

論文 HPFRCC の積層による RC 部材の曲げひび割れ抑制

飯塚 貴洋*1・阪口 裕紀*2・林 承燦*3・六郷 恵哲*4

要旨: 膨張材を添加した HPFRCC を含む, 引張性能の異なる 4 種類の HPFRCC を RC 部材下面に打ち重ねることにより, 耐荷力の向上と複数微細ひび割れの形成を目的とし, RC 部材の曲げ載荷試験を行った。また打ち重ね厚さが 20mm (かぶり位置まで) と 40mm (鉄筋を覆う程度) の 2 水準を比較し, 鉄筋と HPFRCC の合成効果について検討した。その結果, RC 部材の下面に HPFRCC を打ち重ねることにより降伏荷重が大きくなり, ひび割れは分散して小さくなった。またこの傾向は HPFRCC を 20mm (かぶり位置まで) 打ち重ねた供試体より 40mm (鉄筋を覆う程度) 打ち重ねた供試体の方が顕著であった。

キーワード: HPFRCC, 積層供試体, ひび割れ, 曲げ載荷試験, 一軸引張試験

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, 引張力下においてひずみ硬化し複数微細ひび割れを形成する材料であり, 引張変形の増加に伴い, ひび割れ幅が増加するのではなくひび割れ本数が増加する点に特徴がある。HPFRCCは, 新設構造部材や既設コンクリート構造物の表面補修への適用および検討が進められている¹⁾。

既設のRC部材に下面増厚補強を想定したHPFRCCでは, 増厚部に鉄筋補強をした場合, 増厚部と鉄筋の合成効果によりひび割れ分散性が向上し, 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ると既往の研究により報告されている²⁾。よってHPFRCCを引張縁に積層して使用する場合においても, 鉄筋のかぶりまでHPFRCCを使用するよりも鉄筋を覆う程度まで使用した方が鉄筋との相乗効果によりひび割れ分散性が向上すると考えられる。またHPFRCCを積層する場合, 型枠や基準コンクリートに挟まれて収縮が拘束され, ひび割れの原因となることが考えられる。収縮に起因するひび割

れの対策としては, 膨張材を添加して膨張ひずみを導入することが有効であると考えられる。

これらを踏まえ, 本研究では膨張材を添加した HPFRCC を含む, 引張性能の異なる 4 種類の HPFRCC を RC 部材下面に打ち重ねることにより, 耐荷力の向上と複数微細ひび割れの形成を目的とし, RC 部材の曲げ載荷試験を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究では, RC 部材の基準となる普通コンクリートと RC 部材の引張縁に HPFRCC 4 種類を使用した。各供試体の配合を表-1 に示す。RC 部材の基準となる普通コンクリートは水セメント比 48.5%, 細骨材率 41.5%, 粗骨材の最大寸法 25mm とした。HPFRCC は高強度ポリエチレン繊維 (φ0.012×12mm, 引張強度 2600MPa, 弾性係数 88GPa, 以下 PE) を用いた岐大配合を 2 種類とポリビニルアルコール繊維 (φ0.040×12mm, 引張強度 1600MPa, 弾性係数 40GPa, 以下 PVA) を用いたプレミ

表-1 配合

配合	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	水 W (kg/m ³)	セメント C (kg/m ³)	細骨材 S(kg/m ³)	粗骨材 G(kg/m ³)	混和剤① AD1 (kg/m ³)	混和剤② AD2 (kg/m ³)
普通コンクリート	48.5	41.5	163	336	738	1030	3.36	0.056

配合	水 W (kg/m ³)	セメント C (kg/m ³)	膨張材 E (kg/m ³)	細骨材 s (kg/m ³)	増粘剤 M (kg/m ³)	混和剤 ADM (kg/m ³)	繊維混入率 (vol/%)	繊維	
岐大	0%	342	1264	-	395	0.9	37.9	1.5	PE
	8%	342	1163	101	392	0.9	37.9	1.5	PE

配合	水 W (kg/m ³)	水粉体比 W/B (%)	繊維混入率 (vol/%)	繊維	
プレミックス	1	351	29	1.8	PVA
	2	351	32	1.8	PVA

AD1:AE 減水剤 標準形, AD2:AE 剤 I 種
S:揖斐川産砂, s:珪砂 7 号, E:エトリンガイト・石灰複合系
M:メチルセルロース系増粘剤, ADM:高性能 AE 減水剤

*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 丸栄コンクリート工業 (株) 技術開発部 (非会員)

*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)

ックス配合を2種類の計4種類とした。岐大配合は従来の配合（以下岐大-0%）と膨張材をセメント量の内割りで8%添加した配合（以下岐大-8%）とした。膨張材による膨張が収縮補償だけでなく、鉄筋により拘束され若干のプレストレスが HPCRCC に導入されることを期待して、この混入率を選定した。ミキサーは 100L 用のパン型ミキサーを使用した。練り混ぜは、粉体と繊維を混ぜた後に液体を投入し、再度混ぜ合わせた。

表-2 諸物

HPFRCC	テーブルフロー (mm)	空気量 (%)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
岐大-0%	150×165	10.4	65.2	22.3
岐大-8%	160×165	10.5	69.6	23.2
プレミックス1	168×163	13.6	62.4	20.2
プレミックス2	215×220	14.5	45.0	14.3

岐大配合およびプレミックス配合の諸物性を表-2 に示す。プレミックス1に比べプレミックス2の方が圧縮強度も弾性係数も小さいが、その理由として、プレミックス2の方が水結合材比も空気量も大きいことが挙げられる。

2.2 材料特性

(1) 供試体

RC 部材下面に打ち重ねる4種類の HPCRCC の材料特性を把握するため一軸引張試験を行った。一軸引張試験には、引張力の伝達部（掴み部）で破壊が生じにくいダンベル型供試体を用いた。供試体の寸法を図-1 に示す。ダンベル型供試体の外寸は、厚さ15mm、幅60mm、長さ330mmであり、中央部の検査長区間は80mm、断面寸法は15×30mmである。

表-3 供試体名

供試体名	配合	HPFRCC 積層厚さ
NC	普通コンクリート	0mm
岐大-8%-10mm	岐大-8%	10mm
岐大-0%-20mm	岐大-0%	20mm
岐大-8%-20mm	岐大-8%	20mm
岐大-0%-40mm	岐大-0%	40mm
岐大-8%-40mm	岐大-8%	40mm
プレミックス1-20mm	プレミックス1	20mm
プレミックス2-20mm	プレミックス2	20mm
プレミックス1-40mm	プレミックス1	40mm
プレミックス2-40mm	プレミックス2	40mm

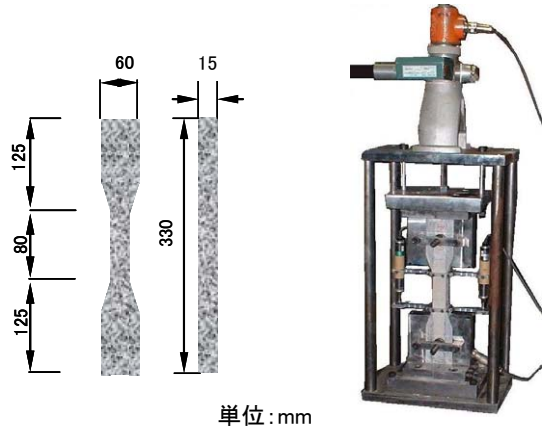


図-1 ダンベル供試体の寸法 写真-1 一軸引張試験装置

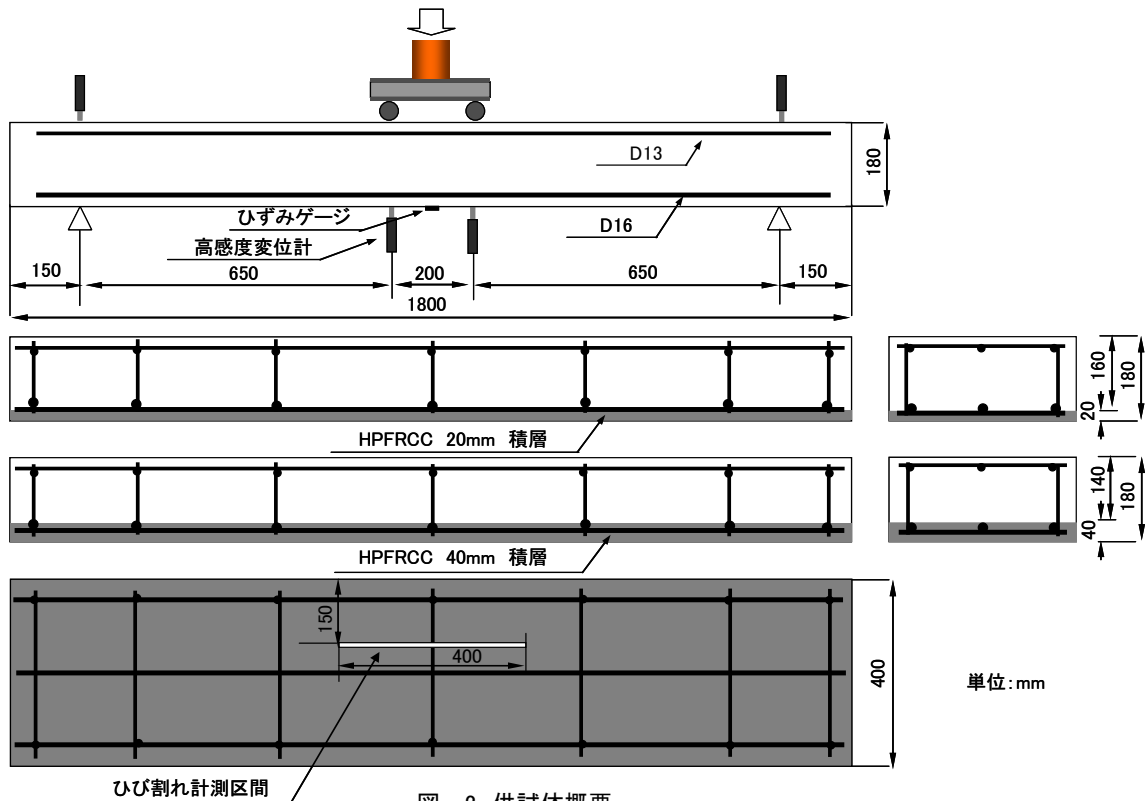


図-2 供試体概要

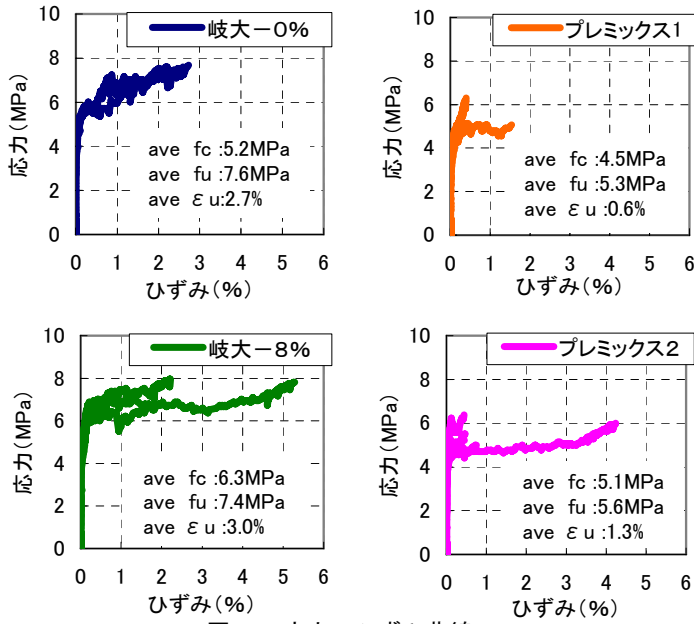


図-3 応力-ひずみ曲線



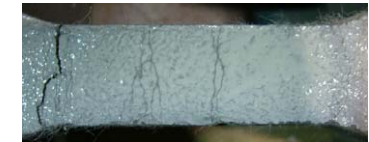
<岐大-0%>



<岐大-8%>



<プレミックス1>



<プレミックス2>

写真-2 ひび割れ画像

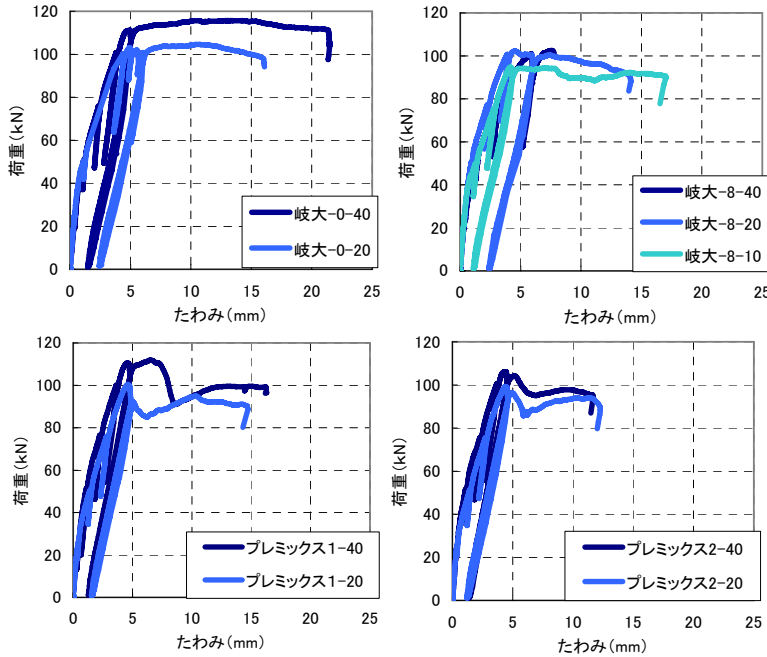
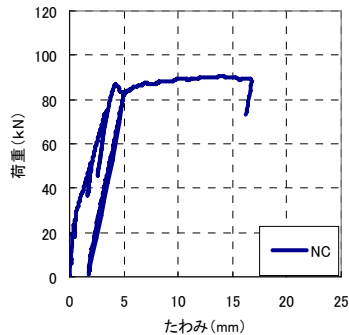


図-4 荷重-たわみ曲線

表-4 ひび割れ荷重と降伏荷重

供試体名	ひび割れ荷重 (N/mm ²)	降伏荷重 (N/mm ²)
NC	15	86
岐大-0%-20mm	30	101
岐大-0%-40mm	22	109
岐大-8%-10mm	32	94
岐大-8%-20mm	30	101
岐大-8%-40mm	27	102
プレミックス1-20mm	22	100
プレミックス1-40mm	17	109
プレミックス2-20mm	28	99
プレミックス2-40mm	24	105



を掴んで引張力を伝達させた³⁾。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。荷重は可搬型の手回し式加力装置の上に設置したロードセル、変位は試験体両側に取り付けた高感度変位計（ストローク：25mm）で計測した。得られた荷重変位関係を応力ひずみ曲線に変換した。最初に応力が低下するか、応力ひずみ曲線の傾きが急変する点の応力から、ひび割れ強度を求めた。応力ひずみ曲線のピークから引張強度を求め、引張強度に対応するひずみを終局ひずみとした。

2.3 曲げ載荷試験

(1) 荷重-たわみ曲線

曲げ載荷試験に用いた積層供試体の概要を表-3 および図-2 に示す。供試体の寸法は高さ 180mm、幅 400mm、

(2) 一軸引張試験

一軸引張試験に使用する載荷装置を写真-1 に示す。鋼製フレーム（質量：約 30kg、外寸：250×200×500mm）の中で、上下の掴み具によりダンベル供試体の肩の部分

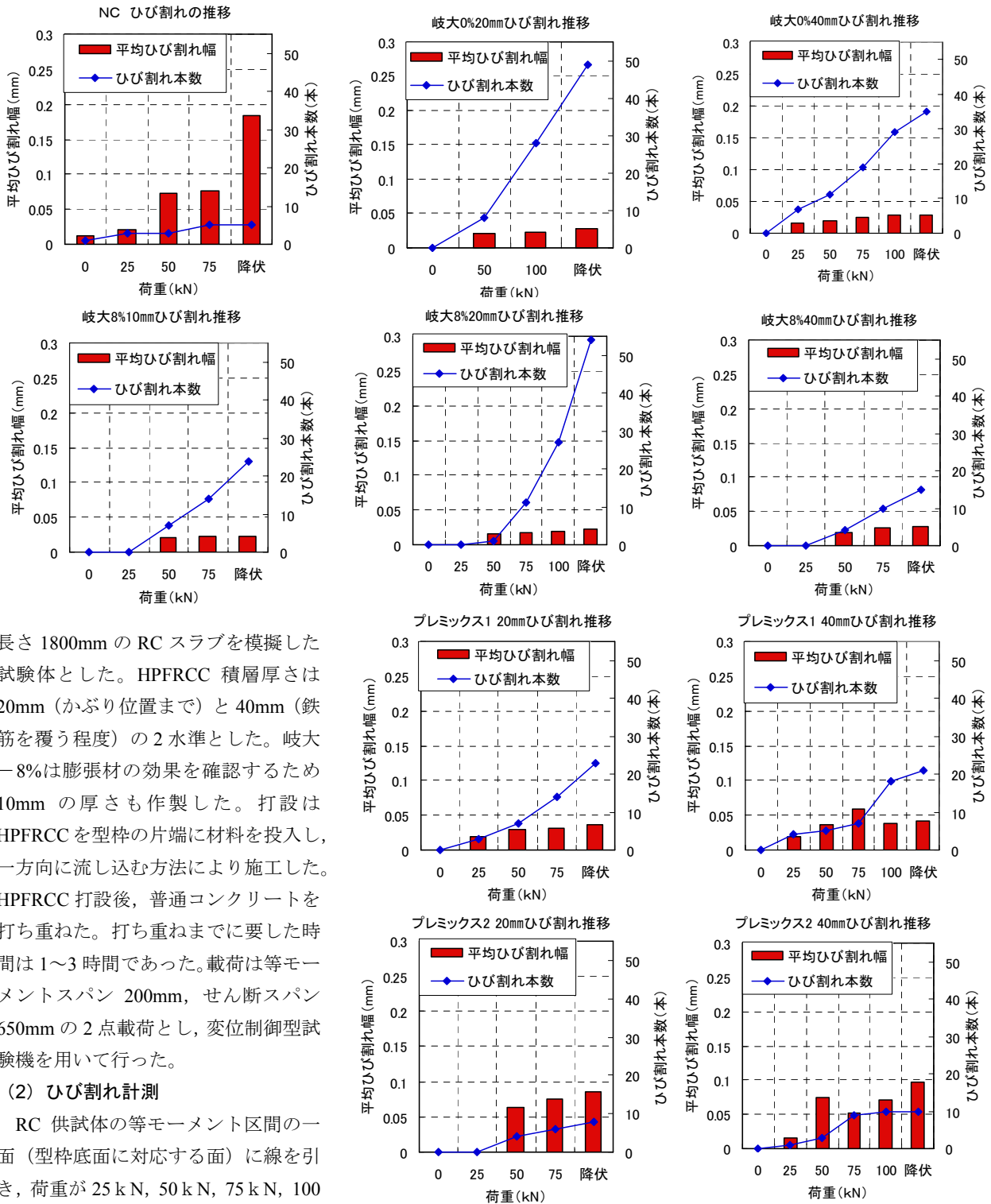


図-5 ひび割れ幅の推移

長さ 1800mm の RC スラブを模擬した試験体とした。HPFRCC 積層厚さは 20mm (かぶり位置まで) と 40mm (鉄筋を覆う程度) の 2 水準とした。岐大-8%は膨張材の効果を確認するため 10mm の厚さも作製した。打設は HPFRCC を型枠の片端に材料を投入し、一方向に流し込む方法により施工した。HPFRCC 打設後、普通コンクリートを打ち重ねた。打ち重ねまでに要した時間は 1~3 時間であった。載荷は等モーメントスパン 200mm, せん断スパン 650mm の 2 点載荷とし、変位制御型試験機を用いて行った。

(2) ひび割れ計測

RC 供試体の等モーメント区間の一面 (型枠底面に対応する面) に線を引き、荷重が 25 kN, 50 kN, 75 kN, 100 kN および降伏時の段階で載荷を止め (変位は止めているが荷重は時間ととも

に低下), その線に沿ってマイクロスコップ (倍率 50 倍) を移動させ、ひび割れを画像としてパソコンに取り込み、ひび割れ幅とひび割れ本数を計測した。型枠底面に接する供試体面に引いた線 (図-2 のひび割れ計測区間) の片側に目盛 1mm の紙製の物差し (縮小コピーにより作成) を置き (両面テープで供試体に張付け), ひび割れ位置を計測し、ひび割れの分布を求めた。

3. 実験結果

3.1 材料特性

一軸引張試験から得られた応力-ひずみ曲線を図-3 に示す。試験後にデジタルカメラにて撮影したひび割れ画像を写真-2 に示す。ここでは、図-3 ならびに写真-2 の実験結果のもと以下に考察する。

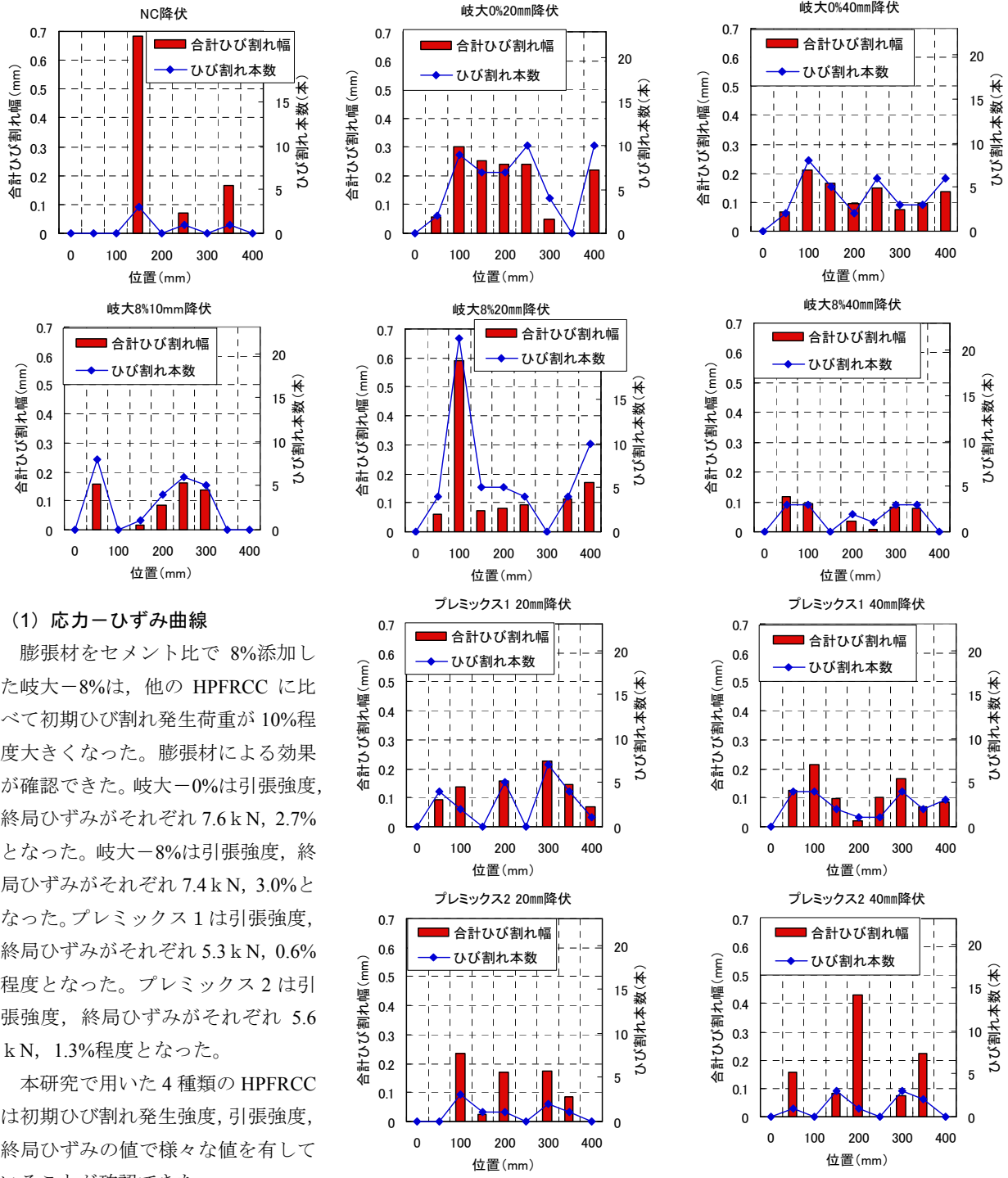


図-6 降伏時のひび割れ分布

(1) 応力-ひずみ曲線

膨張材をセメント比で 8%添加した岐大-8%は、他の HPRCC に比べて初期ひび割れ発生荷重が 10%程度大きくなった。膨張材による効果が確認できた。岐大-0%は引張強度、終局ひずみがそれぞれ 7.6 kN, 2.7%となった。岐大-8%は引張強度、終局ひずみがそれぞれ 7.4 kN, 3.0%となった。プレミックス 1 は引張強度、終局ひずみがそれぞれ 5.3 kN, 0.6%程度となった。プレミックス 2 は引張強度、終局ひずみがそれぞれ 5.6 kN, 1.3%程度となった。

本研究で用いた 4 種類の HPRCC は初期ひび割れ発生強度、引張強度、終局ひずみの値で様々な値を有していることが確認できた。

(2) ひび割れ性状

PE 繊維を用いた岐大配合の HPRCC は、ひび割れ本数が多く複数の微細なひび割れが確認できた。従来配合の岐大-0%は、全体に均一にひび割れが分散した。一方膨張材を添加した岐大-8%は、ひび割れが不均一に発生し、複数ひび割れが発生している箇所とひび割れが発生しない箇所が混在した。PVA 繊維を用いたプレミックス配合の HPRCC は岐大配合に比べてひび割れ本数が少なかった。プレミックス 1 とプレミックス 2 でひび割れ性状の大きな差異はなかった。

3.2 曲げ載荷試験結果

曲げ載荷試験から得られた荷重-たわみ曲線を図-4、ひび割れ荷重と降伏荷重の値を表-4 に示す。25 kN, 50 kN, 75 kN, 100 kN および降伏時の荷重における平均ひび割れ幅、ひび割れ本数の推移を図-5 に示す。降伏時における合計ひび割れ幅の分布とひび割れ本数を図-6 に示す。ここでは、図-4 ならびに図-5、図-6 の実験結果のもと以下に考察する。

(1) 荷重-たわみ曲線

下面に HPRCC を打ち重ねることにより通常のコン

クリート供試体 NC に比べて初期ひび割れ発生荷重が大きくなった。特に膨張材を添加した岐大-8%は、NC の 2 倍程度の値を示し、膨張材の効果が大きであった。また下面に HPFRCC を打ち重ねることにより NC に比べて降伏荷重が大きくなった。岐大-8%を除き、HPFRCC を 40mm 打ち重ねた供試体では 20mm 打ち重ねた供試体に比べ、HPFRCC の引張抵抗の寄与により、降伏荷重が 5%~10% 程度大きくなった。岐大-8%-40mm は HPFRCC と母材 NC との付着が弱かったため降伏点を過ぎたあたりでせん断破壊し降伏荷重の増加を得られなかったと考えられる。一方、HPFRCC を 40mm 打ち重ねた供試体の方が 20mm 打ち重ねた供試体よりひび割れ荷重が小さくなった。その理由としては、HPFRCC が薄い方が繊維の配向が 2 次元に配向しやすく補強効果が大きいためと考えられる。PVA 繊維を使用したプレミックスは降伏点を過ぎたあたりで荷重が低下した。この荷重の低下は繊維の引張応力分担分が失われたためと考えられる。PE 繊維を使用した岐大配合は降伏点を過ぎても荷重が安定して推移した。

(2) ひび割れ性状の推移

NC は荷重の増加に伴い、ひび割れ幅が大きくなりひび割れ本数が増えなかった。また降伏時の平均ひび割れ幅は 0.2mm 近く、非常に大きくなった。岐大配合では荷重が大きくなっても、ひび割れ本数は増えるがひび割れ幅は大きくならなかった。降伏時でも平均ひび割れ幅は 0.05mm 以下であった。岐大-8%-40mm は他の岐大配合の供試体に比べてひび割れ本数が増加しなかった。この理由としては、打ち重ねた HPFRCC と母材の NC との付着が弱く、母材のひび割れが HPFRCC に伝達していないと考えられる。

プレミックス 1 は荷重が大きくなっても、ひび割れ本数は増えるがひび割れ幅は大きくならなかった。降伏時のひび割れ本数は岐大配合の半分程度となった。平均ひび割れ幅は 0.05mm 以下であった。プレミックス 2 は降伏時でも平均ひび割れ幅が 0.1mm 以下であったが、荷重の増加に伴いひび割れ本数、ひび割れ幅ともに大きくなる傾向を示した。プレミックスのひび割れ本数は岐大配合の半分程度となった。この点については一軸引張試験の結果と似た結果となった。

(3) 降伏時のひび割れ性状

NC は 150mm の付近で大きなひび割れが生じている。ひび割れが分散せず 1 箇所で大くなり降伏に至った。岐大-0%は微細なひび割れがひび割れ計測区間全体に分散する分布となった。岐大-8%はひび割れが多く発生する箇所とひび割れが少ない箇所が混在した。これは一軸引張試験から得られた結果と似た結果となった。プレミ

ックス 1 は微細なひび割れがひび割れ計測区間全体に分散する分布となった。プレミックス 2 は他の HPFRCC に比べて降伏時におけるひび割れ幅が大きく、プレミックス 2-40mm は 200mm の付近に大きなひび割れが確認された。

いずれの供試体も 20mm 打ち重ねた供試体より 40mm 打ち重ねた供試体の方が計測区間全体にひび割れが分散する傾向が顕著であった。

4. まとめ

- (1) NC の下面に HPFRCC を打ち重ねることにより NC のみの供試体に比べて降伏荷重が大きくなり、ひび割れは分散して小さくなった。またこの傾向は HPFRCC を 20mm (かぶり位置まで) 打ち重ねた供試体より 40mm (鉄筋を覆う程度) 打ち重ねた供試体の方が顕著であった。
- (2) 一軸引張試験において岐大-0%は、全体に均一にひび割れが分散した。一方膨張材を添加した岐大-8%は、ひび割れが不均一に発生し、複数ひび割れが発生している箇所とひび割れが発生しない箇所が混在した。この傾向は RC スラブの曲げ載荷試験においても確認することができた。
- (3) HPFRCC に膨張材 8%混入することでひび割れ荷重が高くなった。しかし、コンクリートと打ち重ねる場合、HPFRCC の厚さに応じて混入量を調節する必要がある。10mm 程度の薄く打ち重ねる場合には、膨張材を 8%混入しても HPFRCC とコンクリートの界面の付着は良好であった。
- (4) 一軸引張試験において岐大配合は複数の微細なひび割れが確認されたのに対して、プレミックス配合は岐大配合に比べてひび割れ本数が少なかった。この傾向は RC スラブの曲げ載荷試験においても確認することができた。

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) 水田武利，稲熊唯史，林承燦，六郷恵哲：HPFRCC により下面増厚した RC 部材の曲げ性状に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.291-296，2008
- 3) 森山守，林承燦，内田裕市，六郷恵哲：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料の引張性能と試験装置，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.311-316，2006