

# 論文 HPFRCC により下面増厚した RC 部材の曲げ性状に関する研究

水田 武利\*1・稲熊 唯史\*2・林 承燦\*3・六郷 恵哲\*4

**要旨:** 既設 RC 梁部材の下面増厚に用いた複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (HPFRCC) の補強効果を検討する目的で, 材料性能の異なる 3 種類の HPFRCC について増厚部の補強鉄筋の有無を含めて載荷実験により挙動を検証して性能を評価した。いずれの HPFRCC についても増厚部に鉄筋補強を行うことにより無筋補強の供試体に対してひび割れ本数が増加しひび割れ分散性も向上した。鉄筋補強せず, HPFRCC 単独で下面増厚した場合, 靱性が低い HPFRCC では曲げ補強効果が期待できないこと, RC 部材と積層した構造ではコンクリートのひび割れ直下で増厚した HPFRCC に大きなひずみが発生することを明らかにした。

**キーワード:** HPFRCC, 下面増厚, 曲げ載荷試験, ひび割れ, ファイバーモデル

## 1. はじめに

近年, コンクリート構造物において様々な劣化損傷が進み, 道路橋床版や高架橋スラブに対して下面増厚工法による補修および補強が施工されている。しかしながら, 現行補強材として用いられる材料はひび割れ追従性が低いことから, 既設構造物のひび割れ幅の拡大もしくは新たなひび割れの発生により材料自体にひび割れが生じるため, 補強材自身は引張力分担を期待しないとされている。

引張応力作用下ならびに曲げ応力作用下において, 擬似ひずみ硬化特性と複数微細ひび割れ特性を示す HPFRCC が開発されている<sup>1)</sup>。HPFRCC はひび割れ発生後も引張応力を分担できる特性と高いひび割れ追従性を有していることから, 補修・補強材としての適用が検討および進められている<sup>2)</sup>。しかし, 既設 RC 梁に増厚して適用する場合, HPFRCC に作用する引張ひずみは RC 梁のひび割れ部の開口変位に影響を受け, RC 梁のひび割れ直下の HPFRCC では大きな引張ひずみが生じると考えられる。このとき HPFRCC に発生する引張ひずみ

はある区間の変形を平均化して設計したひずみよりも実際には大きなひずみが生じ, HPFRCC の材料性能によっては鉄筋の降伏に対して早期に HPFRCC の軟化が開始し, 想定した補強効果が得られない状態が懸念される。

本研究では HPFRCC のひずみ硬化特性と微細ひび割れ特性を合理的に活用する適用方法の一つとして, 既設構造物への下面増厚補強を想定した性能検証を目的とし, 既設の RC 梁に引張特性の異なる 3 種類の HPFRCC 材料を適用し, 鉄筋コンクリートと HPFRCC を一体化させた RC 構造梁の曲げ載荷試験により, 下面増厚のひびわれ分散の状況および補強効果を検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

本研究では材料特性および施工方法の異なる 3 種類の HPFRCC を使用した。材料はポリビニルアルコール繊維 ( $\phi 0.040 \times 12\text{mm}$ , 引張強度 1600MPa, 弾性係数 40GPa, 以下 PVA) と高強度ポリエチレン繊維 ( $\phi 0.012 \times 12\text{mm}$ , 引張強度 2600MPa, 弾性係数 88GPa, 以下 PE) を用い

表-1 配合

(a) RC 配合	水セメント比 W/C	単位セメント量 C	細骨材率 S/a	混和剤添加量 ×C	
	49.5%	309kg/m <sup>3</sup>	41%	0.30%	
(b) SHOT 配合	繊維	繊維混入量	フレイク粉体	水 W	
	PVA+PE	2.0vol%	1640kg/m <sup>3</sup>	303kg/m <sup>3</sup>	
(c) PVA 配合	繊維	繊維混入量	セメント+フライアッシュ C+FA	水 W	細骨材 S
	PVA	2.0vol%	829kg/m <sup>3</sup>	350kg/m <sup>3</sup>	580kg/m <sup>3</sup>
(d) PE 配合	繊維	繊維混入量	水粉体比 W/B	単位粉体量 B	フライアッシュ置換率 FA/(C+CS+FA)
	PE	1.5vol%	30%	1264kg/m <sup>3</sup>	30%

\*1 岐阜大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

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

\*3 (株) デーロス メンテナンス事業本部 工博 (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)

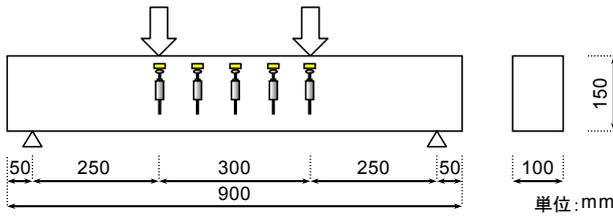


図-1 HPFRCC 無筋梁供試体

表-2 下面増厚供試体種別

試験体種別	試験体名称	増厚厚さ	増厚部鉄筋補強
基準供試体	RC	-	-
吹付けHPFRCC	SH30	30mm	-
	SH50	50mm	D13 (2-SD345)
PVA-HPFRCC	PVA30	30mm	-
	PVA50	50mm	D13 (2-SD345)
PE-HPFRCC	PE30	30mm	-
	PE50	50mm	D13 (2-SD345)

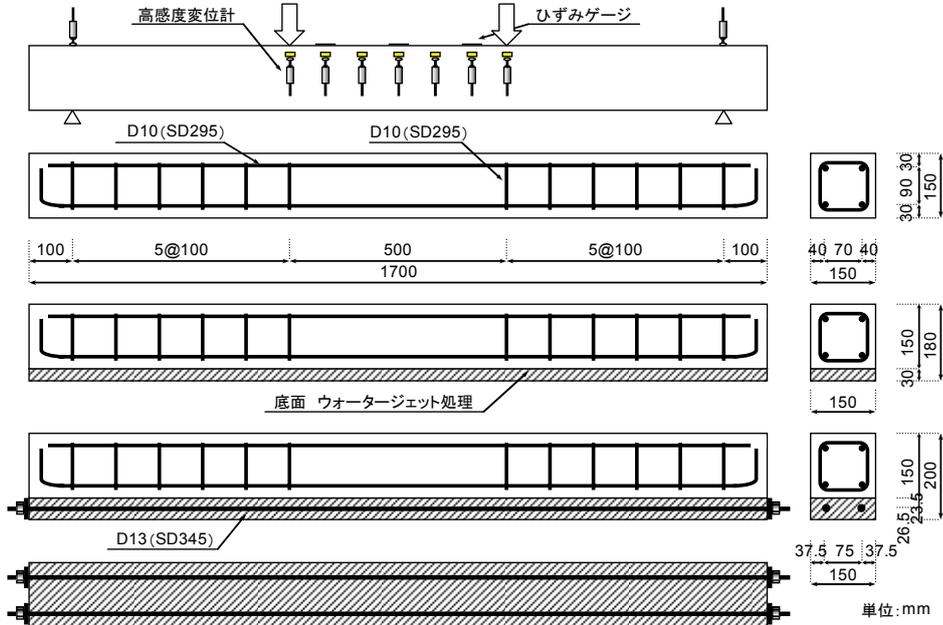


図-2 下面増厚供試体

た 2 種類の配合に加え、ポリビニルアルコール繊維と高強度ポリエチレン繊維を混合させた繊維（以下 SHOT）を用いた配合の計 3 水準とした。基準となる RC は水セメント比 49.5%，細骨材率 41%とした。各供試体の配合と諸物性を表-1 に示す。

SHOT 配合はあらかじめセメントや細骨材などがプレミックスされた材料に混練水、混和剤、短繊維などを加えて練り混ぜ、湿式で吹付け施工した。また PVA 配合および PE 配合の 2 種類は流し込み工法により施工し、PVA 配合は SHOT 配合と同等に繊維を加えたプレミックス材料を用いた。

## 2.2 材料特性

### (1) 試験方法

HPFRCC の引張材料特性を評価する曲げ供試体として高さ 150mm，幅 100mm，長さ 900mm の HPFRCC 無筋梁供試体を作製した。供試体の概要を図-1 に示す。載荷は等モーメントスパン 300mm，せん断スパン 250mm の 2 点載荷とし，変位制御型試験機を用いて行った。計測項目は荷重，変位，ひずみとし，荷重はロードセルにより検出した。変位は等モーメントスパンならびに支점에設置した高感度変位計によって検出し，HPFRCC は曲率がほぼ一定とみなせるため式(1)を用いて純曲げ区間の曲率を算出した。また圧縮縁に貼り付けたひずみゲ

ージによりひずみを検出した。

$$\varphi = \frac{4}{l_0} (2\delta_B - \delta_A - \delta_C) \quad (1)$$

ここで， $\varphi$ ：純曲げ区間の曲率 (1/mm)， $l_0$ ：純曲げ区間 (mm)， $\delta_B$ ：純曲げ区間中央の変位量 (mm)， $\delta_A$ ， $\delta_C$ ：純曲げ区間両端の変位量 (mm) である。

また，PVA 配合及び PE 配合については高さ 100mm，幅 100mm，長さ 400mm の供試体でモーメントスパン 100mm により同様に曲げ載荷試験を行った。

### (2) 評価方法

HPFRCC の引張材料特性は，HPFRCC 無筋梁供試体の曲げ載荷試験より得られたモーメントと曲率の関係から，ファイバーモデル解析により材料の一軸引張応力下における引張応力-ひずみ関係の評価した。引張応力-ひずみ関係は解析により得られたモーメントと曲率の関係が実験値と一致するまで HPFRCC の引張応力-ひずみ関係を変化させ繰り返し計算を行うことにより導いた。HPFRCC の圧縮応力-ひずみ関係は別途行った  $\phi 100 \times 200$ mm 試験体での圧縮試験結果を基に設定した。

### 2.3 下面増厚供試体の曲げ載荷試験

下面増厚供試体の供試体概要を表-2 および図-2 に示す。基準供試体 (RC) は高さ 150mm，幅 150mm，長さ 1700mm の梁を作製し，RC と HPFRCC の界面はウオ

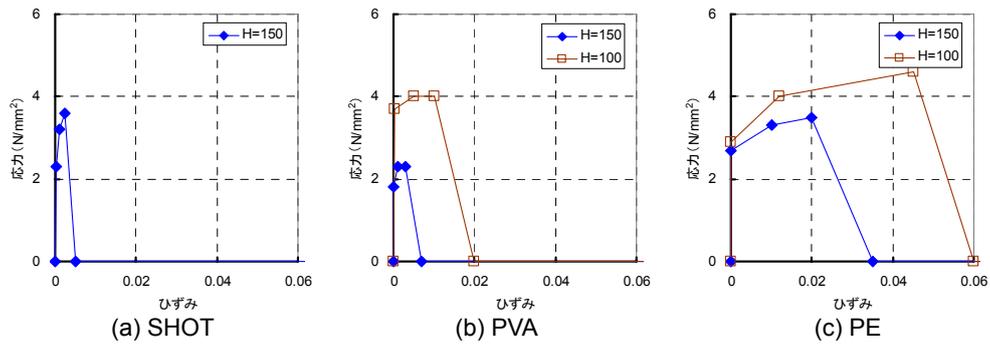


図-3 引張応力-ひずみ関係

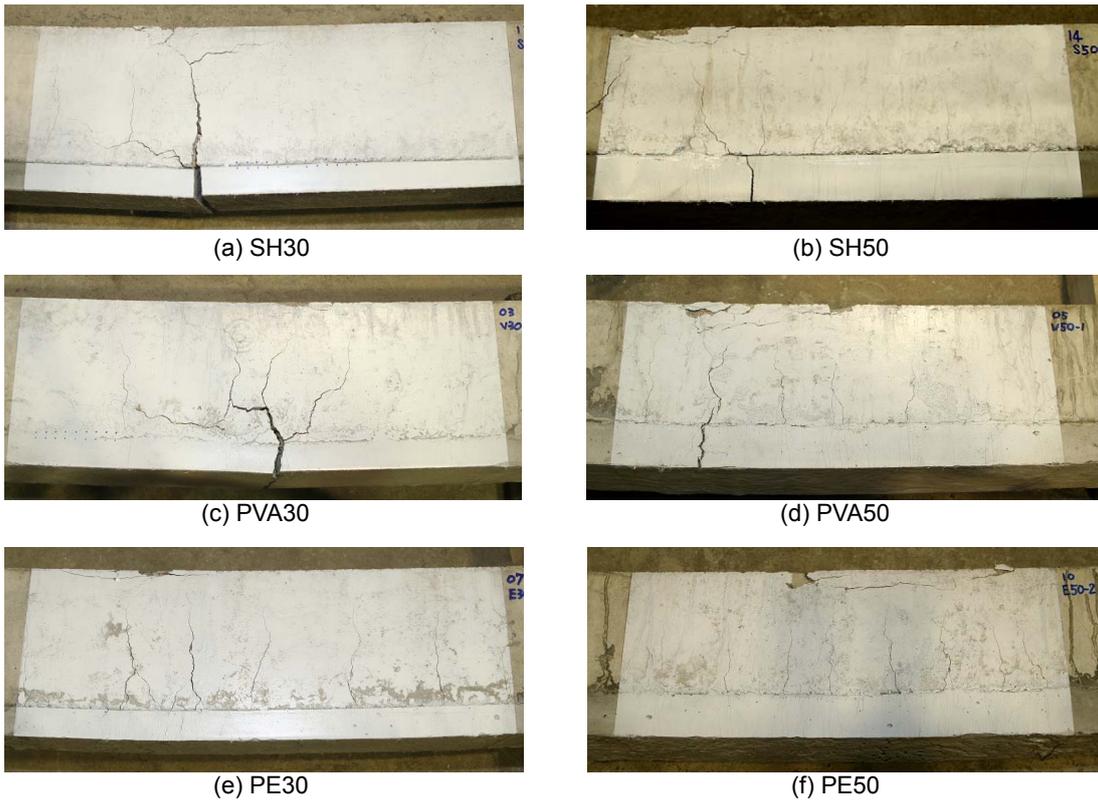


写真-1 載荷試験後のひび割れ状況

ータージェットにより表面処理を施した。基準供試体の養生後、増厚部 HPFRCC を 30mm, 50mm の厚さで吹付け工法または流し込み工法により作製した。増厚厚さ 50mm については D13 (SD345) のねじ鉄筋を 2 本配筋する構造とした。供試体数は 1 水準に 2 体ずつとし、載荷は等モーメントスパン 500mm, せん断スパン 500mm の 2 点載荷とした。計測項目は 2.2(2)節と同様とした。

## 2.4 ひび割れ観察

ひび割れ性状は、RC と HPFRCC の境界面、供試体の引張縁および側面を目視によるほか、デジタルカメラを用いて観察した。

## 3. 実験結果

### 3.1 材料特性

梁高さ 100mm と 150mm の供試体の曲げ載荷試験より解析した引張応力-ひずみ関係を図-3 に示す。梁高さ

の異なる曲げ載荷試験から得られる応力-ひずみ関係は、既往の研究<sup>3)</sup>で示されているとおり梁高さの寸法効果が存在し、本実験においても HPFRCC の種類に関わらず梁高さが高い供試体による結果では、引張強度および終局ひずみが小さくなった。

引張特性は引張強度および終局ひずみ共に PE 配合が最も大きく、SHOT 配合では引張強度は高いが終局ひずみが小さくなった。本研究で用いた 3 種類の HPFRCC の引張特性は、引張強度と引張塑性において幅広い特性を有していることが確認できる。

### 3.2 下面増厚供試体の曲げ載荷試験

#### (1) ひび割れ性状

載荷試験後における基準供試体のひび割れの平均間隔は約 100mm で、モーメントスパン内に 5~6 本のひび割れが発生した。写真-1 に HPFRCC で下面増厚した供試体の載荷試験後のひび割れ状況を示す。基準供試体に

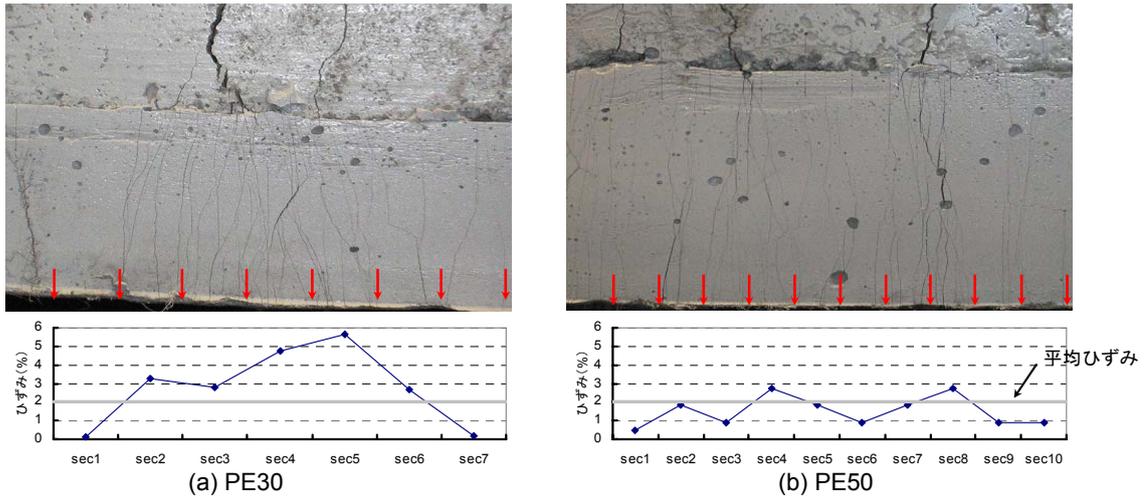


図-4 引張縁での平均ひずみが2%における増厚部のひずみ分布

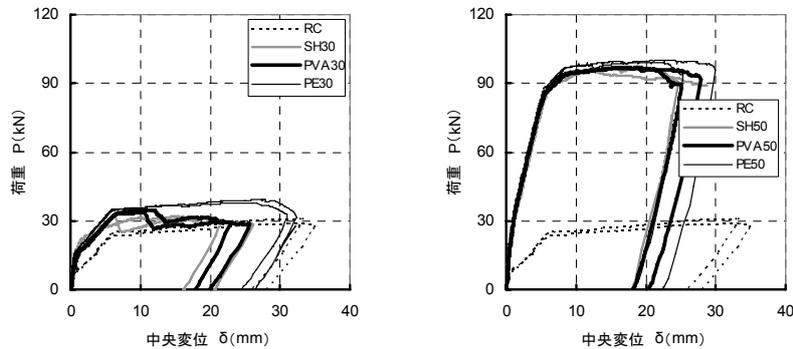


図-5 荷重-中央変位関係

発生したひび割れ本数は増厚部に鉄筋補強をしていない SH30 および PVA30 では減少し、その他の供試体については増加した。また、増厚部の HPRCC に発生したひび割れ本数を試験後に比較すると材料単体の引張靱性と相関関係を示しており、SH, PVA, PE の順でひび割れ本数が増加した。また、いずれの HPRCC についても増厚部に鉄筋補強した供試体は、無筋増厚の供試体に対してひび割れ本数の増加による分散性の向上が確認された。しかし、HPRCC 材料の引張靱性が高い PE では、増厚内の鉄筋の有無に関わらず、HPRCC の増厚部では基準供試体に発生した 1 本のひび割れの下端から微細なひび割れが分散して生じた。

式(2)で算出した引張縁での平均ひずみが約 2% 時ににおいて、無筋で増厚した PE30 と増厚部に鉄筋補強をした PE50 の引張縁におけるひずみ分布を図-4 に示す。ひずみは供試体の引張縁を長手方向に 1cm ずつ区切り、デジタルカメラを用いて撮影した画像から変位量を測定する手法により算出した。なお、ここで算出している引張縁ひずみは、モーメントスパンの両端と中央の変位量から換算したモーメントスパン区間の平均曲率を用いたものを使用した。

$$\varepsilon_t = \varphi \times h + \varepsilon_c \quad (2)$$

ここで、 $\varepsilon_t$  : 引張縁ひずみ、 $h$  : 断面高さ (mm)、 $\varepsilon_c$  : 圧

縮縁ひずみである。

PE30 では基準供試体のひび割れ直下で大きなひずみが生じ、局所的なひずみは約 6% となった。PE50 では基準供試体のひび割れ直下においてはひずみがやや大きくなっているが、PE30 と比較し、局所的なひずみは小さく、一様に分布した。ひび割れ発生状況と計測したひずみ分布から、増厚部に鉄筋補強した供試体では等モーメント区間で HPRCC のひび割れがより均等に分散して、引張縁での平均ひずみ 2% に対してより近いことが確認できる。つまり増厚部に鉄筋を配置することにより、供試体長さ方向において曲げ変形がより均一化し、ひび割れが均等に分散したと思われる。これは後の図-7 に示すとおり、引張荷重分担において鉄筋の補強が大きく寄与しているためと考えられる。繊維の分散、配向によって材料にばらつきを生じる HPRCC に対して、安定して伸びる鉄筋が半分以上の引張力を分担している。そのため、より均等に变形する鉄筋との合成効果になり、基準供試体に発生したひび割れの影響が減少したため均等に分布したと考えられる。

## (2) 荷重-中央変位関係

曲げ載荷試験で得られた各供試体の荷重-中央変位関係を、基準供試体と合わせて図-5 に示す。全ての供試体において基準供試体の鉄筋降伏まで補強効果が認

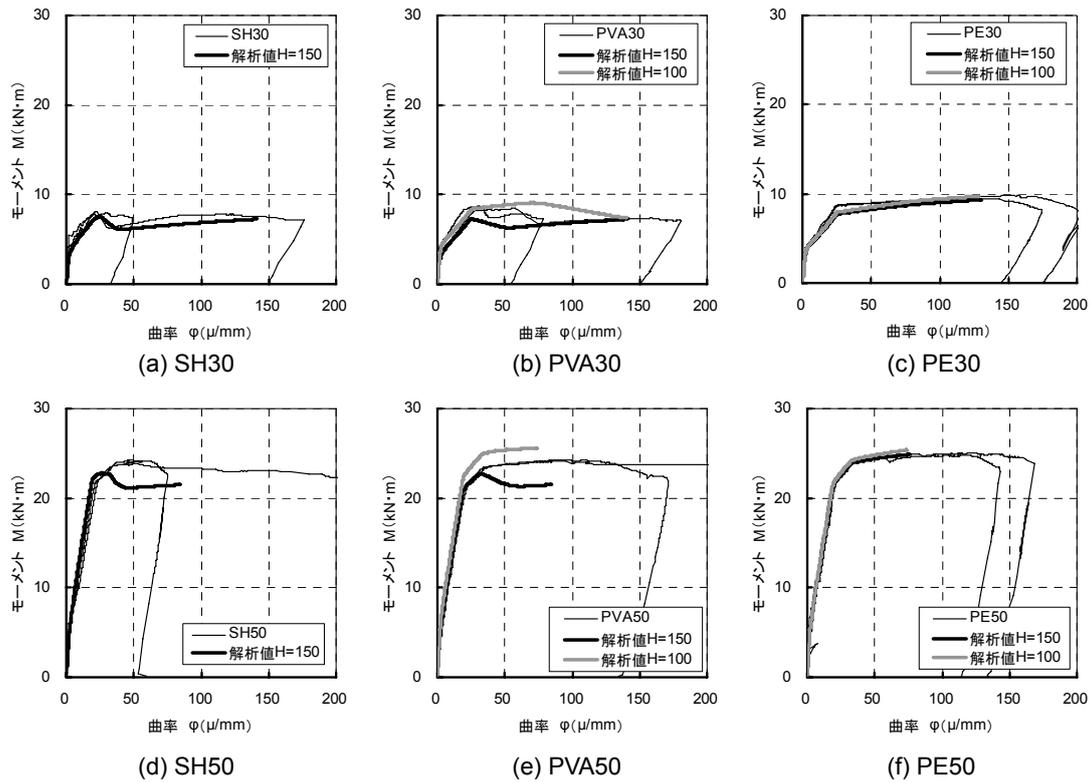


図-6 モーメントー曲率関係

められた。また各供試体の破壊形態は、無筋で増厚した供試体の SH30 および PVA30 では、HPFRCC の軟化開始時に最大荷重となった。その他の供試体では圧縮側コンクリートの圧壊時に最大荷重となった。

増厚部に鉄筋補強をしない場合、PE 配合に比べて終局ひずみが小さい SH 配合の SH30、PVA 配合の PVA30 では増厚部の補強効果が基準供試体の鉄筋の降伏後に減少し基準供試体単体の挙動に漸近した。この結果は基準供試体が圧壊して終局する時点では増厚部の引張荷重分担が消失していたと考えられる。増厚部に鉄筋を配筋した供試体では基準供試体に対して大きく剛性および曲げ耐力が増加した。しかし、SH50、PVA50、PE50 の最大モーメントに大きな差が生じていないことから、増厚した HPFRCC 種類の影響は少なく、終局耐力の増加については増厚部に配筋した補強鉄筋の寄与が大きいと考えられる。

### (3) 解析結果との比較

3.1 節の HPFRCC の曲げ載荷結果から解析によって求めた引張材料特性と圧縮試験から得られた圧縮特性、その他鉄筋の応力ひずみ関係等をもとにファイバーモデル解析によりモーメントと曲率の関係を算出し、下面増厚した試験体の結果と比較した。解析は基準供試体の圧破時まで計算を行った。モーメントと曲率の関係について載荷試験結果と解析結果を図-6 に示す。なお、試験結果として示した曲率は、モーメントスパンの両端と中央の変位量から換算したモーメントスパン区間の平

均曲率を示している。試験結果では供試体の破壊位置の違いにより終局時における曲率が異なる結果も得られた。解析に用いた基準供試体の鉄筋の引張応力ひずみ関係は材料試験結果の降伏応力とテンションステイニングを考慮し文献<sup>4)</sup>を参考に決定し、増厚断面内の鉄筋は別途実施した鉄筋の引張試験の結果から降伏以降の鉄筋のひずみ硬化を考慮したモデルで解析を行った。図-6 中において解析値 H=100 とは、梁高さ 100mm の HPFRCC の曲げ載荷試験から得られた引張材料特性を用いて下面増厚供試体のファイバーモデル解析を行った解析値を示している。

増厚部に鉄筋補強していない供試体の SH30 および PE30 では実験値と解析値がよく一致しているが、PVA30 では若干異なる挙動を示した。PVA30 は材料の引張特性評価結果として供試体高さ 100mm および 150mm の結果の差が大きかったことから解析結果にも差が生じたと思われる、実験結果はその両者の中間的な挙動であった。しかし、実験値として示している曲率はモーメントスパン区間の平均曲率であり、3.2(1)節で示したようにコンクリートのひび割れ直下ではより大きな変形が生じている。一方、増厚部に鉄筋補強した供試体の PE50 では実験値と解析値がよく一致しているが、その他の供試体では鉄筋降伏後において異なる挙動を示した。解析結果では HPFRCC の軟化により引張荷重分担が無くなりモーメントが減少しているが、実験値ではその後も耐力が継続して差が生じている。これは、普通コンクリートと

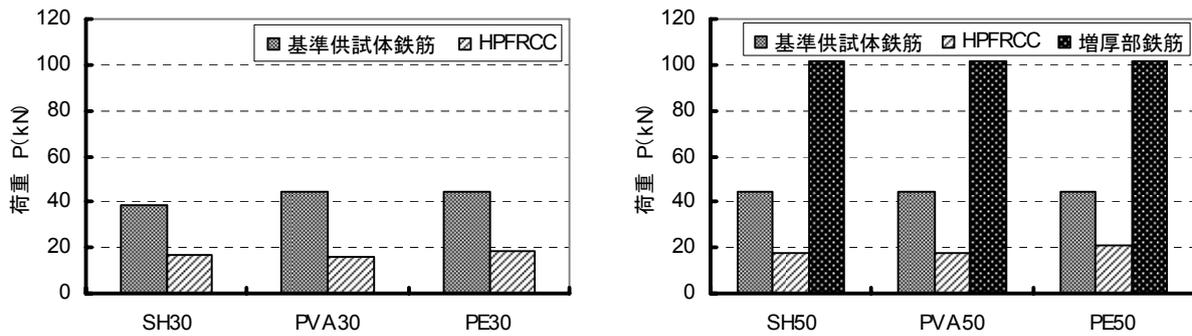


図-7 荷重分担

比較して HPFRCC は鉄筋との付着強度が高いことから、HPFRCC のひび割れが局所化した位置ではすでに鉄筋がひずみ硬化領域にまで達して健全な断面との力の釣り合いを保っていると考えられる。つまり増厚部に鉄筋補強した場合には HPFRCC が局所化した位置で鉄筋がひずみ硬化し、HPFRCC の荷重負担減少分を鉄筋が再配分していると考えられる。

#### (4) 曲げ補強効果

曲げモーメントを受ける下面増厚した供試体では引張荷重は基準供試体の引張鉄筋と HPFRCC で分担し、増厚部に補強鉄筋が配筋されている場合にはこれらに加え増厚部の補強鉄筋で分担されている。ファイバーモデル解析の出力値から引張鉄筋の鉄筋降伏直後における引張荷重分担量を計算した。結果を図-7 に示す。SH30 では基準供試体鉄筋の降伏荷重時において増厚した HPFRCC は軟化していることから、HPFRCC の補強効果が最大値となる鉄筋降伏前の状態の荷重配分を示している。

増厚部に鉄筋補強をしていない場合、HPFRCC の引張特性によりわずかな差はあるが、基準供試体の鉄筋を含めた全引張荷重の概ね26~30%程度の引張荷重の分担を増厚部の HPFRCC で行っている。増厚部に鉄筋補強をした場合、本供試体における補強鉄筋量では HPFRCC が配分している引張荷重の割合は10%程度となり、その60%が増厚部に配筋した補強鉄筋が配分していることが分かる。HPFRCC の分担する荷重の割合が小さく、その補強効果の大部分を増厚部に配筋した補強鉄筋が寄与している。

#### 4. まとめ

- (1) 異なる引張特性の HPFRCC についても増厚部に鉄筋補強した供試体は、無筋の供試体に対してひび割れ本数が増加し分散性が向上した。また増厚部のひび割れの分布は基準供試体に発生したひび割れ下部に集中して複数に分散し、HPFRCC に発生したひび割れ本数は材料単体の引張特性と相関する。
- (2) RC 構造と HPFRCC を組み合わせた場合、HPFRCC

に発生する引張ひずみは解析的に検討される平均的なひずみと比較して、RC 部分のひび割れ近傍で局所的に大きくなる。しかし、増厚部に鉄筋を配置することにより、HPFRCC に発生するひずみのばらつきを緩和できる。

- (3) 増厚部に鉄筋補強をしない場合、既設 RC 梁の最大モーメント時に補強効果を期待するには、既設 RC 部材の圧壊時まで HPFRCC がひずみ硬化特性を有する引張靱性を確保していることが必要であり、HPFRCC の引張靱性によっては曲げ補強効果が得られない。
- (4) 増厚部に鉄筋補強をした場合、増厚部と鉄筋の合効果によりひび割れ分散性が向上し、HPFRCC 軟化開始後においても増厚部の鉄筋ひずみがひずみ硬化領域に達して荷重の再配分が起り、引張荷重分担効果を持続させる。したがって終局ひずみが小さい HPFRCC であっても、既設 RC 部材の圧壊まで増厚部の引張荷重分担が可能であり増厚補強への適用が有効である。

謝辞；本実験に使用した SHOT 配合は(株)デーロス、PVA 配合は鹿島建設(株)よりプレミックス材料をご提供頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案)、コンクリートライブラリー127, 2007.3
- 2) 国枝 稔, 稲熊 弘, 増川淳二, 六郷恵哲：吹付け ECC を用いた表面保護工に関する基礎的検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第4巻, pp.265-270, 2004.10
- 3) 稲熊唯史, 内田裕市, 六郷恵哲：HPFRCC の曲げ挙動の寸法効果ならびに引張特性との関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.369-374, 2007
- 4) 岡村 甫, 前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技法堂出版, 1991