

# 論文 ハイブリッド繊維補強セメント複合体の引張特性に及ぼすひずみ速度及び混入繊維の影響

孫 玫材<sup>\*1</sup>・金 圭庸<sup>\*2</sup>・金 武漢<sup>\*3</sup>・小林 孝一<sup>\*4</sup>

**要旨**：本研究では、ハイブリッド繊維補強セメント複合体の引張特性に及ぼすひずみ速度及び混入繊維の影響を評価した。その結果、フック型鋼繊維補強セメント複合体は、高ひずみ速度で繊維とマトリックスの付着強度が向上するため、マトリックスから急に引き抜ける過程によりフックが直線型に整形される繊維の数が減少した。一方、フック型鋼繊維1.5vol.%, PVA繊維0.5vol.%を併用したハイブリッド調合の場合、PVA繊維がフック型鋼繊維の周りのマトリックスのマイクロクラック発生を抑制するため、フック型鋼繊維の引抜け抵抗性能が向上し、フックが直線状に整形されつつ引抜けが生じる繊維の数が增加することを確かめた。

**キーワード**：ハイブリッド、フック型鋼繊維、PVA繊維、高ひずみ速度、引張特性、引抜け抵抗性能

## 1. はじめに

コンクリートの脆性的な破壊特性を改善するためにセメント系材料に短繊維を多量混入した高性能繊維補強セメント複合体(High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite, 以下HPFRCC)は、準静的引張荷条件で複数ひび割れが発生すると共にひずみ硬化挙動によってエネルギー吸収能力が大きく向上する材料である<sup>1)</sup>。

一方、繊維の形状及び長さ、物理的特性が異なる二種類以上の繊維を混合した高性能ハイブリッド繊維補強セメント複合体 (High Performance-Hybrid Fiber Reinforced Cement Composite, 以下HP-HFRCC)はマイクロクラックとマクロクラックに対して各々の繊維が効率的に対応するため、2.0vol.%以下の繊維混入率でも優れた曲げ・引張強度及び耐久性が確保できると報告されている<sup>2)-7)</sup>。

最近、HP-HFRCCの力学特性に関する研究が行われているが、高ひずみ速度条件での引張特性を評価した研究はまだ少ない。なお、ひずみ速度の違いがHPFRCCの引張挙動に与える影響は補強繊維の種類によって異なり、HP-HFRCCは二種類以上の繊維が混合されるので、補強繊維の種類及び混合比が引張挙動及び破壊メカニズムに与える影響を解明する必要がある<sup>8)-10)</sup>。

本研究では、異なる繊維混合比を持つHP-HFRCCの引張挙動に及ぼすひずみ速度の影響を分析するために、長繊維にフック型鋼繊維(Hooked steel fiber, 以下HSF)、短繊維にポリビニルアルコール繊維(Polyvinyl alcohol fiber, 以下PVA)を用いて、各々の繊維の混合比を調節して、HP-HFRCCを作製した。ひずみ速度の条件は、一般的な静的荷重によって発生する $10^{-6}$ /sと地震、高速衝撃及び爆発によって発生する $10^1$ /sで設定しており、直接引張試験を行った後、応力-ひずみ曲線、引張強度及びひず

表-1 実験計画

試験体の補強種類	試験体の条件			ひずみ速度 (/s)	評価項目
	試験体の種類	繊維種類	繊維の混入率 (vol.%)		
HP-MFRCC*1	HSF2.0*3	フック型鋼繊維(HSF)	2.0	10 <sup>-6</sup>  10 <sup>1</sup>	・応力-ひずみ曲線 ・ひび割れ挙動 ・引張強度 ・ひずみ能力 ・動的増加係数
HP-HFRCC*2	HSF1.5PVA0.5*4	フック型鋼繊維(HSF) + ポリビニルアルコール繊維(PVA)	1.5+0.5		
	HSF1.0PVA1.0		1.0+1.0		
	HSF0.5PVA1.5		0.5+1.5		

\*1: HP-MFRCC : High performance-mono fiber reinforced cement composites,

\*2: HP-HFRCC : High performance-hybrid fiber reinforced cement composites,

\*3: HSF : Hooked steel fiber reinforced cement composites,

\*4: HSF/PVA : Hooked steel fiber and polyvinyl alcohol fiber reinforced cement composites

\*1 大韓民国 忠南大学校 大学院 建築工学科 博士課程 (正会員)

\*2 大韓民国 忠南大学校 建築工学科 教授 博(工) (正会員)

\*3 大韓民国 忠南大学校 建築工学科 名誉教授 博(工) (正会員)

\*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 教授 博(工) (正会員)

表-2 使用材料の物理的特性

種類	物理的特性
セメント	普通ポルトランドセメント 密度 : 3.15g/cm <sup>3</sup> , 粉末度 : 3,200cm <sup>2</sup> /g
フライアッシュ	密度 : 2.20g/cm <sup>3</sup> , 粉末度 : 3,000cm <sup>2</sup> /g
細骨材(珪砂)	密度 : 2.64g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 : 0.38%
混和剤	ポリカルボン酸系高性能減水剤
フック型鋼繊維 (HSF)	密度 : 7.85g/cm <sup>3</sup> , 長さ : 30mm 直径 : 0.5mm, 引張強度 : 1,140MPa
ポリビニルアルコール繊維(PVA)	密度 : 1.30g/cm <sup>3</sup> , 長さ : 12mm 直径 : 42.6μm, 引張強度 : 1,300MPa



(a) フック型鋼繊維 (b) ポリビニルアルコール繊維

図-1 補強繊維の形状

表-3 セメント複合体の調査

$f_{ck}$ (MPa)	W/B	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				繊 維		
		W	C	FA	S	混入率 (vol.%)	混入量 (kg)	
60	0.4	400	850	150	350	2.0	156.0	0
						1.5+0.5	117.8	6.5
						1.0+1.0	78.5	13.0
						0.5+1.5	39.2	19.5

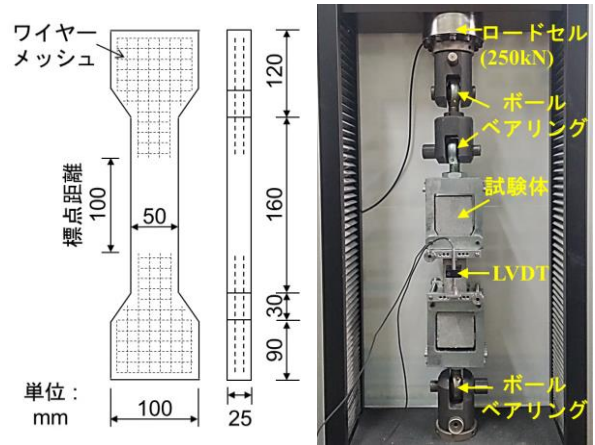
み能力を評価した。また、ひずみ速度による複数ひび割れ挙動と繊維破壊性状の違いを観察して、繊維種類及び混合比が HP-HFRCC の引張挙動及び破壊メカニズムに及ぼす影響について分析・検討した。

## 2. 実験計画及び方法

### 2.1 実験計画

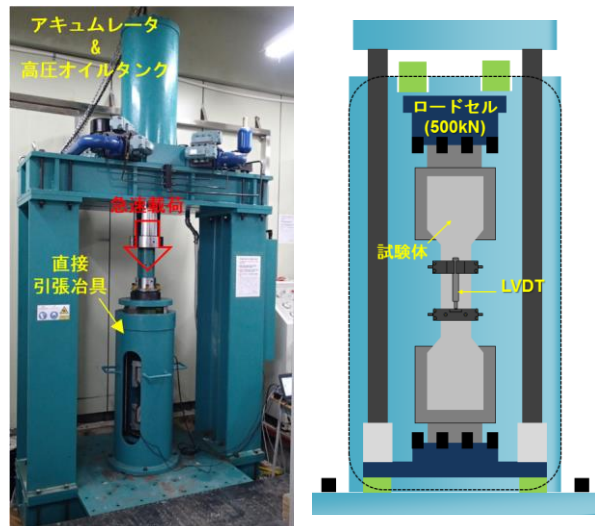
表-1 に実験計画を示す。本研究では、鋼繊維と合成繊維によりハイブリッド補強された HP-HFRCC の引張挙動に及ぼすひずみ速度の影響を評価するために、HSF と PVA を各々 1.5+0.5, 1.0+1.0, 0.5+1.5vol.% の比率で混入した HP-HFRCC と HSF を 2.0vol.% 単一混入した繊維補強セメント複合体(High Performance-Mono Fiber Reinforced Cement Composite, 以下 HP-MFRCC)を作製した。

表-2 に使用材料の物理的特性を示す。セメントは普通ポルトランドセメントを用い、繊維の分散性及びマトリックスの流動性を考慮してフライアッシュを用いた。細骨材はマトリックスの均質性と繊維の分散性を確保するために 7号珪砂を用いた。また、繊維補強による流動性低下を考慮してポリカルボン酸系高性能減水剤を



(a) 引張試験体の形状 (b) 静的引張試験装置

図-2 引張試験体の形状及び静的引張試験装置の概要



(a) 急速載荷試験装置 (b) 引張治具の形状

図-3 急速載荷試験装置の概要

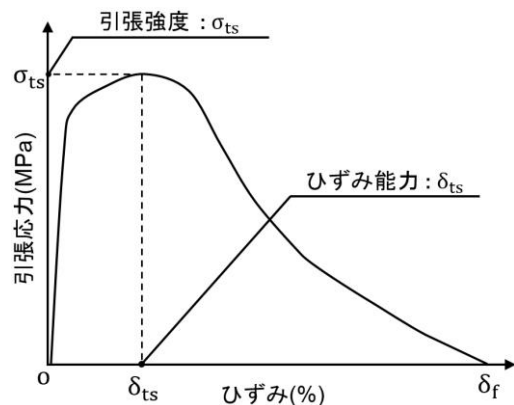
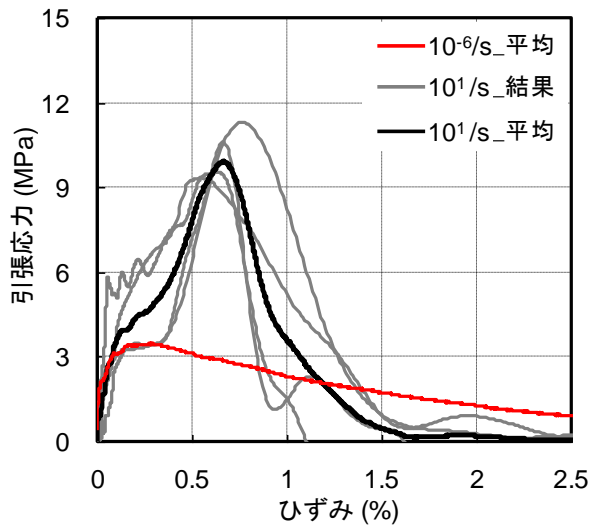


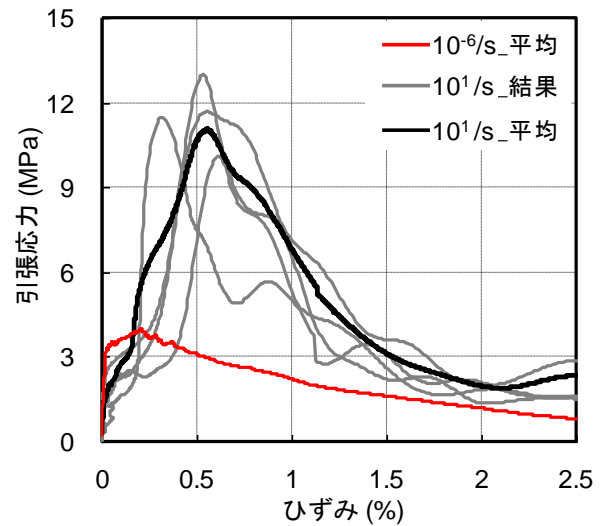
図-4 引張特性の概要

用いた。補強繊維は HSF と PVA を用い、繊維の形状は図-1 に示す。

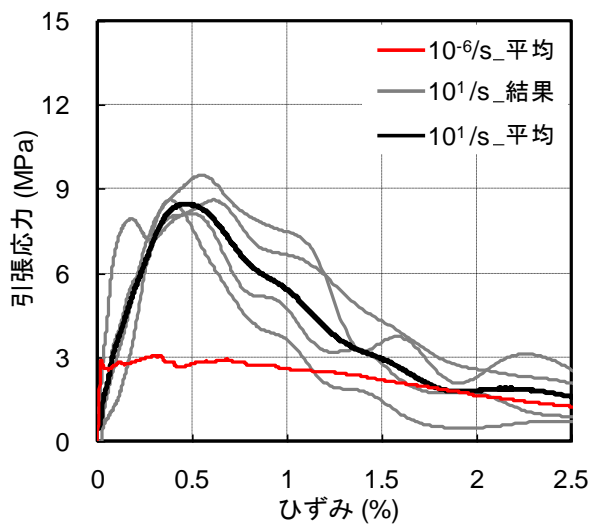
表-3 に HFRCC の調査を示す。W/B は 40% とした。HFRCC の練り混ぜは結合材と珪砂を空練りした後、水と減水剤を投入してマトリックスモルタルを練り混ぜ



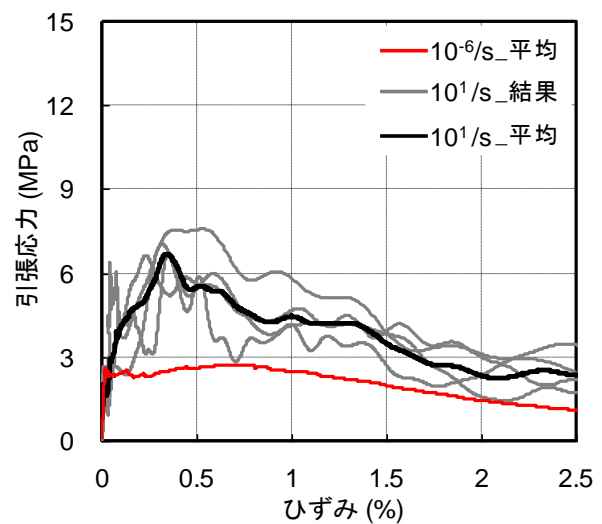
(a) HSF2.0



(b) HSF1.5PVA0.5



(c) HSF1.0PVA1.0



(d) HSF0.5PVA1.5

図-5 それぞれのひずみ速度における引張応力-ひずみ曲線

た。その後、繊維を均等に分散されるように一定速度で投入し、所定の流動性を満たすために十分に練り混ぜた。混練した HSPFRCC は型枠に打設し、打設面を養生シートで覆った後、温度  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度  $50 \pm 5\%$  の条件で 1 日間養生した後、材齢 28 日まで標準水中養生を行った。

## 2.2 試験方法

図-2(a)に本研究で評価した引張試験体の形状を示す。試験体は長さ 400mm、幅 100mm、厚さ 25mm であり、繊維が荷重を受ける方向に配列されるように誘導するために、供試体中央の試験区間の断面が  $25 \times 50\text{mm}$  となるダンベル形状で作製した。ひずみ測定範囲(gauge length)外で試験体が破壊されることを防止するために試験体の両端は各々 2 つのワイヤーメッシュで補強した。また、静的引張試験と高速引張試験は試験体寸法の影響

を受けないように同一な試験体を使用し、各水準ごとに 3~5 つの試験体に対して評価した。

図-2(b)に静的直接引張試験装置を示す。荷重速度は  $1\text{mm}/\text{min}$  (平均ひずみ速度は  $10^{-6}/\text{s}$ ) と設定した。また、図-3 に急速荷重試験装置を示す。圧縮荷重を引張荷重に転換する治具を設置して実験を行った。荷重速度は  $5\text{m}/\text{s}$  (平均ひずみ速度は  $10^1/\text{s}$ ) と設定した。引張荷重は試験装置に設置されているロードセルで測定し、試験体の引張ひずみは試験体の左右に LVDT を設置して測定した伸びから算出した。ひずみ速度は各々の試験体で得られた時間(t)とひずみ( $\epsilon$ ) 曲線の傾きから算定した。

図-4 に引張特性の概要を示す。試験によって得られた引張応力-ひずみ曲線の最大応力点である引張強度 ( $\sigma_{ts}$ )、最大引張応力でのひずみであるひずみ能力 ( $\delta_{ts}$ )



にて、引張特性を評価した。

また、ひずみ速度  $10^1/s$  で測定された引張特性値を、ひずみ速度  $10^{-6}/s$  で測定された引張特性値で除して、動的増加係数(Dynamic increase factor, 以下 DIF)を算出した。

### 3. 実験結果及び考察

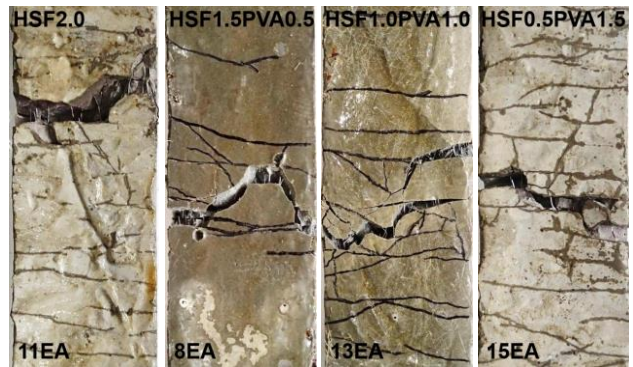
#### 3.1 引張応力-ひずみ曲線及び破壊性状

図-5にそれぞれのひずみ速度における HSPFRCC の引張応力-ひずみ曲線、図-6 に引張試験終了後の試験体のひび割れ状況及び本数を示す。全ての試験体でひずみ硬化挙動及び複数ひび割れの発生が認められた。

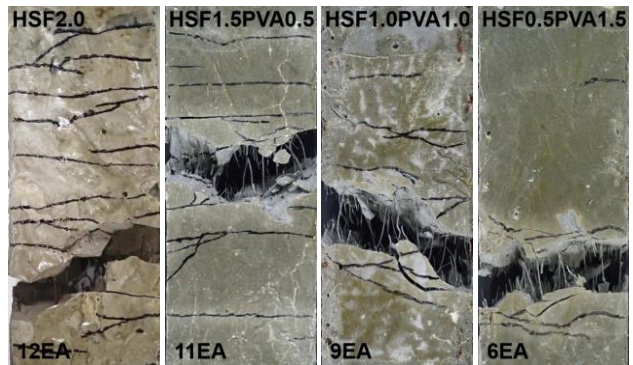
HSF2.0はひずみ速度  $10^{-6}/s$  で初期ひび割れが発生した後、HSFによるマトリックスの架橋作用により複数ひび割れ発生を伴ったひずみ硬化挙動が現れ、引張強度点以後のひずみ軟化区間において殆どの繊維がマトリックスから引き抜ける際に直線型に整形された(図-7(a))。一方、ひずみ速度  $10^1/s$  ではひずみ速度が増加することにより、繊維とマトリックスの間の付着力が向上し、引張強度、ひずみ能力ともに大きくなるが、ひび割れの本数には大きな違いはなかった。また、ひずみ速度  $10^1/s$  では繊維がマトリックスから急に引き抜けていくことによって直線状に整形されることはなく、フックの形状はそのまま保持されていた(図-7(b))。破断面でフックの形状がそのまま保持された繊維の本数は、約60%で確認された。

HSF1.5PVA0.5はPVAがHSFの周囲のマトリックスに分布しており、HSFとマトリックスの付着力が向上するため、ひずみ速度  $10^{-6}/s$  でHSF2.0に比べて引張強度が増加した。しかし、HSFの混入率が減少して、PVAの繊維混入率が0.5vol.%と小さいので、複数ひび割れの数とひずみ能力は減少したと判断される。引張破壊断面でPVAはマトリックスから引き抜かれず、破断する挙動が観察された。一方、ひずみ速度  $10^1/s$  では繊維とマトリックスの付着力が向上して引張強度、ひずみ能力及びひび割れ本数が増加した。また、図-8にPVAのハイブリッド補強によるHSFの表面状態の変化を示す。破断面でフックの形状がそのまま保持された繊維の本数は、約15%でHSF2.0に比べて減少したと確認された。マトリックスに分布しているPVAがHSFの周りのマトリックスでのマイクロクラック発生を抑制するため、HSFの表面に損傷が多く生じ、引抜き過程で直線型に整形されるHSFの数が増加したと判断され、これにより、引張強度以後の応力低下が緩やかになったと考えられる。

HSF1.0PVA1.0及びHSF0.5PVA1.5の場合、ひずみ速度  $10^{-6}/s$  ではHSFの混入率が1.0vol.%以下になるため引張強度は減少したが、PVAの混入率は1.0vol.%以上となる



(a) ひずみ速度  $10^{-6}/s$



(b) ひずみ速度  $10^1/s$

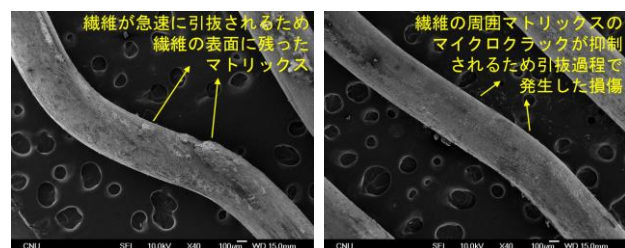
図-6 ひずみ速度がひび割れ状況及び本数に与える影響



(a) ひずみ速度  $10^{-6}/s$

(b) ひずみ速度  $10^1/s$

図-7 ひずみ速度によるHSFの引抜挙動の変化



(a) HSF 単一補強

(b) HSF+PVA ハイブリッド補強

図-8 PVAハイブリッドによるHSFの表面状態変化

ため応力の分散による複数ひび割れの個数とひずみ能力が向上する傾向が現れた。一方、ひずみ速度  $10^1/s$  で引張強度は増加したが、ひずみ能力は減少する傾向が確かめられた。これは高ひずみ速度でPVAは破断されずマトリックスから引き抜かれ、複数ひび割れの発生本数が減少するためであると考えられる。

### 3.2 ひずみ速度及び繊維混合比による引張特性

図-9にひずみ速度及び繊維混合比別の HPRCC の引張強度、ひずみ能力を示す。ひずみ速度  $10^{-6}/s$  で HSF2.0 の引張強度は 3.5MPa であった。HSF1.5PVA0.5 は初期ひび割れ発生以後の硬化初期段階で、PVA が HSF 周囲のマトリックスのマイクロクラック発生を抑制したため、HSF の引抜け抵抗性能が向上し、最も大きい引張強度を示した。一方、HSF1.0PVA1.0 と HSF0.5PVA1.5 では、HSF の混入率が減少するほど引張強度が小さくなる傾向が確かめられた。

ひずみ速度  $10^1/s$  の場合、HSF2.0 の引張強度は 10.17 MPa であり、HSF1.5PVA0.5 は 11.13MPa であった。HSF1.5PVA0.5 は PVA 補強により HSF の引抜け抵抗性能が向上するため、HSF2.0 に比べて引張強度が増加したと考えられる。また、HSF1.0PVA1.0 と HSF0.5PVA1.5 の引張強度は各々 8.65MPa と 7.24MPa であり、HSF の混入率が減少するほど引張強度が小さくなる傾向が見られた。

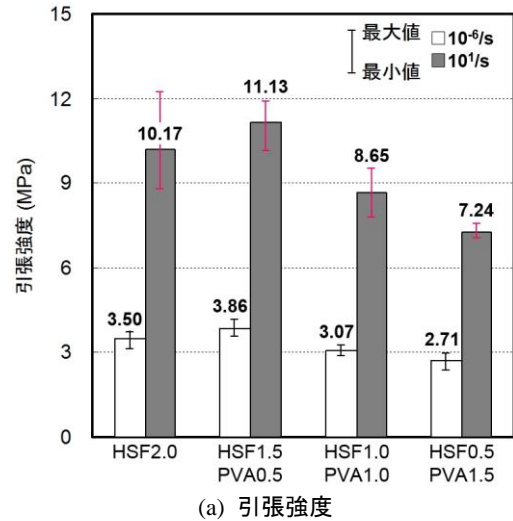
ひずみ速度  $10^{-6}/s$  でのひずみ能力の場合、HSF2.0 は 0.33%，HSF1.5PVA0.5 は 0.27% であった。これは HSF 混入率の減少と PVA の低い混入率によってセメント複合体の複数ひび割れの本数が減少したためであると考えられる。一方、HSF1.0PVA1.0 と HSF0.5PVA1.5 のひずみ能力は各々 0.44%，0.60% で、PVA の混入率が増加するほど複数ひび割れの本数が多くなるため、ひずみ能力が向上したと考えられる。

ひずみ速度  $10^1/s$  で HP-HFRCC のひずみ能力は HSF の混入率が減少し、PVA の混入率が増加するほど小さくなる傾向が認められた。これらの原因は図-10 と図-11 に示すように、ひずみ速度によって PVA の破壊メカニズムが異なるためであると考えられる。ひずみ速度  $10^{-6}/s$  では PVA 繊維とマトリックスの付着力が繊維の引張強度より大きいため、繊維の引抜けが生じず、破断する挙動が見られた。しかし、ひずみ速度が  $10^1/s$  に増加することにより繊維の引張強度が繊維とマトリックスの付着力より大きくなって、繊維の引抜けが生じ、ひび割れの局所化が生じるため、複数ひび割れの本数とひずみ能力が減少したと考えられる。

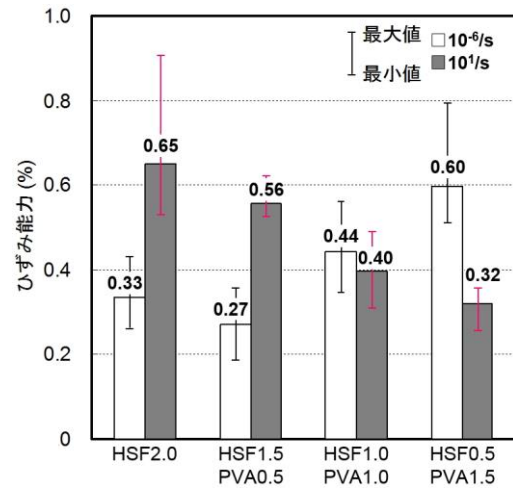
### 3.3 引張特性の動的増加係数

図-12 に繊維混合比別の HPRCC の引張特性 DIF を示す。引張強度の DIF の場合、HSF2.0 では HSF とマトリックスの付着力及び繊維端部のフックによる機械的結合が複合的に作用して、引張強度 DIF が最も大きくなった。また、HSF の混入率が減少するほど引張強度 DIF は小さくなる傾向を確かめた。

ひずみ能力の DIF では、HSF と PVA を混合して補強する場合、PVA が HSF 周りのマトリックスで発生するマイクロクラックの発生を抑制して、HSF の引抜けに対す

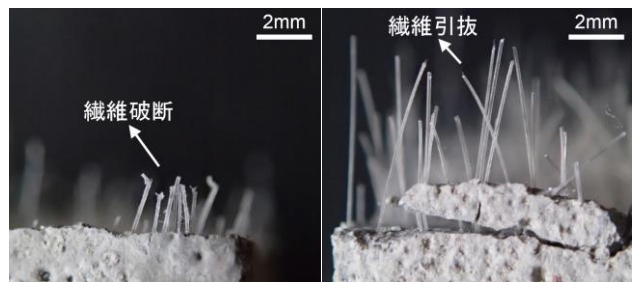


(a) 引張強度



(b) ひずみ能力

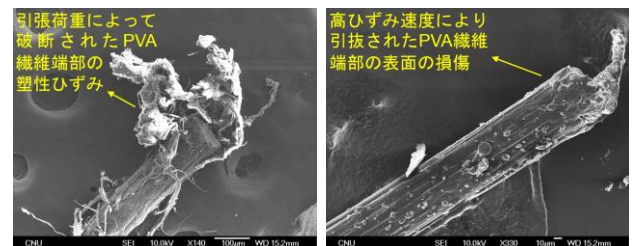
図-9 ひずみ速度及び繊維混合比の引張特性への影響



(a) ひずみ速度  $10^{-6}/s$

(b) ひずみ速度  $10^1/s$

図-10 ひずみ速度の違いによる PVA の破壊挙動の変化



(a) ひずみ速度  $10^{-6}/s$

(b) ひずみ速度  $10^1/s$

図-11 ひずみ速度の違いによる PVA の表面状態変化の SEM 写真



る抵抗性を向上させるために、HSF1.5PVA0.5 のひずみ能力 DIF が HSF2.0 よりも大きくなったと考えられる。一方、HSF1.0PVA1.0、HSF0.5PVA1.5 では HSF の混入率が減少し、PVA の混入率が増加するほどひずみ能力 DIF が小さくなる傾向が見られた。

#### 4. まとめ

- (1) ひずみ速度はフック型鋼繊維とマトリックスの付着及び引抜け挙動に大きな影響を及ぼし、ひずみ速度が増加すると、鋼繊維のフック形状が維持された状態で引き抜ける破壊挙動を確かめた。
- (2) PVA 繊維はひずみ速度  $10^{-6}/s$  で繊維が破断される挙動を見せたが、ひずみ速度  $10^1/s$  では繊維の引張強度が繊維とマトリックスの付着力より大きくなるために、繊維が破断せずに引抜けが生じた。
- (3) PVA 繊維を 0.5vol.% 混入した場合、PVA 繊維による応力分散効果とフック型鋼繊維周りのマトリックスのマイクロクラック発生を抑制することにより、鋼繊維の引抜け抵抗性能が大きくなり、引張強度が大きく向上したと考えられる。
- (4) フック型鋼繊維 1.5vol.% と PVA 繊維 0.5vol.% を混合して補強した場合、PVA によるマトリックス脆性破壊の改善及びフック型鋼繊維とマトリックス間の機械的結合が複合的に作用して、フック型鋼繊維単独で補強したセメント複合体に比べてひずみ能力の DIF が大きくなったと考えられる。

#### 謝辞

本研究は 2015 年度韓国研究財団の支援を受けて行われた基礎研究事業(No.2015R1A5A1037548)の結果であり、ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) Naaman, A. E. & Reinhardt, H. W.: Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response, *Materials and structures*, 39(5), pp. 547-555, 2006
- 2) Lawler, J. S., Wilhelm, T., Zampini, D. & Shah, S. P.: Fracture processes of hybrid fiber-reinforced mortar, *Materials and Structures*, 36(3), pp. 197-208, 2003
- 3) Ahmed, S. F. U. & Maalej, M.: Tensile strain hardening behaviour of hybrid steel-polyethylene fibre reinforced cementitious composites, *Construction and Building Materials*, 23(1), pp. 96-106, 2009
- 4) Kim, N. W., Choi, G. B., Kim, H. S. & Bae, J. S.: A Study on the Fatigue behavior of Hybrid Fiber Rein-

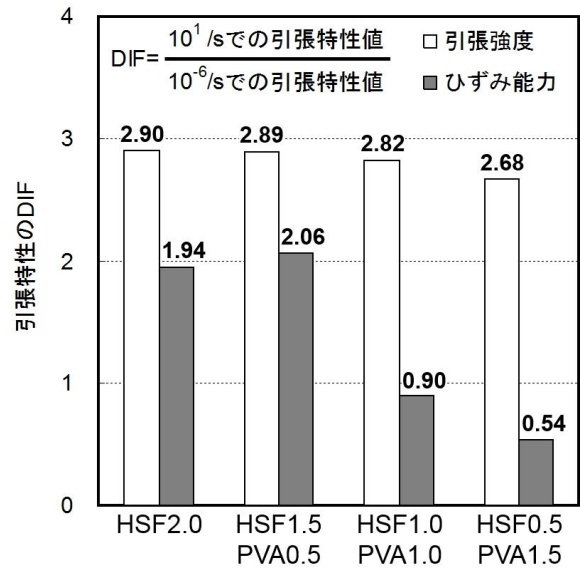


図-12 HSPFRCC の引張特性に及ぼすひずみ速度効果

forced High Strength Concrete, *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, 9(1), pp. 127-135, 2005

- 5) Choi, J. I., Koh, K. T., & Lee, B. Y.: Tensile Behavior of Ultra-High Performance Concrete According to Combination of Fibers. *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, 19(4), 49-56, 2015
- 6) Park, S. H., Kim, D. J., Ryu, G. S., & Koh, K. T.: Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 34(2), 172-184, 2012
- 7) Kim, D. J., Park, S. H., Ryu, G. S., & Koh, K. T.: Comparative flexural behavior of hybrid ultra high performance fiber reinforced concrete with different macro fibers. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4144-4155, 2011
- 8) Yoo, D. Y. & Banthia, N.: Mechanical and structural behaviors of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete subjected to impact and blast, *Construction and Building Materials*, 149, pp. 416-431, 2017
- 9) Mechtcherine, V., de Andrade Silva, F., Butler, M., Zhu, D., Mobasher, B., Gao, S. L., & Mäder, E.: Behaviour of strain-hardening cement-based composites under high strain rates. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 9(1), 51-62, 2011
- 10) Tran, T. K., & Kim, D. J.: Investigating direct tensile behavior of high performance fiber reinforced cementitious composites at high strain rates. *Cement and Concrete Research*, 50, 62-73, 2013