

論文 束型ポリアミド繊維補強コンクリートの曲げ特性及び耐衝撃性能

金 弘燮*1・金 圭庸*2・南 正樹*3・田 重圭*4

要旨: 本実験では、直径 19.5 μmの微細短繊維 544 個を空気噴射成形した束型ポリアミド繊維 補強コンクリートの曲げ特性と耐衝撃性能を、繊維補強コンクリートの補強繊維として一般的に使用するフック型鋼繊維を補強したコンクリート試験体と比較・検討した。その結果、束型のポリアミド繊維は微細間隙の影響によって比表面積が増加し、マトリックスから引き抜きされず破断した。また、ポリアミド繊維補強コンクリートはフック型鋼繊維補強コンクリートより曲げ強度と曲げじん性は小さかったが、高速衝撃による裏面破壊の抑制効果は同等以上の性能を現れた。

キーワード: 束型ポリアミド繊維, 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

繊維補強コンクリートは補強繊維の架橋作用によるひび割れの発生や進展を抑制し、曲げ・引張性能が優れており、高速衝撃及び爆発などの動的荷重に対する安全性能を期待できる材料である。特に、鋼繊維補強コンクリートは、曲げ・引張強度及びじん性の向上とひび割れに対する抵抗性が大きいいため、トンネルライニング構造物などのショットクリートに適用されており、プラント構造物などにも適用範囲が広がっている。

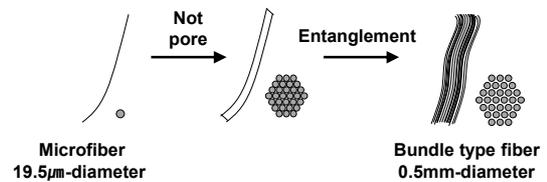
しかし、鋼繊維は重くて硬いため、圧送ホースの磨耗損傷及び破裂などの恐れや、腐食による耐久性の低下などに対する改善が要求されている^{1) 2)}。

本実験では、コンクリートの補強材としての性能を検討するため、直径 19.5 μmの微細繊維を空気噴射整形した有機系束型ポリアミド繊維を用いて、繊維とマトリックスの引抜特性、繊維補強コンクリートの曲げ特性及び耐衝撃性能を評価した後、従来使用されている同一長さのフック型鋼繊維を混入した繊維補強コンクリートと比較・検討した。

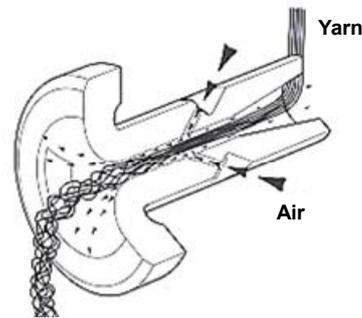
2. 実験計画及び方法

2.1 束型ポリアミド繊維とフック型鋼繊維の概要

図-1 に束型ポリアミド繊維の概要及び性状、製造方法を示す。ポリアミド繊維は、直径 19.5 μmの微細繊維 544 個を空気噴射整形した束型とし、長さ 30mm, 平均直径 0.5mm, アスペクト比 60, 引張強度 594MPa, 密度 1.14g/cm³の有機繊維である。ポリアミド繊維は、コアヤーン(Core yarn)とエフェクトヤーン(Effect yarn)であるマルチフィラメント(Multifilament)が空気ノズルによる高圧の空気噴射整形によって製造した。



(a) 束型の概要



(b) 空気噴射成型



(c) 繊維の性状

図-1 束型ポリアミド繊維

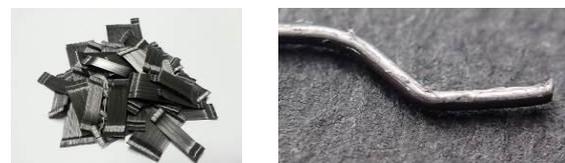


写真-1 フック型鋼繊維

フック型鋼繊維は長さ 30mm, 直径 0.5mm, アスペクト比 60, 引張強度 1,140MPa, 密度 7.8g/cm³である。写真-1 にフック型鋼繊維の形状を示す。

*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)

*3 東京工業大学 建築物理研究センター 研究員 工博 (正会員)

*4 大韓民国 (株)KOLON グローバル R&BD センター 責任研究員 工博 (正会員)

表-1 コンクリートの調合

W/B	Slump (mm)	Air (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				
				C	W	FA	S	G
0.40	120 ±30	4 ±1	55	405	180	45	888	758

表-2 使用材料の物理的性質

Materials	Mechanical properties
Cement (C)	Ordinary portland cement Density : 3.15g/cm ³ , Fineness : 3,200cm ² /g
Fly-ash (FA)	Density : 2.20g/cm ³ , Fineness : 3,000cm ² /g
Sand (S)	Density : 2.61g/cm ³ , Absorptance : 0.81%
Gavel (G)	Crushed gravel, Maximum size : 20mm Density : 2.65g/cm ³ , Absorptance : 0.76%

表-3 試験体の種類とフレッシュ特性及び圧縮強度

ID.	Fiber		Fresh properties		Compressive strength (MPa)
	Type	V _f (%)	Slump (mm)	Air (%)	
Plain	-	0	135	3.9	45.15
PA0.50	Polyamide fiber	0.50	130	4.3	45.40
PA0.75		0.75	125	4.2	43.80
PA1.00		1.00	125	3.0	50.40
SF0.50	Hooked steel fiber	0.50	135	4.6	49.16
SF0.75		0.75	135	4.8	51.38
SF1.00		1.00	120	3.4	52.30

2.2 コンクリート調合及び使用材料

表-1 にコンクリートの調合、表-2 に使用材料の物理的特性を示す。設計基準強度は 40MPa、水結合材比は 0.4 とした。表-3 に試験体の種類とスランプ、空気量及び圧縮強度を示す。ポリアミド繊維とフック型鋼繊維を各々体積混入率 0.50、0.75 及び 1.00vol.% とした。また、全ての試験体は目標スランプと空気量を満たし、材齢 28 日の圧縮強度は設計基準強度以上となった。

2.3 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)のモルタルベースに繊維を 15mm 埋め込み、繊維がモルタルから引抜される応力と変位を測定した。写真-2 に繊維の引抜試験装置を示す。

(2) 繊維補強コンクリートの曲げ特性試験

写真-3 に繊維補強コンクリートの曲げ試験装置を示す。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」に準じた 4 点曲げにより行った。

(3) 高速飛翔体の衝撃による耐衝撃性能試験

図-2 にガス圧力式飛翔体発射装置の概要を示す。本実験では直径 10mm(4.07g)と 25mm(66.4g)の鋼球を各々 300m/sec.と 170m/sec.の速度とした衝撃試験を行った。



写真-2 引抜試験装置 写真-3 曲げ特性試験装置

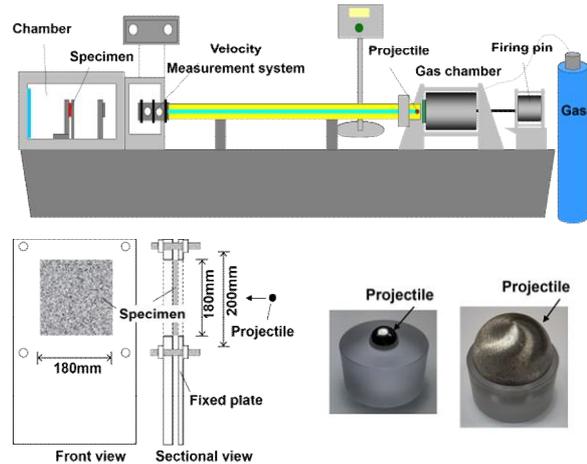


図-2 ガス圧力式飛翔体発射装置の概要

表-4 衝撃試験の条件

Impact condition		Specimen condition	
Projectile diameter (mm)	Velocity (m/s)	Size (mm)	Thickness (mm)
10	300	200×200 (W×H)	30, 40
25	170		50, 60, 70

飛翔体直径 10mm、衝撃速度 300m/sec.の場合、試験体寸法を横縦 200×200mm、厚さ 30、40mm とし、飛翔体直径 25mm、衝撃速度 170m/sec.の場合では、試験体寸法を横縦 200×200mm、厚さ 50、60、70mm と設けた。飛翔体の直径は、本実験で用いた衝撃試験装置の仕様を考慮して設定し、先端形状が球型である鋼製(SS400)を用いた。また、試験結果の信頼性向上のために 3 つ以上の試験体に対して衝撃試験を行った。表-4 に衝撃試験の条件を示す。

3. 実験結果及び考察

3.1 繊維の引抜特性

図-3 に繊維の引抜試験による引抜荷重-変位曲線と繊維の破断状況を示す。ポリアミド繊維は引抜荷重が鋼繊維に比べて小さく、繊維の延伸率によって繊維自体が伸び、最大引抜荷重での変位が 2.5mm となった。また、最大引抜荷重以後に繊維がマトリックスから引抜されず、切れる性状が見られたが、これはポリアミド繊維の微細間隙の内部にモルタルマトリックスが充填され、モルタ

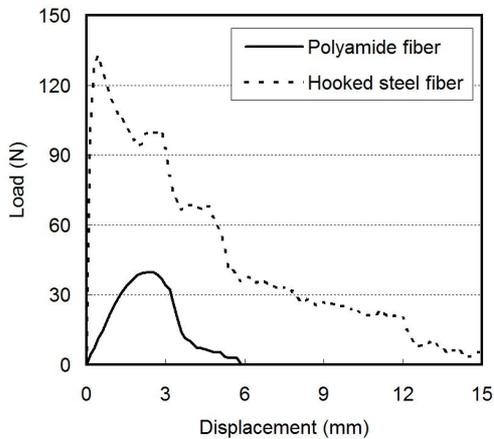


図-3 引抜荷重-変位曲線

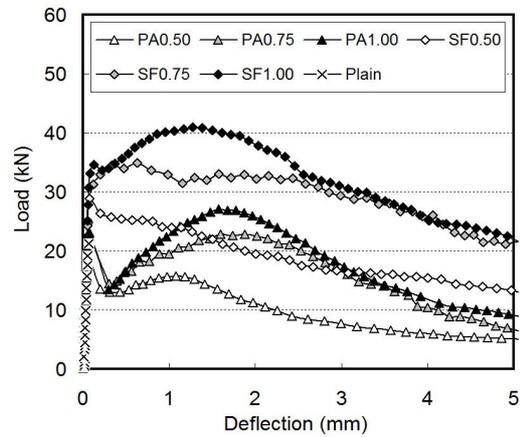


図-4 曲げ荷重-変位曲線

ルとの付着性能が大きいと考えられる。

一方、フック型鋼繊維は大きい引抜荷重を示しており、最大引抜荷重以後に繊維がモルタルマトリックスから引抜された。また、繊維端の屈曲によって引抜荷重が維持されて段階的に荷重が小さくなった。

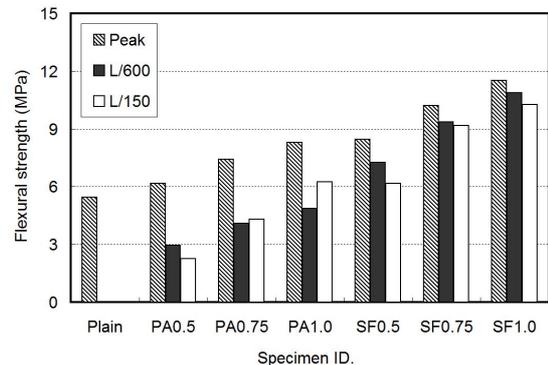
3.2 繊維補強コンクリートの曲げ特性

図-4 に 4 点曲げ試験による曲げ荷重と変位曲線を示す。Plain 試験体は、最大荷重点でひび割れの発生と共に脆性的に破壊した。ポリアミド繊維補強コンクリートの場合、初期ひび割れの発生時に繊維の延伸率によって応力がやや小さくなったが、繊維とマトリックスの付着によりひずみ硬化(Strain Hardening, 材料が降伏点以後でも変形の増加と共に応力が上昇する現象) 挙動が見られた。一方、繊維混入率 1.0vol.%の場合では、繊維とマトリックスの付着によるピーク荷重が降伏点の荷重に比べて大きくなった。

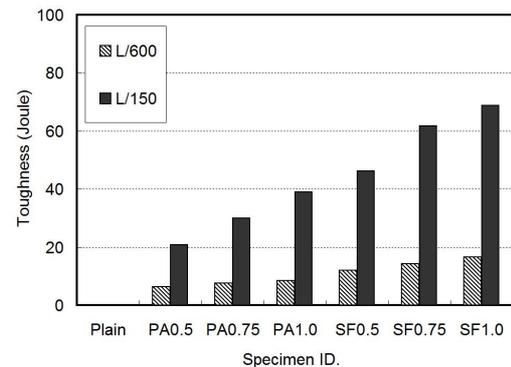
一方、フック型鋼繊維補強コンクリートはポリアミド繊維補強コンクリートより最大曲げ荷重が大きく、初期ひび割れ発生後にひずみ硬化挙動を示した。また、ひずみ軟化区間において繊維がコンクリートマトリックスから引抜する破壊挙動によって、荷重の緩やかな減少が見られた。

図-5 に曲げ強度と曲げじん性の評価結果を示す。最大ピーク点の強度を用いて、スパン長さ(L)の 1/600(=0.5mm)と 1/150(=2mm)点での残留曲げ強度と残留曲げじん性を計算した。曲げ強度の場合、補強繊維の種類に関わらず繊維の混入率が増加するほど向上し、フック型鋼繊維補強コンクリートがポリアミド繊維補強コンクリートより大きくなった。

残留曲げ強度の場合、ポリアミド繊維は変位 1mm 以後の区間でひずみ硬化挙動が見られ、L/600 より L/150 点の残留曲げ強度が大きくなった。一方、フック型鋼繊維補強コンクリートは初期のひび割れ発生後にひずみ硬化挙動を示したが、変位 1mm 以後ではひずみ軟化挙



(a) 曲げ強度



(b) 曲げじん性

図-5 曲げ強度と曲げじん性の評価結果



(a) ポリアミド繊維補強コンクリート (b) フック型鋼繊維補強コンクリート

写真-4 曲げ破壊断面での繊維破壊性状

動が見られ、残留曲げ強度は徐々に小さくなった。

曲げじん性は補強繊維の種類によらず繊維混入率が増加するほど向上した。フック型鋼繊維補強コンクリ

トは最大曲げ耐力が大きく、ひずみ軟化区間での勾配が緩慢するなので、ポリアミド繊維補強コンクリートに比べて曲げじん性が大きいと考えられる。

写真-4 に曲げ破壊断面で繊維の状況を示す。ポリアミド繊維は、束型繊維の間隙にコンクリートマトリックスが付着されており繊維が引抜されず、切れる破壊性状が観察された。ポリアミド繊維とコンクリートマトリックスとの付着効率が高くなって繊維が引抜されず、切れたと考えられる。

一方、フック型鋼繊維はコンクリートにひび割れが生じると繊維がコンクリートマトリックスから引抜されたことが想定される。

繊維補強コンクリートの曲げ破壊特性において、繊維とコンクリートマトリックス間の付着と引抜特性は初期ひび割れ発生後のコンクリートのひずみ硬化と軟化挙動に大きな影響を及ぼしたと考えられる。

3.3 繊維補強コンクリートの耐衝撃性能

(1) 破壊モード

表-5 に高速衝撃による試験体の裏面破壊性状を示す。飛翔体を直径 10mm, 衝撃速度 300m/sec., 試験体の厚さ 30mm の場合, Plain は表面貫入と裏面剥離の深さの合計が試験体の厚さとなる貫通破壊の破壊モードが認められた。一方, PA0.5, SF0.5 と SF0.75 は貫通破壊が生じなかったが, 裏面の剥離が確認された。また, PA0.75, PA1.0 と SF1.0 は裏面にひび割れが生じる程度と裏面の剥離は

見られなかった。繊維補強によって裏面の剥離が抑制され, 繊維混入率が増加するほど裏面剥離の抑制効果が向上されることを確認した。試験体の深さ 40mm の場合, Plain は裏面にひび割れが発生したが, 繊維補強コンクリートは表面貫入のみ発生した。

飛翔体を直径 25mm, 衝撃速度 170m/sec.の実験条件では, 試験体の厚さ 50mm で繊維補強に関わらず全ての試験体で貫通破壊した。試験体の厚さ 60mm の場合, Plain, PA0.5 及び SF0.5 で裏面の剥離による貫通破壊が生じたが, PA0.75, PA1.0 及び SF0.75, SF1.0 では裏面剥離が生じておらず, ひび割れのみ発生した。試験体の厚さ 70mm において Plain は裏面の剥離が見られたが, 繊維補強コンクリートは裏面剥離が生じておらず, 繊維の混入率が増加するほど裏面ひび割れも小さくなる傾向を確認した。

(2) 圧縮強度と表面貫入深さの関係

図-6 に圧縮強度と表面貫入深さの関係を示す。飛翔体の直径と質量, 衝撃速度が大きいほど表面貫入深さは増加した。本実験で繊維補強コンクリートの圧縮強度は補強繊維の種類と混入率に関わらず 50~57MPa の範囲となり, 繊維補強による表面貫入深さの抑制は見られなかった。従って, 繊維補強による曲げ・引張性能の向上は高速衝撃による表面貫入深さの抑制に及ぼす影響は少ないと考えられる。

(3) 裏面剥離深さと直径

図-7 に高速衝撃による裏面剥離深さと直径の測定結

表-5 高速衝撃による試験体の裏面破壊性状

Impact condition	Specimen thickness (mm)	Plain	PA0.5	PA0.75	PA1.0	SF0.5	SF0.75	SF1.0
Projectile diameter 10mm Impact velocity 300m/s	30							
	40							
Projectile diameter 25mm Impact velocity 170m/s	50							
	60							
	70							

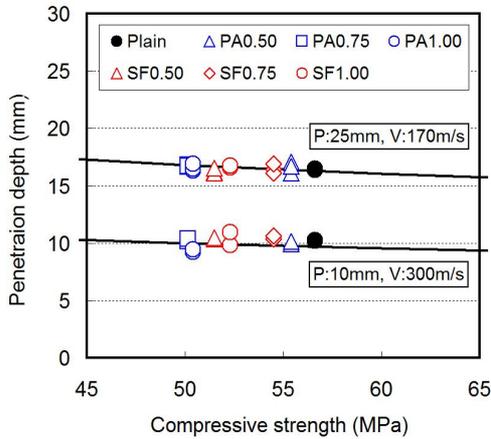


図-6 圧縮強度と表面貫入深さの関係

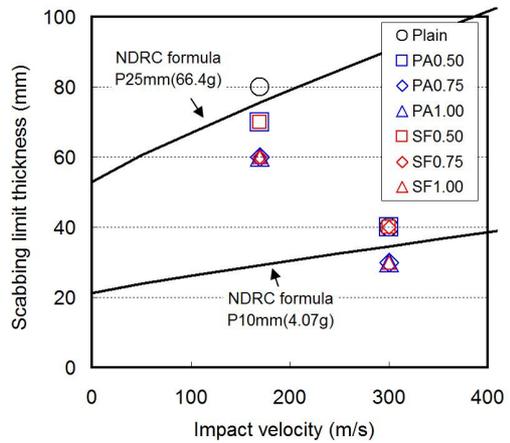
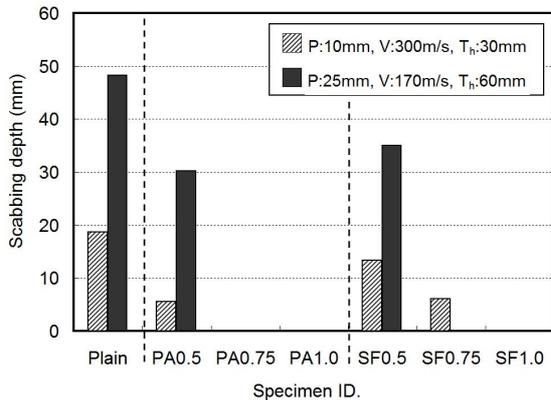
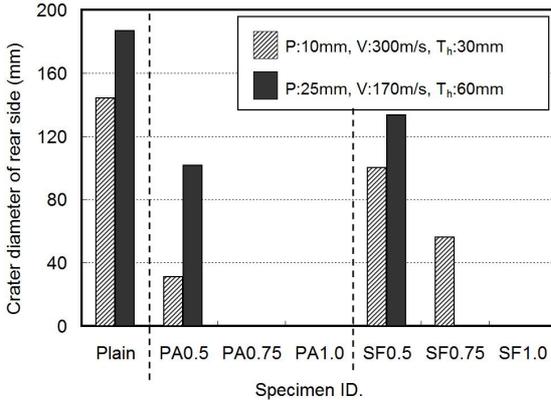


図-8 衝撃速度と裏面剥離限界厚さの関係



(a) 裏面剥離深さ



(b) 裏面剥離直径

図-7 高速衝撃による裏面剥離深さと直径

果を示す。Plain は裏面剥離深さが試験体の厚さの 2/3 となっており、表面貫入深さより大きいことが分かった。

一方、繊維補強コンクリートの場合、裏面剥離深さと直径が小さくなった。ポリアミド繊維補強コンクリートはフック型鋼繊維補強コンクリートに比べて曲げ強度と曲げじん性は小さいが、同じ衝撃条件で裏面剥離深さと直径が小さくなる傾向が見られた。

(4) 裏面剥離限界厚さ

図-8 に衝撃速度と裏面剥離限界厚さの関係を示す。本研究では裏面にひび割れは見られたが、破片の剥離が生じない最小の試験体厚さを裏面剥離限界厚さとした。

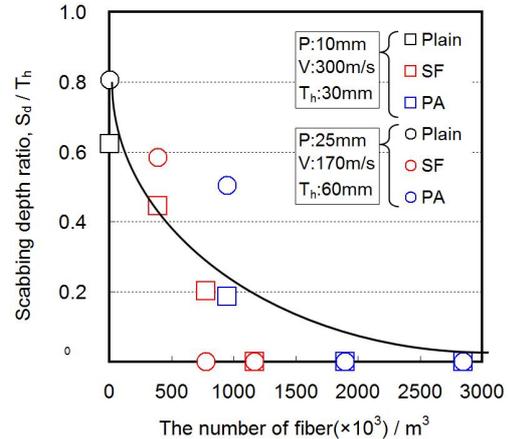


図-9 繊維混入個体数と裏面剥離深さの関係

飛翔体を直径 10mm、衝撃速度 300m/sec.の衝撃条件で Plain, PA0.5 及び SF0.5, SF0.75 では試験体の厚さ 40mm, PA0.75, PA1.0 及び SF1.0 では試験体の厚さ 30mm を裏面剥離限界厚さとした。

飛翔体を直径 25mm、衝撃速度 170m/sec.の場合、Plain では試験体の厚さ 80mm, PA0.5 と SF0.5 では試験体の厚さ 70mm, PA0.75, PA1.0 及び SF0.75, SF1.0 では試験体の厚さ 60mm を裏面剥離限界厚さとした。

本実験では、試験体の厚さを 10mm の単位で設定して裏面剥離限界厚さの算定を行い、繊維補強による曲げ・引張性能の向上により裏面剥離限界厚さが薄くなることを確認した。また、Plain は高速飛翔体に衝突によるコンクリートの局部破壊予測式の修正 NDRC 式(The modified National Defense Research Committee formula)の予測値と一致したが、繊維補強コンクリートは修正 NDRC 式より裏面剥離限界厚さが小さい傾向が現れた。修正 NDRC 式を式(1)に示す。

$$\frac{s}{D} = 7.91 \left(\frac{x}{D}\right) - 5.06 \left(\frac{x}{D}\right)^2 \quad \left(\frac{x}{D} < 0.65\right) \quad (1)$$

$$\frac{s}{D} = 2.12 + 1.36 \left(\frac{x}{D}\right) \quad \left(0.65 \leq \frac{x}{D} < 11.75\right)$$

ここで、x は表面貫入深さ(m)、s は裏面剥離限界厚さ(m)、D は飛翔体に直径(m)である。

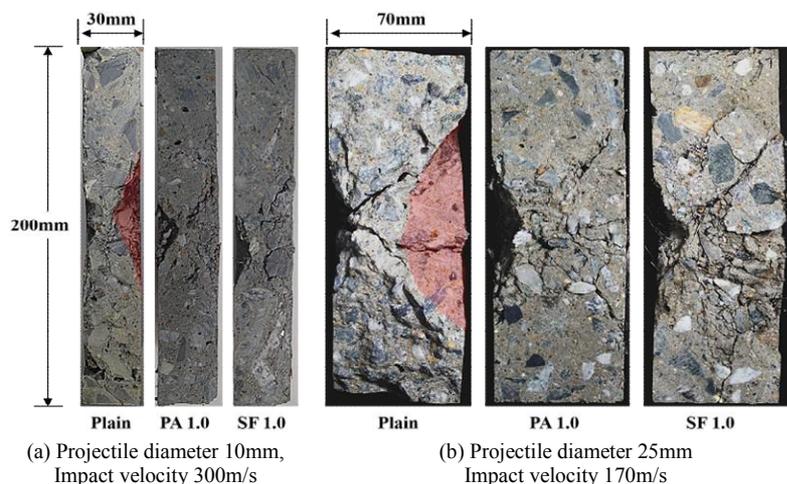


図-10 高速衝撃による試験体の断面破壊性状

(5) 繊維混入個体数と裏面剥離深さの関係

ポリアミド繊維補強コンクリートは、鋼繊維補強コンクリートに比べて同じ混入率で曲げ強度と曲げじん性は小さかったが、高速衝撃による裏面破壊の抑制効果は同等以上の性能を現れた。これは、繊維混入個体数と裏面剥離深さの関係を示した図-9のように、裏面剥離深さが低くなる効果は繊維の個体数と関係が高いことであると考えられる。また、高速衝撃による試験体の断面破壊性状を示した図-10のように繊維補強コンクリートは補強繊維の個体数が架橋作用による斜めひび割れの発生や進展の抑制に密接な関係があると推定できる。

4. まとめ

本研究では、束型ポリアミド繊維補強コンクリートとフック型鋼繊維補強コンクリートの曲げ特性及び耐衝撃性能を比較・検討した。結果は以下の通りである。

- (1) ポリアミド繊維では繊維間に空気間隙によって繊維とマトリックスの付着比表面積が大きくなり、繊維がマトリックスから引抜されず破断されたが、フック型鋼繊維では最大引抜荷重以後に繊維がマトリックスから引抜される破壊挙動が見られた。
- (2) 束型ポリアミド繊維補強コンクリートは同じ体積混入率におけるフック型鋼繊維補強コンクリートに比べて曲げ強度及び曲げじん性が小さかったが、繊維の混入個体数が多いため、衝撃応力とひび割れの分散性の効率が大きくなったと考えられる。
- (3) 繊維補強コンクリートの耐衝撃性能向上のためには、繊維補強コンクリートの曲げ・引張性能と共に補強繊維の種類による要因について考慮する必要がある。

謝辞

本研究は国土交通省建設技術研究事業(防護・防爆用高性能繊維補強セメント複合材料及び性能評価技術開発)

の研究費支援によって遂行した。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Kim YI, Park DS, Seo CH : Variations of material characteristics of high-strength concrete according to increase of steel fiber volume. Journal of the Architecture Institute of Korea, vol.21, pp. 95-101, 2005
- 2) Jeon JK, You JO, Moon JH : Durability evaluation of tunnel lining concrete reinforced with nylon fiber, Journal of the Korea Concrete Institute, vol.20, pp. 487-493, 2008
- 3) 南 正樹, 田 重圭, 金 圭庸, 金 武漢 : 裏面剥離限界厚さの検討のための繊維補強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.34, No.1, 2012
- 4) 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, No.2, pp. 667-672, 2013
- 5) 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 E Vol.63 No.1, pp. 178-191, 2007
- 6) Kanda T, Li Victor C. : Interface property and apparent strength of high strength hydrophilic fiber in cement matrix, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.10, No.5, pp. 5-13, 1998
- 7) Anderson WF, Watson AJ, Rmstrong PJ. : Fiber reinforced concretes for the protection of structures against high velocity impact, Proceedings of the international conference on structural impact and crashworthiness, pp. 687-695, 1984.
- 8) Ramakrishnan V, Coyle WV, Fowler LJ, Schrader EK. : A comparative evaluation of fiber shotcretes, Report SDSM&T-CBS 7902, USA: Civil Engineering Department, South Dakota School of Mines and Technology 1979
- 9) Mohamed AK, Ahmed F. : 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