

## P波の振幅減衰を利用した薬液改良地盤のリアルタイム可視化

○山下航洋<sup>1</sup>・堤彩人<sup>1</sup>・山本敦<sup>1</sup>・榎原淳一<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>五洋建設株式会社・<sup>2</sup>JFEシビル株式会社

### 1. はじめに

薬液注入による地盤改良は既設構造物直下の液状化対策を中心に広く普及している。本研究は、薬液注入による地盤改良に対して、注入時の薬液浸透状況の可視化を試みるものである。筆者らは薬液注入による地盤改良範囲をP波の振幅減衰特性によって把握する研究について取り組んでいる<sup>1</sup>が、この研究の可視化方法は固結した地盤の粘着力の変化を可視化するもの<sup>2</sup>であり、未固結の地盤に対しては適用できないと考えられた。そこで、薬液の練混ぜ水としてマイクロバブル（以下、MB）水を使用することとした。MB水を地中に注入すると地中を伝播する音を減衰させることが知られており<sup>3</sup>、その造影効果に期待した。この効果を確認するために注入模型実験を検討した。ところでMB水それ自体には地盤を不飽和し液状化対策効果があることが知られている<sup>4</sup>が、MB水が薬液改良土の品質評価として使用される一軸圧縮強さ、あるいは出来形に影響する浸透特性やゲルタイム（以下、GT）に影響することがないか、水道水によって練り混ぜた薬液と比較することで確認した。浸透状況を把握するにあたって、測定・解析に時間がかかるトモグラフィ測定を行わず、図1に示すように振幅減衰の起きた波線経路に着目することで簡易的な出来形推定が可能か検討した。

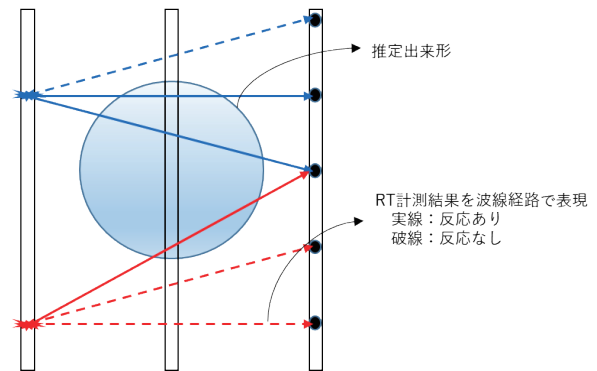


図1 実験コンセプト

### 2. 注入材料

薬液にはエコシリカⅢを使用した<sup>5</sup>。薬液は、主材、硬化材、反応剤、水の4種の材料を所定の配合で混合して作製する。これらの内、体積比で約8割を占める水の代わりに、MB水を使用することでMB混じりの薬液を作製した。MB水は株式会社丸八ポンプ製のMBT-203を使用して作製した。ポンプ運転による熱でMBの溶解度を低下させないため、MB作製時には、保冷剤を使用して水温が20℃程度を維持するよう留意した。また、薬液のシリカ濃度は7%とした。

本ポンプによって作製されたMB水は100 μm以下の気泡を含み、作製後は時間の経過とともに粒径の大きいバブルから消散する。図2に装置から汲上げ直後のMB水と汲上げから10分経過したMB水を並べた写真を示す。実験に先立って水槽にMB水を満たして音波計測を行ったところ、目視確認できる白濁が収束した後も1時間程度、振幅減衰効果が見られたことから振幅減衰効果を持つ粒径の気泡は作製後1時間残存していることが分かった。一方で50~150nm程度の粒径のウルトラファインバブル（ナノクス製。以下UFB）を使用して同様の実験を行ったところ振幅減衰効果が見られなかったことから、UFBでは粒径が小さ過ぎることが分かった。

MB水と水道水の粘度の計測結果を表1に示す。両者を比較したところ大きな差がなく、MB水の使用によって浸透性に影

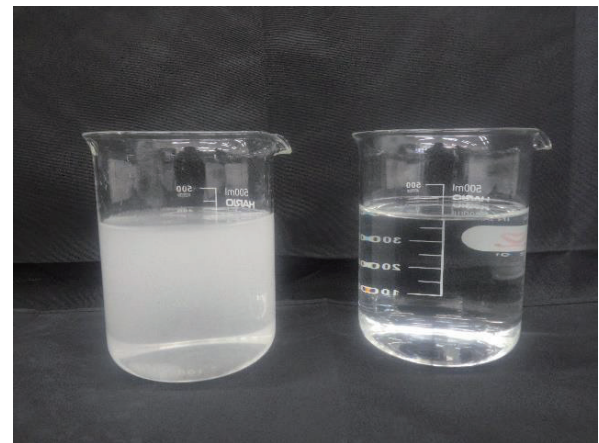


図2 汲み上げ直後のMB水と10分経過後のMB水の観察結果

表1 粘度計測結果

	粘度
水道水	0.97 [mPa・s]
MB水	0.92 [mPa・s]

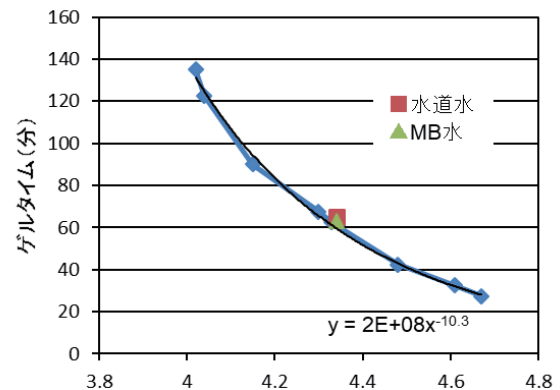


表2 一軸圧縮試験結果

響が出ないことを確認した。

水道水でGT試験を実施し、pHと薬液の固化時間の関係を確認した結果を図3に青線で、pHに応じたGT変化の近似式を黒線で示した。後述の注入模型実験における注入時間に合わせて目標GTが60分となるようpH4.34、室温25°Cの実験条件の下、水道水を使用した薬液とMB水を使用した薬液の固化時間を比較した。試験の結果、水道水で65分、MB水で63分の固化時間となり、MBの有無による有意な差は見られなかった。結果を図3のグラフ上に赤と緑でプロットした。

図3 GT試験結果

		$\sigma_{1A}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\rho_+$ [g/cm <sup>3</sup> ]			$\sigma_{1A}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\rho_+$ [g/cm <sup>3</sup> ]
水道水	No. 1	214.6	1.986	MB水	No. 1	237.4	1.980
	No. 2	226.1	1.998		No. 2	231.7	1.985
	No. 3	260.7	2.004		No. 3	243.7	1.998
	No. 4	244.8	2.002		No. 4	245.4	1.998
	平均	236.6	1.998		平均	239.6	1.990

次にMB水、水道水を使用した薬液により改良土の円筒供試体をそれぞれ作製し、材齢14日で一軸圧縮試験を実施した。試験には東北6号珪砂（土粒子密度2.661g/cm<sup>3</sup>、最小乾燥密度1.401g/cm<sup>3</sup>、最大乾燥密度1.703g/cm<sup>3</sup>）を使用した。供試体は相対密度Dr=60%を目標に設定して各4本作製した。一軸圧縮試験の結果は表2に示すとおりで、MBの有無による有意な差は見られなかった。

以上の実験結果より、MB水は改良土の品質に影響を及ぼさないことが分かった。

### 3. 注入模型実験

実施工では、図4の左図に示すように、正方形に配置された注入外管のうち任意の注入外管を探查孔として用いることを想定している。そこで本実験では図4の右図に示す改良体中央と側面を通過する2側線の計測を行った。また、実施工を模した模型実験を実施するため図5に示すような土槽、治具を作製して注入、計測を行った。内壁はゴムシートで覆うことで土槽を伝播する音波の反射を防止した。薬液注入に先立って真空脱気・二酸化炭素置換した後、土槽下部から脱気水を注入して地盤全体を飽和させた。発振孔には下から順番にch1からch5まで等間隔で発振器を設置した。受信孔は注入孔を通過する断面と、改良体の外周をかすめる断面ができるように2孔設けて、こちらも発振孔と同様に下からch1からch5まで順番に受信機を設置した。図5にはP波が通過すると想定される波線経路を矢印で模式的に示した。

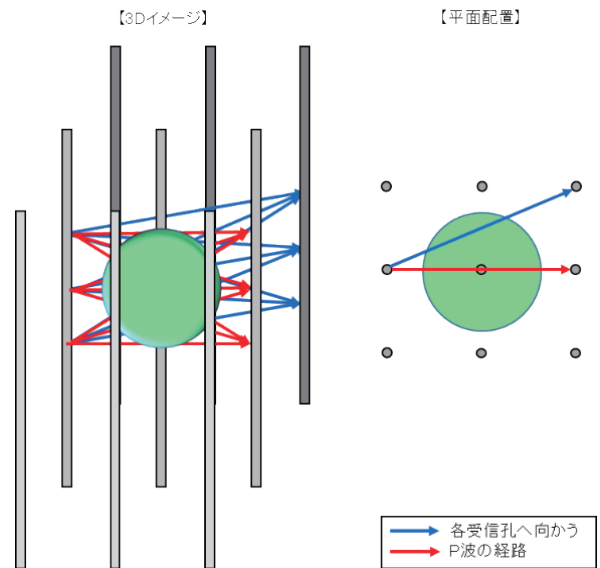


図4 実施工での探查概念図

注入模型実験を表3に示す4ケース実施した。ケース1とケース2ではMB水と水道水の浸透特性の比較、MB水による振幅減衰効果の確認を目的とした。ケース3とケース4は施工不良が発生した場合に、振幅減衰でそれを捉えることが可能か確認することを目的とした。ケース3、ケース4の概念図を図6に示す。ケース3ではフィルムにより水平に広がるようにし、ケース4ではGTを注入時間より長くすることで、薬液がただちに固結せず重力で下方に広がるようにした。薬液の浸透範囲を変えることで、ケース2との各波線経路の反応の差異を出すことを意図している。

ケース1、ケース2の注入出来形の比較を図7、図8に示す。ケース1では配合に使用したpH計の不調によって土中GTが安定せず、土槽の下部から薬液が一部流出した。ここでは流出の影響の少ない改良体の上半分の体積を比較して考察した。図7、図8に計測範囲を赤で示す。体積はkeyence製3Dスキャナ(LJ-X8900)で取り込んだ点群データを点群処理ソフト(Trend Point ver.8)で処理することで計

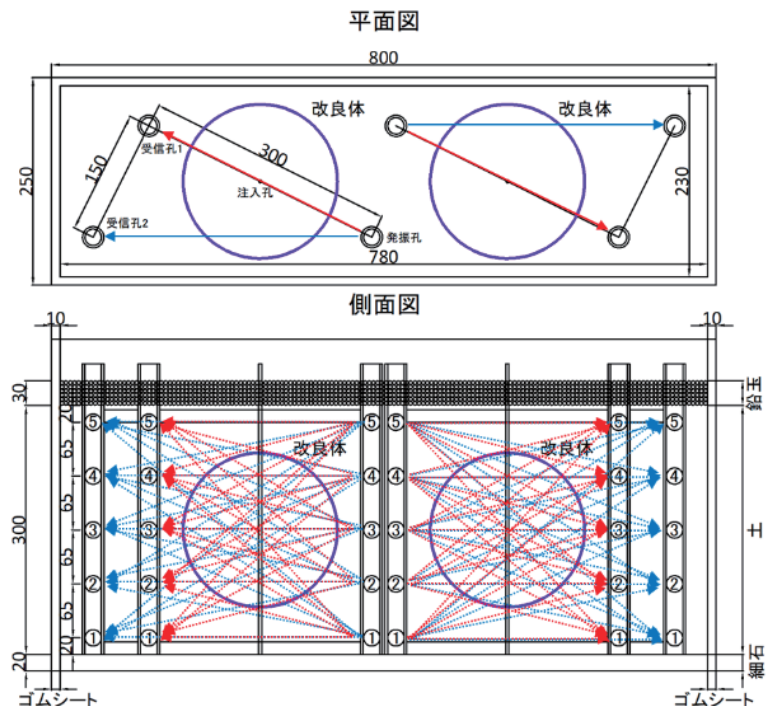


図5 土槽および注入・計測治具構造図

測した。水平方向に最大径となる高さから上部の体積を比較すると、水道水で1,472cm<sup>3</sup>、MB水で1,509cm<sup>3</sup>となる。注入量から想定される改良体積の半分は1,688 cm<sup>3</sup>であり、体積比は水道水で87.2%、MB水で89.4%となり、両者の浸透特性に大きな違いはないと考えられる。

未固結時のMB水の造影剤としての効果を確認するため、ケース1、ケース2のうち注入口付近を伝播すると考えられる発振孔のch3から発振し、受信孔1のch3で受信した音波の結果を図9に示す。同図からMB水では水道水よりも減衰開始が早く、減衰量も大きくなる事が分かる。

表 3 注入模型実験ケース一覧

Case	作液水	注入時間 (分)	GT (分)	地盤	飽和方法
1	水道水	60 (2回作液して30分 で打ち継ぎ)	60	6号 珪砂	真空脱気・二酸化炭素置換、 底部より脱気水注入
2	MB水			6号 珪砂   フィルム	
3		80	6号 珪砂		
4	6号 珪砂				

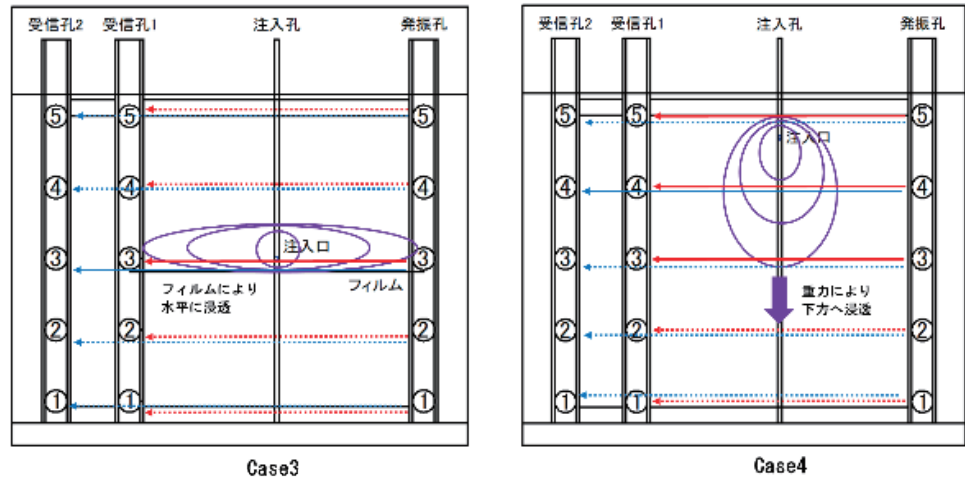


図 6 ケース3, 4実験概念図

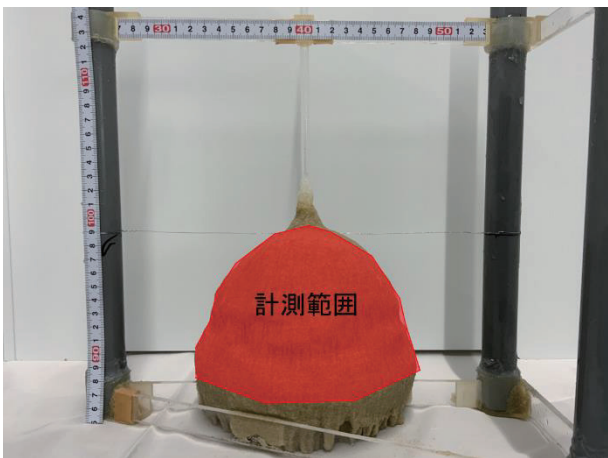


図 7 改良体出来形写真 (ケース1)

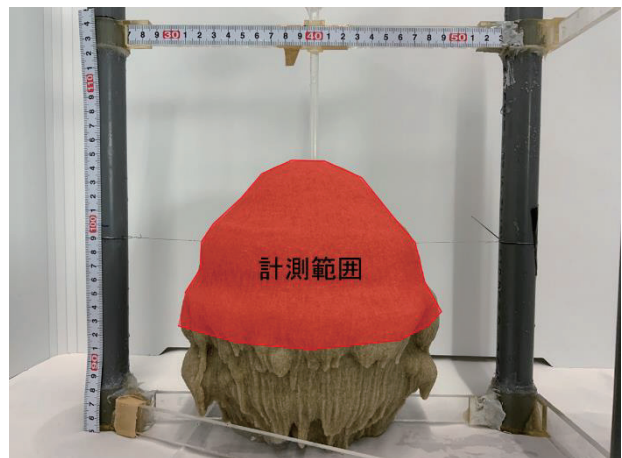


図 8 改良体出来形写真 (ケース2)

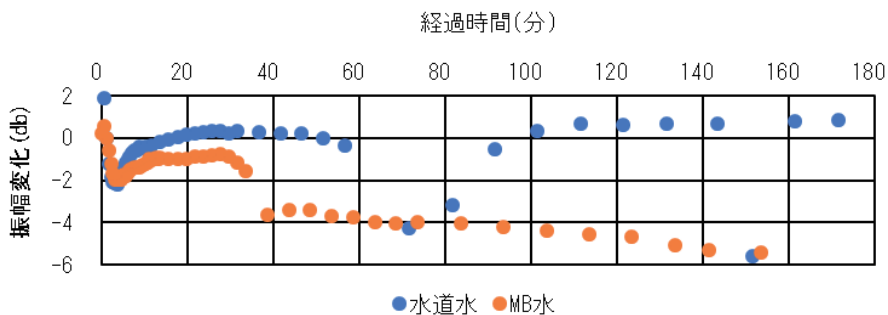


図 9 水道水とMB水の経時変化比較

各ケースに対して発振5ch、受信10chの50経路について測定結果を得た。MB水で作液したケース2~4の3ケースについて、振幅が1db以上減衰した波線経路<sup>9)</sup>を順次着色して、経時変化を示すと図10のようになる。ケース2、ケース4では薬液の浸透範囲に合わせて影響を受けた波線が増加していることが分かる。本実験では探査孔を鉛直に設置し鉛直方向の断面を計測しているため、ケース4では概ね改良範囲の広がり一致した結果を得られている。一方で、水平方向の断面で出来形を推定する必要のあるケース3では十分に一致しなかった。固結後に取り出したケース3、ケース4の出来形を図11、図12に示す。ケース3では薬液がフィルムと注入管の隙間から下部に流出していることも、振幅減衰からの出来形推定が困難となった原因の一つとして考えられる。

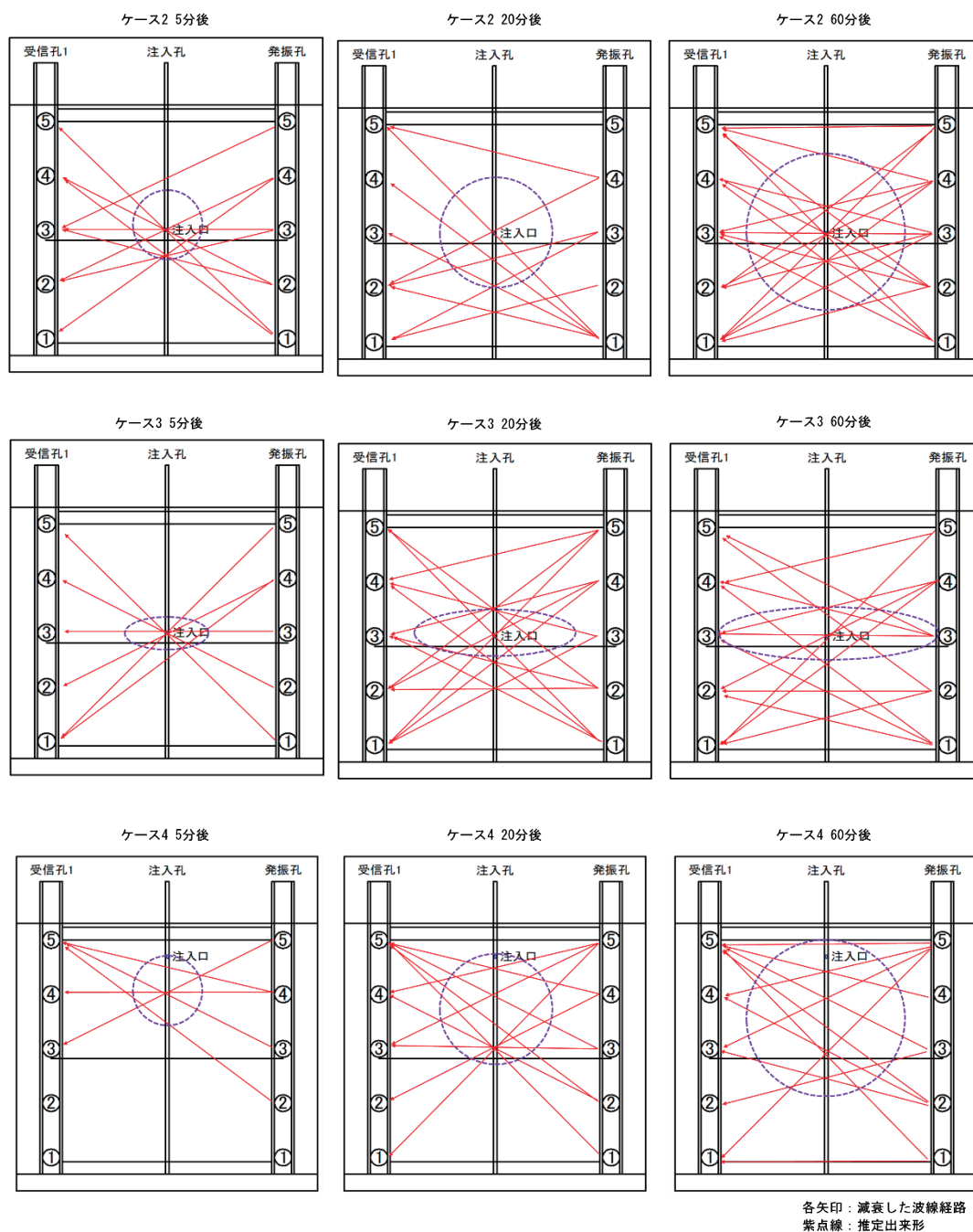


図 10 反応した波線経路の経時変化



図 11 改良体出来形写真 (ケース3)



図 12 改良体出来形写真 (ケース4)

より定量的に判断するために波線経路上の薬液量と振幅減衰量について考える。図 13 にケース2で改良体が真球状に広がった場合の推定の改良径と注入時間の関係を示した。改良径は注入量の3乗根で増加するため、注入初期に改良径が急激に増大する。従って、改良径の増大に伴う振幅減衰の変化は注入初期に顕著にみられることが考えられた。図 14 に示すように改良体が真球状に広がると仮定することで、各計測時点において波線経路上での薬液量が分かる。すべての波線の振幅減衰量と波線経路上の推定薬液量をまとめてプロットしたものを図 15 に示す。同図から波線経路上の薬液量が多いほど振幅減衰量も大きくなっていることが分かる。しかし、決定係数は大きいとは言えない。そこで、個別の波線経路に着目した。これを図 16 と図 17 に示す。図 16 はほぼ直線に近く決定係数が大きくなるが、図 17 は揺動しており決定係数も小さい。この原因として、測定誤差の可能性と薬液が局所的には真円状に浸透していない可能性の2つが考えられる。波線経路を用いた定量的な把握にはさらなる工夫が必要と考えられる。

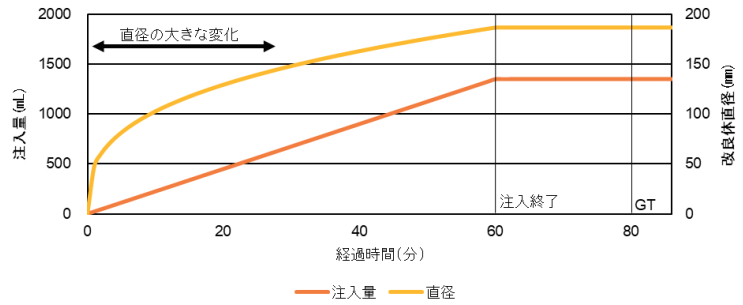


図 13 注入時間と改良径の関係

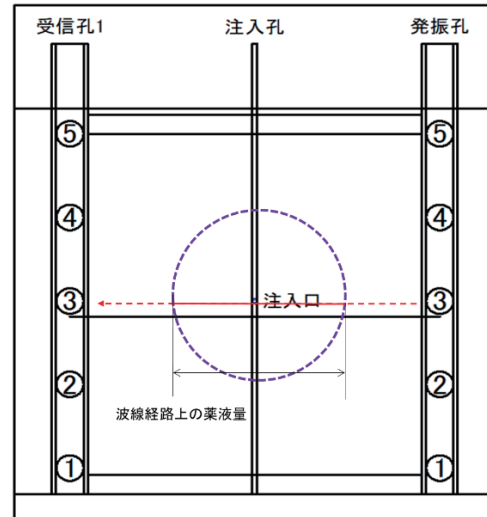


図 14 波線経路上の薬液量の推定

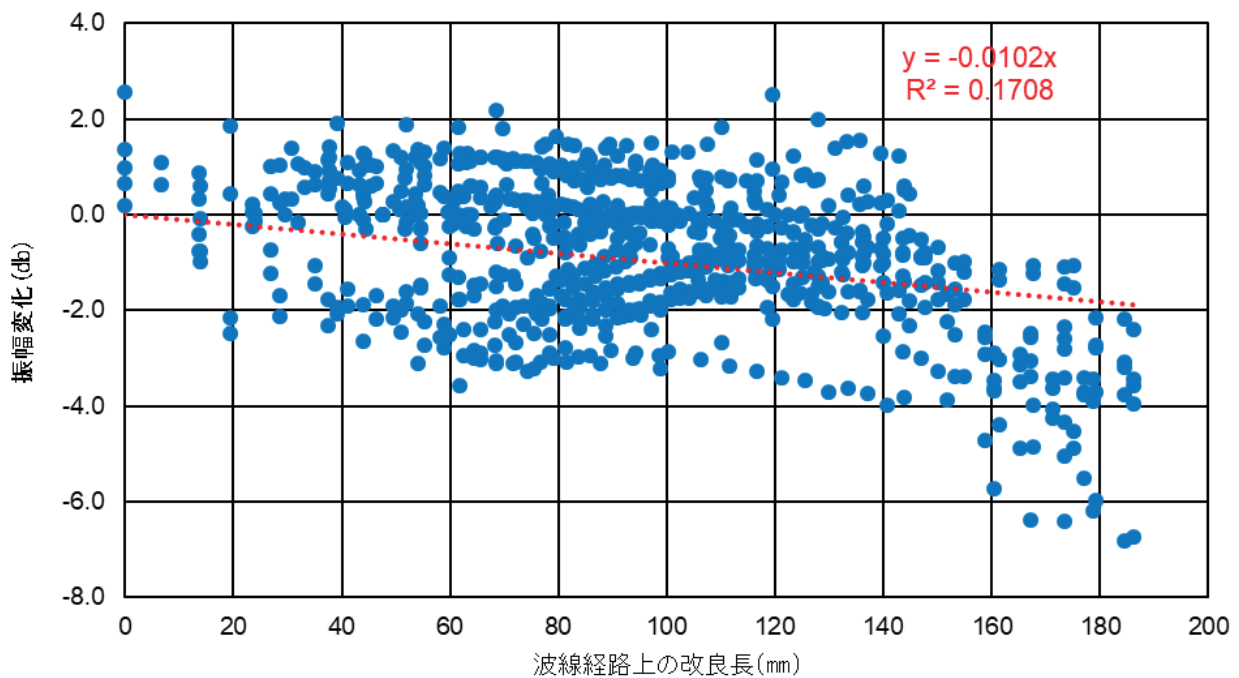


図 15 振幅減衰量と薬液量の関係

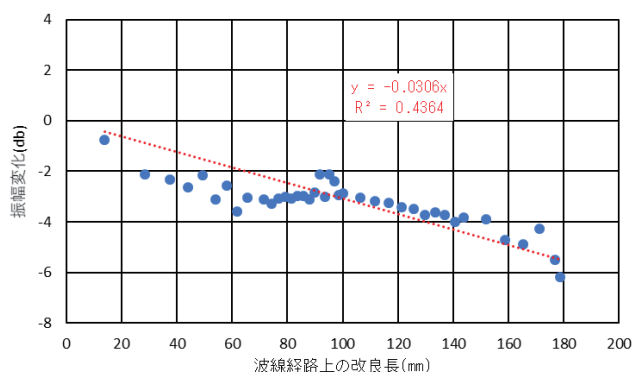


図 16 発振ch1→受信孔1ch4の振幅減衰

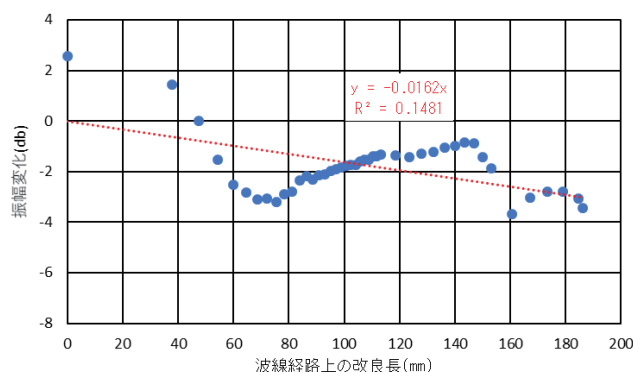


図 17 発振ch4→受信孔1ch2の振幅減衰

#### 4. まとめ

以上の実験結果より以下のことが言える。

- イ. MB水を作作用水に使用したエコシリカⅢ薬液は改良体の品質及び出来形に影響することなくP波の振幅減衰効果を与える。
- ロ. 改良土の固結及びMB水による振幅減衰効果は、発振器と受信器を結ぶ波線経路上の薬液量に大きく影響されるものの、音波は直進せず一番伝播が早い経路を通るように回折することから、振幅減衰量から改良体の出来形を推定するためには更なる工夫が必要となる。
- ハ. 探査孔を鉛直に掘って機器を設置するため、水平方向に薬液が広がったときに振幅減衰効果から薬液の浸透を捉えることは難しい。

以上述べたように、課題は残るもののMB水によって未固結の薬液の注入状況を振幅減衰から把握できること、MB水は振幅減衰以外に改良土に影響を与えることをなく使用できること、定量的な評価は難しいが波線経路上の薬液の広がりに応じて振幅減衰が見られることを示せたことは、出来形の不可視性という特徴を持つ薬液注入による地盤改良の施工の信頼性を向上させる上で大きな意味を持つと考えられる。今後は実施工規模での試験を行うことで薬液注入地盤改良の改良効果と振幅減衰の関係を明らかにできると考える。

謝意：本文での報告した試験の計画立案、準備の際に佐藤工業（株）の永尾浩一氏に貴重な助言をいただいた。また、本文で報告した一連の試験に関して、ペンタテクノサービス（株）の小森裕氏に協力いただいた。両名に対してここで謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 榊原淳一・中谷雅也・山尾和行：音響トモグラフィ法を用いた薬液注入範囲の効果確認に関する実験的研究，第11回地盤改良シンポジウム論文集，2014.
- 2) 榊原淳一・田子彰大・堤彩人・山本敦・増田雄太郎・高野大樹・高橋英紀：震弾性波の振幅減衰を用いた薬液注入範囲の把握，基礎工2018年11月号，2018.
- 3) 田子彰大・榊原淳一・高梨将・永尾浩一：弾性波の振幅減衰トモグラフィを用いた地下流体のモニタリング手法の開発，土木学会第70回年次学術講演会，2015.
- 4) 永尾浩一,末政直晃,片田敏行,山田早恵香：マイクロバブル水注入による砂地盤の不飽和化とその液状化特性の検討，2015.
- 5) 財団法人沿岸技術研究センター：浸透固化処理工法技術マニュアル（改訂版），2020.
- 6) 山下航洋・堤彩人・山本敦・榊原淳一：P波の振幅減衰を利用した薬液改良地盤のリアルタイム出来形推定—実証試験の方法—，第57回地盤工学研究発表会，2022.
- 7) 山下航洋・堤彩人・山本敦・榊原淳一：P波の振幅減衰を利用した薬液改良地盤のリアルタイム出来形推定—実証試験の結果—，第77回土木学会全国大会，2022.