

# 論文 非晶質鋼繊維補強コンクリートの力学特性及び高速衝撃破壊性状

金 弘燮\*1・金 圭庸\*2・南 正樹\*1・李 仁喆\*1

**要旨**：非晶質鋼繊維はコンクリート用繊維補強材に利用され、フック形鋼繊維と比べ引張強度が高いが、塑性能力は小さい。また、薄板・軽量で繊維方向性があり、同一体積混入率においては繊維個体数が多い。本研究では、コンクリート繊維補強材として、非晶質鋼繊維を用いたコンクリートの力学特性と高速衝撃破壊性状を検討したものである。その結果、非晶質鋼繊維コンクリートは曲げ強度がフック形鋼繊維コンクリートより高かったが、最大曲げ耐力以後の応力は急激に低下した。また、非晶質鋼繊維はマトリクスの付着比表面積が大きく、コンクリートの最大曲げ応力が大きいことから裏面剥離を抑制する傾向を示した。

**キーワード**：非晶質鋼繊維、フック形鋼繊維、曲げ強度、高速衝撃、裏面剥離

## 1. はじめに

非晶質物質を製造するためには熔融金属液体を急冷して結晶相が生じないように液体構造を凍結するが非晶質化するためには過冷液体金属に結晶相が生成させないように急速冷却する必要がある。液体から急速に冷却すると凝固点を過ぎて液体の状態を維持する過冷却状態になり、物質の流動性  $\eta$  (粘性係数の逆数,  $1/\eta$ ) が  $10^{-13}$  ( $n=10^{13}$ poise) の付近で固体になる。その時、過冷液体の固化温度がガラス転移温度であり、構造的に準安定状態である非晶質が形成される。普通金属は常温で結晶構造であるが、非晶質金属は結晶構造を持たない等方性の性質を持つ。非晶質金属と結晶金属の概要を図-1に示す

非晶質金属で作製した非晶質鋼繊維はコンクリート補強用繊維として使用されるフック形鋼繊維と比べ引張強度が高いが塑性能力は小さい。また、薄板・軽量で繊維方向性があり、同一体積混入率において繊維個体数が多い。このような非晶質鋼繊維を各種補修・補強材、収

縮低減材及び衝撃・爆発に対する防護材料などのコンクリート用繊維補強材として利用可能か検討するために、フック形鋼繊維補強コンクリートと基本的性能の比較・評価が必要である。

本研究では、繊維の結晶及び形状、機械的性質が異なる非晶質鋼繊維とフック型鋼繊維が、コンクリートの力学特性及び高速衝撃破壊性状に及ぼす影響を検討した。

## 2. 実験計画及び方法

### 2.1 実験計画

表-1 に実験計画を示した。コンクリート補強材として非晶質鋼繊維を利用可能か検討するために、コンクリートの設計圧縮強度は一般強度と高強度の範囲として 40, 80N/mm<sup>2</sup> に設定した。また、繊維混入率は圧縮強度 40N/mm<sup>2</sup> の場合、0.25, 0.50, 0.75vol.%, 圧縮強度 80N/mm<sup>2</sup> の場合は 0.25, 0.50vol.% の範囲においてスランプ、空気量、圧縮強度、曲げ強度、等価曲げ強度及び破壊エネルギーなどの力学特性を評価した。

高速衝撃破壊性状の評価には寸法 100×100×30mm(縦×横×厚さ)の試験体を用いて、直径 10mm、質量 4.07g の鋼球を約 350m/s の衝突速度で発射して裏面剥離厚さ及び裏面剥離面積損失率などの衝撃破壊性状を評価した。

### 2.2 使用材料及びコンクリートの調合

本研究で使用した材料の物理的性質を表-2 に示す。混入繊維は 2 種類とし、非晶質鋼繊維は長さ 30mm、幅 1.6mm、引張強度 1,400N/mm<sup>2</sup>、フック形鋼繊維は長さ 30mm、直径 0.5mm、引張強度 1,140N/mm<sup>2</sup> である。図-2 に非晶質鋼繊維及びフック形鋼繊維の形状を示す。

コンクリート調合は表-3 に示す。設計圧縮強度 40 及び 80N/mm<sup>2</sup> に対して、W/B は 40 及び 25% に設定した。

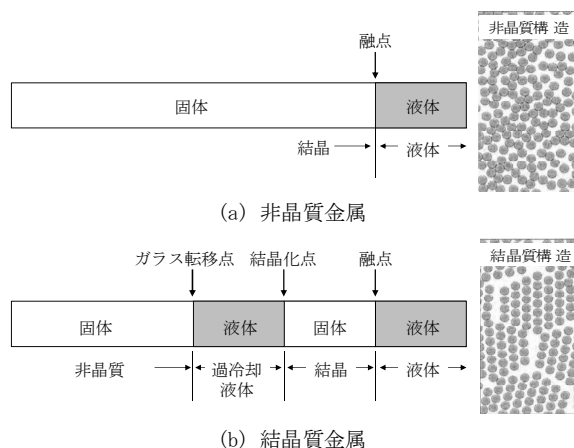


図-1 非晶質金属と結晶質金属の概要

\*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 工博 (正会員)

表-1 実験計画

試験体の条件				衝撃試験の条件				評価項目
設計 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	繊維の 種類 <sup>1)</sup>	繊維 混入率 (vol.%)	試験体の 寸法 (mm)	飛翔体		衝撃 速度 (m/s)	衝撃 エネルギー (J)	
				直径 (mm)	質量 (g)			
40	繊維なし	-	縦横 100×100  厚さ 30	10	4.07	350	245	<ul style="list-style-type: none"> <li>力学特性                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- スランプ(mm)及び空気量(%)</li> <li>- 圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)</li> <li>- 曲げ強度(N/mm<sup>2</sup>)</li> <li>- 等価曲げ強度(N/mm<sup>2</sup>)</li> <li>- 破壊エネルギー(N・m/m<sup>2</sup>)</li> </ul> </li> <li>高速衝撃破壊性状                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 裏面剥離厚さ(mm)</li> <li>- 裏面剥離面積損失率(%)</li> </ul> </li> </ul>
	AF	0.25						
	SF	0.75						
80	繊維なし	-	厚さ 30	10	4.07	350	245	
	AF	0.25						
	SF	0.50						

1) AF：非晶質鋼繊維，SF：フック形鋼繊維

表-2 使用材料の種類と物理的性質

種類	物理的性質
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
シリカフューム	密度:2.50g/cm <sup>3</sup> ，粉末度:200,000cm <sup>2</sup> /g
細骨材(海砂)	密度:2.61g/cm <sup>3</sup> ，吸水率:0.81%
粗骨材(砕石)	最大寸法:20mm，密度:2.63g/cm <sup>3</sup> 吸水率:0.76%
非晶質鋼繊維	幅:1.6mm，長さ:30mm 引張強度:1,400N/mm <sup>2</sup> ，密度:7.2g/cm <sup>3</sup>
フック形鋼繊維	直径:0.5mm，長さ:30mm 引張強度:1,140N/mm <sup>2</sup> ，密度:7.8g/cm <sup>3</sup>



非晶質鋼繊維(AF)      フック形鋼繊維(SF)

図-2 繊維の形状比較

表-3 コンクリートの調査

F <sub>ck</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	W/B (%)	S/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
			W	C	FA	SF	S	G
40	40	55	180	405	45	-	888	758
80	25	55	180	504	144	72	762	646

目標スランプ：150±20mm(F<sub>ck</sub>40)，フロー600±50mm(F<sub>ck</sub>80)

目標空気量：4.0±1.5%(F<sub>ck</sub>40)，2.0±1.0%(F<sub>ck</sub>80)

また、設計圧縮強度 40N/mm<sup>2</sup> の試験体は目標スランプ 150±20mm，目標空気量 4.0±1.5%とし、設計圧縮強度 80N/mm<sup>2</sup> の場合は目標スランプフロー 600±50mm，目標空気量 2.0±1.0%とした。

### 2.3 力学特性の試験方法

圧縮強度試験は寸法 φ100×200mm の円柱形試験体を作製し、KS F 2405「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じて行なった。図-3 及び図-4 に曲げ試験と破壊エネルギー試験の概要を示す。曲げ強度試験用に□100

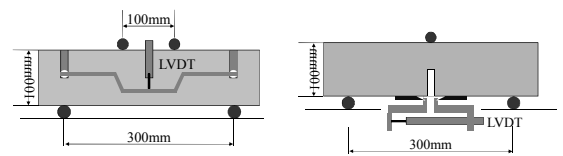


図-3 曲げ強度試験      図-4 破壊エネルギー試験

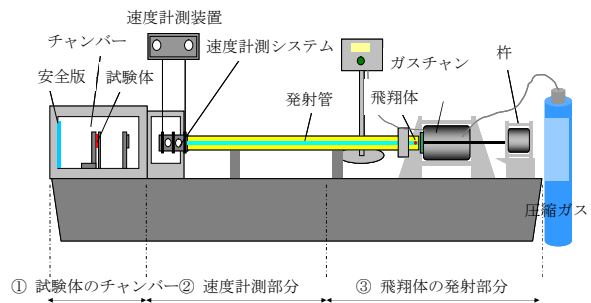
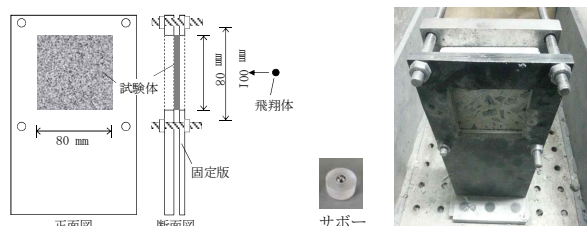


図-5 ガス圧力式飛翔体発射装置の模式図



(a) サポート分離帯      (b) 試験体の据置帯

図-6 チャンバー内の試験体設置模式図

表-4 飛翔体の衝撃による試験体の破壊等級

区分	(I)表面破壊	(II)裏面破壊	(III)貫通破壊
破壊性状			

d:試験体の厚さ(mm)，t<sub>s</sub>:表面貫入深さ(mm)  
t<sub>r</sub>:裏面剥離厚さ(mm)

×100×400mm の角形試験体を作製し、KS F 2408「コンクリート曲げ強度試験方法」に準じて4点曲げ試験を行った。また、等価曲げ強度はKS F 2566「鋼繊維補強コンクリートの曲げ靱性試験方法」によって求めた。

破壊エネルギー試験はRILEM 50-FMC Draft Recommendation が提案した方法に準じて□100×100×400mm の角形試験体の中央部に5mm幅のノッチを入れ、3点曲げ試験を行った。荷重-ひび割れ開口部の変位(CMOD)曲線及び式(1)により破壊エネルギーを求めた。

$$G_f = \frac{W_0 + mg\delta_0}{A_{lig}} \quad (1)$$

- ここで、  
 $G_F$  : 破壊エネルギー  
 $W_0$  : CMOD 荷重-変位曲線の面積  
 $m$  :  $m_1+2m_2$   
 $m_1$  : 支持台間の梁の重さ (kg)  
 $m_2$  : 試験体に付着した治具の重さ (kg)  
 $g$  : 重力加速度(9.81m/s<sup>2</sup>)  
 $\delta_0$  : 梁の最終破壊時の変形 (m)  
 $A_{lig}$  : 破壊断面積 (m<sup>2</sup>)

## 2.4 高速衝撃試験方法

図-5 及び図-6 に高速衝撃試験装置の概要と試験体の設置状況を示す。高速飛翔体の衝突による試験体の衝撃破壊等級は表-4 に示すように、試験体の断面破壊性状によって破壊の程度を (I)表面破壊、(II)裏面破壊、(III)貫通破壊の3等級で分類した。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 スランプ及び空気量

表-5 に非晶質鋼繊維及びフック形鋼繊維を混入したコンクリートのスランプ及び空気量の結果を示す。非晶質鋼繊維補強コンクリートは混入個体数が多く、薄板形でスランプの低下が大きい。繊維混入率 0.75vol.% ではコンクリート混混ぜの効率が低くなり、特に非晶質鋼繊維の場合はフック形鋼繊維より固練りの性状を示した。また、空気量は繊維混入によって増加する傾向を示す。

### 3.2 圧縮強度

図-7 に圧縮強度の評価結果を示す。全ての試験体は設計圧縮強度以上であり、繊維補強コンクリートの場合は繊維無補強コンクリートに比べて圧縮強度がやや向上したが、繊維混入率の違いにより圧縮強度は大きく変化しなかった。

### 3.3 曲げ特性

表-6 及び図-8, 9 に曲げ特性の評価結果を示す。繊維の種類に関わらず、繊維の補強によってコンクリートの曲げ強度は繊維混入率の増加に伴って高くなった。繊維補強による曲げ強度は、非晶質鋼繊維の方がフック形

表-5 繊維種類及び混入率によるスランプと空気量  
評価結果

区分	繊維種類	繊維混入率 (vol.%)	F <sub>ck</sub> 40		F <sub>ck</sub> 80	
			スランプ (mm)	空気量 (%)	スランプフロー (mm)	空気量 (%)
	繊維なし	0.00	165	3.9	605	2.0
AF		0.25	130	4.3	540	2.2
		0.50	110	4.7	460	2.7
		0.75	50	4.9	-	-
SF		0.25	145	4.1	580	2.3
		0.50	135	4.6	550	2.7
		0.75	130	4.8	-	-

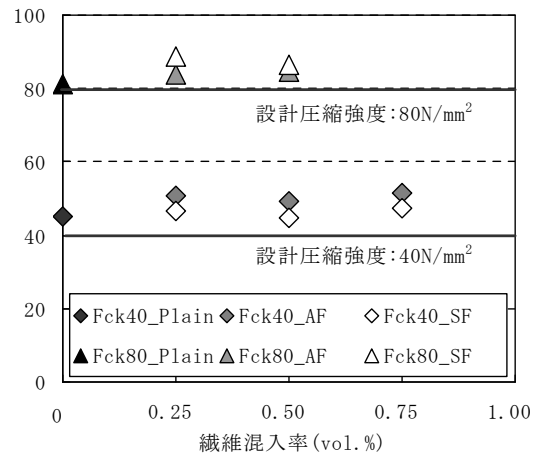


図-7 繊維種類及び混入率による圧縮強度評価結果

表-6 曲げ特性評価結果

区分	繊維種類	繊維混入率 (vol.%)	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	等価曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	等価曲げ強度比 (%)
F <sub>ck</sub> 40	繊維なし	0.00	6.51	-	-
	AF	0.25	7.17	3.89	54.25
		0.50	11.00	6.93	63.00
		0.75	13.86	9.01	65.01
	SF	0.25	5.62	3.22	57.30
		0.50	8.45	6.63	78.46
0.75		10.22	9.27	90.70	
F <sub>ck</sub> 80	繊維なし	0.00	7.26	-	-
	AF	0.25	8.17	2.05	25.09
		0.50	12.54	4.57	36.44
	SF	0.25	9.28	4.77	51.40
		0.50	10.25	5.87	57.27

鋼繊維より多少高くなった。これは、同一体積混入率で繊維個体数が多かったためであると考えられる。

また、非晶質鋼繊維補強コンクリートはフック形鋼繊維補強コンクリートに比べて曲げ強度及び等価曲げ強度は高かったが、等価曲げ強度比は低くなった。これは、フック形鋼繊維補強コンクリートの最大曲げ耐力以後の応力低下において、繊維がコンクリートから引き抜かれる性状を示すように、非晶質鋼繊維コンクリートの場合は繊維が切断され脆性的に破壊したと思われる。この

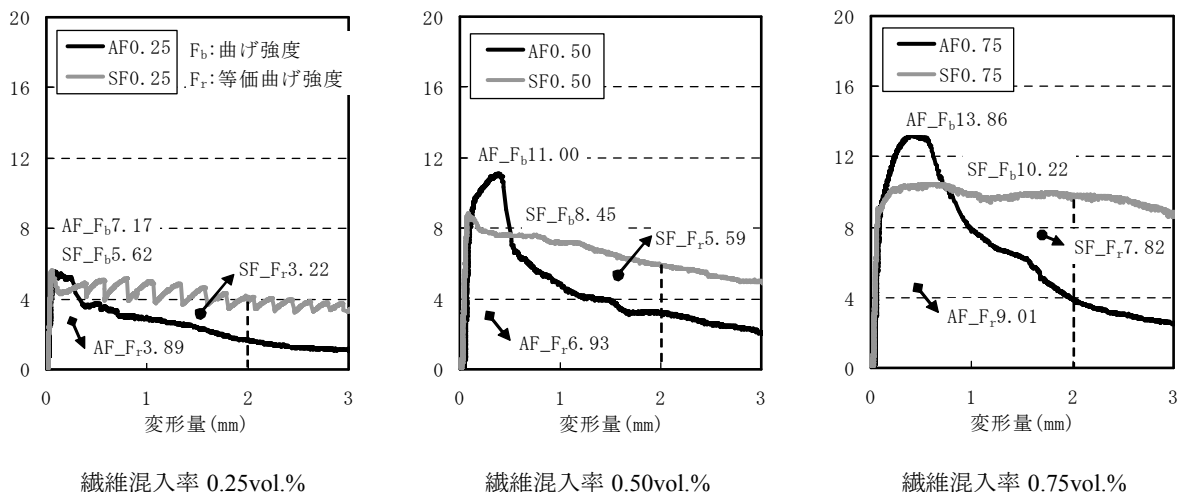


図-8 4点曲げ試験による応力-変形曲線 (設計圧縮強度 40N/mm<sup>2</sup>)

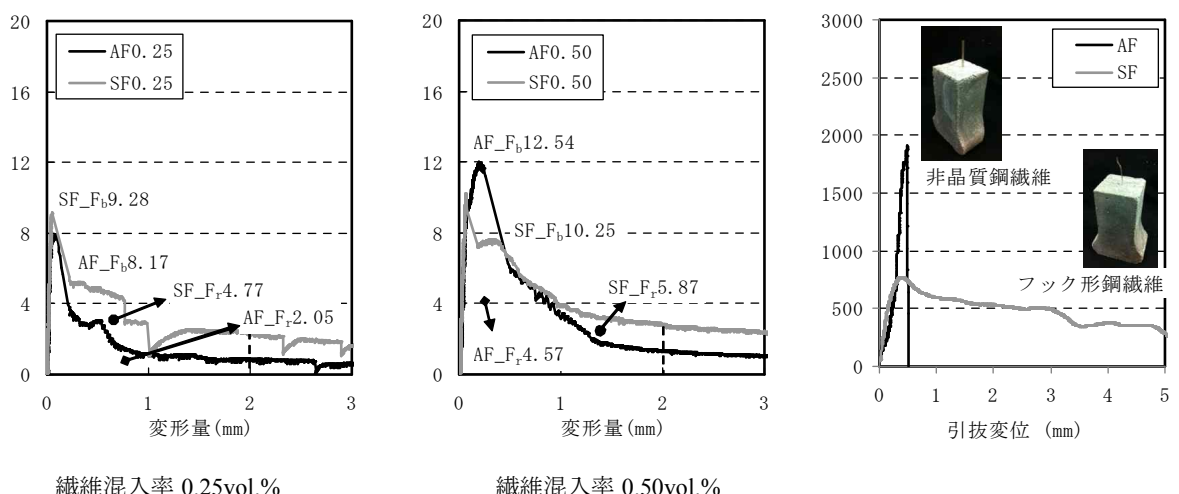


図-9 4点曲げ試験による応力-変形曲線 (設計圧縮強度 80N/mm<sup>2</sup>)

図-11 引抜応力評価結果



図-10 繊維の破壊性状

ようなコンクリートの曲げ破壊による非晶質鋼繊維とフック形繊維の破壊性状を図-10に示す。

図-11に繊維の引抜試験の結果を示す。最大引抜応力は非晶質鋼繊維が高いが、引抜変位はフック形鋼繊維が大きかった。非晶質鋼繊維は最大耐力以後、繊維の抜けがなく破断する脆性的な破壊性状を示した。一方、フック形鋼繊維はマトリクスとの付着作用によって応力の低下が緩和された。

表-7 破壊エネルギー評価結果

繊維種類	繊維混入率 (vol.%)	破壊エネルギー(N・m/m <sup>2</sup> )	
		F <sub>ck</sub> 40	F <sub>ck</sub> 80
繊維なし	0.00	307.44	371.36
AF	0.25	2290.34	2267.74
	0.50	4122.38	4392.98
	0.75	6121.82	-
SF	0.25	4464.00	2582.92
	0.50	7886.97	4756.98
	0.75	9655.38	-

### 3.4 破壊エネルギー

表-7及び図-12に破壊エネルギー及び荷重-ひび割れ開口部変位曲線を示す。繊維無補強コンクリートはひび割れ開口部の変位量が小さく、約 300N・m/m<sup>2</sup>の破壊エネルギーを示したが、繊維補強によって最大荷重以後のひび割れ開口部の変位量が大きくなった。

非晶質鋼繊維補強コンクリートは最大荷重が高かつ

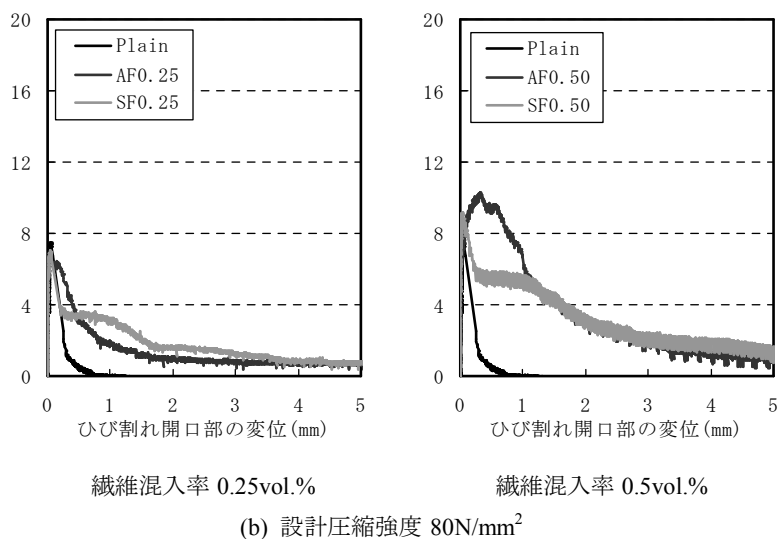
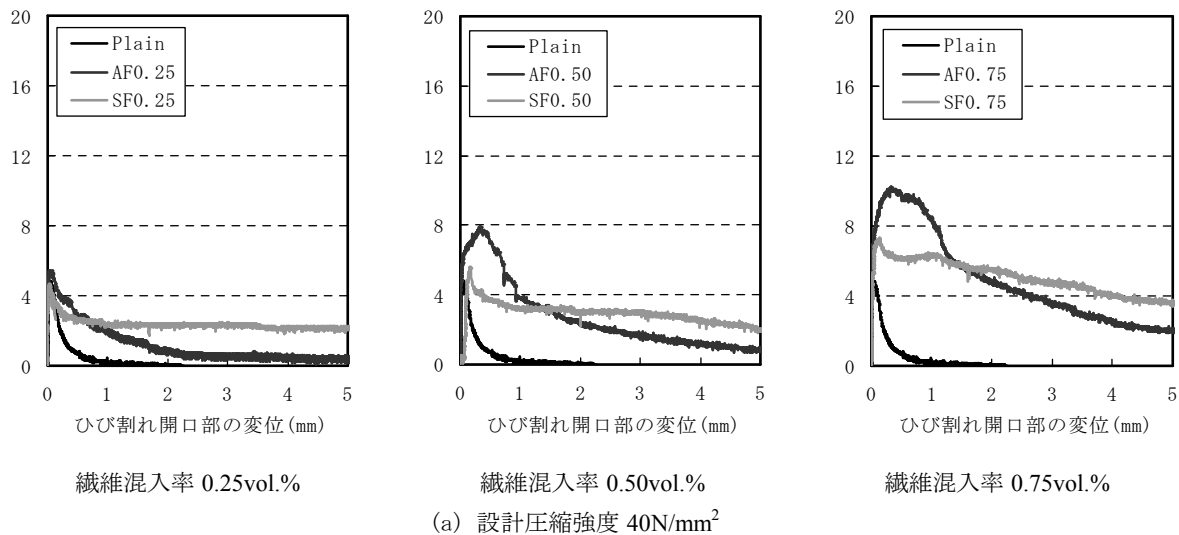


図-12 3点曲げ試験による荷重-ひび割れ開口部変位曲線

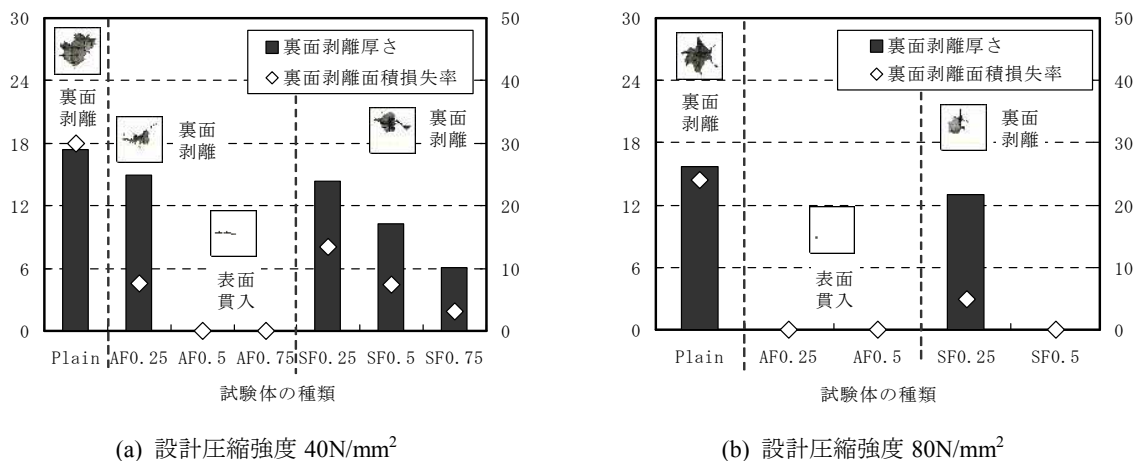


図-13 高速衝撃試験による裏面剥離厚さと裏面剥離面積損失率

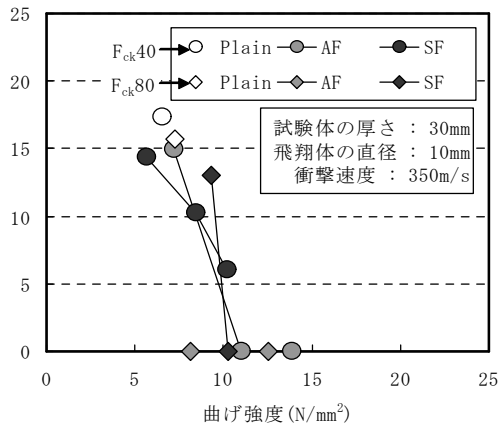
たが、ひび割れ発生後の荷重低下が急激に発生し、荷重-ひび割れ開口部変位の面積が小さく破壊エネルギーが低くなった。

### 3.5 高速衝撃破壊性状

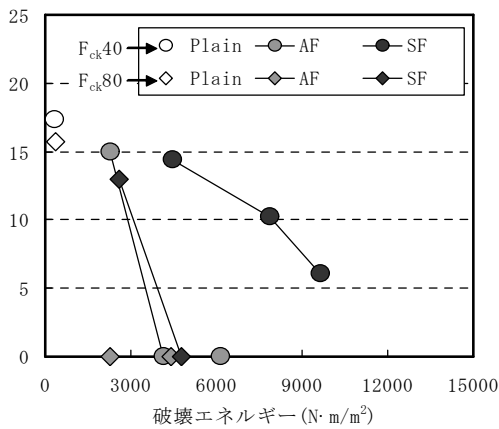
図-13 に高速衝撃試験による裏面剥離厚さ及び裏面剥離面積損失率を示す。また、表-8 に非晶質鋼繊維と

表-8 非晶質鋼繊維とフック形鋼繊維の  
混入個体数と比表面積

繊維種類	混入率 (vol.%)	混入量 (kg)	個体数 (個)	比表面積 (mm <sup>2</sup> )
AF	1.0	72	7,200,000	345,600,000
SF		78	1,560,000	43,476,000



(a) 曲げ強度



(b) 破壊エネルギー

図-14 曲げ強度及び破壊エネルギーと  
裏面剥離厚さの関係

フック形鋼繊維の混入個体数と比表面積を示す。

コンクリート圧縮強度  $80\text{N/mm}^2$  の試験体の方が圧縮強度  $40\text{N/mm}^2$  の試験体より衝撃破壊がやや低減したが、繊維無補強コンクリートの破壊等級は裏面破壊であった。また、繊維補強コンクリートの場合は混入繊維に関わらず、混入率が増加するほど裏面剥離厚さ及び裏面剥離面積損失率が抑制され、 $0.50\text{vol.}\%$ の混入率範囲では表面破壊となる。

一方、同じ繊維混入率において非晶質鋼繊維補強コンクリートの場合は、繊維個体数の増加によってフック形鋼繊維補強コンクリートと比べて、マトリクスと繊維の付着比表面積が大きく、コンクリートの最大曲げ応力が大きいことから裏面剥離が抑制されると考えられる。

図-14 に曲げ強度及び破壊エネルギーと裏面剥離厚

さの関係を示す。曲げ強度及び破壊エネルギーの向上は、高速衝撃による裏面剥離を抑制することが分かった。しかし、繊維の種類が異なる場合は曲げ強度及び破壊エネルギーなどの力学特性と共に繊維の形状及び物性、混入個体数も考慮する必要があると考えられた。

#### 4. まとめ

非晶質鋼繊維コンクリートの力学特性及び高速衝撃破壊性状について評価した結果は以下の通りである。

- (1) 非晶質鋼繊維は同一体積混入率で比較した場合、フック形鋼繊維に比べて繊維個体数が多い。また、形状が薄板形のため比表面積が大きく、その結果相対的に流動性が低かった。
- (2) 非晶質鋼繊維補強コンクリートはフック形鋼繊維補強コンクリートと異なり、繊維が切断されながら脆性的な曲げ破壊となったが、曲げ強度及び破壊エネルギーにおいて最大耐力は高かった。
- (3) 高速衝撃に対する破壊性状において非晶質鋼繊維補強コンクリートは、最大曲げ応力が大きく繊維とマトリクスの付着比表面積が大きいことから裏面剥離が抑制されたと思われる。
- (4) 繊維補強コンクリートの曲げ強度及び破壊エネルギーは耐衝撃性能の予測に重要な要因となるが、繊維種類が異なる場合は繊維の形状及び物性に対する考慮が必要であると考えられる。

#### 謝辞

本研究は教育科学技術部と韓国研究財団の地域革新人力養成事業(2012H1B8A2025606)の支援を受けました。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 井上健二, 宮内博之, 田邊靖博, 田中 享二: 飛翔体の高速衝突によるコンクリート材料の破壊性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp403-404, 2006
- 2) 別府万寿博, 三輪幸治, 大野友則, 塩見昌紀: 鋼製剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の局部破壊に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol.63, No.1, pp178-191, 2007
- 3) Fariborz Vossoughi, Claudia P. Ostertag, Paulo J.M. Monteiro, George C. Johnson: Resistance of concrete protected by fabric to projectile impact, Cement and Concrete Research, Vol.37, No.1, pp96-106, 2007
- 4) Katrin Habel, Paul Gauvreau: Response of ultra-high performance fiber reinforced concrete(UHPFRC) to impact and static loading, Cement&Concrete Composite, Vol.30, pp938-946, 2008