

外 93-45

早稲田大学大学院理工学研究科

2014

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

薬液注入において良好な固結形を得るための
注入条件と電気比抵抗による固結状況の
評価方法に関する研究

申 請 者

小 峯 秀 雄

H I D E O

K O M I N E

平成 5 年 1 1 月

薬液注入工法は、止水および地盤の強度増加を目的とする地盤改良工法のひとつである。この工法は簡便であり、短期施工が可能であるため広く普及している。しかし、対象地盤に対して適切な注入を実施するための基礎理論が未成長であり、注入効果の期待できる合理的な注入方法の選定が困難である。また、注入後の改良範囲や改良効果の確認も難しいため、注入範囲に未固結部が残存し、出水崩壊事故に至ることも少なくない。以上のような問題点が薬液注入工法の信頼性向上の障害とされている。薬液注入工法は、近年、著しい都市地下利用のための掘削工事において、地盤補強や止水対策として非常に重要な工法と考えられている。したがって、上記の問題点を解決することは、注入技術を合理化し信頼性を向上させ、今後の薬液注入工法の発展において大いに役立つものと考えられる。そこで、注入効果の高い浸透固結形状が得られる注入速度と薬液ゲル化時間の選定方法の確立、および注入後の浸透固結状況、すなわち改良範囲と改良効果の測定・評価方法の開発を本論文の目的とする。

第1章では薬液注入工法を合理化する上で隘路となっている問題点とそれに係る現状について概説した。そして、信頼性の高い合理的な薬液注入技術の開発のためには、薬液の浸透形状を支配する注入速度および薬液ゲル化時間の適切な選定方法と注入後の薬液の浸透固結状況の適切な評価方法が必要不可欠であることを述べた。

第2章では、上記の研究目的である良好な浸透形状を得るための条件および注入後の浸透固結状況の評価方法に関する既往の研究について述べた。そして良好な浸透形状を得るためには、地盤条件や注入条件に基づく薬液の浸透・割裂のメカニズムについて把握する必要があると、地盤条件に応じた注入速度や薬液ゲル化時間の選定方法の確立が重要であることが分かった。また、注入後の浸透固結状況の評価方法については、改良範囲や改良効果を定量的に、かつ非破壊で簡便に実施できる方法の開発が必要であることを明らかにした。

第3章では、前章に述べた現状を踏まえて、緩結性薬液とゲル化時間の短い急結・瞬結性薬液それぞれに対して、砂質地盤における浸透と割裂現象について実験的検討を行った。その結果、ゲル化時間の長い緩結性薬液に対して、浸透形状は、土被り圧に相当する拘束圧や透水係数の地盤条件と注入速度に強く依存しており、その状態は有効注入圧 p と注入速度 q の関係、すなわち $p \sim q$ 曲線の形状によって表現できることを示した。したがって、 $p \sim q$ 曲線から注入速度に対応する薬液の浸透および割裂の状況を予測できることが明らかになった。一方、注入時間よりもゲル化時間の短い急結・瞬結性薬液の場合は、注入中に薬液がゲル化するので、後続の薬液が間隙中でゲル化した先行薬液を穿孔する。そして、その先行薬液による固結体の外側に後続薬液が浸透し固結する。この場合、注入圧は緩結性薬液の場合より高くなるので割裂が発生しやすく、特に透水係数の大きい砂層以外は、割裂面が拡大するので不良な板状の固結形状になることが明らか

になった。

第4章では、前章の実験結果を踏まえて、注入効果の期待できる注入速度および薬液ゲル化時間の適切な選定方法を提案した。第3章では $p \sim q$ 曲線の形状から注入速度に対応する薬液の浸透および割裂の状況を予測することが可能であることを明らかにした。ところで実地盤の $p \sim q$ 曲線を得るには、実際の薬液ではなく、水を注入して測定するのが現実的である。そこで、水注入による $p \sim q$ 曲線から薬液の場合の浸透および割裂の状況を予測するために、水と薬液の粘性の違いを補正する方法を実験結果に基づき示した。さらに、注入効果の高い良好な浸透形状が得られる許容割裂面積に着目し、固結形状と割裂面積の関係を実験的に調べた結果、割裂面積の許容値は 3000 cm^2 程度であることを示した。以上の結果に基づいて、許容割裂面積になる薬液の注入速度を水注入による $p \sim q$ 曲線上から、直接求める方法を提示した。この注入速度を限界注入速度 q_{cr} とし、これ以下の注入速度を用いれば良好な浸透固結形状になり得る。さらに実用上の注入速度は $5 \sim 20 \text{ リットル/分}$ であるので、 q_{cr} が、この範囲に入るのは透水係数が $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ cm/sec}$ の砂層であることを明らかにし、この範囲の砂層についてのみ限界注入速度の選定が必要であることを示した。一方、透水係数の小さい場合には、注入時間よりもゲル化時間の長い薬液の方が浸透しやすいことは理論的、実験的に明らかである。透水係数が 10^{-1} cm/sec 以上の砂層では浸透性が良いので、緩結性薬液を用いるとゲル化するまでの間に間隙水との比重差および地下水流により、浸透薬液が注入位置から大きく移動することが実験により明らかになった。したがって、地盤の透水係数に応じてゲル化時間を短く調整する必要があるため、実験結果に基づき地盤の透水性によるゲル化時間の選定基準を提示した。

第5章では、前章の室内実験に基づき提案した限界注入速度の選定方法の妥当性を検証するために、 10^{-4} cm/sec 程度の透水係数を有する砂地盤において現場注入・掘り出し実験を行った。実地盤の限界注入速度を選定するには水注入試験を行う必要があるが、実験室と異なり正確な $p \sim q$ 曲線を求めるのは容易でなく、試行錯誤の上、合理的な現場水注入試験方法を開発し提案した。この方法により現場水注入試験を行い、 $p \sim q$ 曲線を求め、前章で提案した方法により限界注入速度 q_{cr} を選定した。そして、 q_{cr} 以上と以下の注入速度で、それぞれ緩結性薬液を注入した。 q_{cr} 以上では、大きく割裂し固結形状はいびつな不良形状となったが、 q_{cr} 以下では、ほぼ良好な固結形状が得られた。この結果から、第4章で提案した限界注入速度の選定方法の妥当性をほぼ確認できた。

第6章では、既往の研究から電気比抵抗に着目した浸透固結状況、すなわち改良範囲と改良効果の評価方法の可能性を述べた。薬液注入工法で主に使用されている水ガラス薬液の電気比抵抗は、地盤や地下水の比抵抗と比べて約 $1/100$ と小さく、注入前後において注入範囲の電気比抵抗が著しく低下すると考えられる。この点に着目して、注入前後の地盤の電気比抵抗変化による浸透固結状況評価の可

能性について述べ、電気比抵抗による薬液充填率の評価方法の開発と浸透固結状況評価における比抵抗トモグラフィの適用性の検討が必要であることを示した。

第7章では、前章で挙げた課題の一つである電気比抵抗による地盤改良部の薬液充填率評価方法の開発を目的として、注入前後の地盤にそれぞれ相当する飽和未固結砂と薬液固結砂の電気比抵抗特性について実験的に検討した。特に、薬液固結砂の電気比抵抗と改良効果の指標となる薬液充填率との関係に着目して実験を行い、これらが良い相関性を有していることを示した。これらの結果に基づき、飽和未固結砂および薬液固結砂の電気伝導機構をモデル化し、比較的簡易に原位置においても測定できる薬液固結砂の電気比抵抗から薬液充填率を評価する方法を提案した。

第8章では、第6章で挙げたもう一つの課題である薬液の浸透固結状況評価における比抵抗トモグラフィの適用性の検討を行った。本章では、まず第7章で提案した飽和未固結砂と薬液固結砂の電気比抵抗モデルに基づき、地盤中の電気比抵抗分布を測定できる比抵抗トモグラフィを利用した浸透固結状況の測定・評価の手順を示した。さらに、浸透固結状況の評価における比抵抗トモグラフィの適用性を検討するために、比抵抗測定における電極配置、地下水と薬液の比抵抗に関する適用限界、および適用可能な注入形態について室内模型実験により検討した。電極配置については、薬液による固結体が測定用電極に近いほど改良範囲を精度良く測定できることから、注入範囲に対して可能な限り近い位置にボーリング孔を設け、電極を配置する必要性を示した。一方、地下水と薬液の比抵抗については、両者の比抵抗の間に明確な差異があるほど高精度な改良範囲の測定ができ、地下水の比抵抗が薬液の10倍以上であれば、十分良好な測定が可能であることを明らかにした。そして、一般に使用される薬液の場合、海水の影響を受ける海近傍の地点を除くほとんどの地盤に対して比抵抗トモグラフィを利用して浸透固結状況の評価が可能であることが分かった。さらに、薬液の浸透固結状況の評価に比抵抗トモグラフィが適用できるのは浸透注入もしくは一定の改良範囲を有する割裂浸透注入の場合であることも示した。

第9章は、第1章から第8章までの結論をまとめたものである。本論文で提案した限界注入速度の選定方法および薬液ゲル化時間の選定基準により、注入効果の期待できる良好な浸透固結形状が得られることを明らかにした。また提案した浸透固結状況評価方法によれば、注入後の改良範囲や改良効果の評価が精度良く実施できることを示した。