

プレストレストコンクリート部材の残留曲げひび割れ幅評価に関する基礎的検討

独立行政法人土木研究所 正会員 ○竹内 祐樹
 独立行政法人土木研究所 正会員 渡辺 博志
 独立行政法人土木研究所 正会員 古賀 裕久
 川田建設株式会社 正会員 北野 勇一

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、これまでコンクリート断面に圧縮応力を導入し、長期にわたっても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、このような設計手法は、より多くのプレストレスをコンクリート部材に付与する必要がある、その結果、プレストレス導入時の変形やクリープ変形が過大となる場合もあった。このような観点より、架設時にはPCとして施工し、その後の供用中には、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) の導入が近年増加している。しかしながら、今後、PRC構造をより広く適用するためには、ひび割れが生じた際の変形性状やひび割れ幅制御について、より高い精度で評価できる設計手法を確立する必要があると考えられる。

特に、PRC構造物の耐久性を確保するためには、変動荷重の影響を受ける際のひび割れ幅の制御だけではなく、変動荷重の影響が除かれ、永続的な荷重のみが作用する際の残留ひび割れ幅についても適切に評価し、制御することが重要と考えられる。しかし、現状では、残留ひび割れ幅の評価方法が確立しているとはいえない。そこで、本研究では、PRC梁供試体に対し、段階的に荷重レベルを増加させるステップ載荷試験を行って、荷重を除荷した際の残留ひび割れ幅について検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体の種類

供試体の諸元を表-1に、供試体の形状寸法を図-1に示す。供試体はプレストレス導入度 k を概ね 0, 30, 60, 100% と変化させたものを各1体ずつ作製した。ここで、供試体 PRC0 とは PC 鋼材を配置しない RC 構造であり、供試体 PRC100 とは、いわゆる PC 構造である。

供試体 PRC100 では、コンクリート引張縁に 6.0N/mm^2 となるプレストレスを導入した。本実験シリーズでは、この供試体

表-1 供試体諸元

供試体名称	PC 鋼材	鉄筋	引張鋼材比	緊張力 (kN)	λ	k
PRC0	—	3@D22	1.69 %	0	0 %	0 %
PRC30	2φ9.2	3@D19	1.10 %	80	29 %	29 %
PRC60	2φ13	3@D16	0.96 %	159	55 %	58 %
PRC100	2φ17	3@D10	0.68 %	272	89 %	100 %

※ λ はパーシャルプレストレス比であり、 $\lambda = A_p \cdot f_{py} / (A_p \cdot f_{py} + A_s \cdot f_{sy})$ から算出される。ただし、 A_p : PC 鋼材の断面積 (mm^2)、 f_{py} : PC 鋼材の降伏点強度 (N/mm^2)、 A_s : 鉄筋の断面積 (mm^2)、 f_{sy} : 鉄筋の降伏点強度 (N/mm^2) である。

※ 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 (デコンプレッションモーメント)、 M_d : 設計曲げモーメント

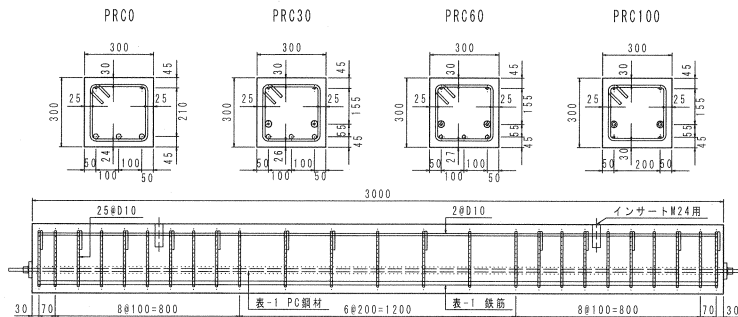


図-1 供試体の形状寸法

(mm)

PRC100 のプレストレスを打ち消すのに必要な曲げモーメント (27.5kN・m) を設計曲げモーメント (M_d) とした。

供試体 PRC30 と PRC60 は、プレストレス導入度が供試体 PRC0 と PRC100 の中間的な値となる PRC 構造であり、 M_d の曲げモーメントが作用した際に供試体 PRC30 では曲げひび割れが発生し、供試体 PRC60 では曲げひび割れが発生しないようにプレストレス導入度を設定した。

なお、各供試体の鉄筋量は、本実験での最大荷重である M_d の2倍のモーメントが載荷した際に生じる鉄筋応力がいずれも約 200N/mm² となるように定めた。

2. 2 供試体の作製

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/mm² が得られる配合を選定し、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 の規格のものを用いた。

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 2 点支持にて管理した。

2. 3 載荷方法

載荷試験は、供試体を図-2 に示すように上下反転させて鋼製の載荷治具に固定し、端部の載荷用 PC 鋼棒を油圧ジャッキで緊張することで行った。載荷時の材齢は概ね 28 日である。

載荷は、図-3 のように段階的に荷重レベルを増大させるステップ載荷とした。荷重レベルの管理には、等曲げモーメント区間内での鉄筋応力を 10 点でモニタリングした結果のうち、引張応力度が

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 (%)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
49.0	148	42.5	4.5	39.7	28.6

※材齢 28 日に試験を実施 (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
PRC0	—	—	—	D22	186	386
PRC30	φ 9.2	200	1262	D19	185	379
PRC60	φ 13	201	1055	D16	188	365
PRC100	φ 17	200	1061	D10	187	369

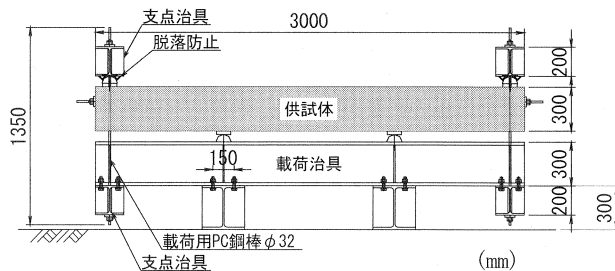
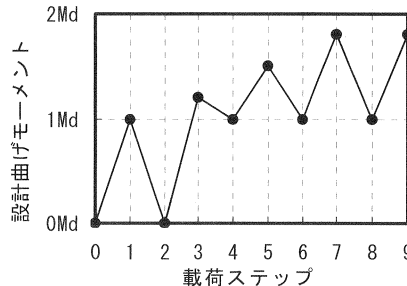


図-2 載荷方法



- Step0: 載荷前
 - Step1: 載荷モーメントが M_d (27.5kN/m) となるまで載荷
 - Step2: 完全に除荷
 - Step3: 鉄筋応力度が 100N/mm² となるまで載荷
 - Step4: 載荷モーメントが M_d となるまで除荷
 - Step5: 鉄筋応力度が 150N/mm² となるまで載荷
 - Step6: 載荷モーメントが M_d となるまで除荷
 - Step7: 鉄筋応力度が 200N/mm² となるまで載荷
 - Step8: 載荷モーメントが M_d となるまで除荷
 - Step9: 鉄筋応力度が 200N/mm² となるまで載荷
- ※ここでいう鉄筋応力度は、載荷開始時の応力度を 0N/mm² としたときの値とした。

図-3 載荷ステップと荷重レベル

最大のものを用いた。

本論文では、step0~2を載荷条件1(設計荷重相当まで載荷した後、完全に除荷)、step0~9を載荷条件2(step3以降は、設計荷重を超える外力が作用した後、設計荷重相当まで除荷)として、各供試体の挙動を考察する。

2. 4 測定方法

載荷試験中には、載荷用PC鋼棒の荷重と引張鉄筋の応力、引張縁のひび割れ幅、供試体中央のたわみを測定した。これらの測定位置を図-4に、ひずみゲージ取り付け状況を写真-1に示す。ここで、載荷用PC鋼棒の荷重は、4本のPC鋼棒にそれぞれ設置したロードセルの平均値とし、2.5kNずつ荷重を増加させた。

引張鉄筋の応力は、等曲げモーメント間に設置した10箇所(2ゲージ/箇所)で測定したひずみに、表-3の弾性係数を乗じて算出した。なお、載荷試験時の荷重レベル管理には10箇所の最大値を用いたが、以降の実験結果の整理では、10箇所の平均値を用い、デコンプレッションモーメント(計算値)における鉄筋応力の増加量(測定値)を差し引いた値を用いた。

ひび割れ状況を表-4に示す。ひび割れ幅の検討は等曲げモーメント区間のスターラップ直上に設置したεゲージ(4箇所)のうち、最大の値を示したもの(最大ひび割れ幅)を用いて行った。これは、最大ひび割れ幅を示したひび割れにおいて、残留ひび割れ幅が最も大きくなっていたためである。

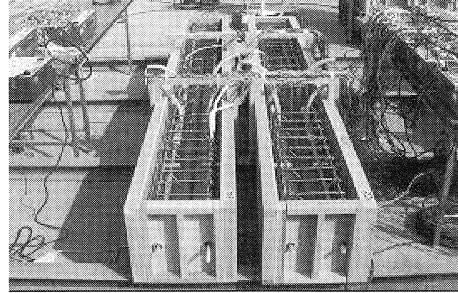


写真-1 ゲージ取付け状況

表-4 ひび割れ状況

供試体名称	最大ひび割れ幅 (mm)	最大間隔 (mm)	平均間隔 (mm)	ひび割れ本数
PRC0	0.198	199	140	9
PRC30	0.196	196	142	9
PRC60	0.206	166	117	10

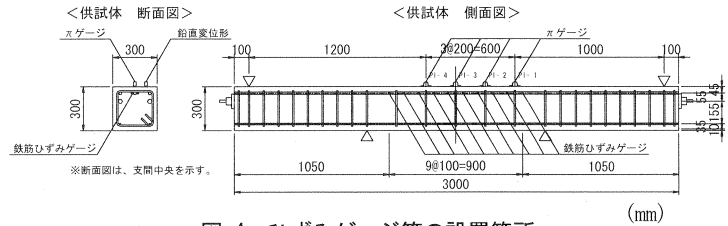


図-4 ひずみゲージ等の設置箇所

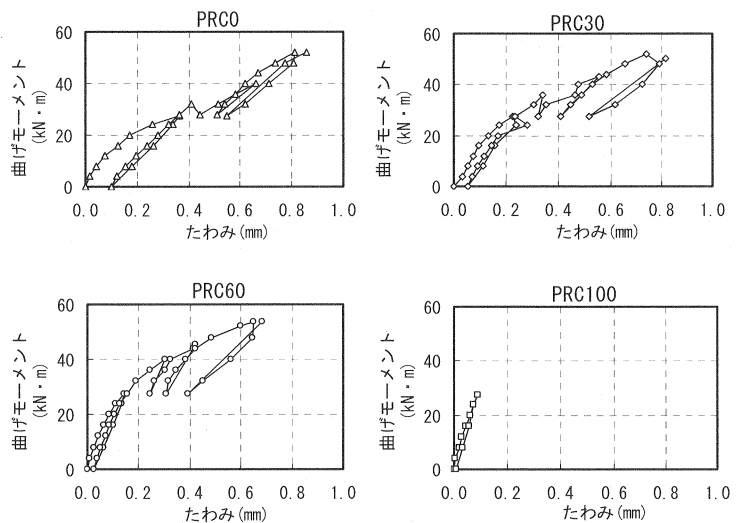


図-5 曲げモーメントとたわみの関係 (全ステップ)

3. 実験結果と考察

3. 1 実験結果の概要

全ステップにおける曲げモーメントとたわみの関係を図-5に示す。ここで、ひび割れ発生荷重は、供試体 PRC0 では16.0kN・m (step1)、PRC30で20.0kN・m (step1)、PRC60で27.5kN・m (step3)であった。なお、

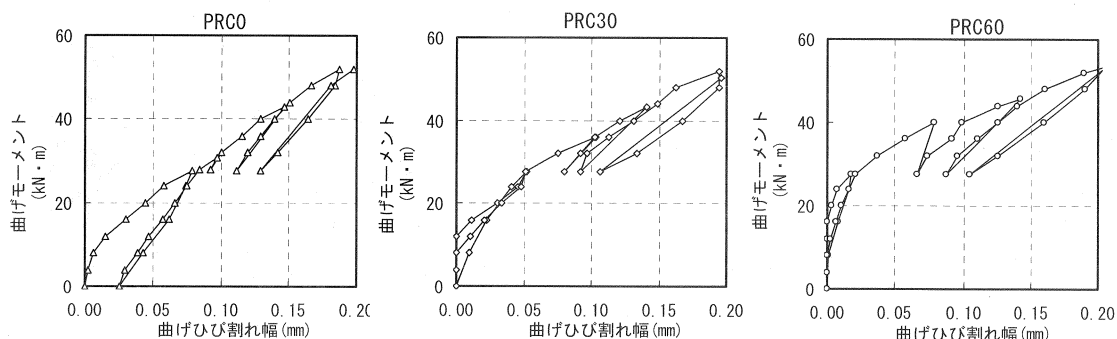


図-6 曲げモーメントと最大ひび割れ幅の関係

PRC100 は、比較用に設定したひび割れを許容しない P C 構造を想定した供試体なので、ひび割れが生じないように step3 以降の荷重は行わなかった。

図-5 より供試体 PRC0 と PRC30 では step2 で完全に除荷した状態でも 0.1mm ほどたわみが残留した。また、供試体 PRC60 でも 0.03mm とわずかではあるが残留たわみが確認された。一方、供試体 PRC100 は荷重を完全に除荷するとたわみもほぼゼロに戻った。

次に、全ステップにおける曲げモーメントとひび割れ幅の関係を図-6 に示す。なお、供試体 PRC100 では、ひび割れが生じていないので省略した。

図から、荷重条件 1 では、R C 構造である供試体 PRC0 に、step2 で 0.025mm ほどの残留ひび割れが残留したが、

P R C 構造である供試体 PRC30 及び PRC60 では、ひび割れが閉じた。

また荷重条件 2 では、P R C 構造である供試体 PRC30 及び PRC60 でも残留ひび割れが生じた。荷重レベルが同一となる step1, 4, 6, 8 時点での供試体のひび割れ幅を図-7 に示す。図から、設計曲げモーメントである $1M_0$ まで除荷した際の残留ひび割れ幅は、供試体が受けた荷重の最大値が大きくなるにつれて増加した。

3. 2 荷重条件 1 (step0~2) における残留ひび割れ幅

鉄筋の引張応力と曲げひび割れ幅の関係を図-8 に示す (ただし、供試体 PRC100 はひび割れが生じていないので省略した)。供試体 PRC0 と PRC30 では、step2 の時点で完全に除荷した状態でも、鉄筋には残留応力が生じた。また、供試体 PRC0 では、ひび割れ幅が 0.025mm 残留した。一方、供試体 PRC30 のひび割れ幅は概ね原点に復帰し、ひび割れは閉じた。これは、荷重を完全に除荷すると、プレストレス力により全断面が圧縮応力状態となるためと考えられる。すなわち、P R C 構造では、変動荷重の影響が取り除かれた後、たわみは残留するが、ひび割れは閉じたことが確認された。R C 構造では、たわみとひび割れ幅ともに残留することが確認された。

なお、供試体 PRC60 は、荷重条件 1 の範囲では曲げひび割れが発生しないように設計されており、実際にひび割れを観察することはできなかったが、step0 の時点と step2 の時点で、 $5.1N/mm^2$ の応力変動があり、0.03mm とわずかではあるが残留たわみも確認された。このことから、目視では把握できなかった微細なひび割れが生じていた可能性がある。

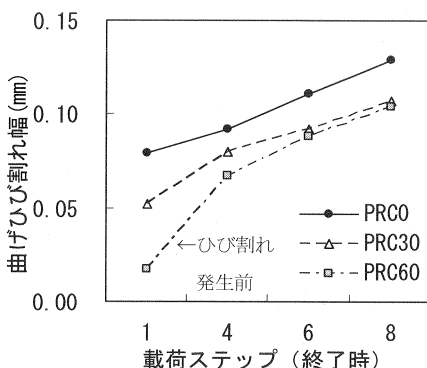
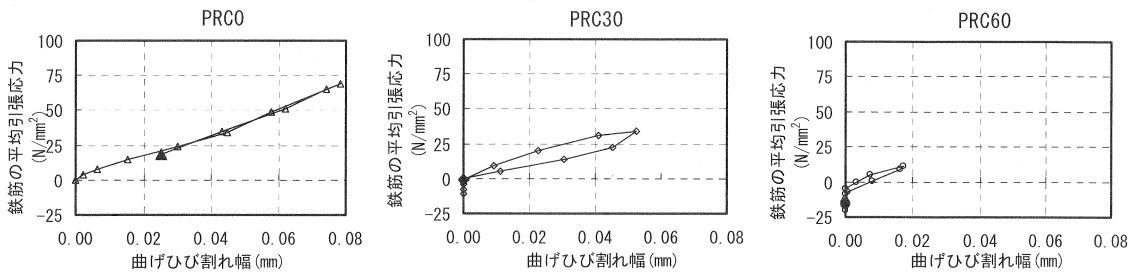
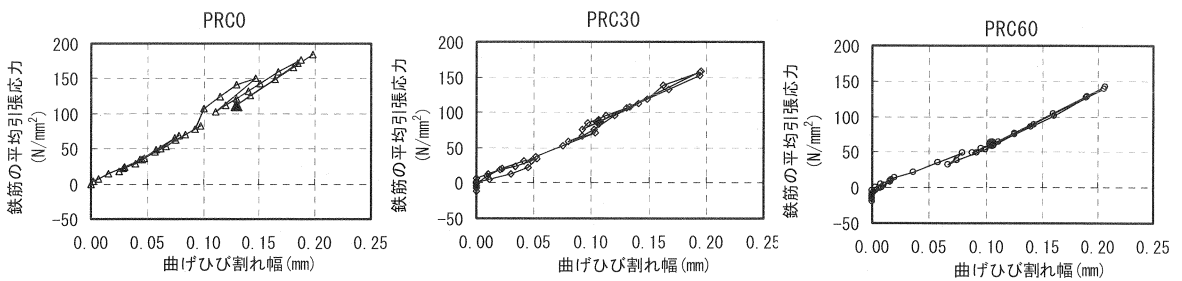


図-7 最大曲げひび割れ幅の推移



*図中の黒印は step2 終了時を示す

図-8 鉄筋の平均引張応力と最大曲げひび割れ幅の関係 (载荷条件 1)



*図中の黒印は step7 終了時を示す

図-9 鉄筋の平均引張応力と最大曲げひび割れ幅の関係 (载荷条件 2)

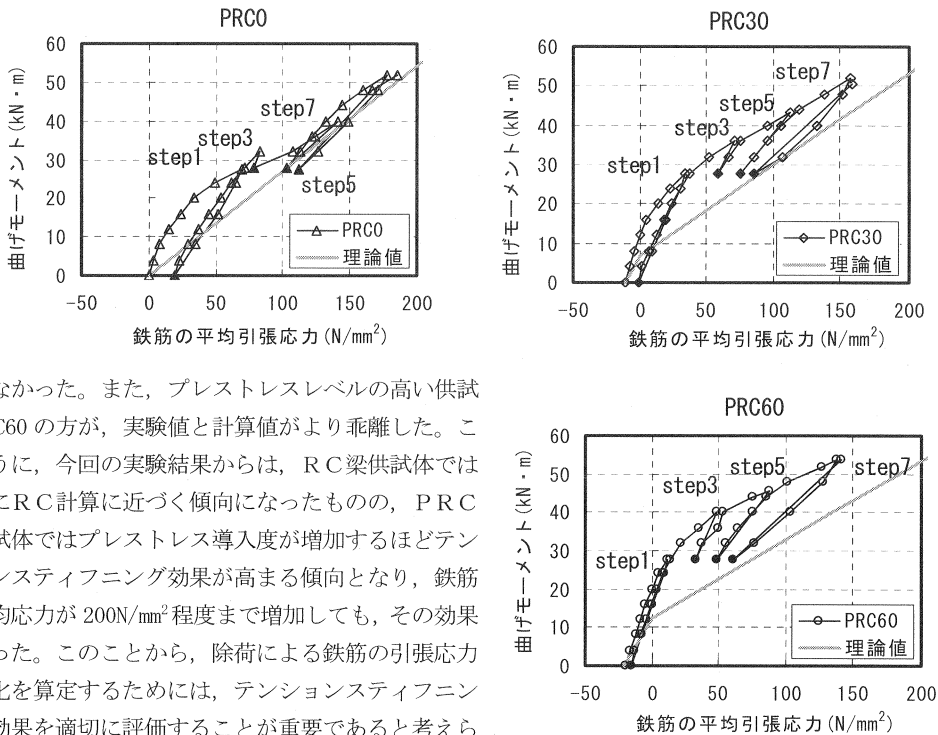
3. 3 载荷条件 2 (step0~9) における残留ひび割れ幅

ひび割れ幅は、鉄筋の引張応力の変動値からこれを求めることとしているが、除荷区間を含む荷重繰り返し条件においても、鉄筋の引張応力度とひび割れ幅の関係が、処女载荷条件のものと同じであるかどうかは明確ではないと考えられる。ここでは、荷重を繰り返し作用させた条件での、鉄筋に発生する引張応力度とひび割れ幅の関係について、検討を行った。図-9 は、载荷ステップ 0~9 における鉄筋の引張応力と曲げひび割れ幅の関係を示したものである。

図から、いずれの供試体でも、鉄筋の平均引張応力と曲げひび割れの間には比例関係があり、繰り返し载荷を行っても、この関係はほとんど変化しなかった。また、3 つの供試体で、その傾きも概ね一致していた。すなわち、今回実施したような数回程度の荷重の繰り返し程度では、鉄筋の平均引張応力とひび割れ幅の関係が変化するようなことはなかった。除荷区間を含む荷重作用下でも、鋼材に生じる引張応力を適切に評価することができれば、プレストレス導入量によらずひび割れ幅も適切に評価することができると思われる。

このことから、除荷過程を含んだ残留ひび割れ幅の算定を正確に行うためには、鉄筋の引張応力の履歴を適切に評価することが重要となる。除荷を含む荷重繰り返し作用下での引張鉄筋の応力履歴についての測定結果を以下に記述する。

図-10 は全载荷行程における曲げモーメントと鉄筋の平均引張応力の関係を示したものである。また、図中には理論値として RC 計算の結果を示した。この際、断面寸法やプレストレス力は表-1 および図-1 に示す値を用い、鉄筋拘束を考慮¹⁾した上で、引張応力が作用する断面の寄与を無視して断面の釣り合いより鉄筋の応力を算出した。なお、鋼材の断面積は公称値を用い、コンクリートおよび鋼材の弾性係数は表-2 および表-3 に示す値を用いた。供試体 PRC0 では、step3 以降、概ね実験値が理論値と一致するのに対し、供試体 PRC30, 60 ではステップを進めるにつれ実験値が計算値に近づくものの、今回の実験の範囲では、完全には一



*図中の黒印は step4, 6, 8 終了時を示す

図-10 鉄筋の平均引張応力の推移 (載荷条件 2)

致しなかった。また、プレストレスレベルの高い供試体 PRC60 の方が、実験値と計算値がより乖離した。このように、今回の実験結果からは、RC 梁供試体では早期に RC 計算に近づく傾向になったものの、PRC 梁供試体ではプレストレス導入度が増加するほどテンションスティフニング効果が高まる傾向となり、鉄筋の平均応力が 200N/mm² 程度まで増加しても、その効果は残った。このことから、除荷による鉄筋の引張応力の変化を算定するためには、テンションスティフニングの効果を適切に評価することが重要であると考えられる。

4. まとめ

本実験で得られた結果を要約すると、以下の通りである。

- (1) 設計荷重相当まで載荷して、その後完全に除荷した場合、PC 構造の供試体 PRC100 ではひび割れが生じず、供試体中央のたわみは載荷前の状態に戻った。RC 構造の供試体 PRC0 では、載荷中にひび割れが発生し、除荷してもたわみは載荷前の状態に戻らず、ひび割れも完全には閉じなかった。これに対し、PRC 構造の供試体 PRC30 では、載荷によってひび割れが発生し、除荷してもたわみは完全には戻らなかったが、ひび割れは閉じた。
- (2) 設計荷重を超える外力を作用させ、その後設計荷重相当まで除荷した場合、RC 構造の供試体 PRC0 だけでなく、PRC 構造の供試体 PRC30 と PRC60 でも、ひび割れは完全に閉じなかった。残留ひび割れ幅は、供試体に載荷した荷重の最大値が大きくなるほど (ただし、今回の検討では設計荷重の 2 倍まで) 大きくなった。
- (3) 荷重の繰り返し回数が数回程度であれば、最大曲げひび割れ幅と鉄筋の平均引張応力の関係には荷重の繰り返しの影響が表れないことが分かった。すなわち、除荷時の残留ひび割れ幅は、引張鉄筋の応力履歴を把握すれば、荷重の繰り返しを考慮しないで求められる鉄筋の引張応力・ひび割れ幅の関係に基づいて、これを算定しうると言える。したがって、テンションスティフニング効果などを適切に評価して鉄筋に生じる残留応力を評価することができれば、PRC 部材における残留ひび割れ幅を評価することも可能と考えられる。

参考文献

- 1) 西澤紀昭：PRC 橋の設計，技報堂出版，1993