

(56) トンネル内空変位の遅延スペクトル解析と計測管理

豊田高専 正会員 ○赤木知之

豊田高専 正会員 伊東 孝

中部電力(株)正会員 土山茂希

A Method of Tunnel Construction Control based on Retardation Spectral Analysis of Convergence

by

T.Akagi and T.Ito

(Toyota National College of Technology)

S.Tsuchiyama

(Chubu Electric Power Co.,Inc.)

Abstract

At the construction of tunnels by NATM, it must be very important to forecast the convergence from field measurements carried out in an early stage of excavation. Convergence is caused by not only the progression of tunnel face, but also the time-dependent properties of rock mass. So it has been very difficult to predict accurately the behavior of ground mass around tunnel.

This paper deals with a method of evaluating the tunnel stability based on the retardation spectral analysis of convergence. The method depends on the exact solution of convergence. The tunnel considered in this paper is circular in shape, and is assumed to be excavated in constant velocity in the isotropic linear visco-elastic homogeneous media. In addition to these conditions the equivalent initial stress is introducing. The exact solution of convergence was obtained under these conditions using correspondence theory. It will be possible to evaluate the stability of tunnel, because the exact solution is separately exhibited, one due to the progression of tunnel face and another due to the time dependent properties of rock mass.

1. はじめに

トンネル施工における計測管理とは、掘削に伴う現時点における地山の挙動を計測し、その結果から内空変位の収束時期および最終変位を予測することである。この予測が正しく行われれば、施工上における綿密な対策工が可能となり、二次覆工時期および増し支保の必要性などの判定がなされる。

トンネル掘削によって生じる内空変位は、一般に経時的に変化する。あるいは、切羽距離に依存すると見る場合もある。すなわち、内空変位のメカニズムには、掘削が進み変位計測点から切羽が離れるにしたがって初期地圧の解放率が高くなり、それに伴う弾性変位と地山のクリープ特性による非弾性変位が考えられる。前者はまさしく切羽距離に依存した変位であり、後者はたとえ切羽の進行が停止し

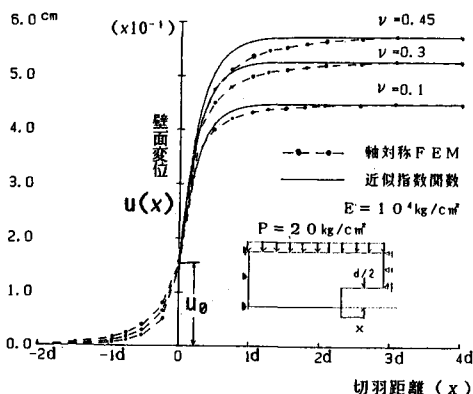


図-1 切羽進行に伴う壁面変位

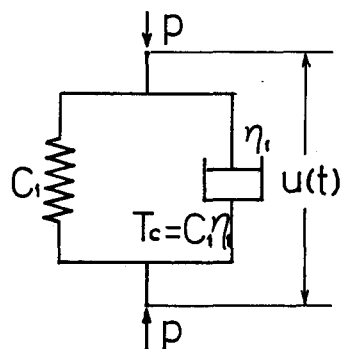
て地山の応力状態に変化がなくとも、内空変位が経時的に増加する現象を呈する。したがって両者が重なり合って現れる実際のトンネルでは、その挙動はきわめて複雑なものとなり、正しい応答関数を導入することはほとんど不可能に近く内空変位の収束時期および最終変位量を正確に予測することはきわめて困難なものとなっている。

現実には、これらの困難を避け、次式に示すような切羽距離に対する簡単な指数関数を導入して、これらの予測を行っている。¹⁾

$$u(x) = u_0(1 - e^{-\beta x}) \quad (1)$$

ここに、 $u(x)$:内空変位、 u_0 :収束内空変位、 x :切羽距離である。この手法は、円形トンネルに対する軸対称FEM解析によれば、ある断面での切羽進行に伴う内空変位が、図-1に示されるように指数関数で近似できるような挙動を示すことに依存している。

一方、クリープ現象を研究する場合の基礎となる粘弾性理論では、材料の時間依存挙動を表す基本モデルとして図-2に示すフォークトモデルが使われる。このモデルのステップ入力(p)に対する応答関数が、次式に示すように式(1)と同形の指数関数となる。



$$u(t) = C(t) \cdot p = C_1(1 - e^{-t/T_c}) \cdot p \quad (2)$$

図-2 フォークトモデル

ここに、 $u(t)$:応答変位、 $C(t)$:クリープ関数、 C_1 :バネコンプライアンス、 $T_c = C_1 \eta_1$:遅延時間、 p :ステップ入力である。ただし、この場合の変数は時間(t)となる。

したがって、もし切羽の進行速度が一定であるとすれば、式(1)における変数である切羽距離は時間変数に置き換えられるので、式(1)と式(2)は重ね合わせることができ、たとえ地山のクリープ的性質が顕著な場合でも、式(1)だけでトンネル挙動の予測を行っている。しかし、現実には全く異なるメカニズムによるものを単独の関数で評価しようとすることに無理があり、それほど高い予測精度は得られていないようである。

著者らは、そのような問題に対処するために、これら二つのメカニズムを分離すべく、粘弾性地山中を円形トンネルが定速度で掘削される場合の内空変位を、等価初期地圧の概念²⁾を導入して厳密に求めた³⁾。本報告は、その解をスペクトル解析し、トンネルが安定に向かっている場合や不安定な要素を含んでいる場合のスペクトルパターンを種々求めておき、実際の計測結果に対するスペクトルをそれらと対比し、トンネル掘削初期における将来挙動予測の精度向上をめざそうとするものである。

2. 切羽進行を考慮した粘弾性地山の内空変位³⁾

図-1に示した軸対称FEM解析結果において、 $x=0$ における内空変位を u_0 とし、収束係数 β を $\beta = 1/f'$ と置き換えると、内空変位(u)は切羽距離(x)に対して次式のように表される。

$$u(x) = u_0 + u_1(1 - e^{-x/f'}) \quad (3)$$

一方、初期地圧 p 、せん断弾性係数 C の地山に直径 d のトンネルを開削した場合の壁面変位は、次式となる。

$$u = \frac{d}{4} C p \quad (4)$$

式(3)と式(5)はどちらもトンネル掘削に伴う壁面の弾性変位である。したがって、これらの式が等しくなるためには、式(4)における初期地圧 p が次式のように表されればよいことがわかる。

$$p = p_0 + p_1(1 - e^{-x/f'}) \quad (5)$$

これを等価初期地圧と呼んでいる。切羽の進行速度 v が一定であれば、 $x=vt$ であるから式(5)は次式となる。

$$p = p_0 + p_1(1 - e^{-t/f}) \quad \text{ここに } f=f'/v \text{ である} \quad (6)$$

そこで、つぎに式(6)で表される地圧が粘弾性地山に開削されたトンネルにかかる場合について考えてみる。粘弾性体に対する解は、対応原理を適用することにより弾性解の式(4)をそのままラプラス変換形に置き換えて次式のように与えられる。

$$\bar{u}(s) = \frac{1}{4} s \bar{C}(s) \cdot \bar{p}(s) \quad (7)$$

いま、クリープ関数のせん断成分 $C(t)$ が、図-2に示したフォークトモデルにバネ(C_0)を一個直列に連結した三要素モデルにより、次式

$$C(t) = C_0 + C_1(1 - e^{-t/T_c}) \quad (8)$$

で表されるとすれば、式(6)と式(8)をラプラス変換し、それらを式(7)に代入して逆変換すると、

$$u(t) = \frac{dC_0}{4} \{p_0 + p_1(1 - e^{-t/f})\} + \frac{dC_1}{4} \left[p_0(1 - e^{-t/T_c}) + p_1 \left\{ 1 - \frac{1}{T_c - f} (T_c e^{-t/T_c} - f e^{-t/f}) \right\} \right] \quad (9)$$

となって、粘弾性地山中をトンネル切羽が一定速度で進行する場合の厳密解が得られる。

3. 内空変位の遅延スペクトル解析

式(8)におけるパラメータ T_c は遅延時間と呼ばれ、変形を遅延させるメカニズムを特性づける。材料のレオロジーを研究する分野では、一般的に、このようなメカニズムが連続的に存在すると考え、クリープ関数を次式のように表す。

$$C(t) = \int_0^\infty \Phi(T)(1 - e^{-t/T})d(\ln T) \quad (10)$$

$\Phi(T)$ を遅延スペクトルと呼び、連続的な遅延時間 T に対応するコンプライアンス(C)の分布強度を表すものと考えることができる。式(10)を $\Phi(T)$ について解くと、次式のような漸近式が得られる。

$$\Phi(T) = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{(-1)^{k+1}}{(k-1)!} (kT)^k \frac{d^k C(kT)}{dT^k} \quad (11)$$

上式は、 k が大きい程近似度の高い式であるが、いま、 $k=1$ の最も近似度の低い場合について考えると、便宜的に $T=t$ において次式が得られる。

$$\Phi(t) = t \frac{dC(t)}{dt} = \frac{1}{\ln 10} \frac{dC(t)}{d(\log t)} \quad (12)$$

すなわち、クリープ関数を微分することによって、近似的な遅延スペクトルが得られる。クリープ関数とは外力に対する変位の応答関数であるから、実際的には、観測される経時変位を微分することによっても遅延スペクトルが得られることになる。

以上のことを広義に解釈して本研究における内空変位に適用する。式(9)で表された内空変位は、その時間依存性を支配する二種類のメカニズムを想定して得られたものであり、それらはパラメータ f と T_c によって特性づけられている。そこで、いま式(9)に対し、 $\phi(t)=tdu/dt$ なる演算を実行すると次式が得られる。

$$\phi(t) = \frac{d \cdot t}{4} \left\{ \left(\frac{C_0 p_1}{f} - \frac{C_1 p_1}{T_c - f} \right) e^{-t/f} + \left(\frac{C_1 p_0}{T_c} + \frac{C_1 p_1}{T_c - f} \right) e^{-t/T_c} \right\} \quad (13)$$

図-1に示したFEM解析の結果によれば、円形トンネルの場合 $p_0=0.3(p_0+p_1)$ 、 $f=0.25d/v$ となるので、これらパラメータに種々の値を代入し、式(13)を計算した結果を図-3および図-4に示す。図-3は $T_c/f=2$ とそれぞれのメカニズムが近接している場合で、図-4は $T_c/f=10$ と比較的離れている場合である。いずれも粘性特性の卓越度を示す C_1/C_0 の値をパラメータとして示している。これらの結果によれば、二つのメカニズムが近接している場合は、スペクトルは分離されずに一個の山を示し、粘性特性が顕著になるにしたがってその山の値が大きくなるとともに山の位置も徐々にずれて行く傾向を示す。一方、 $T_c/f=10$ の場合は、二つのメカニズムが明確に分離されており、

それぞれ、与えた f および T_c の値のところで極値を示している。すなわち、観測変位速度から遅延スペクトルを計算すれば、極値を示す位置からそのメカニズムの特性である f および T_c の値を推定できることがわかる。しかし、 $T_c/f=10$ の場合でも、 C_1/C_0 の値の大小により極値の大きさに変化が見られ、 C_1/C_0 の特に小さい値のスペクトルでは T_c の位置を示す極値が消滅してしまっている。

そこで、 T_c/f および C_1/C_0 の値の組合せによって、二つのメカニズムが分離できる場合を調べるために、式(13)より $d\phi/dt=0$ なる式を演算すると、次式が得られる。

$$\frac{d\phi}{dt} = \left\{ \frac{1}{n} + \frac{p_1}{p_0(n-1)} \right\} e^{-x/n} (1 - \frac{x}{n}) + \left\{ \frac{p_1 C_0}{p_0 C_1} - \frac{p_1}{p_0(n-1)} \right\} e^{-x} (1-x) = 0 \quad (14)$$

ここに、 $n=T_c/f$ 、 $x=t/f$ である。式(13)が示す図-4のスペクトル曲線群からわかるように、式(14)に根が三個存在すれば、スペクトルは二つの山を呈し、根が一個であれば山は一つとなる。式(14)をそのまま解くことは不可能に近いので、いま、 $p_0/p_1=6/14$ とし、 $C_1/C_0=0.5$ の場合について n の値を種々変えて数値計算し図化した例が図-5である。曲線の x 軸との交点が根を与える。およそ $n>8$ で三根となることがわかる。三根となる場合の n と C_1/C_0 の値の組合せを種々計算すると、分離可能なパラメータの組合せを知ることができる。

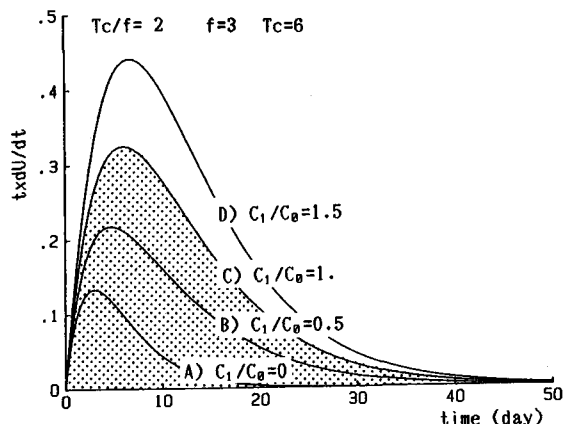


図-3 遅延スペクトルの例 ($T_c/f=2$)

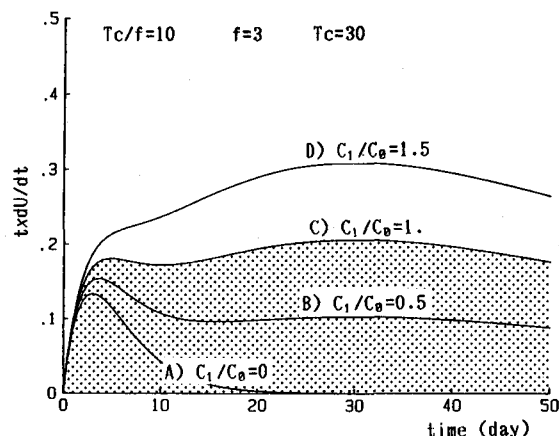


図-4 遅延スペクトルの例 ($T_c/f=10$)

4. 遅延スペクトルによる計測管理例

$C_0=10^{-4}\text{cm}^2/\text{kgf}$ 、初期応力($p_0=6\text{kgf}/\text{cm}^2$, $p_1=14\text{kgf}/\text{cm}^2$)の地山中を直径 $d=12\text{m}$ の円形トンネルが掘削速度 $v=1\text{m}/\text{day}$ で進行する場合の例を図-6に示す。ただし、地山の非弾性特性値は未知とする。弾性地山中を円形トンネルが進行する場合の内空変位は図-1に示したように解析的に求められるので、本トンネルの場合の結果とその遅延スペクトルが図のように示される。円形トンネルの場合は $f'=0.25d$ となるから $f=3\text{day}$ となりスペクトルは3dayのところでピークを示し、高さは $C_0 p_1 d/e$ となっている。同図に計測内空変位の全過程を

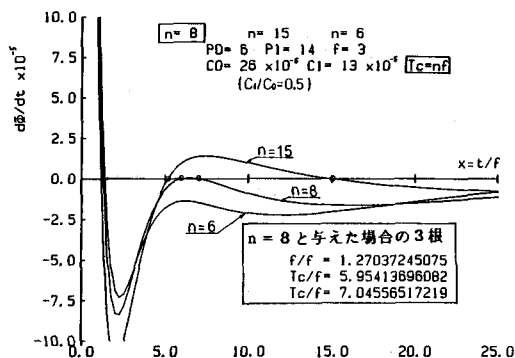


図-5 $d\phi/dt=0$ の根を求めた計算結果

プロットし、それらをディジタイザーによって読み取って求めた遅延スペクトルがプロットされている。計測変位のうち弾性地山の計算変位を越えた部分が地山の非弾性的性質によるものである。同様のことが遅延スペクトルにも言える。そして、両者の違いは内空変位よりも遅延スペクトルの方により敏感にかつ早期に現れている。したがって、地山の弾性コンプライアンス(C_0)、初期応力(p_1)、トンネル直径(d)と掘進速度(v)によって決まる基本的な遅延スペクトルを求めておき、それに計測変位から得られる遅延スペクトルをプロットして行けば、その逸脱の程度を把握することによって、そのトンネルが安定に向かっているかどうかを比較的早期に推定できる。図-6の例では、計測値のスペクトルのピーク高さが基本スペクトルの1.6倍程度であり、安定している場合を示している。どの程度を管理基準とすることが問題となるが、それは多くの事例を蓄積することによって定められよう。たとえば、図-3,4に示した種々の遅延スペクトルで網掛けを施した範囲を管理基準と決められれば、ここに計測値から得られるスペクトルをプロットすることにより計測管理が可能となる。

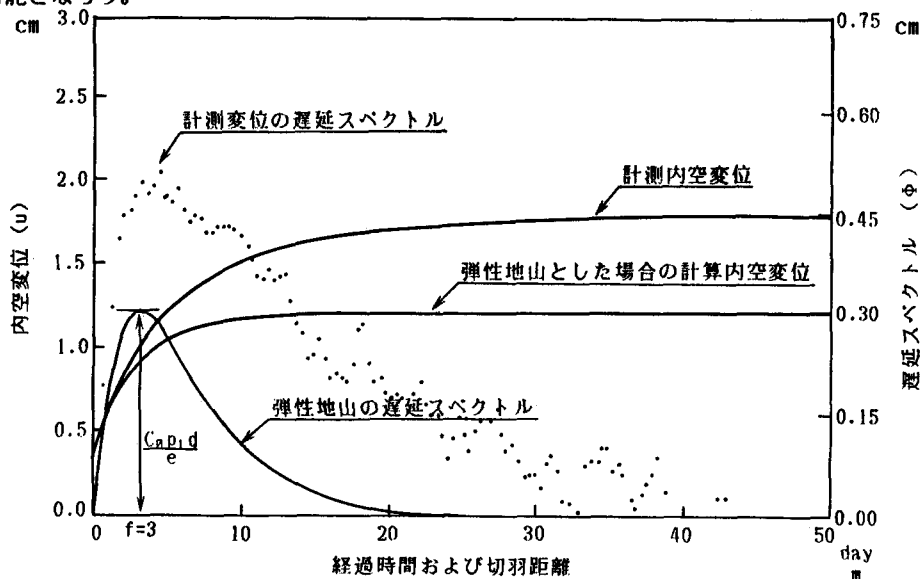


図-6 遅延スペクトル解析例

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、No.337, pp.53-58, 1986
- 2) 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
- 3) 伊東、土山、赤木；コンバージェンスの経時変化とその評価について、第20回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.249-253, 1988