

PRC合成部材の断面応力計算法と長期曲げ載荷実験

李 振宝*1・大野 義照*2

1. はじめに

プレキャストプレストレストコンクリート（以下PCaPCと略記）と場所打ち鉄筋コンクリートとからなる合成構造であるPC合成部材に関する建築分野の取組みをみると、日本建築学会「プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説」1975年版¹⁾に初めて合成ばりの条文が設けられ、1987年版に合成スラブの条文が追加され、さらに1994年に「プレストレストコンクリート(PC)合成床板設計施工指針・同解説」²⁾が刊行され、PCの利用法の多様化に対応するとともに、PC合成部材の普及が図られてきた。これらの合成部材はひび割れの生じないフルPCとして使用されるので、部材の常時荷重下の応力は、プレキャスト単体時の応力に合成部材になってから作用する荷重による応力を足しあわせることによって簡単に求めることができる¹⁾。一方、最近、部材断面の一部をPCa化してこれを型枠兼用として配筋を行い、残りの部分は現場で打設する鉄筋コンクリート（以下RCと略記）のハーフプレキャスト工法が普及してきた。プレキャスト部材にはRCだけでなくPCも用いられている。このハーフプレキャスト工法では施工時にはPCa単体に応力が生じないように支保工によって施工時応力を制御し、荷重は合成部材完成後に作用するものとして、合成部材を通常の一体打ちの部材と同じように扱って応力計算を行っている。

しかし、支保工の設置状況によっては施工時にPCa単体に応力が生じる場合や、PCa単体にPC部材を用いて支保工を省略し施工時にひび割れが生じなくても合成部材完成後には設計荷重によってひび割れが生じる場合がある。さらに積極的にPCa単体に施工時荷重によるひび割れの発生を許容することも考えられる。なお、これらの部材は長期荷重時にひび割れを許容することからRC部材を含めて本報ではプレストレスト鉄筋コンクリート（以下PRCと略記）合成部材と呼ぶ。このようなPRC合成部材の性能はいまだに把握されておらず、また、設計法は確立されていないため、日本建築学会「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」³⁾（以下「PRC指針」と略記）には取り入れられていない。施工時に支保工を省略し、施工時荷重を受けたPCa部材、とくにひび割れの生じたPCa部材からなるPRC合成部材はPCa部上部にプレストレストと施工時荷重による圧縮応力が合成後の断面にも残存するため、長期荷重下におけるひび割れやたわみなど

の曲げ性状は従来の一体打ち部材として扱っているPCやRC合成部材と大きく異なる^{4) 5) 6)}。また、その応力計算には、PCa単体時の応力を無視した一体打ち部材の応力計算法や前述のフルPCの簡単な応力計算法を用いることはできない。

本報では、PCおよびPCa合成部材の利用法のさらなる多様化を図るとともにPRC合成部材の設計法の確立を目指して、PRC合成部材の断面応力およびたわみの計算法を提案した。また、PCa単体時に作用する施工時荷重の大きさ、PCa単体断面のせい、プレストレストの有無を要因に行った持続載荷実験によって、ひび割れやたわみなどの曲げ性状を調べるとともに、計算法の妥当性を検証した。

2. PRC合成断面応力計算法

一般の建築物におけるコンクリートの合成部材は、図-1

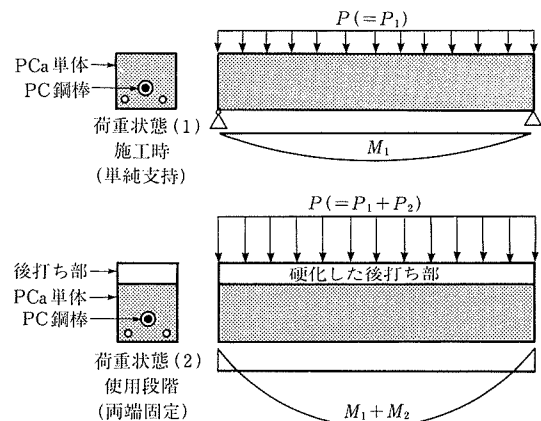


図-1 合成断面応力計算の二つの荷重状態

に示すように施工段階ではPCa単体で自重と施工時荷重（後打ちコンクリートの自重など）を支持している荷重状態（1）と、使用段階で合成断面として積載荷重を支持している荷重状態（2）の二つの荷重状態が考えられる。荷重状態（1）、（2）におけるひび割れの有無によって次の3ケースに分けられる。

- (a)：荷重状態（1）、（2）ともひび割れが発生しない。いわゆるPC合成部材である。
- (b)：荷重状態（1）ではひび割れが発生せず、荷重状態（2）ではひび割れが発生する。

*1 Zhenbao LI：北京工業大学 建築工程学院 教授

*2 Yoshiteru OHNO：大阪大学大学院 工学研究科 建築工学専攻 教授

(c) : 荷重状態 (1) からひび割れが発生する。

ケース (b), (c) が本論が対象とする PRC 合成部材である。その断面応力は、ケース (a) の PC 合成部材のように PCa 単体時における施工時荷重による応力と合成断面完成後の積載荷重による応力を足し合わせることによって求める^{1) 2)} ことはできない。

2.1 初載荷時の応力計算

前述のケース (b), (c) の PCa 単体と合成部材断面の初期および長期ひずみ分布を図 - 2 に示す。PCa 単体のひずみ分布 a - a' はプレストレスによるひずみ分布, 同 b - b' は施工時荷重 P₁ による曲げモーメント M₁ が作用したときのひずみ分布を表している。合成部材断面のひずみ分布 c - c' は合成部材断面に積載荷重 P₂ による曲げモーメント M₂ が作用したときのひずみ変化量を, 同 d - d' は c - c' から b - b' を差し引いて求まるもので PCa 単体の弾性ひずみ分布を表している。時刻 t における長期ひずみ分布を同図 (d) に示している。

- 1) 荷重状態 (1) における PCa 単体の上, 下縁のひずみ ε₁, ε₂ はひび割れが生じていない場合 (ケース (b)) にはコンクリート全断面を有効として PC 断面と同様に計算し¹⁾, ひび割れが生じている場合 (ケース (c)) は通常の RC 又は PRC 断面の応力計算法^{3) 7)} より求める。
- 2) 荷重状態 (2) において, 中立軸 x と曲率 φ を未知数として二つのつり合い式 Σ(C - T) = 0 と ΣM = 0 を解くことによって断面諸応力が求まる。

図 - 2 (c) に示す初載荷時ひずみ分布より, 各位置のひずみは未知数 x, φ を用いて次のように表わせる (記号は図 - 2 を参照)。なお, コンクリートひずみについては圧縮が "+", 引張が "-" で, 鉄筋ひずみについては引張が "+", 圧縮が "-" であるとする。

$$\epsilon_{c2} = \phi \cdot x \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\epsilon_{s2} = \phi \cdot (d_c - x) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\epsilon_{c1} = \epsilon_1 - \phi \cdot (D_2 - x) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\epsilon_{s1} = \phi \cdot (d_s - x) - \left[\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{D_1 - D_2} \cdot (D_1 - d_s) + \epsilon_2 \right] \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\phi_0 = \frac{\epsilon_{c1} - \epsilon_3}{D_1 - D_2} = \frac{\phi \cdot (D_1 - x) - \epsilon_2 + \epsilon_{c1}}{D_1 - D_2}$$

$$= \frac{\phi \cdot (D_1 - D_2) - \epsilon_2 + \epsilon_1}{D_1 - D_2} \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$x_0 = \frac{\epsilon_{c1}}{\phi_0} = \frac{|\epsilon_1 - \phi \cdot (D_2 - x)| \cdot (D_1 - D_2)}{\phi \cdot (D_1 - D_2) - \epsilon_2 + \epsilon_1} \quad \dots\dots\dots(6)$$

コンクリートの圧縮合力 C_c, 鉄筋の圧縮力 C_s と鋼材の引張力 T はすべて二つの未知数 x, φ で表示される。長方形断面で, x ≤ D₂, 0 ≤ x₀ ≤ D₁ - D₂ の場合の C と T を次に示す。

$$C_{c1} = \epsilon_{c1} \cdot E_{c1} \cdot x_0 \cdot \frac{b}{2}$$

$$= |\epsilon_1 - \phi \cdot (D_2 - x)| \cdot E_{c1} \cdot b \cdot \frac{1}{2}$$

$$\cdot \frac{|\epsilon_1 - \phi \cdot (D_2 - x)| \cdot (D_1 - D_2)}{\phi \cdot (D_1 - D_2) - \epsilon_2 + \epsilon_1} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$C_{c2} = \epsilon_{c2} \cdot E_{c2} \cdot x \cdot \frac{b}{2} = \phi \cdot E_{c2} \cdot \frac{b}{2} \cdot x^2 \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$T_p = P_0 + \Delta \epsilon_p \cdot E_p \cdot a_p$$

$$= P_0 + E_p \cdot a_p \cdot \left\{ \phi \cdot (d_p - x) - \left[\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{D_1 - D_2} \cdot (D_1 - d_p) + \epsilon_2 \right] \right\}$$

$$\dots\dots\dots(9)$$

$$T_s = \epsilon_{s1} \cdot E_s \cdot a_t$$

$$= E_s \cdot a_t \cdot \left\{ \phi \cdot (d_s - x) - \left[\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{D_1 - D_2} \cdot (D_1 - d_s) + \epsilon_2 \right] \right\}$$

$$\dots\dots\dots(10)$$

$$C_s = \epsilon_{s2} \cdot E_s \cdot a_c = E_s \cdot a_c \cdot \phi \cdot (d_c - x) \quad \dots\dots\dots(11)$$

- ここに, E_s : 鉄筋のヤング係数
 E_p : PC 鋼材のヤング係数
 E_{c1} : プレキャストコンクリートのヤング係数
 E_{c2} : 後打ちコンクリートのヤング係数
 a_t, a_c, a_p : それぞれ引張鉄筋, 圧縮鉄筋, PC 鋼材の断面積

これらの式を次の軸方向力のつり合い式と中立軸に関するモーメントのつり合い式に代入して解くことによって未知数 x, φ を求め, 断面諸応力を計算する。

軸方向力のつり合い式
 C_{c1} + C_{c2} - T_p - T_s - C_s = 0 $\dots\dots\dots(12)$

中立軸に関するモーメントのつり合い式
 M = M₁ + M₂ = -C_{c1} · (D₂ - x + $\frac{x_0}{3}$) + C_{c2} · 2 · $\frac{x}{3}$
 + T_p · (d_p - x) + T_s · (d_s - x) + C_s · (d_c - x) $\dots\dots\dots(13)$

2.2 長期応力の計算

変動応力下のコンクリートのクリープひずみ ε_c(t) は次

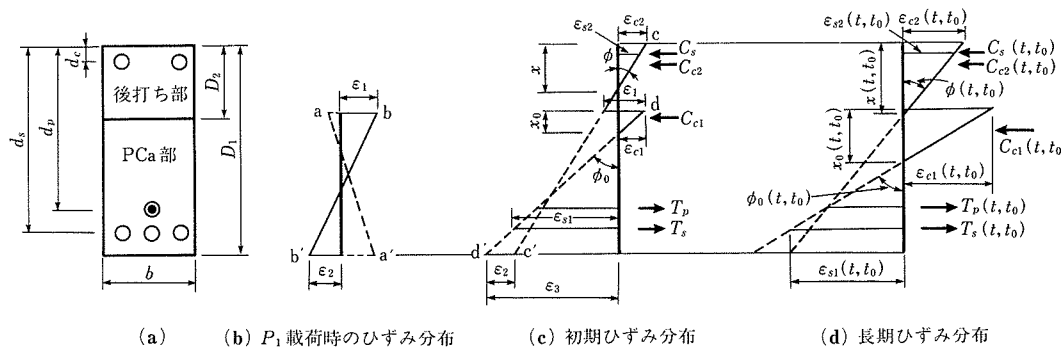


図 - 2 PRC 合成断面のひずみ分布

式のように表わされる。

$$\epsilon_c(t) = \sigma_c(t_0) \frac{1 + \varphi(t, t_0)}{E_c(t_0)} + \int_{\sigma_c(t_0)}^{\sigma_c(t)} \frac{1 + \varphi(t, \tau)}{E_c(\tau)} d\sigma_c(\tau) \quad (14)$$

ここに、 $\sigma_c(t_0)$: 時刻 t_0 のコンクリート応力
 $\sigma_c(t)$: 時刻 t のコンクリート応力
 $\varphi(t, t_0)$: 時刻 t_0 に荷重されたコンクリートの時刻 t におけるクリープ係数
 $E_c(t_0)$: 時刻 t_0 のコンクリートヤング係数
 係数 $\chi(t, t_0)$ を用いることによって (1) 式は次のように置き換えられる⁸⁾。

$$\epsilon_c(t) = \sigma_c(t_0) \frac{1 + \varphi(t, t_0)}{E_c(t_0)} + \Delta\sigma_c(t) \frac{1 + \chi\varphi(t, t_0)}{E_c(t_0)} \dots\dots (15)$$

ここに、 $\chi(t, t_0)$ は 1 より小さい無次元係数である⁸⁾。若材齢に荷重しない場合、 χ は 1 に近いので (3) 式はさらに次のように近似できる。

$$\epsilon_c(t) = (\sigma_c(t_0) + \Delta\sigma_c(t)) \frac{1 + \chi\varphi(t, t_0)}{E_c(t_0)} = \frac{\sigma_c(t)}{\bar{E}_c(t, t_0)} \quad (16)$$

ここに、 $\bar{E}_c(t, t_0) = \frac{E_c(t_0)}{1 + \chi\varphi(t, t_0)}$: 材齢修正ヤング係数

前述の式 (1) ~ (13) のコンクリートヤング係数に材齢修正ヤング係数を用い、未知数 x , ϕ の代りに未知数 $x(t, t_0)$, $\phi(t, t_0)$ を求めることによって長期応力が計算できる。なお、コンクリートひずみ ϵ_1 , ϵ_2 は初期ひずみ分布から定まる。

2.3 鉄筋応力の略算法

前節において PRC 合成部材の応力計算式を誘導したが、その計算は煩雑である。また、略算法として、施工時荷重 P_1 (合成部材自重) による曲げモーメント M_1 と積載荷重 P_2 による曲げモーメント M_2 とが合成断面に作用する、すなわち一体断面として計算する方法、または M_1 による PCa 単体時の応力と M_2 による合成断面の応力の重ね合わせによる計算法が考えられるが、後述のように前者では鉄筋応力を小さめに算出し、後者では逆に鉄筋応力を過大に算出する。そこで以下に応力中心距離に着目した実用的な鉄筋応力の計算法を誘導した。

断面に作用する全曲げモーメント M が、PCa 単体に作用する場合と合成断面を一体打ち断面として作用する場合の断面の応力中心距離をそれぞれ j_1 , j_2 とし、2.1 節の精算法より求めた鉄筋応力の合力 T_s , PC 鋼材応力の合力 T_p を用いて (17) 式から算出される合成断面の応力中心距離を j とする。

$$M = T_s \cdot j + T_p \cdot (j - (d_s - d_p)) \dots\dots (17)$$

(17) 式において、

$M_2 \rightarrow 0$ ($M_1 \rightarrow M$) の場合、 $j \rightarrow j_1$ となり、

$M_2 \rightarrow M$ ($M_1 \rightarrow 0$) の場合、 $j \rightarrow j_2$ となることから、合成断面の応力中心距離 j が $j_1 \leq j \leq j_2$ の範囲にあることがわかる。 j と j_1 , j_2 との関係は長方形断面合成梁、T 型断面合成梁、長方形断面合成スラブについて検討した結果を整理すると (18) 式が得られた⁹⁾。鉄筋応力はこの j を用いて (19) 式から算定される。

$$j = j_1 + (j_2 - j_1) (M_2 / M)^{1.6} \dots\dots (18)$$

$$\sigma_s = (M - P_0 \cdot (j - (d_s - d_p))) / (a_s \cdot j) \dots\dots (19)$$

ここに、 σ_s : 鉄筋応力

- M : 全曲げモーメント ($M = M_1 + M_2$)
- M_1 : 施工時荷重 P_1 による曲げモーメント
- M_2 : 積載荷重 P_2 による曲げモーメント
- P_0 : 有効プレストレス力
- j : 合成断面の応力中心距離
- j_1, j_2 : それぞれ $\frac{7}{8}d_1$ (d_1 : PCa 単体の有効せい)、 $\frac{7}{8}d_s$ で略算できる。

2.4 計算例

図 - 3 に示すような PC 鋼材と鉄筋が併用された T 型

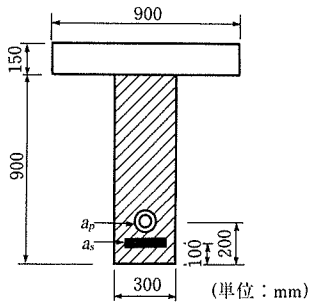


図 - 3 T 型 PRC 合成断面 (計算例)

PRC 合成断面¹⁰⁾ について、前述の計算式による初載荷時の応力の計算結果を図 - 4 に示す。なお、PCa 単体に作用する自重などによる曲げモーメント $M_1 = 407$ kNm, 合成断面に作用する積載荷重による曲げモーメント $M_2 = 746$ kNm である。

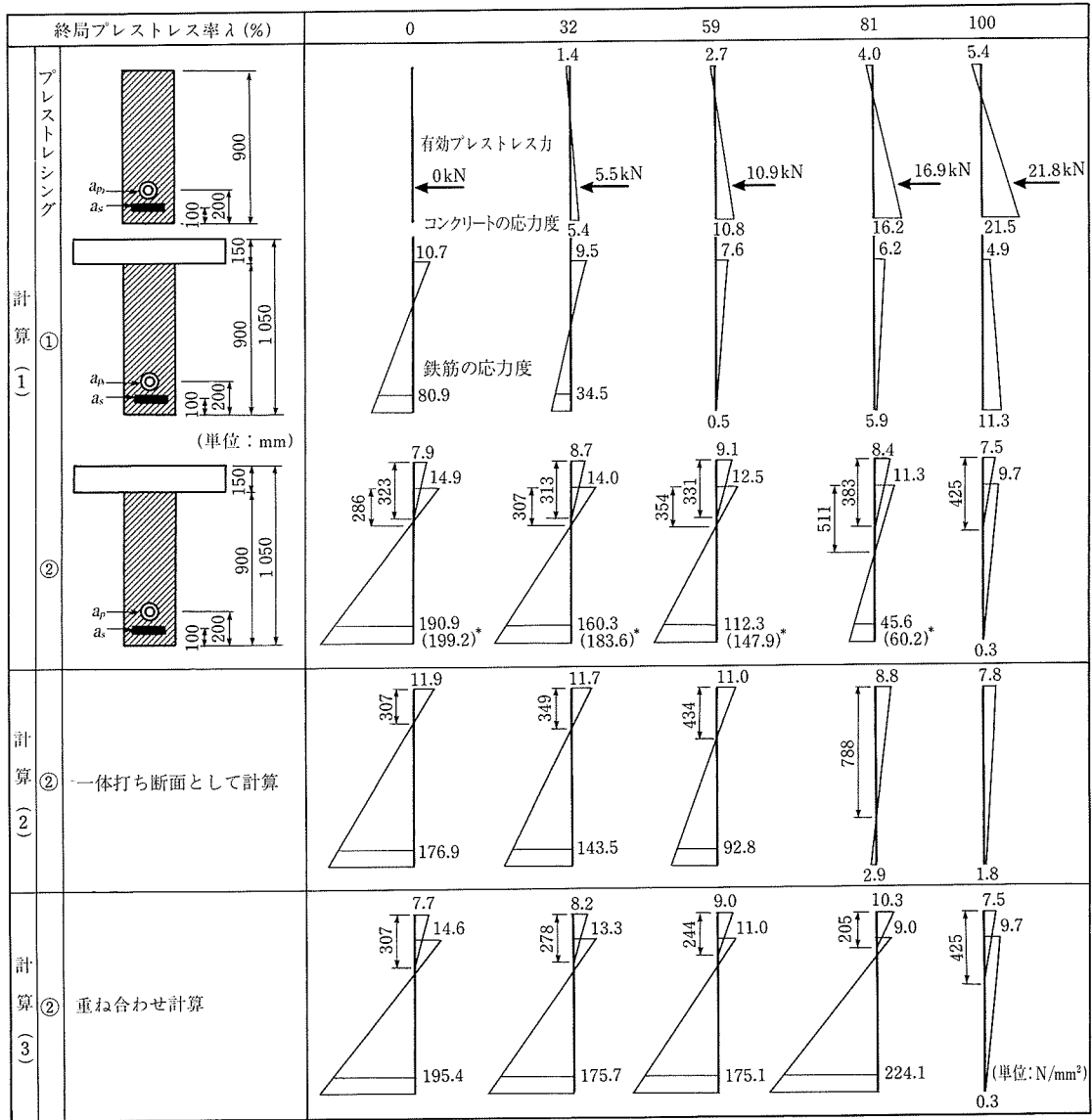
- 鉄筋 : $\sigma_{sy} = 345$ N/mm², $E_s = 2.05 \times 10^5$ N/mm²
- PC 鋼材 : $\sigma_{py} = 1570$ N/mm², $E_p = 1.96 \times 10^5$ N/mm²
- 終局プレストレス率 λ ³⁾ : 0, 32, 59, 81, 100%。

ここに、 $\lambda = \text{PC 鋼材の降伏点引張力} / (\text{鉄筋の降伏点引張力} + \text{PC 鋼材の降伏点引張力})$

λ が異なっても断面の終局耐力がほぼ同じになるように鉄筋の量 (断面積 a_s) と PC 鋼材の量 (断面積 a_p) を選定している。たとえば、 $\lambda = 0$ (RC) の場合 : $a_s = 7650$ mm², $a_p = 0$, $\lambda = 100\%$ (PC) の場合 : $a_s = 0$, $a_p = 2387$ mm² である。

図 - 4 のプレストレスングの欄はプレストレスの導入時の応力状態、①の欄は PCa 単体に M_1 が作用したときの応力状態、および②の欄は合成後さらに合成断面に M_2 が作用したときの応力状態を示している。なお、計算 (1) は 2.1 節の計算式を用いた計算結果を示す。プレストレス力が大きくなるとともにひび割れ幅に直接関係する鉄筋応力が制御され、同じ終局耐力であるにもかかわらず、PCa 単体にプレストレスを導入することによって、長期荷重に対する部材の性能が向上することがわかる。また、2, 3 節の鉄筋応力の略算法による値を () 内に示しているが、安全側に算出している。

計算 (2) は一体打ち断面として $M_1 + M_2$ が合成断面に作用するとして計算した結果、計算 (3) は M_1 による PCa 単体



* ()内は略算法による鉄筋応力の略算値

図-4 T型 PRC 合成断面応力 (計算例)

の応力と合成断面を一体打ち断面 (RC) として計算した M_2 による応力の重ね合せの結果を示している。計算(2)の一体打ち断面として計算した結果は全体的に鉄筋応力を小さめに算出している。これは合成断面では施工時荷重を PCa 単体だけで支えているのに対して、一体打ち部材ではそれを全断面で支えていることによる。計算(3)の重ね合せによる鉄筋応力の計算結果は λ が小さい場合はやや大きめに算出する程度であるが、 λ が大きくなると、極めて過大に算出している。これは M_2 による応力が RC として計算され、プレストレス力 P_0 が応力中心距離 j の小さい M_1 の段階しか効かないことによる。その傾向は、 λ が大きくなると総鋼材断面積 ($= a_s + a_p$) が少なくなり、より大きくなる。

3. PRC 合成部材のひび割れ幅とたわみ計算法

3.1 ひび割れ幅計算法

初載荷時及び持続荷重下におけるひび割れ幅 W_{av} , $W_{av}(t)$

はそれぞれ(20), (21)式を用いて計算する^{3), 11)}。

$$W_{av} = I_{av} \cdot \epsilon_{sav} \dots \dots \dots (20)$$

ここに、 ϵ_{sav} : 平均鉄筋ひずみ

I_{av} : 平均ひび割れ間隔

$$W_{av}(t) = I_{av} \cdot q'(t) (\epsilon_{smax}(t) + S_h(t)) \dots \dots \dots (21)$$

ここに、 $\epsilon_{smax}(t)$: 合成部材の持続荷重中の時刻 t におけるひび割れ断面の鉄筋ひずみ

$S_h(t)$: コンクリートの自由乾燥収縮ひずみ

$q'(t)$: 付着特性係数 (詳しくは参考文献¹¹⁾ 参照)

3.2 たわみ計算法

プレストレスと施工時荷重を受けた PCa 部材からなる PRC 合成部材では、合成後も PCa の上部に圧縮応力が残存しているため、部材の剛性が一体打ち部材の剛性と大きく異なる。したがって、たわみの計算にはこれを評価した剛性を用いて行う。PRC 合成部材の初載荷時のたわみは、PCa 単体時の施工時荷重 P_1 によるたわみ δ_1 と合成断面になってからの積載荷重 P_2 によるたわみ δ_2 との和で求めら

れ、持続荷重によるたわみの増加は、持続荷重開始時の剛性を用いてコンクリートのクリープや乾燥収縮などを考慮して求める。

(1) PCa 単体のたわみ計算

P_1 によるたわみの計算は PCa 単体の曲げ剛性 (EI_e) を用いる。ここでひび割れの生じた PCa 単体の有効断面 2 次モーメント I_e は、次の ACI コード 318 - 83¹²⁾ の式による。

$$I_e = (M_{cr}/M)^3 I_0 + \{1 - (M_{cr}/M)^3\} I_{cr} \dots\dots\dots (22)$$

ここに、 M_{cr} : ひび割れモーメント
 M : 最大曲げモーメント
 I_0 : 全断面の弾性断面 2 次モーメント
 I_{cr} : ひび割れ断面の断面 2 次モーメント

$$I_{cr} = b \cdot (x_n)^3 / 3 + n \cdot a_1 (d_s - x_n)^2 + a_c (n-1) ((x_n) - d_c)^2 \dots\dots\dots (23)$$

ここに、 x_n : ひび割れ断面の圧縮縁から中立軸までの距離
 d_s : 有効せい
 d_c : 圧縮縁から圧縮鉄筋までの距離
 a_c : 圧縮鉄筋断面積
 a_1 : 引張鉄筋断面積

(2) 合成梁のたわみ計算

P_2 による合成部材のたわみ計算において I_e を求めるにあたって、 I_{cr} を $P_1 = 0$ とし P が合成部材に作用した場合の値とすると、 P_1 による圧縮応力の存在する PCa 単体上部の曲げ剛性に対する寄与が考慮されないため、 I_{cr} は過小に算出される。そこで、図 - 2 に示す合成断面のひずみ分布において後打ちコンクリート部の引張ひずみは小さいので、PCa 単体部の中立軸位置より上側のコンクリート断面を有効とすれば、ひび割れの生じた合成断面の I_{cr} は次式で与えられる。

$$I_{cr} = b \cdot (D_2 + x_0)^3 / 3 + n \cdot a_1 (d_s - (D_2 + x_0))^2 + a_c (n-1) ((D_2 + x_0) - d_c)^2 \dots\dots\dots (24)$$

合成部材のひび割れモーメント M_{cr} は、次式により計算する⁷⁾。

$$M_{cr} = (0.56 \cdot \sqrt{\sigma_b} + \sigma_p) (bD^2/6) \dots\dots\dots (25)$$

ここに、 σ_b はコンクリートの圧縮強度、 σ_p は引張縁のプレストレスである。

(3) 持続荷重によるたわみ増加

持続荷重下の PRC 合成梁のたわみはコンクリートのクリープや乾燥収縮などにより増加するが、持続荷重開始時の剛性に大きく関係する。その剛性を前述のように正確に評価し、さらに持続荷重下における剛性の変化を捉えることは長期たわみを予測する前提条件であるが、持続荷重下における PRC 合成梁の剛性への影響要因が多く、その評価は今後の課題である。ただし、後述の実験結果からわかるように PRC 合成梁の持続荷重下のたわみの増加量は、施工時荷重を載荷されていない RC 梁より小さくなっている。

4. PRC 合成梁持続荷重実験

4.1 実験概要

(1) 試験体の種類および荷重方法

試験体の種類を表 - 1 に示す。実験要因は設計荷重 P に

対する PCa 単体時に作用する施工時荷重 P_1 の割合、PCa 単体のせい、およびプレストレスの有無である。荷重は単純梁の 2 点荷重とし、持続荷重 P (4.4×10^4 N, 2 載荷点荷重の合計) は、鉄筋の長期許容応力度 (200 N/mm²) から定まる試験体 A - 1 の長期許容荷重である。

試験体の形状を図 - 5 に示す。試験体は断面 160×320 (mm)、長さ 2900 mm (支点間 2700 mm) の複筋梁である。主筋として引張側に 3 - D13、圧縮側に 2 - D13 を配し、支点と載荷点間の 750 mm にあばら筋 D10 を 150 mm 間隔で配筋している。PCa 部と後打ち部との接合面は木こてで処理し、ずれ止めのコッタなどは設けていないが、あばら筋がずれ止めの役割も果たしており、接合面にずれなどの変状は生じていない。施工時荷重 P_1 を PCa 単体のコンクリー

表 - 1 試験体の種類

試験体名	荷重の割合 (%)		部材せい (mm)		プレストレス力 ($\times 10^4$ N)
	P_1 / P	P_2 / P	PCa 部	後打ち部	
A - 1	0	100	250	70	0
A - 2	50	50	250	70	0
A - 3	50	50	250	70	4.8
A - 4	30	70	180	140	0
A - 5	50	50	180	140	4.8

注：合成梁断面の寸法：幅 160 mm、せい： 320 mm

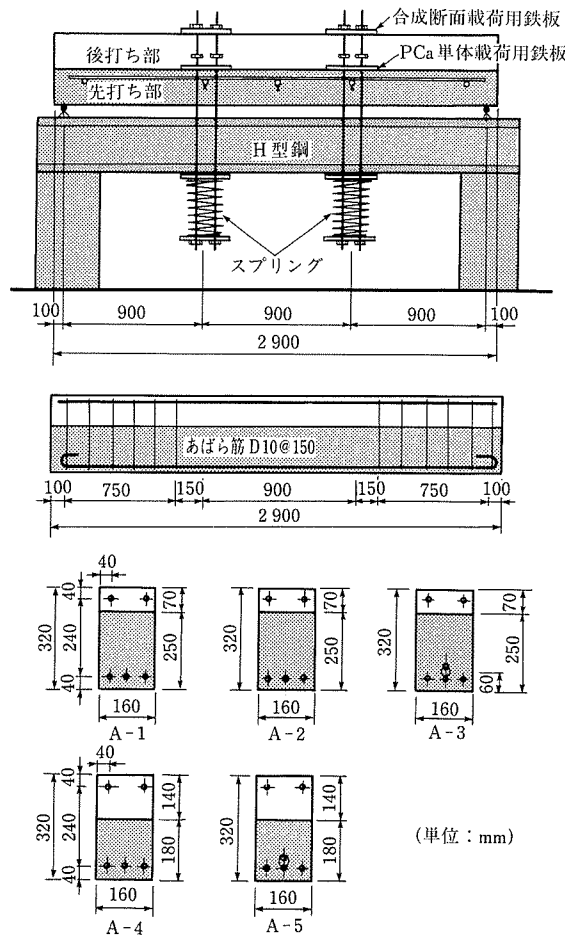


図 - 5 荷重方法および試験体形状

ト材齢 22 日に荷重し、その後、後打ちコンクリートを打設した。後打ちコンクリート材齢 22 日 (PCa コンクリート材齢 65 日) に積載荷重に相当する荷重 $P_2 (=P-P_1)$ を荷重した。試験体 A-3 と A-5 のプレストレスの導入はポストテンション方式で荷重 P_1 の荷重直前に行った。導入したプレストレス力 $4.8 \times 10^4 \text{ N}$ は PC 鋼棒 $\phi 9$, 1 本の許容値で, PCa 単体の平均プレストレスは 1.2 N/mm^2 (A-3), 1.7 N/mm^2 (A-5) である。

(2) 使用材料

コンクリートは目標強度 40 N/mm^2 (PCa 部) と 24 N/mm^2 (後打ち部) のコンクリートを用い, 表-2 にその力学的性質を示す。主筋には SD 495 の D 13 を, PC 鋼棒には C 種の $\phi 9$ を用いた。

表-2 コンクリートの力学的性質

部位	圧縮強度 σ_b (N/mm^2)	割裂引張強度 σ_t (N/mm^2)	ヤング係数 E_c ($\times 10^4 \text{ N/mm}^2$)
PCa 部	37.8	2.5	2.5
後打ち部	21.4	1.7	2.0

注: 試験時材齢は 22 日。

(3) 測定項目

引張鉄筋ひずみは, 3 本の鉄筋のうち中央に配置した鉄筋の等曲げスパン内において 100 mm 間隔に貼付した箔ストレインゲージ (2 mm) で, たわみは中央および荷重点位置の計 3 ヶ所においてダイヤルゲージで測定した。ひび割れ幅は試験体側面の引張鉄筋位置において検長 60 mm のコンタクトストレインゲージ (以下 C.S.G と略記) で, コンクリートのひずみは圧縮縁から 20 mm , および接合面を基準にして上下 20 mm の計 3 ヶ所において検長 100 mm の C.S.G で測定した。

実験は温度 $12 \sim 27^\circ\text{C}$ (平均 20°C), 湿度 $24 \sim 81\%$ (平均 55%) の環境下で行った。荷重期間中の温度および湿度の経時変化を図-6 に示す。

コンクリートの乾燥収縮は, 梁断面と同じ断面の角柱試験体と $100 \times 100 \text{ (mm)}$ 断面の角柱試験体を, クリーブは $100 \times 100 \text{ (mm)}$ 断面の角柱試験体を用いて測定した。クリープ試験体の荷重時材齢は 22 日, 持続圧縮応力は $6 \text{ (N/mm}^2)$ である。図-7 および図-8 にそれぞれ材齢 22 日からの乾燥収縮ひずみ $S_h(t)$ およびクリープ係数 $\phi(t)$ の経時変化を示す。図中の曲線は最小 2 乗法によって求めた回帰曲線である。なお, コンクリートの線膨張係数を $1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ として温度補正を行っている。

4.2 実験結果および考察

(1) ひび割れ性状

持続荷重 P を荷重したときの合成梁のひび割れ状況を図-9 に示す。PCa 単体時に施工時荷重 P_1 を荷重していない試験体 A-1 のひび割れは一体打ちの梁のようにほぼ梁せい $3/4$ の高さまでに進展している。一方, P_1 を荷重した試験体では PCa 単体せいの小さい試験体 A-4, A-5 においても, ひび割れの高さは PCa 単体の範囲内に止まっている。これは後述の断面ひずみ分布からも分かるように, P_1 を受けることにより P_2 を荷重した後も PCa 単体の上部

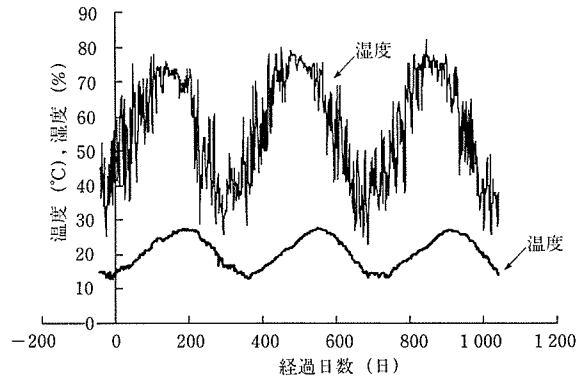


図-6 温度および湿度の経時変化

● PCaコンクリート実測値 — PCaコンクリート回帰曲線
○ 後打ちコンクリート実測値 - - - 後打ちコンクリート回帰曲線

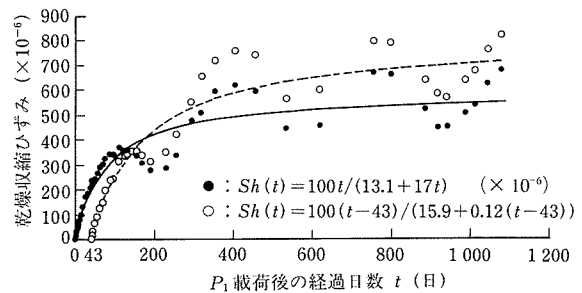


図-7 乾燥収縮ひずみ (梁断面と同じ断面)

● PCaコンクリート実測値 — PCaコンクリート回帰曲線
○ 後打ちコンクリート実測値 - - - 後打ちコンクリート回帰曲線

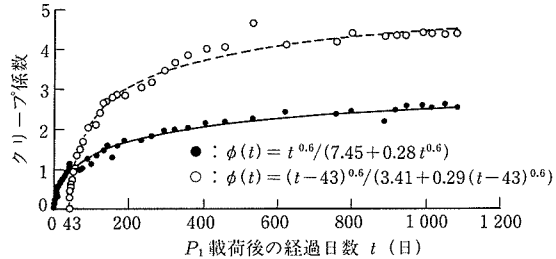


図-8 クリープ係数

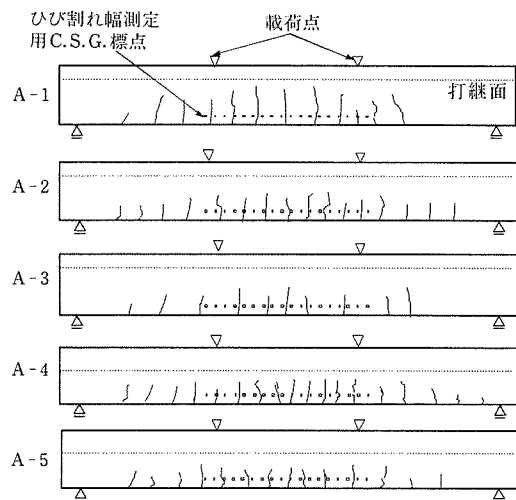


図-9 ひび割れ状況図

に圧縮応力が残存し、ひび割れの進展が制約されていることによるものである。試験体のひび割れ荷重を表 - 3 に示す。 P_1 載荷時において試験体 A - 2, A - 4, A - 5 にはひび割れが生じ、PCa 単体せいが大きくかつプレストレスを導入した試験体 A - 3 にはひび割れが生じていない。合成断面になってから P_2 を載荷し、持続荷重 $P (= P_1 + P_2)$ の載荷完了時にはすべての試験体にひび割れが生じた。等曲げスパンの平均ひび割れ間隔と高さを表 - 4 に示す。平均ひび割れ間隔の実測値は PRC 指針³⁾ の解説の式による計算値と同程度ないしより小さく、いずれの試験体においても新たなひび割れが生じない、ひび割れ定常状態にいたっている。なお、試験体 A - 4, A - 5 のひび割れ間隔が他の試験体より狭いのは PCa 単体のせいが小さいことによる曲げの効果³⁾ によるものと考えられる。

表 - 3 ひび割れ荷重

試験体	実測値 (10 ⁴ N)	計算値 (10 ⁴ N)
A - 1	2.2	2.4
A - 2	1.2	1.5
A - 3	4.0	3.9
A - 4	0.60	0.77
A - 5	1.0	1.2

注：計算値はコンクリートの曲げ強度 4.41 N/mm² として算出し、試験体の自重を考慮している。

表 - 4 ひび割れ間隔 l_{av} と高さ h_{cr}

試験体	l_{av} (mm)		h_{cr} (mm)
	実測値	計算値	実測値
A - 1	135	135	220(250)
A - 2	132		190(250)
A - 3	138		120(250)
A - 4	114		100(180)
A - 5	118		90(180)

注： l_{av} は等曲げ区間における平均ひび割れ間隔、 h_{cr} は等曲げ区間におけるひび割れ高さの平均値、() 内の数値はプレキャスト単体のせい。

(2) 断面ひずみ分布

荷重 P 載荷完了時すなわち持続載荷開始時および持続載荷 1 007 日目の等曲げ区間における断面のひずみ分布を図 - 10 に示す。実線は実測値で、破線は計算値であり、鉄筋位置の () 内に示している数字は前述の略算法による鉄筋応力の略算値から求めたひずみである。試験体名に続く () 内の数値は P_1/P を示している。なお、 P_1 載荷後から P_2 載荷までの期間のコンクリートのクリープ等によるひずみ増加分は除いている。

試験体 A - 1 は P_1 荷重を載荷していないので、一体打ちと同様のひずみ分布となっているのに対して、 P_1 荷重を載荷したその他の試験体は、PCa 部の上部に圧縮応力が残存し、中立軸がより低い位置にある。これは前述のように先に載荷した P_1 によって PCa 単体の上部には圧縮応力が生じているためである。したがって、PCa 単体時に施工時荷重を受けた試験体の荷重 P 載荷時の中立軸位置は、受けていない試験体より深く、これら試験体においては梁の曲げ

剛性に寄与するコンクリートの有効断面が大きくなっている。PCa 単体時に施工時荷重を受けた試験体の圧縮縁ひずみは単体時に受けていない試験体 A - 1 より小さくなり、 P_1/P によって異なるが、約 15%~50% 低減されている。

持続荷重下の断面ひずみ分布については、圧縮力が作用するコンクリート断面ではクリープや乾燥収縮などにより圧縮ひずみが増大する。それに伴って中立軸位置が下がり、応力中心距離が小さくなるので試験体 A - 5 を除き引張鉄筋ひずみは若干増加している。持続載荷による中立軸の低下は PCa 部のせいが小さいほど、 P_1 荷重が大きいほど小さい。また、プレストレスを導入した試験体の方がプレストレスを導入していない試験体より、持続載荷による中立軸の低下は小さい。

なお、計算値は実測値とほぼ一致し、略算値は安全側に計算されている。

(3) 初載荷時のひび割れ幅

P_1 および P_2 載荷時の等曲げスパン区間における平均ひび割れ幅 W_{av} の実測値と荷重との関係を図 - 11 (a) に示す。なお、 P_1 載荷後から P_2 載荷までの期間のひび割れ幅の増加は除いている。

プレストレスを導入した試験体 A - 3 のひび割れ幅はプレストレスを導入していない同じ断面の試験体 A - 2 よりはるかに小さく、また試験体 A - 5 はプレストレスの効果によって A - 4 に比較して、より大きな施工時荷重 P_1 が載荷されているにもかかわらず、 P_2 の載荷終了時のひび割れ幅は小さくなっている。 P_2 載荷終了時のひび割れ幅はプレストレスを導入した試験体 A - 3, A - 5 が小さく、プレストレスの導入もなく P_1 が載荷されていない試験体 A - 1 が最も大きくなっている。このことから、プレストレスの導入によりひび割れ幅が制御されているとともに、PCa 単体に積極的にある程度の施工時荷重を受けさせても、施工時荷重を受けていない RC 梁よりひび割れ幅は大きくならないといえる。また試験体 A - 4, A - 5 のひび割れ間隔が A - 1, A - 2 より狭いので P_2 の載荷終了時のひび割れ幅は A - 1, A - 2 よりも狭くなっている。図 - 11 (b) に (20) 式による平均ひび割れ幅の計算値と実測値をそれぞれ破線と実線で示す。計算値は実測値とよく一致している。

(4) 持続荷重下のひび割れ幅

持続載荷中の引張鉄筋位置のひび割れ幅増加量の経時変化を図 - 12 に示す。ひび割れ幅は温湿度の年変化の影響を受けて大きく変動しながら、ひび割れ間コンクリートの乾燥収縮と引張鉄筋ひずみの増大により徐々に増加し、持続載荷 1 040 日目におけるひび割れ幅の増加量は 0.02~0.08 mm である。鉄筋ひずみ増加量が大きく、ひび割れ間隔も大きい試験体 A - 1, A - 2, A - 3 のひび割れ幅増加量が大きい。一方、鉄筋ひずみ増加量が小さく、ひび割れ間隔も小さい試験体 A - 4, A - 5 のひび割れ幅増加量は小さい。とくに、PCa 単体のせいが低く、大きなプレストレスが導入された試験体 A - 5 のひび割れ幅増加量は 0.02 mm で最も小さい。持続荷重下におけるひび割れ幅増加量の 80~90% 割がコンクリートの乾燥収縮によるものである¹¹⁾ ことから、プレストレス、PCa 単体のせい、 P_1 の影響は比較的

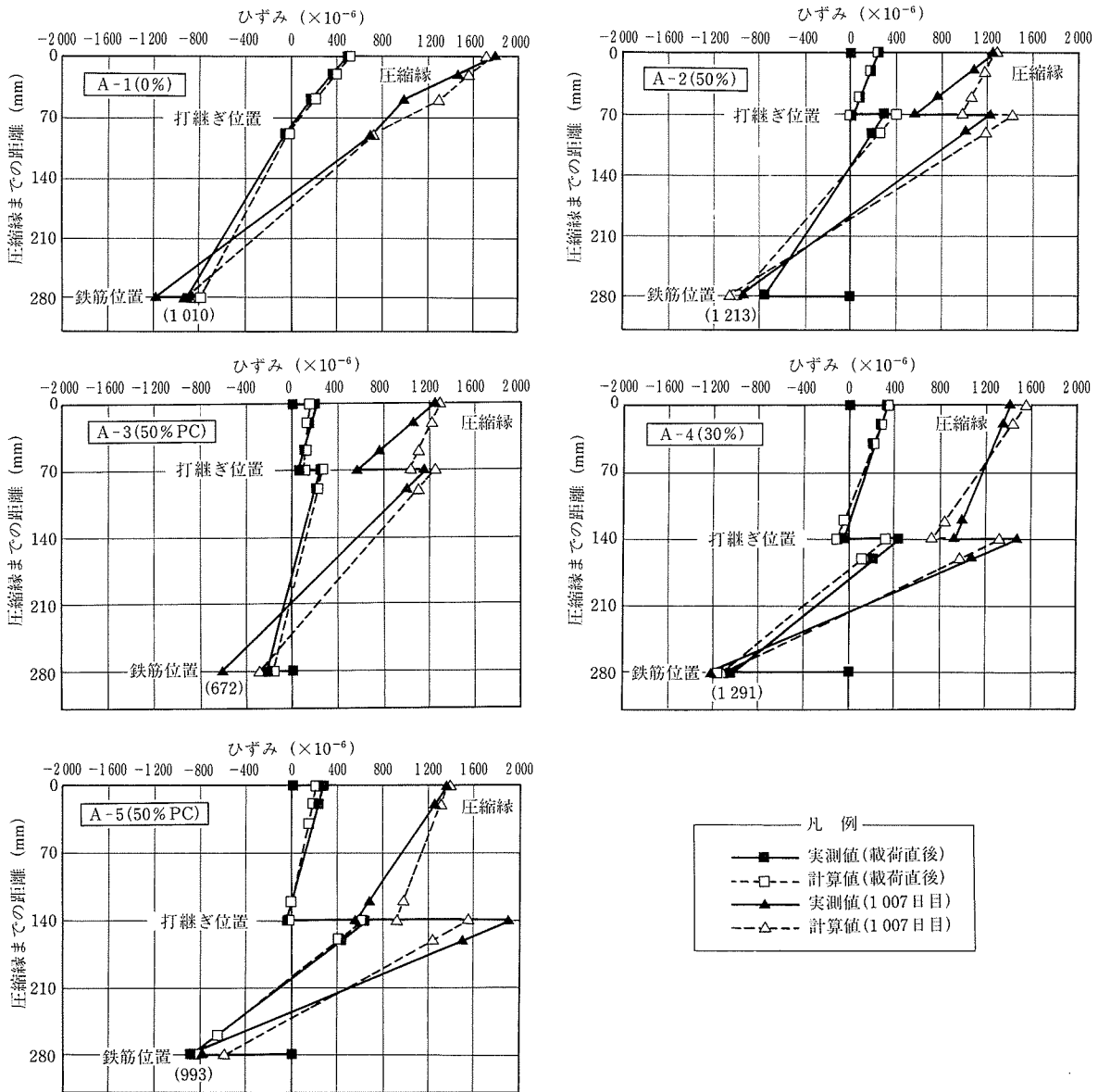


図 - 10 断面ひずみ分布 (実測値と計算値)

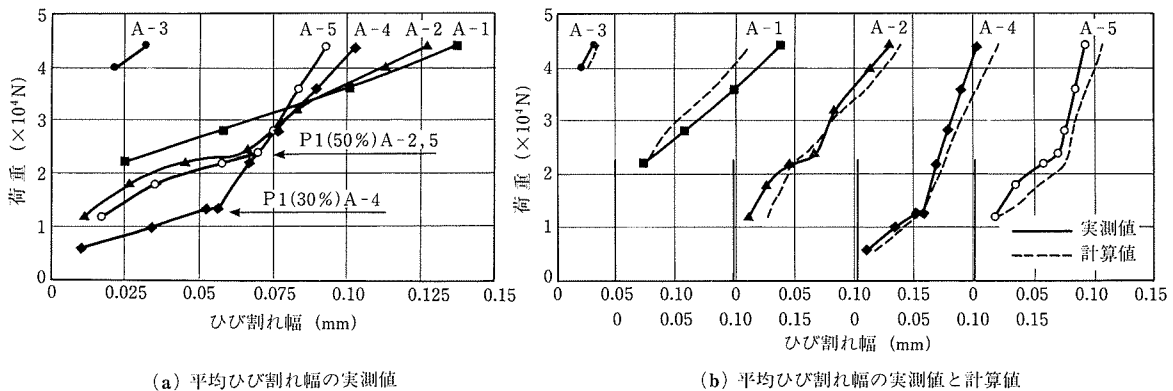


図 - 11 初載荷時のひび割れ幅

小さい。図 - 12 には計算値も示している。実測値は季節的に大きく変動しているが、計算には滑らかなクリープ・乾燥収縮の経時曲線を用いているので計算値は時間とともに

一様に増加している。計算値は実測値の増加傾向とほぼ一致している。

持続載荷開始から 1 040 日目における長期ひび割れ幅の

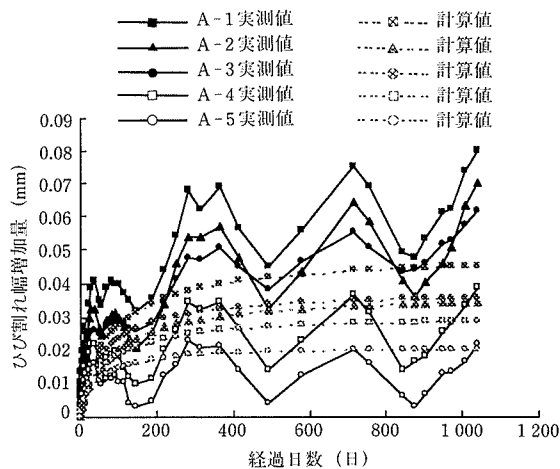


図 - 12 ひび割れ幅増加量の経時変化

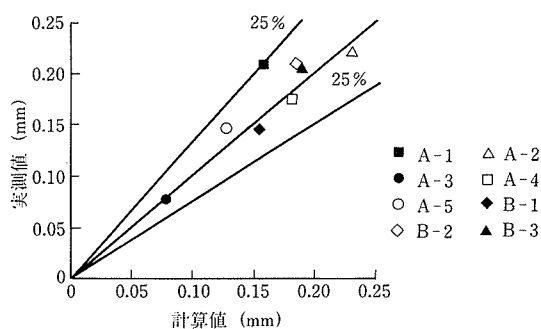
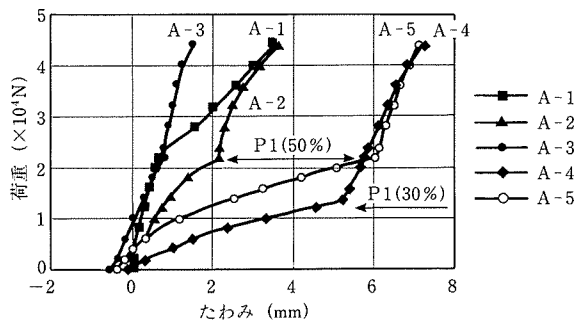


図 - 13 長期ひび割れ幅

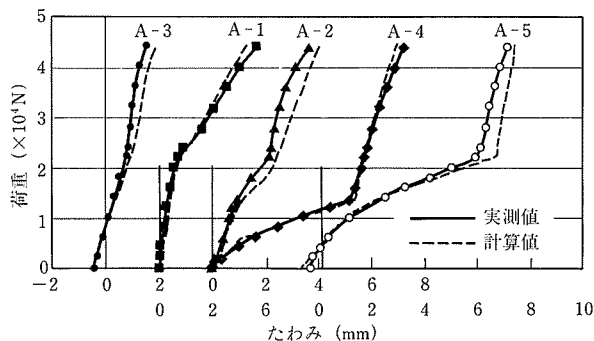
実測値と計算値の比較を図 - 13 に示す。同図には本実験 (実験 A) の結果だけでなく、その後行った RC 合成梁の実験 (実験 B)^{4), 5)} の結果も示している。計算値は実測値の±25%の範囲にある。次に実測値について比較すると、施工時荷重 P_1 が小さく、プレストレスが導入されている試験体 A - 3 はディコンプレッションからの鉄筋ひずみの変化量が小さいため、ひび割れ幅は 0.08 mm で最も小さくなっている。その他の試験体の値は 0.15~0.21 mm で、ひび割れ幅の各試験体の大小関係は持続荷重開始時とほぼ同じである。

(5) 初期たわみ

P_1 および P_2 載荷時における全スパンのたわみの実測値



(a) たわみの実測値



(b) たわみの実測値と計算値

図 - 14 初載荷時の等曲げスパンたわみ

と荷重の関係を図 - 14 (a) に、前述の計算法による計算値と実測値との比較を図 - 14 (b) に示す。実線は実測値を示し、破線は計算値である。なお、 P_1 載荷から P_2 載荷までの間のたわみの増加量は除いている。

P_1 によるたわみを比較すると、プレストレスの効果を含め断面性能および荷重の大きさに応じた大小関係になっている。 P_2 載荷時には、ひび割れ荷重の大きい試験体 A - 3 の曲げ剛性が最も大きく、次に PCa 単体せいの小さい試験体 A - 4, A - 5, 単体せいの大きい試験体 A - 2 の順で、PCa 単体時に P_1 が載荷された試験体の曲げ剛性が PCa 単体時に P_1 が載荷されていない試験体 A - 1 より大きい。一方、 P_2 載荷完了時のたわみはひび割れ幅と異なって、 P_1 載荷時のたわみが大きい試験体 A - 4, A - 5 のたわみが大きい。一方、 P_2 載荷時の曲げ剛性は P_1 の大きさに比例し、それに応じて $P_2 (= P - P_1)$ によるたわみ増加量が小さい傾向を示している。プレストレスを導入した試験体 A - 3 の P_2 載荷完了時のたわみが、同じ PCa 断面でプレストレスを導入していない試験体 A - 2 より小さいのはプレストレスの効果であり、また、試験体 A - 5 は A - 4 と比較して、より大きな施工時荷重を受けているにもかかわらず、 P_2 載荷終了時のたわみがほぼ同じであるのもプレストレスの効果である。なお、計算値は実験値とよく一致している。

(6) 長期たわみ

持続荷重中の等曲げスパンのたわみ増加量の経時変化を図 - 15 に示す。各試験体のたわみは、時間の経過とともにコンクリートのクリープと乾燥収縮による圧縮縁ひずみの増大および引張鉄筋ひずみの増加により徐々に増加している。持続荷重によるたわみの増加量は P_1 が載荷された試験体では持続荷重開始から 1 040 日目まで 0.40~0.51 mm である。全体に各要因の影響は小さい。 P_1 が載荷されていない試験体 A - 1 の増加量は 0.60 mm で最も大きい。

たわみ δ の増加量の計算値は前述の合成断面応力計算法により求めた圧縮縁ひずみとひび割れ断面鉄筋ひずみから求めた平均鉄筋ひずみより計算した曲率の計算値 ϕ を用いて、 $\delta = \phi \cdot l^2/8$ (l : 等曲げスパン長) から求めた。実測値と計算値はほぼ一致している。

持続荷重開始から 1 040 日目における各試験体の等曲げスパンのたわみの実測値と計算値の比較を図 - 16 に示す。計算値は実測値±25%の範囲にある。また同図には試験体

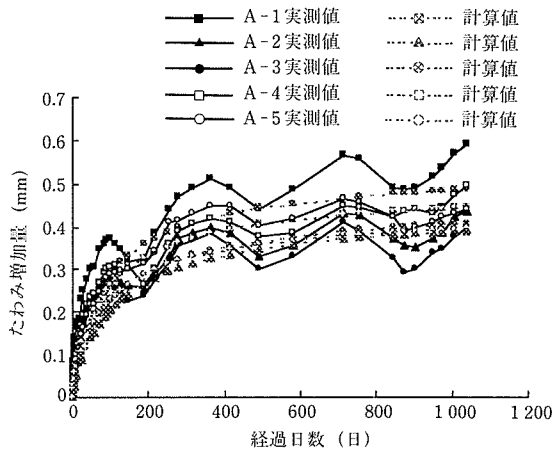


図 - 15 等曲げスパンたわみの経時変化

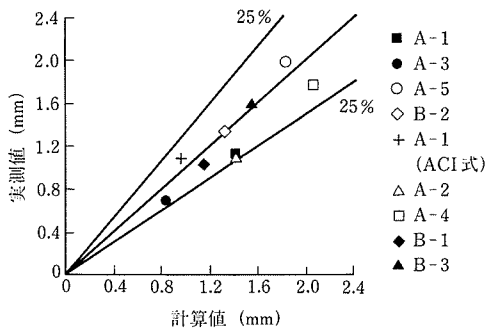


図 - 16 等曲げスパンの長期たわみ

A - 1 の ACI 318 委員会の長期たわみ計算式による計算値も示している。次に実測値についてみると、持続荷重下におけるたわみは、を施工時荷重 P_i の大きさ、PCa 単体のせい、プレストレスの有無によって持続開始時の値が異なっているので大きく異なっているが、前述のように持続荷重中の各試験体のたわみ増加量は同程度なので、長期たわみは初載荷時のたわみと同じ大小関係にある。

試験体の中央に取り付けられたダイヤルゲージより測定した全スパン ($\ell = 2700 \text{ mm}$) における持続荷重開始時たわみ δ_0 、持続荷重開始から 1040 日目の持続荷重によるたわみ増加量 $\Delta\delta$ および全たわみ δ_i を表 - 5 に示す。全スパンたわみも前述の等曲げスパンたわみと同様、施工時荷重 P_i が載荷されていない試験体 A - 1 を除き、初載荷によるたわみは $2.01 (\ell/1343) \sim 10.74 (\ell/251) \text{ mm}$ で、大きく異なっているが、持続荷重による増加量は $3.55 (\ell/761) \sim$

表 - 5 全スパンたわみ (mm)

試験体名	δ_0	$\Delta\delta$	δ_i
A - 1	3.62	4.62	8.24
A - 2	5.12	3.94	9.06
A - 3	2.01	3.78	5.79
A - 4	9.96	4.37	14.33
A - 5	10.74	3.55	14.29

$\delta_i = \delta_0 + \Delta\delta$

δ_0 : 持続荷重開始時たわみ

$\Delta\delta$: 持続荷重によるたわみ増加量

δ_i : 持続荷重後の時刻 i におけるたわみ

4.37 ($\ell/618$) mm で、ほぼ同じである。とくに、プレストレスを導入した試験体 A - 3, A - 5 の増加量が小さい。また、その増加量は A - 1 の増加量 $4.62 (\ell/584) \text{ mm}$ より小さくなっている。初載荷時のたわみに対してはあらかじめむくりを付けるなどの対策を講じれば、施工時に PCa 単体にひび割れの生じた PRC 合成部材は施工時荷重 P_i が載荷されていない場合と同じように扱うことができ、また前述のように、プレストレスの導入は有効なたわみ対策となる。

5. 結 論

以上の計算および実験結果をまとめると次のようになる。

- 1) 施工時荷重を受け、とくにそれによってひび割れが生じた PCa 単体からなる PRC 合成断面の応力計算法を誘導するとともに合成部材のたわみ計算法を提案した。これを用いた断面応力の計算値およびそれによるひび割れ幅やたわみの計算値は実験結果とほぼ一致した。
- 2) PCa 部断面の上部残存圧縮応力および PCa 単体せいが小さいことによるひび割れ間隔の減少によって合成梁の設計荷重時のひび割れ幅は、PCa 単体時にひび割れが生じた方が小さい場合もある。持続荷重期間中のひび割れ幅は、ひび割れ間コンクリートの収縮と鉄筋ひずみの増加により増え、その増加量は施工時荷重が載荷されていない RC 梁より小さい。
- 3) PRC 合成部材では、PCa 部断面の上部にはプレストレスや施工時荷重による圧縮応力が合成後も残存しているため、合成後の荷重に対する曲げ剛性は一体打ち部材の曲げ剛性より大きい。全スパンたわみは、等曲げスパンたわみと同様、施工時荷重によるたわみが大きく異なっているが、持続荷重による増加量はほぼ同じで、施工時荷重が載荷されていない RC 梁より小さくなっている。
- 4) プレストレスが導入された試験体では、鉄筋応力が制御され、初載荷時のひび割れ幅やたわみは、プレストレスが導入されていないものより小さくなっていたり、より大きな施工時荷重を受けても、その値は同程度かより小さくなっている。また、プレストレスが導入された試験体の持続荷重下におけるひび割れ幅やたわみの増加量は、プレストレスが導入されていない試験体と同程度かより小さくなっている。

以上のように、施工時荷重を受けて PCa 単体にひび割れの生じた PRC 合成梁 (前者) の施工時のたわみは、施工時荷重を受けていない RC 梁 (後者) より大きくなっている場合もあるが、持続荷重によるたわみ増加量は前者が後者より小さく、また、施工時のひび割れ幅および持続荷重によるその増加量はともに前者が後者より小さくなっている。一方、プレストレスの導入により、施工時の鉄筋応力およびひび割れ幅やたわみが制御され、持続荷重によるその増加量はプレストレスの導入されていないものと同程度かより小さくなっている。したがって、PRC 合成梁において支保工を省略し PCa 単体にひび割れが生じても施工時のたわ

みに対して必要に応じて対策を講じれば、通常の部材と同じように扱うことができるといえる、また、プレストレスの導入によりさらに設計・施工の自由度が増すことが可能になる。

謝 辞

本研究の遂行に協力を得た大阪大学助手中川隆夫氏、同大学院修了生尚自端氏および同南宏明氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：プレストレスコンクリート設計施工規準・同解説，1975年版，1987年版，1998年版
- 2) 日本建築学会：プレストレスコンクリート（PC）合成床板設計施工指針・同解説，1994
- 3) 日本建築学会：プレストレス鉄筋コンクリート（Ⅲ種PC）構造設計・施工指針・同解説，1986
- 4) 尚 自端，大野義照，李 振宝：施工時にひび割れの生じたプレストレス鉄筋コンクリート合成梁の曲げ性状（初載荷時の曲げ性状について），日本建築学会構造系論文集第542号，pp.131～138，2001.4
- 5) 李 振宝，大野義照，南 宏明：施工時にひび割れの生じたプレストレス鉄筋コンクリート合成梁の曲げ性状（持続荷重下の曲げ性状について），日本建築学会構造系論文集第577号，pp.145～152，2002.7
- 6) 池田永司，青木 繁：プレキャストコンクリートに残存する圧縮応力の影響を受けるコンクリート合成梁の断面算定法の研究，日本建築学会構造系論文集第549号，pp.121～126，2001.11
- 7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説—許容応力度設計法—，1999
- 8) A.Ghali・R.Favre：Concrete Structures（Stresses and Deformation），Second Edition Chapter（1，6），Appendix（A，B），1994（川上洵，樫福浄他訳：コンクリート構造物の応力と変形，技報堂出版，1995）
- 9) 李 振宝，大野義照，鈴木計夫：パーシャルプレストレスコンクリート合成断面の応力計算と略算法，プレストレスコンクリート技術協会シンポジウム'94，pp.105～110，1994.10
- 10) T.Y.Lin and N.Burns: Design of Prestressed Concrete Structure; John Wiley&Sons, Inc. 1981
- 11) 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
- 12) Building Code Requirements for Reinforced Concrete（ACI 318-83）
- 13) 鈴木計夫，大野義照，太田 寛：RC及びPRCスラブの曲げひび割れ幅算定式について，セメント技術年報，第37巻，pp.458～462，1983

【2002年7月1日作成】