

## PRC はりの低サイクル時における残留ひび割れの蓄積に関する基礎的研究

神戸大学大学院 正会員 博士(工学) 三木 朋広  
神戸大学大学院 中野 政弘

Abstract : To investigate the affection of cyclic loading on the flexural crack propagation in prestressed reinforced concrete (PRC) beams, the low cyclic loading tests for these PRC beams were conducted. In the experiment, the flexural crack width at the mid span of the beam was measured. Principal tensile strain around the flexural crack that occurred during the loading was measured by using an image analysis. The test results show that the maximum flexural crack in the PRC beams affects to the residual flexural crack width which is accumulated during the cyclic loading.

Key words : PRC beams, Maximum flexural crack width, Low cycle number of loading, Image Analysis

## 1. 研究の背景と目的

PC桁橋において、交通荷重を受けることにより曲げひび割れが発生し、進展した事例が見られた。この事例に対して、既往の研究<sup>1)</sup>では、残存プレストレスの低下は見られないものの、過大な荷重作用により曲げひび割れが発生し、さらに繰返し荷重を受けることで曲げひび割れが進展したことが実験的、解析的に示唆された。しかし、PRCはりの繰返し載荷状況下におけるひび割れの進展挙動に関して、明らかになっていないのが現状である。そこで本研究では、プレストレス力の異なるPRCはりに関して、繰返し載荷時の曲げひび割れ進展挙動の評価を試みる。実験では、PRCはりを対象として、プレストレス力と上限荷重をパラメータとした、載荷回数が100回程度の低サイクルの繰返し載荷を行った。また、載荷時に発生したはり中央曲げひび割れ周辺のひずみ分布を画像解析により測定した。これらの結果をもとに、載荷に伴う曲げひび割れ幅、ひび割れ長さの推移に着目し、曲げひび割れ進展に与えるプレストレス力の影響について検討した。

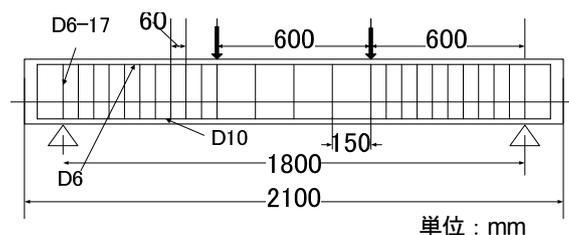
## 2. 実験概要

## 2.1 試験体

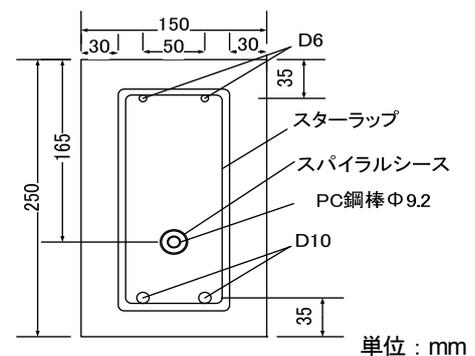
図-1に試験体の概要図、表-1に実験パラメータを示す。試験体には、せん断破壊を防ぐためにスターラップを配置した。また、曲げひび割れ幅を測定するはり中央には、切欠き(深さ15 mm)を設けた。載荷時のコンクリートの圧縮強度は31.6 N/mm<sup>2</sup>、引張強度は1.71 N/mm<sup>2</sup>であった。PC鋼棒にはB種1号φ9.2(耐力1063 N/mm<sup>2</sup>)を使用した。載荷荷重(上限荷重)時の曲げひび割れ幅は、以下の算定式<sup>2)</sup>より求めた曲げひび割れ幅 $w$ の値を参考に設定した。

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

ただし、 $k_1 = 1.0$  (異形鉄筋)、 $c$ : かぶり (mm)、 $c_s$ : 引張鉄筋の中心間隔 (mm)、 $\phi$ : 引張鉄筋径 (mm)、 $\sigma_{se}$ : 引張鉄筋の応力度の増加量 (N/mm<sup>2</sup>)、 $E_s$ : 引張鉄筋の弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)、 $\varepsilon'_{csd}$ : コンクリートの収縮およびクリープに関する数値 (= 150 $\mu$ )、その他の係数は参考文献<sup>2)</sup>を参照。



(a) 側面図



(b) 断面図

図-1 試験体概要

表-1 実験パラメータ

		載荷荷重 (kN)	
		30	23
プレストレス力 (kN)	30	PRC-1 (w=0.13)	—
	16	PRC-2 (w=0.22)	PRC-3 (w=0.13)

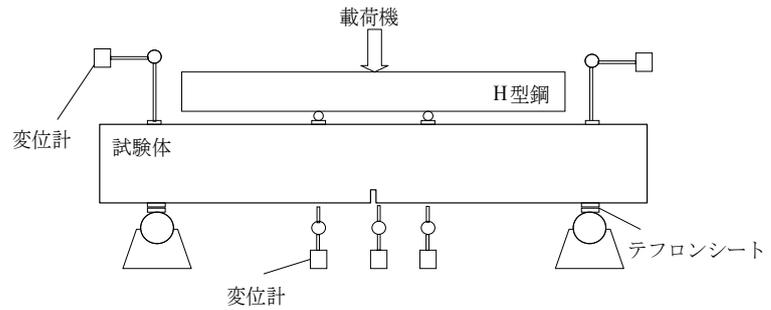


図-2 載荷試験概要図

## 2.2 載荷試験

載荷試験の概要を図-2に示す。単純支持されたPRCはりの2点集中載荷試験を行った。載荷には油圧式2000kN試験機を用いた。支点と試験体の間にはテフロンシートを挿入して、拘束による支点の水平反力を除去した。繰返し載荷回数は全試験体に関して100回とし、10回ごとに目視によるひび割れ観察のため、2分程度インターバルをとった。載荷荷重の下限値は5kNとした。計測項目は、荷重、鉛直変位（支点、載荷点および試験体の中央）、ひずみ（コンクリート、鉄筋、PC鋼棒）とした。また、試験中最大荷重時に、載荷により発生するひび割れの目視観察を行った。ひび割れ発生を確認した後は、発生位置における引張縁の側面にπ型変位計を設置し、ひび割れ幅の測定を行った。なお、PRC-1、PRC-3に関しては、100回繰返し載荷終了時において、発生したひび割れが非常に微細であったため、100回の繰返し載荷終了後、引張鉄筋が降伏しない程度の荷重を上限荷重とし、下限値を5kNとして、さらに10回繰返し載荷を行った。

## 2.3 画像解析

載荷試験中、中央切欠きから発生した曲げひび割れをデジタルカメラで撮影し、ひび割れ周辺のひずみ分を測定した。本研究では、画像解析の手法としてデジタル画像相関法を採用した。この方法では、実験時に得られた変形前後における測定対象画素中の輝度値分布を用いて、特定の輝度値分布の類似点を算出する。この処理を連続する領域において行うことで、全視野における2次元的な変位量を得ることができる。本研究では、変形前の基準となる画像中から特定の輝度値分布領域（サブセット）の輝度値分布について、変形後の画像中からそれと最も相関が高い領域を見つけ出し、その領域中の代表点間の距離を変位とする。得られた変位を節点変位として導入した有限要素を用いて領域補完することにより、ひずみ分布を算出した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 はり中央における曲げひび割れ高さ

図-3にはり中央における曲げひび割れ高さとし、繰返し載荷回数との関係を示す。いずれの試験体に関しても、目視により測定したが、低サイクル時に曲げひび割れ高さが進展していることがわかる。PRC-1に関しては、ひび割れが微細であったため、ひび割れを明確に確認できず、ひび割れ高さを示すひび割れ先端位置の測定には誤差を含むものとする。

### 3.2 PC鋼材のひずみ挙動

図-4に荷重-PC鋼棒ひずみ関係を示す。この図から、ひび割れ発生前まではPC鋼棒が弾性的に挙動し、載荷荷重に伴う増加ひずみは線形的な挙動を示していることがわかる。また、線形性が失われる限界、つまりひび割れが発生する荷重相当では、プレストレス導入量に応じて異なることがわ

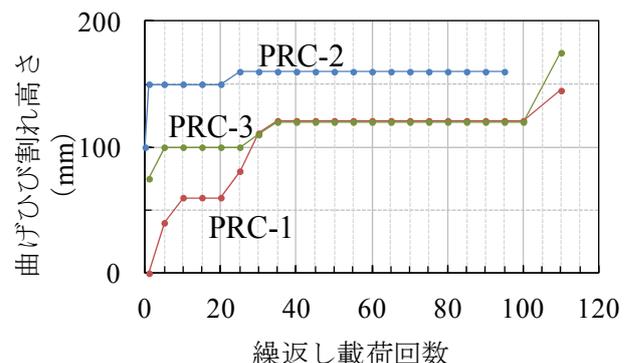


図-3 はり中央曲げひび割れ高さ

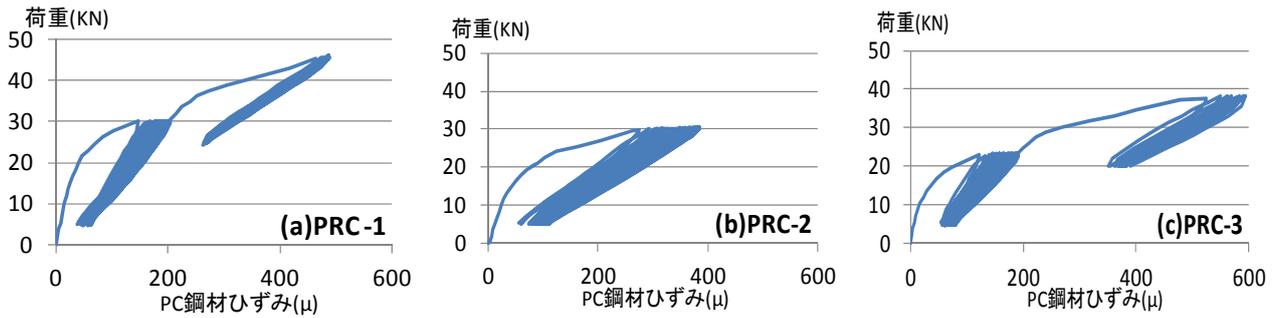


図-4 荷重-PC 鋼棒ひずみの関係

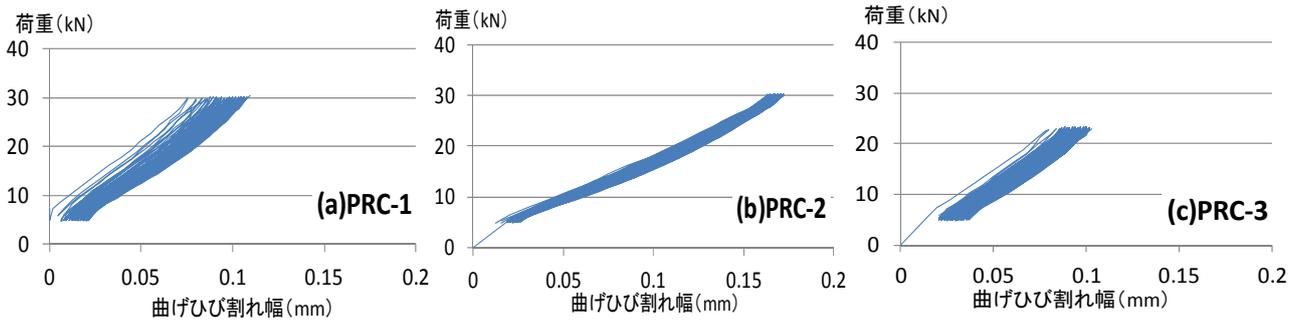


図-5 荷重-はり中央曲げひび割れ幅の関係

かる。荷重の上限荷重値が等しい PRC-1 と PRC-2 を比べると、プレストレス導入量大きいほど、ひび割れ発生時の荷重が大きくなっている。また、いずれの試験体でも 1 回目の荷重時に曲げひび割れが発生し、荷重初期の線形挙動を示す領域を超えていることがわかる。

### 3.3 はり中央における曲げひび割れ幅

図-5に荷重-はり中央における曲げひび割れ幅の関係を示す。ここで示す曲げひび割れ幅は、 $\pi$ 型変位計によって測定した。ただし、目視によるひび割れ確認後に変位計を設置したため、計測開始時の荷重回数はそれぞれ異なっている。ここで、プレストレス力の小さい試験体 (PRC-2, PRC-3) では、曲げひび割れが完全に閉じずに、残留ひび割れ幅が生じていることがわかる。残留ひび割れ幅は、荷重によりひび割れが開いた後、除荷するとプレストレス力によりひび割れが閉じるという過程の中で、骨材のかみ合わせから、ひび割れ幅が残留しているものと推察する。また、荷重による曲げひび割れ幅が小さい試験体 (PRC-1, PRC-3) においては、残留ひび割れ幅の増加が大きくなっていることがわかる。このような荷重の下限荷重のときにひび割れが完全に閉じず、残留ひび割れが生じる現象が、低サイクル時において、繰返し荷重中に同一の荷重曲げひび割れ高さ進展していく挙動に影響するものと推察する。

### 3.4 画像解析結果

#### (1) ひび割れ発生位置と進展の確認

ひび割れの発生位置と進展の確認を行うために、以下の方法で画像解析を行った。繰返し荷重において、

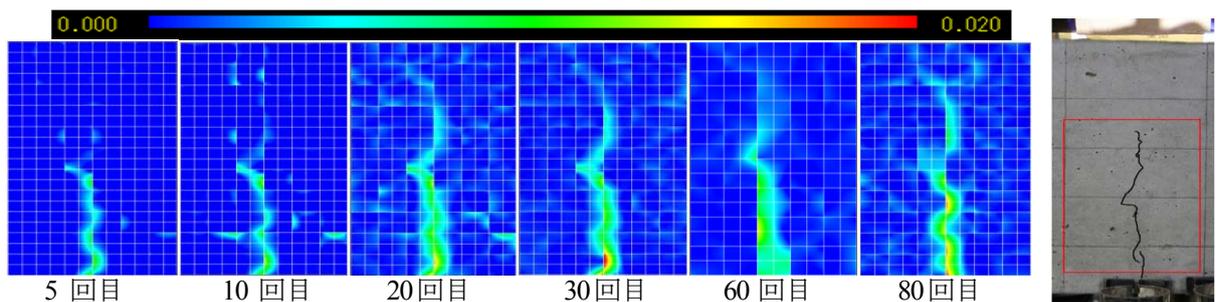


図-6 荷重回数と最大主ひずみ分布 (PRC-2)

解析範囲 (赤枠)

下限荷重載荷時における試験体の状態を基準として、この画像と、直後の荷重を上限値まで載荷したときの、試験体の画像とを比較していく。こうして得られたPRC-2における最大主ひずみ分布を図-6に示す。図-3で確認した低サイクル時におけるひび割れの進展が、この図では引張ひずみの領域の増大として表れている。また、ひび割れが開口しているときは、主にひび割れ周辺に局部的に引張ひずみが生じていることがわかる。

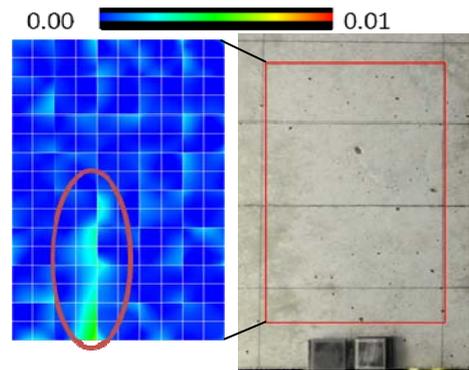


図-7 画像解析 (PRC-1 初回載荷時)

次に、図-6と同様の方法で得た PRC-1 における最大主ひずみ分布を図-7に示す。この図より、初回載荷時点にて、局所的な引張ひずみが生じており、曲げひび割れが発生しているものと考えられる。つまり、画像解析によって、目視やPC鋼材のひずみ挙動からは明確に確認できなかった、初回載荷時におけるはり中央曲げひび割れの発生を確認することができた。

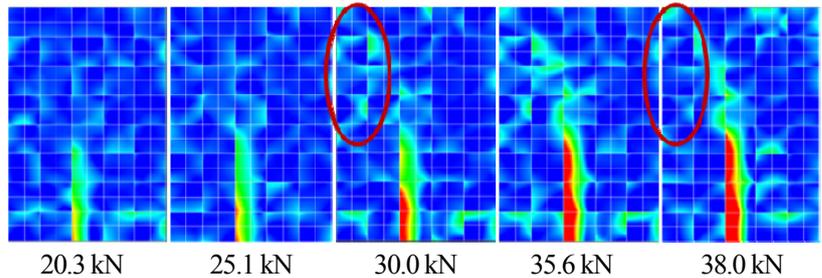


図-8 画像解析結果 (PRC-3 繰返し載荷回数 101 回目)

(2) 曲げひび割れの進展とひび割れ周辺のひずみ分布

図-8に、画像解析によって得られた、PRC-3の繰返し載荷回数101回目におけるはり中央曲げひび割れ周辺の最大主ひずみ分布を示す。この図より、30 kNから38 kNへと荷重が増加し、曲げひび割れが進展していく過程において、ひび割れ周辺に分散していた引張ひずみが、ひび割れの進展と同時に曲げひび割れ周辺へと局所化していることがわかる。

4. 結論

本研究で得られた結論を以下に述べる。

- 1) PC 鋼棒のひずみ挙動から、プレストレス導入量の差異によって、荷重の増加に伴い PC ひずみが線形的に増加する荷重の範囲に違いがみられることが確認できた。いずれの試験体においても、画像解析によるひずみ分布より、繰返し載荷回数 1 回目にはり中央に曲げひび割れが発生していることを確認した。
- 2) はり中央における曲げひび割れ幅の測定により、荷重の下限荷重 (5kN) のときにひび割れが完全に閉じずに、ひび割れ幅が残留していく挙動を確認した。このとき、最大荷重時に生じる曲げひび割れ幅が 0.1 mm 程度で小さい場合、繰返し載荷に伴う残留ひび割れ幅の増加量が大きくなる結果となった。
- 3) 画像解析によって得た最大主ひずみ分布によって、載荷開始直後は試験体の解析範囲内において引張ひずみが分散しており、荷重がさらに増加すると、曲げひび割れの進展とともに引張ひずみがひび割れ周辺に局所化していくという挙動を確認できた。

参考文献

- 1) 真鍋英規ほか：PC梁部材におけるひび割れ性状に及ぼす繰返し載荷の影響に関する研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.9，pp.417-424，2009
- 2) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書設計編