

# 論文 ビニロン繊維補強ポーラスコンクリートの力学的性質に及ぼす繊維長さ及び粗骨材最大寸法の影響

齋藤 俊克\*1・有岡 大輔\*2・出村 克宣\*3

**要旨:** 本研究では、ビニロン繊維補強ポーラスコンクリートの力学的性質に及ぼす繊維長さ及び粗骨材最大寸法の影響について検討している。その結果、粗骨材最大寸法を 20mm とした場合、長さ 40mm のビニロン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、曲げタフネスは、30mm を用いたものそれらに比べて大きい。又、粗骨材最大寸法 15 又は 20mm とした場合、繊維長さとして粗骨材最大寸法の比を一定とすれば、製造されるビニロン繊維補強ポーラスコンクリートの力学的性質は、ほぼ同程度となることが示唆される。

**キーワード:** 繊維補強ポーラスコンクリート、繊維長さ、粗骨材最大寸法、強度、曲げタフネス

## 1. はじめに

繊維補強コンクリートにおいて、小林は、コンクリート補強用繊維として鋼繊維を用いた場合、繊維混入率が大きくなるに従って、曲げ強度が粗骨材の最大寸法によって著しく変化し、繊維長さの 1/2 の最大寸法を持つ粗骨材を使用した時に、その曲げ強度が最大値を示すと報告している<sup>1)</sup>。又、河野らは、繊維長さを長くすることによってコンクリートにおける平均埋め込み長さが長くなるため、繊維の引き抜けに対する抵抗が大きくなり、曲げ強度が増大することを明らかにしている<sup>2)</sup>。しかしながら、繊維長さ/粗骨材最大寸法が 2 より大きくなるとコンクリートの曲げ強度が低下すると報告している<sup>2)</sup>。これらのことから、ポーラスコンクリートにおいても長さの異なる繊維を用いることによって力学的性質の変化が予想されるが、繊維補強を適用した研究が少なく<sup>3)</sup>、その力学的性質に及ぼす繊維長さ及び粗骨材最大寸法の影響について検討した研究報告は見当たらない。

そこで、本研究では、最大寸法 20mm の粗骨材を使用し、繊維長さを 40 及び 30mm としたビニロン繊維補強ポーラスコンクリート並びに、最大寸法 15mm の粗骨材を使用し、繊維長さを 30mm としたビニロン繊維補強ポーラスコンクリートを製造し、それらの圧縮強度、曲げ強度及び曲げタフネスに及ぼす繊維長さとして粗骨材最大寸法の影響について検討する。

## 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。なお、粗骨材については、最大寸法 20mm (Gmax20) のもの及びそれを最大寸法 15mm (Gmax15) となるようにふるい分けたものを使用した。

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

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine Specific Surface (cm <sup>2</sup> /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 <sub>3</sub>	ig. loss	Total Alkali
1.44	2.05	1.70	0.54
			Chloride Ion
			0.011

**Table 2 Properties of Fine Aggregate.**

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

**Table 3 Properties of Coarse Aggregate.**

Size (mm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Water Absorption (%)
5~20	2.64	1.13

### 2.3 練混ぜ水及び混和剤

\*1 日本大学 工学部建築学科助手 博士 (工学) (正会員)

\*2 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

\*3 日本大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

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 40 及び 30mm のビニロン繊維を使用した。その性質を Table 5 に示す。なお、繊維の形状は、モノフィラメント、ねじり無し、3:4 断面である。

### 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、繊維混入率を 0, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5 及び 2.0% と変化させて、長さ 40mm の繊維と最大寸法 20mm の粗骨材の混合物、長さ 30mm の繊維と最大寸法 20mm の粗骨材の混合物及び長さ 30mm の繊維と最大寸法 15mm の粗骨材の混合物について行った。

#### 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 及び Table 7 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、振動数 3200rpm のテーブルバイブレーターを用いて、寸法  $\phi$  15×30cm 及び 10×10×40cm に成形した。その後、調合 Table 6 の繊維補強ポーラスコンクリートについては、24h 湿空及び 27d 水中 (20°C) 養生を、調合 Table 7 の繊維補強ポーラスコンクリートについては、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)

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

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

**Table 5 Physical Properties of Fibers.**

Fiber Length (mm)	Average Diameter (mm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Tensile Strength (MPa)	Elastic Modulus in Tension (GPa)
40	0.66	1.30	880	29.4
30				

**Table 6 Mix Proportions of Fiber-Reinforced Porous Concretes (Part1).**

Gmax* (mm)	W/C (%)	Fiber Length (mm)	Target Voids (%)	Mix Proportions (kg/m <sup>3</sup> )				AE-WRA** (%)	Fiber Content*** (%)	Continuous Voids (%)	Total Voids (%)
				Water	Cement	Fine Aggregate	Coarse Aggregate				
20	22.5	40	15	83	370	232	1478	1.1	0	16.9	18.8
				89	394	248	1418		0.3	14.6	16.2
				92	410	258	1381		0.5	15.3	16.2
				102	452	284	1280		1.0	15.4	17.8
			72	319	201	1449	0		21.7	22.2	
			77	343	215	1393	0.3		20.8	22.1	
			81	358	225	1355	0.5		20.2	20.8	
			90	398	250	1260	1.0		21.6	23.9	
			61	270	169	1420	0		26.0	27.4	
			66	292	184	1366	0.3		24.0	26.1	
			69	306	193	1329	0.5		25.8	26.8	
			77	345	217	1238	1.0		24.8	25.3	
		83	370	232	1478	0	16.9		18.8		
		88	389	245	1428	0.3	16.0		17.7		
		89	397	249	1408	0.5	19.4		20.0		
		93	416	262	1355	1.0	17.8		21.3		
		72	319	201	1449	0	21.7		22.2		
		76	338	212	1403	0.3	19.7		20.2		
		77	345	217	1384	0.5	22.0		23.6		
		81	363	228	1333	1.0	22.9		23.5		
		61	270	169	1420	0	26.0		27.4		
		65	287	181	1375	0.3	25.3		25.3		
		66	294	185	1357	0.5	26.8		27.3		
		70	311	195	1309	1.0	24.6		25.1		
30	20	25	61	270	169	1420	0	26.0	27.4		
			65	287	181	1375	0.3	25.3	25.3		
			66	294	185	1357	0.5	26.8	27.3		
			70	311	195	1309	1.0	24.6	25.1		

Notes, \* : Maximum size of coarse aggregate.

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

\*\*\* : Fiber content in concrete by volume.

Table 7 Mix Proportions of Fiber-Reinforced Porous Concretes (Part2).

Gmax* (mm)	W/C (%)	Fiber Length (mm)	Target Voids (%)	Mix Proportions (kg/m <sup>3</sup> )				AE-WRA** (%)	Fiber Content*** (%)	Continuous Voids (%)	Total Voids (%)
				Water	Cement	Fine Aggregate	Coarse Aggregate				
20	22.5	40	15	83	370	232	1478	1.1	0	15.0	15.7
				89	394	248	1418		0.3	14.9	16.2
				92	410	258	1381		0.5	17.1	18.1
			102	452	284	1280	1.0		18.0	18.6	
			72	319	201	1449	0		19.6	21.8	
			77	343	215	1393	0.3		20.0	22.7	
	20	20	20	81	358	225	1355		0.5	19.5	20.5
				90	398	250	1260		1.0	20.8	23.0
				61	270	169	1420		0	25.5	25.7
			25	66	292	184	1366		0.3	24.5	25.7
			69	306	193	1329	0.5		24.1	25.3	
			77	345	217	1238	1.0		22.1	23.4	
15	22.5	30	15	92	410	258	1393	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	20	20	85	378	238	1315	0.5	19.0	19.7	
				90	398	250	1260	1.0	20.7	21.6	
				70	309	194	1339	0	24.2	25.2	
			25	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		

Notes, \* : Maximum size of coarse aggregate.

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

\*\*\* : Fiber content in concrete by volume.

養生を行って、供試体を作製した。なお、調合は、短繊維と粗骨材の混合物について得られた実積率をもとに、これまでに提案している調合設計法<sup>5)</sup>に準じて決定したものである。又、結合材としてのセメントモルタルは、フロー値を 230±20 に調整したものである。なお、繊維補強ポーラスコンクリートは、ミキサーで繊維と粗骨材を空練りした後に、結合材としてのセメントモルタルを投入し練り混ぜたものである。

### 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)]<sup>6)</sup> 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 (繊維/粗骨材混合物) の実積率と繊維混入率の関係を示す。粗骨材最大寸法及び繊維長さにかかわらず、繊維混入率の増加に伴い、繊維/粗骨材混合物の実積率は減少する傾向にある。又、粗骨材最大寸法 20mm とした繊維/粗骨材混合物の場合、繊維長さ 30mm としたものに比べて、繊維長さ

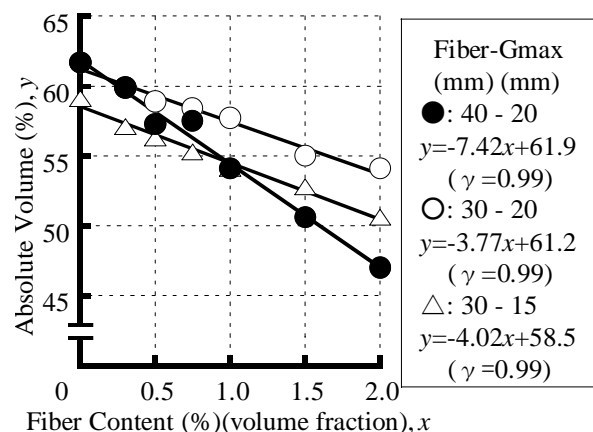


Fig.1 Fiber Content vs. Percentage of Absolute Volume of Fiber-Coarse Aggregate Mixtures.

40mm としたもののほうが繊維混入率の増加に伴う実積率の低下の程度が大きい傾向にある。一方、繊維混入率にかかわらず、繊維長さ 30mm とした繊維／粗骨材混合物においては、粗骨材最大寸法 20mm としたものに比べて、粗骨材最大寸法 15mm としたものの実積率は小さい傾向にある。これらのことから、粗骨材最大寸法に対する繊維長さの割合が大きくなると、粗骨材の充填性が損なわれ、繊維混入率が大きくなるほどその影響が顕著になるといえる。

Fig.2 及び Fig.3 には、粗骨材最大寸法 20mm とし、長さ 40 及び 30mm の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と繊維混入率の関係を示す。目標空隙率にかかわらず、繊維長さ 40mm とした繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮及び曲げ強度は、一部のものを除いて、繊維混入率 0.5% までの増加に伴い増大し、その後減少する傾向にある。繊維混入率の増加に伴う強度の改善は、繊維混入率の増加に伴う繊維／粗骨材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の増加に起因するものと考えられる。しかし、繊維が過剰に混入された場合には、粗骨材間に短繊維の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、強度が低下するものと推察される。しかしながら、繊維長さ 30mm とした繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮及び曲げ強度は、一部のものを除いて、繊維混入率の増加に伴い減少する傾向にあり、その傾向は圧縮強度において顕著である。これは、繊維長さ 30mm とした場合には、繊維混入率の増加に伴う繊維／粗骨材混合物の実積率の低下の程度が繊維長さ 40mm のものよりも小さいため、空隙率一定とした場合には、結合材としての単位セメントモルタル量の増加が繊維長さ 40mm のものよりも少ないことに起因するものと考えられる。

Fig.4 には、粗骨材最大寸法 20mm とし、長さ 40 及び 30mm の繊維を用いた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。目標空隙率にかかわらず、無補強ポーラスコンクリート（繊維混入率 0%）の曲げタフネスはほぼ 0 に近い値であるのに対して、繊維補強ポーラスコンクリートの曲げタフネスは相当に大きい値を示す。このことから、繊維補強することによって、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。なお、繊維長さ 40mm とした繊維補強ポーラスコンクリートにおいては、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、曲げタフネスは増大して最大値を示し、その後、ほぼ一定又は低下する傾向にある。繊維混入率 0.5% までの曲げタフネスの増大は、繊維混入率の増加に伴う結合材としての単位セメントモルタル量の増加が、繊維と粗骨材の

付着性を改善することに起因するものと考えられる。しかし、繊維混入率が過剰になると、粗骨材間に短繊維の

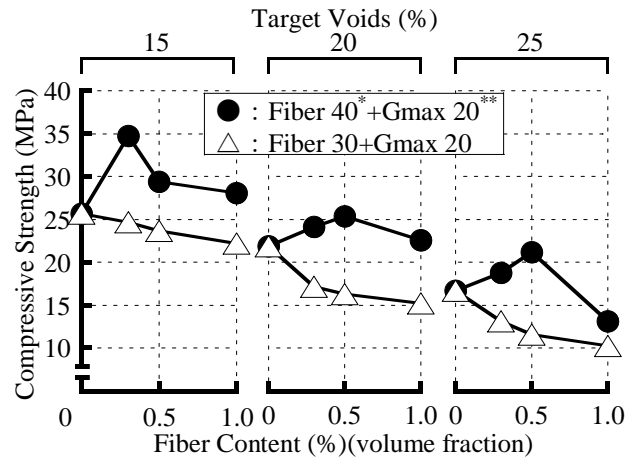


Fig.2 Fiber Content vs. Compressive Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

Notes, \* : Fiber length (mm).

\*\* : Maximum size of coarse aggregate (mm).

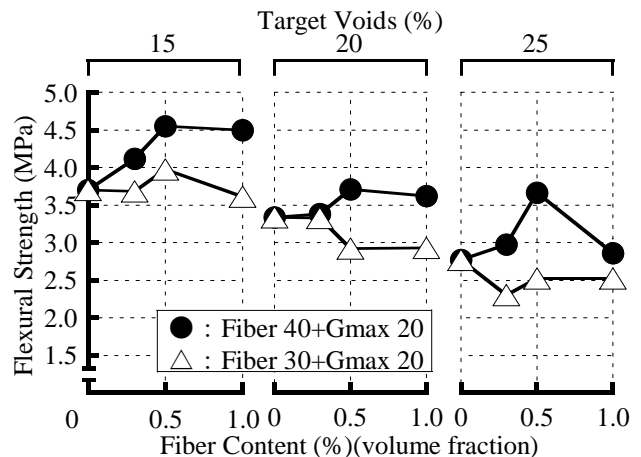


Fig.3 Fiber Content vs. Flexural Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

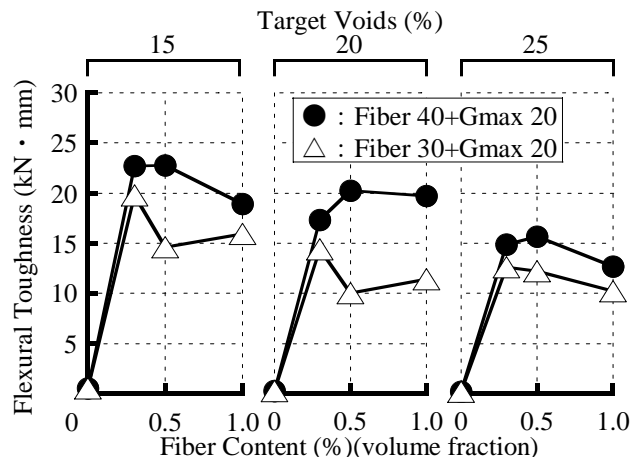


Fig.4 Fiber Content vs. Flexural Toughness of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

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、マトリックス部分の強度低下と共に、繊維と粗骨材間の良好な付着が損なわれるものと推察される。これらのことから、繊維補強ポーラスコンクリートにおいては、繊維混入率を過剰に増加しても、タフネスの改善には寄与しないといえる。一方、繊維混入率にかかわらず、繊維長さ 30mm とした繊維補強ポーラスコンクリートの曲げタフネスは、繊維長さ 40mm としたもののそれよりも小さく、繊維混入率 0.3% において最大値を示し、その後減少する傾向にある。これは、繊維長さ 40mm のものに比べて、繊維長さ 30mm の繊維補強ポーラスコンクリートにおいては、繊維の持つ粗骨材間の架橋効果が現れにくいと推察される。

Fig.5 から Fig.7 には、それぞれ、粗骨材最大寸法 20mm とし、長さ 40 及び 30mm の繊維を用いた繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮強度、曲げ強度及び曲げタフネスと全空隙率の関係を示す。繊維長さ及び繊維混入率にかかわらず、全空隙率の増加に伴って、繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮強度、曲げ強度及び曲げタフネスは著しく減少する傾向にある。当然のことながら、全空隙率の増加は繊維補強ポーラスコンクリート組織中に欠陥を生じさせることを意味しており、その結果、全空隙率の増加に伴ってこれらの力学的性質が低下するといえる。

以上の試験結果より、粗骨材最大寸法を一定とした場合、長さの長い繊維を用いた繊維補強ポーラスコンクリートにおいて優れた力学的性質を持つことが明らかとなった。

そこで、粗骨材最大寸法 20mm とし、長さ 40mm の繊維を用いた繊維補強ポーラスコンクリート並びに、粗骨材最大寸法 15mm とし、長さ 30mm の繊維を用いた繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮強度、曲げ強度及び曲げタフネスと繊維混入率の関係を Fig.8 から Fig.10 に示

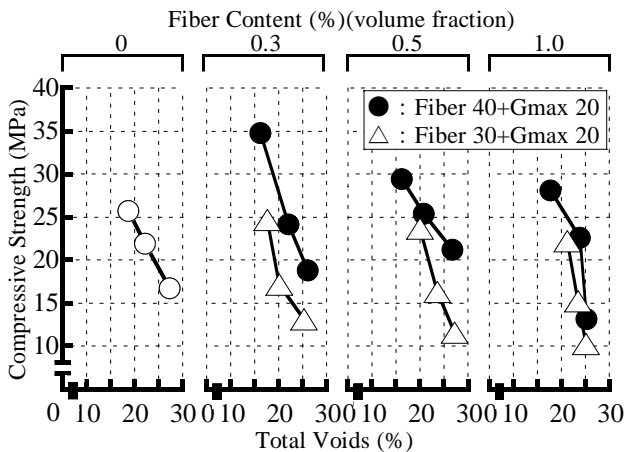


Fig.5 Percentage of Total Voids vs. Compressive Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

す。目標空隙率にかかわらず、一部のものを除けば、粗骨材最大寸法 20mm とし、長さ 40mm の繊維を用いた繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮強度、曲げ強度及び曲げタフネスは、粗骨材最大寸法 15mm とし、長さ 30mm の繊維を用いた繊維補強ポーラスコンクリートのそれ

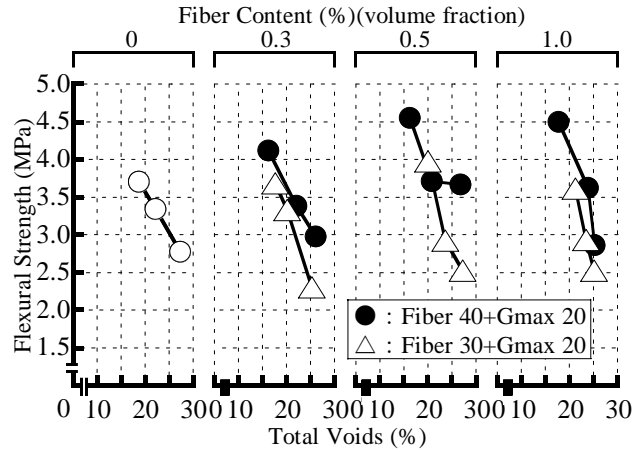


Fig.6 Percentage of Total Voids vs. Flexural Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

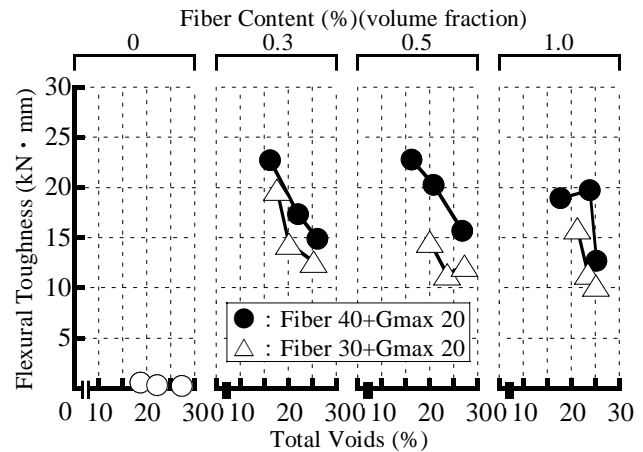


Fig.7 Percentage of Total Voids vs. Flexural Toughness of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

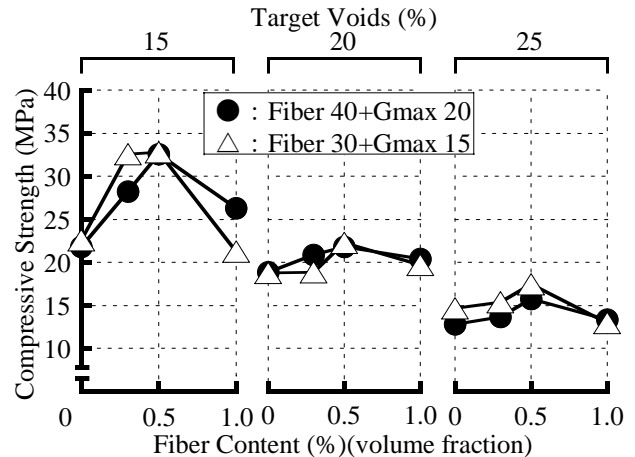


Fig.8 Fiber Content vs. Compressive Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

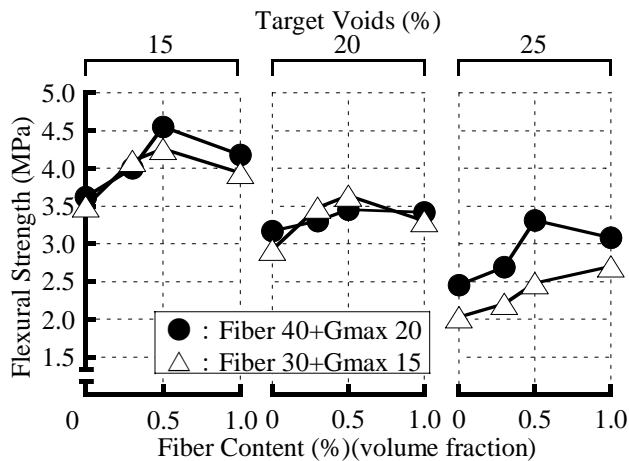


Fig.9 Fiber Content vs. Flexural Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

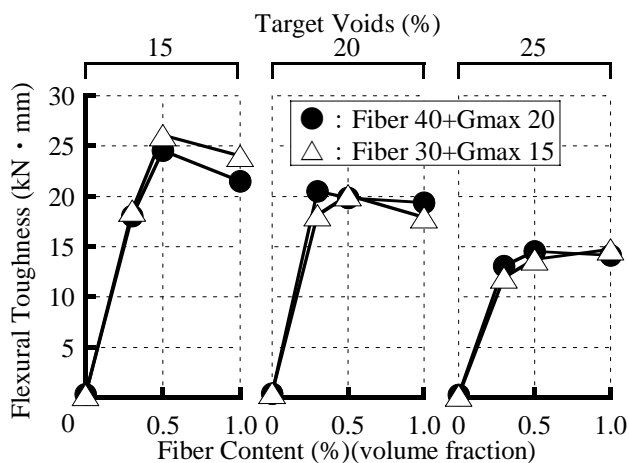


Fig.10 Fiber Content vs. Flexural Toughness of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

らとほぼ同様の値を与え、それらの値は繊維混入率 0.5% までの増加に伴って増大し、その後、一定又は低下する傾向にある。これらの繊維補強ポーラスコンクリートの繊維長さとし粗骨材最大寸法の比（繊維長さ／粗骨材最大寸法）は 2 である。なお、前述した通り、粗骨材最大寸法、繊維長さ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、曲げ強度及び曲げタフネスは目標空隙率の増加に伴い、著しく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) 用いる繊維の種類及び粗骨材最大寸法にかかわらず、繊維と粗骨材の混合物の実積率は、繊維混入

率の増加に伴い、減少する傾向にある。又、いずれの繊維混入率においても、繊維長さが長いもの及び粗骨材最大寸法が小さいものほど、実積率は小さい。

- (2) 粗骨材最大寸法を 20mm とした場合、長さ 40mm のビニロン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、曲げタフネスは、30mm を用いたもののそれらに比べて大きい。
- (3) 本研究の限りでは、粗骨材最大寸法 15 又は 20mm とした場合、繊維長さとし粗骨材最大寸法の比を一定とすれば、製造される繊維補強ポーラスコンクリートの力学的性質は、ほぼ同程度となることが示唆される。

## 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：繊維補強コンクリート—特性と応用—，オーム社，p.88，1981
- 2) 河野 清，佐々木啓次，須田順一郎，鈴木 信：鋼繊維の形状・繊維長及び粗骨材最大寸法が SFRC の曲げ強度，せん断強度及び乾燥収縮に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.14，No.1，pp.1063-1068，1992
- 3) 小椋伸司，国枝 稔，栗原哲彦，六郷恵哲：ポーラスコンクリートの強度改善，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.499-504，1997
- 4) 村上 聖，大谷俊浩，三井宜之，岩佐佑一：緑化用基盤としてのポーラスコンクリートの強度性状，セメント・コンクリート論文集，No.54，pp.784-789，2000
- 5) 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
- 6) 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