

論文 繊維長さ粗骨材最大寸法比が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影響

齋藤 俊克*1・有岡 大輔*2・出村 克宣*3

要旨: 本研究では、繊維長さ粗骨材最大寸法比が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影響について検討している。その結果、繊維混入率にかかわらず、繊維長さ粗骨材最大寸法比を 2 とした場合、長さ 30mm 及び 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強度、静弾性係数、曲げ強度及び曲げタフネスは最大値を示す。又、セメントモルタル、粗骨材、ビニロン繊維及び空隙の体積分率を変数とする圧縮及び曲げ強度制御因子を導き、それを用いた繊維長さ粗骨材最大寸法比を 2 とした場合の繊維補強ポーラスコンクリートの強度推定式を検討している。

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比、力学的性質、強度制御因子

1. はじめに

繊維補強コンクリートにおいて、小林は、繊維長さの 1/2 の最大寸法を持つ粗骨材を使用した時（繊維長さ粗骨材最大寸法比が 2 の時）に、その曲げ強度が最大値を示すと報告している¹⁾。又、河野らは、繊維長さを長くすることによって曲げ強度が増大することを明らかにしている²⁾。しかしながら、繊維長さ粗骨材最大寸法比が 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²⁾。そこで、著者らは、粗骨材最大寸法を 15 又は 20mm、繊維長さ粗骨材最大寸法比を 2 とし、目標空隙率を 15、20 及び 25% とし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³⁾。その結果、粗骨材最大寸法が異なる場合でも、同一の目標空隙率において、繊維長さ粗骨材最大寸法比を一定とすれば、その力学的性質はほぼ同程度となることを見出している。

本研究では、最大寸法 10、15 及び 20mm の粗骨材及び長さ 30 及び 40mm のビニロン繊維を使用して、繊維長さ粗骨材最大寸法比を変化させた、目標空隙率 20% の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、静弾性係数、曲げ強度及び曲げタフネスについて検討する。又、繊維長さ粗骨材最大寸法比を 2 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について、これまでに提案している強度制御因子⁴⁾との関係について検討する。

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 10mm (Gmax10) 又は 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 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 (%)
5~20	2.64	1.13

*1 日本大学 工学部建築学科助手 博士 (工学) (正会員)

*2 オバナヤ・セメンテックス (株) 修士 (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 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 30 及び 40mm の繊維と最大寸法 10, 15 及び 20mm 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

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.

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

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 φ15×30cm 及び 10×10×40cm に成形した。その後、JCI-SE4 [温水法 (70℃) 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℃) 及び 1h 水中 (20℃) 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⁵⁾ 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

Table 6 Mix Proportions of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

W/C (%)	Target Voids (%)	Fiber Length (mm)	G _{max} * (mm)	Mix Proportions (kg/m ³)				AE-WRA** (%)	Fiber Content*** (%)	Continuous Voids (%)	Total Voids (%)
				Water	Cement	Fine Aggregate	Coarse Aggregate				
22.5	20	30	10	90	399	251	1285	1.1	0	20.2	22.9
				93	411	258	1251		0.3	20.5	22.7
				95	421	265	1224		0.5	20.6	22.5
				101	448	282	1155		1.0	20.9	21.7
		81	359	226	1368	0	20.3		20.6		
		84	370	233	1335	0.3	20.7		21.9		
		85	378	238	1315	0.5	19.0		22.5		
		90	398	250	1260	1.0	20.7		21.6		
		72	319	201	1449	0	19.6		21.8		
		76	338	212	1403	0.3	18.4		20.3		
		77	345	217	1384	0.5	19.8		20.1		
		81	363	228	1333	1.0	19.1		20.2		
	90	399	251	1285	0	20.2	20.3				
	95	421	265	1230	0.3	20.1	20.5				
	99	436	274	1192	0.5	20.5	21.1				
	107	475	299	1101	1.0	18.4	20.2				
	81	359	226	1368	0	20.3	20.6				
	83	366	230	1344	0.3	19.5	20.0				
	85	377	237	1316	0.5	19.7	20.1				
	91	406	255	1245	1.0	19.9	20.2				
	72	319	201	1449	0	19.6	21.8				
	77	343	215	1393	0.3	20.6	22.7				
	81	358	225	1355	0.5	19.5	20.5				
	90	398	250	1260	1.0	20.8	23.0				
20	15	40	15	81	359	226	1368	0	20.3	20.6	
				83	366	230	1344	0.3	19.5	20.0	
				85	377	237	1316	0.5	19.7	20.1	
		91	406	255	1245	1.0	19.9	20.2			
		72	319	201	1449	0	19.6	21.8			
		77	343	215	1393	0.3	20.6	22.7			
	20	40	20	20	81	358	225	1355	0.5	19.5	20.5
					90	398	250	1260	1.0	20.8	23.0

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.

ロー値を 230 ± 20 に調整したものである。なお、そのフロー値については、既往の研究結果⁶⁾を参考に、繊維混入率が 1.0% までの範囲で、本研究で用いた供試体寸法及び振動締固め条件であれば、セメントモルタルの分離が生じることなく、所要の空隙率が得られることを予備実験で確かめた。繊維補強ポーラスコンクリートの製造に当っては、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て練り混ぜた。

3.3 圧縮試験

JCI-SPO5 [ポーラスコンクリートの静弾性係数試験方法 (案)] に従って、圧縮試験を行った。その際、コンプレッソメータを用いて供試体の縦ひずみを測定し、静弾性係数を算出した。

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 $10 \times 10 \times 10 \text{cm}$ 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。繊維長さ及び粗骨材最大寸法にかかわらず、繊維混入率の増加に伴い、繊維と粗骨材の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 10, 15 及び 20mm とした繊維と粗骨材の混合物の場合、繊維長さ 30mm としたものに比べて、繊維長さ 40mm としたものの方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 30 又は 40mm とした繊維と粗骨材の混合物においては、粗骨材最大寸法が小さいものほど、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 から Fig.4 には、粗骨材最大寸法を 10, 15 及び 20mm とし、長さ 30 及び 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、静弾性係数及び曲げ強度と繊維混入率の関係を示す。繊維長さ及び粗骨材最大寸法にかかわらず、繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮強度、静弾性係数及び曲げ強度は、一部のものを除

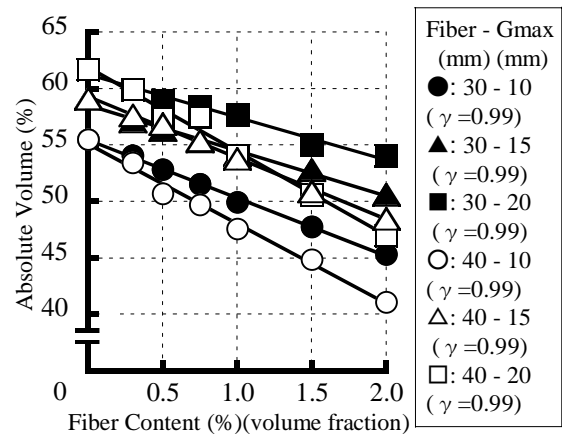


Fig.1 Fiber Content vs. Percentage of Absolute Volume of Fiber-Coarse Aggregate Mixtures.

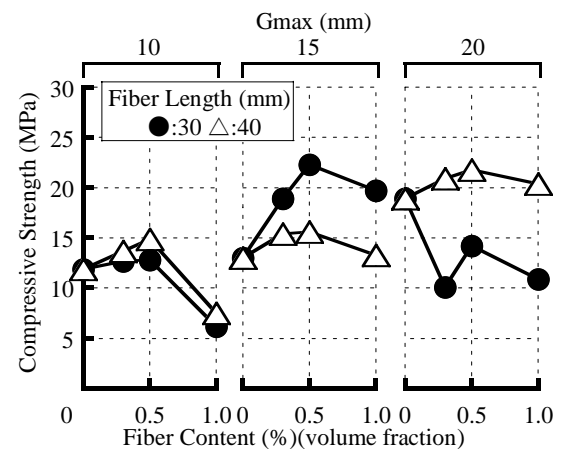


Fig.2 Fiber Content vs. Compressive Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

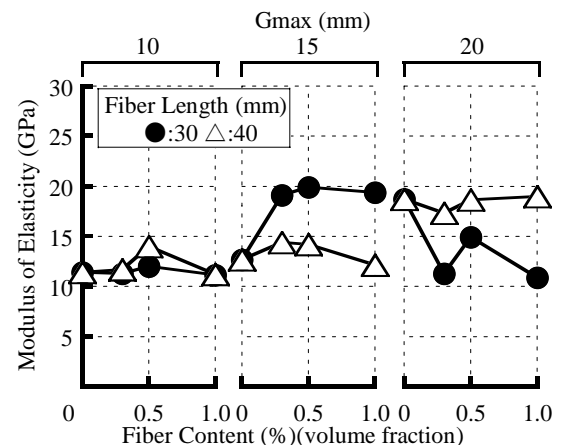


Fig.3 Fiber Content vs. Modulus of Elasticity of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

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圧縮強度、静弾性係数及び曲げ強度の改善は、繊維混入率の増加に伴う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てんが不均質になって、圧縮強度、静弾性係数及び曲げ強度が低下するものと推察される。

Fig.5には、粗骨材最大寸法を10, 15及び20mmとし、長さ30及び40mm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。粗骨材最大寸法にかかわらず、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。しかし、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、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%を超える場合の曲げタフネスの低下は、繊維混入率の増加に伴って粗骨材間に占める繊維の割合が多くなり、マトリックスとしてのセメン

トモルタルの充てんが不均質になって、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ためと推察される。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。

なお、粗骨材最大寸法15mmの繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮強度、曲げ強度、静弾性係数及び曲げタフネスは、長さ30mmの繊維を用いたものの方が大きく、粗骨材最大寸法10及び20mmの場合のそれらは、長さ40mmの繊維を用いたものの方が大きい傾向にある。このことから、粗骨材最大寸法と繊維長さの組み合わせは、繊維補強ポーラスコンクリートの力学的性質に著しい影響をもたらしていることが明らかである。

そこで、**Fig.6**から**Fig.9**には、それぞれ、粗骨材最大寸法を10, 15及び20mmとし、長さ30及び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、静弾性係数、曲げ強度及び曲げタフネスと繊維長さ粗骨材最大寸法比の関係を示す。繊維混入率にかかわらず、長さ30mmの繊維を用いた繊維補強ポーラスコンクリ

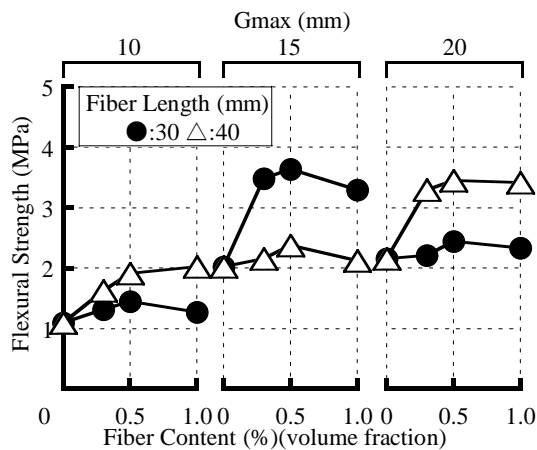


Fig.4 Fiber Content vs. Flexural Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

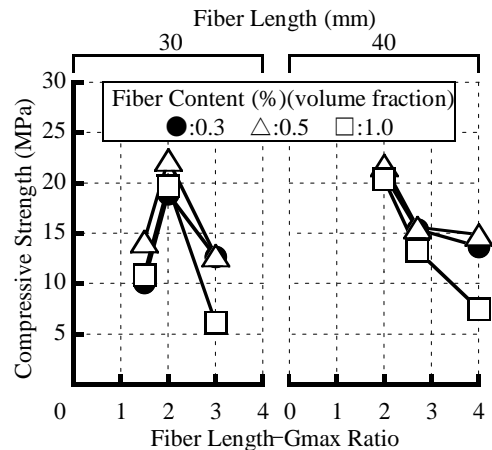


Fig.6 Fiber Length-Gmax Ratio vs. Compressive Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

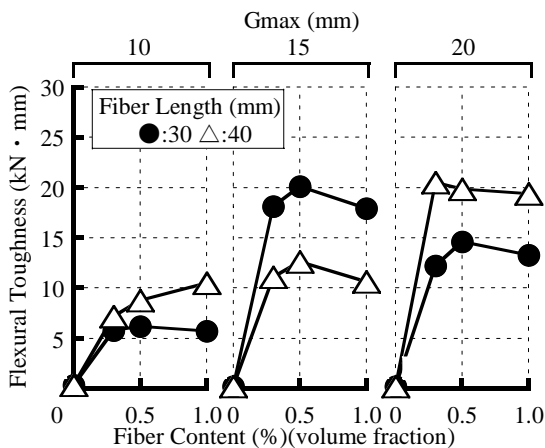


Fig.5 Fiber Content vs. Flexural Toughness of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

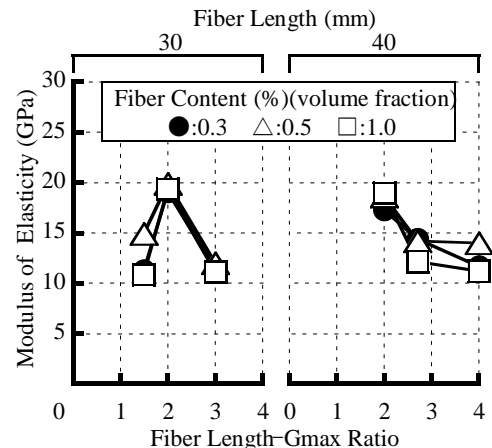


Fig.7 Fiber Length-Gmax Ratio vs. Modulus of Elasticity of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

トの圧縮強度、静弾性係数及び曲げ強度並びに曲げタフネスは、繊維長さ粗骨材最大寸法比 2 までの増加に伴い増大し、その後減少する傾向にある。なお、この圧縮強度、静弾性係数、曲げ強度及び曲げタフネスの増大は、繊維長さが粗骨材最大寸法の 2 倍のとき、粗骨材を効果的に架橋しているためと考えられる。更に、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、静弾性係数、曲げ強度及び曲げタフネスは、繊維長さ粗骨材最大寸法比が 2 より大きくなるのに伴い、減少する傾向にある。このように、30 及び 40mm の繊維を用いた繊維補強ポーラスコンクリートにおいては、繊維長さ粗骨材最大寸法比が 2 以上になると圧縮強度、静弾性係数、曲げ強度及び曲げタフネスが減少する。これは、繊維混入率一定とした場合でも、繊維長さ粗骨材最大寸法比が大きくなると、空隙率を一定とするためにセメントモルタル量が増大するものの、粗骨材の最大寸法が繊維の長さ比べて小さくなるため、マトリックスとしてのセメントモルタル組織が繊維によって分断されやすくなり、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ことに起因するものと考えられる。以上のように、繊維混入率にかかわらず、ポーラスコンクリートの圧縮強度、静弾性係数、曲げ強度及び曲げタフネスは、繊維長さ粗骨材最大寸法比が 2 の時に最大値を示すことから、繊維長さ粗骨材最大寸法比を変数とした場合、繊維補強ポーラスコンクリートの力学的性質には屈曲点が存在することが示唆される。

これまでの研究から、繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮及び曲げ強度は、単位セメントモルタル量、単位粗骨材量、繊維混入率及び空隙率に支配されることを導いている⁴⁾。ここでは、上述の試験結果から、繊維が粗骨材を効果的に架橋していると考えられる、繊維長さ粗骨材最大寸法比 2 とした繊維補強ポーラスコンクリートの強度制御因子と圧縮及び曲げ強度の関係について検討する。なお、これまでの研究から、ビニロン繊維補強ポーラスコンクリートにおいては、実用性のある繊維混入率の最大値は 0.5% であると仮定し、繊維混入率 1.0% のデータを除いて、強度制御因子と強度の関係について検討する。強度制御因子は次のように定義される。

$$C_v = V_m \sqrt{(1 + V_f)(100 - V_a)} \cdot V_g \quad (1)$$

$$F_v = V_m(1 + V_f)(100 - V_a) \cdot V_g \quad (2)$$

$$V_m = V_w + V_c + V_s \quad (3)$$

ここに、

C_v : 圧縮強度制御因子

F_v : 曲げ強度制御因子

V_m : モルタルの体積百分率 (%)

V_g : 粗骨材の体積百分率 (%)

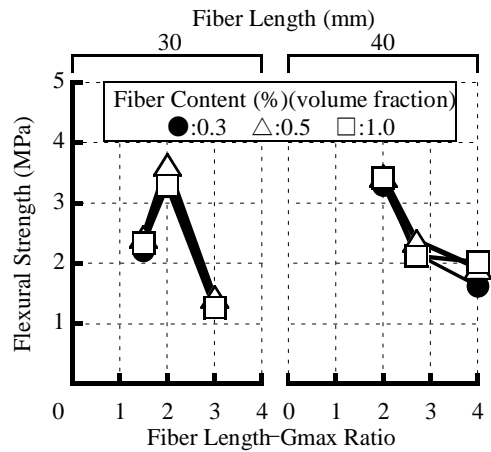


Fig.8 Fiber Length-Gmax Ratio vs. Flexural Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

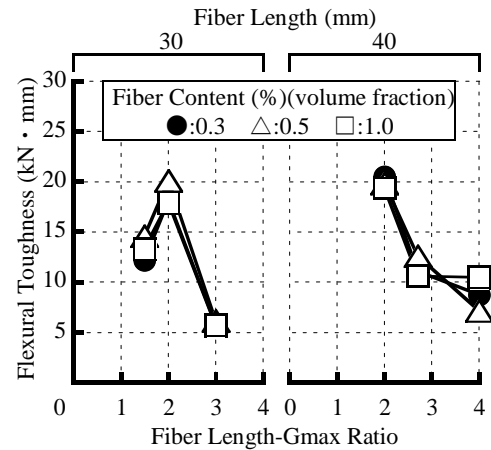


Fig.9 Fiber Length-Gmax Ratio vs. Flexural Toughness of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

V_f : 繊維の体積百分率 (繊維混入率) (%)

V_a : 空隙の体積百分率 (連続空隙率) (%)

V_w , V_c 及び V_s : 水、セメント及び細骨材の体積百分率 (%)

Fig.10 及び Fig.11 には、繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮及び曲げ強度と強度制御因子の関係を示す。プロット数が少ないものの、繊維長さ粗骨材最大寸法比 2 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とそれらの強度制御因子の間には、高い相関性が認められ、その関係は、次に示す一般式で表すことができる。

$$\sigma = A + B \cdot \log_{10} S \quad (4)$$

ここに、

σ : 圧縮及び曲げ強度 (MPa)

S : 圧縮又は曲げ強度制御因子 (C_v , F_v)

A 及び B : 実験定数

以上の結果から、これまでに提案している強度制御因子を用いることにより、繊維長さ粗骨材最大寸法比 2 と

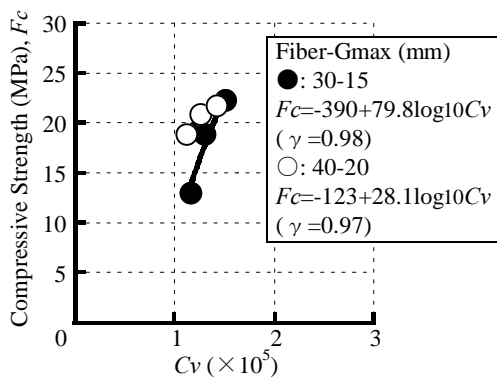


Fig.10 C_v vs. Compressive Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

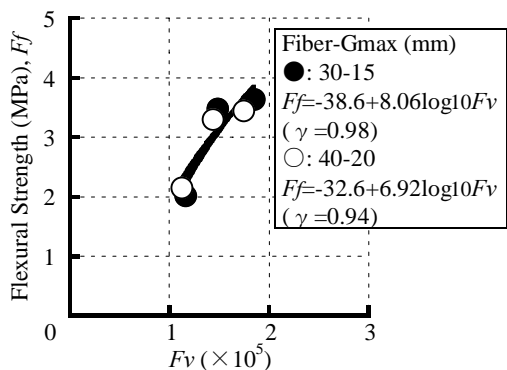


Fig.11 F_v vs. Flexural Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

した繊維補強ポーラスコンクリートについては、その圧縮及び曲げ強度を推定することが可能であることが示唆される。今後は、異なる繊維長さ粗骨材最大寸法比とした場合の繊維補強ポーラスコンクリートについても、強度推定を可能にするような更に広範な検討を行う必要があると考える。

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) 繊維長さ及び粗骨材最大寸法にかかわらず、ビニロン繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮強度、静弾性係数及び曲げ強度は、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。
- (2) 繊維長さ及び粗骨材最大寸法にかかわらず、ビニ

ロン繊維補強ポーラスコンクリートの曲げタフネスは、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、ほぼ一定又は低下する傾向にある。

- (3) 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、静弾性係数、曲げ強度及び曲げタフネスは、繊維長さ粗骨材最大寸法比 2 の時に最大値を示す。
- (4) 粗骨材最大寸法にかかわらず、繊維長さ粗骨材最大寸法比 2 とした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、式 (1) 及び (2) に示す強度制御因子を用いることにより推定できることが示唆される。

参考文献

- 1) 小林一輔：繊維補強コンクリート特性と応用一，オーム社，p.84，1981
- 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) 齋藤俊克，有岡大輔，出村克宣：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1711-1716，2009
- 4) 齋藤俊克，出村克宣，寒河江賢伍：ビニロン繊維補強ポーラスコンクリートの強度性状に及ぼす水セメント比の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.459-464，2007.7
- 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) 平岩 陸，田中清人，谷川恭雄，森 博嗣：ポーラスコンクリートの調合設計法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.121-126，2001