

# 論文 塑性変形に着目した疲労荷重下における PC はり部材の挙動

松本 泰季\*1・恒國 光義\*2・三田 勝也\*3・加藤 佳孝\*4

**要旨:** 著者らはこれまでに、載荷時のひび割れ開口から残存プレストレス力を推定する手法を提案している。既往の実験結果より疲労に伴う残存プレストレス力の低下を確認したが、詳細な要因については不明である。本研究では、疲労荷重下におけるコンクリートのクリープ進行と残存プレストレス力との関連性について把握することを目的として、同繰返し最大荷重、同載荷回数条件下で断面形状の異なる PC はり部材の繰返し載荷を実施した。実験結果より、ひび割れ開口時の荷重、すなわち残存プレストレス力と塑性変形の増加との関係には相関がある可能性が示唆された。

**キーワード:** PC はり, 繰返し載荷, サイクリッククリープ, 塑性変形, 疲労

## 1. はじめに

国土交通省が管理するコンクリート道路橋においては、橋長 15m 以上のプレレストコンクリート橋（以下、PC 橋）は約 4.6 万橋あり、全体の約 36% を占めている<sup>1)</sup>（2008 年 4 月現在）。そのうち約 50% が架橋から 35 年が経過しており、近年の車両の大型化・重量化などの要因により今後、劣化したコンクリート橋の増加が懸念されている。PC 橋の劣化要因としては、プレストレス力低下や疲労の進行などが挙げられるが、外観の変状だけでは判定が困難であり、合理的な維持管理のためには、安全性や使用性といった性能の定量的な評価が重要となる。

著者らはこれまでに、載荷時のひび割れ開口から残存プレストレス力を推定する手法を提案している<sup>2)</sup>。既往の実験結果から、疲労に伴い残存プレストレス力の低下が確認されたが、詳細な要因は明らかとしていない。プレストレス力低下の要因としては、繰返し載荷による残存プレストレス力の低下や疲労荷重下におけるコンクリートのクリープ進行などの塑性変形による影響が考えられる。また、前川らは、水分移動に伴う収縮の観点から PC の劣化を議論している<sup>3)</sup>。また、真鍋らは、PC 部材

のひび割れの進展に対して、繰返し荷重に着目した解析的な検討を行っている<sup>4)</sup>。著者らが残存プレストレス力の推定を行った道路橋は、昭和 40 年代の基準に準拠した I 型断面として設計されており、近年の基準の T 型断面とは形状が異なる。断面形状の違いによる繰返し載荷の影響、すなわち、ひび割れの進展とコンクリートの応力変化の影響が残存プレストレス力の低下に影響することが考えられる。今後、劣化の増加が懸念される PC 橋に対して、プレストレス力低下の要因を明らかにすることは極めて重要である。

本研究では、断面形状の異なる PC はり部材を作製し、断面形状の違いが、同繰返し最大荷重、同載荷回数の疲労荷重下における圧縮域のコンクリートのクリープ進行と残存プレストレス力との関連性について検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体概要

本実験で用いた供試体の形状を図-1 に示す。供試体は、200×260×3400mm と 180×300×3400mm の断面形状の異なる PC はりとした。以下、それぞれの PC はり供

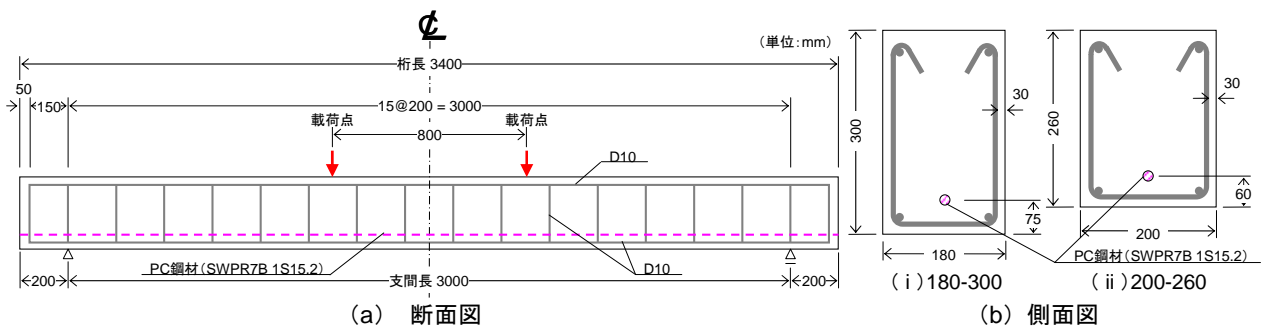


図-1 供試体形状

\*1 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)  
 \*2 東電設計株式会社 博士 (工学) (正会員)  
 \*3 東京理科大学 理工学部土木工学科助教 博士 (工学) (正会員)  
 \*4 東京理科大学 理工学部土木工学科准教授 博士 (工学) (正会員)

試体を 200-260, 180-300 と称する。PC 鋼材および鉄筋は、いずれの供試体も共通とした。PC 鋼材には SWPR7BL1S15.2 を用い、供試体 200-260 は下縁より 60mm, 供試体 180-300 は下縁より 75mm の位置に 1 本を直線配置した。また、用いた鉄筋は全て D10 とし、スターラップは破壊様式が曲げ破壊先行型となるように配置した。純かぶりはいずれの供試体も 30mm とした。

コンクリートの配合を表-1 に、使用材料を表-2 に示す。載荷時のコンクリートの圧縮強度は 55.0N/mm<sup>2</sup>, ヤング係数は 33.5kNmm<sup>2</sup>であった。

載荷試験前の各供試体におけるコンクリート応力状態の計算値を図-2 に示す。PC 鋼材の緊張力は、いずれの供試体も 168.5kN とし、載荷試験前の有効プレストレス力の計算値は 148.3kN である。

本研究では、同荷重時における曲率が変化するように断面形状を決定した。各供試体における荷重と曲率の関係の計算値を図-3 に示す。計算結果より、供試体 200-260 のひび割れ発生荷重は 34.3kN, 終局荷重は 82.6kN であり、供試体 180-300 のひび割れ発生荷重は 43.8kN, 終局荷重は 99.8kN である。

## 2.2 載荷方法

本実験における載荷は 2 点載荷とし、載荷点の位置は支間中央からそれぞれ 400mm で曲げモーメントが一定となる区間が 800mm, 支間長は 3000mm となるようにした。載荷試験は、写真-1 に示すような油圧サーボ式疲労試験機を用いて、荷重制御による片振りの繰返し載荷

を行った。供試体の載荷パターンと発生ひずみを表-3 に示す。載荷試験の繰返し最小荷重は 0.3kN とし、損傷を促進させることを目的として繰返し最大荷重を順次増



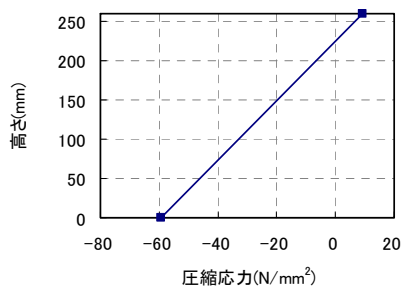
写真-1 本実験で用いた疲労試験機

表-1 コンクリートの配合

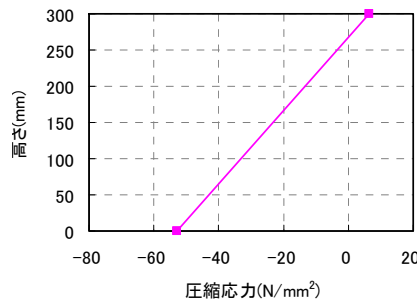
Gmax (mm)	SL (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
					W	C	S	G	SP
20	12.0	4.5	55.0	45.9	165	300	843	1000	6.00

表-2 使用材料

使用材料	記号	種類・物性値等
セメント	C	早強ポルトランドセメント, 密度3.14g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	茨城県西茨城郡岩瀬町産砕砂, 表乾密度2.61g/cm <sup>3</sup> , 吸水率0.75%
粗骨材	G	茨城県西茨城郡岩瀬町産砕石, 表乾密度2.63g/cm <sup>3</sup> , 吸水率0.48%
混和剤	SP	高性能減水剤レオビルドNL-4000



(a) 200-260



(b) 180-300

図-2 載荷試験前のコンクリート応力状態 (計算値)

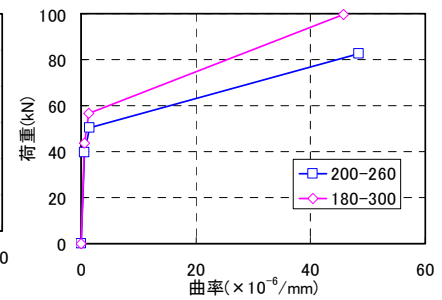


図-3 荷重と曲率の関係 (計算値)

表-3 供試体の載荷パターンと発生ひずみ

繰返し最大荷重 (kN)	繰返し載荷回数	載荷振動数(Hz)		発生ひずみ(μ)		
		200-260	180-300	計測箇所	200-260	180-300
22.5	30,000	2.0	4.0	引張縁コンクリート	100	93
42.7	30,000	2.0	2.0	—	—	—
56.8	30,000	1.0	1.5	引張鉄筋	500	579
79.0	10,000	0.5	1.0	引張鉄筋	1500	1424
56.8 (79.0終了後)	20,000	0.7	1.0	—	—	—

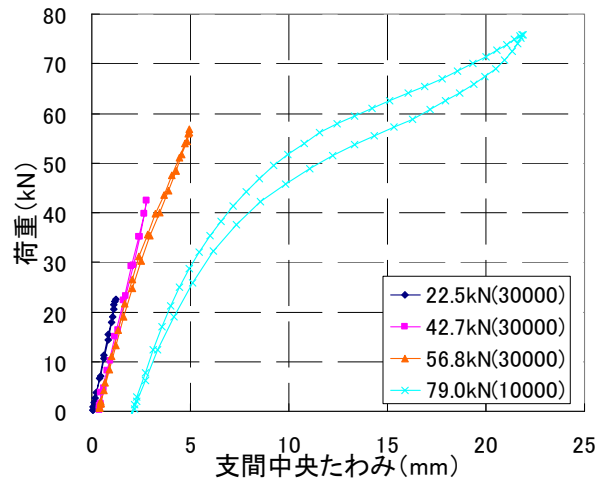
加させた。波形は正弦波とし、繰返し最大荷重に対する試験機の性能に応じて振動数を 0.5~4Hz まで変化させた。

各繰返し最大荷重は、供試体 200-260 の繰返し荷重の開始前、終了後に実施した静的荷重の結果をもとに決定した。基準とした要因は、ひび割れの発生、支間中央の引張域コンクリートひずみ、引張鉄筋ひずみである。繰返し最大荷重 22.5kN は、支間中央下縁から 30mm 位置のコンクリートひずみが 100 $\mu$  のときの荷重とし、ひび割れが発生しない範囲での繰返し荷重が PC はりの塑性変形に及ぼす影響を確認することを目的とした。繰返し最大荷重 42.7kN は、繰返し最大荷重 22.5kN の繰返し荷重が終了後に実施した静的荷重試験にて荷重を漸増させ、目視によりひび割れの発生を確認することで決定した。繰返し最大荷重 56.8kN、79.0kN は、支間中央の引張鉄筋ひずみがそれぞれ 500 $\mu$ 、1500 $\mu$  のときの荷重である。本実験では、繰返し最大荷重 79.0kN で繰返し荷重を行った後、再び繰返し最大荷重を 56.8kN に低下させ繰返し荷重を実施した。繰返し最大荷重を低下させた理由としては、ひび割れが進展した後、比較的小さい疲労荷重下における圧縮域コンクリートの塑性変形の挙動を把握するためである。各繰返し最大荷重における繰返し荷重回数は基本的に 30,000 回としたが、繰返し最大荷重 79.0kN については、供試体 200-260 の断面高さ 80% 程度までひび割れが進展したため 10,000 回で終了した。また、繰返し最大荷重 79.0kN で繰返し荷重を行った後の繰返し最大荷重 56.8kN の繰返し荷重回数は 20,000 回とした。供試体 180-300 の繰返し最大荷重および繰返し荷重回数については、全て供試体 200-260 と共通とした。

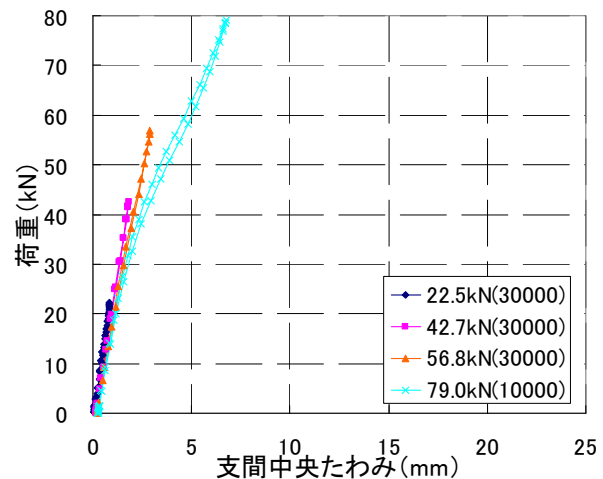
### 3. 実験結果

#### 3.1 荷重とたわみの関係

供試体 200-260 と供試体 180-300 の各繰返し最大荷重での繰返し荷重終了後の静的荷重試験における荷重と支間中央のたわみ関係を図-4 に示す。なお、凡例の()内の数値は繰返し荷重回数を表したものである。繰返し最大荷重 79.0kN の支間中央最大たわみは供試体 200-260 で 21.8mm、供試体 180-300 で 6.8mm と供試体 200-260 の方が大きな値となった。これは、繰返し最大荷重 79.0kN は、供試体 200-260 において計算終局荷重の約 90% と比較的に大きかったことによると考えられる。いずれの供試体においてもひび割れ発生後の各繰返し最大荷重の繰返し荷重の除荷時は、プレストレス力によりひび割れは閉塞していた。供試体 200-260 については、繰返し最大荷重 79.0kN の繰返し荷重終了後、供試体の損傷が大きく、繰返し最大荷重 56.8kN の繰返し荷重終了後から支間中央残留たわみが 1.57mm 増加した。

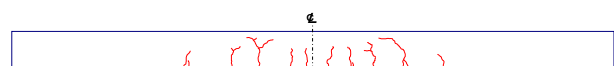


(a) 200-260

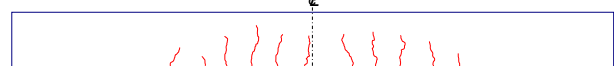


(b) 180-300

図-4 荷重-支間中央たわみ関係



(a) 200-260



(b) 180-300

図-5 ひび割れ性状

#### 3.2 ひび割れ性状

各供試体における試験終了後のひび割れ性状を図-5 に示す。いずれの供試体も破壊様式は、曲げ破壊先行型であった。また、いずれの供試体とも繰返し最大荷重 22.5kN の繰返し荷重試験終了後では、ひび割れは発生していなかった。

各供試体における試験終了後のひび割れ進展状況を表-4 に示す。供試体 200-260 では、荷重を漸増させた静

的載荷試験により 42.7kN でひび割れが載荷点付近内側に発生し、平均ひび割れ高さは 10mm 程度であった。繰返し載荷終了後、平均ひび割れ高さは 31mm まで進展していた。繰返し最大荷重 56.8kN の繰返し載荷終了後においては、ひび割れは 8 本発生しており、支間中央からそれぞれ 450mm の範囲に発生していた。繰返し最大荷重 79.0kN の繰返し載荷終了後は、新たにひび割れが支間中央からそれぞれ 750mm の位置に 3 本発生しており、ひび割れ本数は計 11 本であった。平均ひび割れ高さは 155mm であり、最大ひび割れ高さは 220mm で断面高さ 260mm の 80%以上となっていた。繰返し最大荷重 79.0kN から 56.8kN に低下させて行った繰返し載荷終了後では、新たなひび割れは発生しておらず、ひび割れ高さも進展していなかった。

供試体 180-300 については、繰返し最大荷重 42.7kN で

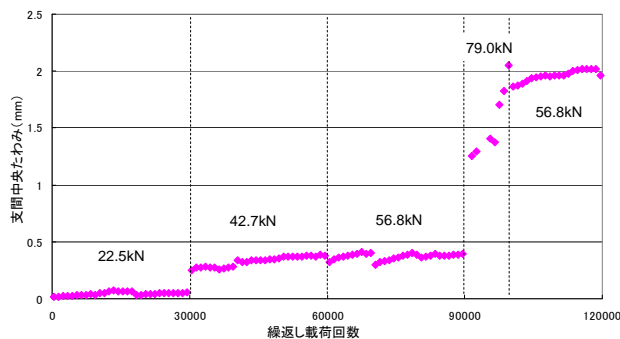
は供試体 200-260 と同様な傾向であった。繰返し最大荷重 56.8kN の繰返し載荷終了後においては、ひび割れは 10 本発生しており、支間中央からそれぞれ 750mm の範囲でひび割れが発生しており、供試体 200-260 と比較してひび割れの分散性は高い傾向あり、ひび割れ本数は多かった。平均ひび割れ高さは 106mm であり、供試体 200-260 の平均ひび割れ高さ 119mm に比べ小さかった。繰返し最大荷重 79.0kN の繰返し載荷終了後は、新たにひび割れが支間中央から 950mm の位置に 1 本発生した。繰返し最大荷重 79.0kN から 56.8kN に低下させて行った繰返し載荷終了後は、供試体 200-260 と同様にひび割れの進展は確認されなかった。

### 3.3 繰返し載荷回数と残留たわみ、残留ひずみの関係

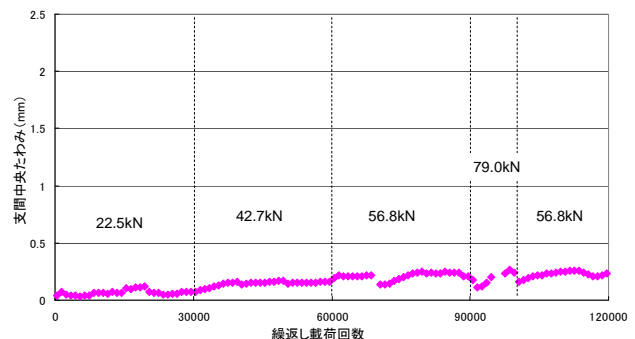
繰返し載荷回数に対する支間中央残留たわみ、圧縮縁

表-4 ひび割れ進展状況

繰返し最大荷重 (kN)	繰返し載荷回数	ひび割れ本数		最大ひび割れ高さ (mm)		平均ひび割れ高さ (mm)	
		200-260	180-300	200-260	180-300	200-260	180-300
22.5	30,000	0	0	—	—	—	—
42.7	30,000	4	5	40	39	31	25
56.8	30,000	8	10	161	138	119	106
79.0	10,000	11	11	220	233	155	152
56.8 (79.0終了後)	20,000	11	11	220	233	155	152

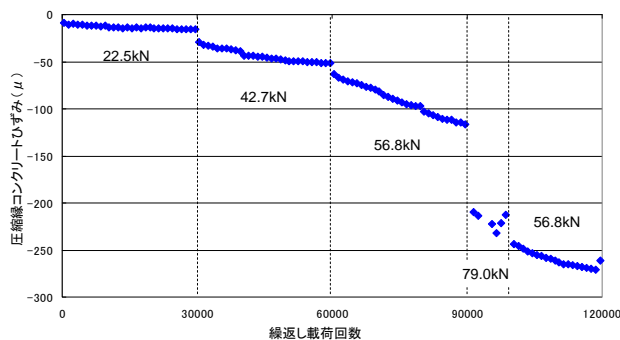


(a) 200-260

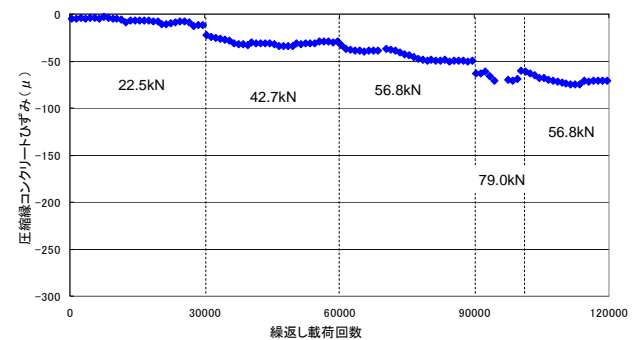


(b) 180-300

図-6 繰返し載荷回数に対する除荷時 (0.3kN) の支間中央残留たわみ



(a) 200-260



(b) 180-300

図-7 繰返し載荷回数に対する除荷時 (0.3kN) の圧縮縁コンクリート残留ひずみ

コンクリートひずみの関係をそれぞれ図-6, 図-7に示す。いずれの供試体もひび割れが発生しない繰返し最大荷重 22.5kN の繰返し載荷 30,000 回終了時点での支間中央残留たわみは、供試体 200-260 で 0.03mm, 供試体 180-300 で 0.05mm と初期の状態とほぼ変わりなかった。また、圧縮縁コンクリート残留ひずみは供試体 200-260 で-16 $\mu$ , 供試体 180-300 で-12 $\mu$  と増加量は比較的少なかった。しかし、いずれの供試体についても 1 回目の載荷から 30,000 回目の載荷まで緩やかに圧縮縁コンクリート残留ひずみが増加しており、圧縮縁コンクリート残留ひずみは収束していなかったため、同繰返し最大荷重で繰返し載荷を行った場合でも圧縮縁コンクリート残留ひずみは増加していくものと考えられる。

供試体 200-260 におけるひび割れ発生繰返し荷重 42.7kN, およびひび割れ発生繰返し荷重よりも繰返し最大荷重を増加させた 56.8kN, 79.0kN の繰返し載荷については、いずれの試験体においても支間中央残留たわみ、圧縮縁コンクリート残留ひずみは、繰返し最大荷重を増加させるごとに繰返し載荷回数に対する増加量は大きくなった。繰返し最大荷重 79.0kN の繰返し載荷終了時点での供試体 200-260 の支間中央残留たわみは 2.02mm, 圧縮縁コンクリート残留ひずみは-212 $\mu$  で、供試体 180-300 の支間中央残留たわみ 0.16mm, 圧縮縁コンクリート残留ひずみ-60 $\mu$  と比較して大きな値となった。繰返し最大荷重 79.0kN の繰返し載荷終了後の繰返し最大荷重 56.8kN の繰返し載荷では、供試体 180-300 の支間中央残留たわみは 0.24mm, 圧縮縁のコンクリート残留ひずみは-77 $\mu$  と繰返し最大荷重を低下させた場合でも値は増加した。供試体 200-260 においては、支間中央残留たわみの増加はみられなかったが、圧縮域コンクリート残留ひずみは-261 $\mu$  まで増加した。供試体 200-260 の結果より、比較的大きな繰返し最大荷重によってひび割れが進展した後、繰返し最大荷重を低下させて繰返し載荷を行った場合は、支間中央残留たわみは増加しにくくなるが、圧縮縁コンクリート残留ひずみは増加し続けるということが示唆された。

### 3.4 ひび割れ開口時曲げモーメントの算出

本研究では、一度生じたひび割れは、ディコンプレッションモーメントに達したときに開口すると仮定し、鈴木ら<sup>5)</sup>と同様に曲げモーメントとたわみの関係に着目してひび割れ開口を評価した。例として、供試体 200-260 の繰返し最大荷重 56.8kN の繰返し載荷 10,000 回終了時点での荷重と曲率の関係を図-8 に示す。曲げモーメントとたわみ関係の勾配が、ひび割れ発生前の勾配から 5% 変化したときをひび割れの開口と判断した。

図-9 に、各繰返し最大荷重における繰返し載荷終了

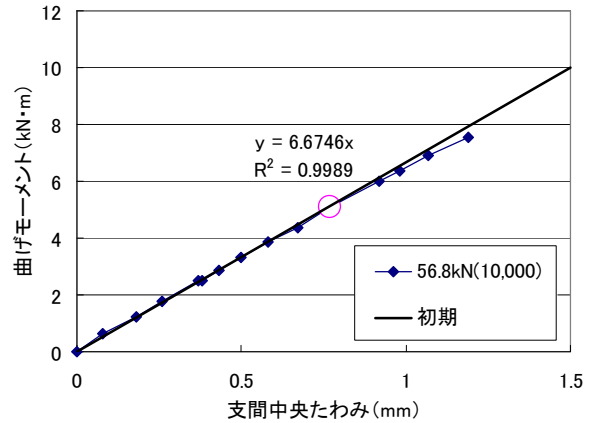


図-8 荷重と支間中央たわみの関係 (200-260)

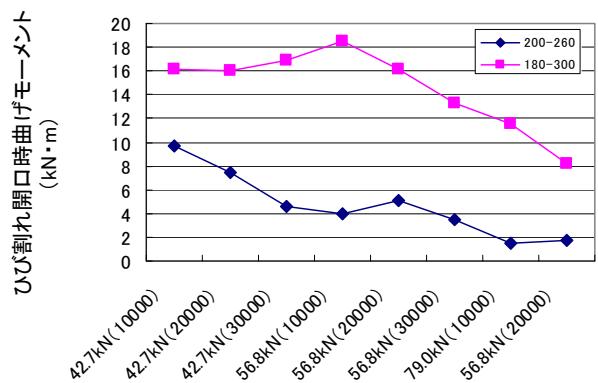


図-9 各繰返し最大荷重における繰返し載荷終了後のひび割れ開口時の荷重

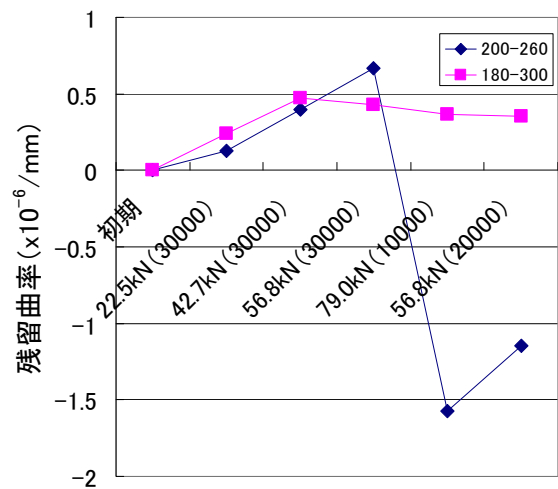


図-10 各繰返し最大荷重における繰返し載荷終了後の残留曲率

後のひび割れ開口時の曲げモーメントを示す。対象とした範囲は、ひび割れ発生後の繰返し最大荷重 42.7kN, 56.8kN, 79.0kN および繰返し最大荷重を低下させた 56.8kN とした。いずれの供試体も疲労の進行に伴い、ひ

び割れ開口時曲げモーメントは緩やかに減少していた。

図-10 に各繰返し最大荷重における繰返し载荷終了後の残留曲率を示す。供試体 200-260 は繰返し最大荷重 56.8kN、供試体 180-300 は繰返し最大荷重 42.7kN の繰返し载荷終了後まで残留曲率は増加した。その後、供試体 180-300 は疲労の進行に伴って、残留曲率が  $0.35 \times 10^{-6}/\text{mm}$  まで緩やかに減少した。供試体 200-260 については、繰返し最大荷重 79.0kN の繰返し载荷終了後、引張鉄筋の降伏と残留ひずみにより曲率が反転したため、ひび割れ開口時曲げモーメントとの比較は不可能であった。

詳細な分析を行う必要はあるが、ひび割れの進展が小さい供試体 180-300 の結果についてみると、ひび割れ開口時曲げモーメントすなわちプレストレス力と、塑性変形の増加には相関がある可能性が考えられる。そのため、ひび割れが進展して残留ひずみが生じることで、プレストレス力がさらに低下する可能性があると考えられる。実験結果より、ひび割れの進展、塑性変形の増加に伴ってプレストレス力が低下する傾向は確認できたが、プレストレス力と塑性変形の相関を明確にするためには、さらなる検討が必要である。

#### 4. まとめ

本研究では、疲労荷重下におけるコンクリートのクリープ進行と残存プレストレス力の関連性について把握することを目的として、同繰返し最大荷重、同载荷回数条件下で断面形状の異なる PC はり部材の疲労試験を実施した。本研究で得られた知見は、以下のとおりである。

- (1) 最大繰返し荷重 79.0kN の繰返し载荷終了後の静的载荷試験において、供試体 200-260 を 79.0kN まで载荷した場合の最大支間中央たわみは 21.8mm と供試体 180-300 と比較して大きな値となった。
- (2) ひび割れ高さは、供試体 200-260 の方が供試体 180-300 に比べ進展した。試験終了後の供試体 200-260 の最大ひび割れ高さは断面高さの 80%以上

となった。

- (3) 疲労の進行に伴い、いずれの供試体においても支間中央残留たわみ、圧縮域コンクリート残留ひずみの増加が確認された。また、繰返し最大荷重を低下させて繰返し载荷を行った場合では、支間中央残留たわみの増加量は小さかったが、圧縮域のコンクリート残留ひずみの増加量は比較的に大きかった。
- (4) 疲労の進行に伴い、いずれの供試体についてもひび割れ開口時曲げモーメントの低下が確認された。

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、東京大学生産技術研究所岸研究室の多大なるご協力を得た。ここに記して感謝の意を表す。本研究の一部は平成 23 年度東京理科大学特定研究助成金を受けたものである。

#### 参考文献

- 1) (財)海洋架橋・橋梁調査会：道路橋マネジメントの手引き，2004.8
- 2) 恒国光義，加藤佳孝，魚本健人：曲げひび割れが生じた PC はり部材の残存プレストレス力の推定手法に関する研究，第 19 回プレストレスコンクリートの進展に関するシンポジウム論文集，pp.235-240，2010.10
- 3) 千々和伸浩，石田哲也，前川宏一：コンクリートの微細空隙中の水分と PC 橋の長期変位，橋梁と基礎，Vol.45 No.1，pp.38-41，2011
- 4) 真鍋英規，川谷泰山，玉越隆史，石尾真理，春田健作：PC 梁部材におけるひび割れ性状に及ぼす繰返し载荷の影響に関する研究，アップグレード論文集第 9 巻，pp.417-424，2009
- 5) 鈴木計夫，大野義照，宮丸孝史，山向優：繰返し载荷下におけるプレストレス鉄筋コンクリートはりの曲げ性状，第 8 回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.699-672，1986