

[73] 高引張力・高温におけるコンクリートの時間依存変形

正会員 R. VIRACH (東京大学大学院)
 正会員 ○森本 宏 (住友セメント中央研究所)
 正会員 鈴木 正治 (東京大学工学部)
 正会員 上田 多門 (東京大学工学部)

1. まえがき

近年、温度応力発生メカニズムを解明し、温度ひびわれの危険性を予測しようという温度応力解析が行われるようになった。この解析上の解明すべき点として、コンクリート打設後の温度履歴、境界条件、熱特性値、変形性および強度等の精度良い推定が挙げられる。変形性に関しては、特に高温状態での引張応力による時間依存変形に関する研究は少なく、マシブなコンクリート内部の変形挙動を定量的に評価するに至っていない。

本研究は、このような観点から、高引張応力下および高温下でのコンクリートの時間依存変形挙動について実験検討し、破壊の概念を導入した粘弾塑性モデルを提案するものである。

2. 実験概要

2. 1 急速繰返し引張試験

コンクリートの時間依存変形モデルを提案するにあたり必要となる載荷直後の変形挙動を把握するために、室温で材令3日および28日、60℃で材令3日のコンクリートで試験を行った。供試体の詳細は図1に示す通りで、材令1日で脱型し、60mmのワイヤストレーンゲージを貼付した後、試験日まで室温で養生した。試験中供試体からの水分の蒸発を防ぐため、試験直前に供試体をコーティングした。荷重の大きさは、推定した引張強度の20%を1ステップとし、約10μ/秒の速度で破壊するまで載荷と除荷を繰返し続けた。また、各荷重ステップごとにその荷重を10秒間保持した。

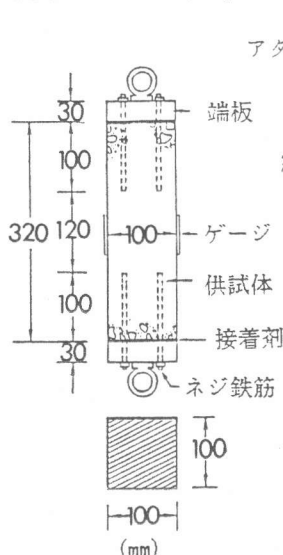


図 . 1 急速繰返し引張供試体

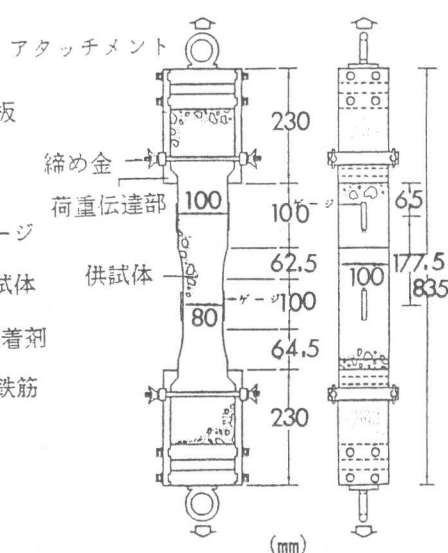


図 . 2 引張クリープ供試体

2. 2 一軸引張クリープ試験

一軸引張試験は、供試体への荷重の伝達が難しく、また応力集中が生じ易いので特に注意を払い、図2に示すような供試体の形状、寸法およびアタッチメントを採用した。供試体の作成および養生等は、急速繰返し引張試験用供試体と同じである。実験パラメータは、表1に示す4つの要因について考慮した。

表 . 1 実験パラメータ

コンクリートの材令	3日および28日
応力レベル	40～90%
温度	室温(20～30℃)および60℃
載荷時間	0.33, 1.5, 6.0および24.0時間

載荷システムは図3に示す通りで、応力が載荷中に変動しないよう供試体を介して重りを吊り上げる方式をとった。60℃における試験では、温度制御装置を併用し、載荷前に予め供試体を加熱(2～3時間)して、供試体の温度が60℃になった後に載荷した。所定の荷重を載荷後、最初の測定が終了するまでには約20秒程要し、以後載荷時間に応じた間隔で測定した。また、回復ひずみの測定は、載荷中に生じる回復可能なひずみが除荷後、載荷時間と同じ時間ですべて回復するという仮定に基づいて行った。

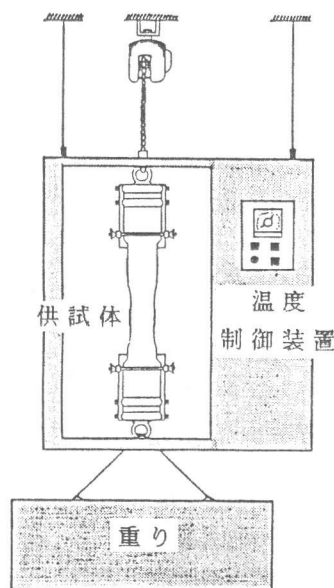


図 . 3 載荷システム

3. 時間依存変形モデル

3. 1 基本的レオロジー要素

モデル化に先立ち基本的レオロジー要素としてバネ、摩擦要素およびダッシュポットの3基本要素を考えた。バネは、フックの法則に従う完全弾性要素で、弾性成分を表し、摩擦要素は、ひずみ硬化領域を示す。そして、ダッシュポットは、遅れ成分を表すものである。

3. 2 破壊概念

コンクリートの応力とひずみの関係の非線形性を説明するために、まず塑性が挙げられるが、除荷時にみられる剛性の低下は、塑性だけでは十分に説明できない。そこで、弾性ひずみエネルギーを保有可能なコンクリートの構成要素が減少するという概念が必要となり、これを破壊と定義する。また、個々の構成要素の破壊強度は、確率密度分布の形で存在し、それはコンクリートの品質に依存すると仮定する。

3. 3 粘弾塑性破壊モデル

ひずみの時間依存性を表すために、弾・塑性破壊の概念に時間の要因を導入した粘弾塑性破壊モデルを考える。コンクリートを図4に示すように、微小構成要素が並列に集合した複合体と仮定する。各構成要素は固有の強度を持ち応力の一部を分担する。図5は時間の要因を考慮するために、すべての変形を応力が作用した瞬間に起こる変形と遅れて起こる変形に分け、構成要素をモデル化したものである。瞬間変形を表す部分は前川モデル¹⁾と呼ばれ、バネと摩擦要素を直列につなげたもので、遅れ変形を表す部分は、ダッシュポットと前記の前川モデルの要素を並列につなげたものである。また、瞬間変形を表す部分と、遅れ変形を表す部分の破壊強度分布は同じであると仮定するが、破壊強度は必ずしも等しくなる必要はない。遅れ変形を表す部分の応力とひずみの関係は、

$$\sigma = E_0(\epsilon_d - \epsilon_{lp}) + (\nu L/A) d\epsilon_d/dt \quad (1)$$

と表すことができ、 $t=0$ で $\epsilon_d=0$ となることより、 ϵ_d について解くと

$$\epsilon_d = \lambda [1 - \exp(-t/\alpha)] \quad (2)$$

となる。ここに、 E_0 は初期接線弾性係数、 ϵ_d は全遅れひずみ、 ϵ_{lp} は全塑性ひずみ、 λ および α は σ 、 E_0 および粘性係数 ν の関数である。

3. 4 時間依存応力-ひずみ関係とひずみの構成成分

前述のモデルに一定応力 σ が作用した場合の、任意の時刻 t における応力とひずみの関係は次のように表される。

$$\sigma = K E_0 [\epsilon - \epsilon_{de} - \epsilon_p] \quad (3)$$

ここに、 K は破壊率で、応力を支えることができる要素の生存率、 ϵ_{de} は時刻 t までに起こる遅れ弾性ひずみ、 ϵ_p は時刻 t までに起こる全塑性ひずみである。

時間の要因がひずみおよび破壊の進行に寄与することを考慮して、破壊率およびひずみ成分を分離すると以下ようになる(図6参照)。破壊率 K は、

$$K = K_1 - F_d = 1 - F_1 - F_d \quad (4)$$

ここに、 K_1 は载荷直後の要素の生存率、 F_1 は载荷直後の要素の破壊率、 F_d は遅れて起こった要素の破壊率である。

塑性ひずみ ϵ_p は、

$$\epsilon_p = \epsilon_{lp} + \epsilon_{dp} \quad (5)$$

$$= \epsilon_{lp} + \epsilon_{dp}^* + \epsilon_{lp}^{df} + \epsilon_{dp}^{df} \quad (6)$$

ここに、 ϵ_p は全塑性ひずみ、 ϵ_{lp} は瞬間塑性ひず

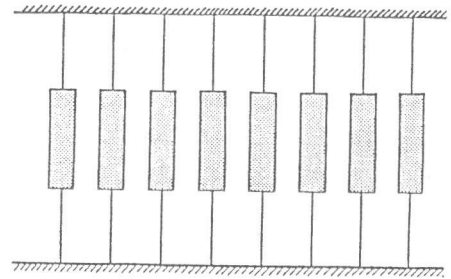


図 4 微小構成要素によるモデル化

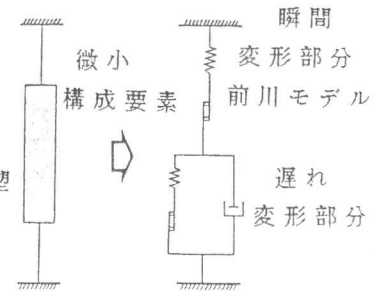


図 5 粘弾塑性破壊モデル

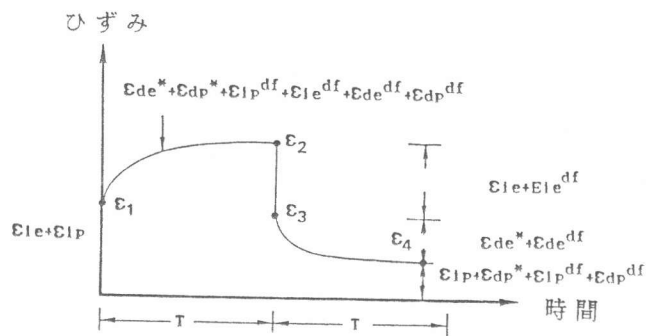


図 6 ひずみの構成要素

み, ϵ_{dp} は破壊による増分を含む遅れ塑性ひずみ, ϵ_{dp}^* は遅れ破壊による増分を含まない遅れ塑性ひずみ, ϵ_{lp}^{df} は遅れ破壊が起こったときに生じる瞬間塑性ひずみ, ϵ_{dp}^{df} は遅れ破壊が起こったときに生じる遅れ塑性ひずみである。

弾性ひずみ ϵ_e は,

$$\epsilon_e = \epsilon_{ie} + \epsilon_{de} + \epsilon_{ie}^{df} \quad (7)$$

$$= \epsilon_{ie} + \epsilon_{de}^* + \epsilon_{de}^{df} + \epsilon_{ie}^{df} \quad (8)$$

ここに, ϵ_e は全弾性ひずみ, ϵ_{de} は破壊による増分を含む遅れ弾性ひずみ, ϵ_{de}^* は遅れ破壊による増分を含まない遅れ弾性ひずみ, ϵ_{ie}^{df} は遅れ破壊が起こったときに生じる瞬間弾性ひずみ, ϵ_{de}^{df} は遅れ破壊が起こったときに生じる遅れ弾性ひずみである。

温度および材令の影響は, 要素の破壊率, 弾性係数, ダッシュボットの粘性係数および塑性ひずみで考慮した。

4. 実験結果およびモデルへの適用

4.1 急速繰返し引張試験

この試験では, 遅れひずみ要素の進展は非常に小さく無視できるという仮定の基に, 応力を0に戻したときに残留するひずみを瞬間塑性ひずみとみなす。前述した摩擦要素の概念から, 塑性ひずみは要素の応力と関係がある。測定データより, 要素の応力は瞬間弾性ひずみにより最も良く表示される。このことより, 瞬間塑性ひずみは, 瞬間弾性ひずみに関係付けて評価でき, 両ひずみを以下に示す ϵ_t により正規化する。

$$\epsilon_t = f_t / E_0 \quad (12)$$

図7に, 正規化 (以後等価と呼ぶ) した瞬間塑性ひずみと瞬間弾性ひずみの関係をしめす。この図より, 室温の場合同一ひずみレベルでは, 材令3日の塑性ひずみの方が大きく現れることがわかる。これはセメントペースト中の非結合水の量が材令が若い程多いと考えられるからで, 高温の場合は, セメントペースト中の空隙水の粘性が低下するので, さらにそれが助長されたと考えられる。

載荷直後の破壊を表す瞬間破壊率 F_I は, 繰返し載荷の包絡線から次式により算出できる。

$$F_I = 1 - \sigma / (\epsilon_i - \epsilon_{ip}) E_0 \quad (13)$$

ここに, ϵ_i は全瞬間ひずみ, E_0 は包絡線における初期接線弾性係数である。材令3日および28日の瞬間破壊率と等価瞬間弾性ひずみの関係をそれぞれ図8, 9に示す。材令3日の値のばらつきは幾分大きい, 同一ひずみレベルで比較すると, 材令28日の方が大きい破壊率を示した。

4.2 一軸引張クリープ試験

遅れ弾性ひずみは, 図6に示すクリープ曲線の ϵ_3 と ϵ_4 の差から直接求めることができる。測定データ

等価瞬間塑性ひずみ (ϵ_{lp}/ϵ_t)

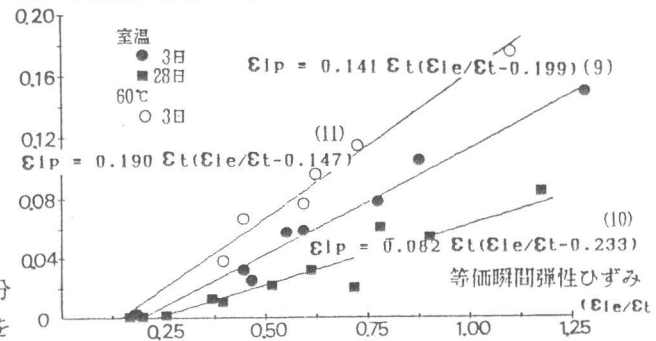


図. 7 等価瞬間塑性ひずみと等価瞬間弾性ひずみの関係

瞬間破壊率 (F_I)

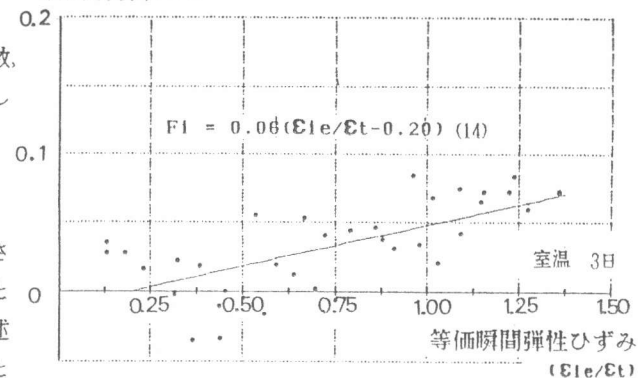


図. 8 瞬間破壊率と等価瞬間弾性ひずみの関係

瞬間破壊率 (F_I)

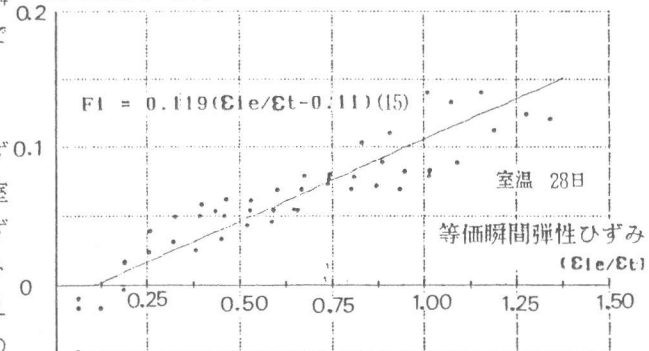


図. 9 瞬間破壊率と等価瞬間弾性ひずみの関係

等価遅れ弾性ひずみ ($\epsilon_{de}/\epsilon_{ie}$)

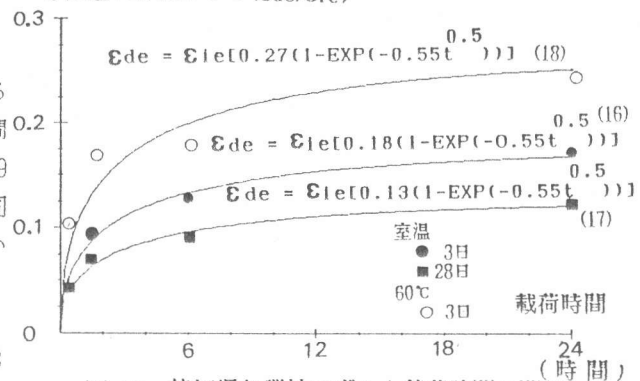


図. 10 等価遅れ弾性ひずみと載荷時間の関係

より遅れ弾性ひずみと応力の間に線形関係がみられたので、この関係を用い、遅れ弾性ひずみを瞬間弾性ひずみで除し正規化し、この値と載荷時間の関係をプロットしたのが図10である。遅れ弾性ひずみは、材令が若い程、また温度が高い程大きくなる傾向にあることがこの図よりわかる。

遅れ塑性ひずみは、図6に示すクリープ曲線の ϵ_4 と先に求めた瞬間塑性ひずみとの差として算出できる。遅れ変形を表す部分の特徴は、瞬間変形を表す部分と同じであるという本モデルの仮定に基づき、遅れ塑性ひずみは、瞬間塑性ひずみに比例する関数として表すことができる。瞬間塑性ひずみにより正規化した遅れ塑性ひずみと載荷時間の関係を図11に示した。

遅れ弾性ひずみと遅れ塑性ひずみを比較すると、遅れ弾性ひずみは短時間のうちにその大部分が生じることがわかる。本モデルにおいては、遅れ弾性ひずみに及ぼす温度の影響を、式(2)中の λ の変化とし、遅れ塑性の場合はさらに、時間シフト法則^{2),3)}の概念を導入して α も変化させた。

遅れ破壊率 F は、次式および式(4)を用い、測定データから計算される。

$$K = \sigma / (E_0 \cdot \epsilon_{lr}) \quad (22)$$

ただし、 ϵ_{lr} は瞬間回復ひずみ

ここで、載荷中一定である仮定される初期接線弾性係数は、式(9)と(10)より ϵ_{lp} を、式(14)と(15)より F_1 を求め、これと全ひずみ ϵ および応力 σ を式(3)に代入することにより決定することができる。ただし、ここでは瞬間変形を考えるので、全遅れひずみ ϵ_d を0とみなした。遅れ破壊率 F_d と時間の間には相関はみられず、また長時間載荷の場合で、 F_d の値が負になったものもあった。これは、長時間載荷の場合、 E_0 を一定と仮定するのに無理があること、および計算過程で ϵ_{lp} , F_1 および E_0 のような不確定数が含まれているかで、時間の経過に伴う遅れ破壊の存在を否定するものではないと考える。

5. 結論

本研究で得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) 提案した粘弾塑性破壊モデルは、コンクリートの時間依存変形を物理的に説明するが、個々のひずみの構成要素はまだ完全に明らかになっておらず、さらに検討が必要である。
- (2) 載荷時材令が遅い程、破壊は進展するが、塑性変形は減少する。
- (3) 遅れ弾性ひずみに及ぼす温度の影響は、みかけの収束値の増加として表され、遅れ塑性ひずみの場合は、さらに時間シフト法則の概念を導入して説明される。
- (4) 遅れ弾性のひずみは、遅れ塑性ひずみと比較すると、速い時間のうちにその多くが生じる。

<謝辞> 本研究は、昭和58年度文部省科学研究費補助金(課題番号 58460159)を受けて行ったものである。研究に際し御指導、御助言を頂いた東京大学岡村甫教授ならびに長岡技術大学前川宏一助手に感謝します。

[参考文献] 1) 前川・岡村：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. 88~99

2) MUKADDAM, M.A and BRESLER, B. : Behavior of Concrete under Variable Temperature and Loading, Concrete Nuclear Reports, SP-34, ACI, 1972

3) FAHMI, H.M., BRESLER, B. and POLIVKA, M. : Prediction of Creep of Concrete at Variable Temperature, ACI Journal, 1973.10

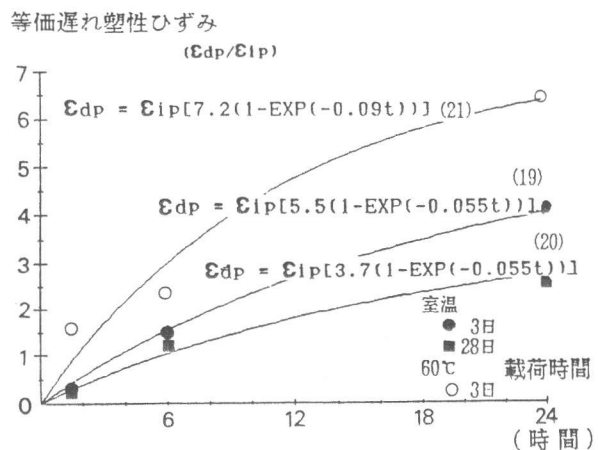


図.11 等価遅れ塑性ひずみと載荷時間の関係