

## 中央導坑先進工法の効果検証に関する一考察（その1）

大成建設株式会社 正会員 ○市田 雄行, 西谷 友幸, 大槻 亮介, 大塚 勇

## 1. 背景

中央導坑先進工法は、不良地山において、前方地山調査、水抜き、いなし効果等を期待して採用されることがある。しかし、切詰め時の切羽安定性に対する効果は定量的に検証されていないのが現状である。そこで本論文では、導坑による前方地山の補強効果に着目し、三次元 FEM 解析を用いた分析によりその有効性を定量的に検証する。

## 2. 導坑による前方地山補強効果

導坑を先進させることにより、先行して支保工の設置や補助工法を実施することが可能となり、前方地山の補強が可能となる。その効果として、トンネル軸方向変位の抑制や切羽の安定化が想定される。これらの機構について、三次元 FEM 解析をもとに検証を行う。

## 3. 解析概要

解析モデルを図1に示す。掘削断面は図2に示すとおりとし、掘削径 9.2m の本坑に対して掘削径 5.35m の導坑を掘削する。

地山の力学モデルは弾性モデルとする。地山の物性値は表1に示す値を用いる。また、補助工法として AGF および鏡ボルトを適用することで切羽前方およびトンネル周辺の地山補強（改良）を想定しており、補強範囲の変形係数は、地山と鋼管の剛性をもとに算出した等価剛性 ( $E' = 1,700 \text{ MN/m}^2$ ) を用いる。支保部材である吹付けコンクリートは弾性シェル要素とし、吹付け厚は導坑、本坑ともに一重あたり 20cm とする。鋼製支保工はビーム要素とし、降伏値以上の応力は分担させない弾完全塑性モデルとする。鋼製支保工は導坑では H-150、本坑では HH-154 を用い、各部材の有する軸剛性、曲げ剛性を用いる。なお、本坑の支保工は二重支保工とする。

解析ケースは導坑の有無、支保剛性および補助工法の有無による影響を比較検討するため、表2のとおり設定する。いずれのケースにおいても、初期応力は土被り 650m に相当する応力 17.6MPa を等方等圧に与える。解析ステップは、導坑を全長 100m 掘削した後、本坑を切詰め掘削するものとし、導坑、本坑ともに、1m 掘進後に切羽 1m 後方に支保工要素を設置する手順を繰り返す。また、図3に示すように CASE1 では AGF と鏡ボルトによる地山の改良効果をそれぞれ切羽前方 9m、6m の範囲で考慮し、改良範囲内の地山要素の変形係数を  $1,700 \text{ MN/m}^2$  に逐次変更したうえで掘削を行う。

## 4. 解析結果と考察

支保の有無による軸方向変位分布の違いを示すため、図4に、本坑切羽到達までの累積軸方向変位量の横断面内の分布を、CASE2 と CASE4 で比較したものを示す。支保工のない CASE4 ではトンネル

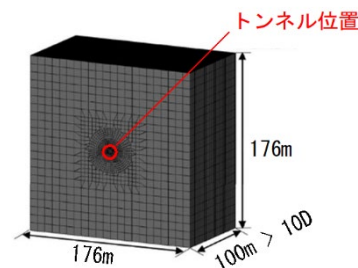


図1 解析モデル図

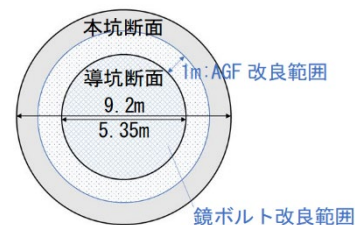


図2 解析モデル断面図

表1 地山物性値

単位体積重量 ( $\text{kN/m}^3$ )	変形係数 ( $\text{MN/m}^2$ )	ポアソン比
27.0	1,000 (地山改良域: 1,700)	0.3

表2 解析ケース

	導坑		支保剛性 大 小
	支保工	補助工法	
CASE1	二重	AGF・鏡ボルト	大 小
CASE2	二重	なし	
CASE3	一重	なし	
CASE4	なし	なし	
CASE5	導坑なし		

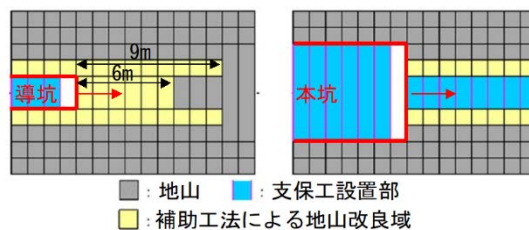


図3 解析ステップ概要(CASE1の場合)

キーワード 中央導坑 三次元 FEM 切羽安定化

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 大成建設株式会社 土木設計部 TEL 03-5381-5296

軸心に近づくほど軸方向変位量は大きくなっているが、CASE2 では導坑の支保工位置で軸方向変位量が抑えられており、軸方向変位量の断面内最大値が30mm程度抑制されている。

本坑切羽到達時までの累積軸方向変位量の断面内最大値を各ケースで比較した結果を図5に示す。CASE4 とCASE5 とから、導坑掘削の効果を比較すると、軸方向変位量は30%程度抑制されていることが分かる。同様に、CASE3 とCASE4 で支保の有無、CASE2 とCASE3 で支保剛性の大小、CASE1 とCASE2 で補助工法の有無による効果の違いを比較すると、支保を入れることによる効果が軸方向変位量の抑制割合35%程度で最も大きく、次いで支保剛性の向上(13%)、補助工法の実施(1%)という順に効果が大きいことが分かる。軸方向変位量を抑制するうえで導坑支保の存在による効果が特に大きく、支保剛性の向上、補助工法の実施によりさらに軸方向変位量の抑制効果をもたせられることを確認できた。

図6に、各ケースの本坑切羽到達時の地山の局所安全率分布図を示す。CASE4 およびCASE5 では、切羽前方の地山に局所安全率1.0を下回る領域が存在するが、導坑に支保工を入れたCASE3 では前方地山の安全率は1.2程度に上昇している。また、支保剛性を高めたCASE2 では安全率は1.6程度に上昇している。これらの結果より、切羽前方の地山の安定性を高めるためには導坑支保を入れること、また支保剛性を高めることが効果的であることを確認することができた。

図7に、CASE2, 3, 5における、導坑天端背面位置の地山要素の応力履歴を示す。図中の $\sigma_{xx}$ 、 $\sigma_{yy}$  および $\sigma_{zz}$  は、それぞれ水平、トンネル軸、鉛直方向の応力成分を表す。CASE2 および3については、導坑切羽通過後、本坑切羽が近づいてくるまで一定の三軸圧縮状態を保持しており、本坑切羽到達直前に軸方向応力のみ低下が生じる。CASE5 も同様に軸方向応力の低下が見られるが、その低下量はCASE3の1.9倍、CASE2の2.3倍程度であり、導坑を先進する場合と比べて大きい。これらの結果より、導坑支保工により軸方向の変形を拘束し軸方向応力の低下を抑制したことで、切上げ直前まで切羽および前方地山の応力は三軸圧縮状態に保たれたものと考察する。よって、導坑には軸方向変位の抑制と切羽を安定化させる効果があることを確認した。また、当該効果は支保剛性が大きいほど高い。

5. まとめ

導坑の前方地山補強効果に着目した三次元FEM解析の結果、以下の知見を得た。

- ・導坑支保工および補助工法により切上げ時の切羽と前方地山が拘束されることで、トンネル軸方向変位が抑制される。この結果、切上げ直前まで地山は三軸圧縮状態を維持し、地山の塑性化を防止し切羽の安定化が図れる。
- ・上記機構は導坑支保工による効果が大きく、補助工法による効果は小さい。ただし、補助工法には本解析で表現しきれない効果もあるため、異なる機構を想定した定量的な評価手法も今後検討する必要がある。

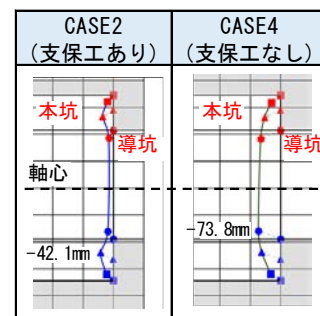


図4 切上げ時軸方向変位分布 (CASE2、4)

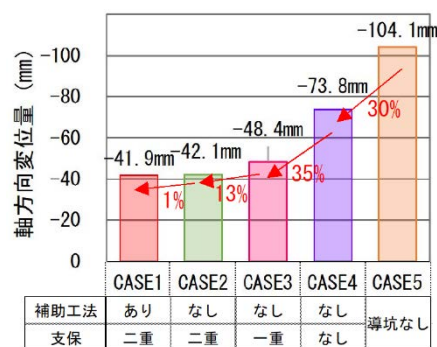
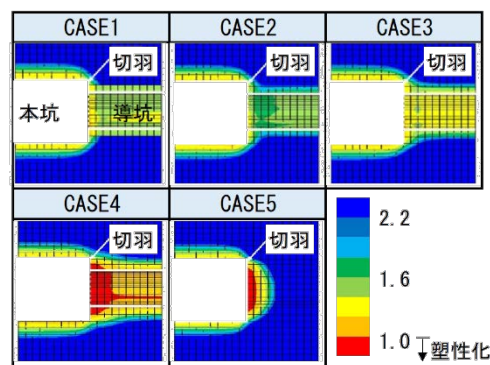


図5 本坑切羽到達時の軸方向変位量最大値



※ $c = 1\text{N/mm}^2$ 、 $\phi = 30^\circ$  を仮定

図6 局所安全率分布図

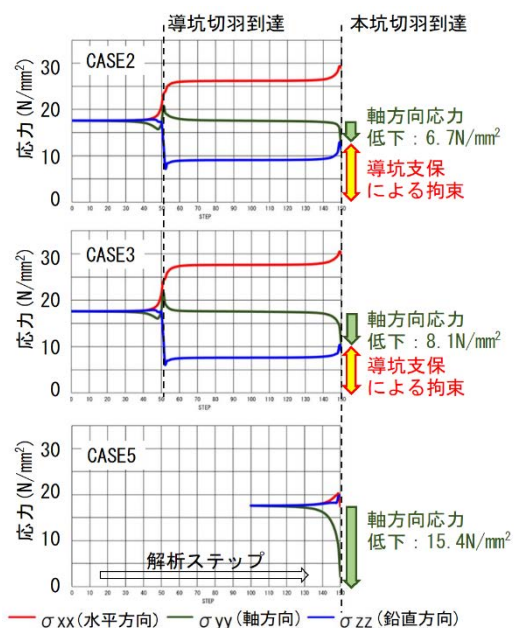


図7 導坑天端位置応力履歴