

論文 短繊維補強 PRC 部材の疲労特性に関する実験的研究

阿部 浩幸^{*1}・二羽 淳一郎^{*2}・余 国雄^{*3}・武知 勉^{*4}

要旨：短繊維は、ひび割れ幅を抑制する有効な方法のひとつとしてコンクリートに適用されている。この短繊維補強コンクリートを PRC (Prestressed Reinforced Concrete) 部材に適用する場合、ひび割れが発生した状態で繰返し荷重を受けることが考えられ、ひび割れ部分の検討が必要となる。このような短繊維補強 PRC 部材の疲労に対する検討は、これまで十分になされていない。そこで、短繊維補強 PRC 部材のひび割れ部およびその間の鉄筋応力度およびひび割れ幅の挙動に着目して、疲労試験を行った。その結果、普通コンクリート PRC 部材に比べ、鉄筋応力度およびひび割れ幅が抑制されることが確認された。

キーワード：ステンレス短繊維、疲労試験、鉄筋ひずみ、ひび割れ幅、たわみ挙動

1. はじめに

短繊維補強コンクリート (以下 SFC と呼ぶ) は普通コンクリートに比べ優れたひび割れ抵抗性を有していることは、これまでの多くの研究^{1)~3)} および筆者らの研究⁴⁾ で報告されている。この SFC をひび割れ制御として構造物に適用することにより、普通コンクリートを使用する構造物に比べ引張鋼材量を少なくすることができ、工費低減が可能になると考えられる。筆者らは、SFC を橋梁上部工 PRC 部材に適用する試算をし、その有効性について報告⁵⁾ した。

PRC 部材は、所要のひび割れ条件を満足するようにプレストレスと鉄筋で補強されたコンクリート部材で、RC 構造と PC 構造の中間的な構造物である。このような PRC 部材の場合、疲労荷重に対する安全性の照査が必要となるが、SFC を PRC 部材に適用するための研究はこれまで行われていない。

SFC は、普通コンクリートに比べ疲労強度の大きいことが報告⁶⁾ されている。しかし、これらの研究は、SFC で作られた小型試験体を用いた試験結果であり、引張鋼材を配置したような構造物

の報告ではない。繰返し荷重を受ける PRC 部材に SFC を適用するためには、繰返し荷重時および疲労後のひび割れ挙動が重要となる。

このような観点から、本研究では SFC と普通コンクリートを使用した PRC 構造の試験体について、ひび割れ挙動および鉄筋ひずみ挙動に着目した曲げ疲労実験を行い、両者の結果を比較することで短繊維補強 PRC 部材の疲労に対する検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体形状と使用材料

実験に用いた試験体は、繊維混入量が 1% の繊維補強コンクリートを用いた試験体 (以下 SFPRC と呼ぶ) と普通コンクリートを用いた試験体 (以下 NPRC と呼ぶ) である。今回用いた短繊維は、ステンレス製で長さ 30mm、太さ $\phi 0.6\text{mm}$ 、引張強度 $800\sim 1100\text{N/mm}^2$ 、弾性係数 200KN/mm^2 のドックボーンタイプのものである (写真-1 参照)。混入量は一般的なひび割れ制御を目的に適用される量である 1% とし、ひび割れが構造物供用期間の初期から発生するため耐久性を考慮して腐食

*1 オリエンタル建設 (株) 技術研究所 工修 (正会員)

*2 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

*3 オリエンタル建設 (株) 本社技術部 工博 (正会員)

*4 オリエンタル建設 (株) 本社技術部



写真-1 ステンレス繊維

抵抗性に優れたステンレス繊維を選択した。

試験体に用いたコンクリートの示方配合を表-1に示す。

試験体は、図-1に示すような幅250mm、高さ600mmの矩形断面内に、引張側鉄筋としてD19を2本、圧縮側鉄筋としてD16を2本そして断面中央にPC鋼材φ17mmを配置した。

試験体は、せん断破壊しないようにせん断スパン部にD16のスターラップを125mm間隔で配置し、等曲げ区間にはひび割れ性状への影響を考慮してスターラップを配置しなかった。ひび割れ部およびひび割れ間の鉄筋ひずみの計測を目的に、引張鉄筋D19の2本の内1本に支間中央320mm区間に20mm間隔でひずみゲージを貼付した(図-1参照)。ひずみゲージは、鉄筋の付着性能を損なわないように縦リブ位置に設けた溝の中に貼付し、エポキシ樹脂で溝を埋めてゲージを固定した。

試験体は、それぞれの配合で各2体製作した。実験前の約1週間前にコンクリート圧縮応力度が0.67N/mm²となる緊張力を導入し、直ちにグラウト注入を行った。実験時のコンクリート強度を表-2に、使用鋼材の強度を表-3に示す。

2.2 実験方法

実験は、2体の内1体を200万回疲労試験後に破壊まで荷重し、他の1体は疲労荷重せず静的荷重を行った(前者をF-SFPRCおよびF-NPRCと、後者をS-SFPRCおよびS-NPRCと記述する)。載

表-1 コンクリート示方配合

試験体種別	W/C (%)	s/a (%)	Vf (%)	配合 (kg/m ³)					
				セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤	繊維
SFPRC	56.4	58	1	310	175	1016	741	5.47	80
NPRC	50	44	-	330	165	787	1009	3.3	-

W/C:水セメント比、s/a:細骨材率、Vf:繊維混入率

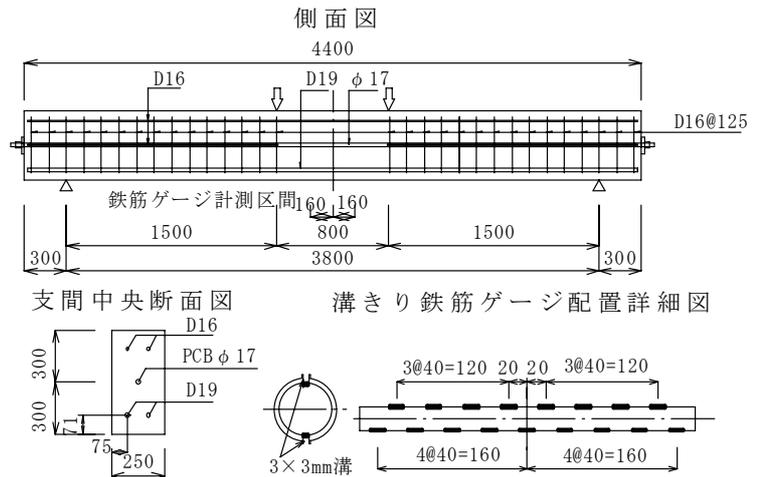


図-1 試験体形状および鉄筋ゲージ位置図

表-2 コンクリート強度試験結果

	NPRC		SFPRC	
	静的	疲労	静的	疲労
試験材齢 (日)	28	43	60	85
圧縮強度 (N/mm ²)	46.9	46.3	52.0	55.7
割裂強度 (N/mm ²)	3.9	3.8	4.6	4.5
ヤング係数 (kN/mm ²)	33.3	32.6	31.5	32.7

表-3 鋼材強度試験結果

	鉄筋 D19	PCB φ17
降伏応力 σ_v (N/mm ²)	378	1215
最大応力 σ_u (N/mm ²)	555	1277

荷は、等曲げ区間を800mmとした純曲げ荷重を行い、繰返し途中において疲労荷重を中断し、疲労上下限荷重間を静的荷重して計測を行った。

疲労荷重振幅は、次のように設定した。PRC構造の設計は、ひび割れ幅、鉄筋応力度またはコンクリート応力度のいずれを制御するかで異なる。ここでは、コンクリート標準示方書⁷⁾など多くの規準に適用されている一般の環境における異形鉄筋に対するひび割れ幅0.005c(c:かぶり)を適用し、このひび割れ幅からコンクリート標準示方書に記載されているひび割れ幅算定式(1)を用いて鉄筋応力度を求めた。

$$w = 1.1k_1k_2k_3 \{4 \cdot c + 0.7(c_s - \phi)\} \cdot \left(\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right) \quad (1)$$

ここに、

w : ひび割れ幅

k₁ : 鋼材の付着性状の影響を表す係数

k₂ : コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数

k₃ : 引張鋼材の段数の影響を表す係数

c : 鉄筋のかぶり

c_s : 鋼材の中心間隔

φ : 鋼材径

σ_{se} : ひび割れ位置の鉄筋応力度の増加量

E_s : 鋼材弾性係数

ε'_{csd} : コンクリート収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値

本試験体では引張鉄筋 D19 の底面からの純かぶりが c=61mm であり、ひび割れ幅 0.005c となる鉄筋応力度は約 180N/mm² となる。これから、公称のヤング係数を用いて鉄筋ひずみを算出すると 900×10⁻⁶ となる。このことから、試験体で計測される最大鉄筋ひずみが、900×10⁻⁶ となる荷重を上限荷重とした。下限荷重は死荷重時の応力制限に相当するひび割れ発生限界と設定し、試験体ひび割れ発生荷重を下限値とした。NPRC 試験体および SFPRC 試験体の疲労荷重振幅は、それぞれ 120~70kN および 155~95kN である。疲労荷重は、1.5Hz で実施した。

計測項目は、支間中央 320mm 区間の引張鉄筋ひずみ、等曲げ区間の引張鉄筋位置でのひび割れ幅および支間中央鉛直変位である。ひび割れ幅は、標点距離 100mm の π 型変位計を並列に配置し、その計測値をひび割れ幅とした。

3. 実験結果と考察

3.1 疲労荷重時の挙動について

(1) たわみ挙動

図-2 に SFPRC 試験体および NPRC 試験体の疲

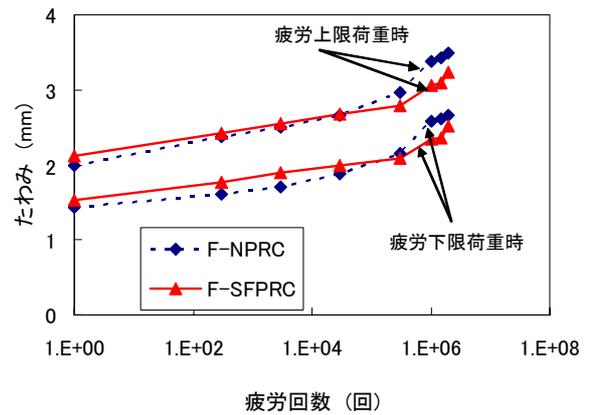


図-2 疲労回数-たわみの関係

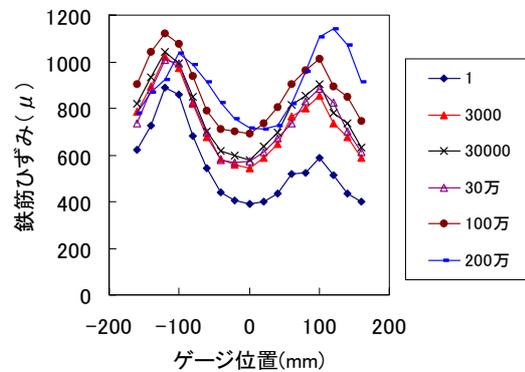


図-3 SFPRC のひび割れ間鉄筋ひずみ分布

労上限荷重および下限荷重載荷時の支間中央変位と疲労回数との関係を示す。両試験体とも 30 万回まではほとんどその挙動に違いはないが、それ以降 SFPRC 試験体の方が NPRC 試験体に比べたわみ増加が小さい傾向を示した。

(2) 鉄筋ひずみおよびひび割れ挙動

図-3 に SFPRC 試験体の各疲労回数での鉄筋ひずみの分布を示す。この図の凸部がひび割れ発生個所とほぼ一致していることから、この部分のひずみをひび割れ部のひずみとする。この図より、回数とともにひずみは増加しているが、ひび割れ間のひずみ分布形状に大きな違いはなく、初期載荷時の最大と最小の差は約 500×10⁻⁶ であるのに対して 200 万回疲労載荷時のその値は 430×10⁻⁶ とその差は小さい。

図-4 に疲労上限荷重および下限荷重時の最大鉄筋ひずみと疲労回数との関係を示す。この図より、SFPRC 試験体および NPRC 試験体ともに疲

疲労回数の増加とともに鉄筋ひずみが増加する傾向を示している。しかし、疲労上限荷重時の初期ひずみに対する最終ひずみの比率は、SFPRC 試験体の方が 1.28 で NPRC 試験体の 1.48 に比べ小さく、かつ、上限荷重時の値と下限荷重時の値の差も SFPRC 試験体の方が小さい。下限荷重時の初期ひずみに対する最終ひずみの比率は、両者ともに 1.37 と同じであった。

図-5 に疲労上限荷重時および下限荷重時の最大ひび割れ幅と疲労回数の関係を示す。SFPRC 試験体の最大ひび割れ幅は上限荷重時初期で 0.15mm、最終で 0.215mm を示し、NPRC はそれぞれ 0.222mm と 0.345mm と SFPRC 試験体の方が疲労载荷全体において 30~40%程度小さい。疲労初期の相違は、繊維の架橋効果によることは他の報告書⁴⁾からも明らかであるが、200 万回疲労後においてもその効果が確認された。また、最大鉄筋ひずみの挙動と同じように、SFPRC 試験体および NPRC 試験体ともに荷重とともに最大ひび割れ幅が増加する傾向を示しているが、上限荷重時の初期値に対する最終値の比率は、NPRC 試験体の 1.65 に対し SFPRC 試験体の 1.47 と小さい。一方、下限荷重時の初期値に対する最終値の比率は、両者とも 1.65 とほぼ同じ値であった。

以上のことから、SFPRC 試験体は NPRC 試験体に比べて疲労载荷に対しても鉄筋ひずみおよびひび割れが抑制されている。

3.2 破壊までの挙動について

(1) 破壊性状

SFPRC 試験体等曲げ区間の破壊時のひび割れ状況を写真-2 および 3 に示す。写真-2 は疲労载荷を行わずに静的破壊した S-SFPRC 試験体の状況を、写真-3 は 200 万回疲労後に破壊した F-SFPRC 試験体の状況を示す。疲労载荷をしなかった S-SFPRC 試験体等曲げ区間のひび割れ本数は 6 本、疲労をした F-SFPRC 試験体の疲労载荷時ひび割れ本数は 3 本で、破壊時には 7 本と増加し、F-SFPRC 試験体の方がひび割れ本数は若干多かった。破壊は、両試験体とも等曲げ区間に発生したひび割れが進展し、上縁コ

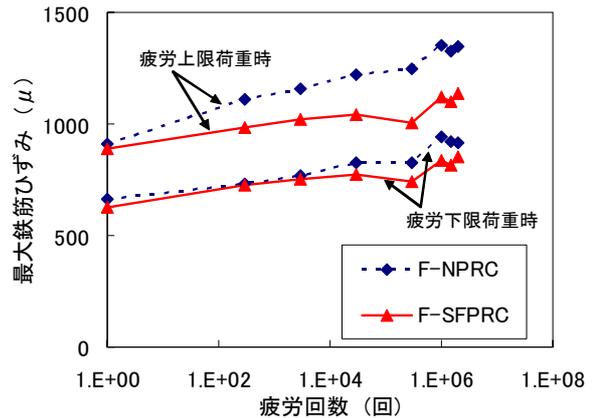


図-4 疲労上下限荷重時の最大鉄筋ひずみ

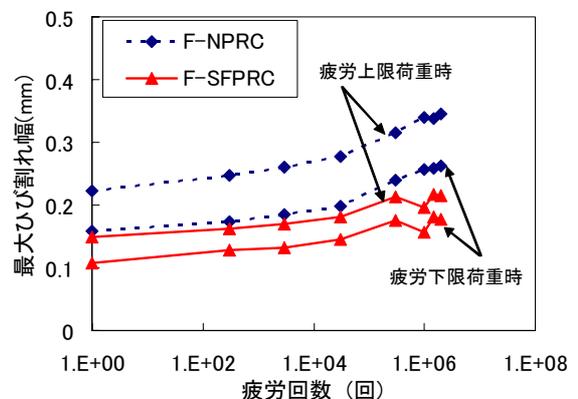


図-5 疲労上下限荷重時の最大ひび割れ幅

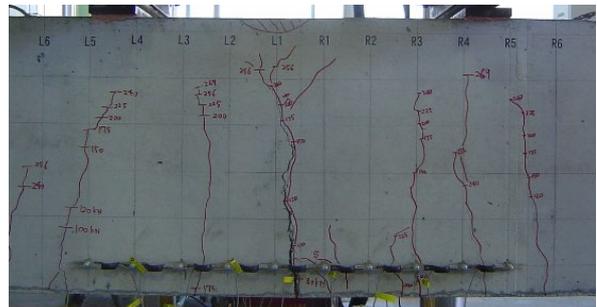


写真-2 S-SFPRC 試験体破壊状況

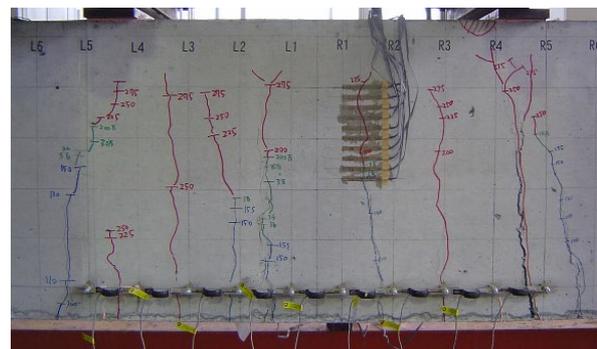


写真-3 F-SFPRC 試験体破壊状況

ンクリートが圧縮破壊するものであった。このことより、SFPRC 試験体の破壊性状には、疲労の影響が少ないと考えられる。

(2) たわみ挙動

NPRC 試験体および SFPRC 試験体の荷重とたわみの関係をそれぞれ図-6 および図-7 に示す。SFPRC 試験体および NPRC 試験体ともに、疲労载荷により変位は増加するものの、剛性の変化する荷重 (SFPRC 試験体で約 250kN および NPRC 試験体で約 200kN) は疲労载荷の有無に関係なくほぼ等しく、それ以降破壊までの勾配もほぼ等しいことがわかる。この結果より、SFPRC 試験体も NPRC 試験体と同様に 200 万回疲労によるたわみ挙動への大きな影響はないと判断できる。

(3) 鉄筋ひずみおよびひび割れ挙動

図-8 および図-9 に NPRC 試験体および SFPRC 試験体の疲労载荷の有無による荷重と最大鉄筋ひずみ関係の比較を示す。NPRC 試験体は、疲労载荷により鉄筋ひずみが増加し、疲労上限荷重以後の挙動は疲労载荷をした F-NPRC 試験体の方が若干大きな値を示している。しかし、降伏はほぼ同じ荷重で発生している。一方、SFPRC 試験体は疲労载荷により鉄筋ひずみは増加するものの、降伏を示す荷重は疲労载荷をしない結果より大きい。以上の結果より、SFPRC 試験体の場合も 200 万回疲労载荷によるひび割れ部の鉄筋ひずみ挙動にほとんど影響がないと考えられる。

図-10 に NPRC 試験体の疲労载荷の有無による荷重と最大ひび割れ幅の関係の比較を、図-11 に SFPRC 試験体の結果を示す。F-NPRC 試験体は、S-NPRC 試験体に比べ疲労载荷によりひび割れ幅が増加し、降伏荷重まで F-NPRC 試験体の方が大きなひび割れ幅の値を示している。これは、疲労による影響と考えられる。一方、F-SFPRC 試験体も、疲労载荷によりひび割れ幅が増加しているものの、疲労上限荷重から降伏荷重までのひび割れ幅は、NPRC 試験体結果とは異なり疲労载荷をした F-SFPRC 試験体の方が小さい。これは、前述したように疲労载荷後の破壊载荷において

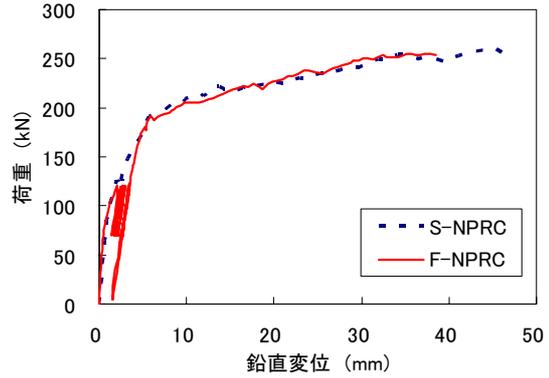


図-6 NPRC の荷重-たわみの関係

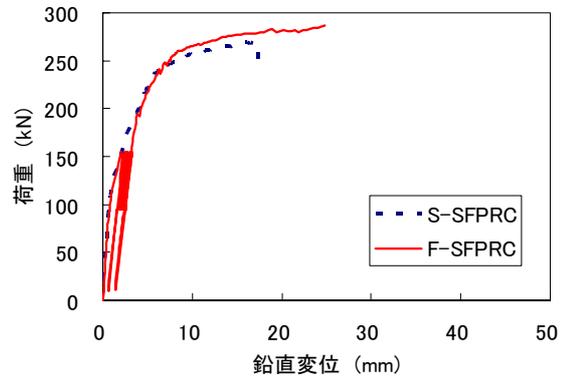


図-7 SFPRC の荷重-たわみの関係

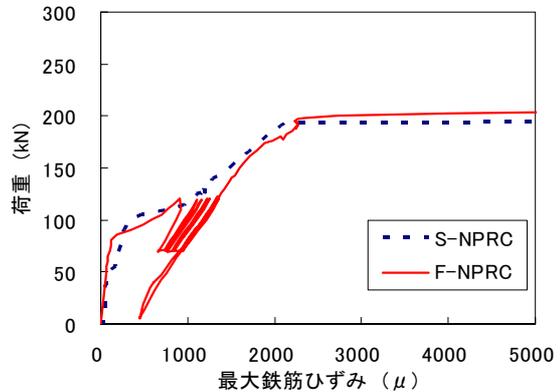


図-8 NPRC の荷重-最大鉄筋ひずみ関係

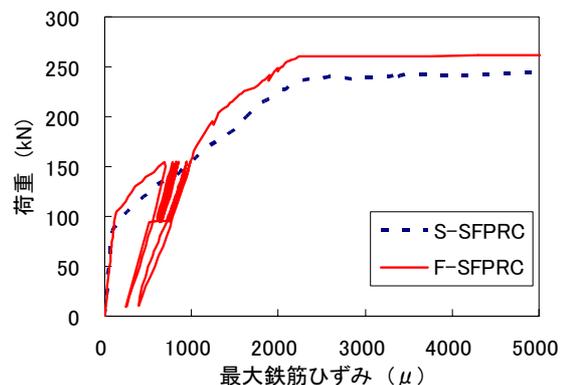


図-9 SFPRC の荷重-最大鉄筋ひずみ関係

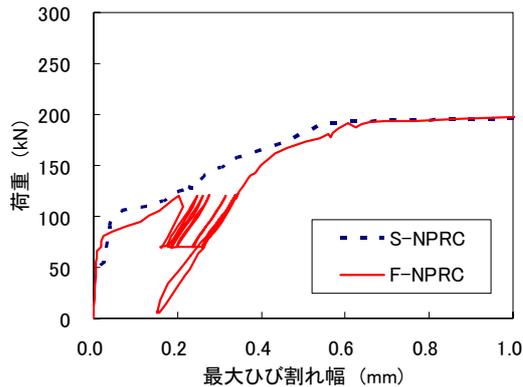


図-10 NPRC の荷重-最大ひび割れ幅関係

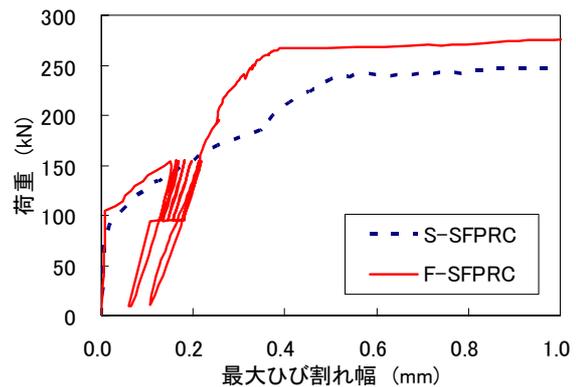


図-11 SFPRC の荷重-最大ひび割れ幅関係

新たにひび割れが発生し、最終ひび割れ本数は疲労載荷をしない S-SFPRC 試験体に比べ多かったことが原因と考えられる。

以上の結果より、疲労による SFPRC 試験体のひび割れ部の性状は、NPRC 試験体に比べ最大鉄筋ひずみおよび最大ひび割れ幅の増加量が小さいことから NPRC 試験体に比べ優れていると考えられる。本実験の荷重レベルにおいて、ひび割れ部の短繊維とコンクリートとの架橋効果は、200 万回疲労載荷後の破壊までの挙動が疲労載荷しないものとはほぼ同じ挙動を示していたことから疲労による影響をほとんど受けていないと考えられる。

4. まとめ

今回行ったステンレス短繊維を使用した PRC 試験体を引張鉄筋ひずみで 900×10^{-6} を上限荷重として行った 200 万回疲労試験より以下のことが得られた。

- (1) 短繊維補強 PRC 試験体の疲労挙動は、普通コンクリートを用いた PRC 試験体に比べ、たわみ、鉄筋ひずみおよびひび割れ幅が抑制される。
- (2) 疲労載荷後においてもひび割れ部の短繊維とコンクリートとの付着性能は、疲労を受けていない状態とほとんど変わらない。

参考文献

- 1) 小林一輔, 趙力采: 鋼繊維補強コンクリートのひびわれ拘束性能の試験方法, 土木学会論文報告集, No. 300, 1980. 7
- 2) 宍戸薫, 関口幹夫: 鋼繊維補強コンクリートのひびわれ分散について, 都土木技研年報, 1978
- 3) 柳博文, 松岡茂ほか: 鋼繊維補強コンクリートのひび割れ分散効果に対する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 3, pp1225-1230, 1998
- 4) 阿部浩幸, 大城壮司ほか: 鋼繊維補強コンクリートの曲げひび割れ性状に関する実験的研究, 土木学会年次講演会概要集, 第 5 部, pp1015-1016, 2004
- 5) 武知勉, 阿部浩幸ほか: 鋼繊維補強コンクリートを用いた PRC 橋の適用性の検討, 第 13 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp155-158, 2004
- 6) 水越睦視, 松井繁之ほか: SFRC の曲げ疲労ひび割れ進展寿命の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 3, pp199-204, 2000
- 7) 土木学会: コンクリート標準示方書[構造性能照査編], 2002.