

[論文 No. GR3]

「微動アレイ探査による埋没地形の検出と考察」

応用地質株式会社 ○伊藤亮太、小西千里、寺田悠祐
中嶋勳雄（地質リスク・エンジニア 登録番号 137）

1. 事例の概要

本事例は、国道のバイパス事業における調査段階において、地質リスクの発現を未然に回避した事例である。事業区間では、道路盛土と補強土壁が計画されている。道路設計では、圧密や変形などの変状の発生原因となる沖積層（軟弱層）の分布範囲や深度を「調査段階」で詳細に把握し、必要な対策を講ずることで、地質リスクの見落としや手戻りなく事業を推進することが重要となる。軟弱層の分布を把握する手段として、一般にボーリング調査や各種サウンディングが実施される。しかしながら、調査コストや工期、あるいは用地の制約条件等の問題により、限られた本数のボーリング調査やサウンディングの結果から道路直下の地質分布を推定することから、自ずと地質状況の把握には限界がある。そのため、地質分布が推定どおりでは無かった場合には、道路盛土や擁壁設置、軟弱地盤改良などの施工段階や道路供用後の維持管理段階において地質リスク（道路や擁壁の沈下・変形）が発現し、それに伴う追加調査や補修対策等による施工工程の遅れや現道の交通障害の発生が懸念される。

本事例は、道路盛土の計画区間に対して、ボーリング調査に加えて2次元微動アレイ探査を実施し、地質分布の推定精度の向上を図ったものである。その結果、ボーリング調査だけでは把握し得なかった埋没谷地形（地質リスクとなる軟弱地盤の局所的分布）を把握することができた。さらに、追加調査として、探査結果の検証を目的とした検証ボーリング調査と、埋没地形の面的な広がりやの把握を目的とした3次元常時微動トモグラフィ探査を実施した。その結果、埋没谷地形の存在を直接的に確認するとともに、 N 値の小さい沖積層粘性土が層厚約20mで分布すること、埋没谷が道路に斜交して分布することが確認できた。

埋没谷が分布する区間は、前後区間に比べて沖積層（軟弱層）が厚く堆積するため、道路縦断の不同沈下の発生が懸念される。また、圧密沈下の収束時間も前後区間と異なるため、施工工程にも遅れが生じる。さらに、軟弱地盤対策として地盤改良を行う場合では、予め設定する改良深度（軟弱層底面）が大幅に異なり、工法選定や施工機械の見直しといった大きな手戻りが生じる可能性がある。以上より、調査段階で埋没谷地形の存在とその分布・性状を確認したことで、詳細設計段階が軟弱地盤技術解析や対策工検討が適切になされ、施工段階あるいは維持管理段階におけるリスク発現の防止に寄与したといえる。

2. 事例分析のシナリオ

本事例における最大の課題は、道路盛土における圧密沈下や液状化等の地質リスクを確実に抽出し、対応することであり、そのために当該地の地形地質から想定される道路盛土区間の複雑な地質状況を詳細に把握することが課題であった。ボーリング調査は、コア観察による地質の直接確認とともに様々な物性値を原位置で直接取得できることが利点である一方で、ボーリング調査で得られる情報は点の情報であり、1地点に一定の調査期間と



図1 地質調査の流れ

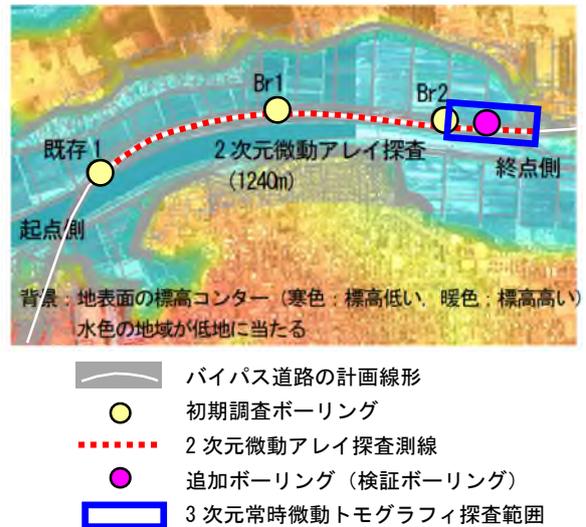
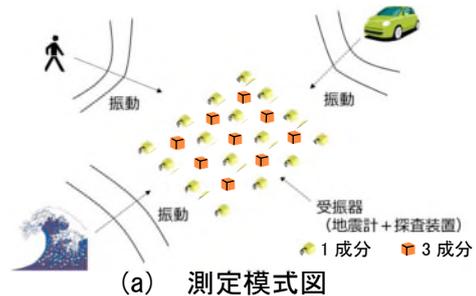


図2 調査位置図

コストを要する。さらには、用地上の制約条件や資機材搬入出ルート、給水ルート・手段の確保が困難等の理由で、必要な箇所ではボーリング調査が実施できない場合もあった。そこで、ボーリング調査に加えて、地盤のS波速度構造を連続的に測定することができる微動アレイ探査を組み合わせた調査を実施し、道路直下の沖積層（軟弱層）の分布範囲や深度の推定精度の向上を図った。初期調査として3地点でボーリング調査を実施したのち、図1に示す追加調査を段階的に実施した。なお、本事例のうち、2次元微動アレイ探査結果までは既往報告¹⁾に記載されており、今回はそれを含む一連の調査結果について報告する。

(1) 2次元微動アレイ探査

微動アレイ探査は、地表の微小振動（常時微動、もしくは単に微動と呼ぶ）を利用した物理探査手法である。表面波探査と同様に、周波数（波長）によって振動の伝わる速度構造を推定する手法であるが、表面波探査²⁾との違いは、人工的な起振源を必要としないことである。今回は、一般的な微動アレイ探査のように地震計を円周、あるいは三角形に配置して測定を行う手法ではなく、直線状に配置して直下のS波速度構造を取得した³⁾。この手法の特徴は、一度に多数の地震計を同時に利用することで効率的な測定を行うことである。使用した受振器（地震計）は図3(b)左に示す1成分のMcSEIS-ATである。GPS内蔵の独立型の探査装置のため、受振器を計測本部に有線接続する必要がなく、設置や移動を迅速に行うことができる。受振器に収録したデータは、測定終了後にWi-Fiを用いて無線でPCに転送可能で



(a) 測定模式図



(b) 受振器 McSEIS-AT (左：1成分，右：3成分)



(c) 探査状況

(●: 1成分, ○: 3成分)

図3 3次元常時微動トモグラフィ探査の測定模式図・探査装置・探査状況

ある。

(2) 検証ボーリング

2次元微動アレイ探査によって地質リスクとなり得る埋没谷地形の存在が示された。しかし、微動アレイ探査は地表面から測定する非破壊調査であり、地盤状況を直接確認していない。そのため、埋没谷地形が最も深くなる位置にて、探査結果の検証を目的としたボーリング調査（検証ボーリング）を実施した。調査方法は、通常のボーリング調査であり1m毎に標準貫入試験を実施した。

(3) 3次元常時微動トモグラフィ探査

埋没谷地形の面的な形状（軟弱層の変化、蛇行）を把握し、計画道路横断方向の設計条件を詳細に得るために、3次元常時微動トモグラフィ探査⁴⁾を実施した。使用した受振器は、図3(b)に示す1成分と3成分のMcSEIS-ATであり、格子状を基本として現地状況に合わせて配置した（図3(a)及び(c)参照）。

3. データ収集分析

(1) 2次元微動アレイ探査結果

探査結果は、探査測線（道路線形下）のS波速度断面図である（図4(b)参照）。同図より、ボーリング地点 Br-2 の終点側にS波速度の低速度の凹部を把握した。初期調査ボーリング（図4(a)参照）との対比によると、沖積層と洪積層の境界は、 $V_s \geq 100 \sim 110 \text{ m/s}$ に対応することから、S波速度の低速度の凹部は埋没谷地形であると推定した。

(2) 検証ボーリング結果

2次元微動アレイ探査により推定した埋没谷地形の検証を目的としてボーリング調査（検証ボーリング）を追加実施した。その結果、N値0~1の軟弱層が約20mの層厚で分布する埋没谷地形を確認した。

初期調査から検証ボーリングまでの調査結果により事業区間

の終点付近に埋没谷地形の存在が明らかとなった。埋没谷地形確認前後の推定地質縦断面図とS波速度断面図の対比を図5に示す。埋没谷地形に相当する位置の軟弱層厚を対比すると、初期調査時点では8mと推定していたところ、追加調査を行った結果、約20m（当

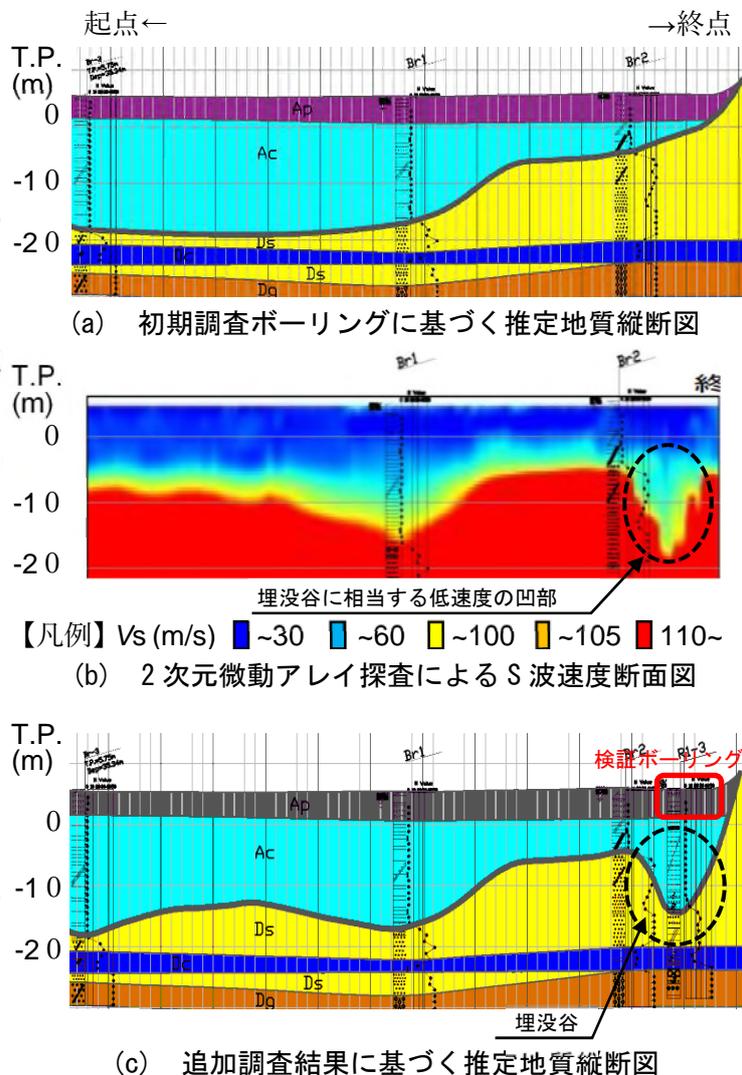


図4 各調査過程に基づく推定地質またはS波速度縦断面図

初比 約 2.5 倍) であることを確認した。

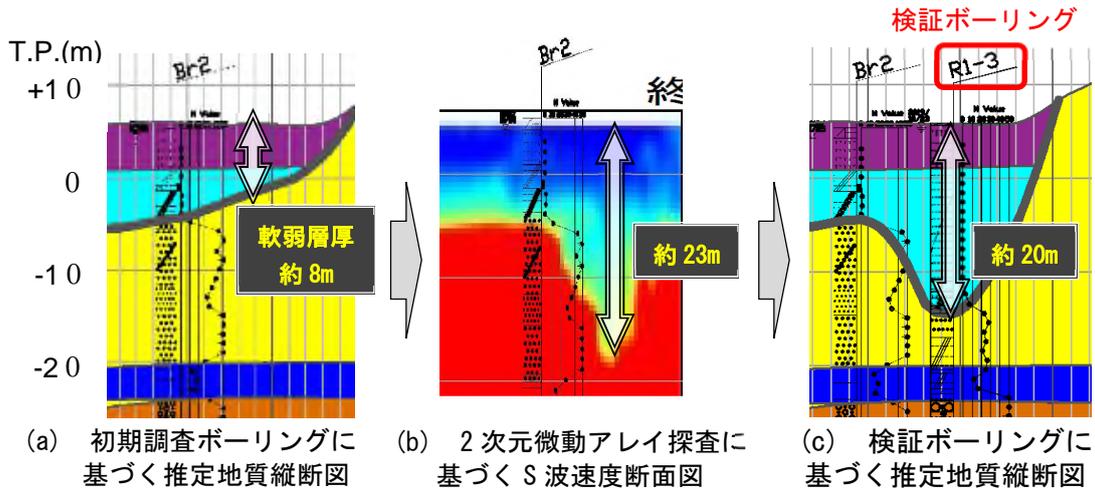


図5 埋没谷地形に相当する位置に推定される軟弱層厚の対比

(3) 3次元常時微動トモグラフィ探索結果

3次元常時微動トモグラフィ探索では、通常使用する1成分の受振器に加えて、3成分の受振器を併用した。これによりH/Vスペクトルを把握することができ、そのピーク周波数から基盤面を推定することができる。今回は、ボーリング調査で確認した沖積層下面深度と、1成分の2次元微動アレイ探索及び3次元常時微動トモグラフィ探索から得られたS波速度構造に加えて、3成分の解析結果から得られる基盤面の深度を総合的に評価することで、道路盛土範囲に対する埋没谷の形状を面的に推定し、埋没谷地形が旧河道と同様の線形であり、道路線形と斜交することを示唆する結果が得られた(図6参照)。

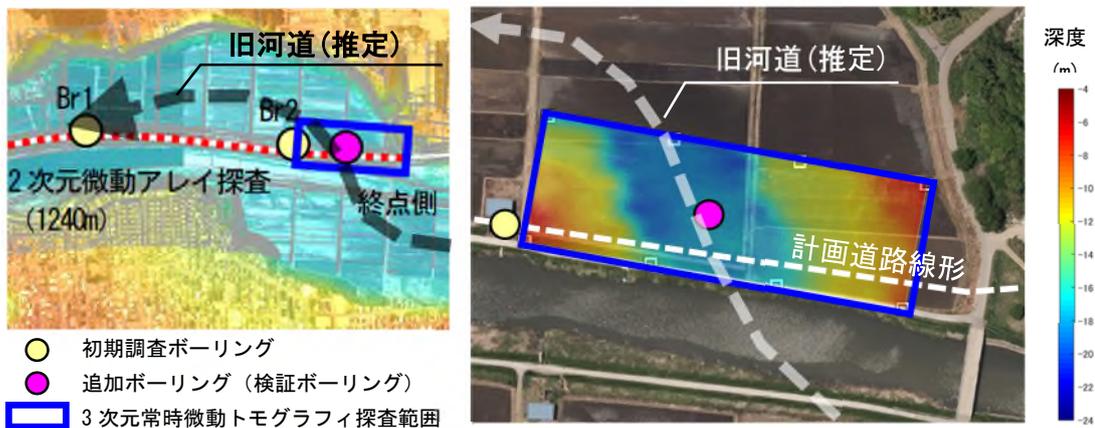


図6 3次元常時微動トモグラフィ結果から推定した基盤深度のコンター図

4. マネジメントの効果

調査段階で推定精度の高い地質縦断面図を取得できたことで、詳細設計段階でその結果にもとづき適切な軟弱地盤技術解析と対策工検討が実施され、地質リスクが回避されるものとする。なお、調査段階で埋没谷地形の存在が把握されずに設計・施工段階へ移行していた場合に、次の2点の地盤トラブルのいずれかが発生していた可能性を挙げる。

- ① 地盤改良におけるトラブル：軟弱地盤対策として地盤改良が施工される際に、軟弱層厚が当初想定よりも大幅に厚いことが確認された場合には、改良深度の再検討や施工機械の変更(中層混合処理工法から深層混合処理工法への変更)等の施工中断や手

戻りが生じる。

- ② 道路盛土の沈下トラブル：軟弱地盤の層厚が薄く、地盤改良は不要との設計にもとづき道路盛土が施工された場合には、道路盛土の施工直後あるいは道路供用後に予測沈下量を上回る沈下が発生し、不同沈下による道路縦断勾配の不陸の発生や、補強土壁の沈下・変形が生じる。また、これらの変状に対する対策工が求められる。

特に②について、道路供用後にリスクが発現した場合には、対策工事や想定以上の補修費用が発生するのみならず、現道の通行止め等による第三者の交通障害にまで影響が及ぶ恐れがある。

本事例では、初期調査から追加調査までの一連の調査により、従来の一般的な調査に比べて調査費用は増加したものの、調査段階で地質分布を詳細に把握したことでリスク発現を未然に回避できたことは、道路事業の円滑な推進にあたり、非常に意義が大きいものであったと考える。

また、調査段階でより詳細な情報を取得するためには、3次元常時微動トモグラフィ探査等の新技術の積極活用も有用であり、これによる効率化や高精度化の促進が期待される。

5. データ様式の提案

本事例は、A型（地質リスクを回避した事例）であることから、データ様式Aを用いて整理した（表1参照）。

引用文献

- 1) 花岡ら：2次元/3次元微動アレイ探査を用いたBIM/CIM地質モデルの作成事例，第1回 i-construction 推進に関するシンポジウム，土木学会，2019.
- 2) 物理探査学会：物理探査適用の手引き-土木物理探査マニュアル2008-，pp.91-109.
- 3) 小西千里・斎藤秀樹：軽量小型の独立型地震探査装置を用いた直線微動アレイ探査，第53回地盤工学研究発表会，2018.
- 4) 林 宏一，小西千里，Falkenstein, Kent, Craig, Mitch, Wong, Leong Toh，鈴木晴彦、劉瑛、田原道崇：二次元および三次元常時微動トモグラフィの開発と適用事例，物理探査学会第138回学術講演会論文集，pp.79-82，2018

表1 データ様式A (リスクを回避した事例) (修正無し)

大項目	小項目		データ
対象工事	発注者		非公開
	工事名		非公開
	工種		道路盛土(軟弱地盤対策)
	工事概要		新規バイパス道路事業
	①当初工事費		—
	当初工期		—
リスク回避 事象	予測されたリスク 発現時期		道路予備設計のための地質調査時 or 道路施工時・道路供用後
	予測されたトラブル		道路盛土の不同沈下、側方変形、すべり破壊
	回避した事象		同上
	工事への影響		—(施工前段階)
リスク管理 の実際	判断した時期		詳細設計着手前の詳細地質調査の実施計画時
	判断した者		発注者及び受注者
	判断の内容		道路盛土の詳細設計として軟弱地盤技術解析および 対策工検討の実施にあたり、業務地の地形地質の特 徴を踏まえ、道路縦断の軟弱地盤の分布状況(軟弱地 盤厚さ)を詳細に把握する必要があると考えた。従来 のボーリング調査の単独実施では、コスト・工期の面 で正確な軟弱地盤分布の把握が困難であると判断し、 物理探査(微動アレイ探査)の追加実施を提案した。
	判断に必要な情報		ボーリング調査結果と物理探査結果の総合解釈による 2次元・3次元的地層分布
リスク対応 の実際	内容	追加調査	ボーリング調査、2次元微動アレイ探査、3次元常時微 動トモグラフィ探査
		修正設計	設計業務にて検討
		対策工	沈下対策等を設計業務にて検討
	費用	追加調査	—
		修正設計	—
		対策工	—
		②合計	—
変更工事の 内容	工事変更の内容		—
	③変更工事費		—
	変更工期		—
	間接的な影響項目		—
	受益者		—
リスクマネジ メントの効 果	費用(①-③-②)		—
	工期		—
	その他		1. 施工時にリスクが発現した場合 軟弱層厚が当初想定よりも大幅に厚いことが確認さ れた場合には、改良深度の再検討や施工機械の変更 等の施工中断や手戻りが生じる。 2. 施工後・供用後にリスクが発現した場合 予測沈下量を上回る沈下が発生し、不同沈下による 道路縦断勾配の不陸の発生や、補強土壁の沈下・変 形が生じる。また、これらの変状の対する対策工が求 められる。