

早期断面閉合を行った山岳トンネルの変形挙動

淡路 太・砂金 伸治・河田 皓介・真下 英人

1. はじめに

近年、山岳トンネルにおける不良地山対策として、補助ベンチ付き全断面工法を行い、切羽近傍で、支保部材を用いてトンネル断面を早期にリング状に閉合する「早期断面閉合^{*}」の採用事例が増加している。不良地山対策として、その有効性が広く認知されてきている一方で、早期断面閉合の作用効果や変位の抑制メカニズム、地山条件への適用性、施工方法、支保工の仕様など、いまだ不明確な点が多い。特に、早期断面閉合では支保工で大きな荷重を負担することになることから、早期断面閉合の設計・施工を合理的に行うためには、支保工の役割や支保部材に発生する応力の挙動等を詳細に把握する必要がある。

本稿では、大土被りの脆弱な地山条件下における早期断面閉合の特徴を理解するために、掘削過程を三次元的に模擬した数値解析を行い、早期断面閉合を行ったトンネルの変形挙動について考察を行った結果について報告する。

2. 早期断面閉合効果に関する数値解析

2.1 解析条件

本稿で実施した数値解析モデルを図-1に示す。早期断面閉合における掘削過程をより忠実に再現し、その実施効果を検証するために、三次元有限差分法（FLAC3D）を用いて数値解析を実施した。解析ではトンネル掘削幅12.8mの半断面モデルを用い、土被り100m、地山はMohr-Coulombの破壊基準に従う完全弾塑性体の1層構造とした。初期応力は側圧係数を1.0として、各要素に土被り100m相当の自重を作用させた。上半およびインバート掘削は1mの逐次解析とし、上半、下半およびインバートの各切羽後方1mの位置から支保工を設置した。早期断面閉合における閉合距離（切羽からインバート設置位置までの距離）の影響を検証するために、閉合距離をそれぞれ1m、

4m、7m、11mおよび上部半断面工法（閉合距離30m）とした場合の解析を行った。解析に用いた地山物性値を表-1、支保部材仕様を表-2に示す。本解析では、地山物性値および支保部材仕様は地山等級DIIに相当する値^{1), 2)}を採用し、地山強度比は0.33に相当している。また、早期断面閉合で併用されることが多い長尺鏡ボルトはケーブル要素として設置している。吹付けコンクリートは、掘削ステップごとに材齢強度に応じた弾性係数を適用した。

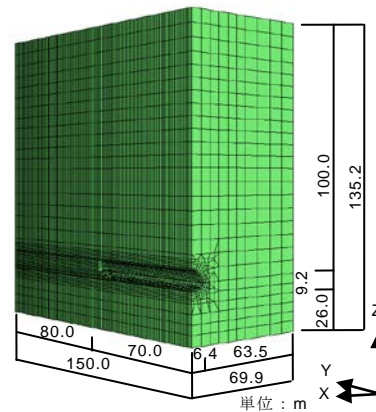


図-1 解析モデル図

表-1 地山物性値一覧

単位体積重量 γ (kN/m ³)	21.0
変形係数 E (MPa)	150
内部摩擦角 ϕ (deg)	30
粘着力 C (MPa)	0.200
ポアソン比 ν	0.35
一軸圧縮強度 q_u (MPa)	0.7

表-2 支保部材仕様一覧

	仕様	要素モデル	変形係数
吹付けコンクリート	t=250mm	Shell	強度発現考慮
鋼材支保工	NH-200	Beam	2×10^5 MPa
ロックボルト	D25, L=4m	Beam	2×10^5 MPa
長尺鏡ボルト	GFRP ϕ 76, L=12m@9m	Cable	2.5×10^4 MPa
		付着剛性: 19.3 MPa 付着強度: 150 MPa	

2.2 解析結果と考察

2.2.1 トンネル変位の抑制効果

上半切羽到達時を初期値とする支保設置後の増分変位（以下、トンネル変位とよぶ）に関する解析結果を図-2に示す。図中の赤色部分は断面閉合前まで、青色部分は断面閉合後のトンネル変位の発生量をそれぞれ示している。これまでの解析事例³⁾で知られているように、早期断面閉合では上部半断面工法（閉合距離30m）と比較して天端沈

下量、脚部沈下量、内空変位量のすべてにおいて発生するトンネル変位が減少している。また、閉合距離が短くなるほど、トンネル変位は小さくなり、変位の抑制効果が高いことが分かる。上半内空変位量の閉合前変位発生率は、11m以内で閉合を行ったすべてのケースで98%以上となっており、断面閉合後、速やかに変位が抑制され、閉合後の変位増分が小さいことを示している。一方、天端・脚部沈下量は、閉合距離が短いほど最終変位量が小さくなっているが、断面閉合によって直ちに変位が抑制される挙動は示さない。

吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工の合成支保部材の発生軸力に関する解析結果（図-3）によ

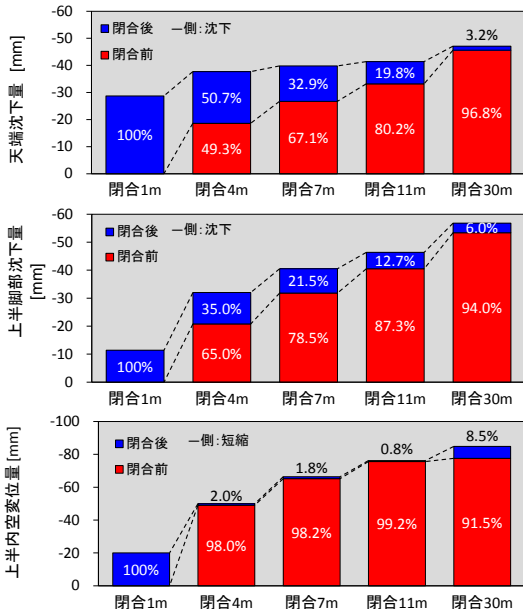


図-2 各閉合距離における変位発生率の比較

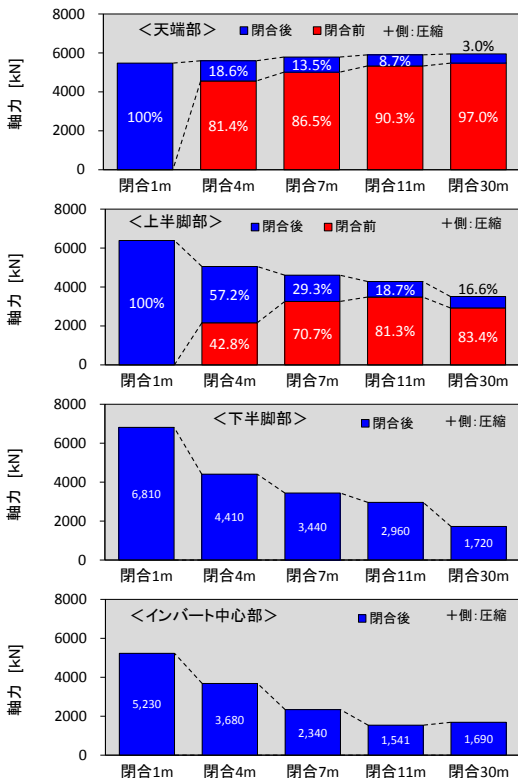


図-3 各閉合距離における軸力発生率の比較

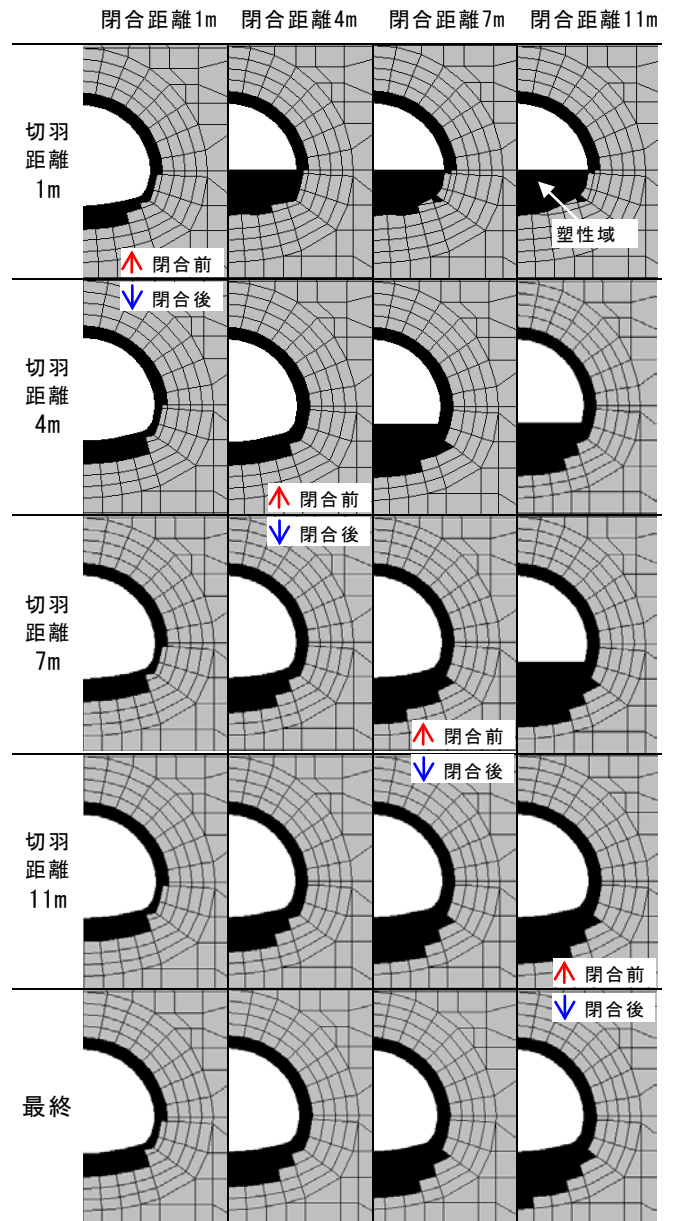


図-4 塑性域分布における閉合距離の影響

れば、上半アーチ部では閉合距離によらず、ほぼ同程度の圧縮力が発生しているが、脚部からインバート部では、閉合距離が短いほど高い圧縮力が発生し、トンネル全周に渡り圧縮力が卓越する構造となっていることが分かる。つまり、トンネル断面の閉合距離を短くすることで、早期に支保工のリング構造が構築され、全周に渡って効率的に軸力を伝達することで、地山への内圧効果が高まっていることが分かる。

2.2.2 トンネル周辺の塑性域抑制効果

各閉合距離におけるトンネル周辺の塑性域発生状況を図-4に示す。最終的な塑性域の広がり、閉合距離が短いほど小さくなっている。また、断面閉合後の塑性域の拡大は顕著ではない。この挙動は上半内空変位量が断面閉合後に速やかに収束する挙動と類似しており（図-2）、早期断面閉合によって上半内空変位量およびトンネル周辺の塑性域の両方が抑制されることを示している。また、閉合距離が短いほど支保部材全周に軸力が均一に発生し、地山への内圧効果が高まっていることから（図-3）、早期断面閉合は支保工による内圧効果を効率的に発揮させることで、上半内空変位と塑性域の発達を抑制し、トンネルの安定性を高める効果が期待できると考えられる。

以上の検討結果から、塑性域の発生を伴うような脆弱地山での早期断面閉合の実施は、支保部材の持つ軸圧縮耐力を効率的に利用することから、支保部材の軸圧縮耐力を考慮した設計が重要になると考えられる。

2.2.3 トンネル構造保有耐力の効率的活用

図-5に吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工の合成支保部材に発生する軸力と曲げモーメントの最終値の分布図を示す。上半アーチ部（測点a, b）では曲げモーメントの発生は軽微で、圧縮力が卓越する圧縮部材としての挙動が顕著である。一方、上半脚部（測点c）では、閉合距離が長くなるほど、曲げモーメントが卓越し、圧縮力が小さくなっており、曲げ部材としての挙動に近くなっている。

一般的な山岳トンネルの施工では、上半、下半、インバートの分割掘削を行っている。このため、上半、下半、インバートの接合部は、連結がなされるまで開放された形状となる。図-6の上半脚部の断面力挙動（測点c）で認められるように、初

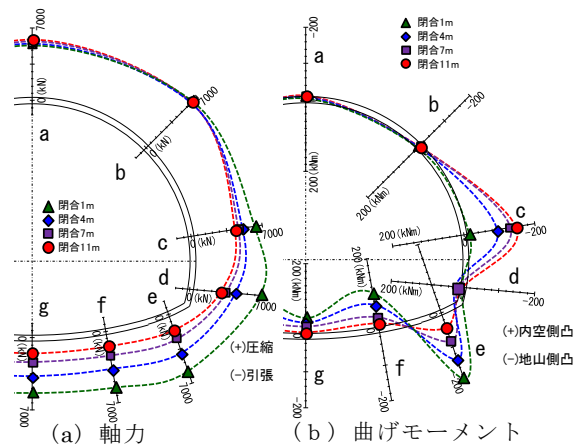


図-5 支保部材断面力分布図（最終値）

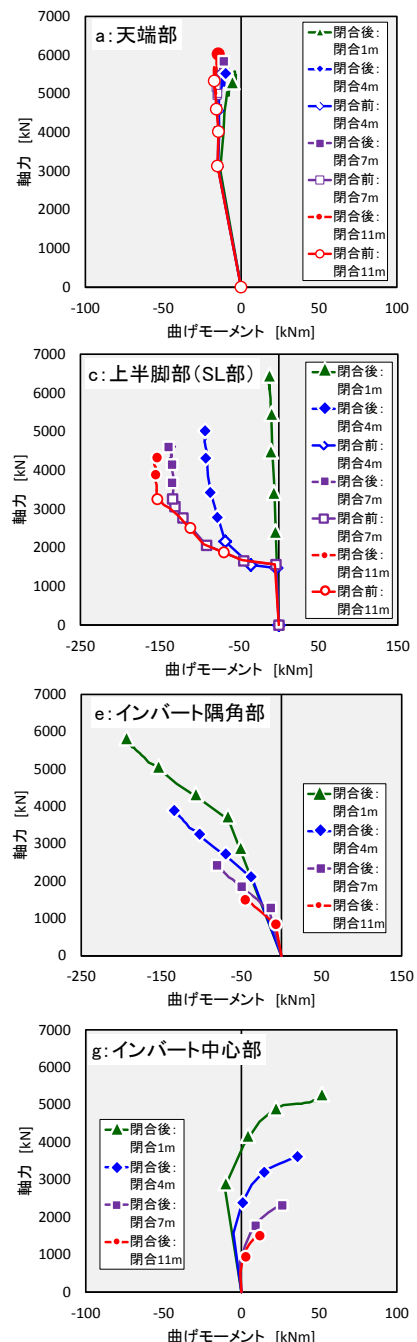


図-6 各閉合距離における断面力挙動の比較

期掘削による軸力の導入後は、リング閉合がなされるまで上半脚部付近における支保部材の軸力増加は認められず、曲げが卓越することになる。したがって、吹付けコンクリートのように圧縮側でその効果を発揮する支保部材では、断面閉合が実施されないと、解放されている支保工連結部で曲げが卓越し、トンネル構造が不安定化する懸念がある。これに対し、早期断面閉合は閉合距離を短くするほど、支保部材に速やかに軸力を導入し、圧縮部材としての挙動に近づけることが可能となり、トンネル構造全体が保有する軸耐力を効率的に活用することができるようになると考えられる。

2.2.4 インバート部の断面力挙動と役割

脚部からインバート部では、閉合距離が短いほど高い圧縮力が発生している（図-3）。一方で、断面力分布図（図-5）では、インバート部の隅角部側と中心側で曲げモーメントの正負が反転し（測点e, f, g）、閉合距離が短くなるほど、大きな圧縮力と曲げモーメントが発生している。インバート隅角部（測点e）の掘削に伴う断面力の挙動（図-6）は、上半脚部とは傾向が異なり、軸力と曲げモーメントの増加勾配は閉合距離によらず一定である。したがって、閉合距離が短いと、軸力と曲げモーメントの両者の発生量が高くなり、曲げ圧縮部材として挙動していることが分かる。

本解析に用いた標準的なトンネル形状では、インバート部の構造半径は上半アーチ部に対して約3倍であり、脚部との接合部では隅角部をなしている。そのため、インバート部では、隅角部周辺に応力集中や曲げが発生しやすく、曲げ圧縮部材としての特徴が顕著になる。したがって、インバート部の支保部材には、軸圧縮耐力だけでなく、曲げ耐力に対しても配慮する必要があると考えられる。

3. まとめ

早期断面閉合に関する数値解析を用いた力学挙動に関する検討から、以下の知見が得られた。

- 1) 早期断面閉合は、断面閉合された剛な支保構造の構築により、閉合後、速やかに内空変位を抑制する効果がある。また、閉合距離を短くするほど、変位の抑制効果は高くなる。
- 2) 早期断面閉合は、断面閉合された剛な支保構造に均一に軸力が発生し内圧効果を発揮することで、地山の塑性化を抑制する効果が認められる。また、閉合距離を短くするほど、下半～インバート部の支保工に発生する軸力が高まり、より高い内圧効果を発揮できる。
- 3) 早期断面閉合は、開放部となる支保部材連結部を、軸力が卓越する構造に速やかに近づけることで、トンネル構造全体が保有する耐力を効率的に活用できるようになる。
- 4) 早期断面閉合は、インバート部の断面力挙動が曲げ圧縮部材となるため、軸耐力に加えて曲げ耐力も考慮した設計および施工を行うことが重要となる。

以上の結果を踏まえ、今後は施工事例分析や実計測データ等との整合性を確認し、早期断面閉合に関する合理的な施工方法および支保仕様等を提案するために研究を進めたいと考えている。

参考文献

- 1) 日本道路公団：トンネル数値解析マニュアル、1998.
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書山岳工法・同解説、2006.
- 3) 真下英人、水川雅之、日下敦：トンネル早期閉合効果に関する解析的検討、トンネル工学報告集、Vol.17、pp.35～41、2007年.

淡路動太



(独)土木研究所つくば中央
研究所道路技術研究グループ
トンネルチーム 主任研究員、博(理)
Dr. Dohta AWAJI

砂金伸治



(独)土木研究所つくば中央
研究所道路技術研究グループ
トンネルチーム 上席研究員、博(工)
Dr. Nobuharu ISAGO

河田皓介



(独)土木研究所つくば中央
研究所道路技術研究グループ
トンネルチーム 専門研究員
Kosuke KAWATA

真下英人



国土交通省国土技術政策総合
研究所道路構造物研究部
長、博(工)
Dr. Hideto MASHIMO