

論文

PPC によって補強した RC 梁の負曲げに関する耐疲労性評価

文屋遼太郎*, 栗原哲彦**, 櫻井俊太*

*工修, 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社, コンポジット事業部 社会資本材料部
(〒103-0027 東京都中央区日本橋 1-13-1)

** 工博, 東京都市大学准教授, 建築都市デザイン学部 都市工学科
(〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

レジンコンクリートである PPC (Polyester Polymer Concrete) は, 防水性や耐摩耗性に優れることから, 米国では橋面舗装のオーバーレイ材料として使用されている. PPC はセメントコンクリートと比較し, 高い引張強度を有しており, RC 床版上面増厚工法の増厚材料としての適用も期待できる. RC 床版の主桁直上や張出部においては, 負曲げモーメントが作用するため, 増厚した PPC に引張力が生じる条件にて, RC 梁の定点疲労载荷試験を実施し, その耐疲労性を評価した.

キーワード: レジンコンクリート, 上面増厚, 定点疲労载荷試験

1. はじめに

1.1 床版上面増厚工法と米国のオーバーレイ事例

道路橋 RC 床版の補修・補強方法の 1 つとして, 上面増厚工法がある. 一般には, アスファルト舗装部および床版上面のコンクリートを 10mm 程度切削した後, 接着剤を塗布し, 新規コンクリートやモルタル材料を打設し, 既設床版のコンクリートと一体化させる工法である. その多くは, SFRC によって施工が行われ, 必要に応じて鉄筋材料が補強材として設置される. 床版断面厚の増加によるせん断耐力の増加, 補強材設置による既設床版の鉄筋応力の低減によって, 長寿命化を図るものである.

近年の米国では, 橋面コンクリート舗装のオーバーレイや, ポットホール補修を目的とした, 部分的なパッチングを不飽和ポリエステル樹脂やメタクリル樹脂を用いたレジンコンクリートを使用した事例が報告されている¹⁾. 補修方法は, 母材となる既設コンクリート表面の研掃を行い, メタクリル樹脂製のプライマーを塗布し, レジンコンクリートの打設を行う. 仕上げ面は砂散布やグレービングを行い, すべり抵抗値の確保を行っている²⁾.

1.2 床版上面増厚工法への PPC の適用性

結合材として不飽和ポリエステル樹脂を用いた, レジンコンクリートである Polyester Polymer Concrete (以下, PPC) は, セメントコンクリートとの付着性が良く, 引張強度が高いことから, RC 床版の上面増厚工法の構造材としての展開が期待できると考えられる. これまで, RC 梁の上面に PPC によって増厚補強を実施した供試体

に対し, 増厚する PPC 内部に CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) 格子筋を設置することで, 負曲げ耐力の増加を確認している³⁾. 一般に, CFRP 格子筋は許容応力度による設計が行われ, 静的な環境下では規格強度の 1/3⁴⁾, 道路橋床版などの疲労環境下ではひずみ $1,000 \times 10^{-6}$ 相当の応力を許容値としている⁵⁾が, PPC と組み合わせた場合は評価されていない. PPC に曲げひび割れが発生する前を使用状態とすれば, 補強材を設置せずに既設鉄筋応力の低減効果が期待できる. また, PPC の材料特性から橋面防水も期待できるが, PPC の疲労環境下におけるひび割れ発生に関しては評価がされていない. そこで本研究では, PPC による増厚 RC 梁と PPC および CFRP 格子筋による補強 RC 梁の疲労環境下における耐荷性能を評価することを目的として, 定点疲労载荷試験を行った.

2. PPC 物性値と増厚を想定した曲げひび割れ発生強度

2.1 PPC の基本物性値

PPC は RC 床版に用いられる一般的なコンクリートと比較し, 表-1 に示すように機械的強度に優れ, 特に曲げ強度や引張割裂強度が高いことが特徴である. また, 絶乾状態の骨材を使用することから, 凍結融解性に優れるだけでなく, 10%の塩化ナトリウム水溶液に 6 か月間浸漬した場合において, 塩化物イオンの侵入がほとんどなく, 物質浸透抵抗性が高いことも報告されている⁶⁾. さらに, 硬化時間が約 4 時間と速硬性があるため急速な施工も可能であり, 良好な引張付着強度および 1 面付着せん断強度が確認されている⁸⁾.

2.2 増厚した PPC のひび割れ発生強度

既往の研究⁹⁾において、PPC を上面に増厚した RC 梁の静的な負曲げ試験を実施した結果を表-2 に示す。これによれば、PPC の増厚量、CFRP 格子筋の有無および最大粗骨材径 8mm、または 13mm の条件において、PPC の曲げひび割れ発生強度は 9.34~12.1N/mm²である。なお、PPC の引張軟化挙動を考慮した RC 計算を行う場合は、曲げひび割れモーメント算定式が煩雑となる。このため、設計実務の簡易化を目的とし、PPC のひび割れ発生ひずみを 777×10^{-6} として、コンクリートを線形材料、RC 断面として計算することで、曲げひび割れ発生耐力を安全側に評価する式(1)、(2)を筆者らは提案している。

$$x = \frac{1}{b} \left(-k_1 + \sqrt{k_1^2 + 2bk_2} \right) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{ここに,} \quad k_1 &= \sum n_i A_i + n_p b h_p \\ k_2 &= \sum n_i d_i A_i + \frac{1}{2} n_p b h_p (2h + h_p) \end{aligned}$$

$$M_{pb} = k_3 \left\{ \frac{1}{3} b x^3 + \sum n_i A_i (x - d_i)^2 + k_4 \right\} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{ここに,} \quad k_3 &= \frac{f_{pb}}{(h + h_p - x) n_p} \\ k_4 &= \frac{1}{3} b n_p \{ (x - h)^3 - (x - h_p)^3 \} \end{aligned}$$

ここで、x:中立軸、b:部材幅、n:弾性係数比、A:断面積、h:部材厚、d:有効高、 M_{pb} :PPC に曲げひび割れが発生するモーメント、 f_{pb} :PPC の曲げひび割れ発生強度、添え字は各部材を示す。

3. 供試体材料及び供試体寸法

3.1 供試体概要と寸法

本試験に用いた供試体は、昭和39年鋼道路橋示方書によって設計された実橋の主桁直上部分のRC床版をモデルとした。試験機の制約から、母材高さを200mmとし、主鉄筋応力度と圧縮側コンクリート応力度がモデル実橋と均整になるよう、鉄筋径とピッチを調整し梁幅150mmにて設計を行った。なお、本モデルは昭和39年から、昭和46年通達の道路橋示方書までに規定された曲げモーメント¹⁰⁾¹¹⁾の照査による主鉄筋およびコンクリートの許容応力度を満足する。無補強供試体をCase1とし、PPCによる増厚補強を実施した供試体をCase2、CFRP格子筋とPPCによる増厚補強を実施した供試体をCase3とした。30mm厚となるようにPPCを増厚し、補強供試体の厚みは230mmとした。図-1に供試体の概要を示す。母材コンクリートは設計圧縮強度24N/mm²、主鉄筋は引張鉄筋をD13、圧縮鉄筋はD10をそれぞれ90mmピッチとし、供試体が曲げ破壊が先行するよう、せん断補強筋はD10を100mmピッチにて配筋を行った。

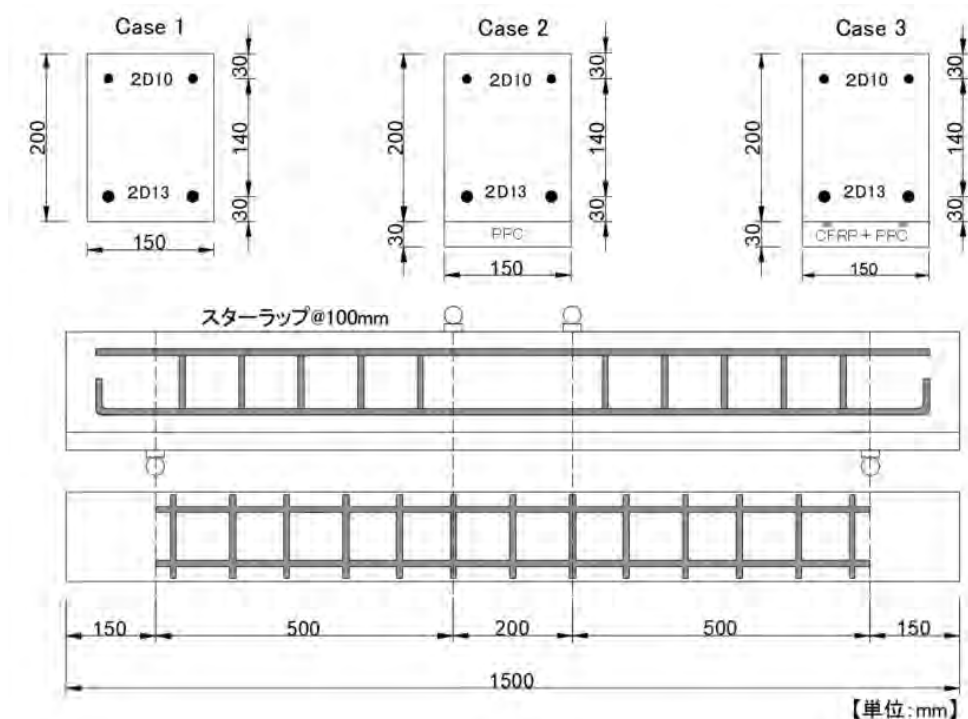
表-1 PPCの基礎物性値

項目	値	試験法
圧縮強度	71.1 N/mm ²	JIS A 1108
静弾性係数	20.5 kN/mm ²	JIS A 1149
引張割裂強度	11.5 N/mm ²	JIS A 1113
曲げ強度	21.9 N/mm ²	JIS A 1116
乾燥収縮	7×10^{-6}	JIS A 1129-3
透水性	透水無し	JIS A 1401

表-2 曲げひび割れ発生強度

供試体名	母材高さ (mm)	PPC 増厚高さ (mm)	粗骨材寸法 (mm)	引張筋	圧縮筋	CFRP 格子筋	PPC ひび割れ発生荷重 (kN)	PPC ひび割れ発生応力 (N/mm ²)
8-17	150	20	8	2D13 $A_s=253\text{mm}^2$	2D10 $A'_s=142.7\text{mm}^2$	-	30.2	9.95
13-17	150	20	13			-	29.7	10.6
8-18	150	30	8			-	39.1	11.7
13-18	150	30	13			-	41.0	12.1
8-22	200	20	8			-	48.1	9.34
8-23	200	30	8			-	60.9	11.3
13-23	200	30	13			-	55.0	10.1
NRP	200	25	8			-	57.7	11.3
NPS	200	25	8			高強度型	50.4	10.7
NPE	200	25	8			高弾性型	60.5	11.9
N	160	40	13			-	52.1	11.8
S	160	40	13			高強度型	46.9	9.50
E	160	40	13			高弾性型	48.9	11.1

*供試体幅 150mm、主筋芯かぶり 30mm、せん断スパン 500mm、等曲げ区間 200mm は本試験共通



図－1 供試体概要

3.2 補強材料

PPC は不飽和ポリエステル樹脂を 13.5wt%, 最大粗骨材寸法 G_{max} は 8mm とし, 細骨材には珪砂をそれぞれ絶乾状態で使用した. CFRP 格子筋は, 高強度型の炭素繊維とビニルエステル樹脂で構成された筋断面積が 39.2mm^2 , 格子間隔が $100 \times 100\text{mm}$ ピッチである. CFRP 格子筋の材料特性を表-3 に示す. 本試験にて使用した CFRP 格子筋はクロスラミネート構造 (交差積層) であるため, 筋の交差部が同一断面となっている. 鉄筋材料と比較し高強度であることから, 小さい断面積においても補強効果が得られ, 薄層増厚となる上面増工法に適していると考えられる. また, PPC は樹脂の特性上, 中性であり内部に鋼材を設置した場合には, 鋼材の不動態被膜形成を期待することできないため, 腐食しない CFRP 材料を補強材として選択した.

4. 試験方法

4.1 試験概要および無補強供試体 (Case1)

載荷スパンを 200mm, せん断スパンを 500mm, スパン長を 1,200mm とし, 対称 4 点曲げ試験とした. 本試験は増厚した PPC に引張力を作用させるため, 増厚面を下向きに試験機へセットアップし, 鉛直下向きに荷重を作用させた. 載荷点および支点には幅 30mm 厚さ 22mm の鋼板を設けた. Case1 の無補強供試体は静的載荷試験とし, 供試体が破壊に至るまで, 荷重を一様に作用させた.

表－3 CFRP 格子筋の物性規格値

繊維の種類	筋断面積 (mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	引張弾性率 (N/mm^2)
高強度型	39.2	1,400	100,000

表－4 載荷条件

供試体	上限荷重	下限荷重
Case2-1	30.0 kN	3.0 kN
Case2-2	35.0 kN (50 万回まで) 37.0 kN (50 万回以降)	3.0 kN
Case3	75.0 kN	3.0 kN

※正弦波による載荷荷重, 載荷速度は 3.0Hz

4.2 補強供試体

定点疲労載荷試験を行う補強供試体は, 3.0Hz の正弦波で荷重を作用させ, 繰り返し載荷回数が 200 万回に到達した場合には, Case1 同様に静的載荷試験を供試体の破壊まで実施し, その残存耐力を確認した. 以下に各供試体の荷重条件を示す. なお, 載荷荷重除荷時の慣性力によって, 供試体に載荷方向と反対の曲げモーメントが作用することを防ぐため, 荷重は完全に除荷することを行わず, すべての供試体で下限荷重は 3.0kN とした. 表-4 に載荷条件を示す.

(1) Case2

PPC を RC 梁に 20~40mm となる施工厚みの範囲で増厚を行い, ひび割れが発生する曲げ引張強度は 9.34~

12.1N/mm²であることから、その平均的な値として、供試体の PPC 曲げ引張強度を 11.0N/mm²と仮定した。初回載荷時に PPC の曲げひび割れ発生強度の 40%の応力度となった 30.0kN を Case2-1 の上限荷重とした。Case2-2 の上限荷重は、曲げ引張強度の 45%の応力度となった 35.0kN とし、繰り返し載荷回数が 50 万回に到達した以降は、上限荷重を 37.0kN まで増加させて PPC にひび割れが発生するまで載荷を行った。

(2) Case3

前記の通り、RC 床版のような疲労部材に CFRP 格子筋や炭素繊維シート等の連続繊維による補強設計を行う場合、補強材のひずみが 1,000×10⁻⁶相当となる応力以下で設計される。本試験では危険側の評価を目的とし、材料規格強度である 1,400N/mm²の 1/3 となる静的な許容応力度 467N/mm²を上回る荷重値を設定した。初回載荷時に載荷スパン中央部の CFRP 格子筋の応力が 470N/mm²となった際の荷重 75.0kN を Case3 の上限荷重とし、下限荷重は Case2 と共通の 3.0kN とした。なお、Case3 の上限荷重である 75.0kN 作用時の引張鉄筋の応力は 210N/mm²であった。

4. 3 等価繰り返し回数

Case2-2 供試体では、段階荷重載荷としたことから、等価繰り返し回数を算出して耐疲労性を評価する。等価繰り返し回数は、マイナー則に従うと仮定すれば、式(3)で与えられる。Case2-1 の上限荷重である 30.0kN を Case2-2 の基準荷重とする。CFRP 格子筋を設置した Case3 は無補強供試体の Case1 と比較を行う。式(4)により算出した、引張鉄筋の 200 万回疲労強度 207N/mm²となった Case1 の荷重は 37.0kN であった。前記の通り、Case3 の上限荷重作用時における引張鉄筋の応力は 210N/mm²とおよそ同等である。よって、37.0kN を Case3 の等価繰り返し回数算出時の基準荷重とする。式(3)における S-N 曲線の傾きの絶対値の逆数は、供試体が疲労破壊するまで実施した定点疲労試験¹⁹⁾を参考にし、11.2 を適用する。

$$N_{eq} = \sum_{i=0}^n (P_i/P)^m \times N_i \quad (3)$$

$$f_{syd} = 10^{\alpha/N^k} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{min}}{f_{suk}}\right) / \gamma_s \quad (4)$$

ここで、 N_{eq} : 等価繰り返し回数 (回)、 P_i : 載荷荷重 (kN)、 P : 基準荷重 (30.0 または 37.0kN)、 N_i : 試験回数 (回)、 m : S-N 曲線の傾きの絶対値の逆数 (11.2)、 f_{syd} : 疲労強度 N/mm²、 N : 繰り返し載荷回数、 k : 0.12、 σ_{min} : 下限作用応力、 f_{suk} : 鉄筋降伏強度、 γ_s : 安全係数 (ここでは 1.0 とした)

5. 試験結果

5. 1 静的載荷試験 (Case1)

無補強供試体は、載荷荷重の増加に伴い、載荷スパン中央部の下面から曲げひび割れが発生した。荷重が 20.3kN 時に鉄筋応力度が現行示方書による許容応力度¹²⁾である 120N/mm²、荷重が 23.7kN 時に復元モデル設計当時の許容応力度である 140N/mm²となった。荷重が 66.0kN 時に引張鉄筋が降伏し、荷重が 73.6kN 時に載荷スパン内のコンクリートが圧縮破壊することで供試体の破壊に至った。

5. 2 等価繰り返し回数

(1) Case2

表-5 に Case2-1 および Case2-2 の基準荷重 30.0kN における等価繰り返し回数と破壊の有無を示す。Case2-1 は PPC の曲げ引張強度の 40%に相当する、設定上限荷重 30.0kN の 200 万回繰り返し載荷にて、ひび割れが発生しなかった。Case2-2 は上限荷重を 35.0kN にて 50 万回載荷後、上限荷重 37.0kN を 5.9 万回載荷した際に、載荷スパン中央部の下面から曲げひび割れが発生した。基準荷重を 30.0kN とした際の等価繰り返し回数は、3,428,388 回であった。

(2) Case3

表-6 に Case3 における基準荷重を 37.0kN とした等価繰り返し回数と破壊状況を示す。無補強供試体である Case1 が鉄筋の疲労強度から設定した 200 万回到達時に破壊すると仮定した場合、Case3 は CFRP 格子筋設置による補強効果により、疲労耐久性が大きく向上していると考えられる。なお、Case1 は鉄筋単体において、計算上の 200 万回繰り返し載荷による破壊を想定しており、RC 梁においては、載荷回数の増加によって、ひび割れが分散することで引張鉄筋の応力も分散されることが考えられ、あくまで参考回数比としている。

表-5 繰り返し回数とひび割れの発生結果

供試体	等価繰り返し回数	PPC ひび割れの有無
Case2-1	2,000,000	無し
Case2-2	3,428,388	発生

表-6 試験結果

供試体	等価繰り返し回数	参考回数比	破壊
Case1	2,000,000	1	-
Case3	5,468,356,704	2734	未破壊

※ Case1 の等価繰り返し回数は理論計算上の破壊回数

5. 3 破壊状況

(1) Case2

図-2 上段に Case2-1 の定点疲労载荷試験後のひび割れ状況を示す。Case2-1 では 200 万回の繰り返し载荷で、PPC にはひび割れが生じていないが、母材コンクリートの下端部、すなわち増厚界面から曲げひび割れが複数発生している。Case2-2 においても、PPC に曲げひび割れが生じるまでは同様なひび割れ状況であり、37.0kN にて 59 万回载荷時に载荷スパン中央に 1 本 PPC に曲げひび割れが生じ、試験を終了した。

Case2-1 にて 200 万回の疲労载荷試験後に静的に载荷試験を実施した結果、载荷荷重が 62.7kN 時にスパン中央の PPC に曲げひび割れが発生した。その際の PPC 最大応力は 11.1N/mm^2 であり、既往の研究成果である静的な载荷時における曲げひび割れ発生応力度 $9.34 \sim 12.1\text{N/mm}^2$ の範囲となった。また、载荷試験終了後 Case2-1 および Case2-2 ともに、目視観察およびパレハンマーによるたたき検査を実施したが、増厚界面での浮きや剥離は生じていなかった。

(2) Case3

図-2 下段に Case3 のひび割れ状況を示す。初回载荷時に载荷点位置の下縁 PPC から曲げひび割れが発生した。その後の载荷回数の増加により、母材コンクリートの増厚界面からも曲げひび割れが発生した。各材料から発生した曲げひび割れは、载荷回数の増加に伴い载荷スパンの外側に増加した。PPC に発生した曲げひび割れ平均間隔は約 150mm であった。200 万回の定点疲労载荷試験では増厚界面にて浮きや剥離は生じなかった。

200 万回の疲労試験終了後、破壊まで実施した静的载荷試験では、既存の曲げひび割れの進展と、新たに载荷スパン内に PPC から 1 本の曲げひび割れが発生した。引張鉄筋降伏後、载荷荷重が約 120kN 時にせん断スパンにおいて、増厚界面の母材コンクリートの凝集破壊による水平ひび割れが発生した。これは、曲げひび割れが少ないせん断スパン部では、引張強度の小さい母材コンクリートがひび割れを発生せずに変形する PPC に曲げ変形が追従できなくなり、材料破壊したと考えられる。

5. 3 補強材料の応力と繰り返し回数の関係

本試験における各供試体の上限荷重時における補強材の応力度と繰り返し回数の関係を以下に示す。

(1) Case2

スパン中央および中央から $\pm 50\text{mm}$ 位置、载荷点直下となる $\pm 100\text{mm}$ 位置における PPC の応力度と基準荷重 30.0kN とした等価繰り返し回数の関係を図-3 へ、上限荷重時における補強材の応力度と繰り返し回数の関係を図-4 へそれぞれ示す。Case2-1、Case2-2 ともに、等価繰り返し回数が 20 万回を超えた付近から PPC の応力度が大きくなった。前記の通り、载荷回数の増加によって、

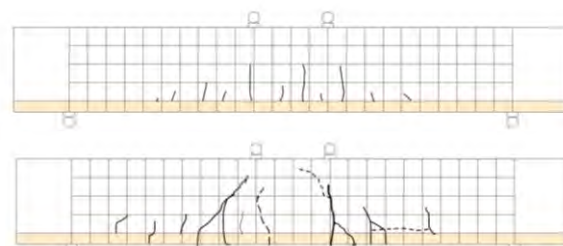


図-2 ひび割れ図（色付き部：PPC）

上段）Case2-1 200 万回载荷終了時

下段）Case3, 実線_疲労試験, 点線_静的载荷

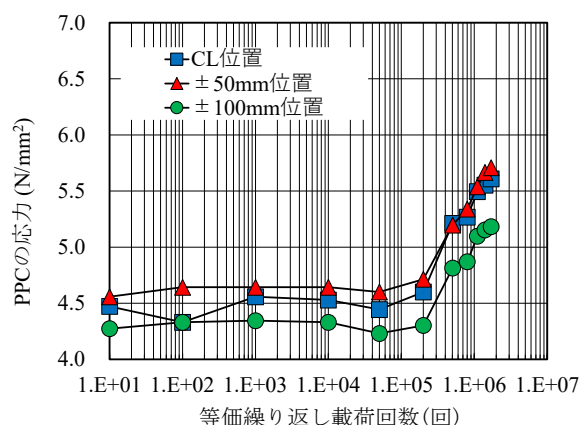


図-3 PPC 応力と等価繰り返し回数の関係
Case2-1

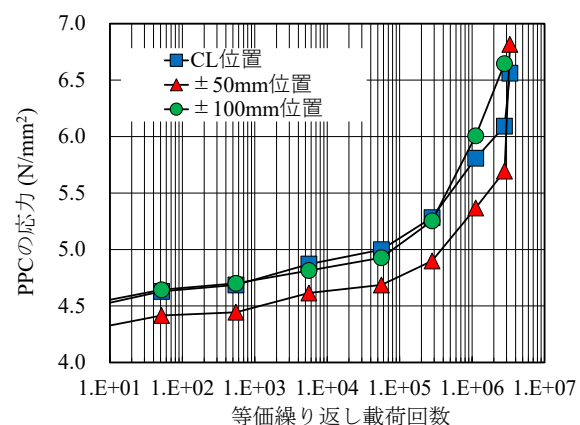


図-4 PPC 応力と等価繰り返し回数の関係
Case2-2

母材コンクリートには曲げひび割れ増加したが、载荷スパン内で曲げモーメントが均一である供試体中央から $\pm 100\text{mm}$ 間の PPC では、およそ等しい挙動で応力が増加する結果となった。曲げひび割れが発生したことで疲労試験を終了した Case2-2 では、等価繰り返し回数が約 300 万回を超えた付近から、加速度的に PPC の応力が増加していることから、発生した曲げひび割れは疲労影響によるものと考えられる。

(2) Case3

図-5にCase3のCFRP格子筋の応力と繰返し回数の関係を示す。初回載荷時は供試体中央から-200mm位置にて、許容応力 467N/mm^2 を超える 470N/mm^2 であった。繰返し載荷回数が1,000回にて、+300mm位置のCFRP格子筋応力が 465N/mm^2 となった。これは、繰返し載荷回数の増加によって、PPCに新たにひび割れが発生し、ひび割れ位置にあるCFRP格子筋の応力が増加したと考えられる。±100mmにおいても同様に繰返し載荷回数が10万回にて、CFRP格子筋の応力が増加している。初回載荷時の最大応力 470N/mm^2 であったのに対し、200万回の繰返し載荷試験中の最大応力は繰返し載荷回数が1,000回時に 487N/mm^2 であった。ひび割れが分散されたことで、CFRP格子筋の応力が集中せず、繰返し載荷回数が1,000回以降はCFRP許容応力を超過しない結果となり、載荷回数200万回の到達に寄与したと考えられる。

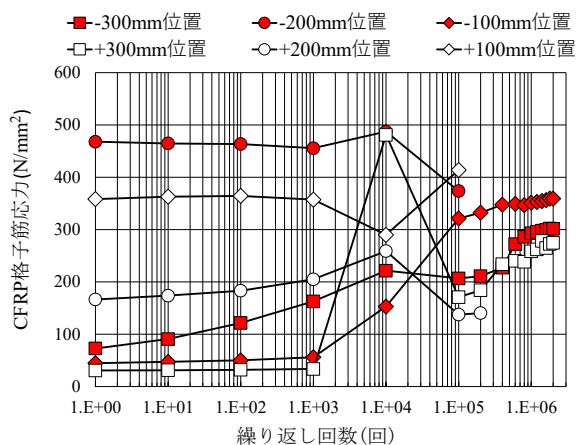


図-5 CFRP格子筋応力と繰返し回数の関係
Case3

6. まとめ

6.1 PPCによる補強を実施した疲労試験

- ・静的載荷試験で得られた、PPCの曲げひび割れ発生強度の40%となる応力度となる載荷条件にて200万回の定点疲労載荷試験を実施した結果、PPCに曲げひび割れは発生しなかった。また、200万回の繰返し載荷後に静的載荷試験を実施した結果、曲げひび割れ発生耐力は低下しなかった。
- ・破壊まで定点疲労載荷を実施した供試体におけるPPCの応力と繰返し回数の関係から、PPCは疲労環境下において、曲げひび割れは発生することが確認された。
- ・実橋においては、設計曲げモーメントと耐用年数から、PPC施工厚によって、PPCに発生する応力を適宜設定することで、疲労耐性を考慮したひび割れの発生を考慮しない設計が可能であると考えられる。

6.2 PPCとCFRP格子筋による補強を実施した疲労試験

- ・CFRP格子筋の許容応力度を超える載荷荷重によって、200万回の繰返し載荷試験を実施した結果、供試体は破壊せず、PPCの増厚界面に浮きや剥離が発生せず、良好な付着状況を確認した。
- ・PPCに発生した曲げひび割れは、繰返し載荷回数の増加に伴い増加した。ひび割れが分散されたことで、CFRP格子筋の応力が緩和され、200万回終了時の最大応力は載荷初期における最大応力の約80%であった。
- ・200万回の繰返し載荷後に静的な載荷を破壊まで実施した結果、RC計算に基づく計算値と概ね合致し、疲労試験による残存耐力の低下は確認されず、CFRP格子筋はレジンコンクリートであるPPC内部に設置しても、疲労耐久性に問題は無い。

参考文献

- 1) Transportation Research Board : High Performance Concrete Specifications and Practices For Bridge. NCHRP Synthesis Report 441, 2013
- 2) 土木学会 : 道路橋床版の橋面コンクリート舗装, 2018.10
- 3) 吉田拓矢, 堀池紘平, 栗原哲彦 : PPCとCFRP格子筋によって補強したRC梁の負曲げ試験, 土木学会全国大会第75回年次学術講演会, V130, 2020.9
- 4) グリッド工法研究会 : FRPグリッド増厚・巻立て工法によるコンクリート構造物の補修補強設計マニュアル(案), 2019.11
- 5) 土木研究所 : コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書(Ⅲ), 1999.7
- 6) 大濱嘉彦, 出村克宜 : ポリマーセメントコンクリート/ポリマーコンクリート, シーエムシー出版, 2002
- 7) 國枝稔, 服部篤史, 宇治公隆, レジンコンクリート構造物の性能設計と将来展望, 材料, 日本材料学会, Vol.54, No.12, pp.1314~1320, 2005.12
- 8) 文屋遼太郎, 小森篤也 : 床版上面増厚を想定したPPCの付着強度試験, 土木学会全国大会第73回年次学術講演会, V138, 2018.9
- 9) 櫻井俊太, 文屋遼太郎, 栗原哲彦 : PPCとCFRP格子筋により上面増厚補強したRC梁の負曲げ挙動に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.45, No.2, pp.301~306, 2023.7
- 10) 日本道路協会 : 鋼道路橋示方書・同解説, 1964
- 11) 日本道路協会 : 鋼道路橋示方書・同解説, 1971
- 12) 日本道路協会 : 鋼道路橋示方書・同解説, 2017
- 13) 小森篤也, 阿部忠, 水口和彦, 岩崎正二 : 張出部を有するRC床版のCFSS接着法に関する耐疲労性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.1309~1314, 2013.7

(2024年7月12受付)