

論文 ビニロン及びポリプロピレン繊維補強ポーラスコンクリートの力学的性質

有岡 大輔*1・齋藤 俊克*2・出村 克宣*3

要旨: 本研究では、ビニロン及びポリプロピレンの短繊維を用いた繊維補強ポーラスコンクリートの力学的性質について検討している。その結果、いずれの目標空隙率及び繊維混入率においても、ビニロン繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮及び曲げ強度並びに曲げタフネスは、ポリプロピレン繊維を用いたものそれらに比べて相当に大きい。又、ビニロン繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮及び曲げ強度は、繊維混入率0.5%までの増加に伴って増大し、その後減少する傾向にある。しかしながら、ポリプロピレン繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮及び曲げ強度は、繊維混入率の増加に伴って減少する傾向にある。

キーワード: 繊維補強ポーラスコンクリート, ビニロン繊維, ポリプロピレン繊維, 強度, 曲げタフネス

1. はじめに

ポーラスコンクリートは、骨材が点接着した組織構造を有しており、一般に、普通セメントコンクリートに比べて、強度が低いことが指摘されている。そのため、ポーラスコンクリートの用途拡大のためには、その強度を改善することが重要である。又、コンクリートは、一度ひび割れを生じると構造体としての機能を失うという欠点を持っている¹⁾。近年、これらの欠点を改善するために、繊維補強コンクリートの研究開発が行われている。繊維補強コンクリートは、短繊維を三次元に配向して製造され、スラブなどの構造部材や舗装に利用される²⁾。用いられる繊維の種類としては、無機繊維として、鋼、石綿、ガラス、炭素など、有機繊維として、アラミド、ポリプロピレン、ビニロンなどが挙げられる。従って、ポーラスコンクリートについても、短繊維を用いて補強を施すことにより、その用途を拡大することが可能であると考えられる。従来の繊維補強コンクリートにおいては、前述した繊維のうち鋼繊維の利用が盛んである。しかし、ポーラスコンクリートは連続した空隙を有することから、鋼繊維を用いる場合には腐食が発生するものと考えられる。又、ポーラスコンクリートは組織が剛であることから、柔らかい繊維では補強効果が得られないことなどが考えられる。そのため、ポーラスコンクリートの補強には、セメント混和用合成繊維であるビニロン及びポリプロピレン短繊維が有用であると考えられる。

本研究では、ビニロン及びポリプロピレンの短繊維を用いた繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮及び曲げ強度並びに、曲げ変形能力について検討する。

2. 使用材料

2.1 セメント

セメントとしては、JIS R 5210(ポルトランドセメント)に規定される普通ポルトランドセメントを使用した。その性質を **Table 1** に示す。

2.2 骨材

細骨材としては阿武隈川産川砂を、粗骨材としては砂岩砕石を使用した。それらの性質を **Table 2** 及び **Table 3** に示す。

Table 1 Physical Properties and Chemical Compositions of Ordinary Portland Cement.

Density (g/cm ³)	Blaine Specific Surface (cm ² /g)	Setting Time (h-min)		
		Initial Set	Final Set	
3.16	3310	2-17	3-15	
Compressive Strength of Mortar (MPa)				
3d		7d		
30.7		45.6		
		28d		
		61.3		
Chemical Compositions (%)				
MgO	SO ₃	ig. loss	Total Alkali	Chloride Ion
1.44	2.05	1.70	0.54	0.011

Table 2 Properties of Fine Aggregate.

Size (mm)	Density (g/cm ³)	Water Absorption (%)
≤2.5	2.57	2.32

Table 3 Properties of Coarse Aggregate.

Size (mm)	Density (g/cm ³)	Water Absorption (%)
5~15	2.64	1.13

*1 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 日本大学 工学部建築学科助手 博士 (工学) (正会員)

*3 日本大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

2.3 練混ぜ水及び混和剤

練混ぜ水としては、水道水を使用した。又、混和剤としてはポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤を使用した。その性質を **Table 4** に示す。

2.4 補強用短繊維

補強用短繊維としては、セメントコンクリート補強用として市販されている繊維長さ 30mm のビニロン及びポリプロピレン繊維を使用した。それらの性質を **Table 5** に示す。

3. 試験方法

3.1 単位容積質量及び実積率試験

JIS A 1104 (骨材の単位容積質量及び実積率試験方法) に従って、短繊維と粗骨材の混合物について、単位容積質量及び実積率試験を行った。なお、試験は、単位体積当りの繊維混入率 (体積分率) を 0, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5 及び 2.0% と変化させて行った。

3.2 供試体の作製

JCI-SPO1-1 [ポーラスコンクリートの供試体の作り方 (案)] に従って、**Table 6** に示す調合で、繊維補強ポーラスコンクリートを練り混ぜ、寸法 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 及び $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ に成形した。その後、JCI-SE4 [温水法 (70°C) によるコンクリートの促進強度試験方法] に従

い、24h 湿空、24h 温水 (70°C) 及び 1h 水中 (20°C) 養生を行って、供試体を作製した。なお、調査については、これまでに提案している調査設計法³⁾ に準じて、次のように決定したものである。まず、所要の繊維混入率とした短繊維と粗骨材の混合物について実積率を求め、更に、繊維の混入及びセメントモルタルの付着による空隙率の補正を行った上で、目標空隙率が得られるように、結合材としてのセメントモルタル混入率を決定した。又、結合材としてのセメントモルタルは、フロー値を 230 ± 20

Table 4 Properties of Air-Entraining and High-Range Water- Reducing Admixture.

Appearance	Density (g/cm ³)	Alkaline Content (%)	Chloride Ion Content (%)
Dark Reddish-Brown Liquid	1.040~1.060	0.9	<0.01

Table 5 Physical Properties of Fibers.

Type of Fiber	Fiber Length (mm)	Average Diameter (mm)	Density (g/cm ³)	Tensile Strength (MPa)	Elastic Modulus in Tension (GPa)
Vinylon	30	0.66	1.30	880	29.4
PP*		0.70	0.91	530	10.5

Note, * : Polypropylene.

Table 6 Mix Proportions of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

Type of Fiber	W/C (%)	Fiber Length (mm)	Target Voids (%)	Mix Proportions (kg/m ³)				AE-WRA* (%)	Fiber Content** (%)	Continuous Voids (%)	Total Voids (%)	
				Water	Cement	Fine Aggregate	Coarse Aggregate					
Vinylon	22.5	30	15	92	410	258	1393	1.1	0	15.8	16.4	
				95	422	265	1359		0.3	15.2	15.7	
				97	431	271	1337		0.5	15.4	15.9	
				102	452	284	1280		1.0	15.8	16.3	
				81	359	226	1368		0	20.3	20.6	
				84	370	233	1335		0.3	20.7	21.4	
			20	85	378	238	1315		0.5	19.0	19.7	
				90	398	250	1260		1.0	20.7	21.6	
				25	70	309	194		1339	0	24.2	25.2
					72	319	201		1309	0.3	23.9	24.6
					74	327	205		1288	0.5	24.2	25.1
				77	345	217	1238		1.0	24.7	25.1	
PP***	22.5	30	15	92	410	258	1393	1.1	0	15.8	16.4	
				87	385	243	1435		0.3	15.3	16.6	
				88	393	247	1416		0.5	15.9	16.3	
				92	411	259	1365		1.0	15.7	16.2	
				81	359	226	1368		0	20.3	20.6	
				75	335	211	1409		0.3	21.8	21.9	
			20	77	341	215	1390		0.5	21.6	22.5	
				80	358	226	1342		1.0	20.2	20.3	
				25	70	309	194		1339	0	24.2	25.2
					64	285	179		1382	0.3	25.3	25.5
					66	290	182		1364	0.5	24.8	25.9
				69	306	192	1318		1.0	25.4	26.4	

Notes, * : Air entraining and high-range water-reducing admixture content to cement by mass.

** : Fiber content in concrete by volume.

*** : Polypropylene.

に調整したものである。

3.3 圧縮強度試験

JCIエココンクリート研究委員会の[ポーラスコンクリートの圧縮強度試験方法(案)]⁴⁾に従って、供試体の圧縮強度試験を行った。

3.4 曲げ試験

JCI-SF4(繊維補強コンクリートの曲げ強度及び曲げタフネス試験方法)に準じて、供試体の曲げ試験を行った。その際、供試体中央部のたわみを測定し、曲げタフネスを算出した。

3.5 空隙率試験

JCI-SPO2-1[ポーラスコンクリートの空隙率試験方法(案)]の「7.1容積法を用いる場合」及び「付属書(参考)角柱供試体」に準じて、曲げ試験後の供試体の切片を寸法10×10×10cmに切断したものを供試体として、空隙率試験を行い、連続及び全空隙率を算出した。

4. 試験結果及び考察

Fig.1には、短繊維と粗骨材の混合物の実積率と繊維混入率の関係を示す。繊維の種類にかかわらず、繊維と粗骨材の混合物の実積率は、繊維混入率の増加に伴って減少する傾向にある。又、ポリプロピレン繊維と粗骨材の混合物に比べて、ビニロン繊維を用いたものの実積率は小さく、繊維混入率の増加に伴う低下の程度も大きい。これは、ビニロン繊維は弾性係数が高く硬質であり、粗骨材が充填しにくいことに起因するものと推察される。又、繊維の種類にかかわらず、繊維混入率と繊維と粗骨材の混合物の実積率の間には高い相関性が認められ、それらの関係は次に示す一般式(1)で表すことができる。

$$y = ax + b \quad (1)$$

ここに、 y : 短繊維と粗骨材の実積率 (%)

x : 繊維混入率 (%)

a 及び b : 実験定数

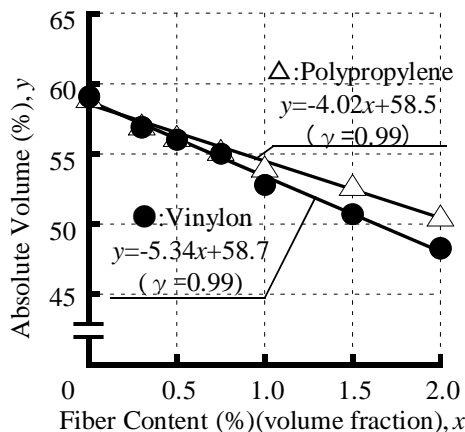


Fig.1 Fiber Content vs. Percentage of Absolute Volume of Fiber-Coarse Aggregate Mixtures.

Fig.2には、ビニロン及びポリプロピレン繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮強度と繊維混入率の関係を示す。ビニロン繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮強度は、一部のものを除いて、繊維混入率0.5%までの増加に伴って増大し、その後、減少する傾向にある。これは、繊維混入率の増加に伴う短繊維と粗骨材の混合物の実積率の低下により、結合材としての単位セメントモルタル量が増大することによるものと考えられる。しかしながら、繊維混入率1.0%になると、短繊維の粗骨材間に占める割合が多くなり、マトリックスとしてのセメントモルタルの充填が不均質になって、圧縮強度の低下が生じるものと推察される。一方、目標空隙率にかかわらず、ポリプロピレン繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮強度は、一部のものを除いて、繊維混入率の増加に伴って減少する傾向にある。これは、形状が波形であるポリプロピレン繊維の場合、練り混ぜ時にファイバールができやすく、ポーラスコンクリート中に適当に分散しなかったためと考えられる。又、繊維混入率にかかわらず、ビニロン繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮強度は、ポリプロピレン繊維補強ポーラスコンクリートのそれより大きい。これは、ビニロン繊維がポリプロピレン繊維に比べて、弾性係数が大きいこと及びセメントマトリックスとの付着性が良好なことに起因するものと推察される。

Fig.3には、ビニロン及びポリプロピレン繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮強度と全空隙率の関係を示す。繊維の種類及び繊維混入率にかかわらず、繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮強度は全空隙率の増加に伴って減少する傾向にある。これは、全空隙率の増加に伴い、繊維補強ポーラスコンクリートの結合材としての単位セメントモルタル量が減少することに起因するものと推察される。

Fig.4には、ビニロン及びポリプロピレン繊維補強ポー

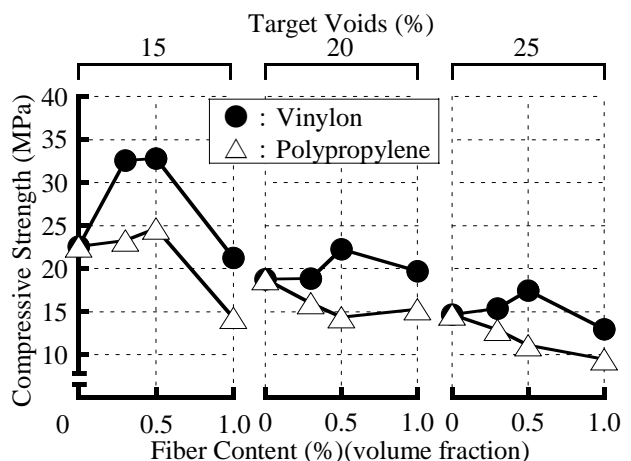


Fig.2 Fiber Content vs. Compressive Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

ラスコンクリートの曲げ荷重-たわみ曲線を示す。いずれの目標空隙率とした場合でも、無補強ポーラスコンクリート（繊維混入率 0%）の曲げ荷重-たわみ曲線は、最大曲げ荷重まで荷重が直線的に増大して破壊に至る

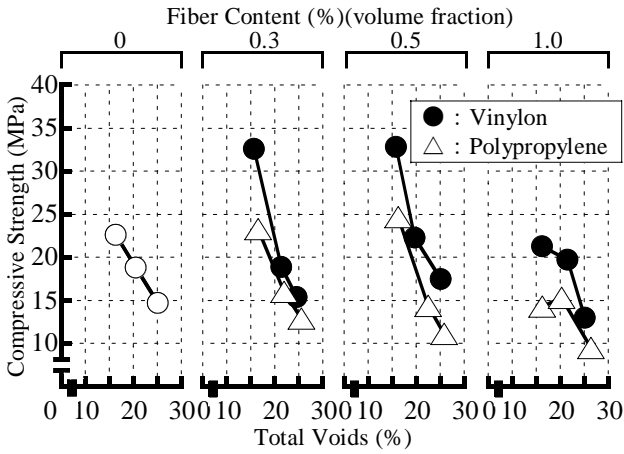


Fig.3 Percentage of Total Voids vs. Compressive Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

という脆性的な挙動を示す。しかしながら、ビニロン及びポリプロピレン繊維補強ポーラスコンクリートの曲げ荷重-たわみ曲線は、最大曲げ荷重を示した後、荷重が緩慢に減少する履歴を示す。又、目標空隙率にかかわらず、繊維混入率 0.5%までの増加に伴って、繊維補強ポーラスコンクリートの最大曲げ荷重は増大し、最大荷重後の荷重低下が少ない傾向にある。なお、最大曲げ荷重後の曲げ荷重-たわみ曲線が直線的な挙動を示している。繊維補強ポーラスコンクリートにおいては、骨材が点接着した組織を形成しており、その骨材間に繊維が付着した状態にあるため、結合材としてのセメントモルタルに対する繊維の付着面積が小さいことが考えられる。従って、最大曲げ荷重以降において、繊維と結合材との摩擦による引抜け効果が得られず、曲げ荷重-たわみ関係は直線的に示されるものと考えられる⁵⁾。なお、繊維補強ポーラスコンクリートの最大曲げ荷重後の挙動に及ぼす繊維の種類の影響は認められない。

Fig.5 には、ビニロン及びポリプロピレン繊維補強ポー

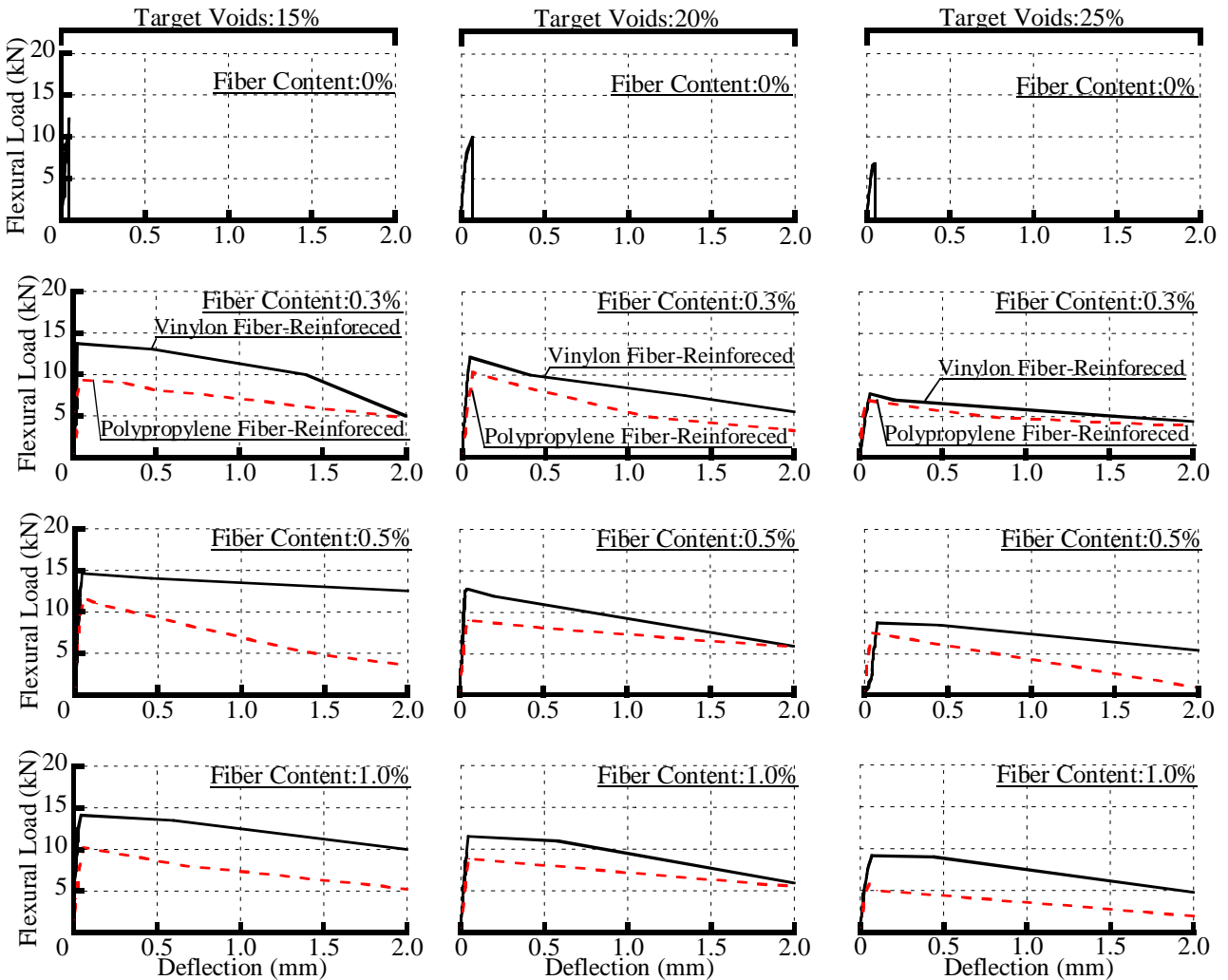


Fig. 4 Flexural Load-Deflection Curves for Fiber-Reinforced Porous Concretes.

Notes, —: Curves show Vinylon Fiber-Reinforced Porous Concretes.

- - -: Curves show Polypropylene Fiber-Reinforced Porous Concretes.

ラスコンクリートの曲げ強度と繊維混入率の関係を示す。ビニロン繊維補強ポーラスコンクリートの曲げ強度は、一部のものを除いて、繊維混入率 0.5% までの増加に伴って増大し、その後、減少する傾向にある。これは、繊維の混入による曲げ補強効果並びに、圧縮強度の場合と同様に、単位セメントモルタル量の増大がもたらす短繊維と粗骨材間の付着性の改善によるものと考えられる。しかしながら、目標空隙率にかかわらず、ポリプロピレン繊維補強ポーラスコンクリートの曲げ強度は、一部のものを除いて、繊維混入率の増加に伴って減少する傾向にある。ポリプロピレン繊維補強ポーラスコンクリートの曲げ強度の減少は、圧縮強度で述べたように、均質な組織構造の形成不良によるためと推察される。又、繊維混入率にかかわらず、ビニロン繊維補強ポーラスコンクリートの曲げ強度は、ポリプロピレン繊維補強ポーラスコンクリートのそれらより大きい。

Fig.6 には、ビニロン及びポリプロピレン繊維補強ポーラスコンクリートの曲げタフネスと繊維混入率の関係を示す。繊維の種類及び目標空隙率にかかわらず、無補

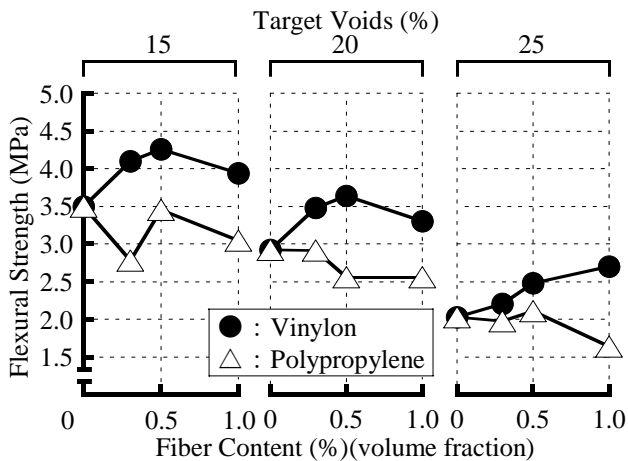


Fig.5 Fiber Content vs. Flexural Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

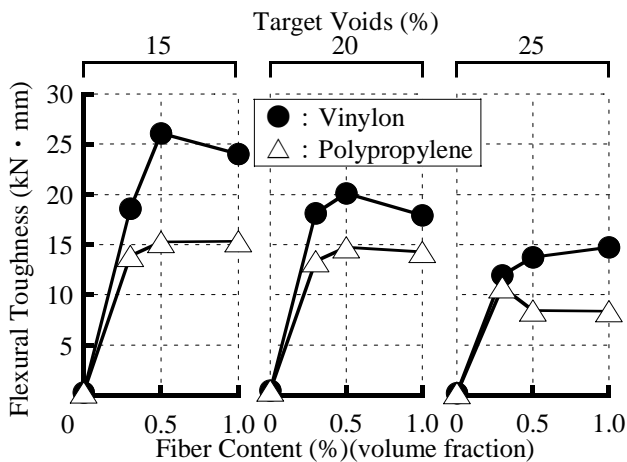


Fig.6 Fiber content vs. Flexural Toughness of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

強ポーラスコンクリートの曲げタフネスは 0 に近い値であるのに対して、繊維混入率 0.3% 以上とした繊維補強ポーラスコンクリートのそれは著しく大きな値を示す。このことから、繊維補強によって、ポーラスコンクリートの曲げタフネスは著しく改善されることが明らかである。しかし、一部のものを除いて、0.5% までの繊維混入率の増加に伴って、ビニロン及びポリプロピレン繊維補強ポーラスコンクリートの曲げタフネスは増大するが、その後、一定又は減少する傾向にある。このことから、繊維補強ポーラスコンクリートにおいては、過剰に繊維混入率を増加しても、曲げタフネスの改善に寄与しないといえる。又、いずれの目標空隙率及び繊維混入率においても、ビニロン繊維補強ポーラスコンクリートの曲げタフネスは、ポリプロピレン繊維補強ポーラスコンクリートのそれに比べて相当に大きい傾向にある。これは、ポリプロピレン繊維を用いたものに比べて、ビニロン繊維補強ポーラスコンクリートの最大曲げ荷重が大きい傾向にあり、最大曲げ荷重後のたわみの減少傾向がほぼ同様か若干小さいことによるものと推察される。

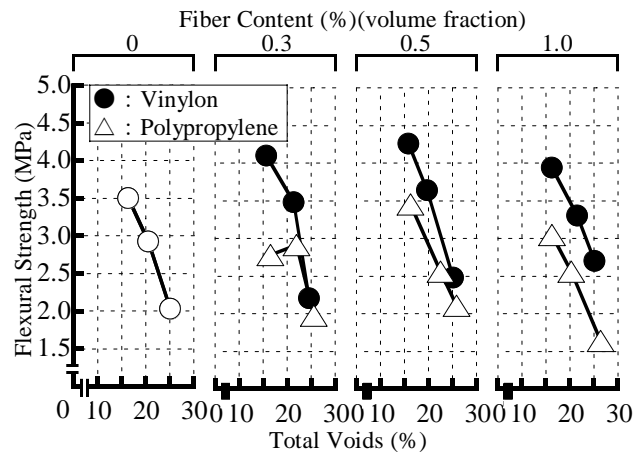


Fig.7 Percentage of Total Voids vs. Flexural Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

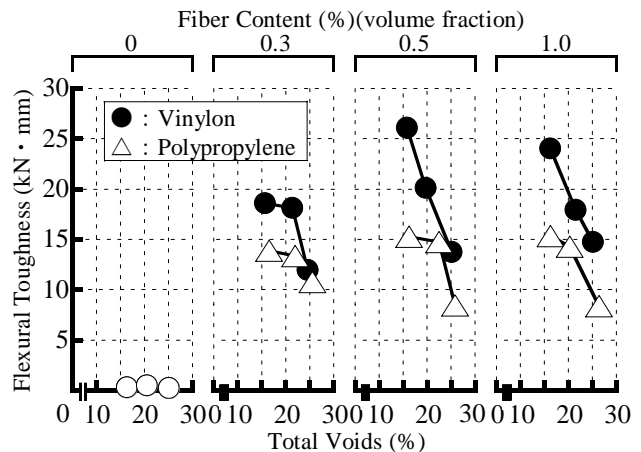


Fig.8 Percentage of Total Voids vs. Flexural Toughness of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

Fig.7 及び Fig.8 には、ビニロン及びポリプロピレン繊維補強ポーラスコンクリートの曲げ強度及び曲げタフネスと全空隙率の関係を示す。圧縮強度の場合と同様に、繊維の種類及び繊維混入率にかかわらず、繊維補強ポーラスコンクリートの曲げ強度及び曲げタフネスは全空隙率の増加に伴って減少する傾向にある。

5. 結論

本研究で得られた試験結果を総括すれば、以下の通りである。

- (1) 用いる繊維の種類にかかわらず、短繊維と粗骨材の混合物の実積率は、繊維混入率の増加に伴い減少する傾向にあり、それらの関係は、一般式 (1) で表すことができる。又、ビニロン繊維と粗骨材の混合物の実積率は、ポリプロピレン繊維を用いたもののそれに比べて小さい。
- (2) 目標空隙率にかかわらず、繊維混入率 0.5% までの増加に伴って、繊維補強ポーラスコンクリートの最大曲げ荷重は増大し、最大荷重後の荷重低下が緩慢に生じる傾向にある。又、繊維補強ポーラスコンクリートの最大曲げ荷重後の挙動に及ぼす繊維の種類の影響は認められない。
- (3) ビニロン繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮及び曲げ強度は、繊維混入率 0.5% までの増加に伴って増大し、その後減少する傾向にある。しかしながら、ポリプロピレン繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮及び曲げ強度は、繊維混入率の増加に伴って減少する傾向にある。又、ビニロン及びポリプロピレン繊維補強ポーラスコンクリートの曲

げタフネスは、繊維混入率 0.5% までの増加に伴って増大し、その後減少する傾向にある。

- (4) いずれの目標空隙率及び繊維混入率においても、ビニロン繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮及び曲げ強度並びに曲げタフネスは、ポリプロピレン繊維を用いたもののそれらに比べて相当に大きい。

謝辞

本研究の一部は、平成 20 年度科学研究費補助金特別研究員奨励費 (研究代表者: 齋藤俊克) の助成を受けた。ここに記して、謝意を表す。

参考文献

- 1) 小林一輔, 田澤栄一: 最新コンクリート技術選書 9 (繊維補強コンクリート・ポリマーコンクリート), 山海堂, p.1, 1980.4
- 2) 真嶋光保, 幸左賢二, 大野定俊: 繊維補強セメント/コンクリート複合材料, 技報堂出版, 203p, 1994.5
- 3) 齋藤俊克, 出村克宣: ビニロン繊維補強ポーラスコンクリートの調合設計法に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), A-1 材料施工, pp.1013-1014, 2006
- 4) 日本コンクリート工学協会編: エココンクリート研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, p.58, 1995
- 5) 齋藤俊克, 出村克宣, 浅里和茂: ビニロン繊維補強ポーラスコンクリートの曲げ性状, セメント・コンクリート論文集, No.61, pp.456-461, 2008.2