土木学会論文集, Vol. 81, No. 18, 25-18161, 2025.

マイクロバブルによる薬液改良地盤可視化手法の検討

山下　航洋[1]・堤　彩人[2]・山本　敦[3]・榊原　淳一[4]

[1] 正会員　五洋建設株式会社　土木設計部（〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8）
E-mail: kouyou.yamashita@mail.penta-ocean.co.jp
[2] 正会員　五洋建設株式会社　土木設計部（〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8）
[3] 正会員　五洋建設株式会社　土木本部（〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8）
[4] 正会員　JFE シビル株式会社　技術開発研究センター（〒111-0051 東京都台東区蔵前 2-17-4）

薬液注入による地盤改良工事では，施工対象が不可視であるために改良効果を直ちに確認することができない．本研究では P 波減衰トモグラフィ探査法に着目し，薬液にマイクロバブルを混入させることで未固結の薬液の浸透状況をリアルタイムに可視化する方法を検討した．マイクロバブル薬液と通常薬液による室内試験結果の比較により，マイクロバブルの使用が品質ならびに出来形に影響を及ぼさないことを確認した．続いて透明砂模型地盤への着色した薬液の浸透過程の目視確認結果と P 波測定結果の比較から，マイクロバブル薬液の浸透が P 波減衰に影響することを確認した．さらに硅砂模型地盤での注入模型地盤を実施することで P 波測定結果から出来形を予測する方法を検討した．

Key Words : *chemical grouting, P-wave amplitude attenuation, microbubble*

1. はじめに

地盤改良工事では，施工対象が不可視であるため，進行状況や改良効果を直ちに確認することが難しいという課題がある．特に港湾空港施設の液状化対策として実施されることの多い浸透固化処理工法 [1]では，薬液が逸走すると改良出来形が設計を満足しない可能性がある．さらに，事後調査も注入後一定期間待って薬液が十分に固結してから実施する必要がある．

これらの課題に対処するために，改良効果を直ちに把握し施工に反映する技術として， P 波減衰トモグラフィ探査法に着目した．この技術は，2 本のボーリング孔間で P 波を送受信し，地中を伝播した波の振幅減衰量を逆解析することで固結した薬液の範囲を可視化するものである．さらに，この技術は地中に注入されたマイクロバブル(MB)水を可視化できることが確認されている [2]．そのため，MB を薬液に混入させることで，注入時に未固結の薬液の浸透状況を P 波減衰トモグラフィ探査法で探査できる可能性が考えられる．浸透状況の可視化によって，注入時の薬液の液だれや割裂をリアルタイムに確認できれば，薬液仕様の見直しを施工中に実施することで高品質な改良が可能となる．

しかしながら，薬液に MB を混入させることで地盤改良工の品質や出来形に悪影響を及ぼす場合は実際の工事で活用することができない．

本研究では，MB を薬液に混入させることで未固結の薬液の浸透状況をリアルタイムに可視化する技術の現場適用における課題を，室内実験を通じて検証した．

表-1に本論文の検討事項を示す．2，3章では地盤工学のMB研究で使用実績の多い加圧溶解式MB発生装置を用いて，MBの混入が薬液改良土の品質・出来形に与える影響を調べた．4，5章では現場適用を見据えて旋回液流式MB発生装置を用いてMB薬液による可視化の可否を検証し，簡易解析手法を提案した．

表-1　本論文で確認した課題と試験内容

章	課題	実験内容	MB 発生装置
2	MB は改良品質への悪影響がないか	ゲルタイム試験，一軸圧縮試験	加圧溶解式
3	MB は改良出来形への悪影響がないか	模型地盤への注入実験	
4	MB 薬液の浸透範囲は P 波減衰波線と一致するか	透明砂模型地盤への注入実験	旋回液流式
5	P 派減衰から簡易的な薬液注入の可視化は可能か	条件の異なる模型地盤への注入実験	

2. 薬液改良土の品質に対するMBの影響

MBの改良品質，改良出来形への影響を確認するために，ゲルタイム試験，一軸圧縮試験を実施してMBの有無による差異を比較した．実験で使用する薬液にはエコシリカⅢを使用した．薬液は主剤，硬化剤，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．これらのうち，体積比で約8割を占める水に，加圧溶解式のMB発生装置（**写真-1**）でMBを混入させた．本装置では粒径10~100μm程度のMBを発生させることができる．試料砂には東北6号硅砂（土粒子密度2.661g/cm^3，最小乾燥密度1.401cm^3，最大乾燥密度1.703g/cm^3）を使用した．

(1) ゲルタイム試験

薬液が固結を始めるまでの時間（ゲルタイム）に変化がある場合，ゲルタイムが長くなると薬液の液だれ，短くなると割裂注入となるリスクがある．通常薬液とMB薬液でゲルタイム試験[1]を実施して両者の結果を比較した．試験結果を**図-1**に示す．図よりMBの有無によってゲルタイムは変化しないことを確認した．



写真-1 加圧式MB発生装置(MBT.203)

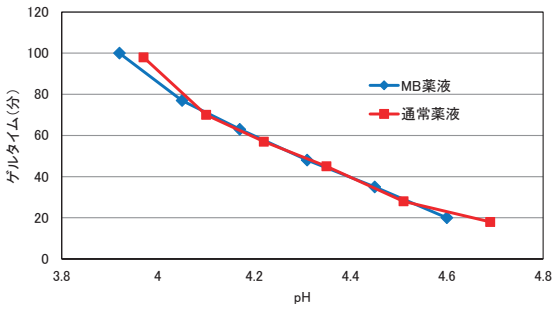


図-1 通常薬液とMB薬液のゲルタイム比較

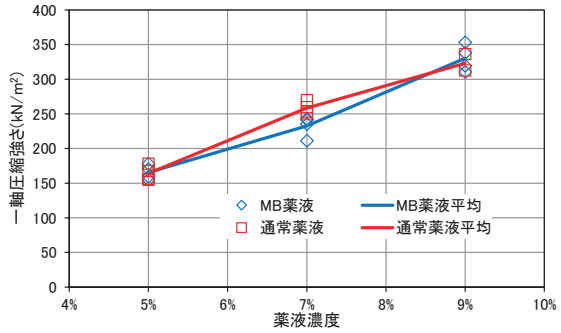


図-2 通常薬液とMB薬液の一軸圧縮強さ比較

(2) 一軸圧縮試験

MBの有無により改良強度に変化がないことを確認するために，一軸圧縮試験を実施した．薬液ゲルタイムは30分，シリカ濃度は5%，7%，9%の3種類，MB薬液と通常薬液で4本ずつの合計24本実施した．供試体は相対密度 Dr=60%を目標に設定して水中落下法で作製し，材齢14日で試験を実施した．

試験結果を**図-2**に示す．図より，MBの有無で強度に差がないことを確認した．

3. 薬液改良土の出来形に対するMBの影響

MBを混入することで薬液の浸透特性に影響がないか確認するため，模型地盤を用いて注入実験を実施した[3]．**図-3**に実験模式図を示す．模型地盤にはP波計測を実施するための注入管を設置している．P波計測結果については次章で説明する．

注入模型実験では，通常薬液とMB薬液の改良体を造成した．ゲルタイムと注入時間は60分に設定した．

両改良体に対してレーザースキャナを使用して半身の体積を測定した．注入量から想定される目標改良土量の半分が1,688cm^{3}であり，測定結果は通常薬液で1,472cm^3，MB薬液で1,509cm^{3}であった．目標に対する比率は87.2%と89.4%であり，MBの有無による改良出来形には，大きな違いはない．

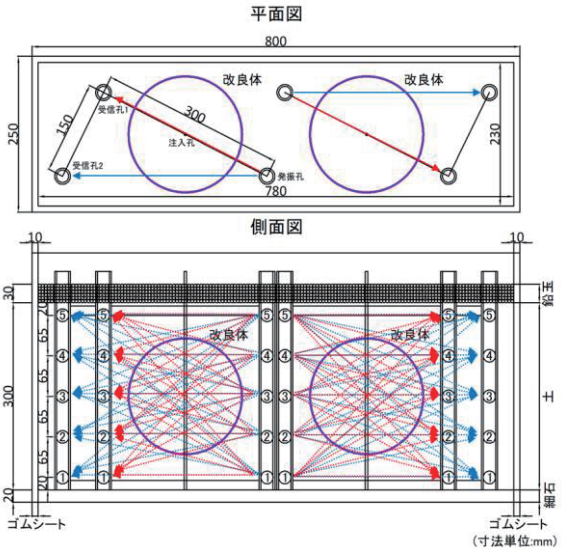


図-3 実験模式図

4. 振幅減衰量と薬液浸透過程の比較

前章の模型地盤の発振孔と受信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て，注入時にP波計測を実施した．**図-3**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．

発振ch3から受信ch3へ向う波線経路におけるMB薬液と通常薬液の振幅減衰の経時変化を比較した．結果を**図-4**に示す．減衰量の差からMBの有無がP波の振幅減衰に影響を与えていると考えられる．P波の振幅減衰の傾向がMB薬液の広がりと一致しているか確認するために，透明地盤を作製してP波計測結果と着色した薬液の広がり方を比較した[4)5)]．

(1) 透明地盤の作製

透過性の高い粒状体を，それと同等の屈折率を有する間隙流体で飽和させることで透明な模型地盤を作製することが可能である[6)]．本実験では粒状材料として溶融石英を，間隙流体として水道水で希釈した氷糖蜜（糖蜜水）を用いた．**表-2** に溶融石英の物理特性を示す．**図-5** に糖蜜水の濃度と粘度，および屈折率の関係を示す．糖蜜水の濃度を 100%に近づけるほど溶融石英の屈折率に一致するが，糖蜜水の粘度も高くなり，真空脱気を実施しても飽和した模型地盤を作ることができなくなる．本可視化技術ではMB を透過する際に発生する P 波の振幅減衰で薬液の浸透を可視化するが，不飽和地盤では地盤全体で振幅減衰が発生するため，薬液の浸透を可視化することが困難となる．糖蜜濃度を変えて透明地盤の脱気を試みたところ，70%まで濃度を上げても P 波測定に問題のない飽和地盤が作製できたため，本実験では 70%の濃度の糖蜜水を間隙流体とする地盤を使用することとした．

実験では透明なアクリル土槽に乾燥状態の溶融石英を投入した後，負圧（-95kPa 程度）の載荷と二酸化炭素の給気を 3 回繰返し，その後に負圧を載荷したまま土槽下部より 70%濃度の糖蜜水を注入した．完成後の透明砂地盤の相対密度は 94%であった．

(2) 注入材料の作製

本実験での地盤の間隙流体の密度は糖蜜を混合しているため，通常の脱気水より重い 1.23g/cm^3 であり，これは水で作製した通常のシリカ濃度 7%のエコシリカⅢ薬液(1.07g/cm^3)より重い．このため，注入した薬液は注入口から均等に広がらず，浮力によって上方へ浮き上がる．対策として，薬液を水ではなく 65%糖蜜で作製することで密度を間隙流体と同程度の 1.23g/cm^3 にした．作製した薬液の配合を**表-3** に示す．

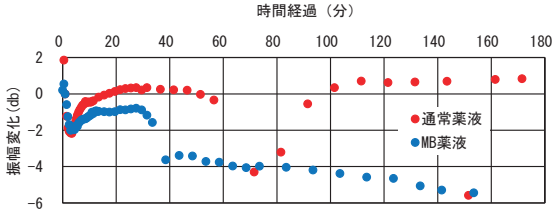


図-4 通常薬液と MB 薬液の注入時の振幅経時変化

(3) 薬液へのマイクロバブル混合方法の再検討

前章で示した実験までは，注入する薬液は加圧溶解式のMB発生装置で作製したMB水を練混ぜ水として，各材料を混合することで作製していた．しかしながら，加圧溶解式は専用の水槽とポンプを必要とするため，実施工規模では設備が大型化することが予想される．さらに実施工では屋外作業が想定されるが，加圧溶解式はMB溶解量が気温の変化に大きな影響をうける．以上の理由から，加圧溶解式では現場適用に難があると考えた．そこで，旋回液流式のMB発生装置（**写真-3**）により，練

表-2 溶融石英の物理特性

土粒子密度	g/cm^3	2.19
粒径	mm	2～5
最小乾燥密度	g/cm^3	1.16
最大乾燥密度	g/cm^3	1.36
屈折率		1.459

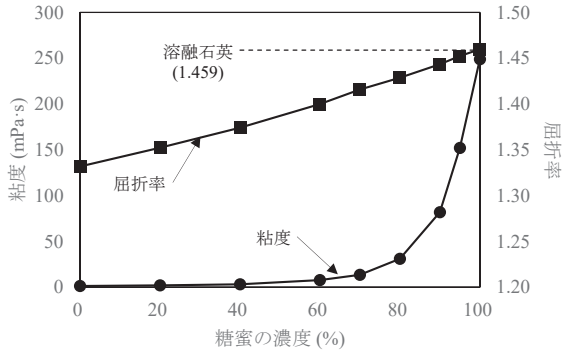


図-5 糖蜜濃度と粘度および屈折率の関係

表-3 糖蜜薬液の配合(g/L)

特殊シリカ	硬化剤	反応剤 A	反応剤 B	65%糖蜜
66.3	198	26.7	13.1	929.9



写真-3 旋回液流式 MB 発生装置

混ぜ後の薬液に直接MBを与える方法を検討した．今回検討したMB発生装置は単旋回流型ファインバブル発生器（FB-S15AI:株式会社坂元技研）と水中ポンプ（KS-20:株式会社工進）から構成され，**図-6**に示すように練混ぜ後の薬液を入れた容器の中に設置した．本装置では粒径10~100 μ m程度のMBを発生させることができる．

(4) 注入実験手順

模型地盤の構造および音波測定機器の配置図を**図-7**に示す．発振孔を1つ，受信孔を2つ設置し，発振孔からそれぞれの受信孔を結ぶ断面を測線1，測線2とする．各孔には受発信器を6つずつ設置した．

薬液は注入時間60分，準備時間10分を目標にゲルタイム70分で作液した．時間当たりの改良体直径の変化が大きく，計測頻度を細かく設定する必要のある注入初期は注入速度を21mL/min，注入開始から40分経過後は123mL/minとした．注入速度は水槽重量の変化から測定した実測値である．

改良率および改良体直径の変化を**図-8**に示す．薬液の固結を確認して注入は52分30秒で完了した．薬液は食紅で赤く着色することで，薬液の浸透範囲を目視確認し，音波計測の結果と比較した．

(5) 注入実験結果

注入後の改良体を**写真-4**に示す．薬液は狙い通りに注入口から均等に広がった．

音波の発振器と受信器を結ぶ波線経路に着目して，横軸に注入量，縦軸に各波線の振幅減衰量をプロットしてグラフ化した結果を**図-9**に示す．注入口近辺を通過し，注入開始後早期にMB糖蜜薬液の影響を受けることが想定される波線経路を赤，注入が一定程度進行してからMB糖蜜薬液の影響を受けることが想定される波線経路を青，ほとんど影響を受けないことが想定される波線経路を緑の3色でグラフを塗り分けた．改良体の中心を通過する測線1では注入口近辺の波線経路から振幅減衰が見られたが，薬液量の少ない改良範囲の端部を通過する測線2ではほとんど反応が見られなかった．なお，測定値のぶれが大きく安定しない波線経路は除外している．

各波線経路の振幅減衰量と薬液の浸透範囲を比較した．1 dB以上振幅の減衰した波線経路を白線で，注入量に応

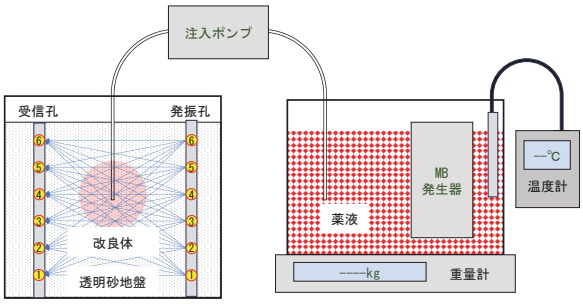


図-6 透明地盤の注入実験装置模式図

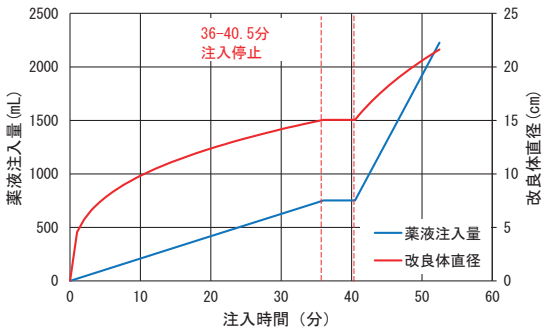


図-8 薬液注入量・改良体直径の時刻歴変化

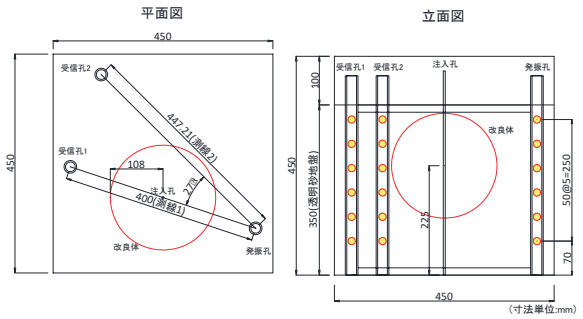


図-7 配置図

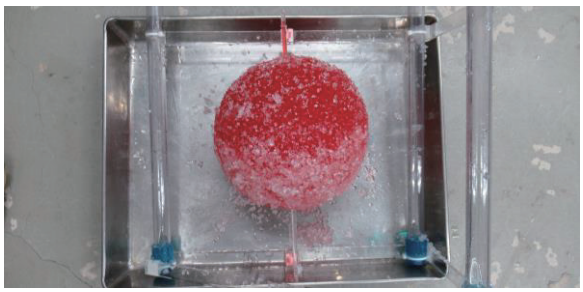
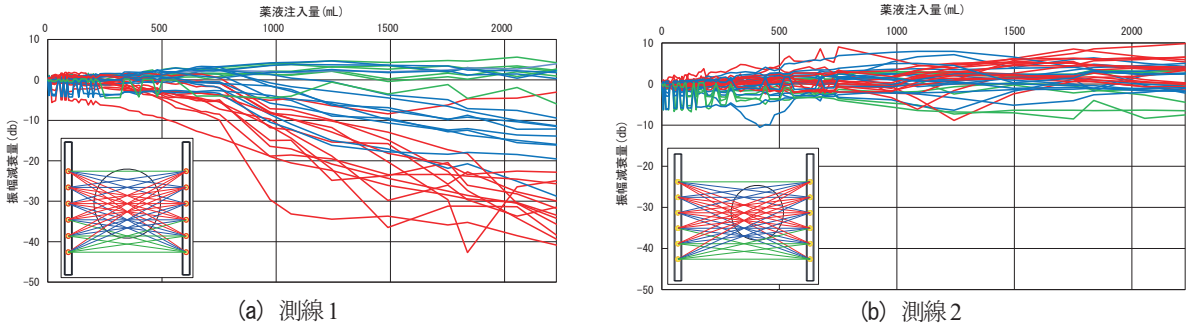
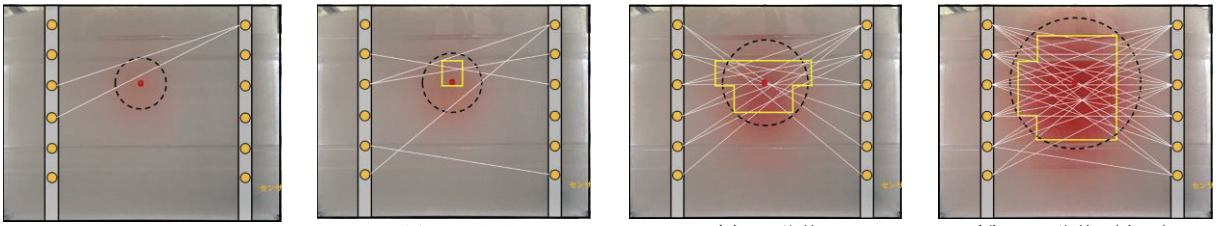


写真-4 注入後の改良体



(a) 測線 1　　(b) 測線 2

図-9 薬液注入量に応じた振幅減衰量



(a) 6 分後　(b) 10 分後　(c) 30 分後　(d) 52.5 分後（完了）

図-10　薬液注入量，改良体直径の時刻歴変化と簡易可視化手法の検証

じて注入口から均等に広がった場合の改良範囲を黒点線で示して，食紅の広がりから想定される薬液の浸透範囲と比較した結果を**図-10**に示す. 両者の範囲はおおよそ一致している．黄枠については次章で説明する.

以上より，MB薬液を地盤に注入したときに測定されるP波減衰は薬液の浸透範囲を捉えることができた.

5.　出来形推定方法の検討

(1)　リアルタイム可視化方法検討

発振孔と受信孔の距離が短いこと，使用する周波数が高いこと, 薬液の浸透はP波速度には影響を与えないことからP波に大きな屈折が起こることは考えにくいため, 発振点と受信点間を音波が直進すると仮定した波線経路に着目した可視化方法を提案する.

図-11に概念図を示す．まず，計測断面をN＊Mのセルに分割する．距離減衰の影響を除外すれば，薬液が浸透した範囲（黄色円）を多く伝播した波線の減衰量は大きく，伝播していない波線の減衰量は小さい．あるセルに着目して一定量以上減衰した波線の本数をカウントする．この波線の数が各セル内での減衰量と相関があると仮定してセルに着色する．この方法は波線数が多い発振点，受信点の近傍（例えば緑枠のセル）を多くカウントする可能性があるため，セル毎に通過する波線数の合計による補正を行う．セルの細かさが本手法の精度となるが，セルの数を増やしても波線が通過しないセルが増えるため, セルの間隔はセンサ間隔の半分程度が限度と考える.

図-10の黄枠は本手法で薬液が浸透したと判定されたブロックである．視覚的な薬液の広がりとおおよそ重なっている.

(2)　実験内容とその結果

本手法の妥当性を検証するため，東北7号硅砂（土粒子密度2.65g/cm^3，最小乾燥密度1.27cm^3，最大乾燥密度1.60g/cm^3）と東北4号硅砂（土粒子密度2.64g/cm^3，最小乾燥密度1.48cm^3，最大乾燥密度1.71g/cm^3）でそれぞれ模型地盤を作製し，MB薬液を注入してP波計測を実施した．東北7号硅砂は通常の球体の改良体の造成を，東北4号硅砂は透水性を上げることで下方へ垂れる改良体の造成を

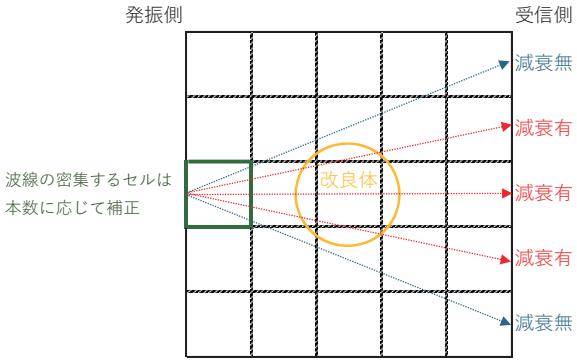


図-11　可視化手法概念図

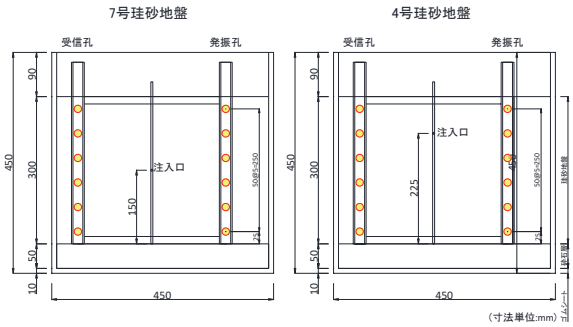
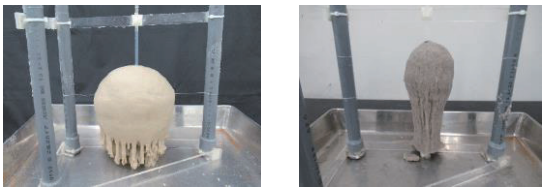


図-12　実験模式図



(a) 7 号硅砂　(b) 4 号硅砂

写真-5　硅砂模型地盤の改良体

再現することを意図した.

模型地盤の断面図を**図-12**に示す．地盤の相対密度は60%とし，注入速度22mL/minで60分かけて1,400mLを注入した．ゲルタイムは注入時間に合わせて注入開始から60分後に固結するよう設定した．注入後の改良体を**写真-5**に示す．模型実験結果に対して，注入量から推定される均質に広がった場合の出来形，最終の出来形，および簡易可視化結果を**図-13**, **図-14**に示す. 波線経路のうち，減衰量が指定した閾値(2db)を超えた線が補正後の判定で2本以上となる箇所を赤く着色した．**図-13**では薬液の浸透方向に向かってP波の減衰が発生していることが分かる．一方で，液だれを模した**図-14**では反応が小さく，通常の改良ができていないことは分かるが，マッピング範囲は実際の出来形と重ならなかった.

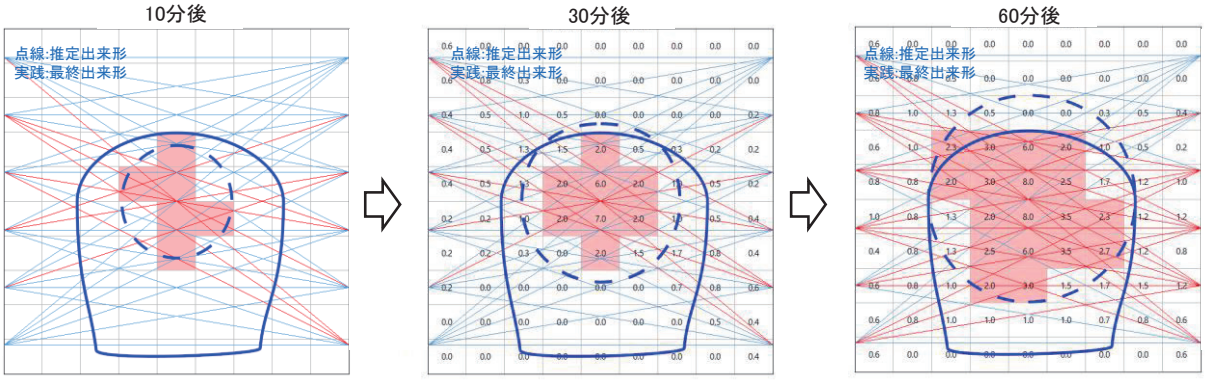


図-13　薬液注入量・改良体直径の時刻歴変化（7 号硅砂）

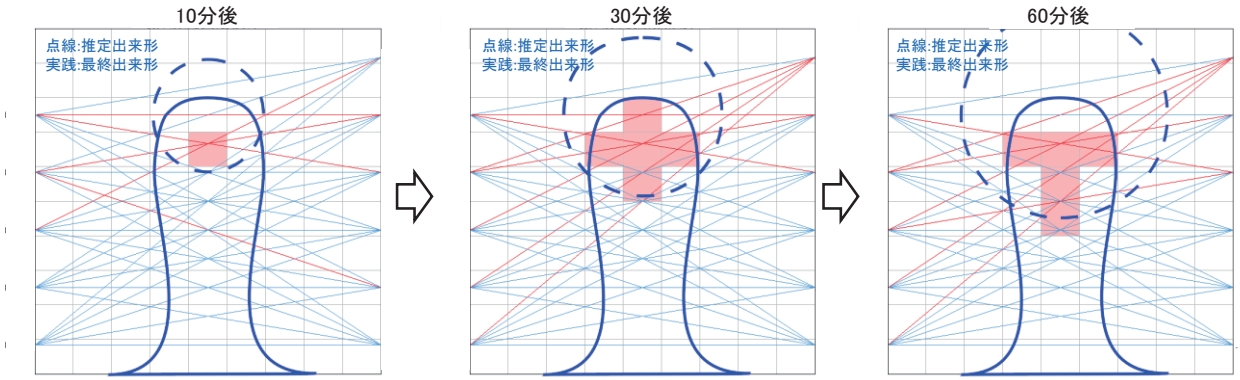


図-14　薬液注入量・改良体直径の時刻歴変化（4 号硅砂）

(3)　考察と課題

以上の実験結果より，正常な改良体が造成された場合は測定結果から確認できるが，異常があった場合には，異常であること自体は推測可能だがどのような改良体が造成されているかをマッピング結果から推測することは難しいという課題が残った．

この原因として，逆解析を実施しない本手法では，センサレイアウトの影響が大きいこと，図-9-(a)のように振幅減衰は継続して発生しているにも関わらず各波線経路を減衰量が閾値を超えたか否かの2択で評価していることが原因であると考える．土質に応じた振幅減衰量，注入口からの距離，メッシュ内を通過する全波線経路の本数等の各パラメータを適切に重みづけして微小な振幅減衰幅を適切に評価できれば，可視化手法を高度化することが出来ると考える．

ただし，実際には音波は多少なりとも屈折すること，同時多重発振数は現状では6が最大であり波線数を十分に確保できないことから，通常のトモグラフィ計測のような精度の高い計測は難しいため，正確な形状の判定を行うよりも，薬液の浸透方向を大まかに把握するといった活用法になると考えられる．

浸透注入における改良品質不良のパターンとして，注入圧力またはゲルタイム設定が適当でないために地盤が割裂してサンドゲルを形成できない，水みちが出来て改良範囲外へ薬液が逸走，ゲルタイムが土質に合わないことによる液だれが考えられる．このうち従来は事後調査まで確認することが難しかった薬液の逸走や液だれを，「設計通りの改良が出来ていない可能性が高い」という形で可視化できた点は，本手法について一定の有用性を示せたと考える．

6.　おわりに

以上の実験結果から薬液にMBを混入させることにより，P波測定で薬液の浸透を捉えることができ，MB薬液は浸透固化処理工法の品質，出来形に悪影響がなく，実施工に適用しても問題がないことを確認した．実施工規模の改良体サイズで本技術を検証するために必要な条件が満たされたと言える．現時点では，測定された振幅減衰に対して，MBの影響，ゲル化した薬液の影響，ならびに土質の違いによる影響を切り分け出来ていないことが課題であると考える．今後は測定精度の向上，簡易可視化手法の更なる高度化，実施工規模の改良体で室内試験との差異がないかの確認を検討する予定である．

謝辞：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，長瀬靖佳氏にご協力いただきました．ここに記して謝意を表します．

REFERENCES

1) 一般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.[Coastal Development Institute of Technology: *Technical Manual of Permeable Grouting Method(modified edition)* , 2020.]
2) 榊原淳一，田子彰大，中村悠希，国司洋介，高梨将 : 弾性波の振幅減衰トモグラフィによる地中へのマイクロバブル水注水のモニタリング，物理探査学会第 133 回（平成 27 年度秋季）学術講演会要旨，39，2015.[Sakakibara, J., Tago, A., Nakamura, Y., Kunishi, Y., Takanashi, M.: Monitoring of Injected Micro-bubble-water by P-Wave Attenuation Tomography, *The 133rd SEGJ Conference*, 39, 2015.]
3) 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可視化，第 15 回地盤改良シンポジウム, 95-100, 2022. [Yamashita, K., Tsutsumi, A., Yamamoto, A., Sakakibara, J.: Real-time visualization of chemical grouting using P-wave amplitude attenuation, *Proceeding of the 15th National Symposium on Ground Improvement*, 95-100, 2022.]
4) 堤彩人，山下航洋，山本敦，榊原淳一 : 屈折率整合技術と P 波を用いた薬液注入過程の可視化実験（その 1），第 59 回地盤工学研究発表会, 23-4-1-01, 2024. [Tsutsumi, A., Yamashita, K., Yamamoto, A., Sakakibara, J.: Experimental study to visualize chemical grouting process using transparent sand and P-wave (part1), *Proceedings of the 59th Annual Japan National Conference on Geotechnical Engineering*, 23-4-1-01, 2024.]
5) 山下航洋，堤彩人，山本敦，榊原淳一 : 屈折率整合技術と P 波を用いた薬液注入過程の可視化実験（その 2），第 59 回地盤工学研究発表会, 23-4-1-02, 2024.[Tsutsumi, A., Yamashita, K., Yamamoto, A., Sakakibara, J.: Experimental study to visualize chemical grouting process using transparent sand and P-wave (part2), *Proceedings of the 59th Annual Japan National Conference on Geotechnical Engineering*, 23-4-1-02, 2024.]
6) 高野大樹，小林孝彰，宮田喜壽，森川嘉之 : 粒状体の屈折率マッチング可視化技術を用いた薬液注入過程の再現実験, 第 50 回地盤工学研究発表会, 1703-1704, 2015. [Takano, D., Kobayashi, T., Miyata, Y., Morikawa, Y.: Physical modelling of chemical grouting using transparent sand, *Proceedings of the 50th Annual Japan National Conference on Geotechnical Engineering*, 1703-1704, 2015.]

(Received February 4, 2025)
(Accepted May 15, 2025)

STUDY OF A VISUALIZATION METHOD USING MICROBUBBLES FOR CHEMICAL GROUTING

Koyo YAMASHITA, Ayato TSUTSUMI, Atsushi YAMAMOTO and Junichi SAKAKIBARA

In ground improvement by chemical grouting, it is challenging to immediately verify the improvement effects because the targets are invisible. This research focuses on the P-wave attenuation tomography method and examines a technique to visualize the penetration of unconsolidated chemical solutions in real-time by mixing microbubbles. A comparison of the results between laboratory tests using microbubble-infused chemical solutions and standard chemical solutions confirmed that the use of microbubbles does not affect the quality or completed form. Furthermore, by comparing the visual verification results of the dyed chemical solution's penetration process into the transparent sand with P-wave measurement results, the study confirmed that the penetration of microbubble chemical solutions influences P-wave attenuation as observed through P-wave attenuation. Additionally, through the experiment of injecting silica sand, the method to predict the shape based on P-wave measurement results was examined.