

清水建設(株)土木本部技術部 正会員 赤田 昌義
 千葉県松戸市 土木部 山口 隆男
 千葉県 土木部 河川課 木嶋 康雄
 清水建設(株)土木本部技術部 正会員 高崎 英邦

1. はじめに

合理的で経済的なトンネルの設計・施工を行なうためには、事前に地山の力学的特性を把握し、地山物性値特に地山変形係数を明らかにしておくことが大切である。しかし、事前に地山全体をマクロに捕え、地山変形係数を求めることは困難である。そのためトンネル掘削による変位の実測結果から地山の変位挙動に合う等価変形係数を逆解析により求めるいくつかの方法が提案されている。これらの方法は、有限要素法あるいは解析解により実測の変位に合致する等価な地山変形係数を試行錯誤より求めたり、さらには最小自乗法などを応用して一意的に決定するものなどである。ここでは、弾性有限要素法を利用した簡易な方法を提案し、連続体の土砂地山である千葉県・松戸市の国分川分水路事業トンネル工事に適用して地山変形係数を逆解析で求め、土質調査結果と対比する。

2. 土質とトンネル概要

トンネル周辺地山は、新世代第4紀に堆積した洪積層の台地である。洪積層は、砂・シルトなどから構成される成田層とその層を被って台地全体に広がる関東ローム層から成る。トンネル掘削部分の洪積層は、N値が30程度、均等係数が5以下、粘土・シルト分が10%程度の砂層から成り、トンネル天端から10m上方に凝灰質粘土およびインバートから5m下方に固結シルトの不透水層がある。地下水は、トンネル天端から50cm下方に自由水面があり、固結シルトの不透水層の下方には被圧された地下水が存在する。また、砂層の変形係数は孔内水平載荷試験より $360 \sim 480 \text{ kg/cm}^2$ の値が得られている。図-1に土質柱状図とトンネル標準断面図を示す。トンネルは掘削幅8.6m断面積 60.5 m^2 のNATMトンネルで、機械掘削による上半リングカット2段ベンチ工法(ベンチ長1.8m)を採用している。また、補助工法として地下水低下のために、バキュームディープウェル工法と坑内ウェルポイント工法が採用されている。

3. 地山変形係数の推定方法

従来から種々の方法を用いて計測結果から地山の変形係数を求める方法が提案されているが、ここでは、トンネル掘削前からの絶対変位量、

トンネルの支保とその設置時期すなわち支保反力の効果を考慮して地山変形係数を推定する。一般に、トンネルの切羽進行に伴い原地山からの絶対変位量は図-2の実線のように変化する。またトンネル支保を設置しなければ、切羽到達後点線のように変化するであろう。以上のことを加味して、全断面瞬時掘削、瞬時支保建込の2次元弾性FEMにより以下の手順で地山変形係数を求める。

- ① 計測位置の支保パターンをモデル化し、変位量 $(U-U_i)$ に相当するような地山変形係数を求める
- ② ①で求めた地山変形係数を用いて、支保を考慮しないすなわち無支保状態での変位量 S を求める。
- ③ ②で求めた変位量 S に切羽到達までの初期変位量 U_i を加えた全体変位量 U' を求める。
- ④ 全体変位量 U' に相当するような無支保状態での地山変形係数を求める。

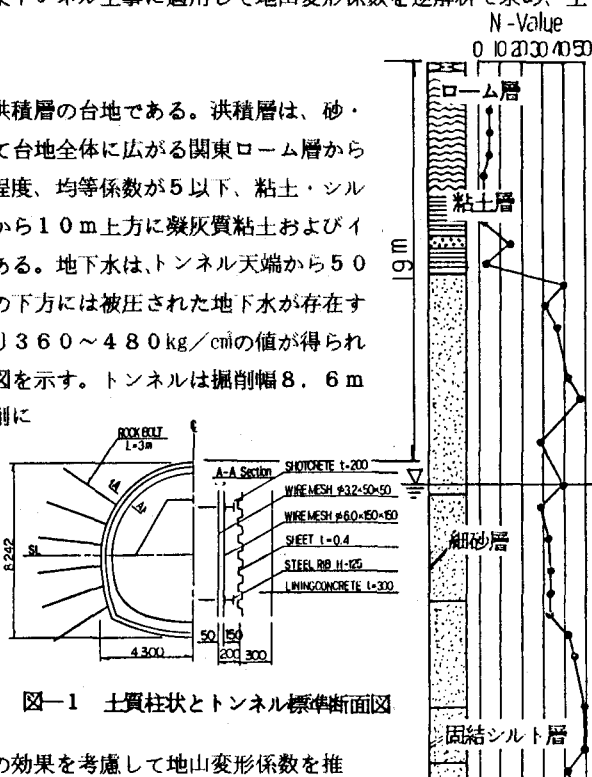


図-1 土質柱状とトンネル標準断面図

4. 逆解析結果と考察

4. 1 計測結果

トンネル掘削前に地表から埋設した地中変位計から得られた掘削に伴うトンネル天端の絶対変位量は、

$$U_i = 31.4 \text{ mm}, \quad U = 50.7 \text{ mm}$$

である。また、吹付けコンクリート（実測吹付け厚25cm）、鋼製支保工の平均軸力はそれぞれ20.3 t/m、16.4 t/mであり、合計の支保材に作用している実測荷重は36.7 t/mである。

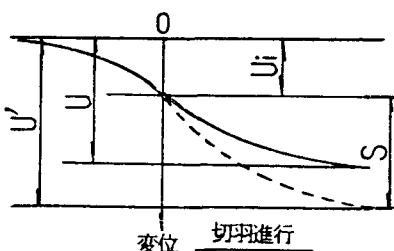


図-2 切羽進行と変位の関係

4. 2 解析条件

解析に際しては地山を図-3のようにモデル化し、トンネル支保については弾性体のロッド要素で表現する。また、支保工の入力定数を表-1に示す。

表-1 支保工の入力定数

材料	項目	入力定数
支保材 吹付け t=25 H-125 ctc-09	等価弾性係数 E	*1) kg/cm^2 3000
ロックボルト	弾性係数 E_R	$2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$
	断面積 A_R	*2) 5.027 cm^2

地山変形係数 E	ポアソン比 ν	単位体積重量 γ
0.222	0.40	1.55
0.122	0.40	1.70
1	0.35	1.80
0.644	0.35	1.85
1.044	0.35	1.90 (t/m^3)

注) E についてはトンネル周辺の細砂層を1としたときの比率で示す

図-3 地山のモデル化と地山物性値

*1) 支保材（吹付けコンクリートと鋼製支保工）の等価弾性係数 E は、壁面の接線方向のひずみ ϵ_θ と支保材に発生している応力 σ_θ から求める。

$$\epsilon_\theta = U a / r, \quad \sigma_\theta = E \epsilon_\theta \quad U a : \text{半径方向の変位}, \quad r : \text{トンネル半径}$$

$$\therefore E = \sigma_\theta / \epsilon_\theta = \sigma_\theta \cdot r / U a = [36.7 \times 10^3 / (100 \times 25)] \times 430 / 1.93 \div 3000 \text{ kg/cm}^2$$

*2) 単位奥行き 1.0 m 当りに換算した。

4. 3 解析結果と考察

解析結果のグラフを図-4に示す。グラフ上で①は支保を考慮した場合の地山変形係数と変位の関係であり②は無背詰状態でのそれである。このグラフを利用して上記の手順により地山変形係数を求めると、

$$E = 440 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{細砂層の地山変形係数})$$

となる。この結果は、事前の孔内水平載荷試験結果と良い一致をする。その理由として、

- ① 初期の地山変位量を考慮していること
- ② 支保材の弾性係数決定において、実測値を利用した等価弾性係数を用いていること
- ③ 地山が比較的均質な一様連続体であること

等があげられる。

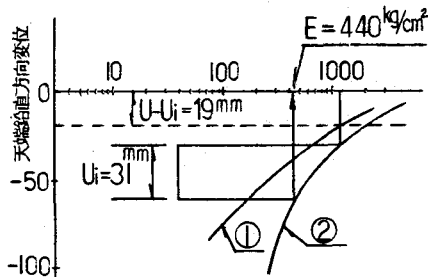


図-4 地山変形係数と変位の関係

以上述べたごとく、ここで示した方法は比較的良好な結果を導いた。地山の等価変形係数の決定は、順解析の際の設計入力定数の設定さらには計測管理時に必要不可欠な重要事項であり、今後多くの例に適用して改善を図っていく必要がある。

おわりに、(財)国土開発技術研究センター国分川分水路事業トンネル工法検討委員会の福岡正巳委員長（東京理科大教授）をはじめとする多くの方々に多大の御指導を賜ったことを感謝します。