プレストレスト鉄筋コンクリート曲げ部材における ひび割れ幅と仮想引張応力度との関係

RELATIONSHIP BETWEEN CRACK WIDTH AND HYPOTHETICAL TENSILE STRESS OF PARTIALLY PRESTRESSED CONCRETE MEMBERS

李文英^{*1}, 大野義照^{*2}, 尚自端^{*1}

Wenying LI, Yoshiteru OHNO and Ziduan SHANG

The estimation of crack width is one of the most important tasks in designing partially prestressed concrete (PPC) members. However, this task, which includes calculation of crack spacing, average steel stress etc., is very tedious using current existing procedures. In this paper, relationship between crack width and hypothetical tensile stress was derived in order to simplify control of crack width in reinforced concrete and PPC members. The hypothetical tensile stress is calculated on the assumption that the entire section is still effective even after cracking has occurred. The instantaneous and long-term crack widths are calculated by using the PPC Recommendation of Architectural Institute of Japan. Factors which had been taken into account in developing procedure of this method are: concrete strength, ratio of reinforcement, depth of beam, concrete cover depth, prestress, shrinkage and creep.

Keywords: hypothetical tensile stress, crack width, PPC member, RC member

仮想引張応力度, ひび割れ幅, プレストレスト鉄筋コンクリート, 鉄筋コンクリート

1. はじめに

コンクリート構造物では耐久性などの観点から、ひび割れ幅の制御が直接、あるいは間接的にに行われている。直接ひび割れ幅を計算して制御する場合は、曲げモーメントから鉄筋応力を計算し、次に平均鉄筋ひずみを求め、さらに配筋状態を考慮してひび割れ間隔を求める必要があり、複雑で面倒な計算を要する^{1), 2)}。

一方、プレストレスト鉄筋コンクリート (PRC) 部材の曲げひび割れ幅制御の簡便な方法として、ひび割れ幅と仮想引張応力度 (ひび割れ発生後も、全断面が有効として計算される引張縁応力度) とを関連づける方法がある。建築学会のプレストレストコンクリート (PC) 設計施工規準・同解説³⁾ における PC 部材の長期応力に対する設計は、フルプレストレスの場合引張縁の応力度は零以下、パースシャルプレストレスの場合引張応力度は設計基準強度の 1/30 程度以下に制御するように引張縁応力度の検討でなされるが、仮想引張応力度による方法はその延長上に位置するものである。また、建築学会プレストレスト鉄筋コンクリート (Ⅲ種 PC) 構造設計・施工指針・同解説¹⁾ (以下 PRC 指針と略記) では、この方法の考えを一部取り入れ、Ⅲ t、Ⅲ tb という種別を設けている。すなわちコンクリートの引張応力度を引張強度あるいは曲げ引張強度まで許容し、その応力度に見合う鉄筋を用心筋として配置してひび割れが生じた場合、

その幅を 0.1 mm 以下に制御しようとするものである。

イギリスの規準 CP110⁴⁾ でも仮想引張応力度法が用いられている。そこでは仮想引張応力度にコンクリート強度、部材せいおよび鉄筋比が考慮されているが、曲げひび割れ幅と密接な関係を持っているコンクリートのかぶり厚さや配筋状態、プレストレスなどは考慮されていない。

本報では、PRC 指針解説の曲げひび割れ幅算定式を用いて、曲げひび割れ幅と仮想引張応力度との関係を求め、コンクリート強度、引張鉄筋比、鉄筋中心間隔、鉄筋径、コンクリートのかぶり厚さ、プレストレス、付着クリープ、乾燥収縮などの仮想引張応力度に対する影響を調べ、これらをパラメータとする初期 (瞬時) 及び長期ひび割れ幅と仮想引張応力度との関係式を導いた。

2. 仮想引張応力度とひび割れ幅との関係

2.1 仮想引張応力度の定義

仮想引張応力度 σ_f は、ひび割れが生じた後もひび割れが生じていないと仮定して、次式により計算される曲げ部材の引張縁応力度である。

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

^{*1} 大阪大学大学院工学研究科建築工学専攻 大学院生

^{*2} 大阪大学大学院工学研究科建築工学専攻 教授・工博

Graduate Student, Dept. of Architectural Engineering, The Graduate School of Engineering, Osaka Univ.
Prof., Dept. of Architectural Engineering, The Graduate School of Engineering, Osaka Univ., Dr. Eng.

ここに、

M : 作用曲げモーメント
 P : 有効プレストレス力
 e : PC 鋼材重心から断面重心軸までの距離
 A : 断面積
 Z : 引張縁の断面係数

(1) 式は PRC 部材の算定式で、RC の場合 $P=0$ となる。

2.2 仮想引張応力度の算出

ひび割れ幅 W_{av} に対応する仮想引張応力度 σ_f は次のようにして求めた。ひび割れ幅 W_{av} に対するひび割れ断面の鉄筋応力度 σ_t を算出し、鉄筋応力度 σ_t から抵抗曲げモーメント M を求め、その M を式 (1) に代入して σ_f を算出する。以下に用いた計算式などを述べる。

1) 鉄筋応力度 σ_t の算出

・初期(瞬時)平均ひび割れ幅 W_{av} に対する鉄筋応力度 σ_t

PRC 指針解説のひび割れ幅算定式から、初期(瞬時)ひび割れ幅 W_{av} に対するひび割れ断面における鉄筋応力度 σ_t の計算式として次式が得られる。

$$\sigma_t = \frac{W_{av}}{l_{av}} \cdot E_s + \frac{F_t}{p_e (2 \times 10^3 W_{av} / l_{av} + 0.8)} \quad (2)$$

ここに、

l_{av} : 平均ひび割れ間隔
 E_s : 鉄筋のヤング係数
 F_t : コンクリート引張強度
 p_e : 有効引張鉄筋比¹⁾

・長期ひび割れ幅 W_{av} に対する鉄筋応力度 σ_t

ひび割れ幅は、鉄筋とコンクリート間の付着クリープによってコンクリートの協力作用が減少し平均鉄筋ひずみが増加することやひび割れ間コンクリートの乾燥収縮によって時間の経過とともに増加する^{5), 6), 7)}。これらの要因を考慮した長期ひび割れ幅の計算式⁷⁾ から、長期ひび割れ幅 W_{av} に対する鉄筋応力度 σ_t の計算式として(2') 式が得られる。

$$\sigma_t = \frac{w_{av} - \varepsilon_{sh} l_{av}}{l_{av}} \cdot E_s + Cr \cdot \frac{F_t}{p_e [2 \times 10^3 (w_{av} - \varepsilon_{sh} l_{av}) / l_{av} + 0.8]} \quad (2')$$

ここに、 ε_{sh} : ひび割れ間コンクリートの乾燥収縮ひずみ

Cr : 付着クリープによるコンクリートの協力作用の減少を評価する係数(初期の協力作用に対する比率)であり、初期ひび割れ幅で付着クリープが生じていない場合は $Cr = 1$ 、長期ひび割れ幅で付着クリープにより協力作用が 50% に減少した時は $Cr = 0.5$ である。

2) 鉄筋応力度 σ_t に対応する曲げモーメント M の算出

1) で求めた鉄筋応力度 σ_t に対応する曲げモーメント M は次式により計算される。

$$M = \frac{\sigma_t}{n_s (d - x)} (I_{cz} + n_s I_{scx} + n_p I_{px} + n_s I_{sx}) + P(d_p - x) \quad (3)$$

ここに、

x : 圧縮縁から中立軸位置までの距離
 n_s : 鉄筋のヤング係数のコンクリートのヤング係数に対する比
 n_p : PC 鋼材のヤング係数のコンクリートのヤング係数に対する比

$I_{cx} = bx^3/3$: 圧縮側コンクリートの中立軸に関する断面 2 次モーメント

$I_{scx} = a_c (x - d_c)^2$: 圧縮鉄筋の中立軸に関する断面 2 次モーメント

$I_{px} = a_p (d_p - x)^2$: PC 鋼材の中立軸に関する断面 2 次モーメント

$I_{sx} = a_t (d - x)^2$: 引張鉄筋の中立軸に関する断面 2 次モーメント

b : はり幅
 a_c : 圧縮鉄筋断面積
 a_p : PC 鋼材断面積
 a_t : 引張鉄筋断面積

曲げモーメント M を (1) 式に代入すると、ひび割れ幅 W_{av} に対応する仮想引張応力度 σ_f が求まる。

3. 基準モデル断面とパラメータ

3.1 基準モデル断面

基準モデル断面を PRC 指針の設計例を参考にして図 1 に示すような長方形断面とする。鉄筋は異形鉄筋とする。

$b=40\text{cm}$, $D=80\text{cm}$,
 $F_c=300\text{kgf/cm}^2$, $c=5\text{cm}$,
 $A_t=20.28\text{cm}^2$
 $(4\text{-D}25, p_t=0.69\%)$,
 $s=9.17\text{cm}$, $n=4$,
 $\sigma_g=0\text{ kgf/cm}^2$

図 1 基準モデル断面

3.2 パラメータ

- 1) コンクリート強度 F_c : 200, 300, 400, 500, 600 kgf/cm²
- 2) 引張鉄筋比 p_t 、鉄筋直径 ϕ および鉄筋本数 n : 異形鉄筋の呼び名 19, 22, 25, 29, 32mm、鉄筋本数 2 本から鉄筋中心間隔の制限(呼び名の数値の 1.5 倍以上)から決まる一段配置可能本数。
- 3) 部材せい D : 30cm ~ 120cm
- 4) コンクリートのかぶり厚さ c : 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 cm
- 5) 平均プレストレス σ_g : 0, 10, 20, 30, 40 kgf/cm²
- 6) 乾燥収縮ひずみ ε_{sh} : 0, 1, 2, 3, 4 ($\times 10^{-4}$)
- 7) 付着クリープによるコンクリートの協力作用の時間的減少 Cr : 1.0 ~ 0

以上の基準モデル断面及びパラメータを用いて各種要因を考慮した $W_{av} - \sigma_f$ 関係を導いた。

4. 誘導過程及び結果

4.1 誘導過程

4.1.1 基準断面

基準モデル断面の $W_{av} - \sigma_f$ 関係は図2のようになり、この関係を(4)式の1次式で表すことにし定数を最小二乗法にて求めると(5)式が得られた。

$$\sigma_f = k w_{av} + \sigma_{f0} \quad (4)$$

$$\sigma_f = 349 w_{av} + 10.1 \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (5)$$

図2 基準モデル断面の $W_{av} - \sigma_f$ 関係

基準モデル断面の $W_{av} - \sigma_f$ 関係を基にし、各パラメータの影響係数を求めるために式(4)を次のように表す。

$$\sigma_f = k \sigma_{f0s} \frac{1}{w_{av0}} w_{av} + \sigma_{f0} \quad (6)$$

$$k = k_1 k_2 k_3 \dots$$

$$\sigma_{f0s} = 34.9 \text{ kgf/cm}^2$$

$$w_{av0} = 0.1 \text{ mm}$$

$$\sigma_{f0} = \sigma_{f0i} m_1 m_2 m_3 \dots$$

$$\sigma_{f0i} = 10.1 \text{ kgf/cm}^2$$

k_1, k_2, k_3 などは各パラメータの一次式(6)の傾きへの影響係数である。 σ_{f0s} 、 σ_{f0i} はそれぞれ基準モデル断面のひび割れ幅 $W_{av}=0.1\text{mm}$ のときの傾きおよび縦軸切片である。 m_1, m_2, m_3 などは各パラメータの切片への影響係数である。

4.1.2 コンクリート圧縮強度

基準断面において、コンクリート圧縮強度のみを変化させて、コンクリート圧縮強度の $W_{av} - \sigma_f$ 関係への影響を調べた結果、図3のような関係が得られた。

この関係を1次式で近似しコンクリート圧縮強度の直線の傾きと縦軸切片への影響をみると、切片への影響は大きい傾きへの影響は小さい。そこで、コンクリート引張強度 F_t と切片との関係を調べると、図4のように線形関係が得られた。これを最小二乗法により近似し、コンクリート引張強度による影響係数 $m_{(Ft)}$ を求めた。なお、コンクリートの引張強度は圧縮強度の0.07倍としている¹⁾。

$$m_{(Ft)} = 1.03 F_t' - 0.03$$

$$\text{ここで, } F_t' = \frac{F_t}{F_{t0}} = \frac{F_t}{21}$$

図3 コンクリート圧縮強度と $W_{av} - \sigma_f$ 関係

図4 $m_{(Ft)}$ と F_t' の関係

4.1.3 引張鉄筋

基準モデル断面において鉄筋の呼び径 ϕ と本数 n を変化させて求めた $W_{av} - \sigma_f$ 関係を図5に示す。

図5 鉄筋径 ϕ 及び本数 n と $W_{av} - \sigma_f$ 関係

この関係を一次式に近似し、その傾きと鉄筋比 P_t との関係を鉄筋径 ϕ 毎に整理すると図6が得られた。図6において各線の傾きはほぼ等しく、縦軸の切片が鉄筋径 ϕ によって異なることを考慮して次式を得た。

図6 p_t , ϕ の傾きへの影響

$$k_s = 2.15p_t - 0.70\phi' + 0.22$$

$$\text{ここに } p_t = 100a_t/bd \quad (\%)$$

$$\phi' = \frac{\phi}{\phi_0} = \frac{\phi}{2.5}$$

また、図5の直線の切片に対する影響は図7のように線形関係になり、これを最小二乗法により近似し、次の切片への影響係数を得た。

$$m_s = -0.12n + 1.5$$

4.1.4 部材せい及びコンクリートかぶり厚さの影響

コンクリート圧縮強度の影響の検討と同様な方法を用いて、部材せい D 及びコンクリートかぶり厚さ c の影響を調べ、以下のような関係式を得た。

$$k_D = 0.69D + 0.31$$

$$k_c = -0.76c' + 1.76$$

$$m_c = 1.2c' - 0.2$$

$$\text{ここに, } c' = \frac{c}{c_0} = \frac{c}{5}$$

$$D' = \frac{D}{D_0} = \frac{D}{80}$$

4.1.5 プレストレスの影響

プレストレスに関連している要因はPC鋼材の断面積、プレストレス力 P 及びPC鋼材の偏心距離 e である。PC鋼材の断面積はひび割れ間隔及び鋼材の応力増分に影響するが、併用されている鉄筋の影響に比べて、その影響は小さい¹⁾。すなわち、PC鋼材の断面積の仮想応力度への影響は小さいので無視できる。プレストレス力 P 及びPC鋼材偏心距離 e の影響を調べるため、次の検討を行った。

式(1)に式(3)を代入すると、次式が得られる。

$$\sigma_f = \frac{\sigma_f}{Z \cdot n_s(d-x)} (I_{cz} + n_s I_{scx} + n_p I_{px} + n_s I_{sx}) + P(d_p - x)/Z - \left(\frac{P}{A} + \frac{Pe}{Z} \right) \quad (7)$$

$$\text{ここに } Z = bD^2/6, \quad A = bD, \quad d_p = D/2 + e$$

(7)式を整理すると次式が得られる。

図7 n の切片への影響

$$\sigma_f = \frac{\sigma_f}{Z \cdot n_s(d-x)} (I_{cz} + n_s I_{scx} + n_p I_{px} + n_s I_{sx}) + \frac{2P}{A} - \frac{Px}{Z} \quad (8)$$

(8)式でプレストレスに関連しているのは中立軸位置 x 及びプレストレス力 P のみである。PC鋼材断面積の影響は小さいので無視すると、中立軸位置 x はPC鋼材偏心距離 e に影響されない。このことから、仮想引張応力度はPC鋼材偏心距離 e とは関係がなく、プレストレス力だけの影響を受けるといえる。

平均プレストレス ($\sigma_g = P/A$) の $W_{av} - \sigma_f$ 関係への影響を調べると図8のようになり、この関係を最小二乗法によって線形近似した。傾きに対する影響は小さく、切片に対する影響は図9のようになり、同図から次の関係式が得られた。

$$\Delta mp = 1.0 \sigma_g$$

この関係は基準モデル断面において得られた結果であり、基準モデル断面の鉄筋量は一般のPRC断面に対しては大きめと考えられるので、基準モデル断面において鉄筋を徐々に減少させて、プレストレス力による切片への影響を調べ、以下のような結果を得た。

$$2\phi 2.5 (p_t = 0.36\%) : \quad \Delta mp = 1.2 \sigma_g$$

$$2\phi 2.2 (p_t = 0.26\%) : \quad \Delta mp = 1.3 \sigma_g$$

通常のPRC断面の鉄筋量を考慮して、簡単化のためにプレストレスによる切片に対する影響を以下のようにする。

$$\Delta mp = 1.3 \sigma_g$$

図8 プレストレスと $W_{av} - \sigma_f$ 関係 図9 モデル断面の $\sigma_g - \Delta mp$ 関係

4.1.6 付着クリープの影響

次に長期ひび割れ幅について検討する。前述のように鉄筋とコンクリート間の付着クリープによってひび割れ幅は増加する。上述の要因の影響の検討と同じ手法で(2')式を用いて付着クリープの影響を調べた。

図10は Cr が1から0まで変化する時の $w_{av} - \sigma_f$ 関係を表している。付着クリープの傾きへの影響は無視出来るほど小さく、切片への影響のみを考慮した(図11参照)。

$$m_{Cr} = Cr$$

図10 クリープ低減係数 Cr と $w_{av} - \sigma_f$ 関係 図11 クリープ低減係数 Cr の切片への影響

4.1.7 乾燥収縮の影響

長期ひび割れ幅への乾燥収縮の影響を考慮する⁷⁾ため、式(2')を用いて検討を行った。ただし式(2')において $Cr=1.0$ とする。

式(2')は式(2)を $\epsilon_{sh} l_{av}$ だけ w_{av} 方向に平行移動した $w_{av} - \sigma_f$ 関係となるので、 $w_{av} - \sigma_f$ 関係における直線の傾きは初期ひび割れと同じ値となる。従って、乾燥収縮の影響を $w_{av} - \sigma_f$ 関係における、切片に対する各パラメータの影響を次式のように表して調べた。

$$\Delta\sigma_{f0sh} = \sigma_{f0sh} \times N1 \times N2 \times N3 \times N4 \dots \dots \quad (9)$$

σ_{f0sh} は乾燥収縮 $\epsilon_{sh} = 0.0002$ による切片に対する増分である。

$N1, N2, N3$ などは乾燥収縮による各要因の仮想引張応力度への影響係数。

$\epsilon_{sh} = 0$ の基準断面に対して $\epsilon_{sh} = 0.0002$ 時:

$$\sigma_f = 349w_{av} - 2.4 \quad (10)$$

式(4)及び(10)から、 $\sigma_{f0sh} = -12.5 \text{ kgf/cm}^2$ が得られる。このと

図12 鉄筋比の乾燥収縮

増分への影響

図13 梁せいDの乾燥収縮

分への影響

き、切片増分 $\Delta\sigma_{f0sh}$ に影響を及ぼすパラメータについて調べたところ、切片増分 $\Delta\sigma_{f0sh}$ に影響するのは図12, 13, 14に示すように、引張鉄筋比 p_t 、部材せい D およびコンクリートかぶり厚さ c で、次式のように表れされる。

$$N1 = 1.43 p_t$$

$$N2 = D / (0.7D + 24) = D' / (0.7D' + 0.3)$$

$$N3 = -0.25c' + 1.25$$

上式は $\epsilon_{sh} = 0.0002$ に対して導いた結果である。次に乾燥収縮ひずみ ϵ_{sh} を変化させると、図15のようになる。

図14 かぶり厚さ c の乾燥収縮増分への影響

図15 乾燥収縮ひずみの乾燥収縮増分への影響

この図から影響係数 $N4$ がえられる。

$$N4 = 4846 \times \epsilon_{sh} \\ \approx 0.5 \times 10^4 \times \epsilon_{sh}$$

以上の乾燥収縮による切片増分 $\Delta\sigma_{f0sh}$ への影響の検討結果をまとめると次のようになる。

$$\sigma_{f0sh} = -12.5 \text{ kgf/cm}^2$$

$$N1 = 1.43 p_t$$

$$N2 = D' / (0.7D' + 0.3)$$

$$N3 = -0.25c' + 1.25$$

$$N4 = 0.5 \times 10^4 \times \epsilon_{sh}$$

$$\Delta\sigma_{f0sh} = \sigma_{f0sh} \times N1 \times N2 \times N3 \times N4 \\ = -6.3 \times 10^4 \times \epsilon_{sh} \times N1 \times N2 \times N3$$

4.2 結果

4.1 で得られた結果をまとめると、平均ひび割れ幅 w_{av} と仮想引張応力度 σ_f の関係式は以下のようになる。

$$\sigma_f = k\sigma_{f0s} \frac{1}{w_{av0}} w_{av} + \sigma_{f0} \quad (11)$$

ここに

$$\sigma_{f0s} = 34.9 \text{ kgf/cm}^2$$

$$w_{av0} = 0.1 \text{ mm}$$

$$k = k_s k_c k_D$$

$$k_s = 2.15 p_t - 0.70 \phi' + 0.22$$

$$k_D = 0.69 D' + 0.31$$

$$k_c = -0.76 c' + 1.76$$

$$\sigma_{f0} = \sigma_{f0i} m_{(R)} m_s m_c m_{Cr} + \Delta m p + \Delta \sigma_{f0sh}$$

$$\sigma_{f0i} = 10.1 \text{ kgf/cm}^2$$

$$m_{(R)} = 1.03 F_t' - 0.03$$

$$m_s = -0.12 n + 1.5$$

$$m_c = 1.2 c' - 0.2$$

$$m_{Cr} = Cr$$

$$\Delta m p = 1.3 \sigma_g$$

$$\Delta \sigma_{f0sh} = -6.3 \times 10^4 \times \epsilon_{sh} \times N1 \times N2 \times N3$$

$$N1 = 1.43 P_t$$

$$N2 = D' / (0.7 D' + 0.3)$$

$$N3 = -0.25 c' + 1.25$$

なお、ひび割れ幅制御設計では最大ひび割れ幅 w_{max} を制御対象とする。PRC 指針では $w_{max} = 1.5 w_{av}$ としているので、 w_{max} と σ_f との関係を求めると、次式のようになる。

$$\begin{aligned} \sigma_f &= k\sigma_{f0s} \frac{1}{w_{av0}} w_{av} + \sigma_{f0} \\ &= k\sigma_{f0s} \frac{1}{w_{av0}} \frac{w_{max}}{1.5} + \sigma_{f0} \\ &= k\sigma_{f0s} \frac{1}{1.5 w_{av0}} w_{max} + \sigma_{f0} \end{aligned} \quad (12)$$

5. 適合性の検討

式(11)の適合性を検討するために、PRC 指針解説のひび割れ幅算定式によりひび割れ幅に対する曲げモーメントを計算し、(1)式より求めた仮想引張応力度と式(11)による仮想引張応力度を比較した。比較断面は、部材せい50cm～120cm、かぶり厚さ5cm～7cm、引張鉄筋2D16～5D29、コンクリート圧縮強度200 kgf/cm²～400 kgf/cm²、平均プレストレス0 kgf/cm²～25 kgf/cm²の範囲

のPRC及びRCの24の断面である。計算結果を図16、17に示す。横軸はPRC指針解説のひび割れ幅算定式による仮想引張応力度であり、縦軸は提案式による仮想引張応力度である。

図16は $Cr = 1$, $\epsilon_{sh} = 0$ の初期(瞬時)ひび割れ幅の比較、図17は付着クリープ($Cr = 0.5$)と乾燥収縮($\epsilon_{sh} = 0.0002$)を考慮した長期ひび割れ幅の比較で、いずれも $w_{av} = 0.2 \text{ mm}$ である(0.1mm及び0.3mmについても0.2mmの場合とほぼ同じ結果が得られている)。

図16 初期(瞬時)ひび割れ幅0.2mm 図17 長期ひび割れ幅0.2mm に対する比較

これらの図から、提案式による仮想引張応力度はPRC指針により直接算出した仮想引張応力度の $\pm 10\%$ の範囲内にあることがわかる。

次に、提案式による仮想引張応力度と、CEB-78の曲げひび割れ幅算定式から曲げモーメントを計算し、(1)式より求めた仮想引張応力度と比較した。図18、19にそれぞれ平均ひび割れ幅0.2mm及び0.3mmに対する比較を示す。いずれも初期(瞬時)ひび割れ幅である。

図18 $w_{av} = 0.2 \text{ mm}$ に対する提案式とCEB78の比較 図19 $w_{av} = 0.3 \text{ mm}$ に対する提案式とCEB78の比較

これらの図から、提案式による仮想引張応力度とCEB-78による仮想引張応力度とはよく一致しており、提案した仮想引張応力度はCEB-78のひび割れ幅計算式にも対応していることがわかる。

また、CP110の仮想引張応力度との比較も行った。CP110は制御目標値を対象としているので、最大の瞬時ひび割れ幅 w_{max} に対する仮想引張応力度を求めた。図20、21に示すように、全般的にCP110の値は提案式による値より大きく(提案式による値の約2倍と大きい場合もある)、ひび割れ幅をかなり小さ目に評価していることとなる。

図 20 $w_{\max} = 0.1\text{mm}$ に対する提案式と CP110 の比較

図 21 $w_{\max} = 0.2\text{mm}$ に対する提案式と CP110 の比較

6. むすび

プレストレスト鉄筋コンクリート (PRC) 部材及び鉄筋コンクリート (RC) 部材の簡便な曲げひび割れ制御法として、仮想引張応力度とひび割れ幅との関係式を導いた。仮想引張応力度はひび割れの発生後も全断面有効として計算されるもので、PC 部材の長期応力に対する設計と同じ手法で、すなわちコンクリートの縁応力度によってひび割れ幅の検討を行うことが出来る。得られたひび割れ幅と仮想引張応力度との関係式の特徴は次のとおりである。

- 1) 初期 (瞬時) ひび割れ幅に対する、仮想引張応力度に影響する要因は、鉄筋比、鉄筋径、鉄筋本数、コンクリート強度、コンクリートのかぶり厚さ、プレストレスである。PC 鋼材の偏心距離は、PC 鋼材応力の増分を考慮しない場合は仮想引張応力度に影響しない。
- 2) コンクリートの乾燥収縮及びひび割れ間コンクリートの付着クリープが考慮されており、長期ひび割れ幅に対しても適用できる。
- 3) 梁せい 50 ～ 120cm、引張鉄筋 2D-16 ～ 5D-29、平均プレストレス $\sigma_g 0 \sim 25 \text{ kgf/cm}^2$ の梁断面について、導いた σ_f と w_{av} の関係式から得た仮想引張応力度は、CEB-78 のひび割れ幅算定式を用いて計算した値ともよい一致をみた。CP110 の仮想引張応力度は導いた関係式による値の約 2 倍と大きい場合もある。

謝 辞

本研究を進めるに際して、李振宝氏 ((株) 耐震企画設計)、岩田樹美氏 ((株) NTT ファシリテイズ) の協力を得た。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会編：プレストレスト鉄筋コンクリート構造設計・施工指針・同解説、1986.1
- 2) CEB-FIP: CEB-FIP Model Code for Concrete Structures, 1978
- 3) 日本建築学会編：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説、1998.11
- 4) British Standards Institution, Code of Practice for The Structural Use of Concrete, CP110 Part 1, p.68, 1972
- 5) 鈴木計夫、大野義照：プレストレスト鉄筋コンクリートはりの曲げひびわれ幅に関する研究 (その 2)、日本建築学会論文報告集、第 305 号、pp. 51-57、1981.7

- 6) 大野義照、李振宝、鈴木計夫：持続荷重下における異形鉄筋とコンクリート間の付着応力～すべり関係、日本建築学会構造系論文集、No. 459、pp. 111-120、1994.5
- 7) 李振宝、大野義照、鈴木計夫：RC はりの長期ひび割れ幅に及ぼす付着クリープと乾燥収縮の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16、No. 2、pp. 407-412、1994

(1999年2月10日原稿受理, 1999年6月25日採用決定)