国土交通大臣認可　統合物性モデル技術研究組合

2022 年 研究発表会 講演集

地震災害・河川災害・土砂災害における最近の研究動向と課題について

2022 年 8 月 26 日(金)

岡山県国際交流センター国際会議場・Web ライブ配信併用

主催：非営利共益法人統合物性モデル技術研究組合 (IMTERA)

後援：一般社団法人日本応用地質学会中国四国支部、公益社団法人砂防学会中四国支部
公益社団法人土木学会中国支部、公益社団法人地盤工学会中国支部
一般社団法人全国地質調査業協会連合会中国地質調査業協会
一般社団法人建設コンサルタンツ協会中国支部　一般社団法人岡山県測量設計業協会
一般社団法人アンカー健全度協会中国支部

助成：公益財団法人八雲環境科学振興財団（研究集会助成）

2022 年 研究発表会 プログラム

10:00	10:10	挨拶（西垣理事長）
10:10	10:30	空気圧連通試験と高密度電気探査の組合せによる不飽和の高透水域の抽出方法に関する一考察 〇新村卓也（パシフィックコンサルタンツ），西垣 誠，斉藤泰久，舘川逸朗，藤吉秀彰
10:30	10:50	河川堤防内の長期水位計測実績に基づいた原位置における不飽和土中の水分計測の意義 〇片山輝彦（アサノ大成基礎エンジニアリング）
10:50	11:10	ジョイント・インバージョン法を使った岡山県南部の三次元 S 波速度構造モデルの作成に関する研究 〇杉本芳博（ダイヤコンサルタント）
11:10	11:30	2022 年 3 月福島県沖地震等の近年の地震における地震動分布推定 〇末富岩雄 （エイト日本技術開発）福島康宏、尾茂淳平
11:30	11:50	小型震動センサーの開発と計測事例 〇橋本和佳(中央開発)，王寺秀介，王林
11:50	12:40	昼食休み
12:40	13:00	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） 〇斉藤泰久（パシフィックコンサルタンツ）
13:00	13:20	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 〇井上真（ウエスコ） 與那城稔
13:20	13:40	傾斜 30 度未満の斜面崩壊に関する一考察 〇笹井友司（中電技術コンサルタント）松井章弘
13:40	14:00	衛星 SAR データによる地盤の変位解析方法と結果例 〇八野祐二（基礎地盤コンサルタンツ） 吉川猛
14:00	14:20	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 〇木村隆行（エイト日本技術開発）
14:20	14:30	休憩
14:30	15:30	特別講演「土砂災害と地下水」 〇西垣誠（岡山大学名誉教授、統合物性モデル技術研究組合理事長）
15:30	15:40	休憩
15:40	17:00	総合討論「現況と今後について」

目　　次

提言

統合物性モデル技術研究組合の成果と未来への夢…… 1

〇西垣誠（岡山大学名誉教授、統合物性モデル技術研究組合理事長）

特別講演

土砂災害と地下水 …… 25

〇西垣誠（岡山大学名誉教授、統合物性モデル技術研究組合理事長

研究発表会

1. 空気圧連通試験と高密度電気探査の組合せによる
   不飽和の高透水域の抽出方法に関する一考察…… 47
   〇新村卓也（パシフィックコンサルタンツ），西垣　誠，斉藤泰久，舘川逸朗，藤吉秀彰
2. 河川堤防内の長期水位計測実績に基づいた
   原位置における不飽和土中の水分計測の意義…… 51
   〇片山輝彦（アサノ大成基礎エンジニアリング
3. ジョイント・インバージョン法を使った
   岡山県南部の三次元 S 波速度構造モデルの作成に関する研究…… 59
   〇杉本芳博（ダイヤコンサルタント）
4. 2022 年 3 月福島県沖地震等の近年の地震における地震動分布推定…… 65
   〇末富岩雄　（エイト日本技術開発）福島康宏、尾茂淳平
5. 小型震動センサーの開発と計測事例…… 69
   〇橋本和佳(中央開発)，王寺秀介，王林
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）…… 73
   〇斉藤泰久（パシフィックコンサルタンツ）
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…… 77
   〇井上真（ウエスコ）　與那城稔
8. 傾斜 30 度未満の斜面崩壊に関する一考察…… 81
   〇笹井友司（中電技術コンサルタント）松井章弘
9. 衛星 SAR データによる地盤の変位解析方法と結果例…… 86
   〇八野祐二（基礎地盤コンサルタンツ）　吉川猛
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…… 89
    〇木村隆行（エイト日本技術開発）

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……97
　　〇新村卓也（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……98
　　〇片山輝彦（アサノ大成基礎エンジニアリング）
3. 河川災害 WG の提言……99
　　〇舘川逸朗（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……101
　　〇末富岩雄 （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……101
　　〇杉本芳博（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……102
　　〇王寺秀介(中央開発)
7. 土砂災害 WG　土砂災害対策上の課題……103
　　〇斉藤泰久（パシフィックコンサルタンツ）
8. 土砂災害 WG　土崩壊土砂量の推定精度向上の課題……104
　　〇井上真（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……105
　　〇笹井友司（中電技術コンサルタント）
10. 土砂災害 WG　衛星 SAR の課題……106
　　〇八野祐二（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……107
　　〇木村隆行（エイト日本技術開発）
12. 土砂災害 WG の提言……108
　　〇與那城稔（ウエスコ）

編集後記……109

場所：岡山県国際交流センター

会場 33 名　Web265 名　 合計 298 名

（Web 参加は、質問はチャットのみ）

岡山市北区奉還町 2 丁目 2 番 1 号

研究発表会　10：00～17：00

会場(無料)・Web（無料） 2F 国際会議場　 CPD5.6

継続討論会　17：30～19：30

会場(無料） Web(無料） 2F 国際会議場

提　言

統合物性モデル技術研究組合の成果と未来への夢

西垣 誠
（岡山大学名誉教授、統合物性モデル技術研究組合理事長）

統合物性モデル技術研究組合の成果の中間報告と未来への夢

統合物性モデル技術研究組合
理事長　西垣誠

１．はじめに

近年，過去の記録を毎回書き換えるような集中豪雨が日本列島の中で起こっている．また，地震も，過去の経験で対応していては不十分な大きなエネルギーを持った規模で発生している．本報文では，自然災害のうち地盤災害に焦点を合わせて，過去の経験を超えた地震や豪雨に対しても，災害から国民をいかに守るかについて研究した成果の中間報告をする．

なお，本研究の根本的な目的は，土砂災害が生じる前に地盤内の状況を把握しておき，その情報を基に土砂災害が起こる前に対策をして，国民の命と財産を守るような社会の構築を提案することである．

２．統合物性モデル技術研究組合の活動

2.1　統合物性モデル技術研究組合とは

国の技術研究組合制度は,昭和 36 年の鉱工業技術研究組合法に基づいて設立された．技術研究組合（CIP 制度；Collaborative Innovation Partnership）は，複数の企業，大学，独立行政法人等が協同して試験研究を行い，単独では解決できない課題を克服して，技術の実用化を図る法人である．技術研究組合での成果を一層発展させるために，開発された技術の実用化を実施するための新しい会社が設立されている場合もある．

この技術研究組合の設立・運営ガイドラインは，令和 3 年 5 月にも改定された．令和 3 年 10 月 1 日現在，国全体として 56 の技術研究組合が活動しており,建設系では３つの技術研究組合が活動している．その１つが統合物性モデル技術研究組合である．

2.2 当統合物性モデル技術研究組合の使命

「統合物性モデル」の構想は，国土交通省国土技術政策総合研究所のデータプラットホーム構想におけるデータ活用の視点の土木からアプローチのひとつでもある．

地上構造物に関しては，BIM/CIM（Building Information Modeling Management / Construction Information Modeling Management）として，多くの情報が統合され，維持管理までの詳細なデータが構築されようとしている．

一方，地盤内の地層や地下水位等の情報を統合したデータの蓄積は,国としてはほとんどなされていないため,2018 年 3 月に国交省が，今後の地盤調査に関する発注者がどのようにすれば地盤情報が集大成されるかについて，中間とりまとめを行った．その結果，官民の地盤情報データベースの構築が提言され，既存の地盤情報の利活用を促進するため，2018 年 4 月に一般社団法人「国土地盤情報センター」が設立された.この組織の確立によって，今までバラバラに保存されていたボーリング調査データが一元化され，これから地下工事をする際に，該当する地域の地盤情報がある程度推定できるようになる方向に進んでいる [1) 2)].

一方，学会や省庁・自治体では，すでに関東平野や，大阪の地盤図や地質図等が，既存のデータを用いて構築されている．また，それらのデータを基に地盤の液状化の危険度マップ等のハザードマップ等が公開されている所もある．しかし，既存のボーリングデータの中には，XY 座標が正確でないといったデータも含まれているため，データそのものの信頼性を検証すべき場合もある．このような課題もあるが，地盤情報の検定，登録，利用システムが確立されてくると，地下空間での施工リスクが低減され，i-construction も深化されていくと考えられる.その主たる目的である 3 次元地盤モデルを構築して，既知のボーリングデータ間の地層構成の推定を AI 等によって実施すると，地盤全体の状況が一層明確になると考えられる．

過去には，このような基礎的なデータもなく，1 本のボーリングデータからの情報だけで施工することによって，きわめて危険な状況で地下工事を実施している時代があった．それによって，都市部の中心で地盤陥没や，隣接する建築物の変状が生じたりしてきた．このような現状に対して,今後はそのような事象が生じないように，地盤データの理解を深め，その場での過去の工事における施工法の選定経緯の情報も学べるシステムも必要と考えられる．

国が地盤情報を一元化した成果をプラットフォームに公開した後，そのデータ群をいかに有効利用するかについてイノベーションするのが，当統合物性モデル技術研究組合の研究課題である．

なお，本研究組合の略称は，そのまま英語で表現した Integration Model of Physical Properties TEchnology Research Association を短くし，IMTERA とした．技術研究組合としては CIP という伝統ある名称があるが,「統合物性モデル技術研究組合」は TRA を用い，以後 IMTERA と称する．

地盤内の種々の特性を統合して，どのような課題に対してチャレンジするかについては，いろいろと検討した結果，日本の国土をいかに強靭なものにするかに課題を絞ることにした．さらに国土強靭化は，何に対してであ

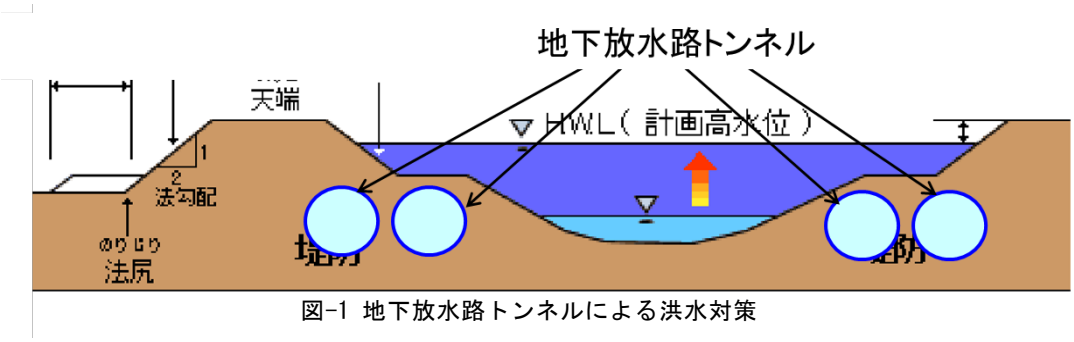


図-1 地下放水路トンネルによる洪水対策

るかと考えると，以下の３つの事項について，課題を絞った．

(1) 地震に対する地盤モデルの構築と地盤強靭化
(2) 豪雨に対する堤防の診断と洪水対策
(3) 豪雨による土砂災害の予測と斜面等の崩壊前の対策

(1)地震に対する地盤モデルの構築と地盤強靭化

地震が起こる都度に，その自然のエネルギーレベルは大きくなってきている．その状況に対応するために，構造物の設計強度は強くなってきている．しかし，その構造物を支持する地盤も，建造物とともに強靭な地盤に改良していかねばならないと考えている．

砂地盤の地下水位が高い所で，地下水位低下による地震時の液状化対策等が広域でなされている．一方，最近では，一度液状化した所でもまた液状化すると言われている．これは，地盤が不均質であるからと考えられる．しかし，このような一律な対策が困難な不均質な場所でも，根本的な液状化防止対策が広域で実施できる方法はないかを提案する．

地震による液状化は，地表から 20m の深さが対象となっている．この 3 次元モデルをどのように構築するかを探求することが重要である．これに対しては，ボーリング孔間の地層を推定する技術の整理と，物理探査による推定方法を探求する．また，地盤の液状化対策として，液状化の危険性がある地盤に対しての新しい地盤強靭化対策を提案する．

(2)豪雨に対する堤防の診断と洪水対策

豪雨によって，日本列島の中のいろいろな所で洪水が生じている．これは，異常気象のため降雨量が，過去の降雨量を基に設計された河川堤防の排水容量を超えてしまっているからであると考えられる．

このような降雨流量の増大に対応するため過去には，大河の水を放水路（分水路）により放流する対策が実施された．また，河川にダムを建設して，一時的な降雨貯水を上流で実施した．しかし，それだけでは，近年，流域に降る水量を処理することは不可能になってきている．また，放水路を建設する場所も，上流にダムも建設する場所も無くなってきている．

2001 年に施行された大深度地下使用法により，地下に巨大な大深度地下放水路を建設して，地表では処理できない降水を流下させ，地域の洪水を防ぐ方法が，関東の神田川放水路や関西の大和川放水路等で実施されている．首都圏外郭放水路も施工されている．雨水が一気に川へ流れ込むのを防ぐ流域対策である．しかし，このような洪水対策ができるのは，大深度地下の公共的使用に関する特別措置法の対象地域である首都圏，近畿圏，中部圏の三大都市圏だけである．

また，現行の地下放水路は，一時的に地下水路に水を溜めて，大河川の流れに影響のない時に大河川にポンプアップして放流する仕組みになっている．しかし，多くの都市は，大深度地下法の対象地域外であるため，個人の住宅の下に地下放水路を掘削することは困難である．また，地表に放水路を建設するにしても，多くの住宅の移転に莫大な費用がかかるために困難である．

昭和 56 年 8 月の北海道の千歳川流域の洪水対策として，千歳川の洪水水を直接太平洋に放流する千歳川放水路計画が検討されてきた．しかし，新しく平成 17 年 4 月より，堤防強化と遊水地群の併用による流域治水対策が策定され，令和 2 年度より 6 地区のすべての遊水地の利用を開始した．しかし，このような流域治水は，用地のある所では可能であるが，多くの所は困難である．例えば，岡山県下の吉井川，旭川，高梁川では，古くより住民が山間部にも河川沿いに住んでおり，流域治水が困難な地区と考えられる．したがって，地上に用地の無い所では，現状の河川では豪雨の排水が不可能な場合は，図-1 に示すように河川領域の地下か地上を利用して，開水路より高い排水処理が可能な閉水路の放水路トンネルを海まで設置する手法を，IMTERA は提案してきた．

このような閉水路の放水路内は粗度係数も少なく，圧力管にすることも可能であるため，同じ断面積の開水路よりも数倍の洪水を海まで排水することが可能になると考えている．

地下に放水路トンネルを掘削することは高価である．新幹線のトンネルを普通のシールド工法で掘削すると約 800 万円/m 程度で掘削が可能である．また，場所打コンクリートのセグメントを用いたシールド工法（ECL 工法）を適用すると，約 450 万円/m 程度の工事費になる．仮に 100 ㎞の地下工事とすると，約 50 兆円にもなる大工事になる．2021 年に完成した福岡県の高尾川の地下放水路工

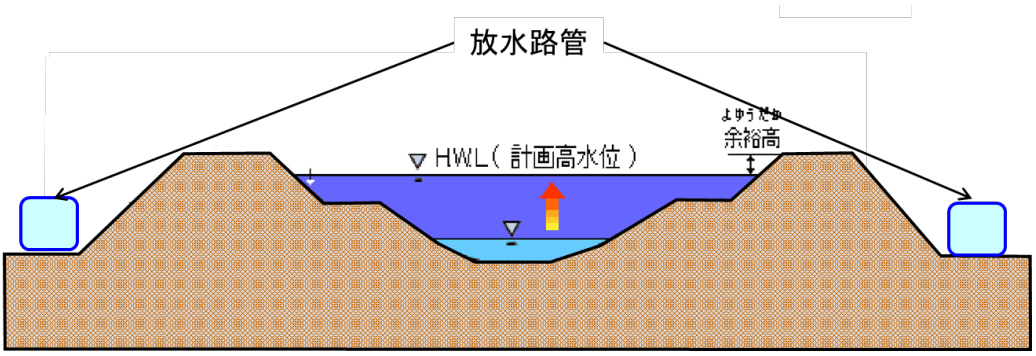


図-2 地上の放水路管による洪水対策

事は，約 1km で 35 億円の建設費になっている．しかし山から海までの地上の空間を変えずに海まで洪水が排水できる工法は魅力がある．この山から海までの空間は，平時は電気自動車の高速道路にもなり，日本中に太平洋から日本海までの大道路網ネットワークが構築できる．

地下工事が高価であれば，図-2 に示すように，堤外地に放水管を海まで設置して，豪雨の水を放水する対策も考えられる．

上記のような根本的な排水計画だけでなく，既存の堤防や堤防基礎等の弱点箇所の抽出方法や，豪雨時の堤体内の危険度のモニタリング手法についての研究に対しても，新しい手法を提案する．

(3)豪雨による土砂災害の予測と斜面の崩壊前の崩壊防止対策

今日，異常気象はどんどん激しくなってきている．これに対しては，狭い国土の山頂までの地層分布と地層の風化層厚を調査して記録すべきである．今日では，物理探査等で微動アレーの技術が進歩している．この手法を LP 調査で危険と判定された山地に適用して，斜面内の風化層等の地層の層厚が推定できる．その物理探査結果の妥当性を確認するために山の頂上まで人力で持っていける軽重量のコーン貫入試験装置（Light Weight Core Penetration Test，以後，LWCPT と称する）を開発した[3]．これらの技術を統合すると，斜面内の豪雨浸透による崩壊場所や亀裂が生じる所が，崩壊前に探知できる．これらの探査結果に対して，崩壊前の事前に対策を実施できれば，土砂災害による人命やその財産を守ることができると考えられる．

2.3 地震に対する地盤災害の対策

2.3.1 はじめに

(a) 地下水位，水圧情報の欠落

日本中の平野部における地盤情報が体系化されると，地震による地盤の液状化災害に関しての危険度はある程度予測が可能になっている．しかし，平野部の地盤の地層分布，特に砂質土層の分布データが収集されても，その場所の地下水位，水圧のデータが収集されない．地下水位のデータがないと，地震時の液状化現象に対して正確な危険度を判定することは困難である．

地下水位は，地層と異なり，固定されたデータではなく，気候によって変動しやすいデータである．この地下水位（水圧）の変動は，周囲の表流水の水位によっても変動する．当然，一年間を通じて渇水期と豊水期で地下水位は当然変動する．また，大気圧の変化によって被圧地下水圧が変動すると言われている．また，地下水は同じ場所でも，観測井の深さによって，観測井内の水位が変動する．したがって，地盤内のどの地下水位を採用するかによって，この地域の砂層が液状化するかどうかの予測は，変わってくることがある．

特に，広域の砂地盤の液状化対策として，地下水位低下工法を適用する際には，地盤内の地下水位の変動を考慮して，危険な状況が生じない高さまで地下水位を低下できる対策が必要である．

当然，豪雨の後や洪水の後に大地震が来た時の液状化対策は，この場合にも地下水位（水圧）低下システムに十分な余裕を持たせた対策である必要がある．しかし，このような議論をする前に，地域の液状化現象を検討するには，地域の地下水位変動データと地下水位変動モデルの確立が大切である．今，日本地下水学会が日本中の平野部の地下水のモデル化データの取集を実施している．国は，この学会の活動と連動して，地震の多い日本での平野部の液状化対策を可能にする必要がある．ここでは，一般の家屋の液状化対策を主に論述する．

(b)個人の家屋の基礎の地盤情報の欠落

日本中のボーリングデータが収集されたが，個人の家屋の基礎のボーリングデータは，個人情報として削除されている自治体がある．しかし，平野部での液状化対策が必要なのは，個人の家屋である．高層ビル等は，基礎工事の段階で，阪神淡路大震災後ある程度耐震対策は実施されているが，個人家屋では，まだ何も対策がなされていない．このような状況であるため，一日でも早く個人家屋での地盤情報を一元的に国や自治体が把握して，東南海地震に対する液状化対策を実施することが行政の責務であると考えられる．

(c)工業地帯の液状化対策

古い工業地帯では，新しい技術による追加の地盤調査もなされていない所もある．このような工業地帯は，地

上の設備も老朽化しており，工業地帯の行政が工業地帯の安全指導を実施している．しかし，ここにおいても個人情報を守る壁があり，行政の指導も及ばない状況になっている所がある．また，工業地帯の中でどのような政策がなされているかについての情報も，公開されていない所もある．ここにおいても，大地震が生じた時でも，地盤の液状化が生じて大災害が生じないように，行政の指導に従って事前に十分な対策を実施して，周囲の住民に被害を及ぼさないように至急に対策をする必要がある．それが事業者倫理の中でいちばん大切なことである．

2.3.2 地下水位低下工法による液状化対策

(a) 恒久的な地下水位低下による液状化対策

(i)地下水位低下施設

広域の液状化対策として，1985 年に建設された東燃ゼネラル石油株式会社の川崎工場の 66 基の石油タンクは，スラリーウォール（ベントナイト止水壁）による長さ 2,600ｍの可動壁（幅 0.8m，深さ 16m）により，26 万 m2 の領域の中に 26 本のディープウェル(計 0.6m，深さ 20m)を設置して地下水位を低下している [4]．

ちなみに，2011 年 3 月 11 日の東北大震災でも地盤の液状化が生じていない結果を得ている．したがって，この工法は，効果ある液状化対策としての実績を継続している．

(ii)地下水位低下対象領域への地表面からの侵入水の軽減対策

広域の地下水位を低下させるために常時，揚水ポンプで降雨などの広域地盤内への浸透水を揚水しているランニングコスト等で 800 万円程度の維持費が必要になる．このランニングコストをいかに削減するかは大きな課題である．

対象領域に侵入する水の内，地表面からの降雨浸透流量の削減が有効的である．この対策は実際に福島第二原発の汚染水量の削減策として，250m×500m の原子力発電敷地の地表面をアスファルト層等で遮水している実績がある．しかし，それによって揚水流量が零にはなっていない．それは，アスファルト面の切裂や目地からの浸透もあるためである．したがって，地表面の止水の維持管理も大変である．また，地表面がアスファルト面の所で住民が満足して快適に生活できるかの心配もある．さらに，周囲の公園の樹木にも，地下水位低下工法による影響がないかを事前に検討しておく必要もある．当然であるが，地下水位を低下させても，その地区での地盤沈下が生じないことを事前で 3 次元での数値解析により確認しておく必要がある．

千葉市都市局都市部市街地整備課液状化対策室によると，千葉市美浜区磯礎辺 4 丁目や 3 丁目地区では，2011 年の東日本大震災で住宅地で液状化現象が生じた．その対策として，地下水位低下工法の実証実験を実施するために，暗渠排水管（ドレーンパイプ）を水平に配置し，対策地区の周囲に鋼矢板を打設（道路の路面下 3.5m まで)して,2018 年 1 月より地下水位低下工法を実施して，その経過をモニタリングしている．この対策の耐久性が確認できるデータが収集できることは，本当にすばらしい実験である．

(iii) 地下水位低下工法の対象領域の周囲の遮水方法

広域での地下水位低下工法において，液状化の対象となる砂層への横からの地下水の流入を防止するために，対策領域の周囲に遮水する必要がある．

1)鋼矢板止水工法

鋼矢板を打設する方法が一般に適用される．近年では打設ではなく，圧入工法で小さな騒音や振動で地盤内の連続矢板止水が可能となっている．しかし，鋼矢板工法は金属であるため，1 年間に 0.2～0.3mm 程度腐食するため，矢板の厚さにもよるが，標準耐用年数が 30～40 年と考えられている．したがって，永久止水ではない．地震が来た時に可動性が必要であるため，止水壁がコンクリート材料では亀裂が入ったりして，止水性能は地震の毎に低下する可能性がある．

2)ベントナイト遮水壁（スラリーウォール）工法

地下水位低下工法を実施する際の側方の遮水壁としてベントナイトスラリーによる遮水壁は，可動壁であり，地震がきても壁に亀裂が発生しない極めて有効な壁である．スラリーウォールのトレンチの掘削には，SMW 工法やスラリー固化壁の工事する小型の機械を用いるので，住宅の近くの工事も可能である．

課題としては，海の近くの地下水には，塩分を含んでいるため，普通のベントナイトを用いたスラリーでは，粘性等の維持が困難になる可能性があるため注意が必要である．

この課題に関しては，海水下でも膨潤する特殊なベントナイトが開発されている [5]ので，それを使うと可能ではないかと考えている．

2.3.3 砂地盤の固結工法

(a) はじめに

砂地盤の液状化対策として，密度の少ない砂地盤の密度を増大する工法や，間隙水圧消散工法等が，多くの地点での液状化対策として適用されている．これらの対策工法に対して，既設の建物の基礎地盤を固結する工法として利用しやすいセメントや薬液を注入して砂地盤を固結化する工法がある．これに対して，砂地盤に注入して地盤が固結し，しかも 50 年，100 年，1000 年間の液状化対策に対して耐久性がある砂地盤改良手法について研究した．その結果，セメントミルクを砂地盤内に注入し注入管を残置して，建物の基盤を構成する対策工法を探求した．

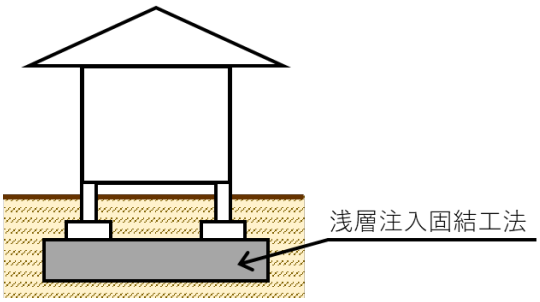


図-3　浅層浸透注入工法

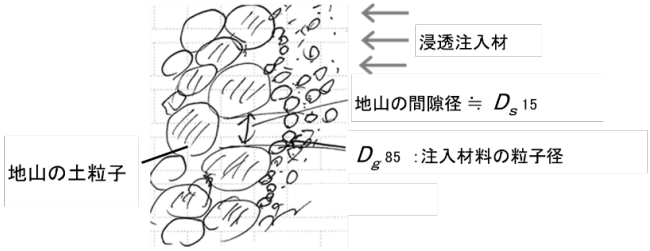


図-4　砂地盤への懸濁性材料の注入

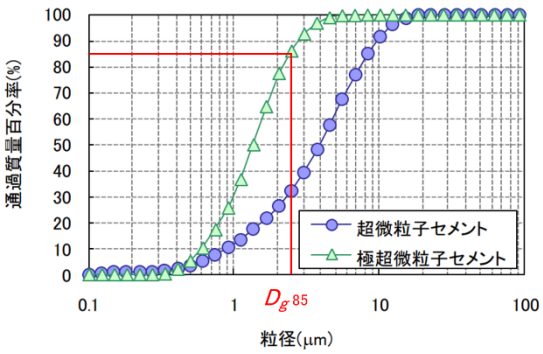


図-5　注入材料の粒径加積曲線

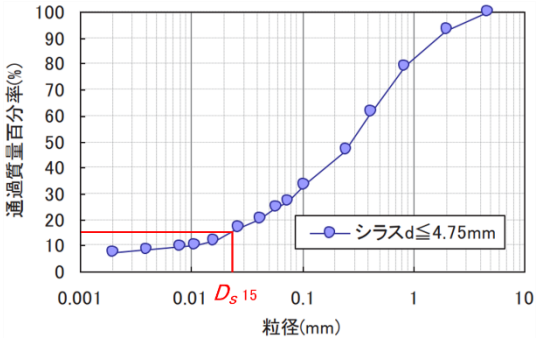


図-6　シラス材料の粒径加積曲線

（b） 砂地盤内へのセメントミルクスラリーの浸透注入工法

砂地盤の浸透固化処理工法では，一般に薬液を間隙内に浸透させる工法が提案される．これに対して，砂地盤にセメントミルクスラリーを浸透（注入）して固結する技術は，既設の構造物の下に**図-3** に示すように，砂地盤に浸透するように注入して砂質地盤を固結する工法である．

一般にセメントミルクスラリーのような懸濁性材料を砂地盤に注入する際には，**図-4** に示すように砂地盤の間隙に注入する懸濁性材料の**図-5** に示す粒径加積曲線の Dg_{85} が容易に浸透する必要がある．一例として，**図-6** に鹿児島県の桜島のシラス材料の粒径加積曲線を示すが，このシラスの地山に懸濁性のセメントミルクスラリーを浸透性注入するには，注入するセメント材料の粒径加積曲線の 85%の粒径（Dg_{85}）がシラス材料の間隙径の 5 分の 1 以下である必要がある．

これは，K.Terzaghi の排水用のフィルター材の間隙径と地山の粒径についての次の試験式 (1) を基本に推定したものである．

$$Df_{15} < 5\ Ds_{85} \qquad (1)$$

ここで，Df_{15}: フィルターの粒径加積曲線の 15%の粒径，

Ds_{85}：地山の土粒子の 85%粒径．

式(1)の Df_{15} は，フィルターの間隙径がフィルターの Df_{15} に近い値として仮定した結果より求めたものである．すなわち，フィルターの間隙の中に地山の骨格を構成する 85%以上の土粒子が地下水の浸透によって流入してこない条件である．これはフィルターの中に地山の骨格を形成する土粒子が流入してくると，フィルターの背後の地山に陥没事象が発生することがないフィルター粒径の条件を規定している．

なお，この条件では，フィルターの中には，Ds_{85} 以下の粒径の地山の土粒子は，流入してくる．したがって，フィルター内はこの細粒土の流入によって目詰まりが生じるため，フィルターは常に洗浄して，フィルター内の目詰まりを回避することが重要である．

Terzaghi のフィルター理論を，砂地盤に浸透注入できる懸濁ミルクのセメント粒子の選定について論述する．シラスの間隙径を**図-6** の Ds_{15} と仮定すると，間隙径は約 0.02mm（20 μ m）になる．この間隙径の中に浸透注入するには，注入するセメント材の Dc_{85} は，シラスの間隙径の 5 分の 1 以下でなければならない．

図-5 にこの基準に従って作成した新しい極超微粒子セメントの粒径加積曲線を示す．また，図中には，現在，ダム等のセメントグラウト材としてよく用いられている超微粒子セメントの粒径加積曲線も対比して示した．

この結果より，シラス地盤には，超微粒子セメントでは，浸透注入が困難であることがわかる．これに対して，極超微粒子セメント（Ultra Super Fine Cement，以後 USFC と称す）では，浸透注入することが可能であることがわかる．

しかし，このような USFC を水で懸濁したミルクを作成しても，セメントの粒子が細かくなるほどセメント粒子は水の中で凝集して団粒化してしまう．この団粒化した材料をもっと粒径を小さくするには，団粒化した材料を分散剤によって分散する必要がある．これに対して一般的なセメント分散剤であるメラミンスルホン酸やナフタレンスルホン酸では不十分であった．そのため，新しくポリカルボン酸系分散剤を用いて，数 μ m 程度まで分散した．

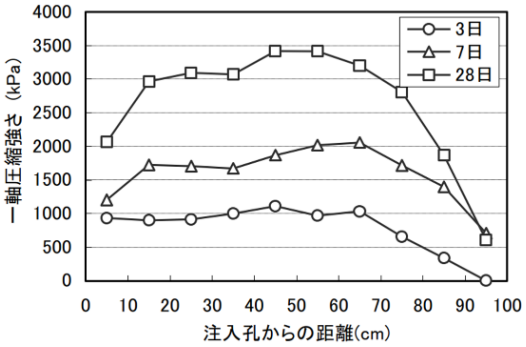


図-7　シラス内に注入した後の地盤内の一軸圧縮強さの経時的変化

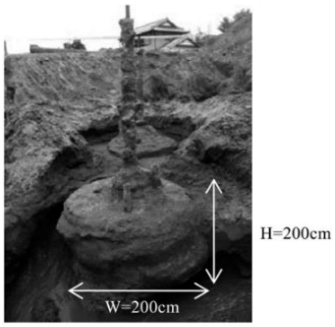


Fig. 11　Observed solidified ground
(W/C = 400%, Q = 15ℓ/min).

図-8　成田砂層への注入結果

また，ポリカルボン酸系分散剤はセメントミルクの流動化剤としても有効である．このセメント懸濁ミルクを水の中で機械的に激しく高速攪拌して，数μmのセメントミルクを作成し，それを数十μmの土粒子の間隙径に浸透注入して，砂地盤を固結することが可能になった．

図-7 に，実験室内で1mのカラム内のシラスに新しい高炉スラグセメントの極超微粒子セメントミルクを注入して，そのシラスのセメントカラムを各深度での一軸圧縮強さを示す．その結果より，28日強度が3MPaと全体的に大きな強度になっていることがわかった．このようなUSFCの浸透注入工法を実際に関東平野に分布する粒径が0.1㎜の成田砂層に注入浸透が可能かどうかを実験した[6]．その結果を**図-8** に示す．また，同様に九州の砂質地盤についての研究も実施した[7]．

従来は，懸濁性材料である普通セメントや超微粒子セメントのミルクでは，関東平野に分布する江戸川砂や成田砂のような粒径が小さい砂質地盤には，浸透注入が困難と考えられていた．しかし，２μm～４μmの細粒度までスラグセメントを粉砕して，そのセメントミルクの凝集を新しく開発した分散剤で分散し，粒径が２μm～４μmの流動性のあるセメントミルクを高速攪拌すれば，十分に日本中のどんな砂質土に対しても，高圧をかけない浸透注入工法で，砂質土を固結する液状化対策が可能になることがわかった．

この研究成果を2016年にイギリスの土木学会でICE（Institution of Civil Engineers）で発表した[8]．その結果，従来では不可能であると考えられていた砂地盤に均質に浸透注入できることが評価され，そのグループが，初代ICEの会長が設立したTelford Premiumを2017年に受賞した．200年の歴史ある学会賞で，日本人としては琵琶湖疎水を建設した田辺朔朗博士以来で，今回の受賞は，日本人の入っているグループとしては6番目の受賞になる価値ある研究成果との評価を受けた．

(c)地盤の固結工法の今後の課題

(i)浸透注入材料費

USFCによる地盤固結工法のUSFCの単価の問題がある．スラグセメントを２μm～４μmまで粉砕するには大きなエネルギーが必要となるため，材料費が高価になる．このコストが高いことが原因ではないが，地盤の液状化マップで示されている所は，まだほとんどその対策がなされていない．しかし，これから多くの地点で地盤固結工法が日本中で実施されてくると，多量に粉砕するため,材料費のコストは当然低下してくると考えられる．また，スラグセメントは粉砕して比表面積が大きくなっても，化学反応による劣化が普通のセメントより遅いことは，スラグセメントの利点である．

(ii)地盤固結による対策の耐久性

砂地盤内でセメントを用いての固結工法の耐久性についてを調べるために，同時条件の所に同じ手法で固結したテストピースを設置しておいて，50年後，60年後，80年後，100年後と長期にわたって固結ピースの強度試験を実施して，その耐久性を確認するシステムを構築しておく必要がある．すなわち，図-３の浅層浸透注入固結工法の２m程度の改良厚さの地盤を形成した近くに,将来，強度を確認するためのダミーの注入を実施しておく必要がある．

水中でのセメントの劣化は，100年程度は大丈夫と考えられるが，それより長期の耐久性を期待する場合は，水ガラス溶液とアルミシリカの粉末の混合体での砂地盤の固結工法を実施すると，1000年単位の耐久性が期待できる．ちなみに，火山国の日本では火山灰と水ガラスでも，ジオポリマーコンクリートを製造することが可能である．これからは，このような耐久性のある浸透注入材料の開発が必要と考えられる．

(iii)地盤への注入工法

既設の建物基礎の下の砂層中に，2m程度のカラムを重ねて注入する工法を対象とした例を示す．家屋の床下に浸透注入をする際には，車の荷台の撹拌機でUSFCセ

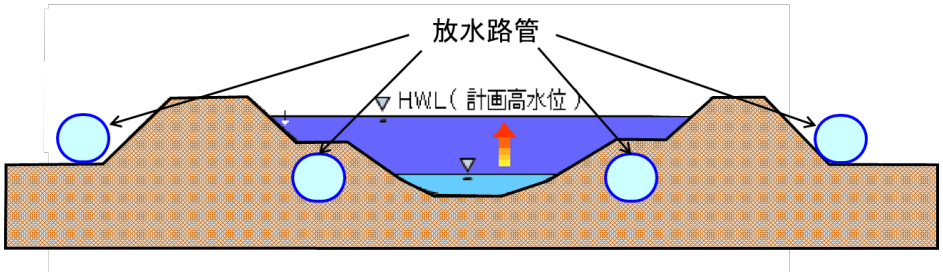


図-9-1 河川下と河川沿いの放水路管による洪水対策

メントミルクを製造して,それを注入ホースと注入管(内径 20～30mm, 長さ 2.5m)を接続して,家屋の基礎に 1.5m ピッチ程度で注入する．注入方法は，地上から２m程度まで砂層に注入管を人力で押し込んで,底部から 50 ㎝毎に浸透注入して，50 ㎝の注入が終わると注入管を 50 ㎝引き上げて再び 50 ㎝区間を注入する動作を繰り返して，2m 程度の基礎を作成する．家屋の周囲に直径 2m 程度，厚さ 2m の浸透注入カラムを作成後，家屋の中心に対しても，床板を取って順次液状化対策をする工法が提案できる．これが最も安価な対策工法を考えられる．

ただ注入工法は，セメントミルクがどこまで到達しているのかがわからない．したがって将来は，水圧トモグラフィーと比抵抗トモグラフィー等でセメント改良範囲の詳細な調査法を開発する必要がある．

砂地盤へのセメントミルク注入による工法では，改良体は圧縮には強いが，引張には弱い構造になることを懸念するのであるなら，砂地盤内に注入前に水平方向に複数の鉄筋等を圧入しておく方法も提案できる．また，注入管をそのまま残しても有効である．

2.4 豪雨に対する堤防の診断と洪水対策

2.4.1 はじめに

河川堤防内の不飽和領域での弱点箇所を抽出する方法と空気圧通過試験と高密度電気探査を用いた手法を提示した．また，堤体の飽和領域に関しての弱点箇所を抽出する方法としては，水圧トモグラフィーによる手法も適用できることは，高レベル放射性廃棄物の地層処分の分野での研究でなされている．このような探査方法により抽出された堤防での弱点箇所をどのように補修するかについてここで論述する．

また，既存の堤体内の地下水位と堤体内の土壌水分量の変動は，静電容量式土壌水分計を用いて，現在ではリアルタイムで計測することが可能になってきている．

今後は，このような堤防内の地下水位の変動と降雨量変化，河川水位との関係と求め，これらのデータより堤体内の浸透特性の計測値の推定を行い，その値と現地よりサンプリングしてきた供試体の浸透特性とを比較して，その物性値を逆解析より推定する手法の妥当性を検証して，それらのデータを蓄積する．また，これらの結果を基礎にして，将来は堤体内のモニタリング結果と降雨と河川水の予測より，堤体の浸透による安定性を AI によって確認できるシステムの構築が必要である．

2.4.2 堤防基礎の漏水対策の見直し

堤防内の弱点箇所が抽出された場合，堤防に河川水や降雨が浸透しないように，堤防表面の止水対策がなされている．一方，堤防基礎からの漏水によるパイピング現象の止水対策としては，現場では，鋼矢板の打設によって止水している．しかし，この鋼矢板による止水に対しては，すでに論述しているが，1 年間に 0.2mm～0.3mm の金属の腐食が生じる．したがって，止水は，20 年から 30 年後に，同じ場所でパイピング現象が生じる可能性がある．2022 年 6 月 3 日，矢作川右岸側の取水施設でのパイピングによる貯留水の漏水事故があった．日本中の多くの河川で，堤防の基礎の漏水に対して簡単に鋼矢板を打設するだけの止水対策がなされている．仮に鋼矢板を打設していてもその腐食がどこまで進んでいるかについて常にモニタリングをしておく必要がある．鋼管杭に対しては,電気的な腐食防止対策が実際に実施されている．

このような鋼矢板による止水に対して，パイピングの経路の止水は，砂層を対象としたものであるので，浸透注入工法で十分止水することが可能であると考えられる．世界中のダム基礎の漏水防止はセメント系材料の止水工法が実施されているのであるから，堤防の基礎への止水に関しても，同様のセメント系材料の浸透注入工法による対策が有効であると考えられる．

2.4.3 これからの洪水対策の課題

(i)放水路計画と堤防強化

図-1 で，河川の下に放水路を掘削する方法と，**図-2** のように河川沿いに放水路管を堤外地に設置する案を提案した．ここでは，これらの併合案を検討する．

河川下を掘削すると，掘削残土が出る．この残土を堤防強化に再利用する．すなわち，**図-9-1** に示すように堤防をスーパー堤防にし，その内部に地上放水路管を設置する案である．

このような放水路を設置しても，洪水対策だけではその空間の利用が無駄な空間になってしまう.したがって，このような空間に対しては，以下のような有効利用が考えられる．

(a) EV 車専用道路（日本のあばら骨道路, Ribs Road）
(b) 老朽化したライフラインの代替共同溝
(c) 地下カプセル物流ネットワーク網

現実に，大阪の淀川左岸堤防の堤外地面に，高速道路が**図-9-2** のように建設中である．このような道路を，豪雨時の放水路として利用することも可能である．

図-9-2 堤外地での高速道路 [9)]

2.5 豪雨による土砂災害対策

2.5.1 はじめに

本研究は，日本中の地盤の 3 次元の情報を国が調査して，それに対して何をすれば国民の命が守れるかを提案するのが目的である．豪雨による土砂災害に対して，以下のような根本的な対策が提案できる．

i) 日本中の山や丘等の地表面データの収集
ii) 日本中の山や丘等の地盤内のデータの収集
iii) 山や丘の地盤内の浸透特性のデータの収集
iv) 山や丘の地盤内の力学特性のデータの収集
v) 豪雨等による斜面の過去の土砂災害履歴の収集
vi) 豪雨の対策斜面の安定予測方法の確立
vii) 危険な斜面の豪雨による土砂災害対策
viii) 土砂災害対策の耐久性のモニタリング

すなわち，本研究の目的は，豪雨による斜面崩壊が生じる前に日本中の斜面の危険度を予測して，豪雨による斜面崩壊規模を推定し，事前に土砂災害の対策をしようとするものである．

福井市内の足羽川沿いの斜面崩壊現象に対して，下記のニュースがある [10)]．

i) 2017 年 12 月に，高さ 47m，幅 66.5m の大規模な崩壊が発生した．専門家は降雪や降雨が原因の地すべり現象と判定した．
ii) 2021 年 3 月 6 日に，既崩壊斜面の左側で，高さ 80m，幅約 80m の崩壊が発生した．
iii) 2021 年 5 月 10 日に，大規模な地すべり箇所の上部に，高さ約 130m，幅約 150m の大崩壊が発生した．

2017 年の現地調査で，専門家は，二次，三次崩壊をどうして予測できなかったのかと疑問が生じる．すなわち，現状の崩壊での現場調査では，周囲の追加崩壊が生じることがわからなかったのかと考えられる．

斜面崩壊現場の地盤工学の専門家としては，以下の事項を調査して，災害復旧を検討する．

i) 何のような崩壊が，崖崩れか地すべりか．
ii) どんな地質なのか．全体の地域の地質図と現場の土，岩より判定する．
iii) 崩壊箇所の周囲の状況．
iv) 降雨等による表面水の流れ方．
v) 崩壊斜面の状況調査．

より詳細に判定するために，どのような追加データが必要かと考えると，以下の事項がある．

i) 崩壊斜面に隣接した斜面の弱層の厚さなどの分布．
ii) 弱層のサンプリングした供試体のせん断定数と透水係数．

しかし，現状では斜面の表面の凹凸の分布のデータすらない状況である．当然であるが，地盤内の弱層の厚さやその分布データは現状では取得されていない．したがって，現地でのボーリングデータもない．

このように現状では斜面崩壊現場での状況を把握するための多くのデータが欠落している．したがって，日本中の山々の地表面の数値標高モデル（Digital Elevation Model，以後 DEM と称する）のデータや，危険と予測される斜面の風化層の厚さの 3 次元分布のデータ等を収集することは，現状ではきわめて困難であることになっている．

しかし，豪雨のある毎に多くの斜面崩壊や土石流などが生じて貴重な人名や財産が失われている．本研究では，集中豪雨の降雨量が拡大化する中，いかにして土砂災害の危険個所を抽出するか，研究の成果とその対策について論述する．

2.5.2 斜面表面からの危険度の把握

今日では，斜面の表面の状況に関しては，レーザープロファイラー（Laser Profiler，以後 LP と称する）によって，山の樹木を取り除いた状況で地表の高さを 10 ㎝程度の精度で測量が可能になってきている．この技術で日本中の山の表面の状況評価が 2018 年から可能になった．計測に関しては，航空機から UAV（ドローン）に変えると計測コストも安くなってきている．

この結果より，谷地形の流域面積等が容易に把握でき，山頂緩斜面での崩壊メカニズムや山麓部斜面での崩壊メカニズム推定に関するデータ取得も可能になってきている．

図-10 斜面での微動アレー探査箇所

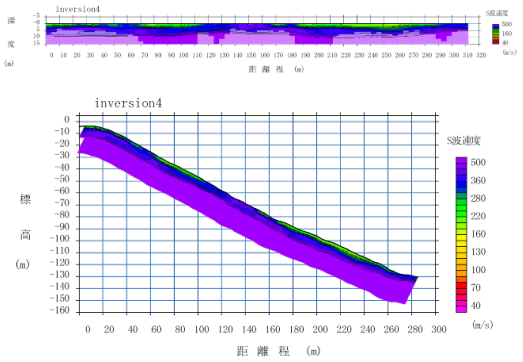


図-11 半田山の微動アレー探査結果

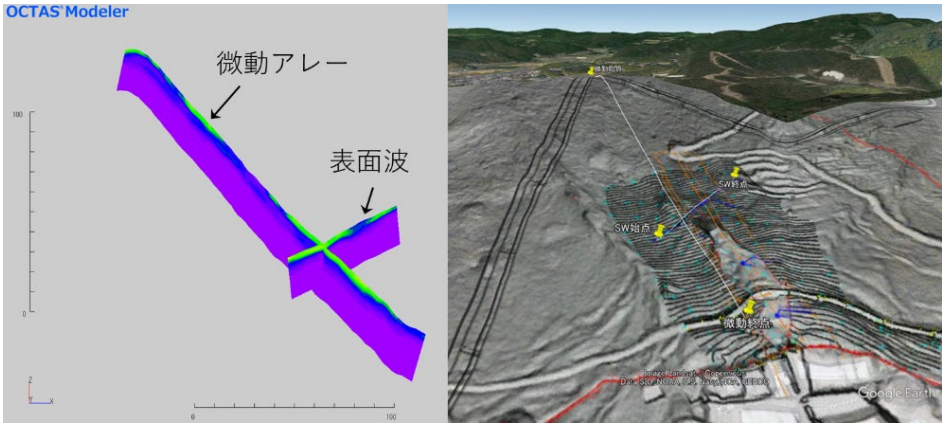


図-12 微動アレーと表面波探査結果

地表面の DEM と AI を用いて，表層崩壊危険斜面抽出システムを構築している研究が既に達成されている [11]. LP データより，実際に中国地方での古い地形からの危険度を予測している研究がなされている [12),13),14].

2.5.3 崩壊の危険性のある箇所の弱層厚の分布調査

(1) 斜面の弱層厚の分布調査法

地表面の LP 調査で危険と判読された場所の地層の状況の分布を推定する技術として一般に，表面波探査，空中電磁波探査(地層の比抵抗の把握)，微動アレー探査(地震計で S 波速度による構造解析)，DAS（Distribution Acoustic Sensor）を用いた振動計測（光ファイバを用いた S 波速度構造解析）が可能性がある．この中で空中電磁波探査に関しては，山の中の斜面の頂上までの計測で，山麓に住居があるため，電波障害が生じるため採用しなかった．

微動探査に関しては，2021 年に物理探査学会と地震防災研究会が計測方法の標準化に関するシンポジウムが開催され，計測の精度を高めようとしている．また，DAS に関しても，2022 年 3 月に物理探査学会が「光ファイバマルチセンシング」と題して講演会を実施している．これは，新しい地盤内の構造を探査する技術として注目されている技術である．地中に 20cm 程度のトレンチを 100m 程度掘削して光ファイバセンサーを埋設して，光ファイバ内の光の位相変化データを 1 週間程度収録して，地層内の S 波速度の構造解析を実施する方法である．現時点では，そのデータを集録する装置の数がわが国では限られているため，フランス等の技術集団に計測を委託しているような状況である．

微動アレー探査に関しては，今日では複数のワイヤレス加速計（地震計）を斜面の地表に 20 分程度設置して，種々の方向から到来する表面波を観測収集して地層の S 波速度構造解析をする方法である．

本報告では，岡山大学が管理して大学の北側にある半田山で表面波探査と微動アレー探査を実施した実例について述べる．

(2) 斜面の弱層厚さの分布調査結果

図-10 に調査対象とした半田山の位置を示す．この半田山は，2018 年 7 月の豪雨によって 2 か所の斜面崩壊が生じた．この場所の地形は，花崗岩の上に古生層があり，古生層の斜面で崩壊が生じた．今回，物理探査の対象とした箇所は，東側の崩壊斜面（崩壊規模：幅 45m，長さ 170m，深さ 2m 程度．崩壊前斜面勾配 26°）の西側で実施した．

この西側には，斜面崩壊の冠頂の西側に東西約 30m の亀裂が発生した状況であった．管理用の道路を基準面(比高 0m）として 270m の距離（比高 150m）まで微動アレーの探査を，ワイヤレスの加速度計を 20 個用いて，2022 年 4 月に実施した．その結果を**図-11** に示す．また，斜面崩壊した時に亀裂が発生した所に沿っての表面波探査した結果を**図-12** に併記した．

この微動アレーによる物理探査の結果，斜面の地表面から 2m 程度の比較的風化の進んだ地層が部分的に分布していることが推定できた．

(3) 微動アレーにより推定された地層探査結果の妥当性の検証

平地での物理探査で得られた結果の妥当性を検証する方法として，一般にボーリング孔を掘削する方法が用いられている．また，ボーリング調査の中で，地盤の強度を確認するために，63.5 kgのおもりを 760 ㎜打ち込む回数を N 値として計測する調査がなされている．しかし，このようなボーリング調査装置は，重量が重く，斜面の多点で調査することには，長時間かかり，経費も高くなる．

標準貫入試験に代わる調査法として，中型動的コーン貫入試験（ミニラム）によって，ハンマー（重量 30 kg）で，落下高さ 35 ㎝から自由落下して 20 ㎝貫入させるのに要する打撃回数（Ndm）を測定する試験方法を斜面に適用することも検討したが，ミニラム試験装置本体重量が 135 kgで付属材料を含めると 270 kgになり，この装置も山の斜面に適用することは困難であることがわかる．

しかし，ミニラムの平野部での適用は，標準貫入試験の代替えとして認知されているので，本体の重量を極力軽量化することを考え，本体重量を 85 kgまで軽量化装置を開発した [4]．この軽重量サウンディング試験機（Light Weight Cone Penetration Test，以後 LWCPT と称する）とミニラムとを比較した結果を**表－1** に示す．

LWCPT の総重量の 85 kgには，30 kgのハンマーと，発電機 30 kgも含まれている．したがって，ハンマーでロッドを貫入する装置は 25 kgで，写真-1 に示すように三脚やロッドは分割できるようになっている．30 kgのハンマーは 2 分割にして，斜面の中でも持ち運べるように加工した．全体の中でいちばん重量のある発電機は，道路で車の所に置いて調査地点まではケーブルだけで電気エネルギーを運ぶ方法も可能である．

半田山の現地での物理探査の結果を LWCPT で貫入試験を実施して，物理探査の精度の確認ができた．また，LWCPT は Nmd35～40 程度まで貫入できることがわかった．ここでは，LWCPT による物理探査の調査結果の確認が可能であることを示したが，微動アレー調査はこれからも解析精度をいっそう良くして，転石等の評価までできるように開発する必要がある．

LWCPT による調査では，貫入が止まると，それがロッドの先端が転石に到達したためか，基盤岩に到達したためかの判断は現時点ではできていない．今後は，ハンマーでロッドを打撃した時のロッドへの反射データから，転石か基岩かを判定する手法を検討する必要がある．また，物理探査結果より浅いところで，ロッドが貫入しなくなったときは，ロッドの貫入位置を変えて，転石か基岩かを確認すると，物理探査の妥当性が検証できると考えられる．

写真-1　軽重量サウンディング試験機（LWCPT）

表－1　ミニラムと LWCPT の比較

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
ハンマー吊上げ	ｴﾝｼﾞﾝ,油圧ﾓｰﾀｰ,ﾁｪｰﾝ	発電機,電動ﾎｲｽﾄ,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)
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	電動ﾎｲｽﾄ
運搬方法	本体車輪で人力運搬	部品に細分し人力運搬
合計質量	270kg(本体135kg) ﾛｯﾄﾞ4.7kg/本	85.8kg(発電機15kg含) ﾛｯﾄﾞ3.8kg/本

浅層部の物理探査の妥当性の検証が確実になされていないのは，浅層部の物理探査後，実際に掘削工事を実施した結果と地層との比較がなされていないのは，現在の土木工事の弱点であるとの指摘もある [15]．

今後は，斜面に対しての安定性を評価する際には，以下の手順で斜面の豪雨に対する弱層の分布の予測をする必要がある．

i) 斜面の地質図，地形図より，豪雨による崩壊の予測をする．
ii) 斜面の LP データより，斜面内の集水状況や表層崩壊を予測する．
iii) 表層崩壊を予測した斜面に対して，現場調査を実施し，斜面の植生特性や地表の水分を調査するため，地表の温度分布を調査する．
iv) 表層崩壊の規模を予測するため，斜面での谷地形の縦断方向と横断方向に対し，微動アレーによる斜面内の 2 次元における S 波速度構造解析を実施する．
v) 上記の一連の調査より谷地形谷部から豪雨による崩壊によって移動する土砂量を予測して，山全体の斜面崩壊の規模と危険度を予測する．
vi) 崩壊危険度の高い地区では LWCPT を実施して，物理探査の精度をより一層確実な状況にする．
vii) LWCPT で形成された貫入孔を利用して，孔内の地下水位の変動，孔内の土壌水分量の変化をリアルタ

イムで計測する．

viii) LWCPT 先端をサンプリング可能コーンに交換して，弱部層の試料を採取する．

ix) 採取した試料を供試体として室内試験より，斜面内の土の浸透特性およびせん断特性を求める．

x) 複数の LWCPT のロッドを反力アンカーとして利用して，原位置からの試験供試体をサンプリングする．

2.5.4 斜面からサンプリングした試料による供試体の浸透特性の求め方

(1) 斜面からの室内試験のためのサンプリング技術

斜面内の各地点からの室内での土質試験のための試料のサンプリング技術に関しては，2006 年の谷らの手法[16]が有効である．すなわち，不飽和状態での土試料を原位置でサンプリングする際に高速回転で地盤内からあまり乱さない試料を採取する方法を示している．また，試料の側面の摩擦熱を削散するために，水溶性ポリマーを用いている．したがって，この手法は採取された試料に飽和度も変えずに採取できる．また，試料を採取した孔を用いて，原位置での水平方向の透水試験も可能である．

(2) 採取した試料を用いた室内での土壌水分特性曲線の求め方

採取した試料を室内試験で水分特性試験は，採取した試料を地盤工学会の基準[17]に従って加圧板法によって体積含水率（θ）に対する u_a -u_w（サクション，圧力水頭）の関係を**図-13** に示すように求められる．

本研究では，もっと簡単な土柱法による水分特性曲線を示す[18]．土柱法による試験は，**図-14** に示すように，供試体の底部，一定水位を保った境界条件にして，底部から水を供試体に補給システムにして，数日間か数か月放置して，供試体内での土中水の含有量が一定になるまで待つ試験である．その後，土柱を複数高さで輪切りして，それぞれの高さの供試体と容器との総重量を計測し，その容器と土を乾燥炉に入れて，土の中の水分を蒸発させた結果より，その高さ（hi）の体積含水率（θi）を求める．この高さ hi が，その土の負の圧力水頭（ϕi）として，ϕi－ θi の関係を，**図-13** に示すようにプロットして，供試体の水分特性曲線を求めている．

これに対して，この土柱法は，現在の地盤工学会での供試体の水分特性曲線を求める正規の試験法としては認められていない．なぜ，正規の試験法として認知されていないかの原因は，境界条件を一定にしてしばらく放置した後の時間で本当に供試体の体積含水率の分布が平衡状態になっているかどうかが確認できないためである．

しかし，現在では，**図-14** に示すように補給用の水が入っている定水位のマリオットサイフォンタンクとタンクからの水を吸水する土柱の底部にそれぞれ電子計量器を設置して，それぞれの重量変化を経時的に計測するだけで，土柱内の体積含水率が平衡に達しているかがわかる．

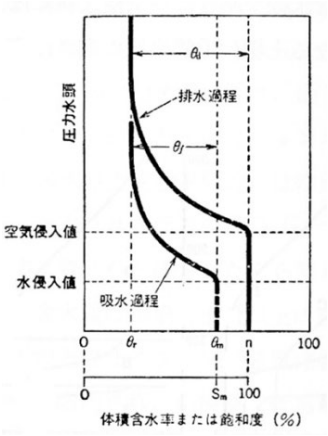


図-13 不飽和土の水分特性曲線

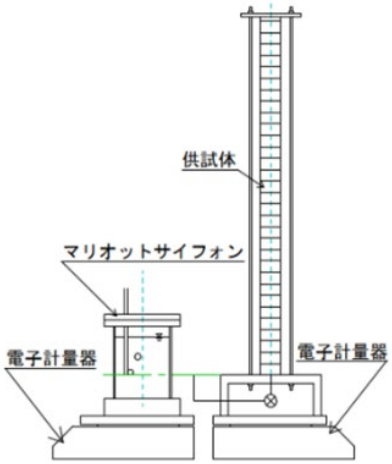


図-14 土柱法による水分特性曲線の測定装置の一例

このように，従来は土柱内の水分量の変化を計測することが困難であったが，今日では，電子計量器を用いるだけで平衡状態に達しているか簡単に判明できるため，土柱法の精度が良くなっていることがわかる．

土壌水分特性曲線には，浸潤過程と排水過程とがある．**図-14** の装置は湿潤過程の装置である．排水過程のデータが必要なら，土柱を水中に入れて，土柱全体を飽和（土中の空気も脱気した状態）にしておいて，その後，土中の底部から排水して，その後の土柱全体の重量低下を計測して，平衡状態まで重力を計測する．平衡状態での土中内の各高さでの供試体をサンプリングして，その体積含水率を計測すると，排水過程での土壌水分特性曲線が求められる．

(3) 不飽和土の透水係数の求め方

不飽和土の透水係数（供試体の体積含水率（θ）とそれに対応する透水係数（k））を瞬時水分計測法（Instantaneous Profile Method）の室内計測で求める方法として，γ線によって供試体内の間隙水分量を非破壊で計測して実施して，その点での動水勾配を負圧で計測する電気的間隙水圧計で計測する方法[19]を実施してきた．

しかし，このような計測方法は特殊な試験装置が必要

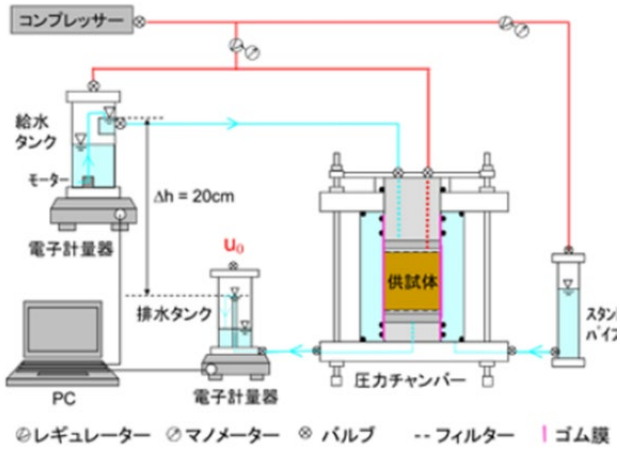


図-15　定常型不飽和透水試験装置

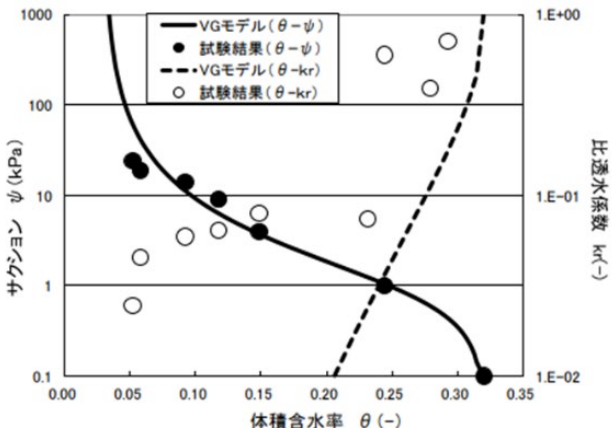


図-17　不飽和透水試験結果の一例

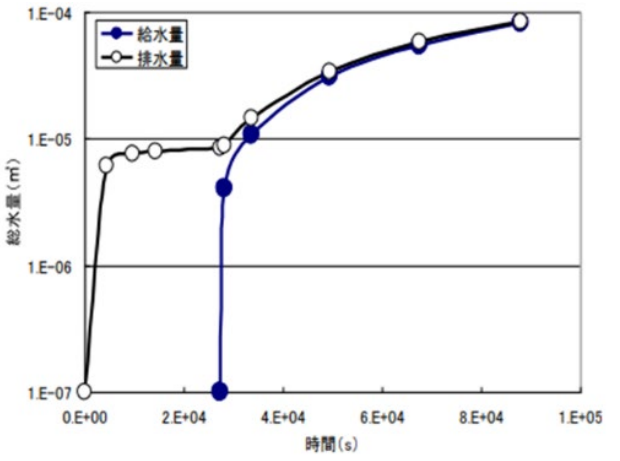


図-16　給水量と排水量の経時的変化（u_a = 20 kPa）

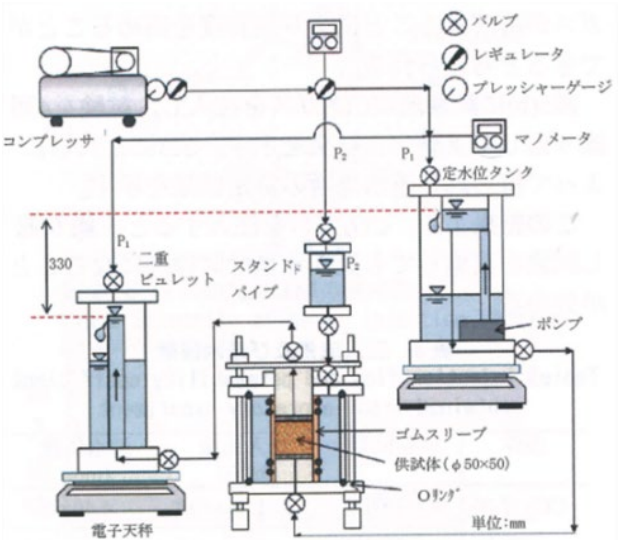


図-18　加圧型透水試験装置

であるため，誰でも正確に不飽和土の透水係数と体積含水率との関係を求めることは困難であった．その結果，我が国での多くの不飽和土の透水係数を求められず，土壌水分特性曲線から推定されるパラメータから簡易モデルを用いて，不飽和透水係数と体積含水率の関係を推定している．

このような現状に対して，**図-15** に示すように，不飽和状態の供試体内を浸透して水の流量が**図-16** に示すように一定になっていることを計測することによって，流量（Q）を求め，その時の供試体内の体積含水率（θi）の値は，流出総流量と流入総流量の差より求めて，供試体の上部と下部の水頭差と供試体長から動水勾配（i）を求め，Qとiの値より，θiに対応した透水係数（ki）を求める方法を提案した．それより求められた不飽和土の透水係数（k）と体積含水率（θ）の関係を**図-17** に示す．**図-17** の右の縦軸は，完全飽和状態の透水係数（ks）と不飽和土の透水係数（k）との比（$kr = k / ks$）を示している．

ここで完全飽和状態の透水係数は，**図-18** に示す加圧型透水試験装置を用いて計測した結果である．この加圧型透水試験装置は現地より採取した試料による供試体に**図-15** の装置で供試体の初期不飽和の飽和状態より乾燥側の透水係数と体積含水率との関係を計測した.その後，初期の飽和度まで，供試体に給水をして，その飽和度を上昇させた．その後さらに供試体の上下から水圧を段階的に加えて，供試体中に存在する気泡の体積を段階的に減少させ（供試体内の飽和度を段階的に上昇させ）て，各段階での飽和度に対する透水係数の値を計測した．最終的に完全飽和状態になった状態で得られた透水係数をksとして求めた．

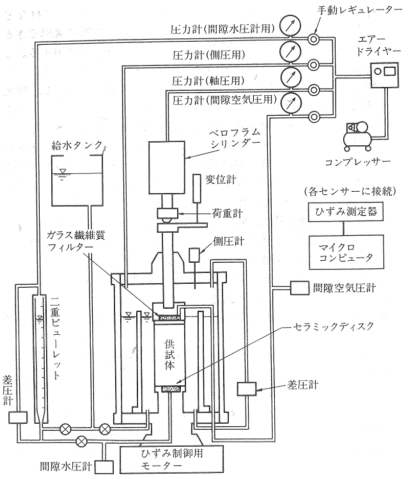


図-19　不飽和土を対象とした三軸圧縮試験装置の例

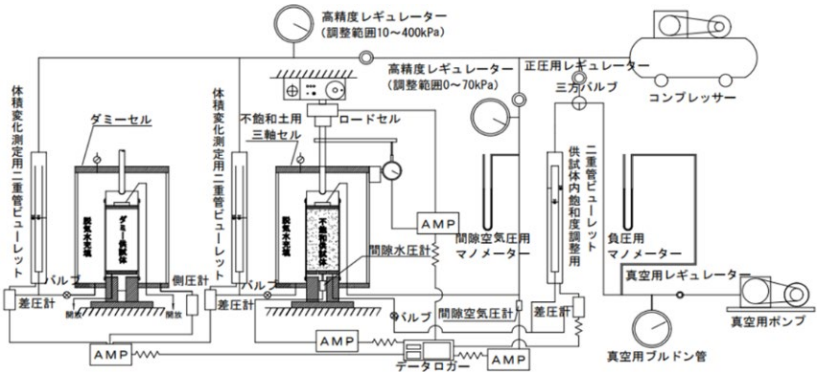


図-20　考案した不飽和土用の三軸圧縮試験システム

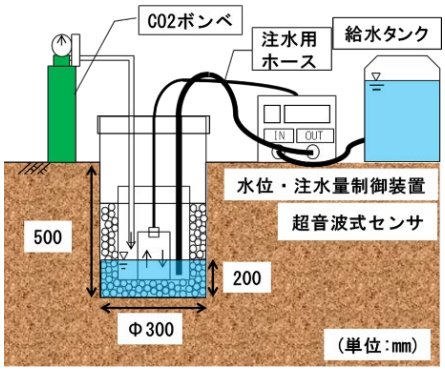


図-21　現場での飽和透水係数（E-19 法）

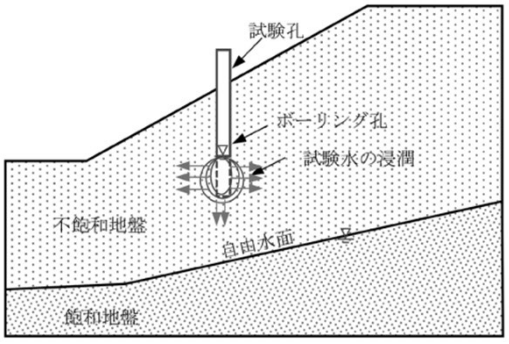


図-22　E-19 法による不飽和領域の透水係数の求め方

2.5.5　斜面からサンプリングした試料の供試体の不飽和土のせん断特性の求め方

一般に不飽和土の飽和度に対するせん断特性，粘着力（$c_{(0)}$），内部摩擦角は，**図-19** に示すように不飽和土を対象とした三軸圧縮試験装置を用いて求めている[21]．しかし，このような２重セルを用いた三軸圧縮試験装置は，取り扱いが複雑であるため，日本全土にあるすべての土質試験センターに設置されている装置にはなっていない．

ここでは，一般的な土質試験センターにある三軸試験器を２つ用いた不飽和土用の三軸圧縮試験システム[22]について紹介する．

図-20 に装置の詳細を示す．図中の２つの三軸圧縮試験装置の右側のセルで，不飽和土の供試体のせん断試験をし，試験中の供試体の体積変化に関しては，左側の三軸セルを用いて計測する．具体的な試験の詳細は，参考文献[23]を参照してほしい．

2.5.6　原位置における浸透特性の調査法

降雨が斜面内にどの程度浸透して，斜面内をどのように浸透するかを予測するには，**表-2** に示すように，斜面内の各層での浸透特性を求める必要がある．

表-2　地盤内各層の浸透特性

(1)	鉛直方向と水平方向の透水係数	k
(2)	不飽和土の透水係数	$k(\theta)$
(3)	不飽和土の水分特性曲線	θ - ψ
(4)	地盤の有効間隙率	n_e

この浸透特性の内，(1)(2)(3)(4)に関しては，室内での試験で求めることが可能であるが，原位置での平均的な水平方向の透水係数分布に関しては，全体の地層の浸透特性を明確にするためにきわめて重要である．原位置での飽和領域を対象とした単孔式透水試験方法に関しては，地盤工学会での基準があるため，平野部では，揚水試験と同様に多くの箇所で適用されている[23]．

一方，斜面での不飽和領域を対象とした原位置での透水試験に関しては，まだ，一般的な基準化はされていない．唯一，ロックフィルダムのセンターコアの透水係数を求める E-19 法に関しては，地盤工学会で基準化されているだけである（**図-21** 参照）[24]．E-19 法は，ダムのセンターコアの各層の転圧が終了後，直径 30 ㎝の竪穴を 50 ㎝程度掘削して，その穴の中に 20 ㎝の定水位を保って水平方向のほぼ飽和に近い状況での透水係数を求める試験である．

このE-19法の試験を図-22に示すように斜面での透水試験として拡張することを研究した．そこにおける課題は，次の２つである．

a) 原位置でのE-19法の透水試験をするためのφ66あるいはφ86 のボーリング孔の斜面での掘削方法の開発．

b) 現状のE-19法の基準で孔底に一定水位を保って原位置透水試験を実施した時の結果の信頼性．

a）斜面での試料のサンプリング方法に関する研究

何回も指摘するが，斜面の多数の地点で，室内での透水試験や力学試験を実施するための乱れの少ない試料を採取するために，平地で用いられているボーリング装置を適用することは困難である．

この大きな課題に対する解決策は，谷らの採取法 [16] と掘削時の反力を LWCPT で貫入した複数のロッドで受け持つ反力を用いた掘削方法が考えられる．

b）E-19法によって得た透水係数の信頼性 [25]

E-19 法によるダムのセンターコアの透水係数の計測は，ほぼ飽和度が 100%に近い状況の粘性土系の層に対する試験である．したがって，E-19法で得られた結果は，コア材を採取して室内試験で求めた値とほぼ同程度の値であると確認されている．

しかし，自然斜面や河川堤防等では，試験時における地山の体積含水率は，同じ場所でも試験の前日に降雨があったり，長い間降雨がなかったりして異なってくる．

図-23 に同じ場所で 3 回繰り返して試験した結果を示す．試験孔内を一定に保って，地盤内への浸透流量を計測すると，第 2 回目，3 回目の浸透流量は，1 回目の 5 分の 1 になっていることがわかる．この結果より，この地盤の透水係数の値が，2 回，3 回で 1 回目の 5 分の 1 に低下したことになる．

このように，2 回目，3 回目の透水係数の値が小さくなるのは，1 回目の透水試験によって，不飽和地盤内にあった空気が気泡として地盤内にトラップしてしまったからである．すなわち，不飽和地盤においては，地盤内の初期飽和度によって，飽和に近い状態と推定される透水係数の値が変化してしまうことになる．

斜面内の透水係数を原位置で求めるのは，降雨がどれほど浸透して，浸透した地下水がどのような速さで水平方向に移動するかを計測することである．したがって，斜面内のそれぞれの層の最も大きい透水係数を求める必要がある．

試験する毎に変化する透水係数の値より，その場の最も大きい透水係数を求める方法として，透水試験をする場の不飽和領域の間隙空気を試験をする前に CO_2 ガスに置換しておくと，透水試験をしても CO_2 ガスは簡単に地下水に溶解するために，間隙内にトラップされる気泡が少なくなる．

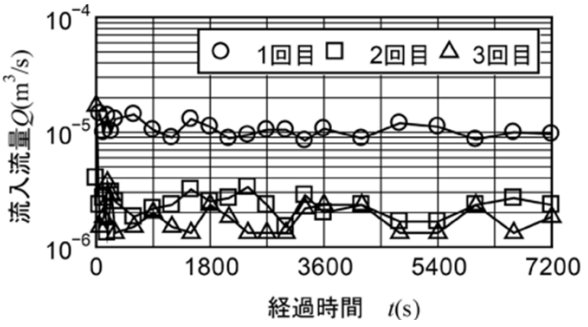


図-23　同じ場所での 3 回の透水試験結果

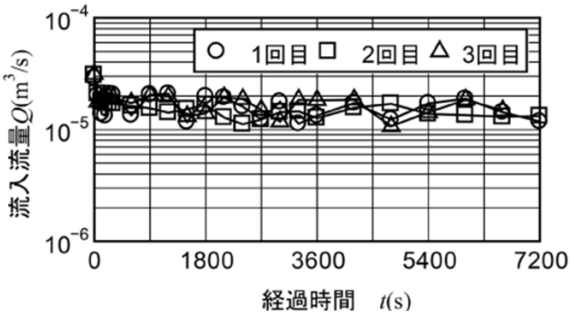


図-24　流入流量の経時変化図（CO2 ガス注入あり）

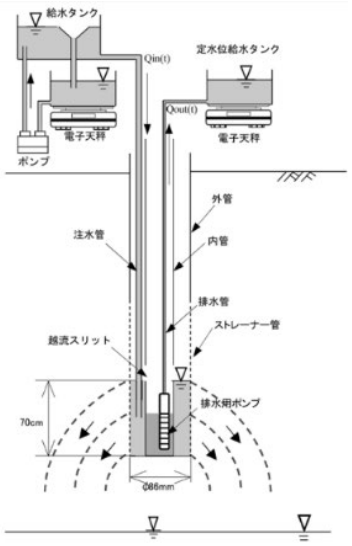


図-25　簡易な E-19 法原位置透水試験装置

このために，本研究では図-21 に示すように試験をする前に試験孔に CO_2 ガスを注入して，地山の間隙空気と置換した後，E-19 法の順序に従って透水試験を実施した．その結果を図-24 に示す．

この結果では，試験を 3 回繰り返しても得られた浸透流入量は，ほぼ同じ値を得られた．この結果より，事前に CO_2 ガスを地盤内に試験前に注入した後，透水試験をすることは，有効であることがわかったが，どの程度の注入圧力で，どの程度の時間，事前に注入すべきかについての正確な量については，よくわからない．なぜなら，その場所の透水係数がよくわからないし，地山の間隙率も未知であるためである．本現場では，1 時間程度の CO_2 ガスの注入後に試験を実施した結果である．

斜面での透水試験をどの場所で実施するかは，既に微

動アレーによる物理探査を実施しているので，弱層でのS波速度が遅い所と，基岩部になる．基岩部であっても，花崗岩であれば，弱風化層の透水係数の値は，弱層の風化層（強風化層，マサ土層）の透水係数より大きい場合がよくある．したがって，このような場合は，弱風化層の下の基岩層までの透水試験が必要になる．

図-25 にボーリング孔の孔底での孔内で一定水位を簡単に維持する方法を示した．

ボーリング孔（裸孔）内に 20 cmの高さの中の所に周囲の水が流入するスリット（幅 2 cm程度）を設置したφ50の塩ビ管を挿入し，その内部に揚水用ポンプを入れて，孔内に上からのポンプで流入した水のオーバーフローした水を揚水して注水孔内の水位を一定にして試験を実施した．また，地盤内に流入した流量は，地上での２つの電子計量計で計測ができる．

孔内に小口径のサーボモーターがあれば，孔内の水位を間隙水圧計で計測して，それに対応した水位一定試験を維持することがシンプルになり，深い孔でも定水位透水試験が可能になる．

2.5.7 原位置における斜面風化層の力学特性試験

斜面風化層に対しての原位置試験としては，透水試験と同様に斜面内にボーリング孔を再掘削して，その孔を用いて孔内載荷試験を実施して，斜面の風化層が弱層であるかどうかを判定する手法しか，現状ではない．この試験によって，地盤の変形係数と降伏圧力がわかる．

2.5.8 斜面への豪雨浸透による斜面崩壊の予測法

(1) 浸透水圧

斜面への豪雨浸透による危険度を予測する場合には，斜面を2次元として解析するより3次元で解析する方が，斜面内の地下水が斜面の谷筋に 3 次元的に集中してくるので，谷筋での地下水の上昇速度は速くなり，その谷筋の「風化層の下の難透水層の地形」によって，特に凹地形の法尻では，地下水が図-26 に示すように，上流から浸透してきた地下水が，その浸透する勾配が変化することによって，A 点付近の地盤内の飽和度は高くなり，地下水が地表面の方向に湧水してくる．

地盤内の飽和度が高くなることによって，地盤内の粘着力が図-27 のように低下してくる．しかも，地下水が浸透する方向が法面に水平方向から直角方向に変化するため，地下水による「浸透水圧」が外方向に作用するために，この A 点付近は崩壊しやすい状況になる．

図-26 の A 点付近と部分的な 1 次崩壊が生じると，斜面全体が不安定になり，図 25 に示すように 2 次崩壊，3 次崩壊と次々と規模の大きな崩壊が生じる．このような崩壊現象は，進行性崩壊（逐次崩壊）と言われている．

このように考えると，斜面の中で，豪雨時にどこが弱点箇所になるかを抽出することがきわめて大切であることがわかる．

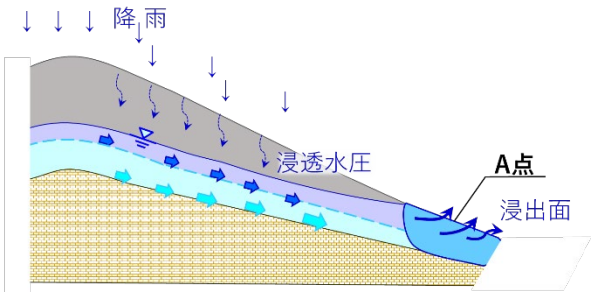


図-26　斜面の遷急線での崩壊

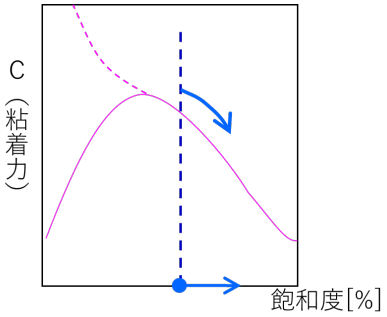


図-27　飽和度の上昇による粘着力の低下

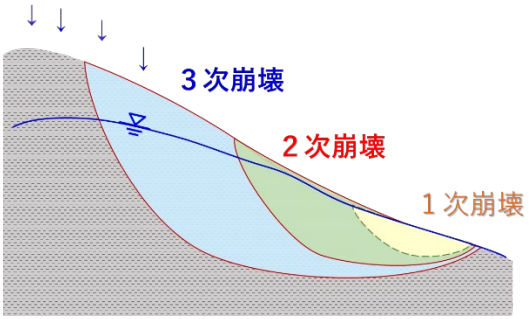


図-28 斜面の逐次崩壊

また，斜面崩壊には斜面内の地下水の浸透方向に大きな浸透水圧が作用することも大きく関与していることがわかる．この浸透水圧の定量的な理解として，図-29 で説明する．地盤内を左から右に地下水が浸透している時，地盤の左端に作用している水圧と右端に作用している水圧の差（Fi）は，次式より求められる．

$$F=\gamma_w h_1 A-\gamma_w h_2 A=\gamma_w A(h_1-h_2)=\gamma_w AL\frac{h_1-h_2}{L}=\gamma_w iAL \quad (2)$$

ここで，r_w：水の単位体積重量，
h_1, h_2：左右の水頭差，
A：カラムの断面積，
L：カラムの長さ，
i：動水勾配．

浸透水（f）は次式で定義できる．

$$f=\frac{F}{AL}=\gamma_w i \quad (3)$$

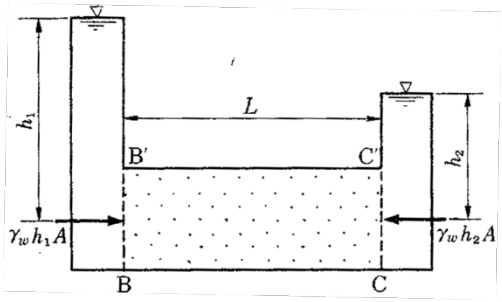


図-29　浸透力と浸透水圧

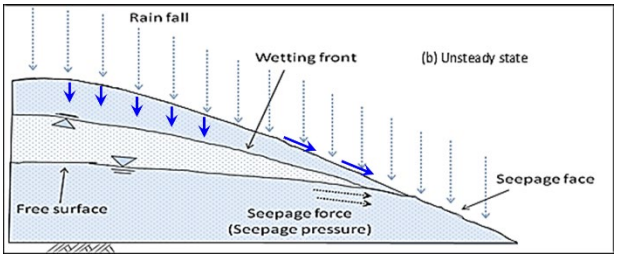


図-31 斜面への降雨浸透と浸潤前線の降下

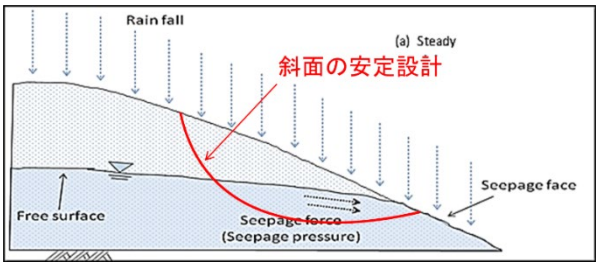


図-30　斜面の安定解析（現在の定常法）

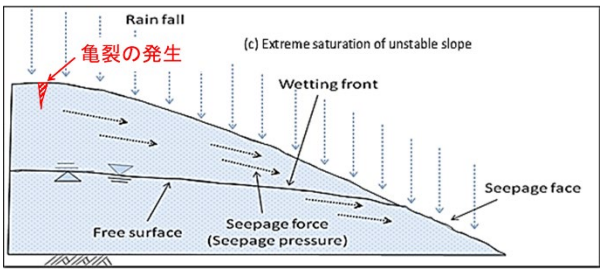


図-32 浸潤前線の地下水面への到達

これは，地下水が浸透することによって地盤の土粒子に重力のように作用する圧力である．この浸透水圧があるため，地盤の内部摩擦角（φ）より小さい角度でも，斜面崩壊が生じることが説明できる．

このように考えると，斜面崩壊の引き金となっている場所の地盤内の飽和度を高くしないようにすること，そして，その場所の地下水の浸透方向を斜面崩壊を生じさせる方向から反対の方向が，地山を安定させる方向にして，浸透水圧による斜面崩壊の助長を少なくする対策が重要であることがわかる．

現状では，地滑り対策のために水平ドレーン管を設置することがあり．土石流を防止するために斜面内に水平ドレーン管を設置することはない．しかし，土石流を起こしそうな谷地形の凹状の位置（遷急線）の位置から水平に地下水の排水管を設置することは，浸透水圧の方向を排水管の方向に変えるためにきわめて有効である．

ただ，透水係数の近い所に水平排水管を設置しても，その効果の範囲が狭いため，斜面全体の地下水の浸透方向を変えるためには，排水管のピッチが 50 ㎝ほどが必要になる．この大きな課題を解決することが，今後の研究の方向と考えられる．

(2) 降雨浸透による斜面安定の評価手法の考え方

現状の斜面安定の評価は，**図-30** に示すように斜面内の定常状態の地下水位を想定して円孔すべり法によって斜面の安定を推定して，安全率が 1.2 以上の斜面は安定と評価している．その評価法には，地下水の浸透水圧の影響は，何も考慮されていない．地下水面より下の所のせん断面での粘着力が，飽和状態の時の粘着力を用いて評価している．

本研究では，斜面内のいろいろな物性値が既知であると考えて，斜面崩壊の非定常状態での降雨浸透実験を実施した，**図-31**，**図-32** にその途中結果を示す．

図-31 は，降雨浸透により，斜面に直角方向に浸透した水が徐々に鉛直方向に浸していく様子がわかる．この状態での浸透は，地下水面と浸透前線との間の空気によってその浸透速度が空気の影響を考えない解析より少し遅くなる．この空気圧が地山のエアーエントリーバリュー空気侵入圧以上になると，間隙中の空気は地山を通って地表面に浸出する．この空気の浸出によって間隙空気圧が低下すると浸潤前線は降下するが，地下水内に間隙水圧は，地下水面が上昇していないので，間隙空気圧が上昇すると少し上昇して，間隙空気が地表に浸出すると，少し低下する挙動を繰り返す現象を観察できた．

一方，**図-32** のように浸潤前線が，地下水面に到達すると，斜面内の間隙水圧は瞬時に上昇して，浸潤前線内の地下水の浸透方向は鉛直方向から斜面の法尻方向に変化した．このような地下水の浸透方向の変化については，トレーサーを注入すると簡単に計測できる．

この浸潤前線が地下水面に到達した瞬間，**図-32** のように斜面の上部の地表面に，斜面に勾配に直角方向に亀裂が発生した．亀裂が発生した後も降雨が継続していると，当然のことであるが，この亀裂から降雨がどんどん浸透して，法尻からその地下水が流出するために，斜面崩壊が生じた．この研究は 2000 年のオーストラリアのメルボルンの IAEG（国際応用地質学会）で発表した [26]．その結果，豪雨時の斜面安定評価において，定常状態の地下水位を用いるのではなく，非定常状態の地下水の挙動を用いることが重要であると指摘したことに対して，IAEG での Award Paper に選ばれた．

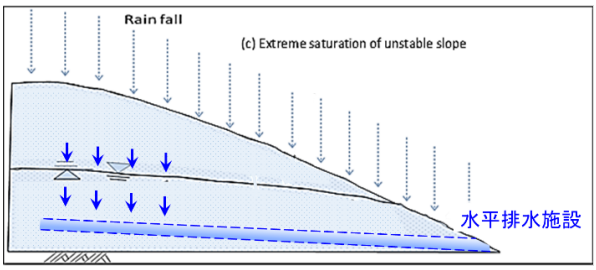


図-33 斜面底部での水平排水施設

浸潤前線が地下水面に到達しても，**図-33** に示すように斜面内の底部に水平排水施設をあらかじめ設置しておくと，地下水の浸透が鉛直方向になり，斜面の表面に亀裂が発生しにくいのではと考えられる．

ただ，**図-33** は，断面 2 次元で検討事項であり，現実には，3 次元的な現場に対して水平排水施設を，どのようなピッチで，どの深度（奥行き）まで挿入させるかについては，大きな課題となる．

トンネル工事で 1000m の排水施設を設置すると 1 億円の経費がかかることを考えると，斜面崩壊を事前に対策することは，大変な仕事になる．ただ，中程度の砂防ダムを 1 基建設しても 10 億円程度の経費が必要となることを考えると，水平排水施設も有効な対策工とも考えられる．

(3) 浸透水圧を考慮した斜面崩壊の予測手法

3 次元での斜面の安定を浸透水圧も考慮して予測するには，降雨の斜面への 3 次元的な浸透解析と地盤内に地下水が浸透することによって粘着力の低下を考慮した力学的な 3 次元の安定解析を適用する必要がある．

これに対応するには，Biot の 3 次元の圧密方程式を不飽和領域まで拡張した研究[27), 28)]が必要である．しかし，現時点での日本では，このような斜面の 3 次元でのカップリングした公開された解析ソフトが筆者の知る限りまだ存在していないと考えられる．

このような現状に対して，2 次元と 3 次元での降雨の浸透流解析を比較すると，3 次元解析の方がずいぶん早く地下水位が上昇することがわかっている[29)]．また，一般に斜面安定に対して 3 次元と 2 次元解析とを比較すると，2 次元解析の方がはるかに不安定であるとの評価は，現象を考えると誰でも理解できる．これらの結果より，飽和・不飽和領域を考えた 3 次元での連成解析が，どこのコンピュータっでも解析できない間は，3 次元の浸透解析で得られた谷筋の地下水位の非定常上昇解析結果を，2 次元での斜面の安定解析の中に取り込むと，現在の数値解析に使用できるコンピュータを用いて，斜面の安定評価は可能となるのではと考えている．

斜面崩壊でいちばん危険な災害の中で最も危険な災害は，土石流による災害である．この土石流災害の危険度と災害の規模が予測可能になると，どのようにして，山の山頂下の谷地形で生じる土砂災害を事前に対策をすることは，きわめて有意義な対策であると考えられる．

土石流災害の事前の対策に関しての先人の研究がほとんどない状況で，以下のような対策を提案する．

i) 土石流災害が起こる谷筋部に水平ドレーンを設置して，斜面内の浸透水圧の方向をコントロールする．
ii) 水平ドレーン施設によって，斜面内の地下水位の上昇を抑制する．
iii) 水平ドレーン施設により，斜面内の水位が 3 次元的に上昇しないために，水平ドレーンの 3 次元的な配置を設計する．
iv) 遷急線付近に地下水が流出してきても斜面崩壊しないように，水平ドレーン施設と蛇カゴ等の法尻排水対策を実施する．
v) 地下排水システムは，当然目詰まりが発生するので，排水システムの水平ドレーン施設および蛇カゴ内に流亡してきた細粒土を洗浄するブラッシングシステムを施工中に構築しておく．
vi) 水平ドレーンの定期的な洗浄システムとして，マイクロバブルによる洗浄機能を設置しておく（**図-34** 参照）[30)]．
vii) 豪雨の時に斜面内に浸透しなかった表面水排水システムが有効に機能するよう配置しておく．
viii) 表面排水システムには獣害が多いため，その構築を事前に検討しておく必要がある．
ix) 斜面内の植物による斜面の不安定化が進行している所は，植生管理して斜面の安定度を増加しておく．
x) 風化が進んでいる斜面に対しては，斜面固化工法のため WSFC を現場で浸透注入して，注入管を残存する．
xi) 斜面内への WSFC やジオポリマー材を浸透注入して，注入材料が固化する前に圧縮空気を注入することによって，斜面内に排水システムを構築する．
xii) 現地で LWCPT 装置により，グランドアンカー設置孔を掘削して，孔内を洗浄後，孔内に WSFC 等による浸透注入を実施し，注入管を残存してグランドアンカーを設置する．
xiii) グランドアンカーの健全度をモニタリングするため光ファイバセンサーをアンカー設置前に設置しておく．

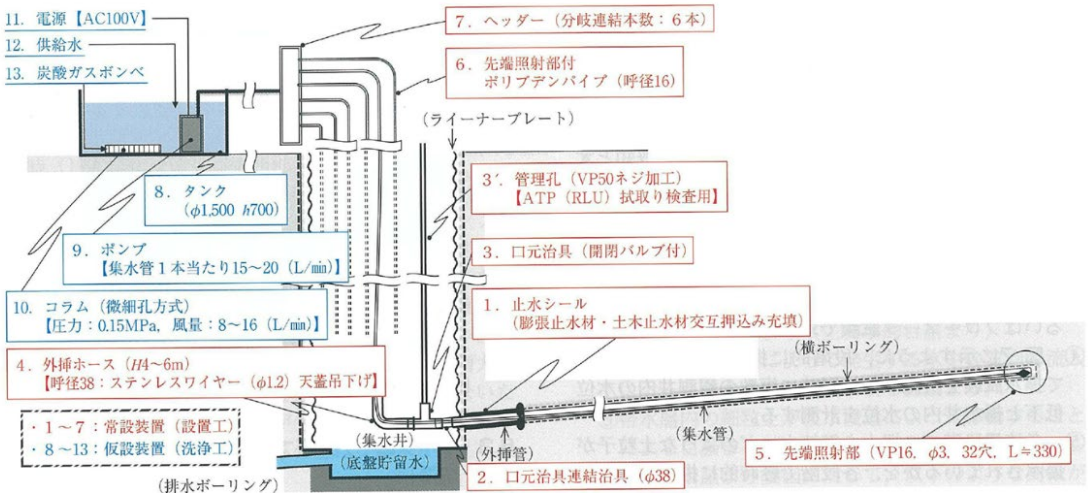


図-34 水平排水管のマイクロバブルによる洗浄システム概念図 [30)]

2.7 斜面の地すべり対策

2.7.1 はじめに

一般的な地すべり対策は地すべりが生じてからの対策が主である，しかし，長野市の地附山で 1985 年 7 月 26 日に発生した地すべりでは，近くの老人ホームの一部が押しつぶされて 26 名の死者がでた．このような状況から考えると，日本中の地すべりが生じる斜面を地すべりが生じる前に探知しておき，その対策を地すべりが生じる前に対策しておくことは，きわめて重要と考えられる．

2.7.2 地すべりに対する調査

斜面に対する LP のデータから斜面災害の予知と同様に地すべり危険性がある箇所に対して微動アレー等による物理探査を実施して，地すべりが発生する危険性を探知する．また，対象としている斜面に LWCPT で，地盤内の N 値分布を計測する．

2.7.3 地すべり対策

地すべりが生じている場所の対策として**図-35** に示す地すべり防止工が一般的に示されている．しかし，本研究では，地すべりが生じる前の地すべり対策として以下の２つの対策が考えられる．

i) 地すべりが生じる可能性のある斜面内の地下水位低下工法
ii) 地すべりが生じる斜面の新しい地すべり防止工の開発

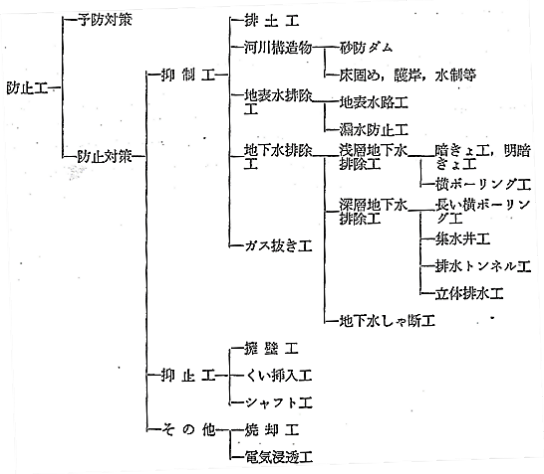


図-35 地すべり防止工 [31)]

(i) 地すべりが生じる可能性がある斜面の地下水位低下工法

一般的に地下水を対象とした地すべり対策としては地下水排除工が主力になっている．すなわち，斜面に集水用の大孔径の竪坑を掘削して，その竪坑の中から地下水集水用水平ボーリング孔を掘削して，地下水を排水する工法である．

しかし，斜面内に水平に排水ボーリングを設置しても，本当に斜面内から地下水が排除されているかどうかに関しては，Hooghoudt（フーゴット）の研究 [32)]から検討すると，不十分ではないかの疑問がある．

Hooghoudt は，**図-36** に示すように，降雨がある状態で 2 本の水平排水孔を設置した場合，式（4）を提案している．

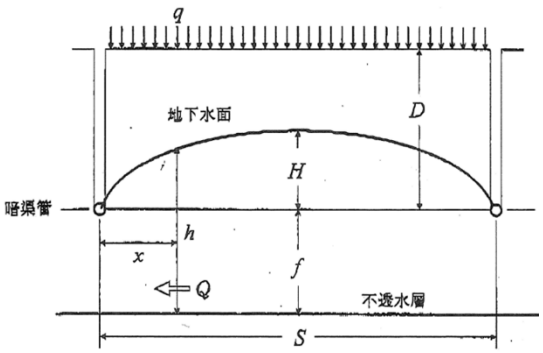


図-36 Hooghoudt のモデル

$$S^2 = \frac{4\,ks}{q}(2f + H)\,H \qquad (4)$$

ここで，S：排水孔のピッチ（m），
ks：斜面内の透水係数（m/s），
q ：降雨流量（m^3/s），
H：排水孔間の中心での地下水位の高さ（m）.

宮崎らによると[33]，仮に排水孔から地表までの深度（D）を 1m，排水孔から不透水層までの距離（f）を 2m，そして 1 日の降雨流量（q）を 20mm（=23×10-7m/s）として，地表からの水位の低下量（D-H）を 0.4m とすると，この地下水位低下量（0.4m）を得るために，どのような排水孔間が必要か計算すると**表-3** になる.

これより，地すべりが生じるような粘性土地盤の透水係数の場合で排水孔の中心での地下水の低下を 0.4m にするには，排水孔間の幅は 1.7m 確保する必要になる．このことは，逆に，排水孔間のピッチを 1.7m にしても，地下水位は 0.4m しか低下しないことになり，斜面内の排水孔を設置しても地下水は 0.4m しか低下しないため，水平排水工を実施しても「地下水排除」はできていないことになる.

しかし，斜面内に排水孔間を 1.7m 以上に設置しても，地すべりですべりを起こしている土塊の地すべりの動きが遅くなる効果がある．この効果の原因は，斜面内の地下水は排除されていなくても，斜面内の地下水の浸透方向が，斜面方向ではなく排水孔の方向に変わるため，斜面方向の浸透水圧が，排水孔方向に作用するために，地すべりの動きが遅くなっていると考えられる.

(ii) 地すべり抑止杭等による地すべり防止工

地すべりが生じる可能性がある斜面に対して，抑止杭等を設置することは，きわめて効果的な対策として多くのところで実施されている．また，地すべりが生じる可能性のある斜面の表面にコンクリートでリフレームを設置して，表面のフレームを反力として，地すべり斜面とグランドアンカー工法によって，縫い止める工法は多くの地すべりが生じているサイトで適用されている.

表-3 排水孔間の中心での地下水位の低下を 0.4m とした時の排水孔間距離

地盤の透水係数(ks)(m/s)	排水孔間距離(m)
1×10^{-7}	1.7
5×10^{-6}	12.3
3×10^{-5}	30.2

このような防止対策はきわめて効果的であるが，きわめて高価な対策になってしまう．地すべりを抑止したり防止するために斜面内に WSFC を注入する案も考えられるが，地すべりが生じているような土に対しては，浸透注入工法はきわめて困難である.

一般に地すべりが起こる原因が何かと考えると，地すべり層の地すべり面の地下水が大きく関与していることがわかる．したがって，現場で LWCPT を用いて，地すべり面以深までロッドを貫入させ，このロッドに太陽光発電より得た電気を加えて，ロッドの周囲の地山の水分を蒸発させると，地すべりはある程度低下してくると考えられる.このような対策はまだ誰も実施していないが，将来性のある対策と考えられる.

LWCPT のロッドにさらに大きな電気エネルギーを加えると，ロッド周囲の粘土層が陶器のようなセラミックになると，この陶器層はこのままで，抑止杭と同じように地すべりの発生を止める可能性がある．このような地すべり防止対策は，きわめて軽重量な道具でできる対策であるため，非常に効果的でかつ安価な抑止対策であると考えられる.

３．今後の統合物性モデル技術研究組合の展望

本報告書では，現在ある治山治水技術をいかに有効に活用して，以下の事項について論述した.

(1) 地震時の地盤の液状化に対する対策
(2) 豪雨時の河川堤防の越流，破壊対策
(3) 豪雨時の斜面崩壊，土石流，地滑り，落石対策

本文中に何回も論述しているが，耐震に対しては，高層建築物では基礎および建物そのものに対して対策がされているのであまり問題がないが，普通の住宅や道路，水路等に対しては，液状化に対する対策がほとんどなされていない.

(1) 地震時の液状化による地盤災害

砂地盤固化による液状化対策の有効性のモニタリングに関しては，固化時に将来の固化された地盤の強度低下をモニタリングするための，試験用のテストピースを数十年に一度，サンプリングする．このサンプリング供

試体の強度試験より，極超微粒子セメント等によって地盤固化した供試体の強度劣化を確認する．一方，火山灰を用いたジオポリマー材を用いて地盤固化した供試体に対しては，強度の経年的な増加を確認する．この結果，ジオポリマーコンクリートの強度の増加が少ない時には，地下水中に CO2 ガスを新しく注入して，地盤のせん断強度を増加させる対策を実施する．

(2) 河川放水能力増加対策

既存の河川堤防では，豪雨の水の流下能力が十分でない河川に対しては，河川の基盤内や河川堤防の河裏部に豪雨の水を流下するために，放水管路を設置する方法を本研究組合では提案している．この提案の一部は，現在，大阪での淀川の河川堤防内に道路トンネルを施工している技術と同じである．淀川での工事は，増加する自動車通行を円滑にするための対策であるが，河川堤防に沿って水路を海まで設置した排水施設は，豪雨の時しか利用しないので，逆に平時はこのトンネル内を自動車道として利用することは，十分可能である．

一般に，水路管のようなセメントコンクリート構造物の劣化に関してのモニタリングは，BIM/CIM で実施されているので，豪雨の水の放水用トンネルの劣化のモニタリングには，特に新しい技術は必要ないと考えられる．

ただ，現状のセメントを用いた建設構造物は，耐久性を 50 年と考えて設計しているが，人命を洪水から守るためには，数百年，数千年の間，国民の命を守る施設であってほしい．このように考えると，ジオポリマーを用いたトンネル構造物に変えて施工する必要があると提案できる．

(3) 豪雨による斜面崩壊の対策

近い将来，斜面の谷部の風化層の底部に水平の排水施設を設置して，斜面の山頂付近からの土石流の発生を防止できるようになる．しかし，その排水管施設は経年的に劣化したり，目詰まりが生じる．また，風化が進んでいて地盤のせん断強度が低下している所に対しては，極超微粒子セメントやジオポリマー材によって地盤を固化する対策が実施される．

このような斜面安定化施設の機能劣化のモニタリングを地域全体で実施でき，劣化した場所を順次，修復する組織が必要となる．役所に道路整備課があるように，斜面防災整備課を設置して，豪雨から住民を守る組織を新設する必要があると考えられる．

したがって，統合物性モデル技術研究組合は，現有の以下の技術を整備して，行政が，その技術を理解し，その技術を水平展開して，住民を永久に自然災害から守る社会を構築できることが必須の課題であると考えている．

また，豪雨時，住民の裏山の斜面でどのような現象が生じているかを時々刻々と行政が対策地区をモニタリングして，1 時間後，2 時間後の豪雨予測に対応して斜面の危険度を予測する必要がある．このような全体の危険度の予測は，将来は AI によって十分に可能であるので，降雨強度が想定外でなければそれほど難しくはない課題である．

したがって，行政は，この予測を住民に伝えて，いかに住民の心を安心させられるかを，それぞれの住民に対して検討しておくことが重要である．そのために後期高齢者の人口が益々増える中，平素から，行政は住民の一人一人の特質を把握して，それに対応した通信システムを構築する必要がある．

また，従来のように災害が起こってから対策をするのではなく，この狭い日本の隅々までの国土の詳細な特性を把握し，国民を確実に守る方向に一日でも早く転換してほしい．

なお，山が隆起しているように，国土の特性は時々刻々と変化している．それに対応するために，常に国土全体をモニタリングして，国民が幸せと感じる国にしてほしい．

４．おわりに

本研究では，地盤内の種々のデータを収録して，そのデータをベースに地震や豪雨災害に対して，どのように事前対策をするかについて論述した．ここで提案した新しい対策工法の適用を国が一団となって進めてほしい．

参考文献

1) 岩崎公俊：既存の地盤情報の利活用国土地盤情報センターの設立，基礎工，2018.9.，pp.47-49. 2018.
2) 岩崎公俊：一般財団法人国土地盤情報センター，地質と調査, 2019 年第 1 号(通巻 153 号), pp.29-32, 2019.
3) 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.
4) 小松憲一：石油コンビナートの液状化被害と対策，Safety & Tomorrow，No.145，pp.38-41，2012.
5) 中村朋弘，皆瀬慎，柴田卓詞，加藤裕将，西山哲，西垣誠：各種電解質水溶液で膨潤するベントナイトペレットの開発とその性能評価, 地盤と建設, Vol .36, No1，pp105-110，2018.
6) 西垣誠，金沢智彦：セメント系注入材の注入によるしらす斜面崩壊防止対策に関する検討，地盤工学ジャーナル，Vol.6，No.2，pp.213-224，2011.
7) 小泉悠，田中俊行，竹内仁哉，金沢智彦，西垣誠：極超微粒子セメント注入材による砂質土地盤への注入工法の開発，材料，Vol.61，No.1，pp.52-57，2012.
8) K.Hashimoto， S.Nishihara， S.Oji， T.Kanazawa， S.Nishie，I.Seko，T.Hyodo，Y.Tsukamoto : Field testing of permeation grouting using microfine cement，Proc. ICE: Ground Improvement，Vol.169，No.2，pp.134‐142，2016.
9) 淀川左岸線（2 期）事業に関する技術検討委員会：淀川左岸線（2 期）事業に関する技術検討報告書【概要版】，p.2，2017.
10) 福井新聞 ONLINE https://www.fukuishimbun.co.jp/articles/-/1314488（2022.8 取得）
11) 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 (1) 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，水利科学，No.382，pp.40-65，2022.
12) 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，地盤と建設，Vol .38，No1，pp9-18，2020.
13) 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面崩壊形態の相関，日本応用地質学会，平成 30 年度 7 月豪雨災害（西日本豪雨災害）調査団報告書，pp.81-86，2019.
14) 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.
15) 稲崎 富士：浅部地盤の特徴と浅部物理探査の役割，地質調査，第 2 号，pp.16-23，2021.
16) 谷和夫，金子進：水溶性ポリマーの濃厚溶液を利用した乱さない試料のサンプリング方法，土と基礎，Vol.54，No.4，pp.19-21，2006.
17) 地盤工学会地盤調査規格・基準委員会編：地盤材料試験の方法と解説（第 1 回改訂版）, pp.184-198, 2020.（JGS 0151-2020）
18) 川崎元，西垣誠：不飽和土の新しい試験法，地盤工学会誌，Vol.69，No1，pp23-28，2021.
19) 河野伊一郎，西垣誠：不飽和砂質土の浸透特性に関する実験的研究，土土木学会論文報告集，Vol.307，pp.59-69，1981.
20) Van Genuchten,M.T. : A closed‐form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil science society of America journal， Vol.44， pp.892-898，1980.
21) 不飽和土の工学的性質に関する研究委員会，標準的不飽和土三軸試験器について，土質工学会，pp.155-165，1989.
22) 川崎元，西垣誠：実用的な不飽和土用三軸圧縮試験装置の開発とそれを用いて測定した不飽和土のせん断強度について，地盤工学ジャーナル，Vol.6，No1，pp39-56，2011.
23) 地盤工学会地盤調査規格・基準委員会編：地盤調査の方法と解説，pp515-531，2013.（JGS 1314-2012）
24) U.S. Department of the Interior，Bureau of reclamation（米国内務省開拓局）: Earth manual，the 2nd ed.，pp.579-593，1974.
25) 西垣誠，菅野雄一，藤田貴文，真木直也，西田宣一：不飽和地盤を対象とした現場透水試験法に関する課題の抽出と改良に関する考察，地下水学会誌，Vol.60，No.3，pp.289-304，2018.
26) A.Tohari， M.Nishigaki， M.Komatsu : Laboratory Experiments On Initiation Of Rainfall induced Slope Failure With Moisture Content Measurements，ISSMGE，ISRM and IAEG GeoEng2000.，24 Nov. 2000 Award paper
27) MA Biot : General theory of three‐dimensional consolidation，Journal of applied physics，Vol.12，pp152-164,1941.
28) 向後雄二：飽和・不飽和圧密解析法を用いた降雨による斜面崩壊実験のシミュレーション，地下水学会誌，Vol.62，No.3，pp.383-398，2020.
29) 笹井友司・西垣誠・西山哲：不飽和領域の浸透水圧を考慮したマサ土斜面の安全性評価に関する考察，土木学会論文集 B1（水工学），74 巻 4 号，pp.13-18，2018.
30) 西垣誠，科野健三：地下水排水工法の課題と対策，基礎工，Vol.6，pp.2-9，2021.
31) 山田剛二，渡正亮，小橋澄治：地すべり・斜面崩壊の実態と対策，p.142，山海堂，1971.
32) Hooghoudt，S.B. : Bijdragen tot de Kennis van ee hige

natuurkundige grootheden van den grong, 7 Bepaling van de door Latend heid in gronden van de Tweede Soort: Therie on toepassing van de Kwantitatieve strooming van het water in ondiep gelegen grond Lagen, Vooralin verband met ont waterings en infiltratievraagstukken. Versl. Landb. and. 43:461-676, 1937.

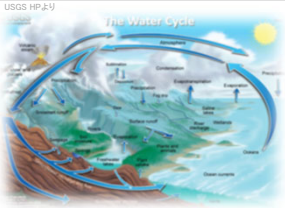
33) 宮崎毅，長谷川周一，粕渕辰昭：土壌物理学，朝倉書店，pp.38-39，2005.

特別講演

土砂災害と地下水

西垣 誠
（岡山大学名誉教授、統合物性モデル技術研究組合理事長）

USGS HPより



2022年8月26日

土砂災害と地下水

統合物性モデル技術研究組合
理事長　西垣 誠

本日の話題

地震や集中豪雨による土砂災害を予測して、
その災害から国民を守るために 何をなすべきか？
について考える。

(A) 統合物性モデル技術研究組合の活動
(B) 地震災害対策
(C) 豪雨による洪水対策
(D) 土砂災害対策
(E) 斜面内の物理探査とサウンディング
(F) 何が解決しているのか
(G) 落石対策
(H) 地すべり対策
(I) 今後の仕事

地盤情報を
国が一元的に収集するシステム化について

岩崎公俊：
既存の地盤情報の利活用国土地盤情報センターの設立，
基礎工, 2018.9., pp.47-49.

(1)2018年3月
今後の発注者の在り方に関する中間とりまとめ。
施行リスクの低減 や i-constructionの深化 の一環として、
官民の地盤情報データベースの構築 が 提言される。

(2) 2018年4月
a) 一般財団法人国土地盤情報センターが設立される。
b) 地盤情報の検定・登録・利用システムの確立。
c) 国土強靭化への貢献
d) 3次元地盤モデルを構築
ボーリング間の地層構成の推定

(3) 2019年
岩崎公俊：
一般財団法人国土地盤情報センター，
地質と調査, 2019年第1号(通巻153号), pp.29-32.
国土地盤情報センターの今後の抱負が示されている。

(A) 統合物性モデル技術研究組合の活動

IMTRA　Integration Model of Physical Properties Technology Research Association

https://imtera.or.jp　　2019年設立

近年の異常気象による豪雨激化？
地震激化？
国民を自然災害から守るために
何をどのように対応すべきか？
の現状に対して、

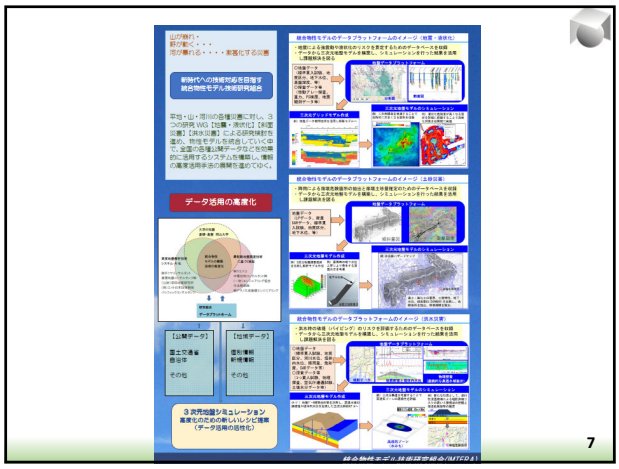
将来の土砂災害にも、本当に大丈夫なのか！
根本的な考え方の転換すべき新しいイノベーションを
提案する。

2020年7月29日(水曜日)

地震・液状化　土砂災害　河川災害

西垣 誠

3WGで国土強靭化の課題解決



統合物性モデル技術研究組合

分散する 防災に関する各種地盤データを集約し、
地盤の統合物性モデル を構築して、
innovation を考案する

背景

地震対策　⇒　地震工学，地震予知，
　　地盤災害予測

洪水対策　⇒　河川工学　地盤工学

土砂災害対策　⇒　地盤工学　地質学

熊本地震　　地震と豪雨の複合災害

9

3次元地質・土質モデルガイドブック

（一財）国土地質情報センター
協力：（一社）全国地質調査業協会連合会

地質・土質モデルの活用
- 不確実性に起因した地質リスクの把握
- 構造物基礎と地盤との相互関係
- 構造物を支える地山の評価
- 構造物と地下水面の関係確認

3次元地質解析マニュアル
3次元地盤モデリングガイドブック
　3次元地質解析技術コンソーシアム
https://www.3dgeoteccon.com/

10

BIM/CIM 活用ガイドライン

BIM（Building Information Modeling, Management）
CIM（Construction Information Modeling, Management）
https://www.mlit.go.jp/tec/tec_fr_000079.htmlttp
国土交通省

土木事業における
地質・地盤リスクマネジメントのガイドライン
https://www.pwri.go.jp/jpn/research/
saisentan/tishitsu-jiban/iinkai-guide2020.html
国立研究開発法人土木研究所

11

3次元地盤モデル構築

課題

(1) 3次元地盤モデルの妥当性評価

(2) 3次元地盤モデルを用いて 何を評価するのか？

(a) 3次元場での地震時の液状化予測
(b) 工事などによる地盤変形、安定評価
(c) 工事などによる地下水流動阻害
(d) 河川堤防の安定
(e) 豪雨時の斜面の安定

12

(a) 平野部 の地盤情報

地盤沈下、陥没、液状化危険度、
地下水流動情報、土壌･地下水汚染情報

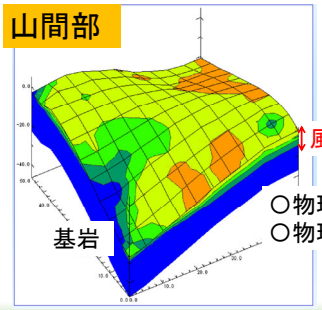
(b) 斜面等山間部 の地盤情報

地表面ﾏｯﾌﾟ(DEM)、LP計測
風化層等の弱部の厚さの3次元分布、
地下水流動情報、 土壌･地下水汚染情報

13

(c) 斜面等 山間部の地盤情報

山間部



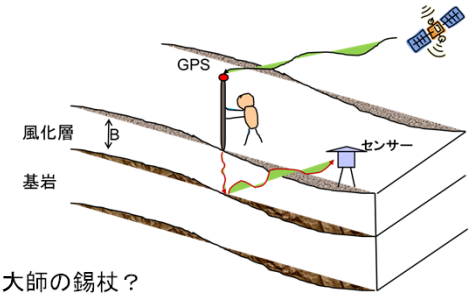
風化層の厚さの分布

基岩

○物理探査
○物理探査の精度の確認

14

(d) 物理探査とGPSによる マサ土斜面の層厚分布調査



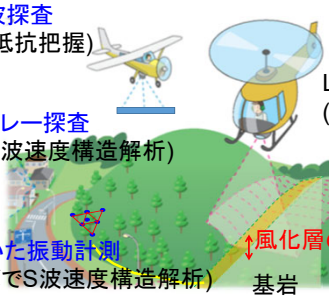
弘法大師の錫杖？

モーゼの杖？

15

(e) 斜面の崩壊しそうな土層厚の分布調査

空中電磁波探査
(地層の比抵抗把握)



LP計測
(微地形把握)

常時微動アレー探査
(地震計でS波速度構造解析)

DASを用いた振動計測
(光ファイバでS波速度構造解析)

風化層の厚さの分布

基岩

2021年 物理探査学会 地震防災研究会 微動探査の国際展開のための標準化に関するシンポジウム

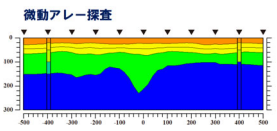
2022年3月　物理探査学会で講演会 光ファイバマルチセンシング

16

(f) 風化層の厚さ分布調査手法

常時微動アレー探査

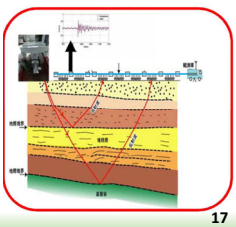
・複数のワイヤレス加速度計で色々な方向から到来する表面波を観測
・地層のS波速度構造解析



観測状況

DASを用いた振動計測
(Distrbution Acoustic Sensor)

・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
・地層のS波速度構造解析



17

(g) 地表水の流動と斜面浸食の予測と対策

i) 豪雨による表面流動水による
斜面浸食が生じる可能性がある所での
谷部等の浸食防止対策の検討（LPﾃﾞｰﾀの活用）

ii) 浸食防止施設（石積、耐候性U字溝、U字溝）の
機能劣化の診断システムの構築

iii) 側溝の設計基準（時間降雨50 mm/hr）の
再検討

iv) **表面排水システム**の
簡易リフレッシュシステムの構築

18

(h) 地下水位変動による斜面崩壊の予測と対策

i) 豪雨・浸透による斜面崩壊が生じる可能性がある
所での地下水位上昇の制御工法のための
地下排水施設の維持・管理システムの構築

ii) 排水施設の**目詰まりに対しての洗浄**と
目詰まり物質の除去システムの構築

iii) 排水施設の酸化による目詰まりに対しての
洗浄システムの構築

iv) 排水施設の**経年劣化の診断システムの構築**と
簡易リフレッシュシステムの構築

19

(B) 地震災害対策

(1) 極超微粒子セメント注入による
液状化地盤の固化方法

(2) 恒久的地下水位低下工法による液状化対策
太陽光エネルギーを用いた揚水ポンプによる
地下水位低下工法

(3) 砂地盤への気泡注入

(4) 塩分を含む地下水の
特殊ベントナイト可動壁による地下水低下工法

20

(1) 地盤固化による 液状化対策

(a) 液状化対策

(i) 液状化の判定 （3次元での地盤モデル）

(ii) 砂地盤の固化対策
- ウルトラ スーパー ファイン セメント 注入
- ジオポリマー材 注入（天然の火山灰 と 水ガラス）

21

(b) ウルトラスーパーファインセメントの シラス地盤への注入による 地震や豪雨に対しての斜面崩壊対策

西垣誠，金沢智彦，
セメント系注入材の注入による
しらす斜面崩壊防止対策に関する検討
地盤工学ジャーナル，Vol.6, No.2, pp.213-224, 2011.

極超微粒子ｾﾒﾝﾄ ＋ ﾎﾟﾘｶﾙﾎﾞﾝ酸系分散剤 ＋ 高速攪拌
→　注入材（セメントミルク）

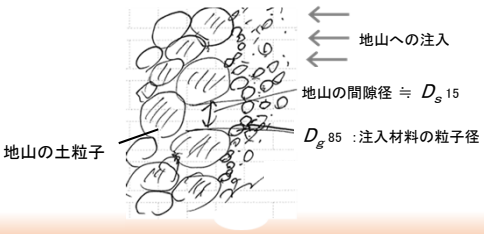
22

(c) 地山への注入材料の選定基準

(1) 地山の土の間隙率と 地山の粒径の$D_{s\,15}$ が 同じと仮定する。

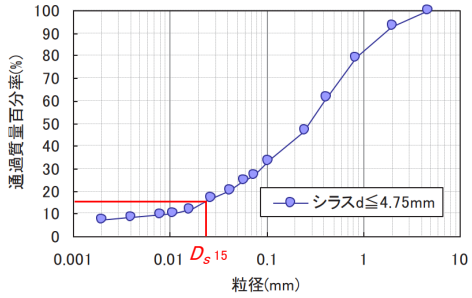
(2) 注入材料の$D_{g\,85}$が、地山の間隙径（$D_{s\,15}$）に注入できる条件は、
$D_{g\,85}$の5倍の値が、$D_{s\,15}$より小さいこと。

$$D_{g\,85} < D_{s\,15} / 5$$



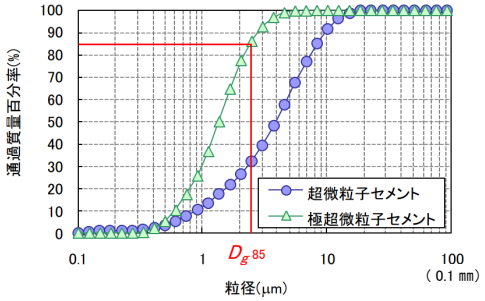
23

(d) しらす供試体材料の粒径加積曲線



24

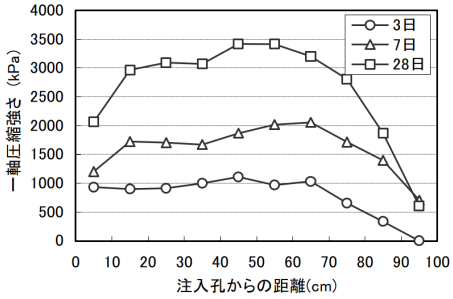
(e) 注入材の粒径加積曲線



極超微粒子セメントミルクの開発

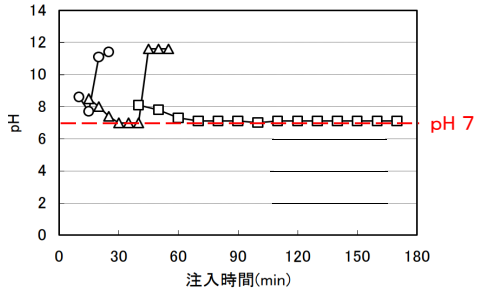
25

(f) シラス内に注入した後の地盤内の一軸圧縮強さの経時的変化



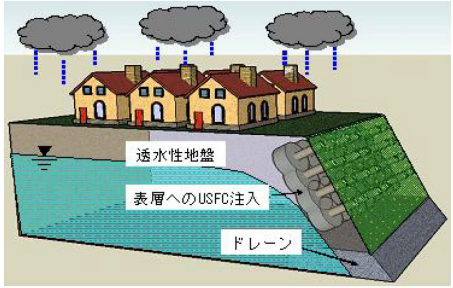
26

(g) シラス地盤にセメント系材料を注入時の排水のpHの変化



27

(h) 斜面対策工法概念図



28

(2) 極超微粒子セメントの江戸川砂、成田砂の 砂質地盤への注入

小泉悠，田中俊行，竹内仁哉，金沢智彦，西垣誠，

極超微粒子セメント注入材による
砂質土地盤への注入工法の開発

材料, Vol.61, No.1, pp.52-57, 2012.

29

(a) 千葉県富津の成田砂への注入

2012年

Fig. 11　Observed solidified ground
(W/C = 400%, Q = 15ℓ/min).

30

(b)

K.Hashimoto, S.Nishihara, S.Oji, T.Kanazawa,
S.Nishie, I.Seko, T.Hyodo, Y.Tsukamoto：

Field testing of permeation grouting using microfine cement,

Proc. ICE: Ground Improvement,
Vol.169, No.2, pp.134–142, 2016.

ICE（Institution of Civil Engineers）　イギリスの土木学会

31

(c) Telford Premium賞・受賞　2017年

ICE（英国土木工学会）
200年の歴史ある学会
ノーベル賞より古い

日本人として6番目の受賞

32

(d) 鹿児島県北薩トンネルでの汚染水の止水

ダム工事の技術でトンネル湧水を9割減
トンネル外周にリング状の改良ゾーン

日経コンストラクション
2017.3.27

33

(C) 豪雨による洪水対策

(a) 豪雨の水の処理 ～増え続ける降水量への対策～

○堤防の弱点箇所を 空気圧と水圧トモグラフィーで探査する。

○堤防を高くする
　堤防決壊が生じると災害規模が大きくなる。

○新しい放水路計画、河川幅を広くする
　都市部には用地がない → 地下放水路（神田川等）

○地下放水路を 海まで建設する。
　（開水路と管路の差）

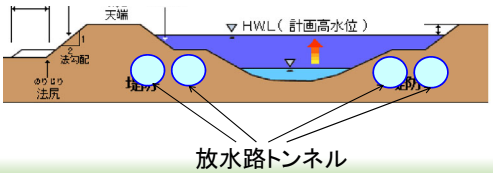
○地方都市では 河川の下に放水路を建設する
　大深度地下使用法（大深度法）適用外

34

(b) 放水路トンネルによる洪水対策

(i) 大深度法の適用地区
　関東　神田川放水路 等
　関西　大和川放水路 等

(ii) 大深度法の適用しない地区
　河川の下にトンネルを掘って 放水路を 海まで造る



35

(c) 洪水対策の課題

(1) 河川下の地盤を 把握しているのか？

(2) 安価で安全な 地下放水路の掘削工法の開発

シールド工法(800万円/m) から　ECL(450万円/m)

(3) 掘削土砂の処理

堤防近くの地盤を高くする。スーパー堤防

(4) 平時の放水路の有効利用

a) EV車専用道路（日本のあばら骨道路 Ribs Road）
b) 老朽化したライフラインの代替共同溝
c) 地震に強い 地下カプセル物流ネットワーク網
d) 山岳部の斜面内地下水排水網

36

(D) 土砂災害対策

豪雨後に 崩壊斜面の対策でいいのか？

本当に 国民の命を守れているのか？

崩壊前に
- 斜面の危険度をあらかじめ予測
- 自然斜面の安定化（治山）を提案し、安定化対策を実施する国土管理

37

豪雨による斜面崩壊

最近のマスコミのニュース

福井市内の足羽川沿いの斜面崩壊

2017年12月
大規模な崩壊が発生した。
高さ47m、幅66.5m
専門家　地すべり（降雪や降雨が原因？）

2021年3月6日　既崩壊斜面の左側崩壊
高さ80m、幅約80m

2021年5月10日　大規模な地滑り箇所の上部崩壊発生
高さ約130m、幅約150m
専門家は、追加崩壊を予測していなかったのか？

日経コンストラクション 2021.6.14., pp.28.

38

地盤の専門家に何が足らなかったのか？
- 地盤工学では、医学のように CTスキャナー を持っていない。
- 平地では、物理探査とボーリング調査が可能になってきている。

斜面に対しての物理探査？
物理探査結果の妥当性の確認技術？

稲崎 富士,
浅部地盤の特徴と浅部物理探査の役割,
地質調査, 第2号, pp.16–23, 2021.

39

(a) 斜面崩壊に対する多くの課題

(1) 斜面崩壊の予測
- i) 自然斜面内の風化層の厚さ分布の推定
- ii) 斜面内の水径(ミズミチ)の分布の推定
- iii) 斜面崩壊，地すべり，落石の危険度の推定

(2) 斜面崩壊対策 と その診断
- i) 斜面崩壊対策（グランドアンカー，表面・地下排水施設等）の健全度診断による危険度の推定と対策
- ii) 斜面崩壊対策の健全度の診断 と 維持管理

40

(b) 自然斜面の土砂災害の事前調査

① 斜面の表面の把握　← LP

② 斜面の状況の把握　← 物理探査 と 軽重量CPT

③ 豪雨に対する安全性の検討　← 3次元の カップリング解析

④ 危険斜面を 崩壊する前に、事前に対策する

地盤工学会
砂防学会
地すべり学会
の新しい方向性を考える！

41

(1) 最新の技術課題　(LPデータより)

(a)
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,
地盤と建設,地盤工学会中国支部, Vol.38, No.1, pp.9-18, 2020.

(b)
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, 地盤工学会中国支部, Vol.38, No.1, pp.39-50, 2020.

42

(i) データ共有化・データ取得技術の高度化

地盤モデル高度化

判定技術の高度化

(a) ボーリング情報のデータベース共有強化
(b) 地質調査法などの整備
(c) 浅層地盤調査の高度化
(d) 微動アレイ・DAS等、各種物理探査の活用
(e) 地下構造のモデル化におけるデータ統合技術の高度化
(f) AIを活用した補間技術
(g) 浅部・深部統合モデルの高度化
(h) 強震動判定・液状化判定の高度化と基準反映

43

(ii) 浅部地盤情報の探査

- 弾性波探査
- 表面波探査
- PS検層
- DAS (**D**istributed **A**coustic **S**ensing)
- 常時微動探査

44

(iii) 深部地盤情報

- 重力や大深度地震探査
- 微動アレイ探査

3次元的な
S波 or
S/V速度分布

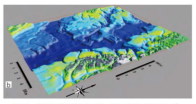


図-7　沖積層基底面モデルの鳥瞰図 (2013) [15]

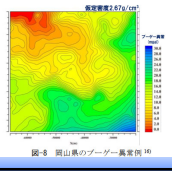


図-8　岡山県のブーゲー異常例 [16]

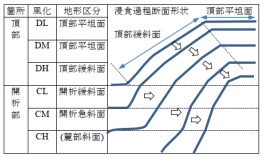


図-9　開析過程による D 級風化帯の減少

45

(iv) LPデータから何を判読するのか？

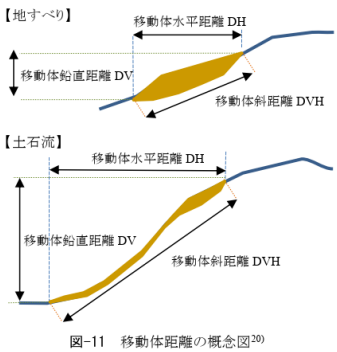


図-11　移動体距離の概念図[20]

46

(v) 斜面災害の技術課題

今後の新しいアプローチ
(a) 山頂緩斜面での崩壊メカニズム(傾斜30度未満)
(b) 麓部斜面での崩壊メカニズム(傾斜30度未満)
(c) 変質鉱物の関与の定量的評価
(d) 地下水流動力の評価手法の開発(浸透水圧)
(e) 低拘束圧下での移動体の適正な強度評価手法
(f) 岩盤境界部の崩積土の適正な強度評価手法
(g) 面的な斜面評価手法の開発(物理探査の精度改善)
(h) データ活用による広域評価手法の開発
(i) 非接触調査解析ツールの開発
(j) N値に代わる小型化地盤探査ツールの開発
(k)斜面作業の軽減化に向けたパワースーツの開発

47

(vi) 斜面崩壊の対策

(l) 山地環境を維持する安価な斜面強化材料の開発
(m) 斜面内の安価な地下水位低下工法の開発
(n) 地下水位低下工法での新たなドレーン材の開発
(o) 目詰まりが生じにくいドレーンシステムの開発
(p) 斜面の表面風化防止工やガリー侵食対策工の改善
(q) グランドアンカーの耐久性診断と改修技術開発
(r) 表面排水工の健全度診断モニタリングシステム
(s) 斜面強化工法健全度診断モニタリングシステム

48

(E) 斜面内の物理探査とサウンディング

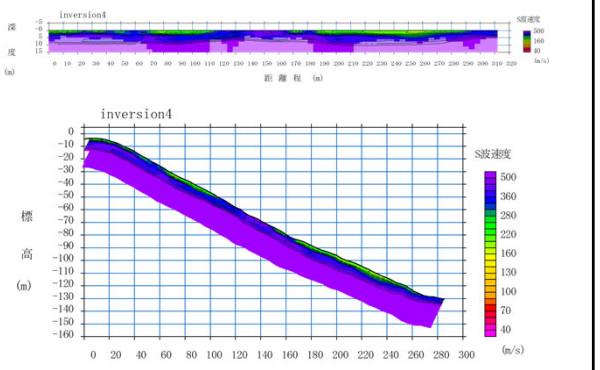
(i) 調査地点

国土地理院地図より

○ 試行箇所

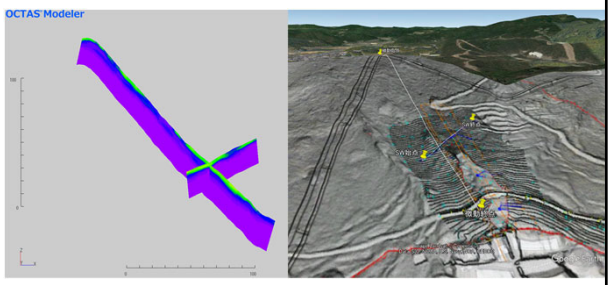
49

(ii) 半田山の常時微動探査結果　2022年4月



50

(iii) 半田山の常時微動探査結果



常時微動探査と表面波探査

51

(iv) 風化層厚さの分布推定の妥当性の確認

物理風化層等，弱部の３次元的分布の把握は、物理探査が有効だが、
精度の確認　が必要。

斜面での作業性と高い貫入能力の軽重量サウンディング機器を開発

52

(v) 斜面調査の現状での各種サウンディング試験

斜面調査用サウンディング試験比較

項　目	簡易貫入試験 (JGS1433)	標準貫入試験 (JISA1219)	スクリューウエイト貫入試験 (JISA1221)
ハンマー、おもり質量	5kg	63.5kg	100kg
落下高さ	50mm	760mm	—
先端コーン、シュー	先端角60度、外径25mm	シュー	スクリューポイント
ロッド外径	16mm	40.5mm	19mm
適用性	作業簡易。礫、玉石含む地盤に不適。	あらゆる地質に適応。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。

53

(vi) LWCPTの試行

新しい調査機器の開発

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，

pp47～50，2021年11月．

54

(vii) 軽重量サウンディング試験機の開発

名称: 軽重量サウンディング試験機

LWCPT
Light
Weight
Cone
Penetration
Test

55

(viii) ミニラムとLWCPT比較

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
ハンマー吊上げ	ｴﾝｼﾞﾝ,油圧ﾓｰﾀｰ,ﾁｪｰﾝ	発電機,電動ﾎｲｽﾄ,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)
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	電動ﾎｲｽﾄ
運搬方法	本体車輪で人力運搬	部品に細分し人力運搬
合計質量	270kg(本体135kg) ﾛｯﾄﾞ4.7kg/本	85.8kg(発電機15kg含) ﾛｯﾄﾞ3.8kg/本

56

(ix) 斜面状況の把握のまとめ

(i) 自然斜面内の風化層の厚さの分布の推定

i) 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。

ii) LWCPTは30kgハンマーを運搬時に2分割しハンマー吊上げを電動ホイストと発電機にして全体質量を85.8kgに軽量化した。
(ミニラム270kg)

iii) LWCPTの試行の結果，推定N値35，38の地盤を確認した。

57

(x) 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ﾃﾞｨﾝｸﾞ試験機(LWCPT)を開発した。以下に今後の課題を列挙する。

1)斜面における風化層や潜在崩土層厚等の弱層の推定には、最終調査深度が礫か基盤岩かを判断できる装置の改良が必要であることがわかった。

2)常時微動アレー探査、空中電磁波探査等の物理探査による風化層等の弱い地層の推定が必要。

58

(xi) LWCPTで形成した貫入孔の有効利用

・孔内水位の常時計測
・地下水面より上部の土中の体積含水率の常時計測装置(ドイツ製小型FDR水分計)の設置

土壌雨量指数
先行降雨指数の再検討

これらに変わる新しい斜面内の
地下水、土壌水分量のモニタリングより
豪雨予測に対する
斜面内の4D解析による　→　IOT
危険度の予測　　アラーム

59

(F) 何が解決しているのか？

(a) 斜面内の基岩、風化層厚の分布等の3次元地層情報から、原位置での斜面崩壊の予測に必要な地盤モデル の構築が可能になる。

(b) 原位置からの試験供試体のサンプリング技術で、それぞれの供試体の力学特性、浸透特性を室内試験で求める技術

谷和夫，金子進
水溶性ポリマーの濃厚溶液を利用した
乱さない試料のサンプリング方法
土と基礎, Vol.54, No.4, pp.19−21, 2006.

60

(c) 斜面内の風化層の土の不飽和状態での室内での浸透特性を求める。

i) 不飽和透水係数および透気係数の求め方

① 河野伊一郎，西垣誠
不飽和砂質土の浸透特性に関する実験的研究
土土木学会論文報告集, Vol.307, pp.59−69, 1981.
Co^{60}による100 μ キュリの γ 線を用いた室内での水分量の非破壊計測と
間隙水圧計による負の間隙水圧の 経時的計測

② 西垣誠，瀬尾昭治
非定常法による不飽和土の透気係数の室内での計測法に関する研究
土土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.70, No.1, pp.83−95, 2014.
Am^{241}による100 μ キュリの中性子水分計と間隙水圧計による
[1] 供試体の不飽和浸透特性（土壌水分保持曲線、$\theta-\psi$）
[2] 不飽和土透水係数（$\theta-Kw(\theta)$）
[3] 不飽和土透気係数（$\theta-Ka(\theta)$）

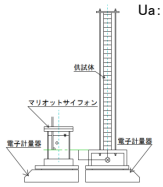
61

③ 川崎元，西垣誠
不飽和土の新しい試験法
地盤工学会誌, Vol.69, No1, pp23−28, 2021.
不飽和土の吸水過程における水分特性曲線の簡易な求め方
（電子計量器を用いた方法）

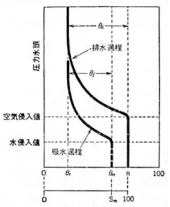
地盤工学会の基準： 加圧法（加圧板法）
土柱法の復活

$\theta = Vw / V$

Ua：大気圧



土柱法による水分特性曲線の
測定装置の一例



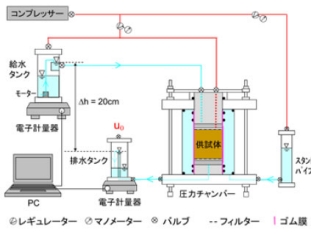
体積含水率または飽和度（%）

62

④ 電子計量器を用いた不飽和土の透水係数の計測法

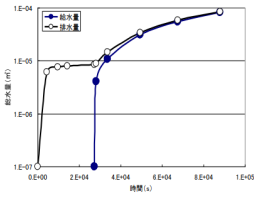
RI、誘電率計（供試体中の体積含水率（θ）の経時的変化の計測）
拡散型間隙水圧計（供試体中の負の圧力水頭の計測）

これらの機器の
必要がない試験法

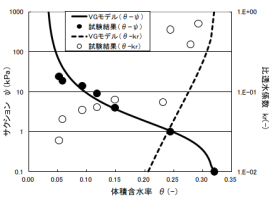


定常型不飽和透水試験装置

63



給水量と排水量の経時的変化（Ua = 20 kPa）

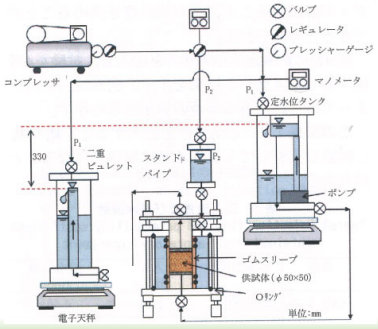


不飽和透水試験結果の一例

64

⑤ 供試体の透水係数を求める装置

加圧型透水試験装置



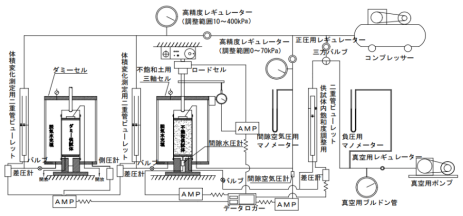
65

(d) 不飽和土の室内でのせん断強度特性の求め方

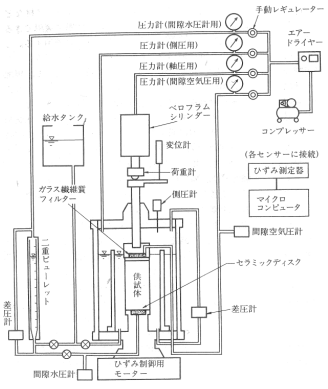
① 川崎元，西垣誠

実用的な不飽和土用三軸圧縮試験装置の開発と
それを用いて測定した不飽和土のせん断強度について

地盤工学ジャーナル，Vol.6, No1，pp39−56, 2011.



考案した不飽和土用の三軸圧縮試験システム



不飽和土を対象とした三軸圧縮試験機の例

不飽和土の工学的性質に関する研究委員会, 標準的不飽和土三軸試験器について, 土質工学会, pp.155−165, 1989.

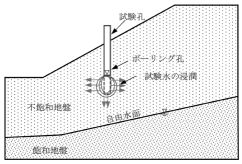
(e) 原位置における浸透等の特性の調査法

i) 西垣誠, 菅野雄一, 藤田貴文, 真木直也, 西田宣一：

不飽和地盤を対象とした現場透水試験法に関する
課題の抽出と改良に関する考察

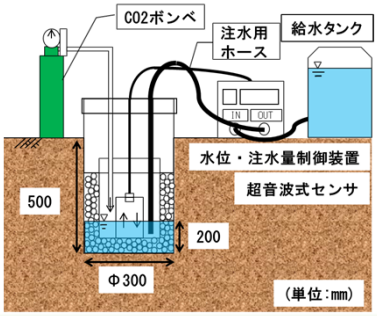
地下水学会誌, Vol.60, No.3, pp.289−304, 2018.

E−19法による不飽和領域の透水係数の求め方



ボーリング孔を用いた不飽和地盤での透水試験
Fig. 1 Permeability test with boring hole for the unsaturated zone.

ii) 現場での飽和透水係数(E-19法)



① 試験結果

同じ場所で、複数回試験すると、結果が異なる？
透水試験の前に、CO_2ガスを注入する。

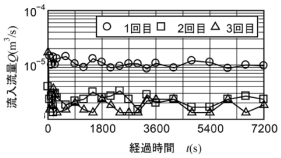


図 11　流入流量の経時変化図（CO_2 ガス注入なし）

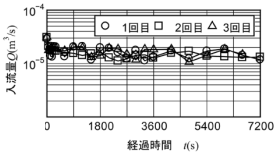
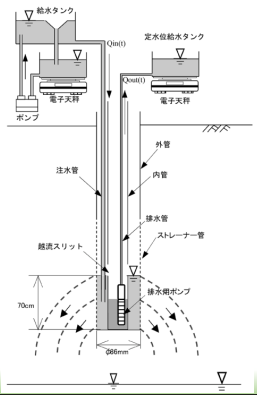
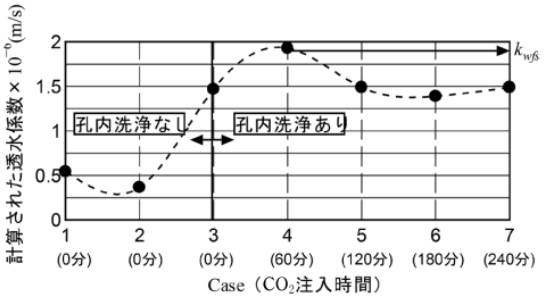


図 12　流入流量の経時変化図（CO_2 ガス注入あり）

② 簡易な原位置透水試験装置



③ 孔内洗浄の有無、CO_2の注入時間による透水係数の変化



72

(f) 原位置における斜面風化層の力学特性試験法？

- 孔内載荷試験
- 現場せん断試験装置 (?)

73

(g) 斜面内への3次元降雨浸透流解析手法

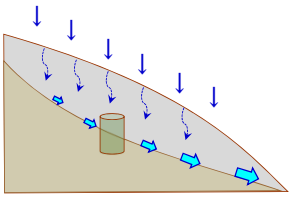
DTRAS-3Dのコード開発
カップリング解析

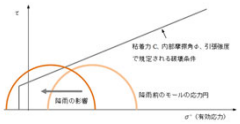
向後雄二：
飽和・不飽和圧密解析法を用いた
降雨による斜面崩壊実験のシミュレーション
地下水学会誌, Vol.62, No.3, pp.383-398, 2020.

74

(h) 斜面崩壊のメカニズム

降雨浸透によるせん断力の低下



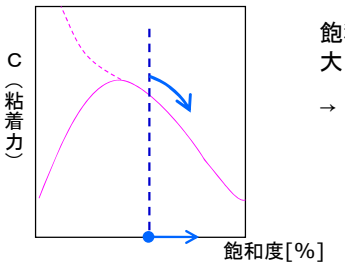


地盤内に降雨が浸透する
↓
土が水を含む ＝ 土のせん断強度が弱くなる

右図：　地層科学研究所HP 「表層崩壊のメカニズ

75

(i) 粘着力の低下



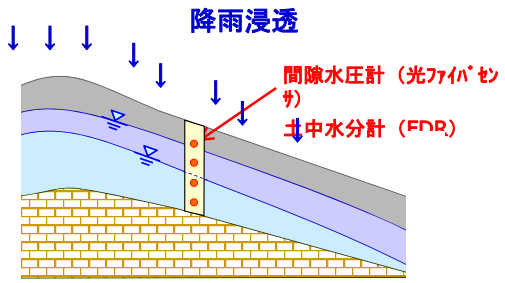
飽和度が
大きくなると、
→　粘着力は
低下する。

$\tau = C + \sigma \tan\varphi$

τ ： せん断力　　[Pa, kgf/cm²]
C ： 粘着力
σ ： 応力

76

(j) 危険斜面でのモニタリング



77

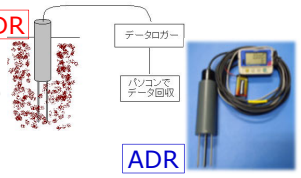
(k) 土の飽和度の計測

深さ方向の各点の土の水分量変化の計測方法

誘電率で測る

TDR

（Time Domain Reflectometry）

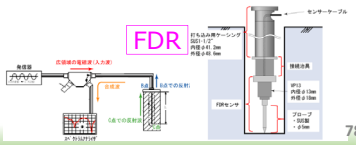


ADR

（Amplitude Domain Reflectometry）

FDR

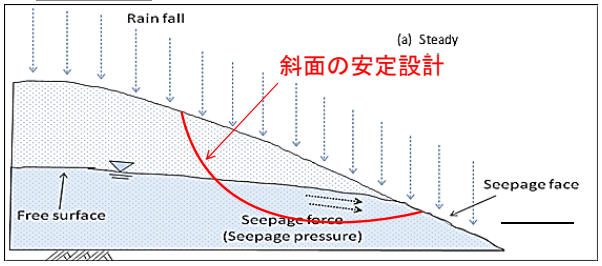
（Frequency Domain Reflectometry）



78

(l) 豪雨によって、どんな新しい現象が生じるのか？

① 定常状態

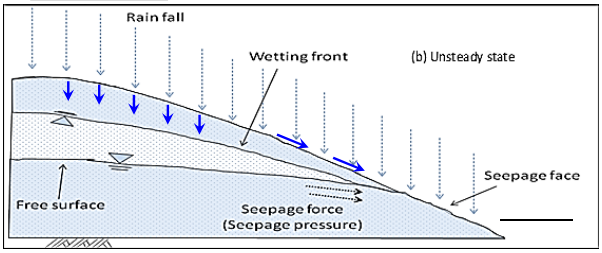


降雨の斜面への浸透(1)
従来の斜面安定設計

79

㊀ 豪雨が浸透して…湿潤前線が移動する。

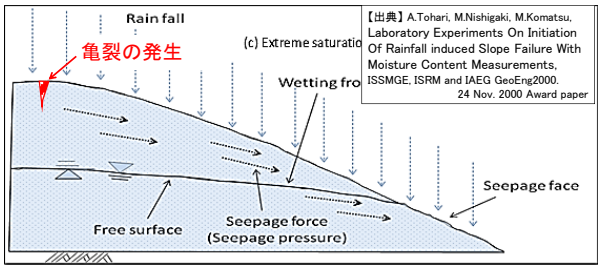
非定常状態



降雨の斜面への浸透(2)

80

㊁ 浸潤前線が地下水面に到達すると、斜面全体が飽和になる。大きな浸透水圧が斜面の下流方向に作用する。

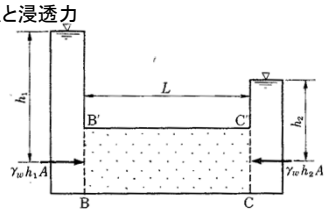


降雨の斜面への浸透(3)

81

④ 浸透水圧と浸透力

浸透水圧と浸透力



浸透力

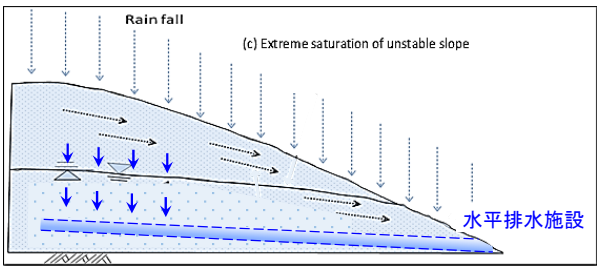
$$F=\gamma_w h_1 A-\gamma_w h_2 A=\gamma_w A(h_1-h_2)=\gamma_w AL\frac{h_1-h_2}{L}=\gamma_w iAL$$

浸透水圧（f）

$$f=\frac{F}{AL}=\gamma_w i$$

82

⑤ 水平排水施設があると、浸透水圧は鉛直方向に作用する。

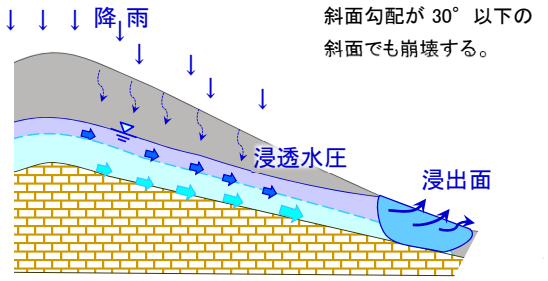


降雨の斜面への浸透

83

⑥ 降雨が浸透すると、**浸透水圧**が発生する。

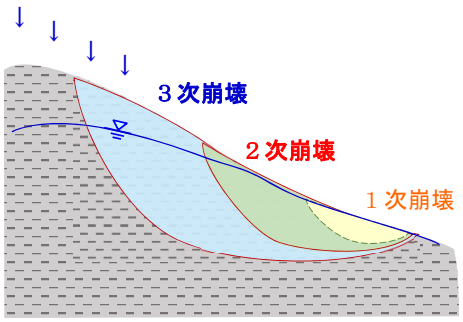
→ 斜面が より**不安定** になる。



斜面勾配が 30° 以下の
斜面でも崩壊する。

84

⑦ 進行性破壊



85

⑧ 豪雨浸透による斜面崩壊の予測

(a) 降雨が斜面内に浸透することの予測
(b) 不飽和領域内の浸透
(c) 空気が邪魔をする ？
(d) 2相流の浸透解析　？
(e) 将来予測には「初期条件が必要」
　(i)　斜面内の初期条件　？
　　土中の水分の状況（FDR）
　(ii) 地下水位の状況
(f) 浸透と力学のカップリング解析

86

⑨ 斜面の3次元浸透流 – 応力連成解析 による
斜面の安定評価が一般的になっていない。

斜面崩壊に関する力学特性の調査法？

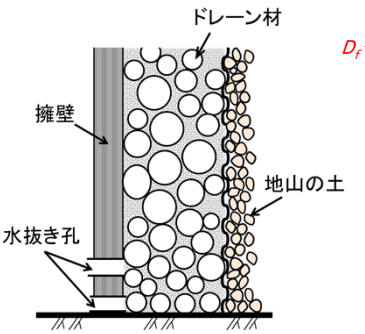
87

⑩ 斜面崩壊に対しての対策

(1) グランドアンカー等は 大丈夫か？
(2) 擁壁は 大丈夫か？
(3) 斜面内の排水システムは 大丈夫か？
(4) 斜面の表面排水施設は 大丈夫か？
(5) 自然斜面に対しての崩壊前の対策
　崩壊する可能性のある地盤を 固化するため、
　斜面に USFC を注入して、対策する。

88

(i) 擁壁背面のドレーンと地山の土

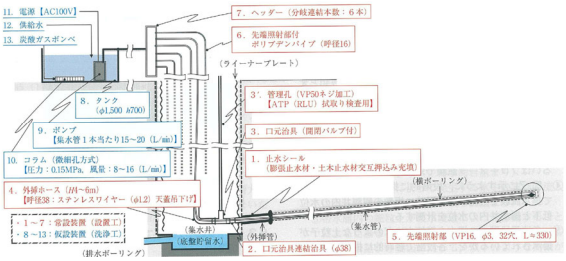


$D_{f15} < 5\,D_{s85}$

89

(ii) 排水システムの目詰まり対策

マイクロバブルによる洗浄



水平排水管の洗浄システム概念図

西垣誠，科野健三：地下水排水工法の課題と対策，
基礎工，Vol.6, pp.2-9, 2021.

90

(iii) 自然斜面内へのグラウトによる対策？

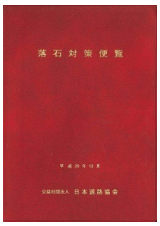
① 斜面への注入を、
劣化しやすい コンクリート から
ジオポリマー材料 へ

② グラウトによる斜面内での排水施設の施工

91

(G)落石対策

(1) 落石対策便覧　平成29年(2017年)12月
公益社団法人日本道路協会出版



92

(2) 地盤工学会誌 2021年6月号：落石対策技術特集号

個別要素法　(DEM：Distinct Element Method)
P.A.Cundall & O.DL.Stack, Geotechnigue, 1979

不連続変形法　(DDA：Discontinuous Deformation Analysis)

落石エネルギーの評価(DEM)　防護工

落石経路の評価(DDA)　防護

防護工の実規模実験

落石現象の不確定性を用いた評価
(RIDM：Risk Informed Decision Making)

地形図、LPデータによる落石危険個所の抽出

岩塊部振動計を用いた岩塊安定性のモニタリング

93

(3) 新しい落石対策

(a) 現地の調査法

① ドローンを用いた3次元撮影による
亀裂岩盤の3次元モデル化　(3次元個別要素法)
表面の不安定性の評価

② 常時微動アレイ計測による
亀裂間の接合性と亀裂内部の評価

③ 亀裂内の粘土鉱物の調査

94

(b) 落石の危険度の判定

① 目視による判定

② 3次元個別要素法(DEM解析)による評価
- 耐震性評価
- 耐風性評価

③ 落石対策の有効性の評価

95

(c) 落石防止対策

① 過去の防止対策工法(接着工、根固め工等)の
老朽化の診断工法の開発

② 亀裂間の介在物の健全度の診断工法の開発 と
劣化物の洗浄工法
・マイクロバブルによる洗浄
・光ファイバカメラによる洗浄効果の確認

③ 1000年程度の耐久性のある火山礫を用いた
ジオポリマー材による接着工、根固め工の適用

96

西村輝, 西垣誠, 鈴木茂之,

火山礫を用いたジオポリマーによる
落石防止材の研究,

2022年7月20～22日,
地盤工学会第57回研究発表会, 新潟市.

97

(d) 複数ドローンによる危険岩石の除去

ペイロード　1台のドローンが運べる重さ
今は　2.3 kg
40 kg, 100 kg,・・・　開発中

新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)は、
2019年10月30日に、
複数のドローン運行管理システムを相互接続して、
37機のドローンを同時飛行する実証実験に成功している。

98

(H)地すべり対策

(a) 地すべりが生じている原因を知るには、
地形、地質データが必要になる(物理探査)。

(b) 将来は、宇宙からの地表面の動きが観測できると、
日本中の地すべり挙動がモニタリングできる。

1) 弾性波物理探査
(1)屈折波法
(2)表面反射法
(3) 常時微動法

常微動
振幅 1 ミクロン以下の振動
周期 0.05～1.2秒

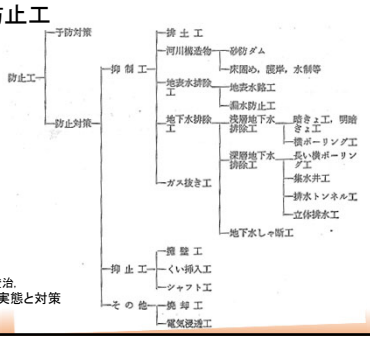
2)電気探査
(1)比抵抗法
(2)電気検層

3)地下水調査
(1)地下水位調査
(2)間隙水圧測定
(3)地下水検層
(4)地下水分布調査

99

(c) 伸縮計、傾斜計による変異のモニタリング
FBG系の光ファイバセンサにより、
遠距離からのリアルタイムでのモニタリングが可能。

(d) 地すべり防止工



山田剛二, 渡正亮, 小橋澄治,
地すべり・斜面崩壊の実態と対策
山海堂, 1971.　(P.142)

100

(e) 地すべり対策

地下水排除工
集水ボーリング工による斜面内の地下水を排水する。

地下水排除工によって、
本当に地下水は排除されているのか？

101

(f) これからの地すべり対策

(1) 地すべり地の地下水位(水圧)低下工法の有効性の評価手法の開発。

(2) 地すべり地の地下水による浸透水圧に対しての定量的な評価手法の開発。

(3) 地すべり面でのすべり抵抗力を増加させるために、地すべり面での含水率を低下させる。

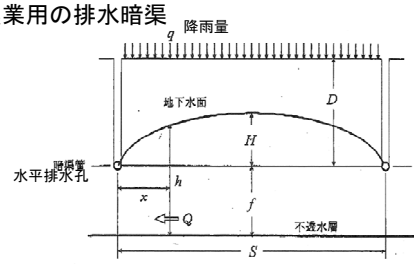
(4) 隆起している山地の不安定現象に対して、地すべり対策の哲学を確立する。

102

(g) 横方向排水施設の機能は？

土壌物理学　宮崎毅, 長谷川周一, 粕渕辰昭(著)
朝倉書店, 2005. pp.38-39

(i) 農業用の排水暗渠



Hooghoudt の モデル

103

(ii) フーゴット(Hooghoudt) の式

$$S^2 = \frac{4\,Ks}{q}(2f + H)\,H$$

S :　排水孔のピッチ (m)
K :　透水係数 (m/s)
q :　降雨流量

宮崎毅, 長谷川周一, 粕渕辰昭(著),
土壌物理学, 朝倉書店, pp.38-39, 2005.

式出典

Hooghoudt, S.B. : Bijdragen tot de Kennis van ee hige natuurkundige grootheden van den grong, 7 Bepaling van de door Latend heid in gronden van de Tweede Soort: Therie on toepassing van de Kwantitatieve strooming van het water in ondiep gelegen grond Lagen, Vooralin verband met ont waterings en infiltratievraagstukken. Versl. Landb. and. 43:461-676, 1937.

104

(iii) 排水孔の有効性の例

排水孔の地表からの深度（D = 1 m）
排水孔から不透水層までの距離（f = 2 m）
1日の降雨　20mm（$q = 23 \times 10^{-7}$ m/s）

この条件で　D − H = 40cm　　地下水位の低下量(S)

地盤の透水係数

$K = 1 \times 10^{-7}$ m/s	S = 1.7 m
$K = 5 \times 10^{-6}$ m/s	S = 12.3 m
$K = 3 \times 10^{-5}$ m/s	S = 30.2 m

本当に　排水孔の機能は何か？　を考える。

105

(I) 今後の仕事

(1) 土砂災害を起こす可能性のある山の頂上までの地盤情報を集録する。
(2) 総合的な安定評価の技術を開発する。
(3) 3次元での豪雨による斜面崩壊予測ツールを開発して、誰でも検討できるようにする。
(4) 原位置での地盤の力学特性を計測する技術開発。
(5) 豪雨でも崩壊しない斜面安定技術を開発する。
(6) 現状の〇倍の降雨が降っても安定である対策技術を開発する。
(7) 斜面崩壊対策が健全であるかどうかのモニタリング方法の開発とシステムの確立。

106

「今日は雨か？ゆっくり読書するか！」

と 言える世界を構築する。

ご 清 聴

ありがとうございました。

107

研究発表会

1. 空気圧連通試験と高密度電気探査の組合せによる
   不飽和の高透水域の抽出方法に関する一考察
   ○新村卓也（パシフィックコンサルタンツ），西垣 誠，斉藤泰久，舘川逸朗，藤吉秀彰
2. 河川堤防内の長期水位計測実績に基づいた
   原位置における不飽和土中の水分計測の意義
   ○片山輝彦（アサノ大成基礎エンジニアリング
3. ジョイント・インバージョン法を使った
   岡山県南部の三次元 S 波速度構造モデルの作成に関する研究
   ○杉本芳博（ダイヤコンサルタント）
4. 2022 年 3 月福島県沖地震等の近年の地震における地震動分布推定
   ○末富岩雄 （エイト日本技術開発）福島康宏、尾茂淳平
5. 小型震動センサーの開発と計測事例
   ○橋本和佳(中央開発)，王寺秀介，王林
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）
   ○斉藤泰久（パシフィックコンサルタンツ）
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
   ○井上真（ウエスコ） 與那城稔
8. 傾斜 30 度未満の斜面崩壊に関する一考察
   ○笹井友司（中電技術コンサルタント）松井章弘
9. 衛星 SAR データによる地盤の変位解析方法と結果例
   ○八野祐二（基礎地盤コンサルタンツ） 吉川猛
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
    ○木村隆行（エイト日本技術開発）