

論文 薄板形非晶質鋼繊維補強セメント複合体の引張挙動に及ぼすひずみ速度の影響

金 弘燮*1・金 圭庸*2・南 正樹*3・野口 貴文*4

要旨： 本研究では、薄板形非晶質鋼繊維またはフック形鋼繊維により補強されたセメント複合体について、ひずみ速度が引張挙動に与える影響を評価した。その結果、非晶質鋼繊維は繊維とマトリックスの付着性能が大きく、薄板形状によってひずみ速度に関わらず繊維が引き抜かれず、破断することを確認した。一方、フック形鋼繊維は静的荷重ではマトリックスから引き抜かれたが、高ひずみ速度では繊維が引き抜かれずマトリックスが破壊する挙動が現れた。非晶質鋼繊維補強セメント複合体の引張強度、ひずみ能力及び靱性はフック形鋼繊維補強セメント複合体に比べて大きい、動的増加係数は小さくなることが分かった。

キーワード： 薄板形非晶質鋼繊維、フック形鋼繊維、ひずみ速度、引張挙動、動的増加係数

1. はじめに

コンクリートは圧縮強度と耐久性が優れた材料であるが、曲げ・引張強度及び衝撃強度が弱く、ひび割れに対する抵抗性が弱いため脆性的に破壊される特性を持つ。そこで、短繊維をマトリックス内部に不連続的に分布させて、繊維とマトリックスの付着及び架橋作用によってひび割れの発生及び進展を抑制し、曲げ・引張性能を大幅に向上させた繊維補強セメント複合体が開発及び適用されている。

コンクリート用繊維補強材として、金属繊維、有機系繊維及び炭素繊維など様々な短繊維が適用されている。フック形鋼繊維は高い弾性係数及びマトリックスとの優れた付着性能によって広く適用されている。しかし、鋼繊維は高密度になると構造物の重量及びショートクリートのリバウンド量が増加する。また、水分接触及び化学的作用により腐食して、構造物の耐久性能が低下する問題がある^{1),2),3)}。

薄板形非晶質鋼繊維は溶融金属を $10^5 \sim 10^6 \text{ K/sec.}$ で急冷して製造され、一般鋼繊維に比べて引張強度が大きく、耐食性及び耐摩母性が高い材料である^{4),5)}。また、薄板形

で作製されアスペクト比と比表面積が大きく、粗い繊維表面によりマトリックスとの付着性能が高いため、コンクリートの曲げ・引張性能の向上を期待できる^{6),7),8)}。図-1に薄板形非晶質鋼繊維の作製方法及形状を示す。

一方、繊維補強セメント複合体の引張挙動に関する研究は主に準静的荷重条件において行われている。しかし、最近、地震、衝撃及び爆発など極端な荷重に対する構造物の安全性能の向上のため繊維補強セメント複合体の適用に関する研究が進められている。そして、繊維とマトリックス界面での破壊メカニズムはひずみ速度によって異なるため、様々なひずみ速度条件において繊維とマトリックスの付着及び繊維の引抜き挙動、繊維補強セメント複合体の引張強度、ひずみ能力及び靱性などについて十分な検討と理解が必要である^{9),10)}。

そこで、本研究では薄板形非晶質鋼繊維とフック形鋼繊維で補強した繊維補強セメント複合体に対してひずみ速度 $10^{-6}/\text{sec.}$ (静的), $10^1/\text{sec.}$ (動的) の範囲で引張挙動を評価した。また、繊維種類とひずみ速度による繊維とマトリックスの付着、繊維の引抜きと破断特性が繊維補強セメントの複合体の引張挙動に及ぼす影響を検討した。



図-1 薄板形非晶質鋼繊維の作製方法

2. 実験計画及び方法

2.1 実験計画

表-1に本研究の実験計画を示す。非晶質鋼繊維とフック形鋼繊維は体積の外割で各々1.0, 1.5及び2.0vol.%混入した。また、材齢28日での圧縮強度はすべて目標強度を満たした。

表-2に本研究で用いた材料と繊維の物理的特性を、図-2に非晶質鋼繊維とフック形鋼繊維の形状を示す。

*1 東京大学 大学院 工学系研究科建築学専攻 博士研究員 工博 (正会員)

*2 忠南大学校 建築工学科 教授 工博 (正会員)

*3 忠南大学校 建築工学科 助教授 工博 (正会員)

*4 東京大学 大学院 工学系研究科建築学専攻 教授 工博 (正会員)

非晶質鋼繊維は長さ 30mm, 幅 1.6mm, 厚さ 0.0029mm, 引張強度 1,400MPa, 密度 7.2g/cm³ で薄板形であり, フック形鋼繊維は長さ 30mm, 直径 0.5mm, 引張強度 1,140MPa, 密度 7.85g/cm³ で繊維両端にフック形の屈曲がある。

表-3 に繊維補強セメント複合体の調合を重量比で示す。試験体の作製のための流動性を考慮して, テーブルフロー 170±20mm, 空気量 4.0%を目標値に設定した。

2.2 試験体の作製

図-3 に引張試験用試験体の概要図を示す。引張試験体はダンベル形として, 応力とひずみの測定部分は断面 25×50mm, 長さ 100mm である。また, 応力とひずみを測定する部分でひび割れが発生するように試験体の両端にワイヤメッシュ(SS400, 12×12mm 格子)を補強した。

表-1 実験計画

試験体種類	繊維種類	繊維混入率 (vol.%)	圧縮強度 (MPa)
AFRCC1.0	非晶質鋼繊維	1.0	59.3
AFRCC1.5		1.5	54.7
AFRCC2.0		2.0	48.3
HSFRCC1.0	フック形鋼繊維	1.0	59.7
HSFRCC1.5		1.5	66.4
HSFRCC2.0		2.0	64.5

表-2 使用材料の物理的性質

種類	物理的特性
セメント(C)	普通ポルトランドセメント 密度: 3.15g/cm ³ , 比表面積: 3,200cm ² /g
フライアッシュ (FA)	密度: 2.20g/cm ³ , 比表面積: 3,000cm ² /g
細骨材(S)	7号珪砂, 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 AE 減水剤
非晶質鋼繊維 (AF)	密度: 7.2g/cm ³ , 長さ: 30mm 幅: 1.6mm, 厚さ: 0.0029mm 引張強度: 1,400MPa
フック形鋼繊維 (HSF)	密度: 7.85g/cm ³ , 長さ: 30mm 直径: 0.5mm, 引張強度: 1,140MPa

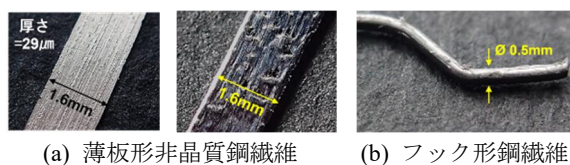


図-2 混入繊維の形状

表-3 セメント複合体の調合

W/B	C/B	FA/B	S/B
0.4	0.85	0.15	0.35

W: Water, B(=C+FA): Binder, C: Cement, FA: Fly-ash
S: Silica sand

2.3 試験方法

図-4 に静的引張試験装置を示す。載荷速度は 1mm/min. に設定して, 試験体のひずみは試験体の左右に LVDT 変位計を付けて測定した。

図-5 に載荷速度 5m/sec., ひずみ速度 10¹/sec., 最大荷重容量 3,000kN 級の油圧式高速載荷試験装置を示す。本研究では高速載荷試験装置に直接引張ジグを設けて, 動的引張試験を行った。直接引張ジグの上部のロードセル (500kN) で引張応力を, 試験体に付く LVDT 変位計で引張ひずみを測定した。高速載荷試験による応力とひずみは高速データロガーを用いて 30,000Hz のサンプリング速度で収集した。

図-6 にひずみ速度による引張応力-ひずみ曲線の概要を示す。引張特性として引張強度(最大応力, f_t), ひずみ能力(最大応力でのひずみ, ϵ_t), 靱性(応力-ひずみ曲線の面積, T_t)を評価した。靱性はピーク靱性と破壊靱性に区分して, ピーク靱性はひずみ硬化区間 OAB の面積, 破壊靱性は OAC の面積で求めた。

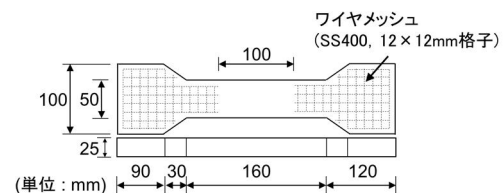


図-3 引張試験体の概要図

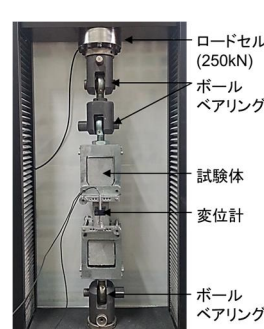


図-4 静的引張試験装置
(載荷速度: 1mm/min.,
ひずみ速度: 10⁻⁶/sec.)

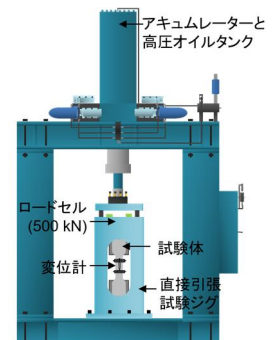


図-5 高速載荷装置
(載荷速度: 5m/sec.,
ひずみ速度: 10¹/sec.)

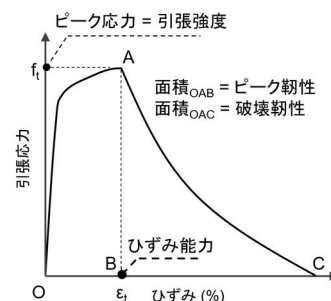


図-6 引張応力-ひずみ曲線の概要図

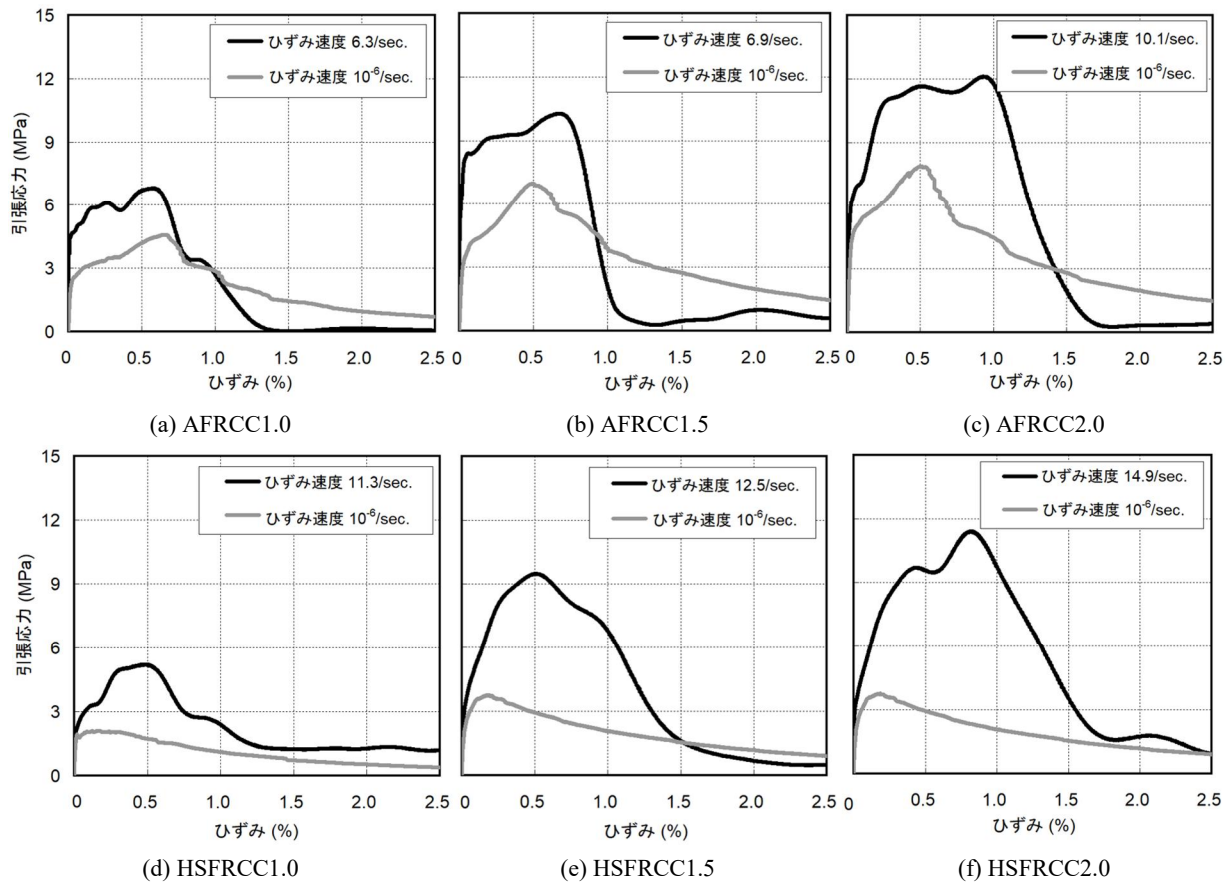


図-7 ひずみ速度による引張応力-ひずみ曲線

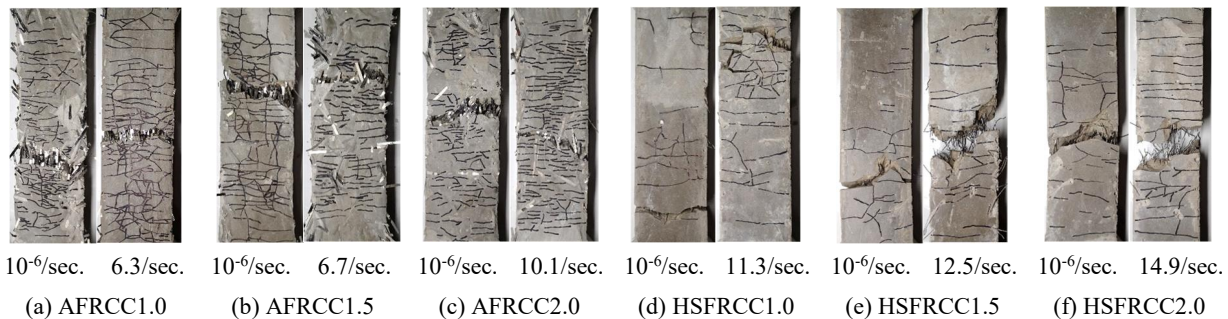


図-8 ひずみ速度によるひび割れ性状

また、動的増加係数(Dynamic Increase Factor, DIF)は式(1)のように静的引張特性の値に比べてひずみ速度 $10^1/\text{sec}$ で測定された引張特性値の増加比で求めた¹⁾。

$$DIF = \frac{\text{Dynamic property}}{\text{Static property}} = \frac{f_{td}}{f_{ts}} = \frac{\varepsilon_{td}}{\varepsilon_{ts}} = \frac{T_{td}}{T_{ts}} \quad (1)$$

3. 実験結果及び考察

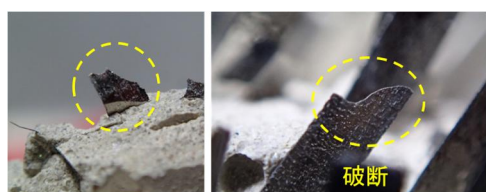
3.1 引張応力-ひずみ曲線及び破壊性状

図-7 と図-8 にひずみ速度による非晶質鋼繊維補強セメント複合体(AFRCC)とフック形鋼繊維補強セメント複合体(HSFRC)の引張応力-ひずみ曲線と試験体のひび割れ性状を示す。すべての試験条件で初期ひび割れが

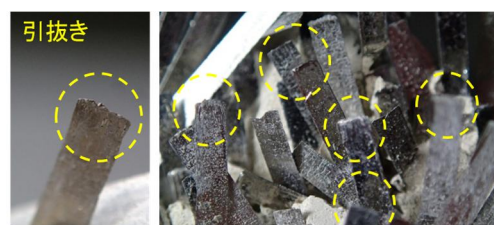
生じた後、マルチクラックと共にひずみ硬化挙動が現れた。静的荷重条件において、AFRCC は繊維の混入個体数が多く繊維の表面に凹凸がありマトリクスとの付着性能が優れているため、応力の分散効果が大きくなり多数のマルチクラックと共にひずみ硬化挙動が観察された。また、AFRCC は HSFRC に比べて引張強度とひずみ能力が大きいことを確かめた。

しかし、ピーク応力以後のひずみ軟化区間で非晶質鋼繊維はマトリクスから引抜かれず、図-9(a)のように薄板形繊維が破断されるため応力が急に低下することが確認された。

AFRCC の場合、繊維混入率 1.5 と 2.0% で繊維の混入個体数が多くなるため、繊維単一個体を取り囲むマトリ

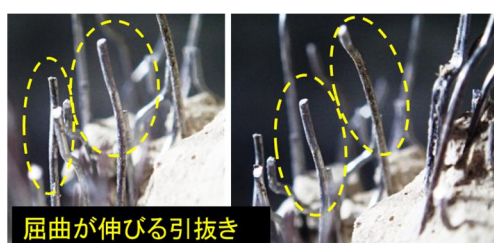


(a) 薄板形繊維の破断

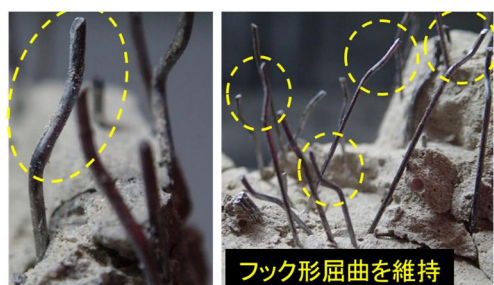


(b) 繊維の引抜き

図-9 壊断面で非晶質鋼繊維の破壊性状



(a) 繊維の引抜き (ひずみ速度 $10^{-6}/\text{sec.}$)



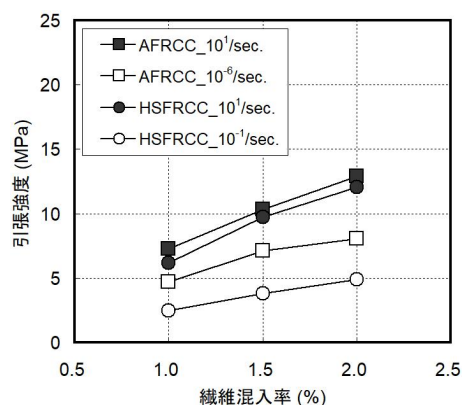
(b) マトリックスの破壊 (ひずみ速度 $10^1/\text{sec.}$)

図-10 壊断面でフック形鋼繊維の破壊性状

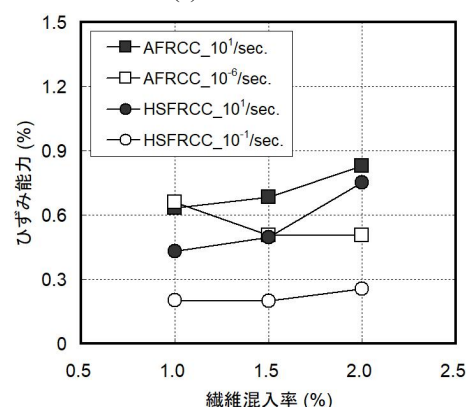
ックスの量が減少するので繊維とマトリックス界面の付着力が減少すると判断される^{12),13)}。従って、AFRCC1.5及びAFRCC2.0ではAFRCC1.0に比べて破断される繊維の数が減少し、図-9(b)のようにマトリックスから引抜きされる繊維の数が増加する傾向が現れた。

HSFRCCは初期ひび割れが発生した後、繊維とマトリックスとの付着及びフック形屈曲の機械的な結合によりひずみ硬化挙動が表れ、ひずみ軟化区間では繊維がマトリックスから引抜かれ応力が緩やかに低下することを確かめた。また、図-10(a)のように破壊断面でフック形鋼繊維の両端の屈曲が伸びる引抜き特性が現れた。

ひずみ速度 $10^1/\text{sec.}$ ではひずみ速度の増加により繊維引張強度、マトリックス強度及び繊維とマトリックスの付着力が増加するため全ての試験体でひずみ硬化挙動



(a) 引張強度



(b) ひずみ能力

図-11 ひずみ速度による引張強度とひずみ能力

がより顕著になり、引張強度とひずみ能力が向上したと判断される^{14),15)}。

しかし、ひずみ軟化区間での応力はひずみ速度の増加により静的荷重条件に比べて急激に低下する傾向が見られた。静的荷重条件では、マトリックスがひび割れる過程で繊維の引抜きまたは繊維破断が徐々に生じるが、高ひずみ速度条件では荷重の載荷速度が速いため、ひずみ軟化区間で繊維の引抜きや破断が早く発生するので最終破壊に至る時間が短くなるためと考えられる。

AFRCCの場合はひずみ速度が増加するほど繊維とマトリックスの付着性能が向上するため、静的荷重条件に比べて引抜かれる繊維の数が減少し、破断される繊維の数が増加する傾向が現れた。

一方、HSFRCCはひずみ速度の増加により繊維とマトリックスの付着性能が大きくなるため、繊維がマトリックスから引抜かれず、図-10(b)のように繊維のフック形の屈曲がそのまま維持される状態でマトリックスが脆性的に破壊される挙動を確認した。

3.2 ひずみ速度による引張特性

(1) 引張強度とひずみ能力

図-11にひずみ速度によるAFRCCとHSFRCCの引張強度とひずみ能力を示す。繊維混入率とひずみ速度が

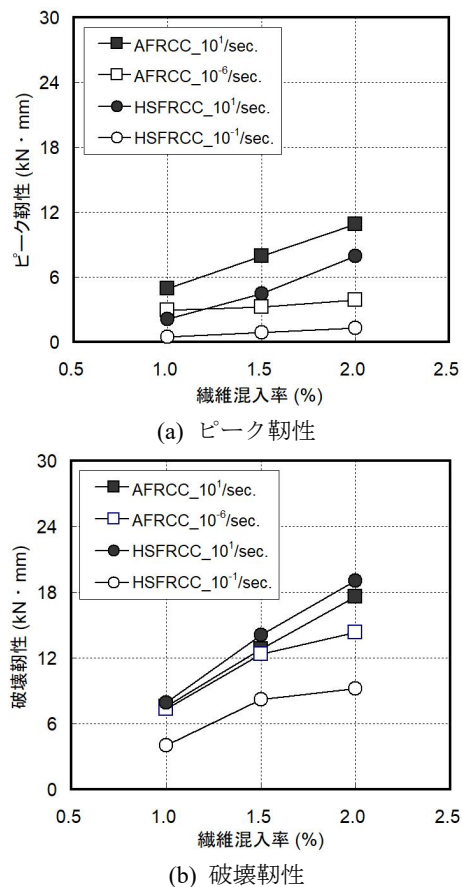


図-12 ひずみ速度による靱性

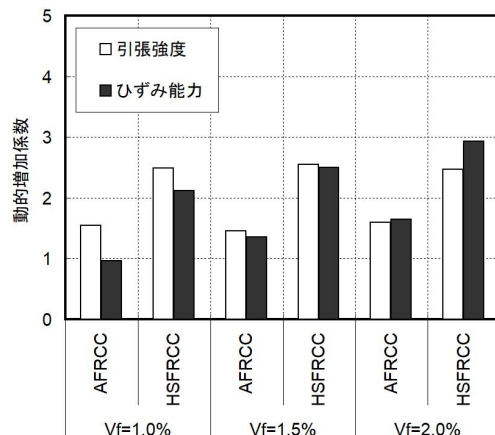
増えるほど引張強度は向上した。一方、AFRCCは薄板形繊維の表面が粗く比表面積が大きいため繊維とマトリックスの付着性能が高く、繊維の混入個体数がフック形鋼繊維より約16倍多いため、HSFRCCに比べて引張強度とひずみ能力が大きくなったと判断される。

一方、静的荷重条件においてAFRCCは繊維の混入率が増加するほどマルチッククラックの数とひずみ能力が減少する傾向が現れた。

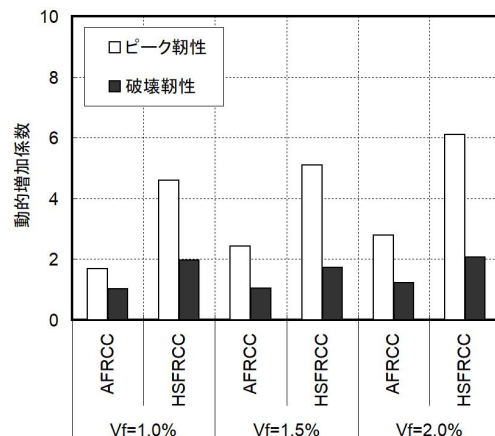
(2) ピーク靱性と破壊靱性

図-12にひずみ速度によるAFRCCとHSFRCCの靱性を示す。ピーク靱性はピーク応力までの応力-ひずみ曲線の面積で算出されるため、引張強度とひずみ能力と密接な関係がある。従って、AFRCCの引張強度とひずみ能力がHSFRCCより大きいためピーク靱性も大きくなったと判断される。

一方、静的荷重条件での破壊靱性はAFRCCがHSFRCCより大きいが、高ひずみ速度条件では逆にHSFRCCがAFRCCより大きくなることが分かった。静的荷重条件及び高ひずみ速度条件において、AFRCCはピーク応力以後繊維が破断され応力が急に低下したが、HSFRCCは繊維がマトリックスから引抜かれてAFRCCに比べて応力の低下が緩やかになるためと判断される。このような破壊挙動は高ひずみ速度条件においてさら



(a) 引張強度とひずみ能力の動的増加係数



(b) 靱性の動的増加係数

図-13 張特性の動的増加係数

に顕著に現れており、HSFRCCの破壊靱性がAFRCCに比べてより大きくなったと考えられる。

3.3 動的増加係数

図-13にひずみ速度による引張特性の動的増加係数を示す。引張特性の動的増加係数は、すべての評価項目に対してHSFRCCがAFRCCより大きくなる傾向が見られた。ひずみ速度の増加は繊維とマトリックスの強度、繊維とマトリックスの付着力に大きな影響を与える。非晶質鋼繊維はフック形鋼繊維に比べて繊維の混入個体数が約16倍多いため、繊維単一個体を取り囲むマトリックス量が相対的に少なくなって動的増加係数が小さくなったと判断される。

また、HSFRCCはひずみ速度の増加により繊維が引抜かれる破壊挙動からマトリックスが破壊されるメカニズムへの変化があるが、AFRCCはひずみ速度に関わらず繊維が破断されるためひずみ速度の影響が異なると判断される。

4. まとめ

異なるひずみ速度において薄板形非晶質鋼繊維補強

セメント複合体の引張挙動をフック形鋼繊維補強セメント複合体と比較・評価した結果、以下の結論が得られた。

- (1) 非晶質鋼繊維は繊維の表面が粗く、繊維の比表面積が大きいことで、マトリックスとの付着性能が優れるため、マトリックスから引抜かれず、薄板形の形状によって破断する特性がある。一方、繊維混入率が増加するほど繊維と付着するマトリックス量が減少するため、破断する繊維が減少し、引抜かれる繊維が増加する傾向があることが確認された。
- (2) フック形鋼繊維補強セメント複合体は、静的荷重条件下で繊維がマトリックスから引抜かれるといった破壊特性が見られたが、ひずみ速度の増加により繊維とマトリックスとの付着性能及びフック形屈曲の機械的結合が向上するため、フック形の屈曲が維持された状態でマトリックスが破壊する挙動が現れた。
- (3) 非晶質鋼繊維補強セメント複合体は繊維とマトリックスの付着性能が優れ、繊維の混入個体数が多いため、フック形鋼繊維補強セメント複合体に比べて引張強度、ひずみ能力及び靱性が大きくなったと判断される。
- (4) 非晶質鋼繊維補強セメント複合体はフック形鋼繊維補強セメント複合体に比べて繊維の混入個体数が多く、繊維単一個体を取り囲むマトリックスの量が減少するため、ひずみ速度による動的増加係数は小さくなったと判断される。

謝辞

本研究は（独）日本学術振興会外国人特別研究員と2017年度韓国政府(教育部)の財源から韓国研究財団の支援(No. 2017R1D1A1B03034776, 基礎研究事業)を受けました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 田中敏嗣, 新藤竹文, 横田弘, 下村匠: 超高強度繊維補強コンクリート中における鋼繊維の腐食に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.267-272, 2004
- 2) 松元淳一, 丸屋剛: 鋼繊維を用いた鉄筋コンクリートの塩害環境における耐久性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1013-1018, 2010
- 3) 石関嘉一, 平田隆祥, 玉滝浩司, 吉田浩一郎: 常温硬化型超高強度繊維補強コンクリートの塩分浸透に対する抵抗性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.214-219, 2012
- 4) Sejin Choi, Byungtak Hong, Sujin Lee, Jongpil Won:

Shrinkage and corrosion resistance of amorphous metallic-fiber-reinforced cement composites, Composite Structures 107, pp.537-543, 2014

- 5) Backjoong Kim, Chongku Yi, Yuri Ahn: Effect of embedment length on pullout behavior of amorphous steel fiber in Portland cement composites, Construction and Building Materials 143, pp.83-91, 2017
- 6) Jongpil Won, Byungtak Hong, Teijoon Choi, Sujin Lee, Joowon Kang: Flexural behaviour of amorphous micro-steel fibre-reinforced cement composites, Composite Structures 94, pp.1443-1449, 2012
- 7) Dooyeol Yoo, Nemkumar Banthia, Junmo Yang, Youngsoo Yoon: Size effect in normal- and high-strength amorphous metallic and steel fiber reinforced concrete beams, Construction and Building Materials 121, pp.676-685, 2016
- 8) Hongseop Kim, Gyuyong Kim, Jeongsoo Nam, Junghyun Kim, Sanghyu Han, Sanggyu Lee: Static mechanical properties and impact resistance of amorphous metallic fiber-reinforced concrete, Composite Structures 134, pp.831-844, 2015
- 9) Bencardino F., Rizzuti L., Spadea G., Swamy RN.: Implications of test methodology on post-cracking and fracture behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete, Composites Part B 46, pp.31-38, 2013
- 10) Bolat H., Şimşek O., Çullu M., Durmuş G., Can Ö.: The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete, Composites Part B 61, pp.191-198, 2014
- 11) CEB-FIP model code 2010 first complete draft.
- 12) Tuan Kiet T., Dongjoo Kim: High strain rate effects on direct tensile behavior of high performance fiber reinforced cementitious composites, Cement & Concrete Composites, 45, pp.186-200, 2014
- 13) Naaman AE., Shah SP: Pull-out mechanism in steel fiber-reinforced concrete, J. Struct. Div, 102(8), pp.1537-1548, 1976
- 14) Jungjin Kim, Gijoon Park, Dongjoo Kim, Jaeheum Moon, Janghwa Lee: High-rate tensile behavior of steel fiber-reinforced concrete for nuclear power plants, Nuclear Engineering and Design, 266, pp.43-54, 2014
- 15) Ngoc Thanh T., Tuan Kiet T., Dongjoo Kim: High rate response of ultra-high-performance fiber-reinforced concretes under direct tension, Cement and Concrete Research, 69, pp.72-87, 2015