数値解析に基づく先受工の施工範囲に関する一考察

国立研究開発法人　土木研究所　正会員　○北川洋平・岸田展明・日下敦・砂金伸治

1. 研究目的

山岳トンネル工法においては天端安定対策等を目的として先受工が用いられることがある．先受け工の効果を数値解析により検討する際には，補助工法自体に期待されているメカニズムと実際の解析により把握できるメカニズムの差違を把握したうえでの結果を解釈することが望まれる．しかし，実務上は簡易な二次元解析により評価される場合が多いため，モデル化の方法によりどの程度の差違が生じるかを把握したうえで評価を行う必要がある．

本稿では補助工法の一例として長尺鋼管先受工を取り上げ，その打設範囲の差違による解析結果に与える影響を把握することを試み，変形（内空変位，天端沈下，脚部沈下）や支保に発生する応力に関して検討を行った．

2. 数値解析の概要

2.1 解析モデル

本研究で検討した先受工の打設範囲を**図 1** に示す．ここでは標準的に用いられていると考えられる打設範囲120°を基本に，打設範囲を 180° に拡大したケースについても考慮した．解析手法は検討の第一段階として概略を把握することを想定し，2 次元弾性 FEM を用いた．

図 2 に解析モデルの概略を示す．トンネルの直径 D は 10m とし，上半は半径 R_1=5m の単心円，下半の半径は R_2=10m とし平面ひずみモデルを用いた．

表 1 に解析物性値を示す．本研究では地山等級を DII と想定し，支保工について，H-150 の鋼アーチ支保工と厚さ 20cm の吹付けコンクリートを念頭に，それらを合成はりとみなした．インバートは厚さ 50cm とし，すりつけ部は設けていない．

長尺鋼管先受工のモデル化の方法として，鋼管の先行変位抑制効果を支保工設置前の応力解放率の減少として評価するとともに，注入材による地山改良効果については改良幅 45cm の見かけの物性値を変化させることとした．鋼管の先受け効果の評価を軸対称モデルによる予備解析を参考文献[1]と同様の手法により行った．先受工を用いない場合の支保工設置前の応力解放率を 40%とした．解析結果から先受け工がある場合は当初の応力解放率のおよそ4割減であることが分かり，25%と仮定することとした．なお，この解放率に関しては種々の条件により変化すると考えられ適切な設定については今後の課題の 1 つである．

2.2 地盤変形解析

前述の条件のもと，地山の自重のみを荷重として地盤変形解析を行った．**表 2** に解析ケースを示す．

初期条件として，解析断面の前方で長尺鋼管先受工を打設していると仮定し，先受け工の打設範囲における地山を改良しているものとした．側圧係数は基本的なケースとして，本稿では 1.0 とした．

Case1~Case3 については，先受け工なし，先受け工 120°

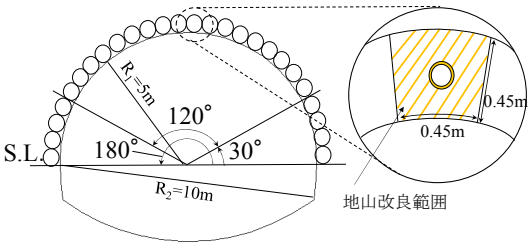

図 1　AGF 鋼管打設範囲の模式図

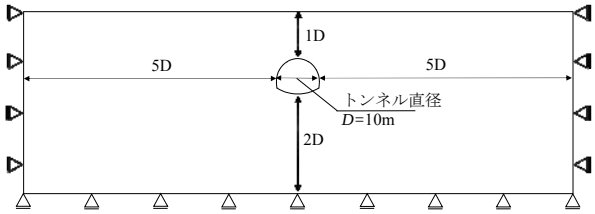

図 2　解析モデルの概略図

表 1　解析物性値

モデル	ヤング係数［MPa］	ポアソン比
地山	150	0.35
鋼アーチ支保工 (H-150)	210,000	0.30
吹付け コンクリート	4,000	0.20
インバート	22,000	0.20
改良地山	300	0.30

表 2　解析ケース

解析 ケース	先受け工打設範囲 (地山改良) [degree]	支保工設置前の 応力解放率 α[%]
Case1	-	25
Case2	120	25
Case3	180	25
Case4	-	40
Case5	120	40
Case6	180	40

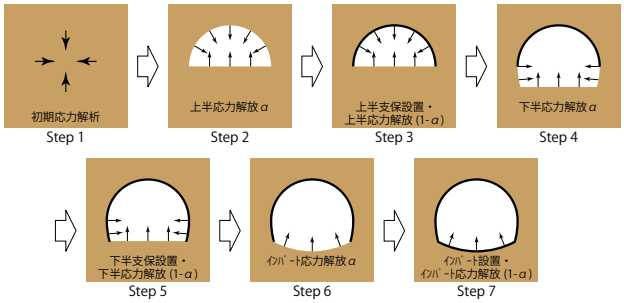

図 3　解析ステップ

Key Words：道路トンネル，長尺鋼管先受け工，　FEM 解析

連絡先：〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6　国立研究開発法人土木研究所　道路技術研究グループ（トンネル）　TEL：029-879-6791

打設, 先受け工 180°打設のそれぞれ打設範囲が異なる条件において，応力解放率 α を前述の 25%として解析を行った. **図 3** に解析のステップを示す. はじめに上半を掘削し, 応力を解放させた後に上半の支保を設置し残りの応力を解放した. 以降の下半掘削，インバート掘削も同様のステップに従った. なお，先行変位抑制効果による影響をみるために行った Case4~Case6 の解析では, Case1～Case3 と同様にそれぞれの打設範囲において応力解放率 α を 40%として解析を行い, Case1～Case3 と同様に地山を改良した状態とすることで地山改良効果による影響を除外した.

3. 解析結果

図 4, 図 5 に掘削前から上半支保設置後の各解析ステップの天端における鉛直方向の変位と S.L.における水平方向の変位をそれぞれ示す. 鉛直方向はトンネル中心から天端方向を正, 水平方向はトンネル中心から地山方向を正とする. 天端の鉛直変位は step2 の際に最も大きな変化を示している一方, S.L.における水平方向の変位は step4 の際に最も大きな変化を示した. **表 3** に step2 における Case4 の鉛直変位に対する各ケースの鉛直変位の割合を示す. Case3 において最も変位が抑制されており，注入により地盤改良のみを行った Case6 と比較すると先受けによる鉛直変位への寄与が大きいことが分かる. 一方, Case2 と Case5, Case3 と Case6 を比較すると，打設範囲を拡大したことにより鉛直変位は抑制されているものの, 割合の差分をみると打設範囲の拡大による先行変位抑制効果の明確な違いは現れなかった.

図 6 に Case2～Case4 の鋼アーチ支保工の縁応力（step7 時）の分布を示す. 鋼アーチ支保工と吹付けコンクリートの軸剛性と曲げ剛性を算出した結果, ほぼ同等の剛性を有しており，軸力と曲げモーメントを同等に分担している. 縁応力は正の値が圧縮を示している. **表 4** は**図 6** の 0°, 30°, 90°に着目した際の Case4 の縁応力を基準とした比である. 0°における Case2 と Case3 の割合は支保工設置後の解放力が大きいので Case4 よりも大きくなっているが，その程度は改良範囲の広い Case3 の方が小さい. 一方，天端では Case2 と Case3 の割合に明確な差はなかった. 今回の解析の結果, 改良範囲を拡大すると脚部では応力の抑制効果が大きいものの，天端では小さいものとなった.

4. 結論

長尺鋼管先受工の打設範囲の違いが支保におよぼす影響について 2 次元 FEM 解析を行った. 解析上，先受け工を 2 次元解析では地山の見かけの物性値を変更することや支保工設置前の応力解放率を変更することでモデル化することが多く，その影響は打設範囲を拡大すると鋼アーチ支保工に発生する応力の増加や天端変位の抑制としてみることが出来た. しかし，実現象や天端の安定といった本来の先受け工の目的に鑑みると，評価の妥当性については一定の判断が必要であると考えられる.

本稿では 2 次元という制約や種々の仮定のもとでの解析であるので，今後は 3 次元での解析や模型実験，施工現場の実測値データの解析などの異なる手法による評価や比較検討を行うことで，補助工法を検討する際の適切な選定手法の提案を行っていく必要がある.

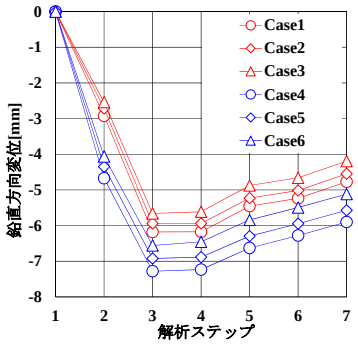

図 4 各解析ステップにおける天端の鉛直方向の変位

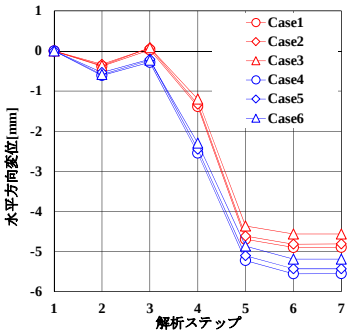

図 5 各解析ステップにおける S.L.の水平方向の変位

表 3 step2 における Case4 の天端の鉛直変位に対する各ケースの割合

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
鉛直変位[mm]	-2.92	-2.72	-2.54	-4.67	-4.35	-4.06
割合[%]	63	58	54	100	93	87

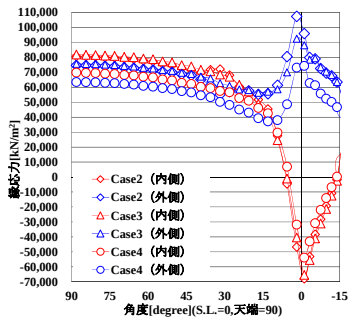

図 6 打設範囲毎の鋼アーチ支保工の縁応力の分布

表 4 各角度における Case4 の内側縁応力に対する各ケースの割合［%］

角度	内側			外側		
	Case2	Case3	Case4	Case2	Case3	Case4
0°	147	127	100	147	126	100
30°	120	118	100	118	126	100
90°	115	117	100	117	119	100

参考文献

1) 日本道路公団試験研究所：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），試験研究所技術資料第 359 号，pp13-18，2013.
2) 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），pp57-61，2012.