

論文 結合材をビニロン繊維補強セメントモルタルとした繊維補強ポーラスコンクリートの機械的性質

十文字 拓也*1・齋藤 俊克*2・出村 克宣*3

要旨: 本研究では、結合材をビニロン繊維補強セメントモルタルとした繊維補強ポーラスコンクリートの機械的性質について検討している。その結果、繊維長さ 6 および 12mm とした場合、繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮強度および曲げ強度は、繊維混入率 0.16% までの増加に伴い増大する傾向にある。また、繊維補強ポーラスコンクリートの静弾性係数は、繊維混入率の増加に伴い減少し、曲げタフネスは繊維混入率 0.3% で最大を示す傾向にある。これらのことから、本研究の限りでは、結合材をビニロン繊維補強セメントモルタルとすることで、繊維補強ポーラスコンクリートの機械的性質は、改善する傾向にある。

キーワード: 繊維補強ポーラスコンクリート, 繊維補強セメントモルタル, 繊維混入率, 機械的性質

1. はじめに

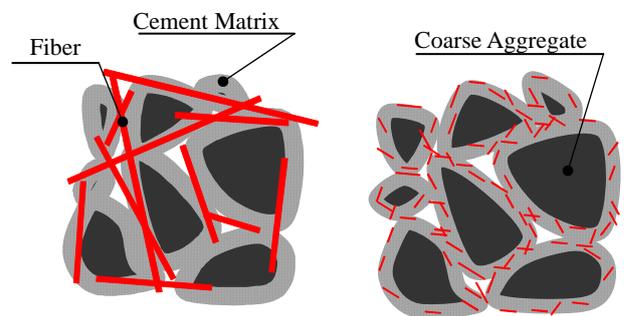
ポーラスコンクリートは、骨材が点接着した組織構造であることから、一般に、普通セメントコンクリートに比べて、強度が低いことが指摘されている。そのため、ポーラスコンクリートの用途拡大のためには、その強度を改善することが重要である。また、ポーラスコンクリートの強度改善策としては、結合材としてのセメントペーストおよびセメントモルタル自体の強さ改善、ポリマーの混入、繊維補強などが挙げられる。著者らはこれまでに、粗骨材間を架橋する長さである繊維長さ 30 および 40mm のビニロン短繊維を用いて、ポーラスコンクリート組織を繊維補強することで、機械的性質および耐久性を改善することを試みている^{1), 2)}。今後、更なる高じん性をポーラスコンクリートに付与するためには、結合材としてのセメントモルタルを繊維補強することも有用であると考えられる。なお、繊維補強ポーラスコンクリートの既往の研究^{3), 4)}においては、繊維長さ 10mm 程度の短繊維を用いている報告もあるが、ポーラスコンクリートの機械的性質に及ぼす繊維混入率の影響についての検討は行われていない。

そこで、本研究では、結合材としてのセメントモルタルの補強用短繊維として、高じん性セメント系複合材料に使用される 2 種類の微細なビニロン短繊維を用いた繊維補強ポーラスコンクリートの機械的性質としての圧縮強度、静弾性係数、曲げ強度および曲げタフネスに及ぼす繊維混入率の影響を検討している。

2. 繊維補強ポーラスコンクリートの調合設計

Fig.1 には、繊維補強ポーラスコンクリートの概念図を示す。齋藤、出村らは、これまで粗骨材間を架橋する長

さを有するビニロン繊維を用いてポーラスコンクリート組織をマクロに補強する改善策を検討している。そのため、ポーラスコンクリートに用いる粗骨材と短繊維の実積率および目標空隙率から調合設計を行っている。なお、本研究では、ポーラスコンクリートの結合材としてのセメントモルタルを微細なビニロン繊維で補強するミクロな補強であることから、混入するビニロン繊維の体積分だけ結合材中の細骨材の体積を置換する調合設計としている。



Macro Reinforcement Micro Reinforcement
Fig.1 Conceptual Diagram of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

3. 使用材料

3.1 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。

3.2 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** および **Table 3** に示す。

*1 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 日本大学 工学部建築学科助教 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)

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	3320	2-08	3-27	
Compressive Strength of Mortar (MPa)				
3d	7d	28d		
31.6	46.3	61.7		
Chemical Compositions (%)				
MgO	SO ₃	ig. loss	Total Alkali	Chloride Ion
2.31	2.02	2.48	0.43	0.016

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

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)
6	0.027	1.3	1800	45
12	0.04	1.3	1560	41

3.3 練混ぜ水および混和剤

練混ぜ水としては、水道水を使用した。また、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。

Table 6 Mix Proportions of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

W/C (%)	Target Voids (%)	Fiber Content in Concrete (%)*	Fiber Content in Mortar (%)*	Mix Proportions (kg/m ³)					AE-WRA** (%)
				Water	Cement	Fine Aggregate	Coarse Aggregate	Fiber	
22.5	20	0	0	72	320	202	1447	0	1.1
		0.10	0.40	72	320	199	1447	1.3	
		0.16	0.64	72	320	198	1447	2.1	
		0.30	1.19	72	320	194	1447	3.9	
		0.50	1.99	72	320	189	1447	6.5	
		1.00	3.97	72	320	176	1447	13.0	

Notes, *: by volume.

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

3.4 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 6 および 12mm のビニロン繊維を使用した。その性質を **Table 5** に示す。

4. 試験方法

4.1 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** に示す調査で、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 φ15×30cm および 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 [20℃, 90% (RH)], 24h 温水 (70℃) および 1h 水中 (20℃) 養生を行って、供試体を作製した。なお、調査は、これまでに提案している調査設計法⁵⁾ に準じて決定したものである。なお、繊維補強ポーラスコンクリートの製造に当たっては、あらかじめ練り混ぜた結合材としての繊維補強セメントモルタルをミキサーに投入し、粗骨材と練り混ぜた。また、**Table 7** には、結合材としてのセメントモルタルの組成を、**Fig.2** には、繊維混入率および繊維を除いたモルタル体積の関係を示す。混入する繊維の体積分だけ細骨材体積を置換させていることから、繊維混入率 1.0% においては、セメント：細骨材率を著しく低下させることになる。

4.2 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。

4.3 曲げ試験

JCI-SF4 (繊維補強コンクリートの曲げ強度およ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。

Table 7 Composition of Mortars as Binder.

Fiber Content in Concrete (%) [*]	Mortar Content without Fiber (l/m ³)	Cement : Sand (by mass)
0.00	251.9	1:0.63
0.10	250.7	1:0.62
0.16	250.3	1:0.62
0.30	248.8	1:0.60
0.50	246.8	1:0.59
1.00	241.7	1:0.55

Note, ^{*}: by volume.

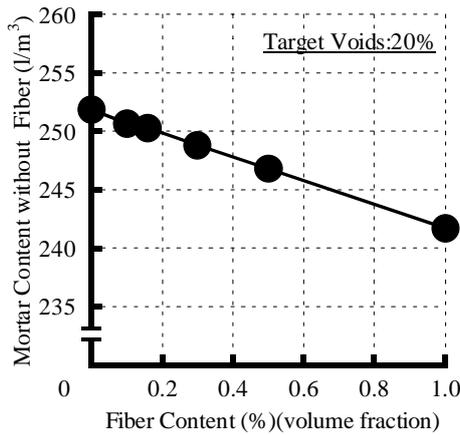


Fig.2 Total Volume of Mortar Content as Binder.

4.4 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」および「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、連続空隙率を算出した。

5. 試験結果および考察

Fig.3 には、繊維補強ポーラスコンクリートの連続空隙率と繊維混入率の関係を示す。繊維長さにかかわらず、目標空隙率 (20%) とほぼ同一の連続空隙率を持つ繊維補強ポーラスコンクリートが得られている。このことから、粗骨材と短繊維の混合物の実積率を求めた上で調合設計を行う、粗骨材間を架橋する長さを有する繊維補強ポーラスコンクリートの場合とは異なり、結合材としてのセメントモルタルを微細な繊維で補強した繊維補強ポーラスコンクリートにおいては、繊維の体積分だけ細骨材体積を置換することのみで、調合設計を行うことができると考えられる。

Fig.4 には、繊維補強ポーラスコンクリートの応力-ひずみ曲線の例を繊維長さ別に示す。繊維長さにかかわらず、繊維補強ポーラスコンクリートの縦ひずみは、応力の増加に伴って増大する傾向にあり、繊維混入率の大き

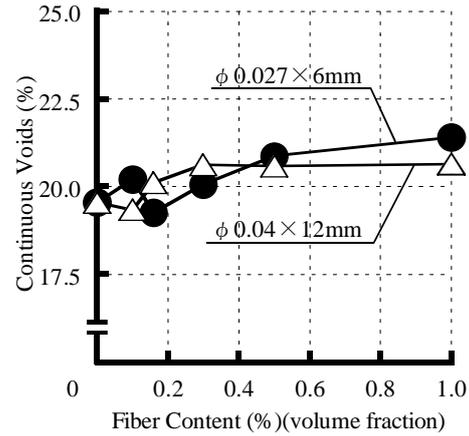


Fig.3 Fiber Content vs. Continuous Voids of Fiber Reinforced Porous Concretes.

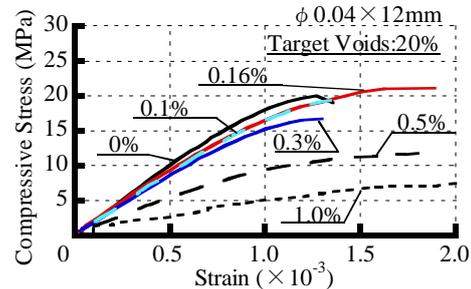
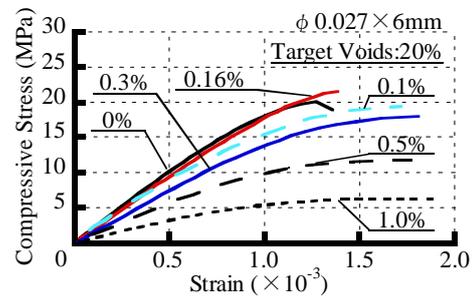


Fig.4 Compressive Stress-Strain Curves for Fiber-Reinforced Porous Concretes.

いものほど、応力-ひずみ曲線の勾配がゆるやかになる履歴を示す。

Fig.5 には、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。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、繊維長さにかかわらず、繊維混入率 0.16% までの増加に伴って増大し、その後、減少する傾向にある。この圧縮強度の増大は、結合材中に繊維が良好に分散したためと推察される。しかしながら、繊維混入率が 0.3% となると、結合材である繊維補強セメントモルタル中の繊維混入率が 1% を超えるため、結合材中での均一な繊維の分散が得られず、良好なセメントモルタル組織の形成が妨げられて、圧縮強度が低下するものと推察される。また、長さ 6mm の繊維を用いた繊維補強ポーラスコンクリートの繊維混入率 0.3% 以上の時の圧縮強度は、繊維長さ 12mm のものに比

べて小さい傾向にある。これは、長さ 6mm の繊維を用いると、同体積中に占める短繊維の本数が長さ 12mm の繊維を用いた時より多くなると共に、その繊維径が小さいことに起因して、ファイバボールができやすくなり、繊維の適当な分散がより妨げられたためと推察される。このことから、結合材としてのセメントモルタルへの過剰な繊維の混入は圧縮強度を低下させる原因となることが示唆される。

Fig.6 には、繊維補強ポーラスコンクリートの静弾性係数と繊維混入率の関係を示す。繊維長さにかかわらず、繊維補強ポーラスコンクリートの静弾性係数は、繊維混入率の増加に伴って減少する傾向にある。これは、ビニロン繊維補強コンクリートの既往の研究^{6),7)}と同様の結果である。つまり、弾性係数の小さいビニロン繊維が混入することによって、結合材としてのセメントモルタルの弾性係数が低下することに起因するものと考えられる。また、異なる繊維長さであっても、それぞれの繊維の弾性係数はほぼ同等であるため、繊維補強ポーラスコンクリートの静弾性係数に及ぼす繊維長さの影響は、ほとんど認められないものと推察される。

Fig.7 には、繊維補強ポーラスコンクリートの曲げ荷重-たわみ曲線の例を繊維長さ別に示す。無補強ポーラスコンクリート（繊維混入率 0%）および繊維混入率 0.16% の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、最大曲げ荷重まで荷重が直線的に増大して破壊に至るといった脆性的な挙動を示す。しかしながら、繊維混入率を 0.3%以上とした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、最大荷重を示した後、荷重が緩慢に減少する履歴を示す。ポーラスコンクリートは、結合材としてのセメントモルタルを介して、粗骨材が点接着した組織を形成しており、その破壊は、セメントモルタルの破壊性状に依存するものと考えられる。また、本研究における繊維補強ポーラスコンクリートの繊維混入率とは、結合材であるセメントモルタル中の繊維混入率を表すものである。従って、繊維混入率が 0.16%では、セメントモルタルの曲げ破壊性状が改善されず、繊維混入率が 0.3%以上になると、セメントモルタルの破壊じん性が改善されることによって、繊維補強ポーラスコンクリートがこのような曲げ荷重-たわみ曲線を示すものと推察される。

Fig.8 には、繊維補強ポー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。繊維長さにかかわらず、繊維補強ポーラスコンクリートの曲げ強度は、繊維混入率 0.16%までの増加に伴って増大し、その後、減少する傾向にある。この曲げ強度の増加は、繊維の混入による結合材としてのセメントモルタルの曲げ強度の改善によるものと考えられる。繊維混入率 0.3%以上の繊維補強ポ

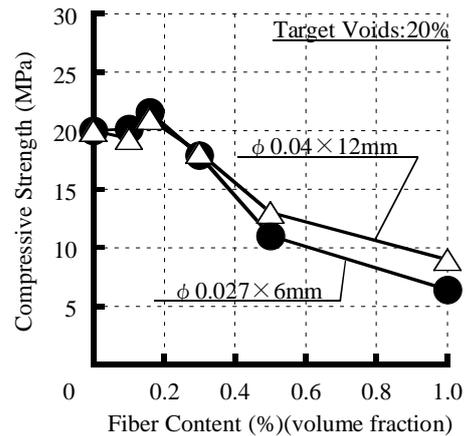


Fig.5 Fiber Content vs. Compressive Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

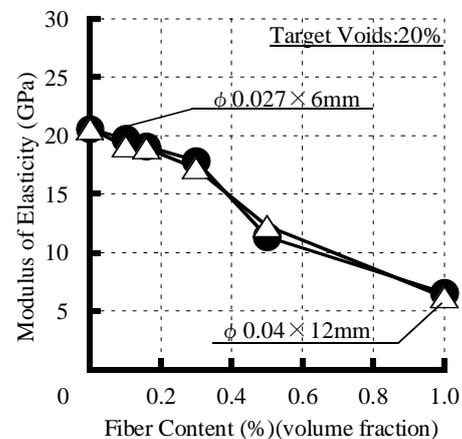


Fig.6 Fiber Content vs. Modulus of Elasticity of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

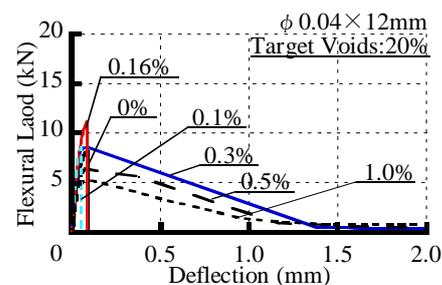
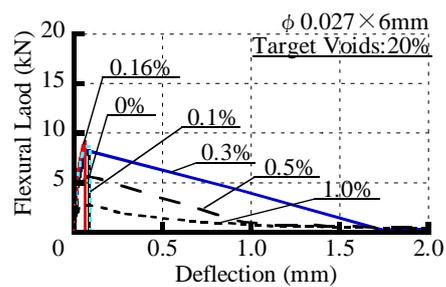


Fig.7 Flexural Load-Deflection Curves for Fiber-Reinforced Porous Concretes.

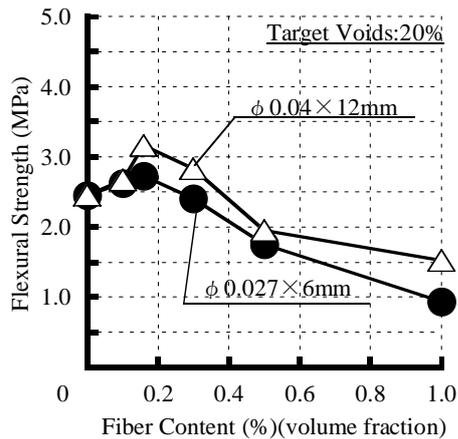


Fig.8 Fiber Content vs. Flexural Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes

ーラスコンクリートにおいては、圧縮強度と同様に、良好な結合材組織が形成されにくくなることにより、曲げ強度が減少したものと考えられる。また、長さ 6mm の繊維を用いた繊維補強ポーラスコンクリートの曲げ強度は、繊維長さ 12mm のものに比べて小さい傾向にある。

Fig.9 には、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。繊維長さにかかわらず、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 0.16% までほぼ 0 に近い値であるものの、0.3% で著しい増大を示し、その後減少する傾向にある。繊維混入率 0.3% における繊維補強ポーラスコンクリートの曲げタフネスの増大は、前述したように、結合材としてのセメントモルタルの破壊性状の改善によるものと考えられる。なお、繊維混入率 0.3% においては、繊維補強ポーラスコンクリートの曲げタフネスは最大値を示すものの、曲げ強度は減少することから、曲げ補強にとって効果的な繊維混入率は 0.16 から 0.3% の範囲にあることが示唆される。

Fig.10 には、繊維補強ポーラスコンクリートの静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。繊維補強ポーラスコンクリートの静弾性係数は、圧縮強度の増加に伴い増大する傾向にある。また、繊維補強ポーラスコンクリートの静弾性係数と圧縮強度の間には高い相関性が認められ、その関係は次の式(1)で表すことができる。

$$E_c = aF_c + b \quad (1)$$

ここに、 E_c : 静弾性係数 (GPa)

F_c : 圧縮強度 (MPa)

a および b : 実験定数

Fig.11 には、繊維補強ポーラスコンクリートの曲げタフネスと曲げ強度の関係を示す。なお、無補強ポーラスコンクリートは繊維を混入したものととはコンクリート組織が異なること、繊維混入率 0.16% までの繊維補強ポーラスコンクリートは、曲げタフネスをほとんど与えない

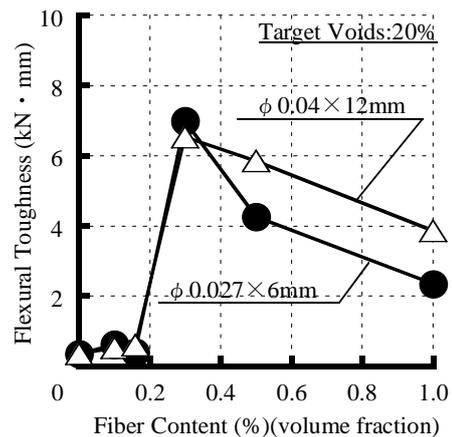


Fig.9 Fiber Content vs. Flexural Toughness of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

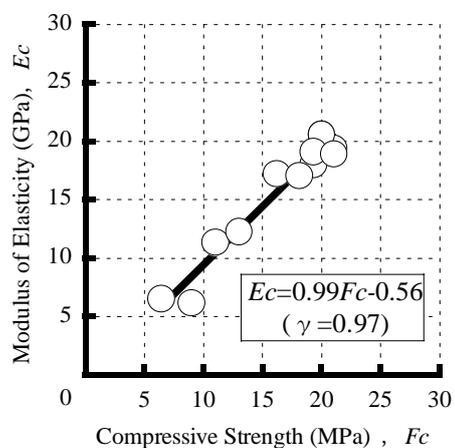


Fig.10 Compressive Strength vs. Modulus of Elasticity of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

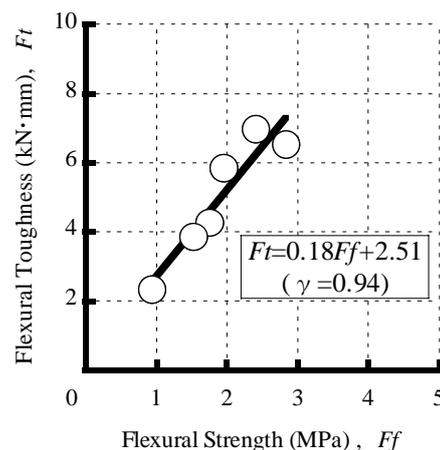


Fig. 11 Flexural Strength vs. Flexural Toughness of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

ことから、それらのデータを除いて示している。繊維補強ポーラスコンクリートの曲げタフネスは、曲げ強度の増加に伴い増大する傾向にある。また、繊維補強ポーラスコンクリートの曲げタフネスと曲げ強度の間には高い

相関性が認められ、その関係は次の式(2)で表すことができる。

$$F_t = cF_f + d \quad (2)$$

ここに、 F_t ：曲げタフネス (kN・mm)

F_f ：曲げ強度 (MPa)

c および d ：実験定数

本研究の限りでは、結合材を繊維補強セメントモルタルとした繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮強度、曲げ強度および曲げタフネスは、繊維混入率 0.16% または 0.3% の時に最大値を示す。これらの繊維混入率は、一般的な繊維補強コンクリートにおいて補強効果が得られる繊維混入率に比べて小さな値である。従って、ポーラスコンクリートの結合材を繊維補強セメントモルタルとすることは、有用な補強方法と考えられる。そのため、粗骨材間を架橋する長さを有する短繊維を用いるマクロな補強方法と結合材を繊維補強セメントモルタルとするミクロな補強方法を併用することにより、更なるポーラスコンクリートの性能改善を図ることができると考える。

6. 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および曲げ強度は、繊維混入率 0.16% までの増加に伴って増大し、その後減少する傾向にある。また、その静弾性係数は、繊維混入率の増加に伴って、減少する傾向にある。
- (2) 繊維長さにかかわらず、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 0.16% までほぼ 0 に近い値であるものの、0.3% で著しい増大を示し、その後減少する傾向にある。
- (3) 結合材を繊維補強セメントモルタルとすることによって、繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮強度、曲げ強度および曲げタフネスは改善する。しかし、繊維の混入が過剰になると、繊維補強ポーラスコンクリートの機械的性質が低下することが示唆される。
- (4) 結合材をビニロン繊維補強セメントモルタルとした繊維補強ポーラスコンクリートの静弾性係数と圧縮強度、また、曲げタフネスと曲げ強度の間には、高い相関性が認められ、それらの関係は、次の一般式 (1) および (2) で表すことができる。

$$E_c = aF_c + b \quad (1)$$

$$F_t = cF_f + d \quad (2)$$

ここに、 E_c ：静弾性係数 (GPa)

F_c ：圧縮強度 (MPa)

F_t ：曲げタフネス (kN・mm)

F_f ：曲げ強度 (MPa)

a , b , c および d ：実験定数

- (5) 本研究の限りでは、ポーラスコンクリートの結合材を繊維補強セメントモルタルとすることは、一般的な繊維補強コンクリートに用いる繊維量に比べて、少量の繊維の混入で効果的な性能改善ができることから、有用な補強方法と考えられる。

謝辞

本研究は、平成 23 年度科学研究費補助金若手研究 B (研究代表者：齋藤俊克、研究課題名：高曲げ強度を有するハイブリッド型繊維補強ポーラスコンクリートの開発) の助成を受けた。ここに記して、謝意を表す。

参考文献

- 1) 齋藤俊克, 寒河江賢伍, 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乾湿繰返しおよび凍結融解に対する抵抗性, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.307-312, 2008.7
- 2) 齋藤俊克, 有岡大輔, 出村克宣: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1421-1426, 2010.7
- 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, 三井宣之, 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査設計法の提案, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.657, pp.1947-1953, 2010.11
- 6) 谷口秀明, 三上浩, 浅井洋, 樋口正典, 藤田学: 高じん性コンクリートの開発ービニロン繊維補強コンクリートの基礎物性ー, 三井住友建設技術研究所報告, 第 6 号, pp.73-82, 2008
- 7) 住学, 竹内博幸, 中出睦, 谷垣正治: ビニロン繊維補強コンクリートに関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.257-262, 2003