

ポリプロピレン短繊維を用いた複数微細ひび割れ型 繊維補強セメント複合材料の開発

平田 隆 祥 川西 貴 士
岡野 素 之 渡辺 哲

Fundamental Studies of HPFRCC using Polypropylene Short Fiber

Takayoshi Hirata Takashi Kawanishi
Motoyuki Okano Satoshi Watanabe

Abstract

This paper describes a high performance fiber reinforced cement composite with a polypropylene short fiber. Polypropylene short fiber is used as a concrete admixture to improve various performances. For instance, this fiber is used to improve fire resistance, delamination resistance, and bending toughness. The purpose of this study was to verify the character and performance of the high performance fiber reinforced cement composite with a polypropylene short fiber. The results of the experiment indicate that this high performance fiber reinforced cement composite with a polypropylene short fiber possesses high tensile toughness. Further, the bend strength and shear strength of a reinforced concrete test beam was confirmed to have improved.

概 要

ポリプロピレン短繊維は、火災時の爆裂抵抗性、はく離はく落対策および曲げじん性の向上などを目的とし、セメント・コンクリート用混和材料として適用されている。一般に、ポリプロピレン短繊維は、セメントマトリックス中での化学的安定性や変形性、分散性に優れるとともに、ポリプロピレン樹脂自体に極性が無く、セメントと化学的に結合しない特徴を有する。そこで、本報告では、多量に繊維を使用する場合のセメントマトリックス中での分散性や、一体性を改良した連糸形状のポリプロピレン短繊維を「複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料」に適用し、その基礎物性や、はり部材による曲げおよびせん断性能について検討した。その結果、ポリプロピレン短繊維を用いた「複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料」は、優れた引張じん性を有するとともに、はり部材の力学的試験結果から、曲げおよびせん断耐力の向上を確認した。

1. はじめに

引張力を分担し、ひび割れ幅を微細に抑制し、大きな引張変形とじん性を有するセメント系材料として「複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (High Performance Fiber Reinforced Cement Composite : 以下HPFRCCと表記)」があり、2007年3月に(社)土木学会からその設計・施工指針(案)¹⁾(以下指針案と表記)が発刊された。このHPFRCCは、セメント系材料と補強用の有機系短繊維を用いた複合材料で、一軸引張応力下において、Fig. 1 に示すような擬似ひずみ硬化特性を示すとともに、微細で高密度の複数ひび割れを形成する高じん性材料である。

従来、このHPFRCCの補強用繊維として、有機系短繊維であるポリビニルアルコール短繊維^{1), 2)}や、高強度ポリエチレン短繊維¹⁾が用いられている。

一方、現在セメント・コンクリートの分野で使用実績が多い有機系短繊維に、ポリプロピレン短繊維(以下PP繊維と表記)がある。このPP繊維は、セメントマトリックス中での化学的安定性や変形性、分散性に優れるととも

に、ポリプロピレン樹脂自体に極性が無く、セメントと化学的に結合しない特徴を有する。

本報告では、多量の繊維を使用する場合に、セメントマトリックス中での分散性や、一体性を改良したPhoto 1 に示す連糸形状のPP繊維に着目し、このPP繊維を用いたHPFRCCの材料特性について検討した。また、比重の異なる材料の分離を抑制するために、分離低減剤を用いた場合の効果についても検討した。さらに、HPFRCCを用いたはり部材の静的曲げ実験を行い、曲げおよびせん断耐力などの構造性能について検討した。

2. HPFRCCとは

HPFRCCは、引張応力下で降伏点を有するセメント複合材料で、Photo 2 に示すように高い変形性能を有する材料である。繊維の種類や長さ、添加量、セメントや粉体の種類を厳選して練混ぜ水と混合することで、ひび割れが発生する際に生じる引張力よりも、ひび割れを架橋する繊維の引張力を大きくすることが可能となる。

これにより、Photo 3 に示すように発生するひび割れ

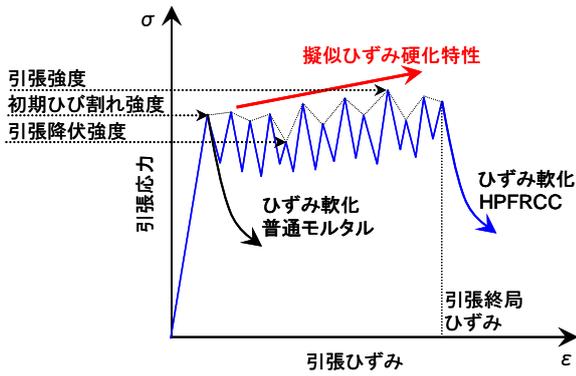


Fig. 1 引張応力化におけるひずみ硬化およびひずみ軟化特性の概念¹⁾
Tensile-strain Diagram of HPFRCC

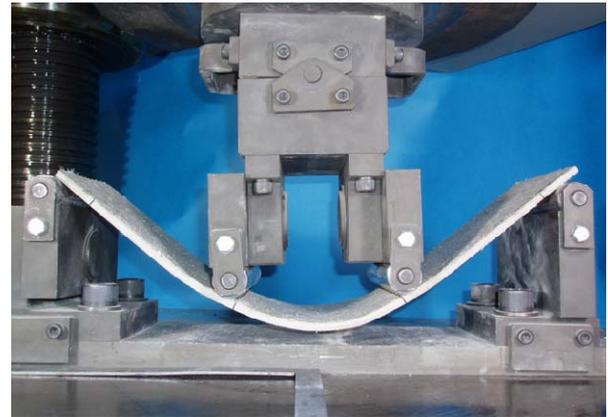


Photo 2 HPFRCCボードの曲げ荷荷状況
Bending test of HPFRCC Board

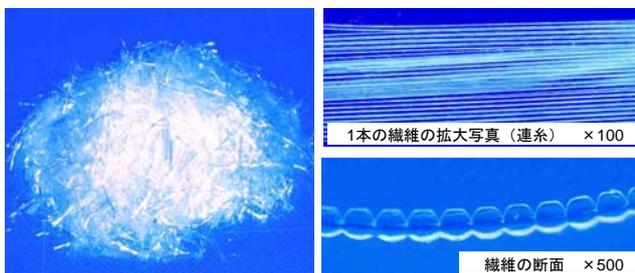


Photo 1 使用したPP繊維
Polypropylene Short Fibers

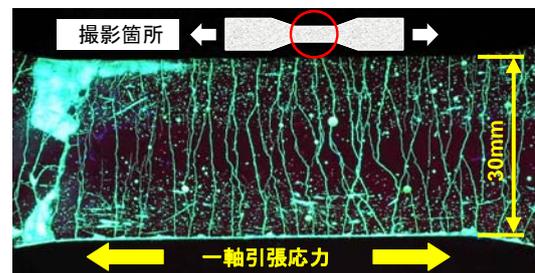


Photo 3 複数微細ひび割れ発生状況
Condition of Many Fine Cracks

幅を微細に制御することができ、高いじん性や伸び能力、耐久性が得られる。このHPFRCCは、下記の適用が考えられる。

- 1) 疲労を受ける床版部材
- 2) ひび割れ幅制御型・高耐久性補修補強部材
- 3) エネルギー吸収部材
- 4) 耐火被覆材

3. 材料の基礎物性確認実験結果と考察

実験に使用したモルタル配合をTable 1 に示す。水結合材比47%の配合 (PP-47) を基本に、付着力の向上を目的として、水結合材比を低減し、分離低減剤を添加した水結合材比 (PP-42) についても併せて検討を行った。いずれもPP繊維は、3.0vol%添加した。

実験に使用したPP繊維の物性をTable 2 に示す。このPP繊維は、Photo 1 に示すように、多量の繊維を添加する場合に、練混ぜ時の分散性を向上することを目的とし、連糸形状に工夫したものである。

練混ぜ方法は、強制練り2軸ミキサを使用し、モルタルを180秒間練り混ぜた後、繊維を一括投入し、さらに120秒間練混ぜを行った。

試験は、フレッシュの特性としてモルタルのスランプフロー、JISフローおよび空気量を測定し、硬化後の特性として、圧縮強度試験と一軸直接引張試験を実施した。

Table 1 モルタルの配合
Mixed Proportion of Mortar

配合の種類	W/B (%)	S/B	W (kg/m ³)	分離低減剤 (kg/m ³)	PP繊維 (vol%)
PP-47	47.0	0.83	385	—	3.0
PP-42	42.0	0.69	350	0.4	3.0

Table 2 PP繊維の物性
Material of Polypropylene Short Fiber

使用繊維	繊維度 (dtex)	長さ (mm)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
ポリプロピレン短繊維 (PP繊維)	13	12	482	5000

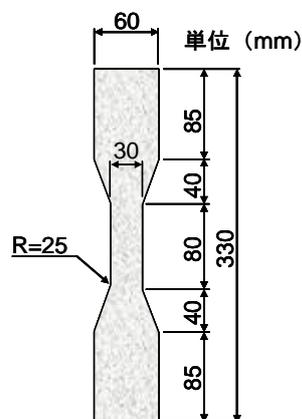


Fig. 2 試験体の形状
Tensile Strength Test Piece



Photo 4 一軸直接引張試験
Uni-axial Tensile Strength Test

Table 3 フレッシュおよび硬化後の特性
Test Results of HPFRCC

試験体種類	フレッシュモルタルの性状					硬化後の特性			
	試験時期	スランプフロー (cm)	JISフロー (mm)		空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	引張終局ひずみ (%)
			0打	15打					
PP-47	直後	59.0×58.0 (58.5)	173×158 (166)	238×230 (234)	8.0	21.5	2.2	4.5	3.2
PP-42	直後	59.0×57.0 (58.0)	170×162 (166)	235×229 (232)	9.2	24.1	2.5	4.4	3.6

※硬化後の特性の各試験結果は、いずれも3本の平均を示す。

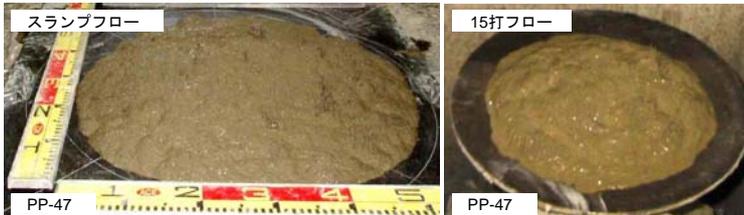


Photo 5 モルタルのスランプフローおよびJISフローの試験状況
Slump and JIS Flow of HPFRCC

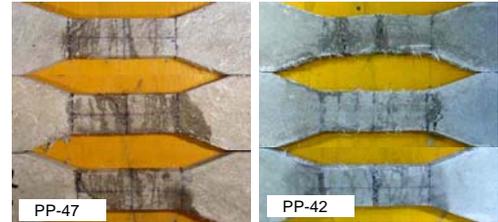


Photo 6 ひび割れの発生状況
Fine Cracks of Test Piece

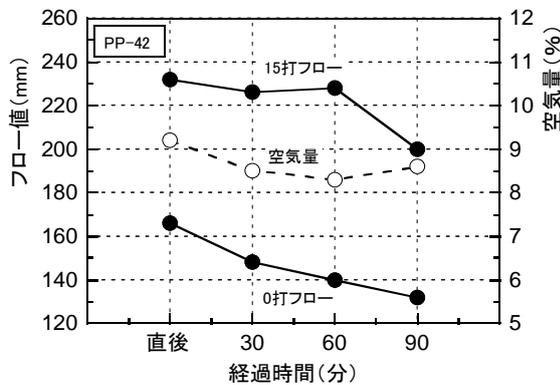


Fig. 3 フレッシュの経時変化
Relationship Between time and JIS Flow, Air

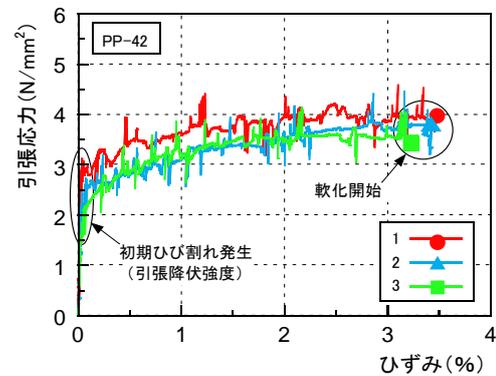


Fig. 4 引張応力-ひずみ曲線 (PP-42)
Tensile-strain Diagram (PP-42)

一軸直接引張試験は、Photo 4 に示す試験装置を用い、指針案に準拠して行った。Fig. 2 に示す幅30mm×厚さ13mmのダンベル型の試験体を使用して、0.5mm/分の変位制御で载荷を行った。圧縮強度試験および一軸直接引張試験は、材齢28日で実施した。

3.1 フレッシュおよび硬化後のHPFRCCの特性

フレッシュおよび硬化後のモルタルの特性をTable 3 に示す。また、PP-47のスランプフローおよびJISフローの試験状況をPhoto 5 に示す。

両モルタル配合とも、スランプフローは58cm程度、15打フローは230mm程度となり、十分な自己充てん性を有していることが確認できた。また、フレッシュの状態は良好であり、材料分離は発生せず、繊維の分散も良好だった。

PP-42のフレッシュの経時変化をFig. 3 に示す。練混ぜ後90分の段階でも、15打フローは、200mm以上確保された。空気量は、ほとんど変化が認められず、8%~9%の間で推移した。

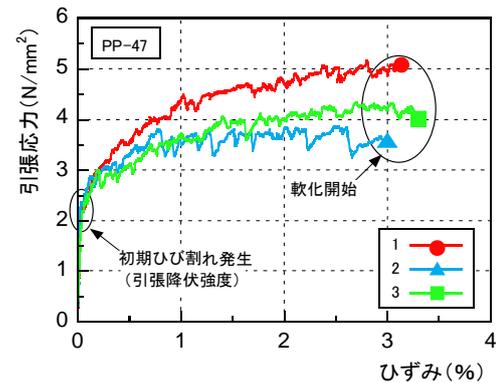


Fig. 5 引張応力-ひずみ曲線 (PP-47)
Tensile-strain Diagram (PP-47)

3.2 HPFRCCの引張応力とひずみの関係

一軸直接引張試験から得られた引張応力-ひずみ曲線をFig. 4, Fig. 5 に示す。いずれの試験体も引張強度は4 N/mm²~5N/mm²程度であり、圧縮強度との比率は1/5~1/6と比較的大きな値を示した。両配合ともに、初期ひび割れ発生後から軟化開始点まで、引張応力は常に初期ひび割れ強度を上回り、擬似ひずみ硬化特性が確認できた。

従って、引張降伏強度と初期ひび割れ強度は同じ値となった。

初期ひび割れ強度は、PP-42の方がPP-47に比べて若干高い値を示した。これは、PP-42の方がPP-47に比べて、圧縮強度が高く、分離低減剤の添加により、繊維の付着力が高まったことに起因していると考えられる。また、引張終局ひずみはいずれも3%程度となった。

ひび割れの発生状況は、Photo 6 に示すように試験区間内において一箇所に偏ることなく、微細で高密度の複数ひび割れが発生しており、良好なひび割れ分散性を示した。

4. 構造性能確認実験結果と考察

PP繊維を用いたHPFRCC部材の曲げとせん断耐力がどの程度向上するか、および、部分的なHPFRCCの使用による補強効果がどの程度であるかの知見と、基礎データを得るため、はり部材による構造性能確認実験を行った。

試験体の種類をTable 4 に示す。試験体の断面は、幅200mm×高さ300mmで、曲げ破壊型とせん断破壊型の試験体合計5体について実験を行った。

曲げ破壊型の試験体は、1/3の範囲にHPFRCCを適用した試験体B-FCSと、全断面にHPFRCCを適用した試験体B-FSの2種類とした。一方、せん断破壊型の試験体は、コンクリートのみが無垢な試験体S-Cと、全断面にHPFRCCを適用した試験体S-F、および全断面にHPFRCCを適用し、かつ帯鉄筋を配置した試験体S-FSの3種類とした。

載荷実験は、Fig. 6 に示すようにローラー支承とし、スパン中央に対し左右対称の2点に対して1方向に載荷する曲げ型のはり形式で、せん断スパン比は2.4とした。

コンクリートおよびHPFRCCの配合をTable 5 に示し、それらの物性をTable 6 に示す。また、使用した鋼材の物性をTable 7 に示す。HPFRCCの配合は、前章の基礎的検討で使用したPP-47の配合を元に、分離低減剤を添加した配合とした。HPFRCCの圧縮強度と割裂引張強度は、ともにコンクリートを2割程度上回った。また、ヤング係数はコンクリートよりも低い値を示した。

4.1 曲げ破壊型試験体

実験結果の一覧をTable 8 に示す。曲げ破壊型の試験体の荷重と変位の関係をFig. 7 に示す。また、各試験体の終局時の破壊状況をPhoto 7, Photo 8 に示す。

曲げ破壊型はり部材のひび割れ発生状況は、通常のはり部材と比較して、ひび割れ本数が多く、分散性が高いことが確認できる。

1/3の範囲にHPFRCCを適用した試験体B-FCSは、34kNで曲げひびわれが発生し、主鉄筋が175kNで降伏した後、荷重の上昇は緩やかになり変位65mmで最大220kNに達した。その後100mmまで降伏荷重を維持した。一方、試験体B-FSは47kNで曲げひびわれが発生し、主鉄筋が175kNで降伏した後、荷重の上昇は緩やかになり変位65mmで最大227kN

Table 4 試験体の一覧
List of Specimens

形式 試験体	曲げ破壊型		せん断破壊型		
	B-FCS	B-FS	S-C	S-F	S-FS
試験体の概略図 (断面の着色部位にHPFRCCを適用)					
	1/3の範囲 HPFRCC	全断面 HPFRCC	HPFRCC なし	全断面 HPFRCC	全断面 HPFRCC
主鉄筋	D19(SD295)		φ23(ゲビンデスタープ)		
帯鉄筋	D6@75(SD345)		なし		D6@150 (SD345)

Table 5 コンクリートおよびモルタルの配合
Mixed Proportion of Concrete and Mortar

配合の種類	W/B (%)	s/a	S/B	W (kg/m ³)	分離 低減剤 (kg/m ³)	PP繊維 (vol%)
コンクリート	45.0	45.0	—	160	—	—
HPFRCC	47.0	—	0.83	385	0.3	3.0

Table 6 コンクリートおよびモルタルの物性
Mechanical Properties of Concrete and Mortar

配合の種類	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm ²)
コンクリート	31.1	2.55	2.53
HPFRCC	39.1	3.16	1.54

Table 7 鋼材の物性
Mechanical Properties of Steels

鋼材の使用部位	サイズ	材質	降伏点 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm ²)
主鉄筋	D19	SD295	327	1.93
	φ23	ゲビンデスタープ	1138	2.02
帯鉄筋	D6	SD345	371	1.95

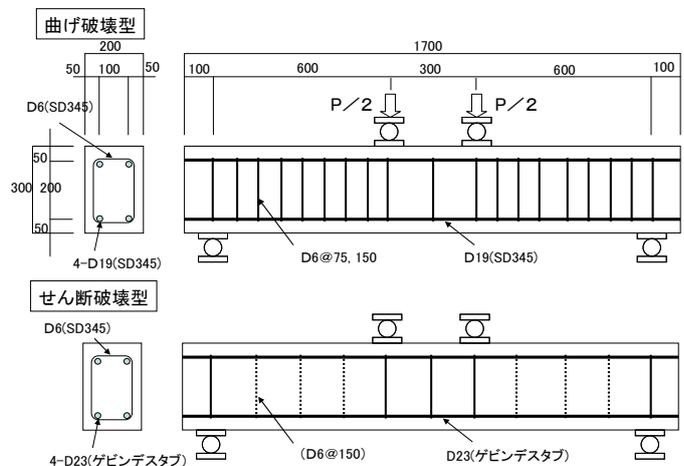


Fig. 6 試験体の寸法
Outline of Specimens

に達した。その後110 mmまで降伏荷重を維持した。断面の引張側1/3の範囲にHPFRCCを適用した試験体B-FCSは、全断面にHPFRCCをいた試験体B-FSとほぼ同程度の耐力を保持した。

曲げ破壊型試験体の曲げ耐力は、PP繊維を混入していない通常のRC部材の曲げ耐力計算値が144kNであるのに対して、HPFRCCを全断面に適用した試験体B-FSの実験値は227kNであり、1.57倍となった。これは、PP繊維が引張力を分担しているためと考えられる。

また、曲げ耐力は、指針案に準拠して算出した耐力計算値 (B-FCS:194kN, B-FS:228kN) と実験値 (B-FCS:220 kN, B-FS:227kN) とがほぼ一致している。両試験体間の曲げ耐力の差が小さい理由としては、繊維がひび割れ後の引張力を分担するため、圧縮縁から遠い部位が支配的となることが考えられる。

4.2 せん断破壊型試験体

実験結果の一覧をTable 8に示す。せん断破壊型の試験体の荷重と変位の関係をFig. 8に示す。また、各試験体の終局時の破壊状況をPhoto 9～Photo 11に示す。

せん断破壊型はり部材の破壊状況は、コンクリートのみの試験体S-Cと比較して、全断面にHPFRCCを適用した試験体S-Fおよび試験体S-FSの方が、明らかにひび割れ分散性が高いことが確認できる。

いずれの試験体の最大荷重とも、指針案に準拠して算出したせん断耐力の計算値と比較して、実験値の方が大きい値を示した。コンクリートのみの試験体S-Cについては、曲げひび割れ発生荷重が47kNであり、変位4.7mmで最大荷重170kNに達した。せん断耐力の計算値は73kNであり、計算値の2.3倍となった。

それに対して、全断面にHPFRCCを適用した試験体S-Fは、曲げひび割れが63kNで発生し、変位10.4mmで最大荷重400kNに達した。また、試験体S-FSは、曲げひび割れが55kNで発生し、変位14.3mmで最大荷重482kNに達した。

せん断耐力の計算値は、試験体S-Fが370kN、試験体S-FSが438kNであり、両者とも計算値と実験値を比較すると、実験値が1割程度大きい値となり、計算値とほぼ一致する結果となった。

せん断耐力について、コンクリートとHPFRCCを比較すると、試験体S-Cの実験値が170kNであるのに対して、全断面にHPFRCCを適用した試験体S-Fは400kNであり、2.35倍までせん断耐力が向上した。圧縮強度の増分を考慮しても、大幅なせん断耐力の増加効果が認められた。

次に、帯鉄筋の有無がせん断耐力に及ぼす影響を比較すると、帯鉄筋を配置していない試験体S-Fの実験値が400kNであるのに対して、帯鉄筋を配置した試験体S-FSの実験値は482kNであり、せん断耐力が82kN向上した。

一方、試験体S-Fのせん断耐力の計算値は370kN、試験体S-FSの計算値は438kNであり、計算値の差分は68kNとなった。以上の結果より、実験で確認した帯鉄筋のせん断耐力の分担分は、指針案に示されている算定式よりも、

Table 8 実験結果の一覧
Experimental Results

形式	試験体	実験値 (kN)		計算値 [※] (kN)		実験値 計算値
		最大荷重	せん断破壊荷重	曲げ耐力	せん断耐力	
曲げ破壊型	B-FCS	220	—	194	—	1.13
	B-FS	227	—	228	—	1.00
せん断破壊型	S-C	—	170	—	73	2.33
	S-F	—	400	—	370	1.08
	S-FS	—	482	—	438	1.10

※計算値は指針案に準拠して算出

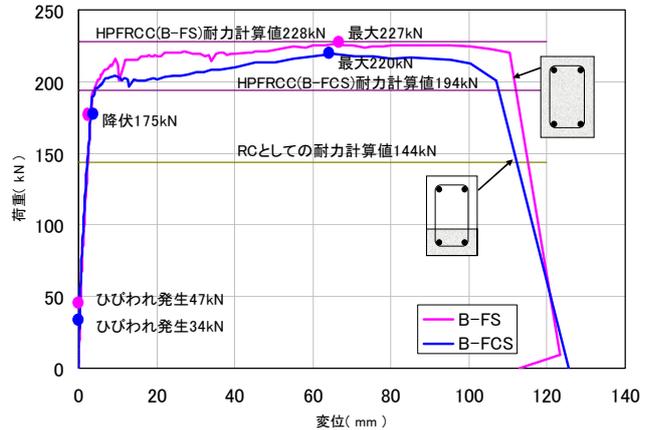


Fig. 7 曲げ破壊型の試験体の荷重と変位の関係
Load-Displacement Relationship of Specific Flexural Failure



Photo 7 終局時の破壊状況 (B-FCS)
Ultimate State of Specimen (B-FCS)

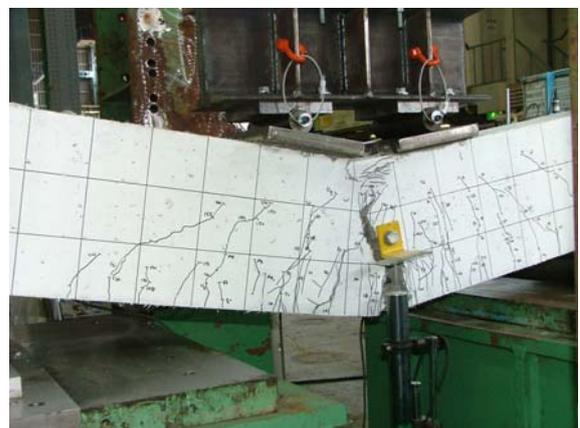


Photo 8 終局時の破壊状況 (B-FS)
Ultimate State of Specimen (B-FS)

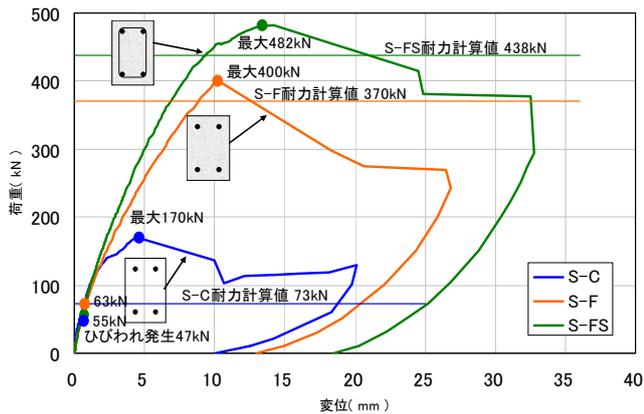


Fig. 8 せん断破壊型の試験体の荷重と変位の関係
Load-Displacement Relationship of Specific Shier Failure



Photo 9 終局時の破壊状況 (S-C)
Ultimate State of Specimen (S-C)



Photo 10 終局時の破壊状況 (S-F)
Ultimate State of Specimen (S-F)



Photo 11 終局時の破壊状況 (S-FS)
Ultimate State of Specimen (S-FS)

大きな値となっており、安全側に評価できることが確認できた。

5. まとめ

ポリプロピレン短繊維を3.0vol%添加したセメント複合材料について、材料の基礎物性と、はり部材による構造性能を確認した結果、以下の知見が得られた。

- 1) スランブフローで58cm程度、15打フローで230mm程度の流動性を確保でき、自己充てん性を有する。
- 2) 硬化後は、初期ひび割れ発生後も引張応力が増加し、擬似ひずみ硬化特性を有する。
- 3) 微細で高密度の複数ひび割れの形成により、3%程度の引張終局ひずみとなる引張変形性能を有する。
- 4) HPRCCを適用したはり部材は、一般のRCはり部材と比較して、ひび割れの分散性が向上する。
- 5) はりの曲げ耐力は、一般のRC部材の計算値と比較して5割以上増加した。また、曲げ耐力は、土木学会の設計・施工指針（案）に準拠した計算値と概ね一致する。

- 6) はり部材の引張側1/3の範囲にHPRCCを適用することで全断面に適用する場合と同程度に曲げ耐力が向上する。
- 7) 全断面にHPRCCを適用したはり部材のせん断耐力は、コンクリートのみのはり部材と比較すると約2倍以上に向上した。
- 8) 土木学会の設計・施工指針（案）に示されているせん断耐力の算定式は、安全側に評価できる。

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，No.127，2007.3
- 2) Li, V. C. etc.: Micromechanics-based Durability Study of Polyvinyl Alcohol-Engineered Cementitious Composite (PVA-ECC), ACI Materials J., Vol. 101, No. 3, pp. 242-248, 2004