

論文 HPFRCC のひび割れ部の引張挙動に及ぼす繰返し荷重作用の影響

畑 朋宏^{*1}・稲熊 唯史^{*2}・柏木 章宏^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨：2種類の有機繊維材料（PE, PVA 繊維）を用いた HPFRCC について、一軸引張試験を行い、それらの引張特性を確認した。その後、鉄筋降伏ひずみレベルにおいて繰返し引張応力を与え、ひび割れ部の引張挙動に及ぼす繰返し荷重作用の影響について実験的に検討した。その結果、PE, PVA 両供試体で繰返し載荷後における変位は、繰返し載荷前と比較して3～6割程度増加した。また繰返し荷重を受けた後の応力変位挙動は、処女載荷と同等の性能を保持しており、さらに擬似ひずみ硬化や複数微細ひび割れ特性を示した。

キーワード：HPFRCC, 繰返し荷重, ひび割れ性状

1. はじめに

引張や曲げ応力下において複数微細ひび割れを生じ、繊維の架橋効果による擬似ひずみ硬化を示す繊維補強セメント複合材料（HPFRCC）が開発され、様々な適用方法が検討されている¹⁾。

繊維補強セメント複合材料では、ひび割れ発生後の引張応力は繊維の架橋応力により維持されている。HPFRCC において、この架橋応力がひび割れ発生応力に対して大きいことと、引張ひずみの増加に伴って架橋応力も増加することが材料全体としての擬似ひずみ硬化特性として位置付けられる。しかし、架橋応力は基本的に繊維の引張応力および繊維とマトリクスとの付着で構成されており、繰返し荷重を受ける HPFRCC の架橋応力の変化についての知見も少ない²⁾。

そこで本研究では、実構造物において地震時に発生するひずみレベルの範囲内で、HPFRCC の繰返し荷重による影響を検討することを目的とした一軸引張試験を行った。実験は、2種類の有機繊維材料（PE, PVA 繊維）を用いた HPFRCC の一軸引張試験および鉄筋降伏ひずみレベルにおける繰返し引張試験を行い、ひび割れ部の引

張挙動について考察した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

使用材料を表-1に、配合の概要を表-2に示す。有機繊維材料には、PE 繊維（引張強度2600MPa）とPVA 繊維（引張強度1690MPa）を用い、それぞれ体積比で1.5%および2.5%混入した。配合種別毎にPE およびPVA と名付けた。PVA においてはセメントの一部をフライアッシュで置換した。また水セメント比（W/C）は、PE で30%、PVA で50%とした。

材料の練り混ぜには、容量20Lのホバート型ミキサーを使用し、粉体のみを空練りした後、PE

表-1 使用材料

材料	仕様
ポリエチレン繊維	繊維径12μm, 繊維長12mm, 引張強度2600MPa, 弾性係数88000MPa
ビニロン繊維	繊維径40μm, 繊維長12mm, 引張強度1690MPa, 弾性係数40600MPa
セメント	JIS R 5210 早強ポルトランドセメント
フライアッシュ	JISA6201 2種
細骨材	7号珪砂
高性能AE減水剤	カルボキシル基含有ポリエーテル系
AE剤	高級脂肪酸塩及び非イオン系界面活性剤

*1 岐阜大学 大学院工学研究科土木工学専攻 (正会員)

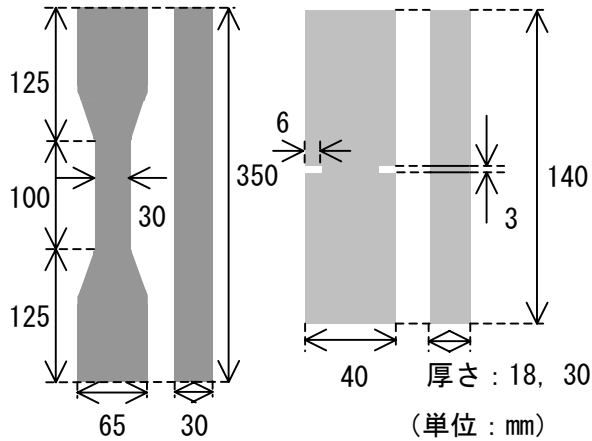
*2 ジェイアール東海コンサルタンツ株式会社 調査事業部開発技術部 (正会員)

*3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (正会員)

*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 工博 (正会員)

表-2 配合の概要

種別	単位セメント量 C(kg/m ³)	フライアッシュ置換率 FA/(C+FA) (%)	水セメント比 W/C(%)	繊維添加量 (vol%)
PE	1264	0	30	1.5
PVA	735	41	50	2.5



(a) ダンベル型供試体 (b) 切欠き供試体

図-1 供試体概要

の場合には水と繊維をまとめて投入し、PVA の場合には水を投入して練混ぜた後、繊維を投入してさらに練混ぜた。ダンベル型供試体は鋼製型枠に、切欠き供試体はコンクリートパネルで作製した型枠に流し込み、成形した。打設後 2 日で脱型し、供試体は養生室内（室温 20℃）において湿潤養生とした。

2.2 供試体概要

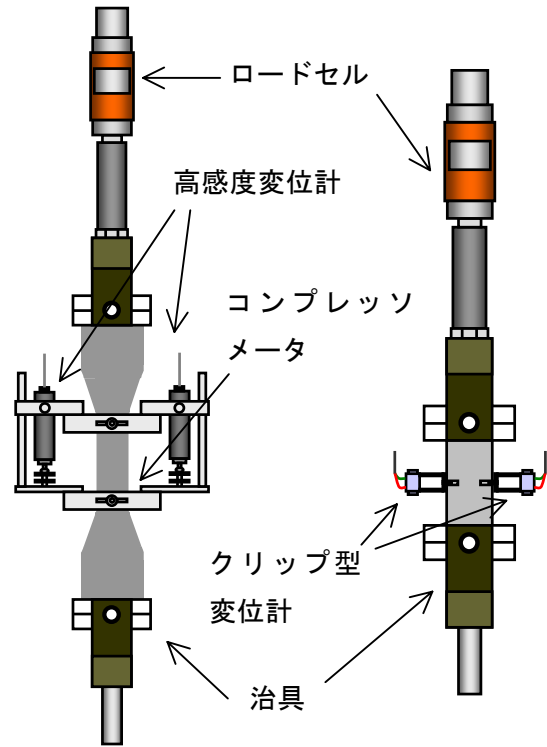
(1) ダンベル型供試体

ダンベル型供試体の形状を図-1(a)に示す。供試体寸法は、試験断面を 30×30mm とし、検長間 100mm とした。各配合 3 体ずつ作製し、ダンベル引張試験に用いた。

(2) 切欠き供試体

切欠き供試体の形状を図-1(b)に示す。供試体の寸法は、幅 40mm、長さ 140mm とし、厚さを 18mm および 30mm とした。また、ひび割れを誘発させるために供試体中央部にダイヤモンドカッターで幅 3mm の切欠きを設けた。

厚さ 18mm の供試体を 18 シリーズ、厚さ 30mm の供試体を 30 シリーズと名付けた。各シリーズ



(a) ダンベル引張試験 (b) 切欠き引張試験

図-2 载荷試験概要

において 1 配合につき 6 体作製し、合計 24 体作製した。これらを切欠き引張試験と繰返し引張試験に用いた。

2.3 一軸引張試験方法

油圧サーボ式試験機を用いて以下に示す 2 つの試験を行った。

(1) ダンベル引張試験

ダンベル引張試験概要を図-2(a)に示す。ダンベル型供試体を試験機に取付けられた治具に直接固定し、両端固定として単調载荷した。荷重はロードセルにて、変位は検長を 100mm とし、コンプレッソメータに取付けられた高感度変位計にて計測した。

(2) 切欠き引張試験

切欠き引張試験概要を図-2(b)に示す。切欠き供試体を試験機に取付けられた治具に直接固定し、両端固定として载荷した。荷重はロードセルにて、変位は供試体中央の切欠きに備え付けた左右 2 つのクリップ型変位計にて計測した。変位の各段階において目視およびマイクロscopeを用いて、ひび割れの観察を行った。

2.4 繰返し引張試験

繰返し引張試験状況を写真-1に示す。油圧サーボ式試験機を用い、試験装置は切欠き引張試験と同様とした。繰返し载荷変位を一軸引張試験の結果をもとに変位 0.25mm, 0.50mm と設定した。はじめに単調载荷をし、繰返し载荷変位に達した状態から繰返し载荷を開始した。振幅は繰返し载荷変位時の荷重とし、荷重一定として载荷した。また载荷周波数は 2Hz とし、繰返し回数は 1000 回とした。20 回毎に荷重および変位を計測し、合計 50 点のデータを取得した。繰返し载荷後、さらに破壊に至るまで単調载荷を行った。ひび割れの観察は、繰返し载荷の前後でマイクروسコープを用いて行った。



写真-1 载荷状況

3. 実験結果および考察

3.1 一軸引張試験結果

ダンベル引張試験より得られた応力-ひずみ曲線を図-3に示す。また、切欠き引張試験より得られた応力-開口変位曲線を図-4に示す。両試験結果より、平均最大応力は、切欠き供試体の方がダンベル型供試体より大きくなった。これは、破壊が生じる領域の大きさの相違および繊維分布のばらつきによると考えられる。すなわち、ダンベル型供試体に比べ、切欠き供試体においては、引張強度を支配する破壊が切欠き部に限定されるとともに、切欠き部にぜい弱部が含まれる確率が低くなるため、平均最大応力が大きくなったと考えられる。

図-4からわかるように、切欠き引張試験においても PE, PVA 両供試体でひび割れ発生後に擬似ひずみ硬化がみられ、供試体には複数の微細なひび割れが生じていた。

ひび割れ幅の推移を応力-開口変位曲線とともに図-5に示す。最大応力以前では、ひび割れ幅およびひび割れ本数が増加するが、ひび割れ幅はある一定値に収束し、ひび割れ本数だけが増加した。最大応力付近からひび

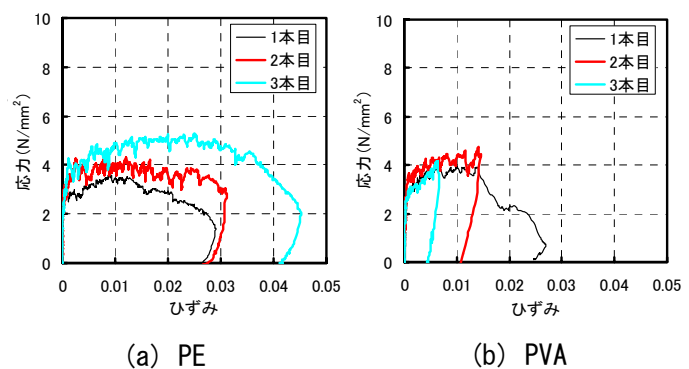


図-3 ダンベル引張試験の応力-ひずみ曲線

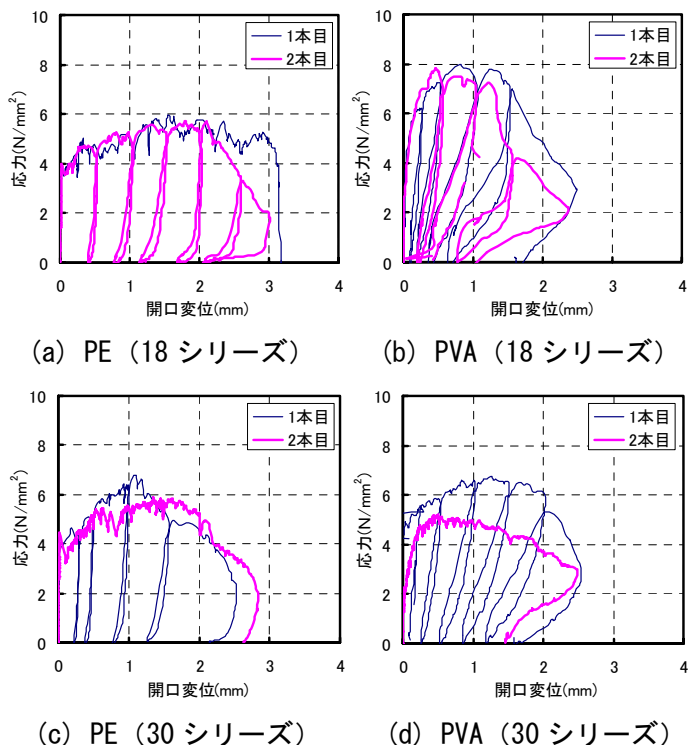


図-4 切欠き引張試験の応力-開口変位曲線

割れ幅の急激な増加がみられ、ひび割れの局所化が確認できた。

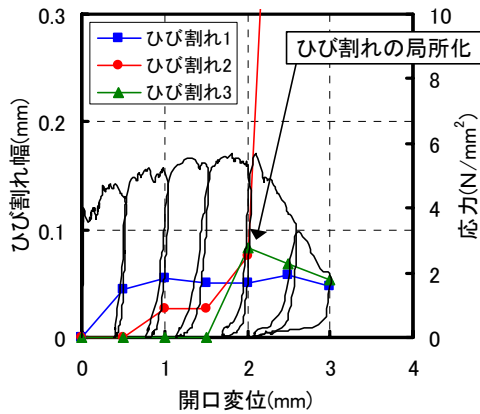


図-5 ひび割れ幅の推移 (18 シリーズ, PE)

除荷後のひび割れ状況を写真-2に示す。両供試体において局所化したひび割れを除いてひび割れ幅は十分小さかった。このような切欠きがある場合、普通コンクリートや繊維補強コンクリートでは、単独のひび割れが切欠きを結ぶ線上に発生するが、HPFRCCでは切欠き部だけでなく、広範囲にわたってひび割れが分散した。

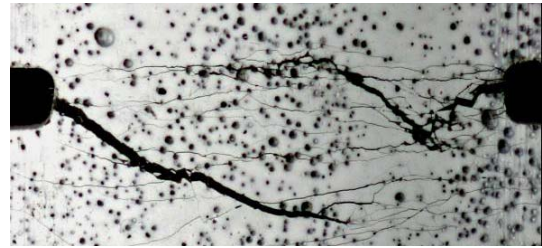
3.2 繰返し引張試験結果

切欠き引張試験における開口変位は、切欠き内に発生した複数本のひび割れ幅の合計を計測していることとなるため、この開口変位を切欠き幅で除して材料ひずみとして評価することは妥当ではないと考えられる。そこで、ダンベル引張試験と切欠き引張試験における最大応力時のひずみと変位を対応させて本実験の繰返し载荷変位が相当する一軸引張ひずみについて検討した。

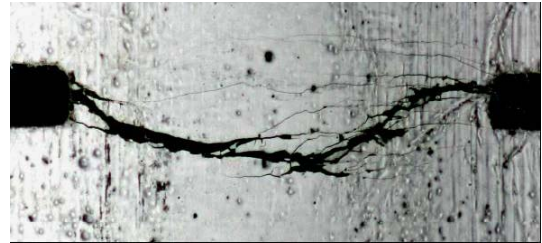
設定した繰返し载荷変位 0.25mm および 0.50mm を、ダンベル引張試験結果のひずみに換算した結果を表-3に示す。この結果より繰返し引張試験で行った繰返し载荷変位 0.25mm および 0.50mm は、ダンベル引張試験における鉄筋降伏ひずみレベルおよびその 2 倍相当のひずみレベルで繰返し载荷を行ったと考えられる。

(1) 繰返し载荷時

18 シリーズにおける繰返し载荷時の繰返し回数と変位の関係を図-6に示す。PE および PVA ともに繰返し回数が増加するにつれて変位が増加する傾向を示した。図-6 から分かるように、



(a) PE



(b) PVA

写真-2 除荷後のひび割れ状況 (30 シリーズ)

表-3 繰返し载荷変位のひずみ

種別	ダンベル引張試験の平均最大応力時ひずみ $\varepsilon(\sigma_{max})$ (μ)	シリーズ	切欠き引張試験の平均最大応力時変位 $\delta(\sigma_{max})$ (mm)	繰返し载荷変位のひずみ(μ)	
				$\varepsilon(0.25)$	$\varepsilon(0.50)$
PE	15000	18	1.85	2027	4054
		30	1.70	2206	4412
PVA	8900	18	0.79	2816	5633
		30	1.31	1698	3397

$$\circ \varepsilon(0.25) = \frac{\varepsilon(\sigma_{max})}{\delta(\sigma_{max})} \times 0.25 \quad \circ \varepsilon(0.50) = \frac{\varepsilon(\sigma_{max})}{\delta(\sigma_{max})} \times 0.50$$

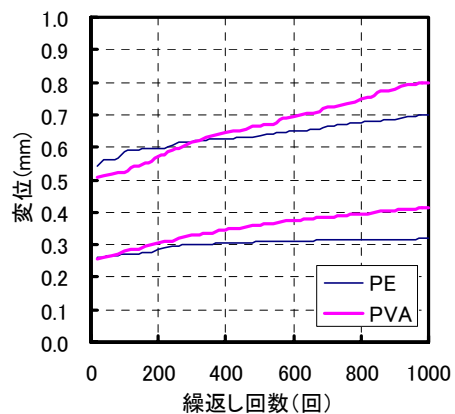


図-6 繰返し回数と変位の関係 (18 シリーズ)

繰返し载荷前後の変位増加は、繰返し载荷変位 0.25mm において、PE では 1.27 倍、PVA では 1.66 倍大きくなった。また、繰返し载荷変位 0.50mm

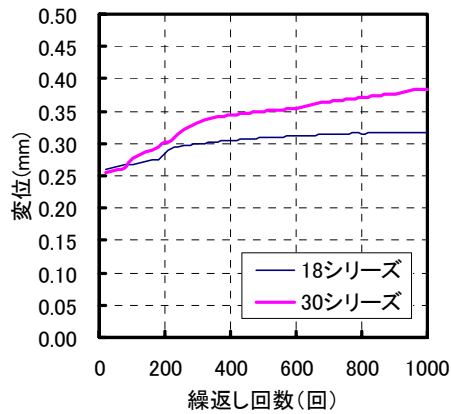


図-7 厚さの違いによる影響 (PE)

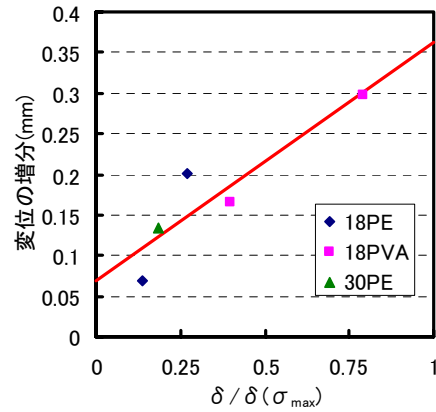


図-8 変位比と変位の増分関係

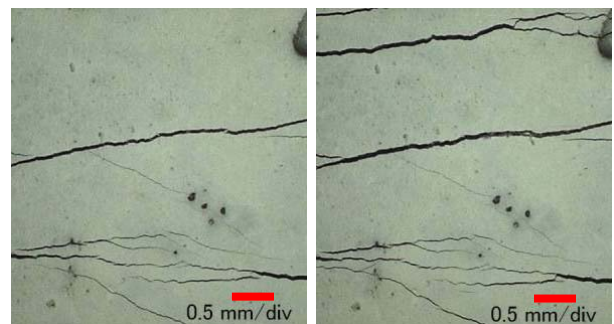
において、PE では 1.40 倍、PVA では 1.60 倍大きくなった。

厚さの違いによる繰返し载荷の影響を図-7に示す。30 シリーズの方が 18 シリーズより変位の増加量が大きくなった。これは、供試体の厚さが薄いほど、繊維の配向は 2 次元的になり易く、ひび割れ部に架橋する繊維が多く、ひび割れの進展を抑制し、変位の増加つまりひび割れ幅を抑制したと考えられる。

材料の性能の違いにより、設定した繰返し载荷変位における繰返し荷重が供試体に与える影響は異なると考えられ、繰返し载荷変位を直接指標として用いることは、適当ではない。そこで、繰返し载荷変位を切欠き引張試験における PE、PVA それぞれの最大応力時変位で除して、無次元化し、これを変位比とした。変位比と繰返し载荷による変位の増分の関係を図-8 に示す。両者は正の相関関係を示した。このことから、最大応力時変位に対する繰返し载荷変位の割合が大きいほど、ひび割れ部における変位の増分も大きくなると考えられる。

繰返し载荷前後のひび割れの状態を写真-3に示す。繰返し载荷前後においてひび割れ本数の増加がみられたが、既存のひび割れ幅の拡大も確認された。しかし、繰返し载荷後のひび割れについてひび割れ幅が 0.1mm を越えるものはなかった。

以上より、鉄筋降伏ひずみ以降のひずみレベルで繰返し载荷を行った場合、1000 回程度の繰



(a) 繰返し载荷前 (b) 繰返し载荷後

写真-3 ひび割れの比較 (18 シリーズ, PVA, マイクロスコップで 50 倍撮影)

返しにおいても変位の進展が起こり、ひび割れ部の引張挙動に及ぼす影響は比較的大きいと考えられる。これはひび割れ部に架橋する繊維のクリープおよびマトリクスとのすべりによるものと考えられるが、本実験の範囲ではその原因について特定することはできない。しかし、本実験で与えた変位は鉄筋降伏ひずみレベルであることを考慮して、実構造物に置き換えて考察すると L2 地震動レベルに相当する。また、地震動における繰返し回数は数十回程度であると考えると、繰返し荷重がひび割れ部の引張挙動に及ぼす影響は小さいと考えられる。

(2) 再载荷時

繰返し载荷後の再载荷より得られた応力-開口変位曲線を図-9に示す。PE および PVA とともに繰返し载荷により変位の増加がみられたが、繰返し载荷後の再载荷においても繰返し载荷前と同等の架橋応力を保持し、さらに擬似ひずみ

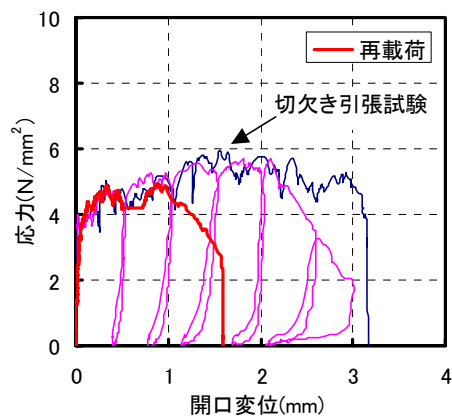
硬化を示した。これより、実構造物に適用した場合、地震時に相当する鉄筋降伏ひずみレベルにおける繰返し荷重を受けた後も、載荷前と同程度の耐荷力を保持しているだけでなく、ひび割れ幅も小さいことから、構造物は破壊に至ることなく、緊急で大規模な補修や補強を必要としないと考えられる。

4. まとめ

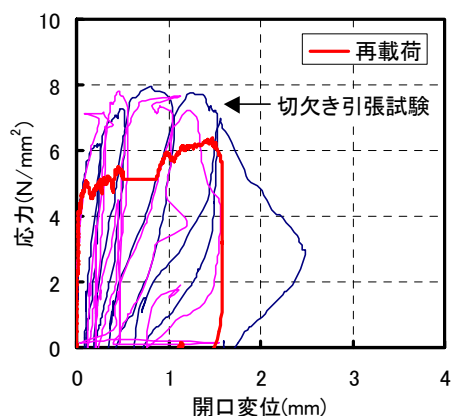
2種類の有機繊維材料を用いた HPRCC の一軸引張試験および鉄筋降伏ひずみレベルにおける繰返し引張試験を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 一軸引張試験において切欠き供試体の最大応力は、ダンベル型供試体と比較して大きくなった。これは、破壊が生じる領域の大きさの相違および繊維分布のばらつきによると考えられる。
- (2) 切欠き引張試験において PE は PVA と比較して最大応力時の変位が大きくなり、靱性能も大きくなった。ひび割れ幅はいずれも小さく、PE ではひび割れが広範囲に分散していた。
- (3) 繰返し引張試験において繰返し載荷後の変位は載荷前と比較して、PE では 3 割程度、PVA では 6 割程度増加した。また、最大応力時の変位に対する繰返し載荷変位の割合が大きくなるほど、変位の増分も大きくなると考えられる。
- (4) 繰返し載荷後の再載荷においても、載荷前と同程度の架橋応力を保持しており、急激な破壊は起きなかった。

鉄筋降伏ひずみレベルにおける繰返し載荷がひび割れ部の引張挙動に及ぼす影響は大きいと考えられる。しかし大地震などにより鉄筋降伏ひずみレベルの繰返し荷重を受けた場合、数十回程度の繰返し荷重において変位の増分は微小であり、また繰返し荷重履歴後の再載荷に対しても処女載荷とほぼ同程度の性能を有すると考えられる。つまり、HPRCC を実構造物に適用



(a) PE



(b) PVA

図-9 再載荷時の応力-開口変位曲線
(18 シリーズ)

した場合、繰返し荷重が及ぼす影響は RC 構造物と比較して十分小さいため、緊急で大規模な補修や補強を必要としないと考えられる。

謝辞

本実験を行うにあたり、試験機の提供および操作のご指導を頂いた名古屋大学国枝稔助教授に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 社団法人日本コンクリート工学協会：高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書(Ⅱ)，2004.5
- 2) 福田一郎，須田久美子，坂田昇，岩井稔，閑田徹志：吹付け ECC により断面修復した RC 梁の疲労試験，土木学会年次学術講演会，Vol.57, No.5, pp.625-626, 2002.9