

論文 仮想引張応力度による PRC 部材のひび割れ制御

岩田樹美^{*1}・李 振宝^{*2}・大野義照^{*3}・鈴木計夫^{*4}

要旨: RCおよびPRC部材の曲げひび割れ制御設計の簡便な方法として、ひび割れ幅を算定が容易な仮想引張応力度、すなわちひび割れ発生後もコンクリートの全断面が有効として計算される引張縁応力度に関連づける方法を、各種要因のひび割れ幅に及ぼす影響を調べた実験結果を用いて検討した。その結果、ひび割れ幅と仮想引張応力度の関係が簡単な線形関係で表現でき、両者の関係式を導いた。

キーワード: 仮想引張応力度, PRC, ひび割れ幅, 鉄筋比, 部材せい, かぶり厚, プレストレス

1. はじめに

近年、ひび割れを許す第三種PCあるいはプレストレスト鉄筋コンクリート（以下PRCと略記）部材が普及してきた。このPRCは鉄筋コンクリート（以下RCと略記）とプレストレストコンクリート（以下PCと略記）の中間に位置するもので、RCとPC両方の性質を合わせ持っている。ひび割れを許すRC部材とそれを許さないPC部材の中間にあるPRC部材を最もよく特徴づける力学的性質はひび割れ挙動であってその設計においてはひび割れ幅の算定が主要な役割を持っている。

そのPRC部材のひび割れ幅算定式としてひび割れ断面の鉄筋応力を基に計算する方法の一つが日本建築学会PRC指針・同解説[1]に採用されているが、平均鉄筋ひずみおよびひび割れ間隔の複雑な計算が必要で、より簡便なひび割れ幅の検討方法が望まれる。

一方、PCでは常時荷重に対する設計はコンクリートの縁応力の検討でなされている[2]。そこで、PRCにおいてもひび割れが生じた後もひび割れが生じていないとし、PCと同じように全断面有効として(1)式により計算されるコンクリートの縁応力（仮想引張応力度と呼ばれている）でもってひび割れ制御設計を行う方法が考えられる。

$$\sigma_f = \frac{M}{Z} - \left(\frac{P}{A} + \frac{P \cdot e}{Z} \right) \quad (1)$$

ここに、M：使用荷重による曲げモーメント、P：有効プレストレス力（RCの場合P=0）、e：PC鋼材の偏心距離、A：部材の断面積、Z：断面係数

この方法は、許容ひび割れ幅に対応する許容仮想引張応力度が分かればひび割れ耐力の検討と同じ方法でひび割れ幅の検討ができることから極めて有用な方法と言えよう。また、(1)式においてP=0とおくことによってRC部材にも適用できる。英国の規準CP-110[3]にはこの方法が用いられている。同規準ではコンクリート強度、普通鉄筋量、部材せいの影響が考慮されているが、ひび割れ幅に密接な関係を持っているコンクリートのかぶり厚さなどが考慮されていない。

前報[4]ではRCおよびPRC梁の曲げ載荷実験を行い、ひび割れ幅に及ぼす各種要因の影響

*1 大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻（正会員）

*2 大末建設（株）設計部、工博（正会員）

*3 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）

について調べた。本報ではRCとPRCとの違いはプレストレスの有無なのでその効果は平均プレストレス σ_g で考慮する事にし、前報の全ての梁の実験結果を用い、ひび割れ幅と仮想引張応力度との関係を調べその実験式を導き、仮想引張応力度によるひび割れ幅制御設計の可能性について検討した。

2. ひび割れ幅と仮想引張応力度との関係

本節では梁の実験結果に基づき、各種要因のひび割れ幅と仮想引張応力度との関係に及ぼす影響を調べその実験式を導く。

2.1 実験概要

本報で用いた試験体は表1に示すように鉄筋比、かぶり厚さ、梁せい、プレストレス量、コンクリート強度を実験要因としたRC18体、PRC4体、計22体である。試験体の断面は図1に示すような長方形断面である。コンクリートは普通ポルトランドセメントまたは早強ポルトランドセメント、山砂、海砂および碎石を用いたレディミクストコンクリートで、鉄筋はSD345を、PC鋼棒はC種の $\phi 11$ および $\phi 15$ を用いた。PC鋼材はアンボンドで核半径($d_p=20\text{cm}$)に配置し載荷直前にプレストレスを導入した。載荷は単調加力でコンクリート材令13~27日に行った。なお、詳細は文献[4]を参照されたい。

表1 試験体の種類

試験体番号	断面寸法 b×D (cm)	かぶり厚さc (cm)	普通鉄筋 [pt(%)]	目標圧縮強度[実強度] (kgf/cm ²)	緊張材 (mm)	プレストレス σ_g^* (kgf/cm ²)	備考 (実験要因)
NO.1	15×30	4	2-D13[0.67]	300[284]	-	0	鉄筋比
NO.2	15×30	4	2-D16[1.05]	300[284]	-	0	
NO.3	15×30	4	2-D19[1.53]	300[284]	-	0	
NO.4	15×30	4	2-D22[2.07]	300[284]	-	0	
NO.5	13×29	3	2-D16[1.21]	300[284]	-	0	かぶり厚さ
NO.6	17×31	5	2-D16[0.93]	300[284]	-	0	梁せい
NO.7	15×20	4	2-D16[1.75]	300[284]	-	0	
NO.8	15×40	4	2-D16[0.75]	300[284]	-	0	
NO.9	15×50	4	2-D16[0.59]	300[284]	-	0	
NO.12	15×30	4	2-D16[1.05]	300[284]	$\phi 11$	20	プレストレス量
NO.13	15×30	4	2-D16[1.05]	300[284]	$\phi 15$	40	
NO.14	15×30	4	2-D16[1.05]	200[212]	-	0	コンクリート強度
NO.15	15×30	4	2-D16[1.05]	400[340]	-	0	
NO.16	15×30	4	2-D16[1.05]	500[439]	-	0	
NO.17	15×30	4	2-D16[1.05]	600[552]	-	0	

*平均プレストレス $\sigma_g = P/A$ 、P：プレストレス力、A：コンクリート断面積

試験体 NO.2,12~17 は各2体ずつ作成

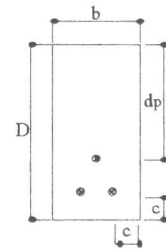


図1 断面図

2.2 コンクリート強度の影響

図2にコンクリート強度の異なる試験体の仮想引張応力度 σ_f と平均ひび割れ幅 w_{av} との関係を示す。 σ_f は(1)式により求めた値で w_{av} は実測値である。コンクリート強度が大きくなるに従い、曲げ強度の上昇に伴いひび割れ発生点における仮想引張応力度が大きくなっている。その後の σ_f-w_{av} 関係はほぼ線形関係を示し、またコンクリート強度に関係なく傾きはほぼ同じである。そこで σ_f と w_{av} の関係は(2)式で表現でき、コンクリート強度の影響は σ_{f0} の項で考慮される。

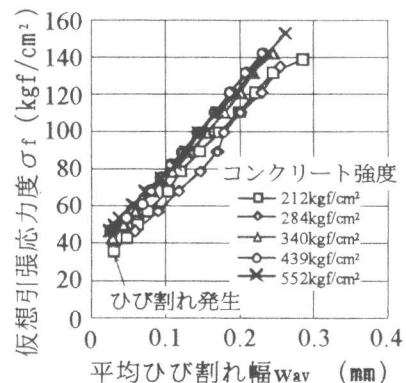


図2 σ_f-w_{av} 関係 (コンクリート強度の影響)

$$\sigma_f = \sigma_{f0} + k w_{av} \quad (2)$$

ここに、 σ_{f0} はひび割れ発生後の σ_f-w_{av} 関係を直線に置換したとき、その直線と σ_f 軸との交点で、kは近似直線の傾きである。

前報で報告したようにひび割れモーメント M_{cr} はコンクリートの曲げ強度 $\sigma_{tb} = 1.8\sqrt{F_c}$ および下縁プレストレス σ_p を用いた計算値 $(\sigma_{tb} + \sigma_p)Z$ とよく対応していることから理解されるように、ひび割れ発生点における仮想引張応力度は $\sigma_{tb} + \sigma_p$ とほぼ一致する。 σ_{f0} と σ_{tb} を対応させるため本実験における $\sigma_{f0} - \sigma_p$ の σ_{tb} に対する比率を整理するとその平均値は 0.84 (変動係数 0.37) となるので、 $\sigma_{f0} = 0.8\sigma_{tb} + \sigma_p$ とした。

k にはコンクリート強度は影響しないが、後述のように引張鉄筋比やかぶり厚さ等は大きく影響するので次項からそれらの影響について調べる。

2.3 引張鉄筋比の影響

図3に引張鉄筋比が異なる試験体の仮想引張応力度と平均ひび割れ幅との関係を示す。ひび割れ発生点における σ_f の値はほぼ同じであるが、その後の $\sigma_f - w_{av}$ 関係はほぼ直線であつ鉄筋比が大きくなるに従い $\sigma_f - w_{av}$ 関係の傾きは大きくなる。これは鉄筋量が異なってもあるひび割れ幅に対する鉄筋応力はほぼ同じであり、鉄筋量が多いほど曲げモーメントが大きくなるためである。この傾き $(\sigma_f - \sigma_{f0}) / w_{av}$ と鉄筋比 p_t との関係を整理事ると、図4に示すように両者の関係はほぼ線形関係になることが分かる。図中の実線は最小二乗法によって求めた(3)式で、これを鉄筋比の影響係数 k_1 とする。

$$k_1 = 508p_t - 97.1 \quad (3)$$

ここに、 p_t : 引張鉄筋比 (%)

2.4 部材せいの影響

図5に部材せいの異なる試験体の仮想引張応力度と平均ひび割れ幅との関係を示す。ひび割れ発生点の σ_f の値はほぼ同じであるが、その後の傾きは部材せいが大きくなるほど小さくなっている。これは当該試験体の鉄筋量が同じであることから部材せいが大きくなるに従い鉄筋比が小さくなるためである。

この鉄筋比の影響を考慮して $(\sigma_f - \sigma_{f0}) / k_1 w_{av}$ と部材せいとの関係を整理事ると、図6に示すように $(\sigma_f - \sigma_{f0}) / k_1 w_{av}$ は部材せいの増大と共にほぼ直線的に増加することが分かる。図中の実線

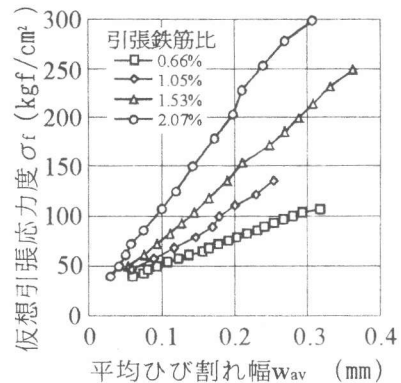


図3 $\sigma_f - w_{av}$ 関係 (鉄筋比の影響)

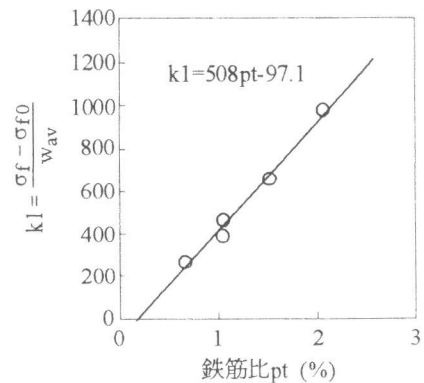


図4 $k_1 - p_t$ 関係

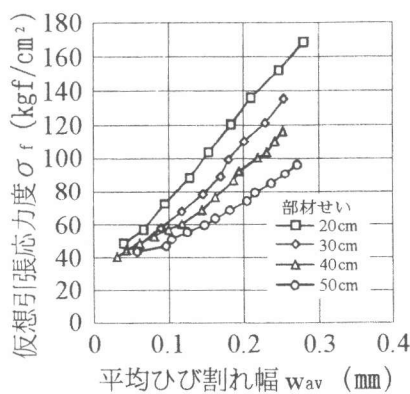


図5 $\sigma_f - w_{av}$ 関係 (部材せいの影響)

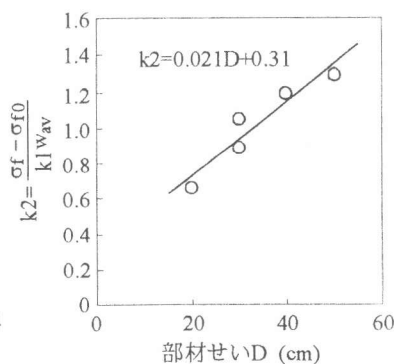


図6 $k_2 - D$ 関係

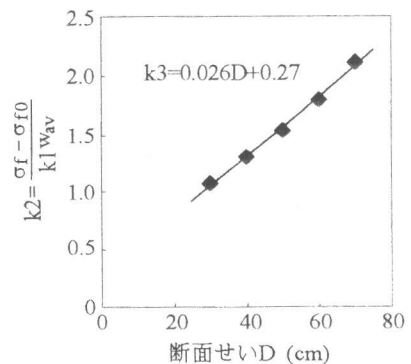


図7 $k_2 - D$ 関係 (梁幅 $b=30\text{cm}$)

は最小二乗法によって求めた(4)式でこれを部材せいの影響係数 k_2 とする。

$$k_2 = 0.021D + 0.31 \quad (4)$$

ここに、 D ：部材せい(cm)

以上の部材せいについての検討は幅15cm、せい20~50cmの断面についての結果である。幅30cm、せい30~70cmの断面について日本建築学会P R C指針に提示されているひび割れ幅算定式（以下P R C指針式と略記）を用いて同じように検討した結果を図7に示すが、部材せいの影響係数 k_2 と D の関係は(4)式とほぼ一致している。

2.5 かぶり厚さの影響

図8にかぶり厚さの異なる試験体の仮想引張応力度 σ_f と平均ひび割れ幅 w_{av} との関係を示す。 σ_f - w_{av} 関係の傾きをかぶり厚さが小さいほど大きくなっている。これはかぶり厚さが小さいとひび割れ分散性がよくなり、ひび割れ間隔が小さくなって同じひび割れ幅に対して鉄筋応力が大きくなることによる。これに部材せいの影響も考慮して $(\sigma_f - \sigma_{f0}) / k_1 k_2 w_{av}$ とかぶり厚さ c との関係を整理したものを図9中に○印で示す。また同図中にP R C指針式により同じように検討した結果も◆印で合わせて示す。 k_1 、 k_2 は $c=4\text{cm}$ を基準にした係数で $c=5\text{cm}$ の試験体についての $(\sigma_f - \sigma_{f0}) / k_1 k_2 w_{av}$ 値が1であることはないと考え、またP R C指針式による計算値の傾向を考慮して、 $c=5\text{cm}$ の実験値を除く他の3体の実験値を用いて求めた(5)式を実線で図中に示す。これをかぶり厚さの影響係数 k_3 とする。

$$k_3 = -0.31c + 2.28 \quad (5)$$

ここに、 c ：かぶり厚さ(cm)

2.6 プレストレスカの影響

図10に導入プレストレス力の異なる試験体の仮想引張応力度と平均ひび割れ幅との関係を示す。ひび割れ発生点については導入プレストレスの程度によりDecompression（下縁（引張縁）のコンクリート応力が0の時点）モーメントに対する引張縁応力度 σ_p の分だけ大きくなっている。この影響はコンクリートの曲げ強度に引張縁応力度 σ_p を加えることにより考慮できる。その後の σ_f - w_{av} 関係の傾きについては導入プレストレス力が大きいものほど、若干大きくなっている。これはP C鋼材応力の増加および荷重の増大に伴う中立軸の上昇により同じひび割れ幅に対して曲げモー

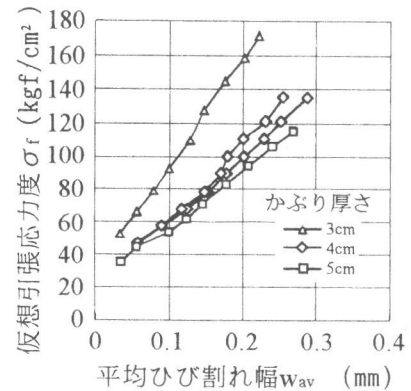


図8 σ_f - w_{av} 関係（かぶり厚さの影響）

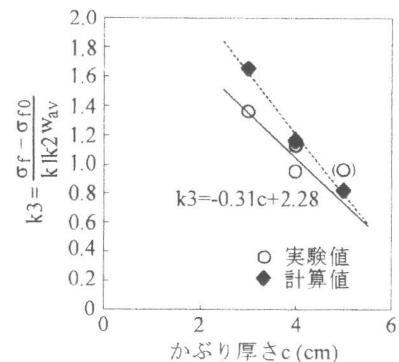


図9 k_3 - c 関係

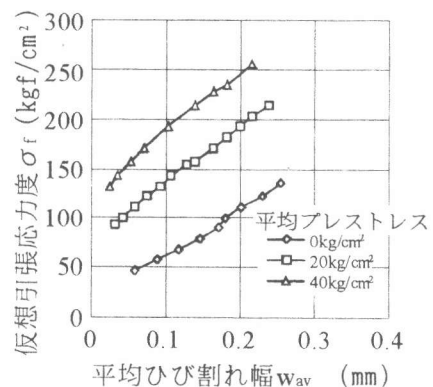


図10 σ_f - w_{av} 関係（プレストレスの影響）

ントが大きくなっているためである。この傾き $(\sigma_f - \sigma_{f0}) / k_1 k_2 k_3 w_{av}$ と平均プレストレス σ_g との関係を図11に示す。両者の関係もほぼ線形関係と見なせるので直線近似して求めた(6)式を図中に実線で示す。これをプレストレスの影響係数 k_4 とする。

$$k_4 = 0.01\sigma_g + 1 \quad (6)$$

ここに、 σ_g ：平均プレストレス(kgf/cm²)

以上をまとめて、仮想引張応力度 σ_f と平均ひび割れ幅 w_{av} との関係を改めて示すと次のような算定式を得る。

$$\sigma_f = \sigma_{f0} + k w_{av} \quad (7)$$

ここに、 $\sigma_{f0} = 0.8\sigma_{tb} + \sigma_p$ 、 $k = k_1 k_2 k_3 k_4$

図12に平均ひび割れ幅に対する(7)式で求めた仮想引張応力度の算定値と実験値との比較の一例を示す。算定値と実験値はよく一致している。なお同図にはP R C指針式によるひび割れ幅計算値から求めた仮想引張応力度も計算値として示している。

図13に本実験の22体の試験体について平均ひび割れ幅が0.2mmにおける仮想引張応力度の(7)式による算定値と実験値との関係を示す。算定値は実験値の±20%の範囲内に収まり実験値との対応は良好である。

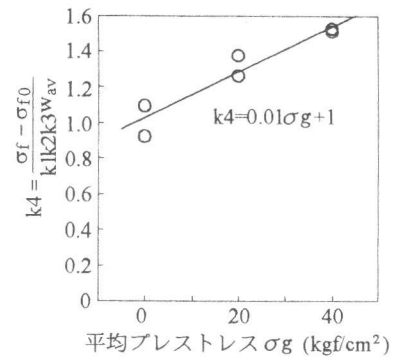


図11 $k_4 - \sigma_g$ 関係

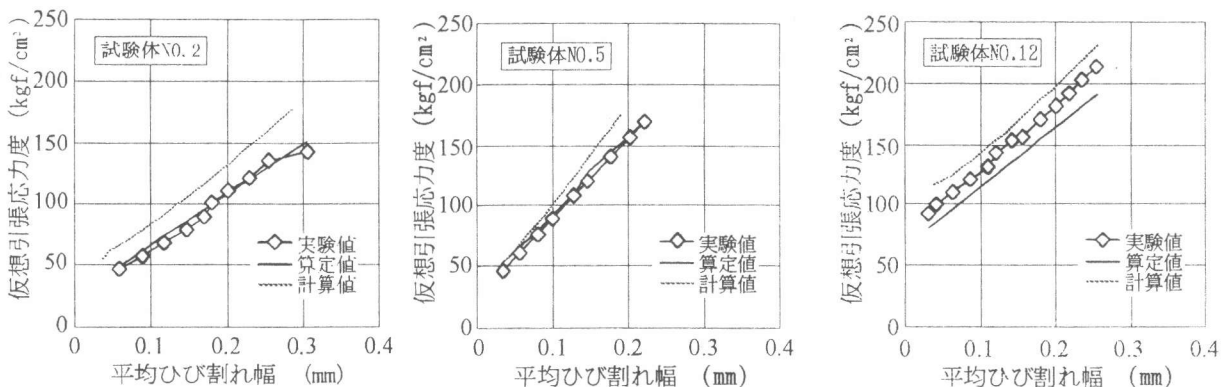


図12 $\sigma_f - w_{av}$ 関係の比較

3. 算定式の適用性

算定式(7)は断面が15×30cmの小さい試験体を中心に得られた式であるので実部材のような大きな断面に対して算定式が適用できるか確かめる必要がある。実部材のモデル断面としてP R C指針解説[1]の設計例からR C部材2つ、P R C部材4つを採り上げ、これらの断面について仮想引張応力度と平均ひび割れ幅との関係の、算定式(7)による算定値(◇)、P R C指針式から求めた計算値(○)、および英国規準CP-110による値(▲)を合わせて図14に示す。なお、算定式(7)式中の σ_{f0} 項の σ_{tb} の係数0.8は比較的小さい試験体から求めた値で、断面が大きくなるに伴い、ひび割れ幅に影響するコンクリートの有効引張断面積[1]の全断

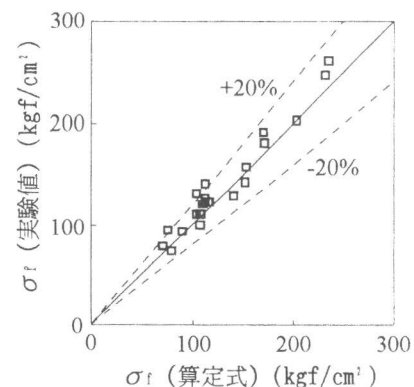


図13 σ_f の実験値と算定値の比較

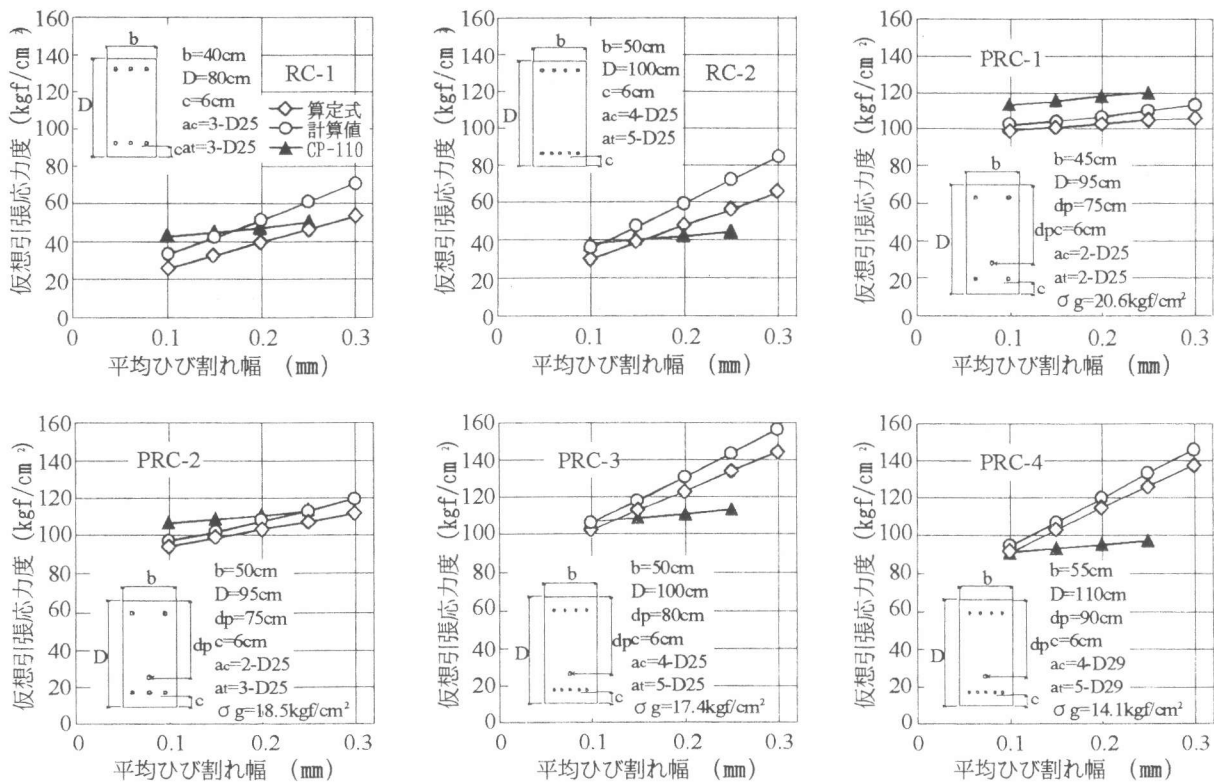


図 14 σ_f - w_{av} 関係 (実部材との比較)

面積に占める割合が低下し、相対的にコンクリートの協力度が減少することなどにより σ_{f0} は低下するので $1/2$ の 0.4 とした。

本報の算定法は P R C 指針式による計算値をよく捉えている。CP-110 の仮想引張応力度はひび割れ幅の増加に対する仮想引張応力度の増分が少なく、特に P R C-3, 4 の様な比較的普通鉄筋の多い場合には算定値と大きく異なり普通鉄筋のひび割れ制御効果を過小評価している。

4. まとめ

コンクリート強度、引張鉄筋比、部材せい、かぶり厚さ、およびプレストレス力が、仮想引張応力度と平均ひび割れ幅との関係に及ぼす影響について調べ、これらの影響を考慮した仮想引張応力度と平均ひび割れ幅との関係式{(7)式}を導いた。この式ではコンクリート強度は曲げ強度で引張鉄筋比等は影響係数で考慮されている。その適用性について R C および P R C 梁の実験結果(図12、13)および実部材のモデル断面を用いて検証した(図14)。

参考文献

- 1) 日本建築学会：プレレスト鉄筋コンクリート構造設計・施工指針・同解説
- 2) 日本建築学会：プレレストコンクリート設計施工規準・同解説
- 3) British Code:CP-110
- 4) 劉 鍵・大野義照・李 振宝・鈴木計夫：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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、N0.2、pp1019~1024、1995