

# 多段配筋を有する鉄筋コンクリートはりの 曲げひびわれ性状に関する実験的研究

趙 唯堅\*・丸山久一\*\*

構造物の大型化に伴い、主筋が多段に配置されるコンクリート構造物が多くなっている。そこで、曲げひびわれ性状に及ぼす多段配筋の影響を検討するために基礎的実験を行った。その結果、最下段以外の鉄筋の位置、径および束ね筋などの配置状況による影響が認められた。また、ひびわれの間隔および幅の分布が正規分布になることを確かめるとともに、最大ひびわれ間隔に及ぼす形状効果を明らかにし、その評価式を提案した。

**Key Words** : multi-layers of bars, crack spacing, crack width, normal distribution, shape effect

## 1. ま え が き

近年、コンクリート構造物の設計法、施工技術の進歩あるいは供用される環境条件の変化に伴い、コンクリート部材のひびわれに対する関心が高まっている。特に、コンクリート構造物の劣化と耐久性が焦点になる場合には、ひびわれ幅の予測技術と制御技術が重要となる。

鉄筋コンクリートはりの曲げひびわれに関しては、古くから数多くの研究が行われ、種々の異なった算定式が提案されている。その中で力の釣合方程式に鉄筋とコンクリートの付着強度がコンクリート引張強度に比例すると仮定することによって導かれたひびわれ間隔の理論式が、長い年数にわたって支配的な位置を占めていたが、実験データの蓄積につれ、ひびわれ間隔およびひびわれ幅の実験結果とこの理論式との間にそれほど強い相関は見られず、むしろかぶり厚さが大きな影響を持つことが示されてきた。そこで、角田は上述の理論を次のように修正した<sup>1)</sup>。すなわち、異形鉄筋の付着強度がコンクリートの引張強度に影響されるだけでなく、かぶり厚さ、鉄筋径および有効コンクリート断面積にも関係するように最大ひびわれ間隔の式を一般化し、実験から得られた付着強度とこれらの要因の関係を一般化した式を導入して、かぶり厚さのみをパラメータとした非常に簡単な最大ひびわれ間隔算定式を得た。この研究を受け、土木学会は、1986年および1991年のコンクリート標準示方書の中で次式に示す曲げひびわれ幅の算定式(以下、示方書式と略す)を定めている<sup>2)</sup>。

$$W_{\max} = k_1 \{4c + 0.7(c_s - \phi)\} (\sigma_{se} / E_s + \epsilon_{cs}') \dots \dots (1)$$

ここに、 $k_1$ は鋼材の付着性状の影響を表す定数で、一般に異形鉄筋の場合に1.0、普通丸鋼およびPC鋼材の

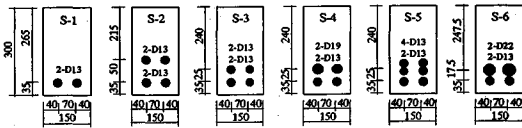
場合に1.3としてよい。 $c$ はかぶり、 $c_s$ は鉄筋の中心間隔、 $\phi$ は鉄筋径、 $\sigma_{se}$ は鉄筋応力度の増加量、 $E_s$ は鉄筋の弾性係数、 $\epsilon_{cs}'$ はコンクリートの乾燥収縮およびクリープによるひびわれ幅の増加を考慮するための数値で、一般に $150 \times 10^{-6}$ としてよい。

ところで、はりの主鉄筋を横1列に並べて配置する1段配筋のはりのひびわれ性状は、通常、鉄筋のかぶりおよび横の配置間隔によって支配されるが、一方、主鉄筋を曲げ引張部の高さ方向に数段に分けて配置するいわゆる多段配筋の場合、そのひびわれ性状は2段目以上の鉄筋の影響を受けると考えられる。角田の理論では、式を一般化する際に1段配筋に限定していないが、導入された付着強度の性質が1段配筋の実験結果から得られたものであるため、導かれた最大ひびわれ間隔の算定式は、厳密には1段配筋にしか適用できず、多段配筋の場合にも精度良く算定できる保証はない。角田の理論をもととした示方書の式も基本的に同じ性格を持っている。また、既往のほかの研究は1段配筋を中心としたものが多く、多段配筋を含めた研究でも、1段目鉄筋と同じ径と間隔の整列配置がほとんどであり、しかも1段配筋と同じように有効コンクリート断面積で全体を平均的に処理するだけで、上段鉄筋の配置状況の影響に注目して検討してはいない。

また、示方書式のひびわれ間隔に相当する項は横ひびわれの間隔のうち最大のもの、すなわち最大ひびわれ間隔 $L_{\max}$ を表すものであると解釈されているが<sup>3)</sup>、その統計的意味は明記されていない。乾燥収縮の少ない供試体のひびわれ間隔および幅は正規分布に従うと言われていたが、実際どの程度適合しているか、分布のばらつきについて、ひびわれ間隔とひびわれ幅の間に差はあるかないかなど、明確な議論はまだなされていない。さらに、モデル供試体による実験結果や理論計算から導かれた最大ひびわれ間隔と幅の算定式は、そのまま寸法の異なる

\* 学生会員 工修 長岡技術科学大学大学院 工学研究科  
(〒940-21 長岡市上富岡町 1603-1)

\*\* 正会員 Ph. D. 長岡技術科学大学教授 工学部



図一 供試体の断面寸法と配筋状態

表一 供試体一覧

供試体名	梁高さ (cm)	主筋配置		かぶり (cm)	横中心間隔 (cm)	主筋比 (%)	呼び強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
		下段 有効高さ(cm)	上段 有効高さ(cm)						
S-1	30	2-D13	26.5	...	2.85	7.0	0.64	291	
S-2	"	"	"	2-D13	21.5	"	"	1.41	291
S-3	"	"	"	2-D13	24.0	"	"	1.34	291
S-4	"	"	"	2-D19	24.0	"	"	2.22	313
S-5	"	"	"	4-D13	24.0	"	"	2.04	313
S-6	"	"	"	2-D22	24.8	"	"	2.72	313

供試体あるいは実構造物に適用していいのか、ひびわれ性状に関して寸法効果があるかどうかについても、まだ解明されていない。

このように、使用限界状態を検討する際の重要な指標の1つであるひびわれ問題について、古い課題であるものの、まだ不明な点が多く残されている。本研究は、軸方向に多段配筋となる鉄筋コンクリートはりの基礎的実験を行い、ひびわれ性状に及ぼす多段配筋の影響を実験的に検証したほか、ひびわれ間隔とひびわれ幅の分布特性、および最大ひびわれ間隔の形状効果について検討したものである。

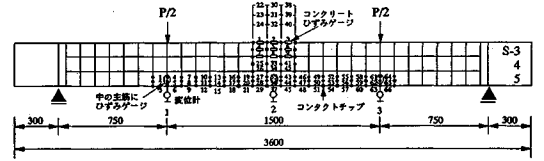
## 2. 実験概要

### (1) 供試体計画

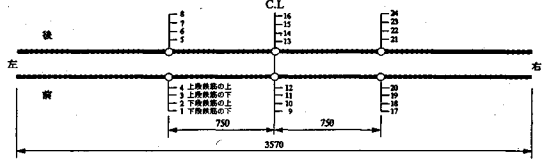
実験に用いた供試体の断面寸法および配筋状態を図一1に、供試体諸元を表一1に示す。2段目以上の配筋の影響を抽出するために、各供試体の1段目(最下段)鉄筋のかぶり厚さ、鉄筋径および鉄筋本数をすべて同一にし、2段目以上の鉄筋の縦配置間隔、鉄筋径および本数を変えた。計6体の供試体のうち、S-1は基準供試体で、S-2、S-3は縦配置間隔(ひずみ勾配)の影響、S-3、S-4は鉄筋径(付着面積)の影響、そしてS-5、S-6は束ね筋(群効果)の影響を見るためのものである。供試体の主筋比は0.64~2.72%で、通常のはりの鉄筋比をカバーしている。周知のように、ひびわれに関する実験データのばらつきは大きく、また供試体長さによる最大ひびわれ間隔の形状効果が存在する可能性があるため、十分な曲げひびわれ本数を得るために、等曲げモーメント区間の長さを断面高さの5倍(有効高さの約6倍)の150 cmとした。また、主鉄筋に貼付したひずみゲージの数および保護コーティングの範囲を、鉄筋の付着性状を損なわぬよう必要最小限に抑えた。なお、せん断破壊が先に起きないように、せん断スパン内にD10鉄筋のスターラップを10 cm間隔で配置した。

表二 鉄筋の機械的性質

種別	呼び名	降伏点 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )
SD345	D13	3900	2.00×10 <sup>4</sup>
	D19	4530	1.95×10 <sup>4</sup>
	D22	4050	1.80×10 <sup>4</sup>



S-2 (S-4, S-6) 鉄筋ゲージの位置:  
1 段目鉄筋D13+2段目鉄筋D13 (D13-D19, D22)



図二 載荷方法及び測定位置

### (2) 使用材料

コンクリートはレデーミクストコンクリートを使用した。その呼び強度は270 kgf/cm<sup>2</sup>、スランプは10 cm、水セメント比は約50%である。信濃川産の細・粗骨材を使用し、粗骨材の最大寸法は25 mmとした。養生は室内空气中自然養生とし、試験時の強度発現は表一1に示すとおり約300 kgf/cm<sup>2</sup>前後であった。鉄筋はSD345の横ふし異形鉄筋で、D13、D19およびD22の3種類を使用した。鉄筋の機械的性質を表二に示す。

### (3) 載荷・計測方法

試験は単純ばりの対称2点集中載荷とし、30 tfのアクチュエーターを用いた。載荷方法は短期単調載荷とし、計測は、荷重ステップ毎に行い、供試体表面および鉄筋に貼りつけたワイヤストレインゲージによって圧縮域コンクリートと引張鉄筋のひずみを測定し、また供試体側面の各段鉄筋高さ位置と縁端位置に貼りつけたコンタクトチップ(10 cm間隔)により等曲げモーメント区間のひびわれ幅を測定した。ひびわれ間隔の測定は1段目鉄筋高さ位置で行った。なお、はりスパン中央点と載荷点のたわみを変位計で測定した。各項目の測定点の位置を図二に示す。

## 3. 実験結果及び考察

### (1) 荷重-変位-ひずみ挙動

各供試体の荷重-変位(中央)曲線を図三に示す。すべての供試体は曲げ挙動が卓越し、S-1~S-5は曲げ引張破壊、S-6は曲げ圧縮破壊であった。各供試体は2.5 tf前後の荷重でひびわれが発生しており、その後、曲げ剛性は主筋比に応じて変化している。

図四に降伏までの各供試体の荷重と1段目鉄筋ひず

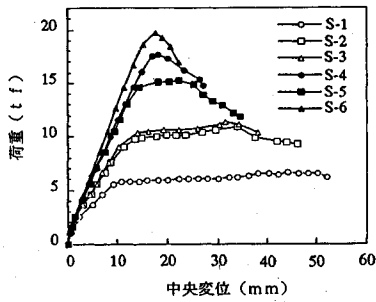


図-3 荷重-変位関係

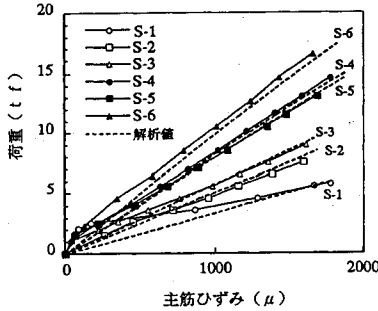


図-4 荷重-主筋ひずみ関係

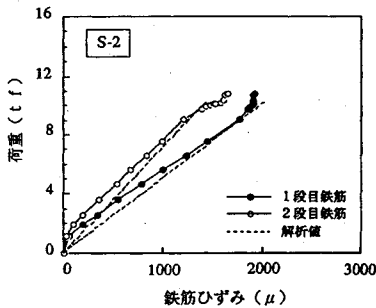


図-5 各段の鉄筋ひずみの例

みの関係を示す。鉄筋のひずみの実測値は1段目の2本の鉄筋の平均値(各鉄筋には上下2枚ゲージを貼付)を使用した。ひずみゲージの位置とひびわれ位置は必ずしも合致していないが、両位置は比較的近かったため、実測値は引張コンクリートを無視した断面解析で求めた荷重-ひずみ曲線とほぼ一致している。また、図-4のS-1に見られるように、主筋比が小さいほど、ひびわれ発生後の低荷重レベルにおいて、ひびわれ間のコンクリート拘束(テンションステイフィング)の影響が顕著に認められたが、荷重と主筋ひずみの関係はおおむね直線的である。

図-5に供試体S-2を例に荷重と各段鉄筋ひずみの関係を、図-6に実験から求めた同じ供試体の断面ひずみ分布を示す。図-6のa)はスパン中央3区間(1区間は10cm)のコンタクトチップの測定結果を平均して求めたもので、図-6のb)は鉄筋とコンクリートのひずみ

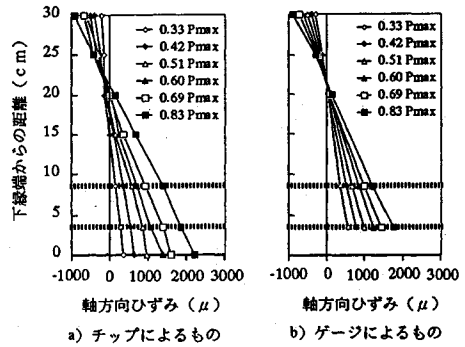


図-6 断面ひずみ分布の例(S-2)

表-3 ひびわれ間隔とひびわれ幅の実測値

供試体名	ひびわれ間隔 (cm)			ひびわれ幅** (mm)		
	平均値*	最大値	最大/平均	平均値	最大値	最大/平均
S-1	11.7	16.7	1.43	0.123	0.186	1.51
S-2	10.2	14.0	1.37	0.112	0.159	1.42
S-3	9.6	14.8	1.54	0.105	0.184	1.75
S-4	9.0	14.3	1.59	0.098	0.150	1.53
S-5	9.4	12.7	1.35	0.107	0.160	1.50
S-6	8.5	13.0	1.53	0.099	0.147	1.48
平均	9.7	14.3	1.47	0.107	0.164	1.53

\* ここでの平均ひびわれ間隔は、各々のひびわれ間隔実測値を平均化して求めたものであって、参考文献4)中の等曲げモーメント区間のひびわれ本数を区間長150cmで割った値と多少異なる。

\*\* 1段目鉄筋ひずみ(解析値)  $\epsilon_s = 1200\mu$ の時のひびわれ幅。

ゲージによるものである。なお、コンクリートのひずみはスパン中央3列の平均値を用いた。図-6から分かるように、コンタクトチップによる結果とひずみゲージによる結果はよく一致しており、コンタクトチップによる変形およびひびわれ幅の測定方法は実用上ほぼ信頼できるものと確認された。また、これらの図から平面保持の仮定が成り立っていることも確認されるが、注目したいのは、断面のひずみ勾配によって1段目鉄筋に比べ2段目鉄筋のひずみが小さく、各段の鉄筋の最大付着応力が同時に生じることはない。したがって、中立軸に近い鉄筋ほどひびわれ性状に及ぼす影響は小さくなると推測される。

(2) ひびわれ間隔

表-3にひびわれ間隔の実測値、および1段目鉄筋のひずみ(計算値)  $\epsilon_s = 1200\mu$ の時に、1段目鉄筋高さ位置でのひびわれ幅の実測値を示す。鉄筋重心位置のひずみが1000 $\mu$ をひびわれ検証時点の目安とすると、1段目鉄筋のひずみがそれを越えていることと、多段配筋の場合ひびわれが定常状態になる時点は1段配筋より幾分遅れることを考慮して、1段目鉄筋ひずみ  $\epsilon_s = 1200\mu$ の時点を基準に取った。また、図-7に定常状態になった後のひびわれパターンを示し、図-8にひびわれ間隔の実測値と示方書式による算定値との比較を示す。これらより、1段配筋のS-1に比べ、多段配筋の供試体

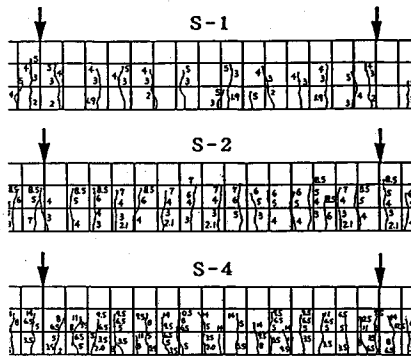


図-7 ひびわれパターンの例

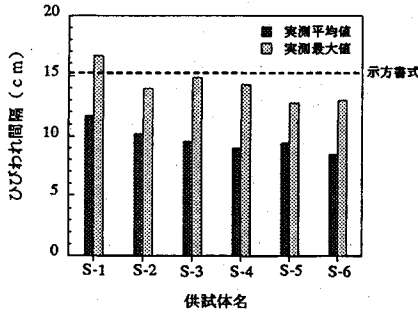


図-8 ひびわれ間隔

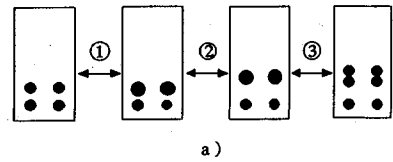
は曲げひびわれの本数が多く、ひびわれ間隔が小さいことが分かる。また、ひびわれ間隔の平均値を見ると、多段配筋の供試体では、1段目と2段目鉄筋の縦間隔が小さいほど(S-2とS-3の比較により)、2段目鉄筋の径が大きいくほど(S-3とS-4の比較により)、平均ひびわれ間隔が小さくなり、縦配置間隔および鉄筋径の影響が認められた。また、S-4に比べS-5の2段目以上の鉄筋周長が大きいくにもかかわらず、平均ひびわれ間隔の実測値はS-4より大きくなっている。これは鉄筋を束ねて配置した場合、2本の鉄筋の接触面近傍において付着面積の欠損が生じたと考えられる。なお、最大ひびわれ間隔と平均ひびわれ間隔の比の平均値は1.47となっている。

図-8では、実測値が2段目以上の鉄筋の有無および配置状況に応じて変化するのに対し、示方書式は1段目鉄筋しか考慮していないため、一定の値を示している。

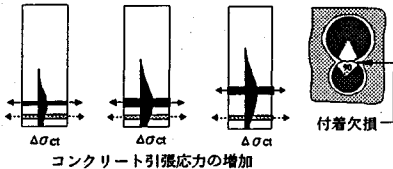
以上の実験結果から、ひびわれ間隔に及ぼす多段配筋の影響が認められ、そのメカニズムとして、次に示す3つの要因が考えられる、その概念図を図-9に示す。

- ① 2段目以上の鉄筋の相対付着面積(量)の影響
- ② 2段目以上の鉄筋の相対縦位置(歪勾配)の影響
- ③ 束ね筋の場合の付着欠損(群効果)の影響

要因①の影響は比較的容易に理解される。要因②のひびわれ勾配の影響は2つの意味を持っている。1つは、曲げモーメントによる断面ひびわれ勾配の影響、すなわち、



a)



b)

図-9 多段配筋影響のメカニズム

2段目以上の鉄筋が断面の中立軸に近いほど、図-5および図-6に示すように、1段目鉄筋に比べその伸びが小さく、同一荷重における全鉄筋に生じる総付着応力は小さくなり、見かけ上、付着性状の悪い鉄筋を用いたことと同じになり、ひびわれ間隔が大きくなる。もう1つは、鉄筋周りのコンクリートのせん断変形による局所ひびわれ勾配の影響、すなわち、図-9b)に示すように、付着作用によるコンクリートの引張応力が3次的に拡散し、鉄筋の中心位置から離れるほど、コンクリートの引張応力が小さくなる。したがって、1段目鉄筋に対して2段目以上の鉄筋の付着重心は断面の引張縁端から離れるほど、縁端コンクリートの引張応力が小さく、断面を貫通した横ひびわれが生じにくく、ひびわれ間隔が大きくなる。

縦間隔の極端なケースとして、要因③の束ね筋が考えられる。たとえば、極太径鉄筋をコンクリートの補強材として用いる場合、少なくとも鉄筋直径以上のかぶりが必要であるためかぶりが大きくなり、コンクリート表面に大きなひびわれが生じてしまう。耐久性から許容されるひびわれ幅の値以下であっても、このようなひびわれは美観等から好ましくないため、極太径鉄筋の使用の妨げとなっている。このようなコンクリート表面のひびわれ幅を減少させるためには、細径の鉄筋を束ねて用いることが考えられる。また、適当太さの鉄筋が手に入らなく、打設のことも配慮しなければならない場合、細径鉄筋を束ねて使用することも材料不足の国と地域では実際に有り得る。これらのように鉄筋を束ねて配置する場合、外部ひびわれ性状はどのように影響されるか、どう評価したらよいかは重要な課題であり、また重ね継ぎ手の定着性状を外部から評価する一つの手がかりとなりうる。しかし、いままで行われてきた外部ひびわれ間隔の算定に関する研究は、ほとんど最も単純な配筋状態しか対象とせず、複雑な配筋状態に適用しにくい。

2本の鉄筋を比較的狭い間隔に並べて配置する場合、その付着効果は2本の鉄筋が遠く離れた場合と異なる。

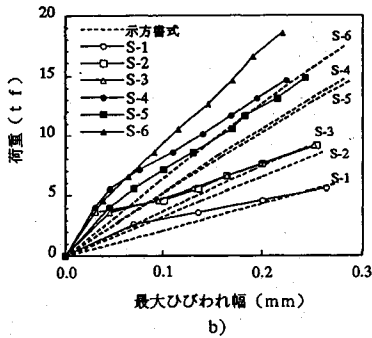
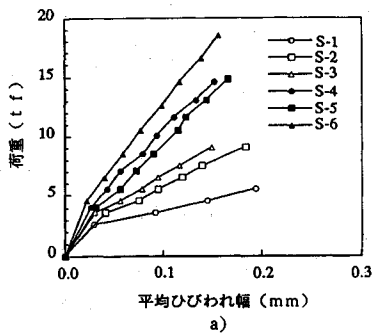


図-10 荷重-最大ひびわれ幅関係

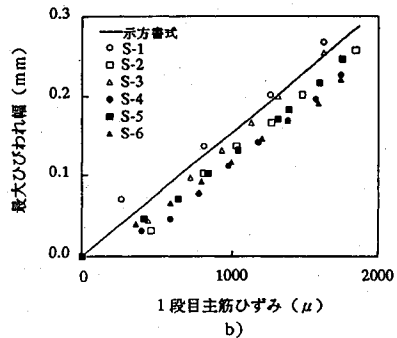
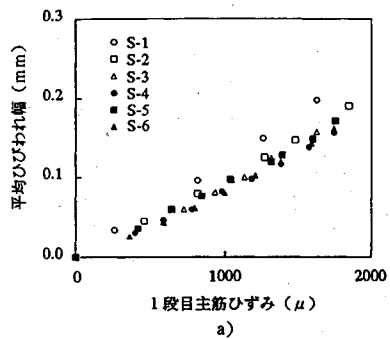


図-11 ひびわれ幅-主筋ひずみ関係

後藤らの研究<sup>5)</sup>、および尾坂らの研究<sup>6)</sup>によれば、鉄筋の純間隔がある間隔より小さくなると、2本の鉄筋に挟まれた部分のコンクリートに、両側の鉄筋のふしとふしを連結するような梯子状内部ひびわれが多数発生する。また、この梯子状のような内部ひびわれは、両方の鉄筋からコンクリートへ伝えられた力が重なり合成された結果であり、梯子状のひびわれが発生している領域のコンクリートは鉄筋の付着および定着に果たす役割が極めて小さいと指摘されていた。また、後藤らの両引試験によれば、両側の鉄筋から発生した内部ひびわれが相互に連結するかしないかの鉄筋純間隔の境界値は、約鉄筋径の2~2.5倍である。したがって、2本の鉄筋はこの程度純間隔を離さなければ1本の鉄筋と同じ付着および定着効果が期待できなく、言い換えれば一種の付着面積欠損が生じると考えられる。

以上の3要因それぞれ影響の割合が具体的な配筋状況によって異なるが、影響のメカニズムとして、2段目以上の鉄筋の付着伝達による縁端コンクリート引張応力の増加に共通していると考えられる。

### (3) ひびわれ幅

図-10に各供試体の荷重とひびわれ幅関係を示し、図-11にひびわれ幅と1段目鉄筋ひずみ実測値の関係を示す。なお、図-10のb)および図-11のb)に示方書式による算定値も同時に示してある。実験において、はり側面の縁端位置、1段目鉄筋および2段目鉄筋高さ位置のひびわれ幅を測定したが、図-10, 11および以

下の議論でのひびわれ幅は、特別の説明がない限り、すべて1段目鉄筋高さ位置のひびわれ幅とする。また、最大ひびわれ幅の取り方について、池田らの研究<sup>7)</sup>では、最も大きいひびわれ幅3個の平均値を用いて評価しているが、鉄筋腐食の観点からは、最大値を示す1本のひびわれに着目するのがより適切と考え、ここでは、1個の最大ひびわれ幅を対象とした。なお、本実験の供試体は室内気中養生とし、載荷試験開始時までの材令はおよそ1ヶ月であり、その間、乾燥収縮によるひびわれは、肉眼でははりの全長にわたって1つも観察されなかった。また、載荷試験は短期間(2時間ほど)で終わったため、コンクリート乾燥収縮の影響は比較的小さいと判断し、示方書式によるひびわれ幅の算定において、乾燥収縮およびクリープの影響 $\epsilon_{cs}$ を0とした。

図-10 a)では、同じ荷重に対し鉄筋縦間隔の小さいS-3の平均ひびわれ幅がS-2より小さく、ひびわれ間隔の傾向と同じであったが、図-10 b)の最大ひびわれ幅では、S-3とS-2はほぼ同じ値となっている。また、同一主筋ひずみで比較すると、図-11 a)では、S-3の平均ひびわれ幅がS-2より小さいのに対し、図-11 b)では、S-3の最大ひびわれ幅は逆にS-2より大きくなっている。この原因はS-3にあり、もともと2本のひびわれはたまたま1段目主筋の位置で1本に合流したことが実験中観察された。したがって、最大ひびわれ幅のばらつきは平均ひびわれ幅より大きいことがいえる。また、示方書式による算定値は、持続荷重および繰り返し荷重

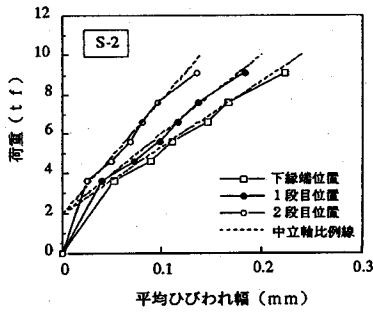


図-12 各位置の平均ひびわれ幅の例

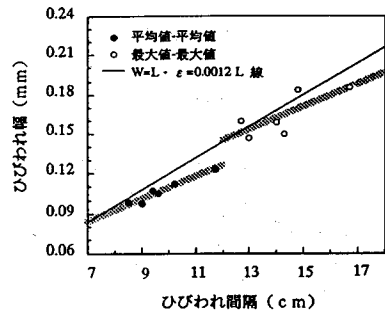


図-14 ひびわれ間隔-ひびわれ幅の関係

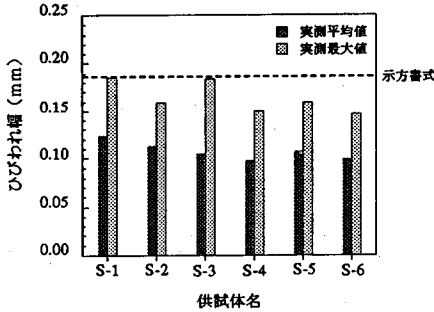


図-13 ひびわれ幅

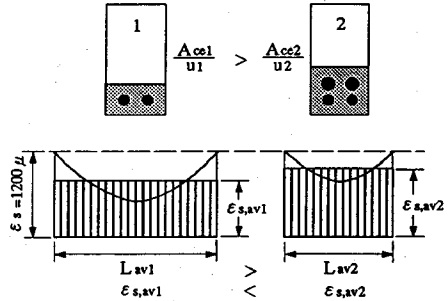


図-15 コンクリート拘束効果の模式図

の影響を考慮すると、鉄筋比の小さい供試体を過小評価、鉄筋比の大きい供試体を過大評価する傾向があり、ひびわれ間隔の算定とほぼ同じ傾向を示している。また、図-11の同一主筋ひずみにおいて、1段配筋と多段配筋のひびわれ幅はひずみレベルによって約1~2割の差が認められる。

1例として供試体 S-2 の荷重と各測定位置の平均ひびわれ幅の関係を図-12 に示す。図-5、6 と対照して分かるように、各位置でのひびわれ幅はほぼその位置のひずみに比例し、すなわち、その位置から断面中立軸までの距離に比例することが認められる。したがって、多段配筋の場合の各段鉄筋高さ位置のひびわれ幅を求める場合、対応位置の鉄筋ひずみを用いればよい。また、はり底面のひびわれ幅について、鉄筋位置でのひびわれ幅を用いて中立軸より比例計算すればよいと考えられる。

図-13 に1段目鉄筋のひずみ(計算値)が1200 $\mu$ 時のひびわれ幅実測値と示方書式による算定値との比較を示す。ひびわれ間隔と同じ傾向が見られ、実測値では上段鉄筋の有無および配筋状態に応じて変化しているが、示方書式では一定の値を示している。ただし、図-8 と比較すると、ひびわれ間隔の実測値よりひびわれ幅実測値の配筋状態による変化は幾分緩やかであったことが認められた。また、図-14 に示すひびわれ間隔とひびわれ幅の関係では、ひびわれ間隔が大きくなるにつれ、ひびわれ幅は次第に  $W=L \cdot \epsilon = 0.0012L$  (コンクリートの拘束効果を無視した)線から離れていく傾向が見られた。

これは図-15 の模式図に示すように、有効コンクリート断面積と引張鉄筋総周長の比  $A_{cc}/u$  が大きくなるにつれ、ひびわれ間隔は大きくなるが、ひびわれ間のコンクリートの拘束効果も幾分増し、よって、引張鉄筋の平均ひずみは幾分小さくなるのが原因であると思われる。なお、表-3 より、実測の最大ひびわれ幅と平均ひびわれ幅の比の平均値は1.53となっている。

いずれにしても、本実験によりひびわれ間隔およびひびわれ幅に及ぼす2段目以上鉄筋の影響は認められ、特にひびわれ間隔に及ぼす影響は大きいことが確認された。

#### 4. ひびわれ間隔およびひびわれ幅の分布特性

尾坂らの研究<sup>8)</sup>によれば、長さ180 cm、断面6×6 cm、使用鉄筋D16、ノッチを設けない10体の長い両引供試体を湿潤状態のまま載荷を行い、発生したひびわれによって形成された182個のひびわれ間隔の分布は、対数正規分布によく適合し、正規分布で近似できるようである。また鈴木らの研究<sup>9)</sup>では、幅12 cm、高さ20~24 cmの28体のRC・PRCはりの実験から得られたひびわれ幅のばらつきは正規分布をなすと指摘された。本研究では、上記の6体供試体を用いてひびわれ間隔およびひびわれ幅の分布特性を調べた。

図-16 に各供試体における各々のひびわれ間隔のその平均値に対する度数分布を示す。ひびわれ間隔の標本数は96であり、ばらつきの標準偏差  $\sigma$  は0.288であっ

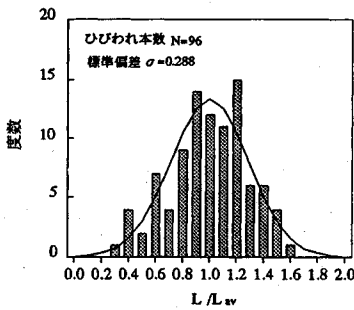


図-16 ひびわれ間隔の度数分布

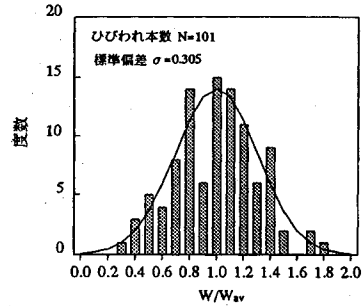


図-17 ひびわれ幅の度数分布

表-4 ひびわれ間隔が正規分布に従うとした時の適合度検定

クラス標識 x <sub>i</sub>	実現度数 f <sub>i</sub>	理論度数 F <sub>i</sub>	(f <sub>i</sub> -F <sub>i</sub> ) <sup>2</sup> F <sub>i</sub>
0.2	1	0.7	0.122
0.4	5	3.2	1.012
0.6	11	10.3	0.047
0.8	19	20.7	0.142
1.0	23	26.2	0.380
1.2	22	20.7	0.079
1.4	10	10.3	0.009
1.6	5	3.2	1.012
合計	96	95.3	χ <sub>0</sub> <sup>2</sup> =2.803

表-5 ひびわれ幅が正規分布に従うとした時の適合度検定

クラス標識 x <sub>i</sub>	実現度数 f <sub>i</sub>	理論度数 F <sub>i</sub>	(f <sub>i</sub> -F <sub>i</sub> ) <sup>2</sup> F <sub>i</sub>
0.4	6	4.1	0.868
0.6	10	10.8	0.065
0.8	22	21.8	0.002
1.0	26	27.5	0.083
1.2	19	21.8	0.359
1.4	14	10.8	0.923
1.6	3	3.4	0.040
1.8	1	0.7	0.181
合計	101	100.9	χ <sub>0</sub> <sup>2</sup> =2.521

た、図-16から、ひびわれ間隔は正規分布によく適合しているようで、それを確かめるために、ひびわれ間隔が正規分布に従うと仮定した時の適合度検定を行った。計算は表-4に示すとおりである。χ<sub>0</sub><sup>2</sup>=2.803となり、自由度ν=8-3=5、したがって、χ<sub>0</sub><sup>2</sup>分布表より仮説事象が起こる確率P>0.70となる。よって、ひびわれ間隔が正規分布に従うという仮説は、有意水準30%を持って捨て去ることができない。すなわち、ひびわれ間隔分布は正規分布をなすと判断してよい。通常、統計的仮説検定を行う場合、有意水準として10%、5%、または1%以下という数値がよく用いられ、30%の値は決してよい結果とは言えないが、コンクリートのひびわれ問題に対してはほぼ満足のできる結果であろう。

ひびわれ幅について、同様な作業を行った。図-17にひびわれ幅の度数分布を示し、適合度検定の計算を表-5に示す。ひびわれ幅標本数は101、標準偏差は0.305であった。ただし、本実験のコンタクトチップの間隔は10cmであるため、ある区間にひびわれが2本以上入った場合がある。その区間に入った複数本のひびわれの各々の幅について、個々のひびわれ進展高さに比例して振り分けることにした。図-17より、ひびわれ幅も従来言われているように正規分布によく適合しており、また、適合度検定の結果、χ<sub>0</sub><sup>2</sup>=2.521、P>0.75、有意水準は25%であった。なお、ひびわれ間隔の結果と比べ、両者のばらつき(標準偏差)はほぼ同程度のものであることが分かった。したがって、ひびわれ幅のば

らつきは基本的にひびわれ間隔のばらつきに起因すると考えられる。

### 5. 最大ひびわれ間隔の形状効果

上述のように、実験から得られたひびわれ間隔のデータは非常にばらついている。それは、ひびわれ間隔の定まる現象が非常に複雑であり、ひびわれ間隔に影響を及ぼす要因が多く、なおかつ相互に影響し合うとともに、ひびわれ現象は本来ランダム的な特徴を持つことに原因がある。いま、最も単純に1本の鉄筋を持つRC引張部材モデルを考えると、力の釣合条件から次式に示す定常状態の最大ひびわれ間隔に関する古典的な理論式が得られる。

$$L_{max} = 2\zeta A_c \sigma_t / u \tau_{max} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、A<sub>c</sub>はコンクリート断面積、σ<sub>t</sub>はコンクリートの引張強度、uは鉄筋の周長、τ<sub>max</sub>はひびわれ間の平均付着応力の最大値、ζは断面内のコンクリート引張応力分布に関する係数である。

この理論式によれば、最大ひびわれ間隔と最小ひびわれ間隔の比L<sub>max</sub>/L<sub>min</sub>=2となり、個々のひびわれ間隔がL<sub>min</sub>~L<sub>max</sub>の間にランダム的に発生する。また、個々の供試体にとって長さ2ζA<sub>c</sub>σ<sub>t</sub>/uτ<sub>max</sub>のひびわれ間隔が生じるのは極端のケースであり、多くの場合はむしろそれよりやや小さくなる。したがって、理論上、最大ひびわれ間隔の推定に式(2)を用いれば、100%の保証率が得られ、すなわち最大ひびわれ間隔の超過確率が0と

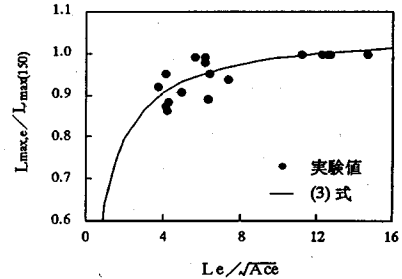
なる。しかし、残念ながら、実際に  $L_{max}/L_{min}$  の値が2よりはるかに大きいことはいままでもに行われた数多くの実験結果によって明らかである。その原因は上述のランダム性と概念的に多少違って、著者はそれを部材長さ方向に沿ったコンクリート引張強度の不均一性（周期不等の波動）に起因すると考えている。式（2）の中で  $\tau_{max}$  は付着応力のある長さ区間における平均値であるのに対し、 $\sigma_t$  は各々の断面の引張強度を表しているの、両者は比例関係であろうがなかろうが、コンクリート引張強度自体が持つ大きなばらつきはそのままひびわれ間隔のところに見れる。そこで、コンクリート引張強度や圧縮強度など材料特性の寸法依存性と同じように、供試体単体の最大（最小）ひびわれ間隔もその供試体の長手方向の長さによって値が異なり、すなわち、断面寸法に対する供試体長さの比率による形状効果（寸法効果には体積効果と形状効果の2種類があるとすれば、寸法効果の一種である）が存在すると考えられる。

そこで、上記の6体供試体の実験結果を用い、等曲げモーメント区間の長さを数種類の長さに仮想的に分割する方法で、この種の形状効果を調べた。供試体の数が少なく、また配筋状態がそれぞれ違うため、ここで各種のひびわれ間隔の特性値（最小、平均、最大）について、全部供試体の平均値を用いることとした。まず、実際にひびわれが発生した断面を境界に等曲げモーメント区間の長さをおおよそ150 cm（6体相当）、75 cm（12体相当）および50 cm（18体相当）の3種類に分割し、それから長さ別に各仮想供試体の最小、最大ひびわれ間隔を抽出し、その平均値を求めた。全体の平均ひびわれ間隔は分割長さと同値の9.7となる。その結果は表一6に示す。分割長さ150 cm、75 cm および50 cmの仮想供試体それぞれの最小ひびわれ間隔平均値  $\bar{L}_{min}$  は4.1 cm、5.6 cm および6.0 cm、最大ひびわれ間隔平均値  $\bar{L}_{max}$  は14.3 cm、13.6 cm および12.8 cm、最大ひびわれ間隔平均値と平均ひびわれ間隔の比  $\bar{L}_{max}/\bar{L}_{av}$  は1.47、1.40 および1.32、最大ひびわれ間隔平均値と最小ひびわれ間隔平均値との比  $\bar{L}_{max}/\bar{L}_{min}$  は3.49、2.43、および2.13となった。また、分割長さ150 cmの最大ひびわれ間隔平均値を1とすると、75 cmと50 cmの場合はそれぞれ0.95と0.90であった。すなわち、供試体の相対的長さが短いほど、得られた最大ひびわれ間隔の値が小さくなる。これが尾坂らの研究<sup>6)</sup>ではノッチ法で求めた最大または最小ひびわれ間隔はノッチを設けない長い両引供試体の実験結果と一致しない原因と思われる、本来ひびわれが生じないかもしれないコンクリート引張強度の大きい断面に、ノッチを入れることによって人為的にひびわれを発生させてしまったからであると考えている。

以上の結果をもとに、本研究では、供試体長さによる最大ひびわれ間隔の形状効果を統計処理の手法で定量的

表一6 分割長さが異なった時のひびわれ間隔特性値

分割長さ (cm)	$\bar{L}_{min}$ (cm)	$\bar{L}_{av}$ (cm)	$\bar{L}_{max}$ (cm)	$\frac{\bar{L}_{max}}{\bar{L}_{av}}$	$\frac{\bar{L}_{max}}{\bar{L}_{min}}$	$\frac{\bar{L}_{max}}{\bar{L}_{max}(150)}$
150 (6体)	4.1	9.7	14.3	1.47	3.49	1.00
75 (12体)	5.6	9.7	13.6	1.40	2.43	0.95
50 (18体)	6.0	9.7	12.8	1.32	2.13	0.90



図一18 最大ひびわれ間隔の形状効果

に表すことを試みた。具体的に、仮想供試体の長さ（検長） $L_e$ と引張鉄筋の付着重心と同一図心をなすコンクリート有効断面積の平方根  $\sqrt{A_{cc}}$  との比を横軸に取り、各分割長さの最大ひびわれ間隔平均値  $L_{max,e}$ と150 cm長さの最大ひびわれ間隔  $L_{max(150)}$ との比を縦軸に取り、上記の実験結果をプロットすると、図一18のようになる。そして、次の回帰式が得られた。

$$L_{max,e}/L_{max(150)} = 1 / (0.95 + 0.62\sqrt{A_{cc}}/L_e) \dots\dots\dots (3)$$

ただし、この式は、供試体長さが150 cmの最大ひびわれ間隔  $L_{max(150)}$ を基準として得られたものであり、検長150 cmの場合の  $L_e/\sqrt{A_{cc}}$ が6体平均して約12.5である。 $L_e/\sqrt{A_{cc}}$ が無限大に近づく場合、式（3）の予測では  $L_{max,e}/L_{max(150)}$ は1.05に収束するが、実構造物を考えると、 $L_e/\sqrt{A_{cc}}$ がそれほど大きくならないので、実用上、 $L_e/\sqrt{A_{cc}} > 12$ の場合、形状効果の影響を無視してもよい。したがって、 $L_e/\sqrt{A_{cc}} < 12$ の場合の換算関係は式（3）を変形して次のようになる。

$$L_{max} = \alpha_1 \cdot L_{max,e} \dots\dots\dots (4)$$

$$\alpha_1 = 0.95 + 0.62\sqrt{A_{cc}}/L_e \geq 1.0 \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $L_{max}$ は十分細長い ( $L_e/\sqrt{A_{cc}} \geq 12$ ) 部材の最大ひびわれ間隔推定値、 $L_{max,e}$ はモデル供試体の最大ひびわれ間隔観測値、 $\alpha_1$ は細長比による形状効果を表す換算係数である。 $\alpha_1$ の評価について、今後より多くの実験データの蓄積が望まれる。

最大ひびわれ間隔の形状効果のことから次のことが考えられる。すなわち、断面寸法に対して比較的長さの短い供試体の実験で、直接に最大ひびわれ間隔を対象として得られた算定式は、必ずしもそれより細長い供試体、あるいは実際の構造物の最大ひびわれ間隔および最大ひびわれ幅を安全側に算出しているとは言えず、むしろ過小評価するおそれがある。



## 6. 結 論

軸方向に多段配筋となる鉄筋コンクリートはりの基礎的実験を行い、ひびわれ性状に及ぼす2段目以上の鉄筋の影響、ひびわれ間隔とひびわれ幅の分布特性、および最大ひびわれ間隔の形状効果について検討した結果、本実験の範囲内では、以下のような結論を得た。

(1) 軸方向鉄筋を多段配置する場合の曲げひびわれ性状は2段目以上の鉄筋の影響を受け、特にひびわれ間隔に及ぼす影響は大きいことが確認された。2段目以上の鉄筋径が大きいほど、その位置がコンクリート引張縁端に近くなるほど、ひびわれ間隔およびひびわれ幅は小さくなる。ただし、付着重心が同じ場合、束ね配置はマイナス効果になる。また、共通の影響メカニズムは、2段目以上の鉄筋の付着伝達による縁端コンクリート引張応力の増加であると考えられる。また、1段配筋と多段配筋のひびわれ幅は約1~2割の差があることが認められた。なお、実測のひびわれ間隔およびひびわれ幅の最大値と平均値の比の平均値は約1.5となっている。

(2) 各供試体の実測平均値で無次元化してひびわれ間隔およびひびわれ幅の度数分布を調べた結果、ひびわれ間隔の標準偏差は0.288、ひびわれ幅の標準偏差は0.305、両者のばらつきはほぼ同程度のものであることが分かった。また、ひびわれ間隔およびひびわれ幅が正規分布に従うと仮定して適合度検定を行った結果、有意水準は30%以下で、ほぼ満足できる結果が得られた。よって、ひびわれ間隔およびひびわれ幅は正規分布に適合していると言える。

(3) 供試体の相対長さが短いほど、最大ひびわれ間隔の実測値は小さくなるという形状効果が存在する。この形状効果は部材長さ方向に沿ったコンクリート引張強度の不均一性に起因するもの、また既往の研究ではノッチ法で求めた最大または最小ひびわれ間隔はノッチを設

けない長い両引供試体の実験結果と一致しない原因であると考えられる。これは、比較的長さの短い供試体の実験で直接に最大ひびわれ間隔を対象として得られた算定式の保証率は予想より低い可能性があることを示唆している。本文では、この種の形状効果の評価式を提案したが、今後これに関する実験データの蓄積が望まれる。

## 参 考 文 献

- 1) 角田与史雄：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, Sept, pp. 1~10, 1970. 9.
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書，1991.
- 3) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書（昭和61年制定）改訂資料，コンクリートライブラリー，第61号，pp. 200~206, 1986. 10.
- 4) 趙 唯堅・丸山久一・清水敬二・大高昌彦：多段配筋を有するRCはりの曲げひびわれ性状，コンクリート工学年次論文報告集15-2, pp. 365~370, 1993.
- 5) 後藤幸正・大塚浩司：引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひびわれに関する実験的研究，土木学会論文集，第294号，pp. 85~100, 1980. 2.
- 6) 尾坂芳夫・大塚浩司・満木泰郎・小林茂敏：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の定着破壊性状と群効果に関する研究，土木学会論文集，第402号，pp. 153~161, 1990. 8.
- 7) 池田尚治・辻 幸和・小山清一・鈴木昭信・山田 紘：太径ねじふし鉄筋D64とひびわれ制御鉄筋を用いたRC部材の曲げひびわれ性状，コンクリートライブラリー，第71号，pp. 37~43, 1991. 10.
- 8) 尾坂芳夫・大塚浩司・松本英信：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, pp. 109~119, 1985.
- 9) 鈴木計夫・大野義照：プレストレスト鉄筋コンクリート梁の曲げひびわれ幅に関する研究—その1. 初期ひびわれ幅について—，日本建築学会論文報告集，第303号，pp. 9~19, 1981.

(1993. 9. 22 受付)

## EXPERIMENTAL STUDY ON FLEXURAL CRACKING OF RC BEAMS WITH MULTI-LAYERS OF LONGITUDINAL BARS

Weijian ZHAO and Kyuichi MARUYAMA

With request for larger RC structures and structural members in these days, longitudinal reinforcing bars are required to be large in size and to be placed in multi-layers in the cross section of members. This trend makes it necessary to examine the applicability of present code equations for flexural crack widths of RC beams. Based on the experimental test results, it is discussed in this paper how the multi layers of longitudinal bars influence the flexural cracking of RC beams. Special attention is paid to how the location and the size of bars as well as the bounded bars influence the cracking behaviors. The test results show that the crack spacings and the crack widths of beams depend upon how the longitudinal bars are placed although the bars nearest to the concrete surface have dominant effects on cracking.