

シールドトンネル前方探査：土層実験

Look ahead prediction for shield tunneling: 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) 用データの取得を目的として実施したシールドトンネル前方探査土層実験結果について報告する。実験では、シールドトンネル工事への適用を前提に、加振方法および受信方法を検討した。締固土層および非締固土層を作成して異なる速度構造を持つ土層を作製した。さらに、EPS (Expanded Poly-Styrene) を配置することで空洞を模擬した土層を作製した。結果として、1) シールドセグメントを模擬した鋼管周囲に受信機を設置することで、打撃加振による直接波および反射波を捉えることが可能であった。2) 直接波と反射波の分離が容易であることから、打撃加振が FWI 用波形データの取得に有用であることを確認した。

1 はじめに

トンネル切羽前方探査（以下、前方探査とする）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探査である。地震反射法を用いた前方探査は、切羽前方の地山の速度構造を調査する方法として山岳トンネル工事において広く用いられている¹⁾。一方、シールドトンネル工事においては、対象とする地盤性状の違いやシールドマシンが切羽に接地していることなど施工上の制約などにより、前方探査技術は未だ確立されていない。

近年、波形全体をフィッティングさせることで物体の詳細な速度構造を推定する Full Waveform Inversion (以下、FWI とする) の進歩により、大陸規模から人体構造まで極めて幅広いスケールで波形解析技術が実用化されている²⁾。一方、FWI のシールドトンネル前方探査への応用は、現状として解析レベルでの有効性が示されているものの³⁾、実地盤における適用性検討が課題である。

本研究では、これらの課題解決に向けた取組みとして、1) シールドトンネルを模擬した土層実験、2) FWI による実験結果の解析および再現性の確認を実施した。本報では、FWI 用のデータ取得を目的として実施したシールドトンネル土層実験の結果について報告する。なお、FWI による実験結果解析については、別報で報告している。

2 シールド前方探査土層実験

本実験は、茨城県つくば市の土木研究所の施設において実施した。本実験の主たる目的は以下の4点である。

- ① シールドトンネルを模擬した土層の作成
- ② FWI 用のデータ取得
- ③ 加震方法の検討
- ④ 波の受信方法の検討

① シールドトンネルを模擬した土層の作成

シールドトンネルは、シールド機械の先端に設けられたカッターヘッドを切羽に押し付ながら回転させることによって掘削される。そのため、一般的にトンネル形状は円形状となり、また、地山を支えるためにセグメントが設置される。土層実験には、このようなシールドトンネルの特徴を反映させることが望ましい。以下に、土層実験における土層作成の要点を挙げる。

- 1) トンネル形状の模擬: シールド掘削においては、カッターヘッドの回転により円形のトンネル形状となることが一般的であるため、土層実験においても円形断面を模擬する。
- 2) セグメントの模擬: シールド掘削が進行すると、地山を支えるために速やかにセグメントが設置される。一般に鋼製セグメントまたは RC セグメントが用いられるため、実験においてはこれらに近い剛性を有する材料を使用することが望ましい。

* 技術センター 土木研究部

- 3) 加震源の模擬: シールド機械による掘削振動、発破、打撃装置等が実用的な加震源となる。いずれの方法においても、切羽付近での加振が前方探査に有利であるため、実験においても加震源の位置を調整可能とすることが重要である。
- 4) 受信機設置の模擬: 振動計測用の受信機は、実際の施工においてセグメント上、あるいはセグメントに設けられた孔を通じて地盤に設置される。本実験においても、これを考慮した受信機設置を行う必要がある。
- 5) 地層境界および障害物の模擬: シールドトンネル掘削においては、地盤情報の誤差、空洞、残置物などがトラブル原因となる場合が報告されている⁶⁾。そのため、本実験では異なる速度構造を有する土層や人工空洞を設けることで、これらの条件を模擬した。

本実験では、シールドトンネルを模擬するために鋼管を用いた。さらに、鋼管端部に載加盤を固定し、その上に加振装置を設置した。くわえて、鋼管周囲に3軸加速度計および1軸加速度計を設置して計測を行った。

② FWI 用のデータ取得

FWI は、モデル地盤の疎密波速度等の物理量を逐次更新し、計測波形とシミュレーション波形との誤差を最小化する逆解析手法である。そのため、FWI 用の入力データには以下の条件を満足することが望ましい。

- 1) セグメント上、もしくはセグメントに設けられた孔を通じて地盤に設置された受信機で計測された波形に、地盤情報が十分に反映されていること。
- 2) 波形が明瞭であること。
- 3) 低～高周波帯の波を計測すること。
- 4) 加速度または速度の波形であること。なお、変位波形は高周波の波に対して感度が低いため、FWI 用波形としては適切ではない。

以上の条件を満足するために、本実験では定格容量±2~20g の3軸加速度計および±2~50g の1軸加速度計を鋼管の周囲に設置して波形を計測した。

③ 加振方法の検討

取得する波形には対象地盤の情報が十分に反映されている必要がある。たとえば、地中レーダーによる探査において電気ケーブル等の地盤内残置物を検知する際には、数百 MHz の波が利用される⁴⁾。また、電磁探査では、数百 kHz の波が利用される⁵⁾。この周波数帯の範囲は、探査対象や探査深度によって異なってくる。このことから、シールド前方探査においても、低周波から高周波までを含む波を発生させる必要があると考えられる。さらに、実際のシールドトンネル施工においては、杭や鋼矢板等の残置物の存在、事前調査と実施工時の地盤特性との差異、局所的な巨礫や空洞の存在などがトラブル要因として報告されている⁶⁾。したがって、前方探査においては、これらを検知可能な加振方法を採用することが重要である。

施工上および空間的な制約を考慮した場合、実施工に適

表-1 実験に用いた起振機の性能

打撃 加振	機器名	エアノッcker RKVS60 (エクセン)
	打撃サイクル	1~60 (回/分)
	打撃エネルギー	20.6~49.0 (N・m)
	衝撃力	6.9~10.6 (kg・m/s)
振動 加振	機器名	Big Wave (旭製作所)
	加振力	200N
	周波数範囲	1~8,000Hz
	最大加速度	285m/s ² (正弦波入力無負荷時)
	最大振幅	15 mmp-p

用可能な加振方法として以下が挙げられる。

- 1) シールドマシンの掘削により生じる振動を利用する。
- 2) 発破または破碎剤を用いて振動を発生させる。
- 3) 油圧インパクターなどの打撃装置を用いて地盤内に振動を発生させる。

まず、1)については、TBM による硬岩掘削（圧縮強度約 200 MPa）の振動測定結果⁷⁾によれば、トンネル坑内において 50 Hz 前後の振動が生じることが報告されている。より軟質な岩盤や地盤を掘削する場合、卓越周波数は 50 Hz 以下になると予想される。したがって、50 Hz 程度の連続振動を発生可能な装置を用いることが、実際の掘削振動の再現につながると考えられる。本実験では、この点を踏まえ、振動周波数を制御可能な加振機を用いてシールドマシンの掘削振動を模擬した。

次に、2)については、シールドマシンやセグメントを損傷させる可能性があること、さらに構造物に近接している場合には適用が困難であることから、本実験条件では除外した。

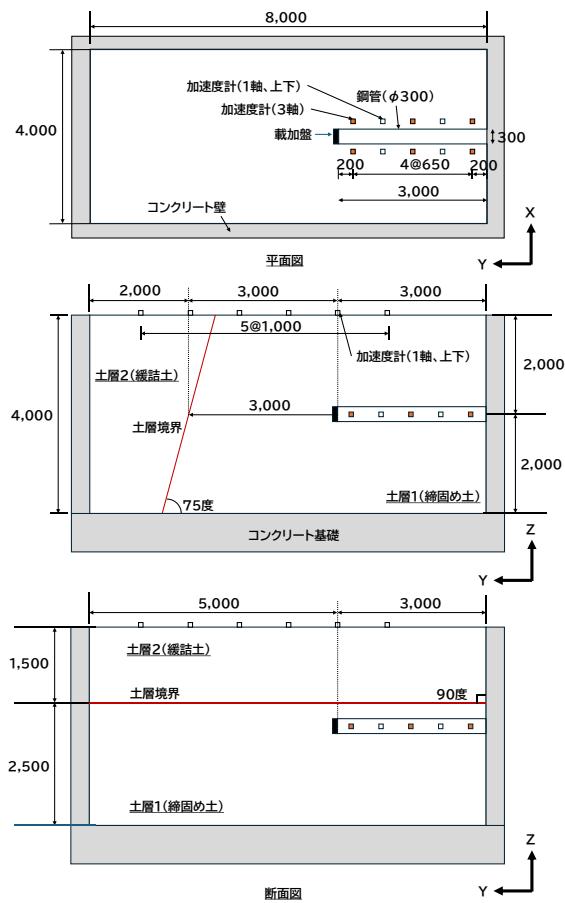
最後に、3)については、エアアクチュエータによる打撃装置を用いた加振方法が既に実施工で試行されており⁸⁾、シールド坑内に持ち運び可能な大きさであることから、有力な方法と考えられる。本実験では、上記の状態を模擬するために、鋼管内に設置可能な大きさのエアノッckerによる打撃加振を行った。

表-1に本実験で用いた起振機の性能を示す。

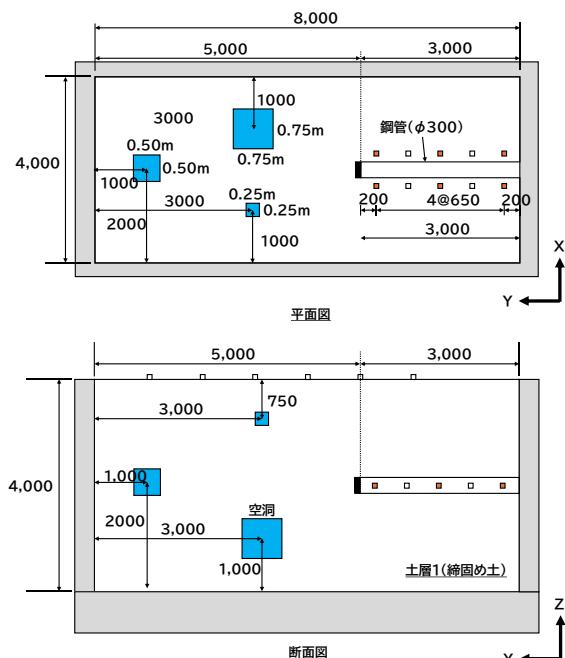
④ 波の受診方法の検討

FWI では、1方向、2方向もしくは3方向で計測されたそれぞれの波形に対してフィッティングすることができる。前述のとおり、計測波形には対象地盤の情報が十分に反映されている必要があり、そのためには、疎密波およびせん断波の伝播を受信できる環境でなければならない。また、シールド前面での加振により発生した波をシールドの周囲および後方で受信できることを確認する必要もある。

一般的に、シールド掘削が進行すると、地山を支えるために間を置かずしてセグメントが設置される。そのため、実際において、振動計測用の受信機の設置場所は、次の場



図上 平面図（垂直土層、水平土層）
図左下：垂直土層 図右下：水平土層



空洞土層 上：平面図、下：断面図

図-1 垂直土層、水平土層および空洞土層の平面図
および断面図

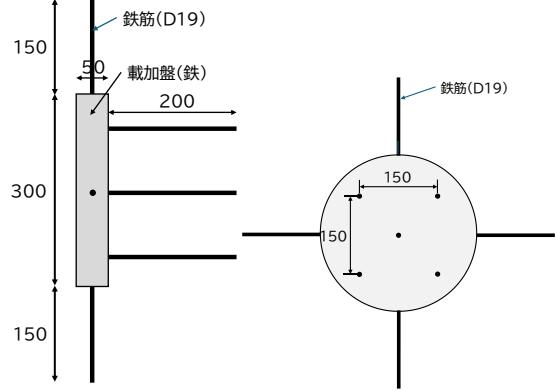


図-2 載加盤の寸法等

所に限られる。

- 1) セグメント表面に設置する。この場合においては、セグメントと直行する方向の振動は、セグメント内を伝播する波となると考えられ、また、セグメント奥行方向の振動にのみ背後地盤から伝播する波が計測されると考えられる。そのため、受信機としては、1方向の計測に限られる。
- 2) セグメント上に設けた受信機設置用の孔を通じて地盤に直接受信機を設置する。この場合においては、あらゆる方向から地盤内を伝播した波を計測することができるため、2方向あるいは3方向での計測が可能となる。

本実験においては、セグメントを模擬した鋼管の周りに3軸加速度計を設置し、3方向での計測を実施した。なお、実験で発生させた波を漏れなく計測するために、鋼管の周囲および地表面に1軸加速度計を追加で設置した。

2.1 土層寸法等

図-1に、実験に使用したコンクリートピットの寸法、加速度計の配置、鋼管の設置位置、土層境界および空洞位置を示す。

ピットの寸法は、幅4.0m、縦8.0m、高さ4.0mである。また、ピットの壁および底面は鉄筋コンクリートにより構成されている。

シールドセグメントを模擬するため、長さ3.0m、肉厚5.0mm、内径30.0cmの鋼管を地表面から2.0mの深さに埋設した。また、加振機設置のため、鋼管端部にφ300、厚さ5mmの載加盤を取り付けた。

空洞土層作成には、立方体形状のEPS(Expanded Poly Styrene)を用いた。寸法は、0.75m角、0.50m角、0.25m角の3種である。

載加盤の寸法を図-2に示す。載加盤には、加振時に地盤とのずれ防止および、振動を地盤に確実に伝播させるために、鉄筋をアンカーとして取り付けた。

2.2 計測機器類等

図-3に計測機器の配置を示す。3軸加速度計を鋼管周囲に0.65m間隔で設置し、その中間に1軸加速度計を設置した。

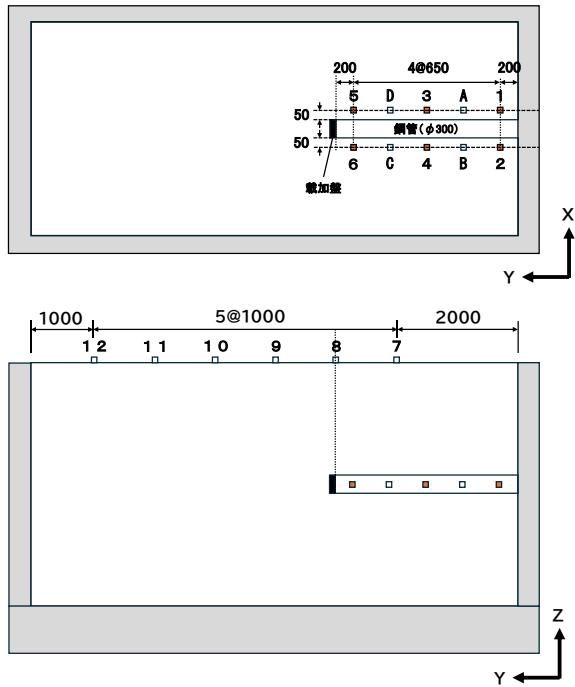


図-3 加速度計の配置

表-2 加速度計の仕様

番号	センサー名	軸	定格容量 (m/s ²)
1	AS-2TG	3軸	±19.61
2	AS-5TG	3軸	±49.0
3	AS-5TG	3軸	±49.0
4	AS-2TG	3軸	±19.6
5	AS-20TB	3軸	±196.1
6	AS-20TB	3軸	±196.1
7	AR-1C	1軸 (Z方向)	±9.81
8	AR-1C	1軸 (Z方向)	±9.81
9	AR-1C	1軸 (Z方向)	±9.81
10	AR-1C	1軸 (Z方向)	±9.81
11	ASW-2A	1軸 (Z方向)	±19.61
12	ASW-2A	1軸 (Z方向)	±19.61
A	AR-50F	1軸 (Z方向)	±490.5
B	AR-50F	1軸 (Z方向)	±490.5
C	AR-50F	1軸 (Z方向)	±490.5
D	AR-50F	1軸 (Z方向)	±490.5

さらに、地表面には1軸加速度計を1m間隔で設置し、鉛直方向の振動を計測した。

加速度計の設置に際しては、地盤への固定が不十分である場合、波動伝播時に滑りが生じ、正確な計測が困難となる可能性がある。したがって、加速度計は地盤の揺れと確実に同期する必要がある。本実験では、過去の振動台実験における方法を参考⁹⁾し、かかと板を有するアクリル板に加速度計を固定した上で地盤に設置した(写真-1)。かかと板が地盤に埋設されることで滑りを防止できる。アクリル板は十分に軽量であり、加速度計の固有周期に影響を与えないことを確認している。表-2に各加速度計の仕様を示す。データロガーには、最大30ch同時計測可能であるデータロガー(東京測器研究所、T-ZACCS9 TS-963)を使

表-3 実験に用いた土の物理定数

土粒子密度	2.714 g/cm ³
D_{60}	0.233
D_{10}	0.017
均等係数	13.72
曲率係数	4.26
締固土の湿潤密度	18.2kN/m ³

表-4 実験ケース

垂直土層	打撃加振
	振動加振(鉛直方向加振, y方向) 振動加振(水平方向加振, x方向)
水平土層	打撃加振
	振動加振(鉛直方向加振, y方向) 振動加振(水平方向加振, x方向)
空洞土層	打撃加振

用した。サンプリング周波数は10kHzとした。

2.3 加振機の設置

本実験では、前述したように2種類の加振方法を試行した。打撃加振についてはエアノッカーを用いて打撃振動を発生させた。また、機械振動を模擬する方法として、鉛直方向に振動を発生可能な小型起振機を使用した。表-2に使用したエアノッカーおよび起振機の性能を示す。写真-2に載加盤およびエアノッカーの取付け状況を示す。

2.4 土層作成

本実験では、前方探査用のモデルケースとして、鉛直方向に土層境界がある場合、水平方向に土層境界がある場合、および、空洞がある場合を想定したケースを実施した。土層境界の位置および空洞位置を図-1に示す。前述のとおり、前方探査の目的として、詳細な地盤の速度構造の把握または残置物、空洞の有無の把握にある。本実験においては、締固土および非締固土を作製することにより、地盤の弾性波速度に明瞭な違いが生じるようにした。なお、締固土の作成には振動プレートを用いた。実験に用いた土の物理的性質を表-2に、写真-4に実験に用いたEPSを示す。

3 実験結果

表-4に実施した実験ケースを示す。水平方向の振動加振は、写真-3に示すように、振動機を横方向に設置することで行った。なお、後述するように、エアノッカーによる加振は、振動機による加振と比較して、発生波の周波数帯が広く、振幅も大きく、波形が明瞭であった。そのため、空洞土層実験においては、垂直土層および水平土層で得られた結果を踏まえ、振動加振は実施せず、打撃加振のみを行った。なお、振動加振では、入力波形として18Hz(周期約0.055秒)のサイン波を用いた。

3.1 波形

3.1.1 加振方法の影響

振動計測例として、図-4に、垂直土層を対象とした場合の各加振方法における、加速度計6の計測波形を示す。

以下に特徴をまとめると。

- 1) 打撃加振では、0.015～0.02 秒付近で主要な振動が計測され、その後、主要振動の1/5～1/10 程度の微振動が0.05 秒付近まで継続した。最大振幅は加振方向であるy 方向に生じた。また、0.09～0.13 秒付近に主要振動に遅れて、数回の振動が全方向で確認された。
- 2) 振動機による鉛直方向加振では、2 m/s²程度の振動が発生した後、約0.025 秒後に再び振動が見られた。これは振動方向が反転し、地盤に対して引張方向の作用となつたためと考えられる。
- 3) 振動機による水平方向加振では、鉛直方向加振と同様に約0.025 秒間隔で周期的な振動が観測された。ただし、方向による振幅差は顕著ではなかった。これは、載荷盤を左右に揺らすため、地盤に伝わる振動が方向に依存しにくいためと考えられる。
- 4) 振動加振では、加振方向に関わらず、打撃加振で観測された主要振動後の遅れ波は明瞭には確認されなかつた。

3.1.2 土層の違いの影響

図-5に、土層条件の違いによる比較として、加速度計2および6の打撃加振によるx 方向波形を示す。

以下に、特徴を示す。

- 1) 加震源に近い加速度計6では、0.01～0.015 秒付近に、主要振動の約1/10の小振幅波が観測された。一方、加震源から離れた加速度計1では、この波は明瞭ではなかつた。
- 2) 加速度計2では、主要振動が0.015～0.025 秒付近で観測された。
- 3) 加速度計6では、主要振動後に、振幅が1/5程度の波が0.04 秒付近まで継続した。同様に、加速度計1でも0.05 秒付近まで小振幅波が観測された。
- 4) 加速度計6では、0.08～0.13 秒付近に小振幅の振動が見られたが、加速度計2では明瞭な振動は確認されなかつた。
- 5) この0.08～0.13 秒付近の波動に関して、垂直土層では空洞土層や水平土層に比べて約0.01 秒遅れて伝播した。具体的には、空洞土層では0.078 秒付近、水平土層では0.08 秒付近、垂直土層では0.09 秒付近で振動が開始した。一方、加速度計1では、垂直土層で0.091 秒付近に振動が確認されたが、空洞土層および水平土層では明瞭な振動は見られなかつた。



写真-1 加速度計の設置板



写真-2 載加盤およびエアノッカーの取付け



写真-3 振動機の取付け



写真-4 実験に用いたEPS

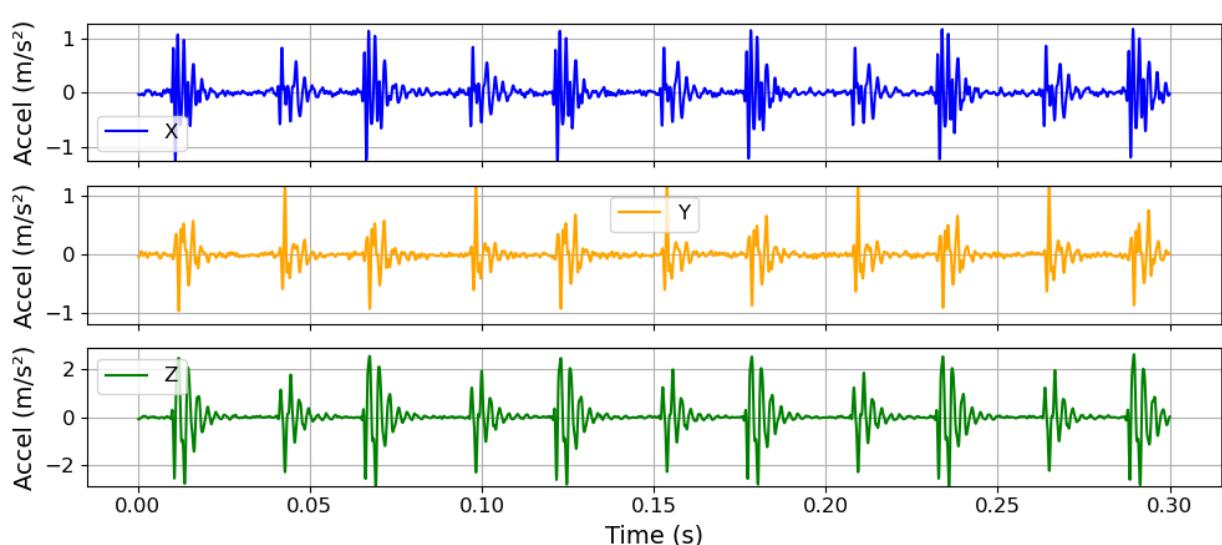
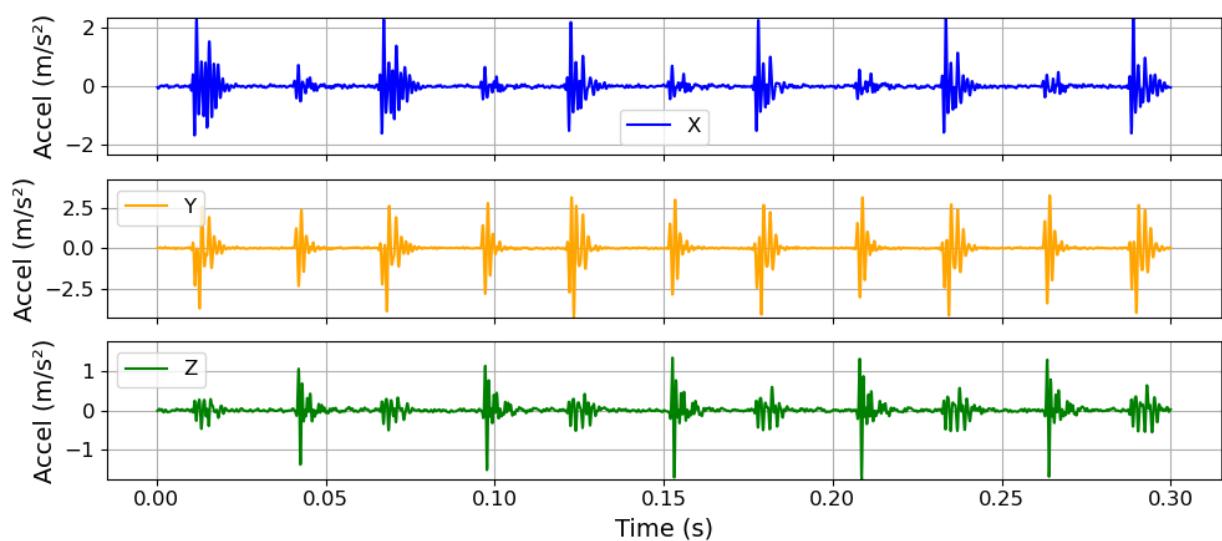
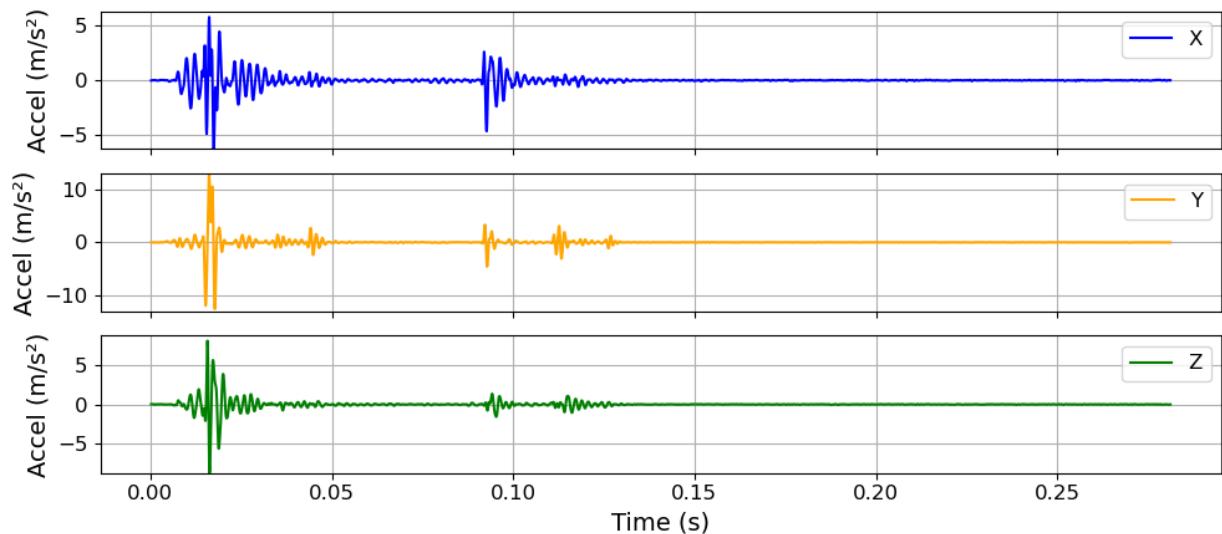


図-4 垂直土層における各加振方法による加速度計 6 に記録された波形

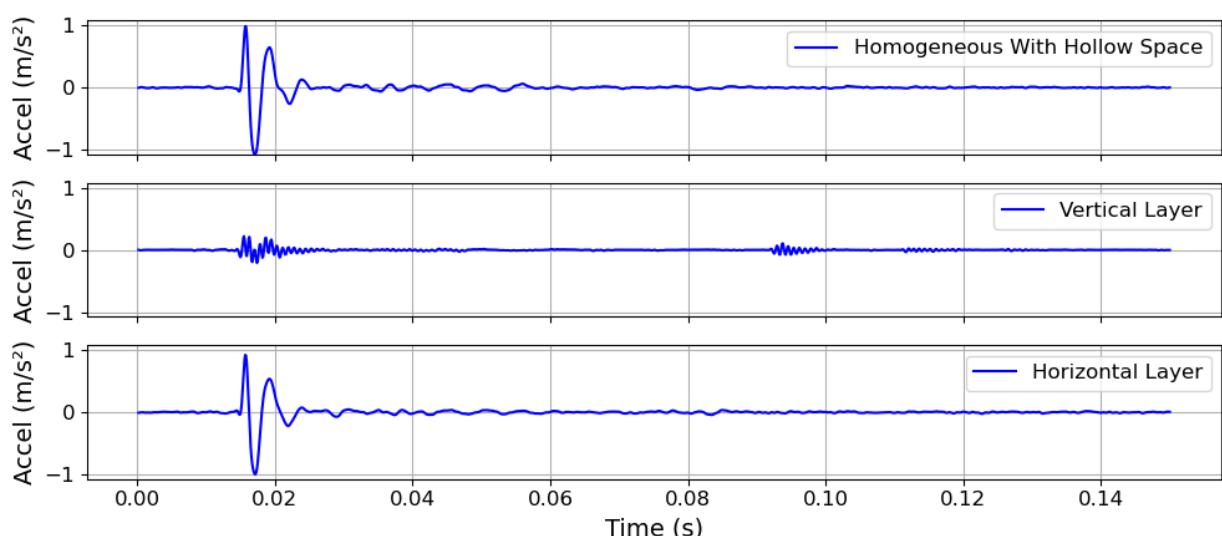
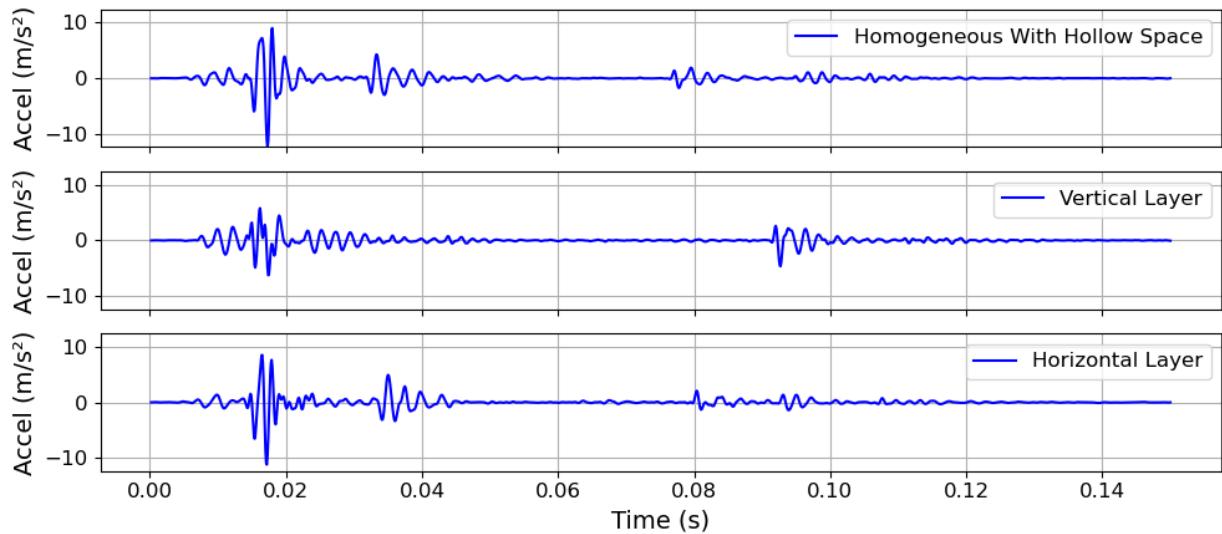


図-5 土層の違いおよび距離の違いによる x 方向の波形（上：加速度計 6, 下：加速度計 2）

3.2 周波数

3.2.1 加振方法の影響

図-6に、垂直土層条件における加速度計6での周波数スペクトルを示す。

特徴を以下に示す。

- 1) 打撃加振では、x・y・z 方向において400～500 Hz 付近で最大振幅が観測された。300 Hz 以下の低周波域を比較すると、100 Hz の振幅は x・z 方向で0.01以下であったのに対し、y 方向では0.018と大きかった。したがって、30～300 Hz 帯では方向に依存した違いが顕著であった。さらに、高周波帯（500 Hz 以上）では、600～700 Hz 付近で全方向において振幅が増加する傾向を示した。
- 2) y 方向の振動加振では、y 方向で700 Hz 付近に最大振幅が生じ、x・z 方向では800 Hz 付近に最大振幅が生じた。

- 3) z 方向の振動加振では、z・y 方向で300～400 Hz に最大振幅が生じた一方、x・z 方向では600 Hz 付近で最大振幅が生じた。
- 4) 打撃加振と振動加振を比較すると、打撃加振では200～800 Hz の広帯域で最大振幅の30～100%に相当する比較的大きな振幅が観測された。一方、振動加振では500～700 Hz の主周波数帯以外では最大振幅の20%程度まで低下し、周波数帯域が限定的であった。これは振動機により発生させる振動周期が機械的に制御され、その前後の周波数に限られるためであると考えられる。

3.2.2 土層の違いの影響

図-7に、各土層条件において、加速度計6で観測された打撃加振波形の周波数スペクトルを示す。

特徴を以下に示す。

- 1) 垂直土層では、x, y, z 方向において400～500 Hz で

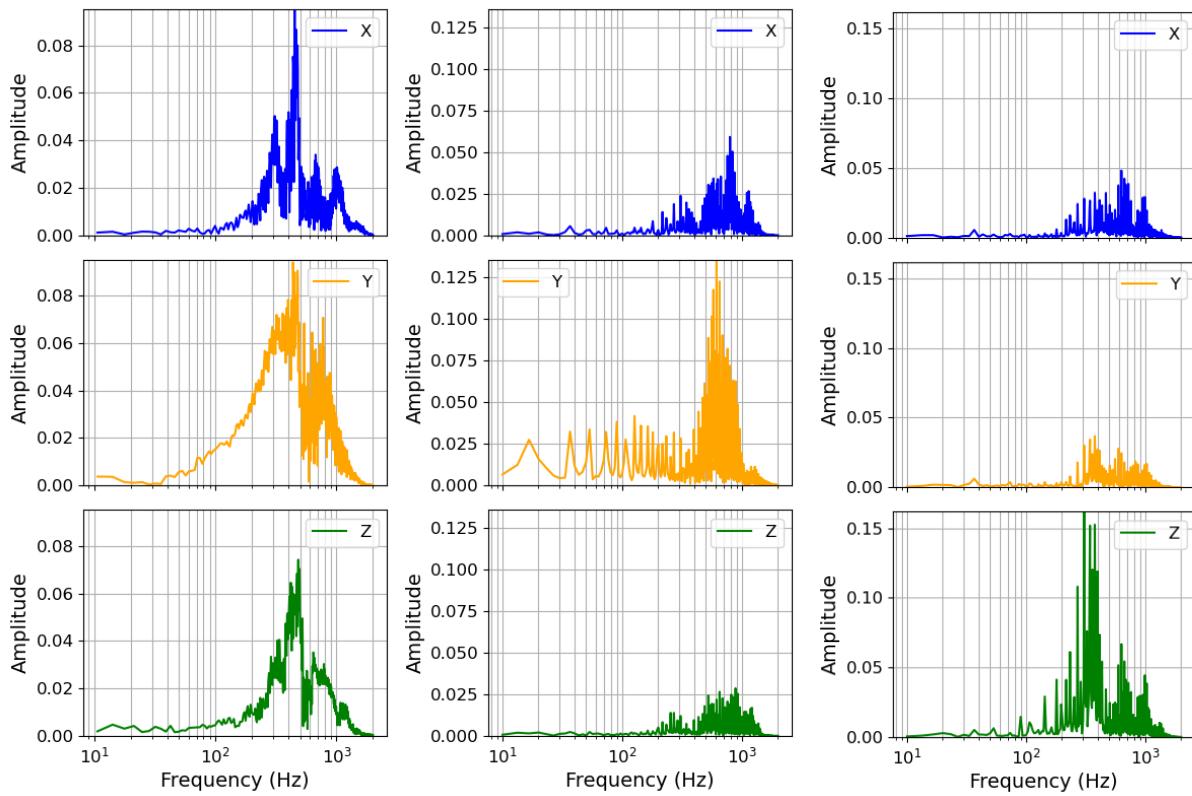


図-6 垂直土層における各加振方法での周波数 (加速度計 6)

左：打撃加振，中：振動加振（鉛直方向加振，y 方向），右：振動加振（水平方向加振 x 方向）

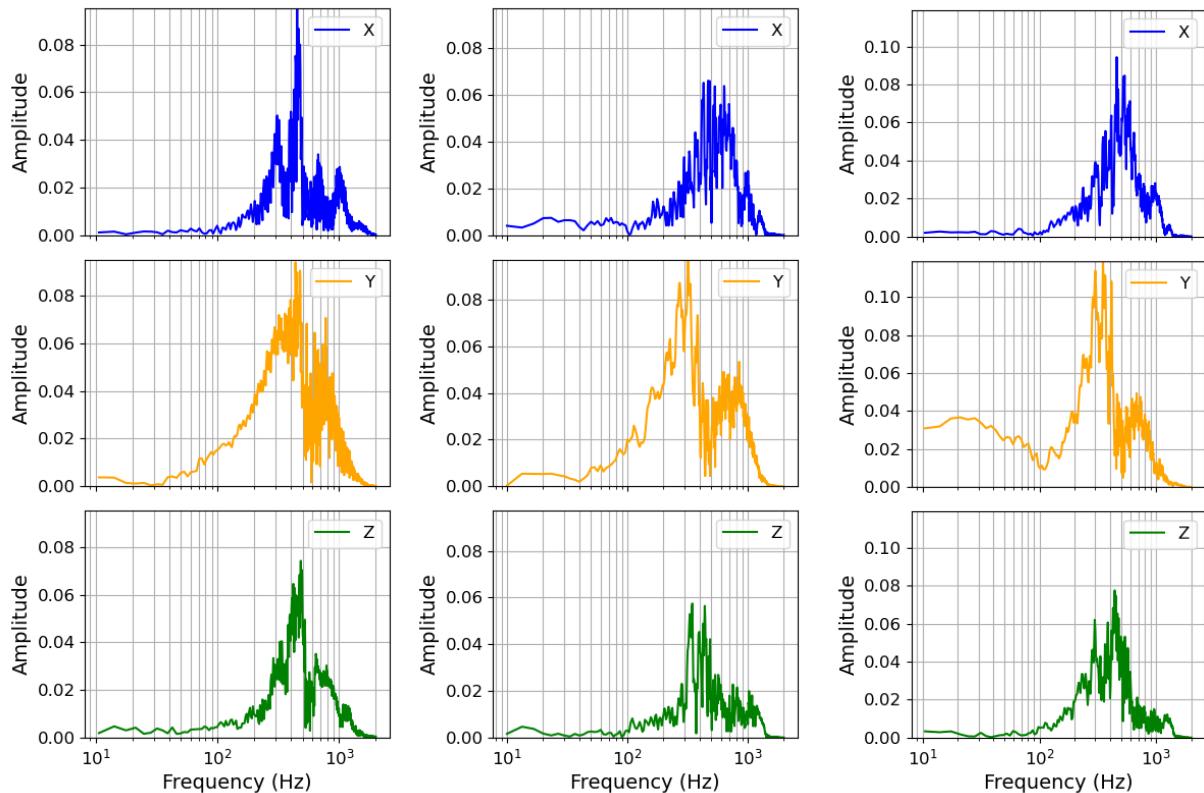


図-7 各土層での打撃加振による波形の周波数 (加速度計 6)

左：垂直土層，中：水平土層，右：空洞土層

が見られ、それ以下の帯域では周波数が小さくなるにつれ振幅も減少した。500 Hz 以上では650 Hz 付近にスパイクがあり、全体として高周波域では振幅が減少する傾向を示した。

- 2) 水平土層では、x, z 方向は垂直土層と同様の傾向を示し、400~500 Hz で最大振幅が観測された。650 Hz 付近にスパイクが確認され、周波数增加に伴い振幅が減少した。一方、y 方向では最大振幅が300 Hz 付近に生じ、x, z 方向よりも低周波側にシフトした。
- 3) 空洞土層では、x, z 方向は水平土層と概ね同様の傾向を示した。y 方向では100 Hz 以下で x, z 方向よりも0.15~0.20程度大きな振幅が観測された。
- 4) 垂直・水平土層では、全体的に低周波から高周波まで大きな差は認められなかった。一方、空洞土層では、y 方向の100 Hz 以下の低周波帯でのみ他の土層と顕著に異なる傾向を示した。
- 5) 全体の比較として、y 方向の100 Hz 以下を除けば、土層条件による周波数特性の差は明確ではなかった。これは、全ケースで同一の打撃力を加えたこと、および加速度計を同一条件の土に設置したことが要因と考えられる。

4 考察

1) 加振方法について

打撃加振では、揺れ始め → 主要振動 → 振動の減衰という流れが比較的明確に波形に現れた。また、主要振動が収束した後に見られる小振動も明瞭に観測された。一方、振動加振では、加振中に揺れが持続するため、主要振動収束後的小振動は波形上で明確に確認できなかった。したがって、少なくとも波形が明瞭である点において、打撃加振の方が FWI に有利な加振方法であると考えられる。この点については、FWI 解析結果において影響を比較する。

2) 波の受信方法について

前方探査の性質上、切羽付近での加振により生じる直接波および反射波を測定可能である必要がある。本実験では、鋼管周囲に加速度計を設置し、この点を検証した。その結果、少なくとも打撃加振においては、直接波および反射波と推定される波を計測できた。したがって、波の受信方法に問題はないと考えられる。波の伝播特性については、FWI 解析により詳細に検討する。

5 おわりに

本研究では、土木研究所の実験施設において、シールドトンネルを模擬した土層実験を実施した。本実験の目的は、①シールドトンネルを模擬した土層の作成、②FWI 用のデータ取得、③加振方法の検討、④波の受信方法の検討、の4点である。得られた知見を以下にまとめた。

1) 加振方法について

打撃加振では、揺れ始めから主要振動、減衰までの過程が明瞭に波形に現れ、FWI に適するデータが取得できた。一方、振動加振では、周期的な揺れが持続するため、主要振動後の波形が明確には得られなかった。したがって、FWI 解析においては、打撃加振の方が有利であると考えられる。

2) 土層の違いについて

垂直土層、水平土層、空洞土層の比較により、主要振動の伝播時間や周波数特性に差が確認された。特に空洞土層では、低周波帯における y 方向の振幅が他の土層と比較して大きいことが示された。

3) 波の受信方法について

鋼管周囲に加速度計を配置した結果、少なくとも打撃加振において、直接波および反射波を捉えることが可能であった。したがって、前方探査に必要な受信方法として有効であることが確認された。

以上の結果より、シールド土層実験においては、打撃加振を用いた計測が FWI 解析に適すること、ならびに加速度計の配置方法が妥当であることが明らかとなった。別報において、得られたデータを用いた FWI 解析結果を報告する。

謝辞

本実験の土層作製および計測機器の設置に協力して下さった東洋計測リサーチの山下様、川畠様には感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 佐藤工業株式会社、技術とサービス、
https://www.satokogyo.co.jp/technology/detail.php?id=35&parent_id=2&category_id=21
- 2) Mondaic Homepage: <https://www.mondaic.com/>
- 3) 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.
- 4) 地盤工学会編：地盤調査の方法と解説、地中レーダー、p.127, 2013.3.
- 5) 地盤工学会編：地盤調査の方法と解説、電磁探査、p.155, 2013.3.
- 6) 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
- 7) 萩本健治、牧野卓三、大塚勝司、浜田元、岩垣富春、中川浩二：TBM による硬岩掘削に伴う振動、騒音特性について、土木学会論文集、No. 623, VI-43, pp. 57-67, 1996.6
- 8) AMBERG TECHNOLOGY: Launch of the new TSP Impact, <https://ambergtechnologies.com/news/article/launch-of-the-new-tsp-impact>
- 9) 福井次郎、中谷 昌一、白戸 真大、野々村佳哲、喜多直之：群杭基礎の大型振動台実験、土木研究所資料、第4015号、2006.8