

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# 低コストで液状化地盤を改良する

薬液を動的に割裂注入することで、地盤内に脈状の改良体を作製して周辺地盤を密実化させる脈状注入による脈状地盤改良工法を開発し、実用化しました。本工法では、汎用の小型施工機械を用い、従来よりも大幅に低い10%程度の改良率（従来工法の1/3程度）で行えるため、コスト削減、工期短縮、地表面変位や騒音、振動の抑制などが可能です。ここでは、本工法の概要を説明するとともに、実用化に向けた施工試験による効果事例について紹介します。



**井澤 淳**  
Jun Izawa  
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  
【専門分野】地盤工学



**大西 高明**  
Takaaki Ohnishi  
ライト工業株式会社  
施工技術開発部  
グループ長  
【専門分野】化学工学、  
地盤工学



**藤原 寅士良**  
Torajiro Fujiwara  
東日本旅客鉄道株式会社  
構造技術センター  
【専門分野】土木工学



**舘山 勝**  
Masaru Tateyama  
事業推進部  
部長  
【専門分野】地盤工学

## はじめに

構造物を支持する地盤が液状化（☞参照）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ります。とく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、杭基礎などで支持された橋りょうや高架橋など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す。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おり、対象となる区間が長い区間にわたるため、経済的に有利な対策工法が求められます。さらに近年、首都直下地震や南海トラフ地震などの大規模

地震の発生も危惧されており、液状化に対する早急な対策が望まれています。

これまでに実用化されている液状化対策工法は数多く存在しますが、多用される工法としては地盤とセメントなどと攪拌することで地盤を完全に固めてしまう固結工法、コンクリート壁や鋼製の矢板などで地盤を取り囲むせん断変形抑制工法、地盤内の空隙を減らして地盤の密度を増加させる密実化工法（☞参照）に分類することができます。このうち、固結工法、せん断変形抑制工法は液状化の発生を完全に防止することを期待しているため、対策効果は高くなりますが、コストが増大することや、大型機械を必要とするなど

### ☞ 地盤の液状化

地盤は土粒子と空隙（主に水）で構成されており、土粒子同士のかみ合わせや摩擦力で地盤上の構造物などを支えています。地盤が地震時に揺すられると、水の圧力（間隙水圧）が増加して、かみ合わせや摩擦力が減少し、構造物などを支える力を失ってしまいます。このような現象を液状化と言い、過去の大規模地震の際に大きな被害を生じています。

### ☞ 密実化工法

液状化は、かみ合わせや摩擦力の小さい密度の低い（土粒子の比率が低く、空隙が多い）砂質地盤で発生します。密実化工法は、密度を増加させる（空隙を減らして、土粒子の比率を高める）ことでかみ合わせや摩擦力を増やし、液状化に対する抵抗を向上させる工法です。

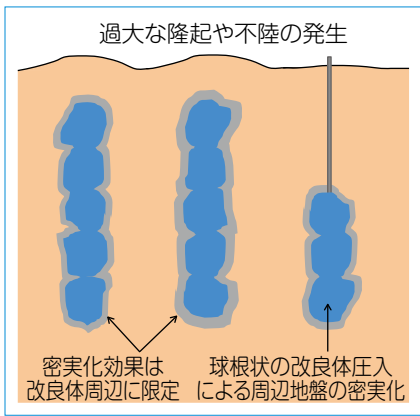


図1 CPG工法の概要

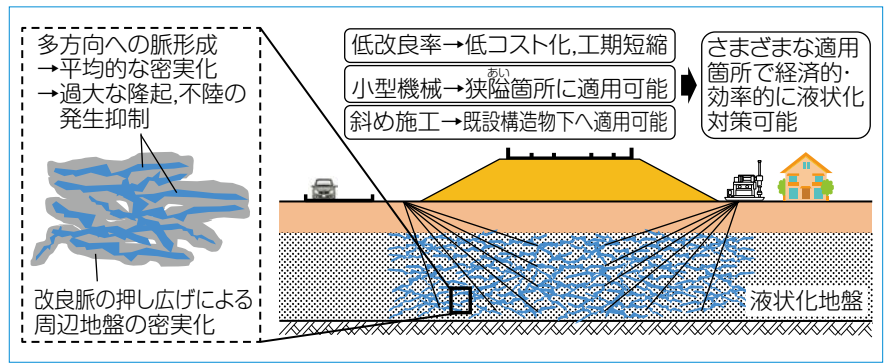


図2 脈状地盤改良工法のイメージ図

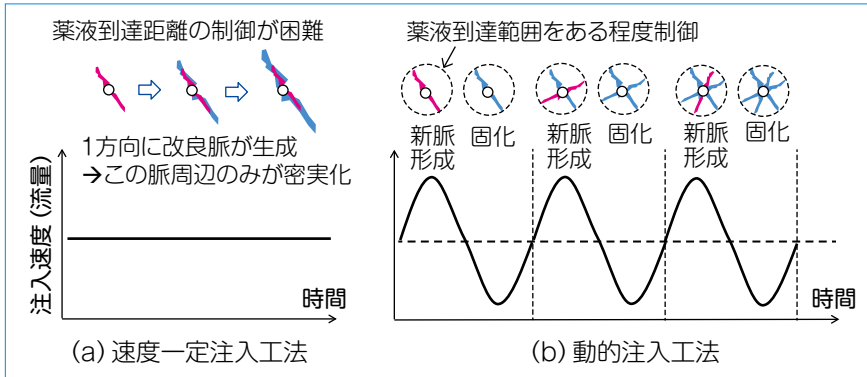


図3 動的注入による脈の作製イメージ

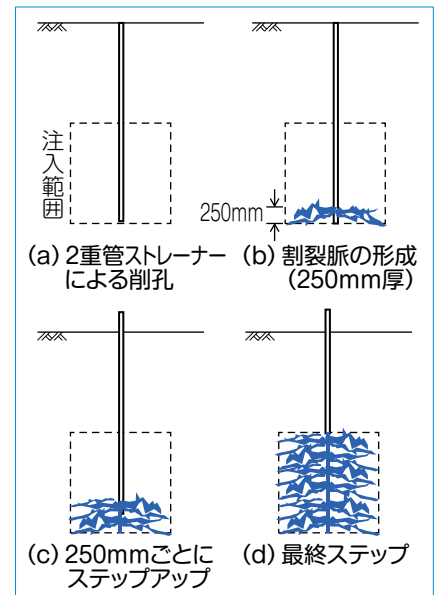


図4 ステップアップ方式注入

の問題があります。密実化工法としては締固め砂杭工法(サンドコンパクションパイル工法, SCP工法)があげられ、過去の大規模地震において有効性が確認されていますが、大型機械を必要とすること、騒音や振動が発生すること、斜め施工が不可能なため既設構造物直下への適用が難しいなどの課題がありました。一方で、同じ密実化工法として、図1に示すようにモルタル注入材を地盤に静的に圧入して周辺地盤の密度を増加させる静的圧入締固め工法(コンパクショングラウチング工法, CPG工法)<sup>1)</sup>が開発されています。この工法では、液状化の完全な抑制は期待せず、液状化の程度を低減させることを目的としており、改良率を10%程度と低く設定できます。また、比較的小型の施工機械を使用できること、斜め施工が可能で既設構造物直下にも適用可能であるなどの利点もあり、近年適用が増えています<sup>2)</sup>。しかしながら、図1に示すように密実化

効果が球根状の改良体周辺に限定されること<sup>3)</sup>、局所的に注入材を圧入するため地表面の過大な変形や不陸を生じること<sup>4)</sup>などの問題があり、鉄道施設への適用は困難でした。

そこで、鉄道施設直下への施工を念頭に置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開発しました<sup>5)6)</sup>。本工法では、図2に示すように薬液を割裂注入することより脈状の改良体を作製し、改良脈周辺地盤を密実化させることで液状化の程度を低減させます。このような脈状改良体をさまざまな方向に作製することで、低改良率であっても平均的かつ効率的に液状化地盤の改良が可能となり、きわめて低コストで改良できること、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、地下水流動障害が低いなどの特徴があります。

### 脈状改良体の作製

脈状地盤改良工法は、高炉スラグ(コ

ンクリート骨材の代わりとなる鉄鋼のスラグ)に水ガラスを加えた薬液を、地盤を押し広げながら注入(割裂注入)させることで改良脈の周辺地盤を密実化させます。このような薬液を一定の注入速度で割裂注入すると、図3(a)に示すように最初に発生した改良脈に集中的に注入される傾向があり、割裂脈を広範囲に作製することができません。この場合、その改良脈の近傍しか密実化されず、注入効果はその周辺に限定されてしまいます。そこで、注入速度を周期的に変化させて薬液を地盤に送液する動的注入工法を採用します。注入速度の振幅や周期、注入薬液が固化する時間(ゲルタイム)などを適切に設定することで、図3(b)に示すように各周期の間に新脈形成→固化→新



図5 注入試験の状況

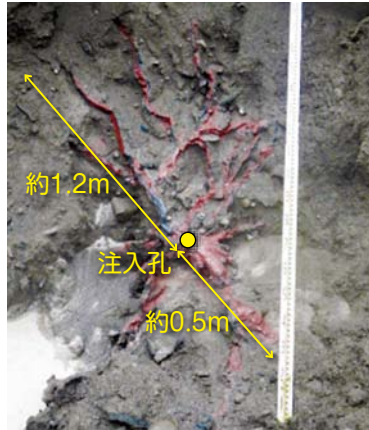


図6 改良体の掘り起こし状況

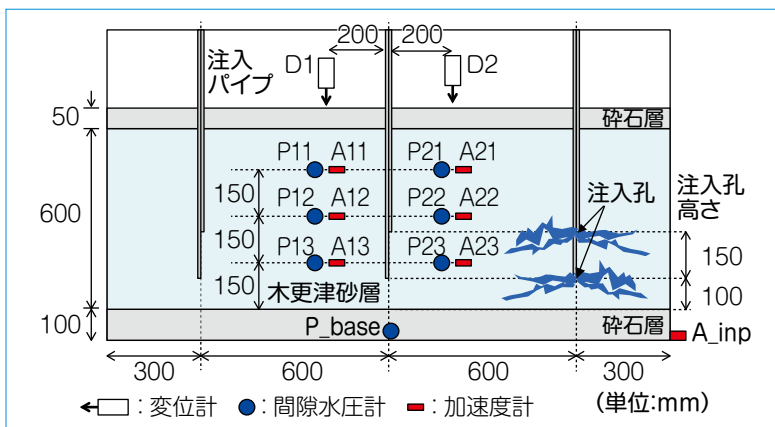


図7 注入孔位置とセンサー配置図

脈形成→固化というプロセスを繰り返して、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できます。また、速度一定注入では改良脈が大きくなり、対象範囲外に到達してしまう可能性もありますが、動的注入を行うことで、到達距離もある程度制御することが可能です。

### 脈状改良体の注入試験

脈状地盤改良工法の開発にあたり、一般的に緩い砂質土を主体とした液状化地盤を対象とした薬液注入試験を実施し、改良脈の作製について検討しました。

本工法の施工順序を図4に示します。まず、図5に示すような小型の施工機械に取り付けた二重管ストレーナーを用いて地盤に注入孔を掘削します(図4(a))。この二重管ストレーナー

には2系統の注入管があり、それぞれの管から主材と反応材を送り込み、先端部で混合して割裂注入させ、5～10秒後に薬液が固化するようにしています。図4(b)～(c)に示すように、下端から250mmピッチで上方へ上げていく、ステップアップ方式の注入方法を採用します。注入試験後の改良体の掘り起こし状況を図6に示しますが、長さ0.5～1.2m程度の改良脈が多方向に作製できているのがわかります。薬液のゲルタイムや動的注入の諸元を適切に設定することで、液状化地盤中にこのような脈状の改良体を多方向に作製できることを確認しました。

### 液状化対策効果

液状化地盤中へ脈状の改良体を割裂注入させることによる液状化対策効果

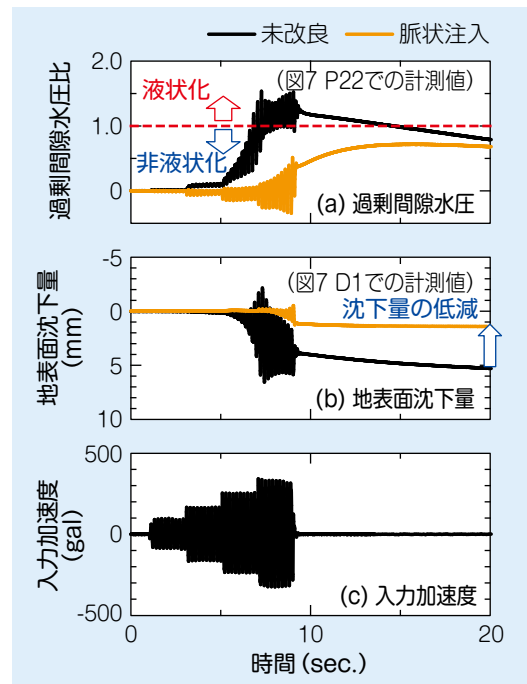


図8 1回目加振時の過剰間隙水圧比および地表面沈下量の比較の時刻歴

を確認するため、図7に示すような小型模型を用いた振動台実験を実施しました。実験では未改良の緩い液状化地盤(ケース1)と注入率10%の脈状改良地盤(ケース2)を実施し、挙動を比較しました。

実験で計測された地盤中の過剰間隙水圧比(※参照)および地表面沈下量の時刻歴を、入力加速度の時刻歴と共に図8に示します。過剰間隙水圧比が1.0を超えると液状化が発生しますが、未改良地盤では1.0を超えて液状化が発生しているのに対して、脈状改良地盤では液状化が発生していないこ

#### ※ 過剰間隙水圧比

地盤は土粒子と水で構成されていますが、地震時に地盤が揺さぶられることで水圧(過剰間隙水圧)が増加します。この過剰間隙水圧と地震前の地盤中に作用している自重(拘束圧 $\sigma_v$ )の比を過剰間隙水圧と呼び、1.0以上(水圧が自重を上回る)になると液状化に至ったと判断します。

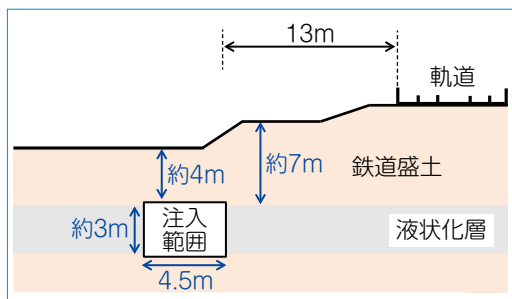


図9 注入孔および品質確認地点

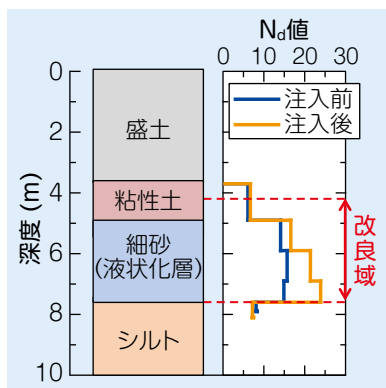


図10 改良前後のN<sub>d</sub>値

とがわかります(図8(a))。また、地表面沈下量も大きく低減できています(図8(b))。このように、脈状地盤改良工法を適用することで、低注入率であっても適切に液状化対策が可能なことを確認しました。

### 施工試験

既設鉄道施設直下の対策を行う場合、軌道変状などの厳しい制約条件下での施工が必要になります。そこで、図9に示すような箇所において、鉄道盛土直下への適用を想定した試験施工を実

#### 液状化判定 ( $F_L$ , $P_L$ )

地盤の液状化強度と地震時に地盤に作用するせん断応力の比  $F_L$  (液状化抵抗率) を求めて、 $F_L < 1.0$  で液状化の発生の可能性があるかと判断します。また、液状化の範囲、程度、深さ方向の分布から総合的に判断して  $P_L$  (液状化指数) を求めます。 $P_L \geq 5$  の場合、液状化による構造物への影響が大きく、液状化を考慮した耐震設計が必要となります。

施し、施工性を確認しました。

本試験では、地表面変位量をリアルタイムで計測し、地表面変位量が20mm以下に収まるように、薬液の注入量を調整しながら施工を実施しました。その結果、計画した注入率10%に対して、実際の施工では注入率8.2%を実現しました。

改良前後で、地盤の堅さを示す  $N_d$  値を計測した結果を図10に示します。図10では、 $N_d$  値の増加が確認できます。この値を用いて、鉄道構造物等設計標準 耐震設計<sup>7)</sup>にしたがって、スペクトルII地震動に対する液状化判定(☞参照)を実施した結果を表1に示します。液状化判定では、液状化抵抗率  $F_L$  を求め、1.0を下回ると液状化に至る可能性がある地層と判定されます。この  $F_L$  を用いて全層の液状化の程度を評価する値が液状化指数  $P_L$  で、5を超えると液状化が構造物に及ぼす影響が大きく、液状化に対する設計が必要と判断されます。表1からわかるように、改良前に  $P_L$  が9.7の地盤が改良後に2.3まで低減されています。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レベルまで液状化の程度を抑制できました。

このような鉄道施設直下の厳しい制約条件下においても、鉄道施設に変状を与えることなく、適切に液状化対策が可能で

表1 液状化判定結果

	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	

### まとめ

従来工法の1/3程度の薬液の注入量で経済的かつ効率的に液状化対策が可能な脈状地盤改良工法について紹介しました。本工法は、すでに営業線盛土直下の液状化対策工法として実適用されています。今後、さまざまな方面で採用していただけるよう、開発を継続していきたいと考えています。

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」により実施しました。[RRR]

### 文献

- 1) 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，沿岸技術研究センター，2007
- 2) 足立雅樹，新坂孝志，黒坂正博，善功企：液状化対策としての静的圧入締固め工法(CPG工法)の施工事例，地盤工学会誌，Vol.58，No.11，pp.26-29，2010
- 3) 高野大樹，西村聡，竹花和浩，森川嘉之，高橋英紀：静的圧入締固め工法の液状化抑制効果に関する検討，地盤工学ジャーナル，Vol.8，No.1，81-95，2013
- 4) 山崎浩之，江本翔一，足立雅樹，原田良信，山田和弘，森河由紀弘：締固め工法施工時の地盤隆起量の予測法，土木学会論文集C，Vol.65，No.4，pp.1039-1044，2009
- 5) 井澤淳，荒木豪，小島謙一，館山勝，大西高明，藤原貞士：効率的な液状化対策が可能な脈状地盤改良工法の開発，鉄道総研報告，Vol.30，No.5，pp.23-28，2016
- 6) 鉄道総合技術研究所：新たな液状化対策工法「脈状地盤改良工法」を開発しました，プレスリリース，[http://www.rtri.or.jp/press/2017/is5f1i0000001q3b-att/20170421\\_001.pdf](http://www.rtri.or.jp/press/2017/is5f1i0000001q3b-att/20170421_001.pdf)
- 7) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善出版，2012