

支保工やベンチ長がトンネルの内空変位計測に及ぼす影響の解析的検討

鉄道総研 正会員 ○大原 勇 嶋本敬介 野城一栄
鉄道・運輸機構 正会員 渡辺和之 石川太郎

1. はじめに

山岳トンネルの施工では、設計、施工計画のための調査により、掘削工法や支保パターンについて当初設計を決定し、施工中の観察・計測等により、必要に応じて当初設計（通常は標準支保パターン）を修正していく。ここで、掘削工法や標準支保パターンの妥当性は施工実績により検証されているが、3次元数値解析により検証された例は必ずしも多くない。そこで本研究では均質な地山を想定したトンネル掘削解析を実施し、支保パターンやベンチ長が内空変位に与える影響について基礎的な検討を行った。

2. 解析概要

トンネルの上下半掘削過程を模擬した数値解析を実施した。解析には有限差分コードFLAC^{3D}を使用した。図1に解析メッシュを示す。天端の土被りが200m相当となるように解析領域上面に土被り荷重を与え、側面、底面をローラー支持とした。トンネル構造は新幹線トンネルの標準的な断面とした。解析では解析メッシュに初期応力を与えたのち、掘削と支保の構築を上半と下半で繰り返し、インバート掘削直前までをモデル化した。なお、本研究では掘削工法や支保パターンに着目したため、補助工法はモデル化していない。

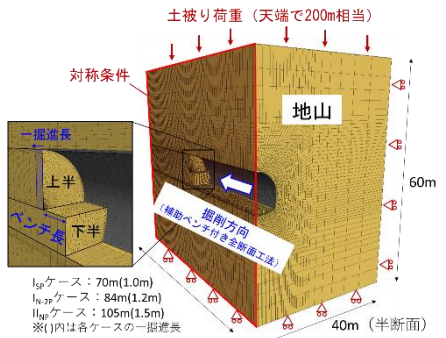


図1 解析メッシュ

3. 解析ケース

解析ケースを表1に示す。地山の物性は一様とし、Mohr-Coulombの破壊基準に従う弾完全塑性体としてモデル化した。本研究では、過去の計測事例¹⁾を参考とし、トンネルの掘削時の変形を決める軸となる地山の物性値として地山強度比を選択した。すなわち、地山の物性値は、地山強度比を0.5~8.0の間で6種類設定し、土被りと単位体積重量から相当する一軸圧縮強度を求め、その他の物性値は軟岩における一軸圧縮強度と各種の物性値の相関関係等^{2),3),4)}を参考に設定した。鉄道・運輸機構の設計施工標準⁵⁾を参考に、側圧係数は1.0とした。また掘削時の支保パターンはI_{SP}、I_{N-2P}、I_{INP}相当の3ケースとした(表3、図2)。吹付けコンクリートには若材齢時の物性を与え、弾性体としてモデル化した。鋼製支保工はBeam要素、ロックボルトはCable要素でモデル化した。

表1 解析ケース

ケースNo.	掘削工法	支保パターン	地山強度比Gn
1~6	ミニベンチ	I _{SP}	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 4.0, 8.0
7~12		I _{N-2P}	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 4.0, 8.0
13~18		I _{INP}	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 4.0, 8.0
19~24	ショートベンチ	I _{SP}	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 4.0, 8.0

※ベンチ長は、ミニベンチ：3掘進長分、ショートベンチ：20m

表2 解析に使用した物性値（抜粋）

部位	物性	単位	物性値
地山	一軸圧縮強度	σ_c MPa	8 ^{*1}
	単位体積重量	γ kN/m ³	20
	弾性係数	E MPa	1135.2 ^{*1}
	ポアソン比	ν	0.300 ^{*1}
	せん断強度	c MPa	2.309 ^{*1}
	内部摩擦角	ϕ °	30
鋼製支保工	ダイヤルシヤ角	ψ °	10
	弾性係数	E GPa	210
	ポアソン比	ν	0.3
	単位体積重量	γ kN/m ³	78.5
	断面積	A m ²	39.65×10 ⁻⁴ ^{*2}
	断面二次モーメント	I m ⁴	1620×10 ⁻⁸ ^{*2}
ロックボルト	弾性係数	E GPa	210
	単位長さ当たりのせん断ばね剛性	k_g MN/m ²	5750
	単位長さ当たりの付着強度	c_g kN/m	地山部初期値：472 ^{*1} コンクリート部：十分大きい
	摩擦角	ϕ_g °	0
	降伏応力	σ_y MPa	400

※1：地山強度比=2.0の場合を示す ※2：H150の場合を示す

4. 解析結果

地山強度比と上下半掘削完了時の水平内空変位の関係を図3に示す。ここで、内空変位はメッシュ奥行方向中央断面のSL+1.5m位置における値である。また、上半切羽が対象断面を一掘進長分通過した時点で計測を開始したとして得られる値であり先行変位を含まない。また、参考までに過去の計測事例¹⁾のプロットも併記している。解析のプロットは計測事例の分布に収まっており、掘削に伴うトンネルの変形をある程度再現できていると考えら

表3 支保パターンの詳細

支保パターン	鋼製支保工	吹付けコンクリート	ロックボルト	一掘進長
I _{SP}	150H (上下半)	150mm	3m×14本	1.0m
I _{N-2P}	125H (上半)	125mm	3m×10本	1.2m
I _{INP}	なし	100mm	3m×10本	1.5m

※全支保パターンにおいて1次インバートは無し

キーワード トンネル、内空変位、数値解析、支保工、ベンチ長

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 トンネル研究室 TEL:042-573-7266

れる．また地山強度比 G_n が小さい ($G_n < 1$) の領域において，支保工の軽量化に伴い変位が増加する傾向が見られる．地山強度比と内空変位比 (図3の各 G_n において I_{SP} ケースの内空変位を1としたときの比率) の関係を図4に示す． G_n が小さい領域において，支保工の軽量化により変位が増加する傾向が見られる．ケース1, 2, 19 (図4) の掘削完了時における塑性領域図を図5に例示する． $G_n=0.5$ のケース1, 19では塑性領域が拡大しており，これに伴い大きな変位が生じていると考えられる．以上から， G_n が小さく塑性領域が生じるような地山では，支保工の内空変位抑制効果が大きくなると考えられる．設計施工標準⁵⁾では，新幹線トンネルの管理基準値の目安として地山等級 $I_{N-2} \sim V_N$ では内空変位量 50mm 以下， I_{N-1} では 50mm~100mm， I_S では 100mm~150mm が例示されている．図3，図4において変位量が 50mm 以下の領域では支保工の変位抑制効果は小さく，100mm 以上で I_{SP} の効果が大きくなっていることから，本研究の解析は設計施工標準の考え方と概ね整合すると考えられる．また解析結果で，ショートベンチについて，ミニベンチより内空変位が大きくなっているが，別途図3の縦軸を先行変位を含む全変位として整理した結果，両者が同程度 ($\pm 5\%$ 程度) となることを確認している．ショートベンチの場合ある断面の計測開始時点において手前側の未掘削の下半が長く，掘削による応力の解放が小さい段階で計測を開始しているため，その後の掘削による変位が大きいと考えられる．

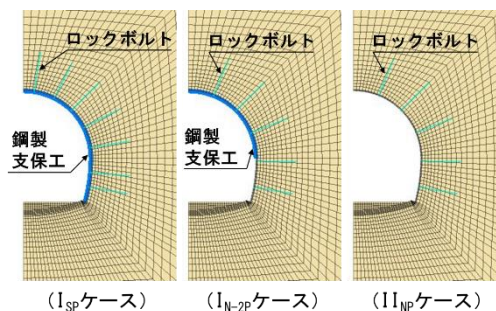


図2 各支保パターン断面

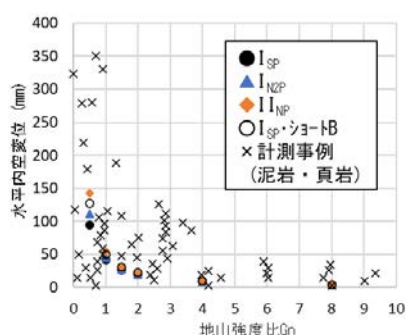


図3 地山強度比～水平内空変位関係

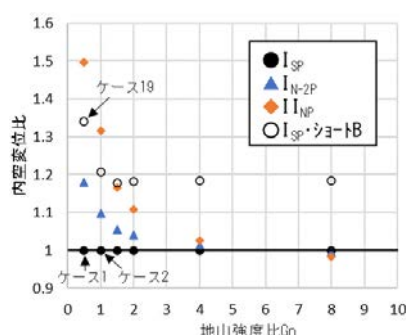


図4 地山強度比～内空変位比関係

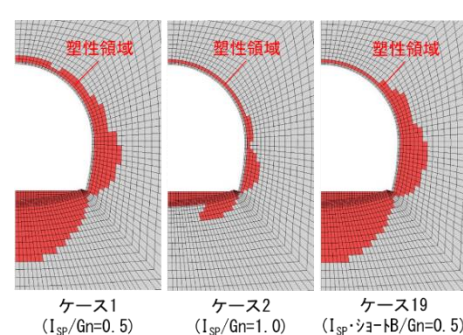


図5 塑性領域図

5. まとめ

本研究では均質な地山を想定したトンネル掘削解析を実施し，支保パターンやベンチ長が計測される内空変位に与える影響について基礎的な検討を行った．得られた知見を以下に示す．

- ・ 地山強度比が小さく塑性領域が生じるような地山では，支保工の内空変位抑制効果が大きくなる．
- ・ 内空変位の観点から，解析結果は設計施工標準の管理基準値の考え方と概ね整合するものであった．
- ・ ベンチ長が大きくなるほど掘削による応力の解放が小さい段階で計測を開始できることになるため，全変位は同程度でも計測される内空変位は大きくなる可能性がある．

参考文献

- 1) 竹林亜夫ら：山岳トンネル工法における岩盤の強度定数と内空変位の関係に関する事例研究，トンネル工学研究論文・報告集，第11巻，p183-188，2001.11.
- 2) アイダノオメールら：スクィーズイング地山におけるトンネルの変形挙動とその予測方法について，土木学会論文集，No.448/III-19，p.73-82，1992.
- 3) 赤木知之ら：スクィーズイング地山におけるトンネル壁面変位の予測と支保の設計，第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，p.719-724，1994.
- 4) 小林寛明ら：長期的な盤膨れに対するインバート構造の抑制効果に関する基礎的研究，土木学会論文集 F1 (トンネル工学)，Vol.72，No.3 (特集号)，I_96-I_107，2016.
- 5) 独立行政法人 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.264，2008.