

トンネルの構造安定性に及ぼす導坑拡幅の効果に関する解析的考察

東京都立大学大学院 ○篠田 かれん 砂金 伸治
五洋建設 大森 禎敏
ケー・エフ・シー 岡部 正 五味 綾子

1. 序論

近年の先進導坑の採用は、本坑トンネルの掘削断面が大きく、全断面工法などで安全に掘削できない場合や、膨張性地山等の軟弱地盤において、先行変位を発生させることで、本坑支保工に発生する変位、応力を低減させる「いなし」の効果を期待する場合に大別されると考えられる。これまで、導坑と本坑の力学的な関連性は経験的に把握されてきた面が多く、導坑を拡幅した場合におけるトンネルの力学的な挙動は一部で3次元数値解析により検討される例も見られているが、施工事例ごとの検討に留められている場合が多く、広範な議論は限られている。

本研究では、導坑拡幅の効果および適用性をより明確化することを目的とし、拡幅時におけるトンネルの変形量や支保構造の断面力を解析的に把握した。具体的には地山の変形係数が、導坑拡幅の効果にどのような影響を及ぼすかについて3次元解析により検討し、トンネル構造の安定性や支保設計に影響を及ぼしやすい導坑拡幅の条件について検討を行った。

2. 解析方法

本研究では有限差分法(解析コード：FLAC3D)により数値解析を行った。図-1に3次元数値解析のモデルを示す。図に示したように座標軸として原点をO、水平方向をx軸(トンネルのS.L.と一致)、掘削方向をy軸、鉛直方向をz軸と定義した。

表-1に解析条件を示す。トンネル形状は、本坑を馬蹄形とし、導坑を円形とした。トンネル本坑の直径Dは15.66mであり、導坑の直径は4.4mとし、実際の施工で用いられた構造を参考にした。解析領域は、本坑の上方を6D程度、下方を4D程度、側方を6D程度確保するものとし、地山の範囲を $-100 \leq x \leq 100$ 、 $0 \leq y \leq 150$ 、 $-65 \leq z \leq 100$ とした(いずれも単位はm)。なお、境界条件は、 $x=-100$ および 100 でx方向を、 $y=0$ および 150 でy方向を、そして $z=-65$ でz方向を固定とした。

また、地山は弾塑性体と仮定しMohr-Coulombの構成則にしたがうものとしたが、解析の簡略化のために本研究では変形係数およびポアソン比は解析領域全てで一定とした。支保工については弾性体と仮定し、鋼アーチ支保工と吹付けコンクリートの断面積をもとにして等価剛性を算定したが、特に吹付けコンクリートの弾性係数に関しては、本坑、導坑掘削時の導坑、本坑掘削時の導坑でそれぞれ一定の値として解析を行った。なお、ロックボルトや補助工法については本研究では見込んでいない。

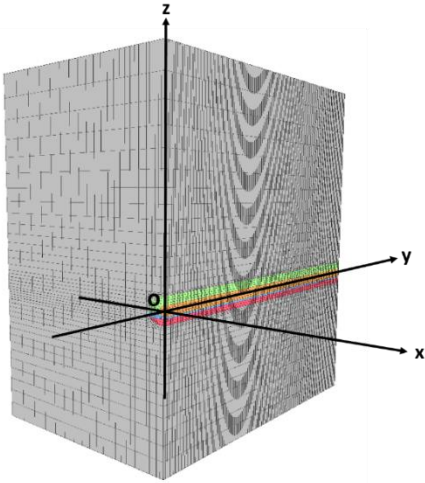


図-1 解析モデルと座標軸

表-1 解析条件

解析プログラム		FLAC3D(有限差分法)		
解析モデル		地山	弾塑性モデル	
		支保工	弾性モデル	
初期応力条件		地山に重力のみを作用させている		
物性値	地山	単位体積重量(kN/m ³)	22	
		変形係数(MN/m ²)	20,200,2000	
		ポアソン比	0.48	
		粘着力(kN/m ²)	200	
		内部摩擦角(°)	20	
	支保工 (鋼製支保工と吹付けコンクリートの等価剛性)	単位体積重量(kN/m ³)	24.60	
		本坑弾性係数(GN/m ²)	13.13	
		導坑弾性係数(GN/m ²)	導坑掘削時:13.13	本坑掘削時:34.57
		ポアソン比	0.174	
		厚さ(m)	0.25	
		補助工法	考慮していない	

表-2 解析ケース

		地山の変形係数		
		200[MN/m²]	2000[MN/m²]	20[MN/m²]
導坑の有無	導坑あり	case1	case2	case3
	導坑なし	case4	case5	case6

キーワード トンネル, 先進導坑, いなし効果, 支保構造, 数値解析

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 東京都立大学大学院

表-2 に解析ケースを示す。本研究では導坑の有無に着目することとし、上述のとおり地山の変形係数($E=200\text{MN/m}^2, 2000\text{MN/m}^2, 20\text{MN/m}^2$)のみを変化させた6ケースに関して検討を行った。また、解析上の掘削模擬方法は、「①導坑を44m一括で掘削→②44m~135mまで1mごとの逐次掘削→③135m~150mまで一度に貫通→④上半, 下半, インバートを44mまで一括で掘削→⑤上半, 下半, インバートを44m~135mまで1mごとの逐次掘削」とした。ここで導坑があるケースは①から、導坑がないケースは④からの手順で解析を行った。

3. 解析結果

3.1 トンネルの天端沈下量

図-2~図-4 に本坑掘削時の $y=90\text{m}$ 、すなわちトンネルの掘削方向に対して解析領域全体の3/5だけ進んだ位置における初期地山からの本坑の天端沈下量を示す。地山の変形係数に応じて天端沈下量の算定値には大小の差があるものの、変形係数に関わらず本坑切羽通過前、すなわち切羽距離が負の区間では、導坑掘削にともなう変位、変形によって導坑がある方が、導坑がない場合よりも、本坑の天端沈下量が総じて大きくなるのが分かる。

一方、本坑切羽通過後は、導坑がない場合の方が、導坑がある場合に比べて、本坑の天端沈下量は大きくなるのが再現でき、初期地山からの変位量としては、いわゆる「いなし効果」としての定性的な傾向と一致する。

3.2 本坑鋼製支保工の軸力

図-5 に本坑掘削後の本坑 $y=90\text{m}$ における鋼アーチ支保工の軸力を示す。地山の変形係数が小さい方が、軸力が大きい結果が得られ、一般的に考えられている傾向と同様であった。また、等しい変形係数で比較すると、導坑がない場合(case4,5,6)の方が、導坑がある場合(case1,2,3)より、本坑支保の軸力としては小さい結果が得られた。

4. 結論

解析の結果、導坑の有無に着目すると、導坑がある方が、切羽通過後である本坑 $y=90\text{m}$ の天端沈下量は小さくなり、鋼アーチ支保工の軸力は大きくなった。また、地山の変形係数に着目すると、地山の変形係数が小さい方が、本坑 $y=90\text{m}$ での本坑の天端沈下量は大きくなり、鋼アーチ支保工の軸力は大きくなった。本研究で用いた変形係数の範囲では、導坑掘削により、本坑掘削時の初期地山からの天端沈下量を減少させる効果が明確に表れたと考えられる。一方、導坑を適用することで、本坑掘削終了時の鋼アーチ支保工の軸力が大きくなった。このため導坑を適用するには、地山条件などによっては本坑の支保規模を増加する必要があることも考えられ、導坑の「いなし効果」による影響を本坑の支保設計に反映させる必要がある場合もありえると考えられる。今後は、得られた解析結果と現場で得られた計測データとの比較、模型実験とその再現解析などで、導坑の拡幅効果を確認する必要があると考えている。

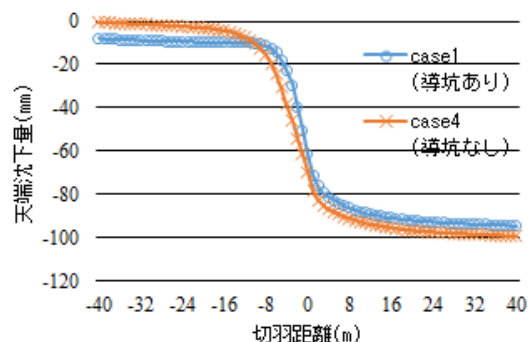


図-2 $E=200\text{MN/m}^2$, 本坑 $y=90\text{m}$ の天端沈下量

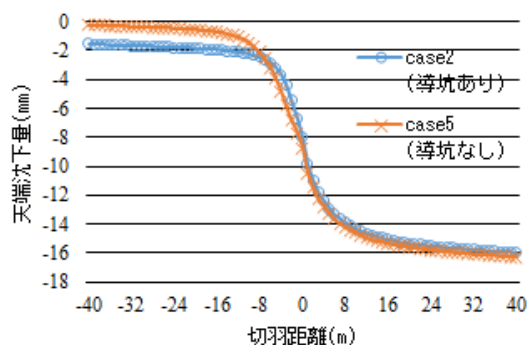


図-3 $E=2000\text{MN/m}^2$, 本坑 $y=90\text{m}$ の天端沈下量

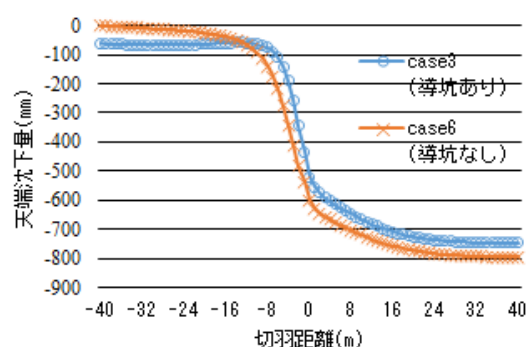


図-4 $E=20\text{MN/m}^2$, 本坑 $y=90\text{m}$ の天端沈下量

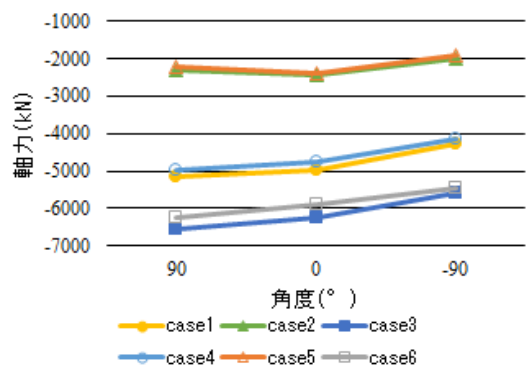


図-5 本坑掘削終了時の

本坑 $y=90\text{m}$ の鋼アーチ支保工の軸力