

P波減衰トモグラフィ探査法を用いた 薬液改良地盤の出来形管理手法に関する検討

堤 彩人¹・山本 敦²・甲斐 雅比呂²・
高野 大樹³・高橋 英紀³・榊原 淳一⁴

¹ 正会員 五洋建設(株) 土木本部 土木設計部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

E-mail: ayato.tsutsumi@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)

² 正会員 五洋建設(株) 土木本部 土木設計部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

³ 正会員 (国研) 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所

(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

⁴ 正会員 JFE シビル(株) 音響トモグラフィ部 (〒111-0051 東京都台東区蔵前 2-17-4)

地盤改良工事では、地中埋設物位置の不整合や地盤条件の不一致等の問題で、施工時に設計を変更せざるを得ないケースが間々ある。このような場合には、地盤改良の効果を適切に評価するための出来形管理手法が必要になると考え、本研究では、薬液改良地盤を対象に、改良効果の可視化手法としての物理探査の適用性について検討した。P波減衰トモグラフィ探査法に着目し、室内模型実験と現地実験を実施した結果、P波の減衰率により薬液改良前後の地盤の状態変化を把握できることを明らかにした。さらに、施工管理情報と物理探査結果をBIM/CIMにより統合管理する方法を提案した。

Key Words : *P-wave amplitude attenuation, seismic tomography, chemical grouting, BIM/CIM*

1. はじめに

薬液注入工事の出来形管理では、設計時に計画された施工管理項目を基準値内に収めることで所定の出来形を満足すると考える。しかし、施工時には、地中埋設物位置の不整合や地盤条件の不一致等の問題により計画を変更せざるを得ないことが間々ある。このような状況では、管理基準値内での施工が難しくなる場合もあるため、改良効果を適切に評価するための可視化技術が必要となる。

改良地盤の事後調査では、原位置でのサウンディング試験や不攪乱試料に対する一軸圧縮試験等により、改良地盤の品質が評価される。これらの試験方法は、改良地盤の品質を精度よく検査できる反面、検査範囲が1次元に限られるため、広範囲に出来形を観察する用途には不向きといえる。一方、近年、改良地盤全体の特性を把握する手法として物理探査が注目されている¹⁾。

本研究では、港湾・空港の液状化対策工事において多数の施工実績を有する浸透固化処理工法²⁾で改良した地盤(以降、薬液改良地盤と呼ぶ。)を対象に、その出来形を計測する手法としての物理探査法の適用性を検討する。さらに、近年、港湾工事においても活用が進んでいるBIM/CIMを用いて、施工管理情報と物理探査結果を統合管理する方法について報告する。

2. 物理探査法の選定

薬液改良地盤に対する物理探査の適用事例として、比抵抗トモグラフィを利用した改良範囲の評価方法が提案されている^{3),4)}。比抵抗トモグラフィは、地盤の電気抵抗(比抵抗)を測定する技術で、間隙水が薬液に置換されると比抵抗が小さくなる性質を利用し薬液改良範囲を把握できることが模型実験と現場実験により明らかにされている。ただし、海水の影響を受ける地点では、間隙水と薬液の比抵抗のコントラストが小さくなるため、可視化精度が低下することが指摘されている。

一方、音響トモグラフィ探査による薬液改良地盤の計測事例も報告されている⁵⁾。音響トモグラフィ探査は、P波の伝播速度に加えて、間隙中の粘性や散乱反射を受けて変化する減衰率の分布を計測できる技術である。薬液改良地盤は、改良の前後で剛性の変化が小さいため、P波速度よりも減衰率による可視化が有効であることが模型実験の結果より示されている。しかし、減衰率と地盤物性との関係や実地盤での適用性等、未解明な点は多い。

本研究グループは、これら2つの物理探査法を薬液改良地盤の有望な可視化手法と考え研究を行ってきたが、本論文では、音響トモグラフィ探査の適用性に関する室内模型実験と現地実験の結果について詳述する。

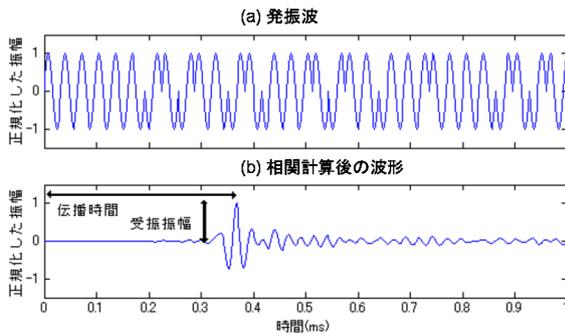


図-1 疑似ランダム波の例

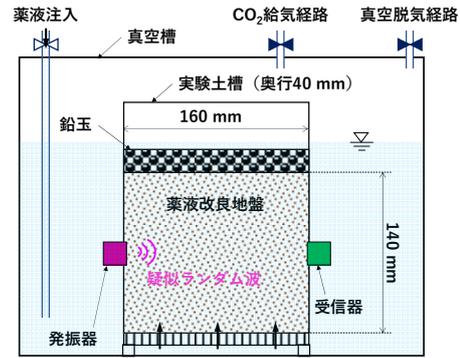


図-2 室内模型実験の模式図

表-1 弾性波実験ケース一覧

Case	砂の種類	目標密度		シリカ濃度 (%)	受信振幅		減衰率				伝播速度				一軸圧縮試験	
		ρ_d (g/cm ³)	D_r (%)		$A_{initial}$ (dB)	A_{3days} (dB)	$Q^{-1}_{initial}$ (dB/m/kHz)	Q^{-1}_{3days} (dB/m/kHz)	ΔQ^{-1} (dB/m/kHz)	RQ^{-1} (-)	$V_{p,initial}$ (m/s)	$V_{p,3days}$ (m/s)	ΔV_p (m/s)	RV_p (-)	q_u (kPa)	E_{50} (MPa)
I7-1.51-ES5	飯豊珪砂 7号	1.51	50	5	95.99	79.98	0.0073	0.0280	0.0207	2.8	1720	1704	-16	-0.01	157.2	11.5
I7-1.51-ES7				7	98.35	72.03	0.0046	0.0383	0.0337	7.3	1719	1689	-30	-0.02	205.8	15.2
I7-1.51-ES9		1.45	30	9	98.25	65.76	0.0042	0.0458	0.0416	9.9	1750	1689	-61	-0.03	281.8	24.8
I7-1.45-ES7				7	97.75	75.82	0.0055	0.0342	0.0287	5.2	1734	1719	-15	-0.01	192.2	12.3
I7-1.68-ES7		1.68	100		95.67	72.24	0.0091	0.0407	0.0316	3.5	1816	1782	-34	-0.02	350.8	22.4
N4-1.49-ES5	日光珪砂 4号	1.49	73	5	98.24	79.02	0.0031	0.0174	0.0143	4.6	1719	1719	0	0	81.2	6.2
N4-1.49-ES7				7	99.43	88.48	0.0036	0.0275	0.0239	6.6	1734	1719	-15	-0.01	139.7	10.7
ES5	液体又はホモゲル			5	102.24	101.99	※水道水で取得した A_0 と受信振幅の差がほとんど認められず、 Q^{-1} を計算することができなかった。				1517	1517	0	0	4.3	0.227
ES7				7	102.26	102.39					1517	1517	0	0	11.6	0.153
ES9				9	102.26	102.39					1541	1541	0	0	24.5	0.421

3. P波の減衰特性に着目した室内模型実験

(1) 実験材料

実験は、砂の種類と密度、薬液のシリカ濃度をパラメータに、薬液改良土の一軸圧縮強さとP波の応答特性の関係を調べる目的で実施した。砂試料は、飯豊珪砂7号と日光珪砂4号を使用した。溶液型薬液には浸透固化処理工法²⁾の標準的な薬液であるエコシリカIIIを使用した。シリカ濃度は5%、7%、9%の3水準とし、薬液のpHはゲルタイム180minを目標に調整した。砂試料と薬液の物理特性の詳細については、文献6)を参照されたい。

(2) 疑似ランダム波

P波の減衰特性は周波数に依存するため、発振信号には周波数と発振エネルギー(振幅)を正確に制御できる疑似ランダム波を用いた⁵⁾。疑似ランダム波は、パルス圧縮と呼ばれる信号圧縮方法の一つで、特殊な配列の連続波を送受信することにより見かけ上の振幅を増幅することを可能にしている。このため、減衰が激しい高周波数の波も使用することができ、現地においては高解像度での探査が可能となる。図-1に疑似ランダム波の例を示す。実験では312kHzの疑似ランダム波を使用し、相関関数計算後の波形より伝播時間と受信振幅を取得した。

(3) 実験方法

図-2に室内模型実験の模式図を示す。実験土槽には、

アクリル製の矩形断面容器(幅160mm、奥行140mm、高さ200mm)を用い、幅方向の側面にP波の発振・受信器(センサー)を設置し、容器底部から薬液を注入できる仕様とした。P波の応答は地盤の飽和度に敏感であるため、模型地盤は、所定の密度で乾燥砂地盤を作製した後、真空槽内で真空脱気とCO₂の給気を繰返し、地盤底部から薬液を注入することで作製した⁶⁾。尚、上向きの浸透圧力による地盤隆起対策として、模型地盤上部に鉛玉3kg(圧力換算で1.3kPa)を載荷した。P波の発振・受信は、所定のインターバルで3日間実施し(以降、弾性波実験と呼ぶ。)、弾性波実験後には、模型地盤から円筒供試体(直径50mm、高さ100mm)を3本採取し、一軸圧縮試験を実施した。表-1に弾性波実験のケース一覧表を示す。実験ケースの名称は、「砂試料の種類」「目標密度」「シリカ濃度」を組み合わせで設定した。

(4) 一軸圧縮試験結果

まずは、薬液改良地盤の強度・変形特性について整理する。図-3に一軸圧縮試験結果の一例を示す。図中の凡例は表-1のケース名と対応している。各ケースにおいて、3供試体の圧縮応力-圧縮ひずみ関係は類似していることから3.(3)の方法により均質な薬液改良地盤が造成されたことがわかる。また、一軸圧縮試験結果の特徴として、①シリカ濃度が高いほど(N4-1.49-ES5 vs. N4-1.49-ES7)、②地盤の乾燥密度が大きいほど(I7-1.51-ES7 vs. I7-1.68-ES7)、③砂の粒径が小さいほど(I7-1.51-ES7 vs. N4-1.49-

ES7), 一軸圧縮強さ q_u は大きくなることが確認された。全てのケースの一軸圧縮試験結果を表-1に整理する。

$$Q^{-1} = \frac{A_0 - A}{d} \times \frac{V_p}{8.686\pi f} \quad (1)$$

(5) 弾性波実験結果

薬液改良地盤を伝播するP波の受信振幅 A の経時変化の一例を図-4に示す。比較のため、飽和砂地盤とホモゲルの実験結果も合わせてプロットしている。飽和砂地盤のケースでは、地盤の状態が変化しないため A にも変化は見られない。また、ホモゲルのケースでは、時間経過とともにゲルの強度は増加するが、 A の値はほぼ一定のままである。これらに対し、薬液改良地盤のケースでは、地盤の状態変化に伴い A が劇的に減衰している。以上の結果から、薬液改良地盤の A の劇的な変化は、構成材料(砂とホモゲル)それぞれの特性では説明できない現象であることがわかる。

一方、粒径が異なる I7-1.51-ES7 と N4-1.49-ES7 の結果を比較してみると、 A の減衰傾向が大きく異なることがわかる。前節において、これらのケースでは、薬液改良地盤の強度・変形特性が異なることが確認されていることから(図-3参照)、 A の減衰傾向と一軸圧縮試験の結果を比較してみることにする。ここで、 A の減衰傾向を評価する指標として減衰率 Q^{-1} を定義する(式(1))。

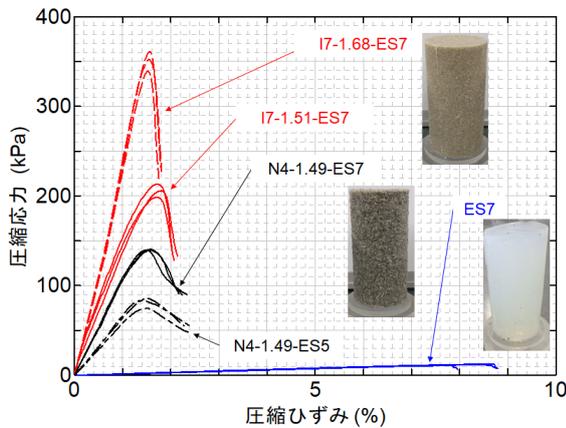


図-3 一軸圧縮試験結果の一例

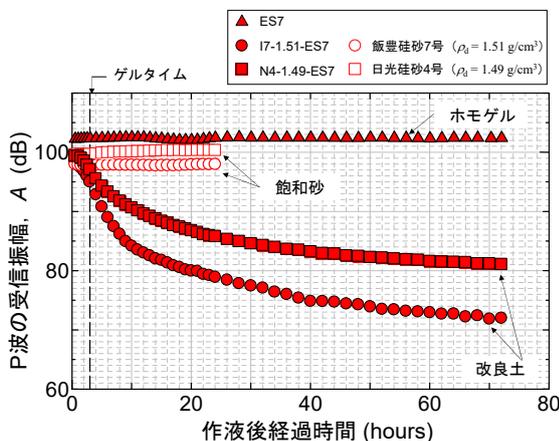


図-4 弾性波実験結果の一例

ここに、 A_0 は発振振幅、 A は受信振幅、 d は伝播距離、 V_p は伝播速度(P波速度)、 f は発振周波数である。現地探査では、探査断面ごとに d や f が異なるため、実験条件に依存しない評価指標として Q^{-1} が用いられる。尚、本実験では、水中を伝播するP波の振幅減衰は極めて小さいと考え、弾性波実験開始前に水道水を用いてキャリブレーションを実施し、この結果より A_0 を決定している⁷⁾。

表-1に計算結果を併記する。ここに、 $Q^{-1}_{Initial}$ 、 $V_{p,Initial}$ は弾性波実験開始時点の減衰率と伝播速度、 Q^{-1}_{3days} 、 $V_{p,3days}$ は3日後の減衰率と伝播速度である。さらに、これらの物理量から差分 Δ (3days-Initial) と変化率 R ($\Delta/Initial$) を計算した。表-1では、薬液改良の前後で、 Q^{-1} だけでなく V_p も減少することが確認されているが、 V_p の変化率 RV_p は 0.03 倍程度と非常に小さいのに対して、 Q^{-1} で評価する場合には変化率 RQ^{-1} は最大で 10 倍程度になることがわかる。このことから、薬液改良前後のコントラストが大きい Q^{-1} の方が改良範囲の把握に適した物理量であるといえる。図-5に薬液改良地盤の一軸圧縮強さ q_u 、変形係数 E_{50} と減衰率の差分 ΔQ^{-1} の関係を示す。減衰率の変化が大きいほど、薬液改良地盤の q_u と E_{50} が大きくなる傾向が確認される。図中には、各関係の相関式と最小二乗法により決定した係数 a 、 b と相関係数 r の値も示しているが、いずれの関係においても良い相関が認められる。したがって、室内実験のように実験条件が厳格に管理された環境においては、 Q^{-1} により薬液改良地盤の出来形に加えて、品質も推定できる可能性が示されたといえる。

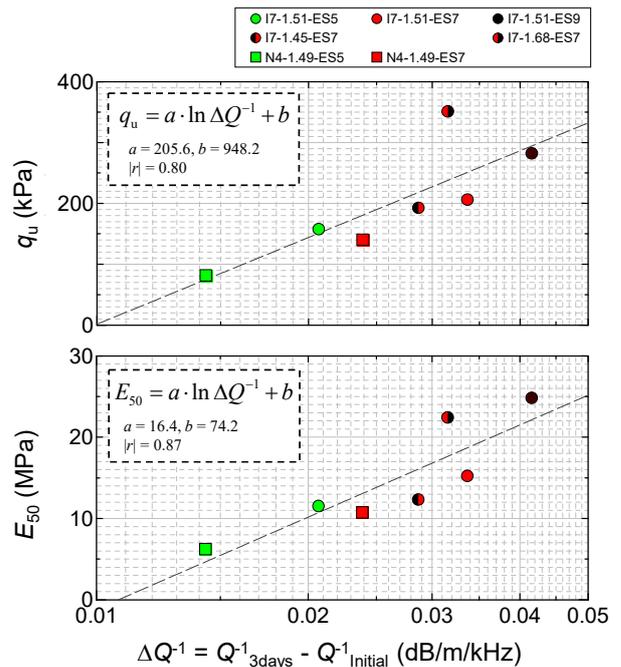


図-5 一軸圧縮試験結果と減衰率の関係

4. 現地実証実験

(1) 薬液改良地盤の合理的な探査手法

本節では、浸透固化処理工法が採用された工事において、音響トモグラフィ探査を適用する際のポイントについて解説する。図-6に探査手法の概念図を示す。従来は、薬液改良範囲の近傍に、発振器と受信器を挿入するための探査孔を削孔する必要があったため、削孔のための作業時間やコストが増大すること、また、薬液注入時には探査孔から薬液がリークすることで施工品質が低下すること等の課題があった。一方で、工事の対象エリアには、約2mの間隔で薬液注入用の塩ビ管（注入外管）が残置されることになる。注入外管の規格はVP40(内径40mm)で、薬液注入後も管内を洗浄することにより、外径40mm未満の機器の挿入が可能となる。そこで、現地実験においては、従来機器より小径の小型発振機(最大外径34mm)を開発し、注入外管を探査孔として使用することを試みた。本手法により、従来法の課題を克服できるうえ、改良エリア内の任意の断面での探査が可能となる。

(2) 実験サイト

仙台塩釜港仙台港区向洋地区岸壁(-14m)耐震改良工事において薬液改良範囲の可視化実験を実施した⁸⁾。実験対象断面の模式図を図-7に示す。実験は、海側から2列目と5列目の注入外管を用いて、音響トモグラフィ探査により薬液改良地盤のP波の応答特性を計測した。計測は、薬液注入前(事前探査)と、薬液注入後(事後探査)の2回実施した。ここで、注入外管を用いることで得られる省力化効果について試算してみる。従来法では、探査孔として塩ビ管VP50を使用するため、探査の前にφ86mmのノンコアボーリングが必要になる。図-7より土層別のボーリング長を測定し、積算基準書⁹⁾を基に探査孔削孔に要する作業日数を計算した結果を表-2に示す。表より、今回の実験条件では、探査孔1本につき5日程度の作業日数の削減効果が得られたことが確認された。

(3) 岸壁の耐震改良工事における物理探査結果

計測条件は、発振周波数を6kHz、センサーピッチを0.25mとした。音響トモグラフィ探査の結果を図-8に示す。特徴的な結果を以下に整理する。

a) 土層境界の推定

事前探査のP波速度分布に着目すると、標高-8m付近と-12m付近に速度境界の存在が確認される(図-8中の青色一点鎖線)。一方、設計時の土層境界「切込砕石とAs1-1(-8m付近)」、「As1-1とAs1-2(-13m付近)」と速度境界を比較すると、そのレベルは大よそ一致していることがわかる。この結果から、P波速度によって原地盤の土質特性の違いを把握できると考えられる。

b) 薬液改良範囲の推定

減衰率の差分に着目すると、標高-7m(黒色二点鎖線)以深について、薬液改良の前後で減衰率が増加していることが確認される。したがって、薬液改良範囲(-8mから-16m)においては、全深度にわたり薬液が注入されたと推察される。ただし、室内模型実験と比べると、減衰率の増加の程度がやや小さくなっていることに気づく。この一因として、事前調査の減衰率のレベルの影響が考えられる。室内模型実験の $Q^{-1}_{Initial}$ に比べると、事前探査の減衰率の値は1オーダー程度大きく、薬液改良の前後でコントラストが付きにくい条件であったことがうかがえる。室内と現地で減衰率のレベルが大きく異なる理由について考察するためには、今後、更なる実験・探査結果の蓄積が必要と考えている。

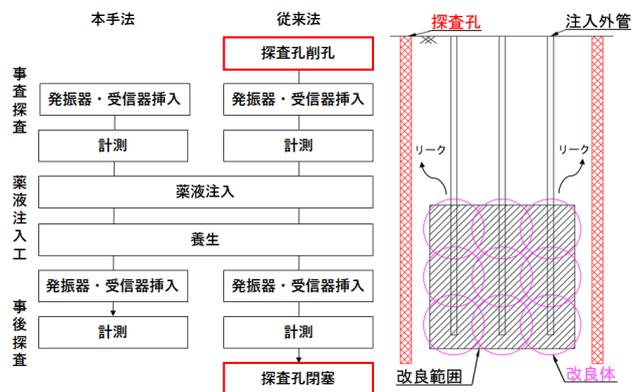


図-6 薬液改良地盤の合理的な探査手法の概念

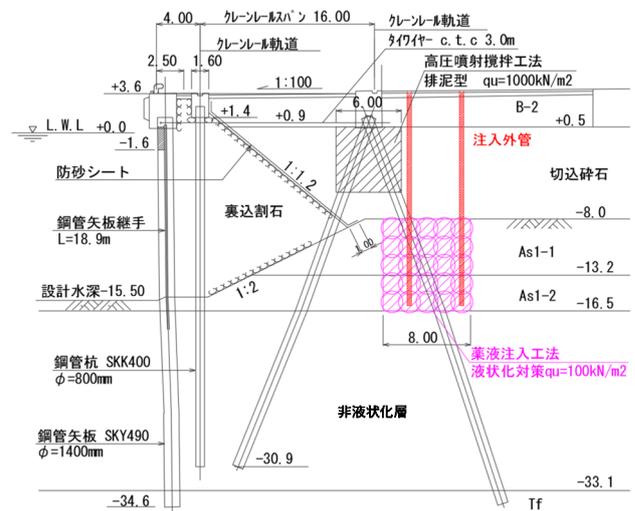


図-7 実験対象断面の模式図

表-2 想定作業時間

土層名	層厚 (m)	積算基準: φ86mm		想定作業時間	
		土質	作業量 (m/日)	土層別 (日)	合計 (日)
B-2	3.0	砂質土	5.0	0.6	5.0
切込砕石	8.5	礫混じり土砂	3.0	2.8	
As1	8.0	砂質土	5.0	1.6	

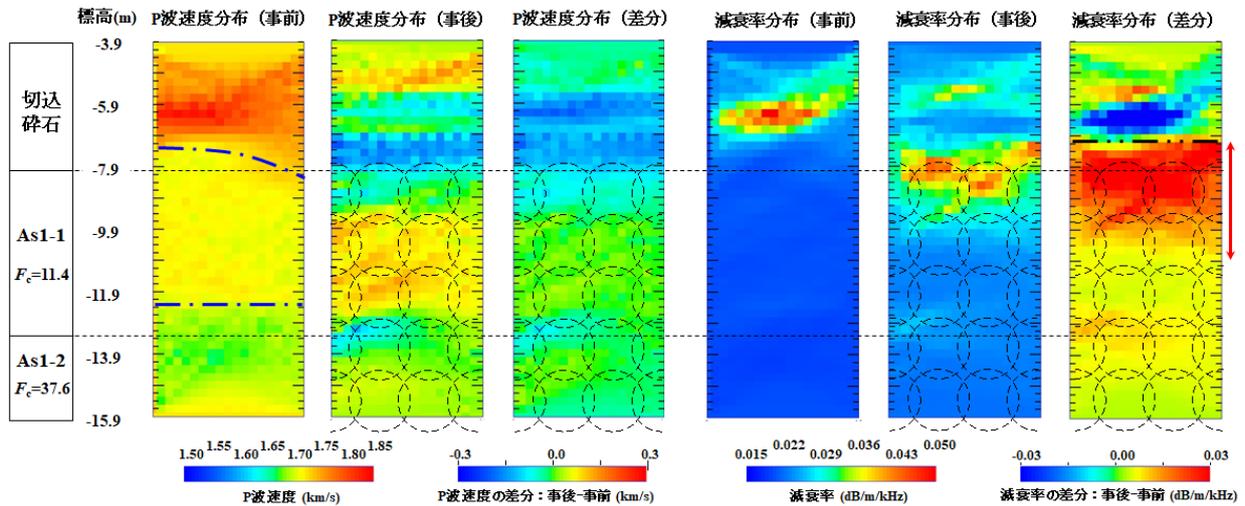


図-8 音響トモグラフィ探査の結果

表-3 浸透固化処理工法における施工管理項目

工種	項目	モデル化	一般的な測定方法
削孔	削孔開始位置	○	トランシット, テープ等による測量
	削孔開始角度	-	デジタルスラント等
	削孔長	○	ケーシングロッド長, 残尺
	注入中心位置	○	位置計測
注入	薬液注入量	○	圧力流量測定装置
	薬液注入速度	-	
	薬液注入圧力	-	
調査	一軸圧縮強さ	-	試料をサンプリング, 室内試験
	シリカ含有量	-	
	物理探査結果	○	

ところで、標高-7m から-11m の範囲 (図中の赤矢印) では、減衰率の差分はそれ以深に比べて大きな値を示しているが、これは土層構成の違いによるものと考えられる。上層の As1-1 の細粒分含有率 F_c は 11.4% であるのに対し、As1-2 の F_c は 37.6% と大きな値を示すことが設計資料より確認されていた。一般に、細粒分が少ないほど地盤の透水係数は大きく、薬液の浸透性も良好であるため、As1-2 に比べ As1-1 の方が薬液の充填性が高くなり、減衰率の増加量が大きくなったと考えられる。

(4) BIM/CIM を用いた施工情報と探査結果の統合管理

本節では、施工管理情報を忠実に 3D モデル化し、物理探査の結果と統合管理することで多角的に施工品質を評価する手法を提案する。

浸透固化処理工法において、改良体の体積 V は、その形状を球形と仮定するため、式(2)、(3)で表される。

$$V = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2} \right)^3 \quad (2)$$

$$Q = \frac{n}{100} \frac{\alpha}{100} V \quad (3)$$

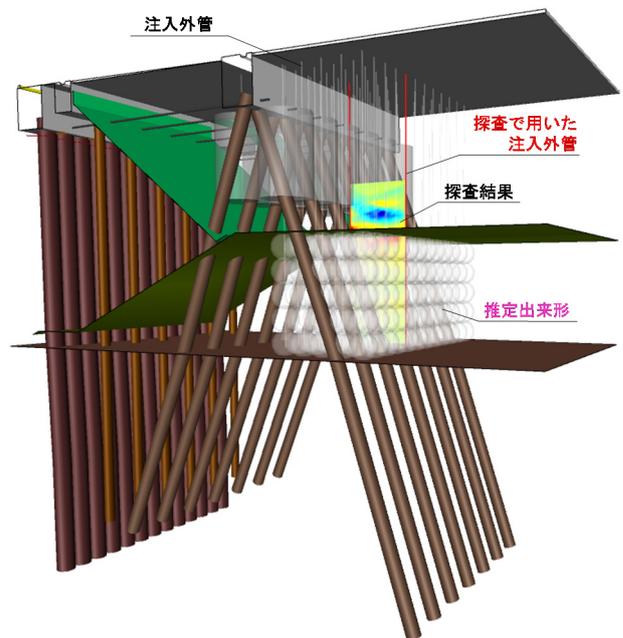


図-9 施工管理情報を基に作成したBIM/CIM

ここに、 D は改良体の直径、 n は間隙率、 α は充填率である。配合設計では、細粒分が多い等の理由で、間隙の内 $\alpha\%$ の部分にしか薬液は充填されないと考える (式(3))。一方、浸透固化処理工法における代表的な施工管理項目を表-3に示す。改良体の注入中心位置 (x, y, z 座標) は、削孔管理項目により定義される。加えて、注入管理項目の薬液注入量 Q と式(2)、(3)により改良体の大きさを推定することができる。以上の方法で施工管理情報を基に推定した 3D の出来形と、図-8 の減衰率分布 (差分) を統合した 3D モデルを図-9に示す(以降、BIM/CIM と呼ぶ)。今回は、探査結果 1 断面のみが統合されているが、4.(1)で述べたとおり、注入外管の組合せによって任意の断面を探査することができるため探査範囲の選択肢は多い。本手法を用いることで、施工エリア内の薬液改良の効果を広範囲・立体的に計測することが可能となる。

一方、モデルに反映した施工管理項目を表-3中に丸印で示す。本工事では、計画どおりの施工がなされているため、BIM/CIMの外観に違和感は認められないが、工事によっては、埋設物を回避するために削孔開始位置を変更したり、地盤条件不一致のため注入を中止したりすることもある。BIM/CIMを用いることで、このようなイレギュラーな施工の結果を視覚的に表現することが可能となり、事後調査において重点的に調査すべき箇所を認識しやすくなる。このような箇所で、音響トモグラフィ探査や一軸圧縮試験等の事後調査を実施し、さらに、これらの結果をBIM/CIMにフィードバックすることで、「施工管理情報を根拠に推定した出来形」と「実際の地盤で計測した事後調査結果」という異なる観点から改良効果を検証できるようになるため、施工の信頼性が向上するものと期待している。

5. まとめ

薬液改良地盤の出来形把握のための物理探査の適用性について検討した。得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 室内模型実験において、P波の減衰率により薬液改良前後の地盤の状態変化を把握できることを確認した。同時に、今回の実験条件下においては、P波の減衰率により薬液改良地盤の一軸圧縮強さや変形係数を推定できることを示した。
- 2) 現地実験においては、P波の減衰率の測定が可能な音響トモグラフィ探査により、薬液改良範囲を把握できる可能性を示した。ただし、出来形を直接的に検査した結果との比較検証には至っていないため、今後もデータの蓄積が必要と考えている。

最後に、施工管理情報と物理探査の結果をBIM/CIMにより統合管理する方法を提案したが、この方法により、

異なる観点から視覚的に改良効果を検証できるようになるため、施工の信頼性が向上することが期待される。

謝辞：現場実験の実施にあたっては国土交通省東北地方整備局塩釜港湾・空港整備事務所および国土交通省関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所にご協力頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 善功企：地盤改良効果の評価と課題，基礎工，Vol.41, No.11, pp.1, 2018.
- 2) 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.
- 3) 小峯秀雄：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適用範囲，土木学会論文集，第561号/III-38, pp.89-98, 1997.
- 4) 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，第603号/III-44, pp.129-138, 1998.
- 5) 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，pp.373-376, 2014.
- 6) 堤彩人，山本敦，榊原淳一，高野大樹，高橋英紀：薬液改良土を伝播する弾性波の振幅減衰特性に関する実験的検討（その1），第56回地盤工学研究発表会，12-2-4-04, 2021.
- 7) 堤彩人，山本敦，榊原淳一，高野大樹，高橋英紀：薬液改良土を伝播する弾性波の振幅減衰特性に関する実験的検討（その2），第56回地盤工学研究発表会，12-2-4-05, 2021.
- 8) 坂元宏司，堤彩人，山本敦，高野大樹，高橋英紀，榊原淳一：薬液注入孔を用いた弾性波トモグラフィ探査の試み，土木学会第75回年次学術講演会，VI-812, 2020.
- 9) 国土交通省大臣官房技術調査課：設計業務等標準積算基準書 設計業務等標準積算基準書（参考資料）令和2年度版，経済調査会，2020.

(Received February 3, 2022)

(Accepted May 9, 2022)

WORK PROGRESS CONTROL FOR GROUND IMPROVED BY CHEMICAL GROUTING USING P-WAVE AMPLITUDE ATTENUATION TOMOGRAPHY

Ayato TSUTSUMI, Atsushi YAMAMOTO, Masahiro KAI,
Daiki TAKANO, Hidenori TAKAHASHI and Junichi SAKAKIBARA

In a ground improvement work, there are cases in which a design must be changed due to problems such as inconsistency in the position of buried objects and discrepancy in the ground conditions. In these cases, advanced management methods of work progress control are required to properly evaluate the effect of ground improvement. This research examined the applicability of geophysical exploration to visualize the ground improved by chemical grouting. The laboratory model test and the field test at construction site were performed using the P-wave amplitude attenuation tomography. These tests demonstrated that the P-wave amplitude attenuation can recognize the change in ground condition due to chemical grouting. Besides, we discussed the method in which construction information and geophysical exploration result were integrated by BIM/CIM.