

# [45] 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

正会員 ○橋本 純 (東京大学大学院)

正会員 原田 修輔 (住友セメント中央研究所)

## 1. まえがき

ダム堤体などのマスコンクリートにおいては、打設後のセメントの水和熱の発生とその後の冷却に伴ない、膨張と収縮をおこす為、拘束によって、温度応力を発生するが、これは同時におこるコンクリートの引張クリープによって緩和される。又、このような構造物では、引張力による変形の為にひびわれを発生する事もある。こうした現象に対処する為には、温度の履歴を受け、ひびわれを発生するような高応力の場合の引張クリープを算定する必要があるが、従来から広く行なわれているクリープ予測の手法では、こうした現象は必ずしもうまく追跡する事ができないというのが現状である。

本研究では、こうした点に鑑み、温度履歴と高応力下という2つの問題のうち、高応力下の引張クリープについて、これを、コンクリートの破壊(fracture)の進行という観点からとらえ、コンクリートのクリープ特性をより良く表わせる様なモデルをつくる為のアプローチを試みた。尚、ここでクリープとは、コンクリートの荷重による時間的変形の全てを含めたものである。

## 2. 実験概要

実験は純引張によって行ない、引張応力によるクリープ歪と、除荷後の歪の回復(クリープリカバリー)を測定した。

### (1) 供試体

実験には図1に示す2種類の形状の供試体を用い、乾燥の影響を除去する為に表面にアクリル系塗料を十分にぬってシールした。又、歪はワイヤーストレインゲージによって測定したが、

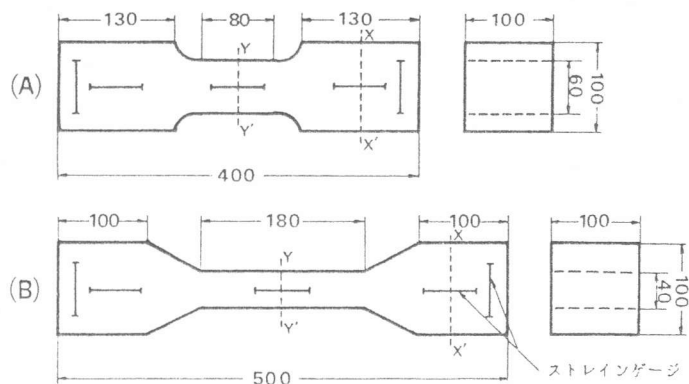


図-1 供試体形状(単位mm)

ゲージ貼付位置には予めエポキシ系接着剤にてベースをつくり、若材令のコンクリート供試体の内部から上がってくる水分がゲージ裏面に及ばない様にした。さらに、外部からの湿気を防ぐ為、ゲージをワックスにより、コーティングした。

### (2) 載荷及び測定方法

実験の全景を図2に示した。供試体の上下に、エポキシ系接着剤によってチャックをつけ、上部は引張用のロードセルを介してクレーンに下げた。又、下部にはワイヤを通して、荷重用のコンクリートブロックをつけた。そして応力の計算をし、所定の応力レベルを得る為に、ブロックだけで荷重が足りない場合は、ブロックの上に、D51鉄筋を切って作ったおもりを加えて荷重を調節した。そして、載荷開始の時は、クレーンを上げて全体を浮かせる事により、供試体に純引張荷重をかけた。

又、クリープには、供試体周囲の温度が影響を与える為、実験は、測定中の温度変化が小さい地下室で行ない、供試体の荷重のかからない方向へもゲージをはって歪を測定し、温度変化や乾燥の影響をチェックした。その結果、この測定方法によれば、温度変化や乾燥の影響による歪の変化は小さく、無視し得るという事が分かった。

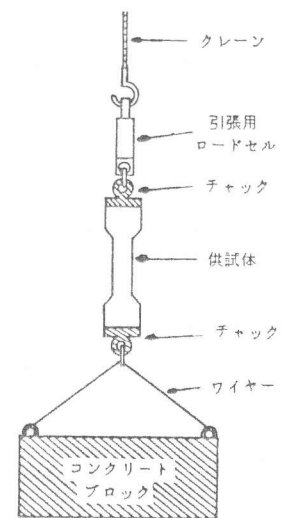


図-2 実験の全景

歪の測定は、デジタルストレインメーターにインターフェイスとマイコンを組み合わせたシステムにより、予め測定タイムスケジュールをインプットしておき、自動測定を行なった。

(3) 応力レベルと載荷時間

実験は、合計10本の供試体で行なった。各々の実験のパラメータを表1に示した。尚、回復時間とは、除荷してからクリープリカバリーによる歪の減少がとまるまでの時間の事である。

3. 実験結果と考察

実験の結果を図3に示した。

次に本文で取り扱っている歪の構成成分の概念及びモデル化の方法について述べる。

(1) 歪の構成成分

コンクリートに継続的な荷重が加わった場合に生じる歪は、弾性歪( $\epsilon_{el}$ )、塑性歪( $\epsilon_{pl}$ )、破壊による歪( $\epsilon_{fr}$ )からなっている。そして各々に、載荷の瞬間に生じる瞬間歪( $\epsilon_i$ )と、時間が経過するうちに生じてくる遅れ歪( $\epsilon_d$ )とがある。すなわち、歪を構成成分に分類すると、

弾性歪 (瞬間弾性歪:  $\epsilon_{eli}$  遅れ弾性歪:  $\epsilon_{del}$ )

塑性歪 (瞬間塑性歪:  $\epsilon_{ipl}$  遅れ塑性歪:  $\epsilon_{dpl}$ )

破壊歪 (瞬間破壊歪:  $\epsilon_{ifr}$  遅れ破壊歪:  $\epsilon_{dfr}$ )

となり、クリープによって生じる歪はこれらの和によって表わされる。次に各成分について述べる。

まず弾性歪は、コンクリートが弾性体として挙動する部分による歪であって、除荷すれば0に戻る回復性の歪である。次に、塑性歪はコンクリートが塑性流動をおこす事によって生じる歪であり除荷しても戻らない非回復性の歪である。最後に破壊歪について述べる。コンクリートを、構成要素の並列集合体としてみた場合、荷重が増加してゆくと、構成要素のうち弱いものから順に破壊してゆくと考えられる。そして、一部の要素が破壊して剛性を失うと、応力が再配分され、生存する残りの要素にかかる応力が増加する。破壊歪とはこのように、一部の要素に破壊が生じて、他の生存する要素にかかる応力が増加することによって生じる歪であり、構成要素が全て破壊してしまわないかぎり、除荷すれば0に戻る回復性の歪である。

表-1 実験パラメーター

供試体	形状	材令 (days)	引張強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	応力レベル		載荷時間 (hr)	回復時間 (hr)
				X-X'	Y-Y'		
NO1	A	3	10.3	0.39	0.65	0.5	0.5
NO2	A	3	10.3	0.51	0.85	0.5	1.0
NO3	A	5	13.3	0.54	0.90	0.5	1.5
NO4	B	7	15.1	0.26	0.65	6.0	4.0
NO5	A	5	13.1	0.51	0.85	6.0	4.0
NO6	B	8	18.2	0.36	0.90	6.0	4.0
NO7	B	9	16.0	0.38	0.94	6.0	4.0
NO8	A	7	17.9	0.39	0.65	20.0	5.0
NO9	A	7	15.2	0.51	0.85	20.0	5.0
NO10	A	6	13.2	0.56	0.94	20.0	5.0

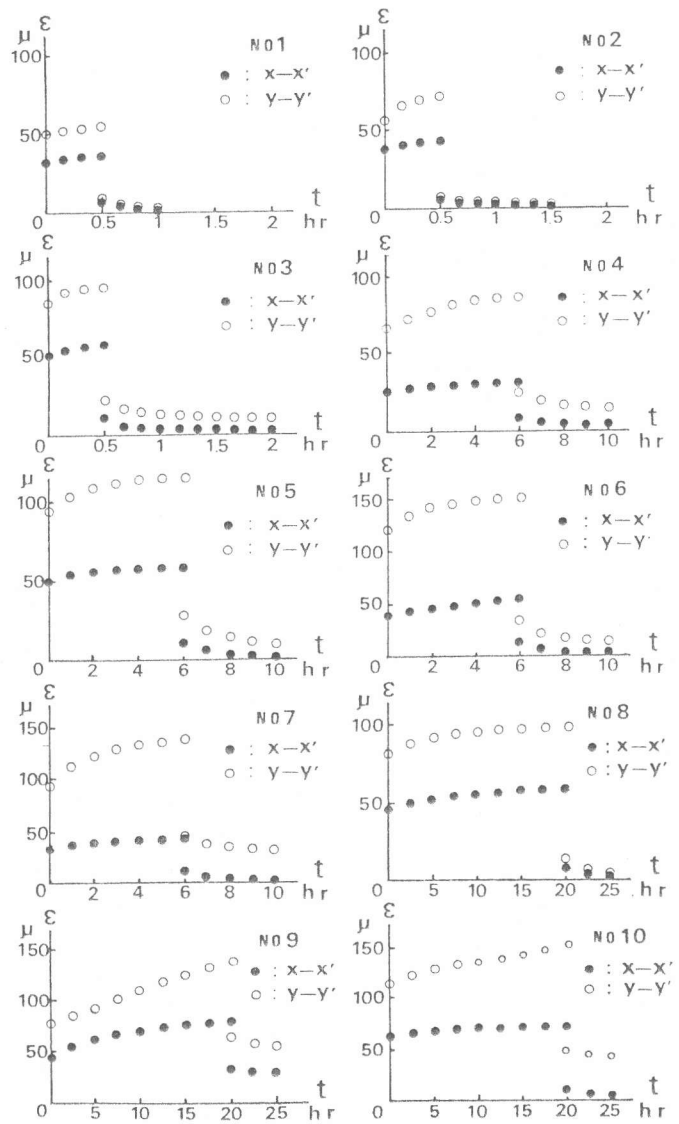


図-3 実験結果

(2) 歪の各構成成分の分離

一般的に、歪の各構成成分を図4の下図のような概念で捉える事ができる。まず、載荷の瞬間に生じる歪は、瞬間弾性歪( $\epsilon_{iel}$ )と瞬間塑性歪( $\epsilon_{ipl}$ )と瞬間破壊歪( $\epsilon_{ifr}$ )の和であり、除荷する直前には、遅れ弾性歪( $\epsilon_{del}$ )と遅れ塑性歪( $\epsilon_{dpl}$ )と遅れ破壊歪( $\epsilon_{dfr}$ )の分が増加している。次に除荷した瞬間には、瞬間弾性歪と瞬間破壊歪の分が戻り、時間が経つうちに遅れ弾性歪と遅れ破壊歪の分が戻ってゆき、最終的には瞬間塑性歪と遅れ塑性歪の分が回復せずに残留する。

歪の各成分の分離を行なう為に、「コンクリートの要素の破壊は、応力レベルがある程度以上にならないと生じない。」という事を仮定し、応力レベルが全ての供試体において0.6以下である図1のX-X'断面では破壊は生じていないとした。以下に具体的な分離手法を示す(図4参照)。

①-② =  $\epsilon_{ielx}$  → ②-③ =  $\epsilon_{iplx}$  → ③-④ =  $\epsilon_{delx}$   
 → ④-⑤ =  $\epsilon_{dplx}$  (X-X'断面では破壊が生じないと仮定している為、 $\epsilon_{ifrx}$ と $\epsilon_{dfrx}$ は共に0である。)

弾性歪は応力に比例すると考えられるので、 $\epsilon_{ielx}$ と $\epsilon_{delx}$ はそれぞれ、 $\epsilon_{ielx}$ と $\epsilon_{delx}$ に図1のY-Y'断面とX-X'断面の応力の比を乗じれば求める事ができる。

②-① =  $\epsilon_{iely}$  → ③-② =  $\epsilon_{iply}$  → ④-③ =  $\epsilon_{dely}$  → ⑤-④ =  $\epsilon_{dply}$  → ⑥-⑤ =  $\epsilon_{dfr}$

以上の手順で、X-X'断面とY-Y'断面の歪をそれぞれの構成成分に分離する事ができる。

(3) 各構成成分のモデル化

上述した方法により、歪を各構成成分に分離し、それらをモデル化する事を試みた。尚その場合、瞬間歪は応力レベルの関数として表わし、遅れ歪は応力レベルと時間の関数で表わす事にした。

・瞬間弾性歪 ( $\epsilon_{iel}$ )

図5は、瞬間弾性歪を応力レベルに対してプロットしたものである。この結果より、瞬間弾性歪は原点を通る直線で表わす事とした。

$\epsilon_{iel} = 95 \times \left(\frac{\sigma_t}{f_t}\right)$

・瞬間塑性歪 ( $\epsilon_{ipl}$ )

図6は、瞬間塑性歪を応力レベルに対してプロットしたものである。この結果より、瞬間塑性歪は原点を通る2次曲線で表わす事とした。

$\epsilon_{ipl} = 10 \times \left(\frac{\sigma_t}{f_t}\right)^2$

・瞬間破壊歪 ( $\epsilon_{ifr}$ )

図7に、瞬間破壊歪を応力レベルに対してプロットした。そして「破壊は応力レベルがある値以上にしないと生じない。」と仮定した事と対応させて、瞬間破壊歪は、グラフ上の(0.6, 0)の点を通る3次曲線で表わす事とした。

$\epsilon_{ifr} = 225 \times \left(\frac{\sigma_t}{f_t} - 0.6\right)^3$  但し  $\frac{\sigma_t}{f_t} \geq 0.6$   
 $\epsilon_{ifr} = 0$  但し  $\frac{\sigma_t}{f_t} < 0.6$

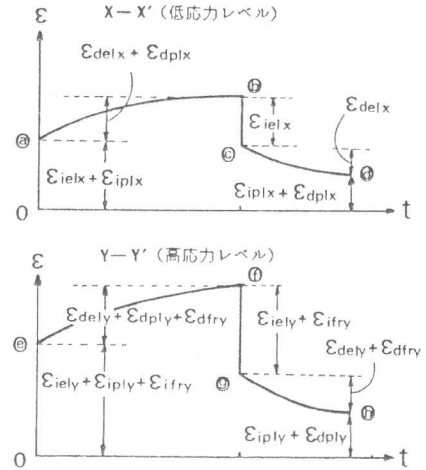


図-4 歪の構成成分の分離

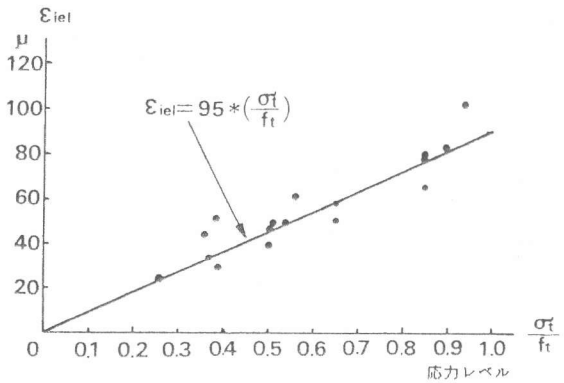


図-5 瞬間弾性歪

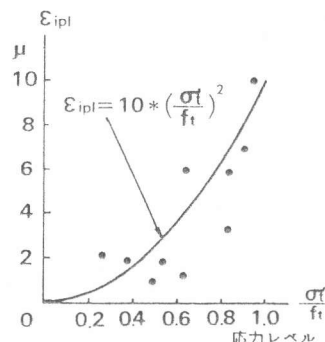


図-6 瞬間塑性歪

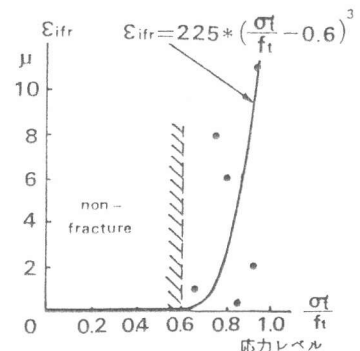


図-7 瞬間破壊歪

以上、図5.6.7より、瞬間歪の成分である、弾性歪・塑性歪・破壊歪は応力レベルに対し各々、1次、2次、3次の関数で表わす事ができた。次に遅れ歪について述べる。まず遅れ弾性歪は応力レベルと時間の関数の積で表わす事として、歪の分離から得られた遅れ弾性歪を応力レベルの値で割って基準化し、それを載荷時間に対してプロットしたのが図8である。又、同様の考えから遅れ塑性歪を応力レベルの2乗で割って基準化し、それを載荷時間に対してプロットしたのが図9であり、図10は遅れ破壊歪を(応力レベル-0.6)の3乗で割ったものを載荷時間に対してプロットしたものである。

・遅れ弾性歪 ( $\epsilon_{del}$ )

図8より、遅れ弾性歪は、時間に対しては、ある所までは増加して、以後一定値に近づいてゆく様な挙動を示す事が分かった。

$$\epsilon_{del} = \left(\frac{\sigma_t}{f_t}\right) \times 11 (1 - \exp(-0.7t)) \quad (t: \text{載荷開始からの時間, hr 単位})$$

・遅れ塑性歪 ( $\epsilon_{dpl}$ )

図9より遅れ塑性歪は時間的に上に凸の増力をする事が分かった。

$$\epsilon_{dpl} = \left(\frac{\sigma_t}{f_t}\right)^2 \times 9.46 t^{0.535}$$

・遅れ破壊歪 ( $\epsilon_{dfr}$ )

図10により遅れ破壊歪は時間と共に一定に近づく事が分かった。

$$\epsilon_{dfr} = (\frac{\sigma_t}{f_t} - 0.6)^3 \times 130 (1 - \exp(-0.5t))$$

(4) モデルによる計算値と実験値の比較

以上定式化した歪の構成成分のモデルを使ってクリープ歪を図4の概念に従って重ね合わせて計算して、実験から得られたデータと比較した。その例を図11と図12に示す。両者の比較から分る様に、このモデルはまだクリープ及びクリープリカバリーの歪を正確に予測できる程完全なものではない。特に、載荷時間が長くなった場合の遅れ歪について誤差が大きくなる傾向にある。これは今回モデルをつくるのに用いたデータの数が十分でなかった事に起因すると考えられる。しかし、精度の良い、十分な数のデータを蓄積した上でこの様なアプローチの仕方では歪を各構成成分に分離し、各々をモデル化すれば、コンクリートの弾性、塑性、破壊という挙動を考慮に入れた、より正確なクリープ構成則をつくる事が十分に可能であると思われる。

4. 結論

本研究の結果、クリープ歪を各構成成分に分離して、各々をモデル化するという方法は、コンクリートのもつ弾性、塑性、破壊といった挙動を考慮できる為、マスコンクリートの温度応力発生時に生じる、高応力下の引張クリープを算定する為には有望なアプローチである事が分かった。

今後はさらに、高応力下で載荷時間が長い場合について精度の良いデータを蓄積して、引張クリープの各構成成分のモデルの精度を上げる事と、クリープリカバリーの時間を正確に定量化する事が必要であると思われる。

<謝辞>

本研究を進めるにあたり、終始御懇切なる御指導を賜った、東京大学土木工学科 岡村甫教授に厚く御礼申し上げます。

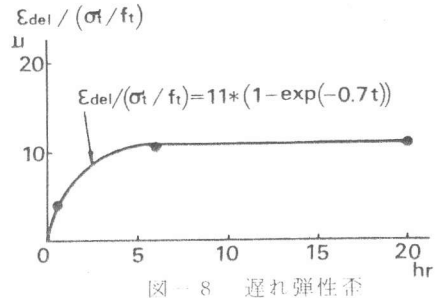


図-8 遅れ弾性歪

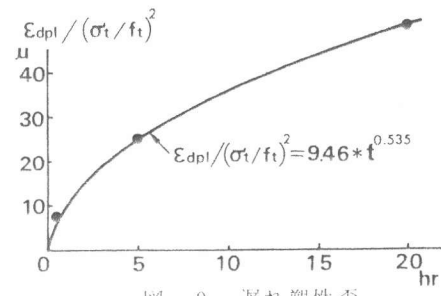


図-9 遅れ塑性歪

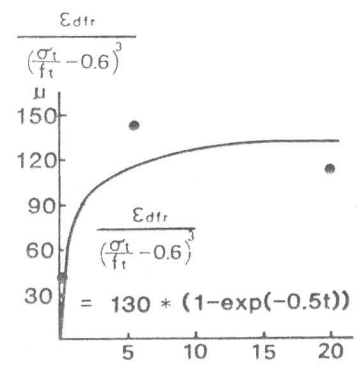


図-10 遅れ破壊歪

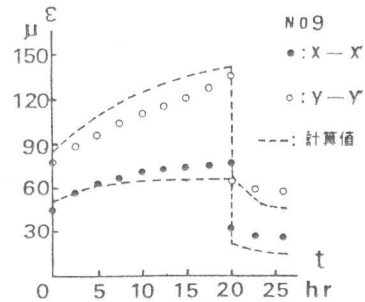
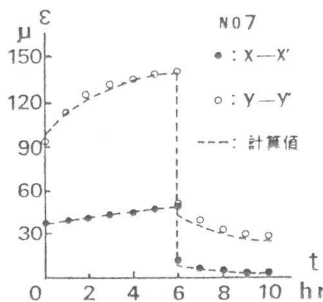


図-11 計算値と実験値の比較 図-12 計算値と実験値の比較