

論文 組糸形ポリアミド繊維補強コンクリートの力学的性能評価

南 正樹*1・田 重圭*2・金 圭庸*3・金 武漢*4

要旨: 繊維補強コンクリートにおいて補強材料である繊維は主に短繊維で使われて、鋼繊維の場合はコンクリートとの付着性能を改善するためのフック形などに繊維の形状を改良する研究が多数行われてきたが、有機繊維の場合は成形製造が難しい繊維形状の改善に関する研究はほとんどない。本研究は直径 19.5 μmの微細繊維を 544 本の組糸形の単体として空気噴射成形で繊維の付着比表面積を大きくし、繊維の表面を界面活性剤で分散性を高めた組糸形ポリアミド繊維を使用したコンクリートの圧縮強度、引張強度および曲げ強度に対し鋼繊維とポリプロピレン繊維補強コンクリートとの力学的特性を比較・評価したものである。

キーワード: 繊維補強コンクリート, 鋼繊維, 組糸形ポリアミド繊維, 空気噴射成形, 曲げ強度

1. はじめに

繊維補強コンクリートは安全性と信頼性が要求されているトンネル、擁壁、斜面構造物などに使われており、多様な繊維補強材料の開発によって繊維補強コンクリートの引張および曲げ性能などの力学的性能に関する研究が進んでいる¹⁾³⁾。今までは繊維補強材料として繊維の剛性と付着性能が大きい鋼繊維が幅広く使用されているが、鋼繊維は重く硬くて圧送ホースの磨耗損傷および破裂などの恐れや、鋼繊維の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⁴⁾⁷⁾。

一方、多様な有機繊維の開発による繊維補強コンクリートの性能評価研究が進められているが、コンクリートの練混ぜ時に有機繊維は鋼繊維に比べて同じ混入率で流動性が低く、有機繊維の形状改良による分散性と付着性の改善が必要である。

本研究は有機繊維として直径 19.5 μmの微細なポリア

ミド繊維を 544 本の単体に集積して空気噴射成形による付着比表面積を大きくし、繊維の表面に界面活性剤を塗って繊維の分散性を改善した組糸形ポリアミド繊維を製造した。その後、鋼繊維、ポリプロピレン繊維補強コンクリートと組糸形ポリアミド繊維補強コンクリートの圧縮強度、引張強度および曲げ強度などの力学的特性を比較・評価した。

2. 実験計画および方法

2.1 実験計画および使用材料

表-1 に鋼繊維と有機繊維を使用したコンクリートの力学的性能を比較・評価するための実験計画を示す。繊維混入率は鋼繊維補強コンクリートの力学的性能と比較するため鋼繊維混入率は 0.5vol.%(約 40kg/m³)、ポリ

表-1 実験計画

実験要因および水準			評価項目 ²⁾
試験体の種類 ¹⁾	繊維の種類	繊維混入率(%)	
Plain	無混入	—	<ul style="list-style-type: none"> ▪ スランプ(mm) ▪ 空気量(%) ▪ 圧縮強度(N/mm²) ▪ 引張強度(N/mm²) ▪ 曲げ強度(N/mm²) ▪ 等価曲げ強度比(%)
SF-05	鋼繊維	0.5	
PP-01	PP 繊維	0.1	
PP-03		0.3	
PP-05		0.5	
PA-01	PA 繊維	0.1	
PA-03		0.3	
PA-05		0.5	

1) SF: 鋼繊維, PP: ポリプロピレン繊維

PA: ポリアミド繊維

2) 強度特性評価: 材齢 28 日

表-2 使用材料の種類と物理・化学的性質

種類	物理・化学的性質		
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: 3,770cm ² /g		
細骨材(海砂)	密度: 2.56g/cm ³ , 吸水率: 0.97%		
粗骨材(碎石)	密度: 2.82g/cm ³ , 吸水率: 0.64% 最大寸法: 13mm		
繊維	SF (steel fiber)	スチールファイバー 密度: 7.85g/cm ³ , 直径: 0.5mm, 長さ: 30mm, 引張強度: 810N/mm ²	
	PP (polypropylene fiber)	ポリプロピレン 密度: 0.91g/cm ³ , 直径: 0.5mm, 長さ: 50mm, 引張強度: 450N/mm ²	
	PA	単一	ポリアミド(polyamide fiber) 密度: 1.14g/cm ³ , 直径: 19.5 μm, 長さ: 30mm, 引張強度: 594N/mm ²
		集積組糸形	単体の繊維本数: 544 本 長さ: 30mm, 直径: 約 1.0mm

*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 KOLON 建設 技術研究センター 責任研究員 工博 (正会員)

*3 大韓民国 忠南大学校 建築工学科 教授 工博 (正会員)

*4 大韓民国 忠南大学校 建築工学科 名誉教授 工博 (正会員)

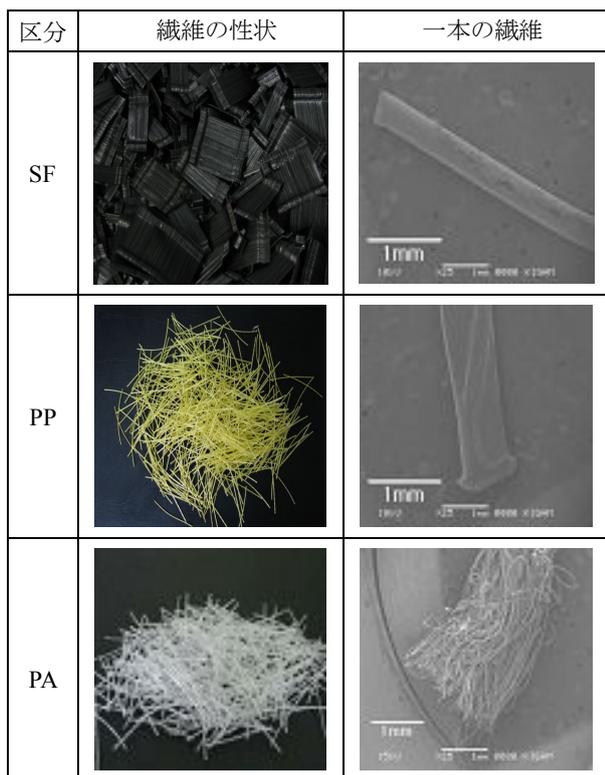


写真-1 繊維種類別の形状

プロピレン繊維およびポリアミド繊維の混入率は 0.1, 0.3, 0.5vol.%の3水準にした。

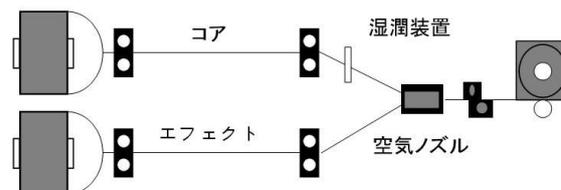
また、評価項目は目標スランプおよび空気量を一定にして、力学的性能は圧縮強度、引張強度、曲げ強度および等価曲げ強度比を評価した。

表-2 に本研究で使用した材料の物理・化学的性質を示し、写真-1 に繊維種類別の形状を示す。組糸形ポリアミド繊維は直径 19.5 μmの微細繊維を 544本の単体に集積し空気噴射成形して繊維の付着比表面積を大きくしたものである。

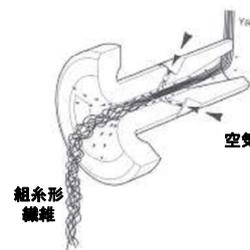
2.2 組糸形ポリアミド繊維の性状

図-1 に組糸形ポリアミド繊維製造の概要を示す。図-1(a)は空気噴射成形による組糸形ポリアミド繊維の製造プロセス、図-1(b)は空気噴射成形による組糸形化、図-1(c)は組糸形ポリアミド繊維の形成段階を示す。ポリアミド繊維は直径 19.5 μmのポリアミド繊維を約 544本を集積して密集状態で直径 0.42mm、その後空気噴射によって微細繊維の間隔が広くなり直径が約 1mm まで大きくなる。

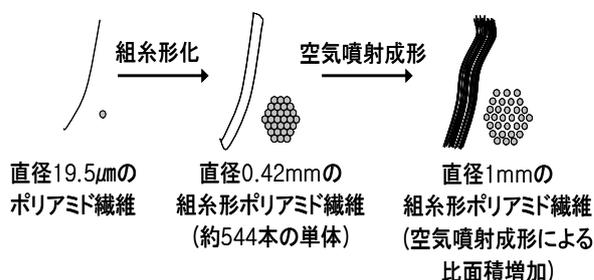
単一繊維として鋼繊維とポリプロピレン繊維の直径は 0.5mm であり、長さは 30mm, 50mm で、比表面積が 47.1mm², 78.5mm² である。ポリアミド繊維の場合は直径は約 1.0mm, 長さ 30mm で、集積した単体の比表面積は 39.6mm², 空気噴射成形した場合は最大 999.2mm² まで増加する。



(a) 繊維製造プロセス



(b) 空気噴射成形による組糸形化



(c) 組糸形ポリアミド繊維の形成段階

図-1 組糸形ポリアミド繊維製造の概要

表-3 コンクリートの調合

試験体種類	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	C	S	G	F ¹⁾
Plain							0.00
SF-05							39.25
PP-01							0.91
PP-03	43	66	205	478	1068	566	2.73
PP-05							4.55
PA-01							1.14
PA-03							3.42
PA-05							5.70

1) F: 繊維の混入量(体積に対する単位量)

※ 目標スランプ: 100±20mm, 目標空気量: 5±1%

また、ポリアミド繊維の場合は表面を界面活性剤にコーティングして繊維の静電的な反発力によって分散性を高めた。

2.3 コンクリートの調合および試験体の作製

表-3 にコンクリートの調合を示す。一般的に使用する鋼繊維の混入率として 0.5vol.%を基準で、鋼繊維補強コンクリートの性能と比較するため、ポリプロピレンおよびポリアミド繊維の混入率を 0.1, 0.3, 0.5vol.%と設定して繊維混入率の影響を検討した。また、コンクリート



(a) コンクリートの練混ぜ (b) プレーン試験体



(c) PA 繊維混入試験体 (d) SF 繊維混入試験体

写真-2 コンクリートの練混ぜおよびスランプ

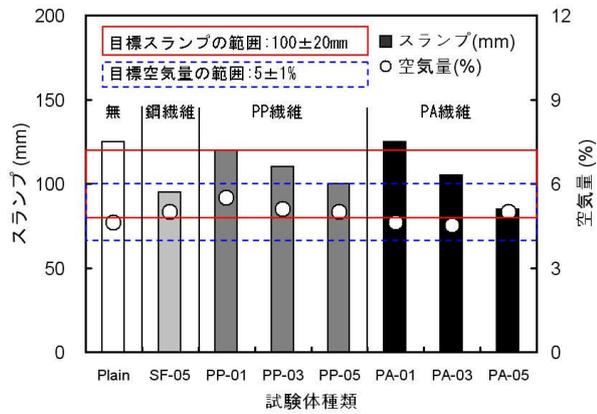


図-2 スランプおよび空気量

表-4 圧縮および引張強度による脆性係数

試験体の種類	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	脆性係数
Plain	40.0	3.08	0.077
SF-05	35.1	3.30	0.094
PP-01	36.5	3.07	0.081
PP-03	38.3	3.24	0.085
PP-05	38.4	3.30	0.086
PA-01	37.5	3.16	0.084
PA-03	38.2	3.43	0.090
PA-05	39.1	3.69	0.095

の目標スランプの範囲は 100±20mm で、空気量は 5±1% と設定した。

また、コンクリートの練混ぜは写真-2 に示すように 60ℓ容量の 1 軸シャフトコンクリートミキサーを使った。試験体の作製は KS F 2403 「コンクリートの強度試験用試験体作製方法」に準じ、28 日の材齢まで温度 20±3℃ の標準養生を行なった。

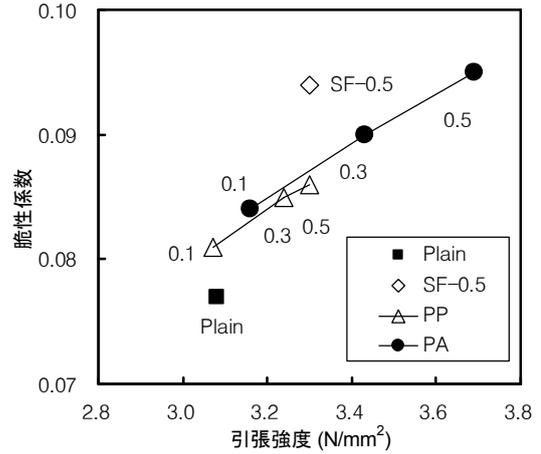
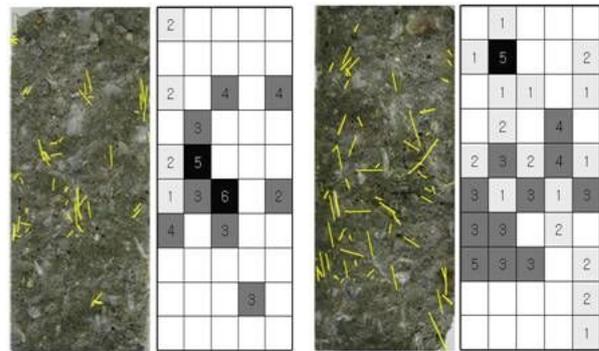


図-3 引張強度と脆性係数の関係



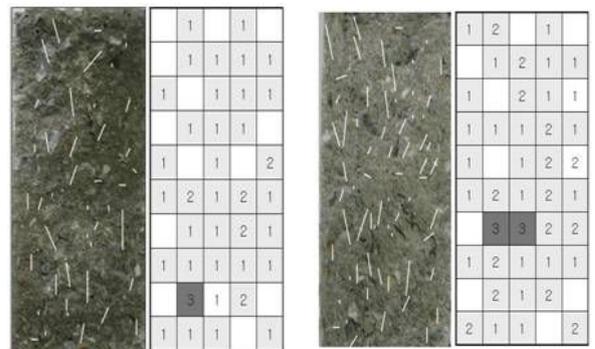
(a) Plain

(b) SF-05



(c) PP-03

(d) PP-05



(e) PA-03

(f) PA-05

図-4 割裂断面の繊維分散性

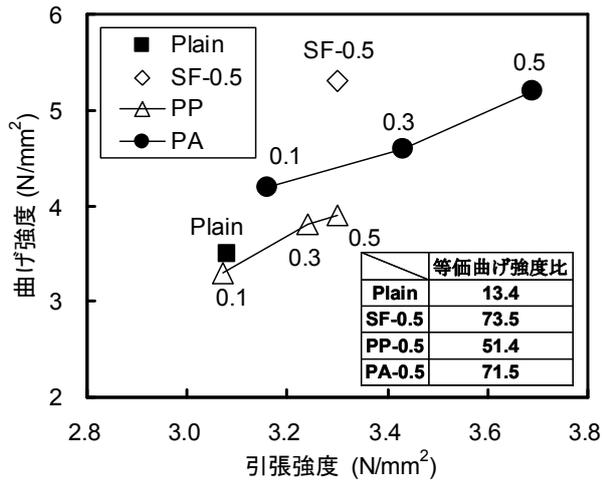


図-5 引張強度と曲げ強度の関係

一方、コンクリートの圧縮強度はKS F 2405「コンクリートの圧縮強度試験方法」、引張強度はKS F 2423「コンクリートの引張強度試験方法」、曲げ強度はKS F 2408「コンクリートの曲げ強度試験方法」に準じて行なった。

3. 実験結果および考察

3.1 スランプおよび空気量

図-2 にスランプおよび空気量の結果を示す。まだ固まらないコンクリートのスランプおよび空気量は設定した範囲を満たしたが、目標スランプ範囲で繊維混入率が 増加するほどスランプが低下した。

3.2 圧縮強度、引張強度および脆性係数

表-4 に圧縮強度、引張強度および脆性係数の評価結果を示す。また、脆性係数は式(1)によって求めた。

$$CB = St T / St C \quad (1)$$

ここで、CB = 脆性係数(Coefficient of brittleness)

St T = 引張強度(N/mm²)

St C = 圧縮強度(N/mm²)

繊維混入コンクリートの圧縮強度はプレーンコンクリートに比べて約 10%程度低く、繊維の種類と混入率による差はほとんど見られなかった。

また、有機繊維の場合、繊維混入率が増加するほど引張強度がやや高くなり、繊維混入率 0.5vol.%で PA 繊維の場合が最も高かった。

図-3 に繊維混入による引張強度と脆性係数の関係を示す。プレーンコンクリートに比べて繊維を混入したコンクリートの脆性係数が高く、有機繊維の混入による引張強度および脆性係数の向上はポリアミド繊維の場合が最も効果的である。

図-4 にコンクリートの割裂引張強度評価後、その断面の繊維分散性状を示す。繊維の分散性状を評価するため試験体の断面をグリッド(grid)で分けて繊維本数を数えた。鋼繊維と PP 繊維補強コンクリートの場合、繊維が集中しているグリッドがあったが、PA コンクリートの場合繊維が集中しなく均一に分散された。繊維混入率 0.5vol.%において鋼繊維の本数は 849 本、PP 繊維の本数は 510 本、PA 繊維は 1,205 本で PA-0.5 試験体の場合混入した繊維個体が最も多かったが、繊維が比較的均一に分布した。

3.3 曲げ強度および等価曲げ強度比

図-5 に 引張強度と曲げ強度の関係を示す。等価曲げ強度比は引張強度に対する曲げ強度の比であり、式(2)によって求めた。

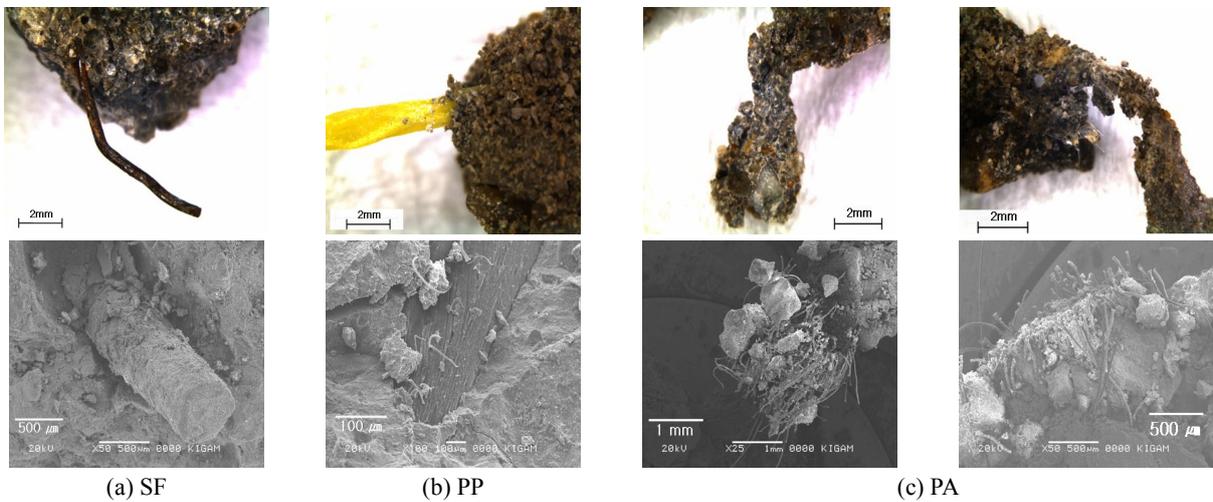


写真-3 繊維の付着性状

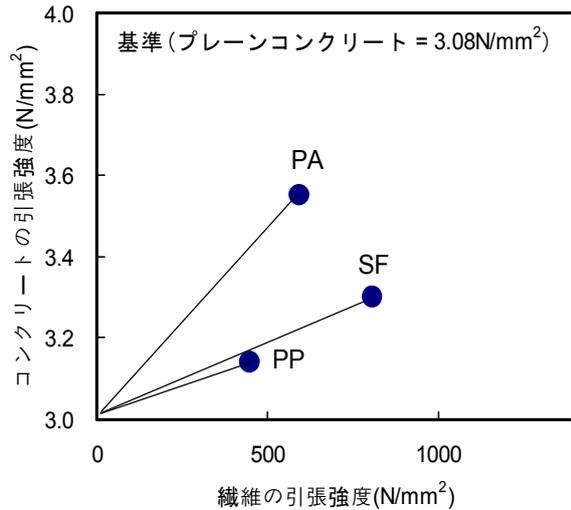


図-6 繊維の引張強度とコンクリート引張強度の関係

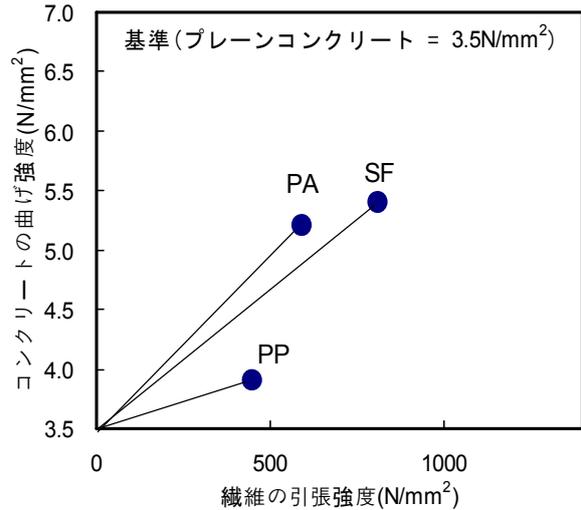


図-7 繊維の引張強度とコンクリート曲げ強度の関係

表-5 繊維種類による比表面積

試験体の種類	繊維混入率 (vol.%)	単一繊維比表面積 (mm ²)	単一繊維の質量 (g)	混入繊維本数	実混入繊維の比表面積 (mm ²) ¹⁾
SF-05	0.5	47.1	46.24	849	39,980
PP-01	0.1	78.5	8.93	102	7,999
PP-03	0.3			306	23,998
PP-05	0.5			510	39,997
PA-01	0.1	39.6 ~999.2	4.73	241	最小 9,544 最大 240,822
PA-03	0.3			723	最小 28,633 最大 722,466
PA-05	0.5			1205	最小 47,721 最大 1,204,110

1) コンクリートと付着した繊維の比表面積

$$R_b = St B / St T \quad (2)$$

ここで、 R_b = 等価曲げ強度比

$St B$ = 曲げ強度(N/mm²)

$St T$ = 引張強度(N/mm²)

PP 繊維補強コンクリート 0.1vol.%の等価曲げ強度比はプレーンコンクリートと類似であるが、PP 繊維混入率が 増加するほどやや向上した。

一方、PA 繊維補強コンクリートは繊維混入率の増加によって引張強度と曲げ強度の向上効率が PP 繊維補強コンクリートより大きい。繊維混入 0.5vol.%においては等価曲げ強度比は鋼繊維と PA 繊維がほぼ同等である。

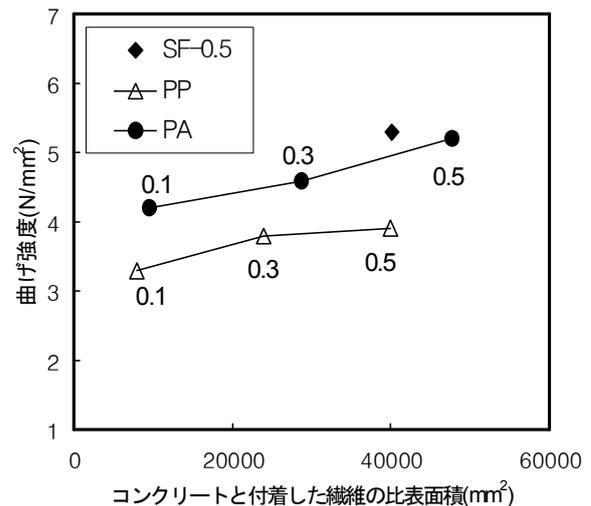


図-8 繊維の比表面積とコンクリート曲げ強度の関係 (比表面積は最小値で算定)

3.4 繊維の付着性状

写真-3 に示すようにコンクリートと繊維の付着性状を観察するために割裂引張試験体から電子顕微鏡で引張り破壊時に各繊維が引き抜かれた状態を撮影した。

鋼繊維および PP 繊維の場合、繊維がコンクリートマトリクスから引き抜かれたが、PA 繊維の場合は多数の微細な繊維群がコンクリートマトリクスと付着されたことが見られた。

3.5 繊維の引張強度とコンクリートの引張強度および曲げ強度

図-6 および図-7 に繊維の引張強度とコンクリートの引張強度および曲げ強度との関係を示す。プレーンコ

ンクリートに対し繊維混入率 0.5vol.%において引張りと曲げ強度の発現効率を評価したものである。引張強度 450N/mm²である PP 繊維の場合、コンクリートの引張りと曲げ強度の発現効率が相対的に低くて、PA 繊維の引張強度は 594N/mm²で 810N/mm²の鋼繊維より低いにも関わらずコンクリートの引張りと曲げ強度の発現効率が最も高く評価された。

3.6 繊維の比表面積とコンクリート曲げ強度の関係

表-5 に繊維種類による繊維 1 本の比表面積、質量、混入繊維の個体数およびコンクリートと付着した繊維の比表面積を示す。また、図-8 に繊維の比表面積とコンクリート曲げ強度との関係を示す。

各々の繊維 1 本の比表面積と繊維混入率による本数から混入した繊維量の比表面積を算出した。PA 繊維の場合、微細な PA 繊維の比表面積を最小値、PA 繊維が集積した状態から空気噴射の状態になった場合の比表面積を最大値を算出し、曲げ強度との関係においては最小値で分析した。

繊維の種類によって繊維混入率 0.5vol.%で PP 繊維は 39,956mm²、鋼繊維は 40,176mm²、PA 繊維の比表面積は最小 47,718mm²と最大 1204,110mm²であり、PA 繊維の付着面積が最も大きい。

また、繊維の比表面積が大きいほど曲げ強度が増加することから、有機繊維の形状を改良し付着面積を増加することによって引張強度および曲げ強度発現効率の向上が認められる。

4. まとめ

組糸形ポリアミド繊維を混入したコンクリートを鋼繊維およびポリプロピレン繊維補強コンクリートの力学的特性と比較・評価した結果は次のようである。

- (1) 単一有機繊維の成形性を考慮し直径 19.5 μmの微細繊維を 544 本の単体に集積して空気噴射成形による付着比表面積を大きくした組糸形ポリアミド繊維を製造した。
- (2) 空気噴射成形による組糸形 PA 繊維は多数の微細繊維で比表面積が大きくなり、コンクリートと繊維の付着面積の増加によって付着性能が向上され、組糸形ポリアミド繊維補強コンクリートの力学的性能は鋼繊維補強コンクリートと同じ水準であった。
- (3) PA 繊維は鋼繊維に比べて繊維の引張強度が低かったが、同じ混入率の範囲ではコンクリートの引張強度および曲げ強度が同等な性能に評価され、PA 繊維はコンクリートの補強材料として補強効果があることを確かめた。

謝辞

研究者の一部は2段階BK21事業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) 石関嘉一, 小池喜嗣, 深津章文, 川瀬哲也: 鋼繊維補強コンクリートの諸物性の改善, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.411-416, 2007.7
- 2) 松原功明, 大野俊夫, 坂井吾郎, 山田真人: 超高強度繊維補強コンクリートの諸特性に及ぼす鋼繊維の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1253-1258, 2006.7
- 3) 牛田耕悟, 上原匠, 梅原秀哲, 深津章文: 鋼繊維の形状が高流動・高強度繊維補強コンクリートに及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.273-278, 2004.7
- 4) 井戸康浩, 菊田繁美, 梅本宗宏, 端直人: 鋼繊維補強した超高強度コンクリートの基礎的研究, 日本建築学会大会術講演梗概集[A-1], pp.527-528, 2008
- 5) 下澤和幸, 田村博, 永山勝: 鋼繊維補強モルタル中の鉄筋腐食モニタリング内陸暴露実験(6年間), 日本建築学会大会術講演梗概集 [A-1], pp.555-556, 2003
- 6) 佐々木徹, 金子佳生, 三橋博三: 寸法・形状の異なる鋼繊維補強セメント系複合材料の力学的特性, 日本建築学会大会術講演梗概集[A-1], pp.503-504, 2002
- 7) A.E. Naaman and H. Najm, Bond-slip mechanisms of steel fibres in concrete, ACI Materials Journal, pp. 135-145, 1991.