

地山特性曲線法による可縮支保構造の検討

大成建設（株）技術センター社会基盤技術研究部 正会員 ○坂井 一雄

1. はじめに

山岳トンネルの施工において、大土被りにも拘わらず地山の強度や剛性が小さく、掘削に伴う地山の大変形が予想される場合（いわゆるスクイージング地山）、日本では早期に高耐力支保を、場合によっては複数層に構築して、「剛」に構造の安定化を図る方法が一般的になりつつある。一方、オーストリアでは、一定の変形抵抗性を有する部材、例えば、図-1 に示す LSC-N¹⁾を吹付けコンクリートに介在させる可縮支保構造が一般的である。この方法は、地山の変形に対し「柔」に追従しようとする方法であり、同じトンネル空間を安定させるために必要な資材量や掘削量を低減できる場合もあると思われる。そこで、実際にスクイージング地山に遭遇し、二重支保構造を採用した日本の施工事例において、可縮支保構造の適用可能性を地山特性曲線法により検討した。なお、本論文はグラーツ工科大学の岩盤・トンネル研究室に客員研究員として滞在した際の研究成果の一部をまとめたものである。

2. 地山特性曲線法 (Convergence Confinement Method, CCM) による支保構造の検討

CCM による支保構造検討では、地山をモール・クーロンの破壊規準に基づく弾完全塑性体とした。地山の初期地圧は等方等圧で、トンネルは円形断面で全断面掘削を仮定した。CCM を構成する各曲線は以下のように作図した。

2. 1. 地山特性曲線 (Ground Characteristic Curve)

地山特性曲線は、トンネルの掘削（掘削半径 r_0 ）に伴って生じる半径方向変位 (u_r) と支保内圧 (p_i) の関係を表した曲線であり、弾性域および塑性域に分けて次のように表現することができる²⁾。

$$(\text{弾性域}) \quad u_r = (p_0 - p_i) \frac{r_0}{2G} \quad (\text{塑性域}) \quad u_r = r_0 \frac{1}{(k+1)} \left(k - 1 + \frac{\sigma_c}{p_0} \right) \frac{1}{2G} \left(\frac{r_p}{r_0} \right)^2 p_0 \quad (1)$$

ここで、 p_0 ：初期地圧、 G ：せん断剛性率、 $k=(1+\sin\phi)/(1-\sin\phi)$ 、 σ_c ：一軸圧縮強さ、および r_p ：塑性半径を表す。

2. 2. 変位特性曲線 (Longitudinal Displacement Profile)

変位特性曲線は、切羽からのトンネル軸方向距離 (x) に応じた変位 ($u_{r(x)}$) と総変位量 (u_∞) の関係を表す曲線であり、種々の推定曲線が提案されている。本検討では、式(2)の Chern ら³⁾が提案する実測データの近似曲線を用いるものとした。この変位特性曲線に基づき、切羽先行変位や支保導入後における掘削毎の変位量を推定した。

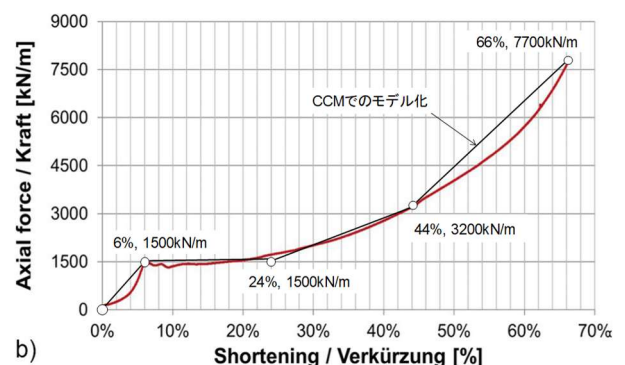
$$u_{r(x)} = u_\infty \cdot \left(1 + e^{(-x/0.55 \cdot 2r_0)} \right)^{-1.7} \quad (2)$$

2. 3. 支保特性曲線 (Support Characteristic Curve)

支保特性曲線は、支保が受けた変位量と支保剛性に基づいて算出される支保内圧を示す曲線であり、地山特性曲線との交点が、地山挙動に対して安定するトンネルの支保内圧と変形量を表す。可縮支保構造では、鋼製支保部材として、ラティスガーダーやスライド機構を持った可縮鋼材 (TH-type) がよく用いられている。これらは、H 鋼に比べて特に鋼材の軸方向剛性が小さいという特徴があり、地山に対して支保内圧を付加する構造部材とみなさない場合もある。そこで、本検討では鋼製支保部材による内圧効果は見込まないものとした。同様に、ロックボルトについても、



a)



b)

図-1 LSC-N a) 室内試験前後の供試体、b) 荷重-変位曲線¹⁾

キーワード 山岳トンネル、可縮支保構造、二重支保工、地山特性曲線法

連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設（株）技術センター TEL 045-814-7217

吊下げ効果や縫付け効果のみを期待し、地山物性改良効果や内圧効果は期待しないものとした。トンネル半径方向の吹付け支保剛性(K_{SC})は、次式のように計算される。

$$K_{SC} = \frac{E_{SC}(r_0^2 - r_i^2)}{(1+\nu)\{(1-2\nu)r_0^2 + r_i^2\}} \quad (3)$$

ここで、 E_{SC} は吹付けコンクリートのヤング率 (3,400MPa)、 r_i は吹付け層の内側半径である。材齢に応じた吹付け強度を考慮し、強度以上の応力が発生した時点で SCC を打ち切った。

可縮支保部材は、グラーツ工科大学で開発された LSC-N を用いるものとした。LSC-N は内部にポーラスコンクリートを充填した鋼管を複数個 (3 個もしくは 4 個が一般的) 配置した部材で図-1 の荷重-変位曲線に示すように、高さ 60%以上の軸方向圧縮変形に対して破壊することなく追従できる。

3. 事例検討

二重支保工による支保の高剛性化を図った二事例の施工条件を表-1 に示す。この地山条件下で可縮支保構造の成立性を検討した。可縮支保構造の吹付け厚さは両トンネルの 1 層目吹付け厚さと同等とした。また、可縮支保構造では二層目が不要である。このため、A トンネルでは等価な掘削断面積の円形トンネルの半径として、 $r_0=6.29\text{m}$ (掘削断面積 124m^2)、B トンネルでは $r_0=6.18\text{m}$ (同 120m^2) とした。支保設置は切羽通過後 1m とした。また、早期全断面閉合を目的とした補助工法の施工も鑑みて、1m/日の掘削進行速度を仮定し、この速度に応じて掘削毎の吹付け強度を計算した。図-2 に A トンネルで 4 個の LSC-N を、図-3 に B トンネルで 6 個の LSC-N を用いた結果を示す。両図で、支保特性曲線の端点は、吹付け応力が材齢時点における吹付け強度に到達したことを表す (図-4 が B トンネルの例)。両トンネルともに、支保設置後に発生する変位量は非常に大きい、LSC-N がその変位の大部分を吸収するために、A トンネルの場合には 4 掘削時点まで、B トンネルの場合には 3 掘削時点まで、吹付け応力が材齢強度に到達せず、地山挙動に支保が追従していることがわかる。この結果、地山特性曲線と交点を持ち、可縮支保構造によってトンネルの安定化を図れることがわかる。なお、可縮支保部材が無い場合には、両トンネルともに、支保設置後 1 掘進時点で、吹付け応力が材齢強度を超過するような検討結果であった。

4. まとめと今後の課題

CCM を用いた検討段階では、二重支保工を用いるような地山条件でも、可縮支保構造が成立する可能性があることが分かった。このため、今後は数値解析等を用いて、可縮支保構造の妥当性をより詳細に検討したいと考えている。

- 参考文献** 1) Schubert, W. et al.: Further development of yielding elements and connecting elements for shotcrete (2018).
2) Sulem, J. et al.: An analytical solution for time-dependent displacements in a circular tunnel (1987).
3) Chern, J. et al.: An empirical safety criterion for tunnel construction (1998).

表-1 施工条件と地山条件

トンネル	Aトンネル	Bトンネル
掘削断面積*	132.4 m ²	130 m ²
土被り	137 m	300 m
支保仕様	1層目 吹付25cm+H200 2層目 吹付20cm+H150	1層目 吹付30cm+HH200 2層目 吹付25cm+HH154
断面閉合距離	6 m	8 m
地山条件	泥岩	蛇紋岩
単位体積重量	24 kN/m ³	24 kN/m ³
変形係数	100 MPa	150 MPa
側圧係数**	0.7 (1.0)	0.52 (1.0)
粘着力	300 kPa	200 kPa
内部摩擦角	20°	30°

*二重支保工の場合 **()内はCCMで採用した値

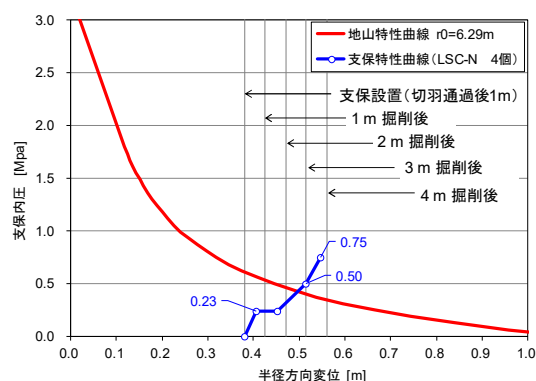


図-2 A トンネル (LSC-N 4 個)

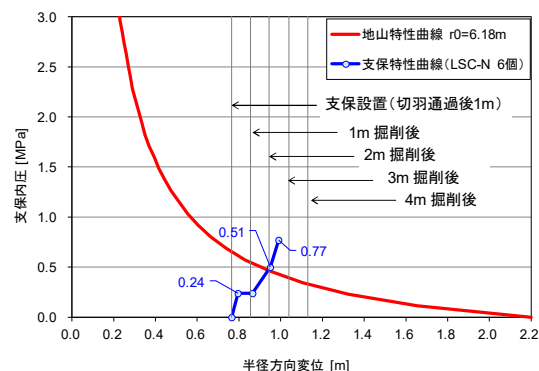


図-3 B トンネル (LSC-N 6 個)

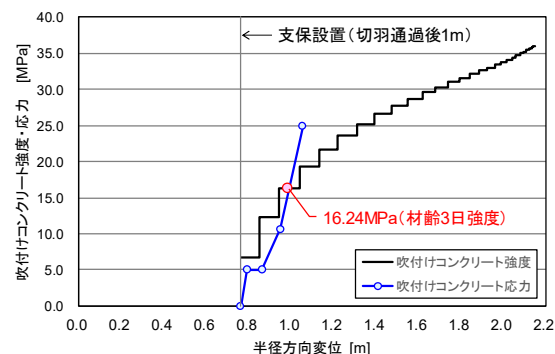


図-4 吹付け強度と応力の関係 (B トンネル)