

大林組

○山本 彰

豊田高専

赤木 知之

名古屋大学 工学部

市川 康明

名古屋大学 工学部

川本 脩万

1. まえがき. 飽和状態における泥岩は顕著なクリープ現象を示し、トンネル掘削時における押し出し、斜面の長期安定性問題、構造物の基礎の長期的な沈下および破壊など岩盤工学上あるいは社会的に大きな問題を引き起こす原因となる。本研究では泥岩の飽和・非排水状態における実験を基に、定常および加速クリープ領域における粘弾塑性構成式を導出した。さらに、この構成式を用いて、円柱供試体片の飽和・非排水クリープ試験、飽和・非排水定ひずみ速度試験に対する数値解析を行なっている。

2. 構成式の導出に当り、その仮定. 実験に用いた試料は新生代第三紀の泥岩である。実験は非排水状態で側圧を一定として、クリープ試験、定ひずみ速度試験、漸増繰返し試験を行なった。実験の詳細は山本に述べてある。これらの結果より、つぎの仮説が導入できることが判明した。(1)時間依存性の破壊過程は、降伏基準と破壊基準によって記述される。降伏基準は静的降伏荷重以上の荷重に対する定常クリープ過程を特徴づけるものであり、弾塑性論における降伏基準と一致する。破壊基準は加速クリープが始まる点を規定し、せん断弾性エネルギー依存である。(2)粘弾性ひずみにおいて、瞬間応答以後、体積ひずみの変化はない。(3)定常クリープ時、加速クリープ時において、体積ひずみの変化はない。(4)定ひずみ速度試験における初期降伏荷重とクリープ試験における静的降伏荷重は一致する。(5)漸増繰返し試験において、Fig. 1に示すように弾性回復エネルギー E_{gr} と損傷エネルギー E_{gi} を定義すると、この弾性回復エネルギーが最大となる点とクリープ試験における加速クリープの始まる点は一致する。

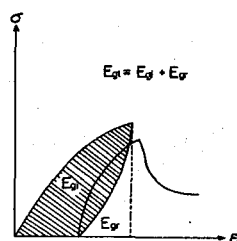
 E_{gr} ; Elastic Energy E_{gi} ; Lose Energy E_o ; Total Energy

Fig. 1 エネルギーの定義

3. 構成式および材料定数. 粘弾性領域では Voigt model, 降伏後の粘塑性領域では Perzyna 理論⁽³⁾⁽⁴⁾を用いた。ここで、材料は完全弾塑性体と仮定し、硬化則は導入しないこととする。以上より本研究における構成式は、

$$\dot{\epsilon}_{ij}(t) = \frac{1}{3} B_0 \dot{\sigma}_{ij}(t) + \frac{1}{2} C_1(t) \dot{S}_{ij}(t) + \frac{1}{2} C_2(t) S_{ij}(t) + \gamma_1 H(f) \left(\frac{\sqrt{J_2}}{k} - 1 \right)^{n_1} \frac{\partial f}{\partial S_{ij}} + \gamma_2 H(F) \left(\frac{W_s}{R} \right)^{n_2} \frac{\partial f}{\partial S_{ij}} \quad (1)$$

$$C_1(t) = C_0 + \sum_{i=1}^n C_{0i} (1 - e^{-t/\tau_{0i}}), \quad C_2(t) = \sum_{i=1}^n \frac{C_{0i}}{\tau_{0i}} e^{-t/\tau_{0i}} \quad (2), (3)$$

$$f = \sqrt{J_2} - k, \quad F = W_s - R \quad (4), (5)$$

$$H(f) = \begin{cases} 1 & f \geq 0 \\ 0 & f < 0 \end{cases} \quad (\text{ヘビサイド関数}) \quad (6)$$

と与えられる。ここに、 B_0 は体積分に関するコンプライアンス、 C_0 は偏差成分に関するコンプライアンス、 τ_0 は偏差成分に関する遅延時間、 k は静的降伏荷重、 R は限界せん断弾性エネルギー、 W_s はせん断弾性エネルギー、 J_2 は偏差応力の第二不変量である。(1)式の第一項は粘弾性ひずみ速度の体積分、第二項、第三項は粘弾性ひずみ速度の偏差成分、第四項は定常クリープ時以後の粘塑性ひずみ速度、第五項は加速クリープ時の粘塑性ひずみ速度を示す。これらの材料定数は実験から Table 1のように定まった。

4. 軟化現象. Fig. 2は弾性回復エネルギー E_{gr} と損傷エネルギー E_{gi} を最大せん断弾性エネルギー R_{max} を生じる時の全エネルギー $E_{go} (= E_{gr} + E_{gi})$ で正規化し、プロットしたものである。この図より、最大せん断弾

性エネルギーが生じた後、残留エネルギー状態に達するまで限界せん断弾性エネルギーは損傷エネルギーの増加に伴い減少していることが伴る。いま、

$$\frac{Egr}{E_{g0}} = \frac{R_{max}}{E_{g0}} - \alpha \frac{E_{g2}}{E_{g0}} \quad (7)$$

とすると、 α は0と1の間の値をとることになる。また、仮定(5)より加速クリープは定ひずみ速度試験における軟化点と一致するので、(6)式によって示される限界せん断弾性エネルギーの減少は加速クリープ現象を示すこととなる。したがって、(1)、(5)式に用いられている限界せん断弾性エネルギーRは、

$$R = R_{max} - \alpha \int dw_s^{pr} \quad (8)$$

と与えられる。ここに、 w_s^{pr} は加速クリープ時に失われる損傷エネルギーを示す。

5. 数値解析 (1)式のように

に示された構成式を用いて、円柱供試体について有限要素法による数値解析を行なった。Fig. 3は非排水クリープ試験結果と数値解析結果を示している。この図より、クリープ現象に対して実験値と解析値はよく一致していることがわかる。一方、クリープ試験と定ひずみ試験に対するモデルは、本来、同一のモデルで表現されるはずであるから、Fig. 4にひずみ速度0.001%/minに対する定ひずみ速度試験に対する実験結果と数値解析結果を示した。ただし、ここでは最大圧縮強度を一致させるように限界弾性エネルギー($R_{max} = 0.235$)を与え、全体的に変形挙動を充分表現できかどうかについて比較している。この図より、ピーク時までの変形挙動および軟化現象を充分に表現していると言える。

6. おわりに。本研究に用いた降伏・破壊基準の考え方、軟化現象を表現する限界弾性エネルギー減少の考え方およびそれらによって誘導された構成式は、飽和・非排水状態にある泥岩の時間依存性破壊過程を表現するのに充分妥当なものであると言える。今後は排水条件のもとで、クリープ試験、定ひずみ速度試験、漸増繰返し試験も行ない、体積成分の依存性についても評価した降伏基準、破壊基準、構成式について検討を加える予定である。

参考文献

- (1) 山本；名古屋大学修士論文，1984。
- (2) 川本ら；材料，第30巻，第332号，1982。
- (3) Perszyna, P. ; Bull. de l'Acad. Polonaise des Sci. Serie. des sciences techniques, Vol.12, No.4, 1964.
- (4) 奥野；名古屋大学修士論文，1983。

Viscoelastic Component	Volumetric Component	Compliance	B_0 (cm ² /kgf)	0.2085×10^{-3}
			C_0 (cm ² /kgf)	0.1758×10^{-3}
			C_1 (cm ² /kgf)	0.1249×10^{-4}
			C_2 (cm ² /kgf)	0.3506×10^{-4}
Viscoplastic Component	Steady-State Creep Component	Relaxation Time	τ_{c1} (min)	50.0
			τ_{c2} (min)	950.0
		Statical Yield Stress	n_1	0.3706
			γ_1 (cm ² /kgfs)	0.5947×10^{-3}
Viscoplastic Component	Accelerating Creep Component	Limit Energy	n_2	3.9591
			γ_2 (cm ² /kgfs)	0.1400×10^{-4}
		Limit Energy	a	0.3960
			R (kgf-cm)	0.1798

Table 1. 材料定数

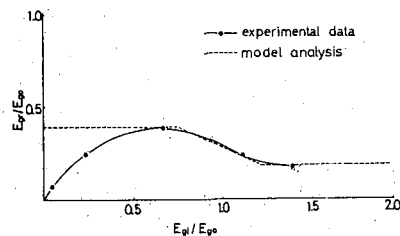


Fig. 2. $E_{gr}/E_{g0} - E_{gr}/E_{g0}$

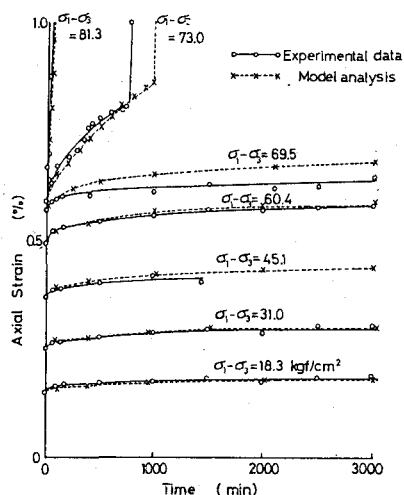


Fig. 3. クリープ曲線

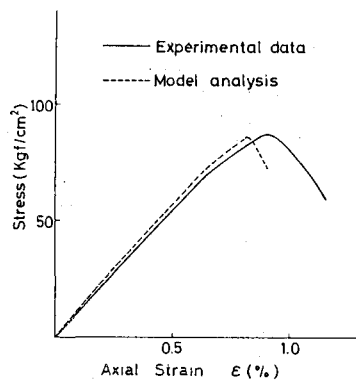


Fig. 4. 応力-ひずみ