

## [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 ○ 田畠昌伸 (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、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無視することはできない。<sup>④</sup>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/cm<sup>2</sup>/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。<sup>⑤</sup>) 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ものである。

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し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'点は同じ応力-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/cm<sup>2</sup>/sで載荷したときの最大応力f<sub>c</sub>と対応するひずみ値ε<sub>0</sub>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<sub>p</sub>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。

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

ただし、σ<sub>e</sub> : 要素応力 ε<sub>e</sub> : 弹性ひずみ E<sub>0</sub> : 定数

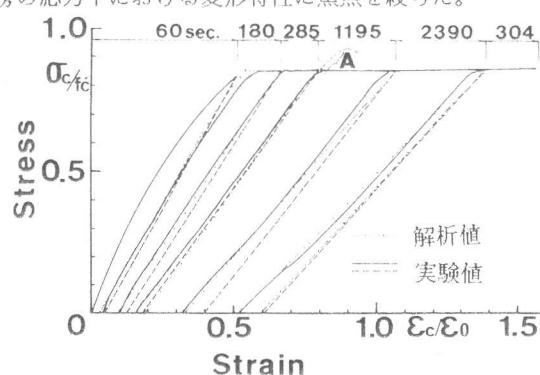


図1 固定高応力下のひずみの経時変化

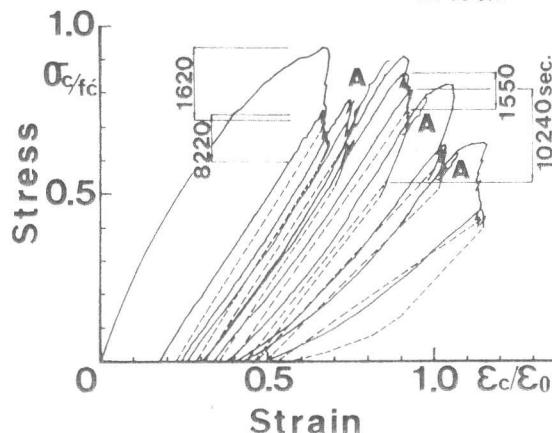


図2 固定高ひずみ下の応力の経時変化

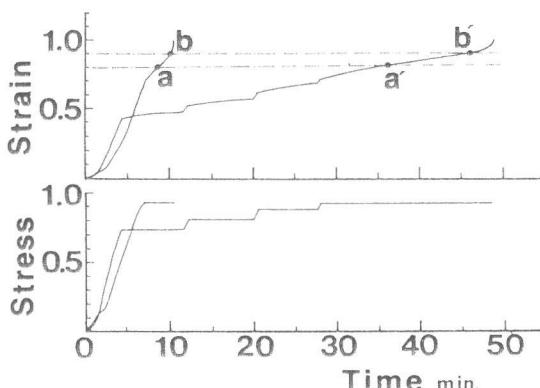


図3 応力経路を変えたときのひずみ変化

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*を付ける。）に分離を行った。

### 3.1 弾性ひずみ（回復ひずみ）の経時変化

塑性ひずみが変化しない経路では、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<sub>o</sub>*（定数）を用いて式（2）で定義される。

$$d\varepsilon_e = \frac{\partial \varepsilon_e}{\partial \sigma_e} d\sigma_e + \frac{\partial \varepsilon_e}{\partial t} dt \equiv d\varepsilon_{ed} + d\varepsilon_{ei}$$

$$\sigma_e = E_o \varepsilon_{ei} \quad (E_o = \frac{\varepsilon_e}{\sigma_e}) \quad (2)$$

瞬間弾性ひずみ*ε<sub>ei</sub>*は、瞬間除荷（Δt=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<sub>ed</sub>*は応力開放時（dσ<sub>e</sub>）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がわかる。

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。

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

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。

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

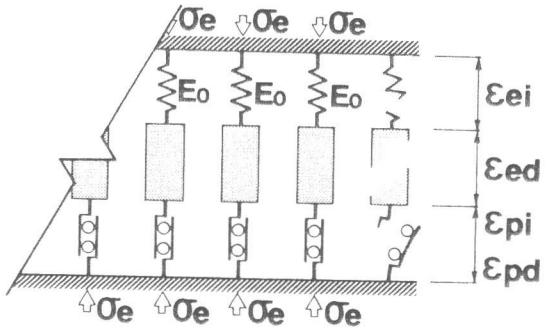


図4 弹塑性破壊の力学モデル

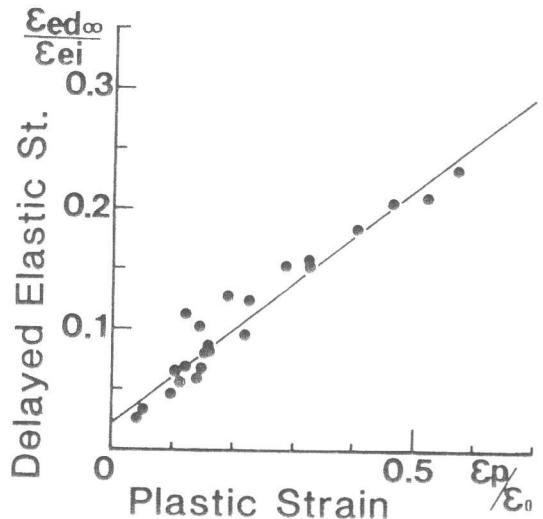


図5 遅れ弾性の最終回復量と塑性の関係

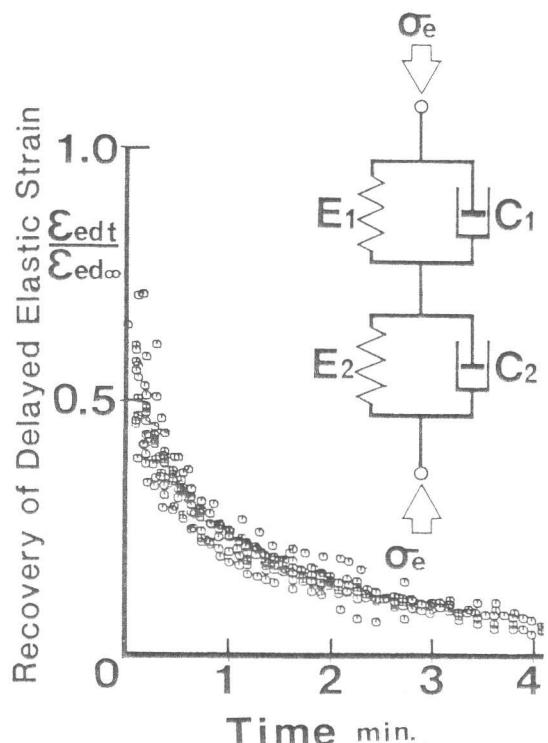


図6 遅れ弾性ひずみの経時変化

第2章の結果にも見られるとおり、要素応力を瞬間に変化させたときに塑性ひずみが変化しない準弾性領域が存在することが認められる。そこで、クリープおよびリラクセーションさせた後に応力が瞬間的 ( $\Delta t = 0$ ) に増加する経路を持つ実験を20ケース行い、準弾性領域と非線形領域の境界と時間的に塑性が進む経路の一例を図7に示した。弾性領域境界での要素応力は、塑性ひずみでほぼ一意的に表されることが認められる。したがって瞬間塑性ひずみ増分は瞬間塑性ポテンシャル  $G$  を用いた塑性条件式(5)で求めることができる。

$$G = 0.019 \varepsilon_0 (\sigma_e / f_c)^{2.06} - \varepsilon_p \quad (5)$$

$d\varepsilon_{pi} = 0$  ただし  $G < 0$  或いは  $G = 0, dG < 0$   
 $d\varepsilon_{pi} \neq 0$  ただし  $G = 0$  かつ  $dG = 0$

遅れ塑性ひずみの変化は、式(5)の塑性流れ条件を満足しないときの塑性ひずみの変化として実測される。ここで、遅れ塑性ひずみ速度を  $\dot{\varepsilon}_p$  と  $\sigma_e$  の2変数で表したもののが図8である。この結果によれば、多少のばらつきはあるが、経路が異なっていても  $\sigma_e$  と  $\dot{\varepsilon}_p$  が確定すると遅れ塑性ひずみ速度がほぼ一意的に決定されることがわかる。これは塑性ひずみが要素応力と時間で微分可能であることを実証するものであり、式(6)で速度を予測するものとした。なおデータのばらつきは塑性速度が破壊の関数でもあることを示唆しているが本文では簡略化のため無視した。

$$\ln(\dot{\varepsilon}_{pd}/\varepsilon_0) = (6.22 \sigma_e / f_c - 13.8) + (65.2 \sigma_e / f_c - 142) \dot{\varepsilon}_p / \varepsilon_0 \quad (6)$$

### 3.3 破壊パラメータの経時変化

塑性ひずみと同様に破壊パラメータを要素応力と時間で全微分して、瞬間および遅れ破壊を定義する。

$$dK = \frac{\partial K}{\partial \sigma_e} d\sigma_e + \frac{\partial K}{\partial t} dt = dK_i + dK_p \quad (7)$$

破壊も塑性と同様に、要素応力の増分に対して変化しない領域が認められた。図9は準弾性的なこの境界上での要素応力—破壊パラメータの包絡線を表したものである。瞬間塑性と同様の議論より式(8)が定式化された。

$$H = K - \exp(-0.348 (\sigma_e / f_c)) \quad (8)$$

$dK_i = 0$  ただし、 $H < 0$  或いは  $H = 0$  かつ  $dH < 0$   
 $dK_i \neq 0$  ただし、 $H = 0$  かつ  $dH = 0$

また、遅れ破壊の増分(破壊速度)を各要素応力レベルで図10に示す。図10のみから判断すると、時間経路が異なっても、その速度はほぼ要素応力と時間で一意的に決定されると判断することができる。そこで、本モデルでは以下の構成式を採用した。

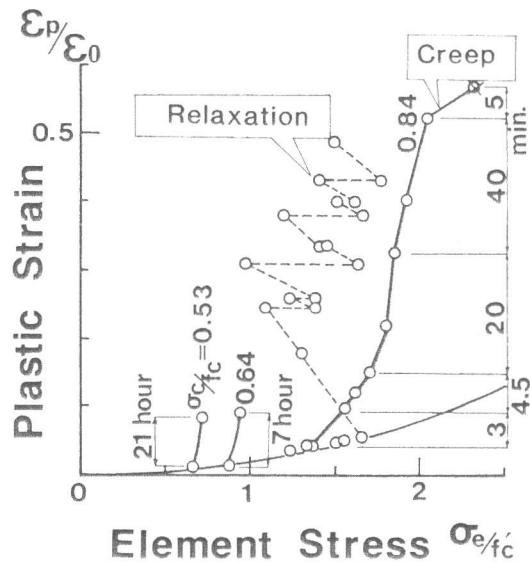


図7 塑性ひずみの経時変化と経路

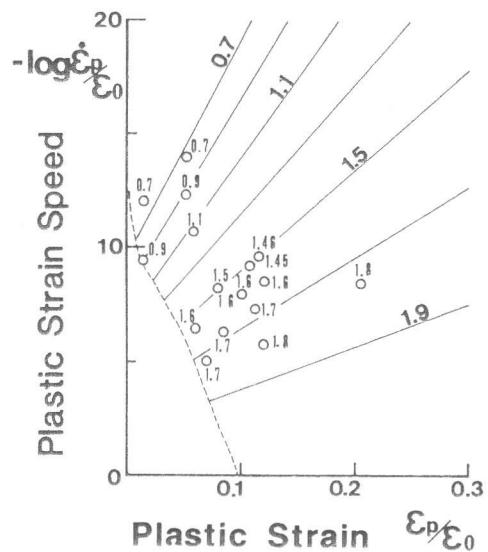


図8 塑性速度と要素応力・塑性ひずみの関係

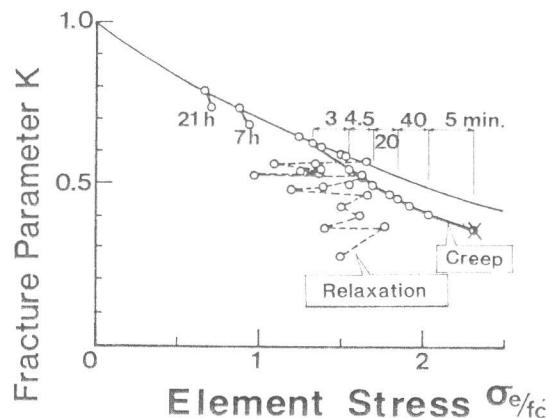


図9 破壊パラメータの経時変化と経路

$$K_d = \frac{1}{60} \exp \left( 0.85 \left( \frac{H}{K-H} \right) \left( \frac{\sigma_e}{f_c} \right) \right) \cdot \frac{1}{K-H} \quad (9)$$

$$\cdot e^{-0.8} \cdot \left( \exp \left( 4.17 \left( \frac{\sigma_e}{f_c} \right) \right) - 1 \right)$$

式(4,7)の偏微分係数が確定したことにより、任意の時間経路に対する塑性と破壊を評価することが可能となった。また、時間およびひずみ経路の影響は構成式(4,7)の積分経路として評価されるのである。

#### 4. 数値解析結果と考察

式(1)から式(9)が本モデルの構成方程式である。これを連立積分することで実際の時間依存変形挙動を予測することができる。図1に高圧縮クリープひずみの予測値と実測値を示す。塑性ひずみおよび破壊の経時変化はほぼ実際の変形に相応している。

図11は高圧縮領域で応力を固定したのち、繰り返しを含まずにひずみの時間変化を表したものである。固定応力が1軸圧縮強度の80%を越えた場合、極めて大きなひずみ速度をもつことが解析においても予測されている。さらに固定後急速にひずみ速度が低下する領域A、ひずみ速度がほぼ一定となる領域Bおよびクリープ破壊前のひずみ速度の上昇領域Cが解析においても予測されている点は興味深い。解析では領域Aでは遅れ弾性ひずみ、遅れ塑性ひずみ、遅れ破壊の速度が非常に大きいのにに対して、領域Bは破壊速度はほぼ定常で塑性ひずみの進行が変形を支配している。領域Cでは破壊が塑性にくらべて早く、要素応力の増加も大きいため、最後には塑性速度も飛躍的に上昇する結果が得られたのである。

#### 5.まとめ

本研究で得た知見は以下の通りである。

1) 時間の経過に伴うコンクリートのひずみの変化は、応力あるいはひずみの時間経路に大きく影響される。この複雑な変形挙動は弾性ひずみ、塑性ひずみおよび除荷剛性の経時変化によってもたらされたものであることが実験から確認された。

2) 弹塑性破壊モデルを導入して、要素応力(瞬間弾性ひずみ×弾性係数)と時間のパラメータによって、塑性ひずみと破壊パラメータの速度を予測することが可能となった。

3) 時間履歴がコンクリートの変形挙動に及ぼす効果は塑性・破壊速度の積分路として計算に反映される。高応力下のクリープ挙動をほぼ正しく予測することが解析値と実験値の比較から明らかになった。以上の結論は構造解析を考慮すると、限定された状態でのみ実証されたものである。しかし耐震解析で用いる、大ひずみ域で繰り返しの効果をも含む構成式導出の方向がおよそ見出されたと思われる。

なお、本研究の一部は昭和58年度文部省科学研究補助金(課題番号58850100)を受けて行ったものである。

#### 参考文献

- (1) Rusch, H.: Researches Toward a General Flexural Theory for Structural Concrete, Jour. of ACI, 1960, July
- (2) 前川宏一, 岡村甫, 「弾塑性破壊モデルに基づくコンクリートの平面応力構成則」、コンクリート工学, Vol.21, No.5, 1983.5 pp.88 ~pp.99
- (3) 橋本 純, 原田修輔, 「歪の非回復成分を考慮したクリープ構成則への1アプローチ、第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集」, 1983.6, pp.177 ~180
- (4) 田畠昌伸, 前川宏一, 1軸高応力下におけるコンクリートの塑性・破壊の時間進行特性、第38回土木学会年次学術講演会講演概要集, 1983.10

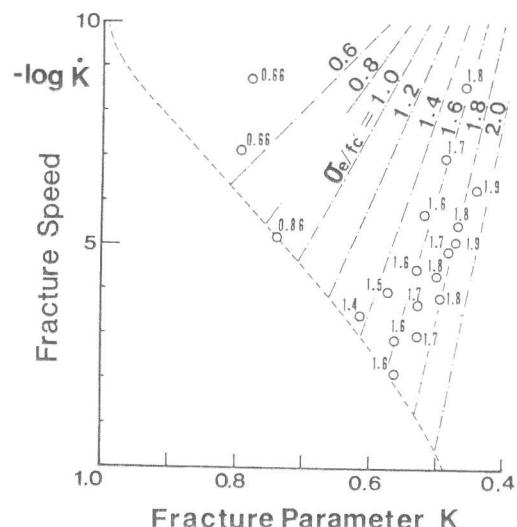


図10 破壊速度と要素応力・破壊の関係

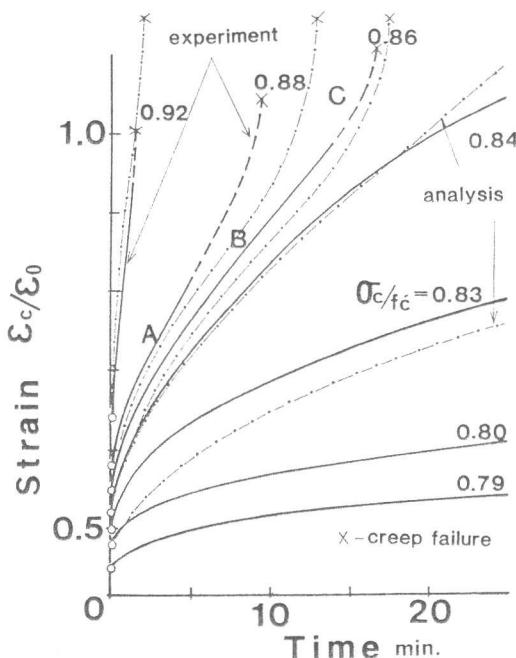


図11 高応力クリープひずみの予測