

論文 結合材を繊維補強ポリマー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及ぼすポリマー混入効果

十文字 拓也*1・齋藤 俊克*2・出村 克宣*3

要旨: 本研究では、結合材を繊維補強ポリマー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及ぼす繊維混入率およびポリマーセメント比の影響について検討している。その結果、ポリマー混入繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮強度、静弾性係数および曲げ強度は、繊維混入率 0.1 または 0.15% までの増加に伴い増大する傾向にある。また、圧縮強度、静弾性係数、曲げ強度および曲げタフネスは、ポリマーセメント比の増加に伴い著しく増大する。本研究の限りでは、結合材を繊維補強ポリマーセメントモルタルとすることは機械的性質の改善において有用である。

キーワード: ポーラスコンクリート, 繊維補強ポリマーセメントモルタル, ポリマーセメント比

1. はじめに

ポーラスコンクリートは、その大きな連続空隙を生かした緑化基盤、水質浄化などに利用できることから、エコマテリアルとして位置付けられている¹⁾。しかしながら、多量の空隙を確保することは粗骨材間の付着特性を低下させることになり、強度低下が生じやすい欠点を有している。そこで、ポーラスコンクリートの強度改善策として、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や繊維補強が試みられている。

これまで、齋藤、出村は、粗骨材間を架橋する長さを持つ短繊維を用いた繊維補強ポーラスコンクリートへのポリマーの混入は、その圧縮および曲げ性状の改善に寄与し、特に、ポリマーセメント比の増加に伴う曲げ性状の顕著な改善効果が認められることを報告している²⁾。

一方、粗骨材最大寸法よりも短い長さの微細繊維で補強した繊維補強セメントモルタルを結合材とした場合でも、ポーラスコンクリートの強度改善に寄与することが認められ、その場合のポーラスコンクリート総体積に占める微細繊維の割合は、従来の繊維補強コンクリートにおける繊維混入率に比べて相当に小さいことを明らかにしている³⁾。

これらのことに鑑み、本研究では、高じん性セメント系複合材料に使用される微細なビニロン短繊維を用いて結合材を繊維補強ポリマー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及ぼす繊維混入率およびポリマーセメント比の影響を検討している。なお、本研究においては、粗骨材間を架橋するほどの長さを持つ繊維は使用していないが、結合材としての繊維補強ポリマーセメントモルタルに使用される繊維は、ポーラスコンクリート組織に分散することから、製造さ

れるポーラスコンクリートをポリマー混入繊維補強ポーラスコンクリートと称する。

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** および **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)		Compressive Strength of Mortar (MPa)		
		Initial Set	Final Set	3d	7d	28d
3.16	3310	1-59	3-13	30.5	46.8	62.3
Chemical Compositions (%)						
MgO	SO ₃	ig. loss	Total Alkali	Chloride Ion		
1.56	2.13	1.68	0.55	0.023		

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)

2.3 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。

2.4 セメント混和用ポリマー

セメント混和用ポリマーとしては、スチレンアクリル酸エステルエマルジョンを使用した。その性質を **Table 5** に示す。

2.5 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 12mm のビニロン繊維を使用した。その性質を **Table 6** に示す。

3. 試験方法

3.1 結合材としての繊維補強ポリマーセメントモルタルの試験

JIS A 1171 (ポリマーセメントモルタルの試験方法) に従って、繊維混入率 0% でフロー値が 230 ± 20^4 となる **Table 7** に示す調合を基本調合とし、繊維混入率を 0, 0.1, 0.15 および 0.3% とした繊維補強ポリマーセメントモルタルを調製した。なお、ポリマーセメントモルタルに短繊維を混入する場合、短繊維の体積分だけ細骨材体積を減少する調合とした。調製した繊維補強ポリマーセメントモルタルについては、寸法 $40 \times 40 \times 160$ mm に成形した。その後、2d 湿空 [20°C, 90% (RH)], 5d 水中 (20°C) および 21d 乾燥 [20°C, 50% (RH)] 養生を行ってモルタル供試体を作製した。

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

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 Properties of Polymer for Cement Modifier.

Type of Polymer	Appearance	Density (20°C, g/cm ³)	Glass Transition Point, Tg (°C)	pH	Volatile Content (%)
Styrene Acrylic Copolymer	White	1.05	24	7~9	50

Table 6 Physical Properties of Fibers.

Fiber Length (mm)	Average Diameter (mm)	Density (g/cm ³)	Tensile Strength (MPa)	Elastic Modulus in Tension (GPa)
12	0.04	1.3	1560	41

Table 7 Mix Proportions of Polymer-Modified Mortars with Flow of 230 ± 20 and Fiber Content of 0%.

P/C (%)	W/C (%)	Cement : Fine Aggregate (by mass)	AE-WRA* (%)
0	22.5	1 : 0.63	1.1
2	20.3		
4	19.1		
6	18.0		

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

方 (案)] に従って、3.1 で調製した繊維補強ポリマーセメントモルタルを結合材とする **Table 8** に示す調合の繊

Table 8 Mix Proportions of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

W/C (%)	Target Voids (%)	P/C (%)	Fiber Content in Concrete (%) [*]	Fiber Content in Mortar (%) [*]	Mix Proportions (kg/m ³)					AE-WRA ^{**} (%)	
					Water	Cement	Fine Aggregate	Coarse Aggregate	Polymer		Fiber
22.5	0		0	0	72	320	201	1445	0	0	1.1
			0.1	0.39	72	320	199	1445	0	1.3	
			0.15	0.59	72	320	198	1445	0	2.0	
			0.3	1.18	72	320	194	1445	0	3.9	
20.3	2		0	0	65	321	202	1445	6.4	0	
			0.1	0.39	65	321	200	1445	6.4	1.3	
			0.15	0.59	65	321	199	1445	6.4	2.0	
			0.3	1.18	65	321	195	1445	6.4	3.9	
19.1	4		0	0	61	318	200	1445	12.7	0	
			0.1	0.39	61	318	198	1445	12.7	1.3	
			0.15	0.59	61	318	197	1445	12.7	2.0	
			0.3	1.18	61	318	193	1445	12.7	3.9	
18.0	6		0	0	57	315	198	1445	18.9	0	
			0.1	0.39	57	315	196	1445	18.9	1.3	
			0.15	0.59	57	315	195	1445	18.9	2.0	
			0.3	1.18	57	315	191	1445	18.9	3.9	

Notes, ^{*}: by volume.

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

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φ 15×30cm および 10×10×40cm に成形した。その後、2d 湿空 [20℃, 90% (RH)], 5d 水中 (20℃) および 21d 乾燥 [20℃, 50% (RH)] 養生を行って、供試体を作製した。なお、調合は、これまでに提案している調合設計法⁵⁾ に準じたものであり、繊維補強ポリマーセメントモルタルの総体積を結合材体積として決定したものである。また、繊維補強ポーラスコンクリートの製造に当っては、あらかじめ練り混ぜた結合材としての繊維補強ポリマーセメントモルタルと粗骨材をミキサーに投入し練り混ぜた。

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。

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」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。

4. 試験結果および考察

Fig.1 には、結合材としての繊維補強ポリマーセメントモルタルのフロー値と繊維混入率の関係を示す。ポリマーセメント比にかかわらず、繊維補強ポリマーセメントモルタルのフロー値は、繊維混入率の増加に伴って減少する傾向にある。本研究においては、繊維未混入 (繊維混入率 0%) でフロー値一定としたポリマーセメント比 0, 2, 4 および 6% のポリマーセメントモルタルに繊維を混入して結合材を調製している。そのため、繊維の混入によりポリマーセメントモルタルの流動性が阻害されるものと考えられる。なお、一般的なポリマーセメントモルタルに比べて、ポリマーセメント比は小さな値である。しかしながら、例えば、ポリマーセメント比 6% の調合において、結合材としての繊維補強ポリマーセメントモルタルに占めるポリマーの体積分率は、セメント：細骨材=1：3、ポリマーセメント比 15% 程度のポリマーセメントモルタルにおけるそれと同程度である。

Fig.2 には、繊維補強ポリマーセメントモルタルの圧縮

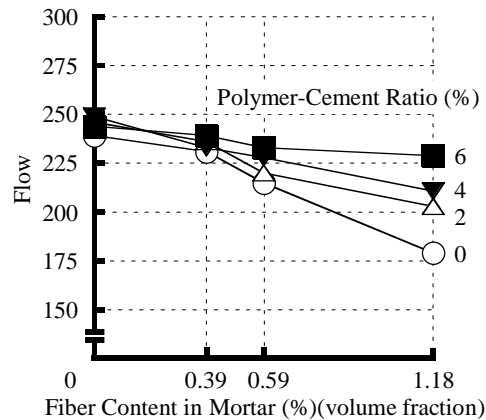


Fig.1 Fiber Content vs. Flow of Fiber-Reinforced Polymer-Modified Mortars as Binder.

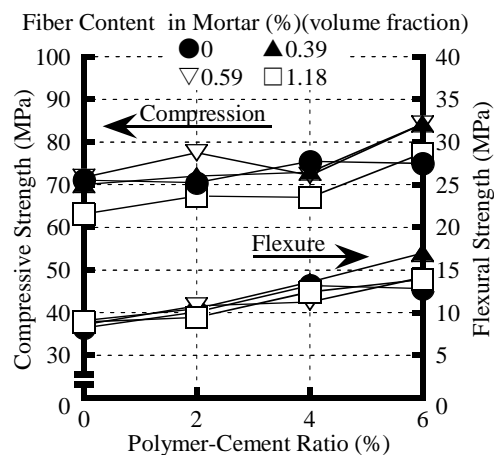


Fig.2 Polymer-Cement Ratio vs. Compressive and Flexural Strengths of Fiber-Reinforced Polymer-Modified Mortars as Binder.

および曲げ強さとポリマーセメント比の関係を示す。繊維補強ポリマーセメントモルタルの圧縮および曲げ強さは、ポリマーセメント比の増加に伴って増大する傾向にある。これは、ポリマーセメント比の増加に伴う水セメント比の減少並びにポリマー混入による曲げ補強効果に起因するものと推察される。なお、繊維補強ポリマーセメントモルタルの圧縮強さは、一部のものを除いて、繊維混入率 0.59% までの増加に伴って若干増大し、繊維混入率 1.18% のもののそれは繊維混入率 0% の圧縮強さよりも小さい傾向にある。このことから推察すれば、0.59% までの繊維混入率の増加は、骨材と結合材の付着性状の改善に寄与して圧縮強さを改善し、それ以上の繊維混入率では、剛性の小さい繊維の増加によって強さが低下するものと考えられる。一方、圧縮強さに比べて、繊維の混入が繊維補強ポリマーセメントモルタルの曲げ強さに及ぼす影響は明確ではない。一般に、繊維補強はセメントモルタルおよびコンクリートの曲げ強さに寄与するものと考えられる。しかしながら、本研究の限りでは、繊維混入率 1.18% までの繊維補強効果に比べて、ポリマー

混入による曲げ補強効果が卓越しているものと推察される。

Fig.3 には、ポリマー混入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。繊維混入率にかかわらず、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。これまで、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製造においては、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ことにより、所要の目標空隙率を得ることができることを明らかにしている⁵⁾。しかしながら、微細な繊維で補強したセメントモルタルを結合材とする場合には、繊維補強セメントモルタルの総体積を結合材体積として取り扱うことにより、所要の連続空隙を持つ調合が可能であるといえる。その場合、混入する繊維の体積分だけ結合材中の細骨材体積を減少する調合設計を行う必要がある。

Fig.4 および **Fig.5** には、ポリマー混入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およびポリマーセメント比の関係を示す。ポリマーセメント比にかかわらず、ポリマー混入繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮強度は、繊維混入率 0.1 または 0.15% 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、前述したように、繊維混入率 0.15% までは結合材である繊維補強ポリマーセメントモルタルの圧縮強さが改善されることに起因するものと考えられる。しかしながら、繊維混入率 0.3% となると、結合材である繊維補強ポリマーセメントモルタルの圧縮強さが低下することに起因して、結合材の剛性が低下し圧縮強度が減少するものと推察される。一方、繊維混入率にかかわらず、ポリマーセメント比の増加に伴って、ポリマー混入繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮強度は増大する傾向にある。これは、ポリマーセメント比の増加に伴う水セメント比の減少によるものと推察される。

Fig.6 および **Fig.7** には、ポリマー混入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およびポリマーセメント比の関係を示す。ポリマー混入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混入率およびポリマーセメント比の影響は、圧縮強度におけるそれらの関係とほぼ同様である。

Fig.8 には、ポリマー混入繊維補強ポーラスコンクリートの曲げ荷重-たわみ曲線をポリマーセメント比別に示す。繊維混入率およびポリマーセメント比にかかわらず、ポリマー混入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、破壊に至る脆性的な挙動を示す。一般に、繊維補強コンクリートにおいては、混入される繊維の引き抜け効果により、最大曲げ荷重後の荷重の低下に伴いたわみが増大する破壊じん性

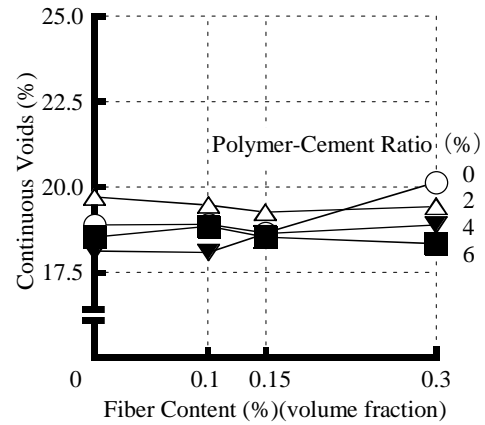


Fig.3 Fiber Content vs. Continuous Voids of Fiber-Reinforced Porous Concretes Using Fiber-Reinforced Polymer-Modified Mortars as Binder.

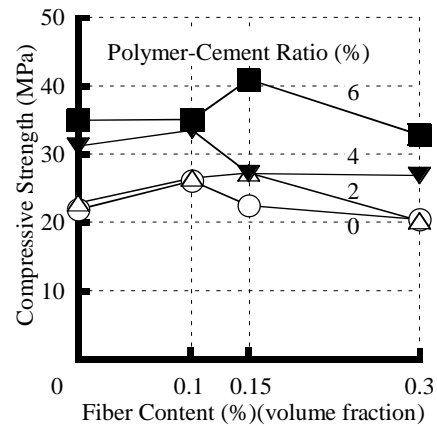


Fig.4 Fiber Content vs. Compressive Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes Using Fiber-Reinforced Polymer-Modified Mortars as Binder.

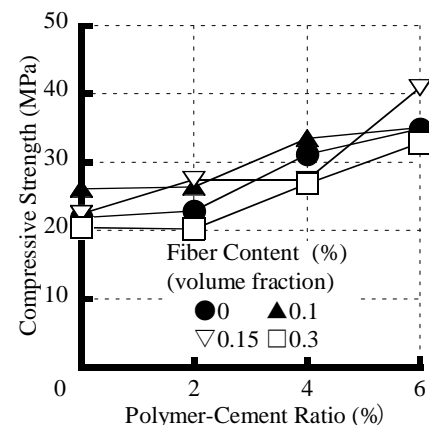


Fig.5 Polymer-Cement Ratio vs. Compressive Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes Using Fiber-Reinforced Polymer-Modified Mortars as Binder.

の改善が得られる。しかしながら、本研究で用いた微細な繊維では、ポリマー混入繊維補強ポーラスコンクリートの粗骨材間を架橋するほどの長さを有しないため、こ

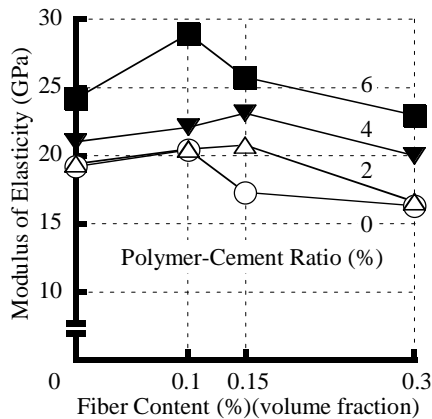


Fig.6 Fiber Content vs. Modulus of Elasticity of Fiber-Reinforced Porous Concretes Using Fiber-Reinforced Polymer-Modified Mortars as Binder.

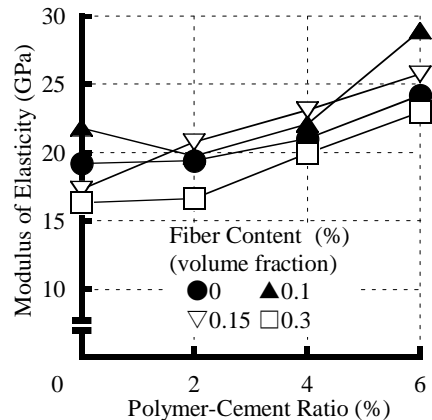


Fig.7 Polymer-Cement Ratio vs. Modulus of Elasticity of Fiber-Reinforced Porous Concretes Using Fiber-Reinforced Polymer-Modified Mortars as Binder.

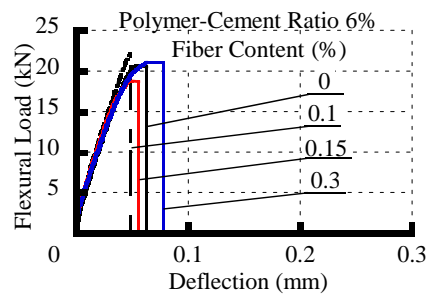
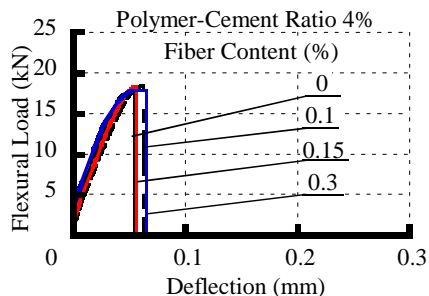
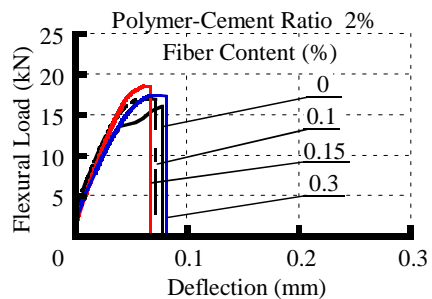
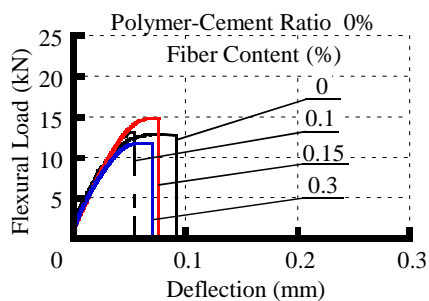


Fig.8 Flexural Load-Deflection Curves for Fiber-Reinforced Porous Concretes Using Fiber-Reinforced Polymer-Modified Mortars as Binder.

のような曲げ荷重-たわみ挙動を示すものと推察される。

Fig.9 および **Fig.10** には、ポリマー混入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およびポリマーセメント比の関係を示す。ポリマー混入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 0.1 または 0.15% までの増加に伴って若干増大し、その後、減少する傾向にある。しかし、繊維混入率にかかわらず、ポリマーセメント比の増加に伴って、ポリマー混入繊維補強ポーラスコンクリートの曲げ強度は著しく増大する傾向にあり、ポリマーセメント比 6% においては、ポリマー未混入のもの 1.5~2 倍の曲げ強度を与える。このような曲げ強度の改善は、適度な繊維の混入による結合材組織の密化、ポリマーの混入による結合材の接着性改善、ポリマーセメント比の増加に伴う水セメント比の減少の

複合効果によるものと推察される。

Fig.11 および **Fig.12** には、ポリマー混入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およびポリマーセメント比の関係を示す。ポリマー混入繊維補強ポーラスコンクリートの曲げタフネスは、ポリマーセメント比の増加に伴って若干増大するものの、繊維混入率の増加に伴う改善はほとんど認められない。このことは、曲げ荷重-たわみ挙動において考察した通り、使用した繊維がポリマー混入繊維補強ポーラスコンクリートの曲げじん性の改善に寄与しないことを示すものである。

以上のことから、本研究の限りでは、結合材を繊維補強ポリマーセメントモルタルとすることは、繊維補強ポーラスコンクリートの機械的性質の改善において有用な補強方法といえる。

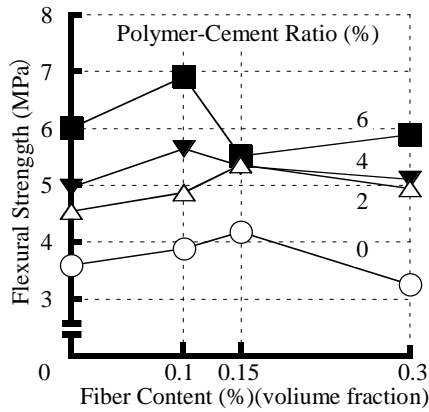


Fig.9 Fiber Content vs. Flexural Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes Using Fiber-Reinforced Polymer-Modified Mortars as Binder.

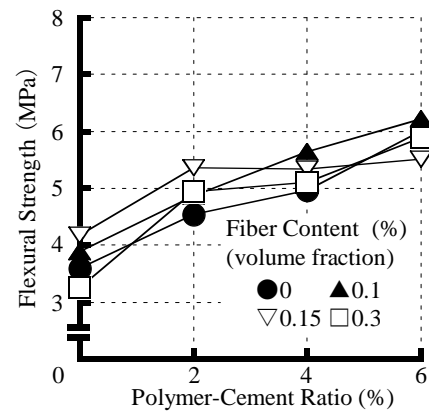


Fig.10 Polymer-Cement Ratio vs. Flexural Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes Using Fiber-Reinforced Polymer-Modified Mortars as Binder.

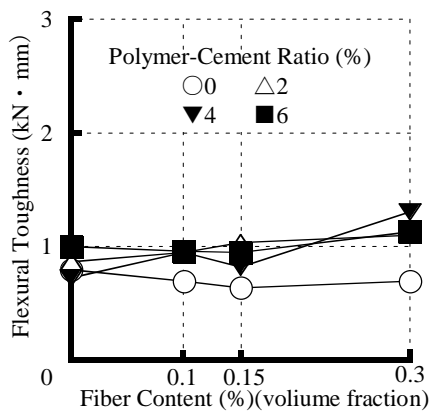


Fig.11 Fiber Content vs. Flexural Toughness of Fiber-Reinforced Porous Concretes Using Fiber-Reinforced Polymer-Modified Mortars as Binder.

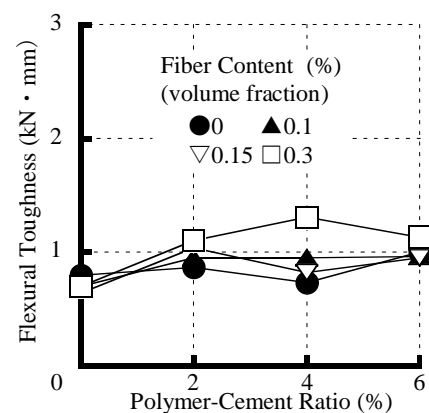


Fig.12 Polymer-Cement Ratio vs. Flexural Toughness of Fiber-Reinforced Porous Concretes Using Fiber-Reinforced Polymer-Modified Mortars as Binder.

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) ポリマーセメント比にかかわらず、ポリマー混入繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮強度、静弾性係数および曲げ強度は、繊維混入率 0.1 または 0.15% までの増加に伴って増大し、その後、減少する傾向にある。
- (2) 繊維混入率にかかわらず、ポリマー混入繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮強度、静弾性係数、曲げ強度および曲げタフネスは、ポリマーセメント比の増加に伴って、著しく増大する傾向にある。
- (3) 本研究の限りでは、結合材を繊維補強ポリマーセメントモルタルとすることは、繊維補強ポーラスコンクリートの機械的性質の改善において有用である。

謝辞

本研究は、平成 23、24 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、謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会編：ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会 委員会報告書、日本コンクリート工学会、2003.5
- 2) 齋藤俊克、出村克宣：ポリマー混入繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮および曲げ性状：セメント・コンクリート論文集、No.65, pp.470-476, 2011
- 3) 十文字拓也、齋藤俊克、出村克宣：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、コンクリート工学年次論文集、Vol.34, No.1, pp.1462-1467, 2012.7
- 4) 平岩陸ほか：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
- 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の提案、日本建築学会構造系論文集、Vol.75, No.657, pp.1947-1953, 2010.11