

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

齋藤 俊克^{*1}・出村 克宣^{*2}

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を明らかにすることを目的に，圧縮および曲げ強度，弾性係数および曲げタフネスに及ぼす繊維混入率および連続空隙率の影響について検討している。その結果，結合材としてのセメントモルタル，粗骨材，ビニロン繊維および空隙の体積分率を変数とする力学的性質の制御因子を提案し，ビニロン繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮および曲げ強度，弾性係数および曲げタフネスの推定式を導いている。

キーワード：繊維補強ポーラスコンクリート，強度，弾性係数，曲げタフネス，制御因子

1. はじめに

近年，ポーラスコンクリートは，エコマテリアルとしての観点からの利用が拡大し，その調合設計法や製造法などについて多くの研究がなされており¹⁾，その力学的性質についての研究成果も多い。しかしながら，短繊維補強によるポーラスコンクリートの強度改善に関する研究はわずかである^{2),3)}。

著者らは，これまで，繊維混入率0.5%までのビニロン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についての強度制御因子を導いている⁴⁾。本研究では，その結果を踏まえて，繊維混入率を1.0%までとしたビニロン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に対する強度制御因子の適用性を検討している。また，弾性係数および曲げタフネスについても強度制御因子と同様の考え方を適用し，強度制御因子も含めて，繊維補強ポーラスコンクリートの力学的性質の制御因子を提案し，その圧縮強度，曲げ強度，弾性係数および曲げタフネスの推定式を導いている。

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，砂岩碎石を使用した。それらの性質を **Table 2** および **Table 3** に示す。

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，

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	3330	2-22	3-28
Compressive Strength of Mortar (MPa)			
		3d	7d
		29.7	45.2
		28d	
			62.6
Chemical Compositions (%)			
	MgO	SO ₃	ig. loss
	1.48	2.07	1.84

Table 2 Properties of Fine Aggregate.

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

*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 工学部建築学科教授 工博（正会員）

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 補強用繊維

補強用繊維としては、セメントコンクリート補強用として市販されているビニロン繊維を使用した。補強用繊維の性質を **Table 5** に示す。

3. 試験方法

3.1 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** に示す調合で、繊維補強ポーラスコンクリートを練り混ぜ、寸法 10×10×40cm およびφ15×30cm に成形し、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、1d 湿空、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、**Table 6** に示す調合は、粗骨材と短繊維の混合物 (繊維/粗骨材混合物) について得られた実積率をもとに、これまでに提案されている調合設計法⁵⁾ に準じて決定したものである。

3.2 圧縮試験

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)] に従って、

供試体の圧縮試験を行った⁶⁾。その際、供試体の縦ひずみを測定し、弾性係数を算出した。

3.3 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。

3.4 空隙率試験

JCI-SPO2-1 [ポーラスコンクリートの空隙率試

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)
40	0.66	1.30	880	29.4

Table 6 Mix Proportions of Porous Concretes.

W/C (%)	Fiber Length (mm)	Percentage of Target Voids (%)	Mix Proportions (kg/m ³)				AE-WRA* (%)	Fibers Content** (%)	
			Water	Cement	Fine Aggregate	Coarse Aggregate			
22.5	40	20.0	66	292	184	1568	0.9	0	
			72	318	201	1501		0.3	
			72	319	201	1457		0.5	
		75	334	211	1346	1.0			
		80	355	224	1568	0			
		86	381	241	1501	0.3			
	17.5	40	17.5	88	389	245		1457	0.5
				90	401	253		1346	1.0
				92	406	256		1568	0
			98	433	273	1501		0.3	
			100	445	280	1457		0.5	
			104	461	291	1346		1.0	

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

** : Fibers content in concrete by volume.

験方法 (案)] に従って空隙率試験を行い、供試体の連続空隙率を算出した。

4. 試験結果および考察

Fig.1 には、繊維補強ポーラスコンクリートの連続空隙率と目標空隙率の関係を示す。繊維混入率 0~0.5% のポーラスコンクリートにおいては、目標空隙率に近い連続空隙率が得られているが、繊維混入率が 1.0% になると、連続空隙率が大きくなり、特に、目標空隙率が大きい場合には、その連続空隙率は著しく増大する傾向にある。

3.1 で述べたように、本研究においては、繊維／粗骨材混合物の実積率を求めることによって、その混合物の間隙にセメントモルタルを充填して目標空隙率を得るように調合設計を行っている。しかしながら、平岩らが指摘するように⁷⁾、ポーラスコンクリートにおいては、粗骨材表面にセメントモルタルが付着することによって、見かけ上、粗骨材の最大寸法が増大すると考えることができ、粗骨材間の間隙は大きくなるものと推察される。一方、繊維混入率の増加に伴って、繊維／粗骨材混合物の実積率は減少する傾向にあるため⁴⁾、繊維混入率が 1.0% になると、粗骨材に対するセメントモルタルの付着量が増加して、そのような間隙の増大の影響が著しくなり、連続空隙率が著しく大きくなる結果をもたらしているものと考えられる。

Fig.2 には、繊維補強ポーラスコンクリートの曲げ荷重-たわみ曲線を示す。目標空隙率およ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は、最大荷重を示した後、荷重が緩やかに減少する荷重-たわみ関係を示し、2mm までのたわみの増加に対する荷重の低下は 3~5kN 程度であり、曲げ変形能力に富む性質を有していると推察される。

Fig.3 には、繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮およ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、一部のものを除けば、繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮および曲げ強度は、繊維混入率 0.5% まで増大する傾向に

ある。目標空隙率を一定とする調査では、繊維混入率の増加に伴って、単位セメントモルタル量が増大することから⁴⁾、繊維および粗骨材の付着性が改善され、このような強度の増大をもたらすものと考えられる。しかしながら、繊維混

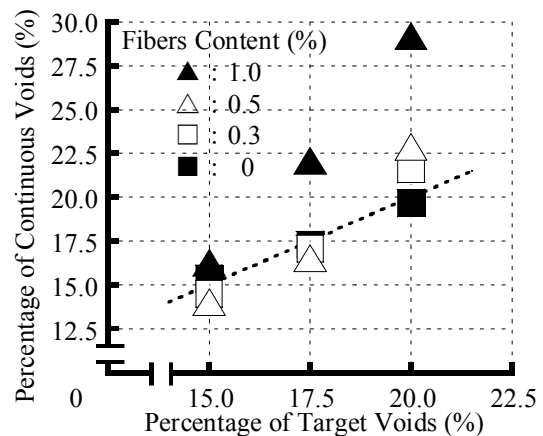


Fig.1 Percentage of Target Voids vs. Percentage of Continuous Voids of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

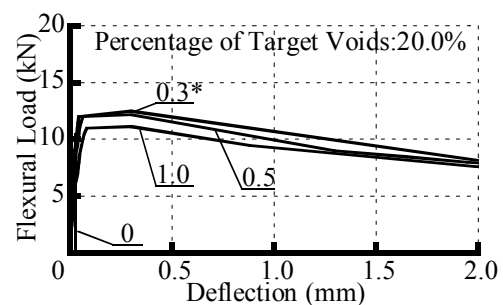
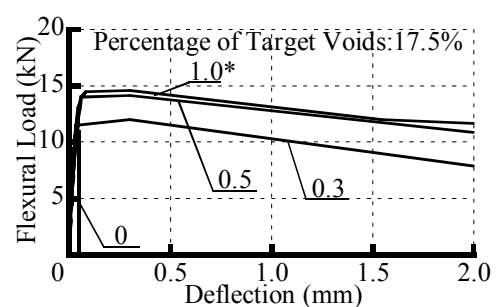
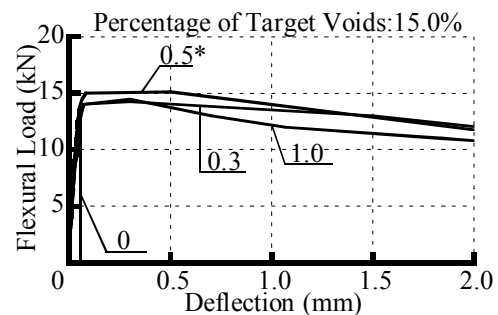


Fig.2 Flexural Load-Deflection Curves for Fiber-Reinforced Porous Concretes. Note, *: Figure shows fibers content (%).

入率が 1.0%になると繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮および曲げ強度は低下する傾向にある。これは、繊維混入率が 1.0%になると連続空隙率が増大し、繊維補強ポーラスコンクリートにおける空隙のセメントモルタルによる充填性が損なわれることに起因するものと考えられる。なお、当然のことながら、繊維混入率にかかわらず、目標空隙率の大きい繊維補強ポーラスコンクリートほど、圧縮および曲げ強度は小さい。

Fig.4 には、繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮および曲げ強度と連続空隙率の関係を示す。繊維混入率にかかわらず、連続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および曲げ強度は減少する。

Fig.5 には、繊維補強ポーラスコンクリートの弾性係数および曲げタフネスと繊維混入率の関係を、

Fig.6 には、繊維補強ポーラスコンクリートの弾性係数および曲げタフネスと連続空隙率の関係を示す。繊維補強ポーラスコンクリートの弾性

係数および曲げタフネスと繊維混入率および連続空隙率との関係は、圧縮および曲げ強度とそれらとの関係と類似した傾向を示している。

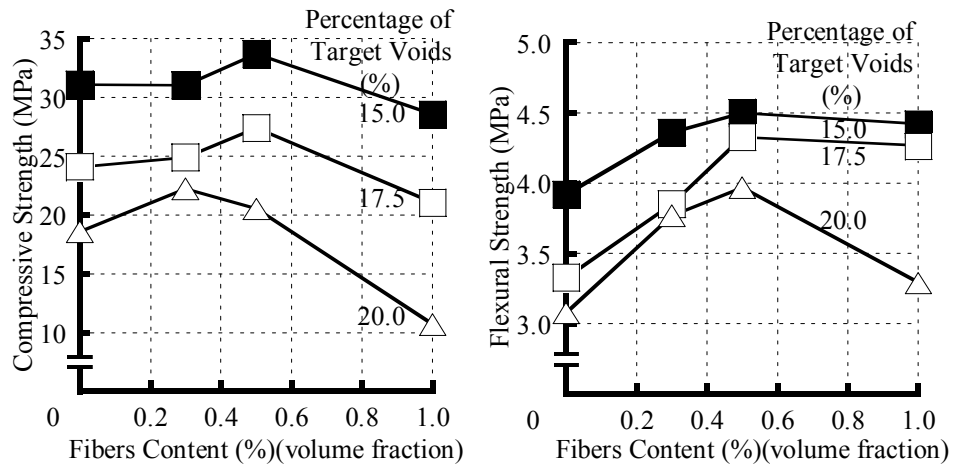


Fig.3 Fibers Content vs. Compressive and Flexural Strengths of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

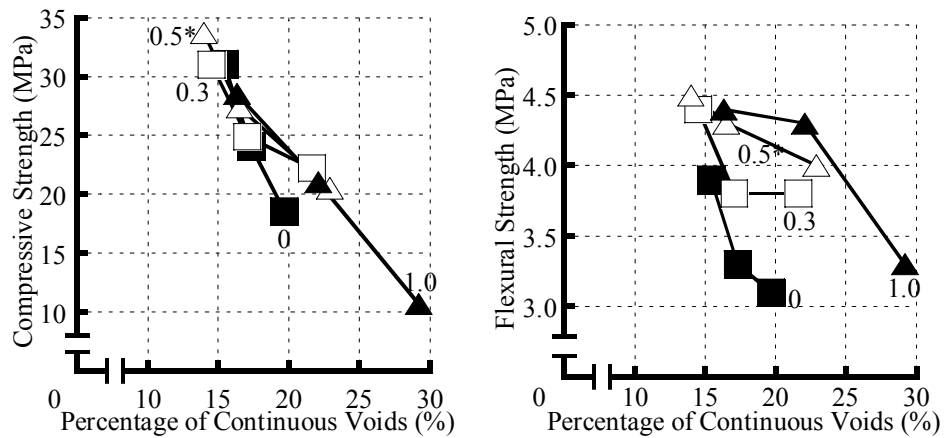


Fig.4 Percentage of Continuous Voids vs. Compressive and Flexural Strengths of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

Note,*: Figure shows fibers content (%).

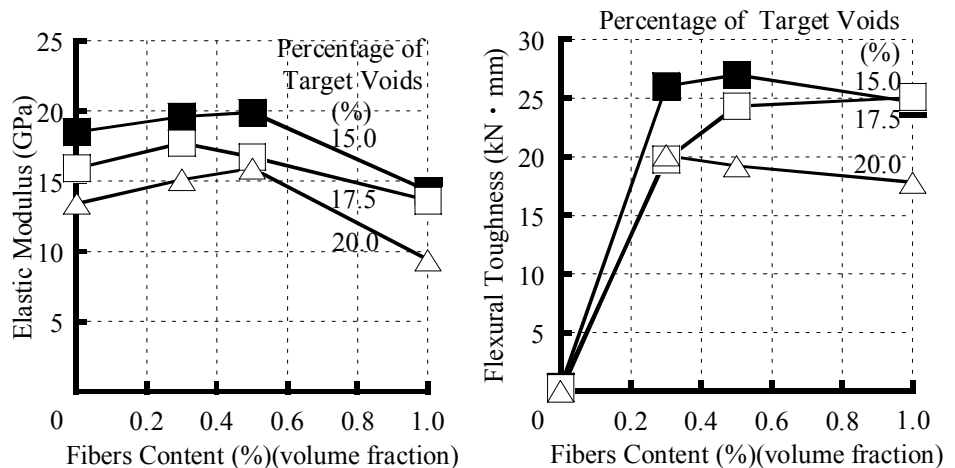


Fig.5 Fibers Content vs. Elastic Modulus and Flexural Toughness of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

以上のことから、繊維補強ポーラスコンクリートの力学的性質としての圧縮強度、曲げ強度、弾性係数および曲げタフネスは、単位セメントモルタル量、単位粗骨材量、繊維混入率および空隙率に支配されると推察される。そこで、これらの要因を考慮して、次のような制御因子を導いた。

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

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

$$FT_v = V_m \sqrt{1 + V_f} (100 - V_a) \cdot V_g \quad (3)$$

$$V_m = V_w + V_c + V_s \quad (4)$$

ここに、

C_v : 圧縮強度および弾性係数制御因子

F_v : 曲げ強度制御因子

FT_v : 曲げタフネス制御因子

V_m : モルタルの体積百分率(%)

V_g : 粗骨材の体積百分率(%)

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 および V_s : 水, セメントおよび細骨材の体積百分率(%)

Fig.7 から Fig.10 には、繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮および曲げ強度、弾性係数および曲げタフネスとそれらの制御因子の関係を示す。なお、曲げタフネスとその制御因子の関係は、繊維混入率 0% のものを除いて示したものである。繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮および曲げ強度、弾性係数および曲げタフネスとそれらの制御因子と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。

$$\sigma = A + B \cdot \log_{10} S \quad (5)$$

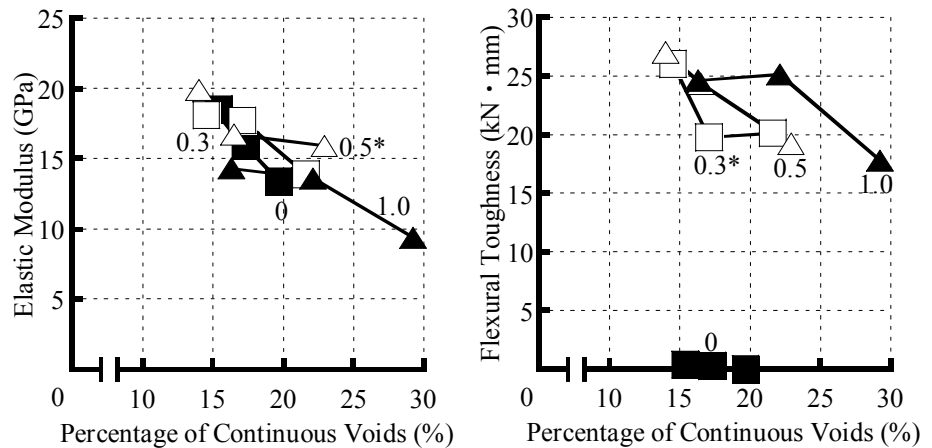


Fig.6 Percentage of Continuous Voids vs. Elastic Modulus and Flexural Toughness of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

Note,*: Figure shows fibers content (%).

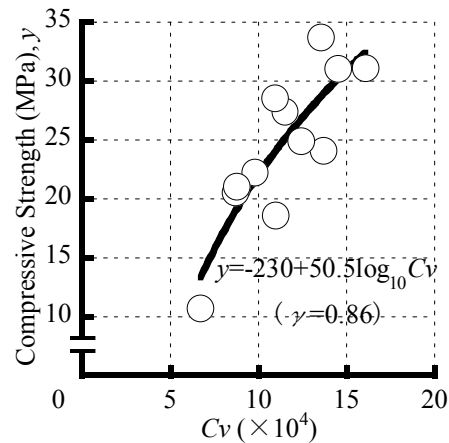


Fig.7 C_v vs. Compressive Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

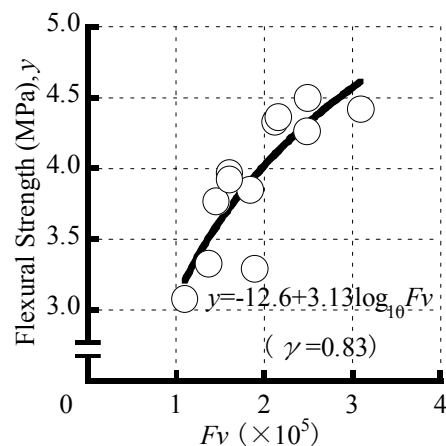


Fig.8 F_v vs. Flexural Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

ここに、

σ : 圧縮強度(MPa), 曲げ強度(MPa), 弾性係数(GPa), 曲げタフネス(kN·mm)

S : 圧縮強度, 曲げ強度, 弾性係数または曲

げタフネス制御因子(C_v , F_v , FT_v)

A および B : 実験定数

なお、前述したように、繊維混入率の増加に伴って、本研究の調合設計における目標空隙率に比べ、測定される連続空隙率は大きい値を示している。しかしながら、式 (1) ~ (3) においては、連続空隙率を用いており、Fig.7 から Fig.10 に示す実験式は、測定される連続空隙率を用いて導いたものである。したがって、目標空隙率と連続空隙率の違いにかかわらず、式 (5) を用いることによって、繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮および曲げ強度、弾性係数および曲げタフネスが推定できるものとする。

5. 結論

本研究で得られた試験結果を総括すれば、次の通りである。

- (1) 繊維混入率 0.5%までのビニロン繊維補強ポーラスコンクリートについて導いた強度制御因子⁴⁾は、繊維混入率が 1.0%まで増加しても適用可能であり、それらは、式 (1) および (2) のように示される。
- (2) ビニロン繊維補強ポーラスコンクリートの弾性係数および曲げタフネスの制御因子として、式 (1) および (3) が提案できる。
- (3) 以上の制御因子は、ビニロン繊維補強ポーラスコンクリートの力学的性質の制御因子として提案でき、それらを用いた式 (5) を適用することによって、圧縮強度、曲げ強度、弾性係数および曲げタフネスが推定できる。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：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報告書，231p，2003.5
- 2) 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

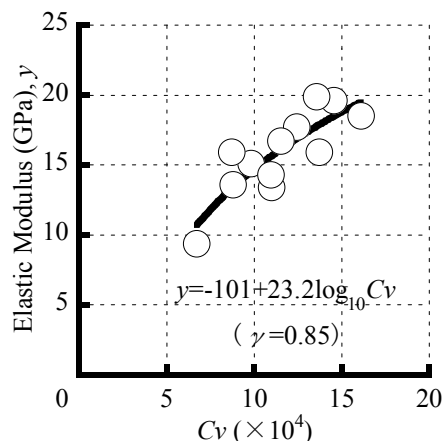


Fig.9 C_v vs. Elastic Modulus of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

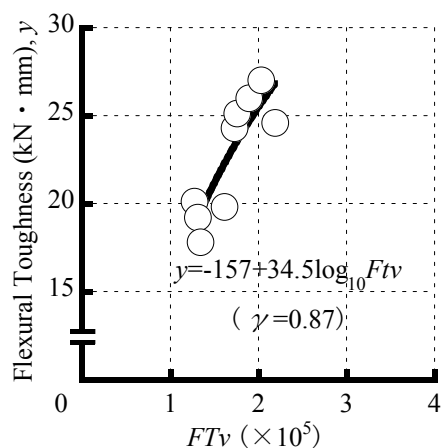


Fig.10 FT_v vs. Flexural Toughness of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

- 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集，Vol.19，No.1，pp.499-504，1997.6
- 4) 斎藤俊克，出村克宣：ビニロン繊維補強ポーラスコンクリートの基礎的性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.247-252，2005.6
- 5) 先端建設技術センター編：ポーラスコンクリート河川護岸工法の手引き，山海堂出版，pp.109-113，2001.4
- 6) 日本コンクリート工学協会：エココンクリート研究委員会報告書，p.58，1995.11
- 7) 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.121-126，2001.6