

導坑先進工法における拡幅掘削前後の変位割合に関する一考察

大成建設(株)土木本部土木設計部

正会員 ○小原 伸高

正会員 市田 雄行

1. はじめに

山岳トンネルにおける導坑先進工法には、導坑を先行掘削することで導坑周辺の地山応力を解放し、本坑断面への切詰め時の変形や本坑支保工に生じる応力度を低減する利点がある。この低減効果は“いなし効果”と呼ばれる¹⁾。本稿は、このいなし効果を数値解析にて再現し、導坑掘削後の状態から切詰め完了までの変位履歴について検討し、その結果および考察を報告するものである。

2. 解析条件

導坑のいなし効果を再現するにあたり、導坑および本坑形状は図-1に示すとおり円形とし、表-1に示すケースにて有限差分法プログラムFLAC3Dを用いた3次元掘削解析を実施する。地山と支保工の物性値を表-2に示す。初期地圧は、土被り150mに相当する土圧3.45MPa ($\gamma = 23\text{kN/m}^3$)を、各地山要素に等方等圧に与える。解析ステップは、導坑を100m掘削し切羽を止め、続いて本坑を50m掘削する。両坑共に一掘進長1.0mの素掘りを基本とするが、case5およびcase10の導坑には支保工を考慮する。

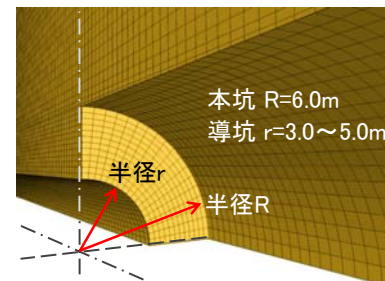


図-1 解析モデル図

表-1 解析ケース

解析ケース	地山の力学モデル	導坑			備考
		導坑有無	掘削半径(m)	支保工有無	
case1	弾性体	×	—	×	本坑掘削のみ
case2		○	3.0	×	導坑支保工が非常に軽い構造、あるいは設置直後に破壊する極端な場合を想定したケース
case3		○	4.0	×	
case4		○	5.0	×	
case5		○	3.0	○	導坑支保工は切羽後方1m位置にて設置
case6	弾塑性体 [※] (モール・クーロン)	×	—	×	本坑掘削のみ
case7		○	3.0	×	導坑支保工が非常に軽い構造、あるいは設置直後に破壊する極端な場合を想定したケース
case8		○	4.0	×	
case9		○	5.0	×	
case10		○	3.0	○	導坑支保工は切羽後方1m位置にて設置

※地山強度比は0.5程度

3. 解析結果および考察

表-2 地山と支保工物性値

物性値		地山		支保工 ^{※1}
		弾性	弾塑性	(弾性)
変形係数	E (MPa)	500	500	3,400
ポアソン比	ν (—)	0.30	0.30	0.20
粘着力	c (MPa)	—	0.50	—
内部摩擦角	ϕ (°)	—	35	—
一軸圧縮強度 ^{※2}	q_u (MPa)	—	1.92	—
備考		地山等級R3相当 ²⁾		$t=10\text{cm}$

※1 支保工:吹付けコンクリート

※2 $q_u = 2c \times \tan(45^\circ + \phi/2)$

(1) トンネル変位量と切羽離れの関係から評価した導坑のいなし効果

本坑予定壁面の半径方向変位量と切羽離れの関係を、図-2に示す。各ケースにて異なる変位履歴を示すが、特に地山が弾性体の場合は本坑切詰め後の最終変位量は全ケースで等しい。弾塑性体の場合では、導坑半径の違いによって最終変位量に最大2mm程度の差がある。この原因は、導坑半径が異なることで掘削過程中的地山の塑性化程度や発生時期等に違いがあり、その結果最終変位量に差が生じたものと考えられる。次に、各ケースにおける本坑切詰め後(切羽通過後)の増分変位量 ΔU を比較する。図-2のcase1と2の比較で示すように、導坑なしの場合と比べて導坑ありの場合は増分変位量 ΔU は小さい。これは導坑によるいなし効果の影響であると考えられ、導坑半径が大きいほどこの効果は大きい。また、支保工の有無による結果の比較をすれば、case2とcase5の弾性地山では両者の増分変位量はほぼ等しい。一方で、case7とcase10の弾塑性性地

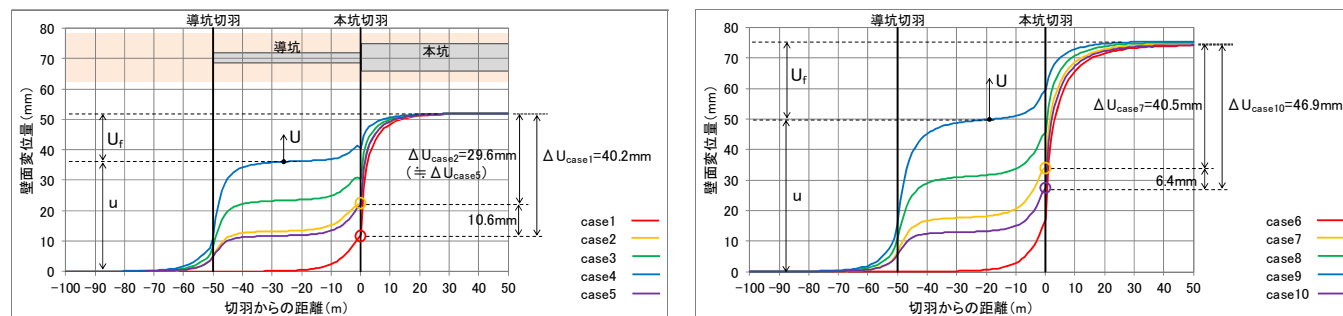


図-2 壁面変位量と切羽離れの関係(地山の力学モデル 左:弾性、右:弾塑性)

キーワード 数値解析, 導坑, いなし効果, 応力解放率

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 (新宿センタービル) 大成建設株式会社 TEL 03-5381-5296

山では、支保工ありの case10 と比べて無支保の case7 の方が増分変位量は 6.4mm 小さい。したがって、掘削時に弾性的な挙動を示す地山では、導坑のいなし効果は期待できず、逆に塑性化する地山においてその効果を十分得られるものと考えられる。さらに、case7 と case10 の比較結果が示すように、導坑を無支保で掘削することは現実的ではないが、導坑支保工に十分な変形を許容させるほど、いなし効果をより多く得られるものと考えられる。

(2) 本坑切上げ掘削前後における変位割合

図-2 に示すように導坑掘削による地山の変形が収束したと判断できる状態における、本坑予定壁面の半径方向変位量を u とする。この変位量 u からの本坑断面への切上げ掘削時の増分変位量を U 、 U の最終値を U_f とし変位割合 U/U_f を得る。さらに、切羽からの距離を本坑掘削径 D で正規化し、これらの関係を図-3 および図-4 に示す。また、各解析ケースの本坑切上げ前後における変位割合 U/U_f を表-3 に示す。これらによれば、導坑が無支保の場合においては、地山が弾性体および弾塑性体に関わらず導坑半径が大きいほど、本坑切上げ前の変位割合（先行変位率）は大きい。例えば、本坑単独掘削となる case6 に対して半径 5m の導坑を先進させた case9 では先行変位率は約 15% 高い。これは導坑により本坑周辺の地山応力を予め解放した影響であると考えられ、この傾向は地山が弾塑性体、言い換えれば地山が塑性化するほど顕著に表れている。

次に、case7 および case10 を例として導坑支保工の有無による先行変位率の違いについて考察する。表-3 より支保工ありの case10 の方が先行変位率は 5.3% 低い。これは支保工により地山が拘束され本坑切上げ前までの変形が抑えられたためである。また、本解析条件においては、case10 の先行変位率は本坑単独掘削となる case6 と同程度の結果が得られているものの、導坑支保工に大きな変形を許容すれば無支保の類似ケース（case7 に相当）と考えることができ、この場合本坑切上げ時の先行変位率は、本坑単独掘削時より大きくなる。したがって、先進導坑に関わる諸検討にて 2 次元掘削解析を行い、かつ応力解放率を変位割合曲線をもとに設定する場合は、導坑の規模および支保工の剛性による影響を十分に検討する必要がある。

4. まとめ

本検討で得られた知見を以下にまとめる。

- ・導坑半径が大きいほど、先進導坑によるいなし効果は大きい。
- ・導坑の支保工に剛な構造よりも十分な変形を許容できる支保工を適用することで、より大きないなし効果が得られる。さらに、塑性化する地山ほどその効果は大きい。
- ・導坑掘削後の本坑切上げ時では、導坑の規模および支保工剛性による影響を受けることで、本坑単独掘削時と比べて先行変位率は大きくなる。

最後に、本報告が類似の先進導坑に関する検討・設計等の参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネルライブラリー第 20 号 山岳トンネルの補助工法－2009 年版－，pp.278-288，2009.9
- 2) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説，p.310，2008.4

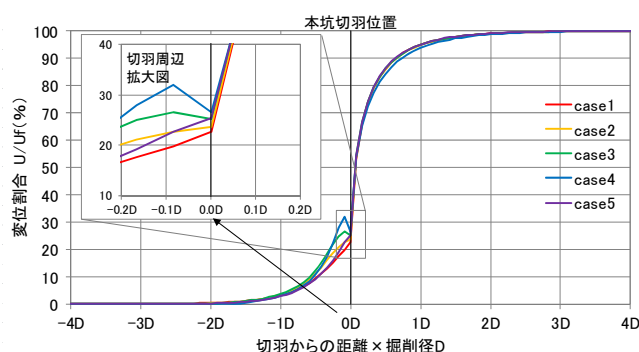


図-3 本坑切上げ時における変位割合曲線（弾性）

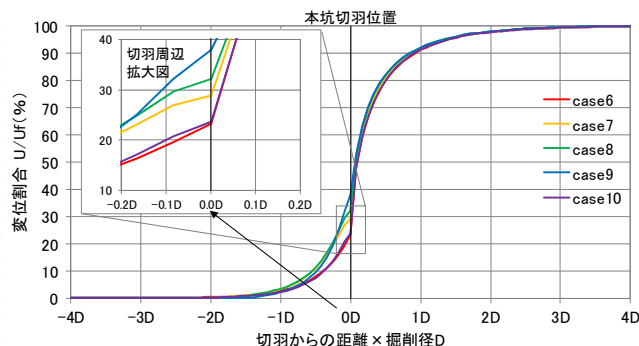


図-4 本坑切上げ時における変位割合曲線（弾塑性）

表-3 導坑掘削後における本坑切上げ前後の変位割合

解析 ケース	地山 モデル	導坑			変位割合(%)	
		導坑 有無	掘削 半径	支保工 有無	切上げ 前	切上げ 後
case1	弾性	×	—	×	22.7	77.3
case2		○	3.0m	×	23.7	76.3
case3		○	4.0m	×	25.2	74.8
case4		○	5.0m	×	26.6	73.4
case5		○	3.0m	○	25.3	74.7
case6	弾塑性	×	—	×	23.3	76.7
case7		○	3.0m	×	29.0	71.0
case8		○	4.0m	×	32.2	67.8
case9		○	5.0m	×	38.1	61.9
case10		○	3.0m	○	23.7	76.3