

既設トンネルの拡幅掘削を想定した応力解放率に関する一考察

清水建設株式会社 正会員 ○東芦谷 謙 福田 毅 征矢 雅宏
一般社団法人 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 正会員 真下 英人

1. 背景

近年、トンネルのリニューアルや変状地山における縫返しなどの事例に見るようにトンネルを拡幅掘削する場合がある。通常トンネルの掘削解析では、坑口部などの特殊な箇所を除いて、二次元解析で内空変位、地表面沈下量等を簡易的に評価するケースが多く、応力解放率を用いてトンネルの施工過程を表現する(例えば1)2)。その際に掘削方法、補助工法等の効果を反映して応力解放率を変化させる試みは多く研究されている。しかし、拡幅掘削する事例(例えば3)は数少なく、各機関が出版している基準書でも拡幅掘削後の支保の健全性を評価する方法を明示するものは見当たらない。そこで、本検討では、拡幅掘削想定時の応力解放率をどのように表現できるか、またトンネル断面形状による応力解放率の差がどの程度あるのか試算を行ったのでその成果を報告する。

2. 拡幅掘削時の解放率設定の考え方

全断面掘削工法による無支保でのトンネル拡幅掘削を想定した変位曲線を図1に示す。face1を初期掘削時の切羽位置、face2を拡幅掘削時の切羽位置とする。応力解放率は先行変位と最終変位から求めることができ、face1での応力解放率は(a/A)%となる。拡幅掘削時は、初期掘削の収束状態が拡幅掘削の初期状態となり拡幅掘削の最終変位をBとするとface2での応力解放率は(b/B)%となる。

以上を踏まえて、拡幅掘削時は初期掘削無支保の変位曲線から初期掘削支保建込時の応力解放率を求め、初期掘削支保の変位収束状態を初期状態として初期掘削支保+拡幅掘削無支保の変位曲線から初期掘削支保+拡幅掘削支保の応力解放率を算定する。

3. 解析条件

本検討では、FLAC3Dを用いて円形状及び実形状(2車線道路トンネル)の2形状で①初期掘削無支保、②初期掘削支保、③初期掘削支保+拡幅掘削無支保、④初期掘削支保+拡幅掘削支保の4ケースの三次元解析を行い、変位曲線を作成する。三次元解析モデルを図2に示す。地山材料一様、側圧係数1.0とする。初期地圧 P_0 として、土被りに相当する土圧を各地山要素に等方等圧に与える。構成則は線形弾性とする。

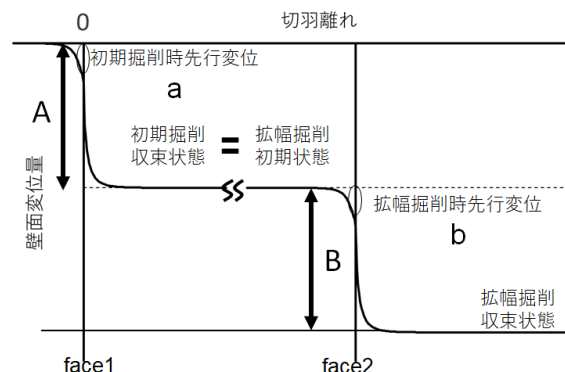


図1 無支保での拡幅掘削時の変位曲線

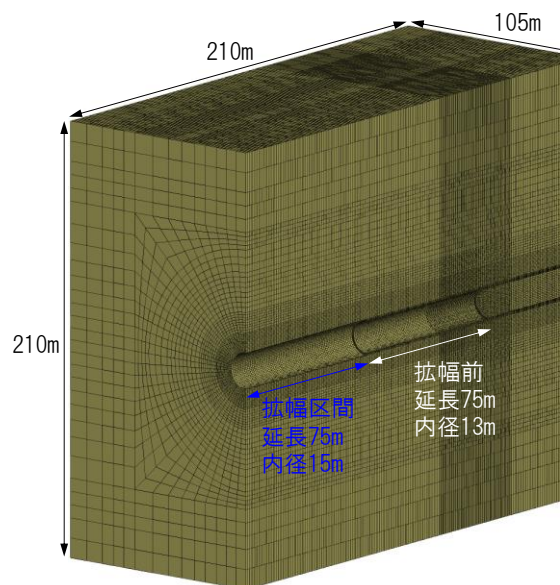


図2 三次元解析モデル

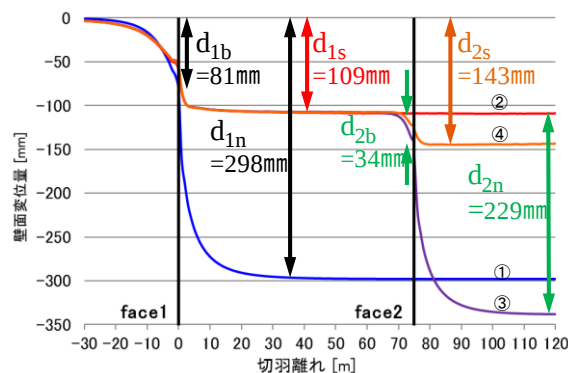


図3 三次元解析により求めた変位曲線

キーワード インフラリニューアル, 応力解放率, 拡幅掘削, 線形弾性

連絡先 〒104-8370 東京都中央区京橋 2-16-1 清水建設(株) 土木技術本部 地下空間統括部

4. 拡幅掘削時の応力解放率算定結果

円形状の三次元解析による変位曲線を図3に示す。図中の $d_{1b}(=81\text{mm})$ は無支保の時の先行変位, $d_{1n}(=298\text{mm})$ は無支保の時の最終変位, $d_{2b}(=34\text{mm})$ は拡幅掘削で無支保の時の先行変位, $d_{2n}(=229\text{mm})$ は拡幅掘削で無支保の時の最終変位である。4ケースの最終変位は②初期掘削支保 $d_{1s}(=109\text{mm})$, ④初期掘削支保+拡幅掘削支保 $d_{2s}(=143\text{mm})$, ①初期掘削無支保 $d_{1n}(=298\text{mm})$, ③初期掘削支保+拡幅掘削無支保 $d_{1s}+d_{2n}(338\text{mm})$ となった。これらを用いて拡幅掘削の応力解放率を算定すると、以下のⅠ～Ⅳのようになる。

- Ⅰ. 初期応力状態 P_0 を素掘りで解放($d_{1b}/d_{1n}=27\%$)
- Ⅱ. 支保を建て込んで、残りの応力を解放($1-d_{1b}/d_{1n}=73\%$)
- Ⅲ. 支保撤去後、拡幅掘削を行い、前の応力状態を素掘りで解放($d_{2b}/d_{2n}=15\%$)
- Ⅳ. 支保を建て込み、残りの応力を解放($1-d_{2b}/d_{2n}=85\%$)

この応力解放率を用いて、二次元拡幅掘削解析を行った。④初期掘削支保+拡幅掘削支保の二次元と三次元解析結果の比較を図4に示す。図4より両者の壁面変位量は一致していることがわかり、上記に設定した応力解放率を用いて三次元の拡幅掘削を再現することができた。Ⅰ～Ⅳの応力解放率について着目すると、初期掘削素掘り時Ⅰ(27%), 拡幅掘削素掘り時Ⅲ(15%)となっており、拡幅掘削時には応力解放率が小さくなっていることがわかる。これは、初期掘削の応力再配分による影響である。

5. 断面形状の違いによる応力解放率の差

図5に円形断面と無支保の時の実形状断面(天端, 側壁, インバート)との三次元解析による変位曲線を示す。表1に円形状と実形状で天端, 側壁, インバートの変位から算出した応力解放率をまとめたものを示す。図5によれば、円形断面の壁面変位量は着目箇所によらず同値であり、実形状断面は着目箇所によって変位量が異なる。しかし、表1を見ると着目箇所による応力解放率の差は1~2%程度と極めて小さい。したがって、断面形状が円形でない場合においても円形断面の応力解放率を適用しても差し支えないと理解できる。

6. まとめ

最後に得られた知見を列挙し、まとめとする。

- ・本検討の条件のように、内径13mから内径15mに拡幅掘削する時は、拡幅を行い前の応力状態を素掘りで解放(応力解放率15%), その後支保工を建て込んで、残りの応力を解放(応力解放率85%)と設定することで三次元解析との整合性を確認。
- ・応力再配分により初期掘削素掘り時の応力解放率(27%)よりも拡幅掘削素掘り時の応力解放率(15%)の方が小さい。
- ・実形状断面で着目箇所(天端, 側壁, インバート)による応力解放率の差は極めて小さく、実形状断面においても円形断面の場合と同様の応力解放率を適用しても差し支えない。

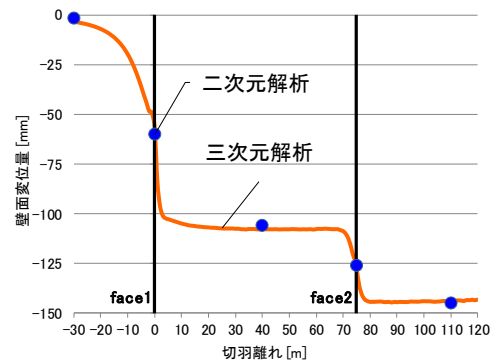


図4 二次元, 三次元解析結果の比較

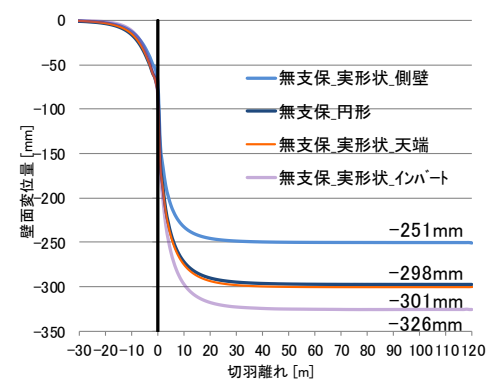


図5 断面形状の違いによる変位曲線

表1 断面形状による応力解放率の比較

		壁面変位量		応力解放率	
		d_{1b} [mm]	d_{1n} [mm]	d_{1b}/d_{1n} [%]	$1-d_{1b}/d_{1n}$ [%]
円形		-81	-298	27	73
実形状	天端	-83	-301	28	72
	側壁	-69	-251	27	73
	インバート	-84	-326	26	74

参考文献

- 1) 日本道路公団試験研究所：トンネル数値解析マニュアル, p.3-21, 1998.
- 2) 公益社団法人土木学会：トンネルライブラリー第24号, 実務者のための山岳トンネルにおける地表面沈下の予測評価と合理的対策工の選定, pp.152-154, 2012.
- 3) 北田正彦, 桜井春輔, 芥川真一, 岡部幸彦, 進士正人：在来工法で建設されたトンネルの拡幅時変形挙動とグラウンドリングに関する考察, 土木学会論文集 F Vol.65, No.2, pp.119-127, 2009.