



2021.6.15, 第9号

はじめに

<御挨拶>

地球の温暖化、気候変動に伴い、日本及び世界において自然災害が頻発し、その被害も甚大なものとなっています。自然災害の主たるものは地震、台風と豪雨によるものであり、公共インフラから住宅までその強靭化は緊急の課題となっています。自然災害の予測やその対策を行うため種々の方法が用いられてきましたが、各種の地盤の液状化予測・解析において数値シミュレーション手法が発展してきました。昨年から本年にかけて、世界的な新型コロナ禍のため災害への取り組みもより困難なものとなっています。本及び世界において自然災害が頻発し、その被害も甚大なものとなっています。その主たるものは地震、台風と豪雨によるものであり、公共インフラから住宅までその強靭化は必須のものとなっています。豪雨災害、地震災害、火山災害など多くの災害が発生し、人命や財産が失われてきました。災害対策を含めたインフラの強靭化には、事前予測と事後評価を前提とした科学的でかつ迅速な対策が望まれています。本研究所では数値シミュレーション手法による地盤の液状化は解析手法を中心に、堤防の浸透問題も解析可能な解析法の開発と普及を行っていく予定です。国土の強靭化への取り組みに資することを願っております。今年もよろしくお願いいたします。

2021年6月

一般社団法人 LIQCA 液状化地盤研究所 会長 岡 二三生

LIQCA 液状化地盤研究所 住所連絡先

606-8226 京都市左京区田中飛鳥井町 138-1

防災研究協会第3研究室気付

電話&FAX 075-585-4445

e-mail office@liqca.org

LIQCA 液状化地盤研究所について

当社団法人は 2013 年 7 月に設立され今年で 6 年目に入ります。現在正会員が 17 名(内法人 4 社)、賛助会員が 4 社、理事は 6 名、監事 2 名で構成されています。ほぼ月 1 回の研究会を行い、最新の情報を取り入れた解析プログラムの開発、より使いやすいプログラム作成、ユーザーのためのサポート事業を行っております。詳しくは <http://liqca.org> を御覧ください。

昨年度のセミナーと活動

1. LIQCA 液状化プログラム普及事業

令和 2 年度は、2020 年版では、2 次元解析の要素、節点数の大幅な増加がなされました。また、2 次元解析での構造材の修正武田モデル使用条件の拡張と 3 次元での非線形ビーム要素の導入がなされています。令和 2 年 12 月 1 日に Zoom により LIQCA 液状化プログラムセミナーを開催しました。このセミナーの追加セミナーは令和 3 年 5 月 20 日に実施しました。資料は“LIQCA2D20・LIQCA3D20 (2020 年公開版) 資料”に対する説明とマニュアルです。また、令和 2 年 10 月 13 日に Zoom により、技術講習会も実施しています。

2. 研究開発

本年も引き続き、解析法の高度化を目指して開発を行う予定です。

次回のセミナー開催について

本年も 10 月には技術講習会、11 月末から 12 月にかけて LIQCA 液状化解析プログラムセミナーを実施する予定です。

ホームページについて

LIQCA 液状化地盤研究所の HOME PAGE でのユーザーのための LIQCA 情報のページでセミナーでの追加資料、正誤表やプログラムの保守情報を掲載しています。 <http://liqca.org>

関連国内国際会議・研究集会

1. 土木学会 2021 年度全国大会 第 76 回年次学術講演会、期間：2021 年 9 月 6 日（月）～10 日（金）オンライン開催 <http://committees.jsce.or.jp/zenkoku/> を参照ください。
2. 第 56 回地盤工学会研究発表会は、2021 年 7 月 12 日（月）-15 日（木）オンライン開催
3. IWBDG 2020-12th Int. Workshop on Bifurcation and Degradation in Geomaterials, Nov.28 - Dec. 1st,2022, Perth, Australia <https://www.iwbdg2020.com.au/program/>
4. 17thWCEE, World Conference on Earthquake Engineering, September 27 to October 2, 2021 (Hybrid Conference) <http://www.17wcee.jp/>
5. 材料学会；第 7 回 材料 week, 2021 年 10 月 12 日（火）～10 月 15 日（金）；会場. 京都テルサ（〒601-8047 京都市南区東九条下殿田 70 TEL:075-692-3400）. 主催. 日本材料学会.

広報 上記第 56 回地盤工学会研究発表会の技術展示へ参加しています。

<https://confit.atlas.jp/guide/event/jgs56/exhibitorslist/ja?page=2&initial=>

編集後記

梅雨の時期ですが、初夏らしくなってきました。コロナ対策など皆様ご健闘のこととおもいます。ニューズレターNO.9号です。昨年も九州を中心に豪雨災害が多発しましたし、東北でも地震がありました。令和3年も新型コロナウイルス感染症問題で激動の年になっていますが、ワクチンの普及に期待している状況です。コラムとしては、岐阜大学の八嶋先生に、地盤改良工法について充実した内容の力作原稿をいただきました。お忙しい中ありがとうございます。今後も、研究所への皆様のご支援をお願いします。

コラム -論文-

新しい薬液注入工法の開発と既設住宅を対象とした液状化対策効果の確認

岐阜大学 八嶋 厚

1. はじめに

本コラムでは、「都市化した市街地で有効な液状化対策とは何か？」という工学的な問いに答えるために実施した「新しい薬液注入工法の開発」と「既設住宅を対象とした液状化対策効果の確認のための動的遠心力载荷試験」について紹介する。

2. 注入効率と品質を向上させた薬液注入工法の開発

薬液注入工法は、既存施設の直下地盤や供用中の施設および狭隘箇所等、施工の制約がある場所で使用できることから液状化対策として広く用いられている¹⁾。特殊シリカ液を浸透注入して改良された改良砂は、液状化抵抗を効果的に改善することが証明されている。

従来の薬液注入工法における浸透注入の方法は、削孔穴のシール方法によりシールグラウト方式と地山パッカ方式に分類される²⁾。シールグラウト方式は、**図-1**に示すように削孔穴へシール材を充填し、シール材が硬化した後、注入管より薬液を注入することから、薬液は硬化したシール材の亀裂から地盤へ注入される。一方、地山パッカ方式は、**図-2**に示すように削孔穴へのシール材の充填は行わず、注入管の外側に装着したパッカ内に充填材を注入してパッカを拡大し、孔壁と密着させて確保した空間から薬液を注入する。

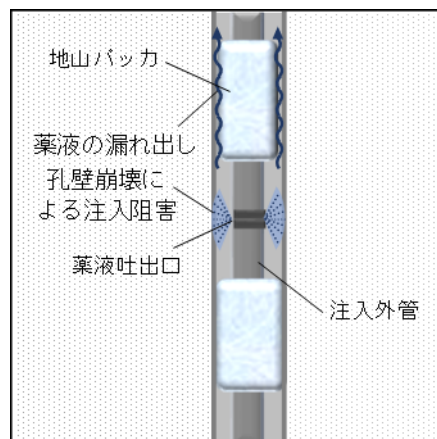
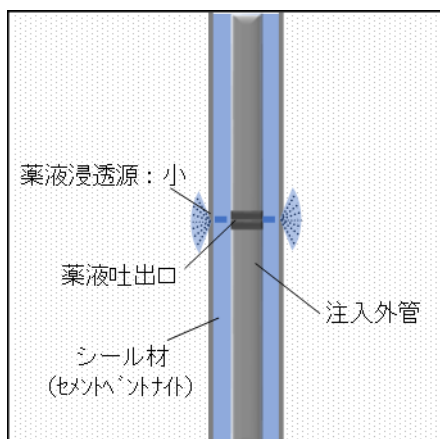


図-1 従来のシールグラウト方式の課題

図-2 従来の地山パッカ方式の課題

しかしながら、従来の二重管ダブルパッカ工法に代表されるシールグラウト方式は、1) 注入管付近からの薬液漏洩⁹⁾¹¹⁾、2) 割裂脈の発生¹²⁾、3) 薬液浸透方向の偏り¹³⁾および4) コスト高¹⁴⁾が課題として指摘されている。これら課題の主な原因は、同方式が小さな薬液浸透源により薬液を注入すること、および高い注入圧力が地盤に作用することによる。また、同方式の課題の改善に向けて、超音波振動による注入方法¹⁵⁾、注入圧力を変化させる動的注入¹²⁾、および低い注入速度で多数の注入箇所より注入する方法¹⁶⁾等、主に注入圧力の工夫による取り組みがなされている。一方、大きな薬液浸透源を有する従来の地山パッカ方式においても5) 多層地盤では透水係数の高い層に浸透しやすい¹⁶⁾、6) 液状化対策が必要な地盤では削孔壁が自立しづらく大きな浸透源を確保できない¹⁶⁾等の課題が指摘されており、地山パッカで仕切られた地山にフィルター材を設置することで孔壁崩壊を防止する取り組みがなされている¹⁷⁾。

本研究では、従来のシールグラウト、地山パッカ方式双方の課題に対し、大きな薬液浸透源の確保に着目した薬液注入工法を開発した¹⁸⁾。後述する「地山パッカの開発」に示すように、開発過程で実施した地山パッカ拡大径測定試験時に、従来の地山パッカで用いられている布製パッカは、パッカからの充填材のにじみ出しによりパッカが収縮することが明らかになり、パッカと地山孔壁との隙間が生じてしまうという問題点があることがわかった。したがって、本研究では、確保した浸透源にロスなく薬液を注入するために削孔穴からの薬液の漏れ出しを防止する地山パッカの開発を行った。

本工法は、シールグラウト方式と地山パッカ方式を併用した注入方式において新しい地山パッカと特殊シール材の二つの技術に特徴を有する。

新しい地山パッカは、布パッカの内側にゴムを装着した二層構造とし、パッカ拡大後の収縮は生じない。したがって、地山パッカと孔壁の間からの薬液の漏れ出しを防止することが可能である。特殊シール材は、特殊シリカ液等の薬液と反応して溶解する特性を有する。したがって、薬液注入前は削孔穴の孔壁崩壊を防止し、薬液注入時には溶解することで大きな薬液浸透源を確保可能である。

本研究では、新しい地山パッカの性能確認および特殊シール材の溶解後の地盤への薬液浸透性能を確認するため地山パッカの拡大試験および特殊シール材のカラム試験を実施した。また、本開発工法の実地盤における有効性を検証するため、佐賀県唐津市および愛知県津島市の砂質地盤にて現地注入実験を実施し、薬液注入時の薬液の漏洩の有無、地盤に作用する注入圧力、改良体の出来形および強度特性等を確認した。

2.1. 工法概要

本工法は、図-3 に示すように削孔穴に特殊シール材を充填し、地山パッカを拡大して仕切られた地山との接触面から薬液を注入する。本工法の特長を以下の 1)~3) に示す。また、本工法の施工手順を図-4 に示す。

1) 拡大後に収縮しない地山パッカにより削孔穴からの薬液漏洩が抑制され、確保した大きな浸透源に薬液をロスなく注入することができる。

2) 特殊シール材の削孔穴への充填により孔壁

崩壊を防止し、大きな薬液浸透源を確保できる。

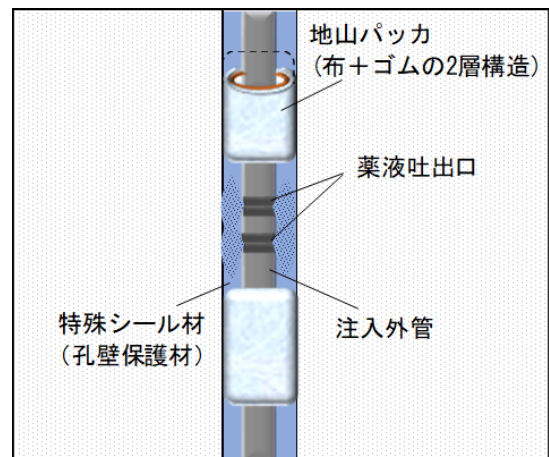


図-3 本工法の注入方法

3) 地山へ作用する薬液注入圧が低減され、割裂を起こさない浸透注入が可能である。

2.2. 地山パッカの開発

(1) 地山パッカの概要

a) 従来の地山パッカの問題点

従来の地山パッカは、一般的に布製が用いられることが多い。後述する開発過程で実施した地山パッカ拡大径測定試験に示すように、布製パッカは、ベントナイト等の充填材で膨ら

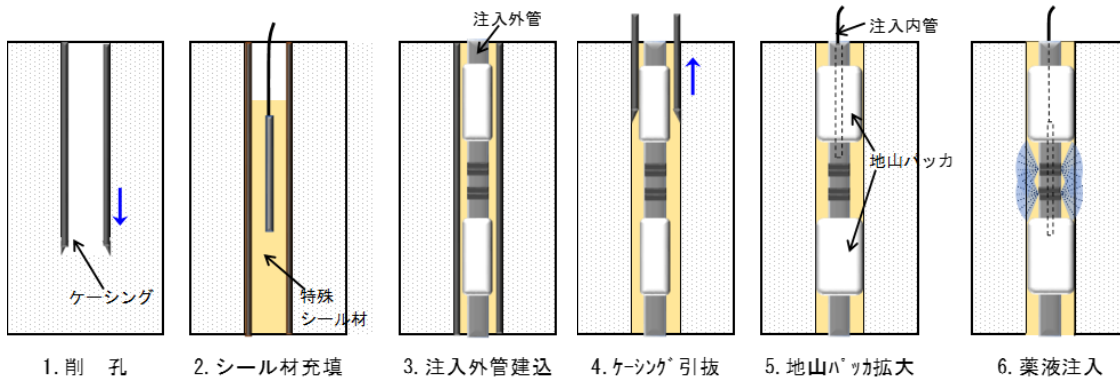


図-4 本工法の施工手順

ませると充填材のにじみ出しによりパッカが収縮し、パッカと地山孔壁とに隙間が生じてしまうという問題点があることがわかった。また、開発パッカでは充填材の漏れが無いため、注入管とパッカの固定部に圧力が作用し、従来パッカの止め金具構造では不具合が生じたので、開発パッカの固定部に作用する圧力にも十分な耐圧性能を有する新たな止め金具構造を開発した。

b) 開発した地山パッカの特長

開発した地山パッカは、ゴム製パッカの外側に布製パッカを装着した二層構造とした。ゴム製パッカは不透水性の材料であり、充填材の漏出を防止できるため、パッカの収縮を抑制できる。布製パッカは、充填材の注入に伴う膨張により所定の形状に達した後は、それ以上膨らむことなく所定形状を維持できる。このように、ゴム製と布製の異なる材料特性の相乗効果により、膨らんだ地山パッカが孔壁により密着して、薬液の漏れを防止する構造とした。

c) 止め金具の接合方式

地山パッカと注入管を接合する止め金具には、幅の異なる二種類の鋼製リングを用いることとし、充填材注入時の限界充填測定試験により、従来の地山パッカに比べ2倍以上の

充填圧に耐えられる接合方式とした。

本工法の地山パッカ構造を写真-1に示す。



写真-1 地山パッカの構造

(2) 地山パッカの性能試験

開発した地山パッカの性能を確認するため、地山パッカ拡大径測定試験および地山パッカ限界充填圧測定試験を実施した。

a) 地山パッカ拡大径測定試験

本試験は、気中にて地山パッカの材質を変えてパッカ内へ所定量のセメントベントナイトを充填し、拡大した地山パッカの直径を充填直後と充填7日後の2回測定した。

セメントベントナイト充填材の 1,000ℓ

表-1 地山パッカ拡大試験 試験ケース

当りの配合は普通セメント：250～300 kg、ト：50～60 kg、水：887～930 kg である。試

表-1 に示す。

充填直後の地山パッカの拡大径は、地山パッカにて充填直後 135mm、充て 135mm であ

地山パッカの材質	膨み直径 (mm)	パッカ長 (m)	充填量 (ℓ)
a)ナイロン+ゴム(本工法)	φ 120	1.0	11
b)ポリプロピレン	φ 140	1.0	15
c)ナイロン+ポリエステル	φ 165	1.0	21
d)ポリエステル	φ 115	1.0	10

ベントナイト試験ケースを

本工法の 充填7日後に

り拡大後の収縮はほとんどないことが確認された。一方、材質が b)ポリプロピレン、c)ナイロン+ポリエステル製の地山パッカでは、充填材の充填中に同パッカから充填材の漏洩によりパッカが拡大せず、d)ポリエステルの地山パッカでは、充填材の充填中に同パッカから充填材の配合水の漏洩があり、所定径までの拡大が確認されなかった。

写真-2 に a)本工法の地山パッカと c)ナイロン+ポリエステル製のパッカの拡大状況を示し、写真-3(a)、(b)に拡大前の地山パッカ、拡大1週間後の地山パッカを示す。なお、開発パッカの地盤への密着具合については、後述する佐賀県唐津市および愛知県津島市における現地実証実験にて、拡大後の同パッカを発掘し、同パッカが地盤へ密着していることを確認している。



【開発パッカ】



【従来パッカ】

写真-2 地山パッカの拡大状況



写真-3(a) 地山パッカの拡大前



写真-3(b) 地山パッカの拡大後 (1週間後)

b) 地山パッカ限界充填圧測定試験

本試験は、気中にて地山パッカ内にセメントベントナイトを毎分 5ℓ の速度で充填し、充填時間と充填圧力との関係を測定し、地山パッカの止め金具が注入管から外れる限界充填圧を測定した。地山パッカは今回開発した布製パッカの内側にゴム製パッカを装着した二層構造のパッカを使用した。止め金具による地山パッカと注入管の接合方法は、**図-5**に示す

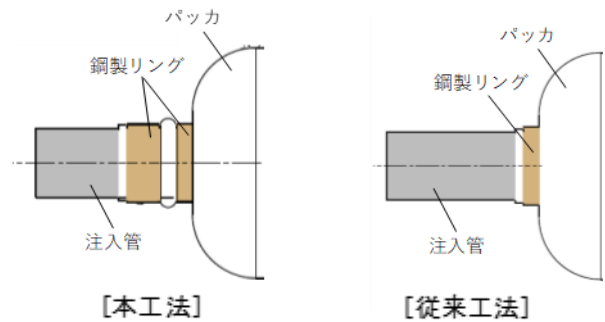


図-5 地山パッカの止め金具構造

カを使用した。止め金具による地山パ

カと注入管の接合方法は、**図-5**に示す

ように、本工法の接合方法（外側リングの幅を内側リングより大きくした 2 種類の鋼製リングを使用）と従来の接合方法（1 重の鋼製リングを使用）について限界充填圧測定試験を実施した。

充填時間と充填圧力および充填速度の関係を**図-6**に示す。限界充填圧は、本接合方式で 1.09MPa、従来の接合方式で 0.46MPa となり、接合箇所の耐圧性能が大幅に向上し開発パッカの固定部に作用する圧力にも十分な耐圧性能を有していることを確認した。

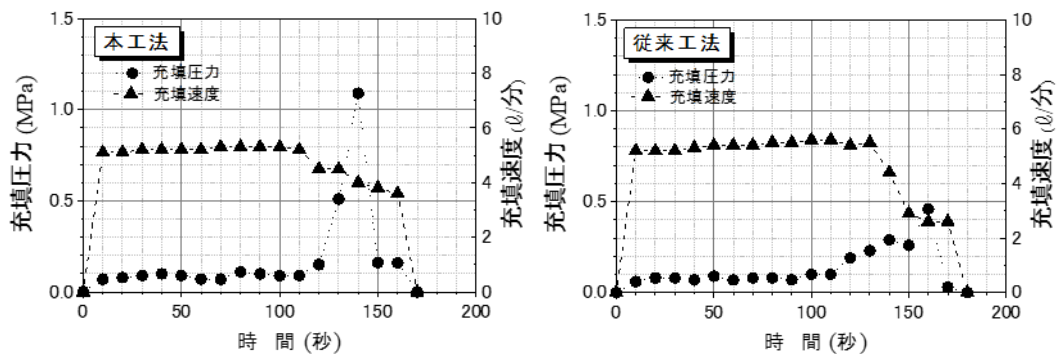


図-6 充填時間～圧力および充填速度関係

2.3. 特殊シール材の開発

(1) 特殊シール材の概要

従来の地山パッカ方式による薬液注入は、孔壁を保持するシール材を用いないため、ケーシング引抜後に孔壁が崩壊して、薬液注入を阻害する不具合が発生していた。一方、従来のシールグラウト方式による薬液注入は、シール材に低強度ベントナイト系材料を用い、シール材が固結後、シール材を割って薬液を注入するため、薬液の浸透源が狭く地山に大きな圧力が生じる課題があった。

このため、本工法においては、削孔後に孔壁を確実に保持する機能と薬液注入時は薬液との反応により溶解して浸透源を確保する機能を併せ持つ特殊シール材を使用し、薬液を確実に地山に浸透させることを試験により確認した。特殊シール材は、高吸水性高分子材と粘土および水から構成される。高吸水性高分子材は、吸水前の平均粒径 35 μ m 程度、白色粉末状の材料であり、自重の 500~1,000 倍の吸水性を発揮する。図-7 に示すように高吸水性高分子材は水を吸収すると親水基(-COO⁻)をもった高分子の鎖は水に溶けようとして広がり、漁網を広げた状態で止まる。この高分子の網の隙間に水が閉じ込められることで吸水膨張する¹⁹⁾。粘土は特殊シール材の比重を上げるため添加する。

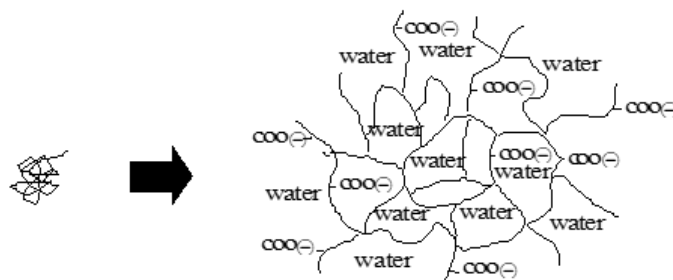


図-7 高吸水性高分子材の吸水原理¹⁹⁾

特殊シール材の配合は、水に高吸水性高分子材を 1~2 kg/m³、粘土を 20kg/m³ 程度添加して使用し、同材の比重は 1.3、ファンネル粘性は 20~45 秒である。また、高吸水性高分子材は、紙オムツなどの衛生用品や土壤保水剤等に使用されており、安全性が確認されている¹⁹⁾。

特殊シール材の孔壁防護・溶解メカニズムは、図-8 に示すように同材を削孔穴に充填後、孔壁面に泥膜を形成し、泥膜を介して同材の液圧で地山圧に抵抗し孔壁崩壊を防止する²⁰⁾。薬液注入時には、水を含んだ高吸水性高分子材が薬液との反応により離水収縮することでシール材が溶解する。高吸水性高分子材の離水収縮は、以下に示す 1)、2) により生じる²¹⁾。

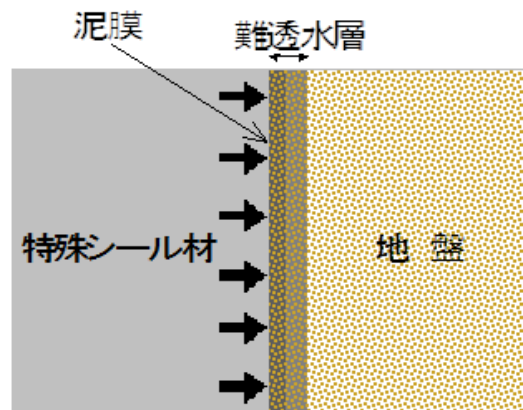


図-8 特殊シール材の孔壁崩壊防止模式図²⁰⁾

1) 多価の金属イオンと樹脂の親水基が反応すると金属イオンを介して 2 つ以上の親水基が架橋することで樹脂の分子同士の繋がりが強くなり、柔軟性が著しく損なわれる。これにより膨張が妨げられるため、吸水できる水量が大幅に制限され、離水収縮する。

2) 電解質を含む液体と接触すると、イオン濃度の内外差が変化する。一方で、吸水の駆動力は樹脂内外のイオン濃度差による浸透圧であるため、高吸水性樹脂に接触する液体に豊富な電解質が含まれていると浸透圧は変化する。樹脂内部よりもイオン濃度が大きい液体と接触すると浸透圧は樹脂から水分が放出される方向に働き、樹脂は収縮する。

一方、薬液は、主に 1 価の Na を電解質として含み、シリカ濃度 4~8wt% に対して 1.3~2.6wt% の電解質濃度を有する。したがって、薬液との反応による高吸水性高分子材の離水収縮は、前述の 2) に示すメカニズムによるもので、主に Na を含む薬液が、特殊シール材と連続的に接触することで高吸水樹脂の内外のイオン濃度差が逆転し、樹脂内部から水が放出され、体積収縮を起こす。これにより特殊シール材は溶解する。

特殊シール材の吸水倍率と水の電気伝導率の関係を 図-9 に示す。特殊シール材の吸水

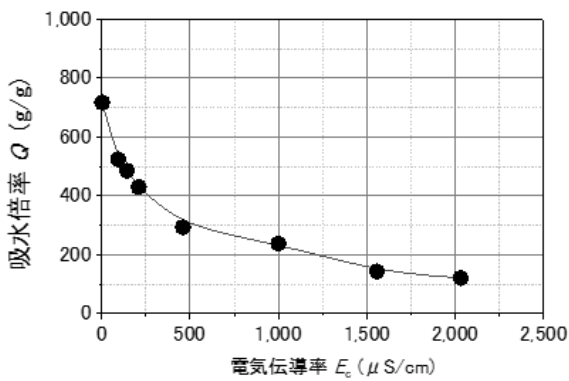


図-9 吸水倍率と使用水の電気伝導率の関係²⁰⁾

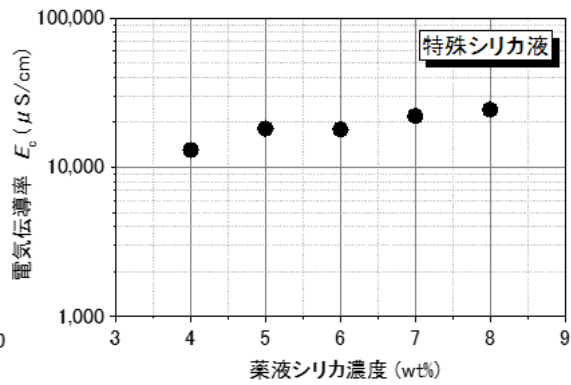


図-10 電気伝導率と薬液シリカ濃度の関係

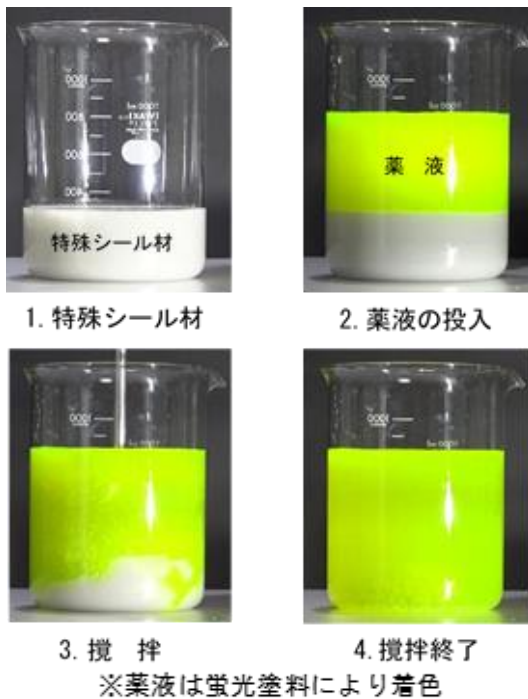


写真-4 薬液と特殊シール材の反応の様子

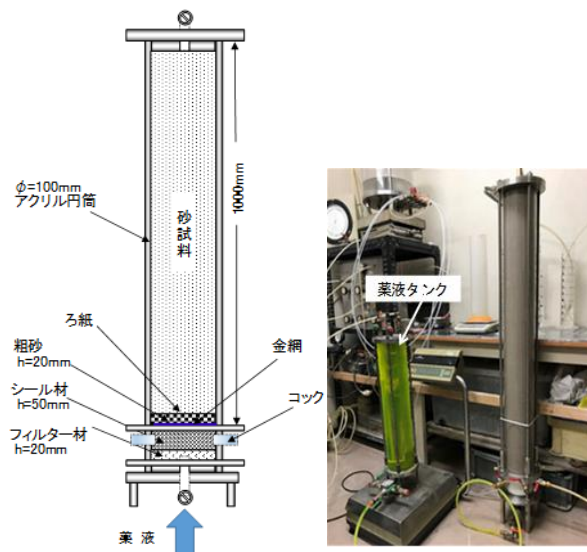


図-11 カラム試験装置

倍率の低下は、同材の体積収縮を表すことから、電気伝導率が高くなると離水することで体積収縮する。一方、薬液の電気伝導率は 図-10 の電気伝導率と薬液シリカ濃度の関係に示すように、4wt% 以上の薬液シリカ濃度における電気伝導率は 10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以上と高く、特殊シール材は薬液と反応することで明らかに溶解することがわかる。なお、薬液と特殊シール材反応時の様子を 写真-4 に示す。

(2) シール材のカラム試験

特殊シール材と薬液との反応による溶解および溶解後の土中への薬液浸透性能を確認するためカラム試験を実施した。試験装置を図-11に示す。同装置は、薬液をモールド下部より注入し、特殊シール材を介して砂試料へ浸透し、モールド上部より排出する構造となっている。試験ケースを表-2に示す。

表-2 シール材カラム試験 試験ケース

試験ケース	CASE-1	CASE-2
シール材	特殊シール材	低強度セメントベントナイト
砂供試体条件	使用砂	珪砂7号
	相対密度	65%
	間隙水	脱気水道水
薬液条件	使用薬液	特殊シリカ液 (5 wt% シリカ)
	pH	3.0

試験はシール材として特殊シール材との比較のため二重管ダブルパッカ工法等で使用されている低強度セメントベントナイト系材料も実施した。試験に使用した砂試料の物理特性を表-3に示しシール材の仕様を表-4に示す。薬液とシール材との反応状況を写真-5に示す。

表-3 砂試料の物理特性

砂試料	珪砂7号
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.652
最大間隙比 e_{max}	1.242
最小間隙比 e_{min}	0.710
平均粒径 D_{50} (mm)	0.24
均等係数 U_c	2.03

特殊シール材を用いた CASE-1 は薬液注入後、

表-4 シール材 仕様

シール材	配合 (1000l)	ゲルタイム
特殊シール材	高吸水性ポリマー 1.5 kg 粘土 19.8 kg 水 99.1kg	非硬化
低強度セメントベントナイト	低強度セメントベントナイト 15.0 kg 水 94.6 kg	50~90 分

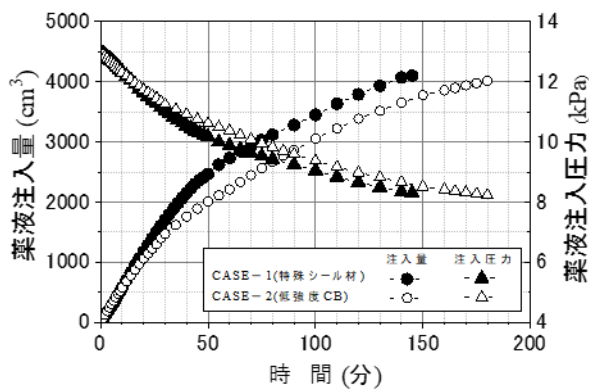


図-12 薬液注入量・注入圧～時間関係

写真-5 シール材と薬液の反応状況

約 3 分で段階的に泥水状のシール材が溶解し始め、最終的にシール材は全て溶解して緑色の薬液に置き換わり、薬液の砂試料への浸透面積は、砂試料の全底面積となった。一方、低強度セメントベントナイト系材料を用いた CASE-2 は薬液注入後、10 秒程度でシール材に複数のクラックが発生し、薬液はクラックを通して砂試料に注入されたことから、薬液の砂試料への浸透面積は CASE-1 と比較して非常に小さいことがわかる。

薬液注入量と注入圧力の経時変化を **図-12** に示す。所定の薬液量の注入時間は、特殊シール材を用いた CASE-1 が 120 分に

対して低強度セメントベントナイトを用いた CASE-2 では 150 分となった。これは、CASE-1 と CASE-2 の砂試料への薬液浸透面積の違いによる。薬液の注入圧力は、CASE-1、CASE-2 とともに薬液の水頭差（初期値 12kPa、最終値 8kPa）によるものとし、薬液の注入にともなって、両者とも時間とともに水頭が減少している。

なお、薬液の砂試料への浸透状況を確認するため、CASE-1 の改良供試体について注入下端より 9cm 毎に切断し、材料令 28 日にて一軸圧縮試験を実施した。一軸圧縮強さの分布を **図-13** に示す。改良体の一軸圧縮強さは試料上端まで強度低下は見られず、概ね試料全体に薬液が注入されたものと考えられる。

2.4. 現地実証試験

本注入工法の現地における性能を確認するため、佐賀県唐津市および愛知県津島市の砂質地盤にて注入試験を実施した。

(1) 佐賀県唐津市実証試験

a) 試験サイトの概要

試験サイトは、佐賀県唐津市内原地内で、地層は地表面より盛土、砂質シルト、細砂およびシルト混じり砂が堆積する。土質柱状図と N 値を **図-14** に示す。地下水位は、GL-2m 程度である。改良対象層は GL-3m～-9m の細砂およびシルト混り砂層で、GL-2m～-4m に有機質土、木片、GL-5m 以深にはシルトを層状に含む。改良対象層の粒径加積曲線を **図-15** に示し、物理特性を **表-5** に示す。

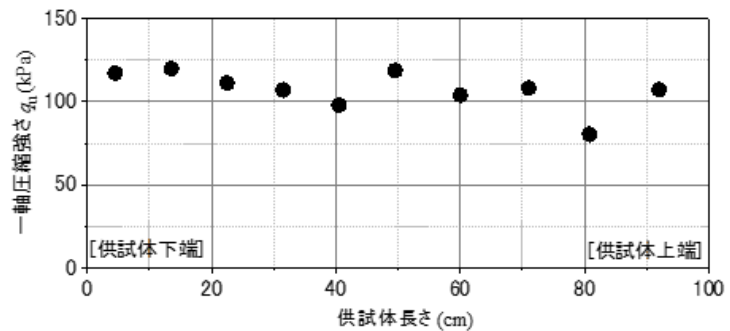


図-13 改良供試体の一軸圧縮強さ (CASE-1)

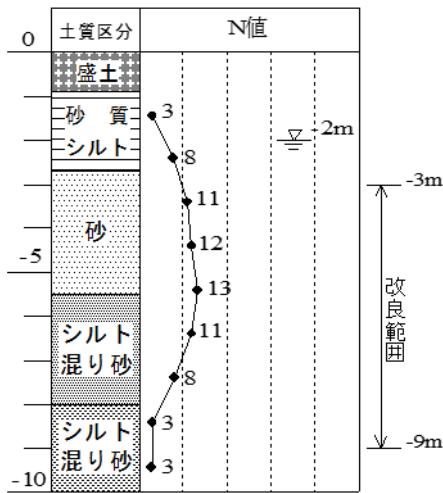


図-14 土質柱状図とN値（唐津市実証試験）

表-5 改良対象層の物理特性（唐津実証試験）

地層	細砂	シルト混り砂
平均N値	12	9
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.64	2.67
平均粒径 D_{50} (mm)	0.39	0.47
細粒含有率 F_c (%)	7	12
均等係数 U_c	3.0	5.6

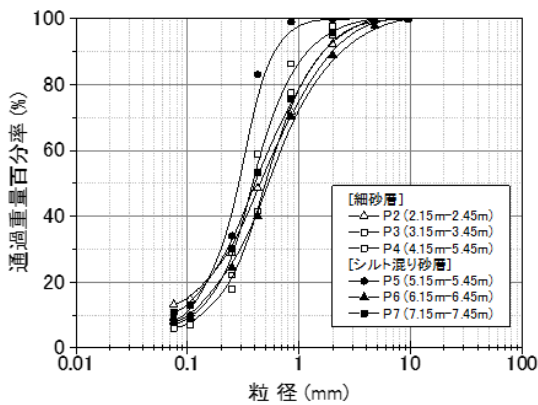


図-15 改良対象層の粒径加積曲線（唐津市実証試験）

表-6 改良仕様（唐津実証試験）

施工方法	本工法	二重管ダブルパッカ工法
使用薬液	特殊シリカ液	特殊シリカ液
薬液シリカ濃度	8%	8%
薬液pH	3.5	3.5
注入率	細砂層：40.5% シルト混り砂：36%	細砂層：40.5% シルト混り砂：36%
改良直径	2.5m	1.0m
改良率	100%	—
注入速度	4～50/min.	4～50/min.
目標改良強度	$q_v \geq 100\text{kPa}$	$q_v \geq 100\text{kPa}$

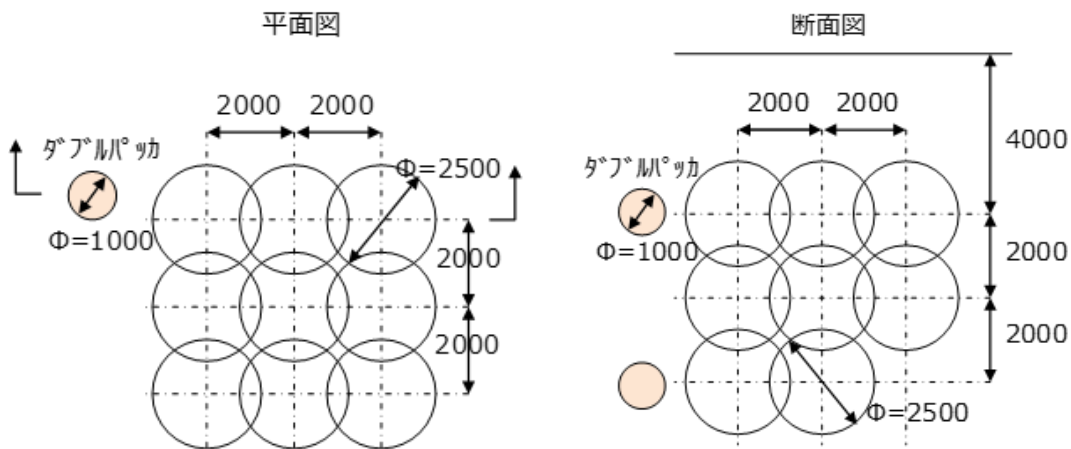


図-16 改良平面・断面図（唐津実証試験）

b) 試験方法

試験は、本注入工法により直径 2.5m の改良体を 20 体（改良土量：8m³×20 体 = 160m³）造成し、比較のため従来工法である二重管ダブルパッカ工法にて直径 1.0m の改良体を 2 体造成した。二重管ダブルパッカ工法のシール材には、表-4 に示した低強度セメントベントナイト系材料を使用した。改良平面・断面図を図-16 に示す。改良仕様は、事前調査、配合試験および現場水注水試験より表-6 に示すとおりとした。ここで、表-6 中の注入率は、設計注入範囲内の地盤体積に対する注入材体積の割合を示し、改良率は、計画改良範囲全体積に対する改良体の体積の割合を示す。

試験では、目視観察による削孔穴からの薬液逸走状況、発掘による地山パッカ拡大径、現場水注水試験による注入圧力および発掘による改良体出来形他を確認した。

c) 試験結果

薬液注入中および注入後の削孔穴からの薬液逸走は、全削孔穴にて認められなかった。また、発掘した本地山パッカの直径は、写真-6 に示すように地山パッカは削孔穴と同径の 120mm まで拡大し、孔壁と密着していることを確認した。

本工法による注入圧力を測定するため現場水注水試験にて注入速度を 1~8ℓ/min.まで変化させた時の注入圧力を測定した。測定位置を図-17 に示し、試験より得られた注入圧力と注入速度の関係を図-18 に示す。本工法による注入圧力は、二重管ダブルパッカ工法と比較して小さく、注入速度が毎分 8ℓ/min.にて比較すると、本工法の注入圧力は 0.3MPa 程度に対して、二重管ダ



写真-6 発掘地山パッカ（唐津実証試験）

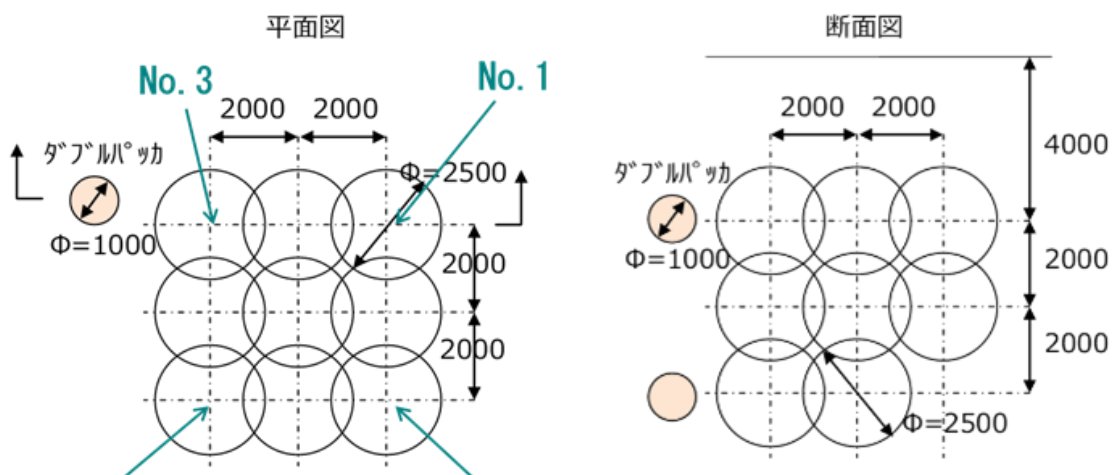


図-17 現場水注水試験位置（唐津実証試験）

本工法測定孔No.	深度GL-4m	No.3, No.9
	深度GL-8m	No.1, No.7
二重管DP工法測定孔No.	深度GL-4m	No.DP
	深度GL-8m	No.DP

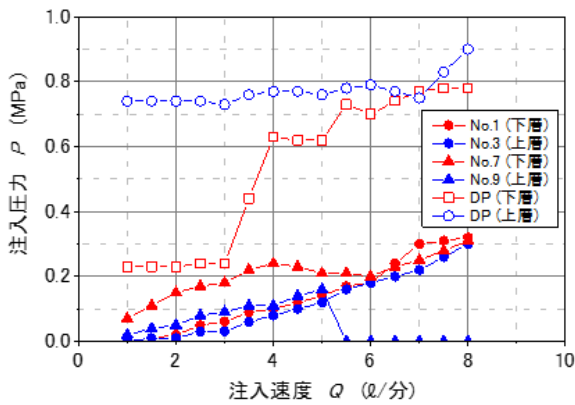


図-18 注入圧力～注入速度関係



写真-7 改良体の発掘全景（唐津実証試験）

ブルパッカ工法の注入圧力は0.8～0.9MPa程度であり、本工法による注入圧力は、二重管ダブルパッカ工法より62～66%低減していることが確認された。

本工法により造成した改良体の発掘全景を写真-7に示し、二重管ダブルパッカ工法により造成した改良体の発掘写真を写真-8に示す。本工法による改良体は、目標改良直径2.5mを満足し、注入口を中心とした球状体となっている。一方、二重管ダブルパッカ工法により造成



写真-8 二重管ダブルパッカ工法改良体

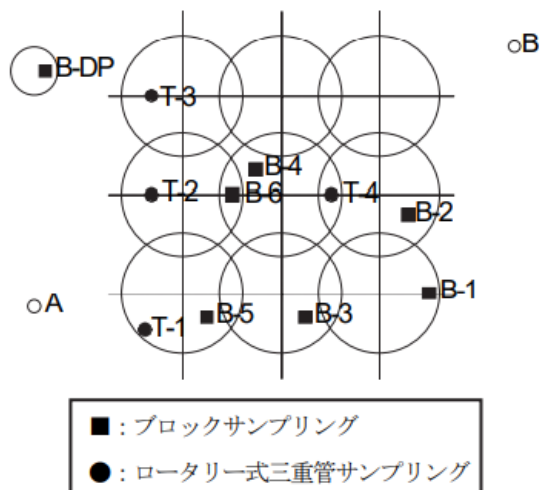


図-19 試料採取位置（唐津実証試験）

表-7 改良体平面採取位置

採取No.		改良体平面採取箇所
ブロックサンプリング	B-1	改良体外周
	B-2	改良体半径の1/2
	B-3	改良体半径の1/2
	B-4	改良体半径の1/2
	B-5	改良体半径の1/2
	B-6	改良体ラップ
三重管サンプリング	B-DP	改良体半径の1/2
	T-1	改良体外周
	T-2	改良体半径の1/2
	T-3	改良体半径の1/2
	T-4	改良体ラップ



写真-9 サンプルング試料（左 B-2、右 B-3）

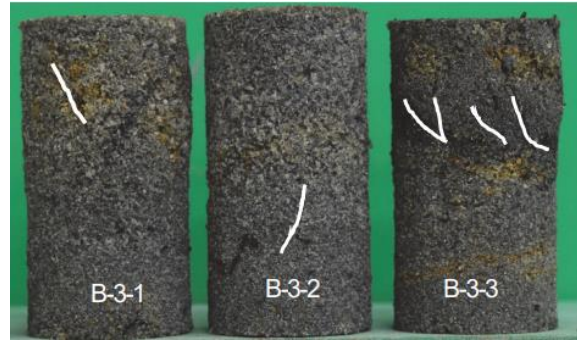


写真-10 一軸圧縮試験後の供試体（B-3）

された改良体は、注入管中心から南西方向に偏って造成されており、同工法の課題として指摘されていた薬液浸透方向の偏りが確認された。また、同工法は目標改良直径である 1.0m を満足しない結果であった。

改良体の強度を把握するため、改良体の乱さない試料を採取し、一軸圧縮試験、繰返し非排水三軸試験他を実施した。

試料の採取は、発掘改良体についてはブロックサンプリング、発掘以深の改良体はロータリー式三重管サンプラーにて採取した。試料採取位置を図-19 に示し、改良体平面における採取箇所を表-7 に示す。

ブロックサンプリングにより採取した改良体試料を写真-9 に示す。改良体には有機質土、腐植土を多く介在する。代表的な試験後の供試体写真を写真-10 に示す。

弱部である有機質土、腐植土に沿ってせん断面が発生している B-3-1 および B-3-3 の一軸圧縮強さ q_0 は 41.6kPa および 57.5kPa であるのに対して、有機質土に沿ったせん断面の発生が無い B-3-2 では、 $q_0=102.4kPa$ と一軸圧縮強さが大きく異なる。したがって、せん断面を観察し、有機物、石、シルト、等の介在物がみられたものを除外し、一軸圧縮強さの

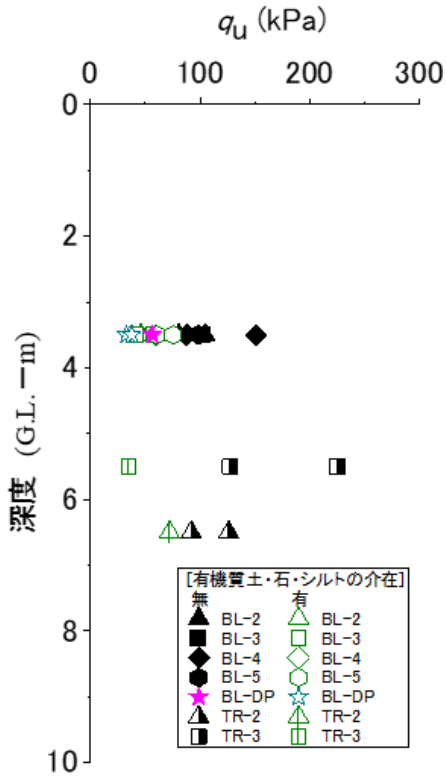


図-20 改良体の一軸圧縮強さの深度分布 (唐津)

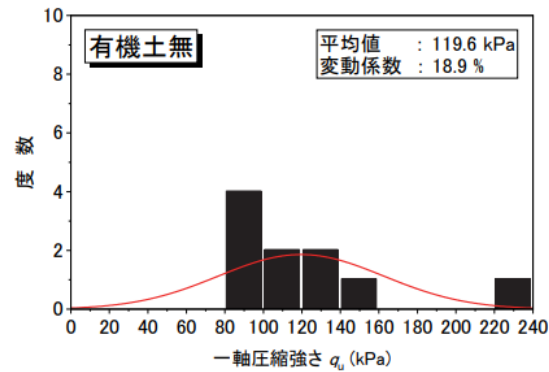
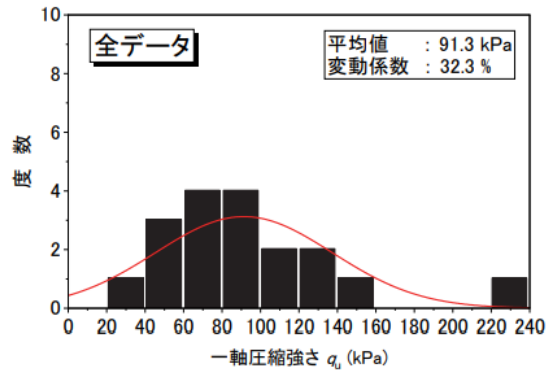


図-21 一軸圧縮強さのヒストグラム (唐津)

深度分布を図-20に整理した。なお、改良体の強度は、改良体半径の1/2箇所にて採取された試料を用いて評価されていることから同図には改良体半径の1/2より採取した試料の一軸圧縮強さをプロットしている。改良体の一軸圧縮強さは、図-21の一軸圧縮強さのヒストグラムに示すように全データの平均が、91.3kPa[COV=32.3%]であるのに対し、有機質土に沿ったせん断面の発生が無いデータの平均値は、119.6kPa[COV=18.9%]である。したがって、本工法による改良体の一軸圧縮強さは、目標改良強度 $q_{uck}=100kPa$ を満足していると考えられる。一方、従来工法の二重管ダブルパッカ工法による改良体の一軸圧縮強さは、有機質土に沿ったせん断面の発生が無い供試体においても56.5kPaであり、本工法と比較して低い結果であった。これは、二重管ダブルパッカ工法による改良体の出来形において薬液浸透方向の偏りが生じており、薬液の注入が不均一になっていた可能性が考えられる。

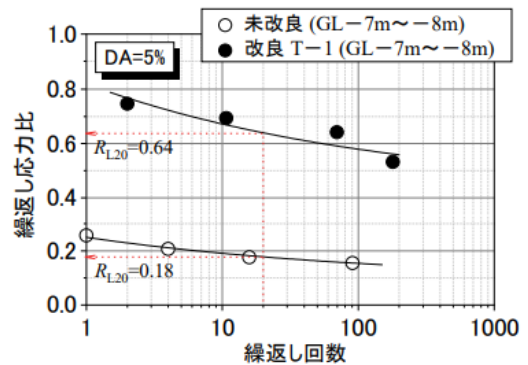
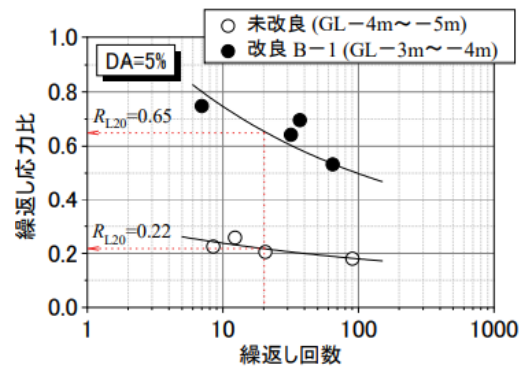


図-22 繰返し応力比～繰返し回数関係 (唐津)

図-22 に繰返し三軸試験より得られた未改良および改良体の繰返し応

力比と繰返し回数との関係を示す。試験時圧密前の B 値は、全て 0.95 以上で、しかも限りなく 1.0 に近い。未改良砂の液状化強度 R_{L20} (20 回の繰返しせん断によって軸ひずみ両振幅が 5.0%に達するような応力振幅比) が、0.2 程度に対して、改良体では 0.6 以上となっており、改良体の液状化強度比は未改良砂の 3 倍以上となっている。

2.5. まとめ

従来の地山パッカ方式による薬液注入工法の課題である削孔穴からの薬液漏洩による注入損失、削孔壁崩壊による注入阻害等を克服するため薬液注入工法を開発した。本工法の技術的特徴は、布パッカの内側にゴムを装着した地山パッカと削孔壁を保護し薬液と反応して溶解する特殊シール材である。本工法の基本性能および実地盤への有効性を確認するため、地山パッカの性能試験、特殊シール材のカラム試験および佐賀県の砂質地盤にて現地実証試験を実施した。試験の結果、以下の 1)~7)に示すことが確認され、本工法が削孔穴からの薬液漏洩による注入損失がほとんどなく、薬液の浸透面積を確保することで地盤へ作用する注入圧力が低減できることがわかった。

- 1) 本地山パッカは、パッカ拡大 7 日後の測定結果にてほとんど収縮がない。
- 2) 本地山パッカの限界充填圧は 1.09MPa を有し、従来工法の地山パッカと比較して約 2 倍の耐圧を有する。
- 3) シール材のカラム試験の結果、特殊シール材は薬液と反応後、約 3 分で溶解し始め、最終的には全てのシール材が溶解した。また、砂試料への薬液注入時間は、低強度セメントベントナイト系材料を用いたケースと比較して 30 分短縮され、改良砂試料の一軸圧縮強さは試料上端まで強度低下は見られず、概ね試料全体に薬液が注入されたものと考えられる。
- 4) 佐賀県の現地実証試験では、薬液注入中および注入後の削孔穴からの薬液逸走は全削孔穴にて認められなかった。また、地山パッカを発掘調査した結果、地山パッカは削孔穴まで拡大し、孔壁と密着していることを確認された。今回開発した布製とゴム製の二層構造パッカは、薬液の逸走防止に有効であることが、自然地盤で検証できた。
- 5) 佐賀県の現地実証試験にて現場水注水試験にて注入圧力を測定した結果、本工法による注入圧力は二重管ダブルパッカ工法と比較して小さく、注入速度が毎分 8ℓ/min.にて比較すると本工法による注入圧力は、二重管ダブルパッカ工法と比較して 62~66%低減していることが確認された。したがって、今回使用した高吸水性高分子材を主剤とする特殊シール材が、薬液注入時に溶解し、注入圧力を抑制することが検証できた。注入圧力を低く抑えることができるため、地山パッカ方式の課題であった多層地盤における透水性の高い地層への浸透集中を抑制する。
- 6) 佐賀県の現地実証試験にて造成した改良体を発掘した結果、本工法は直径 2.5m の球体の改良体を造成可能であることがわかった。また、改良体の一軸圧縮強さは、改良体中に有機質土およびシルトが多く混入していることにより、強度のバラツキが多かった、液状化強度比は、未改良地盤の 3 倍以上になっていることが確認された。
- 7) 本工法では特殊シール材を使用するため、その点では若干のコストアップとなるが、その反面改良径が大きく造成できることから削孔本数を削減でき、改良地山パッカにより注入ロスを減らすことができるため、コストダウンに繋がると考える。

3. 動的遠心力載荷試験による戸建住宅地盤の薬液注入対策の効率化評価

地震が発生するたびに地盤が液状化し住宅に傾斜や沈下などの被害が生じている。これらの被害を抑制するために様々な液状化対策工法が提案されているが、既設住宅を対象とした液状化対策工法は少ないのが現状である。そこで本

研究では、既設住宅にも対策可能な液状化対策工法の1つである薬液浸透注入工法に着目し、相似則を満足できる遠心場荷試験機による振動台模型実験により、薬液浸透注入工法の効果を検討した。

3.1. 実験方法

本研究では、震度6弱程度の地震が発生したことを想定し実験を行った。地盤モデルの概要図ならびに地盤および住宅モデルの応答を求めるための各種計測器の配置を図-23に示す。土槽の内寸は、幅400mm、奥行400mm、高さ300mmであり、剛土槽である。遠心力荷装置(半径2.5m)を使用した。実験は遠心場50Gでの相似則を用いて縮尺1/50とした。間隙流体には相似則を考慮し、粘度50mPasの粘性流体(メトローズ水溶液)を使用した。地盤材料は豊浦標準砂を用い、地盤相対密度60%を目標とした。地盤作成は空中落下法で作成し、メトローズ水溶液で地表面まで飽和した後、住宅模型を設置した。住宅模型の接地圧は19.7kPaとした。これは2~3階建木造住宅の平均的な接地圧に相当する値である。入力地震動は周波数1Hz、最大加速度200Gal、前後にテーパ部10秒を含む正弦波を使用した。模型土槽に設置した加速度計から得られた加速度波形の一例を図-24に示す。

ここで示す実験ケースは、対策を施していない未改良地盤(CASE1)および住宅外縁部を深度40mm~120mm(実スケールで2m~6m)まで改良した場合(CASE2~5)の5ケースである。改良体は事前に一軸圧縮強度50kN/m²を目標としてアクリルモールドで作成し、改良モデルのサイズに整形して地盤内に設置した。

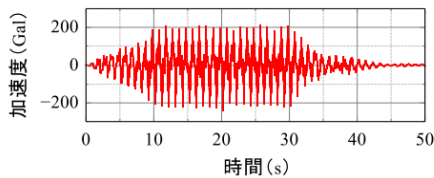


図-24 入力加速度

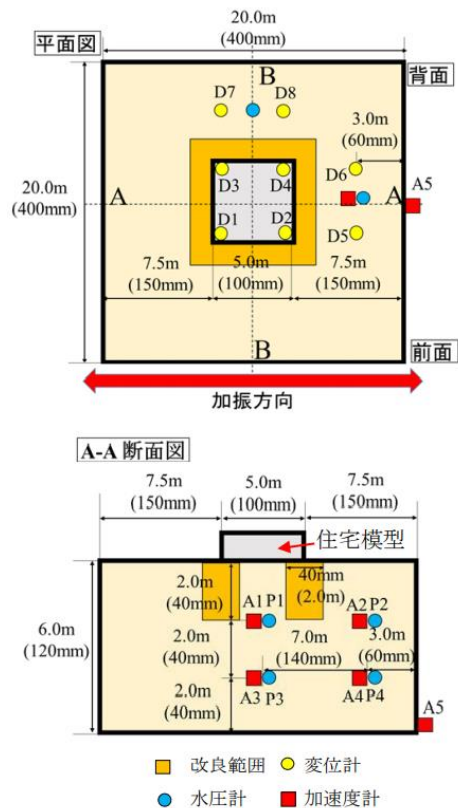


図-23 CASE 2 の模型地盤の概要図

3.2. 実験結果

住宅模型から離れた自由地盤の地表面下2mと4m地点(図1のP2、P4)の間隙水圧の時刻歴(CASE1)を図-25に示す。間隙水圧は加振終了までに初期の有効応力に達しており液状化していることが確認できる。また地表面の沈下量を図-26に示す。D5、D6は沈下量がやや小さく、D7、D8では大きく沈下している。これは加振方向と住宅模型の位置、土槽サイズの影響を受けたものと思われる。次に改良深度毎に住宅模型の4隅で計測した沈下量の平均値の時刻歴を図-27に示す。加振50秒後の沈下量は、未改良の場合は51.5cmとなったが、2m改良で29.7cm、4m改良で21.0cm、6m改良で8.7cmと改良深度に従い沈下量を抑制できることを確認した。先に示した地表面沈下量(D5~D8の平均値)と住宅沈下量、相対沈下量(住宅沈下量-地表面沈下量)を図-28に示す。すべての実験ケースにおいて地表面沈下量は20cm前後の値となり、住宅沈下量は改良深度ごとに減少し、相対沈下量も減少していくことが確認できる。6m改良は改良体が土槽底面(非液状化層)に達しており、相対沈下量は上昇(抜け上がり現象)となった。

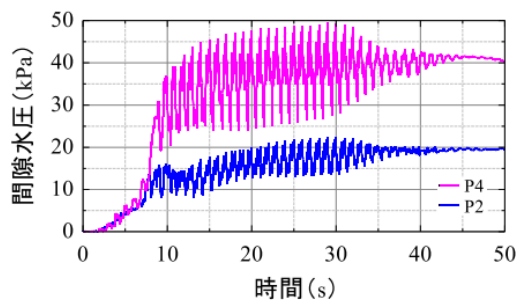


図-25 地盤内間隙水圧 (未改良地盤)

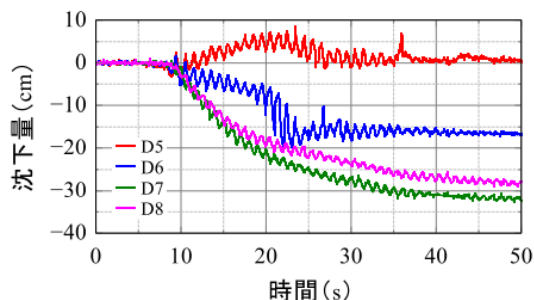


図-26 地表面沈下量 (未改良地盤)

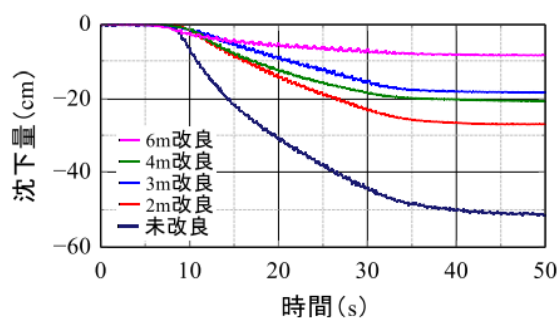


図-27 住宅沈下量

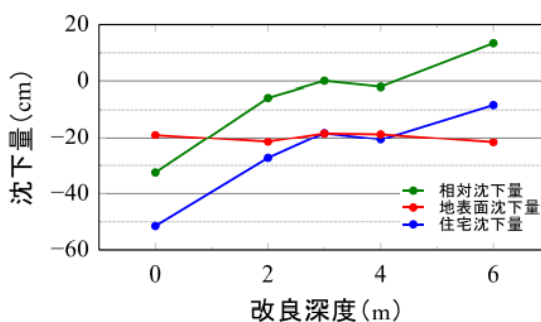


図-28 住宅・地表面・相対 沈下量

3.3. まとめ

実験結果より、既設住宅においても住宅外縁部に地盤改良を施すこと住宅沈下量を抑制できることが確認できた。またその沈下量、相対沈下量も改良深度に応じて減少させることができた。

現在、これらの現象を再現できるよう、3次元液状化解析ソフトおよびSPH法を用いた数値解析を継続している。住宅の許容沈下量を要求性能とした低価格で効率的な液状化対策工法の確立を目指したい。

謝辞

本研究は、戸田建設(株)および太洋基礎工業(株)との共同研究の成果をまとめたものである。また、本研究の一部は、令和元年度京都大学防災研究所一般共同研究「ナノ材料が市街地の地震時液状化被害を低減」の成果による。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) Kaga, M. and Yonekura, R.: Estimation of strength of silicate-grouted sand, *Soils and Foundations*, Vol. 31, No. 3, pp. 43-59, 1991.
- 2) Oka, F., Kodaka, T., Takyu, T., Yamasaki, N. and Ohno, Y.: Deformation and Strength Characteristics of Improved Sand by a Grouting Materials and its Application to Liquefaction Analysis of Man Made Island, *Proc. XIII ECSMGE, Prague, The Czech Republic*, Vol. 1, pp. 861-866, 2003.
- 3) Kodaka, T., Ohno, Y. and Takyu, T.: Cyclic shear characteristics of treated sand with colloidal silica grout, *Proc. 16ICSMGE*, pp. 401-404, 2005.
- 4) Gallagher, P. M. and Mitchell, J. K.: Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loose sand, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, Vol. 22, pp. 1017-1026, 2002.
- 5) Gallagher, P. M., Conlee, C. T. and Rollins, K. M.: Full-scale field testing of colloidal silica grouting for mitigation of liquefaction risk, *Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol. 133 (2), pp. 186-196, 2007.
- 6) Gallagher, P. M., Pamuk, A. and Abdoun, T.: Stabilization of liquefiable soils using colloidal silica grout, *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol.

- 19 (1), pp. 33-40, 2007.
- 7) Huang, Y. and Wen, Z. Q.: Recent developments of soil improvement methods for seismic liquefaction mitigation, *Nat. Hazards*, Vol. 76 (3), pp. 1927-1938, 2015.
 - 8) 公益社団法人地盤工学会 関東支部：薬液注入工法を用いた地盤改良技術の今後の展開に関する調査検討会 活動報告書(案), pp. 32-33, 2012.
 - 9) 公益社団法人地盤工学会：薬液注入工法の調査・設計から施工まで, pp. 9-12, 1985.
 - 10) 公益社団法人地盤工学会：薬液注入工法の調査・設計から施工まで, pp. 65-66, 1985.
 - 11) 公益社団法人地盤工学会：薬液注入工法の理論・設計・施工, pp. 56-57, 2009.
 - 12) 駒延勝広, 村田修, 大河内保彦：新しい薬液注入工法—信頼性が高くコスト縮減の図れる動的注入工法—, 日本鉄道施設協会誌, pp. 42-44, 1991.
 - 13) 本谷洋二, 野口好夫, 石田明人, 岡田宙, 森河由紀弘：超音波振動が浸透性向上に寄与する新しい薬液注入工法の開発, 公益社団法人日本材料学会, 第 13 回地盤改良シンポジウム, pp. 343-348, 2018.
 - 14) Hayashi, K. and Kusumoto, S.: A method to countermeasure the liquefaction beneath the existing structures permeable grouting method, *WAVE Nippon*, Vol.16, pp. 12-15, 2002.
 - 15) 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.
 - 16) 米倉亮三, 小林精二：事例に見る地盤の液状化対策—被害を防止・修復する工法—, pp. 175-176, 近代科学社, 2013.
 - 17) 佐藤潤：液状化対策工法エクスバッカ-N 工法と管理システム「スリーP オクト」の開発, 平成 25 年度建設技術報告会講演集, pp. 17-19, 北陸地方建設事業推進協議会, 2013.
 - 18) Ohno, Y., Ito, T., Mizushima, T., Kato, Y., Shimosaka, K., Akatsuka, M., Yashima, A., Murata, Y., Kariya, K. and Hanada, Y.: Development of new chemical grouting method with high injection efficiency and quality, *Proc. 29th International Ocean and Polar Engineering Conference, Honolulu*, pp. 2394-2401, 2019.
 - 19) 増田房義, 田中健二：新素材シリーズ 7 高吸水性ポリマーとその利用, 日本家政学会誌, Vol. 40, No. 8, pp. 721-724, 1989.
 - 20) 浅野均, 下坂賢二, 赤木寛一, 近藤義正：高吸水性ポリマー材を利用した地盤掘削安定液の基本性状と場所打ち杭工法への適用, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol. 73, No. 2, pp. 71-87, 2017.
 - 21) 増田房義：高吸水性ポリマー／高分子学会編集, pp. 21-23, 共立出版, 1987.