

鉄筋コンクリートはりの 曲げひび割れ幅の算定式に関する一考察

栖原健太郎¹・辻幸和²・橋本親典³・金井昌義⁴

¹正会員 電気化学工業(株)セメント・特混研究所 (〒949-0393 西頸城郡青海町大字青海 2209)

²正会員 工博 群馬大学教授 工学部建設工学科 (〒376-8515 桐生市天神町 1-5-1)

³正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

⁴正会員 ドービー建設工業(株) 東京支店 (〒377-0055 勢多郡北橋村大字上南室)

鉄筋コンクリート構造物の性能照査には、曲げひび割れに関する検討項目がある。形状寸法やコンクリートの配合等の条件を同一とした鉄筋コンクリートはり15体、さらに鉄筋比を変えずにはりの幅を大きくした12体の合計27体の試験体に対して曲げ載荷試験を行い、計測した曲げひび割れ幅と、土木学会コンクリート標準示方書に規定されている曲げひび割れ幅の算定式により求まる値との比較から、算定式に関する考察を行った。その結果、算定式により求まる値は、試験体の側面の引張鉄筋位置に生じた曲げひび割れ幅の最大値および平均値のいずれよりも大きな値を示した。これに対して、試験体の下面に生じた曲げひび割れ幅の平均値は、算定式により求まる値よりも平均で約20%、最大で約50%大きい値を示した。

Key Words : flexural crack, flexural crack width, equation for flexural crack width

1. まえがき

鉄筋コンクリート構造物の性能照査の一つとして、使用限界状態に対する曲げひび割れの検討が土木学会コンクリート標準示方書に規定されている¹⁾。筆者らが行った既往の試験結果²⁾では、コンクリート強度や鉄筋の力学的強度等の材料特性および断面形状をすべて等しくした鉄筋コンクリートはり試験体を15体作製し、同一の方法で曲げ載荷試験を行ったにも関わらず、いずれの試験体もはり側面の引張鉄筋位置における最大曲げひび割れ幅は、土木学会コンクリート標準示方書に規定されている曲げひび割れ幅の算定式の値を大きく上回った。

今回、既往の15体の試験体と同一の鉄筋比で試験体の幅のみを大きくした鉄筋コンクリートはりを新たに12体作製し、曲げ載荷試験を行った。既往の15体と合わせた合計27体の試験結果より得られた曲げひび割れ幅と、土木学会の曲げひび割れ幅の算定式により求まる値との比較を行い、算定式の妥当性について考察した結果を報告する。

2. 曲げひび割れ幅の算定式

曲げひび割れ幅の算定は、正方形のコンクリート断面の中心位置に埋め込まれた1本の鉄筋の両端を引っ張る両引き試験に基づき、その引張力と鉄筋の付着応力度の力の釣合いから導出するのが一般的である。すなわち、曲げひび割れ幅は、ひび割れ間隔に、ひび割れ間の鉄筋とコンクリートの伸びの差を乗じることで、次式で与えることができる。

$$\omega = \ell(\varepsilon_s - \varepsilon_c) \quad (1)$$

ここに、 ω : 曲げひび割れ幅 (mm)、 ℓ : 平均ひび割れ間隔 (mm)、 ε_s : 鉄筋の平均ひずみ、 ε_c : コンクリートの平均ひずみである。

土木学会コンクリート標準示方書「設計編」〔7章 使用限界状態に対する検討 7.3.4〕に規定されている曲げひび割れ幅の算定式は、既往の研究成果を基にひび割れ間隔 ℓ を含めて、式(2)のように定めている。

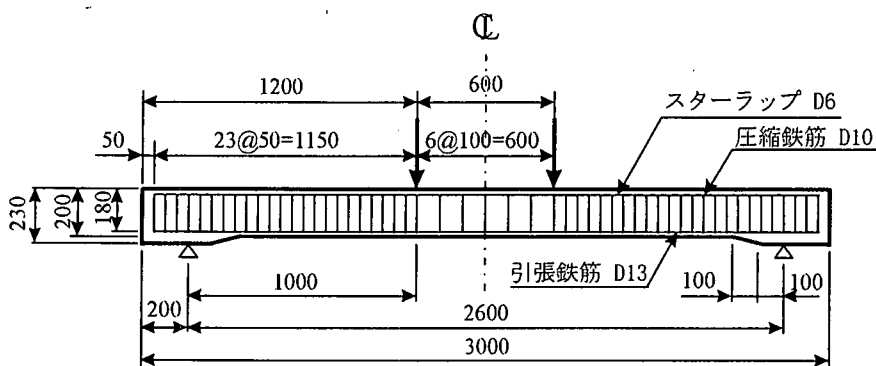


図-1 試験体の形状寸法および載荷方法

表-2 コンクリートの示方配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメン ト比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水	セメン ト	細骨材	粗骨材	AE 減水剤
25	12.0	4.5	59.0	45.5	162	275	838	1009	1.013

表-1 鉄筋の力学的性状

	呼び 名	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
引張鉄筋	D13	352	504	1.90×10 ⁵
圧縮鉄筋	D10	374	509	1.84×10 ⁵
スタールップ	D6	374	541	1.87×10 ⁵

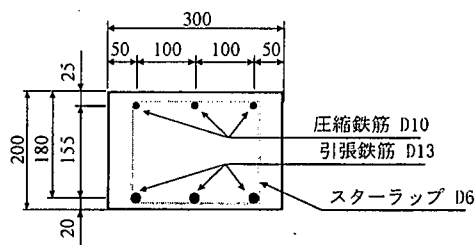
$$\omega = k \{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \left(\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{cs} \right) \quad (2)$$

ここに、 ω ：曲げひび割れ幅 (mm)， ε'_{cs} ：コンクリートの乾燥収縮およびクリープによるひび割れ幅の増加を考慮するための数値， σ_{se} ：引張鉄筋の引張応力度の増加量 (N/mm²)， E_s ：引張鉄筋の弾性係数 (N/mm²)， k ：引張鋼材の付着性状の影響を表す定数で、一般に、異形鉄筋の場合は 1.0、普通丸鋼および PC 鋼材の場合は 1.3， c ：引張鉄筋のかぶり (mm)， c_s ：引張鉄筋の中心間隔 (mm)， ϕ ：引張鉄筋径 (mm) である。

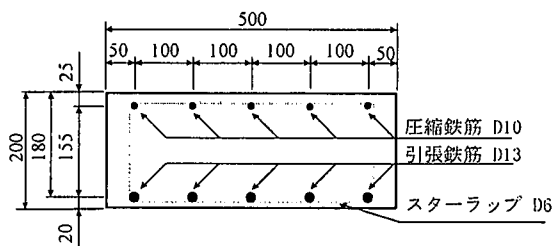
式 (2) によれば、曲げひび割れ幅は、鉄筋コンクリートはりの断面の形状寸法および配筋方法を同一にした場合、引張鉄筋に作用する引張応力度に依存する。

3. 実験の概要

曲げモーメントを受ける鉄筋コンクリートはりの曲げひび割れ幅の測定を目的として、図-1 に示すような等曲げモーメント区間を持つ 2 点載荷を行った。試験体は、鉄筋比等の条件を同一とした鉄筋コンクリートはりを 15 体、さらに幅を大きくした 12 体の合計 27 体を対象とした。試験体に曲げひび割れが発生した後、引張鉄筋に作用する引張応力度が 300N/mm² に至るまで静的載荷



(a) A 断面



(b) B 断面

図-2 試験体の断面の形状寸法

を行い、等曲げモーメント区間に生じた曲げひび割れ幅の計測を行った。

(1) 試験体

载荷に使用した試験体は、はり長が3000mmで、A断面とB断面の2種類とした。それぞれの断面の形状寸法を図-2に示す。両断面とも高さが200mmの矩形断面であるが、A断面では幅を300mm、B断面では幅を500mmとした。使用した鉄筋は、引張側にはSD295-D13を、圧縮側にはSD295-D10を用いた。また、スターラップにはSD295-D6を100mmあるいは50mm間隔で配置した。鉄筋の力学的性状を表-1に示す。

コンクリートを型枠内に打ち込み、脱型後、A断面では屋内において14日間の気中養生を、B断面では1日間の蒸気養生とその後20日間の気中養生をそれぞれ行った。試験体に用いたコンクリートの示方配合を表-2に示す。なお、曲げ载荷試験時における試験体コンクリートの圧縮強度は、A断面で22.1~34.5N/mm²、B断面で22.8~27.4N/mm²であった。

(2) 载荷方法および測定項目

载荷は、スパンが2600mm、等曲げモーメント区間が600mm、せん断スパンが1000mmの2点载荷とした。試験体の引張縁コンクリートに曲げひび割れの発生を確認した後、引張鉄筋に作用する引張応力度が300N/mm²に至るまで静的に漸増载荷を行った。

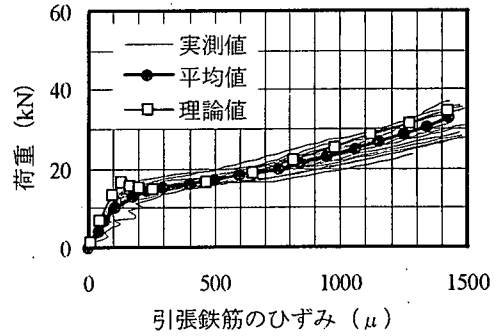
測定項目は、試験体側面の引張鉄筋位置および試験体下面に生じる曲げひび割れ幅および主鉄筋のひずみとした。また、曲げひび割れの発生荷重および曲げひび割れの分布状況等の記録も併せて行った。

曲げひび割れ幅の測定には、等曲げモーメント区間に連続して設置した測定長100mmのバイ型変位計を使用した。主鉄筋のひずみは、等曲げモーメント区間内の主鉄筋に貼付したワイヤストレインゲージにより計測した。

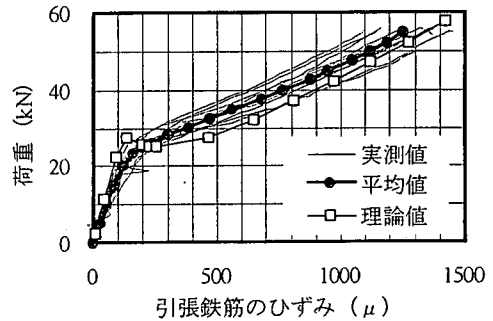
4. 曲げひび割れ幅の算定式の適用

(1) 曲げひび割れ幅

2章に記した式(2)の曲げひび割れ幅の算定式の適用に際して、引張鉄筋の引張応力度等の入力条件を与える必要がある。鉄筋コンクリートはりの鉄筋やその配筋間隔等を同一にした場合、曲げひび割れ幅は、引張鉄筋に作用する引張応力度



(a) A断面



(b) B断面

図-3 引張鉄筋のひずみと荷重

にのみ依存する。引張応力度の与え方として、実験により得られた測定値を使用する方法と、曲げ応力度の算定に基づいた理論値を使用する方法とがある。

前者は、実験により計測した引張鉄筋のひずみを直接式(2)の σ_s/E_s として代入し、曲げひび割れ幅を計算する。以後、この方法で得られた曲げひび割れ幅を、計算値と称する。

後者は、鉄筋コンクリートはりの部材断面に生じる曲げ応力度を算定し、引張鉄筋に作用する引張応力度を理論的に求めるものである。その方法は、コンクリートの圧縮縁のひずみの各段階毎に、ひずみ分布の直線性を仮定し、そのひずみ分布から求まるコンクリートと鉄筋との力の釣合い条件から算出する。計算にあたり、コンクリートや鉄筋の応力・ひずみの関係は、土木学会コンクリート標準示方書「設計編」〔3章 材料の設計用値〕に示されているものを使用し、コンクリートに作用する引張応力度等の諸条件に関しても考慮に入れる。以後、この方法で得られた曲げひび割れ幅を、

理論値と称する。

また、これら2つの方法に対応して、測定長100mmのパイ型変位計により計測した曲げひび割れ幅を、実測値と称する。

なお、試験体はA断面およびB断面ともに屋内による気中養生を行ったため、クリープや乾燥収縮等の影響は殆どないものとして、理論値および計算値の算定には、式(2)の ϵ_s の値を零とした。

(2) 引張鉄筋のひずみ

曲げひび割れ幅の算定式を用いる場合、入力値である引張鉄筋の引張応力度を、曲げ応力度の算定に基づき計算する必要があり、計算された引張鉄筋の引張応力度が実測値と大きな差異があつては、曲げひび割れ幅の算定式の入力値として取り扱うことはできない。ここでは、曲げひび割れ幅の算定式の適用に際して、入力値となる引張鉄筋のひずみの理論値と実測値との比較を行い、入力値としての妥当性について検証する。

図-3にA断面およびB断面の引張鉄筋のひずみと荷重の関係を示す。引張鉄筋のひずみは、各試験体の実測値とその平均値で示している。また、理論値は、曲げ応力度の算定により得られた引張鉄筋のひずみを意味する。

A断面およびB断面ともに、引張鉄筋のひずみの理論値は、同一荷重時における実測の平均値に対して、A断面では若干小さな値を、B断面では若干大きな値を示しているが、概ね実測の平均値に一致している。このことから、曲げひび割れ幅の算定式の入力値として、引張鉄筋の引張応力度に曲げ応力度の算定から計算される理論値を用いても差し支えないと思われる。

5. ひび割れ性状

(1) ひび割れの発生状況

表-3に各試験体のひび割れの性状を示す。なお、曲げひび割れ発生荷重は、目視により試験体の下面に曲げひび割れを確認したときの荷重である。

曲げひび割れ発生荷重は、A断面およびB断面ともにその変動係数は13.1%であった。

等曲げモーメント区間内のひび割れ本数では、試験体の幅を大きくしたB断面の変動係数は25.1%と大きいのが、A断面では18.6%と小さい。また、試験体全体にわたって生じたひび割れ本数では、A断面およびB断面とも20%前後の変動係

表-3 ひび割れ性状

断面	試験体	曲げひび割れ発生荷重(kN)	ひび割れ本数(本)		ひび割れ間隔(mm)
			等曲げモーメント区間	全体	
A断面	A-1	13.0	5	9	109
	A-2	10.3	4	10	133
	A-3	9.7	4	8	120
	A-4	15.3	4	7	120
	A-5	16.2	4	9	133
	A-6	13.9	2	4	220
	A-7	15.5	3	7	171
	A-8	15.2	4	8	120
	A-9	13.3	4	12	133
	A-10	13.3	4	10	120
	A-11	13.3	4	11	133
	A-12	13.9	5	12	109
	A-13	11.9	3	10	171
	A-14	13.3	4	8	133
	A-15	12.6	4	11	120
平均値		13.38	3.87	9.07	136.5
標準偏差		1.75	0.72	2.08	28.67
変動係数(%)		13.1	18.6	22.9	21.0
B断面	B-1	22.0	4	12	133
	B-2	26.0	3	9	155
	B-3	23.0	5	9	109
	B-4	25.0	4	8	151
	B-5	23.0	6	12	92
	B-6	21.4	7	14	86
	B-7	16.0	5	15	115
	B-8	17.5	7	15	76
	B-9	25.0	4	9	125
	B-10	22.0	5	10	109
	B-11	25.1	4	10	133
	B-12	24.5	4	12	120
平均値		22.54	4.83	11.25	117.0
標準偏差		2.96	1.21	2.25	23.42
変動係数(%)		13.1	25.1	20.9	20.0

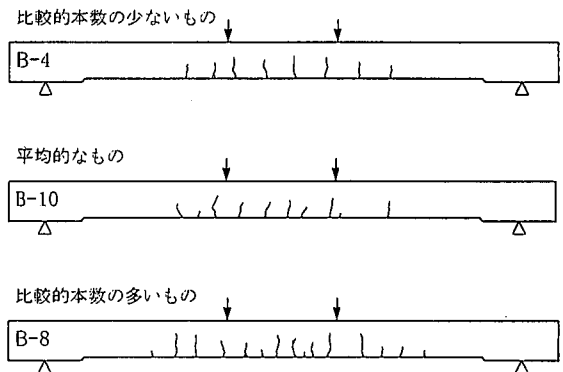
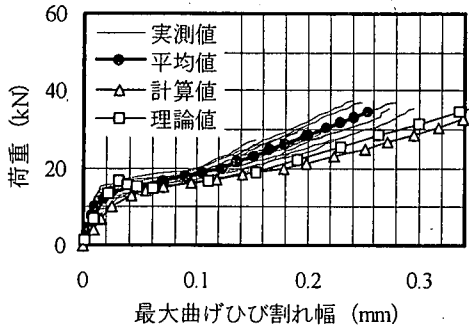
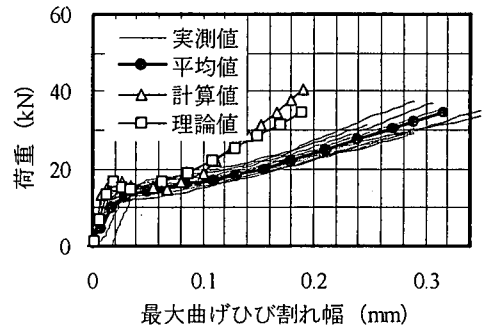


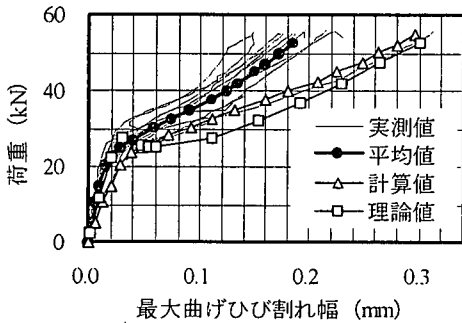
図-4 代表的なひび割れの分布状況



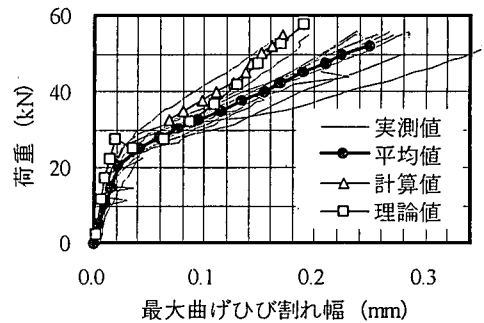
(a) A断面



(a) A断面



(b) B断面



(b) B断面

図-5 側面における最大曲げひび割れ幅

図-6 下面における最大曲げひび割れ幅

数であった。

試験体の幅を大きくしたB断面では、A断面に比べて等曲げモーメント区間に生じた曲げひび割れの本数にばらつきがある。

(2) ひび割れの分布

表-3に示したひび割れ間隔は、等曲げモーメント区間に生じた曲げひび割れの引張鉄筋位置におけるひび割れ間隔の平均値である。A断面およびB断面ともにひび割れ間隔の変動係数は約20%であり、大きなばらつきが認められる。

式(2)の曲げひび割れ幅の算定式によれば、ひび割れ間隔 l は、式(2)中のひび割れ間の鉄筋とコンクリートの伸びの差の項を取り除き、次式により与えられると考える。

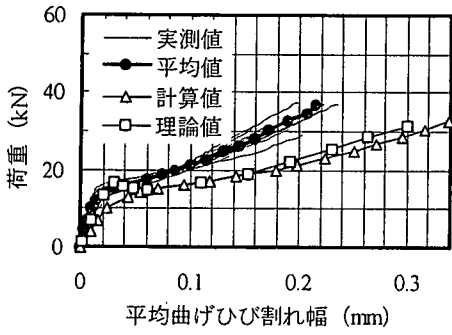
$$l = 4c + 0.7(c_s - \phi) \quad (3)$$

式(3)により、ひび割れ間隔は、引張鉄筋のかぶりや中心間隔により決定され、今回のように試

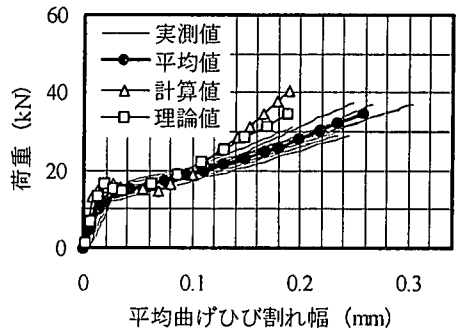
験体の形状寸法や配筋方法を同一にした場合では、A断面およびB断面ともに、ひび割れ間隔は側面のかぶり43.7mmを用いると235.7mmと、下面かぶり13.7mmを用いると115.7mmとそれぞれ計算される。側面のかぶりを用いたひび割れ間隔の計算値は、A断面およびB断面とも実測値に比べて著しく大きい。下面のかぶりを用いた計算値と比較した場合の実測値は、B断面ではほぼ同様なひび割れ間隔を示したが、A断面では2割程度広い間隔となった。

図-4にB断面のひび割れ分布状況の代表例を示す。比較的ひび割れ本数の少なかったB-4では、同程度の曲げひび割れがほぼ等間隔で生じているが、ひび割れ本数が多くなるに従い、細かな曲げひび割れが目立つ。特にひび割れ本数の多かったB-8では、細かい曲げひび割れが著しく生じており、その間隔も、比較的ひび割れ本数の少なかったB-4のもの1/2以下である。

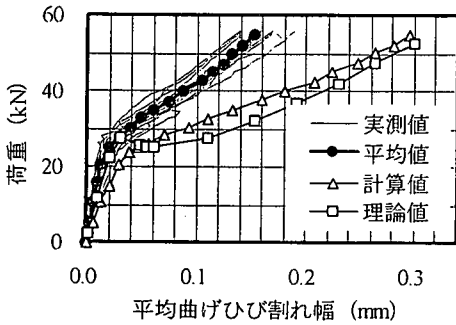
鉄筋コンクリートはり同一条件で作製したが、曲げひび割れ発生荷重は1割程度のばらつきの範



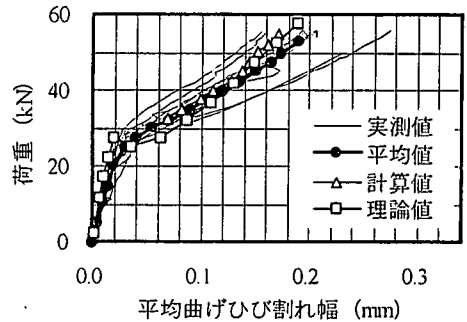
(a) A断面



(a) A断面



(b) B断面



(b) B断面

図-7 側面における平均曲げひび割れ幅

図-8 下面における平均曲げひび割れ幅

囲内であったのに対し、曲げひび割れの本数やひび割れ間隔では、2割程度と大きなばらつきが認められた。

6. 最大曲げひび割れ幅

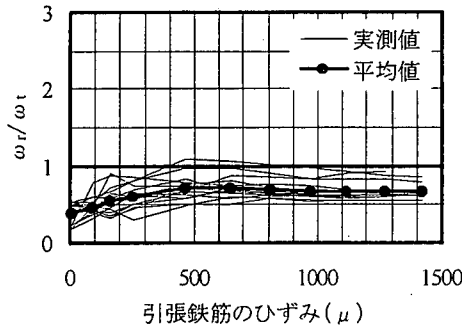
図-5に試験体側面の引張鉄筋位置における最大曲げひび割れ幅と荷重との関係を示す。なお、最大曲げひび割れ幅は、等曲げモーメント区間内の引張鉄筋位置に連続して設置したパイ型変位計の測定値の中から、最大の値を示したものである。図中の最大曲げひび割れ幅は、各試験体の実測値とこれらに対する平均値、そして、式(2)の土木学会の曲げひび割れ幅の算定式により求めた計算値および理論値で示している。

最大曲げひび割れ幅の実測値は、A断面では比較的一様な値を示しているのに対して、はりの幅を大きくしたB断面では最大曲げひび割れ幅に大きなばらつきが認められる。等曲げモーメント区間内のひび割れ本数のばらつきが大きかったこと

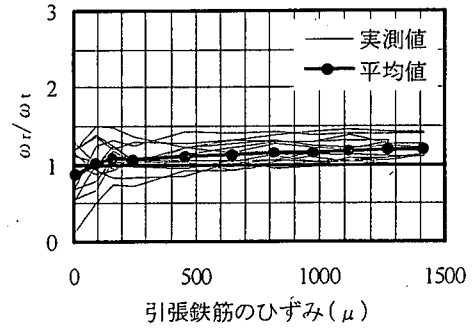
に起因するものである。

曲げひび割れ幅の計算値は、図-3に示した引張鉄筋のひずみにも依存し、A断面とB断面のいずれも理論値や計算値の方が実測値より大きくなっている。この現象は、荷重レベルが大きくなるに従い顕著になっている。

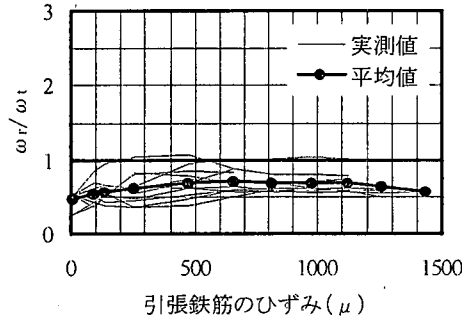
曲げひび割れ幅は、ひび割れ間隔にひび割れ間の鉄筋とコンクリートの伸びの差を乗じたものであり、この両者に大きく影響を受ける。引張鉄筋のひずみは、実測値と理論値とはほぼ一致している。また、ひび割れ間隔は、鉄筋のかぶりやその中心間隔等で与えられ、今回のようにこれらの条件を統一させた場合では5章に記したように式(3)から235.7mmと計算される。計算値あるいは理論値を実測値に近づける場合、このひび割れ間隔を小さな値にしなくてはならない。表-3のひび割れ間隔や図-4のひび割れの分布状況を見ても明らかとなり、ひび割れ間隔の実測値の平均値はA断面では136.5mm、B断面では117.0mm程度であり、式(3)のひび割れ間隔から計算し



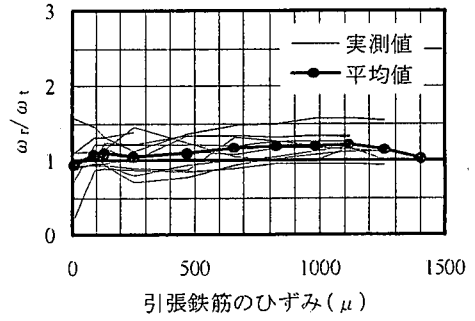
(a) A断面



(a) A断面



(b) B断面



(b) B断面

図-9 最大曲げひび割れ幅の理論値に対する実測値 (側面)

図-10 平均曲げひび割れ幅の理論値に対する実測値 (下面)

た値より小さい。しかしながら、試験体の中で最大の曲げひび割れ幅は、理論値あるいは計算値に近づいている。式(3)は安全側の曲げひび割れ幅を規定していることを示している。

図-6に試験体下面における最大曲げひび割れ幅と荷重との関係を示す。試験体下面の最大曲げひび割れ幅は、下面の幅の中心における実測値である。なお、土木学会の曲げひび割れ幅の算定式では下面の曲げひび割れ幅に対する引張鉄筋位置と下面位置のひずみの相違の影響を無視しているが、曲げひび割れ幅の算定式の適用性を検討するためにはその影響を考慮する必要があるので、曲げひび割れ幅ははり高さ方向に線形的に変化することを仮定して、次式に示す補正係数 R を式(2)の計算値あるいは理論値に乘じ、便宜的に試験体下面の曲げひび割れ幅とした。

$$R = \frac{h-x}{d-x} \quad (4)$$

ここに、 R : 補正係数、 d : 有効高さ (mm)、 x :

中立軸高さ (mm)、 h : 試験体の全高さ (mm) である。

実測値の平均は、計算値あるいは理論値より一般に大きくなっており、特に最大曲げひび割れ幅が0.1mmを超えると、実測値と計算値あるいは実測値との差が顕著になっている。

7. 平均曲げひび割れ幅

図-7に試験体側面の引張鉄筋位置における平均曲げひび割れ幅を、図-8に試験体下面における平均曲げひび割れ幅をそれぞれ示す。平均曲げひび割れ幅は、等曲げモーメント区間に生じた曲げひび割れの中より最大から3本の大きな測定値の平均で表したものである。

図-7および図-8より、平均曲げひび割れ幅は、最大曲げひび割れ幅と同様な傾向を示している。特に試験体側面における平均曲げひび割れ幅は、B断面において実測値が著しく小さくなっている。試験体下面においては、実測値が計算値あ

るいは理論値より一般に小さいものの、B断面では0.2mmの幅まで両者はほぼ一致している。

8. 理論値と実測値との定量的比較

式(2)の曲げひび割れ幅の算定式による理論値と実測値との差を定量的に比較するため、実測値を理論値で除した値 ω_r/ω_l を導入する。図-9は試験体側面の引張鉄筋位置における最大曲げひび割れ幅を、図-10は試験体下面における平均曲げひび割れ幅を、それぞれ式(2)の理論値で除した値と引張鉄筋のひずみとの関係を示したものである。

図-9より、 ω_r/ω_l の値は、A断面およびB断面ともに引張鉄筋のひずみが約500 μ に達するまでは増加を示し、その後、0.7とほぼ一定値をとる。すなわち、試験体側面の引張鉄筋位置における最大曲げひび割れ幅は、A断面およびB断面ともにその平均値は理論値の約0.7倍の値を示しており、最大の値でも理論値を超えるものはほとんど無いことを示している。一方、図-10では、試験体下面の平均曲げひび割れ幅は、A断面およびB断面ともその平均値は理論値を超えており、約1.2倍となっている。そして、平均曲げひび割れ幅の最大は、理論値の約1.5倍を示している。

式(2)の曲げひび割れ幅の算定式は、試験体側面の引張鉄筋位置における曲げひび割れを計算する場合には、曲げひび割れのばらつきを考慮して、ほぼ実測値がそれを超えることはないことが確認できた。しかしながら、かぶりが小さい試験体の下面における曲げひび割れを計算するには、実測値に比べて小さい値を示し、平均曲げひび割れ幅でも算定式により求めた値の約1.5倍の値が実測された。

6章で述べたように、曲げひび割れ幅の理論値と実測値との差異は、引張鉄筋に作用する引張応力度やひび割れ間隔以外にあると思われる。コンクリート標準示方書では、これらのパラメータの他に鋼材の付着性状の影響を表す定数として k を定めているが、式(2)により、かぶりの小さい試験体下面における平均曲げひび割れ幅を算定する場合には、異形鉄筋では1.0、普通丸鋼およびPC鋼材では1.3とした定数 k の値に1.5を乗じ、それぞれ1.5、1.95にすることが必要となる。

9. まとめ

鉄筋比等の条件を同一にした鉄筋コンクリート

はり試験体を15体、さらに鉄筋コンクリートはりの幅を大きくした12体の合計27体のはり試験体に対して、等曲げモーメント区間を持つ2点載荷を行ない、曲げひび割れ性状を検討した。以下、得られた結論をまとめると次のとおりである。

- (1) 曲げひび割れ発生荷重のばらつきは1割程度であるのに対し、曲げひび割れ本数や曲げひび割れ間隔では2割以上のばらつきが認められた。
- (2) 等曲げモーメント区間内の最大曲げひび割れ幅は、土木学会のコンクリート標準示方書に示されている曲げひび割れ幅の算定式により計算された値に比べて、試験体の側面の引張鉄筋位置では小さく、試験体の下面では大きくなった。
- (3) 等曲げモーメント区間内に生じた曲げひび割れの中から最大から3本の大きな測定値の平均値についても、最大曲げひび割れ幅と同様に、土木学会のコンクリート標準示方書に示されている曲げひび割れ幅の算定式により計算された値に比べて、試験体の側面の引張鉄筋位置では小さく、試験体の下面では大きくなった。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書「設計編」, 1996.
- 2) 横田隆雄, 橋本親典, 辻幸和, 杉山隆文：鉄筋コンクリートはりの曲げひび割れ幅算定式の統計的評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, pp.681-686, 1997.
- 3) 土木学会：鉄筋コンクリート終局強度理論の参考, コンクリート・ライブラリー 第34号, pp.75-80, 1972.

(1998.11.9 受付)

AN EVALUATING STUDY OF EQUATION FOR FLEXURAL CRACK WIDTH OF RC BEAMS

Kentaro SUHARA, Yukikazu TSUJI, Chikanori HASHIMOTO
and Masayosi KANAI

It is a part of the performance-based evaluation to examine the flexural crack width of a reinforced concrete structure. For the purpose of comparing the flexural crack width measured for a reinforced concrete beam with that calculated according to the Concrete Standard Specifications (Design Part I) of JSCE, the flexural strength tests were carried out with a number of reinforced concrete beams of the same shape and the same mix proportion. The testing beams were 27 in number.

It was shown that the maximum flexural crack width measured at the position of tensile reinforcing bars of side face in the beam was smaller than one calculated by the JSCE specification. However, the mean flexural crack width measured at low face in the beam was longer than the calculated value by about 20% in mean value, by about 50% in widest value.