先受け工の地山改良効果の現地試験を踏まえた 三次元数値解析モデルに関する一考察

松山 彰宏1・佐々木 亨2・小泉 悠3・日下 敦4

¹正会員 国立研究開発法人土木研究所(〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6) E-mail: matsuyama-a574ck@pwri.go.jp

²正会員 国立研究開発法人土木研究所(〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6) E-mail: to-sasaki@pwri.go.jp

³正会員 国立研究開発法人土木研究所(〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6) E-mail: koizumi-y573ck@pwri.go.jp

⁴正会員 国立研究開発法人土木研究所(〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6) E-mail: kusaka@pwri.go.jp

山岳トンネル工法では、天端の安定や切羽安定等を目的とした補助工法が用いられることがある.補助 工法の設計を行う際には、補助工法が有する効果や効果の発現メカニズムを十分に把握する事が重要とな るが、これらについては完全に明らかになっていないのが現状である.本検討では、補助工法として使用 頻度の多い長尺鋼管フォアパイリングに着目し、模擬地山における試験注入施工および改良体の力学試験 を行い、改良体の出来形および改良体コアの強度定数や変形係数の向上といった地山改良効果を把握する 事が出来た.また、力学試験で把握した地山改良効果を反映する長尺鋼管フォアパイリングのモデル化手 法により3次元数値解析を行い、従来のモデル化手法と比較検討した結果を報告する.

Key Words: forepiling, ground improvement effect, numerical analysis, modeling method

1. はじめに

山岳トンネル工法では、都市部や坑口部などの小土被 り部および断層破砕帯などの軟弱地山において、天端安 定や切羽安定等を目的とした補助工法が用いられること がある.補助工法の設計は過去の実績を参考にしたり、 数値解析によってその効果を確認したりして行われるの が一般的である.これらの方法を用いて補助工法の設計 を行う際には、補助工法が有する効果や効果の発現メカ ニズムを十分に把握することが重要となる.しかし、こ れらについては完全に明らかになっていないのが現状で ある.

例えば、長尺鋼管フォアパイリング(以下、先受け工 という)は、鋼管と注入材が一体となった改良体を形成 することにより地山を補強し、先行変位を抑制する効果 や切羽の安定化を図る効果等があるとされている¹⁾.先 受け工の地山改良効果を数値解析に見込んで評価する場 合、その効果は先受け工と注入対象地山の断面積と剛性 から改良範囲の等価剛性を算出し、地山要素の変形係数 に反映する手法が一般的である². しかし,地山改良効 果については,地山との適性等の不確実性の理由から定 量的に評価することが難しく,条件によっては危険側の 設計になる可能性がある.

佐々木らはこれまで、補助工法の一例として使用頻度 が多い先受け工に着目し、3次元数値解析を行うことで 先受け工のモデル化手法の違いによる結果の差異等につ いて知見を得てきた^{例えば3)}.これらの知見を含めて既往 の研究で得られた知見では、実施工のおける改良体の形 成状況や物性値を定量的に評価し、数値解析で検証した 事例は少ない.

本検討では、先受け工の注入材について模擬地山にお ける試験注入施工を行うとともに、形成された改良体の 力学試験を行うことで注入材の地山改良効果の把握を試 みた.また、力学試験で把握した地山改良効果を反映す る先受け工のモデル化手法により3次元数値解析を行い、 従来の先受け工のモデル化手法と比較検討した結果を報 告する.

試験注入施工および地山改良効果に関するカ 学試験

(1) 試験注入施工の概要

試験注入施工は、実際に先受け工を採用している現場の地山を対象として、適切な注入材の選定に向けた取り 組みの一環として実施した.試験注入施工では実トンネルの掘削ずりを用いて地山を模擬した盛土を作製し、これに対して先受け工による試験注入を実施した.なお、 盛土表面には盛土体からの注入材流出を防ぐため、吹付けコンクリートを施している.試験注入後には盛土を開 削し、形成される改良体の出来形を確認した.

用いた地盤材料の粒度分布を図-1に示す.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 った.盛土は5層に分けて締固めを行い,平均して乾燥 密度 1.5g/cm³,含水比 14~15%程度とした.鋼管は長さ 3m とし,通常の先受け工の打設とは異なり,盛土作製 時にあらかじめ埋設しておくことで鋼管と地盤の隙間を 少なくなるようにした.表-1に使用した注入材の諸元一 覧を示す.今回の試験注入では水ガラス系2種類,ウレ タン系2種類,計4種類の注入材を用いて試験施工を実 施し,改良体の形成状況を確認した.注入量は一般的に 設計で用いられる式⁴を用い,改良径がφ600mmとなる 想定の上で決定した.通常,ウレタン系注入材の注入量 の設計にはウレタン率(40~60%)と呼ばれる軽減率が 考慮されるが,本試験注入施工では水ガラス系注入材と 条件を統一するために100%として計算した.

(2) 注入状況および改良体の出来形

改良径に関する試験注入結果一覧を表-2に、改良体形 成状況を写真-1および写真-2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および③については先受け鋼管の注 入孔周辺に団子状に不連続な改良体が形成されており, 表-2に示すように位置によるばらつきが大きい. 材料④ 均一に形成される結果となった.同じ地盤条件であるに 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、盛土法面付近の締固めが施工上困難であり、当該 箇所の密度は比較的小さい状態であったと想定され、注 入材が鋼管と地山の隙間を経由して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て き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注入孔がない構 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と考えられる.



図-1 地盤材料の粒径加積曲線

表-1 注入材の諸元一覧

材料	1	2	3	(4)	
分類	水ガラ	ラス系	ウレタン系(シリカレジン)		
ゲル/ライズタイム	120秒	34分	60秒	186秒	
発泡倍率	-	-	6~10倍	2~7倍	
圧縮強度(Mpa)※	1.0~1.5	0.1~2.9	3.0±0.5	1.0 ± 0.3	
(3hr強度)	(サンドゲル)	(ホモゲル)	(ホモゲル4倍発泡時)	(ホモゲル3倍発泡時)	
				※粉値はも々ログ参老値	

表-2 試験注入結果(改良径)

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



写真-1 改良体形成状况(材料②~④)



写真-2 改良体形成状況(材料④)

これらの結果から,地盤と注入材の条件により改良体 の形成には不確実性があり,必ずしも連続した改良体が 形成されない可能性がある.また,鋼管と地山の隙間や 本試験注入施工における盛土法面のような弱部が地山に 存在する場合には,注入材が想定通りに浸透せず,設計 上の改良径よりも小さくなる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 険側の設計となり注意が必要であることを確認した.先 受工の注入材を選定する際は,過去の実績に加えて地盤 と注入材の適性を定量的に確認することが重要である.

(3) 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、原地盤材料およ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.表-3 に三軸試験ケース一覧を示す.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.

(4) 地山改良効果に関する力学試験の結果

図-2に三軸試験により得られた全応力状態の破壊包絡 線を示す.全応力状態における原地盤材料の強度定数は, 粘着力が14.9kN/m²,内部摩擦角が13.3°で,改良体の強 度定数は,粘着力776kN/m²,内部摩擦角が47.4°であっ た.全応力状態では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52倍程度と 大きく向上する結果となった.

図-3に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、粘着力が粘着力 532kN/m²,内部摩擦角が 46.6°であった. 有効応力状態では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.

表-3 三軸試験ケース一覧

ケース名	分類	供試体No	乾燥密度	含水比	拘束圧	圧密応力
			(g/cm ³)	(%)	(kN/m^2)	(kN/m2)
CASE 1	原地盤 材料	1	1.51	13.4	250	50
		2	1.51	13.5	300	100
		3	1.51	13.7	400	200
CASE2	改良体	4	1.62	15.1	250	50
		5	1.67	14.9	300	100
		6	1.67	14.5	400	200
		7	1.70	14.1	600	400



図-4 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 における割線勾配から 変形係数 Eso 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.ここで,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.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.

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およ び変形係数が向上する傾向が確認された.しかし,本力 学試験の供試体は,試験注入施工時の鋼管口元で形成さ れた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ものではないことに留 意が必要である.

3. 改良体の力学試験を踏まえた3次元数値解析の 概要

第1章で述べたように、3次元数値解析における先受 け工のモデル化には複数の手法が提示されている.そこ で、本章では3種類の先受け工のモデル化手法を適用し た解析ケースに加えて、先受け工を適用しない解析ケー スにより3次元数値解析を行い、各モデル化手法の比較 検討を行った.なお、使用した解析コードは3次元有限 差分法 FLAC3D5.0である.

(1) 解析モデルおよび掘削条件

図-5に解析モデルを示す.トンネル断面形状は、歩道 無し道路トンネルの標準的な形状を採用した.本解析で は土被り 2D(トンネル掘削径 D=10m)の小さな土被り 条件を想定しており下方領域も同様に 2D確保し、側方 領域は 5D,奥行方向は 10Dを確保した解析モデルとし た.境界条件は上方を自由境界、下面を完全固定、側面 は境界面法線方向を拘束した.

トンネルの掘削方法は、補助ベンチ付き全断面工法とし、1mずつの逐次掘削を行い、ベンチ長は5mとした. 掘削断面は一次インバートによる早期断面閉合を適用し、 上半切羽から10m離れた位置での断面閉合とした.

(2) 解析物性值

表4に各解析ケースに共通する解析物性値を示す.地 山の解析物性値は,前章の原地盤材料の力学試験結果を 適用した.本解析では地下水位を低下させた状態でのト ンネル掘削を想定したため,地山の解析物性値に関して は,有効応力状態における力学試験結果を適用した. 支保構造は DII パターンを適用し, 吹付コンクリートを ソリッド要素, 鋼アーチ支保工をビーム要素でモデル化 し, それぞれの解析物性値は標準的な仕様の諸元を適用 した. ロックボルトはモデル作成の簡略化のため省略す ることとした.





表-4 解析物性值

网长姊妹百日	解析物性値						
<u>脾机物性填</u> 日	地山	吹付コンクリート	鋼アーチ支保工				
構成要素/材料特性	ソリッド要素/弾塑性体	ソリッド要素/弾性体	ビーム要素/弾性体				
変形係数E(MPa)	25.1	4,000	210,000				
ポアソン比 <i>v</i>	0.35	0.2	0.3				
粘着力c(MPa)	0.0081	-	-				
内部摩擦角¢(°)	26.6	-	-				

		使用するモデル化手法	先受け工の解析物性値				
ケース名	推进学品	HILE TO THE PART OF THE PART O	改良地山		先受け鋼管		
	网络武功		解析物性值	構成要素/ 材料特性	解析物性值	構成要素/ 材料特性	
CASE①	先受け鋼管と注入対象地 山の海面積と剛性から改良 範囲の等価剛性を算出し、 ソリッド要素弾性体の変形 係数に反映してモデル化す る手法である、地山はソリ ッド要素(弾塑性体)でモデ ル化している、 ³	※地址はソリッド要素(得望性体)でモデル化 先受け鋼管と改良地山の合成体 000000000000000000000000000000000000	E=2,270MPa ν=0.35	ソリッド/ 弾性体	-	-	
CASE2	先受け鋼管をビーム要素 (弾性体)で一本すっモデル化 し、力学試験で把握した地 山改良効果(強度定数、変形 係数の向上)をソリッド要素 (弾塑性体)に反映するモデル 化手法である、地山はソリ ッド要素弾塑性体)でモデル 化している。	※地はレソリッド要素(得塑性体)でモデル化 先受け鋼管 改良地山 ・先受け鋼管 た受け鋼管 支27長_3m 30 地山 120 120 5.2 3.1 病アーチ支保工 -次インバート	E=151MPa v=0.35 c=0.532MPa \$\$\$=466'	ソリッド/ 弾塑性体	E=210,000MPa v=0.3	ビーム/ 弾性体	
CASE3	地山改良効果を見込まず に先受け鋼管をビーム要素 (弾性体)でー本ずつモデル化 する手法である、地山はソ リッド要素(弾塑性体)でモ デル化している、 ³	**地山はソリット要素 (得麼性体)でモデル化 先受け鋼管 先受け鋼管 た受け鋼管 <u>5.L</u> <u>6.C</u> <u>7.2.7.8.3m</u> <u>7.2.7.8.3m</u> <u>7.2.7.8.3m</u> <u>7.2.7.8.3m</u>	-	-	E=210,000MPa ν=03	ビーム/ 弾性体	
CASE ⁽⁴⁾		先受け工なし			-		

表-5 先受け工のモデル化手法および解析ケース

E:変形係数, ν:ボアソン比, c:粘着力, φ:内部摩擦角

先受け工の適用範囲は 120°とし,先受け鋼管の諸元 は鋼管径を114.3mm,肉厚を6.0mm,打設ピッチを45cm, 打設長を12m, ラップ長を3m,打設角度をトンネル軸 方向に4°とした.解析物性値については,標準的な仕 様の諸元を適用した.

(3) 先受け工のモデル化手法および解析ケース

表-5に先受け工のモデル化手法および解析ケースを示 す. CASE①で適用したモデル化手法は、先受け鋼管と 注入対象地山の断面積と剛性から改良範囲の等価剛性を 算出し、ソリッド要素(弾性体)の変形係数に反映して モデル化する手法である.改良範囲要素の換算変形係数 E' は次式により算出した².

$$E' = \frac{E_g(bh - A_p) + E_p \cdot A_p}{bh} \tag{1}$$

ここで、 $E_g: 改良地山の変形係数(前章の改良体の力学$ $試験結果を適用), <math>E_p: 先受け鋼管の変形係数, A_p: 先$ 受け鋼管の断面積, b: 打設ピッチ, h: 注入改良幅である. また, この式に基づく換算変形係数 E' は, 先受け鋼管と改良地山を等価剛性とする場合は2,270MPa, 先受け鋼管と地山を等価剛性とする(すなわち地山改良効果 $を見込まず <math>E_g$ に地山の変形係数を適用する)場合は 2,140MPaとなる.いずれの場合も変形係数に大きな差は なかったため、本検討では前者の値を解析ケースとして 採用することとした.このモデル化手法は、数値解析に おいて一般的に多く適用されている従来手法であるが、 先受け鋼管に発生する応力や軸力等の挙動が把握するこ とができない.また、本来先受け鋼管は、アーチ状に配 置して縦断方向に打設され、各先受け鋼管が独立して地 山荷重を支持する.一方で、このモデル化手法では、先 受け鋼管の剛性を見込んだ連続体の改良層をモデル化す るため、改良層全体で地山荷重を支持することとなる.

CASE②で適用したモデル化手法は、先受け鋼管をビ ーム要素(弾性体)で一本ずつ厳密にモデル化し、更に 先受け鋼管周辺の注入材による地山改良効果としてソリ ッド要素(弾塑性体)の変形係数、強度定数に反映して モデル化する手法を採用した.改良地山の解析物性値は、 前章の有効応力状態における改良体の力学試験結果を適 用し、理想的な改良体が均一な連続体として形成されて いる状態を想定した.このモデル化手法は、先受け鋼管 に発生する応力や軸力等の挙動が把握でき、先受け鋼管 の軸方向剛性を表現することができる.

CASE③で適用したモデル化手法は,不確実性を伴う 地山改良効果を見込まずに先受け鋼管をビーム要素(弾 性体)で一本ずつ厳密にモデル化する手法である.上記



2 ケースに比べるとこのモデル化手法は、安全側の設計 となることが想定されるが、佐々木らの既往研究では火 山灰質凝灰岩主体の軟弱地山において実施工の計測結果 の再現性が確認されている³.

上記の解析ケースの他,先受け工を適用しない標準ケースの CASE④を加えた計4 ケースの数値解析を行った.

4. 数值解析結果

(1) 変位抑制効果

ここでは、各ケースの変位に関する解析結果について 述べる.対象とした断面はモデル中央位置かつ CASE②、 ③において先受け鋼管のラップがない A 断面とした. A 断面の参考位置は、表-5の概要図に示す通りである.

a) 天端沈下

図-6(1)に天端沈下の推移を、図-6(2)に天端沈下の先行 変位量と切羽到達後変位量の内訳を示す.本稿において 先行変位量とは、上半切羽が基準断面に到達するまでに 発生した変位量を、切羽到達後変位量は最終変位量から 先行変位量を引いた値を示している.図-6(1)、(2)より本 解析条件では、いずれのケースにおいても切羽到達後変 位量より先行変位量が大きくなる傾向となった.標準ケ ースである CASE④の最終変位量 220mmに対する各モデ ル化手法の天端沈下抑制効果に着目すると、CASE①は 90mm、CASE②は 64mm、CASE③は 23mmの天端沈下抑 制効果が確認された.

実施工にて理想的な改良体が形成されている状態を想 定した CASE②に着目すると、先受け鋼管と改良地山を 等価剛性とする CASE①ほどの効果は確認されなかった. これは、CASE①では剛性の非常に大きい連続体の改良 層が地山荷重を支持する解析モデルとなっていることに より、トンネル断面の変位が抑制されていると考えられ る.また、安全側の設計を想定し、既往研究にて実施工 の計測結果の再現性が確認されている CASE③と比べる と、CASE②の抑制効果の方が大きくなる結果となった. これは、CASE②で反映している地山改良効果の影響で あると考えられる.

b) 地表面沈下

図-7(1)に地表面沈下の推移を、図-7(2)に地表面沈下の 先行変位量と切羽到達後変位量の内訳を示す.図-7(1), (2)より本解析条件では、いずれのケースにおいても先 行変位量と切羽到達後変位量がほぼ同様の傾向となった. CASE④の最終変位量 112mm に対する各モデル化手法の 地表面沈下抑制効果に着目すると、CASE①は 25mm, CASE②は 16mm, CASE③は 5mmの地表面沈下抑制効果 が確認された.天端沈下と比べると地表面沈下の抑制効 果は、各ケースの差が小さい結果となった.

地表面沈下抑制効果について CASE②と CASE①および CASE③を比較すると、天端沈下と同様の傾向となっており、その要因についても同様であると考えられる.

c) 内空変位

図-8(1)に内空変位の推移を、図-8(2)に内空変位の先行 変位量と切羽到達後変位量の内訳を示す.図-8(1),(2)よ り本解析条件では、いずれのケースにおいても切羽到達 後変位量より先行変位量が大きくなる傾向となった. CASE④の最終変位量 74mm に対する各モデル化手法の 内空変位抑制効果に着目すると、CASE①は 10mm の内 空変位抑制効果が確認され、CASE②と CASE③に関し ては内空変位抑制効果が確認されなかった.

d) 脚部沈下

図-9(1)に脚部沈下の推移を、図-9(2)に脚部沈下の先行変 位量と切羽到達後変位量の内訳を示す.図-9(1),(2)より 基準断面における脚部沈下の推移は、上半切羽位置が基 準断面の10m程度手前までは沈下が発生し、それ以降は 脚部が隆起する傾向に転じている. CASE④の最終変位 量 39mmに対する各モデル化手法の脚部沈下抑制効果に 着目すると、CASE①は 7mm、CASE②は 3mm、CASE③ は 2mmの脚部沈下抑制効果が確認された.

(2) 支保工応力軽減効果

ここでは、各ケースの支保工応力に関する解析結果に ついて述べる.対象とした断面は、先受け鋼管の軸方向 剛性が支保工応力に及ぼす影響を確認するため、A断面 と先受け工の支点部であるB断面とした.B断面の参考 位置は、表-5の概要図に示す通りである.

a) 吹付コンクリート

図-10に吹付コンクリートに発生する軸応力を示す. A断面に着目して CASE④と先受け工を適用した各ケースを比較する.従来手法である CASE①は先受け工適用 範囲内にて応力が軽減される結果となった.これは、先



受け工により剛性が非常に大きい連続体の改良層が形成 される解析モデルとなっていることから、この改良層が 応力を負担していることが要因であると考えられる.一 方で、先受け工適用外では応力が増加する結果となった. これは、先受け工適用範囲内で負担している応力が側壁 および脚部に伝達され負荷が生じていることが要因であ ると考えられる.

実施工にて理想的な改良体が形成されている状態を想 定した CASE②は、先受け工適用範囲内にて応力が軽減 される結果となった.しかし、先受け鋼管と改良地山を 等価剛性とする CASE①ほどの応力軽減は確認されない. これは、CASE①、CASE②はいずれも改良層が応力を負 担しているため、剛性の大きい CASE①の方がより応力 を負担していことが要因であると考えられる.更に、 CASE①では先受け工の打設角度を考慮しておらず、改 良層が吹付コンクリート直上(地山側)に連続して形成 されている.そのため、先受け工の打設角度を考慮して いる CASE②に比べると、CASE①は吹付コンクリート の応力が軽減されやすい解析モデルであったことも要因 として考えられる.また、CASE②の先受け工適用範囲 外では若干の応力増加の傾向が見られた.

安全側の設計を想定し,既往研究にて実施工の計測結 果の再現性が確認されている CASE③は,先受け工適用 範囲内において応力軽減効果は見られず,先受け工適用 範囲外では若干の応力増加の傾向が見られた.

b) 鋼アーチ支保工

図-11 に鋼アーチ支保工に発生する縁応力を示す. A 断面に着目して CASE④と先受け工を適用した各ケース を比較する. CASE①は部材外側内側ともに先受け工適 用範囲内にて応力が軽減されている. しかし, 図-11(1) に示す通り,部材外側の先受け工端部にて圧縮応力から 引張応力に逆転している. これは,先受け工適用範囲境 界における局所的な剛性の違いにより応力集中が発生し たことが要因であると考えられる.

CASE②は部材外側内側ともに先受け工適用範囲内に て応力が軽減されており、特に部材外側において顕著な 応力軽減が確認された.先受け工適用範囲外では、若干 の応力増加の傾向が見られた.

CASE③は部材外側において応力が軽減されている. 部材内側では CASE④とほぼ同じ値を示しており,先受 け工による応力軽減効果は見られなかった.

c) 支保工応力の断面による違いについて

吹付コンクリートおよび鋼アーチ支保工に発生する応 力について各ケースの断面による違いに着目する. 図-10,11より,吹付コンクリート,鋼アーチ支保工とも に先受け工適用範囲内において,CASE①ではA断面の 方が,CASE②ではB断面の方が発生する応力が大きく なった.これは,CASE②において打設角度を考慮した 先受け鋼管および改良地山により支持された前方荷重が 軸方向に伝達され、支点部であるB断面に対して応力負 荷が生じていることが要因であると考えられる.

5. まとめ

(1) 注入材の地山改良効果

本検討では、先受け工の注入材について模擬地山にお ける試験注入施工を行い、形成された改良体の力学試験 を行うことで注入材の地山改良効果の把握を試みた.得 られた主な知見を以下に示す.

- 注入材による改良体は、地山と注入材の適性によりその出来形が大きく変化する。
- 設計注入量を完全に注入できたとしても、地盤の 弱層等への逸走により設計時に想定した形状の改 良体が形成されない可能性がある。
- 本試験施工で対象とした土砂地山にて理想的な改 良体が形成されている部分では、地山改良効果と して地山の強度定数および変形係数が向上する傾 向が確認された.

(2) 改良体の力学試験を踏まえた3次元数値解析

本検討では、3 種類の先受け工のモデル化手法により 3 次元数値解析を行い、比較検討した.得られた主な知 見を以下に示す.

- 先受け鋼管と改良地山を等価剛性のソリッド要素 (弾性体)としてモデル化した CASE①は、剛性の 非常に大きい連続体の改良層が形成される解析モ デルとなっている.数値解析上において CASE①で は、天端沈下および地表面沈下の変位抑制効果、 支保工の応力軽減効果が確認され、これらの効果 は他ケースに比べて大きくなる結果となった.こ れは、連続体の改良層が地山荷重を支持する解析 モデルとなっているため、トンネル断面の変位が 抑制されたことにより、支保工に発生する応力も 軽減されたことが要因であると考えられる.
 - 理想的な改良体が形成されている状態を想定した CASE②は、先受け鋼管のビーム要素(弾性体)に 加えて、地山改良効果をソリッド要素(弾塑性体) に反映する解析モデルとなっている.CASE②では、 天端沈下および地表面沈下の変位抑制効果、支保 工の応力軽減効果が表れる結果となったが、これ らの効果はCASE①と比べると小さい結果となった. これは、CASE②の改良層の変形係数がCASE①の 1/15 程度であることに加えて、CASE①では先受け 工を弾性体としてモデル化しており、数値解析上 では塑性化しない解析モデルとなっていることが

要因であると考えられる.

- 安全側の設計を想定した CASE③は,先受け鋼管を ビーム要素でモデル化し,地山改良効果は反映し ない解析モデルとなっている. CASE③では,天端 沈下および地表面沈下の変位抑制効果が表れる結 果となったが,その効果は他ケースと比べて小さ い結果となった.これは,CASE③では地山改良効 果を見込んでいないため,CASE①,②に比べると トンネル断面に対する地山荷重が大きくなってい ることが要因であると考えられる.また,支保工 応力に関しては軽減効果が確認されなかった.こ れは,トンネル断面周辺に改良層が形成されてい ないため,支保工に対して地山からの応力負荷が 直接生じていることが要因であると考えられる.
- 本試験注入施工では、実施工で必ずしも理想的な 改良体が均一な連続体として形成されるとは限ら ないことが確認されている.このことから、実施 工における先受け工の効果としては、理想的な地 山改良効果を見込んだ CASE ②と地山改良効果を見 込まない CASE ③の間に位置することが想定され、

その程度は改良体の状態によるものと考えられる. 実施工において先受け工の地山改良効果を見込む 場合には,試験注入施工や力学試験等により地山 と注入材の適性および地山改良効果を適切に把握 した上で,先受け工により得られる効果を過剰に 評価しない設計を行うことが重要である.

参考文献

- 1) 土木学会:トンネルライブラリー20 山岳トンネルの 補助工法-2009 年版-, p.69, 2009.9
- 日本道路公団試験所:トンネル数値解析マニュアル (都市部トンネル解析留意事項編), pp.14-16, 2002.3
- 3) 佐々木亨, 巽義知, 日下敦, 砂金伸治, 菊地浩貴, 小出孝明: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,トンネル工学論文集,第30巻, I-42,2020.11
- ジェオフロンテ研究会 AGF WG:注入式長尺先受工法(AGF 工法)技術資料(六訂版), pp.97-103, p.41, 2012.3

(2021.8.6 受付)

STUDY ON MODELING METHODS OF FOREPILING BY 3D NUMERICAL ANALYSIS CONSIDERING THE EFFECT OF GROUND IMPROVEMENT

Akihiro MATSUYAMA, Toru SASAKI, Yu KOIZUMI and Atsushi KUSAKA

In the excavation by mountain tunneling, the auxiliary methods such as forepiling are used to stabilize the face of tunnels. In order to design the auxiliary methods reasonably, it is important to understand their effects on the ground and to use the appropriate modeling methods in the numerical analysis. In this study, we conducted in-situ injection tests and evaluated the mechanical properties of the improved ground by triaxial tests. Furthermore, we conducted a set of 3D numerical analyses using different modeling methods where the effect of the ground improvement was taken account of. As a result, significant differences were found between the numerical results. It was found that it is important to choose the appropriate modeling methods considering the characteristics of the ground and the used forepiling methods.