

早期断面閉合における支保部材の挙動特性に関する解析的考察

(独) 土木研究所 正会員 ○淡路動太・砂金伸治・河田皓介・真下英人

1. はじめに

近年, 不良地山においてトンネル構造の安定性を確保するために, 切羽から 1D 程度後方でインバートを 1 次支保として構築し, トンネル断面を早期にリング状に閉合する, 補助ベンチ付き早期断面閉合(以降, 早期断面閉合)の事例が増加している. 早期断面閉合は, 小土かぶり部では脚部沈下と地表面沈下の抑制を, 大土かぶり部では支保耐荷力の向上によるトンネルの変形とゆりみ域の抑制を期待して採用されている. しかし, その変形抑制のメカニズムや閉合によるトンネル支保部材の挙動特性について不明確な点が残されている. 本稿では, 大土被りの脆弱地山を対象とした 3 次元数値解析を行い, 早期断面閉合が支保部材の挙動特性に与える影響を検証し, 支保部材の役割について考察を行った.

2. 早期断面閉合の支保部材挙動に関する数値解析

(1) 解析モデル

本検討は三次元有限差分法によって掘削過程を模擬した数値解析によって行った. 図-1 に解析モデルを示す. 解析ではトンネル掘削径 12.8m, 土かぶり 100m とし, 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. 解析領域は掘削の対称性を考慮して半断面とし, 境界条件は, 上面を自由面, 側面をローラー境界, 底面を固定境界とした. 初期応力は側圧係数を 1.0 として, 各要素に土かぶり厚さ相当の自重を作用させた. 解析に用いた地山物性値および支保部材仕様を表-1, 表-2 に示す. 吹付けコンクリートは, 材令に応じた強度発現を考慮し, 掘削ステップごとに弾性係数を変化させた. 上下半およびインバート掘削は 1m の逐次解析とし, 切羽後方 1m の位置から支保工を設置した. 閉合距離がトンネル変位と支保部材の挙動に及ぼす影響を比較するために, 閉合距離 0m, 4m, 6m, 11m および上半先進(閉合距離 30m)を模擬した 5 ケースについて解析を行った.

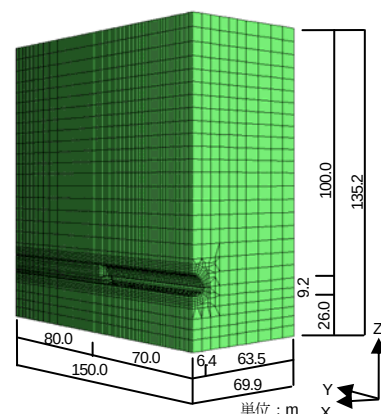


図-1 解析モデル

表-1 地山物性値

単位体積重量 γ (kN/m ³)	変形係数 E (kN/m ²)	ポアソン比 ν	粘着力 C (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (deg)
21.0	150,000	0.35	200	30

表-2 支保部材仕様

	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
鋼アーチ支保工	NH-200	Beam	2×10^5 MPa
ロックボルト	D25, L=4m	Beam	2×10^5 MPa

(2) トンネル変位の抑制効果

図-2 に各ケースにおける断面閉合前と閉合後のトンネル変位に関する解析結果を示す. 閉合距離が短くなるほど, 天端沈下, 脚部沈下および上半水平内空変位の総変位量は小さくなっている. 上半水平内空変位における最終変位に対する閉合前変位の発生率は閉合距離によらず約 95%となっている. これは断面閉合後, 直ちに内空変位の進行が抑制され, 閉合後の増分変位が小さいことを示している. 一方, 天端・脚部沈下については, 断面閉合によって直ちに変位が止まる挙動は示されず, 閉合の前後で全体的に変位速度が緩やかになることで変位が抑制されている.

(3) トンネル周辺の塑性域抑制効果

図-3 にトンネル周辺の最終的な塑性域発生状況を示す. 塑性域の広がり, 閉合距離が短くなるほど小さくなった. トンネル掘削に伴う塑性域の拡大は, 断面閉合と同時に収束傾向を示し, 断面閉合後の塑性域の拡大は顕著ではない. これは, 上半水平内空変位と類似した挙動を示し, 早期断面閉合によってトンネル周辺の変位が抑制されたことによって, 塑性域の拡大が抑制されたことを示唆している.

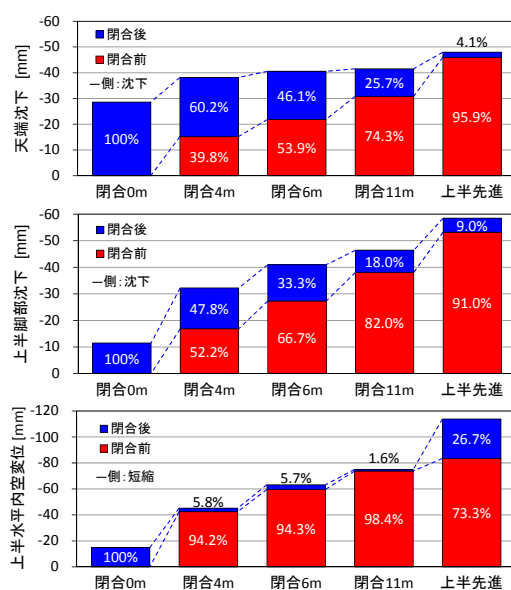


図-2 トンネル変位

キーワード 山岳トンネル, 早期断面閉合, 弾塑性解析, 三次元解析

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 (独) 土木研究所 道路技術研究グループ TEL: 029-879-6791

(4) 支保部材断面力の挙動特性

図-4 に吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工を合成した支保部材断面力の分布図を示す。上半アーチ部では閉合距離によらず、ほぼ同程度の軸力が発生しているが、下半からインバート部では、閉合距離が短いほど軸力が高くなっている。また、上半アーチ部では曲げモーメントの発生が軽微で軸力部材としての挙動が特徴的であるが、インバート部では、隅角部側とトンネル中心側で曲げモーメントの正負が反転し、閉合距離が短くなるほど大きな曲げモーメントが発生し、曲げ圧縮部材としての挙動が顕著となる。一方、上半脚部(測点 c)では、閉合距離が長くなるほど、地山側に凸となる曲げモーメントが大きく発生している。

図-5 は支保部材の各点における軸力と曲げモーメントの掘削に伴う挙動を示したものである。天端部(測点 a)では、閉合距離によらず、曲げモーメントの発生は軽微で、軸力部材としての挙動が認められる。上半脚部(測点 c)は、支保構造が閉合されるまではアーチアクションが得られず曲げが卓越するが、断面閉合後に軸力が高まる挙動を示していると考えられる。したがって、閉合距離が長いほど軸力は小さくなり、曲げモーメントが大きくなる傾向を示している。一方、インバート隅角部(測点 e)では、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り、閉合距離が短いほど軸力と曲げモーメントの両者の発生量が高くなる傾向を示している。

3. 考察

(1) 変位の抑制効果と支保部材断面力の関係

解析結果より、閉合距離が短いほど、トンネル変位と塑性域は抑制されるが、支保部材に発生する軸力は下半～インバート部にかけて大きくなり、トンネル全周に渡ってほぼ一様に軸力が発生する。つまり、トンネル断面の閉合距離を短くすることで、早期にリング構造が構築され効率的に支保工に荷重が伝達され、地山側への内圧効果が高まっていると考えられる。すなわち、塑性域の発生が多いと考えられる大土かぶり脆弱地山における早期断面閉合の実施は、支保の内圧効果を効率的に発揮させることで、トンネル変位と塑性域の広がりを抑制し、トンネルの安定性が高まるメカニズムが期待できると考えられる。

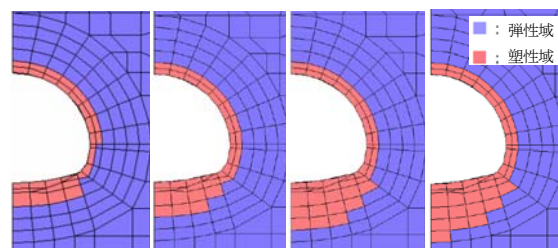
(2) インバート部の断面力挙動と支保部材の役割

一般的な山岳トンネルでは、インバート部は上半アーチに対して、構造半径が大きく、また、接合部において隅角部をなすことが多いため、アーチアクションが得にくい。このため、インバート部には図-4、図-5 に示したように軸力と同時に大きな曲げが発生し、支保部材として曲げ圧縮部材としての特徴が顕著になる。したがって、早期断面閉合によりトンネルの安定化を志向する場合には、インバート部には曲げ耐力が期待できる支保部材を採用することが重要になると考えられる。すなわち、早期断面閉合実施の際にはインバート部の曲げ圧縮部材としての特徴に配慮した設計および施工を行うことが望ましいと考えられる。

4. まとめ

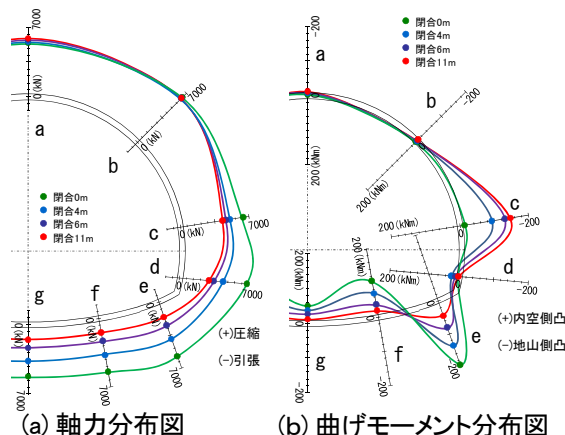
大土かぶり脆弱地山における早期断面閉合を模擬した3次元数値解析の結果から、以下の知見が得られた。

- ・早期断面閉合では、閉合距離を短くするほど上半からインバート部まで均一に軸力が発生し、地山への内圧効果が高まることで、トンネル変位と塑性域の発生を抑制する効果が期待できる。
- ・早期断面閉合では、上半アーチ部に対して大きな構造半径を持つインバート部では曲げ圧縮材としての挙動が顕著となるため、圧縮耐力だけでなく、曲げ耐力も考慮した支保部材の選択と施工を実施することが重要となる。



(a) 閉合 0m (b) 閉合 4m (c) 閉合 6m (d) 閉合 11m

図-3 塑性域分布図



(a) 軸力分布図 (b) 曲げモーメント分布図

図-4 支保部材断面力分布図

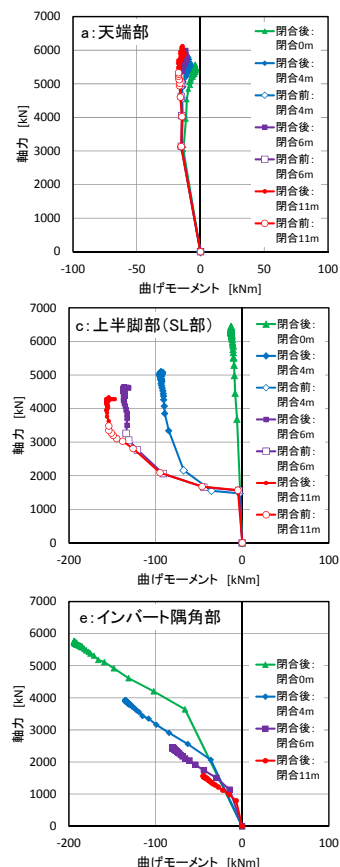


図-5 支保部材断面力の挙動