

博士論文概要

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 Grouted 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

2013年11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。その歴史は古く、19世紀初頭にフランスの Berigny(ベリーニ)によって開発され、日本では1915年に長崎県松浦炭鉱で利用されたことが最初の記録として残されている。その後の日本では、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」（建設省官技発160号、以下、暫定指針と呼ぶ）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続けている。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、社会的な安全性向上やコストダウンに対する要望から、注入の計画・設計・施工の精度をさらに向上させる必要性が指摘されている。特に、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。ただし、注入自体の施工も近接構造物に影響を与える可能性があるため、注入範囲および近接構造物との離隔に応じた近接程度の判定を行い、施工の影響度合いを事前に検討する必要がある。鉄道の近接程度の判定によれば、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、近年、周辺地盤への影響が小さい浸透注入（土の骨格構造を変えずに注入材を間隙に充填する注入形態）を主体とした新しい工法が利用され始めている。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。例えば、鉄道構造物直下の注入では、夜間の線路閉鎖間合いでの注入作業とするなどの対策が一律に講じられるため、補助工法である注入の工期やコストが工事全体に占める比率は高くなる傾向にある。

（2）改良体の長期耐久性

現在の地盤注入に用いられる注入材料は、前述したように暫定指針でセメント系または水ガラスを主材としたものに制限されている。このうち、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、これまで材料に含まれるナトリウムイオンが水ガラスに含まれるシリカの共有結合を破壊するため、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、注入に伴う周辺地盤の変位・変形の影響予測手法については、数少ないながらも検討されていることが明らかになった。しかしながら、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、室内促進実験で耐久性を有する注入材料を選別する研究は行われているものの、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、本研究では、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た。

本論文は 5 章から構成されており、以下に各章の概要を述べる。

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た。

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た。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が明らかになった。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が確認できた。

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た。既往の研究では、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が明らかになっていた。この要因は、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、本研究では、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た。

- 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ることとした。

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た。また、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た。

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(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た。

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、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た。この結果を用いて、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た。

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た。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たところ、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た。

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た。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 仲山 貴司 印

(2013年11月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
1. 論文	
○論文	仲山貴司, 澤田亮, 平岡陽, 赤木寛一, 薬液注入工法で固化した改良体の耐久性評価に関する研究, 土木学会論文集 C, Vol.69, pp.162-173, 2013年4月
○論文	仲山貴司, 橋直毅, 岡野 法之, 赤木寛一, 薬液注入に伴う地盤変形の数値解析手法に関する研究, 土木学会論文集 F1 特集号, Vol.66, pp.137-143, 2010年11月
○論文	T. Nakayama, N. Tachibana, N. Okano and H. Akagi, A study on numerical simulation during chemical grouting, <i>Ground Technology and Geo-Information(IS-AGTG2011)</i> , 2012年12月
○論文	仲山貴司, 岡野法之, エレメント推進工法における緩み土圧算定方法の提案, トンネルと地下, Vol.42, pp.301-307, 2011年4月
○論文	仲山貴司, 岡野法之, 薬液注入に伴う地盤変形予測法の構築, 鉄道総研報告, Vol.27, 2013年6月
○論文	仲山貴司, 岡野法之, エレメント推進・けん引工法における緩み土圧の分布形状, 鉄道総研報告, Vol.21, pp.41-46, 2007年8月
○論文	仲山貴司, 焼田真司, 岡野法之, 井浦智, 注入の設計施工マニュアルの要点, 日本鉄道施設協会誌, Vol.49, pp.1037-1039, 2011年12月
○論文	仲山貴司, 小島謙一, 都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル, 日本鉄道施設協会誌, Vol.45, pp.394-396, 2007年5月
論文	小西真治, 仲山貴司, 田村武, 豊田浩史, 松長剛, 井浦智実, 地下水圧および飽和度による粘着力の変化を考慮した切羽安定評価法, 土木学会論文集 F, Vol.69, pp.1-9, 2013年1月
論文	岡野法之, 仲山貴司, 津野究, 小島芳之, 西藤潤, 朝倉俊弘, れんが積み覆工トンネルの耐力評価に関する研究, 土木学会論文集 F, Vol.69, pp.29-38, 2013年1月
論文	木股浩孝, 仲山貴司, 津野究, 粥川幸司, 小西真治, シールドテールとセグメントの接触を考慮した施工時荷重の解析的検討, 土木学会論文集 F, Vol.69, pp.73-88, 2013年1月
論文	高山博文, 増田康男, 仲山貴司, 重田佳幸, YINGYOGRATTANAKUL Narentorn, 朝倉俊弘, トンネル覆工コンクリートに生じるひび割れの現地計測・解析と発生抑制法の一考察, 土木学会論文集 F, Vol.67, pp.46-61, 2011年6月
論文	近藤義正, 仲山貴司, 赤木寛一, 掘削土砂に気泡と水を添加した地盤掘削用安定液の開発と適用, 土木学会論文集 C, Vol.64, pp.505-518, 2008年7月
論文	焼田真司, 仲山貴司, 小西真治, 赤木寛一, シールドトンネルのひび割れ進展過程に関する一考察, 土木学会論文集 F1 特集号, pp.109-116, 2011年11月
論文	高山博文, 増田康男, 仲山貴司, 植村義幸, 朝倉俊弘, トンネル覆工コンクリートに生じるひび割れの発生メカニズムに関する実験的研究, 土木学会論文集 F, vol.66, pp.132-145, 2010年6月
論文	佐藤豊, 仲山貴司, トンネル裏込め注入材の圧密と固化のメカニズム, 鉄道総研報告, Vol.20, 47-52, 2006年5月

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 仲山 貴司 印

(2013年11月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	小西真治, 佐藤豊, 仲山貴司, リスクマネジメント手法を用いた鉄道トンネル維持管理計画法の検討, 信頼性シンポジウム発表報文集, pp.45-48, 2006年10月
2. 講演	
○講演	仲山貴司, 澤田亮, 弾性波探査による薬液注入の効果確認手法に関する研究, 第48回地盤工学研究発表会, pp.835-836, 2013年7月
○講演	仲山貴司, 牛田貴士, 焼田真司, 岡野法之, 近年の注入工事例と改良体の強度特性, 第21回トンネル工学研究発表会報告集, Vol.21, pp.136~148, 2011年11月
○講演	仲山貴司, 岡野法之, 宇井仁将, 高橋博樹, 小宮一仁, エレメント推進けん引工法における下床版エレメント施工時の上床版変位の計測と解析, 第65回土木学会年次学術講演会, pp.857-858, 2010年9月
○講演	仲山貴司, 岡野法之, 水石舞衣子, エレメント推進・牽引工法における緩み領域に関する研究, 第62回土木学会年次学術講演会, pp.175-176, 2007年9月
○講演	仲山貴司, 小西真治, 地下水の影響を考慮したトンネル安定の評価法, 第60回土木学会年次学術講演会, pp.232-233, 2009年9月
○講演	仲山貴司, 新井泰, 渡辺忠朋, 栗林 建一, コンクリートと鉄筋の付着特性に関する実験解析(その1), 第59回土木学会年次学術講演会, pp.399-400, 2004年9月
○講演	仲山貴司, 赤木寛一, 起泡剤を用いた地盤掘削用安定液の圧力と地下水との差圧について, 第57回土木学会年次学術講演会, pp.249-250, 2002年9月
講演	橘直毅, 仲山貴司, 岡野法之, 薬液注入に伴う近接施工影響における数値解析手法に関する研究, 第66回土木学会年次学術講演会, pp.151-152, 2011年9月
講演	平岡陽, 赤木寛一, 澤田亮, 仲山貴司, 弾性波試験による薬液改良砂の劣化評価について, 第66回土木学会年次学術講演会, pp.71-72, 2011年9月
講演	牛田貴士, 仲山貴司, 岡野法之, 焼田真司, 吉川和行, 水ガラス系注入材の強度特性, 第66回土木学会年次学術講演会, pp.39-40, 2011年9月
講演	宇井仁将, 高橋博樹, 小宮一仁, 仲山貴司, 山下康彦, 函体推進工法における現地計測と有限要素法によるシミュレーション, 第66回土木学会年次学術講演会, pp.267-269, 2011年9月
講演	平岡陽, 赤木寛一, 澤田亮, 仲山貴司, 弾性波法に基づく薬液改良砂の力学特性評価について, 第46回地盤工学研究発表会, pp.835-836, 2011年7月
講演	赤木寛一, 一色康広, 平岡亮, 澤田亮, 仲山貴司, 希釈した薬液による改良地盤の長期耐久性について, 第7回地盤工学会関東支部発表会, pp.105-106, 2010年11月
講演	赤木寛一, 井出雄介, 岡野法之, 仲山貴司, 大型薬液注入実験におけるシリカ濃度と一軸強度の分布について, III-483, 第64回土木学会年次学術講演会, pp.965-966, 2009年9月
講演	吉川和行, 岡野法之, 仲山貴司, 砂地盤中のトンネル掘削に伴う周辺土圧に関するシミュレーション解析について, III-316, 第63回土木学会年次学術講演会, pp.631-632, 2008年9月

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 仲山 貴司 印

(2013年11月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	岡野法之, <u>仲山貴司</u> , 吉川和行, 砂地盤中のトンネル掘削に伴う周辺地盤の力学的挙動について, III-174, 第62回土木学会年次学術講演会, pp.174-175, 2007年9月
講演	吉川和行, <u>仲山貴司</u> , 連続半円筒形落し戸実験における周辺地盤の力学的挙動について, III-55, 第61回土木学会年次学術講演会, pp.55-56, 2006年9月
講演	直江久永, <u>仲山貴司</u> , 赤木寛一, 近藤義正, 地盤掘削用気泡安定液の連続地中壁工法への適用について, III-611, 第58回土木学会年次学術講演会, pp.1221-1222, 2003年9月
講演	直江久永, <u>仲山貴司</u> , 赤木寛一, 近藤義正, 気泡剤を用いた地盤掘削用安定液の性状管理, K-06, 第38回地盤工学研究発表会, pp.1527-1528, 2003年7月
講演	赤木寛一, 高橋好古, <u>仲山貴司</u> , 近藤義正, 起泡剤を用いた地盤掘削用安定液の溝壁安定化機構に関する研究, H-02, 第36回地盤工学研究発表会, pp.1859-1860, 2001年6月
3. その他	
○書籍	注入の設計施工マニュアル, (公財) 鉄道総合技術研究所, 2011年10月
○書籍	都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル, (財) 鉄道総合技術研究所, 2006年1月
○書籍	鉄道構造物等維持管理標準・同解説, (財) 鉄道総合技術研究所, 2007年1月
○特許	<u>仲山貴司</u> , 澤田亮, 赤木寛一, 薬液注入地盤の効果確認方法, 出願中
○特許	<u>仲山貴司</u> , 澤田亮, 赤木寛一, 薬液注入地盤の経年劣化調査試験, 出願中
特許	津野究, <u>仲山貴司</u> , トンネル内空変位の監視システム, 特許第300324号, 2009年12月
特許	橘直毅, <u>仲山貴司</u> , 小島芳之, トンネルのひび割れ位置検知システム, 特許第317350号, 2006年11月
特許	小島芳之, 田邊将樹, <u>仲山貴司</u> , ひび割れ検知用電気回路の製造方法, ひび割れ検知システムならびにひび割れ回路方法, 特許第4648080号, 2010年12月
特許	栗林健一, 小島芳之, <u>仲山貴司</u> , 小野隆利, 野城一栄, 小西真治, トンネル覆工コンクリートの内面補強構造物, 特許第4536565号, 2010年6月
特許	栗林健一, 小島芳之, <u>仲山貴司</u> , 田邊将樹, 野城一栄, 小西真治, トンネルの覆工コンクリートのはく落防止構造物, 特許第4494267号, 2010年4月