

土工構造物の維持管理の合理化に関する研究

関西大学環境都市工学部 準教授 北岡貴文

1. はじめに

近年、線状降水帯による集中豪雨が多発している。浅層崩壊は突発的なものであり、崩壊が生じる可能性のある斜面を予測することは非常に困難である。土砂災害危険箇所は、全国で合計約 52 万箇所存在する¹⁾（がけ崩れ（表層崩壊）約 33 万箇所、土石流約 18 万箇所、地滑りや約 1 万箇所）。土工構造物（本研究では、道路土工構造物を対象とする）の点検では、まず何を、どのように点検すれば良いのか、に関する事項が重要となる。しかし、土工構造物に関するアセットマネジメントは、他の分野と比較して遅れている。これは、土工構造物は橋梁やトンネルなどの他の分野と比較すると、不確実性要因が多く含まれているので、明確な劣化過程を示さないということが要因であると考えられている。また、崩壊の発生する危険箇所は地下水が集中しやすい地下構造の斜面であると考えられており、簡単に地下水の集中する場所を特定できる探査手法があれば、点検の高度化が図れる。浅層崩壊では、地表面近くの不飽和浸透による影響が大きく作用される。不飽和浸透による浅層崩壊は、地盤の不均質性の問題もあり、浸透現象は複雑であり、選択流（preferential flow）やマクロポア流の影響から、従来の浸透理論よりも速い浸透が生じることが指摘されている²⁾。このような背景から、土工構造物におけるアセットマネジメントの点検手法の高度化の重要性が指摘されている。簡易的に地下水が集中しやすい場所、降雨浸透現象の特性を把握できる可能性のある、地下流水音探査の活用が期待されている。

ここで、地下流水音探査に関する既往の研究について述べる。多田ら³⁾は、均一な土層に水みちが 1 つ存在する場合の地下流水音を検討するために、模型実験を行った。その結果、地表面に伝わる地下流水音の大きさは、水みちの流量と深さの両者の関係によって定まるという知見が得られた（水みちの深さが等しければ、流量が多いほど音は大きくなり、少ないほど音は小さくなる）。多田ら⁴⁾は、水みちと崩壊の因果関係の研究が進んでいない原因の一つとして急峻な山地において、簡便に水みちの位置を特定する手法がないということを挙げ、地下流水音の分布と崩壊位置の関係性に着目した研究を行った。その結果、崩壊の発生している位置では地下流水音が強く、地中水の集中する部位（水みち）で崩壊が発生していることを示した。また、強い地下流水音が認められた未崩壊斜面が豪雨後に崩壊したことから、斜面には日常的に水みちが存在し、そこに豪雨などで多量の水が供給されることにより崩壊が発生すると推定した。本研究から崩壊する斜面と、崩壊しない斜面は根本的に水の供給のされ方が異なるということを明らかにした。

地下流水音探査は、自然斜面においても簡易的に水みちを調査できることから、その有用性が認められている。しかしながら、土工構造物を対象とした水みちや降雨浸透を対象とした点検手法の研究事例は、まだまだ少ない。簡易的に実施可能な地下流水音探査は、降雨浸透特性において、どのような地下流水音の反応が示され、原位置計測との総合的な検討が課題として残されている。

上記のことから、本研究の目的は、関西大学の敷地内にある大阪層群（堆積岩系）で構成された細粒分～粘土分を多く含む切土斜面を対象として、地下流水音探査を実施し、降雨浸透における探査の点検手法の適用性について検証することである。実験は大学の敷地内の三つの異なる人口斜面において、無降雨時、散水後、降雨後における地下流水音探査を実施することにより、原位置計測結果との定性的な考察を加えた。さらに、地下流水音探査を用いた今後の点検手法の高度化について提言した。

2. 実験対象地

図1は、本研究において対象とする人工斜面を示す。場所は、元々大阪北群に拡がる「千里丘陵」の南域部に位置する（関西大学の北門付近）。千里丘陵の地質構成は、表層部より新生代新三紀鮮新世～新生代第四紀更新世にかけて堆積した大阪層群（砂、礫および粘性土互層、数枚の火山灰を伴う）が分布する。本人工斜面は、細砂から粘土分で構成される比較的透水性の低い小規模切土斜面である（斜長は5m、斜面横の長さは7m）。そのため、透水性は比較的に低いと考えられる。現場周辺のボーリング調査において、孔内水位が12/28(1990)の1箇所において、2.40mと観測されているが、ほとんどの箇所では孔内水位は現れず、地下水位はだいぶ深部にあると考えられる。すなわち、本研究において、地下流水音探査でとらえようとしているのは、不飽和浸透である。また、切土I、切土IIは、図2、図3に示すように、それぞれ5.0m×7.0m(1.0m間隔で探査を実施)、12.0m×12.0m(2.0m間隔で探査を実施)の斜面の範囲で、地形的には切土Iの標高は、切土IIの標高と比較して数m高い箇所にある。



図1 実験対象地（関西大学北門付近）

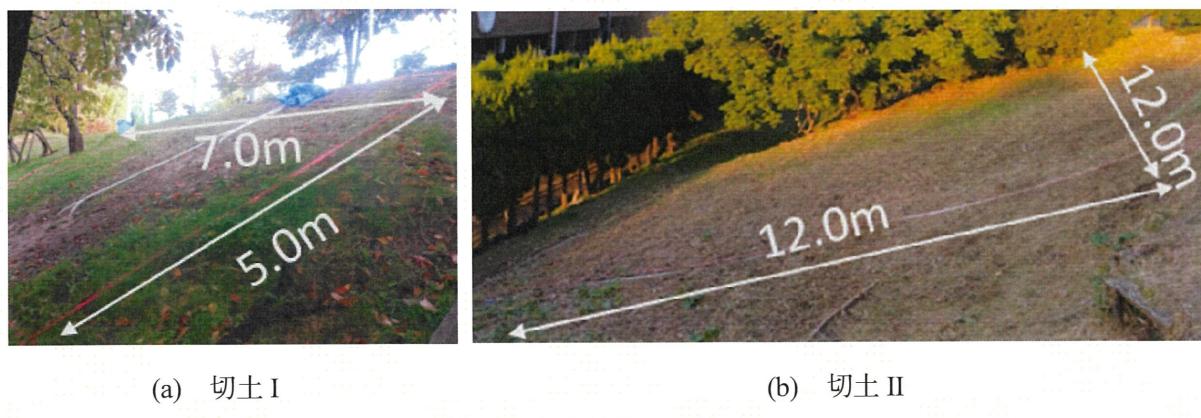


図2 実験対象人口斜面

3. 実験方法

本章では、原位置計測における概要と、地下流水音探査特性について言及する。

3.1 原位置計測の概要

実験サイトには、雨量計、土壤水分計、テンシオメータを設置し、2020年11月からモニタリングを開始した。本研究では、このモニタリングデータ（降雨と土壤水分、降雨とサクションの関係）の

分析を行った。当該斜面では、法尻と中腹ともに深さ 0.4m, 1.0m の計 4 つにセンサーを設置した（図 3 参照）。設置した計測器具は、土壤水分計（Decagon 社 EC-5）とテンシオメータ（モル製）、雨量計（転倒マス雨量計（応用地質製））である。計測は、2020 年 11 月 1 日から開始した。計測間隔は 10 分間であるが、降雨計測中は 1 分間隔で計測するシステムである。なお、体積含水率やサクションのデータは電圧で読み取られるため、得られたモニタリングデータは、式 1、式 2 の変換式を用いて推定した。

$$\text{体積含水率} = 11.9 * 10^{-4} * \text{mv} - 0.401 \quad (\text{式 } 1)$$

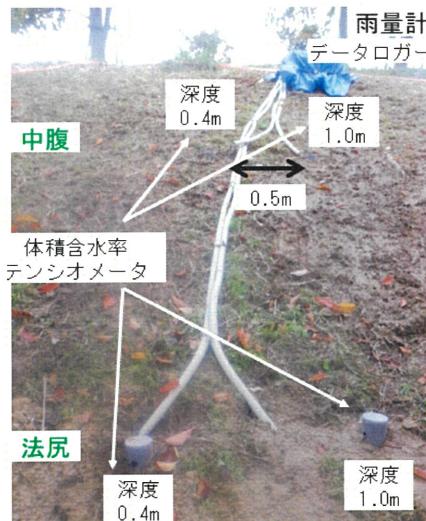
ここで、mv：土壤水分計

$$\text{テンシオメーターの値} = 100 * (\text{pf}/1000) - 200.4 \quad (\text{式 } 2)$$

ここで、pf：テンシオメーターの値

なお、計測を 2020 年 11 月から開始しているため、雨季における計測はまだ実施できていない。そのため、実験条件として、実験斜面に散水をして、表 1 に示す散水後に地下流水音探査を実施した。散水は、降雨強度に換算すると 10~20 (mm/hour) 程である。

表 1 実験条件（散水）



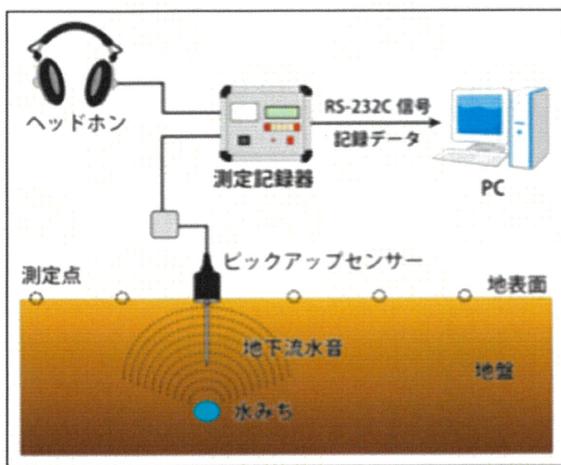
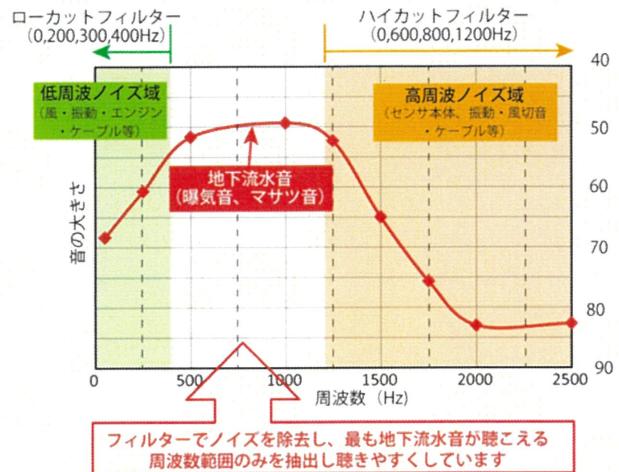
				天気	散水強度 (mm/hour)	開始時間	終了時間	継続時間
	10/2	盛土 I	散水	晴れ	20~30	8:20 11:50	10:20 13:00	3hr10min
①	10/2	盛土 II	探査	晴れ	—	10:20	11:50	1hr30min
②	10/2	盛土 I	探査	晴	—	13:30	—	—
	10/2	盛土 I	散水	晴れ	20~30	18:00	23:00	5hr00min
③	10/3	盛土 I	探査	晴れ	—	10:10	13:50	3hr40min
	10/3	切土 I	散水	晴れ	20~30	10:10	13:50	3hr40min
④	10/3	切土 I	探査	晴れ	—	13:50	15:10	1hr20min
計測器確認	10/30	切土 I	散水	晴れ	20~30	15:30	16:30	1hr00min
	11/12	切土 I	散水	晴れ	20~30	9:30	15:00	5hr30min
⑤	11/12	切土 I	探査	晴れ	—	15:00	16:25	1hr25min
単点	11/13	切土 I	散水	曇り	20~30	9:00	13:00	1hr30min
⑥	11/13	切土 II	探査	小雨	—	14:00	16:30	2hr30min
⑦	12/25	切土 II	探査	晴	降雨後	9:30	10:50	1hr20min
	1/25R3	切土 I	探査	晴れ	降雨後	10:25	11:25	1hr00min

図 3 計測システムの様子

3.2 地下流水音探査の概要

この地下流水音探査の仕組みは、地下水流に含まれる気泡が、地下水の移動に伴って破裂する際に生じる曝気音の強弱から、地下水が集中して流れている位置を特定するという仕組みである（図 4 参照）⁵⁾。測定装置はピックアップセンサー、測定記録器、ヘッドホンで構成されている。ピックアップセンサーは加速度センサー、センサーロッド、（防振板）で構成されている（旧バージョン GAS-03）。センサーロッドで地盤にセンサーを固定し、加速度センサーによって地中を伝搬する微弱な振動（音）を底面で検出し、電圧信号に変換後、測定記録器へ送信され、その値が探査の結果として数値で表示される。防振板は、ケーブルの揺れや振動によるノイズがセンサーへ伝わるのを防ぐためのものであるが、新バージョン（GAS-04）では必要なくなった。ピックアップセンサーでとらえた音には、地下水の流れる音、風切り音、砂礫の摩擦音、外界のノイズなどが含まれる。このような仕組みによって、測定部で地下流水音を增幅させたり、雑音を抑えたりすることで、加速度センサー底面部に伝わる微弱な音を検出している。測定機器で捉えた音には、地下流水音の他に、ノイズも含まれているので、図 5 のように測定した音の情報から周波数を制限するフィルター機能によりノイズに対応している⁶⁾。検出された音はヘッドホンから聞こえると同時にデジタルデータと

して測定機器に表示されるので聴覚的かつ視覚的に判断することができる。なお、探査で得られる単位は、加速度の検出値に対して複数回観測による平均化とフィルター処理を実施しているため、単位はない。

図4 地下流水音探査の仕組み⁵⁾図5 地下流水音の周波数範囲とフィルター効果⁶⁾

4. 実験結果と考察

4.1 原位置計測結果と考察（法尻）

図6は、法尻におけるサクションの結果を示す。図7は、法尻における体積含水率の結果を示す。なお、今回は、法尻サクションの深度1.0mでは計測初期不良のため、計測していない。図に示すように、降雨（または散水）時にサクション及び体積含水率が反応している。図6に示すように、先の11月12日前後の散水（約10 (mm/1hour) × 7時間）では、法尻深度0.4mで1.5kPa程上昇している。その後、1ヵ月と2週間程、ほぼ無降雨であったため、3.5kPa程低下した。12月27日、29日には、

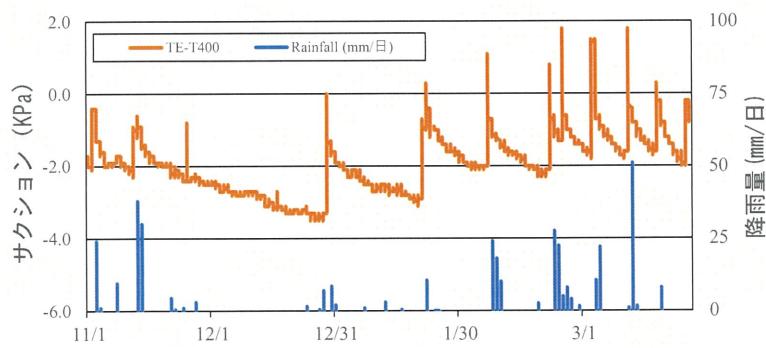


図6 サクションの変動 (法尻)

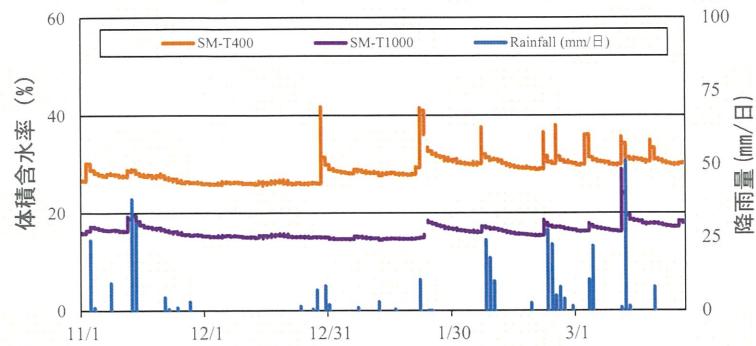


図7 体積含水率の変動 (法尻)

15.5(mm/2day)の降雨が降った際には、0kPa まで急上昇した。なお、計測が最後までできなかつたが、2021年1月21日と22日には、30.5(mm/2day)の降雨が計測された際は、負圧から正圧になった。23日、24日にも降雨は降っていたが、人為的なミス（バッテリー交換ミス）で計測できていない。なお、気象庁の雨量データ（茨木）では、23日に25mm（1時間最大3.0mm）、24日13.5mm（1時間最大3.0mm）であり、24日の16時には降雨は終了した。一方、図7に示すように、先の降雨において体積含水率の急上昇が計測された。これは、先述したように、テンシオメータが正圧を示した時と一致する。12月29日2時頃に降雨が開始した際には体積含水率26.2%から、6時15分頃には40%を超えた。この4時間程度に降った雨量は、5.5mm程であった。1月22日5時25頃に降雨が開始した際には体積含水率29.3%から、10時35分頃には40%を超えた。この5時間程度に降った雨量は、6.5mm程であった。

本斜面は大阪層群のシルト質を含む粘土（細砂も含む）であるため、透水性が非常に小さいと考えられる。そのため、本斜面において各項目が急上昇するのに要する時間は1時間程度であり、マクロポア流の可能性は低いと考えられる。

4.2 原位置計測結果と考察（中腹）

図8は、中腹におけるサクションの結果を示す。図9は、中腹における体積含水率の結果を示す。図に示すように、降雨（または散水）時にサクション及び体積含水率が反応していない。法尻の特性とは違い、中腹においては、浸透せず、表面流出が生じている可能性がある。

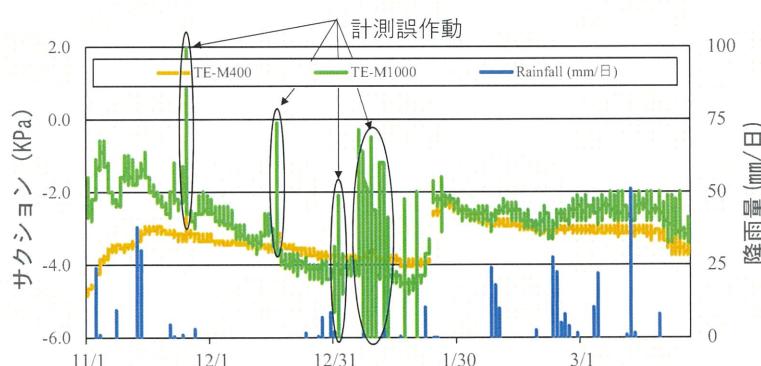


図8 サクションの変動（中腹）

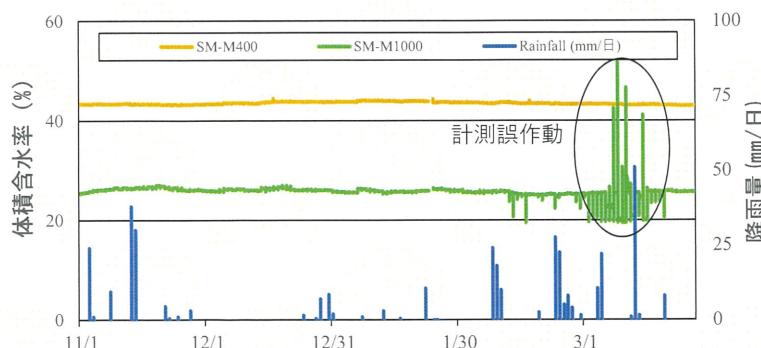


図9 体積含水率の変動（中腹）

4.3 地下流水音探査の結果と考察（切土I）

まず、切土Iについて考察する。図10は、2020年11月12日の、散水直後の地下流水音探査の結果を示す。法肩中央部において、比較的に強い反応が見られた（最大で100程、平均50程）。この結果から、水みちは、法肩の中央部に浸透しやすい（水みちと想定）領域が局所的にあると考えられる。図11は、2021年1月25日の、三日間降り続けた降雨数時間後の地下流水音探査の結果を示す。

す。なお、計測がバッテリーの問題で最後まで計測できなかったが、2021年1月21日と22日には、30.5(mm/2day)の降雨が計測された際は、テンシオメータが負圧から正圧になったことを確認した。23日、24日にも降雨は降っていたが、先述したように計測できていない。現地の観測データとは異なるが、降雨は24日の16時頃に終了したと推定される。本結果は、降雨終了から18時間前後経過した結果であると推定される。図に示すように、法肩ではあまり反応を示さなかつたが、法尻において比較的に強い反応が示された。このことから、降雨後の数時間において、水みちが法尻に集水していると推定される。なお、本探査結果は、原位置計測結果（法尻）において、深度0.4mで体積含水率が上昇していることから、計測結果と整合性がある。しかしながら、深度1.0mでは反応していないことから、探査の結果は、深度0.4m程に浸透した結果であると考えられる。一方、中腹においては特に反応を示さなかつたことから、中腹では浸透せず、表面流出していたと推察される。原位置計測結果においても、反応は示されていないことから、整合性がある。

上記のことから、散水直後（降雨直後）は、法肩に水みちがあり、数時間経過してから、法尻に水みちが集中したと考えられる。このように、地下流水音探査は、地盤中の不飽和部における水みちや、地盤の浸透しやすい場所の、不均質性を把握できると考えられる。

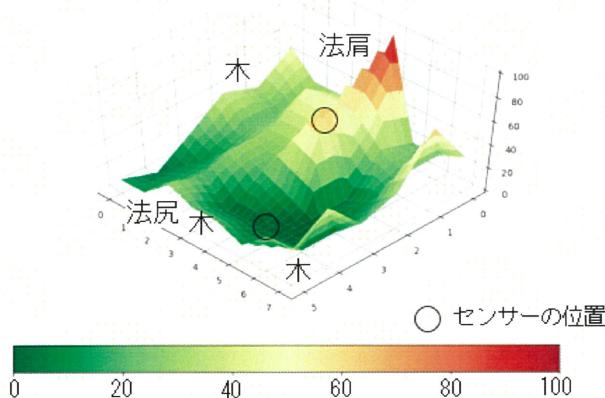


図10 切土I (⑤11月12日 散水直後)

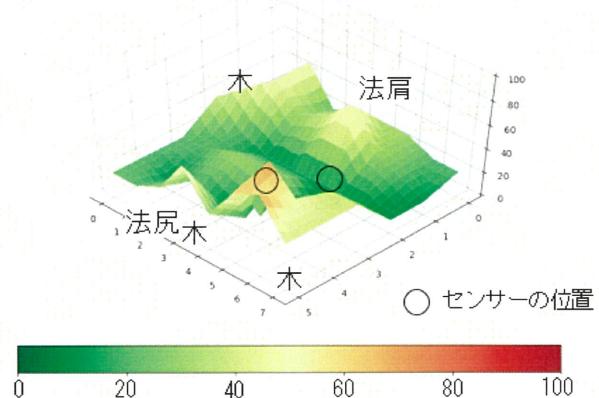


図11 切土I (⑥1月25日 (R3) 降雨後)

4.4 地下流水音探査の結果（切土II）

次に、切土IIについて考察する。図12は、2020年11月13日の途中降雨の場合、図13は、2020年12月25日の降雨後の結果を示す。図に示すように、途中降雨の場合と降雨後の結果を比較するとあまり変化がなかった。図12は、反応が高い箇所もあるが、これは途中で小雨が降った影響である。図13は、図12と比較して当初は、図13の地下流水音の反応が高いと予想したが、先述したよ

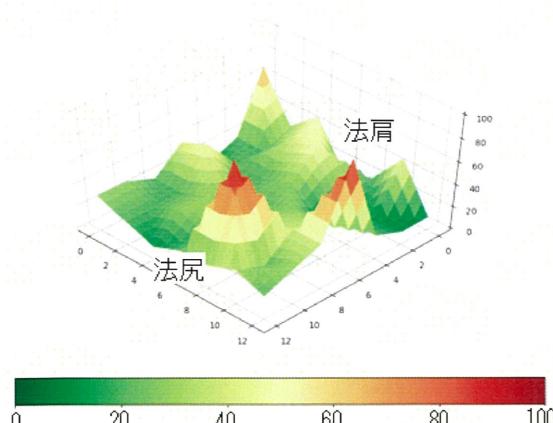


図12 切土II (⑥11月13日 途中降雨)

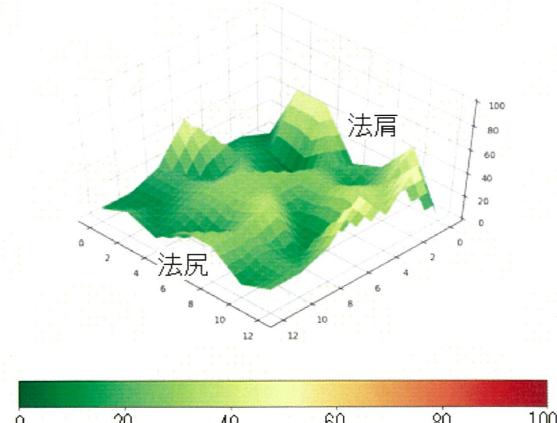


図13 切土II (⑦12月25日 降雨後)

うに、先の探査では途中の降雨の影響もあり、このような結果になったと考えられる。

一方、切土 I と比較すると、切土 II は、降雨が無い場合でも比較的に高い反応があったため、地形・地質的な影響による差と考えられる。例えば、切土 II は、切土 I と比較して標高が低い、地盤特性の違い等が考えられる。

4.5 地下流水音探査の結果（盛土）

最後に、盛土について考察する。図 14 に示すように、散水無しの測定結果は、ほとんどの領域において 0~50 程度であった。図 15 は、5 時間散水した直後に探査した結果を示す。図に示すように、左上の法肩と法尻中央部に大きな音を確認できた。この結果は、局所的に降雨浸透の可能性が高い領域を捉えていると考えられる。または、地下水位の上昇がしやすい領域がある可能性もある。一方、中腹においては反応を示さないことから、中腹においては表面流出していると考えられる。

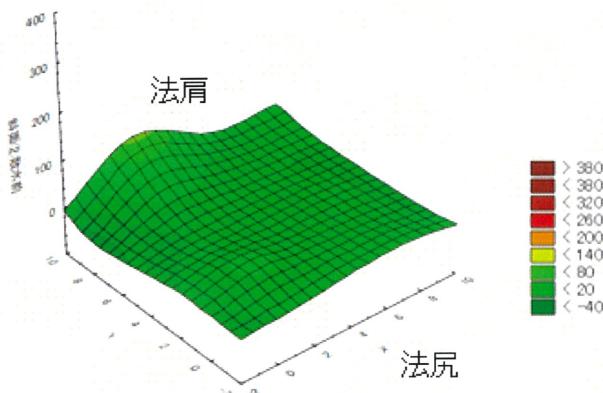


図 14 盛土 II (①10月2日 散水無)

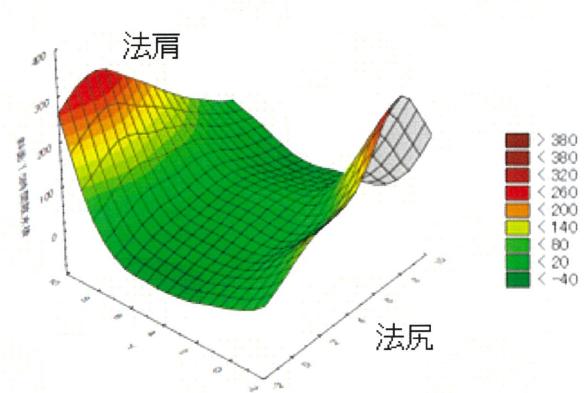


図 15 盛土 I (③10月2日 5時間散水後)

4.6 地下流水音探査を用いた土工構造物の点検への適用性に関する考察

上記の結果を踏まえ、地下流水音探査を用いた道路土工構造物の点検手法について考察を加える。

- まず、地下流水音探査の最大のメリットは簡易的に探査を実施できることである。図 10～図 15 で示す結果は、探査時間としては 1 時間程度で実施でき、水みちを簡易的に調査できるものである。今回、旧バージョン (GAS-03) と新バージョン (GAS-04) を用いて検討したが、新バージョンは、作業面において旧バージョンから改善が施されている。
- 雑音は、フィルター効果により多くは取り除かれているが、飛行機の騒音 (300~400), カラスの鳴き声 (100), 雨音 (500~600) と、取り除くことができない音があるため、どのような音が取り除くことができないのかについては、今後も整理していく必要がある。
- 降雨浸透は、原位置計測では理論よりも速い浸透が報告されている。この主な原因是、原位置地盤は不均質性があるためである。そのため、原位置斜面における降雨浸透を検討する上では、不均質場を考慮する必要があるが、地下流水音探査は、その不均質場を評価できる可能性を示した。
- 地下流水音探査の結果は、原位置計測結果との整合性が高かったことから（今回、法肩における浸透特性は検討できていない）、人工斜面に対する浸透現象を、簡易的に推定する際には、有用性が期待される。しかしながら、マクロポア部を把握できるのか等、十分な考察までには至っていないため、今後の検証が必要である。
- 植生や木の根により振動の減衰率が大きく変化すると予想されるため、影響はあると考えられるが、今回の結果からは十分な検討するには至らなかった。そのため、今後多くの実験を実施

する必要がある。

- 原位置計測で得られた結果と、地下流水音探査の結果との詳細な分析はできていない。しかし、これらのデータを分析することで、例えば、人工知能を用いて、探査結果と原位置計測結果との関係性を学習させることで、地下流水音探査を用いた土工構造物の点検手法の高度化が期待される。その理由としては、地下流水音探査は、実際の地下水位や（水みちの場所）、流量などを定量的に分析することはできないが、多くの現場で得られた原位置データを学習することで、探査結果に付加価値のあるデータを推定できる可能性があるためである。

上記、原位置計測結果は、現状では雨季（6月頃）の計測はできていないため、詳細な分析は実施できていない。引き続き、原位置計測を継続し、多くの条件における地下流水音探査を実施していく。

5. 結論

本研究は、関西大学の敷地内にある大阪層群で構成された細粒分～粘土分を多く含む切土斜面を対象として、地下流水音探査を実施し、道路土工構造物の点検手法の適用性について検証した。得られた知見については、4章にまとめているため、文面の都合上、ここでは割愛する。

今後の展望としては、原位置計測を継続することで、本斜面における降雨浸透現象の分析を試みる。特に、降水量の多い6月頃にも地下流水音探査を実施し、その結果を比較検討することで、時期や降雨量の変化を考慮した分析をする必要がある。さらに、地下流水音探査は、地下水位や流量を把握できるものではないが、得られた原位置計測データと探査の結果を、人工知能を活用して相関的な関係について分析をすることで、地下流水音探査を用いた道路土工構造物の点検手法の高度化を図る。

参考文献

- 1) 土木学会地盤工学委員会斜面工学研究小委員会：実験で学ぶ土砂災害, pp.60-61, 2020.
- 2) 多田泰之, 藤田正治, 堤大三, 小山敢, 河合隆行：地下流水音による地中水みち経路の推定, 水工学論文集, Vol.50, pp.283-288, 2006.
- 3) 多田泰之, 藤田正治, 堤大三, 小山敢, 河合隆行, 奥村武信, 本田尚正：地中水みちと崩壊発生位置の関連性, 砂防学会誌, Vol.60, No.4, pp.25-33, 2007.
- 4) 大津宏康, 北岡貴文, 馬場隆聰, 矢部満, 櫻井健：不均質な空隙分布に起因する選択流が降雨浸透特性・排水特性に与える影響, 土木学会論文集 C (地盤工学), Vol.76, No.2, pp. 122-141, 2020.
- 5) 竹内太一, 松尾信明：地下流水音探査測定による堤体盛土での探査事例, 全地連「技術フォーラム 2016」熊本, No.78, 2016.
- 6) 株式会社拓和 HP：地下流水音測定装置とは, <http://www.mizumichi.jp/sound.php>, 2021/1/12 閲覧