

（株）熊谷組技術研究所第1部長 大塚本夫

○上野正高

まえがき

トンネル周辺の地山の挙動を観察すると、掘さく経過日数にしたがって、トンネル壁面が次第に変形することがわかる。この現象は一般にクリープ現象と考える。クリープはトンネルの掘さく後、トンネル周辺に応力が発生し、その応力がたとえ一定値を保つにもかかわらずトンネルの壁面が時間の経過にしたがって変形する現象をいう。地山が完全弾性体とみなすことができればトンネルの壁面の変形は掘さく直後に完了してしまうにちがいない。クリープ現象は塑性流動的性質と遅延弾性的性質がくみ合えたものであることが推察される。ここでは粘弾性地山の挙動に関して、理論的考察と、実際の地山の挙動に関する関連性につき考察したものである。

1. 粘弾性地山の基礎理論¹⁾

a). Maxwell 体

Maxwell 体を力学的模型におきかえて考察すると、スプリングとダッシュポットとが直結されている場合を考えることができる。ダッシュポットは Newton 粘性を意味し、スプリングは Hooke 弾性を意味する。模型を急激に引伸ばした場合を考えると、ダッシュポットは急激な変化に作動しずらく、最初にスプリングだけが作動する。一定の伸びをスプリングにあたえらる、ダッシュポットは次第に作動して、スプリングの弾性力を次第にゆるめていく結果になる。スプリングにたくわえられた応力は時間の経過にしたがって、緩和され、最終状態で、スプリングにたくわえた応力は消滅する。力学的模型を数学的考察を行なうと、全体の伸びを ϵ とすると、 ϵ はスプリングとダッシュポットの伸びの総和になる。スプリングの伸び ϵ_1 、ダッシュポットの伸びを ϵ_2 とすると、 ϵ は、

$$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 \text{ ----- (1). スプリングは Hooke の法則にしたがうかう力と伸びの関係は、}$$

$$F = E \epsilon \text{ ----- (2). ダッシュポットを Newton 粘性と考え、力 } F \text{ による流動速度は}$$

$$d\epsilon_2/dt \text{ で、比例定数を } \eta \text{ とすれば、 } F = \eta \frac{d\epsilon_2}{dt} \text{ ----- (3). (1) 式を時間で微分すると、}$$

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d\epsilon_1}{dt} + \frac{d\epsilon_2}{dt} \text{ ----- (4). (2) 式を時間で微分すると } \frac{d\epsilon_1}{dt} = \frac{1}{E} \cdot \frac{dF}{dt} \text{ ----- (5). (4) 式に}$$

$$(5), (3) \text{ 式を代入し整理すると、 } \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{dF}{dt} + \frac{F}{\eta} \text{ ----- (6). (6) 式にて一定の伸びである場合}$$

$$\text{は、} d\epsilon/dt = 0 \text{ で、(6) 式は } \frac{1}{E} \frac{dF}{dt} + \frac{F}{\eta} = 0 \text{ ----- (7). (7) 式を積分すると、 } F = F_0 e^{-\frac{Et}{\eta}} \text{ ----- (8).}$$

$$(8) \text{ 式を考察すると伸びを一定に保つと応力は時間とともに指数函数的に減少する。一般のクリープ実験は一定荷重で行なうから (6) 式は } \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{F}{\eta} \text{ ----- (9) となり、(9) 式は、}$$

$$\text{Newton 粘性の式と同一の式になる、(9) 式を積分すると、 } \epsilon = \frac{F_1}{\eta} t + \epsilon_1 \text{ ----- (10)}$$

F_1 の荷重を Maxwell 体にかけると瞬間に ϵ_1 の伸びが生じ、その後伸びは時間がたつにしたがって、一定速度で大きくなる性質がある。

b). Kelvin 体

Kelvin 体はスプリングとダッシュポットが並列に結合された力学的模型が考えられる。

Kelvin 体は急激な荷重に対して、ダッシュポットが抵抗し、並列のスプリングが単独の場合のよう

に瞬時にひずみを生じない。一定荷重では、次第にひずみだす。引張荷重をあたえらと、ゆっくり伸び、荷重を除くと、伸びた量だけゆっくりともとの量だけ縮む、ひずみ量は単独にスプリング一定荷重を加えた場合、瞬時にひずみ量と同一量であることが推測される。したがって一定荷重のクリープ実験をおこなえばケルビン体は時間を要するかも知れないが一定の平行状態に達することがわかる。

この現象を遅延現象といい、弾性ひずみがおくられて現われることから遅延弾性という、Kelvin 体を力学的模型によって数学的考察をおこなえば、スプリングとダッシュポットとが並列に結合されているから、スプリングに F_1 、ダッシュポットに F_2 なる荷重が作用した場合は F は F_1 と F_2 との和になる。 $F = F_1 + F_2$ ----- (11)、ダッシュポットとスプリングが並列であるからひずみ量は同一と考える、(11)式の第1項、第2項に Hooke の法則、及び Newton の粘性法則を適合させると

$$F_1 = \epsilon E \text{ ----- (12), } F_2 = \eta \frac{d\epsilon}{dt} \text{ ----- (13), (11)式に(12), (13)式を代入すると}$$

$F = \epsilon E + \eta \frac{d\epsilon}{dt} \text{ ----- (14),}$ クリープ実験のように一定荷重、 $F = F_0$ を作用させた場合は、(14)式は $F_0 = \epsilon E + \eta \frac{d\epsilon}{dt} \text{ ----- (15),}$ (15)式を積分して初めのひずみを $\epsilon = 0$ とすると、

$\epsilon = \frac{F_0}{E} (1 - e^{-\frac{Et}{\eta}}) \text{ ----- (16),}$ η は $\frac{\eta}{E}$ で Kelvin 体における最後の弾性的平行に達するのにどのくらいの時間遅れが生ずるかの目安となる。

c). Burgers 体

Burgers 体は力学的模型で考察すると、Maxwell 体と Kelvin 体の連結で考えることができる。ひずみ成分は各々加えると良いから、(10)式と(16)式を加える。

$$\epsilon = \frac{F_1}{\eta_1} t + \epsilon_1 + \frac{F_0}{E} (1 - e^{-\frac{Et}{\eta_2}}) \text{ ----- (19), (19)式におけるクリープ曲線は、}$$

$$\epsilon = \frac{F_0}{E_1} + \frac{F_0}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}}) + \frac{E_0}{\eta_1} \text{ ----- (20).}$$

d). 実験公式²⁾

クリープ曲線が得られると(20)式より粘弾性要素のパラメーターを求めることができる。

直接クリープ曲線を解析するには、クリープ自体に誤差が含まれるから求めずらい。そこで実験公式によりクリープ曲線を求めて、粘弾性方程式を解く方法を用いる。クリープ曲線の一般式として次の実験公式が考えられている。 $\frac{d\epsilon}{dt} = Ca^m t^{-n} \text{ ----- (21),}$ 応力を一定に保つ場合に(21)式は

$$\frac{d\epsilon}{dt} = A t^{-n} \text{ ----- (22), (22)式に } n=0 \text{ を代入し、積分すると、 } \epsilon = A t \text{ ----- (23)}$$

となり、Maxwell 体のクリープ曲線と同一結果になる。(22)式に $n=1$ を代入し積分すると、

$$\epsilon = B \log t \text{ ----- (24), となり Kelvin 体のクリープ曲線に相当する。}$$

Burgers 体は、Maxwell 体と Kelvin 体のひずみを加えたものを考えるとよいから結局(23)式と(24)式を加えるとよい。 $\epsilon = A t + B \log t \text{ ----- (25)}$

2. 地山の変形と粘弾性

トンネル壁面の掘さく経過日数に対する変形量は表-1に示される

図-2～図-3は表-1の結果をそれぞれ Kelvin 型と Burgers 型と考えた場合の実験公式によるクリープ曲線を求め、その後粘弾性方程式を求めた結果を示すものである。

3. ライニングの変形と粘弾性

地山が粘弾性性質の挙動を示す場合に当然トンネルのライニングにおよぼす応力および変形も粘弾性の影響を受けることが推察される。地山の変形を測定した TD/990～2020附近のライニングの

変形を測定した結果を図-4に示すものである。図-4の結果をクリープ曲線方程式で求めると図-5～図-6に示すものであるが、実線は実測の追跡で、点線はインバートコンクリートを打設しない場合の推定線である。これらのクリープ曲線からライニングの応力状態をインバートを打設したことによりどのように変化するかを推定することができる。計算結果よりインバートを打設することにより約30%応力が減少することが推定できる。

4. 試料と粘弾性

地山が完全弾性体に近かければ応力～ひずみの関係は比例関係に近いかはすである。しかしながら地山は弾性体といいがたいので応力～ひずみの関係は指数法則にしたがうものと考えることができる。図-7は粘土の圧密弾性係数を求めた結果である。この結果と粘弾性方程式より得られた弾性係数とは関連があるものと考えられる。

5. 結論

1. 地山の粘弾性方程式を解くにあたり、実測値を実験公式にあてはめてから、粘弾性方程式を解く方法を提案する。

2. 粘弾性要素と試料の実験値との関連性を追求し、圧密弾性係数と粘弾性方程式の弾性係数との関連性があることを指摘する。

3. 粘弾性地山におけるライニングの挙動とインバートのはたす応力関係はインバートを打設することにより約30%応力が減少することが推定できる。

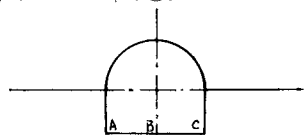


図-1. 測定位置図

表-1. 掘さく経過日数と変形量³⁾

T. D	掘さく経過日数	測点A (cm)	測点B (cm)	測点C (cm)	平均
1.990	9	16	14	15	15.0
	18	26	28	27	27.0
	22	27	29	28	28.0
2.000	6	15	15	15	15.0
	15	26	27	24	25.7
	22	28	30	26	28.0
2.010	5	10	10	10	10.0
	14	19	18	20	19.0
	18	20	20	20	20.0
2.020	3	5	6	5	5.3
	12	18	19	18	18.3
	16	19	21	20	20.0

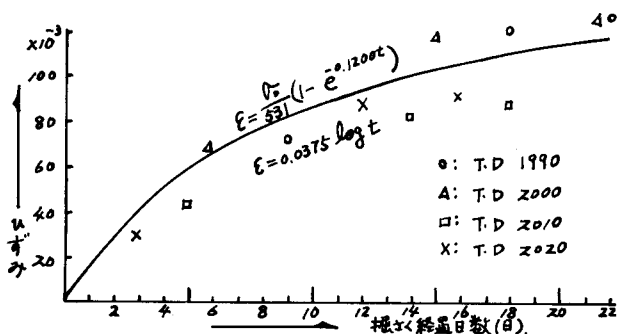


図-2. 地山をKelvin型と考えた場合のクリープ曲線

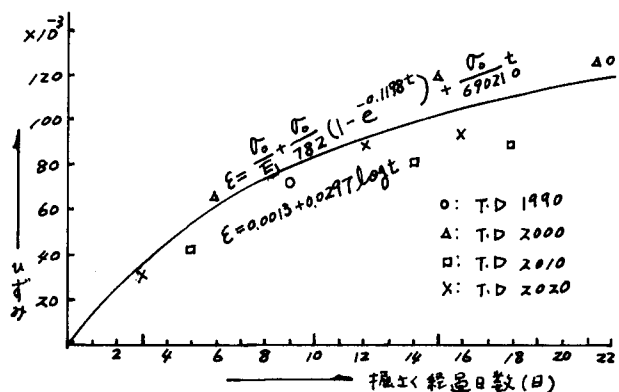


図-3. 地山をBurgers型と考えた場合のクリープ曲線

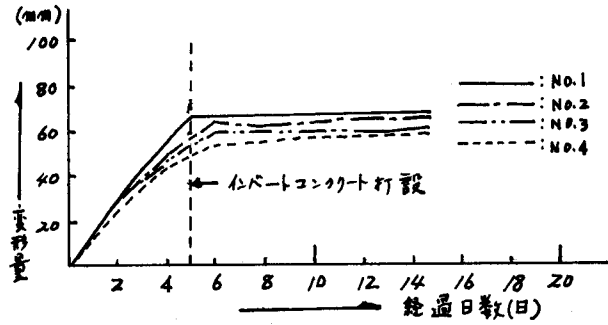


図-4. ライニングの変形

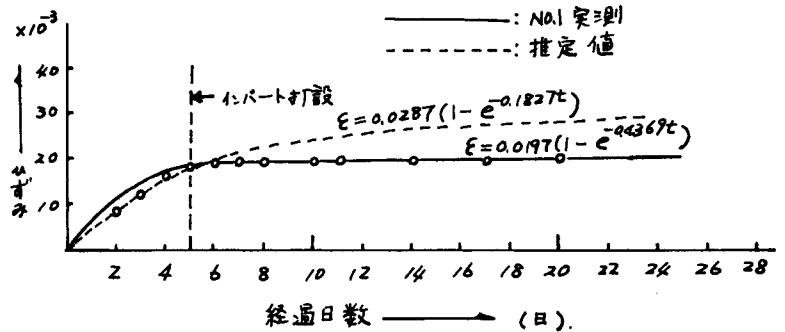


図-5. ライニングのクリープ曲線 (No. 1)

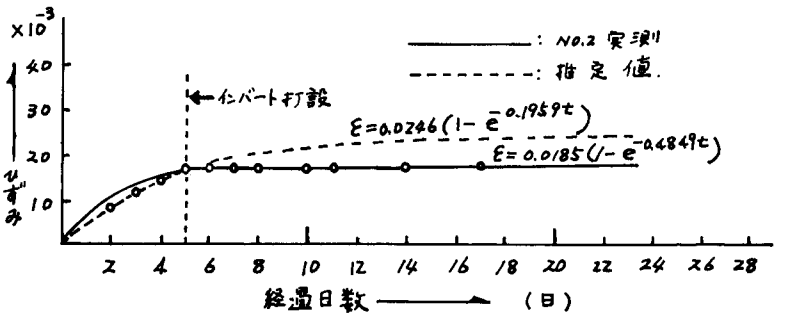


図-6 ライニングのクリープ曲線 (No. 2)

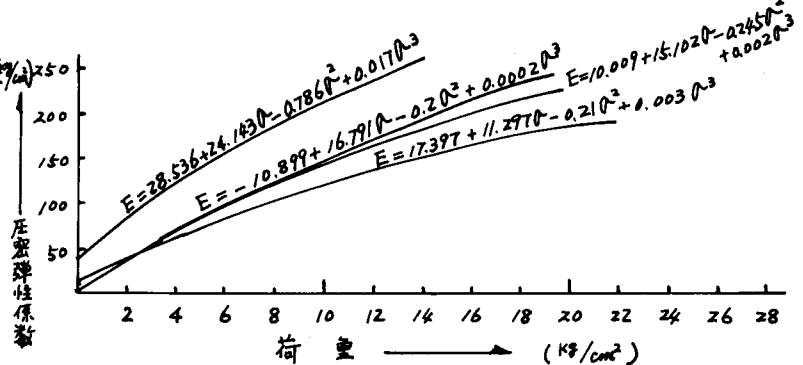


図-7. 試料の圧密弾性係数^(*)

1). 「レオロジーとその応用」

「後藤 平井 花井

P. 73 ~ 90

2). 「岩石の変形と破壊」

神戸大学 桜井

岩盤の調査、計測と設計

・ 施工に関する講習会

P. 26 ~ 28

3). 「第3回技術検討会恵那

山トンネル断層資料」

中央道恵那山飯田方トン

ネル工事第5回膨張個所

復旧工事報告書 P. 46 ~ 47

4). 「恵那山トンネル地質説

明書」

(第二版) 昭和46年10月

日本道路公団名古屋支社

P. 85 ~ 86