

# 3DFEMによるシールドトンネル覆工の設計定数の検討

地盤工学研究室 白井隆文

指導教員 杉本光隆

## 1. はじめに

トンネル覆工設計における解析手法は、主としてはりばねモデルと連続体モデルの二種類に大別され、広く用いられてきた。しかしながら、この二つのモデルには整合性がなく、境界条件も異なることから、統一的な解析モデルが求められている。これまでに、変位境界のはりばねモデルを拡張し、覆工と周辺地盤をモデル化した3DFEMモデル（以後、本解析モデルと呼ぶ）を開発し、パラメータスタディによって同モデルの妥当性を確認した<sup>1,2)</sup>。

本解析モデルを含む連続体モデルでは、地盤を連続体として扱い、地盤の弾性係数 $E_s$ を設計定数として用いる。一方、はりばねモデルは、地盤と覆工の相互作用として全周ばねモデルを適用し、設計定数には、ばね値である地盤反力係数 $k$ を用いる。すなわち、両モデルの解析結果の整合性を得るためには、 $E_s$ と $k$ を正しく評価できる換算式が必要となる。

そこで本研究は、本解析モデルとはりばねモデルにおける設計定数 $E_s$ 、 $k$ の換算式を提示し、その妥当性の確認を目的とする。

## 2. 解析ケース

地盤の条件は軟弱地盤から硬質地盤までを対象とした。シールド工法が適用される軟弱地盤において、はりばねモデルを用いる際の地盤反力係数 $k$ は、トンネル半径との積 $k \times r$ として表-1で与えられることから、 $k \times r$ を変数とし、 $k \times r=3,5,10,20,40,70,90 \text{ MN/m}^2$ の7パターンを設定した。硬質地盤では、 $k$ を変数にとり、 $k=50,100,300,500,1000 \text{ MN/m}^3$ の5パターンを設定した。また、軟弱地盤において $k$ が $r$ に依存することから、 $r$ を変数に加え、 $r=1 \sim 7 \text{ m}$ を1m刻みで7パターンを設定した。さらに、有効裏込め注入率 $\alpha_g$ を80,90,100,

表-1 全周ばねモデルの地盤反力係数<sup>3)</sup>

土の種類	$k \times r \text{ (MN/m}^2\text{)}$	N値による目安
砂質土	非常に密な	$30 \leq N < 50$
	密な	$15 \leq N < 30$
粘土	中位, 緩い	$N < 15$
	固結した	$25 \leq N$
粘性土	硬い	$8 \leq N < 25$
	中位	$4 \leq N < 8$
	軟らかい	$2 \leq N < 4$
	非常に軟らかい	$N < 2$

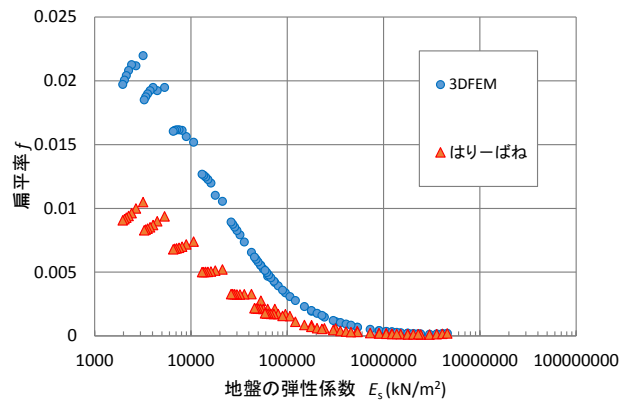


図-1 経験式による扁平率と弾性係数の関係

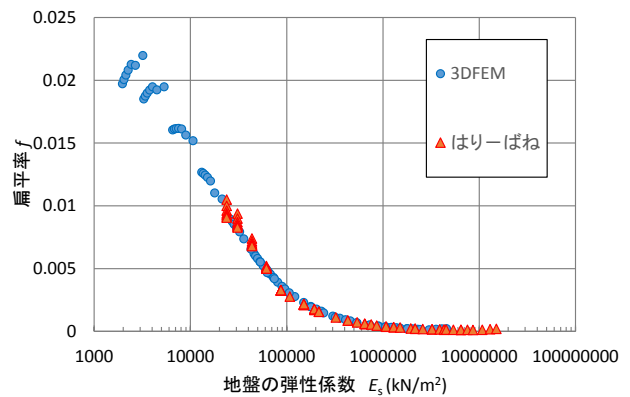


図-2 提案式による扁平率と弾性係数の関係

105,110%の5パターンを設定し、計420ケースの解析を行った。

## 3. 解析結果と考察

### (1) 換算式の導出

本解析モデルでは、地盤をソリッド要素で表現しているため、地盤による応力再配分を考慮でき

るが、はりばねモデルでは、端部を固定した地盤ばねによって地盤を表現しているため、地盤による応力再配分を考慮できず、地盤を硬質よりに評価してしまう傾向がある。特に、軟弱地盤では、地盤の変形が大きくなり、このモデルの特性の違いによる差が大きくなると考えられる。そこで、本研究ではまず、両モデルの差が小さくなる硬質地盤において、 $E_s$ と $k$ の換算式を求めることとした。ここで、硬質地盤は、通常シールドトンネル設計に用いられる地盤反力係数の最大値  $50\text{MN/m}^3$  を参考として、 $k \geq 50\text{MN/m}^3$  と定義した。

換算式を求めるにあたり、曲がり梁の解析解を基に、覆工や地盤条件が同一であれば、覆工の変形を表す扁平率は両モデルで等しいという条件の下、さらに2つの条件を設定した。すなわち、

- ①  $k$ と $r$ は反比例する。
- ② 換算式は、以下の経験式<sup>4)</sup>に基づき、かつ比較的単純な形とする。

$$k = 1.58\alpha E_s B_v^{-0.75} \quad (1)$$

上記を基に、地盤反力係数 $k$ と地盤の弾性係数 $E_s$ の換算式として、以下の式を得た。

$$k = 0.4636\alpha E_s r^{-1} \quad (2)$$

さらに、軟弱地盤( $k < 50\text{MN/m}^3$ )では、はりばねモデルと本解析モデルの特性が異なることから、軟弱地盤における両モデルの扁平率が等しくなるように、式(2)の補正式を導出し、以下の式を得た。

$$E_s' = 296.4 E_s^{0.5} \quad (3)$$

式(2)、式(3)より、 $E_s$ と $k$ の換算式として以下の式を得た。

$$E_s' = \begin{cases} 2.157(k \times r) & (k \geq 50\text{MN/m}^3, E_s \geq 87852\text{kN/m}^2) \\ 435.3(k \times r)^{0.5} & (k < 50\text{MN/m}^3, E_s < 87852\text{kN/m}^2) \end{cases} \quad (4)$$

図-1、図-2に経験式(1)および提案した換算式(4)による地盤の弾性係数 $E_s$ と扁平率 $f$ の関係を示す。

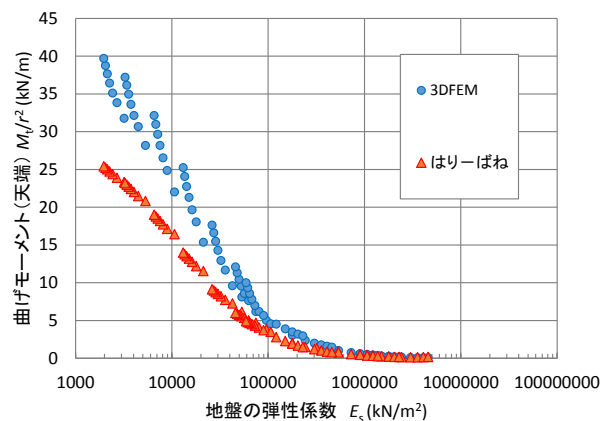


図-3 経験式による曲げモーメントと弾性係数の関係

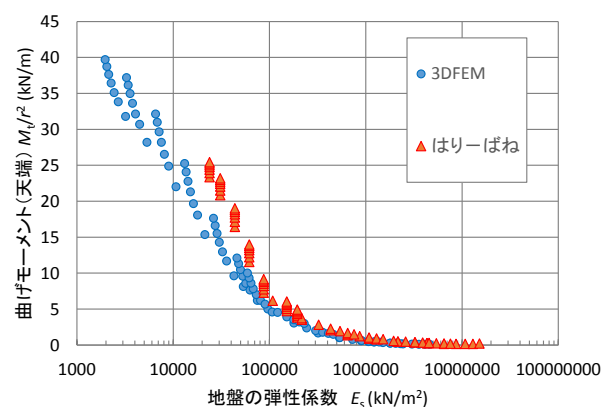


図-4 提案式による曲げモーメントと弾性係数の関係

これらより、換算式(4)を用いると、両モデルの $f$ は、地盤の硬さによらず、よく一致することがわかる。

## (2) 提案式の妥当性の検証

提案式の妥当性を、覆工設計で重要となる曲げモーメントにより検証した。図-3、図-4に経験式(1)および提案した換算式(4)による地盤の弾性係数 $E_s$ と天端の曲げモーメントの関係を示す。ここで、曲がり梁の解析解を基に、天端の曲げモーメント $M_t$ をトンネル半径 $r$ で正規化した $M_t/r^2$ を用いた。

図-4において、提案式による換算の結果、曲げモーメントは、本解析モデルよりはりばねモデルの方が大きくなった。実設計においては、地盤の $N$ 値から弾性係数 $E_s$ を求め、そこから地盤反力係数 $k$ を算出することが多い。本解析モデルに比

べ、後工程であるはりーばねモデルで安全側の評価となっており、提案式は妥当であると考えられる。

#### 4. 今後の課題

##### (1) 3DFEM モデルの適用現場の拡張

本解析モデルは、硬質地盤にも適用可能であることから、NATM 工法による計測データにより、本モデルの妥当性を検証する。

#### 参考文献

- 1) 松岡治, 杉本光隆: 連続体 FEM によるトンネル覆工設計法に関する研究, 長岡技術科学大学工学研究科修士論文, 2014.
- 2) 赤井勇司, 杉本光隆: 地盤の応力再配分を考慮したシールド覆工の設計法に関する研究, 長岡技術科学大学工学研究科修士論文, 2015.
- 3) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説, シールドトンネル, 鉄道総合技術研究所, 1997.
- 4) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 都市部山岳工法トンネル, 丸善, 2002.