誘導式水平ボーリング技術を用いた 薬液浸透注入工法の開発

大野康年1

1正会員 工修 東亜建設工業株式会社 土木本部技術開発部 (〒102-8451 東京都千代田区四番町5)

本論文は、従来の地盤改良工法では対応が困難な既設構造物下部地盤の液状化対策における新しい 技術として、誘導式の水平ボーリング技術と多点式薬液浸透注入工法を組み合わせた薬液浸透注入工 法の概要および特徴について述べるとともに、原位置において実施した注入実験結果について報告す るものである.現地注入実験の結果、本技術の液状化対策工としての有用性が実証された.

キーワード:液状化対策,地盤改良,薬液浸透注入,水平ボーリング,特殊シリカ液

1. はじめに

従来の地盤改良工法では対応が困難な既設構造物 下部地盤などへの液状化対策における新しい技術と して,地盤内の任意の場所へ低圧・低吐出にて同時 に注入可能な多点同時注入装置と浸透性・耐久性に 優れた活性シリカ系薬液を用いた薬液浸透注入工法 が開発されている^{1)~3)}.また,削孔技術として,地 上より削孔位置を確認しながら改良位置まで水平削 孔可能な誘導式の水平ボーリング技術が開発されて いる.著者は,これらの技術を用いて供用空港滑走 路下部地盤,ケーソン式岸壁直下置換砂等,既設構 造物直下地盤の液状化対策を目的に誘導式の水平ボ ーリング技術を用いた薬液注入工法の開発に取り組 んでいる.本論文は,本工法の概要および特長につ いて述べるとともに,原位置において実施した注入 実験結果について報告するものである.

2. 水平誘導式薬液浸透注入工法の概要

(1) 工法概要

図-1 に本工法の概念図を示す.本工法は,誘導 式の水平削孔機(写真-1)により地表面から直線・ 曲線削孔を繰返すことで所定の改良位置まで削孔し, 複数の逆止弁機能の付いた注入ノズル(写真-2)を 所定の位置に配置後,各ノズルから毎分0.5~4.0 リットルという低吐出・低圧で注入を同時に行うこ とによって改良体を形成する.多点同時注入装置を 写真-3 に示す.このような注入方法により,地盤 の割裂を伴わない浸透注入を行う.なお、地盤削孔 時の削孔ヘッド先端位置は,削孔ロッド(写真-4) に内蔵された発信機から発信された信号を地上の受 信機で検知することにより確認し誘導する.

注入材料4)は、水ガラスのアルカリをイオン交換

によって完全に除去して得られる純粋なシリカから なる活性シリカコロイドがベースで、薬液注入によ る改良体形成後の劣化原因であるアルカリを含まな いため改良体からのシリカの溶脱がほとんど無く、 耐久性に優れている.



図-1 工法概念



写真-1 水平誘導削孔機



写真-2 ノズルチップ



写真-3 多点同時注入装置



写真-4 削孔ロッド

(2) 施工手順

本工法の施工手順を次に示す.

a)水平誘導削孔

削孔ロッドに内蔵しておいた発信装置からの電磁 波を受信しながら計画線上に常時位置するよう方向 修正を加え、ベントナイト液(またはポリマー 液)・泥水を噴射しながら掘進・削孔する.ドリル ヘッドの誘導方法はヘッドの修正板で操作され、直 進は回転・給圧により、また方向修正は給圧による 修正板と地山の反力により方向制御される.



図-2(a) 水平誘導削孔

b) 注入菅引込み

バックリーマーを回転させることにより,シール 材を充填しながら注入管を引込み,注入ノズルを所 定の位置に設置する.



c) 薬液同時注入

地中に設置された各注入ノズルから低圧・低吐出 (1ノズルあたり毎分 0.5~4.0 リットル)注入を 同時に行うことによって改良体を形成する.



(3) 工法の特長

- 本工法の特長を1)~6)に示す.
- 1)狭い場所で施工が可能である.
- 2) 既設構造物への影響がほとんど無い.
- 3)低騒音・低振動である.
- 4)多点同時注入により従来の浸透注入工法より 施工効率がよい.
- 5) 耐久性のある改良体を造成できる.
- 6) 曲率半径が R=25m と急カーブ削孔が可能である.

3. 現地注入実験

(1) 実験サイトの概要

実験サイトは、千葉港臨海部埋立地で、地層は地 表面から GL-4.0m まで細砂を主体とした埋立土、そ の下部にシルト層を挟んで細砂層が分布する.図-3 に柱状図と標準貫入試験結果を示す.地下水位は GL-1.95m,注入対象となるシルト混じり細砂層は、 N値が5程度、土粒子密度は ρ s=2.7 g/cm³、均等係 数 U_c=13.5、曲率係数 U_c'=4.0、平均粒径 D₅₀=0.15mm、 細粒分含有率 F_c=25%である.



(2) 実験方法

図-4 に改良平面図および断面図を示す. 実験は, 水平距離 25m離れた地表面より GL-3.0m~GL-7.0m の範囲に φ1.8m の改良体 18 個を 3 回に分けて造成 した.写真-5 に実験状況を示す.本実験で使用し た注入材料は,特殊シリカ液(シリカ濃度6%)で ある.表-1 に注入仕様を示す.注入速度は,改良 層を対象として事前に注水試験を実施し,改良形態 が浸透注入形態となるような適正注入速度を決定し た.また,注入率は注入対象地盤の間隙率 n=39~ 46(%)に対し40(%)とした.

注入約1ヶ月後,改良砂の土質試験を実施すると ともに掘削により GL-3.0~GL-4.0m 間の出来形を確 認した.



写真-5 実験状況





図-4(c) B-B断面

(3) 実験結果

1)施工時の周辺への影響

a)地表面変位

施工による周辺地盤への影響を把握するため、地 表面に設置した 50 箇所の計測点に対し、3回/日 の頻度で水平XY方向および鉛直方向(-:隆起、 +:沈下)の変位量を測定した.図-5 に削孔開始 時から注入完了時までの地表面XY方向変位ベクト ル図を示し、図-6 に地表面沈下量を示す.施工時 の地表面への影響はほとんど見られず、変位量の最 大値は、水平X方向 5mm、水平Y方向 5mm、鉛直方 向 4mm であった.







b) 地下水位・p H

薬液注入による地下水位およびpHの変化を把握す るため、薬液注入時に地下水位およびpHを測定した. 図−7に測定位置を示し、図−8に地下水位・pHの注入 開始から完了までの経時変化を示す.





図-7(a) 平面図

地下水位は,薬液注入時に上昇,注入完了後に現 状水位に回復する.また,注入時の水位上昇量は最 大で35cm程度であった.

pHは、日常の変動量を含めて薬液注入時にpH=7 ~8の範囲で変動した.



図−8 地下水位・pH経時変化

2) 改良体出来形

写真-6~写真-8に改良体の発掘写真を示す.改良体の出来形寸法は,計画天端GL-3.0mに対して実測 天端はGL-2.7~GL-3.0m,計画改良直径1.8mに対し て実測改良直径は1.85~1.94mであり,計画寸法を 満足している.また,改良体には計画時の接円部の 未改良領域は見られず,各孔の円筒状の改良砂同士 が連結し,連続した一体固結体を呈している.また, 写真-7,8から薬液が地盤の間隙に浸透することで原 地盤(砂地盤)の堆積性状を残したまま固結している ことがわかる.



写真-7 改良体[No,3孔]



写真-8 改良体[No, 5孔]

3) 改良砂の変形・強度特性 a) 非排水繰返しねじり試験

注入対象層であるGL-3.0m~GL-4.0mおよびGL-5.0m~GL-6.0mの2深度について改良砂および未改 良砂の非排水繰返しねじり試験を実施した.拘束圧 は,試料採取深度の有効土被り圧と等価になるよう σ'_{c} =49(kPa)および 69(kPa)とした.**図**-9に7.5% せん断ひずみ両振幅における繰返し回数と応力比の 関係を示す.液状化強度R_{20L}(20回の繰返しせん断 によってせん断ひずみ両振幅が7.5%に達するような せん断応力振幅)は,未改良砂R_{20L(unimp.)}=0.25 [GL-3.0m~-4.0m],R_{20L(unimp.)}=0.28[GL-5.0m~-6.0m]に対して,改良砂ではR_{20L(imp.)}=0.55[GL-3.0m~-4.0m],R_{20L(imp.)}=0.70[GL-5.0m~-6.0m] となっており改良砂の液状化強度R_{20L}は未改良砂の



写真-6 改良体全景

2倍以上に大きくなっている.これら改良砂の液状 化強度は、本実験近傍にて実施された鉛直削孔後の 注入により造成された改良砂²⁾の液状化強度[R 20L(imp.)=0.55~0.75(シルト上部細砂層)、0.65~ 0.85(シルト下部細砂層)]とほぼ同等な強度を示し ており、本工法にて採用している注入方法において は、水平方向注入も従来の鉛直方向注入と同等な液 状化強度が得られることを示している.

図-10(a) (b) に深度GL-3.0m~GL-4.0mにおける未 改良砂,改良砂の有効応力経路図を示す.未改良砂 では繰返し載荷によって有効応力がゼロになり液状 化に至っているのに対し,改良砂では有効応力がゼ ロに至っていない.

図-11(a)(b)に深度GL3.0m~GL-4.0mにおける未改 良砂,改良砂の応力~ひずみ関係図を示す.改良体 と未改良地盤の応力~ひずみ関係を比較すると、改 良体では繰返し載荷において未改良砂のような過剰 間隙水圧、せん断ひずみの急激な増加が見られず、 ともに徐々に増加する.これは、改良体がせん断に 対して粒子間のかみ合わせと粘着力によって抵抗す るためと考えられる.











図-10(b) 改良砂の有効応力経路図[応力比0.43]



図-11(a) 未改良砂の応力~ひずみ関係図 [応力比0.22]



図-11(b) 改良砂の応力~ひずみ関係図 [応力比0.43]

b) **圧密排水三軸圧縮試験**

GL-3.0m~GL-4.0mの深度について改良砂および未 改良砂の圧密排水三軸圧縮試験を実施した. 図-12 に拘束圧49(kPa)の条件下における未改良砂および 改良砂の軸差応力~軸ひずみ,体積ひずみ~軸ひず み関係を示す.未改良砂は,体積収縮(負のダイレ イタンシー)を示すのに対して改良砂は,変形の初 期に圧縮した後,正のダイレイタンシーによる膨張 に転じている.また,強度も明らかに改良砂の方が 大きくなっており,改良砂では,最大圧縮点に達し た後,変形が進行するにつれて応力が減少するひず み軟化現象を示している.また,改良前後の内部摩 擦角 ϕ_d ,粘着力 c_d を比較すると,内部摩擦角は ϕ_d (unimp) = 39.5°, $\phi_d(imp)$ = 39.8° で変化はみられな いが,粘着力は、 $c_d(unimp)$ = 8.9 kPa, $c_d(imp)$ = 20.1 kPaと改良による12 (kPa)の増加が見られる.



図-12 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_v \sim \epsilon_a$ 関係図 [拘束圧 49 kPa]

c)一軸圧縮試験

GL-3.0m~GL-4.0mの深度について改良砂の一軸圧 縮試験を実施した.改良砂の一軸圧縮強度はqu=82 ~145(kPa)の範囲にあり,平均で,qu=129(kPa)で あった.

4) 改良砂の透水特性

GL-3.0m~GL-4.0mの深度について未改良砂および 改良砂の三軸透水試験を実施した.拘束圧は,試料 採取深度の有効土被り圧と等価になるようσ'。=49 (kPa)とした.

未改良砂の透水係数は, k_{(unimp})=9.7×10⁻⁴(m/s)に 対して改良砂では, k_{(imp})=6.7×10⁻⁵(m/s)であった. これは, 薬液が砂の間隙に充填されたことによる.

4. まとめ

新たに開発した水平誘導式の薬液浸透注入工法に ついて,原位置における適用性を把握するため現地 注入実験を実施した.

現地注入実験の結果、1)~4)について明らかになった.

- 1) 削孔および注入時の周辺への影響はほとんど無い.
- 2) 改良砂は、計画寸法・位置を満足している.
- 3) 改良砂の液状化強度は未改良地盤の2倍以上に 大きくなり、従来の鉛直方向注入と同等な液状 化強度を有する。
- 改良後の地盤は、液状化に対する強度・変形特 性が改善されている。

本工法は、地盤中を自在に改良可能なことから既 存構造物を傷めることなく、しかもその稼動を止め ることなく既設構造物直下地盤の液状化対策が可能 なことから、ケーソン式岸壁直下の置換砂、供用中 の空港滑走路下部地盤をはじめ広範な適用が考えら れる技術である.今後は、本実験結果をもとに施工 精度のさらなる向上を目指してゆきたいと考えてい る.

なお、本工法は、東亜建設工業株式会社,信幸建 設株式会社、株式会社トーメック,強化土エンジニ ヤリングの4社にて開発された工法である.

参考文献

- 1) 関口宏二・大野康年・三浦仁・那須丈夫・野村一郎・ 松尾淳:超多点注入工法による液状化対策技術 ~大 型土槽注入実験結果~、第44回地盤工学シンポジウム, pp.371-376(1999).
- 2) 大野康年・三浦仁・那須丈夫・野村一郎・関口宏二・ 松尾淳:多点浸透注入工法による液状化対策技術~現 地注入実験結果~,第4回構造物の安全性・信頼に関す る国内シンポジウム,pp.315-322,2000.
- 3) 斉藤正明・稲村佑一・大野康年・川瀬将:多点浸透注 入工法によるウオーターフロント既設構造物の耐震補強, 土と基礎, Vol.50 No.4,Ser.No.531 pp.16~18, 2002.
- 4) 米倉亮三・島田俊介:恒久グラウトー第1回恒久グラウトの恒久性のメカニズムー,土木施工,Vol.40 No.7,pp.99-106,1996