

## 道路盛土内部の地盤物性取得のための S 波トモグラフィー探査の適用性検討

盛土 S 波速度 弾性波探査

(国研) 土木研究所 正会員 ○尾西恭亮・大石佑輔

(国研) 土木研究所 鈴木望夢

(国研) 土木研究所 正会員 加藤俊二・東拓生・佐々木直也

## 1. はじめに

谷部を埋めた高盛土や、橋長の抑制によるコスト縮減や発生土の有効活用などを目的とした「盛りこぼし橋台」の背面の高盛土において、大規模地震により変状や段差の発生などの被災が多く発生している。盛土の耐震性には盛土材料、締め条件、湧水など多くの条件が影響するとともに、建設発生土が活用される盛土の内部構造は不均質・不規則であり、ボーリングやサウンディングなど点における地盤情報のみでは弱点箇所の面的な広がり把握することが困難である。このため、非開削で面的に地盤情報を把握可能な物理探査技術を活用し、盛土の弱点箇所を抽出する技術が求められている。本文では、構造物背面の高盛土の地震時の沈下量を評価することを想定し、盛土の物性を面的に把握するため、S 波トモグラフィー探査を行った結果について報告する。

## 2. S 波速度の測定

高盛土に対して地震応答解析を実施する際に、剛性率が必要となる。この時、採取試料を用いた力学試験や N 値からの換算では、限られた地点の情報しか得られない。土質構成が不均質なことが多い盛土内部の剛性率分布を把握するためには、物理探査を活用し空間方向に連続した情報を取得する方法がある。

剛性率は S 波速度と密度により表せる。密度の変化量は相対的に小さいため、S 波速度分布が測定できれば、十分な精度で剛性率分布を取得できる。ここで、地盤を伝播する弾性波は縦波 (P 波) と横波 (S 波) が存在し、起振近傍域、または、不均質な地盤中の伝播において、必ず両者が混在する。また、地表近傍においては、必ず表面波が励起され伝播する。振動記録において、この 3 種類の波動を識別して S 波の応答のみを解析することが求められる。特に P 波は必ず S 波より先行して伝播するため、S 波の応答を目的とする場合には大きなノイズとなる。そこで、地盤を伝達する S 波の伝播速度を解析するために、対象構造物に合わせた探査手法や解析手法の設計が要点となる。なお、表面波 (レイリー波) の位相速度は、半無限媒質において S 波速度の 0.92 倍と相違が小さいため、工学的には両者は同一とみなして活用している。

物理探査を用いた浅部地盤用の主な S 波速度の取得手法を表 1 に示す。他にも S 波速度を取得可能な手法は幾つか存在するが、経費や探査条件が限定される浅部地盤調査においては、4 手法以外の手法が適合する条件は少ない。表 1 に示すような地盤条件への適合性や利点・欠点がある中で、調査目的に適合した探査手法を選択する。なお、S 波トモグラフィー探査と S 波弾性波探査は、原理的には同一の手法である。ただし、一般的に、弾性波探査が地表面で観測を行い、深部の高速度層を伝わる波動を解析するのに対し、トモグラフィー探査は坑井間などにおいて、発振点と受振点で囲まれる領域を解析する調査手法である。しかし、弾性波探査において、いわゆるハグトリ法などの層構造を仮定した解析法を用いず、数値地盤モデルにおいて波動伝播計算を行い、逆解析により伝播速度分布を推定する手法を用いる場合には、両者は探査・解析の両面において相違はない。

表 1 浅部地盤用の S 波速度の測定が可能な主な物理探査手法と適用条件

調査手法	調査域	測定条件	地盤構造条件	解像度	コスト	道路振動下
PS 検層	坑井近傍	坑井	(なし)	高い	低	難
表面波探査	測線下の地表域 (約 10m)	平坦な地表	深部がより高速度	やや高い	低	良
S 波弾性波探査 (S 波屈折法地震探査, S 波トモグラフィー探査)	やや深部まで	直線上の測線	深部がより高速度 (坑井間などの測定対象を挟む場合は条件なし)	やや低い	高	難
微動アレイ探査	測線下の深部まで可能	平坦な地表	深部がより高速度	低い	低	難 (条件により良)

## 3. 実盛土における S 波速度分布の測定

図 1 に試験探査を実施した盛土の平面図を示し、図 2 に盛土の横断断面と起振・受振点の位置を示す。対象盛土は、

A study to apply S-wave tomography survey for acquiring physical properties inside the embankment

Kyosuke Onishi, Yusuke Oishi, Nozomu Suzuki, Shunji Kato, Takuo Azuma, Naoya Sasaki, PWRI

20m 程度の高さで天端幅を有する。道路交通がある天端道路下部域に対し、ボーリングや貫入試験の実施は困難であり、非破壊調査が有力な測定手段となる。しかし、適合する物理探査手法も限られ、表面波探査は探査深度が不十分である。また、微動アレイ探査は測定点の直下域の情報しか得られないため、交通規制が必要となる。そこで、両盛土の 2 つののり面を利用し、調査対象域を挟み込む起振・受振点配置とし、S 波トモグラフィー探査の適用試験を行った。受振器は 10Hz の水平動用のジオフォンを用い、起振・受振点間隔は最大で 80m を超えた。

ここで、S 波トモグラフィー探査では起振・受振点間距離が長い場合に、波動の伝達能力が課題となる。のり面における S 波起振では、機械式振源は移動や設置が困難であるため利用が難しい。しかし、人力による S 波起振は打撃強度が不足し、天端道路の振動環境下では、高盛土の横断に必要な 50m を超える距離の伝播が難しい可能性があった。

S 波起振は、枕木状の大型の木片を、測線に対して直交方向（のり面の傾斜に直交方向、すなわち水平となる方向）に設置し、かけやを用いて枕木状木片の両端面を打つ方法を用いた。斜面における横方向の打撃は、不安定な体勢のために打撃力が小さくなる傾向にあり、さらに横滑りに伴う摩擦力によるエネルギーの散逸により、S 波の起振強度は P 波と比べてはるかに小さくなる。このため、遠方の受振点まで十分な S/N で S 波振動を伝播させるには工夫が必要となる。そこで、作業員 2 名の自重により適度な荷重を木片に載せ、打撃に伴い木片を適度に横滑りさせることにより、P 波を抑制した S 波を起振した。

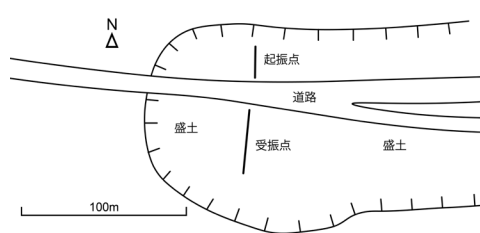


図 1 盛土の平面図

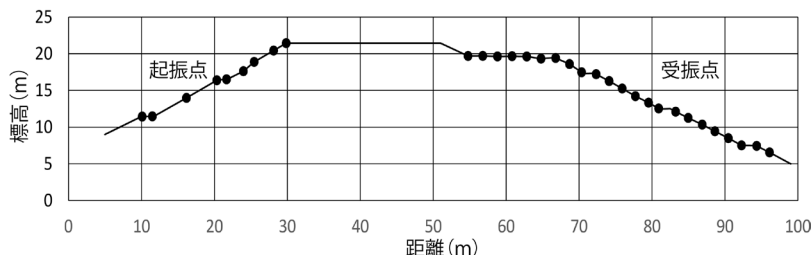


図 2 盛土の横断面図

#### 4. S 波速度分布の測定結果

図 3 に観測した波動記録例を示す。S 波は打撃方向が異なる 2 種類の波動を伝播させることができる。受振点において、両者は逆位相となる。図中では打撃方向の異なる振動を青と黒で分けて示している。逆位相の波動は S 波と判別でき、良好に S 波の初動（最初に伝達する波動）が観測できていることがわかる。本適用試験では、最も発振点と受振点の間隔が離れた条件でも初動走時の読み取りが行えた。

観測記録の初動走時を読み取り、波動伝播計算を行い、S 波速度分布を求めた。図 4 に解析結果断面を示す。深度 5～10m に低速度域が認められ、南側では北側より低い標高でも低速度領域が広がる傾向を示した。また、盛土内部の S 波速度分布は深度方向にのみ大きな変化を示し、水平方向には均質な傾向を示している。

本適用結果は、人力による S 波起振により、起振点の反対側ののり面において、初動の読み取りが十分可能な S 波振動を取得でき、S 波トモグラフィー探査の実施が可能であったことを示す。S 波トモグラフィー探査の活用により、供用中の天端道路を有する高盛土内部の多くの領域において、S 波速度を求めることができる。

起振・受振間隔が 2m 程度と低密度なため、1 日内の短時間で探査を実施し、表面波探査などに比べても十分高い効率で探査が行えた。ただし、効率向上のため、5W の簡易無線を用いて探査作業を行い、RTK-GNSS で測定点を測量した。

#### 5. まとめ

本試験により道路高盛土において、のり面における起振・受振により、調査対象域を挟み込む S 波トモグラフィーの実施が可能で、天端の道路交通の規制を行うことなく調査に必要な S 波振動記録の取得ができることがわかった。天端道路下部域の S 波速度の入手は、ボーリングや貫入試験だけでなく、PS 検層、表面波探査、微動アレイ等の他の手法でも困難であることから、貴重な測定手段であると考えられる。

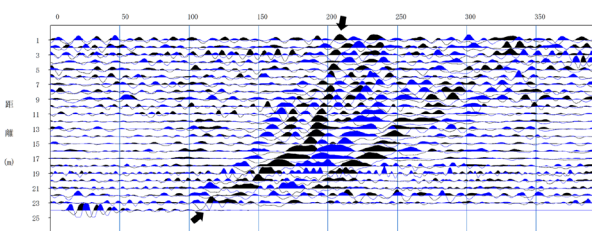


図 3 記録波動例

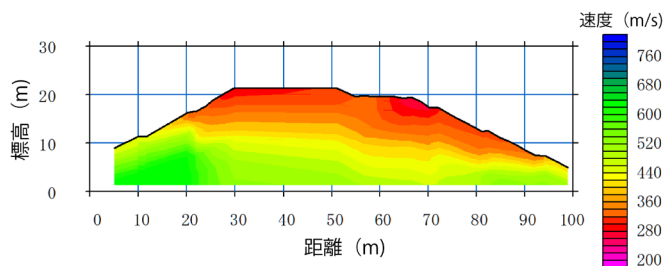


図 4 解析断面

謝辞

東北地方整備局南三陸沿岸国道事務所には試験調査にご協力を頂きました。