

論文 鋼繊維の種類が高強度高じん性セメント複合材料の引張特性に及ぼす影響

石関 嘉一^{*1}・平田 隆祥^{*2}・片野 啓三郎^{*3}・竹田 宣典^{*4}

要旨: 現行の超高強度繊維補強コンクリート (UFC) は, 鋼繊維を多量に添加していることが特徴である。しかしながら, 鋼繊維の違いによる UFC の引張性能について多く研究されていない。そこで, 鋼繊維の線径, 繊維長, 混入率, 混合率を試験要因として, フレッシュ試験, 圧縮強度, 一軸引張試験を実施した。その結果, 繊維径 0.16 mm 繊維長 13 mm でアスペクト比の高い鋼繊維が, 引張特性に有効であることが確認できた。

キーワード: 超高強度, 高じん性, 鋼繊維, アスペクト比, 一軸引張試験, 引張じん性係数

1. はじめに

近年, 超高強度かつ高じん性セメント複合材料は, この優れた材料特性を生かして構造部材に適用されることにより, **写真-1** に示すような橋梁部材等に用いられ, 部材断面の縮小, 使用材料の減少, 長期耐久性の向上など多くの合理化が図られ, 次世代の建設材料として期待されている。現在, 国内外で様々な超高強度繊維補強コンクリート (Ultra high Fiber reinforced Concrete: 以下 UFC と表記) の研究開発が進められ, 実構造物への適用が増加している¹⁾。2004 年には, 土木学会より超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案)²⁾ (以下指針と表記) が発行され, 今後もこれらの材料を使用した建設構造物は増加すると予想される。UFC の構成材料として超高強度モルタルまたはコンクリートおよび鋼繊維が挙げられる。しかしながら, UFC へ多量に添加され重要な構成材料であり, 引張強度特性やひび割れ分散性に影響を与える鋼繊維についての検討は十分に行われていない。特に, 鋼繊維の形状や寸法の違いが UFC の力学的特性について, どのように影響を及ぼすか十分に明らかにされていない。そこで, 本研究は UFC に適している鋼繊維を選定する目的で, 形状, 寸法, 製法の異なる鋼繊維を用い, 試験要因に対して, 各種実験を行い鋼繊維の評価を行った。



写真-1 橋梁部材

表-1 配合

W/B (%)	単体量 (kg/m ³)			SP C×%
	W	P	S	
14.0	220	1764	445	3.0

表-2 使用鋼繊維の諸元

記号	製造方法	線径 (mm)	長さ (mm)	アスペクト比	用途
HF2	延伸	0.2	13	65	高強度鋼繊維
HF16	延伸	0.16	13	81	
HF34	延伸	0.34	15	44	
F58	延伸	0.58	30	51	一般建設用
CF09	切削	0.09	6	67	工業資材用



写真-2 使用した鋼繊維

殊な養生を行わなくても十分な強度特性を発現できるものである。なお, 配合を表-1 に示す。

2. 実験概要

2.1 使用材料および練混ぜ方法

(1)モルタル

今回使用したモルタルは, セメント等の反応性微粉末と微粉細骨材を混合したプレミックス粉体 (P), 水 (W), 細骨材 (S) および高性能減水剤 (SP) で構成されている。また, 空気量は消泡剤を用いて, 5%以下に調整した。このモルタルは常温硬化型であり, 給熱養生等の特

*1 (株)大林組 技術研究所生産技術研究部 (正会員)
 *2 (株)大林組 技術研究所生産技術研究部 工博 (正会員)
 *3 (株)大林組 四国支店 工修 (正会員)
 *4 (株)大林組 技術研究所生産技術研究部 工博 (正会員)

(2)鋼繊維

鋼繊維は大きく分けて高強度鋼繊維、一般建設用鋼繊維、工業資材用高強度切削鋼繊維の3種類を使用した。なお、使用した鋼繊維を写真-2に示す

高強度鋼繊維は、延伸製法により製造された自動車タイヤに使用するスチールコードである。写真-2に示すように表面は真ちゅうでメッキしており、抗張力は $2,000\text{N}/\text{mm}^2$ 以上である。繊維径は 0.16mm 、 2.0mm および 0.34mm であり、形状はすべて直線である。

一般建設用鋼繊維は、トンネルの吹付けコンクリートや2次覆工、建築の土間等実績のある鋼繊維を使用した。形状は繊維径 0.58mm 、繊維長 30mm で両端に波形形状が施してあり、分散性向上のため鋼繊維同士を接着剤で結束している。抗張力は $1,000\text{N}/\text{mm}^2$ 以上である。

高強度切削鋼繊維は、ブレーキパッド等の耐摩耗性、耐熱性が必要な部材の一部として使用されている繊維である。形状は繊維径 0.09mm 、繊維長 6.0mm であり、鋼材を削って製作しているため、全体的に湾曲し、寸法精度が他の鋼繊維と比較して安定していない。抗張力は $2,000\text{N}/\text{mm}^2$ 以上である。なお、これらの鋼繊維の諸元を表-2に示す。

(3)練混ぜ方法

練混ぜは10リットルのホバート型モルタルミキサを用いて、モルタルを8分程度練混ぜた後、均一に分散するようにふるいを用いて鋼繊維を投入し、さらに3分間練混ぜを行った。なお、写真-3に練混ぜ状況を示す。

2.2 試験要因

試験は3ケースについて行った。ケース1では各種鋼繊維の性能を比較する目的で、モルタル中に体積比2%の鋼繊維を混入し、鋼繊維の違いが硬化物性に与える影響を確認した。ケース2ではケース1で良好と思われる繊維の混入率を1%、2%、2.5%、3%と変化させ、混入率が硬化物性に与える影響を確認した。ケース3では2種類の鋼繊維を混合し、混合比率を10:0、7:3、5:5、0:10と変化させ、混合比率が硬化物性に与える影響を確認した。なお、表-3に使用鋼繊維の混入率および混合比率を示す。

2.3 試験方法

(1)フレッシュ性状試験

フレッシュ性状試験はモルタルフロー試験および空気量測定を行った。モルタルフロー試験はJIS R 5201に準拠しフローを測定した。その際、フローテーブルの落下は行わなかった。空気量測定は容量2リットルのモルタル用空気量測定器を用いて、JIS A 1128に準拠して、実施した。なお、モルタルの分離は目視にて判断した。

(2)硬化物性試験

硬化物性試験として、圧縮強度試験および一軸引張り

表-3 使用鋼繊維の混入率および混入比率

配合 No.	配合記号	使用繊維	繊維混入率 (Vol %)	混合比率
1	B	----	----	----
2	2HF2	HF2	2.0	----
3	1HF16	HF16	1.0	----
4	2HF16		2.0	----
5	25HF16		2.5	----
6	3HF16		3.0	----
7	2HF34S	HF34	2.0	----
8	2F58	F58	2.0	----
9	2CF09	CF09	2.0	----
10	2(5)HF16F58	HF16 : F58	2.0	5 : 5
11	2(7)HF16F58		2.0	7 : 3



写真-3 高強度高じん性材料の練混ぜ状況

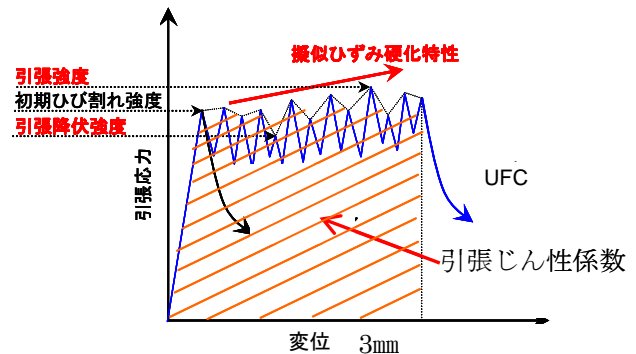


図-1 一軸引張応力下での引張応力-ひずみ曲線の概念

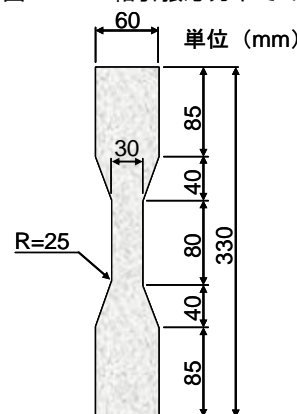


図-2 試験体の形状

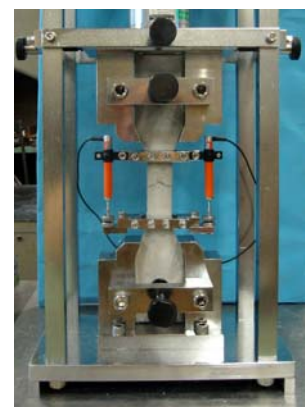


写真-4 試験状況

試験を実施した。

圧縮強度試験はφ50mm×100mmの円柱供試体を作成し、JIS A1108に基づき材齢28日において、試験を実施した。

鋼繊維の評価方法として、通常UFCはJCIから提案されている曲げ試験を実施し、引張軟化曲線を推測する方法で評価³⁾されるが、この方法は特殊な試験器具を用い、データ処理が煩雑となる。そのため今回比較試験として、土木学会の複数ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案)⁴⁾に基づき、一軸引張試験を実施した。一軸直接引張試験は引張強度および引張ひずみ変位について確認した。一軸引張応力下での荷重-ひずみ変位曲線の概念図を図-1に示す。引張応力-ひずみ曲線の抱絡線において、初期ひび割れ点と軟化開始点までの間で、最小応力を示す値を引張降伏強度とし、最大応力を示す値を引張強度とした。また、一軸引張試験結果を定量化する目的で、変位3mmまでの荷重-ひずみ変位曲線の面積を積分し、引張じん性係数と称して数値化した。

一軸引張試験は、図-2に示す幅30mm×厚さ13mmのダンベル型の試験体を作製し、写真-4に示す装置を用い、0.5mm/分の変位制御で载荷を行った。試験は、材齢28日で実施した。なお、各試験体数は4本とし、試験結果は異常値を除き平均化した。

3. 試験結果および考察

3.1 各種鋼繊維の性能比較(シリーズ1)

(1) フレッシュ試験

図-3に各種鋼繊維2%混入したUFCのアスペクト比(繊維長/繊維径)とモルタルフローの関係を示す。ベースのモルタルに鋼繊維を混入すると、2F58を除きアスペクト比が増加することによって、モルタルフローが低下していることが確認できる。アスペクト比の増加は鋼繊維全体の表面積の増加を示している。よって、表面積の増加に伴いペースト部が拘束され、モルタルフローの低下が発生したと考える。また、F58の表面積は単位体積あたり $1.4 \times 10^8 \text{ mm}^2$ であり、2HF16の $4.0 \times 10^8 \text{ mm}^2$ と比較して340%少ない。そのため、ペースト部の拘束力が低下し、材料分離が発生した。加えて、F58は他の鋼繊維と比較して、繊維長が2倍程度長い。そのため、混入率2%の高添加では繊維同士が絡み合い、分散性が著しく低下した。よって、一般建設用鋼繊維を著しくペースト量が多い材料に多量混入する場合は、均一性の確認が必要となる。

空気量はすべての配合で、2.5%から3.5%の範囲にあり、強度に大きな影響を及ぼしていないと考える。

(2) 圧縮強度試験

図-4に各種鋼繊維2%混入したUFCの圧縮強度を示

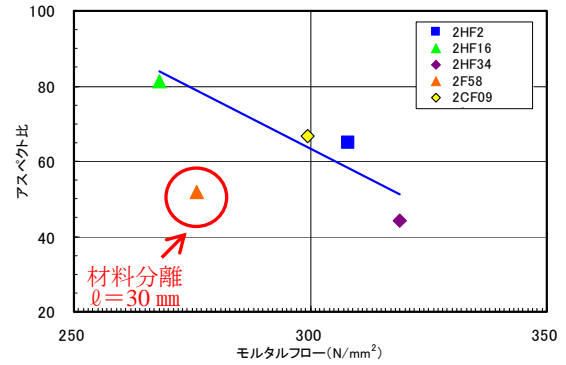


図-3 アスペクト比とモルタルフロー

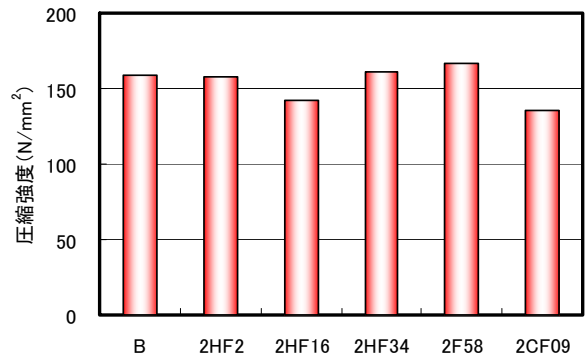


図-4 各種鋼繊維2%混入したUFCの圧縮強度

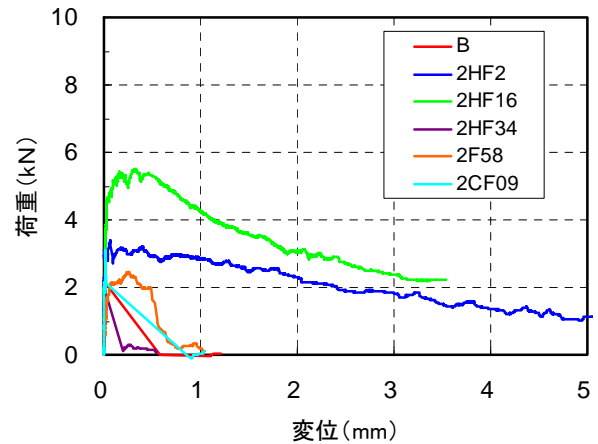


図-5 各種鋼繊維2%混入したUFCの荷重ひずみ変位曲線

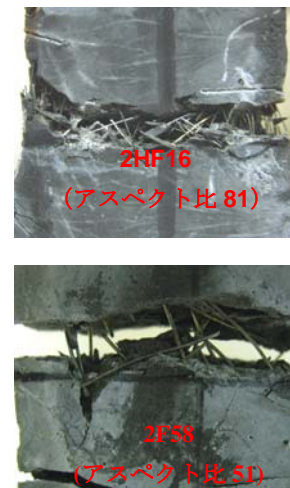


写真-5 一軸引張試験ひび割れ状況

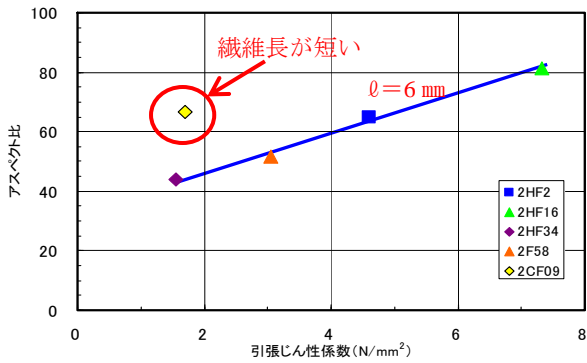


図-6 引張じん性係数とアスペクト比

す。圧縮強度は材齢28日において150N/mm²前後であり、大きな差異は確認できなかった。よって、鋼繊維混入が圧縮強度に与える影響は少ないと考える。

(3) 一軸引張試験

図-5 に各種鋼繊維を2%混入したUFCの荷重ひずみ変位曲線、図-6に各種鋼繊維を2%混入したUFCの引張じん性係数とアスペクト比の関係を示す。荷重ひずみ変位曲線において、2HF2および2FH16はひび割れ発生後も荷重を保持し緩やかに軟化していることが確認できる。しかし、その他の繊維はひび割れ発生直後に荷重を保持できず直線的に軟化しており、引張に対するじん性が小さいことが確認された。2F58は多少硬化しているものの、2F16と比較して著しく小さいことから、試験時の誤差と考えられる。引張じん性とアスペクト比の関係により、アスペクト比が高い鋼繊維は引張じん性係数が高いことが判る。ただし、2CF09のアスペクト比は2HF2と同程度であるが、引張じん性係数は2HF2の34%程度であった。2CF09の引張試験体の破壊断面は繊維の飛び出しが見受けられた。これは繊維長が他の繊維と比較して50%程度と短いので、ひび割れが発生した後、モルタルとの付着が弱く抜けてしまったと考えられる。これらより、繊維長が13mm程度で、アスペクト比が高い鋼繊維は引張じん性係数向上に有効である。また、アスペクト比が高く、繊維径が細く繊維長が短い場合、鋼繊維は写真-5に示すように、一断面に対して繊維量が著しく多くなり、モルタル部の補強効果が向上し、ひび割れ抵抗性が向上すると考える。

各鋼繊維を2%混入したUFCの引張試験結果を図-7に示す。引張強度も引張じん性係数と同様にアスペクト比が高い鋼繊維を用いたものが高い結果を得られた。つまり、引張強度が高い鋼繊維は引張じん性係数が高いことが確認できる。

以上より、各鋼繊維の性能比較において、アスペクト比の高い鋼繊維が最も高い引張性能となり、優れていることが確認できた。

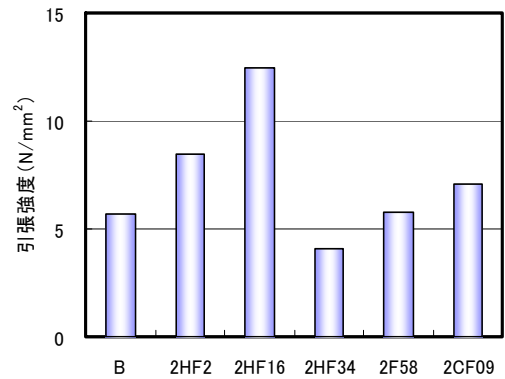


図-7 各種鋼繊維2%混入したUFCの引張強度

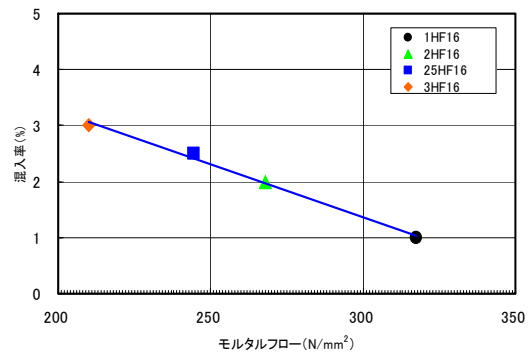


図-8 混入率とモルタルフロー

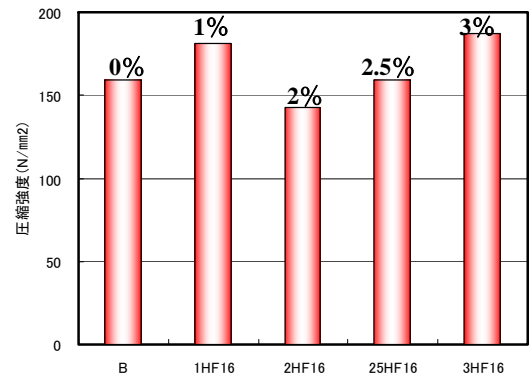


図-9 混入率における圧縮強度

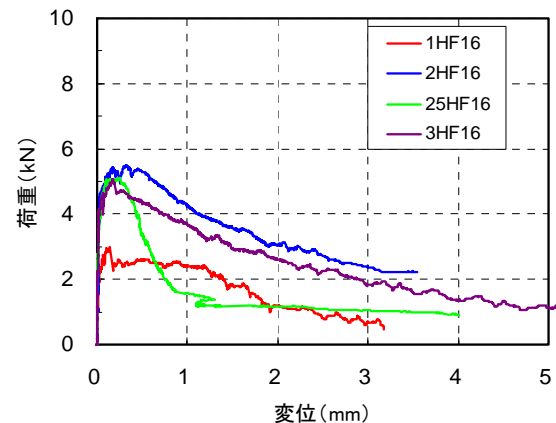


図-10 混入率における荷重ひずみ変位曲

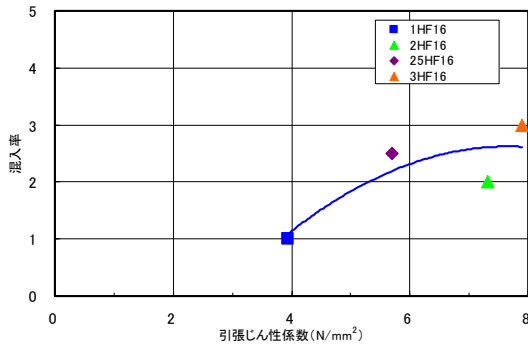


図-11 混入率と引張じん性係数

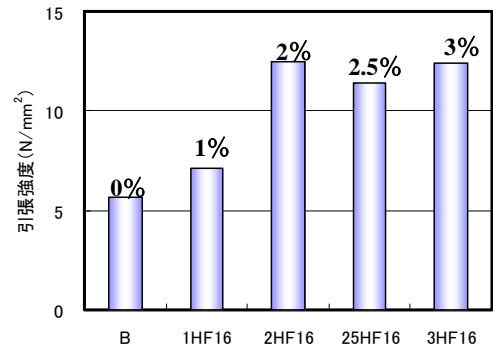


図-12 混入率における引張試験

3.2 鋼繊維の混入率による影響 (シリーズ 2)

(1) フレッシュ試験

図-8 に鋼繊維混入率とモルタルフローの関係を示す。シリーズ 1 と同様に混入率が増加し、鋼繊維の表面積が増えると、ペースト部を拘束しモルタルフローが低下したと考える。また、目視により添加率が 2.5%、3% の 25HF16、3HF16 は鋼繊維同士が絡み合い、材料分離が発生していた。なお、空気量は 2.6%～3.3% の範囲にあった。

(2) 圧縮強度試験

図-9 に混入率における圧縮強度試験結果を示す。混入率 1%、3% の 1HF16、3HF16 の圧縮強度は 180N/mm^2 を超える結果となった。混入率と圧縮強度の相関性は見出せなかった。

(3) 一軸引張試験

図-10 に混入率における荷重ひずみ変位曲線を、図-11 に混入率と引張じん性係数の関係を示す。いずれの混入率においても、ひび割れ発生後も荷重を保ち緩やかに軟化していることが確認できる。しかし、混入率 2.5% の配合は最大荷重直後に急激に軟化している。これはフレッシュ試験結果からわかるように、繊維同士が絡まり鋼繊維の分散性が低下したことが原因であると推測できる。混入率 3% の配合は 2% の配合と同程度であるが、混入率 2.5% を超えると分散性にばらつきが生じ、試験結果が大きくばらつくため、偶然に良好な結果となる場合があると考えられる。同様に混入率と引張じん性係数からも同様な現象が生じていると考えられる。

図-12 に混入率の引張強度を示す。混入率 2% が最大の値を示しているが、混入率 2.5%、3% においてもほぼ同程度の試験結果であり、鋼繊維を 2% 以上混入しても鋼繊維同士が絡まり分散性が低下し、鋼繊維の性能を有効に発揮できないためと考える。以上より鋼繊維の混入率は HF16 の鋼繊維 2% 程度がよいことが確認できた。

3.3 2 種類の鋼繊維を混合した影響 (シリーズ 3)

(1) モルタル試験

図-13 に HF16 の混合率とモルタルフローの関係を示す。HF16 と F58 の混合比率を変化させても、モルタル

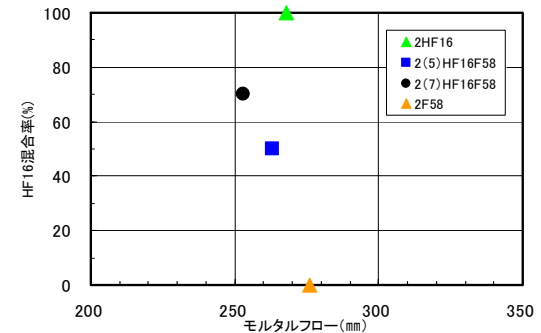


図-13 HF16 の混合率とモルタルフロー

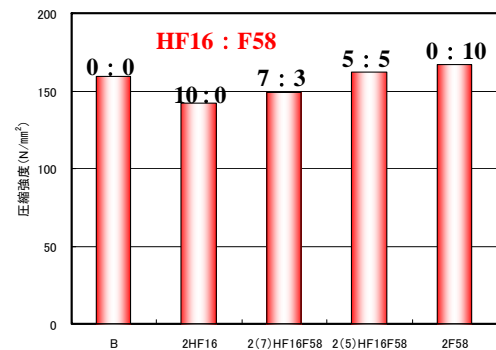


図-14 2 種類の鋼繊維を混合した圧縮強度

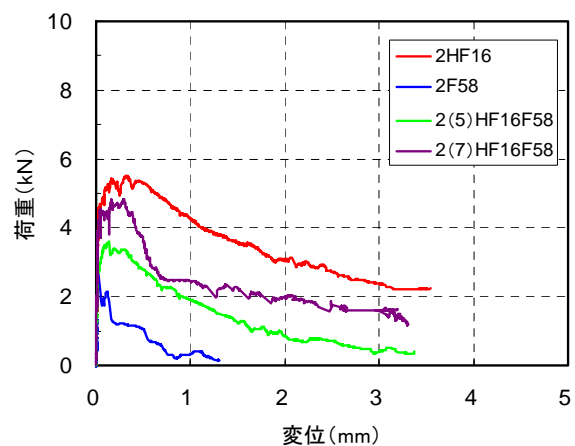


図-15 2 種類の鋼繊維を混合した荷重ひずみ変位曲線

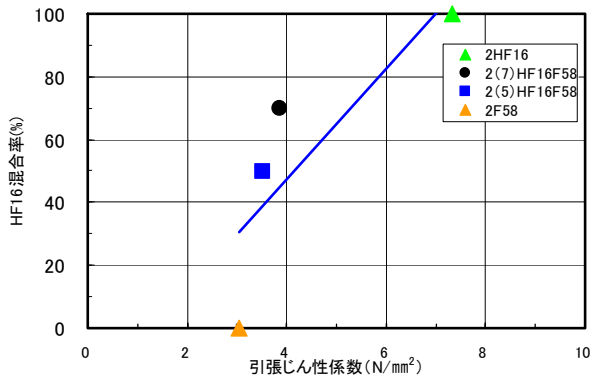


図-16 HF16の混合率と引張じん性係数

フローは250mm～300mmの範囲にあり、混入による変化は認められない。しかし、目視試験の結果では、一般建設用鋼繊維の混合比率30%、50%混入の2(7)HF16F58、2(5)HF16F58の配合において材料分離が認められた。これはケース1における2F58と同様に表面積が著しく少ない鋼繊維を使用したことにより、ペーストの拘束力が低下し、材料分離が発生したと考えられる。なお、空気量は2.6%～4.7%の範囲にあり、圧縮強度に与える影響は少ないと考える。

(2) 圧縮強度試験

図-14にHF16の混入率の圧縮強度を示す。圧縮強度は材齢28日において150N/mm²前後であった。2種類の鋼繊維の混合割合が圧縮強度に与える影響は少ないと考える。

(3) 一軸引張試験

図-15にHF16混合率の荷重ひび割れ変位曲線を、図-16に2種類の鋼繊維を混合した引張じん性係数を示す。2F58を除きひび割れ発生後緩やかに軟化しているものの、F58が混入している配合は軟化曲線の傾きが急激に低下している。引張じん性係数からわかるようにこれらを定量的に判断すると、HF16を100%とした2HF16と比較して、F58が30%混合している2(7)HF16F58は46%程度低下している。すなわち、ケース1の試験結果からわかるように、F58を少量添加することにより、F58の繊維長がHF16の繊維長と比較して2倍以上長いために、鋼繊維同士が絡み合い、鋼繊維の分散性が低下し、鋼繊維に期待している性能を十分に発揮できていないことが確認できる。

図-17に2種類の鋼繊維を混合した引張強度を示す。F58の混入率が増加することにより、引張強度は低下する傾向が確認できた。

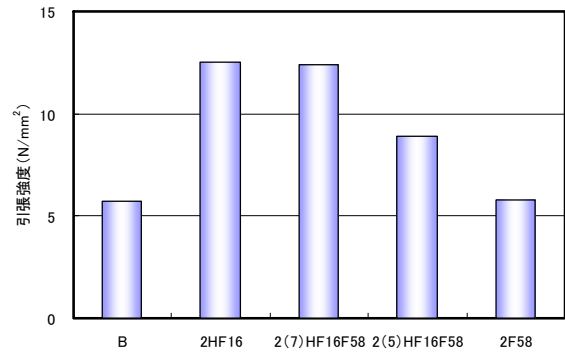


図-17 2種類の鋼繊維を混合した引張強度

4. まとめ

常温硬化型の高じん性高強度セメント複合材料に使用する鋼繊維選定試験の結果から以下の知見が得られた。

- (1) 各種鋼繊維のアスペクト比とモルタルフローは反比例の関係にあり、アスペクト比が増加するとモルタルフローが低下していることが確認できる。
- (2) 表面積が小さく、かつ繊維長が長い鋼繊維は材料分離を発生しやすい。
- (3) 鋼繊維混入による圧縮強度の改善効果は小さいと考えられる。
- (4) φ0.16mm×13mmのアスペクト比が高い鋼繊維は引張じん性係数向上に有効である。
- (5) 引張強度が高い鋼繊維は、引張じん性係数も高いことが確認できる。
- (6) 添加率2.5%、3%の配合は鋼繊維同士が絡み合い、材料分離が発生した。
- (7) 鋼繊維を2%以上混入しても鋼繊維同士が絡まり分散性が低下し、鋼繊維の性能を有効に発揮できない。
- (8) φ0.58mm×30mmの鋼繊維を30%程度混合すると、ペーストの拘束力が低下し、材料分離が発生した。
- (9) φ0.58mm×30mmの鋼繊維を30%以上混合すると、鋼繊維の分散性が著しく低下し、鋼繊維に期待している性能を十分に発揮できない。

参考文献

- 1) 塩永亮介：鉄筋を有する高強度繊維補強モルタル部材の曲げ挙動，コンクリート工学年次論文集 Vol.30, No.1, 2008年7月，pp309-314
- 2) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），2004年9月
- 3) コンクリート工学協会：高強度・高じん性コンクリート利用研究委員会報告書，2009年3月，pp64
- 4) 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）