

論文

[2061] 多段配筋を有する RC はりの曲げひびわれ性状

趙 唯堅*1・丸山久一*2・清水敬二*3・大高昌彦*4

1. はじめに

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って、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、既に数多くの研究が行われ、種々の算定式が提案されている。それらの成果は土木学会コンクリート標準示方書の曲げひびわれ幅の算定式（以下、学会式と略す）[1] にまとめられ、一般的によく使われている。ところで、鉄筋コンクリート構造物のひびわれ幅算定において、現行の手法を適用する際、2つの問題点がある。1つは、著者らの研究[2][3]でも示されているが、多段配筋を有するコンクリートはりの曲げひびわれ性状は2段目以上の鉄筋の配筋状態の影響を受け、1段配筋の実験結果[4]をもとに作られた学会式は、多段配筋に適用する場合、算定精度が落ちること[5]、他の1つは、スケール効果の問題で、普通寸法のはりおよびモデル供試体による実験式は、大型構造物への適用の可否についてはまだ明らかにされていないことである。

本研究では、第1の問題点に対し、軸方向に多段配筋となる鉄筋コンクリートはりの基礎実験を行い、ひびわれ性状に対する多段配筋の影響のメカニズムを実験的に検討し、曲げひびわれ幅の算定方法を考案することとした。

2. 実験方法

2.1 供試体の種類

供試体の断面寸法および配筋状態を図-1に、供試体諸元を表-1に示す。多段配筋の影響を調べるために、各供試体の1段目（最下段）鉄筋のかぶり厚さ、径、本数をすべて同一にし、2段目以上（上段）の鉄筋の縦間隔、径、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は縦間隔（ひずみ勾配）の影響、S-4は鉄筋径（付着面積）の

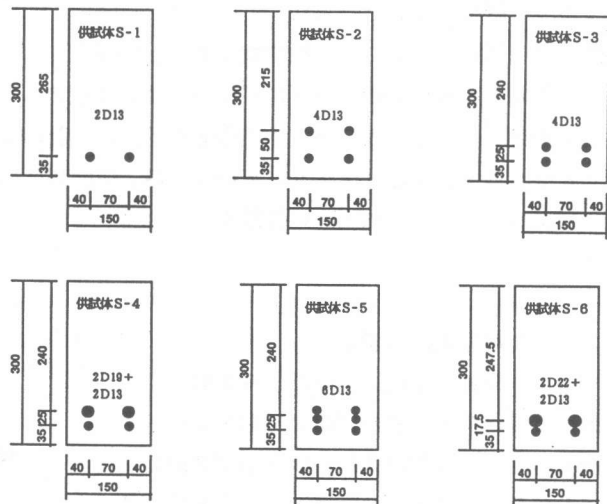


図-1 供試体の断面寸法と配筋状態

- *1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科材料工学専攻 工修（正会員）
- *2 長岡技術科学大学助教授 工学部建設系 Ph.D.（正会員）
- *3 長岡技術科学大学教授 工学部建設系 農博
- *4 東北電力株式会社 工修

影響、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、通常の鉄筋量をカバーしている。周知のように、ひびわれに関する実験データは非常にばらつくので、十分な

表-1 供試体諸元

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 (%)	コンクリート強度 (kg/cm ²)
		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

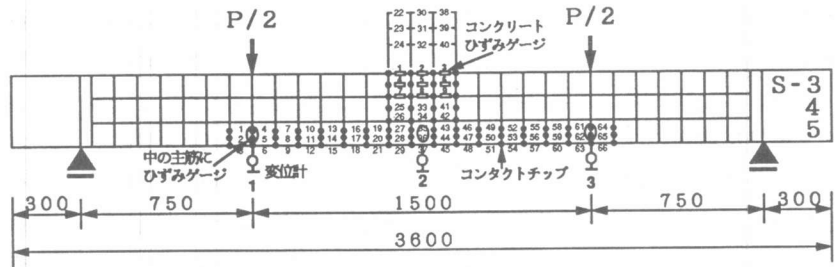


図-2 荷重方法及び測定位置

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）とした。また、せん断破壊を起こさないように、せん断スパン内に D10の鉄筋スターラップを10cm間隔で配置した。なお、使用材料においては、コンクリートの圧縮強度は約300kgf/cm²、粗骨材の最大寸法は25mm、鉄筋は SD345の横ふし異形鉄筋を使用した。

2. 2 荷重および計測方法

試験は単純ばりの対称2点集中荷重とし、30tfのアクチュエーターを用いた。荷重を左右均等にかけるために、荷重分配桁の下に相互をパイプで連結した油圧ジャッキを用いた。荷重方法は短期単調荷重とし、S-6だけ途中1回繰り返した。計測は荷重ステップ毎に行った。測定項目は主筋のひずみ、圧縮域コンクリートのひずみ、等曲げ区間内のひびわれ間隔、ひびわれ幅およびはりのたわみとした。測定点の位置を図-2に示す。

3. 実験結果及び考察

3. 1 荷重-変位-主筋ひずみ挙動

各供試体の荷重-変位（中央）曲線を図-3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。各供試体の曲げひびわれは2.5tf前後で発生しており、その後、曲げ剛性は主筋比に応じて変化している。

図-4に各供試体の荷重と1段目主筋ひずみの関係を示す。ひずみゲージの位置とひびわれ

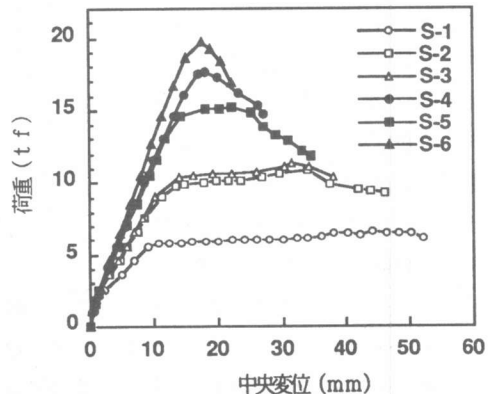


図-3 荷重-変位関係

位置は必ずしも合致していないが、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することが分かる。また、主筋比が最も小さいS-1はテンションスティフニングの影響が比較的顕著であったが、他の供試体では、荷重と主筋ひずみの関係はほぼ直線関係にある。

3.2 曲げひびわれ間隔

図-5に曲げひびわれ間隔が定常状態になった後の各供試体のひびわれパターンを示し、表-2にひびわれ間隔の実測値を示す。これらより、1段配筋のS-1に比べ、多段配筋の供試体は曲げひびわれの本数が多く、ひびわれ間隔が小さい。また、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)、鉄筋径が大きいほど(S-3とS-4の比較により)、平均ひびわれ間隔が小さく、縦間隔および鉄筋径の影響が認められる。また、S-4に比べS-5の上段鉄筋総周長が大きいにもかかわらず、平均ひびわれ間隔の実測値はS-4と変わらない。これは鉄筋を束ねて配置した場合、接触面近傍において鉄筋とコンクリートの付着が弱め、つまり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約1.5となっており、既往の研究結果と一致している[6]。

図-6にひびわれ間隔の実測値と学会式による算定値の比較を示す。実測値が配筋状態に応じて変化するのに対し、学会式は1段目鉄筋(最下段)のみを対象としているため、一定の値を示している。

3.3 曲げひびわれ幅

図-7に各供試体の荷重-平均ひびわれ幅の関係を示し、図-8に荷重-最大ひびわれ幅の関係および学会式による算定値との比較を示す。実験では、はり側面の縁端位置、1段目主筋および2段目主筋位置のひ

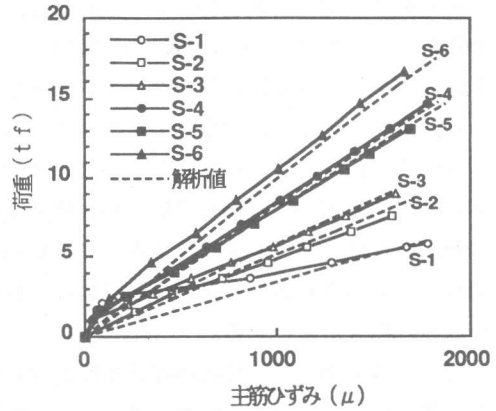


図-4 荷重-主筋ひずみ関係

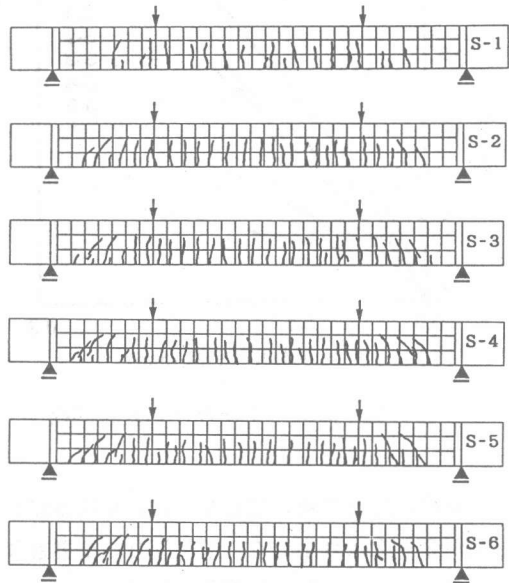


図-5 ひびわれパターン

表-2 曲げひびわれ間隔の実測値

供試体名	ひびわれ本数 (本)	平均ひびわれ間隔 (cm)	最大ひびわれ間隔 (cm)	最大/平均
S-1	13	11.5	16.7	1.45
S-2	15	10.0	14.0	1.40
S-3	16	9.4	14.8	1.57
S-4	17	8.8	14.3	1.63
S-5	17	8.8	12.7	1.44
S-6	18	8.3	13.0	1.57
平均値	16	9.5	14.3	1.51

びわれ幅を測定したが、図-7、8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段目主筋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[7]では、最も大きいひびわれ幅3本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、最大ひびわれ幅を対象とする。

図-7の平均ひびわれ幅曲線は配筋状態の差を安定的に示しているのに対して、図-8の最大ひびわれ幅曲線は必ずしもそうではない。図

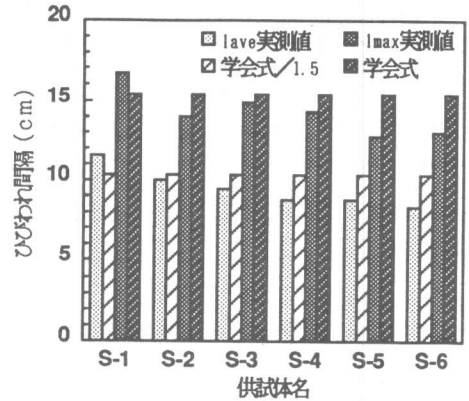


図-6 ひびわれ間隔の比較

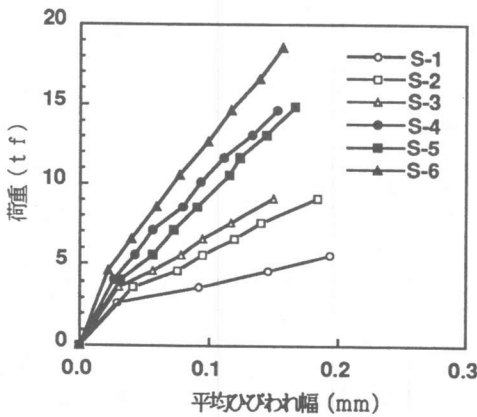


図-7 荷重-平均ひびわれ幅関係

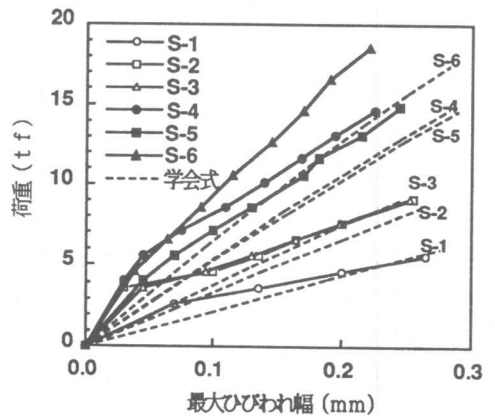


図-8 荷重-最大ひびわれ幅関係

-7では、同じ荷重に対しS-3の平均ひびわれ幅がS-2より小さく、予想通りの結果となったが、図-8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、図-9では、同じ主筋ひずみに対しS-3の最大ひびわれ幅は逆にS-2より大きめにしている。その原因はもともと2本のひびわれがたまたま1段目主筋の位置で1本に合流したためである。すなわち、平均ひびわれ間隔より最大ひびわれ間隔のバラツキが大きい。また、学会式による算定曲線は、持続荷重および繰り返し荷重の影響を考慮すると、1段配筋のS-1を過小評価する恐れがあるにもかかわらず、それ以外は供試体名の番号が大きいほど、過大評価となり、ひびわれ間隔の算定とほぼ同じ傾向を示している。

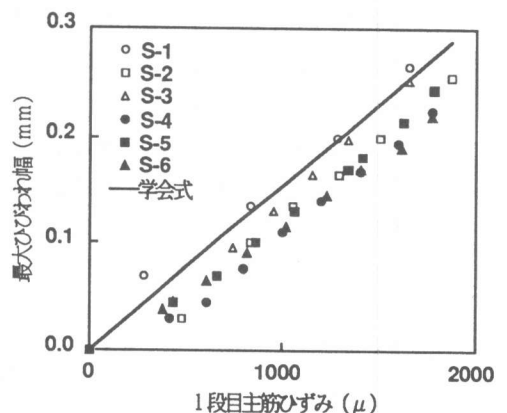


図-9 ひびわれ幅-主筋ひずみ関係

また、図-9の同一主筋ひずみにおいては、1段配筋と多段配筋のひびわれ幅はおよそ2割近くの差が認められる。

4. 曲げひびわれ幅の算定

4.1 算定方法

学会式は角田の提案式[4]をもとに作られたもので、基本的に最下段鉄筋の状態とのかぶりをパラメータとしている。しかし、実際の構造物では、むしろ多段配筋のほうが多く、多段配筋の影響を考慮する必要がある。学会式を基準として、多段配筋の影響のメカニズムを考えると、次の3要因が挙げられる。

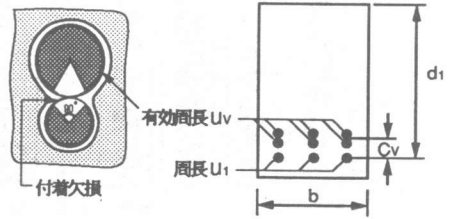


図-10 断面パラメータ概念図

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

そこで、学会式を基本モデルとし、さらに以上のことを考えて、多段配筋の影響を取り入れた曲げひびわれ幅算定式を提案する。

$$W_{max} = k_1 k_2 \{4c + 0.7(c_s - \phi)\} [\sigma_{s,s} / E_s + \epsilon_{s,s}] \quad (1)$$

ここに、 k_2 以外の符号はすべて学会式と同じ意味を持つ[1]。そして k_2 を多段配筋係数と定義し、次の式で求める（図-10を参照）。

$$k_2 = 1 / [0.01(u_v / u_1) \cdot (d_1 / c_v) + 1] \quad (2)$$

ここに、 u_1 ：1段目鉄筋の周長の和（cm）。 u_v ：2段目以上の鉄筋の有効周長の和（cm）。鉄筋を束ねて配置した場合、上段鉄筋総周長から束ね筋中の細径鉄筋周長の1/4の2倍をカットする。 d_1 ：1段目鉄筋の有効高さ（cm）。 c_v ：2段目以上の鉄筋の付着中心から1段目鉄筋の中心までの距離（縦中心間隔）（cm）。

式(2)の中で、 (d_1 / c_v) は要因(1)の影響を、 (u_v / u_1) は要因(2)と(3)の影響を表す。

4.2 実験値との比較

図-11にひびわれ間隔に関する実測値と提案式による算定値の比較を示し、図-12に1段目鉄筋のひずみが1200 μ 時のひびわれ幅の比較を示す。なお、本実験の供試体は室内自然養生とし、載荷試験開始時までの材令はおよそ1ヶ月であり、その間のコンクリートの乾燥収縮による影響は比較的小さく、また、載荷試験は短期間（2時間ほど）で終わったため、ここではひびわれ幅の算定において、コンクリートの乾燥収縮およびクリープの影響 $\epsilon_{s,s}$ を0とした。ひびわれ間隔について、本実験の範囲内では、提案式による算定値は実測値とよく一致していることが分かる。また、ひびわれ幅の場合、一見多少過大評価のようであるが、実測値が短期単調載荷におけるもので、さらに持続荷重および繰返し荷重の影響を考慮すると、算定式(1)が実測値にかなり近い値を与えていると言える。

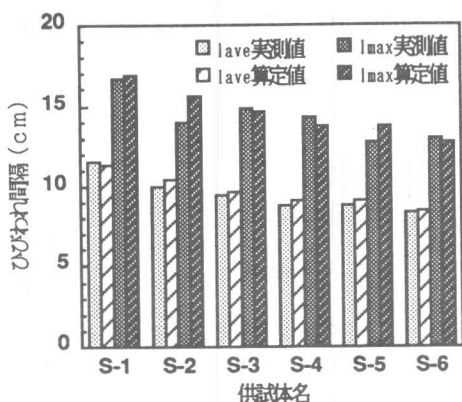


図-1 1 実測値と提案式の比較（間隔）

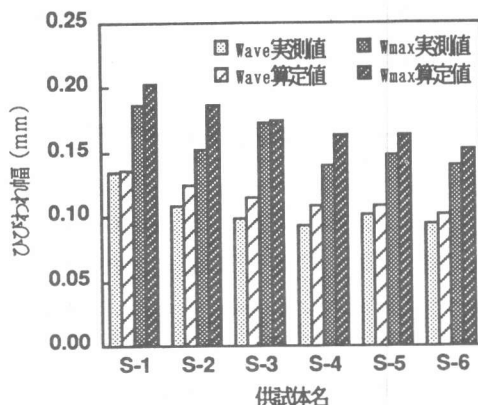


図-1 2 実測値と提案式の比較（幅）

5. 結論

多段配筋を有するコンクリートはりの曲げひびわれ性状に関する基礎実験を行い、実験結果の検討により、以下の結論を得た。

- (1) 多段配筋の曲げひびわれ性状は2段目以上の鉄筋の影響を受ける。
- (2) 多段配筋の影響を①縦間隔、②付着面積、および③束ね筋の群効果の3要因で考慮することができる。
- (3) 本実験の範囲内で、多段配筋の影響を考慮した提案式は実験値と良好な対応を示している。

謝辞：実験の遂行にあたって、長岡技術科学大学文部技官の中村裕剛氏と間組（株）の金倉正三氏に多大な協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書（設計篇）、1991
- 2) 酒井公生・丸山久一・清水敬二・中村裕剛：多段配筋を有するコンクリート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13-2、pp. 259-264、1991
- 3) 趙 唯堅・丸山久一・山本康之・清水敬二：FRPロッドを主筋に用いたコンクリートはりの曲げひびわれ性状、土木学会連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム論文集、pp. 123-128、1992. 4
- 4) 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、1970. 9
- 5) 趙 唯堅・丸山久一・山本康之・清水敬二：多段配筋を有するRCはりの曲げひびわれ間隔の算定、土木学会第47回年次学術講演会講演概要集V、pp. 750-751、1992. 9
- 6) 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
- 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、土木学会コンクリートライブラリー7 1、pp. 37-43、1991. 10