

長尺鋼管先受工の三次元数値解析における モデル化手法に関する一考察

佐々木 亨¹・日下 敦²・巽 義知³

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

² 正会員 国立研究開発法人土木研究所 道路技術研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)
E-mail: kusaka@pwri.go.jp

³ 正会員 国立研究開発法人土木研究所 道路技術研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)
E-mail: tatsumi-y173bt@pwri.go.jp

山岳トンネル工法では、天端安定対策等を目的とした補助工法が用いられることがある。補助工法の設計の際には、過去の事例を参考にすることに加え、数値解析により各種工法の効果を検討する事例も多く見られている。数値解析によって検討を行う場合は、モデル化の妥当性について十分な検証が必要である。しかし、実務上用いられる数値解析には複数のモデル化手法が存在する一方で、モデル化手法によりどの程度の差異が生じるのかを詳細に検討した事例は少ない。本稿では、長尺鋼管先受工に着目し、2種類のモデル化手法について解析を行い、結果を比較・検討することで、モデル化手法の違いによる結果の差異について把握を試みた結果を報告する。

Key Words: forepiling, numerical analysis, modeling method, mountain tunnel

1. はじめに

山岳トンネル工法では、天端安定対策等を目的とした補助工法が用いられることがあり、特に都市部や不良地山において多用されてきている。補助工法の設計の際には、過去の事例を参考にすることに加え、数値解析により各種工法の効果について検討を行ったうえで、採用する補助工法を決定する事例も多くみられる。本来、数値解析によって検討を行う場合は、補助工法に用いられる部材の構造等と、解析におけるモデル化の仮定の妥当性を検討しておく必要がある。

補助工法の選定において実務上用いられる数値解析には複数のモデル化手法が存在し、モデル化の手法により結果に差異が生じる一方で、どのモデル化手法が実現象を十分に再現できているかについて詳細に検証された事例は少ない。このような状況下で、補助工法本来の目的とは異なる効果が数値解析結果として現れることを根拠に、工法を選定してしまう場合がある。例えば、長尺鋼管先受工（以下、先受工という。）の効果に関する数値解析において、モデル化手法によっては支保工にかかる応力が低減され、先受工に支保効果があるような結果が出力される場合がある。このような結果をもとに、先受

工を打設することで支保工の低減を図るなどの検討を行っている事例や、側方からの変位が大きい地山に対して、先受工を側部に打設することで変位を抑制しようと試みた事例などがある。

筆者らはこれまで、補助工法の一例として使用頻度が多い先受工に着目し、2次元および3次元の数値解析を行うことで先受工の打設範囲と効果についていくつかの知見を得てきた¹⁾²⁾。これらの知見を含め、既往の研究で得られた知見は、ある1つのモデル化手法を用いて得られたものが多く、モデル化手法によっては今まで得られた知見と異なる結果となる可能性がある。しかし、その程度について比較検討したものは少ない。今後実計測と比較し、数値解析による補助工法選定の妥当性を検討するためには、モデル化手法によりどのような結果の差異があるか明らかにすることは重要である。

本稿では、先受工のモデル化手法および打設範囲を変えた3次元数値解析を行い、モデル化手法や打設範囲の違いが支保構造の変形挙動ならびに応力状態に与える影響について把握することを試みた結果を報告する。

2. 数値解析の概要

本解析は、先受工のモデル化手法と打設範囲の違い、および地山の構成則の違いにより、表-1 に示す 10 ケースとした。使用した解析コードは 3次元有限差分法解析コード FLAC3D5.0 である。

(1) 先受工のモデル化手法

本研究では、先受工のモデル化手法として一般的に多く用いられている以下の 2 種類の手法を比較対象とし解析を行った。

1) ソリッド要素でモデル化

先受け鋼管および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、ソリッド要素の弾性係数に反映してモデル化する手法

2) ビーム要素でモデル化

先受け鋼管のみをビーム要素で一本ずつモデル化する手法

先受工の打設範囲に関しては、標準的に用いられる打設範囲 120° と打設範囲を側部まで拡大した打設範囲 180° のケースについて解析を行うこととした。先受け鋼管のモデル化手法の概念図を図-1 に示す。なお、2) において、改良範囲の地山物性値を、注入材による改良効果を見込んだ値に変更する場合もあるが、改良範囲や改良後の剛性等が不明であることから、本研究では考慮しないこととした。

(2) 解析の諸条件

図-2 に解析モデルを示す。トンネルの形状は実設計に近くなるように実施中の道路トンネルのものをを用いて図-3 に示す形状とした。土被りおよび側方領域、下方領域は、境界面の影響がトンネル断面の挙動に及ばないように $5D$ (トンネル直径 $D=15.6\text{m}$) 確保することとし、境界条件は上方を自由境界、トンネル軸方向の前後を含む側面を鉛直方向ローラー、下面を完全固定とした。

地山の構成則は線形弾性 (以下、弾性体という。) および弾完全塑性 (以下、弾塑性体という。) の 2 パターンとし、地山等級 DII 相当の物性値を設定した。表-2 に

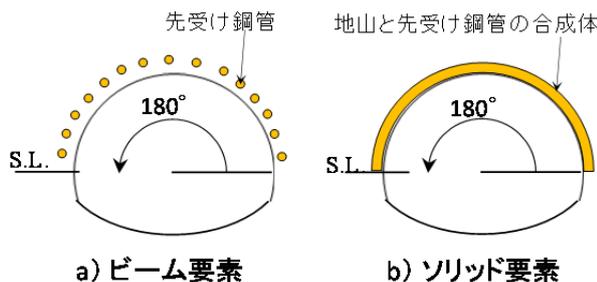


図-1 先受工モデル概念図 (例: 打設範囲 180°)

表-1 解析ケース一覧

ケース名	地山の構成則	長尺鋼管先受工	
		モデル化手法	打設範囲
Case1	弾性体	-	0°
Case2		ソリッド要素	120°
Case3		ソリッド要素	180°
Case4		ビーム要素	120°
Case5		ビーム要素	180°
Case6	弾塑性体	-	0°
Case7		ソリッド要素	120°
Case8		ソリッド要素	180°
Case9		ビーム要素	120°
Case10		ビーム要素	180°

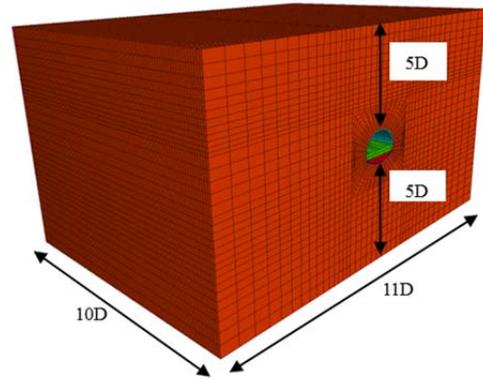


図-2 解析モデル

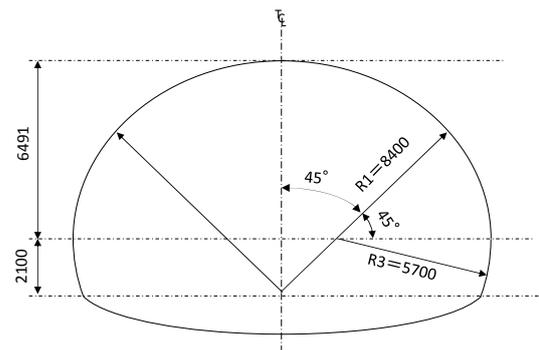


図-3 断面形状

表-2 解析物性値

構成要素	ヤング係数 (MPa)	ポアソン比	粘着力 (Mpa)	内部摩擦角 ($^\circ$)	断面二次モーメント I_y (m^4)
地山	Solid 150	0.35	(0.35)	(30)	
鋼アーチ支保工	Beam 205,000	0.20			
吹付けコンクリート	Solid 4,000	0.20			
先受工	Solid 2,266	0.35	(0.35)	(30)	
	Beam 210,000	0.20			3.0×10^{-6}

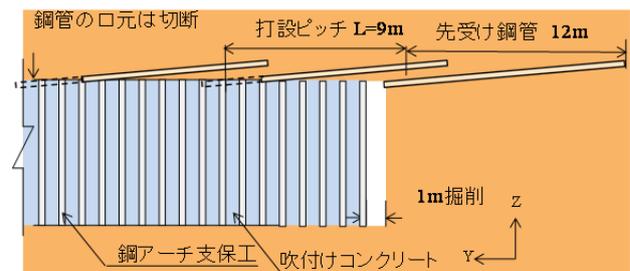


図-4 先受工の打設概要図

各物性値を示す。支保構造は鋼アーチ支保工をビーム要素、吹付けコンクリートをソリッド要素でモデル化した。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。

想定した先受工の打設方法について図-4 に概要図を示す。先受け鋼管はφ114.3mm, t=6.0mm, L=12mとした。打設角度はトンネル軸方向に対して10°とし、横断方向は8°ごとに1本の間隔で打設(120°で31本, 180°で47本)することを想定した。打設ピッチは1シフト9m, 前シフトとのラップ長は3mとし、打設はトンネル断面内から行うことを想定した。ビーム要素でモデル化するケースでは、トンネル断面内に含まれる口元3mの範囲の先受け鋼管に関しては切断(削除)した。先受工をソリッド要素で再現する手法では、上記の打設方法を再現することは困難であるため、奥行き方向に一連の改良体をモデル化することとした。

初期応力状態は、トンネル掘削解析前に地山の自重解析を行うことで土被りに対応した応力をモデルに作用させた。

(3) 解析手順

掘削方法は上半先進ベンチカット工法とし、はじめに12m先受工をモデル化し、上半を1mずつ逐次掘削した。その後、9m掘削した時点で次の先受工をモデル化し、再度9m進むまで逐次掘削を続ける。ベンチ長は30mとし、上半と下半切羽の距離を30m確保するように下半掘削を行った。支保工は上半下半ともに切羽後方1mの位置まで逐次設置した。

3. 解析結果

(1) 先受工の変位抑制効果について

先受工のモデル化がトンネルの変位に及ぼす影響について以下に示す。図-5 は弾性解析での基準断面(モデル中央80m位置)における天端沈下、内空変位および脚部沈下の推移を、図-6 は弾塑性解析でのそれらの推移を示している。また、図-7 は弾性解析における各ケースの基準断面での天端沈下、内空変位および脚部沈下の最終変位量、切羽到達後の変位量および先行変位量の内訳を、図-8 は弾塑性解析におけるそれらの結果を示している。本稿では、先行変位量とは、切羽が基準断面に到達するまでに生じた変位量を、切羽到達後の変位量は、最終変位量から先行変位を引いたものを示している。加えて、図-9 に弾性解析において、先受工がないケースと先受工があるケースの各変位量の差を、図-10 に弾塑性解析におけるそれらの結果を示す。天端沈下および脚部沈下において、変位量の差が-の場合は沈下量の減

少を、+の場合は沈下量の増加を、内空変位においては、変位量の差が-の場合は地山側、+の場合は内空側への変位の増加を示している。

a) 先行変位への影響

まず、弾性解析を行った Case1~5 に着目する。

図-7 および図-9 より、天端沈下の先行変位は、先受工のない Case1 では 23.9mm の沈下であったのに対し、先受工をソリッド要素でモデル化した Case2, 3 では 24.3mm (+0.4mm) と 23.2mm (-0.7mm), 先受工をビーム要素でモデル化した Case4, 5, では、22.3mm (-

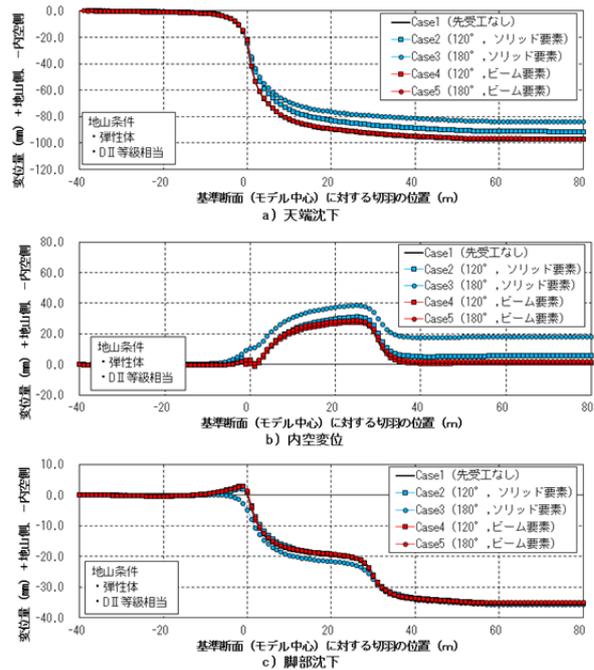


図-5 基準断面における変位の推移(弾性体)

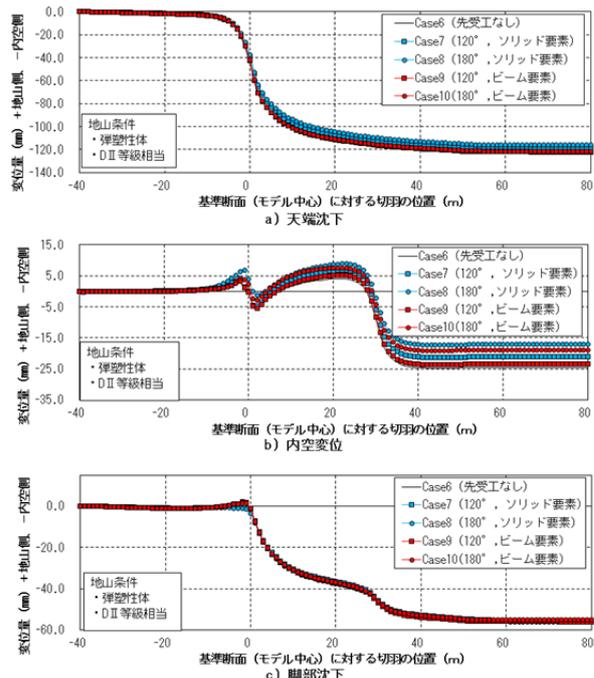


図-6 基準断面における変位の推移(弾塑性体)

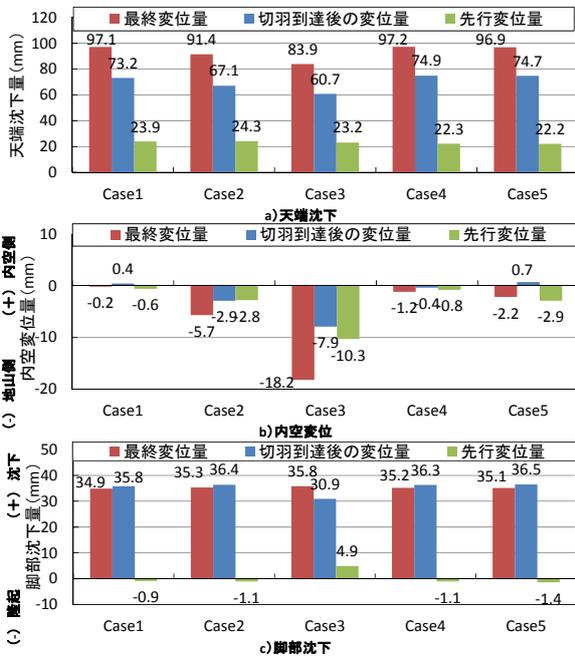


図-7 各ケースの変位量の内訳 (弾性体)

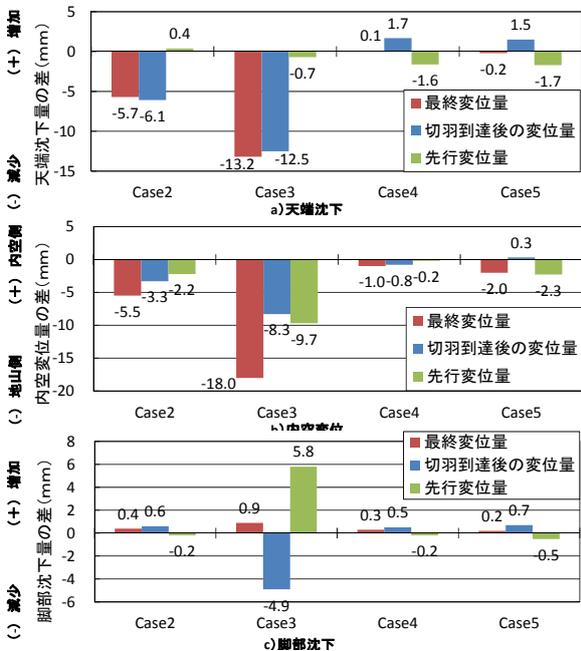


図-9 先受工による変位量の変化 (弾性体)

1.6mm) と 22.2mm (-1.7mm) であった. ここで, () 内の数値は先受工のないケース (Case1 もしくは Case6) と各ケースの変位量の差を表している.

弾性解析における天端沈下の先行変位は, Case2 で 0.4mm の微小な変位の増加があるが, Case3, 4, 5 では変位量が減少している. このことから, 弾性解析では先受工を打設することにより先行変位の抑制効果があると考えられる. また, Case2, 3, 4, 5 の結果から, 先受工をソリッド要素でモデル化するよりもビーム要素でモデル化した方が, 先行変位の抑制効果は大きい結果となった. 打設範囲が 120° の Case2, 4 と打設範囲が 180° の Case3, 5 を比較すると, 1 mm 未満の差ではあるが

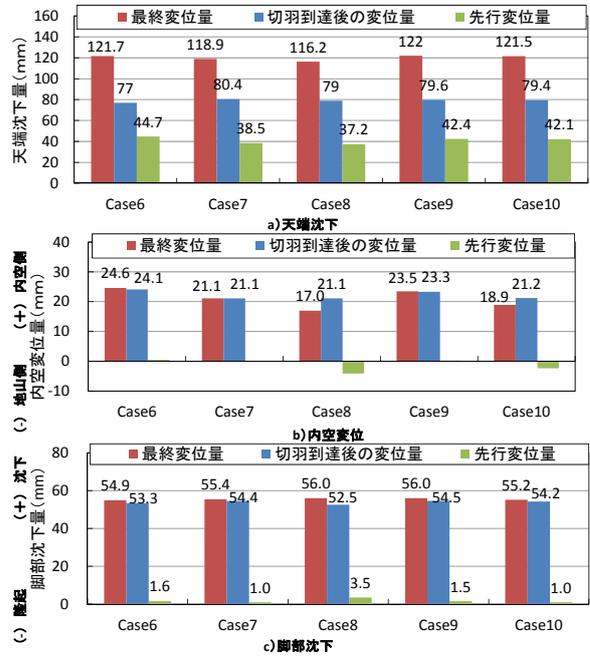


図-8 各ケースの変位量の内訳 (弾塑性体)

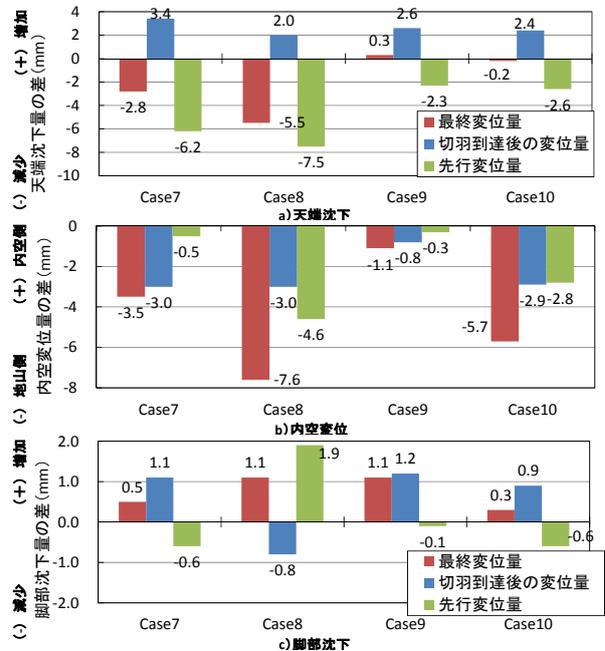


図-10 先受工による変位量の変化 (弾塑性体)

180° 打設した Case3, 5 の方が天端の先行変位量が小さくなっている.

内空変位の先行変位量は, Case1 では-0.6mm と微小な地山側への変位があるのに対し, 先受工をソリッド要素でモデル化した Case2, 3では-2.8mm (-2.2mm) と-10.3mm (-9.7mm) であり, 内空の地山側への変位が大きくなっている. 先受工をビーム要素でモデル化した Case4, 5 は先行変位が-0.8mm (-0.2mm) と-2.9mm (-2.3mm) であり, 同様に先行変位が大きくなった. 先受工の打設範囲に着目すると, 120° 打設した Case2, 4 よりも 180° 打設した Case3, 5 の方が Case1 に対する内空の先行変位量の差は大きくなった.

脚部沈下の先行変位量は、Case1 では-0.9mm であったのに対し、先受工をソリッド要素でモデル化した Case2, 3 では-1.1mm (-0.2mm) と+4.9mm (+5.8mm) であり、先受工をビーム要素でモデル化した Case4, 5 では、-1.1mm (-0.2mm) と-1.4mm (-0.5mm) であった。Case3 を除く 3 ケースでは、先受工をモデル化することにより脚部沈下の先行変位量が減少している。また、打設範囲に着目すると、120° で打設した Case2, 4 に比べ、打設範囲が 180° である Case5 は先行変位の減少量が大きい傾向がある。Case3 において、脚部の先行変位が大きくなった原因としては、図-5 より、その他の 4 ケースが切羽の到達前に脚部が浮き上がるような挙動をしているのに対し、Case3 では、そのような浮き上がりが生じていないためと考えられるが、詳細については不明であり、今後検討が必要である。

次に、弾塑性解析を行った Case6~10 に着目する。

図-8 および図-10 より、天端の先行変位量は、先受工のない Case6 で 44.7mm であったのに対し、先受工をソリッド要素でモデル化した Case7, 8 では 38.5mm (-6.2mm) と 37.2mm (-7.5mm) であり、先受工をビーム要素でモデル化した Case9, 10 では 42.2mm (-2.3mm) と 42.1mm (-2.6mm) であった。先受工をソリッド要素でモデル化したケース、ビーム要素でモデル化したケースどちらも天端の先行変位量は抑制される結果となった。弾塑性解析では、先受工をソリッド要素でモデル化したケースの方が、先受工をビーム要素でモデル化したケースよりも天端沈下の先行変位量は抑制される結果となる。また、打設範囲 120° の Case7, 9 と打設範囲 180° の Case8, 10 では、打設範囲が広い Case8, 10 の方が天端沈下の先行変位が抑制される傾向がある。

内空変位の先行変位量は、先受工のない Case6 で 0.5mm、先受工をソリッド要素でモデル化した Case7, 8 では 0.0mm (-0.5mm) と -4.1mm (-4.6mm)、先受工をビーム要素でモデル化した Case9, 10 では +0.2mm (-0.3mm) と -2.3mm (-2.8mm) であった。先受工をソリッド要素でモデル化した Case7, 8、ビーム要素でモデル化した Case9, 10 にともに、内空側への先行変位が抑制された。また、打設範囲が 180° のケースの方が変位の抑制量は大きくなる。

脚部沈下の先行変位は、Case6 では 1.6mm、先受工をソリッド要素でモデル化した Case7, 8 では 1.0mm (-0.6mm) と 3.5mm (+1.9mm)、ビーム要素でモデル化した Case9, 10 では 1.5mm (-0.1mm) と 1.0mm (-0.6mm) であった。先受工の有無およびモデル化手法毎の傾向は弾性解析と同様であり、先受工をソリッド要素で 180° モデル化した Case8 を除く 3 ケースでは、先受工をモデル化することにより脚部沈下の先行変位量が減少しており、打設範囲に着目すると、120° で打設した Case7, 9

に比べ、Case10 は先行変位の抑制量が大きい傾向がある。

ほとんどのケースで先行変位を抑制する効果が確認できた。先受工の効果の 1 つである先行変位の抑制に関しては、両モデル化手法とも再現できていると考えられる。

b) 切羽到達後の変位量への影響

弾性解析を行った Case1~5 に着目する。

図-7 および図-9 より、天端沈下の切羽到達後の変位量は先受工のない Case1 で 73.2mm であるのに対し、先受工をソリッド要素でモデル化した Case2, 3 では 67.1mm (-6.1mm) と 60.7mm (-12.5mm) であり、先受工をビーム要素でモデル化した Case4, 5 では 74.9mm (+1.7mm) と 74.7mm (+1.5mm) であった。先受工をソリッド要素でモデル化した場合、切羽到達後の天端沈下量は小さくなり、ビーム要素でモデル化した場合は切羽到達後の天端沈下量が大きくなる結果となった。打設範囲による差は微小であるが、先受工をソリッド要素でモデル化した Case2, 3 では、打設範囲 180° である Case3 の方が、天端沈下が小さくなっている。

切羽到達後の内空変位は、Case1 では 0.4mm であるのに対し、先受工をソリッド要素でモデル化した Case2, 3 では -2.9mm (-3.3mm) と -7.9mm (-8.3mm) であり、先受工をビーム要素でモデル化した Case4, 5 では -0.4mm (-0.8mm) と 0.7mm (+0.3mm) であった。Case5 以外のケースでは、先受工を打設することにより、地山側への変位量が大きくなっている。打設範囲に着目すると、先受工をソリッド要素でモデル化した場合、打設範囲 120° の Case2 に比べ打設範囲 180° の Case3 の方が切羽通過後の内空変位は地山側へ大きくなる。

切羽通過後の脚部沈下量は、Case1 で 35.8mm、先受工をソリッド要素でモデル化した Case2, 3 では 36.4mm (+0.6mm) と 30.9mm (-4.9mm) であり、先受工をビーム要素でモデル化した Case4, 5 では 36.3mm (+0.5mm) と 36.5mm (+0.7mm) であった。切羽到達後の脚部沈下量は Case3 を除き増加傾向である。切羽到達後の脚部沈下量は先行変位量とは逆に先受工を打設することにより増加すると考えられる。打設範囲による差異は 0.1mm 程度と微小である。

次に、弾塑性解析を行った Case6~10 に着目する。

図-8 および図-10 より、切羽到達後の天端沈下量は、先受工のない Case6 で 77.0mm であったのに対し、先受工をソリッド要素でモデル化した Case7, 8 では、80.4mm (+3.4mm) と 79.0mm (+2.0mm) であり、先受工をビーム要素でモデル化した Case9, 10 では、79.6mm (+2.6mm) と 79.4mm (+2.4mm) であった。弾塑性解析においては、切羽到達後の天端沈下量は先受工を打設することにより増加する結果となった。

切羽到達後の内空変位量は、先受工のない Case6 では 24.6mm であるのに対し、先受工をソリッド要素でモデ

ル化した Case7, 8 ではどちらも 21.1mm (-3.0mm) , 先受工をビーム要素でモデル化した Case9, 10 では 23.3mm (-0.8mm) と 21.2mm (-2.9mm) であった. 先受工を打設することにより切羽到達後の内空変位量は抑制される結果となった. また, 先受工をソリッド要素でモデル化した Case7, 8 の方が, 先受工をビーム要素でモデル化した Case9, 10 よりも切羽到達後の内空変位の抑制量は大きい. 打設範囲 120° と 180° のケースを比較すると, 打設は範囲 120° の Case7, 9 よりも 180° の Case8, 10 の方が変位量は抑制される.

切羽到達後の脚部沈下量は, Case6 では 53.3mm, 先受工をソリッド要素でモデル化した Case7, 8 では 54.4mm (+1.1mm) と 52.5mm (-0.8mm) , ビーム要素でモデル化した Case9, 10 では 54.5mm (+1.2mm) と 54.2mm (+0.9mm) であった. 先受工の有無およびモデル化手法毎の傾向は弾性解析と同様であり, 先受工をソリッド要素で 180° モデル化した Case8 を除く 3 ケースでは, 先受工をモデル化することにより切羽到達後の脚部沈下量が増加する結果となった.

c) 最終変位量への影響

図-5～図-10 より, 各ケースの最終天端沈下量は, 先受工をソリッド要素でモデル化した Case2, 3, 7, 8 では先受工のない Case1, Case6 よりも小さくなった. 一方, 先受工をビーム要素でモデル化した Case4, 5, 9, 10 では最終天端沈下量は先受工のない Case1, 6 と同程度であった.

内空変位の最終変位量は, 先受工を打設した全ケースで地山側への変位量が大きくなった. 弾性解析を行った Case2～5 では, 先受工のない Case1 における内空変位量が -0.2mm とほぼ発生していなかったため, 先受工を打設することにより大きくなったと考えられる. 弾塑性解析を行った Case7～10 では先受工のない Case6 に比べ最終内空変位量は抑制されている.

最終の脚部沈下量は, 先受工を打設することにより大きくなった.

(2) 支保工に対する影響について

本稿では先受工を打設した際に最も影響を受けると考えられる先受工と鋼アーチ支保工が接する箇所での計測結果を示す. 支保工応力の測定位置の概念図を図-11 に示す.

a) 吹付けコンクリートの軸応力

図-12 に吹付けコンクリートに発生する軸応力を示す. 横軸はトンネル中心からの角度を, 縦軸は軸力を示している. 軸力が引張の場合は+, 圧縮の場合は- の値を示す. 弾性解析の場合, 図-12a)より, 先受工をソリッド要素でモデル化した Case2 および Case3 において, 吹付けコンクリートに発生する軸応力は先受工なしの Case1

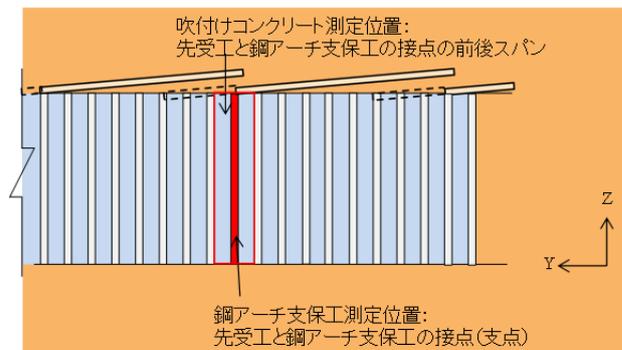


図-11 支保工応力測定位置の概略図

と比較して, 先受工をモデル化した範囲で軽減されている傾向が確認できる. Case2 において先受工のない 30°～40° の範囲に着目すると, 軸応力が Case1 よりも大きくなっている. 先受工をソリッド要素でモデル化することで先受工を打設した範囲では軸応力が軽減される一方で, 打設範囲外では上部から荷重が伝達され, 応力が大きくなっていると考えられる. ビーム要素でモデル化した Case4, 5 では軸応力は増加している.

弾塑性解析の場合, 図-12b)より, 先受工をモデル化した全ケースで吹付けコンクリートに発生する軸力は増加する傾向がある. 特に, ソリッド要素でモデル化した Case7, Case8 では軸応力が他のケースに比べ大きくなっている.

b) 鋼アーチ支保工の軸力

図-13 に鋼アーチ支保工に生じる軸力を示す. 鋼アーチ支保工に発生する軸力は, 図-13 より, 弾性解析で先受工をソリッド要素で再現した Case2, Case3のみ軽減されている. また, 吹付けコンクリートの軸応力同様に, 軸力が軽減されるのは先受工を打設した範囲に限られ, Case2 において, 先受工の打設範囲外である側壁部では軽減効果は見られなかった.

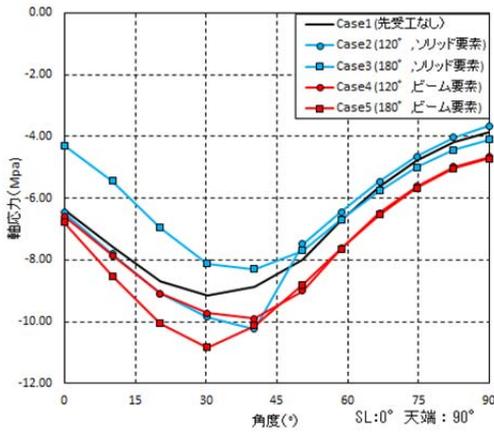
弾塑性解析では, 弾性解析を行ったケースほど大きいが, 先受工なしの Case1, 6 に比べ全ケースで軸力が大きくなった.

c) 鋼アーチ支保工の曲げモーメント

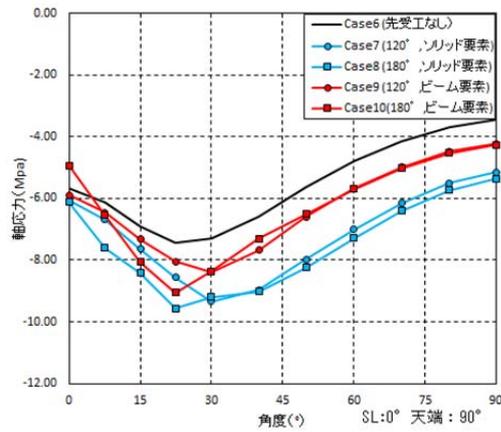
鋼アーチ支保工に発生する曲げモーメントを図-14 に示す. 曲げモーメントは変形が地山側に凸の場合を+, 内空側に凸の場合を-として示している. 図-14 より, 鋼アーチ支保工に発生する曲げモーメントの正負は全ケースでほぼ同様の分布を示しており, 先受工のモデル化手法の違いによる差異は見られない. 先受工の打設範囲の境界である中心角 0° から 30° の範囲では, 曲げモーメントの値に若干のバラつきが見られるが, モデル化手法および打設範囲とバラつきの関係について明確な傾向は見い出せない.

d) 支保工に発生する応力に関する考察

先受工をソリッド要素でモデル化した場合, 弾性解析において支保工にかかる軸力(軸応力)が軽減された原因としては, 支保工の外側に剛性の高いアーチ状の領域

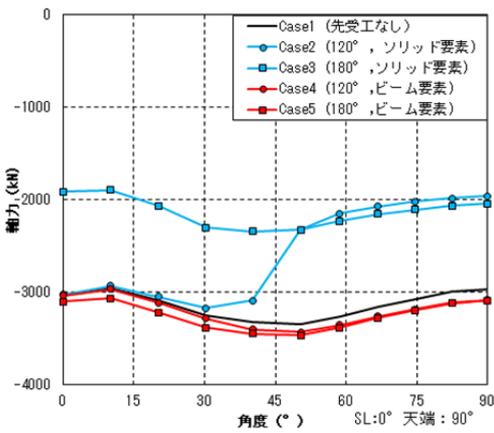


a) 弾性解析時

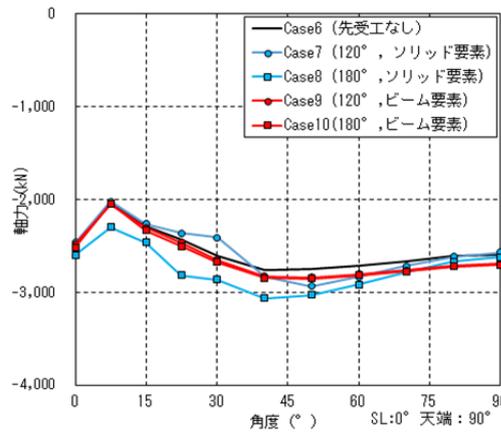


b) 弾塑性解析時

図-12 吹付け応力に発生する軸力

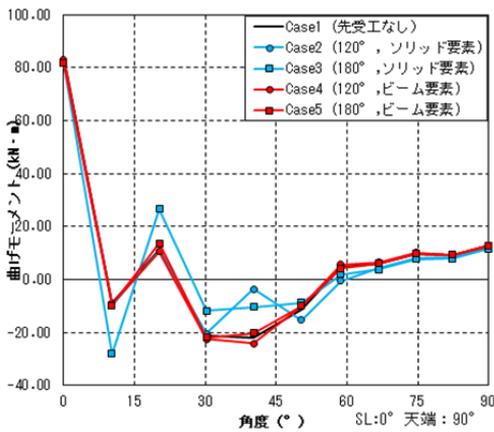


a) 弾性解析時

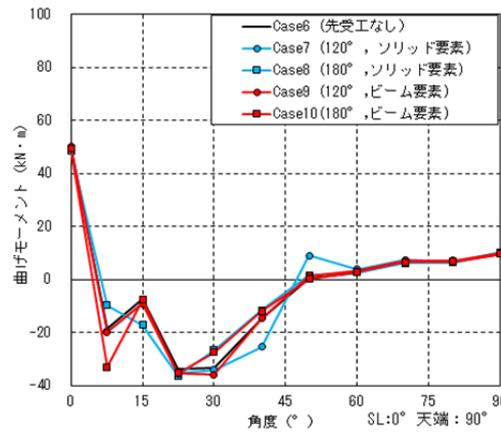


b) 弾塑性解析時

図-13 鋼アーチ支保工に発生する軸力



a) 弾性解析時



b) 弾塑性解析時

図-14 鋼アーチ支保工に発生する曲げモーメント

が形成されることにより、その領域が地山荷重を受け持ち、支保工にかかる荷重が軽減されたためであると考えられる。弾塑性解析場合にも、上記のようなアーチ効果が改良域に生じるはずであるが、弾塑性解析では軸力（軸応力）を低減する効果は見られなかった。この原因としてはいくつか考えられるが、一つの原因として、本解析において先受工をソリッド要素でモデル化する際、

先受工による改良域も地山同様に弾塑性体で構成しているため、ゆるみ荷重が改良域に作用することで塑性化が生じ、荷重を受け持たなくなったことが考えられる。

一方、先受工をビーム要素でモデル化したケースでは、全体的に支保工に発生する応力が先受工なしのケースと比べ増加する傾向が見られる。これは、先受工に発生する前方の応力が先受工との接点となる支保工に集中して

伝わってくるためであると考えられる。

(3) 数値解析モデルの特徴

以上の解析結果の傾向をまとめると、以下のとおりである。

- 先受工をソリッド要素でモデル化した場合
 - ・先受工なしのケースに比べ天端の最終沈下量が抑制される結果となる。
 - ・弾塑性解析では先受工なしのケースに比べ、天端の先行変位が抑制される一方、切羽到達後の天端沈下は増加する結果となる。
 - ・弾塑性解析では、先受工なしのケースに比べ、先行変位および切羽到達後の内空変位は抑制される結果となる。
 - ・弾性、弾塑性に関わらず、脚部の最終沈下量は先受工なしの場合と比べ増加する傾向がある。
 - ・打設範囲 120° と 180° では、 180° の方が各変位の抑制量が大きい結果となる。
 - ・弾性解析において、吹付けコンクリートおよび鋼アーチ支保工に発生する軸力が先受工なしの場合に比べ低減される結果となる。
 - ・弾塑性解析においては、吹付けコンクリートに発生する軸応力および鋼アーチ支保工に発生する軸力は、掘削面周辺の地山の要素が塑性化することにより、先受工なしの場合と比較して大きくなる。
 - ・弾性解析において、先受工を 180° 打設した場合、先受工なしおよび打設範囲 120° の場合と比べ支保工の側部に発生する応力を軽減できる結果となる。
 - ・鋼アーチ支保工に発生する曲げモーメントは先受工の有無で変化しない結果となった。
- 先受工をビーム要素でモデル化した場合
 - ・最終天端沈下量は、先受工なしと比べて変化しない結果となる。一方、最終内空変位量は先受工を打設することで抑制される結果となる。
 - ・弾塑性解析では天端沈下および内空変位において、先行変位は先受工なしの場合と比較して抑制されるが、切羽到達後の変位量は、天端沈下が増加し、内空変位は減少する結果となる。
 - ・弾塑性解析において、先受工の打設範囲が 120° と 180° の場合を比較すると、先受工の打設範囲が 180° の方が内空変位の抑制量が大きい結果となる。
 - ・吹付けコンクリートに発生する軸応力および鋼アーチ支保工に作用する軸力は、先受工がないケースに比べ大きい結果となる。
 - ・鋼アーチ支保工に曲げモーメントは先受工なしの場合と比較しても明確な変化はない結果となる。

4. まとめ

本稿では、3次元数値解析における先受工のモデル化手法に着目し、モデル化手法の違いや打設範囲の違いが数値解析結果に及ぼす影響について検討を行った。主な知見は以下のとおりである。

- ・先受工をソリッド要素の換算剛性としてモデル化し、掘削面周辺の地山の剛性を増加させた場合は、天端の最終沈下量を抑制する効果が確認された。特に先受工を 120° 打設した場合に比べ先受工を 180° 打設した場合のほうが抑制する効果が大きい結果となる。
 - ・ビーム要素で先受鋼管のみをモデル化した場合は、天端の先行変位を抑制する効果があるが、切羽到達後の沈下および最終沈下量を抑制する効果は現れない結果となる。
 - ・弾塑性解析において、先受工のモデル化手法に関わらず内空変位を抑制する効果が確認された。特に、先受工を 120° 打設した場合に比べ 180° 打設した場合の方が内空変位が大きく抑制される結果となる。
 - ・弾性解析において先受工をソリッド要素の換算剛性としてモデル化した場合、支保工の外側に剛性の大きな要素が配置されることとなり、支保工に発生する軸力（軸応力）を低減する結果となる。
 - ・弾塑性解析において先受工をソリッド要素の換算剛性としてモデル化した場合は、掘削面周辺の地山の要素が塑性化することにより、切羽到達後の天端沈下量や支保工に発生する軸力が増加する結果となる。
 - ・先受工の鋼管のみをビーム要素でモデル化した場合、切羽前方の荷重を先受工が受け持ったことにより支保工に発生する軸力（軸応力）が増加する結果となる。
- 以上のように、同一の先受工を対象とした数値解析において、先受工のモデル化の手法の違いにより、変位抑制効果や支保工の応力軽減効果の傾向が異なることが明らかとなった。これらの数値解析モデルにおいては多くの仮定を設けており、モデル化の妥当性を検証するためには実施工における計測結果を用いた検証が必要である。
- 今後は実際のトンネル施工現場における計測結果と解析結果を比較し、適切なモデル化手法の確立に資する検討を行っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 北川洋平, 岸田展明, 日下敦, 砂金伸治: 数値解析に基づく先受工の施工範囲に関する一考察, 第 72 回年次学術講演会, III-359, 2017
- 2) 北川洋平, 日下敦, 岸田展明, 砂金伸治: 3次元数値解析による先受工の打設範囲に関する一考察, トンネル工学報告集, 第 27 巻, I-38, 2017

(2019. 8. 9 受付)

A CHARACTERISITIC OF MODELING METHODS IN 3D NUMERICAL SIMULATION FOR FOREPILES IN CONVENTIONAL TUNNELING

Toru SASAKI, Atsushi KUSAKA and Yoshitomo TATSUMI

In the NATM, Support measures to reinforce the rock may be used for the purpose of stabilization the top. In designing the support measures, there are cases where the effects of various methods examined by numerical simulation. When the effect of support measures is assessed by numerical simulation, we need to enough verify its validity. However, while there are multiple modeling methods in the numerical simulation used in practice, the result is deffer for each modeling methods.

In this report, focus on the difference of modeling methods of forepiles in the 3 dimensional numerical simulations, we tried to grasp the difference in results due to the difference in modeling methods.

From the result of the simulations, the following were clarified: 1) In the case that forepile was modeled with solid element, the finally top subsidence is suppressed; 2) In the elastic analysis , When the forepile is modeled with solid elements, the stress acting on the support is suppressed; 3) when the forepile is modeled with beam elements, there are no effect like suppressing the stress and the top subsidence.