

論文 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

横田隆雄*¹・橋本親典*²・辻幸和*³・杉山隆文*⁴

要旨：同一条件における多数のはり供試体の曲げ載荷試験を行い、曲げひび割れ幅に着目し統計的評価を行った。ひび割れ本数の変動は全変形量の変動には影響を及ぼさないが、一本当たりのひび割れ幅については多少の変動を伴う。しかし、引張鉄筋位置での曲げひび割れ幅は、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算定式から求まる値より、いずれも小さかった。また引張縁における曲げひび割れ幅を求める際には、上述の曲げひび割れ幅算定式に鉄筋のかぶりを考慮した補正係数を乗じることにより、より正確な値を得ることができた。

キーワード：曲げひび割れ幅、曲げひび割れ幅算定式、ひび割れ幅の変動係数と補正係数

1. はじめに

コンクリートの圧縮・引張・曲げ等の強度試験を行う場合、JIS A1132 「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」において、同一条件の試験に対して必要な供試体の数は3個以上とする規定されている。しかし、はり供試体の曲げ載荷試験を行う場合、試験規模の大きいものは同一条件の試験に対して複数個の供試体を作製するのは困難である。このために多くの場合、各試験条件に対して一体の試験体で載荷試験を行うのが現状である。

本研究では、同一条件におけるはり供試体の曲げ性状の変動を統計的に評価することを目的とし、コンクリート強度や鉄筋の降伏強度などの材料特性や断面寸法をすべて等しくした鉄筋コンクリートはりを15体作製して曲げ載荷試験を行い、供試体の曲げひび割れに着目し統計的評価を行った。さらに、曲げひび割れ幅の算定式との比較検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体の作製

供試体の形状寸法、載荷方法およびゲージ貼付位置を図-1に示す。供試体は、桁長3000mm、軸方向断面300×200mmの矩形断面である。鉄筋は、圧縮側にSD295 D10を3本、引張側にSD295 D13を3本、スターラップにSD295 D6を50mmあるいは100mmの間隔で、それぞれ図-1に示すとおりに配置した。コンクリートの示方配合および圧縮強度を表-1に示す。また養生は、屋内において14日間、気中養生を行った。

2.2 載荷方法および測定項目

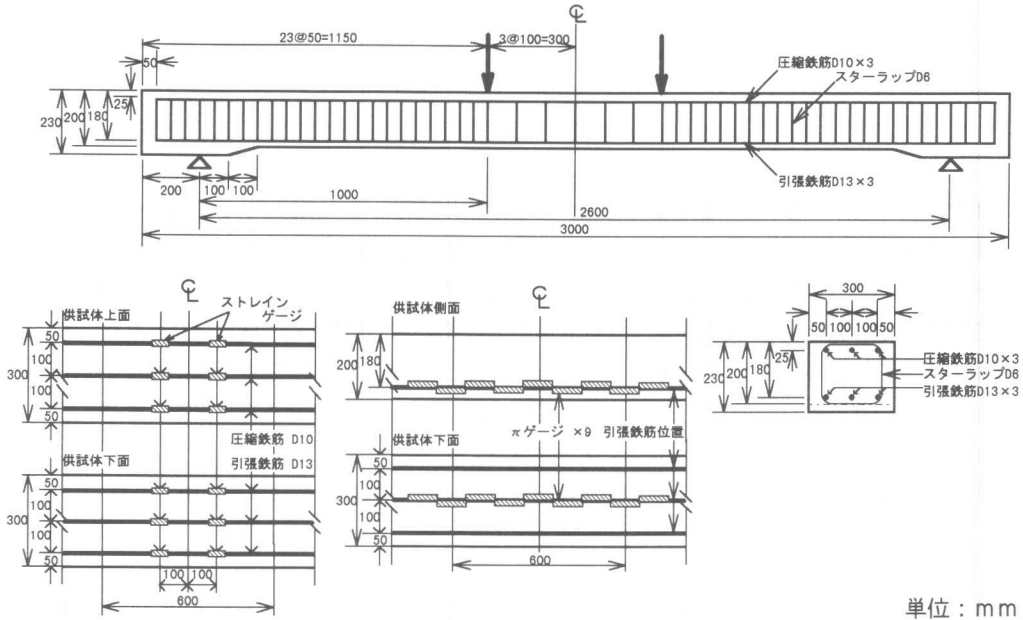
載荷方法は、等曲げモーメント区間600mm、スパン2600mm、せん断スパン1000mmの2点集中載荷とした。載荷は曲げひび割れが発生した後、引張鉄筋の応力度が300N/mm²に至るまで静的に漸

*1 群馬大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (学生会員)

*2 徳島大学助教授 工学部建設工学科、工博 (正会員)

*3 群馬大学 教授 工学部建設工学科、工博 (正会員)

*4 群馬大学助教授 工学部建設工学科、Ph.D. (正会員)



図－１ 供試体の形状寸法、載荷方法およびゲージ貼付位置

表－１ コンクリートの示方配合および圧縮強度

細骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメ ント比 (%)	細骨材 率 (%)	単位量 (kg/m ³)					圧縮強度 (N/mm ²)
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	
25	12	4.5	69	45.5	182	275	838	1009	1.031	30.2

増載荷し、その後除荷した。測定項目は、ワイヤストレインゲージによる等曲げモーメント区間内での圧縮鉄筋と引張鉄筋のひずみおよび測定基準長 10cm のπゲージによる供試体側面引張鉄筋位置と引張縁での曲げひび割れ幅とした。ゲージ貼付位置は、図－１に示すとおりである。また、ひび割れの発生荷重、本数および分布状況も記録した。

引張鉄筋 SD295 D13 の弾性係数が $1.8 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ より、引張鉄筋の応力度が $\sigma_s = 300 \text{N/mm}^2$ となる引張鉄筋のひずみ ε_s が 1700μ を計測するまで載荷することとした。

はり供試体の引張鉄筋ひずみの解析値は、コンクリートの圧縮縁ひずみの各段階ごとに、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の力の釣合条件から算出した。なお、解析に用いたコンクリートと鉄筋の応力-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用いた。また、曲げひび割れ幅の解析値は、「設計編」〔７章 使用限界状態に対する検討〕に規定されている曲げひび割れ幅算定式（１）に、先述の引張鉄筋ひずみの解析値を代入して求めた値を用いた。

$$\omega = k \{ 4c + 0.7(c_s - \phi) \} \left[\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right] \quad (1)$$

ここに、 ω : 曲げひび割れ幅(mm), k : 鋼材の付着性状の影響を表す定数で、異形鉄筋の場合 1.0 c : かぶり 13.65mm, c_s : 鋼材の中心間隔 100mm, ϕ : 鋼材径 12.7mm, ε'_{csd} : コンクリートの収縮およびクリープ等による曲げひび割れ幅の増加を考慮するための数値で、通常は 150×10^{-6} である

が、本実験では屋内による14日間の気中養生であったため、収縮およびクリープ等の影響はほとんどないものと考え0とした。 σ_{se}/E_s ：引張鉄筋ひずみの増加量

3. 実験結果および考察

3.1 ひび割れ性状および分布状況

表－2にひび割れの諸性状を示す。曲げひび割れ発生荷重および除荷荷重ともに、変動係数が小さくばらつきが小さい。ひび割れの本数は、等モーメント区間での曲げひび割れの本数については変動係数17%と小さいが、総ひび割れ本数の変動係数は23%と大きな値をとっている。

図－2にひび割れの分布状況を示す。上段が最もひび割れの本数が少なかった供試体No.6を、中断が平均的であったNo.5を、下段には最も本数の多かったNo.9を示す。ひび割れ本数によって、部材軸直角方向のひび割れ長さにあまり大きな差は見られないが、本数が少ないもののほど、ひび割れ間隔が大きくなっている。

図－3に荷重と引張鉄筋ひずみの関係を示す。引張鉄筋ひずみが1700 μ に達していないものがあるが、これは引張鉄筋に貼付したワイヤストレインゲージ6枚の平均を取っているためである。実験値の平均と解析値を比較すると、ほぼ同様の値をとっているものの、解析値の方が概ね大きい値を示している。

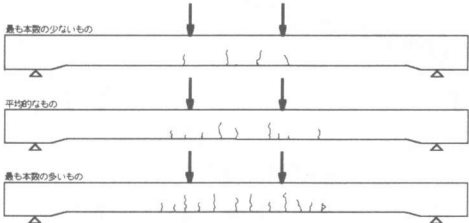
3.2 等モーメント区間最大曲げひび割れ幅

図－4～図－7に、荷重および引張鉄筋ひずみと側面および下面の最大曲げひび割れ幅の関係を示す。ここで最大曲げひび割れ幅とは、側面および下面に貼付した等曲げモーメント区間の π ゲージの測定値で最大の値をとったものである。

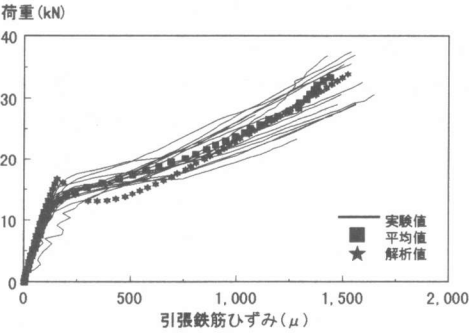
図－4の荷重と側面最大曲げひび割れ幅の関係について、曲げひび割れ幅の実験値は供試体ごとに大きな違いが見られ、ばらつきも大きい。また、実験値の平均と解析値を比較すると、曲げひび割れ幅が約0.1mmまでは、平均値は解析値とほぼ同様か安全側の値を示しているが、それ以降では平均値が大きく危険側の値を示している。図－5の引張鉄筋ひずみとの比較においても、実験値は図－4と同様であり、平均値は初期の段階から解析値より大きく、危険側の値をとっている。この傾向は、図－6、図－7における下面最大曲げひび割れ幅においてさらに顕著に表れている。また、表－3には、図－4の実験値を各荷重レベル毎に数値化したものを示す。変動係数

表－2 ひび割れ性状

供試体 No.	曲げひび割れ 発生荷重 (kN)	除荷荷重 (kN)	ひび割れの本数 (本)	
			等モーメント区間	全体
1	13.01	29.05	5	9
2	10.34	36.84	4	10
3	9.72	31.49	4	8
4	15.34	29.28	4	7
5	16.15	27.31	4	9
6	13.94	23.36	2	4
7	15.46	27.19	3	7
8	15.22	32.65	4	8
9	13.25	35.67	4	12
10	13.25	30.68	4	10
11	13.25	35.56	4	11
12	13.94	37.53	5	12
13	11.85	29.05	3	10
14	13.25	30.68	4	8
15	12.55	39.95	4	11
平均値	13.37	31.55	3.87	9.07
変動係数 (%)	13	13	17	23



図－2 ひび割れの分布状況



図－3 荷重－引張鉄筋ひずみ

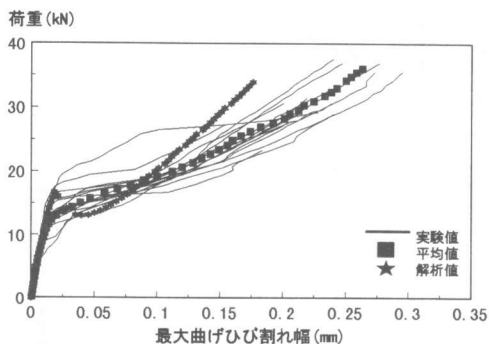


図-4 荷重-側面最大曲げひび割れ幅

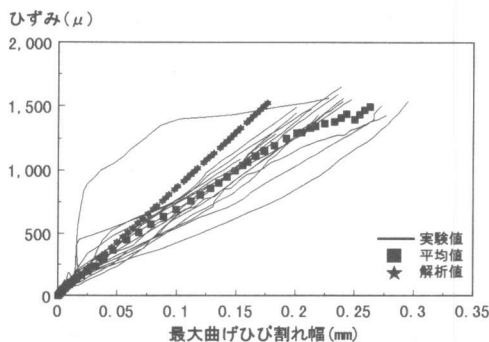


図-5 引張鉄筋ひずみ-側面最大曲げひび割れ幅

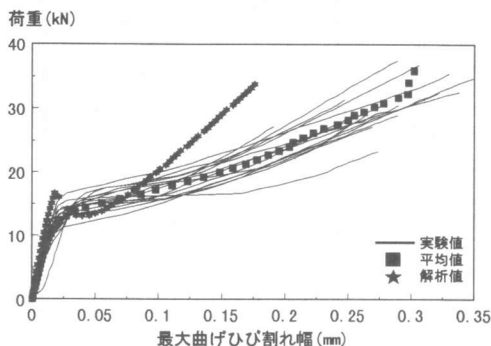


図-6 荷重-下面最大曲げひび割れ幅

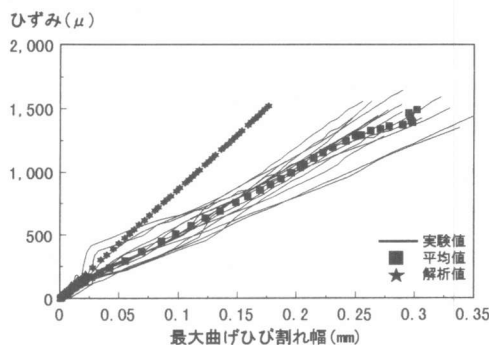


図-7 引張鉄筋ひずみ-下面最大曲げひび割れ幅

が最大で61%と大きな値をとっており、ここでも最大曲げひび割れ幅が大きくばらついているのが分かる。これは、計測方法に問題があったものと思われる。すなわち、基準長が10cmの π ゲージを用いた曲げひび割れの計測では、同一 π ゲージ内に複数のひび割れを含んでおり、この方法では曲げひび割れ1本の正確な計測ができていなく、そのために式(1)より得られた解析値に対して π ゲージによる実験値が大きく異なったものと考えられる。

3.3 等モーメント区間平均曲げひび割れ幅

図-8～図-11に、荷重および引張鉄筋ひずみと側面および下面の平均曲げひび割れ幅の関係を示す。ここで平均曲げひび割れ幅とは、側面および下面に貼付した等曲げモーメント区間内全ての π ゲージからの測定値の和を、各供試体の曲げひび割れの本数で除したものである。各図において波線で示した値は、表-2で示した供試体N o. 6で曲げひび割れが2本と少ないために、一本当たりのひび割れ幅が他と比較して極端に大きな値をとっている。

図-8，図-9の側面曲げひび割れ幅の検討について、実験値の平均と解析値を比較すると、載荷初期の段階においてはほぼ同様の値をとっているが、概ね解析値が平均値より大きくなって

表-3 各荷重レベルの側面最大曲げひび割れ幅

供試体N o.	荷重レベル(kN)									
	4	8	12	16	20	24	28	32	36	
1	3	7	17	78	141	199	241			
2	4	10	27	74	115	159	205	236	270	
3	5	17	29	65	106	161	201			
4	4	8	11	16	24	67	185			
5	3	6	9	14	47	120				
6	3	7	10	37	151	180				
7	2	6	9	13	91	156	201			
8	4	7	10	15	100	147	194	230		
9	3	7	11	34	119	180	237	271	295	
10	3	6	9	26	61	135	198	231		
11	3	8	14	59	118	168	218	253	273	
12	2	6	11	61	111	138	172	199	230	
13	2	6	12	72	104	145	196			
14	3	6	11	55	94	132	181			
15	5	8	14	80	113	147	184	212	246	
平均値	3	8	14	47	100	149	201	233	263	
変動係数(%)	33	38	43	53	32	61	10	10	9	

×0.001 (mm)

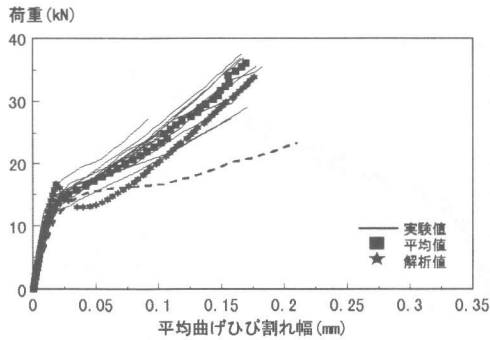


図-8 荷重-側面平均曲げひび割れ幅

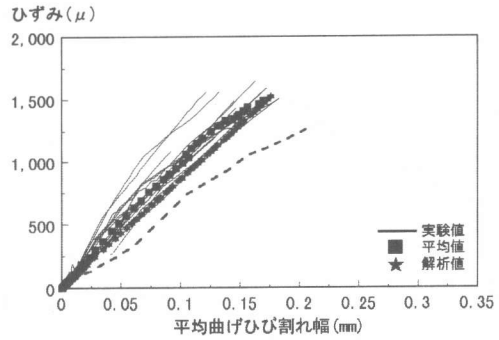


図-9 引張鉄筋ひずみ-側面平均曲げひび割れ幅

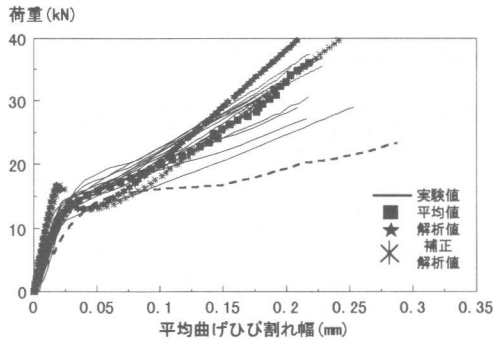


図-10 荷重-下面平均曲げひび割れ幅

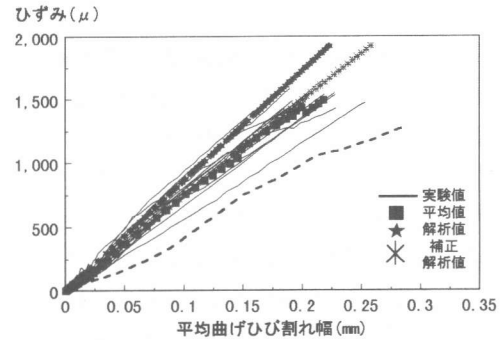


図-11 引張鉄筋ひずみ-下面平均曲げひび割れ幅

いる。図-10、図-11の下面平均曲げひび割れ幅の検討については、図-6、図-7の下面最大曲げひび割れ幅と比較すると、実験値が解析値に近づいてきているが、実験値の平均は解析値より大きくなっている。これは、引張鉄筋位置での曲げひび割れ幅に比べ、下面曲げひび割れ幅の方が鉄筋のかぶりの分だけ大きな値をとるためである。このため式(1)に補正係数式(2)を乗じて、下面の曲げひび割れ幅の解析値を補正することにより、平均値と補正解析値がほぼ同様の値をとる。

$$k' = \frac{h-x}{h-x-c} \quad (2)$$

ここに、 k' ：補正係数， h ：供試体高さ(mm)， x ：中立軸(mm)，中立軸は、はり供試体の解析において、各荷重レベル毎にひずみの直線性を仮定して求めたものである。

また、表-4には、図-8の実験値を各荷重レベル毎に数値化したものを示す。変動係数は、最大で33%であり、表-3の最大曲げひび割れ幅と比較するとばらつきが半減している。

表-4 各荷重レベルの側面平均曲げひび割れ幅

供試体No.	荷重レベル(kN)									
	4	8	12	16	20	24	28	32	36	
1	2	7	12	39	65	100	133			
2	3	9	17	38	65	94	120	140	162	
3	3	10	18	37	67	100	129			
4	2	7	11	28	66	93	114			
5	4	8	11	18	49	76				
6	4	12	20	62	157	210				
7	4	9	14	20	70	120	158			
8	3	7	11	30	66	99	136	168		
9	3	8	14	25	65	94	128	153	178	
10	3	6	11	26	68	103	137	158		
11	3	9	13	40	72	101	127	148	183	
12	1	5	8	29	58	87	113	135	158	
13	2	7	11	41	84	120	157			
14	3	6	11	40	75	107	132			
15	5	10	15	44	72	99	123	143	167	
平均値	3	8	13	34	73	107	131	149	170	
変動係数(%)	33	25	23	32	33	27	10	7	5	

×0.001(mm)

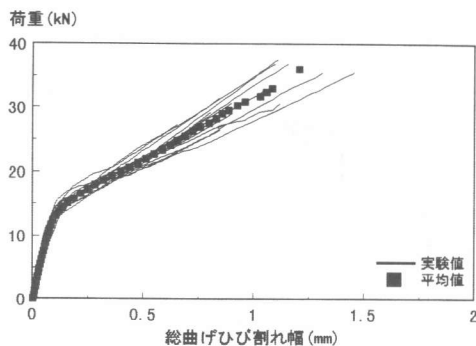


図-1 2 荷重-側面総曲げひび割れ幅

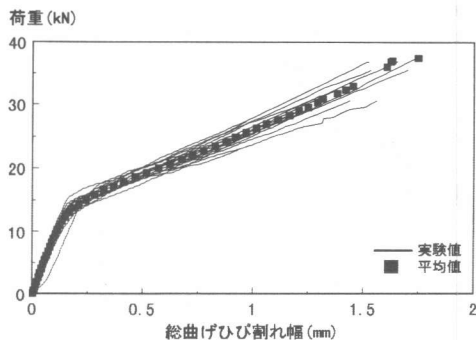


図-1 3 荷重-下面総曲げひび割れ幅

3.4 等モーメント区間総曲げひび割れ幅

図-1 2, 図-1 3に、荷重と側面および下面の総曲げひび割れ幅の関係を示す。ここで総曲げひび割れ幅とは、側面および下面に貼付した等曲げモーメント区間内全 π ゲージの測定値の和である。図-1 2, 図-1 3より、15体全ての供試体とも、同様な挙動を示している。また、表-5には、図-1 2の実験値を各荷重レベル毎に数値化したものを示す。表より、ひび割れ本数に関わらず変動係数が小さな値である。これは、各供試体のたわみ量がひび割れの本数によらずほぼ一定であることを示している。

表-5 各荷重レベルの側面総曲げひび割れ幅

供試体No.	荷重レベル(kN)									
	4	8	12	16	20	24	28	32	36	
1	25	58	98	264	467	684	898			
2	30	67	107	205	338	512	722	879	1,063	
3	29	65	97	185	370	554	732			
4	24	50	78	169	406	620	756			
5	40	66	93	144	329	528				
6	20	43	69	166	479	675				
7	24	48	72	98	303	591	863			
8	22	47	73	163	371	602	828	1,011		
9	28	61	96	188	462	779	1,042	1,248	1,456	
10	25	45	73	145	349	641	838	1,085		
11	26	62	95	232	481	725	941	1,115	1,313	
12	14	39	67	199	400	590	758	895	1,053	
13	14	33	50	162	372	583	786			
14	23	42	67	188	394	611	806			
15	39	70	103	275	461	645	821	968	1,150	
平均値	26	53	83	186	399	623	830	1,029	1,207	
変動係数(%)	27	21	19	24	14	11	10	12	13	

×0.001 (mm)

4. 結論

本研究の範囲内において、以下のことが明らかとなった。

- (1) 等曲げモーメント区間内における最大値をとった π ゲージの変形量を計測するより、区間内の総変形量をひび割れの本数で割ることにより、一本あたりの曲げひび割れ幅を正確に計測でき、解析値によるひび割れ幅算定式の結果と近似した値をとる。
- (2) 供試体表面の曲げひび割れ幅を算定する場合は、示方書の算定式をそのまま用いると危険側となるため、かぶりを考慮する必要がある。
- (3) 一本あたりの曲げひび割れ幅についての各供試体間のばらつきは、荷重レベルに関係なく30%程度であるのに対し、総曲げひび割れ幅のばらつきは15%と小さい。

謝辞 本研究を実施するに当たり、ドービー建設工業(株)の金井昌義氏に多大なご協力を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献 (1) 岡村甫、前田詔一：鉄筋コンクリート工学、市ヶ谷出版社、1990