

論文

[1103] RC はりの長期変形挙動に及ぼすクリープの影響

綾野克紀*¹・阪田憲次*²

1. はじめに

コンクリートのクリープまたは乾燥収縮によるひずみは、使用荷重下におけるコンクリート部材の性能にいろいろな影響を与えるために、設計においてその大きさが考慮されなければならない。これらの時間に依存するひずみは、コンクリート部材の変形と曲率を増大させ、コンクリートと鉄筋間の応力の再配分または内力の原因ともなる。また、高強度の鉄筋やコンクリートの使用の増加にともない、鉄筋コンクリート部材もますますスレンダーなものが採用されるようになっており、コンクリート構造物の使用性の検討上、コンクリート部材の長期にわたって生じるクリープたわみ等の変形挙動を正確に求めることがきわめて重要な要件となっている。

鉄筋コンクリート部材およびプレストレストコンクリート部材のクリープおよび乾燥収縮等の時間に依存するひずみの影響を含む解析手法は、これまでも種々のものが提案されている。しかし、設計において考慮されていた約4倍のクリープたわみが、実際のコンクリート構造物では生じた例も報告されている。このように、計算値と実験値との間に大きな差が現れる原因には、クリープ解析を行う上での種々の仮定、すなわち、平面保持の仮定、鉄筋ひずみとコンクリートひずみとの適合条件に関する仮定またはコンクリートのクリープひずみの応力に対する線形仮定等、様々な仮定の中に妥当でない仮定が含まれていることが考えられる。

また、ひびわれを生じる鉄筋コンクリートはりのたわみを求める場合等においては、ひびわれの影響を考慮にいたした有効断面二次モーメントが決定されなければならない。しかし、有効断面二次モーメントは、鉄筋とコンクリートの付着特性、ひびわれ幅およびひびわれ間隔等の多くの影響を考慮に入れなければならない。従って、特にプレストレスト力を導入しない一般の鉄筋コンクリート部材においては、外荷重によるひびわれを伴うために、部材の変形は、大きく、さらに正確に予測することの難しいものとなる。

本研究は、一定持続荷重下にある鉄筋コンクリートはりの曲げたわみ、鉄筋ひずみ、コンクリート断面内におけるひずみ分布およびひびわれ幅を長期にわたって測定し、鉄筋コンクリートはりの長期挙動に及ぼすクリープの影響を調べることを目的とするものである。また、現在一般に用いられているクリープ解析手法に含まれる種々の仮定の妥当性についての検証を行う。

2. 実験概要

図-1は、鉄筋コンクリートはりのクリープ試験を行うために用いた持続荷重載荷試験装置を示したものである。荷重は、ジャッキにて載荷し、ロードセルにて所定の荷重に達したことを確認した後ナットを締め付け、PC鋼棒に荷重を負荷させた。持続荷重載荷中において、鉄筋コンクリートはりのたわみによって、PC鋼棒の受け持つ荷重の損失は、4本のバネ（外形50mm、内径25mm、自由長300mm）によって緩和させた。

* 1 岡山大学助手 工学部土木工学科、工博（正会員）

* 2 岡山大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

図-2に、本実験に用いた鉄筋コンクリートはりの供試体の寸法および形状を示す。供試体の長さは、1m70cmで、断面は、14cm×12cm（縦×横）の矩形断面である。引張り応力を受ける鉄筋には、いずれの供試体においてもD 16mmの異形棒鋼を2本用い、圧縮応力を受ける鉄筋には、D 9mmの異形棒鋼を用いた。実験は、圧縮鉄筋の本数を0本、1本、2本、3本および4本と変えて行った。D 9mmの異形棒鋼を用いたスターラップは、12cm間隔で左右5本ずつ配筋した。荷重の載荷は、図-2に示すように、三分点載荷とし、破壊時に曲げ破壊となるようにせん断スパン有効高さ比（ a/d ）を6.37とした。なお、外荷重Pは、鉄筋コンクリートはりの破壊荷重の40%(1.50tf)とした。なお、鉄筋コンクリートはりの破壊荷重は、上部鉄筋の本数に関係なく、ほぼ全て同じであった。

実験は、全て、温度 $19 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、湿度 $68 \pm 5\%$ の恒温恒湿度室内にて行った。コンクリートひずみの計測には、ゲージ率が2.13で、ゲージ長が120mmのひずみゲージを、また、鉄筋ひずみの計測には、ゲージ率が2.06で、ゲージ長が5mmのひずみゲージを用いた。ひびわれ幅の測定には、 π 型ゲージ（定格容量 ± 2 mm，標点距離62mm，感度 1.8×10^{-3} mm）を用い、たわみの測定には、ダイヤルゲージ（定格容量 ± 50 mm，感度 1.0×10^{-2} mm）を用いた。

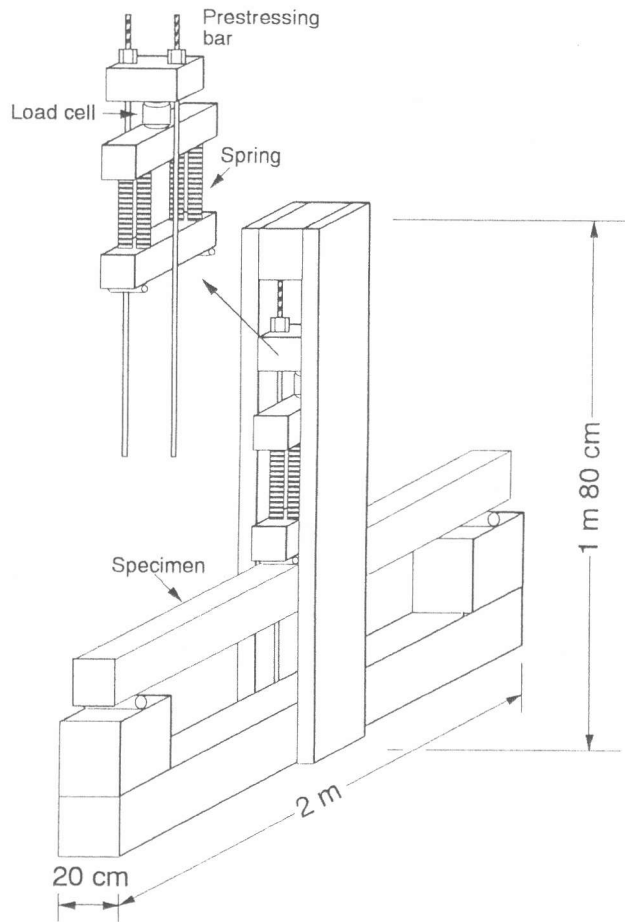


図-1 持続荷重載荷試験装置

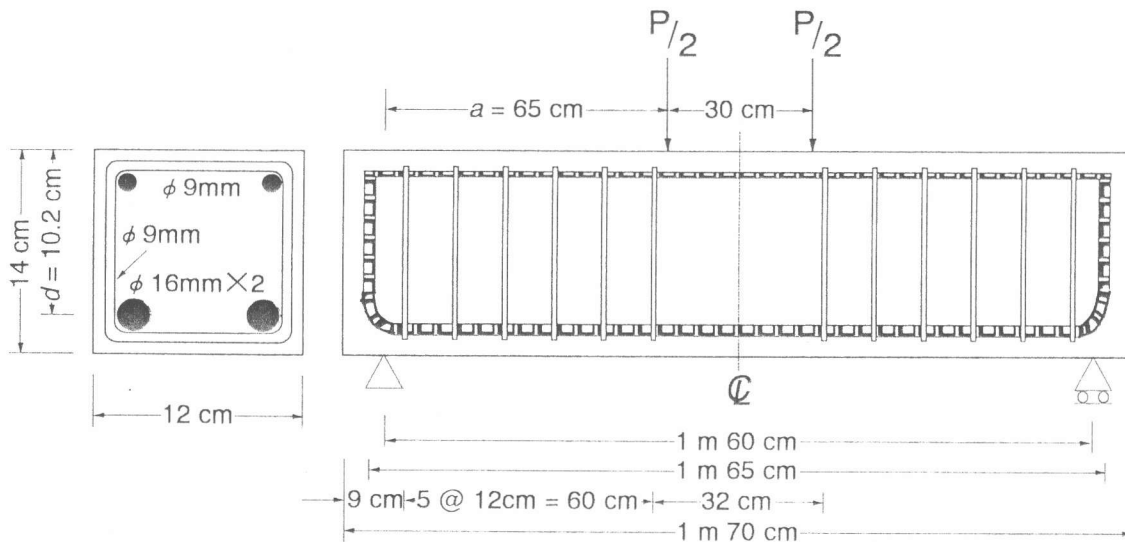


図-2 供試体寸法および形状

表-1 コンクリートの配合表

最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
20	6.7	1.5	60.0	47.7	200	333	842	963	—

コンクリートの配合を表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを用い、粗骨材には碎石（比重：2.73，吸水率：0.76，F.M.：6.68）を、細骨材には川砂（比重：2.62，吸水率：1.78，F.M.：2.81）を使用した。

鉄筋コンクリートはりの供試体は、3日間水中養生した後、21日間、温度 19 ± 0.5 °C、湿度 68 ± 5 % の恒温恒湿度室内にて気中養生を行った。なお、初載荷時材令 24 日におけるコンクリートの圧縮強度は、32.3MPa で、弾性係数は、2.30 × 10⁴ MPa であった。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートの乾燥収縮ひずみおよびクリープひずみ

鉄筋コンクリートはりのたわみクリープおよび断面内におけるコンクリートのひずみ分布を解析するために用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみ式およびクリープひずみ式を、それぞれ、(1)式、(2)式、(3)式および(4)式に示す。

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \left\{ \frac{100(t - t_0)}{1 + 0.01(t - t_0)} \right\}^{0.735} \quad (1)$$

$$\phi_c(t, t') = 4.8(0.002t' + 1)^{-2.9} \left(\frac{t - t'}{262 + (t - t')} \right)^{0.434} \quad (2)$$

$\varepsilon_0 \leq c_2$ の場合：

$$\varepsilon_{cr}(\varepsilon_0, t, t') = a(t, t') \left(\frac{c_2 - c_1}{c_2} \varepsilon_0 \right)^b \quad (3)$$

$\varepsilon_0 > c_2$ の場合：

$$\varepsilon_{cr}(\varepsilon_0, t, t') = a(t, t') (\varepsilon_0 - c_1)^b \quad (4)$$

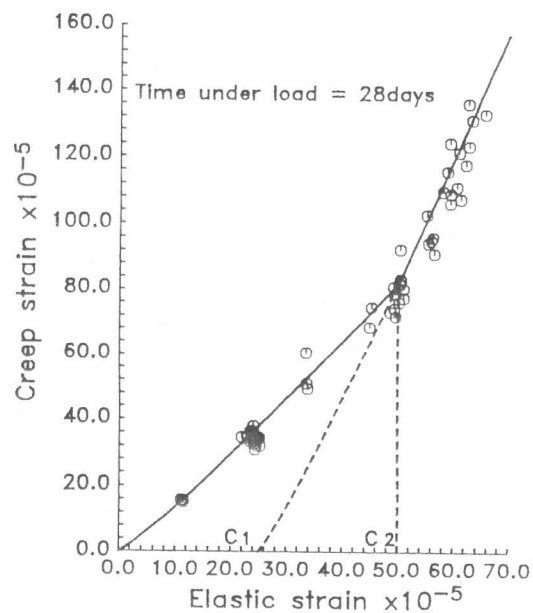


図-3 クリープと弾性ひずみの関係

ただし、 $a(t, t') = 3.0(0.002t' + 1)^{-2.9} \left(\frac{t - t'}{262 + (t - t')} \right)^{0.434}$, $b = 1.25$, $c_1 = 13.0$

$c_2 = 41.7 \exp(-0.055t'^{0.214})$ である。

(1)式は、コンクリートの乾燥収縮ひずみを表す式で、式中の t および t_0 は、コンクリートの材令(日)および乾燥開始時材令(日)である。(2)式は、鉄筋コンクリートはりに及ぼすクリープの影響をクリープひずみの線形仮定に基づき求める際に用いる式で、クリープ係数の経時変化を表す式である。この式中の t は、載荷開始時材令(日)を表す。また、(3)式および(4)式は、コンクリートのクリープひずみを応力に対して非線形な現象として表した式 [1] で、(3)式および(4)式に基づき載荷期間 28 日目におけるクリープひずみと弾性ひずみの関係を示したものが図-3である。(1)式および(2)式に基づけば、載荷期間 100 日目における乾燥収縮ひずみおよびクリープ係数は、それぞれ、約 300μ および 2.40 となる。

(1)式~(4)式を導くために用いたコンクリートのクリープひずみおよび乾燥収縮ひずみデータは、鉄筋コンクリートはりと同じ配合のコンクリートを用い、鉄筋コンクリートはりのクリープ試験を行うのと同じ環境下において測定されたものである。ただし、乾燥収縮ひずみは、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の角柱供試体を、クリープひずみは、 $10 \times 10 \times 38\text{cm}$ の角柱供試体を用いて測定された。

3. 2 供試体中央の断面内におけるコンクリートのひずみ分布

図-4は、圧縮鉄筋を含まない供試体の中央断面において、外荷重によって生じるコンクリートの弾性ひずみ分布を示したものである。この図から明らかなように、破壊荷重の40%の外荷重によって生じる弾性ひずみの大きさは、載荷期間の長さに関係なくほぼ同じ大きさであり、また、断面の平面保持が成り立っていることが分かる。図-5は、図-4に示した供試体の同じ中央断面において、総ひずみより弾性ひずみを引いた残りのひずみ、すなわち、クリープおよび乾燥収縮等の影響によって生じるひずみの分布を示したものである。このように、時間に依存するひずみの影響によって、断面の平面保持が保たれないことが分かる。

図-6は、(1)式および(2)式を用い、線形クリープ解析によって図-5に示したひずみ

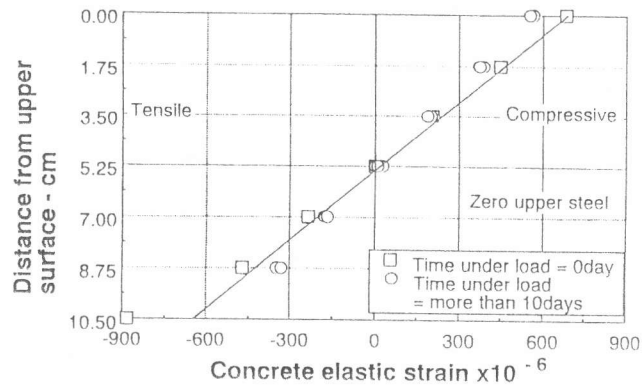


図-4 コンクリートの弾性ひずみの経時変化

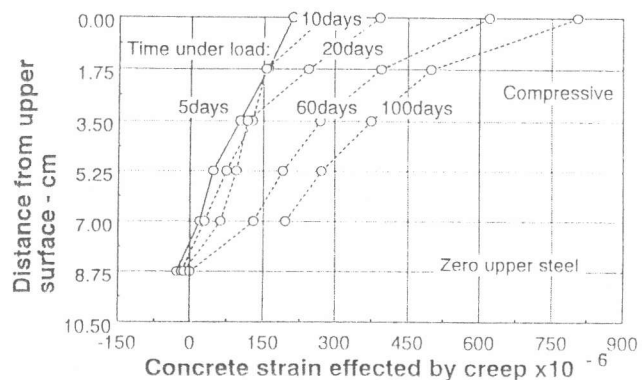


図-5 コンクリートの非弾性ひずみの経時変化

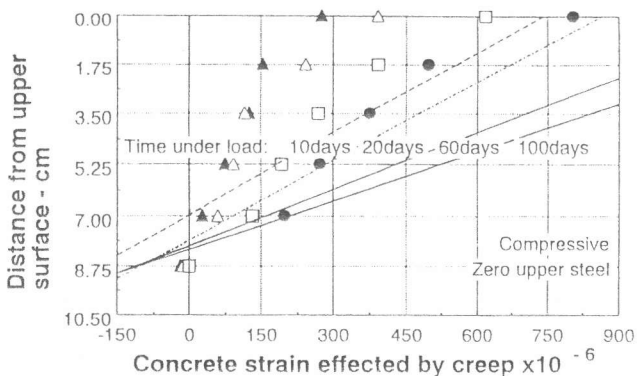


図-6 線形クリープ解析による計算値との比較

分布を計算した結果を示したものである。ただし、計算は、コンクリートと鉄筋間の完全付着の仮定と全断面有効の仮定に基づき行った。また、引張りクリープは、圧縮クリープとその絶対値が同じで、向きが逆と仮定した。この図から明らかなように、線形クリープ解析に基づく計算結果は、圧縮側および引張り側の両側において、実験値よりも大きなものとなっている。また、線形クリープ解析によって求められた結果では、平面保持が成り立っており、実験の傾向とは、明らかに異なることが分かる。

図-7は、(1)式、(3)式および(4)式を用い、非線形クリープ解析によって図-5に示したひずみ分布を計算した結果を示したものである。ただし、計算は、線形クリープ解析の場合と同様、コンクリートと鉄筋間の完全付着の仮定と全断面有効の仮定に基づき行った。また、引張りクリープは、圧縮クリープとその絶対値が同じで、向きが逆と仮定した。また、変動応力下のクリープひずみを求めるためのクリープ硬化則には、応力が反転した場合にも適用できる修正ひずみ硬化則を用いた。図-7から明らかなように、非線形クリープ解析に基づく計算値は、実験結果の傾向と非常によく一致しており、また、計算値の大きさも、実験値とほぼ同じであることが分かる。

図-8は、圧縮鉄筋を4本含む供試体において、図-7の場合と同様に非線形クリープ解析による計算値と実験値との比較を

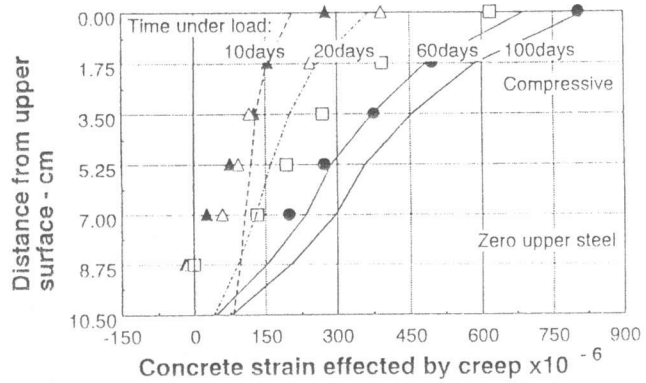


図-7 非線形クリープ解析結果との比較
(圧縮鉄筋0本)

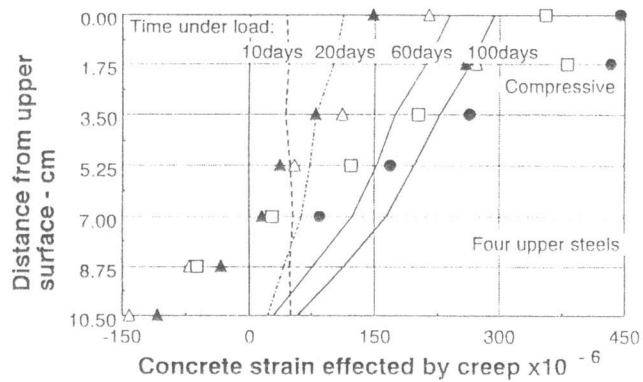


図-8 非線形クリープ解析結果との比較
(圧縮鉄筋4本)

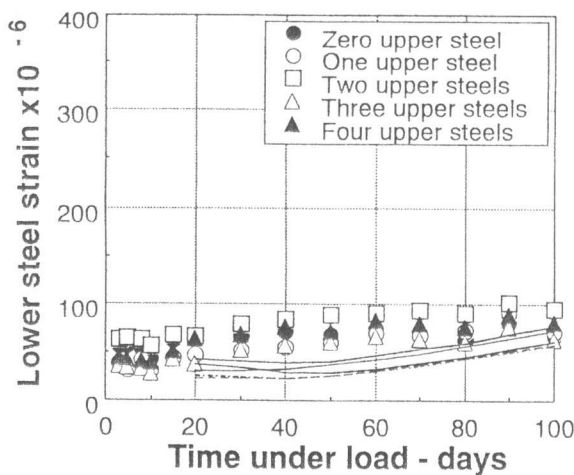


図-9 圧縮鉄筋ひずみの経時変化

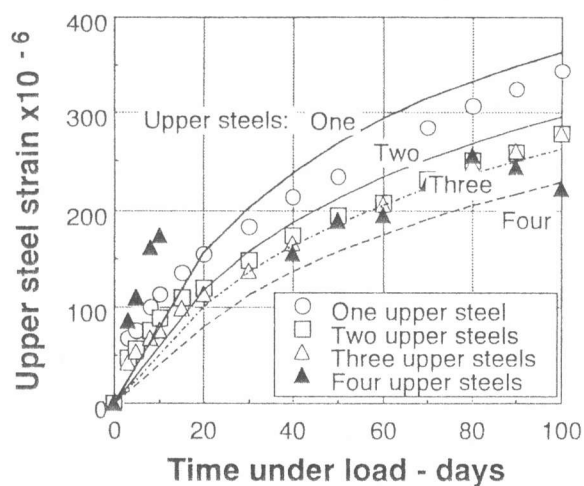


図-10 引張り鉄筋ひずみ

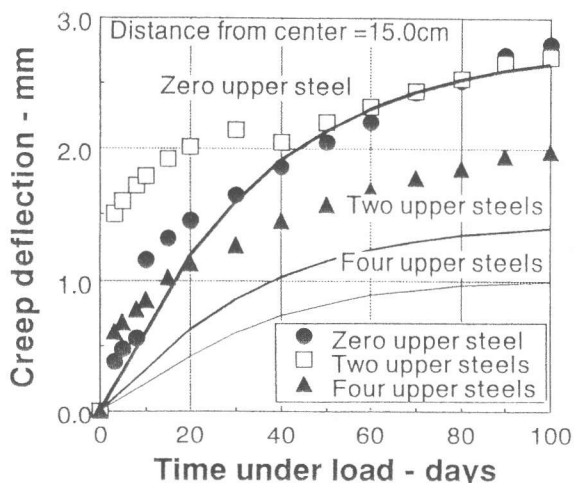


図-11 たわみの経時変化

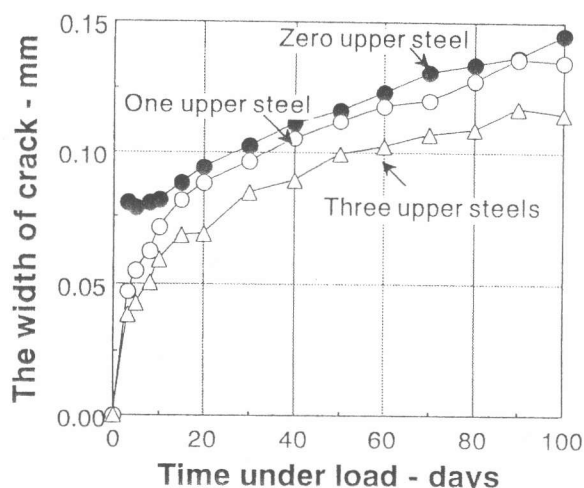


図-12 ひびわれ幅の経時変化

行ったものである。圧縮鉄筋が多い場合には、計算値は、実験値よりも小さい値となるが、計算値に基づくひずみ分布は、実験の傾向を非常によく表していることが分かる。

図-9および図-10は、それぞれ、圧縮鉄筋および引張り鉄筋のひずみの経時変化を非線形クリープ解析に基づき計算し、実験値と比較したものである。これらの図より、計算値は、実験値に比べほぼ妥当な値であることが分かる。すなわち、本実験の範囲においては、コンクリートと鉄筋間の完全付着および全断面有効の仮定が妥当なものであることがいえる。

図-11は、仮想仕事の原理に基づく(5)式によって荷重載荷点における供試体のたわみ Δy の経時変化を求めた図である。また、図-12は、コンクリートのひびわれ幅の経時変化を示したものである。仮想仕事に基づくたわみの計算値は、圧縮鉄筋が多くなるにつれ、実験値に比べ小さくなることが分かる。すなわち、たわみクリープに及ぼすひびわれ幅の影響は非常に大きく、全断面有効の仮定は、計算値の精度を落とす最大の原因であることがいえる。

$$\Delta y = k_s I^2 [\Delta \Psi]_{max}, \quad [\Delta \Psi]_{max} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{h_1} \quad (5)$$

ここに、 k_s は、荷重の種類および支持点の条件によって決まる係数で、 I は、供試体の長さである。また、 $[\Delta \Psi]_{max}$ は、最大モーメントの発生する位置において、クリープおよび乾燥収縮の影響によって生じた曲率である。図-11に示した計算値には、 ε_1 および ε_2 に、それぞれ、供試体上縁および引張り鉄筋位置において生じたコンクリートひずみを用いている。

4. まとめ

曲げ応力を受ける鉄筋コンクリートはりにおいて、断面内のひずみ分布は、非線形クリープ解析により正確に計算できることが分かった。また、ひびわれ幅のたわみに及ぼす影響は大きく、全断面有効と仮定した計算値は、実験値よりもかなり小さい値となることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 阪田憲次・綾野克紀：コンクリートの非線形クリープ予測式の提案、土木学会論文集、No.451、V-17、pp.179-188、1992.8