

## 大断面シールドトンネルにおける地盤反力係数補正方法の検証

公益財団法人鉄道総合技術研究所 正会員 ○中山卓人, 野城一榮

## 1. はじめに

鉄道シールドトンネルの構造解析では地盤反力係数  $k_r$  の算出には, Muir Wood, A.M. の理論解が用いられている。

$$k_r = \frac{3E_0}{(1+\nu)(5-6\nu)R_c} \quad \text{式(1)}$$

ここに,  $E_0$ : 裏込注入の剛性を考慮した換算変形係数

$\nu$ : ポアソン比

式(1)を用いると, トンネル半径  $R_c$  に反比例して地盤反力係数が小さく,  $R_c$  に比例して掘削時の変形が大きくなる。ここで, 実際は断面が大きくなるとともに相応の桁高が用いられ変形が抑制される傾向にあると考えられることから,  $R_c$  に単純に反比例させて  $k_r$  を算出すると, 地盤の応力~ひずみ関係の非線形性を鑑みれば, 過剰に安全側の検討になる可能性がある。そこで, 文献<sup>2)</sup>では, 大断面トンネルにおける地盤反力係数の補正方法として,  $k_r$  に式(2)で計算される地盤修正係数  $\rho_{gk}$  を乗じる補正方法を提案した。

$$\rho_{gk} = 0.48R_c^{0.58} \quad (R_c > 3.5\text{m}) \quad \text{式(2)}$$

式(2)の導出にあたり,  $R_c$  と実際の変位の関係が「電力などの中小口径のトンネルの場合に直径 1/100 程度, 鉄道などの大口径の場合に 1/200 程度とされた例がある」という実績にもとづき, 実際の変位が  $R_c$  の指数関数に比例するという仮定を用いている。そこで, FEM 解析により上記の仮定の検証を行った。

## 2. Muir Wood の理論解の検証

はじめに, Muir Wood 理論解の検証を行った。検証は, 素掘りトンネルを想定した単純な FEM 解析により地盤反力係数  $k_r$  を算出することにより行った。図-1 に解析モデルを示す。土被りを  $2R_c$  とし,  $R_c$  を変えた 2 つのモデルを準備し, トンネル内空から地山に向かって一様に単位内圧を付与し, 下記の関係により地盤反力係数  $k_{r1}$  を算出した。

(地盤ばね係数  $\text{kN/m}^2$ ) = (節点荷重  $\text{kN}$ ) / (変位量  $\text{m}$ ) / (部材幅  $\text{m}$ )

図-2 に各解析ケースについて, FEM 解析で算出した

トンネルの各節点における地盤反力係数  $k_{r1}$  と式(1)で求めた地盤反力係数  $k_{r2}$  を比較する。ここで, 節点位置番号とその位置は図-1 に示したとおりである。

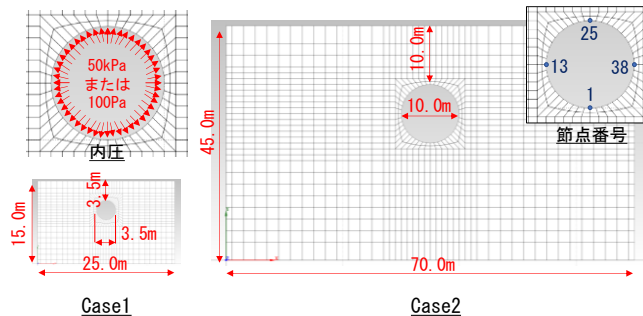


図-1 FEM 解析モデル

図-2 より,  $k_{r1}$  はトンネルの位置により変化し, トンネル天端部では小さく, トンネル底部で大きくなった。これは, FEM の解析領域がトンネル天端部に比べてトンネル側部やトンネル底部のほうが広いことや地表面は拘束されていないことによる影響と考えられる。

図-3 に地盤反力係数のトンネル全周の平均値を比較する。平均的には,  $R_c$  が大きい Case2 ( $R_c=5\text{m}$ ) のほうが  $k_{r1}$  が小さくなり, また, 平均値については  $k_{r1}$  と  $k_{r2}$  は近い値となっており, FEM 解析値が Muir Wood の理論解と同様の傾向となることを確認した。

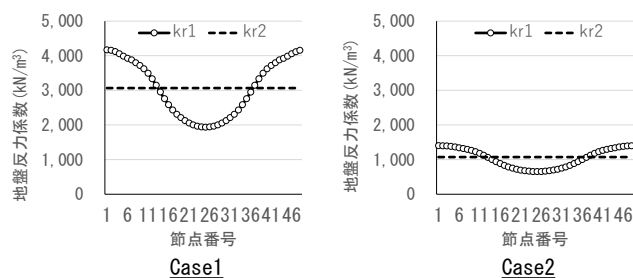


図-2 地盤反力係数  $k_{r1}$ ,  $k_{r2}$  の比較

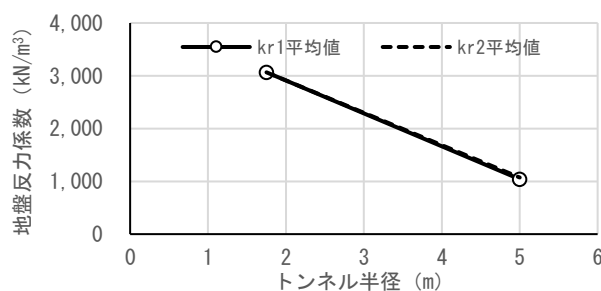


図-3 地盤反力係数  $k_{r1}$ ,  $k_{r2}$  の平均値の比較

キーワード シールドトンネル 地盤反力係数 FEM 解析

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 構造物技術研究部 トンネル TEL 042-573-7266

3. トンネル半径  $R_c$  と建設時のトンネル変位との関係  
次に、トンネル半径  $R_c$  と建設時のトンネル変位との関係を把握した。

図-4 に解析モデル、表-1 に解析ケースを示す。トンネル直径 ( $2R_c$ ) を 3.5m, 7.0m, 10.0m, 15.0m の 4 通りとして、それぞれ桁高を  $2R_c$  の 2%, 3%, 4% の 3 通り、地盤の変形係数を  $7,000\text{kN/m}^3$ ,  $14,000\text{kN/m}^3$  の 2 通りとして、合計 24 ケースの FEM による応力解放解析を行った。ここで、トンネル周囲の応力状態については極力近いものとなるよう、全ケーストンネル中心位置の深度は 15.0m に揃えた。解析 step は、step1 : 初期応力解放、step2 : 応力解放率 20% での掘削解析、step3 : 覆工設置、step4 : 応力解放率 80% による掘削解析の 4step とした。

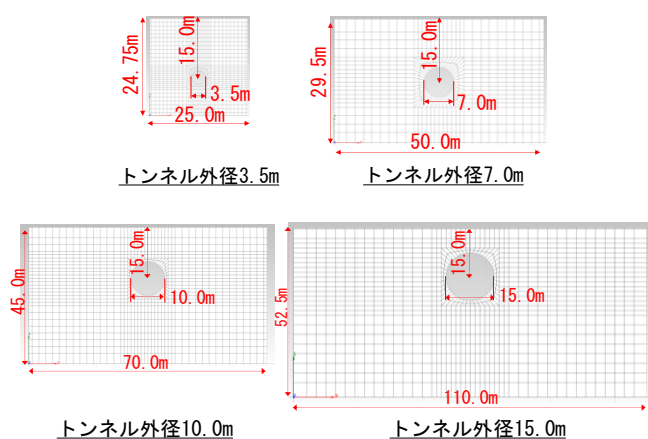


図-4 FEM 解析モデル

表-1 解析ケース

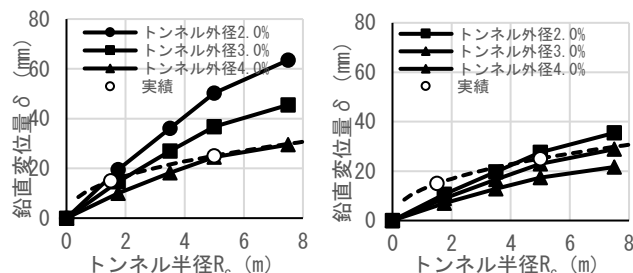
Case	トンネル高さ (m)	トンネル直径 (m)	変形係数 ( $\text{kN/m}^3$ )	ポアソン比	地山の単位体積重量 ( $\text{kN/m}^3$ )
1-1	トンネル	3.5m 7m 10m 15m	7,000	0.35	19.0
1-2	外径の 2%		14,000		
2-1	トンネル		7,000		
2-2	外径の 3%		14,000		
3-1	トンネル		7,000		
3-2	外径の 4%		14,000		

\*覆工のヤング係数は継手部の存在による剛性の低下を考慮して  $2.5 \times 10^4 \text{N/mm}^2$  の 80% の  $2.0 \times 10^4 \text{N/mm}^2$  とした。

図-5 に各解析ケースにおける各  $R_c$  に対する覆工変位量の変化を示す。覆工変位量は、step4 での鉛直変位量  $\delta_4$  から step3 での鉛直変位量  $\delta_3$  を減じた値  $\delta$  とした。なお、図中には解析結果とともに、文献<sup>2)</sup>に記述のある従来の実績（トンネル半径 1.5m で変位 15mm，トンネル

半径 5m で変位 25mm）を通る指数関数も合わせてプロットした。

FEM 解析の結果、 $R_c$  が大きくなるに従い覆工変位量も大きくなるのがわかる。また、地盤の変形係数が大きいほど覆工変位量は小さくなる傾向を示すが、どちらの場合も、式(2)の適用範囲である  $R_c > 3.5\text{m}$  においては、桁高が  $2R_c$  の 2%~4% の範囲では指数関数でおおむね近似できること、従来の実績をもとに設定した指数関数に近い関係にあることが確認できた。



(a) 地盤の  $E=7,000\text{kPa}$  (b) 地盤の  $E=14,000\text{kPa}$

図-5 トンネル半径ごとの覆工変位量の変化

#### 4. まとめ

FEM 解析により、大断面シールドトンネルにおける地盤反力係数の補正方法について検証を行った。以下に得られた結論をまとめる。

- (1) 解析モデルのトンネルの各節点における地盤反力係数  $k_{r1}$  と式(1)で求めた地盤反力係数  $k_{r2}$  の平均値はよく一致しており、FEM 解析値は Muir Wood の理論解と同様の傾向となる。
- (2) トンネル半径が大きくなるに従い建設時の覆工変位量も増加し、指数関数で近似できることを確認した。また、従来の実績をもとに設定した指数関数に近い関係であることも確認できた。
- (3) 以上より、大断面シールドトンネルにおける地盤反力係数の補正方法の妥当性を確認した。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（シールドトンネル），pp.142，1997.
- 2) 津野 究，仲山貴司，藤田輝一，船越宏治，木下果穂：大断面シールドトンネルにおける地盤反力係数の検討，第 73 回土木学会年次学術講演会，III-569，2018