

大型載荷試験の再現解析による覆工コンクリートのモデル化手法の検討

(株)フジタ 正会員 ○新井 智之 正会員 村山 秀幸
 熊本大学 オノ木 敦士
 北海道大学 正会員 児玉 淳一

1. はじめに

長期変状現象が懸念される山岳トンネルで、トンネルの長期安定性を評価することは非常に重要である。トンネルの安定性を評価する有用な手法として数値解析が挙げられる。変状が発生した場合、通常外力がかからないとされる覆工にも大きな荷重がかかり、安定性に大きな影響を与える。しかし、FLAC3Dを用いた数値解析では覆工のモデル化手法について十分な検討がなされていない。そこで本稿ではトンネル安定性評価のために力学的に正しく覆工をモデル化する手法について検討する。

2. 覆工のモデル化手法

覆工のモデル化を検討するにあたり、砂金・真下(2010)¹⁾の実大覆工コンクリートの載荷実験について再現解析を行った。解析コードはFLAC3D5.01である。覆工は既存文献で採用が多いソリッド要素(例えば野城ほか2012²⁾)とシェル要素(例えばArima et al.2017³⁾)の2つを比較した。ソリッド要素は弾性解析とモール・

表1 メッシュ分割数

ソリッド要素 (厚さ×高さ×周)	シェル要素 (高さ×周)
10×10×180	10×180

表2 物性値の一覧

圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング率 (kN/mm ²)	ポアソン比	密度 (kg/m ³)	摩擦角 (°)	引張強度 (N/mm ²)
2.02×10^7	17.8×10^9	0.16	2.35	30	2.0×10^6

クーロンモデルを用いた弾塑性解析を行い、シェル要素は弾性解析のみを行った。メッシュ分割と覆工の物性値については表1、表2に示す。分割数は計算時間と精度の観点から決定した。物性値は文献¹⁾中のものを使用し、記載のなかったものについては一般値を用いた。境界条件は実験の状況と解析の安定性を考慮し、図1のようにした。

実際の実験では直径9.7m、高さ1m、厚さ30mmの樹脂補強コンクリート供試体を横倒しにして使用する。実験の載荷方法を再現するために、油圧ジャッキと同じ高さ30cmと70cmの位置に地盤反力バネを設定した。地盤反力バネにはライナー要素を用いた(図1)。解析では載荷実験と同じく10°間隔でライナー要素に対し20kNに相当する応力をかける。解析が一旦収束した後に、80–100°の位置については応力を増やしていき、それ以外の場所は反力バネを固定する。最終的には実験で見られた破壊よりも大きい400kNまで荷重を増やし解析を行った。

キーワード 長期変状, トンネル, 数値解析, 覆工, モデル化

連絡先 〒243-0125 神奈川県厚木市小野 2025-1 (株)フジタ 技術センター 土木研究部 TEL 046-250-709

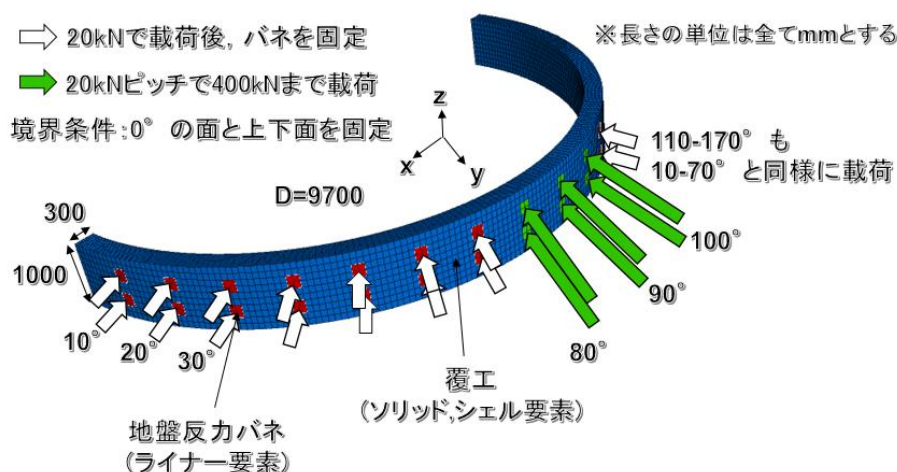


図1 解析モデルの概要図

(図は覆工をソリッド要素にした場合)

解析では載荷実験と同じく10°間隔でライナー要素に対し20kNに相当する応力をかける。解析が一旦収束した後に、80–100°の位置については応力を増やしていき、それ以外の場所は反力バネを固定する。最終的には実験で見られた破壊よりも大きい400kNまで荷重を増やし解析を行った。

3. 検討結果

各物性値を変えながら解析を行なった結果、地盤反力バネの垂直剛性が覆工の変位量に特に大きな影響を与えることが分かった。まず、文献¹⁾中の FEM 解析に用いた地盤バネの垂直剛性 100MN/m^2 に合わせて解析を行なった時の荷重変位曲線を図 2 に示す。弾性解析の場合、覆工をどちらの要素にしても荷重 20kN までの天端中央の変位量の傾きより、それ以降の変位の傾きの方が大きい。これは

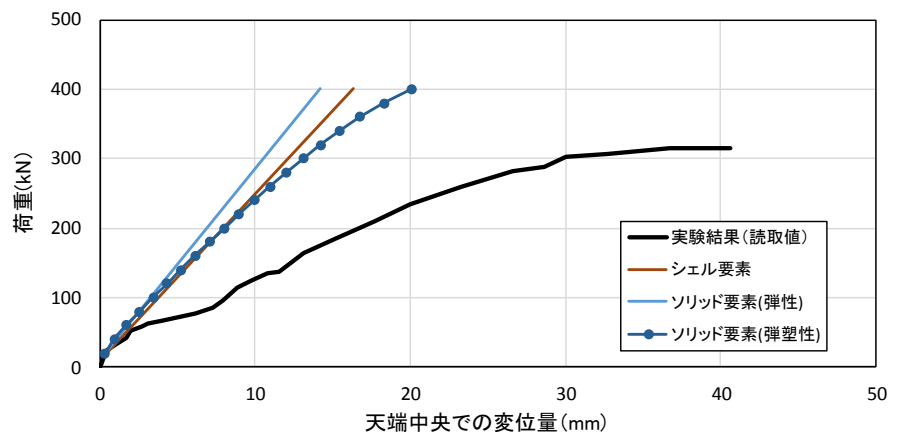


図 2 荷重変位曲線
(地盤バネの垂直剛性： 100MN/m)

80-100° 以外の地盤バネが周辺の変位を抑制した影響で、天端での変位が大きくなったものと考えられる。また、荷重 20kN から実験で第一ひび割れが発生した 60kN までを弾性領域と考え、10kN ごとに実験値との変位量の差の平均値を計算した。ソリッド要素では約 0.44mm に対し、シェル要素では 0.23mm でありどちらも比較的实验値に近いがシェル要素の方が精度は高い。ソリッド要素の弾塑性解析では、同様に荷重 20-300kN までを 20kN 間隔で計算すると平均 7.2mm となった。この値はシェル要素より大きいが、弾性領域で比較すると、0.6mm となる。ソリッド要素の解析はロッキング現象が発生し、載荷実験やシェル要素に比べて変位量が小さくなっていると考えられる。また、弾塑性解析の途中段階において荷重 60kN で天端内側中央に破壊が生じ、80kN で 60° と 120° 付近の外側で破壊が生じた。これは載荷実験で観察されたひび割れの発生とほとんど同じ荷重と位置であり、同じ破壊のモードであると考えられる。

次に地盤バネの垂直剛性を自由に变化させて、実験の荷重変位曲線に近くなる値を探った。ソリッド要素の場合、弾塑性解析で約 15MN/m の垂直剛性の時、最も実験に近くなった。変位量の差の平均値は 1.8mm である。また、シェル要素では 50MN/m の時に実験値と近づき、弾性領域で変位量の差の平均値を取ると 0.003mm となった。

4. まとめと今後の課題

本報告ではトンネルの安定性評価のための覆工コンクリートのモデル化の手法について、覆工コンクリートの実物大の載荷実験を再現解析することにより検討し、下記の知見を得た。

- ・覆工に生じる変位量の再現性は地盤バネの垂直剛性に大きく依存する
- ・ソリッド要素の弾塑性解析では垂直剛性は実験値との変位の差で比較すると最も小さい場合と 4 倍異なる
- ・弾性解析ではソリッド要素、シェル要素は共に比較的高い精度で覆工の変位量を再現できる

今後は実在のトンネルに対して、本手法を適用するために、周囲の岩盤がある状況での覆工の再現や、他の支保部材についても検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1)砂金伸治, 真下英人: トンネル覆工コンクリートの力学的挙動に関する研究,土木研究所報告(214),pp.1-46, 2010-2.
- 2) 野城一栄, 嶋本敬介, 中西祐介, 小島芳之: 山岳トンネルの路盤隆起補強工の効果とその設計手法,鉄道総研報告,Vol.26,No.4,pp.41-46, 2012.
- 3)Arima,H.,Sainoki,A.,Fukuda,D.,Kodama,J.,Fuji,Y.,Murayama,H.,Niwa,H.,Okazaki,K.,3D numerical analysis of time-dependent behavior of a tunnel constructed with conventional support system. *Proceedings of 2017 ISRM Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics (YSRM 2017) & 2017 International Conference on New Development in Rock Mechanics and Geotechnical Engineering (NDRMGE 2017)*, pp.250-253, 2017.