

活性シリカ系薬液注入工法における 土壌への薬液浸透状態の化学的評価方法

The Chemical Evaluation of Chemical-grout Permeated into Soil by an Activated Silica Chemical-grouting Method

竹越 重治, 今吉 朗

Shigeji TAKEKOSHI and Akira IMAYOSHI

1 緒 言

近年、橋脚基礎の強化や護岸、石油備蓄等のタンク基礎地盤などに液状化対策工法として活性シリカをベースに用いた薬液注入工法が多用されている。主剤となる活性シリカは、プロトン (H^+) を担持させた陽イオン交換樹脂に水ガラスを通すことにより水ガラス中の Na^+ と樹脂が持つ H^+ を交換させて脱アルカリを行うイオン交換法によって生成する。活性シリカは、ケイ素原子に結合した水酸基 (シラノール基) が水溶液中でわずかにイオン解離する微弱な酸である。生成した活性シリカは時間とともに分子間のシラノール基が縮合脱水反応によって、シロキサン結合鎖を形成することにより三次元的な網目構造をつくりながら高分子化していく。

活性シリカは反応性に優れ、時間と共にゲル化する特性を有するため、イオン交換をした後は安定化させるための処理を行う^{1) 2)}。この活性シリカ系薬液は、地盤へ注入する直前に添加剤を加えて安定化を解除し再活性化させることによりゲル化する。

上記薬液注入工法では、地盤改良後にアルカリがほとんど含まれていないため、改良地盤からのシリカ (SiO_2) の溶脱はほとんど無い。そのため長期耐久性に優れていることに加えて地下水環境を汚染しないなど環境面にも優れている³⁾。

日本化学工業株式会社 (以下、当社) では2004年4月から西淀川工場において、この薬液材料 (製品名: ASF シリカ-N) の生産を開始した。

現在、液状化対策などの薬液注入工事における注入後の評価は、ボーリング等で試料を採取し、目視観察によ

る薬液の浸透状態や固結状況の判定および一軸圧縮試験等による固結体の強さを求める物理的方法が主に用いられている。

薬液が注入されたことを確認する化学的方法としては、ボーリング等により採取した試料に対して試験紙などによる pH の測定以外あまり行なわれていない。pH の測定は注入直後の薬液の浸透状態を確認する目安としては適用可能である。しかし薬液を注入してから数ヶ月を経過すると、改良した地盤は土壌等の影響で徐々に中性化してしまうため、薬液の浸透状態を pH によって把握することは困難となってしまう。そこで改良地盤から薬液の主成分である SiO_2 濃度の測定を行ない、薬液の浸透状態を確認する方法を考案した。また薬液の SiO_2 濃度は強度発現に影響のある成分なので、 SiO_2 濃度を測定する事により、長期圧縮強度の推定も可能となる。

本研究では薬液を浸透させた試料を用いて、一軸圧縮強度と試料および薬液の SiO_2 濃度を測定し、一軸圧縮強度と薬液の SiO_2 濃度との関係、および試料中の SiO_2 濃度と薬液の SiO_2 濃度との関係から、試料に含まれる薬液の SiO_2 濃度を算出する方法について検討を行ったので報告する。

2 実験方法

2.1 サンドゲルの作製

Table 1 に示す薬液注入材料 (当社製) を用いて、Table 2 に示す配合で三種類 (SiO_2 濃度 4%, 5%, 6%) の薬液を調製した。

Table 1 Properties of materials for chemical-grout.

Sample	sp.gr.	SiO ₂ /%	pH
ASF Silica N	1.025	4.5	9.5
ASF Aquater M	1.58	—	1.0 under
PR Silica	1.32	26.0	11.5

Table 2 Composition of grout solutions.

SiO ₂ /%	Liquid A 200 mL			Liquid B 200 mL	
	ASF Silica N /mL	ASF Aquater M /mL	Water /mL	PR Silica /mL	Water /mL
4	40	11	149	40	160
5	50	14	136	50	150
6	60	16	124	60	140

薬液のpHは3前後。供試体に薬液を浸透させたもの（以下サンドゲルと表記）におけるゲル化に要する時間（ゲルタイム）は12h程度である。

供試体は、直径5cm×高さ10cmの円柱モールドを使い、豊浦標準砂（豊浦硅石鉱業製）を用いて、相対密度（以下Drと表記する）⁴⁾ 40%と80%の二種類の試料を作製した。

豊浦標準砂の最大乾燥密度（ $\rho_{d_{max}}$ ）は、1.650 g/cm³、最小乾燥密度（ $\rho_{d_{min}}$ ）は、1.334 g/cm³となっている。この条件下で下式から相対密度を求めると、Dr = 40%の場合の供試体の乾燥密度は1.446 g/cm³、Dr = 80%の場合では1.576 g/cm³となる。この二種類の供試体へ、SiO₂濃度の異なる三種類の薬液を浸透させた。

相対密度

$$Dr(\%) = \{ \rho_{d_{max}} (\rho_d - \rho_{d_{min}}) \} / \{ \rho_d (\rho_{d_{max}} - \rho_{d_{min}}) \}$$

ρ_d = 供試体の乾燥密度

2.2 試料の測定

作製したサンドゲルを用いて、材齢7日、28日、90日の一軸圧縮強度とSiO₂濃度を測定した。

2.3 一軸圧縮強度の測定

一軸圧縮強度の測定は、材齢日となったサンドゲルをモールドから脱型し、標準一軸圧縮試験装置 KS-11200（テスコ製）を使用して測定した。

2.4 SiO₂濃度の測定

サンドゲル中のSiO₂濃度を測定するため、水酸化ナトリウム溶液を使い、SiO₂を溶出させてから測定した。

サンドゲルからは薬液に由来するSiO₂と豊浦標準砂自体に由来するSiO₂の両方が溶出する可能性がある。そのため、薬液に相当するSiO₂濃度を算定するのに基準値が必要となるので、薬液を含まない豊浦標準砂をブランクとした。

2.4.1 SiO₂溶出液の調製法

ブランクおよび材齢日となったサンドゲルを105℃の恒温槽で2h乾燥させる。乾燥させたサンドゲル5gを量り取り、10%の水酸化ナトリウム溶液20mLと水50mLを加え1h攪拌する。攪拌後、No.5Bのろ紙でろ過し、ろ紙上の砂を水で洗浄し、洗液と共にろ液を回収する。このろ液を水で全量を250mLとしてSiO₂溶出液とした。

2.4.2 SiO₂濃度の測定法

SiO₂濃度の測定は当社独自の滴定法による。SiO₂溶出液に塩酸を加えて加熱する。冷却後、水酸化カリウムで中和してからフッ化カリウムで処理すると液中のSiO₂はケイフッ化カリウムとして沈殿する。このときケイフッ化カリウム生成量に比例して水酸化カリウムが副生するので一定量の塩酸を加えた後、水酸化カリウムで逆滴定により相当するSiO₂濃度を求める。

3 結果と考察

3.1 一軸圧縮強度の測定結果

薬液のSiO₂濃度が高いほど圧縮強度は高く、経過日数では材齢が増えるに従い圧縮強度は高くなる傾向があった。

供試体の相対密度と圧縮強度との関係では、薬液の SiO_2 濃度が同じ場合、相対密度の高いものが圧縮強度も高い結果となった。この結果を Table 3 に示す。

薬液の SiO_2 濃度と材齢 28 日における二つの相対密度 ($\text{Dr} = 40\%$, 80%) による一軸圧縮強度の関係を Fig. 1 に示す。

Table 3 Uniaxial compressive strength of sand gel.

SiO_2 in a solution / %	Dr / %	7 d / MPa	28 d / MPa	90 d / MPa
4	40	0.11	0.12	0.13
4	80	0.20	0.22	0.25
5	40	0.14	0.16	0.17
5	80	0.26	0.28	0.30
6	40	0.20	0.21	0.23
6	80	0.33	0.36	0.38

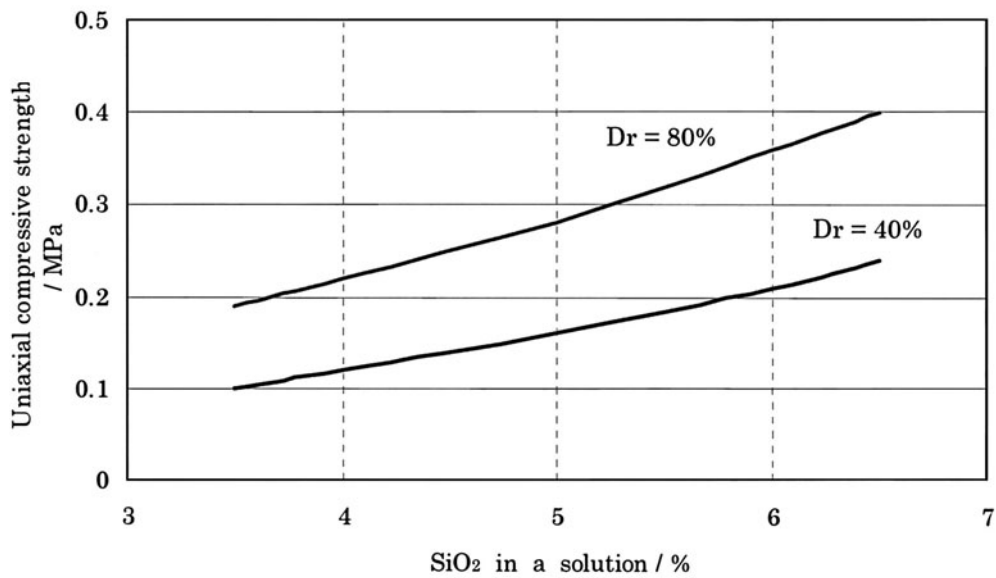


Fig. 1 Relationship between SiO_2 concentration of a grouting solution and uniaxial compressive strength.

3.2 SiO₂ 濃度の測定結果

SiO₂ 濃度の測定を行ったところ、ブランクとした豊浦標準砂の SiO₂ 濃度は 0.07 % となった。これは豊浦標準砂の一部が処理に用いた水酸化ナトリウム溶液の影響でわずかに溶出したものと思われる。

SiO₂ 濃度が異なる三種類の薬液を浸透させたサンドゲルでは、薬液濃度にしたがって測定値も変化している。

また同じ濃度の薬液を使用しても試料の相対密度が異なると SiO₂ 濃度は異なる傾向を見せている。つまり相対

密度が高いほど試料中の空隙は少なくなるので、浸透する薬液量も少なくなる。その結果、薬液濃度が同じ場合 SiO₂ 濃度は相対密度に反比例する結果となる。

薬液濃度、相対密度が同じ条件でのサンドゲルの SiO₂ 濃度は、日数が経過しても変化は極わずかだった (Table 4)。SiO₂ 濃度は日数が経過しても変わらないと考えられるので、経過日数による測定値の違いはサンプル調製および分析の誤差とみなすことが出来る。

Table 4 SiO₂ determined in several conditions using standard sand.

SiO ₂ in a solution /%	Dr /%	7 d /%	28 d /%	90 d /%	Average /%
4	40	1.00	0.98	0.98	0.99
4	80	0.75	0.75	0.77	0.76
5	40	1.27	1.27	1.31	1.28
5	80	1.06	1.08	1.04	1.06
6	40	1.58	1.56	1.58	1.57
6	80	1.21	1.23	1.25	1.23

Blank 0.07 %

3.3 SiO₂ 濃度測定値から薬液の SiO₂ 濃度への評価方法

サンドゲル中の SiO₂ 濃度は、薬液の SiO₂ 濃度の数値と違い、実情では把握にくい数値である。そこで、測定値を基に薬液の SiO₂ 濃度へ換算する必要がある。

サンドゲル中の SiO₂ 濃度と薬液の SiO₂ 濃度との関係では、相対密度によって異なるため、Dr = 40 % の場合と Dr = 80 % との場合に分けて、それぞれの SiO₂ 濃度の平均値を用いて、サンドゲル中の薬液の SiO₂ 濃度を換算した。

3.4 試料に含まれる薬液の SiO₂ 濃度の評価方法

薬液の SiO₂ 濃度を 4 %、5 %、6 % とするとき、Dr = 40 % で作製したサンドゲルの SiO₂ 濃度はそれぞれ 0.99 %、1.28 %、1.57 % となった。同様に Dr = 80 % の場合はそれぞれ 0.76 %、1.06 %、1.23 % となった。

この値とブランクの SiO₂ 測定値 0.07 % から、X 軸に

薬液の SiO₂ 濃度、Y 軸にサンドゲルの SiO₂ 濃度測定値をプロットし Fig. 2 を得た。

この図から、Dr = 40 % の場合 $y = 0.2432x + 0.07$ 、Dr = 80 % では $y = 0.1905x + 0.07$ の関係が成り立つ。

この式に、サンドゲルの SiO₂ 濃度測定値 (y) を代入すると、薬液の SiO₂ 濃度 (x) を求めることができる。

Dr = 40 % における薬液の SiO₂ 濃度を求める式

薬液の SiO₂ 濃度 (x)

$$= \{ \text{SiO}_2 \text{ 濃度測定値 (y)} - 0.07 \} / 0.2432$$

Dr = 80 % における薬液の SiO₂ 濃度を求める式

薬液の SiO₂ 濃度 (x)

$$= \{ \text{SiO}_2 \text{ 濃度測定値 (y)} - 0.07 \} / 0.1905$$

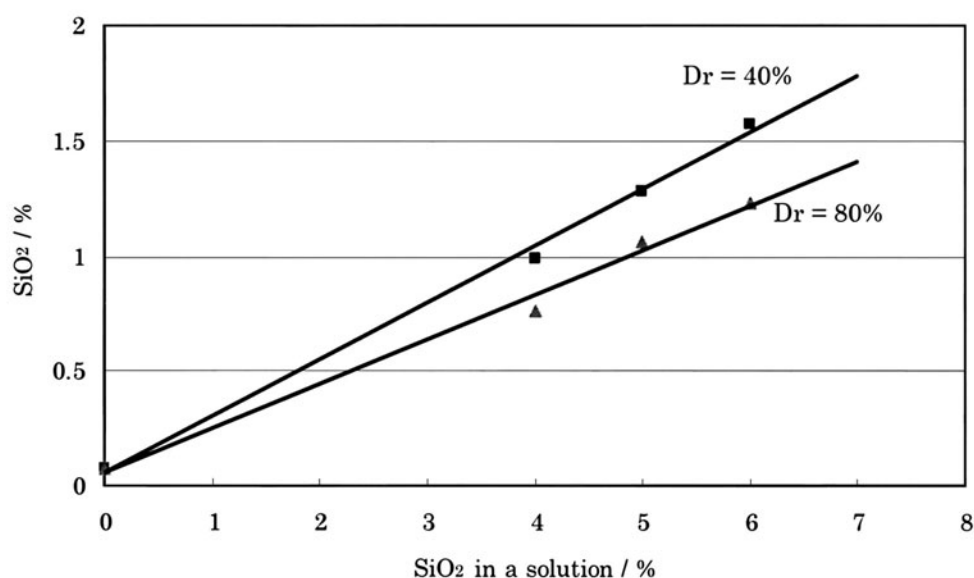


Fig. 2 Relationship between SiO₂ concentration in the grouting solution and SiO₂ measurement data of sand gel.

4 実試料への応用

実際に ASF シリカ-N を主剤とする薬液注入を行った現場から試料を採取し、先に述べた方法で注入後の改良地盤に含まれる薬液の SiO₂ 濃度を求め、薬液の浸透状態を確認した⁵⁾。

4.1 基準試料の作製と測定

基準試料には施工現場の砂を使用した。あらかじめ調べた注入現場の地盤密度 (1.90-1.91 g/cm³) に合わせて試料を作製し、Table 2 の配合にしたがって調製した三種類の薬液 (SiO₂ 濃度 4 % 品, 5 % 品, 6 % 品) を浸透させた。この試料とブランクとする現場の砂の SiO₂ 濃度を 4 回測定した。結果を Table 5 に示す。

Table 5 SiO₂ determined on construction sites.

SiO ₂ in a solution / %	No.1 / %	No.2 / %	No.3 / %	No.4 / %	Average / %
4	0.98	0.98	0.92	0.93	0.95
5	1.18	—	1.11	1.10	1.13
6	1.47	1.43	1.60	1.54	1.51

Blank 0.11 %

4.2 改良地盤に含まれる薬液の SiO_2 濃度の求め方

現場の砂をブランクとした SiO_2 濃度は 0.11 % となり、豊浦標準砂よりも現場の砂の方がわずかに高く、砂によって SiO_2 濃度溶出量に違いがあった。

現場の砂を使用したサンドゲルの測定値とブランク値から近似直線は $y = 0.219x + 0.11$ となり、地盤に含まれる薬液の SiO_2 濃度 (x) を逆算する式は、 $x = (y - 0.11) / 0.219$ となる。

この式を用いて注入後の地盤から採取した試料の測定を行い、測定値を y へ代入して改良された地盤に含まれる薬液の SiO_2 濃度を求めた。

4.3 改良地盤に含まれる薬液の SiO_2 濃度と浸透状態

薬液注入現場にて、改良後の地盤の二ヶ所から深度

1.5-2.5 m の試料 A と深度 2.5-3.5 m の試料 B を採取して SiO_2 濃度を測定した。この結果を上記の式に代入して改良地盤に含まれる薬液の SiO_2 濃度を求め、薬液の浸透状態を確認した。改良地盤に含まれる薬液の SiO_2 濃度と試料を採取した地点の深度との関係を Fig. 3 に示す。

注入した薬液の SiO_2 濃度と深度との関係から浸透状態を把握した施工管理が可能である。

今回、注入した薬液の SiO_2 濃度は 5.5 % で採取した試料 A の平均は 5.2 %、試料 B は 4.3 % であった。この施工現場で改良地盤に期待される一軸圧縮強度は SiO_2 濃度 4 % で達成できるため、今回の測定で薬液が計画通り注入されていることを確認した。

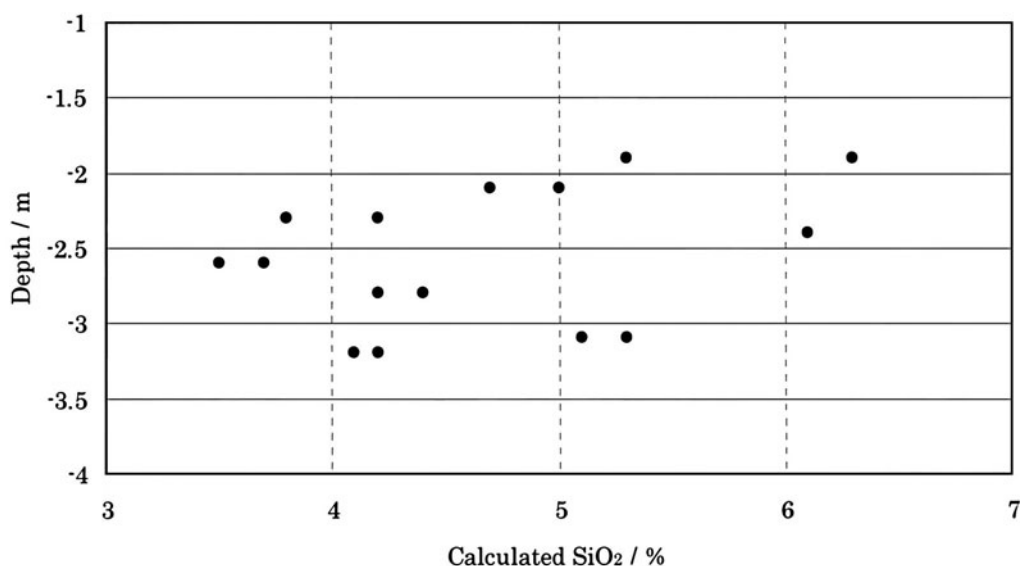


Fig. 3 Relationship between the SiO_2 concentration calculated of grouting solutions permeated on construction sites and the depth of soil.

5 結 論

一連の検討結果から、以下の結論を得た。

- (1) 一軸圧縮強度は、薬液の SiO_2 濃度、経過日数、試料の相対密度によって異なる。
- (2) 試料の相対密度が異なると、同じ薬液を使用しても SiO_2 測定値に差が出る。
- (3) サンドゲル中の SiO_2 測定値から薬液の SiO_2 濃度を求めるには、試料の相対密度による影響があるので、注意しなければならない。
- (4) 豊浦標準砂と現場の砂では、ブランク値に違いがあ

った。このことは、施工現場によって砂の SiO_2 溶出量は違うものと推測される。

- (5) 施工現場によって、構成地盤の組成は違うものと推測されるため、近似直線の式も変化することが考えられる。

活性シリカ系薬液注入工法における改良地盤の化学的評価法は下記に要約される。

注入後の地盤の SiO_2 濃度の測定値から薬液の SiO_2 濃度を求め、薬液の浸透状態の確認や長期圧縮強度を推定する場合、事前に注入現場から砂などを採取して、地盤

密度を考慮した基準試料を作製する必要がある。この基準試料に薬液を浸透させ、この試料と現場の砂をブランクとした SiO_2 濃度から近似式を求める。施工現場で注入後の改良地盤から試料を採取して SiO_2 濃度の測定を行い、測定値を換算式に代入すれば薬液の SiO_2 濃度を求めることが出来る。

今後、改良現場から採取した試料の SiO_2 濃度を測定し、地盤に含まれる薬液の SiO_2 濃度を求める方法は、薬液注入後の評価方法の一つとして有用と思われる。

参考文献

- 1) “最新地盤注入工法技術総覧”，産業技術サービスセンター（1997），p120.
- 2) 米倉亮三，島田俊介，土木施工雑誌，40（7），105（1999）.
- 3) 米倉亮三，島田俊介，土木施工雑誌，40（8），107（1999）.
- 4) “土質試験の方法と解説”，土質工学会（1990），p106.
- 5) 社本康広，風間広志，桂豊，土木学会第60回年次学術講演会概要集（平成17年9月），559（2005）.



著者
氏名 竹越 重治
Shigeji TAKEKOSHI
所属 化学品事業本部
研究開発部
第一グループ



著者
氏名 今吉 朗
Akira IMAYOSHI
所属 化学品事業本部
西淀川工場
開発課