

9. 将来への課題

9.1 建築分野の地盤調査について思うこと

1. はじめに

2011 年の東北太平洋沖地震により、東京湾岸地域で広範囲に渡って液状化が発生し、戸建て住宅の被害が目撃された。また、この地震では震源から 500km 以上離れた首都圏の超高層ビルでも大きな揺れが観測され、高層建築物の耐震設計では長周期地震動の検討が義務づけられるようになった。以降、筆者自身も宅地の液状化や高層建築物等の耐震設計に関わる地盤調査・地盤設計の業務に携わる機会が多くなり、気づけば既に 10 年以上が経過している。およそ 30 年前に大学の土木工学科を卒業し、地質調査・建設コンサルタント業界で、土木系の土質調査やコンサルタント業務に従事してきた筆者にとって、建築分野の発注者や技術者との仕事は非常に新鮮であり、当初は同じ建設分野でありながら建築と土木との文化の違いを痛感したものである。また、最近では地盤品質判定士協議会での活動を通じて、建築分野の方々から地盤調査や基礎設計について多くのことを学ぶ機会にも恵まれている。ここでは、筆者がこれまでの建築関係の業務での経験をもとに、僭越ながら今後の建築分野の地盤調査の在り方について述べる。

2. 地盤分野における建築・土木の違い

建設とは、国語辞典（大辞泉）によれば「建物・施設・道路などを、新たに造ること」とあり、建物（建築物、人が活動しやすい空間）を造る建築と土木構造物（社会基盤、人の暮らし全体を良くするもの）を造る土木の両方を含む広い概念である。しかしながら、①民需が大半を占める建築と、官需が大半を占める土木、②建築士という法律で決められた資格が必要な建築と、技術者資格が必ずしも明確ではない土木など、同じ「建設」分野でありながら、両者は大学教育から実務の現場に至るまで長年棲み分けがなされてきたとされる¹⁾。構造物を支える「地盤・基礎の扱い」についても同様で、建築物と土木構造物ともに同じ地盤に基礎をおくものでありながら、同じ「基礎設計」であっても、設計の考え方や方法に違いがある。表-1 に地盤・基礎に関わる設計手法における違いを整理した。

土木分野では、基本的にオーダーメイドであり、公共の利益のために安全性や使用性の確保を目標としている。このため、計画対象範囲のみならず周辺地盤全体を視野に入れ、地震力のみならず多様な外力に対する安定性の確保が求められる。施設にもよるが、設計に必要な地盤条件を把握するために、数百 m～数 km の範囲でボーリング調査を主体とする地盤調査を実施することが多い。

一方、建築分野では建築基準法を遵守することが基本であり、敷地内を中心として人が活動しやすい空間（建物）をつくることを目標としている。このため、居住性や施工性に重点が置かれ、建物の沈下（特に、不同沈下）の防止や支持力確保が目的となる。特に、住宅の場合は、建物と土地は個人の資産であり、費用は個人負担であるため、居住性や快適性を損なわないコスト効率の高い設計が求められる。

表-1 地盤・基礎に関わる設計手法の比較

項目	土木分野	建築分野
基本	オーダーメイド (公共の利益)	法律(建築基準法)遵守
対象	橋梁・ダム・道路・港湾施設など	住宅・ビル・商業施設など
目的 (着眼点)	構造物と周辺地盤全体の安定を確保 (安定性, 耐久性, 防災・減災)	建物の沈下・不同沈下の防止・支持力確保 (居住性, 施工性, コスト)
主な基準	道路橋示方書, 港湾基準, ダム設計指針等の技術基準	建築基準法, 建築基礎構造設計指針(日本建築学会)等
設計手法	限界状態設計法 (性能設計)が主流	許容応力度設計法が中心 (限界状態設計も導入)
基礎形式	橋梁: 杭基礎・ケーソン, ダム: 岩盤基礎・グラウチング, 港湾: 鋼管杭・重力式など	直接基礎(布基礎・ベタ基礎), 杭基礎(既製杭・場所打ち杭), 地盤補強工法
地盤調査	ボーリング調査 原位置試験 物理探査・検層 室内土質試験	宅地: サウンディングが中心 高層: ボーリング調査(土木と同様)
影響範囲	広域的な地盤条件, 周辺への影響も評価	計画敷地範囲内での地盤条件

また、建築分野では、1995 年に発生した兵庫県南部地震による甚大な建物被害を契機に、2000 年に建築基準法が改正され、建物を建てる前に地盤調査を行うことが義務付けられた。地盤調査は、計画建物の敷地という限られた範囲で実施されることがほとんどである。高層建築物や免震建物の場合、地震動の地盤増幅を考慮した設計用入力地震動を設定し、時刻歴応答解析による耐震設計を行う必要があるため、土木構造物と同様に工学的基盤までの地盤状況を把握するためにボーリング調査が不可欠である。一方、戸建て住宅の場合は、計画建物四隅と中央でサウンディング(スクリーウエイト貫入試験(SWS)が主流)により数 m～10 m の深さまでの地盤を調査するケースが多い。また、「小規模建築物基礎設計指

針」(日本建築学会)では、圧密沈下量を含水比から計算する方法²⁾も推奨されている。個人が「憧れのマイホーム」を手に入れるための費用を捻出する立場で考えてみれば、できるだけコストを抑えた調査・設計手法に工夫されているとも言える。

なお、全国の建築系学科を有する大学の中でも基礎構造を専門とする先生が在籍する大学はわずかであり、講義を非常勤講師で補っているとしても、建築系学科では地盤工学・基礎構造をきちんと学んだ学生の数は少ないとされる³⁾。土木系技術者が構造・水理・地盤などの構造系から計画系まで「広く浅く(良い意味で)」学ぶのに対して、建築の構造設計者には地盤工学の知識を必要とする基礎設計が得意な人が少ないようである。このため、建築専門の地盤調査会社や地盤改良工事会社には、土木出身の技術者が多数在籍し、活躍している。

3. 宅地地盤調査の課題と今後の展望

前章で述べたように、建築と土木で地盤・基礎の扱い方に違いがあるものの、建築分野における地盤評価のニーズは、今後も高いと考えられる。特に、東日本大震災をはじめとする宅地被害の教訓を踏まえて創設された「地盤品質判定士」(2013年～)は、国土交通省の「公共工事に関する調査及び設計等の品質確保に資する技術者資格登録規定」において、「宅地防災分野」の唯一の資格として、2018年に登録資格認定を受けている。さらに、2021年の熱海市伊豆山の土石流災害を契機に大幅に改正された「宅地造成及び特定盛土等規制法」により、宅地分野における地盤評価の重要性と需要はますます高まると予想される。また、人口減少に伴い、建設分野に限らず人材不足が深刻化している中で、こうしたニーズに対応していくためには、従来の調査技術の継承に加え、新たな取組や技術開発も重要である。

戸建て住宅(宅地)の地盤調査は、建築分野の中でも特に調査費用や工期の制約を強く受けるため、簡便かつ低コストのSWSによる調査が主流となっている。しかし、SWSだけでは地盤の不均質性や深部地盤の強度を十分に把握できず、局所的な軟弱層や液状化リスクを見逃す可能性がある。また、SWSに限らず地盤調査結果の解釈には技術者の経験が大きく影響し、調査者や設計者の結果の解釈にばらつきが生じやすい。さらに、調査数が敷地内の数点に限られることが多く、不同沈下などの地盤リスクを完全に排除することは困難である。このように、宅地の地盤調査は「低コスト・短期間でいかに精度を確保するか」が最大の課題であり、今後は技術革新とデータ連携により、より安全で信頼性の高い調査体系へと進展が求められる。今後の展望としては、既存の調査技術の効果的な活用とDX推進による公開データの高度活用が必要である。

調査技術の効果的な活用としては、三成分コーン試験

(CPT)のように詳細な情報が得られる手法の採用や探査技術の併用により、SWS単独では得られない「より確からしい地盤情報」の取得が期待される。また、施工後においても、沈下センサーやIoT技術を活用したモニタリングにより長期的な地盤挙動を把握し、維持管理や災害対応へフィードバックする仕組みも可能となる。

DX推進としては、近隣地域の既存地盤データや地形図等の活用に加えDEMデータを用いた微地形解析⁵⁾を組み合わせることにより、地域スケールの地盤状況把握ができ、対象地の地盤特性の推定精度が向上する。特に、民間企業等が保有する膨大な地盤データが共有されることにより、3次元地層モデルの推定精度向上や現実的な地盤リスク評価が可能となるため、民間データの活用に向けた制度整備も重要である。更に、近年様々な分野で利用されているAIや機械学習を用いた地盤評価システムの導入により、評価結果のばらつき低減と生産性向上を図りつつ、より合理的かつ効率的な設計が可能である。

4. おわりに

本報告では、著者の経験と主観に基づき、建築分野(特に宅地)の地盤調査について現状、課題と今後の展望について述べた。ここで取り上げた宅地分野に限らず地盤調査業界を取り巻く社会的課題は年々多様化かつ複雑化しており、従来の地質調査技術のみでの解決は困難になりつつある。これらの課題を解決するためには、新技術や周辺技術の取り込みに加え、他産業との連携による事業領域の拡大、更には他業種との協調が重要である。このため、個々の技術者がこれまでの枠にとらわれず、他産業とも積極的に連携し、技術の取り込み、組合せ、融合による技術革新と事業領域の拡大が求められる。最後に、著者自身も統合物性モデル共同研究組合での活動を通じて得た成果を、様々な分野・事業領域へ適用することを提案するとともに、今後も自己研鑽を重ね技術を通じた社会貢献に努めていく所存である。

(執筆責任者 橋本和佳)

参考文献

- 1) 中島正愛：建築と土木の棲み分けと連携，土木学会誌 Vol.86 No.10，pp.26-29，2001.10.
- 2) 日本建築学会：小規模建築物基礎設計指針，pp.50-51，2008.5.
- 3) 小椋仁志：「土木と建築」，(社)地盤工学会関東支部ニューズレターNo.16，pp.1-2，2009.2.
- 4) 全国地質調査業協会連合会：新たな時代の地質調査業発展ビジョン，2021.12.
- 5) 上原大二郎ほか：収束度(Convergence Index)を利用する微地形表現図「CIマップ」の考案，第59回地盤工学研究発表会，23-13-1-06

9.2 調査に関わる技術者の育成について

1. はじめに

私が平成4年にこの業界に入り、はや30数年経過する。経験した業務は、地質調査をメインに、ため池設計、法面対策設計、橋梁補修設計等であり、いろいろなことを経験させていただいている。

業界ではまだまだ若輩者の私が、技術者の育成について語るのは非常に心苦しいが、機会をいただいたので以下に述べたいと思う。

2. 初期編

私が最初に入社した会社の大先輩から、「地質調査の担当者は酒が飲めたらOK!」と言われていた。最初はあまり飲めなかったことから、お酒が飲めるように鍛えられたことを覚えている。仕事が終わってから飲みに行くことが多く、出張ではタゴ飯と称する飲み会が多かった。したがって、本当にお酒が飲めないといけないんだ!と思っていた(今ではすっかり、飲酒の習慣がついてしまい、 γ -GPTはハイスコアを更新中で、飲酒量を減らさないといけない状況に追い込まれている。皆様も飲みすぎに注意しましょう)。もちろん、現在では飲酒の強要は許されないと思う。結局、一番重要なのは、お酒が飲めることではなく、コミュニケーションが大事なのではないかと思う次第である。地質調査ではボーリングの立会(位置の立会、検尺)とか、打合せ協議等、コミュニケーションが必要な業務であると考え、どの仕事でもコミュニケーションは大切ということを実感している。

私の新入社員時代では、打合せに連れていかれるが、最初は知識がないことから、打合せ時には何もしゃべれなかったことを覚えている(何を話しているのか?が本当にわからなかった)。しかし、業務を数年経験するうちに、ある程度話ができるようになった(話す内容がわかることと、度胸が出てくる)ので、これは経験するしかないと思っている(3~5年くらいはかかったような気がします)。また、社内勉強会の発表及び外部の発表会(学会開催の)に発表者として参加することも有意義であると考え(若手の時は特に)。

3. 中級編

地質調査を行う場所には、何らかの土木構造物(道路、橋梁、トンネル等)を構築される場合が多い。そこで、地質調査の技術者も土木構造物の設計時に、どのような問題が発生するため、どのような調査が必要なのか?とい

うことも把握しておくことが重要であると考えている。

これには2通りの意見があり、「基本的に、発注者(設計会社)から調査内容の指示が来るから、指示されたことだけ、やっておけばよい」という意見がある(基本的にはそうである。指示された調査に対して正しいデータを取得することは非常に大事である)。ただし、私は、「でも、地質調査の担当者といえども、調査内容を提案することも必要では?」と思っていた。私の主任時代には、1級土木施工管理技士の受験に制約がなかったので、勉強できたこと、資格が取得できたことは、土木工事を理解するうえで、非常に良かったと思っている。また、今後は、総合評価落札方式等、プロポーザル方式の入札に参加する機会も増加すると予想されることから、地質調査の人員が、設計するための調査提案をすることは重要であると考え(調査のポイントを抑えることは、よい地質調査の成果に繋がると思っている)。

資格の話がでたので、資格に関する話題を1つ。私が広島で地質調査課にいたとき、当時の技術部長と打合せに行く道中に、「地質調査の人間は、技術士をもっていないと、〇〇や~」と言われた。その時は「ほんとかな~?」と思いつつ、受験はしていました(それから、7年後に合格しました。技術士を持っていると発注者の聞く態度が違うな~と思うことはあった(気のせいかもしれませんが)。なお、技術者であれば、1回は、技術士の口頭試験の経験をされた方が良いと思う(あの体験はなかなかできない。私も、初回面接時はガッチガチに緊張した。今となってはいい思い出)。

4. 上級編

上級技術者となった段階では、複雑な地質条件(断層、地すべり、液状化など)への対応能力や、他分野との連携能力が求められる。特に近年では、UAVを活用した空中写真測量やレーザー測量による点群データの取得、CIM(Construction Information Modeling)及び3次元地質モデルの構築といったICT技術の導入が進んでおり、こうした最新技術を理解し、業務に取り入れていくことも育成の大きな柱となっている。

いろいろ書きましたが、技術者の育成には、OJT(On the Job Training)を中心とした現場経験の積み重ねが非常に重要である。経験豊富な先輩技術者とともに現場に赴き、実務を通じて技能を習得することが最も効果的であると考え。また、前述しているが、社内勉強会の開催や、(一社)中国地質調査業協会、(公社)地盤工学会などが主催する外部研修への参加、さらに地質調査技士、技術士(建設部門(土質及び基礎)、応用理学部門(地質))、RCCM(土質及び基礎部門、地質部門)といった資格取得

支援を通じて、知識を習得し、系統的な育成を行うことが望ましいと考えている。

5. おわりに

地質調査のボーリング調査は、ボーリング作業の担い手も減少傾向にあり、かつ、ボーリングの自動化も多少は進んでいるが、特定の土質に限定されており、非常に厳しい状況ではある。しかし、複数の調査方法(物理探査等、サウンディング)及び最新技術を駆使して、若手～ベテランの各々がステップアップしていけば、この難局は乗り越えられる！と思っている。

(執筆責任者 三宅雅生)

9.3 防災に関する思い

1. これまでの研究

日本列島では日常生活のすぐ隣に災害リスクが存在する。集中豪雨による土砂崩れ等は毎年のように各地で発生している。にも関わらず、どの斜面がどの程度危険であるかを発災前に予測し対策することは現状では難しい。地域のハザードマップは整備されたが斜面の安定度に関する情報は反映されていない。その理由は斜面全体の地形や地盤に関する情報（微地形分布、崩落土砂の層厚・土質特性、地下水分布等）が予め入手できていないためである。予防保全には多大なコストと時間を要するため災害が発生してから対応する手順とならざるを得ない。

これまで7年間に亘って土砂災害WGでは、岡山大学北側の半田山（平成30年度豪雨災害の被災斜面）を実験フィールドとして、予防保全を念頭にした危険斜面の抽出手法に関するの研究に取り組んできた。

- (1) LPデータによる詳細地形図の作成（傾斜量図）
- (2) 各種物理探査の適用（表面波探査、光ファイバー）
- (3) 軽量サウンディング試験機の開発（LWCPT）
- (4) 物理探査データと貫入抵抗値との相関性の検証
- (5) 補間技術を駆使した3次元地盤モデルの作成
- (6) 衛星データによる斜面モニタリングの可能性検討

斜面上に分布する崩落土砂の層厚や物性値を知る調査手法の開発、3次元地盤モデルによる安定度評価の実施、広域の斜面モニタリング手法の開発がテーマである。実現すれば斜面ごとの定量的な危険度区分や防災情報を適時提供するシステムの構築に繋がる。そして安定対策工を計画的に布設することで国土強靱化を推進できる。

2. 岡山県の立地

2.1 自然環境

岡山県の地形は北から南に向かって階段状に標高が低くなる様相を呈している。中国山地を發した3つの大きな河川は吉備高原に深い谷を刻んで南下し、瀬戸内海に流れ込んで沿岸に広い沖積平野を形成している。岡山県の地質は古生代から新生代の幅広い年代の堆積岩・火成岩・変成岩がモザイク状に分布している。沿岸部を中心にマサ土状を呈する花崗岩層が広く露呈している。沖積平野の深部には締まった砂礫層が厚く堆積している一方地表付近は軟弱な粘土・砂層に覆われている。県北東部には兵庫県から延びる山崎断層があるが隣県に比べて活断層の分布数は少ない。過去の県域での地震発生数も少なく震度4以上を観測した事例は稀である。岡山県の気

象は降雨量1mm未満の日数が全国1位で特に県南部の年間降水量は隣の山陰・四国方面に較べて雨が少ない。

2.2 社会環境

岡山県は瀬戸内海や河川などの水運に恵まれ古代から産業が盛んな地域の一つである。特に砂鉄を含むマサ土が県内で豊富に採れたことから「たたら製鉄」が永く営まれてきた。これに伴い大量の土砂が河川に流出した結果、多島海に土砂が堆積して陸続きになり沖積平野が徐々に拡大していった。多雨期には度々洪水が発生するようになり平野部ではその都度堤防を嵩上げたことで天井川となっていった。一方で遠浅になった沿岸部では干満差を利用した干拓が繰り返され行われ全国でも有数の広大なゼロメートル地帯が形成されていった。県南部の沖積平野は人の営みも加担して造られてきた土地であり、県人口の過半数はこのエリアで生活している。

2.3 新しい知見

近年、岡山市域を中心に重力探査による沖積平野部の地下構造調査が行われ、基盤を成す花崗岩層の上面に著しい起伏があることが報告された。中でも笹ヶ瀬川下流付近には東北東から西南西に伸びる溝状の窪みがあり、最大深度は370mに及ぶ大規模な構造であることが判明した。さらにこの溝状の窪みが検出された位置と昭和南海地震による損壊家屋の分布に有意な相関があり、基盤面の起伏の影響で地震波が焦点効果で集中し帯状の震災ゾーンが出現していた可能性があるとしている。そして差し迫った次の南海トラフ地震の際にも同様な現象が起こる恐れが高く、これらの影響を揺れやすさマップ等の災害情報に反映させるべきであると提言している。

3. 岡山県が抱える災害リスク

岡山県は3つの大きな災害リスクを抱えている。

(1) 雨に弱い斜面が多く存在する

他の地域に比べて過去に大きな雨に遭遇した履歴が少なく、多くの斜面上には崩落し得る土砂層が分布していると予想される。実験フィールドの半田山では勾配30度未満（急傾斜地崩壊危険区域の指定基準以下）の斜面で崩壊が発生しており、マサ土の地質特性も相まって豪雨による土砂災害が発生しやすい状況にある。

(2) 浸水しやすい低平地が広がる

天井川で河川勾配が小さい平野部では豪雨による洪水（特に内水氾濫）が発生しやすく、更に一度洪水が起こると長く浸水が続きやすい地形状況にある。平成30年度の実備水害では排水が追い付かず大きな被害を生じた。

また沿岸部の干拓地では地震による堤防の沈下も予想され津波・高潮による同様の浸水が懸念される。

(3) 地震動を増幅する軟弱地盤が分布する

軟弱地盤が分布する平野部では地震動の増幅による家屋の倒壊や道路・上下水道の寸断など広域で大きな被害が発生しやすい状況にある。昭和南海地震では震源から遠く離れた岡山県南の平野部で強振動が観測され多数の家屋倒壊や地盤の液状化の発生が記録されている。

4. 防災意識を変える ―岡山県も災害に弱い！―

岡山県は「晴れの国」と県民が自慢する気候穏やかな瀬戸内エリアの中程に位置している。北側と南側を高い山脈に遮られているためか大型台風も岡山に接近する頃には弱っているケースが多い。このようなことも重なり「岡山県は災害が少ない」との意識が多くの県民にある。ただ視点を変えれば、これまで大きな雨を経験することが無かっただけであり、地震災害に関してもここ数十年に限って大きな地震に遭遇せずに済んだ幸運に過ぎないと言える。生活上の災害体験の少なさが防災意識を低くしている主な原因である。

一方、昨今の「地球温暖化」の進行により気象環境が変化して毎年のようにどこかの地域で記録的な豪雨に見舞われるようになってきた。しかもその傾向は年々激化しているように見え岡山県も例外ではないと思われる。しかも近い将来、南海トラフ地震による広域震災に必ず遭遇することが判っている。前回の昭和南海地震の頃は県南の平野部の大半は農地であったが、戦後の高度成長期を経て郊外の斜面近くまで市街地が迫るようになり干拓地のゼロメートル地帯でも都市化が進行する状況になっている。次の南海トラフ地震では前回をはるかに上回る規模の震災となることは疑いがない。防災情報を早く正しく伝えるシステムの構築と共に、正しく理解し行動するための知識の普及への取組みが急務である。

今後の技術革新で、あらゆる場所の地形や地盤・地下水などに関するデータが詳細にリアルタイムに入手できるようになることをおおいに期待したい。そうなればハザードマップは日々更新されて生活の安全・安心のための礎となる。近未来には「自宅の裏山の安全予報」を毎朝の天気予報と同じように見る日が来るに違いない。

身近な真備町での大水害を目の当たりにしてからは岡山県でもようやく自分の住む地域の災害リスクに関心を持つ人が増えてきたように感じる。防災意識を変えていくためには、さまざまな災害の特徴や対処策・避難方法を住む人にわかりやすく知らせ、自分の地域が抱える防災上の弱点を正しく理解してもらうことが重要であり、その普及活動は建設コンサルタントに課せられた使命である。われわれは今後も科学技術力を駆使して100年計画で日本列島の強靱化を推進していかなければならな

い。住む人の安心・安全を高めて産業を振興することが地域の持続的な発展に繋がり、曳いては日本国の国際的な信頼度を高めることになると思っています。

(執筆責任者 與那城 稔)



写真-1 平成 30 年災害・半田山被災状況



写真-2 半田山実験フィールド

参考文献

- 1) 西村敬一：岡山平野における昭和南海地震による被害と要因の再検討―「ゆれやすさマップ」改善の試み―，岡山理科大学フロンティア理工学研究所研究報告，第 3 号，43―48，(2021)。
- 2) 西村敬一：岡山平野の 3 次元重力基盤構造と 1946 年昭和南海地震による被害分布，岡山理科大学技術科学研究所年報，第 35 号，45―57，(2017)
- 3) 西村敬一：地下構造からみた岡山平野の成り立ちと地震災害，岡山の自然と文化，第 38 号，73―122，(2019)
- 4) 鈴木茂之：岡山平野における最終氷期最盛期以降の海水準変動，岡山大学地球科学研究報告，Vol.11，No. 1，33―37，(2004)
- 5) 西村敬一：地盤工学会中国支部講演会発表資料，岡山平野の基盤構造からみた地震災害，(2010)。
- 6) 木村隆行：中国地質調査業協会岡山県支部技術資料，
- 7) 国土交通省中国地方整備局岡山河川事務所 HP：岡山平野ゼロメートル地帯，
<https://www.cgr.mlit.go.jp/okakawa/>

9.4 斜面崩壊に対しての原位置モニタリングの課題

1. はじめに

原位置の斜面のモニタリングと言っても、何のためにモニタリングするかの基本を考える必要がある。特に斜面に関しては、今まで、斜面の表面の地形や斜面内部の地層構成が未知の状況で斜面崩壊が生じたりして、時に斜面の下にある住居をまもるために、住居より上の斜面の表面の動きを「伸縮計」で計測したり、地すべりしている斜面の中にボーリング孔を設置して、その孔内に傾斜計を定期的に挿入して、孔内の傾斜を計測して、斜面内の変位が大きいすべり面の位置を計測してきた。

斜面内の地下水位の変化も計測してきた。また、斜面内の土壌水分量の変化も計測してきた。しかし、これらのモニタリング結果をどのように結合させて斜面の安定性を予測するかについては、まだまだ不可能な状況であると考えて、モニタリングの課題について論述する。

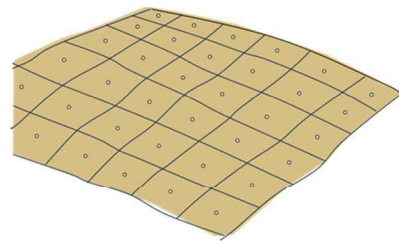


図-1 斜面表面での光ファイバーネットの設置

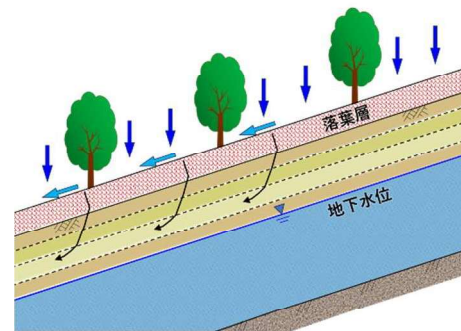


図-2 斜面内への降雨浸透状況

2. 斜面内のモニタリング

2.1 降雨量のモニタリング

気象庁の降雨データと実際に対象にしている樹林の中の降雨データとを比較すると、その降雨データは必ずしも一致していない。このことは、地質の3次元モデルであるデジタルツインに対しての降雨の正確な外力のデータがわからなくなる。しかし、ここで検討しようとしている目的は、対象としている斜面がどの程度の降雨によって斜面崩壊が生じるかを予測することである。

したがって、樹林のある斜面に対しては、樹林によって地表面に降る降雨量は、気象庁のデータを用いて斜面崩壊を予測する方が安全側の評価として考えられる。しかし、斜面内の地下の地層構造が可視化できると、樹林のある斜面内に水分計や地下水位系を設置して得た観測データと、数値解析より得た予測結果とが異なる場合が生じてくる。これに対しては、外力である降雨データが異なっていると判断するしかない。

樹林下の斜面表面に降る降雨量に対して正確なデータを得るには、斜面表面に密に雨量計を設置するしか対策がない。しかし、このような地表面の降雨分布を面的に計測することは現在では不可能である。

地表面下に光ファイバーケーブルをネット上に設置して、以下の事項を計測する。

- (i) 地表面に表流水が発生しているかどうか？
- (ii) 地表面に表流水が発生していれば、表流水の挙動を3次元の Navier-Stokes の方程式で数値解析をして、地表面と土中水の連成解析を実施する。
- (iii) 表流水の Navier-Stokes の3次元解析が困難であれば、

- 完全な Navier-Stokes の方程式が持つ非線形特性を線形化した方程式（疑似 Navier-Stokes 方程式）を用いて、地表面と地下水との挙動の連成解析を実施する。
- (iv) 地表面と地下水との連成解析は、Allan R. Freeze による Manning 則を用いた解析手法^{1), 2), 3)}に必要な地表面の粗度係数を計測する。
- (v) 斜面内の鉛直と水平方向の異方性の透水係数（飽和と不飽和領域での値）と原位置かボーリングコアを用いて計測する。
- (vi) 表流水が発生していない場合には、地表面からの蒸発散を求めることが困難であるため、地中の2点で間隙水圧と間隙空気圧を計測し、その間の鉛直方向の不飽和透水係数を求めて、地中の鉛直の2点間での浸透流量を計測する。
- (vii) この鉛直方向の浸透流量は、地下水への涵養流量であり、大きな水収支を論議する時の大切な流量である。
- (viii) しかし、斜面崩壊を予測するには、鉛直方向の多重の地層の浸透特性を計測する必要がある。

2.2 斜面の樹林の根茎による斜面崩壊への影響

斜面内にある樹林の根茎によって、斜面崩壊が起きにくくなっていることは、ある程度理解できる。しかし、根茎がどの程度斜面崩壊を防いでいるかを定量化することは、きわめて困難である。広葉樹林の根は、斜面の上方向に張っているが、針葉樹林では、斜面の下方向に

根を張っているので、木の下流の斜面が崩壊すると、針葉樹は下流に倒木して、下流に水によって流され、建物や橋を崩壊させたり、橋脚に集積してダムのようになり河川の上流の水位を上昇させて、橋脚より上流の堤防で越流が生じて、堤防決壊の原因になっていることがある。福井県の平成 16 年 7 月の足羽川の沢壊は、このような作用による決壊である。

平成 29 年 7 月の九州北部豪雨による福岡県朝倉市の水害は、流木が洪水と流動によって下流の家屋災害が増大したと考えられる。

林業は、大切な産業である。したがって、斜面崩壊しにくいように対策を事前しておくことはきわめて重要である。しかし、たとえこのような事前対策をしていない斜面であっても、斜面の樹林の育つ特性などを記録して、そのデータより、斜面下の地盤の水分特性や土砂特性を推定して、現有の木を伐採した後の植林をする際には、従来のように縦方向に針葉樹、広葉樹と分けるだけでなく、斜面全体を対象として、一つの縦方向でも、上下部において土石流等の土砂災害が生じて、針葉樹が下流の流木とならないように、針葉樹の下部に広葉樹を植林するような対策を実施する必要がある。斜面から流木の元になる木が出てこない植林対策を検討してほしい。

3. おわりに

斜面崩壊を予測するには、対象としている場の 3 次元モデルを構築する必要がある。しかし、斜面崩壊が生じないと斜面表面や内部のデータののための調査は実施されないのが現状である。

それからの出発ができるようになってきているので、これからは災害を起こす可能性のある斜面に関しては、LP や DAS によって斜面のモデルを作成するためのデータを蓄積してほしい。

(執筆責任者 西垣誠)

参考文献

- 1) Freeze, R.A. and J.A. Cherry : Groundwater, Prentice Hall, 181-186, 352-356, 540-541, 1979.
- 2) 西垣誠, 孫躍, 今井紀和 : 地表面要素を考慮した浸透流解析手法及び応用に関する検討, 日本地下水学会 2009 年春季講演会講演要旨, pp.140-145, 2009.5.
- 3) 西垣誠, 孫躍 : 地表面要素を考慮した浸透流解析手法及び応用に関する検討-越流を含む堤防浸透解析への応用-, 日本地下水学会 2010 年春季講演会講演要旨, pp.100-106, 2010.5. :

9.5 津波対策のエネルギー減衰

1. はじめに

2025 年は、1995 年に発生した阪神・淡路大震災が発生して 30 年になる。6,434 人の死者のうち 59%が 60 歳以上の高齢者であった。防ぐすべのない災害であったが、死者の多くは木造家屋が倒壊したために圧死した。

この災害後、建築基準が大きく改定されたが、現在でも古い規格の家に住んでいる国民が多く、2024 年の能登地震でも家屋の中で圧死している。

阪神・淡路大震災後、高速道路の建設も高架から地下へと変わっていった。しかし、地下に高速道路が建設されることによる地下水の流動阻害が生じないように、地下水の流動保全する書籍も出版された¹⁾。現在は、それに従って地中の道路を施工している。

2011 年 3 月 11 日の地震による津波は、久慈市の長内川を太平洋から川の上流へ遡上していった。それによって河川堤防を越流して河川範囲の住民に水害が生じた。この津波による水害は豪雨による水害と同じ現象であると考え、現状の河川を流れる可能な流量以上の水が動くために起こる現象である。このような水害を防止するには、河床に排水管を埋設しておき、遡上しようとする水を地中の大空洞に放流する対策を設置しておくことが可能ではないかと考えられる。

今から 30 年以内に南海トラフ地震が発生すると推定されている。この南海トラフ地震が生じると、高知県の黒潮町は、全国で最も高い 19m の津波が来ることになっている。6 階建のビルの屋上まで来る。土佐清水市と四万十市が 17m、高知市が 9m の高さまで来ると予測されている。この津波災害を少しでも小さくすることは考えられないのかと思う。2011 年 3 月 11 日に東北地方太平洋沖地震で地震が生じた。この地震は日本国内観測史上最大規模で、1900 年以後の世界の地震の中でも 4 番目の規模の地震だった。

津波は、海の深さが海岸線に近づくとなんて浅くなってくること、海底での摩擦で水面の方が容易に海水が移動できるために、海水面が上昇するために生じる現象である。

1m の津波に巻き込まれた人の死亡率は 100%である。この津波対策として一般に以下の対策が提案されている。

(1) 海岸線に津波避難タワーを設置する。

(2) 住民が高い位置に避難するルートを決めておく。

津波は、最も恐ろしい自然災害である。例えば、2011 年 3 月の東日本大震災による死者は 2 万 2228 人であり、その内、津波による死者は 15900 人で、行方不明者は 2520 人であった。したがって、津波によって 83%の人が、死者や行方不明者になっている。このように津波は、何万人という人間の命と財産を奪い取っている。

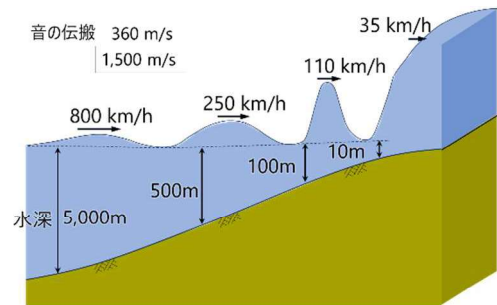


図-1 津波のスピード

人間の命については、一次的に避難をすれば救われるが、長年築いた財産を一瞬に奪ってしまうことは、人間の心の中のすべての希望を奪ってしまうと、人間を生きても希望を持たない人間にしてしまうほど、恐ろしい自然災害である。

したがって、津波が人間の近くに来るまでに、その大きな津波のエネルギーをどのように小さくするかに関する研究は、きわめて重要であると考えられる。以下に、2つの新しい津波対策を提案する。

2. 新しい津波対策

2.1 海中の人工島設置による対策

2011 年 3 月 11 日、宮城県の松島湾の奥にある松島町の瑞巖寺は、津波から救われた。湾の中の瑞巖寺がなぜ津波災害から守られたかを AI に尋ねると、「松島湾の地形と多くの島々が津波のエネルギーを分散したためだ」との答えが返ってきた。松島湾奥の被害が小さかったのは、松島湾の沖合に配列する島々が天然の津波防潮堤の役割を果たしたためと考えられている²⁾。すなわち、3 次元で流動している津波が多島の中を流動しているうちに、互いにぶつけ合うように移動すると、海岸線まで上陸する前にエネルギーが消滅するように人工島を配置する方法を開発すれば良いと考えられる。

それでは、図-2 に示すように日本中の海岸線に人工島を設置して津波のエネルギーを分散することが、津波対策の一つと考えられる。

2.2 津波と地下導水路トンネルによる対策

防潮堤が造れる所は、防潮堤を造れば良い。しかし、河川や、高知のように湾になっている所は、湾の奥に行くほど津波の高さが高くなり、最終的にはその津波が高知市を破壊してしまうことになっている。

このように湾内に侵入してくる津波の幅は、湾の幅である。最も高い高さが 10m とすると、問題は津波の波長がわかれば、津波の対応としてどれほどの容量の地下空洞施設が必要であるかを予測できる。津波が複数回、河川や湾内に遡上してくるのであれば、事前にそれだけの地下トンネルを掘削して対応しておけば可能かと考えている。

津波は洪水のように河川の中を遮なく流れているのではなく、海底地震や斜面崩壊のショックによる海水に加えられた力が周囲に伝搬する現象であるため、一過性の現象であると考えられる。したがって、この状態の津波のエネルギーを分散させる方法として、津波の来る民家の海岸線に津波のエネルギーを分散する海中トンネルを掘削しておく方法も考えられる。津波は複数回来るようであれば、複数の地下トンネルを事前に設置しておく、民家の前に来る津波のエネルギーは分散して、大切な人命や財産を失わないですむ可能性がある。

この対策は、「津波の落とし穴」のような対策である。どれだけの空洞を事前に掘削するかについての設計は、過去の津波の高さと幅のデータを調べれば予測がつくと考えられる。この予測に対して、どれくらいの安全率を見込むかについては、その時の政治が決める課題である。ちなみに首都圏外環放水路では、67 万 m^3 の空間を地下に設置している。関西の大和川地下放水路の総体積は 2600 万 m^3 である。これほど強大な地下空間を設置しなくても、第 1 波、第 2 波等の津波を地下の空間に落とし込めば、高知市の津波被害は軽減できるのではと考えられる。

3. おわりに

津波対策として、河川や湾のない所は高い防潮堤で対処するしかない。しかし、河川や湾内で可能な新しい 2 つの対策案を提示した。人々の命と財産を守るために、大河の近くの地下に放水路を設置しようとする計画と同じように、津波対策として地下空間を考えることも有効かと考えてほしい。

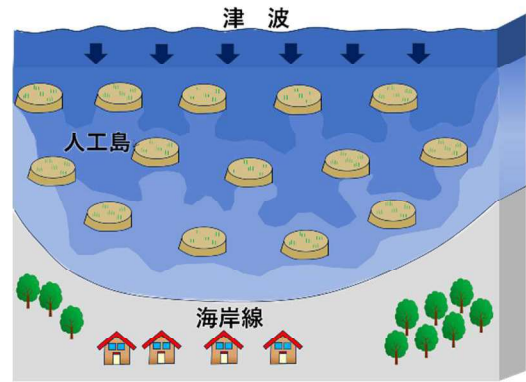


図-2 民家の前の海中の人工島

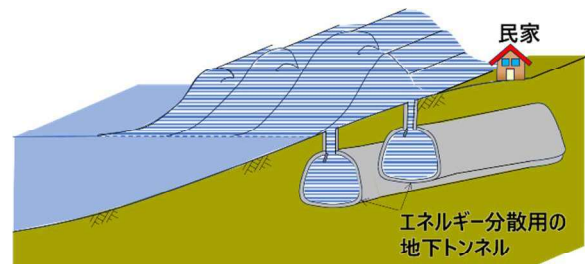


図-3 津波のエネルギー分散用地下トンネル

(執筆責任者 西垣誠)

参考文献

- 1) 地盤工学会編：地下水流動保全のための環境影響評価と対策 一調査・設計・施工から管理まで一, p.375, 2004.
- 2) 長谷川修一, Ranjan Kumar Dahal, 野々村敦子, 鏡原和也, : “なぜ松島湾奥の津波被害が小さく、湾口の島々の岩盤崩壊が多発したのか?”, 日本応用地質学会中国四国支部研究発表会発表論文集, 2011, pp.27-32.

9.6 地下水位低下工法による液状化対策の課題とその回復方法

1. はじめに

液状化が起こる所は、ハザードマップで示されている。しかし、そこに対しての液状化対策は、災害が起こらないと対策されないのが現状である。また、過去に液状化が起こった所でも、再び液状化が発生することは、わかってきたので、いっそう確実な液状化対策が必要である。液状化対策のために3つの方法が考えられるが、ここでは、地下水位低下工法について検討する。

- (1) 砂地盤を締め固める。液状化しないように地盤内にセメントミルク等を注入して、液状化する砂地盤を拘束する対策。
- (2) 液状化する地域の地下水位を恒常的に低下する地下水位低下工法を実施する。
- (3) 液状化する砂を固化する。

2. 地下水位低下工法

地下水位低下工法による対策では、以下の事項が課題になる。

- (a) 止水材料の耐久性
- (b) 降雨の浸透流の制御
- (c) 揚水するための電気エネルギー

液状化対策をしたい地域を効率よく地下水位を低下するために、地下水を低下したい領域に外部から地下水が流入しないように砂地盤に鉛直に止水鋼矢板等を打設して、止水地域を限定する工法が実施されている。

対象領域内の地下水位を低下させるため恒常的に地下水を揚水するため、その揚水ポンプの電気代が必要になってくる。

3. 周囲の止水材料の耐久性

3.1 ジオポリマー材による止水壁

ここでの課題は、地下の止水施設の耐久性である。地中の金属物は60年近くで劣化してくる。矢板の腐食によって、地下の止水が困難になってくることは中間報告で指摘しているので²⁾、ここでは耐久性のある止水工法について提案する。

たとえば、周囲の止水材料をジオポリマーコンクリートを用いたTDR工法にする。ジオポリマーコンクリートの問題は、水ガラスの材料費(1,500円/kg)である。ケイ酸ソーダ水をいかに安価に製造するかが、大課題になっている。

古代は火山灰と塩水と生石灰でジオポリマーコンクリートが製造されている。日本の火山の火山灰は国立公園内にあり掘り出すことができないが、伊豆大島の三原山の火山灰は民地にもあり、古い火山灰は、降雨によって重金属がリーチングされているため、ジオポリマー材に使用することは可能である²⁾。火山灰の代わりとしては、ゴミスラグや石灰灰でも作成できる。しかし、これらのスラグをジオポリマーにするには、ケイ酸ソーダが必要になる。

また、TDR工法は、鋼矢板打設より大きな工事になるので、もう少しコンパクトなTDR法の開発も必要である。

3.2 ベントナイトによる液状化防止対策地域外周の止水壁の構築

地震時の砂地盤の液状化対策として、液状化対象地区の地下水位を低下させる工法は、きわめて安価な工法である。地下水位低下対象地区に外部からの地下水が混入しないように対象地区に矢板を打設して側方からの地下水の浸入を防止する工法が実施されている。しかし、矢板は50年で確実に地中構造物としての耐久性に問題が出てくる。

液状化が生じる砂地盤に「ベントナイトとアルコールとの懸濁液」を注入して、注入液の塩水濃度が周囲の淡水の地下水により希釈されると、ベントナイトが膨潤して止水性を持った縦の層が形成される。この縦の止水層は、地震が来ても壊れない可動式のベントナイトと砂の混合壁になる。このようなベントナイトと砂の止水層は、地上に植物のない所ではベントナイトと塩水（濃度2%程度）の懸濁液でも構築できる³⁾。

液状化が起きやすい砂層は、密度が小さい砂層である。したがって、ベントナイト懸濁液を深度15~20mまで注入することは可能であるので、側方の縦の止水壁が施工できる。ただし、地下水の流れがある所では、注入領域をケミカルな溶液注入によって一次的に止水しておく必要がある。

ベントナイト注入による止水壁は、地下水中では、亀裂を発生しない壁であるが、壁の外と内の水位（水圧）が異なるためベントナイトが膨潤しているが細粒土が移動する可能性があるため、止水壁内外に光ファイバセンサーを設置して、ベントナイト壁のひずみを計測しておくことで、止水壁の健全性を定期的にモニタリングできる。

4. 降雨の地下水への浸透防止対策法

4.1 一般家屋での植栽域の課題

砂地盤で地下水位が高い所では、地震時に液状化しやすいと考えられている。したがって、戸建てのある砂地盤の周囲に地下水が流入して来ないように止水して、止水した領域内の地下水を揚水して地下水位低下工法による液状化対策がなされている。

このような地下水位低下工法で課題となるのは、止水領域内への降雨の浸透によって地下水位が一次的に上昇する現象である。一次的であれ地下水位が上昇している時に地震が来ると、砂地盤は液状化する。

一般に、地表面からの降雨の浸透による地下水位の上昇を軽減するために地表をアスファルト舗装することによる止水対策がなされている。しかし、図-1のように家屋のある所以外の地表をアスファルト舗装することは、地表に植物がなくなることになり、生活環境としては、きわめて殺風景な状況になる。しかし、植栽のある所から降雨が浸透し、地下水位が上昇してくる。このような状況に対応する方法として、植栽の上部の土層に降雨が浸透しにくい層を構築することにより、どの程度、降雨の地下水への浸透が減少するかについて検討した結果を論述する。

ここで、戸建ての家屋の周囲はコンクリートかアスファルト等により表面遮水されている状況であると仮定すると、降雨が地下に浸透してくるのは植栽域だけに限定される。この状況で植栽域の表面に遮水シートを設置してしまうと、植物は成長しなくなる。したがってある程度の水は地下に浸透させることを考えると、土質性遮水層を地表面に設置する方法しかないと考えられる。

一般に土質遮水は粘土等の難透水性の土層を地表に敷設する工法で、図-2 に示すように土層厚が 50 cm 以上で鉛直透水係数が $1.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ が基準となっている。しかし、このような難透水層を敷設することは、すでに植栽がある所ではきわめて困難である。

ここでは、既存の植栽がある所でいかに降雨の地下水への浸透を減少させるかについて検討する。

4.2 植栽域を対象とした降雨浸透水流量の低減化工法

地表面層に降雨の止水層を構成する方法は、以下の手順で行う。

- (1) 植栽域の表面からの降雨の浸透を減少させるため、地表面に薄い「アルコールのベントナイト懸濁液」を散布して、表面からベントナイト懸濁液を植栽の土の中に浸透させていく。
- (2) アルコール中ではベントナイトは膨潤せず団粒化しないので、砂質土の中には懸濁液として浸透していく。ベントナイト懸濁液が地表面から浸透した後、真水を散水すると、アルコール濃度が薄くなり、浸潤した領域の中でベントナイトが膨潤して、膨潤層の表層透水係数が低下してくる。

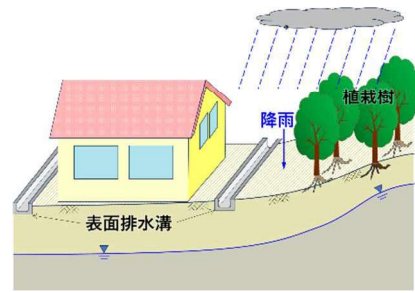


図-1 戸建ての家屋の例

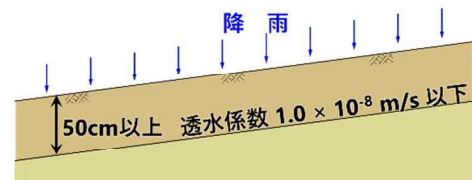


図-2 土質遮水工の基準の例

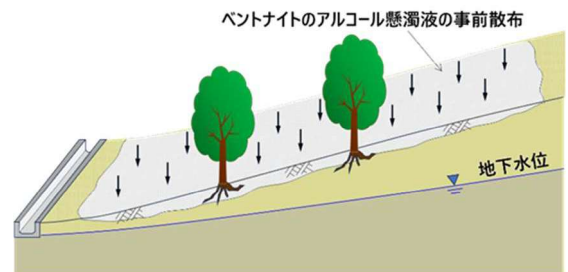


図-3 植栽地における難透水層の形成法

- (3) ここで使用するベントナイトは、米国ワイオミング産のベントナイトの粒径は $3.0 \sim 6.0 \mu\text{m}$ 程度であり、関東の江戸川層や成田砂のような粒径が $180 \mu\text{m}$ 程度の砂の中にも浸透注入することができる。ここでは、ベントナイトのアルコール懸濁液を提案したが、縦の止水壁と同様にベントナイトの薄い塩水懸濁液を用いても、降水の地中への浸透を減少させることが可能である。しかし、塩水による植物の生長への影響は、別途事前に検討しておく必要がある。
- (4) 降雨の鉛直への浸透流量を制御する前と後の地中の水分量の変化をモニタリングして、浸透水が少ないようであれば、それぞれの植物の根に直接ドリッピングーションを実施して、植物の成長をコントロールするシステムを構築する。

4.3 砂質地盤内の地下水位低下対策

地盤内が飽和状態であると、地震時に地盤は液状化する。したがって、常時、砂質地盤内の地下水位の低下量は $3 \sim 4 \text{ m}$ といわれている。

この値は、豪雨があっても維持する必要がある。したがって、変動する降雨に対して地下水位を計測して、常に水位の低下能力をコントロールできるシステムでないと、絶対的な液状化対策とは断言できないと考えられる。

豪雨で地下水位が上昇した時に地震がきて液状化現象が生じることも考えて、複合事象の対策を考えておく必要がある。そのためには、地下水位を低下させる揚水ポンプもサーボポンプを用いる必要がある。地下水位がある高さになると作動する普通の揚水ポンプでは、将来の気象予測に対応して地下水位を制御することは困難である。周囲の地下水位の変化により、ポンプの回転運動を制御するシステムは、砂地盤に対して過度の動水勾配を発生しないと考えられる。

地下水位を低下させる地域の地下水が十分に低下していることを確認するためには、当然、十分な観測井を設置して、降雨強度と地下水の関係データを収集して、揚水ポンプによる揚水流量をコントロールしていく必要がある。

4.4 恒久的な地下水低下システムによる地盤沈下に対する対策

地下水位を恒久的に一定以下に低下させることによって周囲の地盤にどのような影響があるかについては、対策を実施する前に十分に検討しておく必要がある。

今日では、3次元での砂質層、粘土層のある地盤において、砂質層の地下水位を低下させることが原因となつてどの程度の地盤沈下が生じるかの予測は可能になっているので⁴⁾、対策を講じる前に地盤内の粘土層の圧密特性を調査して、不均質に生じる地盤沈下を予測する必要がある。

もし、地下水位低下工法による液状化対策によって部分的に地盤沈下が生じるのであれば、その粘土層の地盤改良を実施して、地下水位低下工法を実施する必要がある。

4.5 恒久的な地下水位低下システムの維持管理

地下水位低下システムを恒久的に維持管理するには、排水システムの見詰まり対策がいちばん大切な課題になる。排水システムにどのような見詰まりが生じるかを整理すると、以下になる。

- (a) 揚水ポンプ周囲の見詰まり
- (b) 広域の排水管の見詰まり
- (c) 砂質層内の見詰まり

(a) 揚水ポンプ周囲の見詰まり

揚水ポンプ周囲のフィルター等の見詰まりは、恒久的にポンプを作動していると生じる一般的な見詰まり現象であるので、定期的に揚水システムの洗浄を実施する必要がある。また、揚水用の井戸内の洗浄も必要である。

ここで大きな課題は、洗浄等のメンテナンスを実施している時に地震が発生した場合の対策を、事前に検討しておく必要がある。いかにして地下水位を回復させないでシステムを洗浄するかは、大きな課題である。本システムを洗浄するために予備のポンプや揚水井戸を設置しておく必要性を検討する必要がある。

(b) 広域の排水管の見詰まり

排水管の見詰まり対策はきわめて重要である。地下水位を低下させるための鉛直井戸や水平井戸のフィルターの見詰まりは、「必ず起こる」現象である。したがって、排水管の中にフィルターを洗浄するための細管を、排水管の設置時に設置しておく必要がある。洗浄の際にこの細管からナノバブルの水を注入して、ナノバブルによるフィルターの見詰まり物質を洗浄する能力を利用する洗浄は、高圧ジェット等による洗浄より効果がある技術が開発されている⁵⁾ので、フィルターを定期的に洗浄する。

洗浄効果の確認は、排水管の地山部と排水管内の細管内との水圧差から判定できる。

(c) 砂質層内の見詰まり

砂質層内の地下水位を恒常的に低下させるには、砂質地盤内の土粒子をできるだけ移動させないように、低い動水勾配で地下水位を排水する必要がある。高い動水勾配で揚水すると、砂質層内の微細粒子が地下水とともに移動する現象（suffusion 現象、internal erosion 現象）が生じる。この時に排水管のスクリーンのサイズは、地山の砂質層の土の粒度分布を考慮して選定する必要がある。もし、選択に誤りがあると、揚水することによって、地盤の骨格を構成している土粒子（一般に D_{85} ）が流亡してしまうと、地盤陥没が生じることがある。

また、この粒子移動により砂質層内で見詰まりが生じてしまうと、砂質層内で部分的に透水係数が小さくなってしまうことがある。この現象を回避するには、内部浸食を起こさない動水勾配で、排水管のピッチを設計しておく必要がある。また、恒久的な地下水位を低下させる前に、長期の段階揚水試験を実施して地盤内の細粒土を取り除く必要がある。

5. おわりに

本研究では、地震による戸建ての液状化対策として、広域の土地の地下の地下水を低下させる際の手法について検討した。地下水を恒常的に揚水して排水するのであれば、太陽光発電によるエネルギーを用いれば良いが、そのエネルギーの蓄電システムが必要になる。しかし、対象地区の地下水への涵養流量を少なくしておく、太陽光のエネルギーがなくなる夜間は揚水をしなくても、地下水の上昇がゆっくりであれば、揚水を停止しておいても大丈夫な管理ができる可能性があると考えている。

地下水位のモニタリングシステム屋、鉛直の止水壁の止水効果のモニタリングに対しては、これからは DAS によって実施していく必要がある。

（執筆責任者 西垣誠）

参考文献

- 1) 西垣誠：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

- 2022 年研究発表会講演集,p.6, 2022.
- 2) 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, 第 57 回地盤工学研究発表会, 2022.
 - 3) 西垣誠, 小松満, 見掛信一郎, 田岡洋, 中島朋宏: エタノールを用いたベントナイトスラリーの亀裂性岩盤へのグラウト効果, 土木学会論文集, No. 764/III-67, pp.221-233, 2004. 6.
 - 4) 入江彰: トンネル掘削における地盤環境保全に関する研究, 岡山大学大学院 博士論文, 2006
 - 5) 科野健三, 保志篤, 熊谷茂一, 川俣和久, 西垣誠: マイクロ・ナノバブルによる集水井横ボーリング集水管外閉塞物除去に関する研究, 地盤工学ジャーナル, 19 巻 3 号, p.285-303, 2024.

9.7 地下空洞探査

1. はじめに

2025 年 1 月 28 日 9:40 頃、埼玉県八潮市の中央一丁目交差点で道路陥没事故が発生した。大型トラック 1 台が陥没する穴ができ（直径 5m、深さ 10m 程度）、トラックが転落した。原因は、計 4.75m の地下の下水道管の破損が引き起こした事故である。この陥没によって、隣接する地下にある雨水管が破損して、川の水が逆流し、道路陥没が拡大して、トラックの運転手の救助ができず、行方不明のまま埋め戻された。その後、孔の直径は 40m を超えるまで拡大した。下水道管が下水からの硫化水素が空気に混入して硫酸になり、コンクリート管を溶解したことが原因になっている。

陥没した地域は、近くを流れる中川の低地で、暑さが 45m 程度ある沖積層である。地下水は、地表から -1m で、N 値は 4 以下の軟弱地盤が GL-32m まで連続している所である。

下水道は 5 年に 1 回以上、点検することが下水道法で定められている。どのような点検なのかがよくわからない。2025 年 2 月 6 日にも、名古屋市緑区で市道が陥没して乗用車が動けなくなった事故が生じた。北海道の下水道管は全長約 33,000 km で、50 年経過管が 4,200 km もあるといわれている。しかし、その対策は人員不足や財政難で対応できていないのが現状である。このように対策が必要な下水道は 50 万 km あるという。これに対して、今後どのようにあるべきかを論述する。

2. 土地の陥没を起こさない方法

土地の陥没は、土地の下の土がどこかに流亡するためである。すなわち、土が地下水の動きによって移動するためである。このような陥没を起こさないようにするために現状では、地中に構造物を設置した後、埋め戻し材に砂を用いる。しかし、砂では十分な締固めができない。また、地盤内に空洞があると容易に地下水と共に流動してしまう。不飽和領域では砂は動きにくいですが、地下水位が上昇してくると、砂は水締めされるため体積が減少し、砂層の上部に空洞ができる。しかし、この現象はコラプス現象で、この地下水の上下が繰り返されると細粒土が移動して、陥没は生じる。

一般に、地上の陥没事象は、地下水が上下する毎に地下の土砂が移動するために生じる。地下に人工的な構造物があり、その中に地下水と共に移動した土砂があると、いつか地下に空洞ができ、繰り返し生じる地下水の上下運動によってその空洞の体積が大きくなって、地表に陥没が生じる。

1998 年に岡山県中部の高梁市の旧備中町平川郷地区の陥没事象も、地下の基岩の石灰岩の溶食によって生じたものである。地下水が毎年 10m 以上上下している現象が生じており、それが原因で石灰岩上部の土砂が溶食の穴（ドリネ）の中に流亡する現象が陥没の原因として、対策をした。

河川を 3 面張りにして河川の水が地下に流入しないようにした。地下水位が大きく変状する原因として、水田の利用も関係していることを示した。また、地下の状況を探査するため、地中の石灰岩の溶食の頭部の分布調査を実施した。これらの結果として、ドリネの上にある数件の家屋の移動だけで、全住民の転居はなかった。転居しない家屋の住民には、地盤陥没が生じても寝室には倒れてきて圧迫死になるような家具を置かないよう注意した。その後、この地域では大きな陥没が生じていない。

土地の陥没を起こさない方法は、地下水位を大きく上下させないようにすることが大切だと判断した。しかし、自然の地下の変状はいつまでも続いている。それに対して現地では、何もモニタリングしていないのが心配である。

3. 明石市の人工海浜の陥没による子供の死亡事故

2001 年 12 月 30 日、明石市の大蔵海岸の人工砂浜で発生した陥没事故、明石大蔵海岸砂浜陥没事故が発生した。この砂浜を 4 歳の女兒が歩いていた時に陥没に吸い込まれて生き埋めになり、2002 年 5 月に死亡した。

この事故で、国と市の管理責任が問われ、担当者 4 人が有罪判決を受けた。事故前に 1999 年と 2000 年に多数の陥没が発生していたが、管理者は、その記録も行わず、国への報告もしていなかった。確かに 20 年も前になるこの時にも、人工砂浜の下に空洞があることを、上から探知する技術がなかった。しかし、砂浜で少女が死亡する前に、何度か陥没が生じていた。それに対して、何も対策をせず放置したことによる判決かもしれない。

地中の空洞を探知する技術がないのなら、毎朝、砂浜に海水を充分放水していれば、陥没する場所を探知できたのではないかと考えられる。しかし、誰も実施していなかった。詳細は各自調べてほしい。

4. 現状の地下空洞探査技術の限界と新しい探査法

電磁波探査では、地表から 3m 程度しかわからない。しかも、地下水下で何が起きているかが探査できない。しかし、下水道の上部に DAS を設置しておくと、下水道

のどこに穴があり、その穴に砂が流亡している現象が確認できる可能性がある。

- (1) 埋め戻しを砂で実施する時は、十分水を入れて、十分に水締めを実施する。また、地下構造物の劣化による空洞が生じると、砂による埋め戻しでは、簡単に構造物の中に砂が流動してしまう。今後は、図-1 に示すように、地下構造物と埋め戻し材の間に耐久性のある材料でラップしておく、埋め戻し材である砂が構造物の中に流亡しなくなると考えられる。当然のことであるが、地中構造物に周囲の地下水が漏洩していないかどうかのモニタリングを、小型ドローン等で常に調査する必要がある。
- (2) 軟弱地盤上の下水管は、地震等によって変位するので、その変位箇所が下水管の継手部の止水が劣化して下水管内に地下水が流入して、継手部の砂が下水管内に流亡して、継手部の上部に空洞が生じる。このような地下での変状を DAS は探査できる。
- (3) この空洞が経年的に大きく成長して道路下に空洞が生じる状況も、DAS によってリアルタイムでモニタリングができる。
- (4) 現状の探査ではこの空洞の探査は、空洞のトップが地表から 3m 程度にまで成長しないと、空洞の存在を探知できない。しかし、電磁波では地下水位が高い所では探知が困難である。
- (5) この道路内の地層の変化をリアルタイムで探知するため、地下構造物の上部の地層に DAS を設置して、下部の砂層の密度変化をリアルタイムで探査して、地中の空洞探知を実施するしか方法がないと考えられる。

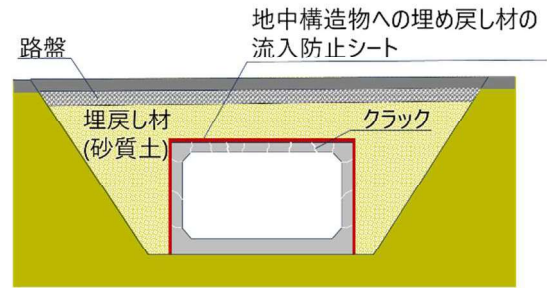


図-1 地中構造物への埋め戻し材の流入防止

- (6) 地中内の空洞があるかないかを探知する簡単な方法は、地表から水を注入して、道路下を飽和にして空洞の成長を早くして探知する方法も提案できる。しかし、それは空洞が生じてからの探査である。

5. 地下埋設工事の改善

現状の地下埋設工事では、地下構造物の耐久性は検討しているが、構造物の劣化のモニタリングについては検討されていない。当然であるが、自然の地盤内の土地の地下構造の変化について何もモニタリングしていない。地下水位の上下のデータすらモニタリングしていない。

これからは、形のある物は必ず劣化すると考え、地下に埋設された物こそ綿密にモニタリングする社会を確立してほしい。

(執筆責任者 西垣誠)

9.8 地盤陥没と地下水

1. はじめに

地下で地下水によって何が起きているのかが良くわからない。特に、ドレーンシステムが目詰まりにより、地下水位が上昇して盛土材料が飽和になり、地下水が上昇して盛土内の細粒土が移動し、下水管の損傷穴に土砂が移動して、それを繰り返していると、地盤内の空洞が大きくなり地盤陥没が生じる。

埼玉県八潮市のようなことが起こらないようにする対策として以下の事項が考えられる。

- (1) 地盤の支持率が低い所は、下水道管の基礎を、ジオポリマー材で地盤改良をしておく。
- (2) 下水道管を亜硫酸ガス等で劣化しないように、下水道管内の換気を行い、ガス濃度を低下する。
- (3) 下水道管の周囲の埋土は、砂だけではなく礫を充分に含んだ砂質土で、十分に締固めて施工する。下水道管に亀裂や穴ができて、その穴に砂質土が流入しないように、下水道管の周囲を耐久性のある不織布で覆って、下水道管内への砂の流亡を防ぐ。それによって下水道上の空洞の発生を防ぐことができる。
- (4) 下水道管の上部の埋め戻し土内に陥没するような空洞が生じていないかどうかを、DAS を用いてリアルタイムで、埋め戻し土内の S 波の伝播速度の変化をモニタリングする。道路の地表面の微小な変状探査は、赤外線サーモグラフィで計測することも可能である。
- (5) 今後は下水道管を埋敷設すると同時に、DAS によって、その上部の S 波の伝播速度をリアルタイムで計測することによって下水道施設の周囲の地盤のゆるみ度をモニタリングすることができる。
- (6) 飽和領域内の埋め戻し土内の土の密度変化を探査するには、音響トモグラフィ探査も適用できる可能性がある。この技術は、「飽和領域」での地層探査に使われている。
- (7) 水平方向の音響トモグラフィ探査手法は、米国マイアミ大学の山本先生が、潜水艦での通信（水中音響通信）システムを地中内の地層の診断システムとして開発された技術である¹⁾。ボーリング孔内で一定の周波数の音を発信して、周囲のボーリング孔内にレーザーを深さ方向に設置して、地層内の地盤の密度分布を計測する手法である。
- (8) 下水道管の上部の埋め戻し土内の地層の水平的な密度変化を調査する方法は、下水道管内の健全度を調査する「マンホール管間」において音響トモグラフィで調査すると、精度の高い地盤内の密度変化の計測が可能になると考えられる。ただ、水深が浅い所は困難である。
- (9) 自然の地盤内は経年的に変化している。プレートの中にある日本列島は、経年的に隆起や沈降、そして、水平的な地表面の座標も移動をしているので、その変動も考慮する必要がある。
- (10) 豪雨があると、地表面もガリー浸食され、地形が変化している。当然のことであるが、地中も浸透水の流動によって、内部浸食が起こって、各地層内の透水係数も時々刻々と変化している。いわんや、人工の土構造物は浸透水によってどんどん内部浸食が生じて、空洞が発展する可能性がある。このような地表面の変化は、国土地理院によって、常に計測されている。しかし、地盤内の土中水による経年的な変化を計測するモニタリング網は、わが国ではまだなされていない。DAS のシステム網を国土全体に設置すると、国土の地盤内の変動や密度等の変化がリアルタイムでモニタリングすることが可能である。
- (11) DAS による地中のモニタリングは、国道であればビデオカメラのデータ等を送信するために通信用の光ファイバーが日本中に既に張り巡らせている。この通信用の光ファイバーケーブルの「つかっていないケーブル」（ダークファイバー）を用いて道路の基礎地盤内を探索することは可能である。
- (12) 計測したデータをコンピュータの中に蓄積していくことによって、従来のような地層のリスクを考えなくても、将来の変状が推定できる。
- (13) 地盤内の状況を現状でも 0.4m ピッチで可視化できる。1 日でも早くこの技術を国土全体に拡張してほしい。
- (14) 現在の日本では老人の人口がどんどん増え、自分で自分の命を守る行動ができなくなっている。一方、異常気象によって土砂災害の規模がどんどん大きくなっているので、事前対策を検討するための荷重のデータをどうするかが定まらない状況である。したがって、十分に余裕のある事前対策を検討して、実施する必要がある。

2. 対策したところのモニタリング

- (1) これに対処するためには、災害が起こる前に災害の対策をした所が、豪雨時にどのような挙動をしているかをモニタリングして、そのデータから対策が十分であったかどうかと判断するデータの集録が必要と考えられる。ここでは、災害対策も当然であるが、その対策が時々刻々と劣化していくので、その状況をモニタリングして、次なる再対策ができるような社会になっていきたいものである。

- (2) しかし、今日では対策のために、打設した鋼矢板の腐食等のモニタリングはなされていない。今日では、水道管の腐食や地震による水道管の破損等が、能登半島地震後、大きな社会問題になっている。
- (3) 広島市内で、洪水時の河川水の一時貯蔵のための地下施設のためのシールド工事で、上部の水道施設の影響によってシールド工法による工事が止まっているような事故が生じている。
- (4) 60 年近い地中の水道施設の劣化は、30 年前の阪神淡路地震において地下の水道管の影響がわかっていたが、その後対策をしているが、それがまだ終わっていないのが現状である。また、新しく設置した水道管に対しても、その劣化度をモニタリングするシステムが導入されていないのも現状である。
- (5) 鉄構造物が劣化することはわかっているのに、一日でも早く、その劣化度をモニタリングするシステムを確立する必要がある。そのシステムとして DAS が現状、注目されている。

3. おわりに

地下水のある地中では、地表より劣化が遅いかもしれないが、地下水の水質が悪い所では、地表より劣化が早い所もあると考え、一日でも早く DAS によって劣化度をモニタリングするシステムを開発して、日本中に DAS のネットワークを構築することを検討してほしい。

地盤陥没は道路だけではなく鉄道盛土でも生じている。起こっている現象は同じであるので、鉄道のローカル線にも DAS を設置してほしい。また、モニタリングだけでなく陥没を生じさせない対策を実施して、その将来の劣化もモニタリングして、再対策を実施することが普通となるシステムを確立してほしい。

(執筆責任者 西垣誠)

参考文献

- 1) 榑原淳一，高周波数の弾性波の速度と減衰率を用いた弾性波トモグラフィ地盤調査手法に関する研究，早稲田大学大学院創造理工学研究科博士論文，2013.

9.9 山林火災と土砂災害対策

1. はじめに

2025 年 2 月 26 日に岩手県大船渡市で山林火災が発生し、3 月 9 日に鎮圧宣言があったが、4 月 9 日に沈下宣言をした。類焼面積は 2,900 ha であった。過去最大規模の山林火災である。被害は死者 1 名でている。住宅被害は、住家 102 棟で、うち全壊 76 棟であった。非住家 108 棟（うち全壊 95 棟）も被害を受けている¹⁾。

また、2025 年 3 月 23 日には、愛媛県今治市、西条市でも消失面積約 442 ha の山林火災が発生し、3 月 31 日に鎮圧宣言した。さらに 3 月 20 日に岡山市で、焼失面積 565 ha の山林火災が発生し、3 月 28 日に鎮圧宣言をした。

山林火災の消火がこんなに長期間続くのは、山間部に消防車や消防隊員が入りにくく、消火活動が難航するためだと言われている。また、防災ヘリによる空からのサーモグラフィーでの熱源探査技術では、まだ詳細な確認が困難であるため、人間の目視での最終安全確認が必要であることにもよる。

山林火災の消火では、消火するための水の確保も大変である。防災ヘリにより空中からの消火もされているが、夜間は稼働できないため、その間に火事は拡大していく状況であった。

2025 年 2 月 2 日に発生したロサンゼルス²⁾の山林火災でも防災ヘリが活躍していたが、鎮圧まで 24 日かかり、29 人の死者がでている。消失面積は 200km² (2 万 ha) 以上で、東京都 23 区の 3 分の 1 の面積の土地が焼失したことになる。世界最強の軍隊を持っている米国でも、30 人近い死者を出して 1 か月近く消火できなかったことに対して、現有の消火施設では、十分な水量と水圧での消火ができなかったと説明している。

2025 年 3 月 21 日に韓国南東部江原道で山林火災が発生し、焼失面積は 4,800 ha で、30 人死亡し、3 月 30 日に鎮圧した。韓国では毎年大規模な山火事が繰り返されて、過去に 2022 年の太白山脈周辺や被害海岸地域で、大きな山林火災の被害を受けている。韓国では、「山林火災はもう日常」と言われている。2025 年 8 月には、乾燥した日が続く中で、スペイン、ポルトガル、フランスで森林の火災が生じている。

2. 山林火災の対策：消防艇による消火

日本中で季節が乾燥している状況下での消火対策として、今後、何が必要かと考えると、消火のための水の確保である。大船渡の火災に対して住民の方々は海に面した所に住んでいるので、住民の家屋の裏山の火事による

火の類焼をいかに防ぐかがいちばん大切なことと考えると、海水をポンプアップすることによって消火する消防艇の設置と類焼防止のための家屋の裏山に防火帯を設置しておくべきであると考ええる。しかし、現在はなされていない。消火と海水散布による環境への悪化と、どちらが大切かは今後の議論であるが、阪神淡路大震災の火災の消火でも、海水を用いた事例がある。

これからの山林火災の早期消火に必要なことをまとめると、以下になる。

(a) 消防艇組織の強化

日本には消防艇が 49 艇あるとのことだが、石油コンビナート施設や船舶の消火活動用とのことで、一般には利用できない。また、普通の消防艇の移動速度は、現状（2025 年）最大で 36 km/h (20 ノット程度) であるため、瞬時には火災現地に移動して消火できないようである。福岡市消防には最高 74 km/h 出せる消防艇があると聞けるが、一般の火災には出動できないそうだ。このような状況では、国が中心となって海や空からの消火対策をする必要がある。

(b) 山頂防火槽

山林火災のための水に対しては、図-1 に示すように、それぞれの山の頂上に防火水槽を設置して、山の中にパイプラインを事前に設置して、防火用の消防ホースと結合できる施設を設置すべきである。

当然であるが、埋設したパイプラインには光ファイバセンサーを設置して、山全体の地温、地下水圧、地下の変位を計測して、パイプの劣化度をモニタリングして耐久性を常に感知しておく必要がある。また、このような施設は、山麓の水道施設が地震等で被害を受けた時の緊急対策施設にもなる。

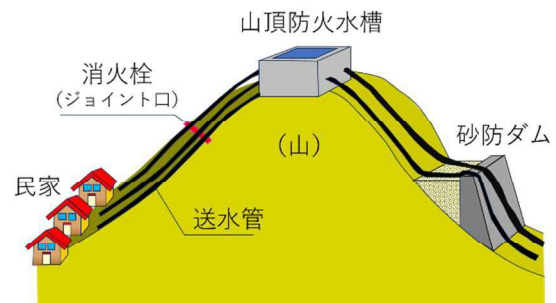


図-1 民家のある地区の山火対策（山頂防火水槽）

(c) 防火帯

山の林と林の間の防火帯を設置することも重要である

が、山林を国がすべて管理できないので、まず、山林を確実に管理する新しい法律を設定して、管理ができていない山林は、山林火災においてきわめて危険であることを国民に周知して、管理できない山林は、国が管理して国民を守るべきであると考えられる。

しかし、防火帯の機能を山林の間で維持することも非常に難しい仕事であるため、防火帯の除草専用のロボット等が開発されることを祈っている。

(d) 新しい鎮火車の開発

現在の消防自動車は、平野部に対応した消火専用車である。したがって、林道がない所では消火できない。これに対して、キャタピラ付きの鎮火専用車を開発して、林道が無くても消火できる体制を確立することが急務になっていると考える。

(e) 夜間可動鎮火ヘリの開発

現状では鎮火ヘリは日中しか稼働しないが、夜間も稼働できる鎮火ヘリの開発と普及を急速に実施すべきである。山林の地山の温度を空中から高精度に感知するセンサーを搭載しておく、残り火の分布を感知することができるので、鎮圧の判断がしやすくなると考えられると、夜間も活動できる鎮火ヘリ組織の構築も必要である。

3. 山林火災後土砂災害

四国の西条市と今治市は、2025 年の山林火災に対して愛媛県知事に砂防ダム設置要望を、2025 年 4 月 28 日に提出した。また、岡山市も山林火災による土砂流出の危険性を検討するために現地の調査が 4 月 17 日頃から開始した。

一般に、山林火災が発生すると斜面の表面が乾燥して亀裂が入り、そこに雨が降ると表面の亀裂から降水が浸透して、これを何回も繰り返すと表面の土砂が降雨の表面流によって浸食され、斜面の表面に部分的なガリー浸食が深くなって、土石流となって土砂が沢に流出してくる。

このように上流より流出した土砂の下流への流出を防ぐために土石流防止の砂防ダムを設置して、土砂災害を防止する対策が一般的になされている。

しかし、どの程度の土砂が砂防ダムに流出してくるかを予測することは極めて困難である。以下に砂防ダムに流出してくる土砂量の推定方法を示す。

(a) 対象斜面の表面についての調査を LP で実施する。

(b) 対象斜面内の風化層の厚さの 3 次元分布を求めるため、DAS によって風化層の厚さを求める。風化層の厚さは経年的に変化するため、常にモニタリングを実施する必要がある。

(c) 3 次元で求めた風化層の層堆積を算出して、その土砂が、水分を含むことによって移動してくると、どれくらいの体積になるかを推定して、最悪、一度の土石流でその現象が生じた場合を求めて、砂防ダムを設計す

る。

(d) 土石流で移動する土砂が、砂防ダムによる堆積より多すぎた場合は、一部の斜面が崩壊しないように斜面保全対策をして、砂防ダムを設計する。

(e) 山林は常に変化しているので、山林のモニタリングから対策の劣化も考慮して、新しい対策を追加することを常に検討して、斜面全体の安全を確認する。

山林火災が生じた領域は森林の根系が腐食すると、降雨による土砂災害が生じやすいので、できるだけ早いうちに植林をして山林の環境保全をする必要がある。この場合、山林が商業目的の所であれば、その目的に合った植林をするが、日本中でスギ花粉問題が出ているので、無花粉スギを植林する等の対策をする必要がある。

最近の豪雨による土砂災害では、土石流とともに大木が根ごと流されてくることが多いので、そのようなことが起こらないように、植生を考えた植林をしてほしい。土砂災害だけを考えると、早く成長する針葉樹が広葉樹より有効であるが、山の状況を考え、針葉樹や広葉樹の根系の特徴を考慮して、土砂災害が生じにくい山林を構成することが重要である。

岡山市には、5 世紀前半に築造されて日本で 4 番目（仁徳、応神、履中古墳の次の古墳）に大きい造山古墳がある。全長約 350m の前方後円墳であるが、天皇の墓ではないため、自由に墳丘に登ることができる。1975 年頃は、古墳の上は畑地があったが、古墳の上に桜の木を植林して、周囲の大木を伐採した。その後、大木を伐採した所が、2018 年の小田川の大水害の時に、古墳の中ほどで土砂崩壊が生じた。古墳築造して約 1600 年後の土砂崩壊である。

この崩壊は、伐採された切り株の根系は処理されていないので、切り株の根系は数年で腐食して、腐食した根系に降雨が浸透して、2018 年の古墳の一部の崩壊が生じたのではと考えている。

2014 年の広島土砂災害についても、マツクイムシの災害で雨の少ない瀬戸内海のアカマツが枯れてしまった。その松枯れによる土砂災害を防ぐためカシの木を植林したが、木が成長する前に、アカマツの杭のような根系が数年で腐食して、2014 年 8 月 20 日に安佐北区、安佐南区の住宅地での土砂災害で 77 人の人命を失った。

このような根系が関係する土砂災害の議論は、あまりされていない。なぜなら、山の木を伐採した時に伐採した木の根系を処理するのは大変であるので、一般には処理をしないで植林をしている。しかし、「森林の根系の腐食による表層崩壊防止機能」に関しては、多くの森林に関する研究者によって論述されているので²⁾、今後は根系を処理してほしい。

これを逆に考えると、山林火災やマツクイムシ被害によって森林が枯れると、樹木の根系がもつ土砂栽培防止効果である水平根による表層のネット効果と、垂直根による鉄筋挿入工法のような斜面のせん断防止の杭効果が

低下すると考えられる。

多くの文献より、条件が異なる森林と土砂災害との関係を求める研究を比較した研究があるが、地盤内の条件がまたよくわかっていないので、森林と土砂災害の関係を論じるのはまだ無理であるとの研究が正しいようである³⁾。

ただ、「地すべり地は、森林は浸透水を増すため良い」との意見は検討してみる価値がある。ただ、ここで「森林は浸透水を増す」との表現は、森林は落葉層を構造し、日陰を作るため降水を地盤内に涵養しやすくすることを説明すると考えると、現状では森林が表層の斜面崩壊や浸食を防いでいることがわかるが、森林を伐採した後に植林をしても、伐根腐朽の 5～10 年は危険な状況であるので、常に斜面内の状況のモニタリングを十分に実施する必要がある。

また、伐根腐朽によって地盤内の鉛直方向の透水係数が大きくなることにも注意して、腐朽した株の透水性を低下させる処理方法も、今後の大きな課題である。

4. おわりに

2025 年 8 月中旬には、フランス、ポルトガル、ギリシャ、そしてオーストラリアで山火事が発生している。山火事の原因は、焚火や放火、たばこ等が主たる原因となっている。

森林火災に何回も対応しているスペインには、「防火」についての専門部隊もある。15m 幅の防火帯が山の中に設置していると聞いている。草木が密集している所は、専門部隊が事前に燃やして、予防策を実施している。森林を火災から守るために、ドローン部隊が活躍している。

特に、近年は地球の温暖化により、豪雨があるが晴れの日が多い気候になってきている。そして、日本中の森林は、管理者の高齢化により管理の悪い山林が増えている。

狭い国土の 80% は山林であるため、このままの状況では山林火災がどんどん増えてくる可能性がある。国有林や民有林等と分けなくて、今後は、国全体でこの山林火災対策を根底から考えてほしい。

(執筆責任者 西垣誠)

参考文献

- 1) 大船渡市赤時町林野火災発生に伴う対応状況(第 35 報兼最終報)、岩手県復興防災部防災課防災危機管理担当(2025 年 3 月 19 日)。
- 2) 林野庁、解説書「森林の根系による表層崩壊防止機能について」、p.94, 2023.
- 3) 川口武雄、森林の山崩れ防止機能論議、水利科学、Vol.35, No.2, pp.24-46, 1991.

9.10 斜面中腹に生じた亀裂対策

1. はじめに

2024 年 7 月 12 日の早朝に、松山城城山の北東側斜面が崩壊し、土砂が山麓の住宅密集地に流入し、死者 3 名、住家 3 棟前回の甚大な被害をもたらしたり、7 月 10 日 24 時から 7 月 12 日 7 時までの総降水量は 213 mm、最大時間降水量は 41 mm（7 月 11 日の 3～4 時）であった。城山の崩壊した北側の基盤地質は花崗閃緑岩であるが、土砂流出の発生範囲は和泉層群分布域であった。

崩壊は城壁直下の緊急車両用道路（2015 年構築）から発生した。この場所は、2017 年 9 月から 2024 年 6 月にかけて継続的に道路路面にクラックが発生しており、道路盛土の擁壁が谷川に変状していたとの報告がある¹⁾。

このような斜面中腹の亀裂に対しては、専門家でない立場の人が見ても、豪雨があれば亀裂の中に降雨や上流からの表流水が浸透して、斜面崩壊が生じる危険性があることがわかる。川尻らの研究報告でも、地震によって生じた亀裂や、豪雨による崩壊した斜面の周囲のすべり残りのような亀裂であっても、このような亀裂の次の降雨に対する耐力は低減している²⁾。

斜面中腹に亀裂が生じたことが斜面崩壊であるとして、2000 年のオーストラリアのメルボルンでの国際会議で、豪雨による亀裂の発生を示した研究報告で述べた³⁾。しかし、誰もこの亀裂の事前処理方法については検討されていない。このような亀裂は、次の降雨によって大災害を起こす可能性がある。ここでは、このような斜面中腹に生じた亀裂対策について論述する。

2. 斜面に生じた亀裂の探査

豪雨や地震によって斜面に生じた図-1 のような亀裂の発生箇所を探査することは、森林のある時には現状ではきわめて困難である。しかし、能登地震の後、豪雨により土砂災害が生じるような複合災害から人命を守るには、きわめて重要な課題である。これに対して、以下の事項を提案する。

- (1) 人家の背後の斜面に対し、LP による地表面調査を実施する。
- (2) 斜面崩壊の危険性のある流域を抽出する。これは専門家でないといけないが。
- (3) 地震によって崩壊しそうな場所を抽出する。
- (4) 崩壊の危険性のある場所に DAS のケーブルを埋設して、斜面内を可視化して、斜面内の変位をモニタリングする。
- (5) 豪雨や地震の後、変位が生じた場所を確認する。現在では LP による調査しかない。
- (6) 斜面の亀裂を確認した場合は、その場所の亀裂の幅、

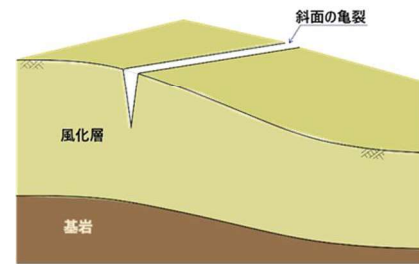


図-1 斜面の亀裂

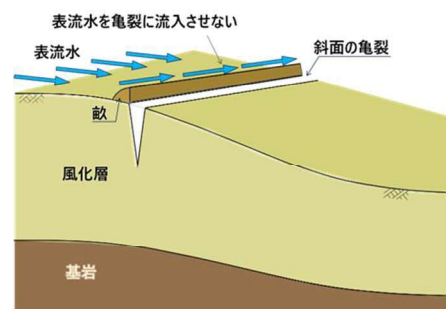


図-2 簡易表流水流入防止畝

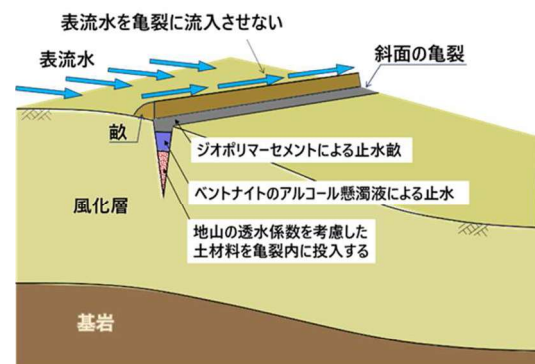


図-3 亀裂の修復

深さを調査する。

- (7) 次の豪雨による斜面崩壊を回避するため、亀裂を 1 日でも早く修復する。
- (8) 修復機能の劣化をモニタリングして、劣化と判断すると、再修復をする。

3. 斜面の亀裂の修復

- (1) 亀裂内に表流水が浸入しないように、図-2 のように亀裂の上流側に簡易のソイルセメント等による畝を設置する。最も良いのはジオポリマー材による畝であるが、表流水を亀裂に流入させないように、3 次元的に畝を設置する。
- (2) 地表面から降雨の直接浸入を防ぐために仮設のシートを亀裂の上に被せる。

- (3) 亀裂内に表流水や降雨が侵入しないように、亀裂内のすべてにセメントモルタルを流入させる対策も考えられるが、亀裂内の透水性が周囲の地層より低くなると、亀裂の上流側の地下水位が上昇する可能性があるため、亀裂の上流と下流に LWCPT で地山の特性を調査して、一般的には、図-3 に示す方法で修復する。
- (a) 亀裂内の深さを考慮して、透水性の良い地層に対しては、砂等の透水性材料を投入する。
 - (b) 亀裂の上部からの降水の浸入を防ぐため、粒径が数 μm の小さいベントナイト（例えば米国ワイオミングやインドのベントナイト）とアルコールの懸濁液を流入する。
 - (c) この懸濁液のアルコール濃度が降水によって低下することにより、ベントナイトの膨潤が開始し始めるので、その止水状況を確認する。
 - (d) 斜面の亀裂が変状していないかの確認を、モニタリングと DAS によって実施する。
 - (e) 対策に変状が生じたら、再対策を実施する。

4. おわりに

本研究では、斜面の亀裂の探査から斜面に生じた亀裂

に対しての対策法を論述した。しかし、ここで論述した事項は、実際に対策をされた事例はないので、後日のモニタリングを充分に実施する。多くの人々にここに論述した手法の妥当性を確認して、改良すべき事項については真摯に再検討して、よりタフな対策に育ってほしい。

（執筆責任者 西垣誠）

参考文献

- 1) 愛媛県砂防課, 松山市緑町土砂災害対策技術検討委員会報告書, 2025 年 1 月, p.18.
- 2) 川尻 峻三, 布川 修, 伊藤 賀章, 西田 幹嗣, 松丸 貴樹, 川口 貴之, 太田 直之, 杉山 友康, 実験的検討による地震後の降雨による盛土崩壊メカニズムについて, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.2, pp. 153-168, 2014.
- 3) A Tohari, M Nishigaki, M Komatsu, Laboratory Experiments On Initiation Of Rainfallinduced Slope Failure With Moisture Content Measurements, ISSMGE, ISRM and IAEG GeoEng2000., 24 Nov.2000, Award paper.

9.11 降雨の地下水への浸透流量の求め方

1. はじめに

異常気象になり、集中豪雨があり洪水や土砂災害が増加しているが、地下への降水流入量が増加しているかどうかについては、まだわかっていない。豪雨はあるが晴れの日が増加して、年間透水量はあまり変わっていない状況が日本では続いている。

地下水への正確な涵養量を予測しないと、豪雨による斜面崩壊も予測できなくなる。また、地表からの地下水流の涵養によって、水封式の石油がLPGの備蓄システムが成立しなくなる。ここでは、地下への涵養流量の推定手法について論述する。

2. 地盤内への浸透流量

豪雨による水は地表に降ると、図-1のように4つのパスに分離される。

$$P = I + S + E \quad (1)$$

ここで、

P : 降雨流量 (m^3/s),

I : 地盤内への浸透流量 (m^3/s),

S : 表面流量 (m^3/s),

E : 空気中への蒸発散流量 (m^3/s).

式(1)は一瞬の状況を表しており、図-2に示す流域のあるコントロールボリューム (CV) である時間でのバランスを考えると、

$$\bar{P} = \bar{I} + \bar{S} + \bar{E} \quad (2)$$

ここで、

$\bar{P}$: 流域(C)にある時間で降った降雨量,

$\bar{I}$: 流域(C)の地盤内にある時間内に浸透した流量,

$\bar{S}$: 流域(C)の表流水としてある時間で流出した流量,

$\bar{E}$: 流域(C)からのある時間での蒸発量と植物の葉からの蒸散量。

式(2)で私達が計測できる流量は、 $\bar{P}$ と $\bar{S}$ の値である。しかし、 $\bar{P}$ の値も、流域に植物があれば、その木の下で計測した降雨量は、地域の气象台が出している降雨量とは異なった値になると考えると、 $\bar{P}$ も信じられる値かとの疑問が生じる。また、 $\bar{S}$ に関しても、流域の地下からどれだけの水量が流出しているかは良くわからない。

式(2)は対象流域のタンクモデルとして、降雨と流出流量の時間的変化や気温からある程度の蒸発散量を予測して、地盤への浸透流量を予測している。しかし、このような地盤内の地層構造を調査しないでの水収支で、斜面崩壊を予測した結果は、精度の悪い方法であると考え

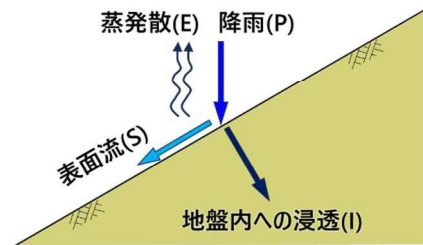


図-1 降雨の浸透と表面流下と蒸発

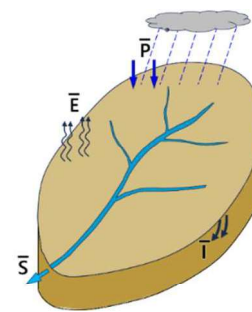


図-2 タンクモデル的な流域の水収支

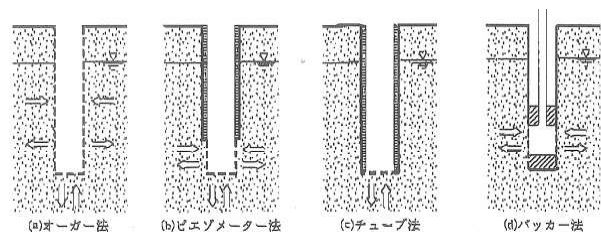


図-3 試験孔使用による試験法の分類¹⁾

られる。したがって、豪雨の何割が地盤内に浸透していくのかを直接計測していく方法を探求することは、きわめて大切であると考え。実際に不均質な斜面での複数個所の地盤の浸透特性を調査する手法には、どのように浸透特性を求めるかについて検討する。

3. 原位置での鉛直、水平方向の透水係数の計測

地盤内の鉛直方向の透水係数を求める方法としては、一般に図-3に示す原位置単孔式透水試験が実施される。

図-3の中のピエゾメーター法は、 $i/r_0 > 4$ の条件を満たすと、地盤内の水平方向の透水係数(k_h)を求めている。

それに対して、図-4のチューブ法は、回復法の試験ではボーリング孔の先端からの地下水が孔底に集まってくるため、鉛直方向の透水係数(k_z)の影響を受けるため、

チューブ法で求められた透水係数 (k') は次式の値を求めている。

$$k' = \sqrt{k_v k_h} \quad (3)$$

この2つの原位置での透水試験を応用する降雨浸透に関する鉛直透水係数 (k_v) の値を求めることが可能になる。

これらの異方性の透水係数 k_h , k_v を具体的に求める手順を以下に示す。

- (a) ボーリング孔の孔壁崩壊を防ぐため、ボーリング孔内にケーシングを設置して、その孔底を洗浄して図-4のチューブ法によって帯水層の透水係数 k' を求める。
- (b) この孔底にストレーナ管(図-5 参照)を押し込んで、孔底にパッカーを設置してピエゾメーター試験を実施し、その深度の水平方向の透水係数 (k_h) を求める。その値を用いて、式(3)より鉛直方向の透水係数 (k_v) の値は式(4)より算定できる。

$$k_v = \frac{k' r^2}{k_h} \quad (4)$$

- (c) この透水試験は、飽和な斜面に対しての試験であるが、孔内の水を注入して、注入孔内(ボーリング孔内)の水位を一定に保ってその注入流量が一定になるまで実施すると、ボーリング孔底での疑似飽和状態での透水係数が求められる。
- (d) 斜面内の各深度での透水係数を求めるには、(a), (b) を実施して地盤内の透水係数を計測する。

4. 降雨等の地下水への涵養流量の計測方法

図-6 は、地中の深度方向における全水頭分布を示している。この分布曲線で Z 方向の勾配が零の面 ($dh/dz = 0$) を発散ゼロフラックス面 (Divergent Zero Flux Plane, DZFP) と称している²⁾。

このゼロフラックス面より上部の領域は、降雨浸透や地表や植物からの蒸発散により地中水分が左右に変動している領域である。

これに対して、DZFP 面より下部では地中水の蒸発散の影響を受けにくい領域であり、重力の作用によって土中水が下方に移動する領域である。

日本の気象条件では、平坦な草地においては $-0.8 \sim -1.5\text{m}$ 付近にゼロフラックス面があると言われている³⁾。このゼロフラックス面の深度を求めるには、深さ方向の複数点での圧力水頭 (ψ) の経時的な変化を計測する必要がある。その結果より、図-7 に示すように、ゼロフラックス面以深の2点 (A, B 点) での圧力水頭 (ψ_A , ψ_B) の値を計測すると、下方向への地下水の動水勾配が計測し、その区間の不飽和透水係数 (k) があれば、降雨等の水の下方向への地下水への涵養流量 (q) が次式より求められる^{4), 5), 6)}。

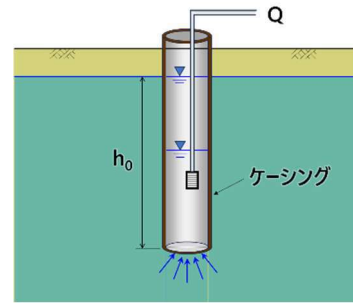


図-4 チューブ法

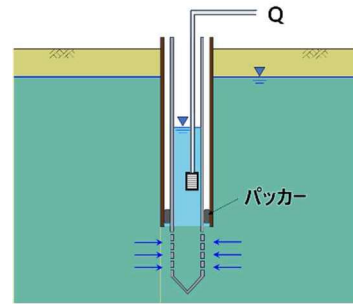


図-5 ストレーナ管を挿入してのピエゾメーター試験

$$q = -k \left(\frac{\psi_A - \psi_B}{L_{AB}} + 1 \right) \quad (5)$$

ここで L_{AB} は、図-7 に示す計測点 A, B 間の距離。

広域の地下水の地層変化を鑑みた地下水への降水等の涵養流量を正確に計測するには、上記の計測点を流域全体に設置する必要がある。その際の注意点を以下に列挙する。

- (a) 原位置での圧力水頭を計測するには、一般にテンションメーターを用いて計測するが、テンションメーターは、センサーの先端に飽和状態のセラミックディスクを介して地山の負の圧力水頭を計測することが一般的である。しかし、セラミックディスクを飽和状態に保つために常に水を補充する必要があるため、長期の計測ではきわめて注意深く管理する必要がある。
- (b) 原位置での不飽和状態での鉛直の透水係数を原位置で計測することはきわめて困難であるため、飽和度に対応した不飽和土の土の透水係数を求めるためには、原位置から試料をサンプリングして、室内で不飽和土の透水試験を実施して、体積含水率 (θ) に対応した不飽和土の透水係数を求める必要がある。
- (c) 原位置での圧力水頭の計測には、当然、その場の土中の間隙空気圧の影響を受けるため、圧力水頭変化を間隙水圧計測している時には、間隙空気圧の変動も計測して、それに対応した負の圧力水頭に換算して、動水勾配を算出する必要がある。
- (d) テンションメーターから得られた負の圧力水圧を計

測するより、A 点、B 点の体積含水率を土壤水分計で計測しておき、PF 曲線を計測しておくと、体積含水率の変化を用いて負の圧力水頭を PF 曲線より求めると、安定した状態で長期の圧力水頭の変化を推定できる。しかし、PF 曲線はヒステリシス曲線があるので、その補正も必要であるため注意する必要がある。

- (f) 地中の A 点、B 点で負の圧力水頭の計測の際には、当然、同じ点での間隙空気圧 (u_a) の計測が必要である。しかし、浸潤前線下の間隙空気圧の値は、トラップされている空気層の空気圧であり、A 点でも B 点でも同じ空気圧になっており、式 (5) を用いて地下水への涵養流量を求める場合には、空気圧の計測が必要ないとも考えられる。
- (g) 不飽和領域の透水係数を原位置で計測することは、まだ困難であるので、不飽和領域の異方性の透水係数を求めることに関しては、ここで示したように、不飽和領域に十分に水を浸透させて飽和に近い状態にして、その透水係数を求めるのが従来より一般的であるので、本研究でもそれに従って異方性の透水係数を求める方法を提案した。

5. おわりに

ここでは、降雨がどれだけ地下水涵養に寄与しているかを、ここでは論述した。ここでの結論は、年間降雨量がおなじだから、涵養量が同じと考えるのではなく、どのような降雨が地下水に関与しているかを考えて、地下水の状況を予測する必要があることを理解してほしい。

(執筆責任者 西垣誠)

参考文献

- 1) 地盤工学会, 地盤調査の方法と解説, 第 1 刷発行, p.381, 2004.
- 2) 杉田倫明・田中正, 水文科学, 共立出版, pp.145-147, 2009.
- 3) 地下水学会編, 21 世紀の地下水管理 雨水浸透・地

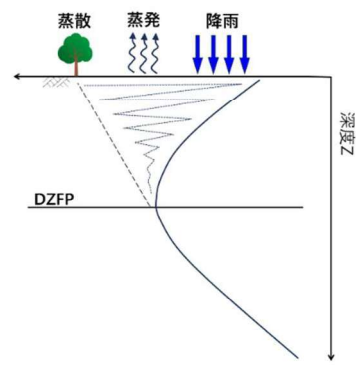


図-6 ゼロフラックス面 (DZFP)

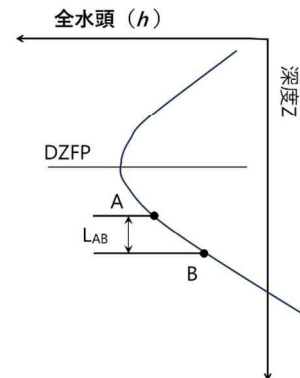


図-7 降雨の地下への浸透流量の計測

下水涵養, 理工図書, pp.50-64, 2001.

- 4) 西垣誠・中本有軌・今西啓太・佐藤朱生, 不飽和土の定常法による浸透特性の計測法に関する研究, 地下水学会 2009 年秋季講演会講演要旨, pp.64-65, 2009.
- 5) 西垣誠・瀬尾昭治・渡部高広・藤原聖也, 原位置における間隙空気圧と間隙水圧の長期計測に関する研究, 地下水学会 2010 年秋季講演会講演要旨, pp.210-211, 2010.
- 6) 西垣誠・平田洋一・渡部啓示・藤本泰史・飯島智典・藤田貴文, 降雨の地下水の涵養流量の評価手法に関する計測, 地下水学会 2011 年秋季講演会講演要旨, pp.74-75, 2011.

9.12 地球温暖化による豪雨対策

1. はじめに

地球温暖化によって世界中で豪雨が降り、世界中で洪水が生じている。また、当然のことであるが、山間部では斜面崩壊や土砂災害が生じている。もし、このような状況の中で地震が生じると、地下水位が上昇しているため、複合災害として地盤の液状化が生じる所が多くなる。

豪雨によって、平野部では表面水の流れが、表流水が重力によって流下する以上の降雨があるため、内水排除ができなくなり、洪水が生じ、河川水が堤防を越流して氾濫する。

これは、コントロールボリューム（以後、CV と称す）内、質量保存則を考えると、豪雨によって天から流入してくる流量が多いため、表流水の流れが重力だけの力では、CV 内の水

$$\int_V \mathbf{v} + \int_S \mathbf{Q} = 0 \quad (1)$$

排水できないために起こっている現象である。

豪雨による災害の課題を簡単に整理すると、以下のようになる。

- (a) 豪雨による洪水対策
- (b) 地下水位低下による液状化対策
- (c) 斜面への降雨浸透による斜面崩壊や土石流、地すべり現象の対策

本研究では、これらの自然災害から、いかに人命と財産を守るかについて論述する。

2. 豪雨による洪水対策

2.1 洪水対策の基本

洪水に対しての対策は、CV に流入してくる流量より、流出する流量が少ないために生じる現象である（図-1 参照）。

これは、表流水の流れを簡単に考えると、排水流量として、動水勾配と水位差によって移動する水量が、重力のエネルギーだけを考えているため、豪雨時に CV 内の体積が増加して洪水が生じることを表している。洪水を対象としている流域内の水を排水するために、重力のエネルギーだけではなく、太陽光のエネルギーを新しい太陽光発電（ペロブスカイト太陽光発電）のエネルギーを付加した排水システムを構築すると、豪雨強度を考慮して豪雨による水の排水能力をコントロールすることは可能であると考えられる。

昔は、流域に集まってきた水を効率よく海まで排水するために、河川から分岐した水を海まで排水していた。

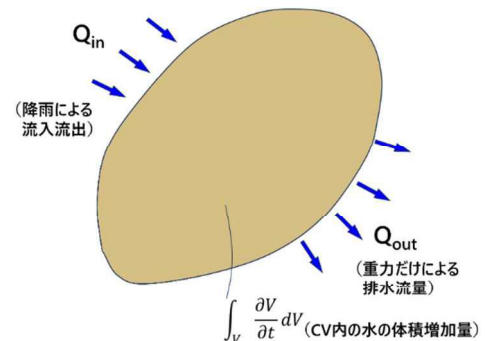


図-1 流域内の水の質量保存則

この対策の基本は、流出するための断面を大きくする（CV の表面積を大きくする）対策である。この対策によって豪雨時の洪水に対しての排水能力は格段に増加した。

しかし、今日では新しい放水路を建設することは諸事情により困難になってきているため、排水面積を拡大することは難しい。このような現状に対して、どのような対策があるかと考えると、以下の2つの対策が考えられる。

- (a) 河川の流末に排水ポンプを設置する対策
- (b) 河川内に放水管を海まで設置する対策

以下に、具体的な対策を説明する。

2.2 河川の流末に排水ポンプを設置する対策

これは、きわめて簡単な対策で、重力だけで表流水を海まで排水するのではなく、排水ポンプの力を借りて河川内の流速を増加させる対策である。広大な河川に対して、人工的なポンプによってどこまで水を排水できるかはきわめて難しい課題であるが、河川内の水を速やかに海まで放流することによって、洪水の氾濫をある程度防げる可能性はある。

2.3 河川内に放水管を海まで設置する対策

水の流れには、開水路と閉水路がある。閉水路は開水路の2倍の水を流下すると考えられている。単純に考えて2倍であるが、自由水面を持つ開水路の流れは乱流になり、もっと複雑な流れになる。これに対して閉水路は、流末にポンプをつけると、同じ断面積でも大きな水位差をつけることが可能になり、開水路の10倍以上の水を流下することが可能になると考えられる。

3. おわりに

ここでは、河川堤防を高くしなくても河川の河床に管

水路を海まで設置すると、現状の河川でも、従来の 10 倍程度の水を下流に流下することが可能になると考えられる。

しかし、実際に洪水の時には、河川内に流木等の水以外のものが流下してくるため、それによる流動障害が生じるため、その対策については今後の課題である。

これからは、太陽光から十分な電気エネルギーを得ることが可能となるので、そのエネルギーを用いて、内水排除や洪水対策を検討していくことが重要である。

災害が起こる前の対策である事前整備費より、氾濫被害の復旧費の方が多いことが、3 年前の国交省の資料より明らかになった。これは、費用だけの比較である。災害によって人命を失うことがどれだけの損害であるかを考えると、事前整備がきわめて大切であることがわかる。しかし、津波以外では事前対策がなされていない。

過去の 1000 年とか 100 年確率による設計から、将来の気候変動を見据えた対策が必要であると国交省が検討するようになったことは心強い²⁾。

今、国が検討しているのは、「将来の気象の状況、土地利用を考えて治水計画をする」³⁾となっているが、具体的な対策が示されていない。しかし、例えばインドネシアのジャカルタの年間降水量は 1800 mm から 2400 mm 程度とされているので、日本の将来の気象予測では、現在の雨量の 1.5 倍から 2 倍の降雨があると考えても良い。河川流域全体で 1.5 倍から 2 倍の豪雨に対抗できる堤防高を考えることは、現状では不可能に近い計画である。

また、流域内に新たな放水路を 2 本、3 本と設置することも、現状ではきわめて困難と言える。しかし、流域の豪雨の水を海に放流しないと、洪水が起こる。

どんな豪雨があっても、流域から水を排水するには、現在のオープンチャネルの河川水路ではなく、河川に流入してくる水を海まで放流するクロズドチャネル（パイプ水路）を、河川内や河川の底部、あるいは河川の両側にある堤防内に設置しておく方法が考えられる。

このクロズドパイプの下流端に強大な排水ポンプを設置しておくことで、洪水の排水能力はコントロールできることになる。また、このような施設を地震がきても大丈夫な施設にすることは、堤防高を高くしてそれを耐震構造にすることより十分容易であると考えられる。そのためには、日本の製鉄業、機械業が土木業とタッグを組んで、このシステムを確立してほしい。また、世界中の水害対策にも適用してほしい。

（執筆責任者 西垣誠）

参考文献

- 1) 禰津家久, 中川博次, 自由水面を考慮した開水路乱流の数値計算手法-修正 K- ϵ 乱流モデルによる解法-, 京都大学防災研究所年報, 第 29 号 B-2, pp.647-673, 1976.
- 2) 近年の水害と「流域治水」の推進, 社会資本整備審議会河川分科会, 第 109 回 河川整備基本方針検討小委員会資料 1, 2021 年.
- 3) 梯 滋郎, 気候変動に対応した未来志向の治水に向けて—100 年後の未来を見据えて—, 土木学会誌, Vol.109, No.5, pp.16-17, 2024.

9.13 洪水対策として放水路を作成する

1. はじめに

異常気象による豪雨によって、2025 年の現在でも、世界中で洪水が生じている。本報告で何回も提唱しているように、豪雨によって生じる洪水を既存の河川で「重力」で海まで排水することは、現状の河川の断面では不可能である。

重力だけでなく原油のパイプラインのように地表にパイプライン網を構成して、洪水の水を「ポンプ」で海まで排水するシステムの設置を考えている。価値ある原油であるから大陸間を強大なパイプライン網が建設されている。ガスにしても、大阪ガスが大阪から岡山までのガスパイプラインが構築されている。

しかし、豪雨に対しての内水排除のパイプラインに関しては、何も検討されていない。洪水の水と原油とを比較するのはおかしいが、国民の命と財産を守るため、国家が主体となって、洪水を起こさぬように大パイプラインを日本中に設置して、何回も提唱するが、線状降水帯が生じて、国民が避難しない社会を確立することを考えてほしい。

2. 現場の排水ポンプ

以下に、放水管の考え方を論述する。

- (1) 日本中の堤防のすべてを高くするより、山から海まで放水管を設置する。
- (2) 地球温暖化によって、線状降水帯によりこれからどれくらいの降雨があるかは、良くわからない。
- (3) 流域治水より、ポンプによる排水システムは豪雨の規模の変化に迅速に対策できる。
- (4) 大阪の大和川放水路の排水ポンプは、大型ポンプ 6 台で $330\text{m}^3/\text{s}$ の排水能力がある。日本最大級の排水流量

を誇る毛馬排水機場のポンプがある。

- (5) 日本最大級の排水機場である新潟県新川河口排水機場で、西蒲原地区の排水に 40 年前から使っている排水ポンプ 6 台は、 $\phi 4200\text{ mm}$ 、 $250\text{m}^3/\text{s}$ の排水能力がある。荏原製作所製のチューブポンプで、すでにある。
- (6) 河口に堰を造り、塩水遡上を防ぐ工事は、日本中の多くの河川で実施されている。しかし、その工事毎に環境問題から反対が起こる。岐阜県の長良川の河口堰がその一例である。したがって、本川の河口ではない放水路を新たに設置して、河川に集まってくる豪雨の水を速やかに海に放流する新しいシステムを構築する必要がある。
- (7) ちなみに、2025 年で世界一の能力を持つ排水ポンプは、出力 3350HP (2500kW) の水中モータポンプで、100m の揚程に対して流量 $78.86\text{m}^3/\text{min}$ とされている。

3. おわりに

洪水が起こる前に、放水管を用いて、河川水を海に排水する。ローカルな内水に関しても、排水路の所に排水管を設置して、重力ではなく電気のエネルギーで内水を速やかに海まで排水する排水網を確立する。

降雨の予測だけでなく、洪水が生じないように何をすべきかを考え、鉄道等の下の道路内の排水も、排水ポンプで速やかに排水するシステムを、国家は構築すべきである。これは河川工学ではなく、石油の配油工学(パイプライン工学)かもしれない。原油と人命とどちらが大切かを検討してほしい。しかし、答えはわかっている。

(執筆責任者 西垣誠)

9.14 道路土工構造物基準の改定からの考え方

1. はじめに

道路土工構造物技術基準が 10 年ぶりに改訂されることになったり、2024 年の能登半島地震による被害を踏まえた対応である。具体的な内容については、国土交通省道路局のホームページを参照してほしい²⁾。ここでは、この改定に対して、これから道路設計において何をすべきかについて論述する。

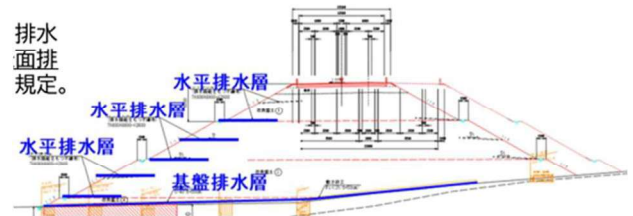


図-1 斜面の法尻の排水層の目詰まり対策例

2. 道路土工構造物の設計初期段階における配慮事項の明確化

道路の路線の設計段階で道路機能を確保するために、線状の構造物である道路のすべての箇所において、道路基盤情報だけでなく、道路周辺の地形、地質を十分に把握することを強調している。具体的には、以下の事項への配慮の重要性を指摘している。

- (1) 道路の周囲で地すべりが発生しないか。
- (2) 道路周辺の沢筋から土石流災害を受けないか。
- (3) 山岳道路で道路の側溝に表流水が集水して、道路の谷筋に土石流が生じないか。
- (4) 軟弱地盤上の道路の地震時の大変形が生じないか。
- (5) 砂地盤状の道路の地震時の液状化による盛土等の大変形が生じないか。
- (6) 道路周囲の地山の地震や豪雨等の外力に対しての安定性を事前に予測する。
- (7) 種々の外荷重による道路と道路周囲の変状を予測して、その事象が起こらないように（回避するために）施工段階で対策をしておく。

3. 地質及び地盤等の不確実性への対応の明確化

地質や地盤の不確実性を解消するために地質構造に対してボーリング調査を実施して地盤の不確実性を少なくするが、一般にボーリング調査はそれほど高密度で実施できない。

この現状に対して、路線と考えられる地形に対して、LP で表面形状を明確にして、地震や豪雨によって災害を受けると考えられる所の地盤内の地層構成を知るために、DAS による地盤内の探査を実施する。この探査によって、地盤内の地層構成が明確になる。

しかし、それぞれおの地層の浸透特性や、斜面崩壊に関するせん断特性、そして盛土をすることによる圧密特

性等に関しては、それぞれの地層にボーリング調査を実施して、地中から不攪乱に近い地質のサンプルを採取して、室内試験を実施する必要がある。

これらのデータを用いて対象にしている場の 3 次元のデジタルツインモデルを構築して、地震や豪雨に対して「最も弱い条件」を考慮して、安全な場合を模索する。

4. 排水対策の明確化

土工締固の基準の変更や排水対策の改良が、2013 年（平成 25 年）に実施された。その中で大きく変更されたのは、2010 年の道路土工・盛土指針における土の締固め度が 90% 以上という規定がなされた。また、平成 25 年に排水対策も改良された。これらの基準に従って道路の締固めや排水施設を設置した結果と平成 25 年より前の基準で施工された道路の地震時の耐久性は、2024 年の能登半島地震で比較されて、2013 年（平成 25 年）の基準が有意であることが検証された。

これらの実績より、図-1 に示すように盛土の排水を強化することが地震や豪雨に対してきわめて有力であることがわかった。また、「のり尻排水施設」では、碎石置換と水平排水層が盛土を強化されることがわかった。

5. 排水対策の目詰まりによる劣化とその対策

図-1 の排水施設はきわめて強力な帯水施設である。従来は盛土内に排水管を数 m ピッチで挿入する方法があるが、法尻に排水のための鉄筋かごの中に碎石を入れた排水層（じゃかご層）を設置する層に変化している。

ここで問題になるのは、この水平排水層の耐久性である。河川堤防の堤外法面や法尻に同様にじゃかご層を設置している。このようなじゃかご層の課題を整理すると、以下の事項が考えられる。

- (1) 鉄筋である鉄の耐久性.
- (2) 排水層への盛土材料の流亡による排水層の目詰まり.
- (3) 土材料の流亡による盛土内の空洞化や陥没.
- (4) 排水層の目詰まり度のモニタリング.
- (5) 排水層の目詰まり対策.
- (6) 排水層の目詰まりに対して、リフレッシュ化のための洗浄工法.
- (7) 盛土内の空洞発生とその対策

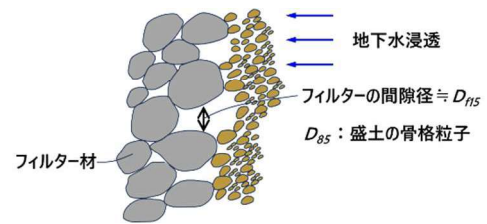


図-2 フィルター材

5.1 鉄筋の耐久性

土木構造物は 50 年の耐久性を考えて施工しているため鉄筋の耐久性が進んできていると目視判断した「じゃかご」を交換する。しかし、蛇籠の施工時に 50 年先にとのように交換するかまで本当に検討して工事はなされているのかについてはよくわからない。

5.2 排水層への盛土材料の流亡に対する対策

排水層へ盛土材料が流亡してくることを防止するために「細粒分流防止シート」が盛土と排水施設の間に不織布等のシートを設置するよう、道路指示等に記述されている。

このようなシートの誤った選択により、不織布シートの地山側に地山から流出した細粒土が数層にわたり付着して、道路盛土からの地下水が排水層に排水されず、じゃかごの上部から道路盛土内の浸透水が流出してくる現象に遭遇する。

この現象は、排水層の構造に大きな誤りがある。地山から排水層内には、地山盛土の骨格をなす土粒子(D_{85})がフィルター層に流亡すると、盛土が変形したり、盛土内に空洞が生じてしまう。したがって、盛土の骨格となる粒子が地下水の浸透によってフィルターの間隙(D_f)に流亡しない基準は、K.Terzaghi によって、以下の式(1)に定められている³⁾。

$$D_{f15} < 5 D_{85} \quad (1)$$

ここで、 D_{f15} は、フィルター材の粒度過積曲線の 15% の粒径である。これは、フィルター材の間隙を計測することは大変であるため、フィルターの間隙の幅(D_f)をフィルター材の 15%粒径と仮定した値である。

また、盛土の骨格を構成している土粒子(D_{85})は、5 個がアーチを組む幅よりフィルターの間隙が大きければ、フィルターの間隙に盛土や地山の D_{85} の土粒子が流亡するとの仮説である。

したがって、フィルターに D_{85} の粒子が流亡して来ないために、式(1)の条件を満足するフィルターを選定する必要がある。しかし、逆に考えると、この式(1)を満足するフィルターを選定すると、フィルター内に地山の D_{85} 以下の粒径の土粒子がどんどん流亡してしまっており、フィルター内に目詰まりが生じてしまうことになる。

したがって、フィルター層は単一の粒径の材料で構成するのではなく、盛土に接している第 1 層のフィルター

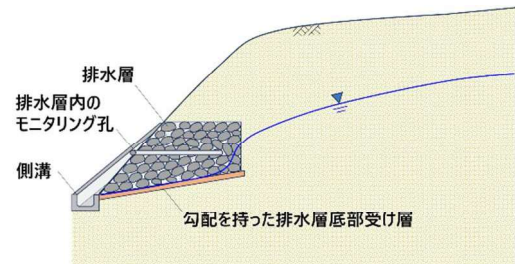


図-3 斜面の法尻の排水層の目詰まり対策例

は、盛土の D_{85} の粒子を流亡させないフィルター材で構成する。第 2 層目のフィルターは、第 1 層のフィルター材を流亡させない第 1 層より少し大きいフィルター材で構成する。

このようにフィルター材を複数の材料で構成することは、ロックフィルダムセンターコア材から流出側のフィルターでは複数層に設計するのは、一般的な設計となっているが、一般の盛土ではこの技術は使われていない。

当然のことであるが、河川堤防のフィルター材や道路盛土のフィルター材の基準には、現在でも単粒のフィルター材のじゃかごが現在でも使われている。盛土の構造の安定を考えるのではなく、フィルターが目詰まり防止を維持することを考えて、「フィルターの外側に不織布」を設置している。これはきわめて危険な方法で、地山から流亡してきた細粒土が不織布の地山側の表面に付着して、不織布の透水性を低下させてフィルター層に地下水が流れなくなり、フィルター層の機能が低下する。その結果、地山や盛土内の地下水位が上昇してくる。実際に、フィルター層の上部から地下水が流出している現場に度々遭遇する。また、この不織布シートが目詰まり度をモニタリングする研究報告もある⁴⁾。

フィルターを不織布等でカバーしなければ、当然フィルター内に盛土や地山からの細粒土が流入してきてフィルターの中で目詰まりが生じる。フィルターがどの程度目詰まりしているかを定期的にモニタリングすることは、小口径ビデオスコープを用いることによって可能になっている。

擁壁に設置下水抜き孔からの地山からの地下水の流出する高さが年々上に移動していくことから、水抜き孔から下の水抜き孔が地山からの細粒土で目詰まりしていることがわかる。

フィルター内に流亡してきた細粒土をいかにして、フ

フィルターから速やかに除去するかについては、以下の手法が考えられる。

(1)排水層の底部に勾配をつける。

排水層の底部を図-3 に示すように勾配をつけて、地山から流亡してきた細粒土が速やかに側溝に流出できるようにする。

(2) 擁壁の水抜き孔を底部に設置する。

擁壁の水抜き孔は、2～3m²に1つ設置する基準になっているが、擁壁の水抜き孔を図-4 に示すように一番下に設置し、裏込めフィルターの底部に勾配をつけておく。この手法により、地下水と共にフィルター内に流亡してきた細粒土がフィルター層の底部の水抜き孔を通して側溝に流出できる。

(3) フィルター層の目詰まり状況を判定するシステムの確立

アースダムやロックフィルダムのフィルター層は、高さがあり、粘土質のセンターコアからの浸透水によってフィルター層に細粒土が流亡してきても、フィルター層の底部に堆積する容量が十分にあり、フィルター層の底部が目詰まりしても100年程度の時間は大丈夫であるが、法面尻の排水層や擁壁の現状のフィルター層は、簡単に目詰まりが生じてしまう。

フィルター層内に流亡してきた細粒土を速やかに底部受け層から側溝に排水しているかどうかの確認をするために事前に設置しておいた排水層内モニタリング孔や水抜き孔からフィルター層の目詰まり度を胃カメラのように「工業用の小口径のビデオスコープ」を用いて、フィルター内の状況を定期的に目視で調査して、フィルター層の目詰まり状況を検査する。

(4) フィルター層の洗浄システムの確立

フィルター層の内部の目詰まりが確認されれば、フィルター層内の確認孔からマイクロナノバブル水等でフィルター層を洗浄する注水孔を事前に設置しておく。

5.3 盛土内の空洞探査とその対策

盛土内の細粒土の土は、地下水とともに、上流から下流へと移動してしまう。このように盛土内の間隙率等は、長い年月の間さまさまに変化している。この変化をモニタリングするには盛土内に事前に光ファイバーケーブルを設置しておく、盛土内の経年的な密度変化もモニタリングできるため、このDASによるケーブルの設置はきわめて重要である。

さらに、盛土内に空洞等が発見されれば天然材料である粒径の小さいベントナイト(例えば米国のワイオミングのベントナイト)の塩水またはアルコールの懸濁液を低い水圧で注入し、塩分濃度やアルコール濃度が降水によって低下してくることによってベントナイトの徐々の膨潤による空洞の充填工法が有効である。

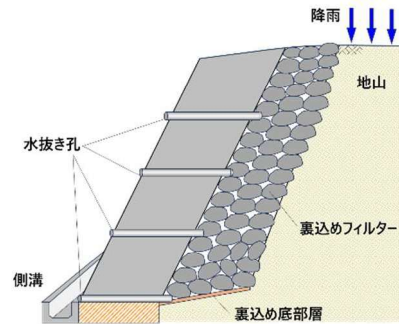


図-4 擁壁の水抜き孔と裏込め層底部

6. おわりに

斜面内の排水対策を強化することが、豪雨や地震から斜面を守ることに対して一番大切な項目であることを国土交通省が認めてくれたので、日本中の斜面や盛土に対して排水層や排水工が設置される時代に変化している。しかし、そのような排水施設は、地下水が流れることによって「必ず目詰まり現象が生じて」排水機能が劣化していくことを理解する必要がある。

「フィルターの目詰まりを回避する」ため、フィルター層と盛土の境界に「細粒分流出防止シート」(不織布等)を設置することを、平成22年度版では指針としている⁹⁾。

何回も同じことを指摘するが、この不織布の地山側に微粒子や細粒土が堆積するため、フィルターの周囲を難透水材料が覆ってしまうので、当然、フィルターの機能は低下してしまう。

このような現象を回避するために不織布ではなく、地山のD₈₅の土粒子がフィルターの中に流亡しないフィルター材をフィルター層と地山の間に設置すると、地山の細粒土がフィルター層の中に流入してきてフィルター層が目詰まりしてしまう。

式(1)Terzaghiの理論に従って、フィルター層が目詰まりを生じさせてしまうか、不織布を目詰まりさせるかのどちらの目詰まりを選択するかを考えると、目詰まりしたフィルター層を洗浄するだけで排水機能が回復できる手法が一番簡単な維持管理手法といえる。

斜面や盛土の表面水を排水する側溝は、周囲の樹木の落葉が堆積するため、毎年側溝の洗浄が必要である。その時に目では見れないフィルター内の目詰まり状況を観察するために小型ビデオスコープを水抜き孔内に挿入して、フィルター材の目詰まり診断して、目詰まりがあれば水で洗浄していく維持管理システムが普通である社会を確立することが必要である。将来はそれが普通になって、ロボットがやってくれる時代が来てほしい。

(執筆責任者 西垣誠)

参考文献

- 1) 国土交通省,「道路土工構造物技術基準」の改定について～令和6年能登半島地震による被害を踏まえた

対応等～，2025 年 6 月 26 日，道路局国道・技術課
都市局街路交通施設課，<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001897110.pdf>

- 2) 国土交通省 報道発表資料 令和 7 年 6 月 26 日，
https://www.mlit.go.jp/report/press/road01_hh_001960.html
- 3) (社)日本道路協会，道路土工 盛土指針，平成 22 年度版，pp.165-167.
- 4) 藤井宏和，榊利博，森裕紀，小松満：河川堤防におけるドレーン工フィルター部の目詰まり箇所の検知を目的とした加熱式光ファイバ計測による堤体内流速のモニタリングのための基礎的実験，地下水学会誌，第 67 巻，2 号，pp.151-166, 2025.
- 5) (社)日本道路協会，道路土工 盛土指針，平成 22 年度版，pp.155-159.

9.15 斜面安定を評価するために何をモニタリングするのか

1. はじめに

豪雨に対して、斜面内で何が起きているかを知るために、斜面内に土壌水分計や間隙水圧計、間隙空気圧計を設置することは、きわめて大切である。また、斜面表面の変位を計測するために、伸縮計や孔内傾斜計を設置することも大切である。しかし、これからは、斜面内の構造がわかってきているので、もう少し斜面崩壊がいつ起こるかを予測できるモニタリングにするべきだと考えている。ここでは、その例について論述する。

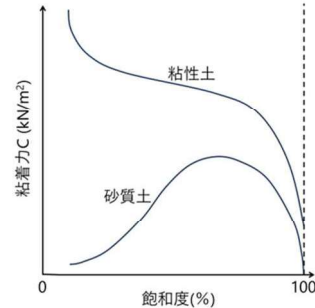


図-1 飽和度と粘着力の関係

2. 斜面内の土壌水分計測

斜面内の土壌水分の変動を計測するセンサーが開発されている。土の中の誘電率の変化を計測することによって、土壌水分の変動は計測できる時代になってきた。

しかし、土壌水分の変化を計測することによって、斜面内の土の飽和度の変化がわかる。土壌の飽和度が増えてくると、以下の現象が生じる。

- (1) 土壌の飽和度が増えてくると、図-1 に示すように土の粘着力が減少してくるために斜面が崩壊しやすくなる。
- (2) 斜面方向への浸透水圧の増加

斜面内の飽和度が 100% 近くになると、地下水が浸透しようとする。その浸透は、全水頭の高い所から低い方向に移動してくるので、その土粒子間の流れによって浸透水圧が土粒子に作用する。どのくらいの浸透水圧が作用しているかを知るには、斜面内の複数の地点での間隙水圧(u_w)変動を計測する必要がある。

この間隙水圧の値は、不飽和領域では負の値を示し、飽和領域では正の値を示す。正の値は、土粒子の間隙の水圧を計測するので、間隙水圧計の活力を感知する所に土粒子等が直接するのを防ぐために耐久性のあるフィルター材を設置する必要がある。

地盤内の複数点に設置した、間隙水圧計間の動き（流速 v ）は、一般的にはダルシーの法則より次式より求められる。

$$v = ki = k \frac{dh}{dx} \quad (1)$$

ここで、 k は透水係数 (m/s)、 h は全水頭である。

地下水が動くとき土粒子にどのような浸透圧が作用しているかを検討するために、図-2 の水平な浸透モデルを用いるとわかりやすい。

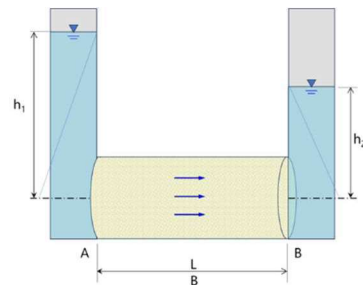


図-2 水平一次元の砂層内の浸透

図-2 で A 面に作用する水圧(P_A)、B 面に作用する水圧(P_B)とすると、地下水が浸透することによって流末のフィルターに作用する力 (F) は次式になる。

$$F = P_A - P_B \quad (2)$$

ここで、砂層の断面積を a とすると、

$$P_A = ah_1 \cdot \gamma_w \quad (3)$$

$$P_B = ah_2 \cdot \gamma_w \quad (4)$$

ここで、 γ_w : 土中水の単位体積重量である。したがって、(2)式は、次式になる。

$$F = aL\gamma_w \frac{(h_1 - h_2)}{L} \quad (5)$$

$$F = V_i \cdot \gamma_w \cdot i \quad (6)$$

ここで、 $V_i (= aL)$ は砂層の全体積である。したがって、砂層に作用する浸透水圧 (f) は次式になる。

$$f = \frac{F}{V} = \gamma_w i \quad (7)$$

この f の値は有限要素法のような数値解析をする場合に、有効応力を用い数値解析を実施すると、

$$\sigma' = \sigma - u \quad (8)$$

ここで、 σ' は有効応力、 σ は全応力、 u は間隙水圧。

浸透水圧に関しては、特に考慮しなくても自動的に浸透水圧による荷重の増加は考慮されている。このように浸透水圧を考慮するためには、斜面内の複数点での「正

の間隙水圧」をモニタリングしておく必要がある。ただ、電気式の間隙水圧計の耐久性は 5 年程度であるため、5 年毎にセンサーを交換する必要がある。一般に、日本は湿度が高いため、電気式の間隙水圧計は水圧を計測するセンサー内の所が腐食しやすいと考えている。

このような電気製の間隙水圧計に対して、光ファイバーによる間隙水圧計は、岡山県の水島での天然ガスの備蓄基地での地下 150~180m の岩盤タンク内のガス圧などの計測を 20 年近く計測ができています。

(3) 斜面内の正の間隙水圧変化のモニタリングで何がわかるのか。

斜面内の飽和状態の中に間隙水圧計を設置して、斜面の安定を検討することが一般によく知られているが、斜面内の水圧がある値になると、斜面崩壊が生じることを室内実験でも確認されているが、飽和領域内の間隙水圧が急に上昇した後、崩壊が生じ、瞬時に斜面崩壊が発生するため、モニタリング結果を人民に通知して、全員が避難するまでの時間を準備することは、現状では困難である。また、現状では豪雨がいつまで続くかの予測も、まだ困難である。

このように考えると、地盤内の正圧の間隙水圧だけをモニタリングすることは、住民の避難勧告には役に立たないことになる。図-3 に、斜面内での複数の深度での間隙水圧や間隙空気圧を計測する例を示す。

3. おわりに

斜面内の 3 次元的地層モデルが物理探査技術によって構築できるようになってきている。しかし、その技術に

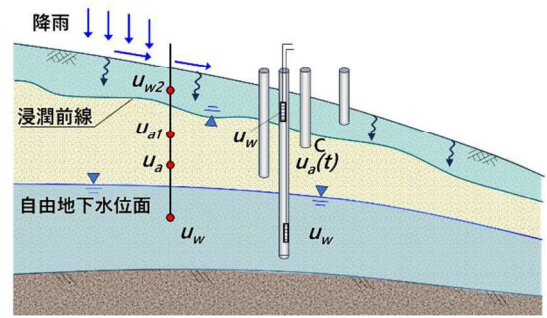


図-3 斜面内への降雨浸透のモニタリング

対応できるようにまだ、3 次元で斜面安定を検討できるソフトが公開されていない。地下水に関しては 3 次元の一相流の解析手法は公開されているが、地盤内の間隙空気の挙動までを考慮した数値解析ソフトも公開されていない。斜面内の間隙空気が斜面崩壊に対してどれほど影響するかについても、まだそれほど検討されていない。

間隙空気が影響しないと考えて、一相流で斜面の安定を論議しても良いのではとも考えられる。また、それで斜面崩壊を予測して、その対策を検討して、変位に対してのモニタリングで、対策の劣化度を検討すれば良いかもしれない。

しかし、間隙水圧や土壌水分量等の変化をモニタリングすることは、時間軸の議論ではきわめて重要なモニタリングであるので、これからも多相の場の物性の変化を計測して、それらの変動から斜面安定対策をする世界になってほしい。

(執筆責任者 西垣誠)

9.16 将来の技術展開に向けて

1. はじめに

統合物性モデル技術研究組合が考える「地盤災害が起こる前の災害対策」について、再度、整理する。

2. 地震による液状化と津波対策

(a) 地震時の地盤の液状化対策

- (i) 液状化対策の地下水位低下工法では、ジオポリマー材による TRD 工法を用いて対象地区の周囲に止水壁を設置し、その中の地下水をポンプアップして地下水位を恒常的に低下する。
- (ii) 地下水揚水ポンプのエネルギーは、ペブロスカイト等による太陽光発電システムを用いる。気候に左右されずに揚水できる体制を構築する。
- (iii) 地下水位低下施設の目詰まり等の劣化対策として、排水システムの目詰まり状況をリアルタイムでモニタリングする。
- (iv) 目詰まりは、マイクロナノバブル等による洗浄を実施する。
- (v) 液状化する砂層を極超微粒子セメントの注入によって固化する。

(b) 地震による津波対策

- (i) 多島による津波災害の減少法
- (ii) 湾や河川下への放流施設による津波エネルギーの減少法を実施する。

3. 豪雨による洪水対策

線状降水帯による豪雨の増加を考えると、日本中の現状の河川堤防等では、豪雨時の洪水対策を確実に実施することが困難となっている。したがって、新しい洪水対策では、重力だけで排水するのではなく、河川の河床下等に排水管を海まで施工する。電気エネルギーを用いたポンプシステムと従来の排水システムとを併用することによって、多様な豪雨パターンに対応できると考えている。この河川の地下の排水管ネットは、平時はリニア新幹線と同様に山から海のための物流システムに利用する。

4. 豪雨による斜面の土砂災害

- (a) 森林内の地山の表面の地形探査を図-1 に示すように

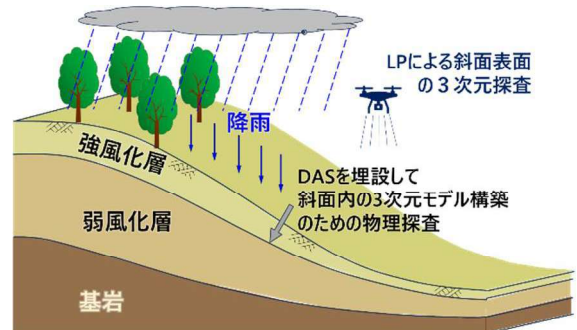


図-1 斜面表面と斜面内の調査

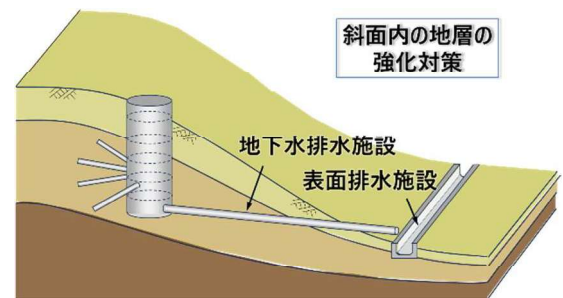


図-2 斜面内の地下水排水施設

- LP で実施して、斜面の危険度を判定する。
- (b) 危険な斜面に対しては、図-2 に示すように DAS を地中に設置して、「地盤内を可視化」して、地層構成を把握する。また、DAS による斜面の変位をモニタリングする。
- (c) 斜面内の各構成層の力学特性、浸透特性を求めるため、LWCPT による斜面内探査を実施する。原位置、室内試験より、力学特性、浸透特性を求める。
- (d) 対象斜面のデジタルツインモデルを構築して、豪雨や地震に対する斜面の安定性を検討する。
- (e) 豪雨等に対して危険と判定された斜面に対しては、災害が生じる前に以下の対策をする。
 - (i) 斜面崩壊が生じる所には、ジオポリマーコンクリート等を注入して斜面強化を実施する。
 - (ii) 斜面内の地下水位が上昇しないように、斜面内に水平排水施設を設置する。
 - (iii) 斜面の表面は降雨等で浸食されるので、地表面変化のモニタリングとして定期的にドローン等による LP 探査を実施する。
 - (iv) 降雨は斜面表面から容易に浸透してくるので、透水性が大きい斜面の浅層部に低透水性材料であるベントナイトのアルコール懸濁液等を表面に散布して、浅層部に低透水層を形成する技術開発

も重要であると考えている。

- (v) 図-2 に示すように、斜面内部に設置した排水施設の目詰まり対策として、目詰まり状況を光ファイバービデオスコープでモニタリングして、排水施設のスクリーンおよびフィルター等をマイクロナノバブルで洗浄をする。
- (vi) 基岩の風化を DAS によりモニタリングして、斜面崩壊対策を再考して、対策を強化する。
- (f) (d)から(e)を図-3 のフローチャートに示すように繰り返して、斜面安定を確認して、住民の命や財産を常に保護するシステムを確立する。

5. 粘性土斜面の地すべり

- (a) 斜面の表面形状の LP による探査。
- (b) 斜面内の粘性土層の分布を DAS により探査する。
- (c) 粘性土層を含んだ斜面の 3 次元デジタルツインモデルを構築するために、LWCPT 調査をして、斜面内の土質、透水性の原位置および室内試験を実施して、浸透と安定に必要なデータを取る。
- (d) 粘性土内の水分を排水するためのシステムを、水平ドレーン工法を設置している。この排水工により、地下水の浸透方向が水平から鉛直に変わるため、地山に作用する浸透水圧の方向を変化させる。したがって、水平排水工は地すべり対策として現在でも実施している。しかし、粘性土地盤がなぜ地すべりを起こすかを考えると、地盤内に地下水が浸透するためである。これは、粘性土地盤から土中水を取り除いていないためである。したがって、いつまでの地すべり対策を実施する必要がある。
- (e) 粘性土地盤から土中水を除去する方法としては、粘性土地盤内に電子レンジと同じように「マイクロウェーブを負荷して粘性土からの土中水を除去する方法」が考えられる。
- (f) 事実、現在では大きな木材板を乾燥させるため、マイクロウェーブが用いられている。
- (g) この技術を地すべり斜面に応用して、粘性土地盤から土中の水分を除去する方法が提案できる。
- (h) 粘性土の粘着力は、砂地盤とは異なり、図-4 に示すように土中の水分量を少なくすればするほど、その粘着力は増加する。
- (i) このように、地すべり面の粘着力が増加すると、地滑りの移動速度は低下してくる。
- (j) しかし、地すべり面の土中水を零にしても再び周囲の土中水が含水率の低い所に移動してくる。より一層の夢としては、太陽のエネルギーを集中させて、現場の

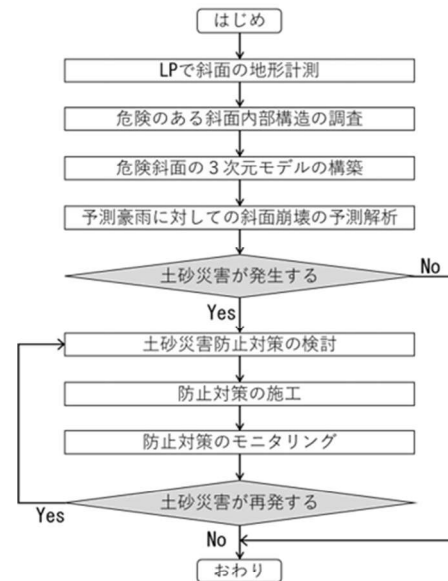


図-3 斜面崩壊対策のフローチャート

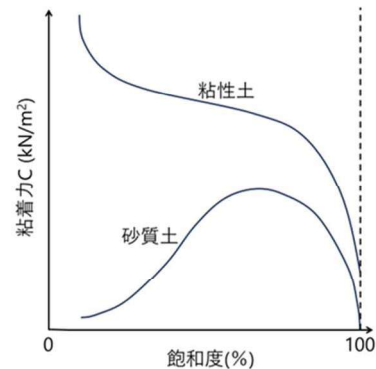


図-4 斜土砂の飽和度による粘着力の変化

粘土を陶器になるまで焼き上げれば、地すべり地の抑止杭になり、地すべり地の長期間の安定性が保持され则认为している。

6. おわりに

本研究グループは、自然災害を少しでも少なくするための研究を7年間続けてきました。まだまだ多くの課題がありますので、皆様に興味を持っていただき、どんどん改良されて、世界中の人々を自然災害から守ってあげる社会を形成していただくことを願っています。

(執筆責任者 西垣誠)

編集後記

この研究報告書を取りまとめるにあたり、5 人の寄稿論文と、西垣理事長をはじめとした 23 人の組合員の執筆論文により、多方面の分野における包括的な研究報告書として、とりまとめることができました。ありがとうございました。今後、更なる技術発展により新しい防災技術が確立されることが考えられ、また期待されますが、そのひとつのサインポストとして活用いただければ幸いです。

(事務局長 木村隆行)

国土交通大臣認可 統合物性モデル技術研究組合
令和 7 年度 研究発表会 研究報告書

発行日 令和 7 年 11 月 19 日 第 1 刷

編 集 統合物性モデル技術研究組合 事務局

発 行 統合物性モデル技術研究組合 理事長 西垣誠

〒700-0087 岡山市北区津島京町3丁目1-21

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

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

助 成 公益財団法人八雲環境科学振興財団(研究集会助成)

印 刷 イシダ印刷

執筆者一覧

	氏名	所属	執筆 章番号
	西垣誠	統合物性モデル技術研究組合(理事長)	1, 5.6, 5.8, 5.9, 7.4, 9.4, 9.5, 9.6, 9.7, 9.8, 9.9, 9.10, 9.11, 9.12, 9.13, 9.14, 9.15, 9.16
寄稿	横山俊治	公益財団法人深田地質研究所(元高知大学)	2.6
寄稿	西村友良	足利大学	5.1
寄稿	下野宗彦	西日本高速道路エンジニア中国株式会社	5.2
寄稿	森啓年	山口大学	8.7
寄稿	今井道男	鹿島建設株式会社 技術研究所	8.8
	木村隆行	株式会社エイト日本技術開発	2.1, 2.4, 2.8, 3.1, 3.4, 3.7, 5.1
	斉藤泰久	パシフィックコンサルタンツ株式会社	2.2, 6.1
	八野祐二	基礎地盤コンサルタンツ株式会社	2.3, 8.5
	井上真	株式会社ウエスコ	2.5, 3.2, 3.3
	今井利宗	川崎地質株式会社	2.7
	橘徹	土質工学株式会社	3.5
	麻生健介	株式会社ソイル・プレーン	3.6
	杉本芳博	大日本ダイヤコンサルタント株式会社・ジオトモラボ	4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 6.3
	片山輝彦	アサノ大成基礎エンジニアリング	5.3, 8.4
	笹井友司	中電技術コンサルタント株式会社	5.4, 5.5, 6.4, 6.5, 6.7, 7.1
	菅野雄一	復建調査設計株式会社	5.7
	末富岩雄	株式会社エイト日本技術開発	6.2
	松井章弘	中電技術コンサルタント株式会社	6.6
	西村正一	株式会社ウエスコ	7.2
	橋本和佳	中央開発株式会社	7.3, 9.1
	王林、陶尚寧	中央開発株式会社	8.1
	後藤和幸	アサノ大成基礎エンジニアリング	8.2
	上原大二郎	中央開発株式会社	8.3
	山内泰知	大日本ダイヤコンサルタント株式会社	8.6
	三宅雅生	株式会社ソイル・プレーン	9.2
	与那城稔	株式会社ウエスコ	9.3