した。谷底に近い斜面での崩壊であったため、崩壊土砂は砂防ダムで捕捉され伽藍に影響を及ぼすことはなかった。崩壊箇所を図-7、図-10 に示す。林道が造成されており斜面には崩壊跡とみられる馬蹄形の凹地形態が認められる。この斜面には安山岩の風化層が露岩しており、図-10 のボーリングで確認された N 値 6~17 を示す固結した礫混じりの粘性土であった。林道に面した法面は比較的安定していると目視できたことや土石流が発生させる可能性は低いこと、砂防ダムが存在することなどから、この馬蹄形法面上方を崩壊危険斜面として扱うことはしなかった。しかし、地形断面だけみれば図-3 と同様の形態であり、斜面が侵食され谷地形が発達していくことを鑑みれば、ランク 2 の相対的崩壊危険斜面に含まれる位置であることから、現時点では、このような地形形態には注意が必要であると考えている。

3.2 DEM 地形解析の高度化と精度向上について

DEM の有効活用については太田・八戸 (2006) ¹⁰⁾ が解析の目的に応じた解像度の DEM を用いることの重要性を指摘している。永平寺の事例では、相対的崩壊危険度評価は国土地理院の地形図等高線から作成された 10mDEM を越前中央山地北部地域の解析に、航空レーザ測量で得た 1mDEM を 10mDEM に変換したデータを永平寺伽藍周辺の山地に適用した。また、永平寺伽藍周辺山地斜面における表層崩壊危険個所の抽出も後者の DEM を用いている。現在は、国土地理院が 1mDEM を整備・提供し始めており、GIS の機能も高まっていることから、地形解析を実施する上での負荷量は相当に縮小している。例えば、本事例の高度分散量は検討流域のポリゴンさえ作成すれば容易に DEM から複数流域間の地形特性を算出・解析できる。一方、重み付き横断面平均傾斜は地形量を集計する流域ポリゴンの設定から流域内の水系の設定まで GIS での画一的な操作で算出することはできず、現時点でも検討上の作業負荷は大きく容易に利用できる地形量ではない。つまり、DEM 地形解析を実施する上での課題はまだ存在していると認識できる。

一方、DEM と AI を組み合わせることで表層崩壊危険個所が存在する領域を一定の精度のもと抽出する新たな活用手法も検討されている ¹²⁾。したがって、広域から局所へ崩壊危険個所などを絞り込み、絞り込んだ領域に高度化している地盤技術を適用する調査を組立てる際に、DEM 地形解析の活用性は高いと考える。

ここで、平成 18 (2006 年) 年 7 月の北九州豪雨により

大規模な土砂災害が発生した朝倉地域に、相対的表層崩壊危険度評価を適用した事例を紹介する。解析に用いた DEM は、豪雨前年の 2005 年に国土地理院が整備した地形図に基づく 10mDEM である。

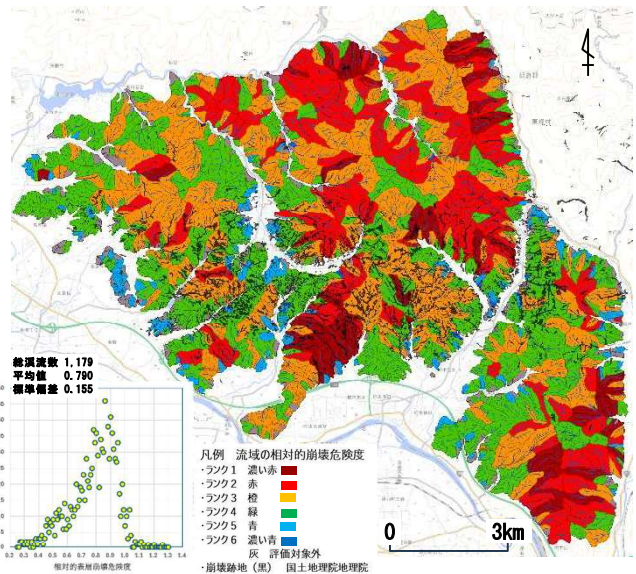


図-12 朝倉地域の相対的崩壊危険度

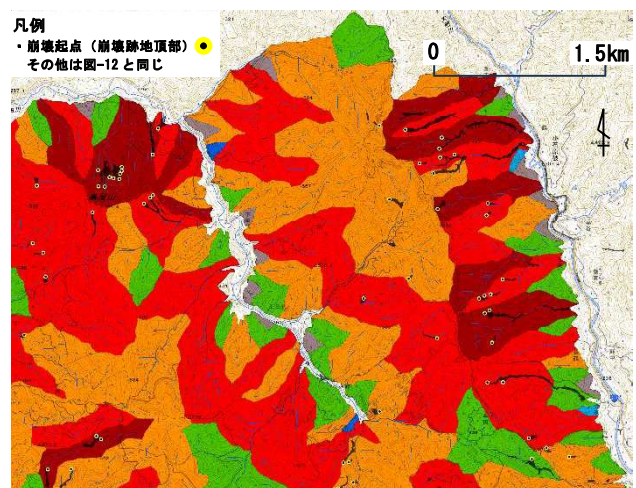


図-13 朝倉地域の相対的崩壊危険度 (北部拡大)

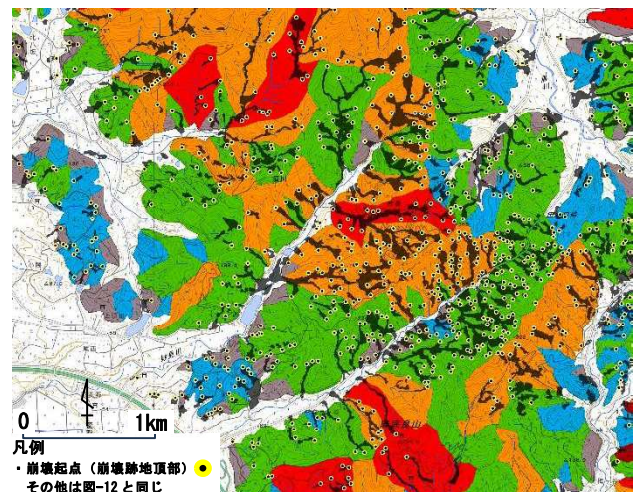


図-14 朝倉地域の相対的崩壊危険度 (南西部拡大)

検討範囲を 1,179 の溪流に分割し高度分散量と重み付き横断面平均傾斜を解析して相対的崩壊危険度を求めると、朝倉地域においても溪流間の相対的崩壊危険度は正規分布となった。検討範囲の溪流の相対的崩壊危険度を平均値と標準偏差で 6 ランクに区分し図-12 に示した。また、線状降水帯が掛からなかった検討範囲北部では図-13 のようにランク 1 とランク 2 で崩壊が発生しており、相対的崩壊危険度が高いと評価した流域で崩壊が発生している状況となっている。一方、線状降水帯が掛かった検討範囲中央付近では図-14 のように、すべてのランクで崩壊が発生する状況となっている。この結果の解釈については、溪流ごとの高度分散量や重み付き横断面平均傾斜の解析手法上の課題、例えば、解析に用いる DEM の精度・解像度や解析時に設定する水系の設定方法などのより詳細な検討が必要である。しかしながら、DEM 地形解析が高度な地盤調査手法を適用するための広域解析技術として活用できそうな感触を得た。

5. おわりに

- (1) 土木・建築物の計画地や斜面安定対策工の実施箇所、地すべりの変位計測など、オンサイトでの地盤調査技術が高度化している。このような高度化した地盤調査技術を活用するためには、変状を予測して事前対策を行うという文脈において、対策すべき箇所、つまり詳細な調査を実施すべき箇所を合理的に抽出することが重要であると考えられる。
- (2) この観点から、豪雨に伴う表層崩壊により土石流を発生させる可能性のある斜面を抽出しその可能性を評価した事例として、大本山永平寺伽藍周辺の山地斜面を対象とした検討事例を紹介した。
- (3) この事例では、二つの DEM 地形解析と表層崩壊シミュレーションの結果から、表層崩壊が発生する可能性のある斜面を抽出した。そして、当該斜面において、表層崩壊の発生可能性に影響する表層土層厚を把握するために簡易貫入試験、ボーリング調査、比抵抗モニター法などを実施した。比抵抗モニター法は、検討当時、高度化した地盤調査技術の一つであると考えられる。
- (4) 高度化する地盤調査技術を用いるための調査解析手法を組立てるにあたり、高度な地盤調査技術を適用する場所をどのように抽出するのかは大きな課題である。表層崩壊であれば、その発生可能性が相対的に高いと考えられる斜面を抽出することが必要となる。本報では、DEM 地形解析により広域から局所を絞り込む手法として、高度分散量と重み付き横断面平均傾斜を用いた相対的崩壊危険度という指標の活用例を示した。
- (5) 永平寺の事例に加え、平成 18 年 7 月北九州豪雨により大規模な土砂災害が発生した朝倉地域において相対的崩壊危険度評価を実施した。線状降水帯が掛

らなかった地域では、相対的崩壊危険度が大きいと評価された流域で実際に崩壊が発生した。一方、線状降水帯が掛かった地域では相対的崩壊危険度のランクに関わらず崩壊が発生した。

- (6) 相対的崩壊危険度については、解析手法において課題のあることを示した上でこれを解決することにより、今後の DEM 地形解析に活用できる可能性を示唆した。

(執筆責任者 斉藤 泰久)

参考文献

- 1) 例えば、日本応用地質学会四国支部：応用地質 Q&A 中国四国版、土-15 空洞調査の手法と適用限界、https://www.jseg.or.jp/chushikoku/wp-jseg/wp-content/uploads/2025/03/1_15.pdf (参照 2025.7.31)。
- 2) 内田太郎：表層崩壊の予測精度向上に向けて、平成 25 年度国土技術政策総合研究所講演会講演集、pp.147-162, 2013。
- 3) 独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ：「表層崩壊に起因する土石流の発生危険度評価マニュアル (案)」、土木研究所資料第 4129 号, 2009。
- 4) 例えば、手束宗弘他：市街地での GNSS と InSAR における変位計測の適用の可能性、地盤工学会誌、Vol.70, No.01, Ser.No.808, pp.26-30, 2022。
- 5) 例えば、森口周二他：三次元地質構造を考慮した広域斜面安定性評価、地盤工学会誌、Vol.73, No.05, Ser.No.808, pp.52-55, 2025。
- 6) 例えば、内藤昌平他：複数の光ファイバおよびインテロゲータを用いた DAS 試験観測による地盤モニタリング性能比較、日本地震工学会論文集 第 25 巻、第 4 号(特集号)、pp.206-219, 2025。
- 7) 斉藤泰久、新貝文明、上野紗綾子、原田光則：大本山永平寺の森における表層崩壊危険度と森林の生育状態、土木学会西部支部第 7 回土砂災害に関するシンポジウム論文集、pp.37-42, 2014。
- 8) 新貝文昭、斉藤泰久、上野紗綾子：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 2)、平成 24 年度砂防学会研究発表会 2012。
- 9) 上野紗綾子、斉藤泰久、新貝文明：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 3)、平成 24 年度砂防学会研究発表会 2012。
- 10) 太田岳洋、八戸昭一：数値標高モデルによる地形計測の現状と応用例、応用地質、第 46 巻、第 6 号、pp.347-360, 2006。
- 11) Lin, Z.and Oguchi, T.: Longitudinal and transverse profiles of hilly and mountainous watersheds in Japan, Geomorphology, 111, pp.17-26, 2009。
- 12) 斉藤泰久：DEM と AI で危険斜面を予測、統合物性モデル技術研究組合 2025 年度研究発表会 (最新の技術展開に向けて) 研究報告書, 2025。

6.2 3次元地盤モデルの地震応答解析の現状と課題

1. はじめに

「統合物性モデル技術研究組合」では、三次元地盤モデルの構築を可能とするための様々な探査法について研究が行われてきた。地震防災分野におけるその利活用の形としては、三次元地震応答解析が代表的なものと言えるであろう。本文では、三次元地盤モデルの構築に関する現状をレビューし、さらに三次元地盤モデルを用いた三次元地震応答解析の現状と将来展望について記す。

2. 3次元地盤モデルの構築

2.1 高密度のボーリングデータの活用

従来の二次元地震応答解析では、地質断面図を作成し、各層の物性は一様とするものが大半であった。21世紀になりコンピュータの計算処理能力が向上し、三次元解析が可能となってきても、地盤モデルの構築手順は二次元で行っていることをそのまま三次元に拡張していた。最近になってようやくボーリングデータ等の地盤情報が密に得られるようになったことから、3次元地盤モデルの構築手法に関する研究が進んできている。

東京東部であれば、中澤ら(2022)¹⁾のように沖積層基底は丁寧に整理されているものを活用できる。表層地盤の地震応答解析を実施するならば、表層を3~4層程度に区分したいところであり、また都市中心部以外では沖積層基底さえも容易ではない。そのようなことから、村上(2022)²⁾や阪田(2022)³⁾のように地層区分の推定法が重要となってくる。阪田(2022)³⁾では表層地質という平面上の問題で扱ってはいるが、地層区分は連続量ではないので、インディケータ・クリギングを適用することが有効であることを示している。村上(2022)²⁾はあらかじめボーリングデータの地層区分を定めてニューラル・ネットワークに学習データを学ばせた上で、区分されていないボーリングデータに地層区分を与えるものである。

王寺ら(2022)⁴⁾は地震応答解析のための三次元グリッドモデル構築の流れを示しており、木村ら(2022)⁵⁾は具体例で詳細な手順を示している。密なボーリングデータを必要とし、かつ谷筋等の地形が変化するエリアではデータ不足を補うために補填データを追加する必要がある。この際には、三次元の可視化を容易に行えるツールと地質構造解釈の経験が必要となる。これらの検討では、数千のデータを扱っており、やや広域のモデルを構築していることに留意する必要があると考えられる。

2.2 微動探査法の活用

本報告書の3章で詳しく述べられているように、微動

探査法が近年では広く活用されている。実務レベルでは、3章で述べられているように、1点観測とアレイ観測をうまく組み合わせることで、精度のよい地盤構造推定を行うことができる。(国研)防災科学技術研究所の地震ハザードステーション(J-SHIS)⁶⁾でも、関東地方では、浅部深部統合地盤物性モデルとして、現状は地盤モデルというよりAVS30(深さ30mまでの平均S波速度)の指標値にとどまっているとはいえ公開されている。

3. 3次元地盤応答解析

3.1 解析手法

従来は大規模な地盤の有限要素解析は現実的ではなかったが、Ichimuraら^{7,8)}による計算手法では、地盤の物性に応じて適切なサイズのメッシュ(ソリッド四面体二次要素)を生成し、それを大規模な並列計算で非線形解析を行うことができる。

3.2 解析事例

穴太ら⁹⁾は3次元地盤震動解析により得られた結果から、ガス導管位置の地表面変位の時刻歴波形を抽出し、これを外力として配管系解析を実施した(図-1)。以下に3次元地震応答解析の事例として、その概要を記す。対象地域では、三角州・海岸低地では厚い軟弱土層が堆積しており、地震時の地盤増幅が懸念される。火山灰台地では工学的基盤面までの層厚が浅い。ボーリングデータに加え、このように地形変化が激しい箇所では、常時微動観測・解析を行い、データを補強している。地震動増幅への寄与が大きい軟弱土層をモデル化することを目的とし、ボーリングデータに対し、砂層、軟弱土層への分類を行った。軟弱土層は、N値3以下を含むシルト・粘性土層として層厚を確認したところ、最大40m程度であった。分類の結果、軟弱土の堆積エリアでは軟弱土層より浅部及び深部に砂層が確認された。深部の砂層は浅部よりも比較的硬く、深くなるにつれN値が大きくなり、工学的基盤に到達している傾向が見られた。浅部の砂層は深さによるN値のバラツキが大きく、2層に分割した。上記で定義した軟弱土層の上端・下端を空間的に内挿した。浅部の砂層に対しては、N値10の深さを内挿した。軟弱土層がないボーリングデータに対しては、深部の砂層をN値30の深さで内挿した。工学的基盤面も同様に内挿した。

ガス導管沿いに矩形領域を6つ設定し、有限要素モデルを構築した。6モデルの内、最大領域は2,048m×9,048mで、自由度は約3.6億と大規模な計算対象であり、このモデルの茨城波の解析は、並列計算に512個のCPU

を用いて計算時間は約 7.5 時間と、実務で扱えるレベルで計算することができた。図-1 は解析により得られた地盤ひずみの分布である。

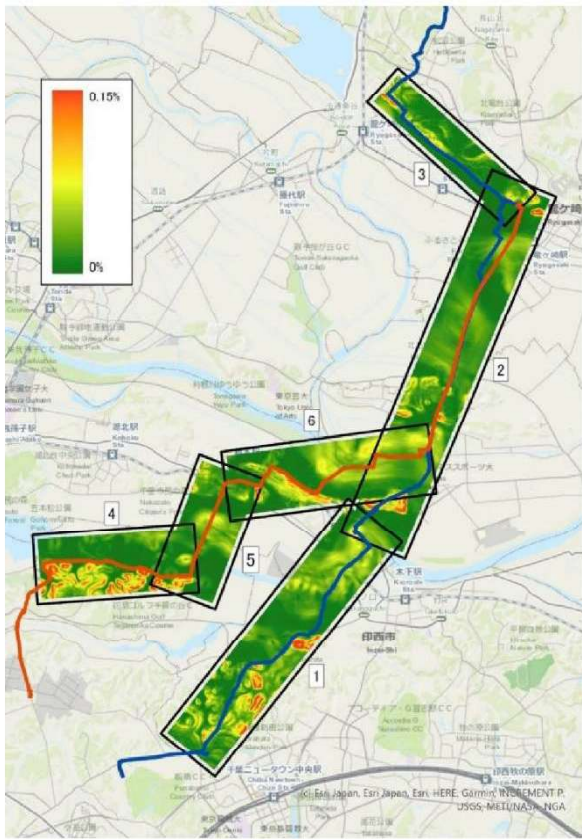


図-1 3次元地震応答解析による地盤ひずみ分布の算出例（穴太ら）

4. おわりに

穴太ら⁹⁾の解析例で示されているように、市村ら⁷⁾⁸⁾による手法・プログラムコード・計算機環境により数 km²の範囲で工学的に必要な周波数帯での非線形地震応答解析による評価が可能となっている。とはいえ、まだ地盤モデルの精度は十分なものではない。穴太らの解析は、地盤の軸ひずみが大きくなるとガス管に生じるひずみも大きくなるものである。地盤の軸ひずみは、丘陵と低地では地震時挙動が大きく異なるので、その境界付近で大きくなるが、境界の傾斜や物性が急激に変化するか、緩やかに変化するかによって、軸ひずみの大きさは左右さ

れる。一方で、従来の最大速度、震度等の算定を目的とするのであれば、低地部中央の表層が厚いところで大きくなるので、東京周辺部の地盤情報が密に得られるエリアでは解析により有用な情報が得られると考えられる。

（執筆責任者 末富岩雄）

参考文献

- 1) 中澤努,野々垣進: 東京都心部の三次元地盤構造の可視化と今後の利活用, 地盤工学会誌, Vol.70, No.5, pp.19-24, 2022. .
- 2) 村上哲: 地盤情報 DB に適用する NN による地層区分推定法, 地盤工学会誌, Vol.70, No.5, pp.35-38, 2022.
- 3) 阪田義隆: 確率論的アプローチに基づく地盤物性値の推定: 確率加重平均法, 地盤工学会誌, Vol.70, No.5, pp.31-34, 2022.
- 4) 王寺秀介, 木村克己, 大井昌弘, 和田里絵, 石原与四郎: 都市地盤モデルを対象とした三次元グリッドモデルの適用性, 地盤工学会誌, Vol.70, No.5, pp.14-18, 2022.
- 5) 木村克己, 花島裕樹, 石原与四郎, 西山昭一: 埋没地形面の形成過程を考慮したボーリングデータ補間による沖積層基底面モデルの三次元解析: 東京低地北部から中川低地南部の沖積層の例, 地質学雑誌, 第 119 巻, 第 8 号, pp.537-553, 2013
- 6) (国研) 防災科学技術研究所: 地震ハザードステーション(J-SHIS), <https://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 7) T. Ichimura, M. Hori, and J. Bielak: A Hybrid multiresolution meshing technique for finite element three-dimensional earthquake ground motion modeling in basins including topography, Geophysical Journal International, vol. 177, pp. 1221–1232, 2009.
- 8) T. Ichimura et al.: Three-Dimensional Nonlinear Seismic Ground Response Analysis of Local Site Effects for Estimating Seismic Behavior of Buried Pipelines, ASME J.
- 9) 穴太聖哉, 三津谷維基, 小林実央, 末富岩雄, 藤田航平, 市村強, 堀宗朗: 大規模数値計算を用いたガス導管の耐震性評価手法の提案, 土木学会論文集, Vol.80, No.15, 2024 年

6.3 物理探査データを使った地盤モデル構築についての課題

1. はじめに

物理探査は探査対象領域の弾性波速度や比抵抗等の物理量、地層境界の形状といった情報を、非破壊的に取得することができる。ボーリングや原位置試験に比べるとデータの精度や信頼性は劣るものの、広い範囲の情報を地盤モデルの作成に不可欠な 2 次元的、3 次元的な物性情報や地層内の不均質性の情報を提供する手法として期待されている。

石油やガス田の開発においては物理探査結果を基にした貯留層モデルの作成、流体シミュレーションの実施、埋蔵量の推定等が行われている。しかし、土木分野を対象とした浅部の調査では物理探査の役割は限定的である。両者の違いにはいくつかの理由がある。石油・ガス田のように大深度の調査では、コストの面からボーリングの数は制限される。代わりに物理探査のような比較的成本のかからない手法が重宝される。また、石油の調査で使われる反射法は屈折法や電気・電磁探査、重力探査に比べるとデータに含まれる情報が圧倒的に多い。反射波の往復走時に着目することで地層境界の形状が捉えられるばかりでなく、反射波の振幅情報からは様々なアトリビュートが抽出される。検層データを含めた総合解析によって岩相や間隙率等貯留槽評価に必要な情報が提供される。一方、浅層部の調査ではボーリングが比較的容易であり、必要に応じて複数の地点で原位置試験や室内試験を実施し地盤物性を取得することができる。そのため、物性値データの取得にわざわざ物理探査を使う必要性は深部探査に比べると低い。また、土木物理探査で主流になっている屈折法や電気探査の結果は、物性値の分布をコンタマップ表示するのみで地層や物性の境界を明示的に表さない。これでは土木技術者や地質技術者がイメージする地盤モデルのイメージとは相容れない。反射法や地中レーダーのように地下の境界面を直接調べる手法もあるが、コストや可探深度の問題から適用は限られている。これらの理由から、浅部地盤のモデル構築では物理探査は参考データとしての地位に甘んじており、そのポテンシャルが十分に生かされているという状況ではない。物理探査をもっとモデルの構築に活用するためには、物理探査データの解析方法や解析結果の表現方法について、もう少し検討する必要がある。

2. 地盤モデル構築における物理探査の役割

物理探査について考える前に地盤モデルの現状について簡単にまとめる。表-1 は全国地質調査業協会連合会によってまとめられた「三次元地盤モデル作成の手引

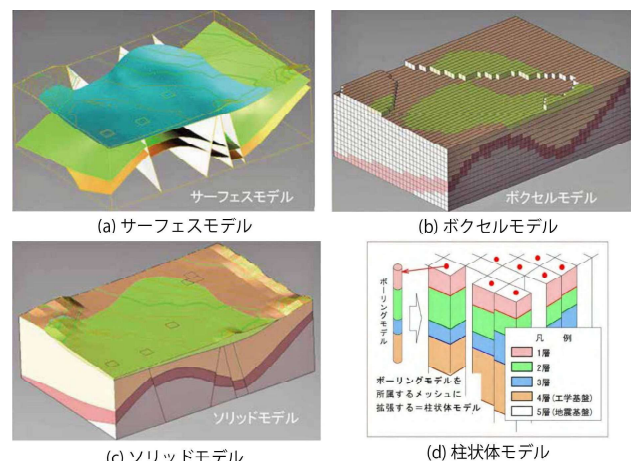
き」¹⁾にある地盤モデルの種類である。このうち、準 3 次元モデルやパネルダイアグラムは 3 次元地盤の表示方法とみることできる。物理探査による 3 次元地盤モデル構築の観点からは、ソリッドモデル、ボクセルモデル、柱状体モデルが重要である (図-1)。

ソリッドモデルは地層境界や物性境界、断面、側面といった境界面 (サーフェスモデル) によって囲まれたブロックからなり、ブロックは岩種や土質、物性値等の属性を持つ。ボクセルモデルは対象領域を水平方向 (XY 方向) および深度方向に等間隔に分割し、分割された立方体または直方体のボクセルに属性を与えたものである。柱状体モデルは水平方向についてはボクセルモデルと同様に等間隔に分割し、深度方向については地層境界や速度境界で分割する。分割されたそれぞれのブロックは岩種や物性値等の属性を持つ。

表-1 3 次元地盤モデル

モデル名称	特記事項
一次元地盤モデル	
ボーリングモデル	ボーリング柱状図から層序等を抽出したモデル
準三次元地盤モデル	
テクスチャモデル (準三次元平面図)	三次元地形表面に地質平面図などを張り付けたモデル
準三次元断面図	従来手法の地質断面図に空間情報を付与したモデル
三次元地盤モデル	
サーフェスモデル	地質あるいは物性値層による境界モデル
ボクセルモデル	属性データをボクセルと接点の両方を対象とする
ソリッドモデル	柱状体モデル
パネルダイアグラム	二次元地盤モデルから作成された任意の断(平)面図

全国地質調査業協会連合会編「二次元地盤モデル作成の手引き」より引用



(a) ~ (c): 山根裕之・他 (2013)
(d): 3 次元地質・土質モデルガイドブック (2022)
国土情報センター、全地連

図-1 サーフェスモデル、ボクセルモデル、ソリッドモデル、柱状体モデルの例 (文献 2,3)

サーフェスモデルのための境界面の検出には反射法や地中レーダーのような反射波を使う手法が向いているが、探査コストの問題や探査深度の制約から地盤モデル構築を目的として使用されることは少ない。一方、屈折法や電気探査は解析結果がコンタマップとして表現されるため境界面そのものを捉えることができない。このため従来は、コンタマップで表現された物理探査断面を専門家が解釈して境界面を推定し、サーフェスモデルに反映させてきた。すなわち、物理探査は定量的な手法であることを謳い文句にしているにもかかわらず、実際のモデル作成に際しては、定性的なやり方で限定的にしか利用されてこなかったというのが実情である。

4章で述べたように、ジョイント・インバージョンの方法はこの問題を打開できる可能性がある。境界面を明示的に扱い、さらにボーリングやサウンディング、その他の地質情報と物理探査データを統合することによって直接サーフェスモデルを作成できるようになると考えられる。ジョイント・インバージョンによって得られるモデルは境界面に境界面に囲まれた領域の属性を含むソリッドモデルでもある。境界面間の物性値を均一として解析することもできるが、不均質性を考慮して解析することもできる。定量的な手法としての物理探査の特性を生かしたモデル作成の枠組みについては後述の「モデル作成を目的とした物理探査の逆解析」のところで述べる。

弾性波速度や比抵抗等、探査によって取得された物性値はそのままでは設計に使われる変形係数や透水係数等の工学的物性値（属性）には変換できない。これらの工学的物性値はボーリング等の原位置での試験で求めるのが一般的であり、コ・クリギング等物理探査結果を考慮した内挿・外挿することによってモデル全域の物性値分布を精度よく求めることができる。また、岩石物理学の知見を基に複数の物理探査の結果から圧縮強度や変形係数、透水係数等の工学的な物性量を推定する試みもなされている。これについては、次の「統合物理探査による工学的物性値の推定」で述べる。

3. 統合物理探査による工学的物性値の推定

3.1 探査結果から工学的物性値を推定する方法

一般に、物理探査によって得られる弾性波速度や比抵抗といった物理量はそのままでは土木分野で使用できない。微動アレイ探査で求められる V_s の値がそのまま強震動シミュレーションで使用されるというのは例外中の例外であり、多くの場合、探査で得られる物理量は力学モデルに必要な地盤の変形係数や強度、水理モデルに必要な透水係数といった工学的な量に変換しなければならない。このため従来は調査地で取得されたデータ物性値間の相関関係を使ったり、既往研究で提案されている経験式を使ったりして、物理探査の結果から工学的な物性値に変換することが行われてきた。また、最近では岩

石物理学（ロックフィジックス）を使った検討も進められている。岩石物理学によるアプローチでは、物理探査で取得される物性値や工学で使用する物性値といったマクロな量（弾性波速度、比抵抗、力学強度、透水係数等）を、間隙率等の粒子レベルのミクロな量を使って記述し、ミクロな量を經由してマクロな物性量の間の関係を合理的に説明しようとするものである。これにより、探査で求められた物性値から透水係数等の工学的な物性を導くことができるとされている。

物理探査の結果から工学的物性値を得るためには、弾性波速度と比抵抗のように異なる探査の結果を組み合わせる必要がある。異なる探査の結果を統合するという意味から統合物理探査とも呼ばれている。

物理探査データによる地盤物性評価の具体的なやり方については、物理探査学会統合物理探査調査研究委員会から出されている報告書「統合物理探査による地盤物性評価と土木建設分野への適用（平成 29 年）」⁴⁾に網羅されている。また、高橋(2015)⁵⁾では岩石物理学に基づく物理探査データの解釈および工学的な物性量への変換の試みについて詳しく述べられている。それらの中から代表的な事例を一つ紹介する。

3.2 V_s と比抵抗を使って透水係数の評価した事例

高橋・他(2015)⁶⁾は、河川堤防で実施した V_s と表面波探査と 3 次元電気探査の結果から堤体内部の透水係数を推定した。以下はその概要である。なお、紙面のスペースの関係で大半の数式は割愛した。興味のある方は高橋・他(2015)を参照されたい。

(1) V_s と比抵抗、間隙率、粘土含有量の関係

V_s は岩石物理学でよく知られている未固結砂岩モデルを使って記述される。このモデルは地盤の土を「固い砂粒子と柔らかい粘土粒子の 2 種類の粒子から構成される」粒状物質と考える。途中の式は省くが、いくつかの仮定の基で V_s と間隙率は図-2(a) の関係に従う。両者の関係は粘土含有率にも依存する。

比抵抗と間隙率の関係を表すモデルはアーチーの式を拡張した並列回路モデルを使用して記述される。並列回路モデルは土の基質と間隙の両方を導電体と考えるモデルで、両者が並列回路を形成しているとみなす。さらに土の基質が砂粒子と粘土粒子の 2 粒子からなると仮定すると、基質の比抵抗は砂粒子と粘土粒子の比抵抗の有効値で表せるとし、この計算には粘土含有率が使われる。結論としては比抵抗と間隙率、粘土含有率の関係は図-2(b) のようになる。

V_s と間隙率の関係および比抵抗と間隙率の関係から間隙率のファクターを消去すると図-2(c) のように V_s と比抵抗の関係が得られる。同じ場所で V_s と比抵抗が計測されていれば、これを図-2(c) の上にプロットすると粘土含有率が推定できる。

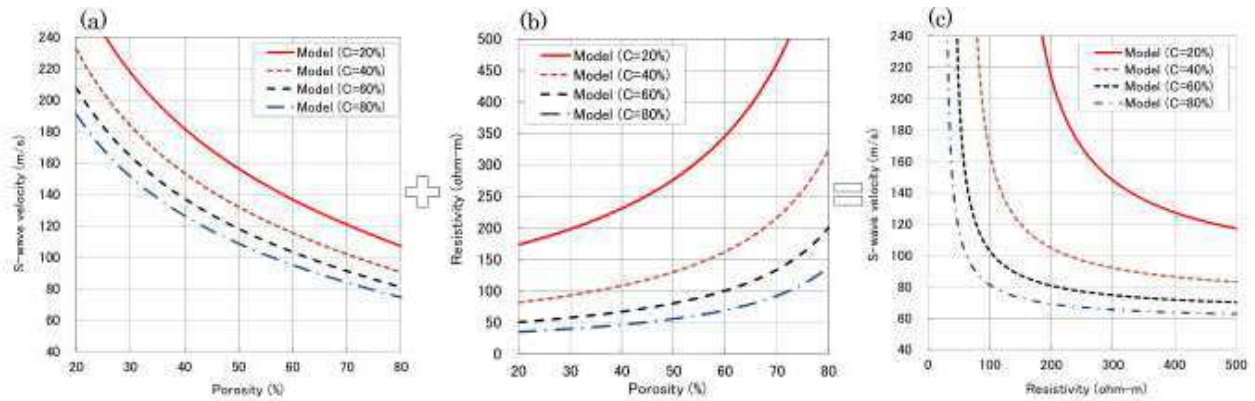


図-2 Vs と間隙率の関係(a)と比抵抗と間隙率の関係(b)から求められた Vs と比抵抗の関係(c)
(高橋・他, 2015 より引用)

図-3(b) は S 波屈折トモグラフィによる Vs の分布、図-3(c) は 3 次元比抵抗トモグラフィによる比抵抗の分布である。図-2(c) の関係を使って Vs と比抵抗が粘土含有率が推定される。これを基にソイルタイプとしてカテゴリ分けしたのが図-3(d) である。ここでは、推定された粘土含有率が 20% 以下をクラス 1、20%~30% をクラス 2、30%~40% をクラス 3 に、40% 以上をクラス 4 に分類した。また、参考までに開削断面のスケッチを図-2(a) に示す。ソイルタイプ I と II は粘土に、III と IV は砂に対比される。

(2) 透水係数の推定

粒状媒質に対する透水係数 k は Kozeny-Carman の式より次のように書かれる。

$$k = \frac{1}{72} \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2 \tau^2} d^2 \quad (1)$$

ここで、 ϕ は間隙率、 τ は迂回係数、 d は平均粒径である。砂と粘土の粒径 d_s 、 d_c をそれぞれ 1mm と 0.005mm と仮定すると平均粒径は粘土含有率 C から $d = (C/d_c + (1-C)/d_s)^{-1}$ と書かれ、Vs と比抵抗から求めた C から平均粒径を求めることができる。また、 C が分かれば Vs あるいは比抵抗から間隙率 ϕ が求められる。迂回率 τ は流路の複雑さに応じて 1~5 程度とされており、この事例では流路が複雑な場合の値 5 が使われた。このようにして求めた ϕ 、 d 、 τ を (1) 式に代入することで透水係数が求められる。図-4 はこのようにして推定された堤体断面上の透水係数分布である。

図-3 の赤丸の地点で採取されたサンプルの室内透水試験結果によると砂質土部分では $8.22 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 、粘性土部分では $1.21 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ であった。物理探査データによる推定値は、それぞれ $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ cm/s}$ と $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ cm/s}$ である。誤差は概ね 1 桁以内であり室内試験結果と整合的であることが報告されている。

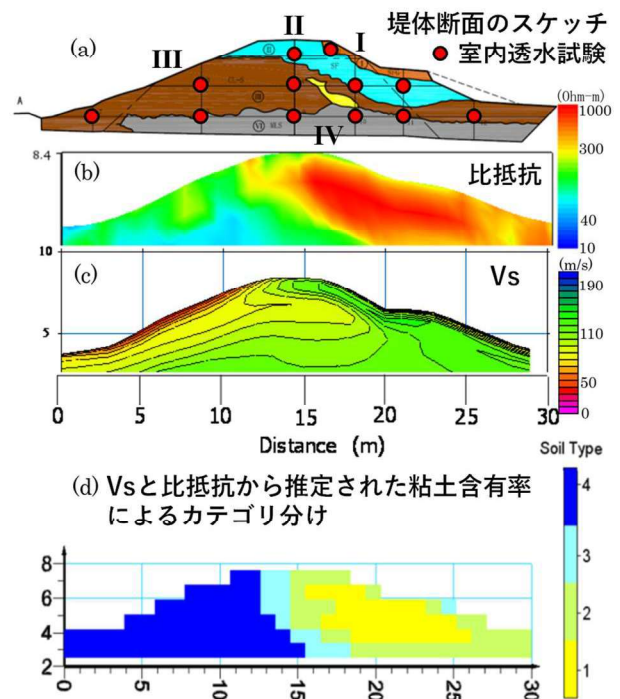


図-3 Vs と比抵抗から推定した粘土含有率によるカテゴリ分け (高橋・他, 2015 に加筆)

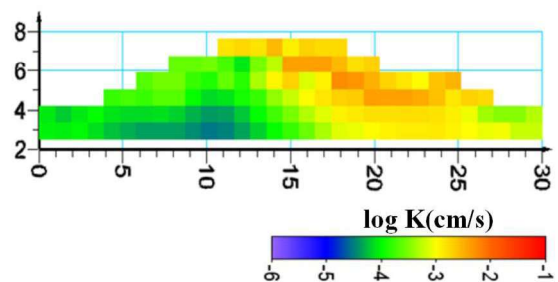


図-4 推定された透水係数の分布
(高橋・他, 2015 に加筆)

(3) 今後の課題

以上、 V_s と比抵抗から粘土含有率や透水係数が推定した事例を紹介した。推定結果の精度について考える場合、次の点について留意する必要がある。

- ① V_s や比抵抗を説明する岩石物理学モデルは理想化されたものであり、現実の地盤や岩盤の挙動を完全に再現したものではない。また、割愛した式では砂粒子や粘土粒子それぞれの剛性率や比抵抗等の値として経験的な値が使われている。間隙流体の比抵抗についても完全不飽和を仮定している。この妥当性については今のところ検証されていない。
- ② 透水係数の推定においても、土粒子の径や迂回係数等のモデルパラメータとして経験的な値を使用しているが、使用した値の妥当性については十分に検証されていない。
- ③ 工学的物性値の評価の基になる物理探査の結果は分解能が低く、堤体断面のスケッチとは完全には一致しない。透水係数断面の分解能もこれに制約されている。

4. モデル作成を目的とした物理探査の逆解析

地盤モデル作成を念頭において物理探査の解析法を見直すため、従来の物理探査の解析で使われてきた逆解析モデルについて議論する。2次元または3次元物理探査の逆解析にはトモグラフィ解析と層構造解析の2つがある。トモグラフィ解析は対象領域を小さなセルや要素で離散化して、それぞれのセルや要素の物性値を求める。セルや要素の形状は3角形や4角形（2次元探査）や4面体や6面体（3次元探査）が使われる。通常のボクセルモデルとは異なり、浅層部では小さなセル、深部では大きなセルを使って分割する。

層構造解析は地盤を多層構造で表現し、各層の層厚と物性値の両方を未知数として取り扱う。垂直電気探査や微動アレイ探査等の一次元解析では、層構造解析が主流である。一方、2次元探査や3次元探査ではトモグラフィ解析が主流であり層構造解析の事例は少ない。

2次元探査のデータを層構造解析した事例としては林・斎藤(1998)⁷⁾が挙げられる。彼らは、当時最新のデジタル測定装置を使った高精度屈折法弾性波探査を提案し、トモグラフィ解析に相当する「層構造を仮定しない解析」と層構造解析に相当する「層構造を仮定した解析」の2つの解析方法を示した。論文の地すべり調査の事例では、通常トモグラフィ解析結果のコンタ線から層区分を行い、これを初期モデルとして層構造解析が行われた。この方法が実用化されれば、はぎとり法の結果よりも精度の高い層構造モデルが作成できると期待されたが、一般に普及することはなかった。層構造を仮定することによってプログラムが複雑になることや、層厚パラメータの

導入によって逆解析の非一意性が強くなり解が収束しづらくなったためと考えられる。現在でも「屈折法弾性波探査の層構造解析」は「はぎとり法」のことを指している。しかし、地盤モデルの作成に使うことを考えると「はぎとり法」の解析では限界があり、地層境界面の存在を明示的に扱った逆解析手法の確立が望まれる。

我々は、統合物性モデル技術研究組合の活動の一環として令和5年以降にジョイント・インバージョン解析プログラム Jtomo3d を整備してきた。本プログラムはトモグラフィ解析に加えて層構造解析も取り扱えるようにしている。層厚パラメータの導入によって非一意性が増す問題に対しては、ボーリングやサウンディング等の地層境界深度データ、反射法の往復走時データ等の情報を補うことによって改善することができるようになった。これらの対策によって信頼性の高い層構造モデルの作成が可能になってきている。

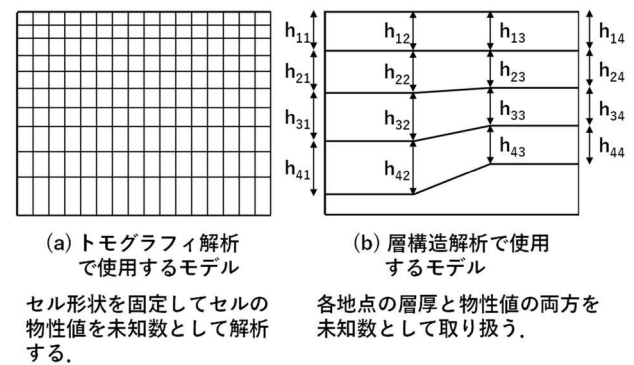
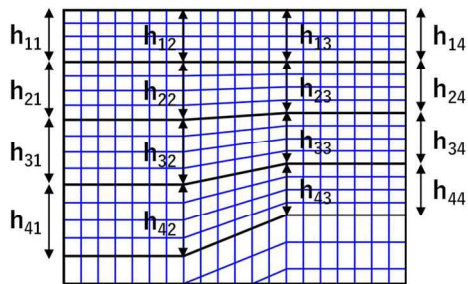


図-5 トモグラフィ解析と層構造解析

地盤モデルの構築を考えた場合、主要な地層境界や物性境界を明示的に取り扱うことに加えて、層内の不均質性を調べることも物理探査の重要な役割の一つである。地層や物性の境界面と内部の不均質性の両方を同時に扱うためのモデルの概念図を図-6に示す。このモデルは層構造モデルのように地層境界を明示的に取り扱うとともに、層内をさらに細かいセルで分割することによって不均質性を表現することができる。基本的には層構造モデルであるがセルモデルの性質もあるため、拡張層構造モデルと呼ぶことにする。プログラム Jtomo3d は拡張層構造モデルもサポートしており、4章の4.4.1～4.4.3では、この機能を使って解析した事例を紹介している。

層構造モデルや拡張層構造モデルは、浸食や堆積環境の変化で地層が欠如している場合や不整合があるモデルでも表現することができる。その場合は、地層が消えた部分の層厚を0mとすればよい。図-7は不整合があるモデルの例である。この方法は断層等が複雑に入り組んだところに適用することは難しいが、少数の大きな断層だけであれば対応することができる。図-8は正断層がある場合、図-9は逆断層がある場合のモデルの例である。いずれの例も、地表踏査やボーリング、反射法の結果から

作成した地質モデルを変換して作成した。このモデルを初期モデルとして使って逆解析すると、ボーリング地点の深度はそのままに各層の層厚と層内の弾性波速度を修正することができる。層厚の修正が大きすぎて境界面の形状が崩れた場合には、必要に応じて地質モデルを作り直してから解析を続行することが望ましい。



層厚の修正に伴ってセルの形状を変えながら各セルの物性値を解析する。

図-6 拡張層構造モデルの概念図

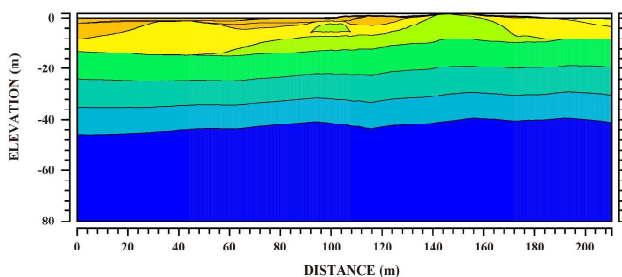
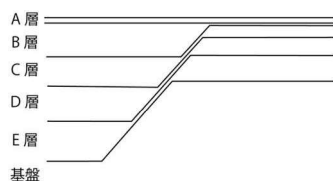
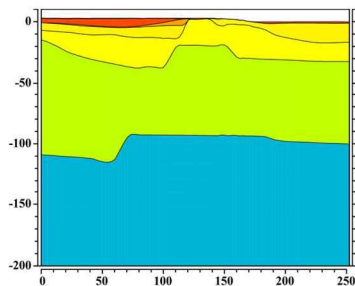


図-7 不整合があるモデルの例



(a) 層構造モデルで正断層を表現する方法



(b) 正断層を含む層構造モデルの例

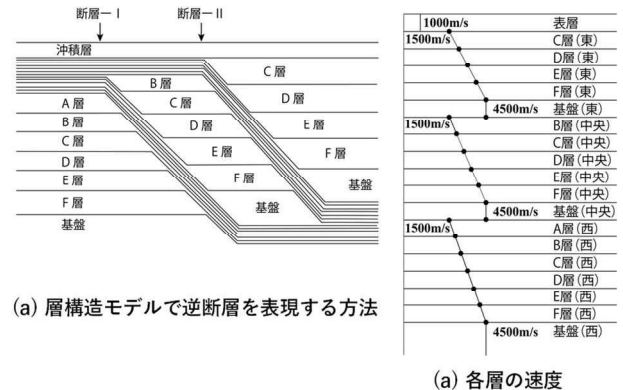
図-8 拡張層構造モデルにより正断層を表現した事例

5. 今後の課題

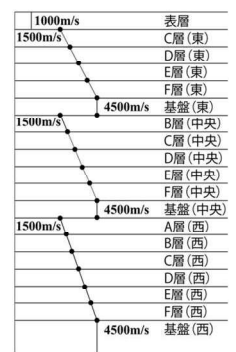
物理探査結果を使った地盤モデルの作成に関連して統合物理探査による工学的な物性値の推定法と地盤モデルを念頭に置いた物理探査の逆解析について述べた。

原位置試験や室内試験データの検討や岩石物理学を使ったアプローチを通して、探査による物性値（弾性波速度や比抵抗）と工学的物性値（透水係数や力学強度、変形係数）との相関性が理解できるようになり、物理探査の結果から工学的物性値を推定するための方法は確立されつつある。今後は原位置試験結果との比較から、探査領域全体についてキャリブレーションすることも検討する必要がある。

当然のことながら、これら工学的物性値の推定の基となる物理探査の解析精度の向上と異なる物性情報の使用は必須である。このためには、①弾性波速度と比抵抗の同時逆解析や②物性境界を考慮した層構造解析に対応した比抵抗探査逆解析ツールの開発も将来の課題である。



(a) 層構造モデルで逆断層を表現する方法



(b) 各層の速度

図-9 拡張層構造モデルにより逆断層を表現した事例

6. おわりに

近年、土木分野でもデジタルツインが注目されている（松岡,2021⁸⁾）。既往の土質・地質情報やボーリングデータ、探査データを基にコンピュータの中に仮想的な地盤モデルを作成し、シミュレーションによって将来を予測するとともに、予測と実際の現象にずれがあったならばモデルを修正する。また新しいデータが追加された時には、それを地下構造モデルに反映させる。このように現実の地盤と仮想空間上の地盤モデルをツインで考えていくことで、構造物の効率的な管理や災害防止に役立て

ていこうという考えである．そのためには，新しいデータが追加されたときにモデルを迅速に修正しシミュレーションを実施し，さらにシミュレーション結果と現実の現象とのずれを迅速に反映してモデルを修正するツールが必要である．先に言及した Jtomo3d の開発では，新たなボーリングデータや探査データが追加された場合に，これらを取り込んで簡単にモデルを修正することを想定してシステムを構築してきた．将来的にはデジタルツイン実現のためのツールとして使用することができるものと考えている．また，このようにして作成した探査モデルから工学的な物性値，例えば透水係数モデルに変換して浸透流シミュレーションや地すべりシミュレーション等の地盤シミュレーションを実施することも不可能ではない．そのためには，Jtomo3d が扱うグリッドモデルからシミュレーションで使用する FEM モデルへの変換ツールを整備する必要がある．また地盤シミュレーション結果のフィードバックあるいは逆解析と組み合わせることによって実地盤をより良く反映したモデルに改良する必要もある．課題は多いがデジタルツインの高度化に向けて一歩進めることができるであろう．

(執筆責任者 杉本芳博)

参考文献

- 1) 全国地質調査業協会連合会，日本建設情報総合センター：三次元地盤モデル作成の手引き，第 1 版，2016.
- 2) 山根裕之，椎葉航，新良子，小林一郎：CIM における 3D モデルの属性利用について，日本情報地質学会シンポジウム講演論文集，pp.49-50，2013.
- 3) 国土地盤情報センター：3 次元地質・土質モデルガイドブック，2022.
- 4) 物理探査学会統合物理探査調査研究委員会：統合物理探査による地盤物性評価と土木建設分野への適用，2017.
- 5) 高橋 亨：地盤工学における浅層物理探査データの物理モデルに基づく解釈技術の高度化に関する研究，京都大学博士論文，2015.
- 6) 高橋 亨，相澤 隆生，村田和則，西尾英貴，松岡俊文：統合物理探査データを用いた河川堤防の浸透性プロファイリング，物理探査，Vol.68，No.3，pp.167-175，2015.
- 7) 林宏一，斎藤秀樹：高精度屈折法の開発と適用例，物理探査，vol.51，No.5，pp.471-492，1998.
- 8) 松岡敏文：物理探査トランスフォーメーション，地質と調査，Vol.158，p.1，2021.

6.4 統合物性モデル構築における課題

1. はじめに

統合地盤物性モデルとは、地盤に関する多様な物性データを空間的・時間的に統合して3次元的に可視化したモデルであり、その構成要素として以下が挙げられる。

- (1)ボーリングデータ（柱状図、N値、地層構成）
- (2)物理探査データ（弾性波、比抵抗等）
- (3)地質・地形情報（地質図、微地形分類）
- (4)地盤試験結果（室内・現場試験）
- (5)空間補間技術（グリッドモデル等）

また、統合地盤物性モデル構築の目的は、科学技術を用いて地震・液状化・斜面災害・洪水等の地盤関連の自然災害に対する防災技術・減災技術の高度化、地盤調査データの利活用促進と一元管理、国土強靱化のための基盤情報としての活用であると考えられる。

本論では、統合地盤モデル技術研究組合設立以降に当研究組合で議論された課題について整理する。なお、マクロな視点での統合地盤物性モデル構築における課題は、以下のとおりと考える。

- (1)物理探査結果の解釈の難しさ
- (2)異種データの統合と標準化
- (3)欠損データの補完と推定精度
- (4)3次元モデル構築の空間補完精度
- (5)モデル活用に向けた物性設定とその信頼性評価
- (6)データベース整備とそれへのアクセス性の向上

2. 強震動予測の精度向上に向けた課題

2.1 浅部地盤情報

現在、柱状図については「KuniJiban」国土地盤情報検索サイトで、全国約141,500本のデータが公開されているが、これらのデータは道路や河川に沿って線状に分布し、面的に不均質である。そのため、より多くのデータ確保には、自治体などの情報公開推進や建築申請時の法的公開推進なども課題であり、最終的には台湾のような包括的な地質法の整備⁷⁾が必要であろう。また、付帯資料として土質試験結果が一部公開されているが、それら土質試験の全面的公開やカラーコア写真の公開も、今後の2次利用への展開において重要と考える。

ボーリングデータの補間として、弾性波探査やPS検層などととも、DASも有効な調査手法と考えられる。

DASは、地下に埋設された光ファイバーを使って地盤振動を観測する技術で、従来の物理探査に比べてコスト面で有利である。適用については、様々な分野で研究が進められ、浅層部のS波速度構造の把握に使われた事例

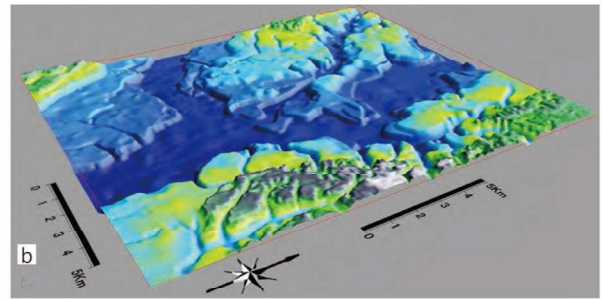


図-1 沖積層基底面モデルの鳥瞰図（2013）⁵⁾

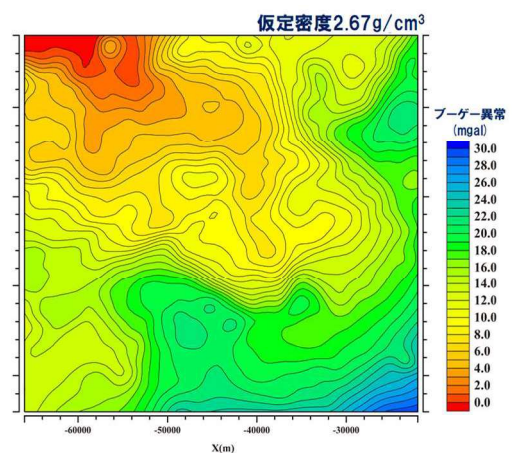


図-2 岡山県のブーゲー異常例⁶⁾

が報告されている^{2),3)}。これらのデータを包括的に補間して地盤モデルを構築する手法としては、AIを用いた地質断面図支援ツールや、地質統計学手法などもある。他の例では、木村他^{4),5)}が公開している三次元グリッドモデルがあり、その一例の沖積層基底面モデルの鳥瞰図を図-1に示す。以上のように、適正な補間には課題が多く、今後、更なる補間手法の開発が必要となる。

2.2 深部地盤情報

深部地盤の構造調査では、重力や大深度地震探査、微動アレイ探査等の物理探査データや地震観測データが使われる。

重力データは、地下の物質の密度分布を反映するので、観測された重力値から地形の影響や観測点の標高の影響を除去したブーゲー異常分布は、地震基盤深度の分布と相関性があることが知られており、深部地盤モデルを作成するためのデータになる。国内の重力データは、産業技術総合研究所によって取りまとめ・公開されており、図-2にその活用例を示す⁶⁾。

他に、K-netによる地震情報や微動アレイ探査による任意地点での計測情報を、深部構造のS波速度構造モデル

として解析することで、重力データを補間することが可能になる。微動アレイ探査はアレイ直下の一次元 S 波速度分布を求める手法であり、深部ボーリングの代用として有効かつ経済的である。複数地点で実施した微動アレイ探査結果を、重力データをガイドとして補間することにより、三次元的な S 波速度の分布を推定することができる。今後の調査と活用が期待される。

以上のような浅部・深部地盤統合モデルを構築し、サイトでの的確な地震動を把握することは強震動予測において重要であり、想定地震動の再現性向上の切り札になると考える。

3. 斜面災害予測の精度向上に向けた課題

3.1 面的な斜面評価手法

近年、ドローン、LP、SAR、空中電磁探査、ミュオン探査など、面的で広範囲を対象とした調査手法が研究開発されている。ドローンでの LP 測定は、施工現場などで実用化され、着実に研究が進んでいる。今後は、その解析手法の高度化による精度向上が必要と考える。

LP 計測による傾斜量図では、遷急線や遷緩線等の微地形が明確に把握できる。また、LP データの蓄積により、崩壊の前後や複数時期の差分解析が可能となり、地形的素因の把握も可能となった。図-3 は、岡山大学北側の崩壊斜面の傾斜量図である⁷⁾。崩壊は、一般的に遷急線前後の 0 次谷で発生するが、この事例では 0 次谷でない麓部斜面上端の 30 度未満の緩斜面で発生している。今後、このような崩壊のメカニズム解明が必要と考える。

3.2 低拘束圧下での移動体の強度評価手法

土石流の発生源の多くは表層崩壊であり、その表層の低圧下での強度は、必ずしも深部と同じ内部摩擦角 ϕ とは限らない。多くの強度試験は、 ϕ が変化しないという仮定で低圧から高圧のモールの応力円では ϕ を求めてしまうため、必ずしも崩壊が生じる表層の強度を反映できていない。

図-4 にマサ土の低拘束圧下での強度の低下現象を示す⁸⁾。低拘束圧下でのボシユレフ強度（圧縮・膨張履歴による同一間隙比での強度）の把握は、実務上困難なので、他の低拘束圧力学試験法を今後確立する必要がある。また、酸化物質によるボンド効果や動植物による多孔体の表層土塊は、通常ではない土質構造を有する可能性もあり、低拘束強度とともにパイプ流などを発生しやすい土質構造の把握が重要になる。

3.3 岩盤境界部の崩積土の適正な強度評価手法

表層崩壊は、岩盤上の崩積土が崩壊する事例が多く、その境界面では図-5 に示すようなプレカット強度となり、土質試験より低下する^{9),10)}。その更なる検証が、今後のメカニズム解明に必要である。

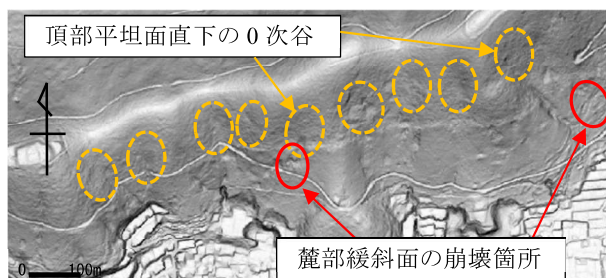


図-3 現地 LP 計測による傾斜量図と 0 次谷想定分布⁷⁾

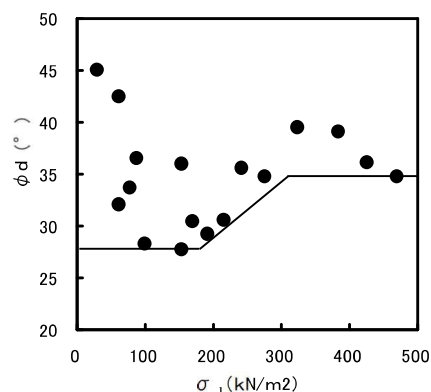


図-4 マサ土の一面せん断の σ_1 と ϕ_d ⁸⁾

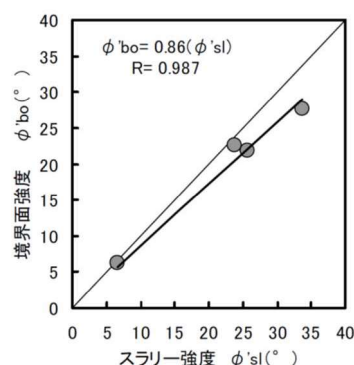


図-5 境界面強度の低下率¹⁰⁾

4. 洪水災害予測の精度向上に向けた課題

4.1 中間土・砂礫堤体材料の適正な評価

堤体材料の多くは、様々な中間土や礫混じり砂などが多く、大半は砂質土に分類される。その場合、 ϕ 材として評価されるが、礫の混入率により極端に内部摩擦角 ϕ が低下することは意外に知られていない。図-6 に示す粘土と礫の混入土において非圧密非排水強度定数 ϕ_u は礫率 50% で低下する例¹¹⁾や、砂礫材料で礫率 40~50% の低拘束圧において、圧密非排水で間隙水压を考慮した強度定数 ϕ' が低下する図-7 のような現象がある¹²⁾。今後、このような礫率や拘束圧の適正な評価方法を確立していく必要がある。

4.2 堤体内空気圧・浸透圧の適正評価

豪雨の堤体内への浸透過程において、時系列的に(1)堤体内空気圧の発生、(2)浸透圧の発生の 2 段階の変化が想定され、その力学試験方法の開発が必要と考える。

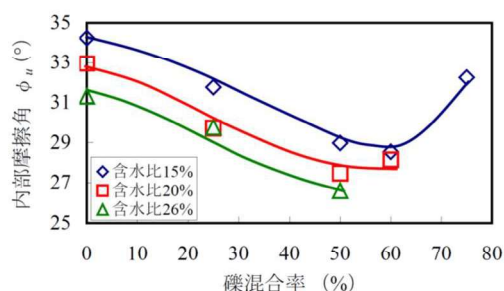


図-6 礫率と ϕ_u の相関¹¹⁾

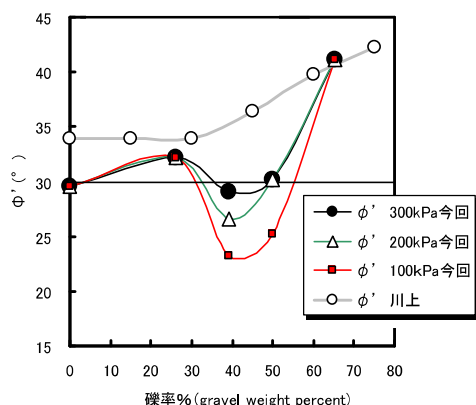


図-7 礫率と ϕ' の相関¹²⁾

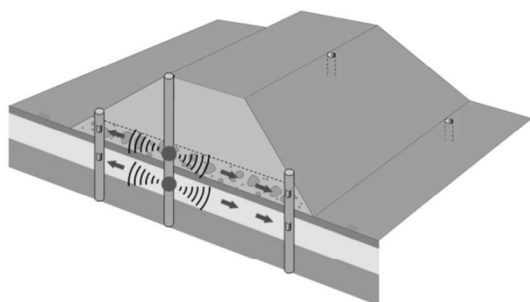


図-8 空気連通試験のイメージ³⁰⁾

4.3 堤防弱点箇所の調査手法の確立

堤防の弱点箇所（浸透破壊により決壊に至る可能性の高い箇所）の確実な抽出と、対策は極めて重要である。

しかし、堤体内に局所的に潜在する高透水層、水ミチ等の弱点箇所を抽出する調査手法は、確立されていない。

図-8の空気圧連通試験と高密度電気探査を組み合わせた方法¹³⁾は、有効な調査手法としての確立が望まれる。

5. シミュレーション技術の課題

2～4章では、地震災害、斜面災害、洪水災害の予測シミュレーションの基礎となる地盤内調査、構造把握、物性設定に係る課題を論じた。

国土交通省は、自らのデータと民間等の多様なデータを連携し、業務効率化やスマートシティ施策等の高度化、産学官連携によるイノベーション創出のための「国土交通データプラットフォーム整備計画」を、2019年5

月に公表した¹⁴⁾。この計画の目指す姿を以下に記す。

- (1) 三次元データ視覚化機能として、国土地理院の三次元地形データをベースに、三次元地図上に点群データ等の構造物三次元データや地盤情報を表示する。
- (2) データハブ機能として、国土交通分野の多種多様な産学官のデータをAPIで連携し、同一インターフェースで横断的に検索、ダウンロード可能にする。
- (3) 情報発信機能として、国土交通データプラットフォームのデータを活用してシミュレーション等を行った事例を、登録・閲覧可能にする。

6. 今後の課題

地震災害・斜面災害・洪水災害における共通課題の解決には、企業間の垣根を超えた新しい研究体制も新たなポテンシャルになるのではないかと考える。このため、今後も関係者一同連携のもと、激甚化する外力に対して国土交通データプラットフォーム整備への貢献や包括的アプローチも見据えた新たな研究に取り組む必要がある。

(執筆責任者 笹井友司)

参考文献

- 1) 太田陽子：台湾の「地質法」について，活断層研究 38号，pp.51-54，2013.
- 2) 山内泰知，笠原順三，羽佐田葉子，川島裕貴，杉本芳博，山口隆志：DAS(Distributed Acoustic Sensor)の表面波分散曲線への適用可能性，日本地球惑星科学連合大会予稿集，2018.
- 3) 山内泰知，笠原順三，羽佐田葉子，川島裕貴，杉本芳博，山口隆志：人工震源と微動を震源として用いたDASによる表面波解析，物理探査学会第138回学術講演会論文集，pp.29-32，2018.5.
- 4) 木村克己，花島裕樹，石原与四郎，西山昭一：埋没地形面の形成過程を考慮したボーリングデータ補間による沖積層基底面モデルの三次元解析—東京低地北部から中川低地南部の沖積層の例，地質学雑誌，Vol.119，pp.537-553，2013.
- 5) 木村克己，花島裕樹，西山昭一，石原与四郎：ボーリングデータ解析による浅部地下地質構造の三次元モデリング—東京低地北部から中川低地南部の例，関東平野中央部の地下地質情報とその応用，特殊地質図，No.40，pp.56-113，2014.
- 6) 産業技術総合研究所地質調査総合センター：日本重力データベースDVD版，2013.
- 7) 井上真，西垣誠，鈴木茂之，木村隆行，笹井友司：2018年7月豪雨により崩壊した傾斜30度未満の崩壊斜面の機構解明，公益社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.39-50，2020.

- 8) 武居有恒, 三浦清: マサ土崩壊とその対策, 島根県, 1978.
- 9) 山本哲朗, 鈴木素之, 寺山崇, 原田博: 斜面崩壊の素因となる不連続面のせん断強度の評価手法, 地盤工学会, 土と基礎, Vol.49(7), pp.7-9, 2001.
- 10) 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No.22, 2010.
- 11) 田中利典, 棚橋由彦, 蔣宇静, 杉本知史, 辻大志: 風化地山を想定した礫-粘性土混合試料の強度特性の実験的評価, 土木学会西部支部研究発表会, pp.78-79, 2010.
- 12) 山名孝志, 木村隆行, 徳方完: 礫質土のせん断強度と斜面安定評価, 日本応用地質学会平成 16 年度研究発表会, pp.173-176, 2004.
- 13) 館川逸朗, 藤吉秀彰, 新村卓也, 西村伸一, 西垣誠: 河川堤防における弱点箇所を抽出する組合せ調査法についての一考察, 第 53 回地盤工学研究発表会講演集, pp.981-982, 2018.
- 14) 国土交通省: 国土交通データプラットフォーム (仮称) 整備計画, 2019.

6.5 2次元浸透－応力連成解析による斜面安定性評価

1. はじめに

各地で集中豪雨による斜面崩壊が多発する中、現状の設計実務や各種研究の多くは、降雨浸透問題には有限要素法による2次元飽和・不飽和非定常浸透流解析が用いられているが、斜面安定問題には簡便な2次元極限平衡法（修正フェレニウス法）が用いられている。

また、斜面崩壊は、表層崩壊、深層崩壊および地すべり性崩壊に大別され、図-1¹⁾に示すとおり、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おり、このうちの80%以上は表土や崩積土等の表層崩壊に分類されている。

これに、近年の豪雨では、傾斜度30°未満の斜面でも表層崩壊が多発していることを踏まえ、傾斜度25°の斜面に対する2次元浸透－応力連成解析（せん断強度低減法）による安定性評価について報告する。

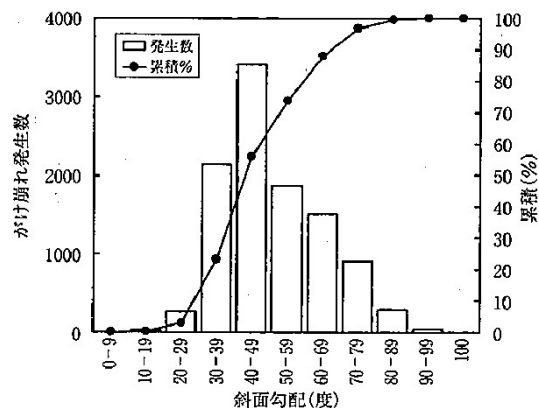


図-1 斜面崩壊が発生した勾配の分布¹⁾

2. 2次元飽和・不飽和非定常浸透流解析

2.1 解析条件

2.1.1 解析モデル

解析モデルとしては、図-2に示すような斜面の傾斜度を25°とした一様傾斜モデルと、斜面中腹で傾斜度25°から30°に変えたモデル（以降、「傾斜度25°の遷急線モデル」と記載）の2つの単純モデルを対象とする。

2.1.2 境界条件

検討2モデルの代表として、一様傾斜モデルの境界条件を図-3に示す。

2次元浸透流解析における初期水位設定時の境界条件は、モデル底面を不透水境界、モデル側方を水頭固定境界とし、降雨時の境界条件はモデル底面およびモデル側方については初期水位設定時と同様とし、地表面に降雨浸透境界を設定する。

図-4に示す2018年7月豪雨による岡山地方気象台の観測記録²⁾によると、7月4日～7月7日にかけての90時間と長時間にわたる総雨量は333mmに達している。また、その他の豪雨として、例えば2012年7月九州北部豪雨³⁾では3時間雨量が280mmに達しており、4時間雨量で前記333mmに達することは現実的であると言える。以上より、本研究では、地表面に与える降雨条件として、以下に示す典型的な2ケースを設定した。

- ① 長期型降雨：3.7mm/時間×90時間＝333mm
- ② 短期型降雨：83.25mm/時間×4時間＝333mm

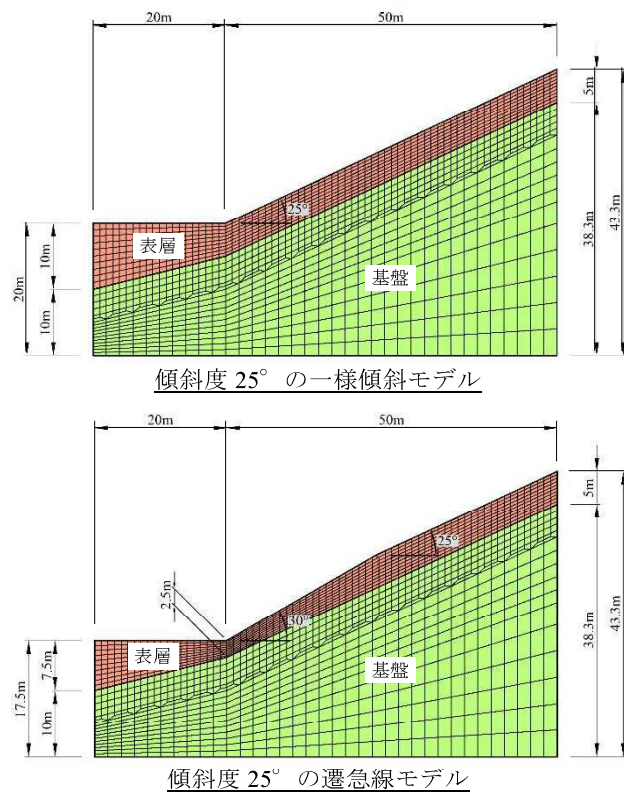


図-2 解析モデル

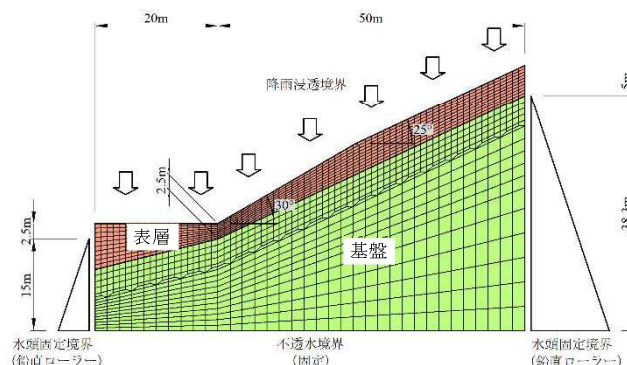


図-3 境界条件【一様傾斜モデルの例】

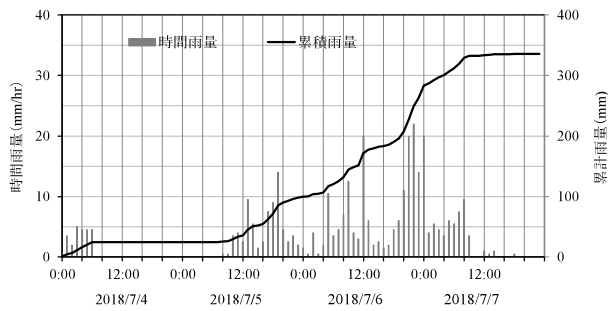


図-4 岡山地方気象台の雨量記録（2018 年 7 月）²⁾

2.1.3 解析用物性値

本研究では、表-1 に示す解析用物性値を仮定した。

なお、2 次元浸透流解析に用いる表層の飽和透水係数は、既往資料⁴⁾を参考に、マサ土の概ね上限値とされる $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ と、概ね下限値とされる $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ の 2 ケースを対象とする。表層の不飽和特性⁵⁾は、図-5 に示す飽和透水係数 $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ の場合には砂質土の特性を、飽和透水係数 $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ の場合には粘性土の特性を用いる。基岩の飽和透水係数は、前記表層の飽和透水係数の下限値 $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ から 1 オーダー下げた $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ を仮定し、図-5 の粘性土の特性を仮定する。

2.1.4 検討ケース

前項までの解析モデル、境界条件、解析用物性値に基づく 2 次元浸透流解析ケースを表-2 に示す。

2.2 解析結果

検討 8 ケースの降雨完了時点における 2 次元浸透流計算結果を図-6 に示し、以下に結果の考察を記載する。

2.2.1 傾斜度 25° の一様傾斜モデル

- (1) 表層の飽和透水係数を大きくした場合、長期型降雨を考慮した Case1-A-①では、地下への浸透量に加えて下流側への流出量も多くなるため、地下水位上昇は斜面法尻付近に留まっており、地下水位面は地表面に至らない。
- (2) 一方で、短期型降雨を考慮した Case1-A-②では、Case1-A-①に比べて下流側への流出量が少なくなるため、斜面法尻から上流側へ向けて飽和域が大きく拡がり、広い範囲で地下水位が地表面に達している。
- (3) 表層の飽和透水係数を小さくした場合、長期型降雨を考慮した Case1-B-①では、地表面から下方に向けた圧力水頭（飽和度）の上昇が認められるものの、地下への浸透速度が遅いために地下水位面上昇はほとんど認められない。
- (4) また、短期型降雨を考慮した Case1-B-②では、降雨の継続時間が短いために、表層内への浸透量が Case1-B-①よりもさらに少なくなり、地表面からの下方に向けた圧力水頭（飽和度）の上昇、地下水位面上昇ともにほとんど認められない。

表-1 2 次元浸透流解析用物性値^{4),5)}

Case 名	飽和透水係数 (m/s)		不飽和特性	
	表層	基岩	表層	基岩
A	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-8}	図-5 の砂質土特性	図-5 の粘性土特性
B	1.0×10^{-7}	同上	図-5 の粘性土特性	同上

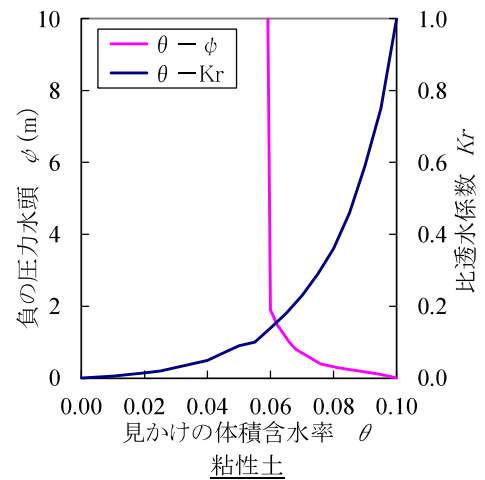
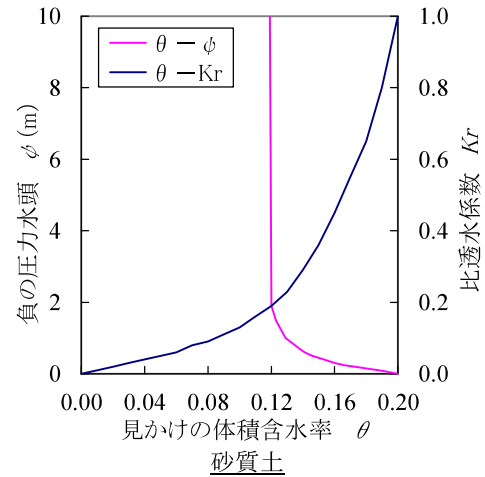


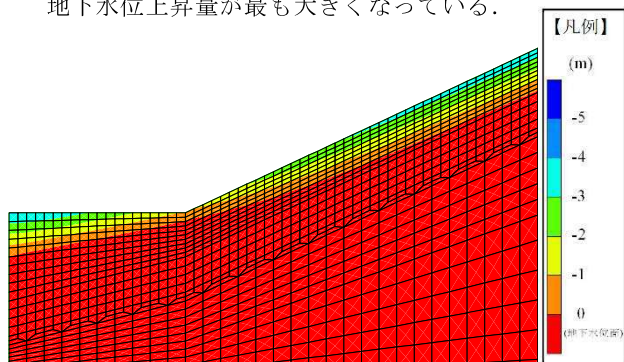
図-5 不飽和特性⁵⁾

表-2 2 次元浸透流解析ケース

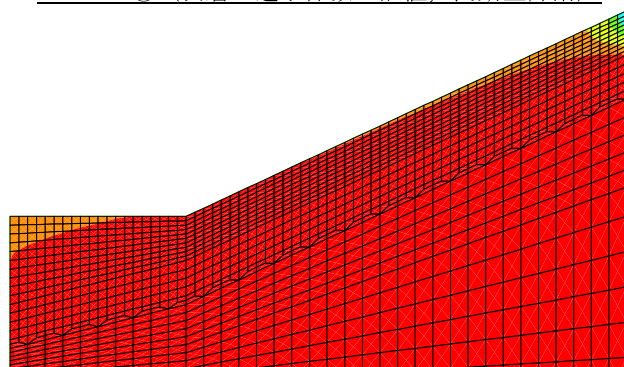
Case 名	解析モデル	表層の飽和透水係数 (m/s)	降雨条件
Case 1-A-①	傾斜度 25° の一様傾斜モデル	1.0×10^{-4} 【上限値】	3.7mm/hr×90hr 【長期型降雨】
Case 1-A-②	同上	同上	83.25mm/hr×4hr 【短期型降雨】
Case 1-B-①	同上	1.0×10^{-7} 【下限値】	3.7mm/hr×90hr 【長期型降雨】
Case 1-B-②	同上	同上	83.25mm/hr×4hr 【短期型降雨】
Case 2-A-①	傾斜度 25° の遷急線モデル	1.0×10^{-4} 【上限値】	3.7mm/hr×90hr 【長期型降雨】
Case 2-A-②	同上	同上	83.25mm/hr×4hr 【短期型降雨】
Case 2-B-①	同上	1.0×10^{-7} 【下限値】	3.7mm/hr×90hr 【長期型降雨】
Case 2-B-②	同上	同上	83.25mm/hr×4hr 【短期型降雨】

2.2.2 傾斜度 25° の遷急線モデル

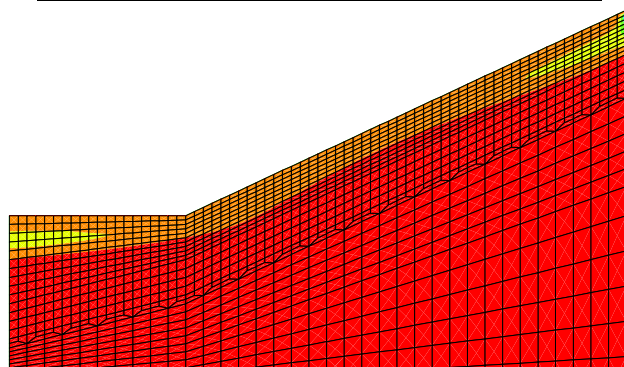
- (1) 遷急線を考慮していない一様傾斜モデルと比べて、遷急線によって法尻付近の表層の層厚が薄くなると、全てのケースで法尻まで地下水位面上昇する。
- (2) また、斜面法尻から上流側へ向けて飽和域が大きく広がる Case2-A-②を除くと、表層の飽和透水係数が小さく、長期型降雨を考慮した Case2-B-①が、法尻付近の地下水位上昇量が最も大きくなっている。



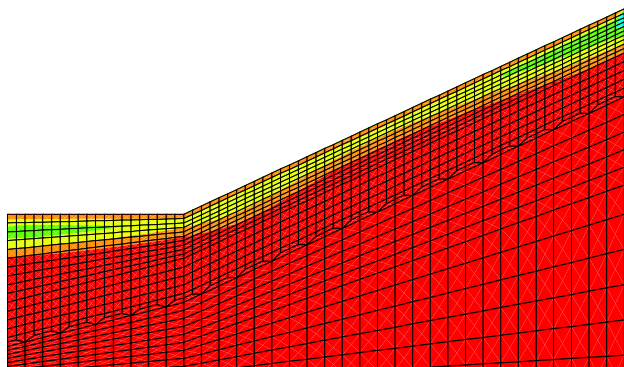
Case1-A-①（表層の透水係数上限値，長期型降雨）



Case1-A-②（表層の透水係数上限値，短期型降雨）



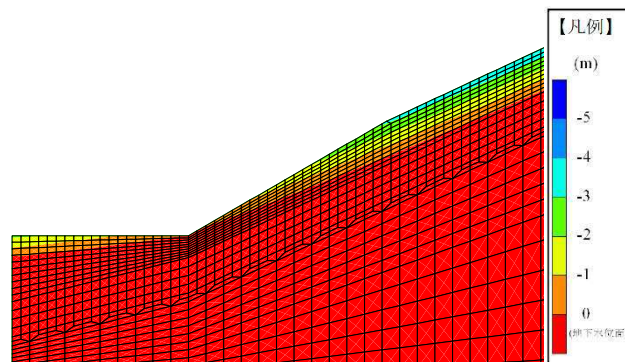
Case1-B-①（表層の透水係数下限値，長期型降雨）



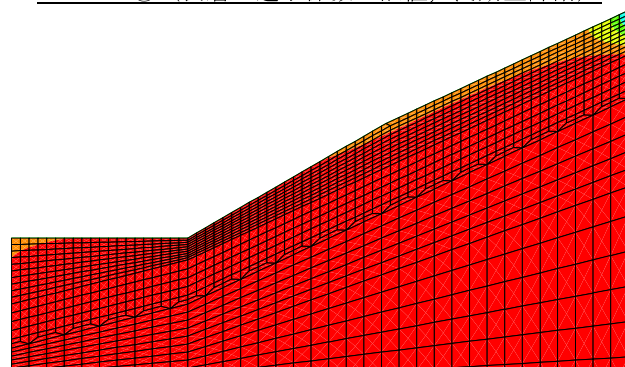
Case1-B-②（表層の透水係数下限値，短期型降雨）

2.2.3 総括

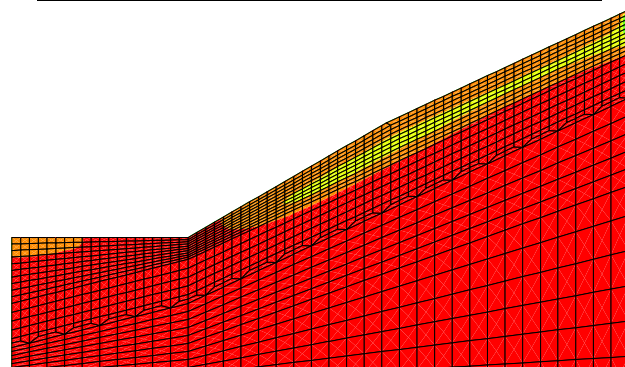
- (1) 表層の透水性が高い場合には、至近年各地で発生している集中豪雨のような短期型降雨の方が、地下水位が上昇する。
- (2) 一方で、表層の透水性が低い場合、特に遷急線が存在する斜面では、2018 年 7 月豪雨のような長期型降雨で表層内の地下水位が大きく上昇する。



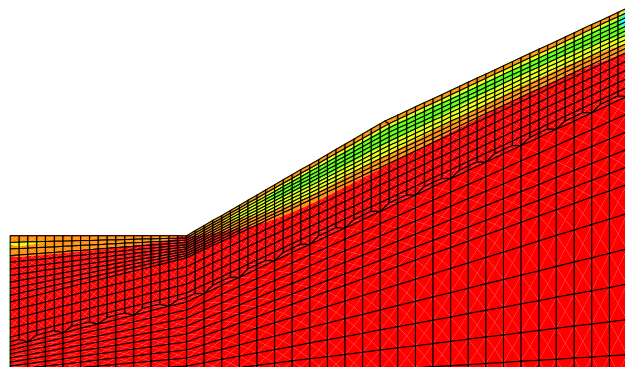
Case2-A-①（表層の透水係数上限値，長期型降雨）



Case2-A-②（表層の透水係数上限値，短期型降雨）



Case2-B-①（表層の透水係数下限値，長期型降雨）



Case2-B-②（表層の透水係数下限値，短期型降雨）

図-6 2次元浸透流計算による降雨完了時の地下水位分布

3. 2次元斜面安定性評価

本章では、前章の浸透流解析結果を基に、極限平衡法（修正フェレニウス法）と弾塑性 FEM 解析（せん断強度低減法）を用いて、斜面の安定性を評価する。

3.1 極限平衡法（修正フェレニウス法）

3.1.1 解析手法¹⁾

極限平衡法は、下式の修正フェレニウス法を用いる。この手法は、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る（図-7 参照）。

$$F_s = \frac{\sum \{c \cdot l + (W - U \cdot b) \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi\}}{\sum W \cdot \sin \alpha} \quad (1)$$

ここに、 F_s ：すべり安全率、 c ：粘着力、

l ：すべり面の弧長、 W ：分割片の重量、

U ：間隙水圧、 b ：分割片の幅、

α ：分割片で切られたすべり面中点とすべり面の中心を結ぶ直線と鉛直線のなす角、

ϕ ：内部摩擦角

3.1.2 解析条件

3.1.2.1 解析モデル

解析モデルは、前章の図-2 f 2 モデルを対象とする。

3.1.2.2 解析用物性値

本研究では、表-3 に示す解析用物性値を仮定した。

なお、極限平衡法で用いる物性値は、単位体積重量と強度特性であり、後者について表層は N 値 15 程度を仮定した一般値⁴⁾を、基岩は表層に比べて十分に大きな値を仮定した。

3.1.2.3 検討ケース

前章の表-2 に示す 2 次元浸透流解析を実施した 8 ケースを対象とする。

3.1.3 解析結果

極限平衡法（修正フェレニウス法）によるすべり安全率算定結果を図-8 に示し、以下に結果の考察を記載する。

3.1.3.1 傾斜度 25° の一様傾斜モデル

一様傾斜モデルでは、地下水位面が地表面に達するケースも含めた全ケースですべり安全率が 2.0 を上回っており、崩壊に至らないと評価できる。このように十分な安全率を有する理由は、層厚が 5m と厚いために粘着力

（すべり線延長）の効果が発揮されることによる。この結果は、通常豪雨による斜面崩壊が表層厚 3m 程度以下の薄い箇所が発生^{例えば 4)}していることとも整合している。

3.1.3.2 傾斜度 25° の遷急線モデル

遷急線モデルについて、表層の透水係数を $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ と大きくした 2 ケースでは、降雨特性に係らずすべり安全率が 1.0 を下回っており、崩壊に至る結果となる。この 2 ケースの計算最終ステップのすべり線は、図-9 のとおり、地下水位面が地表面に達している領域を包絡する形状となっている。また、表層の透水係数を $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ と小さくしたケースでは、短期型降雨（83.25mm/時間×4 時間）では安全率が低下しないが、長期型降雨（3.7mm/時間×90 時間）の場合には安全率が 1.05 程度まで低下し、崩壊に至るもしくは崩壊に至る直前と評価できる。

3.1.3.3 総括

上記結果の総括として、平均的な傾斜度が 30° 未満の斜面であっても、遷急線が豪雨時の安定性に大きく影響することと、表層の透水性が低い斜面でも長期型降雨によってすべり安全率が 1.05 程度まで低下することである。

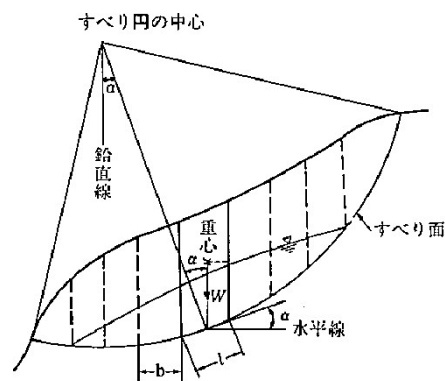


図-7 すべり面内のスライス分割例¹⁾

表-3 応力解析および安定性評価の条件⁴⁾

解析用物性値		表層	基盤
単位体積重量	湿潤	18kN/m ³	24kN/m ³
	飽和	20kN/m ³	25kN/m ³
強度特性	内部摩擦角	30°	45°
	粘着力	1kN/m ²	100kN/m ²
変形特性	弾性係数	$5.0 \times 10^4 \text{kN/m}^2$	$1.0 \times 10^7 \text{kN/m}^2$
	ポアソン比	0.333	0.200

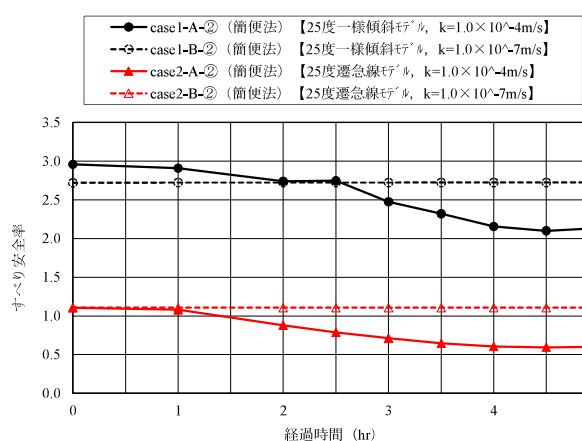
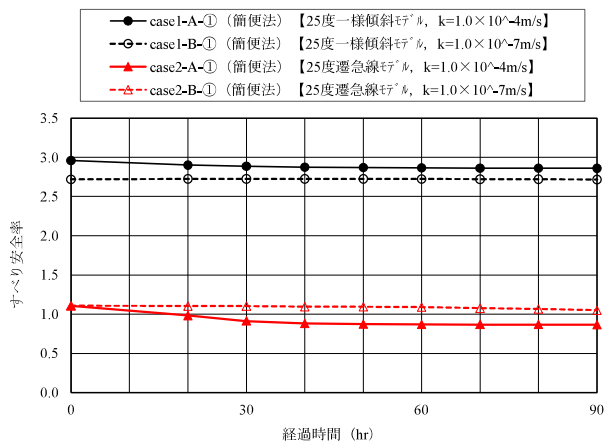


図-8 極限平衡法によるすべり安全率の経時変化

3.2 せん断強度低減法（弾塑性 FEM 解析）^{6), 7)}

3.2.1 解析手法

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。

$$C'_F = \frac{C'}{F}, \quad \tan \phi'_F = \frac{\tan \phi'}{F} \quad (2)$$

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。

$$f = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} - C' \cdot \cos \phi' - \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \sin \phi' \quad (3)$$

$$g = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \sin \phi \quad (4)$$

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-10 に示すとおりで、式(2)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、計算で自動的に決定される。 F が小さな場合、 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モール・クーロン式を満たすようになる。

3.2.2 解析条件

3.2.2.1 解析モデル

解析モデルは、図-2 の傾斜度 25° の遷急線モデルを対象とする。

3.2.2.2 境界条件

応力解析時の境界条件は、図-3 に示すとおり、モデル底面を固定境界、モデル側方を鉛直ローラーとする。

3.2.2.3 解析用物性値

本研究では、表-3 に示す解析用物性値を仮定した。

なお、応力解析に用いる変形係数の設定方針は、前節の極限平衡法によるすべり安全率の算定に用いた強度特性と同様である。

3.2.2.4 検討ケース

前節の極限平衡法の総括を踏まえ、case2-B-①（長期型降雨・表層の飽和透水係数下限値）を対象とする。

3.2.3 解析結果

対象 1 ケースのせん断強度低減法と極限平衡法とのすべり安全率の比較を図-11 に、両手法の計算最終ステップにおけるすべり線の比較を図-12 に示し、以下に結果の考察を記載する。

なお、図-12 のせん断強度低減法によるすべり線は、せん断ひずみの大きさと表現される臨界すべり線である。

— Case2-A-①の降雨開始 90 時間後のすべり線
— Case2-A-②の降雨開始 5 時間後
(降雨完了 1 時間後) のすべり線

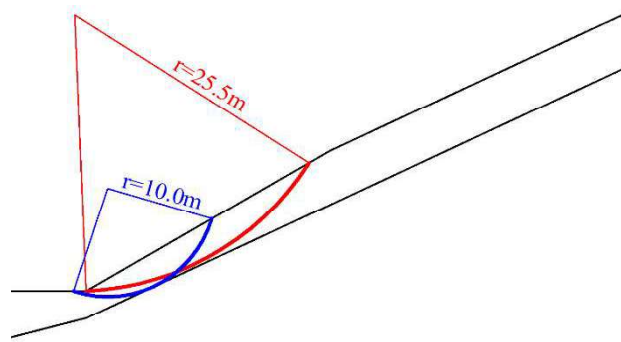


図-9 極限平衡法による代表 2 ケースのすべり線

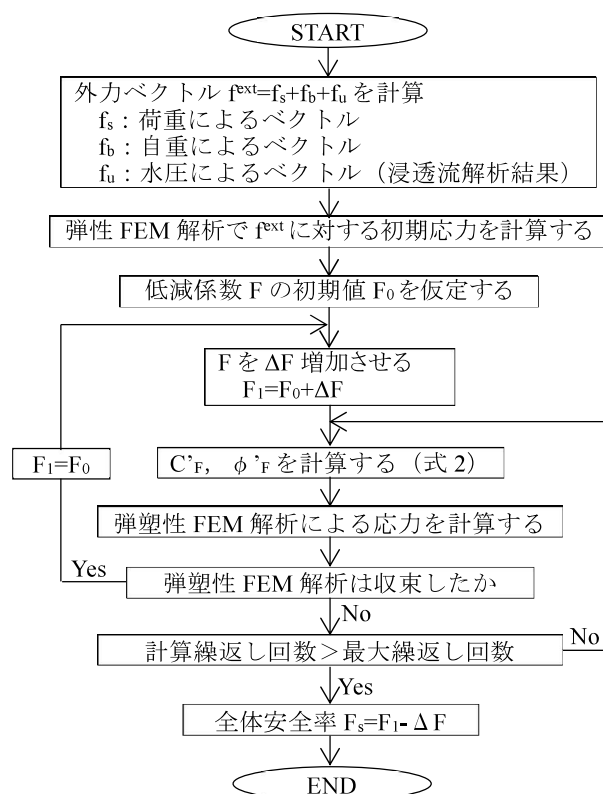


図-10 せん断強度低減法による応力解析フロー

- (1)せん断強度低減法の最小すべり安全率は、極限平衡法に比べて小さくなっている。なお、極限平衡法では、地下水位上昇の影響をすべり線直交方向の間隙水圧で考慮するのに対し、せん断強度低減法では浸透流解析による水圧ベクトルで考慮するため、後者では不飽和域も含めた地盤内の地下水の流向が応力状態、ひいてはすべり安全率に影響する。特に、斜面法尻が飽和に至ると斜面の外側へ向けた浸透水圧が発生し、すべり安全率を低下させる。
- (2)また、両手法のすべり線を比較すると、せん断強度低減法は遷急線下方の全体すべりであるのに対して、極限平衡法は法尻近傍の小さなすべりとなっており、両者で大きく異なっている。

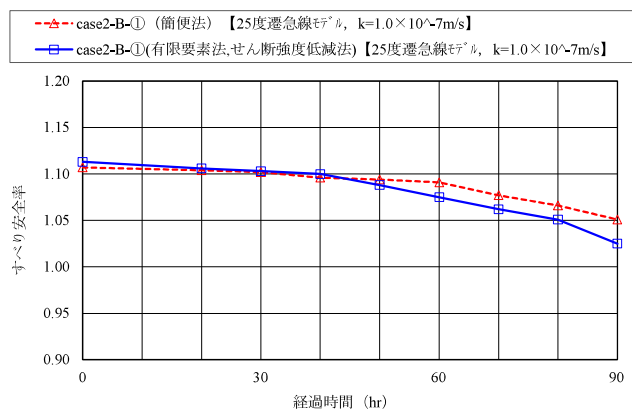


図-11 極限平衡法とせん断強度低減法のすべり安全率の比較 (Case2-B-①)

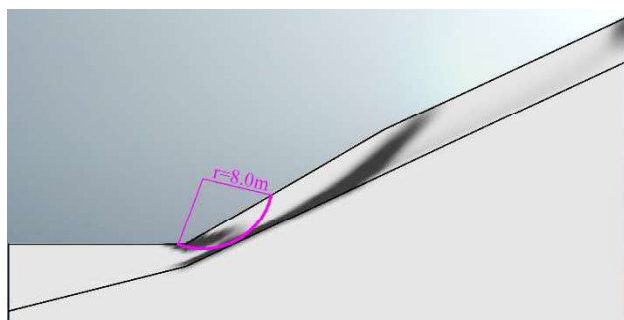


図-12 極限平衡法とせん断強度低減法のすべり線の比較 (Case2-B-①)

4. まとめ

本研究におけるまとめを以下に記載する。

- (1)せん断強度低減法では、浸透流解析の結果を水压ベクトルで考慮する。このため、特に斜面法尻が飽和に至るような場合には、斜面の外側へ向けた浸透水压が発生し、一般設計で用いられる極限平衡法よりもすべり安全率を大きく低下させる可能性が示唆された。
- (2)土砂災害警戒区域（急傾斜地）に指定されない 30° 未満の斜面の遷急線を把握することで、傾斜度 25° を指標とした斜面崩壊危険度評価の精度向上に繋がる可能性が示唆された。
- (3)今後は、国土地理院の保有する航空レーザー測量等による DEM データを活用した、 30° 未満の斜面の遷急線の把握が望まれる。

（執筆責任者 笹井友司）

参考文献

- 1) 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），p.314，2009.
- 2) 気象庁 web：http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php（入手日 2020.3.15）

- 3) 公益財団法人地盤工学会 平成 24 年 7 月九州北部豪雨による地盤災害調査団：平成 24 年 7 月九州北部豪雨による地盤災害調査報告書，2013.
- 4) 公益財団法人地盤工学会 平成 11 年広島県豪雨災害緊急調査委員会：平成 11 年の広島県豪雨災害調査報告書，2000.
- 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，鵜飼恵三：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) 鵜飼恵三，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.

6.6 2次元気液二相流解析の適用性に関する検討

1. はじめに

地下水が地盤工学にどのように関係しているかを考えると、地盤内に地下水が無い場合、ほとんどの地盤災害は生じないと結論付けても過言ではない。特に多雨の東アジアでは、地下水があることによって斜面崩壊や地盤の液状化が生じており、地下水は地盤工学における土砂災害とは切っても切れない要因となっている。地盤の液状化に対しての危険度マップは、自治体によって住民に提示されているが、地質的な分類での判定であり、地下水位（水圧）分布でのデータはほとんど収集されていないのが現状である。また、豪雨における斜面崩壊に関しても、地下水は大きく関与している。

近年の豪雨災害は、2014年8月の広島豪雨災害や2017年7月九州北部豪雨災害等のように短時間の降雨強度が大きい場合や2018年7月西日本豪雨のような降雨強度は比較的小さいが長く続く場合など、様々な特徴の豪雨に起因して発生している。

これまで降雨浸透による斜面崩壊のメカニズム解明のため、様々な解析手法による研究が行われている。豪雨時の斜面安定性評価には、雨水の浸透挙動や浸透水圧の変化を正確に把握する必要がある。不飽和地盤における浸透現象を数値解析により表現するためには、地盤内の間隙中における地下水と空気が同時に流動する現象を取り扱う、気液二相流解析を実施する必要がある。しかし、実務のほとんどは、地下水のみを取り扱った一相流解析であり、二相流解析に関する研究・事例は少ないのが現状である。

これまでに齋藤ら¹⁾は、降雨浸透・地下水排水過程における間隙空気の影響を確認するために水槽型の室内実験と二相流および単相流解析を実施し、降雨浸透過程の再現に適した解析手法を検討している。これにより、降雨強度が地盤の浸透能に比べ十分に小さい場合においては、その浸透・浸出過程は気液二相流解析および単相流解析いずれでも再現できることを確認している。一方で、石田ら²⁾は、降雨強度を変えた斜面模型実験と二相流解析を用いた再現解析および過去の斜面崩壊現場の再現解析を実施し、降雨強度が大きい場合は二相流解析が降雨時の斜面安定性評価に有用である可能性を示している。また、齋藤ら³⁾は、疑似的にばらつきと偏りのある不均一斜面に対する豪雨時の斜面内浸透流の性質について、気液二相流解析により検討し、均一場を仮定することで不均一場より斜面内の間隙水圧を過小評価する可能性があること、また間隙空気の影響は不均一場でより大きくなる可能性があることを示している。

本論文では、2018年7月の西日本豪雨で表層崩壊が発

生した傾斜30°未満の斜面を対象に、気液二相流解析と単相流解析を実施した。また、その結果を基に、実務で広く用いられている極限平衡法によりすべり安全率を算定し、斜面の安定性評価における気液二相流解析の適用性について検討した。

2. 気液二相流の基礎方程式

地盤内の気液二相流の基礎方程式⁴⁾は、連続の式とダルシー則、不飽和浸透特性、空気の圧縮性等を考慮して、以下のように表される。なお、本検討においては、溶解、揮発および水の圧縮性は考慮していない。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K_{ij} \lambda_n \left(\frac{\partial P_n}{\partial x_j} + \rho_n g \frac{\partial x_3}{\partial x_j} \right) + K_{ij} R_s \lambda_w \left(\frac{\partial P_w}{\partial x_j} + \rho_w g \frac{\partial x_3}{\partial x_j} \right) \right] \\ &= \phi \left[- \left(\frac{1}{\beta_n} \right) S_w' \left(\frac{\partial P_n}{\partial t} - \frac{\partial P_w}{\partial t} \right) + (1 - S_w) B_n' \frac{\partial P_n}{\partial t} \right. \\ & \quad \left. + \left(\frac{1}{\beta_w} \right) R_s S_w' \left(\frac{\partial P_n}{\partial t} - \frac{\partial P_w}{\partial t} \right) \right. \\ & \quad \left. + R_s S_w B_w' \frac{\partial P_w}{\partial t} + \left(\frac{1}{\beta_w} \right) S_w R_s' \frac{\partial P_w}{\partial t} \right] \\ & \quad - q_n \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K_{ij} \lambda_w \left(\frac{\partial P_w}{\partial x_j} + \rho_w g \frac{\partial x_3}{\partial x_j} \right) + K_{ij} R_v \lambda_n \left(\frac{\partial P_n}{\partial x_j} + \rho_n g \frac{\partial x_3}{\partial x_j} \right) \right] \\ &= \phi \left[\left(\frac{1}{\beta_w} \right) S_w' \left(\frac{\partial P_n}{\partial t} - \frac{\partial P_w}{\partial t} \right) + S_w B_w' \frac{\partial P_w}{\partial t} \right. \\ & \quad \left. - \left(\frac{1}{\beta_n} \right) R_v S_w' \left(\frac{\partial P_n}{\partial t} - \frac{\partial P_w}{\partial t} \right) \right. \\ & \quad \left. + R_v (1 - S_w) B_n' \frac{\partial P_n}{\partial t} \right. \\ & \quad \left. + \left(\frac{1}{\beta_n} \right) (1 - S_w) R_v' \frac{\partial P_n}{\partial t} \right] - q_w \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 t ：時間、 x_i ：空間座標、 g ：重力加速度、 P_w 、 P_n ：水圧および空気圧、 ϕ ：間隙率、 S_w ：水の飽和度、 ρ_w 、 ρ_n ：水および空気の密度、 β_w 、 β_n ：水および空気の組成体積因子、 R_s 、 R_v ：溶解度および揮発、 K_{ij} ：絶対透過性テンソル
 $\lambda_w = k_{rw} / \mu_w \beta_n$ 、 $\lambda_n = k_m / \mu_n \beta_n$ 、 k_{rw} ：比透水係数、 k_m ：比透気係数、 μ_w 、 μ_n ：水および空気の粘性係数
 B_w' 、 B_n' および S_w' ：下式のとおる

$$B_w' = \frac{d}{dP_w} \left(\frac{1}{\beta_w} \right), \quad B_n' = \frac{d}{dP_n} \left(\frac{1}{\beta_n} \right) \quad (3)$$

$$S_w' = \frac{dS_w}{dP_c}, \quad P_c = P_n - P_w \quad (4)$$

3. 気液二相流解析

3.1 解析条件

二次元気液二相流解析は、2018 年 7 月豪雨で崩壊した岡山大学北側の半田山の自然斜面を対象に実施した。本斜面は、既往研究にて井上ら⁵⁾が一相流解析を実施しており、傾斜 30° 未満の急傾斜地崩壊危険箇所⁶⁾に指定されていない斜面である。

解析モデルは、図-1 に示す既往研究のものを用いた。

境界条件は、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、側方上流側と底面は不透水境界とした。

解析ケースおよび地盤特性を表-1 に示す。解析ケースは、既往研究の一相流解析の条件であるケース①と、参考に短期的な集中豪雨を想定したケース②とした。

不飽和浸透特性は、「河川堤防の構造検討の手引き」に示されている粘性土の不飽和浸透特性を参考に、van Genuchten の式を用いて図-2 に示す関係とした^{6),7)}。

初期水位は、既往調査ボーリング孔内観測水位⁵⁾を基に、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設定した。また、降雨条件は、図-3⁸⁾のとおり崩壊地近傍の岡山地方気象台における観測雨量を考慮した。

3.2 解析結果

一相流解析と二相流解析の降雨開始 90 時間後の飽和度分布の比較を図-4 に示す。なお、本図に示す二相流解析の飽和度分布は、サクション圧 $P_c = P_n - P_w$ (P_n : 間隙空気圧, P_w : 間隙水圧) と不飽和特性を用いて算定している。長期降雨イベントであった観測雨量のケース①は、通常の一相流解析では降雨浸透により表土内の飽和度が上昇しているが、二相流解析では表土最下端のごくわずかな範囲のみの飽和度上昇にとどまった。一方、短期的な集中豪雨を想定したケース②では、一相流解析および二相流解析ともに表土内の飽和度が上昇しない結果となった。

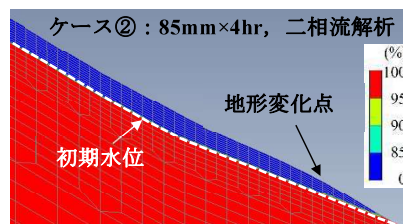
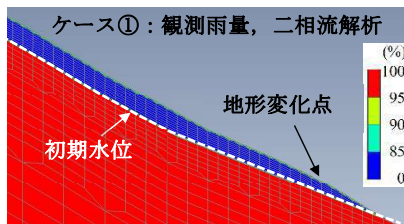
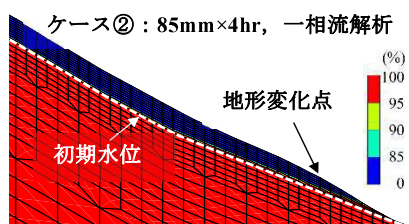
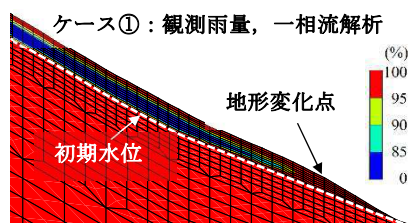


図-4 降雨開始 90 時間後の飽和度分布

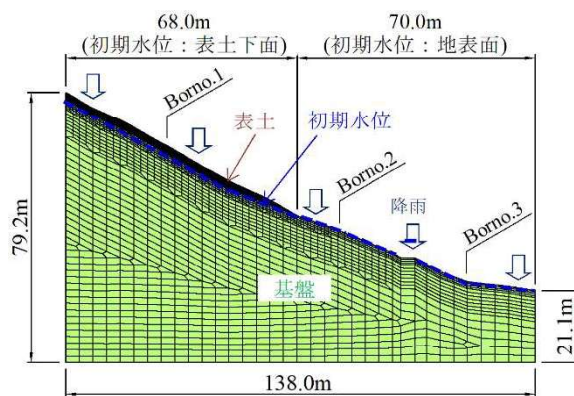


図-1 2次元解析モデル⁵⁾

表-1 解析ケース

No.	表土の飽和透水係数 (m/s)	表土の不飽和浸透特性	降雨条件
①	1.0×10^{-7}	粘性土	観測雨量
②	1.0×10^{-7}	粘性土	85mm × 4hr ^{※2}

※1 : 基盤の飽和透水係数は 1.0×10^{-9} m/s とする。

※2 : 90 時間後の総雨量が 336mm に相当する短期的な集中豪雨を想定したケース

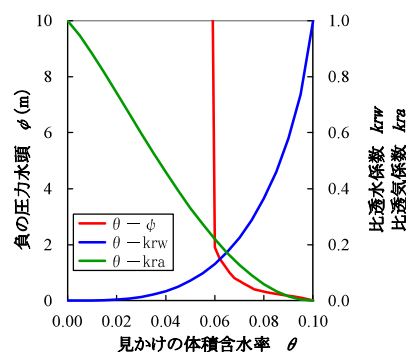


図-2 不飽和浸透特性

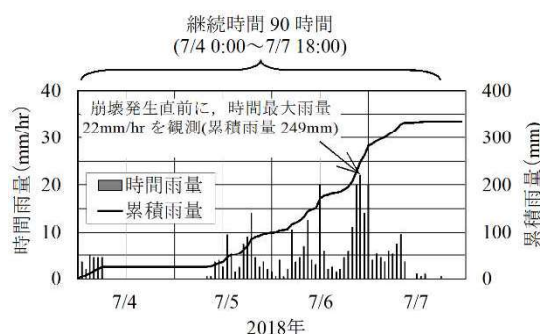


図-3 岡山地方気象台の雨量記録 (2018 年)⁸⁾

また、二相流解析における降雨開始 90 時間後の間隙空気圧分布を図-5 に示す。ケース①は、表土内全域の間隙空気圧 P_n が上昇しており、この空気圧縮の影響で一相流解析に比べて降雨浸透が遅れると考えられる。一方、ケース②は、間隙空気圧の上昇が認められなかった。

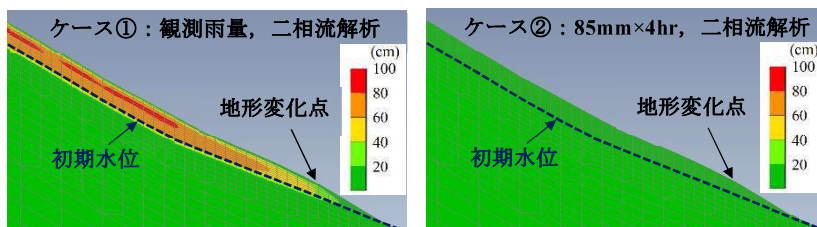


図-5 降雨開始 90 時間後の間隙空気圧 P_n 分布(空気圧を圧力水頭に換算)

4. 極限平衡法による斜面の安定性評価

4.1 評価手法⁹⁾

極限平衡法は、下式の修正フェレニウス法を用いる。この手法は、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る (図-6 参照)。

$$F_s = \frac{\sum \{c \cdot l + (W - U \cdot b) \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi\}}{\sum W \cdot \sin \alpha} \quad (5)$$

ここで、 F_s ：すべり安全率、 c ：粘着力、

l ：すべり面の弧長、 W ：分割片の重量、

U ：間隙水圧、 b ：分割片の幅、

α ：分割片で切られたすべり面中点とすべり面の中心を結ぶ直線と鉛直線のなす角、

ϕ ：内部摩擦角

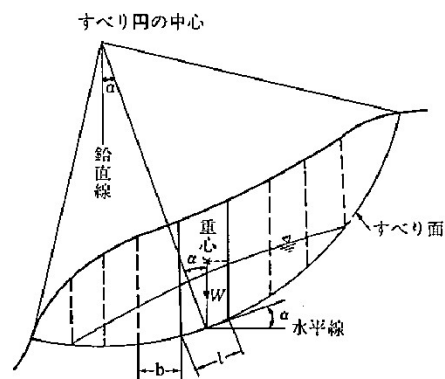


図-6 すべり面内のスライス分割例⁹⁾

表-2 安定性評価用物性値⁵⁾

解析用物性値		表土
単位 体積重量	湿潤	18kN/m ³
	飽和	20kN/m ³
強度特性	内部摩擦角	33°
	粘着力	0kN/m ²

※1：基岩は、表土に対して十分大きな強度特性を仮定した。

※2：水の単位体積重量は 10kN/m³ とした。

4.2 評価条件

安定性評価用の地盤条件は、表-2 のとおり、井上らによる当該崩壊斜面の試験結果⁵⁾を参考に設定した。

4.3 評価結果

前章の解析結果から求まる飽和度および間隙空気圧を基に算定したケース①での極限平衡法による安定性評価結果を図-7 に示す。なお、すべり安全率算定における地下水位は、一相流解析は図-4 の飽和度分布より算定するが、二相流解析は空気圧 P_n による有効応力の減少を簡易的に考慮するため、サクシオン圧 P_c から空気圧 P_n を差し引いた間隙水圧 P_w より算定した。

図-7 より、一相流解析は、地下水位の上昇により降雨開始 30 時間後に安全率が大きく低下している。一方、二相流解析は、徐々にすべり安全率が低下していき、崩壊発生時刻と想定される降雨開始 70 時間後付近ですべり安全率が 1.0 程度となった。この時の空気圧 P_n を考慮した場合の仮想地下水位は、図-8 に示すとおりである。

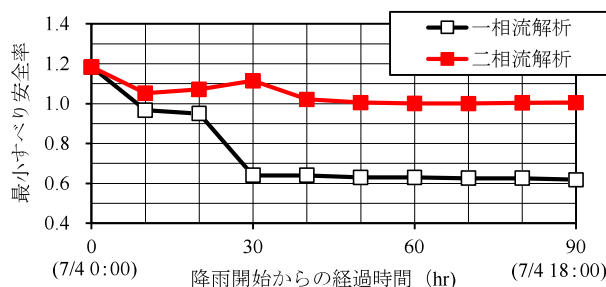


図-7 極限平衡法によるすべり安全率の比較(ケース①)

5. まとめ

2次元気液二相流解析結果に基づく極限平衡法によるすべり安全率は、一相流解析での安全率に比べて、当該斜面の崩壊に対する再現性が高い結果となり、二相流解析が斜面の安定性評価に有用であることを示唆した結果となった。

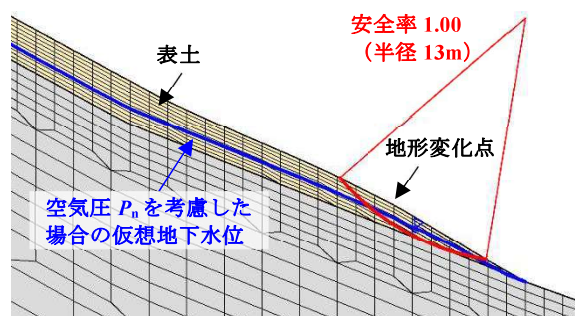


図-8 二相流解析ですべり安全率が最小となるすべり線 (降雨開始 70 時間後)

6. 今後の課題および展望

- (1) 今後は、傾斜や地盤特性の違い、地層の不陸等に着目し、斜面の安定性評価における気液二相流解析の適用性についてさらに研究を進めていく必要がある。
- (2) 自然斜面の安定性予測の向上のためには、斜面内の弱層の3次元的な分布を調査する技術開発が必要であり、簡易的に斜面内の風化層の広がりを把握する方法として、物理探査と軽量貫入試験装置の併用が挙げられる。
- (3) 貫入試験で得たサンプルから、不飽和土の力学特性および浸透特性を室内試験で求めるとともに、貫入孔を活用した間隙水压計、間隙空気圧計、土壌水分計の設置が望まれる。
- (4) 予測モデルと降雨状況および原位置のモニタリングを基に、降雨時における道路等の通行規制または解除の判断につなげる必要がある。

(執筆責任者 松井章弘)

参考文献

- 1) 齋藤雅彦, 八木宗一郎, 正木寛昭, 市成準一: 降雨浸透・浸出過程における地盤内間隙空気の影響に関する実験と数値解析, 応用力学論文集, Vol.9, pp.901-908, 2006.
- 2) 石田純平, 杉本知史, 蔣宇静: 斜面安定解析への二相流解析適用に関する基礎的研究, 応用地質, 第59巻, 第5号, pp.263-272, 2018.
- 3) 齋藤雅彦, 増田竜士: 不均一性と間隙空気を考慮した数値解析による豪雨時の斜面内浸透流に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.4, I_7-I_12, 2018.
- 4) 河野伊一郎, 西垣誠, 浅間康史: 有限要素法による水と空気の二相浸透流解析, 土質工学研究発表会発表講演集, Vol.19, pp.1371-1374, 1984.
- 5) 井上真, 西垣誠, 鈴木茂之, 木村隆行, 笹井友司: 2018年7月豪雨により崩壊した傾斜30度未満の崩壊斜面の機構解明, 地盤と建設, Vol.38, No.1, pp.39-50, 2020.
- 6) 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.
- 7) van Genuchten, M.T: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society American journal, Vol.44, pp.892-898, 1980.
- 8) 気象庁 HP: <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (入手日: 2020.3.15)
- 9) 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), p.398-399, 2009.

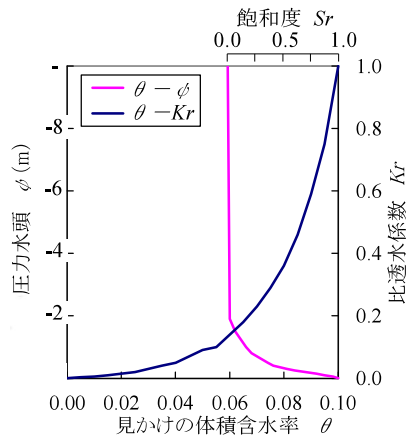


図-4 不飽和特性（粘性土）⁵⁾

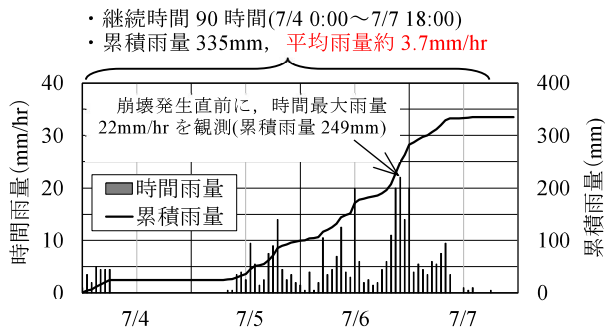


図-5 岡山地方気象台の雨量記録（2018 年）⁶⁾

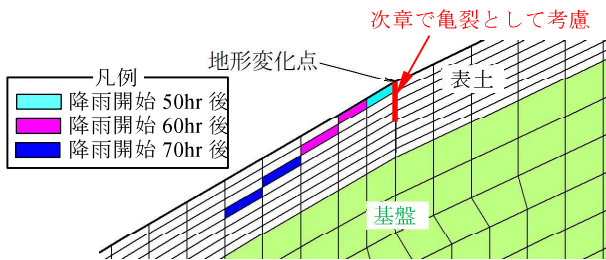


図-6 浸透－応力連成解析結果
（引張応力発生要素に着色）

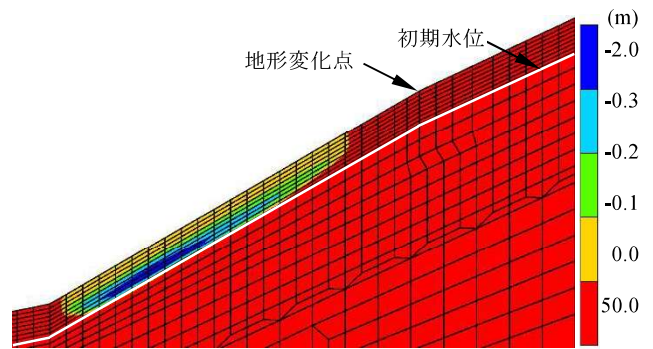
3. 引張り亀裂を考慮した飽和・不飽和浸透流解析

本章では、前章の浸透－応力連成解析結果を踏まえ、図-6 に示す表層から 4 要素（厚さ 1m）へ引張り亀裂の発生を仮定した 2 次元飽和・不飽和浸透流解析を行う。本検討では、引張り亀裂幅を 1cm、表土の飽和透水係数を表-1 の 10^7 倍である 1.0m/s を仮定した。その他解析用物性値、不飽和特性、降雨条件等は、前章と同様である。

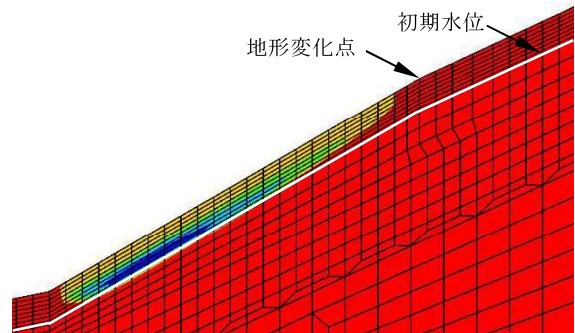
図-7 に解析最終時刻である降雨開始 90hr 後の圧力水頭分布を示す。圧力水頭が正となる飽和域は、引張り亀裂を考慮した場合の方が、地形変化点から斜面下方に向けて広がっている。

4. 極限平衡法による斜面安定性評価

本章では、前章に示す 2 次元浸透流解析結果を基にし



引張り亀裂を考慮したケース



引張り亀裂を考慮しないケース

図-7 2 次元浸透流解析結果
（圧力水頭分布、降雨開始 90hr 後）

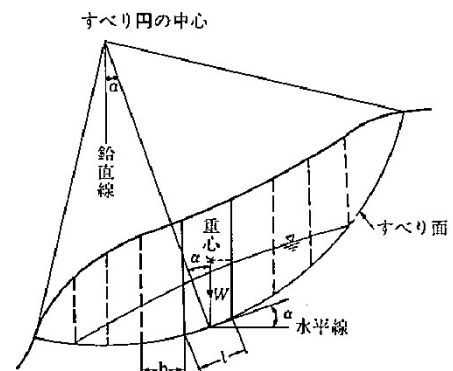


図-8 すべり面内のスライス分割例⁸⁾

た極限平衡法（修正フェレニウス法）⁷⁾による安定性評価を行う。

極限平衡法は、下式の修正フェレニウス法を用いる、この手法は、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る（図-8 参照）。

$$F_s = \frac{\sum \{c \cdot l + (W - U \cdot b) \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi\}}{\sum W \cdot \sin \alpha} \quad (1)$$

ここに、 F_s ：すべり安全率、 c ：粘着力、

l ：すべり面の弧長、 W ：分割片の重量、

U ：間隙水圧、 b ：分割片の幅、

α ：分割片で切られたすべり面中点とすべり面の中心を結ぶ直線と鉛直線のなす角、

ϕ ：内部摩擦角

上記手法による斜面安定性検討の結果を図-9 および図-10 に示す。

引張り亀裂を考慮した場合には、降雨開始 40hr 以降から安全率が大きく低下しており、考慮しない場合に比べて低下開始が早い。これにより、両者の安全率の差異は、降雨開始 80hr 後に最大約 15% となる。また、両者の降雨開始 90hr 後のすべり線形状は概ね一致しており、いずれも地形変化点を始点に斜面中腹へ抜けている。

5. まとめ

- (1) 今回の検討により、地形変化点付近への引張応力の発生が確認されるとともに、これが斜面の安定性評価、すなわち崩壊の発生に大きく影響する可能性を示唆した。
- (2) 今後、引張応力の発生による亀裂（剥離）の進展を考慮できる解析手法の採用が望まれる。例えば、現状の解析モデルの要素間に、ジョイント要素を設定する案が挙げられる。
- (3) また、斜面の傾斜や物性値の違いによる本検討手法の適用性検討や、引張り亀裂の幅・深さが斜面の安定性評価へ及ぼす影響把握を要する。

（執筆責任者 笹井友司）

参考文献

- 1) 公益社団法人日本地すべり学会：日本地すべり学会誌，Vol.42，No.5，p.64，2006.
- 2) 井上真，西垣誠，鈴木茂之，木村隆行，笹井友司：2018 年 7 月豪雨により崩壊した傾斜 30 度未満の崩壊斜面の機構解明，建設と地盤，地盤工学会中国支部，Vol.38，pp.39-50，2020.
- 3) 赤井浩一，大西有三，西垣誠：有限要素法による飽和－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.
- 4) Griffiths, D.V. and Lane, P.A. : Slope stability analysis by finite elements, *Geotechnique*, Vol.49, No.3, pp.387-403, 1999.
- 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) 気象庁 HP: <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>（入手日 2020.3.15）.
- 7) 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.
- 8) 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），p.314，2009.

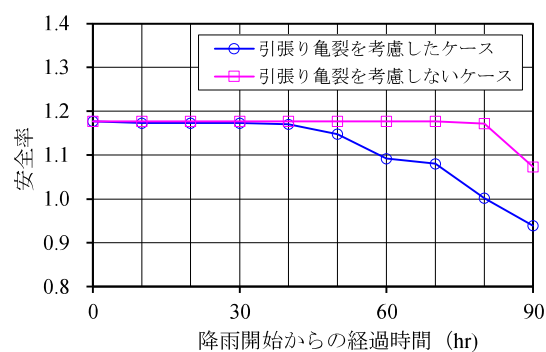


図-9 極限平衡法による斜面安定性評価結果

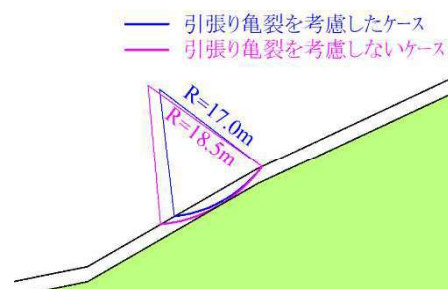


図-10 すべり線（降雨開始 90hr 後）

