HDD 工法におけるバイブロを用いた ドリルビットの三次元位置推定手法の検討

A Study for Estimating the 3D Location of the Drill-Bit during Horizontal Directional Drilling using “Vibro”

田村潤平*・川村洋平*・持地英美**・佐々木直人**・大川浩一***

Junpei Tamura, Youhei Kawamura, Hidemi Mochiji, Naoto Sasaki, and Hirokazu Okawa

*筑波大学大学院システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1 丁目)

**多田建設株式会社 (〒136-0072 東京都江東区大島 2 丁目)

***秋田大学大学院工学資源学研究科 (〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町)

Horizontal directional drilling (HDD) is the method expected to prevail for laying lifelines that avoids the need to make an open cut. However, the location of the drill-bit underground must be known at all times when conducting this method. As conventional electromagnetic wave-based methods are known to have several problems, herein we suggest a new method based on the propagation of elastic waves in the ground. In this study, “Vibro” is used as the generation method of elastic waves. This is a feature loaded on the heavy machineries used for HDD. Differences of arrival time are obtained from first peak times of the waveforms measured by the geophones set up on the ground. The possibility to actualize this method is examined by application of an approximate three-dimensional (3D) location method to the differences. As the result of this study, there is the possibility to actualize this method but accuracy improvement is challenges for the future.

Key Words: HDD, 3D location estimation, difference in arrival time, elastic wave

1 緒言

近年、都市機能の高速化、高度化に伴い各種ライフラインの整備手法が重要となっている。本研究の対象である HDD(Horizontal directional drilling)工法(図-1)とは、電気、ガス、上下水道、ネットワーク等の各種ライフラインを非開削(表-1)で敷設することができる工法の一つであり、交通遮断や排土問題の少ないクリーンで安全性の高い工法であることから、今後の普及が期待されて

いる。この工法は、掘削、拡張、引き込みの3つの作業工程を有している。初めに、重機からロッドを継ぎ足しながら(写真-1)、先端に取り付けられているドリルビット(写真-2)で地中に埋設管を通すための細い穴を掘削する。次に、掘削工程で貫通させた穴を、埋設管の口径に達するまで徐々に拡張していく。最後に、拡張した穴に埋設管を引き込み、ライフラインの敷設を行う。しかしながら、上記の工程で意図した位置にライフラインの埋設を行うためには、最初の工程である掘削を行う際に、地中のドリルビットの位置を随時計測し、ドリルビット

図-1 HDD 工法模式図

写真-1 HDD 工法に用いられる重機

写真-2 ドリル先端部

の進路に修正を加えながら掘削を進めていく必要がある。そして、そのときの計測精度が、HDD 工法でライフラインの敷設を行う際の最終的な埋設位置に大きく影響する。地中のドリルビットの位置を計測するための手法として、現在一般的に用いられている手法は電磁波を利用したものである。しかしながら、この手法では、ドリルビットの真上で計測を行うことが必須である。そのため、HDD 工法の施工ライン上に建造物がある場合には、ドリルビットの位置計測を行うことができない。また、電磁波を利用するという特性上、降水があった場合など土中の含水率が大きく変化している場合や、付近に鉄塔があるような場合等、電磁波が周辺の環境から大きく影響を受けてしまうような状況下においては正確な計測を行うことができない。そこで、上述の状況にも対応できる位置計測システムを構築することが、本工法の更なる普及に繋がると考えられる。そのため、社会的にも新たな位置計測システムの構築は強く望まれており、本研究の目的はその要望に応える計測システムを構築することである。

本研究では電磁波に替わる新たな計測手法として、ドリルビットから発生する弾性波による計測手法を提案した。弾性波を用いた物理探査手法としては反射法¹⁹⁾

が一般的であるが、本研究では地中からの弾性波を利用した位置計測を行うため、直接法による位置計測を試みた。本実験は、弾性波の入力手法として油圧バイプロ(バイプロサイズ)を用いたものである。これは、HDD 工法で用いる重機に掘削を進めるための手段の一つとして予め搭載されている機能であり、油圧を用いてドリルビットに前後運動を生じさせることで、礫混土のような固い地盤や帯水砂層など従来の HDD 工法では掘削が困難な地盤に対しても、HDD 工法の施工を可能にするものである。本研究では、バイプロによって生じさせた弾性波を計測し位置推定を試みることで、弾性波による位置推定の可能性を検討した。

表-1 主な非開削工法の技術区分

技術区分	備考
大口径管推進工法	呼び径800以上の推進工法
小口径管推進工法	呼び径700以下の推進工法
取付管推進工法	地中の本管に接続管を推進させる
改築推進工法	老朽既設管を新設管に置き換える
誘導式水平ドリル(HDD)工法	新設管を地上から引き込む
下水道管渠更生工法	老朽下水道管渠を補強更生
ケーシング(小型)立坑工法	推進用の円形小型立坑を設置
非開削特殊工法	上記の範疇に入らない特殊工法

2 計測原理

弾性波を用いた一般的な地中埋設物検知手法としては、地表面から弾性波を入力し、埋設物からの反射波から位置計測を行う反射法が考えられる。しかしながら、今回は地中のドリルビットから弾性波を出力することが可能であるため、直接法による位置計測を行う。直接法を用いる際には、地中で弾性波が出力された瞬間から各ジオフォンに達するまでの時間を計測することで三点測量的な位置推定を行いたい。HDD 工法においてはドリルビットまでロッド内部を通して信号ケーブルを接続することが困難であるため、弾性波の発生タイミングと同時にトリガをかけることができない。そのため、一般的な三点測量のような位置測定は行うことができない。そこで、本手法では地表面に展開したセンサのいずれか1つに弾性波が到達した瞬間にトリガをかけ計測を開始し、各ジオフォンへの弾性波の到達時間差からドリルビットの三次元位置推定を行う。なお、弾性波には、実体波の他に表面波も混在して計測されるが、本研究では実体波の到達時間差を利用して位置推定を行う。

まず、ジオフォンを2つ用いた場合について考える。以降、2節では地表面でのドリルビットの進行方向を y 軸、垂直な方向で右向き正を x 軸とし、地表面に垂直で上向き方向を z 軸とする。図-2は、二つのジオフォン、及びドリルビットが $x-z$ 平面上にある場合のモデルであ

図-2 位置推定モデル

る。図中の W はセンサ間距離、 d はドリルビットまでの距離差を示しており、 L は弾性波の発生タイミングを取得できないことから生じる未知数である。このモデルでは、計測現場一帯での層モデルが単一であると仮定し、弾性波は屈折せずジオフォンまでの最短距離を伝播するものとする。2つのジオフォンではドリルビットの位置を完全に特定することはできないが、図-2より x, z, d, W を用いて、式(1)が示す軌跡上にドリルビットが存在すると考えることができる。

$$z = -\sqrt{(W^2 - d^2)\left(\frac{x^2}{d^2} - 0.25\right)} \quad \dots (1)$$

図-2中の点線は式(1)の軌跡の概形を示したものである。ここで d は2つのジオフォンへの弾性波の到達時間差 t と弾性波の伝播速度 v の積(式(2))で表すことができる。

$$d = v \times t \quad \dots (2)$$

よって、速度は土質によって変化することを考慮すると、式(1)は x, z, v の3つの未知数を持つ関係式と考えることができる。次に、ドリルビットが図-2の平面上にない場合を考える。式(1)より、三次元の場合の関係式は y を用いて式(3)で表すことができる。

$$z = -\sqrt{(W^2 - d^2)\left(\frac{x^2}{d^2} - 0.25\right) - y^2} \quad \dots (3)$$

式(1)と同様に、 d は式(2)で表されるので、2つのジオフォンで震源からの弾性波を計測すると、4つの未知数 (x, y, z, v) を持つ関係式が得られる。従って、実際にドリルビットの位置推定を行う際には、同様の関係式を4つ準備し、それらの交点を調べることで震源の位置を特定することができると考えられる。以上より、4つの到達時間差が得られれば三次元での位置推定が可能であると言える。ここで、4つの到達時間差を得るためには最低限5つのセンサを用いる必要があることに注意する。これは必要な値が“差”である事に起因する。もし、弾性波発生のタイミングを取得できるのであれば、そのタイミングを基準とし差を得れば良いため4つのセンサで

位置推定を行うことができる。しかしながら、HDD工法を対象とする本研究では基準となるタイミングが取得できないため、もう一つセンサを用いる必要がある。以上の理由から、三次元での位置推定を実現するためには最低限5つのジオフォンが必要であることがわかる。しかしながら、実際に弾性波の計測を行い、位置推定を適用する際には、地盤中の不確定要素の影響を受けてしまうため、最低限のセンサ個数である5つのジオフォンで位置推定を行うと大きな誤差を含んでしまう可能性がある。そこで、精度向上のためにセンサ個数を増やして計測する場合、計測誤差の影響で一つの交点を得ることができない。そのため、本研究ではインバージョン(逆解析処理)を用いることで位置推定を行った。具体的なインバージョン手法については4節で述べる。

3 バイブロを用いた計測実験

3.1 バイブロを用いた計測実験の概要

本実験では、バイブロを用いて実規模での計測実験を行った。バイブロはHDD工法に用いる重機に予め備わっている機能の一つであり、油圧を用いて重機からロッドを通してドリルビットに前後運動を生じさせるものである。任意波形の出力は行うことはできないが、非常に強力な弾性波の出力が可能であり、広範囲での位置推定が期待される。バイブロの本来の用途は、従来のHDD工法では困難であった礫混土のような堅い地盤や帯水砂層等に対しても、連続的な衝撃を加えることで、掘削を進めることが可能になるというものである。今回は、その際の前後運動によって生じる弾性波を利用して位置推定を試みる。図-3に実験時のシステム構成を示す。弾性波の計測には、ジオフォンを使用した。ジオフォンはムービングコイル型の速度計である。図-4は使用したジオフォンの感度に対する周波数特性を示したものであり、10Hz以上の周波数に対してフラットな周波数特性を示している事が読み取れる。また、図-5はバイブ

図-3 実験時のシステム構成

ロによって生じた弾性波のパワースペクトルを示したものである。主な周波数成分が 15Hz から 35Hz 程度に分布していることから、今回利用するジオフォンは計測に適していることが読み取れる。ジオフォンを用いて計測した波形は震源からの距離に応じて適宜増幅して記録した。実験時の土壌はほぼ単一の泥層であり、地表面のみ砂利層である。図-6 にジオフォンの配置図と震源を示す。震源は図中×印で示された深さ 1.52m の位置である。なお、この震源位置は従来の手法である電磁波法を用いて計測したものである。

図-4 ジオフォン感度の周波数特性

図-5 バイブロのパワースペクトル

図-6 ジオフォンの配置と震源位置

3.2 バイブロを用いた計測実験の結果

図-7 はバイibroによって生じた弾性波の計測波形を示したものである。上から順に(a)Ch2, (b)Ch6, (c)Ch17の計測波形を示している。なお、各計測波形の0秒のタイミングはCh2で弾性波の到達を検知したタイミングである。これは、2節計測原理で触れたように、弾性波の発生タイミングを検知することが困難であるためである。図-6より、Ch2に位置するセンサは震源から最も近い距離にあるセンサであり、このセンサに弾性波が到達したタイミングで全センサの計測を開始する。また、Ch6の計測波形は震源から最も遠いセンサによる計測結果を示したものであるが、十分大きなS/N比を保ったまま弾性波がセンサに到達していることが確認できる。Ch17はドリルビットの進行方向からずれた位置にあり、かつ震源-センサ間距離の大きいChを示したものであるが、Ch6と同様にバイibroによって生じた弾性波成分を十分に計測できている事が確認できる。以上より、バイibroによって生じさせた弾性波は非常に強力であり、今回行った実験領域であれば十分に弾性波が伝播している事が確認できる。しかしながら、図-7に示す計測波形は、実体波と表面波の混在した波形である。特に、バイibroは出力できる弾性波がやや低周波よりであることや出力が大きいことから表面波の影響を大きく受けてしまっていると考えられる。

以降で、各計測波形に対する表面波の影響について検証した。本実験では、従来の手法である電磁波法を用いて実際の震源位置を予め計測した。これを用いると実際の震源から各Chまでの震源-センサ間距離を計算することができる。図-8は、計算した震源-センサ間距離と各Chでの計測波形の正のピークの到達時間の関係をまとめたものである。縦軸方向に並んでいるプロットは、震源-センサ間距離が同じものであり、同一のChで計測したデータから抽出した各ピークタイムである。また、図中の各シンボルは計測波形のピーク毎に分けられたものである。ピーク検出を行う際には、高周波数成分による影響を避けるため200HzのLPFを適用した後にピーク検出を行った。なお、今回用いたLPFはFFTフィルタである。元波形にFFTを適用後、不要な周波数成分を除去し逆FFTを適用することで、必要な周波数成分を含んだ波形を得ることができる。ピーク検出の際には減衰等の影響で検出できないピークがあったため、そのようなピークに関してはプロットしていない。図中の直線は各ピークのプロット毎の近似直線であり、その傾きの逆数は各ピーク部分の弾性波速度を表す。図-9はピーク毎の弾性波の地中伝播速度を求め、Ch2における各ピークの到達時間との関係をまとめたものである。ここで、図-10は、Ch2における計測波形のウェーブレット変換による時間-周波数マップを示したものである。表面波は周波数が高い程伝播速度が低くなるという特

図-7 計測波形

図-8 各センサにおけるピーク到達時間

長¹⁰⁾を持っているが、表面波の影響が弱く計測波形の主要成分がドリルビットからの直達波であれば、各ピークで地中伝播速度に差はほとんど出ないと考えられる。しかしながら、図-9 より各ピークでの地中伝播速度は一定ではなく、また、図-10 と比較するとパイプロによる出力周波数の遷移傾向と強く一致している。以上より、

パイプロによる弾性波の計測波形後半部は表面波の影響を強く受けてしまっていると言える。次節では、本実験の計測結果を用いて三次元位置推定を試みるが、表面波の影響から波形後半部に関しては単純に相互相関等を用いた解析は行うことができない。そこで、各 Ch での第1ピークの時間差を取得することで位置推定を試みる。

図-9 各ピークの地中伝播速度

図-10 ウェーブレット変換

3.3 第1ピーク時間による到達時間差解析

3.2 節より、パイプロによって生じさせた弾性波には、計測波形の後半部に表面波の影響を強く受けてしまっていることが確認できた。そこで、各 Ch での計測波形の第1ピークの時間差を取ることで弾性波の到達時間差の解析を行った。各 Ch の第1ピークの検出時には3.2 節と同様に 200Hz の LPF 適用後にピーク検出を行った。なお、単純にピーク検出を行う場合第1ピークであるという判断が非常に困難であると考えられるが、本実験では震源の位置が予めわかっていることから、図-8 のように他 Ch との整合性を考慮することで検出したピークが第1ピークであるという判断は容易に行うことが可能である。この手法は、実際の計測時にもほぼ同様に利用できると予想される。実際の計測時に 1m 掘進する毎に計測を行う事を考えた場合、ドリルビット先端の位置は 4.1 節(2)項で詳しく示すが半径 1m 程度の範囲内に限る事が可能である。これに対し、ピークを一つ取り間違えるとパイプロの場合少なくとも到達時間に 0.04 秒程度の誤差、つまり距離にして 4m 程度の誤差が生じる事になり他 Ch との整合性が取れなくなる。このことから検出したピークは第1ピークでないという判断することが可能であると考えられる。表-2 に示すのが以上の手法により求められた各 Ch での計測波形の第1ピーク時間をまとめたものである。

横線で示される Ch では明確な第 1 ピークを得ることができなかった。4 節では表-2 で示すデータを用いて位置推定を試みる。

表-2 計測波形の第 1 ピーク到達時間

Ch	到達時間差(s)	Ch	到達時間差(s)
2	-0.05444	10	-0.01565
3	-0.04125	11	-0.04744
4	-0.03185	12	-0.03965
5	—	13	-0.02925
6	—	14	-0.01525
7	-0.05304	15	-0.03025
8	-0.03945	16	—
9	-0.02745	17	—

4 インバージョンによる位置推定

4.1 インバージョン手法

(1) インバージョンの概要

本研究では推定対象が地中のドリルビット位置であり、推定に利用する計測対象として地中を伝播する弾性波を用いる。従って、地中の層構造や岩石等の地盤中の不確定な要素の影響を強く受けてしまう。そのため、2 節の測定原理で示したように最小限のセンサ個数である 5 つのセンサのみで幾何学的な計算からドリルビットの位置推定を行うと推定結果に大きな誤差を含んでしまう。そこで、3 節の実験で計測した多数のセンサの計測結果に対して、インバージョンを適用することでドリルビットの位置推定を行った。以下にインバージョンによる位置推定手法の手順を示す。

本研究で用いるインバージョンでは、様々な震源位置と弾性波速度を仮定し(次項参照)、各仮定値からシミュレーションによって到達時間差を計算する。具体的な計算手法については 3 項で示すが、この到達時間差と実測値との合致度合いを比較し、最も合致度の高かった仮定値を推定結果とすることで位置推定を行う。位置推定の簡単な流れは以下の通りである。まず、震源位置を仮定し、各センサとの震源-センサ間距離を計算する。次に、2 節と同様に計測現場一帯で層モデルが単一であると考え、地盤中の弾性波速度を仮定することで震源から各センサまでの弾性波の到達時間を計算することができる。この結果と実測データとで比較を行い、仮定した震源、及び弾性波速度が実際の震源、速度とどの程度合致しているかの指標を計算する。この指標を、全仮定値に対して計算し、その値が最も大きくなった仮定位置がドリルビット位置の推定結果となる。

(2) 震源位置と弾性波速度の仮定

HDD 工法においては、重機から延ばしたロッドの前

進距離を計測することで、ある期間にドリルビットの先端がどの程度前進したかを知ることができる。そこで、本研究で用いるインバージョンにおいては、ドリルビット先端の移動前の位置が既知であり、そこから一定距離前進した場合にどの位置にドリルビットが移動したかを推定する。図-11 は HDD 工法における推定対象領域の絞り込みモデルを示したものである。上記の状況下では、ドリルビットの仮定位置は、元位置を中心とし、移動距離を半径とする球面上に絞り込むことができる。さらに、HDD 工法ではロッドの方向転換に制限があるため、球面の中でもドリルビット前方の領域に絞り込むことができる。本研究では、以上のようにドリルビットが存在し得る領域を絞り込んだ上でインバージョンによる位置推定を行った。図-11 中の部分球面が絞り込まれた推定対象領域の概形を示したものである。この領域内で以下の方法で震源位置、及び弾性波速度の仮定値を設定する。震源位置の仮定値は R_1 及び R_2 の 2 つのパラメータを用いて指定する。 R_1 はドリルビットの進行方向に対して仰角方向の角度であり、 R_2 は進行方向に対して回転方向角度である。本研究では各パラメータの領域を以下のように設定し、刻み幅はそれぞれ 1° で変化させた。

$$0^\circ \leq R_1 \leq 70^\circ, 0^\circ \leq R_2 < 360^\circ$$

合致度の計算を行う際には、上記のパラメータから仮定位置 (x_a, y_a, z_a) を算出して利用する。元位置を (x_0, y_0, z_0) 、移動距離を M とすると仮定位置はそれぞれ以下の式で表すことができる。

$$\begin{cases} x_a = x_0 + M \sin R_1 \sin R_2 \\ y_a = y_0 + M \cos R_1 \\ z_a = z_0 + M \sin R_1 \cos R_2 \end{cases} \quad \dots (4)$$

また、仮定速度 va の設定領域は十分広く取り、刻み幅は 10m/s で変化させた。本研究で行ったインバージョンでは、 R_1 、 R_2 、 va の全組み合わせに対して、次項で示す合致度の計算を行い各仮定値と実測値との合致度合いの最も高い仮定値を推定結果とした。

図-11 位置推定領域の絞り込みモデル

(3) 合致度の計算

図-12 は合致度計算のフローチャートを示したものである。以下、図-12 に沿って合致度計算手法を示す。図-13 は仮定値と実測値の偏差を計算する際の概念図を示したものである。図中の n は Ch を示しており、 a_{ij} 及び b_{ij} はそれぞれ Ch i と Ch j の仮定値から算出した到達時間差、及び実測値から算出した到達時間差を示している。なお、実際の計測時には地盤中の不確定要素の影響や減衰により第 1 ピークが得られない Ch も存在する。本研究においては、表一中の Ch 5, 6, 16, 17 が第 1 ピークの得られなかった Ch であり、位置推定にはこれらの Ch を除いた 12 個の Ch によって計測した波形の到達時間を利用した。

初めに、実測値に関して弾性波のセンサへの到達時間差を計算する。これは各 Ch の計測波形の正方向の第 1 ピークの時間差を取ったものであり、図-13 中の b_{ij} に相当するものである。この値は全仮定値における合致度の計算で利用する。

ここからの処理は全仮定値に対して行う処理である。最初に震源位置、及び弾性波速度を仮定する。これは 2 項で示した方法で行う。2 項と同様に仮定位置は (xa, ya, za) 、仮定速度は va で表記する。この仮定値を利用して震源から各センサまでの距離を計算する。Ch $i(i=1,2,3,\dots,17 \text{ ※}1,5,6,16,17 \text{ は除く})$ のセンサの位置を (xs_i, ys_i, zs_i) とすると震源-センサ(Ch i)間距離 L_i は以下の式(5)で表される。

$$L_i = \sqrt{(xs_i - xa)^2 + (ys_i - ya)^2 + (zs_i - za)^2} \quad \dots (5)$$

これと、仮定速度 va から Ch i までの弾性波の到達時間 T_i を式(6)で算出することができる。

$$T_i = \frac{L_i}{v_i} \quad \dots (6)$$

よって、Ch i と Ch j の到達時間差 a_{ij} は式(7)で表される。

$$a_{ij} = T_i - T_j \quad \dots (7)$$

よって、仮定値から求めた到達時間差と実測値の到達時間差の偏差は $a_{ij}-b_{ij}$ で与えられる。これを D_{ij} とし到達時間差の組み合わせの数を N とすると、平均 A 及び標準偏差 S はそれぞれ、以下の式(8)、(9)で表される。

$$A = \frac{\sum D_{ij}}{N} \quad \dots (8)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum D_{ij}^2}{N} - A^2} \quad \dots (9)$$

ここで、実測値と最も合致していると考えられるのは、平均、標準偏差の双方が 0 になる場合である。つまり、仮定データの合致度は平均が 0 に近く、また標準偏差が小さいほど大きくなるようにすればよい。そこで、

図-12 合致度計算のフローチャート

図-13 偏差計算の概念図

今回は求めた平均と標準偏差から正規分布曲線 $f(x)$ を描き、その $f(0)$ に対応する値を仮定データの合致度とした。

正規分布曲線 $f(x)$ は、以下のようになる。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi S^2}} \exp\left(-\frac{(x-A)^2}{2S^2}\right) \cdots (10)$$

よって、合致度は式(10)で算出される値である。

$$f(0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi S^2}} \exp\left(-\frac{A^2}{2S^2}\right) \cdots (11)$$

以上の方法で一つの仮定値に対する合致度を計算する。これを全仮定値に対して行い、最も合致度の高い仮定値を本手法の推定値とする。

なお、平均及び標準偏差算出の際に、(a)算出したすべての偏差を用いる場合と(b)突発的な計測誤差を取り除くために、偏差の絶対値の大きさが上位 30% のものを無視する場合の 2 種類の解析を行った。

4.2 三次元位置推定

3 節の実験で得られた実測データに 4.1 節で示したインバージョンを適用し、ドリルビットの三次元位置推定を試みた。センサ配置、及び震源位置は図-6 で示す通りであるが、本研究で用いるインバージョンでは移動前の元位置、及び移動距離が必要であるため、元位置を $x=0\text{m}$, $y=-0.8\text{m}$, $z=1.52\text{m}$ とし、移動距離を 2m とした。パイプロによる弾性波の計測波形から、(a)、(b)の各手法を用いて位置推定を行った結果、最も合致度の高かった仮定値を示す。

(a) 全計測データを用いた場合

$$x=0.36[\text{m}], y=0.23[\text{m}], z=-0.16[\text{m}], v=170[\text{m/s}]$$

$$(0.36[\text{m}]) (-0.97[\text{m}]) (-1.68[\text{m}])$$

(b) 上位 30% のデータを除いた場合

$$x=0.18[\text{m}], y=0.97[\text{m}], z=0.60[\text{m}], v=170[\text{m/s}]$$

$$(0.18[\text{m}]) (-0.23[\text{m}]) (-0.92[\text{m}])$$

また、図-14、図-15 は上記(a)、(b)における位置推定の結果として得られた各仮定位置の合致度を、弾性波速度が 170m/s の場合において輝度値表示したものである。図中の部分球面は 4.1 節(2)項で示した絞り込みによって得られた推定対象領域である。白い部分程仮定値と実測値との合致度が高い事を示している。また、図中の○印は実際の震源位置を示したものであり、×印は最良の合致度が得られた仮定位置を示している。(a)と(b)を比較すると、全計測データを用いた場合に比べ、偏差の大きいデータを除いた場合の方が、推定精度が向上している事が確認できる。

5 結言

本研究では、弾性波の入力手法としてパイプロを用いた実験を行い、その計測結果から震源位置の三次元位置推定を試みた。

図-14 パイプロによる位置推定(a)

図-15 パイプロによる位置推定(b)

本実験では、HDD 工法に用いる重機に予め備え付けられているパイプロを用いて生じさせた弾性波を、地表面に設置した複数のジオフォンを用いて計測した。今回の実験では、震源-センサ間距離は最大 10m 程度の範囲で実験を行ったが、パイプロによって入力された弾性波は設置した全てのセンサで十分に計測することができた。このことから、パイプロでは、非常に大きな弾性波を出力することが可能であり、センサの設置範囲を広くすることで、さらに広範囲での位置推定を行えることが期待できる。

また、実験によって得られた計測波形から到達時間差を取得し、インバージョンを用いて位置推定を行った。計測したデータから岩石等の地盤中の不明確な要素の影響を大きく受けている Ch を取り除くことができれば、位置推定を行える可能性があることがわかった。しかしながら、精度に関しては実用という観点では不十分であり、本研究で得られた結果では、偏差の大きいものを取

り除いた場合であっても0.9m程度の誤差を含んでいた。これは、従来の電磁波法の推定精度が0.1m程度に収まっていることと比較しても、決していいものとは言えない。そのため、本手法を実用的なものとするためには、今後の精度向上が必須であるが、解析手法の改善により推定精度の向上も見られたことから、パイプロによって生じさせた弾性波による位置推定を実現する可能性は十分に示すことができた。

今後の精度向上のための具体策の一つとしては、複数回の計測結果の利用が挙げられる。これは、地中の不確定要素に対する耐性を強くするためである。今回の実験では、1回の計測結果から位置推定を行っているが、センサ数の増加や同一地点での複数回計測を行う事で不確定要素の影響を受けにくいシステムを構築することができると考えられる。また、実際にHDD工法を施工する際には、ドリルビットが徐々に進行していくため、掘進に伴って計測を繰り返し行い、現在の位置に到達するまでに計測した複数の計測結果を統合することで、ドリルビットの進行と共に徐々に位置推定精度が向上していくようなシステムの構築が可能になると考えている。

参考文献

- 1) L. Tao, T. Takashi, T. Watanabe, and S. Motooka: Jpn. J. Appl. Phys. 38 (1999) 3148.
- 2) Y. Matsuo, L. Tao, T. Watanabe, and S. Motooka: Jpn. J. Appl. Phys. 41 (2002) 3539.
- 3) L. Tao and S. Motooka: Jpn. J. Appl. Phys. 46 (2007) 4589.
- 4) M. Moriya, T. Okamura, T. Sugimoto, T. Shirakawa, and K. Nakamura: Jpn. J. Appl. Phys. 42 (2003) 2929.
- 5) Ryo Toh and Seiichi Motooka: Jpn. J. Appl. Phys. 49 (2010) 07HC16
- 6) 河宜成、川村洋平、蒲原章裕、水谷幸一、大川浩一：表面波の最大減衰点を利用した埋設物検知、資源素材学会平成19年秋大会、名古屋、pp.271-272、2007
- 7) T. Sugimoto, N. Yoshida, and M. Okujima: Jpn. J. Appl. Phys. 38(1999) 3161.
- 8) T. Shirakawa and T. Sugimoto: Proc. Symp. Ultrasonic Electronics, 2005, p. 183.
- 9) Hiraku Kawasaki and Tsuneyoshi Sugimoto: Jpn. J. Appl. Phys. 48 (2009) 07GC08
- 10) T.レイ、T.C.ウォレス：地震学 上巻、古今書店

2011年3月8日