

[68] 時間を考慮したコンクリートの塑性・破壊の予測モデル

正会員 ○ 田畑昌伸 (長岡技術科学大学大学院)
 正会員 前川宏一 (長岡技術科学大学建設系)

1. はじめに

固定高応力を受けるコンクリートのひずみ速度は極めて大きく⁽¹⁾⁽³⁾、その塑性挙動や繰り返しの影響、さらに破壊や座屈を議論する場合は時間の効果を見捨てることはできない⁽⁴⁾。しかし高応力下の構成式の大半は応力、あるいはひずみ速度を限定して記述されている。そのため、繰り返しを受けるRC構造物内に発生する応力-ひずみの関係を正確に予測して解析に反映する段階には至っていない。本研究は、短時間載荷状態で定式化された弾塑性破壊の概念を拡張し、時間のパラメータを含む1軸圧縮応力下の構成式の導出を試みたものである。特に高応力を経験する繰り返し挙動へ拡張することを考え、圧縮強度近傍の応力下における変形特性に焦点を絞った。

2. コンクリートの変形性状の経路依存性

図1, 2は高応力域でのクリープ(固定応力までは4.7 kg/cm²/s)およびリラクセーション実験の結果であり、時間の経過と共に塑性ひずみと除荷剛性の低下(以下破壊と呼ぶ⁽²⁾)が進んでいることがわかる。ただし、塑性ひずみと破壊との間には一定の関係は無く、載荷経路によって異なることが図1、図2より認められ、応力-ひずみ面内で除荷の曲線が一意的に決まるとはいえないのである。

除荷経路では弾性挙動をしていることが図1、図2から認められる。ところが、図2の再載荷経路(A線)に見られるように、弾性領域はまだコンクリートが経験していない応力、ひずみ領域にまで弾性領域が拡大されていることがわかる。時間の経過とともに弾性領域が拡大するこの現象は図1のクリープ実験においても認められるのである。

図3は時間的に異なる応力経路でのひずみの経時変化を示したものである。図中のa, a'点と同じ応力-ひずみ値を持つにも拘わらず、初めから高応力状態に応力を保持した経路でのa点のひずみ速度は16 μ/sであるのに対して、階段上に時間をかけて応力を増加させた履歴の場合(a'点)は、わずかに0.4 μ/sにすぎないのである。

以上の例からも分かる通り、塑性ひずみ、破壊、弾性領域およびひずみ速度は極めて複雑な時間経路依存性をもつのである。

なお、図中の応力、ひずみ値は応力速度5 kg/cm²で載荷したときの最大応力fcと対応するひずみ値ε₀で正規化したもので表示している。

3. 弾塑性破壊モデルの拡張

短期載荷条件下のコンクリートの応力σ-ひずみεの関係は、任意のひずみ経路に対して破壊パラメータKと塑性ひずみε_pを予測することにより、弾塑性破壊式(1)によって簡単に表現できることが実証されている。

$$\sigma = K \sigma_e, \quad \sigma_e \equiv E_0 \varepsilon_e, \quad \varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad (1)$$

ただし、σ_e : 要素応力 ε_e : 弾性ひずみ E₀ : 定数

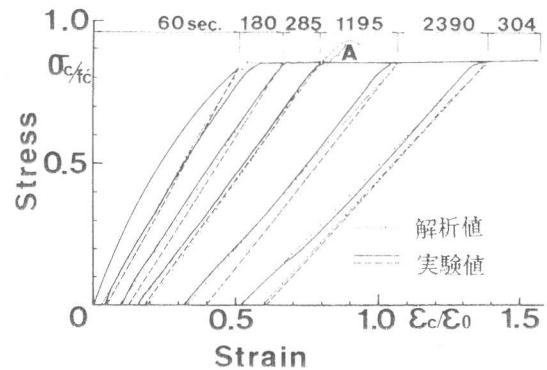


図1 固定高応力下のひずみの経時変化

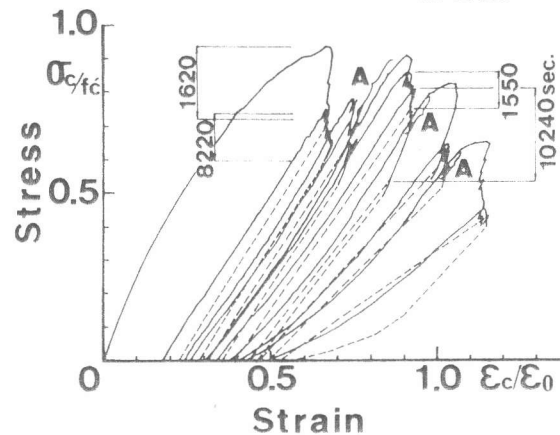


図2 固定高ひずみ下の応力の経時変化

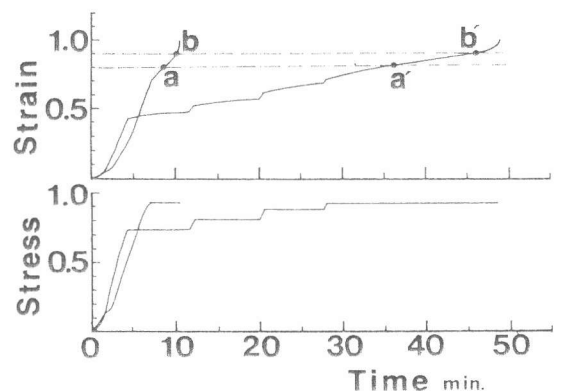


図3 応力経路を変えたときのひずみ変化

2節の実験結果も基本的にこの定式化に矛盾しない。そこで図4に示す力学モデルを基礎に弾性ひずみ、塑性ひずみおよび破壊パラメータは要素応力と時間によって全微分可能であるとの仮定を設け、要素応力の経路で決定される「瞬間」成分（記号に*i*を付ける。）と時間の経過に伴う「遅れ」成分（記号に*d*をつける。）に分離を行った。

3.1 弾性ひずみ（回復ひずみ）の経時変化

塑性ひずみが増えない経路では、仮定より弾性ひずみは要素応力と時間で全微分でき、図4の弾塑性破壊モデルより、要素応力は弾性係数 E_0 （定数）を用いて式（2）で定義される。

$$d\epsilon_e = \frac{\partial \epsilon_e}{\partial \sigma_e} d\sigma_e + \frac{\partial \epsilon_e}{\partial t} dt \equiv d\epsilon_{ed} + d\epsilon_{ei} \quad (2)$$

$$\sigma_e = E_0 \epsilon_{ei} \quad (E_0 = \frac{\sigma_e}{\epsilon_{ei}})$$

瞬間弾性ひずみ ϵ_{ei} は、瞬間除荷（ $\Delta t = 0$ ）時のひずみ変化として求めることができ、遅れ弾性ひずみ ϵ_{ed} は応力開放時（ $d\sigma_e$ ）の遅れ回復ひずみとして実測される。応力および全ひずみの変化がほぼ一定で、遅れ弾性ひずみの増分がほぼゼロと予想される状態から瞬間に応力を除荷したときのひずみの計測から、遅れ弾性ひずみの最終回復値（除荷後10分で収束したと判断した。）と瞬間弾性ひずみの比が求まる。これを塑性ひずみとの関係で示したものが図5である。除荷応力は様々であるにもかかわらず両者の比は塑性ひずみにより一意的に求まることわかる。

この弾性挙動はVoigtの粘弾性モデル（図6）と瞬間弾性バネの直列システムで記述することができる。なお、遅れ回復量の収束値が履歴によって変化することは、粘弾性バネが塑性ひずみによって変化すると仮定することで表現できるのである。

図6は瞬間除荷から弾性ひずみが回復する（遅れ弾性ひずみ）経時変化を最終回復値で正規化して示したものである。回復量の収束値がどの値であっても、最終回復値に対して時間的に相似に回復することが認められた。この結果から粘性係数を求めることができ、式（3）を得た。

$$\frac{\epsilon_{ed}}{\epsilon_{ed\infty}} = 0.62 \exp\left(-\frac{1}{12.6}t\right) + 0.38 \exp\left(-\frac{1}{136}t\right) \quad (3)$$

実際の粘性係数等は応力レベルによっても異なる可能性があるが、本モデルでは現段階では式（3）が全時間経路にわたり成立するものと仮定した。

3.2 塑性ひずみの経時変化

3.1節と同様に塑性ひずみの全微分をとり、瞬間と遅れ塑性を式（4）で定義する。

$$d\epsilon_p = \frac{\partial \epsilon_p}{\partial \sigma_e} d\sigma_e + \frac{\partial \epsilon_p}{\partial t} dt \equiv d\epsilon_{pi} + d\epsilon_{pd} \quad (4)$$

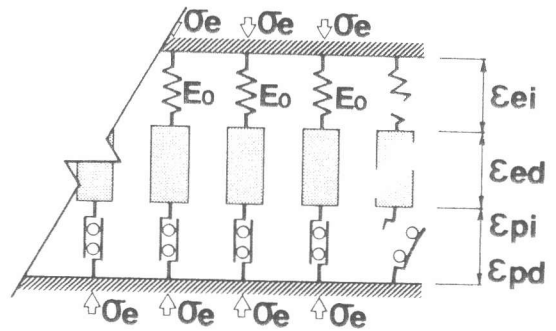


図4 弾塑性破壊の力学モデル

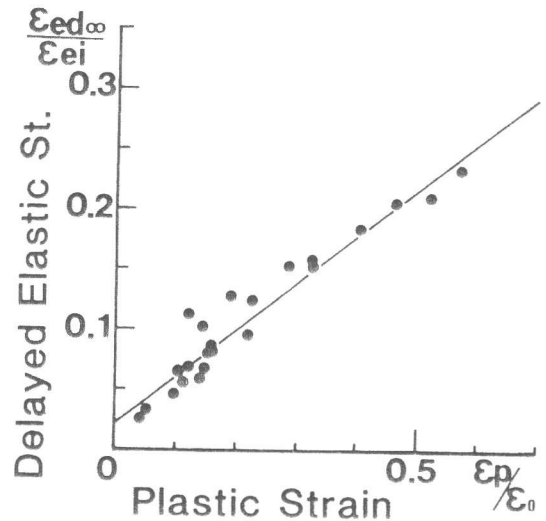


図5 遅れ弾性の最終回復量と塑性の関係

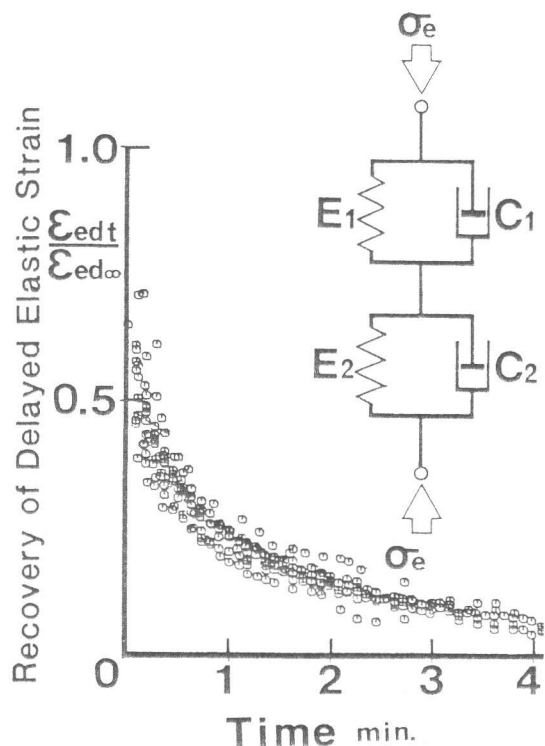


図6 遅れ弾性ひずみの経時変化