

北海道大学 正員 横道英雄
角田幸史雄

高強度異形鉄筋を用いる鉄筋コンクリート部材において、その特性を有効に活かすためには、破壊安全性と共にひびわれ安全性を合理的に確保するように配慮する必要がある。鉄筋コンクリートのひびわれは、鉄筋の腐蝕、美観および利用者への心理的影響等によってその大きさに制限を受けるが、一般には主として鉄筋の腐蝕に伴う部材の耐久性が問題になる。その際に許容されるひびわれの大きさは、鉄筋の種類やかぶり量等によって大きく影響を受けるが、通常はその部材周囲の環境条件に応じた最大ひびわれ幅によって制限が与えられている^{3,4)}。本文は、鉄筋コンクリートの最大ひびわれ幅の計算方法について、著者らの行った研究結果に基づいて論ずるもので、引張および曲げ部材のひびわれとその対象としている。

鉄筋コンクリートはりの曲げひびわれは、初期コンクリートの曲げ引張応力によって生ずるが、ひびわれ間隔/はり高さの減少に伴って鉄筋周囲のコンクリートの応力状態に対する曲げの影響は弱くなり、鉄筋との付着によって伝達される力が支配的になる。そしてひびわれ間の平均付着応力が最大値に達した後は、二次的ひびわれを除き、新たなひびわれは生じなくなり、ひびわれ間隔は定常状態になる。このような状態は引張部材（両引き試験）における性状と類似するものであり、従って一般にひびわれ解析は引張部材をその直接対象として行なわれている。

鉄筋コンクリートの最大ひびわれ幅は一般に次式で表わされる：

$$w_{\max} = (\sigma_s / E_s - \sigma_{ca} / E_{spe} - \epsilon_c) l_{\max} \quad (1)$$

ここに σ_s はひびわれ位置における鉄筋応力度、 E_s は鉄筋の弾性係数、 σ_{ca} はひびわれ内のコンクリートの軸方向平均引張応力、 ϵ_c は鉄筋との肉の付着作用によって伝達される力を受持つコンクリート有効断面積（ここでは鉄筋とその重心の一致する断面積⁵⁾をとる）に関する有効鉄筋比、 ϵ_c はひびわれ内のコンクリートの弾性および塑性歪の平均値 $\epsilon_{c, \text{surf}}$ およびコンクリートの収縮、クリープ等によって生じた鉄筋とコンクリートとの肉の弾性歪差 ϵ_g の和、 $l_{\max}$ は最大ひびわれ間隔を表わす。なお σ_{ca} / E_{spe} はひびわれ内の付着による鉄筋歪の減少量を表わす。以下に (1) 式中の各項の大きさについて述べる。

最大ひびわれ間隔 $l_{\max}$ 上述のようにひびわれが次々に生じていく初期段階と新たなひびわれの生じなくなる定常状態とは明確に区別することができる。定常状態に達した後の最大ひびわれ間隔について一般に次式が成立つ。

$$l_{\max} = 2k A_{ce} \sigma_{ct} / u_{\tau \max} \quad (2)$$

ここに A_{ce} は前述のコンクリート有効断面積、 σ_{ct} はコンクリート引張強度、 u は鉄筋周長、 $\tau_{\max}$ はひびわれ内の平均付着応力その最大値を表わす。 $\tau_{\max}$ の大きさは鉄筋周囲のコンクリートの変形剛性および付着作用に伴って鉄筋周囲のコンクリートに生ずる内部微小ひびわれの発生進行に対する抵抗に関係し、著者らの行った種々の断面寸法の両引き供試体についての測定結果によれば、実用上の

範囲内において次の関係をとることができ。 (図-1)

$$U_{\text{max}} / \sigma_{ct} = k_2 A_{ce} / t_{\text{mean}} \quad (3)$$

ここに t_{mean} は左右のかぼりの平均値を示す。(2) および (3) 式より l_{max} は簡単にかぶり量によって表わされることがわかる。

$$l_{\text{max}} = k_3 t_{\text{mean}} \quad (4)$$

(4) 式の適用性については多数の両引き試験結果によって検証され (図-2), l_{max} と t_{mean} との間の比例関係がくずれるのはかぶり量が 2cm 以下, または鉄筋直径以下の場合であり, 実用上の範囲では (4) 式が十分に適用できるとわかる。なお係数 k_3 は鉄筋の付着性状によって異なる値をとり, 図-2にも鉄筋種類によるいくらかの相違が見られる。

鉄筋肉隔のひびわれ肉隔に対する影響はかぼりの影響に比して非常に小さく, かつ通常の鉄筋コンクリートはりでは鉄筋肉隔/かぼりの比はそれほど大きな範囲に変化しないのでその影響は実際にはあまり大きくはないが, 合理的配筋を定める際には重要な要素の一つである。図-3はかぶり量の等しい (側面および底面ともに 4.2cm) 鉄筋コンクリートはりの最大ひびわれ肉隔 l_{max} および最大ひびわれ幅/鉄筋平均歪 W_{max}/E_s (この比は (1) 式より明らかに l_{max} に相当する値を表わす) の測定値を, 鉄筋水平肉隔 e_s に対して描いたものである。図より明らかに, 最大ひびわれ肉隔はかぶり一定の場合には鉄筋肉隔の大きい程大きい値をとり, 両者はほぼ直線関係にある。この結果を (4) 式と組合わせれば

$$l_{\text{max}} = k_3 t_{\text{mean}} (1 + k_4 e_s / t_{\text{mean}}) \quad (5)$$

実験結果によれば $k_3 \approx 2.5$, $k_4 \approx 0.18$ であり, e_s / t_{mean} の影響の強さはかぼりの約 20% であることがわかる (試験はりでは e_s / t_{mean} の影響を強くとり出すために, その比を約 1/7 という実用範囲以上に変えていく事に注意された)。なお, 鉄筋/本のはりに対しては, 実験結果と (5) 式との比較より, (5) 式中の e_s として $2.5 t_{\text{mean}}$ の値を入れればよいことがわかった, すなわち $l_{\text{max}} = k_3 t_{\text{mean}} (1 + 2.5 k_4)$ となる。図-4は最近着者の行ったはり試験 (いずれも横フジ型異形棒鋼を使用し, 支間 3m , 高さ 30cm のはりにおいて, 鉄筋直径, 側面および底面かぶり, 鉄筋肉隔を種々に変えたもので, 純曲げ区間にはせん断鉄筋を配置していない) において測定された l_{max} および W_{max}/E_s の測定値を, (5) 式に応じて $t_{\text{mean}} (1 + 0.18 e_s / t_{\text{mean}})$ または $1.45 t_{\text{mean}}$ (鉄筋/本の場合) に対してプロットしたものであり, 両者の間に明らかな比例関係が見られる。

付着に関する項 $\sigma_{cm} / E_s k_e$ ひびわれ肉の付着による鉄筋歪の減少量 $\sigma_{cm} / E_s k_e$ の大きさは,

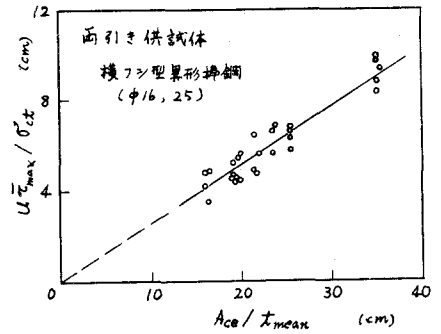


図-1

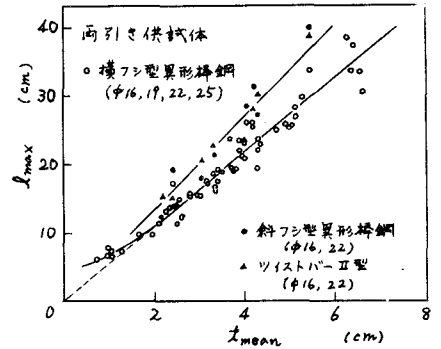


図-2

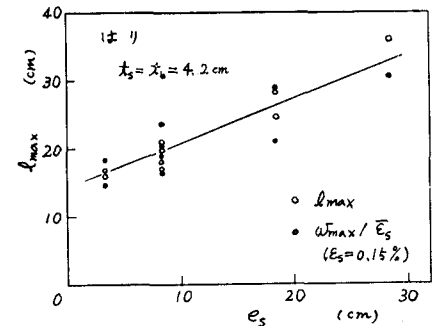


図-3

図-5に見られるように、荷重の増加に伴って徐々に減少するが、鉄筋応力 $\sigma_s = 2000 \text{ kg/cm}^2$ ($\epsilon_s = 0.1\%$) 以上ではほぼ一定とみなすことができる。いま $\sigma_s = 2000 \sim 3000 \text{ kg/cm}^2$ の範囲における $\sigma_{cm}/E_s t_e$ の平均値をとって t_e に対して掲げば、図-6に示すように t_e の小さい程大きい値をとる。このことは図-4における l_{max} または W_{max}/E_s の代りに W_{max} の測定値をとれば図-7に示すように直線ではなく、曲線状になることから知る事ができる。図-6の曲線形状より、実用上においては $\sigma_{cm} = 0.4 \sigma_{ci}$ とれば十分であることがわかる。

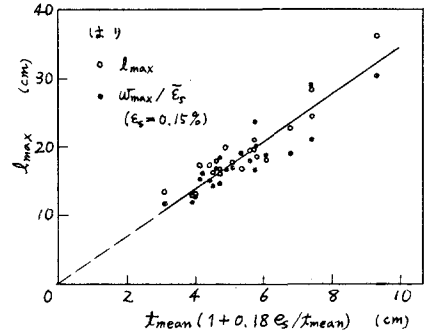


図-4

コンクリートの弾塑性歪 $\epsilon_{c, mcf}$ これはひびわれ内の鉄筋との付着によって伝えられる力によるコンクリートの弾性変形およびひびわれ発生前に受けた引張塑性歪となる。前者については l_{max} に相当する長さの両引き供試体の表面歪、後者については $\sigma_{cm} \times t_{ocm}$ のコンクリートシリンダーの単純引張破断後の塑性残留歪の平均値としてそれぞれの大きさを推算した結果、ともに約 0.001% 程度であって、ひびわれ幅の計算においては無視できることが示された。すなわち

$\epsilon_{c, mcf} \approx 0$ である。

ひびわれ発生前に受けたクリープおよび収縮の影響 ひびわれ発生前のコンクリートのクリープおよび収縮のひびわれ幅に対する影響は、理論上はそれらによって鉄筋とコンクリートとの間に生じた内部応力度による弾性歪差：

$$\epsilon_g = \sigma_{sg}/E_s + \sigma_{csg}/E_c \quad (6)$$

により (1) 式によって考慮される。そのことは著者らの行った両引き試験(収縮の影響)およびはり試験(クリープ)によって確かめられた。図-8は乾燥収縮によって ϵ_g が導入された両引き供試体のひびわれ幅の測定値と、それに対する ϵ_g を考慮した計算値とを比較した一例を示す。

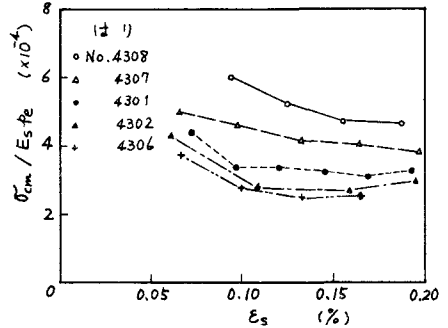


図-5

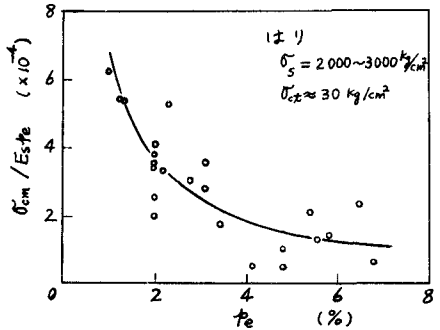


図-6

ひびわれ発生後の持続荷重および繰返し荷重の影響 ひびわれ発生後の持続荷重等の影響は、ひびわれの存在のために引張ゾーンコンクリート応力が非常に小さく、かつ拘束の影響がほとんどないために、 ϵ_g としてよりはむしろ付着応力、すなわち $\sigma_{cm}/E_s t_e$ の減少を捉える方が有効である。図-9は支間 $3m$ の鉄筋コンクリートはり、ひびわれが定常状態にあるような大きさの持続荷重を与えたときの $\sigma_{cm}/E_s t_e$ の時間的变化を示したものである。なお試験中ははりに散水を続けることにより乾燥収縮はほぼ完全に防止された。図に見られるように $\sigma_{cm}/E_s t_e$

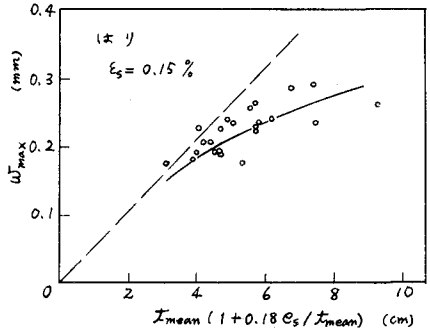


図-7

は持続荷重によって徐々に減少していく傾向が見られる。従って、十分な時間を経過した後のひびわれ幅の計算に際しては、 $\sigma_{cm}/E_s f_c$ の値の初期値 ($\sigma_{cm} = 0.4 \sigma_{ct}$) からの減少を考慮する必要があり、安全側には $\sigma_{cm} = 0$ とするのがよいであろう。

図-10は繰返し荷重を受ける際の鉄筋コンクリートはりの $\sigma_{cm}/E_s f_c$ の変化を示したものである。 $\sigma_{cm}/E_s f_c$ の値は繰返し上限荷重および下限荷重の両者に対してほぼ同様に減少していく傾向が見られ、上限荷重に対する正の値と、下限荷重に対する負の値の絶対値が平均化されるように、すなわち $\sigma_{cm}/E_s f_c$ の値が繰返し平均荷重に対して0の値に近づいている。これは上述の持続荷重に対する性状と類似するものであるが、その近づく速度は繰返し荷重の場合には非常に早いことがわかる。これらのことから大きな荷重繰返しを受けるひびわれの生じている部材では、持続荷重(繰返し下限荷重)に対しては $\sigma_{cm} \approx -0.2 \sigma_{ct}$ 、繰返し上限荷重に対して $\sigma_{cm} \approx 0.2 \sigma_{ct}$ 程度の値をとるのが妥当であろう。

ひびわれ発生後の収縮の影響 ひびわれが生じた後に生ずるコンクリートの乾燥収縮に対しては、ひびわれの存在によるコンクリートの変形拘束の減少等のため、クリープによる二次的作用が小さいので、(6)式に代りに

$$E_g = w' \quad (7)$$

にとるべきであろう。図-11はひびわれが定常状態にあるような大きさの持続荷重を受けている鉄筋コンクリートはりが同時に乾燥収縮を受けたときのひびわれ幅の変化量を、(7)式による E_g および持続荷重による $\sigma_{cm}/E_s f_c$ の減少量の測定値を用いた計算値と比較したものであり、両者の良好一致が見られる。

文献

- 1) G. Edm. H. Mull: Versuche zum Studium des Einflusses der Rißbreite auf die Rasthaltung an der Bewehrung von Stahlbetondeckeln; D.A.S. 1962.
- 2) 岡村高隆: 変形鉄筋の使用に関する基礎研究; コンクリート, 2, 6, 1966.
- 3) C. E. B: Recommendations for an International Code of Practice for Reinforced Concrete; ACI, CCA, 1963.
- 4) E. G. Gary: Crack Control in Reinforced Concrete Structures; ACI Journal, Oct. 1968.
- 5) 横道 角田全井: RCリ鉄部材のひびわれ; セメント技術年報 XXII, 1968.
- 6) 横道 角田: RC部の曲げ性状; セメント技術年報 XXII, 1968.
- 7) 角田: 鉄筋コンクリート橋のひびわれおよび変形に関する基礎研究, セメント部研究報告 854号, 1967.
- 8) 横道 角田小野: 鉄筋コンクリートのひびわれ制御に関する研究; セメント技術年報 XXII, 1967.
- 9) A. Elsen, H. Krenschel: Progress of the Crack Problems in Reinforced Concrete Based on Statistical Investigations; RILEM Symposium, 1957.
- 10) 横道: コンクリート橋, 技報堂 昭37, p. 49.

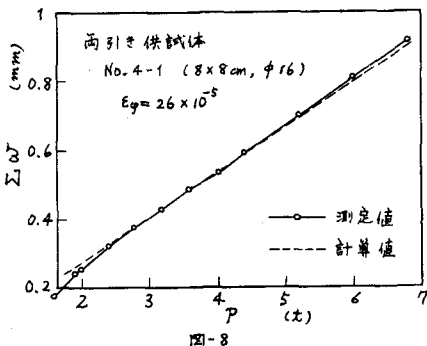


図-8

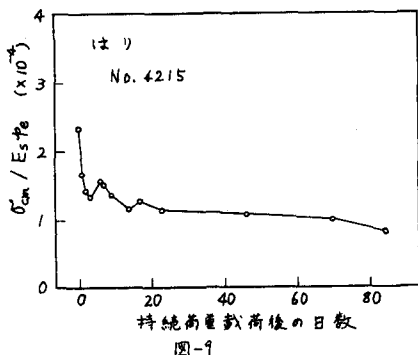


図-9

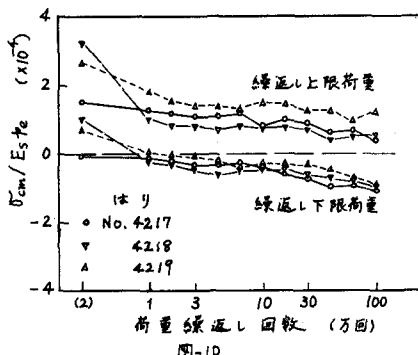


図-10

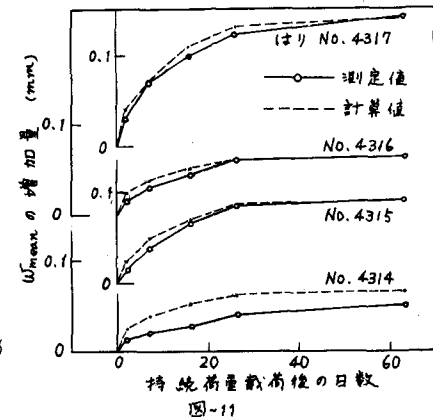


図-11