

## 論文 ポーラスコンクリートの乾湿繰り返し抵抗性に関する一検討

本田陵二<sup>\*1</sup>・水口裕之<sup>\*2</sup>・西川浩史<sup>\*3</sup>・石丸啓輔<sup>\*4</sup>

**要旨**：ポーラスコンクリートは、多くの連続空隙を持っており、雨水や河川水等による乾湿の繰り返し作用によって性能劣化が生じることが懸念されている。本研究では、ポーラスコンクリートの乾湿繰り返し抵抗性を向上させるため、炭素およびビニロン繊維、シリカフェーム、セメント用ポリマーならびにアルミナセメントを用いたポーラスコンクリートの乾湿繰り返し抵抗性について調査した。その結果、炭素繊維およびアルミナセメントを使用したものの乾湿繰り返し抵抗性が大きいことが分かった。

**キーワード**：繊維混入、混和材料、乾湿繰り返し抵抗性、超音波伝播速度

## 1. はじめに

近年、地球温暖化や異常気象などの地球環境問題への対策が必要であり、自然環境と調和するよう考慮することが求められている。特に建設事業では自然環境を及ぼす影響が大きいため、自然や人間社会に対する環境負荷を低減させることが要求されている。

コンクリートはその原料の段階から環境にかなり負荷を与えており、セメントや骨材の原材料の採取、セメント製造時の二酸化炭素の排出などがある。現在では、高炉スラグやフライアッシュなどの産業副産物のコンクリートへの利用、都市ゴミ、焼却灰などを主原料としたエコセメント等、環境負荷を低減するための努力がなされている。しかし、それらには限度があり、より環境負荷を低減する必要がある。

ポーラスコンクリートは、連続空隙を多く持ち、透水性・透気性が大きく、その空隙構造によって従来のコンクリートにはない多様な性能がある。そのため、生物が生息でき水質浄化機能を持つコンクリート構造物、植生コンクリート、漁礁、吸音版、透水舗装等に利用され、環境負荷を低減できる可能性を持っている。

しかし、ポーラスコンクリートの強度、耐久性は従来のコンクリートに比べて低いという問題点がある。このため、ポーラスコンクリートをより多くの場所で使用するためには、強度や耐久性を向上させることが必要である。

特に耐久性は、ポーラスコンクリートには多くの連続空隙があるため、雨水や河川水等による乾湿の繰り返し作用によって従来のコンクリートよりも性能劣化が早期に生じることが懸念されている。

本研究では、強度・耐久性の向上を目的として、バインダーであるセメントペーストを強化するため、炭素およびビニロン繊維、シリカフェーム、セメント用ポリマーならびにアルミナセメントを用い、ポーラスコンクリートの乾湿繰り返し抵抗性について調査した。

## 2. 実験の概要

## 2.1 使用材料および配合

セメントには密度  $3.16\text{g/cm}^3$ 、比表面積  $3260\text{cm}^2/\text{g}$  の普通ポルトランドセメント、密度  $3.01\text{g/cm}^3$ 、比表面積  $4600\text{cm}^2/\text{g}$  のアルミナセメントを使用した。

\*1 徳島大学大学院工学研究科マクロ制御工学専攻（正会員）

\*2 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門 教授 工博（正会員）

\*3 徳島大学大学院先端技術科学教育部知的力学システム工学専攻

\*4 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部総合技術センター 技術職員（正会員）

混和材には、密度 1.76g/cm<sup>3</sup>、繊維長 12mm の炭素繊維および密度 1.30g/cm<sup>3</sup>、繊維長 12mm のビニロン繊維、密度 2.21g/cm<sup>3</sup>、比表面積 190000cm<sup>2</sup>/g、シリカ分 99.2%のシリカフュームと、密度 1.98g/cm<sup>3</sup>、フロー値 178mm（ポリマーのみ）の特殊変性ポリエステル樹脂を主成分とするセメント用ポリマーを使用した。表-1 に繊維の物理試験成績を示す。混和剤にはポリカルボン酸エーテル系の複合体を主成分とする高性能 AE 減水剤を使用した。

粗骨材には、粒径 5~13mm、密度 2.61g/cm<sup>3</sup>、吸水率 1.52%、実績率 59.0%の鳴門市大麻町産の砂岩砕石を使用した。使用に際しては、表乾状態で用いた。

使用したポーラスコンクリートの配合を表-2 に示す。なお、以下の各種配合は、表-2 の配合記号で示す。全空隙率はポーラスコンクリート中に存在する全ての空隙率であり、目標全空隙率は配合で目標としている全空隙率である。

ポーラスコンクリートの全空隙率は 25%、水セメント比は 25%とそれぞれ一定とした。高性能 AE 減水剤は、セメント質量に対して、表-2

に示す配合記号で普通では 0.7%、炭素およびビニロンでは 1.5%、ポリマーでは使用せず、シリカでは 0.7%、アルミナでは 0.2%それぞれ使用した。また、シリカフュームおよびセメント用ポリマーの最適な混入率を求めめるため、質量比で、10%、15%および 20%、炭素繊維およびビニロン繊維では体積比で 0.25%、0.50%および 0.75%と変化させた。ただし、炭素繊維の 0.75%についてはフレッシュ時における状態が良好でなかったため供試体は作製しなかった。

圧縮強度試験結果から、最適な混入率はシリカフュームおよびセメント用ポリマーでは質量比で 10%、炭素繊維およびビニロン繊維は体積比で 0.50%とした。

表-1 繊維の物理試験成績

繊維の種類	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	繊維長 (mm)	繊維直径 (μm)	引張弾性係数 (GPa)
炭素	1.76	12	7	230
ビニロン	1.3	12	40	40

表-2 ポーラスコンクリートの配合

配合記号	セメント	繊維、混和材料の種類	混入率	目標全空隙率 (%)	W/C (%)	骨材粒径 (mm)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
							W	C	添加材料*	G	高性能 AE 減水剤
普通	普通ポルトランドセメント	-	-	25	25	5-13	76	303	-	1509	2.12
炭素		炭素繊維	0.50 (vol %)						8.80		4.55
ビニロン		ビニロン繊維							6.50		
ポリマー	トランドセメント	セメント用ポリマー	10 (mass %)	25	25	5-13	73	264	29	1509	0.00
シリカ	シリカフューム	74					267	30	2.07		
アルミナ	アルミナセメント	-	-	74	295	-	0.59				

注) \*は炭素繊維、ビニロン繊維、セメント用ポリマーおよびシリカフュームの各使用量を示す。

## 2.2 コンクリートの練混ぜ、供試体の作製、養生および試験

コンクリートの練混ぜは、容量 60L の強制水平 2 軸ミキサを使用し、セメントおよび粗骨材を入れて 30 秒間練り混ぜ、水と高性能 AE 減水剤を加えてさらに 90 秒間練り混ぜた。炭素、ビニロンおよびポリマーの場合は、繊維もしくはポリマーを入れてさらに 30 秒間練り混ぜた。シリカの場合は、シリカフュームをセメントと同時に練り混ぜた。

供試体は円柱供試体  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  と角柱供試体  $100 \times 100 \times 400\text{mm}$  とし、各試験用に 5 体ずつ作製した。

締固め方法は、所定の空隙率とするために、供試体 1 体当たりの質量を理論的に求め、供試体ごとに所定量を計りとして、ほぼ等しい 3 層に分けて詰めた。締固めは、 $\phi 16\text{mm}$  の突き棒で各層 25 回ずつ突いて行った。

供試体は、打設から 24 時間後に脱型を行い、 $20 \pm 1^\circ\text{C}$  の水中で養生した。

試験は、日本コンクリート工学協会の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<sup>1)</sup>の方法に従い、標準養生 28 日後に行った。圧縮試験用供試体の載荷面は、試験直前に研磨を行った。圧縮、曲げ試験では載荷面に水で練った焼き石膏を塗布し、供試体との密着を確保するように努めた。静弾性係数の測定は、コンプレッソメータを用いて行った。

乾湿繰り返し抵抗性は、相対動弾性係数、質量減少率および乾湿繰り返し前後の曲げ強度から評価した。乾湿繰り返し試験は、乾燥期間 3 日、湿潤期間 1 日、乾燥期間 2 日、湿潤期間 1 日の 1 週間を 2 サイクルとし、試験開始前および試験開始後 2 サイクルごとに、動弾性係数および質量を測定した。乾燥条件は、温度  $40^\circ\text{C}$ 、湿度 30% の恒温恒湿装置、湿潤条件は温度  $20^\circ\text{C}$  の水中とした。測定は、水中から取り出し、1 時間程度気中で内部の水抜きをし、表面の水をふき取って行った。繰り返し回数は 30 サイクルまで行った。30 サイクル終了後、動弾性係数およ

び質量を測定し、曲げ試験を行った。

相対動弾性係数は、超音波伝播速度から求めた動弾性係数を用いた。超音波伝播速度は図-1 の超音波測定器を使用して、超音波伝播時間から求めた。供試体の測定面には水で練った焼き石膏を塗布し、平面にして行った。また、供試体の測定面と測定器の接触面の接着をよくするために、計測時にグリースを薄く塗布して計測した。

動弾性係数は式(1)、相対動弾性係数は式(2)、質量減少率は式(3)から求めた。

$$Ed = \rho VL^2 \quad (1)$$

ここに、 $Ed$  : 動弾性係数 (GPa)

$\rho$  : 供試体の密度 ( $\text{g/cm}^3$ )

$VL$  : 超音波伝搬速度 (km/s)

$$P_n = \left( \frac{Ed_n}{Ed_0} \right) \times 100 \quad (2)$$

ここに、 $P_n$  :  $n$  サイクル後の相対動弾性係数 (%)

$Ed_n$  :  $n$  サイクル後の動弾性係数 (GPa)

$Ed_0$  : 試験前における動弾性係数 (GPa)

$$W_n = \frac{w_0 - w_n}{w_0} \times 100 \quad (3)$$

ここに、 $W_n$  :  $n$  サイクル後の質量減少率 (%)

$w_n$  :  $n$  サイクル後の供試体の質量 (g)

$w_0$  : 試験前における供試体の質量 (g)



図-1 超音波測定器

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 空隙率

図-2に材齢28日の全空隙率と連続空隙率を示す。空隙率は、すべての配合で目標全空隙率の25%に近い値となり、目標とした空隙率のポーラスコンクリートを製造することができている。これは供試体の締固め時に、供試体1体当たりの質量を理論的に求め、供試体ごとに所定量を計ったためと考えられる。

#### 3.2 圧縮強度

図-3に材齢28日の圧縮強度を示す。ビニロンおよびシリカは普通より大きくなっている。ビニロンの圧縮強度が大きくなっているのは、粗骨材間をビニロン繊維が架橋したためと考えられる。シリカはシリカフェームによってペースト強度が大きくなって、他のものより大きな強度になったと思われる。普通に比べて炭素、ポリマーおよびアルミナの圧縮強度は小さくなっている。ポリマーおよびアルミナは、普通とほとんど差はないといえる。圧縮強度は、ビニロン繊維およびシリカフェームを混入させたものが大きくなっている。

#### 3.3 曲げ強度

図-4に材齢28日の曲げ強度を示す。シリカおよびアルミナを除くと3.2の圧縮強度と同様の傾向となっている。ビニロン、ポリマーおよびアルミナは、普通より大きくなっている。シリカは普通に比べて、圧縮強度では大きくなっているが、曲げ強度では小さくなっており、この原因については今後の検討課題である。曲げ強度は、ビニロン繊維およびセメント用ポリマーを混入させたものや、アルミナセメントを使用したものが普通ポルトランドセメントを用いたものより大きくなっている。

#### 3.4 静弾性係数

図-5に材齢28日の静弾性係数を示す。静弾性係数も、3.2の圧縮強度と同様の傾向となっており、シリカは普通に比べて大きくなっている。アルミナが圧縮強度では比較的大きな値を示しているのに、静弾性係数は若干小さくなっている。

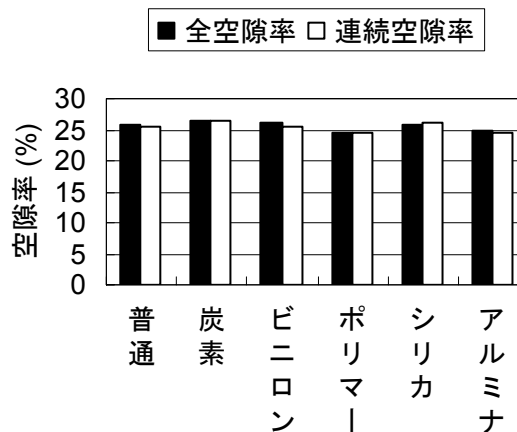


図-2 空隙率

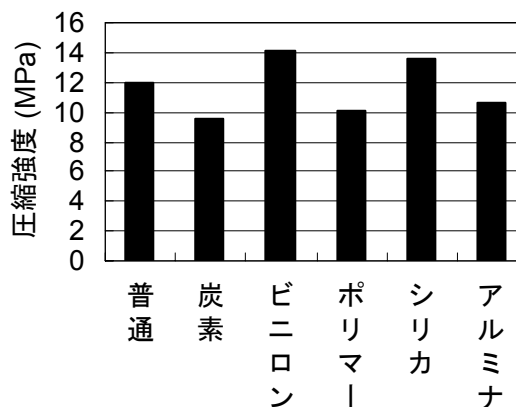


図-3 圧縮強度

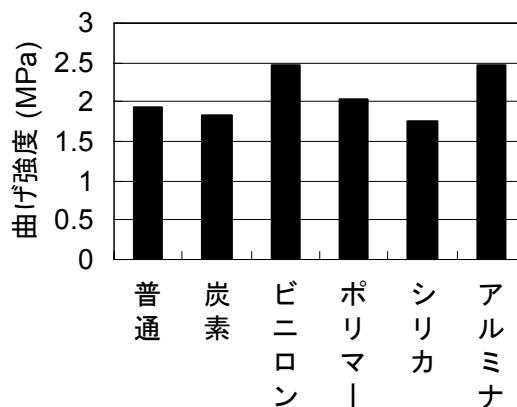


図-4 曲げ強度

るが、配合要因の違いによる傾向は圧縮強度の傾向と同様である。

### 3.5 繊維混入時の供試体表面

2種の繊維を混入したことによる強度への影響が、繊維の種類によって異なっており、その原因として繊維の分散状況にあると考え、その状況を観察した。その結果を図-6に繊維混入時の供試体表面を示す。左が炭素の供試体表面、右がビニロンの供試体表面である。図から炭素は、炭素繊維の固まりが左上および下側に発生している。練混ぜ時に炭素繊維が十分分散しなかったためである。このため炭素は、圧縮・曲げ強度、静弾性係数の値が、普通に比べて低くなったものと考えられる。分散しなかった原因としては、炭素繊維自体は吸水しないが、今回

使用した繊維は束になっているため、その束の間に水が入り、束が分散しなかったためと考えられる。図からビニロンは、ビニロン繊維がよく分散していることがわかる。

したがって、この分散結果によって、ビニロン繊維混入による強度増加につながったと考えられる。

### 3.6 乾湿繰り返し

#### (1) 相対動弾性係数

図-7に乾湿繰り返しによる相対動弾性係数を示す。相対動弾性係数は、すべての供試体で増減している。特に、普通は繰り返し回数に伴って、相対動弾性係数が100%を越えている場合が多い。他の配合では70から95%の範囲で変動している。今回の結果からでは、相対動弾性係

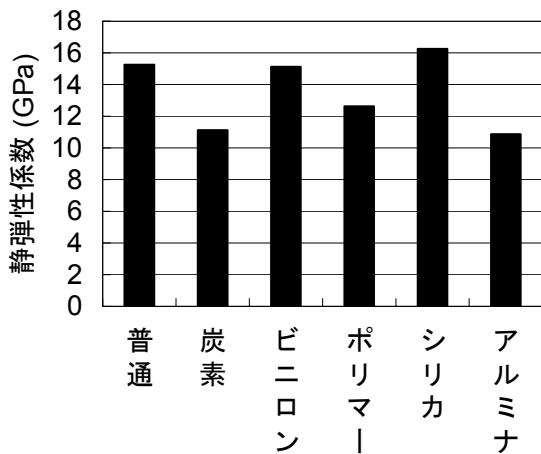


図-5 静弾性係数

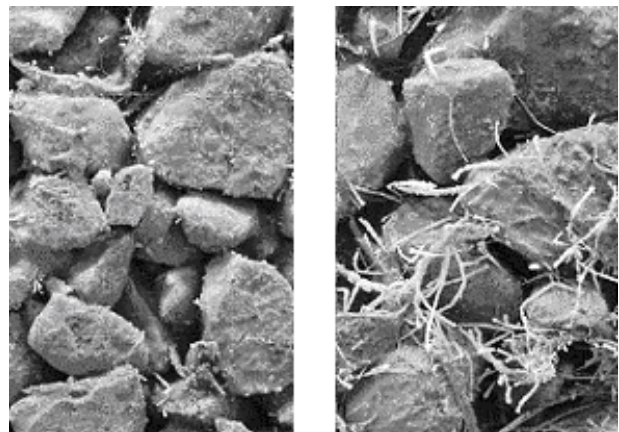


図-6 繊維混入時の供試体表面

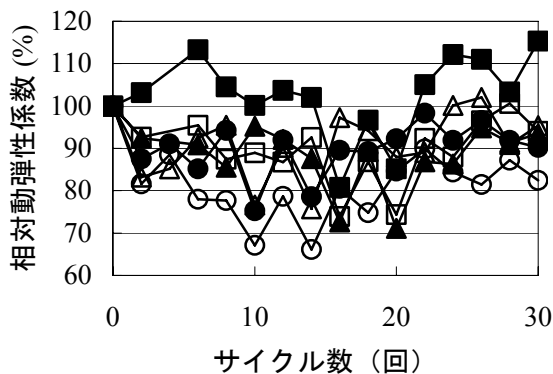
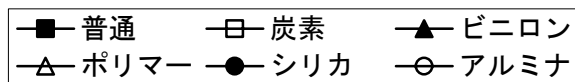


図-7 相対動弾性係数

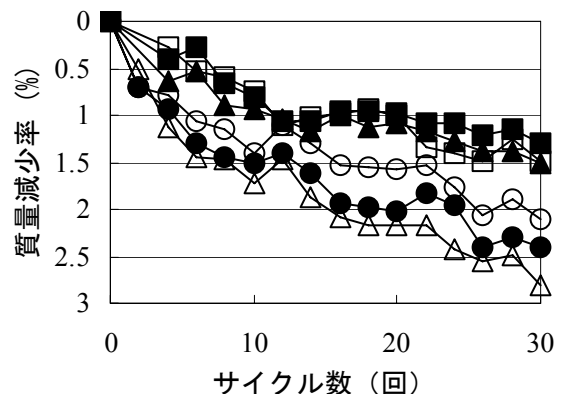
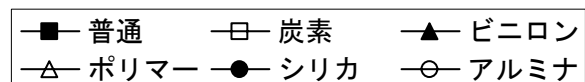


図-8 質量減少率

数により乾湿繰り返し抵抗性の程度を明確な判断することはできない結果となっている。これは、ポーラスコンクリートのように多くの空隙を含み、粗骨材が点のみで結合しているためとも考えられ、評価方法について今後検討する必要がある。

## (2) 質量減少率

図-8 に乾湿繰り返しによる質量減少率を示す。質量減少率が乾湿繰り返しによって、徐々に大きくなっている。配合によつての差は、普通、炭素、ビニロンの値はほぼ同じで、ポリマー、シリカ、アルミナは、普通より質量減少率が大きい。特にポリマーは3%と近くと最も大きくなっている。

## (3) 乾湿繰り返し前後の曲げ強度

図-9 に乾湿繰り返し前と乾湿繰り返し 30 サイクル後の曲げ強度を示す。乾湿繰り返し 30 サイクル後の曲げ強度は、炭素、ビニロンおよびアルミナが普通に比べて大きくなっている。ビニロンおよびアルミナは、乾湿繰り返し前から普通より大きいですが、炭素は乾湿繰り返し 30 サイクル後で逆転して、普通より大きくなっている。また、炭素およびアルミナは、乾湿繰り返しによる曲げ強度の低下割合 8%程で、他の 25%に比べて 3 分の 1 程度となった。ポリマーは、乾湿繰り返し前には普通より大きいものの、乾湿繰り返し 30 サイクル後に曲げ強度が下がり、普通に比べてかなり小さいことが分かる。

## (4) 乾湿繰り返し抵抗性

乾湿繰り返し前後の曲げ強度から判断すると、炭素およびアルミナは、普通に比べて乾湿繰り返し抵抗性は向上している。ビニロンの乾湿繰り返し抵抗性は若干向上している。シリカは普通と同じ程度となっている。質量減少率および乾湿繰り返し前後の曲げ強度から、ポリマーは乾湿繰り返し抵抗性が大きく低下しており、乾湿繰り返しに弱いことが分かる。

## 4. まとめ

本研究では、ポーラスコンクリートの耐久性

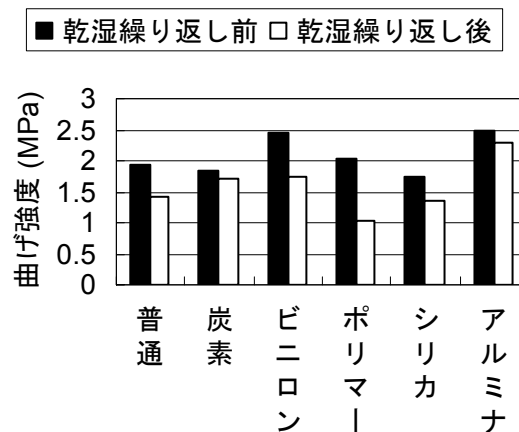


図-9 乾湿繰り返し前後の曲げ強度

を向上させるために、炭素およびビニロン繊維、シリカフェームおよびセメント用ポリマーの混入、アルミナセメントの使用によって、圧縮強度、曲げ強度、静弾性係数、乾湿繰り返し抵抗性について検討を行なった。以下の結果を得た。

- (1) すべての配合において、目標とした空隙率のポーラスコンクリートを製造することができた。
- (2) ビニロン繊維およびアルミナセメントを用いたポーラスコンクリートの圧縮・曲げ強度、静弾性係数および乾湿繰り返し抵抗性は、普通ポルトランドセメントを用いたものより大きくなった。
- (3) 炭素繊維およびアルミナセメントを用いたポーラスコンクリートは、乾湿繰り返しによる曲げ強度の低下が他のものに比べて 3 分の 1 程度となった。
- (4) 以上の結果から、圧縮強度を大きくするにはビニロン繊維やシリカフェームを用いることが有効であり、乾湿繰り返し抵抗性を向上させるためには、圧縮強度は大きくならないが、炭素繊維あるいはアルミナセメントを用いることが効果的であることが分かった。

## 参考文献

1) 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, JCI 社団法人 日本コンクリート工学協会, 2003.5