

# 地盤の防災・減災に役立つ地盤性状把握手法： 表面波探査の活用事例

川尻 峻三<sup>1</sup>

<sup>1</sup>九州工業大学大学院 工学研究院 建設社会工学研究系

気候変動に伴う降雨量の増加と洪水規模の拡大、大規模地震の発生に対し、住民の生命・財産を守るための地盤構造物の役割は近年、その重要性を増している。設計で考えている外力に対して地盤構造物が想定した性能を発揮するためには、地盤性状を可能な限り正しく評価し、現状の耐力評価を行う必要がある。本文では、非破壊で地盤内のS波速度分布を把握可能な表面波探査の実施例として、試験盛土、河川堤防、宅地盛土の事例を紹介する。

キーワード：地盤構造物、地盤性状、S波速度、表面波探査

## 1. はじめに

地盤構造物の健全性を評価するための一般的な地盤性状の物性値としては、標準貫入試験によるN値やPS検層によるS波速度 $V_s$ が広く利用されている。しかし、これらの方法は機材が大きかりとなるためコストや時間を多く必要とすることや、実施地点での深さ方向の1次元的地盤情報しか得ることができない。このため、道路や河川堤防などの広域線状インフラにおける地盤構造物の内部性状を把握し、健全性を評価するためにはある程度の時間と労力を必要とする。このような理由から昨今では、地盤構造物の内部性状把握に $V_s$ の2次元分布（以下、S波速度分布とする）を迅速に得られる表面波探査を適用する事例が増えている。

本文では、地盤構造物の内部性状の把握事例として筆者らが実施した締固め度 $D_c$ を変化させた実大試験盛土での結果<sup>1</sup>、河川増水による越水によって侵食が発生した堤防での結果<sup>2</sup>、最後に2018年北海道胆振東部地震で被災した札幌市内の宅地盛土の復旧で活用した事例<sup>3</sup>を紹介する。

## 2. 表面波探査の概要

図-1は筆者らが実施している表面波探査の原理<sup>4</sup>を概念的に示したものである。また、写真-1は補強土壁天端での表面波探査の実施例を示している。表面波探査は地盤の地表付近を伝わる表面波（レイリー波）を測定・解析することにより地盤の $V_s$ を求めることができる調査方法である。かけや等で人工的に地表面を起振すると表面

波が発生する。この表面波の時間領域の波形記録をフーリエ解析することで周波数と位相速度の関係を算出し、すべての速度計での結果を重ね合わせることで位相速度と周波数の関係である分散曲線が取得できる。一般的に表面波はその周波数によって伝播する深度が異なり、高

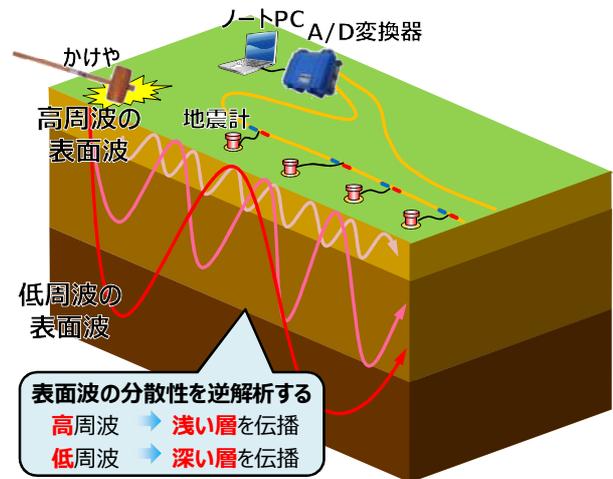


図-1 表面波探査の概念図<sup>4</sup>



写真-1 補強土壁での表面波探査の測線の例

周波数の波は浅い地盤を、低周波数の波は深い地盤を反映している。波長の3分の1が深さに相当するという関係を利用して解析の初期モデルを作成し、波形記録から算出した高次モードを除いた分散曲線を最も良く再現するS波速度構造を非線形最小二乗法による逆解析によって推定することができる<sup>4)</sup>。この解析を各速度計での分散曲線に応じて行い、各速度計で得られた1次元方向のS波速度構造を測線方向に補間することでS波速度 $V_s$ の2次元分布が取得できる。なお、分散曲線はPark et al.<sup>4)</sup>の表面波多チャンネル解析を基本として、さらに複雑な地盤構造に対応可能な林ら<sup>5),6)</sup>が開発した表面波CMP (Common Mid Point) によって算出している。

既往の事例として河川堤防に対する取り組みでは、表面波探査から得られる $V_s$ や電磁探査から得られる比抵抗を透水係数や粒度と関連付けることで、堤体内の地盤性状の空間分布把握手法を河川堤防統合物理探査<sup>7)</sup>として提案されている。補強土壁の変状メカニズム解明に関する取り組みについて川尻ら<sup>8)</sup>や中村ら<sup>9)</sup>は、変状発生箇所では相対的に $V_s$ が低下することを指摘している。北出ら<sup>10)</sup>は、港湾構造物の健全性評価に対する表面波探査の適用性について検討しており、潮位に伴う $V_s$ の変化を表面波探査によって把握することが可能であり、矢板式岸壁の健全性評価への適用性が高いとしている。Watabe and Sassa<sup>11)</sup>は干潟を構成する独特の地質構造や微地形を $V_s$ の分布で把握可能であるとし、ボーリング調査等の地盤調査と比較した場合の表面波探査の有用性を報告している。

あるようにブルーシートと土のうによって養生を行った。試験盛土の仕様は、高さ3.0m、のり面勾配1:1.5、天端幅3.0m、延長39.0mであり、標準的な道路一般盛土や鉄道単純盛土を想定している。盛土中央部で低密度盛土と高密度盛土に分かれている。盛土材料の土質分類では礫質砂 (SG) に相当する。試験盛土の施工は仕上がり厚が0.3mとなるように転圧を行った。低密度盛土では、最適含水比付近の試料をまき出し後、まき出しに使用したバックホウによって1回転圧を行った。なお、本研究における低密度盛土は、現在の実務で取り扱われている設計・施工体系が確立する前に施工された、締固め度および耐降雨性が低く、健全性の評価が必要となる盛土を想定している。一方で、高密度盛土では健全な盛土を想定し、試料のまき出し後、バックホウでの1回転圧と振動ローラーによって4回転圧を行った。盛土中央部の縦断方向と横断方向の各箇所て1層目、3層目、5層目、7層目、9層目の転圧完了後にRI計測<sup>12)</sup>によって乾燥密度 $\rho_d$ と含水比 $w$ を計測した。表面波探査は、盛土天端の中央部に測線を設けて実施した。

図-3a),b)はそれぞれRI計測から得られた $\rho_d$ と表面波探査から得られた $V_s$ の分布である。盛土部の $V_s$ は、低密度盛土では $H=0.0\sim 1.5\text{m}$ の領域で $V_s=130\sim 150\text{m/sec}$ 程度、 $H=1.5\sim 3.0\text{m}$ の領域で $V_s=100\sim 130\text{m/sec}$ 程度の範囲で分布している。一方、高密度盛土の $V_s$ は、 $H=0.0\sim 1.5\text{m}$ の領域で $V_s=160\sim 180\text{m/sec}$ 程度、 $H=1.5\sim 3.0\text{m}$ の領域で $V_s=130\sim 160\text{m/sec}$ 程度の範囲で分布している。ここで低密度盛

### 3. 表面波探査での地盤構造物の $V_s$ の測定事例

#### (1) 締固め度が異なる実大試験盛土での事例<sup>1)</sup>

図-2は本事例で対象とした実大試験盛土の全景を示している。試験盛土には降雨時の雨滴による浸食崩壊を防止するために農業用のナイロン紗を両のり面に敷設した。また、のり肩部のガリー浸食を防ぐために図中の挿絵に

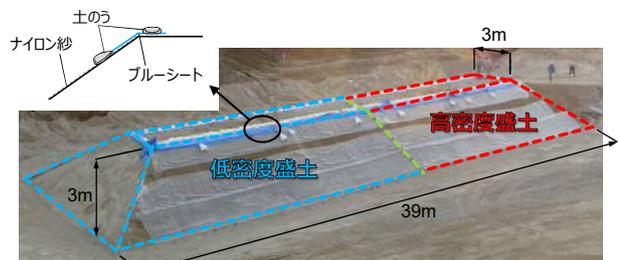


図-2 試験盛土の全景図

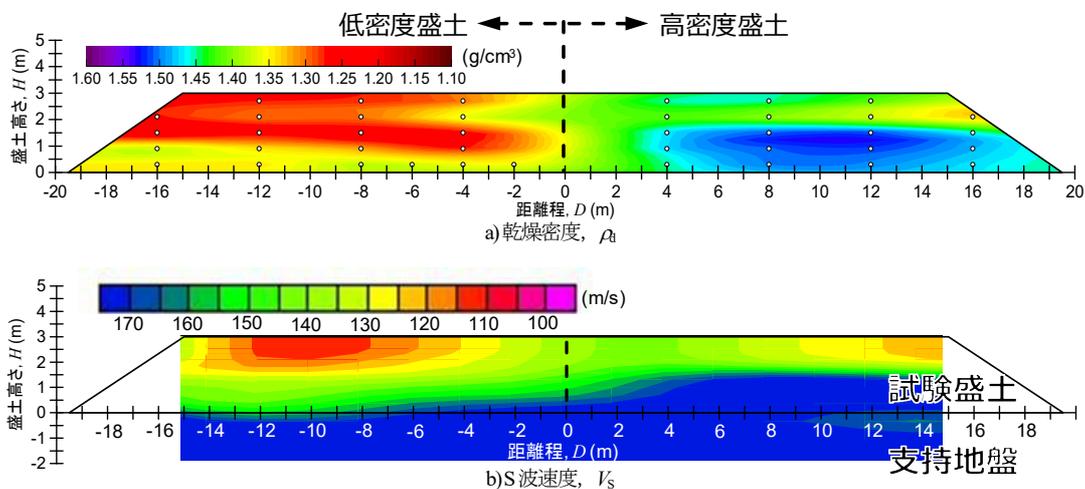


図-3 試験盛土竣工時の乾燥密度、S波速度分布

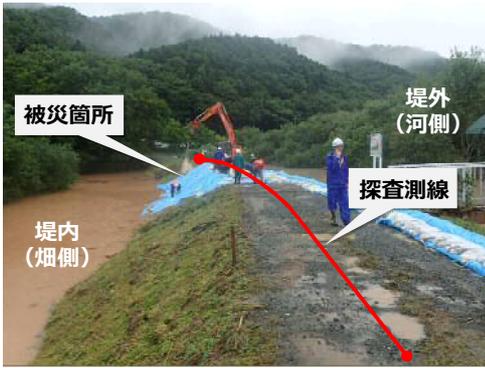


写真-2 越水による被災した河川堤防の状況

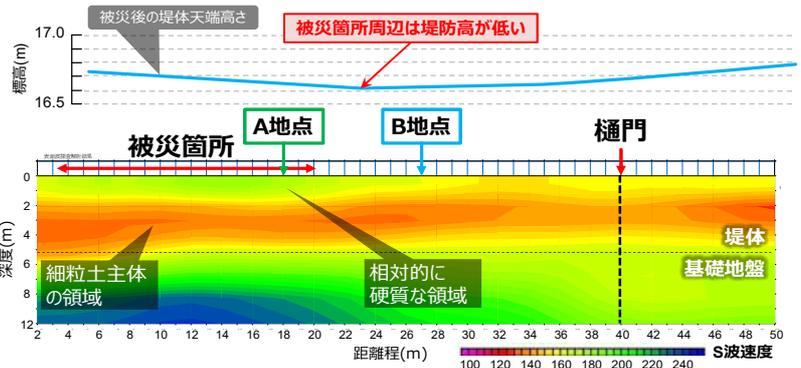


図-4 堤防天端標高とVs分布

土では、高密度盛土と比較すると $V_s$ と $\rho_a$ の分布の整合性が低い。この理由として、 $\rho_a$ は盛土の施工途中で実施したRI計測の結果を示したものであるが、 $V_s$ は盛土施工完了後に上載圧が作用し、 $\rho_a$ が変化した条件での地盤性状を反映しているためと考えられる。なお、 $H=0.0\sim 1.5m$ 、 $D=-12.0\sim -8.0m$ の盛土表層の領域では $V_s$ が小さく、 $\rho_a$ の分布と概ね整合する。これは盛土表層付近では作用している上載圧が小さいため、盛土完了後の $\rho_a$ の変化が小さかったためと考えられる。一方で、高密度盛土の $V_s$ は低密度盛土の $V_s$ よりも全体的な傾向として大きな値となっている。さらに $V_s$ の分布と $\rho_a$ の分布との整合性が良い。これは、高密度盛土では $\rho_a$ が大きいため盛土施工完了後の $\rho_a$ の変化が小さかったためと推察される。

(2) 越水による堤防侵食が発生した河川堤防の事例<sup>2)</sup>

2016年北海道豪雨災害の際に1級河川である常呂川で発生した堤防の越水侵食箇所（写真-2）で表面波探査を実施した。図-4は堤防延長方向の $V_s$ 分布および堤防天端の標高を示している。堤防天端が最も低い箇所は被災箇所よりもやや上流側であるが、被災箇所周辺は上流側の樋門付近よりも堤防天端が低いため、越流が発生したと予想される。 $V_s$ 分布を見ると、被災箇所周辺の堤防天端下1~2m程度までは $V_s=200m/s$ 程度であり、その他の箇所と比較すると高速度領域となっている。開削調査の結果から、A地点での開削断面では堤防天端下1~1.5m程度には礫質土が分布しており、その下部には青灰色のシルト質土が分布していた。一方で、B地点での礫質土の層厚は0.3m程度であり、A地点よりも小さかった。この結果から、被災箇所付近は堤防天端高さが低いため越流水が発生したものの堤防天端には礫質土が周辺よりも厚く分布し、当該箇所では越流水が発生した際の相対的な耐侵食性は高く、粘りを発揮した可能性がある。このような堤防内の地盤性状を $V_s$ の高速度領域として、表面波探査では把握可能である。

(3) 地震によって被災した宅地盛土での事例<sup>3)</sup>

2018北海道胆振東部地震では、震源から50km以上離れた札幌市清田区里塚地区では火山灰質土で造成された



図-5 2018年胆振東部地震での札幌市内での主な被災状況



図-6 旧水路および盛土範囲と表面波探査の測線

宅地盛土において液状化が発生し、これによって盛土が流動することで戸建て住宅の沈下・傾斜などの大規模な災害が発生した。図-5は被災箇所周辺の地形および被災状況を示している図-5a)~d)については2018年9月7日の状況を、図-5e)およびf)は2018年9月27日の状況を撮影したものである。札幌市清田区里塚地区の里塚1条1丁目では図-5a)や図-5d)に示すような戸建て住宅の沈下・傾斜および周辺道路の大規模な沈下・崩壊が発生した。図-5a)ではマンホール周辺の地盤沈下により、周囲よりも突出した状態のマンホールが確認できる。図-6は旧地形として、盛土内部の現・旧水路および宅地盛土造成時の許可申請図書に基づき推定した盛土範囲と本研究で実施した表面波探査の測線を示している。図-5に示した被害が大きかった領域は、図-6中の盛土範囲における旧水路と暗渠管の埋設範囲と概ね一致する。探査測線は旧水路

# 1 切盛り境界

- 明瞭に判断できる
- 旧河川で  $V_s$  が低下

# 2 被災規模の違い

- 盛土厚が厚く,  $V_s$  が低い

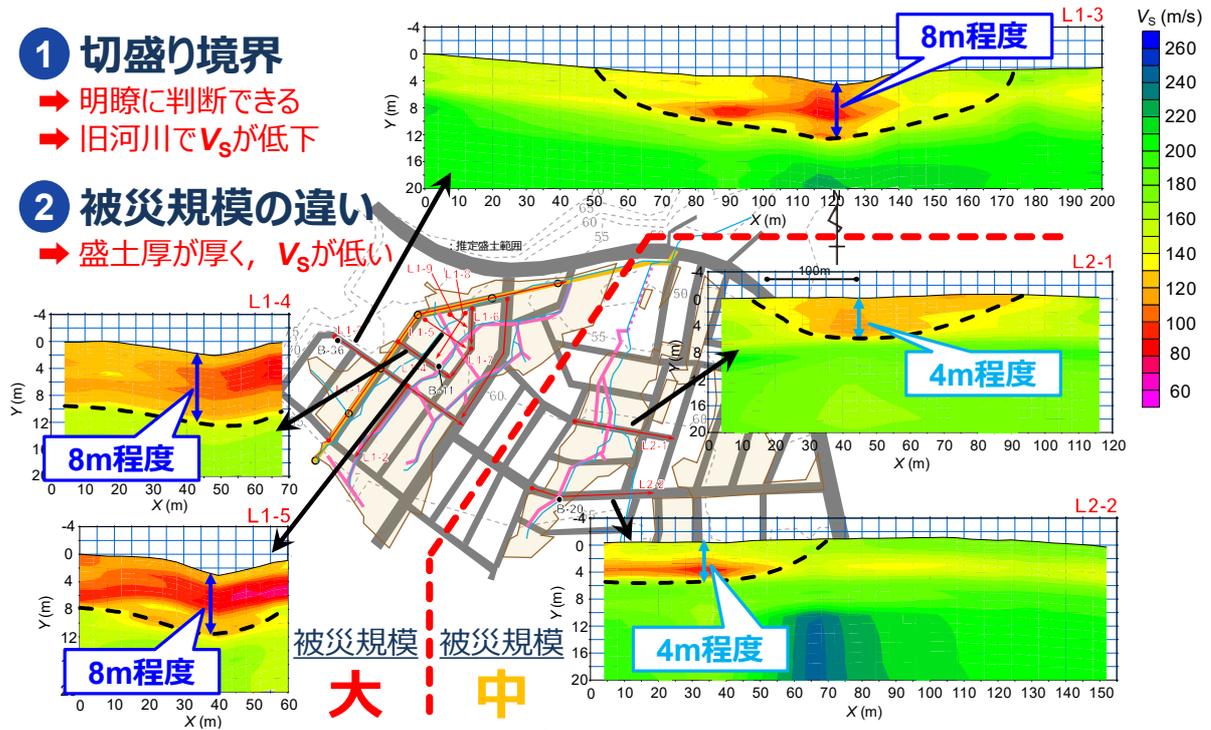


図-7 代表的な測線における  $V_s$  分布の比較

周辺での地盤性状を把握するために旧水路周辺の地盤沈下が顕著な領域を網羅するように設定した。

## 4. おわりに

本文では、限定的ではあるが、筆者が実施した地盤性状を把握するための表面波探査を活用した事例を紹介した。表面波探査はそれほど最新の技術ではなく、約20年前にはPisaの斜塔周辺での地盤調査に活用した事例が報告されている<sup>12)</sup>。一方で、同様に原位置試験で  $V_s$  を得ることができるPS検層と比較して表面波探査の原理がやや複雑である点や、市販の解析ソフトがブラックボックス化されていることもあってか「解析者の技量に左右され、上手く行かない事例が多い探査」と認識しているという声をよく耳にする。しかし、本文で示した結果は主に筆者の指導学生が解析したものである（もちろん、著者は都度、解析の経過と結果の確認をしている）。市販の解析ソフトであっても経験を積むことで本文で紹介した結果は得られるといえる。この結果の精度の良し悪しは読者の判断に委ねるしかないが、現在の表面波探査は決して「上手く行かない探査」ではないと筆者らは考えている。最後に本文の結果が読者の地盤調査手法の選択時の一助となれば幸いである。

### 参考文献

- 川尻峻三, 川口貴之, 橋本聖, 田中悠暉, 中村大, 山下聡: 盛土内の性状把握に対する表面波探査の適用性, 地盤工学ジャーナル, Vol.13, No.1, p.61-74, 2018.
- Kawajiri, S., Kawaguchi, T., Watanabe, Y., Hayakawa, H., Miyamori, Y.,

Nakamura, D. and Yamashita, S.: Investigation report of geotechnical disaster on river area due to typhoon landfall three times on Okhotsk region, Hokkaido, Japan, *Soils and Foundations*, Vol.59, No.3, pp. 764-782, 2019.

- 川尻峻三, 小笠原明信, 川口貴之, 佐々木将仁, 須志田健, 山下聡: 平成 30 年北海道胆振東部地震で被災した宅地造成盛土の被災後の S 波速度分布, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.76, No. 4, [特]地震工学論文集, pp. I\_87-I\_95, 2020.
- Park, C. B., Miller, R. D. and Xia, J.: Multichannel analysis of surface waves, *Geophysics*, Vol. 64, No. 3, pp. 800-808, 1999.
- 林宏一・鈴木晴彦・斎藤秀樹: 人工震源を用いた表面波探査の開発とその土地質調査への適用, 応用地質技術年報, No.21, 2001.
- 林宏一: 表面波探査における CMP 解析, 物理探査学会第 105 回学術講演会論文集, pp.13-16, 2001.
- 国立研究開発法人 土木研究所, 一般社団法人 物理探査学会 編: 河川堤防の統合物理探査 -安全性評価への適用の手引き-, 愛知出版, 2013.
- 川尻峻三, 澁谷啓, 鳥居宣之: ジオテキスタイル補強土壁の変状メカニズムに関する事例研究, 地盤工学ジャーナル, Vol.6, No.1, pp.15-25, 2011.
- 中村洋丈, 横田聖哉, 中澤正典, 竜田尚希, 辻慎一郎: 泥岩を用いたジオテキスタイル補強土壁の変状事例研究, 地盤工学ジャーナル, Vol.8, No.1, pp.35-51, 2013.
- 北出圭介, 一井康二, 河野真弓, 栗原大, 田口依久夫: 港湾構造物の健全度診断のための表面波探査の適用性の検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.4, pp.495-501, 2014.
- Watabe, Y. and Sassa, S.: Application of MASW technology to identification of tidal flat stratigraphy and its geoenvironmental interpretation, *Marine Geology*, Vol. 252, pp. 79-88, 2008.
- 澁谷啓・渡部要一・田中政典・山下聡・林宏一・荘司泰敬: 遺跡の保守・保全のための地盤調査法 - Pisa の斜塔を例として, 土と基礎, Vol. 52, No. 6, pp. 35-37, 2004.