

論文 膨張型 HPFRCC を用いたせん断スパン比の異なる RC はりのひび割れ性状と破壊性状

高橋 祐二^{*1}・高田 浩夫^{*2}・浅野 幸男^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨: 収縮補償をした膨張型 HPFRCC を用いて、せん断補強鉄筋を配置しない RC はりを作製し、せん断スパン比を 1.5~2.5 と変化させて載荷試験を行った。比較とした普通コンクリートを用いたはりは、せん断圧縮破壊を示し、膨張型 HPFRCC を用いたはりは、曲げ引張破壊を示した。等曲げ区間のひび割れは、曲げモーメントに比例して発生し、一定の幅で推移するのに対して、せん断区間のひび割れは、鉄筋降伏間近で発生本数が増え、幅が大きくなる傾向を示した。等曲げ区間、せん断区間ともに発生したひび割れ幅の平均値は 0.02mm 以下であった。

キーワード: HPFRCC, ひずみ硬化, せん断スパン比, 曲げ引張破壊, せん断圧縮破壊

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 (HPFRCC) は、一軸引張応力下において擬似ひずみ硬化特性を示す高靱性材料である¹⁾。安定して引張応力を分担することができるため、鉄筋コンクリート (RC) 棒部材のせん断耐力の算定において補強繊維による分担を見込むことができる。HPFRCC はセメント量が多く収縮量の大きな材料であるので、鉄筋と組み合わせる場合には、膨張材を添加するなどの収縮低減対策とられる場合が多い。RC はりのせん断破壊形式や破壊強度は、せん断スパン比 a/d によって大きく影響され²⁾、 a/d の小さいはりは、スレンダーなはりとは異なる破壊性状を示すことが知られている³⁾。このためコンクリート標準示方書においては、せん断スパン比 a/d が小さい場合に対してせん断圧縮破壊耐力式を定め、せん断スパン比 a/d が 2.5 程度で通常の RC 棒部材のせん断耐力式に漸近するよう定めている⁴⁾。

HPFRCC を用いた RC はりに関する研究では、曲げひび割れ性状を対象としたものが多く、せん断ひび割れ性状について、特にひび割れの幅や本数の推移について検討したものは少ない。本研究においては、収縮による軸引張力の影響を除くため、膨張材により収縮補償をした膨張型 HPFRCC⁵⁾を用いて、せん断補強鉄筋を配置しない RC はりを作製し、せん断スパン比 a/d を 2.5, 2.25, 2.0, 1.75, 1.5 と段階的に変化させて 4 点曲げ載荷試験を行い、曲げモーメントとせん断力が作用する状態でひび割れ性状と破壊性状を確認した。比較として、収縮補償をした普通コンクリートを用いた同じ断面のはりについて破壊性状を確認した。

2. 実験概要

2.1 膨張型HPFRCCとコンクリートの配合

実験に用いた膨張型 HPFRCC は、高強度ポリエチレン繊維を体積比で 1.5%混入した HPFRCC に膨張材を結合材に質量で 6%添加したものである。単位結合材質量が一定となるようセメントと置換えて膨張材を配合した。膨張材の添加率は、収縮補償を目的として、これまでの著者らの研究⁵⁾に基づき 6%とした。一般の RC 部材の場合には、本研究の試験条件 (せん断スパン比 1.5~2.5) では、せん断破壊が生じることを確認するため、水セメント比 50%の普通コンクリートを用いた。このコンクリートには収縮補償を目的とし、膨張材メーカーが示す標準使用量 20kg/m³を添加した。

100 リットルのパン型ミキサで練混ぜを行った。打設

表-1 使用材料

材料	仕様, 物性
高強度ポリエチレン繊維 (PE)	繊維径 12 μ m, 繊維長 12mm, 密度 0.98g/cm ³ , 引張強度 2.6GPa, 弾性係数 88GPa
セメント (C)	JIS R 5210 早強ポルトランドセメント, 密度 3.13g/cm ³
膨張材 (EX)	JIS A6202 エトリンライト・石灰複合系 密度 3.05 g/cm ³
細骨材 (S1)	7号珪砂, 密度 2.60g/cm ³
高性能 AE 減水剤 (SP)	ポリカルボン酸エーテル系
増粘剤 (MC)	水溶性メチルセルロース系
細骨材 (S2)	砂, 密度 2.58 g/cm ³
粗骨材 (G)	砂利 密度 2.62 g/cm ³
AE 減水剤 (AD)	変性リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体
空気量調整剤 (AE)	陰イオン界面活性剤

*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 岐阜県生コンクリート工業組合 技術センター所長 (正会員)

*3 岐阜大学 社会資本アセットマネジメントセンター 博士 (工学) (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 HPRCC の配合

配合 (記号)	水結合材比 W/B (%)	単位量 (kg/m ³)						
		水 W	結合材 B		7号珪砂 S1	高性能 AE 減水剤 SP	増粘剤 MC	繊維 PE
			セメント C	膨張材 EX				
HPFRCC (HP)	30	379	1188	76	395	37.9	0.9	14.6

表-3 コンクリートの配合

配合 (記号)	水結合 材比 W/B (%)	細骨 材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							
			水	結合材 B		細骨 材	粗骨 材	AE 減 水剤	空気量 調整剤	
				セメント C	膨張材 EX					S2
普通コンクリート (NC)	50	43.0	165	310	20	756	1022	0.825	0.0165	1A

表-4 実験に供したはりの種類

	記号	材料	せん断 スパン比 a/d	はり長さ l (mm)	はり断面	備考
1	HP2.5LA	HPFRCC	2.5	1360	複鉄筋	
2	NC2.5LA	NC		1360	複鉄筋	
3	HP2.25LA	HPFRCC	2.25	1360	複鉄筋	定着長 247mm
4	HP2.25SA	HPFRCC		1020	複鉄筋	定着長 77mm
5	HP2.0SA	HPFRCC	2.0	1020	複鉄筋	
6	HP2.0SB	HPFRCC		1020	単鉄筋	
7	NC2.0SA	NC		1020	複鉄筋	
8	HP1.75SA	HPFRCC	1.75	1020	複鉄筋	
9	HP1.5SA	HPFRCC	1.5	1020	複鉄筋	
10	HP1.5SB	HPFRCC		1020	単鉄筋	
11	NC1.5SA	NC		1020	複鉄筋	

日を1ロットとして、HPFRCCでは一軸引張強度試験用にダンベル型供試体5本と圧縮強度試験用に直径5cm円柱供試体3本を採取し、普通コンクリートでは圧縮強度試験用に直径10cm円柱供試体3本と割裂引張強度試験用に直径15cm円柱供試体3本を採取した。

HPFRCCとコンクリートに用いた材料を表-1に、配合を表-2に示す

2.2 はりの作製

実験に供したはりの種類を表-4にまとめる。はりの名称は、材料を表す記号HPあるいはNCに続いてせん断スパン比、次にはりの長さ1360mmをL、1020mmをSと示し、末尾に複鉄筋断面をA、単鉄筋断面をBとした記号で表す。

はりの断面は、D19を2本配置して引張鉄筋比を3.4%とし、図-1に示すような同じ量の鉄筋を圧縮側にも配置して複鉄筋断面とした。鉄筋端部の定着を確実にするため、ねじふし鉄筋を用いて厚さ9mmの鋼板をナットで固定した。膨張型HPFRCCを用いて長さ1360mmのはりを2体、1020mmのはりを6体作製し、その内、長さ

1020mmのはり2本は、圧縮側鉄筋のはりの破壊挙動に対する影響を確認するため単鉄筋断面とした。比較として、普通コンクリートを用いて、複鉄筋断面の長さ1360mmのはりを1体、1020mmのはりを2体作製した。

はりの作製にあたっては、はり側面を打設面として、軸方向に傾斜させた型枠の片側からHPFRCCを流し込み、軸方向に材料が流れながら連続的に鉄筋下端や型枠先端に行き渡るよう打設し、型枠振動機を用いて型枠面の巻き込み空気を除去した。打設後24時間で脱型を行い、はり供試体を20℃の養生室に移し養生シートによる湿布養生を材齢14日まで行った。その後、載荷試験までは実験棟の室内環境に静置した。はりに用いた材料の力学的特性を確認するための供試体は、はりと同様の環境で養生をした。

2.3 はりの曲げ載荷試験

曲げ載荷試験方法は4点曲げ載荷とし、等曲げ区間100mmを一定として、支点間距離を移動させて、せん断スパン比を2.5、2.25、2.0、1.75、1.5と変化させた。はりの載荷方法の一例を図-2に示す。荷重をロードセル、

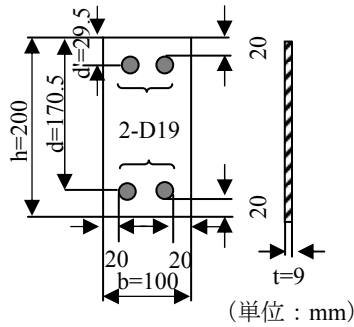


図-1 はりの断面と定着板の寸法

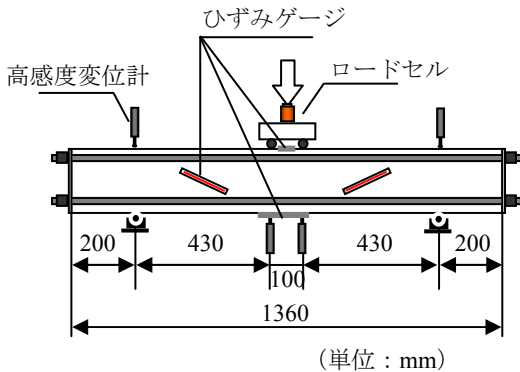


図-2 曲げ載荷試験方法の例 (a/d : 2.5)

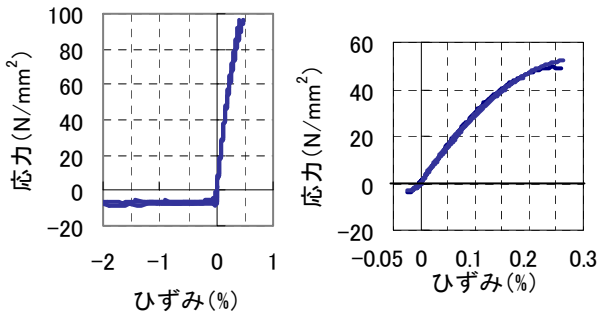


図-3 HPFRCC (左) と普通コンクリート (右) の応力ひずみ関係

表-5 材料の力学特性

材料	圧縮強度 N/mm ²	引張降伏 強度 N/mm ²	引張 強度 N/mm ²	ヤング 係数 kN/mm ²
HPFRCC	91.4	6.30	7.70	27.2
NC	48.9	—	3.40	31.5

支点と載荷点の変位を高感度変位計で測定し、圧縮縁には検長区間 30mm のひずみゲージを、また引張縁とはり左右のせん断区間には検長区間 120mm のひずみゲージをそれぞれ貼付し、はりの挙動を確認した。載荷試験においては、60kN までは 20kN ごとに、60kN を超えて降伏までは 40kN あるいは 80kN ごとに等間隔で段階的に載荷を止め、マイクロスコープにより、等曲げ区間とせん断区間のひび割れ計測を行った。せん断区間のひび割れは、載荷点直下の下面と支点直上の上面を結ぶ斜めの直線上で計測した。

3. 実験結果と考察

3.1 はりに用いた材料の力学特性

はりに用いた材料の力学特性については、はりの載荷試験の直後に材齢 12 週で試験した。HPFRCC のダンベル型供試体による一軸引張試験と直径 5cm 円柱供試体による圧縮試験から求めた応力とひずみの関係と、普通コンクリートの圧縮試験と割裂引張試験から求めた応力とひずみの関係を図-3 に示し、力学特性を表-5 に示す。応力ひずみ曲線は、圧縮側を正として第一象限に、引張側を負として第三象限にプロットした。実験に用いた HPFRCC は、ひずみが 0.1% 以前からひずみ硬化を示し、この特性はひずみが 1~2% に至るまで維持されていることから、鉄筋降伏前から引張応力を負担し降伏後もこの作用が持続すると考えられる。

3.2 はりの載荷試験結果

(1) 膨張型 HPFRCC を用いたはり

せん断スパン比を 2.5, 2.25, 2.0, 1.75, 1.5 としたはりの荷重とたわみの関係、荷重とせん断区間対角線のひずみの関係、荷重と引張縁ひずみの関係、ならびに荷重と圧縮縁ひずみの関係を図-4, 5, 6, 7, 8, 9 に示す。

いずれのせん断スパン比の場合も膨張型 HPFRCC を用いたはりにおいては、鉄筋降伏後も鉄筋のひずみ硬化により荷重が増加し、最大荷重に達する前に圧縮縁のひずみが急減する挙動から、載荷点間の HPFRCC の圧縮破壊ではりが破壊したことが確認できる。荷重と全等曲げ区間を検長区間とするひずみゲージから得られる引張

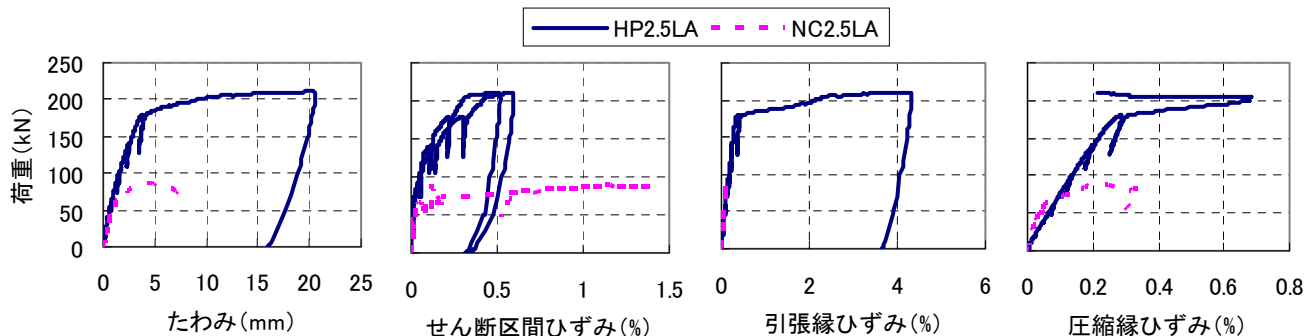


図-4 HP2.5LA, NC2.5LA の載荷試験結果

縁ひずみの関係は、荷重-たわみ曲線と相似の曲線が得られ、等曲げ区間において鉄筋降伏後もひび割れが局所化せず終局に至っていることを示す。左右のせん断区間のひずみの軌跡は、同様の挙動を示しており、はりが左右均等に变形したことを表している。以上のことから、これらのはりは、いずれのせん断スパン比の場合も曲げ引張破壊したことがわかる。

(2) 鉄筋定着長の影響

鉄筋の定着長が短いはりの破壊性状を確認するため、長さ1360mmと1020mmのはりを用いてせん断スパン比を2.25とした荷重試験結果を図-5に示す。長さ1020mmのはりの鉄筋定着長は77mmであり、さらに定着板の固定を外して荷重試験に供した。

いずれのはりも曲げ引張破壊したことを図-5は示しており、本研究の範囲では、定着長が77mmであっても破壊性状への影響は確認されなかった。

(3) 圧縮鉄筋のはりの破壊挙動への影響

はりの破壊挙動に対する圧縮側鉄筋の影響を確認するため、単鉄筋断面と複鉄筋断面でせん断スパン比2.0, 1.5のはりの荷重試験を行い、その結果を図-6, 9に示す。いずれの断面のはりにおいても、鉄筋降伏まではりの荷重とたわみの関係、ならびに荷重と引張縁ひずみの関係は同じ挙動を示すが、単鉄筋断面のはりは、せん断区間のひずみが小さく、圧縮縁ひずみが大きくなった。

(4) 普通コンクリートを用いたはりとの比較

膨張型 HPRCC と普通コンクリートを用いたせん断スパン比2.5, 2.0, 1.5のはりの荷重試験結果を図-4, 7, 10に示す。普通コンクリートを用いたはりは、膨張型 HPRCC によるはりの50~70%の最大荷重となり、荷重点付近で斜めひび割れ上部のコンクリートが圧壊して破壊しており、せん断圧縮破壊したと考える。コンクリート標準示方書⁴⁾によるこの部材のせん断圧縮破壊耐力は、せん断スパン比が2.5, 2.0, 1.5と変化した場合、70kN, 101kN, 155kNと算定され、実験値89.7kN, 130kN, 203kN

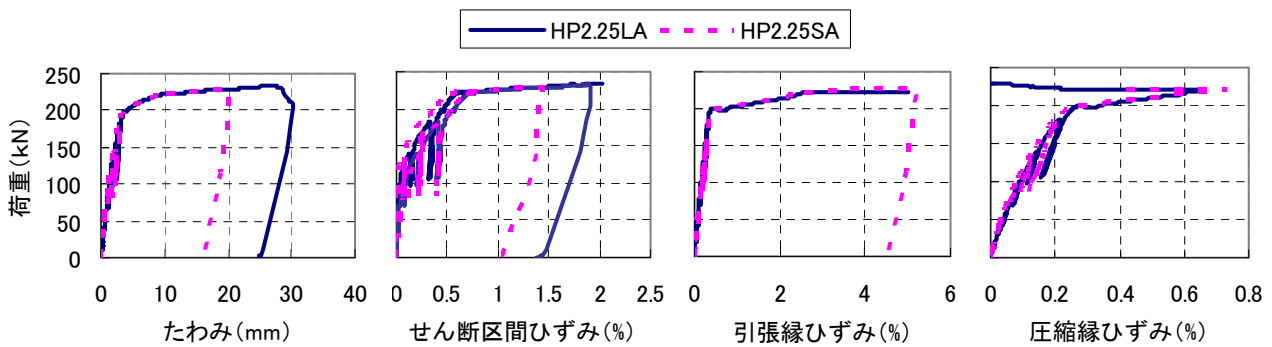


図-5 HP2.25LA, HP2.25SAの荷重試験結果

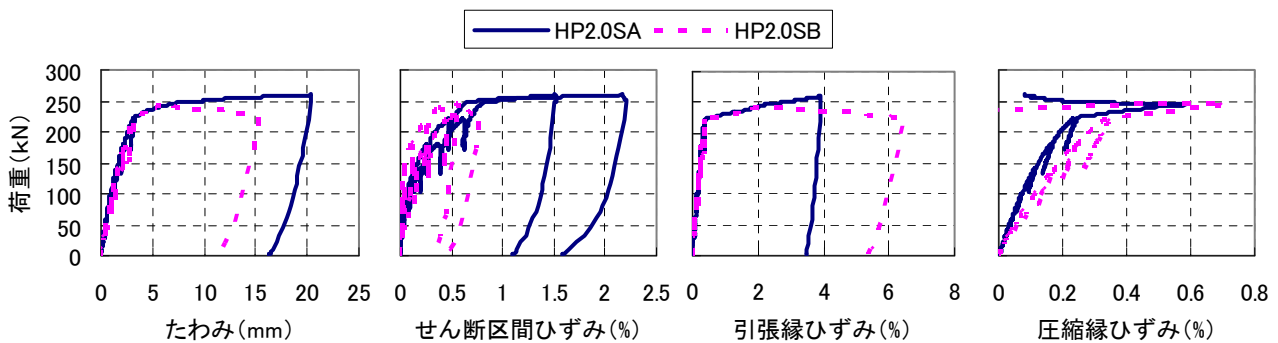


図-6 HP2.0SA, HP2.0SBの荷重試験結果

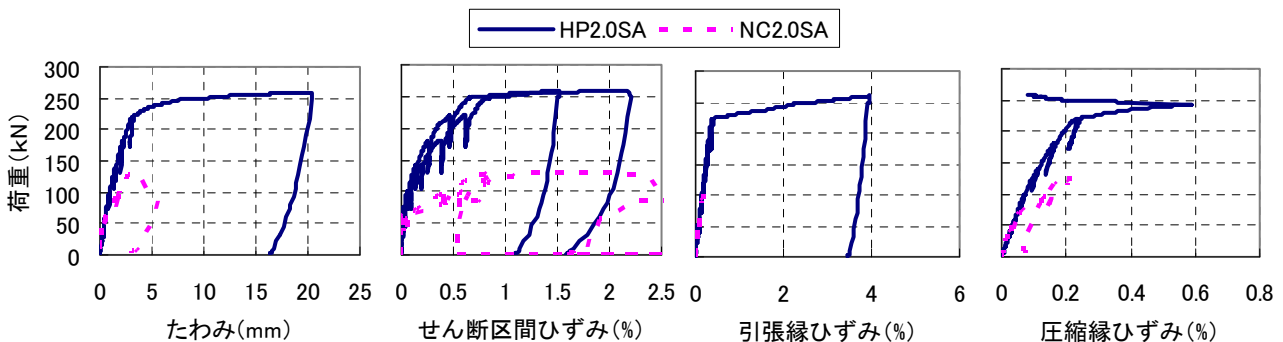


図-7 HP2.0SA, NC2.0SAの荷重試験結果

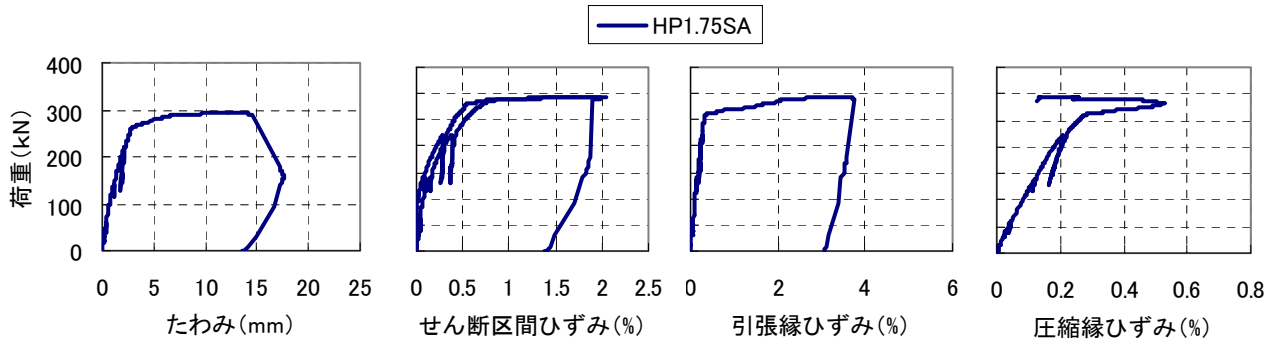


図-8 HP1.75SAの載荷試験結果

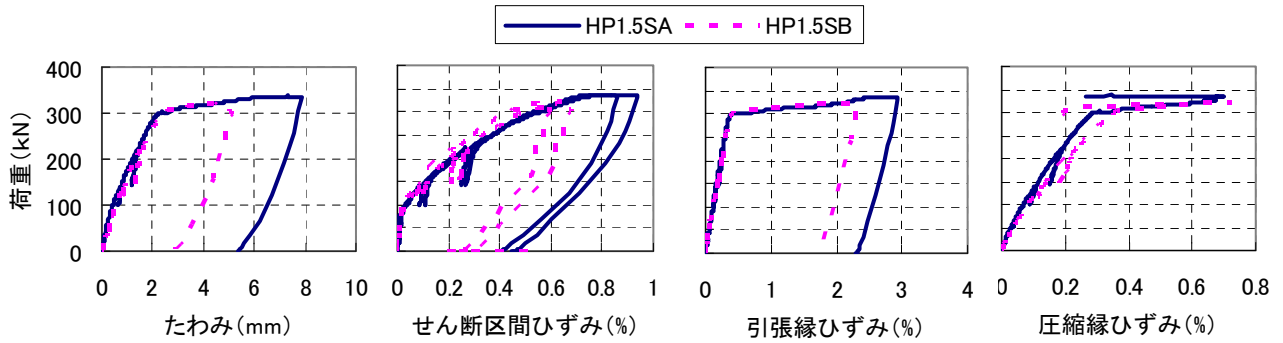


図-10 HP1.5SA, NC1.5SAの載荷試験結果

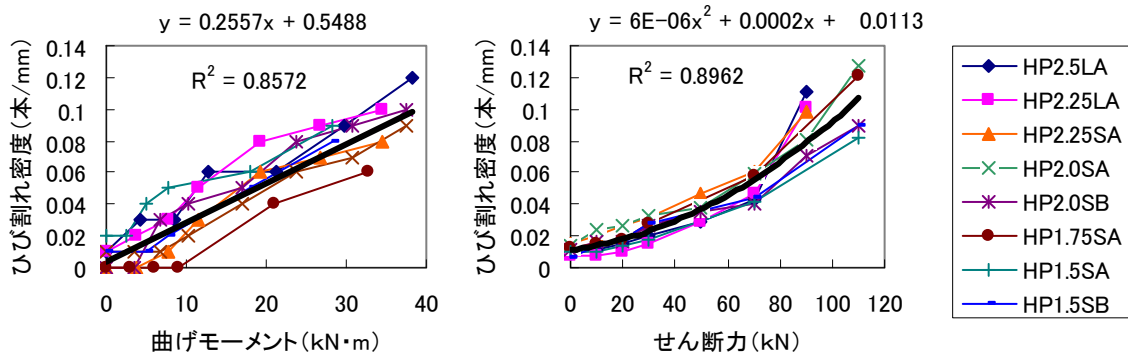
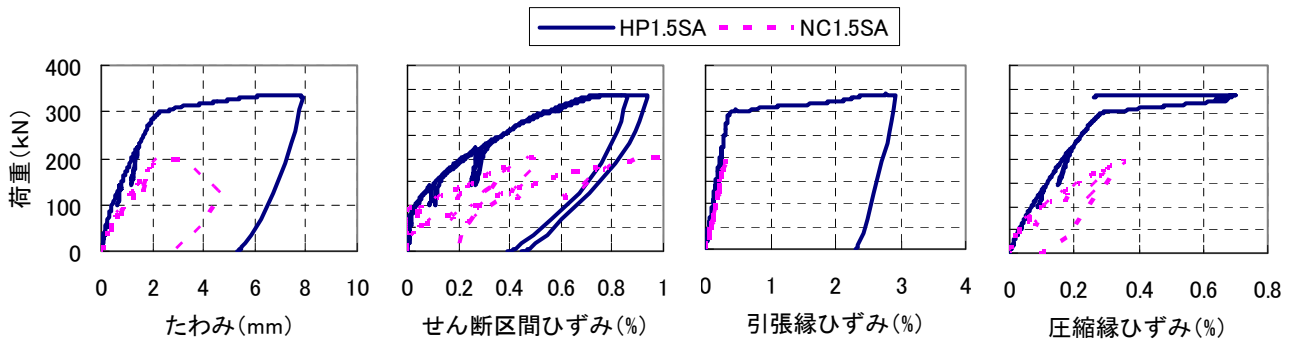


図-11 曲げモーメントと等曲げ区間に発生したひび割れ密度の関係（左）とせん断力とせん断区間に発生したひび割れ密度の関係（右）

は算定値の1.3倍であった。圧壊が生じる際の圧縮ひずみは、普通コンクリートでは0.35%程度であるのに対して、HPFRCCでは0.6%前後であった。

(5) 等曲げ区間とせん断区間のひび割れ性状

曲げモーメントと等曲げ区間のひび割れ密度の関係

と、せん断力とせん断区間のひび割れ密度の関係を図-11に示す。ひび割れ密度は、ひび割れ本数を観察区間の長さで除した値とした。等曲げ区間では、曲げモーメントに比例してひび割れ密度が大きくなる傾向を示し、せん断区間では、曲線的に鉄筋降伏間近でひび割れ密度

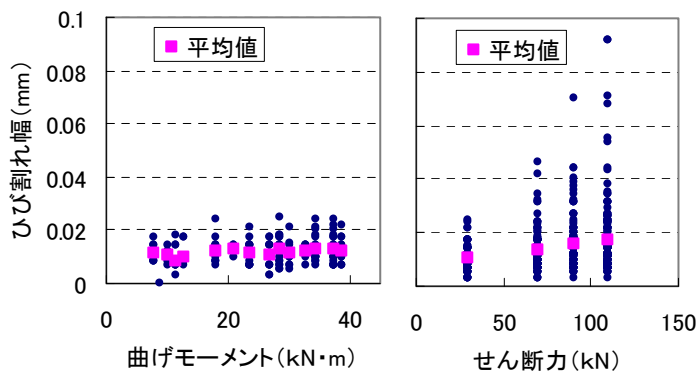


図-12 曲げモーメントと等曲げ区間に発生したひび割れ幅の関係

図-13 せん断力とせん断区間に発生したひび割れ幅の関係

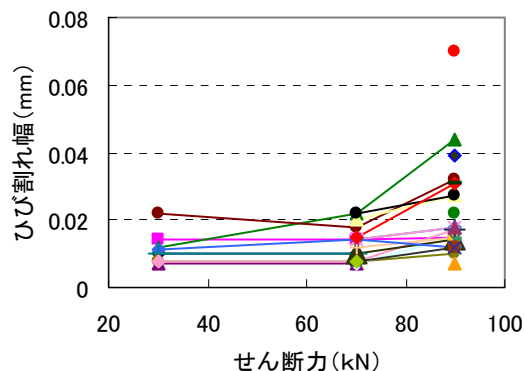


図-14 HP1.75SAのせん断区間に発生した19本のひび割れ幅の推移

が大きくなる傾向を示す。

マイクロスコープに取り込んだひび割れ写真の一例を写真-1に、等曲げ区間とせん断区間に発生するひび割れ幅の傾向を図-12と図-13に示す。引張鉄筋が配置された等曲げ区間に発生するひび割れの幅は、曲げモーメントに関係なくほとんど0.02mm以下の一定の幅に分布しているが、せん断補強筋のないせん断区間に発生するひび割れの幅は、せん断力が大きくなるに従い、ひび割れ幅の最大値が大きくなる傾向がある。

はりのせん断区間に発生したひび割れ幅の推移の例を図-14に示す。鉄筋降伏の約70%の荷重に相当するせん断力70kNまでは、発生しているひび割れの幅は0.02mm以下で推移しているが、鉄筋降伏間近になると既に発生しているひび割れ幅の拡大、あるいは新しく大きな幅のひび割れが発生する傾向が確認できる。ひび割れ幅の平均値は、等曲げ区間とせん断区間において差はなく0.02mm以下で推移することを図-12、13は示す。

4. まとめ

収縮補償をした膨張型HPFRCCを用いて、せん断補強鉄筋を配置しないRCはりを作製し、せん断スパン比を変化させて荷重試験を行い、ひび割れ性状と破壊性状について検討を行った。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 鉄筋比3.4%のRCはりは、せん断スパン比1.5~2.5の範囲において、普通コンクリートを用いた場合せん断圧縮破壊を示し、膨張型FPFRCCを用いた場合曲げ引張破壊を示した。すなわち、本研究の範囲(長方形断面、引張鉄筋比3.4%、せん断スパン比1.5~2.5)では、膨張型HPFRCCを用いたRCはりにせん断破壊は生じなかった。
- (2) 鉄筋D19の定着長を77mmと短くしても膨張型HPFRCCを用いたRCはりの破壊性状への影響は認められなかった。

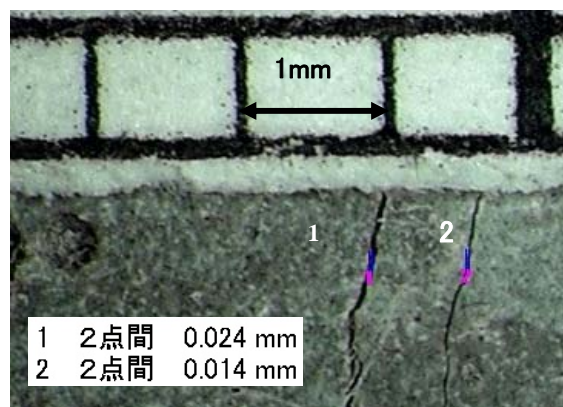


写真-1 ひび割れ写真の一例

- (3) 等曲げ区間の引張縁のひび割れ密度は、曲げモーメントに比例して直線的に大きくなり、せん断区間のはりの側面のひび割れ密度は、曲線的に鉄筋降間近で大きくなる傾向を示した。
- (4) せん断区間のひび割れは鉄筋降伏間近になると、ひび割れ幅が拡大したり、大きなひび割れが新しく発生したりする傾向が確認できたが、平均ひび割れ幅は、等曲げ区間とせん断区間に差はなく0.02mm以下で推移した。

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) 岡田 清：鉄筋コンクリート工学，朝倉書院，1981
- 3) 土木学会：2007年版コンクリート標準示方書改訂資料，コンクリートライブラリー129，2008.3
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，2008.3
- 5) 高田浩夫，高橋祐二，浅野幸男，六郷恵哲：膨張型HPFRCCでケミカルプレストレスを導入したRC梁のひび割れ特性，コンクリート工学年次論文集，Vol. 31，No.1，pp.337-342，2009.7