

博士論文審査報告書

論 文 題 目

薬液注入における限界注入速度決定の
問題点とその改善に関する研究

Study on Improvement of the Determining Method
for Critical Injection Rate in Chemical Grouting

申 請 者

福井	義弘
Yoshihiro	FUKUI

2020年7月

薬液注入は止水や強度増加を主たる目的とした地盤改良工法の一つであり、開削工事やシールドトンネル、近年では増加している線路下横断工事など地下水面上の地盤の掘削を実施する場合に広く用いられている。この工法は、簡便で迅速な処理が可能で、狭隘な空間においても施工できる特徴がある。このように他の工法では代替できない場合が多いので、今後とも広く採用されるものと想定される。しかし、重要な注入効果における確実性の面では、未だに十分な信頼性を確保できているとは言い難い。このことが薬液注入工法の最大の問題点であり、これを解決するには薬液の浸透状態を支配する主要因とその対応手段を見出す基礎研究が必要不可欠である。

薬液注入は砂質系地盤を主対象とするので、この場合その効果を確実にするには、設計段階の想定のように、注入孔の各ステップにおける薬液の浸透固結体が球状または円筒状で良好なまとまった形状になり、隣接ステップの固結体と漏れなく連結一体化させることが必要である。これこそが薬液注入の基本思想とも言える。この基本思想の立場から、薬液の浸透固結形状に注目し、固結形態に最も影響を及ぼす因子は、注入の際に地盤中に進展する割裂面の大きさであることが確認されている。このことから、良好にまとまった固結形状にするための薬液の浸透面となる割裂面積の許容限界の定量化は極めて重要である。ここで、発生する割裂面積の大きさは、注入地点の地盤状態と注入速度によって決まり、許容割裂面積に達する注入速度を限界注入速度と定義付けられている。薬液注入においては注入地盤の限界注入速度以下の注入速度を用いることが必要条件であり、それによって良好にまとまった固結形状になり得る。一方でこの限界注入速度の決定理論と実際地盤における試験方法については、限界注入速度試験の普及に伴って新たな問題が生じてきた。

本論文では、限界注入速度の決定に係わるこうした問題点を分析し、それに関する複数の修正法を提案するとともに、その妥当性と適用性を検証した一連の研究について要約している。

審査にあたっては、2020年3月5日に審査員予定者3名による予備審査を実施し、専攻内縦覧に付してよい旨の判定を得た。3月6日から14日間の建設工学専攻における縦覧の後、3月19日の専攻会議で博士論文受理申請が承認され、4月16日の創造理工学研究科運営委員会で論文が受理された。5月28日に公聴会を開催するとともに、4科目の学識確認を実施した。研究倫理については受理前に申請者が研究倫理科目を受講するとともに、論文の剽窃・盗用チェックを実施して問題のないことを確認した。

本論文は緒言から結論までの全7章で構成されており、以下に各章の概要と審査結果を述べる。

第1章は緒言であり、薬液注入が地盤改良工法の一つとしてこれまで果たしてきた役割を概観するとともに、その中で限界注入速度の考え方が適正な注入施工の基本となっていること、他方、限界注入速度試験の普及に伴って新たな課題が明らかになり、その解決に向けての改善に関する提案に至った本研究の

経緯などを述べている。

第2章では、薬液注入に関する既往の研究をまとめ、多面的なアプローチで信頼性向上の研究が実施されてきたことや残された課題について述べるとともに、既往の研究と本研究との関係についても概説されている。

第3章では、限界注入速度の重要性とその決定に際しての問題点を詳述しており、その内容は以下のように要約することができる。

限界注入速度の決定には段階的に増加させる注入速度 q とそれに応じた注入圧 p との関係を表す $p\sim q$ 曲線が基本となるが、この $p\sim q$ 曲線は注入による地盤の割裂状況を示すことから、当然のことながら正確なものでなければならない。しかし、 $p\sim q$ 曲線のプロットの値や曲線の形状を地盤の割裂圧やその他の条件を考慮して修正しなければならない場合のあることを示している。したがって、限界注入速度の正しい決定には $p\sim q$ 曲線の修正の要否を判別する必要がある、そのためには実務上熟練を要するうえ、 $p\sim q$ 曲線に必要な現場注水試験はかなりの手間を要するとともに1孔で1つの $p\sim q$ 曲線が得られるのみであることから、広範囲にわたる薬液注入範囲の地盤の限界注入速度をより詳しく調査するのは容易ではないことが指摘されている。

第4章では、限界注入速度決定における問題点を分析し、それに基づき限界注入速度に関する容易で簡便な複数の修正法を新たに提案しており、その内容は下記のとおりである。

(1)限界注入速度は作図した $p\sim q$ 曲線に基づいて決定するが、限界注入速度に最も影響する初期直線勾配 i_0 の決め方は必ずしも容易ではない。この勾配部の最高点は地盤の割裂発生圧 p_f であるが、これを $p\sim q$ 曲線上で明確に判定できない場合は i_0 の誤差が出やすいので、その地盤に適用可能な最小割裂発生圧による修正法が利用できる。

(2)限界注入速度試験中の p と経過時間 t の関係曲線が上昇型になる場合がある。これは地盤の目詰まりなどから注入により地盤の間隙圧が上昇したことを意味するもので、その上昇分とそれ以前の段階で生じた上昇分の全合計量を差し引き、修正した p を用いたプロットによる $p\sim q$ 曲線にすれば、誤差の少ない限界注入速度を決定できる。

(3) $p\sim q$ 曲線の $q=2(\ell/\text{min})$ と $q=10(\ell/\text{min})$ にあたる注入圧を各々 p_2 、 p_{10} としたとき、 (p_{10}/p_2) 値は地盤の透水特性と注入速度 q の増加に伴う地盤の割裂進展特性をよく表していることに着目し、 (p_{10}/p_2) 値と限界注入速度 q_{cr} の実測結果をもとに次のような簡便な関係式を求め、その適用性を論じている。

$$q_{cr} = 10 \{ (p_{10}/p_2) - 1 \} (\ell/\text{min})$$

ダブルパッカー方式を用いた注入現場についてこの簡便式を適用し、その妥当性を検証したところ、平均的には低めでばらつきの大きい q_{cr} 値になることを確認している。この原因としては、ダブルパッカー方式における薬液の浸透面積を決定するシールグラウトの注入に伴って割裂進展面積に変化が生じることと注入圧力を支配する真の管内抵抗の測定不備であることを解明し

ている。

第5章では、本論文の主題である限界注入速度試験が鉄道構造物の設計施工に係る基準である「注入の設計施工マニュアル」に導入されたことを述べている。

従来未解明の部分が多い限界注入速度の重要性が鉄道工事での薬液注入施工において認識され、本論文で示した研究成果が限界注入速度評価の研究事例として採用されたことは、研究成果の社会的貢献という意味でその意義は大きいと認められる。

第6章では、この基準に則って施工され、良好な浸透固結が得られた実際の比較的規模の大きい線路下横断の推進工事での注入効果確認に関して新たな提案を行っている。

具体的には、薬液注入効果を確認する高周波の弾性波を用いた音響トモグラフィ探査および固結体のシリカ濃度測定結果をもとに、注入後の改良地盤の圧縮強度と透水係数を推定する方法を考案している。その結果、音響トモグラフィ探査と固結体のシリカ濃度による推定値は、土質条件の違いを考慮することにより別途求めた圧縮強度や透水係数と概ね対応していることを確認している。目的別の原位置試験は作業時間と費用を要するため、比較的簡便な弾性波速度やシリカ濃度の測定値を地盤条件に応じて組み合わせることにより注入効果が推定できれば大幅な効率化が期待できるものと評価できる。

第7章では、結論として各章で述べた結果および知見をとりまとめ、今後益々ニーズが高まると想定される地盤改良における薬液注入の本研究での課題を整理している。

以上を要するに、本論文は薬液注入工法における限界注入速度の決定に係わる問題点を分析し、それに関する修正法を提案するとともに、その妥当性と適用性を検証した一連の研究の成果を総括したものである。この成果の一部は、既に鉄道構造物の設計・施工基準に反映されるとともに、各種の既設地下構造物の輻輳した都市部で地下水の存在する線路下横断工事などにおける確実な薬液注入工法の適用に向けて具体的な解決手法を提示するものであり、地盤工学、トンネル工学上の貢献大なるものと判断される。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。

2020年6月

審査員 主査 早稲田大学教授 工学博士(早稲田大学) 赤木 寛一

副査 早稲田大学教授 博士(工学)早稲田大学 小峯 秀雄

早稲田大学教授 博士(工学)早稲田大学 岩波 基
