

# 論文 PRC 部材のひび割れ幅の長期変化に関する検討

青山 尚<sup>\*1</sup>・古賀 裕久<sup>\*2</sup>・渡辺 博志<sup>\*3</sup>・竹内 祐樹<sup>\*4</sup>

**要旨:** 持続荷重を受ける PRC 部材の曲げひび割れ幅の長期変化について、導入するプレストレス力、荷重条件および載荷材齢が異なる供試体を作成して検討した。その結果、導入したプレストレス力の大小と、持続荷重によるたわみ、ひび割れ幅、鉄筋ひずみの増加量の関係は、明確ではなかった。一方、プレストレスが導入されている供試体は、載荷開始時点でのひび割れ幅のばらつきが大きく、それが持続載荷中のひび割れ幅の増加量のばらつきにも影響する傾向があった。

**キーワード:** プレストレス, 持続載荷, PRC 部材, ひび割れ幅

## 1. はじめに

プレストレスコンクリート（以下、PC）道路橋は、一般的に、通常の荷重条件下では、ひび割れが生じないように設計・施工されてきた。一方、最近では、変動荷重作用時（活荷重等）にひび割れ発生を許容するプレストレスコンクリート（以下、PRC）道路橋の採用により、構造物の合理化を図ろうとする試みもなされつつある。このような PRC 構造において、十分な耐久性を確保するためには、発生するひび割れの幅やその経時的な変化を適切にコントロールできることが前提である。しかし、現状では、特に長期に持続する荷重を受ける部材において、十分な精度でひび割れ幅を制御することが可能かどうか明らかではない。

そこで、本研究では、導入するプレストレス力の大きさを变化させた供試体を作製し、荷重および載荷材齢の異なる持続載荷試験を行い、乾燥収縮やクリープの影響によるひび割れ幅の長期変化について検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体の種類

供試体の形状寸法を図-1 に、供試体の諸元を表-1 に示す。供試体は、いずれも断面形状を 300×300mm、長さを 3000mm とし、プレストレス導入度を変化させた供試体を作成した。このプレストレス導入度は、本実験で仮定する設計曲げモーメント 27.5kN・m（以下、1M<sub>d</sub>）が作用する時に部材引張縁の応力度がゼロとなるようなプレストレス導入度を 100%とした時に、B 供試体で 60%、C 供試体で 30%、D 供試体で 0%となるように定めた。配置する引張鉄筋は、載荷荷重を 2.0M<sub>d</sub>（55.0kN・m）とした場合に、供試体中の鉄筋ひずみが、載荷前に比べ 1000μ 増加するようにその鉄筋径を決定した。この実験条件は、比較的頻度が高い荷重組合せでも軸方向鉄筋に引張応力が生じることを許容するような PRC 部材を想定したものである。

載荷荷重は、B1,D1 供試体で 1.0M<sub>d</sub> とし、その他の供試体は、2.0M<sub>d</sub>（55.0kN・m）とした。供試体はコンクリ

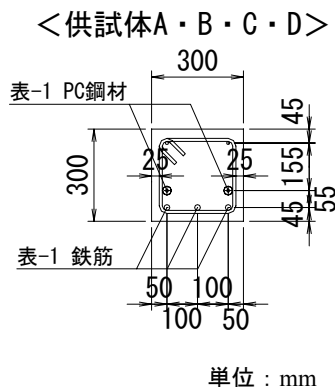


図-1 供試体の形状寸法

表-1 供試体の諸元

供試体の種類	PC 鋼材	引張鉄筋	緊張力 (kN)	k (%)	M / M <sub>d</sub> 計画値	載荷材齢
A1	2-φ17	2-D10	272	100	1.0	(参考供試体)
B1	2-φ13	3-D16	159	58	1.0	28 日
B2					2.0	27 日
B3					2.0	418 日
C2	2-φ9.2	3-D19	80	29	2.0	27 日
D1	—	3-D22	—	0	1.0	28 日
D2					2.0	26 日

※k はプレストレス導入度であり、 $k = M_0 / M_d$  から算出される。ただし、M<sub>0</sub>: プレストレス力および軸方向力によるコンクリート応力度が部材引張縁でゼロとなる曲げモーメント、M<sub>d</sub>: 設計曲げモーメント(M<sub>d</sub>=27.5kN・m)、M: 持続荷重モーメント M および M<sub>d</sub> は計画値であり、載荷荷重に関しては、鉄筋ひずみで管理した。

- \*1 独立行政法人土木研究所 橋梁構造研究グループ 構造物メンテナンス研究センター 交流研究員 (正会員)
- \*2 独立行政法人土木研究所 材料地盤研究グループ 基礎材料チーム 主任研究員 工修 (正会員)
- \*3 独立行政法人土木研究所 材料地盤研究グループ 基礎材料チーム 上席研究員 工博 (正会員)
- \*4 独立行政法人土木研究所 橋梁構造研究グループ 構造物メンテナンス研究センター 交流研究員 (正会員)

ートの材齢が約 28 日となった時点で載荷することを基本とした。B3 供試体は、その約 1 年後（材齢 418 日）に載荷した。

## 2.2 配合および使用材料

コンクリートの配合および材料試験結果を表-2 に、鋼材の材料試験結果を表-3 に示す。ここで、コンクリートは、目標強度 40N/mm<sup>2</sup> が得られる配合とし、全ての供試体で同一バッチのものを用いた。なお、コンクリート材料には、早強セメント、砂利（鬼怒川流域、表乾密度 2.62g/cm<sup>3</sup>）、砂（鬼怒川流域、表乾密度 2.60g/cm<sup>3</sup>）を使用した。また、PC 鋼材は SBPR930/1030（B 種 1 号）、鉄筋は SD345 のものを用いた。

供試体は、打設後 4 日目に脱枠を行い、10 日目に PC 鋼材の緊張作業を行った。この際、PC 鋼材のひずみをモニタリングし、所定の緊張力が得られるように 3~4% の引き越し後、定着具の締め付けを行った。緊張翌日にはグラウトを注入した。

## 2.3 載荷方法

載荷は、図-2 に示すように、供試体の上面が引張縁となるように上下反転させ、端部の載荷用 PC 鋼棒を緊張することにより行った。また、載荷は、10 点測定した鉄筋ひずみの最大値が、載荷前（表-4）と比較して 1000μ 増加するまで行った。

なお、B3 供試体においては、載荷時の材齢が 1 年以上と長く、載荷までの間に生じたコンクリートの収縮やクリープの影響で、鉄筋に 430μ 程度の圧縮ひずみが導入されていた。一方、B3 供試体と同じ 300×300mm の断面を有する無筋コンクリート供試体を B3 供試体と同時に作成し、B3 供試体と同様な養生・保管条件で乾燥収縮量およびクリープ係数を測定した結果、鉄筋の拘束がなければ 500μ 程度（収縮：400μ、クリープ：100μ）のひずみが生じることがわかった。そこで、供試体の鉄筋には、乾燥収縮・クリープの影響で 70μ（500μ と 430μ の差）の圧縮ひずみが作用していると考えた。プレストレスによる圧縮ひずみ 90.8μ と合計すると、載荷直前の B3 供試体の鉄筋には、160.8μ の圧縮ひずみが作用していたと仮定した。

持続載荷試験中は、載荷用 PC 鋼材の緊張力を月に一回調整することで、載荷荷重を一定とした。持続載荷試験は、茨城県つくば市の土木研究所内にある実験棟内で行った。実験棟内での温度および相対湿度の変化を図-3 に示す。なお、温度と相対湿度の結果は、10 分ごとに測定した結果を使用し、一日の平均値として示した。

## 2.4 持続載荷中における測定

持続載荷中は、図-4 に示すように、供試体中央のたわみ、等曲げ区間の鉄筋のひずみ（10 点）をモニタリングした。また、鉄筋ひずみを測定するひずみゲージと対

応する供試体側面にコンタクトゲージ測定用チップを貼り付け、約 1 ヶ月ごとにチップ間の距離を測定した。このチップ間の距離の増加を、ひび割れ幅として評価することとした。

表-2 コンクリート配合および材料試験結果

水セメント比 (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材率 (%)	材齢 28 日		
			圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
49.0	148	42.5	39.7	28.6	3.22

表-3 鋼材の材料試験結果

供試体名	PC 鋼棒			異形鉄筋		
	呼び名	弾性係数 kN/mm <sup>2</sup>	降伏強度 N/mm <sup>2</sup>	呼び名	弾性係数 kN/mm <sup>2</sup>	降伏強度 N/mm <sup>2</sup>
B1 ~ B3	φ 13	201	1055	D16	188	365
C2	φ 9.2	200	1262	D19	185	379
D1, D2	—	—	—	D22	186	386

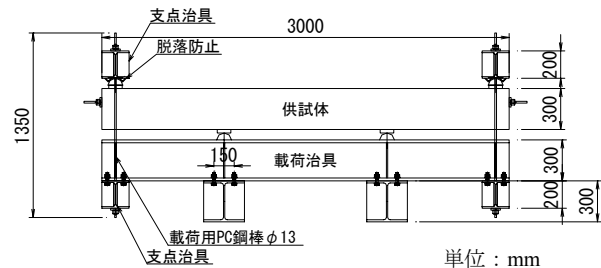


図-2 載荷方法

表-4 載荷前における鉄筋圧縮ひずみ

供試体名	鉄筋の圧縮ひずみ (μ)
B1	108.6
B2	111.4
B3	160.8
C2	56.7
D1	—
D2	—

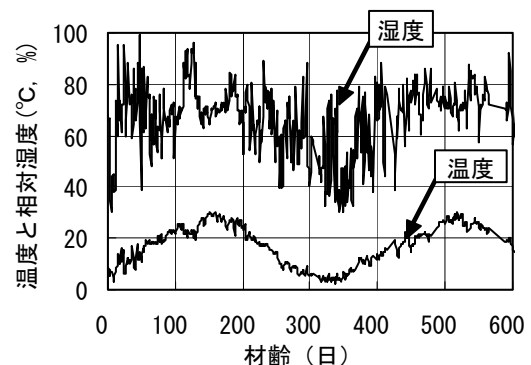


図-3 実験棟内の温度と湿度結果

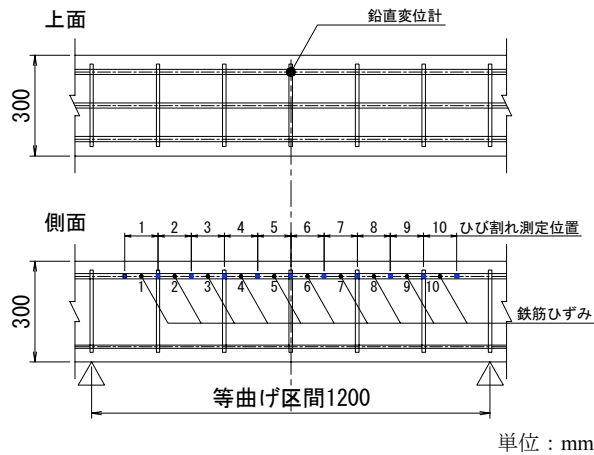


図-4 測定位置

### 2.5 乾燥収縮試験

荷重する供試体と同じ形状、配合の無筋コンクリート供試体を製作し、持続荷重中の供試体の近傍に保管してその寸法変化を測定した。その結果を図-5に示す。材齢28日前後での乾燥収縮は、100 $\mu$ 程度であった。B3供試体の荷重を行った材齢418日以降は、ひずみの増加が量はわずかであった。

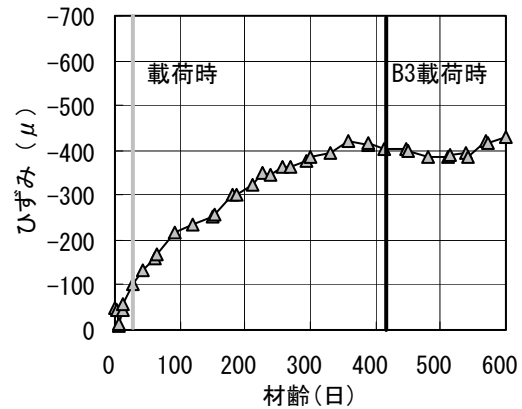


図-5 乾燥収縮ひずみ

表-5 ひび割れ本数および間隔

供試体名	ひび割れ本数	ひび割れ間隔	
		最大	平均
B1	5本	271mm	220mm
B2	10本	166mm	118mm
B3	8本	215mm	169mm
C2	9本	196mm	142mm
D1	7本	258mm	186mm
D2	9本	199mm	140mm

### 3. 長期持続荷重結果

#### 3.1 ひび割れ本数・ひび割れ間隔

各供試体のひび割れ本数とひび割れ間隔を表-5に示す。また、図-6にひび割れ図を示す。B1供試体以外では、持続荷重試験を開始した時点で、表-5に示した本数のひび割れが入り、その後、本数の変化はなかった。一方、B1供試体では、荷重直後はひび割れが発生しなかったが、荷重後60日にひび割れが観察された。しかし、その後のひび割れ本数の増加はなかった。

#### 3.2 たわみ

持続荷重中における各供試体のたわみの変化を図-7に示す。持続荷重中のたわみには、いずれの供試体でも共通して上下する傾向があった。これについて検討したところ、供試体の温度変化との関係が認められた。長期持続荷重中は、荷重の影響で供試体が拘束されており、温度変化によって供試体のたわみ変動したものと考えられる。同様に以降に示す鉄筋ひずみおよびひび割れ幅においても温度変化によって生じた変形の影響を受けていた。

図-7で長期的なたわみの増加傾向を見ると、荷重荷重が2.0Mdの供試体では、プレストレス力に関わらずほぼ同等となった。また、約1年後に荷重したB3供試体のたわみは、B2供試体に比べて、荷重開始時点でのたわみは同程度であったが、持続荷重中の荷重後180日までの増加が約半分程度と小さくなっていた(B2:0.70mm, B3:0.36mm)。荷重までの材齢が長かったため、長期的

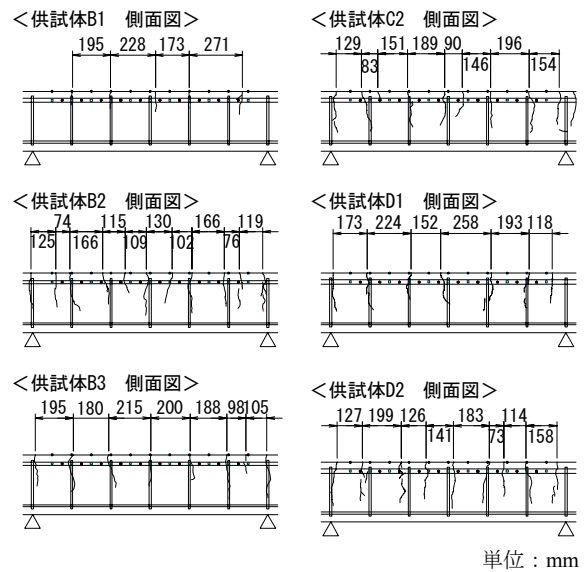


図-6 ひび割れ図

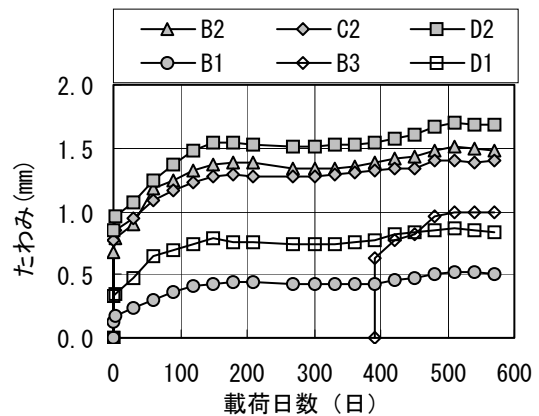


図-7 たわみ

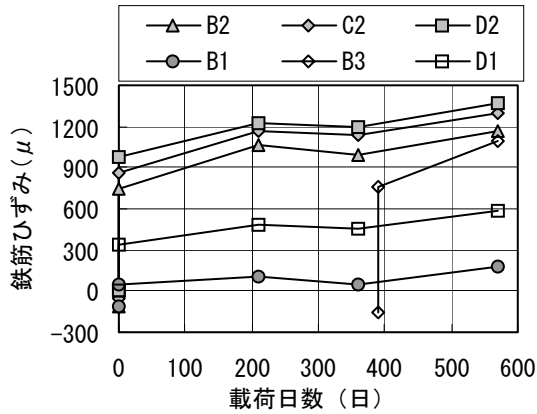


図-8 鉄筋ひずみの平均値

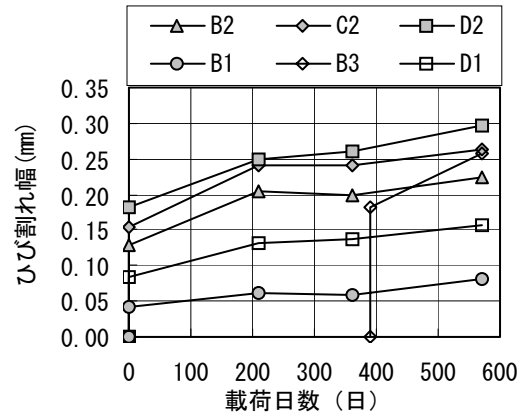


図-9 曲げひび割れ幅の最大値

なたわみの変化が小さくなったと考えられる。

### 3.3 鉄筋ひずみ

各供試体の鉄筋ひずみの平均値を図-8に示す。各材齢の鉄筋ひずみは、供試体の温度変化による変形の影響も受けており、持続荷重の影響による鉄筋ひずみの増減がわかりにくい。そのため、供試体の温度とほぼ同等となった荷重後1日,210日,360日,570日の結果を抜粋して比較した。

B2,C2,D2 供試体の鉄筋ひずみの変化は、荷重直後から荷重後 570 日までほぼ同様な傾向を示した。すなわち、持続荷重中の鉄筋ひずみの増加に関して、供試体の導入プレストレスの影響は明確ではなかった。

### 3.4 曲げひび割れ幅

各供試体の曲げひび割れ幅の最大値を図-9に示す。荷重荷重が2.0Mdの供試体では、曲げひび割れ幅の最大値は、導入プレストレスが大きい供試体ほど小さかった。これは、荷重前からの鉄筋ひずみの変化量が同程度になるように荷重したため、コンクリートの応力度が0となる状態を基準として整理すると、プレストレス力の大きい供試体ほど、荷重による鉄筋の引張ひずみが小さいためと考えられる。

## 4. ひび割れ幅の長期変化における考察

### 4.1 検討方法

持続荷重中の各材齢で見られた曲げひび割れ幅 ( $w$ ) は、鋼材位置のコンクリート応力度が0の状態からの鉄筋応力度の増加に起因するひび割れ幅 ( $w_s$ ) とコンクリートの収縮およびクリープ等の影響におけるひび割れ幅の和と捉えることができる。そこで、特に収縮およびクリープ等の影響によるひび割れ幅の増加 ( $w-w_s$ ) に着目して、その持続荷重中の変化を整理した。

このとき鉄筋応力度の増加によるひび割れ幅  $w_s$  は、ひび割れ間隔と各材齢における鉄筋ひずみの平均値から求めた。今回の供試体では、ひび割れ間に1つの鉄筋ひずみゲージしかない場合もあり、ひび割れ間の鉄筋ひず

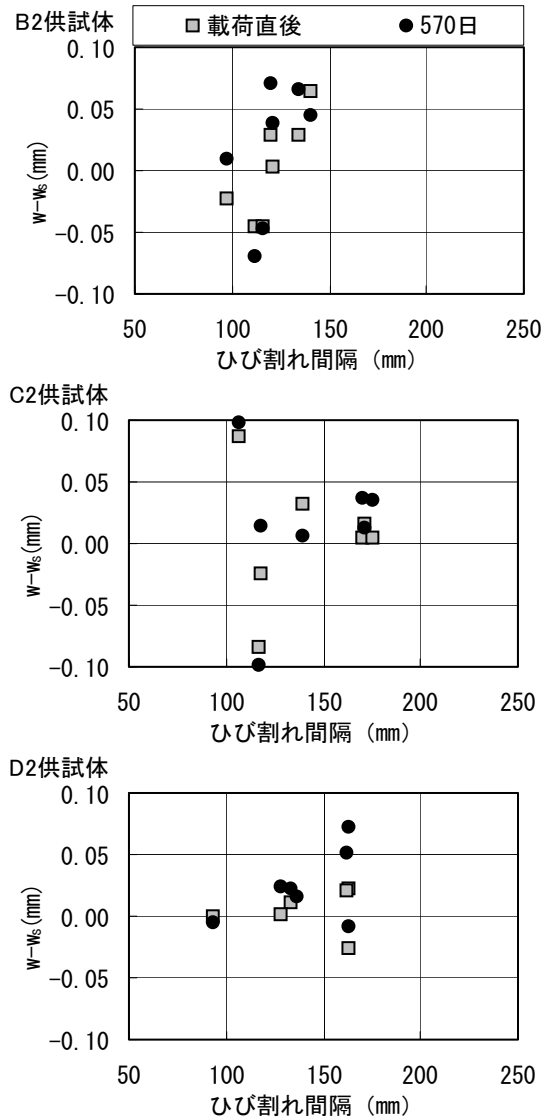


図-10 コンクリートの収縮およびクリープ等の影響によるひび割れ幅とひび割れ間隔の関係

みの代表値としてこれを用いるのは必ずしも適当でない。そこで、鉄筋ひずみは、等曲げ区間で測定した10点の平均値を用いた。ひび割れ間隔は、検討したひび割れから左右のひび割れまでの間隔を平均したものを使

用した。

なお、コンタクトゲージによる長さ測定範囲にひび割れが複数入っていた箇所は、各ひび割れの幅を測定することができないので、検討から除外した。

#### 4.2 ひび割れ幅の長期変化とひび割れ間隔の関係

コンクリートの収縮およびクリープ等の影響によるひび割れ幅の計算値とひび割れ間隔の関係を図-10に示す。コンクリートの収縮およびクリープ等の影響によるひび割れ幅は、持続載荷期間の経過とともに増大し、また、ひび割れ間隔が大きいほど大きくなるものと予想される。各供試体の測定結果を見ると、プレストレスが導入されていないD2供試体では、このような傾向が確認できた。一方、プレストレスが導入されているB2,C2供試体では、載荷直後と570日の計算値の違いに、ひび割れ間隔が大きい位置で大きくなる傾向は認められなかった。このことから、プレストレスが導入により、長期ひび割れ幅の増加傾向が異なる可能性がある。

#### 4.3 載荷直後のひび割れ幅とひび割れ幅の変化の関係

載荷直後に観察されたひび割れ幅とコンクリートの収縮およびクリープ等の影響によるひび割れ幅の関係を図-11に示す。B2,C2供試体では、載荷直後ひび割れ幅がひび割れによって大きく異なっており、最大と最小の差が0.13~0.15mmあった。また、持続載荷期間中の収縮およびクリープ等の影響によるひび割れ幅の変化もひび割れによる違いが大きく、載荷直後のひび割れ幅との関係は明確でなかった。また、載荷直後のひび割れ幅が0.05mm程度以下のひび割れでは、持続載荷期間中の収縮およびクリープ等の影響によるひび割れ幅の変化が負となっていた。すなわち、プレストレスが導入されている部材で、載荷直後に観察されたひび割れのうちひび割れ幅が小さいものは、ひび割れ幅が増加していないものや減少しているものがあるため、長期的にはひび割れとして挙動していない可能性がある。

#### 4.4 載荷材齢が異なる供試体のひび割れ幅の長期変化

載荷した材齢が1年以上と大きいB3供試体の結果について図-12~13に示す。収縮およびクリープ等の影響によるひび割れ幅とひび割れ間隔の結果は、B2,C2供試体の結果と同様、明確ではなかった。載荷直後のひび割れ幅と収縮およびクリープ等の影響によるひび割れ幅の関係に着目すると、載荷直後のひび割れ幅が大きいものほど、持続載荷中の収縮およびクリープ等によるひび割れの増大が大きくなっているようにも見受けられた。B3供試体のひび割れ本数は、B2供試体よりも少なく、ひび割れ間隔が広いことが影響している可能性がある。

供試体ごとにもとめた、収縮およびクリープ等の影響によるひび割れ幅の持続載荷中の変化の最大値を図-

14に示す。なお、ひび割れ幅の最大値は、温度変化の影響がない同等な材齢とし、B3供試体以外は、載荷後210日、B3供試体は載荷後180日の値としている。B3供試体は、他の供試体に比べ、約1/3程度とかなり小さい値となっていた。これは、載荷までの材齢が長く、曲げひ

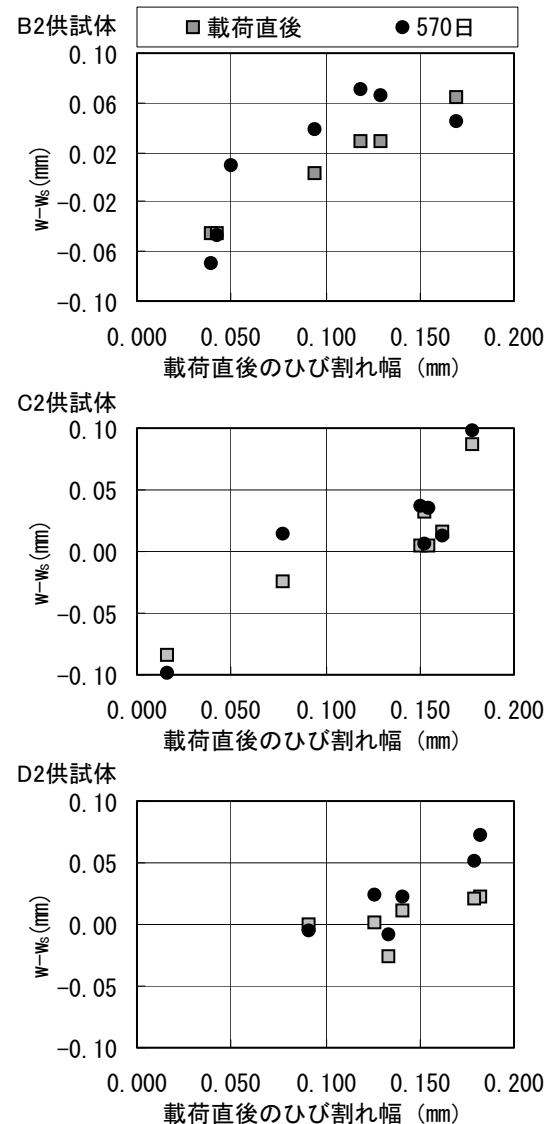


図-11 載荷直後のひび割れ幅とコンクリートの収縮およびクリープ等の影響によるひび割れ幅の関係

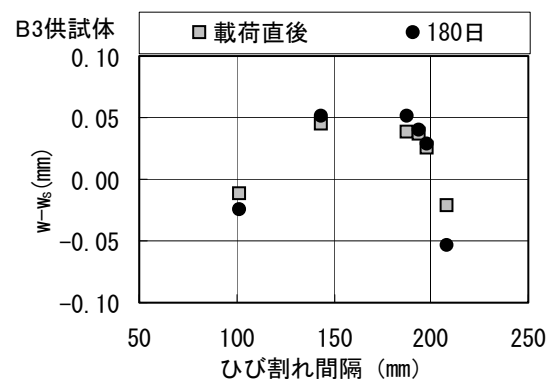


図-12 コンクリートの収縮およびクリープ等の影響によるひび割れ幅とひび割れ間隔の関係

ひび割れ発生後のコンクリートの収縮およびクリープが小さかったことが影響していると考えられる。

## 5. 土木学会のひび割れ算定式との比較

### 5.1 コンクリートの収縮やクリープ等の影響の評価方法

土木学会のコンクリート標準示方書<sup>1)</sup>では、曲げひび割れ幅を評価する式として式(1)が示されている。そこで、今回の実験結果から曲げひび割れ幅、曲げひび割れ間隔、鉄筋ひずみの実測値を用いて、式(1)の $\epsilon'_{csd}$ を算出し、コンクリートの収縮やクリープ等の影響程度を評価した。なお、算出はひび割れごとに行い、ひび割れ間隔および鉄筋ひずみについては、前章と同様な方法で求めた値とした。

$$w = l \left( \frac{\sigma_{se}}{E_s} + \epsilon'_{csd} \right) \quad (1)$$

ここに、 $w$ ：曲げひび割れ幅、 $l$ ：ひび割れ間隔、 $\sigma_{se}$ ：鋼材位置のコンクリート応力度が0の状態からの鉄筋応力度の増加量(N/mm<sup>2</sup>)、 $E_s$ ：鉄筋の弾性係数(N/mm<sup>2</sup>)、 $\epsilon'_{csd}$ ：コンクリートの収縮およびクリープ等を考慮するための数値

供試体ごとに算出した $\epsilon'_{csd}$ (平均値)を図-15に示す。 $\epsilon'_{csd}$ は、載荷後360日まで増加傾向にあり、その後はほぼ一定の値を示した。図-5で示した乾燥収縮結果においても、材齢300日程度で増加が小さくなっており、コンクリートの収縮と同様な傾向であった。B2,C2,D2供試体の結果においては、載荷後360日まで、増加傾向および増加量ともにほぼ同等の値であり、プレストレスの影響は確認できなかった。また、荷重が小さいB1,D1供試体においても、多少のばらつきはあるが、荷重が大きいB2,D2供試体の $\epsilon'_{csd}$ とほぼ同等となる結果であった。B3供試体の $\epsilon'_{csd}$ は、若干小さい値となった。算出した $\epsilon'_{csd}$ の結果は、いずれの供試体でも概ね150 $\mu$ 程度以下となっていた。

## 6. まとめ

今回の実験の範囲において、以下の知見を得た。

- (1) 長期持続載荷におけるたわみ、鉄筋ひずみ、曲げひび割れ幅の増加について、導入したプレストレスの影響は顕著ではなかった。
- (2) プレストレスを導入していない供試体では、ひび割れ間隔や載荷直後のひび割れ幅と収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の間に関係が認められた。
- (3) プレストレスが導入されている部材は、載荷直後の等曲げ区間に入ったひび割れ幅のばらつきが大きかった。また、ひび割れによって収縮および

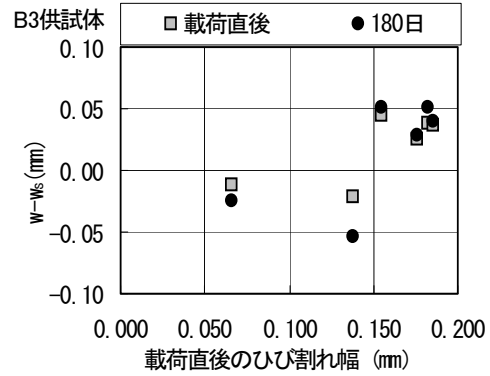


図-13 載荷直後のひび割れ幅とコンクリートの収縮およびクリープ等の影響によるひび割れ幅の関係

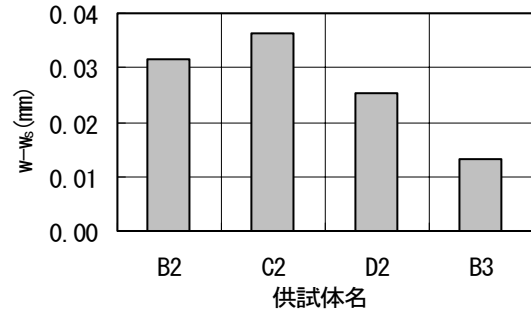


図-14 収縮およびクリープの影響によるひび割れ幅の持続載荷中の変化の最大値

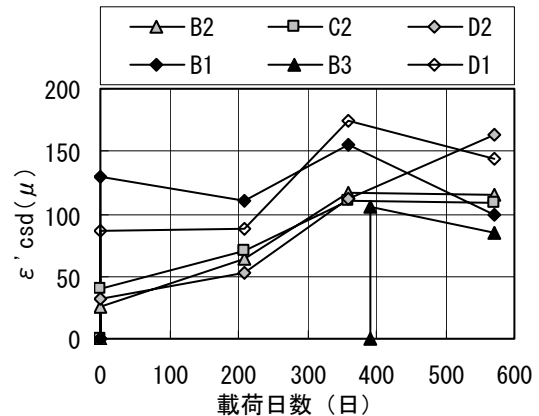


図-15 供試体ごとに算出した $\epsilon'_{csd}$ (平均値)

クリープ等によるひび割れ幅の増加量が異なっていたが、その原因が明確でなく、持続載荷後のひび割れ幅の予測が難しいことがわかった。

- (4) 載荷材齢の異なる B3 供試体のひび割れ幅の長期変動は、載荷までの材齢が長かったため、コンクリートの収縮およびクリープの影響が低減されていた。
- (5) コンクリートの収縮およびクリープ等の影響である $\epsilon'_{csd}$ の平均値には、導入プレストレスや載荷荷重による影響は明確には認められなかった。

### 参考文献

- 1) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書【設計編】，pp.102-105，pp.115，2007.12