

論文 HPFRCC で補修された RC 梁のひび割れ挙動

林 承燦^{*1}・森山 守^{*2}・河合 正則^{*3}・内田 裕市^{*4}

要旨：本研究では，HPFRCC を対象として，引張終局ひずみが異なる 2 種類の HPFRCC で断面修復された RC 梁のひび割れ挙動について実験的に比較検討した。実験では等モーメント区間 (80cm) の引張縁のひび割れ幅，ひび割れ本数および引張鉄筋のひずみ分布を計測した。その結果，HPFRCC のひび割れ幅は，高々0.1mm 程度であり，荷重が増加してもひび割れ幅は増加することなく，ひび割れ本数が増加することが示された。

キーワード：HPFRCC，ひび割れ幅，断面修復，鉄筋コンクリート梁

1. はじめに

複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (以下，HPFRCC) は，引張力を受けても脆性的に破壊せず，変形 (あるいはひずみ) の増大に伴って，引張荷重 (あるいは引張応力) が増加する「ひずみ硬化特性」と，複数の細かいひび割れが分散して生じる「複数ひび割れ特性」を示す点に特徴がある。

劣化したコンクリート構造物に対する補修工法の一つに断面修復工法がある。断面修復材に要求される性能には，強度，寸法安定性，遮蔽性，耐久性および母材との一体性などが挙げられる。下面増厚を対象とした力学性能について各種実験が実施されており¹⁾，HPFRCC の断面修復材や下面増厚への適用の可能性について検討されている²⁾。しかし，断面修復材にどの程度の靱性が要求されているのかは明らかにはされていない。また，断面修復材としての HPFRCC の靱性の程度 (引張終局ひずみ) が補修後の力学

特性に及ぼす影響や微細ひび割れの分散程度も異なると考えられる。

本研究では，HPFRCC を対象として，引張終局ひずみが異なる 2 種類の HPFRCC で断面修復された RC 梁のひび割れ挙動と耐力変形関係について実験的に比較検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

試験に使用した母材コンクリート及び 2 種類の HPFRCC の配合を表-1,2 に示す。

(1) 母材コンクリート

母材コンクリートの水セメント比は 49.5% とし，セメントには普通ポルトランドセメント (密度: 3.15g/cm³)，細骨材に陸砂 (密度: 2.58 g/cm³)，粗骨材には最大寸法 20mm の碎石 (密度: 2.62 g/cm³) を用いた。

(2) HPFRCC

HPFRCC は打込みタイプと吹付けタイプの 2

表-1 母材コンクリートの配合

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					スランプ (cm)	空気量 (%)
	W	C	S	G	Ad		
49.5	153	309	748	1082	0.966	7.5	4.0

*1 (株) デーロス メンテナンス事業本部 工博 (正会員)

*2 中日本高速道路 (株) 中部地区清見工事事務所 飛騨工事長 (正会員)

*3 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

*4 岐阜大学 総合情報メディアセンター 教授 工博 (正会員)

表-2 HPFRCC の配合

HPFRCC の種類	単位量 (kg/m ³)				フロー (mm)
	水	プレミックス 粉体	ポリマー (エマルジョン系)	繊維混入率 (vol%)	
打込みタイプ	286	1507	34.7	2	520 ^{*1}
吹付けタイプ	303	1640	—	2	147 ^{*2}

*1：スランプフロー *2：モルタルテーブルフロー

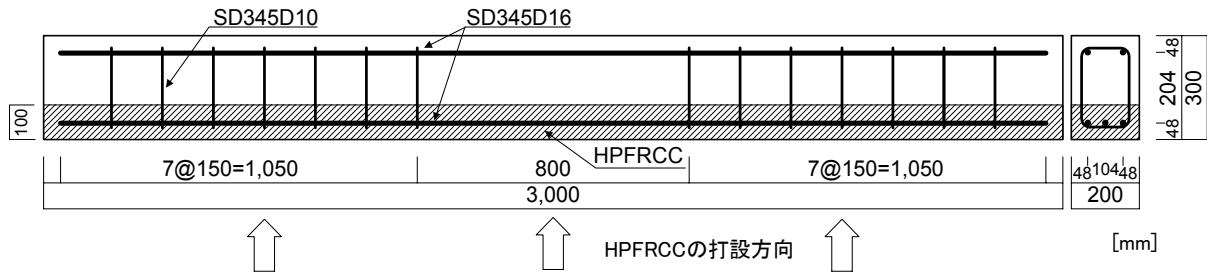


図-1 梁供試体形状・寸法および HPFRCC の打設方向

種類を用いた。2 種類の HPFRCC ともマトリックスは、プレミックスされたポリマーセメントモルタルとし、繊維（混入率：2vol%）には、長さ 12mm（直径 40 μ m）のポリビニルアルコール（PVA）と長さ 9mm（直径 12 μ m）のポリエチレン（PE）繊維を混合して使用した。

打込みタイプの HPFRCC は、単位水量を 286kg/m³ とし、スランプフローは 520mm であった。吹付けタイプは、単位水量を 303kg/m³ とし、テーブルフローは 147mm であった。

材料の練混ぜは、ニューギヤードミキサーを用い、材料をミキサーに一括投入して、打込みタイプは 2 分間、吹付けタイプは 3 分間練り混ぜた。

2.2 供試体の概要

(1) 母材供試体

図-1 に梁供試体の形状及び寸法を示す。梁供試体は複鉄筋で幅 200×高さ 300×長さ 3000mm の RC 梁とし、無補強の供試体を含めて各シリーズともに 2 体ずつ合計 6 体作製した。梁供試体は曲げ破壊型を想定し、D16（SD345）のねじふし鉄筋を圧縮側に 2 本、引張側には 3 本配置し、スターラップには D10（SD345）の異型鉄筋を 150mm 間隔で配筋した。各シリーズともに 2 体

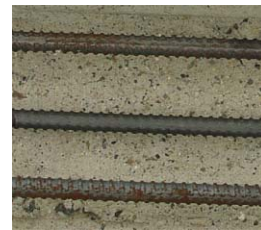


写真-1 ウォータージェット法による打継面の表面処理

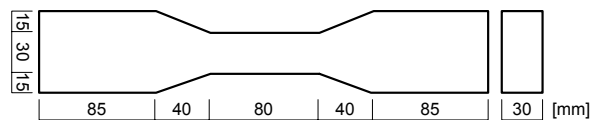


図-2 引張供試体寸法

のうち 1 体については、引張側の中央の鉄筋に溝切り加工をして、等曲げモーメント区間（800mm）にゲージ長 2mm のひずみゲージを 40mm 間隔で貼り付けた。

供試体の作製は、いずれも供試体の圧縮側を型枠の底面として打設を行った。HPFRCC により断面修復を行う供試体においては、高さ 200mm まで打設を行い、気中養生後材齢 14 日でウォータージェット法により打継面の処理を行った。その後、材齢 4 週目に吹付け及び打込みにより断面修復を行った。

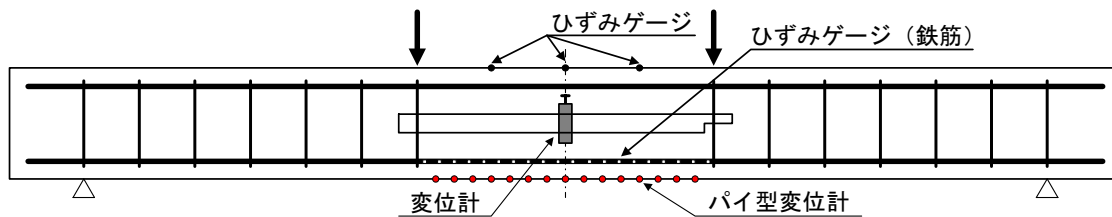


図-3 曲げ載荷試験の概要

(2) 打継面の表面処理

HPFRCC により断面修復を行う供試体の打継面の処理は、ウォータージェット法により噴射圧力 $1800\text{kg}/\text{cm}^2$ 、水量 $10\text{kg}/\text{分}$ で行った。表面処理程度は、粗骨材が見える程度の深さ約 $1\sim 2\text{mm}$ とした。写真-1 に表面処理後の状況を示す。

(3) 断面修復

HPFRCC による断面修復は、吹付け及び打込み方法で行った。

吹付けタイプの HPFRCC による断面修復は、練混ぜを行った材料をスクイーズポンプにより圧送し、下向き方向で吹付けを行った。

打込みタイプの HPFRCC による断面修復は、練混ぜを行った材料を供試体中央から両側に流し込む方法により打設を行った。打設の際には、突き棒や内部振動機を使わずに木づちやパイプレータで型枠表面に振動を与えるようにした。

なお、下向き施工は、実施工では一般的でないが、本試験では試験結果に影響を及ぼす施工の要因を限定するために、吹付け、打込みタイプともに施工が容易で安定した特性が得られると考えられる下向き施工を採用した。したがって、打設方向の影響については今後の課題としたい。

(4) 強度試験用供試体

梁供試体とは別途に、母材コンクリート及び2種類の HPFRCC とともに圧縮、曲げ、引張試験用供試体を作製した。強度試験用供試体も吹付け及び打込み方法により作製した。圧縮供試体は $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 、曲げ供試体は $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 、引張供試体は図-2 に示すダンベル形の供試体を用いた。曲げ試験は3等分点曲げ載荷試験とした。引張試験は、掴み具により供試体の肩の

表-2 圧縮・曲げ強度

	圧縮強度 (N/mm^2)	曲げ強度 (N/mm^2)
母材コンクリート	24.6	3.8
HPFRCC (打込み)	29.3	10.7
HPFRCC (吹付け)	42.8	8.0

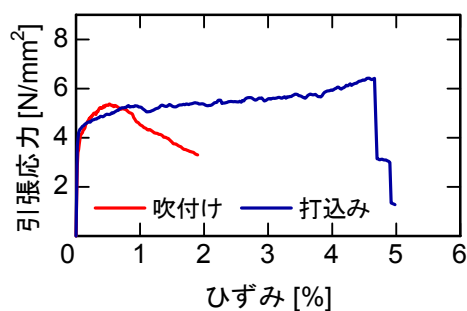


図-4 HPFRCC の引張応力-ひずみ関係

部分を掴んで引張力を伝達させる方法により行った。引張試験における変位計測の検長は 80mm とし、載荷速度は $0.5\text{mm}/\text{分}$ 程度とした。

2.3 曲げ載荷試験

図-3 に梁供試体の曲げ載荷試験の概要を示す。載荷試験はモーメントスパンを 800mm とした4点曲げ載荷とし、HPFRCC の材齢1ヶ月で実施した。全ての供試体において、荷重およびスパン中央の変位を計測するとともに、圧縮側の曲げモーメント区間に貼り付けた3個のひずみゲージ(供試体中央の 200mm 間隔)より圧縮ひずみを計測した。また、引張側の曲げモーメント区間内には検長 50mm のパイ型変位計(検長 $50\text{mm} \times 15$ 個)を連続的に貼り付け、ひび割れ幅を計測した。

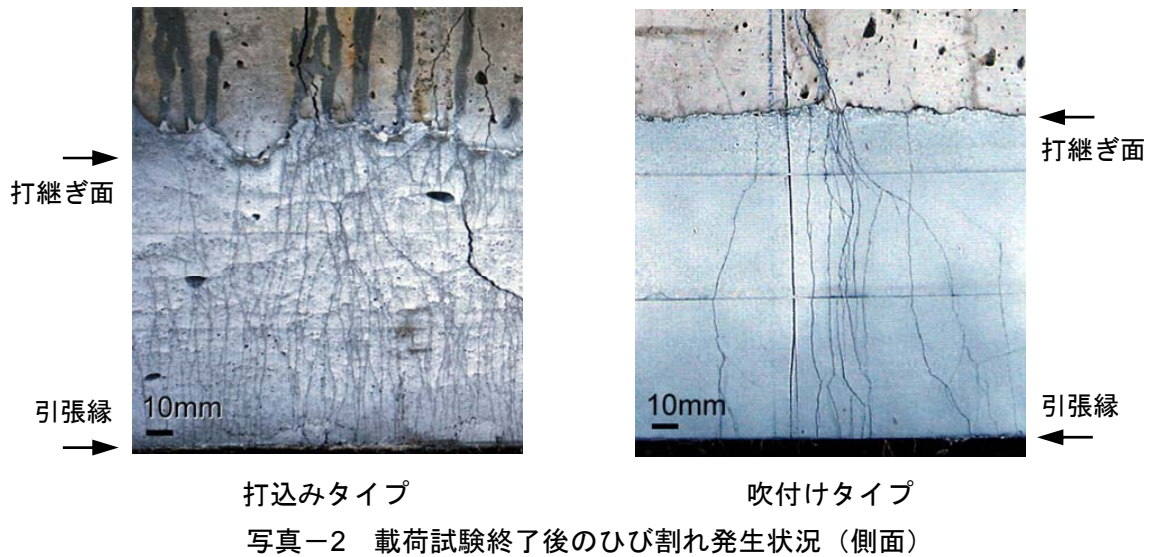


写真-2 載荷試験終了後のひび割れ発生状況（側面）

3. 試験結果

3.1 材料強度試験結果

各材料の圧縮強度、曲げ強度を表-2に示す。

HPFRCCの一軸直接引張試験の結果を図-4に示す。吹付けタイプの供試体は、終局ひずみ0.6%、引張強度 5.3kN/mm^2 を示し、打込みタイプの供試体は、終局ひずみ4.7%、引張強度 6.4kN/mm^2 となった。

3.2 梁供試体のひび割れ発生状況

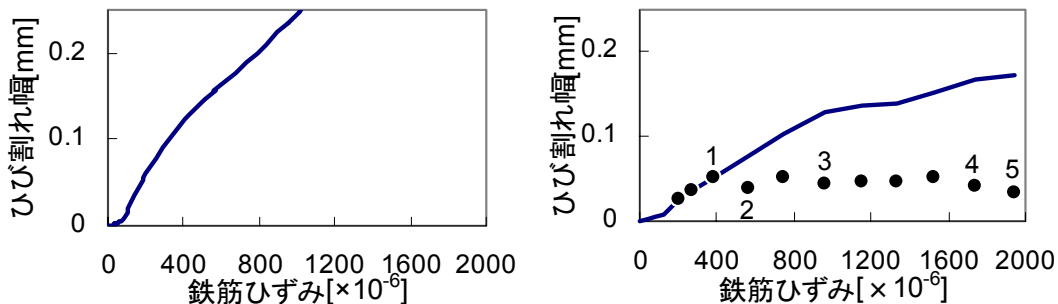
(1) 概況

無補修供試体とHPFRCCによって断面修復された供試体では、載荷試験中のひび割れ発生状況に大きな違いが見られた。

無補修供試体では、引張縁に15~20cm間隔でひび割れが発生し、荷重が大きくなるにつれてひび割れ幅が次第に大きくなった。

一方、打込みタイプのHPFRCCによって補修した供試体では、荷重の増加とともに、引張縁に微細なひび割れが分散して発生し、その後、母材コンクリートにひび割れが発生すると、HPFRCCのひび割れは母材コンクリートのひび割れ位置に集中するようになるが、その間もHPFRCCの引張縁では微細ひび割れの本数が増加し、引張縁ではひび割れ幅が集中するようにはなかった（写真-2参照）。なお、このとき母材コンクリートのひび割れ間隔は10cm程度であり、無補修の場合より明らかに狭くなっていた。また、鉄筋が降伏する以前においては打継面に沿ったひび割れは肉眼では確認されなかった。

吹付けタイプのHPFRCCの場合も打込みタイプの場合とほぼ同様の挙動を示したが、HPFRCC



(a) 無補修 (b) 打込みタイプのHPFRCC

図-5 ひび割れと鉄筋ひずみ関係

に発生するひび割れの本数は打込みタイプのそれよりも少なく、モーメント区間全体に一様に分散せず、部分的に集中する傾向が見られた。ただし、母材コンクリートにはほぼ 10cm 間隔でひび割れが発生しており、この点は打込みタイプの場合と大きな差はなかった。

(2) 鉄筋ひずみとひび割れ幅の関係

図-5 (a) には無補修供試体の引張縁においてパイ型変位計で計測された代表的な 1 本のひび割れの幅とその位置の鉄筋ひずみの関係を示す。この場合には、ひび割れ幅は鉄筋ひずみにほぼ比例して大きくなった。

図-5 (b) には打込みタイプの HPFRCC で補修した供試体で計測された代表的な箇所のひび割れ幅と鉄筋ひずみの関係を示す。図中、実線はパイ型変位計で計測されたひび割れ幅であり、鉄筋ひずみの増加とともに大きくなっている。ただし、曲線の傾きは図-5 (a) に示した無補修の場合に比べ明らかに小さくなっている。

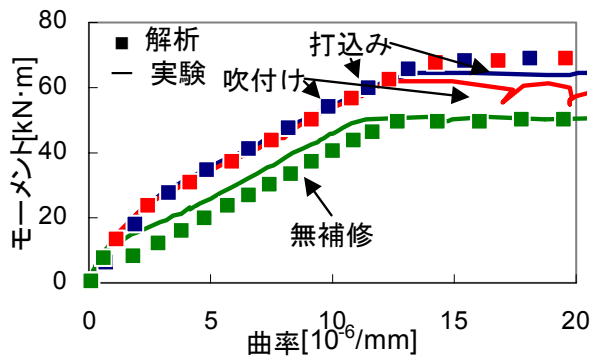
HPFRCC で補修した供試体では、一定の荷重ごとに荷重を止め、目視により各パイ型変位計の検長区間内に発生したひび割れ本数を数えた。図-5 中の●は、パイ型変位計で計測された値をその区間内に発生したひび割れ本数で除したものであり、パイ型変位計の検長区間内の平均ひび割れ幅に相当するものである。また図中の数字はひび割れ本数を示す。これより、HPFRCC で補修した供試体の平均ひび割れ幅は、0.1mm 程度までは鉄筋応力の上昇とともに大きくなっているが、それ以降はひび割れの本数が増えることで、平均ひび割れ幅はほとんど増加しない結果となった。

3.3 荷重-変形関係

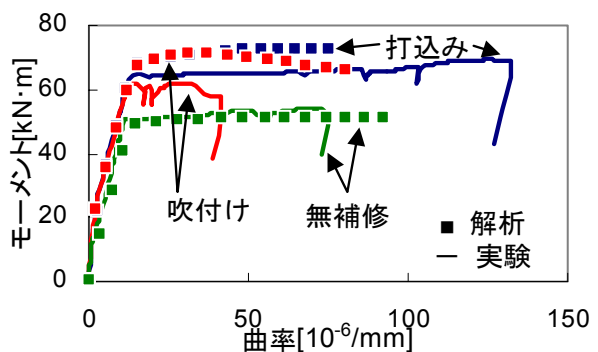
図-6 には各供試体の等モーメント区間内のモーメント-曲率関係を示す。HPFRCC で補修した供試体のひび割れ荷重、降伏荷重、および終局荷重は無補修供試体のそれより大きくなっており、HPFRCC が引張力を分担していることがわかる。また、打込みと吹付け供試体を比較すると、降伏付近まではほとんど差はないが、

降伏荷重は打込みの方が若干大きくなった。ただし、吹付けタイプの場合には、降伏直後から徐々に耐力が低下した。これは、吹付けタイプの場合、鉄筋降伏後、ひび割れ断面での HPFRCC の引張分担が早期に喪失し、そのひび割れ断面に変形が集中し、圧縮縁のコンクリートの圧壊が早まったためと考えられる。

図-6 には材料試験で得られた各材料の応力-ひずみ関係を用いてファイバーモデルによって計算したモーメント-曲率関係を■で示す。なお、ここではテンションスティフニング効果は無視し、母材コンクリートは引張強度に達した時点で脆性破壊するモデルを、HPFRCC には材料試験の結果 (図-4) をモデル化した図-7 に示す応力-ひずみ関係を用いた。鉄筋は完全弾塑性型とした。



(a) 降伏まで



(b) 全体

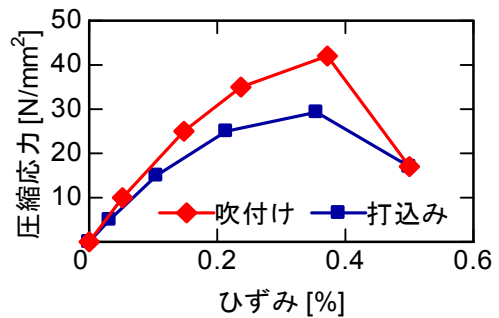
図-6 モーメント-曲率関係

無補修供試体の場合には、降伏前の剛性が計算値の方が小さくなっており、これはテンションステイフニング効果を見逃したためであると考えられる。一方、HPFRCC で補修した供試体では、降伏するまで計算値と実験値はよく一致しており、HPFRCC 単体の引張応力-ひずみ関係を考慮すれば、テンションステイフニング効果は考慮する必要がないことがわかる。また、HPFRCC で補修した供試体の降伏およびそれ以降の荷重を計算と実験と比較すると、計算値の方が荷重が高くなっている。この原因としては、HPFRCC 単体の材料試験で得られる応力-ひずみ関係と梁供試体中の HPFRCC のそれで、寸法効果や繊維の配向の影響により特性が異なっていることが考えられる。なお、吹付けタイプの場合、降伏後の変形の小さな段階で耐力低下が生じることが図-6 (b) の計算結果にも現れている。これは、図-7 に示すように、引張応力-ひずみ関係における終局値の違いによるものだと考えられる。

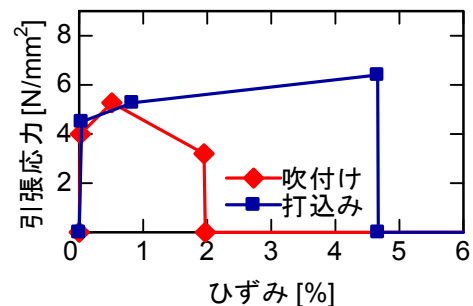
4. まとめ

本研究で得られた主な結果をまとめると以下の通りである。

- (1) HPFRCC で断面修復した供試体では、引張縁のひび割れの幅は荷重の増加とともに大きくなるが、高々0.1mm程度までであり、その後引張ひずみは増加しても平均ひび割れ幅は増加することなく、ひび割れ本数が増加した。ただし、ひび割れの分散性は吹付けタイプより打込みタイプの方が優れていた。
- (2) モーメント-曲率関係に関しては、HPFRCC で補修したものと無補修を比較すると明らかに HPFRCC が引張分担することで、補修した供試体の方の耐力が高くなった。
- (3) HPFRCC で補修した供試体のモーメント-曲率関係は、テンションステイフニング効果を見逃して HPFRCC 単体の引張応力



圧縮応力-ひずみ関係



引張応力-ひずみ関係

図-7 解析に用いた応力-ひずみ関係

ひずみ関係を考慮すれば、計算値と実験値はほぼ一致した。

- (4) 吹付けタイプの HPFRCC 単体の引張終局ひずみが、打込みタイプのそれより小さいことは、梁供試体の挙動においてはひび割れの分散性と降伏後の耐力低下開始時の変位の違いとして現れた。

参考文献

- 1) 原 功明, 横山和昭, 鹿野善則, 坂田 昇: 下面増厚材料の力学特性および耐久性に関する基礎実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1419-1424, 2002
- 2) 閑田徹志, 齊藤 忠, 坂田 昇, 平石剛紀: PVA 繊維を用いた高靱性 FRC による吹付け補修材の基礎的特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.475-480, 2001