

論文 ビニロン繊維補強ポーラスコンクリートの乾湿繰返し及び凍結融解に対する抵抗性

齋藤 俊克*1・寒河江 賢伍*2・有岡 大輔*3・出村 克宣*4

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乾湿繰返し及び凍結融解に対する抵抗性について検討している。その結果、繊維補強ポーラスコンクリートは、乾湿繰返し及び凍結融解の進行に伴い、相対動弾性係数は減少し、質量減少率は増大する傾向にある。又、乾湿繰返し後の繊維補強ポーラスコンクリートの曲げ強度は、乾湿繰返し前のものに比べて、著しい低下を示す。しかしながら、本研究の限りでは、繊維補強ポーラスコンクリートの乾湿繰返し及び凍結融解に対する抵抗性は、繊維混入率 0.5%までの増加に伴い改善される傾向にある。

キーワード: 繊維補強ポーラスコンクリート, 乾湿繰返し, 凍結融解, 相対動弾性係数, 質量減少率

1. はじめに

ポーラスコンクリートは、多量の連続空隙を有していることから、結合材としてのセメントペースト又はモルタルは、乾燥及び湿潤環境の繰返し作用による劣化の影響を受けやすいといわれている^{1), 2)}。又、容易に雨水などの水が浸入することから、凍結融解作用の影響を受けやすく、普通コンクリートに比べて、劣化が生じやすいことが懸念される¹⁾。しかしながら、ポーラスコンクリートに繊維を混入することによって、粗骨材間が架橋されるため、乾湿繰返しや凍結融解作用に対する抵抗性が向上するものと考えられるが、短繊維補強ポーラスコンクリートの耐久性に関する研究はわずかである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性状、曲げ性状^{4), 5)}及び乾湿繰返し抵抗性⁶⁾に及ぼす水セメント比、空隙率並びに繊維混入率の影響について検討している。

本研究では、繊維混入率を変化させた繊維補強ポーラスコンクリートについて乾湿繰返し及び凍結融解試験を行い、乾湿繰返し及び凍結融解サイクルの進行に伴う相対動弾性係数及び質量の変化並びに、耐久性指数について検討している。又、乾湿繰返し抵抗性については、乾湿繰返し試験前後の繊維補強ポーラスコンクリートの曲げ強度についても検討を行っている。

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。

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

Table 2 Properties of Fine Aggregate.

Size (mm)	Bulk Density (kg/l)	Density (g/cm ³)	Water Absorption (%)
≤2.5	1.63	2.57	2.32

Table 3 Properties of Coarse Aggregate.

Size (mm)	Bulk Density (kg/l)	Density (g/cm ³)	Water Absorption (%)
5~20	1.61	2.64	1.13

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** 及び **Table 3** に示す。

*1 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 修士 (工学) (正会員)

*2 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻

*3 日本大学 工学部建築学科

*4 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** に示す目標空隙率 20%とした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 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℃) 及び 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、これまでの研究から短繊維と粗骨材の混合物について得られた実績率をもとに、決定したものである⁷⁾。

3.2 乾湿繰返し試験

JCI-SPO6 [ポーラスコンクリートの乾湿繰返し試験方法 (案)] に従って、供試体の乾湿繰返し試験を行った。なお、乾湿繰返し試験については、**Fig.1** に示すような手順で行い、2 サイクル毎に相対動弾性係数、質量減少率を求めると共に、耐久性指数を算出した。なお、JCI-SPO6 においては、その算定式が規定されていないため、次式により、乾湿繰返しにおける耐久性指数を求めた。

$$DFwd = \frac{P \times N}{M}$$

ここに、DFwd : 乾湿繰返し耐久性指数

P : N サイクルのときの相対動弾性係数

N : 相対動弾性係数が 60%以下になるサイクル数、
又は 100 サイクルのいずれか小さいもの

M : 100 サイクル

3.3 凍結融解試験

JIS A 1148 (コンクリートの凍結融解試験方法) に従っ

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)	Tensile Strength (MPa)	Density (g/cm ³)	Elastic Modulus in Tension (GPa)
40	0.66	880	1.30	29.4

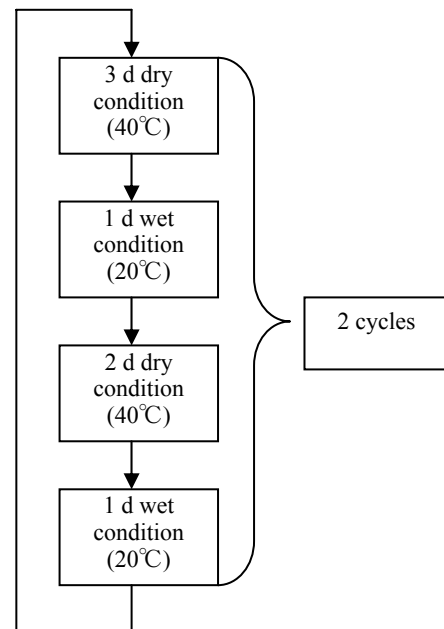


Fig.1 Process for Drying and Wetting Test.

て、供試体の水中凍結融解試験 (A 法) を行い、JIS A 1127 (共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法) に従って、10 サイクル毎に、相対動弾性係数、質量減少率を求めると共に、耐久性指数を算出した。

Table 6 Mix Proportions of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

W/C (%)	Target Voids (%)	Mix Proportions (kg/m ³)				Fiber Content* (%)	AE-WRA** (%)
		Water	Cement	Fine Aggregate	Coarse Aggregate		
22.5	20	72	319	201	1449	0	1.1
		77	343	215	1393	0.3	
		81	358	225	1355	0.5	
		90	398	250	1260	1.0	

Notes,*: Fiber content in concrete by volume.

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

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及び曲げタフネス試験方法)に準じて、乾湿繰返し試験前及び相対動弾性係数が60%以下になった時点において、供試体の曲げ強度試験を行った。

4. 試験結果及び考察

4.1 乾湿繰返しに対する抵抗性

Fig.2には、繊維補強ポーラスコンクリートの相対動弾性係数と乾湿繰返しサイクルの関係を示す。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相対動弾性係数は、乾湿繰返し初期において若干増大し、その後、乾湿繰返しの進行に伴って低下する傾向にある。しかし、乾湿繰返し40サイクル程度までは、繊維混入率の大きいものほど、繊維補強ポーラスコンクリートの相対動弾性係数は大きい傾向にある。これは、目標空隙率を一定とする調合では、繊維混入率の増加に伴う繊維と粗骨材混合物の実積率の低下により、繊維補強ポーラスコンクリートの単位セメントモルタル量が増大するため、繊維と粗骨材間の付着性が改善することによるものと考え⁷⁾。なお、繊維補強ポーラスコンクリートに比べて、無補強ポーラスコンクリート(繊維混入率0%)の乾湿繰返しに伴う相対動弾性係数の低下の程度が著しく、乾湿繰返し46サイクルにおいて、60%を下回っている。

Fig.3には、乾湿繰返し20、40、46及び60サイクル後における繊維補強ポーラスコンクリートの相対動弾性係数と繊維混入率の関係を示す。繊維混入率0.3%以上の繊維補強ポーラスコンクリートは、無補強ポーラスコンクリートの相対動弾性係数が60%を下回る乾湿繰返し46サイクル後において75%以上の相対動弾性係数を維持し、乾湿繰返し60サイクル後までは、65%以上の相対動弾性係数を保持している。又、乾湿繰返しサイクル数が増大すると繊維混入率の違いによる相対動弾性の差異は認められなくなる。しかしながら、繊維混入率1.0%の繊維補強ポーラスコンクリートの相対動弾性係数は、乾湿繰返し68サイクル後において60%を下回る。

Fig.4には、繊維補強ポーラスコンクリートの質量減少率と乾湿繰返しサイクルの関係を示す。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質量減少率は、乾湿繰返しの進行に伴って増大する傾向にある。繊維補強ポーラスコンクリートの質量減少の要因としては、ポーラスコンクリートは連続空隙を有しており、コンクリート内部まで乾湿繰返しの影響が及ぶため。乾湿繰返しの進行により、粗骨材を結合するセメントモルタルが劣化しやすくなることによるものと推察される。しかし、繊維混入率1.0%のものを除けば、いずれの乾湿繰

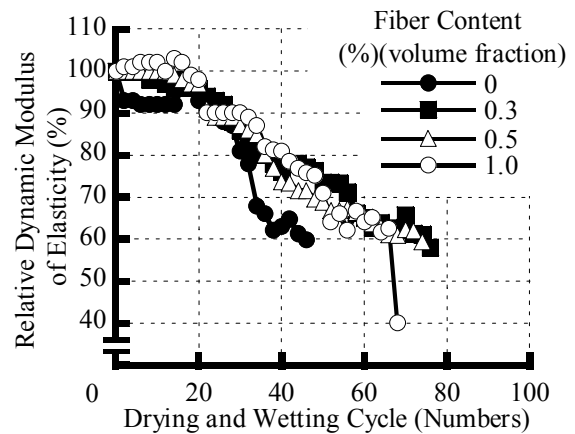


Fig.2 Drying and Wetting Cycle vs. Relative Dynamic Modulus of Elasticity of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

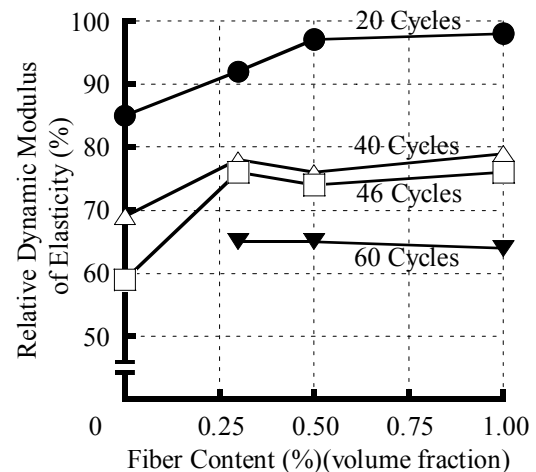


Fig.3 Fiber Content vs. Relative Dynamic Modulus of Elasticity of Fiber-Reinforced Porous Concretes at 20, 40, 46 and 60 Cycles after Drying and Wetting.

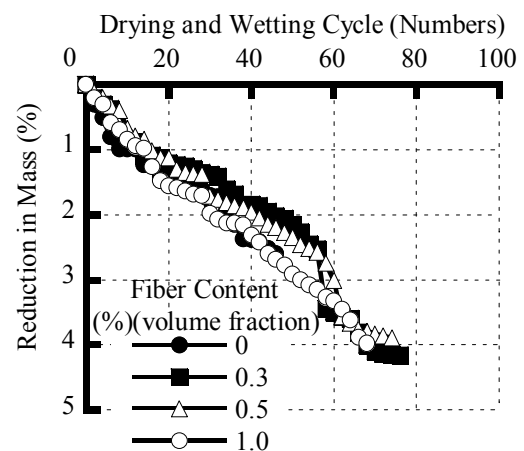


Fig.4 Drying and Wetting Cycle vs. Percentage of Reduction in Mass of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

返しサイクルにおいても、無補強ポーラスコンクリートに比べて、繊維補強ポーラスコンクリートの質量減少率は若干小さい傾向にある。なお、Fig.3 に示したように、繊維混入率 1.0%のものの相対動弾性係数がその他の繊維補強ポーラスコンクリートよりも短いサイクル数において60%を下回ること並びに、その質量減少率が他のものよりも若干大きい傾向にあるのは、後述するように、密実な組織構造の形成が成されないことに起因するものと考えられる。

Fig.5 には、乾湿繰返し試験前及び、相対動弾性係数が60%以下になった乾湿繰返し試験後における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。繊維混入率にかかわらず、乾湿繰返し試験後の繊維補強ポーラスコンクリートの曲げ強度は、乾湿繰返し前のそれに比べて、著しく低下している。このことから、繊維補強ポーラスコンクリートであっても、乾湿繰返しによって、その組織が劣化して強度低下が生じることが示唆される。しかし、無補強ポーラスコンクリートに比べて、繊維混入率 0.3%以上の繊維補強ポーラスコンクリートの曲げ強度は、無補強ポーラスコンクリートの約 1.5 倍の曲げ強度を与える。

Fig.6 には、繊維補強ポーラスコンクリートの乾湿繰返し耐久性指数と繊維混入率の関係を示す。繊維混入率 0.3 及び 0.5%とした繊維補強ポーラスコンクリートの乾湿繰返し耐久性指数は、無補強ポーラスコンクリートの約 1.5 倍の値を与える。しかし、繊維混入率 1.0%のそれは、無補強ポーラスコンクリートとほぼ同様の耐久性指数を示す。このことから、乾湿繰返しに対する抵抗性の改善には、ポーラスコンクリートへの繊維の混入が有効であることが示唆される。しかし、繊維混入率が 0.5%を超えても、顕著な改善効果は得られないものと推察される。

4.2 凍結融解作用に対する抵抗性

Fig.7 には、繊維補強ポーラスコンクリートの相対動弾性係数と凍結融解サイクルの関係を示す。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相対動弾性係数は、凍結融解初期において若干増大し、その後、凍結融解サイクルの進行に伴って低下する傾向にある。しかし、無補強ポーラスコンクリートに比べて、繊維混入率 0.5%までの繊維補強ポーラスコンクリートにおいては、繊維混入率が大きいものほど、凍結融解サイクル数の増加に伴う相対動弾性係数の低下の程度は緩慢である。これは、前述した乾湿繰返し試験と同様に、繊維混入率の増加によって、粗骨材間を架橋する繊維が増加すると共に、単位セメント量が増加することによって、粗骨材と繊維間の付着性が改善されたためと推察される。なお、この結果は、繊維長 54mm のポリプロピレン繊維を混入した既往の研究³⁾と同様の傾向を示したこと

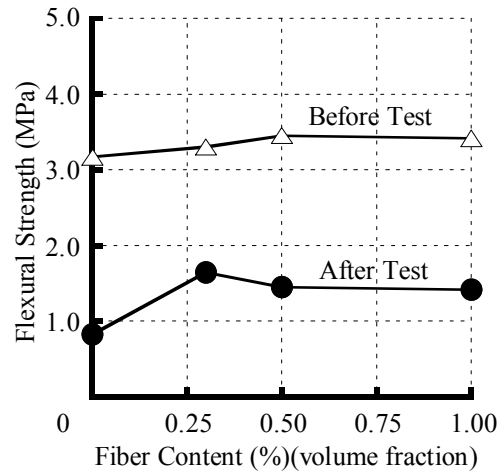


Fig.5 Fiber Content vs. Flexural Strength of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

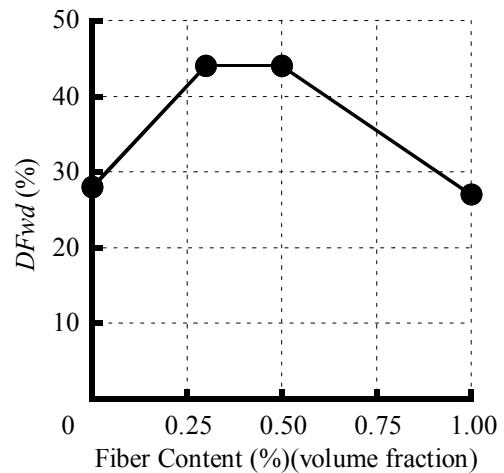


Fig.6 Fiber Content vs. Durability Factor of Drying and Wetting of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

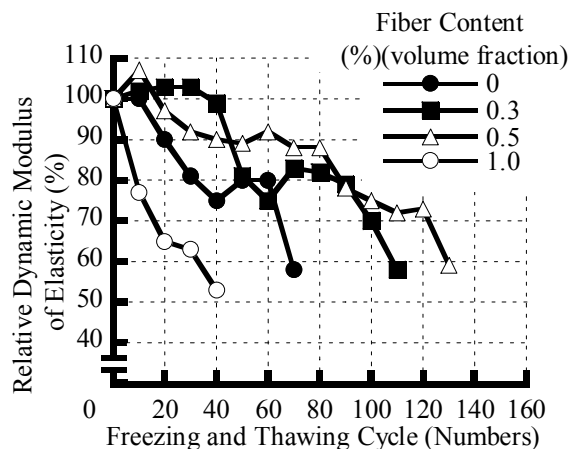


Fig.7 Freezing and Thawing Cycle vs. Relative Dynamic Modulus of Elasticity of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

から、ビニロン繊維であっても、ポーラスコンクリート

に混入することにより、その凍結融解抵抗性を改善することができるものと推察される。しかしながら、繊維混入率 1.0%の繊維補強ポーラスコンクリートの相対動弾性係数は、凍結融解サイクルの進行に伴って、著しく低下する傾向にある。繊維混入率の増加は単位セメント量の増大をもたらすことから、繊維補強ポーラスコンクリートの粗骨材間の付着性を改善すると考えられる。しかし、繊維混入率が過剰になると、粗骨材間の間隔が離れ、繊維と結合材のみの組織が粗骨材間に存在することが多くなるものと推察される。その場合、結合材であるセメントモルタルと繊維が密実な組織を形成せず、粗な組織構造を持つ結合材組織が存在するようになり、結合材であるセメントモルタル相の凍結融解に対する抵抗性が失われることが考えられる。このことから、繊維を過剰に混入しても、ポーラスコンクリートの凍結融解抵抗性の改善に寄与しないことが示唆される。

なお、乾湿繰返し試験において、繊維混入率 1.0%の繊維補強ポーラスコンクリートの抵抗性が優れなかったことは、上述のことに起因するものと推察される。

Fig.8 には、繊維補強ポーラスコンクリートの質量減少率と凍結融解サイクルの関係を示す。繊維混入率 0、0.3 及び 1.0%の繊維補強ポーラスコンクリートは、凍結融解サイクルの進行に伴って質量減少率は若干増大するのみであるが、繊維混入率 0.5%のものそれは、著しい増大を示す。これは、繊維混入率 0.5%以外の繊維補強ポーラスコンクリートにおいては、表面劣化が生じる前に、セメントマトリックスが著しく劣化して試験が終了するのに比べて、繊維混入率 0.5%のものは、骨材が剥離するほどの表面劣化が生じた場合でも、内部のマトリックスが健全な状態に維持されていることを示唆するものである。そこで、**Photo 1** には、凍結融解試験後の繊維混入率 0.5 及び 1.0%の繊維補強ポーラスコンクリートの外観を示す。繊維混入率 0.5%のものに比べて、繊維混入率 1.0%の繊維補強ポーラスコンクリートにおいては、表面の劣化が認められない。

Fig.9 には、繊維補強ポーラスコンクリートの凍結融解耐久性指数と繊維混入率の関係を示す。上述したことに起因して、繊維補強ポーラスコンクリートの凍結融解耐久性指数は、繊維混入率 0.5%までの増加に伴って増大し、その後著しく減少する傾向にある。

なお、本研究では、ポーラスコンクリートの凍結融解に対する繊維の補強効果について検討するために、実験環境として厳しい条件である水中凍結融解試験方法 (A 法) を適用したが、繊維を混入したものであっても、凍結融解 100 サイクル程度で著しい劣化が生じたため、今後、既往の研究^{8), 9)}でも報告されているように、JIS A 1148 の気中凍結水中融解試験 (B 法) や一面凍結融解試

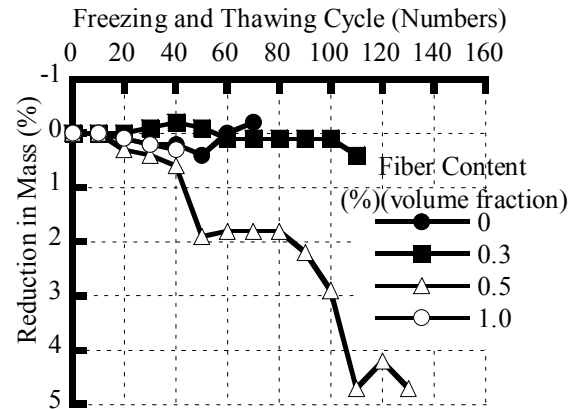


Fig.8 Freezing and Thawing Cycle vs. Percentage of Reduction in Mass of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

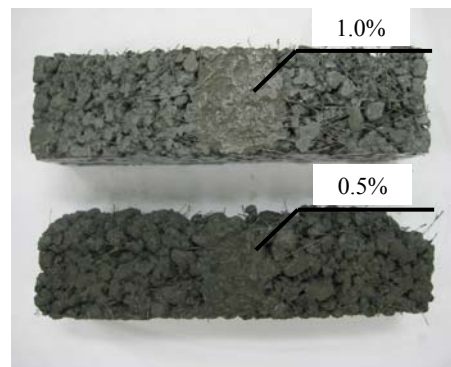


Photo 1 Appearance of Fiber-Reinforced Porous Concretes with Fiber Content of 0.5 and 1.0% after Freezing and Thawing Test.

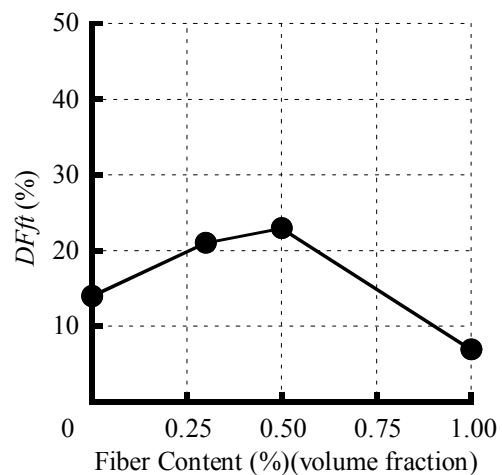


Fig.9 Fiber Content vs. Durability Factor of Freezing and Thawing of Fiber-Reinforced Porous Concretes.

験など、他の試験条件での性能を検討する必要があると考える。

以上のことから、本研究の限りでは、ポーラスコンクリートに適切な量のビニロン繊維を混入することによ

って、その乾湿繰返し及び凍結融解に対する抵抗性を向上させることが可能である。

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) 繊維混入率にかかわらず、繊維補強ポーラスコンクリートの相対動弾性係数は、乾湿繰返し及び凍結融解の進行に伴って低下する傾向にある。しかし、無補強ポーラスコンクリートに比べて、繊維補強ポーラスコンクリートの相対動弾性係数の低下の程度は小さい。
- (2) 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質量減少率は、乾湿繰返し及び凍結融解の進行に伴って増大する傾向にある。
- (3) 繊維補強ポーラスコンクリートの乾湿繰返し及び凍結融解耐久性指数は、繊維混入率 0.5%までの増加に伴って増大し、その後減少する傾向にある。
- (4) 乾湿繰返し試験において、相対動弾性係数が 60%以下になった時点において、繊維補強ポーラスコンクリートは強度低下を生じる。しかし、無補強ポーラスコンクリートに比べて、繊維補強ポーラスコンクリートは高い強度を維持する。
- (5) 凍結融解試験後において、繊維混入率 0.5%のものに比べて、繊維混入率 1.0%の繊維補強ポーラスコンクリートにおいては、表面の劣化が認められない。
- (6) 以上のことから、本研究の限りでは、ポーラスコンクリートに適切な量のビニロン繊維を混入することによって、その乾湿繰返し及び凍結融解に対する抵抗性を向上させることが可能である。

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，p.65-77，2003.5
- 2) 梶尾聡，水口裕之，片平博：ポーラスコンクリートの乾湿繰返し抵抗性に関する研究，ポーラスコンクリートの設計・施工法と最近の適応例に関するシンポジウム論文集，pp.139-142，2003.5
- 3) 鈴木徹，八尋正典，小関裕二，加賀谷誠：車道用ポーラスコンクリートのコンシステンシー試験及び基礎物性に関する考察，セメント・コンクリート論文集，No.55，pp.345-352，2001
- 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
- 5) 斎藤俊克，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.459-464，2007.6
- 6) 寒河江賢伍，出村克宣，斎藤俊克：ビニロン繊維補強ポーラスコンクリートの乾湿繰返しに対する抵抗性，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.851-852，2007.8
- 7) 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，pp.1013-1014，2006.9
- 8) 杉山雅：透水コンクリートの凍結融解抵抗性に関する基礎的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1081-1082，1999
- 9) 梶尾聡，小島明，佐藤達三，大森啓至：舗装用ポーラスコンクリートの耐久性に関する実験的検討，セメント・コンクリート論文集，No.56，pp.419-424，2002