

# 論文 化学的応力を付与した超高強度繊維補強モルタルの破壊力学特性

川口 哲生\*1・石田 征男\*2・河野 克哉\*3・田中 敏嗣\*4

**要旨:** セメント系材料の脆性的破壊挙動を防止するには短繊維補強が有効である。しかし、補強効果向上のために、過剰な繊維補強を行うと流動性の確保が難しくなる。そこで、本研究は過剰な繊維補強を行わずに、補強効果を向上させる手法について検討を行った。具体的には、膨張材と合成繊維を併用して、マトリックス部に化学的応力を付与した超高強度繊維補強モルタルを対象に、自己収縮特性と破壊力学特性について実験的検討を行った。検討の結果、合成繊維と膨張材の材料をそれぞれ単独で用いた場合よりも、併用した方が自己収縮の低減と破壊力学特性の改善をより効果的に実現できることを確認した。

**キーワード:** 合成繊維, 超高強度繊維補強モルタル, 膨張材, 自己収縮, 破壊力学特性

## 1. はじめに

セメント系材料は引張力を受けて破壊に至る際、脆性的な挙動を示す。そのため、構造部材に適用する場合、部材厚が増加し、死荷重が増加するなど、合理的な設計を阻害する要因となり得る。また、セメント系材料の高強度化は、部材断面の縮小や薄肉軽量化に有効と考えられるが、自己収縮が増大し、より脆性的な挙動を示すようになる。つまり、構造部材への適用に対して、長所ばかりを持ち合わせているわけではない。

セメント系材料が示す脆性的破壊挙動を防止する手法として、短繊維補強が有効である。短繊維混入率を増加させれば、破壊力学特性は向上し、高い変形能力を示すものと予想される。しかし、引張性能を向上させるために、多量の短繊維を混入すると、流動性を確保することが極めて難しくなる。

これらの課題解決策として、膨張材と短繊維を併用して、短繊維補強効果を向上させる手法に関する検討がなされている。これらは、膨張材または収縮低減剤を添加し、母材マトリックスに圧縮の化学的応力を発生させ、その反作用として短繊維にプレストレスを発生させる。その結果、ひび割れの進展など、破壊に要するエネルギーを向上させることができる。しかしこれらの研究は、普通強度コンクリート<sup>1)</sup>や軽量コンクリート<sup>2)</sup>が対象とされており、超高強度のセメント系材料に適用した場合の補強効果は不明である。さらに、合成繊維を対象とした研究は十分とは言えないのが現状である。そこで、本研究では、膨張材と合成繊維を併用した超高強度繊維補強モルタルを対象とした。具体的には、自己収縮特性と破壊力学特性を把握し、膨張材と合成繊維の併用による補強効果について検証を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

表-1は、使用材料の一覧を示したものである。早強セメントとともにシリカフェームならびに高性能減水剤を使用した。コンクリートの圧縮強度を向上させるために、細骨材には硬質骨材を用いた。ただし、硬質骨材単品では適切な粒度を確保できなかったため、珪砂を混合して粒度を調整した。ここで使用した硬質骨材は、エメリー砂であり、これは極めて高い硬度を有する骨材である。また、低水結合材比モルタルに生じる自己収縮の低減に有効となる混和材料として、石灰系の早強型膨張材<sup>3)</sup>(以下、EXと表記)を使用した。本研究で対象とした短繊維は合成繊維であり、ポリプロピレン繊維(以下、PP繊維と表記)とポリビニルアルコール繊維(以下、PVA繊維と表記)を使用した。繊維長はそれぞれ15mmであり、PP繊維の繊維径は0.7mm、PVA繊維の繊維径は0.66mmである。これらの短繊維を用いた理由は、一般的に市販・流通しており、混入によるフレッシュ性状の低下が比較的小さくなると予想されたためである。さらに、繊維単体の引張強度はそれぞれ大きく異なるが、繊維径がほぼ等しいためである。

### 2.2 配合

配合条件を表-2に示す。すべての配合において、単位水量を170kg/m<sup>3</sup>、水結合材比を20%と一定とした。シリカフェームは全結合材量に対して内割で10%置換した。添加した膨張材量は0, 15, 30, 45kg/m<sup>3</sup>の4水準とした。繊維混入率はモルタル体積の外割りで、0, 2.0, 4.0%の3水準とした。膨張材はセメント量の一部に内割で置換した。全てのケースにおいて、0.04(C×%)の泡消剤を添加した。コンシステンシーの試験として、フロー試験(JIS

\*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 技術企画部 複合構造材料チーム 研究員 工修(正会員)  
 \*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 技術企画部 複合構造材料チーム 副主任研究員 工修(非会員)  
 \*3 太平洋セメント(株) 中央研究所 技術企画部 複合構造材料チーム 主任研究員 工修(正会員)  
 \*4 太平洋セメント(株) 中央研究所 技術企画部 複合構造材料チーム リーダー 工博(正会員)

表-1 使用材料

材料	種類	記号	物性または成分
結合材 (B)	早強セメント	C	密度 3.12g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 4650cm <sup>2</sup> /g
	シリカフューム	SF	密度 2.37g/cm <sup>3</sup>
	早強型膨張材	EX	石灰系, 密度 3.19g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 4550cm <sup>2</sup> /g
細骨材 (S)	珪砂+硬質骨材	S	表乾密度 2.95kg/l, 吸水率 1.03% 硬質骨材:エメリー砂(大分県木浦産)
	ポリプロピレン	PP	繊維長 15mm, 繊維径 0.70mm, アスペクト比 21.4, 密度 0.91kg/l, 引張強度 465N/mm <sup>2</sup> , 弾性係数 15kN/mm <sup>2</sup>
短繊維	ポリビニルアルコール	PVA	繊維長 15mm, 繊維径 0.66mm, アスペクト比 22.7, 密度 1.30kg/l, 引張強度 900N/mm <sup>2</sup> , 弾性係数 230kN/mm <sup>2</sup>
混和剤	高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系化合物, 密度 1.07g/cm <sup>3</sup>
	消泡剤	-	ポリアルキレングリコール誘導体, 密度 1.00g/cm <sup>3</sup>

表-2 配合条件

配合条件									フレッシュ性状	強度性状 <sup>*2</sup>
W/B (%)	単位量								フロー値(0打) (mm)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
	W (kg/m <sup>3</sup> )	C (kg/m <sup>3</sup> )	SF (kg/m <sup>3</sup> )	EX (kg/m <sup>3</sup> )	S (kg/m <sup>3</sup> )	SP (B×%)	PVA <sup>*1</sup> (vol.%)	PP <sup>*1</sup> (vol.%)		
20	170	765	85	0	680	2.0	0.0	-	270	145.8
						2.0	2.0	-	262	138.7
						2.2	4.0	-	250	122.7
						1.8	-	2.0	269	130.3
						1.8	-	4.0	245	109.0
						2.0	2.0	-	259	133.7
						2.0	4.0	-	263	135.3
						2.0	0.0	-	255	124.0
		2.0		2.0		-	222	121.3		
		2.2		4.0		-	243	116.7		
		1.8		-		2.0	245	119.7		
		1.8		-		4.0	221	96.0		
		2.0		2.0		-	260	123.7		
		2.2		4.0		-	259	125.3		
		1.8		-		2.0	235	117.7		
		1.8		-		4.0	218	93.3		

\*1モルタル体積に対する短繊維の外割体積比率, \*2材齢 14日(水中養生 20℃)

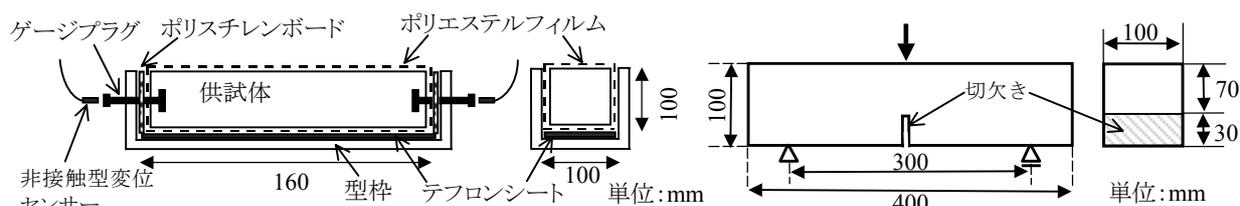


図-1 自己収縮の測定方法 (材齢 24 時間前)

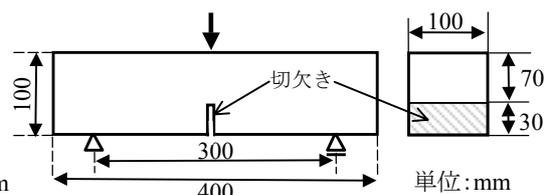


図-2 切欠きはりの 3 点曲げ試験

R 5201, 0 打) を行い, フロー値の管理を行った。フロー値については, 高性能減水剤添加量を調整することにより, 繊維混入直前のモルタルのフロー値が 270±10 mm の範囲内になるように管理を行った。なお, これらの配合は表-2に示すように 90~145N/mm<sup>2</sup> 程度の圧縮強度を有する超高強度繊維補強モルタルとなった。

### 2.3 練混ぜと養生

練混ぜは 20℃の恒温室内で実施し, 容量 5 リットルのオムニミキサーを用いた。ミキサーにて粉体を 15 秒間, 空練りした後に注水し, 3 分間練り混ぜてモルタルを製造した。その後, 短繊維を投入し, 2 分間の練混ぜを行

った後, コンシステンシーの試験を実施した。

圧縮強度の測定にはφ50×100mm の円柱供試体を, 破壊力学特性値の測定には切欠きを有するはり供試体を用いた。ここで, 供試体数は各水準につき 3 体とした。いずれの場合も材齢 1 日で脱型した。その後, 20℃の水中養生を行い, 材齢 14 日で各試験を実施した。

### 2.4 自己収縮の測定方法

#### (1) 材齢 24 時間以前の測定方法

図-1に示すように供試体の自由な変形の拘束, および水分の逸散を防止した型枠(40×40×160mm)内で, 始発に達した時点から両端部に設置したゲージプラグの

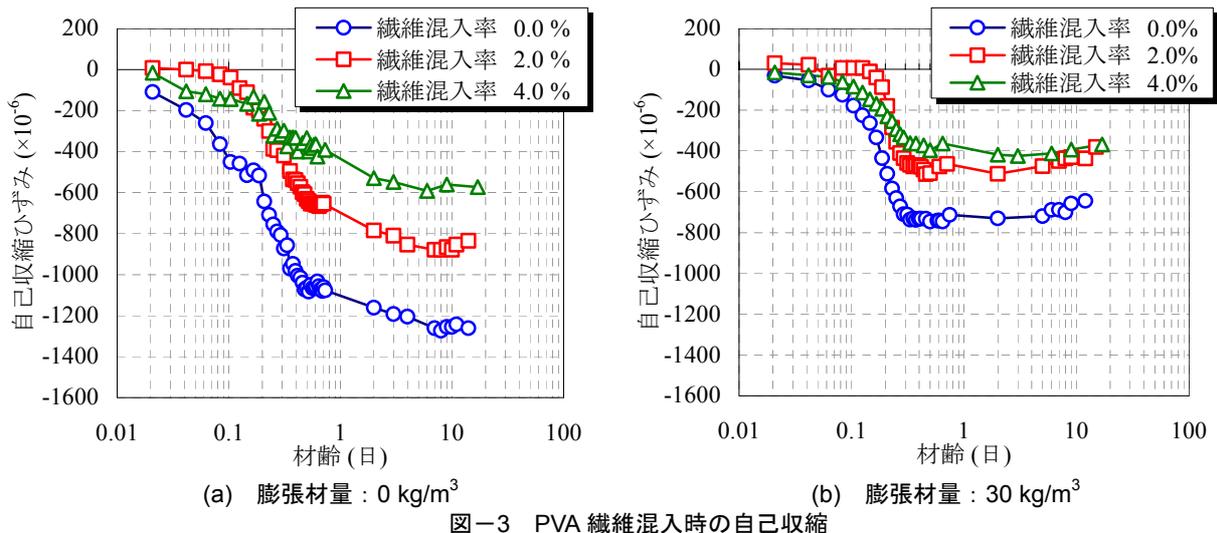


図-3 PVA 繊維混入時の自己収縮

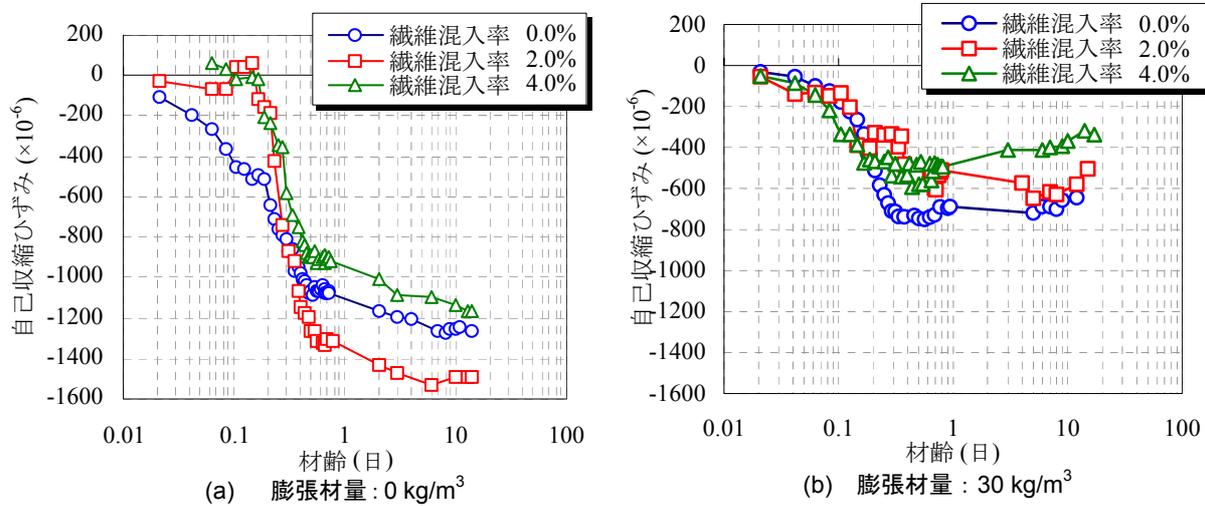


図-4 PP 繊維混入時の自己収縮

移動量を非接触型変位計にて測長した。測定は 20℃の恒温室内で実施した。ひずみの算出では、コンクリートの線膨張係数を  $10 \times 10^{-6}/\text{℃}$  と仮定して補正を行った。補正に用いた供試体温度は、同一バッチで別途成型し、同一の養生を行った  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$  供試体に設置した熱電対より測定した。

## (2) 材齢 24 時間以降の測定方法

図-1 の供試体を脱型後、アルミ粘着テープで供試体全面をシールし、乾燥を防いだ。さらに、側面にコンタクトチップを貼り付け、セメント協会式マイクロメーターにて測長した。

## 2.5 破壊力学特性の測定方法

### (1) 破壊エネルギーの算出方法

ここでは「切欠きはりをを用いた繊維コンクリートの荷重-変位曲線試験方法」(JCI-S-002-2003)<sup>4)</sup>に従い、切欠きを有するはりの 3 点曲げ試験を行った(図-2)。試験体は、 $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$  の角柱供試体であり、角柱の軸方向中央部に深さ 30 mm の切欠きを設けた。クリップゲージを用いて、切欠き開口部の変位を測定した。破壊エネルギー  $G_F$  は JCI-S-002-2003 に従い、(1)式を用いて

算出した。

$$G_F = (0.75W_0 + W_1) / A_{lig} \quad (\text{N/mm}) \quad (1)$$

ここで、 $W_0$ ：荷重-開口変位曲線下の面積(N・mm)、 $W_1$ ：供試体の自重および載荷治具がなす仕事(N・mm)、 $A_{lig}$ ：はり破断部分面積(mm<sup>2</sup>)

なお、短繊維を混入した供試体は、最終的に破断しないため、開口変位が 10mm に達した時点で破断したものと仮定して計算した。

### (2) 引張軟化曲線の推定方法

引張軟化曲線は、試験より得られた荷重と開口変位を逆解析して推定した。ここでは、JCI より配布されている逆解析プログラム<sup>4)</sup>を用いた。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 自己収縮

図-3は、PVA 繊維を 0~4.0%混入したケースの自己収縮を示したものであり、図-4は、PP 繊維を 0~4.0%混入したケースの自己収縮を示したものである。両図の(a)は膨張材量が  $0 \text{ kg/m}^3$  のケース、(b)は膨張材量が  $30 \text{ kg/m}^3$  のケースについて示したものである。膨張材量

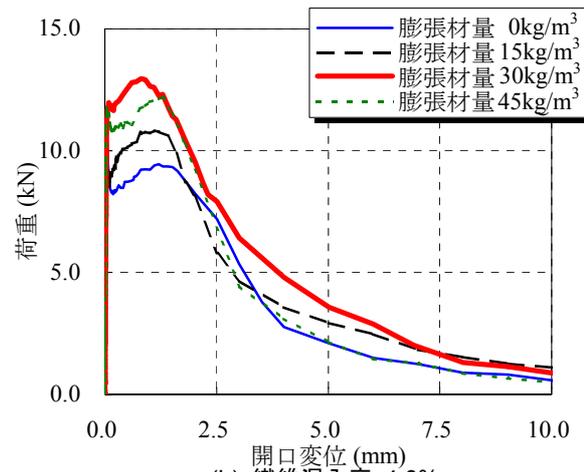
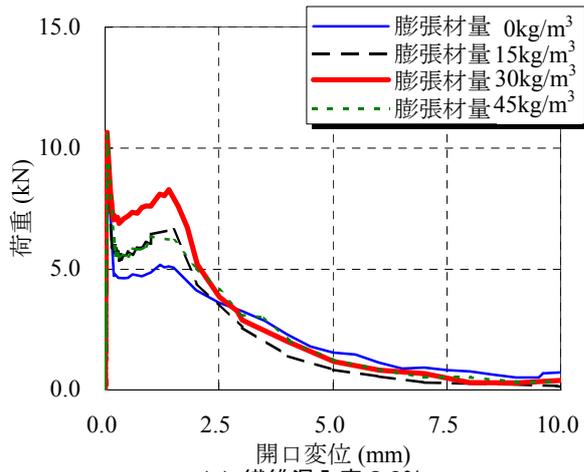


図-5 荷重—開口変位関係 (PVA 繊維混入時)

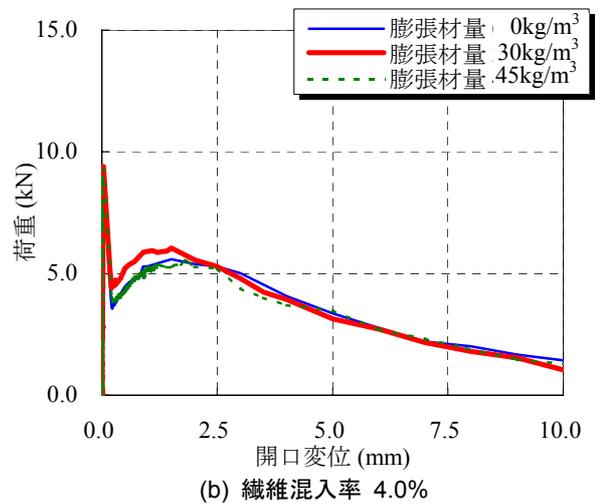
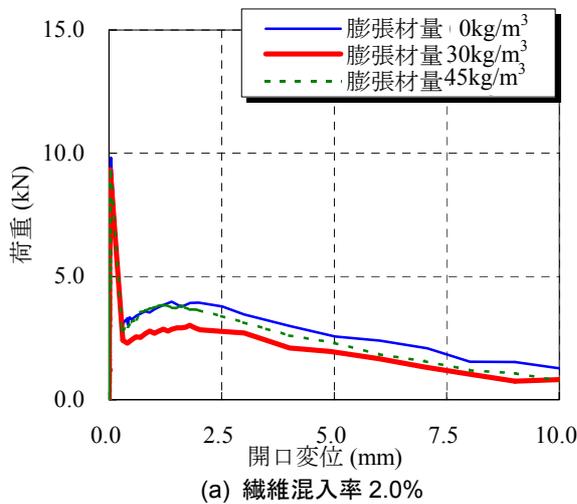


図-6 荷重—開口変位関係 (PP 繊維混入時)

が  $0\text{kg/m}^3$  のケースでは、PVA 繊維混入率の増加に伴い、発生する自己収縮量が低減されることが確認された。一方、図-3(b)に示す膨張材量  $30\text{kg/m}^3$  のケースでは、PVA 繊維混入率の増加によって自己収縮量の発生に違いが生じた。供試体の材齢 14 日における自己収縮量は、膨張材を無添加とした供試体に比べて、繊維混入率が 0%、2.0%および 4.0%のケースで、それぞれ  $640 \times 10^{-6}$ 、 $880 \times 10^{-6}$  および  $890 \times 10^{-6}$  程度低減することが確認された。また、繊維混入率が 2.0%、4.0%のケースはほぼ同等の自己収縮量を示すことが確認された。このことは、膨張材、短繊維それぞれを単独で使用するよりも併用した方が、より自己収縮量を抑制できることを示している。これは、膨張材の添加によって母材マトリックスに生じる収縮力が低減し、PVA 繊維が収縮変形を拘束したためと考えられる。

次に、図-4(a)に示す膨張材量  $0\text{kg/m}^3$  で、PP 繊維の混入率が 0.0%、4.0%のケースにおける材齢 14 日の収縮量は、ほぼ等しくなっており、2.0%のケースが最も大きい収縮量を有していた。PVA 繊維に比べて、PP 繊維は比較的軟質である。つまり、母材マトリックスに生じる

引張の収縮力を、PP 繊維単体では、十分に拘束できなかったと考えられる。

図-4(b)に示す膨張材量  $30\text{kg/m}^3$  のケースにおいて、繊維混入率 0%と 2.0%における自己収縮量はほぼ等しくなった。しかし、繊維混入率が 4.0%のケースでは、他のケースに比べて自己収縮量が低減されることが確認された。これは、自己収縮に起因して、母材マトリックスに発生する引張応力が膨張材の添加により緩和され、比較的軟質な PP 繊維でも拘束できたためと考えられる。

以上より、PP 繊維混入よりも PVA 繊維混入の方が高い収縮低減効果を有しており、比較的硬質な短繊維を混入することで、自己収縮の拘束が可能とあることを示している。また、膨張材と PVA 繊維を併用することで、より効果的に自己収縮量の抑制が可能となることが確認された。

### 3.2 破壊力学特性

#### (1) 荷重—開口変位関係

図-5、図-6 は、切欠きはりの 3 点曲げ試験から得られた荷重—開口変位関係を示したものである。図-5 は PVA 繊維を混入したケース、図-6 は PP 繊維を混入し

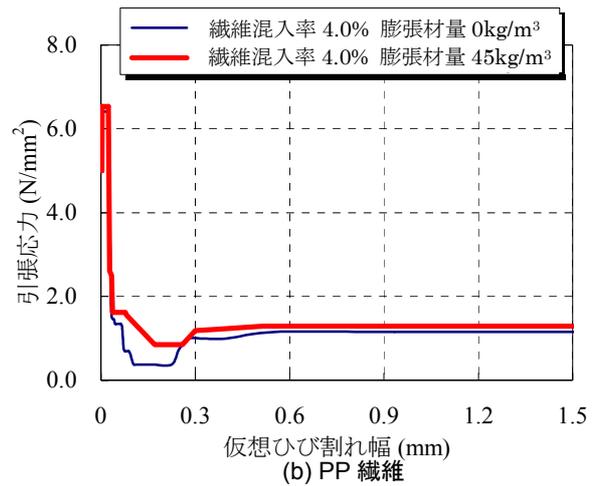
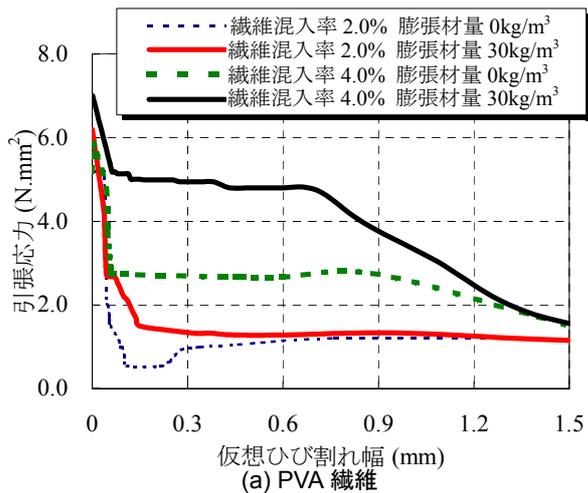


図-7 引張軟化曲線

たケースを示したものである。両図の(a)は繊維混入率が2.0%, (b)は繊維混入率が4.0%のケースを示している。ここで、繊維種類、繊維混入率、膨張材量にかかわらず、荷重-変位曲線には2つのピークが存在した。つまり、母材マトリックスに初期ひび割れが生じて荷重が急減する点(以降、第1ピークと表記)、ならびに初期ひび割れ発生後にひずみ硬化を伴いながら荷重が漸増した後にひずみ軟化に転じる点(以降、第2ピークと表記)である。繊維混入率2.0%のPVA繊維を混入したケースでは、膨張材量を増加させても、第1ピークの荷重はほとんど変化しなかった。しかし、膨張材を添加することによって、第2ピークの荷重が向上することが確認された。しかし、膨張材の添加量と対応しておらず、膨張材量30kg/m<sup>3</sup>のケースで第2ピークの荷重が最大となった。図-3に示した自己収縮の結果と考え合わせると、膨張材を30kg/m<sup>3</sup>を使用した配合では母材マトリックスに圧縮の化学的応力が作用し、その反作用として、繊維にプレストレスが発生したと考えられる。さらに、母材の収縮を短繊維が拘束することで生じる微視的な自己収縮応力が緩和され、短繊維との付着が向上したため、破壊に要するエネルギーが増加し、第2ピークの荷重が大きくなったと推察できる。また、第2ピーク以降は、各ケースともほぼ同様の挙動を示すことが確認されており、膨張材添加の影響は、第1ピークと第2ピーク間で顕著に現れることが確認された。次に、繊維混入率4.0%のケースでは、膨張材量の増加に伴い、第1ピークの荷重が変化することが確認された。また、第2ピークの荷重も膨張材量によって増大することが確認された。ここでも、膨張材量が30kg/m<sup>3</sup>のケースで、第2ピークの荷重は最大となった。このように第2ピーク荷重はPVA繊維の混入率ならびに膨張材の使用によって増大した。この理由は、以下のように考えられる。PVA繊維の混入率を増加させると、ひび割れ面に架橋する短繊維量が増大することで第2ピークに至るまでに架橋繊維全部で受け持つ引

張力が増大する。一方、膨張材の使用量を増加させると、母材の収縮を短繊維が拘束することで生じる微視的な自己収縮応力が緩和され、短繊維との付着が向上すると推測される。そのため、短繊維の引抜けが生じにくくなり、第2ピークに至るまでに架橋繊維自体が受け持つことのできる引張力が増大したと考えられる。そしてPVA繊維と膨張材を併用した場合には、これらの効果が組み合わせることで大きな引張力を負担できるようになったのではないかと考えられる。

次に図-6(a), (b)に示したPP繊維を用いたケースにおいて、繊維混入率が2.0%と4.0%のケースを比較すると、繊維混入率の増加に伴い第2ピークの荷重は増大した。しかし、繊維混入率を一定とした場合、膨張材量が増加しても、第1ピークの荷重と第2ピークの荷重に大きな変化は生じなかった。図-5、図-6を比較すると、PVA繊維の場合はPP繊維の場合にくらべて第2ピーク以降の荷重低下が急激であり、開口変位が10mmに達した際の荷重も小さくなった。以上より、第1ピーク以降の挙動(引張力の繊維負担による荷重増加)には合成繊維が有する力学的性能が、さらに第2ピーク以降の挙動(繊維の引抜けによる荷重低下)では合成繊維が有する母材マトリックスとの付着性能が大きく関与すると考えられる。このようなPVA繊維とPP繊維の種類による性能の違いが荷重-開口変位関係に影響したものと考えられる。

## (2) 引張軟化曲線

図-7は、繊維混入率、膨張材量を変化させた場合の引張軟化曲線を示したものである。(a)は、PVA繊維を混入したケースであり、繊維混入率は2.0、4.0%、膨張材量は0、20kg/m<sup>3</sup>である。(b)は、PP繊維を混入したケースであり、繊維混入率は4.0%、膨張材量は0、45kg/m<sup>3</sup>である。図-6に示した荷重-開口変位で、繊維混入率2.0%と4.0%のケースでは、顕著な差が確認されなかったため、ここでは繊維混入率4.0%のケースのみ示した。繊維混入率が2.0%、4.0%のPVA繊維を混入したケースで

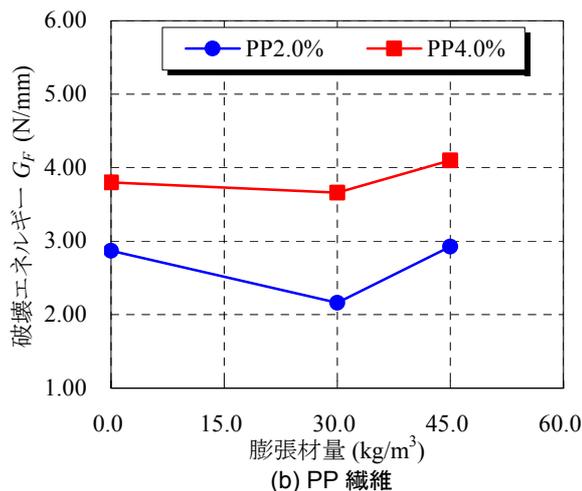
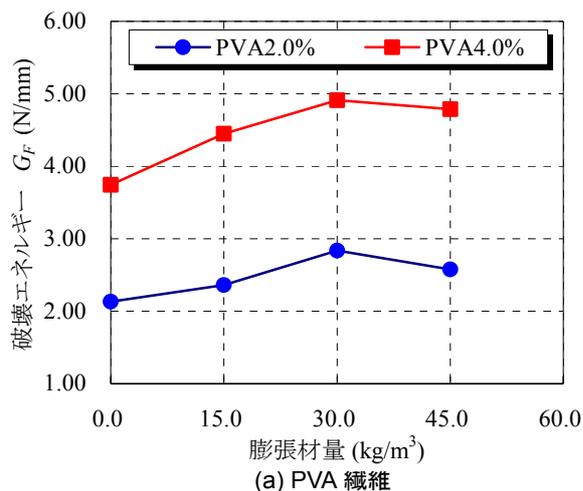


図-8 膨張材量と破壊エネルギーの関係

は、膨張材を添加することで、ひび割れ面に生じる引張応力が増加した。特に、繊維混入率が4.0%のケースでは、膨張材量を30kg/m<sup>3</sup>とすることで、引張軟化曲線が大きく変化し、破壊力学特性が向上した。これは、膨張材の添加で繊維と母材マトリックスの付着が改善され、ひび割れ面における繊維の応力伝達効果が向上したものと推察できる。一方、繊維混入率が4.0%のPP繊維を混入したケースでは、膨張材を添加しても、ひび割れ面に生じる引張応力が若干増加するだけに留まった。

### (3) 破壊エネルギー

図-8は、膨張材量と破壊エネルギーの関係を示したものである。(a)は、PVA繊維を混入したケースであり、繊維混入率は2.0、4.0%、膨張材量は、0、15、30、45kg/m<sup>3</sup>である。(b)は、PP繊維を混入したケースであり、繊維混入率は2.0、4.0%、膨張材量は、0、30、45kg/m<sup>3</sup>である。繊維混入率が2.0、4.0%のPVA繊維を混入したケースでは、膨張材量の増加にともなって徐々に破壊エネルギーが増加する傾向が見られた。また、繊維混入率2.0%、4.0%のどちらのケースでも、膨張材量30kg/m<sup>3</sup>のときに破壊エネルギーの向上効果が最大となり、逆にこれ以上、膨張材量が増加した場合には膨張材による改善効果が低下した。

次に、PP繊維を混入したケースでは、繊維混入率が4.0%で、膨張材量が0kg/m<sup>3</sup>、30kg/m<sup>3</sup>のケースにおける、破壊エネルギーはほぼ等しくなった。しかし、膨張材量を45kg/m<sup>3</sup>とすると破壊エネルギーは増加した。また、繊維混入率が2.0%で、膨張材量が0kg/m<sup>3</sup>と45kg/m<sup>3</sup>のケースにおける破壊エネルギーはほぼ等しくなった。

以上より、本研究で検討した範囲内で、PVA繊維を混入したケースでは、繊維混入率を4.0%とし、膨張材量を30kg/m<sup>3</sup>とするケースが、最も高い破壊エネルギーの改善効果を有していた。また、PP繊維を混入したケースでは、繊維混入率が4.0%、膨張材量が45kg/m<sup>3</sup>となる配合が最も高い改善効果を有していた。

## 4. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 膨張材を用いていない配合では、ポリビニルアルコール繊維単体の混入率を増加させることによって自己収縮量は低減した。しかし、ポリプロピレン繊維単体を混入した場合は、繊維混入率が增大しても、自己収縮量は大きく変化しなかった。
- (2) ポリビニルアルコール繊維と膨張材を併用したケースは、より効果的に自己収縮量の低減と破壊力学特性の改善を図ることができた。また、膨張材量が30kg/m<sup>3</sup>のときに、破壊エネルギーが最大となり、膨張材の添加による補強効果を最大化する配合が存在した。
- (3) ポリプロピレン繊維の繊維混入率が2.0%のケースでは、膨張材量を増加させても、破壊力学特性の向上は確認されなかった。しかし、繊維混入率を4.0%、膨張材量を45kg/m<sup>3</sup>とすることで、破壊力学特性の改善効果が若干確認された。

## 参考文献

- 1) 小林一輔ほか：膨張コンクリートをマトリックスとした鋼繊維補強コンクリートの複合特性，土木学会論文報告集，第336号，pp.169-177，1983.8
- 2) 河野克哉ほか：高品質軽量骨材を用いたコンクリートの破壊力学特性ならびに自己収縮に及ぼす短繊維の効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1587-1592，2004.7.
- 3) 佐久間隆司ほか：早強型膨張材の諸特性とコンクリート製品への適用性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.1，pp.131-136，2003.7
- 4) [http://www.jci-web.jp/jci\\_standard/kitsutaka\\_dl.htm](http://www.jci-web.jp/jci_standard/kitsutaka_dl.htm)