

## 薬液注入による液状化防止工法に関する研究

藤原 敏光  
林 健太郎

### 要旨

薬液注入による地盤改良工法は、土木分野では一般に使用される工法である。しかしながら、液状化の防止を目的とした地盤改良を想定した場合、必要とする強度は比較的小さく、広い範囲の浸透能力が必要なため、従来の注入工法の延長では対応ができないのが現状である。本文では、液状化の防止工法という観点から、4種類の恒久型の固化剤を用いて比較的低強度の改良体を作成し、浸透性状や強度特性に関する実験を行った。この結果、超微粒子シリカによる改良体は、強度、浸透能力の点から、液状化防止に適した固化剤であることがわかった。

### 1. まえがき

1964年の新潟地震以降、砂地盤の液状化現象については、数多くの研究がなされている。現状では、液状化のメカニズムもほぼ解明され、液状化の恐れのある地盤では液状化防止に関する各種の工法が実施されている。しかしながら、液状化対策工法が用いられ始めたのは、昭和34年以降であるため、それ以前に構築された構造物においては液状化に関する対策工法は用いられておらず、近年の地震による被害を考えた場合、液状化現象に関する対策工法は既設の構造物に対しても必要であると考えられる。

新規の地盤に関する液状化防止工法には各種の方法が提案されているが、既設構造物の直下に限れば、有効な手法は開発されていない。既設構造物を撤去せずにその直下を改良する場合、方法としては図-1に示すような薬液の注入による改良方法が最も有効である。しかしながら、液状化の防止を目的とした地盤改良を想定した場合、従来の注入工法に比べ、必要強度は比較的小さく、広い範囲の浸透能力が必要となる。このため、従来の局所的な高強度の注入法では、そのまま使用することはで

きない。これらの点に留意し、本文では液状化防止という観点から、4種類の固化剤を用いて比較的低強度の改良体を作成し浸透特性や液状化強度特性に関する実験を行い、液状化防止工法に用いる注入剤としての可能性を検討した。

液状化防止を目的とした固化剤を選定するにあたり、以下のようないくつかの条件を設定した。

1. 液状化強度 :  $qu=1.0\text{kgf/cm}^2$ 程度
2. 浸透能力 : 浸透距離4m以上
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

### 2. 固化剤の性状試験

#### 2.1 検討固化剤

検討を行った固化材は、以下の4つである。

- アクリル酸系接着剤(タイル下地処理剤)
- エチレン酢酸系接着剤(モルタル増強剤)
- 超微粒子セメント
- 超微粒子シリカ

上記の固化剤のうち、超微粒子シリカを除く三つの固化剤はいずれも市販のものであり、建設材料として比較的古くから使用されている。このため、これらの材料については、上記選定ポイントの安全性と耐久性に関しては、問題ないと考える。

超微粒子シリカは、従来の水ガラス系の固化剤の欠点であるナトリウムイオンの溶脱による強度低下を改善するために、水ガラス系の固化剤からナトリウム分を排し、シリカ成分だけを抽出したものである。このため、

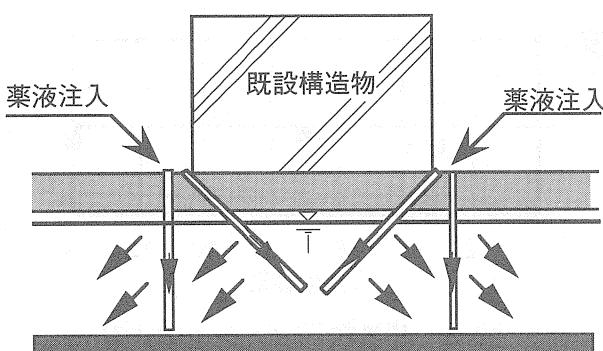


図-1 既設構造物直下の地盤改良

材料的には水ガラス系と同じ二液型の固化剤でありながら、長期的に強度低下が生じない事が確認されている<sup>1)</sup>。これらのことから、超微粒子シリカについても耐久性と安全性は問題はないものと考える。

また、懸濁液型の超微粒子セメントを除いて、他の3つは溶液型の固化剤である。

## 2.2 検討内容

今回は一軸圧縮試験により、改良体の基本的な強度特性を確認した後、長さ4mの一次元モデル地盤を作成し、浸透特性に関する試験を行った。さらに、超微粒子シリカに関して、繰り返し三軸試験を行い、改良体の液状化強度を測定した。実験に使用した浅間山砂の基本特性を表-1に示す。

表-1 浅間山砂物理特性

比重	Gs	2.699
最大乾燥密度(gf/cm <sup>3</sup> )	1.703	
最小乾燥密度(gf/cm <sup>3</sup> )	1.388	
平均粒径 D50(mm)	0.36	
均等係数 Uc	1.80	
細粒分 FC (%)	2	

## 3. 実験結果

### 3.1 改良体の一軸強度に関する実験

供試体は、乾燥砂に対して空隙量に等しい固化剤を混和、攪拌した後、Dr=50%になるようにモールドに詰めて作成した。固化剤を用いた改良体の強度の目安として、約1kgf/cm<sup>2</sup>以上の一軸強度があれば、破壊時の形態が間隙水圧の上昇に伴う液状化ではなく、引張破壊となる事が善ら<sup>2)</sup>によって報告されている。すなわち、液状化対策を目的とした場合、1kgf/cm<sup>2</sup>程度の強度であれば十分であると考える。

アクリル酸系接着剤およびエチレン酢酸系接着剤による固化剤中の原液率と改良体の一軸強度quの関係を図-2に示す。これらの改良体は、いずれも原液率4.0%程度で目標の強度(qu=1.0 kgf/cm<sup>2</sup>)を超えたが、乾燥養生によって接着剤中の水分がなくなるないと固結しないことが判明した。このため、これらの固化剤に関しては液状化防止を目的とした注入には不適当であることがわかったため、以降の実験は行わなかった。

超微粒子セメントと超微粒子シリカによる改良体の養生日数と一軸強度の関係を図-3に示す。超微粒子セメントは3日養生後qu=1.0 kgf/cm<sup>2</sup>を超え、14日後には約3.5kgf/cm<sup>2</sup>程度の強度となり、液状化対策工としては十分な強度を発生することがわかった。

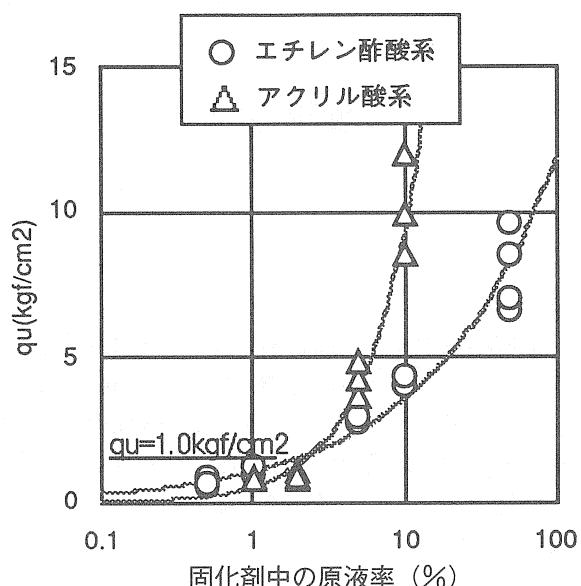


図-2 アクリル酸系接着剤およびエチレン酢酸系接着剤の一軸強度

超微粒子シリカは、注入剤の濃度を変えて供試体を作成したが、いずれのケースも3日後以降の強度的なのびはあまり見られず、quは注入剤に含まれるSiO<sub>2</sub>の濃度に従い、SiO<sub>2</sub>=5%で0.3、SiO<sub>2</sub>=10%で0.8kgf/cm<sup>2</sup>程度であった。超微粒子シリカはいずれのケースも水中で、拘束圧(0.1kgf/cm<sup>2</sup>)をかけて養生を行った。拘束圧をかけずに水中養生した場合には、供試体が膨潤し7日以降では強度の低下が見られた。実際の施工を考慮すると地盤中では拘束圧が作用しているため、膨潤による強度の低下は生じないものと考える。

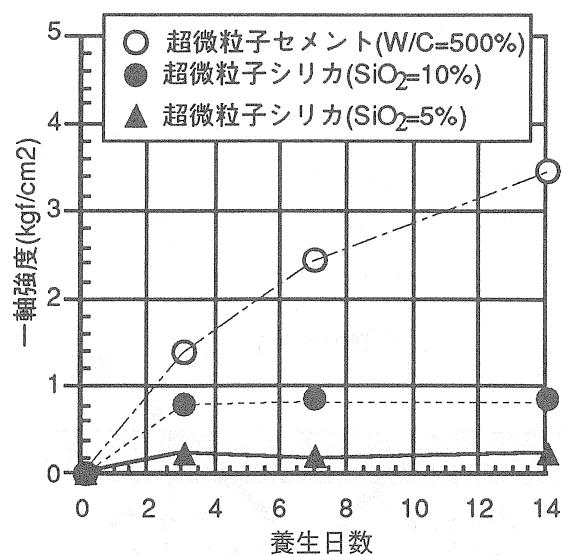


図-3 超微粒子セメントおよび超微粒子シリカの一軸強度

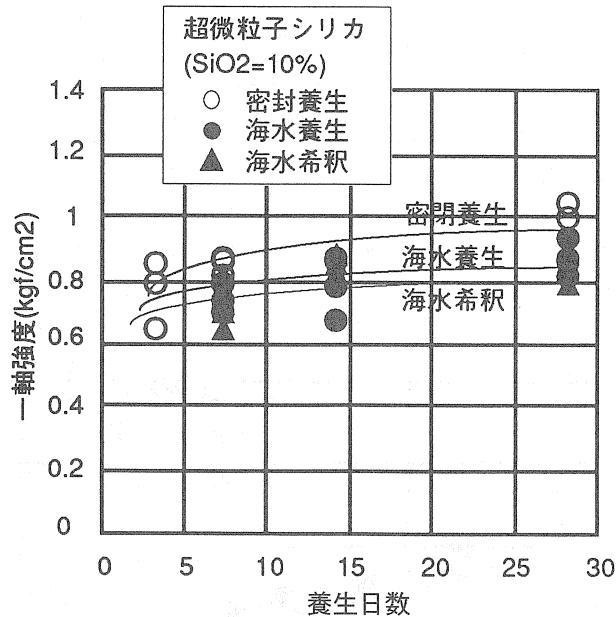


図-4 超微粒子シリカの一軸強度

液状化対策工では施工場所が沿岸部である可能性が高いため、養生時に海水に接する場合や固化剤の希釈水として海水を使用することが十分考えられる。また、超微粒子シリカでは、 $\text{Na}^+$ などの塩類が固化時の硬化剤として作用するため、海水中の塩類も固化時に影響を与えるものと考えられる。これらの影響を見るために、海水中で養生した改良体と、注入剤を海水で希釈した改良体を作成し、注入剤と真水で希釈して密封養生した改良体と比較を行った。これらの改良体の一軸強度を図-4に示す。いずれのケースも $\text{SiO}_2$ の濃度は10%と一定である。実験結果によると、海水養生と海水希釈で、それぞれ10, 15%程度、強度が低下する傾向が見られた。これらの強度の低下の原因として硬化剤となる塩類の過多が考えられるため、海水の影響等が考えられる場合には、塩類の量によって固化剤中の硬化剤の量を調整する必要があると考える。

また、超微粒子シリカの固化に要する時間（ゲルタイム）は、注入前の溶液のPHによって変化し、30秒から、およそ24時間までの調整が可能である。

### 3.2 改良体の浸透特性に関する実験

超微粒子セメントと超微粒子シリカによる改良体について、土質条件を変えて長さ4mの1次元浸透実験を行った。実験ケースの詳細を表-2に、実験装置を図-5に示す。実験に用いた地盤は、直径8.5cmの塩化ビニール管に高さ16cm毎に所定の量の砂を空中落下法により充填し、50cm毎に注水を行い、均一な相対密度になるように作成した。実際の施工では、一端ウェルアップにより土中の水を排水し、地盤を不飽和状態にすることにより、液状化抵抗と浸透性を高める方法を考えている。このため、モデル地盤についても高さ4mまで組立後、装置上部より空気圧をかけて強制的に土中水の排水を行い、飽和度5%程度の不飽和な地盤にして注入を行った。各固化剤は0.5kgf/cm²の注入圧で上部より注入した。

超微粒子セメントを用いたケース1～3の実験では、地盤の条件によって、浸透特性が大きく異なる結果となった。7日養生後の各深度の一軸圧縮強度の分布を図-6に示す。細粒分を含まないケース1は、透水係数の最も大きい地盤であるが、固化剤は4mまで到達した。細粒分を含む(2%)その他のケースでは固化剤は1～2m程度しか浸透しなかった。モデル地盤の強度の分布をみると、いずれのケースでも浸透範囲の中央部で一軸試験結果に比べ非常に大きくなり、全体的にかたよったものとなつた。これより、超微粒子セメントは滲過現象のようにモデル地盤に蓄積されていることがわかる。

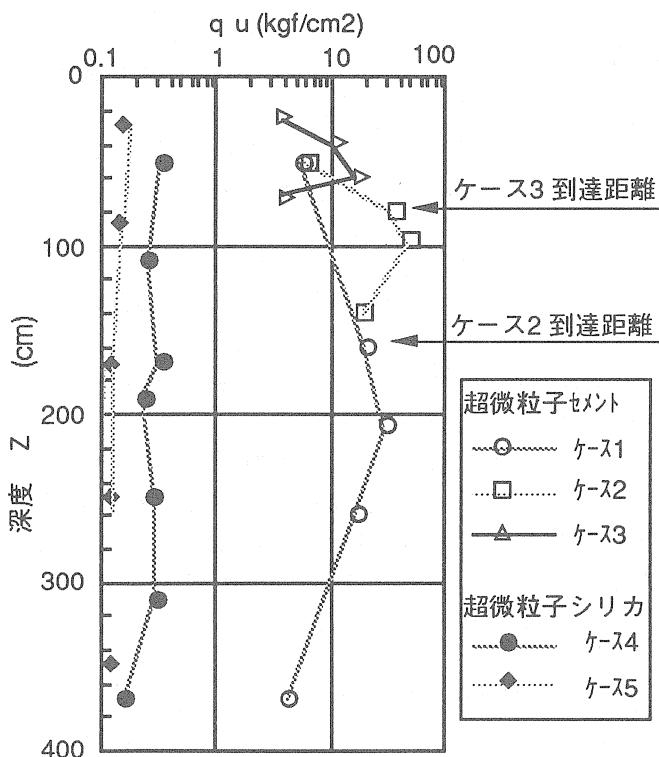
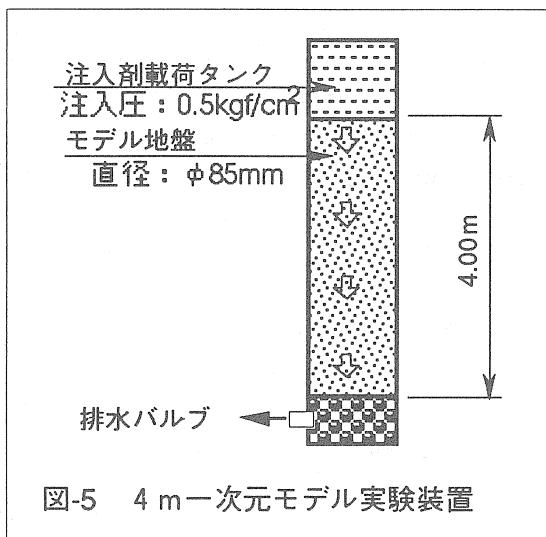
超微粒子シリカでは、いずれのケースも4mまで浸透し、強度分布もほぼ、均一なものとなっている。しかしながら、改良体の強度は一軸圧縮試験結果より小さく、固化剤の濃度によって0.1～0.3kgf/cm²程度であり、液状化対策を目的とした場合、若干低い強度であった。また、超微粒子シリカは溶液型の固化剤であるため、浸透速度は水に比べ50%程度であった。

### 3.3 液状化強度特性

超微粒子シリカについて4mの1次元浸透試験(ケース4)の改良体とモールドで密封養生して作成したものについて繰り返し三軸試験による液状化強度試験を行った。すべてのケースについて $\text{Dr}=50\%$ の状態で実験を行った。繰り返し応力比( $\tau'/\sigma_m'$ )と繰り返し回数(N)の関係を図-7に示す。モールドで作成した改良体では液状化強度

表-2 浸透実験ケース

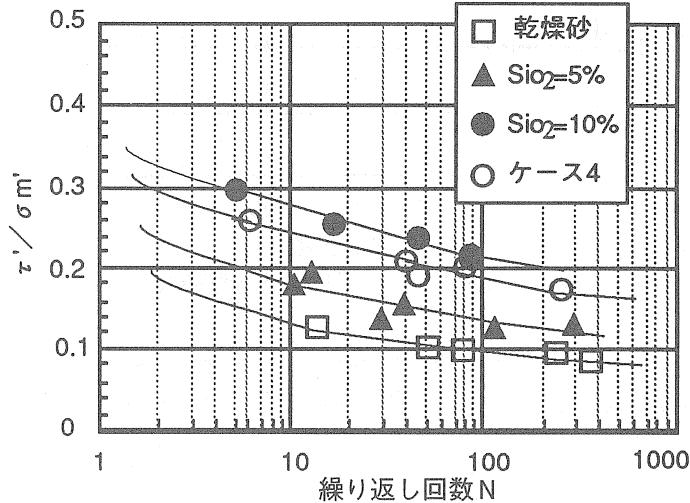
実験ケース	固化剤	固化剤濃度	k(cm/s)	Dr(%)	Fc(%)
1	超微粒子セメント	W/C:500%	0.06	50	0.00
2	~	~	0.04	50	2.00
3	~	~	0.02	90	2.00
4	超微粒子シリカ	$\text{SiO}_2: 10\%$	0.04	50	2.00
5	~	$\text{SiO}_2: 5\%$	0.04	50	2.00



比R<sub>1</sub>(N=20, ε=5%)で比較すると未改良の砂のR<sub>1</sub>=0.12と比べ、SiO<sub>2</sub>=5%の場合でR<sub>1</sub>=0.15、10%でR<sub>1</sub>=0.25程度まで改善されている。

一次元浸透実験のケース4で採取された改良体についても液状化強度試験を行った。これらの試料は改良体の内部に8%程度の空隙を含んでいる不飽和状態であるため、B値は0.7~0.8と低い値となった。一般的にB値が低くなるほど液状化強度は大きくなるが、今回の試験でも、モールドで作成した改良体と浸透実験ケース4のものを比較すると一軸強度はケース4の方が小さかったが、R<sub>1</sub>

はほぼ同程度であった。これらのことから、土中の空隙を残した不飽和状態で固化を行う方法は、液状化強度を向上させるためには、有効な手法であると考える。今回の実験の範囲では、改良後の供試体は水を全く通さないことが確認されており、水中で水圧が作用した状態でも土中の空隙は安定した状態であることがわかった。しかしながら、不飽和状態を維持することによって液状化防止を行う場合には、さらに長期的な検討が必要であると考える。



#### 4. 考察

薬液注入による液状化対策工法は、既設構造物の直下であっても改良できる点、および、固化までの時間を制御することにより局所的な改良も可能である点は、他の液状化対策工法にない特長であると考える。今回の実験では、超微粒子シリカと超微粒子セメントの2つの固化剤は液状化対策として有効な固化剤であることがわかつたが、地盤条件や必要とされる強度などによって使い分けを行うことが必要であると考える。超微粒子シリカは、浸透性状が良く、固結時間の調整も容易であり、液状化強度比も2倍程度に改善されることから、液状化防止を目的とした注入工法に適した固化剤であることがわかつた。また、超微粒子セメントは、細粒分を含まない地盤に対しては4m程度の浸透距離があり、q<sub>u</sub>も3.5kgf/cm<sup>2</sup>程度あるため、有効な固化剤であることがわかつた。今後の課題としては、設計手法の観点から、必要とされる改良範囲の問題および改良部の品質のばらつきの取り扱い等の検討を行う必要があると考える。

#### 参考文献

- 1)米倉亮三,島田俊介:"薬液注入における長期耐久性の研究"土と基礎1992年12月pp17
- 2)善功企,山崎浩之,長澤啓介:"事前混合処理土の動的強度変形特性"第27回土質工学研究発表会pp993