

# 弾性波の振幅減衰を用いた地盤改良範囲の確認に関する実験的研究

榊原淳一\* (JFE シビル)

## An experimental study on verifying a soil improved area by P-wave amplitude tomography

Junichi Sakakibara\* (JFE Civil Engineering & Construction)

**Abstract:** P-wave amplitude tomography is proposed for the purpose of verifying a soil improved area by chemical grouting. Verification experiment results by using a small tank which has a sand gel injected in the middle show that a highly attenuated area agrees with the area where the sand gel is injected.

### 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を目的として広く普及している。しかし、注入された薬液は土粒子の粒径や土粒子間の間隙の影響を受け、浸透しやすい部分に選択的に浸透するため、注入範囲の確認が必要となる<sup>1)</sup>。注入範囲を非破壊で確認する方法として比抵抗トモグラフィによる注入範囲の評価方法が提案、実証されている<sup>1)</sup>。これは薬液の注入部分の比抵抗が小さくなることを利用している。一方、弾性波による注入範囲の確認は難しいとされてきた。これは薬液の浸透部分は微少歪みレベルでは強度が変化しないため、弾性波速度はほとんど変化しないことによる<sup>2)</sup>。しかし、薬液の浸透部分は一軸圧縮強度が増加することが知られている<sup>2)</sup>。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。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。実験には筆者らが独自に開発した音響トモグラフィ法を用いた<sup>3)</sup>(Fig. 1)。飽和した砂を設置した模型土槽の内部に薬液を注入し、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、速度は変化しないことを確認した。さらに、結果の妥当性を検証するために数値シミュレーションによる比較検討を行い、計算結果が計測結果とよく一致することを確認した。以上のことから同法で得られた減衰率分布図が薬液注入範囲の確認に有効であることがわかった。

### 2. 実験方法

(1)音響トモグラフィ法とは

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ノイズ比を向上させる手法の一つであり、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。Fig. 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。

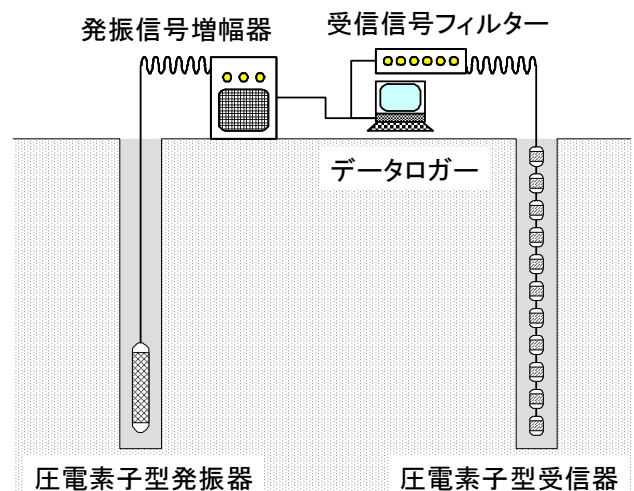


Fig. 1 音響トモグラフィ法の概念図

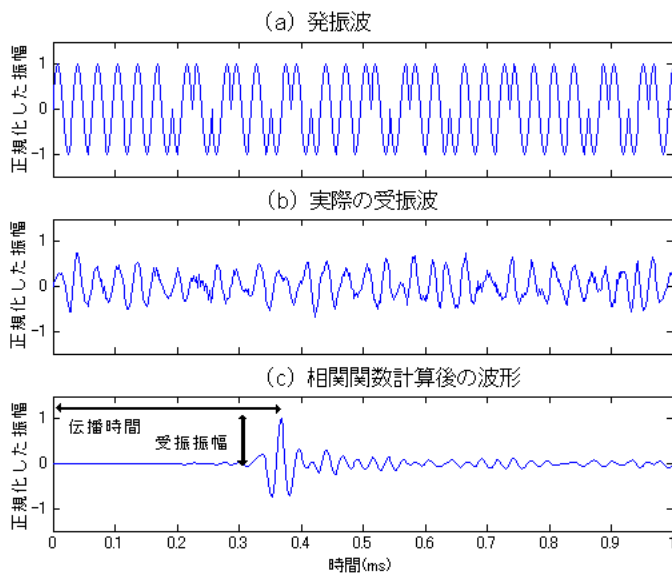


Fig. 2 疑似ランダム波の例

### (2) 振幅減衰率の計算

地盤中を伝播する弾性波の振幅(音圧)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  $\alpha$  を用いて式(1)として表される. また, 減衰定数  $\alpha$  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  $\alpha$  を求め, 式(2)を変形した式(3)に代入し  $Q^{-1}$  を求める<sup>4)</sup>. 計測結果から得られる減衰率  $Q^{-1}$  は土粒子と間隙流体の間の粘性減衰に加えて透過減衰と散乱減衰の影響を受けているため, 厳密にはこれらの影響を取り除く必要がある. しかし, 本研究で行った実験では密度の変化が少ない均一な地盤を用いたことから透過減衰と散乱減衰の影響は小さいと考え, この計測結果から得られた  $Q^{-1}$  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.

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

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

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

### (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 ( $\rho_s$  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(Table 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. Fig. 3, Table 2 に実験装置のレイアウトと主な使用機器を, Fig. 4, Fig. 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各点数は共に 10mm, 34点, 発振周波数は 150kHz であった. 容器内の水温は実験期間を通じてほぼ 18°C と一定であった.

Table. 1 実験ケース.

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

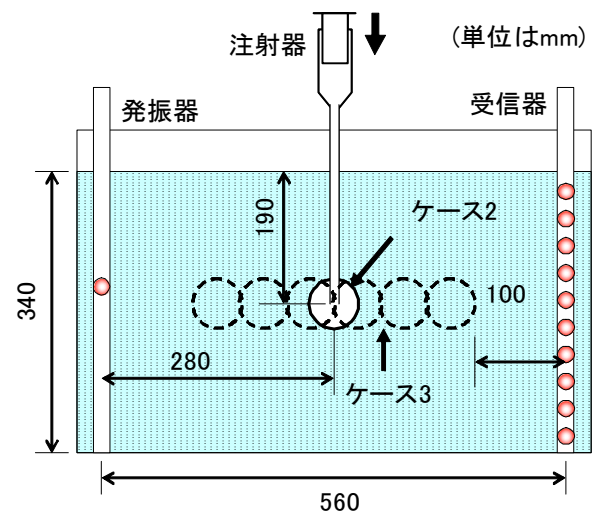


Fig. 3 実験装置のレイアウト(断面図)

Table. 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, フジセラムックス製, 外径 約 10mm, 最小センサー間隔 10mm, 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/ch, DA 変換速度 2MHz, 入力分解能 14bit.

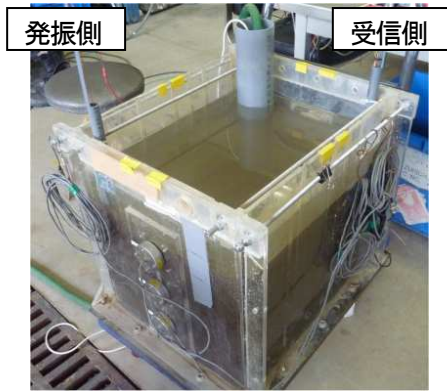


Fig. 4 実験の状況



Fig. 5 作成した改良体(左 ケース2, 右 ケース3)

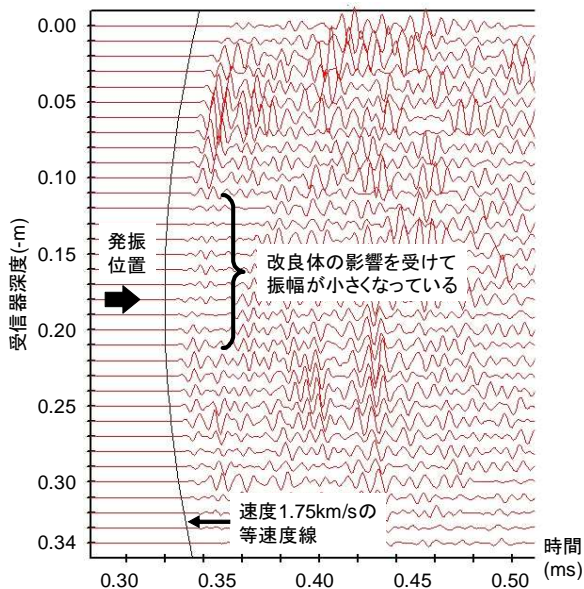


Fig. 6 受信記録の例(ケース2, 発振深度-0.18m)

### 3. 実験結果

受信波形の例としてケース2の発振位置 -0.18m の受信記録を Fig. 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、一方で到達速度は他の受振位置とほとんど変化がないことが分る。これらの受信波形記録から読み取った初期到達波の到達時間と振幅を用いて、前章で述べた手法で解析を行った。各ケースの解析結果を減衰率分布図、速度分布図に分けてそれぞれ Fig.7, Fig. 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。注入してい

ない部分の減衰率がケース1<ケース2<ケース3となっているのは、逆計算の初期値としてデータの平均値を用いていることが理由と考えられる。一方、速度分布図はケース1からケース3まで大きな変化がなく(1.67km/s~1.69km/s)、改良体の影響を受けていないことがわかる。これらの結果は、「葉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はほとんど変化しないが、粘着力が増加するために一軸圧縮強度は増加する」という既往の研究結果<sup>2)</sup>と一致する。解析結果の検証を行うためにケース2をモデルとして行った数値計算結果を Fig. 9 に示す。計算結果は Fig. 7, Fig. 8 のケース2の結果と良く一致しており解析結果が妥当であることがわかった。

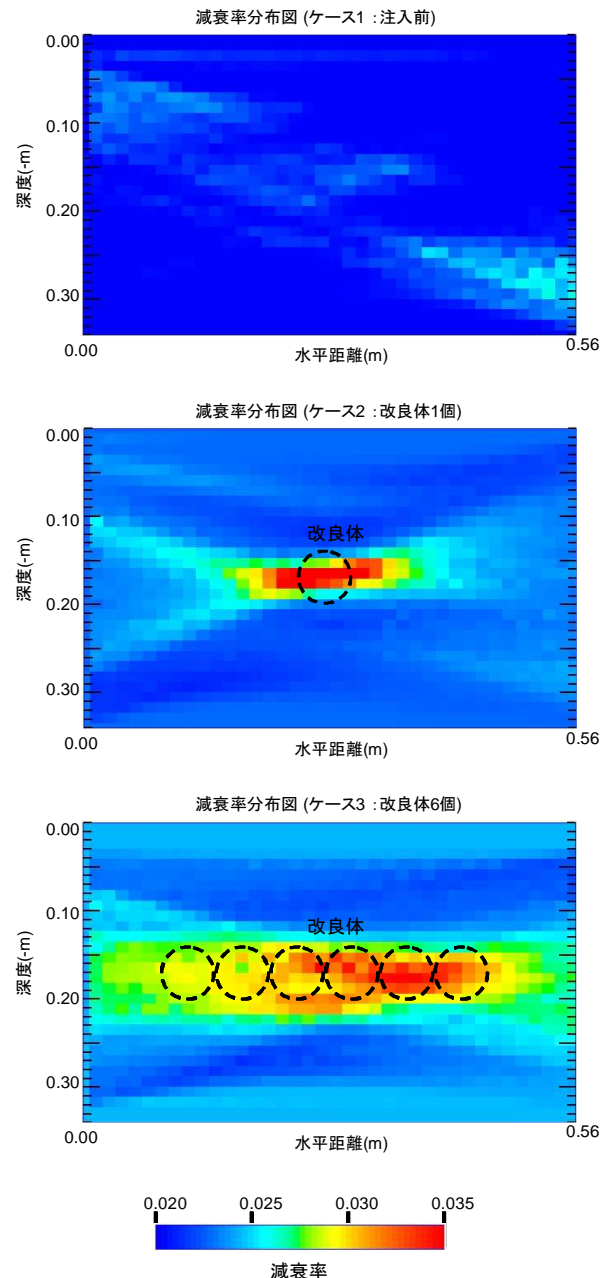


Fig. 7 解析結果(減衰率分布図)

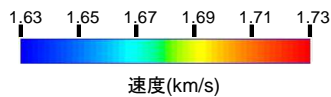
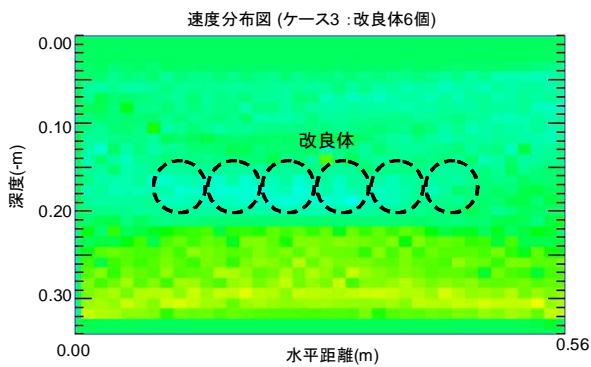
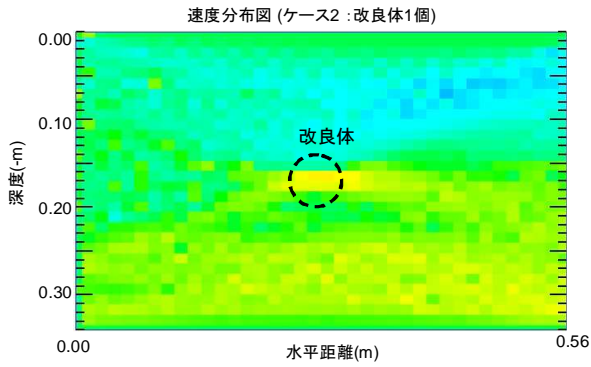
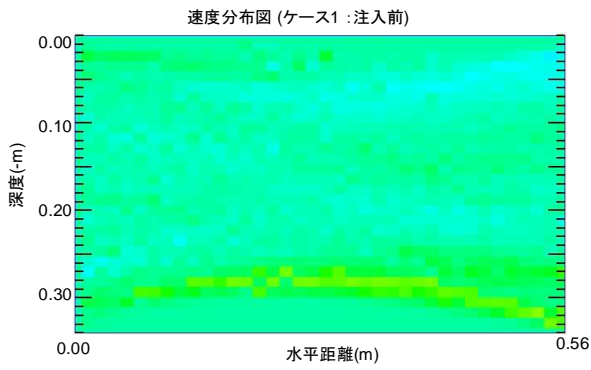


Fig. 8 解析結果(速度分布図)

#### 4. 結論

音響トモグラフィ法による薬液注入範囲の把握を目的として実施した模型土槽実験の結果から、注入した範囲で減衰率が大きくなることを確認した。これにより同法で得られる減衰率分布図が薬液注入範囲の確認に有効であることがわかった。また、解析結果の検証のために実施した数値計算の結果もこれと良い一致を示し、実験結果が妥当であることがわかった。

#### 謝辞

本実験を行うにあたり JFE シビル(株)の石原氏、山尾氏、共立基礎(株)の望月氏のご協力を戴いた。ここに感謝の意を表します。

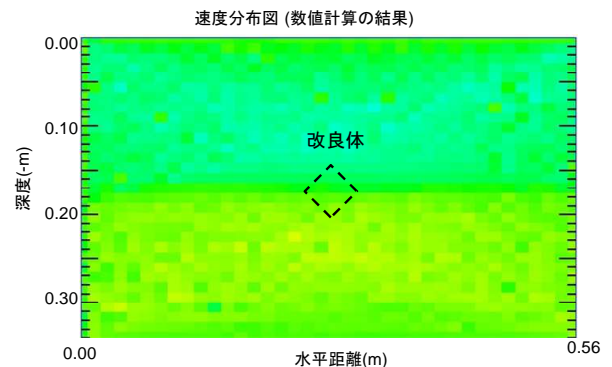
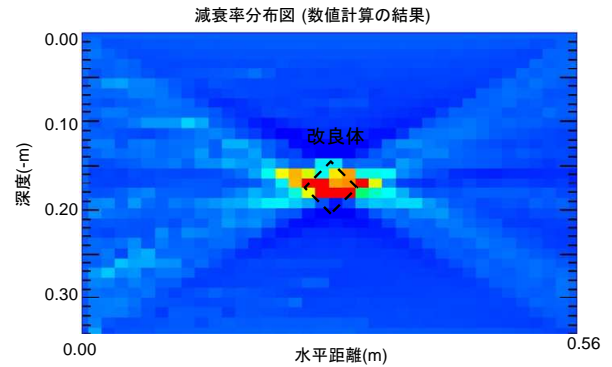
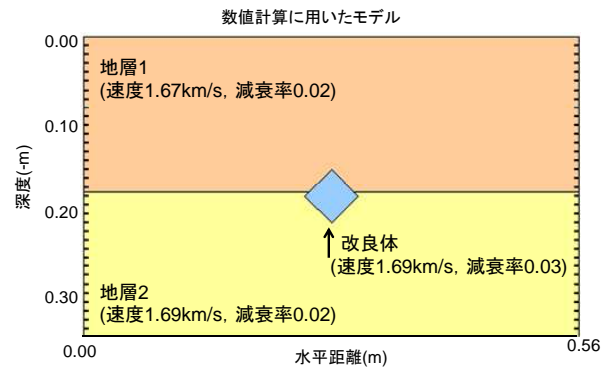


Fig. 9 数値計算の結果(減衰率と速度のインデックスは Fig. 7 と Fig. 8 と同じ)

#### 参考文献

- 1) 小峯秀雄, 後藤和生 (1998) : 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, **603**, III-44, 129-138.
- 2) 山崎浩之, 善 功企, 河村建輔(2002) : 溶液型薬液注入工法の液状化対策への適用, 港湾空港技術研究所報告, **41**, No.2, 119-152.
- 3) 榑原淳一, 毛利栄征, 山本督夫(2011) : 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, **67**, No.3, 310-318.
- 4) Johnston, D. H. and Toksoz, M. N.(1981) : Definition and Terminology, Seismic Wave Attenuation, Geophysics Reprint Series, **2**, 1-5.