

# 供用中の沈埋トンネル直下地盤を対象とした液状化対策 カーベックス工法の施工実績

深澤 哲也・鎗田 哲也・加納 義晴

自在ボーリングと薬液注入工法を組み合わせた地盤改良技術であるカーベックス工法（以下「本工法」という）を、供用中の沈埋トンネルの液状化対策に適用した。浮き上がり易いトンネルの躯体直下地盤の改良のため技術的に難しい工事であった。施工時の注入管理並びにトンネル躯体の変状計測の強化、さらには薬液注入で発生する間隙水圧の測定及びドレーン工による間隙水圧の上昇抑制を行うことで、躯体の浮き上がりを抑止し工事を無事完了することができた。

キーワード：沈埋トンネル、液状化、浮き上がり、自在ボーリング、地盤改良、薬液注入

## 1. はじめに

大規模地震の際の事業継続に関連し、既設構造物の経済的な液状化対策の関心が高まっている。既設構造物を対象に地盤の液状化対策を行う場合、施工時に構造物への影響が少なく改良効果が確実なことから、固化系地盤改良工法が有効である。実際、東日本大震災後、高圧噴射攪拌工法その他、薬液注入工法といった固化系地盤改良工法が適用された施工事例（延べ19件）を調査した結果、地震被害が一切発生していないことを確認している。

地震時に地盤応答が大きくなる軟弱地盤に建設される沈埋トンネルを対象に耐震設計照査すると、耐震補強や液状化対策が必要となる事例がある。沈埋トンネルの液状化対策が必要となる場合、自在ボーリングと薬液注入工法を組み合わせた工法（例えば、本工法）を用いて、トンネル直下の地盤を改良することができる。その施工においては、遠方から構造物際を施工すること並びに沈埋トンネルは浮き上がり易い構造物であるため、削孔精度と注入時の躯体の浮き上がり防止について十分な施工管理が求められる。

川崎市の千鳥町と東扇島とを結ぶ全長1,200mの川崎港海底トンネルは、沈埋トンネル工法で建設され1979年に供用を開始した。2008年度～2011年度に、トンネルの液状化対策並びに耐震補強工事を実施しており、液状化対策では、合計注入量で約1万m<sup>3</sup>の地盤改良工事を、本工法を用いることで無事に完了している。2011年東日本大震災の際、震度5強の地震動を観測したが、当該トンネルの地震被害は発生してい

ない。

本稿では、沈埋トンネルの液状化対策工事の実施例として、本工法並びに川崎港海底トンネル地盤改良工事の概要を紹介する。さらに、沈埋トンネルの液状化対策工事に関連し、注入管理、躯体変状のモニタリング、並びにドレーン工といった施工管理上の留意点について考察する。

## 2. 本工法

本工法は、自在ボーリングと薬液注入を組み合わせた地盤改良工法である<sup>1)</sup>（図-1、2参照）。2001年の工法開発<sup>2)</sup>以降、これまでに合計26件の施工実績がある。そのうち16件の実績は液状化対策工事に関するものである。構造物直下の地盤改良を地表から構造物を避けながら行うことができるため、施設を供用しながら施工できる。従来、既設構造物直下の地盤改良は、躯体近傍に立坑を構築し、立坑内から水平ボーリ

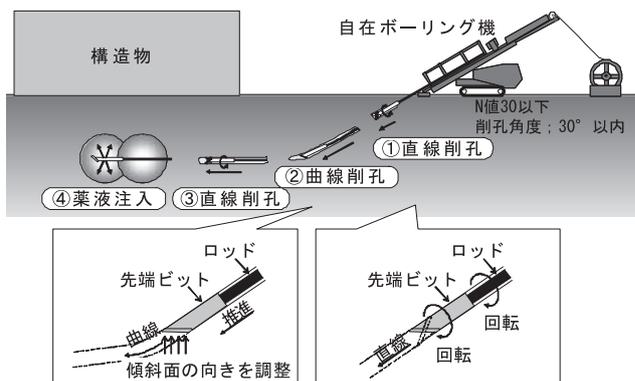
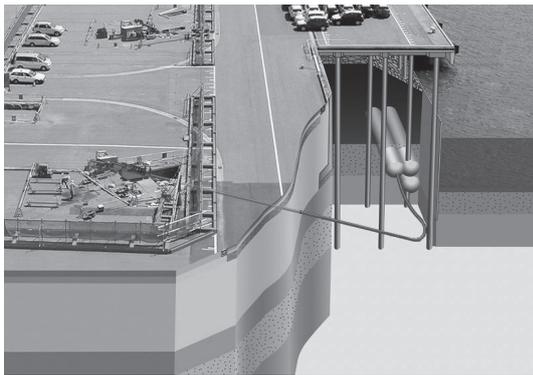


図-1 本工法の概要



図一 2 本工法の適用概念図

ングで削孔し薬液注入することが多かった。本工法では立坑等大規模仮設備が不要となり、コストを削減するとともに、工期を短縮できる。

本工法は、特殊ロッドの採用により急曲径（最小曲率半径 30 m）の削孔を可能にしている。また、高精度な位置検知および姿勢制御システムを装備し、位置計測を繰り返しながらボーリングすることで、位置修正の自由度が高く、障害物を避けての削孔が可能である。遠方からの削孔（最大削孔長は 150 m）であっても、削孔の軌跡を計画位置に対して ±30 cm 以内を目標とする削孔精度を有している。このように自由度が大きく高精度な自在ボーリング技術は、薬液注入による地盤改良だけではなく、アンカーや水平井戸設置を目的としたボーリングに適用できる。

以上、工法並びに削孔精度の概要を紹介した。工法の詳細並びに主な施工実績は既往文献<sup>1)~4)</sup>を参照されたい。

### 3. 川崎港海底トンネル（沈埋トンネル）の地盤改良工事

#### (1) 概要

川崎市の千鳥町と東扇島を結ぶ川崎港海底トンネルは、陸上部は開削トンネル工法、京浜運河部は沈埋ト

ンネル工法によって建設され、1979年10月に一般車の通行を禁止とした上で開通した。1992年に一般車両の通行が可能となり現在に至っている。表層には、埋立地盤並びに自然地盤からなるN値20以下の細砂層が堆積し、陸上部のトンネルアプローチは、当該細砂層を通過する。細砂層は、千鳥町側に厚さ2.9~4.5m延長約130m、東扇島側に最大厚さ1.5m延長約100mで分布する。大規模地震時に当該砂層で液状化の発生が懸念される。そこで、本工事は、トンネル下面に堆積する当該砂層を本工法で地盤改良することで、トンネルの液状化対策を行うものである。本工法による液状化対策工の概念図を図一3に示す。

#### (2) 工事手順

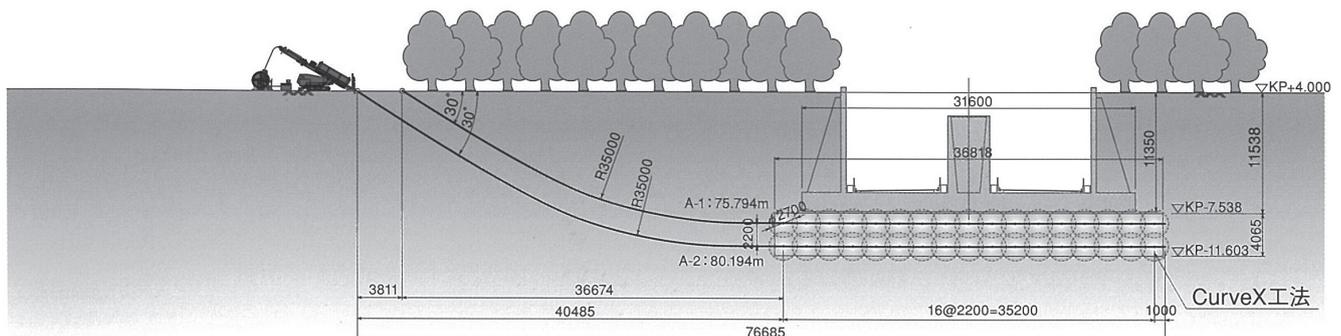
本工法の施工は、事前に実施する室内配合試験による注入材仕様の決定後、削孔、注入外管の設置、限界注入速度試験の実施と注入速度の決定、浸透注入による本注入の実施からなる。以降、主な手順を順を追って紹介する。

##### ・注入材仕様の決定

薬液は、水ガラス系溶液型薬液のうち、長期耐久性に優れ<sup>5)</sup>、特殊中性・酸性系薬液に分類されるエコリオンを用いる。施工に先立ち現地土を採取し室内配合試験を実施する。その結果から、液状化対策に必要な目標改良強度（一軸圧縮強度で80kN/m<sup>2</sup>）<sup>6)</sup>、並びに1球（ステップ）当り注入時間の約90%の時間で固化する目標ゲルタイムを確保できるように、配合（：結果的にシリカ濃度は6~8%<sup>6)</sup>、ゲルタイムは47~235分の範囲で使い分けた）を決定する。

##### ・削孔

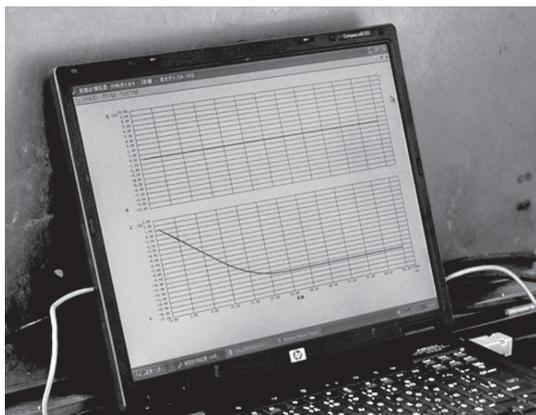
削孔は、自在ボーリング施工機を削孔方向に合わせて設置した後、ベントナイト泥水を用いて行う。削孔方向は、挿入式的位置計測器を使いながら、削孔先端位置を計画線にあわせて制御しながら行う。挿入式的位置計測は原則として1ロッド毎に行う。削孔状



図一 3 沈埋トンネルアプローチの液状化対策用地盤改良の概念図



写真—1 削孔状況

写真—2 削孔精度測定状況  
(PC上で削孔ロッドの軌道を計画と実績で比較)

況を写真—1、削孔精度測定状況を写真—2に示す。

#### ・注入外管の設置

削孔完了後、切り離しジグを挿入しロッド先端部を切り離し、注入外管を挿入する。その後、削孔ロッドを回収し、注入外管の設置を完了する。

#### ・注入速度の決定

注入外管設置後、注入管を設置し、シールグラウトを行う。シールグラウトは、中結のエコリオンを用いる。その後、注入対象地盤を代表する所定の位置で、水押しすることで、地盤の注入圧力と注入量の関係を把握する限界注入速度試験を実施する。注入速度が過大になると、地盤内に亀裂が生じ、注入形態が浸透注入から割裂注入になり、地盤改良強度の低下要因となる。そこで、限界注入速度試験から、注入対象地盤で薬液を浸透注入できる適切な注入速度を注入材と水の粘度差を考慮しながら決定する。

#### ・浸透注入による本注入

注入は、1分間当たり12～16ℓの注入速度を使い分けて行った。1ステップ当りの計画注入量に達するまで同一箇所で注入を行う定量管理を採用した。注入順序は、ステップアップ方式を原則とした。

## 4. 沈埋トンネル直下地盤の薬液注入工の施工管理に関する考察

薬液注入工法では、注入に伴い地盤の間隙水圧が上昇しやすくなる。水圧上昇は、複数の注入ステップを同時施工すると顕著になる傾向がある。構造物の浮き上がり安全率は小さい。深度が浅い構造物直下地盤の薬液注入工事では躯体が動かないように特に注意が必要となる。躯体の動きは、目地部の変形集中、漏水、注入材のリーク、改良地盤の品質不足へと繋がるためである。

川崎港海底トンネルの液状化対策の施工管理では、1) 注入状況の正確な把握、2) トンネル躯体変状のモニタリング、3) 必要に応じてドレーン孔を設置し過剰間隙水圧の消散を図った結果、改良地盤の目標強度(80 kN/m<sup>2</sup>)を十分に満足する一軸圧縮強度(平均で208～232 kN/m<sup>2</sup>)<sup>5)</sup>を得て、無事に地盤改良工事を完了することができた。以降、それぞれの留意点について考察する。

### (1) 注入状況の正確な把握

流量計を用いて注入時の注入速度、注入圧を監視した。また、日々の注入終了時の注入実績を平面図上に可視化することで、注入状況の長期的な変遷並びに短期的な変動の有無に注目し注入実績の把握に努めた。注入実績は、躯体変状のモニタリング結果と比較しながら分析し、注入工事の後工程に反映した。

施工管理上必要となる現場でのデータ整理の省力化並びにデータの可視化を推進するため、3次元CAD上で地盤、構造物、注入実績データ並びに構造物や地盤の変状データを日々可視化するシステム(：3次元注入管理・支援システム、概念図を図—4に示す)の開発を終了している。今後は、当該システムを、本工法を用いた薬液注入工事に適用することで、注入実績と構造物や地盤の変状実績をそれぞれ関連付けながら、早期に分析することが可能となる。過去の実績を次工程に生かす情報化施工を強化することで、さらに确实、安全に施工できる。

### (2) 躯体変状のモニタリング

本工事では、トンネル躯体に傾斜計並びに変位計を設置した。ブロック当り並びに継目部当りの計測項目と数量を表—1に示す。躯体の傾斜角度および継目の目開き量並びに目違い量を計測し、躯体の動きを監視した。

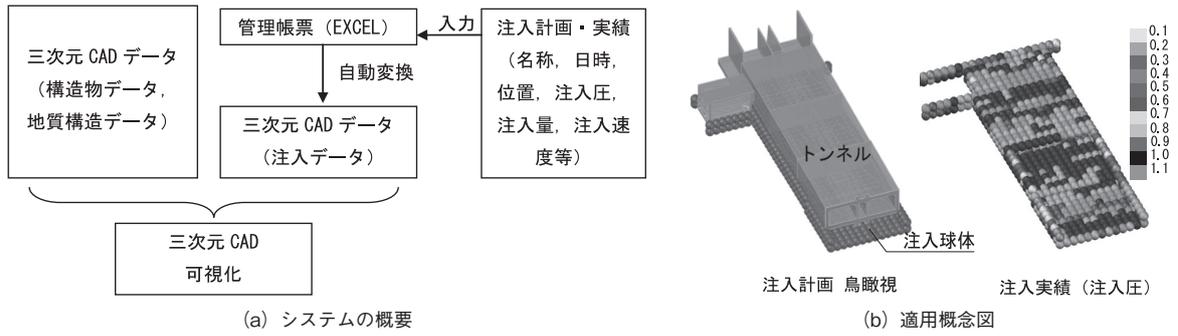


図-4 3次元注入管理・支援システム

表-1 トンネル躯体のブロック当り並びに継目部当りの計測項目と数量

計測項目	内容および目的	使用計器	数量
躯体の傾斜挙動	<ul style="list-style-type: none"> <li>躯体に傾斜計を設置し、構造物の移動の有無の確認</li> <li>管理基準値との比較による安全管理</li> </ul>	固定式傾斜計	2台/箇所 (トンネル軸方向, 軸直角方向)
躯体の継目変位	<ul style="list-style-type: none"> <li>躯体の継目部に変位計を取り付け、継目の目開き、目違いの変位の有無を確認</li> <li>管理基準値との比較による安全管理</li> <li>管理基準値との比較による安全管理</li> </ul>	変位計	3台/箇所

(3) ドレーン孔並びに間隙水圧観測孔の設置による間隙水圧の管理

本工事では、躯体の浮き上がりが懸念される深度の浅い工事範囲に、ドレーン孔並びに間隙水圧観測孔を本工法の精度の高い削孔技術で設置し(図-5参照)、水圧の消散と監視を強化して、浮き上がりの抑制に努めた。

ドレーン孔は、注入孔と同様の設置手順で削孔した後、ストレーナータイプの有孔管と通常の無孔管を使用し、先端から39.5m(3.95m/本×10本)を有孔管とし、39.5mから地上までは無孔管を接続した。その後、ライザーパイプをドレーン管内へ挿入し、先端をGL-6mの深度まで下げ、真空ポンプを接続し吸引することで、ウェルポイント方式の揚水を行った。注入時に、揚水前後並びに揚水期間中の間隙水圧、揚水量、及び揚水のpHをそれぞれ常時測定し、注入時に過剰な間隙水圧の蓄積がないこと、並びに注入材を吸引することがないことを監視した。構造物や地盤の変

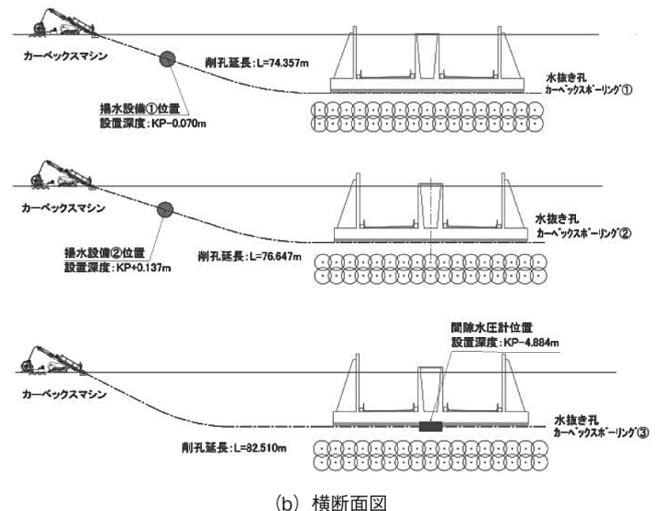
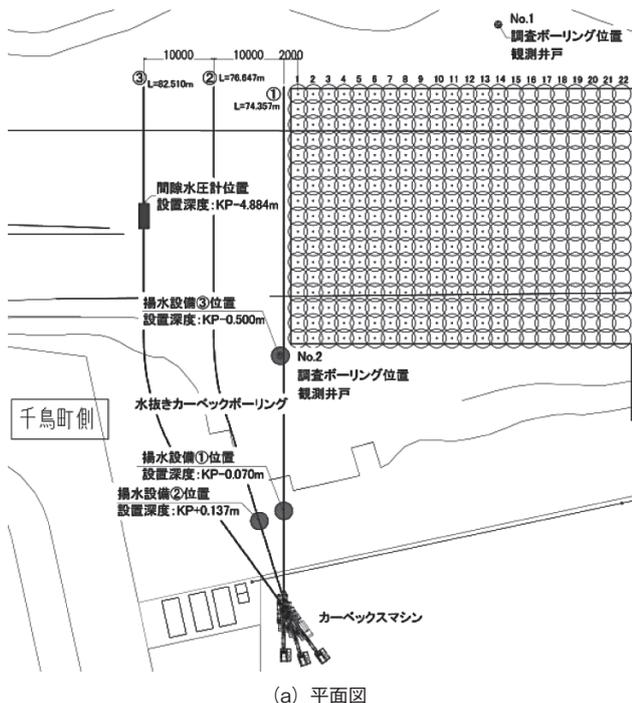


図-5 ドレーン孔並びに間隙水圧観測孔の設置状況

位が見込まれる場合には、注入材のリークを助長しないなど適正な注入を妨げないことを前提に、ドレーン孔や間隙水圧観測孔の設置が有効である。

## 5. おわりに

川崎港海底トンネルの液状化対策は、非常に浮き上がり易いトンネルの躯体直下地盤の改良のため技術的に難しい工事であった。施工時の注入管理並びに躯体の変状計測の強化、さらには薬液注入で発生する間隙水圧の測定及びウェルポイントによって間隙水圧の上昇抑制を行うことで、施工時の躯体の浮き上がりを防止することができた。

構造物直下の地盤改良工事では、施工条件の制約が多く、高精度かつ高性能な3次元自在ボーリング技術を適用することで、施工が可能になることも多い。カーベックス工法の削孔機は、最大削孔長150m、最小曲率半径が30mで一つの削孔で複数回の曲げが可能であるなど高い性能を有する。また、削孔精度も高い。3次元的にまた時系列で注入実績を自動可視化し、日々変化する現場の施工管理に役立てることもできる。特に繊細かつ安全な施工が必要となる供用中の構造物直下の地盤改良工事に、カーベックス工法が貢献できることを期待している。

J|C|M|A

### 《参考文献》

- 1) 山崎浩之, 向井雅志, 山田岳峰, 三原孝彦, 横尾充: 曲がりボーリングを用いた薬液注入による液状化対策工法の現地実証試験, 土木学会論文集, No.756/VI-62, pp.89~99, 2004年.
- 2) 田中龍夫, 条川政則, 小林正志: 三次元削孔による耐震補強・液状化防止工法の現状-カーベックス工法-, 建設の施工企画, No.720, pp.21~25, 2010年2月.
- 3) 秋山義信, 山崎浩之, 小林正志: 最近の地盤注入工法 自在ボーリング技術とその適用, 基礎工, Vol.36, No.5, pp.40~43, 2008年5月.
- 4) 安宅之夫, 小林正志, 山中一男: 自在ボーリングを用いた構造物下の液状化対策, 基礎工, Vol.34, No.4, pp.69-73, 2006年4月.
- 5) 齋藤潤, 李济宇, 山田岳峰, 渡邊陽介, 高橋正光: 厳しい・養生条件下での薬液改良土の長期耐久性に関する検討, 第65回土木学会年次学術講演会, III-486, 2010年.
- 6) 深澤哲也, 釘本幹生: 曲線ボーリングを採用した供用トンネル直下における液状化対策工事, 第65回土木学会年次学術講演会, VI-271, 2010年.

### 【筆者紹介】



深澤 哲也 (ふかざわ てつや)  
鹿島建設株式会社  
横浜支店 新東名徳定トンネル工事事務所  
副所長



鎗田 哲也 (やりた てつや)  
鹿島建設株式会社  
土木設計本部  
設計長



加納 義晴 (かのう よしはる)  
ケミカルグラウト(株)  
施工本部  
地盤改良部  
課長