

# 論文 鉄筋コンクリート梁の曲げひび割れ幅に及ぼす各種要因の影響

劉 鍵\*<sup>1</sup>・大野 義照\*<sup>2</sup>・李 振宝\*<sup>3</sup>・鈴木 計夫\*<sup>4</sup>

**要旨：**コンクリート強度（200～600kgf/cm<sup>2</sup>）、部材せい（20～50cm）、鉄筋径（D13～D22）、かぶり厚さ（3～5cm）、プレストレス（ $\sigma_g=0, 20, 40$ kgf/cm<sup>2</sup>）、配筋状態（一段、二段）を要因に単筋はりの曲げ載荷実験を行い、これら要因のひび割れ間隔、ひび割れ幅に及ぼす影響を調べるとともに既往の算定式の適合性を検討した。その結果本実験の範囲ではコンクリート強度、部材せい及びプレストレスのひび割れ間隔への影響は小さく、筆者らの式を含め既往のひび割れ幅算定式がそのまま適用できることがわかった。

**キーワード：**ひび割れ幅、ひび割れ間隔、コンクリート強度、部材せい、鉄筋径

## 1. まえがき

一般にコンクリート系部材のひび割れ幅の制御は鉄筋応力度の一律な制限による間接的な方法[1]か、直接ひび割れ幅を算定する方法[2]によって行われている。前者は簡便ではあるが精度が悪く、後者は精度はよいが煩雑である。

第3の方法としてP R C部材に用いられる仮想引張応力度による方法がある。これはひび割れ荷重以上の荷重域においてもひび割れは生じないとして算定される引張縁の応力度（これを仮想引張応力度と呼ぶ）とひび割れ幅を関係づける方法で、簡単な数式あるいは図表で両者の関係が表現できれば、特にひび割れ幅の計算に不可欠な鉄筋応力の算定が複雑となるP R C部材においては、ひび割れ耐力のチェックと同じ方法でひび割れ幅のチェックができることから、極めて有用な方法といえよう。英国の規準CP110[3]に、この第3の方法が用いられている。そこでは仮想引張応力度はコンクリート圧縮強度や部材せいの関数で表され、すなわちそれらがひび割れ幅に大きく影響するとされている。

一方、筆者らは内外の約140の試験体に基づいてひび割れ幅算定式を提案し[4]、建築学会P R C指針・同解説[2]にとりあげられている。それらの試験体の部材せいは20～120cm、コンクリートの圧縮強度は300kgf/cm<sup>2</sup>を中心に広範囲ではあるが、他の要因も変化しており、部材せいやコンクリートの圧縮強度の影響は明瞭でなく、提案したひび割れ間隔算定式においては考慮されていない。また近年普及してきた高強度コンクリートへの提案式の適用性も検討する必要がある。本研究ではコンクリートの圧縮強度、部材せい、かぶり厚さ、プレストレスの有無、鉄筋径および配筋状態を要因に24体のはり試験体の載荷実験を行い、各要因のひび割れ性状に及ぼす影響を調べるとともに提案式並びに既往の式の適用性を検討した。

## 2. 実験要因

### 2.1 使用材料

コンクリートの目標強度は5種類で普通ポルトランドセメント又は早強ポルトランドセメント、

---

\*1、\*3大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻（正会員）

\*2大阪大学助教授 工学部建築工学科、工博（正会員）

\*4大阪大学教授 工学部建築工学科、工博（正会員）

山砂・海砂および砕砂を用いたレディミクストコンクリートを用いた。梁試験体載荷時のコンクリートの力学性質を表1に示す。鉄筋はSD345のD13、D16、D19およびD22を、PC鋼棒はC種のφ11とφ15を用いた。

表1 コンクリートの力学性質

目標強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	材令 (日)	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	割裂強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (×10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )
200	15	212	23.7	2.37
300	21	284	24.0	2.68
400	27	340	27.2	2.88
500	27	439	31.6	2.97
600	13	552	44.5	3.12

2. 2 試験体の種類

試験体の種類を表2に、試験体の形状と載荷方法を図1に示す。実験要因は鉄筋径 (D13、D16、D19、D22)、かぶりに厚さ (3、4、5cm)、梁せい (30、40、50cm)、配筋状態 (一段、二段配筋)、プレストレス (σ<sub>g</sub>=20,40 kgf/cm<sup>2</sup>) およびコンクリート強度 (目標強度

表2 試験体の種類

試験体記号	断面寸法 (cm)	かぶり厚さ (cm)	普通鉄筋 (mm)	目標圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	緊張材 (mm)	プレストレス (kgf/cm <sup>2</sup> )	備考 (実験要因)
NO.1	15×30	4	2-D13	300	-	0	鉄筋径
NO.2,2'	15×30	4	2-D16	300	-	0	
NO.3	15×30	4	2-D19	300	-	0	
NO.4	15×30	4	2-D22	300	-	0	
NO.5	13×29	3	2-D16	300	-	0	かぶり厚さ
NO.6	17×31	5	2-D16	300	-	0	梁せい
NO.7	15×20	4	2-D16	300	-	0	
NO.8	15×40	4	2-D16	300	-	0	
NO.9	15×50	4	2-D16	300	-	0	二段配筋
NO.10	15×40	4	4-D16	300	-	0	
NO.11	15×50	4	4-D16	300	-	0	プレストレス量
NO.12,12'	15×30	4	2-D16	300	φ11	20	
NO.13,13'	15×30	4	2-D16	300	φ15	40	
NO.14,14'	15×30	4	2-D16	200	-	0	コンクリート強度
NO.15,15'	15×30	4	2-D16	400	-	0	
NO.16,16'	15×30	4	2-D16	500	-	0	
NO.17,17'	15×30	4	2-D16	600	-	0	

200、300、400、500、600kgf/cm<sup>2</sup>) で、試験体の種類は17種、1部の種類については各2体作成し、試験体総数は24体である。試験体の基準断面は15×30cm、その鉄筋のかぶり厚さは側面、引張縁とも4cmとし、試験体の長さは全て2.6mである。PC鋼材にはアンボンDPC鋼棒を用い、核半径位置に配した。

2. 3 試験体の製作および載荷方法

試験体は屋外で製作し、原則として載荷前日まで湿布養生を行った。プレストレスの導入は載荷直前に行った。載荷は等曲げスパン80cmの3等分点載荷で、コンクリート材令13~27日に原則として単調加力載荷を行った。測定項目は、ひび割れ幅、たわみ、鉄筋ひずみおよび上下縁のコンクリートひずみである。ひび割れ幅は側面鉄筋高さ位置において検長6cmのコンタクトストレインゲージを用いて、たわみは等曲げスパン内たわみお

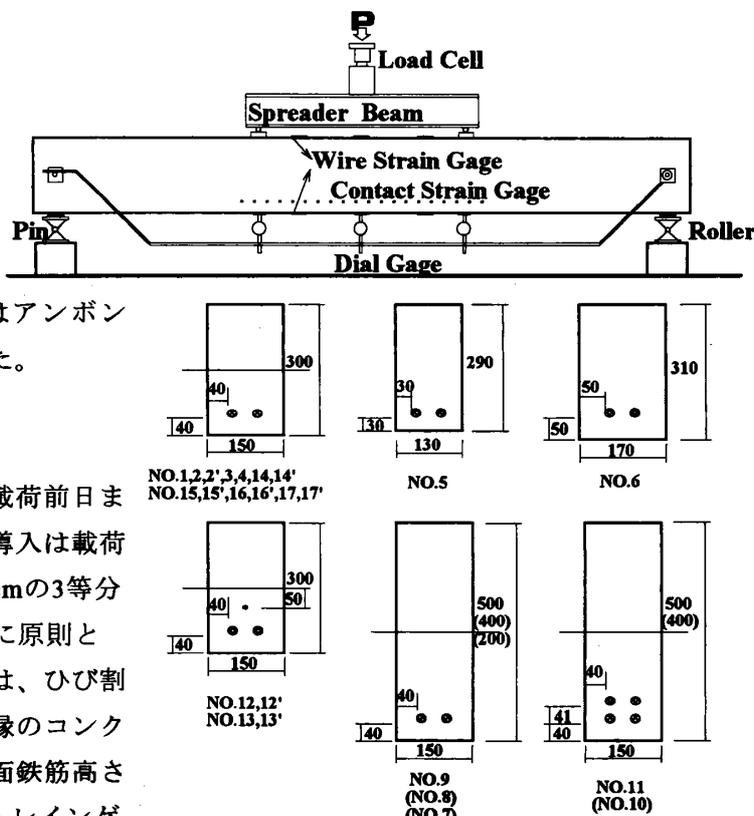


図1 試験体形状および載荷方法

よび全スパンたわみを、鉄筋ひずみは鉄筋表面に8cm間隔で貼付した検長2mmのワイヤーストレインゲージにて測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 ひび割れモーメント ( $M_{cr}$ )

試験体下縁に貼付したワイヤーストレインゲージによるひずみ測定値から判定したひび割れモーメント実測値と(1)式による計算値との比較を図2に示す。なお実測値はたわみ測定値における剛性の変化に対応している。

$$M_{cr} = (\sigma_{tb} + \sigma_p) Z_e \tag{1}$$

ここに、 $\sigma_{tb}$  : コンクリートの曲げ強度、 $\sigma_p$  : 下縁プレストレス、 $Z_e$  : 鉄筋を考慮した断面係数

図2-(a)、(b)および(c)の計算値は、コンクリートの曲げ強度 $\sigma_{tb}$ をそれぞれ、 $1.8\sqrt{\sigma_B}$  ( $\sigma_B$ : コンクリート圧縮強度) [1]、 $\alpha$  (コンクリートの割裂引張強度) および  $5/3\alpha$  [5] として算出した。これらの図から鉄筋を考慮した断面係数を用いることによって鉄筋比を考慮でき、またコンクリートの曲げ強度 $1.8\sqrt{\sigma_B}$ を用いた(1)式によってコンクリート強度、部材せいの如何に係わらず $M_{cr}$ が算定できることがわかる。また(b)、(c)図からコンクリートの曲げ強度として $5/3\alpha$ よりも $\alpha$ を用いた方が実測値と一致しているのは、湿布養生後のコンクリートの乾燥収縮が鉄筋によって拘束され、引張応力が生じていたためと考えられる[6]。

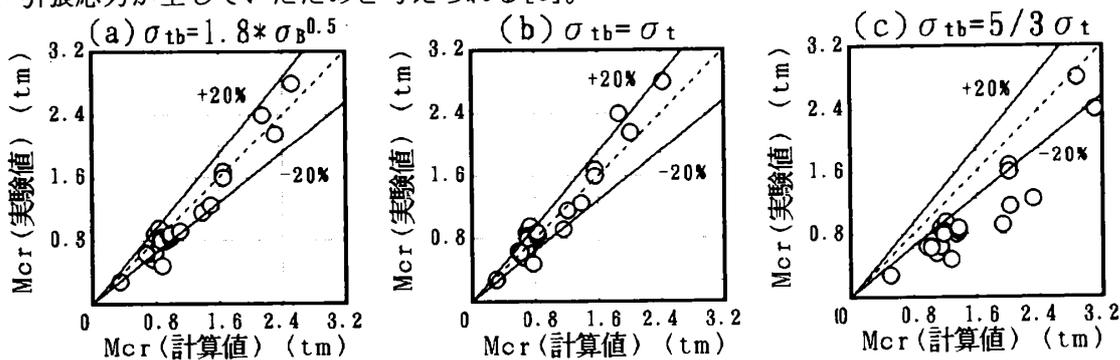


図2 ひび割れモーメントの比較

3.2 ひび割れ間隔

等曲げスパン内の鉄筋高さ位置におけるひび割れ間隔の平均値を平均ひび割れ間隔 $l_{av}$ として表3に示す。また図3-(a)、(b)、(c)、(d)および(e)にそれぞれコンクリート強度、鉄筋径、かぶり厚さ、梁せいおよびプレストレス量と平均ひび割れ間隔との関係を示す。表3および図3には、建築学会PRC指針、土木学会示

表3 平均ひび割れ間隔 $l_{av}$ の比較

試験体記号	実験値 (cm)	計算値 (cm)			
		PRC指針式	土木示方書式	ACI式	CEB-FIP式
NO1	16.2	16.3 (1.01)	13.2 (0.81)	12.9 (0.80)	14.6 (0.90)
NO2, NO2'	14.8, 14.5	14.9 (1.01, 1.03)	12.9 (0.87, 0.89)	13.2 (0.89, 0.91)	14.1 (0.95, 0.97)
NO3	14.9	14.0 (0.94)	12.6 (0.85)	13.5 (0.91)	13.8 (0.93)
NO4	12.7	13.3 (1.05)	12.3 (0.97)	13.7 (1.08)	13.6 (1.07)
NO5	11.7	11.6 (0.99)	10.1 (0.86)	10.8 (0.92)	11.2 (0.96)
NO6	17.6	19.0 (1.08)	15.6 (0.89)	15.6 (0.89)	17.1 (0.97)
NO7	15.2	14.9 (0.98)	12.9 (0.85)	13.2 (0.87)	14.1 (0.93)
NO8	14.3	14.9 (1.04)	12.9 (0.90)	13.2 (0.92)	14.1 (0.99)
NO9	15.5	14.9 (0.96)	12.9 (0.83)	13.2 (0.85)	14.1 (0.91)
NO10	15.2	13.2 (0.87)	12.9 (0.85)	12.2 (0.80)	12.2 (0.80)
NO11	14.5	13.2 (0.91)	12.9 (0.89)	12.2 (0.84)	12.2 (0.84)
NO12, NO12'	14.0, 14.0	14.9 (1.06, 1.06)	12.9 (0.92, 0.92)	13.2 (0.94, 0.94)	14.1 (1.01, 1.01)
NO13, NO13'	14.7, 14.5	14.9 (1.01, 1.03)	12.9 (0.88, 0.89)	13.2 (0.90, 0.91)	14.1 (0.96, 0.97)
NO14, NO14'	15.0, 14.6	14.9 (0.99, 1.02)	12.9 (0.86, 0.88)	13.2 (0.88, 0.90)	14.1 (0.94, 0.97)
NO15, NO15'	15.0, 14.9	14.9 (0.99, 1.00)	12.9 (0.86, 0.87)	13.2 (0.88, 0.89)	14.1 (0.94, 0.95)
NO16, NO16'	14.3, 14.0	14.9 (1.04, 1.06)	12.9 (0.90, 0.92)	13.2 (0.92, 0.94)	14.1 (0.99, 1.01)
NO17, NO17'	14.4, 14.2	14.9 (1.03, 1.05)	12.9 (0.90, 0.91)	13.2 (0.92, 0.93)	14.1 (0.98, 0.99)

注: ( )の数值は計算値/実験値

方書[7]、ACI [8]およびCEB-FIP [9]の計算式による計算値も示す。既往のひび割れ幅

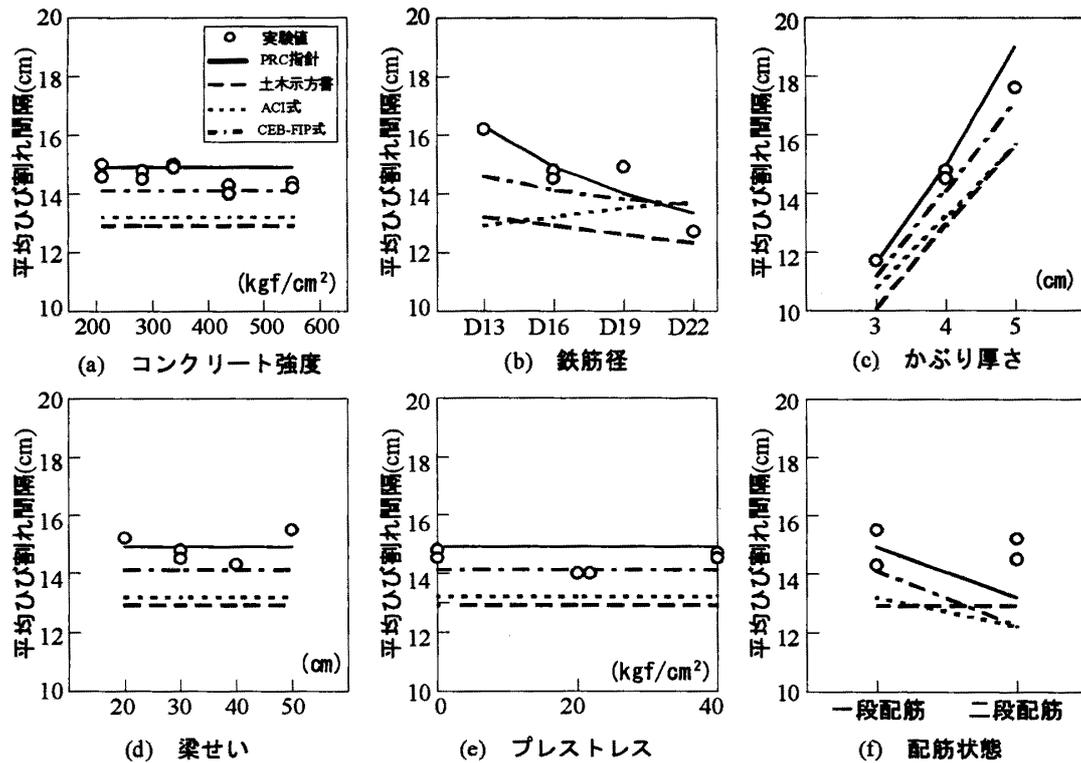


図3 平均ひび割れ間隔と各要因との関係

算定式は圧縮強度200~300kgf/cm<sup>2</sup>程度のコンクリートを対象に導かれ、ひび割れ間隔算定式はコンクリート強度の関数となっていない。図3-(a)をみるとコンクリート強度が大きくなるとlavは僅かに小さくなるが、その変化は無視し得る程度である。これは、最初の曲げひび割れに続くひび割れは主に鉄筋からコンクリート伝達される引張応力によって生じるが、コンクリート強度が大きくなると付着張度も引張強度もともに大きくなり、コンクリートの引張耐力まで引張応力を付着によって鉄筋からコンクリートに伝達するのに必要な距離は変わらないことを示している。

鉄筋径が大きくなるとlavは小さく、またかぶり厚さが大きくなるとlavも大きくなる(図3(b),(c)参照)が、既往の算定式はこのような傾向をとらえている。

梁せいが大きくなると同じ鉄筋応力レベルにおけるひずみ勾配は小さく純引張りの状態に近づき、ひび割れ間隔は広くなることが考えられる[7]。プレストレスが導入されたはりでは、逆に中立軸が下がることからひずみ勾配が大きくなり、ひび割れ間隔が狭くなることが考えられる。図3-(d),(e)からはそのような傾向は認められず、本実験の範囲では部材せいおよびプレストレス量の影響は無視できるといえよう。

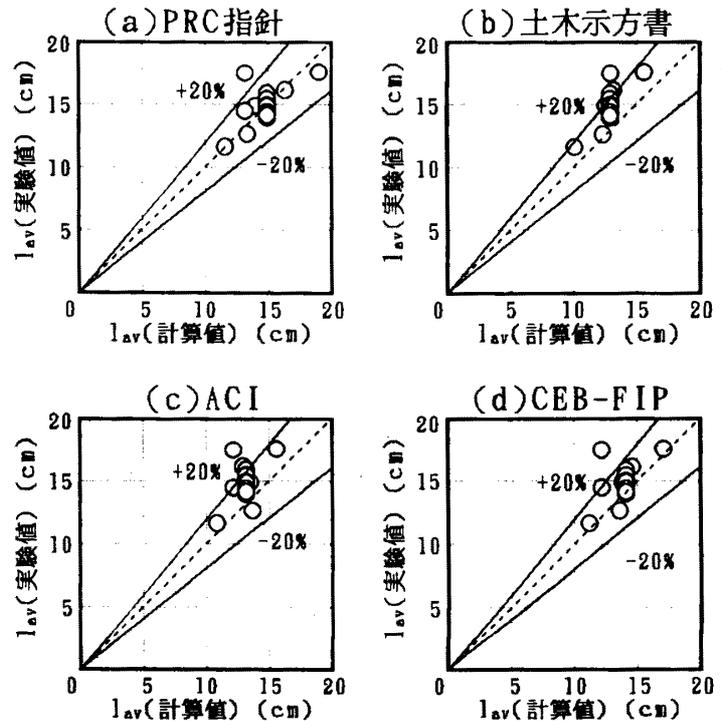


図4 平均ひび割れ間隔lavの実験値と計算値の比較

配筋状態に関しては、一段配筋と二段配筋の平均ひび割れ間隔に大きな差はなく、二段目の鉄筋の影響は小さい。既往の算定式はいずれも二段配筋の平均ひび割れ間隔を実測値より小さく算出している。

平均ひび割れ間隔の実験値と計算値との比較を図4に示す。P R C指針式による計算値の±20%の範囲に実験値がある。

### 3. 3 平均鉄筋ひずみ

鉄筋表面に貼付したストレインゲージにて測定した平均鉄筋ひずみと荷重の関係の1例を図5に示す。同図中の計算値は平面保持の仮定により計算されたひび割れ断面の鉄筋応力をP R C指針解説式の平均鉄筋ひずみ算定式に代入して求めた値である。計算値は実測値とほぼ一致している。

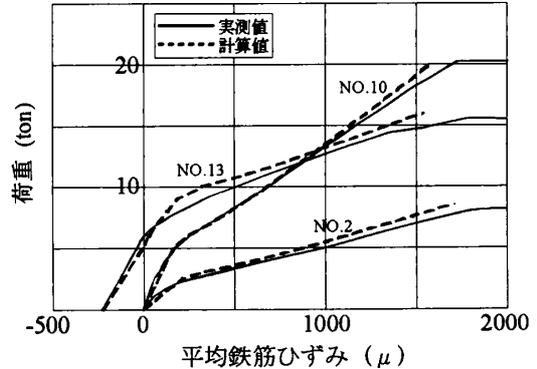


図5 荷重と平均ひずみとの関係

### 3. 4 平均ひび割れ幅

荷重と平均ひび割れ幅との関係の1例を図6に示す。図中の計算値はP R C指針解説式による計算値である。計算値は実測値とよく一致している。

図7-(a)、(b)、(c)、(d)、(e)にひび割れ断面における鉄筋応力計算値が2000kgf/cm<sup>2</sup>の荷重における平

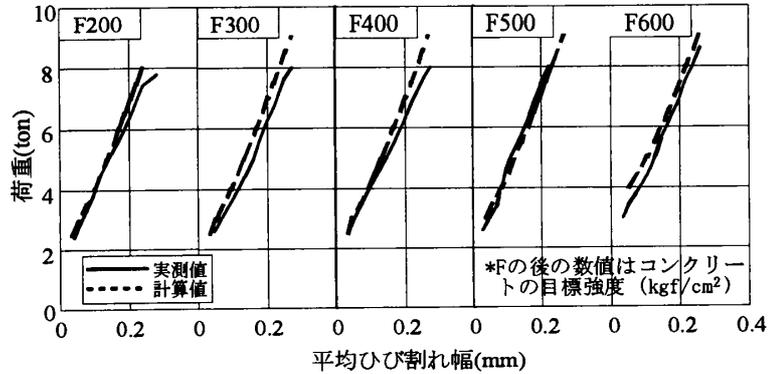


図6 荷重と平均ひび割れ幅との関係

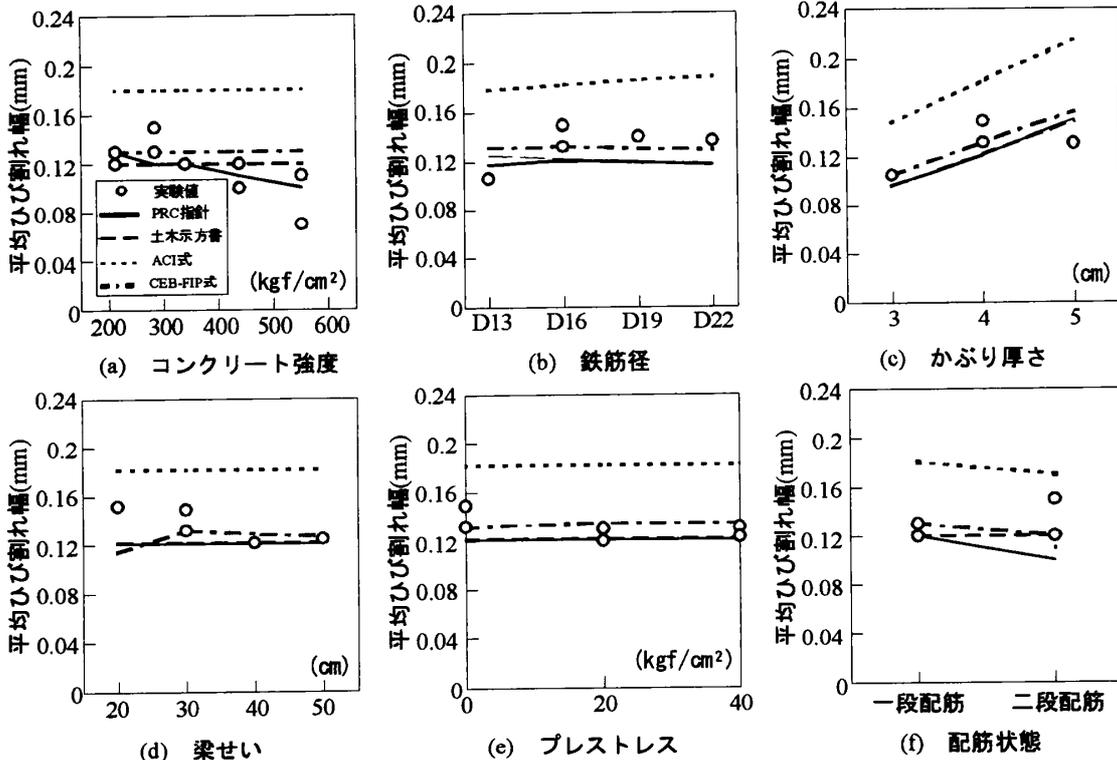


図7 平均ひび割れ幅と各要因との関係

均ひび割れ幅 ( $w_{av}$ ) とそれぞれコンクリート強度、鉄筋径、かぶり厚さ、梁せいおよびプレストレス量の関係を示す。コンクリート強度が大きくなる程  $w_{av}$  は小さくなるが、これはひび割れ間コンクリートの引張分担による引張剛性（テンションスティフニング効果）によるものである。PRC 指針式はその傾向を捉えている。ひび割れ間隔に差異がなかった梁せいの影響が  $w_{av}$  には現れているが、これもテンションスティフニング効果によるものと考えられる。

図 8 に既往の平均ひび割れ幅 ( $w_{av}$ ) 計算式による計算値と実測値との比較を示す。ACI 式がひび割れ幅を過大に算出している他は、実測値は計算値の  $\pm 20\%$  にほぼおさまっている。

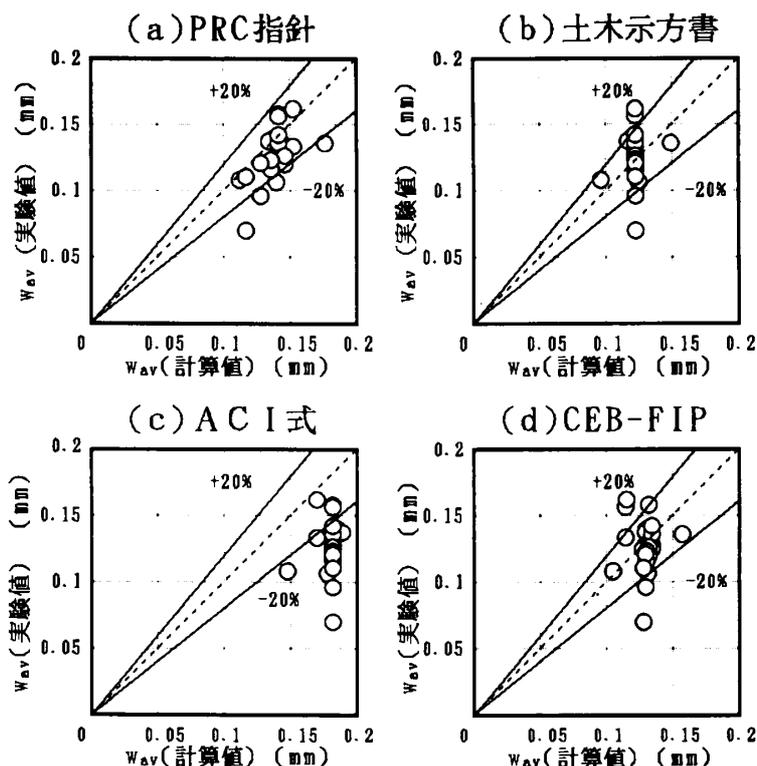


図 8 平均ひび割れ幅  $w_{av}$  の実験値と計算値との比較

#### 4. まとめ

コンクリート強度、部材せい、鉄筋径、かぶり厚さ、プレストレス、および配筋状態の曲げひび割れ間隔とひび割れ幅に及ぼす影響を調べた結果をまとめると以下ようになる。

- 1) ひび割れ間隔に及ぼすコンクリート強度、部材せい、及びプレストレスの影響は小さい。
- 2) 既往のひび割れ間隔算定式が  $500\text{kgf/cm}^2$  クラスの高強度コンクリートにも適用できる。
- 3) コンクリート強度はひび割れ幅に影響を及ぼすが、建築学会 PRC 指針式はその影響を捉えている。ひび割れ幅に及ぼす部材せいの影響は小さい。
- 4) ACI 式を除く既往のひび割れ幅算定式による計算値は実験結果とほぼ一致し、その適合性を確認できた。

**謝辞** 本研究は本学学生岩田樹美君の協力を得て行ったものであり、記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 例えば、日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準
- 2) 例えば、日本建築学会：プレストレス鉄筋コンクリート構造設計・施工指針
- 3) British Code: CP110.
- 4) 鈴木計夫, 大野義照：プレストレス鉄筋コンクリートはりの曲げひび割れ幅に関する研究(その 1), 日本建築学会論文報告集, 第 303 号, 昭和 56 年 5 月, PP. 9~19
- 5) 日本建築学会：プレストレスコンクリート設計施工規準
- 6) 奥島正一, 鈴木計夫, 田村博：PC 及び RC ばりの補強鉄筋量と曲げひび割れ耐力, セメント技術年報, XXV, 昭和 46 年, PP. 394~397
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書 1991
- 8) Building Code Requirements for Reinforced Concrete. ACI 318-83
- 9) CEB-FIP: Model Code for Concrete Structures 1978.