

浸透固化処理工法による供用中の岸壁の液状化対策事例

Application of Permeable Grouting Method for Soil Improvement beneath Port Structures

林 健太郎 (はやし けんたろう)

五洋建設㈱技術研究所 副所長

館 山 大 樹 (たてやま ひろき)

五洋建設㈱東北支店 工事主任

平木 正男 (ひらき まさお)

五洋建設㈱東北支店 工事所長

原田 智弘 (はらだ ともひろ)

五洋建設㈱東北支店 工事主任

1. 概要

近年、企業のBCPが検討され、地震などの災害に際しても経済活動が影響を受けないリスク管理が求められている。2006年の中越地震の際には、線状に機能する高速道路や鉄道は数カ所の損傷で分断され、輸送機能が麻痺してしまった。この際、人や貨物の代替え輸送手段として空港が有効であったことから、既設空港の耐震補強が求められている。

このように既存の拠点施設の耐震補強が求められているが、その多くは使用中であり、重要な施設であるほど、工事期間中に施設を止めることができない。重要な拠点施設の耐震補強を行う場合には、ほとんどの場合、施設を供用しながらの施工が求められる。浸透固化処理工法は、溶液型の恒久薬液を地盤に注入して液状化を防止する工法である¹⁾。1998年の開発以来、多くの既設構造物の液状化対策に用いられており、10年間で100件を超える施設の液状化対策に用いられている²⁾。

本稿は、使用中の岸壁の液状化対策に浸透固化処理工法が適用された事例を紹介するものである。本工事は、当初、岸壁の使用を一旦止めて耐震補強を行う計画であったが、岸壁使用者の事情から岸壁を供用しながらの施工が求められた。このため、岸壁の荷役作業への影響を最小にする施工法として浸透固化処理工法が選択された。本事例は、荷役作業に与える影響を減ずるために施工上の工夫を行い、岸壁を供用しながら液状化対策を実施し

た事例である。

2. 浸透固化処理工法の概要

本工法の原理は、恒久薬液を地盤内の液状化層に注入し、間隙水をゼリー状の物質（ホモゲル）に置換することで液状化を防止するものである。薬液には、耐久性の高い特殊シリカ系の溶液型薬液を使用する。本薬液は、粘性が水の1.2倍程度と低いため浸透性がよく、ゲル化時間を1時間から数時間まで調整ができるのが特徴である。ゲル化した薬液はせん断強度で2~5 kN/m²と非常に低強度であるが、改良土の一軸圧縮強度は、原位置で50~100 kN/m²程度となり、改良土は間隙をホモゲルに置換されるため液状化しなくなる。改良土の耐久性については、室内試験により確認されているほか、施工後5年経過した実改良地盤にて採取され、強度の低下がないことが確認されている³⁾。

本工法の施工手順を図-1に示す。①地盤を削孔して直径11 cmの鋼管を立て込み、鋼管内の土をジェット水により排泥する。②改良深さに注入口を設けた注入外管を鋼管内に立て込んだ後、鋼管を引き抜く。③注入外管内部にホースと注入装置を挿入し、外側に取り付けた布製パッカーの深さでセメントベントナイトを充填し、布製パッカーをふくらますことにより地山とパッカーを密着させる。④上・下の布製パッカーにより、仕切られた注入口深さに注入装置を降ろし、特殊シリカ薬液を注入する。

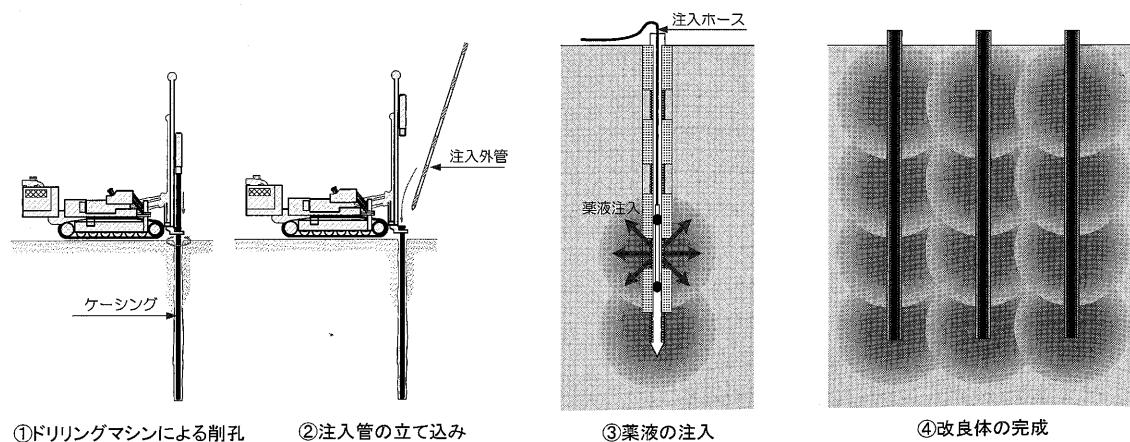
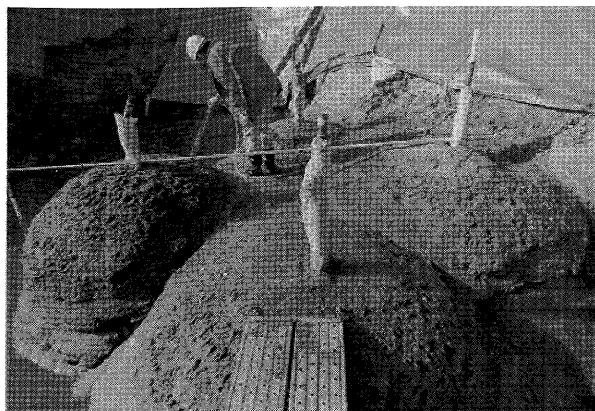
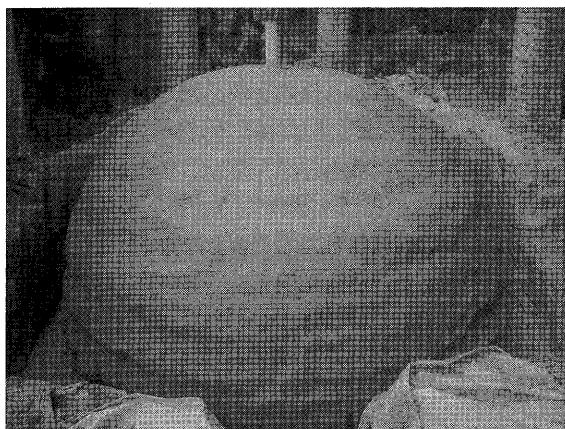


図-1 施工手順



写真一 1 改良体の出来形

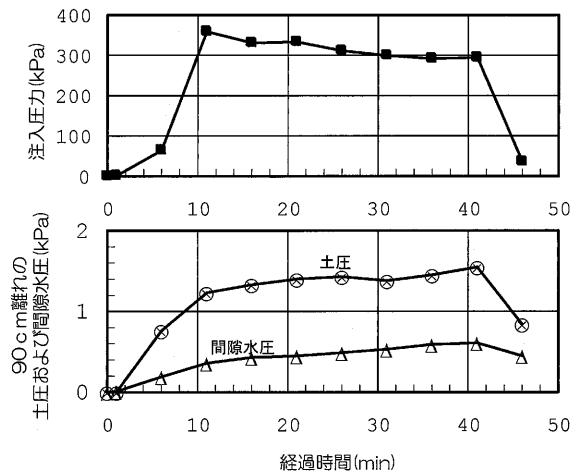


写真二 2 大型土槽実験による改良形状

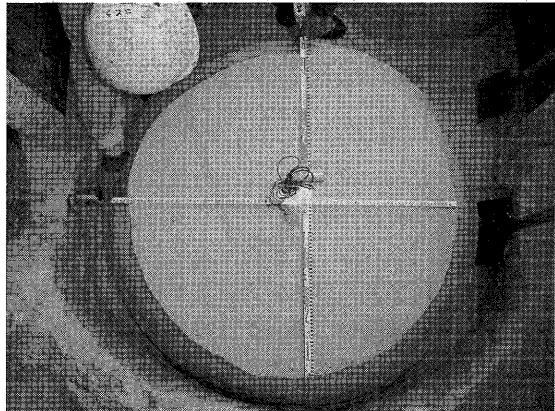
改良体の出来形については、写真一 1 に示すように原位置での試験施工により確認されている。薬液の充填率やシリカ濃度の分布等について確認するために、大型土槽を用いて直径 1.2 m の改良体を作成し、現場では測定しにくい改良体の出来形について詳細な計測を行った。実験では $B \times L \times H = 1.8 \text{ m} \times 1.8 \text{ m} \times 1.8 \text{ m}$ の土槽内に水中落下法により乾燥砂を充填し、模擬地盤を作成した。砂には、相馬産の 7 号ケイ砂 ($F_c = 2\%$, $U_c = 1.8$) を使用し、相対密度 (D_r) が 80% となるように地盤を作成した。あらかじめ、地盤内に注入パイプを設置し、厚さ 10 cm のモルタルで蓋をした後、注入速度 10 l/min で 386 l の薬液を注入した。

注入筒先の水圧および注入位置より 90 cm 離れた壁面での土圧と間隙水圧の経時変化を図一 2 に示す。筒先では、350~300 kPa の水圧が作用しているが、薬液が浸透することにより徐々に拡散され、90 cm 離れた土槽の壁面で間隙水圧は千分の一程度に低減されている。また、土圧は、経時的に少しづつ増加しているが最大でも 1.5 kPa 程度であった。

写真一 2 および 3 は、土槽を解体したときに得られた改良体の出来形である。掘り出された改良体は、ほぼ球状に固結しており、断面形状は円形であることが確認された。このように細粒分含有率が小さく、均等係数が 2 以下の砂では、中央の点から注入された薬液はほぼ球状に浸透することが確認された。この場合の間隙量に対す



図一 2 注入圧力の経時変化



写真三 3 土槽解体時の出来形

る薬液の充填率は 98% であった。

浸透性の良い薬液を地盤内に注入する場合、薬液の注入に要する時間と、地盤内で薬液が固結する時間（ゲルタイム）をほぼ同様にすることが重要である。ゲルタイムを長くしそうした場合、比重が重く浸透性の良い薬液は間隙内をゆっくり落下するため、希釈を受け強度の低下が生じる。このため、溶液型の薬液を用いて改良土を作成する場合、適切なゲルタイムの設定をすることが、改良土の品質に大きく影響する。

3. 供用中の岸壁の液状化対策工事

本工事は仙台港区の高松埠頭の (-12 m) 岸壁の耐震補強を目的としている。本岸壁では、月に 6 隻程度、土木資材の砂が降ろされ、ペイローダにより荷役作業が行われる。また、船が着いていない状況でも野積場からダンプトラックによる土木資材の搬出があるため、この作業にも影響を与えないことが求められた。

本工事の施工平面を図一 3 に、施工断面を図一 4 に示す。本岸壁は、控え矢板式の鋼管矢板岸壁である。改良範囲は、幅 105.4 m の区間であり、改良深度は、T.P. + 16 m から -3.7 m まで、改良層厚 5.3 m である。全体改良体積は、9 602 m³、薬液の注入率は改良体積の 40.5% である。改良範囲の土質はほぼ均一な砂質土で、50% 粒径は 0.32 mm、細粒分含有率 (F_c) 3% 程度、均等係

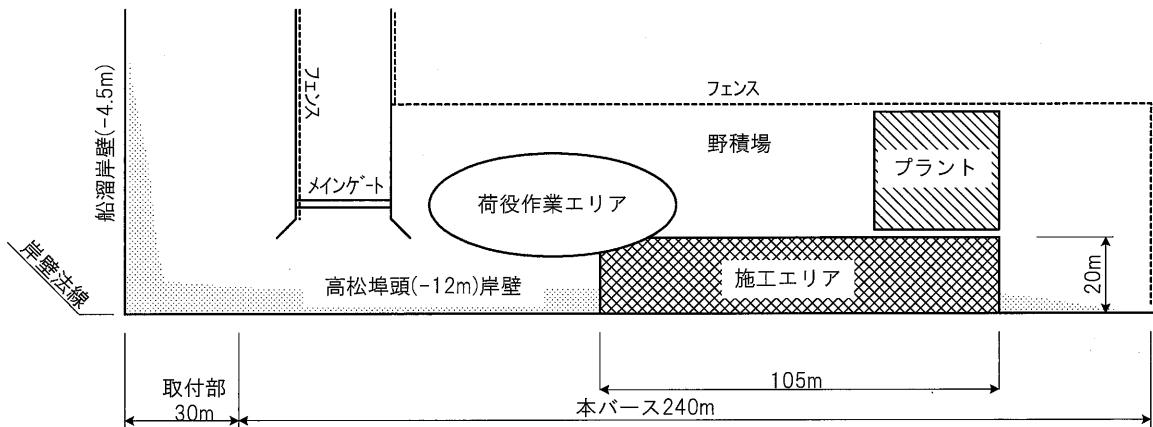


図-3 施工平面図

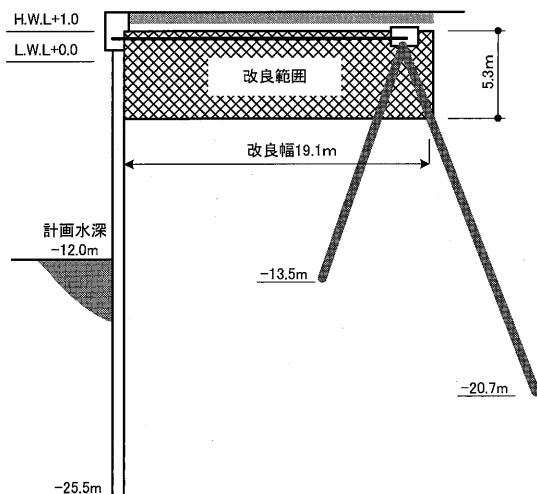


図-4 施工断面図

数 (U_c) は 2.3 である。

本工事では前提として荷役作業に影響を与えないような施工計画が検討された。大規模な荷役作業があるときには、施工現場を縮小すること、また、作液プラントも含めて、削孔や注入作業に関わる施工エリアでの安全性を確保しながら、荷役車両の通行が常時可能である施工法が検討された。

この結果、以下のような工夫を行い、荷役作業への影響を低減した。

(1) タイロッド位置の事前確認

施工エリアでは、地盤改良範囲内に岸壁法線と直角方向に設置間隔 1.5 m でタイロッドが存在していた。削孔作業の際に、ケーシングでタイロッドを切断する恐れがあるため、事前にタイロッド位置の確認を実施した。数箇所の試掘をする方法もあったが、時間がかかり、荷役作業への影響が大きくなるため、地中レーダー探査を使用してタイロッドの位置を出し、精度確認のため、1 箇所のみ試掘を行った。

試掘の結果では、地中レーダー探査の測定値と ± 10 cm の誤差範囲であったため、このレーダー探査の結果から削孔位置を決めて作業に入った。ただし、測定装置の特性上、地下水位（潮位）が高い、あるいは異物が多く存在している場合には目的物の位置を明確に判断でき

ないため、レーダーによる測定位置が不明確な箇所はタイロッドの設計間隔から位置を決めた。

削孔本数 450 本を施工したが、タイロッドを切断することなく作業完了することができた。地中レーダーによる確認のため、試掘は 1 箇所のみであったため、荷役作業への影響は低減された。しかしながら、施工に際しては、タイロッドの位置が明確に判断されなかった箇所もあった。削孔時にタイロッドの深度付近で異物に当たったため、その位置をかわして再度削孔を行った地点も数箇所あった。

今回のタイロッドは、高張力鋼で $\phi 55$ mm と比較的大型であったため、タイロッドを切断することは無かったが、タイロープなどの破断しやすい材料の場合、地中レーダーによる探査の適用は難しいと考える。

(2) プラント用地の縮小

浸透固化処理工法では、工場生産した薬液を現地へ運搬して使用するエコシリカ I-N と施工現場で作液を行うエコシリカ II の二つの薬液がある。当工事ではエコシリカ II を採用したが、施工する岸壁背後には常時碎石、砂およびベントナイトがストックしており、荷役作業への影響を低減するためにプラント用地を最小限の面積に抑える必要があった。

作液プラントと注入プラントに通常 230 m^2 程度の用地が必要であるが、近隣に用地を借りて作液プラントを設置し、ローリー車で現場まで運搬する方法を取った。これにより、現場内には注入プラントの用地 (70 m^2 程度) のみとなり、荷役作業への影響が低減できた。

(3) 削孔作業の影響縮減

注入孔の削孔は、ゴム製のクローラ式ドリリングマシンを 2 台使用し、施工時には、施工領域をバリケードで囲い、作業の安全性を確保した。施工領域を荷役作業者に周知させ、周辺の荷役車両の通行経路を明示することで、荷役作業への影響を最小限とした。施工場所は事前に荷役業者と打ち合わせした結果を踏まえ、ダンプトラックが走行できる範囲を確保するように計画しながら、20 本 / 日・台以上のペースで削孔作業を行うことができた。

(4) 注入作業の影響縮減



写真一4 注入状況

薬液注入は12セットのイグニッションポンプを使用し、1セット当たり日3球体の注入を行うことで、日当たり合計36球体の注入を実施した。注入量は、1球体当たり約3.2 m³であり、1球体注入するのに約4時間かかるため、日当たり12時間の作業となった。注入を開始より4時間は注入装置を移動できなくなることから、削孔作業と同様に荷役業者と綿密な打合せを行い、荷役作業で使用する場所を確保しながら薬液注入作業を行った。

注入作業の施工状況を写真一4に示す。写真から荷役作業を行っている近傍で、施工エリアを明確に区分しながら、安全に注入を実施しているのが分かる。

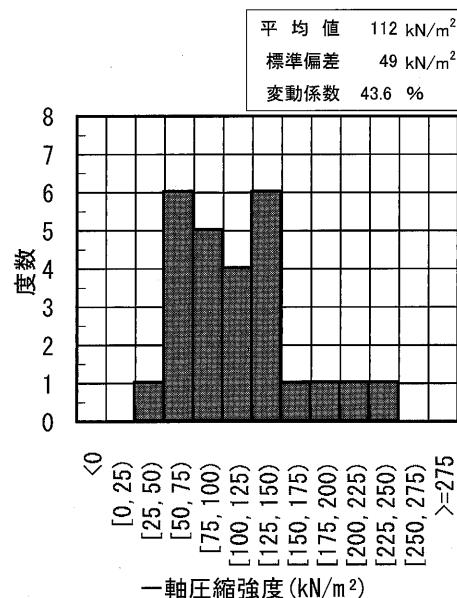
4. 改良効果の確認

本工事では、改良効果の確認は、ロータリー式三重管サンプラーにより採取した試料の一軸圧縮強度により確認を行った。試料の採取は3箇所のボーリングにより実施し、各孔あたり9本、全体で27本の不搅乱試料を採取した。試料の一軸圧縮強度の頻度分布を図一5に示す。目標とする一軸圧縮強度60 kN/m²に対し、得られた試料の平均圧縮強度は、112 kN/m²であった。また、変動係数は43.8%と、これまでの施工実績⁴⁾が50%程度である中では比較的小さい値となった。これは、施工範囲の砂の粒度分布のばらつきが小さかったことが影響していると考える。

今回使用したロータリー式三重管サンプラーによる試料採取では、オペレーターの熟練度に依存する傾向があるがわれ、今回、変動係数が小さかったことにもこの熟練度が影響しているとも考えられる。

5. まとめ

本稿で述べた浸透固化処理工法を含む、溶液型の恒久



図一5 採取試料の強度の頻度分布

薬液による液状化対策工法は、1998年にはじめて羽田空港で採用された比較的新しい工法である。本施工事例のように施設を供用しながら地盤改良ができるため、施工実績はここ数年、確実に増加している。しかしながら、薬液が浸透するメカニズムや希釈の問題、適用可能な土質の限界など明確にされていない課題も多く、施工実績が増える中で、担当されるエンジニアがいろいろな問題にぶつかっているのが現状である。今後、この新しい施工方法を普遍のものとするためには、さらに研究を進め、工法の信頼性をより高めていく必要があると考える。

最後に、本稿をとりまとめるにあたり有益な助言をいただいた国土交通省塩釜港湾・空港整備事務所の皆様に誌面を借りて謝意を表します。

参考文献

- 1) 林健太郎・山崎浩之・前田健一・高橋邦夫・善功企：溶液型注入固化材による液状化対策工法の開発、港湾技研資料、No. 905, 1998.
- 2) 河村健輔・善功企・山崎浩之・林健太郎：既設構造物直下地盤の液状化対策—浸透固化処理工法—、土と基礎、Vol. 51, No. 3, pp. 13~15, 2003.
- 3) 善功企・山崎浩之・河村健輔・林健太郎：浸透固化処理土の原位置における長期耐久性、第41回地盤工学研究発表会、pp. 781~782, 2006.
- 4) 林健太郎・善功企・山崎浩之・林規夫：溶液型薬液注入工法の浸透および強度特性に関する大型土槽実験、土木学会論文集、No. 694/III-57, pp. 221~228, 2001.

(原稿受理 2007.10.3)