特集報文：地質・地盤リスクマネジメントの社会実装に向けて

トンネル工事における補助工法の効果に関する不確実性の評価

佐々木亨・松山彰宏・日下　敦

1. はじめに

一般に広く用いられている山岳トンネル工法の掘削では、切羽と呼ばれる掘削面の安定性を確保することが重要である。しかし、トンネル工事は地中深くに、縦断的に長い構造物を構築するため、その施工範囲の地質情報を事前に完全に把握することは困難であり、設計終了時点においても地質の不確実性が残り、切羽の安定性は実際に施工するまで判断できない場合が多い。そのため、こうした地質の不確実性やそれに伴う設計の不確実性に対し、施工の段階に応じて不確実性を低減させていく地質・地盤リスクマネジメントの考え方を適用し、適切な支保工や補助工法を選定していくことが有効である。

本報告では、切羽安定等を目的に使用される長尺鋼管フォアパイリング（先受工）について、試験施工や先受工のモデル化手法を変えた三次元数値解析を実施し、地質等の不確実性による事前設計と実施工における先受工の効果の差異を評価した事例を報告するとともに、これらの検討段階で得られた先受工選定上の留意点を報告する。

2. 補助工法について

一般的に、山岳トンネルの切羽の安定性は鋼アーチ支保工やロックボルト、吹付けコンクリートから構成される支保工により確保される。しかし、未固結性地山のような地質が悪い場所では、支保工のほかに補助工法を用いる場合がある。ここで、補助工法とは、トンネル掘削に際し、主として切羽面及び切羽周辺地山の安定化を図るための手段、並びに周辺環境等の保全を目的とした対策手段の総称である[1)]。

近年多くの山岳トンネル現場で採用されている代表的な補助工法の一つが先受工である。先受工は鋼管及び注入材により地山の一体化を図ることで天端の安定性を確保する工法である。しかし、この先受工の効果は地質等の不確実性に影響を受ける可能性があり、その効果を事前設計において把握することには限界があるという課題がある。

3. 注入改良の不確実性に関する検討

3.1 盛土を用いた試験注入施工

3.1.1 試験注入施工の概要

ここでは、先受工の注入材として一般的に用いられている注入材を用いて、改良効果のバラツキを評価することを目的とした試験注入を実施した。

試験注入は、実トンネルの掘削ずりを用いて地山を模擬した盛土（高さ1.9m×奥行き3m）を作製し、そこに実際の先受工を介して注入材を注入することで実施した。

地盤材料は細粒分含有率が6.9%と低く、透水性の高い砂質土であり、原地盤と同等の密度及び含水状態となるように盛土した。先受鋼管は通常の施工では地山を削孔し3m鋼管を繋ぎ合わせながら挿入していくのに対し、試験施工においては、盛土作製時にあらかじめ3mの鋼管を埋設しておくことで鋼管と地盤の隙間を少なくなるよう設置しており、実施工よりも改良体が作成されやすい状態とした。本試験注入は、水ガラス系2種類、ウレタン系2種類、計4種類の注入材を用いて実施した。注入量は一般的に設計で用いられる式[2)]を基に、改良径φ600を想定し算出した。

3.1.2 注入改良体出来形の確認

改良径に関する試験注入結果の一覧を表-1に、改良体形成状況を写真-1に示す。材料①は注入中に盛土のり面からのリークが発生し、改良体が形成できていなかった。材料②及び③については先受鋼管の注入孔周辺に団子状に不連続な改良体が形成されてたが、表-1に示すように位置によるばらつきが大きい。材料④については設計時の想定に近い円筒状の改良体が均一に形成される結果となったが、平均してφ300mm程度と想定の半分程度の改良径となった。同じ条件下であるにもかかわらず、注入材の種類によって形成状況が異なる結果となり、いずれの材料においても形成され

Evaluation of Uncertainty in Effectiveness of Auxiliary Methods for Conventional Tunneling

た改良体は、設計で見込んでいる改良径よりも小さくなった。これは、改良体がある程度形成された後に注入材が鋼管と地山の隙間等からより透水性の高い盛土法面へ逸走したためと考えられる。実際に鋼管口元の法面には逸走した注入材により改良体の塊が形成されていた（写真-1赤枠）。なお、鋼管先端は仕切構造かつ無孔構造としたため、本試験注入施工においては鋼管先端部に改良体が形成されにくい条件であった。

比較的に注入材が浸透しやすく地山改良効果が高いと考えられていた砂質土地盤かつ、実施工よりも鋼管と地山間の隙間が少ない条件下において上記のような結果であったことから、地盤と注入材の条件により改良体の形成状況には不確実性があり、必ずしも想定通りの連続した改良体が形成されない可能性が示唆された。そのため、先受工の設計や数値解析において、注入材の効果を均一な連続体として期待することは、条件次第では危険側の設計となり得る。

3.2 注入改良体の力学特性の把握

3.2.1 地山改良効果に関する力学試験の概要

本検討では、注入材の地山改良効果を定量的に評価するため、原地盤材料及び改良体の圧密非排水三軸圧縮試験（CUB試験）を行い、注入による強度定数と変形係数の変化を確認した。改良体は試験注入施工にて形成状況が最も良かった材料④を対象とし、鋼管周辺の改良体では供試体のコアリングが困難であったため、鋼管口元に形成された改良体を用いて供試体を作成した。原地盤材料については3供試体、改良体については4供試体に対し、圧密応力（拘束圧）を変化させて試験を実施した。なお、試験時のセル圧は200kN/m²である。

3.2.2 地山改良効果に関する力学試験の結果

図-1に三軸試験により得られた有効応力状態の破壊包絡線を示す。有効応力状態における原地盤材料の強度定数は、粘着力8.1kN/m²、内部摩擦角が26.6°で、改良体の強度定数は、粘着力が532kN/m²、内部摩擦角が46.6°であった。注入材の地山改良効果により粘着力、内部摩擦角ともに向上し、特に粘着力では65倍程度と大きく向上する結果となった。

図-2に各ケースの軸差応力-軸ひずみ関係を示す。各供試体について、圧縮強さの1/2における

表-1　試験注入結果（改良径）

材料	試験注入結果（改良径）									
	鋼管口元からの距離（mm）									標準偏差
	500	800	1100	1400	1700	2000	2300	2600	2900	
①	改良体未形成のため測定不能									-
②	-	-	520	350	310	250	280	260	-	91.91
③	-	-	200	230	310	140	-	-	-	61.24
④	-	-	340	280	320	300	300	-	-	20.4

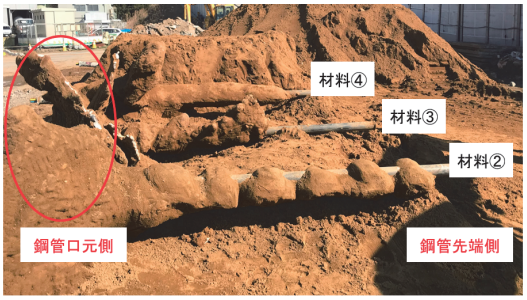
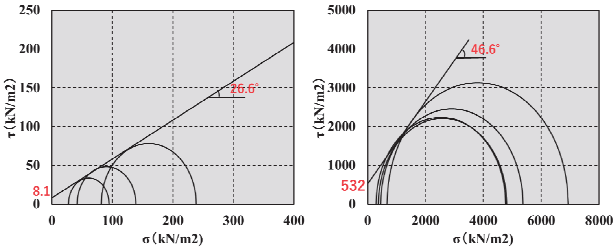
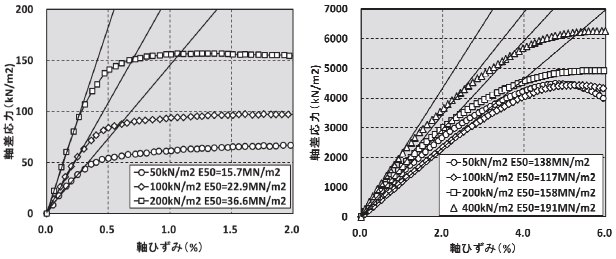


写真-1　改良体形成状況（材料②～④）



（1）　原地盤材料　　（2）　改良体

図-1　破壊包絡線（有効応力状態）



（1）　原地盤材料　　（2）　改良体

図-2　軸差応力-軸ひずみ関係

割線勾配から変形係数E50を求めると、原地盤の供試体では15~35MN/m²であるのに対し、改良体の供試体では115~200MN/m²であった。注入材の地山改良効果により変形係数は6倍程度の向上が見られた。両ケースともに供試体ごとに変形係数のバラつきが生じる原因は、変形係数が拘束圧に依存するためと考えられる。

以上より、透水係数の高い砂地盤かつ、地盤の間隙に対してウレタン系注入材が十分に充填され、理想的な改良体が形成された場合は、改良体のコアの強度定数及び変形係数が向上する傾向が確認された。しかし、本検討では、鋼管口元で形成された理想的な改良体を対象としており、同様の傾

向が施工時の切羽前方に対して確実に期待できるかについては注意が必要である。

3.3 試験注入施工のまとめ

試験注入施工により得られた知見を以下に示す。

・地盤と注入材の適性次第で形成される改良体の出来形にはバラツキが生じ、必ずしも想定通りの改良径が確保されているとは限らない

・密度が低い箇所等の脆弱部がある場合、注入材が逸走する可能性がある

・透水係数の高い砂地盤かつ、地盤の間隙に対してウレタン系注入材が十分に充填された場合は、変形係数及び強度定数が増加する傾向がある

設計時に見込む先受工の地山改良効果については、過去の実績等による知見が十分にないと判断される場合には、例えば上記のような試験を実施することにより検討することがよいと考えられる。

4. 先受工の三次元数値解析手法の検討

4.1 三次元数値解析の概要

本数値解析では、2種類の先受工のモデル化手法による三次元数値解析を行い、地山改良効果を数値解析に見込むことによる結果の差異を比較検討した。使用した解析コードは三次元有限差分法FLAC3D5.0である。

図-3に解析モデル、境界条件及び掘削条件を示す。断面形状は2車線道路トンネルの地山等級DIIにおける標準断面を採用した。表-2に解析物性値と解析ケースを示す。支保工の解析物性値は一般的な諸元を適用し、地山と改良地山の解析物性値は、前述の力学試験結果に基づいて設定した。

本解析では計3ケース実施し、CASE1は先受工をモデル化しないケースとした。先受工は図-4に示す2つのモデル化手法を採用することとし、CASE2が先受鋼管のみをビーム要素でモデル化したケース、CASE3が先受鋼管をビーム要素で、注入改良体をソリッド要素の剛性及び強度定数の増加としてモデル化したケースとした。それぞれのモデル化手法の特徴に着目すると、CASE2が注入材の地山改良効果を見込んでいないケース、CASE3が注入材の地山改良効果を最大限見込んだケースと整理できる。

4.2 三次元数値解析の結果と評価

本項では、モデル中央位置を対象断面とし、モデル化手法ごとの結果を比較する。

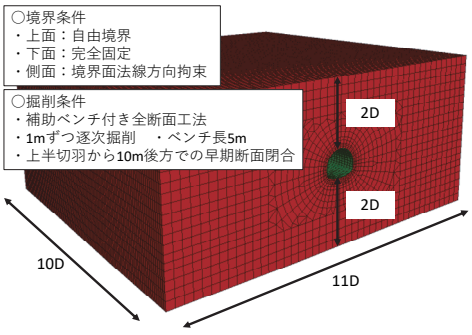
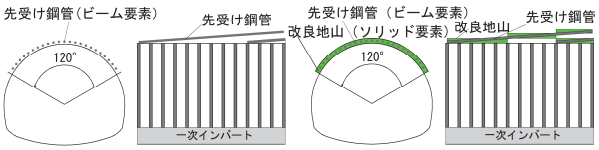


図-3　解析モデル、境界条件及び掘削条件

表-2　解析物性値と解析ケース

項目			構成要素/材料特性	変形係数E (MPa)	ポアソン比ν	粘着力c (MPa)	内部摩擦角φ (°)
共通	吹付コンクリート		ソリッド要素/弾性体	4,000	0.2	-	-
	鋼アーチ支保工		ビーム要素/弾性体	210,000	0.3	-	-
	地山		ソリッド要素/弾性体	25.1	0.35	0.0081	26.6
先受け工	CASE1	-	先受け工なし				
	CASE2	改良地山	ソリッド要素/弾塑性体	地山と同じ			
		先受け鋼管	ビーム要素/弾性体	210,000	0.3	-	-
	CASE3	改良地山	ソリッド要素/弾塑性体	151	0.35	0.532	46.6
		先受け鋼管	ビーム要素/弾性体	210,000	0.3	-	-



1）モデル化手法１　　2）モデル化手法２

図-4　モデル化手法概略図

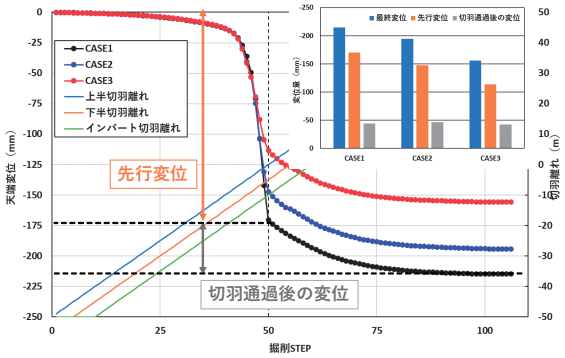


図-5　天端沈下の推移と内訳

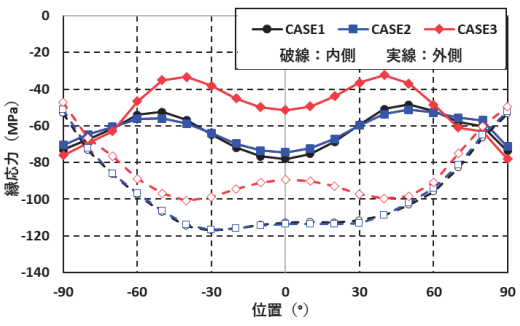


図-6　鋼アーチ支保工の縁応力分布

図-5に天端沈下の推移とその内訳を示す。CASE2とCASE3の最終の天端沈下量は、CASE1に比べ抑制される結果となった。しかし、天端沈下の内訳をみると、CASE2、CASE3ともに先行

変位（切羽が到達するまでの変位）は先受工により抑制されているものの、切羽通過後の変位量はほとんど変化していない。

これらのことから、先受工は先行変位を抑制し、切羽の安定性を向上させる効果が期待できる一方で、切羽通過後の変位には寄与しないと考えられる。また、その先行抑制効果は地山改良体の剛性及び強度を見込むほど大きくなることがわかった。

図-6に鋼アーチ支保工の縁応力分布を示す。CASE2はCASE1とほぼ同様の応力分布となった。一方、CASE3はCASE1に比べ先受工の打設範囲(120°)内で応力が軽減される傾向がみられるが、打設範囲外ではCASE1と同程度、若しくはCASE1よりも増加している。これは、先受工打設範囲では地山改良効果により支保工の曲げモーメントが抑制された一方で、打設範囲外では打設範囲内で軽減された応力が伝達され、局所的に応力が増加したと考えられる。

4.3 三次元数値解析のまとめ

本三次元数値解析で得られた知見を以下に示す。

・先受工をモデル化することで得られる主な効果は先行変位抑制効果であり、その効果は改良体の剛性及び強度を見込むことで大きくなる。

・地山改良効果を見込む場合、先受工の支保工応力の低減効果は、先受工の打設範囲内に限定され、打設範囲外では支保工に対して負荷が生じる。

・数値解析上、これらの効果は地山改良を考慮したモデルにおいて大きく、改良を考慮しないモデルでは小さく現れることとなる。

また、実施工における先受工の種々の効果に関しては、地山改良効果の不確実性の観点から、本解析におけるCASE2とCASE3の間に位置すると考えられる。なお、筆者らが別途行った現地計測と三次元数値解析では、CASE2のように先受鋼管のみをモデル化するだけで実施工の挙動を再現できる事例も確認されている[3)]。

先受工の効果を適切に発揮させるためには、事前設計段階では地質等の不確実性が含まれていることを十分に認識したうえで、施工時において地質の状況や注入材の効果等を現場で確認し、注入材の再選定や鋼管の打設間隔の変更等、施工に反映させることが有効である。

5. まとめ

本報告では、山岳トンネル工法で頻繁に用いられる補助工法の中から先受工に着目し、試験注入施工及び三次元数値解析により、地山改良効果の不確実性について評価し、先受工の設計時における留意点を取りまとめた。試験施工により地盤と注入材の適性により注入材による地山改良効果にばらつきがあることを確認し、同時に、先受工の三次元数値解析において、一様に改良されていると仮定したモデル化手法と改良を考慮しないモデル化手法では結果に差異が生じることを確認した。先受工の効果は、注入改良体の形成状況や地山補強の不確実性に影響を受けることが確認された。

補助工法の施工時にこうした地質等の不確実性へ適切に対応するためには、リスクマネジメントの考え方を取り入れ、事前設計の段階から決められた注入材料や打設間隔などの仕様に対して、施工時に判明する地質状況等をどのように取り入れていくのかを決めておくことが有効である。

参考文献

1）土木学会：トンネル標準示方書［山岳工法編］・同解説、p.285、2016.7
2）ジェオフロンテ研究会：注入式長尺先受工法（AGF工法）技術資料、p.97～104、2012.3
3）佐々木亨、日下敦、巽義知、他：長尺鋼管フォアパイリングの三次元的な効果に関する一考察、トンネル工学講演集第30巻、I-42、2020.11

佐々木亨

土木研究所道路技術研究グループトンネルチーム
研究員
SASAKI Toru

松山彰宏

研究当時　土木研究所道路技術研究グループトンネルチーム　交流研究員、現（株）ニュージェック
MATSUYAMA Akihiro

日下　敦

土木研究所道路技術研究グループトンネルチーム
上席研究員
KUSAKA Atsushi