

トンネル掘削過程を考慮した周辺地山の挙動解析

九州大学工学部 学生会員 ○吉田昌史

正会員 江崎哲郎

正会員 蔣 宇静

(財) 鉄道総合研究所 正会員 木谷日出男

1. はじめに

近年, NATMなどのトンネル工法の技術の発達により, 軟岩地山中にトンネルを掘削する機会が増加している. 一方, トンネル安定性の確保や支保工の合理的設計を図るうえで, トンネル周辺の力学的挙動を的確に把握するため, 3次元掘削解析は近年行われるようになっていっている. ところが, 従来の解析ではトンネルの掘削過程を重視しているものは少ない¹⁾.

そこで, 本研究は軟岩地山を対象に3次元応力状態, 軟岩の挙動特性(ひずみ軟化, ダイレタニシー), ロックボルトのモデル化を考慮し, 掘削過程を最大限忠実に再現する解析を行う.

2. トンネルの3次元掘削解析

従来のトンネル解析では, 2次元モデル(2D), または初期地山応力状態を等圧とした軸対称準3次元解析が主として用いられている. しかし, トンネル切羽面の影響や支保工の打設効果は本来3次元的なものであり, 掘削にともなって変化する. ここでは軟岩地山が大変形や塑性流動を生じることを考えて, 破壊後の挙動も追跡できる3次元大変形差分解析法²⁾を用いる. トンネルの掘削過程は1m掘削ステップ毎に表現する. また, 掘削過程を無視した解析との比較も行い, 2つの解析結果の差異を明らかにする.

地山モデルは軟岩として, Mohr-Coulombの破壊規準に従い, ピーク後はひずみ軟化挙動を呈するものとする. また, 残留強度をピーク強度の50%とする. 円形断面トンネルの深さは地表からトンネルの中心まで150m, 側圧係数を0.54とする. 地山の物性値は日本道路公団の分類規準³⁾に従いDクラスとし, ヤング率277.8MPa, ポアソン比0.35, 密度0.0024kg/cm³, 粘着力0.5MPa, 内部摩擦角25°, ダイレクション角20°と設定する.

掘削と支保工の特性値をFig. 1に示す. 支保工の打設に関しては, 日本道路公団の道路トンネルにおける標準支保パターン³⁾を参考にして, 延長方向1.0m

間隔に剛製支保工(H-125)の打設を考慮した吹き付けコンクリート, 二次覆工(切羽面からの距離10m)を設置し, ロックボルト(SD30-D29, 26本)を円周方向1.2mに等間隔で打設する.

まず, 無支保状態での逐次掘削解析(Case 1a)と支保工を打設した逐次掘削解析(Case 1b)を行う. 次に, 比較するため無支保と支保工打設のそれぞれの場合で掘削過程を考えずに掘削方向に30m範囲の要素を瞬時に取り除いた解析(Case 2a, Case 2b)および平面ひずみ状態での2次元解析(Case 3a, Case 3b)を実施する.

3. 掘削に伴う地山挙動の比較と考察

ここでは逐次掘削解析を行ったCase 1aおよびCase 1bにおけるトンネル周辺地山の塑性領域の発達をFig. 2に, 支保工を打設した解析Case 1b, Case 2bでの天端沈下の分布 $u(x)$ をFig. 3に示す. また, 6つの解析ケースにおいて, トンネル切羽面付近に生じた先行変位(u_0)と切羽面から30m離れた地点での最終変位(u_{fin})をTable 1にまとめた.

Case 2aの天端の最終変位 u_{fin} はCase 1aの8割以下になっており, Case 2bをCase 1bと比べても u_{fin} は6割以下となっている. 同等の差異が平面ひずみ解析との比較でも見られる. さらに, 側壁の変位を比較すると, Case 2b, Case 3bの u_{fin} はCase 1bの結果とは大きくかけ離れている. 先行変位 u_0 についても全ての解析

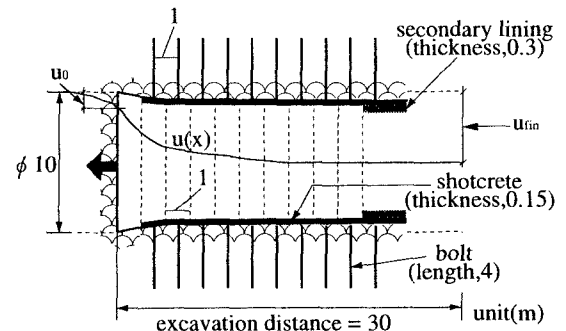


Fig.1 Tunnel excavation and support construction process.

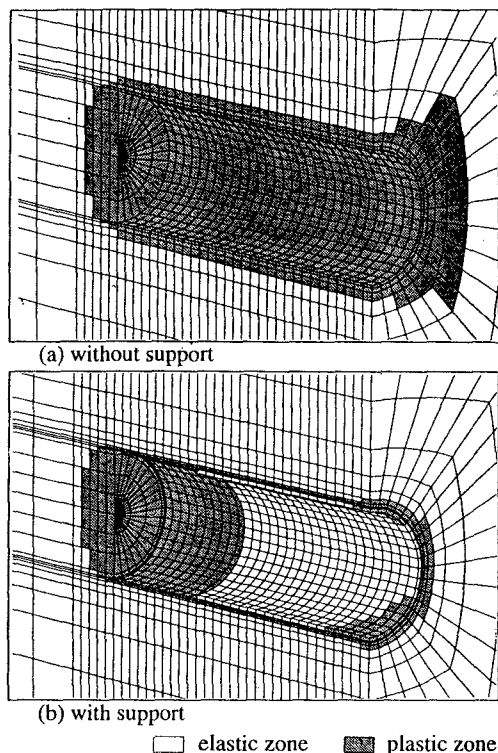


Fig.2 Plastic zone around the tunnel(excavation distance 30m) .

ケースで Case 2a, Case2b は Case 1a, Case1b を下回っている。

これらの差異は、30m を瞬時に取り除く場合の解析では、掘削に伴う塑性領域の進展と塑性履歴が正しく表現されていないことによると考えられる。塑性状態でのひずみは塑性ひずみと弾性ひずみの和で表されるため、掘削により応力が再分配され、塑性領域と塑性ひずみが履歴的に変化する。また、支保工が受け持つ荷重はその打設時期により異なる。30m を瞬時に取り除く解析や平面ひずみ解析では、それらの特徴が再現できない。これに対し、Case 1a と Case 1b では掘削過程を忠実に再現しているために、トンネルの変形挙動および支保効果を的確に表現していると言える。

これらの比較より、解析結果の実用性を向上するために、塑性領域がトンネル周辺の地山に広く生じると予測される軟質な地山や大断面トンネルなどには、掘削過程の忠実な再現が必要であると考えられる。

4. おわりに

トンネル掘削と支保工の打設過程を最大限忠実に再

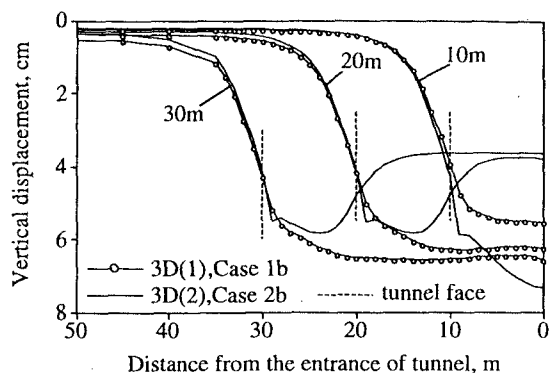


Fig.3 Displacement distribution on the support tunnel crown according to the calculation methods.

Table 1 Displacement at the crown and the springline of tunnel according to the analytical methods.

analysis method	crown (cm)				springline (cm)			
	without support		with support		without support		with support	
	U_0	U_{fin}	U_0	U_{fin}	U_0	U_{fin}	U_0	U_{fin}
3D(1)	6.73	16.9	4.32	6.60	2.30	40.1	0.87	3.01
3D(2)	6.72	13.6	4.12	3.66	2.05	29.6	0.66	-1.48
2D	15.3		3.46		31.5		-1.32	

3D(1) : 3D(three dimension) step by step analysis

3D(2) : 3D without considering excavation step

2D : two dimension analysis

現した解析を行うことにより、周辺地山の挙動をより的確に把握することができた。また、掘削過程を無視した解析および平面ひずみ解析との比較では、周辺地山の变形が掘削過程を考慮した場合の60%～80%以下にとどまってしまうことがわかり、掘削過程の忠実な再現の必要性が示された。

一方、今回の解析では吹き付けコンクリートと二次覆工が地山に密着させているために支保工が過大に地山荷重を受けていることがわかり、今後は支保工の地山変形に対する緩め効果などについても検討し、NATMのメカニズムを解明していく予定である。

<参考文献>

- 1) 例えば、杉江茂彦ほか：第27回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.71-75，1996。
- 2) ITASCA CONSULTING GROUP, INC. : FLAC3D user manuals, 1994.
- 3) 土木学会編：トンネル標準示方書(山岳工法編)・同解説，1996。