

脈状地盤改良による液状化対策工法

石 橋 利 倫・大 西 高 明・滝 沢 聡・井 澤 淳

地盤の液状化は鉄道構造物の安全性および列車の走行性に大きく影響を与えるため、薬液注入による地盤改良により液状化対策されることが多い。しかしながら、現在の薬液注入工法による液状化対策は高改良率（70～100%）で改良することが多く、コスト高が問題となっている。そこで、動的に薬液注入を行うことで地盤内に脈状の改良体を作製し、低改良率で効率的に液状化被害の軽減が可能な脈状注入工法を提案している。本工法は液状化の完全な抑制ではなく、必要なレベルまで液状化程度を低減させるものであるため、低改良率で効率的な液状化対策が可能である。

キーワード：液状化対策、薬液注入、割裂注入、締固め、低改良率

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は崩壊や大きな変形が残留するなど、杭基礎等で支持された橋梁や高架橋等と比較して致命的な被害を引き起こす可能性があるため留意が必要である。また、都市部や河川部、沿岸部では液状化地盤が幅広く分布しているため、長区間を経済的に対策する必要がある。

更に近年、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。

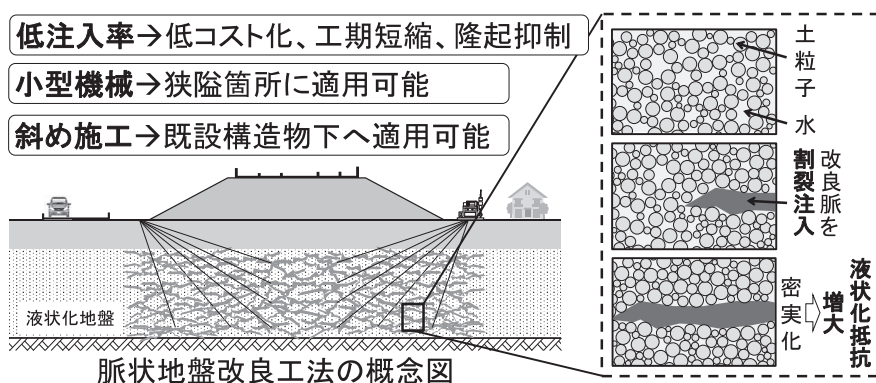
そこで、鉄道施設直下への施工を念頭においた地盤の密実化による液状化対策工法として、脈状地盤改良工法を提案している。本工法では、図—1に示すよ

うに薬液を注入することにより脈状の改良体を地盤内に割裂注入させ、改良脈周辺地盤を密実化させることで液状化程度を低減させる。このような改良脈を様々な方向に作製することで、10%程度の注入率であっても対象領域を満遍なく効率的に改良可能となり、極めて低コストで改良出来ること、施工期間が短縮できること、地表面変位が抑制できること、地下水流動阻害が小さいなどの利点がある。

2. 脈状地盤改良工法の概要

(1) 改良脈の作製原理

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）を用い、薬液を割裂注入させることで改良体の周辺地盤を密実化させること、改良体を脈状に多方向に形成することで対象地盤を満遍なく密実化させることを期待している。ここ



図—1 脈状地盤改良工法の概念図

で、粘性の高い材料を用いた場合、CPG 工法と同様に注入孔近傍のみに改良体が集中し、改良効果が限定的となる。一方で、粘性の低い材料を用いた場合は浸透注入されてしまい、割裂注入出来なくなる。そこで本工法では、薬液の粒子濃度を上げることで低粘性でも割裂注入可能な材料を用いる。また、この材料を用いた場合でも、図一 2 (a) に示すように注入速度を一定として割裂注入を行うと、地盤の最弱部に発生する最初の改良脈に薬液が集中的に注入される。その結果、改良脈は 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。そのため、注入速度および速度振幅を適切に設定して薬液を地盤に送液する動的注入工法を採用する。このとき、注入速度の振幅や周期、注入薬液のゲルタイムを適切に設定することで、改良脈形成→薬液固結→新たな改良脈形成→固結というプロセスを繰り返し、改良脈を多方向に形成させることを可能とする（図一 2 (b)）。また、速度一定注入では薬液到達距離が過大になる問題もあるが、多方向に改良体が進展していくため、到達距離もある程度制御することも可能となる。

(2) 大型土槽を用いた注入試験

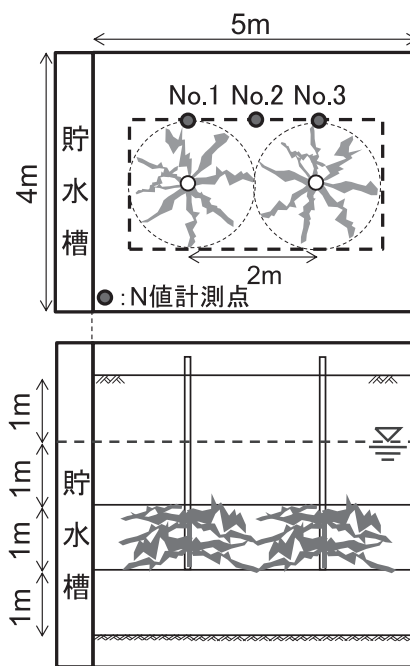
動的注入工法は、砂地盤に対する品質の高い浸透固化や、粘性土地盤や岩盤の水道やクラックの止水等を目的とした割裂注入を適切に実施するために開発された工法である。一方、脈状地盤改良工法では、一般的に緩い砂質土を主体とする液状化地盤に対して、薬液を浸透させず、改良脈を多数配置するため、動的注入を適用するには実績の乏しい工法である。また、薬液の粘性やゲルタイム等の関係で、適切な動的注入諸元は異なることが考えられる。そこで、想定する改良脈を液状化地盤中に作製するための薬液諸元や動的注入諸元を設定するため、大型土槽ピット内において注入試験を実施した。本試験では、掘り起しによる出来形

確認と、注入前後でのミニラムサウンディング試験による換算 N 値（N 値と同等の値。以降、 N_d 値とする。）の変化についても評価を行った。

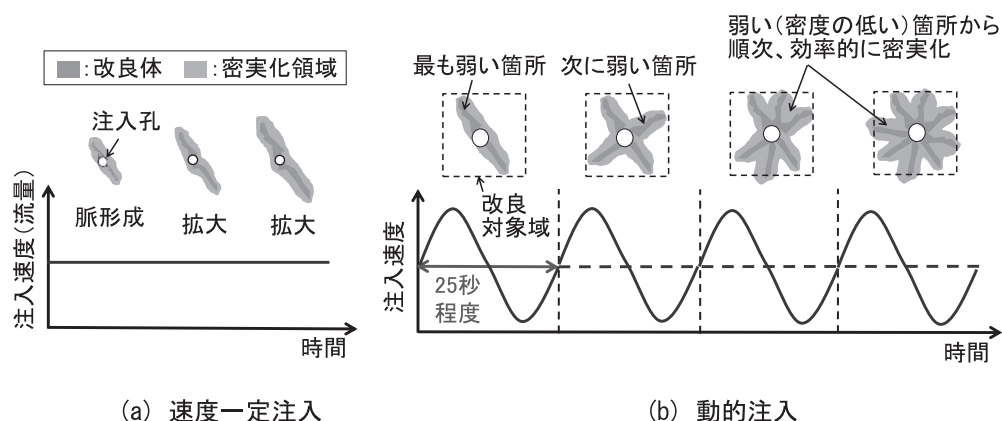
(a) 試験概要

対象地盤は、図一 3 に示すように縦 4.0 m × 横 5.0 m × 深さ 4.0 m のピット内に、鬼怒川砂 ($G_s = 2.698$, $F_c = 6.4\%$, $D_{50} = 0.775$ mm, $U_c = 8.4$, $U'_c = 1.02$) を充填率 50%（単位体積重量は地下水以浅 $\gamma_t = 15.5$ kN/m³，地下水以深 $\gamma_{sat} = 19.6$ kN/m³，間隙比 $e = 0.701$ ，相対密度 $D_r = 54.4\%$ ）となるように締固めながら層厚 4 m で作製し、縦 2.0 m × 横 2.0 m × 深さ 1.0 m の範囲を改良対象土量として注入間隔 2.0 m の 2 点注入を実施した。土層ピット側面には水位調整用貯水槽が設けられており、土層内の水位を地表から 1.0 m に設定した。

大型土槽を用いた注入試験を実施するに当たり、設定する薬液配合や動的注入諸元については、別途小型



図一 3 大型土槽を用いた注入試験の概要



図一 2 動的注入による改良脈の形成イメージ

土層を用いた基礎的検討を多数実施し、改良脈の作製し易さを把握した上で設定した。注入薬液は、ゲルタイムを5～10秒に調整したA液およびB液を2:1の体積比で2重管ストレーナの先端において混合する2ショット方式で注入率10.0%の改良を行った。動的注入は平均注入速度17.0 L/min, 速度振幅 ± 7.0 L/min, 速度周期25秒で設定し、図—4に示すように改良対象域下端から上端に向けて1ステップ250 mm ずつのステップアップ方式で実施した。1ステップにおける注入速度の時刻歴を図—5に示す。

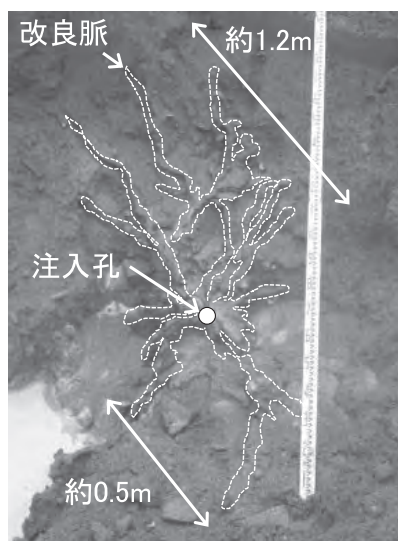
(b) 試験結果

写真—1に注入試験の状況を示す。本試験では、所定量の薬液を問題なく注入でき、地表面の変形量も5 mm 程度であった。施工後の掘り起こし状況を写真—2に示すが、多方向に到達範囲0.5～1.2 m 程度の改良脈が作製されており、上記の薬液配合、動的注入諸元で液状化地盤中に適切な改良脈の作製が可能であることを確認した。図—6に、注入前後のミニラムサウンディング試験から得られた N_d 値を示す。なお、 N_d 値は200 mm ピッチで測定されるが、1 m 間隔の

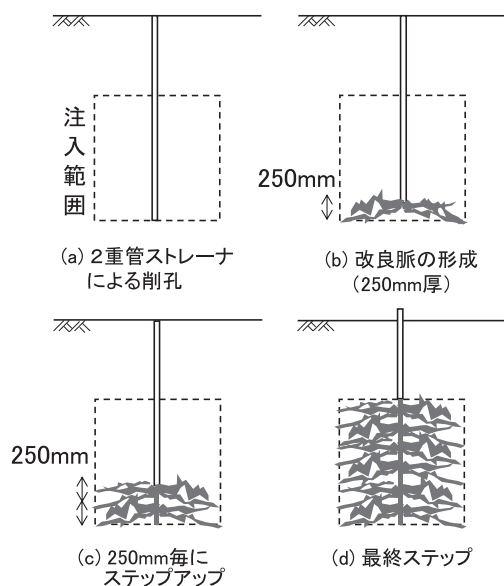
平均値も示す。各計測のバラツキはあるものの、3程度であった N_d 値が8程度まで増加されているのを確認した。



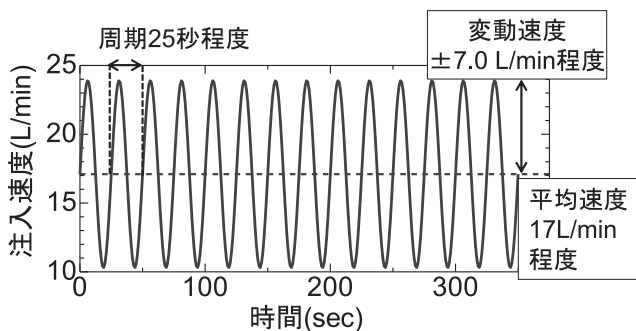
写真—1 注入試験の状況



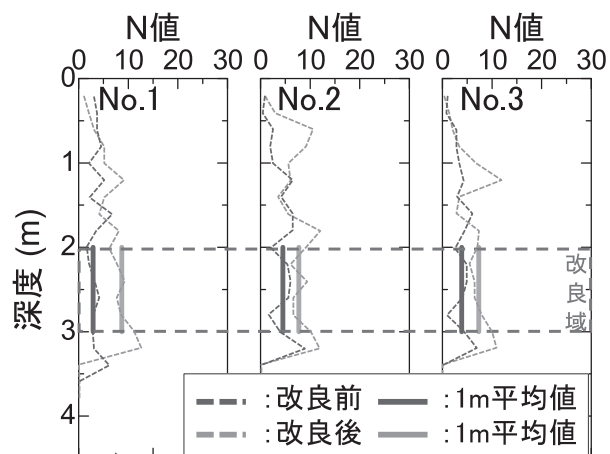
写真—2 改良脈の掘り起こし状況



図—4 ステップアップ方式の注入



図—5 1ステップにおける注入速度の時刻歴の例



図—6 注入試験における改良前後の N_d 値

(3) 脈状地盤改良工法の特徴

本工法では、CPG 工法と同様に、この改良脈周辺地盤を密実化することで液状化抵抗の増加を期待する。CPG 工法では、注入孔のごく近傍に球根状のモルタル改良体を作製するため、密実化は改良体近傍に限定されるが、本工法では写真—2 に示すように改良対象域内に多数の改良脈を形成させるため、改良対象域を満遍なく密実化でき、効率的な改良が可能である。また、固結工法やせん断変形抑制工法のような完全に液状化を防止することは期待せず、構造物の要求性能を満たすレベルまでの液状化程度の低減を目的とするため、低注入率（10%程度で従来工法の 1/3 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。なお、写真—1 に示すような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、低注入率とすることで薬液量も少なく、注入圧力も抑えられるため地表面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。

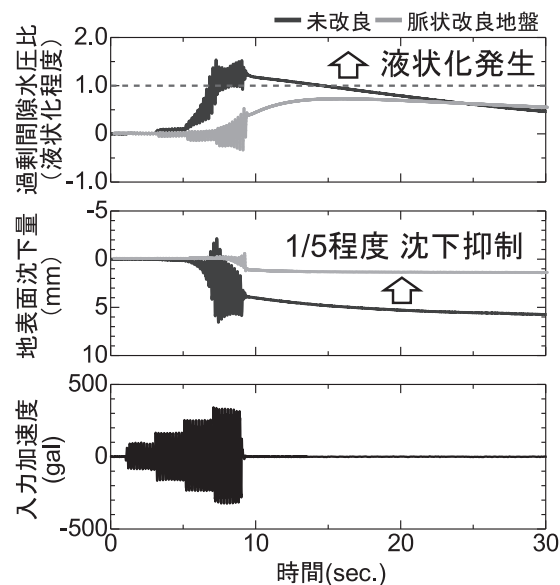
3. 液状化対策効果に関する検討

(1) 実験概要

液状化地盤中へ改良脈を割裂注入させることによる液状化対策効果を確認するため、1G 場での小型模型を用いた振動台実験を実施した。本実験では液状化地盤を想定した緩い未改良地盤、注入率 10% で脈状地盤改良を実施した地盤の挙動を比較した。地盤条件、注入孔位置、センサー配置等を図—7 に示す。

(2) 実験結果

過剰間隙水圧比および地表面沈下量の時刻歴を図—8 に示す。加振直後の過剰間隙水圧比の上昇は未改良地盤が最も大きく、1.0 を超えて液状化に至っていることが分かる。一方、脈状地盤改良地盤では、振動中

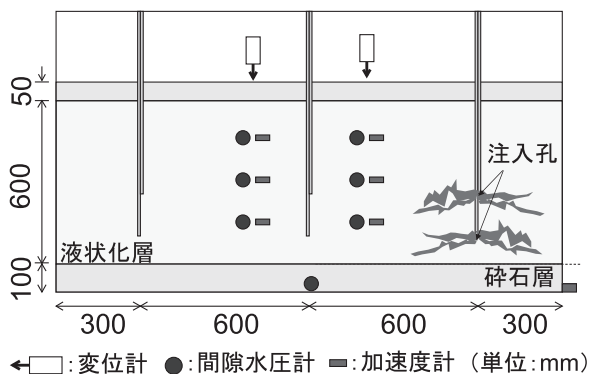


図—8 過剰間隙水圧比および地表面沈下量の時刻歴

にはほぼ同等の値を示し、過剰間隙水圧比は 1.0 に達しておらず、液状化に至っていないことが分かる。加振終了後の水圧挙動に着目すると、未改良地盤では徐々に消散する挙動が見られるのに対して、脈状地盤改良地盤では一旦水圧が上昇した後、消散する傾向にある。これは、改良脈の存在により地盤の透水性が低下し、水圧消散を阻害したためと考えられる。なお、試験後に実施した透水試験において、脈状地盤改良地盤の透水係数が未改良地盤の 1/2 程度まで低下していることを確認している。また、液状化に達したと考えられる未改良地盤では、5 mm 以上の沈下を生じており、脈状地盤改良地盤で大きく沈下を抑制することができている。以上より、脈状地盤改良により密実化された地盤では、地震時の過剰間隙水圧の上昇が抑えられ、液状化に至りにくいことを確認した。

4. 改良品質の確認手法

2, 3 章の検討から、薬液配合や注入諸元を適切に設定した動的注入により、液状化地盤内に脈状の改良体を作製することが可能であり、締固めに起因する N 値の増加が見込めること、地震時の間隙水圧や沈下量の増加を抑制する対策効果があることを確認した。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かを評価することが重要となる。また、様々な方向に不均質に改良脈を形成することになるため、写真—2 に示すような改良脈の出来形評価や改良対象域のある一部分の供試体の液状化強度などによる評価ではな

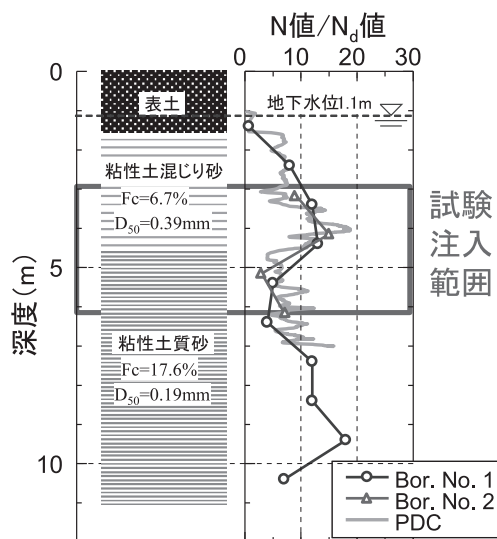


図—7 注入孔位置とセンサー配置図

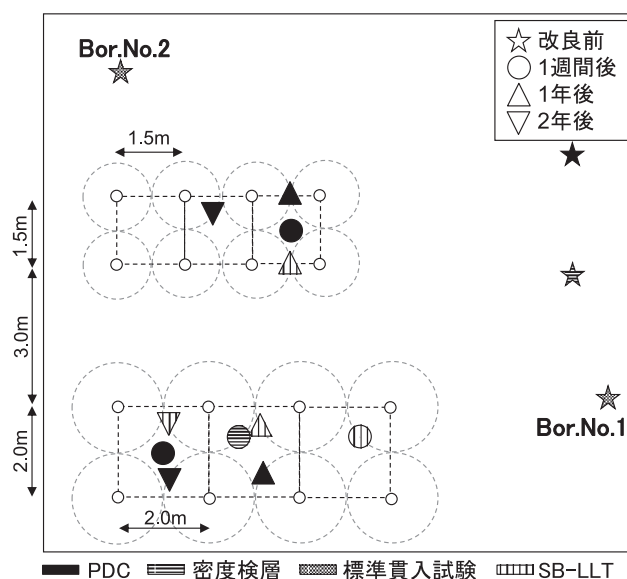
く、改良対象領域全体として密度や剛性等の増加を確認し、改良品質を評価する必要がある。改良品質確認手法としては、大型土槽を用いた注入試験結果や施工性、コスト、耐震設計への適用性を勘案し、N 値で評価することが最も効率的である。ただし、N 値の増加は細粒分含有率によって影響を受ける可能性があるため、ここでは N_d 値の増加とともに細粒分含有率（以降、 F_c ）を確認可能なピエゾドライブコーン試験（以降、PDC 試験）の適用を検討した。また、密度の増加を直接的に確認する密度検層、ボーリング削孔時の地盤の緩みを除去可能なセルフボーリングタイプの孔内水平載荷試験（以降、SB-LLT 試験）の適用についても検討した。

(1) 施工試験概要

本検討では、液状化層と考えられる砂層が地表面近くから 10 m 程度堆積している自然地盤に対して脈状地盤改良を行い、改良前後でそれぞれの改良品質確認手法を適用した。図一 9 に事前ボーリング調査の結果を示すが、GL-1.5 m ～ 5.0 m 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。図一 9 には対象箇所の四隅のうち 3 箇所調査した N 値および N_d 値も示しているが、ほぼ同様の N 値性状を示しており、一様な地盤が堆積していると判断できる。改良対象範囲はこの 2 つの層に跨る GL-3 ～ 6 m（層厚 3 m）とし、水平方向には図一 10 に示すように 1.5 m ピッチで 8 点、2.0 m ピッチで 8 点の 2 パターンで、注入率 10% として実施した。図一 10 には各種の調査試験の適用位置と注入から 1 年後および 2 年後の改良品質の経年変化について示した。



図一 9 改良前の N 値および N_d 値



図一 10 品質確認試験の適用位置

(2) 改良品質確認試験結果

(a) ピエゾドライブコーン試験

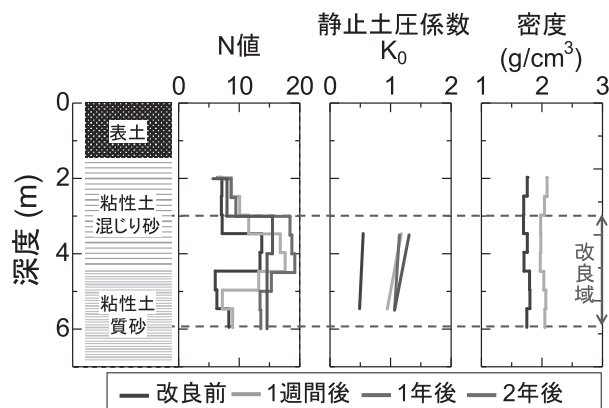
図一 11 左に、PDC 試験から得られた注入前後での N_d 値を示す。改良前と改良 1 週間後を比較すると、改良 1 週間後は、5 m 以深の下部層ではあまり増加の傾向が見られないがその他の改良域では N_d 値が増加する傾向を示す。また、改良 1 年後、2 年後を見ても、 N_d 値は減少することなく改良 1 週間後と変わらない値を示す。

(b) 孔内水平載荷試験

図一 11 中央に、SB-LLT 試験から求めた静止土圧係数 K_0 を示す。SB-LLT 試験の結果から、 K_0 は改良前で 0.5 程度、改良後で 1.0 程度と 2 倍程度の K_0 の増加が確認できた。こちらも N_d 値同様、改良 1 年後、2 年後においても、 K_0 は減少することなく改良 1 週間後と変わらない値を示す。

(c) 密度検層

図一 11 右に、密度検層の結果を示す。改良体の密



図一 11 改良から 2 年後までの品質確認試験結果

度は 1.4 g/cm^3 程度であるため、通常 $1.5 \sim 2.0 \text{ g/cm}^3$ 程度の密度を有する地盤に改良体が存在した場合、改良体の存在は密度を小さく算定させる傾向にある。しかしながら、本試験ではその影響は小さく、注入前に比べて密度の増加が確認できた。

5. 液状化対策効果の評価方法

脈状地盤改良工法による液状化地盤の密実化効果について、標準貫入試験から求まる N 値やミニラムサウンディング試験および PDC 試験から求まる N_d 値、SB-LLT 試験から求まる K_0 および変形係数を用いて、改良品質を評価できることを確認した。本工法の特徴を踏まえた実務的な観点に立つと、本工法の調査の簡便性、経済性、設計への適用性が重要となることから、上記の調査手法のうち、 N 値または N_d 値で評価することが最も適切であると考えられる。そこで、 N 値を用いた本工法の液状化対策効果の評価手法を構築した。

(1) 計画注入率の算定法

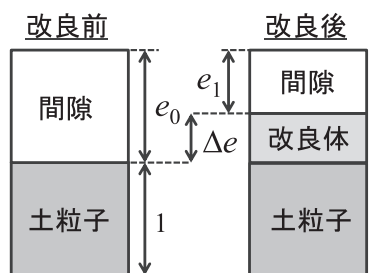
液状化地盤内に改良脈を注入することにより、図—12 に示すように、注入した改良体の体積分だけ間隙が減少し、密実化すると考える。この関係と CPG 工法で採用されている C 法²⁾を参考に、設計時に設定する計画注入率 A_s を以下の手順で算定する。

- 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³⁾。

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

- ②相対密度と N 値の関係¹⁾を用いて、改良前の地盤の N 値 (N_0) より改良前の間隙比 e_0 を求める。

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



e_0 : 初期間隙比
 e_1 : 計画間隙比
 Δe : 減少間隙比 (=改良体割合)

図—12 脈状注入による密実化のイメージ

- ③鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計（以降、耐震標準⁴⁾）により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 N 値増加の低減率 β ⁵⁾ を考慮して、期待する改良後の計画 N 値 (N'_1) を設定する。

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

- ⑤ N'_1 に対応する計画間隙比 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計画注入率 A_s を式 (5) より求める。

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

(2) 改良後の有効注入率の算定

4章で示した施工試験では、自然地盤に対して注入率 10% として改良を実施した。そこで、5章 (1) の評価手法の考え方を用いて 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、以下の手順で有効に効果を発揮した注入率（有効注入率） A_{se} 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 β については考慮しない。

- ①改良後の N 値 (N_1) より、改良後の間隙比 e_1 を式 (6) より求める。

$$e_1 = e_{\max} - 0.21(e_{\max} - e_{\min}) \sqrt{\frac{98N'_1}{69 + \sigma'_v}} \quad (6)$$

- ②改良前の間隙比 e_0 と (6) から求めた e_1 より、有効注入率 A_{se} を求める。

$$A_{se} = \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} \quad (7)$$

表—1 に 4章で述べた施工試験から得られた上・下部層の N_d 値を用いて算定した有効注入率を示す。有効注入率は上部層で 4.2 ~ 5.7% 程度、 N_d 値の増加の小さかった下部層では 4.0 ~ 6.4% 程度の値となった。本工法では、改良脈の割裂注入による密実化が改良対象外にも伝播することや、地盤を上方に押し上げるなどにより、実際の注入率よりも改良効果は低下するが、今回の施工試験の注入率としては 5% 相当が有効に作用していたと考えられる。表—1 には、耐震標準⁴⁾に従って算出した液状化強度比 R_{20} も示してい

表—1 改良品質確認試験結果を用いた有効注入率と液状化強度比
(a) 上部層 (3.0 ～ 5.0 m)

	改良前	改良後 (1 週間)	
		注入孔 1.5 m ピッチ	注入孔 2.0 m ピッチ
N_d 値	10.0	17.8	15.4
有効注入率: A_{se} (%)	—	5.73	4.20
液状化強度比: R_{20}	0.277	0.755	0.433

(b) 下部層 (5.0 ～ 6.0 m)

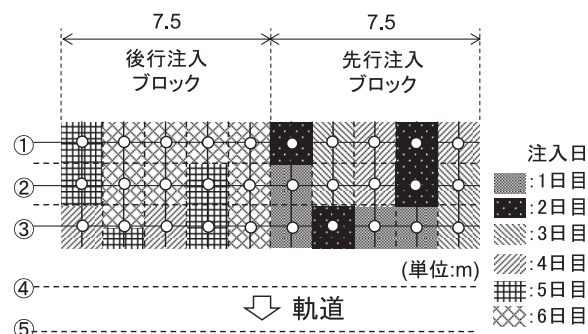
	改良前	改良後 (1 週間)	
		注入孔 1.5 m ピッチ	注入孔 2.0 m ピッチ
N_d 値	7.2	13.4	11.0
有効注入率: A_{se} (%)	—	6.43	3.99
液状化強度比: R_{20}	0.315	0.384	0.354

る。本工法では、改良後に得られた N_d 値より算定した R_{20} を用いて液状化判定を実施し、要求性能を満たすレベルまで液状化程度が低減出来ているかを確認することで、液状化対策効果としての性能を確認するものとする。

6. 盛土直下を対象とした試験施工

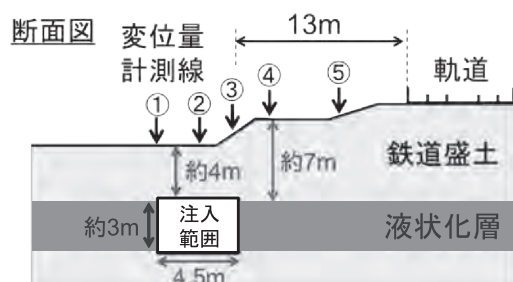
(1) 試験施工概要

脈状地盤改良工法の既設鉄道構造物直下地盤への適用に向けた施工試験を実施した。本試験では、図—13 に示すような軌道に近接した土被り 4.2 m、層厚 3.4 m 程度の液状化層を改良対象とし、計画注入率 10%、注入ピッチ 1.5 m、250 mm のステップアップ施工で実施した。既設鉄道構造物直下へ適用する場合、軌道変状に対する制限が厳しく、注入中の地表面の鉛直変位に十分注意する必要がある。また、改良済みの箇所や比較的堅牢な地盤に向かって注入を進めると、締固め効果は向上すると考えられる反面、大きな地表面の鉛直変位が生じることも想定される。そこで、図—14 に示すように、対象領域を先行注入ブロックと後行注入ブロックの 2 ブロックに分け、まず先行注入ブロックの左側から注入し、その後、後行注入ブロック

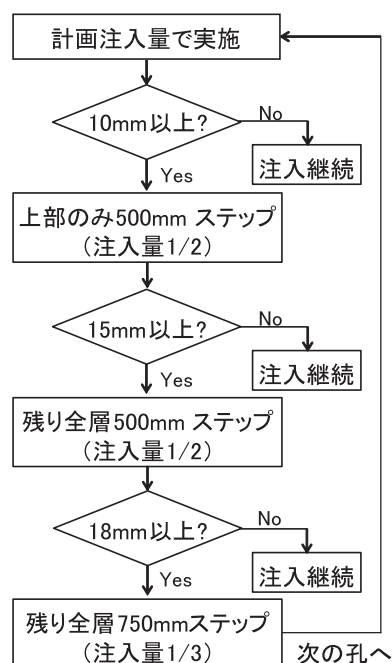


図—14 注入孔および品質確認試験の適用位置

を同じように左側から施工することで、各ブロックの地表面変位量等の比較を行った。本試験では、鉄道盛土直下へ注入することを想定し、図—13 の①～⑤で示す測線の地表面の鉛直変位を注入中にリアルタイムで計測し、地表面の鉛直変位によって注入量を調整しながら施工を行った。図—15 に本施工試験で設定した注入量管理のフロー図を示す。薬液が注入ロッドに沿って地表面までリークした場合は、注入ロッド付近の薬液が固化するまで 5 分程度待ってから注入を再開することとし、それでもリークが止まらない場合は注入を中止し、次のステップへ進むこととした。先行注入ブロックでは、地表面の鉛直変位の変動にかかわらず計画通りの量を注入することとしたが、軌道への影響に配慮し、軌道に近接する測線④および⑤での変位量が 20 mm を超えた場合は注入を停止することとした。後行注入ブロックでは、注入孔近傍の地表面の鉛直変位に応じて、注入量を管理した。まず、地表面の鉛直変位が 10 mm に達した場合は、通常 250 mm のステップアップ施工を上部層のみ 500 mm ステップとすること、変形量を抑制することとした。さらに 15 mm に達した場合は残りの全層 500 mm ステップとして全層の注入量を 1/2 に、18 mm に達した場合は 750 mm ステップ



図—13 盛土直下を対象とした施工試験の概要



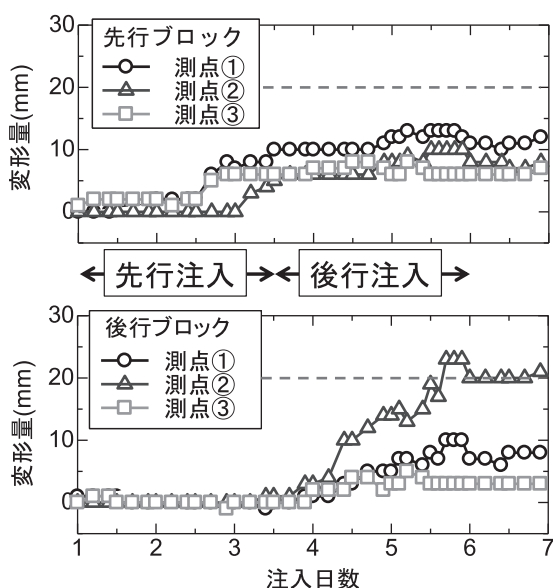
図—15 盛土直下を対象とした施工試験の注入量管理フロー

ブとして残りの全層の注入量を 1/3 として進めることとした。なお、測線①～③の変形量が 20 mm に達した時点で、その注入孔への注入を中止することとした。

(2) 試験施工結果

(a) 施工時の挙動

試験施工時は注入ロッドに沿った薬液のリークは発生しなかったため、地表面の鉛直変位量による注入管理のみを行った。図—14 に示した計測点①②③での地表面の鉛直変位量の経時変化を図—16 に示す。先行注入ブロック施工時の 3.5 日目までは変形量が 10 mm 以内に抑えられており、所定量を問題なく注

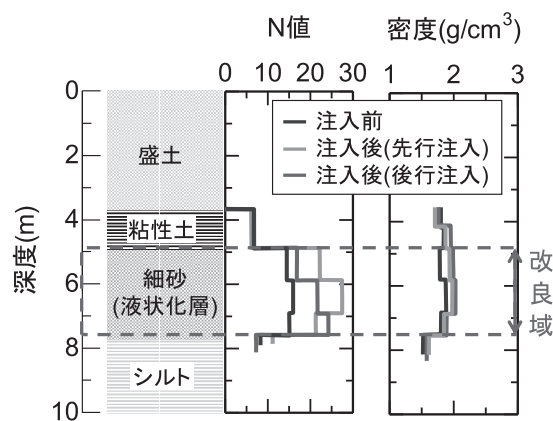


図—16 地表面の鉛直変位量の計測結果

入できた。一方、3.5 日目以降の後行注入ブロック施工時において地表面の鉛直変位量は急増し、10 mm、15 mm を超える変位量が発生したため、図—15 のフローにしたがって、注入量の調整を行った。最終的には、最後の注入孔に対して注入を実施した際に測線②において 20 mm を超える変位量が発生したため、注入を中止した。このような地表面変位を考慮した注入量管理をしながら注入を実施した結果、後行注入ブロックでは、計画注入率 10% に対して、実際に施工した注入率（実施注入率）は 6.5% となった。また、両ブロック平均では実施注入率 8.2% であった。

(b) 品質確認結果

注入前後での PDC 試験から得られた N_d 値および密度検層の結果を図—17 に示す。すべての地点で N_d 値および密度の増加が確認できたが、 N_d 値は実施注入率の低い後行注入が低い値を示す結果となった。表—2 に先行、後行ブロックの実施注入率、改良後の N_d 値から逆算した有効注入率、有効注入率を実施注入率で除した注入効率を示す。実施注入率の高い先行注入ブロックの注入効率は 53% であったのに対して、実施注入率の低い後行注入ブロックでは 60% と高くなっており、改良済みの箇所または堅牢な地盤に向かって注入を実施する場合、地表面変位量が増大する可能性があるが、注入効率は向上すると考えられる。



図—17 試験施工箇所での改良品質確認試験結果

表—2 注入効率の比較

	先行ブロック	後行ブロック
計画注入率	10%	10%
実施注入率	10%	6.5%
有効注入率	5.3%	3.9%
注入効率	53%	60%

実施注入率：実際の注入率

有効注入率：改良後 N 値から逆算した注入率

注入効率：実施注入率 / 有効注入率

(c) 液状化対策効果の評価

先行注入ブロックと比較して改良後の N_d 値が低く算定された後行注入ブロックの値を用いて、耐震標準に示すスペクトル II に対する液状化判定結果を表—3 に示すが、改良前に $P_L=9.7$ であった地盤を $P_L=2.3$ まで低減できている。各層での 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することができた。

表—3 液状化判定結果 (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	

7. おわりに

本報告では、動的注入により地盤内に脈状の改良体を作製し、従来工法と比較して 1/3 程度の注入率で液状化被害の軽減が可能な脈状地盤改良工法について、工法開発および実用化を行った。本報告で得られた成果を以下に示す。

- ①薬液のゲルタイムや注入速度および速度周期を適切に調整した動的注入により、液状化地盤中に脈状の改良体を割裂注入する手法を確立した。
- ②振動台実験を実施し、脈状地盤改良工法により地震時に発生する過剰間隙水圧や地表面沈下量を低減可能であることを確認した。
- ③改良品質確認手法として、ピエゾドライブコーン試験、密度検層等が適用可能であることを確認した。
- ④密度増大による N 値および液状化抵抗の増加を考慮した注入率 A_s の算定方法、改良品質確認結果を用いた液状化対策効果の評価手法を構築した。
- ⑤鉄道構造物近接またはその直下地盤へ本工法を適用する際の施工法として、地表面変位量をリアル

タイムで計測しながら注入量を管理する手法を構築した。

- ⑥ $P_L=10$ 程度の地盤に対して本工法を適用することで、液状化が構造物に与える影響を無視できる $P_L<5$ まで低減させることが可能であることを確認した。本工法は、強制的に地盤を固める固結工法などとは異なり、地盤条件によって効果の程度は異なる。

本研究の一部は「国土交通省 交通運輸技術開発推進制度」により実施しました。

JCM/A

《参考文献》

- 1) Meyerhof, G. G.: Discussion of Session 1, Proc. of 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 3, pp. 110, 1957.
- 2) 財団法人技術研究センター：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—コンパクショングラウチング工法, 2007.
- 3) 平間邦興：相対密度の適応に関する 2・3 の私見, 砂の相対密度と工学的性質に関するシンポジウム発表論文集, pp. 53-56, 1979.
- 4) 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 鉄道総合技術研究所, 2012.
- 5) 水野恭男, 末松直幹, 奥山一典：細粒分を含む砂質地盤におけるサンドコンパクションバイブル工法の設計法, 土と基礎, Vol. 35, No. 5, pp. 21-26, 1987.

【筆者紹介】

石橋 利倫 (いしばし としつぐ)
(公財) 鉄道総合技術研究所
鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室
研究員



大西 高明 (おおにし たかあき)
ライト工業(株)
施工技術本部 R&D センター 材料開発部
グループ長



滝沢 聡 (たきさわ さとし)
東日本旅客鉄道(株)
構造技術センター 課長
基礎・土構造グループリーダー



井澤 淳 (いざわ じゅん)
(公財) 鉄道総合技術研究所
鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室
主任研究員

