

大阪大学工学部 正員 久武 勝 保
近畿日本鉄道 正員 中村 雄二郎
鹿島建設 正員 中川 淳一

1 はじめに

トンネルの解析では、個々の現場において解析条件が異なるため、解析手法の適用性という観点から、できるだけパラメータの少ない、簡易な手法が要求される。本研究では、三次元的な切端進行の影響、掘進速度、及び地山と覆工のクリープ特性を考慮して、従来の解析手法に比較してはるかに簡単な、トンネルの解析手法を提案し、提案した解析手法の妥当性の検証を行なったものである。

2 解析手法の概略

(1) 素掘トンネルの変位

いま、粘弾性地山内に、図-1のようなトンネルを速度 V で施工する場合を想定する。この場合のトンネル内面及び覆工の変位は既に求められており¹⁾、覆工施工時刻を時間の基準($t_i=0$)にとれば、その後には生じる素掘トンネルの内面変位 ΔU_0 は、次のように与えられる。

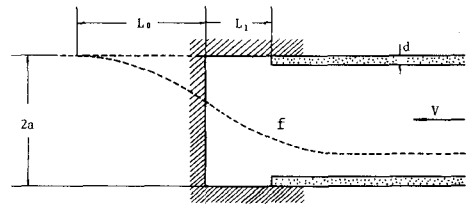


図-1 トンネルと覆工の幾何学的関係

$$\{\Delta U_0(t_i)\} = Q(t_i) [K_0(t=0)]^{-1} \{F_0\}, \quad Q(t_i) = \int_0^{t_i+t_i} T(t_i+t_i-\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} f\{V(\tau-t_0)\} d\tau - \int_0^{t_i} T(t_i-\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} f\{V(\tau-t_0)\} d\tau \quad (1)$$

ここに、 L_0 、 L_1 は図-1に示す通りであり、 $t_0=L_0/V$ 、 $t_i=(L_0+L_1)/V$ 、 f は図-1に示すように、トンネル境界及び仮想トンネル境界での変位の特性曲線^{2),2)}、 $T(t)$ は地山のクリープ関数 $\phi(t)=T(t)/E_0$ (E_0 : 弾性定数)に含まれる無次元時間関数、 $\{F_0\}$ はトンネル境界で解放される節点カベクトル、 $\{K_0(t=0)\}$ はトンネル横断面内での地山の二次元剛性マトリックスである。ただし、地山のポアソン比は、経時的に変化しないとする。

(2) 吹付コンクリート施工後の変位

次に、図-1のように覆工を施工しつつ切端が進む場合について、覆工施工後のトンネル内面変位 ΔU を求めることにする。いま、覆工のクリープ特性³⁾を考慮して、そのクリープ関数が式(1)の $T(t)/E_0$ (E_0 : 覆工の弾性定数)で表わされ、また覆工のポアソン比 μ が経時的に変化しないとすれば、覆工の変位は、

$$\begin{Bmatrix} \Delta U^e(t_i) \\ \Delta U^i(t_i) \end{Bmatrix} = [K_e(t=0)]^{-1} \begin{Bmatrix} 0 \\ \bar{F}_2(t_i) \end{Bmatrix}, \quad \{\bar{F}_2(t_i)\} = \int_0^{t_i} T(t_i-\tau) \left\{ \frac{\partial}{\partial \tau} \bar{F}_2(\tau) \right\} d\tau \quad (2)$$

ここに、 ΔU^e は覆工外面上の節点以外の覆工の節点変位、 ΔU^i は覆工外面上の節点変位、 $[K_e(t=0)]$ は覆工の弾性剛性マトリックス、 $\bar{F}_2(t_i)$ は、今のところ未知であり、覆工外面に作用する経時地圧に関する節点カベクトルである。一方、覆工施工後には、トンネル内面の節点には、覆工外面から経時的に $-\bar{F}_2(t_i)$ が作用するので、覆工施工後の地山の変位増分 ΔU は、式(1)を用いて、次のようになる。

$$\begin{Bmatrix} \Delta U^e(t_i) \\ \Delta U^i(t_i) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta U_0^e(t_i) \\ \Delta U_0^i(t_i) \end{Bmatrix} - [K_0(t=0)]^{-1} \begin{Bmatrix} \bar{F}_2(t_i) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここに、 ΔU^e は、トンネル内面上の節点以外の節点の変位増分、 ΔU^i は、トンネル内面上の節点の変位増分である。ここで、覆工施工後において、覆工外面とトンネル内面の変位は同一であるので、式(2)の ΔU^e を ΔU^i としたのち、式(2)、(3)から $\bar{F}_2(t_i)$ を消去すれば、次式が得られる。

$$\begin{Bmatrix} \Delta U^e(t_i) \\ \Delta U^f(t_i) \\ \Delta U^g(t_i) \end{Bmatrix} = Q(t_i) [K_{g+e}(t=0)]^{-1} \begin{Bmatrix} 0 \\ P_0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

ここに、 $[K_{g+e}(t=0)]$ は、地山と覆工から成るトンネル横断面内の弾性剛性マトリックスである。上式において、 $[K_{g+e}(t=0)]^{-1} \{0, P_0, 0\}^T$ は、覆工外面とトンネル内面とで共有する節点に、 P_0 なる外力を作用させた場合の、覆工及び地山の弾性変位に相当する。ただし $\{ \}^T$ は転置を示す。したがって、式(4)は次のように書くこともできる。

$$\begin{Bmatrix} \Delta U^e(t_i) \\ \Delta U^f(t_i) \\ \Delta U^g(t_i) \end{Bmatrix} = Q(t_i) \begin{Bmatrix} \bar{U}^e \\ \bar{U}^f \\ \bar{U}^g \end{Bmatrix} \quad (5)$$

ここに、 $\bar{U}^e, \bar{U}^f, \bar{U}^g$ はそれぞれ、覆工外面以外の覆工の節点変位、覆工外面の節点変位、トンネル内面以外の地山の節点の変位である。要するに、覆工と地山を弾性体と仮定し、覆工と地山の境界の節点に外力 P_0 を作用させて、弾性変位 $\bar{U}$ を求めておけば、特性曲線す、無次元時間関数 $T(t)$ 、時間 t とち、掘進速度 V によって決定されるスカラー量 $Q(t)$ を $\bar{U}$ に乘ずることによって、覆工施工後の変位が、式(5)で求められるわけである。したがって、覆工が施工されるまでは式(1)により、また、覆工施工後は式(5)によって、変位が求められる。

③ 解析手法の妥当性の検証

等方初期応力 P_0 の作用する地山内に、図-1のような円形トンネルを一定速度 V で掘削し、 $L_1=0$ の状態では覆工を施工した場合について、覆工外面の変位は既に与えられている³⁾ので、同一条件のもとで、本解析手法により解析を行い、その結果を理論解と比較したものが図-2である。図-2の横軸は覆工施工後の時間、縦軸は覆工施工後のトンネルクラウンにおける変位増分を表わしており、両者は非常によく一致していることがわかる。

また、図-3は、重力により初期応力の作用する粘弾性地山内に、図-4のようなトンネルも一定速度 V で掘削した場合の地表面次下について、境界要素法(BEM)により求めた三次元粘弾性解析結果と、提案した解析手法により求めた解析結果とを比較したものである。なお、この場合においては、すはトンネル縦断地表面の次下の特性曲線が用いられる。図-3の縦軸は、トンネル縦断地表面測点における切端通過後の次下増分を、トンネル半径 a 、土の単位重量 γ 、及び土のせん断弾性定数 G で無次元化したものであり、横軸は切端通過後の時間である。両者はよく一致していることがわかる。

以上のことから、本解析手法は妥当であると考えられる。

- 参考文献 1) Ito, T. and M. Hisatake; Proc. 10th I.C.S.M.F.E., Vol. 1, Section 2, pp. 311-314, Stockholm, 1981.
2) 久武, 伊藤; 土木学会論文報告集投稿中。 3) 鈴木; コンクリート工学, Vol. 16, No. 1, pp. 29-37, 1978.
4) Ito, T. and M. Hisatake; Proc. 4th Int. Conf. Numer. Meth. Geomech., Edmonton, 1982.

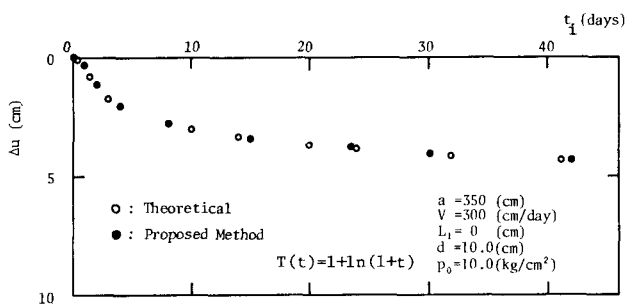


図-2 覆工施工後のトンネル内面変位の比較

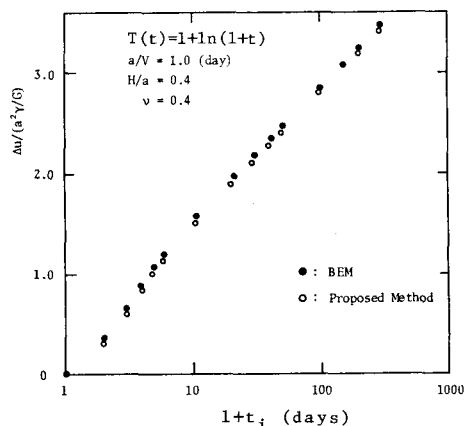


図-3 トンネル縦断地表面測点の経時次下

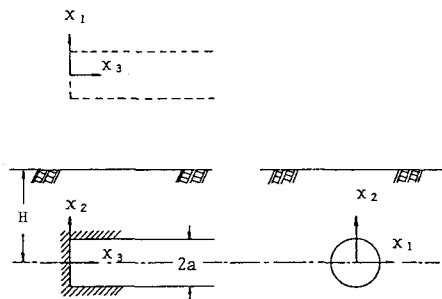


図-4 トンネルの幾何学的関係