

# 論文 プレキャスト単体にひび割れの生じた RC, PRC 合成梁の長期ひび割れ幅とたわみ

南宏明\*1・大野義照\*2・尚自端\*3・李振宝\*4

**要旨：**施工時荷重によりプレキャスト単体にひび割れが生じた RC, PRC 合成梁 8 体の持続荷重実験を行い、長期ひび割れ幅とたわみについて検討した。実験要因は、プレキャスト単体に作用する施工時荷重の大きさ、単体のせい、プレストレスの有無である。持続荷重期間は 5 体の試験体が 2 年間、3 体の試験体が 1 年間である。持続荷重によるひび割れ幅やたわみの増加量は、持続荷重開始時の値の大小に関わらずほぼ一定であった。また、長期ひび割れ幅やたわみの計算値は実測値とほぼ一致した。

**キーワード：**プレキャスト合成梁, 施工時荷重, 長期ひび割れ幅, 長期たわみ

## 1. はじめに

プレキャスト単体を用いた合成部材（プレキャスト複合コンクリートともいう）は、一般に施工時には支保工が用いられ、プレキャスト（以下 PCa と略記）単体に荷重は作用しない。しかしプレストレスコンクリート合成部材<sup>1)</sup>のように PCa 単体で施工時荷重を支持できれば、その施工は容易になる。本研究では、PCa 単体が施工時荷重を支持する合成梁の曲げ性状について PCa 単体のせい、施工時荷重、プレストレスなどを実験要因に調べた。初荷重時の挙動ならびに持続荷重時の一部の挙動は前報<sup>2)</sup>で報告した。本報で新たに行った実験を追加するとともに持続荷重時の挙動を主に実験結果と解析結果について報告する。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体の種類及び荷重方法

試験体の種類を表-1 に示す。実験 A は設計荷重 P（鉄筋の長期許容応力度(200MPa)から定まる S-A-1 の許容荷重  $4.4 \times 10^4 \text{N}$ ）に対する PCa 単体時に作用する施工時荷重 P1 の割合、PCa 単体のせい、及びプレストレスの有無を実験要因とし、実験 B は設計荷重 P に対する施

工時荷重 P1 の割合のみを実験要因とした。

荷重方法及び実験 B の試験体の形状を図-1 に示す（実験 A の断面形状は前報に掲載した）。

表-1 試験体の種類

試験体	荷重の割合 (%)		部材せい (mm)		プレストレス力 ( $\times 10^4 \text{N}$ )
	P1/P	P2/P	PCa	後打	
S-A-1	0	100	250	70	0
S-A-2	50	50	250	70	0
S-A-3	50	50	250	70	4.8
S-A-4	30	70	180	140	0
S-A-5	50	50	180	140	4.8
S-B-1	15	85	220	100	0
S-B-2	30	70	220	100	
S-B-3	40	60	220	100	

注：P=P1+P2, P1は施工時荷重, P2は積載荷重

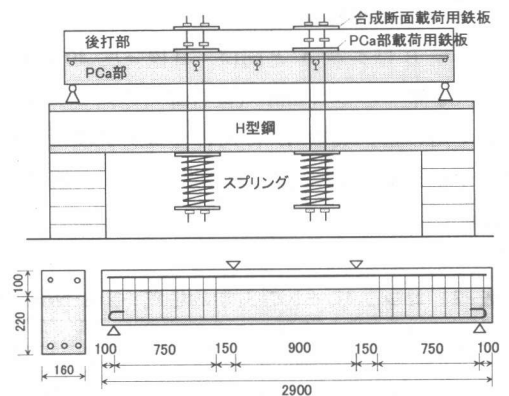


図-1 持続荷重方法及び断面

\*1, \*3 大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻 (正会員)  
 \*2 大阪大学教授 工学研究科建築工学専攻 工博 (正会員)  
 \*4 大末建設(株) 技術開発部 工博 (正会員)

試験体は実験 A,B とも断面 160×320(mm), 長さ 2900mm の複筋梁である。引張側には 3-D13, 圧縮側には 2-D13 を配し, 支点と載荷点間の 750mm にあばら筋 D10 を 150mm 間隔で配筋し, 等曲げ区間には配筋していない。持続荷重は 3 等分点載荷とした。実験 A は PCa 単体コンクリート材齢 22 日に, 実験 B は同じく 12 日に施工時荷重 P1 を載荷した。その後, PCa 単体に後打コンクリートを打設し, 実験 A においては後打コンクリートの材齢 22 日 (PCa 単体に P1 を載荷した 43 日後) に, 実験 B においては後打コンクリートの材齢 7 日 (同じく 11 日後) に積載荷重に相当する荷重 P2 (P2=P-P1) を載荷した。実験は温度 12~27°C, 湿度 30~80% の環境中で行った。載荷期間の温度と湿度の経時変化を図-2 に示す。

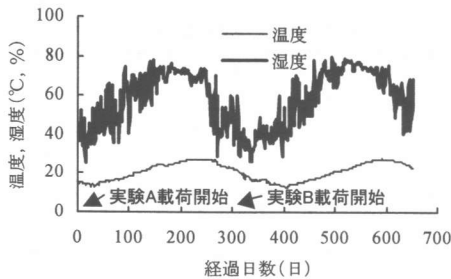


図-2 温度及び湿度の経時変化

## 2.2 使用材料

実験 B は実験 A と同様, 目標強度 40N/mm<sup>2</sup> (PCa 部) と 24N/mm<sup>2</sup> (後打部) のコンクリートを用いた。実験 B に用いたコンクリートの力学的性質を表-2 に示す。なお, 主筋には SD495D13 を用いた。

表-2 コンクリートの力学的性質 単位:N/mm<sup>2</sup>

位置	PCa 部		後打部	
材齢(日)	12	23	7	378
圧縮強度(F <sub>c</sub> )	31.8	32.4	22.2	32.0
引張強度(F <sub>t</sub> )	2.30	2.10	1.80	2.50
Ec(×10 <sup>4</sup> )	2.30	2.70	2.20	2.46

## 2.3 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において 100mm 間隔に貼付した箔ストレインゲージ (2mm) で測定し, たわみは中央及び載荷点位置の計 3ヶ所においてダイヤルゲージで測定した。ひび割れ幅は引張鉄筋高さ位置において検長 60mm のコンタクトストレインゲージ (以下 C.S.G と略記) で, 圧縮側コンクリートのひずみは圧縮縁から 20mm 下の両側面において検長 100mm の C.S.G で測定した。その他に, 断面のひずみ分布を調べるため, 接合面の上下 20mm の 2点において, コンクリートのひずみを C.S.G で測定した。なお, 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で, クリープは 100×100(mm)断面の角柱試験体を用いて測定した。クリープ試験体の持続圧縮応力は 6N/mm<sup>2</sup> である。図-3 及び図-4 にそれぞれ乾燥収縮ひずみ Sh(t)及びクリープ係数 φ(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近似曲線である。

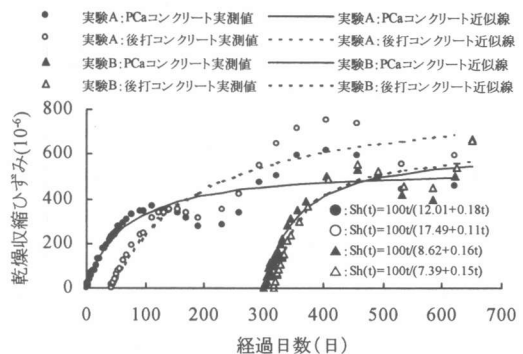


図-3 乾燥収縮ひずみ

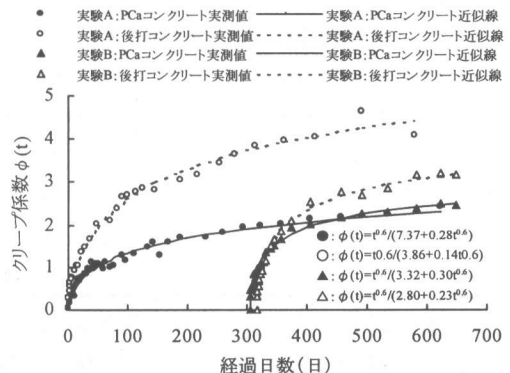


図-4 クリープ係数

### 3. PCa 合成梁断面の長期応力算定法

#### 3.1 変動応力下のクリープひずみ

変動応力下のコンクリートのクリープひずみは次式のように表わされる。

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

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、

$$\varepsilon_c(t) = \sigma_c(t_0) \frac{1 + \phi(t, t_0)}{E_c(t_0)} + \Delta\sigma_c(t) \frac{1 + \chi\phi(t, t_0)}{E_c(t_0)} \quad (2)$$

ここに、 $\chi(t, t_0)$  は材令係数と呼ばれ、1 より小さい無次元係数である<sup>3)</sup>。若材令に載荷しない場合、 $\chi$  は 1 に近いため(2)式はさらに次のように近似される。

$$\varepsilon_c(t) = (\sigma_c(t_0) + \Delta\sigma_c(t)) \frac{1 + \chi\phi(t, t_0)}{E_c(t_0)} = \frac{\sigma_c(t)}{\bar{E}_c(t, t_0)} \quad (3)$$

ここに、 $\bar{E}_c(t, t_0) = \frac{E_c(t_0)}{1 + \chi\phi(t, t_0)}$  材令修正ヤング係数

#### 3.2 方程式の誘導

PCa 単体時にひび割れの生じた RC, PRC 合成梁の初期断面ひずみ分布<sup>4)</sup>と長期断面ひずみ分布を PCa 単体の P1 載荷時のひずみ分布と共に図-5 に示す。各位置のひずみは未知数  $x(t, t_0)$ 、 $\phi(t, t_0)$  を用いて次のように表わせる(記号は図-5 を参照)。

$$\varepsilon_{c2}(t, t_0) = \phi(t, t_0) \cdot x(t, t_0)$$

$$\varepsilon_{s2}(t, t_0) = \phi(t, t_0) \cdot (d_c - x(t, t_0))$$

$$\varepsilon_{c1}(t, t_0) = \varepsilon_1 - \phi(t, t_0) \cdot (D_2 - x(t, t_0))$$

$$\Delta\varepsilon_p(t, t_0) = \phi(t, t_0) \cdot (d_p - x(t, t_0)) - \left\{ \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{D_1 - D_2} \cdot (D_1 - d_p) + \varepsilon_2 \right\}$$

$$\varepsilon_{s1}(t, t_0) = \phi(t, t_0) \cdot (d_s - x(t, t_0)) - \left\{ \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{D_1 - D_2} \cdot (D_1 - d_s) + \varepsilon_2 \right\}$$

$$\begin{aligned} \phi_0(t, t_0) &= \frac{\varepsilon_{c1}(t) - \varepsilon_3}{D_1 - D_2} = \frac{\phi(t, t_0) \cdot (D_1 - x(t, t_0)) - \varepsilon_2 + \varepsilon_{c1}(t)}{D_1 - D_2} \\ &= \frac{\phi(t, t_0) \cdot (D_1 - D_2) - \varepsilon_2 + \varepsilon_1}{D_1 - D_2} \end{aligned}$$

$$x_0(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{c1}(t)}{\phi_0(t, t_0)} = \frac{\{\varepsilon_1 - \phi(t, t_0) \cdot (D_2 - x(t, t_0))\} \cdot (D_1 - D_2)}{\phi(t, t_0) \cdot (D_1 - D_2) - \varepsilon_2 + \varepsilon_1}$$

$x \leq D_2$ 、 $0 \leq x_0 \leq D_1 - D_2$  の場合、合成梁断面の長期応力の合力  $C(t, t_0)$  と  $T(t, t_0)$  は次のように表わされる。

$$C_{c2}(t, t_0) = \varepsilon_{c2}(t) \cdot \bar{E}_{c2}(t, t_0) \cdot x(t, t_0) \cdot \frac{b}{2}$$

$$C_{c1}(t, t_0) = \varepsilon_{c1}(t) \cdot \bar{E}_{c1}(t, t_0) \cdot x_0 \cdot \frac{b}{2}$$

$$T_p(t, t_0) = P_0 + \Delta\varepsilon_p(t) \cdot E_p \cdot a_p$$

$$T_s(t, t_0) = \varepsilon_{s1}(t) \cdot E_s \cdot a_s$$

$$C_s(t, t_0) = \varepsilon_{s2}(t) \cdot E_s \cdot a_c$$

ここに、 $E_s$  : 鉄筋のヤング係数、 $E_p$  : PC 鋼材のヤング係数、 $\bar{E}_{c1}(t, t_0)$  : PCa コンクリートの材令修正ヤング係数、 $\bar{E}_{c2}(t, t_0)$  : 場所打コンクリートの材令修正ヤング係数

これらの式を軸方向力の釣合式  $\Sigma(C-T)=0$  と中立軸に関するモーメントの釣合式  $\Sigma M=0$  に代入して解けば、合成断面の長期応力の算定ができる。

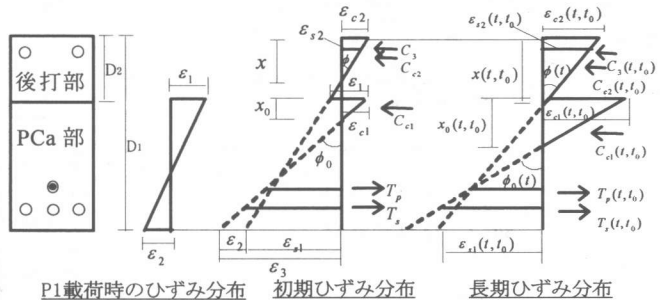


図-5 合成断面の初期及び長期ひずみ分布

### 4. 実験結果と考察

#### 4.1 合成梁の初期曲げ性状

##### (1) 曲げひび割れ幅とたわみ

実験 A についてはすでに報告しているの、実験 B についてのみ記述する。

P1 および P2 載荷時の鉄筋ひずみ、ひび割れ幅およびたわみの荷重との関係を、それぞれ図-6、図-7、および図-8 に示す。同図中には比較のため、実験 A の施工時荷重 P1=0 の試験体 S-A-1 の結果も示している。

前報で指摘したように PCa 単体時に施工時荷重 P1 を載荷された試験体は、合成梁となっ

てから P2 を載荷されると図-9 の断面ひずみ分布からわかるように中立軸位置が下方になり、圧縮域が広く、曲げ剛性が大きくなる。その結果、鉄筋ひずみやひび割れ幅の持続載荷開始時における値は試験体間において大きな差異はない。一方、たわみは P1 載荷時の差異が大きく、持続載荷開始時においても P1 が大きい程たわみは大きくなっている。

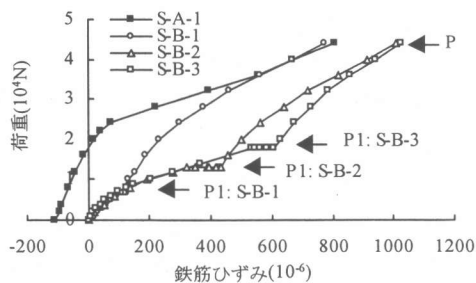


図-6 鉄筋ひずみ

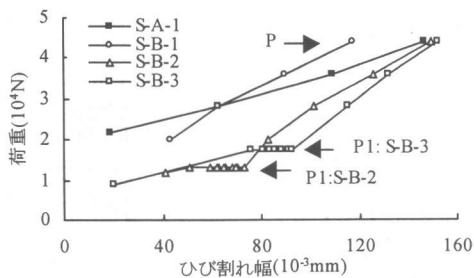


図-7 ひび割れ幅

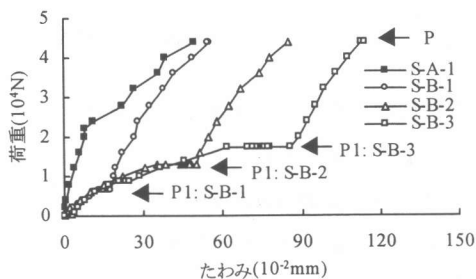


図-8 たわみ

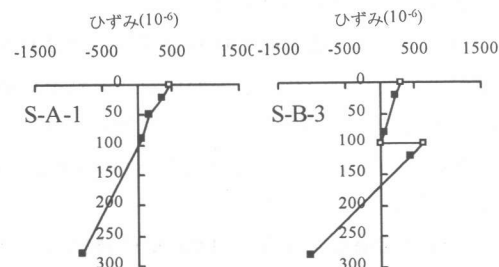


図-9 断面ひずみ分布

## (2) P2 載荷直前におけるひずみ

PCa 単体の圧縮縁ひずみ、鉄筋ひずみ、たわみなどの P1 載荷とその持続載荷による値を前掲のクリープ係数と乾燥収縮ひずみを用いて Mean-stress 法により計算した。その結果を実測値と共に表-3 に示す。解析値は実測値にほぼ一致している。

表-3 P2 載荷直前の実測値と解析値

試験体	圧縮縁ひずみ (10 <sup>-6</sup> )		鉄筋ひずみ (10 <sup>-6</sup> )		たわみ (10 <sup>-2</sup> mm)	
	実測	解析	実測	解析	実測	解析
S-A-1	136	134	-162	-179	-0.75	—
S-A-2	474	686	380	685	43.8	63.8
S-A-3	429	474	42	9	19.0	33.9
S-A-4	696	720	736	631	100.0	99.3
S-A-5	1044	808	644	626	123.3	103.1
S-B-1	197	297	98	242	17	26
S-B-2	469	486	416	489	48	45
S-B-3	514	612	585	654	77	68

## 4.2 合成梁の長期曲げ性状

### (1) 圧縮縁ひずみの経時変化

圧縮縁ひずみの経時変化を図-10 に示す。

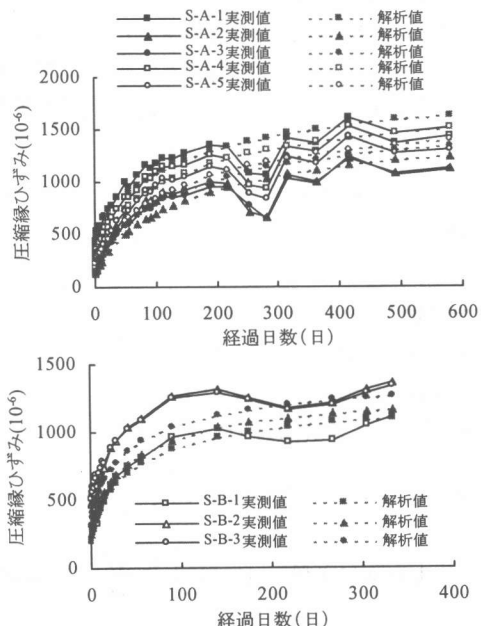


図-10 長期圧縮縁ひずみ

各試験体の圧縮縁ひずみは、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り増加している。解析値は前述のクリープ解析に

より求めた圧縮縁ひずみにコンクリートの乾燥収縮分を加えた値である。実測値と解析値はほぼ対応している。なお、実測値はコンクリートの線膨張係数を  $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$  として温度補正を行っている。

圧縮縁のひずみの実測値が大きく変動しているのは、季節による湿度変化の影響を受けたものである。解析値は、乾燥収縮ひずみおよびクリープをそれぞれ図-2 および図-3 に示した近似線の関数で与えているため、変動していない。

### (2) 鉄筋ひずみの経時変化

鉄筋ひずみの経時変化を図-11 に示す。鉄筋ひずみは持続荷重開始直後に付着クリープによって急増しているが、全般に経時変化はコンクリートの圧縮縁ひずみに比べて小さい。

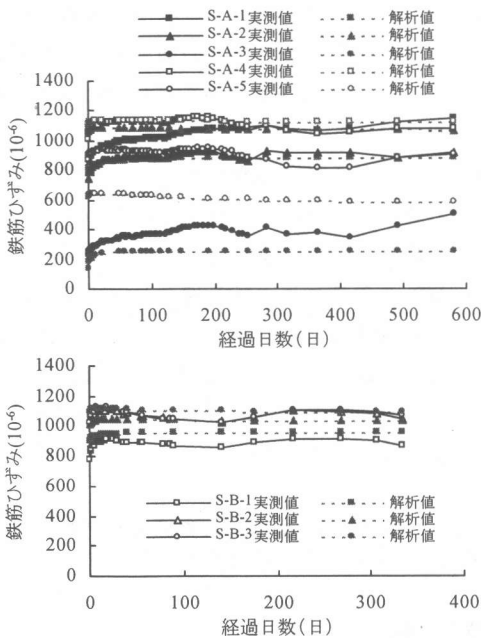


図-11 長期鉄筋ひずみ

### (3) 長期断面ひずみ分布

断面ひずみ分布の経時変化を図-12 に示す。この断面ひずみ分布は、後打ち部の上部と下部、PCa 単体の上部のコンクリートひずみと引張鉄筋ひずみの4つの実測値から作成した。

各試験体において、圧縮力が作用するコンクリート断面はクリープと乾燥収縮により圧縮ひ

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引張鉄筋ひずみも増加している。

試験体 S-A-1 は P1 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、P1 荷重を載荷した試験体 S-A-4 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。

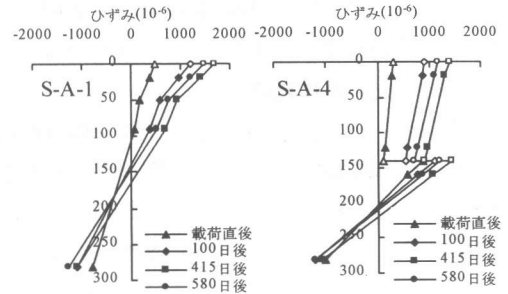


図-12 長期断面ひずみ分布

### (4) ひび割れ幅の経時変化

ひび割れ幅の経時変化を図-13 に示す。各試験体のひび割れ幅は、時間の経過とともに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ている。

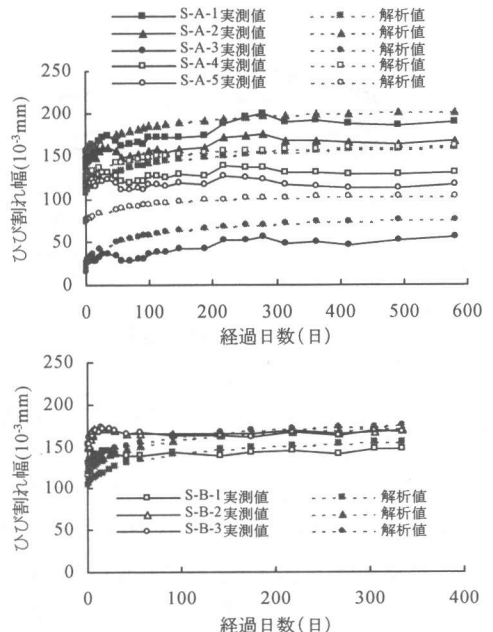


図-13 長期ひび割れ幅

ひび割れ幅  $W_{av}$  は次式により算定した。

$$W_{av} = l_{av} \cdot (\epsilon_{sav} + \epsilon_{sh})$$

$l_{av}$  は平均ひび割れ間隔で実測値を用いた。

$\epsilon_{sav}$  は平均鉄筋ひずみでひび割れ断面での鉄筋ひずみ計算値からひび割れ間コンクリートの協力作用を減じて求められるが、ここでは持続載荷を考慮してその協力作用を 1/2 としている<sup>5)</sup>。 $\epsilon_{sh}$  はコンクリートの乾燥収縮ひずみでコントロール試験体の乾燥収縮ひずみの 0.9 倍を用いた<sup>5)</sup>。計算値は実測値にほぼ一致している。

### (5) たわみの経時変化

等曲げスパンのたわみの経時変化を図-14 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により徐々に増加している。

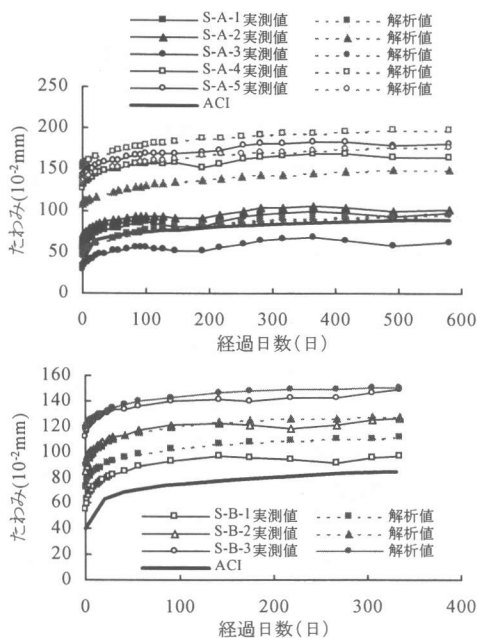


図-14 長期たわみ

たわみ  $\delta$  は前述の解析による曲率の計算値  $\phi$  を用いて、 $\delta = \phi \cdot L^2/8$ 、 $L$ ：等曲げスパン、から計算した。実測値と計算値はほぼ一致している。また、図中には ACI318 委員会の長期たわみ計算式による計算値を示している。P1 が載荷されていない S-A-1 については実測値とほぼ一致している。その他の試験体については P1

載荷やプレストレスによって初期値が異なっているのが大きく異なっているものもあるが、増加量についてはほぼ一致している。

持続載荷によるたわみの増加量は実験 A では 0.40~0.51mm、実験 B では 0.37~0.42mm で P1 の大きさに関係なくほぼ同じである。

## 5. まとめ

実験結果をまとめると次のようになる。

- 1) 鉄筋ひずみとひび割れ幅の持続載荷開始時における値は、PCa 単体時の施工時荷重 P1 の大きさの影響をあまり受けない。一方、たわみは P1 載荷の影響が大きく、持続載荷開始時において P1 が大きい程たわみは大きくなっている。
- 2) 施工時荷重 P1 の大きさは持続載荷期間中のひび割れ幅やたわみの増加量には影響せず、P1 の異なる試験体の増加量に大きな差異はない。
- 3) 合成部材の載荷履歴を考慮した長期応力の計算によるひび割れ幅やたわみの算定値は実験値とほぼ一致した。
- 4) ACI の計算法による長期たわみの算定値は P1 の載荷がない試験体においては実測値とほぼ一致した。P1 が載荷された場合も、長期たわみの増加量については算定値と実測値はほぼ一致している。

謝辞：本実験の実施に際して協力を得た本研究室技官 中川隆夫氏に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 建築学会：プレレストコンクリート(PC)合成床板設計施工指針・同解説、1994.11
- 2) 尚自端・大野義照・李振宝・南宏明：鉄筋コンクリート合成梁の長期曲げ性状、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.22, No.3, pp.907-912, 2000.6
- 3) A.Ghali・R.Favre：Concrete Structures (stresses and Deformation), Second Edition Chapter(1,6), Appendix (A, B), 1994
- 4) 李振宝, 大野義照, 鈴木計夫：パーシャリープレレストコンクリート合成断面の応力計算と略算法、プレストレス技術協会シンポジウム'94, 1994.10
- 5) 李振宝・大野義照・尚自端・鈴木計夫：鉄筋コンクリート梁の長期ひび割れ幅、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.19, No.2, pp.879-884, 1997.6