

## III-251

## トンネル変位からのクリープ係数の算出法について

金沢工業大学  
兵庫県土木部土屋 敬  
吉田 恒彦

## 1. まえがき

膨張性地山におけるトンネル施工は従来より土木工事において最も困難とされているものであり、ロックボルト、吹付けコンクリートを主体とした工法(NATM)を用いてもこの事情は変わるものではない。適切な設計を行うには、まず膨張性地山の特性を正確に把握することが必要であるが本報告ではトンネルの実測値からクリープ係数を定量的に摘取する方法について述べる。

## 2. 地山のクリープ係数の決定法の問題点

計測データは、新設トンネルの設計のためには試験坑のデータまたは地質条件等の近い既存トンネルの過去の施工時のデータから、施工中のトンネルの設計修正のためには既施工区間のデータから得られる。

トンネルの周辺地山のひずみにおける経時的な要素としては次の2つのものがある。

$\varepsilon_{c1}$ : 地山のクリープ特性によるひずみ

$\varepsilon_{c2}$ : 切羽の進行による三次元的な応力解放によるひずみ

観察されるひずみはこの合計のひずみ

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{c1} + \varepsilon_{c2}$$

である。この両者はVoigtモデルによれば

$$\varepsilon_{c1} = \alpha_1 \varepsilon_0 (1 - e^{-\beta_1 t})$$

$$\varepsilon_{c2} = \alpha_2 \varepsilon_{0,F} (1 - e^{-\beta_2 t})$$

ここで、 $\varepsilon_{0,F}$ : 切羽での弾性ひずみ

$\varepsilon_0$ :  $\varepsilon_{0,F}$ と $\varepsilon_{c2}$ の合計

$t$ : 掘削からの時間

$\alpha_1, \beta_1$ : 地山のクリープ係数

$\alpha_2, \beta_2$ : 切羽の進行を表現するクリープ係数

のように表している。一般のトンネルでは $\varepsilon_{c1}$ はほとんどないので $\varepsilon_{c1} = 0$ とみなしている。膨張性が大きくなるに従い、 $\alpha_1$ は0からだいに大きくなる。また切羽進行に伴うひずみ $\varepsilon_{c2}$ はトンネルの直径の2倍程度進行すると(3~10日)ほぼ収束するのにに対し、クリープひずみ $\varepsilon_{c1}$ は収束性が遅く、数倍の日数を要する。以上の関係を整理すると、掘削直後からの変位は、次式で表される。

$$U(t) = [\alpha_1 \{1 + \alpha_2 (1 - e^{-\beta_2 t})\} (1 - e^{-\beta_1 t}) + \alpha_2 (1 - e^{-\beta_2 t})] U_{0,F} \quad \text{---- (a)}$$

ここで、 $U_{0,F}$ : 切羽での弾性変位

図-1はこの $\varepsilon_{c1}$ と $\varepsilon_{c2}$ の重ね合わせを例示したものである。 $\varepsilon_{c1}$ のクリープ係数は飯山トンネルの $\alpha_1 = 0.67, \beta_1 = 0.03$ による。 $\varepsilon_{c2}$ は新幹線トンネルで月進約60mを想定し $\alpha_2 = 2.0, \beta_2 = 0.3$ とする。現場における観察では合成された変位を観察するわけであるが、この図から2本の曲線を分離することはほとんど不可能であり、相当の工夫を要する。

3.  $\beta_1$ の一次推定

まず切羽進行による係数 $\alpha_2, \beta_2$ はこれまでの研究により定まるものとする。切羽の進行による変位が収束する時刻を $t_1$ とすると $t \geq t_1$ の範囲において計測される変位 $U(t)$ は次式で表される。

$$U(t) = \{\alpha_1 (1 + \alpha_2) (1 - e^{-\beta_1 t}) + \alpha_2\} U_{0,F}$$

これを微分し変位速度を求めると

$$dU(t)/dt = \alpha_1 (1 + \alpha_2) \beta_1 U_{0,F} e^{-\beta_1 t}$$

上式の対数をとると

$$\begin{aligned} \log(dU(t)/dt) &= \log\{\alpha_1 (1 + \alpha_2) \beta_1 U_{0,F} e^{-\beta_1 t}\} \\ &= \log\{\alpha_1 (1 + \alpha_2) \beta_1 U_{0,F}\} + \log e^{-\beta_1 t} \\ &= \log\{\alpha_1 (1 + \alpha_2) \beta_1 U_{0,F}\} - \beta_1 t / 2.3 \quad \text{---- (b)} \end{aligned}$$

また $t < t_1$ の範囲では、切羽の進行による変位が卓越するため、 $U'(t)$ は

$$U'(t) \doteq U_{0,F} + \alpha_2 U_{0,F} (1 - e^{-\beta_2 t})$$

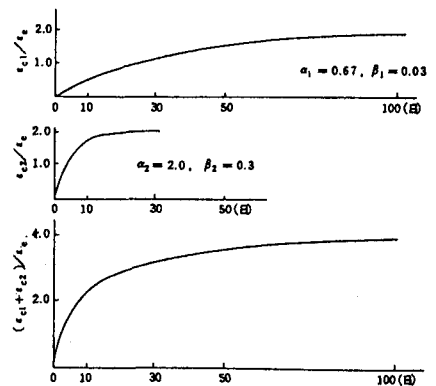


図-1  $\varepsilon_{c1}$ と $\varepsilon_{c2}$ の重ねせ例

で表わされる。これは、上記と同様の処理により

$$\log (dU(t)/dt) = \log \alpha_2 \beta_2 U_{\infty, F} - \beta_2 t / 2.3 \quad \text{----- (c)}$$

式(b), (c)は $\log (dU(t)/dt)$ と $t$ との間の直線式であり、図-2において①②で表される。①は $t_1 \ll t$ のデータにより最小二乗法により定められる。この勾配から $\beta_1$ が得られる。切片は $\alpha_1 (1 + \alpha_2) U_{\infty, F} \beta_1$ であり $\beta_1$ は上記で得られ、 $\alpha_2$ はすでに定まっているが、これからだけでは $\alpha_1$ 、 $U_{\infty, F}$ を同時に定めることはできない。②は $\beta_2$ より定まる勾配を用いて直線を得る。その切片 $\alpha_2 \beta_2 U_{\infty, F}$ であり、 $\alpha_2$ 、 $\beta_2$ ともに既知であるとする $U_{\infty, F}$ が定まる。 $U_{\infty, F}$ が定まると最後に $\alpha_1$ が求まる。このように $\log (dU(t)/dt)$ と $t$ の関係図より $\alpha_1$ 、 $\beta_1$ 、 $U_{\infty, F}$ を求めることができるが、使用経験からこの方法は誤差が多いと思われるため、実際には①の勾配から $\beta_1$ のみ求めこれを、 $\beta_1$ の一次推定値とし、次に述べる4.の方法により $\alpha_1$ 、 $\beta_1$ を確定している。誤差の理由は次のものと考えられる。

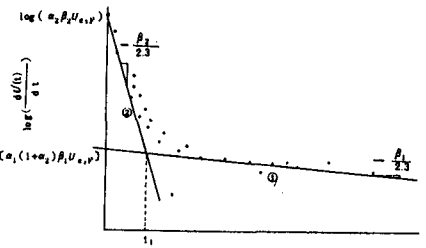


図-2  $\beta_1$ の一次推定手法

- 1) 両直線を分離することはかなり難しい。
- 2) 切片の誤差は対数軸上にあるので大きい。
- 3) 初期には $\varepsilon_{c1}$ を無視できているが膨張性地山では必ずしも無視できない。

#### 4. $\alpha_1$ 及び $\beta_1$ の確定

掘削後からの変位 $U(t)$ は式(a)で表され、掘削後 $t_0$  (day) で計測が開始されるとすると、計測される変位 $U'(t)$ は

$$U'(t) = U(t) - U'(t_0) \\ = U_{\infty, F} \alpha_1 [e^{-\beta_1 t_0} - e^{-\beta_1 t} + \alpha_2 \{e^{-\beta_1 t_0} - e^{-\beta_1 t} + e^{-\beta_2 t_0} - e^{-\beta_2 t} - e^{-(\beta_1 + \beta_2) t_0} + e^{-(\beta_1 + \beta_2) t}\}] \\ + U_{\infty, F} \alpha_2 (e^{-\beta_2 t_0} - e^{-\beta_2 t}) \quad \text{----- (d)}$$

これをとりまとめ、

$$U'(t) = a x_1(t) + b x_2(t)$$

ここで、

$$x_1(t) = e^{-\beta_1 t_0} - e^{-\beta_1 t} + \alpha_2 \{e^{-\beta_1 t_0} - e^{-\beta_1 t} + e^{-\beta_2 t_0} - e^{-\beta_2 t} - e^{-(\beta_1 + \beta_2) t_0} + e^{-(\beta_1 + \beta_2) t}\}$$

$$x_2(t) = \alpha_2 (e^{-\beta_2 t_0} - e^{-\beta_2 t})$$

$$a = U_{\infty, F} \alpha_1$$

$$b = U_{\infty, F}$$

と表せる。 $\alpha_2$ 、 $\beta_2$ については、各トンネルの切羽の進行より得られ、 $\beta_1$ は前項の一次推定にて定められているので $x_1$ 、 $x_2$ は $t_0$ 、 $t$ のみによって定まる。式(d)について、重回帰分析を行い係数 $a$ 、 $b$ を決定すれば $U_{\infty, F}$ 、 $\alpha_1$ が求まる。 $\beta_1$ は3.によって求めたが、直線回帰上の誤差のある場合 $\beta_1$ を再仮定する。

#### 5. クリープ係数の実例

第三期中新世の泥岩中の第一白坂トンネル、塩嶺トンネル、飯山調査坑について、これらの手法により求めた $\alpha_1$ 、 $\beta_1$ により描いた曲線と実測による曲線との比較を図-3に示す。

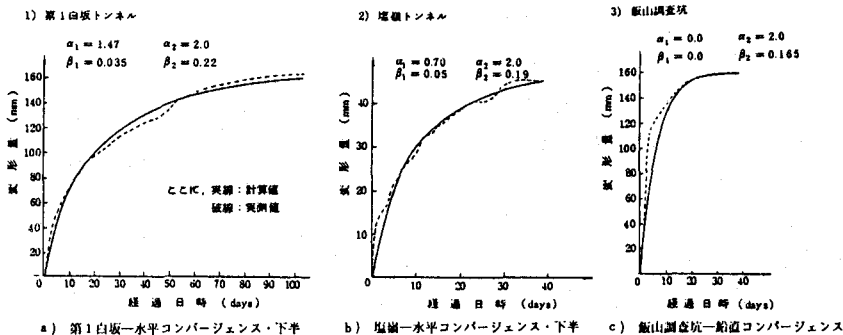


図-3 クリープ係数の実例