

九州大学 工学部 正員 徳光 善治
 “ 生産研 “ 江崎 哲郎

1. 緒言.

最近では諸外国において終局強度設計法あるいは限界状態設計法と採用しており、材料の力学的挙動についても破壊近傍までの特性をつかみ、数式化、定量化することが必要となってきた。短時間強度（一般にいう圧縮強度）に対して持続荷重の大きさが比較的小さい場合は、図-1. A に示すようにクリープ速度は徐々に小さくなり、ひずみは一定値に収束するが、持続荷重がそれに近い場合は、B のように再びクリープ速度が増加し、ある経過時間の後に破壊する。この現象は、材料のクリープ破壊として

知られているが、過大な変形ともなるため、また、コンクリートの長期的な強度という点からも、コンクリートの耐える限界を考える上で非常に重要な要素の一つである。筆者らは数年来クリープ破壊の実験的研究を行なってきたが、時間と共に変化する応力-ひずみ関係とより一般的に表示するという目的から、金属材料などで提案されている理論などを基に、コンクリートのクリープおよびクリープ破壊特性に対するモデルを検討した。

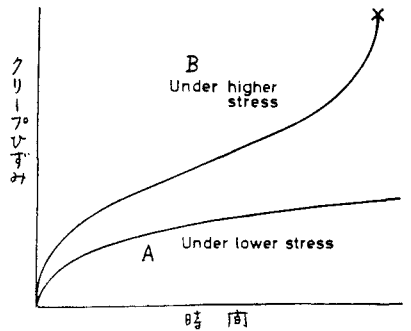


図-1. クリープ曲線

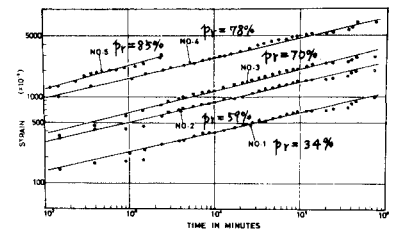


図-2. $\log \epsilon_t - \log t$ の関係

2. 算表示式について

従来低応力レベルのクリープの実験式として用いられてきた Kelvin Model をはじめとする 2 定数型の表示では、比例則の成立しない高応力レベルまではよく近似できない。クリープひずみ ϵ_t 、時間 t に対して $\epsilon_t = A t^B$ ……(1) なる算表示式はクリープ研究の初期から提案されているが、(B の値はおよそ 0.2~0.5) $t \rightarrow \infty$ に対し ϵ_t が収束しない欠点があるため、あまり用いられていないが、初期においては比較的近似性がよい。Nadai, 久保らは応力 p も含めて $\epsilon_t = f(p) \cdot g(t)$ ……(2) なる相乗型を提案し、更に Nutting は繊維の応力-ひずみ-時間の関係と $\epsilon_t g = p^\alpha t^\alpha$ ……(3) とより拡張された非線型粘弾性ともいうべき式で表わしている。即ち、 α, β に特別の値と入れるとフック弾性、ニュートン粘性を示し α は弾性率、粘性率となる。Scott Blair らは多くの材料に対して適当な α, β を与えることにより、 $t \rightarrow \infty$ などの障害はあるものの、この式が成立し一定値 α が得られることを示した。筆者らの実験結果(図-2, 3) に対し検討すると、(ここでは応力 p を応力レベル p_r (%)、 t を分で示すが、単位にかかわらず α, β は不変で α のみが変わる) 図-2 では $\log \epsilon_t - \log t$ は平行に近い直線となり勾配 α は低応力レベルでは約 0.25、高応力レベルでは 0.4~0.6 と大きくなる。図-3 の $\log p_r - \log \epsilon_t$ の関係 ($t = 10, 10^2, \dots, 10^3$ (分) とした) は $p_r = 70\%$ は近に折点を持つ 2 本の直線と考えられ、低応力側の勾配を $1/3$ 、高応力側を $1/3'$ とした。これら両方の結果から α を求めると図 4, 5 のように

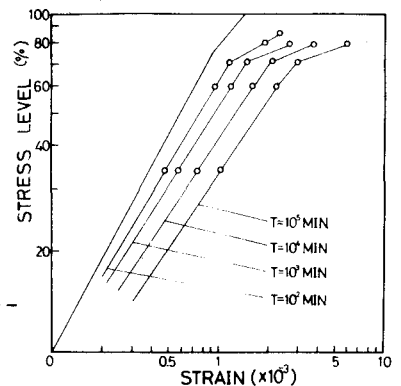


図-3 $\log p_r - \log \epsilon_t$ の関係

$p_r < \text{約} 70\%$ で $\phi = 10^7$, $p_r > 70\%$ で $\phi = 10^{19}$ とほぼ一定となり, 高応力と低応力の2つに分ければ, 応力-ひずみ-時間の関係は(3)式で示されるといふ。また(3)式は σ , $\dot{\epsilon}t$ の形で表わさずとも消去できるので, 応力が変化する場合には拡張されると考えられる。また ϕ は, クリープ破壊の限界応力レベル付近において明らかな変化を示し, コンクリート内部における損傷の指標とすることができ, ϕ に変化が生じた場合には破壊がさし迫っていると判断できよう。

3. クリープ破壊のモデルについて.

露表式においては, 高応力レベルにおける, 特に初期における急激なひずみの進行の挙動を示すことは可能だが, 一般にクリープ破壊とする場合のクリープ曲線は図-6に示すように一定速度による Secondary Creep の後に, ひずみ速度が増加する過程, すなわち Tertiary Creep を生じるが, この過程は示すことができない。また材料の強度特性を示し寿命が推定できるようなモデルでなければならない。金属材料では, クラックの成長などと結びつけた時間依存の変形と破壊について数多く研究されているが, ここでは最も一般的なものの一つである Kachanov-Rabotnov 理論とコンクリートに対し検討してみる。この理論では損傷の程度を示す損傷パラメータ ω を導入し, (ω は初めの0から破壊時1へと単調増加) ω の変化速度と $\dot{\omega} = f(\sigma, \omega, t) \dots (4)$ と示す, いま(4)と $\dot{\omega} = C \sigma^x / (1-\omega)^\phi \dots (4')$ (C, x, ϕ は定数) とおくとき境界条件より, 破壊時間 t_R は $t_R = 1 / (C \sigma^x (\phi+1)) \dots (5)$ となり応力と破壊時間は両対数で linear である。筆者らは, この関係と求めてあり, その関係は $\log \sigma_R = -0.014 t_R + 1.97 \dots (6)$ でこれとそのまま使うことができる。次に(4)(5)式により, ある時間 t における ω は $\omega(t) = 1 - (1 - t/t_R)^{\phi+1} \dots (7)$ となる。図-7に ω と t/t_R の関係を示したが, 寿命のほとんどを過ぎて後に ω が上昇し, 破壊前の突然の強度低下と定性的に結びつくものと考えられる。Secondary Creep rate と $\dot{\epsilon}_s = G \sigma^m \dots (8)$ とおく, 応力と損傷と考慮した有効な応力として $\sigma/(1-\omega)$ とすると $\dot{\epsilon}_s = G \sigma^m (1-\omega)^{-m} \dots (8')$ 故にクリープひずみは $\epsilon(t) = \dot{\epsilon}_s t_R \frac{(\phi+1)}{(\phi-n+1)} \{1 - (1-\omega(t))^{\phi-n+1}\} \dots (9)$ 。しかしながら(9)は Primary Creep を考えていないので(8')に更に t^m (m は定数) を乗じて速度の式は $\dot{\epsilon} = G \sigma^m t^m (1-\omega)^{-m} \dots (8'')$ となる。従って短時間においては $\dot{\omega}$ の変化はほとんどなく, t^m が Primary Creep を示し, 長時間になると ω が支配的となり Tertiary Creep が表現される。従って, ある時間 t_1 におけるクリープひずみは $\epsilon_{t_1} = G \sigma^m \int_0^{t_1} t^m / (1-\omega)^m dt \dots (10)$ で与えられる。また破壊時ひずみは $t/t_R = X$ とおくと $X=0 \sim 1$ までの定積分となり

$\epsilon_{t_R} = G \sigma^m t_R^{m+1} \int_0^1 X^m (1-X)^{-\frac{m}{\phi+1}} dX = G \sigma^m t_R^{m+1} \cdot B\left(\frac{\phi-n+1}{\phi+1}, m+1\right)$ となる。実験結果との近似は適当な定数を定めなければならないが, $\dots (11)$

(3)式の定数式の応力-ひずみ-時間関係および(6)の破壊時間と応力の関係式が同じ形式で与えられており容易に求められる。詳細については講演時に述べる。図-7, ω と t/t_R の関係

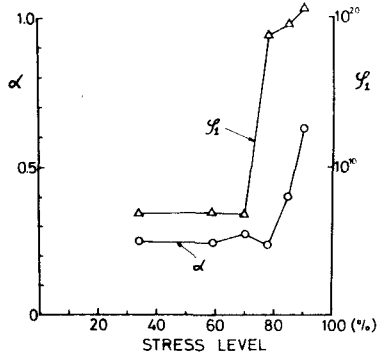


図-4. α および ϕ

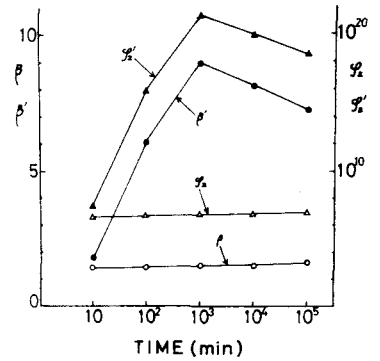


図-5. β および ϕ

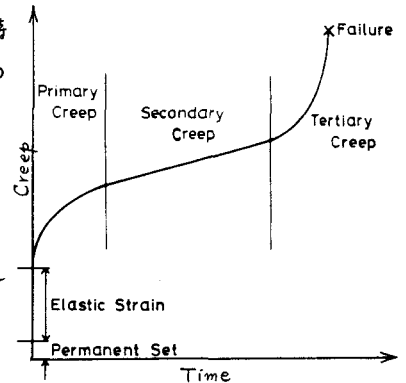


図-6 クリープ破壊曲線

