

(61) 双設トンネル掘削時の、地山物性値に対する 先行トンネル掘削の影響評価

東京大学 正会員○杉本 光隆
正会員 松本 嘉司

Influence of Excavation of Front Tunnel to Physical Values of Ground in Parallel Tunnel

Mitsutaka SUGIMOTO, Tokyo University
Yoshiji MATSUMOTO, Tokyo University

Abstract

The values of convergence in this paper are measured at railway parallel tunnels, which are executed by short bench cut method with NATM in soft rock mass. At first, the elastic constant of ground after the front tunnel excavation and coefficient of lateral pressure are calculated using reverse analysis method based on the data of front tunnel. And then, the elastic constant of ground after the rear tunnel excavation is calculated using similar method of parallel tunnel based on that of rear tunnel. As a result of examination of these values, the followings are made clear, that is, elastic constant of ground decreases by the front tunnel excavation, and that fact is related with separation ratio and structural coefficient ratio of front tunnel.

1. はじめに

交通需要の増加にともない、既存鉄道・道路トンネルの複線化が行なわれるようになってきている。一方、新設トンネルにおいても、複線の鉄道トンネルは双設トンネルとすることが多く、道路トンネルも2車線の道路トンネルを2本並列して、進行方向を分けたトンネルとすることがある。このように、双設トンネルの需要は増大してきている。

ところで、このように2つのトンネルを近接して建設する場合には、2つのトンネル間に相互作用が働くために、単一トンネルの設計方法がそのままの形では適用できない。すなわち、双設トンネルの設計においては、

- ①相互の影響によるトンネルの安定性
 - ②先行トンネルの覆工に対する後行トンネルの発破振動の影響
 - ③地山物性値に対する先行トンネル掘削の影響
- を考慮しなければならない。

本研究は、双設トンネルの実測データを用いて、双設トンネルの安定性に関する諸問題の内、地山物性値に対する先行トンネル掘削の影響について、評価を試みたものである。

2. 解析方法

(1) 解析モデルと解析に用いるパラメータ

本研究では、

- ①掘削前後とも地山は等方性弾性状態にある
- ②トンネル断面は円形断面である
- ③トンネル周辺地山の境界において、鉛直方向には上載圧が、水平方向には上載圧に側圧係数を乗じた圧力が、地圧として働らく
- ④切羽は並列的に進行する

という仮定を用いて、解析対象のモデル化を行なった。図1、図2はそれぞれ先行トンネル掘削終了後、後行トンネル掘削終了後の解析モデルである。

これらのモデルの解析解^{1), 2)}より得られるトンネルの安定性を規定するパラメータは、側圧係数 K 、構造係数比 α_a' 、ロックボルト比 α_b 、地山のポアソン比 ν_R 、吹付コンクリートのポアソン比 ν_c 、離間距離比 d/r_0 、の6つであって、構造係数比¹⁾、ロックボルト比¹⁾は次式で表わされる。

$$\alpha_a' = \frac{E_c}{E_R} \times \frac{t}{r_0} \quad (1)$$

$$\alpha_b = \frac{n A_b}{2 \pi r_0 L} \frac{\sigma_b}{S} \quad (2)$$

ここに、

E_R : 平面歪状態に換算した地山の変形係数

E_c : 平面歪状態に換算した吹付コンクリートの
変形係数

r_0 : トンネル外周半径

t : 吹付コンクリートの巻厚

A_b : ロックボルトの断面積

σ_b : ロックボルトの降伏応力

n : トンネル軸方向長さ L 当りのロックボルトの本数

L : トンネル軸方向のロックボルト打設ピッチ

S : トンネル設置深度における上載圧

d : 双設トンネルの中心とトンネル外周上との離間距離

である。ここで、構造係数比は、地山に対する吹付コンクリートの相対的剛性を表わす無次元量であり、ロックボルト比は、トンネル設置深度における上載圧に対する、ロックボルト施工によって発生する応力変化の相対的割合を表わす無次元量である。

(2) 解析手順

実測データの解析にあたっては、諸物性値の設定が必要となる。本研究では、軟岩地山を想定し地山のポアソン比は $\nu_R=0.30$ とし、吹付コンクリートの変形係数²⁾は $E_c=20000\text{Kg/cm}^2$ 、ポアソン比は $\nu_c=0.17$ とした。また、その他の物性値は施工データをもとにした。これらをもとに、双設トンネルの実測データを用いて、地山の側圧係数・変形係数を求める手順を以下に示す。

①先行トンネルの逆解析：後行トンネル未掘削時の先行トンネルは、単一トンネルを掘削したのと同じ状態にある。したがって、先行トンネルの最終内空変位、最終天端沈下に単一円形孔トンネルの解析解を適用し、逆解析³⁾を行い、地山の側圧係数 K 、変形係数比 E_R' を求める。

②後行トンネルの逆解析：側圧係数は、境界条件の1つであるトンネルより遠方における水平方向荷重とト

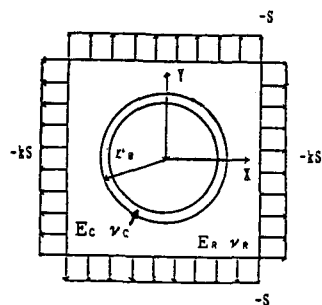


図1 先行トンネル掘削終了後の解析モデル

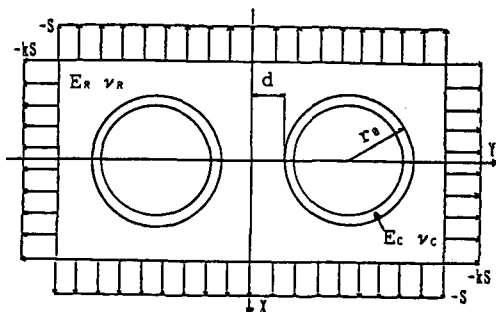


図2 後行トンネル掘削終了後の解析モデル

ンネル設置深度における上載圧の比を表わすパラメータであるので、単一トンネルを掘削しても、双設トンネルを掘削しても変化はしないと考えられる。したがって、同一地点における側圧係数は一定であるとし、先行トンネルを逆解析して得られた値を使用する。後行トンネルの最終内空変位、最終天端沈下に双設トンネルの解析解を適用し、最終内空変位、最終天端沈下それぞれの実測値と計算値の残差²乗和が最小となるように収束計算を行い、地山の变形係数 E_R^B を求める。

現実にはトンネルを2本同時に並列して掘削することはないし、トンネル掘削にともないトンネル周辺地山の变形係数は低下する⁴⁾。このため、ここでは、先行トンネルと後行トンネルの切羽位置のズレ、先行トンネル掘削によるトンネル周辺地山の变形係数の低下等をも考慮にいれた形で、後行トンネルの变形係数を先行トンネルの变形係数と独立に求めた。また、解析結果の検討を行なうにあたっては、測定誤差を考慮に入れるため、ロバスト推定法⁵⁾を用いて重みが減少したデータは除外した。

3. 実測データの解析

(1) 解析に用いたデータ

仙台地区の3つの鉄道用単線双設トンネルを解析の対象とした。これらのトンネルは、新第3紀層の軟岩地山に、吹付コンクリートとロックボルトを支保工とするショートベンチ工法を用いて、トンネル外周半径2.975-3.350m、土被り10-40m、トンネル中心間距離11-15m、で施工されたものである。用いた計測データは、

- ① 先行トンネルと後行トンネルの変位測定位置のズレが、トンネル軸方向の距離で10m以下であること
 - ② 後行トンネルの変位が収束するまで、先行トンネルの2次覆工が行なわれていないこと
 - ③ 補助工法を使用していないこと
 - ④ 地山が緩んで塑性化していないこと
 - ⑤ 土被り比 $h/r_0 \geq 6.5$ であること
 - ⑥ 計測開始時刻が切羽通過後2日以内であること
- という解析上必要な条件を満たす30断面の内空変位・天端沈下の実測データである。

(2) 解析結果

先行トンネルと後行トンネルの最終内空変位・最終天端沈下の関係を、外周半径500cmのトンネルの変位量に換算して整理すると、図3のようになる。ここで用いた実測データの離間距離比は1.17-1.62であるが、この位離れていても、後行トンネルの最終内空変位は先行トンネルのものより大きくなっていて、明らかに後行トンネルは先行トンネルの影響を受けていることを示している。また、先行トンネルと後行トンネルの逆解析によって得られるそれぞれの変形係数の関係を示すと図4のようになる。後行トンネルの逆解析によって得られる変形係数は、先行トンネルの逆解析によって得られる変形係数より小さくなっていて、先行トンネルによってトンネル周辺地山の变形係数が低下することを示している。

離間距離比 d/r_0 が十分に大きい時には E_R^B と E_R^F は一致するということを考慮して、 E_R^B/E_R^F を d/r_0 で整理す

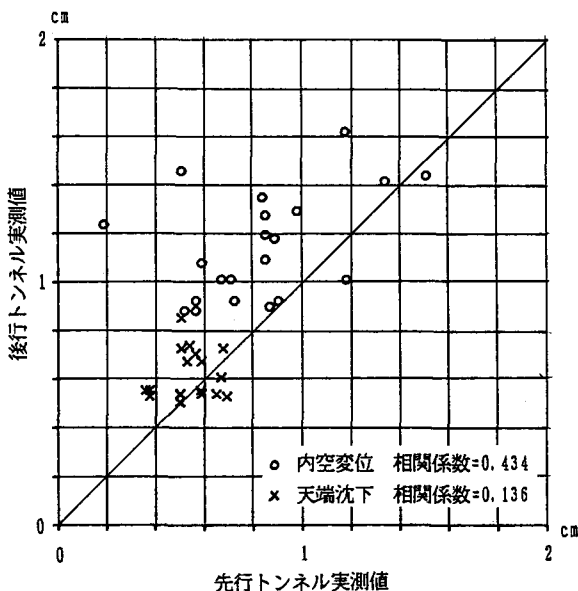


図3 先行トンネルと後行トンネルの
最終内空変位・最終天端沈下の関係

ると図5のようになる。 d/r_0 の小さい方が E_R^B/E_R^F は小さくなっていて、 d/r_0 の小さい方が先行トンネル掘削の影響を受けやすいことを示している。一方、 E_R^B/E_R^F を $\alpha_a'^F$ で整理すると図6のようになる。 $\alpha_a'^F$ の大きい方が E_R^B/E_R^F は1に近くなっている。いいかえれば、先行トンネルの覆工の支保効果が大きい程、 E_R^B/E_R^F は1に近づくことになる。硬岩地山を対象とした既往の研究⁴⁾では、覆工に関係なく、変形係数の小さい地山程、トンネル掘削によるトンネル周辺地山の変形係数の低下の範囲は大きいとされているが、覆工の支保効果が大きい軟岩地山においてトンネル掘削による地山の変形係数の低下を論ずる場合には、覆工の効果も考慮する必要があることを、図6は示している。また、 E_R^B/E_R^F をKで整理すると図7のようになる。これは、両者に有意な相関がないことを示している。

ところで、本解析に用いたデータは r_0 、 t 、 E_c が一定で、 $\alpha_a'^F$ の変動は E_R^F の変動のみに依存しており、 $\alpha_a'^F$ を E_R^B/E_R^F の説明変数とするためには、 r_0 、 t 、 E_c が異なる、より多くのデータを必要とすると考えられる。これらを考慮すると、軟岩地山における後行トンネル解析用の変形係数の推定式は次式で表わされる。

$$E_R^B/E_R^F = 1 - 0.4 \times r_0/d \quad (d/r_0 \geq 1.0) \quad (3)$$

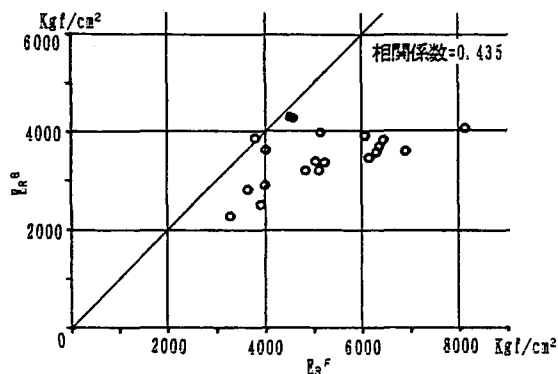


図4 先行トンネルと後行トンネルの逆解析によって得られる変形係数の関係

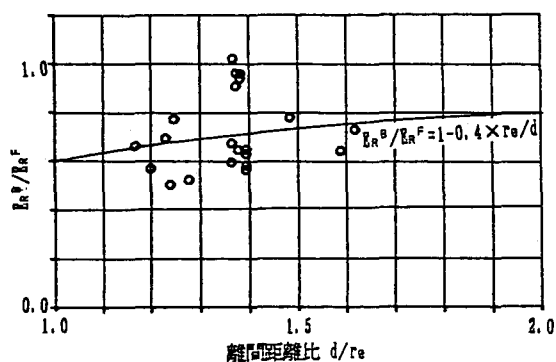


図5 離間距離比と E_R^B/E_R^F の関係

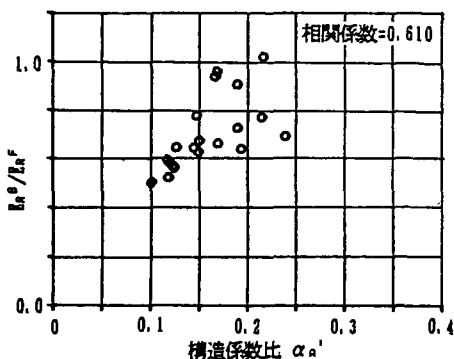


図6 構造係数比と E_R^B/E_R^F の関係

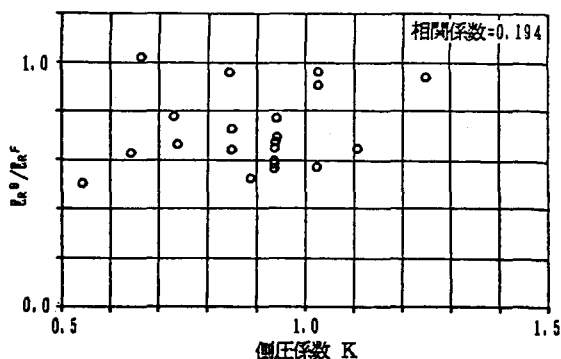


図7 側圧係数と E_R^B/E_R^F の関係

4. 結論

本解析によりわかったことは、以下のとおりである。

- ① 双設トンネルは、先行トンネルを掘削した後、後行トンネルを掘削するが、この後行トンネルの解析を行う場合には、式(3)を用いて地山の変形係数を修正する必要がある。
- ② 通常の軟岩地山において、トンネル掘削によるトンネル周辺地山の変形係数の低下を論ずる場合には、覆工の効果を考慮する必要がある。双設トンネル掘削において、先行トンネル掘削によるみかけの変形係数の低下は、離間距離比が小さい程、構造係数比が小さい程大きい。
- ③ 軟岩地山においては、双設トンネルの中心間隔が掘削幅の2倍を越えても⁶⁾、後行トンネルは先行トンネル掘削による影響を受ける。

参考文献

- 1) 西岡隆・松本嘉司：形状弾性歪エネルギーによるトンネル周辺地山の安定解析，土木学会論文集，No. 376，pp. 151-160，1986.
- 2) 杉本光隆・松本嘉司・西岡隆：エネルギー論に基づく双設トンネルの安定解析，土木学会論文集，投稿中.
- 3) 松本嘉司・西岡隆・鹿野正人：吹付コンクリートとロックボルトを用いたトンネルの特性と事前設計方法，土木学会論文集，No. 376，pp. 161-169，1986.
- 4) 桜井春輔：トンネル掘削に伴うゆるみ領域の研究，トンネルと地下，Vol. 14 No. 1，pp. 35-41，1983.
- 5) 中川徹・小柳義夫：最小2乗法による実験データの解析，東京大学出版会，pp. 163-176，1982.
- 6) 土木学会：トンネル標準示方書（山岳編）・同解説，土木学会，pp. 30-31，1977.