

多点同時注入工法

— 恒久グラウトを用いた変位抑制型の薬液浸透注入工法 —

若築建設株式会社 技術設計部 水野 健太

多点同時注入工法は、長期的な耐久性や止水性が求められる液状化対策や吸い出し防止対策として適用可能な薬液注入工法である。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震後の追跡調査においても、本工法により事前に液状化対策を実施していた施設では液状化被害が発生しておらず、本工法が耐震強化対策として有効であったことが実証されている。本稿では、本工法の開発経緯、特徴、施工手順および湾岸エリアにおける施工事例について紹介する。

1. はじめに

液状化対策や耐震補強対策として実施される薬液注入工法においては、改良地盤の品質確保、注入材の逸走や割裂注入に伴い生じる地盤や近接・既設構造物の変位を防止するために、ポンプ吐出量をできる限り少なくして注入圧力の上昇を抑え、注入材を土粒子間に確実に浸透させることが重要と考える。しかしながら、土留め工事や推進工事における止水や補助工法としての地盤補強など、仮設を主な目的としていた二重管ストレーナ工法やダブルパッカ工法などの従来の薬液注入工法では、浸透源が小さいため割裂注入を生じやすく、長期的な品質を確保する上では課題が多かった。また、吐出量を少なくすると施工期間が極端に長くなり、施工費が高くなるといった欠点もあった。

多点同時注入工法(または、超多点注入工法、結束細管多点工法¹⁾と呼ばれる)は、上記の課題や欠点を解決することを目的として開発された薬液注入工法の一つである。本工法では、理想的な浸透注入形態を実現するために、吐出量を他工法よりも少なくしつつ、同時に注入する箇所を多数にすることによって、地盤や構造物に対する変位を抑えて、経済的に浸透注入を行うことができる。

2. 技術の特徴

多点同時注入工法のシステム概要図を図-1に示す。本工法は最先端要素技術を集積した薬液注入工法である。その特徴を以下に列挙する。

- ① 1.0ℓ/分～6.0ℓ/分の低吐出を実現する小型低騒音型ダイヤフラム式注入ポンプを採用している。
- ② 1ユニットで32個の注入ポンプを搭載する。

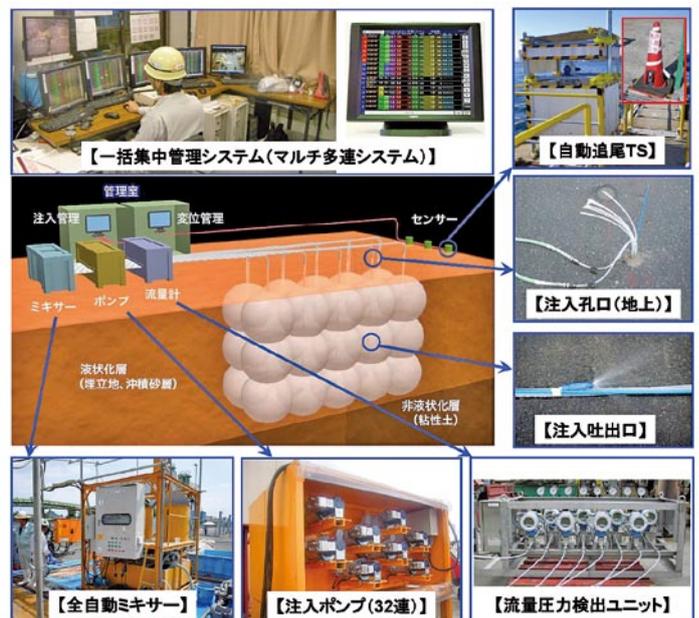


図-1 多点同時注入工法のシステム概要

- ③ 多数の注入ポンプを同時に管理できるように、各注入ポンプの注入圧力・吐出量を監視し、これらのデータをリアルタイムに表示・記録・制御する一括集中管理システム(マルチ多連システム)を採用している。
- ④ 注入管は内径6mmの細いフレキシブル管を採用し、これを注入箇所数束ねて(結束注入細管)地盤に建込む。注入管の長さは任意に調整可能であり、適切な位置に注入吐出口を配置できる。
- ⑤ 注入管の残置が困難な施工条件においては、土中で生分解する性質を持つ特殊注入管(バイオチューブ)を選択することもできる。
- ⑥ 自動追尾式トータルステーションなどの変位測定装置と連動して、注入ポンプの吐出量をリアルタイムで制御することができる変位観測制御システム

(DCIシステム、NETIS：KT-100019-A)を導入することができる。

⑦液状化対策や吸い出し防止対策等では、耐久性に関する理論と現場実証がなされた活性シリカ系の専用注入材(恒久グラウト)を使用する。

本工法は1998年に開発されて以来、液状化対策をはじめとして、地盤強化、長期的な止水・吸い出し防止、土圧軽減等を目的として、港湾、海岸、河川、建築、鉄道、農水等の多分野で採用され、現在までに139件の施工実績(2015年7月末)を有している。2014年11月には、(一財)沿岸技術研究センターより、港湾関連民間技術の確認審査・評価事業による評価(第14002号)を受けている(申請者：若築建設、りんかい日産建設、強化土エンジニアリング)。以下では、港湾関連民間技術の確認審査・評価事業において審査・評価を受けた開発項目²⁾を中心に、本工法の特徴を述べる。

2-1 一括集中管理システムによる施工管理

一括集中管理システムは、1台の施工管理モニターで16ヵ所の注入時各種データを表示・記録し、注入ポンプの吐出量を遠隔制御する。これにより、1ユニット(32ポンプ)を2台のモニターで同時に管理できるため、注入の施工効率が格段に向上し、ヒューマンエラーによる施工トラブルを回避するとともに、注入圧力を管理値以下に確実に抑えて施工することができる。図-2は、後述する施工事例における注入圧力の実績値である。全ての注入(注入箇所総数N=3349)において、管理圧力以下で注入が行われており、最終圧力は初期圧力とほぼ等しいことから、浸透注入が達成されていると判断できる。

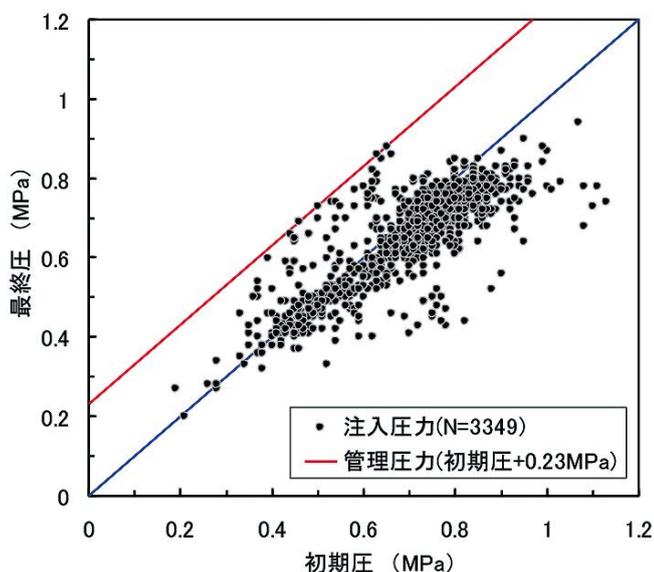


図-2 一括集中管理システムによる注入圧力

2-2 変位観測制御システムによる変位抑制

変位観測制御システム(DCIシステム)は、注入に伴う地盤や構造物の変位を自動追尾式トータルステーション等で常時監視し、この観測データと前述の一括集中管理システムとを連動させることにより、変位の発生量に応じて吐出量を自動で調整することを可能としている。本システムを導入することによって、変位の発生が厳しく制限される重要構造物直下の改良などにおいて、変位を管理値以下に確実に抑えて施工することができる。

図-3は、擬似的な変位を与えることにより、変位観測制御システムが正常に動作するかを確認した実験結果の一例である。変位の増減によって吐出量が設定通りに自動調整されていることがわかる。

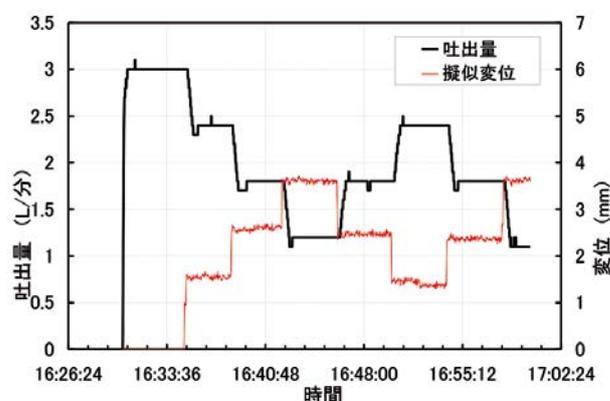


図-3 擬似変位量に応じた吐出量制御の様子

2-3 専用ミキサーによる注入材の高品質作液

本工法では、従来の汎用ミキサーの2倍以上の作液能力(7.2 m³/h)を有する全自動ミキサーを使用する。本ミキサーは、3液2槽混合型の恒久グラウト専用ミキサーで、流量計の計量誤差が1%以下であるため、施工現場において高品質の作液を行うことができる。図-4は、ある施工日の作液濃度のばらつき(176バッチ)を調べたものであるが、計画シリカ濃度(5.95%≒6%)に対して、実施シリカ濃度の誤差が±0.1%以下に抑えられていることがわかる。

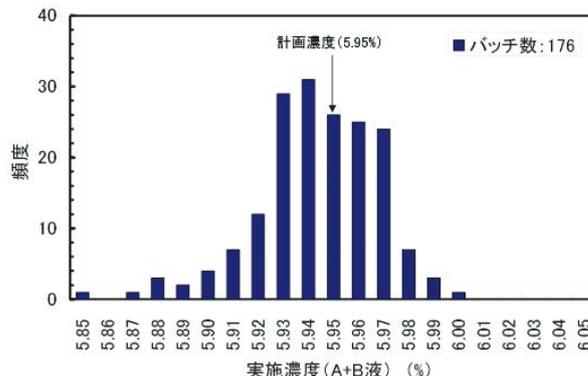


図-4 作液濃度の頻度分布

2-4 生分解性注入管による残置物削減

ダブルパッカ工法などの従来工法と同様、本工法でも地盤中に建込んだ注入管は残置するのが一般的である。一方、改良後に異物を残置したくない施工条件への対応として、微生物の代謝により生分解される特殊注入管(バイオチューブ)を使用することもできる。分解が進んだ注入管は容易に破断されるため、掘削時の障害にならない。図-5は、埋設1年後のバイオチューブの外観、破断強度、破断伸び率を調べたものである。外観は乳白色から褐色に変色し、破断強度は製造直後の35.7%に低下、破断伸び率は製造直後の1.3%に大きく低下していることがわかる。

項目	製造直後	1年埋設後回収
側面		
切断面		
破断強度 (N)	540.0	192.6 (製造直後の35.7%に低下)
破断伸び率 (%)	443	5.6 (製造直後の1.3%に低下)

図-5 バイオチューブの埋設1年後の物性変化

2-5 恒久グラウトによる改良地盤の長期耐久性

液状化対策や吸い出し防止対策等で改良地盤に長期的な耐久性を必要とする場合、本工法では恒久グラウトである活性シリカ系溶液型注入材(パーマロック ASF シリーズ)を使用する。本注入材で改良された注入固結砂は、液状化強度が未改良砂よりも増加し、かつ粘性土に類似した粘り強い動的応答特性を示すことを確認している³⁾。

本工法の開発当初に実施した大規模屋外注入実験の追跡調査では、図-6に示すようにサンプリングコアの一軸圧縮強さが10年間にわたり微増しており、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震後(改良後12年)も改良地盤の強度が劣化していないことを確認している。

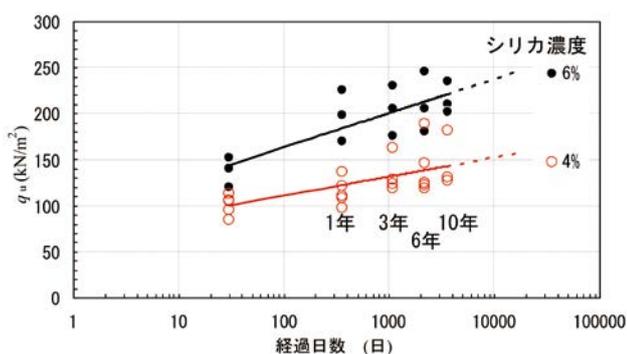


図-6 現場注入実験採取コアの一軸圧縮強さ

3. 施工手順

本工法の施工手順は、ダブルパッカ工法と基本的に同じであり、注入管の建込みにはシールグラウト方式¹⁾を採用している。一般的な施工手順を図-7に示す。

①削孔

削孔機(ロータリーパーカッションドリル)を用いて、注入管(結束注入細管)の太さに適したケーシング径によって所定の深度まで削孔する。

②シール材充填

シール材として、速硬タイプの低アルカリ性懸濁グラウトをケーシング内に充填する。

③注入管建込み

あらかじめ工場あるいは現場ヤードで製作しておいた結束注入細管をケーシング内に挿入する。

④ケーシング引抜き

ケーシングを引抜き、シール材を硬化(養生)させ、結束注入細管の位置を固定する。①から④までが一連の削孔作業であり、削孔機を移動させて順次、削孔作業を繰り返す。

⑤クラッキング

手押しポンプ等で送水し、シール材に水みちを作り注入作業に備える。

⑥薬液注入

地上に突出した注入管(図-1)と注入ポンプから延伸した注入ホースを連結し、注入を開始する。

注入外管と注入内管を用いるダブルパッカ工法あるいはそれに準じた工法では、吐出口前後にパッカーを備えた注入内管を注入外管に挿入して注入作業を行うため、同一孔で複数箇所の同時注入を行えない。これに対して本工法は、結束注入細管の採用によって、全ての注入吐出口があらかじめ地盤中にセットされているため、図-7に示すように同一孔で同時注入を可能としている点が大きな特徴となっている。このため、深さ方向の注入順序としては、上昇式、下降式、下降・上昇折衷式⁴⁾などいずれの方式も対応可能であり、現場の地盤条件や改良目的に応じて適切な方式を採用すれば良い。

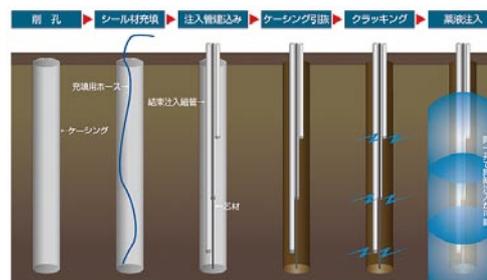


図-7 一般的な施工手順(鉛直施工の場合)

4. 施工事例

湾岸エリアにおける本工法の施工事例を紹介する。八代港(熊本県)において、既設岸壁の増深化に伴う背面埋立地の土圧軽減・液状化対策として、本工法を採用した⁵⁾。主な施工数量は、改良土量 11,251m³、注入量 4,557kℓ (注入率 40.5%)、削孔本数 444本である。クローラ型削孔機 4台、全自動ミキサー 3台、注入ポンプ 2ユニット(64台)を導入し、ピーク時で 58カ所の同時注入施工を実施した。

施工断面図を図-8に、施工状況を写真-1～写真-3に示す。本工法の採用により、工程短縮が図られるとともに、既設岸壁や近接構造物への影響を最小限に抑えて施工を完了することができた。

施工後の改良地盤の品質は、サンプリング試料(ボーリング 6カ所)の三軸圧縮試験(UU条件)で評価した。設計基準強度 $S_{ud}=50 \text{ kN/m}^2$ に対して、現場改良強度の平均値は $S_{uf}=124 \text{ kN/m}^2$ であり、設計基準強度を十分に満足していることを確認した。

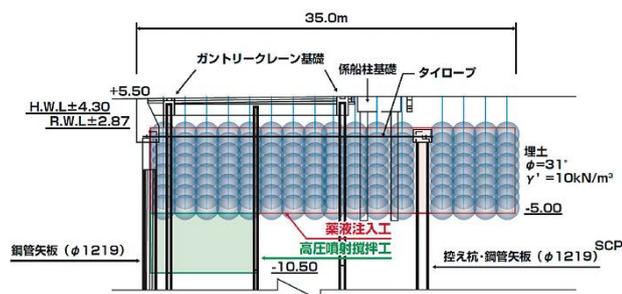


図-8 施工断面図

5. おわりに

多点同時注入工法は、締固め工法や機械攪拌式深層混合処理工法と比較すると経済性は劣るが、施工時の構造物変位や地盤変位が小さく、既設構造物直下の改良にも対応でき、稼働中事業所などの狭隘な施工条件でも施工できる数少ない地盤改良工法である。今後も本工法のさらなる効率化、品質向上、コスト縮減を図ることにより、近い将来の大規模地震に備えた地盤強化対策として、本工法の普及を推進していく所存である。

文末ながら、本工法の開発および施工に携わってこられた関係各位、港湾関連民間技術の確認審査・評価委員会にて審議をしていただいた関係各位、本稿で紹介した施工事例において多大なるご指導と事例の公表にご理解を頂きました発注機関の関係各位に、本誌をお借りして感謝申し上げます。



写真-1 施工状況(削孔)



写真-2 施工状況(注入プラント)



写真-3 施工状況(注入)

参考文献

- 1) (一社)日本グラウト協会：薬液注入工 設計資料(平成 27 年度版)。
- 2) (一財)沿岸技術研究センター：港湾関連民間技術の確認審査・評価 報告書、第14002号、平成 26 年 11 月。
- 3) 水野健太：薬液注入固化砂の繰返しせん断特性の一考察、第 50 回地盤工学研究発表会(札幌)、pp.607-608、2015。
- 4) (公財)鉄道総合技術研究所：注入の設計施工マニュアル、pp.62-63、平成 23 年 10 月。
- 5) 水野健太・後藤敬一・岡田和成・松本大輔・佐々木隆光・岡村勲：薬液注入工法による貝殻混じり砂礫地盤の液状化対策、第 10 回地盤改良シンポジウム論文集、日本材料学会、pp.55-62、2010。