

# 論文 ポリプロピレン短繊維を用いた高じん性セメント系材料の一軸引張特性および耐久性に関する基礎的検討

川西 貴士<sup>\*1</sup>・平田 隆祥<sup>\*2</sup>・大島 章弘<sup>\*3</sup>・森宗 義和<sup>\*4</sup>

**要旨**：ポリプロピレン短繊維は、比較的安価であり、セメントマトリックス中での化学的安定性や変形性、分散性に優れるため、幅広い用途で使用されているが、樹脂自体に極性がなく、セメントと化学的に結合しない特徴を有するため、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料には不向きとされてきた。そこで、付着性を向上させたポリプロピレン短繊維を、多量に添加したモルタルの一軸引張特性、耐久性および収縮特性について検討した。その結果、擬似ひずみ硬化特性を有し、ひび割れを微細に分散することが可能であることと、繊維を混入しないモルタルと同等の耐久性や収縮ひずみとなることを確認した。

**キーワード**：ポリプロピレン短繊維, HPFRCC, じん性, 引張降伏強度, 引張終局ひずみ, 耐久性

## 1. はじめに

近年、じん性や疲労耐久性を要する部材の補強や、中性化、塩分浸透に対する耐久性を要する部材の表面補修などに、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) の適用が検討されており、2007年3月に土木学会から設計・施工指針(案)<sup>1)</sup>(以下, 指針案と表記)が発刊された。この材料は、変形性能に優れ、ひび割れ幅を微細に分散できることが特徴である。

指針案では、引張強度、ヤング係数、付着力などが高いことから、補強用短繊維として、主にビニロン短繊維(以下, PVA 繊維と表記)を使用した場合について記述しているが、伸び能力が高く、アルカリ環境下での耐久性に優れる繊維として、ポリプロピレン短繊維(以下, PP 繊維と表記)も有力な候補材料として挙げられる。PP 繊維は、比較的安価であり、素材が柔らかく、繊維の分散性や作業性が良いことから、ひび割れ抑制、はく離はく落防止、曲げじん性の向上および火災時の爆裂抵抗性改善など幅広い用途で使用されている。しかし、ポリプロピレン樹脂は、C, H の分子式からなり、OH 基等の親水基を有していないので、樹脂自体に極性がなく、セメントと化学的に結合しない特徴<sup>2)</sup>を有するため、HPFRCC には不向きとされてきた。

そこで、著者らは、PP 繊維の表面に微細な凹凸を施すことで、繊維の付着力の改善を試みてきた。この改良した PP 繊維を多量に添加したモルタルについて、これまでに良好なフレッシュ性状、繊維の分散性、擬似ひずみ硬化特性およびひび割れの分散性が得られることを確認<sup>3)</sup>している。

本稿では、力学的性能のうち一軸引張特性に着目し、PP 繊維の添加量や水結合材比などの配合条件を変化させたモルタルについて、指針案に規定されている一軸直接引張試験により検討を行った。

また、PP 繊維を多量に添加した場合、繊維とモルタルの界面から塩化物イオンや二酸化炭素が浸入する可能性があり、耐久性に与える影響を確認する必要がある。そこで、PP 繊維を混入した配合と混入しない配合について比較し、PP 繊維の多量添加が耐久性や収縮特性に及ぼす影響について検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験ケース

実験は、2つのシリーズに大別して実施した。シリーズ1では、HPFRCC としての所要の性能である擬似ひずみ硬化特性や、複数で微細なひび割れを形成する配合を選定するために、PP 繊維の混入率、水結合材比、膨張材および分離低減剤を添加した試験体を作製し、一軸直接引張試験を行い一軸引張特性に及ぼす各種要因の影響について検討した。

シリーズ2では、シリーズ1で得られたいくつかの配合について、耐久性や収縮特性について検討した。

### 2.2 使用材料、配合および練混ぜ方法

実験に使用したモルタルの種類と実験の検討ケースを表-1に示す。使用したセメントは、普通ポルトランドセメントをベースとした。補強用短繊維は、PP 繊維を基本とし、比較用として PVA 繊維を用いた。使用した繊維の物性を表-2に示す。PP 繊維は、写真-1に示すように、繊維を多量添加し、練混ぜ性能を向上させるため

\*1 (株)大林組 技術研究所生産技術研究部 主任 工修 (正会員)

\*2 (株)大林組 技術研究所生産技術研究部 主任研究員 博士(工学) (正会員)

\*3 萩原工業(株) 合成樹脂事業部製品開発部 製品開発グループハギライン BU チームリーダー 工修 (正会員)

\*4 萩原工業(株) 合成樹脂事業部営業部 バルチップグループリーダー (正会員)

表-1 モルタルの種類および検討ケース

試験体種類	配合条件							一軸引張特性の検討 (シリーズ1)							耐久性および収縮の検討 (シリーズ2)									
	補強用繊維の種類	W/B (%)	S/B	W (kg/m <sup>3</sup> )	膨張材※1 (kg/m <sup>3</sup> )	分離低減剤 (kg/m <sup>3</sup> )	PP繊維 (vol%)	(1) 引張強度・引張降伏強度	(2) 繊維混入率	(3) 長期材齢	(4) 膨張材※1	(5) 分離低減剤	(6) 引張応力-ひずみ曲線	(7) ひび割れ分散性	(1) 塩分浸漬試験	(2) 中性化促進試験	(3) 凍結融解試験	(4) 拘束膨張および収縮試験						
PVA2-47	PVA繊維	47.0	0.83	385	0	0	2.0※2			●														
PP0-47	PP繊維	47.0	0.83	385	0	0	0.0							●	●			●						
PP2-47							2.0							●									●	
PP3-47							3.0	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
PP3-47-E2							20	●							●									●
PP3-47-E4							40	●							●									●
PP3-47-V5							0	0.5※3							●		●							
PP3-47-V10							0	1.0※3							●		●							
PP3-44-E2-V4		44.0	0.77	350	20	0.4※4								●	●	●		●						
PP0-42-E2-V4		42.0	0.69				0.0							●	●	●		●						
PP3-42-E2-V4		40.0	0.61				3.0							●	●	●		●						
PP3-40-E2	0						●						●					●	●	●		●		

※1 低添加型石灰系膨張材を使用  
 ※2 PVA繊維を使用  
 ※3 多糖類ポリマー系分離低減剤を使用  
 ※4 ウェランガム系分離低減剤を使用

PP3 - 42 - E2 - V4  
 分離低減剤の添加率 (記述なし: 分離低減剤なし, V4: 0.4kg/m<sup>3</sup>, V5: 0.5kg/m<sup>3</sup>, V10: 1.0kg/m<sup>3</sup>)  
 膨張材の添加率 (記述なし: 膨張材なし, E2: 20kg/m<sup>3</sup>, E4: 40kg/m<sup>3</sup>)  
 水結合材比 (47: 47%, 44: 44%, 42: 42%, 40: 40%)  
 有機短繊維の種類と混入率 (PP0: PP繊維なし, PP2: PP繊維2.0vol%, PP3: PP繊維3.0vol%, PVA2:PVA繊維2.0vol%)

表-2 繊維の物性

使用繊維	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	繊維度 (dtex)	長さ (mm)	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
PVA繊維	1.3	15	12	1600	40	6
PP繊維	0.91	13	12	480	5	15

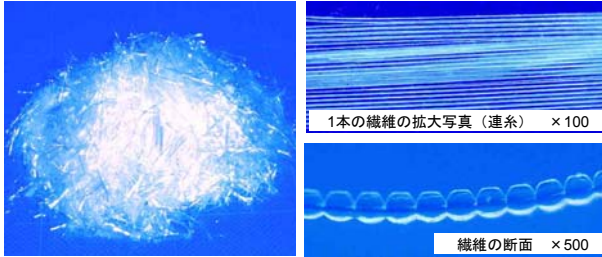


写真-1 使用したPP繊維

に、連糸形状とした。PP繊維の混入率は、擬似ひずみ硬化特性が確認<sup>3)</sup>されている3.0vol%を基本とし、PVA繊維の混入率は、指針案を基に2.0vol%とした。

水結合材比は、40%~47%の範囲で検討を行った。また、収縮を低減することを目的として膨張材を用い、モルタルの粘性の調整と付着力の向上を目的として分離低減剤を用いた。

練混ぜ方法は、ホバート型ミキサを使用し、モルタルを150秒間練り混ぜた後、繊維を一括投入し、さらに60秒間練混ぜを行った。

2.3 試験概要

(1) 一軸引張特性の検討 (シリーズ1)

シリーズ1では、一軸引張特性を確認するために、指針案に規定されている一軸直接引張試験を行い、引張降伏強度、引張強度および引張終局ひずみ (以下、一軸引張特性と表記) について確認した。一軸引張応力下での引張応力-ひずみ曲線の概念図を図-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。ひずみ軟化

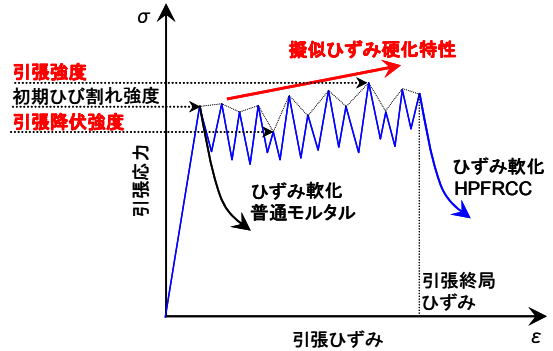


図-1 一軸引張応力下での引張応力-ひずみ曲線の概念

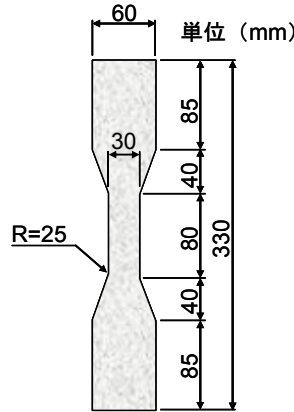


図-2 試験体の形状

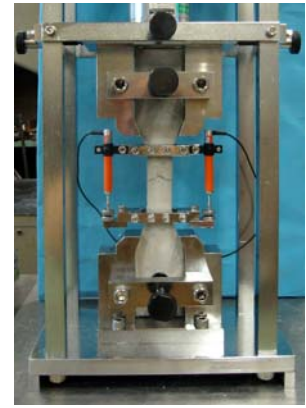


写真-2 試験状況

を開始するひずみを引張終局ひずみとした。また、初期ひび割れ点の強度を初期ひび割れ強度とした。

試験は、図-2に示す幅30mm×厚さ13mmのダンベル型の試験体を用いて、写真-2に示す装置を用い、0.5mm/分の変位制御で載荷を行った。試験は、材齢28日で実施し、PVA2-47およびPP3-47については、材齢の影響を確認するために、材齢14日、28日、56日および91日で実施した。また、モルタルエアメータを用いて空気量を測定し、φ5×10cmの円柱試験体を用いて、圧縮強度試験を実施した。

(2) 耐久性および収縮特性の検討 (シリーズ 2)

シリーズ 2 では、塩分浸せき試験、中性化促進試験、凍結融解試験、拘束膨張および収縮試験を実施し、HPRFCC の耐久性や収縮特性について検討した。

塩分浸せき試験は、JSCE-G 572 の 5.1 (供試体の浸せき試験) に準拠して実施した。試験体寸法 10×10×40cm の角柱試験体を用い、側面 1 面を残し他の 5 面はエポキシ樹脂でシールし、温度 20±2℃、濃度 10%の塩化ナトリウム水溶液中に浸せきした。塩化物イオンの浸透深さは、JIS A 1171 の 7.8 (塩化物イオン浸透深さ試験) に準拠して実施した。材齢 4 週、8 週、13 週、26 週および 75 週で試験体を切断し、0.1%フルオレセインナトリウム水溶液および 0.1N 硝酸銀溶液を噴霧して、蛍光を発する部分を測定した。

中性化促進試験は、JIS A 1153 に準拠して実施した。試験体寸法は、10×10×40cm の角柱試験体とし、促進条件は、温度 30±2℃、相対湿度 50±5%および二酸化炭素濃度 5±0.2%とした。中性化深さの測定は、材齢 1 週、4 週、8 週、13 週、26 週および 75 週で実施した。

凍結融解試験は、指針案の評価例に基き、JIS A 1148 A 法に準拠して実施した。試験体寸法は 10×10×40cm の角柱試験体とし、最初の 10 サイクルを測定した後、30 サイクルごとに相対動弾性係数および重量減少率の測定を行い、300 サイクルまで試験を実施した。PP3-47 については、著しく相対動弾性係数が低下したので、90 サイクルで試験を終了した。

拘束膨張および収縮試験は、JIS A 6202 付属書 2 に準拠して実施した。試験体寸法は、10×10×40cm の角柱試験体とし、温度 20±3℃の水中に 7 日間浸せきした後、温度 20±3℃で相対湿度 60±5%の恒温恒湿室内にて養生を行い、適宜ひずみを測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 一軸引張特性の検討 (シリーズ 1)

一軸直接引張試験結果を表-3 に示す。PP 繊維を用いた PP3-47 と比較して、PVA 繊維を用いた PVA2-47 の方が、圧縮強度が高かった。これは、空気量が PVA2-47 の方が少ないことと、繊維とモルタルとの付着力が高いことが原因として考えられる。

(1) 引張降伏強度および引張強度と圧縮強度の関係

PP 繊維を 3.0vol%混入した試験体の、引張降伏強度および引張強度と圧縮強度の関係を図-3 に示す。いずれの試験体も PP 繊維が抜け出し、ひび割れ幅の拡大により破壊に至った。

引張降伏強度および引張強度は、圧縮強度が 20~30N/mm<sup>2</sup> の範囲では、圧縮強度に依存していないが、50N/mm<sup>2</sup> を超える付近から圧縮強度の増加に伴い、増加

表-3 一軸直接引張試験結果

試験体種類	材齢 (日)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張終局ひずみ (%)
PVA2-47	14	3.0	31.7	3.9	5.5	4.2
	28		44.5	4.2	5.5	1.7
	56		63.1	3.8	4.9	1.1
	91		62.7	6.9	8.3	0.8
PP0-47	28	1.5	53.2	3.7	3.7	0.0
PP2-47	28	4.4	27.5	3.1	3.8	0.6
PP3-47	14	4.6	27.1	2.8	4.6	3.7
	28		31.9	2.9	5.1	3.0
	56		48.2	4.3	6.5	3.7
	91		56.3	6.8	8.4	2.7
PP3-47-E2	28	8.0	21.5	2.9	4.8	3.2
PP3-47-E4	28	6.0	23.4	2.3	4.8	3.1
PP3-47-V5	28	6.3	24.4	4.5	5.7	2.6
PP3-47-V10	28	7.2	25.4	4.7	6.4	3.0
PP3-44-E2-V4	28	7.8	26.1	2.7	4.7	3.6
PP0-42-E2-V4	28	8.6*	32.5	-	-	-
PP3-42-E2-V4	28	9.2	24.1	2.5	4.4	3.6
PP3-40-E2-V4	28	9.3	20.1	2.3	4.8	3.8

※ 試験体の単位容積質量より算出

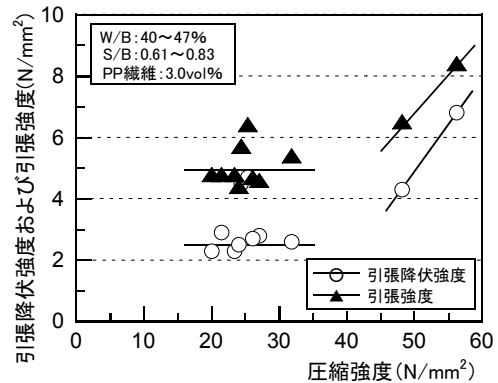


図-3 水結合材比と一軸引張特性の関係

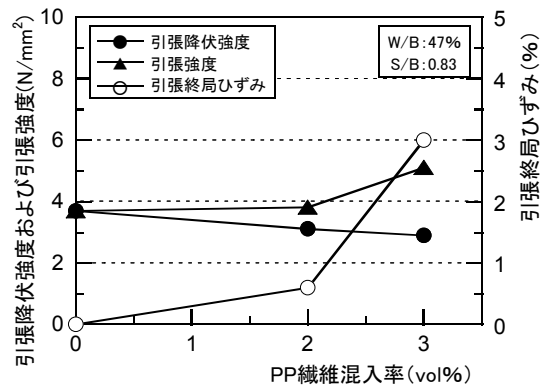


図-4 PP 繊維混入率と一軸引張特性の関係

傾向を示した。これは、付着力が向上したことと微細な凹凸を施したためであると思われる。圧縮強度が 25N/mm<sup>2</sup> 付近に強度の高い点が認められるが、これは、分離低減剤を添加した PP3-47-V5 および PP3-47-V10 のデータであり、付着力が向上したものと考えられる。引張強度の圧縮強度との比率は、概ね 1/4~1/8 程度であり、比較的大きな値を示した。引張強度は、引張降伏強度よりも概ね 2N/mm<sup>2</sup> 程度強度が増大しており、擬似ひずみ硬化特性が確保されたことを確認した。

## (2) PP 繊維混入率の検討

PP 繊維の混入率と一軸引張特性の関係を図-4 に示す。いずれの試験体も初期ひび割れ強度が、引張降伏強度となった。PP 繊維の混入率の増加が、直接初期ひび割れ強度の増加には繋がらないため、引張降伏強度は、PP 繊維の混入率が変化しても増加しなかった。それに対して、引張強度および引張降伏ひずみは、2vol%~3vol%にかけて大きく向上した。PP 繊維を 3vol%混入することで、擬似ひずみ硬化特性が向上することを確認した。

## (3) 長期材齢に関する検討

W/B=47%で、PVA 繊維を 2vol%混入した PVA2-47 と、PP 繊維を 3vol%混入した PP3-47 の材齢に伴う一軸引張特性の推移を図-5 および図-6 に示す。両者とも、引張降伏強度および引張強度については、材齢の経過とともに増加傾向を示した。引張終局ひずみについては、PP3-47 は変化が少ないのに対して、PVA2-47 は材齢の経過とともに4%から1%以下に減少しており、既往の PVA 繊維の知見と同様な傾向<sup>4)</sup>を示した。

## (4) 膨張材に関する検討

膨張材の添加率と一軸引張特性の関係を図-7 に示す。膨張材の添加率によって、引張降伏強度、引張強度および引張終局ひずみともに顕著な差は認められなかった。引張降伏強度よりも引張強度が大きな値を示しており、初期ひび割れ発生後も強度が増加していることから、膨張材を混入した場合においても、擬似ひずみ硬化特性が得られることを確認した。

## (5) 分離低減剤に関する検討

分離低減剤の添加率と一軸引張特性の関係を図-8 に示す。引張降伏強度および引張強度は、分離低減剤の添加率の増加に伴い、増加傾向を示した。特に、引張降伏強度は、添加率を 0kg/m<sup>3</sup>から 0.5kg/m<sup>3</sup>に増加した場合、大きく増加した。これは、PP 繊維の表面に凹凸を施したことと、分離低減剤の添加により、分離が抑制され、繊維とモルタルとの界面が密実になったことが原因として考えられる。

## (6) 引張応力-ひずみ曲線

代表的な試験体として、水結合材比が 47%の PP3-47 と、42%の PP3-42-E2-V4 における引張応力-ひずみ曲線をそれぞれ図-9 および図-10 に示す。引張強度を比較すると、PP3-47 の方が、PP3-42-E2-V4 に比べて高い値となった。これは、PP3-47 の方が、空気量が少なく、圧縮強度が高かったことが原因として考えられる。それに対して、PP3-42-E2-V4 の初期ひび割れ強度は、PP3-47 と同程度の値を示した。これは、3.1 (5)項の結果と同様な傾向であり、分離低減剤の添加によって、繊維とモルタルとの間の付着力が高まったことが原因として考えられる。圧縮強度（引張強度）が低くても繊維の付着力の改

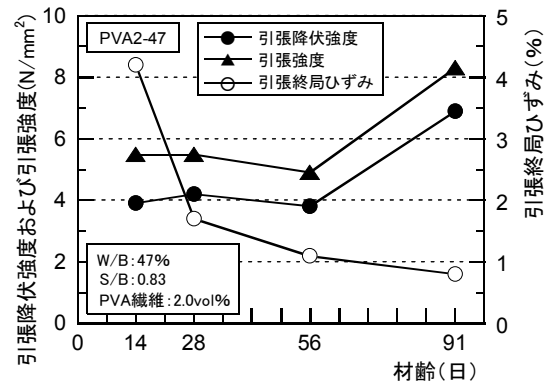


図-5 一軸引張特性の推移 (PVA 繊維)

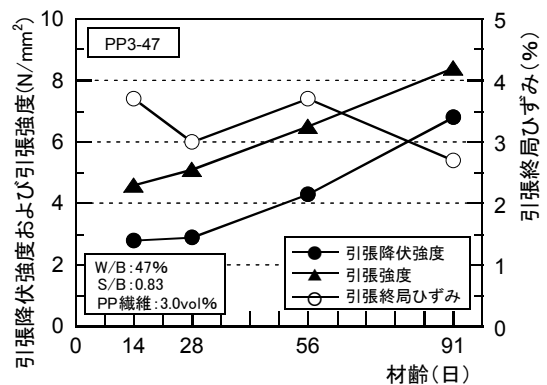


図-6 一軸引張特性の推移 (PP 繊維)

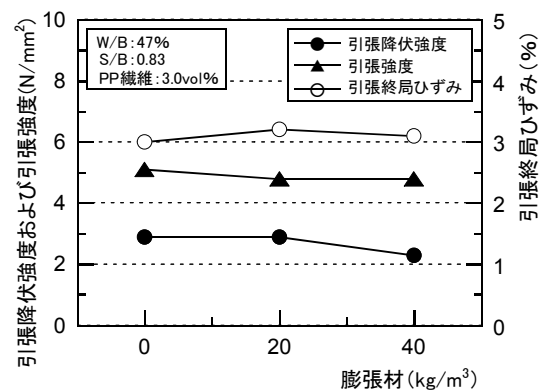


図-7 膨張材添加量と一軸引張特性の関係

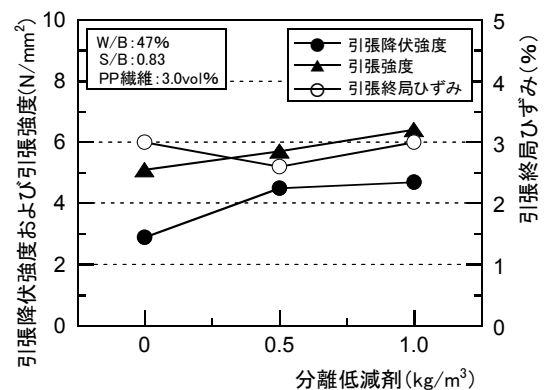


図-8 分離低減剤添加量と一軸引張特性の関係

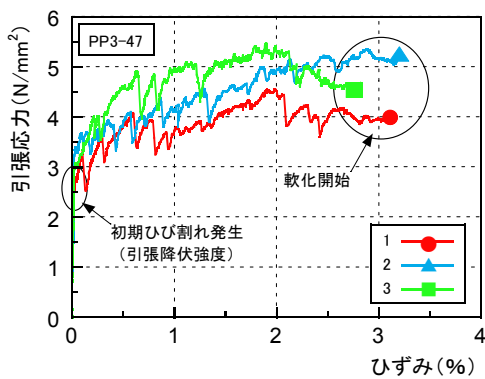


図-9 引張応力-ひずみ曲線

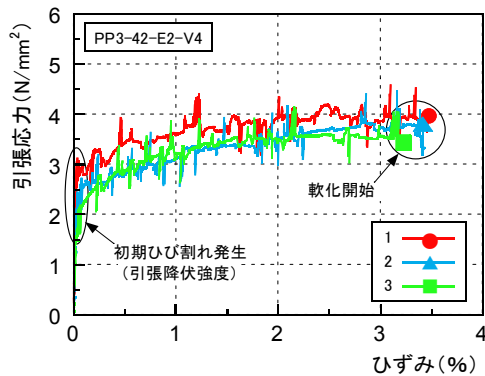


図-10 引張応力-ひずみ曲線

善によって、初期ひび割れ強度を向上させることが可能であると考えられる。

両配合ともに初期ひび割れ点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された。引張終局ひずみは、いずれも 3%程度となり、十分な変形性能を示した。

### (7) ひび割れ状況

PP 繊維を 2vol%混入した PP2-47 と 3vol%混入した PP3-47 について、一軸直接引張試験後のひび割れ状況を写真-3 に示す。PP2-47 は 1~2 箇所発生したひび割れがひずみの増加とともに拡大したのに対して、PP3-47 は、ひび割れが一箇所に偏ることなく、良好なひび割れ分散性を示した。3.1 (2)項に記述したが、PP3-47 の方が、PP2-47 と比較して、引張終局ひずみが大きな値を示しており、ひび割れの分散性と引張終局ひずみの間には密接な関係があるものと思われる。

## 3.2 耐久性および収縮特性の検討 (シリーズ 2)

### (1) 塩分浸せき試験

PP 繊維を混入しない配合 (PP0-47, PP0-42-E2-V4) と、3.0vol%混入した配合 (PP3-47, PP3-42-E2-V4) について、塩化物イオンの浸透深さの履歴を図-11 に示す。水結合材比が小さい方が、同一材齢における塩化物イオンの浸

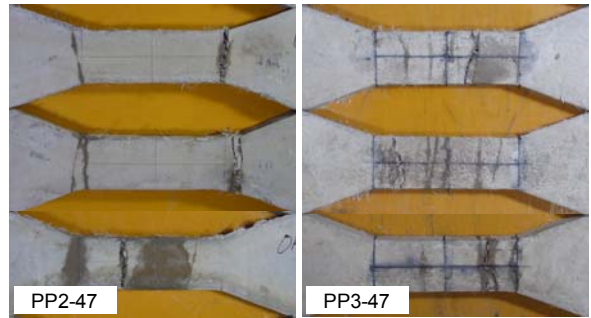


写真-3 ひび割れ状況

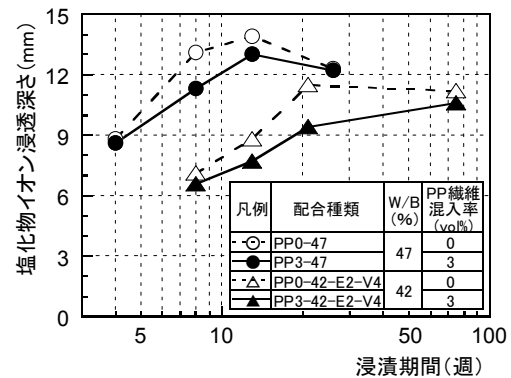


図-11 塩化物イオン浸透深さの履歴

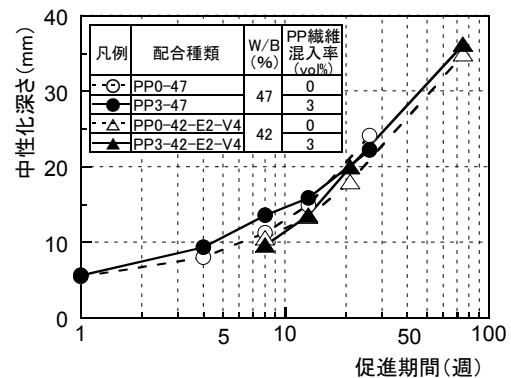


図-12 中性化深さの履歴

透深さも小さい値を示し、一般的なモルタルやコンクリートと同様な傾向であることが確認できた。また、同一水結合材比では、PP 繊維の有無による有意な差は認められず、PP 繊維を混入したことによる塩化物イオンの浸透への影響は小さいことを確認した。

### (2) 中性化促進試験

3.2 (1)項と同様に PP 繊維を混入しない配合 (PP0-47, PP0-42-E2-V4) と、3.0vol%混入した配合 (PP3-47, PP3-42-E2-V4) について、中性化深さの履歴を図-12 に示す。同一水結合材比では、PP 繊維の有無により中性化深さの有意な差は認められなかった。PP 繊維とモルタルとの界面からの二酸化炭素の侵入はないものと考えられる。

### (3) 凍結融解試験

PP 繊維を混入していない PP0-42-E2-V4 と 3vol%混入した PP3-47 および PP3-42-E2-V4 について、相対動弾性係数の履歴を図-13 に示す。相対動弾性係数を比較すると、空気量が 4.6%の PP3-47 は、30 サイクルで 60%を下回ったのに対して、空気量が 9.2%の PP3-42-E2-V4 は、300 サイクル終了時でも 80%程度にとどまった。PP0-42-E2-V4 および PP3-42-E2-V4 は、AE 剤の添加により、エントレインドエアを混入することで、8~9%程度の空気量を確保した。必要な空気量を混入することで、凍結融解抵抗性が改善されることを確認した。

コンクリート表面の状況は、PP 繊維を混入した PP3-42-E2-V4 に比べて、PP0-42-E2-V4 の方が、スケーリングによる損傷が激しかった。重量減少率の履歴を図-14 に示す。重量減少率を比較しても、PP 繊維を 3vol%混入している PP3-47 および PP3-42-E2-V4 は、ほとんど重量の損失がないのに対して、繊維を混入していない PP0-42-E2-V4 は、60 サイクル目から重量の損失が激しく、300 サイクルで 10%程度の重量損失が認められた。

### (4) 拘束膨張および収縮試験

膨張材の添加量を変化させた PP3-47, PP3-47-E2 および PP3-47-E4 と、PP 繊維を混入していない PP0-47 について、拘束膨張および収縮ひずみの履歴を図-15 に示す。膨張材の添加量で比較すると、添加量が増加するほど、収縮ひずみが低減されており、膨張材の添加量で収縮ひずみの制御が可能であることが分かった。PP 繊維の有無で比較すると、PP 繊維を 3.0vol%混入した PP3-47 の方が、混入していない PP0-47 と比較して、同等あるいは若干抑制できた。膨張材を 40kg/m<sup>3</sup> 添加することで、600 × 10<sup>-6</sup> 程度に制御できることを確認した。

## 4. まとめ

付着力を改良した PP 繊維を多量に添加したモルタルについて、一軸引張特性、耐久性および収縮特性に関して検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) PP 繊維を 3vol%混入することにより、擬似ひずみ硬化特性や 3%程度の引張終局ひずみが得られ、ひび割れ幅を微細に分散することができる。
- (2) PP 繊維を 3vol%混入したモルタルは、長期的にも引張終局ひずみを保持できる。
- (3) この実験の範囲内において、PP 繊維の有無が塩化物イオンや二酸化炭素の浸入に与える影響は小さい。
- (4) 必要な空気量を混入することで、凍結融解抵抗性を改善できる。
- (5) 膨張材を 40kg/m<sup>3</sup> 添加することで、拘束膨張および収縮ひずみを 600 × 10<sup>-6</sup> 程度に制御できる。

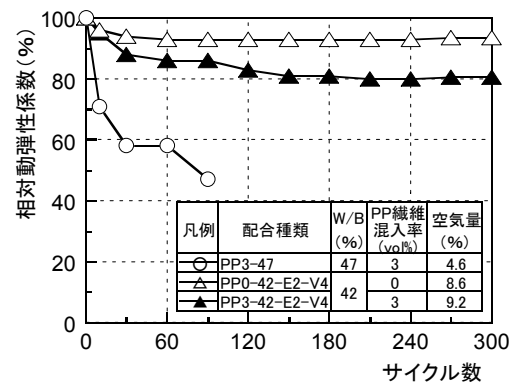


図-13 相対動弾性係数の履歴

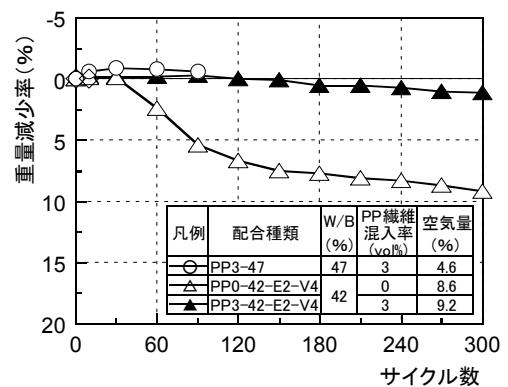


図-14 重量減少率の履歴

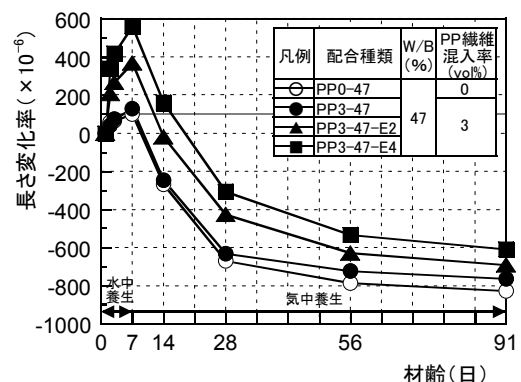


図-15 拘束膨張および収縮ひずみの履歴

## 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) （株）プラスチック・エージ：プラスチック読本，pp.149-153，1954.10
- 3) 川西貴士，平田隆祥，大島章弘，森宗義和：ポリプロピレン短繊維を使用した高じん性セメント系複合材料の基本特性，土木学会第 63 回年次学術講演会，pp.685-686，2008.9
- 4) Shuxin Wang, Victor C. Li : High-Early-Strength Engineered Cementitious Composites, ACI Material Journal, Technical Paper, PP.97-105, 2006.3-4