

論文 鉄筋を有する高強度繊維補強モルタル部材の引張挙動

塩永 亮介^{*1}・佐藤 靖彦^{*2}・Joost C. Walraven^{*3}

要旨：現在，多種の高性能繊維補強セメント系複合材の開発が国内外で進められている中，材料単体の引張性能の実験的評価は多くなされているものの，鉄筋コンクリート部材としての引張性能の把握は十分になされていない。本論文では，鉄筋補強された高強度繊維補強モルタル部材の一軸引張試験結果より，鋼繊維の混入量が多いほど，鋼繊維のアスペクト比が高いほど部材の引張剛性や耐荷力が向上することを確認した。さらに試験体製作時に違えた鋼繊維の配向性の差によってもこれら力学的特性に大きな差が生じることも示された。

キーワード：高強度繊維補強モルタル，一軸引張試験，テンションスティフニング

1. はじめに

近年，西欧諸国をはじめ日本国内においても様々なタイプの高性能繊維補強セメント系複合材（High Performance Fiber Reinforced Composites, 以下 HPFRC）の技術開発が進められ，橋梁を中心とした実工事への適用実績も増加している。この種の材料は高強度・高靱性・高流動の等の優れた性能を有することから，施工の省力化および構造物の長寿命化を図ることができる。HPFRC の採用実績としては長スパン化・断面の薄肉化等の観点から，これまで PC 構造が主となっている。そのため，設計的に必要な HPFRC の引張特性については，材料自身の引張性能の検討はなされてきている¹⁾が，鉄筋コンクリート部

材（以下，RC 部材）としての引張性能の把握は現状では十分になされていない。

一般に RC 部材は引張応力下において，コンクリートにひび割れ発生後も鉄筋との付着が働くため，コンクリートも引張力を一部負担する。したがって図-1に示すように，鉄筋コンクリートの引張剛性は，鉄筋単体の剛性より高く，ひび割れ後徐々に鉄筋単体の挙動に近づいていく。これを簡易的に力学モデルに適用する場合，コンクリート側に引張応力を負わせた平均応力-平均ひずみ関係（テンションスティフニング）として扱う²⁾。鋼繊維補強コンクリート（以下 SFRC）の場合，鋼繊維がひび割れ面で引張力を負担できるため，ひび割れ後もテンションスティフニングは普通コンクリートよりも増加することが既往の研究で報告されている^{3),4)}。

しかしながら HPFRC を適用した RC 部材の場合，従来の SFRC と比較して材料自身の引張性能の向上や鉄筋とコンクリートの付着特性の違いから，SFRC の引張挙動とは異なることが予想される。そこで本研究では，鉄筋を有する HPFRC 部材による一軸引張試験を実施し，繊維混入率やその種類，配向性が部材の引張性能やひび割れ性状に与える影響を把握した。

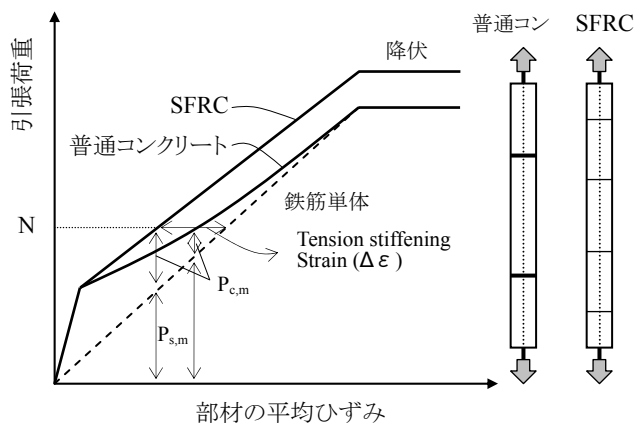


図-1 鉄筋を有する RC 部材の一軸引張挙動

*1 株式会社 IHI 技術開発本部 基盤技術研究所 工修（正会員）

*2 北海道大学大学院 工学研究科環境創生工学専攻 助教授（正会員）

*3 Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Full Professor

2. 実験概要

2.1 材料

本実験に用いた HPFRC の材料特性を表－１に示す。圧縮強度の目標値 130 N/mm^2 （ただし、EN-12390 で定める 100mm 立方体供試体による材齢 28 日の圧縮強度）を達成するため、セメントには比表面積の比較的大きなポルトランドセメントに高炉微粉末およびシリカ系微粉末を混入した。水粉体比は 22%程度に抑え、かつフレッシュ時の自己充填性を発揮するため高性能減水剤を添加・調整している。このベース配合に対して、鋼繊維を 0, 0.8, 1.6 vol.%（容積比）で混入した。使用した鋼繊維は硬鋼製（引張強度 $2,000 \text{ N/mm}^2$ 以上）の短繊維であり、表－２に示されるようなアスペクト比（長さ/直径）の異なる 3 種類の繊維を使用した。

フレッシュ時の性状は、いずれの配合においてもスランプフロー値 $60\sim 80\text{cm}$ 、V ロート流下時間 $10\sim 15$ 秒と計測され、図－２に示されるように材料分離もなく、十分な自己充填性が確認された。なお本材料は、打込み後に熱養生・蒸気養生等を施す必要はなく、一般的な湿潤養生（温度 20°C 、相対湿度 95%以上）で所定の強度発現を期待できる。

2.2 一軸引張試験

図－３に一軸引張試験で用いた試験体を示す。試験体長さは 700mm 、断面 $50\times 50\text{mm}$ とし、中心に異形鉄筋（径 10mm ）を 1 本埋め込んだ。できる限り断面に一樣な引張力を与えるため、試験体端部にはネジ切りした丸鋼（径 6mm ）を埋め込み、カップラーと連結板を介して引張治具に固定した。下端にはロードセルを設置し、上端の引張治具を油圧ジャッキに固定し試験体に引張力を与えた。

計測はいずれも LVDT（Linear Variable Differential Transformer：変位計）による変位計測とした。4 つの試験体側面のうち 2 面で全長を計測するため測長 650mm の変位計を設置し、その他の 2 面では平均ひび割れ幅を計測するため 100mm おきに計 6 つの小型変位計を設置した。

表－１ HPFRC の材料特性

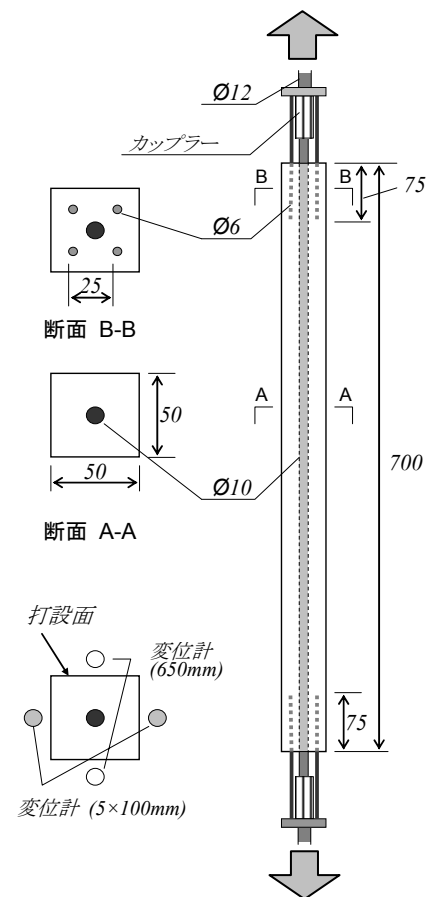
最大骨材径	水粉体比	鋼繊維混入率	スランプフロー	目標強度 (材齢 28 日)
$G_{\max}[\text{mm}]$	w/b [%]	[vol. %]	[cm]	$[\text{N/mm}^2]$
2.0	22	0,0.8,1.6	60~80	130 以上

表－２ 鋼繊維の材料特性

長さ	直径	アスペクト比	引張強度
$L_f[\text{mm}]$	$d_f[\text{mm}]$	L_f/d_f	$E_s[\text{N/mm}^2]$
13	0.16	81.3	$>2,000$
20	0.30	66.7	$>2,000$
6	0.16	37.5	$>2,000$



図－２ HPFRC の練上り性状



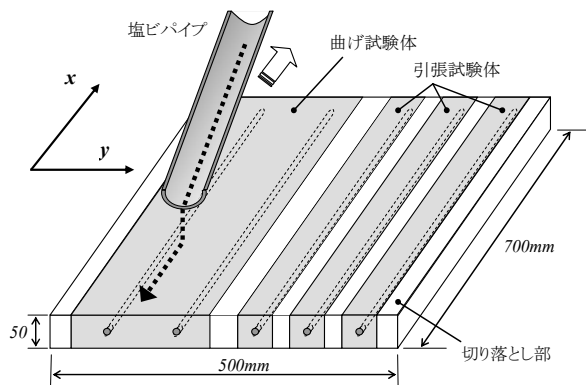
図－３ 鉄筋を有する一軸引張試験体

2.3 実験ケース

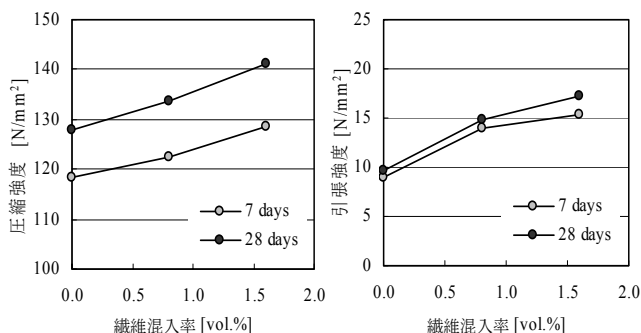
表－3に本実験で用いた HPFRC の実験ケースを示す。実験パラメータとしては、鋼繊維の混入率、鋼繊維のアスペクト比（表－2）および鋼繊維の配向性とし、計7ケースを作成した。鋼繊維の配向については、図－4に示すように、試験体製作時に HPFRC を型枠に流し込む方向により調整した。鉄筋と同方向に流し込んだケースを x 方向、鉄筋に直行する方向を y 方向とした。試験体は鋼繊維の均一性を目的に大きな板として作成し、脱型後にコンクリートカッタ

表－3 実験ケース

No.	目標強度 [N/mm ²]	鋼繊維の特性		
		混入率 [vol.%]	アスペクト比 [-]	配向性
1	130	0	-	-
2	130	0.8	81.3	x 方向
3	130	0.8	81.3	y 方向
4	130	1.6	81.3	x 方向
5	130	1.6	81.3	y 方向
6	130	1.6	66.7	x 方向
7	130	1.6	35.5	x 方向



図－4 試験体の製作法（HPFRC の打込み方向）



図－5 強度試験結果（EN-12390 による）

一にて試験体寸法に切断した。なお、1 ケースにつき同一試験体を 3 体作成し、その平均を計測値とした。

3. 実験結果

3.1 強度試験結果

材齢 7 日および 28 日の圧縮強度および引張強度の試験結果を図－5に示す（試験体 No.1, No.2, No.4 の比較）。なお、ここで示す引張強度は、割裂試験による初期ひび割れ発生強度である。これら強度特性には鋼繊維の混入率による影響がみられ、混入率が高いほど圧縮強度、引張強度ともやや増加する傾向にあった。圧縮強度においては、繊維混入率 1.6 vol.%の増加で約 10%の強度増加に対し、引張強度では 50%程度も増加している。なお、鋼繊維の配向性については、強度用供試体では配向を図－4 のようには調整できなかったため考慮していない。また、鋼繊維の種類（アスペクト比）の違いによる大きな差は見受けられなかった。弾性係数は、ケースごとの大きな差はなく、材齢 28 日の平均で 46,000 N/mm² 程度であった。

3.2 一軸引張試験における荷重-ひずみ関係

一軸引張試験結果を、引張荷重と平均ひずみの関係として図－6～8に示す。部材の平均ひずみは、試験体の 2 側面で全長（650mm）を計測した変位より求めたひずみ平均値で算出した。

(1) 繊維混入率の影響

図－6に、鋼繊維の混入率を違えた 3 ケースの実験結果を示す。またそれらに対し、鉄筋単体の直接引張試験による荷重-ひずみ関係も示している。鉄筋の降伏強度は 530 N/mm²、弾性係数は 190,000 N/mm² であった。鋼繊維のない試験体 No.1 は 7 kN 程度の荷重でひび割れの発生とともに剛性が低下し、鉄筋単体の挙動にすぐ近づくのに対し、鋼繊維が混入されている試験体 No.2 および No.4 では、初期のひび割れ発生荷重も 10 kN 以上に増加し、なおかつひび割れ後も剛性をある程度保持して最終的な降伏荷重も増加した。またこの傾向は、鋼繊維の混入率 1.6 vol.%と大

さい試験体 No.4 の方が大きい。同一荷重で比較すると、部材の平均ひずみが繊維の混入により大きく抑えられていることがわかる。

(2) 鋼繊維の種類の影響

図－7 に鋼繊維の種類（アスペクト比）を違えた3 ケースの結果を示す。いずれの試験体もひび割れ後、ほぼ一定のスティフネス（鉄筋単体とのひずみ差）を保持したまま鉄筋の降伏にいたったが、アスペクト比が大きい鋼繊維を用いた試験体ほどその効果は大きく、降伏時の荷重も増加した。

(3) 繊維の配向性の影響

図－8 には、鋼繊維の配向性を違えたケースの結果を示す。同じ繊維混入率で比較した場合、y 方向（鉄筋と直交する方向）に流し込んだ試験体（No.3 および No.5）では、初期のひび割れ発生荷重が減少し、その後のスティフネスも小さいものとなった。この傾向は、繊維混入率が 0.8 vol.% の場合（No.2 と No.3 の比較）はさほど大きくないが、1.6 vol.% と混入率が高い場合（No.4 と No.5 の比較）では、その差は大きいものとなっている。

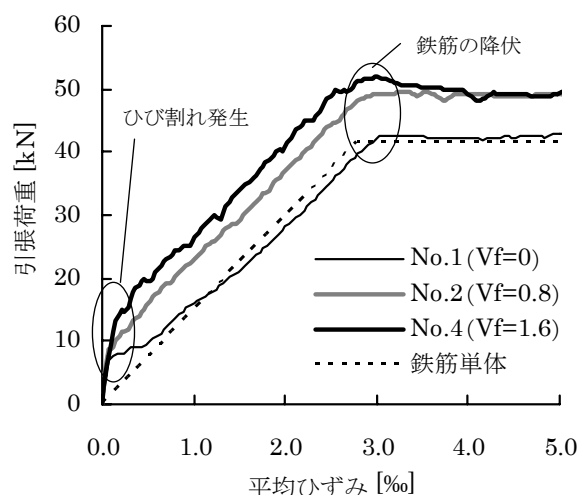
3.3 一軸引張試験におけるひび割れ性状

(1) 試験体のひび割れ性状

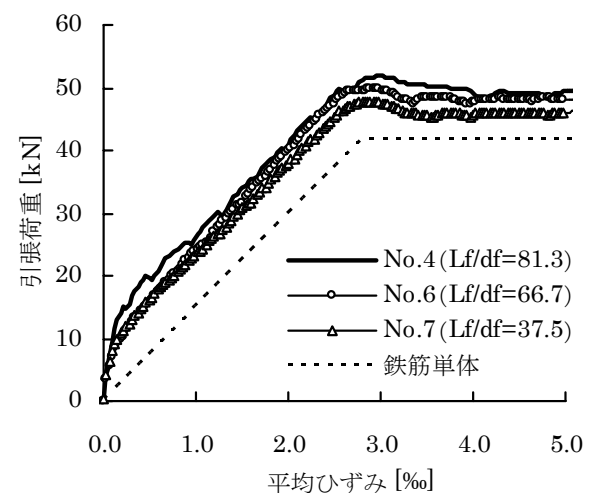
一軸引張試験体の載荷後（降伏後）のひび割れ分布図を図－9 に示す。さらに観察されたひび割れ本数および平均ひび割れ幅を表－4 にまとめた。鋼繊維の混入率が高いほど、試験体に発生するひび割れ本数は多く、試験体 No.4 では計 42 本のひび割れが確認された。このとき平均のひび割れ間隔は 14mm と非常に狭い。また同じ繊維混入率であっても、鋼繊維のアスペクト比が小さいものは、ひび割れ本数が減少した。

(2) 平均ひび割れ幅

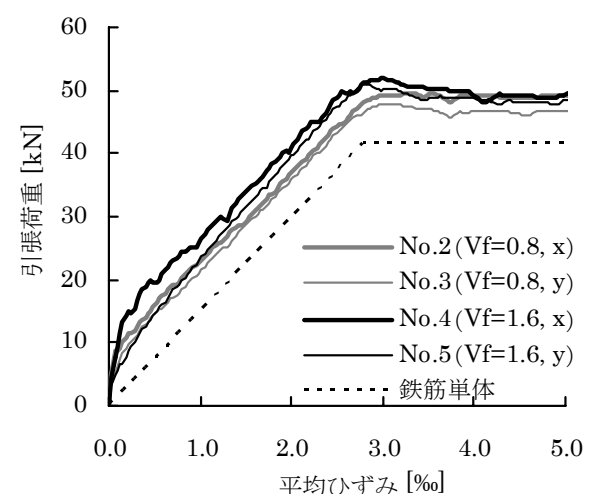
鋼繊維の混入によって、図－9 においてはみかけ上損傷が増加したように見えるが、実際は細かなひび割れに分散されたことで、一つ一つのひび割れ幅としては非常に小さな幅に抑えられている。それを定量的に示したのが、図－1



図－6 引張試験結果①（鋼繊維混入率の影響）

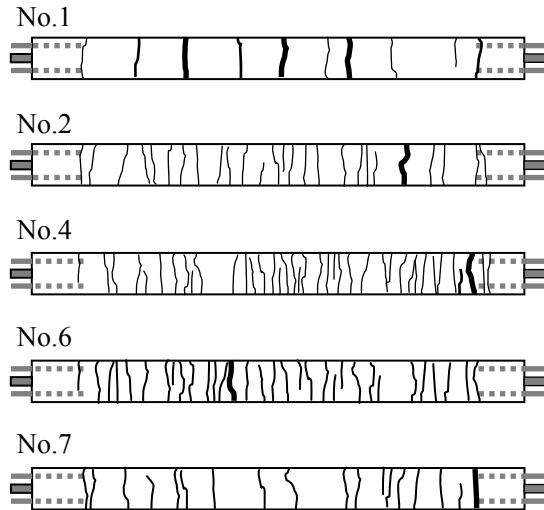


図－7 引張試験結果②（鋼繊維種類の影響）



図－8 引張試験結果③（鋼繊維配向性の影響）

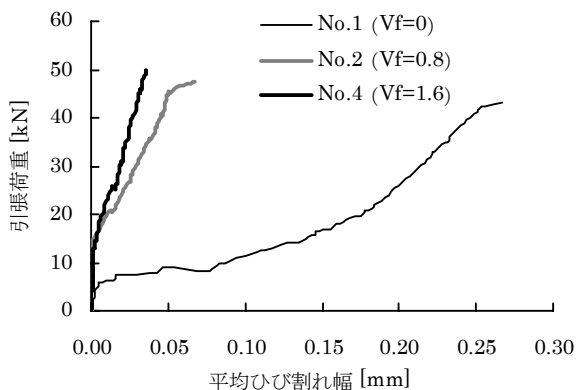
0 のグラフである。100 mm 間隔で側面に設置した LVDT のデータから、その間に観察されたひび割れ本数より平均ひび割れ幅を算出したところ、鋼繊維未混入の試験体の場合は終局荷重時に 0.25 mm 程度となる試験体 No.1 に対し、鋼繊維混入の試験体 No.2 および No.4 では、終局時の平均ひび割れ幅は 0.1 mm 以内に収まっていた。



図－9 ひび割れ分布図

表－4 ひび割れ本数と平均間隔

No.	鋼繊維の条件		ひび割れ性状	
	混入率 V_f	アスペクト比 L_f/d_f	平均本数	平均間隔
	[vol.%]	[-]	[本]	[mm]
1	0	-	11	56.0
2	0.8	81.3	25	22.7
4	1.6	81.3	40	14.2
6	1.6	66.7	35	16.5
7	1.6	37.5	17	34.1



図－10 平均ひび割れ幅の推移

4. 考察

4.1 コンクリート平均応力の評価

図－6～8で示した引張荷重－平均ひずみ関係から式(1)よりコンクリートの平均応力 f_{cm} として算出した値を図－11に示す。

$$f_{cm} = P_{cm} / A_c = (N - P_{sm}) / A_c \quad (1)$$

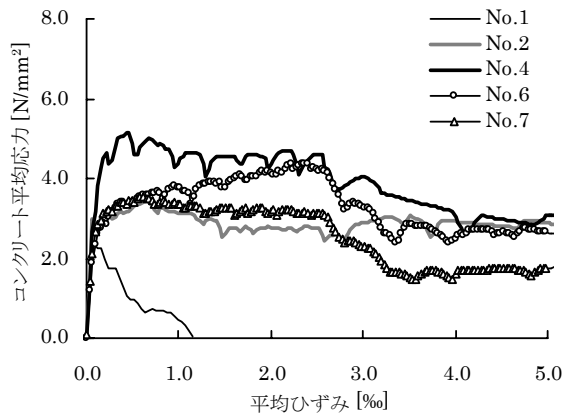
ここに、 P_{cm} はコンクリートが負担する引張力、 P_{sm} は鉄筋が負担する引張力、 N は部材がうける引張荷重、 A_c は試験体断面積である。鋼繊維未混入の試験体 No.1 ではひび割れ後、コンクリート平均応力がすぐに減少するのに対し、鋼繊維混入の試験体では、軟化特性が大幅に改善されている。この平均応力（軟化応力）は、繊維混入率が高いほど、鋼繊維のアスペクト比が大きいほど増加する傾向にあった。

4.2 Fiber Factor との関係

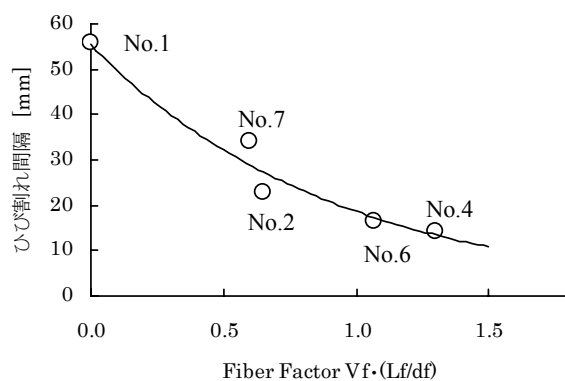
鋼繊維混入の条件が、材料の力学的特性に与える影響を定量的に示す指標として、しばしば繊維混入率とアスペクト比を乗じた Fiber factor ($=V_f \cdot (L_f/d_f)$) が用いられている⁵⁾。表－4に示したひび割れ性状の結果より、各ケースの Fiber factor とひび割れ間隔の関係を図－12に示す。両者は比較的によい相関があり、Fiber factor の増加するほどひび割れ間隔が細くなる傾向にある。このひび割れ分散効果は、図－9のひび割れ図からも試験体 No.4 の平均ひび割れ幅が最小となることは示されている。

4.3 繊維の配向性の影響

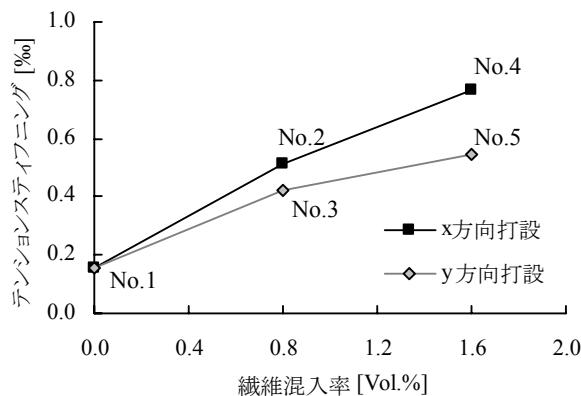
図－8で示した鋼繊維の配向性を違えた試験体の引張荷重－平均ひずみ関係より、図－13に引張荷重 20 kN 時のテンションステイフニング（図－1で示す $\Delta \varepsilon$: 平均ひずみと鉄筋の弾性ひずみの差）を示した。x 方向に打設したケースではひずみ量が増大し、その差異は混入率が高いほど大きい。これは、鋼繊維の配向が引張力の作用方向とできるだけ平行になる事が、引張剛性の増加につながることを示している。今後これらを定量化するため、ひび割れ断面での繊維の本数、配向度の計測を検討している。



図－１１ コンクリート平均応力



図－１２ Fiber factor とひび割れ間隔



図－１３ テンションスティフニングにおける鋼繊維の配向性の影響

5. まとめ

鋼繊維の混入率、種類、配向性をパラメータとした鉄筋を有する HPFRC 部材の一軸引張試験結果より以下の知見が得られた。

- (1) 鉄筋を有する HPFRC 部材の引張挙動においては、鋼繊維を混入することで、ひび割れ後の引張剛性（テンションスティフニング）を増加するほか、部材の引張耐力（降伏荷重）も向上することを確認した。

- (2) さらに鋼繊維混入率の増加にともない、部材の引張剛性は高まり、その結果、ひび割れは分散し、平均ひび割れ幅は減少した。また、同じ繊維混入率であっても鋼繊維のアスペクト比（長さ/直径）が小さいものでは、その効果が減少した。これらより HPFRC の引張特性は、繊維混入率とアスペクト比を乗じた Fiber factor との相関性が高いと推察される。
- (3) また、打設方向の影響による鋼繊維の配向性の違いによっても HPFRC 部材の引張性能が大きく変化することが確認された。

謝辞

本研究は（財）国際石油交流センター（JCCP）殿の専門家養成事業の一環で第一著者がオランダ・デルフト工科大学留学時に実施した研究成果である。本業務を助成していただいた JCCP 関係各位、また研究・実験を指導、協力していただいたデルフト工科大学の職員および学生一同にはこの場を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 例えば、田中良弘，福浦尚之ら：超高強度繊維補強コンクリートの引張特性と引張軟化曲線のモデル化，土木学会論文集，Vol.788/V-67，pp.159-173，2005.5
- 2) 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，技報堂出版，1991
- 3) H.H. Abrishami, D. Mitchell : Influence of Steel Fiber on Tension Stiffening, ACI Structural Journal, Vol.94, No.6, pp.769-776, November-December.1997
- 4) P.H. Bischoff : Tension Stiffening and Cracking of Steel Fiber-Reinforced Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering @ASCE, Vol.15, No.2, pp.174-182, April.2003
- 5) S. Grunewald : Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete, TU Delft doctoral thesis, 2004