

セグメント設計における地盤反力係数の設定に関する一考察

株式会社 ニュージェック 正会員 ○岡田 範彦
（元・独立行政法人 土木研究所 交流研究員）

独立行政法人 土木研究所 正会員 真下 英人

独立行政法人 土木研究所 正会員 石村 利明

1. はじめに

現在のシールドトンネルのセグメント設計において一般的に用いられている骨組み解析（フレーム解析）では、トンネルを直線梁、トンネル周囲の地盤を地盤ばねで支持するようにモデル化されている。大深度地下のような自立性の高い比較的良質な地盤においては地盤反力係数 k や側方土圧係数 λ を適切に評価することがトンネル覆工の合理的な設計に必要不可欠であるものと思われる。本報告では、二次元載荷模型実験および二次元弾性 FEM 解析により、洪積粘性土（土丹層）のような良質地盤における地盤反力係数の設定方法に関する一考察を行うものである。

2. 二次元載荷模型実験の概要

(1) 載荷装置・模型および地盤の概要

二次元載荷装置の概要図を図-1に示す。当該装置の側面は載荷板となっており、外側に設置されている計12基の油圧ジャッキにより4方向からの載荷が可能な構造である。当該実験では、鉛直方向に対する水平方向の載荷重の比率を0.4とし、鉛直方向の載荷圧が 200kN/m^2 となるまで荷重制御方式による段階載荷を実施した。トンネル模型は、外径 330mm （肉厚 2mm ）、長さ 295mm の鋼管であり、載荷装置の中央に設置した。各々の模型には、模型の発生断面力、作用荷重および変形の把握を目的とし、所定の位置にひずみゲージ・土圧計・変位計を設置した。また、地盤材料は洪積粘性土を模擬した人工地盤（ソイルセメント）を使用した。

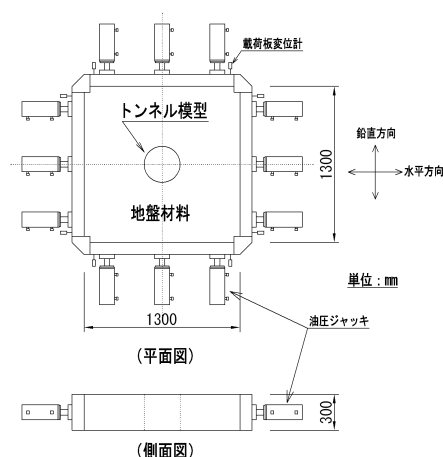


図-1 二次元載荷装置概要図

(2) 二次元弾性 FEM 解析

実験結果について二次元弾性 FEM 解析を実施した。当該解析は、トンネル模型を梁要素、地盤を弾性体としてモデル化した。表-1 に解析条件を示す。解析に用いる地盤の変形係数 E は、模型実験における鉛直載荷圧～模型地盤ひずみ（載荷板の変位を載荷装置幅（ 1.3m ）で除して算出）関係から $E=196,180\text{kN/m}^2$ と設定した。

表-1 解析用物性値

	人工地盤	鋼材 (トンネル模型)
変形係数 E (kN/m^2)	196,180	2.1×10^8
ポアソン比	0.33	0.29

(3) 解析結果

上記に示したものと同様の模型実験に関して、実験時の鉛直載荷圧～模型地盤ひずみ関係から設定した変形係数を用いた二次元弾性 FEM 解析により、内空変位および発生断面力に関して概ね実験結果を再現できることが報告されている¹⁾。ここでは、地盤反力係数に着目し、二次元弾性 FEM 解析から求められる地盤反力係数と模型実験から得られる地盤反力係数との比較を行った。図-2 は内空変位に関して実験値と解析値を比較したものである。図中で $0^\circ \sim 270^\circ$ 付近において変位量に若干の差は見られるものの、全体的に概ね一致している。図-3 は地盤反力係数に関して実験値と解析値を比較したものである。図中の 90° 位置に着目すると、解析値で $1,336\text{MN/m}^3$ 、実験値の平均値が $1,325\text{MN/m}^3$ と良い一致が見られる。同様に $0^\circ \sim 180^\circ$ 位置においても実験値と解析値は概

キーワード シールドトンネル，模型実験，地盤反力係数，二次元弾性 FEM 解析

連絡先 〒531-0074 大阪市北区本庄東二丁目3番20号 (株) ニュージェック TEL : 06-6374-4901
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 独立行政法人 土木研究所 TEL : 029-879-6791

ね一致しており、受働側・主働側のいずれの地盤反力係数においても解析により概ね求めることができた。ここで解析における地盤反力係数は、対象箇所における法線方向の発生応力を模型変位で除した値としている。これより、地盤反力係数に関して解析結果は実験結果と概ね一致しており、地盤の変形係数を適切に設定した二次元弾性 FEM 解析により、地盤反力係数を概ね求めることができると考えられる。

3. トンネル径および地盤強度に着目した地盤反力係数の検討

前節で述べた手法により地盤反力係数を概ね求めることができた結果を受け、本節では特にトンネル径および地盤強度に着目して二次元弾性 FEM 解析を行い、大深度地下における地盤反力係数の設定法に関する考察を行う。解析における荷重条件は前節と同様とし、解析検討ケースを表-2 に示す。

(1) 解析結果

図-4 は $E=196,180\text{kN/m}^2$ 時のトンネル径別の地盤反力係数の解析結果を、図-5 は地盤強度別の FEM 解析結果をそれぞれ示したものである。ここで、図中の地盤反力係数とはトンネル側部における地盤反力係数を示している。なお、参考として現在実設計に用いられている地盤反力係数 k の算定式のうち、「トンネル標準示方書 開削工法編・同解説」における、 $k_v=1.58\alpha E_0 B_h^{-3/4}$ (kN/m^3)・・・(式-1) (E_0 : 地盤変形係数、 B_h : 載荷幅(水平直径点から上下 45° の中心角の範囲とする)で求まる値(以下「理論値」と呼ぶ)も示す。図-4 に着目すると、トンネル径が大きくなるのに伴い地盤反力係数は減少していくことがわかる。これは地盤反力係数がトンネル径の影響により大きく変化することを示している。また、図-5 で地盤強度が低い時に比べて、地盤強度が大きい条件下におけるトンネル径ごとの地盤反力係数の変化の度合いが大きいことがわかる。この結果から、地盤強度が大きくなるほど、トンネル径が地盤反力係数に与える影響が大きいことがわかった。

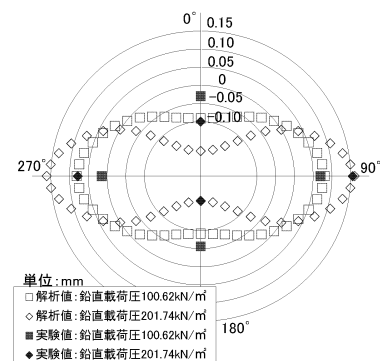


図-2 内空変位分布比較図

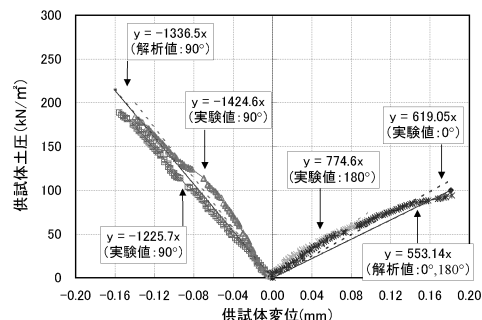


図-3 地盤反力係数比較図

表-2 解析検討ケース

トンネル外径(m)	3	6.2	12
セグメント厚(mm)	150	250	450
セグメントの変形係数(kN/m^2)	3.9×10^7		
セグメントのポアソン比	0.17		
地盤変形係数(kN/m^2)	196180	392360	588540

※土丹層(上総群層)のEは $E=186748 \sim 354880\text{kN/m}^2$

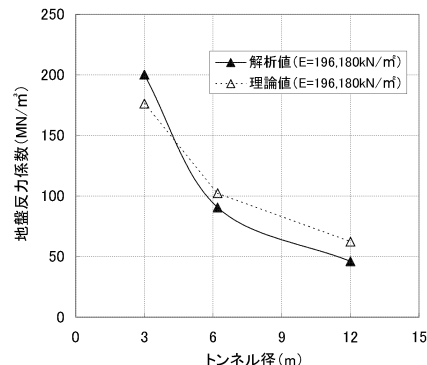


図-4 地盤反力係数比較(トンネル径別)

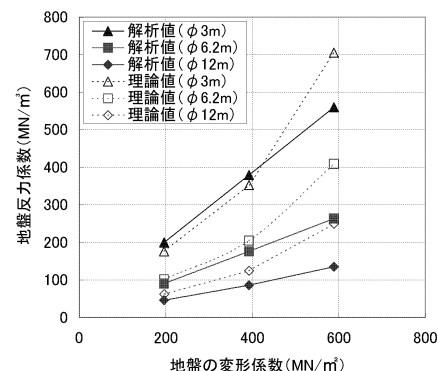


図-5 地盤反力係数比較(地盤強度別)

4. まとめおよび今後の課題

- 1) 鉛直載荷圧～地盤ひずみ関係から地盤の変形係数を適切に設定することで二次元弾性 FEM 解析により地盤反力係数を概ね求めることができた。
- 2) 良質地盤中におけるセグメント設計時の地盤反力係数は、トンネル径が地盤反力係数 k に与える影響が大きい。

今後は、トンネル径を変化させた模型実験等により 2) に関する検証を行い、地盤反力係数 k の評価モデルについて検討していきたい。

参考文献

- 1) 岡田範彦・真下英人・石村利明：良質地盤におけるトンネル構造の設計法に関する実験的検討，トンネル工学報告集第15巻/pp.281-286，2005.12
- 2) 東京都総合地盤図(Ⅱ)ー山の手・多摩地区一，東京都土木技術研究所，1990.3