

トンネル掘削解析における吹付けコンクリートの等価弾性係数の適用限界に関する一考察

松江工業高等専門学校 正会員 ○岡崎 泰幸

山口大学大学院 正会員 林 久資

ドボクリエイト 正会員 森本 真吾

1. はじめに

NATM の主要な支保部材である吹付けコンクリートは、トンネル掘削に伴う地山の変形を受けながら徐々に硬化するという特殊な状況下にある。そのため、トンネル掘削解析の予測精度をより向上させるには、切羽進行速度と吹付けコンクリートの変形・強度特性の変化の関係を数値解析に反映させる必要があると考えられる。しかしながら、実務におけるトンネル掘削解析では、吹付けコンクリートの硬化に伴う物性変化やクリープ変形などを考慮した等価弾性係数 3420N/mm² 程度を用いることが多く¹⁾²⁾、切羽進行速度と吹付けコンクリートの変形・強度特性の変化の関係を数値解析に明確には反映しないのが一般的である。そのため、この等価弾性係数を用いたトンネル掘削解析によってトンネル周辺挙動を予測する場合、切羽進行速度の条件によってはその適用に限界があると考えられる。

そこで、本研究では、同一の地山条件および支保仕様における等価弾性係数を用いたトンネル掘削解析結果と、切羽進行速度と吹付けコンクリートの変形・強度特性の変化の関係を考慮したトンネル掘削解析結果を比較し、切羽進行速度に着目したトンネル掘削解析における吹付けコンクリートの等価弾性係数の適用限界について検討した。

2. 採用した数値解析コードと解析モデル

本研究で実施するトンネル掘削解析では、三次元有限差分法解析コード FLAC3D を採用した。また、本研究で用いたトンネル掘削解析モデルを図-1 に示す。ここで、トンネル掘削形状とその寸法は、中断面程度の道路トンネルを模擬したものとした。また、トンネル掘削解析モデルは、構造の対称性を考慮して半断面モデルとした。

3. 解析条件

トンネル掘削解析における解析物性値および支保仕様を表-1 に示す。ここで、地山の材料構成則は、弾完全塑性体（破壊規準：モールクーロンの破壊規準）とし、その解析物性値は、解析物性値の事例²⁾を参考に設定した。また、モデル化する支保工は吹付けコンクリートおよび鋼製支保工とし、その仕様は地山等級 DI 時の道路トンネル（中断面）の標準的な支保パターンに基づいて設定した。

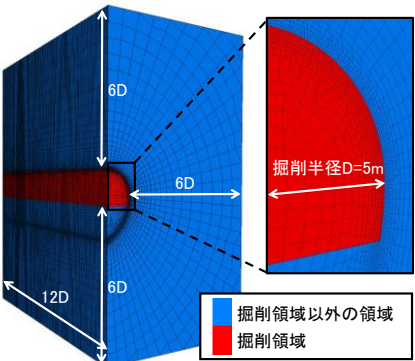


図-1 トンネル掘削解析モデル

表-1 解析物性値および支保仕様

地山 (要素種類: ソリッド要素)	単位体積重量	22.0	kN/m ³
	ヤング係数	500	MPa
	ポアソン比	0.30	—
	一軸圧縮強さ	2.05	MPa
	粘着力	0.50	MPa
	内部摩擦角	38.0	°
吹付け コンクリート (要素種類: ソリッド要素)	設計基準強度	18.0	MPa
	厚さ	0.15	m
	ヤング係数	表-2参照	MPa
	ポアソン比	0.20	—
	一軸圧縮強さ σ_c	表-2参照	MPa
	粘着力	σ_c と ϕ から算出	MPa
	内部摩擦角 ϕ	50.0	°
	引張強度	$\sigma_c/10$	MPa
鋼製支保工 (要素種類: ビーム要素)	規格	H-125	
	ヤング係数	2.10×10^5	MPa
	ポアソン比	0.3	—
掘進長		1.0	m

表-2 吹付けコンクリートの材料構成則および解析物性値

切羽離れ (m)	支保工 の設置	case0 (材料構成則: 線形弾性体)	case1(1m×4/日) (材料構成則:弾完全塑性体 (破壊規準:モールクーロンの破壊規準))			case2(1m×2/日) (材料構成則:弾完全塑性体 (破壊規準:モールクーロンの破壊規準))		
		吹付けコンクリート のヤング係数 (MPa)	経過時間 (時間)	吹付けコンクリート のヤング係数 (MPa) (経過時間(時間))	吹付けコンクリート の一軸圧縮強さ (MPa) (経過時間(時間))	経過時間 (時間)	吹付けコンクリート のヤング係数 (MPa) (経過時間(時間))	吹付けコンクリート の一軸圧縮強さ (MPa) (経過時間(時間))
1	無		0			0		
2	有	3420	6	1465 (3)	0.89 (3)	12	2930 (6)	1.78 (6)
3	有	3420	12	4395 (9)	2.66 (9)	24	8789 (18)	5.33 (18)
⋮	有	3420	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
30	有	3420	174	18637 (171)	16.6 (171)	348	20677 (342)	19.6 (342)
⋮	有	3420	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

キーワード NATM, トンネル掘削解析, 吹付けコンクリート, 等価弾性係数, 切羽進行速度

連絡先 〒690-8518 島根県松江市西生馬町 14-4 松江工業高等専門学校 T E L 0852-36-5224

各解析ケースにおける吹付けコンクリートの材料構成則および解析物性値を表-2に示す。ここで、表-2中のcase0は、等価弾性係数を用いてトンネル掘削解析を行う方法であり、case1およびcase2は、切羽進行速度と吹付けコンクリートの変形・強度特性の変化の関係を考慮してトンネル掘削解析を行う方法である。特にcase1およびcase2では、任意断面位置から切羽離れ1m時(図-2参照)を経過時間0時間とし、切羽進行速度がそれぞれ1m×4/日、1m×2/日であると仮定し経過時間を算出している。ただし、吹付けコンクリートの設置時点からの経過時間は、1つ前と現在の切羽離れにおける経過時間の中間の経過時間を用いることとした。そして、設定した吹付けコンクリートの設置時点からの経過時間から、文献3)を参考に定めた図-3の関係など(本概要では、吹付けコンクリートの一軸圧縮強さと材齢の関係は省略する。)を用いて表-2に示すような各切羽離れ(切羽進行時)における吹付けコンクリートのヤング係数および一軸圧縮強さの値を算出した。ここで、各切羽離れにおける吹付けコンクリートの強度特性に関する解析物性値は、表-1に示すように算出した。

トンネル掘削解析時における初期応力は、すべての解析ケースにおいて地山強度比および側圧係数が1.0となるように設定した。また、トンネル掘削解析モデルの境界条件は、すべての解析ケースにおいて解析領域の面外法線方向の変位を拘束条件とした。上記のように設定した解析条件に基づき、図-2に示すような1m逐次掘削解析を実施した。

4. 解析結果とその考察

それぞれの解析ケースにおいて取得した解析結果(図-2参照)と切羽離れとの関係を図-4に示す。ただし、解析結果を取得した位置は、境界条件が解析結果に及ぼす影響を考え、トンネル掘削解析モデルの奥行き29~30m地点とした。図-4から、切羽進行速度が遅いケースほどcase0との解析結果の相違が大きくなることがわかる。すなわち、現状の等価弾性係数を用いたトンネル掘削解析は、切羽進行速度が遅くなるほど、切羽進行速度と吹付けコンクリートの変形・強度特性の変化の関係を解析結果に反映できないと考えられる。したがって、切羽進行速度が遅くなるような地山を対象としてトンネル掘削解析を行う場合、現状の等価弾性係数の適用には限界があり、等価弾性係数の見直しを必要があると考えられることがわかった。

5. まとめ

本研究では、等価弾性係数を用いたトンネル掘削解析結果と切羽進行速度と吹付けコンクリートの変形・強度特性の変化の関係を考慮したトンネル掘削解析結果を比較した。その結果、切羽進行速度が遅くなるような地山を対象としたトンネル掘削解析では、現状の等価弾性係数の適用に問題がある可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 土屋敬：トンネル設計のための支保と地山物性値に関する研究，土木学会論文集，Vol.364/III-4，pp.31-40，1985。
- 2) 土木学会：トンネル・ライブラリー16号 山岳トンネルにおける模型実験と数値解析の実務，丸善，pp.152-153,163，2006。
- 3) 谷卓也，青木智幸，小川豊和，武田均，藤井義明：若材齢トンネル吹付けコンクリートの粘弾性特性に関する研究，大成建設技術センター報，Vol.40，pp.15-1-15-8，2007。

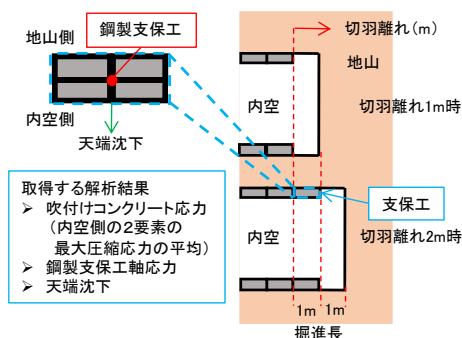


図-2 切羽と支保工の関係および取得する解析結果

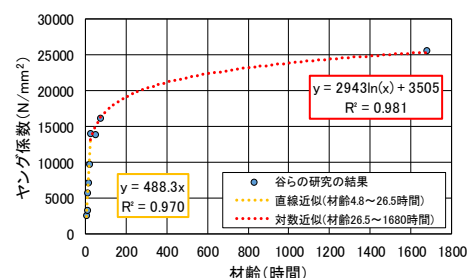
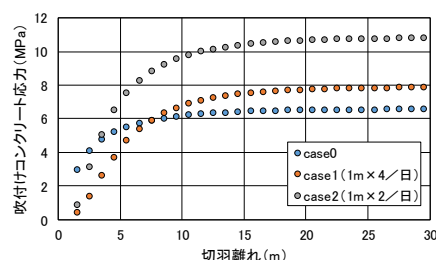
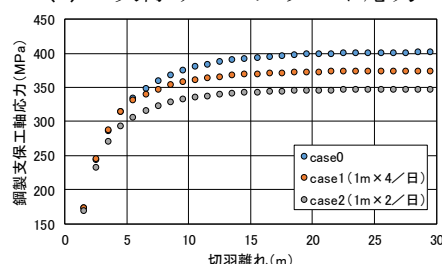


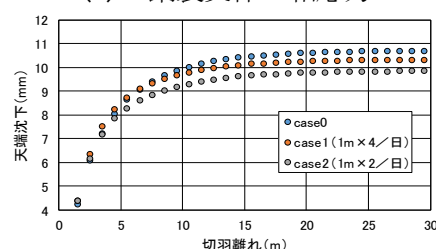
図-3 吹付けコンクリートのヤング係数と材齢の関係³⁾



(a) 吹付けコンクリート応力



(b) 鋼製支保工軸応力



(c) 天端沈下

図-4 取得した解析結果と切羽離れとの関係