

豊田高専 正会員 ○伊東 孝
 中部電力(株) 正会員 土山 茂希
 豊田高専 正会員 赤木 知之

1. まえがき

NATMにおいては、施工中のコンバージェンス等をたえず計測管理しながら、その挙動の変化に応じて柔軟に工法を変えてゆけることが理想とされる。しかし、現実には計測結果を正しく評価し、その結果を施工へ迅速にフィードバックする具体的方法が基準化できなかつたり、管理基準値を明確に定めることができず、NATMの本質を生かせない場合が多い。

トンネル内空変位は経時的に変化する。たとえ地山が弾性体であっても、切羽の進行とともに応力の解放率が経時的に増大し、変位は時間とともに増加する。一方、地山が時間依存の変形特性(クリープ)を顕著に有しておれば、その変位が重なり合って計測されることになる。NATMにおいては、トンネル掘削初期の段階における観測変位から、これら経時的な挙動の予測、すなわち収束値および収束時期を予測することが主要課題とされている。

トンネル掘削により生じる内空変位は、切羽距離(掘削速度が一定であれば時間と同等)に依存する傾向が強いということで、高橋¹⁾らは、これらを指数関数で表し、切羽距離 $1d$ (トンネル径)における変位と収束値との相関関係を用いて将来予測を行っている。関²⁾らは、初期における計測値を同じ指数関数に最小二乗近似してパラメータを決めている。将来挙動を予測するということは、その関数近似をいかにするかということでは決ってしまうが、土肥³⁾らは指数関数、ワイブル関数および双曲線関数による近似を同じ計測データに適用して比較検討しており、久武⁴⁾らは、対数関数近似している。

いずれにしろ、近似される関数がトンネル掘削によって生じる変位のメカニズムを反映しているものであれば、その予測精度の向上が期待できる。従来は、切羽距離に依存した弾性変位と地山のクリープ特性に依存した変位を分離することは困難であるとされてきた。そこで、本研究ではその分離を試みるべく、線形粘弾性地盤中に円形トンネルが一定の掘進速度で掘削された場合の壁面変位を、等価初期地圧⁵⁾の概念を導入して理論的に求め、その結果を種々考察した結果について報告する。

2. 等価初期地圧⁵⁾について

切羽進行に伴うトンネル壁面の弾性変位は、3次元有限要素解析によらなければ求められないが、もしトンネルが円形で地山が均質であるとすれば、トンネル軸を対称軸とした軸対称問題として解析できる。解析例を図-1に示す。ポアソン比(ν)を3種に変えた場合の結果であるが、いずれも変位(u)が切羽距離(x)に対して次式のような指数関数で近似できる。

$$u(x) = u_0 + u_1(1 - e^{-x/l}) \quad (1)$$

図中に、式(1)で近似した曲線も描かれている。

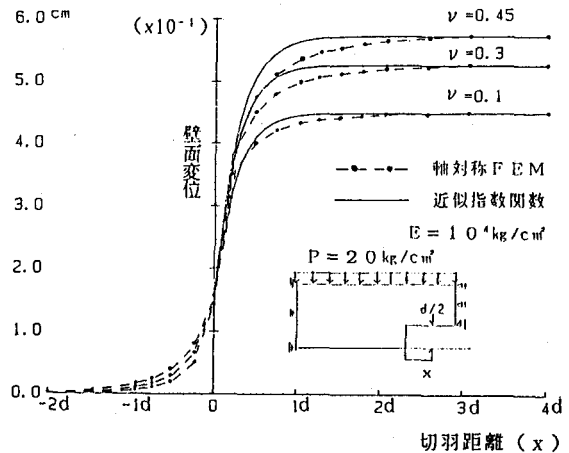


図-1 切羽進行に伴う壁面変位

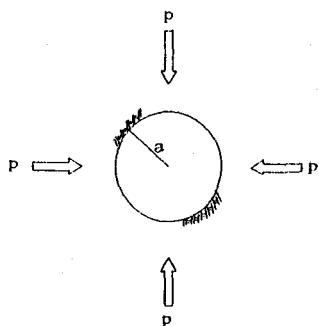


図-2 円形トンネル

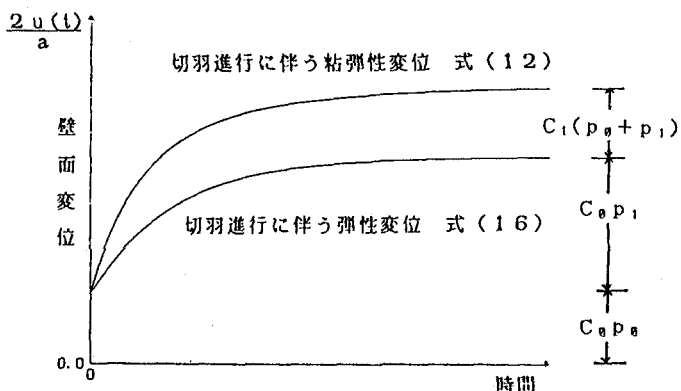


図-3 壁面の弾性および粘弾性解による変位

一方、図-2に示すような円形トンネル壁面の弾性変位は、厚肉円筒理論による解

$$u_r = \frac{1+\nu}{E} \left\{ \frac{b^2}{b^2-a^2} (1-2\nu) r + \frac{a^2 b^2}{b^2-a^2} \cdot \frac{1}{r} \right\} p$$

より、 $b \rightarrow \infty$ 、 $r = a$ とした場合の変位

$$u_{r=a}^* = \frac{2a(1-\nu^2)}{E} p$$

と、 $b \rightarrow \infty$ 、 $a = 0$ 、 $r = a$ とした掘削前の変位

$$u_{r=a}^0 = \frac{a(1+\nu)(1-2\nu)}{E} p$$

との差として次式のように求められる。

$$u = u_{r=a}^* - u_{r=a}^0 = \frac{a(1+\nu)}{E} p \quad (2)$$

ここに、 a ：トンネル半径、 p ：初期地圧、 E ：地山の弾性係数。したがって、式(1)と式(2)が等しくなるためには、式(2)における初期地圧が、

$$p(x) = p_0 + p_1 (1 - e^{-x/f'}) \quad (3)$$

と表されればよいことがわかる。また、切羽が定速度(v)で進行するものとすれば、 $x = vt$ であるから、式(3)は、

$$p(t) = p_0 + p_1 (1 - e^{-t/f'}) \quad (4)$$

と表される。式中のパラメータは、式(1)、(2)、(3)より

$$p_0 = \frac{E}{a(1+\nu)} u_0, \quad p_1 = \frac{E}{a(1+\nu)} u_1, \quad f' = \frac{f}{v} \quad (5)$$

として求められ、図-1の結果より、これらの値が次のように決められる。

$$\frac{p_0}{p_0 + p_1} = 0.3, \quad \frac{p_1}{p_0 + p_1} = 0.7, \quad f' = 0.25d \quad (6)$$

以上のことは切羽の進行にともなって、変位計測点の応力解放等が変化することによって、変位が変化すると考えれば、その挙動は最初からトンネルが開削されており、そこに働く地圧が式(4)のように変化することと等価であるとし、平面ひずみ問題として解析できることを示している。式(4)を等価初期地圧と呼ぶ。

3. 粘弾性地山のトンネル内空変位

コンプライアンスのせん断成分 $C (= \frac{2(1+\nu)}{E})$ を用いると、式(2)は次のように書き換えられる。

$$u = \frac{a}{2} C P \quad (7)$$

粘弾性体に対する解は、対応原理⁶⁾を上式に適用して、ラプラス変換形で

$$\bar{u}(s) = \frac{a}{2} s \bar{C}(s) \cdot \bar{p}(s) \quad (8)$$

と表され、この逆変換は次式となる。

$$u(t) = \frac{a}{2} \int_0^t C(t-\tau) \frac{d p(\tau)}{d \tau} d \tau \quad (9)$$

ここに、 $C(t)$ はクリープ関数のせん断成分で、いま3要素モデルによって

$$C(t) = C_0 + C_1 (1 - e^{-t/T_c}) \quad (10)$$

と表されるとし、地圧 $p(t)$ は式(4)とする。

式(4)および(10)にラプラス変換を施し、それらを式(8)に代入すると、

$$s \bar{C}(s) \bar{p}(s) = \frac{(C_0 + C_1)(p_0 + p_1)}{s} + \frac{C_1 p_1}{s + 1/T_c} - \frac{C_1 p_0}{s + 1/T_c} + \frac{C_1 p_1}{s + 1/f} - \frac{C_0 p_1}{s + 1/f} \quad (11)$$

となる。この逆変換を取ると、トンネル壁面変位の時間依存式が次のように得られる。

$$u(t) = \frac{a C_0}{2} \{ p_0 + p_1 (1 - e^{-t/T_c}) \} + \frac{a C_1}{2} [p_0 (1 - e^{-t/T_c}) + p_1 \{ 1 - \frac{1}{T_c - f} (T_c e^{-t/T_c} - f e^{-t/f}) \}] \quad (12)$$

特別な値として、

$$t=0 \text{ の場合 } u(0) = \frac{a}{2} C_0 p_0 \quad (13)$$

$$t=\infty \text{ の場合 } u(\infty) = \frac{a}{2} (C_0 + C_1)(p_0 + p_1) \quad (14)$$

$$T_c = f \text{ の場合 } u(t) = \frac{a}{2} \{ p_0 C_0 + (p_0 C_1 + p_1 C_0)(1 - e^{-t/f}) \} \quad (15)$$

であり、弾性体の場合は $T_c = 0$ 、 $C_1 = 0$ として

$$u_e(t) = \frac{a}{2} C_0 \{ p_0 + p_1 (1 - e^{-t/T_c}) \} \quad (16)$$

となり、式(2)に式(4)を代入した場合と一致する。したがって、式(12)は切羽進行による弾性解と式(17)に示す切羽進行を考慮した粘性解

$$u_v(t) = p_0 C_1 (1 - e^{-t/T_c}) + p_1 C_1 \{ 1 - \frac{1}{T_c - f} (T_c e^{-t/T_c} - f e^{-t/f}) \} \quad (17)$$

の和となっていることがわかる。

以上の結果を変位時間曲線として図示したのが図-3である。

4. 考察

式(6)で得られた等価初期地圧のパラメータは、十分に深い円形トンネルの場合であり、これらパラメータは、トンネル形状、土被り圧、地質の不均一性、初期地圧状態、および施工方法等に影響されるので、実際のトンネルに式(12)を直接適用するのは困難であるが、3次元有限要素解析などを行って、あらかじめ、 p_0 、 p_1 、 f が求められトンネル形状の係数も得られておれば、そのトンネルの管理基準値を定めるのに、式(12)は有効な手段となろう。

従来、計測管理は変位あるいは変位速度に注目して行われているが、さらに、全過程の挙動に注目した運

延スペクトル解析⁷⁾を行うと、より精度の高い計測管理が可能となるものと思われる。また、ここでは地山のクリープ特性を3要素モデルによる指数関数で表したが、他に対数関数あるいは双曲線関数の方がより妥当である場合もあり、それらの選択も遅延スペクトルを求めることによって明快に行うことが可能となろう。例えば、図-4に示した4種類の関数によるクリープ曲線から、それらの遅延スペクトルを求め図-5に示す。クリープ曲線には、それほどの違いが認められないにもかかわらず、遅延スペクトルには大きな違いが認められる。したがって、あらかじめトンネル内空変位の時間依存特性を表す式(12)の遅延スペクトルを求め、パラメトリックにその特性を把握しておけば、実際の計測値をスペクトル解析しながら、より厳密にトンネル挙動の将来予測が可能となろう。

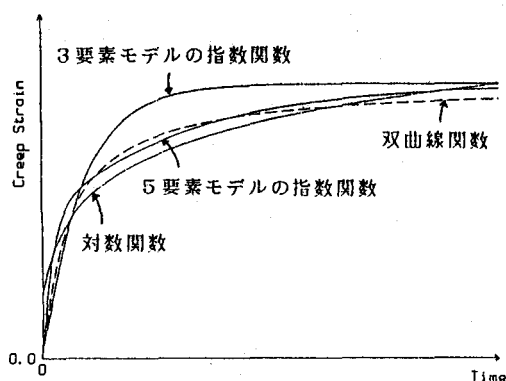


図-4 各種関数によるクリープ曲線

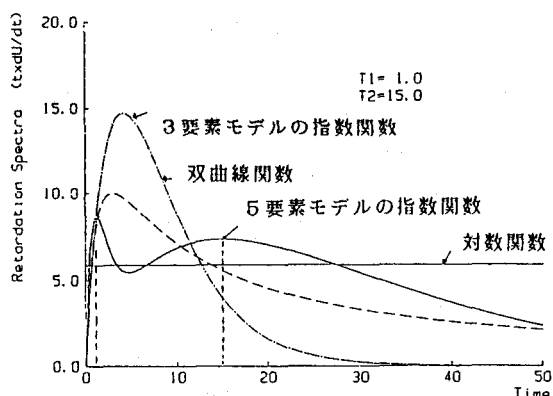


図-5 各種のクリープ関数に対する近似遅延スペクトル

5. あとがき

粘弾性地山中に円形トンネルが等速で掘削進行する場合のトンネル壁面変位の厳密解を求めた。この結果は、遅延スペクトル解析されることによって有効に利用し得ると考えるが、その具体的な方法の提案は次回に譲ることとする。

参考文献

- 1) 高橋、佐藤、関、岡田；変形の大きいトンネルでの計測管理事例、土と基礎N0.337, PP.53-58, 1986
- 2) 関、中村、岡田、三輪；NATMにおける変位予測法の適用性、第18回岩盤力学に関するシンポジウム、PP.21-25, 1986
- 3) 土肥、高橋、中島；トンネルの施工管理(その1)、第18回岩盤力学に関するシンポジウム、PP.26-29, 1986
- 4) 久武、加藤；三次元逆解析法の時間依存性トンネルへの適用、土木学会第42回年次学術講演回概要集、PP.506-507, 1987
- 5) S.Sakurai; Approximate Time-dependent Analysis of Tunnel Support Structure Considering Progress of Tunnel Face, Int. J. Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol.2, pp.159-175, 1978
- 6) Schapery, R.A.; A Method of Viscoelastic Stress Analysis using Elastic Solution, Jour. of Franklin Ins. Vol.279, No.4, pp.208-289, 1965
- 7) 赤木知之；レオロジーモデル定数の一決定法、土と基礎、Vol.25, No.3, pp.47-52, 1977

(51) Evaluation of Time-Dependent Behavior of the
Convergence caused by Tunnel Excavation

by

T.Ito

(Toyota College of Technology)

S.Tsuchiyama

(Chubu Electric Power Co., Inc.)

T.Akagi

(Toyota College of Technology)

ABSTRACT

In tunnel construction by NATM, forecasting of convergence by initial observation is very important.

Convergence is caused by not only the progression of the tunnel face, but also the time-dependent mechanical properties of the underground rock mass.

The tunnel considered in this paper is circular in shape, and is assumed to excavated in constant velocity in the isotropic linear visco-elastic homogeneous media.

In order to clarify these two effects, the equation expressing the displacement of tunnel face caused by these two effects is proposed by introducing the equivalent initial stress. Using the equivalent initial stress, the three-dimensional effects of the tunnel face are taken into the plane strain consideration.