

8. 地盤を監視する技術

8.1 多点对应高精度微動振動で岩盤崩落および斜面安定を監視する『震介』

1. はじめに

微動計は、地盤や構造物が自然環境下で受ける微小な揺れ（地球の自然振動、遠地地震など）を計測する装置である。地盤調査での主な適用は、微動アレイ観測法（SPAC 法、FK 法など）で数台の微動計を一定の配置で設置し、地盤が伝える表面波の位相速度を解析する。これにより S 波速度構造 (V_s 構造) を推定することと、H/V スペクトル比法 (Nakamura 法) より垂直成分と水平成分のスペクトル比を解析し、地盤の共振周波数 (卓越周期) を求め、地盤の柔らかさや層構造の概略を推定する。

振動計は、地震などの強い揺れを高感度で計測する装置で、人工的な振動源や自然地震による揺れを記録する。地盤調査での主な適用は、実際の地震動を複数地点で記録して地盤増幅特性を分析する「地震応答観測」になる。

これまでに、高精度な微動計と MEMS 振動計を組み込んだ『震介』を開発してきた。本文は岩盤崩落および斜面安定を監視する事例を紹介する。

2. 岩盤崩落監視への適用

岩盤斜面の崩壊・落石は、表層崩壊に比べて発生頻度は低いものの、崩壊が発生した場合には甚大な被害が生じる。このため、その対策や監視は道路防災上の重要な課題である。しかしながら、広範囲に存在する岩盤斜面のすべてに対して対策や監視を行うことは困難であるため、道路防災点検やその後の詳細調査を行うことにより、対策や監視を行うべき斜面の優先度をつけている。また、優先度が高い岩盤斜面はその安定性の評価が必要となる。従来の岩盤斜面の安定性評価は、現場における定性的な落石調査（目視調査）に基づく方法であり、常時監視を前提としたものではない。本技術は、MEMS 振動計を活用し、地震動・振動が発生時また発生後の岩盤振動特性を随時に監視するものである。不安定岩盤斜面の健全度を、岩盤斜面の固有振動数、減衰定数、RMS 速度振幅比を用いて遠隔で把握することができる。

2.1 技術概要・ポイント

道路岩盤斜面の安定性評価において、近接目視時による防災カルテ点検が一般的な方法であるが、本技術は道路管理の一層の充実・道路の安全性向上と、岩盤崩壊の早期検知および崩壊の前兆現象把握を目的として下記の機能を有する。

- ◆ 加速度の多点計測 (図-1)
- ◆ 地震動・車両振動を感知し閾値 (最大加速度) を超

過した加速度の収録 (図-2)

- ◆ 卓越周波数、減衰定数、RMS 速度を随時解析し遠隔地にリアルタイム送信 (図-3) ¹⁾²⁾
- ◆ Web による斜面状況の遠隔監視 (図-4)

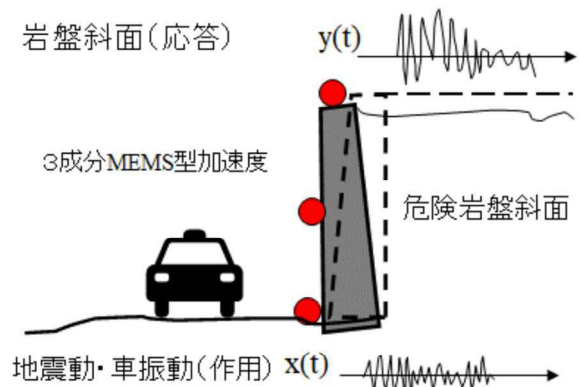


図-1 機器設置イメージ

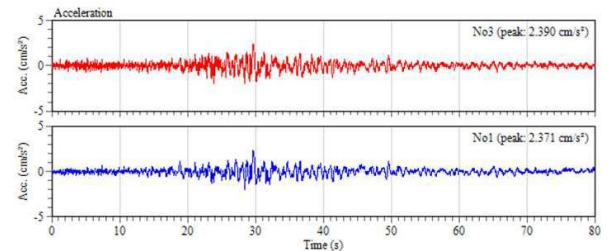


図-2 地震動加速度波形

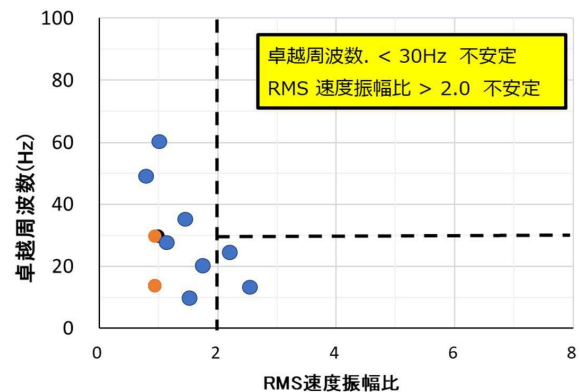


図-3 落石振動調査法

落石振動調査法では、不安定領域の判定のしきい値として

- ・ RMS速度振幅比が2以上
- ・ 卓越周波数が30Hz以下
- ・ 減衰定数が0.2以下

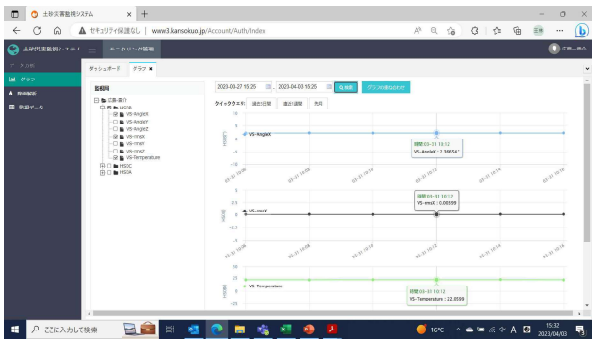


図-4 監視 Web 画面

2.2 現場状況と機器の設置

実証実験サイトの調査結果により、岩種は日本国内に広く分布する花崗岩系の深成岩である。当該斜面は、岩盤の緩みや落石が発生しやすい場所であり、鉛直に近い崖斜面である。その上部は、亀裂の発達と開口が進み緩んでいる状態で、落石の発生が予想される領域である。その下部は、亀裂の開口が少ないので、崩壊発生の可能性は低い、緩みの進行が予想される領域である。さらにその下部の道路面付近には亀裂の少ない不動領域が分布している。図-5 に示すように、3 成分の MEMS 型の加速度振動計 3 台 (No1～No3) を 3 つの領域 (上, 中, 下) に取り付け、岩盤斜面の振動を計測した。また、卓越周波数等を得るため計測点のうち 1 つ (No1) を安定岩盤に設置して基準振動とし、落石・崩壊部分の応答 (No.2,3) と比較する。各計測点における 3 成分 (NS, EW, UD 方向) の振動を 125Hz のサンプリング速度で常に記録する。計測した加速度が設定閾値 ($\approx 2.0\text{gal}$) を超えた時に加速度波形が出力され、各計測点における振動の大きさの比を把握する。

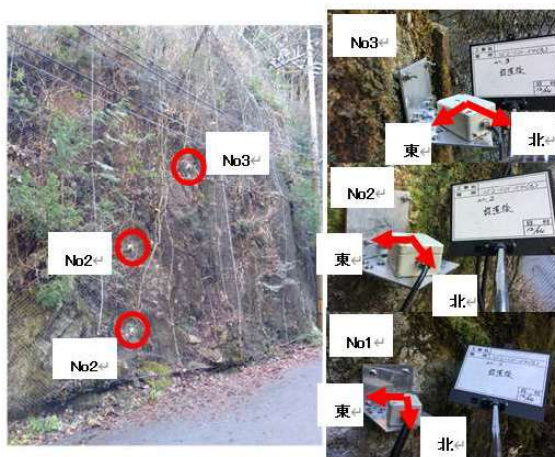


図-5 計の設置と機器方向

2.3 地震動の観測結果

2022 年 1 月 22 日 1 時 8 分ごろ、日向灘を震源とする地震 ($M_j=6.6$) が発生した。180km を離れた本実証実験サイトでもこの地震動を計測した。振動計 No3 (上) と No1 (下) の NS 成分の地震波形を図-6 に、振動計 No2 (中) と No1 の NS 成分の地震波形を図-7 に示す。これ

らの振動波形記録をもとに、3 つの振動計の振動変位軌跡を NS—EW 平面に整理して図-8 に示す。全ての振動計は、北東—南西の 45 度方向に振動しており、同一の不安定岩盤ブロックに配置した振動計の振動特性を示している。振動変位軌跡の方向は、不安定斜面の亀裂とほぼ直交しており、岩盤斜面の脆弱性の特徴が示されている。

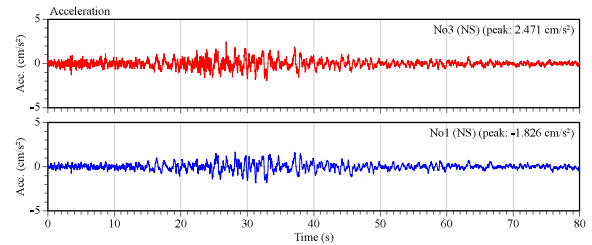


図-6 振動計 No3 (上) と No1 (下) NS 成分地震波形

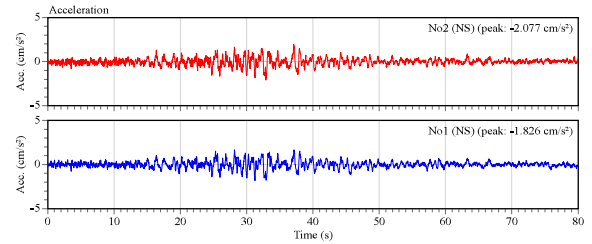


図-7 振動計 No2 (中) と No1 (下) NS 成分地震波形

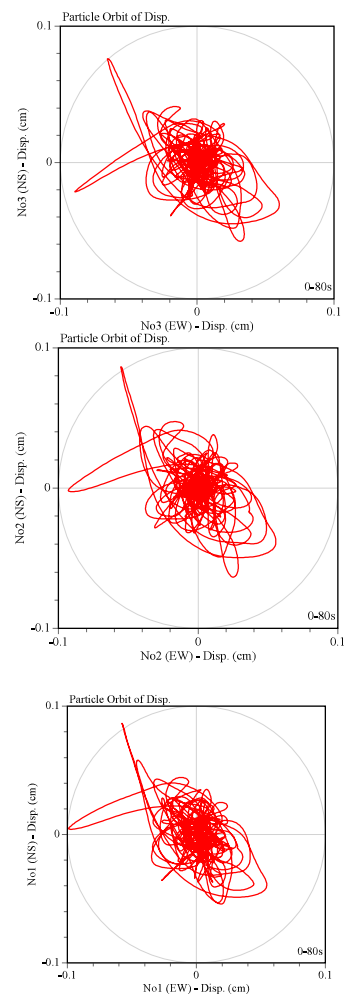


図-8 振動計 No3 (上) No2 (中) No1 (下) の震動変位 (cm) 軌跡

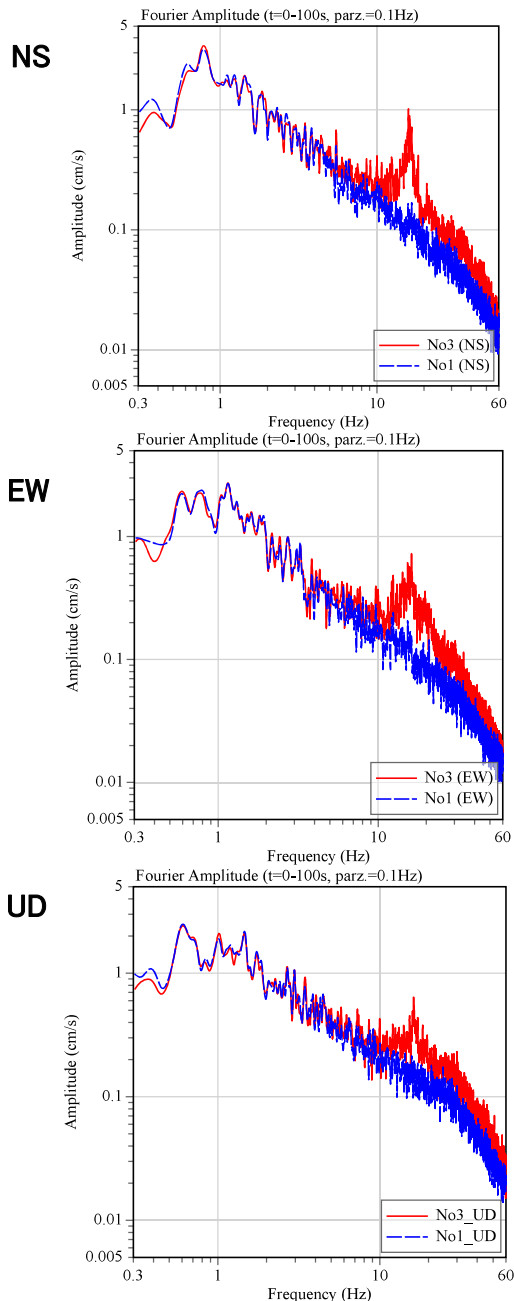


図-9 振動計 No3 上と No1 下の NS, EW, UD 方向のフーリエスペクトル

安定岩盤と不安定岩盤との間で、どのような周波数の振動が増幅されているのかを把握するため、安定岩盤 (No1) と不安定岩盤 (No3) のフーリエスペクトルを図-9に、No.1を基準としたフーリエスペクトル比 (伝達関数) を図-10に示す。また、振動計 No2 と振動計 No1 のフーリエスペクトル・RMS 速度振幅比・減衰定数の解析結果を加えて表-1に示す。今回の結果では、上部の振動計の振幅が大きく、増幅していることが確認できた。

また、フーリエスペクトル比より求めた卓越周波数は No3/No1 では 13Hz, No2/No1 では 29Hz であり、No.2の方が高い値となっている。落石危険度振動調査では、岩塊の浮石部と基盤部の振動特性の相違により、岩塊の安定性の評価を行う¹⁾。具体的には基盤部と浮石部の揺れの増幅を示す RMS 速度振幅比、浮石部の揺れの特性

を示す卓越周波数、揺れの減少度合いを示す減衰定数との関係から岩塊の安定性を評価する¹⁾。不安定化の判定閾値として RMS 速度振幅比が 2 以上、卓越周波数が 30Hz 以下、減衰定数が 0.2 以下を用いている²⁾。

上述した方法を参考して道路岩盤斜面の安定性の評価を行う。日向灘を震源とした地震動で得られた RMS 速度振幅比、卓越周波数、減衰定数との関係を整理した。

図-11 は RMS 速度振幅比と卓越周波数の関係を、図-12 は RMS 速度振幅比と減衰定数の関係を示す。図-11 と図-12 においては、計測値が左上にプロットされるものほど危険度は低く、右下にプロットされるものほど危険度は高くなる²⁾。

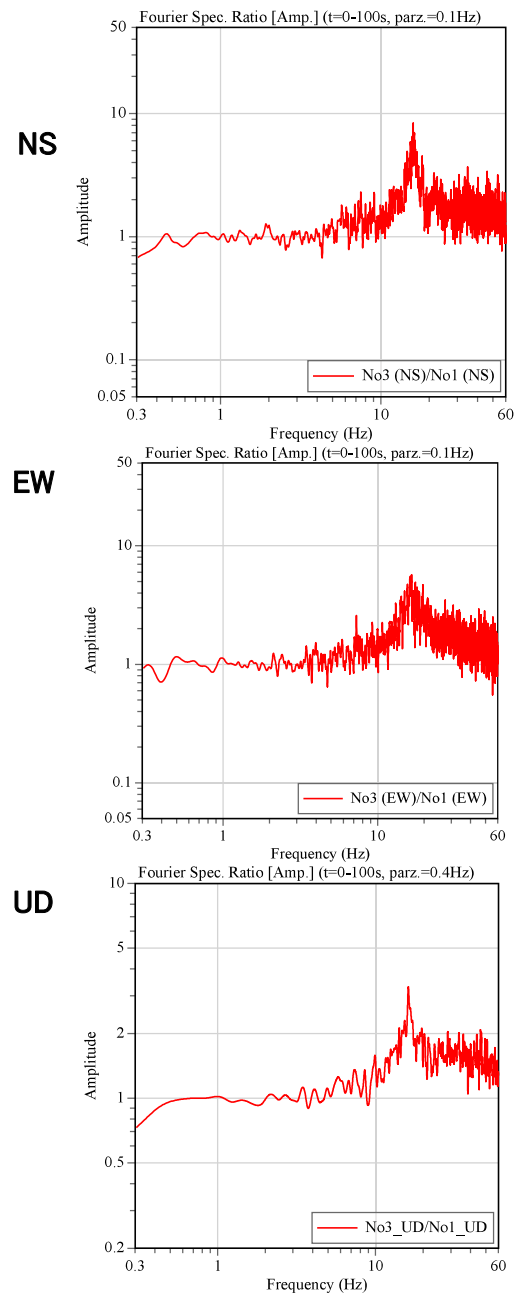


図-10 振動計 No3 上と No1 下の NS, EW, UD 方向のフーリエスペクトル比

表-1に示すように RMS 速度振幅比のほとんどが 1 であり、危険判断の閾値 (<2) 以下になっている。これは基盤部に対して岩盤部の応答は小さく岩盤斜面が安全にあ

ると判断するが、卓越周波数は 13Hz および 29Hz と判定閾値の 30Hz より低い数値になっており、不安定領域の範囲である。これは不安定岩盤の劣化で地盤構造が不均一となり、やや不安定な構造になっていると判断できる。よって、この岩盤斜面は、引き続き長期的なモニタリングの実施が必要と考えられる。

表-1 地震動による振動計 No3 (上)
No2 (中) No1 (下) の解析結果

伝達関数		RMS速度 振幅比	卓越周波数 (Hz)	減衰定数
No.2/No.1	NS	0.99	29.81	0.06
	EW	0.94	29.81	0.07
No.3/No.1	NS	0.94	13.87	0.06
	EW	0.94	13.87	0.05

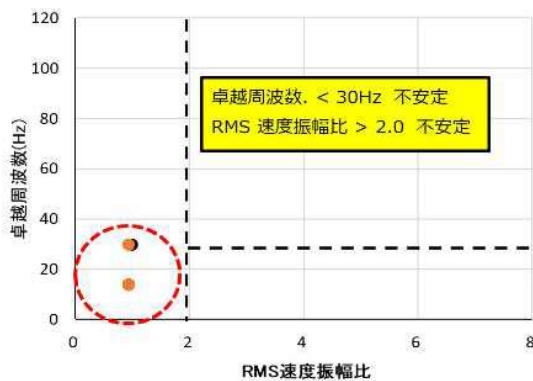


図-11 卓越周波数と RMS 速度振幅比の関係

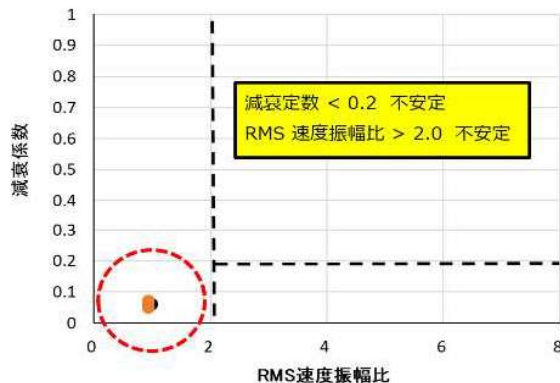


図-12 減衰定数と RMS 速度振幅比の関係

3. 斜面安定監視への適用

地面が自然に振動している状態（常時微動）の中で、ある特定の周波数において水平方向の振動が強くなる（ピークが現れる）現象が観測される。このピーク周波数（共振周波数）は、主に軟らかい地層（堆積層）とその下にある硬い基盤との構造に依存する。

H/V スペクトル比とは、水平方向の加速度時刻歴データから求めた振幅スペクトルを鉛直方向の振幅スペクト

ルで割った比であり、これを用いて地盤特性を評価する手法が提案されている⁴⁾⁵⁾。

一般に、H/V スペクトル比のピーク（地盤の固有周期）の値が大きいほど、地盤の地震動増幅が大きくなるとされている。さらに、H/V スペクトル比は地盤の S 波速度（Vs）と密接に関係しており、S 波速度が小さい地盤ほど、H/V スペクトル比のピーク値は大きくなる傾向がある。このように、常時微動 H/V スペクトル比と地盤の S 波速度（Vs：せん断波速度）の関係は、地盤の固有周波数や地盤構造の推定において非常に有効な手法である。

H/V スペクトル比のピーク周波数 f_0 は、次のような単純化された式で近似される：

$$f_0 = V_s / 4H \quad (1)$$

f_0 : H/V スペクトル比のピーク周波数 (Hz)

V_s : 最上部軟弱層の S 波速度 (m/s)

H : 軟弱層の厚さ (m)

この式は、「地表面に垂直に入射する S 波が地表面で反射して共振するモデル」（一次元 SH 波モデル）に基づいており、1 層地盤モデルにおいて特に有効である。

3.1. 現場状況と機器の設置

岡山県岡山市北区半田山（津島・半田町周辺）は、2018 年 7 月の豪雨により、複数箇所では斜面崩壊が発生した地域である。地盤は下部に中生代白亜紀の花崗岩（万成石）、その上部に熱変成を受けた泥質堆積岩（ホルンフェルス化）が分布しており、一般には安定な地盤と考えられていた⁶⁾。しかし、2018 年 7 月 7 日午前 10 時ごろ、東西斜面の少なくとも 2 箇所では斜面崩壊が発生し、住宅被害も確認された。崩壊が発生した斜面の傾斜角はおおむね 22°～25°程度であり、急傾斜地（30°以上）には該当しない範囲であった。

被災後には、微動アレイ探査（地震計による S 波速度構造解析）および DAS（Distributed Acoustic Sensing：光ファイバを用いた S 波速度構造解析）による振動計測が行われ、表層風化層の厚さや地下構造（S 波速度）の調査結果が図-13 に示されている。

そこで、今回微動振動センサー「震介」を軽量コーン貫入試験装置（Light Weight Core Penetration Test）の調査地点 LW-2 と LW-9 の中間地点に設置した。その詳細な設置位置は図-14 に示す。

事前調査の結果から当該計測地点における軟弱層の厚さは約 3.4m、S 波速度はおおむね 160～200m/s の範囲であることが確認された。

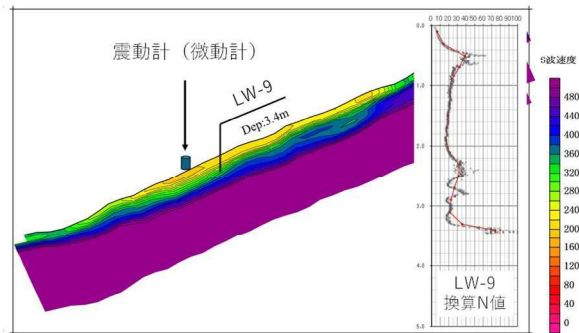


図-13 被災後の調査における表層風化層の換算 N 値と地下構造 (Vs) の結果

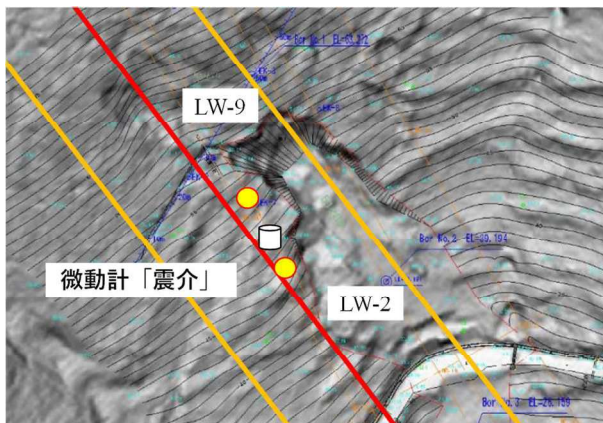


図-14 微動震動計の詳細設置位置

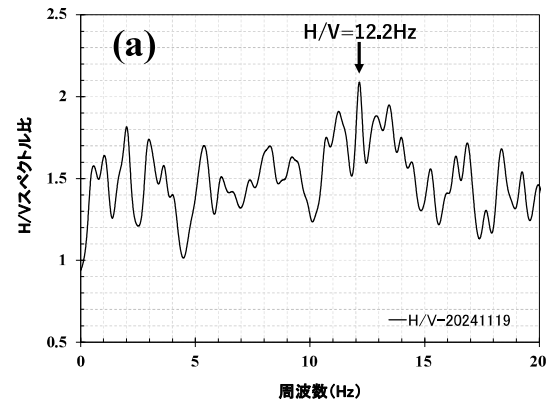
3.2. 常時微動の観測結果

常時微動計測は、深夜 1 時から 30 分間にわたってサンプリングを実施し、得られたデータを 50 秒ごとに区切って複数のスペクトルを算出した。これらのスペクトルを 5 回平均化（スタッキング）することで、信頼性の高い H/V スペクトル比の結果を得た。3 日間にわたる観測結果を図-15 に示す。H/V 比が最大となる周波数（共振周波数） f_0 は、それぞれ 12.2 Hz、12.6 Hz、13.3 Hz であり、これらの平均値は 12.7 Hz となった。1 層地盤モデルに基づく近似式（式 1）において、H/V スペクトル比のピーク周波数 f_0 と LW-9 地点における軟弱層の厚さ（3.4 m）を代入して換算すると、最上部軟弱層の S 波速度（Vs）は約 172 m/s と求められた。この結果は、これまでに実施された「崩壊の危険性のある箇所における弱層厚の分布調査」⁷⁾において得られた S 波速度（Vs = 160～200 m/s）の範囲とほぼ一致しており、妥当な値であると考えられる。

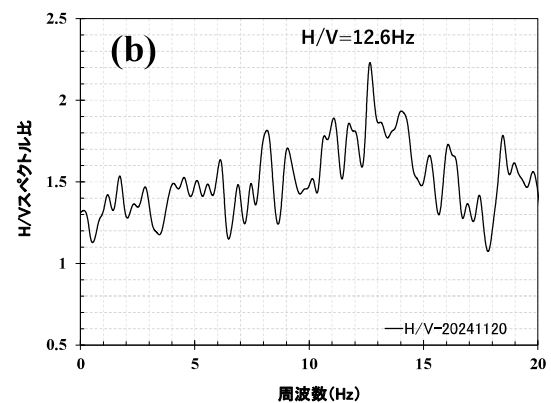
4. まとめ

振動計を用いることにより、道路岩盤斜面の安定性変化

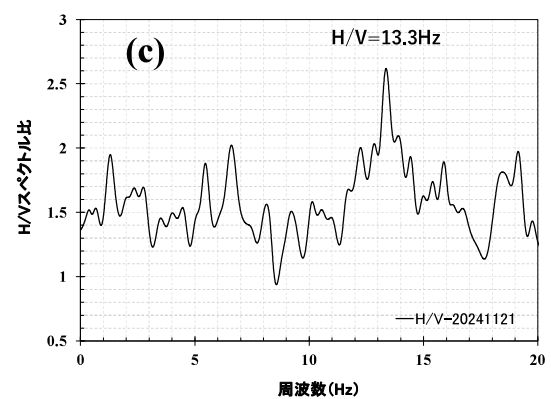
を定量的に遠隔地から監視する方法の適用事例について述べた。本技術は、道路維持管理に対して、対策工の適切な実施時期の判断や、工事中の安全管理等で使用できる技術と考えられる。現在は、さらに各種の振動源（車両走行振動など）を用いた計測を行い解析することにより、より適切な岩盤の不安定評価方法を高速道路斜面と鉄道斜面で行っている³⁾。



(a) 2024/11/19



(b) 2024/11/20



(c) 2024/11/21

図-15 H/V スペクトル比

微動探査に関しては、2021 年に物理探査学会および地震防災研究会によって、計測方法の標準化に関するシンポジウムが開催され、計測精度の向上が図られている。微動探査は、新たな地盤内部構造の探査技術として注目されており、今回実施した常時微動モニタリングは、省

電力かつ設置が容易な機器を用いることで、継続的なモニタリングを可能とするシステムである。システムでは日々の観測データを遠隔地のサーバに送信し、地盤構造の変化が常時監視されるとともに、地層の S 波速度構造変化を捉えることができる点が大きな特徴である。

(執筆責任者 王林, 陶尚寧)

参考文献

- 1) 不安定岩盤ブロック抽出のための岩盤斜面振動計測マニュアル, 土木研究所資料, 第 4051 号, 2007 年.
- 2) 土木構造物のためのモニタリングシステム活用ガイドライン (案) 土木研究所資料, 第 4408 号, 令和 2 年 12 月.
- 3) 王林, 陶尚寧, 山口弘志, 森脇武夫: 地震動を利用した道路岩盤斜面の安定性評価について, 第 58 回地盤工学研究発表会, 12-8-2-06, 2023.7.
- 4) 中村 K.: 常時微動による地盤の評価に関する研究. 地震, 58(1), 37-48.2005
- 5) 中村豊: H/V スペクトル比の基本構造, 物理探査学会第 3 回地震防災シンポジウム「微動と地震防災」, 2008.
- 6) 公益社団法人地盤工学会中国支部, https://jgs-okayama.sidedesk.jp/report/report2022_4th.php
- 7) 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

8.2 光ファイバ給電技術を用いたセンシング事例

1. はじめに

光ファイバ給電とは、レーザー光を光ファイバへ通して電源の無い遠隔地まで送り、そこでレーザー光を電気に変換しセンサ等に給電する技術である。光ファイバ給電方式は既存の技術¹⁾ではあるが、防災関連の野外観測装置に使用された事例は少ない。また、光ファイバ給電を用いたシステム（以後光給電システムと呼ぶ）では、光ファイバ給電に使用する光ファイバにデータ通信を乗せることが可能であり、電線や無線によるデータ通信網を必要としないのも特徴の一つである。そして、光給電システムを用いた野外観測装置は、電気式の監視装置に比べ、落雷を受けやすい電源部のソーラーパネルやデータ通信のアンテナなどがいないため、雷雨や豪雨に対する抵抗性が高く、長期の安定的な観測が可能である²⁾。

本稿では、斜面崩壊や堤防等の監視用として開発した土壌水分量の多点計測と斜面の傾斜角度を計測できる光給電システムを半田山の LW8 地点の観測に使用した。

LW8 地点と現地管理用道路わきの観測小屋の結ぶ約 115m のうち 100m 区間は、微動、表面波、DAS で使用された SM 光ファイバを利用した。

今回観測に使用した光給電システムについて報告する。

2. センサの選定

観測地点の土壌水分と斜面の傾斜を同時に計測するセンサとして、株式会社 A・R・P 社製の WD5-WTA を選定した。選定理由は、1 台で土壌の体積含水率、電気伝導度と環境温度および 3 軸の加速度を計測でき、1 分間に 1 回測定時の平均消費電流が 0.9mA と小さいためである。

また、SDI12 デジタル通信を採用しているため、1 本のケーブルで多数のセンサを接続できることも選定理由の 1 つである。また WD5-WTA は 2.6 土壌水分センサによる体積含水率の変化特性で使用された LW-9 に設置したセンサと同じ型式である。図-1 に WD5-WTA の外形寸法と加速度の軸方向、表-1 に仕様を示す。

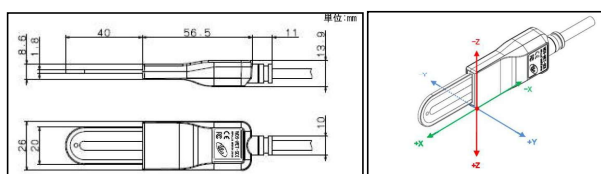


図-1 WD5-WTA の外形寸法と加速度の軸方向

表-1 WD5-WTA の仕様

項目	WD5-WTA-SDI
体積含水率 (VWC)	計測範囲 0 (空気中) ~ 100% (水溶液中)
	分解能 0.1%
	測定精度 50%以下: $\pm 3\%$ 50%以上: $\pm 10\%$ (*1)
	精度保率温度範囲 $-5^{\circ}\text{C} \sim +45^{\circ}\text{C}$ (*2)
加速度 (X/Y/Z: 3 軸)	計測範囲 各軸 2G
	分解能 0.001G
	測定精度 オフセット誤差: ± 0.186 感度誤差: ± 0.126 *測定温度 25°C にて
	計測範囲 $-10^{\circ}\text{C} \sim +60^{\circ}\text{C}$ (*4)
温度	分解能 0.1°C
	測定精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$
	精度保率温度範囲 $-10^{\circ}\text{C} \sim +60^{\circ}\text{C}$
	動作温度範囲 (センサー部) $-10^{\circ}\text{C} \sim +60^{\circ}\text{C}$ (*4)
環境条件	保管温度範囲 $-20^{\circ}\text{C} \sim +70^{\circ}\text{C}$ (*4) (*5)
	防水性 (センサー部) IPx8 相当 (水深 1m, 1 時間水没)
	EMC EN 61326-1:2013 Class B / FCC Part15B Class B
	供給電源 $+4.5 \sim +15\text{VDC}$
電源	消費電流 (DC5V) 平均消費電流: 0.9mA (1 分間に 1 回測定) 計測時消費電流: 33mA (typ) スタンバイ時: 550 μA 常温 (typ)
	消費電流 (DC15V) 平均消費電流: 0.4mA (1 分間に 1 回測定) 計測時消費電流: 15mA (typ) スタンバイ時: 260 μA 常温 (typ)
	回路 SDI-12 Ver1.3
	出力レベル H レベル: 3.3V 以上 / L レベル: 1V 以下
インターフェース	通信速度 1,200baud $\pm 2\%$
	計測間隔 1 秒 (min)
	ケーブル径 $\phi 5.4\text{mm}$
	ケーブル長 5m (+200m/-0m) ※最大 30m まで延長可
ケーブル	ケーブル型名 サンライズ SX (NE) LF A#G25 (0.25G) X2P
	末端処理 平面上げ処理
	最大接続数 9 台
	プローブ長 40mm $\pm 20\text{mm}$
センサー プローブ	構造 折り返し平行伝送路
	材質 FR-4 (4 層)
	重量 107.5mm x 26mm x 13.9mm
	外形寸法 240g
付属品	RdHe
取扱い	取扱説明書 1 冊

3. 光ファイバ給電システムの概要

本光給電システムは、計測小屋に設置したゲートウェイ (親機) と監視現場に設置したセンサーノード (子機) とを 1 本の SM 光ファイバ線で繋ぎ、WD5-WTA と子機に対しての電力供給とデータ通信を行う観測装置となる (図-2 参照)。子機の電力は、親機の発電用光源 (レーザー光) を光ファイバ線で子機の発電部にある光発電素子へ送り、この素子でレーザー光を電力に変換して供給する。半田山サイトの電力は、計測間隔を 15 分と設定したことから子機を含めた 3 台の WD5-WTA が計測にて消費する電圧降下を十分に充電できる電圧設定が必要となる。1 回の計測で消費電力が約 15mW であることから余裕を持って親機のレーザー光の強さを 250mW とし、子機に対し約 5 分で 60mW まで充電するように設定した。写真-1 に親機、写真-2 に子機と配線 BOX に接続された WD5-WTA を示す。

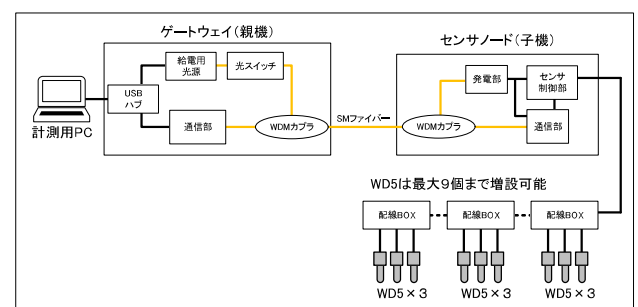


図-2 光給電システムの構成

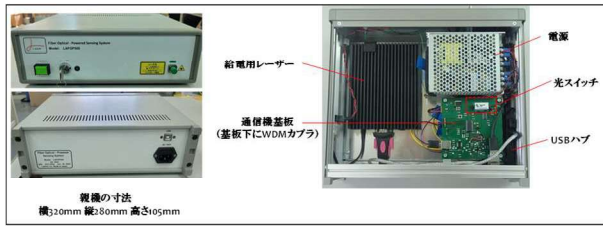


写真-1 親機の外観と構成



写真-2 子機（右）と配線BOXとWD5-WAT（左）

4. 半田山 LW8 の子機と親機の設置

本来光給電システムの親機は、光ファイバ網と商業電源の設置してある観測室内で使用するのが前提である。しかし、半田山サイトでは商業電源のある観測室を準備することができなかったため、管理道路脇の地盤内部の可視化実験のDASで使用されたSM光ファイバBOX付近に計測小屋を設け、ソーラーパネルによる電源供給で対応した。図-3に設置位置と設置後の光給電システムの写真を写真-3と写真-4に示す。



図-3 子機設置位置（LW8）と親機設置位置



写真-3 LW8に設置したWD5-WTAと子機



写真-4 親機とPC等を設置したソーラー発電計測小屋

5. 計測結果と課題

光給電システムでLW8地点の土壌水分と傾斜角度を計測した結果、土壌水分の計測結果は同地点で当社のセンサーノードで計測した結果と同じとなった。しかし、傾斜角度は光給電量の関係で15分に1回の計測に付き1回のサンプリングとしたため、図-7で示すように同地点同センサを用いたセンサーノード計測結果に比べ光給電システムのゆらぎが大きく表れる結果となった。ちなみにセンサーノード計測では、1回の計測に対して6回サンプリングした平均値を採用している。加速度センサのゆらぎに対しては、1計測に対しサンプリング数を増やし統計学手法で近似した値を求めざるを得ない。よって、今回の課題に対する解決策として現在親機のレーザー出力を上げ、平均値を得るためのサンプリング回数増加においても十分な電力を供給できる対策を実施している。

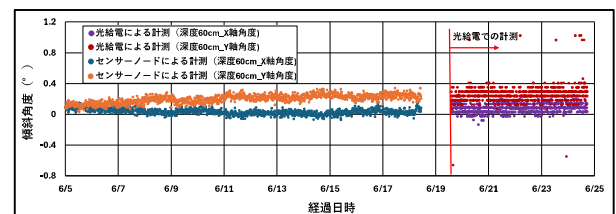


図-7 計測手法の違いによる傾斜角度のゆらぎ

（執筆責任者 後藤和幸）

参考文献

- 1) 三好貴子・瀬尾昭治・栗原啓丞・岩田樹哉・竹延千良・後藤和幸：光ファイバによる給電・通信機能を実現した計測技術の開発―地下水の物理・化学パラメータ計測装置の例―，日本地下水学 2021 年秋季講演会，175～180，2021。
- 2) 後藤和幸・片山輝彦・長田遼介：光給電システムを使用した斜面の土壌水分量と傾斜角度同時観測装置の開発，日本地下水学 2023 年秋季講演会，46～51，2023。

8.3 比抵抗モニタリング『レス・ツール』で監視する

1. はじめに

地盤の比抵抗（＝電気伝導度の逆数）は、間隙率（ φ ）や間隙水の比抵抗（ ρ_w ）、飽和度（ S_w ）、導電性鉱物の種類や量に依存する。導電性鉱物を含まないときの比抵抗 ρ は、アーチーの式と呼ばれる式(1)で表されることが経験的に知られている。

$$\rho = a \times \varphi^{-m} \times S_w^{-n} \times \rho_w \quad (1)$$

ここで a , m , n は地盤に固有の定数で、 $a = 0.6 \sim 1.5$, $m = 1.3 \sim 3$, $n = 2$ となる。すなわち、地盤の間隙率や間隙水の比抵抗が変化しなければ、地盤の比抵抗は飽和度の 2 乗に反比例することを意味し、たとえば飽和度が 30% から 90% に変化すると、比抵抗はほぼ一桁小さくなる。したがって、地盤の比抵抗をモニタリングすれば、含水状態の変化を知ることができ、斜面崩壊の警報システムとして利用可能であると考えられる。

現在、地盤調査などで一般的に用いられる電気探査は、比抵抗 2 次元探査（または高密度電気探査）と呼ばれる手法で、測線上に設置した数十点以上の電極をすべて測定装置に結線し、電極切り替え装置をコンピュータで制御することによって、数百～数千通りの電流電極－電位電極の組み合わせの測定を行う。これをインバージョン解析することによって、地下の比抵抗分布を可視化できることが大きな利点である。これまで、同一測線の比抵抗 2 次元探査を繰り返し実施して、降雨前後の比抵抗構造の比較することは行われているものの²⁾、モニタリングとして適用するためには、測定と解析に多大な時間を要すること、電源として商用電源や発電機が必要で、測定装置も大掛かりで、高価なものであることなどの難点がある。

発想を変えると、斜面崩壊警報システムとしては、降雨等によって比抵抗が平常時から変化していることを検出することが重要であり、詳細な比抵抗断面は必ずしも必要ではないと考えられる。ここでは、電気探査の垂直探査を利用する比抵抗モニタリングシステム^{3), 4)}について紹介する。

2. 比抵抗モニタリング装置『レス・ツール®』

2.1 測定装置

比抵抗モニタリング装置の主な仕様とシステムの模式図を表-1 および図-1 に示す。斜面崩壊警報システムとして、高頻度で比抵抗の解析結果が得られることと、外部電源がない場所でも使用できることの 2 点が要求されることから、上述のとおり比抵抗 2 次元探査は現実的ではなく、垂直探査を用いている。

表-1 比抵抗モニタリング装置の主な仕様

本体サイズ	284×363×120mm, 4.3kg
最大通電電圧・電流	120V, 50mA
通電周期	500msec
電位測定	10ch（同時測定）, 24bitA/D
測定間隔	5, 10, 15, 20, 30 分～1, 2, 4, 8, 12, 24 時間（選択可能）
内蔵電池	12V, 15Ah
記憶媒体	SD カード

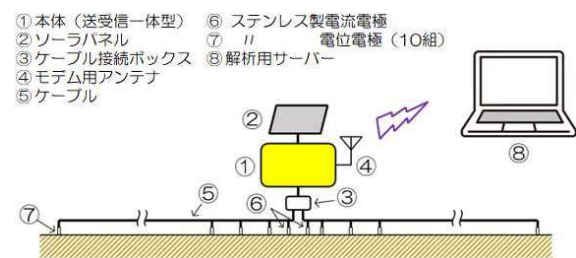


図-1 比抵抗モニタリング装置の模式図

垂直探査は、測点を中心として両側に電極を展開し、電極間隔の異なるデータを集めて、測点の下の比抵抗構造を水平多層構造として求める手法である。シュランベルジャー法と呼ばれる測定方法では、測点近くに電位電極を固定し、それを挟んで外側に電流電極を展開する。電流電極の間隔を変化させながら電位測定を行い、一組のデータとする。ただし、この方法では電流電極間隔を変更するたびに通電と電位測定が必要となり、電流電極を切り替える機構（もしくは手作業による電極の移動）が必要となるので、装置が複雑で、消費電力も多くなる。そこで筆者らのシステムでは、測点近くの電極（図-1 の⑥）で電流を流し、それを挟む外側の電位電極（同⑦）で測定を行う、“逆”シュランベルジャー法を採用した。

シュランベルジャー法と逆シュランベルジャー法は理論的に等価である一方、電極間隔の異なる複数の電位電極をあらかじめ多チャンネルの測定装置に結線しておくことで、一組の垂直探査データを一度の通電で取得することができる。そのため高頻度の測定および装置の小型・省電力化の点においてメリットがある。「レス・ツール」は、最大 10 チャンネルの電位測定を、最短 5 分間隔で実施することができる設計となっている。なお、厚さ数 m 以下の浅層崩壊をモニタリング対象として想定し、最大通電電流は 50mA としている。

電源には内蔵バッテリーのほかにソーラーパネルを用いる。内蔵バッテリーは、満充電状態から無充電で、10 分間隔の測定を一週間以上継続できる容量となっている。消費電力を抑えるため、測定後はスリープ状態と

なる。日照条件次第であるが、後述するテストサイトでの試験測定では、15 分間隔の測定で約 2 か月間、再充電なく測定を継続した実績がある。

測定したデータ（通電電流および 10 チャンネル分の電位差）は SD カードに保存されるとともに、内蔵の LTE モデムでサーバーに送信される。測定からデータ送信まで、30 秒程度で完結する。

サーバーからレス・トールにコマンドを送信することにより、測定間隔の設定、接地抵抗の測定、特定の日のデータのダウンロード・消去などを実行することができる。

2.2 解析とユーザーインターフェイス (UI)

地下の比抵抗構造が 1 次元（水平多層）構造であると仮定し、1 次元インバージョン解析⁵⁾により比抵抗構造を求める。

はじめに適切な層数を与え、各層の層厚と比抵抗を変数として、大地をモデル化する。適当な初期モデルに対して、実際の測定をシミュレートした電位差をリニアフィルタ法によって計算する。電位差の実測値と計算値には残差が生じるため、マルカート法を用いた非線形最小二乗法によりモデル(各層の厚さと比抵抗)を修正する。電位の計算とモデルの修正を繰り返すことにより、実測値を再現することができる最適な比抵抗モデルが得られる。

1 次元インバージョン解析は、一般的なパソコンでも十数秒で完了することから、リアルタイムの比抵抗モニタリングが成立する。

インバージョン解析で得られた比抵抗構造をボーリングの柱状図のように表現し、これを時系列に並べていくと、横軸を時間、縦軸を深度とする比抵抗構造の推移図が得られる。

UI 画面（図-2）では、比抵抗構造の推移（左上）、アメダスの降雨量/実効雨量/土壌雨量指数の推移（左下）、最新の 1 次元解析結果（右上）、バッテリー電圧の推移（右下）をブラウザで表示する。推移図の横軸長は 6, 12, 24 時間～7, 14, 28 日間で選択することができる。アメダスのデータは、Windows のタイムスケジューラ機能と、Python による Web スクレイピングを組み合わせ、最新のデータを自動収集するシステムとなっている。

3. 観測事例

テストサイト（図-3）は埼玉県北西部に位置し、地形としては“残丘”に相当する。平野部が標高 60m 前後であるのに対して、残丘の最高点は標高 112m で、鮮新～洪積統の上位段丘礫層によって構成される。比抵抗モニタリング装置の設置箇所は、残丘の最高地点から東北東に流下する谷を約 300m 下ったところに位置し、標高は約 80m である。この谷の上流部は 300m 以上ある。なお、

テストサイトは長期的に利用可能な地点を選定したものであり、斜面崩壊のリスクがあるわけではない。

比抵抗モニタリングは、電流電極間隔 0.25m、電位電極間隔 1～15m（いずれも片側長）で行った。

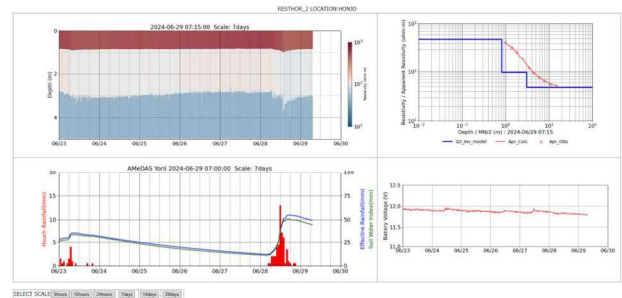


図-2 比抵抗モニタリングの UI 画面

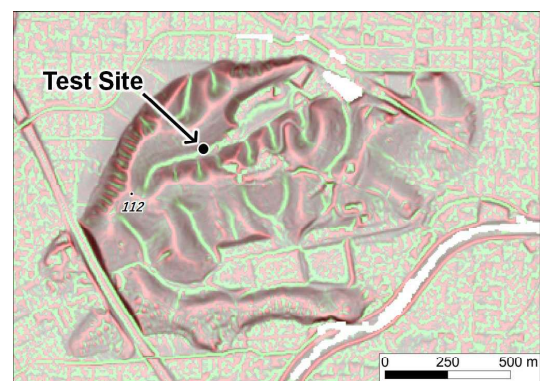


図-3 テストサイトの微地形表現図（CI マップ）⁶⁾

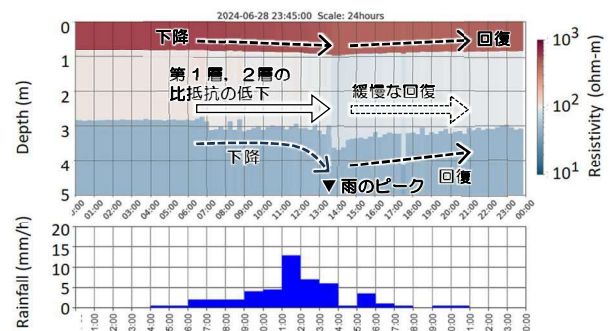


図-4 比較的弱い雨による比抵抗変化(横軸=24 時間)

3.1 比較的弱い雨が続き続いたときの比抵抗変化

図-4 は、比較的弱い雨が降り続いたときの比抵抗モニタリング事例で、上段は深さ 5m までの比抵抗の推移、下段は最寄りのアメダス観測点の降雨量を示している。テストサイトからアメダス観測点までは約 12km 離れていて、17 時間で計 48mm の降雨があった。アメダスでは 11 時から 12 時までの 1 時間に 13mm の降雨が観測されているが、レーダ雨量によると、テストサイト周辺では 13:35 頃（図中の▼）に最も強い雨が降ったと推定される。

深度 5m までの比抵抗は、表層から高・中・低比抵抗の 3

層構造で、破線矢印で示す通り、雨の降り始めとともに第 1/第 2 層境界、第 2/第 3 層境界が徐々に深くなり、雨が強くなるとそれが加速した。それぞれ、午前 6 時から最大変化量は-0.17m と-0.86m であった。雨のピークを過ぎると、各層の層厚は徐々に回復した。

比抵抗に着目すると、第 3 層の比抵抗はほとんど変化していないが、第 1 層、第 2 層の比抵抗は降雨とともに低下した（それぞれ 16%および 24%）。その後の比抵抗は回復しているが、層厚に比べると緩慢である。

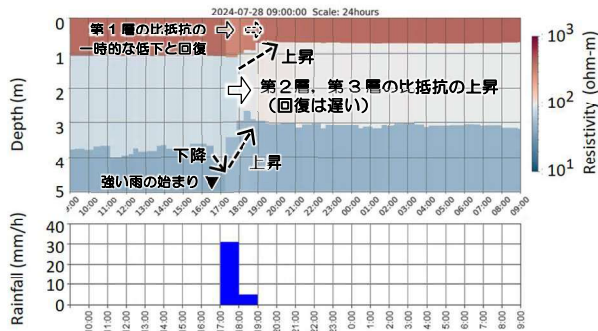


図-5 短時間の強い雨による比抵抗変化(横軸=24 時間)

3.2 短時間の強い雨による比抵抗変化

図-5 は、短時間に強い雨が降った事例である。アメダス観測点では 17 時から 18 時までの 1 時間に 31mm の降雨が観測された。レーダ雨量によると、テストサイト周辺では 16:30 頃（図中の▼）から雨が降り始め、1 時間程度激しい雨が降ったと推定される。

比抵抗構造の変化は前の事例とは異なる。降り始めに第 2/第 3 層境界が一度下降し、その後、急激に 1m 以上上昇した。第 1/第 2 層境界は、降雨より遅れて、30cm 以上浅くなった。各層境界の回復は極めて緩慢である。

第 1 層の比抵抗は降雨中、一時的に約 27%低下し、速やかに回復している。第 2 層の比抵抗は、降雨中の変化は小さく（-5%程度）、降雨後に約 24%上昇した。第 3 層の比抵抗は降り始めに一度約 8%低下し、その後約 25%上昇した。層境界と同様に、比抵抗の回復も緩やかであった。一般に天水は地下水よりも比抵抗が高く（=電気伝導度が低く）、強い降雨により比抵抗が上昇したのは、天水による地下水の希釈が原因の一つとして考えられる。

4. 今後の課題

4.1 観測事例とノウハウの蓄積

前節に示したとおり、比抵抗を高頻度でモニタリングしたことにより、地盤の比抵抗構造（層厚と比抵抗）が降雨によって変化し、しかも雨の降り方によって変化パターンが異なることがわかった。このことは、比抵抗をモニタリングすることによって、地中の含水状態の変化を知ることができるということを示唆するものである。

今後はこれを斜面崩壊警報システムとして確立するため、観測事例を増やす必要がある。とくに、斜面崩壊につながるような強い雨に伴う比抵抗構造の変化の、一部始終を観測し、リスクの大きな比抵抗構造の変化パターンを把握する必要がある。ピンポイントの雨量や地下水位との同時測定も望ましい。

また、比抵抗 2 次元探索の事前実施など、斜面の中で効果的なモニタリング地点を選定するノウハウの蓄積も必要である。

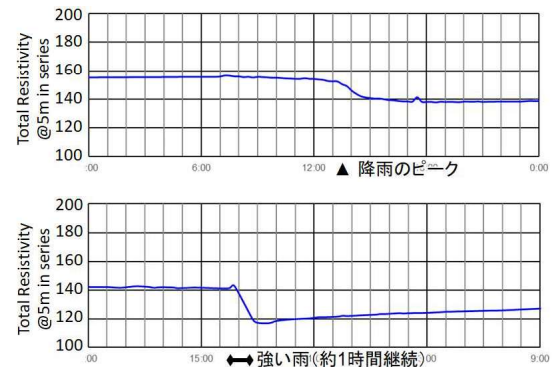


図-6 地表から深度 5m までの平均比抵抗の変化（上下それぞれ 3.1 節、3.2 節の事例。横軸=24 時間）

4.2 リスク評価手法の確立

比抵抗構造の変化は複雑であることから、斜面崩壊のリスクを定量的に評価する手法や基準の確立が必要である。

その際、一つには機械学習による判定が考えられるが、学習用データを蓄積するまでに多大な時間を要すると思われる。もう一つは、何らかの機械的な方法により数値基準を設けることである。

図-6 は、前節で紹介した 2 事例について、式(2)を用いて地表から深度 5m までの平均比抵抗 ρ_{ave} を求めたものである。

$$\rho_{ave} = \sum(t_n \times \rho_n) / \sum t_n \quad (2)$$

ここで、 t_n および ρ_n は n 番目の層の層厚および比抵抗であり、層厚の変化と比抵抗の変化を同時に評価可能である。2 事例では比抵抗構造の変化パターンが異なるにもかかわらず、この指標は降雨の推移と調和的に見える。今後、観測事例を増やす中で、このような指標化も検討する必要がある。

（執筆責任者 上原大二郎）

参考文献

- 1) G.E. Archie : The Electrical Resistivity Log as Aid in Determining Some Reservoir Characteristics, Transactions of the AIME, Vol.146, pp.54-62, 1942.
- 2) たとえば、鈴木浩一、田中姿郎、窪田健二、末永弘、

吉武宏晃，三宮明，東健一：比抵抗法による地すべり斜面における集中豪雨時の浸透水のモニタリング，物理探査，Vol.69，No.2，pp.103-116，2016.

- 3) 上原大二郎，王寺秀介，上田匠，與田至門：比抵抗モニタリングによる斜面崩壊警報システムの開発，令和 4 年度 日本応用地質学会 研究発表会，001，2022.
- 4) 上原大二郎，竹田和弘，上田匠，與田至門，宮本虎之介：斜面崩壊警報システムとしての比抵抗モニタリング装置の開発と観測事例，令和 6 年度 日本応用地質学会 研究発表会，080，2024.
- 5) 與田至門，上田匠，上原大二郎，王寺秀介：Python を用いた水平多層構造・3D 任意電極配置に対応した電位応答解析手法，物理探査学会第 146 回学術講演会論文集，pp.19-22，2022.
- 6) 上原大二郎，西村修一，田中風羽，竹田和弘：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，23-13-1-06，2024.

8.4 傾斜センサおよび土壌水分センサを活用した斜面管理について

1. はじめに

近年の異常気象に伴い豪雨災害が激甚化しており、各地で土砂崩れによる被害が報告されている。一般的に、切土斜面で想定される斜面崩壊の形態には、表面水の集中的な流入に起因する斜面浸食（ガリー浸食）や、地下水位の上昇に伴う斜面の不安定化により発生する斜面すべりによるものがある。鉄道事業者や道路事業者においては、不安定化リスクが顕在する土構造物を対象にフリーフレーム工法等による法面保護工の対策を順次講じているが、対策を講じていない斜面についても、降雨時の斜面安定性を定量的に把握することが求められている。

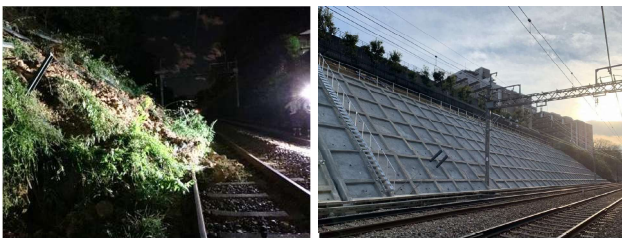


写真-1 被災状況と復旧状況

斜面安定に関する研究は多く行われているが、降雨時の斜面安定性を把握する新たな試みとして、小泉ら¹⁾が示す体積含水率と変形挙動の関係に注目した。すなわち、図-1 のように表層崩壊が発生する前に斜面内の体積含水率の上昇率が変化する時点の体積含水率を初期擬似飽和体積含水率（IQS）と定義し、IQS と変形挙動の関係を提案したものであり、ある鉄道会社では、この関係を運転規制方法に活用できないか模索中である。

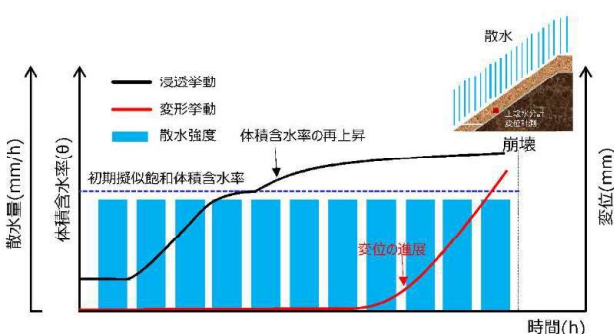


図-1 小型模型実験における体積含水率と変位の関係¹⁾

本章では、2022 年に営業線切土斜面に設置したシステムの計測結果の事例紹介と、計測結果で得られた降雨強度と体積含水率の関係についてまとめ、斜面の新たな管理方法を示すものである。

2. 斜面管理システムの概要

斜面管理システムの概要を図-2 に示す。本システムは、通信モジュールが組み込まれた測定器本体、傾斜センサ、土壌水分センサ、雨量計、および電源から構成されている。

写真-2 に傾斜センサ、土壌水分センサを示し、写真-3 に測定器本体を示す。

測定器本体は地中に打設した杭に固定し、傾斜センサは地中に設置し、斜面鉛直ならびに水平方向の地表面の変動を傾斜角として計測する。土壌水分センサは傾斜センサと同様に地中に埋設し、土壌水分の変化を体積含水率として計測する。

計測データは NB-IoT 通信を通じてクラウドに保存され、関係者間での計測データの共有を可能としている。

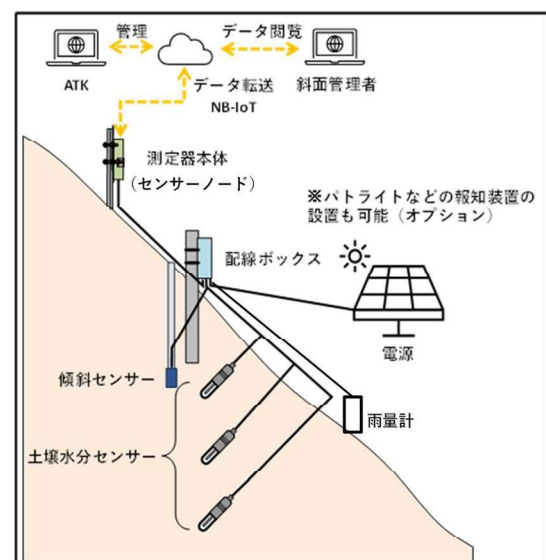


図-2 計測システム概念図²⁾



写真-2 傾斜センサプローブ（上）
土壌水分センサプローブ（下）



写真-3 測定器本体

3. 計測事例

3.1 計測システム設置箇所

写真-4 に設置状況を示す。設置箇所は鉄道営業線の切土斜面法尻部とした。斜面の変状を詳細に把握するため、SH 型貫入試験で表層の緩み分布を把握し、傾斜センサは深度 100cm に、土壌水分センサは、深度 30cm, 60cm, 100cm の 3 深度に設置した。



写真-4 システム設置状況

3.2 計測結果

図-3 に計測結果と降水量を示す。降水量は現地に設置した雨量計のデータを使用した。注目すべき点は、8 月 27 日からの断続的な降雨によって、8 月 29 日 13:15 から 22:30 にかけて、傾斜角度で約 0.4° の斜面変状が確認されたことである。この傾斜角度は水平変位に換算すると約 0.7mm に相当する。

変状発生前後の降雨と体積含水率の変化を見てみると、現地は8月27日の降雨で各深度とも体積含水率が上昇した後、29日の降雨で各深度の体積含水率が再上昇し、体積含水率の再上昇に遅れて傾斜角に大きな変化が確認された。

その後、降雨が収まるとともに、変位の進行が収まり、変位発生前の傾斜角まで戻る挙動を示したが、変位発生前の傾斜角までは戻らず、約 0.1° 傾斜している状況であることが確認された。

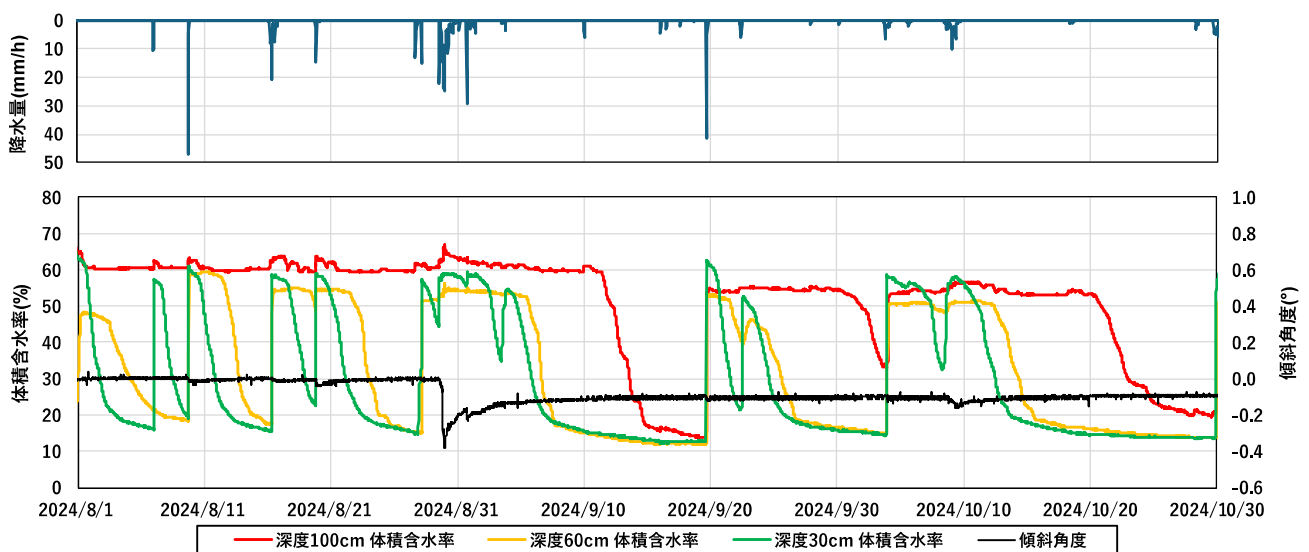


図-3 計測結果 (2024/8/1～2024/10/30)

3.3 考察

ここでは、各深度の体積含水率と降水量の関係について考察を行った。使用したデータは、計測期間中で変位が確認された 8 月 29 日を挟む前後 2 週間 (8 月 15 日～9 月 12 日) とした。

表-1 に変状発生前、発生直前直後、発生後における体積含水率の変化をまとめ、図-4 に設置深度 100cm における各期間の降水量と体積含水率の関係を示す。

表-1 によると、各深度とも変状発生直前直後 (8 月 29 日～9 月 1 日) における体積含水率の最小値と最大値は、変状発生前よりも大きい値を示し、特に深度 100cm は変状発生前と比較して体積含水率の最大値が 3%以上増加したことが明らかとなった。

表-1 各期間の体積含水率の変化

		8/15～8/28	8/29～9/1	9/2～9/12
期間中の累積雨量(mm)		130.2	289.2	18.8
深度 100cm	最小値(%)	59.28	60.46	36.94
	最大値(%)	63.84	67.02	61.96
	平均値(%)	60.57	62.62	58.74
	標準偏差	1.24	1.28	18.93
深度 60cm	最小値(%)	15.22	51.42	13.28
	最大値(%)	55.08	56.04	54.12
	平均値(%)	38.67	53.77	31.07
	標準偏差	17.09	0.97	17.64
深度 30cm	最小値(%)	14.82	44.68	14.04
	最大値(%)	58.96	59.26	56.86
	平均値(%)	32.00	56.52	27.66
	標準偏差	16.66	3.91	15.09

図-4 によると、変状発生前(8 月 15 日～8 月 28 日)に降雨に伴い体積含水率が最大で 64%付近まで増加後、変状発生直前直後(図-4 中の□)には、変状発生前と比較してさらに体積含水率が 67%付近まで再上昇したことが示された。

このことは、図-1 に示す体積含水率の再上昇に相当するものと考えられ、変位進展の要因の一つと推定される。

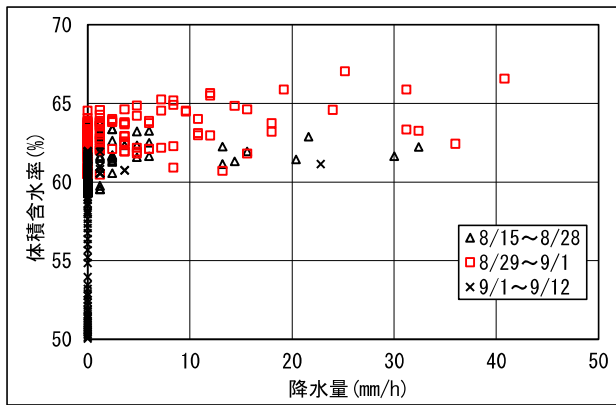


図-4 深度 100cm の体積含水率と降水量の関係

4. まとめ

計測結果から、断続的な降雨による体積含水率の上昇に伴い、斜面変状の進展が確認された。これに伴い鉄道事業者では補修を行い、変状の進行を防ぐ処置を行った。

変状発生時の体積含水率をみると、各深度とも変状発生時に IQS から体積含水率の再上昇が確認され、斜面変位の発生につながったものと推定される。しかしながら、本サイトにおける検証はまだ不十分であるため、今後も実斜面での計測データを蓄積し、体積含水率と降水量の関連について計測データの分析を進めていく計画となっている。

また、鉄道事業者ではこれらの分析結果を基に、体積含水率の変化や IQS を活用した新たな運転規制方法や規制解除の検討をすすめていきたいと考えている。

(執筆責任者 片山輝彦)

参考文献

- 1) 小泉圭吾, 櫻谷慶治, 小田和広, 伊藤真一, 福田芳雄, Maria Q. FENG, 竹本将: 降雨時の表層崩壊に対する高速道路通行規制基準の高度化に向けた基礎的研究, 土木学会論文集 C (地圏工学) Vol. 73, No. 1, pp. 93-105, 2017.

8.5 地盤調査における測位とリモートセンシング技術の展望

1. はじめに

最近のデジタル化とリアルタイム、3次元的な位置出しの必要性などの流れの中で、地盤調査における測位にも人工衛星やドローンが使われるようになり、インフラメンテナンス等にも、モニタリングなどで、リモートセンシングを利用した非破壊の調査や探査手法が多く用いられるようになってきている。

以下に、地盤調査における測位とリモートセンシング技術の展望について述べる。

2. 地盤調査における測位

2.1 従来の測位

従来の測位技術としては、レベルやトランシット、トータルステーション等の測量機器による2点間の高さや角度、距離を基本とした測位が挙げられるが、最近では、GNSSを利用したドローンによる測位やモバイル端末による測位も一般化しつつある。更に、地すべり地などの斜面監視には、リアルタイムでGNSSによる測位がされている。

2.2 今後の測位

今後の測位技術としては、GNSSを利用した測位が進むと考えられる。日本の測位衛星で、準天頂衛星である「みちびき」は、2018年度から4機体制で運用されているが、2026年度からは7機体制になる予定で、単独測位の誤差が10m程度から1m以下になると言われている¹⁾。またドローンの活用として、UAV測量(LiDARやLP)も行われつつある²⁾。

3. 地盤調査におけるリモートセンシング技術

3.1 従来のリモートセンシング技術

航空機による光学的な画像は、1900年前後位から多く撮られるようになった。人工衛星による光学的な画像も、1970年代から米国のランドサットにより得られており³⁾、現在では、GoogleMapを始め、多くの所で利用されている。また近年では、衛星SARによる地面の変位解析や、SWOT衛星による海面の変化からの海山を含む海底地形の把握、ドローンによる物理探査なども実施されている²⁾。

3.2 今後のリモートセンシング技術

特に小型衛星によるリモートセンシングでは、光学衛

星で、米国Planet社は既に数百機からなるDove衛星で衛星コンステレーションを分解能3.7mで構築しており、更に分解能30cmのPelican衛星の運用を目指している⁴⁾。

またSAR衛星では、国内の㈱Synspectiveと㈱QPS研究所が小型SAR衛星の運用を開始しており、両社とも30機以上の衛星コンステレーションの構築を目指している²⁾。これらのSAR衛星では、従来のだいち2号や4号のような太陽同期回帰軌道だけでなく、傾斜回帰軌道も組み合わせて運用され、東西成分の変位だけでなく、南北成分の変位も解析できることを目指している。

更に、洋上風力発電所の建設に伴う地盤調査では、水中ドローン(AUV)の使用も、一層拡大すると思われる。

4. まとめ

地盤調査における測位では、日本の準天頂衛星である「みちびき」により、人工衛星による測位精度が格段に上がり、その適用が増えると考えられる。またドローンによるUAV測量なども増えることが期待される。

地盤調査におけるリモートセンシング技術では、SAR衛星によるリモートセンシングで、今後、センサの高解像度化が進み、衛星コンステレーションによる観測の高頻度化に加え、衛星通信とデータ処理技術の高度化により、データ提供のリアルタイム性が増すと予想される²⁾。また衛星の小型化により、低コストで衛星を打ち上げることが可能となり、より多数かつ多様なデータ収集が期待される²⁾。ドローンによるリモートセンシングにおいても、地上でのUAVや水中でのAUVが活用されることが期待される²⁾。

(執筆責任者 八野祐二)

参考文献

- 1) Shamen-net 研究会:[新]知っておきたいGPS/GNSSのはなし, 2019.5.30
- 2) 吉川猛, 六川修一, 酒井直樹, 虫明成生, 竹下航: 宇宙や空中からの物理探査(リモートセンシングとドローン物理探査), 物理探査, 第77巻, pp26-31, 2024.
- 3) ウィキペディア:ランドサット, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ランドサット>
- 4) Planet: Products, <https://www.planet.com/products/>

8.6 DAS の利用例

分散型音響センシング（Distributed Acoustic Sensing, DAS）は、近年、地震モニタリングの新たな技術として注目を集めている。この手法は既存の通信用光ファイバーケーブルを振動センサーとして活用するものであり、数十 km にわたる広域のデータ取得が可能である点に特徴を有する。従来の地震計やジオフォンは測線長が数十～数百 m 程度と比較的限られているのに対し、DAS は高密度かつ長距離のアレイ観測を実現できることから、広域モニタリングに優れた適用性を示す。

石油・ガス分野においては、DAS は主に坑井内に恒久設置され、VSP 探査に利用されてきた。従来の坑井地震計と比較すると、DAS は低コストで長期連続観測が可能であり、地下イメージングや地層解析においても有効である。その結果、油田・ガス田におけるリアルタイムモニタリングや詳細な地下構造解析を実現し、探査精度の向上が期待されている。一方、土木分野における DAS の適用は、そのスケールメリットを活かした長距離計測に関する研究が進展している。地表面に光ファイバーを設置することで高密度なデータ収集が可能となり、地下のイメージングやインフラ構造物の健全性評価に寄与している。具体的な適用例としては、埋設した光ファイバーを利用した振動解析による地下構造の可視化、道路・橋梁・トンネルといった線状構造物に対する振動監視や劣化診断が挙げられる。こうした応用は、DAS の長距離・高密度計測能力を最大限に活用した新たなモニタリング手法として位置づけられる。

以上のように、DAS 技術は石油・ガス分野における詳細な地下構造解析から、土木分野における広域モニタリングまで、幅広い領域での実用化が進みつつある。本稿では、特に 2025 年に報告された、地表面に設置された光ファイバーケーブルを用いた DAS による地下構造探査事例を 3 件紹介する。

まず、[1] では高速道路の路肩に埋設された光ファイバーを利用して DAS 計測を行い、得られた微動データについて直線微動アレイ解析に適用することで高速道路直下の S 波速度構造を推定した。その結果、従来の地震計を用いた直線微動アレイ探査と比較して、深度 15 m 以浅において良好な整合が確認された。さらに道路点検結果との比較から、法面変状、小段からの湧水、排水工の沈下・変状箇所では S 波速度の低下が認められ、構造的異常と速度低下が対応することが示された。

次に、[2] では 2 路線（国道 6 号・国道 50 号）沿いに敷設された供用中の通信用光ファイバーを利用して DAS 計測を実施し、それぞれ 56.65 km および 62.80 km にわたる測線で約半月間のデータを取得した。相互相関関数（CMPCC 法）および位相シフト法に基づく分散曲線解析を経て逆解析を行った結果、得られた S 波

速度構造断面は、地形・地質から推定されるモデルと概ね整合することが示された。

さらに、[3] では既設の通信用導管内光ファイバーを利用した Stanford DAS-2 Array を対象に、交通振動を震源とする微動記録を解析し、地下水位の推定が試みられた。具体的には、DAS データに相互相関解析を適用して仮想起振記録を生成し、これに全波形インバージョン（Full Waveform Inversion, FWI）を実施することで詳細な S 波速度構造を推定した。さらに、連続観測を活かしたタイムラプス FWI により速度変化を抽出した結果、その変化分布の上面が井戸観測による地下水位と一致することが確認され、DAS を用いた地下水位検出の可能性が示唆された。

以上の 3 事例に共通する特徴は、①表層部に設置された光ファイバーケーブルを利用していること、②人工震源を用いず交通振動等の環境雑微動を利用していること、③成果として S 波速度構造断面を導出している点である。すなわち、従来の物理探査のように人工震源を用いて観測機器を設置するのではなく、既設光ファイバーを受振器として活用し、受動的にデータを取得することで地下構造の把握が可能となる。このアプローチは、長距離にわたる地盤構造の把握や時系列的変化の検出に有効であり、継続的モニタリング技術としての大きな潜在性を有している。

（執筆責任者 山内泰知）

参考文献

- [1] 山崎充、八嶋厚、井上雅王、上野慎也、藤岡一頼、沢田和秀、村田芳信、林宏一、小西千里、町島裕一：泥岩を用いた道路盛土における分布型音響センシング（DAS）の適用、60 回地盤工学研究発表会、22-3-2-02, 2025
- [2] 小川直人、鈴木晴彦、櫻井健、小西千里、藤原広行、中村洋光、内藤昌平：国道沿いの通信用光ファイバを用いた DAS 記録による表層地盤モデル作成、60 回地盤工学研究発表会、22-3-2-03, 2025
- [3] Haipeng Li, Jingxiao Liu, Shujuan Mao, Siyuan Yuan, Robert G. Clapp, and Biondo L. Biondi : Daily Groundwater Monitoring Using Vehicle-DAS Elastic Full-waveform Inversion, arXiv: [arXiv:2501.10618]. [https://arxiv.org/abs/2501.10618] (アクセス日：2025 年 8 月 30 日)

8.7 堤防の声に耳をかたむける ～DAS による越水時の振動モニタリング～

1. はじめに

河川堤防は、災害から人命や財産を保護するうえで極めて重要な社会基盤施設である。近年、集中豪雨の頻発により、その機能と役割は一層重要性を増している。こうした状況下において、高度な維持管理を実現するために、堤防の健全性を効率的かつ継続的に把握するためのモニタリング技術の導入が喫緊の課題となっている。

国管理区間の河川堤防には管理に使用される通信用光ファイバ（いわゆるダークファイバ、以下 DF）が埋設されている。それをセンサとして用いることができる分布型光ファイバセンサ（以下、光ファイバ）はモニタリング技術の一つの選択肢となり得る。

本研究は、分布型音響センシング（Distributed Acoustic Sensing：以下、DAS）を河川堤防のモニタリング技術として適用し、河川水の越水や河川堤防の大変形などの異常をリアルタイムに検知することを目的に技術開発を行っている。

図-1 に DAS の概念図を示す。DAS は計測器から光ファイバに向けてパルス光を一定周期で送信し、光ファイバに加わる振動に応じて変化する後方散乱光の位相変化を検出することで、振動とその発生位置を計測する技術である。

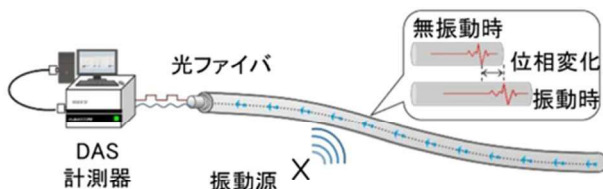


図-1 DAS による振動測定概念図

本報告では、越水時に河川堤防で発生する振動（堤防の声）の検出可能性を検証するために小型および大型模型実験を実施した結果^{4),5)}について報告する。

実験では、DAS を前述の DF に適用することを想定した検討を行った。あわせて光ファイバを敷設する鞘管に DF を密着させることで感度の向上を図る「セミ・ダークファイバ」（以下、SDF）^{1),2),3)}の活用についても検討した。ここで SDF としてビニールホースを鞘管内に光ファイバとともに挿入し、ホース内部に空気を充填して光ファイバを鞘管と密着させた。図-2 に本研究における SDF の概念図を示す。

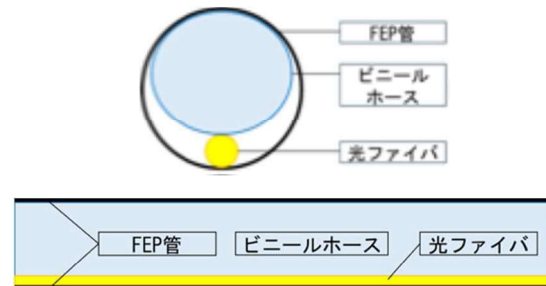


図-2 SDF 概念図

2. 小型模型実験

2.1 実験方法

河川堤防の小型模型を作成し、DF と SDF による越水検知を目的とした小型模型実験を実施した。実験に用いた模型を図-3、写真-1 に、塩ビ管端部の状態を写真-2 に示す。小型堤防模型には、高さ 220 mm、幅 584 mm、奥行 285 mm の土槽を使用した。堤体土には珪砂 6 号と木節粘土の混合土を用い、天端部には舗装を模擬する目的で厚さ 23 mm のファスト・アスを敷設した。

天端下には管理用光ファイバの鞘管を模した塩ビ管（外径 38mm、内径 32 mm）を埋設した。その内部に、DAS 計測における空間分解能を考慮して越水幅の範囲内に 5 m の光ファイバを巻き付けてビニールホースとともに敷設し、空気の充填状況を変化させることができるようにした。また、実験装置の給水能力を踏まえ、越水幅は天端中心部の 100 mm の範囲に限定した。

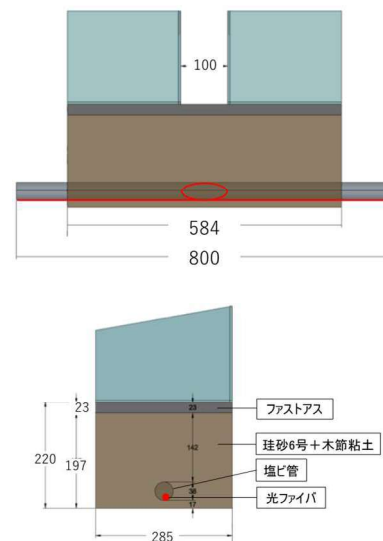


図-3 小型実験模型



写真-1 小型実験模型



写真-2 塩ビ管端部の状態

給水開始後、水位が天端高さに達し越水が開始した段階で DAS による振動計測を開始し、その後越水深を段階的に増加させた。越水深が 5.5 cm の場合を除き、その他の越水深では各 10 分間の計測を実施した。越水深 5.5 cm については給水・排水装置の制約により、約 4 分間の計測とした。各実験ケースを表-1 に示す。

表-1 実験ケース

ケース	越水深			
空気充填無 (DF)	1cm	2cm	3.5cm	5.5cm
空気充填有 (SDF)	1cm	2cm	3.5cm	5.5cm

本実験では、ビニールホース内に空気を充填しない状態で計測を行う空圧無のケース (DF を想定) と、空気を 15 kPa で充填し光ファイバと塩ビ管を密着させた空圧有のケース (SDF を想定) の比較を行った。

2.2 実験結果

越水時の実験状況を写真-3 に、振動計測の結果を図-4 に示す。図-4 のヒートマップからは、空圧無のケース (DF) では、ほとんど振動が計測されていないことが分かる。一方、空圧有のケース (SDF) においては、越水深 2 cm 以降で明瞭な振動が計測されていることが確認された。



写真-3 実験状況

さらに、各ケースにおける天端中心線上の振動波形に対して FFT (高速フーリエ変換) 処理を行い、周波数解析を実施した。今回の越水実験では、0.3~2 Hz の周波数帯域において越水による卓越周波数が観測されたため、この周波数範囲を対象としたフィルタ処理を施したうえで図-5 に示した。その結果、ヒートマップと同様に、空圧有 (SDF) のケースでは越水深 2 cm 以降において明確な応答の増加が認められた。

この結果は、光ファイバと鞘管を密着させることで感度を高め、越流水に伴う振動をより明瞭に把握することが可能であることを示唆している。

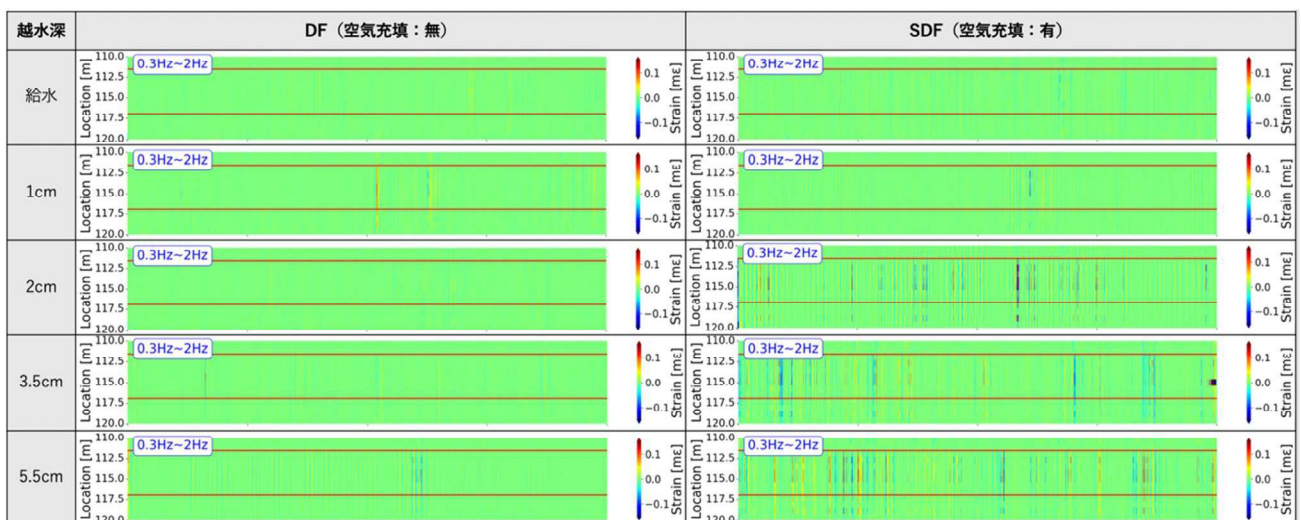


図-4 実験結果 (ヒートマップ)

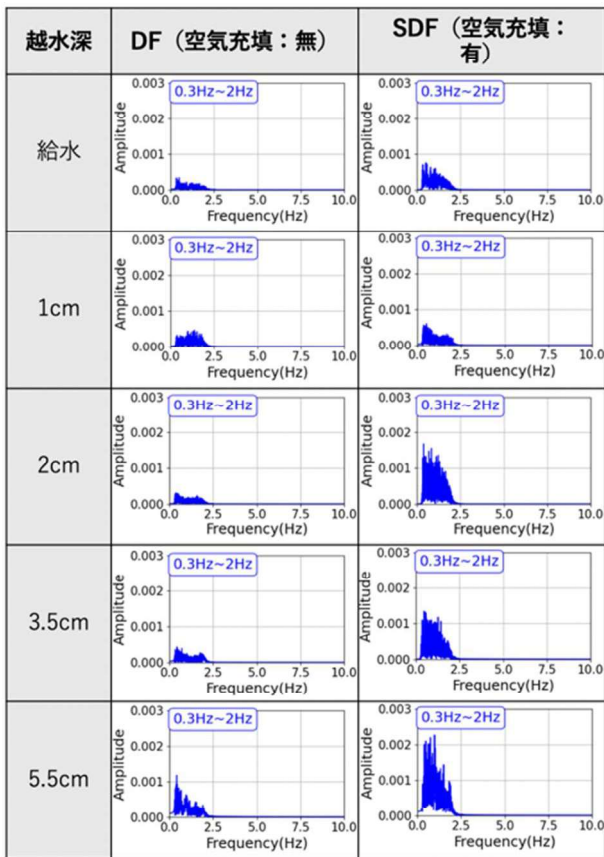


図-5 FFT 分析結果

3. 大型模型実験

3.1 実験方法

国土交通省国土技術政策総合研究所(茨城県つくば市)の落差実験水路に河川堤防の大型模型を作成し、前節と同様の DF と SDF による越水検知を目的とした大型模型実験を実施した。本実験では、高さ 6000mm、幅 5000mm の水路内に、天端幅 3200mm、堤防高さ 2500mm、堤内地盤高 1000mm、裏法面勾配 2 割となる大型堤防模型(図-6)を用いた。大型堤防模型の天端にはアスファルト舗装、川裏法肩にはブロック、川裏法面にはブロックマットによる保護工と通気防水シートが敷設され、川裏法尻にはドレーンが設置されている。

この大型堤防模型に対し、越水深 30cm となるように外力として越流水を与え、通算 3 時間以上にわたって実験を実施した。実験模型および越水時の状況を写真-4 及び写真-5 に示す。越水深 30cm 程度となる条件下における各部の越水深は、天端 32.5cm、法肩 14cm、法面 5cm であり、各位置の流速は、天端約 2m/s、法肩約 1.5m/s、法面および法尻で約 4m/s であった。なお、いずれの川裏法面保護工も実験終了時において著しい変状は確認されず、その下の堤体にも目立った変形は生じなかった。

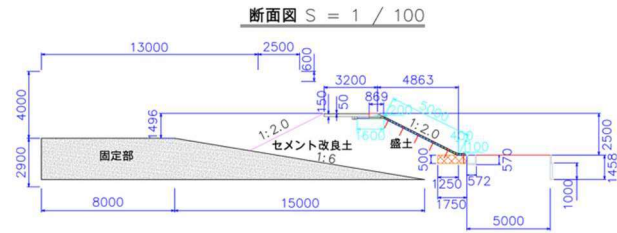


図-6 大型堤防模型



写真-4 越水実験 (越水前)



写真-5 越水実験 (越水時)

この大型堤防模型の天端アスファルト舗装下には、DF と SDF を模して、光ファイバとビニールホースを挿入した FEP 管(内径 80mm)を埋設した。実験では、ビニールホース内に空気を充填しない状態で計測を行う空圧無のケース(ケース 1: DF を想定)と、空気を 30kPa で充填し光ファイバと FEP 管を密着させた空圧有のケース(ケース 2: SDF を想定)の 2 条件において実施した。

3.2 実験結果

実験結果を図-7 及び図-8 に示す。ヒートマップ(赤線で囲まれた区間が越流範囲)および模型中心線上の 5~40 Hz の周波数成分に対応する振動波形に着目すると、DF では実験前の振動が大きく越水による振動の増加を明瞭に確認することはできなかった。一方、SDF は実験前、越流開始、越水中の順に振動の振幅が明瞭に増加していることが確認された。特に、越流開始時と比較して越水中の振動が顕著に増大しており、越流水深の増加に伴って天端上を流れる水量が増加することで、光ファイバが計測する振動も増加する傾向が見られた。

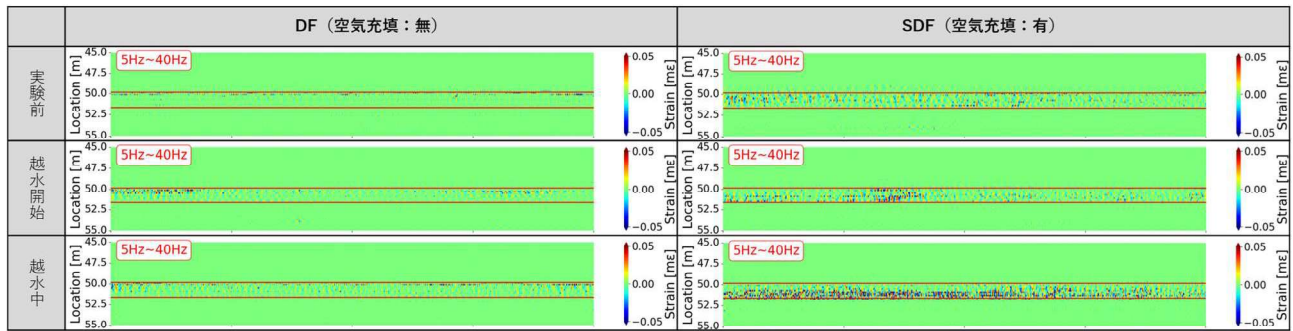


図-7 実験結果（ヒートマップ）

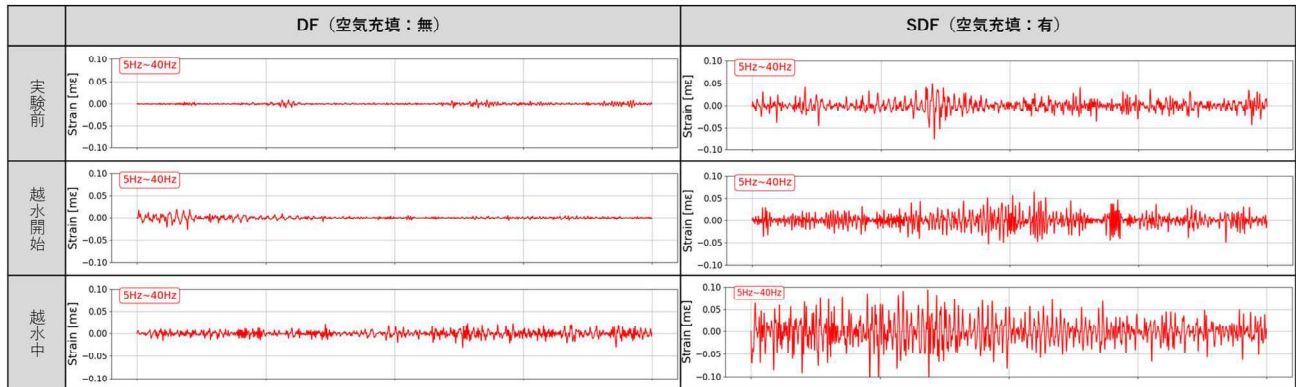


図-8 実験結果（振動波形）

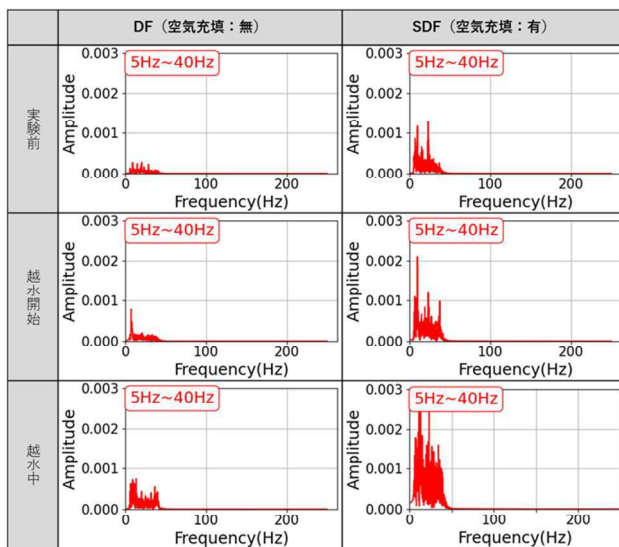


図-9 FFT 分析結果

これらの結果から、いずれの時点においても、SDFはDFよりも大きな振動を計測しており、感度の向上が示された。前節の小型模型実験の結果と同様に、光ファイバと鞘管（FEP管）を密着させることで感度を高めることが可能であることを裏付けている。

次に、図-8に示す振動波形に対して高速フーリエ変換（FFT）を適用した結果（図-9）をみると、実験前と比較して越流時には10 Hz付近に明瞭なピークが現れていることが分かる。このピークはSDFのほうがDFよりも明

確に捉えており、ノイズを排除して卓越する周波数成分を捉えることで越流の発生を効率的に検知できる可能性が示唆された。

4. 結論

本研究では、小型模型実験と大型模型実験を通じてDASによる振動計測により、既設の通信用光ファイバ（DF）や光ファイバと鞘管を密着させたSDFを用いて、越水時の振動（堤防の声）を検知できることを実証した。加えて、SDFではDFと比較して明確な感度向上が確認された。

また、大型模型実験では越水時の振動に関する周波数解析を行った結果、10 Hz付近に卓越したピークが見られた。今後の実用化に向けては、この周波数帯域に着目した効率的なモニタリングが有効であると考えられる。

今後は、実堤防における常時の振動特性の蓄積を進め、越水時の異常振動との識別に向けて研究を継続する予定である。

（執筆責任者 森 啓年、檜山孔聖）

参考文献

- 1) 檜山孔聖，加来穰，中村仁美，森啓年，永谷英基，

川野健一，安部利亮，千田裕司，内山政行，東屋俊：河川堤防の管理用光ファイバを用いた振動計測（DAS）の感度向上に関する実験，第 59 回地盤工学研究発表会，23-10-3-01，2024.

- 2) 安部利亮，永谷英基，川野健一，今井道男，吉村雄一，川端淳一，森啓年，中村仁美，加未穰，檜山孔聖，千田裕司，内山政行，東屋俊：河川管理用光ファイバの計測感度を向上させた振動計測（DAS）～その 1，第 59 回地盤工学研究発表会，23-10-3-02，2024.
- 3) 永谷英基，川野健一，安部利亮，今井道男，吉村雄一，川端淳一，森啓年，中村仁美，加未穰，檜山孔聖，千田裕司，内山政行，東屋俊：河川管理用光ファイバの計測感度を向上させた振動計測（DAS）～

その 2，第 59 回地盤工学研究発表会，23-10-3-03，2024.

- 4) 檜山孔聖，森啓年，永谷英基，川野健一，毛利輝，安部利亮：河川堤防越水時の発生振動を対象とした DAS 計測に関する大型模型実験，第 60 回地盤工学研究発表会，DS-5-09，2025.
- 5) 檜山孔聖，森啓年，永谷英基，川野健一，毛利輝，安部利亮：河川堤防の越水を対象とした DAS 振動計測による小型模型実験，土木学会第 80 回年次学術講演会，投稿中.

8.8 DAS 活用の全体展望について

1. はじめに

光ファイバセンサには様々な方式があるが、なかでも光ファイバそのものがセンサとして機能する“分布型”光ファイバセンサでは、図-1に示すように光ケーブル全長で様々な情報を得られる。光ファイバ内を光が透過する際に生じる散乱光を解析することにより、決められたポイントではなく、すべての位置で温度やひずみ、振動を計測できる。小型軽量、長寿命、長距離伝送可能などの光ファイバの特長を活かし、長大なインフラ構造物を監視する手段として期待されている。

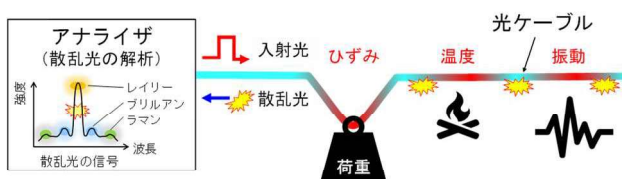


図-1 分布型光ファイバセンサイメージ

本項では、分布型光ファイバセンサのなかでも振動分布計測技術に関する概要と様々な取組み事例を紹介するとともに、その将来展望について概観する。

2. 分布型光ファイバ計測

光ファイバ内で生じる散乱光には3種類あり（ラマン、ブリルアン、レイリー）、これらを計測方式などに整理して表-1に示す。主にラマン散乱光を利用した分布温度計測（DTS：Distributed Temperature Sensing）は、火災検知などを中心に広く展開されている。分布ひずみ計測（DSS：Distributed Strain Sensing）は、ブリルアン散乱光やレイリー散乱光のスペクトルが変化することを利用して、 10^{-4} ～ 10^{-6} オーダーのひずみ（光ファイバの伸縮）を計測する。近年、レイリー散乱光の位相変化などをもとにした分布音響計測（DAS：Distributed Acoustic Sensing）が盛んに開発されており、高速（数kHz～）で 10^{-9} オーダーの動的なひずみを捉えられるようになってきた¹⁾。

表-1 主な分布型光ファイバ計測

計測物理量	散乱光	計測方式の例
温度 DTS	ラマン ブリルアン	R-OTDR B-OTDR
ひずみ DSS	ブリルアン レイリー（スペクトル）	B-OTDR OFDR, TW-COTDR
振動 DAS	レイリー（位相など）	ϕ -COTDR

注記：片端接続の方式のみ

光ファイバセンサの適用にあたっては、計測物理量に

応じた計測方式だけでなく、光ファイバが被覆された光ケーブルを考慮する必要がある。DTSでは光ケーブルを敷設さえすれば温度を計測できるが、DSSでは光ケーブルを計測対象物に一体化（固定）させないとひずみが伝達されない。また、温度計測用光ケーブルではケーブル被覆と内部光ファイバの一体性は不要であるが、ひずみ計測用光ケーブルではケーブル被覆と内部光ファイバの一体性が必要である。そのため、前者は一般的な通信用ケーブルを転用できるが、後者は転用できず、DSSは光ケーブルの設置に手間とコストがかかると言える。両者の特長を表-2に示す。なお、DASは非常に感度が高く、光ケーブルに生じる僅かな振動さえ計測できる。必ずしも光ケーブルそのものを対象に一体化（固定）せずとも振動は一定程度伝わるため、通信用ケーブルを使うことが可能である。わが国では通信網が国土を広くカバーしていることもあり、既存の通信用ケーブルの空き芯（ダークファイバと呼ぶ）を有効活用する手段のひとつとして、昨今非常に注目を集めている²⁾。

表-2 光ケーブルの種類

用途	コスト	適用可能技術	芯数
通信用	安価	DTS, DAS	多芯
計測用	高価	DTS, DSS, DAS	通常 1~2 程度

3. 光ファイバ振動分布計測（DAS）による取組み

3.1 物理探査

近年、集中豪雨などに伴う土砂災害や盛土の地すべりが全国各地で発生している。これらの被害を低減するためには、地盤内の土質構成や水理構造を事前に把握したうえで対策工を考案するのが望ましいが、必要となる地質調査データについてはボーリングによる地質柱状図などのポイントにおける情報がほとんどである。表層の物性値を得るためには空中電磁探査や表面波探査などの物理探査手法が用いられる。DASは光ケーブルそのものを地震計とみなすことができ、従来のジオフォンを用いた物理探査よりも高密度にデータを取得できることから、効率的に広範囲な調査が可能な物理探査手法として期待されている。ここでは、DASによるS波速度構造推定の例を紹介する³⁾。

調査対象は、2018年7月の豪雨で斜面崩壊が生じた箇所の西側で測線長81mの斜面とした。その概要を図-2に示す。深さ10cm程度の溝を掘り、溝の中に通信用光ケーブルを敷設し、上から軽く土をかぶせた。表面波探査の振源にはかけやを使用し、測線に沿っておよそ5m間

隔で鉛直に 4 回加振することでデータ取得を行った。



図-2 斜面での DAS 計測の概要³⁾

65m 位置付近を打撃した際の DAS データを 4 回分重合した結果を図-3(a)に示す。今回適用した DAS アナライザは、散乱光の位相変化をもとに動的なひずみ（光ファイバの伸縮）を捉える方式が一般的であり、位相変化が $\pm\pi$ を越えた場合に評価が困難となる。今回、打撃箇所付近ではひずみ変化が大きく $\pm\pi$ を越え、却って信号の S/N が低い結果となった。通常、表面波探査で用いられる受振器は鉛直成分の速度を計測するが、DAS は光ケーブル軸方向のひずみ変化を計測するため、DAS データを速度へ変換した（図-3(b)）。ひずみから速度への変換は、周波数-波数領域に変換したひずみ起振記録 $E(\omega, k)$ に対して $-\omega/k$ を乗算後、逆フーリエ変換することで得た。ひずみと速度変換結果ともに、フーリエスペクトルに関してはひずみ値と速度値で同等の結果であった（図-3(c)(d)）ことから、以降の解析はひずみ結果を用いた。

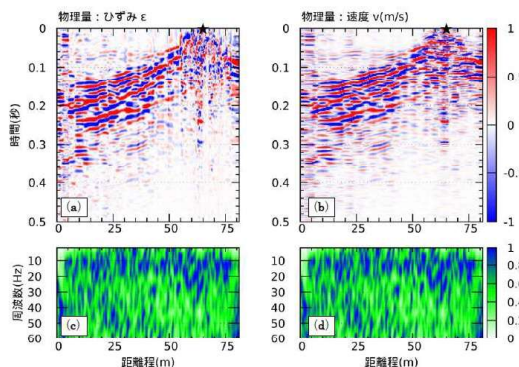


図-3 重合された DAS データと速度変換結果ならびに両者のフーリエスペクトル³⁾

重合された DAS データに対して相互相関解析（Common Mid Point : CMP）を適用し、各測点（約 0.2m 間隔）における CMP 起振記録を求めた。そして、各 CMP 起振記録に対して位相シフト法を適用し、分散曲線を得た。その後、レイリー波基本モードを仮定した分散曲線の逆解析により各 CMP における 1 次元 S 波速度構造をそれぞれ推定し、それらを統合して 2 次元 S 波速度構造モデルを得た（図-4）。得られた S 波速度構造モデルは、地表から深度 5m 程度に $V_s=300\text{m/s}$ の層が分布し、深度 5m 以深では $V_s=500\text{m/s}$ 以上の速度層が成層に分布した結果となった。得られた結果は別途実施された通常の受振器による表面波探査結果とも概ね一致しており、表面

波探査の実施においては光ケーブルも通常のジオフォンと同程度の性能を有することが分かった。DAS は数 10km 以上にも及ぶ広範囲を計測可能で、その特長を考慮した解析を適用することで、従来のジオフォンよりも効率的な物理探査を実現できる。

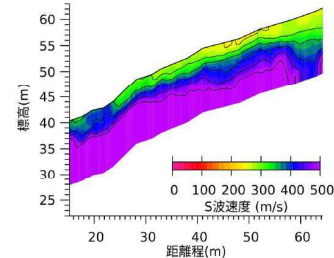


図-4 DAS データによる S 波速度構造モデル³⁾

3.2 工事振動検知

都市部や住宅街における建設工事では、生活環境の保全を十分に確保しながらの円滑な工事遂行が不可欠である。特に、工事作業に起因した振動については、現場周辺への影響範囲や程度をタイムリーに把握することが重要である。しかし、地盤なども含む振動の伝搬経路は複雑でその予測が困難である。その上、従来の振動計などでの測定では、多点かつ長期的な振動計測において制約が多い。一方、光ファイバは通信手段として広く日本中に張り巡らされており、DAS と組み合わせることで、新たな工事振動の把握手段となり得る。

DAS と通信用光ファイバを用いた工事振動モニタリングシステムの概要を図-5 に示す⁴⁾。DAS アナライザは、監視対象エリアに敷設された通信用光ケーブルと接続し、データ取得を行う。このとき、通信用光ケーブルのうちダークファイバを使用する。建設重機などの振動源から発生した振動は、地盤から地下とう道内の通信用光ケーブル、または地盤から電柱～電柱から架線された通信用光ケーブルへと伝搬し、光ファイバに微小なひずみ変化を与える。DAS では光ファイバに沿ってすべての位置でひずみ変化を捉え、現地の座標情報と組み合わせることで、リアルタイムに地図上に振動変化をマッピングし可視化できる。

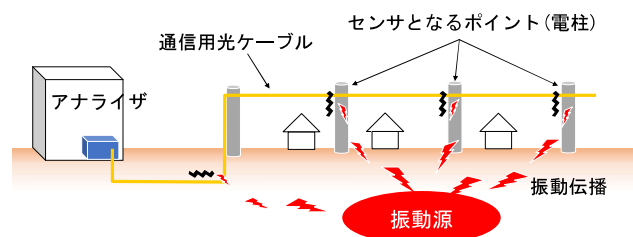
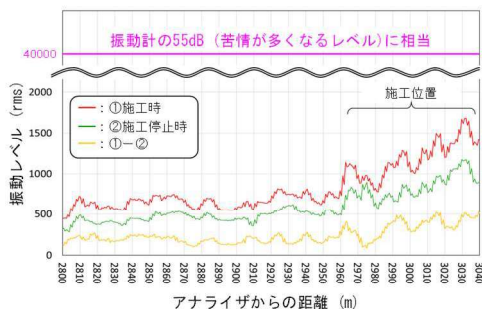
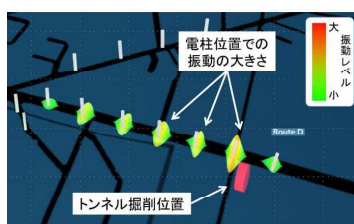


図-5 DAS による工事振動モニタリングシステム⁴⁾

本システムを用いて、トンネル掘削時の振動測定を行った。トンネル掘削の施工中から施工停止中まで DAS デ

ータを取得し、その変化を考察した。結果の一例を図-6に示す。赤線と緑線は、それぞれ施工時と施工停止時に観測された振動分布であり、黄線はそれらの差分を表す。これらは、DAS の生データからノイズ振動を除去する信号処理を行っている。測定された光ファイバ全長の振動分布のうちモニタリングエリアとなった距離 2,800～3,040m を抽出しており、トンネル掘削位置は 3,000m 付近である。測定されたトンネル掘進による振動は一般的に人が感じるとされる振動レベル (55 dB) に比べ非常に小さかったものの、施工時と施工停止時の振動レベルを比較すると、トンネル掘削位置で僅かに増加する傾向を確認することができた。また、電柱位置での振動レベルを抽出し、図-7 のように地図上にマッピング、各地点の振動レベルの変化をリアルタイムに可視化した。振動レベルに応じて各マーカーの大きさと色が変化し、複数のマーカーの挙動から振動の影響範囲を直観的に把握することができる。国土を網羅的に敷設されている通信用光ケーブルを活用し、近接工事による影響などを広く把握できる手段であり、安心な社会構築の一助として期待できる。

図-6 DAS データによる工事振動⁴⁾図-7 振動分布の可視化イメージ⁴⁾

3.3 交通流監視

道路上の様々な情報(交通流、事故や逆走など)をとらえる手段としては、路側に設置されたカメラやレーダーなどが一般的であるが、それぞれの認識範囲は数 100m 程度にとどまる。そのため、道路全長にわたって情報を把握するためには網羅的な監視手段が望まれている。また、高速道路や主な国道沿いには通信用光ケーブルが敷設されていることが多く、ダークファイバと DAS による交通流監視への活用が期待されている。車両などの移動に伴う振動が舗装や地盤を介して通信用光ケーブルに伝

播するため、DAS データによって移動体を監視できるからである。

DAS による交通流監視の処理フローを図-8～9に示す。まず、アナライザから得られた DAS データの必要な箇所のみを抽出し、交通流からの振動以外のノイズ成分を除去するためにフィルタ処理を行う。車両軌跡は、二値化後にエッジ検出、クラスタリングされた振動源群として軌跡を算出する。ここで得られた結果は光ケーブル上の位置であるため、光ケーブル敷設情報と地図情報をもとに緯度経度に変換され、交通流表示などが実現される⁵⁾。

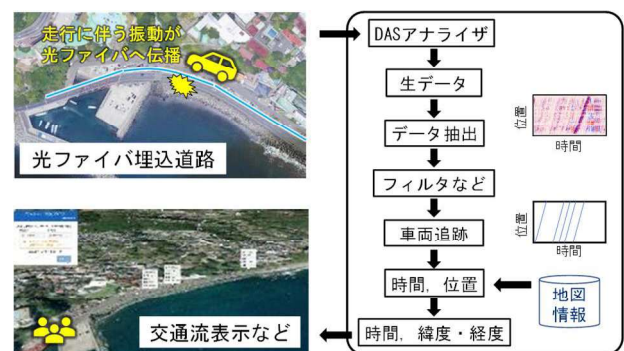


図-8 光ファイバによる交通流監視フロー

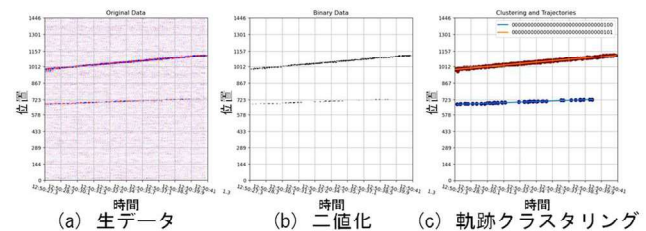


図-9 DAS データからの車両追跡

なお、通信用光ケーブルではなく、計測用光ケーブルを用いた交通流監視の取り組みもはじまっている。具体的には、舗装表面からカッター加工した溝内部に計測用光ケーブルを直接敷設し、充填剤を施工することで舗装と一体化させる試みなどがなされている⁶⁾。図-10に両者の DAS データを示す。計測用光ケーブルは、舗装との一体性が一様に確保されていることから、より解像度の高い定量的な道路上の情報の評価が期待できる。

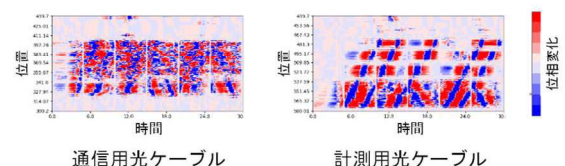


図-10 通信用と計測用光ケーブルで得られた DAS データの比較

将来的な自動運転システムでは、車両と道路インフラ間でリアルタイムの情報交換が行われると予想されるた

め、本技術は交通事故のリスク減少、渋滞の緩和や燃費の向上など交通流の最適化だけでなく、高齢者や障害者の支援など様々なモビリティサービスへの貢献が期待できる。さらに、車側だけでは把握しきれない道路情報を補完できるため、より安全で快適な移動が実現できる。今後、自動運転へ展開するために、リアルタイムで路側の DAS データを自動運転車両と低遅延で連携する技術が求められる。

4. 今後の展望

DAS は非常に高感度であり、特に侵入者検知や油井監視などで適用範囲が広がっている。わが国では、光ファイバ通信網の世帯普及率が高く、その網羅的に敷設された通信用光ケーブルを利用して、特に地震観測などを中心とした取組みが盛んである。こうした通信用光ケーブルは、通信会社だけでなく、電力やガス、上下水道などのインフラ管理者や、道路会社、鉄道会社も所有しており、一級河川や国道沿いにも敷設されている。最近では、通信会社の光ファイバ通信網と下水道内の光ケーブルを融合させた横断的な試みも着手（図-11）されており⁸⁾、新たな価値創造が期待される。一方で、通信用途以外での利用が規制されている光ファイバ通信ケーブルもあることから、ダークファイバの計測用途への門戸開放が期待される。

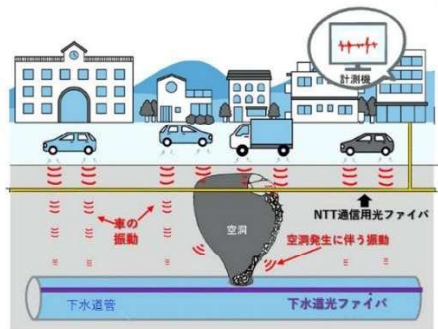


図-11 光ファイバを用いた地中空洞検知イメージ⁸⁾

また、散乱光解析の計測技術そのものも日進月歩である。計測範囲のさらなる長距離化、静ひずみ計測も可能にする低周波のドリフト低減、フェージング（干渉による信号強度の変動）への対応などが求められる。合わせて、時空間的に膨大な DAS データを取り扱う必要があるため、その処理～通信～蓄積技術の開発も不可欠である。

さらに、通信用光ケーブルの計測感度向上に向けた取組みも行われている。管内に敷設された通信用ケーブルをパッカーなどで周囲に押し付ける方法（セミ・ダークファイバ）によって、DAS データの感度向上効果が報告されている⁹⁾。既設の設備を有効活用する手段として期待される。

5. おわりに

本項では、分布型光ファイバセンサのひとつである振動分布計測（DAS）の概要と、物理探査、工事振動検知、交通流監視など、地盤構造を振動伝播経路のひとつとする様々な適用例を紹介した。今後、計測技術（散乱光解析の技術）とともに高度なデータ評価技術、特に常時計測に不可欠なビッグデータ処理技術などの開発が望まれる。また、さらなる網羅的、多面的、効率的な評価のためにも、様々な光ファイバ通信網が融合され、単一インフラ評価に留まらない横断的な取組みを期待したい。

（執筆責任者 今井道男）

参考文献

- 1) Hartog, A. H. (2017). An introduction to distributed optical fibre sensors. CRC press.
- 2) He, Z., & Liu, Q. (2021). Optical fiber distributed acoustic sensors: A review. *Journal of Lightwave Technology*, 39(12), 3671-3686.
- 3) 山内泰知, 杉本芳博, 高岡宏之, 瀬尾昭治, 今井道男, 吉村雄一, 西垣誠, 西村輝. (2023). 斜面上に埋設された光ファイバーの DAS 計測を用いた表面波探査による S 波速度構造の推定, 地盤工学研究発表会発表講演集, 58th, ROMBUNNO.11-11-3-05.
- 4) 岡本圭司, 今井道男, 永谷英基, 川端淳一, 江口周平, 村上太一, 隅谷亮太, 堀田大資, 法月佑太, 伊藤靖之, 佐々木理, 森洗遥, 大内啓佑, 佐伯直人, 青野義明, (2025). 通信用光ファイバを活用した工事振動モニタリングシステム, 令和 7 年度土木学会年次学術講演会, VI-48.
- 5) 青鹿弘行, 今井道男, 吉村雄一, 永谷英基, 辻良祐, 川端淳一, (2024). 路面上に敷設した光ファイバセンサによる交通流可視化技術, 令和 6 年度土木学会年次学術講演会, CS9-95.
- 6) 岩井稔, 五十嵐乃愛, 皆川春奈, 今井道男, 青鹿弘行, 大窪一正, 金塚英一, 大塚雄次郎, 田中宏幸, 保田祐司, 三枝貴志, (2024). 既存橋梁を対象とした光ファイバによる車両走行試験時の深度分布計測, 令和 6 年度土木学会年次学術講演会, IV-15.
- 7) 今井道男, 青鹿弘行, 永谷英基, 辻良祐, 川端淳一, 小山哉, 山口史人, 中道积夫, (2025). 舗装敷設光ファイバセンサによる道路情報解析を用いた路車間協調型自動運転システム, 令和 7 年度土木学会年次学術講演会, IV-15.
- 8) 下水道光ファイバを活用した地中空洞化調査技術の開発を開始, <https://www.kajimaco.jp/news/press/202505/29c1-j.htm>, (参照 2025.8.12)-
- 9) 檜山孔聖, 森啓年, 永谷英基, 川野健一, 毛利輝, 安部利亮, (2025). 河川堤防の越水を対象とした DAS 振動計測による小型模型実験, 令和 7 年度土木学会年次学術講演会, 11PM1-Co-09.