

論文 持続載荷した PRC 部材の長期的な挙動に関する検討

竹内 祐樹^{*1}・古賀 裕久^{*2}・北野 勇一^{*3}・渡辺 博志^{*4}

要旨： PRC 部材のひび割れ幅の長期変動について、プレストレスレベルや荷重条件が異なるはり供試体を数体作成し、持続載荷試験を行い検討した。その結果、荷重条件と鉄筋の引張応力度が同一であり、ひび割れが定常状態に達していれば、たわみ、ひび割れ幅、コンクリートおよび鉄筋のひずみ分布性状、などの経時変化はプレストレスレベルに依存しないことを確認した。また、コンクリート標準示方書の曲げひび割れ幅照査式の中のコンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値 (ϵ'_{csd}) に着目し、持続載荷の影響を受けた鉄筋の引張応力度と実測値での最大ひび割れ幅より ϵ'_{csd} を算出した。

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

プレストレストコンクリート（以下、PC）道路橋は、一般的に、通常の荷重条件ではひび割れを生じさせないように設計・施工されてきた。一方、最近では、変動荷重作用時にひび割れの発生を許容するプレストレストコンクリート（以下、PRC）の採用により構造物の建設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を適切にコントロールできることが前提であるが、構造物の供用期間にわたって長期的に作用する荷重に対して、十分な精度でひび割れ幅の制御が可能かどうかはまだ明らかでないのが現状である。

そこで、本研究では、プレストレス力の大きさを変化させたはり供試体を作製し、荷重条件の異なる持続載荷試験を行うことで、PRC 部材のひび割れ幅やたわみの長期的な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 $300 \times 300\text{mm}$ 、長さを 3000mm とし、プレストレス導入度を変化させたものを作製した。この内、供試体 A1 は想定している設計曲げモーメント $M=27.5\text{kN} \cdot \text{m}$ （以下、 $1M_d$ ）が作用する時に部材引張縁の応力度がゼロとなるように、プレストレス力を定めた。これに対し、プレストレス導入度 k を約 60%としたものを供試体 B1、0%としたものを供試体 D1 とした。また、設計曲げモーメントの 2 倍の持続荷重（以下、 $2M_d$ ）を与える供試体を供試体 B2 ($k=60\%$)、供試体 C2 ($k=30\%$)、供試体 D2 ($k=0\%$) とした。この $2M_d$ の荷重を載荷した直後には、いずれの供試体でも引張鉄筋の応力度が概ね 200N/mm^2 となるように鉄筋径を定めた。載荷荷重 $1M_d$ の供試体の鉄筋径もこれらに合わ

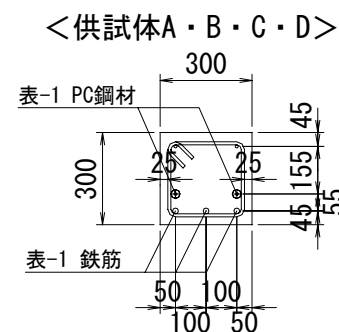


図-1 供試体の形状寸法

単位:mm

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_d	$\sigma_s^{**})$ (N/mm^2)	$\sigma_c^{***})$ (N/mm^2)
A1	2-φ17	2-D10	272	100	1.0	1.6	0.0
B1	2-φ13	3-D16	159	58	1.0	38.0	2.1
B2					2.0	222.0	7.5
C2	2-φ9.2	3-D19	80	29	2.0	219.0	8.7
D1	—	3-D22	—	0	1.0	110.8	4.8
D2					2.0	210.8	9.8

^{*)} 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_0 ：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_d ：設計曲げモーメント ($M_d = 27.5\text{kN} \cdot \text{m}$)、 M ：持続荷重モーメント

^{**)} コンクリートの寄与を無視した鉄筋引張応力度の計算値。なお、緊張力は表-1 中の値、ヤング係数比は、表-2、表-3 から算出した値を使用。

^{***)} 全断面有効の仮定によるコンクリートの縁仮想引張応力度の計算値。(σ_s 、 σ_c ともに、持続載荷開始時点)

*1 独立行政法人土木研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム 交流研究員 (正会員)

*2 独立行政法人土木研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム 主任研究員 工修 (正会員)

*3 川田建設株式会社 技術部技術課 (正会員)

*4 独立行政法人土木研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム 主席研究員 工博 (正会員)

せた。なお、供試体は各 1 体作製し、合計 6 体とした。

2.2 供試体の製作

コンクリート配合および材料試験結果を表-2 に、鋼材の材料特性値を表-3 に示す。ここで、コンクリートは、目標強度 40N/mm^2 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。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、所定の形状寸法となるように鋼材を配置し、バケットにより丁寧に打設を行った。また、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。緊張管理は、緊張ジャッキ側に設置したロードセルにて行い、各供試体とも 2 本の PC 鋼材を片側より同時に緊張した。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、そのまま上屋施設のある場所にて静置した。

2.3 荷重方法

供試体は材齢約 28 日より持続荷重を実施した。荷重した曲げモーメントと鉄筋の最大引張応力度を表-4 に示す。持続荷重は、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、端部の荷重用 PC 鋼棒を緊張することにより行った。また、定期的にこの荷重用 PC 鋼棒の張力を調整した。

2.4 持続荷重試験中の測定

持続荷重中は、図-3 に示す位置で供試体中央のたわみ (δ)、鋼材およびコンクリートのひずみ量、荷重用 PC 鋼棒のひずみ量をモニタリングした。また、標点間距離 100mm のコンタクトゲージを用いて等曲げモーメント区間内の引張縁コンクリートの伸び量を測定し、ひび割れが認められた部位では、荷重開始前からの伸び量をひび割れ幅と考えた。なお、持続荷重中に供試体全体の寸法が一樣に変化することについては、この影響はないものと考えた。

2.5 コンクリートのクリープ・乾燥収縮試験

持続荷重を行うはり供試体の長期的な挙動と比較するため、はり供試体と同時に製作、養生した無筋のコンクリート供試体を用いて材齢に伴うクリープ・乾燥収縮ひずみを測定した。

乾燥収縮ひずみの測定には、 $300 \times 300 \times 1200\text{mm}$ の供試体を用い、その中央のひずみを埋込型ひずみ計で測定した。クリープの測定には、 $300 \times 300 \times 3600\text{mm}$ の供試体を用い、PC 鋼棒で緊張して、 483kN の軸力を断面図心に導入した。これらの供試体を用いて求めた乾燥収縮ひずみ、クリープ係数を表-5、表-6 に示す。

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^3)	細骨材率 (%)	圧縮強度 (N/mm^2)	弾性係数 (kN/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)
49.0	148	42.5	39.7	28.6	3.22

※ 材齢 28 日に短期荷重試験を実施 (各供試体同一養生)

表-3 鋼材の材料特性値

供試体の種類	P C 鋼棒			異形鉄筋		
	径	弾性係数 kN/mm^2	降伏強度 N/mm^2	径	弾性係数 kN/mm^2	降伏強度 N/mm^2
A1	$\phi 17$	200	1061	D10	187	369
B1,B2	$\phi 13$	201	1055	D16	188	365
C2	$\phi 9.2$	200	1262	D19	185	379
D1,D2	—	—	—	D22	186	386

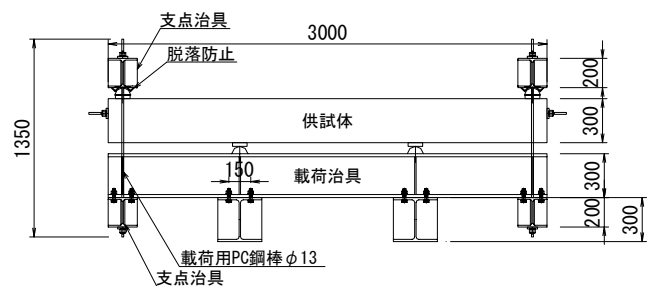


図-2 荷重方法

単位:mm

表-4 持続荷重開始時の断面力と鉄筋応力の測定値

供試体の種類	持続荷重モーメント ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	鉄筋の最大引張応力度 (N/mm^2)
A1	25.4	-15.0
B1	25.4	11.1
B2	51.6	179.1
C2	50.8	187.6
D1	25.4	76.5
D2	53.0	202.3

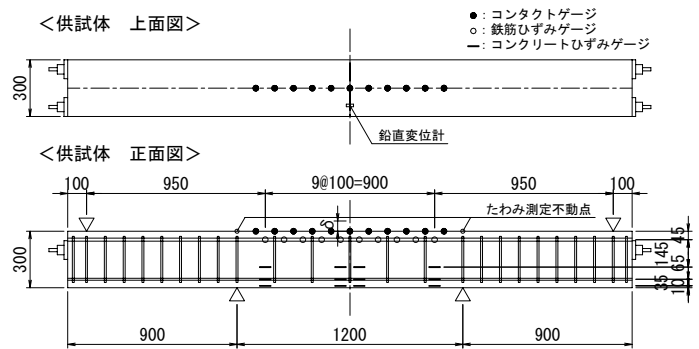


図-3 測定位置

単位:mm

表-5 乾燥収縮ひずみ結果

	30 日	60 日	180 日
乾燥収縮ひずみ (μ)	-58.3	-119.1	-250.3

表-6 クリープ係数

	30 日	60 日	180 日
クリープ係数	0.7	1.0	1.6

3. 実験結果

3.1 供試体の長期的な挙動の測定結果

(1) ひび割れ本数

載荷後 180 日後のひび割れ状況を図-4 に示す。供試体 B2, C2, D1, D2 では、初期載荷において所定の荷重に到達した時点で等曲げモーメント区間に 9～10 本のひび割れが発生していたが、持続載荷中にひび割れ本数が増加することはなかった。一方、供試体 B1 では、初期載荷において所定の荷重に到達した時点ではひび割れが認められなかったが、荷重をホールドして 60 日経過した時点の観察でひび割れが 5 本確認された。供試体 B1 のひび割れ本数は、その後は変化しなかった。このように、供試体 B1 は、持続載荷期間中に新たなひび割れが発生したものであるが、同じ鋼材配置状況にある供試体 B2 と比べてひび割れ発生間隔が広いことから、ひび割れの定常状態には達していない。

供試体 A1 は、実験期間を通して、ひび割れの発生は、認められなかった。

(2) たわみ

持続載荷中のたわみの経時変化を図-5 に示す。供試体 B2, C2, D2 では、180 日間の載荷で 0.5mm 以上、供試体 D1 では 0.4mm 以上のたわみの増大が見られた。一方、ひび割れが生じなかった供試体 A1 では、たわみ量はほとんど増加しなかった。供試体 B1 は、載荷直後のたわみ量は供試体 A1 に近かったが、載荷日数とともにたわみが増加した。

(3) 曲げひび割れ幅の変化

持続載荷中の最大ひび割れ幅の経時変化を図-6 に示す。持続載荷モーメントを $2M_d$ とした供試体 B2, C2, D2 の最大ひび割れ幅増加量は、概ね 0.1mm でプレストレス量の違いによる影響は明確でなかった。一方、持続載荷モーメントを $1M_d$ とした供試体 D1 では最大ひび割れ幅増加量は 0.07mm であった。載荷後 60 日にひび割れの発生を確認した供試体 B1 は、他の供試体と評価指標を併せるため、載荷直後からの標点間の伸び量を最大ひび割れ幅の増加量とし、このように求めた供試体 B1 の最大ひび割れ幅の増加量は 0.04mm であった。供試体 B1 で発生しているひび割れはひび割れ定常状態に達しておらず、また、ひび割れ幅が非常に小さく完全に開口していない破壊進行領域であり、設計における仮定と異なり、ひび割れ発生面においてコンクリートの引張抵抗が幾分残っていると考えられる。

持続載荷モーメントを $2M_d$ とした供試体 B2 のコンタクトゲージの全測定点の経時変化を図-7 に示す。図から、持続載荷中のひび割れ幅の増加量は、部位によって異なっている。ただし、載荷直後にひび割れ幅が比較的大きかった箇所では、その後の持続載荷期間中も常にひ

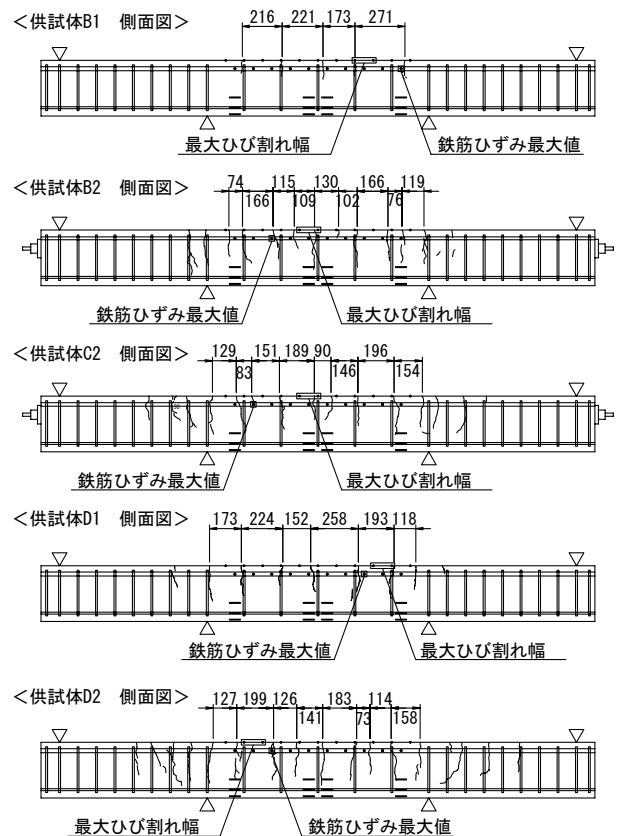


図-4 ひび割れ状況 単位:mm

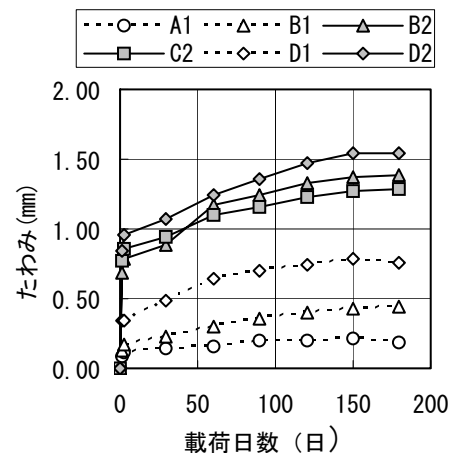


図-5 たわみの経時変化

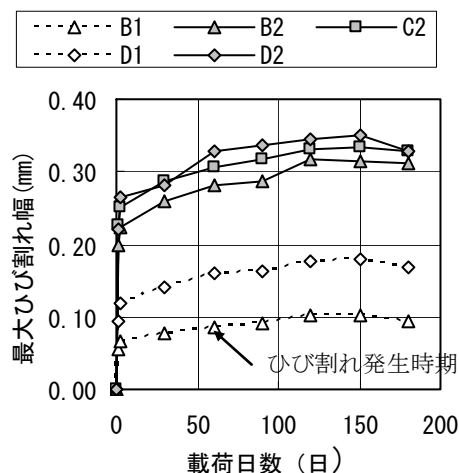


図-6 最大ひび割れ幅の経時変化

び割れ幅が他よりも大きい傾向が見られた。

3.2 断面ひずみ分布の変化

供試体 B2 と B1 を対象に、コンクリートのひずみを測定した4断面から求めた平均ひずみの分布性状の経時変化を図-8に示す。ここではプレストレス導入前の断面ひずみの状態を0とした。また、図には、供試体の断面高さ方向に設置したコンクリートひずみゲージ(3点)から求められる近似直線を荷重直後(1日)と最終値(180日)の2ケースを併せて示した。これより、実験値に着目すると、供試体 B2 ではコンクリート下縁側の圧縮ひずみは荷重初期の 600μ から最終値 1500μ と 2.5 倍ほど増加している。また、鉄筋ひずみの変化は初期値および最終値ともコンクリートひずみより算出した近似直線の変化に概ね一致しており、 500μ 程度増加した。他の供試体も概ね持続荷重が作用した間の、ひずみについては直線的な分布性状を示していた。

一方、供試体 B1 では荷重荷重を所定の値まで到達させ持続荷重に移行した時点での鉄筋ひずみはほぼ0であり、この時点で鉄筋の引張応力の負担はないものと思われる。コンクリートの圧縮ひずみ分布を引張鉄筋側に延長して得られるひずみとは一致していない。しかし、荷重持続期間の増加に伴い、コンクリートにひび割れが発生するとともに、鉄筋の引張ひずみが増加している。このことは、先に述べたひび割れ断面でのコンクリートの引張軟化作用の影響であると考えられる。すなわち、荷重持続期間の増加とともに、荷重荷重は一定に保たれていたものの、コンクリートのひび割れ領域が、次第に進展し、これにともない、ひびわれを含むコンクリートの引張応力の負担が小さくなり、鉄筋に引張応力の負担が移行していったものと考えられる。

また、断面ひずみの分布性状より算出した曲率の経時変化を図-9に示す。曲率の経時変化は、持続荷重レベルが $2M_d$ の供試体 B2, C2, D2 で概ね等しくなり、荷重レベルが $1M_d$ の供試体 B1 と D1 については、プレストレスの導入の有無により差が生じ、各供試体とも図-6のひび割れ幅の経時変化と同様な傾向となった。

3.3 鉄筋ひずみ分布の経時変化

上に示したとおり、供試体 B1 と供試体 B2 とで比較すると、持続荷重における荷重の大きさに大きな差があるため、ひび割れ開口状況やひび割れ定常状態、ひび割れ軟化状況やテンションスティフニングの経時変化に違いがあることが予想される。この点について考察するため、ここでは、供試体 B1 および B2 の等曲げモーメント区間における引張鉄筋のひずみ分布状況について考察する。図-10 は持続荷重に移行した後の、鉄筋ひずみ分布の変化について測定結果を示したものである。

供試体 B1 では、鉄筋の引張応力分布は当初均一であ

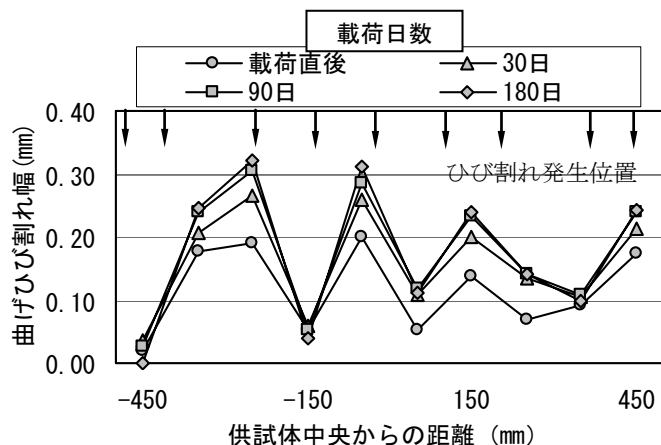


図-7 コンタクトゲージ全測定点の経時変化(供試体 B2)

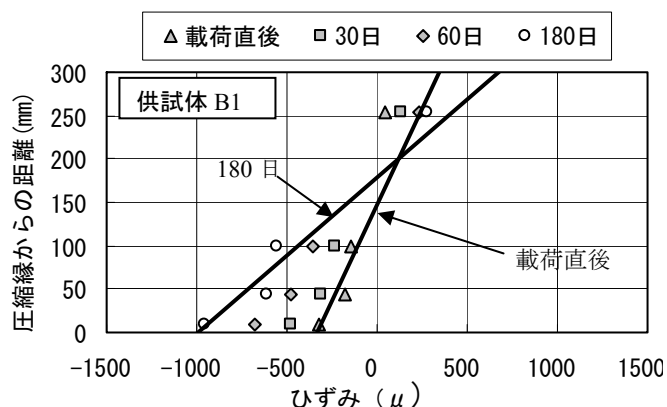
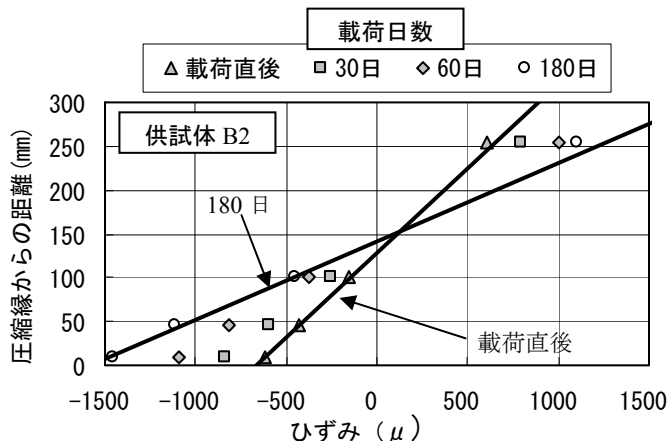


図-8 断面ひずみ分布の経時変化

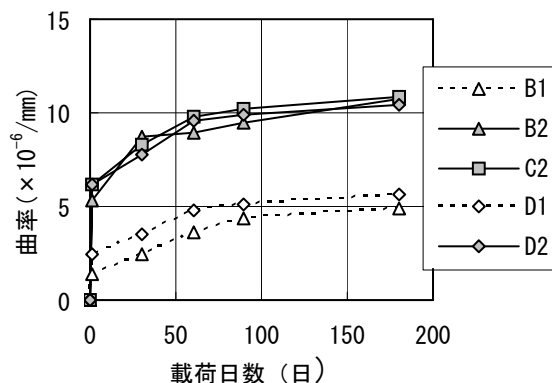


図-9 曲率の経時変化

り、均一性を保ったまま、次第に引張ひずみの増加が生じていた。しかし、コンクリートにひび割れが発生した後には、ひび割れ近傍で付着作用が低下し、鉄筋のひずみ

分布の均一性が失われ、局所的な増加が生じ始めていた。

持続載荷に移行した後、コンクリートにひび割れが発生した原因として、コンクリートの引張強度に及ぼす載荷速度の影響が考えられる³⁾。コンクリートが持続的な引張応力を受けた場合、荷重速度が非常に小さい場合は、通常の割裂引張試験で得られる引張強度よりも小さくなり、いわゆる引張クリープ破壊が発生する。今回の供試体 B1 についても引張縁のコンクリートには引張強度に近い引張応力が持続的に作用したため、引張クリープ破壊によるひび割れが発生したものと考えられる。

一方、供試体 B2 では持続載荷を開始時から 10 本のひび割れが発生しており、そのひび割れ間隔は既存のひび割れ幅算定式から推定される値に近かった¹⁾。また、持続載荷中のひび割れ本数の変化もなかった。これらのことから、供試体 B2 のひび割れ本数は、ほぼ定常状態になっていると考えられる。この供試体 B2 の鉄筋ひずみ分布に着目すると、その形状は持続載荷試験中も変化することなく、載荷期間の経過に伴う鉄筋ひずみの変化は、各部位ともほとんど同程度である。このような傾向は、持続載荷モーメントを $2M_d$ とした供試体 C2, D2, および $1M_d$ とした供試体 D1 でも同様であった。

以上のことから、載荷を開始した時点でひび割れがほぼ定常状態に達していた供試体については、持続載荷中の付着性状の変化は、明確には認められなかった。

3.4 コンクリートの乾燥収縮の影響

表-1 に示した供試体以外に、持続載荷試験を行っていない供試体（配筋等は、供試体 B1, B2 と同じ）により、その乾燥収縮ひずみを測定した（図-11）。測定は、断面方向に供試体圧縮縁から 110mm (ϵ_c1), 45mm (ϵ_c2), 10mm (ϵ_c3) の位置に設置したコンクリートのひずみゲージにより測定した。その結果、供試体の 3 点の乾燥収縮ひずみ量は、無筋コンクリートで測定した乾燥収縮ひずみ量と大きくは異ならなかった。

持続載荷開始時から載荷後 180 日までの間の乾燥収縮ひずみ量は、乾燥収縮試験（表-5）の結果から、 250μ である。ここで、実測から得られた最大ひび割れ間隔を用いると、持続載荷中に、ひび割れ間のコンクリートの収縮により増加すると予想されるひび割れ幅は 0.05mm 程度であった。この値は、 M/M_d を 2 と設定した供試体 B2, C2, D2 で観測された最大曲げひび割れ幅の増加量（供試体 B2=0.113mm, 供試体 C2=0.101mm, 供試体 D2=0.106mm）の約 5 割程度と小さく、持続載荷期間中に認められるひび割れ幅の増大は乾燥収縮によるものだけではないと考えられる。

4. 既往のひび割れ幅算定式との比較

PRC 部材の曲げひび割れ幅の照査は、コンクリート標準示方書の方法によると、式(1)を用いて曲げひび割れ幅

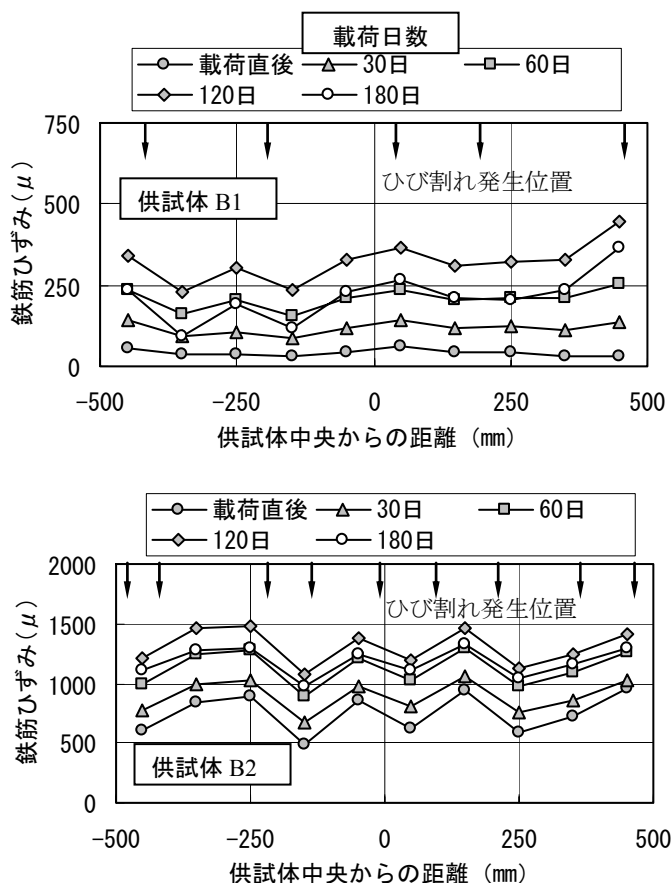


図-10 鉄筋ひずみ分布の経時変化

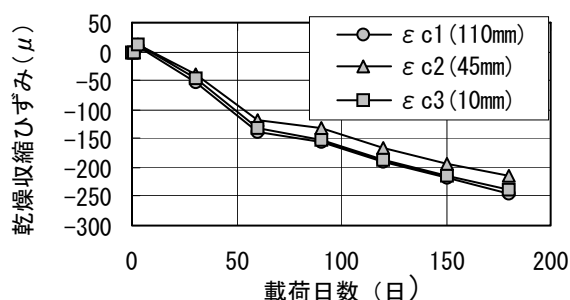


図-11 乾燥収縮ひずみの経時変化

を算出（以下、土木学会式）し、これが許容ひび割れ幅よりも小さくなることを照査するものとされている。また、我が国の PRC 橋の設計でもコンクリート標準示方書に準じた照査が行われている。ここで用いる ϵ'_{csd} の値は、ひび割れ幅に及ぼすコンクリートの収縮とクリープの影響を表すものであり、コンクリートの種類、部材の断面形状、環境条件および応力の大きさ等の影響を受けて変化するものであると考えられる。しかし、 ϵ'_{csd} として適当な値は、現状では必ずしも明確ではない。そこで、今回の実験結果から ϵ'_{csd} としてどの程度の値となるか試算した。

$$w = 1.1k_1k_2k_3\{4c + 0.7(c_s - \phi)\}\left(\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \epsilon'_{csd}\right) \quad (1)$$

k_1, k_2, k_3 : 鉄筋の付着性状やコンクリートの品質、鉄筋段数を考慮するための係数、 c : かぶり (mm)、 c_s : 鋼材の

中心間隔 (mm), ϕ : 鋼材の径 (mm), σ_{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/mm²), E_s : 鉄筋の弾性係数 (N/mm²), ϵ'_{csd} : コンクリートの収縮, クリープ等を考慮するための数値。

土木学会式は, ひび割れ幅の最大に近い値を算出するための評価式と考えられるので¹⁾ 本研究では, 実験により観察されたひび割れ幅の最大値と鋼材位置のコンクリートの応力度が 0 の状態からの鉄筋応力度の最大増加量を式(1)に代入し, 載荷後 180 日の実測した鉄筋の最大ひずみ(ϵ_s)と算出した ϵ'_{csd} を図-12 に示す。持続荷重レベルが $2M_d$ の供試体の ϵ'_{csd} は, 供試体 B2 で 111 μ , C2 で 127 μ , D2 で 166 μ であり, プレストレスレベルが大きいほど ϵ'_{csd} はやや小さくなる傾向を示したが, どの供試体も土木学会式の提案値 150 μ に概ね近い値となった。

一方, 持続荷重レベルが $1M_d$ の供試体では, 載荷初期にひび割れの発生が確認された供試体 D1 は 151 μ であり, $2M_d$ の供試体に近い値を示した。また, ひび割れ発生が載荷後 60 日に確認された供試体 B1 では, 71 μ と他の供試体と比較すると若干低い値を示した。この要因として, 供試体 B1 のひび割れは定常状態に達していないため, 今後の結果より, ひび割れ本数が仮に増えれば, それに伴いひび割れ幅も大きく変化することが考えられる。

持続載荷中の ϵ'_{csd} の経時変化を図-13 に示す。供試体 B1 はひび割れが認められた載荷後 60 日以降について示した。図より, 載荷日数の経過とともに各供試体の ϵ'_{csd} の値は増加する傾向を示した。なお, 載荷後 30 日の値は各供試体とも特異な値を示したが, この要因については明確に出来なかった。今回の報告は持続載荷日数が 180 日と比較的短いため, ϵ'_{csd} と材齢との相関性については, 今後も継続してモニタリングを行い検証していきたい。

5. まとめ

本研究を通じ, 以下の結論を得た。

- (1) 持続荷重が $1M_d$, $2M_d$ の各供試体とも持続荷重を受けたわみ, ひび割れ幅が経時的に増大した。これは, 断面のひずみ分布から求めた曲率の変化に類似しており, ひび割れが定常状態に達して, かつ鉄筋の引張応力度が同程度であれば, これらの挙動はプレストレスレベルに依存しないことを確認した。
- (2) 断面ひずみ分布の経時変化を確認した所, 平面保持の仮定はある程度成立していると言えるものの, 完全には把握できなかった。長期持続載荷の影響を受けた構造物の曲げひび割れ幅の照査を行う際は, 鉄筋の引張応力度の経時変化を追跡する必要があると思われる。
- (3) 鉄筋ひずみ分布の経時変化を確認した結果, ひび割

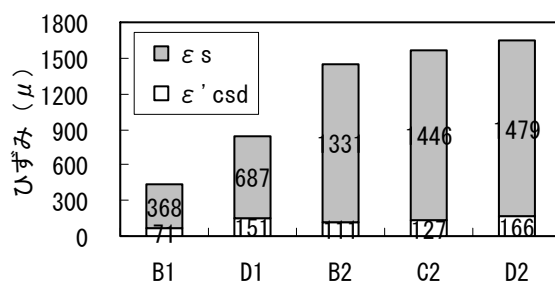


図-12 載荷後 180 日の ϵ'_{csd} および ϵ_s

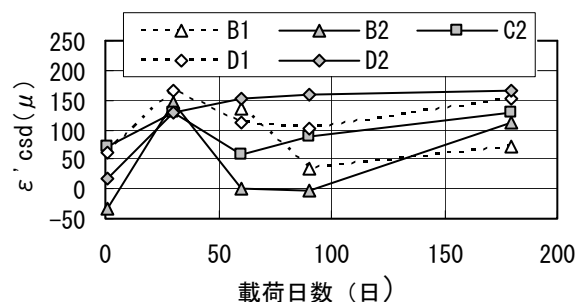


図-13 ϵ'_{csd} の経時変化

れが定常状態となっていれば各供試体とも付着性状は変化しないことを確認した。一方, 持続載荷中にひび割れの発生が確認された供試体では, ひずみ分布性状が経時的に変化した。これは, ひび割れの進展や新たなひび割れの発生など, ひび割れが定常状態に至っていない影響を受けているものと考えられる。

- (4) コンクリート標準示方書の曲げひび割れ幅照査式に着目したところ, ひび割れが定常状態に達していれば, プレストレスレベルに関わらず持続載荷の影響を受けた鉄筋の引張応力度と ϵ'_{csd} により最大ひび割れ幅を評価できる。またその際に適用する ϵ'_{csd} は現行の示方書通り概ね 150 μ を見込んでおけば最大ひび割れ幅の正当な評価が可能であると思われる。一方, 載荷荷重レベルが小さくひび割れが定常状態に達していない供試体については, 今後, ひび割れ本数の変化が生ずることが考えられるので継続してモニタリングし, ひび割れ幅の変化に着目していきたい。

参考文献

- 1) 青山 尚, 渡辺博志, 古賀裕久, 北野勇一: プレストレストコンクリート部材の曲げひび割れ幅算定に関する実験的検討, PC 技術協会第 16 回シンポジウム論文集, pp.129-134, 2007.10
- 2) 手塚正道, 佐藤良一, 山本浩嗣, 鳥取誠一: PRC 部材の長期変形・応力に関する研究, 土木学会論文集, Vol.42, No.613, pp.43-57, 1999
- 3) 鈴木雅博, 河野広隆, 渡辺博志, 田中良樹: コンクリートの引張強度に及ぼす載荷速度の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.649-654, 1999