

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

Fundamental Study on Applicability of Buried Object Exploration Method using Elastic Wave

R&Dセンター 程塚 保行 YASUYUKI HODOTSUKA

R&Dセンター 神山 圭佑 KEISUKE KAMIYAMA

R&Dセンター 川島 学 MANABU KAWASHIMA

深度 1~10m の埋設物を対象とした探査手法の開発を目的として、S/N 比の高い探査結果を取得する手法の確立のために実験を実施し、測定方法とデータ処理について数値シミュレーションと併せて検討した。その結果、起振器波形を用いた逆畳み込み法によって高解像度な探査波形が得られ、数値シミュレーション結果と整合性が確認できた。さらに、埋設管の敷設方向に起振し受振することで明瞭な探査波形を複数種の受振器で得られることが確認できた。

キーワード：地下埋設物、反射法弾性波探査、数値シミュレーション、逆畳み込み法、相互相関法

A field experiment was carried out to establish a method for obtaining data with a high S/N ratio to develop a buried object exploration method at depths around 1 to 10m. As a result, it was clarified that high S/N ratio data can be obtained by the deconvolution method using excited data and meet with the results of numerical simulation. It was also found that clear waveforms can be obtained with multiple types of geophones by exciting and receiving vibrations in the laying direction of the buried pipe.

Key Words: Underground buried objects, Seismic reflection survey, Numerical simulation, Deconvolution method, Cross-correlation method

1. はじめに

試掘確認が困難な深度 1~10m の埋設物は、ボーリング掘削による探査などが行われ、調査に多大な労力を要している。そのため、この深度の効率的な探査手法の開発が求められている。

著者らは、深度 1~10m の埋設物探査手法の開発を目的として、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に着目し、深度 2.5m の矩形函渠を対象に反射法弾性波探査手法を用いた実験を実施した。その実験では鉛直方向に起振し鉛直方向に受振する測定方法を用いた。その実験結果では、矩形函渠上面の位置を特定できたものの、取得した波形が不明瞭なため S/N 比の向上が課題となった¹⁾。その取得波形の不明瞭さの要因として、不均質な地盤で地下の埋設物から散乱し反射した波の複雑さと微弱さ²⁾が挙げられる。それにより、地表面を伝搬する直達波と表面波が微弱な埋設物からの反射波を覆い隠してしまうこと、埋設物からの反射波にも P 波の反射、S 波の反射、P 波や S 波へと変換して反射する変換波などがあり探査波形上でそれらの判別が困

難となることが懸念される。

また、S/N 比の高い探査結果を得るためには、任意の信号で制御された振動で起振し、地盤へ伝搬したその振動を地表で受振する必要がある。すなわち地盤に伝搬させる起振の信号波形と地表で受振される信号波形を測定する必要がある。

これらのことから、不均質でなく均質な地盤で探査を実施し、正確な起振-受振波形を適切な方向で測定することができれば S/N 比の高い明瞭な反射波が取得でき、それらの反射波と数値シミュレーションによる理論波形の比較により開発手法の適用性を確認することができる。

本研究では、深度 1~10m の埋設物を探査する手法の確立のために、理論的な考察のもと、比較的均質な地盤内に設置した埋設管を対象に実施した実験の結果について報告する。

2. 探査理論

反射法弾性波探査は、地盤に伝搬する弾性波が地盤中の物性の境界で反射し地表に設置された受振器でその反

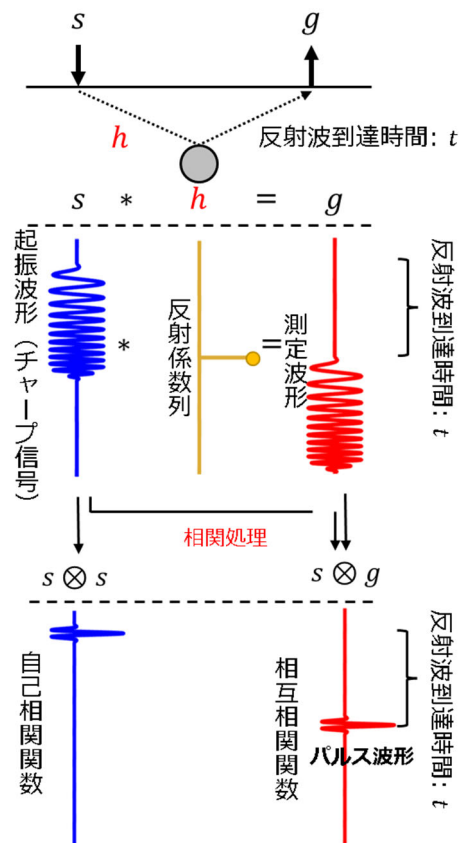


図-1 相互相関法

射波を測定する。そして、データ処理によりそれらの物性境界の位置および深度の情報が得られる。その反射波は物性境界のインピーダンスの差が大きいほど振幅が大きくなり明瞭な反射面としてイメージされる。

(1) 相互相関法

反射法弾性波探査におけるデータ処理では、一般に相互相関法が用いられる。このデータ処理手法はパルス波形(図-1)を得ることを目的として利用される。探査波形において、測定波形 $g(t)$ は起振波形 $s(t)$ に反射係数の時系列 $h(t)$ を畳み込んだものとみなされる³⁾。

$$g(t) = s(t) * h(t) \tag{1}$$

広い周波数帯域で周波数変調されたチャープ信号 $s(t)$ による起振波形と測定波形 $g(t)$ の相互相関により、式(2)および図-1 に示す反射係数列 $h(t)$ に近いパルス波形 $r_{ss}(t)$ で形成される相互相関関数 $c(t)$ が得られる。ここで演算記号 \otimes は相互相関の計算を示す。

$$\begin{aligned} c(t) &= s(t) \otimes g(t) \\ &= [s(t) \otimes s(t)] * h(t) \\ &= r_{ss}(t) * h(t) \end{aligned} \tag{2}$$

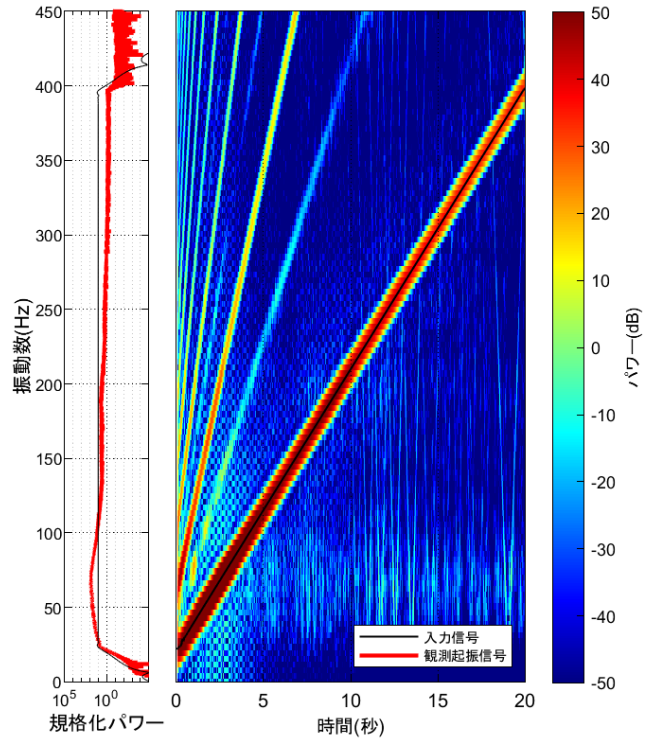


図-2 X方向の起振波形のパワースペクトル

探査で得られる測定波形は、起振波形、物性境界での反射、地盤の吸収効果、測定機器の特性などの影響を受け変形した波形として測定される。パルス波形を得るには起振点と受振点とも機器の特性が同一の受振器で測定し、それらのデータを用いることで探査波形への影響は物性境界での反射や地盤の吸収効果など地盤の情報に起因するものに限定され、より地盤物性境界の分布を表す反射係数列に近いパルス波形が得られる。

(2) 事前確認

本報の実験で使用する起振器には、時系列に線形で周波数変調するチャープ信号を入力信号として起振が可能な可搬型パイププレート振源を採用した。このチャープ信号をより広い周波数帯域で起振し、その振動が地盤へ伝搬することで反射係数列に近い探査波形を得ることができる。そのため、実験の事前確認としてこの起振器がチャープ信号どおりに動いているかどうか確認するため、起振器の底盤を受振器を3方向(水平2方向: X, Y, 鉛直1方向: Z)設置し、その方向に起振した波形をそれぞれ取得した。

図-2 に X 方向の起振波形とチャープ信号のパワースペクトルを示す。全サンプルのデータで計算した結果を左図に、1,024 サンプル(0.128 秒区間)を一つのセグメントとして、1,000 サンプルずつオーバーラップさせながら計算した時間-周波数解析の結果を右図に示す。黒線

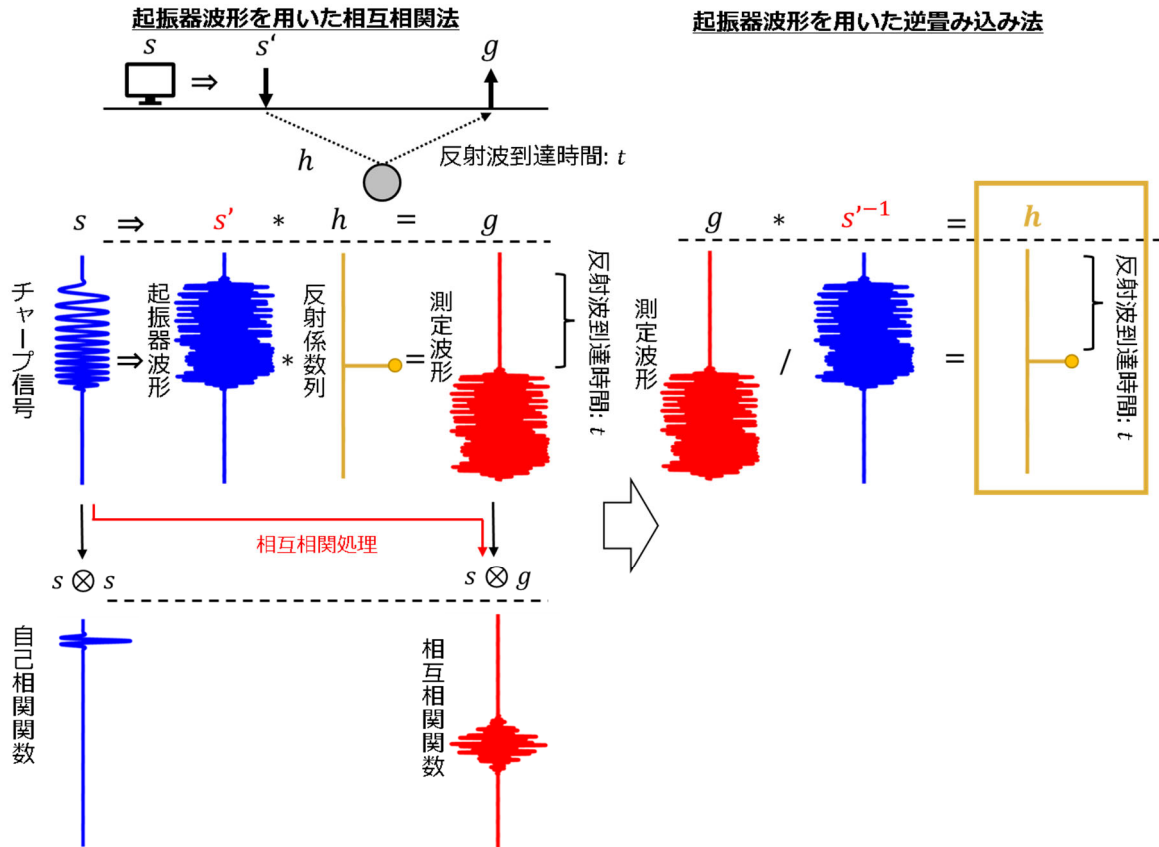


図-3 起振器波形を用いた探査理論の検討

でチャープ信号のパワースペクトルを示す。両図の比較のため、波形の全パワーを用いてそれぞれ規格化した。このパワースペクトルから、起振波形にはチャープ信号にはない高調波が存在し、さらにチャープ信号の周波数帯域には帯域によってパワーに偏りがあることが確認された。この高調波については時間-周波数の領域でフィルター処理を適用すればその影響は軽減できるが、チャープ信号の周波数帯域のパワーの偏りは探査結果に影響が大きい。そのため、この影響を考慮した探査理論について検討を行った。

(3) 探査理論の検討

実際の起振波形がチャープ信号と一致していれば、入力したチャープ信号と測定波形の相互相関を取ることによって探査波形を計算することができる。しかし、起振波形には周波数帯域によってパワーに偏りがあるため、その起振波形の影響を軽減する方法について検討する。図-3に検討する探査理論の概念図を示す。

チャープ信号を $s(t)$ 、実際の起振波形を $s'(t)$ 、測定波形を $g(t)$ 、反射係数列を $h(t)$ としたとき、測定波形は、式(3)で得られる。

$$g(t) = s'(t) * h(t) \quad (3)$$

チャープ信号と測定波形に相互相関法を適用すると得られる相互相関関数 $c(t)$ は式(4)のように表せる。

$$\begin{aligned} c(t) &= s(t) \otimes g(t) \\ &= [s(t) \otimes s'(t)] * h(t) \\ &= r_{ss'}(t) * h(t) \end{aligned} \quad (4)$$

式中の $r_{ss'}(t)$ はチャープ信号と起振波形の相関関数を示し、起振波形がチャープ信号と一致するほど、 $r_{ss'}(t)$ は反射係数列に近いパルス波形になる。しかし、図-3に示すように相互相関関数は起振器波形の影響により時間軸方向に波群が広がり、探査結果における埋設物の位置の精度が低下してしまう。そのため、この影響を軽減することにより反射係数列を得ることが可能な逆畳み込み手法について検討した。式(5)に起振器波形を用いた逆畳み込み法を示す。

$$h(t) = g(t) * s'^{-1}(t) \quad (5)$$

逆畳み込み手法では起振器波形を測定波形から除算することで、起振力のパワースペクトルの偏りによる影響を軽減できる。しかし、除算により起振力のパワーが乏しい周波数帯域においては取得信号に含まれるノイズ

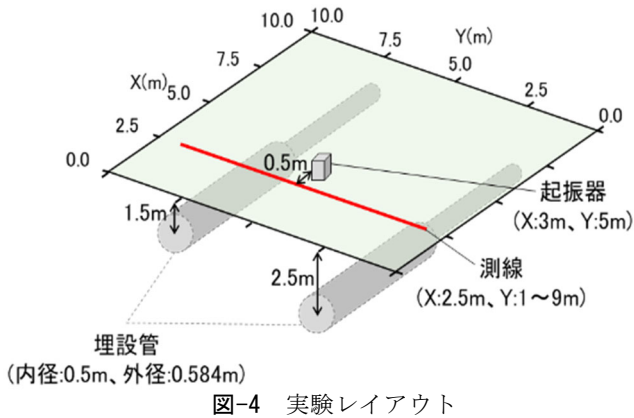


図-4 実験レイアウト



写真-1 実験状況

が相対的に大きくなり、起振していない周波数領域においてはゼロでの除算となる影響で得られる結果にノイズが多く含まれてしまう。それらの影響を軽減するために、起振するチャープ信号の周波数範囲に 20~400Hz の帯域制限を設けて計算を行うこととした。

3. 埋設物探査実験

実験では、S/N 比の高い探査データを取得することを目的として、実験場を整備し最適な起振-受振方向とデータ処理方法について、実験波形と数値シミュレーションによる理論波形との比較により検討した。

(1) 実験概要

比較的均質な関東ローム層を深度 3m 掘削し、埋設管をその芯位置が 1.5m と 2.5m の深度に設置し埋設して実験場を整備した。埋戻しの際には掘削土で厚さ 30cm ごとに転圧して締め固めた。実験レイアウトを図-4 と写真-1 に示す。測線は埋設した内径 0.5m のヒューム管の中央部直上を横断する方向に配置した。受振点は 0.1m 間隔で 81 点、起振点は測線から X 方向に 0.5m オフセットして 1 点配置した。起振器は、周波数変調が可能な可搬型パイププレート振源を用い、20~400Hz で掃引するチャープ信号で起振した。実験に使用した機器を表-1 に示す。

表-1 機器仕様

機器名	規格・仕様	
レーザードップラー振動計	電源	100VAC
	レーザータイプ	ヘリウムネオン
	最大速度	± 12 m/s
	測定周波数	DC ~ 24 MHz
	分解能	1.5~300 (nm/s)/√Hz
ジオフォン	固有周波数	30 Hz
	感度	30 V/m/s
弾性波探査測定器	ダイナミックレンジ	144dB
	周波数レンジ	DC~3.2kHz
	A/D変換	24bit
可搬型パイププレート振源	電源	12VDC
	加振力	450N
	周波数範囲	20~400Hz
	起振部重量	35kg
	全重量	130kg

(2) 測定仕様の検討

測定方向は、起振-受振方向の検討のため、前章と同様に起振と受振の方向を合わせて 3 方向 (X,Y,Z) とした。使用する機器は、データ処理の検討において起振点と受振点を同時に測定できる受振器が必要となる。しかし、本研究で着目しているレーザードップラー振動計での測定は 1 点ごとになることから、本検討の受振器には同時に複数点の測定が可能なジオフォンおよび弾性波探査測定器を用いた。さらに、複数機器での再現性の確認と測定作業の効率化のため、起振-受振方向の検討で得られた明瞭な反射波が取得可能な起振-受振方向でレーザードップラー振動計の測定を行った。

(3) 実験結果

a) データ処理方法の検討

データ処理方法の検討は、前章の探査理論で検討した相互相関法と逆畳み込み法を実験データに適用した。これらの検討には、3 方向の起振-受振方向のデータにデータ処理手法を適用し結果を比較した。データ処理結果を図-5 に示す。相互相関法結果と比較して逆畳み込み法結果の波長が短いため分解能が高くなり鮮明な結果となった。これは、逆畳み込み法により前章の探査理論で述べた起振器波形による変形の影響が効果的に軽減されたものと考えられる。それにより相互相関法では波が重なり合って区別することが難しい連続した多くの波群を確認することが可能となった。

b) 起振-受振方向の検討

図-4 の実験レイアウトの埋設管位置と図-5 の結果について起振-受振方向ごとの特徴に着目すると、X 方向の探査波形において、双曲線状に分布し連続した波群が

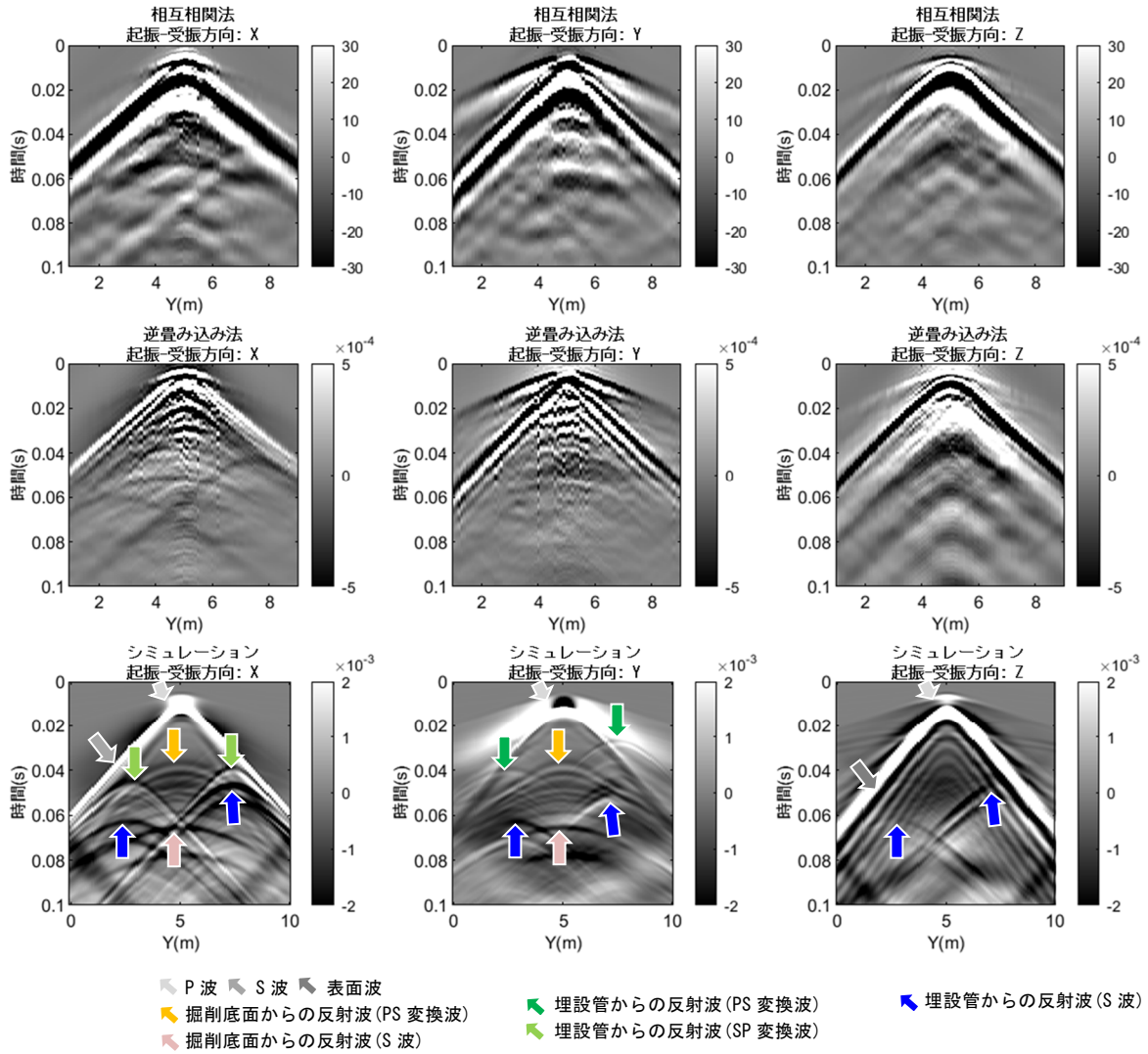


図-5 ジオフォンデータを用いた測定手法とデータ処理手法の検討結果

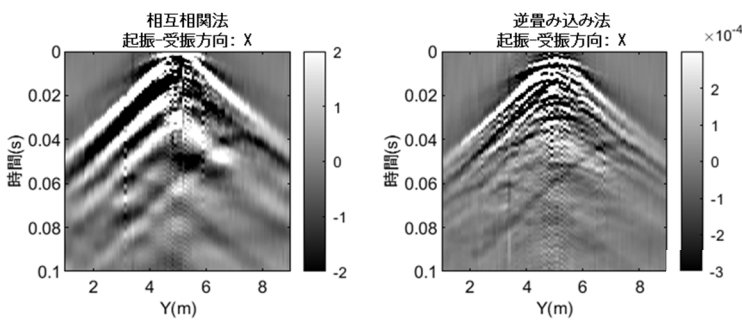


図-6 レーザードップラー振動計の実験結果

明瞭に確認できる。それらの波群のピークは2つの埋設管の水平位置に対応し、それらの分布位置からそれぞれ2つの埋設管からの反射波であることが分かる。一方、これらの埋設管からの反射波はY方向やZ方向には認められない。これらの測定方向における埋設管からの反射波の特徴は、後述する数値シミュレーションの理論波形と比較により確認する。

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 (t/m ³)
掘削範囲	300	90	1.1
関東ローム	470	130	1.4
ヒューム管	3800	2400	2.4

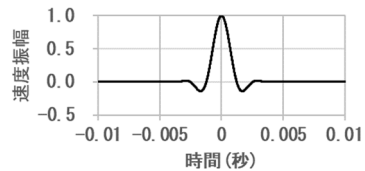


図-7 数値シミュレーションの入力波形

c) レーザードップラー振動計の適用性確認

前項の起振-受振方向の検討結果を踏まえて、レーザードップラー振動計を用いてX方向に起振し受振した。データ処理手法は相互相関法と逆畳み込み法を適用した。実験結果を図-6に示す。相互相関法と比較して逆畳み

込み法の探査波形が明瞭であり、波長が短いため分解能が高く埋設管からの反射波を容易に確認することができる。そして、それらの反射波はジオフォンの結果と同様であることから、レーザードップラー振動計においても埋設管を探査可能であることを確認した。

d) 数値シミュレーションによる実験結果の検証

前述の実験結果で確認した逆畳み込み法による分解能向上の効果や明瞭な埋設管からの反射波が得られる起振-受振方向の特徴について、理論波形においても同様であるか確認するため3次元の数値シミュレーションを実施した。

数値モデルは図-4の実験レイアウトを模擬して作成し、表-2に示す物性値を与えた。数値モデルの大きさはX:10m×Y:10m×Z:20mとし、Z=3mを掘削範囲、それ以深を関東ロームの物性値に設定した。掘削範囲の物性値は測定データや近傍のボーリングデータを基に設定した。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-7に示すパルス波形を用いた。

数値シミュレーション波形を図-5に示す。シミュレーション結果と併せて実験結果を比較すると、直達波(P波やS波)や表面波はおおむね同様であり、埋設管からの反射波以外にも掘削底面の反射波も確認することができる。また、すべての結果において埋設管からの反射波は起振-受振方向がX方向の探査波形が最も明瞭であり、埋設管の敷設方向であるX方向へ起振し受振することが有効であることが確認された。

e) 既往文献による実験結果の検証

実験結果と数値シミュレーションの比較から、有効な起振-受振方向が確認され、ジオフォンの探査結果とレーザードップラー振動計の探査結果の両方で同様な結果が得られたことで探査手法の再現性を確認することができた。しかし、数値シミュレーションで計算された反射波のうちPS変換波やSP変換波がジオフォン結果とレーザードップラー振動計結果のX方向とY方向において認められない。この特徴は加野ほか(1999)⁴⁾においても同様の結果が報告されており、表層での減衰が大きいことが理由として挙げられている。そして、Andre et al.(2019)⁵⁾は、地質構造の探査で得られる変換波の振幅について着目して検討し、P波やS波、PS変換波、SP変換波の反射波は鉛直加振および水平加振に問わず発生するが、土質地盤では、P波やPS変換波、SP変換波の振幅と比較してS波の振幅が顕著に大きく、そして、測

線に直交した水平方向に加振しその方向に受振することで最も振幅の大きいS波の反射波が得られると理論と実験から反射波の特性について論じている。本報の結果も同様の結果であり、埋設物を対象とした場合においても水平起振-水平受振によるS波の反射法弾性波探査が有効であるといえる。これらのことから、実験結果の妥当性と探査手法の適用性が確認できた。

4. まとめ

試掘確認が困難な深度1~10mの効率的な探査手法の開発を目的として、S/N比の高い探査結果を得るために実験を行い、測定方法とデータ処理について数値シミュレーションと併せて検討した。その結果、起振器波形を用いた逆畳み込み法によって高解像度な探査波形が得られ、数値シミュレーション結果と整合した直達波や表面波、埋設管からの反射波を得ることができた。さらに、埋設物探査の測定方法における適切な起振-受振の方向がジオフォンデータとレーザードップラー振動計データの両方で確認できた。また、数値シミュレーション結果と整合していない特徴についても既往文献の結果と同様であり反射波の特性によるものであることが分かり、実験結果の妥当性と探査手法の適用性が確認できた。

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) 程塚ほか：弾性波を用いた埋設物探査手法に関する基礎的実験、令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会論文集、2022。
- 2) Bachrach, R., et al. : 3D ultra shallow seismic imaging of buried pipe using dense receiver array-Practical and theoretical considerations, GEOPHYSICS, VOL. 75, NO. 6, G45-G51, 2010.
- 3) 物理探査学会：物理探査ハンドブック、1998。
- 4) 加野ほか：P-S変換波を利用した反射法の基礎実験、物理探査学会第101回学術講演会論文集、1999。
- 5) Andre Pugin¹ and Öz Yilmaz : Optimum source-receiver orientations to capture PP, PS, SP, and SS reflected wave modes, The Leading Edge, VOL.38, NO.1, pp.10-80, 2019.