

高性能 AE 減水剤添加率および細骨材としての砕砂の使用が ポリエチレン繊維補強コンクリートの力学的特性に及ぼす影響

山口信^{*1} 村上聖^{*2} 武田浩二^{*2} 平居孝之^{*1}

*1 日本文理大学 工学部建築学科(〒870-0397 大分県大分市大字一木 1727)

*2 熊本大学 大学院自然科学研究科環境共生工学専攻(〒860-8555 熊本県熊本市黒髪 2 丁目 39-1)

要旨：ポリエチレン繊維補強コンクリート(PEFRC)の実用化に際し、製造条件の制約に伴う使用材料等の変動が PEFRC の品質に及ぼす影響を把握することは重要であると考えられる。そこで、本研究では、高性能 AE 減水剤添加率および細骨材としての砕砂の使用が PEFRC のスランプおよび各種力学的特性に及ぼす影響について実験的検討を行った。その結果、高性能 AE 減水剤添加率の不足や全面的な砕砂の使用によりスランプが低下した PEFRC において、硬化時の曲げタフネスが低下する傾向が認められた。また、マトリックスのコンシステンシーの変化に伴う繊維の分散状態の変化が PEFRC の曲げタフネスに影響していることが示唆された。

キーワード：ポリエチレン繊維補強コンクリート、高性能 AE 減水剤、砕砂、スランプ、力学的特性

1. はじめに

著者らはこれまでに、高分子量ポリエチレン繊維のコンクリート補強用繊維としての適用を目的に、マトリックスの調合、繊維形状および繊維体積率がポリエチレン繊維補強コンクリート(以下、PEFRC と称する)の力学的特性に及ぼす影響について実験的検討を行ってきた。その結果として、高流動コンクリートの使用材料(高炉スラグ微粉末と高性能 AE 減水剤)に準じたマトリックスの調合と、せん断攪拌時に局所的に解繊する集束タイプのポリエチレン繊維を適用することにより、プレキャストコンクリートへの適用を想定する上で十分なスランプと、鋼繊維補強コンクリートと同等以上の力学的性能を有する PEFRC が得られることを示している^{1,2,3,4)}。

ところで、PEFRC の実用化を考える場合、製造条件の制約に伴う使用材料等の変動が PEFRC の品質に及ぼす影響を把握することは重要な課題であると考えられる。PEFRC の製造に用いられる材料の中で、セメント(早強ポルトランドセメント)および混和材(高炉スラグ微粉末)に関しては、それぞれ JIS R 5210(ポルトランドセメント)および JIS A 6206(コンクリート用高炉スラグ微粉末)により規格化されているため、全国一律に同一仕様の製品を入手することが可能である。しかし、高性能 AE 減水剤は、JIS A 6204(コンクリート用化学混和剤)により規格化されているものの、製品に応じて減水率等が異なるため、添加量不足により硬練りとなった場合や、過剰添加により材料分離が生じた場合の PEFRC の力学的特性について把握しておく必要があると考えられる。また、PEFRC の良好なワーカビリティを確保

するためには、川砂などの粒形の良い骨材を用いることが望ましいが、近年のコンクリート用骨材は資源的・地域的な制約から良質なもののみを使用できる状況にはなく、砕砂のように粒形の劣る骨材を用いて PEFRC を製造しなければならないケースも想定される。

そこで、本研究では、製造条件の制約に起因する使用材料等の変動を想定し、① 高性能 AE 減水剤添加率が PEFRC の力学的特性に及ぼす影響(実験 A)、② 細骨材としての砕砂の使用が PEFRC の力学的特性に及ぼす影響(実験 B)に関して実験的検討を行った。

2. 実験方法

Table 1 に使用材料を示す。補強用繊維には、既報³⁾において PEFRC の高靱性を確保する上で適切と判断された、集束タイプのポリエチレン繊維を用いた。その形状は、ポリエチレンのストランドを芯部がポリプロピレン、鞘部が低融点ポリエチレンから成る熱融着糸で緩く巻付けカバリングしたものであり、せん断攪拌時に局所的に解繊した部分に結合材ペーストが充填されることを意図している。マトリックスには、繊維混入に伴うスランプ低下を補償するため高炉スラグ微粉末と高性能 AE 減水剤を併用し、プレキャストコンクリートとしての用途を想定して、セメントには早強ポルトランドセメントを用いた。また、細骨材としては、実験 A では川砂のみ、実験 B では川砂と砕砂の 2 種類を使用した。

Table 2 に使用調合を示す。各実験シリーズで使用し

た調査の概要は、以下の通りである。

① 実験 A：ベースとなる調合を既報⁴⁾で選定した最適調合で一定とし、高性能 AE 減水剤添加率のみを Sp/B = 0.25、0.50、0.75、1.00 % の 4 水準で変化させた。なお、Sp/B = 0 % は、繊維の練り混ぜ自体が困難であると判

断された。

② 実験 B：ベースとなる調合を最適調合で一定とし、砕砂混入率(細骨材全質量に対する砕砂の質量比率)を S_c/S = 0、25、50、75、100 % の 5 水準で変化させた。なお、高性能 AE 減水剤添加率は、同製品の標準使用量である Sp/B = 0.50 % で一定とした。

ここで、上述の最適調合とは、Sp/B = 0.50 % および細骨材：川砂の条件下で、プレキャストコンクリートへの適用を想定する上で十分な 10cm 程度のスランプを満足し、尚且つ曲げタフネスが最大となる調合として、著者らが既往の研究において選定したものである⁴⁾。参考までに、本実験データの中から、適切または適切でないと考えられるフレッシュ PEFRC のスランプの例を Photo. 1 に示す。

PEFRC の混練には、容量 55L の強制 2 軸攪拌型ミキサーを使用した。混練手順としては、最初にセメント、高炉スラグ微粉末および骨材を投入して 15 秒間空練りした後、水および高性能 AE 減水剤を投入して 90 秒間

Table 1 Materials used

Cement	High-early strength Portland cement Density : 3.13g/cm ³
Fine aggregate	River sand (used in Experiment A and B) Surface-dried density : 2.63g/cm ³ Water absorption : 2.69 % Maximum size : 2.5mm Fineness modulus : 2.58 Percentage of absolute volume : 63.0 % Crushed sand (Hard sandstone, used in Experiment B) Surface-dried density : 3.02g/cm ³ Water absorption : 1.00 % Maximum size : 5.0mm Fineness modulus : 3.18 Percentage of absolute volume : 55.2 %
Coarse aggregate	Crushed stone (Hard sandstone) Surface-dried density : 2.95g/cm ³ Water absorption : 1.27 % Maximum size : 15mm Percentage of absolute volume : 56.3 %
Admixture	Blast furnace slag Density : 2.89g/cm ³ Specific surface area : 6140cm ² /g Superplasticizer (Polycarboxylic acid type) Standard additive rate : Sp/B = 0.50 %
Short fiber	Polyethylene fiber (Strand type) Density : 0.97g/cm ³ Size : 68μm (diameter) × 30mm (length) Tensile strength : 1870N/mm ² Tensile elastic modulus : 43kN/mm ²

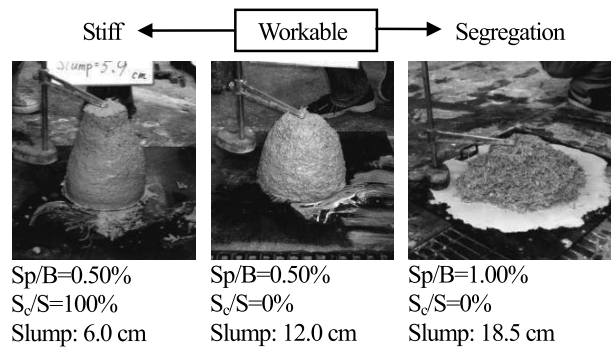


Photo. 1 Examples of slump of fresh PEFRC

Table 2 Mix proportions used

a) Experiment A

V _f (%)	W/B (%)	Sg/B (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m ³)					Sp/B (%)	Slump (cm)	ρ _a (g/cm ³)
				C	Sg	W	S _r	G			
4.0	33	50	65	488	488	325	565	341	0.25	0	2.13
4.0	33	50	65	488	488	325	565	341	0.50	10.0	2.14
4.0	33	50	65	488	488	325	565	341	0.75	16.5*	2.15
4.0	33	50	65	488	488	325	565	341	1.00	18.5*	2.10

b) Experiment B

V _f (%)	W/B (%)	Sg/B (%)	s/a (%)	S _c /S (%)	Unit weight (kg/m ³)					Sp/B (%)	Slump (cm)	ρ _a (g/cm ³)	
					C	Sg	W	S _r	S _c				G
4.0	33	50	65	0	488	488	325	565	0	341	0.50	12.0	2.12
4.0	33	50	65	25	488	488	325	424	141	341	0.50	10.0	2.13
4.0	33	50	65	50	488	488	325	283	283	341	0.50	10.0	2.16
4.0	33	50	65	75	488	488	325	141	424	341	0.50	12.0	2.17
4.0	33	50	65	100	488	488	325	0	565	341	0.50	6.0	2.18

Notes : V_f : Fiber volume fraction, W/B : Water-binder ratio, Sg/B : Blast furnace slag-binder ratio, s/a : Sand percentage, S_c/S : Mixing rate of crushed sand, C : Cement, Sg : Blast furnace slag, B (= C + Sg) : Binder, W : Water, S_r : River sand, S_c : Crushed sand, S (= S_r + S_c) : Fine aggregate, G : Coarse aggregate, Sp/B : Additive rate of superplasticizer, ρ_a : Air-dried density

The symbol of * means that segregation has occurred, and the colored cells mean parameters.

混練し、最後に短繊維を投入して3分間練り混ぜた。

PEFRCの靱性(エネルギー吸収能力)の評価は中央3点曲げ載荷による曲げタフネスによることとし、その他、基礎的な力学的特性試験として圧縮および割裂引張試験を加えている。供試体条件に関して、圧縮および割裂引張試験にはφ100×200mm円柱供試体、曲げ試験には100×100×400mm角柱供試体を各3体ずつ作製し、標準養生材齢14日後、試験時まで気中養生とした。試験方法に関して、圧縮試験では圧縮応力-ひずみ曲線、割裂引張試験では割裂引張強度、曲げ試験ではスパン300mmの中央3点曲げ載荷による荷重-載荷点変位曲線をそれぞれ計測した。なお、曲げタフネスは、日本コンクリート工学協会標準に準拠し、載荷点変位が2.0mmに至るまでの荷重-変位曲線下の面積として求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 実験A：高性能AE減水剤添加率がスランプおよび各種力学的特性に及ぼす影響

Fig.1に圧縮応力-ひずみ曲線の測定値、Fig.2に曲げ試験における荷重-載荷点変位曲線の測定値、Fig.3に高性能AE減水剤添加率がスランプおよび各種力学的特性に及ぼす影響をそれぞれ示す。

スランプは、高性能AE減水剤添加率の増加に伴い増大する傾向を示したが、Sp/B=0.75、1.00%では結合材ペーストの分離が生じ、その程度はSp/B=0.75%よりもSp/B=1.00%で顕著であった。また、Sp/B=

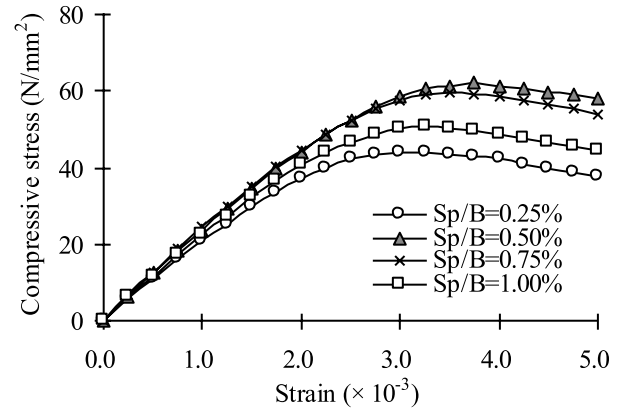


Fig. 1 Compressive stress - strain curves measured (Experiment A)

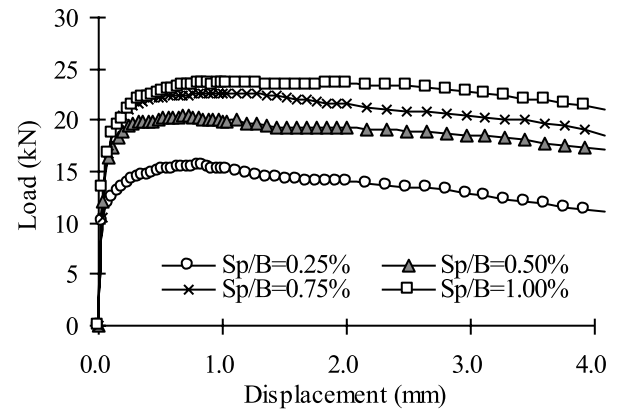


Fig. 2 Load - displacement curves measured (Experiment A)

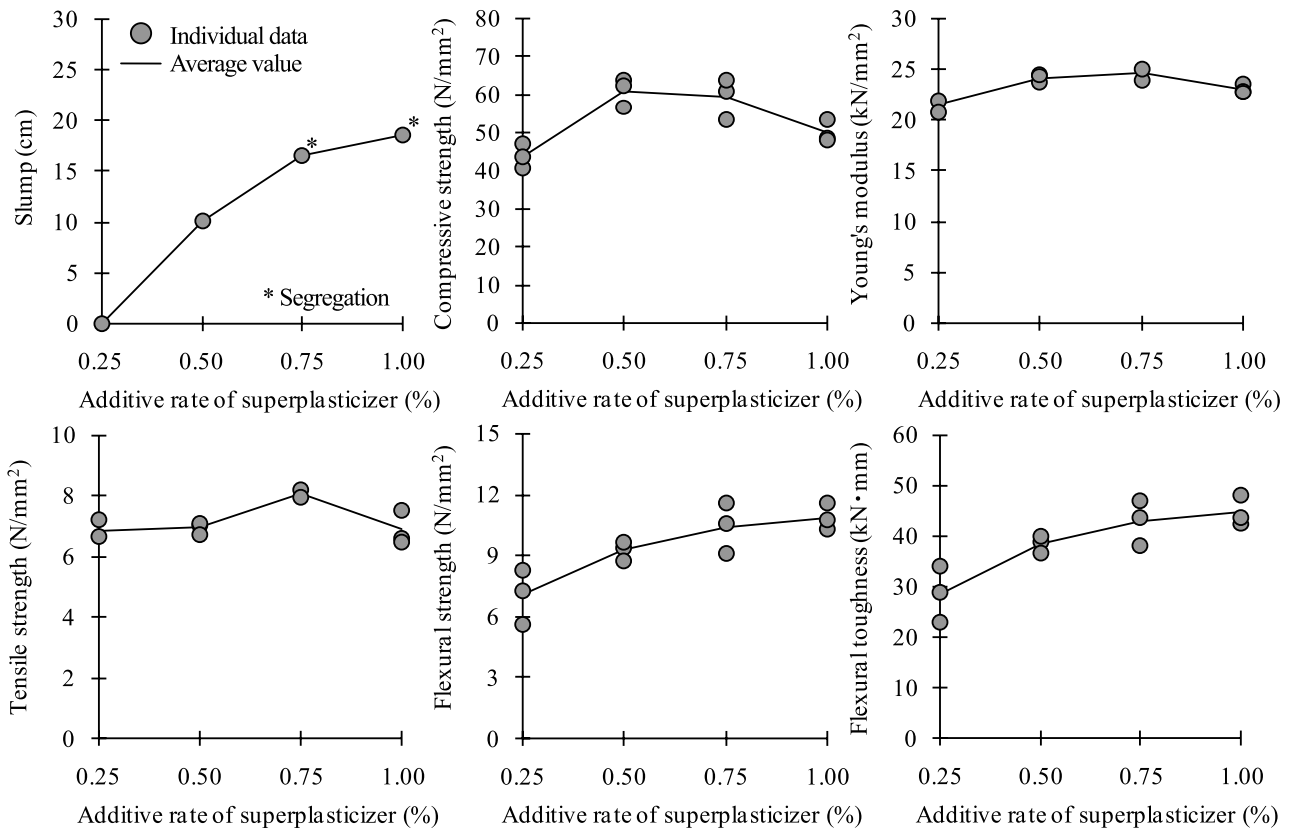


Fig. 3 Influences of additive rate of superplasticizer on slump and various mechanical characteristics (Experiment A)

0.50 %では、スランプは $Sp/B=0.75$ 、1.00 % に比して小さいものの、材料分離を生じることなく適度な粘性を示し、4水準中最もワーカブルなフレッシュ PEFRC が得られた。なお、 $Sp/B=0.25$ % では混練時にファイバーボールを生じ、スランプは 0cm となった。

圧縮強度およびヤング係数は、 $Sp/B=0.50\sim 0.75$ % の範囲で最大となっていることから、フレッシュ PEFRC のワーカビリティが良好であるほど向上する傾向にあることが判る。但し、Fig. 1 を見ると、ピーク以降の変形性能は各水準間で大差ないことが確認される。

曲げ強度および曲げタフネスは、結合材ペーストの分離の有無に関わらず高性能 AE 減水剤添加率の増加に伴い増大する傾向を示しており、ともに $Sp/B=1.00$ % で最大値を示した。このことは、標準使用量 $Sp/B=0.50$ % を基準とした場合、高性能 AE 減水剤の過剰添加により材料分離が生じても曲げタフネスで示される繊維補強効果が低下する危険性は小さく、むしろ添加量不足により硬練りとなった場合に PEFRC の曲げ靱性が低下する危険性を示唆しているものと考えられる。

3.2 実験 B：細骨材としての砕砂の使用がスランプおよび各種力学的特性に及ぼす影響

Fig. 4 に圧縮応力-ひずみ曲線の測定値、Fig. 5 に曲げ試験における荷重-変位曲線の測定値、Fig. 6 に砕砂混入率がスランプおよび各種力学的特性に及ぼす影響をそれぞれ示す。

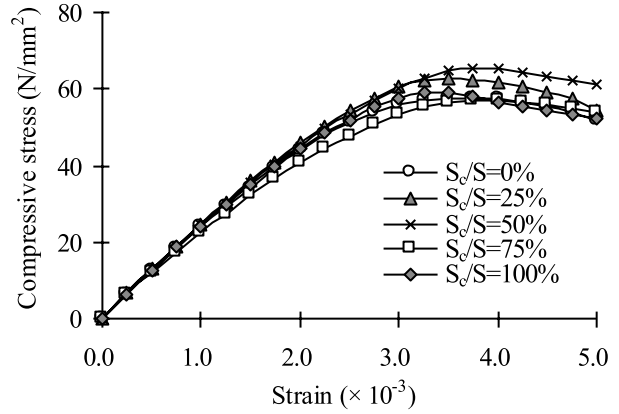


Fig. 4 Compressive stress - strain curves measured (Experiment B)

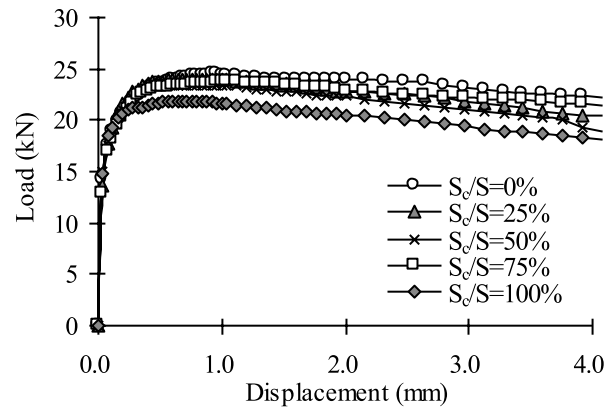


Fig. 5 Load - displacement curves measured (Experiment B)

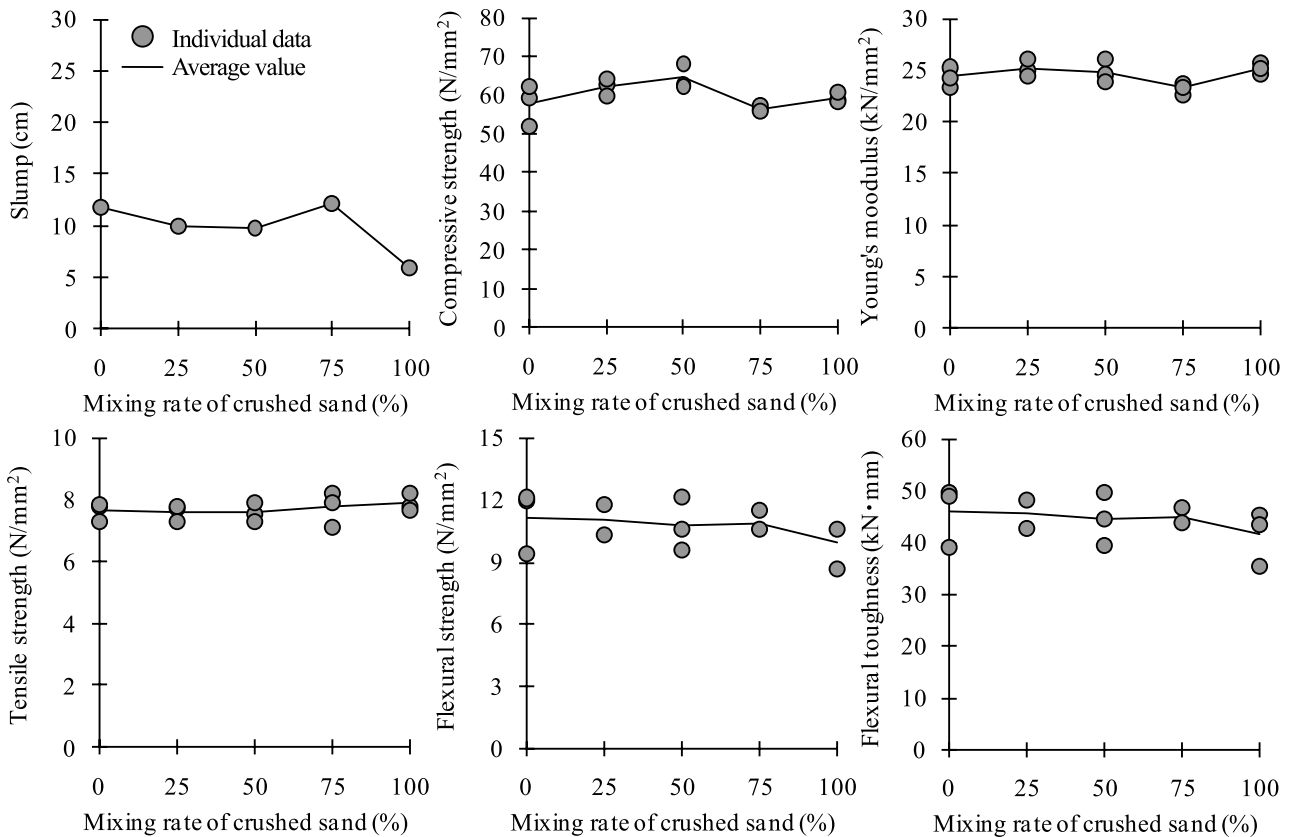


Fig. 6 Influences of mixing rate of crushed sand on slump and various mechanical characteristics (Experiment B)

スランブは、 $S_c/S=100\%$ において低下しているが、 $S_c/S=75\%$ までであれば顕著な差異は見られず、いずれも10cm前後の、プレキャストコンクリートへの適用を想定する上で十分なスランブが得られていることが判る。

圧縮強度、ヤング係数および割裂引張強度に関しては、砕砂混入率の変化に伴う大きな変動は認められず、ほぼ一定の値を保持している。曲げ強度および曲げタフネスに関して、 $S_c/S=75\%$ 以下では砕砂混入率の変化に関わらずほぼ一定の値を保持しているが、 $S_c/S=100\%$ において若干低下しており、上述のスランブと概ね同様の傾向を示していることが判る。

以上の結果より、砕砂混入率 $S_c/S=75\%$ 程度までであれば、細骨材として砕砂を用いても、川砂のみを使用した場合と同等のスランブおよび各種力学的特性を有する PEFRC が得られることが判った。

3.3 繊維の分散状態の間接的評価

繊維補強コンクリートのように短繊維を分散混入する繊維強化複合材料の引張破壊は、繊維数が最も少ない部分で進行するために、繊維をマトリックス中に均等に分散させることが重要となる⁵⁾。高性能 AE 減水剤添加率や砕砂混入率を変化させた際、マトリックスのコンシステンシーが変化することに起因して、PEFRC 中の繊維の分散状態に変動が生じている可能性が考えられた。そこで、ここでは、繊維の様な分散が損なわれた場合、上述の理由により供試体破断面を架橋する繊維数が減少するものと想定し、曲げ供試体破断面における架橋繊維数の測定を行った。なお、検討対象としたいずれの調査においても繊維破断の形跡は認められておらず、繊維引き抜けが PEFRC の曲げ破壊を支配しているものと考えられたため、本実験では、相対する破断面に突出した繊維数をそれぞれ計上し、その合計を架橋繊維数とした。

Fig. 7 に架橋繊維数の測定結果を示す。なお、図中には、前掲の曲げタフネスの測定結果も再掲している。

同図より、フレッシュ PEFRC のスランブが小さい調査において曲げ供試体破断面における架橋繊維数が減少し、同時に曲げタフネスも低下する傾向にあることが判る。このことから、高性能 AE 減水剤の添加量不足や砕砂の全面的な使用によりマトリックスのコンシステンシーが増大した場合、繊維の様な分散が損なわれることに起因して、曲げタフネスで示される繊維補強効果が低下する傾向にあるものと推察される。

なお、材料分離を生じた実験 A の $Sp/B=0.75, 1.00\%$ の調査においても、スランブ増加に伴い架橋繊維数が増大する傾向が認められるが、これは、結合材ペーストの分離により繊維の配向状態が2次元ランダム配向に近い状態となったためであることが予想される。

4. まとめ

本研究では、製造条件の制約に伴う使用材料等の変動を想定し、高性能 AE 減水剤添加率および細骨材とし

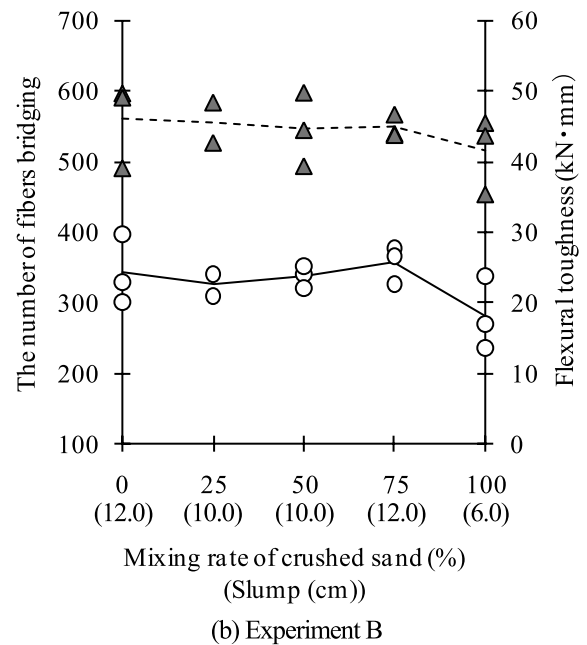
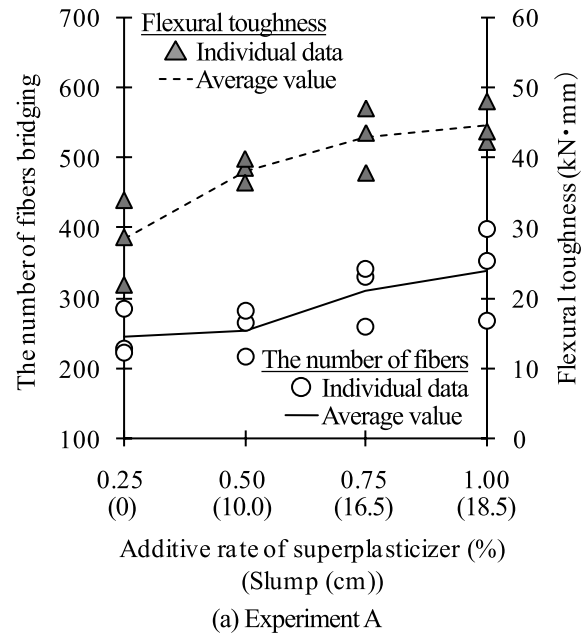


Fig. 7 The number of fibers bridging at the fracture face

での砕砂の使用が PEFRC のスランブおよび各種力学的特性に及ぼす影響について実験的検討を行った。本研究の範囲内で得られた知見を要約すると、以下のようになる。

- (1) 高性能 AE 減水剤の過剰添加により材料分離が生じて、曲げタフネスで示される繊維補強効果が低下する危険性は小さく、むしろ添加量不足により硬練りとなった場合に硬化 PEFRC の曲げタフネスが低下する危険性が示された。
- (2) 細骨材として全面的に砕砂を用いた場合においてフレッシュ PEFRC のスランブが低下し、同時に硬化 PEFRC の曲げタフネスも若干低下する傾向が見られたが、砕砂混入率 $S_c/S=75\%$ 程度までであ

れば、川砂のみを使用した場合と同等のスランプおよび各種力学的特性を有する PEFRC が得られることが判った。

- (3) 両実験シリーズにおいて、特にフレッシュ PEFRC のスランプが小さい調合で供試体破断面における架橋繊維数が減少し、これに伴い PEFRC の曲げタフネスが低下する傾向が認められた。このことから、マトリックスのコンシステンシーの変化に伴う繊維の分散状態の変化が硬化 PEFRC の曲げタフネスに影響しているものと考えられた。

但し、以上の知見は供試体寸法等に影響されることが予想され、今後検討する必要がある。

謝辞：

実験にあたり、熊本大学の三井宜之名誉教授、甲斐定夫技術専門職員ならびに建築材料・施工研究室の皆様は多大なご協力を賜りました。また、ポリエチレン繊維は東洋紡績(株)よりご提供いただきました。ここに記して

謝意を表します。

参考文献：

- 1) 村上聖ほか：合成繊維補強コンクリートの最適調合と各種力学的特性、セメント・コンクリート論文集、No. 54、pp. 737-743 (2001)
- 2) 村上聖ほか：新素材繊維補強コンクリートの開発研究、セメント・コンクリート論文集、No. 55、pp. 551-556 (2002)
- 3) 山口信ほか：繊維タイプがポリエチレン繊維補強コンクリートの力学的特性に及ぼす影響、セメント・コンクリート論文集、No. 57、pp. 464-470 (2004)
- 4) 武田浩二ほか：新素材繊維を用いた高靱性繊維補強コンクリートの開発研究、セメント・コンクリート論文集、No. 58、pp. 454-459 (2005)
- 5) 小林一輔：繊維補強コンクリート—特性と応用—、オーム社 (1984)

INFLUENCES OF ADDITIVE RATE OF SUPERPLASTICIZER AND USE OF CRUSHED SAND AS FINE AGGREGATE ON MECHANICAL CHARACTERISTICS OF POLYETHYLENE FIBER REINFORCED CONCRETE

Makoto YAMAGUCHI^{*1}, Kiyoshi MURAKAMI^{*2}, Koji TAKEDA^{*2} and Takayuki HIRAI^{*1}

*1 NIPPON BUNRI UNIVERSITY, Department of Architecture, Faculty of Engineering (1727, Ichigi, Oita-shi, Oita 870-0397, Japan)

*2 KUMAMOTO UNIVERSITY, Graduate School of Science and Technology, Environmental Science (2-39-1, Kurokami, Kumamoto-shi, Kumamoto 860-8555, Japan)

ABSTRACT : For practical use of polyethylene fiber reinforced concrete (PEFRC), it is necessary to understand influences of variety of materials for making PEFRC on consistency and various mechanical characteristics of the PEFRC. In this study, experimental investigations were conducted regarding influences of additive rate of superplasticizer (S_p/B) and mixing rate of crushed sand (S_c/S) on slump of fresh PEFRC and various mechanical characteristics of hardened PEFRC. As a result, the following conclusions could be derived : 1) Flexural toughness of the hardened PEFRC increased with increasing in S_p/B , in spite of occurrence of segregation. In $S_p/B=0.25\%$, slump of the fresh PEFRC became zero, and flexural toughness of the hardened PEFRC considerably decreased as compared with that in $S_p/B=0.50\%$ (standard additive rate). 2) Both slump of the fresh PEFRC and flexural toughness of the hardened PEFRC kept constant within the range of $S_c/S=0-75\%$, however they slightly decreased in $S_c/S=100\%$. 3) In both experiments, the number of fibers bridging at the fracture face decreased in mix proportion of which slump was low, such as $S_p/B=0.25\%$ and $S_c/S=100\%$. Therefore, flexural toughness of the hardened PEFRC might be influenced by variety of fiber distribution due to variety of consistency of matrix.

KEY WORDS : Polyethylene fiber reinforced concrete, Superplasticizer, Crushed sand, Slump, Mechanical characteristics