

見えない地盤内を改良して 鉄道施設を地震から守る



小野寺 智哉

Tomoya Onodera

鉄道地震工学研究センター
地震動力学研究室
研究員



井澤 淳

Jun Izawa

鉄道地震工学研究センター
地震動力学研究室長

はじめに

地震が発生すると、軟らかい砂地盤において「液状化」と呼ばれる現象が発生する可能性があります。日本の都市部などにもこのような軟らかい砂地盤は広く分布しており、東北地方太平洋沖地震や能登半島地震の際には液状化による被害が多数報告されています。液状化が発生すると、地盤が急激に強度や剛性を失うため、構造物の沈下や、トンネルなどの地中構造の浮き上がりといった被害が発生し、鉄道の安全な運行に支障をきたしたり、長期間に及ぶ復旧が必要になったりするおそれがあります。このような液状化による被害を防ぐための一つの方法として、鉄道総研が開発した「脈状地盤改良工

法¹⁾を取り上げ、改良の原理や特徴を説明するとともに、見えない地盤内に施した地盤改良の効果を評価する方法についても解説します。

見えない地盤内に改良脈を作る

液状化は密度が低く、軟らかい砂地盤（一般的に「**緩い砂地盤**」²⁾と言います）において発生しやすい現象です。そこで、液状化を防ぐための一つの方法として、地盤の密度を上げることが考えられます。「脈状地盤改良工法」は、地盤内に比較的硬い改良体を葉脈のようにあらゆる方向に注入することで、その周囲の地盤の密度を上げる**密実化工法**³⁾です（図1）。脈状地盤改良工法を用いて地盤を効果的に改良するため

2) 緩い地盤・密な地盤

地盤は砂や粘土などの土粒子が集まって形成され、粒子同士の隙間には水や空気が存在します。土粒子がどれだけの体積を占有しているかによって、地盤の強度や剛性などの性質が異なります。土粒子の占有率が高い地盤を「密な」地盤、土粒子の占有率が低い地盤を「緩い」地盤と呼びます。緩い砂地盤は土粒子同士のかみ合わせや摩擦力が小さいため、地震時に液状化が発生しやすいと考えられています。（図1）

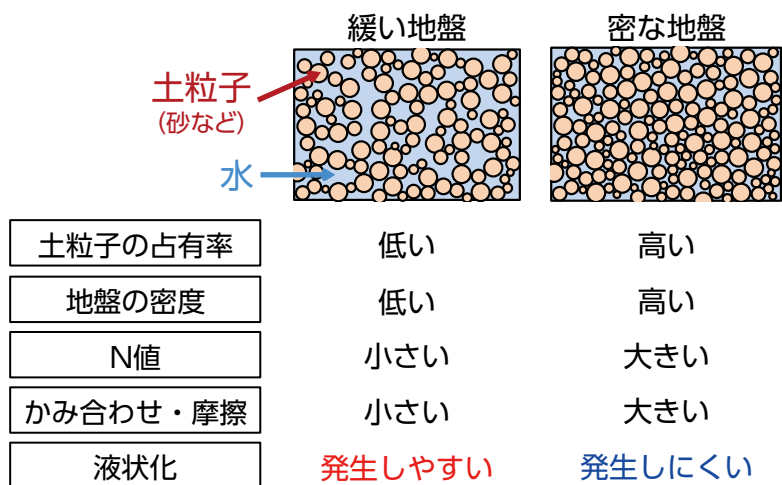


図1 緩い地盤・密な地盤

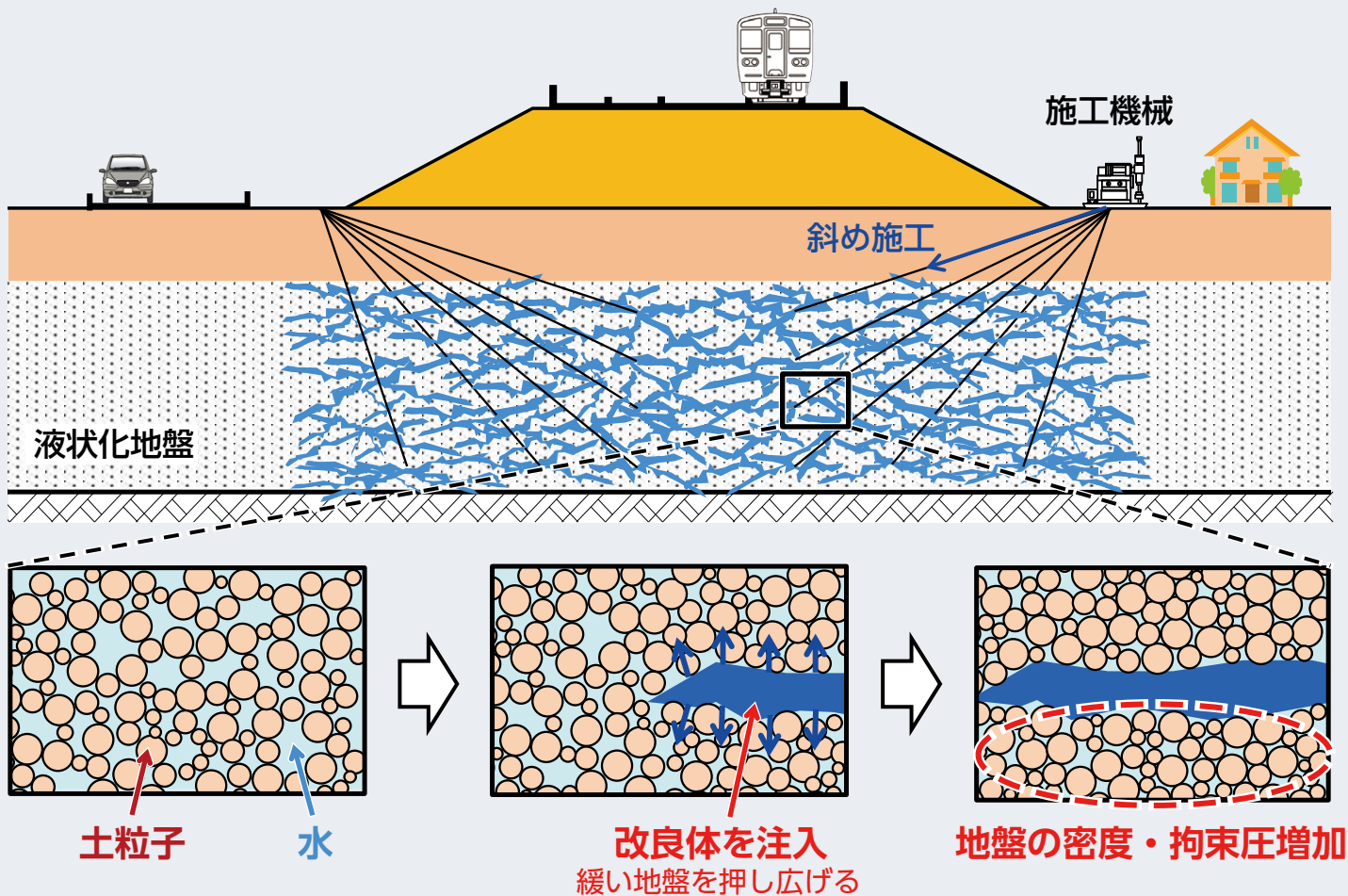


図1 脈状地盤改良工法の概念図

には、改良体をさまざまな方向に満遍なく注入することが重要です。改良体を速度一定で注入すると、一番弱い箇所にも改良体が注入され続け、密実化の範囲が限定されたり、意図しないところまで改良体が到達したりするなどの問題があります。そのため、本工法では20秒程度の周期で注入速度を変化させながら施工を行う動的注入(図2)を採用しています。これにより、各

密実化工法の原理

液状化は緩い砂地盤で発生します。密実化工法は、密度を増加させてかみ合わせや摩擦力を増やし、液状化抵抗を向上させる工法です。密実化工法以外にも、たとえば、セメントを混合することで地盤を固化する工法、鋼やコンクリート製の壁などを地盤内に設置することで地盤の変形を抑える工法、地下水位を下げたり排水性を高めたりする工法などがあります。対策を行う際には、さまざまな工法の中から、コストや施工条件などを考えて適した工法を選定します。

周期で密度の低い箇所から順に改良体を多方向に注入するとともに、改良体の到達範囲をある程度制御することで効率的に施工を行うことができます。以上のような原理によって、比較的少ない量の改良体でも、地盤を効率的に改良することが可能となっています。

本工法は鉄道の現場に適用するにあたり以下のような利点があると考えられます。まず、注入する改良体の量が比較的少なくて済むため、コストが低く、短期間で改良を完了でき、地表面の隆起が発生しにくい点が挙げられます。また、小型機械を用いた斜め施工が可能であることから、既設の構造物の直下にある液状化地盤の対策に用いることができる点も特長です。騒音や振動も比較的小さく、都市部や住宅地などでの夜間施工にも適しています。実際の現場においては、盛土の下に存在する液状化層に対し

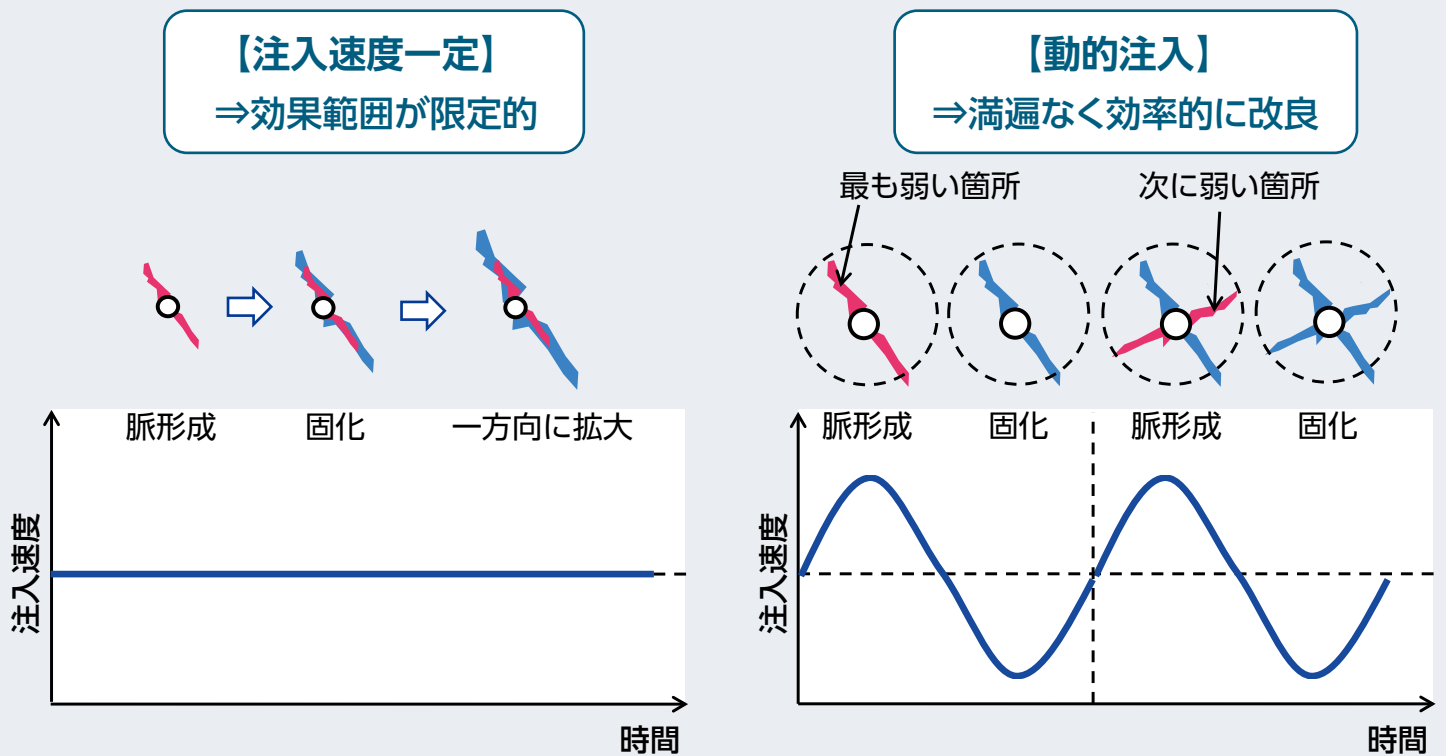


図2 動的注入の原理

て施工することで盛土の沈下を防いだり²⁾、トンネル建設箇所に施工することで液状化によるトンネルの浮き上がりを防いだりする目的で用いられています。鉄道盛土の近傍における実際の夜間施工の様子を図3に示しますが、鉄道運行への支障や近隣への影響を最小限にとどめながら、液状化対策の施工が可能となっています。

見えない改良脈の健全性を確認する

地盤の中に改良体を注入することで液状化対策を行う脈状地盤改良工法ですが、想定通り改良脈が形成されて密度が増加しているか、そして長期間にわたり改良効果を保っているかを直接目で見て確認することはできません。そこで、さまざまな地盤調査を行うことによって地盤の

密度や応力状態を把握し、液状化対策効果を確認する方法が用いられます。本稿では「N値」という指標を用いた改良効果の評価方法について説明します。

N値は標準貫入試験という試験方法を用いて得られる地盤の硬さを表す指標で、大きいほど地盤は密で硬く、小さいほど緩くて軟らかいことを示します。N値から地盤の密度や液状化強度など、地盤に関する多くの情報を推定することも可能です。このような特徴から、N値は地盤の液状化判定や構造物の設計などにも広く活用されています。

脈状地盤改良工法を適用した箇所において、改良前、改良直後（適用から約7日後）にそれぞれN値を計測した結果を図4(a)に示します。改



図3 脈状地盤改良工法 施工の様子

良前ではN値が最大でも15程度であったのに対し、改良直後にはおおむね20以上にまで増加しています。このことから、地盤の密度が上昇していることが確認でき、液状化に対する抵抗性も向上していると考えられます。また、液状化対策を施工した箇所において、長期間にわたって改良効果が持続することも重要です。そこで、脈状地盤改良工法の適用から約10年後に同じ現場で地盤調査を行い、N値がどのように変化しているかを確認しました。改良前、改良直後、改良から約10年後のN値の計測結果を図4(b)に示します。約10年経過後においても改良直後とほぼ同等のN値が得られており、長期間にわたり密度の増加が維持されていることが確認できました。以上のような検討により、

脈状地盤改良工法による液状化対策効果を施工直後の段階で確認できたことに加え、施工から約10年経過後にも一定程度効果が維持されており、実際の現場に適用するにあたって、長期的な効果を見込めることが確認できました。

ただし、N値の計測では調査地点の地盤条件によってある程度のバラツキが生じるのが一般的であり、実際に今回の計測でも一定程度N値のバラツキが確認できます。したがって、複数地点または複数の調査方法を用いて地盤調査を行い、それらの結果を踏まえて改良効果を判断することが重要であると考えられます。本稿では詳細は省略しますが、鉄道総研ではN値の計測のほかに、地盤内の圧力を計測する孔内水平載荷試験や表層地盤の硬さの分布を測定する表

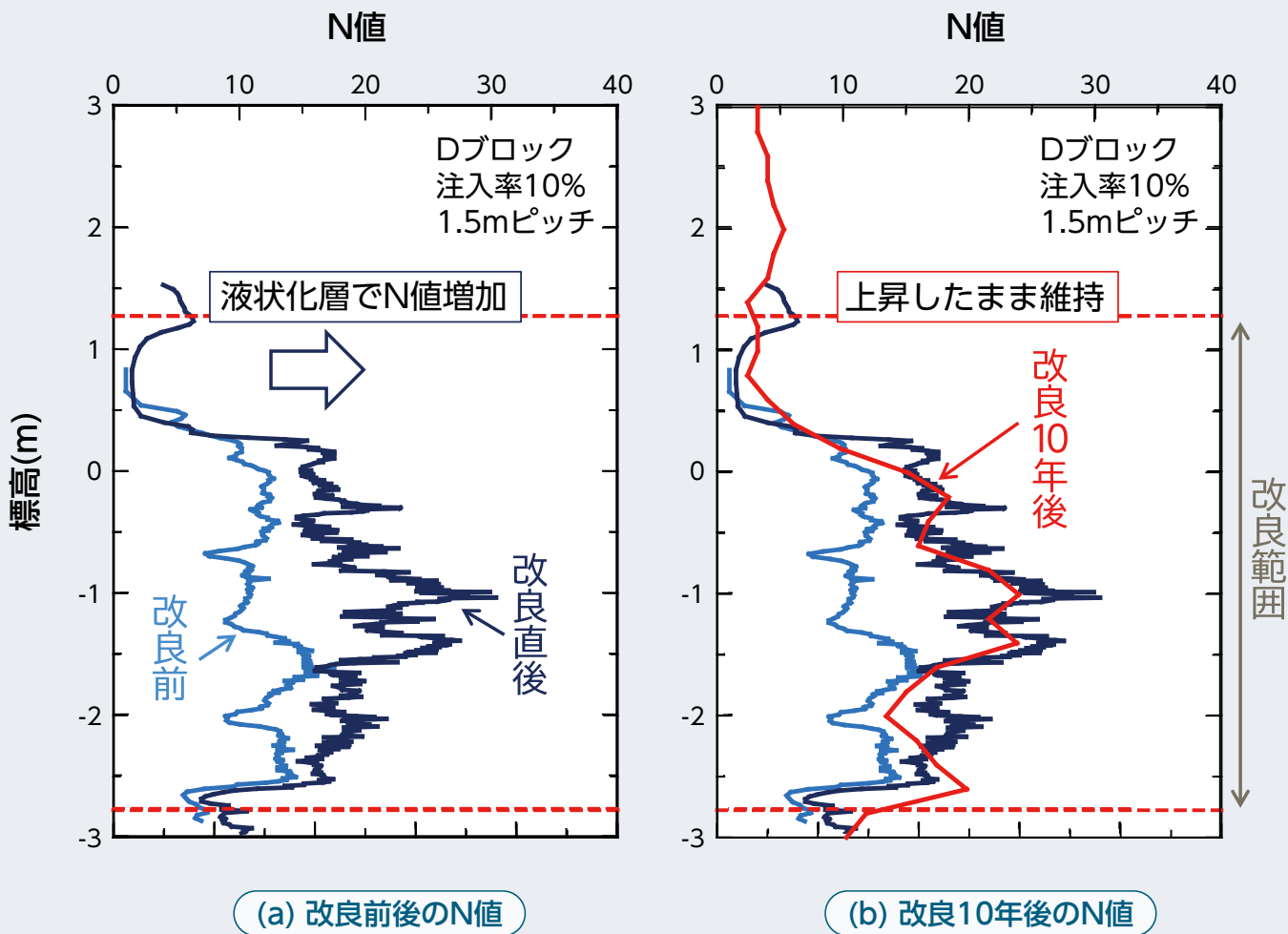


図4 改良前後および10年後のN値の計測結果例

面波探査試験，現場の土サンプルを採取して実験室で行われる液状化試験[®]などを実施しており，これらの結果を総合的に判断して現場における改良効果を確認しています。

以上の調査結果を踏まえ，構造物の設計時に行われる液状化判定[®]を，改良前後のN値を

用いて実施した結果を表1に示します。判定を行った地点では，改良前の液状化指数 P_L が11.2で液状化の発生する地盤と判定されたのに対し，改良後には P_L が3.08まで低下しており，液状化の影響が無視できる5以下まで低下させることができます。さらに，改良から

液状化試験

現場で採取した土サンプルを用い，実験室内で地震時に想定される繰返し力を作用させることで液状化強度を調べる試験です。与えた繰返す力の大きさと，液状化に至るまでの繰返し回数との関係（液状化強度曲線）を求めることで，その地盤条件における液状化抵抗を定量的に示すことが可能です。N値のみでは判断の難しい土の性質の違いなどを考慮して，詳細に液状化強度を把握したい場合などに用いられます。

液状化判定

地盤の液状化強度と地震時に地盤に作用する繰返し力の比 F_L （液状化抵抗率）を求めて，繰返し力が液状化強度を上回る（ $F_L < 1.0$ ）場合に液状化が発生すると判断します。 $F_L < 1.0$ となる層の厚さなどから液状化被害の程度を判断する液状化指数（ P_L 値）を計算します。 $P_L \geq 5$ 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。そのため，脈状地盤改良工法では $P_L < 5$ となるように改良を行う場合が多いです。

【改良前】

	N値	F_L	P_L
第1層	14.04	0.542	11.2
第2層	15.63	0.542	
第3層	13.89	0.438	

【改良前】

$$P_L \geq 5$$

液状化のおそれあり

【改良直後】

	N値	F_L	P_L
第1層	21.97	1.167	3.08
第2層	27.00	2.042	
第3層	19.33	0.625	

【改良後】

$$P_L < 5$$

液状化考慮不要

【10年後】

	N値	F_L	P_L
第1層	22.00	1.167	2.91
第2層	25.48	1.583	
第3層	19.60	0.646	

表1 対策前後における液状化判定結果

約10年後のN値の計測結果を用いた判定でも、 P_L は2.91と、5以下の値を維持していることが確認できました。以上より、脈状地盤改良工法によって、構造物設計において液状化を考慮しなくて良い程度までの対策が実現でき、かつその効果は経年的に持続すると評価することができました。

おわりに

本稿では脈状地盤改良工法について説明するとともに、液状化対策の原理や対策効果の確認・評価方法について解説し、見えない地盤内の改良によって鉄道構造物を守る取り組みを紹介しました。地盤の中の状況を直接目で見て確認することはできませんが、さまざまな地盤調査に

より、液状化の危険度を判断したり、対策工法による改良効果を評価したりすることが可能となります。また、実験や数値解析によって、より高精度な評価を行える可能性もあります。鉄道総研ではより効率的な改良の仕様について検討するとともに、さまざまな試験・解析手法を組み合わせることで液状化地盤の応答や構造物への影響を評価するための技術の開発も進めています。

RRR

文献

- 1) 井澤淳, 大西高明, 藤原寅士良, 館山勝: 低コストで液状化地盤を改良する, RRR, Vol.74, No.6, pp.8-11, 2017
- 2) 井上康太: 脈状地盤改良工法による液状化対策, RRR, Vol.79, No.2, pp.32, 2022