

粘弾性地山に開削するトンネルの変形予測について

大阪大学工学部 正員 伊藤富雄  
 同上 正員 久武勝保

(1) はじめに

近年、トンネルや地下発電所などの地中構造物が巨大化・長大化の傾向を示しはじめ、また非常に苛酷な地質条件の下においても建設を余儀なくされつつある。そのために、地盤特性の的確な把握がより一層必要となって来たり、現場調査試験の必要性が認識されるようになった。現場調査試験は一般に広い面積と多大の費用、それに長時間の準備期間を必要とする事により、簡単で比較的信頼性の高いボアホールによる種々の方法がよく利用される。しかしながらその結果を定量的に評価して設計施工へ反映させるための手段は今だ十分だと言いがたい。特に軟弱地盤に開削されるトンネルにおいては、その断面が時とともに縮小するためにLining 施工時に所定の内空断面を保持できず、縫い返しをしなければならぬことがある。その原因の一つにボアホールによる調査結果と地盤の変形予測に対していかに取り入れるかという研究が立遅れしていることが挙げられる。

本報告では以上の点を考慮し、ボアホールの孔径変位の測定結果のみを利用して、トンネルの経時変位を予測し、余掘りの量やLining 施工の適正時期を求める方法を述べる。

(2) 変位と地山外力、力学定数との関係

一般に地山の初期応力はFig.(1)のように表わすことができ、Fig.(2)に示すごとくy軸と新しい座標系(X', y', z')のy'軸とを一致させたX-Z面内で回転させた場合、新しい座標系におけるボアホールの半径方向の変位  $u_r$  は次のようになる。

$$\{u_r(\theta, z), u_z\} = k_{11}\sigma_z + k_{21}\sigma_y + k_{31}\sigma_z + k_{41}\tau_{xy} + k_{51}\tau_{yz} + k_{61}\tau_{yz} \quad (1)$$

$$k_{11} = \{ \cos^2\theta + (3-4\nu)\cos^2\theta \cos 2\theta_m \} / (4G), \quad k_{21} = \{ 1 - (3-4\nu)\cos 2\theta_m \} / (4G)$$

$$k_{31} = \{ \sin^2\theta + (3-4\nu)\sin^2\theta \cos 2\theta_m \} / (4G), \quad k_{41} = (3-4\nu)\cos\theta \sin 2\theta_m / (2G)$$

$$k_{51} = -\{ \sin 2\theta + (3-4\nu)\sin 2\theta \cos 2\theta_m \} / (4G), \quad k_{61} = -(3-4\nu)\sin\theta \sin 2\theta_m / (2G)$$

任意方向のボアホールの直径変位を測定することより所定の方向に開削されるトンネルの変形を予測する為には、一本のボアホールで3点の直径変位を測定すれば、少くとも3本のボアホールを穿孔しなければならぬ。すなわち4個の  $\{u_r(\theta, z), u_z\}$  の測定値を式(1)に代入し、4個の6元一次方程式を最小自乗法により解けば良い。ところで式(1)より明らかなるように、同一変形状態を表す初期応力  $\sigma_{ij}$  と力学定数  $G$  との組合せは幾通りもあることがわかる。すなわち、変位が与えられた時  $\sigma_{ij}$  と  $G$  とは一義的には定まらない不定方程式群が得られることより初期応力  $\sigma_{ij}$ 、力学定数  $G$  の状態下に開削したトンネルの変位は

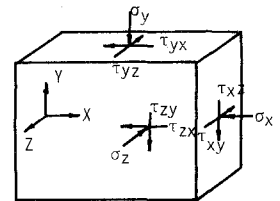


Fig.(1)

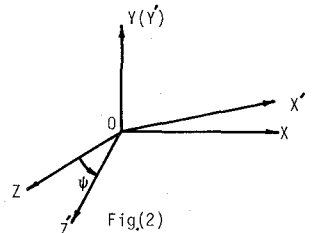


Fig.(2)

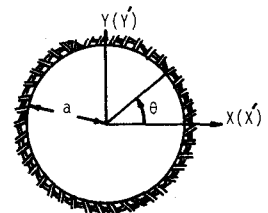


Fig.(3)

初期応力 $\sigma_0$ 、力学定数 $dG$ なる地山に南削したトンネルの変位と同一であることがわかる。またポアソン比 $\nu$ も各応力の係数の中に含まれることより、実際の地山のポアソン比 $\nu$ と全く異なつた任意のポアソン比の値を代入しても、それに対応した $\sigma_0$ が最小自乗法により決定されることから結局、 $\nu$ にも任意の値を仮定して式(1)を定めおけばよいこととなる。ところでクリープ特性の大きい地山において問題となるのはトンネルを南削してからLiningを施すまでの間にトンネル内空断面がどれだけ縮小されるかということである。すなわち、Lining施工時に所定の内空断面が保持出来なければ縫い返しをしなければならなくなるのでLining施工時期を早めるか、あるいは余掘りを大きくとらなければならなくなる。そこでトンネルの経時変形を予測するために、ボアホール $\sigma_0$ の経時変位を測定しておけば式(1)を利用することより $\sigma_0(t)$ が得られる。明らかに地山外力 $\sigma_0$ は時間的に変化しなく力学定数が変化するのであるけれどもこれらの間には不定方程式の関係より変位に対しては見掛上同一の効果をおぼすこととなる。すなわち、次式

$$\{u_r(\theta, t_m)/a\}_{1/2} = k_{11}\sigma_x(t_m) + k_{21}\sigma_y(t_m) + k_{31}\sigma_z(t_m) + k_{41}\sigma_{xy}(t_m) + k_{51}\sigma_x + k_{61}\sigma_y(t_m) \quad (2)$$

より $t=t_m$ において9個の直径方向の変位を最小自乗法より求めれば、見掛上の経時外力が求められることとなり、それを用いてトンネルの変形を予測することができよう。

### (3) 考察

一般に線形粘弾性体の構成方程式はせん断変形と体積変形を分離して

$$e_{ij}(t) = \int_0^t J(t-\tau) \dot{\sigma}_{ij}(\tau) d\tau, \quad e_{kk}(t) = \int_0^t J_v(t-\tau) \dot{\sigma}_{kk}(\tau) d\tau \quad (3)$$

と表わすことができ、トンネルの変位は

$$u_r(t) - u_0(t) = \int_0^t \left\{ \sigma_x(\tau) \left[ 3 - 4 \frac{J_1(\tau)}{2J_1(\tau) + J_2(\tau)} \right] + \sigma_y(\tau) \left[ 3 - 4 \frac{J_2(\tau)}{2J_1(\tau) + J_2(\tau)} \right] + \sigma_z(\tau) \left[ 3 - 4 \frac{J_3(\tau)}{2J_1(\tau) + J_2(\tau)} \right] \right\} e^{\alpha\tau} d\tau \quad (4)$$

( $e^{\alpha\tau}$ はラプラス逆変換)となる。 $\sigma_{ij}$ 、 $J_1(t)$ および $J_2(t)$ が既知の場合、トンネルの経時変位を上式より求めたものと、地山外力、クリープ特性が未知でありボアホールの経時変位のみをinputとして式(2)に代入して $\sigma_0(t)$ を求め、それよりトンネルの経時変位を予測したものとをFig.(4)に示す。ただし式(2)の中に入っている力学定数は任意の値を用いてもよいことより計算を容易にするために $\nu=1$ 、 $\nu=0$ とした。Fig.(4)よりボアホールの変位測定のみによってトンネルの経時変位を非常に良く予測することができると言えよう。また、Fig.(4)より内空半径が3.6m必要であれば、トンネル南削後3日以内にLiningを施工しなければならぬこととなり、それが不可能であれば南削時のトンネル半径を大きくして余掘りを多くとらなければならない(Fig.(5))。

詳細は講演当日にて述べる。

$$J_1(t) = \frac{1}{26} + \frac{1}{26} (1 - \exp(-t/\tau_1))$$

$$J_2(t) = \frac{1}{2K} + \frac{1}{2K} (1 - \exp(-t/\tau_2))$$

$$\sigma_x = 10 \text{ kg/cm}^2, \sigma_y = 12 \text{ kg/cm}^2, \sigma_z = 6 \text{ kg/cm}^2,$$

$$\tau_{xy} = 4 \text{ kg/cm}^2, \tau_{xz} = 3 \text{ kg/cm}^2, \tau_{yz} = 1 \text{ kg/cm}^2,$$

$$G = 200 \text{ kg/cm}^2, G^* = 200 \text{ kg/cm}^2,$$

$$K = 180 \text{ kg/cm}^2, K^* = 130 \text{ kg/cm}^2,$$

$$\tau_1 = 2 \text{ days}, \tau_2 = 2 \text{ days}, a = 378 \text{ cm}.$$

