

地上部開削時の影響を考慮したトンネル覆工の解析手法の検討

首都大学東京大学院

日揮株式会社（元首都大学東京）

首都大学東京大学院

首都大学東京大学院

学生会員 ○板場 建太

非会員 岡野 輝之

正会員 土門 剛

正会員 西村 和夫

1. はじめに

近年、既設トンネルの直上や近傍での開削工事が増加している。開削工事では既設トンネルが近接している場合、トンネルおよび周辺地盤への影響が懸念される。現在、この影響は二次元 FEM 解析による掘削解析とトンネル覆工をモデル化した FRAME 解析を組み合わせることで検討することが多い。しかし、FRAME 解析のみで開削工事などの影響を表現できれば、両解析を組み合わせることによる計算や評価の煩雑さを大幅に改善できる。そこで本研究では、地上部開削時の除荷過程を考慮した荷重モデルによるトンネル覆工の FRAME 解析を実施し、その有効性を検討する。その方法として、実挙動を比較的再現しやすい FEM 解析と種々の荷重モデルにおける FRAME 解析との比較検討を試みる。

2. FEM 解析と FRAME 解析の研究手法

本研究は、まず、トンネル掘削（以下、载荷と称す）により覆工に作用する荷重モデル（以下、载荷モデルと称す）をいくつか設定して FRAME 解析を実施し、その結果と FEM 解析の結果を比較し、FRAME 解析に用いる荷重モデルを選定する。次に、その荷重モデルを用い、地上部開削（以下、除荷と称す）による覆工への影響を考慮した荷重モデル（以下、除荷モデルと称す）を用いた FRAME 解析の結果と、地上部開削を考慮した FEM 解析の結果との比較を行う。

入力する地盤物性値は中硬岩と軟岩の 2 ケースを想定し、両地盤ともに $\nu=0.3$ とする。今回は地上部開削により地盤が除荷される領域（载荷時の E の 4 倍とした。）として、既往の研究成果¹⁾より、図 1 のように掘削面から左右 45°方向全域に設定する。除荷領域とそれ以外の载荷領域の地盤の弾性係数を表 1 に示す。トンネル覆工は外径 $D=10\text{m}$ の真円の円弧梁を 72 分割する。円弧梁の物性値は、弾性係数 25GPa, $\nu=0.2$ とした。表 2 に载荷モデルおよび除荷モデルを示す。また、トンネル覆工と地盤との相互作用を表現する地盤ばねを全周に配置する。一般的に用いられている種々のばね定数の適用性も確認するため、法線ばね定数 k は表 3 の 3 つの算定式を採用する。また、接線ばねについては法線ばねの 1/3 の値とする。载荷時では、表 2 の荷重条件 a), b), 表 3 の地盤ばね係数 A)~C) のそれぞれを組み合わせたモデルで FRAME 解析を実施し、同じ弾性係数での FEM 解析による覆工に発生する曲げモーメントを比較し、除荷時では土被り $2.0D$ の初期地盤高

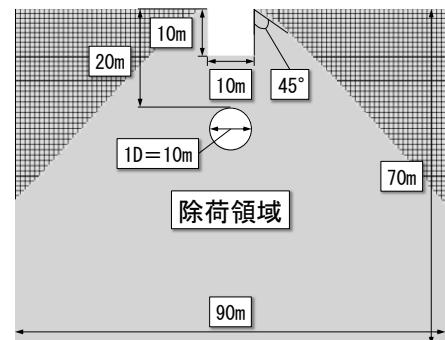


図 1 除荷領域考慮モデル (FEM)

表 1 地盤の弾性係数 (FEM)

	载荷領域(MN/m ³)	除荷領域(MN/m ³)
中硬岩	300	1200
軟岩	50	200

表 2 载荷・除荷モデルのまとめ (FRAME)

	载荷モデル		除荷モデル
モデル図	a)	b)	
鉛直荷重	地盤の単位体積重量 × 各節点までの土被り厚 ※下方荷重は無し	地盤の単位体積重量 × 土被り厚 ※下方荷重は地盤反力	地盤の単位体積重量 × 開削深さ ※下方荷重は無し
側方荷重は全ての場合で鉛直荷重 × 0.5			

表 3 各地盤ばねの算定式 (FRAME)

	A)道路橋示方書	B)トンネル標準示方書	C)Muir Wood
算定式	$k = \frac{\alpha E}{0.3} \left(\frac{B}{0.3} \right)^{\frac{3}{4}}$	$k = 0.5 \alpha E B^{\frac{3}{4}}$	$k = \frac{3E}{(1-\nu)(5-6\nu)B}$
記号	k : 地盤ばね定数 α : 計算に用いる定数で $\alpha = 4$ とする E : 弾性係数 B : トンネルの直径 ν : ポアソン比		

キーワード FEM 解析, FRAME 解析, トンネル覆工, 除荷, 地盤ばね

連絡先

〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域

さから深さ $0.5D$, $1.0D$, $1.5D$ の条件で開削を行い、トンネル覆工の曲げモーメントと FEM 解析からの開削のそれとを比較し、FRAME 解析の除荷モデルの適否を確認する。

3. FEM 解析結果と FRAME 解析結果の比較

FRAME 解析における荷重モデルを選定するため、覆工に発生する曲げモーメントを両解析結果から検討する。図 2 より、両地盤ともに曲げモーメントでは荷重モデル b)、地盤ばね算定式では C) が最も FEM 解析に近くなった。また、軸力の算定結果でも同様の結果となることを確認した。以上より、荷重モデル b)、地盤ばね算定式 C) のモデルを用いて地上部開削の影響を確認することとした。

図 3 は地上部開削の影響について、覆工に発生する曲げモーメントを両解析結果から比較したものである。FEM 解析結果によると、両地盤とも開削の影響による覆工上部の断面力の減少が確認でき、開削深さが深いほど、減少量は大きくなっていった。この地上部開削による影響は、開削深さによらず FRAME 解析でも概ね表現できていることがわかる。

次に、覆工の 3 か所(天端部(0°), スプリングライン(以下、S.L と称す) (90°), 覆工下部 (180°))における両解析の曲げモーメントを比較し、増減の傾向から FRAME 解析の除荷モデルの妥当性について、地盤による違いも加味して考察する。3 箇所の各開削深さによる増減の傾向を図 4 に示す。まず、天端部において、軟岩よりも中硬岩のほうが開削深さに応じた曲げモーメントの減少モードが、両解析ともに近い傾向であった。一方、軟岩では FEM 解析において、開削深さ $1.0D$ 時から $1.5D$ 時にかけて急激に減少していた。次に、S.L において、中硬岩、軟岩の両者とも開削深さに応じた曲げモーメントの線形的な減少が確認された。以上より、軟岩の値に開きはあるが、覆工の S.L は天端部と比較し、除荷の影響を予測しやすい可能性があることが判明した。最後に、覆工下部において、中硬岩、軟岩どちらの地盤も FRAME 解析では開削深さに応じて曲げモーメントが増加する傾向なのに対し、FEM 解析では逆に減少する傾向になることを確認した。

4. おわりに

本研究により、地上部開削による除荷の影響を地盤ばねや荷重の設定方法で、ある条件の下では概ね再現することができた。今後は、地下水の影響、特に浮力が無視できない場合についての FRAME 解析への適用方法についても検討する予定である。なお現在、解析手法の適否を判断する根拠となる浮力を考慮した模型実験を実施中である。

【参考文献】

- 1) 朝位充, 鈴木健之ら: トンネルの FEM 解析における解析領域の影響, トンネル工学報告集第 19 巻, pp.125-132, 2009.11

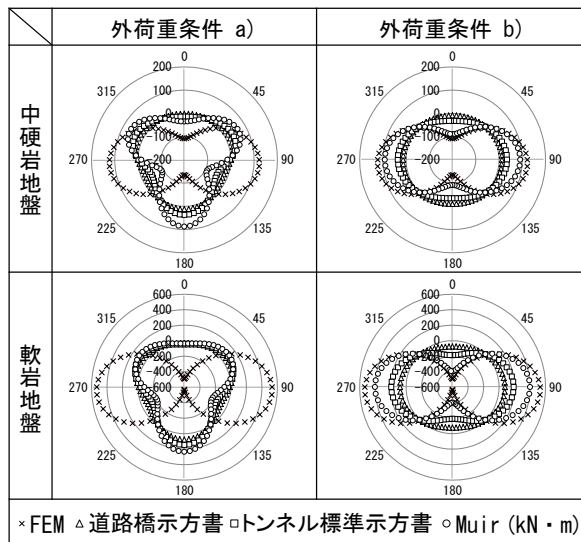


図 2 各荷重条件時の曲げモーメント

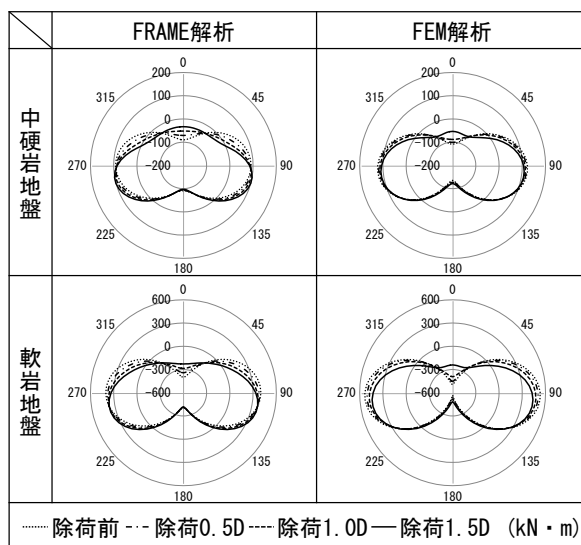


図 3 各開削深さ時の曲げモーメント

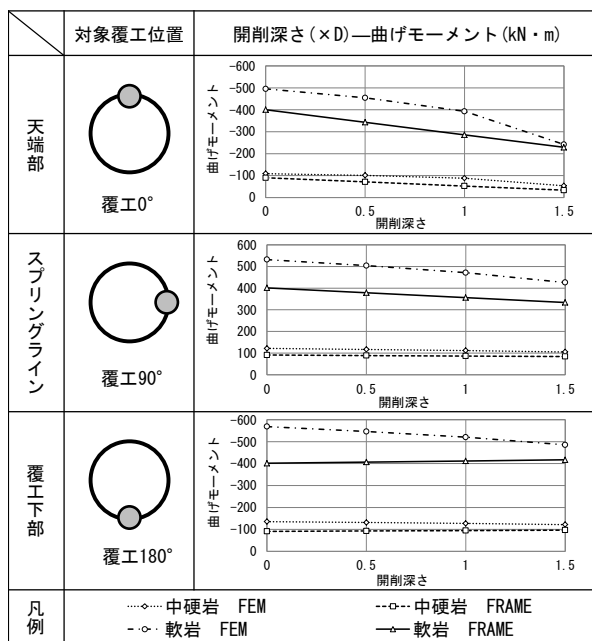


図 4 除荷高さによる曲げモーメントの変化