

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

北川 洋平¹・日下 敦²・岸田 展明³・砂金 伸治⁴

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:y-kitagawa@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 中電技術コンサルタント株式会社 (元 国立研究開発法人 土木研究所 交流研究員)
(〒734-8510 広島県広島市南区出汐2-3-30)
E-mail:nkishida@cecnet.co.jp

⁴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:n-isago@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り、設計を行う際には、過去の事例等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うケースも多く見られている。この場合、工法自体に期待されている種々の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異を把握したうえで結果を解釈することが望ましい。しかし、実務上は簡易な2次元解析により評価を行う場合が多く、解析で得られた結果をもとに、補助工法の本来の効果を十分に吟味しないまま数値を評価する懸念も存在すると考えられる。本報告では施工で採用される補助工法の一例として長尺鋼管先受工を取り上げ、3次元解析を行い、その打設範囲の違いにより先受け鋼管に発生する曲げモーメントやトンネルの変形について得られる差異の把握を試みた結果について報告する。

Key Words: forepiling, preceding displacement, numerical analysis, 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区間等において多用されている。

補助工法には切羽安定対策、地下水対策、地表面沈下対策、近接構造物対策などの目的がある。選定にあたっては、その目的に鑑み、地山条件等の調査結果に基づき設計、施工事例を参考として各種工法の効果、施工方法、工程、経済性等を考慮して行われる。

2016年11月に発生した福岡市地下鉄七隈線延伸工事現場における道路陥没事故では、補助工法に期待する効果が十分発揮されなかったことが事故の副次的な要因となった可能性が高いものとして指摘される¹⁾など、補助工法の選定は極めて重要であるといえる。

補助工法の設計を行う場合は、過去の事例等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うケースも多く見られている。この場合は、工法自体に期待されている種々の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異を把握したうえで結果を解釈することが必要である。例えば、モデル化の方法によりどの程度の差異が生じるかを把握したうえで評価を行うことが本来は必要であると考えられる。

一般に、数値解析を行う場合は、実構造物を一定の仮定のもとに理想化してモデル化するため、全ての実現象を再現できるわけではない。しかしながら、実務上、簡略化した2次元解析により補助工法の効果を評価し、本来期待されていない補助工法の効果も数値解析上で効果があるような結果となることを根拠に、例えば先受工を施工することにより支保工の低減を図るなどの検討を行っている事例も散見される。極端な例としては、側方からの変位が大きい地山に対して、先受工を側部にも施工することにより変位の抑制と支保工の低減を試みるなどの検討を行う事例も見受けられる。

筆者らは補助工法の一例として使用頻度が増加傾向にある長尺鋼管先受工を取り上げ、先受け鋼管の打設範囲の差異が解析結果に与える影響の把握を2次元解析により行い、いくつかの知見を得た²⁾。一方で2次元という制

約のもとであり、先受工の本来の目的に鑑みた場合、一定の判断が必要であると考えられ、実施工により近い長尺鋼管先受工の効果を把握するためには3次元での解析を行い、その差異を把握する必要があると考えた。

本報告では、3次元による解析を試み、先受け鋼管に発生する曲げモーメントやトンネルの変形について、その打設範囲の違いによって得られる差異を把握し、補助工法のモデル化の合理性等の基礎的な知見を得るための検討を行った結果について報告する。

2. 数値解析の概要

本研究で検討対象とした先受工に関して、先受け鋼管の打設範囲を図-1に示す。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考慮した。本解析は3次元有限差分法（解析コード：FLAC3D）により行った。図-2に解析モデル図と境界条件を示す。トンネルの形状は基礎的な現象を把握するために簡略化することを念頭に直径 $D=10\text{m}$ の円形とし、土被りは $1D$ とした。また、下方領域を $2D$ 、側方領域を $5D$ と想定した。なお、実際には解析領域の影響もあるものと考えられる。解析断面は左右対称であるため、半断面において解析を行った。境界条件は下端を拘束、対称面を鉛直ローラーとし、弾性解析によるものとした。本報告では図-2に示す O を原点とし、水平方向を x 、掘削方向を y 、鉛直方向を z と定義した。

表-1に解析物性値を示す。本研究では地山等級を DII と想定した支保工を設置するものと仮定した。H-150の鋼アーチ支保工をビーム要素とし、吹付けコンクリートを厚さ 20cm のシェル要素としてトンネル全面に設置した。掘進長は 1m とし、掘削後、吹付けコンクリートを掘削長さ分のトンネル全周に、鋼アーチ支保工を 1m 間隔にそれぞれ設置した。なお、ロックボルトは全周において配置しないものと仮定した。

長尺鋼管先受工のモデル化について図-3に示す。先受け鋼管の形状は $\phi 114.3\text{mm}$ 、 $t=6.0\text{mm}$ 、 $L=12.5\text{m}$ とした。先受け鋼管の打設角度は前方のトンネル軸方向に対して 10° とし、横断方向は打設範囲 10° 毎に1本の間隔（ 120° 打設で7本、 180° 打設で10本）で打設を行い、打設ピッチは 9m とした³⁾。なお、本研究のモデルにおいては奇数鋼管、偶数鋼管の違いによる千鳥配列は行っていない。また、先受け鋼管はビーム要素にてモデル化を行い、鋼管単体の先受け効果のみに着目するために、本報告のモデルではグラウト材による鋼管周辺の地山改良効果については考慮していない。

前述の条件のもと、地山の鉛直方向および側方から

1MPa の荷重を作用させて地盤変形解析を行った。解析フローを図-4に示す。はじめに先受け鋼管を打設し、その後 1m 毎に掘削を行った。掘削の都度支保工を設置し、 9m 掘削した。上述の流れを1サイクルとし、6サイクル繰り返したのちに、先受け鋼管を打設し 1m 掘削を行った。解析は図-1による考え方を反映した表-2に示

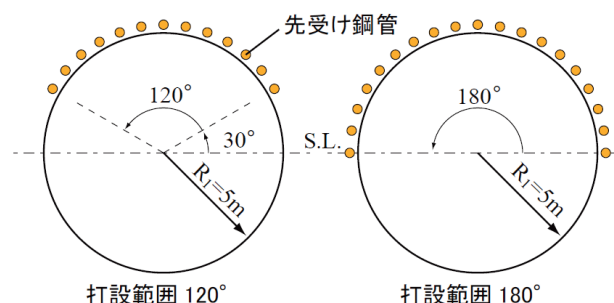


図-1 トンネル断面と先受け鋼管打設範囲の模式図

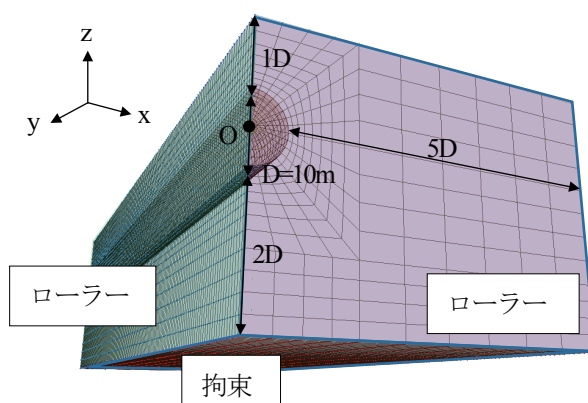


図-2 解析モデル図と境界条件

表-1 解析物性値

モデル	構造要素	ヤング係数 [MPa]	ポアソン比
地山	Solid	150, 50	0.35
鋼アーチ支保工 (H-150)	Beam	210,000	0.30
吹付け コンクリート	Shell	4,000	0.20
先受鋼管	Beam	210,000	0.30

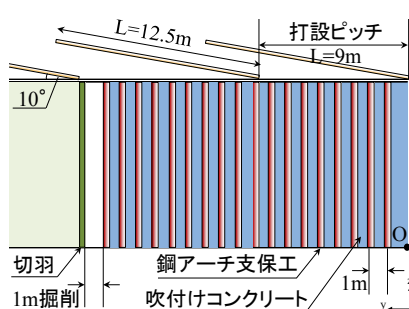


図-3 縦断方向の模式図

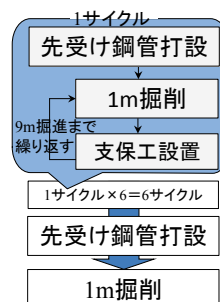


図-4 解析フロー

表-2 解析ケース

解析ケース	先受工打設範囲	地山の弾性係数
Case 1	なし	150MPa
Case 2	120°	150MPa
Case 3	180°	150MPa
Case 4	なし	50MPa
Case 5	120°	50MPa
Case 6	180°	50MPa

す通り 6 ケース行い、長尺鋼管先受工なし、長尺鋼管先受工 120°打設、長尺鋼管先受工 180°打設の 3 ケースについて、地山の弾性係数を 150MPa と 50MPa のそれぞれについて検討を行った。

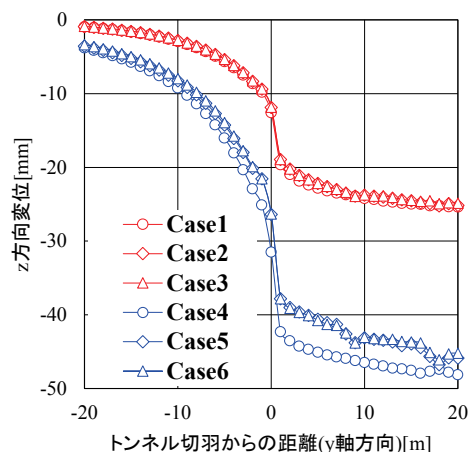
3. 解析結果

(1) 先受け鋼管の先行変位抑制効果について

先受け鋼管を打設することによる先行変位の抑制効果について検討を行う。Case1, Case2, Case3において、切羽を $y=54\text{m}$ まで掘削し、先受け鋼管を各ケースの打設範囲に打設した後に 1m 掘進したときの変位の比較を行う。

はじめに、天端における z 方向の変位について検討を行う。図-5はCase1~Case6における天端の z 方向の変位を示している。Case1~Case3に着目すると、先受工の打設範囲に関わらず、先行変位の抑制効果が非常に小さいことがわかる。一方、Case4~Case6に着目するとCase4に比べて、Case5, Case6の方が先行変位が抑制されていることが分かる。このことから、地山の変形係数によっては先行変位抑制効果の発現が異なるといえる。先受工に対しては、先行変位抑制効果があるのは定性的には把握されているものの、その効果だけを期待することではなく、併せて掘削時の切羽安定対策や地表面沈下対策という意図も含まれていると考えられる。また、先受け鋼管の打設範囲の異なるCase5とCase6を比較すると z 方向の変位に明瞭な違いは現れなかった。

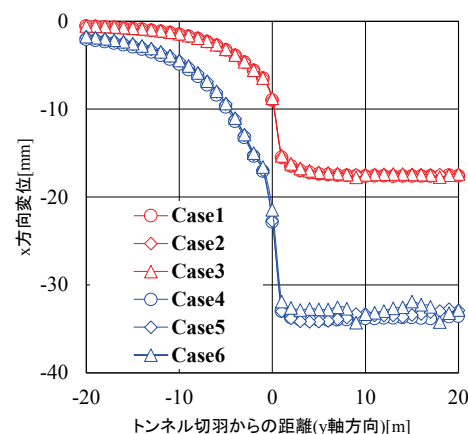
表-3は切羽位置における天端の各解析ケースの z 方向の変位（先行変位）と先行変位抑制割合を示している。なお、ここでの先行変位抑制割合とは先受工がある場合の変位抑制量を先受工がない場合の z 方向の変位で除した値である。Case2, Case3においては先行変位抑制割合は1割弱であるが、Case5, Case6においてはおよそ2割弱の先行変位を抑制していることが分かる。表-4は切羽と2D後方の天端における各解析ケースの z 方向の変位とその差分を示している。この差分は切羽通過後の切羽から2D後方の天端の変位を表していることになる。

図-5 天端における各ケースの z 方向の変位表-3 切羽位置における天端の各解析ケースの z 方向の変位（先行変位）と先行変位抑制割合

解析ケース	z 方向変位 [mm]	先行変位抑制割合 [%]
Case 1	-12.58	-
Case 2	-11.85	5.74
Case 3	-11.82	6.01
Case 4	-31.50	-
Case 5	-26.36	16.33
Case 6	-26.31	16.50

表-4 切羽と2D後方の天端における各解析ケースの z 方向の変位とその差分

解析ケース	z 方向変位[mm]		② - ① 差分
	① ($y=55\text{m}$)	② ($y=35\text{m}$)	
Case 1	-12.58	-25.35	-12.77
Case 2	-11.85	-25.16	-13.31
Case 3	-11.82	-24.86	-13.04
Case 4	-31.50	-48.11	-16.61
Case 5	-26.36	-45.86	-19.50
Case 6	-26.31	-45.18	-18.87

図-6 S.L.における各ケースの x 方向の変位

Case1~Case3に着目すると、先受工があるCase2, Case3の方が先受工がないCase1よりも差分が大きい。このことは、先受工が切羽後方の変位の抑制には寄与しない可能性が高いことを示唆していると思われる。

次に、S.L.におけるx方向の変位について検討を行う。

図-6はCase1~Case6におけるS.L.のx方向の変位を示している。Case1~Case3に着目すると、天端におけるz方向の変位同様、いずれのケースも先受工の打設範囲に関わらず先行変位抑制効果が非常に小さいことがわかる。このことはCase4~Case6においても同様であり、地山の変形係数による影響は小さいものと考えられる。

これらの結果から、地山の弾性係数により先行変位抑制効果の発現に差があることが確認された。一方で、先受工の打設範囲を拡大することによる先行変位抑制効果については本解析の条件下では明確には見られないものであると考えられる。

(2) 先受け鋼管の先受け効果について

図-7に先受工を打設した各ケースの天端における、切羽の進行に伴う先受け鋼管の曲げモーメントの経時変化を示す。曲げモーメントの値が正の場合は上に凸、負の場合は下に凹みを示す。切羽位置が $y=47\text{m}$ のときに曲げモーメントが正に最大を示し、切羽位置が $y=48\text{m}$ のときに曲げモーメントが負に最大となっている。これは、前シフトの鋼管 ($y=36\text{m}$)において打設)とのラップ部分がなくなることで、 $y=45\text{m}$ に打設した鋼管のみで応力を負担していると考えられるためである。

その後、曲げ応力の変曲点が前進し、負担する応力が収束していることが分かる。この結果から、先受け鋼管に発生する主要な曲げモーメントが切羽付近でしか発生しておらず、先受け鋼管による先受け効果が切羽の進行とともに薄れていることを示している。これらの傾向は先受け鋼管に働く応力の計測結果^{4b)}と兼ね一致している。

Case2とCase5を比較すると鋼管に及ぼす曲げモーメントは概してCase5の方が大きかった。このことから、先受け鋼管が負担する曲げモーメントの違いが先行変位の抑制につながったものと考えられる。一方、先受け鋼管の打設範囲が異なるCase2とCase3を比較すると、発生する曲げモーメントに差はほとんど見られなかった。Case5とCase6を比較しても同様の結果となった。このことから打設範囲を拡大することにより先受け鋼管に発生する曲げモーメントの差は小さいものであるといえる。むしろ本報告の解析条件では地山の弾性係数の違いが先受け鋼管の先受け効果に影響を与える結果となったと考えられる。

図-8はCase3, Case6のS.L.における、切羽の進行に伴う先受け鋼管の曲げモーメント (z, x方向) の経時変化を示す。z方向の曲げモーメントについては天端の先受け

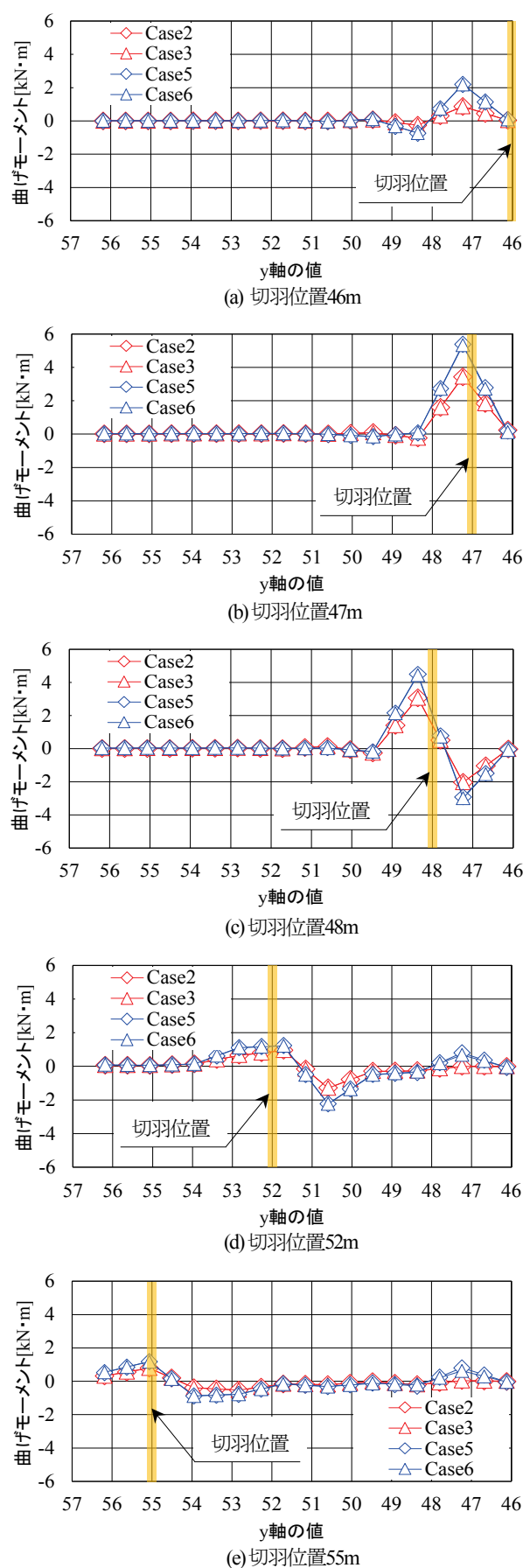


図-7 各ケースの天端における先受け鋼管に作用する曲げモーメント

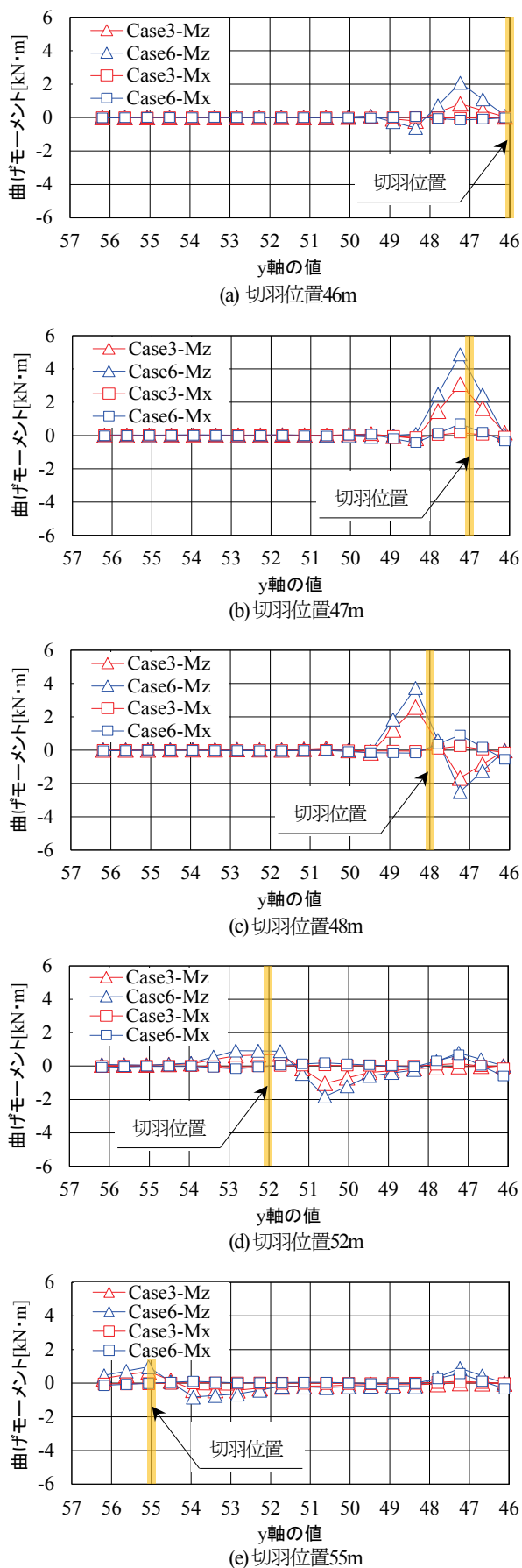


図-8 各ケースのSLにおける先受け鋼管に作用する曲げモーメント

鋼管の挙動と同様の傾向を示している。一方、x方向の曲げモーメントは、z方向の曲げモーメントと比べて値が小さいことが分かる。図-6において、SLの先行変位が抑制されていなかった要因として、側方からの荷重が卓越しているわけではないので、側方に先受け鋼管の打設範囲を拡大してもその効果は小さいことが考えられる。

なお、本検討での条件は限られており、例えば荷重の作用に関する条件との関係については今後の検討課題である。

(3) 鋼アーチ支保工に発生する軸力について

先受工の打設による鋼アーチ支保工への影響について検討を行う。切羽を $y=54\text{m}$ まで掘削し、先受け鋼管を各ケースの打設範囲で打設した後に 1m 掘進したときの $y=54\text{m}$ に設置した鋼アーチ支保工の軸力の分布を図-9に示す。Case1~Case3に着目するとケース間の軸力の差はほとんど見受けられなかった。Case4~Case6についても同様に、ケース間の軸力の差は見受けられなかった。

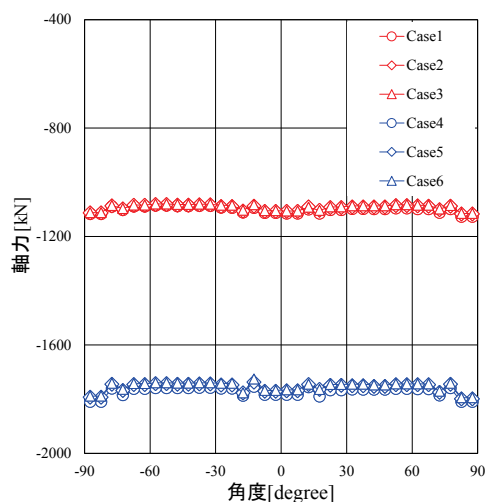


図-9 各ケースの鋼アーチ支保工の軸力

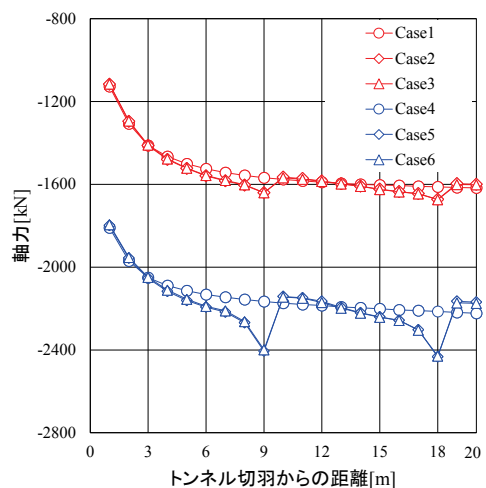


図-10 各ケースの天端における各鋼アーチ支保工の軸力

図-10は各ケースの天端における各鋼アーチ支保工の軸力を示している。切羽の進行とともに鋼アーチ支保工に作用する軸力は増加しているが切羽から2D程度で収束している。先受工の有無による鋼アーチ支保工に作用する軸力の大きな低減は本条件下では見られなかった。

これらの結果から、先受工の打設による支保に働く応力の低減効果は確認されず、支保工の設計に先受工の効果を見込むことは困難な条件も存在すると考えられる。支保工と補助工法のメカニズムを考慮した上での検討が必要になると考えられ、今後の検討課題である。

4. おわりに

長尺鋼管先受工の打設範囲の違いが先受け鋼管に発生する曲げモーメントやトンネルの変形におよぼす影響の違いについて3次元有限差分法により解析を行った。本解析モデルによる解析の結果から得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 先受け鋼管の先行変位抑制効果について、地山の弾性係数が小さい場合では切羽前方におけるz方向の変位の抑制効果が確認された。一方、先受け鋼管の打設範囲の違いによる変位抑制効果の差異は本検討の打設範囲においては解析的には確認できなかった。また、x方向の変位抑制効果はいずれのケースも確認されなかった。
- 2) 先受け鋼管の先受け効果について、地山の弾性係数の違いにより鋼管に働く曲げモーメントに差異が現れた。結果、この差異が先行変位の抑制効果の有無に寄与したと考えられる。
- 3) 鋼アーチ支保工の軸力について、先受工の打設による応力の低減効果は確認できなかった。このことか

ら、支保工の設計に先受工の効果を見込むことに対しては一定の解釈を要するものと思われる。

今回の検討により、長尺鋼管先受工による効果が数値解析上で出やすい地山の条件が存在することが示された。ただし、数値解析結果の差異が対象とする補助工法に本来期待すべき効果であるかは十分に吟味する必要がある。換言すれば数値解析の単なる値だけに注目すると誤った解釈へとつながる恐れがあることに留意すべきであると考えられる。

本報告では、種々の仮定のもとでの解析であるので、今後は異なるモデル化についての検討や模型実験、また実際の施工現場での実測値データの分析などの複数の手法による評価や比較検討を行うことにより、補助工法を検討する際の適切な解析手法や選定手法の提案を行っていく必要がある。

参考文献

- 1) 福岡市地下鉄七隈線延伸工事現場における道路陥没に関する検討委員会，国立研究開発法人土木研究所：福岡市地下鉄七隈線延伸工事現場における道路陥没に関する検討委員会報告書，pp.2-48-2-54,2017.
- 2) 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，投稿中，2017.
- 3) ジェオフロンテ協会 AGF WG：注入式長尺先受工法（AGF工法）（六訂版），p72,2012.
- 4) 小島一路，小林正邦，奥田良三，五島三明：極浅い土かぶりをAGF工法で施工，トンネルと地下，vol.26，No.3，pp.23-30，1995.
- 5) 御手洗良夫，松尾勉，手塚仁，岡本哲也，西村誠一，松井保：山岳トンネルにおける長尺鏡補強工の作用効果の評価，土木学会論文集，No.743/III-64，pp.213-222，2003.

(2017.8.11 受付)

A STUDY ON PLACING RANGE OF FOREPILES BY 3D NUMERICAL ANALYSIS

Yohei KITAGAWA, Atsushi KUSAKA, Noriaki KISHIDA and Nobuharu ISAGO

Support measures to reinforce the rock is applied when a shallow tunnel is excavated in soft ground in an urban area. Considering the construction situation, environment, cost and more, we select the appropriate support measures. In general, the effect of support measures is assessed by numerical analysis, especially 2 dimensions. However, it is not equal the mechanism of the real site and the simulation model, so that we should grasp the difference between of the two.

In this report, focus on the 3 dimensional analysis and the effect of the placing range of forepiles.

From the results of the simulation, the following were clarified: 1) The effect of the vertical leading displacement to install forepiles is confirmed while horizontal is not confirmed; 2) leading displacement caused by bending moment applied to forepiles; and 3) The result of axial force for steel arch indicate that the effect of stress reduction by forepiles is not confirmed.