

[2038] 収縮応力が RC 部材の曲げひびわれ特性に及ぼす影響

正会員 田澤栄一 (広島大学 工学部)
 正会員○宮沢伸吾 (広島大学 工学部)
 山本哲也 (広島大学 工学部)
 坂田拓司 (広島大学 工学部)

1. まえがき

限界状態設計法の採用に伴ないコンクリート部材のひびわれ幅の制御が耐久性上より重要な要因とされている。RC部材のひびわれ幅は種々の要因に影響されるが、中でもコンクリートの乾燥収縮の影響は大きいにもかかわらずその機構は今だ十分明らかにされていない。本研究では、コンクリートの乾燥収縮が内部拘束されることにより自己応力が生じることに着目し、合理的なひびわれ幅算定式の確立に資することを目的とし、二面乾燥を受けたRCはりに生じる自己応力と静的曲げ載荷時のひびわれ幅との関係について実験的に検討した。

2. 実験概要

早強ポルトランドセメント、山砂(比重2.59)、および碎石(最大寸法10mm, 比重2.71)を用い、表-1に示す配合でコンクリートを製造した。供試体はコンクリート打設後2日で脱型し、材令7日まで20℃で水中養生し、乾燥させる場合は以後20℃、50%R.H.の恒温恒湿室内に静置した。また、はり供試体は上下縁以外をエポキシ樹脂でコーティングし、上下縁からの2面乾燥とした。

図-1は、RCはりの断面寸法と載荷方法を示したものである。軸方向鉄筋には横ふし異形鉄筋D19, SD30を用いた。載荷以前の乾燥収縮により、曲げスパンの側面に生じる軸方向の表面ひずみ分布を図-2に示すようにコンタクトチップで測定した(測定区間: 30cm)。

載荷時の各測定は以下のように行なった。曲げひびわれ幅は、はり側面の鉄筋位置に6cm間隔で貼付したコンタクトチップにより、はり下縁のコンクリートのひずみを曲げスパン全長に載荷直前に貼付した60mmゲージにより測定した。また、主鉄筋のリブに5x5mmの溝を切り2cm間隔に貼付した5mmゲージにより載荷時の付着応力度分布を測定した。この際、ゲージはシアノアクリレート系接着剤にて接着した後、ポリエステル系接着剤にてコーティングしリブの溝を充填した。

表-1 コンクリートの配合

G _{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m ³)				add. ml/m ³
			W	C	S	G	
10	50	46	180	360	780	959	900

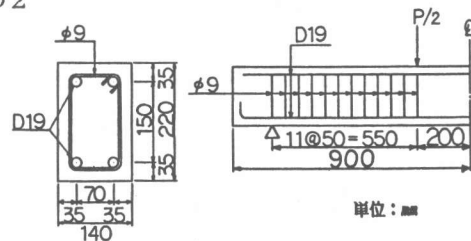


図-1 RCはりの断面寸法および載荷方法

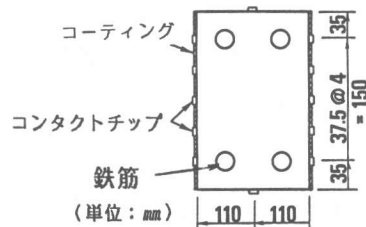


図-2 コーティングおよびコンタクトチップの位置

引張クリープ試験は図-3に示したような重力で式の加力装置を用い、20℃、50%R.H.の恒温恒湿室内で行なった。供試体は、10×10×40cmで全面コーティングおよび2面乾燥とした。載荷応力は9kgf/cm²および18kgf/cm²とし、クリープひずみの測定は相対する2面（2面乾燥の場合は乾燥面）としコンタクトチップで行なった。

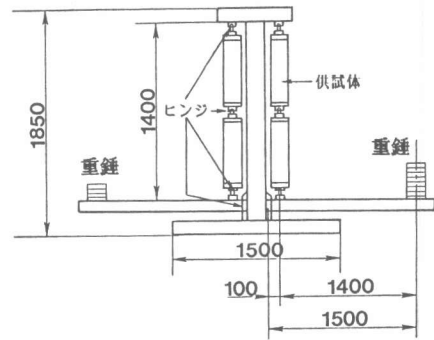


図-3 引張クリープ試験装置 (単位: mm)

3. 実験結果および考察

3-1. 乾燥収縮がコンクリートの曲げ強度に及ぼす影響

表-2は、コンクリートの強度特性に及ぼす乾燥収縮の影響を、図-4は、特に曲げ強度についてそれぞれ示したものである。10×10×40cmの場合、乾燥期間28日以降で乾燥による曲げ強度の低下が認められない。従って、この程度の供試体寸法で28日程度以上の4面乾燥を受ける場合は、乾燥収縮が断面内部に拘束されることにより生じる引張応力（自己応力）の影響は無視できるほど小さくなっていると考えられる。

一方、RCはりと同じ断面および乾燥条件の場合（14×22×180 cm、2面乾燥）は乾燥により曲げ強度が著しく低下している。供試体表面でかなり大きな引張の自己応力が生じているためである。

3-2. 乾燥収縮により無筋およびRCはりに生じる自己応力

(1) 曲げひびわれ発生荷重より求めた自己応力

RCはりの場合は、先に述べた内部コンクリートの拘束と同時に鉄筋による拘束が作用する。コンクリートの乾燥収縮により無筋およびRCはり下縁に生じる自己応力を、それぞれ破壊荷重および曲げひびわれ発生荷重から次式により算出した。

$$\sigma_b = \frac{M}{I} y + \sigma_d + \sigma_{self} \quad \text{----- (1)}$$

σ_b : コンクリートの曲げ強度

σ_d : 無筋あるいはRCはりの自重による曲げ応力

σ_{self} : 乾燥収縮により生じる自己応力

I : 無筋あるいはRCはりの断面二次モーメント

表-2 コンクリートの力学的特性

	供試体寸法 (cm)	水中37日	水中7日乾燥28日	水中7日乾燥51日	乾燥条件	供試体本数
圧縮強度 (kgf/cm ²)	φ10×20	480	556	481	全面乾燥	3
引張強度 (kgf/cm ²)	φ15×20	35.5	31.2	24.6	全面乾燥	3
曲げ強度 (kgf/cm ²)	10×10×40	59.4	58.9	61.5	4面乾燥	3
	14×22×180	56.9	38.9	37.7	2面乾燥	1
静弾性係数 (kgf/cm ²)	φ10×20	3.49×10 ⁵	3.32×10 ⁵	3.15×10 ⁵	全面乾燥	3
乾燥収縮ひずみ 10 ⁻⁶	10×10×40	0	296×10 ⁻⁶	412×10 ⁻⁶	4面乾燥	3

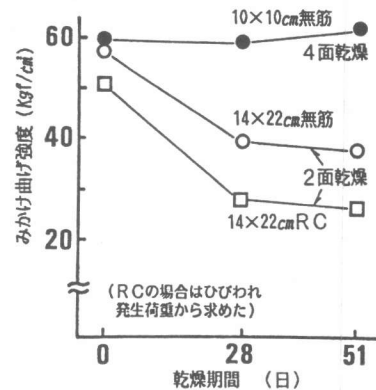


図-4 みかけ曲げ強度の経時変化

y : 中立軸から下縁までの距離

M : 破壊時あるいは曲げひびわれ発生時の荷重による曲げモーメント

Mは、無筋はりの場合は破壊荷重、RCはりの場合は下縁に貼付したひずみゲージによるひずみの急変点および目視により判断した曲げひびわれ発生荷重とした。なお 3-1で述べたように、 $10 \times 10 \times 40$ cm 供

試体では自己応力の影響をうけていないと考え、この試験値に寸法効果の影響も加味し、自己応力の影響がないと仮定した場合のはり供試体の曲げ強度 (σ_b) とした。

表-3は、式(1)による自己応力の算定結果を示したものである。乾燥期間51日では、無筋はりでは断面内の拘束により 21.1 kgf/cm^2 、RCはりで 32.7 kgf/cm^2 の引張応力がはり下縁に生じていることになり、両者の差から鉄筋の拘束により 11.6 kgf/cm^2 の引張応力が付加されているといえる。

乾燥を受けていないRCはりにおいて 5.9 kgf/cm^2 の引張応力が算定されているが、無筋はりの場合より長い載荷準備期間中の乾燥と、室温が若干低かったことによる温度応力の影響であると思われる。

なお、以上の議論は、通常の曲げ強度の算定と同様に弾性体を前提としたものであるため、自己応力の算定値は実際の引張応力の大きさを表わすものでなく、あくまで便宜上の曲げ引張応力を意味するものである。

(2) 引張クリープの特性

前述した、曲げひびわれ発生荷重から求めたはり下縁における鉄筋の拘束応力 (11.6 kgf/cm^2) と、無筋はり と RC はりの収縮ひずみの差から、乾燥面部分の引張クリープ係数を求めると、乾燥期間28日で1.0、58日で1.2となった。

引張クリープ試験 (7日水中養生) において応力導入時の引張弾性係数は、載荷応力 9 kgf/cm^2 で $3.03 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、 18 kgf/cm^2 で $2.91 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ であった。図-5は引張クリープ試験結果を示したものである。若干の偏心載荷が認められたため、相対する2面の平均値を用いて検討した。同図は同一乾燥条件での無載荷供試体のひずみを差し引いた結果を示している。このことにより乾燥収縮ひずみと、自己応力に対応する弾性およびクリープひずみの影響を除くことができる。載荷応力 9 kgf/cm^2 で比較すると乾燥により引張クリープは小さくなった。また、全面コーティングの場合、載荷応力 18 kgf/cm^2 程度までは、引張クリープは載荷応力にほぼ比例していると思われるが、2面乾燥の場合は、載荷応力 18 kgf/cm^2 で引張クリープが急増している。これは、乾燥による自己応力を加えた応力の合計が引張強度に近くなり、乾燥面で塑性ひずみが生じた事が原因の一つと考えられる。

図-5は引張クリープ試験結果を示したものである。若干の偏心載荷が認められたため、相対する2面の平均値を用いて検討した。同図は同一乾燥条件での無載荷供試体のひずみを差し引いた結果を示している。このことにより乾燥収縮ひずみと、自己応力に対応する弾性およびクリープひずみの影響を除くことができる。載荷応力 9 kgf/cm^2 で比較すると乾燥により引張クリープは小さくなった。また、全面コーティングの場合、載荷応力 18 kgf/cm^2 程度までは、引張クリープは載荷応力にほぼ比例していると思われるが、2面乾燥の場合は、載荷応力 18 kgf/cm^2 で引張クリープが急増している。これは、乾燥による自己応力を加えた応力の合計が引張強度に近くなり、乾燥面で塑性ひずみが生じた事が原因の一つと考えられる。

(3) 乾燥収縮ひずみ

図-6は、無筋はりの表面ひずみ分布の経時変化を示したものである。はり上縁の収縮量が若

表-3 曲げひびわれ発生荷重より求めた自己応力 (はり下縁の引張応力)

乾燥期間	無筋はり	RCはり
0日	0	5.9
28日	17.5	28.3
51日	21.2	32.7

(kgf/cm²)

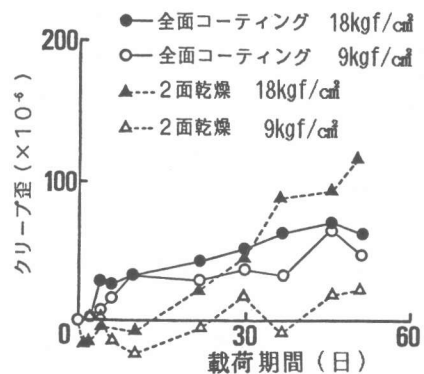


図-5 引張クリープ試験結果

干大きくなっているのは、ブリージングの影響により上部コンクリートの品質が低下したことによると考えられる。このことを除外して考えると、2面乾燥の場合は、そりを生じず、断面内でほぼ均一に収縮しているといえる。

図中の破線は、断面の各要素が非拘束であったと仮定した場合の自由収縮ひずみの分布を示したものである。すなわち、測定ひずみから自己応力に対応する弾性ひずみとクリープひずみを差し引いて求めたものである。ここで、表面部の自己応力は、曲げひびわれ発生荷重から求めた値を用いたが、中心部の自己応力は以下のようなPickett¹⁾の方法により算定した。

すなわち、断面内の各要素が無拘束であると仮定した場合の自由収縮ひずみは拡散方程式に従うとし、このひずみが連続条件、つり合い条件およびフックの法則を満足させるような自己応力が生じるとした。また、はり下縁における自己応力の計算値が、ひびわれ発生荷重から求めた値と一致するように拡散係数および表面係数を決定した。なお、コンクリートのクリープの影響は、乾燥期間28日および51日におけるクリープ係数を3-2(2)で述べた値とし、有効弾性係数を用いることにより考慮した。以上のように求めた自己応力の算定結果を図-7に示す。

図-8はRCはり表面の各位置における乾燥収縮ひずみおよび鉄筋のひずみの経時変化を示したものである。はり表面の乾燥収縮ひずみは、いずれの位置においてもほぼ同程度である。また、鉄筋のひずみは、乾燥期間20日程度まではコンクリートとほぼ同様に増加したが、それ以降はほとんど増加しておらず、付着クリープの影響が現われたものと考えられる。

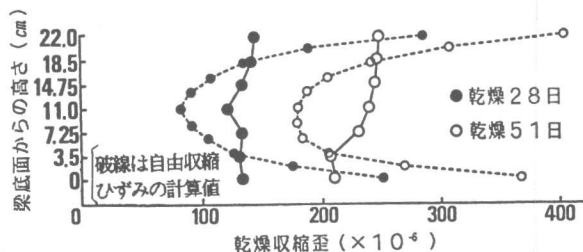


図-6 無筋はりの乾燥収縮ひずみ分布

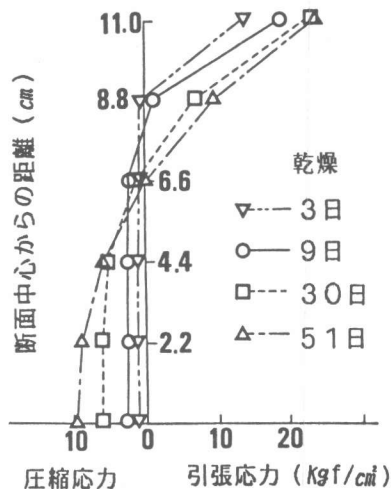


図-7 自己応力の算定結果

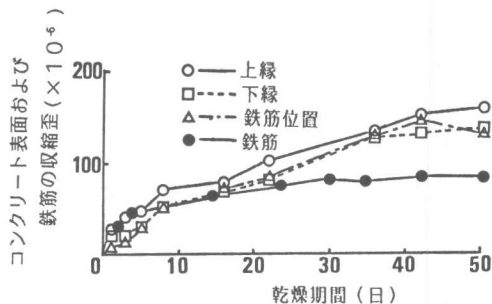


図-8 RCはりの乾燥収縮ひずみ

3-3. 乾燥収縮がRCはりの曲げひびわれ幅に及ぼす影響

(1) 最大ひびわれ間隔

ひびわれ幅に直接関係するひびわれ間隔は鉄筋の種類やかぶりなど種々の要因に影響を受け、乾燥収縮も主要な要因と考えられる²⁾。図-9は、曲げ載荷時におけるRCはりの曲げスパンにおけるひびわれ間の鉄筋の付着応力度分布を示したものであるが、乾燥により鉄筋とコンクリート間の付着性状が改善されていることがわかる³⁾。

ここで、付着に関する次の基礎式

$$L_{max} = 2 A_c f_t / u \tau_{max} \text{ ----- (2)}$$

L_{max} : 最大ひびわれ間隔

A_c : コンクリートの有効断面積

f_t : コンクリートの引張強度

u : 鉄筋の周長

τ_{max} : 最大平均付着応力度

により検討すると、乾燥により生じる自己応力によりみかけの引張強度 f_t が減少し、乾燥により付着が改善されて τ_{max} が増加するので L_{max} が減少することになるといえる。

RCはりの曲げ試験においては、逐次新たなひびわれが発生し荷重レベルにより傾向が異なるが、鉄筋応力2000kgf/cm²においては、上述した傾向が認められた。(図-12参照) このような変動の大きいひびわれ性状について検討するには、ひびわれ発生位置をノッチにより制御した両引き試験が有効であろう⁴⁾。

(2) 乾燥を受けたRCはりの曲げひびわれ幅

RCはりの曲げひびわれ幅に及ぼす乾燥収縮の影響の評価方法については、いくつかの研究⁵⁾があるが、本研究では乾燥により生じるコンクリートの自己応力に着目して検討を行なった。

図-10は、鉄筋応力と最大曲げひびわれ幅の関係を示したものである。ここで、ひびわれ幅の測定ははり側面の鉄筋位置で行なったが、はり底面におけるひびわれ幅に換算して示した。コンクリートが乾燥収縮を生じることにより最大曲げひびわれ幅が増大していることがわかる。

はり下縁に貼付したひずみゲージから、乾燥を受けないはりの場合、曲げひびわれ発生後、はり下縁において荷重による曲げ応力は解放され、コンクリートの表面ひずみは弾性もどりを生じた。これに対し、乾燥を受けたはりの場合はひびわれ発生後に載荷前の基長よりみかけの圧縮ひずみが認められた⁶⁾。乾燥により生じた引張応力による弾性ひずみ、すなわち、乾燥期間28日で 90×10^{-6} 、51日で 110×10^{-6} の引張ひずみも解放されたためと考えられる。

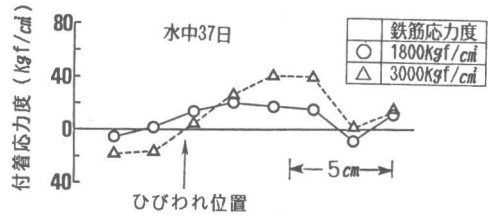
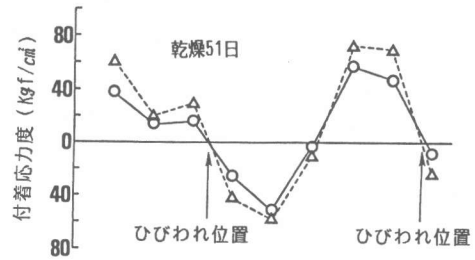


図-9 載荷時の付着応力度分布

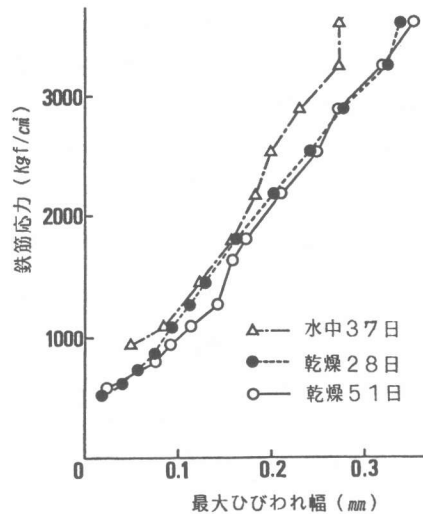


図-10 最大曲げひびわれ幅

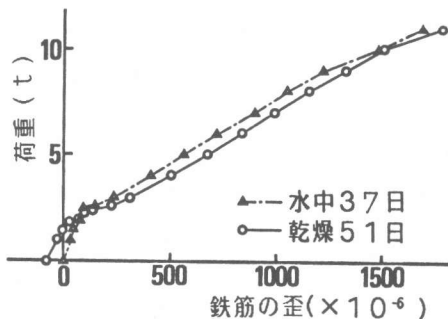


図-11 載荷時の主鉄筋ひずみ

図-11は、ひびわれ間の鉄筋の平均ひずみの測定結果を示したものである。乾燥を受けた場合のほうがひびわれ発生後の鉄筋のひずみが同一荷重で大きくなっているが、ひびわれの発生が早いとその進展が早くなったためと考えられる。

乾燥収縮によるひびわれ幅の増大量を乾燥期間51日の場合について、上記の検討から算定すると次のようになる。

- RCはりの乾燥収縮ひずみ： 143×10^{-6} 、
- 自己応力に対応する弾性もどり量： 112×10^{-6}
- 鉄筋のひずみの増加量： 100×10^{-6}

であるので、ひびわれ増大量は $355 \times 10^{-6} \times$ (ひびわれ間隔) となる。

図-12は、鉄筋応力 2000 kgf/cm^2 の時の、曲げスパンにおけるひびわれ間隔とひびわれ幅の関係を示した

ものである。ここで、ひびわれ間隔は、着目したひびわれの両側のひびわれ間隔の平均値とした。図中の実線は、乾燥をうけない場合について原点を通る直線で回帰したもの、破線は上記の算定方法により求めたものである。同図から、本算定方法にひびわれ間隔の変化を考慮に入れることより、乾燥収縮が曲げひびわれ幅に及ぼす影響をほぼ評価できると考えられる。なお、昨年改訂されたコンクリート標準示方書では、曲げひびわれ幅に及ぼす乾燥収縮およびクリープの影響は概ね 150×10^{-6} としてよいとしているが、場合によっては危険側の推定値を与える可能性のあることを示唆している。

4. まとめ

コンクリートの乾燥収縮により生じた自己応力がRC部材の曲げひびわれ特性に及ぼす影響について検討した結果から、より合理的なひびわれ幅算定方法を提案した。すなわち、乾燥収縮により生じる自己応力を曲げひびわれ発生荷重より求め、ひびわれ発生とともに自己応力が解放されることを考慮したものである。今後データの蓄積と同時に、断面内の含水量分布や各要素のクリープ特性と関連させた検討が必要である。

<参考文献>

- 1) Gerald Pickett, "Shrinkage Stresses in Concrete", Journal of ACI, Vol. 17, No. 3, 1946
- 2) 尾坂, 大塚・松本: 乾燥の影響を受ける引張RC供試体のひびわれ性状, コンクリート工学 Vol. 23, No. 3, 1985
- 3) 森田, 角: 鉄筋コンクリート部材の引張り試験による付着効果の研究, セメ技年報18, 1964
- 4) 後藤, 植田, 満木: 鉄筋コンクリート部材引張部のひびわれに関する研究, コンクリート・ライブラリー第14号(土木学会), 1965
- 5) 角田: 鉄筋コンクリートの最大ひびわれ幅, コンクリート工学, Vol. 8, No. 9, 1970
- 6) 宮沢, 田澤, 山本: 体積変化による自己応力とRC部材の曲げひびわれ, 土木学会第41回年次講演会講演概要集, 1986

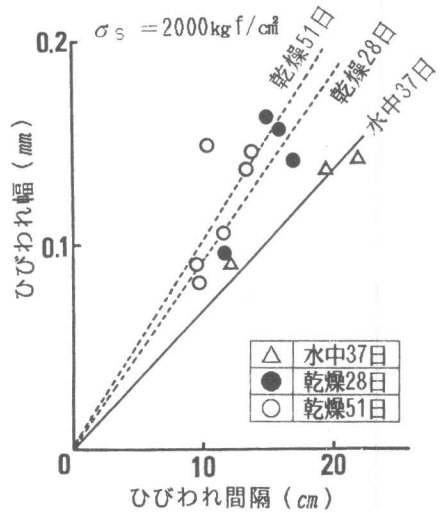


図-12 ひびわれ間隔とひびわれ幅の関係