

# 論文 薄板型非晶質鋼繊維補強セメント複合体の静力学特性と耐衝撃性能

金 弘燮\*1・金 圭庸\*2・南 正樹\*3・篠原 保二\*4

**要旨：** 本研究では、薄板型非晶質鋼繊維補強セメント複合体の静力学特性と耐衝撃性能について、フック型鋼繊維補強セメント複合体と比較・評価した。その結果、非晶質鋼繊維は付着面積と付着力が大きいため、フック型鋼繊維の引抜挙動と異なり、マトリックスから引抜しないで、切断される特性が見られた。また、非晶質鋼繊維補強セメント複合体の曲げ強度は大きい、最大曲げ応力以後の応力低下はフック型鋼繊維補強セメント複合体より急激になった。一方、高速飛翔体の衝突に対するセメント複合体の耐衝撃性は、非晶質鋼繊維の補強によって明らかに向上し、薄板型繊維の配向状況が大きな影響を与えることが分かった。

**キーワード：** 薄板型非晶質鋼繊維, フック型鋼繊維, 引抜特性, 曲げ特性, 耐衝撃性能

## 1. はじめに

コンクリート材料は圧縮力に強く曲げ・引張力に弱く、また延性に極めて乏しいという特性があり脆性的な破壊特性が表れる。そこで、曲げ・引張性能を向上させるために、短繊維(short fiber)を多量に混入した繊維補強セメント複合体 (fiber-reinforced cementitious composite, FRCC)が開発された。繊維補強セメント複合体は混入繊維の架橋作用によって、ひび割れ発生後の応力の急激な低下を大幅に改善することが出来るため、曲げ・引張性能の飛躍的な向上が期待される材料である。さらに、偶発的な爆発や高速衝突事故のように極限衝撃現象に対しても、安全性能を高めるために繊維補強セメント複合体を用いた研究が行われている<sup>1),2),3)</sup>。

繊維補強セメント複合体の曲げ・引張性能には、混入繊維の形状, アスペクト比(L/d), 引張強度, 混入率(V<sub>f</sub>),

付着や引抜特性などが大きい影響を及ぼす。従って、様々な種類の繊維が繊維補強セメント複合体の補強材として検討されている。

薄板型非晶質鋼繊維は熔融金属を 10<sup>5</sup>~10<sup>6</sup>°C/s で急冷させて引張強度, 耐食性と耐摩耗性を高めたものであり、繊維補強セメント複合体の補強繊維として検討されている。図-1 及び図-2 に薄板型非晶質鋼繊維の構造及び作製方法を示す。薄板型非晶質鋼繊維は結晶構造を持たない非晶質構造であり、熔融金属を急冷させて薄板型の形状に作製されたものである<sup>4),5)</sup>。

本研究では、前報<sup>6)</sup>に続いて型非晶質鋼繊維補強セメント複合体の静力学特性及び耐衝撃性能についてフック型鋼繊維補強セメント複合体との比較評価を行った。また、薄板型非晶質鋼繊維の配向状況が飛翔体の高速衝突に対する試験体の破壊特性に及ぼす影響を検討する。

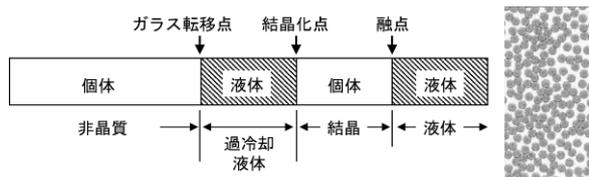


図-1 薄板型非晶質鋼繊維の構造

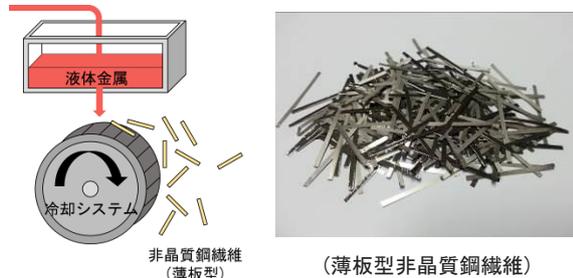


図-2 薄板型非晶質鋼繊維の作製方法

## 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。セメント複合体の設計圧縮強度は 40MPa であり、非晶質鋼繊維とフック型鋼繊維を体積の外割で 2.0% 混入した。また、混入繊維の種類による静力学特性を検討するために、繊維の引抜特性と繊維補強セメント複合体の曲げ特性を評価する。なお、衝突試験に用いた試験体の寸法は 200×200×50, 60, 70mm (縦×横×厚さ) であり、直径 20mm, 質量 31.8g の鋼球を飛翔体として約 170m/s の速度で衝突実験を行った。衝突試験後の破壊特性については、試験体の表面と裏面の破壊深さと直径, 破壊断面のひび割れパターンを評価した。

一方、非晶質鋼繊維補強セメント複合体の場合、薄板

\*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)

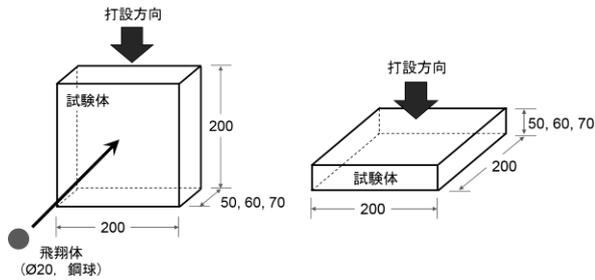
\*3 東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所 研究員 博(工) (正会員)

\*4 東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所 准教授 博(工) (正会員)

表-1 実験計画

試験体の種類 <sup>1)</sup>	試験体の条件			衝撃試験の条件			評価項目
	混入繊維の種類	繊維の混入率 (vol.%)	試験体の寸法 (mm)	飛翔体		衝撃速度 (m/s)	
				直径 (mm)	質量 (g)		
NCC	繊維なし	0	200×200 (縦横)	20	31.8	170	・固まらない性状 ・静力学特性 - 繊維引抜特性 - 曲げ特性 ・耐衝撃性能
AFRCC-2.0	非晶質鋼繊維	2.00	50, 60, 70 (厚さ)				
HSFRCC-2.0	フック型鋼繊維	2.00					

1) NCC : Normal Cement Composite, AFRCC : Amorphous metallic Fiber Reinforced Cement Composite, HSFRCC : Hooked-end Steel Fiber Reinforced Cement Composite



(a) 飛翔体の衝突方向と直交する方向から打設 (b) 飛翔体の衝突方向と同じ方向から打設

図-3 非晶質鋼繊維の方向性を考慮した

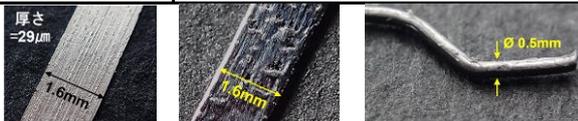
打設方法

表-2 セメント複合体の調合

W/B	単位重量 (kg/m <sup>3</sup> )				繊維	
	C	W	FA	S	V <sub>f</sub> (%)	(kg)
0.4	850	400	150	350	2.0	144.0(AF) 156.0(HSF)

表-3 使用材料の物理的性質

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
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 AE 減水剤
非晶質鋼繊維 (AF)	密度 : 7.2g/cm <sup>3</sup> , 長さ : 30mm 幅 : 1.6mm, 厚さ : 29 μm 比表面積 : 97.7mm <sup>2</sup> 引張強度 : 1,400MPa
フック型鋼繊維 (HSF)	密度 : 7.85g/cm <sup>3</sup> , 長さ : 30mm 直径 : 0.5mm, 比表面積 : 47.1mm <sup>2</sup> 引張強度 : 1,140MPa



(a) 薄板型非晶質鋼繊維 (b) フック型鋼繊維

写真-1 混入繊維の形状

型繊維の打設方向による繊維の配向が衝撃破壊特性に及ぼす影響を検討するために、図-3 に示すように飛翔体の衝突方向に直交する方向(a)と飛翔体の衝突方向と同じ方向(b)から打設した。セメント複合体の調合は表-

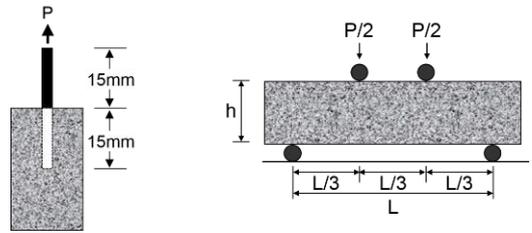


図-4 引抜試験概要

図-5 曲げ試験概要

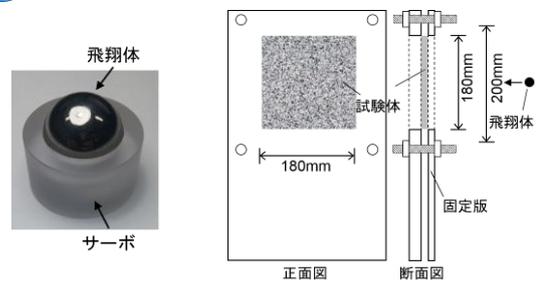
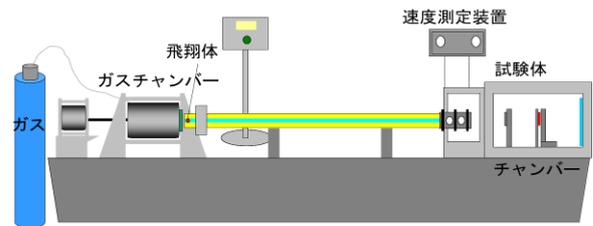


図-6 ガス圧力式飛翔体発射装置の概要

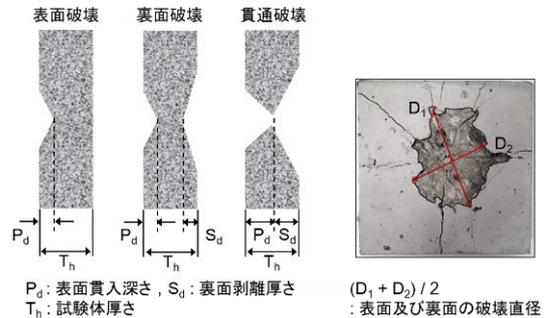


図-7 衝撃破壊特性の評価方法

2, 使用材料の物理的性質と混入繊維の形状は各々表-3と写真-1 に示す。

2.2 試験方法

(1) 繊維の引抜特性試験

繊維の引抜試験は、寸法 25×25mm(W×H)のモルタル

表-4 固まらない性状及び圧縮強度

試験体の種類	テーブルフロー (mm)	空気量 (%)	圧縮強度 (MPa)
NCC	210	4.1	45.36
AFRCC-2.0	205	4.2	46.48
HSFRCC-2.0	225	3.8	44.32

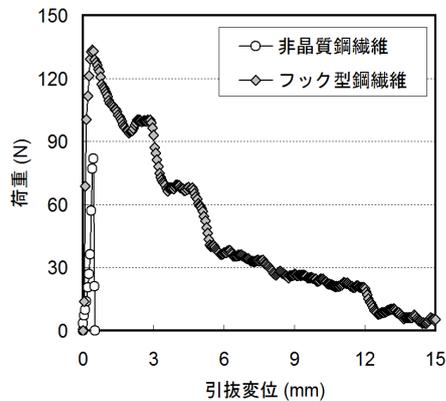


図-8 引抜荷重-変位曲線

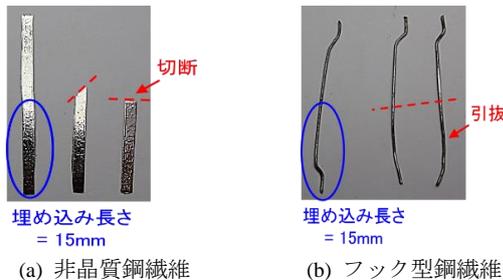


写真-2 繊維の破壊性状

ベースに繊維を 15mm 埋め込み、繊維がモルタルから引抜する応力と拔出し変位を測定した。図-4 に繊維の引抜試験概要を示す。

### (2) 繊維補強セメント複合体の曲げ特性試験

図-5 に繊維補強セメント複合体の曲げ試験概要を示す。曲げ試験は 100×100×400mm の角形試験体を用いて、ASTM C 1609 「繊維補強コンクリートの曲げ性能評価方法」に準じて 4 点曲げ試験を行った。

### (3) 高速飛翔体の衝撃による耐衝撃性能試験

図-6 にガス圧力式飛翔体発射装置の概要を示す。本試験では直径 20mm(31.08g)の鋼球を 170m/sec.の速度で衝突させる衝撃試験を行った。また、衝撃試験は結果の信頼性向上のために 3 体以上の試験体に対して衝撃試験を行った。図-7 に衝撃破壊特性の評価方法を示す。飛翔体の衝撃後、試験体の表面貫入深さ、裏面剥離厚さと破壊直径を測定した。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 固まらない性状及び圧縮強度

表-4 に繊維補強セメント複合体のテーブルフロー、

空気量及び材齢 28 日での圧縮強度を示す。非晶質鋼繊維補強セメント複合体の場合、コンクリート調合と異なり、テーブルフローの低下がなく、全ての調合条件で目標テーブルフロー、空気量及び圧縮強度を満たした。

### 3.2 繊維の引抜特性

図-8 に繊維引抜試験による引抜荷重-拔出し変位曲線を示す。非晶質鋼繊維は最大引抜荷重で繊維がマトリックスから引抜しないで、切断した。非晶質鋼繊維は大きい比表面積によって、繊維とマトリックスの付着力が大きくなり、繊維の形状が薄板型で荷重方向によってせん断や引張破壊が起こると判断される。一方、フック型鋼繊維は非晶質鋼繊維に比べて最大引抜荷重が大きく、最大引抜荷重で繊維がマトリックスから引抜する破壊挙動を示す。また、繊維端の屈曲によって引抜荷重の維持されて段階的な荷重の低下が生じる。写真-2 に引抜試験による繊維の破壊性状を示す。

### 3.3 繊維補強セメント複合体の曲げ特性

図-9 に 4 点曲げ試験による曲げ応力-変位曲線と破壊断面で繊維の破壊性状を示す。プレーン試験体は最大曲げ応力で脆性的に破壊した。一方、繊維補強セメント複合体の場合は補強繊維の架橋作用により引張応力の伝達が保持されるため、最大曲げ応力と変位が大きく向上し、最大曲げ応力以降も急激な耐力低下が抑えられている。

非晶質鋼繊維補強セメント複合体はフック型鋼繊維補強セメント複合体に比べて最大曲げ応力が大きくなった。しかし、非晶質鋼繊維補強セメント複合体はひび割れ発生後の変形軟化区間で繊維がマトリックスから引抜しないで、ひび割れの方によってせん断や引張破壊されるので、フック型鋼繊維補強セメント複合体に比べて応力の低下が大きくなる。

一方、フック型鋼繊維補強セメント複合体の最大曲げ応力は非晶質鋼繊維補強セメント複合体より小さいが、変形軟化区間で繊維がマトリックスから引抜する破壊挙動によって応力の低下が小さくなる。

曲げ破壊断面での非晶質鋼繊維は、繊維の表面に凹凸があり、マトリックスとの付着性能が高くなるため、繊維がマトリックスから引抜しないで、切断される。一方、フック型鋼繊維は繊維がマトリックスから引抜して、繊維の屈曲が伸ばして破壊特性を示す。写真-3 に曲げ破壊断面での繊維の破壊性状を示す。

図-10 に曲げ試験による最大曲げ応力と残留曲げ応力を示す。残留曲げ応力は曲げ変位 0.5mm (L/600)と 2.0mm (L/150)での曲げ応力として、繊維補強セメント複合体の変形硬化と軟化挙動における荷重の維持能力を示す。本研究で繊維補強セメント複合体は最大曲げ応力まで変形硬化挙動が起こるため、変位 0.5mm (L/600)での

表-4 固まらない性状及び圧縮強度

試験体の種類	テーブルフロー (mm)	空気量 (%)	圧縮強度 (MPa)
NCC	210	4.1	45.36
AFRCC-2.0	205	4.2	46.48
HSFRCC-2.0	225	3.8	44.32

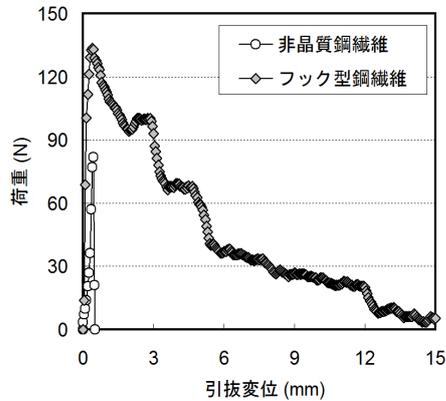


図-8 引抜荷重-変位曲線

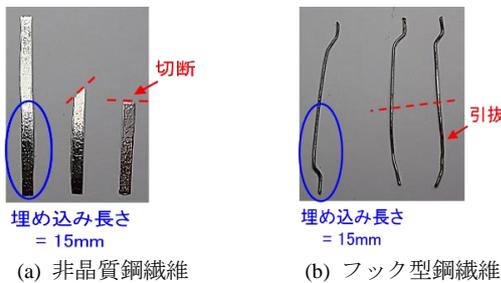


写真-2 繊維の破壊性状

曲げ応力が最大曲げ応力より小さくなる。

最大曲げ応力と変位 0.5mm (L/600)での曲げ応力は非晶質鋼繊維補強セメント複合体が、繊維の引張強度と付着性能が高いため、フック型鋼繊維補強セメント複合体より大きくなる。一方、最大曲げ応力以降の変位 2.0mm (L/150)での残留曲げ応力は、非晶質鋼繊維が破断するため、フック型鋼繊維補強セメント複合体が非晶質鋼繊維補強セメント複合体より大きくなる。

### 3.4 繊維補強セメント複合体の耐衝撃性能

#### (1) 破壊モード

表-5 に飛翔体の衝撃による試験体の破壊モードを示す。プレーン試験体は厚さ 50mm で飛翔体が試験体を貫通して、厚さ 60 と 70mm では飛翔体が貫通していなかったが、裏面剥離による貫通破壊が生じる。非晶質鋼繊維補強セメント複合体は厚さ 50mm から裏面剥離がなく、ひび割れのみ生じ、試験体の厚さが増やすほどひび割れ領域は減る。特に、非晶質鋼繊維は図-2 右の写真のように、繊維が広い面で積層する傾向があり、これはセメント複合体に混入した時にも、同じ傾向で積層なり、よりひび割れ損傷を抑えている。一方、フック型鋼繊維補強セメント複合体は試験体厚さ 50mm では裏面剥離が生

じるが、60 と 70mm では裏面剥離が抑制されている。

図-11 に試験体厚さ 50mm での裏面剥離厚さと直径を示す。プレーン試験体は、試験体厚さの半分を超える裏面剥離が生じて、破壊直径も大きくなる。一方、非晶質鋼繊維補強セメント複合体は、裏面剥離が生じず、フック型鋼繊維補強セメント複合体は、裏面剥離は生じたが、補強繊維の影響でプレーン試験体より裏面剥離厚さと直径はともに減少している。

図-12 に高速飛翔体の衝撃による繊維補強セメント複合体の破壊断面性状とひび割れパターンを示す。一般的に高速飛翔体の衝突を受けるコンクリートは試験体の内部に放射状の斜めひび割れが生じる。しかし、繊維を補強した場合、補強繊維の分散と配向によってひび割れのパターンが異なる。

フック型鋼繊維補強セメント複合体は放射状のひび割れが試験体内部の全体に分布しているが、補強繊維により破片の剥離が抑制されている。

一方、非晶質鋼繊維補強セメント複合体は飛翔体の衝突方向に対し、直交方向打設と同じ方向打設に関わらずひび割れは生じるが、フック型鋼繊維補強セメント複合体に比べてひび割れ領域が大幅に減少する。非晶質鋼繊維はセメント複合体の打設方向による繊維の配向に大きな影響を与え、衝撃による試験体内部のひび割れパターンが明らかに異なっている。直交打設の場合、繊維が衝撃波の伝達方向と同じ方向に配する傾向になり、ひび割れが試験体の中央に集中して裏面に進展する。一方、衝突方向打設の場合、繊維が衝撃波の伝達方向と直交する傾向になり、衝突方向のひび割れを効率よく制御しているが、試験体厚さの小さい裏面剥離に対しては補強効果が低下している。高速飛翔体の衝撃によるセメント系材料の裏面剥離は、衝撃波の伝達による発生する裏面の引張応力とひずみによる生じる。従って、衝撃波の吸収と分散、材料の曲げ引張性能を向上させることによって、裏面破壊を抑制することができる。

本実験で評価した非晶質鋼繊維補強セメント複合体はフック型鋼繊維補強セメント複合体に比べて混入繊維の個体数が多く、曲げ強度が大きいため裏面破壊の抑制性能が大きくなったと判断される。また、非晶質鋼繊維は打設方向によって試験体内部の繊維配向が異なり、衝撃による内部損傷に大きな影響を与えることを確かめた。従って、非晶質鋼繊維をセメント系材料の補強繊維として用いる場合、打設方向を検討する必要がある。

## 4. まとめ

薄板型非晶質鋼繊維補強セメント複合体の静力学特性と耐衝撃性能についてフック型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。

表-5 飛翔体の衝突による破壊モード(飛翔体直径 20mm, 衝撃速度 170m/s)

試験体種類	試験体の厚さ 50mm		試験体の厚さ 60mm		試験体の厚さ 70mm	
	表面	裏面	表面	裏面	表面	裏面
NCC						
AFRCC-2.0 (衝突と直交方向打設)						
AFRCC-2.0 (衝突と同じ方向打設)						
HSFCC-2.0						

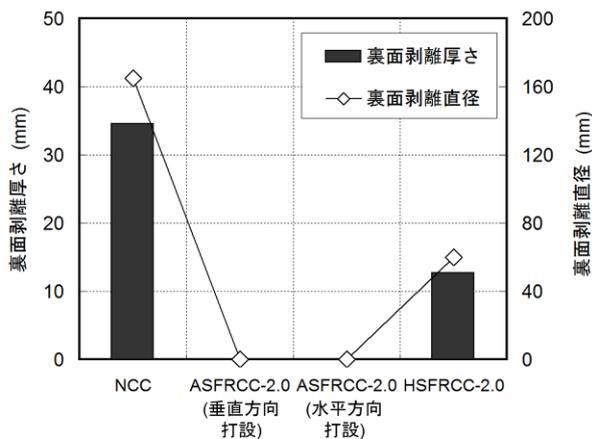


図-11 試験体厚さ 50mm での裏面剥離厚さと直径

- (1) 繊維の引抜挙動におけるフック型鋼繊維は、フック形状が変形して抜出すが、薄板型非晶質鋼繊維は付着面積と付着強度が大きいため抜出されず、脆性的に切断される。従って、セメント複合体の曲げ破壊挙動において薄板型非晶質鋼繊維がフック型鋼繊維より曲げ強度は大きい、ピーク後より脆性的な挙動を示す。
- (2) 薄板型非晶質鋼繊維はフック型鋼繊維に比べて繊維の混入個体数多く、曲げ強度が大きいためフック型鋼繊維に比べて裏面破壊の抑制性能が大きい。
- (3) 薄板型非晶質鋼繊維は繊維配向が高速衝撃による試

験体内部のひび割れ性状に大きな影響を与える。

- (4) 薄板型非晶質鋼繊維補強セメント複合体は曲げ強度が大きく、高速飛翔体の衝撃に対する破壊抵抗性能が優れるので、薄板型の方向性を考慮した打設方法を検討した後、曲げ補強材と衝撃防護パネル材などに活用する可能性が大きいと判断される。

#### 謝辞

本研究は 2015 年度未来創造科学部の財源に韓国研究財団(No. 2015R1A5A1037548)と 2015 年度東京工業大学応用セラミックス研究所共同利用研究事業(国際 B)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) Mohamed Abdel-Kader, Ahmed Fouda, Effect of reinforced on the response of concrete panels to impact of hard projectile, International Journal of Impact Engineering, Vol.63, pp.1-17, 2014
- 2) Tarek H. Almusallam, Nadeem A. Siddiqui A. Iqbal, Husain Abbas, Response of hybrid-fiber reinforced concrete slabs to hard projectile impact, International Journal of Impact Engineering, Vol.58, pp.17-30, 2013
- 3) 山口信, 村上聖, 武田浩二, 佐藤あゆみ, スラリー充填繊維コンクリート SIFCON の調査および耐爆性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, pp.511-516,

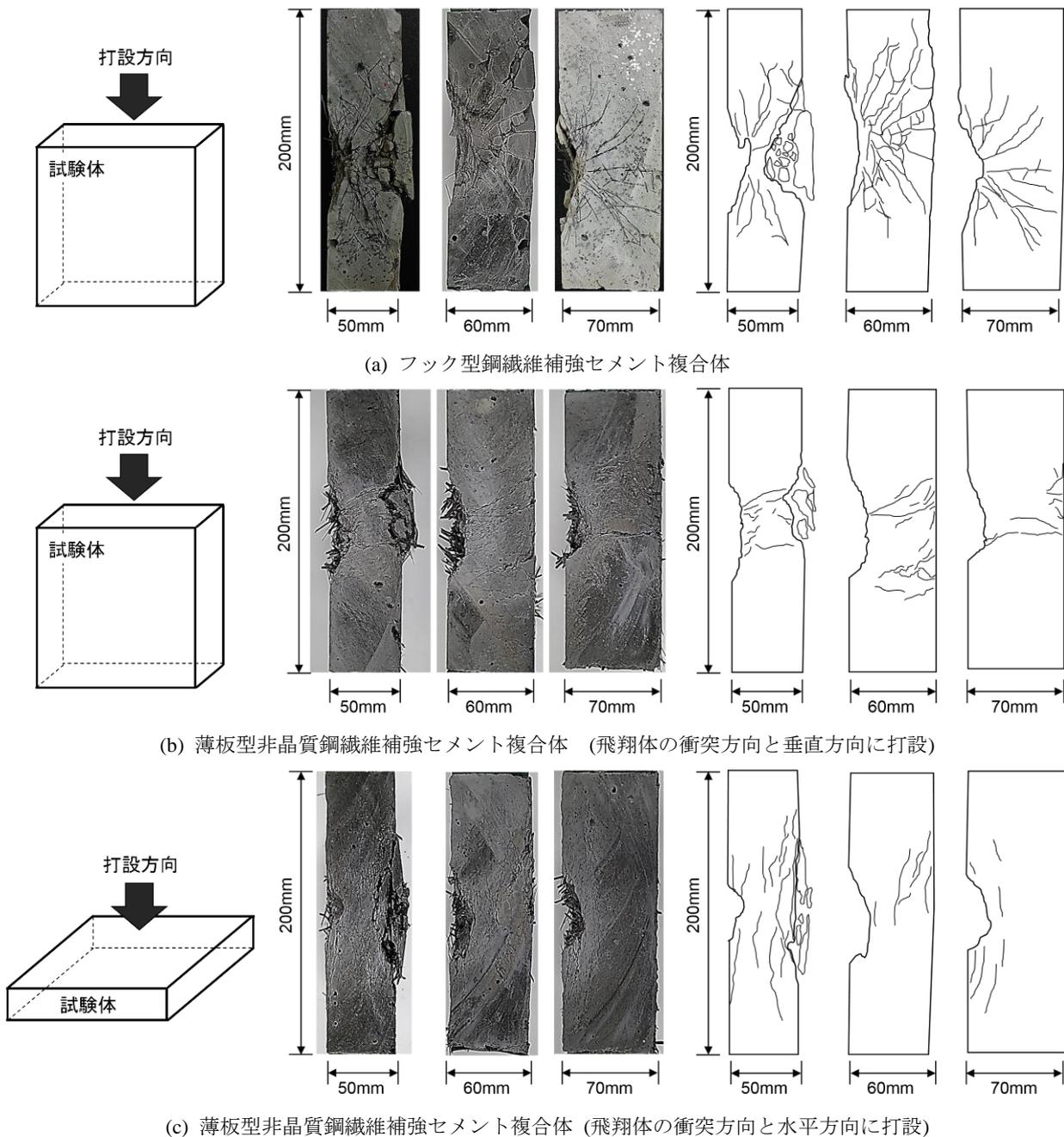


図-12 高速飛翔体の衝突による繊維補強セメント複合体の破壊断面性状とひび割れパターン

2014

4) Won Jong Pil, Hong Byung Tak, Lee Su Jin, Choi Se Jin, Bonding properties of amorphous micro-steel fibre-reinforced cementitious composites, Composite Structure, Vol.102, pp101-109, 2013

5) Rashid Hameed, Anaclet Turatsinze, Frédéric Duprat, Alain Sellier, Study on the flexural properties of metallic-hybrid-fibre-reinforced concrete, Maejo International Journal of Science and Technology, Vol.4, pp.169-184, 2010

6) 金弘燮, 金圭庸, 南正樹, 李仁喆, 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,

コンクリート工学年次論文集, Vol.35, pp.289-294, 2013

7) 森田 武, 別府 万寿博, 鈴木 誠, 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性状における短繊維補強と鉄筋補強の効果に関する実験的検討コンクリート工学年次論文集, Vol.35, pp.667-672, 2013

8) 上野 裕, 別府 万寿博, 小川 敦久, 高速衝突を受ける繊維補強セメント系複合材料板の局所破壊低減効果に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, pp.517-522, 2014