

小断面トンネル(NATM)の支保構造に関する考察

国立研究開発法人土木研究所 正会員 ○小出孝明・砂金伸治・日下敦・岸田展明

1. はじめに

道路トンネルでは内空幅 3.0~5.0m 程度のものが小断面と区分され¹⁾、主に避難坑などに採用されている。そのため、小断面トンネルの使用目的と求められる機能および施工条件などは通常断面トンネルとは異なり、支保構造にも特徴があると考えられる。しかしながら、これまでに小断面トンネルにおける施工事例などのデータは少なく、支保構造の合理化には更なる検討の余地があると考えられる。このような状況を踏まえ、本稿では NATM により建設された小断面トンネルの施工データを収集分析するとともに数値解析を行い、その結果を用いて支保構造の力学的特性などについて考察する。

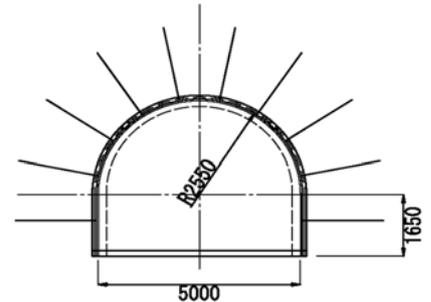


図-1 支保パターン図の例

2. 施工データによる現状確認および分析

今回の調査では 7 本の小断面トンネルにおける合計延長 17km の施工データを収集した。これらを整理すると、まず断面形状については側壁が直線形状であり、断面サイズは掘削高さ 4m、掘削幅 5m 前後で設計されている(図-1)。これはレール方式による施工を根拠にしていると考えられるが、施工条件によってはタイヤ方式が経済的となり実際に採用されるケースも多くあった。更に構造上考慮すべき点として 2 点が存在すると考えられる。1 点は本坑掘削の影響である。調査した避難坑は全てが本坑と併設され、避難坑掘削が本坑掘削に対する事前調査や水抜きになることから先行して実施されていることが多い。本坑と避難坑の離隔は本坑掘削径の 2 倍以上が確保されているが、避難坑に本坑掘削の影響が現れたとのヒヤリング結果もあり、地山状態により決まる相互の影響範囲に関しては不確実性が残る。もう 1 点は覆工コンクリートの省略である。これは主に避難坑の利用頻度の低さなどの条件から経済性に配慮した結果と考えられる。将来的に変状が発生した場合には覆工コンクリートを設置するなどの対応が可能であるが、例えば側壁をアーチ形状にするなどの軽微な変更により変状のリスクを低減できれば、ライフサイクルコストが最小になる可能性もある。

次に支保パターン(表-1)の採用実績について、各支保パターンが全体に占める割合を設計(図-2)と実施(図-3)でまとめた。実施支保パターンの割合では CII パターンが 40%、DI パターンが 45% となり合わせて 85% を占める明確な傾向が現れた。設計支保パターンの割合と比べると B~CI パターンが 1/3 程度に減少するのに対して DI~DII パターンが倍増している。結果として 50% 以上の地山状態において鋼アーチ支保工を含む支保パターンが採用されていた。

3. 小断面トンネルの支保構造に関する課題

このような現状から、小断面トンネルの支保構造に関して 2 つの課題が挙げられる。1 つには側壁を直線形状とする特徴的な断面形状について、その力学的特性を把握して施工時のみならず長期的な支保構造の安定性を確認する必要がある。もう 1 つには実施支保パターンの割合に鋼アーチ支保工が必要とされる傾向が現れる一方で、CII パターンと DI パターンの間には構造全体としての剛性に大きな差があり(表-1)、これを改善することに経済性向上の余地がある。これらの課題の解決に資する数値解析や考察の内容を以下に記す。

表-1 小断面トンネルの標準的な支保構造の組み合わせの目安¹⁾

地山等級	支保パターン	標準掘削長さ (m)	ロックボルト		鋼アーチ支保工		吹付け厚 (cm)	覆工厚 (cm)	
			長さ (m)	施工間隔 (m)	種類	建込間隔 (m)			
B	B	2.0	なし	-	-	なし	-	5	20
CI	CI	1.5	2.0	1.2	上半 下半	なし	-	5	20
CII	CII	1.2	2.0	1.2 ~ 1.5	上半 下半	なし	-	5	20
DI	DI	1.0	2.0	1.0	1.0	H-100	1.0	10	20
DII	DII	1.0	2.0 ~ 3.0	1.0 以下	1.0	H-100	1.0	10 ~ 12	20

注)該当トンネルの利用状況および地山状況などを考慮し、覆工の省略を検討する必要がある。

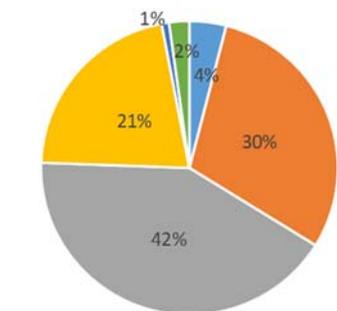


図-2 設計支保パターンの割合

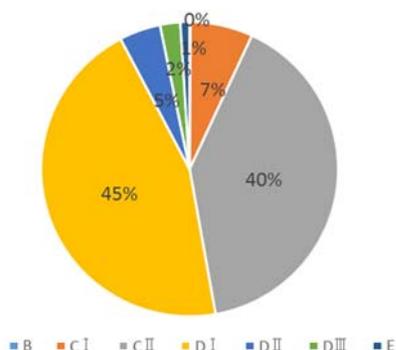


図-3 実施支保パターンの割合

キーワード：小断面トンネル，支保パターン，断面形状

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 国立研究開発法人 土木研究所 道路技術研究グループ TEL: 029-879-6791

4. 断面形状に関する数値解析と結果の考察

小断面トンネルの特徴的な支保構造に関して、2次元有限要素法による線形弾性解析を実施して断面形状の違いが安定性に与える影響を確認した。解析モデルは①上半がアーチ形状で側壁が直線形状(図-4)、②全体がアーチ形状(図-5)とした。地山は一樣な状態とし単位体積重量を23kN/m³、土被りを2D、側圧係数は0.5、支保部材は厚さ10cmの吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工であるH-100を合成した梁要素とし、ロックボルトはモデル化していない。また、モデル②の形状を決める際には路盤高さにおける幅員をモデル①と同一にし、アーチ形状について下半の半径を上半の2倍程度とした。このようにして解析した結果を変形図(図-4,5)および断面力図(図-6,7)に示す。まず、変形図を確認すると水平方向の内空変位量の最大値はモデル①では15.4mmである。これに対してモデル②では12.0mmとなりモデル①と比較して22%の大きな減少が見られた。これにより同様の地山状態にあっても支保構造の形状により変位量に一定の差が生じることがわかった。そのため、変位量を支保構造変更の判断材料にする際は形状の影響に注意する必要がある。また、変形の状態についてモデル①では上半部材はアーチ形状を保ったまま圧縮されているが、直線形状の側壁部では曲げ変形が顕著になっている。これに対してモデル②では支保構造全体がアーチ形状を保持しながら圧縮されている様子がわかる。この状態を断面力で確認すると、モデル①の側壁部には最大でM=31.5kN・mの曲げモーメントが発生している。この断面力を吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工の分担に分け、吹付けコンクリートに発生する縁応力度を算出すると、 $\sigma_c = -1.35\text{N/mm}^2$ となり引張応力が発生している。これに対してモデル②の側壁部に発生する曲げモーメントの最大値はM=17.5kN・mで縁応力度は $\sigma_c = 1.50\text{N/mm}^2$ となり支保構造全体も圧縮応力状態にある。この結果から直線形状の側壁部は支保構造の弱点になりうるということが分かった。また、曲げ変形が発生しやすい支保構造では、部材特性として引張力に弱い吹付けコンクリートだけでは不安定なため鋼アーチ支保工が必要となり、D I～D IIパターンの適用が増加する傾向の一因となる可能性がある。このような構造的弱点は本坑掘削の影響や覆工コンクリートの省略に対する長期安定性についても同様な課題となるが、現時点ではその影響の大きさ、範囲および発生頻度などの知見が不足するため具体的な考察には至らない。これに関しては地中変位の計測などを実施してデータを収集し、本坑と避難坑の適切な隔離や一次支保工のみで長期的安定が確保できる支保構造について検討を行う必要がある。

5. 実施支保パターンの割合に関する考察

鋼アーチ支保工は曲げ抵抗による安定の確保や地山の抜け落ち防止に見られるような短期的な安全の確保などに大きな役割を果たす支保部材であり、実施支保パターンの割合(図-3)に影響を与えていると考えられる。また、鋼アーチ支保工の有無の境界となるC IIパターンとD Iパターンの間には支保構造に大きな剛性差があり(表-1)、円滑なパターン変更を妨げる要因になり得る。このような状況に対して中間的な支保パターンを増設して該当する地山状態を分担させれば、安全性、安定性を確保した上でコストの適性化が図れるため支保構造の合理性が高まる可能性がある。そのため、C II、D Iパターンにおける標準1掘進長、鋼アーチ支保工、吹付けコンクリートの関連性を精査する必要がある。

6. まとめ

本稿においては小断面トンネルの支保構造の力学的特性や経済性に関して考察し、断面形状と安定性の関係や標準的な支保パターンの細分化の必要性について確認した。今後はライフサイクルコストを適切に判断するためにも、本坑掘削の影響や覆工コンクリートの省略に関する検討を行う必要がある。

謝辞: 貴重なデータを提供して下さった関係者各位に深甚なる謝意を表します。

参考文献

1) 日本道路協会: 道路トンネル技術基準(構造編)・同解説, 2003.

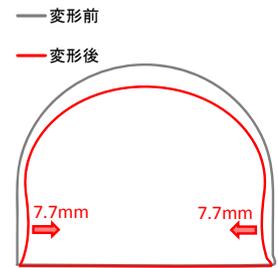


図-4 モデル①変形図

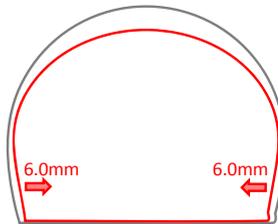


図-5 モデル②変形図

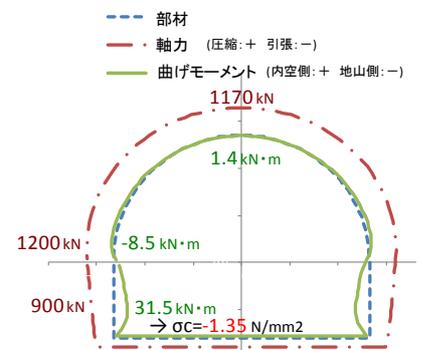


図-6 モデル①断面力図

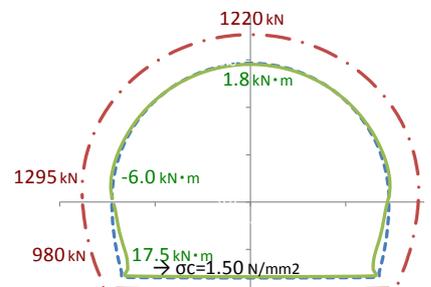


図-7 モデル②断面力図