

論文 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

齋藤 俊克^{*1}・出村 克宣^{*2}・寒河江 賢伍^{*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圧縮および曲げ強度に及ぼす水セメント比の影響を検討している。その結果、繊維補強普通コンクリートと同様に、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、水セメント比の増加に伴い減少する傾向にある。また、結合材としてのセメントモルタルの水セメント比および体積分率ならびに、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圧縮および曲げ強度制御因子を導き、それを用いた繊維補強ポーラスコンクリートの強度推定式を提案している。

キーワード：繊維補強ポーラスコンクリート、水セメント比、強度制御因子、強度

1. はじめに

近年、ポーラスコンクリートは、水質浄化、屋上緑化、河川護岸、道路舗装、吸音などの用途に用いられ、エコマテリアルとして注目を浴びている。また、ポーラスコンクリートの基礎的性質である調合設計法や製造法、その力学的性質などについて多くの研究がなされている¹⁾。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、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性状について検討し、水セメント比一定とした時の力学的性質の制御因子を提案して、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^{4), 5)}。

本研究では、これまでに提案した力学的性質の制御因子の変数として水セメント比を加えるために、繊維混入率を変化させたポーラスコンクリートの圧縮および曲げ強度に及ぼす水セメント比の影響を検討して、新規な圧縮および曲げ強度制御因子を導き、それを用いた強度の推定式を提案している。

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、砂岩砕石を使用した。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	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	
1.44	2.05	1.70	

*1 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 工修 (正会員)

*2 日本大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

*3 日本大学 工学部建築学科

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 結合材としてのセメントモルタルの試験

セメント：細骨材=1：0.63（質量比），水セメント比を 20.0, 22.5 および 25.0%と変化させた調合の供試モルタルを，そのフロー値が 230±20 となるように高性能 AE 減水剤添加率を調整して練り混ぜた。その後，供試モルタルを寸法 40×40×160mm 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，24h 湿空，24h 温水（70℃）および 1h 水中（20℃）養生を行ってモルタル供試体を作製した。モルタル供試体については，JIS R 5201（セメントの物理試験方法）に準じて，曲げおよび圧縮強さ試験を行った。

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，目標空隙率 20%とした **Table 6** に示す調合の繊維補強ポーラスコンク

リートを練混ぜ，寸法 10×10×40cm および φ15×30cm に成形し，JCI-SE4 に従い，24h 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，決

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)
40	0.66	1.30	880	29.4

Table 6 Mix Proportions of Porous Concretes.

W/C (%)	Mix Proportions (kg/m ³)				AE-WRA* (%)	Fibers Content** (%)	Solid Content*** (%)	Percentage of Continuous Voids (%)
	Water	Cement	Fine Aggregate	Coarse Aggregate				
20.0	71	356	224	1568	1.5	0	61.9	20.4
	76	381	240	1501		0.3	59.7	21.3
	80	398	250	1457		0.5	58.2	19.1
	88	439	276	1346		1.0	54.5	19.3
22.5	78	345	217	1568	1.1	0	61.9	19.6
	83	369	232	1501		0.3	59.7	20.0
	87	385	242	1457		0.5	58.2	19.5
	96	425	267	1346		1.0	54.5	20.8
25.0	84	334	210	1568	0.8	0	61.9	20.7
	89	357	225	1501		0.3	59.7	19.7
	93	373	235	1457		0.5	58.2	20.4
	103	412	259	1346		1.0	54.5	21.3

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

** : Fibers content in concrete by volume. *** : Solid content in fiber-coarse aggregate mixtures.

定したものである⁶⁾。

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)]に従って、供試体の圧縮強度試験を行った⁷⁾。

3.4 曲げ強度試験

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、供試体の曲げ強度試験を行った。

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「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、結合材としてのセメントモルタルの圧縮および曲げ強さと水セメント比の関係を示す。結合材としてのセメントモルタルの圧縮および曲げ強さは、水セメント比の増加に伴って減少する傾向にある。

Fig.2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。水セメント比にかかわらず、繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮強度は、繊維混入率0.5%まで増大し、その後、低下する傾向にある。このような圧縮強度の増大をもたらす要因として、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が増大し、繊維補強ポーラスコンクリート中の繊維/粗骨材間の付着性が改善されることが考えられる。しかしながら、繊維混入率1.0%になると単位セメントモルタル量が増加するものの、弾性係数の小さいビニロン繊維の量が増大するため、圧縮強度の低下が生じるものと推察される。

Fig.3には、繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮強度と水セメント比の関係を示す。繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮強度は、水セメ

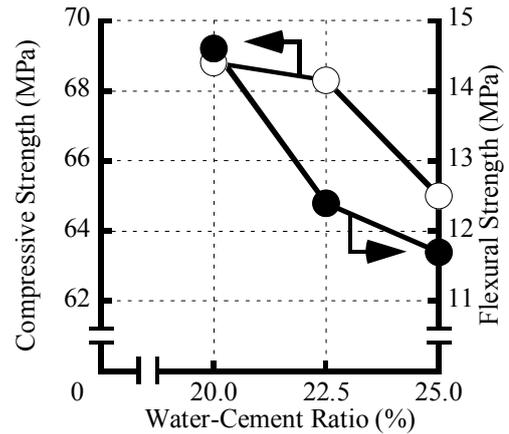


Fig.1 Water-Cement Ratio vs. Compressive and Flexural Strengths of Cement Mortars.

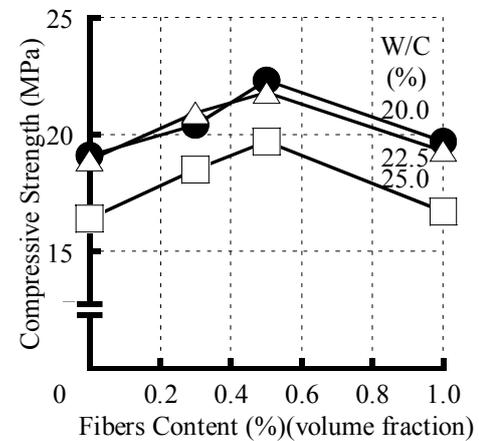


Fig.2 Fibers Content vs. Compressive Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

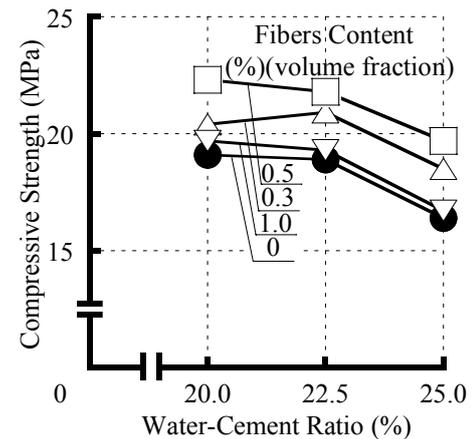


Fig.3 Water-Cement Ratio vs. Compressive Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

ント比の増加に伴って減少する傾向にある。

Fig.4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。水セメント比にかかわらず、繊維補強ポーラスコンクリ

ートの曲げ強度は、繊維混入率の増加に伴って増大し、繊維混入率 0.5%以上ではほぼ一定となる。これは、繊維の混入による曲げ補強効果によるものと考えられるが、繊維混入率 1.0%では繊維量が多く、その分散性が低下して、効果的な曲げ補強効果が発揮されないことが示唆される。

Fig.5 には、繊維補強ポーラスコンクリートの曲げ強度と水セメント比の関係を示す。圧縮強度と同様に、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曲げ強度は、水セメント比の増加に伴って減少する傾向にある。

以上のように、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、その水セメント比、換言すれば、結合材としてのセメントモルタルの水セメント比の増加に伴って減少する傾向にある。この傾向は、既往の研究結果とも一致している⁸⁾。

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および曲げ強度は、単位セメントモルタル量、単位粗骨材量、繊維混入率および空隙率に支配される^{4), 5)}。本研究では、更に、結合材としてのセメントモルタルの水セメント比を考慮しようとするものである。そこで、まず、結合材としてのセメントモルタルの水セメント比別に、次に示す強度制御因子と圧縮および曲げ強度の関係について検討する。なお、繊維混入率 0.5%以上では、圧縮強度の低下が認められると共に、曲げ強度はほぼ一定となることから、本研究で開発した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している。

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

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

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

ここに、

C_v : 圧縮強度制御因子

F_v : 曲げ強度制御因子

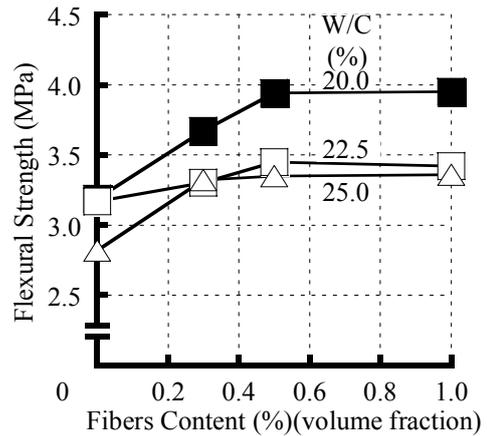


Fig.4 Fibers Content vs. Flexural Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

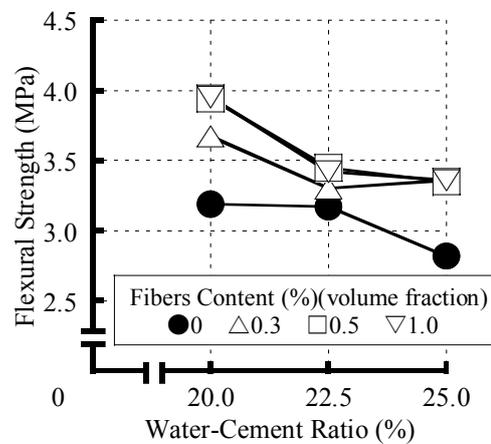


Fig.5 Water-Cement Ratio vs. Flexural Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

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.6 および Fig.7 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それらの強度制御因子の関係を、結合材としてのセメントモルタルの水セメント比別に示す。いずれの水セメント比においても、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それらの強度制御因子の間には、高い相関性が認められる。

次に、結合材としてのセメントモルタルの水セメント比を強度制御因子の変数とするために、水セメント比 (W/C) 25.0%のセメントモルタルの圧縮および曲げ強さを指標とする圧縮および

曲げ強さ比を次式により算出した。

$$R_{si} = \frac{\sigma_i}{\sigma_{25.0}} \quad (4)$$

ここに、

R_{si} : 圧縮または曲げ強さ比

$\sigma_{25.0}$: W/C25.0%のセメントモルタルの圧縮
または曲げ強さ (MPa)

σ_i : 各調合のセメントモルタルの圧縮ま
たは曲げ強さ (MPa)

Fig.8 には、結合材としてのセメントモルタルの圧縮および曲げ強さ比と水セメント比の関係を示す。結合材としてのセメントモルタルの曲げおよび圧縮強さ比と水セメント比の間には、高い相関性が認められ、それらの関係は次に示す一般式で表すことができる。

$$y = ax + b \quad (5)$$

ここに、

y : 圧縮および曲げ強さ比

x : 水セメント比 (%)

a および b : 実験定数

ここで、W/C25.0%のセメントモルタルに対する圧縮および曲げ強さ比は、水セメント比別の強度制御因子と強度の関係を示す曲線間の距離を表す変数であると考えられる。そこで、前述の式 (1) および式 (2) にこれらの強さ比を乗じることによって、水セメント比を考慮した新規な強度制御因子を次のように提案できる。

$$C_{sc} = V_m \sqrt{(1 + V_f)} (100 - V_a) \cdot V_g \cdot R_c \quad (6)$$

$$F_{sc} = V_m (1 + V_f) (100 - V_a) \cdot V_g \cdot R_f \quad (7)$$

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

$$R_c = -0.01 \cdot W/C + 1.31 \quad (8)$$

$$R_f = -0.05 \cdot W/C + 2.23 \quad (9)$$

ここに、

C_{sc} : W/C を考慮した圧縮強度制御因子

F_{sc} : W/C を考慮した曲げ強度制御因子

V_m : モルタルの体積百分率 (%)

V_g : 粗骨材の体積百分率 (%)

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) (%)

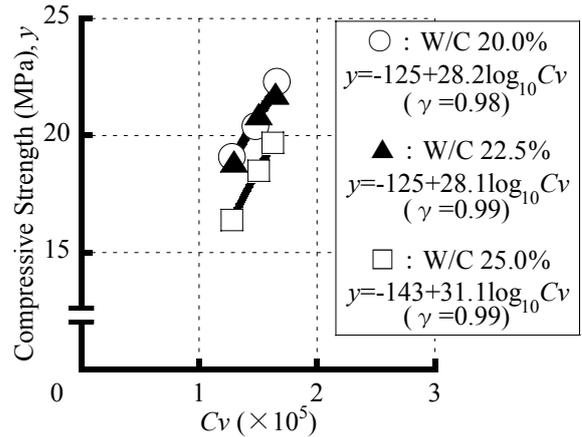


Fig.6 C_v vs. Compressive Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

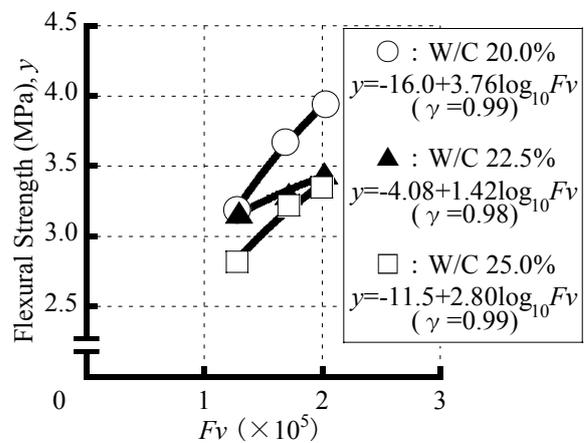


Fig.7 F_v vs. Flexural Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

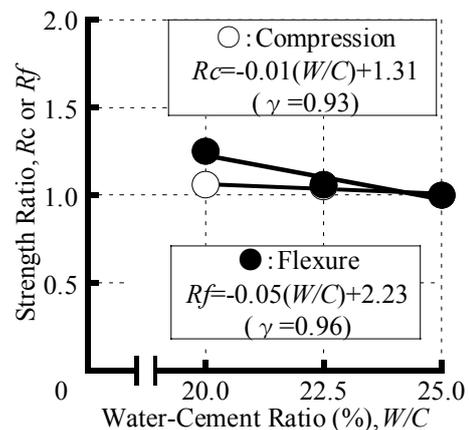


Fig.8 Water-Cement Ratio vs. Strength Ratios of Cement Mortars as Binder.

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 (%)

R_c または R_f : セメントモルタルの圧縮または曲げ強さ比

W/C : 水セメント比 (%)

Fig.9 および 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と水セメント比を考慮した強度制御因子の関係を示す。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それらの強度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。

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

ここに、

σ : 圧縮および曲げ強度 (MPa)

S : 圧縮または曲げ強度制御因子 (C_{sc} , F_{sc})

A および B : 実験定数

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) 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は、繊維混入率 0.5%までの増加に伴い増大する傾向にあるが、水セメント比の増加に伴い減少する。
- (2) 本研究で開発した繊維混入率 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および曲げ強度は、水セメント比を考慮した式 (6) および式 (7) で表される強度制御因子との間に高い相関性があり、それらを用いた式 (10) を適用することによって、圧縮および曲げ強度が推定できる。

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
- 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.499-504，1997.6
- 4) 斎藤俊克，出村克宣：ビニロン繊維補強ポー

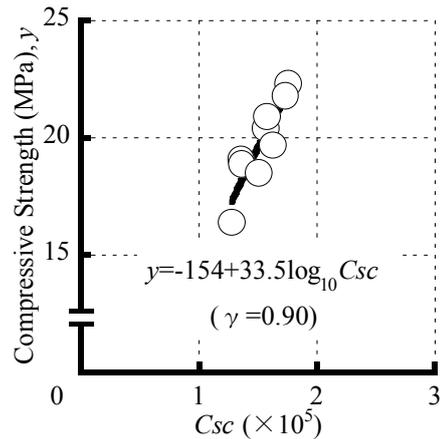


Fig.9 C_{sc} vs. Compressive Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

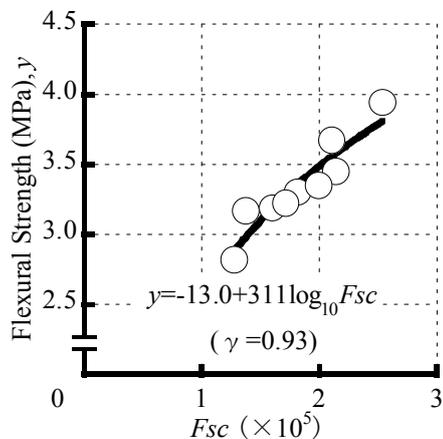


Fig.10 F_{sc} vs. Flexural Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

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) 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力学的性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.293-298，2006.6
- 6) 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調査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，pp.1013-1014，2006.9
- 7) 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
- 8) 中澤隆雄，Abderrazak ZOUAGHI，今井富士夫：ポーラスコンクリートの配合が透水性および強度に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集，No.50，pp.382-387，1996