

論文

[1027] 応力履歴を受けたコンクリートのクリープ特性に関する研究

正会員 ○綾野克紀 (岡山大学工学部)

檜垣 智 (岡山大学大学院)

大西幸雄 (香 川 県 庁)

正会員 阪田憲次 (岡山大学工学部)

1. まえがき

変動応力下にあるコンクリートのクリープひずみを解析するために、クリープひずみの重ね合せ則がよく用いられる。変動応力下のクリープひずみの挙動を規定する法則には、重ね合せ則の他にクリープ硬化則がある。クリープの重ね合せ則が、応力増分によって生じるクリープひずみがそれと同じ大きさの応力によって生じるパージンクリープひずみと同一であるとするのに対して、クリープ硬化則は、過去に受けた応力履歴の影響を考慮して応力増分によるクリープひずみを決定しようとするものである。クリープの重ね合せ則と従来のクリープ硬化則の共通点は、クリープひずみと時間の関係を規定することにより、任意時間の応力増分によるクリープひずみを求めようとするところである。従って、クリープの構成方程式が線形式であれば、これらの法則に基づく計算値は線形または構成方程式の時間項の関数形に従うことになり、応力履歴を受けるコンクリートのクリープひずみを必ずしも適切に表すことのできない場合がある。

本論文は、応力履歴を受けたコンクリートのクリープひずみの持続応力に対する非線形性を実験的に明らかにし、非線形性を考慮した新たなクリープ硬化則を確立することを目的とする。

2. 実験概要

実験に使用したセメントは普通ポルトランドセメントで、粗骨材は碎石、細骨材は川砂である。コンクリートの配合を表1に示す。供試体は10cm×10cm×38cmの角柱で、打設後3日間水中養生し、その後は材令28日まで気中養生した。実験はすべて、温度19±1℃、湿度68±7%の恒温恒湿室内で行った。

第1, 2および3サイクル目の持続荷重の載荷は、それぞれ材令28日目, 91日目および154日目に行った。第1, 2サイクルの荷重持続期間は49日間で、サイクル間に、14日間の除荷期間を設けた。第1サイクルでは各々の供試体に28日圧縮強度の10%, 20%, 30%, 40%, 50%の一定持続荷重を載荷した。第2サイクルでは、第1サイクルにおける持続応力/強度比10%, 30%および50%の供試体には28日圧縮強度の10%, 20%, 30%, 40%, 50%の持続荷重を載荷し、第1サイクルにおける持続応力/強度比が20%および40%の供試体には28日圧縮強度の20%, 40%および50%の持続荷重を載荷した。第2サイクルで28日圧縮強度の20%, 40%および50%の持続応力を受けた供試体には、第3サイクルにおいて28日圧縮強度の10%, 20%, 30%, 40%, 50%の持続荷重を載荷した。

表1 コンクリートの配合

Max size (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m ³)				Admix- ture
					W	C	S	G	
20	4~5	2.0	66.1	44.0	185	280	808	1083	—

3. 実験結果および考察

3.1 第2サイクルにおけるクリープひずみと持続応力との関係

図1は、第2サイクル載荷時の初期弾性ひずみ（以下、弾性ひずみと略する）と14日目におけるクリープひずみとの関係を示した図である。第1サイクルにおいて載荷された持続荷重が28日強度の10%、20%、30%、40%および50%のときの実験値をそれぞれ曲線で近似すれば、第1サイクルにおける持続荷重が第2サイクルにおける持続荷重よりも大きい場合と小さい場合とで曲線の傾きが異なる。すなわち、第2サイクルにおける持続荷重が第1サイクルにおける持続荷重よりも大きい場合では、クリープひずみと弾性ひずみとの関係は、第2サイクル開始時材令で載荷したコンクリートのクリープと弾性ひずみの関係（図1中のVirgin creepを指す）を横軸方向に平行移動した曲線に一致する。また、第2サイクルにおける持続荷重が第1サイクルにおける持続荷重に等しいかまたは小さい場合では、クリープひずみと弾性ひずみとの関係は全て、一つの曲線で表される。

以上の実験結果は、図2で定義する記号を用いて以下のように要約できる。ただし、図2の横軸は、第2サイクルにおける弾性ひずみを表す。第1サイクルにおいて弾性ひずみ ε_D' を生じる荷重を受けたコンクリートに、第2サイクルにおいても同一の持続荷重を載荷した場合の時間 t におけるクリープひずみを $D'A'$ とする。また、バージンコンクリートに弾性ひずみ ε_D を生じさせる持続荷重によるクリープひずみ DA が、 $D'A'$ に等しいとする。バージンコンクリートの時間 t におけるクリープひずみ-弾性ひずみ関係を曲線 $O-ABC$ とすれば、第1サイクルにおいて弾性ひずみ ε_D' を生じる荷重を受けたコンクリートの第2サイクル時間 t におけるクリープひずみ-弾性ひずみの関係は、以下に説明するように ε_D' と ε_D から決定される曲線 $O-A'C'$ で表される。

いま、バージンクリープの構成方程式を以下のように表す。

$$\varepsilon_{cr} = f(\varepsilon_0, t, t') \quad \text{---(1)}$$

ここに、 ε_0 ; 第2サイクルにおける弾性ひずみ, t ; 材令 (日), t' ; 載荷時材令 (日)

第1サイクルにおいて弾性ひずみ ε_D' を生じる荷重を受けたコンクリートに、第2サイクルにおいてそれよりも大きい持続荷重が載荷される場合、第2サイクルにおけるクリープひずみ-弾

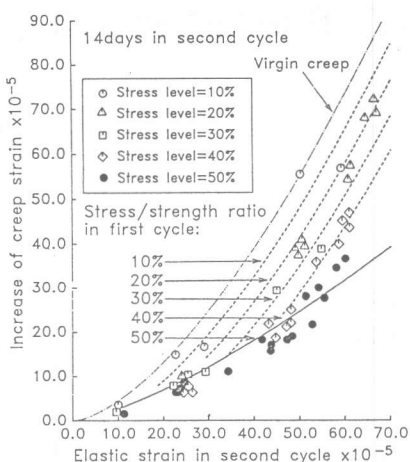


図1 第2サイクルにおけるクリープひずみと弾性ひずみの関係（実験結果）

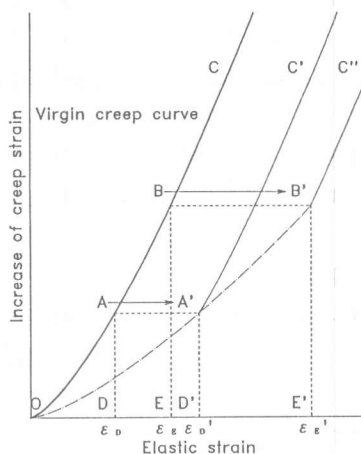


図2 第2サイクルにおけるクリープひずみと弾性ひずみの関係（概念図）

性ひずみの関係は、(1)式に基づく曲線0-ABCを横軸方向に平行移動することにより、

$$\varepsilon_{cr} = f(\varepsilon_D + (\varepsilon_0 - \varepsilon_D'), t, t_2) \quad \text{---(2)}$$

で表される。

一方、第2サイクルにおける持続荷重が第1サイクルのそれと等しいか小さい場合には、(1)式に基づく曲線0-ABCの横座標を $\varepsilon_D' / \varepsilon_D$ 倍することにより、

$$\varepsilon_{cr} = f((\varepsilon_D / \varepsilon_D') \times \varepsilon_0, t, t_2) \quad \text{---(3)}$$

で表される。

従って、クリープの構成方程式が与えられ、 ε_D' と ε_D が分かれば、(2),(3)式により第2サイクルの任意時間におけるクリープひずみと弾性ひずみの関係を決定することができる。図3の実線は、第1サイクルにおいて28日強度の10%、20%、30%、40%および50%の持続荷重を受け、第2サイクルにおいてもそれぞれ、同一持続荷重を受けるコンクリートのクリープひずみ(図2のD'A'に相当するクリープひずみ)に、実験値を用いて ε_D を決定し、(2),(3)式に基づき第2サイクル14日目のクリープひずみと弾性ひずみとの関係を示した曲線である。なお、(1)式のクリープ構成方程式には(4)式を用いた。(4)式は、材令28日、91日、154日で28日圧縮強度の10%、20%、30%、40%および50%の持続荷重を載荷し、84日~200日間測定したバージンクリープひずみをもとに最小2乗法によって求めたものである。

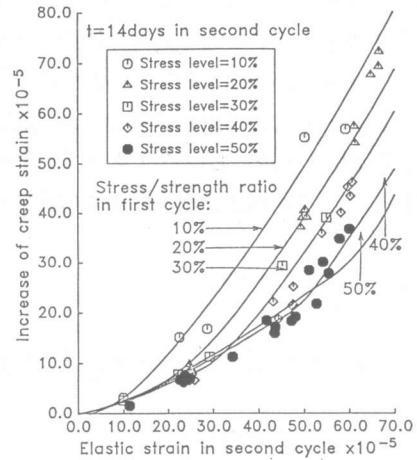


図3 (2),(3)式に基づく計算結果

$$\left. \begin{aligned} f(\varepsilon_0, t, t') &= a \varepsilon_0^B \\ a &= 0.44(t-t')^{-0.12} t'^{-0.21} \\ B &= 1.25(\log_e(t-t'+1))^{0.11} \end{aligned} \right\} \text{---(4)}$$

ここに、 ε_0 : 初期弾性ひずみ ($\times 10^{-5}$)、 t : 材令 (日)、 t' : 載荷時材令 (日)

(2),(3)式が表す曲線は、図3に示すように、実験結果の傾向を非常によく示しており計算値の実験値との適合性もあると思われる。

3.2 第3サイクルにおけるクリープひずみと持続応力の関係

図4と図5は第3サイクル載荷時の初期弾性ひずみと28日目におけるクリープひずみとの関係を示す図である。図中の一点鎖線は、各々のコンクリートの第3サイクル開始時材令までに生じたクリープひずみを表す。20%-50%等は、そのコンクリートが、第1サイクルにおいては28日圧縮強度の20%の持続荷重を受け、第2サイクルにおいては28日圧縮強度50%の持続荷重を受けたことを示している。これらの図から過去に受けた最大持続荷重と第3サイクルで再びその最大持続荷重を受けるコンクリートの第3サイクルにおけるクリープひずみから、第3サイクルにおけるクリープひずみ-弾性ひずみの関係を決定することが可能であることが考えられる。

まず、第3サイクル以前に受けた最大持続荷重によって生じる弾性ひずみを ε_{max}' とする。また、第3サイクルより載荷を開始したコンクリートに弾性ひずみ ε_{max} を生じる持続荷重を載荷

したとき生ずるクリープひずみと、第3サイクルで再び弾性ひずみ ε_{max}' を生じる最大持続荷重を受けるコンクリートのクリープひずみとが等しいとする。

ε_{max}' と ε_{max} を用い、(2), (3)式を拡張することにより、第3サイクルにおけるクリープひずみと弾性ひずみの関係を決定する式は、以下のように表すことができる。

$\varepsilon_0 > \varepsilon_{max}'$ の場合：

$$\varepsilon_{cr} = f(\varepsilon_{max} + (\varepsilon_0 - \varepsilon_{max}'), t, t_3) \quad (5)$$

$\varepsilon_0 < \varepsilon_{max}'$ の場合：

$$\varepsilon_{cr} = f((\varepsilon_{max}/\varepsilon_{max}') \times \varepsilon_0, t, t_3) \quad (6)$$

ただし、 ε_0 は第3サイクルにおける弾性ひずみを表す。

図4, 図5中の曲線は(4)式のクリープ構成方程式を用い、(5), (6)式に従って計算を行った結果である。これらの曲線が ε_{max}' より小さい弾性ひずみにおけるクリープひずみを過大評価することを除けば、(5), (6)式によって表されるこれらの曲線は、実験結果と非常に一致を示している。

図4, 図5に示す曲線が、 ε_{max}' より小さい弾性ひずみにおけるクリープひずみを過大評価する理由は、これらの曲線を求めるために用いた(4)式に回復性クリープひずみを表す項がないためである。すなわち、 $\varepsilon_0 = 0$ のとき、 ε_{cr} は回復性クリープひずみに一致しなければならないが、(4)式で示されるバージクリープの構成方程式には回復性クリープの項が含まれていないため、 $\varepsilon_0 = 0$ において $\varepsilon_{cr} = 0$ となり、実際のバージクリープひずみ-弾性ひずみの関係を表していない。従って、回復性クリープの項を含むクリープ構成方程式を用いれば、 ε_{max}' より小さい弾性ひずみによるクリープひずみを ε_{max}' より大きい弾性ひずみによるクリープひずみと同様に的確に表現することが可能であると思われる。

また、応力履歴が以降、第4, 第5サイクルと続いても、(5), (6)式の一般性により、過去に受けた最大持続荷重と第4, 第5サイクルで再びその最大持続荷重を受けるコンクリートのクリープひずみとが分かれば、第4, 第5サイクルの任意時間におけるクリープひずみ-弾性ひずみの関係を決定することが可能である。

3.3 ε_{max} の決定方法

以上の論議で、過去に受けた最大持続荷重とその最大持続荷重によって生じるクリープひずみ分かれば、同一の応力履歴を受けたコンクリートの任意時間におけるクリープひずみ-弾性ひずみの関係が分かることを示した。しかし、実際の設計において、(5), (6)式を用いて変動応力

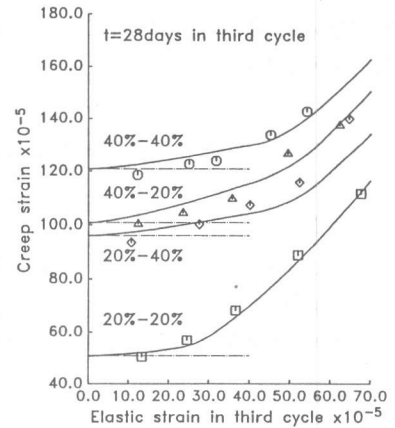


図4 第3サイクルにおけるクリープひずみと弾性ひずみの関係

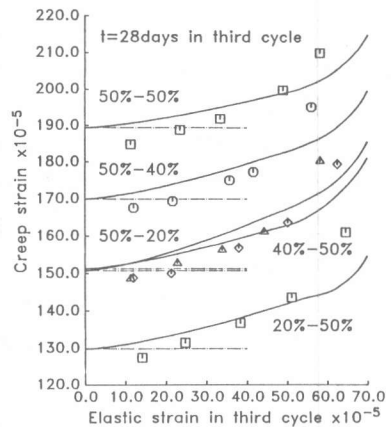


図5 第3サイクルにおけるクリープひずみと弾性ひずみの関係

下のクリープひずみを計算するためには、過去に受けた最大持続荷重によって生じるクリープひずみが分からなければならない。ここでは、過去に受けた最大持続荷重によって生じるクリープひずみの求め方、すなわち、 ε_{max} の決定方法について論じる。

もし、応力履歴に荷重休止期間がないとすれば、以前受けた最大持続荷重 ε_{max}' を受けるコンクリートの任意時間におけるクリープひずみ $\varepsilon_{cr,max}$ (またはバージンコンクリートに $\varepsilon_{cr,max}$ のクリープひずみを生じさせるときの弾性ひずみ ε_{max}) をクリープ構成方程式と(5)、(6)式によって求めることが可能である。第3サイクルを例にとれば以下のように表すことができる。ただし、第1、第2サイクルにおける弾性ひずみを ε_1' 、 ε_2' とし、第2、第3サイクル開始時刻を t_2 、 t_3 とする。

$\varepsilon_1' > \varepsilon_2'$ ($\varepsilon_{max}' = \varepsilon_1'$) の場合 :

$$\left. \begin{aligned} f((\varepsilon_{max}'/\varepsilon_1') \times \varepsilon_2', t, t_3) &= \Delta \\ \Delta &= f((\varepsilon_1'/\varepsilon_1') \times \varepsilon_2', t, t_2) - f((\varepsilon_1'/\varepsilon_1') \times \varepsilon_2', t_3, t_2) \end{aligned} \right\} \text{---(7)}$$

$\varepsilon_1' < \varepsilon_2'$ ($\varepsilon_{max}' = \varepsilon_2'$) の場合 :

$$\varepsilon_{cr,max} = f(\varepsilon_1 + (\varepsilon_2' - \varepsilon_1'), t, t_2) - f(\varepsilon_1 + (\varepsilon_2' - \varepsilon_1'), t_3, t_2) \text{ ---(8)}$$

しかし、(7)、(8)式は、一度クリープひずみが回復した後のコンクリートに、過去に受けた最大持続荷重を載荷したとき再び生じるクリープひずみを求めることはできない。従って、応力履歴に荷重休止期間がある場合、 $\varepsilon_{cr,max}$ (または ε_{max}) はクリープ-時間の関係より求めなければならない。クリープひずみ-時間の関係を規定するクリープの重ね合せ則および種々のクリープ硬化則の中で、もっとも実験値との適合性が見られたひずみ硬化則に基づく計算値と実験値との比較を図6~図9に示す。なお、ひずみ硬化則とはクリープひずみ速度がその時点の応力と累積クリープひずみに依存すると仮定するものである¹⁾。

図6~図8は、第3サイクルにおいて以前受けた最大持続荷重を受けるコンクリートの第3サイクル14日、49日目、63日目におけるクリープひずみを比較した図で、図9は第2サイクルにおいて第1サ

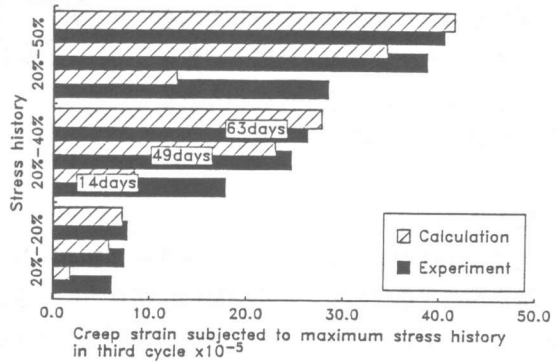


図6 第1サイクルの持続荷重が20%の場合

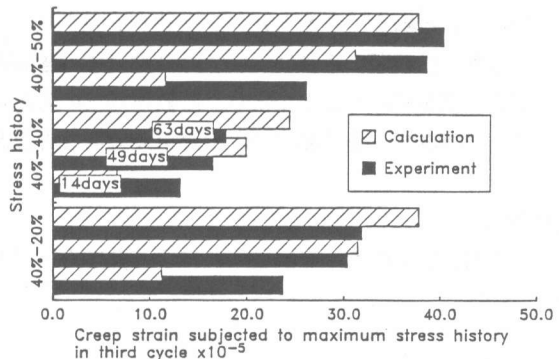


図7 第1サイクルの持続荷重が40%の場合

イクルと同一の持続荷重を受けるコンクリートの第2サイクル14日、28日目、49日目におけるクリープひずみの計算値と実験値を比較した図である。

図6～図8により、ひずみ硬化則は第3サイクルにおいて $\varepsilon_1' > \varepsilon_2'$ の場合、 $\varepsilon_1' = \varepsilon_2'$ の場合、 $\varepsilon_1' < \varepsilon_2'$ の場合の全ての場合の ε_{cr}^{max} を的確に表していることが分かる。しかし、第2サイクルにおける ε_{cr}^{max} をひずみ硬化則に基づいて計算した結果はかなり実験値を過少評価している。従って、ひずみ硬化則はクリープひずみが十分進行した後、あるいは十分載荷期間が経った後の ε_{cr}^{max} は的確に表すことができるが、全ての場合の ε_{cr}^{max} を表すことができる法則ではないことが分かる。

従って、従来の法則では一度クリープひずみが回復した後のコンクリートに過去に受けた最大持続応力を載荷した場合に生じるクリープひずみ-時間の関係を表すことはできず、これらに代わる新しい法則を見つけた必要がある。

4. まとめ

応力履歴を受けたコンクリートのクリープひずみが、過去に受けた最大持続荷重の影響を受ける非線形な現象であることを実験的に明らかにすることができた。また、このように非線形な現象をバージンコンクリートのクリープひずみ-弾性ひずみの関係を用いて表す、新たなクリープ硬化則を提案した。さらに、実際の設計において、クリープ構成方程式（またはクリープ予測式）が与えられていて、応力履歴に荷重休止期間がなければ、いかなる変動応力下の（連続的に応力が変化する場合でさえも）コンクリートのクリープひずみをも予測できることを示した。従って、荷重休止期間の影響について今後検討すべき問題を若干残しているが、本論文で示したクリープ硬化則を用いることにより、圧縮荷重下の考えられる全ての応力履歴を受けるコンクリートのクリープひずみを予測することが可能であると思われる。

参考文献

- 1) 矢川元基、宮崎則幸：有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析、サイエンス社、1987、pp.59～65

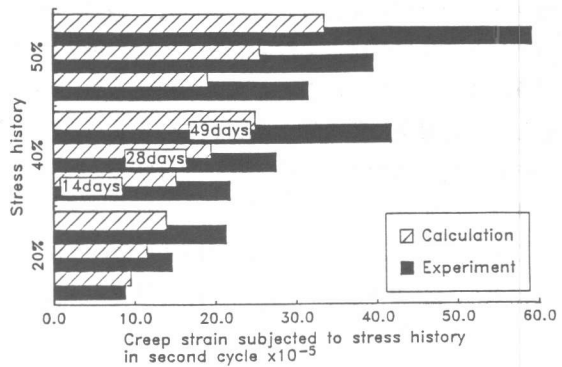


図8 第1サイクルの持続荷重が50%の場合

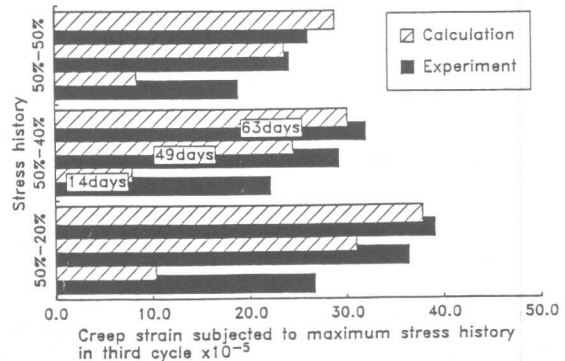


図9 第2サイクルの場合