

総説

# 注入工法による 地盤改良の長期利用の現状と課題

赤木 寛一\*

## 1. まえがき

地盤注入工法は、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供用中の長期にわたる耐久性と環境影響評価が要求されている。

わが国では、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、地盤注入工法の利用が著しく増加してきた。一方、地盤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図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、その特性により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取扱いに細心の注意が必要であり、注入工事の施工に当ってはより十分な施工管理が要請されていた。それにも関わらず、昭和48年と49年に高分子系の薬液を使用した地盤注入工事において、薬液が原因と見られる地盤・地下水汚染事故が発生した。

当時の建設省では、ただちに同省を中心に国鉄や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ヵ月間の集中的な検討審議を行ない、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ても、人の健康被害の発生と地下水等の汚染の防止を図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中に第一上野トンネル（通称：御徒町トンネル）の建設現場で、地盤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、地盤注入のメカニズム、地盤注入材料の長期耐久性および地盤注入に伴う環境影響の研究成果の一部を紹介して、本特集の総説の役割を果たすこととしたい。

## 2. 地盤注入のメカニズム<sup>1)</sup>

地盤注入とは何か？ 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。この溶液は、その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(SiO<sub>4</sub>)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。

このような地盤注入で起きている現象の鍵は、ずばり水ガラス系溶液の土中の間隙における移動状況である。この移動状況を例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、地盤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

\*AKAGI Hirokazu 早稲田大学 理工学術院 教授、工博 | 東京都新宿区大久保3-4-1

をもって決定することができる。すなわち、地盤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、地盤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基礎的な考察を行なった。

実地盤における薬液注入に伴う薬液に含まれるシリカ分の土中の移動と薬液固結砂の強度特性の関係を調査するために、注入実験と薬液シリカ分の移流分散解析を実施した。図-1に示す注入実験装置を利用して、珪砂7号と珪砂8号を混合した試料と水ガラス系薬液を用いた注入実験を行なった。図-1の中央に設置した地盤試験体(直径60cm, 高さ60cm)の内部に、薬液注入用の注入管と薬液採取用の観測管を立てる。観測管を利用して、薬液注入時の土中の間隙水圧を測定するとともに、注入薬液が固結する前に観測管より薬液を採取し、ICP分析装置により薬液シリカ濃度を測定した。注入材固結後に注入実験装置を解体し、薬液固結砂のブロックから供試体を切出して一軸圧縮試験を行なった。また、注入実験により得られた観測管位置での薬液シリカ濃度の変化に関する測定結果と、別途行なった移流分散解析により得られたシリカ分の移動に関する解析結果と比較検討した。

図-2に間隙水圧に関する移流分散解析による解析値と実測値との関係、図-3にシリカ分の移動に関する解析値と観測管から採取した注入材のシリカ濃度、固結後の供試体について測定したシリカ濃度との関係を示す。

図-2・図-3より、注入点からの距離に応じた間隙水圧やシリカ濃度の分布状況は、解析値・実験値ともに非常に類似した形の曲線を描き、間隙水圧の変化がシリカ濃度変化に強く関係していることがわかる。地盤内の動水勾配に相当する間隙水圧の変化がシリカ濃度の変化に密接に関係していることから、薬液注入に伴う移流分散においては、移流による薬液移動の影響を強く受けていることがわかる。また、間隙水圧、シリカ濃度ともに解析値と実測値はほぼ一致しているといえる。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は可能である。

図-4は、上記の注入実験で得られた固結砂のシリカ濃度からシリカ濃縮率 $S$ を求め、そのシリカ濃縮率 $S$ と固結ブロックから切出した供試体の一軸圧縮強度の関係に、別途行なったモールド実験で得られたシリカ濃縮率 $S$ と一軸圧縮強度の関係を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、注入口近傍では薬液の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ことがわかる。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。

### 3. 地盤注入材料の長期耐久性<sup>2)</sup>

図-1の注入試験装置を利用して、2.と同じ砂試料を用いて注入速度:1.0 (l/min), 注入量:6.0 (l),

注入圧の計測間隔:1 (sec), 側圧:30 (kPa)のもとで、水ガラス系溶液を注入した。写真-1は、注入された溶液が球状に浸透固結した試料ブロックを示したものである。実地盤においても、規模は異なるが写真-1に示すような固結体ブロックが形成されて、地盤改良範囲が形成されることになる。

ここでは、この固結体ブロックを2種類の温度条件(20℃, 60℃)で最大16週間(一部は32週間または80週間)

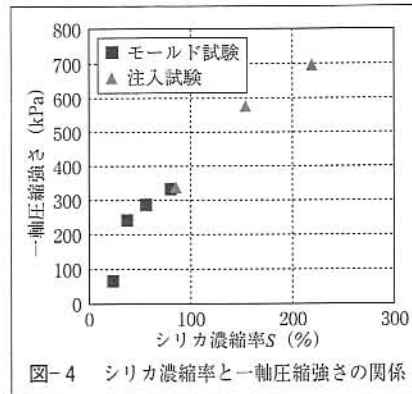
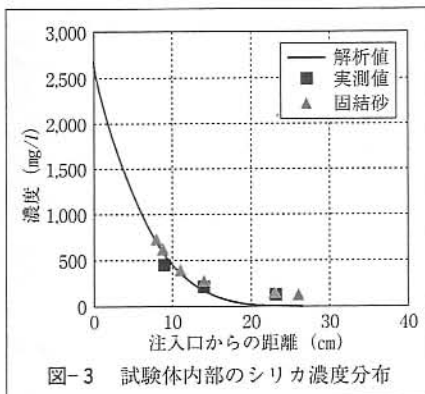
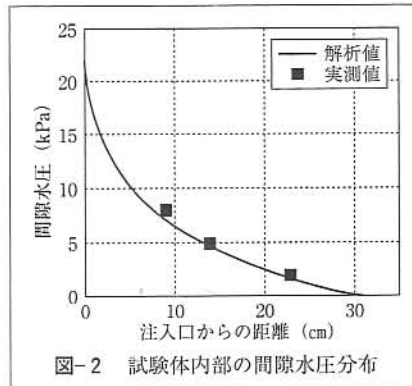
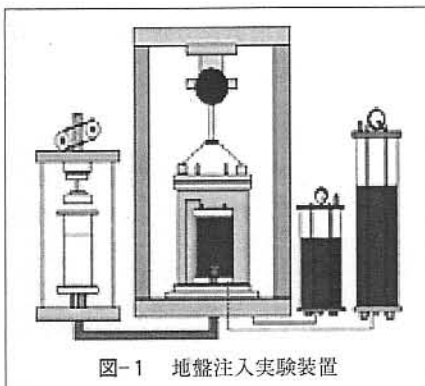


写真-1 地盤注入による固結ブロック

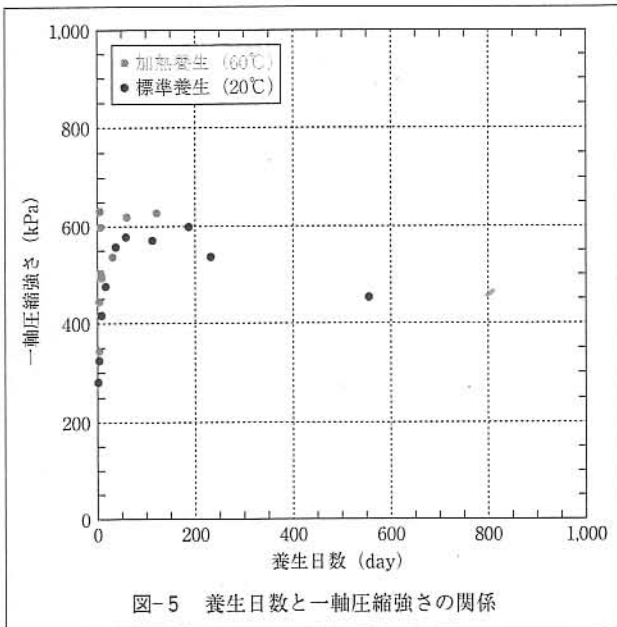


図-5 養生日数と一軸圧縮強さの関係

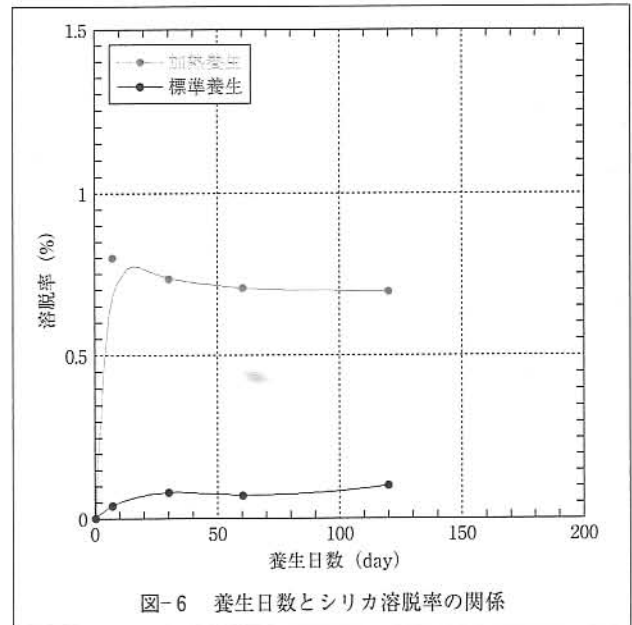


図-6 養生日数とシリカ溶脱率の関係

にわたって水中養生後、各々の固結砂の一軸圧縮強度とシリカ溶脱率の変化を測定し、長期耐久性の評価を試みた。

図-5に示すように、加熱養生された固結体ブロックの一軸圧縮強度の増加は標準養生に比べて養生後早期のうちに出現するが、その絶対値は標準養生の場合とほぼ同じであることがわかる。また、80週間の長期にわたる標準養生後であっても、その一軸圧縮強度は約25%低下するが、なお450 (kPa) の強度を保持している。

水ガラス系溶液が地盤内の間隙に注入されてゲル化した場合、地盤中のシリカ ( $\text{SiO}_2$ ) は正四面体の構造で存在する。 $\text{SiO}_2$ 同士は三次元上に網目状に広がっており、この連結によってゲル化すると考えられている。温度が高くなった場合、O原子の電気陰性度が大きくなるため、Si-O-Si結合角は広げられ、Si-Oの結合力が強くなる。したがって、短期的には養生温度が高い方がシリカの結合力が強くなるため、強度が大きくなると考えられる。

また図-6より、加熱養生の方が標準養生よりシリカ溶脱率が大きいことがわかる。このことは前述のように注入固結砂の強度が増す要因であるシリカは非結晶シリカであり、非結晶シリカは養生温度が上がると一般的に溶解度は増加する。しかしながら、その溶脱率はその強度低下を生じるほどではなく、標準養生の一軸圧縮強度とほとんど違いはない。

以上のことから、シリカの溶脱の少ない水ガラス系溶液を注入材料として利用することにより、長期にわたる十分な高強度と低い透水性を確保することが期待できることがわかる。なお、日本グラウト協会が実施された原位置における地盤注入の長期耐久性試験結果からも、このことが確認されている。

#### 4. 地盤注入に伴う環境負荷

近年、環境汚染化学物質が各種の生態系に及ぼす影響に対して社会的関心が高まってきており、古くから地盤

改良工法に適用されてきた地盤注入材料についても、あらためてその安全性を確認する必要が出てきた。特に、港湾地域に多く存在する既存構造物基礎地盤の液状化対策を目的とする地盤注入工法の適用に当たっては、その地盤改良効果の長期耐久性とともに、海産生物に対する注入材料の影響評価が不可欠である。

この種の環境負荷は、地盤注入における注入材料の流出負荷とゲル化物質からの再溶出負荷に分けられるが、さらにその作用メカニズムから考えると、化学物質の要因とゲル化作用の要因によるものがあると考えられる。両要因の影響を把握するためには、ゲル化して流動性が低下した後に、ある濃度(薬液注入材原液の10%v/v)までろ過海水で希釈した薬液希釈試験水とゲル化して固化した薬液注入材を、環境庁告示46号土壤汚染による環境基準溶出処理法に準拠して得た溶出水を試験水として用い、広く行なわれている急性毒性試験 (JIS-K0102) でその影響を評価することができる。

ここでは、全国沿岸域に生息する代表的な海産顕花植物類、貝類、海藻類、魚類、甲殻類などを供試生物とした試験例について紹介する。対象とした薬液注入材は中性・酸性系水ガラスで、主材 (20%)、硬化剤 (2%)、pH緩衝剤 (1%)、固化促進剤 (0.2%) と水 (76.8%) で、 $\text{SiO}_2$ 配合濃度5.8%である。

生物試験では、一般広く行なわれている急性毒性試験で当工法材料の影響評価を行なった。急性毒性試験は、海産生物に対する化学物質の許容濃度を推定するための1つの便法として、半数致死濃度 ( $\text{LC}_{50}$ ; 50% Lethal Concentration) または半数影響濃度 ( $\text{EC}_{50}$ ; 50% Effect Concentration) に適用係数を乗じることが行なわれている。本法は、日本でも公定法としてJIS-K0102に試験法が定められている。なお $\text{LC}_{50}$ または $\text{EC}_{50}$ は、試験生物の50%が死亡・影響される濃度を示すものである。図-7に示すように、縦軸を普通目盛りの阻害・死亡率(%), 横軸を対数濃度目盛りとして濃度と阻害・死亡の関係を

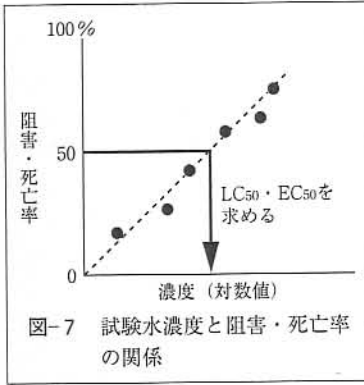


図-7 試験水濃度と阻害・死亡率の関係

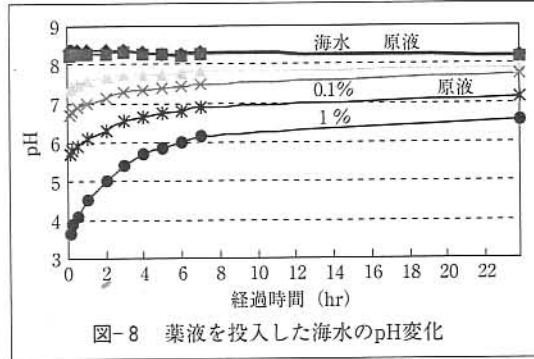


図-8 薬液を投入した海水のpH変化

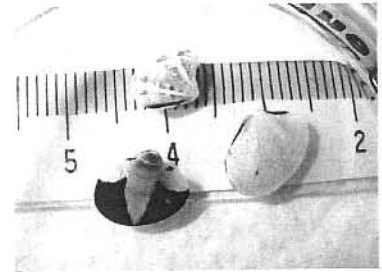


写真-2 アサリ稚貝

表し、測定値を回帰直線式（最小二乗法）で結んで $LC_{50}$ または $EC_{50}$ を算出する。

ここでは、影響が懸念される海水中の薬液注入材によるpH変化の測定結果、2種類の供試生物の暴露試験結果について述べる。

図-8に示すように、薬液注入材を投入した

海水のpH変化は、濃度が高くなるにつれて投入初期のpH低下も大きくなったが、急速に中性に回復している。また、溶出水のpHも同様な変化傾向が見られ、作成24時間後7.3から8.0まで移行する。すなわち、原液1.0%濃度および溶出水のpH値は作成24時間以上であれば、水産用水基準値（7.8～8.5）範囲内にある。

写真-2、図-9に示すアサリ稚貝の試験では、溶出試験水ケースは対照ケースと有意な差はなかったが、希釈試験水ケースは1.2%以上の濃度になるとへい死個体が観察されて、2.0%以上になるとへい死率が100%となっている。図-10のアサリD型幼生の試験では、溶出試験水ケースは対照ケースと有意な差はなかったが、希釈試験水ケース0.31%で半数致死濃度となった。この場合にも薬液注入材のゲル化による遊泳阻害が死因の1つと考えられている。以上のような暴露試験中の生物行動観察、死亡生物解剖観察、水質変化などから考察すると、水ガラス系溶液のゲル化に伴う微粒子の発生濃度がある濃度を超えると、動物プランクトンや幼生等の遊泳に阻害を与えたり、稚魚の鰓に詰まり呼吸に阻害を与えたりする悪影響があることが示唆されている。このような影響は、物理的な要因が支配的と思われる。ゲル化微粒子の移動拡散現象に着目して、注入薬液ゲルの海水中でのSi濃度の拡散をFick型の拡散方程式をもとに検討したその結果、この試験で得られた安全濃度と比較してその拡散濃度は十分小さいことから、安全性が担保されることになる。

## 5. まとめ

本論では、注入による地盤改良の長期利用を目的とし

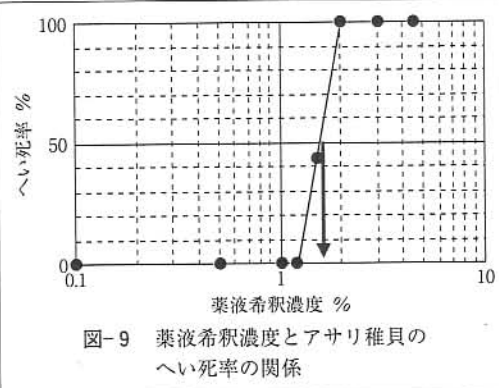


図-9 薬液希釈濃度とアサリ稚貝のへい死率の関係

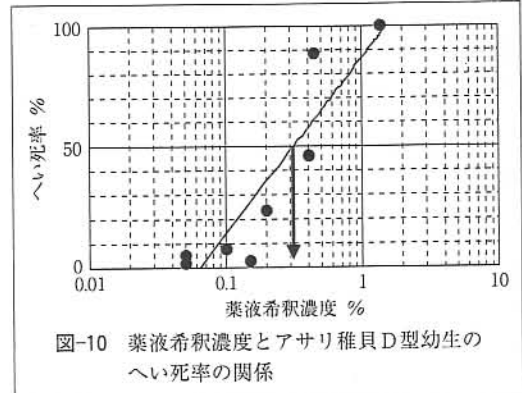


図-10 薬液希釈濃度とアサリ稚貝D型幼生のへい死率の関係

た技術開発の現状と課題について、特に地盤注入材料の土中の間隙における移動現象とそのゲル化による固結作用の立場から、地盤注入のメカニズム、固結体の長期耐久性と注入に伴う環境負荷に関する知見をとりまとめた。

地盤構造物に関しても、性能設計への対応が不可欠である。ここで述べたような地盤注入に伴う注入材料の地盤内部での動きに着目することによって、性能設計の要求にも十分応える注入工法による地盤改良技術が確立できるものと確信している。なお、地盤工学会では、今年度に「薬液注入工法の調査・設計から施工まで」の改訂版発行を予定しており、日本グラウト協会では平成21年を目標に注入工法による地盤改良の長期利用を目的とした指針案の検討が進められている。また、鉄道総合技術研究所では平成23年を目標に「注入の設計・施工指針」

（昭和61年、国鉄）の改訂作業が進められており、これまで蓄積されてきた地盤注入に関する研究と現場実績に基づいて、長期耐久性を視野に入れた新たな地盤注入技術のガイドラインが整備されることになる。

## ■参考文献

- 1) 竹内, 岸上, 赤木, 高橋: 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回地盤工学研究発表会, 2006年7月。
- 2) 岸上, 赤木: 薬液注入による固結砂の長期耐久性と強度について, No.378, pp. 755~756, 第40回地盤工学研究発表会, 2005年7月。
- 3) 林, 中村, 鈴木, 三原, 横尾, 赤木, 小河: 自在ボーリングを用いた地盤改良工法による海産生物に対する安全性について—Curvex工法による薬液注入材の試験結果—, 3-282, pp. 563~564, 土木学会第60回年次学術講演会, 2005年9月。