

論文 HPFRCC とコンクリートを複合させた供試体の引張・曲げ破壊挙動

水田 武利*1・稲熊 唯史*2・岩瀬 裕之*3・六郷 恵哲*4

要旨：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料(HPFRCC)と普通コンクリート(NC)を複合させた供試体の引張ならびに曲げ破壊挙動について検討した。ダンベル型供試体の肩を掴んで引っ張る方法により、掴み部を破壊することなく HPFRCC と NC の一軸引張試験を行うことができた。曲げ作用を受ける複合供試体は、NC を引張側に配置すると、NC に早期にひび割れが生じて耐荷力が小さくなり、HPFRCC 部分の変形量も小さくなった。引張ならびに曲げ作用下で、HPFRCC を NC の外側に配置した供試体は、内部の NC にひび割れが生じて、そのひび割れの先にある外側の HPFRCC のひび割れは複数で微細なものとなった。

キーワード：HPFRCC, 複合供試体, 一軸引張試験, 曲げ試験, ひび割れ

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(High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, 以下 HPFRCC と略)^{1), 2)}は、引張作用下および曲げ作用下において複数ひび割れ特性と擬似ひずみ硬化特性を示す靱性に富む材料である。HPFRCC を新設の構造部材に適用する場合、脆性的な破壊性状を示す通常のコンクリート(以下 NC と略)と複合された部材として利用される場合もある。また表面のひび割れの幅を抑えることを目的として、ひび割れを有する既設のコンクリート構造物の表面補修に、HPFRCC は用いられることもある。

本研究においては、HPFRCC と NC とを複合させた供試体の引張ならびに曲げ破壊挙動について、荷重、変形、ひび割れに着目して、実験的に明らかにすることを目的としている。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 に HPFRCC と NC の配合を示す。セメントには早強ポルトランドセメントを用いた。

HPFRCC の細骨材には 7 号珪砂を使用し、繊維には、ポリエチレン繊維(φ 0.012×12mm)を体積で 1.5%使用した。NC には、最大寸法 15mm の碎石粗骨材を用いた。

表-1 配合

配合種別	単位セメント量 C(kg/m ³)	水セメント比 W/C(%)	繊維添加量 (vol%)
HPFRCC	1264	30	1.5
NC	331	55	-

2.2 一軸引張試験

(1) 引張供試体

引張供試体の形状と種類を図-1(a)および表-2 に示す。供試体は、長さ 400mm, 高さ 100mm, 端部の幅 100mm, くびれ部の幅 60mm のダンベル型とした。複合した HNH 複合供試体では、くびれ部の下部 25mm と上部 25mm を HPFRCC とし中央部 50mm を NC とし、2 時間以内に順次打ち重ねた。NHN 複合供試体では、NC を外側に配置し HPFRCC を中央に配置した。供試体数は、型枠の関係から、1 条件に 2 個ずつとした。

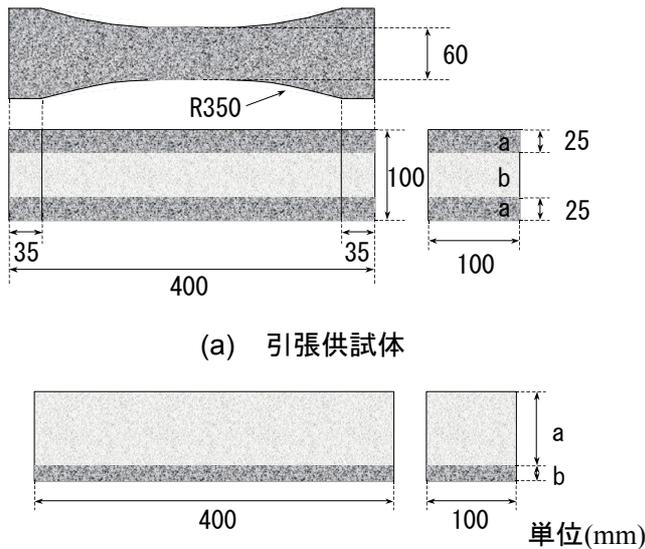
(2) 引張試験方法

*1 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (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 岐阜工業高等専門学校 環境都市工学科教授 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)



(a) 引張供試体

(b) 曲げ供試体

図-1 供試体概要



図-2 一軸引張試験

表-2 引張供試体の種類

シリーズ	配置	材料	シリーズ	配置	材料
HNH	a	HPFRCC	HPFRCC	a	HPFRCC
	b	NC		b	
NHN	a	NC	NC	a	NC
	b	HPFRCC		b	

表-3 曲げ供試体の種類

シリーズ	配置	材料	断面厚さ(mm)				
			100	90	80	70	60
HC#	a	HPFRCC	100	90	80	70	60
	b	NC	0	10	20	30	40
CH#	a	NC	100	90	80	70	60
	b	HPFRCC	0	10	20	30	40

: 引張側bの材料の断面厚さ

一軸引張試験装置を図-2に示す。鋼製フレーム内で、供試体の両端の膨らんだ部分を鋼製の掴み具で掴んだ。左右の掴み具を、拡がらないようボルトで固定した。NC 単独供試体, NHN, HNH 複合供試体では、掴み具と供試体との間に固練りの石膏(10分程度で硬化開始)を薄く挟み、局所的な応力集中を緩和した。

荷重はセンターホール型油圧ジャッキを用いて行った。荷重はロードセルにて検出し、変位は供試体くびれ直線部に取り付けた高感度変位計により検出した。変位計測区間は100mmとした。供試体の端部の固定条件は、下端を固定支持とし、上端を回転支持とした。試験材齢は18~25日とした。

2.3 曲げ試験

(1) 曲げ供試体

本研究にて作製した曲げ試験供試体の形状と種類を図-1(b)および表-3に示す。供試体寸法は、長さ400mm、高さ100mmおよび幅100mmとした。供試体の引張側から0, 10, 20, 30, 40mmの部分にNCを残りの部分にHPFRCCを打ち重ねたHC#複合供試体と、HPFRCCとNCを入れ替えたCH#複合供試体を作製した(#は引張側の材料の厚さ)。上記の中で0mmの場合は、単独供試体である。供試体高さ60~90mmのHPFRCC, NC単独供試体を追加して作製した。供試体数は、原則として1条件に2個ずつとした。

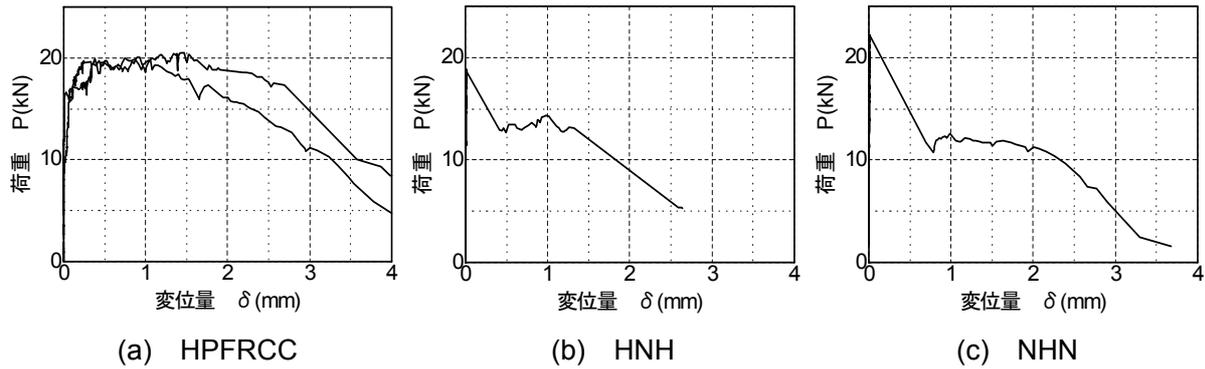


図-3 一軸引張試験結果

表-4 最大引張荷重

シリーズ	最大荷重(kN)		平均(kN)
HNH	23.0	18.9	20.9
NHN	22.2	20.1	21.1
HPFRCC	19.8	20.5	20.2
NC	26.5	19.8	23.1

(2) 曲げ試験方法

曲げ試験は 3 等分点曲げ荷重により、一軸引張試験と同様に材齢 18~25 日で行った。荷重はロードセルにて検出し、変位は支点及び載荷点に設置した高感度変位計によって検出した。

2.4 ひび割れ観察

ひび割れの観察には、目視によるほか、マイクロスコープ(VH-5000, Keyence 社製, 倍率 50 倍)を用い、画像をパソコンへ取り込んだ。

3. 実験結果

3.1 一軸引張試験

(1) 最終破壊位置と最大荷重

最終的な破壊の局所化(NC の場合は破断, HPFRCC の場合はひび割れの拡大)は、供試体の中央部のくびれた位置(幅 60mm)に生じた。すなわち、両端が広がった形状のダンベル型引張供試体の肩を掴んで引っ張る方法により、掴み部を破壊することなく、HPFRCC と NC の一軸引張試験を行うことができた。

一軸引張試験から得られた最大荷重を表-4 に示す。HPFRCC と NC を複合させた供試体の最大荷重は、HPFRCC あるいは NC 単独供試体の最大荷重の中間値となった。すなわち、複合供試体の引張耐荷力は、HPFRCC と NC の耐荷力が重ね合わさったものとなった。

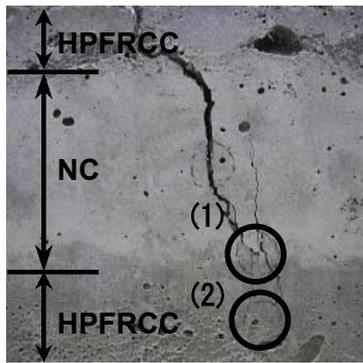
(2) 荷重-変位関係

一軸引張試験より得られた荷重-変位曲線を図-3 に示す。HPFRCC 単独供試体は初期ひび割れ発生後、荷重が増加し、明確な擬似ひずみ硬

化挙動を示した。一方、HPFRCC と NC の断面の割合を 1/2 ずつとした複合供試体の一軸引張試験を行うと、最大荷重点で NC にひび割れが発生し、その後荷重が急激に減少し、脆性的な破壊を生じた。これは、ひび割れ発生後に HPFRCC のひずみ硬化に伴う荷重増加分だけでは、NC の負担していた引張力を肩代わりできないためと考えられる。

NC と HPFRCC とが組み合されて引張作用を受ける部材として用いられる場合は、一般に鉄筋等の鋼材も配置されることが考えられるが、RC 部材の最小鉄筋比の考え方と同じように、NC にひび割れが生じた後の引張力が安定して負担されるように鋼材の配置を考える必要がある。

各条件 2 個の複合供試体のうち 1 個は最大荷重後の変位を制御できず急激な破断を生じたが、1 個は途中から変位を計測することができた。最大荷重点後に繊維の架橋効果により HPFRCC で受け持たれる複合供試体の荷重の最大値は、HPFRCC のみの場合に予想される荷重(高さ 100mm の供試体の荷重の 1/2)の 1.2 倍程度となった。これは、NC に大きなひび割れが生じた位置に HPFRCC の終局破壊域が限定されるとともに、NC にひび割れが生じていない領域では HPFRCC だけでなく NC にも引張力が受け持たれているためと考えられる。



(a) 供試体の写真

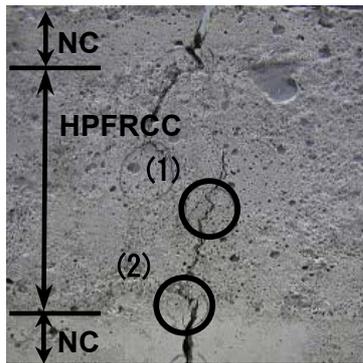


(b) (1)部分の写真



(c) (2)部分の写真

図-4 ひび割れ写真(HNH)



(a) 供試体の写真



(b) (1)部分の写真



(c) (2)部分の写真

図-5 ひび割れ写真(NHN)

計測できた複合供試体の最大荷重点後の変形量には、HPFRCC 単独供試体のものに比べ明確な差は見られないが、供試体数が少ないことから、このことについてはさらに検討が必要であると考える。

(3) ひび割れ

NC にひび割れが生じた後の変形を制御できた HNH 複合供試体では、中央の NC がひび割れた後も外側の HPFRCC のひび割れは複数の微細なひび割れであった。NHN 複合供試体の中央部の HPFRCC も同様に複数の微細なひび割れであった。

一軸引張試験後に観察した供試体側面上のひび割れの写真を図-4 および図-5 に示す。NC 部においては局所的な幅の大きなひび割れが発生しているのに対し、HPFRCC 部では NC 部から続くひび割れが複数の微細なものに分かれていた。HPFRCC のひび割れ域は、NC のひび割れによって限定されていた。

3.2 曲げ試験

(1) 複合割合と最大荷重

引張側からの NC あるいは HPFRCC の厚さと最大荷重との関係を図-6 に示す。NC ならびに HPFRCC 単独供試体の最大荷重を結んだ線を破線で図-6 中に示す。図-6(a)には、引張側の NC を無視した場合の予想荷重(HPFRCC 部の高さの 2 乗に比例)を実線で示す。

引張側に NC を配置した複合供試体の最大荷重は、破線の値より大幅に小さく、NC を無視した場合の実線の値に近くなった。これは、NC に早い段階で大きなひび割れが生じたためと考えられる。

一方、引張側に HPFRCC を配置した複合供試体の最大荷重は、破線の値と同程度となった。これは、HPFRCC の変形性能が大きいいため、HPFRCC と NC が協力して曲げ作用に抵抗したためと考えられる。

(2) 荷重-変位曲線

曲げ試験より得られた荷重-変位曲線を図-

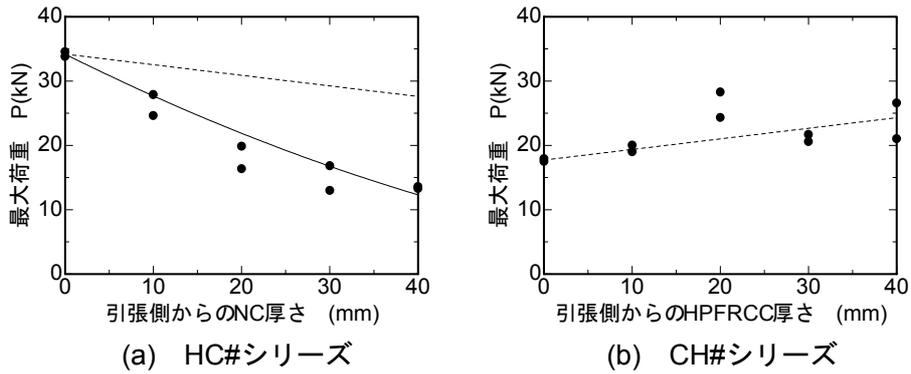


図-6 最大荷重と積層厚さの関係

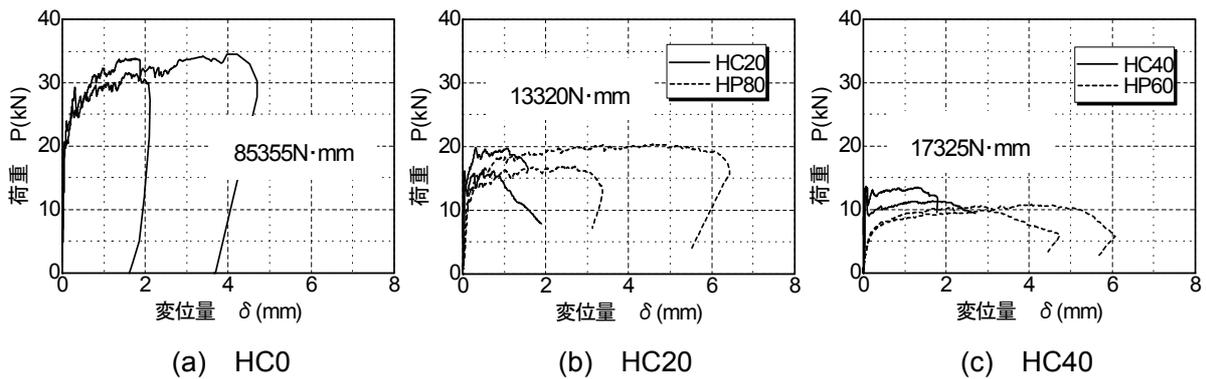


図-7 曲げ試験結果(HC#シリーズ)

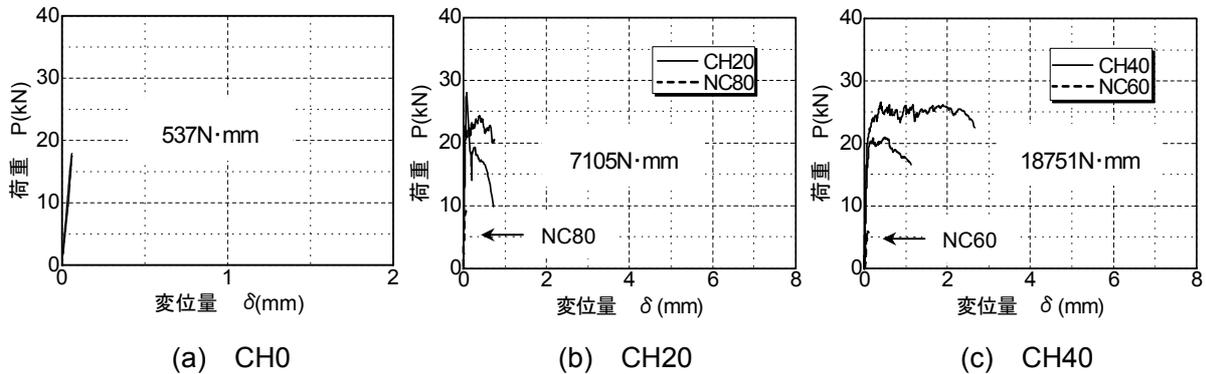


図-8 曲げ試験結果(CH#シリーズ)

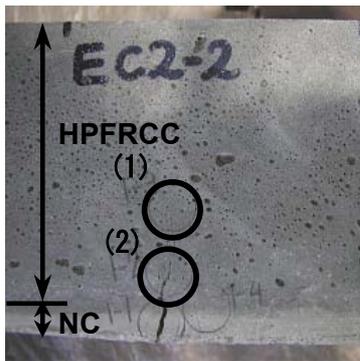
7 および図-8 に示す。NC を引張側に配置した供試体の変形量(例えば、繊維の効果が発揮された後の最大の荷重点に対応する変位に着目)は、HPFRCC の厚さが同じ単独供試体(HP80)の変位量と比べ $1/2\sim 1/3$ 程度に小さくなった。すなわち、靱性に富む HPFRCC の外側に脆性的な NC を複合させることにより、HPFRCC の変形性能が抑制された。このことに関して、HPFRCC を通常のコンクリートやアスファルトコンクリートを複合させて使う場合には配慮が必要である。

一方、HPFRCC を引張側に配置した供試体では、NC 部分にひび割れが発生した後に、HPFRCC

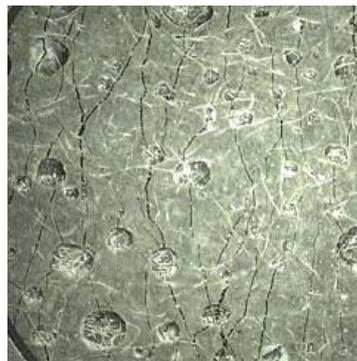
により荷重が受け持たれ、変形が生じた。HPFRCC の厚みが増すほど、変形量が大きくなった。HPFRCC を引張側に 40mm 複合させた供試体の荷重-変位曲線は、HPFRCC 単独供試体のものに近いものとなった。曲げ作用を受ける脆性的な NC の引張側に HPFRCC を配置することにより、複合供試体の耐荷力と変形量が向上した。

(3) ひび割れ

曲げ試験後のひび割れの様子を図-9 および図-10 に、複合供試体の荷重-変位曲線下の面積(繊維の効果が発揮された後の最大の荷重点ま



(a) 供試体の写真

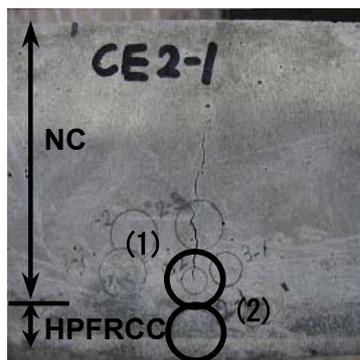


(b) (1)部分の写真



(c) (2)部分の写真

図-9 ひび割れ写真(HC20)



(a) 供試体の写真



(b) (1)部分の写真



(c) (2)部分の写真

図-10 ひび割れ写真(CH20)

で)の平均値を図-7, 図-8中に示す。NCに生じたひび割れが、HPFRCCへ伝播し、複数の微細なひび割れとなっていることが、図-10から分かる。荷重-変位曲線下の面積が大きいほど、供試体側面上のひび割れ域が広く、ひび割れ本数が多い傾向が観察された。今後はひび割れの領域と本数に着目した検討が必要と考えられる。

4. まとめ

本研究にて得られた結果を以下に示す。

- 1) 両端が広がった形状のダンベル型引張供試体の肩を掴んで引っ張る方法により、掴み部を破壊することなく、HPFRCCとNCの一軸引張試験を行うことができた。
- 2) HPFRCCとNCの断面の割合を1/2ずつとした複合供試体の一軸引張試験を行うと、最大荷重点でNCにひび割れが発生し、その後荷重が急激に減少し、脆性的な破壊が生じた。

- 3) 曲げ作用を受ける複合供試体の場合、HPFRCCを引張側、NCを内側に配置すると供試体の荷重と変形量が増加したが、逆にNCを引張側に配置すると、NCに早期にひび割れが生じて耐荷力が小さくなるだけでなく、HPFRCCの変形量も小さく抑制された。
- 4) HPFRCCをNCの外側に配置した供試体が引張らびに曲げ作用を受ける場合、内部のNCに新たにひび割れが生じても、そのひび割れの先にある外側のHPFRCCのひび割れは複数で微細なものとなった。

参考文献

- 1) 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，2002.1
- 2) 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強モルタルの評価と利用，コンクリート技術シリーズ64，2005.7