

数値解析を用いたシリカ溶脱メカニズムと長期耐久性能の評価

早稲田大学 学生会員 ○森 拓之

早稲田大学 フェロー会員 赤木 寛一

早稲田大学 学生会員 仲田 泰大

ケミカルグラウト(株) 正会員 川村 淳, 渡邊 陽介

1.はじめに

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。その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。薬液注入工法とは、薬液が砂粒子間の間隙水と置き換わりながら浸透し、地盤を固結させる工法である。

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(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が知られている。ただし、そのシリカ分の溶脱とそれに基づく耐久性能の評価については、未解明の部分が多い。ここでは、室内試験と数値解析により薬液の化学的劣化メカニズムと長期耐久性能について検討した。

2.研究概要

地盤中には地下水の流れが存在する。そのため、薬液注入により改良した砂地盤が、地下水の流れにさらされることが予想される。このとき、図1に示すように薬液改良体は地下水の流れにより主成分であるシリカ(SiO_2)が溶脱し、劣化することが考えられる。そこで、薬液改良体を流水環境下に設置することで、実験的に劣化の挙動を調査するとともに、数値解析により100年後の劣化予測を行った。

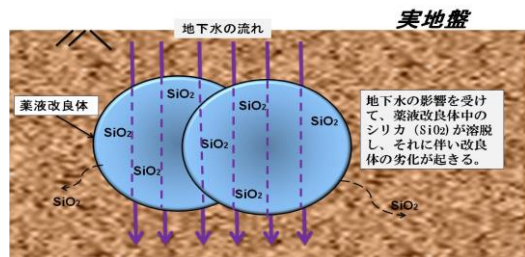


図1 改良体劣化の概念図

3.実験方法と結果

大型注入装置(図2参照)を用いて、飽和模型砂地盤に浸透注入することで、固結砂の球状供試体を作製した。使用した砂は珪砂7号、注入速度は1L/min、設計改良半径は15cmとした。使用した薬液は、特殊水ガラス濃度25%の薬液Aと特殊水ガラス濃度20%にコロイダルシリカ3.75%を添加した薬液Bの2種類である。

その後、固結砂供試体を実地盤の10倍の流速に設定した流水水槽に設置し、所定期間養生した後、固結砂供試体の質量を測定し、その結果を用いて球状の固結砂供試体の形状変化に相当する改良半径比(r_t/r_0 : r_0 は初期の球状供試体の質量をもとに求めた等価改良半径, r_t は促進期間tにおける等価改良半径)を求めた。

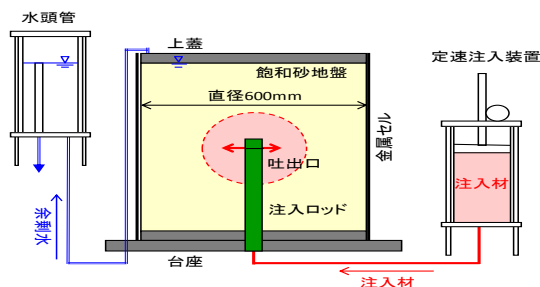


図2 大型注入装置

図3の点線で示された曲線が、実験結果である。注入材により結果のばらつきはあるものの、促進期間20年でも注入材Aの改良半径比は85%が保持されており、コロイダルシリカを添加した注入材Bのほうが改良半径比の低下は小さいことがわかる。

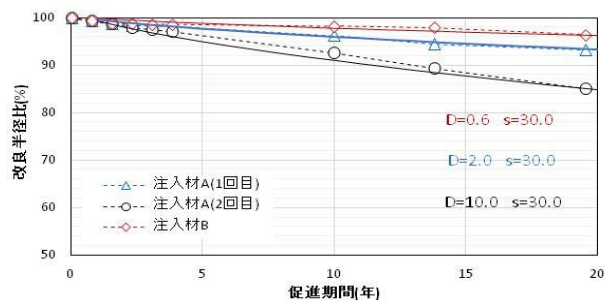


図3 改良半径比 ($r_0=0.15\text{m}$)

薬液 改良半径 数値解析

連絡先 〒169-8555 新宿区大久保 3-4-1-58-205 TEL.03-5286-3405

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。

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

この Fick 則を、改良体表面のシリカ濃度が継時的に変化すると解くと、式 (2) のようになる。

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

ここに、 c : 固結砂供試体内部のシリカ濃度 (mg/g-dry)、 D : 拡散係数 ($\text{mm}^2/\text{年}$)、 s : 固結砂供試体表面のシリカ濃度係数 ($\text{mg}/(\text{g-dry}/\sqrt{\text{年}})$)、 x : 固結砂供試体中心からの距離 (mm)、 t : 経過時間 (年)、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¹⁾の値を参照し 8.4mg/g-dry を用いた。

式(2)を利用して、図 4 に示すような方法で球状の改良供試体の等価半径の減少量を推定した。

以上のような手順で、図 3 の実験結果について、拡散係数 D とシリカ濃度係数 s の値を変化させて、Fick 則による Fitting を行った結果が実線で示されている。なお、図中には採用した D と s の値を併記している。

一方、式(1)に基づく相似則により、半径 R_A の供試体における拡散係数 D_A を半径 R_B ($=N\cdot R_A$, $N>1$) の球状供試体 B に用いると、拡散係数は N^2 倍されることになる。したがって、供試体 B に用いるべき拡散係数 D_B は図 5 に示すように $D_B = D_A / N^2$ ($N = R_B / R_A$) で与えられることになる。

手順①: ある時間の改良体内部のシリカ濃度の分布を算定する。

手順②: 改良体が自立できる限界のシリカ濃度となる位置をその時点の半径とする。

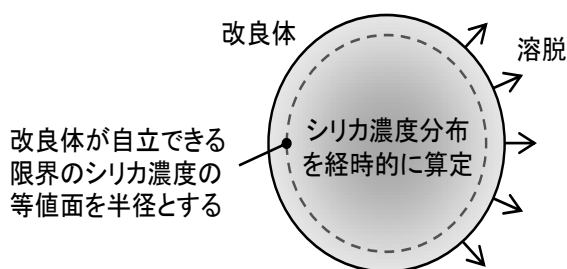


図 4 改良体の半径減少量の予測

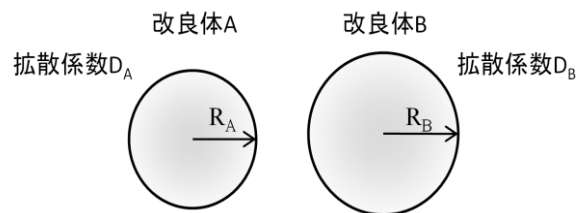


図 5 拡散係数に関する相似則

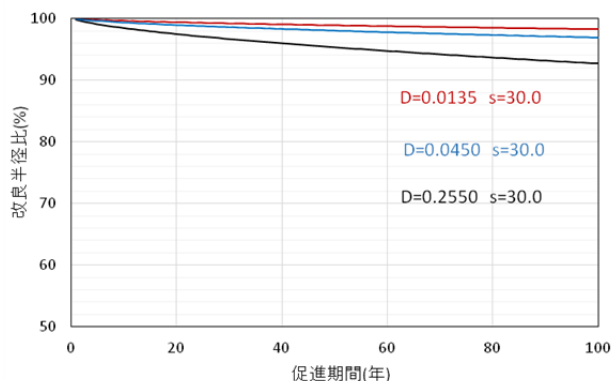


図 6 改良半径比（初期等価半径 $r_0=1.00\text{m}$ ）

これらの結果を用いて、実地盤での薬液注入固結砂に相当する初期等価半径($r_0=1\text{m}$)の供試体の 100 年間にわたる改良半径比の変化について推定した結果を図 5 に示す。

この結果より、100 年経過の時点において、最小の場合でも 93% 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¹⁾の行った FEM 解析の 100 年後予測結果である 92% とほぼ同等の値であり、簡便な式(2)でも同様な結果が得られることがわかる。

5.まとめ

実験結果に基づく簡便な数値解析で得られた改良半径比の最小値は 93% であり、これは別途行われた FEM 解析の推定値とほぼ同等であった。100 年後においても、固結砂による半径 1m の改良供試体の半径減少量は 10cm 以下である。すなわち、当初設計で外周部に 1.1 倍程度の改良範囲を見込めば、十分な性能を持つ薬液注入による固結体を造成できると考えられる。

6.参考文献

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, No.2, 2013 年