

弾性波を用いた三次元埋設物探査手法の基礎的検討

Fundamental Study on the 3D Exploration Method for Buried Objects using Elastic Waves

R&D センター 程塚 保行 YASUYUKI HODOTSUKA

深度 1～10m の埋設物を対象とした三次元探査手法の開発を目的として、3 台のレーザードップラー振動計を連動させた埋設物探査実験を実施した。その結果、弾性波の直接波は P 波および S 波ともに振幅の大きさの平面分布の特徴や極性が数値シミュレーション結果とほぼ同じ結果が得られることが確認できた。そして、埋設管からの反射波は、起振方向に受振したデータにおいて、数値シミュレーションデータと類似した埋設管からの反射波の三次元分布の特徴が確認でき、二次元探査では推定できない埋設管の敷設方向を推定することができた。

キーワード：埋設物、反射法弾性波探査、三次元探査、数値シミュレーション、レーザードップラー振動計

A buried object exploration experiment was carried out using three linked laser Doppler vibrometers with the aim of developing a three-dimensional exploration method for buried objects at depths of 1 to 10 meters. As a result, it was confirmed that the characteristics of the planar distribution of the amplitude and polarity of the direct elastic waves, both P-waves and S-waves, were almost identical to the numerical simulation results. Furthermore, the reflected waves from the buried pipes showed three-dimensional distribution characteristics similar to the numerical simulation data in the data received in the excitation direction, and it was possible to estimate the laying direction of the buried pipes, which could not be estimated by two-dimensional exploration.

Key Words: Buried objects, Seismic reflection survey, 3D survey, Numerical simulation, Laser Doppler vibrometer

1. はじめに

試掘確認が困難な深度 1～10m の埋設物の調査は、ボーリング掘削による探査などによって行われるため、調査に多大な労力を要している。これまでに、この深度の効率的かつ高分解能な埋設物探査手法を開発することを目的とし、非接触で高密度の測定を可能とするレーザードップラー振動計（以下、LDV と呼ぶ）に着目し反射法弾性波探査手法を用いた二次元探査実験を実施した¹⁾。その結果、埋設管の敷設方向に起振して 0.1m 間隔の高密度で受振することにより数値シミュレーション結果と整合した直接波や表面波、測線に直交して敷設された埋設管からの反射波を得ることができ、埋設物探査における適切な起振方向と受振方向が確認できた。しかし、この測定方法は二次元探査であるため、測線に直交した埋設管の位置および深度の情報を得ることはできるが、埋

設管の敷設方向の情報は得られない。そのため、埋設管の三次元分布の情報を得ることのできる探査手法の開発が必要となった。三次元の反射波分布を得る探査手法としては、受振器および起振器を格子状に配置する三次元反射法弾性波探査²⁾が知られている。しかし、三次元反射法弾性波探査はケーブルで受振器をつないで測定する機器構成であるため、埋設管を対象とした数 m 四方の調査領域を 0.1m 間隔の高密度で測定すると、受振器とケーブルで調査エリアが埋め尽くされ、ケーブルを伝わって伝搬する振動がノイズとなってデータの品質を低下させる恐れがあった。そこで、本研究ではより高品質な三次元の反射波分布を得るための基礎的な検討として、比較的均質な地盤内に設置した埋設管を対象に、LDV を用いた三次元探査手法の適用性について検討した。本報ではその結果を報告する。

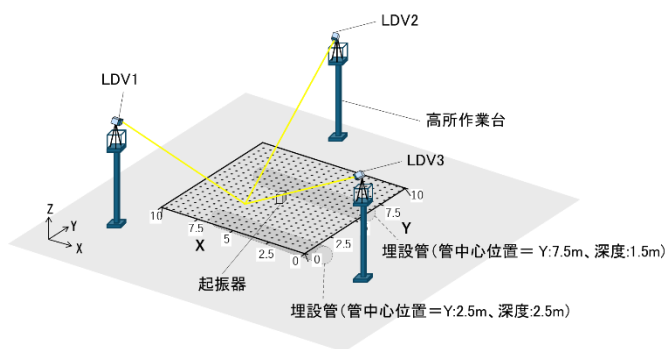
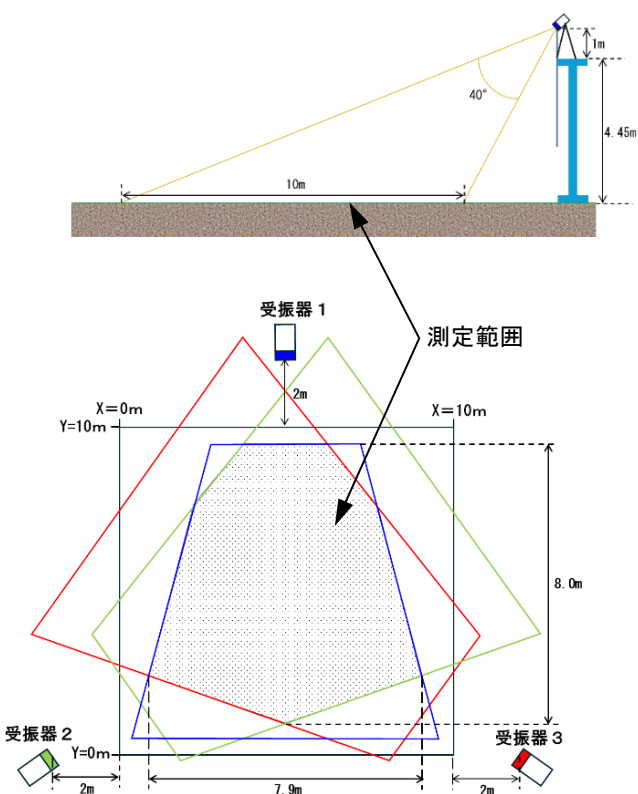


図-1 三次元埋設物探査実験の概念図

図-2 LDVの配置と測定範囲
(上：立面図，下：平面図)

2. 三次元埋設物探査手法の検討

埋設物の三次元分布の情報を得る探査手法の開発を目的として、高密度で面的に測定する方法を検討し、実験を行った。そして、その実験で得られた探査波形と数値シミュレーションによる理論波形を比較することにより、検討した三次元埋設物探査手法の妥当性を評価した。

(1) 実験計画

LDVによる三次元埋設物探査実験の概念図を図-1に示す。非接触で高密度かつ高精度の測定を可能とするス

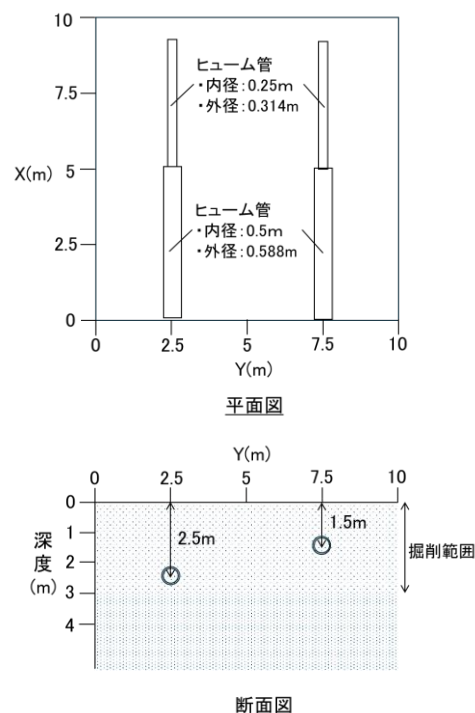


図-3 埋設管位置

キャニング式LDVを3台連動させ、3台それぞれのレーザーの照射方向の振動を直交座標系に座標変換することで三成分(X, Y, Z)の測定ができる仕組みとなっている³⁾。

三次元測定の実施にあたり、各LDVの設置位置と高さ、LDVの照射範囲と測定範囲について検討を行った。LDVの配置と測定範囲を図-2に示す。各LDVの設置位置は、埋設物探査実験場の敷地(15m×15m)の範囲内とし、測定対象はその中央部の10m×10mの範囲とした。使用したLDVのスキャニング範囲が縦40°、横50°であるため可能な限り広い平面範囲を測定できるよう高所作業台を用いて5.45mの高さにLDVを設置し、測定範囲を取り囲むよう3台のLDVを正三角形に配置した。

(2) 実験概要

実験は、比較的均質な関東ローム層を深度3m掘削し、埋設管を設置して掘削土で厚さ30cmごとに転圧して締め固めて整備した実験場で実施した。埋設管の位置を図-3に、実験状況を写真-1に、実験機器の仕様を表-1に示す。起振点は実験場の中央(X=5m, Y=5m)に設置した。起振器は、周波数変調が可能なパイププレート振源を用い、20～400Hzで掃引するチャープ方式で埋設管の敷設方向のX方向に起振した。前節で検討した図-2のLDVの配置で測定した受振点の分布を図-4に示す。受振点は0.2m間隔の三角形メッシュで高密度に1,600点配置した。X=4～6m, Y=1～2mで受振点が抜けている箇



写真-1 実験状況

表-1 実験機器の仕様

機器名	規格・仕様	
レーザードップラー振動計	電源	100VAC
	測定距離	125mm～100m
	最大測定速度	±30m/s
	スキャン角度	H:50° × V:40°
	測定周波数帯域	0～100kHz
	分解能	0.01～0.15 (μm/s)/√Hz
可搬型パイプレータ振源	電源	12VDC
	加振力	450N
	周波数範囲	20～400Hz
	起振部重量	35kg
	全重量	130kg

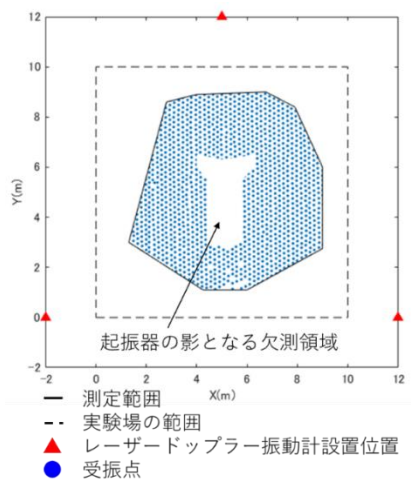


図-4 受振点分布

所がいくつかあるが、これは起振器に繋がったチャープ信号ケーブルや同期信号ケーブル、モニター用に起振器に取り付けた地震計のケーブルにレーザーが当たって欠測となった点である。測定の際には、データのS/N比向上のため、頂部に高輝度の再帰反射テープを貼ったプラスチック製の鋏を受振点に打設し、それをレーザーの的とした。実験データは、分解能向上のため測定データへの起振データの逆畳み込みの処理⁴⁾を行った。

表-2 数値モデルの物性値

	P波速度 (m/s)	S波速度 (m/s)	密度 (kg/m ³)
掘削範囲	300	90	1100
関東ローム	470	130	1400
ヒューム管	3800	2400	2400

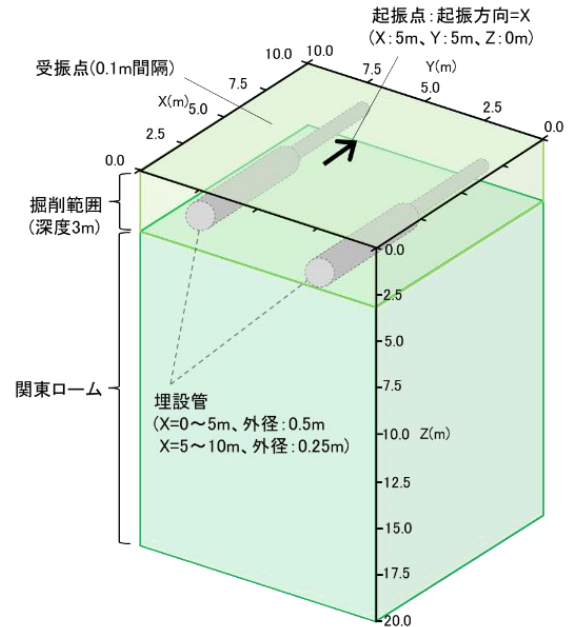


図-5 数値モデル

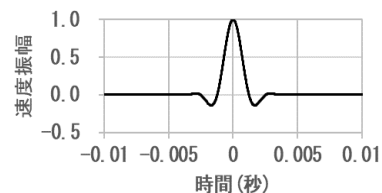


図-6 数値シミュレーションの入力波形

（3）数値シミュレーション

実験データの特徴が理論波形と同様であるかを確認するために Madagascar⁵⁾を用いて三次元の差分法²⁾による数値シミュレーションを実施した。数値モデルの物性値を表-2に示す。数値シミュレーションは、実験場を模擬した図-5に示す数値モデルで計算した。数値モデルの大きさは X:10m×Y:10m×Z:20m とし、Z=3m 以浅を掘削範囲、それ以深を関東ロームの物性値に設定した。数値モデルの側面と底面は吸収境界条件を設定し、グリッド間隔は0.05mとした。数値シミュレーションの入力波形は、20～400Hzのチャープ信号の自己相関関数から算出した図-6のパルス波形を用いた。実験と同様に、起振点は地表面の中央部（X:5m, Y:5m）とし、受振点はX方向およびY方向ともに0.1m間隔とした。

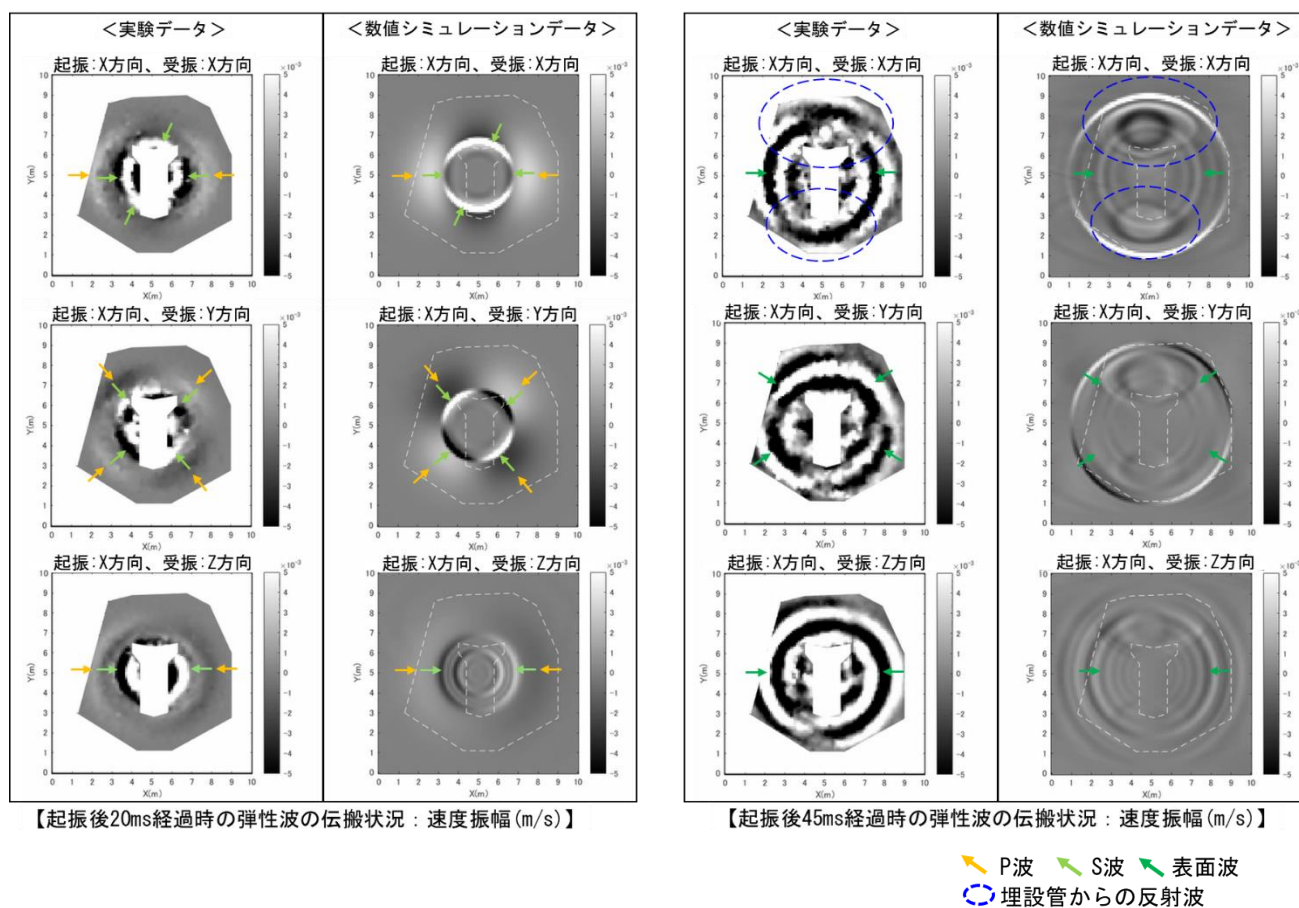


図-7 実験結果と数値シミュレーション結果の比較：X-Y 平面図

(4) 実験および数値シミュレーション結果

実験結果と数値シミュレーション結果の比較を図-7に示す。図中、P波の振幅が大きい箇所に橙矢印、S波の振幅が大きい箇所に黄緑矢印、表面波の振幅が大きい箇所に緑矢印を記すとともに、埋設管からの反射波を破線で囲んでいる。

図-7 左図は、弾性波の直接波（P波およびS波）の放射特性を確認するために作成した、起振開始後 20ms 後の X-Y 平面図である。実験およびシミュレーションで得られた直接波の振幅と極性の分布を面的に可視化し、直接波の3成分（X, Y, Z）の放射特性を比較することにより、実験計画で設定した3台のLDVの配置で理論通りの3成分のデータが測定できたことが確認できる。また、各受振点位置のP波およびS波の到来時間と振幅、極性が実験結果と数値シミュレーション結果でほぼ同一の分布を示していることから、実験場の物性が数値モデルと同様であることが確認できる。

そして、理論通りの3成分データが測定できたことを踏まえた上で、2つの埋設管からの反射波の平面分布が数値シミュレーション結果と同様であるか確認するため、起振開始後 45ms 後の図面を作成した。

図-7 右図は、2つの埋設管からの反射波の平面分布を

確認するために作成した、起振開始後 45ms 後の X-Y 平面図である。表面波（緑矢印）に着目し、実験および数値シミュレーションの結果を比較すると、振幅の到来時間と極性は同じであるものの、振幅の大きさは実験結果が格段に大きい。これは、表面波が非常に柔らかい表層で増幅したためと考えられる。その増幅した表面波の大きな振幅の影響により埋設管からの反射波の分布はやや不明瞭ではあるが、X方向の受振データにおいて埋設管からの反射波の分布の特徴が実験結果と数値シミュレーション結果で類似していることが確認できる。埋設管からの反射波の振幅が起振方向であるX方向で大きく明瞭であるという特徴は、程塚ほか（2023）¹⁾において結論付けた埋設管探査における最適な受振-起振方向の結果とも一致しており、埋設管の敷設方向に起振し受振することが振幅の大きな埋設管からの反射波が得られる最適な測定方法であることが再確認できた。

続いて、X方向の受振データに着目し、埋設管と直交するY方向の時間断面を作成し、反射波の双曲線分布を確認した。実験および数値シミュレーションによるY方向の時間断面を図-8に示す。図中、P波の振幅が大きい箇所を橙矢印、S波の振幅が大きい箇所を黄緑矢印、埋設管からの反射を青矢印で示した。

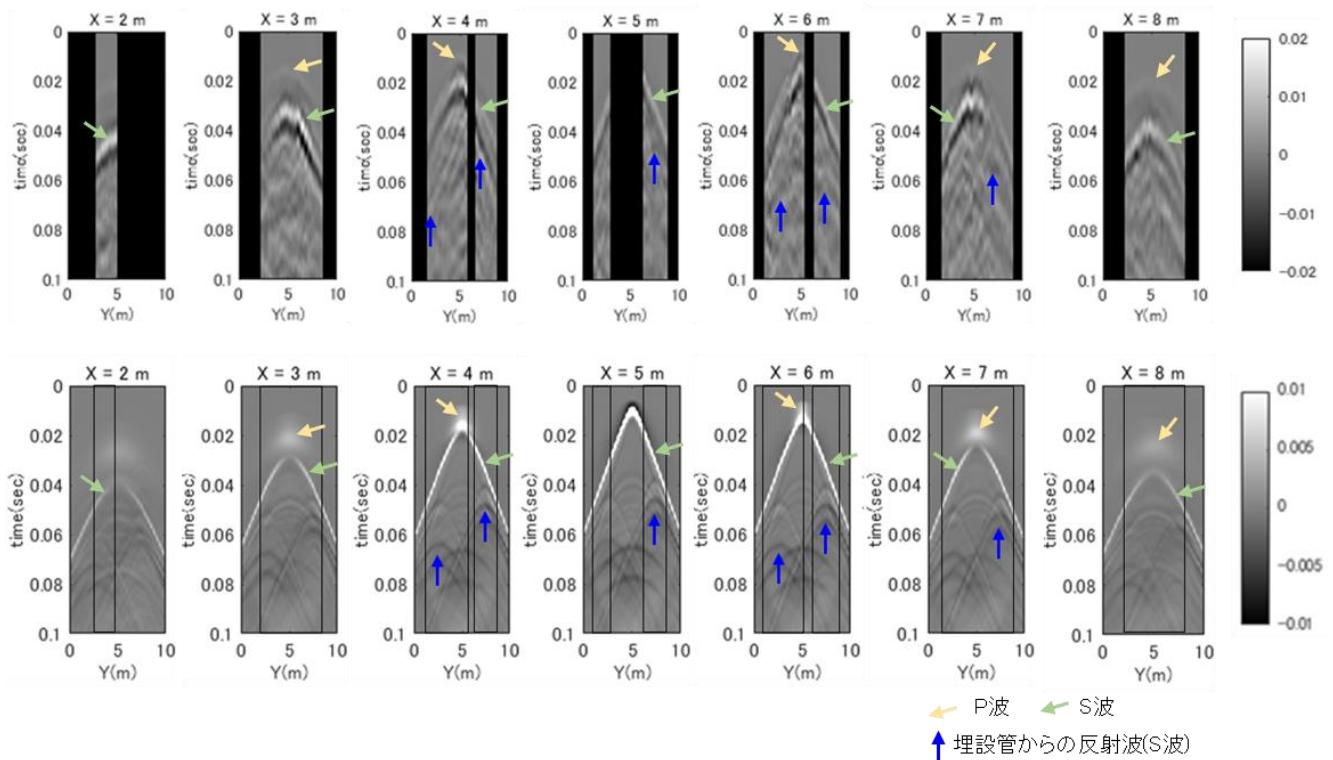


図-8 実験結果と数値シミュレーション結果の比較：X-時間 断面図
 (上図：実験結果，下図：数値シミュレーション結果)

P 波、S 波および表面波は、実験結果と数値シミュレーション結果ともに鮮明な双曲線分布が確認できる。一方、埋設管からの反射波は、それに比べやや不鮮明ではあるが $X=4\sim 7\text{m}$ の両データの探査波形の比較からその分布が確認でき、それらの X 方向の連続性から埋設管の敷設方向を推定することができる。埋設管からの反射波がやや不鮮明であった理由としては、実験日は風が強く 5m の高さに設置した LDV が大きく揺れていたことでデータの S/N 比が低下したことが考えられる。また、起振点から X 方向へ 2m 以上離れた場所 ($X=3\text{m}$ 以下および 7m 以上) の探査波形において埋設管からの反射波が認められなかった理由としては、LDV の受振点座標の設定の調整が不十分で測定エリアの端部ほど再帰反射テープにレーザーが当たらなかった受振点が多かったことが考えられる。この S/N 比の低下についての課題は残るものの、埋設管の敷設方向を推定する三次元埋設管探査手法として、埋設管が敷設されている箇所の地表面に面的に高密度で弾性波を測定し、得られたデータの反射波の平面的な分布の特徴から埋設管の敷設方向を推定する手法が有用であることが確認できた。今後の課題としては、強風でも LDV が大きく揺れないようにすることやレーザーが確実に再帰反射テープに当たるように調整方法を

改良することなど、より精度の良い埋設管の位置や深度の推定を目指した測定方法の改善ならびに推定結果の可視化があげられる。

3. まとめ

埋設管の三次元分布情報を得るための測定方法を検討し、3 台の LDV を連動させた三次元埋設物探査実験を実施した。その結果、P 波および S 波ともに振幅の大きさの平面分布の特徴や極性は数値シミュレーション結果とほぼ同じであり、P 波および S 波の直接波は正確に測定できることが確認できた。一方、埋設管からの反射波はやや不鮮明ではあるものの、起振方向の受振データにおいて、数値シミュレーション結果と類似した埋設管からの反射波の三次元分布の特徴が確認でき、二次元探査では推定できない埋設管の敷設方向を推定することができた。

謝辞：本研究は、東京大学生産技術研究所の水谷司准教授との共同研究によるご指導の下、実験の計画および実施、結果の検討に至るまで、多くのご助言をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 程塚保行, 神山圭佑, 川島学: 弾性波を用いた埋設物探査手法の適用性に関する基礎的検討, 三井住友建設技術研究開発報告, 第 21 号, No.10, 2023.10
- 2) 物理探査学会: 物理探査ハンドブック, 1998
- 3) 宮下剛, 藤野陽三: レーザードップラー速度計を用いた三次元多点振動計測システムの開発, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.4, pp.561-575, 2007.10
- 4) 神山圭佑, 水谷司, 程塚保行, 川島学: 起振観測信号を用いた高解像度な浅層反射法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp.643-644, 2023.7
- 5) Sergey Fomel, Paul Sava, Ioan Vlad, Yang Liu, Vladimir Bashkardin,5.:Madagascar:Open-source software project for multidimensional data analysis and reproducible computational experiments: Journal of Open Research Software, 1, e8, November 2013.