

論文 HPFRCC のテンションスティフニング特性の評価

稲熊 唯史^{*1}・山下 賢司^{*2}・水田 武利^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨：ひび割れ発生後において数パーセントのひずみまで疑似ひずみ硬化を有する複数微細ひび割れ型繊維補強モルタル（HPFRCC）と鉄筋を複合させて構造利用した場合、引張応力下におけるテンションスティフネスが改善されることが期待できる。そこで、本研究では HPFRCC の両引き試験を行い鉄筋降伏前のテンションスティフネスを検証し、さらに一軸引張試験により HPFRCC の引張特性を評価してその関係について考察した。その結果、鉄筋降伏前の状態に加えて鉄筋降伏後のひずみ領域においても、HPFRCC の補強効果がテンションスティフネスの向上及び鉄筋降伏後の補強として機能していることが確認できた。

キーワード：HPFRCC, 微細ひび割れ, テンションスティフニング, ひずみ硬化

1. はじめに

コンクリートなどセメント複合材料の強度特性の一つとして、圧縮強度に対して引張強度が比較的低いことがあげられる。従来よりこれらを解決する手段の一つとして短繊維材料をセメントマトリックスに混入し引張強度を補填する複合材料が繊維補強モルタル又は繊維補強コンクリートとして実用化されている（以下 FRCC という）。FRCC は一般に引張強度の向上を目的として配合設計されており、その特性は引張軟化を示すものが多い。これに対して複数微細ひび割れ型繊維補強モルタル（以下 HPFRCC という）は、構成材料としては基本的に FRCC と大きな違いはないが、繊維の付着をコントロールし、引張特性としてひび割れ発生後のひずみ硬化を有し複数の微細なひび割れに分散することを特徴としている¹⁾。

近年、HPFRCC の研究が各方面で進められており実構造物への利用も始まっている。実構造物では補強の必要性がない場合でも脆性的な破壊を回避するために鉄筋と組み合わせることが不可欠で、実際には RC 構造による適用が大部分

となる。そこで、HPFRCC の鉄筋との複合構造を設計する場合、引張剛性の評価は部材の変形や不静定構造物の解析、エネルギー吸収を検討する上で非常に重要である。

一般に鉄筋コンクリートのテンションスティフネスはコンクリートに発生するひび割れとその周囲の付着破壊と滑りによって支配されるが、HPFRCC ではひび割れ発生後も繊維の架橋応力により引張応力を分担し続けることから普通コンクリートとは異なった挙動を示すことが予想される。また、HPFRCC の場合、数パーセントの引張ひずみ領域まで疑似ひずみ硬化特性を有することから、鉄筋降伏以降においても荷重を分担するなどの効果が期待できる。

そこで本研究では引張特性の異なる HPFRCC、鋼繊維補強コンクリート（以下 SFRC という）、及び普通コンクリートを用いた両引き試験を実施して、鉄筋降伏前のテンションスティフニング挙動の相違、鉄筋降伏後の荷重分担の特性等を検討した。

2. 実験概要

*1 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）

*2 岐阜大学 大学院工学研究科土木工学専攻（正会員）

*3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科（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-1 主要材料諸元

材 料	仕 様
ポリエチレン繊維	繊維径12 μ m, 繊維長12mm 引張強度2600MPa, 弾性係数88GPa,
ビニロン繊維	繊維径40 μ m, 繊維長12mm 引張強度1600MPa, 弾性係数40GPa
セメント	JIS R 5210 早強ポルトランドセメント
フライアッシュ	JISA6201 2種
細骨材	珪砂 7号
混和剤	ポリエーテル系高性能AE減水剤 ポリカルボン酸系高性能AE減水剤
AE剤	高級脂肪酸塩及び非イオン系界面活性剤

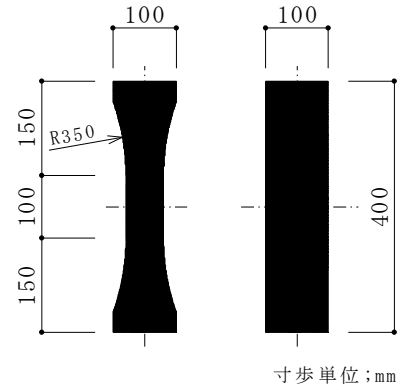


表-2 試験体配合

材料種別	材料名称	単位 セメント量 C(kg/m ³)	フライアッシュ 置換率 FA/(C+FA)(%)	水セメント比 W/C(%)	繊維 添加量 (vol%)
複数微細ひび割れ型 繊維補強モルタル (HPFRCC)	PE	885	30	43	1.5
	PVA	735	41	50	2.5
鋼繊維補強 コンクリート	SFRC	378	0	49	1.0
普通コンクリート	NC	331	0	55	0

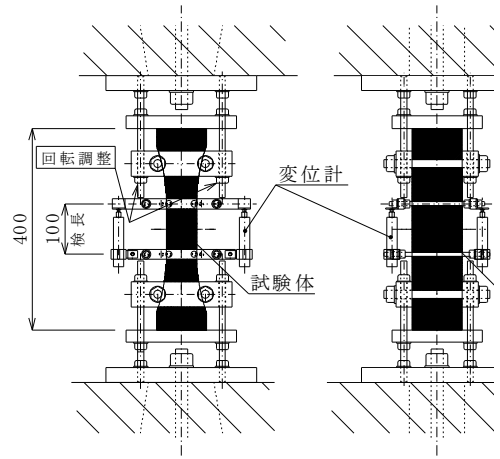


図-1 一軸引張試験

本研究では HPFRCC のテンションスティフネスを検討する目的で両引き試験の他、各種材料の引張特性を把握するため、普通コンクリートでは円柱供試体の割裂による引張強度試験を行い、HPFRCC と SFRC については一軸引張試験により応力ひずみを測定した。

2.1 使用材料及び配合

試験体に使用した材料は HPFRCC としてポリビニルアルコール（以下 PVA という）と高強度ポリエチレン（以下 PE という）を使用した 2 配合とした。両者は繊維の弾性係数、引張強度、アスペクト比の違いからひび割れ発生後の降伏強度及び引張強度、終局ひずみ等において異なった特性を示す。また、HPFRCC に対する比較として、本研究ではひずみ軟化型の鋼繊維補強コンクリートと圧縮強度 35N/mm² の普通コンクリート（以下 NC という）を用いて HPFRCC と比較した。

配合に使用した材料を表-1 に、配合の概要を表-2 に示す。

2.2 一軸引張試験

一軸引張試験は切り欠き梁のひび割れ開口変位量より逆解析する手法に比べて、材料の応力ひずみ及び靱性を直接把握できるが、一般に試

験体両端の拘束状況や試験精度の影響を大きく受ける。また、HPFRCC に類する高靱性な材料については、試験体内においてひび割れ発生後の 2 次曲げが生じるなどの材料の性能を適正に評価するためには、試験方法に配慮する必要がある。また、試験体断面寸法や試験体製作時の打設方向によって短繊維の配向に方向性が発生して、ばらつきが大きくなるなどの報告もされている²⁾。

そこで、本研究では HPFRCC 及び SFRC など繊維補強した材料の引張特性の評価として、両引き試験体断面と比較的近い断面積を持ったダンベル型試験体により一軸引張試験を行った。引張荷重は 100mm の検長間を 4 本の変位計で測定し、荷重中に両端の回転角度を制御して検長間が平行に維持できるように荷重した。

試験体形状及び試験方法を図-1 に示す。

2.3 両引き試験

本研究で使用した HPFRCC は鉄筋降伏以降の

引張ひずみにおいてもひずみ硬化挙動を示し、引張荷重を分担することから、両引き試験では鉄筋降伏以降の挙動を計測するため HPRCC 打設部分の鉄筋を SD295 とし、HPRCC の打設していない両端定着部の鉄筋を SD490 として試験体部の鉄筋を降伏させる構造とした。

載荷中の試験体のひずみは反力床から変位計により試験体の変位を計測し、両端の変位計の差分を検長で除して引張平均ひずみとした。

また、載荷の過程で発生したひび割れに対してマイクروسコープでひび割れを撮影し、画像解析によってひび割れ幅を計測した。

試験体及び実験方法を図-2 に示す。

表-3 両引き試験体

試験体名称	材料種別	鉄筋仕様	断面寸法
PED1	PE (HPRCC)	SD295D25	100×100mm
PED2			100×80mm
PED3			100×60mm
PER2	PVA (HPRCC)	SD295D25	100×100mm
PVD1			100×80mm
PVD2			100×60mm
PVR2	SR235R25	100×80mm	
SFD1	SFRC (鋼繊維補強コンクリート)	SD295D25	100×100mm
SFD2			100×80mm
SFD3			100×60mm
SFR2	SR235R25	100×80mm	
NCD1	NC (普通コンクリート)	SD295D25	100×100mm
NCD2			100×80mm
NCD3			100×60mm
NCR2	SR235R25	100×80mm	

3. 実験結果及び考察

3.1 材料の引張特性

図-3 一軸引張試験で得られた応力ひずみ関係を示す。HPRCC の PE 及び PVA 配合はいずれもひび割れ発生後にひずみ硬化を示し、終局ひずみは PVA 配合では 2%、PE では 4%程度まで確認され、SFRC 配合では最大応力後軟化を開始している。

引張応力下におけるひび割れの発生は、PE 及び PVA 配合では複数の分散したひび割れが発生し、SFRC 配合では数本の局所化したひび割れが確認できた。

3.2 鉄筋降伏前のテンションステイフィニング

両引き試験において計測された、鉄筋降伏までの平均ひずみと荷重の関係について PE, PVA, SFRC と NC のそれぞれ 100mm×100mm 断面試験体の結果を図-4 に示す。

また、それぞれのデータには別途行った鉄筋単体の引張試験より得られた応力ひずみを合わせて示す。

普通コンクリートの NC 試験体ではひび割れ

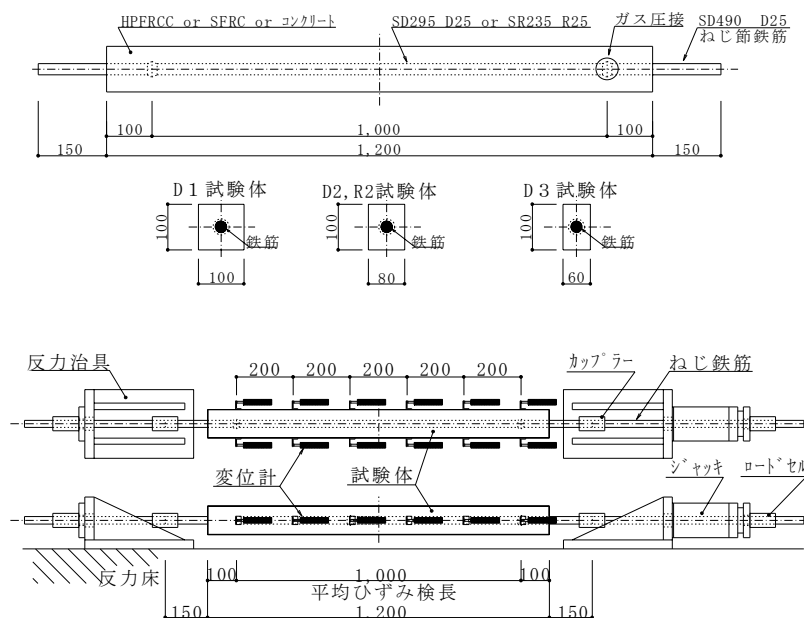


図-2 試験体及び実験方法

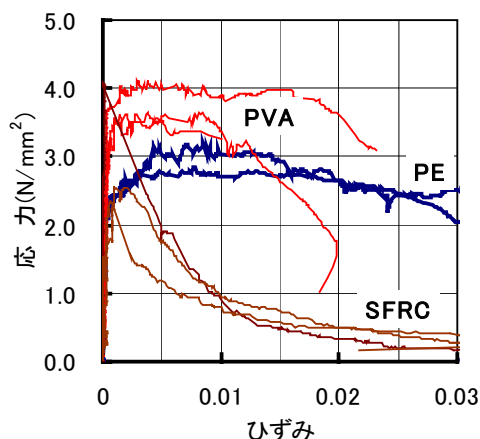


図-3 引張試験応力ひずみ

発生後全断面有効の剛性から鉄筋単体の剛性に暫減している。これは、ひび割れ発生による断面欠損と、ひび割れ部を起点とする付着破壊の進展によるものと考えられ、これらの挙動は既往の研究結果³⁾と一致している。これに対して、PED1, PVD1, SFD1 試験体では、ひび割れ発生後も鉄筋の降伏までテンションステイフネスが認められる。これは、図-5 に示した概念図のとおり、普通コンクリートではひび割れ発生箇所引張力を分担せず、また、その周辺の付着破壊によってコンクリートの剛性寄与を失うが、HPFRCC では微細ひび割れ発生後においても均等に引張応力を分担する機構によるものと考えられる。

鉄筋降伏までのテンションステイフネスの変化に着目すると、PVD1 では 500μ 以降鉄筋剛性に対して一定の寄与を示すが、PED1 では鉄筋降伏まで徐々に増加している。これは PE 配合のひずみ硬化挙動と関係していると考えられ、図-3 の一軸引張試験結果に示した通り、PVA 配合ではひび割れ発生後緩やかな疑似ひずみ硬化で数パーセントまで推移するのに対して、PE 配合ではひび割れ発生後 5000μ (0.005)まで急激に疑似ひずみ硬化を示すことに起因していると考えられる。

3.3 鉄筋降伏後の挙動

鉄筋降伏後の平均ひずみ 5000μ におけるひび割れ発生状況の代表例として、HPFRCC の PED1 と普通コンクリートの NCD1 のひび割れ発生状況を図-6 に示す。

普通コンクリートの NCD1 試験体では鉄筋降伏後の付着損失がさらに助長されひび割れ本数は増えず割れ幅が拡大している。これに対して HPFRCC の PED1 ではひび割れが分散して発生しており、一軸引張試験結果と比較すると疑似ひずみ硬化域にあると考えられる。

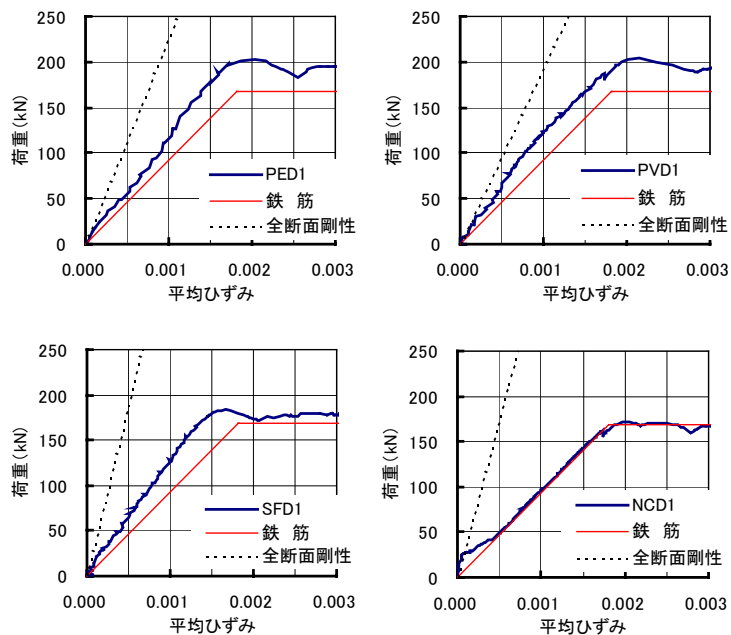


図-4 鉄筋降伏前のテンションステイフネス

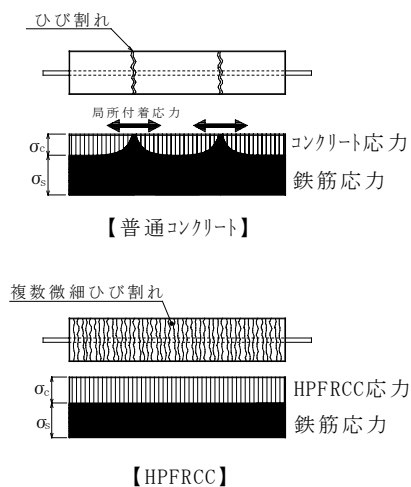


図-5 応力分布概念図

平均ひずみ 2%以上まで荷重した荷重平均ひずみ関係を図-7 に示す。鉄筋降伏以降普通コンクリートの NC では鉄筋単体の降伏荷重と一致しており、NC が補強に寄与していないことが分かるが、HPFRCC の PE, PVA 及び SFRC では鉄筋降伏後も HPFRCC 又は SFRC 断面が荷重を分担していることが確認できる。

鉄筋に丸鋼を用いた両引き試験結果を図-8 に示す。丸鋼を使用した試験体では PE, PVA 及び SFRC ついても鉄筋降伏後直後に荷重が低下

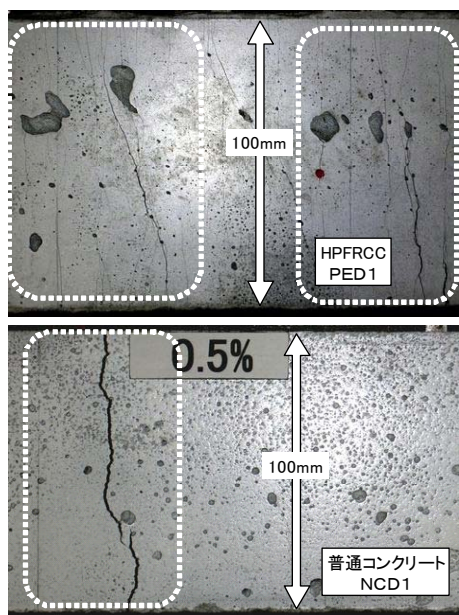


図-6 ひび割れ状況

し、鉄筋単体の荷重に収束している。

両引き試験の荷重ひずみデータから鉄筋単体の荷重分担分を差し引いて、マトリックス断面積で除し応力に換算した結果を図-9に示す。PE及びPVAの荷重寄与分は約 3N/mm^2 程度で推移しており、図-3の一軸引張試験結果と比べるとPE配合では良く一致しているが、PVAでは一軸引張試験結果に対してやや低い値となった。また、一軸引張試験結果から、SFRC配合では鉄筋降伏以降のひずみ領域で引張軟化域にあり、引張ひずみ2%付近ではほとんど応力を発生しないが、両引き試験では見かけ上SFRC断面が 3N/mm^2 程度の応力を分担している結果となっている。これはひび割れ発生状況と合わせて考察すると、局所化したひび割れ部で鉄筋がひずみ硬化していることが考えられる。

3.4 ひび割れ幅の比較

HPRCの一軸引張試験及び両引き試験時に発生したひび割れ幅の変化について、図-10に示す。 5000μ 付近で局所化した一部のひび割れを除き、いずれの試験においても発生したひび割れ幅は 0.1mm 以下の微細なもので、 2000μ 以降はひび割れ幅が一定値に収束している。両引き試験で発生するひび割れの方が、一軸引張試験で発生するひび割れに対してやや小さい傾向

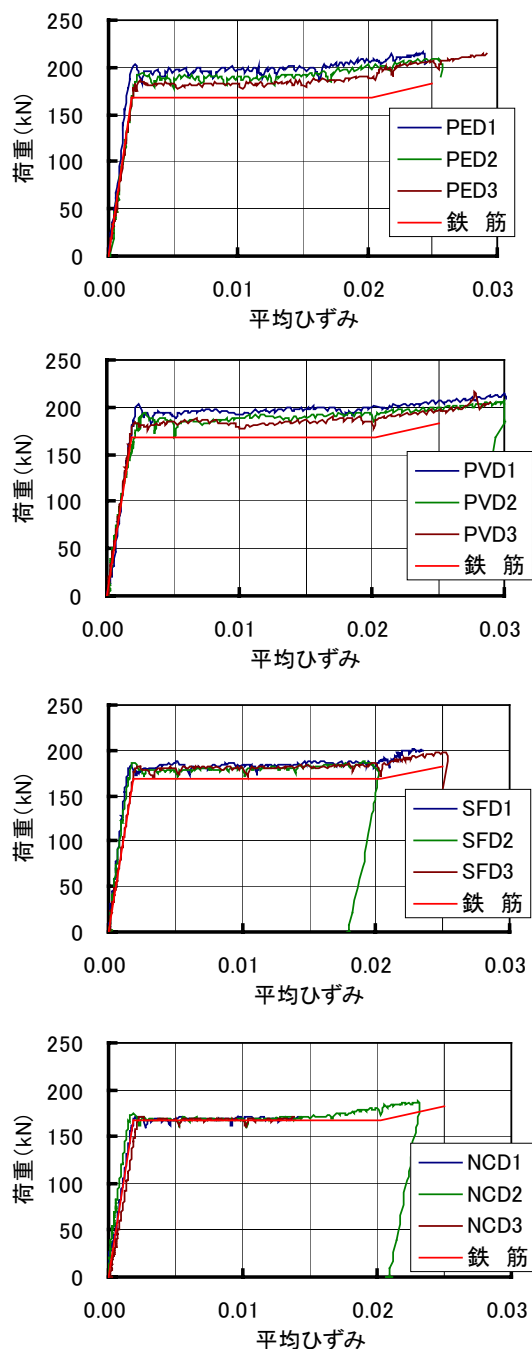


図-7 異形鉄筋の両引き試験結果

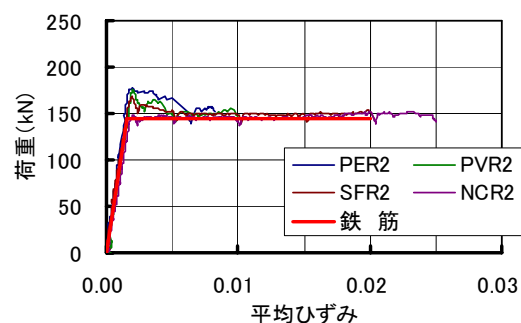


図-8 丸鋼鉄筋の両引き試験結果

があるが明確な差は認められない。

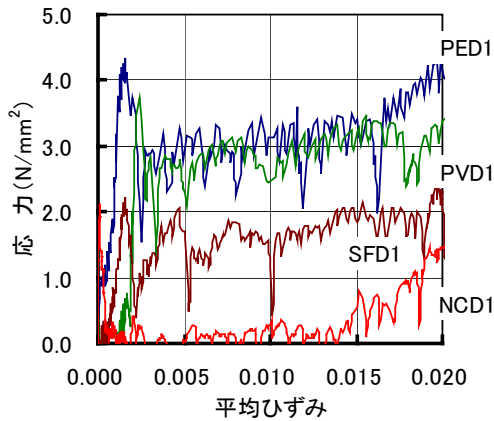


図-9 マトリックス断面応力

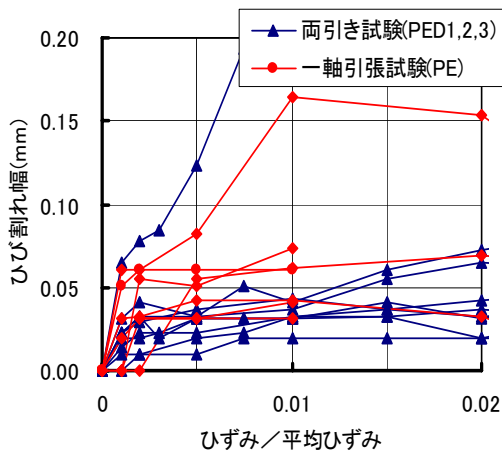


図-10 HPFRCC のひび割れ幅

4. まとめ

HPFRCC と鉄筋複合構造の引張挙動について本研究で確認された内容を以下にまとめる。

- (1) 鉄筋降伏前の平均ひずみにおいて、HPFRCC は疑似弾性的な挙動を示し、ひび割れ発生後においてもテンションスティフニング効果を発現する。またその剛性寄与分は HPFRCC の一軸引張試験で評価された引張特性と比較的良く一致していることから、HPFRCC の補強効果が断面剛性に寄与したものである。従って、鉄筋との複合構造により全断面引張部材に対して、HPFRCC の引張特性を有効に活用した構造体利用が期待できると思われる。
- (2) HPFRCC がひずみ硬化している範囲では、ひび割れ部と付着部の応力勾配によって起こる

滑りを伴う鉄筋とのせん断応力が発生しないため、異形鉄筋の場合では鉄筋降伏後においても鉄筋との付着が良好で、降伏前と同様に HPFRCC の材料強度が効果的に機能し引張荷重を分担する。

- (3) HPFRCC と丸鋼鉄筋を組み合わせた場合、鉄筋との付着が確保されている状態までは HPFRCC の補強効果が有効に機能するが、鉄筋降伏以降において付着応力が減少した直後に HPFRCC にひび割れの局所化が発生し、急激に荷重分担機能を失う。これらを実構造物に置き換えた場合、鉄筋降伏後に脆性的な破壊につながる可能性があると思われる。

本研究では HPFRCC を鉄筋と複合させた構造体における引張特性として、テンションスティフニングと鉄筋降伏後の荷重分配について各種材料を比較し挙動を検証した。しかし、HPFRCC の構造物への適用が進められている状況で、HPFRCC の引張特性を有効に設計に反映させるためには鉄筋との複合作用を多角的に評価し、定量化あるいは定式化していくことが必要であると考えられる。今後は、普通コンクリートとは異なる挙動を示したテンションスティフニング及び鉄筋降伏後の荷重分担作用などの機構についてさらに検討を進めることが必要であると思われる。

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，pp.4-7，2004.5
- 2) 清水克将，金久保利之，閑田徹志，永井覚：HPFRCC の一軸引張および曲げ性状に及ぼす打設方向の影響，コンクリート工学年次論文集，vol.25，No.1，pp.281-286，2003
- 3) 玉井真一，島弘，出雲淳一，岡村甫：一軸引張部材における鉄筋降伏以降の平均応力-平均ひずみ関係，土木学会論文集，378号，pp.239-246，1987.2