

既設構造物の耐震補強，液状化対策を 目的とした地盤改良技術



※田中 俊行¹・藤崎 勝利²

¹鹿島建設株式会社 技術研究所 土質・地盤グループ（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）

²鹿島建設株式会社 技術研究所 土質・地盤グループ（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）

筆者らは，これまで高圧噴射攪拌工法による既設地中構造物の耐震補強工事や薬液注入工法による港湾施設の液状化対策工事を実施しており，これらに並行して技術開発を継続している。本報告では，既設構造物の耐震補強，液状化対策を目的とした地盤改良工法の概要について述べる。また，既設構造物の耐震補強・液状化対策工事として，高圧噴射攪拌工法ならびに薬液注入工法を用いた工事例について報告する。さらに，新しい地盤改良技術として，従来よりも高性能な高圧噴射攪拌工法であるジェットクリート工法，ならびに従来の薬液よりも高強度・高耐久性が実現できる極超微粒子セメント注入工法について紹介する。

テーマ 地盤改良，耐震補強，液状化対策，高圧噴射攪拌工法，注入工法

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震による土木構造物の被害は甚大であり，我が国の国民生活や経済活動に与えた影響は計り知れない。今回の地震を契機として，東北地方等で被災した構造物の復旧はもちろんのこと，大きな地震被害が無かった地域においても既設構造物の耐震性評価技術および耐震補強技術が注目を浴びている。筆者らは，これまでに高圧噴射攪拌工法による既設地中構造物の耐震補強工事や薬液注入工法による港湾施設の液状化対策工事を実施し，これらに並行して技術開発を継続している。

本報告では，既設構造物の耐震補強，液状化対策を目的とした地盤改良工法の概要について述べる。また，既設構造物の耐震補強・液状化対策として，高圧噴射攪拌

工法ならびに薬液注入工法による工事例について報告する。さらに，新しい地盤改良技術として，従来よりも高性能な高圧噴射攪拌工法であるジェットクリート工法，および従来の薬液よりも高強度・高耐久性が実現できる極超微粒子セメント注入工法について紹介する。

2. 地盤改良工法の概要

これまでの耐震補強工事や液状化対策工事の地盤改良工法の実績から，置換工法，深層混合処理工法，高圧噴射攪拌工法，薬液注入工法を抽出し，表-1に各工法の比較および既設構造物に対する耐震補強，液状化対策の適用性について検討した。この表から，既設構造物周辺へ

表-1 既設構造物を対象にした地盤改良工法比較表

工法名	置換工法	深層混合処理工法 (スラリー系機械慢件工法)	高圧噴射攪拌工法	薬液注入工法
適用地盤	地盤に依存しない	粘性土、砂質土	砂質土、粘性土	砂質土
施工	・深度が大きくなると大規模な掘削が必要である。 ・周辺の埋設物を移送・防護が必要である。 ・掘削に伴って残土が発生する。	・大型機械のため、広い敷地での施工に適する。 ・施工に伴って既設構造物に及ぼす影響が大きい。 ・施工に伴ってスライムが発生する。	・小型機械であり、狭いヤードの施工に適する。 ・既設構造物周辺の施工が可能である。 ・施工に伴って、スライムが発生する。	・小型機械であり、狭いヤードの施工に適する。 ・既設構造物周辺の施工が可能である。 ・曲りボーリングと併用して、構造物直下の地盤改良が可能である。 ・スライムが発生しない。
品質	・コンクリートと同等である。	・強度発現性に優れる。 ・改良範囲の制御が可能である。	・強度発現性に優れる ・改良範囲の制御が可能である	・強度発現性に劣る。 ・改良範囲の制御が困難である。
既設構造物 に対する 適用性評価	耐震補強	△	○	×
	液状化 対策	△	○	○

及ぼす影響が小さく施工が可能である高圧噴射攪拌工法（耐震補強、液状化対策）、薬液注入工法（液状化対策）の二つの工法の概要について説明する。

(1) 高圧噴射攪拌工法の概要

高圧噴射攪拌工法は、日本で発明、実用化された工法であり、水噴流によって直接あるいは間接的にセメント系固化材を地盤に攪拌混合して、強度や剛性が高い改良地盤を造成する地盤改良工法である。高圧噴射攪拌工法は、地中におけるセメント系固化材の噴射、注入方法によって、単管式、二重管式、三重管式があり、様々な工法が実用化されている¹⁾。この工法の特長は、任意の深度で改良地盤の造成が可能であり、他の深層混合処理工（例えば、CDM等）に比べて施工機械で小型であることが挙げられる。従来、立坑底版改良や山留欠損部改良等、仮設としての適用実績が多いが、近年では既設地中構造物の耐震補強に適用される事例²⁾³⁾が増加している。

様々な高圧噴射攪拌工法のうちスーパージェット工法（以下、SJ工法）、スーパージェットミディ工法（以下、SJM工法）、クロスジェット工法（以下、XJ工法）の概要を表-2に示す。これらの技術資料によると、設計基準強度（材齢28日）は砂質土で3N/mm²程度、粘性土で1N/mm²とされており、地盤改良工法としては比較的高

い強度となっている。また、最近の施工実績では、改良地盤のS波速度⁴⁾は700m/s以上（ただし、改良対象地盤が粘性土地盤の場合を除く）となることを確認できている。

(2) 薬液注入工法の概要

薬液注入工法は、注入材を地盤中の間隙に浸透させて間隙水と置換し、止水や強度の増加を図る地盤改良工法である。この工法は、高圧噴射攪拌工法等に比べて、スライム等の建設副産物の発生が無く、環境負荷を低減することができる。一方、注入改良体は地盤条件に左右されやすく、効果の確認が困難であるという課題を有する。

図-1に一般的な地盤注入材料の分類を示す。薬液注入材は、主に溶液型の水ガラス系薬液注入材のことであり、アルカリ系、中性・酸性系、特殊水ガラス系に区分される。従来、水ガラス系薬液注入材は、耐久性に劣るといわれており、仮設として使用されることが多かった。近年、長期耐久性を確実にするために、劣化（アルカリ溶脱）しない成分を加えた特殊水ガラス系等が開発され、液状化対策に用いられている。但し、これらは、浸透性に優れるが強度発現性に劣るため、耐震補強工事へ不適とされている。

一方、非薬液であるセメント系注入材は、強度発現性に優れるが、浸透性に劣り、現在市販されている超微粒子セメント注入材でも、シルト分以下が含まれる細砂地盤への適用は難しいとされている。したがって、細砂地盤に十分に浸透し、かつ強度発現性に優れた注入材料は、今まで存在しなかったため、耐震補強工事への適用は困難であった。

表-1 SJ工法, SJM工法, XJ工法の概要

工法名称	スーパージェット工法 (SJ工法)	スーパージェットミディ工法 (SJM工法)	クロスジェット工法 (XJ工法)
標準改良径	最大5.0m	最大3.5m	2.0m
概要	高圧の固化材ミルクを圧縮空気とともに地盤中で噴射して、地盤を切削するとともに、地盤と固化材ミルクの混合攪拌を行う。	2系統から噴射する高圧水と圧縮空気の変差噴流で地盤を切削し、その後固化材ミルクを注入する。	
噴射形式	二重管形式	三重管形式	
工法分類	エアージェット噴射系	水・エアージェット噴射系	
切削方式	固化材ミルク切削(2系統)	清水変差噴流切削(2系統)	
噴射圧力	30MPa	40MPa	
圧縮空気	0.7~1.05MPa	0.6~1.05MPa	
置換方式	切削時の固化材ミルクで置換	固化材ミルクを注入(1系統)、置換	
模式図			

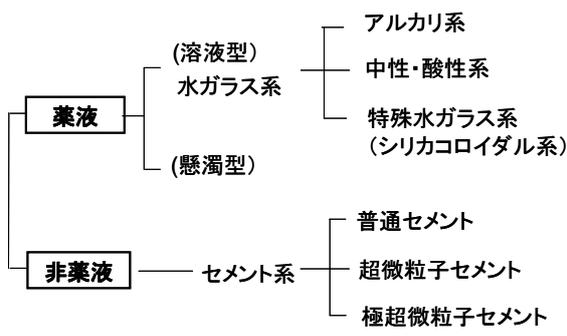


図-1 一般的な地盤注入材料の分類

3. 既設構造物の耐震補強・液状化対策

(1) 既設地中構造物における耐震補強

既設地中構造物の耐震補強方法概念図を図-2に示す。高圧噴射攪拌工法による既設地中構造物の耐震補強は、周辺地盤（埋戻し地盤の場合が多い）を高剛性化するこ

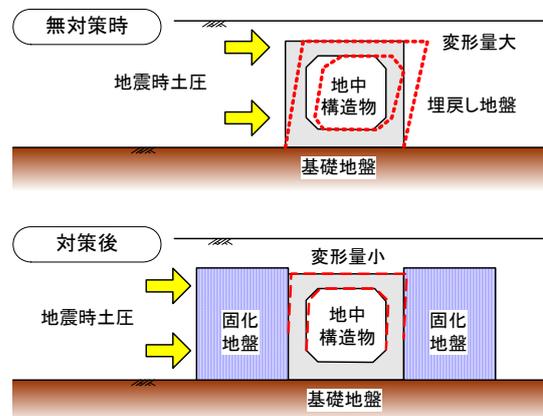


図-2 既設地中構造物の耐震補強方法概念図

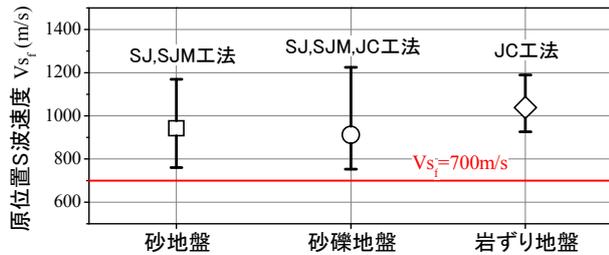


図-3 改良地盤のS波速度測定結果例

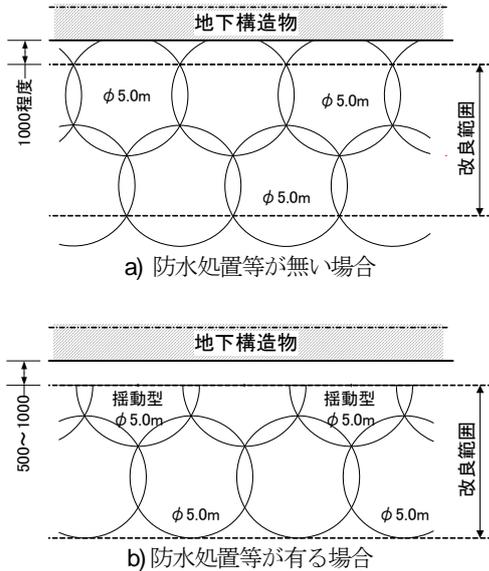


図-4 既設地中構造物の改良体平面配置例

とで、地中構造物に作用する地震時土圧を低減し、地中構造物の変形抑制ならびに断面力低減を図ることを基本原理としている。周辺地盤の高剛性化方法として、高圧噴射攪拌工法で固化する方法や周辺地盤を掘削しコンクリート等で置換する方法²⁾が用いられる。しかし、既設地中構造物周辺には移設が困難な埋設物が多いため、周辺地盤を掘削せずに、比較的小型の機械で施工できる地盤改良工法として高圧噴射攪拌工法が採用される事例²⁾が増加している。最近では、護岸等の港湾構造物や杭基礎構造物の耐震補強でも実績を挙げている。

また、耐震補強を目的とした高圧噴射攪拌工法では、耐震補強設計段階で動的解析を実施して補強効果を検証するため、改良地盤のS波速度 V_s ⁹⁾(または初期せん断弾性係数 G_0)が要求される場合が多い。改良地盤のS波速度測定結果を図-3に示す。図-3によるとS波速度 V_s は砂地盤で800~1200m/s程度、砂礫地盤で700~1200m/s程度、岩ずり地盤で900~1200m/s程度となっており、改良地盤は岩相当の剛性を有することがわかる。なお、改良地盤の剛性をより高くするために、施工ステップを変更した事例⁹⁾もある。

既設地中構造物周囲への地盤改良体の配置は、図-4に示すように改良範囲内に未改良部が生じないように配置する(ラップ配置と称する)ことが多い。図-4a)に示すように、地中構造物外周に防水処置等が無い場合は改良

体が地中構造物に接するように配置するが、地中構造物の目地等への影響を考慮して地盤改良体が完全に密着しないように配置する。一方、図-4b)に示すように、地中構造物外周に防水処置等が有る場合は、ジェット噴射によってこれを傷付けることがないように、地中構造物極近傍には扇型~半円形の改良体が造成できる「揺動型改良機」を用いて地盤改良体を造成する場合がある。このとき地中構造物と改良体の離隔は500~1000mmを確保することが多い。これは、既設地中構造物の位置が若干異なっている場合やガイドホール削孔の精度を考慮するためであり、地中構造物と改良体間にこの程度の離隔があっても、耐震補強効果が低下しないことが解析的に確認されている⁶⁾。

(2) 既設港湾施設における液状化対策

稼動中のコンテナターミナルの地盤が、地震時に液状化した場合、隣接するターミナルへその影響を伝播させないことを目的とする岸壁部の地盤改良工事が実施された。改良対象箇所は、図-5に示すとおり栈橋下の海底地盤部、護岸ケーソン直下部及び背面部、一般部からなる。これらの目標性能は、以下のとおりである。

- ・地震の発生後、多少の損傷が生じても復旧できること。
- ・地中構造物に対して復旧可能な損傷に抑えること。
- ・周辺が液状化しても過剰間隙水圧の伝播を抑え、側方流動などの被害を最低限に抑えること。

当初設計では、全ての改良対象箇所に、溶液型薬液注入工法による地盤改良を施工する計画であった。

a)薬液注入工法による液状化対策

事前ボーリング調査から、図-5に示す栈橋部、ケーソン部は、玉石・礫混じり砂からなる高透水性地盤($1 \times 10^0 \sim 1 \times 10^1 \text{cm/sec}$)であることが判明した。以上から、水中で漏出・懸濁せず、しかも溶液型薬液と同程度の強度及び恒久的性能を確保した可塑性グラウト⁷⁾で改良対象地盤の改良範囲の両棲部、表層部を先行し固化させた。可塑性グラウトとは、液体と固体の中間領域に位置し、加圧すれば容易に流動する特性を有し、水中不分離性を有するものである⁷⁾。

改良地盤内の流速は、可塑性グラウトで改良対象地盤を囲い覆った結果、注入前に観測された最大流速が6.9cm/secから0.01cm/minに低減され、薬液の逸散を効果的に遮断でき改良が良好であったことが確認された⁸⁾。

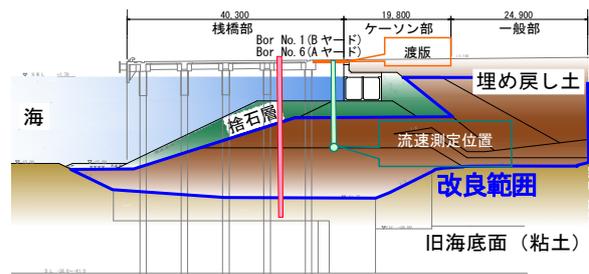


図-5 対象工事の断面図

表-3 高圧噴射攪拌工法による改良体の配置検討

配置	全面	接円 (正方形)	杭状 (千鳥)	
概要図				
改良率	100%	78.5%	35~58%	
性能評価	水圧上昇抑制	○	△	×
	水圧伝播抑制	○	△	×
	沈下抑制	○	○	△
経済性	×	△	○	
総合評価	△	○	×	

b)高圧噴射攪拌工法による液状化対策

陸上にある一般部の地盤において、溶液型薬液注入工法では、所定の強度の確保が困難である可能性があると判断された。検討の結果、地下埋設物周辺の施工が可能で、小型機械であるため狭いヤードでの施工が可能である高圧噴射攪拌工法が採用された。

改良体の配置は、改良率によって、①~③に区分される。検討結果は以下のとおりである。

- ① 全面改良 (改良率100%) : 改良効果は優れているが、経済性に劣る。
- ② 接円 (正方形) 配置 (改良率78%) : 全面改良に比べて水圧の上昇や局所的な沈下発生が予想されるが、経済性に優れる。
- ③ 杭状 (千鳥) 配置 (例えば、改良率51.9%) : 経済性が最も優れるが、改良率によっては、接円配置に比べて、水圧の伝播速度や発生する間隙水圧が大きくなる⁹⁾。

そこで、表-3に示すように水圧抑制や沈下抑制効果を有する、接円配置を選定した。

施工は高圧噴射攪拌工法のうち、ジオパスタ

(GEOPASTA)工法を選定した。この工法は、地盤の液状化防止を目的とし、固化材を地盤中に混合攪拌して地盤を固化するものであり、地盤固化に必要な最小量の固化材で、短い工期で改良体を造成できるものである。施工は、埋設物と干渉しないように改良径3.2mと4.5mの2タイプを併用した配置とした。コアサンプリングによって行った一軸圧縮強さによる改良効果は液状化対策として要求される100kN/m²以上を十分満足した。

(3) 供用中の道路トンネルにおける液状化対策

供用中の海底トンネルの躯体直下に液状化層である細砂層が延長約130m存在していることが調査により判明した。この液状化層に対する対策工として、図-6に示すように既設海底トンネル内を占有せずに近接した駐車場より曲線ボーリングを使用した薬液注入工法による地盤改良工法が採用された¹⁰⁾。

曲線ボーリングは、カーボックス (CurveX) 工法を採用した。この工法の特長は、既設構造物直下の改良範囲に対して離れた位置から特殊ロッドで削孔し、目的の地点まで計画線に沿わせて削孔できることである。削孔終了後、写真-2に示すように注入用注入外管を挿入残置して、ロッドを回収し次孔に移動する。

目標一軸圧縮強さ80kN/m²を満足するための注入材料には、長期耐久性に優れた特殊中性・酸性薬液注入材のエコリオンを採用した。この材料は、同種類の中性・酸性系注入材と比較して、酸の含有量が少なく環境負荷を低減できるとともに、海産生物に対して安全であることを確認している¹¹⁾。また、水ガラス中の劣化成分を減じる等の材料組成上の工夫がされている。図-7に示す水道水を用いた劣化促進試験を実施した結果、エコリオンは、特殊水ガラス系の恒久グラウト (パーマロック) に比べて、高い強度および同等以上の耐久性を有することを確

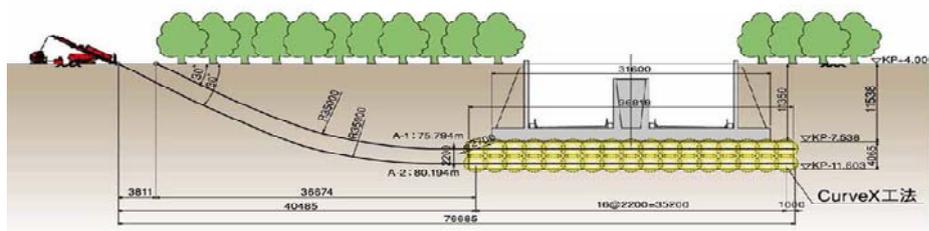


図-6 曲線ボーリングを使用した薬液注入工法による地盤改良工法のイメージ図



写真-2 カーボックス工法による削孔・注入管設置状況

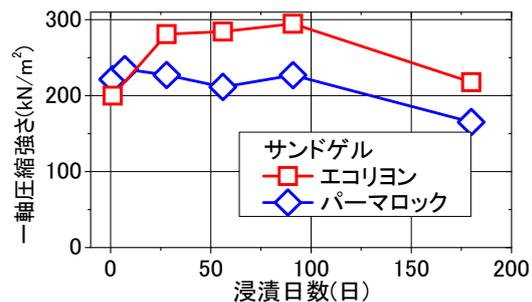


図-7 水ガラス系薬液注入材の劣化促進試験

認している¹²⁾。

施工完了後、事後調査を実施した結果、改良強度は目標値を満足する結果を得た。本トンネルは、東北地方太平洋沖地震で震度5強を観測したが、液状化による影響は無く、地震直後も通行に支障が生じなかった。

4. 新しい地盤改良技術

(1) ジェットクリート工法

既設構造物周囲の埋戻し地盤や護岸背面埋立地盤には、岩ずりが使用されている場合があり、このような岩ずり地盤を対象とした地盤改良事例はほとんどなかった。このため、岩ずり地盤でも改良可能な新しい高圧噴射攪拌工法として、ケミカルグラウト(株)と共同でジェットクリート工法を開発し、すでに3件の実績を挙げている。ジ

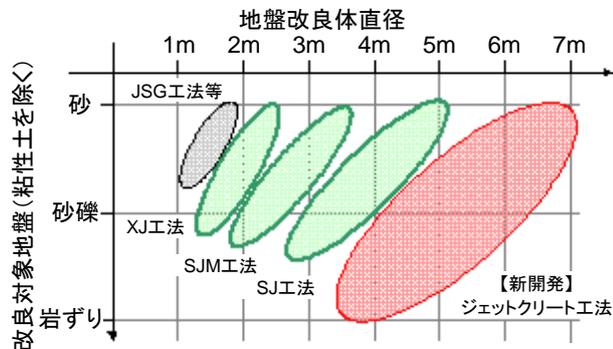


図-8 改良対象地盤と地盤改良体直径の関係

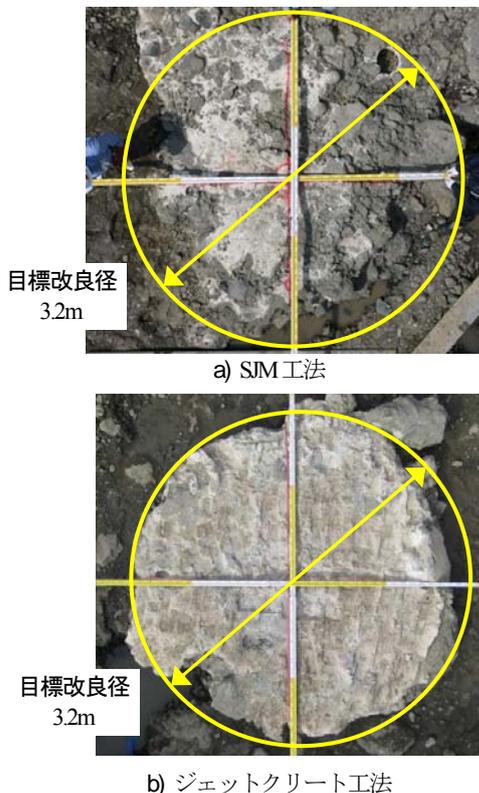


写真-3 岩ずり地盤における地盤改良体出来形

ェットクリート工法とSJ工法等の従来工法との比較を 図-8に示す。ジェットクリート工法は、ジェットを噴射するモニター管を新たに開発し、従来よりもエネルギー効率を高めることに成功した結果、ジェットによる地盤切削距離が従来よりも長くなったのが特長である。この工法によって、最大粒径500mm程度の岩ずり地盤においても目標改良径と同等の改良体が造成できた。現在では、岩ずり地盤において直径4.5mの改良体を造成した実績を挙げている。

現在、自在ボーリング技術を応用したジェットグラウト工法の開発等も進められており、今後も益々発展が期待される。

(2) 極超微粒子セメント注入工法

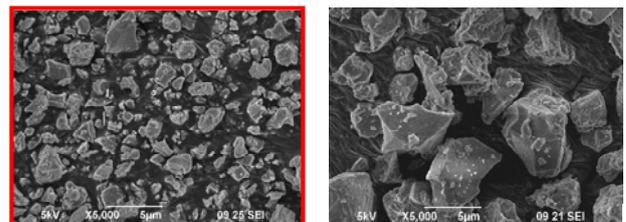
a)工法概要¹³⁾

耐震補強および液状化対策工事への適用を目的として、高浸透性・高強度発現性を有する新しいセメント系注入材である極超微粒子セメント注入材による地盤注入工法の開発を進めている。

極超微粒子セメントの平均粒径は、写真-4に示すように、従来の超微粒子注入材(4 μ m)に比べて、さらに約1/3倍の1.5 μ m程度である。また、普通ポルトランドセメントの20 μ mに比べて、約1/13である。この材料は、水和反応の遅い高炉スラグを使用して、ポリマー構造を有する特殊分散剤を使用することで、高度な分散性を保持して、高い浸透性を発揮できる。

細粒分含有率約21%の細砂(透水係数 $1\sim 2\times 10^3$ cm/sec, 相対密度87%)を用いた模擬地盤(長さ1000mm, 内径50mmの亚克力筒)を対象に室内浸透試験を行い、各種注入材料と比較検討した結果を図-9に示す。この図から、水セメント比W/C=800%の極超微粒子セメント注入材の浸透長は、溶液型薬液注入材と同様、所定の設計長どおり(浸透長/設計改良長=100%)に改良できた。しかし、同じ配合の超微粒子セメント注入材は約50%の改良であった。この地盤条件では、懸濁型薬液注入材は、浸透不可能であった。極超微粒子セメント注入材の σ_{28} は約3N/mm²であり、溶液型薬液注入材($\sigma_{28}\approx 0.3$ N/mm²)と比べて約10倍の高い強度を得た。

さらに、極超微粒子セメント注入材の施工性の検証を目的として、現場注入試験を実施した。沖積砂層(細粒



極超微粒子セメント
(平均粒径 1.5 μ m)

超微粒子セメント
(平均粒径 4.0 μ m)

写真-4 注入材の電子顕微鏡写真

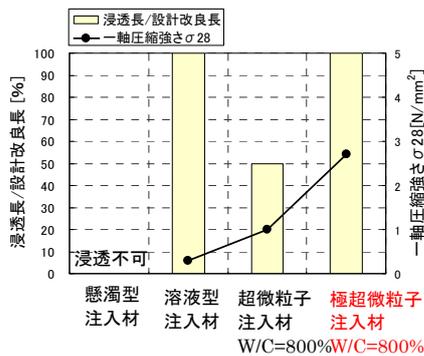


図-9 各注入材の浸透長，材令 28 日の一軸圧縮強さ

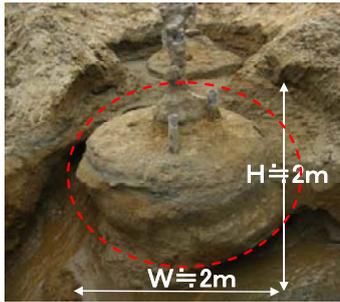


写真-5 沖積砂層を対象とした現場注入出来形

分含有率3%，相対密度100%以上、透水係数 4.7×10^{-3} cm/sec、N値27)を対象地盤として、目標直径2mの改良体を構築した。注入材の配合はW/C=400～800%とし、15～20l/minの速度で注入した結果、写真-5に示すとおり設計どおりの良好な出来形が得られた。

b)耐震補強工事や液状化対策工事への適用

極超微粒子セメント注入材による地盤注入工法では、従来の超微粒子セメント注入材で適用が困難であったシルト分以下が含まれる細砂地盤に対して、溶液型薬液注入材と同等の浸透性を有し、高圧噴射攪拌工法と同等の強度を有することができる。したがって、高圧噴射攪拌工法で地盤改良が困難である既設構造物直下の耐震補強工事に極超微粒子セメントと曲線ボーリング（カーベックス工法）を併用した工法を適用できる。

液状化対策工事においても、材料配合の調整によって、現状の薬液注入材と同等の経済性や浸透性を確保できると共に、溶液型薬液注入材の1.5倍、未改良砂の6倍の高い液状化強度を発揮することができる。この材料による対策工法は、東北地方太平洋沖地震のような大型地震に対しても、従来の薬液注入工法に比べて、より高い安全性や耐久性を確保できると考えられる¹⁴⁾。

5. おわりに

以上、既設構造物の耐震補強・液状化対策として、高圧噴射攪拌工法ならびに薬液注入工法を用いた工事例に

ついて紹介した。さらに、新しい地盤改良技術として、従来よりも高性能な高圧噴射攪拌工法であるジェットクリート工法、ならびに従来の薬液よりも高強度・高耐久性が実現できる極超微粒子セメント注入工法について紹介した。今後、増加すると考えられる既設構造物の耐震補強および液状化対策工事の要求性能や地盤・現場条件に相応した施工法を提供できるよう工事実績を蓄積すると共に、安全で安心できる国土造りの貢献に寄与できるように研究開発を継続する所存である。

参考文献

- 1) 吉田宏：高圧噴射攪拌工法の技術的課題と展望，基礎工，Vol.37, No.5, pp.8-13, 2009.
- 2) 大西義裕，近藤睦，服部和司：浜岡原子力発電所耐震裕度向上工事における土木工事，電力土木，No.331, pp.39-43, 2007.
- 3) 平原健二，坂本博臣，藤田悦郎：耐震裕度向上を目的とした川内・玄海原子力発電所地盤改良工事における課題と対応（その1），電力土木，No.350, pp.121-125, 2010.
- 4) (社)地盤工学会：地盤調査の方法と解説，第3編物理探査・検層，第2章速度検層，pp.82-88, 2004.
- 5) 河村精一，市橋豊隆，遠藤大輔，渋谷旬，藤崎勝利，浜村憲：地中構造物の耐震性向上を目的とした高圧噴射攪拌工法の試験施工，第41回地盤工学研究発表会，pp.911-912, 2007.
- 6) 河村精一，東川直樹，亀谷泰久，山崎宏晃，鍋谷雅司：地中構造物周囲の地盤改良による耐震補強効果，第40回地盤工学研究発表会，pp.2091-2092, 2005.
- 7) 三木五三郎，下田一雄：可塑状グラウト注入工法，日刊建設新聞社，2001.
- 8) 浜田武，水田博昭：高透水性海底地盤における薬液注入工法，平成23年近畿地方整備局研究発表会，施工・安全管理対策部門，2011.
- 9) 高橋正光，館下和行，桑川政則，菅野高弘，中澤博志：ジオパスタ工法(GEOPASTA工法)を用いた液状化対策の効果確認，第8回空港技術報告会，国土交通省航空局，2007.
- 10) 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，土木学会第65回年次学術講演会，VI-271, 2010.
- 11) 林文慶，中村華子，鈴木伸康，横尾充，赤木寛一，小河久朗：地盤改良薬液注入材(Ecoryon)の海産生物に対する環境評価試験，鹿島技術研究所年報第55号，pp.113-118, 2007.
- 12) 齋藤潤，李濟宇，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，土木学会65回年次学術講演会，III-489, 2010.
- 13) 小泉悠，田中俊行，竹内仁哉，金沢智彦，西垣誠：極超微粒子注入材による地盤改良工法の開発，第9回地盤改良シンポジウム，pp.237-242, 2010.
- 14) 齋藤潤，田中俊行，北本幸義，竹内仁哉，金沢智彦，西垣誠：超大型地震に対する極超微粒子注入材による液状化対策，土木学会第66回年次学術講演会，III-038, 2011.