

# 効率的な液状化対策が可能な 脈状地盤改良工法の開発

井澤 淳\* 荒木 豪\* 小島 謙一\*  
 館山 勝\*\* 大西 高明\*\*\* 藤原 寅士良#

## Development of an Effective and Economical Liquefaction Countermeasure Method

Jun IZAWA Go ARAKI Kenichi KOJIMA  
 Masaru TATEYAMA Takaaki OHNISHI Torajiro FUJIWARA

Liquefiable ground is widely spreading in the Tokyo metropolitan area, where the gigantic near fault earthquake may occur with high probability. Since liquefaction of the foundation ground supporting railway structures may cause severe damage to the structures, it is necessary to improve the liquefiable ground as early as possible. The current existing countermeasure methods against liquefaction are, however, very expensive, and are not suitable to improve the wide-spread liquefiable ground. The authors are, therefore, now developing a new effective and economical liquefaction countermeasure method, which can make loose liquefiable ground denser by injecting silica-gel dendritically using the dynamic pressuring grouting method with low improving ratio. This paper introduces an abstract of the method, and describes the results of some execution tests and trial analyses.

キーワード：液状化対策，動的薬液注入，割裂注入

## 1. はじめに

構造物を支持する地盤が液状化に至った場合、地盤が急激に強度および剛性を失い、構造物に被害をおよぼす可能性がある。特に土構造物を支持する地盤が液状化に至った場合、崩壊や大きな変形が残留するなど、致命的な被害を引き起こす場合がある。近年、首都直下地震や南海トラフ地震などの大規模地震の発生が危惧されており、液状化に対する早急な対策が望まれている。しかしながら、従来採用されている液状化対策工法は、液状化の発生を完全に防止することを前提とした高改良率で高コストな工法であるため、鉄道路線のような長区間の領域を対象として適用することが困難な場合が多い。

液状化による構造物の被害は液状化の程度に依存すると考えられるが、構造物が要求性能の限界値以上に損傷しないレベルの液状化の発生は許容できる。したがって、液状化発生の完全な防止は必ずしも必要ではなく、構造物の性能が要求性能以上に保たれるレベルまで液状化程度を低減する対策を実施すればよい。そこで、筆者らは動的薬液注入により図1に示すような脈状の改良体を地盤内に割裂注入し、周辺地盤を密実化させることで液状化抵抗を増大させ、液状化の程度を低減する低改良率の液状化対策工法（以降、脈状地盤改良工法）の開発を進めている。本稿ではその概要および各種の検討結果について紹介する。

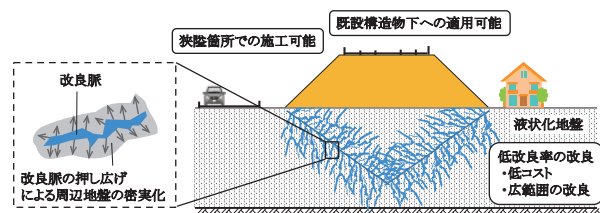


図1 脈状地盤改良工法のイメージ図

## 2. 動的注入による脈状地盤改良工法

### 2.1 改良脈の作成原理

脈状地盤改良では、使用薬液として懸濁系の非浸透薬液（高炉スラグ+ケイ酸塩系）を採用し、薬液を割裂注入することで改良脈の周辺地盤を密実化させる。注入速度を一定にして割裂注入を行うと、地盤の弱部に薬液が集中的に注入される。その結果、図2(a)に示すように割裂脈は1～2方向にしか形成されず、注入の効果はその周辺地盤に限定される。一方、脈状地盤改良工法では、注入速度および注入圧力を意図的に変化させて薬液

\* 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室  
 \*\* 事業推進部  
 \*\*\* ライト工業株式会社 施工技術本部  
 # 東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター

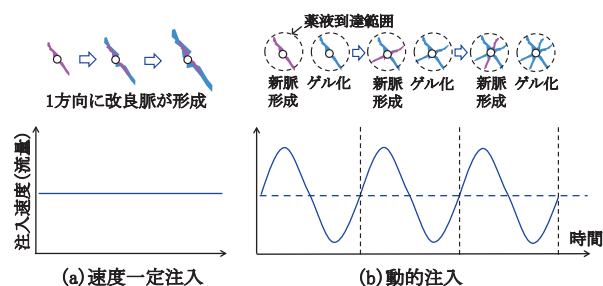


図2 動的注入による改良脈の作成イメージ

を地盤に送液する動的注入工法を採用する。このとき、注入圧力の振幅や周期、注入薬液のゲルタイム、注入速度を適切に設定することで、割裂脈形成→薬液固結→新たな割裂脈形成→固結という繰り返しプロセスにより割裂脈を多方向に形成させ、地盤を効率的に密実化させることが可能となる(図2(b))。また、速度一定注入では困難な薬液到達範囲の制御も、ある程度制御可能となる。これまでに周期やゲルタイムを調整した各種の注入試験を実施し、上記の注入概念を採用して図3に示すような脈状の改良体が作成できることを確認している<sup>1)</sup>。

### 2.2 脈状地盤改良工法の特徴

脈状地盤改良工法では、従来の非浸透系液状化対策薬液注入工法<sup>2)</sup>と同様に、改良脈周辺地盤の密実化による液状化抵抗の増加を期待する。従来の工法では、薬液を注入孔のごく近傍に限定的に注入するため、改良体近傍が重点的に密実化されることになる。一方で、本工法は改良域内に多数の改良脈を形成させるため、改良対象域を効率的に密実化させることが可能である。このとき、形成される改良脈は不均質に配置されることになるが、マクロ的には改良対象域を平均的に密実化できる。

また、浸透系薬液注入工法や高圧噴射攪拌工法のように完全に液状化を防止することは期待せず、構造物の性能が要求性能以上に保たれるレベルまでの液状化程度の低減を目的とする。したがって、低改良率(注入率10%程度)で改良が可能となり、コストの削減や施工期間の短縮が期待できる。また、小型施工機械で施工が可能であるため狭隘地や軟弱地盤での施工が容易であること、低改良率とすることで注入圧力を抑えられるため注入による周辺地盤の変状を抑制出来ること、改良体を脈状に配置するため地下水阻害の影響が小さいなどの利点も有している。

### 3. 改良品質の確認手法

本工法は、地盤の液状化を完全に抑制せず、要求されるレベルまで液状化程度を低減することを目的とするため、改良後の地盤がどの程度の液状化抵抗を有している



図3 改良体の作成状況

かを評価することが重要となる。また、改良脈を不均質に形成し、改良対象域を平均的に密実化するため、図3に示すような改良脈の出来形ではなく、改良対象領域全体として密度や剛性等の増加を確認し、改良品質を評価することが必要となる。そこで、自然地盤に対する施工試験を行い、改良前後の地盤に各種の原位置調査試験を実施することで、改良品質の評価手法を検討した。本施工試験では、評価項目、経済性、作業性等を考慮して $N_d$ 値の増加や細粒分含有率を確認可能なピエゾドライブコーン試験(PDC試験)、密度の増加を直接的に確認する密度検層、 $E_{50}$ レベルの地盤剛性や静止土圧係数 $K_0$ の増加を確認する孔内水平載荷試験(LLT試験)およびLLT試験においてボーリング削孔時の地盤の緩みを除去可能なセルフボーリングタイプの孔内水平載荷試験(SB-LLT試験)を選定して適用した。

### 3.1 現場試験概要

施工試験は、JR常磐線金町・松戸間近傍の施工試験ヤードにて実施した。本ヤードは、江戸川から東に数100mに位置し、液状化層と考えられる有楽町砂層が地表近くから10m程度堆積している。図4に事前ボーリング調査の結果を、図5に注入箇所および各種原位置調査試験の適用位置等を示す。図4に示すように、GL-1.5m~5.0m付近の粘性土混じり砂層と、その下の粘性土質砂層が液状化に至る可能性のある砂質土層である。図4には調査範囲の四隅のうち3箇所調査した $N$ 値および $N_d$ 値を示しているが、いずれもほぼ同様の性状を示しており、一様な地盤が堆積していると判断できる。施工試験では、GL-3~6mの層厚3mを注入範囲とし、下端より250mmピッチでステップアップ施工を実施した。水平方向の注入ピッチは1.5mと2.0mの2パターンとし、注入率(改良対象域全体の体積に対する注入薬液の体積)はいずれも10%とした。

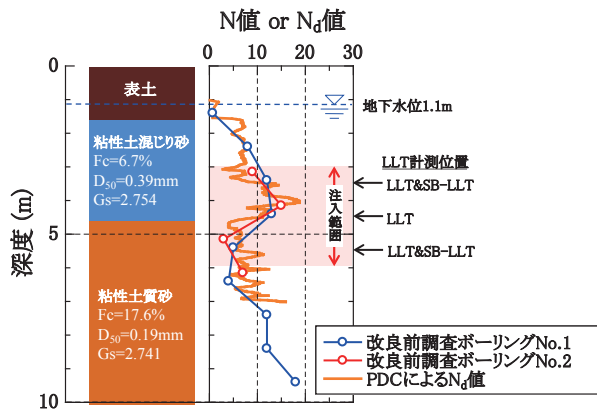


図4 改良前の地盤調査結果

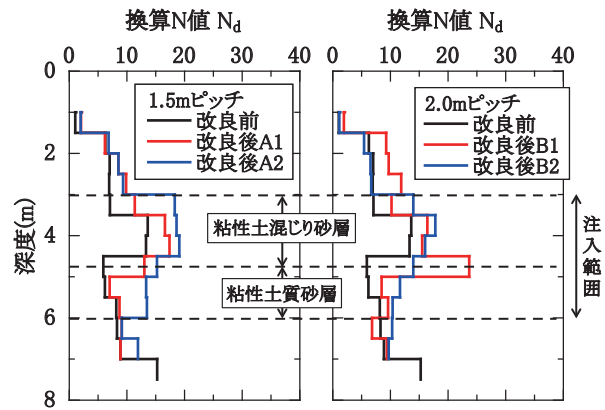


図6 PDC試験結果(0.5m間隔の平均)

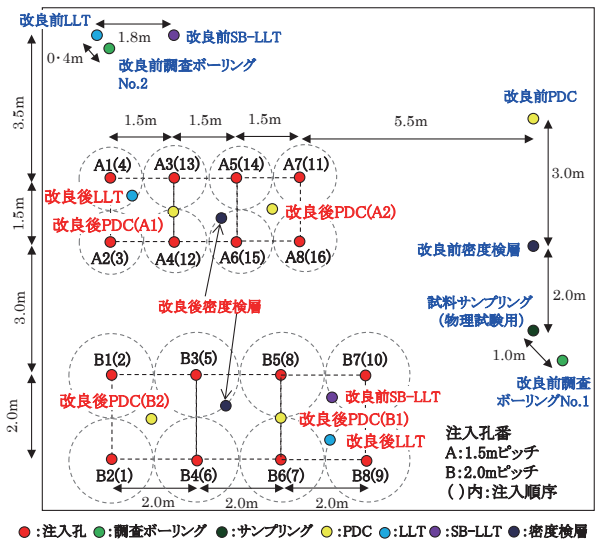


図5 注入試験の概要, 改良品質確認試験の位置

3.2 改良品質確認試験結果

(1) ピエゾドライブコーン試験

図6にPDC試験から得られた注入前後での $N_d$ 値(深さ方向に0.5m間隔の平均値)を示す。改良後の試験位置は、図5に示すように2つの注入孔の中間位置(A1, B1)と注入孔から最も離れた位置(A2, B2)の4カ所とした。すべての地点で $N_d$ 値の増加が見られたが、上部の粘性土混じり砂層(約3.0~4.7m)に対して、細粒分の多い下部の粘性土質砂層(約4.7~6.0m)での増加率が低い結果となった。一方、後述するように密度検層では下部層でも上部層と同程度の密度増加が確認されている。一般的に細粒分の多い地盤は密度増加による剛性や強度の増加が現れにくい傾向にあることから、本試験における下部層においても $N_d$ 値の増加が現れにくい地盤であったことが影響したと考えられる。

なお、PDC試験では水圧の消散を計測することで、地盤の細粒分含有率 $F_c$ を計測することが出来る。本工程は地盤を密実化するための、改良前後で $F_c$ は変化しないが、今回のPDC試験においても水圧消散挙動

に変化が見られた。水圧情報から密実化を確認できれば非常に有益であり、今後、データを蓄積しながら品質確認指標の一つとして取り入れていきたいと考えている。

(2) 密度検層

図7に密度検層の結果を示す。注入前に比べて1.5mピッチでは1.14倍程度、2.0mピッチでは1.06倍程度の密度増加が確認できた。また、上・下部層とも同程度の増加率であり、PDC試験において改良効果が小さく判定された下部層についても、同等の改良を実施できていることが確認できた。したがって、PDC試験では細粒分を多く含む地盤の密度増加を過小評価する可能性があるが、密度検層を実施することで地盤の物性に左右されず改良品質を評価できると考えられる。ただし、考え得る密度の変動幅は広くとも1.4~2.5g/cm程度と狭いため、少しの増減で敏感に改良品質を評価する可能性がある。また、改良脈の密度(通常1.4g/cm<sup>3</sup>程度)の影響について把握できていない。これらを整理した上で、実用化を図りたいと考えている。

(3) 孔内水平载荷試験

図8にSB-LLTとLLTから求めた静止土圧係数 $K_0$ および変形係数 $E_{50}$ 、降伏圧を示す。なお、SB-LLTは2.0mピッチのケースのみで測定した。SB-LLTの結果から、 $K_0$ は事前で0.5程度、事後で1.0程度と地盤の密実化によって2倍程度の増加が確認できた。この $K_0$ の増加を液状化対策効果として取り入れることが出来れば非常に有効であり、今後、 $K_0$ の経年的な変動を確認しながら設計体系への導入を検討する予定である。一方、LLTからはSB-LLTによる値よりも大きな $K_0$ の増加や $E_{50}$ 、降伏圧の増加も確認できたが、孔壁の乱れによる影響と考えられるばらつきが見られる。したがって、 $K_0$ および $E_{50}$ の増加の確認についてはSB-LLTの適用が望ましいと考えられるが、比較的簡便に実施が可能なLLTでの評価が可能となるよう、今後検討を深めていきたい。

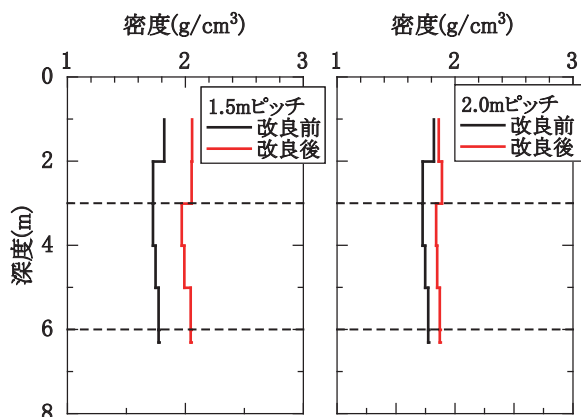


図7 密度検層結果 (0.5m 間隔の平均)

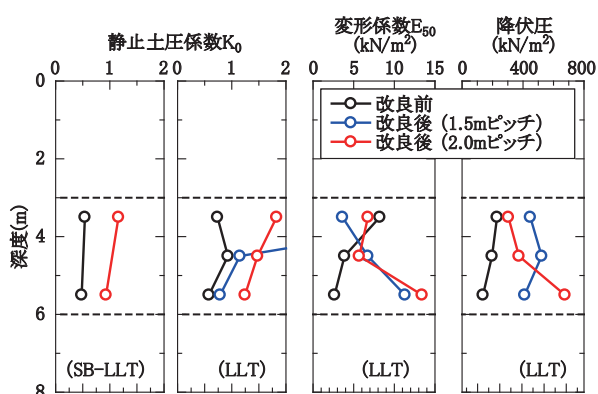


図8 SB-LLT および LLT 試験結果

#### 4. 液状化対策効果の評価方法

脈状地盤改良工法を適用することで液状化地盤の密実化が可能であり、その結果として  $N_d$  値の増加を確認出来ることが分かった。そこで、非浸透系液状化対策薬液注入工法<sup>2)</sup>を参考にして、 $N$  値を用いた液状化対策効果の評価手法を構築した。

##### 4.1 評価手法

液状化地盤内に脈状改良体を注入することにより、図9に示すように、注入した改良体の体積分だけ間隙が減少し、密実化すると考える。これを元に、設計時に設定する注入率  $A_s$  (対象改良域体積に対する注入量の割合) を以下の手順で算定する。

- ① 対象地盤の細粒分含有率  $F_c$  を用いて、式(1)より最大・最小間隙比  $e_{max}$ ,  $e_{min}$  を求める

$$e_{max} = 0.02F_c + 1.0, e_{min} = 0.008F_c + 0.6 \quad (1)$$

- ② 改良前の地盤の  $N$  値 ( $N_0$ ) より改良前の間隙比  $e_0$  を式(2)により求める。

$$e_0 = e_{max} - 0.21(e_{max} - e_{min}) \sqrt{\frac{98N_0}{69 + \sigma'_v}} \quad (2)$$

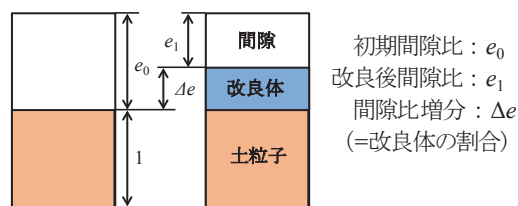


図9 脈状注入による密実化のイメージ

表1 提案評価手法による有効注入率と液状化強度比

(a) 上部層					
	改良前	改良後			
		A1	A2	B1	B2
$N_d$ 値	10.0	14.6	17.8	16.4	15.4
有効注入率 (%)	—	3.59	5.73	4.53	4.20
液状化強度比 $R_{20}$	0.277	0.382	0.755	0.578	0.433
(b) 下部層					
	改良前	改良後			
		A1	A2	B1	B2
$N_d$ 値	7.2	7.9	13.4	9.0	11.0
有効注入率 (%)	—	0.821	6.43	2.12	3.99
液状化強度比 $R_{20}$	0.315	0.318	0.384	0.328	0.354

- ③ 鉄道構造物等設計標準 耐震設計<sup>3)</sup>にしたがって液状化判定を実施し、要求性能を満たす液状化対策に必要な改良後の  $N$  値 ( $N_1$ ) を設定する。
- ④ 細粒分による増加  $N$  値の低減率  $\beta$  ( $=1.05-0.51 \log F_c$ ) を考慮して、式(3)により改良後の目標  $N$  値 ( $N'$ ) を設定する。

$$N'_1 = N_0 + \frac{N_1 - N_0}{\beta} \quad (3)$$

- ⑤  $N'_1$  に対応する目標間隙比  $e'_1$  を式(4)より求める。

$$e'_1 = e_{max} - 0.21(e_{max} - e_{min}) \sqrt{\frac{98N'_1}{69 + \sigma'_v}} \quad (4)$$

- ⑥ 目標注入率  $A_s$  を式(5)より求める。

$$A_s = \frac{e'_1 - e_0}{1 + e_0} \quad (5)$$

##### 4.2 評価手法を用いた有効注入率の検討

3章で示した施工試験では、注入率 10% として施工を実施した。そこで、上記の評価手法の考え方をを用いて PDC 試験から得られた改良前後の  $N_d$  値から間隙比を算出し、実質的な有効注入率を逆算した。なお、実測値との比較となるため、細粒分による密度増加の低減率  $\beta$  については考慮していない。

表1に上・下部層別の改良前後の  $N_d$  値、有効注入率を示す。有効注入率は上部層で 3.6 ~ 5.7% 程度、 $N_d$  値の増加の小さかった下部層では 0.8 ~ 6.4% 程度の値となった。実際の注入では、密実化が改良対象外にも伝播することや地表面が隆起することにより、実際の注入

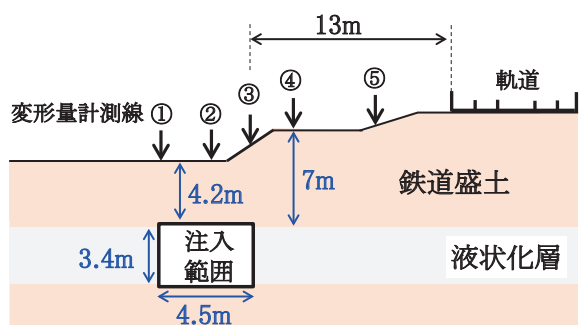


図10 各種の品質確認結果

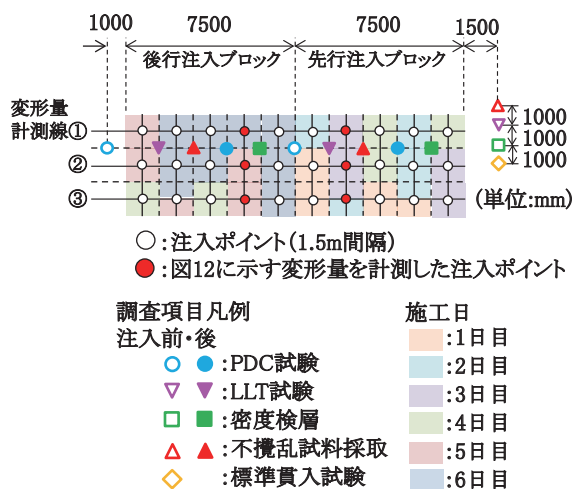


図11 注入ポイントおよび品質確認地点

量よりも実質的な改良効果は低下するが、今回の施工試験では実質 5% 程度の改良が実施されていたと考えられる。

表1には  $N_d$  値の増加から算定される密度増加のみを考慮した液状化強度比  $R_{20}$  についても示した。対象とする地盤の諸元にも依存するが、4～5% 程度の改良率でも液状化強度比の増加が確認できる。別途、数値解析<sup>4)</sup> や振動台実験<sup>5)</sup> による液状化対策効果の定量的な確認を行っており、 $N$  値の増加から算定される密度増加のみを考慮した効果以上の液状化対策効果が得られることも確認している。これらの結果との整合を図りながら、改良効果の適切な評価手法の精度を向上させていく予定である。

また、3章で示したように密度検層を用いた場合は細粒分を多く含む下部層についても密度増加が確認できた。したがって、このような地盤については、 $N_d$  値のみを用いた場合に安全側に評価される可能性がある。今後、水圧の情報、密度検層や LLT の結果などを用いた、より合理的な液状化対策効果評価手法を構築していきたい。

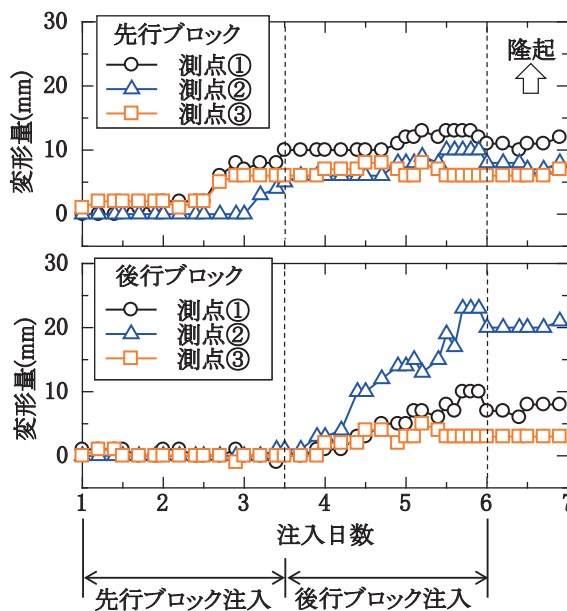


図12 変形量計測結果

## 5. 鉄道近接箇所を対象とした試験施工

### 5.1 試験施工概要

脈状地盤改良工法の鉄道施設直下の液状化地盤への実用化に向けて、図10に示すような鉄道近接箇所での試験施工を実施し、制約条件下での施工性や液状化対策効果を確認した。本施工試験では、土被り4.2m、層厚3.4m程度の液状化層に対して、注入率10%、注入ピッチ1.5mとし、液状化層下端から上端に向けて250mmピッチのステップアップ法で施工を行った。また、図11に示す箇所でも改良品質確認を実施した。

### 5.2 試験施工結果

#### (1) 施工中の変形量

試験施工では鉄道盛土直下への注入を想定し、図10および図11に示す変形量測点で注入中の地盤変形量をリアルタイムで計測し、変形量によって注入量を制限しながら注入を行った。また、先行・後行の2つのブロックに分け、各ブロックに2台の施工機械を投入して図11に色づけした順序で注入を実施した。先行注入ブロックでは、軌道に近接する測線④および⑤での変位量が23mmを超えない限り、計画通りの注入を実施することとした。後行注入ブロックでは、注入位置直上およびその周辺の変位量が6, 8, 10mmに達した時点で一旦注入を停止し、注入ステップを飛ばすなどの対応をしながら注入を進めた。最終的には、測線①～③の変形量が20mmに達した時点で注入を中止した。

図11に示す変形量計測位置での変位量の経時変化を図12に示す。先行注入ブロックを注入する過程では、先行注入ブロックのみで変形が見られ、変形量は10mm以内に抑えられていた。一方、後行注入ブロックへの注

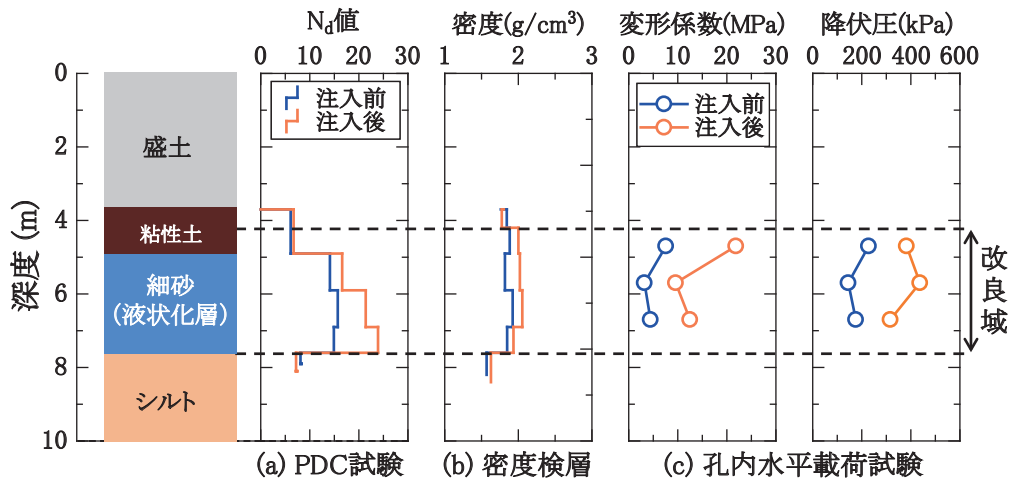


図13 試験施工箇所での改良品質確認結果の例

表2 試験施工箇所の液状化判定結果(L2 スペクトルⅡ)

	検討深度 (m)	$N_d$ 値	$F_L$	$P_L$
改良前	4.9 - 5.9	14.1	0.604	9.7
	5.9 - 6.9	15.7	0.604	
	6.9 - 7.6	14.9	0.542	
改良後	4.9 - 5.9	16.6	0.917	2.3
	5.9 - 6.9	21.4	0.958	
	6.9 - 7.6	23.9	0.792	

入時には後行注入ブロックで10mm以上に達するような変形が見られ、先行注入ブロックでも若干の変動が見られている。最終的には測点②において20mmを超える変位が発生して注入を終了した。

このような変形量管理をしながら注入を実施した結果、最終的に注入した量は先行注入ブロックでは計画注入量に対して100%であったが、後行注入ブロックでは注入量を制限したため、65%程度となった。両ブロックを平均すると実際の注入率は8.2%程度であった。

(2) 改良品質確認および液状化対策効果の評価

改良前後でのPDC試験から得られた $N_d$ 値および密度検層、LLT試験の結果を図13に示すが、改良域において $N_d$ 値および密度、変形係数等の増加が確認できる。なお、改良前後での $N_d$ 値から求めた有効注入率は、改良域全体を平均して4.5%であった。

PDC試験の結果から得られた $N_d$ 値を用いて実施した液状化判定の結果を表2に示す。耐震標準に示されているL2スペクトルⅡ地震動に対して $P_L=9.7$ であった地盤を $P_L=2.3$ まで低減できた。各層の $F_L$ は1を下回っていることから完全に液状化を抑制するものではないものの、構造物に対する液状化の影響を無視できる $P_L=5$ 以下まで液状化程度を抑制可能であることが確認できた。

以上より、鉄道施設近傍を想定した厳しい条件下で施工を実施した場合でも、十分な注入が実施可能で、液状化程度を低減可能であることを確認した。

6. まとめ

動的注入により地盤内に脈状の改良体を作成し、低改良率で効率的に液状化被害の軽減が可能な脈状地盤改良工法を提案した。本工法の現場施工試験および改良品質確認試験により、自然地盤に対して十分な施工性を有していること、密実化によると考えられる $N_d$ 値、密度、 $K_0$ 、 $E_{50}$ の増加も確認出来た。また、 $N$ 値を用いた液状化対策効果の評価手法を提案し、現場施工試験において目標注入率10%に対して有効注入率5%程度の改良を実施できること、液状化程度を低減出来ることを確認した。今後、更に検討を深め、早期の実用化を目指したい。

なお、本技術開発の一部は「国土交通省 交通運輸技術開発推進制度」の助成を受けて実施致しました。

文献

- 1) 大西高明, 林田 晃, 入山 修, 井澤 淳, 上田恭平, 小島謙一, 館山 勝, 藤原寅士良: 脈状注入工法による液状化対策の提案, 第50回地盤工学研究発表会, pp. 1791-1792, 2015
- 2) 沿岸技術研究センター: 液状化対策としての静的圧入締固め工法技術マニュアル
- 3) (公財) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善出版, 2012
- 4) 上田恭平, 荒木 豪, 井澤 淳, 小島謙一: 有効応力解析による脈状地盤改良工法の液状化対策効果の検討, 第70回土木学会年次講演会, III -028, pp. 55-56, 2015
- 5) 荒木 豪, 井澤 淳, 小島謙一, 上田恭平, 大西高明, 藤原 寅士良: 脈状地盤改良工法による液状化対策効果に関する振動台実験, 第12回地盤工学会関東支部発表会, pp. 228-231, 2015