

曲線ボーリングを併用した静的圧入締固め工法の開発と試験施工

Development of Compaction Grouting Using Horizontal Directional Drilling Technique

新 坂 孝 志 (しんさか たかし)

三信建設工業㈱技術本部 部長

吉 見 力 (よしみ つとむ)

三信建設工業㈱東京支店 係長

1. はじめに

東日本大震災では、多くの施設が液状化による被害を受けたが、事前に液状化対策が行われた施設の被害は少なかった。改めて事前対策の重要性が問われるようになってきているが、既設構造物が存在し、その構造物が供用されている場合には、施工上の制約や費用の面で対策自体が困難となる場合が多いのが現状である。

静的圧入締固め工法（コンパクショングラウチング工法、以下 CPG 工法とする）は、流動性の低い硬練りモルタルを地盤中に静的に圧入することにより周辺地盤を圧縮強化する工法で、密度増大工法に分類される¹⁾。コンパクトな機械設備を使用し、無振動・低騒音といった工法の特長を生かし、最近では既設構造物直下に対する液状化対策工法の一つとして実績が増えている²⁾。

図-1 に示すように、既設構造物直下を改良する場合には通常は構造物の中からの鉛直施工や、構造物周囲からの斜施工で対応する。しかし、構造物や施工条件によっては、構造物を削孔することができない場合がある。また、斜施工では構造物直下に死角が生じ、未改良部が発生するといった不具合が発生する場合があった。こうした条件下での施工に対応するため、「曲線ボーリングを併用した CPG 工法—CPG ガイドアーク工法—」を開発した。図-2 に本工法の概要図を示す。本工法は、曲線ボーリング（または、自在ボーリング）により削孔を行い、低流動性のモルタルを圧入することによる締固め

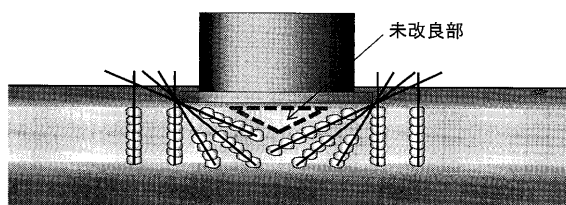


図-1 斜施工時に発生する未改良部

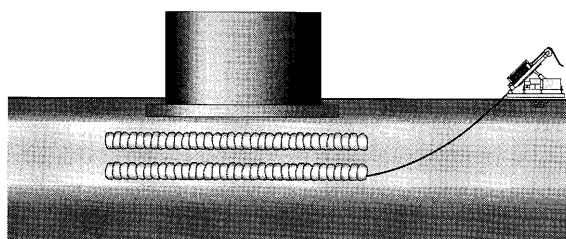


図-2 CPG ガイドアーク工法の概要図

効果を利用して、既設構造物直下地盤の液状化対策を行うものである。本稿では、この工法開発に際して実施した試験施工と、その取組みについて述べる。

2. 既往の技術及び本工法の開発

既往の工法において、曲線ボーリングを用いた代表的なものとして薬液注入工法がある³⁾。薬液注入工法は固結工法に分類される工法で、土粒子間に薬液を浸透させ、固化することにより液状化抵抗を増加させるものである。曲線ボーリングを併用した既往の地盤改良技術は、いずれも固結工法に分類される工法のみで、密度増大工法は存在しなかった。以下に、開発に際しての主な課題をまとめる。

2.1 開発課題

(1) 工法（メカニズム）の課題

CPG 工法は、注入材を圧入することにより周辺地盤を締固めるため、注入管のジャミング（引抜き不能状態）が発生する可能性が高い。曲線ボーリングを併用する場合は従来よりも削孔長が長くなるため、ジャミングが起りやすい状態となる。そのため、注入管の引抜き時に従来よりも大きな引抜き力を要することから、ジャミング対策が必要となる。

(2) 注入材料の課題

CPG 工法では、浸透注入や割裂注入にならないようにするため、注入材料に低流動性のモルタルを使用する。流動性が低いことから、注入管内の圧力損失が大きく材料圧送に必要な圧力が薬液注入工法よりも高圧となる。また、曲線ボーリングを併用する場合には、鉛直削孔よりも長距離を圧送する必要があるため、従来の注入材料では圧送不能となる可能性が高い。

(3) 削孔・注入資機材の課題

注入管の引抜き時に大きな引抜き力が必要なことから、CPG 工法では細径で肉厚の管を使用している。このため、従来の曲線ボーリングで使用している管よりも、曲げ剛性の高い管を使用することとなり、注入管の湾曲の可否について検証する必要がある。また、注入管の接続部からの漏水により材料が脱水し、圧送不能となることが懸念されるため、漏水が発生しない構造が必要となる。

(4) 削孔方式の課題

曲線ボーリングの削孔方式としては、ケーシング削孔方式とロッド削孔方式がある。ケーシング削孔方式は、ガイド管（ケーシング）により削孔を行い、注入管を挿

入し、ガイド管を引抜いた上で注入を行うものである。ロッド削孔方式は、注入管（ロッド）を用いて削孔を行い、その後、注入管を引抜きながら注入を行うものである。一般に曲線ボーリングを併用した薬液注入工法では、注入時に施工機械が不要なことから、湾曲しやすい肉薄の管が利用できるケーシング削孔方式が用いられている。ケーシング削孔方式は、注入が別工程であることから、削孔時の漏水は許容できるといった利点がある一方で、ガイド管を引抜く必要があるため、工数が多くなるといった欠点がある。また、CPG 工法ではロッド引抜き時に大きな引抜き力が必要となるため、ケーシング削孔方式を採用した場合でも、それに見合った注入用の施工機械も必要となる。

2.2 開発フロー

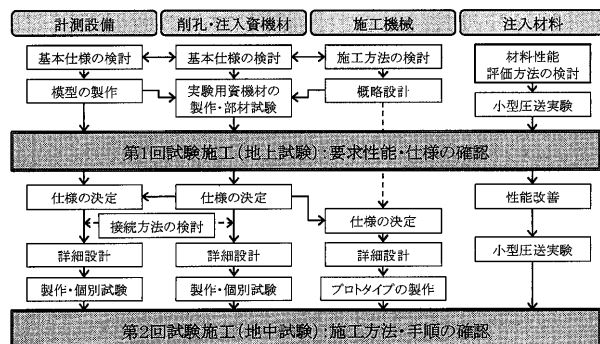
図—3 に示すように、検討課題を①計測設備、②削孔・注入資機材、③施工機械、④注入材料の4項目からアプローチするように開発を進めた。それぞれの項目毎に室内試験や部材試験を実施し、基本性能を確認した。また、個別に行った試験結果をもとに、2回の実物大の試験施工を実施した。

第1回目の試験施工は、CPG 工法で使用している削孔・注入資機材の曲線ボーリングへの適用性を確認するためのもので、地上で注入管を湾曲させた試験及び注入材の圧送試験を行った。この試験施工で得られた結果をもとに、削孔・注入資機材の仕様を決定した。また、削孔・注入資機材の仕様をもとに、本工法専用の施工機械及び計測設備の仕様を決定し製作した。次に、施工機械等を含む施工システム及び施工手順を確認するため、第2回目の試験施工を地中にて実施した。

(1) 注入材料

骨材の粒度分布、セメントの配合量及びスランプ値については、従来の CPG 工法と同様とした。この材料に助材（保水性流動化剤）を添加し、流動性を増加させ長距離圧送が可能な注入材料とした。注入材料の特性として、助材を添加することにより圧送性は改善されるが、添加しすぎると地中で脈状に迷走しやすくなり、地盤の締固めを行う材料としては不適切なものとなる。そこで、小型圧送試験機⁴⁾を使用し、注入材料として所要の性能を満足できる助材の限界量を確認した。

(2) 削孔方式及び施工機械



図—3 開発フロー

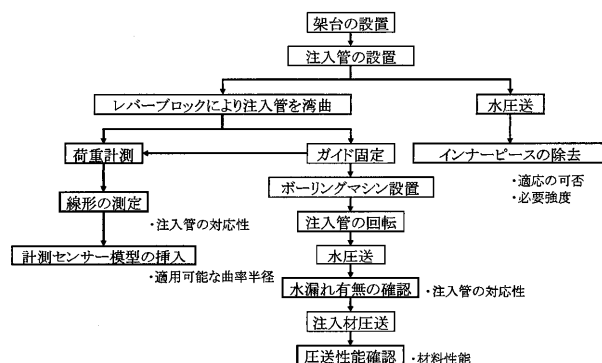
削孔方式は、工数が少なく、削孔と注入で同じ径の管が使用できるロッド削孔方式を選定し、本工法専用の削孔・圧入兼用機を開発することとした。

3. 第1回試験施工（地上試験）⁵⁾

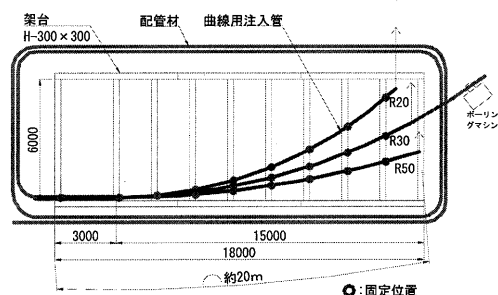
3.1 試験概要

試験施工は、図—4 に示す第1回試験施工フローにしたがって行った。図—5 に第1回試験施工概要図を、写真—1 及び口絵写真—1 に試験施工の状況を示す。はじめに、H 鋼（H-300×300）で 6 m×18 m の架台を設置し、この架台上に外径 73 mm の曲線ボーリング用の注入管を設置した。次に、端部を固定した状態で図中に示す方向にレバブロックを用いて引っ張り、所定の曲率半径になるように湾曲させた。注入管は、外径 73 mm のストレート管と、中間部の肉厚を薄くした管の2種類を用いた。また、架台の外側には1周約50 mの配管を2周配置し、全長で約120 mの圧送経路となるようにした。

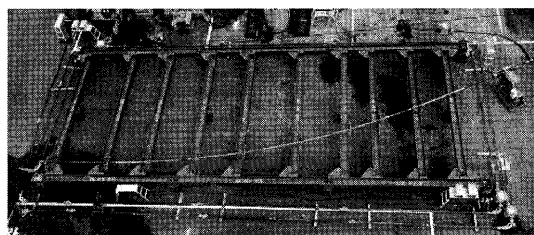
一つ目の確認試験として、固定金具を用いて架台に固定しながら注入管を湾曲させ、このときに必要な引張り荷重をロードセルにより計測した。また、注入管の線形を測定した。湾曲させた注入管に挿入可能な計測セン



図—4 第1回試験施工フロー



図—5 第1回試験施工概要図



写真—1 第1回試験施工状況（地上試験）

報告

サーの寸法・形状を確認した。

次に二つ目の確認試験として、湾曲させた注入管にボーリングマシンを設置し、ボーリングマシンにより注入管を回転させ、疑似的に地中の状態を再現した状態にした。写真-2に示すように、固定金具にはローラーが取付けられており、曲線形状を保持しながら回転をすることができる構造となっている。この状態で水及び注入材料の圧送試験を行った。気中への圧送試験時には、25 m 間隔で圧力を計測し、管内抵抗による圧力損失を確認した。また、注入管の接続部からの水漏れの有無を確認した。

3.2 試験結果及び考察

(1) 注入管の適用性

図-6に、固定位置からの距離と引張り荷重の関係を示す。曲線ボーリングでは地盤を反力にししながら方向修正をするため、液状化層のような軟弱な地盤で方向を修正するには、小さな力で湾曲する管を用いる必要がある。人力程度で湾曲できるかどうかを判断基準とした場合、ストレート管で曲率半径 $R=50\text{ m}$ 程度、中間部肉薄管で曲率半径 $R=30\text{ m}$ 程度までがそれぞれ対応可能であることになる。

(2) 注入材料の長距離圧送性能

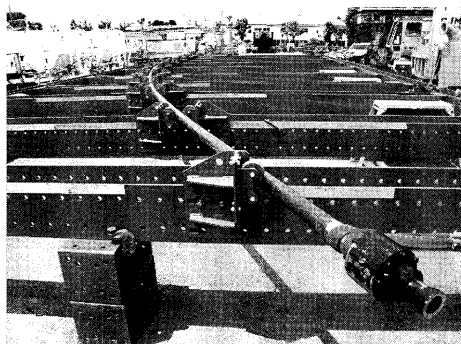


写真-2 固定金具

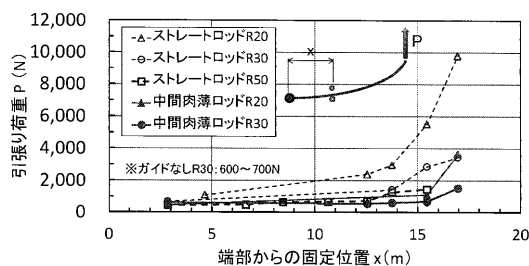


図-6 湾曲するのに必要な荷重

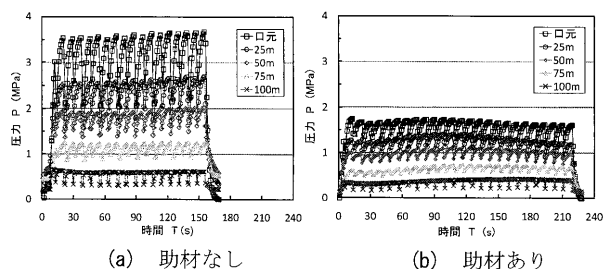


図-7 圧送距離と圧力の関係

助材の添加の有無における注入材料の圧送損失を確認した。図-7は、25 m 間隔で計測した圧力の経時変化を示したものである。両者を比較すると、助材を用いた圧入材料は、従来の圧入材料の $1/2 \sim 1/3$ 程度の圧力損失であることがわかった。

4. 第2回試験施工 (地中試験)⁶⁾

4.1 試験概要

第1回の試験施工から得られた知見をもとに、本工法専用の施工機械を開発した。写真-3に施工機械の外観及び主要装備を、表-1に施工機械の主な仕様をそれぞれ示す。この施工機械を用いて、施工システム及び施工手順を確認することを目的とし、第2回目の試験施工を実施した。この試験施工は、削孔長、注入深度及び曲率半径を変化させた条件のもと、前述の2種類のロッドを使い分けて行った。また、この試験施工では、実際に地中に注入材を圧入することにより長距離圧送用の材料の適用性も確認した。

図-8に試験施工フローを示す。はじめに、注入管の先端にインナーピースを取付けた状態の先端ヘッドを装

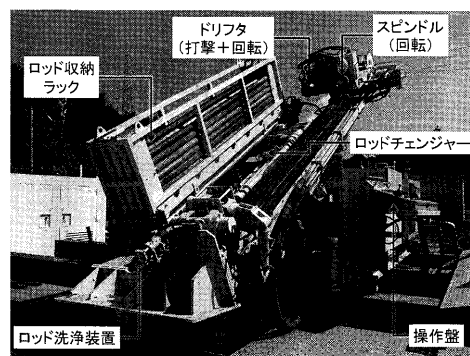


写真-3 削孔・圧入兼用機の外観及び主要装備

表-1 削孔・圧入兼用機の主な仕様

削孔方式	ロータリーパーカッション／ ロータリー切換式
適用可能な管径	$\phi 73 \sim \phi 115\text{ mm}$
注入管収納数	4列 $\times$ 10段=40本(120m)
給進力／引抜き力	200kN／200kN
リーダー起倒角	0(水平) $\sim 45^\circ$
ベース	スキッド式横スライド装置
機体寸法(水平時)	L6400 $\times$ W2200 $\times$ H2100
機体質量	約7.8t(注入管、ラック別)

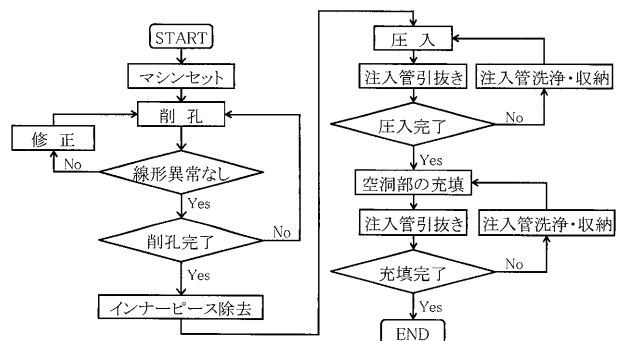
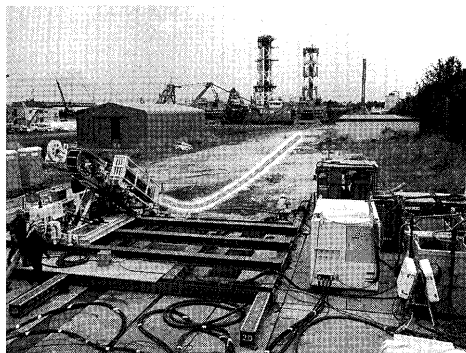


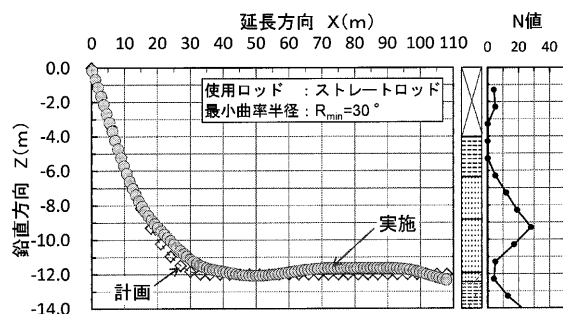
図-8 第2回試験施工フロー



写真一4 第2回試験施工状況（地中試験）



写真一5 改良効果の確認



図一9 削孔線形の一例

着し、注入管を継ぎ足しながら削孔する⁷⁾。削孔は、計測機器により削孔線形を確認しながら行う。このとき、計画と同じ線形になるように、随時修正を行いながら削孔する。修正作業は、従来の曲線ボーリングと同様で、回転と押込みを使い分けながら行う。

削孔が完了した後は水圧によりインナーピースを除去し、注入材料を圧入する。圧入は通常のCPG工法と同様、ステップ毎に所定の改良径となるように行う。所定量の圧入が完了した後は注入管を引抜き、このときに発生する空洞部に注入材料を充填して完了となる。

写真一4及び口絵写真一2に実験状況を示す。圧入対象層は、GL-3 m付近とGL-12 m付近の N 値が $N=2 \sim 10$ 程度の砂質地盤である。これらの層を目標とし、曲率半径 $R=30$ m及び $R=50$ mの線形で約120 mの削孔を行った。

4.2 試験結果及び考察

図一9に削孔線形の一例を示す。削孔線形は、管内にジャイロセンサーを挿入して確認した。この結果、ほぼ計画どおりの線形に制御できることが確認できた。削孔後には、地中にてインナーピースを除去し、最大で30 mの延長を連続して圧入した。

実験完了後には、GL-3 m付近に圧入した固結体を掘出し、改良効果を確認した。写真一5及び口絵写真一3に固結体の掘出し状況を示す。この結果、従来のCPG

工法と同様に、脈状に逸走することもなく、計測した位置に団子状の固結体となっていることを確認した。

5. おわりに

密度増大工法の一つであるCPG工法に曲線ボーリングを適用するには、工法、注入材料、削孔・注入資機材及び施工機械の課題を解決する必要があった。これらの課題を解決するため、課題ごとに室内試験や部材試験を実施し、性能を確認した。これらの個別に行った試験結果をもとに、地上での試験施工と地中での試験施工を段階的に実施し、本工法の開発を進めた。この結果、効率よく本工法を開発することができた。また、同時に試験施工の有用性も改めて確認することができた。

現在は、施工能率の向上及び施工精度を向上させるため、施工機械等の改善及び改良を行っている。今後は、これらのシステムにより実施工に臨みたいと思う。

参 考 文 献

- 1) 地盤工学会：液状化対策工法，pp. 274～280，2004.
- 2) 勸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ーコンパクショングラウチング工法一，2007.
- 3) 石井裕泰・檜垣貫司・川井俊介・三和信二・小泉亮之祐・小山忠雄：自在ボーリングによる地盤改良に適した浸透注入方式の開発と実証試験，土木学会論文集F，Vol. 64，No. 3，pp. 272～282，2008.
- 4) 唐 佳穎・山崎淳一・新坂孝志・原田良信・飯川聡美：静的圧入締固め工法における注入材料の圧送性能評価に関する検討，第46回地盤工学研究発表会，pp. 881～882，2011.
- 5) 新坂孝志・渡邊将美・岡見 強：曲線ボーリングを併用した静的圧入締固め工法の開発，土木学会第66回年次学術講演会，第Ⅲ部門，pp. 85～86，2011.
- 6) 新坂孝志・渡邊将美・岡見 強：曲線ボーリングを併用した静的圧入締固め工法の開発，土木学会第67回年次学術講演会，第Ⅲ部門，2012（投稿中）.
- 7) 新坂孝志・渡邊将美・岡見 強：曲線ボーリングを併用した静的圧入締固め工法，建設機械，No. 11，pp. 27～31，2011.

（原稿受理 2012.4.17）