

報告 鉄筋コンクリートはりの曲げひび割れ幅性状の統計的評価

有賀 大峰*¹・辻 幸和*²・池田 正志*³・杉山 隆文*⁴

要旨：土木学会コンクリート標準示方書に規定されている RC 梁の曲げひび割れ幅の算定式より求まる値は、載荷試験より得られる実測値と比較すると差異があるとの報告を既に行ってきた。そこで本研究では、同一の断面形状寸法および配筋で、せん断スパン比のみが異なる供試体について曲げ載荷試験を行い、既往の算定式の適合性を評価した。その結果、せん断スパン比を変化させることにより、曲げひび割れ幅の実測値の算定値に対する分布には明確な相違が認められた。

キーワード：曲げひび割れ幅の算定式、せん断スパン比、変動係数、分布形状

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の性能照査の一つとして、使用限界状態における曲げひび割れの検討があり、土木学会コンクリート標準示方書には曲げひび割れ幅の算定式が規定されている¹⁾。筆者らは、本式より算定される値は実際に載荷試験を行い得られる実測値と比較すると差異があるとの報告を既に行った²⁾。しかし、2002年のコンクリート標準示方書の改訂に伴い、曲げひび割れ幅の算定式も改訂された。すなわち、既往の式に対し、コンクリートの品質および鉄筋の段数による影響が考慮され、収縮とクリープ等による影響を考慮する数値も見直されたことにより、さらに広範囲な要因に対し適応可能な式へと改訂された。

本研究では、コンクリートの強度と鉄筋の力学的特性等の材料特性および断面形状寸法が等しく、せん断スパン比のみが異なる鉄筋コンクリートはり供試体を2種類の合計36体作製し、同一の方法で曲げ載荷試験を行った。その結果得られた曲げひび割れ幅の実測値と、コンクリ

ート標準示方書の曲げひび割れ幅の算定式より求まる値との比較を行い、上述の算定式の適合性について考察を行った。さらに、引張鉄筋ひずみの各段階における実測値と算定値の相違の程度についても考察を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体の形状寸法および載荷方法を図-1に示す。供試体は軸方向断面が500×199mmの矩形断面とし、長さが2400mmのAシリーズが18体、3000mmのBシリーズが18体の合計36体である。鉄筋は、引張側にSD295D13を5本、圧縮側にSD295D10を5本、スターラップにはSD295D6を、図-1に示すとおり配置した。

コンクリートおよび鉄筋の強度等を表-1と表-2に示す。コンクリートの設計基準強度は20N/mm²を目標とし、養生は打込み後1日間の蒸気養生の後、27日間の屋外養生とした。

2.2 載荷方法および測定項目

載荷方法は、Aシリーズでは等曲げモーメン

*1 群馬大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (正会員)

*2 群馬大学 工学部 建設工学科 教授 工博 (正会員)

*3 群馬大学 工学部 建設工学科 技術専門職員 (正会員)

*4 北海道大学大学院 工学研究科 環境創生工学専攻 教授 Ph.D (正会員)

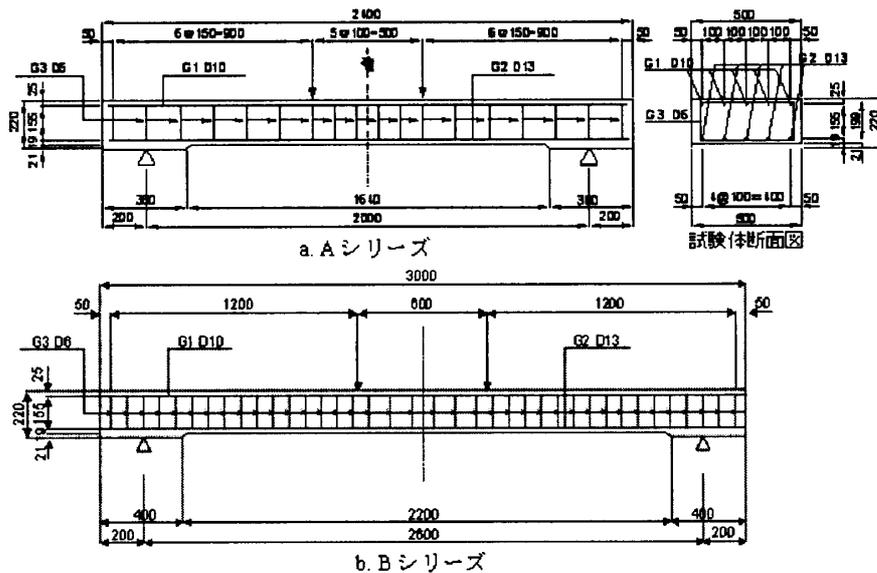


図-1 供試体の形状寸法および荷重方法

表-1 コンクリートの示方配合および圧縮強度

供試体	目標強度 (N/mm ²)	C _{max} (mm)	スランブ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						載荷時強度 (N/mm ²)	せん断ス パン比	
						セメント C	水 W	細骨材 S1	細骨材 S2	粗骨材 G1	粗骨材 G2			混和剤
Aシリーズ	20	25	8	64	46.2	247	158	692	168	816	203	2.63	22.6	4.17
Bシリーズ					46.5	241	154	543	337	627	387	2.89	23.6	5.56

ト区間が 500mm, 支点間スパンが 2000mm, せん断スパンが 750mm, B シリーズでは等曲げモーメント区間が 600mm, 支点間スパンが 2600mm, せん断スパンが 1000mm の 2 点集中荷重とした。

荷重は、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 に相当する引張鉄筋ひずみの測定値に至るまで静的漸増荷重を行った。測定項目は、測定長が 100mm の π 型変位計による供試体側面の引張鉄筋位置での曲げひび割れ幅、およびワイヤストレーンゲージによる等曲げモーメント区間内での引張鉄筋、圧縮鉄筋、コンクリート圧縮縁のひずみとした。

2.3 曲げひび割れ幅の算定式

曲げひび割れ幅の算定式は、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、次式のように与えることができる。

$$w = l(\epsilon_s - \epsilon_c) \quad (1)$$

ここに、 w : 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。

表-2 鉄筋の力学的特性

	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
スターラップ	D6	374	541	1.87×10^5

土木学会コンクリート標準示方書「構造性能照査編」[7章 構造物の使用性能照査 7.4.4]に規定されている曲げひび割れ幅の算定式は、式(2)のように定められている。

$$w = 1.1k_1k_2k_3\{4c + 0.7(c_s - \phi)\}(\sigma_{se} / E_s + \epsilon'_{cs}) \quad (2)$$

ここに、 w : 曲げひび割れ幅(mm), k_1 : 鋼材の付着性状を表す定数, 異形鉄筋の場合 1.0, k_2 : コンクリートの品質による影響を表す定数, k_3 : 引張鉄筋の段数の影響を表す定数, c : かぶり(mm), c_s : 鋼材の中心間隔(mm), ϕ : 鋼材径(mm), σ_{se} : 引張鉄筋の応力度, E_s : 引張鉄筋のヤング係数, ϵ'_{cs} : コンクリートの収縮およびクリープ等の影響を考慮する数値, 本研究では 0 とした。

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形状寸法および配筋方法等

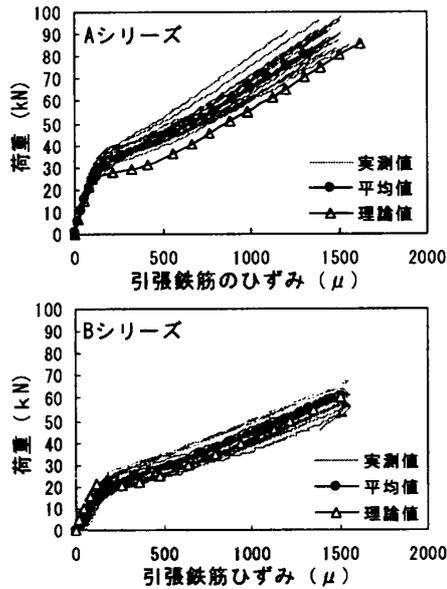


図-2 引張鉄筋ひずみ

表-3 ひび割れ性状

供試体	曲げひび割れ発生荷重 (kN)	ひび割れ本数 (本)		平均ひび割れ間隔 (mm)
		等曲げモーメント区間	全体	
A-1	28.17	6	14	72
A-2	32.75	5	11	100
A-3	28.53	5	12	102
A-4	29.33	6	11	81
A-5	30.25	7	13	65
A-6	28.67	7	13	80
A-7	27.55	7	15	62
A-8	32.15	5	9	117
A-9	28.98	5	11	105
A-10	29.97	6	12	95
A-11	27.73	5	11	90
A-12	29.73	6	13	83
A-13	29.37	7	16	61
A-14	24.35	5	13	94
A-15	30.99	7	13	64
A-16	28.48	6	14	82
平均値	29.06	5.94	12.56	84.62
標準偏差	1.99	0.83	1.69	16.50
変動係数 (%)	6.9	13.9	13.5	19.5
B-1	19.10	7	16	89
B-2	17.29	7	15	88
B-3	18.07	7	15	84
B-4	19.62	6	15	100
B-5	20.27	6	15	101
B-6	21.17	6	16	97
B-7	12.60	5	15	113
B-8	12.21	6	15	105
B-9	19.25	6	15	97
B-10	15.75	6	14	98
B-11	16.54	6	13	107
B-12	17.63	5	14	131
B-13	19.19	7	14	79
B-14	20.35	6	16	98
B-15	17.53	6	16	98
B-16	18.11	6	13	100
B-17	14.92	6	14	100
B-18	18.08	6	16	100
平均値	17.65	6.11	14.83	99.25
標準偏差	2.42	0.57	0.96	11.02
変動係数 (%)	13.7	9.3	6.5	11.1

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。そこで、本研究で用いる曲げひび割れ幅の理論値は、式(2)に引張鉄筋ひずみの

理論値を代入して求めた値を使用した。なお引張鉄筋ひずみの理論値は、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、その分布より求まるコンクリートと鉄筋の力の釣合条件から算定した。

ここで図-2 に、両シリーズの荷重と引張鉄筋ひずみの関係を示す。A シリーズでは、小さい荷重段階で理論値を若干下回るものはあるが、引張鉄筋ひずみの値が全ての供試体で、ほぼ一致した挙動を示している。またBシリーズでは、全ての供試体が理論値に近似した値を示す。以上のことから、上述の方法で算定した引張鉄筋ひずみの理論値は、実測値と大きな誤差は認められず、曲げひび割れ幅の理論値を求める際の代入値として使用できる。また、算定に使用し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「構造性能照査編」[3章 材料の設計値]に規定されているものを用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 ひび割れ性状

表-3 に各供試体のひび割れ性状を示す。ここで示す平均ひび割れ間隔とは、等曲げモーメント区間に発生したひび割れ同士の間隔を測定し、その平均値を取ったものである。また表-3 おいて、A シリーズは 16 体しか示していない。これは、等曲げモーメント区間内およびスパン全長で発生したひび割れの本数の変動係数は、B シリーズではともに 10%以下と小さな値を示したのに対し、A シリーズの合計 18 体ではそれぞれ 22%および 15%と非常に大きな値を示した。さらに A シリーズでは、後述する最大および平均の曲げひび割れ幅についても、各供試体間で非常に大きなばらつきが認められた。これらは、等曲げモーメント区間内のひび割れの測定方法による影響が一因であると考えられる。すなわち、測定長が 100mm の π ゲージを用いた曲げひび割れ幅の計測では、同一 π ゲージ内に

複数のひび割れを含む場合があった。この場合は、 π ゲージの測定値をひび割れの本数で除して平均を取り、各ひび割れの幅としているため、発生した曲げひび割れ1本の正確な計測ができなかったことによる。そこで、Aシリーズのデータを統計的な観点から処理するため、等曲げモーメント区間内のひび割れの本数に対して99%信頼区間を定め、信頼区間外に該当し、上述のような要因で大きくひび割れ幅がばらついたり考えられる供試体を除いて評価することで、より一層精度の高い評価を行うことが可能だと考えた。その結果、信頼区間内にはあてはまる16体を採用して、表-3に示した。

信頼区間を定めたことで、Aシリーズの等曲げモーメント区間内のひび割れの本数に関する変動係数は、約14%程度となった。しかしながら、ひび割れの本数に影響を与えると考えられる平均曲げひび割れ間隔の変動係数は、約20%と大きな値を示した。これは、各供試体ごとでひび割れの発生する位置にばらつきがあったためである。また、曲げひび割れ間隔は同一の断面形状であるAとBシリーズの場合は一致するはずである。しかしながら、曲げひび割れ間隔の平均値には、約10mm程度の差異が見られた。以上のことより、Aシリーズはスパンを長くしたBシリーズに比べ、曲げひび割れの分散性がよかった。

3.2 最大曲げひび割れ幅

図-3に、両シリーズの引張鉄筋のひずみと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、等曲げモーメント区間に設置した π 型変位計の測定値で最大の値を採用したものである。図中に使用した値は、各供試体の実測値とこれらの平均値、そして式(2)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ある。また、2本の点線は理論値の $\pm 20\%$ の値を示している。

最大曲げひび割れ幅の実測値は、両シリーズとも各供試体間のばらつきが非常に大きい。特

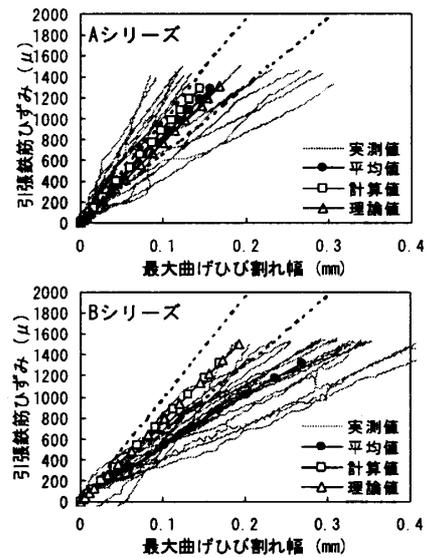


図-3 引張鉄筋のひずみと最大曲げひび割れ幅の関係

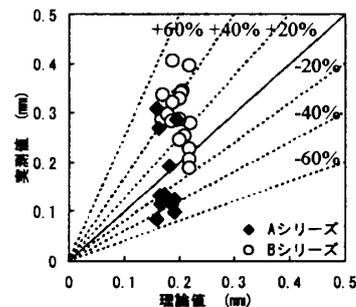


図-4 最大曲げひび割れ幅の理論値と実測値

にAシリーズでは、引張鉄筋のひずみが200 μ 前後からばらつき始め、引張鉄筋ひずみが1500 μ 付近の値を比較すると、最大曲げひび割れ幅が最小の供試体は最大の供試体の1/2~1/3程度にしか進展しない。理論値と比較しても、近似した供試体は少なく、常に理論値の $\pm 20\%$ の範囲内の値を取る供試体は1~2割程度である。しかし、供試体間のばらつきは大きいものの、全供試体の平均値は理論値および計算値と近似し、ほぼ同様の挙動を示す。

一方、せん断スパン比の大きなBシリーズでも、初期ひずみの段階でこそ各供試体はほぼ同様の挙動を示すが、400 μ 以降からばらつき始め、1500 μ 付近の値を比較すると、最大曲げひび割れ幅が最小の供試体は最大の供試体の1/2程度の進展である。また全供試体の平均値をみても、

理論値を大きく上回り、ほぼ全ての供試体が理論値を超えて危険側の値を示した。

図-4には、引張鉄筋ひずみ 1500μ 時の最大曲げひび割れ幅の実測値と理論値の関係を示す。B シリーズは、理論値に一致する値から理論値の+60%の範囲までほぼ一様に分布し、ばらつきが大きい。一方 A シリーズでは、約 7 割の供試体が理論値の-40%から-60%の範囲に分布しており、残りの供試体は突発的に大きな値を示している。

このような A と B シリーズの供試体間におけるばらつきは、前述のように等曲げ区間のひび割れ幅の計測方法による影響が大きいと考えられる。また、最大曲げひび割れ幅は、載荷の偏心や π 型変位計の設置方法などの外的要因により、1 本でも大きなひび割れが発生した場合、それが最大曲げひび割れ幅として採用されてしまう。それらのこともあり、各供試体間に大きなばらつきが現われてしまったと考えられる。

3.3 平均曲げひび割れ幅

両シリーズの引張鉄筋のひずみと平均曲げひび割れ幅の関係を、図-5に示す。ここで、平均曲げひび割れ幅とは、等曲げモーメント区間に設置した π 型変位計の測定値の平均を採ったものである。平均曲げひび割れ幅の実測値は、A シリーズでは初期ひずみの段階から各供試体間に大きなばらつきが認められる。引張鉄筋ひずみが 1500μ 付近において、平均曲げひび割れ幅が最小の供試体は、最大の供試体と比較すると 1/2 程度にしか進展しない。この傾向は、図-3に示した最大曲げひび割れ幅と同様であり、ひずみレベルが大きくなるに従い、各供試体間のばらつきが顕著に現われる点も同様である。理論値と比較すると、ほぼ全ての供試体が理論値を下回る安全側の値を示し、平均値は理論値の 1/2 程度の値である。また、理論値の $\pm 20\%$ の範囲内に収まる供試体は 1~2 割程度である。

せん断スパン比の大きい B シリーズでは、全体的なばらつきが小さく、初期ひずみの段階か

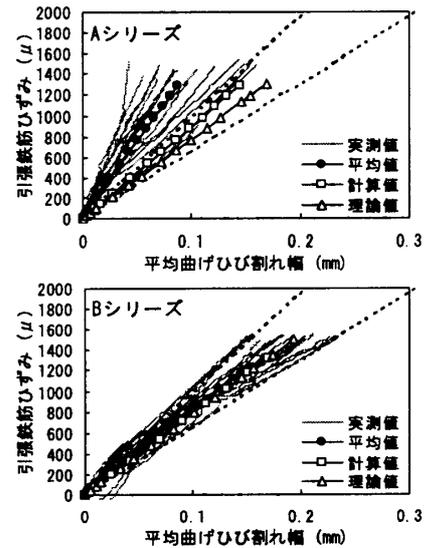


図-5 引張鉄筋のひずみと平均曲げひび割れ幅の関係

ら各供試体ともに一様な挙動を示し、常に 8~9 割が理論値の $\pm 20\%$ の範囲内に収まっている。また、引張鉄筋のひずみが 1500μ 付近の平均曲げひび割れ幅が最小および最大の供試体を比較しても、前節の最大曲げひび割れ幅ほど大きなばらつきは認められず、全供試体の平均値も理論値に近似した挙動を示す。

曲げひび割れ幅は、式(2)からも明らかとなり、曲げ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、この両者に大きな影響を受ける。ここで、A シリーズの引張鉄筋ひずみの実測値は、図-2の荷重と引張鉄筋のひずみの関係に示したように、理論値とほぼ一致している。このことから、A シリーズの平均曲げひび割れ幅のばらつきは、等曲げモーメント区間内のひび割れ本数のばらつきとそれに直接影響を受ける曲げひび割れ間隔のばらつきに起因するものと考えられる。しかし、このようなばらつきは、引張鉄筋に作用する引張応力度やひび割れ間隔以外にもあるものと推測される。今回の A シリーズは、B シリーズに比べてせん断スパン比が小さいことから、曲げモーメントだけでなくせん断力による影響を大きく受けた供試体があったためと考えられる。

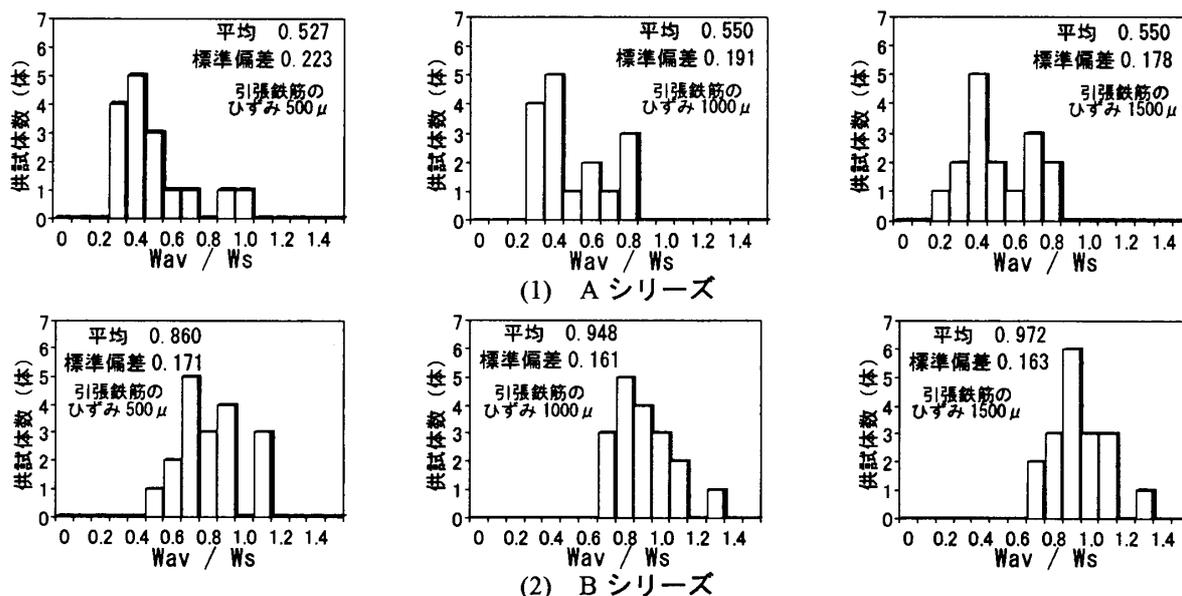


図-6 引張鉄筋ひずみの各段階における曲げひび割れ幅の実測値の分布

3.4 平均曲げひび割れ幅の理論値に対する分布

図-6に、両シリーズにおける平均曲げひび割れ幅の理論値(w_s)に対する実測値(w_{av})の分布を示す。両シリーズのグラフとも左から順に、引張鉄筋のひずみが 500μ , 1000μ , 1500μ 時の分布である。A シリーズは、各ひずみ段階においても、理論値の 0.5 強の値を中心に、やや大きなばらつきの分布を示す。そして、引張鉄筋のひずみが大きくなるに従ってひび割れが安定し、各供試体間のばらつきが小さくなる傾向が認められる。なお、分布形状は各段階とも決まった形は見られない。各段階とも分布の集中する値はあるものの、中心部での凹凸が多く、一定の形に定まっていかない。

B シリーズは、理論値の 0.9 前後の値を中心に、A シリーズに比べ小さなばらつきでまとまった分布を示す。引張鉄筋のひずみが大きくなるに従って、平均値は理論値に近似してくるが、各供試体のばらつきは標準偏差の値からも分かるように、ほぼ変わらない。分布形状は、各段階で A シリーズに比べまとまりのある山型を示し、特に引張鉄筋のひずみが 1500μ 時では、明確に分布の集中する値がある。そして、その値を中心に分布の広がりがあることなどから、正規分布に近い形状を示しているといえる。

4. 結論

本研究の範囲内で、以下のことが認められた。

- (1)せん断スパン比の小さな供試体では、各供試体間のひび割れ本数のばらつきが大きく、ひび割れ幅のばらつきも大きい事が認められる。
- (2)等曲げモーメント区間内の最大曲げひび割れ幅は、土木学会コンクリート標準示方書に規定されている算定値を上回ることがあり、せん断スパン比が大きくなるとその現象は顕著になる。
- (3)等曲げモーメント区間内の平均曲げひび割れ幅は、曲げひび割れ幅の算定値に対し、一致するかもしくは下回る安全側の値を示すが、せん断スパン比の違いによる曲げひび割れ幅の分布の相違が認められる。
- (4)平均曲げひび割れ幅は、せん断スパン比が大きくなると荷重の初期段階からばらつきが小さく安定し、より理論値に近い値をとる。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書「構造的な性能照査編」, 2002
- 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