

# 物理探査の地質・地盤リスクマネジメントへの活用

尾西恭亮・品川俊介

## 1. はじめに

地質・地盤の不確実性は、土木事業において安全性や効率性に関するリスクの要因となっている。地質や地盤は不均質性を有するにも関わらず、直接調査することが簡単ではなく、把握が難しい。不確実性を縮小し、地質・地盤リスクに合理的に対応する堅実な方法は、ボーリングなどの調査数量を増やし、情報量を増やすことであるが、費用面の制約がある。そこで、効率的に情報量を増大できる物理探査や地形判読などが活用できる。これらの空間方向に連続した情報は、空間方向の変化の傾向に対する信頼性が高い。この特質を活かすことにより、土木構造物の建設に当たり好適な地盤条件箇所を選定にも利用可能であり、地質・地盤リスクマネジメントへ活用できる。

本報では、地質・地盤の不確実性の縮小に物理探査が利用可能な場合があることへの理解促進を目的に、地質・地盤リスクマネジメントにおける物理探査手法の適用の要点を整理した上で、物理探査の空間的に連続した情報とその他の調査資料を適切に組み合わせることにより河川堤防に関する地盤の不均質性を把握した事例を報告する。

## 2. 物理探査による地質・地盤リスクの低減

### 2.1 離散情報に基づく地質・地盤リスク

ボーリングやサウンディングによる調査は、一般に調査地点間に距離があり、空間方向に離散的な情報である。地盤の不均質性が大きい場合には、調査密度が低いと、知りたい対象の不確実性が大きくなり問題となる。離散情報に基づいた場合の地質・地盤リスクを下記に示す。

- (1) 施工の進捗に伴い想定と異なる地質が現れ、施工期間の延長や施工費用の増大が生じる。
- (2) 土工構造物などの脆弱部を見落とす。これにより、対策を優先すべき箇所の選択を誤る。
- (3) 有効な対策施工の選択を誤る。これにより、

対策施工の効果が低下する。または、効果の低い対策を実施する。

- (4) 実際と異なる地質や地盤の構造モデルを用いることにより、安定度や浸透量などの数値計算の誤差が増大する。

### 2.2 手法の組み合わせによる信頼性の向上

ボーリングなどの一地点の情報では不確実性が大きい場合に、物理探査などで地盤全体を調査し空間補間すると、効率的に不確実性を縮小できる。

しかし、不均質性の大きい地盤では、ボーリングの位置が不適切であると、その記録は付近を代表していない場合がある。初めから、不均質性が大きいと分かっている場合は、先に物理探査や高密度サウンディングを実施し、およその地盤構造を把握しておき、その後付近を代表する場所にボーリングを実施すると、調査精度が向上し、地質・地盤リスクをより低く抑えることができる。

また、物理探査は、通常、地表面のみにセンサーを設置し、地盤内部の広い範囲の情報を得ようとする。これは、少ない境界値を用いて多くの解を求めることになり、解が一意に決定されない。このため、測定記録をそのまま利用せず、解析や解釈の工程を経て、地盤物性分布を出力する。この結果、測定記録に再現性があっても、出力される地盤物性分布は無数の種類が存在する。

地質・地盤リスクを低減するためには、不確実性の縮小が必要であり、測定手法による不確実性はできるだけ低いことが望ましい。物理探査手法自体が持つ不確実性の縮小には、ボーリングなどの参照情報の組み合わせが大変有効なため、解析者や解釈者は積極的に情報を取得し活用することが重要である。

### 2.3 物理探査の適用の要点

浅部地盤調査における、物理探査の適用の要点を示す。例えば堤防は大きな空間的不均質性を有している<sup>2)</sup>。しかし、築堤履歴の喪失など、不均質性の把握に必要な情報が不足しがちである。ここで、ボーリングだけでは堤体やその基礎地盤の内部構造の不均質性の把握を十分に行えない場合

がある。このとき、高密度サウンディング、物理探査、開削調査などの手段を用いる必要が生じる。

空間方向に連続した調査の実施に際し、すべての区間で、同一の精度および調査密度で実施する必要はない。必要な精度や調査密度を、個々の現場の状況や調査の目的に即して設定することで、合理的な調査を行うことができる。

ここで、空間方向に連続した調査は、地盤の不均質性の把握のために実施するが、必要な精度や密度の決定は、堤体や基礎地盤の土質構成の不均質性の度合いにのみ基づき決定することは難しい。

これに対し、調査対象の堤防が抱えている問題の要点を理解し、これの解消に必要な情報を的確に捉えれば、精度や密度は自ずと決定される。物理探査の手法の選択や仕様の決定は、地盤の状況ではなく、課題の解決方法に即して決定する。

確固とした目的なく漠然と空間方向に連続した情報を求めても物理探査は役に立たず、地質・地盤リスクを低減させることはできない。砂質土の検知や粘性土層の連続性、層厚分布など、調査対象を明確に設定すると有効な探査設計が行える。

### 3. 河川堤防周辺の透水特性に関する地質・地盤リスクを低減する物理探査調査事例

河川堤防の漏水現象は、堤防及びその基礎地盤の局所的な透水特性の違いによって発生していると考えられることから、詳細なボーリング調査によってもその透水経路の把握が困難な場合がある。そこで土木研究所では堤防被災箇所周辺の堤防及び基礎地盤の不均質性に関する総合的な調査を実施してきた。以下に調査事例のいくつかを示す。

#### 3.1 堤体の構成土質分布の把握

堤防の築堤履歴のうち、特に構成土質材料の情報が失われていることが多い。そこで、堤体や基礎地盤の構成土質が把握できると、弱点箇所の判別が行え、また、不測の事態が生じた際の原因特定が行いやすいなど、管理に有効である。

例えば、砂質土に対し、粘性土の方が越水による洗掘や浸透による法面崩壊、液状化に対して耐性が高いとされる。一方で、経年による沈下は軟弱地盤で発生する。

ここでは、豪雨により法面崩壊や法尻における漏水を生じた堤防において、被災原因特定のために実施した調査事例を示す。

土質分布の把握に適した代表的な物理探査手法に電気探査がある。図-1に堤体における電気比抵抗断面例を示す。電気探査により、地盤の電気の流れやすさの分布を調べることができる。単位体積あたりの電気の流れ「にくさ」を電気抵抗率（地盤分野では（電気）比抵抗）と呼ぶ。

図-1では、電気比抵抗の値が大きく変化している。35～115mの区間の寒色系の領域は粘性土質で構成されており、その他の区間はより粗粒の成分で構成されていることを示している。このような単純な土質分布も地表面からの判別は難しい。

調査例の粘性土質の区間長はおよそ80mある。実際に、長手方向において堤防は100mより短い範囲で土質構成を変えている場合が少なくない。

調査例のように表層から内部まで全ての深度区間で土質構成が変化する場合ばかりでなく、一部の土質や層厚が遷移幅を有して徐々に変化する場合も多い。このような場合には最も弱い箇所でも法面崩壊などの被災が生じる傾向があるため、監視注意箇所の選定や被災原因の特定に有効である。

なお、一般的に粘性土と砂質土の判定は物理探査による記録だけでは確定できない。しかし、電気比抵抗の値が標準的な値に比べて、十分に大きい（500 Ω m以上）または小さい（100 Ω m以下）値を示している場合は、物理探査の記録からだけでも砂質～砂礫混じりや粘性土質の可能性が高いと推定できる。

次に、図-2に同じ堤体の横断面の電気比抵抗分布を示す。交差点は図-1の169mに位置する。

図-2の右側の川表の小段の下方の領域の電気比抵抗がほかよりも低い値を示している。ここには旧堤体が存在しているとの築堤履歴があり、旧堤体は粘性土～シルト質で構成されていると推定される。

図-3に川表の小段の縦断記録を示す。旧堤体は一樣に低比抵抗であることから、比較的均質な粘性土～シルト質で連続して構成されていることが推定される。すなわち、弱点箇所のない連続した遮水性能を有していることがわかる。したがって、裏法面や裏法尻における漏水は、川表から川裏への河川水の堤体内浸透が原因となった可能性は低く、基礎地盤の浸透か雨水の堤体内浸透が有力な原因と考えられる。

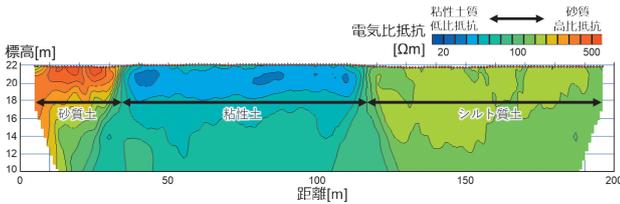


図-1 電気探査による堤体の電気比抵抗分布

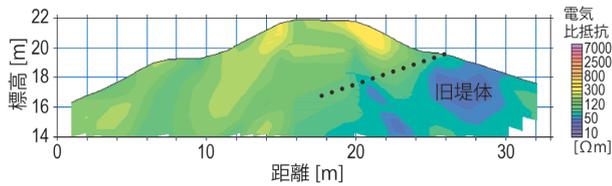


図-2 横断面における電気比抵抗分布

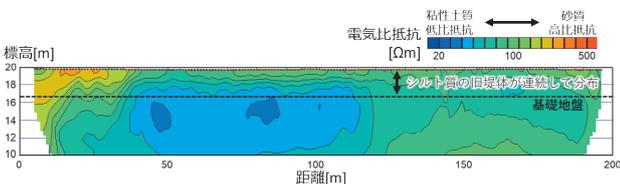


図-3 川表の小段下部の電気比抵抗分布

### 3.2 最適なボーリング位置の決定

次に、図-4に谷埋め盛土で実施した表面波探査によるS波速度分布の調査事例を示す。弾性波(地震波)の横波の速度をS波速度と呼ぶ。S波速度は剛性率と密度の関数であり、土質が同じ場合は、脆弱部の把握に用いることもできる。

S波速度分布からだけでは地層構造を推定することは難しい。しかし、ボーリング記録を参照し、図-4ではAとBの土質境界を推定している。境界Aは地山と盛土の境界、境界Bは造成年の異なる盛土の境界と考えられる。境界AとBはそれぞれ32mと44m付近を中心として谷部が存在しており、どちらも当該時代の旧河道に相当すると考えられる。これらは古い航空写真から推定される旧河道の位置と整合している。

旧河道の正確な位置がわかっていると、得たい情報に即した、ボーリング位置の適切な選定が行える。水位や地盤の排水性を知りたい場合は旧河道の位置に設置し、付近を代表する土質の情報を得たい場合は、旧河道を避ける位置とする。

地盤構造の情報のないボーリング結果は、付近の地盤をどのように代表しているか正確にはわからない。これは、地盤分布の把握に不確実性があり、ボーリング結果だけでは地質・地盤リスクの低減が十分に行えない場合があることを意味する。

一般にボーリングは付近を代表する場所に設け

ることが望ましく、地層が変化する箇所の中心点に設置するか、地層が大きく変化する変曲域を避けた位置に設置する。物理探査を活用すれば、ボーリングによる得られる情報の有効性を向上させることができる。

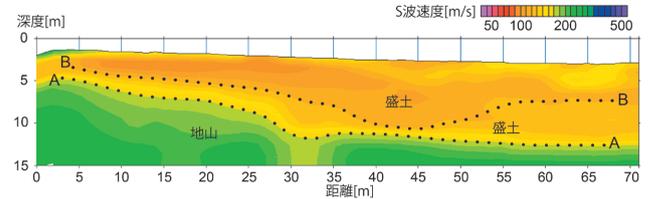


図-4 盛土のS波速度の分布

### 3.3 見落としのない地盤構造の把握

続いて、増水による法面崩壊や法尻における漏水を生じた堤防において、被災原因特定のために実施した調査事例を示す。

図-5に河川堤防の天端から探査した堤体内部の電気比抵抗の記録断面を示す。図-5は牽引式電気探査で記録を取得した。

牽引式電気探査は、通常の電極棒を地面に刺して実施する電気探査よりも高い効率で探査を行うことができ、一般的に通常の電気探査が1日に100~200m程度の距離しか探査が行えないところ、500~1000mなどの長い距離を探査できる。しかし、深部の探査が行えない地盤があり、また、探査精度がやや低い。堤防は延長が長いため、牽引式電気探査を採用するケースが多い。

図-5は電気比抵抗が通常に比べて異常に高いことを示しており、砂礫混じり層の存在が示唆される。しかし、既往記録による堤体断面構造や付近のボーリング記録に砂礫混じり層の情報はなかった。そのため、精度の高い通常の電気探査による追加調査が求められた。

図-6に通常の電気探査による電気比抵抗分布を示す。牽引式電気探査測線の一部の区間のみで実施したが、ほぼ同様に高い電気比抵抗を示しており、堤体は砂礫混じりなどの高比抵抗材料で構成されている可能性が高いことがわかった。

続いて、図-7と図-8に180m地点の横断面を示す。図-7の地中レーダ断面は堤体の浅部に明瞭な構造境界があることを示している。

図-8の電気比抵抗分布は、堤体全体が高比抵抗で砂質または砂礫混じりの土質で構成されていることを示している。表層付近の構造は地中レーダの示す構造が正しく、深度50cm~1mより下部に

砂質または砂礫混じり層の存在が推定される。

ここで、電気比抵抗分布は、赤色で示される高比抵抗領域が表層域と接続しており、一部で適切に表されていない。しかし、複数の探査手法を組み合わせるにより、手法の弱点を補完し不確実性を減らすことができる。

後日の開削調査で砂礫混じり層が表裏両法面下部で確認され、堤体内部を経路とする浸透が発生したと推定された。物理探査を概略調査に用いることにより、既往情報からでは推定が難しい地質分布や地盤構造の見落としを防ぐことができる。

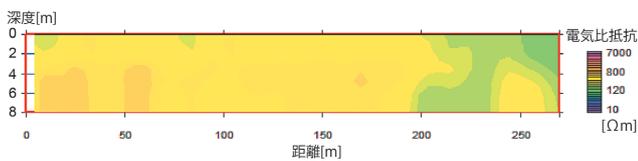


図-5 牽引式電気探査による電気比抵抗分布

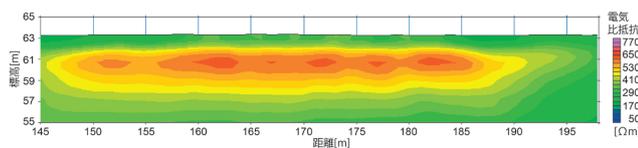


図-6 電極棒を用いた電気探査による電気比抵抗分布

#### 4. まとめ

調査対象地盤の、空間的不均質性とその物性評価や対策方法に影響する場合には、その情報不足による不確実性が地質・地盤リスクとなる。地質・地盤リスクの低減には、空間的不均質性の把握が必要で、物理探査などの空間方向に連続した調査が活用できる。

本論では、構成土質の把握、ボーリングとの組み合わせ、見落としのない地盤構造の把握に関する堤防や盛土の調査事例を示し、物理探査が不均質性の把握に有効であることを示した。

物理探査は、調査対象の土工構造物の物性値の確定よりも、物性分布の変化傾向の把握に長けた技術である。不確実性の大きな地質・地盤構造物においてリスクマネジメントを行うにあたり、特に供用後、維持管理における活用が期待される。

地質・地盤の不確実性のうち、局所的な不確実性は、主に設計の際の土質定数の設定などが必要になるために重視される傾向がある一方で、広域の不確実性はやや軽視される傾向がある。しかし、事業費の増大要因となるのは、むしろ広域の不確実性に関係するものが多い。物理探査はこうした

広域の不確実性の縮小が可能で、地質・地盤リスクマネジメントを通じて、事業の効率化に貢献できるものとする。

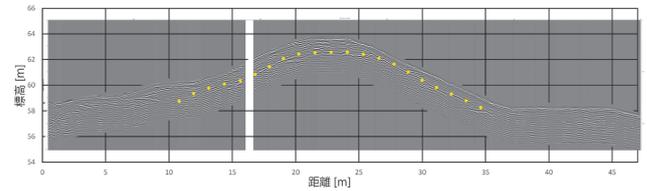


図-7 地中レーダによる横断断面の構造境界分布

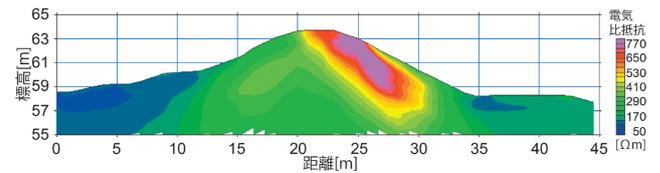


図-8 横断断面の電気比抵抗分布

#### 謝辞

国土交通省各地方整備局や自治体には現場調査許可を頂いた。元土木研究所（以下「土研」という。）地質・地盤研究グループ小林貴幸交流研究員（現応用地質（株））、土研地質チーム大石佑輔交流研究員には記録取得・解析に御協力を頂いた。土研地質・地盤研究グループ石原雅規上席研究員、元土研地質チーム矢島良紀主任研究員（現研究企画課長）には現場調査で支援を頂いた。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省、土木研究所、土木事業における地質・地盤リスクマネジメント検討委員会：土木事業における地質・地盤リスクマネジメントのガイドライン-関係者がONE-TEAMでリスクに対応するために、2020、  
<https://www.pwri.go.jp/jpn/research/saisentan/tis-hitsu-jiban/iinkai-guide2020.html>
- 2) 国土技術センター：河川堤防の構造検討の手引き（改訂版）、192pp.、2012.

尾西恭亮



土木研究所地質・地盤研究グループ地質チーム主任研究員  
ONISHI Kyosuke

品川俊介



土木研究所地質・地盤研究グループ地質チーム上席研究員  
SHINAGAWA Shunsuke