

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・品質管理手法に関する研究

高野 大樹*・高橋 英紀**・堤 彩人***・山本 敦****
山下 航洋*****・榎原 淳一*****

要 旨

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。

キーワード：P 波減衰，弾性波トモグラフィ，薬液注入工法，BIM/CIM

* 地盤研究領域 土質研究グループ長
** 地盤研究領域 地盤改良研究グループ長
*** 五洋建設株式会社 土木設計部 担当課長
**** 五洋建設株式会社 土木設計部 地盤耐震グループ長
***** 五洋建設株式会社 土木設計部 係員
***** JFEシビル株式会社 音響トモグラフィ部長
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1
国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5053 E-mail：takano-d@p.mpat.go.jp

Quality Control for Ground Improved by Chemical Grouting Using P-Wave Amplitude Attenuation Tomography

Daiki TAKANO*

Hidenori TAKAHASHI**

Ayato TSUTSUMI***

Atsushi YAMAMOTO****

Koyo YAMASHITA*****

Junichi SAKAKIBARA*****

Synopsis

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 quality 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 element experiment, the model ground experiment and the field experiment at construction site were performed using the P-wave amplitude attenuation tomography. These experiments 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.

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

* Head of Soil Mechanics and Geo-Environment Group, Geotechnical Engineering Department
** Head of Soil Stabilization Group, Geotechnical Engineering Department
*** Manager, Design and Engineering Division, PENTA-OCEAN CONSTRUCTION CO., LTD.
**** Head of Geotechnical and Seismic Design Group, Design and Engineering Division,
PENTA-OCEAN CONSTRUCTION CO., LTD.
***** Staff Member, Design and Engineering Division, PENTA-OCEAN CONSTRUCTION CO., LTD.
***** General Manager, Geo-Acoustic Department, JFE Civil Engineering & Construction Corporation
3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute
Phone : +81-46-844-5053 E-mail : takano-d@p.mpat.go.jp

目 次

要 旨	3
1. まえがき	6
2. 物理探査技術を用いた地盤改良効果の評価事例	6
2.1 既往の研究と実施例	6
2.2 P波減衰トモグラフィ探査法の概要	6
3. 薬液改良地盤の力学特性とP波の減衰特性の関係	7
3.1 室内要素実験の概要	7
3.2 実験結果と考察	10
3.3 まとめ	11
4. 薬液改良地盤の出来形確認に対するP波減衰トモグラフィ探査法の適用性の検討	11
4.1 模型土槽実験の概要	12
4.2 実験結果と考察	13
4.3 まとめ	14
5. 岸壁の耐震改良工事における薬液改良地盤の出来形可視化実証実験	14
5.1 現地実証実験の概要	14
5.2 実験結果と考察	15
5.3 まとめ	16
6. BIM/CIMを用いた施工情報と探査結果の統合管理	16
6.1 地盤改良工事のBIM/CIM作成方法	16
6.2 BIM/CIMによるリスクの可視化	17
6.3 BIM/CIMによる出来形・品質管理方法の提案	17
7. 結論	18
謝辞	18
参考文献	18

1. まえがき

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・空港エリア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⁾に代表される薬液注入工法で改良した地盤（以降、薬液改良地盤と呼ぶ。）を対象に、物理探査法による出来形・品質可視化の可能性を検討する。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し、改良地盤の出来形・品質を評価する方法について述べる。

2. 物理探査技術を用いた地盤改良効果の評価事例

2.1 既往の研究と実施例

物理探査技術は弾性波や電磁波などの波動現象を利用するものであり、地中や構造物内部の伝播特性からその内部構造を可視化する技術である。一般的な調査手法であるボーリング調査は物性や物質を直接確認できるという長所と点の調査しかできないという短所があるのに対して、物理探査技術は波動の伝播特性から物性や物質を間接的にしか把握できないという短所と面的または立体的に広範囲な非破壊調査が可能という長所を持つ。この広範囲の調査が可能であるという特長は改良効果、特に改良範囲の把握には有効な手段であると考えられる。例えば小峯、後藤³⁾は溶液型注入材の浸透部分の地盤比抵抗が小さくなることを利用し、比抵抗トモグラフィによる改良範囲の評価方法を提案、実証した。これに対して、弾性波を用いた手法に関して、榎本ら⁴⁾は飽和砂を用いた実験結果から、液状化の危険性がある飽和砂の場合には溶液型注入材の注入前後でP波（縦波）速度は変化しないことを示している。また、佐々木ら⁵⁾は、注入によ

りP波速度はほとんど変化しないがS波（横波）速度は増加することを模型実験により示している。

ところで、山崎ら⁶⁾は、室内試験の結果から、溶液型注入材は土の動的変形特性に影響を与えないが一軸圧縮強さは増加することを示した。山崎らは、溶液型注入材は土粒子間の間隙水を寒天のようなゲルで置換しただけであり微小な歪レベルでは強度は変化しないため、歪レベルが小さい範囲（ 10^{-3} 以下）で調査するP波を用いた探査は適用できないとしている。また、一軸圧縮強さの増加は、間隙水がゲルに置換されたことで土粒子間の粘着力が増加したためであるとしている。榊原ら⁷⁾はこの土粒子間の粘着力の増加に着目し小型土槽を用いた実験を行い、薬液の浸透範囲ではP波の振幅が減衰することを確認し、P波振幅減衰トモグラフィ探査法を用いることで薬液注入範囲の可視化が可能であることを示した。

2.2 P波減衰トモグラフィ探査法の概要

(1) 探査方法の概要

P波減衰トモグラフィ探査法⁸⁾は音響トモグラフィ探査とも呼ばれる技術であり弾性波探査手法の一つに分類される。一般的な弾性波探査は発振方法として爆薬や機械振動による衝撃波を用いるのに対して、P波減衰トモグラフィは圧電素子を用いた孔内発振器による連続波を用いる。弾性波探査波はそのメカニズムにより周波数や発振振幅の制御が困難であるのに対して、P波減衰トモグラフィは正確に制御した周波数と振幅を持つP波を発振することができる。発振波を正確に制御するため再現性が極めて高いことも長所の一つといえる。図-2.1に探査法の概念図を示す。2本のボーリング孔の一方に孔内発振器、他方に孔内受信器を設置し地中を伝播したP波の到達時間と振幅を計測する。

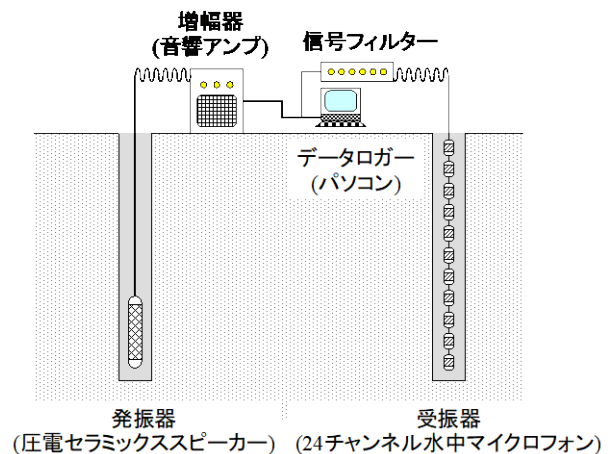


図-2.1 P波減衰トモグラフィ探査法の概要

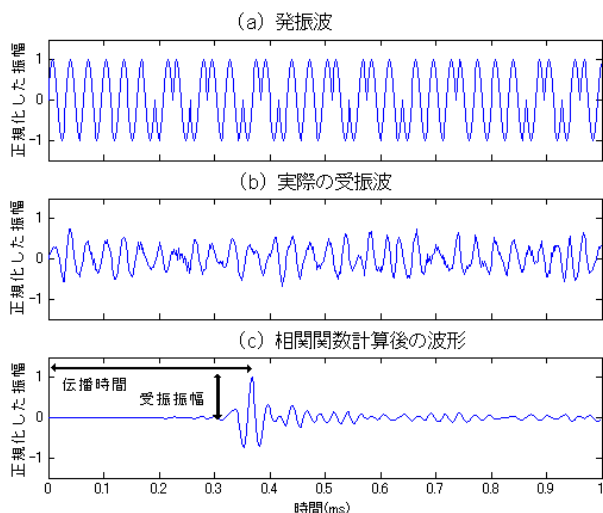


図-2.2 疑似ランダム波の例

(2) 疑似ランダム波

P波減衰トモグラフィは発振波として疑似ランダム波を用いることにも特徴がある。疑似ランダム波はパルス圧縮⁸⁾と呼ばれる信号増幅方法の一つである。連続波を用いることにより送信するエネルギーを時間軸上に分散させているため、パルス波に比べて送信信号全体のエネルギーを大きくすることができる。疑似ランダム波は、特定のデータ長を持つ連続波でありこの範囲ではランダムな性質を持つこと、単一周波数の正弦波をベースとし位相変換されていること、自己相関関数がこの周波数に依存した波長のパルス波となることが特長である。図-2.2に疑似ランダム波の例として、発振波(a)、実際の受振波(b)、発振波と受振波の相関計算後の波形(c)を示した。相関関数のピーク値となる時間(図-2.2(c)では0.36 ms付近の極大値)は疑似ランダム波の到達時間であり、ピーク値の大きさは到達波の持つ受振エネルギーと考えてよいので、これにより地中を伝播してきた波の到達時間と振幅を得ることができる。

(3) 振幅減衰の評価方法⁹⁾

本研究では振幅減衰を評価するために発振音圧と発振周波数、伝播距離で正規化した減衰率(Q^{-1})を用いた。 Q は Q 値と呼ばれる媒質の減衰特性を表す無次元量であり、この逆数 Q^{-1} を減衰率とした。減衰率の計算方法を式(1)および(2)に示す。ここで A 、 A_0 は受信音圧(振幅)、発振音圧(振幅)、 d は伝播距離、 V_p 、 f はP波速度、発振周波数である。式(2)に示されるように減衰率は発振周波数による正規化が必要であり、減衰率を把握するためには周波数の制御が重要であることがわかる。

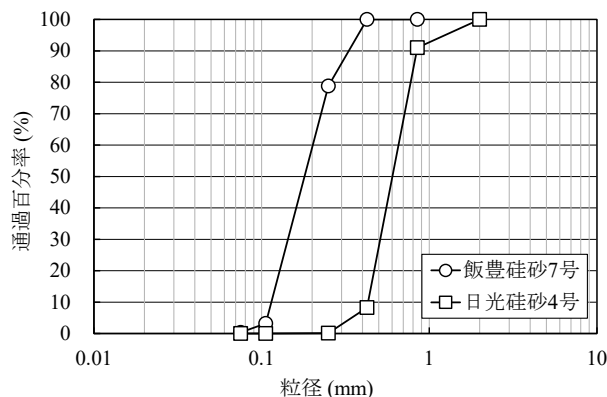


図-3.1 砂試料の粒径加積曲線

表-3.1 砂試料の代表的な物理特性

試料		飯豊硅砂7号	日光硅砂4号
土粒子密度	ρ_s (g/cm ³)	2.640	2.669
50%粒径	D_{50} (mm)	0.17	0.59
均等係数	U_c	1.68	1.26
最小密度	ρ_{min} (g/cm ³)	1.369	1.302
最大密度	ρ_{max} (g/cm ³)	1.684	1.573

$$A = \frac{1}{d} A_0 e^{-\alpha d} \tag{1}$$

$$Q^{-1} = \frac{1}{8.686\pi} \frac{V_p}{f} \alpha \tag{2}$$

以降の章では、P波減衰トモグラフィ探査の適用性に関する室内要素実験、模型土槽実験、現地実証実験の結果について詳述する。

3. 薬液改良地盤の力学特性とP波の減衰特性の関係

本章では、薬液改良地盤を伝播するP波の応答特性に関する基礎的な知見を得るために実施した室内要素実験の結果について述べる。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、薬液改良地盤の一軸圧縮試験の結果とP波速度・振幅減衰の関係を調べる目的で実施した。

3.1 室内要素実験の概要

(1) 実験材料

砂試料は、飯豊硅砂7号と日光硅砂4号を使用した。図-3.1に砂試料の粒径加積曲線を、表-3.1に砂試料の代表的な物理特性を示す。両者の均等係数 U_c は同程度であ

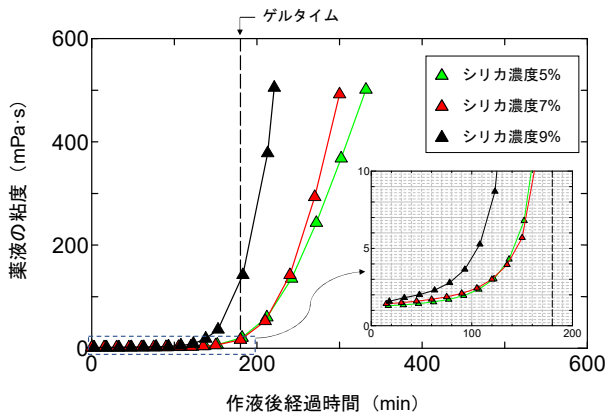
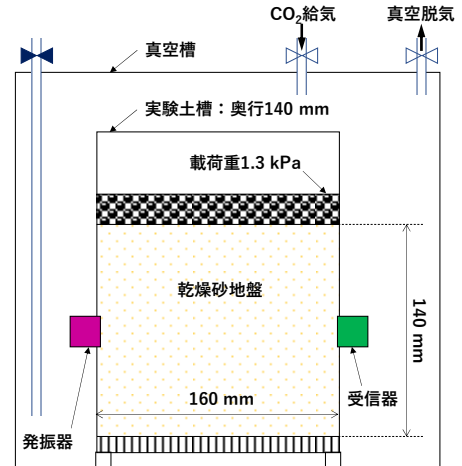


図-3.2 薬液の粘度の経時変化



(a) 乾燥砂地盤の作製イメージ

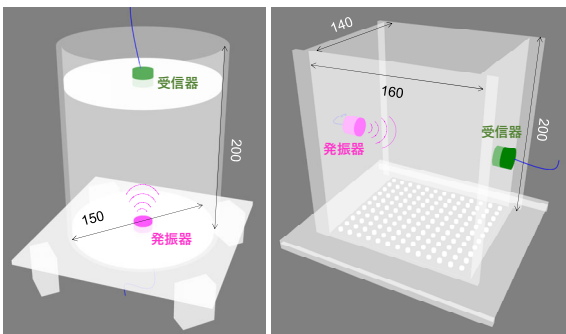


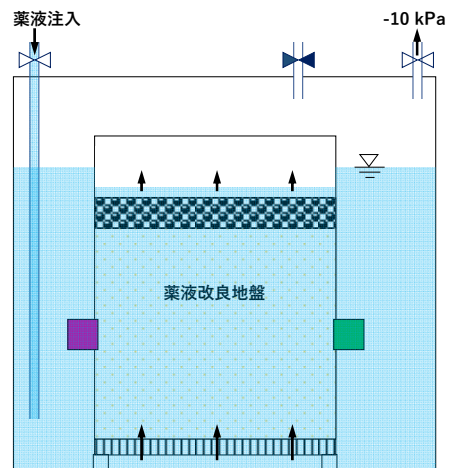
図-3.3 実験容器の模式図

り、粒径の違いは 50%粒径 D_{50} で比較すると 3.5 倍程度である。ほぼ相似形の粒度分布を有する 2 つの試料により、粒径の影響を評価することが、これらの試料の選定理由である。

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シリカ系薬液(エコシリカ III)を使用した。シリカ濃度は 5%, 7%, 9% とし、薬液の pH はゲルタイム 180 min を目標に配合を調整した。図-3.2 に薬液の粘度の経時変化を示す。薬液の粘度は、ゲル化前は水と同程度の値 (1 mPa·s) を示すが、ゲルタイム (180 min) 付近になると急激に上昇することがわかる。また、その上昇率はシリカ濃度が高いほど大きくなる傾向にある。

(2) 実験方法

実験は、液体・ホモゲル・飽和砂・改良地盤を対象に、これらの材料を伝搬する P 波の速度と振幅の変化を所定の時間間隔で連続的に計測した (弾性波実験)。ここで、ホモゲルはゲル化した薬液のことである。図-3.3 に実験容器の模式図を示す。



(b) 薬液の浸透注入イメージ

図-3.4 室内要素実験の模式図

液体・ホモゲルの弾性波実験は、アクリル製の円形断面容器 (直径 150 mm, 高さ 200 mm) を用いて、鉛直方向に P 波を発振・受信する方法とした。円形断面容器を用いた実験では、容器の高さ 160 mm 程度の位置まで液体を供給した後、センサーを取り付けた蓋を液面の位置で固定し実験を開始した。

ホモゲルについては、完全にゲル化した後、蓋の固定を解除しホモゲルの収縮に追従できるようにした。また、実験中には、ホモゲルの収縮の程度を調べるため、蓋の鉛直変位量をレーザー変位計により計測したが、最大で 0.3 mm 程度の値しか観測されなかったため、P 波の速度や振幅に与える影響は小さいと考え、データ整理上はこの値を考慮していない。

表-3.2 弾性波実験ケース一覧表

Case	実験容器	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	矩形	飯豊硅砂 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					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			1.45	30	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	7	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			日光硅砂 4号	1.49	73	5	98.24	79.02	0.0031	0.0174	0.0143	4.6	1719	1719	0	0	81.2
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	円形	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		
W			水道水	101.72	102.13	1482	1482					0	0	※液体のため実施不可能			
SW			海水	101.72	102.13	1523	1523					0	0				
ASW			人工海水	101.33	101.71	1517	1517					0	0				

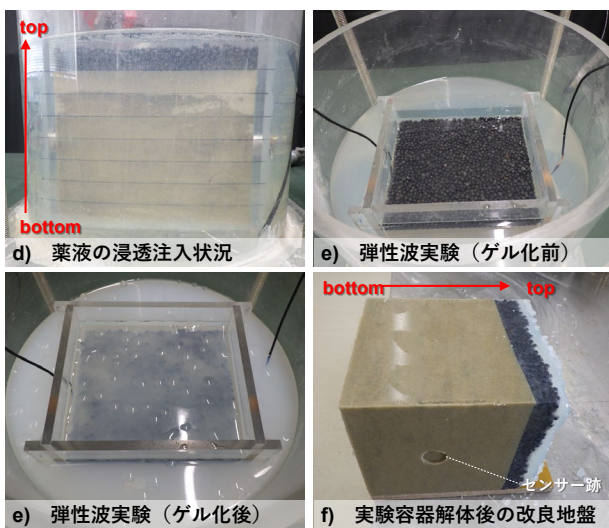
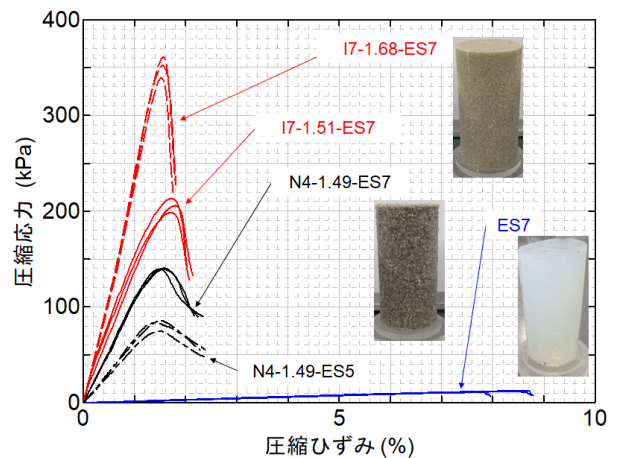


図-3.5 実験状況の写真

一方、飽和砂・改良地盤の弾性波実験では、アクリル製の矩形断面容器(幅 160 mm, 奥行 140 mm, 高さ 200 mm)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供給できる構造とした。P 波の振幅は地盤の飽和度の影響を強く受ける。薬液の浸透方向にセンサー類を設置するとセンサーの下に気泡が残存し、この影響で受信振幅が不安定になることが懸念されたため、水平方向に発振・受信する方法を採用した。図-3.4 に飽和砂・改良地盤の弾性波実験の模式図を示す。実験は以下の手順で実施した。

- 実験容器内に脱気した水道水を満たし、これを媒質とし、疑似ランダム波を発振・受信して受信振幅を取得した(発振振幅 A_0 のキャリブレーション試験)。
- 実験容器から脱気水道水を排出し水分を拭き取った後、所定の密度で乾燥砂地盤(高さ 140mm)を作製した。実験容器を真空槽内に移し、浸透注入による



地盤隆起対策として圧力換算で 1.3 kPa の鉛玉で載荷

図-3.6 一軸圧縮試験結果の一例

した。

- 真空槽に蓋をして、負圧(-90 kPa 程度)を 1 時間載荷した。その後、CO₂の給気と 10 分間の負圧載荷を 3 回繰り返した。CO₂の給気は圧力ゲージの値が-10 kPa になるまでとし、大気開放しないよう注意した(図-3.4(a))。
- 真空槽内に薬液を注入し、模型地盤内外の水位差により、地盤底部から薬液を浸透注入した。浸透注入中も負圧を載荷し続け、鉛玉の水没をもって注入完了とした(図-3.4(b))。
- 真空槽を大気開放した後、センサーと計測システムを有線接続し、所定の時間間隔で疑似ランダムを発振・受信し振幅の経時変化を調べた。なお、発振周波数は 312 kHz に設定した。
- 弾性波実験を 3 日間継続した後、実験容器を解体し、改良地盤から円筒供試体(直径 50 mm, 高さ 100 mm)を 3 本採取し、一軸圧縮試験を実施した。

図-3.5 に実験状況の写真を示す。表-3.2 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。

3.2 実験結果と考察

(1) 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-3.6に一軸圧縮試験結果の一例を示す。図中の凡例は表-3.2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 3.1(2)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-3.2に整理する。

(2) 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-3.7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しているはずだが、 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。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-3.6 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。本実験では、 A の減衰傾向を減衰率 Q^{-1} で評価する (式(1)(2))。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} が用いられるため、本実験においても Q^{-1} を用いるものとする。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 (手順 a))。表-3.2 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変化 Δ (3days-Initial) と変化率 R ($\Delta / Initial$) を計算した。表-3.2 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。

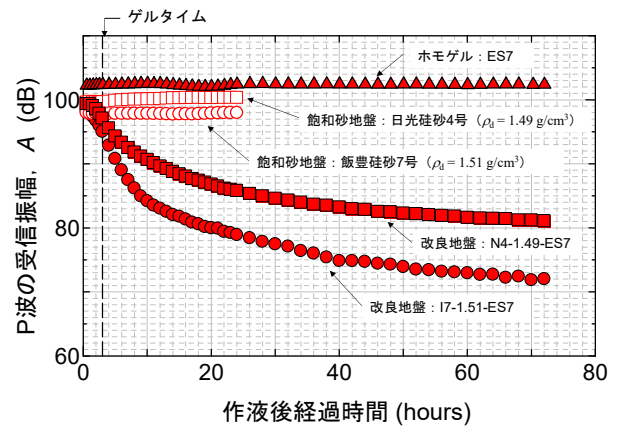


図-3.7 弾性波試験結果の一例

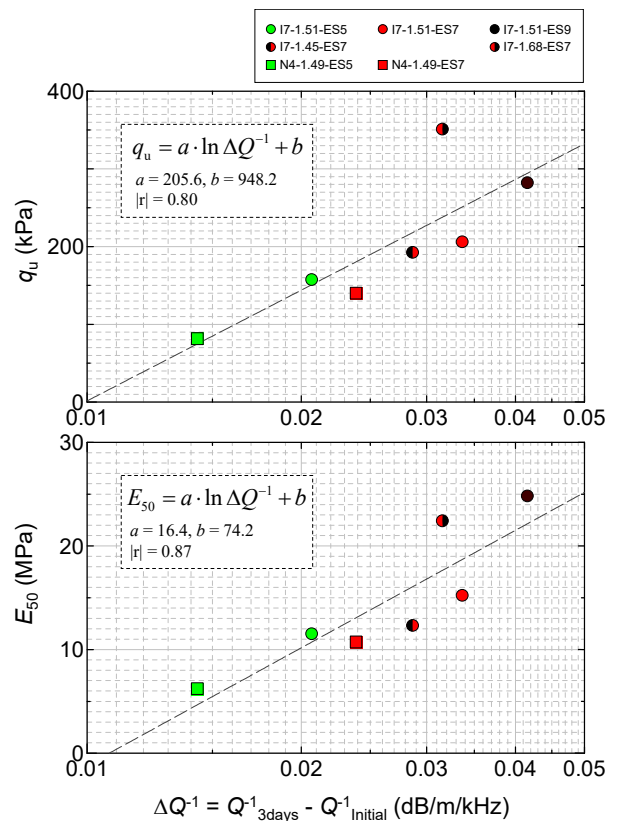


図-3.8 一軸圧縮試験結果と減衰率の関係

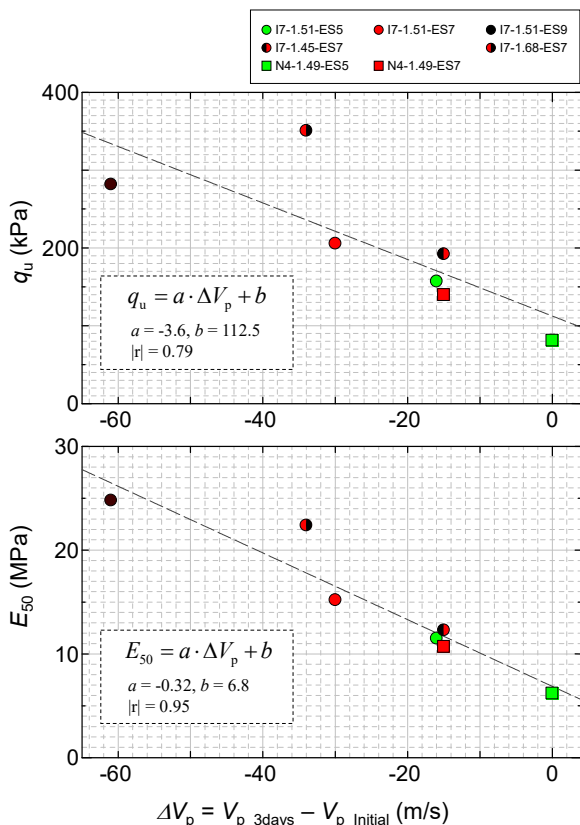


図-3.9 一軸圧縮試験結果とP波速度の関係

図-3.8 に薬液改良地盤の一軸圧縮試験結果 (q_u と E_{50}) と減衰率の変化 (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。

また、図-3.9 に薬液改良地盤の一軸圧縮試験結果 (q_u と E_{50}) と P 波速度の変化 (ΔV_p) の関係を示す。前述のとおり、薬液改良前後の V_p の変化は小さいものの (10 m/s オーダー)、 q_u と E_{50} との相関は認められることから、 V_p による出来形・品質の可視化の可能性も示されたといえる。一方で、 V_p による出来形・品質の可視化は現地で 10 m/s 程度の高い計測精度が求められることが確認された。また、コンクリートのような材料では強度が大きくなるほど V_p も大きくなるが、薬液改良地盤では q_u が大きくなるほど V_p が低下していることは興味深い実験事実である。この結果は、薬液のゲル化が影響を与えている可能性が考えられる。

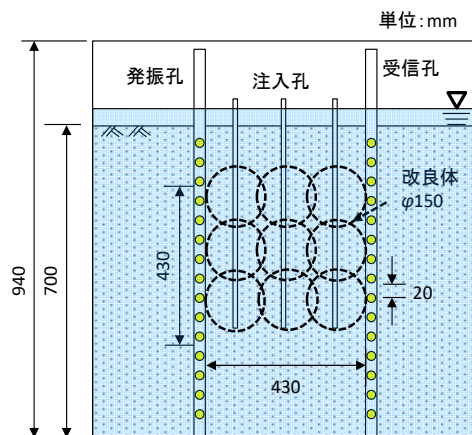


図-4.1 模型土槽実験レイアウト (断面図)

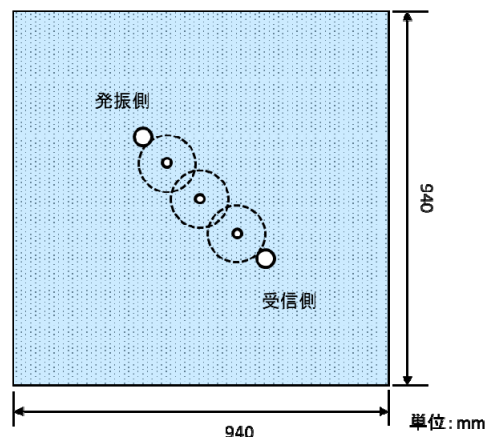


図-4.2 模型土槽実験レイアウト (平面図)

3.3 まとめ

室内要素実験により、薬液改良地盤を伝搬する P 波の応答特性を調べた結果、改良地盤の強度・変形特性 (q_u と E_{50}) と P 波の応答特性 (ΔQ^{-1} の ΔV_p) には相関関係が認められた。このことから、 ΔQ^{-1} の ΔV_p により、薬液改良地盤の出来形・品質を可視化できる可能性が示されたといえる。ただし、 ΔV_p よりも ΔQ^{-1} の方が改良前後の変化率が大きいため、様々な計測誤差を有する現地での探査においては、 ΔQ^{-1} による探査がより有望な薬液改良地盤の可視化方法と考えられる。

4. 薬液改良地盤の出来形確認に対するP波減衰トモグラフィ探査法の適用性の検討

前章で述べたように P 波の振幅減衰は薬液改良地盤の一軸圧縮強さに比例して大きくなることがわかった。続いて本章では改良体の出来形確認に対する適用性を検討

するために行った模型土槽実験¹⁰⁾の概要とその結果について述べる。

4.1 模型土槽実験の概要

実験レイアウトを図-4.1, 図-4.2に, 実験に用いた模型土槽と実験状況を図-4.3, 図-4.4に示す。高さ, 幅, 奥行きがいずれも940 mmの亚克力容器内に予め発振孔と受信孔および注入孔を設置し, 内部を脱気水で満たした後, 水中落下法により前章でも用いた飯豊珪砂7号を投入した。相対密度は約50%であった。続いて真空脱気により土槽内部の気泡を極力取り除いた後, 発振孔と受信孔を用いて注入前のトモグラフィ計測を行った。計測後, 3本の注入孔から前章で用いたものと同じ薬液(シリカ濃度9%)を注入した。2日間の養生後, 注入後のトモグラフィ計測を行い注入前と注入後の結果を比較した。発振孔と受信孔間の距離は430 mm, 計測深度はGL-250 mmからGL-920 mm, センサー設置間隔は20 mmであった。使用した実験装置を表-4.1, 図-4.5に示す。前章の供試体試験と同様に発振波には疑似ランダム波を用いた。また計測孔間の距離を考慮して発振周波数は50 kHzとした。実験に用いた周波数は, 第5章で示す現場計測における距離, 波長の比とほぼ同じになるように決めた。

解析は以下の手順で行った。まず, 発振波と受信波の相関関数の計算により得られた波形から最初に到達した波の到達時間と振幅を読み取った。次に, 波動解析と特異値分解法¹¹⁾を用いた逆計算を行い減衰率分布図と速度分布図を作成した。逆計算のセルサイズはセンサー設置間隔と同じ20 mmとした。なお, 振幅減衰率 Q^{-1} は式(1)と(2)を用いて計算した。

解析結果の検証を行うため, 実験終了後に注入により作製した改良体を掘り出した。これを図-4.6に示す。

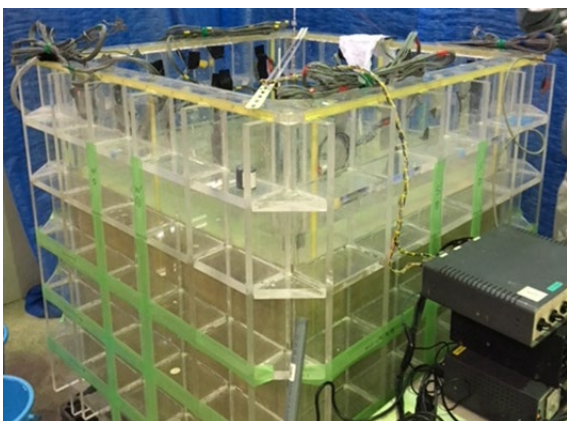


図-4.3 実験に用いた模型土槽

図中に点線で実験前の計画出来形を示すが, これとはかなり異なった出来形であった。

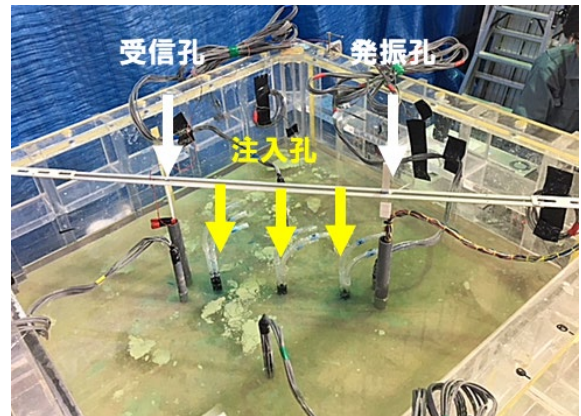


図-4.4 設置した発振孔, 受信孔, 注入孔

表-4.1 模型土槽実験に使用した主な機材

名称	メーカー・仕様
発振センサー 受信センサー アレイ	富士セラミックス製, 圧電素子型 外径 10 mm, 厚み 5 mm, 使用可能周波数 20 kHz~300 kHz (実績) センサー数 33 個, センサー間隔 20 mm
信号フィルタ	JFE シビル製, 増幅ゲイン 1 倍~100 倍, 使用可能周波 5 kHz から 300 kHz (実績)
データロガー	JFE シビル製, 入力 4 ch, 出力 1 ch, AD 変換速度 1 MHz/ch, DA 変換速度 2 MHz/ch, 分解能 14 bit



図-4.5 計測機材の写真



点線は計画した注入範囲

図-4.6 掘り出した改良体

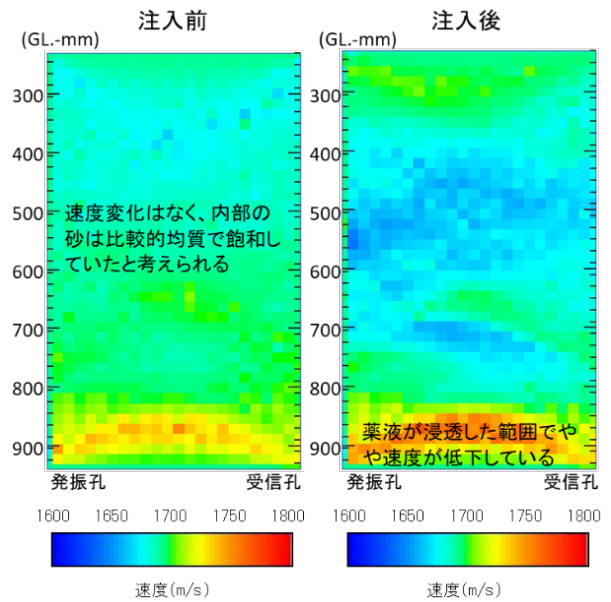


図-4.8 解析結果（速度分布）

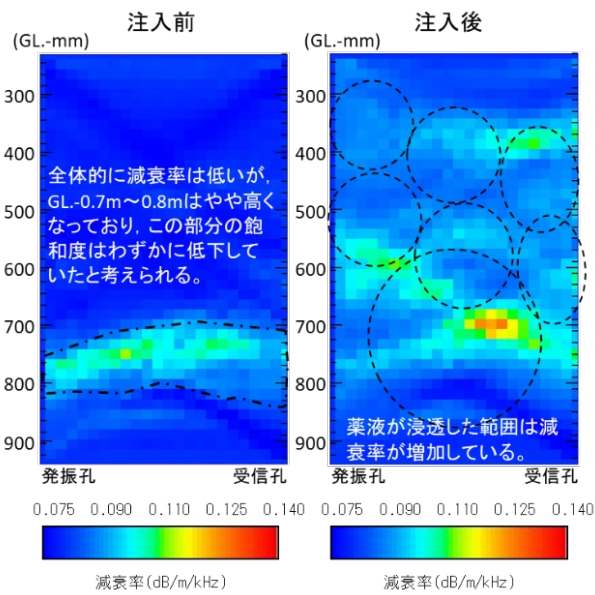


図-4.7 解析結果（減衰率分布）

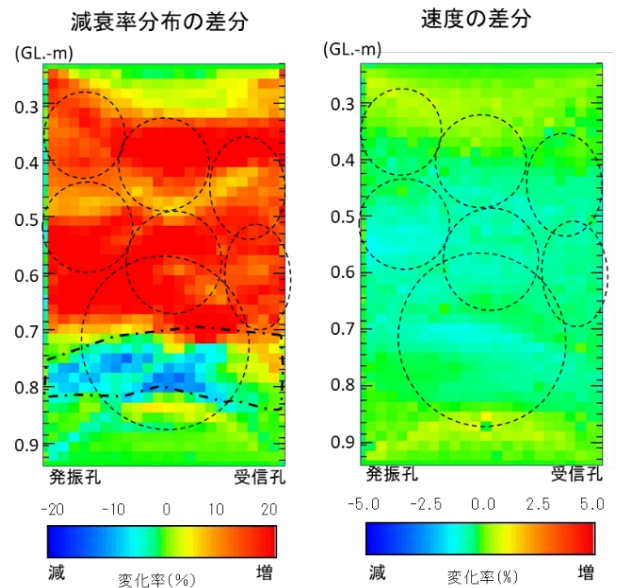


図-4.9 解析結果（差分）

4.2 実験結果と考察

トモグラフィ計測の結果として減衰率分布図と速度分布図を図-4.7と図-4.8に示す。左は注入前、右は注入後の結果を示している。また、注入前後の差分は、 $(\text{注入後の値} - \text{注入前の値}) / \text{注入前の値}$ を計算して変化率として求めた。これを図-4.9に示す。図中には掘り出した改良体の観察結果（形状と位置）を点線で示した。これらの図から以下のことがわかる。

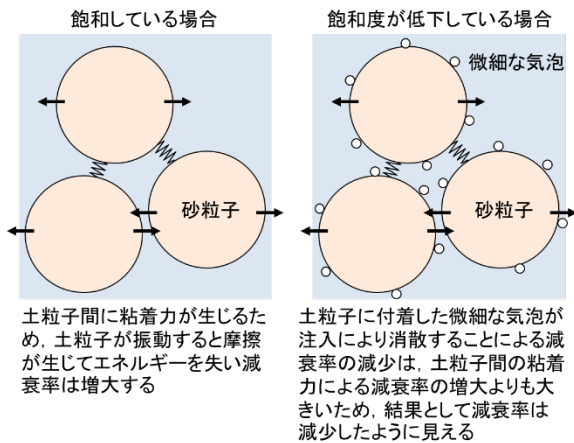


図-4.10 減衰率変化のメカニズム

注入前の減衰率は0.075 dB/m/kHzと全体的に小さいがGL.-700 mmからGL.-800 mmの範囲で0.100 dB/m/kHzとやや大きい部分が認められる(図中一点鎖線で囲んだ部分). 注入後は薬液が浸透した範囲で減衰率は増加した. 注入前後の減衰率の差分は薬液が実際に浸透した範囲を良くとらえており、改良体全体が傾斜している様子がよくわかる. また、GL.-400 mmからGL.-500 mmの範囲で変化率がやや小さい部分がある. これは改良体のむらを示している可能性がある. 一方、注入前に減衰率がやや大きかったGL.-700 mmからGL.-800 mmの範囲では減衰率は逆に減少した. この理由として図-4.10に示す推察を行った. 地盤が飽和している場合は土粒子間に生じる粘着力により減衰率が増大するが、飽和度が低下している場合には土粒子に付着した微細な気泡が注入により消散して減衰率が減少する. この減衰率の減少の影響が大きかったため結果として減衰率が減少したものと考えられる.

一方、速度に関しては、注入の前後で速度が1,690 m/sから1,650 m/s程度に低下した. これは前章で述べた要素実験の結果と整合的である. しかし、減衰率ほど明瞭に改良体の出来形を表してはならず、過去の知見と同様に、弾性波速度の変化から出来形を推定するのは難しいことがわかった.

4.3 まとめ

模型土槽実験から薬液が浸透した範囲で振幅は減衰し、減衰率の差分を求めることで出来形確認が可能であることがわかった. 一方、速度の差分は減衰率ほど明瞭な違いは得られなかった. また、飽和度が低下している部分では逆に振幅は増加した. この原因は粘着力の増加による減衰率の増大と土粒子に付着した気泡の消散による減

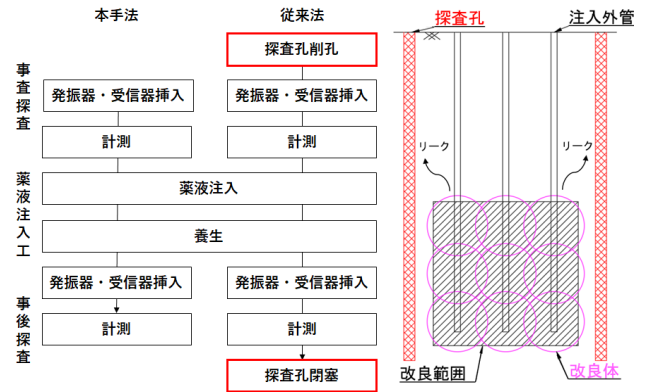


図-5.1 薬液改良地盤の合理的な探査手法の概念

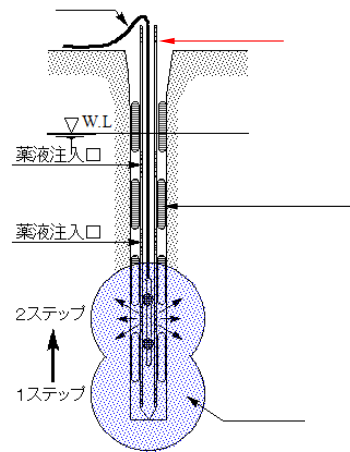


図-5.2 注入外管の模式図

衰率の減少という2つの現象が重なったためと考えられる. 薬液の出来形を確認するには減衰率の差分を比較することが有効であるが、差分画像の解釈には事前に元の地盤の状態を把握しておくことが重要であると考えられる.

5. 岸壁の耐震改良工事における薬液改良地盤の出来形可視化実証実験

前章では模型土槽でP波減衰により薬液改良地盤の出来形を可視化できることを確認した. 本章ではP波減衰トモグラフィ探査法の実工事での適用性を検討した現地実証実験の概要とその結果について述べる.

5.1 現地実証実験の概要

(1) 薬液改良地盤の合理的な探査手法

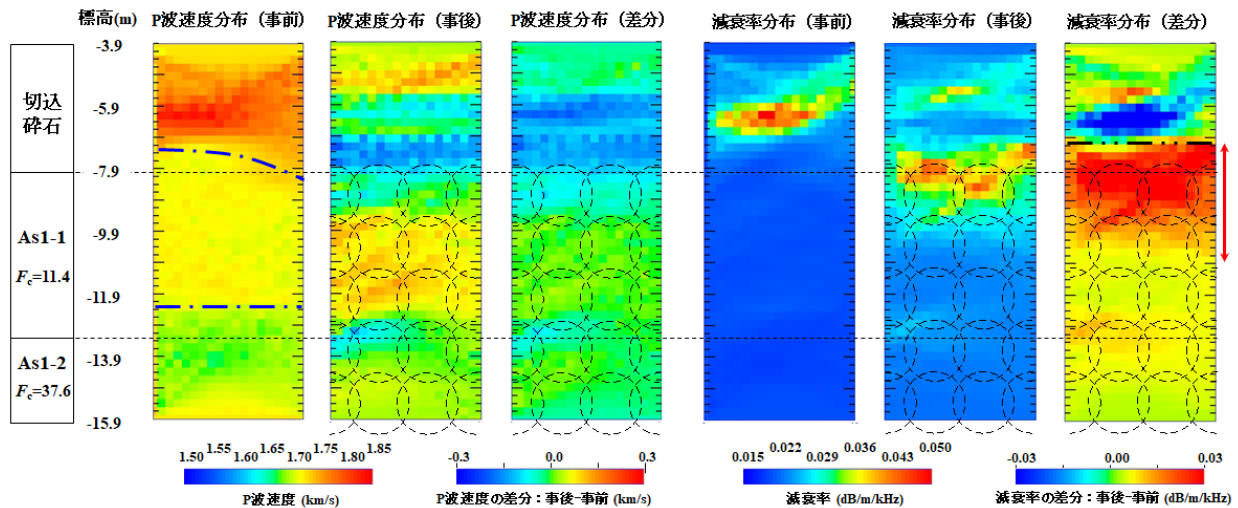


図-5.4 P波減衰トモグラフィ探査の結果

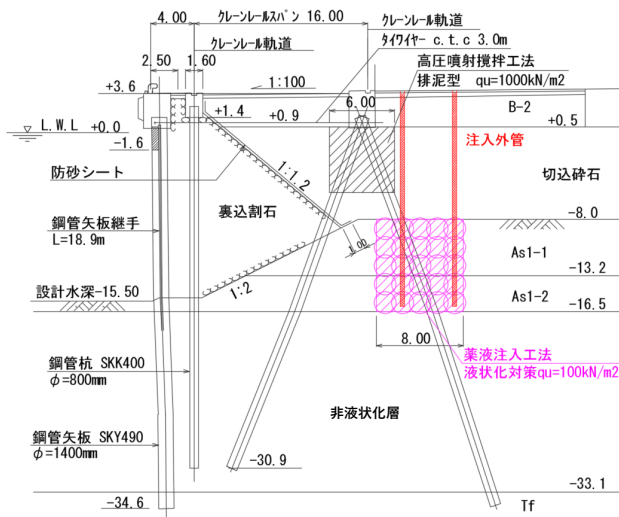


図-5.3 実験対象断面の模式図

本節では、浸透固化処理工法が採用された工事において、P波減衰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-5.1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。図-5.2に注入外管の模式図を示す。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。

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¹²⁾。実験対象断面の模式図を図-5.3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、トモグラフィ計測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、注入外管を用いる方法の合理性について検討する。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-5.3より土層別のボーリング長を測定し、積算基準書¹³⁾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-5.1に示す。表より、今回の実験条件では、探査孔1本につき作業時間を5日程度短縮できることが確認された。広範囲に詳細な探査を実施する際には、探査断面を増やす必要があり、探査孔の本数も増加するため、従来法に対する本手法の工程的・費用的な利点がより大きくなるといえる。

5.2 実験結果と考察

(1) 岸壁の耐震改良工事における探査結果

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。トモグラフィ計測の結果を図-5.4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-5.4中

表-5.1 従来法による探査に要する想定作業時間

施工条件		積算基準：φ86 mm		想定作業時間	
土層名	層厚 (m)	土質	作業量 (m ³ /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	

の青色一点鎖線)。一方、設計時の土層境界「切込砕石とAs1-1 (-8 m 付近)」、「As1-1 と As1-2 (-13 m 付近)」と速度境界の深度を比較すると、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-7 m (黒色二点鎖線)に深について、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 (-8 m から-16 m) 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 $Q_{Initial}^{-1}$ 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。

ところで、標高-7 m から-11 m の範囲 (図中の赤矢印) では、減衰率の差分はそれ以上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薬液の浸透性が良好であり、より大きい体積の薬液が浸透するため、As1-2 に比べ As1-1 の方が薬液の相対量が大きくなり、減衰率の増加量が大きくなったと考えられる。

5.3 まとめ

岸壁の耐震改良工事において、P 波の伝搬速度と減衰率の測定が可能な音響トモグラフィ探査により、薬液改良範囲の出来形可視化実験を実施した。実験では、薬液注入のための注入外管を探査孔として使用できることを示し、この方法により、探査孔新設にかかる時間を 5 日/

本程度削減できることを確認した。また、探査の結果、薬液注入前の地盤の P 波速度の分布より粘土・砂などの土層区分を判別できること、薬液注入前後の地盤の減衰率の分布より薬液改良範囲の出来形を可視化できる可能性があることを示した。ただし、本実験の結果と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。

6. BIM/CIMを用いた施工情報と探査結果の統合管理

前章において、P 波減衰トモグラフィ探査 (物理探査) により、薬液改良範囲の出来形を把握できる可能性を示したが、同時に、解釈が難しい現象も確認された。本章では、施工管理情報を基に BIM/CIM を作成し、これに物理探査の結果を統合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。

6.1 地盤改良工事の BIM/CIM 作成方法

「2023 年までに小規模を除く全ての公共工事に BIM/CIM を原則適用する」方針が示されたことを背景に、最近の浸透固化処理工法による地盤改良工事では、BIM/CIM を作成することが多くなっている¹⁴⁾。同工法では、改良体の形状を球形と仮定するため、改良体の体積 V は式(3)、(4)で表される。

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

$$Q = \frac{n}{100} \frac{\alpha}{100} V \quad (4)$$

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、間隙内の $\alpha\%$ の部分にしか薬液は充填されないと考える (式(4))。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-6.1 に示す。BIM/CIM 上では、改良体の中心位置は削孔出来形上の任意の点として表現され、その空間座標(x, y, z)は施工管理項目：削孔開始位置・削孔開始角度・削孔長・注入中心位置より決定することができる。加えて、注入管理項目の薬液注入量 Q と式(4)、(5)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作成した 3D の改良体出来形 (BIM/CIM) と、図-5.3 の減衰率分布 (差分) を統合したものを図-6.1 に示す。減衰率分布 (差分) は TIN サーフェスにより 2D 断面を作成し、BIM/CIM 上の探査位置に配置した。

表-6.1 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	○	ゲーシングロッド長、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	○	音響トモグラフィ探査等

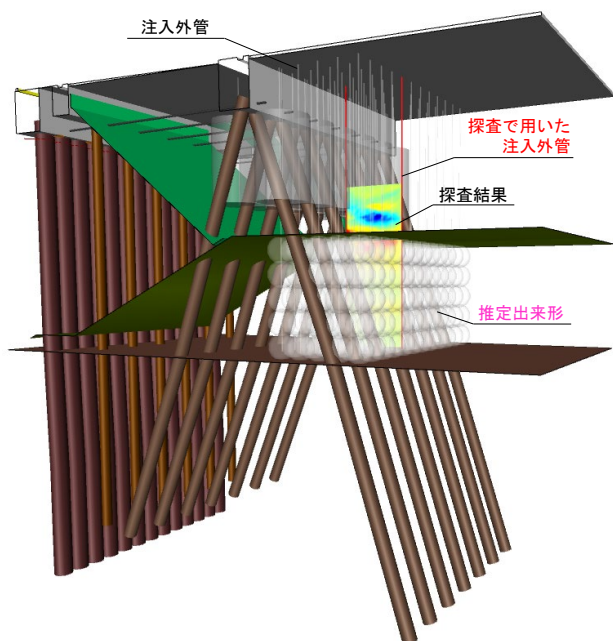


図-6.1 施工管理情報を基に作成した BIM/CIM

6.2 BIM/CIMによるリスクの可視化

BIM/CIM に反映した施工管理項目を表-6.1 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、現場条件不一致のため計画どおりの施工が難しい場合もある。例えば、注入中心位置の施工誤差は $D/4$ 以内と規定されているため、この範囲内で削孔開始位置を変更し埋設物をかわすことはよくある。参考までに、図-6.1 の地盤改良部分のみを題材に、仮想の埋設管を設置し、これをかわすために削孔開始位置を $D/4$ の範囲で修正した BIM/CIM を作成してみる。

図-6.2 に埋設管をかわすため削孔開始位置を 35 cm (規格値 50 cm) 移動して作成した BIM/CIM を示す。図には、設計どおりに薬液を注入した場合の改良体もモデル化しているが、隣接する削孔ラインの離隔が大きい箇所では、未改良部が発生する可能性があることが視覚的に確認できる。

に確認できる。

理論的には、既に固化体が造成されている部分には、その後に注入する薬液は浸透せず未注入部に周り込むため、未改良部は発生しないことになる。しかしながら、現実の地盤では、不均質性や水みちの存在など、理論どおりの注入を阻害する様々な要因が考えられる。このため、計画どおりに施工した箇所と比較すると、削孔ラインの離隔が大きい箇所は改良品質が低下するリスクが高い状態といえる。したがって、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で、品質低下リスクが高い箇所を把握し、この箇所を事後調査において重点的に調査する計画を立案することができる。このような事後調査方法は、リスク管理上、有効な対策手段と考えられる。

6.3 BIM/CIMによる出来形・品質管理方法の提案

浸透固化処理工法で改良した地盤を、注入外管を用いた P波減衰トモグラフィ探査により計測し、この結果を施工管理情報と合わせて BIM/CIM 化することにより、改良地盤の出来形・品質を管理する方法を提案する。

- ① 削孔管理項目により 3D の削孔出来形をモデル化する。埋設物を交わす等の理由で、削孔計画を変更した場合には、薬液注入時に未改良部が発生する可能性があるため、BIM/CIM により、このような改良品質低下リスク箇所を把握する。
- ② リスク箇所に対する探査計画を立案する。5章で示した方法では、探査に用いる注入外管の組み合わせにより任意の断面を計測できるため、BIM/CIM を用いて、リスク箇所の計測が可能な探査断面を検討する。
- ③ 薬液注入前に、②で決定した探査断面において、未改良地盤の減衰率分布を計測する。
- ④ 薬液注入後に、③と同様の探査断面において、改良地盤の減衰率分布を計測する。薬液注入前後の計測結果から減衰率分布(差分)を計算する。
- ⑤ 薬液注入管理項目により 3D の改良体出来形をモデル化する。合わせて、減衰率分布(差分)の 2D 断面を BIM/CIM に統合する。

以上の 5 つの手順で作成した BIM/CIM を用いて、改良地盤の出来形・品質を評価する。評価の結果、改良効果が低いと判定された場合には、探査断面の近傍の注入外管を用いて、薬液を追加注入することにより改良品質の適正化を図ることができる。一方、改良効果が適正と判定された場合には、「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物理探査結果」という異なる観点から適合品質であることを証明できるため、

施工の信頼性を向上させることができる。

7. 結論

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) 室内要素実験において、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) 模型土槽実験では、模型地盤内の薬液が浸透した範囲でP波振幅は減衰し、減衰率の差分を求めることで出来形を把握できることがわかった。ただし、飽和度が低下している部分ではP波振幅が増加する傾向があるため、減衰率の変化を適切に評価するには、改良前の地盤の状態を把握することが極めて重要であることを確認した。
- 3) 現地実証実験においては、実際の工事スケールの地盤改良施工に対してP波減衰トモグラフィ探査を実施し、薬液改良範囲の出来形を可視化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る。また、本手法は飽和度など地盤の状態によって精度が大きく変動することも確認できた。実際の工事に適用する際は、従来手法であるボーリングによる確認や、電気比抵抗など他の物理探査との併用を含めて適材適所での活用が重要となる。
- 4) 本論文では、施工管理情報と物理探査の結果を統合したBIM/CIMにより改良地盤の出来形・品質を管理する方法を提案した。この方法では、BIM/CIMを用いることで改良品質の低下リスクを可視化し、このようなリスク箇所に対して注入外管を用いたP波減衰トモグラフィ探査を実施することで地盤改良の品質・出来形を評価することができる。今後の地盤改良工事において、施工の確実性と信頼性を向上するための有望なツールとなることを期待している。

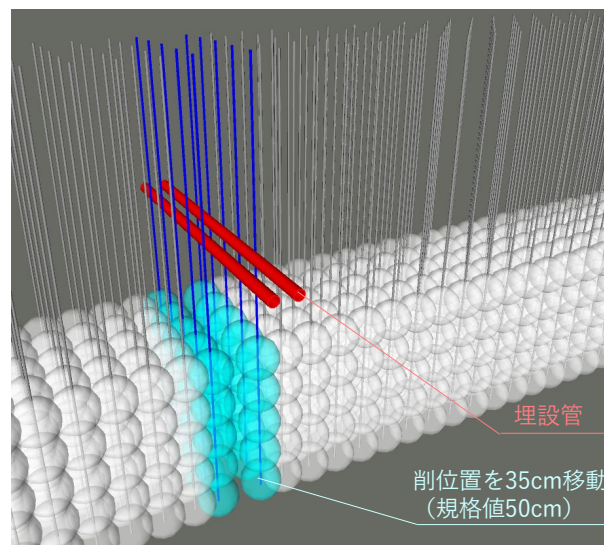


図-6.2 BIM/CIMによるリスクの可視化

(2023年2月6日受付)

謝辞

本研究の一部は、国土交通省東京国際空港整備事務からの受託研究予算を用いて実施したものです。現地実証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をいただきました。また、模型実験の実施にあたり、株式会社ジオデザインの竹花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。

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，p.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，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，Vol. 603, III-44，pp. 129-138，1998。
- 4) 平岡 陽，赤木寛一，澤田 亮，中山貴志：弾性波法に基づく薬液改良砂の力学特性評価について，第46回地盤工学研究発表会，pp. 835-836，2011。
- 5) 榎本忠夫，吉田晃，石原研而，塚本良道，梅田敬太郎：浸透注入により固化された砂の液状化強度と波動伝播特性，土木学会第59回年次学術講演会，pp. 1033-1034,2004。
- 6) 山崎浩之，善 功企，河村建輔：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, pp. 119-152.

- 7) 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.
- 8) 榊原淳一, 山本督夫: 高周波数の弾性波を用いた高精度地盤調査手法の開発, 土木学会論文集, Vol. 65, No. 1, pp. 97-106, 2009.
- 9) 榊原淳一, 毛利栄征, 山本督夫: 弾性波の速度と減衰率を用いた地盤の不均一性評価と可視化手法の開発, 土木学会論文集, Vol. 67, No.3, pp. 310-318, 2011.
- 10) 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: 弾性波の振幅減衰を用いた薬液注入による地盤改良範囲の把握に関する検証実験, 物理探査学会学術講演会講演論文集 139th pp. 27-30, 2018.
- 11) Bergman, N.D., Bailey, R.C., Chapman, C.H.: Crosshole seismic tomography, Geophysics, Vol. 54, No. 2, pp. 200-215, 1989.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 堤彩人, 山本敦: 地盤改良工事の見える化技術, 五洋建設技術年報, Vol.52, pp.12-17, 2022.