

薬液固結砂のシリカ溶脱による長期耐久性能について

薬液注入 シリカ含有量 FEM 解析

早稲田大学 学生会員 ○仲田 泰大

早稲田大学 国際会員 赤木 寛一

(財)鉄道総合技術研究所 正会員 澤田 亮, 仲山 貴司

ケミカルグラウト(株) 正会員 川村 淳, 渡辺 陽介

1. はじめに

我が国は、1995年の阪神淡路大震災や2011年の東日本大震災における液状化の被害は甚大なものであり、液状化防止対策について考案・検討がなされている。また、既設構造物直下における地盤には、薬液注入工法が有効であるとされており、薬液改良体の長期的な耐久性が求められている。しかし、地下水の流れを考慮した既往の研究¹⁾では、薬液改良体中のシリカ分(SiO₂)が長期的に溶脱し、一部強度低下を起すことが確認されている。さらに用いる注入材は、開発後十数年しか経過しておらず、実証試験はこの期間しか実施されていないことから、長期耐久性を評価する定量的な手法がないという課題も残されている。

そこで、本研究ではφ10cm×20cm(本研究ではこれを中型とする)の薬液改良体を作製し、それを地下水の流れを模擬した流水条件下に設置することで、シリカ溶脱のメカニズムと長期耐久性能について把握することを目的とした実験的検討²⁾を行った。さらに、シリカの溶脱状況をFEM解析により表現することで、長期耐久性を評価する定量的な手法について検討した。

2. 実験内容

2.1 供試体の条件

ブラモールド(φ10cm×20cm)を用いて、水中落下法により供試体(相対密度60%)を作製した。東北珪砂7号物理的性質を表1に、特殊中性・酸性薬液の配合を表2に示した。

2.2 本研究における実験手順

本研究は、流水促進試験・シリカ含有量測定試験(ICP試験)&一軸圧縮強度試験・FEM解析の順に行う。

まず、流水促進試験は、地下水の流れを模擬した流水水槽内に供試体を設置し、水の流れにさらし劣化の進行を把握していくもので、1日1回水槽内の水を入れ替えて、シリカ溶脱が生じやすい条件とした。試験流速は相似則を考慮して、透水係数10⁻¹(cm/s)・動水勾配*i*=1.0の実地盤を再現するための透過流量から算出し6.69×10⁻³(cm/s)とし、促進倍率を10倍としている。シリカ分布測定は、所定週数経過した供試体の流水試験を終了させ、供試体内各部位におけるシリカ含有量を測定するものである。ただし本報告は、養生期間0週、4週、8週、12週、16週、20週、52週の結果である。測定方法は、供試体中心から外側に向かって1cm間隔(0~5cm)でサンプルとして採取し、シリカ含有量測定試験

(ICP試験)を行う。一軸圧縮強度試験では、シリカ分布測定用の試料を除いた箇所から、一軸圧縮試験用の供試体(φ5×10cm)を採取し、強度を測定する。最後に、長期耐久性の評価手法を検証・構築するためFEM解析を行う。解析のもととなるのは式(2.1)の極座標系における拡散方程式であり、改良体の表面には境界条件として、式(2.2)に示す表面拡散速度を与えた。図2は、本研究の解析モデルであり、これは供試体横断面に相当している。

表1 東北珪砂7号の物理的性質

土粒子密度 (g/cm ³)	2.62
最大間隙比 e _{max}	0.931
最小間隙比 e _{min}	0.613
D ₅₀	0.18

表2 薬液の配合表

A液	B液
主剤 250(ml)	反応剤 25 (ml)
水 650 (ml)	添加剤 10 (g)
	水 69 (ml)

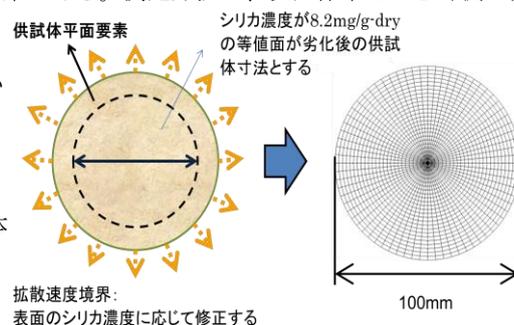


図2 解析モデル

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (2.1)$$

$$R = \alpha C_B \quad (2.2)$$

C: シリカ含有量 (mg/g-dry) t: 時刻 (s) D: 拡散係数 (mm²/year) r: 距離 (mm)

C_B: 表面のシリカ濃度(mg/g-dry), α: 影響係数, R: 表面拡散速度(mm/year)

3. 実験結果

図3は、中心からの距離とシリカ含有量の関係を表したものであり、どの経過週数においても供試体外周部のシリカ含有量は、低下傾向にあることが確認できた。ただし、52週においては、供試体の外周部が流水の影響により砂粒子が流出して半径が小さくなったため、中心からの距離4cmまでのサンプル採取となった。今回の透水係数 10^{-1} (cm/sec) 実地盤を想定した条件では、供試体の周囲は劣化傾向にあることは確認されたが、内部のシリカ含有量は52週経過後も初期の値を保持しているため、流水の影響を供試体内部は现阶段では大きく受けていないことがわかった。

図4は、経過週数と供試体中心部から採取したサンプルの一軸圧縮強度の関係である。20週までは供試体内部の強度増加が確認されたが、52週では強度低下を示した。これは供試体が長期間、流水の影響を受けたことが原因と考える。しかし、その強度低下は強度発現初期と同程度で留まっていることがわかる。

図5は、実験とFEM解析で得られたシリカ含有量の半径方向の分布を比較したもので、実験値は52週目（促進倍率10倍×1年=10年）のシリカ含有量であり、解析値は10年経過後のシリカ含有量を示した。実験値は各部位どれもシリカ含有量が25 (mg/g-dry) 程度の値で推移し、解析値は外周部になるにつれて緩やかにシリカ含有量が減少しているため、外周部では大きな差となっている。一方、供試体の半径に着目すると、実験値は約10mmの減少に対して、砂粒子の剥離流出現象が生じるシリカ含有量8.2 (mg/g-dry) に対応する解析値を参照すると、約6mmの減少という結果となった。この剥離濃度8.2 (mg/g-dry) は、既往の研究において、供試体半径減少が確認された時の表面のシリカ含有量が8.2 (mg/g-dry) であったこと、さらに実地盤に薬液を注入して固化させた改良体の10年間のモニタリング後に測定されたシリカ濃度が4.78~10.54 (mg/g-dry) の範囲にあることから設定した。

4. 本研究のまとめ

- (1) 流水環境下の供試体は、流水と接触する外周面よりシリカが溶脱していくことで周囲から砂粒子が流出し、その寸法は縮小していく。ただし、影響を受けにくい内部は、シリカ含有量・強度の観点から薬液性能・耐久性を概ね保持することが確認できた。
- (2) 供試体内部のシリカ含有量の分布について、拡散方程式に基づくFEM解析と実験結果は、注目した中心部の含有量については、ほぼ同じ挙動を示していることが確認でき、砂粒子の剥離流出による供試体半径の変化についても、ほぼ実験結果と対応した結果が得られたことから、劣化状況を表す1つの手段として今後の実用性につながるものと考えられる。今後は、外周部においても実験値・解析値のシリカ含有量が一致する解析の方法を検証していく必要がある。また土中でも同期間で同様の剥離現象・シリカ溶脱が発生するかを試験し、実地盤に近い状況での改良体の挙動を検証していきたい。

参考文献

- 1) 平岡、赤木、澤田：弾性波試験による薬液改良砂の劣化評価について、土木学会第66回年次学術講演会, pp71~72, 2011
- 2) 小川、赤木、平岡、川村、渡辺：薬液で改良した砂地盤の耐久性能について、第8回地盤工学会関東支部発表会, 2011

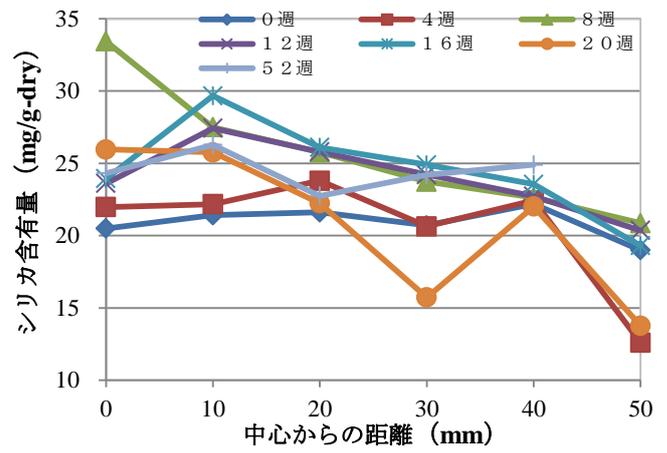


図3 中心からの距離とシリカ含有量の関係

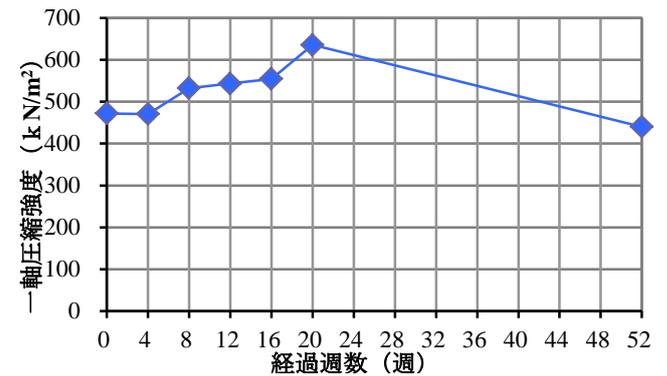


図4 改良体中心部：一軸圧縮強度結果

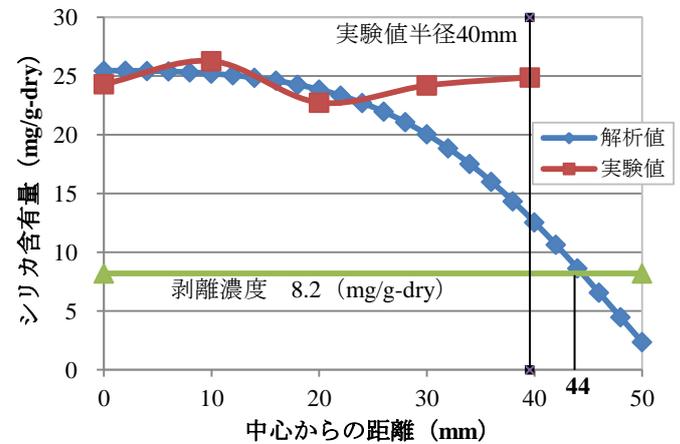


図5 シリカ含有量 実験値と解析値の比較 (10年経過後)