

薬液注入工法

Chemical Grouting Method

赤木 寛一 (あかき ひろかず)

早稲田大学教授 理工学術院

1. はじめに

薬液注入工法は、地盤の透水性を減少させるとともに、地盤の強度を増加させることにより、工事中の安全性を向上させるために用いられる工法であり、トンネル掘削や地下掘削には不可欠な補助工法である。また最近では、既設構造物直下での基礎地盤の液状化対策のために地盤注入工法が用いられる場合が増えており、工事中の注入管理および工事終了後の長期供用中の耐久性評価が要求されている。

我が国では、昭和30年代の高度経済成長に伴い、建設投資が急速に増大し、上下水道の整備、地下鉄の建設、電話ケーブルの布設などの都市内におけるトンネル工事および地下掘削工事が多数実施されることとなった。このような状況のもとで、注入による地盤改良の必要性が高まり、本工法が急激に発展してきた。昭和40年代には、都市内におけるシールド工法によるトンネル工事などが増大してきたことにより、薬液注入工法の利用が著しく増加してきた。一方、薬液注入工法に関する研究開発も急速に進み、従来から用いられてきた水ガラス系の薬液に加えて、止水性の向上や地盤強度の向上をはかるため、高分子系の薬液が多数開発され、これらの薬液の使用量が急激に増加するに至った。

高分子系薬液は、止水効果の高いものや、地盤の支持力をより増大させるものなど、水ガラス系薬液に比べ注入効果が大きい利点もあるが、反面、薬剤として劇物などの人の健康に影響を与える物質を含むことから、水ガラス系薬液に比べその取扱いに細心の注意が必要であり、注入工事の施工に当たってはより十分な施工管理が要請されていた。それにもかかわらず、昭和48年と49年に高分子系の薬液を使用した注入工事において、薬液が原因とみられる地盤、地下水汚染事故が発生した。

当時の建設省では、直ちに同省を中心に、国鉄、東京都などの学識経験者により構成される薬液注入工法調査委員会を設置し、約2か月間の集中的な検討審議を行い、地盤注入工事の再開に当たっての留意事項と、薬液注入工法の設計、施工に関する技術指針を作成した。この技術指針は、昭和49年7月に「薬液注入工法による建設工事の施工に関する暫定指針について」という建設事務次官通達として発せられた。この暫定指針は、建設省の下部機関、関係公団、都道府県などに指示されるとともに、他の関係省庁や関係業界団体へも通知された。

薬液注入工法の暫定指針は、高分子薬液による地下水の汚染や、これに伴う人の健康被害の発生を防止することを目的として制定されたものであり、この目的を達成するために薬液注入工法を使用する場合の工法の選定、設計、施工および地下水等の水質の監視について定めたものである。なお、暫定指針という名称が付されているが、人の健康被害の発生と地下水等の汚染の防止をはかるために必要な基本的事項を定めたものであり、薬液注入工事に従事する者は暫定指針を十分に熟知し、遵守しなければならない。

一方、平成2年1月には東北新幹線の東京駅延伸工事に第一上野トンネル（通称：御徒町トンネル）の建設現場で、薬液注入に伴って土砂が噴出し地上の道路が陥没する事故が発生しており、地盤注入のメカニズムをはじめとして未解決の技術的課題は多い。

ここでは、注入工法による地盤改良の長期利用を念頭において、薬液注入のメカニズム、注入材料の長期耐久性に関して解説する。

2. 薬液注入のメカニズム

薬液注入とは何か？ 対象とする土中の間隙内に水ガラス系溶液を浸透させて、間隙流体を水ガラス系の溶液で置き換える工法である。この溶液はpHなどに依存してゲル化して、硬化する特徴を有している。その結果、溶液がゲル化すると土中の間隙は水ガラス系溶液のゲル化物で満たされるので、その力学的特性は大幅に改善され、注入前と比較して強度は増加し、透水性は著しく低下することになる。ところが、ゲル化物はシリカ四面体(SiO₄)なので、その力学的特性はゲル化物に含まれるシリカ濃度によって左右されることになる。

このような薬液注入で起きている地盤工学的現象解明の鍵は、水ガラス系溶液の土中の間隙における移動状況の把握である。この移動状況をたとえば移流分散解析のような数値解析手法などを利用して忠実に再現することができれば、注入に伴う土中の溶液移動を適切に予測することが可能となる。土中の溶液移動状況がわかれば、薬液注入の注入点の配置、改良範囲、注入率などの設計細目を十分な根拠を持って決定することができる。すなわち、薬液注入の設計においても、要求性能、達成性能の照査を含めた性能設計が可能となる。

このために、薬液注入地盤の強度に影響を与える水ガラス系薬液のシリカ濃度に着目し、薬液固結砂の強度特

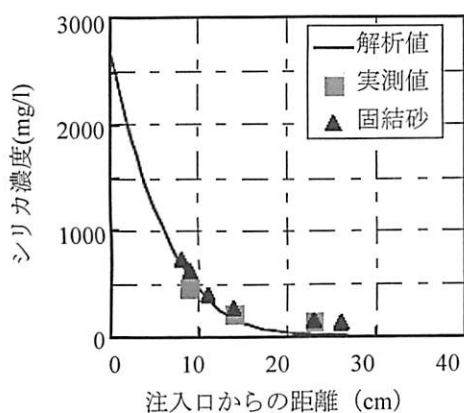


図-1 供試体内部のシリカ濃度分布

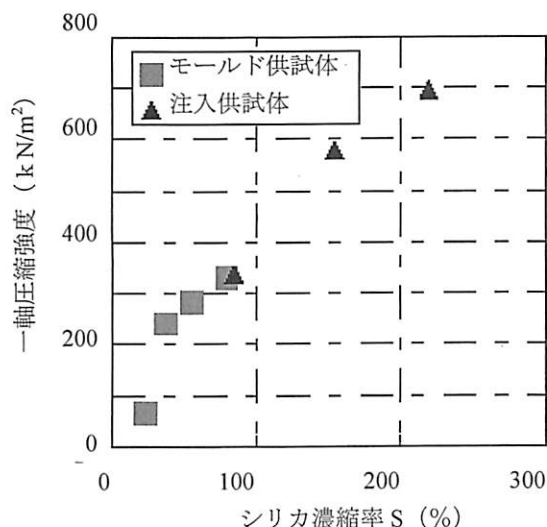


図-2 シリカ濃縮率と一軸圧縮強さの関係

性を実験的に調査した。あわせて、注入時の薬液シリカ分の移動を実験と移流分散解析により調査し、薬液注入による地盤改良メカニズムについて、薬液に含まれるシリカ濃度の観点から考察した結果を以下に述べる¹⁾。

図-1に、シリカ分の移動に関する解析値と供試体内部の観測管から直接採取した注入材のシリカ濃度、固結後の供試体について分析測定した固結砂のシリカ濃度との関係を示す。このことから、移流分散解析により薬液注入時の薬液の分布状態に相当するシリカ分の移動を推定することが可能であることがわかる。

図-2は、上記の注入実験で得られた固結砂のシリカ濃度の注入薬液に含まれるシリカ濃度に対する比率であるシリカ濃縮率Sを求め、そのシリカ濃縮率Sと固結ブロックから切り出した供試体の一軸圧縮強度の関係に、モールド内で作成した供試体で得られたシリカ濃縮率Sと一軸圧縮強度の関係と併せてプロットしたものである。この図より、注入実験で得られたシリカ濃縮率は注入口近傍ではゲル化した薬液を含む土粒子間隙内での薬液のろ過などによる濃縮が起こるために100%近くかそれ以上となっているが、それらの供試体の一軸圧縮強さはモールド実験で得られたものの延長上にプロットされて

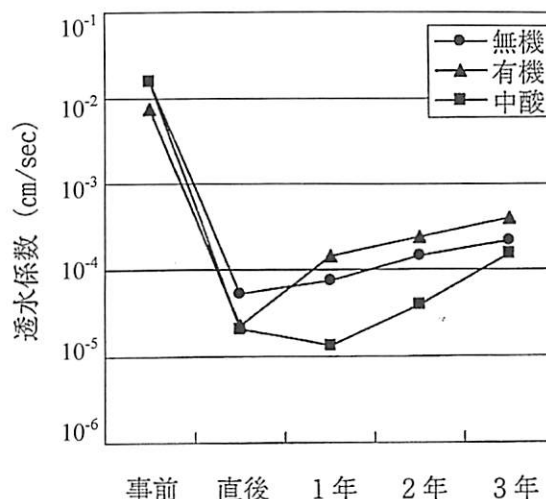


図-3 薬液注入地盤の現場透水試験結果

おり、モールド実験と注入実験で得られたシリカ濃縮率と一軸圧縮強度の関係はほぼ対応している事がわかる。以上より、移流分散解析により薬液注入に伴うシリカ分の移動を求めた結果をもとに固結砂の強度分布予測が可能となることがわかる。

3. 薬液注入材料の長期耐久性

薬液注入工法を採用する目的は、都市の管路敷設の補助工法などの短期的な効果を期待するものであり、長期にわたりその効果を期待する例は少なかった。そのため、地盤中に圧入された薬液がどの程度の期間にわたってその品質を保持しているかについて、追跡調査を実施した例は皆無である。

一方、液状化対策や既設物を支持するなど長期に耐久性を期待するケースで、薬液注入工法の適用性についての要望が多く寄せられている。そこで、原位置で地盤に圧入して浸透固化させた薬液の耐久性を確認する大規模な試験が、日本グラウト協会(旧日本薬液注入協会)により実施されている²⁾。図-3は、注入後3年間にわたる硬化剤が異なる3種類(アルカリ無機、アルカリ有機、中酸性)の薬液注入地盤の現場透水試験結果を示したものである。薬液の種類によらず、透水係数は注入直後の値から徐々に増加する傾向にあるが、3年経過後も事前の透水係数より約2ケタ小さい透水係数が保持されていることがわかる。この測定はその後にも継続されており、近く注入後10年経過後の薬液注入地盤の透水性、強度特性を含めた貴重な測定結果が公表される予定である。

参考文献

- 1) 竹内ほか：薬液注入による地盤改良メカニズムに関する考察, No. 390, pp. 779~780, 第41回地盤工学会研究発表会, 2006.
- 2) 薬液注入工法の理論・設計・施工：地盤工学会, pp. 128~130, 2009.

(原稿受理 2010.6.28)