

論文 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

真鍋 英規^{*1}, 川谷 泰山^{*2}, 玉越 隆史^{*3}, 石尾 真理^{*4}, 春田 健作^{*5}

Study on Cracks Properties of Prestressed
Concrete Beams Under Cyclic Load

Hideki MANABE^{*1}, Taizan KAWATANI^{*2}, Takashi TAMAKOSHI^{*3}, Mari ISHIO^{*4}
and Kensaku HARUTA^{*5}

要旨: 繰返し荷重を受ける PC 梁の载荷実験において, 曲げひび割れが生じた後, 载荷回数
の増加と共にひび割れが中立軸付近まで鉛直に進展する性状が見られた. また, 実橋で
も長年にわたり過大な繰返し荷重を受けた道路橋 PC 桁において鉛直に進展したひび割れ
が確認された. いずれも繰返し载荷しない場合と比較して, ひび割れ発生本数は少なく分
散しない. これらのひび割れは単独の荷重では発生せず, 繰返し载荷の影響によるもの
であるが, その原因の一つを主鉄筋とコンクリートの付着が劣化することにあると考えた.
本研究では, PC 梁部材の疲労载荷実験, 付着性状に着目した非線形 FEM 解析および実橋
の PC 橋の詳細調査を通してひび割れ性状に及ぼす繰返し载荷の影響に関する考察を行っ
た.

キーワード: PC 梁, 疲労, ひび割れ, 付着特性, 非線形 FEM 解析

1. はじめに

通常の使用状態において曲げひび割れを許容
しないプレストレストコンクリート (PC) 部材
は, 変動荷重による PC 鋼材の応力振幅は非常
に小さく, PC 鋼材に付着のある場合には, 疲労
は問題とはならない. しかし, 使用状態におい
て曲げひび割れを許容する PRC 部材, あるいは
PC 部材でも曲げひび割れが発生するような大
きな変動荷重の繰返しの影響を受ける場合には,
疲労破壊が問題となることもある¹⁾. コンクリ
ートにひび割れが発生するとひび割れ発生位置
において PC 鋼材に急激な引張応力度の増加が

おこる. このような増加張力はひび割れ位置附
近において付着が無くなることによるものであ
り, 繰返し载荷のレベルによっては, 付着が完
全に破壊され, PC 鋼材が破断にいたる場合もあ
る²⁾. PC 部材の疲労破壊に対する安全性の照査
は, コンクリート標準示方書³⁾において評価法
が明示されているが, 現行の道路橋示方書では
規定されていない. 問題点の検討を含め規準の
整備が望まれるところである.

本稿では, PC (PRC) 梁部材の疲労性状を検
討することを目的とし, まず, プレストレスレ
ベルを変化させた疲労载荷実験を行った. 次に

*1 (株)国際建設技術研究所 構造設計部 部長

*2 (株)国際建設技術研究所 構造設計部

*3 国土交通省 国土技術政策総合研究所 道路研究部 道路構造物管理研究室 室長

*4 国土交通省 関東地方整備局 横浜国道事務所 管理第二課

*5 (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会

表-1 実験供試体の種類およびその詳細

	コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)	主鉄筋	PC鋼棒	プレストレスカ			設計荷重時 (55kN 載荷時)			
				導入力 (kN)	導入応力度 (N/mm ²)	許容応力度 (N/mm ²)	コンクリート応力度 (N/mm ²)		RC計算 (N/mm ²)	
							σ_{co}	σ_{cu}	σ_c	σ_s
PRC-A	53.0	3-D6	B1-φ23	173.9	418.532	648.0	5.17	-2.08	7.5	50.6
PRC-B	53.0	2-D13	B1-φ13	83.0	625.471	648.0	5.36	-3.86	10.7	180.0
PRC-B'	53.0	2-D13	B1-φ13	83.0	625.471	648.0	5.36	-3.86	10.7	180.0
RC	56.0	2-D13	-	-	-	-	5.25	-5.04	6.9	180.0

その結果を用い、ひび割れの進展および分散性状に関して、付着特性をパラメータとした非線形 FEM 解析による検証を行った。併せて、実際に荷重の繰返し疲労によるひび割れが生じている道路橋 PC 桁橋を対象として詳細調査を実施し評価を行った。

2. PRC 梁部材の疲労載荷実験

2.1 実験概要

PRC 梁部材に繰返し荷重が作用する場合の挙動の確認を行った。主に着目した項目は、曲げひび割れの進展状況、および分散性状、主鉄筋のひずみ分布の変化などである。

供試体は、プレストレス導入レベルを変えた 2 種類の PRC 供試体および比較の対象として RC 供試体の計 4 体を製作した。供試体の種類および詳細を表-1 に示す。PRC-A、PRC-B はそれぞれ、載荷荷重の上限時 ($P_{ul}=55kN$) においてひび割れ発生限界応力度程度、曲げひび割れ幅が $w=0.2mm$ 程度となるように設計を行った。RC は鉄筋の応力度が $180N/mm^2$ となる荷

重を上限值 ($P_{ul}=46kN$) とした。供試体の寸法は、 $200 \times 400 \times 3300mm$ (幅×高さ×長さ) であり、PRC 供試体は下縁より 140mm の位置に PC 鋼棒を 1 本配置している。

載荷は支間 3000mm の 2 点曲げ載荷とし、支間中央から左右に 500mm 離れた定点位置に繰返し疲労載荷を行った。表-2 に各供試体における載荷荷重と繰返し回数を示す。

2.2 実験結果

(1) ひび割れ性状

図-1 に各供試体の疲労試験終了時、図-2 に PRC 供試体の静的破壊試験後におけるひび割れ状況を示す。疲労試験終了時において、PRC-A では微細なひび割れが多数生じたものの曲げひび割れは生じなかった。一方 PRC-B では、初回載荷で曲げひび割れが曲げモーメント一定区間にほぼ 250mm の間隔で 5 本生じ、繰返し回数の増加とともに鉛直方向にひび割れが進展した。疲労載荷 200 万回終了時では、上記の曲げひび割れが高さ 150~200mm まで進展した。最終的に曲げひび割れは 6 本発生した。また RC では、初回載荷で曲げひび割れが曲げモーメント一定区間を中心にほぼ 250mm の間隔で 6 本生じ、繰返し回数の増加とともに鉛直方向にひび割れが進展した。疲労載荷 900 万回終了時では、上記の曲げひび割れが高さ 200~250mm まで進展した。最終的に曲げひび割れは 7 本発生した。

静的破壊試験では、PRC-A では曲げモーメント一定区間に 4 本の顕著な曲げひび割れが生じた後、上縁圧壊に至った。PRC-B は疲労載荷

表-2 載荷荷重と繰返し回数

	荷重振幅 下限~上限 (kN)	載荷回数 (回)	疲労試験終了後の静的破壊試験の有無	備考
PRC-A	10~55	350万	○	-
PRC-B	10~55	200万	○	-
PRC-B'	10~55	10	○	-
RC	10~46	100万	-	100万回以降は、低荷重による長期繰返しによる鉄筋ひずみの変化を観察
	10~20	730万		
	10~46	70万		

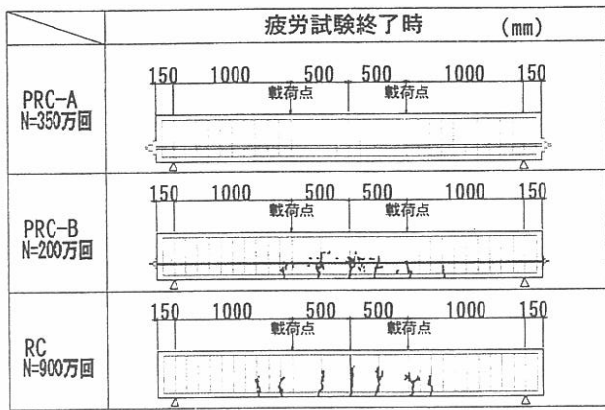


図-1 疲労試験終了時ひび割れ状況

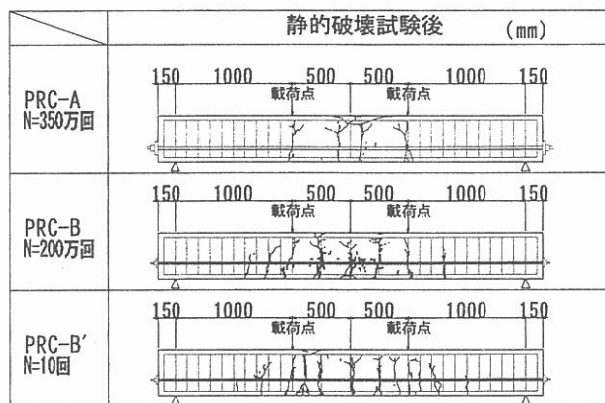


図-2 静的破壊試験後ひび割れ状況

を200万回した供試体 (PRC-B) と、僅か10回でとどめた供試体 (PRC-B') のひび割れ状況を比較として示した。曲げひび割れ本数はPRC-Bが8本に対して、PRC-B'は12本生じた。破壊は何れも上縁圧壊となった。

実験結果からは、ひび割れの分散性状はプレストレス導入レベルが高い供試体よりプレストレス導入レベルが低い供試体の方が良くなる結果が得られた。また、PRC供試体1ケースの比較ではあるが、疲労荷重を受けた供試体より疲労荷重を受けていない供試体の方がひび割れ分散性状は良くなった。

(2) 主鉄筋の付着性状

図-3にPRC-Bにおける各繰返し荷重回数の主鉄筋ひずみ分布 (部材軸方向) を示す。ひび割れが発生した位置において疲労回数が増加するに伴って主鉄筋ひずみが顕著に増加しており、また、ひずみが増加する範囲がひび割れを中心に部材軸方向に広がっていることが解る。

これは、繰返し荷重により曲げひび割れが鉛直方向に進展するとともに、主鉄筋のひび割れ周辺の付着性能が低下すること、あるいは付着がなくなる (付着切れ) ことにより主鉄筋ひずみが増加するのではないかと考えられた。

主鋼材の付着性能が悪くなるとひび割れが分散しないことも報告⁴⁾されており、PRC供試体において疲労荷重を受けた供試体の方が疲労荷重を受けていない供試体よりひび割れ分散性状が悪くなったことも、主鉄筋の付着性能の低下が原因の一つと考えられる。付着特性に起因するひび割れの性状および主鉄筋のひずみ特性についての検証は次項で詳述する。

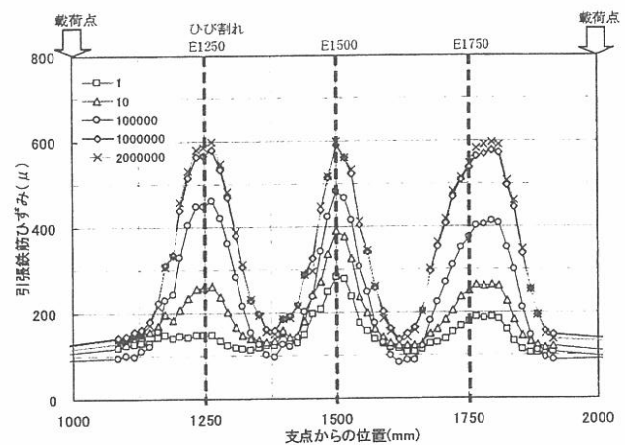


図-3 主鉄筋のひずみ分布

3. 鉄筋付着特性に着目したFEM解析

3.1 FEM解析概要

PRC供試体では、繰返し荷重回数が増加するにつれて、曲げひび割れの進展と曲げひび割れ付近の鉄筋ひずみの増加がみられた。この現象は、繰返し荷重を受けることにより、初期曲げひび割れが生じた位置の軸方向鉄筋で付着が徐々に低下していくことに起因していると考えられる。そこで、FEM解析では、繰返し荷重の影響を受けるのは主鉄筋の付着特性のみとすることにより、シンプルにモデル化を行い、その影響が曲げひび割れ性状に及ぼす影響を検討することとした。

解析にはコンクリートの非線形挙動の評価が可能である非線形有限要素法解析プログラム

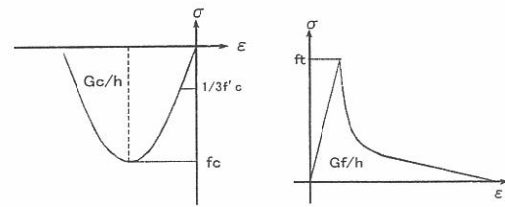
「DIANA」を使用した。また、コンクリート内部鉄筋の付着をモデル化するため、コンクリートをソリッド要素とする3次元モデルとした。

3.2 解析条件

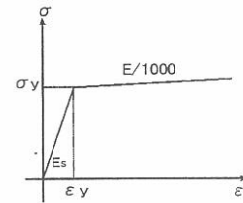
表-3に解析に用いた条件を示す。FEM解析で用いたコンクリート（圧縮，引張）および鉄筋の応力ひずみ関係を図-4に示す。コンクリートの応力-ひずみ関係は破壊エネルギー⁵⁾を考慮した。主鉄筋とコンクリートの付着は、付着損失区間を与えるモデルでは剛結合とし、付着剛性を変化させるモデル⁶⁾では図-5に示す付着応力度-すべり関係を用いた。コンクリートに生じるひび割れは、分散ひび割れとして扱い、回転ひび割れモデル⁵⁾を適用した。表-4に解析ケースと付着条件を示す。

3.3 要素分割

FEM解析では、載荷荷重の繰返しによるコンクリートの損傷状態を再現することを目的としているため、解析モデルの要素分割はある程度細かい要素とすることによってひび割れの表現が可能なものとした。図-6に部材軸方向の



コンクリート（圧縮側） コンクリート（引張側）



鉄筋

h: (ソリッド要素の体積)^{1/3}

図-4 応力-ひずみ関係

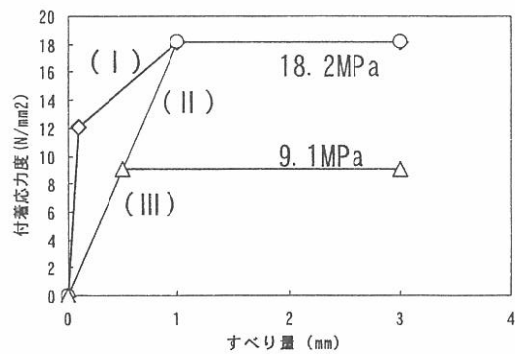


図-5 応力度-すべり関係

表-3 解析条件

部位	項目	PRC-B	単位	備考
コンクリート	ヤング係数: E_c	35010.0	N/mm ²	※実測値
	ポアソン比	0.166	-	
	単位体積重量	2.45E-05	N/mm ³	
	圧縮強度: f'_c	53.0	N/mm ²	※実測値
	圧縮破壊エネルギー: G_c	63.847	N/mm	$G_c = 8.770 * (f'_c)^{1/2}$
	引張強度: f_t	3.2	N/mm ²	$0.23 * f'_c^{2/3}$
鉄筋	引張破壊エネルギー: G_f	0.251	N/mm	$G_f = 0.0345 * (f'_c)^{1/2}$
	ヤング係数: E_s	2.00E+05	N/mm ²	
	ポアソン比	0.3	-	
	単位体積重量	0.0	N/mm ³	
	降伏点強度: σ_{sy}	345	N/mm ²	
	ヤング係数	2.00E+05	N/mm ²	
PC鋼棒	ポアソン比	0.3	-	
	単位体積重量	0.0	N/mm ³	
	降伏点強度	304.5	N/mm ²	

表-4 解析ケースおよび付着条件

ケース	a) 付着無視		b) 付着性能低下	
	付着無視区間 (±, mm)	ひび割れ部以外の付着剛性 (MPa)	ひび割れ部の最大付着応力度 (MPa)	付着剛性変化区間 (±, mm)
PRC-①	0	-	-	-
PRC-②	5			
PRC-③	20			
PRC-④	-	(I) 250	(I) 250	100
PRC-⑤	-	(I) 250	(II) 18.2	100
PRC-⑥	-	(I) 250	(III) 9.1	100

要素分割を示す。PRC 供試体の繰返し載荷実験における初期ひび割れは、曲げモーメント一定区間のスターラップ付近で5本発生した。解析においてひび割れ位置を整合させるために、解析モデルにひび割れ誘発部を設定し、その部分の引張強度を落とすことで初期ひび割れを再現した。初期ひび割れ位置と交差する主鉄筋において付着切れおよび付着剛性を変化させるため、

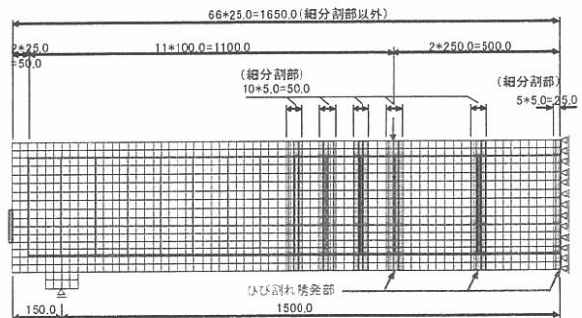


図-6 要素分割（部材軸方向）(mm)

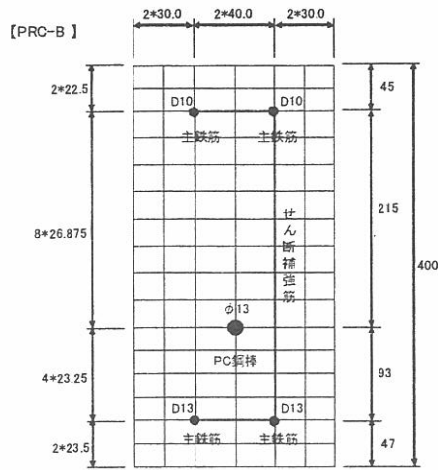


図-7 要素分割 (断面) (mm)

初期ひび割れ付近の要素を細分割した。

図-7 に要素分割断面図を示す。実験において使用した主鉄筋、スターラップ、PC 鋼材の配置位置を忠実に再現し、それぞれ引張剛性を評価したコンクリートと剛結されたトラス要素としてモデル化を行った。なお、プレストレスは外力として導入している。プレストレスおよび自重までの挙動を事前事象 (Phase1) として扱い、載荷荷重以前の変形 (ひずみ, 応力) はキャンセルしその後の変形を算出した (Phase2)。以後の解析結果は Phase2 の値を示した。

4. 解析結果

4.1 主鉄筋の付着損失区間を設けた場合

PRC 梁部材において主鉄筋とコンクリートの付着を無くす長さを変化させることにより、曲

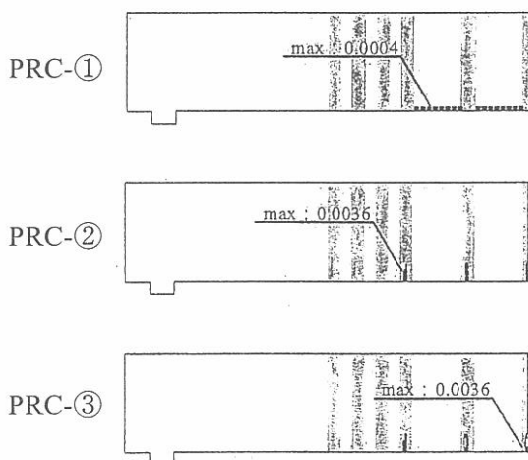


図-8 ひび割れ概念図 (ひずみ)

げひび割れの性状および主鉄筋ひずみの変化に対する影響を検討した。解析モデルにおいて付着を損失させる区間は、曲げひび割れ発生位置において部材軸方向に、 $\pm 5\text{mm}$ (PRC-②) および $\pm 20\text{mm}$ (PRC-③) の 2 種類とした。

付着損失区間長を変えた解析ケースのひび割れ発生荷重時のひび割れ概念図を図-8 に示す。図より、PRC-②および PRC-③では、ひび割れが下縁より 70mm 程度まで進展していることがわかる。実験において疲労載荷終了時では、下縁より 150mm 程度のひび割れ高さが確認されており、解析値とは一致しない。付着切れ区間の変化 (5mm~20mm) に対して、ひび割れ性状に明確な違いは認められなかった。

図-9 に主鉄筋ひずみの分布の比較を示す。解析では、ひび割れ部周辺において若干のひずみの増加が見られるものの、実験における顕著なひずみの増加 (図-3) は再現できなかった。

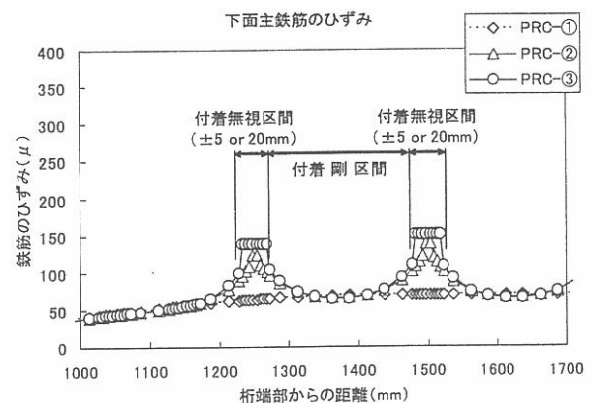


図-9 主鉄筋ひずみ分布

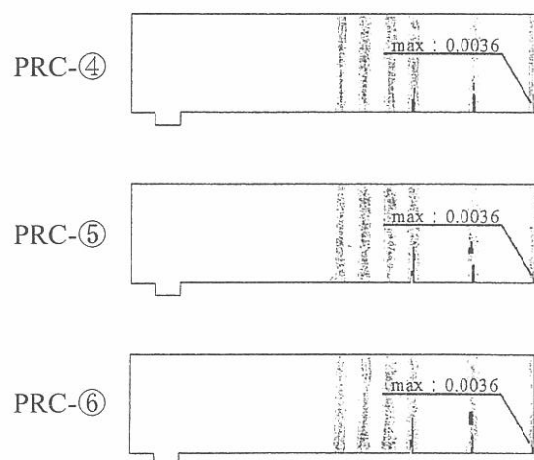


図-10 ひび割れ概念図 (ひずみ)

また、主鉄筋のひずみ分布形状も異なる。解析では付着損失区間では主鉄筋ひずみが一定となるが、実験ではひび割れ部でピークを示す山形形状を示した。

4.2 主鉄筋の付着剛性を変化させた場合

疲労により主鉄筋の付着が全くなくなるのではなく付着剛性が変化（低下）するものとし付着モデルを変更し解析を行った。解析で用いた鉄筋とコンクリートの付着特性モデルは既往の文献⁶⁾を元に図-5に示す付着応力度-すべり量の関係を3種類与えた。付着が健全なモデルをPRC-④、疲労により付着剛性が低下したモデルをPRC-⑤、極端に付着剛性が低下したモデルをPRC-⑥とした。付着剛性が低下する区間は実験結果を参考にしてひび割れ位置の±100mm区間とした。

付着剛性を変化させた場合のひび割れ発生荷重時のひび割れ概念図を図-10に示す。図より、付着が健全なPRC-④ではひび割れが下縁より50mm程度であるのに対して、付着剛性を低下させたPRC-⑤およびPRC-⑥では下縁より170mm程度まで進展している。疲労実験により確認されたひび割れ進展高さとはほぼ一致している。しかし、PRC-⑤とPRC-⑥では明確な差は認められない。

図-11に主鉄筋ひずみ分布の比較を示す。実験では主鉄筋ひずみがひび割れ位置で最大600

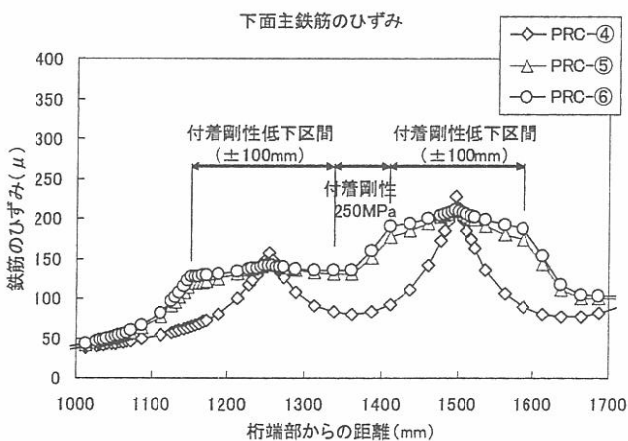


図-11 主鉄筋ひずみ分布

μ程度発生しているのに対して、解析では何れのケースも最大200μ程度となった。付着損失区間を設けた場合と同様に顕著なひずみの増加は再現できなかった。

繰返し疲労载荷の影響によりひび割れが鉛直に進展し、主鉄筋ひずみが増大する現象は、主鉄筋とコンクリートの付着が劣化することが影響しているものの、それだけでは上記の現象を完全に再現することはできない。

4.3 終局時の比較

終局時の破壊は、実験ではすべて上縁圧壊であった。解析では、計算が発散する1ステップ前を破壊と定義している。疲労载荷後の静的破壊実験における終局荷重126.7kNに対して、解析値はそれぞれPRC-①:128kN, PRC-④:128kN, PRC-⑤:120kN, PRC-⑥:112kNとなった。付着が健全なケース（PRC-①, ④）と比較して付着剛性を低下させたケース（PRC-⑤, ⑥）では終局耐力が低下する。付着剛性を落とした解析ケースPRC-④~⑥の終局時のひび割れ性状（ひび割れ発生本数、高さ方向の進展）は疲労载荷を受けた実験供試体とはほぼ同様であった。一方、主鉄筋の付着を剛結合としたPRC-①では、他のケースと比較してひび割れ誘発部以外に発生しているひび割れ本数は多く、ひび割れが分散する傾向となった。各解析ケースの荷重-変位曲線を図-12に示す。

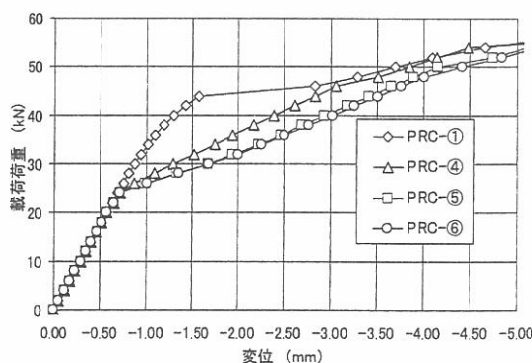


図-12 荷重-変位曲線

5. 実橋梁における調査

5.1 ひび割れの生じたPCT桁橋

重交通路線で長期間供用されたポストテン

ション方式T桁（PCT桁）にひび割れが生じている事例がある。PCT桁に生じたひび割れは耳桁の支間中央付近に下縁から上フランジ付近まで鉛直に2本だけ生じていた。図-13にひび割れの写真を示す。ひび割れは、中立軸付近まで進展しており、発生本数が少なく分散していないことが特徴であり、供用が開始されてから50年が経過しており、当時の設計荷重より実際の通行荷重が大きくなっている。また路線は交通量が非常に多く大型車混入率が高いこと、さらに、対向2車線の幅員構成で荷重走行位置が固定されていること等から、繰返し車両走行による疲労が原因と考えられた。

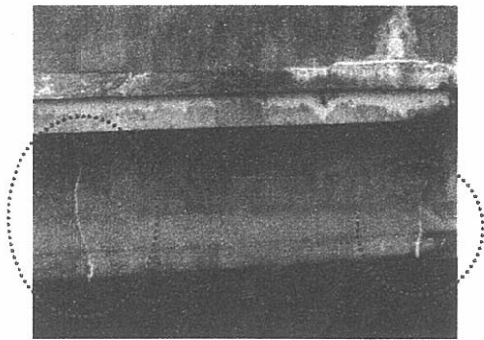


図-13 ひび割れ写真

5.2 ひび割れ原因の推定

実交通荷重下における、ひび割れが生じているPCT桁の挙動を確認しひび割れ原因の推定を行った。図-14に実際交通荷重とひび割れ開口量の関係を示す。荷重の計測は車両通行に伴う主桁の応答値、影響線を利用する間接法⁷⁾を用いて軸重を推定した。ひび割れ開口量は、ひび割れを跨いで設置したπ型ゲージの50mm間隔のひずみである。荷重とひび割れ開口量の関係はばらつきがあるものの近似曲線にあてはめれば、荷重値が30tf付近で変曲点を見いだすことができる。この点付近を境界として、荷重-ひび割れ開口量関係が線形関係から非線形関係に移行している。つまり、残存する有効プレストレスによりひび割れが閉じた状態から、荷重による引張応力が有効プレストレスによる応力を上回りひび割れが開口する変曲点と見なすことができる。載荷荷重が30tfの時にひび割れが開口した

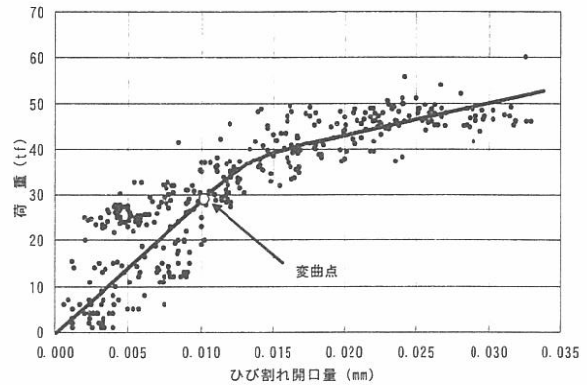


図-14 交通荷重-ひび割れ開口量

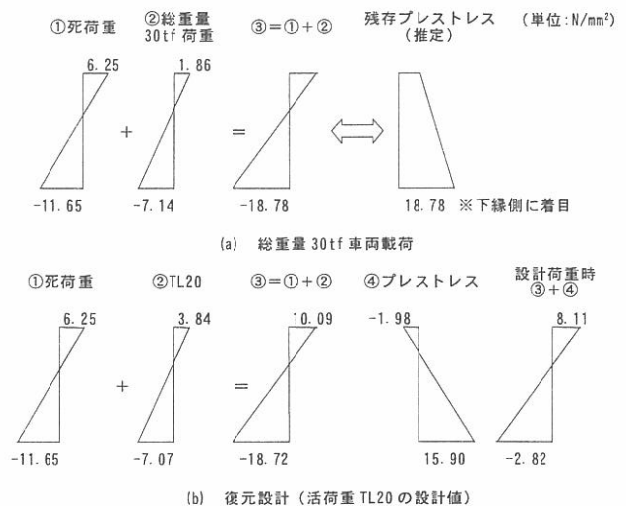


図-15 有効プレストレスの推定

とすれば図-15(a)に示すとおり、下縁側の残存プレストレスは18.78N/mm²と推定できる。残存する有効プレストレスを推定すれば、ほぼ設計値と同程度となった。図-15(b)に復元設計の結果を示す。残存する有効プレストレスは建設後50年経過しても特別な減少は無く健全な状態を保っているといえる。

ひび割れ原因となる要因を調査した結果（支承拘束、施工不良、環境条件等）、特別な原因は見出せなかった。以上より、PCT桁に生じているひび割れは、何らかの理由（過積載、コンクリート強度のばらつき等）で支間中央付近に曲げひび割れが生じ、その後、実交通荷重による繰返し載荷の影響を受けひび割れが上昇したと推察する。

5.3 主鉄筋付着の有効範囲の推定

図-16にひび割れが生じている位置近辺の

主桁下縁のコンクリート表面ひずみの分布を示す。図より、低荷重を含め各荷重段階でひび割れ近傍のひずみがほぼ一様に発生しており、主鉄筋の付着が広範囲にわたって劣化していないことが推定できる。解析結果でも考察したように、繰返し荷重による曲げひび割れの進展と付着劣化の影響は直接的には関係していないと考えられる。

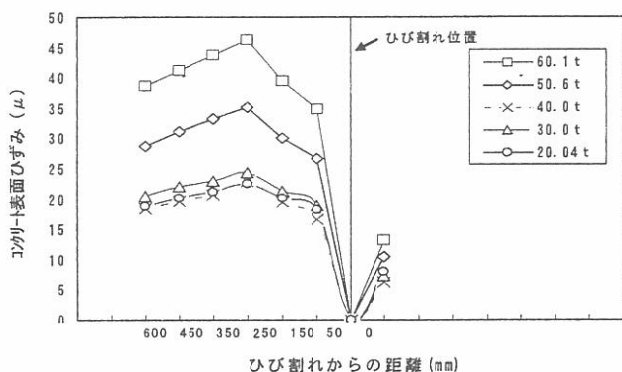


図-16 コンクリート表面ひずみ

6. まとめ

PC 梁部材の疲労性状を検討することを目的から、疲労載荷実験、付着特性に着目した FEM 解析および実橋梁の調査を行った。以下にまとめを示す。

1) 疲労載荷実験

PC 供試体では疲労により顕著なひび割れは生じなかったが、載荷荷重によりコンクリート下縁にひび割れ発生限界程度の引張応力度が発生する PRC 供試体では、曲げひび割れが発生し、繰返し回数の増加とともに中立軸を超えるひび割れの上昇が見られた。ひび割れの分散性状は、繰返し載荷の影響を受けていない供試体に比べて疲労実験後の供試体の方が悪くなった。

2) 付着特性に着目した FEM 解析

鉄筋とコンクリートの付着特性が曲げひび割れ性状に及ぼす影響を検討した。繰返し載荷の影響によりひび割れが鉛直に進展し、主鉄筋ひずみが増大する現象は、主鉄筋とコンクリートの付着が劣化することが影響しているものの、それだけでは上記の現象を完全に再現することはできない。

3) 実橋梁調査

重交通路線で長期間供用された PCT 桁にひび割れが生じている橋梁に関して詳細調査を実施した。残存プレストレスは健全であり、その他のひび割れ要因も見あたらない、曲げひび割れが生じた後繰返し荷重の影響によりひび割れが進展したと推察される。

荷重の繰返しを受けることにより、コンクリートの微視的な組織構造の変化がおり微細なひび割れが少しずつではあるが進展、蓄積され、最終的に破壊にいたることが定性的には知られているが、ミクロ的な側面からは十分に解明されていないのが現状である。今後、実験や実橋において確認された繰返し荷重によるひび割れ性状の解明に対しては、付着劣化の影響と併せて曲げひび割れ先端の応力集中やコンクリート引張強度低下を引き起こすひずみの蓄積等に着眼して研究を進める必要がある。

参考文献

- 1) 松下博通・牧角龍憲：プレテンション PC 梁の疲労強度に関する研究—プレテンション PC 梁の疲労性状、プレレストコンクリート、Vol.21, No.5, 1979.
- 2) 猪俣俊司著：プレレストコンクリートの設計および施工、技報堂、1957.
- 3) 土木学会、2007 年制定コンクリート標準示方書 設計編、2007.12.
- 4) 中須誠、岩立次郎：コンクリートと鉄筋の付着力の疲労に関する実験、土木学会第 51 回年次学術講演概要集、第 V 部 pp852-853, 1996.9
- 5) 山谷敦、中村光、檜垣勇：回転ひび割れモデルによる RC 梁のせん断挙動解析、土木学会論文集 No.620/V-43, 187-199, 1999.5.
- 6) 杉本訓祥：鉄筋とコンクリート間の付着特性モデル、コンクリート工学 Vol.46, No.7, pp38-43, 2008.7
- 7) 中谷昌一、玉越隆史、中州啓太、石尾真理：橋梁を用いた車両重量計測システムの開発、土木技術資料 44-12, pp62-67, 2002.