

## 数値解析を用いた薬液改良体の長期耐久性能の評価

薬液注入 数値解析 改良半径

早稲田大学 学生会員 ○森 拓之

早稲田大学 国際会員 赤木 寛一

早稲田大学 学生会員 仲田 泰大, 門田 桃子

ケミカルグラウト(株) 正会員 川村 淳, 渡邊 陽介

### 1. 研究目的

日本は世界でも有数の地震大国であり、近年日本各地で大規模な地震による被害が発生している。その中でも阪神淡路大震災や東日本大震災において、埋め立て地を中心に発生した液状化の被害は甚大なものであった。このような液状化対策の工法として薬液注入工法が多く用いられている。

薬液注入工法の課題としては、薬液で改良した砂地盤は耐久性能を保持すると報告されているが、地下水の流れを考慮した既往研究などにおいては、薬液改良体中のシリカ分 ( $\text{SiO}_2$ ) が長期的に溶脱していくことにより、一部で強度低下を起すことである。さらに、そのシリカ分の溶脱におけるメカニズムや、耐久性についての挙動は詳細に解明されていないのが現状である。ここでは、地下水流れを模擬した環境に浸透注入法により作製した薬液供試体 ( $\phi 5 \times h 10 \text{ cm}$ ) を設置し、流水試験を行った。この室内試験の結果と数値解析により薬液改良体の長期耐久性能について検討した。また、仲山ら<sup>1)</sup>が行った流水養生試験に基づく数値解析結果と比較した。

### 2. 実験方法



図2 土槽の状況

図1に示す装置を用いて、地下水流動環境を模擬した流水試験を行った。図2に実験に用いた土槽と供試体の状況を示した。使用材料は珪砂7号、特殊水ガラス濃度25%の注入材Aを使用した。流水期間を1か月、2か月、3か月と設定し、所定期間経過後に土槽を解体し、供試体内部のシリカ含有量を調査した。土槽を循環する水については1週間ごとに採取し、供試体から溶脱していると考えられるシリカ量を調査した。これらの実験結果と数値解析により、100年後の劣化予測を行った。

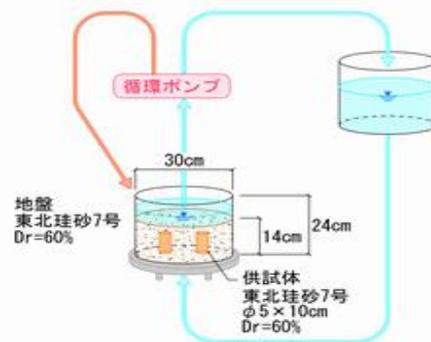


図1 地下水流環境試験

### 3. 実験結果

所定の流水期間終了後の供試体中心部からの距離とシリカ含有量比の関係をまとめたものが図3である。図3中のシリカ含有量比とは、供試体中心部におけるシリカ含有量 ( $\text{mg/g-dry}$ ) を1として供試体中心部からの距離によるシリカ含有量の変化量を表したものである。流水期間0か月には、供試体作製直後のデータを用いた。

このグラフより、供試体中心部からの距離が増加するにしたがって供試体内部のシリカ含有量は減少傾向にあることが確認出来た。また、流水期間と供試体内部のシリカ含有量の変化量との間には比例関係があることが確認された。

図4は固結砂のシリカ含有量と循環水のシリカ含有量をもとに、水ガラス配合に基づくシリカ含有量の理論値と実験値(供試体内部のシリカ含有量+循環水中のシリカ含有量)の時間的変化を示したものである。

この結果から、多少のばらつきはあるものの、実験期間3か月では理論値と実験値がほぼ一致した。供試体内部から溶脱したシリカが水中に溶け出しており、薬液の水ガラス配合に基づくシリカ含有量収支が確認出来た。

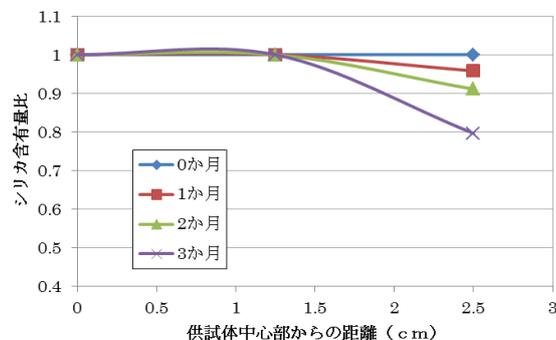


図3 シリカ含有量比

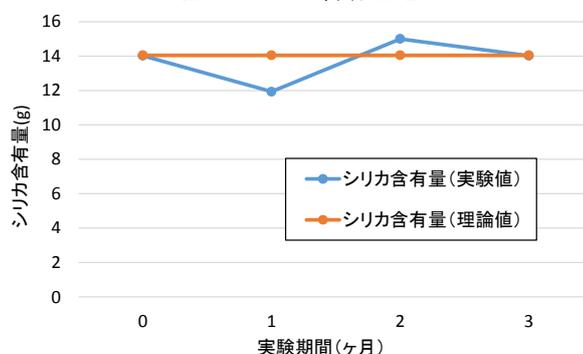


図4 シリカ含有量収支

#### 4. 数値解析

球状の固結砂供試体内部のシリカ濃度の拡散は式 (1) の FICK 則により支配されると考えられる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left\{ \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right\} \dots (1)$$

この式 (1) を改良体表面のシリカ濃度が経時的に変化するとして解くと、式 (2) のようになる。この式 (2) を用いて改良半径 1m の球状改良体における 100 年後のシリカ濃度変化に基づく劣化予測を行った。

$$c = s\sqrt{t} \left\{ \exp\left(-\frac{x^2}{4D \cdot t}\right) - \frac{x \cdot \sqrt{\pi}}{2\sqrt{D \cdot t}} \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}\right) \right\} \dots (2)$$

ここで、 $c$  : 固結砂供試体内部のシリカ濃度(mg/g-dry)、 $D$  : 拡散係数(mm<sup>2</sup>/年)、 $s$  : 固結砂供試体表面のシリカ濃度係数(mg/(g-dry/√年))、 $x$  : 固結砂供試体中心からの距離(mm)、 $t$  : 経過時間(年)である。なお、固結砂供試体が自立できるシリカの限界濃度は文献<sup>1)</sup>の値を参照し 8.2mg/g-dry を用いた。

今回行った地下水流動環境を模擬した流水試験で、得られた 3 か月分の経時変化に伴うシリカ濃度  $s$  の変化を式 (2) にフィッティングさせて係数を求めたところ  $s=7.2$ (mg/(g-dry/√年))となった。なお、拡散係数に関しては、改良体内部のシリカ濃度の移動速度を支配するもので、使用する注入剤に依存することから、同じ注入剤を用いた場合は同様の値 (拡散係数  $D=2.0$ mm<sup>2</sup>/年) を用いた。ただし、この拡散係数  $D$  は小型供試体 (半径  $r=2.5$ cm、高さ  $L=10$ cm) のものであり、改良体の大きさにより変化させる必要がある。相似則により、拡散係数  $D_A$  を異なる半径  $R_B$  ( $=N \cdot R_A$ ,  $N>1$ ) の球状改良体 B に用いると、拡散係数は  $N^2$  倍されるため、改良体 B に用いるべき拡散係数  $D_B$  は  $D_B=D_A/N^2$  で求められる。

また、今回の実験で使用した供試体は円柱 (半径  $r=2.5$ cm、高さ  $L=10$ cm) であるので、球状の大型供試体<sup>1)</sup>と比較するために円柱を球体に換算している。円柱と同体積を有する球体の半径  $R_A$  は以下のようになる。

$$R_A = \sqrt[3]{\frac{\pi r^2 \times L}{4/3\pi}} = \sqrt[3]{\frac{3.14 \times 25^2 \times 100}{4/3 \times 3.14}} = 36.1 \text{ (mm)}$$

この球体の半径  $R_A$  を用いて、拡散係数  $D_A$  を求めると  $D_A=34.5$  (mm<sup>2</sup>/年) となる。

地下水流動環境を模擬した流水試験により得られた結果をもとに、フィッティングや計算によって求めたシリカ濃度係数と拡散係数を用いて改良半径 1m の改良体の 100 年後の改良半径比を推定した結果を図 5 に示す。

この結果より、100 年経過の時点において、98%の改良半径比は保持されている結果となった。これは、仲山ら<sup>1)</sup>の行った FEM 解析の 100 年後の予測結果である 92%よりも劣化が少ないものとなった。仲山らが行った流水試験では供試体が直接流水にさらされる環境であったのに対し、今回は地下水流動環境を模擬した流水環境であったことが理由として考えられる。

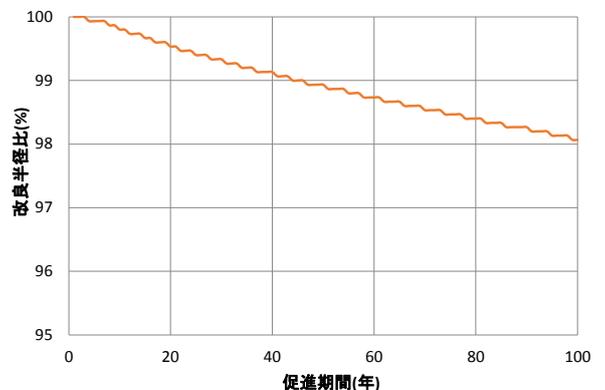


図 5 改良半径比と促進期間の関係

#### 5. まとめ

今回の実験的検討、解析的検討から得られた知見は以下のように要約出来る。

- 1) 薬液の水ガラス配合に基づく薬液固結砂からのシリカ溶脱に伴うシリカ含有量収支を実験的に確認することが出来た。
- 2) 薬液改良体の劣化における 100 年後の数値解析の結果、地下水流環境の方が、直接流水環境下よりも劣化傾向が緩やかであることが確認された。

#### 6. 謝辞

本研究に際して実験にご協力を頂き、様々なご指導を賜りましたケミカルグラウト株式会社の皆様に感謝の意を表します。

#### 7. 参考文献

- 1) 仲山、赤木ら”薬液注入工法で固化した改良体の耐久性評価に関する研究”, 土木学会論文集 C, Vol.69, No2,162-173, 2013.