

# [155] 乾燥収縮ひびわれが鉄筋コンクリート部材に及ぼす影響

正会員 ○長谷川 俊昭 (清水建設技術研究所)  
 正会員 関 博 (早稲田大学理工学部)

## 1. まえがき

鉄筋コンクリート構造物の乾燥収縮が拘束されると、しばしば乾燥収縮ひびわれが発生する。このような乾燥収縮ひびわれを設計上どのように取り扱ったらよいかは未だに確立されているとは言えない。そこで本研究では鉄筋コンクリート部材に乾燥収縮ひびわれを発生させ、さらに曲げ載荷試験を実施した結果についてFEMによる乾燥収縮応力解析や平均曲げ剛性評価などを行なった。

## 2. 実験概要

本実験では次の4種類の試験を行なった。乾燥収縮拘束試験(A試験)では図-1に示すRC部材2体を乾燥開始材令 $t_0=12$ 日から $20^\circ\text{C}$ 、 $50\%$  R.H.の実験室に設置し、ダイヤルゲージとコンタクトゲージを併用してスパン80cmの区間での収縮量を測定し変位が生じた時には、それを拘束ジャッキで調整し $t_0$ でのスパン長に保持し乾燥収縮ひびわれを発生させ材令37, 70日で曲げ載荷試験を行なった。標準養生試験(B試験)ではA試験体と同形状の2体を $20^\circ\text{C}$ 、 $95\%$  R.H.の養生装置内で約60日間養生した後、拘束ジャッキを無拘束力の状態で取り付け、曲げ載荷試験を行なった。なお曲げ載荷は図-1のようにH型鋼を試験体に取り付けて偏心圧縮により行ない、試験体の上下一対の鉄筋の左スパンには2cm間隔でストレインゲージをはり、ひずみ分布を測定した。乾燥収縮非拘束試験(C試験)ではA試験体の試験区間70cmに相当するコンクリート試験体(端面はシール)の自由乾燥収縮ひずみをコンタクトゲージで測定した。引張クリープ試験(D試験)ではC試験体と同形状のもの3体に応力強度比50, 30%で引張持続載荷しコンクリートの引張クリープひずみをコンタクトゲージで測定した。

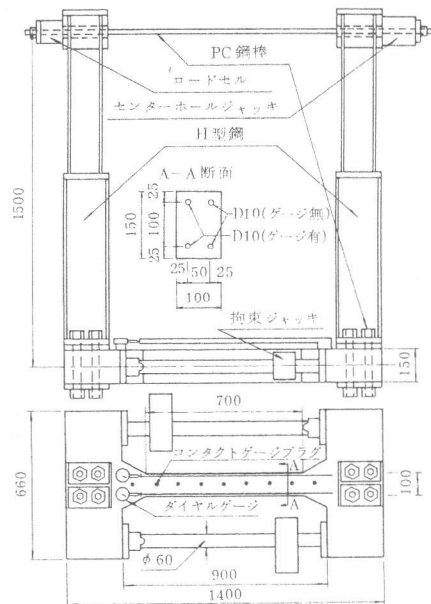


図-1 A, B試験体

表-1 A, B試験体の諸元

試験体	条件	引張鉄筋比 (%)	コンクリート強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	曲げ載荷試験材令 (日)	鉄筋降伏強度 (kg/cm <sup>2</sup> )
A1	乾燥収縮拘束	0.99	466	70	399.6
A2	乾燥収縮拘束	1.00	435	37	(S)33.5
B1	標準養生	0.96	460	64	(D)10
B2	標準養生	0.97	455	60	

## 3. 実験結果及び考察

### 3-1 乾燥収縮非拘束試験及び引張クリープ試験

図-2, 3にC, D試験で得られた自由乾燥収縮ひずみ $\epsilon_{sh}$ 、クリープ係数 $\phi$ の経時変化をBažantの子測値<sup>1)</sup>、CEB-FIPモデルロードの計算値と合わせて示した。Bažantの子測式では一般に初期材令の水分拡散を過小評価するが適合性はCEBより良好であり、 $\phi$ に対してはほぼ妥当な値を与えていると思われる。しかしBažant

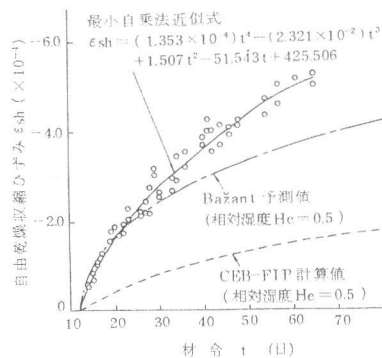


図-2 自由乾燥収縮ひずみ $\epsilon_{sh}$

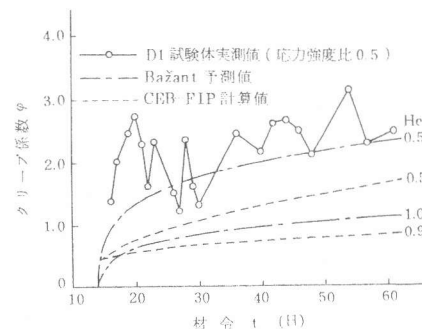


図-3 引張クリープ試験結果

の予測式は圧縮クリープの実験データを整理したものであり、実際図-3において小さな予測値を与えているので高応力の引張クリープの応力非線形性などについては検討を要するであろう。

### 3-2 有限要素法による乾燥収縮応力解析

A試験でのひびわれ発生予測のためにコンクリートの等方性、平面応力場を仮定し履歴理論に基づいたクリープ構成方程式(①式)を用い増分計算により時間積分を評価するというFEMクリープ解析を行なった。

$$[\sigma] = [K][\epsilon] - [\int \varphi d\sigma] - [K]\epsilon_{sh} \quad \text{---(1)式}$$

ここで $[\sigma]$ ,  $[\epsilon]$ ; 応力, ひずみマトリックス

$[K]$ ; 要素剛性マトリックス

$\epsilon_{sh}$ はC試験で得られた最小自乗法近似式によって与え、 $\varphi$ はBažantの予測式から求め、またコンクリート弾性係数の経時変化もBažantの式(図-4参照)で与え、 $[K]$ にagingの影響を考慮した。また図-5に示したA試験体の拘束率Rの経時変化を拘束節点の強制変位という形の境界条件で満足させ、

その際の拘束節点の位置として図-6に示す3ケースを解析した。図-7に第1ひびわれが発生したハンチ付根の要素の応力解析値を示したが、Rを境界条件で満足させることによりひびわれ発生をほぼ正確に予測できている。しかし図-8に示したA1試験体上縁のコンクリートひずみ実測値 $\epsilon_{cf}$ とFEM解析値とでは、その分布性状が明らかに異なっており、これは主に鉄筋の付着状態の変化のためであり付着すべり・劣化や付着クリープなどを考慮した合理的な付着モデル化が必要であると思われる。

### 3-3 乾燥収縮拘束試験

図-5よりわかるようにA1では4回の変位調整の後つまり十分なクリープ変形を起こさせた後に第1ひびわれが発生したのに対し、A2は1回の変位調整でひびわれが発生した。このため両試験体のひびわれ分布性状は図-13のように大きく異なると考えられる。図-9は引張鉄筋ひずみ分布(図-10)から算出した付着応力度の正負の最大値、平均値であり、ひびわれが分散して発生したA2ではひびわれ発生後約1週間で付着応力度がほぼ一定値に達しているのに対し、ハンチ付根のひびわれに引張鉄筋ひずみが集中したA1では

ゆるやかに付着応力度が増大している。図-11は付着応力度の絶対値の平均を実測したひびわれ幅の1/2で除したみかけの割線付着剛性Bsecの経時変化を示したものであるが、A1ではBsecの低下つまり付着クリープや付着劣化が引きつづき生じているのに対し、A2ではそのような付着状況の変化がほとんど生じていないと考えられる。図-12には変位調整前後でのひびわれ位置の最大引

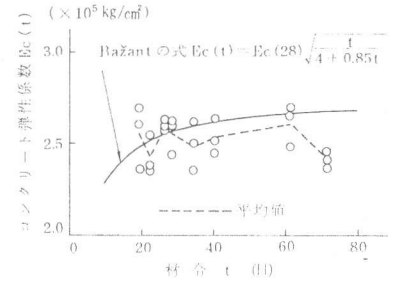


図-4 コンクリート弾性係数の経時変化

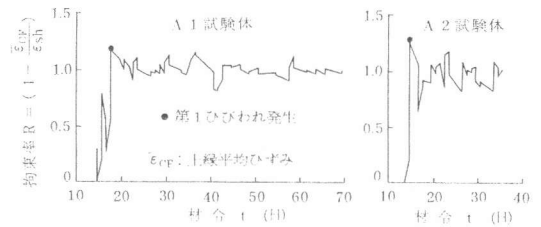


図-5 A試験体の拘束率の経時変化

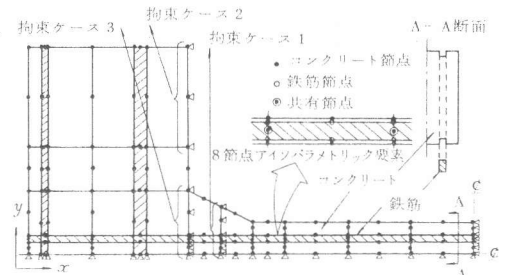


図-6 A試験体の有限要素分割

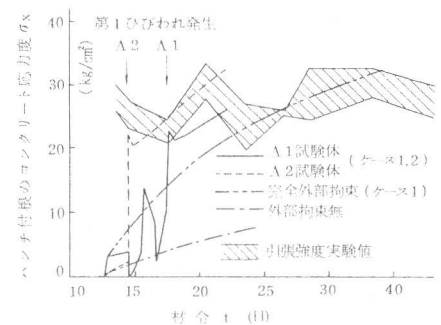


図-7 A試験体のFEM乾燥収縮応力解析値

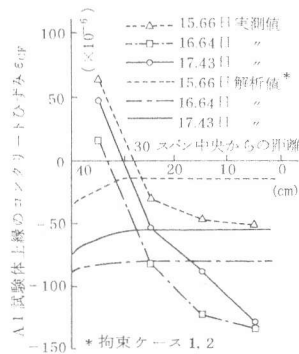


図-8 A1試験体の上縁ひずみ

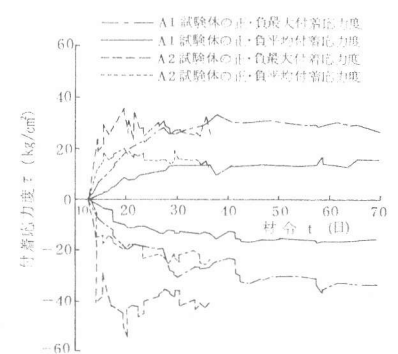


図-9 A試験体の付着応力度の経時変化

張鉄筋ひずみ増分  $\Delta \epsilon_{st}^{cr}$  と平均引張鉄筋ひずみ増分  $\Delta \bar{\epsilon}_{st}$  との比

(引張軸剛性特性値  $S = \Delta \epsilon_{st}^{cr} / \Delta \bar{\epsilon}_{st}$ ) が示してある。この値  $S$  は部材の引張軸剛性に対応する値であるが、A1の  $S$  はA2の2倍ほどの値でありA1が曲げ載荷開始時にA2よりも大きな引張軸剛性を持っていたと考えられる。

### 3-4 平均曲げ剛性評価

図-9より平均付着応力度の最大値は  $20 \text{ kg/cm}^2$  程度であるが、角田の理論<sup>2)</sup>の  $\bar{\tau}_{max}$  を算出すると  $\bar{\tau}_{max} = 50 \sim 60 \text{ kg/cm}^2$  である。このためA試験体に曲げ載荷するとさらに曲げひびわれが発生し部

材平均剛性もさらに低下して平均ひびわれ間隔はB試験体よりも1cmほど小さくなった。A試験体の鉄筋に生じている残留応力を考慮するため実験で得られた最大引張鉄筋応力度  $\sigma_{stmax}^{sh+M}$  と平均剛性  $E I_{ave}$  との関係を考えることにし、 $E I_{ave}$  は鉄筋の平均ひずみとRC部材の抵抗モーメント  $M_{RC}$  とから算出し、その際拘束ジャッキの抵抗モーメント  $M_J$  を外力モーメント  $M$  から減じたものを  $M_{RC}$  と考え、RC部材のみの剛性を評価するようにした。なお  $M_J$  はジャッキにはりつけたストレインゲージの値から算出した。図-14より乾燥収縮ひびわれを有する場合でも  $\sigma_{stmax}^{sh+M}$  を評価することにより平均剛性を把握することが可能であると思われる。A2は曲げひびわれ発生前後をとおしてB試験体とほぼ同様な剛性変化をたどっているが、A1の剛性は曲げひびわれ発生とともにひびわれ断面剛性  $E I_{cr}$  まで低下している。これは図-15のようにA1の曲げ載荷時における引張鉄筋応力度の平均化係数  $\varphi_{st}^M (= \sigma_{stmean}^M / \sigma_{stcal}^M)$  が曲げひびわれの発生とともに大きく増大するためである。この  $\varphi_{st}^M$  の増大は乾燥収縮拘束時に引張軸剛性が大きくコンクリートの乾燥収縮応力が大きかったため tension stiffening 効果が曲げひびわれ発生時に急激に減少したことによると思われる。

しかし図-16に示した残留応力をも含めて評価する  $\varphi_{st}^{sh+M}$  ( $= \sigma_{stmean}^{sh+M} / \sigma_{stmax}^{sh+M}$ ) については曲げひびわれ発生後でA、B試験体に大きな差異はない。このことは図-17に示したひびわれ断面引張鉄筋応力度計算値  $\sigma_{stcal}$  と  $\sigma_{stmax}^{sh+M}$  との関係を実験的に把握できれば、引張鉄筋の残留初期最大応力度つまり  $\sigma_{stcal} = 0$  の時の  $\sigma_{stmax}^{sh+M}$  を評価することが Rao や青柳<sup>3)</sup> の考え方に基づいて残留応力も含めた統一的な剛性評価を可能に

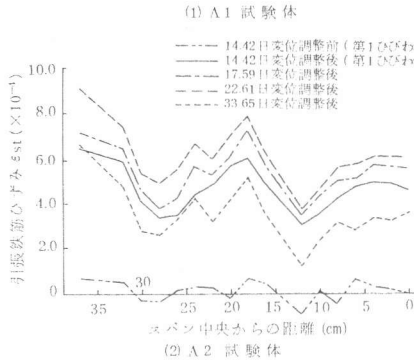
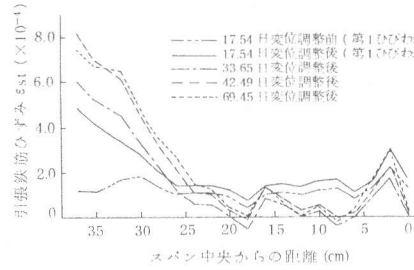


図-10 A試験体の引張鉄筋ひずみ分布

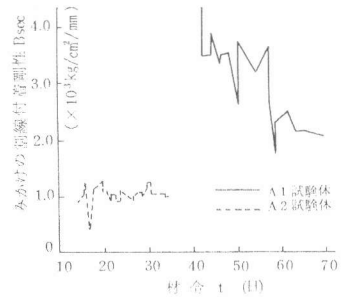


図-11 みかけの割線付着剛性

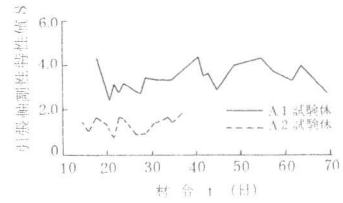


図-12 引張軸剛性特性値の経時変化

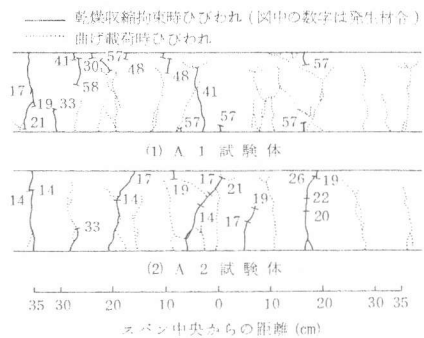


図-13 A試験体のひびわれ状況

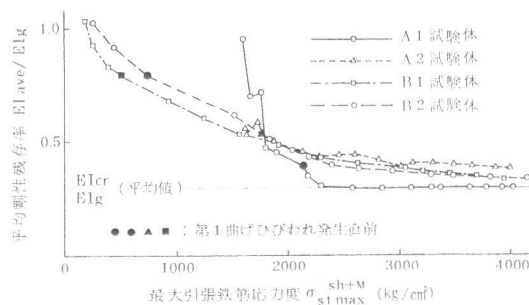


図-14  $\sigma_{stmax}^{sh+M}$  と平均剛性残存率の関係

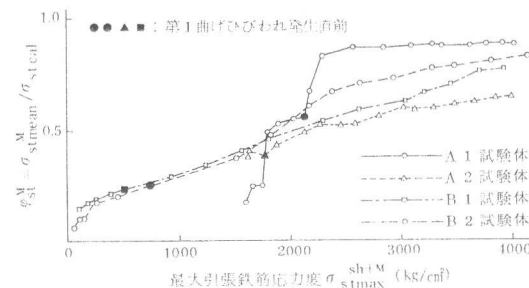


図-15 引張鉄筋応力度の平均化係数  $\varphi_{st}^M$

すると思われる。なお図-17ではA試験体の $\sigma_{stcal}$ と $\sigma_{stmax}^{sh+M}$ とがほぼ直線的な関係にあり、この両者の関係を実験的に把握することは比較的むずかしいと思われる。し

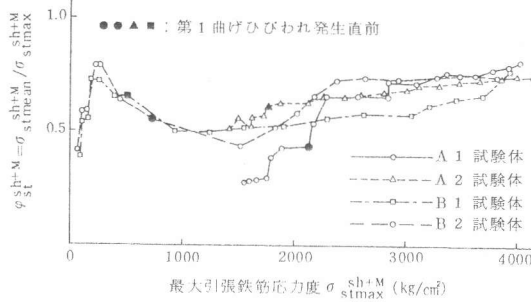


図-16 引張鉄筋応力度の平均化係数  $\varphi_{st}^{sh+M}$

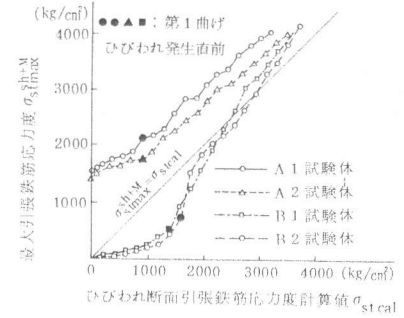


図-17  $\sigma_{stcal}$ と $\sigma_{stmax}^{sh+M}$ の関係

かしA1の曲げひびわれ発生前では $\varphi_{st}^{sh+M}$ が小さく $\sigma_{st} = 2000 \text{ kg/cm}^2$ 前後の不安定領域の $\varphi_{st}^{sh+M}$ の評価は非常にむずかしいことがうかがえる。図-18, 19には既往の曲げ剛性評価法によるA1の計算値と実験値とが示してある。 $\varphi_{st}$ がほぼ一致しているCEB-FIP計算値( $\beta_2 = 0.5$ )でも平均剛性が高めに評価されているのは圧縮側コンクリート応力度の平均化係数 $\varphi_c = 0.9$ としたためであり、圧縮側にも貫通ひびわれが発生していたことが曲げ圧縮側の変形を大きくしていると考えられる。本実験のように圧縮側のコンクリートや鉄筋にも引張側と同様な乾燥収縮ひびわれによる残留応力が生じている場合には $\varphi_c$ よりもむしろ圧縮鉄筋応力度の平均化係数を考える方がよいのではないかと思う。

### 3-5 降伏耐力及び終局耐力

A, B試験体の降伏耐力 $M_y$ , 終局耐力 $M_u$ の差異を調べるために $M_y, M_u$ の計算値を曲げ軸力解析により求め、この計算値と実験値との比を表-2, 3に示した。 $M_y, M_u$ ともに $M_j$ を考慮すると、この比はほぼ1となり、実用上乾燥収縮ひびわれを有するRC部材の $M_y, M_u$ は残留応力状態を無視し通常のRC耐力計算法で算出しても十分であると言える。

### 4. まとめ

(1) 拘束率の経時変化を境界条件で満足させることにより乾燥収縮ひびわれ発生予測をFEMで行なうことができた。(2) 乾燥収縮拘束時の引張軸剛性が大きいと後の曲げ剛性は大きく低下すると思われる。(3) 乾燥収縮による残留応力を考慮した最大引張鉄筋応力度を把握することで平均曲げ剛性評価が可能であると思われる。(4) 耐力の算定は乾燥収縮による残留応力を無視して通常の計算法で行なうことができた。

参考文献 1) Z.P.Bažant; Practical Prediction of time-dependent deformations of concrete, Matériaux et Constructions, Vol. 11, No 65-66, 1978

2) 角田;鉄筋コンクリートの最大ひびわれ幅, コンクリートジャーナル, Vol. 8, No 9, 1970

3) 青柳・大沼;温度勾配による鉄筋コンクリート中空円筒のひびわれ性状, セメント技術年報, 1976

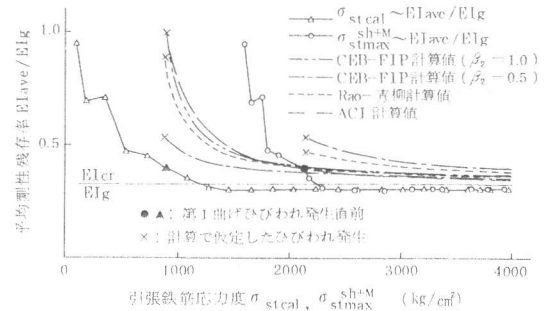


図-18 既往の評価法によるA1試験体のE\_lave

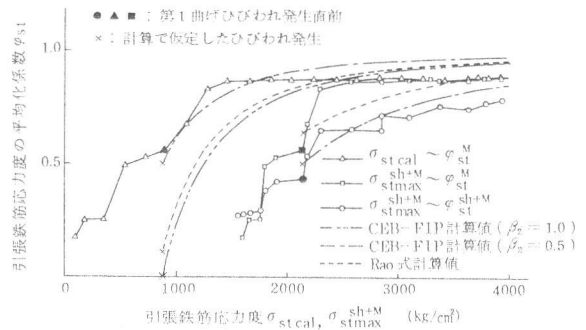


図-19 既往の評価法によるA1試験体の $\varphi_{st}$

表-2 降伏耐力の比(実験値/計算値)

試験体	拘束ジャックのモーメントを考慮しない				拘束ジャックのモーメントを考慮する			
	A1	A2	B1	B2	A1	A2	B1	B2
$-2.0 \times 10^{-3}$	0.994	0.998	0.986	1.018	0.958	0.935	0.984	0.994
$-2.5 \times 10^{-3}$	1.005	1.008	0.996	1.029	0.968	0.944	0.995	1.004
$-3.0 \times 10^{-3}$	1.014	1.016	1.006	1.039	0.977	0.952	1.004	1.014

表-3 終局耐力の比(実験値/計算値)

試験体	拘束ジャックのモーメントを考慮しない				拘束ジャックのモーメントを考慮する			
	A1	A2	B1	B2	A1	A2	B1	B2
$-4.0 \times 10^{-3}$	1.133	1.134	1.183	1.157	1.010	0.972	1.042	1.013
$-4.5 \times 10^{-3}$	1.140	1.129	1.189	1.164	1.025	0.968	1.047	1.020
$-5.0 \times 10^{-3}$	1.138	1.126	1.189	1.164	1.024	0.965	1.047	1.020

注)  $\epsilon_{cu} = -2.0 \times 10^{-3}$