

不良地山における先進導坑の効果とトンネル構造安定性に関する解析的考察

東京都立大学大学院 学生会員 ○篠田 かれん
 東京都立大学 正会員 砂金 伸治
 五洋建設 正会員 大森 禎敏
 東京都立大学 正会員 河田 皓介

1. 序論

先進導坑とは、新たに建設する本坑トンネルの掘削断面内に中小断面を予め先進させるもので、本坑トンネルの掘削断面が大きく、全断面工法などで一度に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」の目的で採用される。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、近年、導坑を拡幅した場合における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ようになった。しかしながら、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、不良地山における先進導坑の効果を明らかにし、トンネルの設計法へ反映する考え方を示すことを目的とし、トンネル掘削時におけるトンネルの力学的挙動を解析的に検討した。具体的には、導坑掘削で生じると考えられる塑性領域に対して、本坑掘削時にその塑性領域の大小の影響により、本坑の支保工や周辺地山の挙動がどのように変化するかを解析的に検証した。

2. 研究方法

2.1 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。その理由として、地盤や岩盤、構造物を対象として大変形や非線形の物性挙動、崩壊に至る過程を議論しやすいと考えたことによる。

2.2 解析条件

図-1に3次元数値解析のモデルを示す。座標軸として原点O、トンネルの断面に対して水平方向をx軸(なお、トンネルのS.L.と一致させている)、トンネルの掘削方向をy軸、また、断面に対して鉛直方向をz軸と定義した。トンネル本坑は馬蹄形、導坑は円形とし、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、これらの仕様は実際の構造を参考にした。また、地山は弾塑性と仮定し、上方領域を6D程度、下方領域を4D程度、側方領域を6D程度とし、地山の範囲を、 $-100 \leq x \leq 100, 0 \leq y \leq 150, -65 \leq z \leq 100$ (単位はm)とした。なお、境界条件は、 $x = -100$ および 100 のx方向を、 $y = 0$ および 150 のy方向を、そして $z = -65$ のz方向を固定とした。その他の解析条件は表-1に示すとおりである。

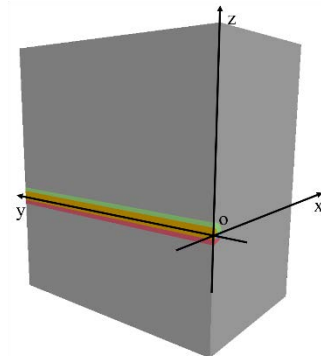


図-1 解析モデル

表-1 解析条件

解析モデル	地山	弾塑性モデル(ただし初期応力解析は弾性解析)		
	支保工	弾性モデル		
初期応力条件	地山に重力のみ作用させている			
物性値	地山	単位体積重量(kN/m ³)	22	
		変形係数(MN/m ²)	200	
		ポアソン比	0.48	
		粘着力(kN/m ²)	50, 200	
	支保工	内部摩擦角(°)	15, 20	
		単位体積重量(kN/m ³)	24.60	
		導坑の弾性係数(GN/m ²)	導坑掘削時: 13.13	本坑掘削時: 34.57
		本坑の弾性係数(GN/m ²)	13.13	
補助工法	ポアソン比	0.174		
	厚さ(m)	0.25		
補助工法	考慮していない			

ただし、支保工は鋼アーチ支保工と吹付けコンクリートの等価剛性

表-2 解析ケース

ケース名	地山	閉合距離	導坑
Case1-1	E~DII (粘着力: 200kN/m ²) (内部摩擦角: 20°)	1m	有
Case1-2			無
Case1-3		8m	有
Case1-4			無
Case2-1	Case1より不良 (粘着力: 50kN/m ²) (内部摩擦角: 15°)	1m	有
Case2-2			無
Case2-3		8m	有
Case2-4			無

キーワード 山岳トンネル, 先進導坑, いなし効果, 支保工, 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

2.3 解析ケース

表-2 に解析ケースを示す。解析では、地山等級が E~DII 程度の地山を Case1, それよりも不良な地山を Case2 とし、導坑の有無と閉合距離を変えた検討を行った。ここで、閉合距離 8m は、約 0.5D(D:トンネル本坑の直径)とした。掘削の手順は「(i)導坑を 0~44m まで一括で掘削→(ii)44~135m まで 1m ごとの逐次掘削→(iii)135~150m まで一度に掘削→(iv)本坑を 0~44m まで一括で拡幅掘削→(v) 44~135m まで 1m ごとの逐次拡幅掘削」とした。なお、導坑があるケースは(i)から、導坑がないケースは(iv)から解析を行った。

3. 研究結果

3.1 トンネルの天端沈下量

表-3 に、導坑掘削時と本坑掘削時の本坑 y=90m における天端沈下量を示す。地山条件の異なる両ケースにおいて、導坑がある場合の方が、本坑掘削時の天端沈下量は小さくなるため、地山の不良の程度によらず、導坑掘削により本坑掘削開始から本坑掘削終了までの天端沈下量が小さくなるのが分かる。また、本坑掘削時の天端沈下量は、導坑がある場合は導坑がない場合と比較して、Case1 では 8 割程度、Case2 では 4~5 割程度となっており、地山が不良な場合の方が、導坑掘削による変位抑制効果が大きいことが解析的に分かった。

3.2 本坑支保工の軸力

図-2 に本坑掘削後の本坑 y=90m における鋼アーチ支保工の軸力を示す。地山条件の異なる両ケースともに、軸力は導坑がある場合は導坑がない場合と比較して、Case1 では 2~5%, Case2 では 3%~10%大きくなる結果が得られ、また、吹付けコンクリート等の他の断面力においても同様の傾向が確認できた。

3.3 塑性領域

表-4 に導坑掘削後と本坑掘削後における塑性領域を示す。Case1 では、Case1-2 が Case1-1 に比べて天端部分の塑性領域が 0.18D(D:トンネル本坑の直径)大きくなったものの、Case1-3 と Case1-4 の塑性領域の大きさに差異はなく、導坑の有無によって本坑掘削後の塑性領域に明確な差異があるとはいえない。一方 Case2 では、天端部分の塑性領域が Case2-2 は Case2-1 に比べて 0.27D, Case2-4 は Case2-3 に比べて 0.33D 大きくなり、加えて Case2-2 では Case2-1 に比べて路盤部分と側壁部分の塑性領域が、Case2-4 は Case2-3 に比べて側壁部分の塑性領域が大きくなった。よって導坑がある場合の本坑掘削後の塑性領域は小さくなる結果となった。導坑掘削時に本坑掘削断面まで塑性化するような極めて不良と考えられる地山の場合、導坑掘削により本坑掘削断面まで地山が塑性化され、その塑性化された部分を掘削するため、本坑掘削時の塑性領域が小さくなり、いなしの効果が発現することが解析的に表現できる可能性があると考えられる。

4. 結論

本研究の解析条件では、導坑掘削により、本坑掘削時の天端沈下量が減少し、本坑掘削終了時の本坑の断面力が増加した。また、導坑掘削時に本坑掘削断面まで塑性領域が拡大する地山条件であるとき、導坑掘削による変位抑制効果が大きくなった。よって、導坑掘削による効果として、変位抑制効果が確認できたが、支保工に発生する応力は増加し、地山条件によって、導坑拡幅による変位抑制効果は異なることが分かった。導坑を拡幅した方が、構造安定性が減少する可能性も解析的に示されており、地山条件によっては導坑拡幅の効果も異なる可能性もあるため、導坑拡幅による評価は本坑の支保設計に反映する必要があることを示唆している。今後は行った解析に関連して現場で得られた計測データとの比較、また模型実験やその再現解析を行い、不良地山における先進導坑の効果とトンネルの構造安定性に影響を及ぼしやすい導坑拡幅の条件について、さらなる検討を行う必要がある。

表-3 天端沈下量

地山	Case1-1	Case1-2	Case1-3	Case1-4
	E~DII			
閉合距離	1m	1m	8m	8m
導坑	有	無	有	無
導坑掘削時沈下量(mm)	17	17	17	17
本坑掘削時沈下量(mm)	76	98	105	127
地山	Case2-1	Case2-2	Case2-3	Case2-4
	Case1より不良			
閉合距離	1m	1m	8m	8m
導坑	有	無	有	無
導坑掘削時沈下量(mm)	79	79	79	79
本坑掘削時沈下量(mm)	156	395	273	549

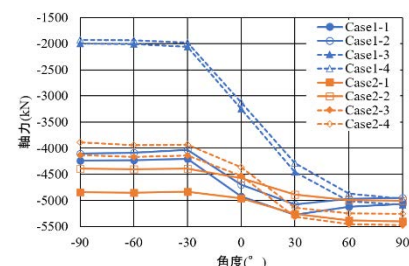


図-2 鋼アーチ支保工の軸力

表-4 塑性領域

地山	Case1-1	Case1-2	Case1-3	Case1-4
	E~DII			
閉合距離	1m	1m	8m	8m
導坑	有	無	有	無
導坑掘削後塑性領域	0.12D		0.12D	
本坑掘削後塑性領域	0.41D	0.59D	0.74D	0.74D
地山	Case2-1	Case2-2	Case2-3	Case2-4
	Case1より不良			
閉合距離	1m	1m	8m	8m
導坑	有	無	有	無
導坑掘削後塑性領域	0.80D		0.80D	
本坑掘削後塑性領域	1.74D	2.20D	2.71D	3.04D