

バルーングラウト工法

大野 康年

東亜建設工業株式会社 土木事業本部 エンジニアリング事業部

バルーングラウト工法(NETIS No.SK-110016-A)は、恒久型薬液を用いた薬液注入工法の一つで地盤に恒久型薬液を低圧で注入することで地盤の間隙水を薬液に置き換え、薬液がゲル化することにより地盤強度を増大させる。また、周辺地盤を圧縮しないため周辺への影響はほとんど無く、既設構造物直下および地下埋設物が輻射している地盤においての適用が可能である。本報告では、本工法の概要、施工事例について述べるとともに、レベル2地震に対応した高濃度特殊シリカ液の特徴、適用範囲について示す。

キーワード：薬液注入工法、高濃度特殊シリカ液、液状化対策、側方流動対策

1. はじめに

近年、岸壁・護岸、タンク等の既存施設の耐震対策に恒久型薬液を用いた薬液注入工法が多く適用されている。この理由として、薬液注入工法がa)既存施設の直下地盤の改良が可能であること、b)既存施設を供用しながらの施工が可能であること、c)狭隘箇所への適用が可能であること、d)特殊シリカ液がセメント系注入材と比較して地盤への浸透性がよいこと等が挙げられる。しかしながら、従来の薬液注入工法は、1)削孔経路および注入管の沿った薬液の逸走、2)局所的な注入圧力の増大による地盤割裂といった施工品質上の課題、および3)改良体の発現強度が $q_u=100\text{kPa}$ 程度と薬液性能に限界があった。

本報告では、上記の施工課題および薬液性能限界を克服したバルーングラウト工法について述べるとともに、東日本大震災における改良地盤の効果、レベル2地震に対応した高濃度特殊シリカ液の特徴について示す。

2. バルーングラウト工法^{1),2)}

(1)概要

工法イメージ、注入概要および改良体の発掘写真を図-1、図-2および写真-1に示す。

本工法は、ボーリングマシンにて地盤を削孔し、恒久型薬液を地盤に低圧にて注入することで地盤強度を高める工法である。同工法は、薬液注入時の削孔経路に沿った薬液の逸走を防止するため、注入外管に20秒以内でゲル化する瞬結材充填によるゴム製バルーンを装着するとともに、注入口に減圧ネットを装着することにより地盤へ作用する注入圧力の低減を可能とした工法である。ま

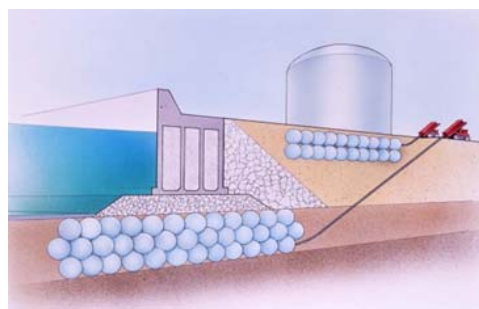


図-1 工法イメージ

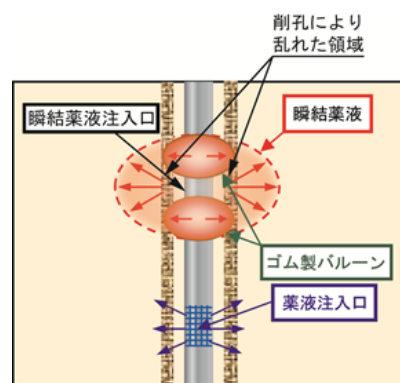


図-2 注入概要



写真-1 発掘改良体[羽田空港実海域実験]

た、削孔方法として、鉛直、斜め削孔の他、削孔延長200mの長距離対応型の曲り削孔システムを有する。

(2)施工方法

施工は、削孔、バルーン充填、薬液注入から構成され、施工手順を図-3に示す。

1)削孔工 (図-3 ①②)

削孔は、鉛直・斜め削孔にはロータリーパーカッション式のドリリングマシン、曲り削孔には曲り削孔機を使用する。

2)バルーン充填工 (図-3 ③④)

バルーン充填は、薬液注入時の削孔経路に沿った薬液の逸走を防止する目的で実施する。バルーン充填工では、ダブルパッカー付きのバルーン充填用内管を注入外管に挿入し、バルーン用バルブに20秒以内でゲル化する瞬結型特殊水ガラスを充填する。バルーン充填完了後は、注入外管内を洗浄し、洗浄水はプラントにて中和処理する。

3)薬液注入工 (図-3 ⑤⑥)

薬液注入は、事前に現地注水試験を実施し、適正な注入速度を設定して注入計画を立案する。注入計画は、現場作業条件、改良範囲より所要の性能を有する施工機械を使用し、効率的な改良効果が期待できる注入手順を設定する。なお、本工法では、注入速度、注入圧力をリアルタイムで管理する集中管理・監視システムを設置することで、1セットあたり16注入ポイントの同時注入が可能である。

(3)技術的特長

本工法の技術的特長を以下の1)~4)に示す。

1)削孔軌道・注入管に沿った薬液の逸走を確実に止める技術

本工法では、20秒以内でゲル化する特殊水ガラス系薬液(瞬結材)を注入管と地山との隙間を充填することで注入管と地山との隙間への薬液の逸走防止性能を向上させている。具体的には、注入管の注入口の上下に二つのバルーンとバルーン間に瞬結材の吐出口を配置し、瞬結材充填によるバルーンの膨張と削孔地山周辺地盤への瞬結薬液の注入により注入管と地山との隙間への薬液の逸走を防止する(図-2注入概要参照)。

2)均一な薬液吐出による球状の改良体を形成する技術

本工法は、薬液を吐出する注入口の周りにネットを設置することでネット全体から薬液が均一に吐出される。これにより、地盤へ作用する注入圧力を低減するとともに、球状の改良体を形成することが可能である。写真-2に注入管写真を示す。



写真-2 注入外管

3)種々の注入材料の適用が可能

従来の恒久型薬液(特殊シリカ液)は、配合可能な薬液シリカ濃度が最大10%であるため現地改良体の発現強度は $q_u=100\text{kPa}$ 程度が最大である。一方、レベル2地震時の岸壁・護岸の側方流動抑制等では、改良強度として、さらに高い強度が求められるようになってきている。本工法では、高強度改良に対応するため、高シリカ濃度特殊シリカ液および微粉末スラグセメントの注入材を開発している。表-1に本工法にて所有する各注入材の性能と適用性を示す。

4)長距離曲り削孔技術

本工法における曲り削孔は、1)ロッド先端に取り付ける削孔ビット形状の改良による土壌とケーシングとの摩擦低減、2)粘り強い特殊鋼をケーシングロッドに用いることによる耐久性向上および3)小型ジャイロシステムの精度向上を行うことで、従来工法の2倍となる200mの長距離削孔を高精度で実現している。

本工法における曲り削孔システムは、曲り削孔機、削孔管理システム、計測装置(小型ジャイロセンサ、ビーコン型計測器およびワイヤレス式位置計測装置)、注入管挿入装置および泥水プラントにより構成される。同機の削孔能力は、押込み力、引抜き力が $178\text{kN}\sim 267\text{kN}$ を有し、削孔能力としては国内最大級である。また、削孔可能な地盤種別は砂礫、砂($N<30$)および粘土である。

曲り削孔機、曲り削孔管理モニターを写真-3、写真-4に示す。

(4)用途・適用範囲

本工法の用途は、護岸・岸壁等の港湾施設、空港滑走路・誘導路等の空港施設、海岸・河川堤防、タンク基礎等の耐震対策の他に岸壁・護岸背面砂地盤の吸い出し対策、止水対策、地盤強化・支持力増強等である。また、施工は、既存施設直下、直近および狭隘箇所においても適用可能である。図-4,5に既存岸壁・護岸の耐震化、既存タンク基礎の液状化対策のイメージ図を示す。

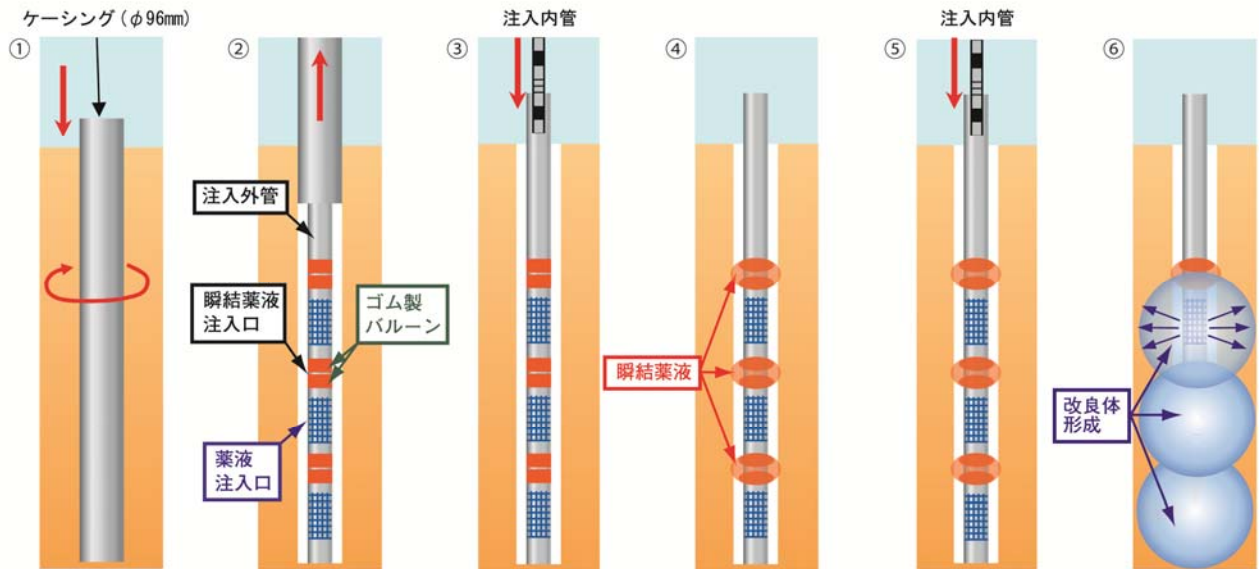


図-3 施工手順

表-1 バルーングラウト工法 使用注入材一覧

薬液	特殊シリカ液	高シリカ濃度 特殊シリカ液	微粉末スラグセメント
適用地盤	砂質地盤 ($F_c < 40\%$)		砂質地盤 ($F_c < 10\%$) 礫質地盤
シリカ濃度 添加量	4~10%	11%~16%	$120 \text{ kg/m}^3 \sim 250 \text{ kg/m}^3$
改良地盤の 強度(目安)	$q_{uf} = 50 \sim 200 \text{ kPa}$	$q_{uf} = 200 \sim 500 \text{ kPa}$	$q_{uf} = 200 \sim 2000 \text{ kPa}$
ゲルタイム	数十秒~15時間 (調整可)		数十秒~6時間 (調整可)
主な用途	液状化対策 吸出し対策	側方流動対策他 (レベル2地震)	側方流動対策他 (レベル2地震)



写真-3 曲り削孔機



写真-4 曲り削孔管理モニター

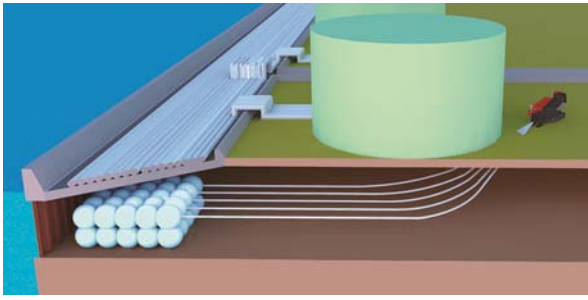


図-4 既存岸壁・護岸の耐震化

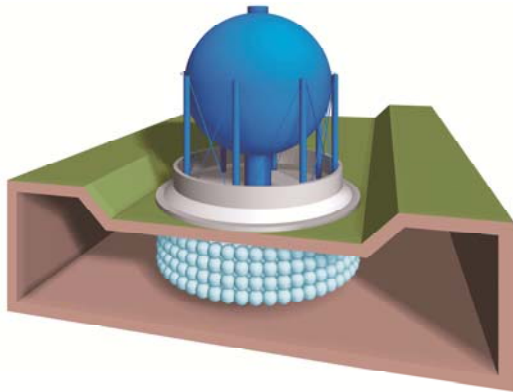


図-5 既存タンク基礎の液状化対策

3. 高濃度特殊シリカ液^{2),3)}

従来の恒久型薬液（特殊シリカ液）を用いた薬液注入工法では、現地で配合可能な薬液シリカ濃度の限界が10%であることから、改良強度は $q_u=100\text{kPa} \sim 200\text{kPa}$ 程度であった。したがって、レベル2地震動に対応した対策では、条件によっては強度が不足し、適用が困難になるケースがあった。一方、セメント系注入材を用いた薬液注入工法は、改良強度として $q_u=500 \sim 2,000\text{kPa}$ の強度発現が可能であるが、地盤への浸透性が悪く、適用できる地盤が非常に少ないのが現状である。

バルーングラウト工法では、地盤への浸透性のよい特殊シリカ液の配合を16%濃度まで可能とすることで、改良強度の高強度化を図っている。図-6に高濃度特殊シリカ液による一軸圧縮強さ（室内）と薬液シリカ濃度の関係を示す。

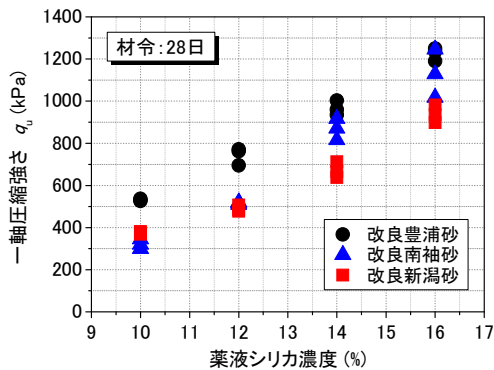


図-6 一軸圧縮強さと薬液シリカ濃度関係

同薬液の現地への適用を検証するため、現地実証試験を実施している。

試験場所は、千葉県袖ヶ浦市南袖の埋立て地盤で、図-7に柱状図および標準貫入試験結果を示す。注入対象とする細砂層はN値が3~7、地下水位はGL-1.35mである。細砂層の物理特性は、土粒子密度 $\rho_s=2.707\text{g/cm}^3$ 、平均粒径 $D_{50}=0.159\text{mm}$ 、細粒分含有率 $F_c=10.3\%$ である。

試験は、薬液シリカ濃度14%の高シリカ濃度特殊シリカ液を図-8に示す深度に注入し、改良直径2.5mの改良砂を平面4体×鉛直2体の計8体造成した。薬液注入率 λ は、事前調査結果より $\lambda=43\%$ とし、注入速度は現地注水試験より浸透形態の注入が可能になるよう毎分6リットルとした。注入完了14日後に改良砂を発掘し、出来型を確認するとともに改良砂をブロックサンプリングし、一軸圧縮試験（材令28日）を実施した。改良砂試料の採取位置は、上部改良砂の半径の1/2位置である。

改良体の出来型全景を写真-5に示す。同写真中のマーキングは、計画改良径を示す。改良砂に出来型は、計画天端GL-1.35mに対して実測天端GL-1.30mと計画値を満足した。また、改良径は計画直径2.5mをほぼ満足し、改良範囲内には未改良領域は見られない。

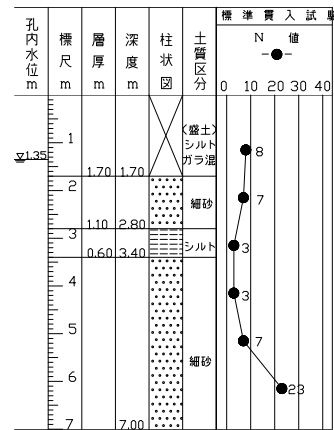


図-7 柱状図とN値

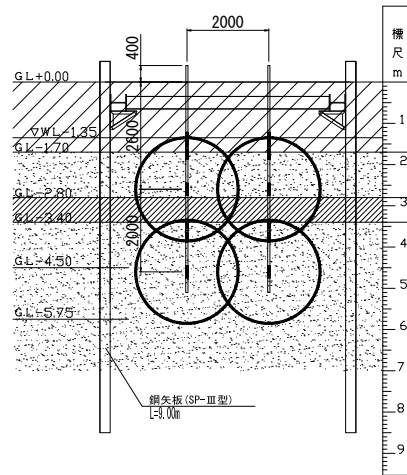


図-8 改良断面図



写真-5 改良体発掘全景

現地改良体の一軸圧縮強さ q_u は、 $q_u=396.7\sim 724.7\text{kPa}$ の範囲にあり、平均で $q_u = 543.9\text{kPa}$ であった。

4. 東日本大震災における改良効果

バルーングラウト工法による地震時の改良効果は、M9.0を記録した2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震時に仙台塩釜港仙台港区中野地区岸壁にて確認されている。

図-9に岸壁の改良断面を示す。同岸壁の改良は、岸壁の増深に伴う背面側土圧の低減である。

バルーングラウト工法は、岸壁背面の改良エリア（改良層厚3.5m）に適用し、改良強度は $q_u=100\text{kPa}$ 、改良率は100%である。

写真-6, 7に震災前後の現地状況を示す。未改良エリアでは液状化による30～40cmの沈下や噴砂現象が確認された。一方、改良エリアでは、3cm程度の沈下にとどまっている。改良範囲下部に未改良の液状下層が存在することを考慮すると同工法による改良効果は十分あったと考えられる。

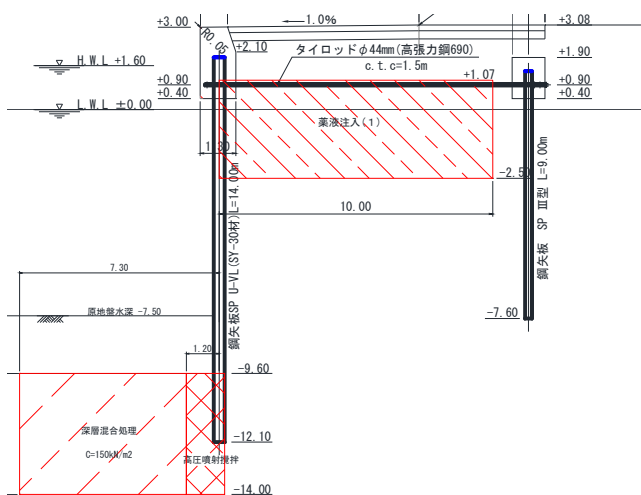


図-9 岸壁の改良断面（仙台塩釜港）



写真-6 震災前



写真-7 震災後

5. 適用例

[和歌山下津港地区岸壁改良工事]⁴⁾

当該工事は、重力式岸壁下部の置換砂の液状化対策例である。

施工場所は、和歌山県和歌山市内で、岸壁の荷役作業を供用しながら改良を実施している。改良断面図を図-10に示す。

改良対象層である置換砂は、土粒子密度 $\rho_s=2.64\text{g/cm}^3$ 、平均粒径 $D_{50}=2.6\text{mm}$ の礫混じり砂である。また、改良層の設計基準強度は $q_u=70\text{kPa}$ 、改良率は70%である。

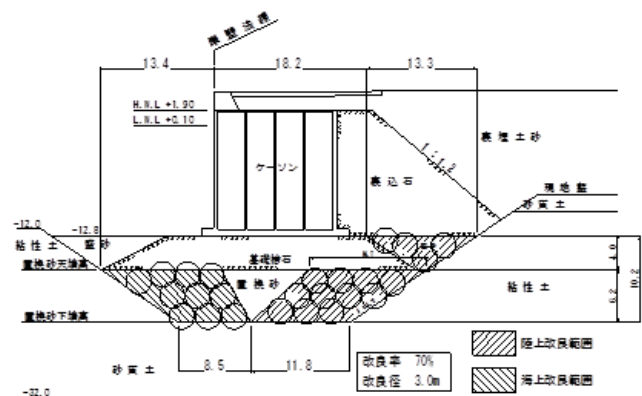
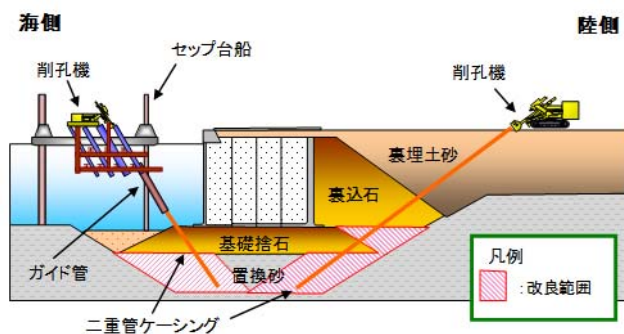


図-10 改良断面図

施工は、使用する機材を全て車載式とすることで、岸壁の供用に大きな影響を与えることなく改良を行った。

削孔方法は、図-11の施工概要に示すように海側および陸側より斜め削孔にて削孔後、注入管を設置した後、恒久型薬液である特殊シリカ液を注入した。海側からの施工は、セップ台船上に使用機材を配置し、削孔を海上から実施した。写真-8に施工状況写真を示す。

[削孔時(斜め削孔)]



[薬液注入時]

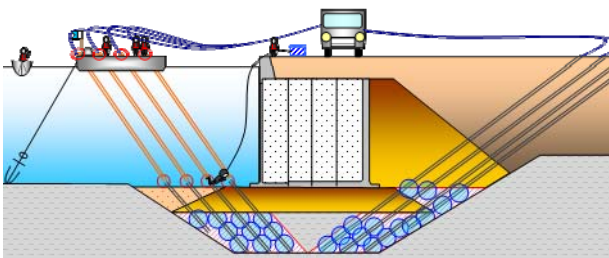


図-11 施工概要図



写真-8 施工状況(全景)

6 まとめ

バルーングラウト工法は、既存構造物の直下および周辺地盤の地盤強化に有効な工法である。また、高濃度特殊シリカ液を使用することで、薬液注入工法として、レベル2地震に対応した対策を可能としている。

今後は、現行基準を満足しない既存の岸壁・護岸、空港滑走路・誘導路、河川・海岸堤防、地下埋設物等の液状化対策および岸壁・護岸背面砂地盤の吸い出し対策等に提案していきたいと考えている。

参考文献

- 1) バルーングラウト工法研究会：バルーングラウト工法、地盤工学会 地震時における地盤災害の課題と対策 2011年東日本大震災の教訓と提言、2011.
- 2) 一般財団法人沿岸技術研究センター：港湾関連民間技術の確認審査・評価に関する評価証 第13002号、平成25年11月.
- 3) 大野康年：高シリカ濃度特殊シリカ液改良砂の変形・強度特性、日本材料学会第11回地盤改良シンポジウム論文集、pp.381-386,2014.
- 4) 東亜建設工業株式会社 ホームページ
<http://www.toa-const.co.jp/company/introduction/report/05/>