

薬液注入による液状化防止工法に関する研究 — シリカ系溶液型薬液の開発 —

林 健太郎
* 村松 伴博

要 旨

1995年の兵庫県南部地震の被害によって、これまでの耐震基準が見直されようとしており、古い基準で建設された多くの構造物の耐震性が再検討されている。しかしながら、耐震性に問題があると判定された構造物の直下の地盤の耐震性を強化することは、現状では非常に困難である。これらの点を解決するために技術研究所では、薬液注入による既設構造物の直下の地盤改良工法の開発を行っており、これまでの研究でシリカ系の溶液型薬液が有効であることがわかった。本文ではこれまでの実験結果をまとめ、薬液注入による地盤改良の有効性について検討している。

1. はじめに

薬液注入工法は、一般的な工法であり、使用実績も多いが、使用の用途としては高強度で、仮設的かつ局所的なものが多い。また、他の地盤改良工法に比べ比較的高価である。これに対して、液状化対策に使用するためには、改良強度は低強度で良いが、一方で広範囲な施工や恒久的な改良強度が必要となる。また、既設構造物の直下へ適用するためには、既存の薬液注入工法に比べ高い浸透性が必要となる。このため、従来の薬液注入工法をそのまま適用することは困難であり、上記の条件に適應する新しい薬液や施工方法の開発が必要である。また、液状化対策を行う場合には、広範囲な改良が必要となるため、経済的な施工方法であることが望まれる。施工イメージ図を図-1に示す。

上記の点を考慮し、液状化防止を目的とした薬液を選定するにあたり、以下のような条件を設定した。

1. 液状化強度： $q_u=50\sim 100\text{kPa}$ 程度
2. 浸透能力：浸透距離4m以上

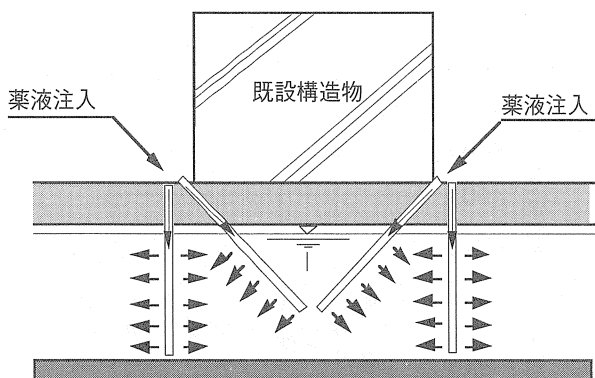


図-1 薬液注入による構造物直下の地盤改良工法
施工イメージ図

3. 安全性：注入薬液として法的にも安全であること
4. 耐久性：50年以上

これまで数種類の薬液に関して実験を行った結果、非アルカリシリカを用いた薬液注入工法が有効であることが分かった。本文では、非アルカリシリカの配合特性や動的特性、浸透特性に関する検討を行っている。

2. 非アルカリシリカの基本特性

2.1 非アルカリシリカの固化原理

薬液注入で使用される薬液については“薬液注入工法による建設工事の施工に関する暫定指針”で限定されており、これらの薬液を硬化剤の種類によって分類すると、図-2のように表される。同図よりわかるように非アルカリシリカは、無機系の溶液型の注入固化剤に分類され、懸濁型に比べ浸透性が良く、また、他の溶液型に比べ耐久性があり、比較的安価であることを特徴としている。

一般に溶液型の薬液は、二酸化ケイ素溶液（アルカリ性溶液）と酸または酸性塩（酸性溶液）を混合することにより固化する特徴を利用している。通常の溶液型の薬液では、混合から固化までの時間（ゲル化時間）を長く

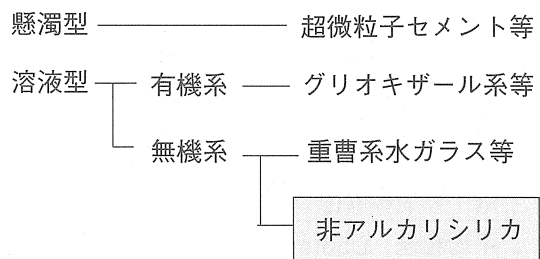


図-2 硬化剤による薬液の分類と特徴

* 中国支店

するために二酸化ケイ素に対する硬化剤の量を少なくしている。このため、未反応の二酸化ケイ素がゲル内に残留し、長期的に溶脱し改良体の強度低下を引き起こす。非アルカリシリカは、酸性溶液過多の状態で固結させることにより、劣化の原因となる未反応の二酸化ケイ素をなくし、耐久性を高めている。

2. 2 固化時間に関する検討

養生時の温度と非アルカリシリカ溶液の固化時間の関係を明らかにするために、溶液と養生時の温度を20℃と40℃にした場合のホモゲルの固化時間を測定した。実験結果を図-3に示す。非アルカリシリカの固化時間は養生温度に大きく影響を受けることがわかる。

ただし、土にはpHの緩和作用があり、地盤への注入後は薬液のpHが徐々に増加するため、図-3のpH~固化時間関係をそのまま適用することはできない。土の緩和作用は細粒分の多い土ほど顕著であり、固化時間は図-3に比べ速くなる。このため、実施時には現地土を使用した固化時間に関する実験が必要である。

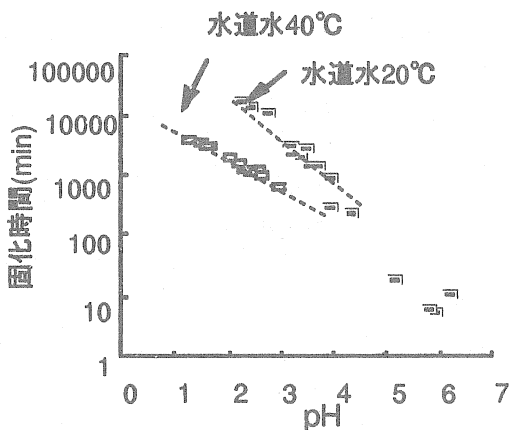


図-3 pH~固化時間の関係

2. 3 配合強度特性

薬液の二酸化ケイ素 (SiO₂) 濃度やpHと改良体の強度の関係をみるために、モールド毎に所定量の砂と薬液を攪拌して改良体を作成した。SiO₂と反応させる酸性化剤には硫酸を使用した。また、実験には新潟砂を使用した。新潟砂の物理特性を表-1に示す。

表-1 新潟砂の物理特性一覧表

土粒子の密度 ρ_s	2.644
最大乾燥密度(g/cm ³)	1.545
最小乾燥密度(g/cm ³)	1.184
平均粒径 D50(mm)	0.31
均等係数 U _c	2.33
細粒分 FC (%)	1.5

非アルカリシリカ薬液の固化時間は、薬液のpHによって変化する。pHの変化が固化強度に与える影響を見るために、pHを変化させた場合の改良体の一軸圧縮試験を行った。試験結果を図-4に示す。これらの実験により以下の所見が得られた。

- (1)pH=1.5の供試体では他のpHに比べ、110日後の強度は3割程度小さくなった。このことから、pHを大きくして注入する方が強度は大きくなることがわかった。
- (2)pH=3.5の供試体では試料の作成直後にゲル化が終了した。このことから試料作成中にゲル化が進行していたため、他のケースに比べ強度が低下したと考えられる。
- (3)pHの違いは初期の強度発現に大きく影響し、pHが低い薬液ほど初期の強度が小さくなることがわかった。

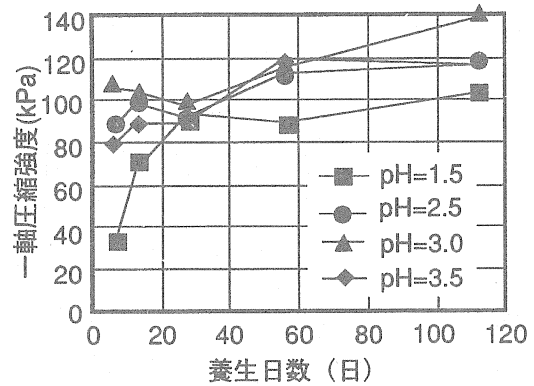


図-4 薬液のpHと一軸圧縮強度の関係

薬液中のSiO₂の濃度と改良体の一軸圧縮強度の関係を調べたものを図-5に示す。改良体の強度はSiO₂の濃度によって大きく変化する。液状化防止に必要な改良強度を100kPa程度とするならば、注入時に必要な二酸化ケイ素の濃度は4%~6%程度であることがわかる。なお、薬液中の二酸化ケイ素の濃度は以下の式で算定している。

$$\text{二酸化ケイ素濃度} = (\text{薬液中の水ガラス濃度}) \times (\text{水ガラスのSiO}_2\text{含有率} = 28.65\%)$$

これまでの実験では、酸性剤として硫酸を使用してい

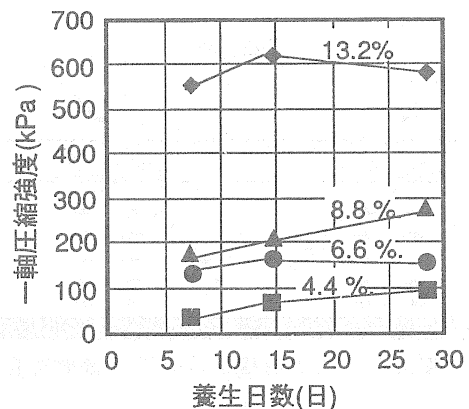


図-5 二酸化ケイ素濃度と一軸圧縮強度の関係

るため、薬液作成時に発熱等の危険性を伴う作業が必要であった。このため、硫酸の代りに危険性の少ない酸性剤として硫酸塩 (As) を使用した場合の配合実験を行った。硫酸塩自体は白い粉体であるため、水に溶解して使用する。硫酸塩の溶液は、硫酸溶液に比べて発熱などの危険性が少なくハンドリングが容易であるため、作業時の安全性は高い。

酸化材として硫酸を用いた場合と硫酸塩を用いた場合のSiO₂濃度と28日養生の一軸強度の関係を図-6に示す。同図より、硫酸を用いたものに比べ若干強度は低くなるものの、SiO₂の濃度を調整することにより、ほぼ同程度の強度にすることが可能である。

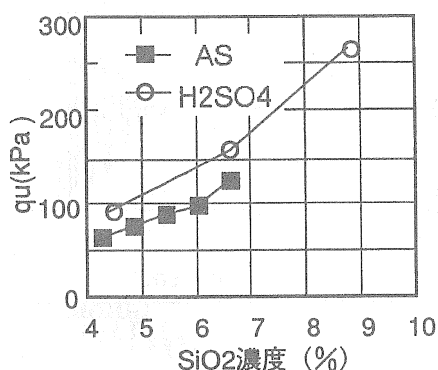


図-6 酸化剤の種類と一軸圧縮強度の関係 (28日)

2. 4 改良体の変形特性

非アルカリシリカによる改良体の変形特性の大きな特徴の一つはセメント系などの改良体に比べ改良後の剛性が低いことが挙げられる。図-7にセメント系の低強度改良体と非アルカリシリカ改良体の一軸圧縮試験時の代表的な応力~歪み関係を示す。同図からわかるように、セメント系改良体が1%以下で圧縮応力のピークに達しているのに比べ、非アルカリシリカではピーク時の歪み量は2.2%と大きくなっている。また、弾性係数E50は、

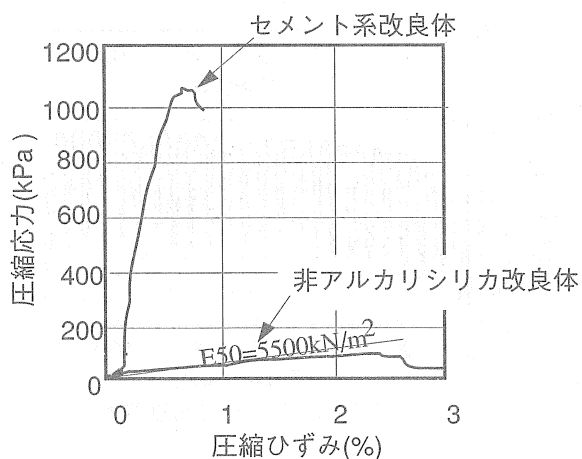


図-7 改良体の応力歪み曲線

5,500kN/m²程度とセメント系の改良体の数百分の一である。このため、セメント系の地盤改良で見られる剛性の違いによる改良部への応力の集中などの現象は生じないと考えられる。

2. 5 改良体の長期強度特性について

米倉らは薬液の安定性を検討するために、各種固化剤のホモゲルからのSiO₂の溶脱量を長期的に測定している。非アルカリシリカに関しては1,000日程度の養生実験が行われており、実験によると長期的な強度の増加はなかったものの、安定した強度を保つことが認められている。

三輪やりが行った非アルカリシリカの改良体は一軸圧縮強度が400kPa程度と大きく、液状化対策を目的とした場合、必要な改良体の一軸圧縮強度は50~100kPa程度である。これらの低強度の改良体の長期耐久性を検討するために、長期養生実験を行った。

この実験では、図-8に示す直径5cm長さ60cmの塩化ビニール管に新潟砂を充填し、下部より非アルカリシリカを注入して供試体を作成した。作成した供試体は、固結後注入装置を取り外し、塩化ビニール管ごと長さ60cmの状態水中で養生した。このため、両端部は水と常に接しており、劣化を受けやすい状態になっており、反対に中心部は劣化を受けにくい密封養生状態になっている。

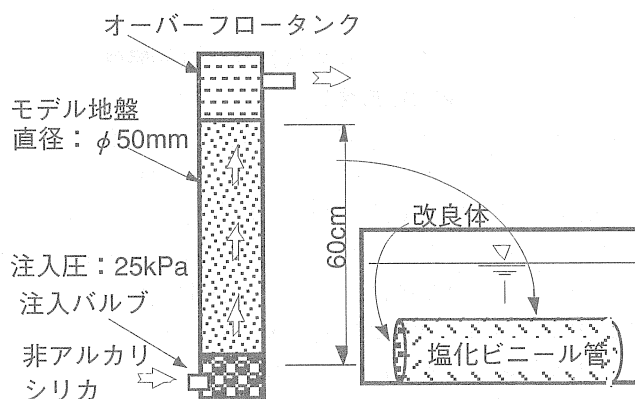


図-8 供試体の作成方法について

なお、温水養生による促進効果を見るために、水温20度と40度の場合の2つの条件で実験を行った。430日後の供試体内の一軸圧縮強度の分布を図-9に示す。同図より、水と接触している両端の改良体には強度の増加は見られないが、強度の低下も認められず、安定した状態にあることが伺える。このことは、米倉等が行った長期水中養生した改良体の一軸圧縮強度試験の結果と同様な傾向を示している。また、密封状態にある管の中央部では、徐々に一軸強度は増加し、20度養生の7日後と430日後とで比較すると2倍程度の強度の伸びが認められる。

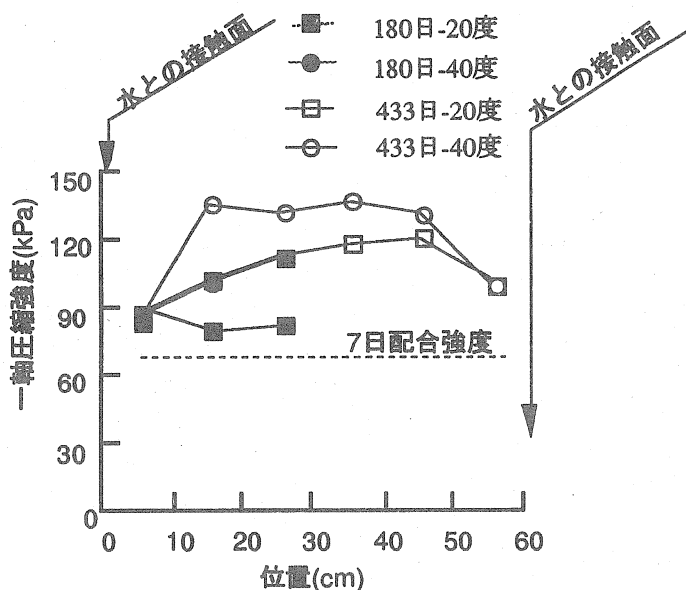


図-9 低強度非アルカリシリカの長期養生実験

また、40度養生では、高温養生による促進効果が認められ、433日後で比較すると20度養生に比べ1.2倍程度の強度の伸びとなり、密封状態ではさらに長期的に強度が増加する傾向を示している。

以上のことから、低強度の非アルカリシリカ改良体も、高強度のものと同じように長期的に強度が安定していると考えられる。

2.6 非アルカリシリカ改良体の動的特性について

2.6.1 液状化強度比

非アルカリシリカ改良体の繰り返し三軸試験結果を図-10に示す。供試体はいずれのケースも $Dr=50\%$ の新潟砂を用い、改良体の SiO_2 の濃度は3%、養生日数28日~56日で試験を行っている。試験を行った改良体の28日養生時の一軸圧縮強度は97kPaであった。試験結果によると、改良体の繰り返し強度比 RI_{20} ($N=20, \epsilon=5\%$)は0.32であり、未改良砂の0.14に比べ2.3倍ほど大きくなった。

図-11に未改良砂及び改良体の軸ひずみ、過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。未改良砂、改良体の応力比 τ_{max}'/σ_m' はそれぞれ0.15および0.30である。未改良砂では間隙水圧が0.7を超えると変位が大きくなり、数回の振動で破壊に至る液状化現象が認められる。これに比べ、改良体では間隙水圧比が1.0に近づいた後も、徐々に変形が進んで片振幅5%の破壊状態に至っているのがわかる。改良体では振幅が数%になっても急激な変位の増加は認められないことから、未改良砂の液状化の様な破壊現象は生じないと考えられる。

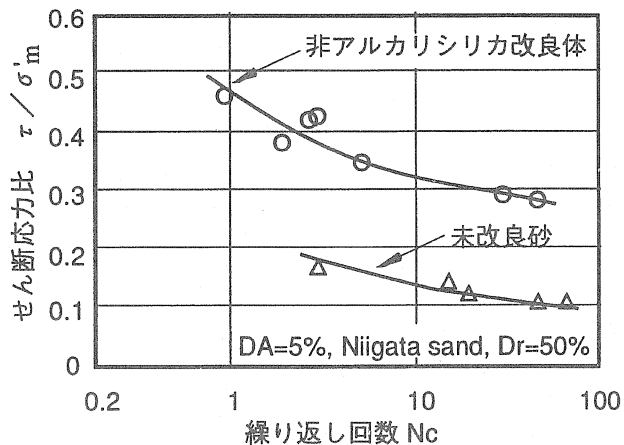


図-10 繰り返し強度実験 (5%歪み)

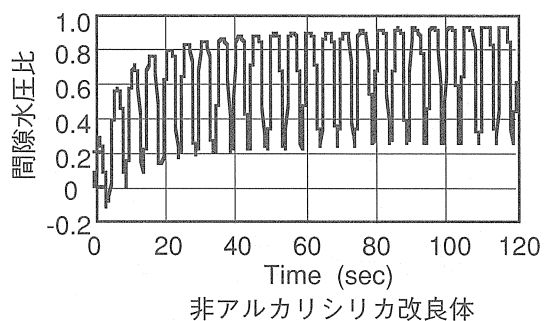
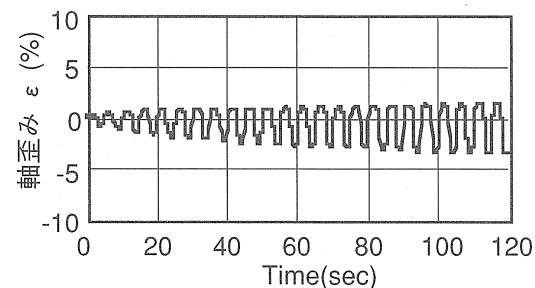
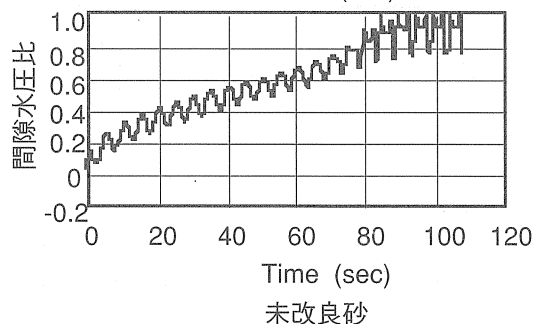
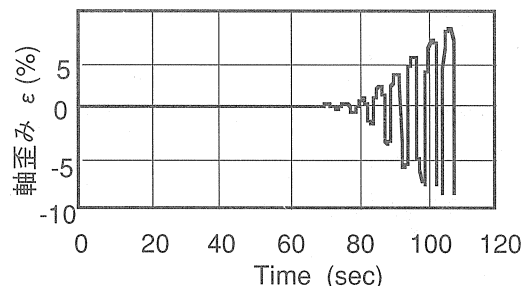
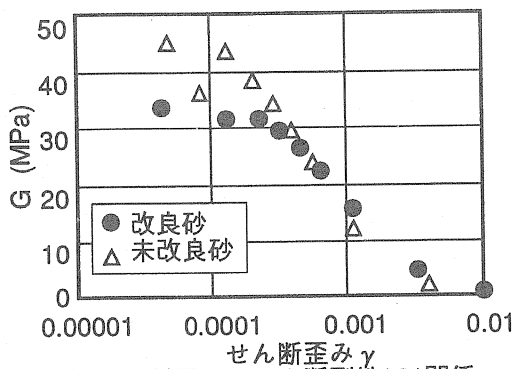


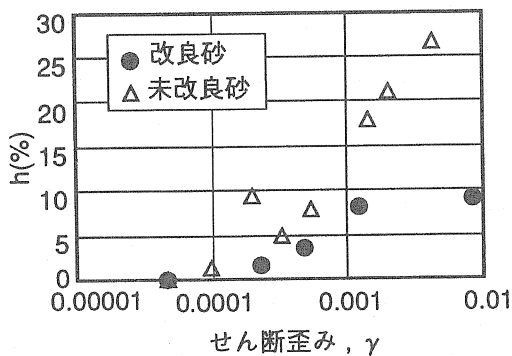
図-11 軸ひずみ、過剰間隙水圧比の時刻歴

2. 6. 2 動的変形特性

非アルカリシリカによる改良体の繰り返し変形特性について実験を行った。側圧 $\sigma_3=50\text{kPa}$ の時の剛性 G と減衰定数 h の関係を図-12に示す。同図より、改良体でも未改良砂と同様に歪みの進行に伴い、剛性が低下し、減衰が大きくなっているのがわかる。また、改良体の剛性 G は、初期剛性 G_0 、歪み依存性曲線ともに未改良の砂と同様であったが、減衰定数 h の最大値(h_{max})は、未改良砂の約1/2程度と小さくなった。このため、剛性が等しく、減衰が小さいことから、改良範囲内の地盤に発生するせん断力は、未改良の砂地盤よりも大きくなると考えられる。



(a) せん断歪み～せん断剛性(G)関係



(b) せん断歪み～減衰定数(h)関係

図-12 改良体の動的変形特性

3. 非アルカリシリカ溶液の浸透特性

液状化対策などのように広範囲な改良を行うためには、打設ピッチを大きくすることにより、削孔本数を減じ、施工コストを低下させる必要がある。これを満足するためには地盤に対して十分な浸透性を持ち、また、固化に至るまでに十分なゲルタイムを持つことが薬液に求められる。ここでは、一次元地盤や三次元地盤に対する浸透実験を行い、非アルカリシリカの浸透性状に関する実験を行っている。

3. 1 一次元モデル地盤への浸透特性

3. 1. 1 実験内容

非アルカリシリカの浸透特性を検討するために図-1

3に示す長さ5mの一次元モデル地盤を用いて薬液の注入実験を行った。モデル地盤は、直径8.5cmの塩ビ管に高さ30cm毎に所定量の砂を充填しながら高さ5mまで組み立てた後、CO₂を1 l/minの割合で90分間通じてから、水を下部から注入して飽和させて作成した。注入実験は使用する薬液の濃度を調整して2つのケースについて行った。また、懸濁型の薬液の例として超微粒子セメントを用いた実験結果も追加している。各ケースの実験条件を表-2に示す。

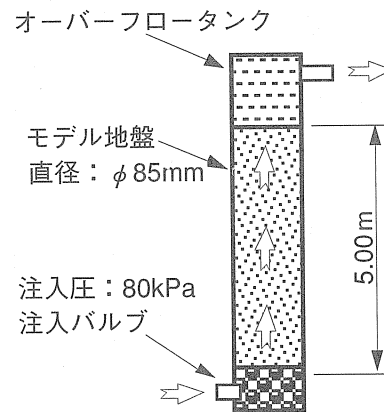


図-13 一次元注入実験装置

表-2 一次元注入実験 実験ケース一覧表

ケース	1	2	3
薬液の種類	非アルカリシリカ	非アルカリシリカ	超微粒子セメント
薬液の濃度	SiO ₂ =5%	SiO ₂ =4.4% ~6.6%	W/C=500%
透水係数 cm/sec	0.04	0.04	0.04
相対密度(%)	55	55	50
細粒分(%)	2	2	2

3. 1. 2 実験結果

各ケースの14日養生後の注入孔からの距離と一軸圧縮強度の関係を図-14に示す。ケース3の超微粒子セメントは水セメント比500%で注入しており、この溶液を使用した配合試験では7日後の一軸圧縮強度で250kPa程度であった。図-14よりわかるように非アルカリシリカを使用したケース1および2がモデル地盤全長の5mまで浸透しているのに対し、ケース3の超微粒子セメントは注入孔より1.6m程度しか浸透しなかった。

超微粒子セメントを使用したケース3の一軸圧縮強度の分布をみると、浸透範囲の中央部で配合強度:250kPaに比べ10倍以上大きくなり、全体的に不均一な分布となった。これより、超微粒子セメントなどの懸濁型の薬液を砂地盤へ注入する場合、漉過現象のようにモデル地

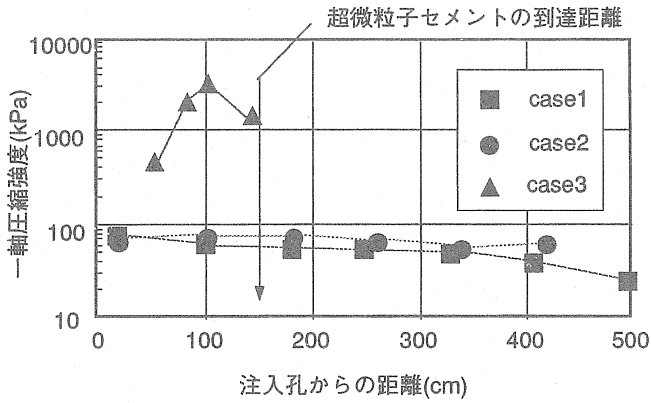


図-1 4 一軸圧縮強度の分布 (全ケース、14日後)

盤に蓄積されているため均一な改良は困難であることがわかる。

非アルカリシリカの濃度を均一にして地盤に注入したケース1の一軸圧縮強度分布を図-15に示す。同図より、非アルカリシリカは5mのモデル地盤の注入孔から端部まで到達しているのが分かる。しかしながら、強度分布に関しては均一とはならず、注入口付近では $qu=90\text{kPa}$ 程度の強度が得られたが、浸透延長が延びるにしたがって強度の低下が見られ、浸透延長5m地点では $qu=20\text{kPa}$ 程度まで低下している。

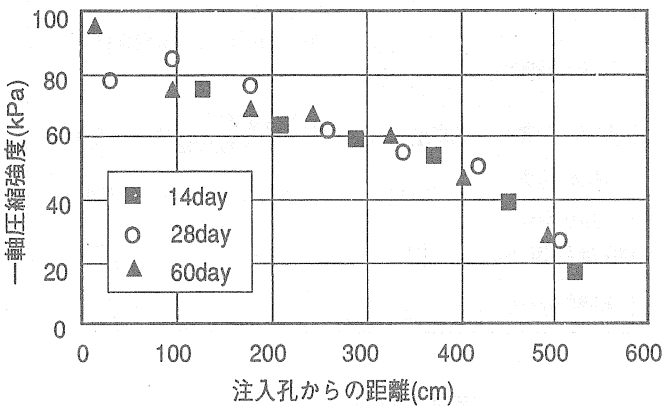


図-1 5 一軸圧縮強度の分布 (ケース1)

浸透距離に伴う強度低下の原因として、先端部の薬液が地盤内の間隙水によって希釈されたことが推察されたため、ケース2では、改良案としてまず全量の30%の薬液を SiO_2 濃度6.6% (1.5倍)と高濃度にして注入し、引き続いて残りの70%を元の4.4%に戻して注入するという方法を試みた。ケース2の一軸圧縮強度の分布を図-16に示す。同図より明らかなように、注入後60日で5mの注入範囲の全域においてほぼ均等に一軸圧縮強度は 80kPa 程度に改良することができた。

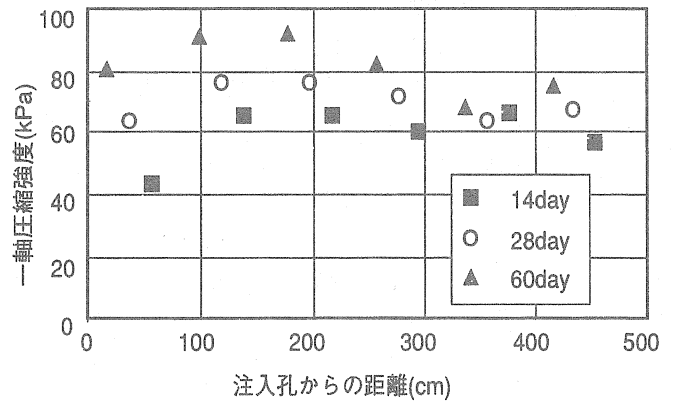


図-1 6 一軸圧縮強度の分布 (ケース2)

上記の点から、非アルカリシリカは砂地盤に対して十分な浸透性を有していることがわかった。ただし、溶液型の薬液の特性として浸透距離によって薬液の希釈率が増加するため、浸透距離を大きくした場合、注入時の濃度を調整する必要がある。

3. 2 三次元モデル地盤への浸透実験

3. 2. 1 実験内容

三次元地盤への浸透特性を検討するために、非アルカリシリカと同じシリカ系溶液グラウトの一種である超微粒子シリカを用いた大型土層注入実験を行い、溶液型薬液の浸透特性について検討を行った。注入実験に使用した土層を図-17に示す。実験土層の大きさは $B \times L \times H = 3.0\text{m} \times 3.0\text{m} \times 1.5\text{m}$ であり、地盤容積は 13.5m^3 である。模型地盤は、新潟砂を 0.5m^3 毎に水中落下により堆積させた後、振動棒により締め固めて作成した。試料重量より計算した地盤の平均相対密度 Dr は77%であった。 $Dr:75\%$ 時の新潟砂の透水係数は 0.033cm/sec である。

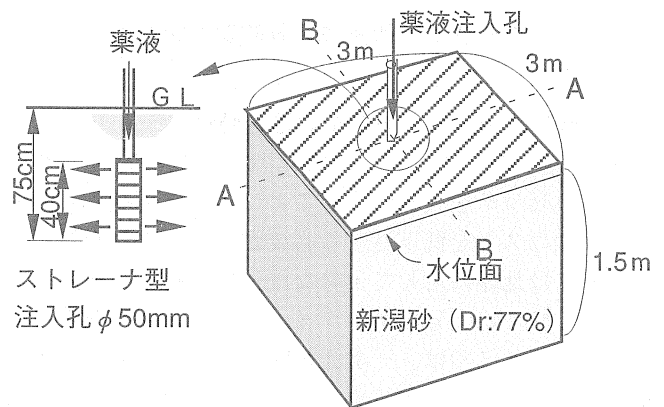


図-1 7 注入装置および大型土層

3. 2. 2 実験結果

模型地盤への薬液の注入は、図-17に示すように直径5cm,長さ40cmの円筒状のストレーナー管を使用して模型地盤中央より行った。注入を行った薬液および注入時の諸元を表-3に示す。

注入開始後の時間～注入量の関係を図-18に示す。構造物直下での施工を念頭におき、注入圧力は比較的小さく、75kPaに設定したが、同図よりわかるように、実験当初は約10 l/min程度の比較的高速な注入ができた。しかしながら、注入開始後約3時間で地表面からの薬液の漏水が認められたため、注入速度を3～5 l/minまで絞って注入を行った。注入開始後11時間後に予定注入量の3,150 lを注入し実験を終了した。

実験終了後、28日間養生し、実験土層の解体を行った。土層解体後、ジェット噴流水を地盤に噴射して改良体の形状を明らかにしたところ、直径2.6m高さ1.4mの円筒状であることがわかった。

表-3 薬液の諸元

シリカ濃度	10%
溶液のpH	8.8
ゲルタイム	7日
配合一軸強度	100kPa
注入圧力	75kPa
注入速度	3～10 /min
総注入量	3,152

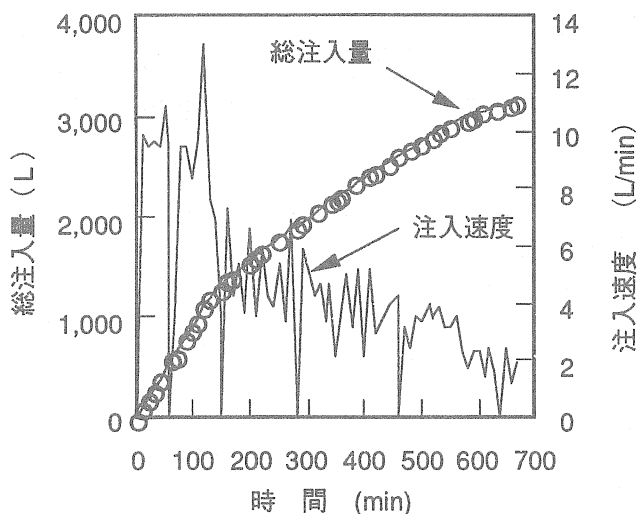


図-18 時間～注入量関係

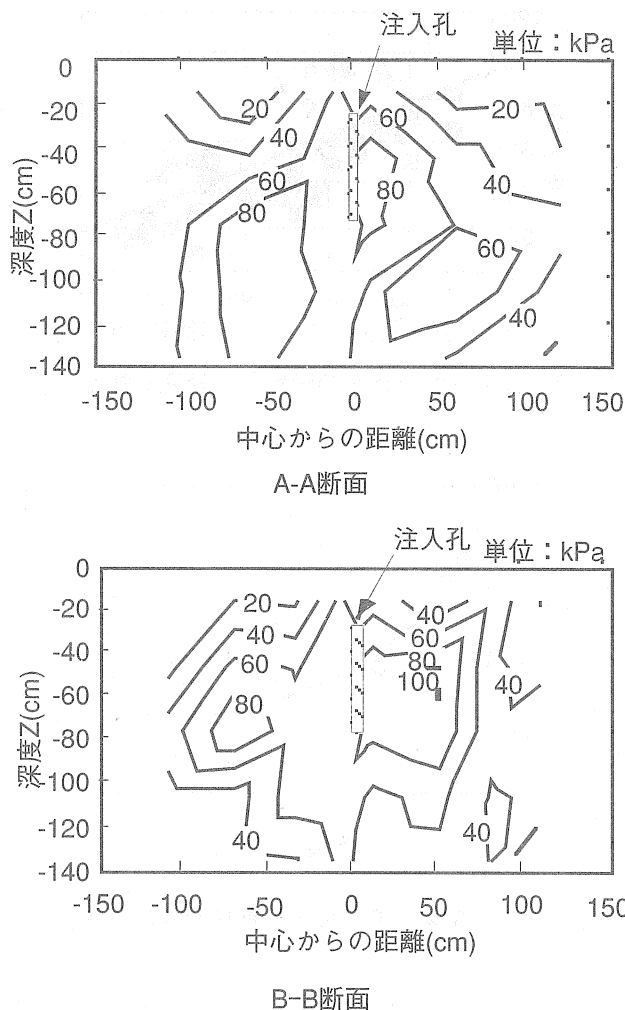


図-19 注入孔からの距離と一軸圧縮強度の関係

改良体の中心を通る2断面について61点のブロックサンプリングを行い、一軸圧縮試験を行った。一軸圧縮強度分布の測定結果を図-19に示す。同図よりわかるように、サンプリング試料の強度のばらつきは大きかった。この原因として、振動棒で地盤を締め固めたため、地盤の密度に局所的なばらつきが生じたことが考えられる。

しかしながら、全体的には、注入孔の近傍では強度は80kPa程度と配合試験の一軸圧縮強度に近く、注入孔から離れるに従い、強度が次第に低下する傾向が伺える。図-20に注入孔からの距離と一軸圧縮強度の関係をまとめている。ばらつきがあるものの薬液の浸透距離が大きくなるに従い強度が低下しているのが分かる。これらの強度低下の原因としては、浸透時の水による薬液の希釈が考えられる。

このため、実験に使用した薬液を加水して希釈を行った場合の配合試験を行った。希釈率は原液の重量に対する加水量の比で表している。改良体の強度と希釈率の関係を図-21に示す。

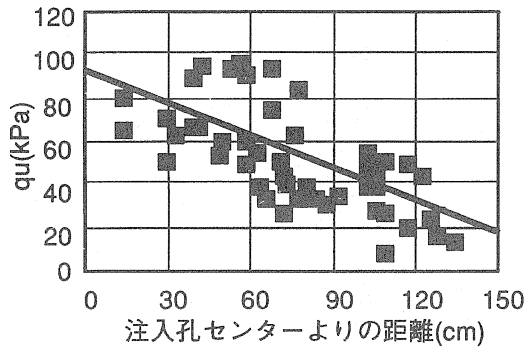


図-2 0 注入孔中心からの距離と一軸圧縮強度の関係

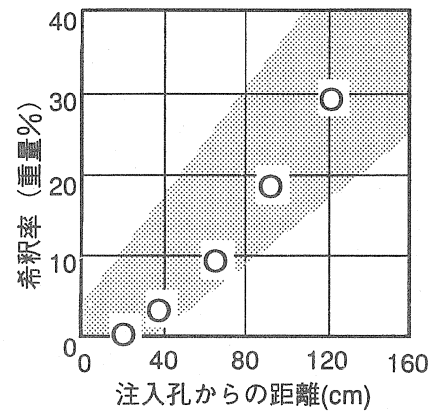


図-2 2 注入距離と希釈率の関係

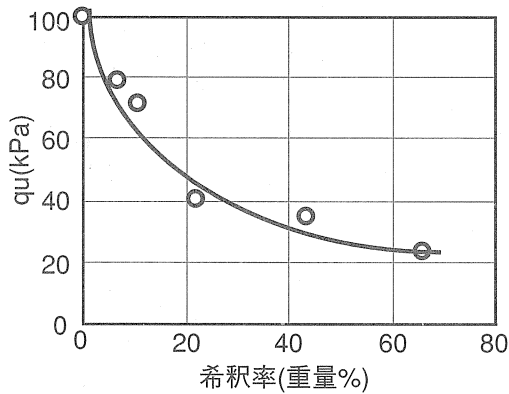


図-2 1 薬液の希釈率と一軸圧縮強度の関係

一般的に使用される薬液注入工事では、浸透距離は50～60cm程度であるが、同図よりこの範囲では希釈率は5%程度であるため、強度の低下の影響は小さいことがわかる。一方、浸透距離が1mを越えると20～30%程度の希釈を受けるため強度低下率が大きくなることがわかった。このため、溶液型の薬液を使用して、注入孔の削孔ピッチを2m以上大きくするためには、これらの点を改善しなければ、均一な地盤強度の改良は困難であることがわかる。

上記の実験では、直径2.6m、高さ1.4mの改良体を作成できた。ただし、一次元注入実験の結果と同様に浸透距離が大きくなると希釈による強度低下が生じることがわかった。浸透距離を大きくして均一な改良体を形成するためには、浸透距離に比例して薬液の濃度を調整する必要があると考える。今回の大型土層注入実験と希釈配合実験の結果から予想される、浸透距離と希釈率の関係を図-2 1 に示す。大型土層実験の一軸圧縮強度分布にはばらつきが大きいいため、浸透距離と希釈率との間にも一定の範囲を設定している。溶液中のシリカの濃度が同程度であれば、図-2 2 を用いることにより、施工時に必要な浸透距離から、その位置での希釈率を予測することが可能である。

4. 結論

これまでの実験から液状化抑止を目的とした非アルカリシリカによる薬液注入工法に関して以下のことがわかった。

(1) シリカ濃度3～5%の非アルカリシリカを注入した改良体は、液状化による破壊現象を生じないことから、同溶液を使用する薬液注入工法は液状化抑止に十分な効果を持つ。

(2) シリカ濃度3～5%の非アルカリシリカを注入した改良体の長期養生試験結果から、水中に養生した改良体は安定した強度を保ち、品質の劣化は少ない。

(3) 溶液型の薬液を使用して、浸透距離が1mを越えるような注入を行った場合、薬液は浸透距離に伴い、希釈を受ける。このため、注入時に図-2 2 等により希釈を見込んだ配合の薬液を注入することで、経済的に均一地盤強度の増加を行うことができる。

参考文献

1) 三輪 求, 米倉 亮三: 水ガラス系グラウト材の基本特性について, 土質工学会論文報告集, Vol34, No.3, 113-121, Sept. 1994