

シールドトンネル前方探査：FWIによる土層実験解析

Look ahead prediction for shield tunneling: Full waveform inversion for large-scale pit experiment

キーワード

シールドトンネル, 前方探査, 土層実験, Full Waveform Inversion

加藤 謙吾*, 瀬谷 正巳*, 北川 真也*

研究概要

本報では、FWI (Full Waveform Inversion) のシールドトンネル前方探査への適用性を検討することを目的として、シールド土層を対象とした解析結果について報告した。検討項目は、①土層境界位置の推定、②空洞位置の推定の2点である。解析の結果、切羽近傍の地盤のせん断波速度分布を把握できることが明らかになった。一方、空洞位置の推定には至らなかった。要因として、波が受信機に到達するまでに高周波帯の波が減衰したこと、空洞寸法が波長に対して小さかったこと、メッシュサイズの空洞寸法に対する比が影響したことなどが挙げられる。

1 はじめに

トンネル切羽前方探査は、トンネル掘削時における切羽前方の地山状況を把握し、施工合理化に必要な情報を取得することを目的として実施される。これまで、山岳トンネル工事においては、反射法による探査技術が主に前方探査技術として用いられてきた¹⁾。一方、シールドトンネル工事においては、地質条件の違い、施工上の制約、シールドマシンが切羽に接地していることなどの制約があり、有効な探査方法が未だ確立されていない。

FWI (Full Waveform Inversion) は、計算波形と観測波形の全体をフィッティングさせることで、対象領域の疎密波速度やポアソン比などの物理量を高精度に推定する逆解析手法である。山岳トンネル前方探査に対しては、解析レベルでの有効性が示されており^{2), 3)}、実施工における適用事例も報告されている⁴⁾。しかし、シールドトンネル前方探査に対しては、筆者の知る限り解析レベルでの検討例がわずかに存在⁵⁾するものの、実地盤に基づく検討事例は報告されていない。

本報では、FWI のシールドトンネル前方探査への適用性を検討することを目的として実施したシールド土層解析結果について報告する。実験結果の詳細は別報にて報告しており、本報では、FWI に用いた初期モデルの設定方法、初期パラメータの推定方法、境界条件、加震源の入力波形関数の評価方法について述べる。さらに、各ケースにおける実験結果と解析結果の比較を行い、前方探査への適用性について考察する。

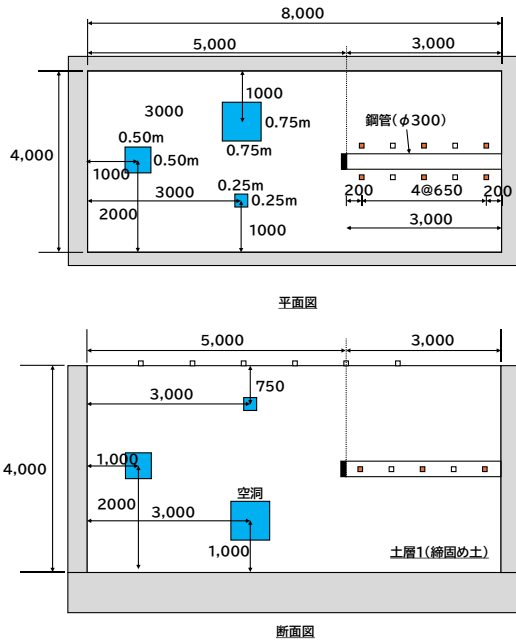
2 Full Waveform Inversion

シールドトンネル掘削でのトラブル要因として、残置物の存在、空洞の存在および事前調査における地盤情報と掘削時の地盤物性との差などが報告されている⁶⁾。前方調査の目的として、これらのトラブルを予見可能な詳細な地盤情報を得ることが挙げられる。この視点に立ち、土層実験では、異なる速度を持つ土層および空洞を模擬した土層を作成した。本報におけるFWI解析について、空洞の位置および大きさの推定を目的にFWI解析を実施した。

図-1に土層寸法、加速度計の位置等の概要を示す。シールドセグメントを模擬した鋼管を地表面から2mの深さに設置し、鋼管の端部に加振装置を設置するための載加盤を設けた。その鋼管の周囲に3軸加速度計および1軸加速度計を設置した。また、地表面にデータ補完用に1軸加速度計を設置した。加速度計や加振装置の性能等については、別報に詳細を記載している。

FWIの実施には、*Salvus* (Mondaic AG, 2025) を用いた。*Salvus* は、土木構造物の検査において、鉄筋コンクリート造の鉄筋探査等に適用事例のあるFWIソフトウェアである⁷⁾。本ソフトは、2次元および3次元の複雑な形状のモデル化に対応しており、さらに地盤条件を比較的容易に反映できる。以下に、本研究で用いた土層寸法、解析手順、解析結果および考察を示す。*Salvus* における境界条件、材料モデル等については、Mondaic社のHPに詳細が記載されていることから、そちらを参照されたい。

* 技術センター 土木研究部



層 上：平面図，下：断面図

図ー1 空洞土層の平面図および断面図

2.1 解析手順

① 初期モデルの作成

A) 初期モデル作成の考え方

FWI においては、最初に入力したパラメータを逐次更新することにより波形のフィッティングを行う。そのため、初期モデルの作成方法がインバージョン結果に大きく影響する。シールドトンネル前方探査において想定される初期モデルの作成方法は、大きく以下の3つに分類できる。

● サウンディング試験結果に基づく方法

標準貫入試験やコーン貫入試験などのサウンディング試験結果を用いて初期モデルを作成する。この場合、砂質土層や粘土層といった地層境界、密度、P 波速度、S 波速度などの土質定数を推定し、それらの情報を基に初期モデルを構築する。

● 物理探査結果に基づく方法

表面波探査や磁気探査などの物理探査結果を取り入れて初期モデルを作成する。この場合、各探査手法から得られる情報を初期モデルに反映し、そのモデルを FWI によりさらに高精度化することが目的となる。

● 均質モデルを仮定する方法

地盤情報が全く存在しない場合、一般的な土質定数を用いた均質なモデルを初期モデルとして設定する。

本解析では上記の③の考え方に基いて初期モデルを作成した。すなわち、均質な土層を仮定したモデルを用い、そして、FWI により空洞位置の疎密波速度またはせん断波速度に変化が生じるかどうかを検討した。

B) 土質定数

表ー1に本解析に用いたパラメータを示す。湿潤密度、疎密波速度およびせん断波速度については、土層実験で直

表ー1 解析に用いた土質パラメータ

材料モデル	IsotropicViscoElastic	
湿潤密度 ρ_t (kg/m ³)	1,800	
疎密波速度 V_P (m/s)	500	
せん断波速度 V_S (m/s)	200	
減衰定数	$qkappa$	10
	qmu	47

接計測した値を初期値とした。減衰定数 qmu は Q_s に等しい値を取る。 Q_s の設定方法としては、せん断波速度に比例させる方法がよく用いられる。本解析においては、文献⁸⁾を参考に、次式により与えた。

$$qmu = Q_s = 50 \cdot V_s \quad (1)$$

$qkappa$ は、 Q_P に等しい値をとる。 Q_P の設定方法としては、 Q_s 比例される方法がよく用いられ、 $Q_P = 2 \cdot Q_s$ とすることが多い⁹⁾。本解析では、文献⁸⁾を参考に、次式により与えた。

$$qkappa = Q_P = \frac{3}{4} \cdot \left(\frac{V_s}{V_P} \right)^2 \cdot Q_s \quad (2)$$

C) 境界条件

実験に用いたピットは鉄筋コンクリート製であり、底盤や壁の剛性は締固土や非締固土に比べて100-200倍程度大きい。この場合、透過波よりも反射波エネルギーが卓越することから、大半の入射波は反射すると考えられる。FWI では一般に吸収境界(Absorbing boundary)やPML (Perfectly Matched Layer) が用いられるが、本解析では実験条件を踏まえ、最も単純な境界条件である剛境界を採用した。

D) メッシュ条件

波長に基づいてメッシュサイズを決定した。*Salvus* では3次元解析に六面体メッシュを採用している。本解析では、要素1辺の最大長さ L を入力波形の波長を基準に下記式により与えた。

$$L = a \cdot \lambda \quad (3)$$

ここで a は補正係数、 λ は波長である。加振による主要周波数帯は1,200~1,400 Hz であり、要素サイズは波長の1.5倍とした。初期モデルの疎密波速度を500 m/s と仮定すると、要素幅は500/1400*1.5=約0.5m となる。全要素をこの長さ以下に設定した。

② 波形処理

本実験で観測された振動には、土層実験結果で報告したように、概ね10~1200Hzの周波数帯の波が含まれていた。これらの周波数帯には、ピット境界、土層境界または空洞位置等の情報が含まれていると思われる。FWI 解析に用いるターゲットとする波形の選定について、下記の2点を考慮した。

時間範囲：本実験においては、鋼管周囲に設置した加速度計は加振後約0.15秒間振動した一方、地表面に設置した加速度計は、約0.4秒後まで振動し続けた。本実験においては、鋼管周囲に設置した加速度計の波形から前方探査を試

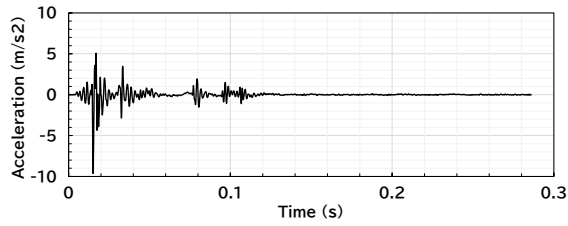
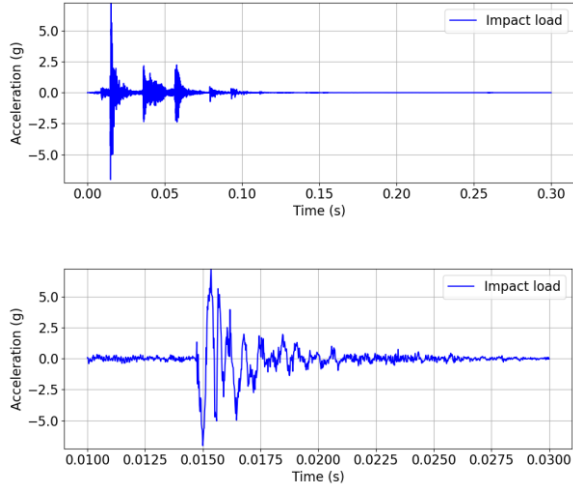


図-2 加重平均による加速度波形



上：全波形，下：0.01～0.03 秒の初期波形

図-3 載加盤に設置した加速度計の記録

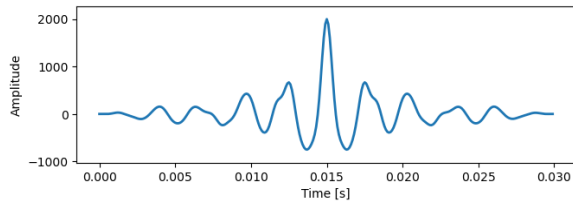


図-4 解析に用いた STF の波形

みることから、そのデータを対象に、解析には0.3秒までの波形を用いた。

周波数領域：0.08秒前後に測定された反射波による振動と思われる振動の周波数帯を含むように周波数帯域を選定した。くわえて、加震源から各境界までの距離が最大波長の2倍となるように周波数帯を選定した。境界までの最短距離は2mであり、入力した疎密波速度は500m/sであることから、 $500(\text{m/s})/(2(\text{m})/2)=500\text{Hz}$ とした。よって、本解析においては、10-500Hzのバンドパスフィルターを掛け、この周波数帯の波形を用いた。

③ STF (Source Time Function)の評価

FWI においては、加震源に波形関数 (STF: Source Time Function) を入力する必要がある。STF の評価方法としては、式 (1) に示す全ての観測データとの誤差が最小となる波形を評価し、その波形に基づき STF を作成する方法¹⁰⁾が提案されている。

表-2 フォワード解析に用いた設定

解析時間 (s)	0.30
加振時間 (s)	0.01
Minimal frequency (Hz)	1200
Reference frequency (Hz)	400
Rank_per_job	4

表-3 インバージョン解析に用いた設定

Preconditioner	ConstantSmoothing
Misfit function	Graph_space_optimal_transport
Mapping	Absolute
Inversion parameter	VP, VS, RHO
Upper boundary	$1.2 \cdot V_P$ $1.2 \cdot V_S$
Lower boundary	$0.1 \cdot V_P$ $0.1 \cdot V_S$

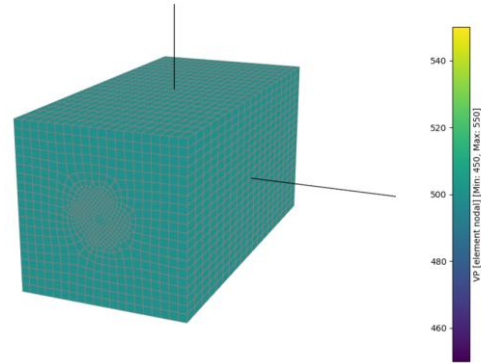


図-5 空洞土層の初期モデル

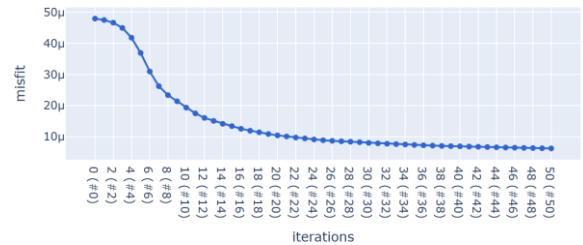


図-6 インバージョン回数による misfit の変化

$$E = \sum_j \sum_i \left| D_j(t_k + \tau_i) - A_j \cdot s(t_k) \right| \quad (4)$$

ここに、 j は受信地点番号、 t_k は各受信機の時間軸、 $D_j(t_k + \tau_j)$ はシフト後の各時間における波形振幅、時間 τ_i はシフト時間、 A_j は、各受信地点における重みづけ値、 $s(t_k)$ は時間 t_k における平均化された STF の振幅値である。式 (4) の未知数は、 A_j 、 τ_i および平均化された波形振幅 $s(t_k)$ である。式 (4) の目標は、未知数を最適化することにより、 E を最小化することにある。

以下に、本解析における STF の評価手順を示す。

1. 観測された各波形 $D_j(t_k)$ を正規化する。そして、正規化された各波形がある閾値を最初に超える時間 (τ_i)を取得する。

2. 各波形を時間 t_i だけシフトする。
3. シフト後の各時間における波形振幅 $D_j(t_k+t_j)$ を平均化することにより $s(t_k)$ を求める。
4. $s(t_k)$ を A_j により重み付けする。
5. 各受信点での $D_j(t_k+t_j)$ と $A_j \cdot s(t_k)$ の差分を求め、その値の絶対値を求める。
6. 5で求めた絶対値の総和 E を求める。
7. A_j を更新することにより、 E を最小化する。
8. $\sum_j A_j \cdot s(t_k)$ を計算する。
9. 8で得た波形に基づき STF を作成する。

図-2に上記の方法により評価した波形を示す。STF の加振時間については、STF の入力時間が解析上の加振時間となることから、実際に加振した時間と一致させることが望ましい。図-3に、載加盤上に設置した加速度計の記録を示す。0.015秒付近で約6 g の加速度が確認され、その後数回の振動が観測された。また、0.01~0.03秒の加震源の初期波形では、加速度が0.015秒辺りで最大加速度を記録し、0.025秒付近で概ね最大加速度の2%程度まで低下している。打撃による振動は0.03秒辺りでほぼ減衰し、その後に観測される振動は載加盤と地盤の相互作用に起因すると推定される。この間の振動継続時間は約0.03秒であった。上記の記録から、SFT の加振時間を0.03秒とした。

以上の分析に基づき、本解析では、加震源に最も近い加速度計6の記録を用いて STF を評価した。周波数帯域は10~300 Hz を採用し、加振時間は0.01秒とした。図-4に、本解析で用いた STF の波形を示す。

④ Forward Analysis

初期モデル作成、波形処理、STF の評価を終えると、フォワード解析に用いるモデルの確認を行った。ここでは、受信機の位置、加震源の位置、設定した土質定数を確認した。そして、設定どおりであることを確認後、フォワード解析を実施した。表-2にフォワード解析に用いた設定を示す。

図-5に空洞土層の解析に用いたモデルを示す。加震源は、鋼管を模擬した孔の先端部に設けた。

⑤ Inversion Analysis

フォワード解析を実施後、インバージョン解析を実施した。インバージョン解析に用いた設定を表-3に示す。物理量がマイナスの値をとる場合があったため、そのエラーを避けるために、インバージョンにおける変化量を制限する上解および下解を設定した。

なお、misfitの減少率が1.0%以下となることをインバージョン解析終了条件とした。図-6に misfit の変化の一例を示す。

3 インバージョン結果

図-7に空洞土層における打撃加振波形を用いたインバージョン解析結果を示す。結果の一例として、 $x=3.0\text{m}$ の疎密波速度分布について、加震源と受信機との間の要素の

疎密波速度が $\pm 4\text{m/s}$ 程度更新された一方、加震源前方の要素については、 -2m/s 程度速度が低下し、加震源から距離が離れるほどその速度の更新量の大きさが小さくなる傾向を示した。せん断波速度分布について、加震源から1.5-2.0m 離れた位置までせん断波速度が更新された一方、その距離より前方ではせん断波速度はほとんど更新されなかった。また、空洞を設置した位置の速度分布については、疎密波速度は若干の低下が見られた一方、せん断波速度については速度の低下は見られなかった。両速度分布においては、空洞が存在すると考えられるほどの速度変化は見られなかった。他の断面における疎密波速度分布およびせん断波速度分布についても、空洞との位置と速度分布との明確な一致は見られなかった。

4 考察

1) 土層境界位置の推定について

図-7に示すように、本解析では、空洞位置を明瞭に示す結果を得られなかった。要因として、次の4点が考えられる。

- ① 空洞から加震源および受信機までの距離
- ② シールド（鋼管）の寸法の影響
- ③ 高周波帯の波の減衰
- ④ 空洞寸法およびメッシュサイズの空洞寸法に対する比

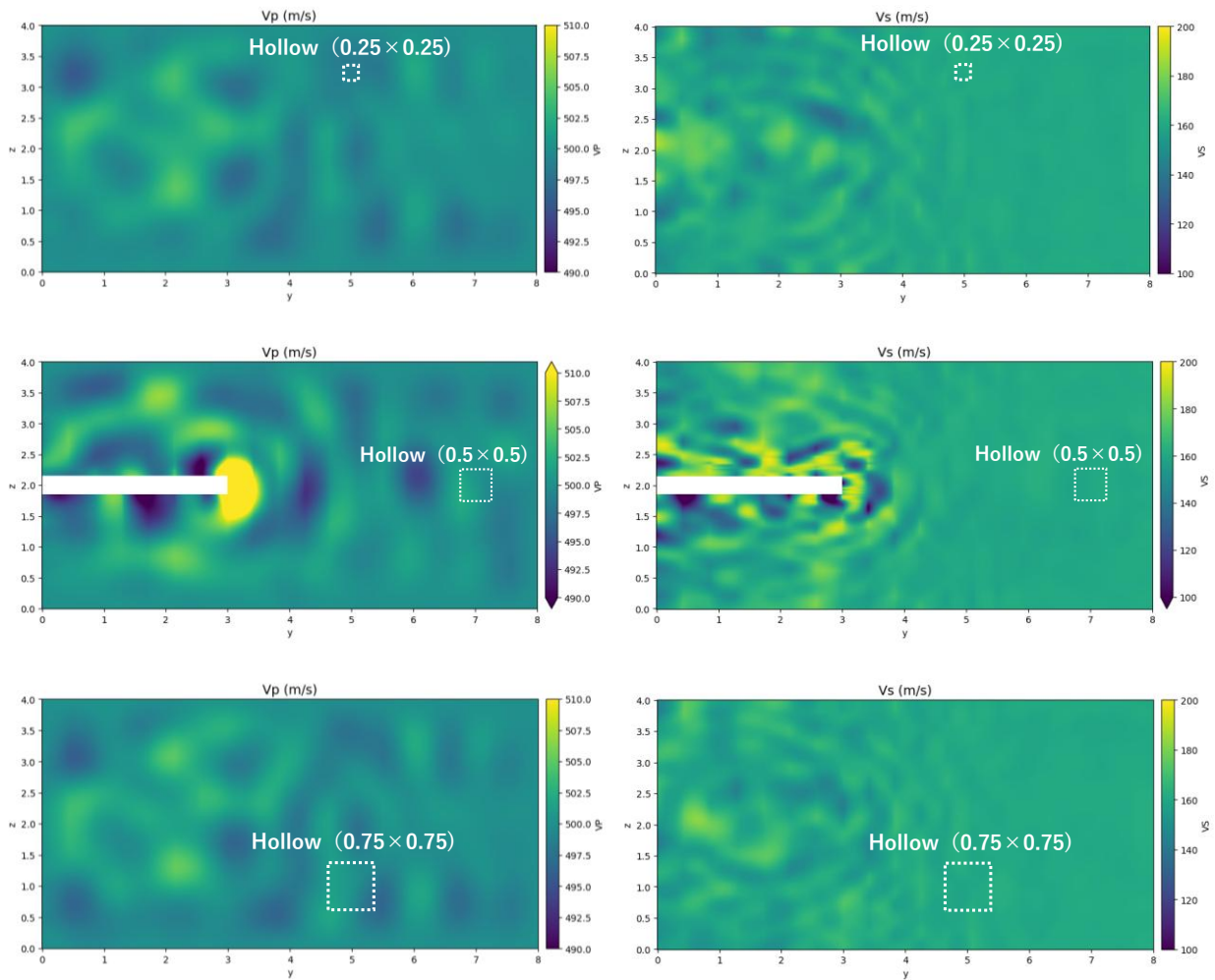
① 空洞から加震源および受信機までの距離

受信機が土層境界に近い場合、土層境界そのものではなく、加振源と土層境界の間に位置する要素の物性を数%変化させることで、反射波の到達時間の整合が得られてしまう。この影響は受信機数よりも、むしろ受信機と境界までの距離に依存すると考えられる。たとえば、せん断波速度と受信機間隔の比が 5/200 の場合、要素速度を 10%増加させることで伝播時間を約 0.003 秒短縮でき、境界位置を更新しなくても波形の整合が可能となる。

この難しさを低減させる方法として、切羽付近および切羽から離れた位置に複数の受信機を設置し、反射波の到達時間差を大きくすることが有効である。これにより、反射面の位置をより矛盾なく推定できると考えられる。また、切羽前方や地表面に設置した受信機を併用し、ボーリング孔受信のようなトモグラフィー的配置を採用することで、解析結果の補完が可能である。その際、シールド坑内受信機による解析結果を初期モデルとし、外部受信機データを用いて再解析を行う逐次的手法が有効であると考えられる。（図-8）。

② シールド（鋼管）の寸法の影響

本実験では鋼管の左右に受信機を設置したが、断面寸法が小さいため直接波における疎密波とせん断波の到達時間差はほとんど生じなかったと思われる。実験条件下では、鋼管寸法と疎密波速度との比は0.3/500、せん断波速度の比



(上) $x=1.0\text{m}$, (中) $x=2.0\text{m}$, (下) $x=3.0\text{m}$

図ー7 各断面における疎密波速度分布およびせん断波速度分布

は $0.3/200$ であり、管径の影響を無視できる大きさであった。実施工における大断面シールドでは左右受信機間に到達時間差が生じ、直接波と反射波の分離に有利に働く可能性がある。そのため、シールド断面規模に応じて左右に受信機を配置することが有効であると考えられる。

③ 高周波帯の波の減衰

一般的に、地中レーダー等による地盤探査においては、数十 kHz から数 GHz の周波数他の波を用いてケーブル等の探査を行う。この場合、探査対象物の寸法に対する波長の長さは1万分の1以下程度となり非常に小さい。今回用いた土層の疎密波速度を 500m/s とすると、波長は $500/1000\text{Hz}=0.5\text{m}$ 前後となり、空洞との寸法比は $0.5/750 \approx 1/1600$ となる。そのため、今回の空洞を検知するための周波数帯としては低すぎた可能性がある。また、媒介物が土であることから、受信機に到達するまでに反射波の成分が減衰し、波形に現れにくかったことも考えられる。

④ 空洞寸法およびメッシュサイズの空洞寸法に対する比

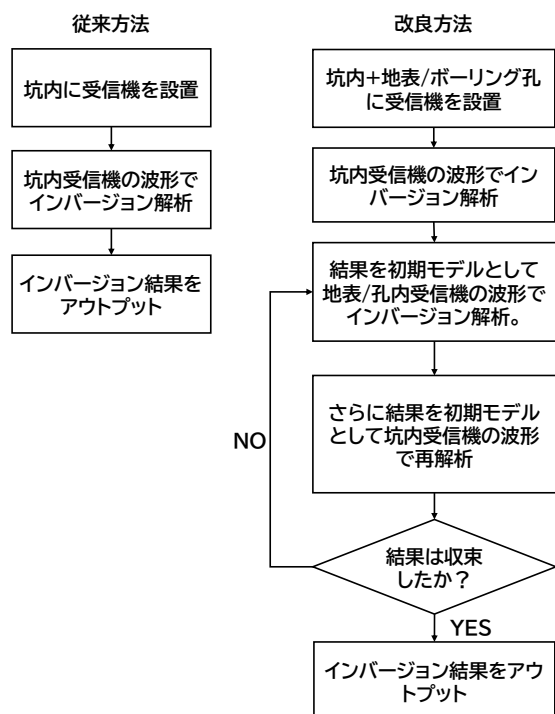
メッシュサイズについては、検知対象物寸法に対してどの

程度小さくすべきかの明確な指標がない。たとえば、対象物の $1/100$ のメッシュと仮定した場合、本実験条件では約 7.5mm となる。しかし、このサイズでメッシュを生成すると要素数が過大となり、計算が終了しない可能性が高い。現状では、最小メッシュサイズを 0.2m としている。空洞検知に関しては、これらの影響を今後再検討する予定である。

2) 疎密波速度の更新の大きさがせん断波速度と比較して小さい理由

インバージョン後のモデルと初期モデルにおいて VP に大きな変化が見られなかった要因として、土層境界および空洞が加振源に近接していたため、計測波形から疎密波の直接波と反射波の分離が困難であったことが挙げられる。たとえば、土層境界位置は垂直土層で加振源から約 3m 、水平方向土層で 0.5m である。垂直土層において疎密波速度を 500m/s とすると、反射波の到達は $6/500=0.012$ 秒後である。一方、図ー4に示す加振時間は約 0.03 秒であり、反射波は直接波に重なって明瞭に識別できなかった可能性が高い。水平方向土層の場合には、反射波の到達時間はさらに短くなるため、同様の影響がより顕著になる。こ

のような条件下では、インバージョンの過程において、加震源と最も近傍に設置された加速度計との間の要素の疎密波速度が主に更新され、測定データとの誤差が最小化されたものと推定される。その結果、加震源から離れた領域の物理量はほとんど更新されなかったと考えられる。



図－8 前方探査の逐次解析の提案

以上の結果は、加震源近傍に土層境界や空洞などの不均質が存在する場合、本解析におけるインバージョン解析結果が示すように、これらの影響はせん断波速度の伝播に強く依存することを示している。言い換えると、シールドトンネル前方探査においては、切羽近傍の地盤状態の把握にせん断波速度の分布を重視することが重要である。本実験においても、加震源から約1.5 m 程度の範囲に存在する地盤状態を適切に評価するためには、せん断波速度分布の把握が不可欠であることが確認された。

3) 地震探査法がシールドトンネル工事に適用されていない理由

- **地下水の影響**：シールドトンネル工事は地下水面より深い地盤を掘削する場合が多く、水の疎密波速度は地盤より速いため、最初に伝播する疎密波は水中を伝わる。このため、受信波形には地下水の応答が含まれ、地盤情報を適切に抽出できない。地震探査法は主に疎密波の到達時間に基づく推定法であるため、地下水を含む地盤とは相性が悪い。
- **波の減衰**：シールドトンネルは土被りが小さい地盤や軟岩を対象とすることが多く、これらでは波の減衰が大きい。そのため、地震探査法では詳細な速度構造の推定が困難である。
- **疎密波とせん断波の分離困難**：地震探査法では、記録

波形から疎密波とせん断波を明確に分離することが難しく、通常は疎密波の到達時間から速度構造を推定する。しかし、シールドトンネル工事で求められる切羽近傍の地盤情報を得ることは困難である。

4) FWI をシールドトンネル前方探査に用いることの優位点

- **せん断波速度分布を推定可能**：解析結果は、鋼管端部に取り付けた加振盤付近の要素のせん断波速度分布を良好に再現しており、切羽付近の地盤状態を把握可能であることを示している。
- **複雑な地形、地層、構造物を考慮可能**：FWI では、3次元地形データや地層データ、構造物情報を解析モデルに反映できるため、複雑な地盤構造にも適用可能である。
- **様々な地盤環境に適用可能**：FWI は、せん断波速度分布を推定可能な逆解析法である。せん断波の伝播は地下水の影響を受けにくいため、地下水位以下の地盤にも適用できる。したがって、シールドトンネル工事における前方探査との相性が良い。

5 おわりに

本報では、FWI（Full Waveform Inversion）のシールドトンネル前方探査への適用性を検討し、シールド土層を対象とした解析結果を示した。

結果として、加振源近傍に不均質が存在する場合、インバージョン結果はせん断波速度の伝播特性に強く依存することが明らかとなった。すなわち、シールドトンネル前方探査では、切羽近傍の地盤状態を把握するうえでせん断波速度分布の推定が重要である。

本研究により、FWI が切羽近傍の詳細な地盤状態の把握に有効であることが示唆された。

謝辞

本解析を実施するに当たり、Mondaic 社の Lion Krischer 氏および David Sollberger 氏には、メッシュ作成からインバージョン解析実施までのソフトの使用法の助言を頂いた。彼らの助言なしにはシールドトンネル土層実験解析の実施は成りませんでした。ここに、感謝いたします。

参考文献

- 1) Lamert, A., Nguyen, L. T., Friederich, W., Nestorovic, T.: Imaging disturbance zones ahead of a tunnel by elastic full-waveform inversion: Adjoint gradient based inversion vs. parameter space reduction using a level-set method. *Underground Space*, Volume 3, Issue 1, pp. 21-22, 2018.
- 2) Liu, B., Gong, Z., Zhang, F., Xu, X., Zhao, Y., and Chen, L.: Full-waveform inversion method for tunnel seismic forward prospecting, *Geophys*, 232, 2186–2204, 2023.
- 3) Xie, H., Chen, B., Liu, Q., Xiao Y., Liu, L., Zhu, X., and Li, P.: A Real-Time Inverted Velocity Model for Fault Detection in

- Deep-Buried Hard Rock Tunnels Based on a Microseismic Monitoring System, Buildings, 14, 2024, pp. 2663.
- 4) Christopher Riedel, C., Musayev, K., Baitsch, M., Hackl, K.: Elastic waveform inversion in the frequency domain for an application in mechanized tunneling, Tunnelling and Underground Space Technology, 137, 105114, 2023
- 5) 国土交通省 シールドトンネル施工技術検討会, 付録② シールドトンネル工事に関する事例集, 令和3年12月
- 6) Mondaic Homepage: <https://www.mondaic.com/>
- 7) Taborda, R.: Evaluation of Attenuation Models (Q-Vs Relationships) used in Physics-Based Ground-Motion Earthquake Simulation through Validation with Data, 2014 SCEC Annual Report, Project No. 14022.