

氏名	きたもと ゆきよし 北本 幸 義
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	論工博第3801号
学位授与の日付	平成16年5月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	鋼管打設と注入によるトンネル先受け工の合理化に関する研究

論文調査委員 (主査) 教授 嘉門雅史 教授 大西有三 教授 青木謙治

### 論 文 内 容 の 要 旨

都市域における土被りの薄い未固結地山におけるトンネル掘削工事等では、コストの縮減や断面形状に対する自由度を確保するといった視点から、山岳トンネル工法を導入する事例が近年増加している。このような施工環境下では安全確実な地盤の補強が肝要であって、都市域の工事における周辺環境への悪影響を未然に防がねばならない。本論文は、トンネル先受け工の補強地盤として鋼管と注入によって形成される補強手法に着目し、連続一体化という観点から補強のメカニズムを説明するとともに、従来用いられている技術との比較に基づいて、補強と環境保全効果の優位性、ならびに経済性に優れた新工法の開発を行ったものであり、以下の8章からなっている。

第1章は序論であり、本研究の社会的な背景を述べ、その意義を明らかにし、鋼管と注入によって形成される先受け補強地盤の形成工法を開発することの重要性を詳述した。

第2章では、先受け工技術とその評価手法に関する現状をとりまとめ、補助工法における注入式鋼管フォアパイリングの位置づけとともに、注入式鋼管フォアパイリングが抱える現状の課題を明確にした。地山の補強対策として多用されている注入式の長尺鋼管フォアパイリングに焦点を絞り、品質および安全性の保持と、コスト縮減ならびに工期短縮を課題として検討した。その結果、鋼管を特に長尺と限定せずに、注入式鋼管フォアパイリングという名称を用いた、中尺鋼管を用いた新たなトンネル先受け工の可能性を明らかにした。また、注入式鋼管フォアパイリングの地山補強メカニズムが現状では未解明であることから、施工技術の進歩に対応するべく合理的で簡便な設計法の確立が望まれている状況を詳述した。

第3章ではトンネル先受け工による補強地盤が呈するアーチシェル状の形態に着目し、先受け補強地盤が目指す鋼管と一体化した、薬液注入の地山改良効果の評価を実施した。

さらに、土かぶり薄い状況下での掘削荷重は径方向に等分布で作用するという近似に基づいて、円筒シェル理論による解析解を誘導し、先受け補強地盤の縦断方向と横断方向で3次的に融合された補強メカニズムを簡易に表現することに成功している。

第4章では模型実験による円筒シェル理論の検証を試みており、先受け補強地盤を均質なアクリル樹脂で模擬した遠心模型実験を行い、掘削に伴う先受け補強地盤の挙動を評価した。先受け補強地盤のモーメント分布や軸ひずみ分布によれば、径方向等分布荷重を受ける円筒シェル体の挙動を呈しており、慣用設計法による一次元的な梁構造解析を用いた結果に比較して、円筒シェル理論に基づく計算結果は実験結果とよく一致している。また、長いシェルと判断される残長を有する条件では、切羽安定が保たれている限り変形抑制効果にさほど大きな差異が生じず、注入式鋼管フォアパイリングで一般に確保されている3.5mという経験的な値は、円筒シェル理論からも妥当な設定であることを明らかにした。

次に、遠心模型実験では幾何学的制約から困難であった、鋼管と注入による改良地山からなる複合体としての先受け補強地盤に関し、その変形特性に及ぼす鋼管の打設方法の影響を把握した。鋼管の周方向占有率が増加すれば複合体の弾性係数も増大し、通常0.2程度で施工されている先受け鋼管の周方向占有率では、先受け補強地盤の弾性係数が改良地山の約2倍になることを明らかにした。さらに、小口径の鋼管であっても、密に打設して周方向占有率を維持すれば先受け補強地盤の

弾性係数を確保できること、鋼管の長さや打設角度に関する大型土槽実験から、鋼管の打設角度を大きくすることによって、中尺鋼管であっても、先受け補強地盤の厚層化をもたらす変形抑制効果の増大に寄与できること等から、新開発である中尺鋼管先受け工法の基本的なコンセプトを確立した。

第5章では長尺鋼管よりも口径の小さい、長さ6~7mの中尺鋼管をより密に高角度で打設することにより、連続一体化に加え厚層化によるQCD向上効果を明らかにした。さらに、高角度で密に打設された鋼管が注入によって地山と一体化し、緩みに対抗する厚層の先受け補強地盤を形成することによって、鋼製支保工への荷重分担が極めて小さくなることを確認した。その結果、新たに開発した鋼管先受け工法は施工スピードを従来工法に比べて約20%向上させるとともに、使用材料の厳正な選別を行うことによって、10%程度のコスト縮減を図ることに成功している。

第6章では、薬液注入による先受け補強地盤の連続一体化効果について検討し、均質な浸透注入を実現するための、高性能水ガラス系薬液の開発を行った。種々の土質条件を有する地山で注入実験を行った結果、懸濁型やウレタン系では逸走したり割裂したりしてしまうような密な砂質地山においても、新開発の溶液型の特殊水ガラス系薬液は、注入圧が大きく上昇することなく、均質な浸透注入が可能であることを確認した。また、改良効果についても、目標強度をほぼ達成している。

第7章では、注入式鋼管フォアパイリングにおけるトンネル先受け工の合理的な設計・施工法を、円筒シェル理論を適用した設計手法、中口径・中尺鋼管を用いた先受け工法、ならびに高浸透性薬液を用いた注入の三者一体として提案した。また、地山の変化や注入による改良効果を迅速・安全に評価できる施工管理システムとして、汎用重機の油圧源を利用したコーン貫入試験装置を開発した。本システムから得られるコーン指数 $q_c$  (MPa)は、事前に測定したN値と $q_c=0.4N$ なる関係を有することを確認し、従来、定量的な土質評価が困難であった未固結地山の掘削に対し、有効な施工管理情報を提供できることを実証した。

第8章は結論であり、本論文で得られた成果について要約し、今後の課題を整理して示している。

#### 論文審査の結果の要旨

都市域における土被りの薄い未固結地山で、経済性や断面形状に対する自由度の面から、いわゆる山岳トンネル工法の採用される事例が近年増加している。このような施工環境下では切羽の安定性確保はもとより、地表面沈下の抑制など厳しい制約条件を余儀なくされることから、適正な地盤補強工法の開発が求められている。本論文は、鋼管と注入によって形成される先受け補強地盤に対して、連続一体化という観点から補強メカニズムの解明を行うとともに、現行技術に比べて補強と環境保全効果、ならびに経済性に優れた新工法の開発を行ったもので、得られた成果は以下のとおりである。

1) 注入式鋼管フォアパイリングによるトンネル先受け工補強地盤を、アーチシェル構造として3次的に捉えることの必要性を指摘し、円筒シェル体の補強メカニズムを遠心模型実験で明らかにするとともに、評価手法として円筒シェル理論解の適用が合理的であることを実証した。

2) 円筒供試体の載荷実験を実施し、鋼管と注入による改良地山からなる複合体としての先受け補強地盤の物性を明らかにし、鋼管の打設間隔を変えた現場の地表面沈下挙動を適切に表現することを可能にした。

3) トンネル先受け工による補強地盤の連続一体化を注入によって達成しうる、環境負荷の小さい高浸透性薬液注入材料の開発を行った。さらに、適切な補助工法の選定を目的として未固結地山における切羽の土質状態を定量的に把握するコーン貫入システムを開発して、その施工管理における有効性を確認した。

4) トンネル先受け工における補強地盤の形成効果として、連続一体化と厚層化とに焦点を当て、補強地盤形成のための鋼管の仕様や打設方法の影響を検討し、長尺鋼管に比べ中口径で中尺の汎用鋼管を用いる合理的な中尺鋼管先受け工法を開発した。

5) 新たに開発した鋼管先受け工法は鋼管の接続作業が不要となるため、施工スピードを従来工法に比べて約20%向上させるとともに、使用材料の厳正な選別を行うことによって、10%程度のコスト縮減を図ることに成功した。

以上要するに、本論文は鋼管と注入によって形成されるトンネル先受け工による補強地盤に対して、連続一体化という観点から補強メカニズムの解明を行うとともに、現行技術に比べて補強と環境保全効果、ならびに経済性に優れた新工法の開発を行ったものであり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。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。また、平成16年4月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。