

# 博士論文審査報告書

## 論 文 題 目

地盤注入工法における注入材料の  
移動と耐久性に関する数値解析

Numerical Analysis on Movement and Long Term  
Performance of Grouting Material by Chemical  
Injection Method

申 請 者

|         |          |
|---------|----------|
| 仲山      | 貴司       |
| Takashi | Nakayama |

建設工学専攻土質力学研究

2014 年 2 月

地盤注入は、地盤改良工法の一つであり、固化時間を調整できる材料（注入材料）を岩盤の亀裂や土の間隙に充填して、強度や止水性の向上を図るものである。日本では、1970年代に発生した地盤注入に伴う井戸水汚染事故を受けて制定された「薬液注入工法による建設工事の施工に関する暫定指針」によって、注入材料はセメント系または水ガラスを主材とするものに使用制限されることとなった。しかしながら、注入は作業の方向性や施工順序の自由度が高く、作業空間や時間に制約が多い現場では必要不可欠であるため、現在に至るまで地盤掘削工事の補助工法としての施工実績を数多く挙げている。さらに、近年では大規模地震の発生に伴う甚大な地盤災害を契機として、既設の鉄道盛土や埋立地などの支持地盤を強化する長期的な耐久性を要求される地盤改良工事にも利用が拡大している。

一方で、鉄道事業者が共通して利用する「注入の設計施工指針」が25年ぶりに改訂されるにあたって、以下の2つが克服すべき重要課題であった。

#### （1）周辺地盤の変位・変形

地盤掘削を伴う近接工事では、近接構造物に有害な影響を与えないようにするため、注入で事前に地盤改良を行う場合が多い。地盤注入の通常の施工法によると有害な影響が及ぶとされる範囲（たとえば、近接構造物との離隔が注入深度の1.5倍の範囲）では、土被りや地盤条件によらず、事前の対策や影響予測が必須とされている。

この効果的な対策として、周辺地盤への影響が小さい浸透注入を主体とした工法が多く利用されている。ただし、これらが開発されてから日が浅いことに加え、浸透注入を対象とした周辺地盤への影響予測法は確立されておらず、従来から行われた近接施工対策も併せて行っているのが現状である。

#### （2）改良体の長期耐久性

これまで耐久性を有することが一般的に知られている注入材料はセメント系材料であり、特に高炉スラグを用いたものは耐久性が高いとされてきた。これに対して、砂質地盤に対して浸透注入が可能な水ガラス系材料は、時間の経過とともに徐々に改良効果が失われるとされてきた。近年はこの劣化現象を抑制した材料も開発されたが、開発から十数年程度しか経過しておらず、コンクリート構造物の一般的な耐用年数とされる100年にわたり改良効果を期待することができるか、明確な答えは得られていない。

これらの課題に対して既往の研究を調査した結果、土の間隙を乱すような脈状注入を想定した注入工法に関する検討例はあるものの、浸透注入を主体とする注入工法を対象とした手法は確立されていない。また、改良体の長期耐久性については、長期経過後の注入材料の耐久性を予測する定量的な手法を確立しようとする研究は行われていない。

以上を踏まえ、本論文では、地盤注入工法を対象として、有限要素法を用いた注入に伴う地盤変形解析と改良体の長期耐久性評価の手法を構築するこ

とを目的としている。

第1章の序論では、地盤注入工法の歴史と近年の技術開発の動向、既往の研究を調査して、現状の計画・設計・施工における課題を明らかにするとともに、本論文の構成を示している。

第2章の鉄道分野における地盤注入工法の施工事例分析では、鉄道事業者を対象としたアンケート調査を実施し、鉄道における地盤注入工法の施工事例（221事例）における使用された注入材料や注入工法の傾向分析を行っている。この結果、周辺地盤への影響を最小限とすることを目的として、注入精度や浸透に優れる注入工法が比較的高価であるにも関わらず、施工事例の大半を占めることを明らかにしている。また、注入材料については、長期耐久性を有するとされるものの使用が少ないながらも見られ、長期的な耐久性を要求される地盤改良工法としての利用が進められていることを確認している。

第3章の地盤注入に伴う周辺地盤の変位予測手法では、注入材料の浸透現象に基づく周辺地盤の変位予測手法を考案している。既往の地盤の受働状態における崩壊角度の観点からの考察や注入管の吐出口位置に注入圧力を作用させた地盤変形解析では、実際の計測結果を説明しきれないことを指摘している。この要因が、注入材料や間隙水が周辺地盤を浸透することで土粒子骨格に作用する圧力（浸透水圧）を無視していることにあると考えて、有限要素法により、以下の手順を採用して注入に伴う地盤変形解析を実施している。

① 注入に伴って地盤全体に生じる過剰間隙水圧を求める。

② 求めた過剰間隙水圧をもとに、浸透水圧を求める。

③ 浸透水圧を等価節点外力に換算して、有効応力として土粒子骨格に作用させて地盤変形解析を行う。

ただし、①の過剰間隙水圧を浸透流解析で求める場合、注入材料と間隙水は粘度が異なるため、二相混合流体として取扱わなければならない、浸透流解析は複雑かつ時間を要するものになるという課題がある。したがって、①では簡易に注入に伴う過剰間隙水圧を求められる **Maag**(マージ)の理論式を修正して用いている。

浸透流解析との比較および現場計測結果のシミュレーション解析を実施したところ、**Maag**の理論式はそのまま用いると地盤変位量が実測値と大きく乖離する結果となった。このため、注入孔以深の過剰間隙水圧には注入に伴う地下水圧の増加を考慮する補正方法を考案して、現場計測結果と対応した結果が得られることを確認し、パラメトリックスタディにより、注入孔直上の地表面の隆起量を求める簡易算定式を作成している。

第4章の地盤注入による改良体の耐久性評価手法では、流水を利用した促進試験とその有限要素法による解析結果を利用して、注入材料に含まれるシリカ（ $\text{SiO}_2$ ）の拡散現象に基づく改良体の長期耐久性の評価手法を提案して

いる。

水ガラス系の薬液で固結させた  $\phi 5 \times 10 \text{cm}$  の砂供試体を流水中に設置して、シリカの溶脱促進試験を実施している。この結果、供試体の強度や透水係数、体積の変化と供試体内部のシリカ濃度の変化との関係を明らかにし、化学平衡の観点から、供試体表面でのシリカ溶脱速度がその時のシリカ濃度に依存すると仮定した有限要素法による拡散解析で、適切な拡散係数を用いることによって促進試験で得られた供試体内部のシリカ濃度分布に対応した結果が得られることを確認している。

この解析手法を利用して、 $\phi 30 \text{cm}$  の大型球状供試体、また別途行われた薬液注入による長期耐久性に関する現場実証試験におけるシリカ溶出のシミュレーション解析を実施し、実規模におけるシリカ溶出挙動を再現できることを明らかにしている。さらに、鉄道施設に用いられるコンクリート構造物の一般的な耐用年数である 100 年後までの直径 1m の薬液固結砂の体積減少量を試算している。この結果、対象とした注入材料による固結物の 100 年後の体積減少発生箇所は、外周部の 85mm の範囲に限定されること、また外周部は必要な強度を満たすことから、地盤注入における設計では面積比で約 1.2 倍の改良範囲を設定すれば、100 年後も必要な性能を満たすことを照査している。

第 5 章は本論文の結論であり、本研究で得られた主要な成果を総括するとともに、今後の課題について要約している。

以上を要するに、本論文は、地盤注入工法を対象として、有限要素法を用いた注入に伴う地盤変形解析と改良体の長期耐久性評価の手法を新たに構築し、その妥当性を室内実験と現場実験により確認している。この成果は、各種の鉄道施設の維持管理や液状化対策上、必要不可欠な地盤注入工法に適用可能な数値解析手法を提示するものであって、地盤工学、環境地盤工学上の貢献大と言える。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。

2014 年 2 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 | 工学博士(東京大学)  | 濱田政則 |
|     |    | 茨城大学教授  | 博士(工学)早稲田大学 | 小峯秀雄 |