

論文 ひずみ速度による束型ポリアミド繊維とフック型鋼繊維補強セメント複合体の引張特性の変化

李 常揆*1・金 圭庸*2・金 弘燮*3・南 正樹 *4

要旨：本研究では、ひずみ速度による束型ポリアミド繊維とフック型鋼繊維補強セメント複合体の引張特性の変化を評価した。束型ポリアミド繊維補強セメント複合体は、補強繊維が束型であり、混入個体数が多いため、マトリックスとの付着力が大きく、ひずみ速度に関わらず繊維が切れる挙動が現れる。一方、フック型鋼繊維補強セメント複合体は、静的荷重条件で繊維がマトリックスから引き抜かれるが、動的荷重条件では繊維とマトリックスの機械的な付着力が増加し、マトリックスが破壊される挙動が見られる。各繊維の形状がひずみ速度による繊維とマトリックスの付着および引抜挙動の変化に大きな影響を与えると判断される。

キーワード：ひずみ速度、束型ポリアミド繊維、フック型鋼繊維、セメント複合体、引張特性、繊維引抜

1. はじめに

セメント系材料が脆性的に破壊される特性を改善するためには、一般的にマトリックスの曲げ引張性能を確保する必要がある。このことから、混入繊維の架橋作用によりひび割れを抑制し、曲げ引張性能を高めることが出来る繊維補強セメント複合体に関する研究が進められている。特にトンネル用材料として採用されているショックリートでは、マトリックスの曲げ引張性能を高めるためにフック型鋼繊維(Hooked steel fiber)を混入する方法が用いられている。しかし、フック型鋼繊維は、腐食によるショックリートの耐久性低下の原因となる可能性が存在するため、韓国では有機系の束型ポリアミド繊維(Bundle-type polyamide fiber)の採用を検討している。

先行研究^{1),2)}では、図-1のように束型ポリアミド繊維とフック型鋼繊維を補強したセメント複合体の静的力学特性と耐衝撃性能について評価した。その結果、混入繊維の形状、引張強度および混入個体数などの影響によって静的力学特性と耐衝撃性能の向上効果が異なることを明らかにした。

また、既往の研究から、繊維とマトリックスとの付着特性にはひずみ速度が大きく影響し、繊維とマトリックス

の付着特性は、繊維補強セメント複合体の圧縮強度よりも引張強度と靱性に与える影響が大きいことが報告されている^{3),9)}。

そこで本研究では、束型ポリアミド繊維とフック型鋼繊維補強セメント複合体を対象とし、静的ひずみ速度10⁻⁶/sと動的ひずみ速度10¹/sの条件下で直接引張試験を行った。また、ひずみ速度による繊維補強セメント複合体の引張強度、ひずみ能力、靱性などの引張特性の変化を評価し、束型ポリアミド繊維とフック型鋼繊維の形状がひずみ速度が繊維とマトリックスの付着および引抜挙動に及ぼす影響について比較・検討したものである。

2. 実験計画および方法

2.1 実験計画

表-1 に実験計画を示す。試験体は、混入繊維の種類および繊維混入率により定めた。評価項目はひずみ速度による引張強度、ひずみ能力、靱性、動的増加係数の変化とし、引張試験によるひび割れ、繊維とマトリックス間の引抜および破壊挙動の相違を観察した。引張試験は各水準について3つ以上の試験体を用いた。

表-2 および表-3 に繊維補強セメント複合体の調査および使用材料の物理的特性を示す。各繊維の長さおよび直径はそれぞれ30mmおよび0.5mmと同一であり、繊維の引張強度については、ポリアミド繊維は597MPa、フック型鋼繊維は1,140MPaである。

図-2 に引張試験体の形状を示す。試験体はダンベル型とし、寸法は長さ400mm、幅100mm、厚さ25mmであり、中央部の断面は幅50mm、厚さ25mmである。また、ゲージ(LVDT)測定範囲内でひび割れが発生するよう

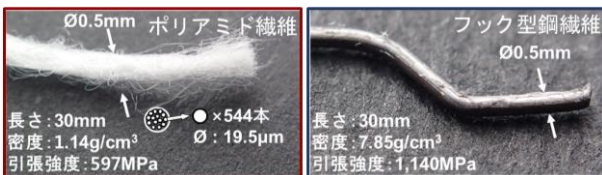


図-1 束型ポリアミド繊維とフック型鋼繊維の性状

*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 研究員 博(工) (正会員)

*4 大韓民国 忠南大学校 建築工学科 助教授 博(工) (正会員)

表一 実験計画

試験体の種類	試験体の条件		評価項目
	繊維種類	繊維の混入率 (vol.%)	
PAFRCC1.0 ¹⁾	東型ポリアミド繊維	1.0	・引張強度 ・ひずみ能力
PAFRCC2.0		2.0	
HSFRCC1.0 ²⁾	フック型鋼繊維	1.0	・靱性 ・動的増加係数
HSFRCC2.0		2.0	

1) PAFRCC : Polyamide Fiber Reinforced Cement Composite
2) HSFRCC : Hooked Steel Fiber Reinforced Cement Composite

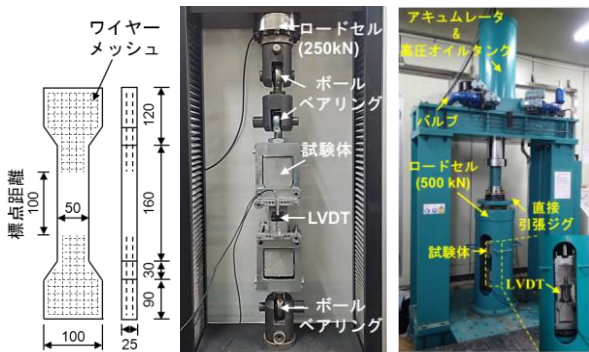
表二 繊維補強セメント複合体の調査

W/B	単 位 量 ¹⁾ (kg/m ³)				繊維 ²⁾		
	C	W	FA	S	種類	(vol.%)	(kg)
0.4	850	400	150	350	PA	1.0	11.4
						2.0	22.8
					HSF	1.0	78.5
						2.0	157.0

1) C: セメント, FA: フライアッシュ, S: 細骨材
2) PA: Polyamide fiber, HSF: Hooked steel fiber

表三 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 ³ , 粉末度 : 3,200cm ² /g
フライアッシュ	密度 : 2.20g/cm ³ , 粉末度 : 3,000cm ² /g
細骨材(珪砂)	密度 : 2.64g/cm ³ , 吸水率 : 0.38%
混和剤	ポリカルボン酸系高性能減水剤
東型ポリアミド繊維 (PA)	密度 : 1.14g/cm ³ , 長さ : 30mm 直径 : 0.5mm, 引張強度 : 597MPa 弾性係数 : 3×10 ³ MPa
フック型鋼繊維 (HSF)	密度 : 7.85g/cm ³ , 長さ : 30mm 直径 : 0.5mm, 引張強度 : 1,140MPa 弾性係数 : 200×10 ³ MPa



図二 試験体の形状

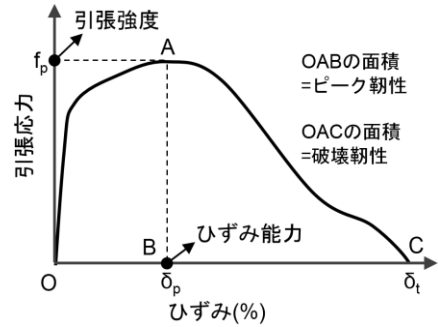
(a) ひずみ速度 10⁻⁶/s (b) ひずみ速度 10¹/s

図三 直接引張試験装置

に、試験体の両方にワイヤメッシュを補強した。

2.2 試験方法

図三(a)に載荷容量250kNの静的直接引張試験装置を示す。載荷速度は1mm/min(平均ひずみ速度10⁻⁶/s)と設定



図四 引張ひずみ曲線

$$DIF = \frac{f_{t,imp}}{f_t} = \left(\frac{\epsilon_t}{\epsilon_{t0}}\right)^{0.018} \text{ for } \epsilon_t \leq 10/s \quad \text{式(1)}$$

$$DIF = \frac{f_{t,imp}}{f_t} = 0.0062(\epsilon_t/\epsilon_{t0})^{1/3} \text{ for } \epsilon_t > 10/s \quad \text{式(2)}$$

ここで、 $f_{t,imp}$: ひずみ速度 ϵ_t での引張強度 (MPa)

f_t : 静的ひずみ速度 ϵ_{t0} での引張強度 (MPa)

ϵ_t : 試験によるひずみ速度 (/s)

ϵ_{t0} : 静的荷重条件でのひずみ速度 $1 \cdot 10^{-6}/s$

$$DIF = \frac{\epsilon_{c1,imp}}{\epsilon_{c1}} = \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c0}}\right)^{0.02} \quad \text{式(3)}$$

ここで、 $\epsilon_{c1,imp}$: ひずみ速度 ϵ_c でのひずみ(ϵ または%)

ϵ_{c1} : 静的ひずみ速度 ϵ_{c0} でのひずみ(ϵ または%)

ϵ_c : 試験によるひずみ速度 (/s)

ϵ_{c0} : 静的荷重条件でのひずみ速度

ϵ_{c0} : 圧縮: $30 \cdot 10^{-6}/s$, 引張: $1 \cdot 10^{-6}/s$

した。図三(b)は急速載荷試験装置として圧縮荷重を引張荷重に転換させるジグを設置し、載荷速度は5m/s(平均ひずみ速度10¹/s)とした。試験体のひずみは、試験体左右に変位計によって測定し、急速載荷条件では30,000Hzのサンプリング速度でデータを収集した。

引張特性については、図四のように引張強度(最大応力点、 f_p)、ひずみ能力(最大応力でのひずみ、 δ_p)、靱性(応力-ひずみ曲線の面積)を評価した。靱性はピーク靱性と破壊靱性に区分し、ピーク靱性については ΔOAB の面積、破壊靱性については ΔOAC の面積により計算した。

動的増加係数(Dynamic Increase Factor, DIF)は、ひずみ速度10¹/sの範囲で測定した引張特性値を静的ひずみ速度10⁻⁶/sの引張特性値で除して算出した。その後、CEB-FIP model code 2010¹⁰⁾の提案式である式(1), (2), (3)から求めた引張強度とひずみ能力のDIFと比較した。

3. 実験結果および考察

3.1 引張破壊性状

図五にひずみ速度による直接引張試験後のPAFRCCとHSFRCCのひび割れ性状の相違を示す。ひずみ速度は引張試験で得られた時間-ひずみ曲線の傾きで求めた。急速載荷試験では試験結果の偏差が大きいため3つ以

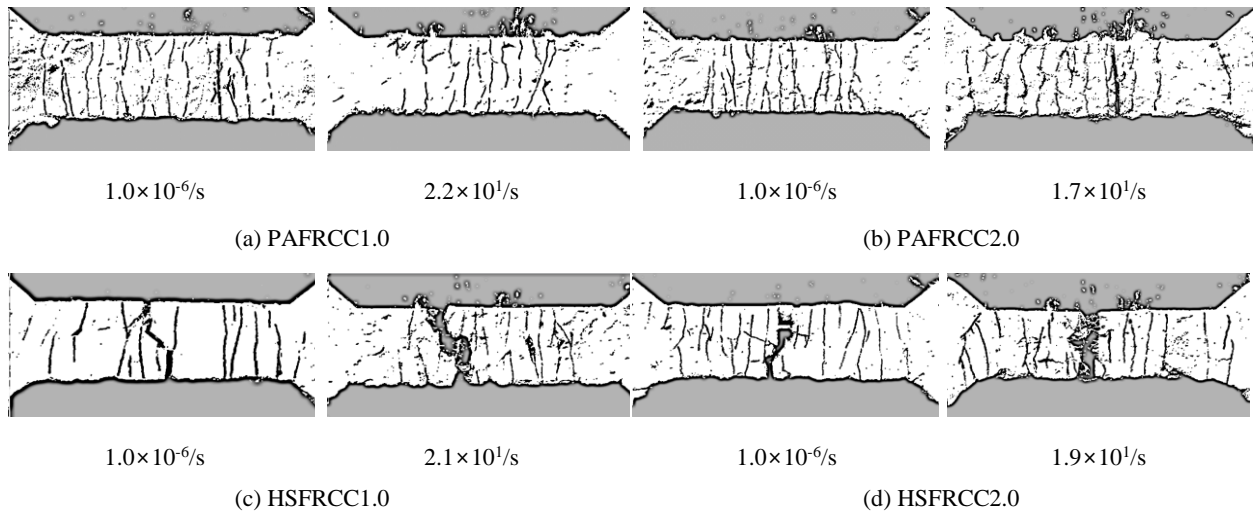


図-5 ひずみ速度による繊維補強セメント複合体のひび割れ性状の相違

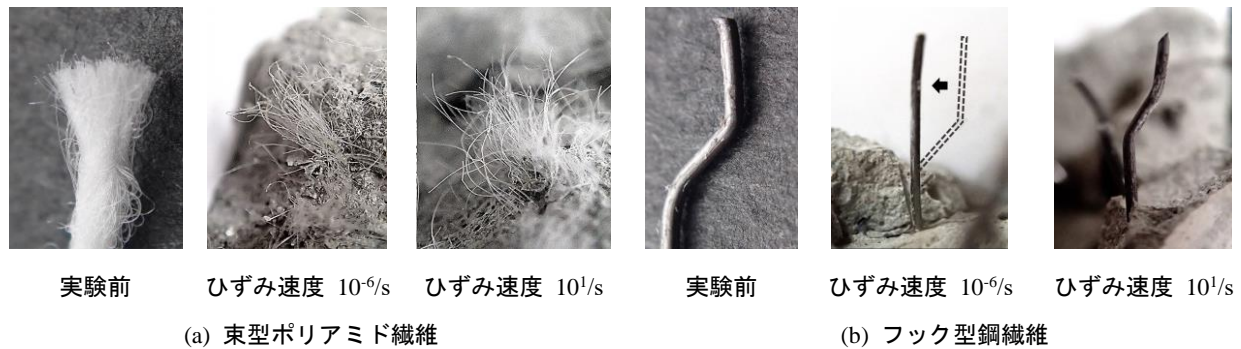


写真-1 破壊断面の繊維形状の相違

上の試験体を用いて評価を行った。それぞれの試験体で得られたひずみ速度の平均は約 $1.7\sim 2.2\times 10^1/s$ の範囲である。全ての試験体において複数ひび割れが発生しており、繊維の混入率が増加するほどひび割れ本数が増加する傾向であるが、ひずみ速度が増加する場合には、ひび割れ本数が減少する傾向であった。

ひずみ速度 $10^{-6}/s$ での PAFRCC の場合は、補強繊維が束型で、混入個体数が多く、応力分散効果が HSFRC に比べて優れるため、繊維混入率に関わらず HSFRC よりひび割れ本数が多いと判断される。一方、ひずみ速度 $10^1/s$ では、繊維によって応力が分散される時間的余裕が減少するため、PAFRCC と HSFRC のひび割れ本数が類似な結果であると考えられる。

写真-1 にひずみ速度による破壊断面での繊維形状の相違を示す。束型ポリアミド繊維の場合、ひずみ速度に関わらず繊維がマトリックスから引き抜かれずに切れる破壊挙動が現れた。一方、フック型鋼繊維の場合は、ひずみ速度 $10^{-6}/s$ で繊維端部の屈曲が直線的に伸びながらマトリックスから引き抜かれ、破壊される挙動が観察された。しかし、ひずみ速度 $10^1/s$ では、繊維とマトリックスの間に機械的な結合が増加するため、繊維がマトリックスから引き抜かれず、繊維のフック形態がそのまま

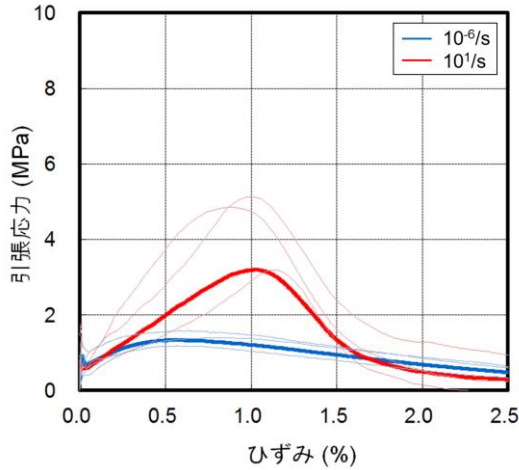
維持される状態でマトリックスが破壊される挙動が見られた。

従って、束型ポリアミド繊維は繊維の引張強度、フック型鋼繊維は繊維とマトリックス間の機械的な結合が繊維補強セメント複合体の引張挙動に影響を及ぼす主要な要因であると考えられる。

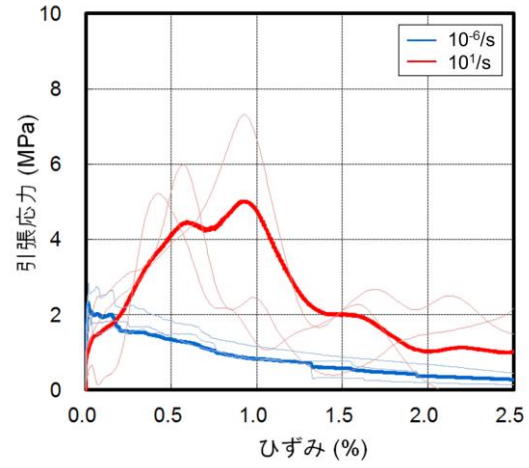
3.2 引張応力-ひずみ曲線

図-6 にひずみ速度による平均化された引張応力-ひずみ曲線の相違を示す。PAFRCC は束型繊維とマトリックスの付着と多数の繊維による応力の分散による複数ひび割れと共にひずみ硬化挙動が観察された。ひずみ速度の増加によって繊維の引張強度の影響が大きくなってひずみ硬化挙動がより明らかになることと判断される。ひずみ速度 $10^{-6}/s$ では最大応力以後のひずみ軟化区間で、繊維がマトリックスから引き抜かれる、繊維が切れるため応力が徐々に低下する挙動が見られた。ひずみ速度 $10^1/s$ では、応力が分散される時間的余裕が減少するため、応力が急に低下する挙動が見られたと考えられる。

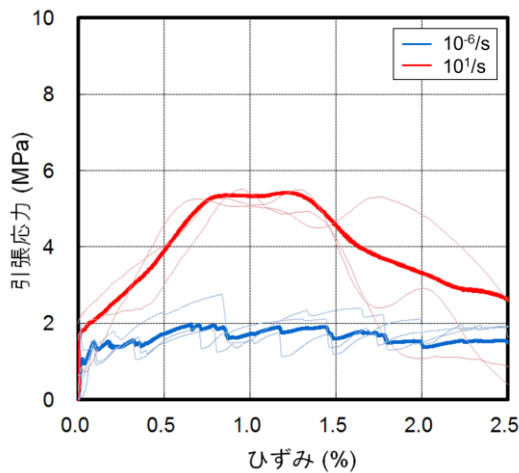
一方、HSFRC の場合、繊維とマトリックスの付着と機械的なかみ合いによるひずみ硬化挙動が観察された。ひずみ速度 $10^{-6}/s$ では繊維端部の屈曲が伸びながら引き抜かれるため最大応力以後応力が徐々に低下する挙動



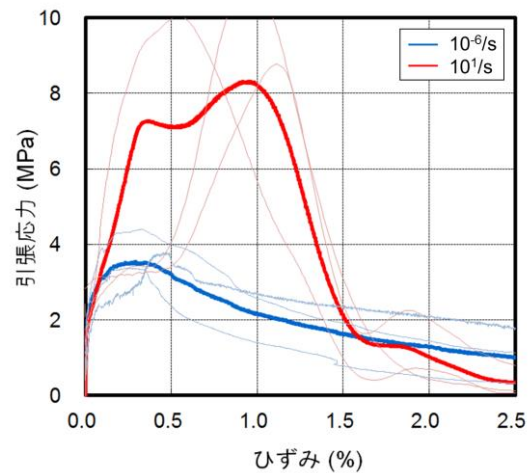
(a) PAFRCC1.0



(b) HSFRC1.0



(c) PAFRCC2.0



(d) HSFRC2.0

図-6 ひずみ速度による引張応力-ひずみ曲線の相違（平均化曲線）

が現れた。ひずみ速度 $10^1/s$ では繊維とマトリックスの付着力と機械的なみ合いなどの影響が大きく作用してマトリックスが破壊され繊維端部の屈曲が維持されながら引き抜かれるために、最大応力以後の応力が急に低下する挙動を確かめた。

3.3 引張強度、ひずみ能力および靱性

図-7 にひずみ速度による引張強度の変化を示す。ひずみ速度と繊維混入率の増加に伴い引張強度が大きく向上した。同一のひずみ速度と繊維混入率の条件では、HSFRCC の引張強度が PAFRCC より大きい結果となった。

図-8 にひずみ速度によるひずみ能力の変化を示す。繊維混入率の増加によってひずみ能力が向上した。また、同一のひずみ速度と繊維混入率の条件で、PAFRCC は多量の東型繊維の混入によって応力分散能力が優れるため、HSFRCC に比べてひずみ能力が大きいと考えられる。

特に、PAFRCC2.0 はひずみ速度が増加してもひずみ能力が減少する傾向であった。これはひずみ速度の増加によって複数のひび割れが生じる時間が減少したためで

あると判断される。

一方、HSFRCC の場合、ひずみ速度の増加によってひずみ能力が大きくなり、これは繊維とマトリックスの付着能力が増加するため、繊維の引抜抵抗性能が向上したことが原因として考えられる。

図-9 と図-10 にひずみ速度によるピーク靱性と破壊靱性の変化を示す。ひずみ速度の増加によってピーク靱性と破壊靱性が大きくなる傾向が現れた。

同一なひずみ速度と繊維混入率の条件において、PAFRCC の場合は、HSFRCC より引張強度は小さいが、ひずみ能力が大きく、ピーク応力以後の応力低下が緩やかなため、ピーク靱性と破壊靱性が HSFRCC より大きくなったと判断される。

3.4 動的増加係数(Dynamic Increase Factor, DIF)

ひずみ速度による引張強度とひずみ能力の DIF の実測値と CEB-FIP model code 2010 の比較を図-11 に示す。図-11 (a) のように引張強度の DIF は CEB-FIP model code 2010 を上回る傾向であり、全ての条件下で 1.5 以上の DIF が確認できた。一方、図-11 (b) のようにひずみ能力の

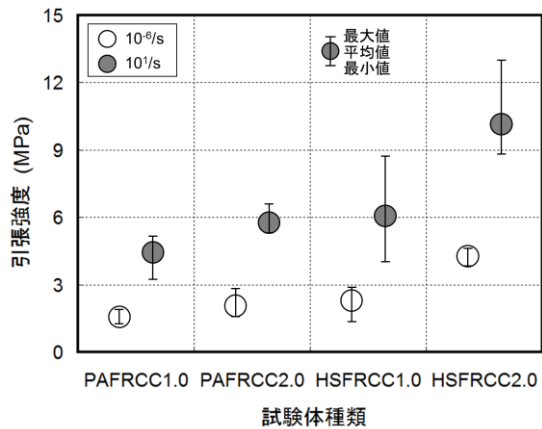


図-7 引張強度

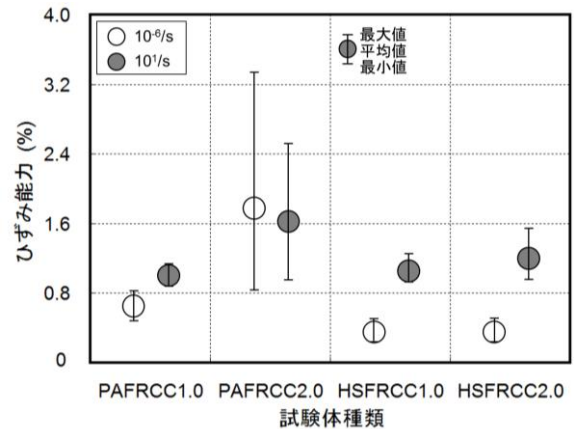


図-8 ひずみ能力

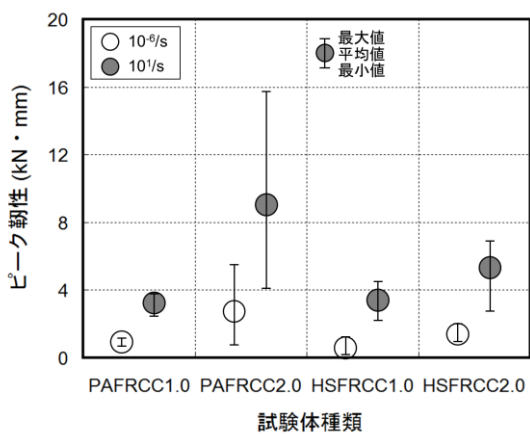


図-9 ピーク靱性

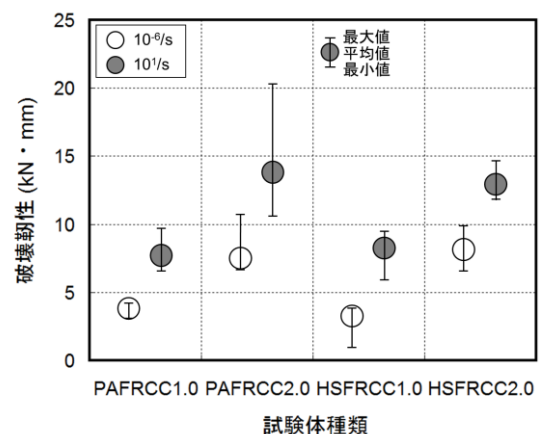


図-10 破壊靱性

DIF の場合、PAFRCC2.0 は CEB-FIP model code 2010 より小さく、PAFRCC1.0 と HSFRC1.0, 2.0 は CEB-FIP model code 2010 より大きくなる傾向が現れた。

図-12 にひずみ速度および補強繊維の種類による引張特性の DIF の相違を示す。図-12(a)の引張強度の DIF の場合、PAFRCC が HSFRC に比べて大きい結果であった。引張強度の向上において、ひずみ速度によるポリアミド繊維の引張強度の向上がフック型鋼繊維とマトリックスの付着力の向上に比べて大きいためであると判断される。

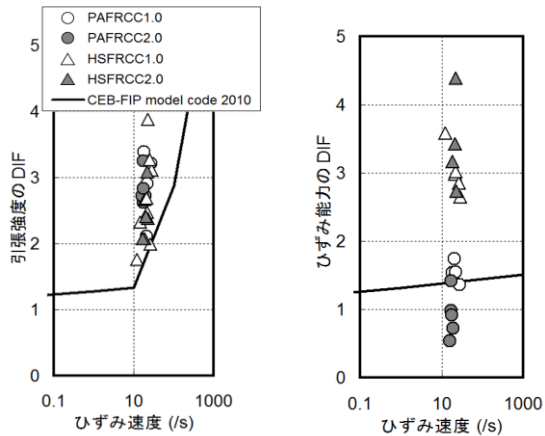
一方、図-12(b)のひずみ能力の DIF は、HSFRCC が PAFRCC に比べて大きい結果であった。HSFRCC の場合、ひずみ速度が増加するほど繊維とマトリックスの機械的な結合力の向上による引抜抵抗性能が大きくなったため、ひずみ能力の増加率が大きいと考えられる。

図-12(c)にピーク靱性と破壊靱性の DIF を示す。破壊靱性 DIF の場合 PAFRCC と HSFRC が似ているが、ピーク靱性 DIF は PAFRCC が HSFRC より小さくなった。ひずみ速度は束型繊維の引張強度及び複数ひび割れの数に及ぼす影響が大きいですが、フック型繊維の場合では

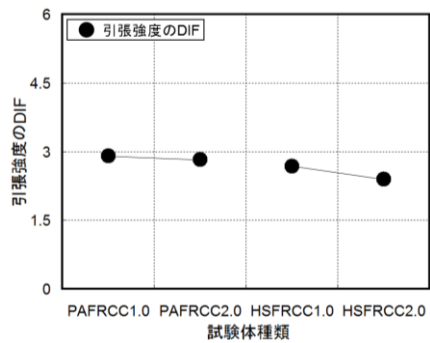
機械的な結合及び繊維とマトリックスの付着力に及ぼす影響が大きいと判断される。従って、繊維補強セメント複合体の靱性はひずみ速度によって引張応力-ひずみ曲線を導出して引張強度とひずみ能力を全て考慮する必要があると考えられる。

4. まとめ

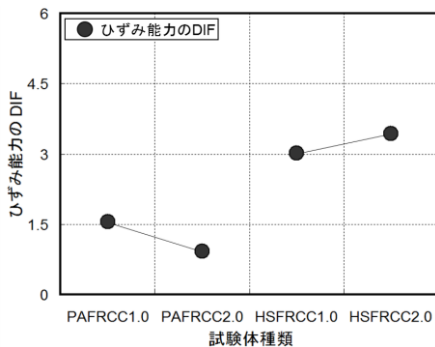
- (1) PAFRCC はひずみ速度に関わらず、混入繊維が破断するため、繊維自体の引張強度が繊維補強セメント複合体の引張特性に及ぼす影響が大きいと思われ、ポリアミド繊維は混入個体数が多く、束型であるため、応力分散能力が優れ、繊維補強セメント複合体のひずみ能力と靱性が大幅に向上したと考えられる。
- (2) HSFRC は繊維とマトリックスの付着力、フック型の屈曲による機械的な結合が引張特性に大きな影響を及ぼすと考えられる。静的荷重条件では、繊維がマトリックスから直線的に引き抜かれるが、動的荷重条件では繊維がフック型の形態で引き抜かれる傾向が見られ、動的荷重条件では、繊維とマトリックスの付着力が強い状態で繊維周辺のマトリックスが破壊



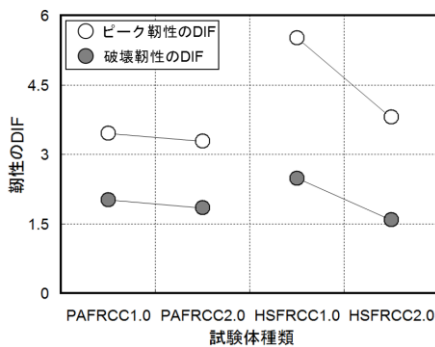
(a) 引張強度 (b) ひずみ能力
 図-11 ひずみ速度による引張特性 DIF の
 実測値と提案値の比較



(a) 引張強度



(b) ひずみ能力



(c) 靱性

図-12 補強繊維の種類による引張特性 DIF の相違

されたと判断される。

- (3) 動的載荷条件で PAFRCC は、多量の束型繊維による複数のひび割れによってひずみ能力と靱性が大幅に増加し、HSFRCC は繊維とマトリックスの付着力によって引張強度が大きくなったと思われる。

謝辞

本研究は 2015 年度未来創造科学部の財源で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) 南正樹, 金圭庸, 田重圭, 金武漢, 高速飛翔体の衝突に対する各種コンクリートの耐衝撃性能評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, 2013.
- 2) 金弘燮, 金圭庸, 南正樹, 田重圭, 束型ポリアミド繊維補強コンクリートの曲げ特性および耐衝撃性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, 2015.
- 3) Kanda, T., & Li, V. C. (1998). Interface property and apparent strength of high-strength hydrophilic fiber in cement matrix. *Journal of materials in civil engineering*, 10(1), 5-13.
- 4) Bencardino, F., Rizzuti, L., Spadea, G., & Swamy, R. N. (2013). Implications of test methodology on post-cracking and fracture behaviour of steel fibre reinforced concrete. *Composites Part B: Engineering*, 46, 31-38.
- 5) Bolat, H., Şimşek, O., Çullu, M., Durmuş, G., & Can, Ö. (2014). The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete. *Composites Part B: Engineering*, 61, 191-198.
- 6) Soroushian, P., Tlili, A., & Khan, A. (1993). Development and characterization of hybrid polyethylene fiber reinforced cement composites. *Materials Journal*, 90(2), 182-190.
- 7) Maalej, M., & Li, V. C. (1995). Introduction of strain-hardening engineered cementitious composites in design of reinforced concrete flexural members for improved durability. *Structural Journal*, 92(2), 167-176.
- 8) Tran, T. K., & Kim, D. J. (2013). Investigating direct tensile behavior of high performance fiber reinforced cementitious composites at high strain rates. *Cement and Concrete Research*, 50, 62-73.
- 9) Tran, T. K., & Kim, D. J. (2014). High strain rate effects on direct tensile behavior of high performance fiber reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 45, 186-200.
- 10) CEB-FIP Model Code 2010 First complete draft