

報文 (音響トモグラフィ法による薬液注入の改良範囲の把握)

榊原淳一、石原謙治、山尾和行*

1. はじめに

地盤改良工法は地震時に大きな被害をもたらす地盤の液状化防止に有効な手法である。地盤改良工法の一つである薬液注入工法は施工が簡便・迅速であるため、都市部のシールド工事や地下構造物工事における、止水性の向上や強度増加による地盤の安定性確保を目的として広く普及している。しかし、薬液の地盤への浸透は地盤構造の影響を受けるため、注入後の改良範囲の確認が難しいという問題点がある¹⁾。この問題を解決するために、薬液の浸透部分の地盤比抵抗が小さくなることを利用して、物理探査手法の一つである比抵抗トモグラフィによる改良範囲の評価方法が提案、実証されている¹⁾。しかし、比抵抗トモグラフィは、トンネルの鋼製セグメントや鋼矢板などの電気伝導体が存在する場合には適用できない場合がある。鋼材の影響を受けない物理探査手法として弾性波探査があるが、薬液の浸透部分は微小歪みレベルでは強度は変化しないため、弾性波速度の変化から改良範囲の特定を行うことは難しいとされている²⁾。

一方、薬液の浸透部分は一軸圧縮強度が増加する。これは間隙水が薬液に置換されることにより土粒子間の粘着力が増加するためとされている²⁾。そこで、弾性波の振幅減衰がこの粘着力の影響を受けて変化すると考え、振幅減衰率による改良範囲の把握を実験的に検証した。実験には弊社が独自に開発した音響トモグラフィ法を用いた(図 1)。同手法は圧電素子型の発振器から疑似ランダム波と呼ばれる連続波を発振することで、周波数と振幅を正確に制御することができる。飽和した砂に薬液を注入し、同法を用いて注入前後の計測を行ったところ、注入した範囲で減衰率が大きくなることを確認した。これにより同法から得られた減衰率分布図が薬液注入工法の効果確認に有効であることが分かった。

2. 実験方法

(1)音響トモグラフィ法とは³⁾

音響トモグラフィ法は弾性波探査手法の1つであるが、発振波として疑似ランダム波を用いることで、①従来手

法よりも精度が高い、②弾性波速度だけではなく振幅減衰を計測できる、③周囲のノイズの影響を受けにくいという特長がある。疑似ランダム波はパルス圧縮と呼ばれる信号増幅方法の一つであり、特定の長さを持つ連続波であること、単一の周波数の正弦波をベースとして位相変換されていること、発振波と受信波の相関関数がこの周波数に依存した波長のパルス波になることが特徴である。図 2にこの例を示すが、発振波と受信波の相関関数計算後の波形から到達時間と到達波の受信振幅を計測することができる。

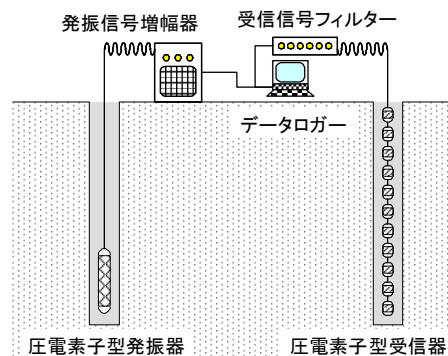


図 1 計測システム概念図

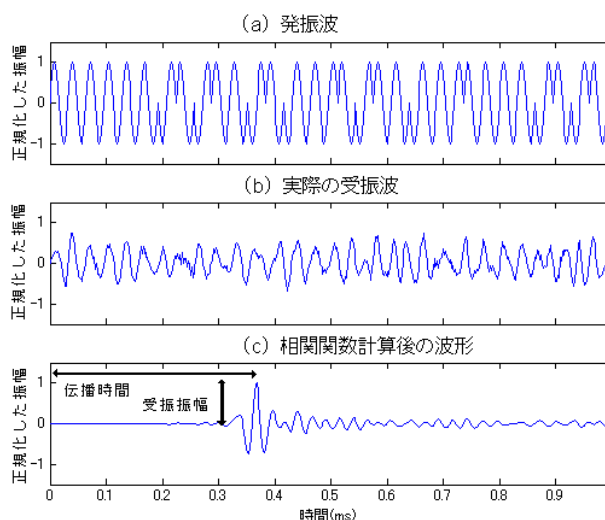


図 2 疑似ランダム波の例

*Junichi Sakakibara, Kenji, Ishihara, Kazuyuki Yamao. JFE シビル株式会社、〒111-0051 東京都台東区蔵前 2-17-4、JFE 蔵前ビル 5F

(2)振幅減衰率の計算

地盤中を伝播する弾性波の減衰は発振音圧 A_0 、受信音圧 A 、計測距離 d 、発振周波数 f 、減衰定数 α を用いて式(1)として表される。また、減衰定数 α は減衰率 Q^{-1} を用いて式(2)として表される。式(1)から減衰定数 α を求め、式(2)を変形した式(3)に代入し Q^{-1} を求める。距離減衰以外の減衰には密度の異なる物質を透過する際の透過減衰、散乱による散乱減衰、土粒子と間隙流体の間の粘性減衰があり、計算結果として得られる Q^{-1} はこれら全ての影響を受けている。しかし、透過減衰と散乱減衰の影響を取り除くことは難しいこと、また本報では比較的均一な地盤を取り扱うことからこの Q^{-1} を粘性減衰と見なすこととした。逆計算は特異値分解法を用いた速度トモグラフィ解析によって波線経路を決定し、その波線に沿って各セル毎の Q^{-1} を計算した。

$$A = \frac{1}{d} A_0 e^{-\alpha d} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{8.686\pi f}{VQ} \quad (2)$$

$$Q^{-1} = \frac{1}{8.686\pi} \frac{V}{f} \alpha \quad (3)$$

(3)実験装置

実験は縦、横、高さがそれぞれ 0.5m、0.4m、0.5m のアクリル容器に、飽和した霞ヶ浦砂 (ρ_s 2.719、 e_{min} 0.624、 e_{max} 0.992、最大粒径 0.85mm) を設置して行った。計測は薬液注入前、注入後(1カ所注入、6カ所注入)の3ケースで行い結果を比較した(表 1)。何れのケースも相対密度は 0.52 となるように調整した。薬液として東亜合成(株)のアロン SR を注射器により注入し、計測終了後に掘り起して位置と寸法を確認した。薬液のゲルタイムは 2分~3分となるように調整した。図 3、表 2 に実験装置のレイアウトと主な使用機器を、図 4、図 5 に実験状況と作成した改良体の写真を示す。なお、発振点と受信点の間隔と点数は共に 10mm、34点、発振周波数は 150kHz、容器内の水温はほぼ 18°C と一定であった。

3. 実験結果

受信波形の例としてケース 2 の発振深度-0.18m の受信記録を図 6 に示す。同図から、発振位置から見て改良体の陰になる受信位置の初期到達波の振幅が小さくなっていること、到達波の速度はほとんど変化がないことが分る。前章で述べた手法で行った解析結果を図 7、図 8 に示す。減衰率分布図からは、ケース 2 とケース 3 で改良体の位置と大きさに相当する高減衰率部(0.03 以上)が現れていることがわかる。これらの高減衰率部は深度方向には正確に一致しているが水平方向にはやや間延びしたような形になっている。これは計測レイアウトに起因する偽像であり孔間トモグラフィの解析では一般的な事象である。一方、速度分布図はほとんど変化がなく(1.67~1.69)、改良体の影響を受けていないことがわかる。このことは既往の研究結果²⁾と一致する。

表 1 計測ケース

ケース	状態	掘り出した改良体の状況
1	注入前	—
2	1カ所注入	直径 70mm の球体 1 個
3	6カ所注入	直径 70mm の連続した球体 6 個 全長は 380mm

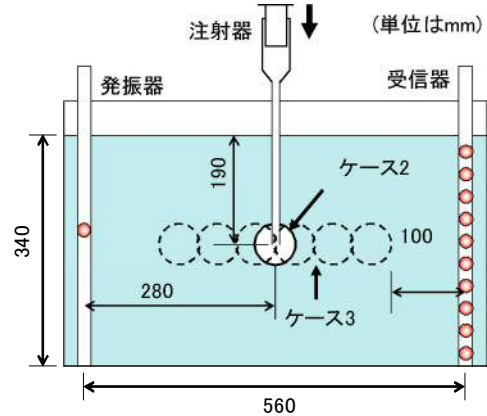


図 3 実験装置のレイアウト図

表 2 主な使用機器

名称	仕様
発振器	圧電素子型、Benthos 社製、外径 約 15mm、長さ 約 20mm、使用可能周波数帯域、10Hz~150kHz(実績)
受信器	圧電素子型、フジセラミックス製、外径 約 10mm、最小センサー間隔 10mm、センサー数 12 個、使用可能周波数帯域 10kHz~200kHz(実績)
増幅器	出力電圧 50V(150kHz 時)、使用可能帯域 1Hz~200kHz、電源 AC100V、消費電力 30W
信号フィルター	ゲイン 1 倍~100 倍、使用可能周波数帯域 5kHz~200kHz、電源 DC+12V
データロガー	入力 4ch、出力 1ch、AD 変換速度 1MHz/チャンネル、DA 変換速度 2MHz、入力分解能 14bit



図 4 実験状況



図 5 作成した改良体(左 ケース 2、右 ケース 3)

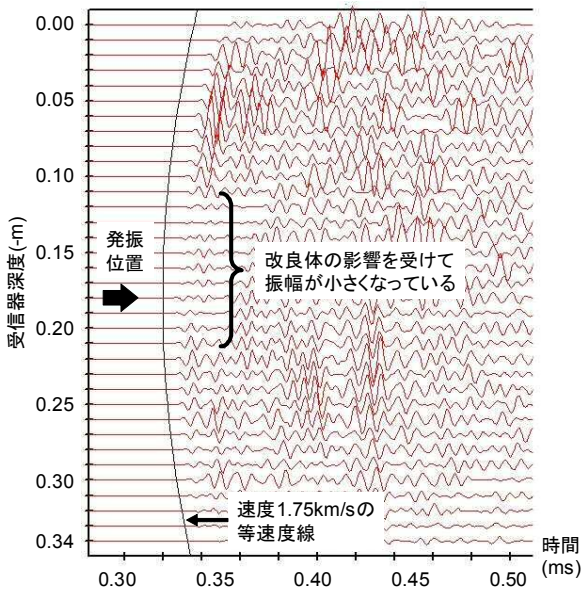


図 6 受信記録の例(ケース 2、発振深度-0.18m)

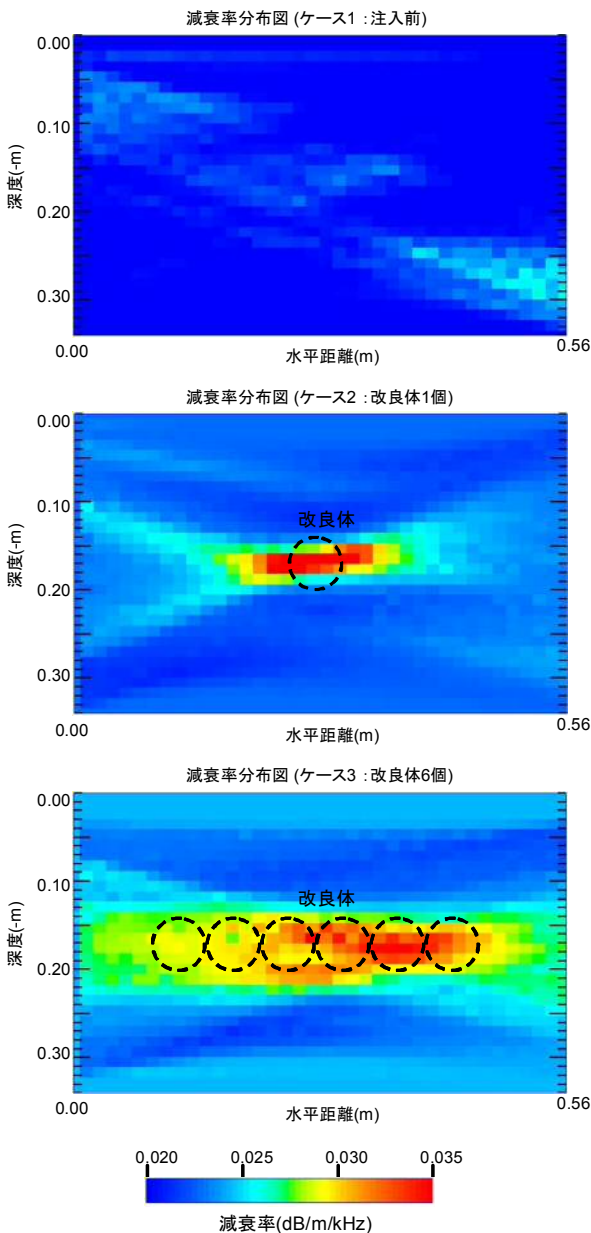


図 7 解析結果(減衰率分布図)

4. 結論

本実験により、音響トモグラフィ法により得られた減衰率分布が薬液注入工法の改良範囲の把握に適用可能であることを実証した。

謝辞：本実験を行うにあたり協立基礎(株)の望月氏のご協力とご助言を戴いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献：

- 1) 小峯秀雄、後藤和生：現場試験による比抵抗トモグラフィを利用した薬液注入の改良範囲評価方法の実証、土木学会論文集、No.603/III-44、129-138、1998
- 2) 山崎浩之、善 功企、河村建輔：溶液型薬液注入工法の液化対策への適用、港湾空港技術研究所報告、Vol.41、No.2、119-152、2002
- 3) 榎原淳一、毛利栄征、山本督夫：高周波数の弾性波の速度と減衰率を用いた模型土槽内部の可視化手法の開発、土木学会論文集C Vol. 67、No.3、310-318、2011

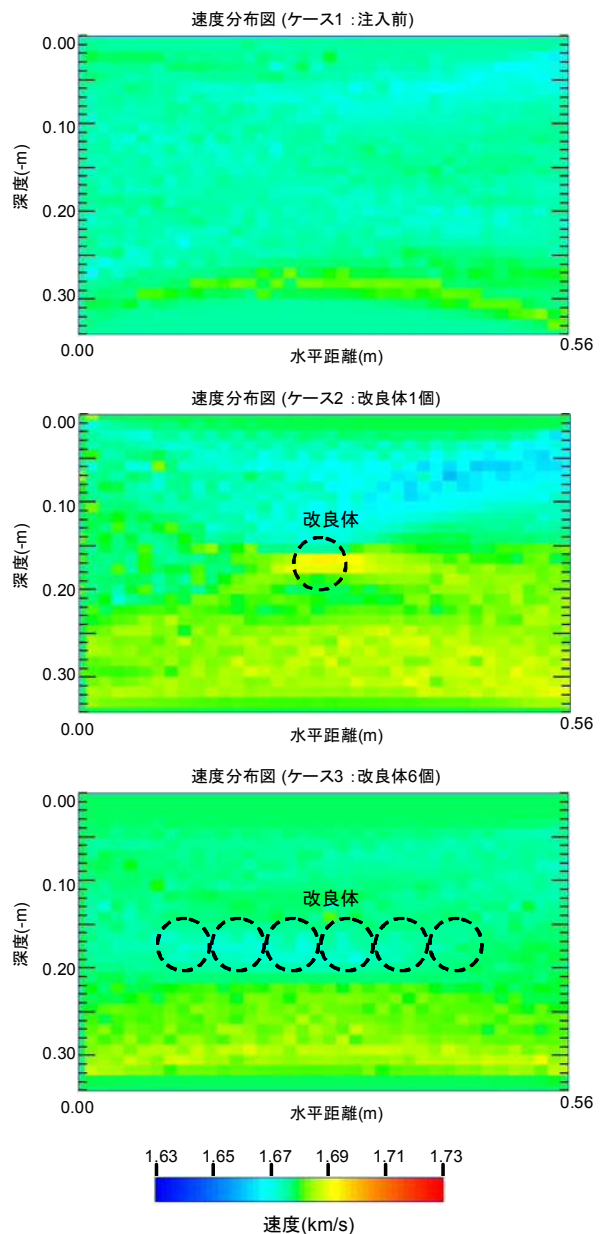


図 8 解析結果(速度分布図)