

論文 ポーラスコンクリートの骨材飛散抵抗性に関する基礎的研究

坂本 英輔*1・砂田 栄治*2・古井 博*3

要旨: 本研究では、ポーラスコンクリートの骨材飛散抵抗性の基礎特性の把握および繊維混入率が骨材飛散抵抗性に及ぼす影響を把握することを目的として、実験的な検討を行った。その結果、実測空隙率 15%程度では、繊維混入率が質量損失率に及ぼす影響はほとんどなかったが、実測空隙率 25%では、繊維混入率が最も高い 1.0%において、質量損失率が若干低下した。このことから、POC の質量損失率を低減する方法の一つとして、POC への繊維の混入が有効となる可能性が示唆された。また、圧縮強度および曲げ強度と質量損失率の間には、高い相関があることを明らかにした。

キーワード: ポーラスコンクリート, 骨材飛散抵抗性, カンタプロ試験, ビニロン繊維, 空隙率, 骨材粒径

1. はじめに

ポーラスコンクリート（以下、POC と略記する）は、粗骨材同士をセメントペーストやモルタルによって連結させたおこし状のコンクリートである。その内部には連続もしくは独立した空隙を持っており、それらの空隙によって得られるさまざまな性能¹⁾などを活用し、道路舗装、河川護岸、法面保護など幅広く用いられている²⁾。

現在、国内での POC 舗装は、高速道路³⁾や重交通道路⁴⁾にも広がりつつあるが、主に歩道や軽交通道路に使用されているのが現状である。これは、粗骨材をセメントペーストやモルタルで連結しただけの POC では、強度や耐久性が通常のコンクリート舗装より劣るためである。一方で、道路舗装では、強度の必要性能として曲げ強度が要求される場合が多いが、POC に繊維を混入した繊維補強 POC は曲げ強度が向上⁵⁾などと報告されている。そこで筆者らは、POC 舗装のさらなる普及を目指し、道路舗装の耐久性指標の一つである骨材飛散抵抗性⁷⁾の向上策として、繊維を混入した繊維補強 POC に着目することとした。

本研究では、POC の骨材飛散抵抗性の基礎特性の把握および繊維混入率が骨材飛散抵抗性に及ぼす影響を把握することを目的として、実験的な検討を行った。

2. 実験概要

2.1 要因と実験水準

表-1 に本実験の要因と実験水準を示す。本実験では 2 シリーズの実験を実施し、シリーズ I では、POC の骨材飛散抵抗性の基礎特性を把握するため、設計空隙率および骨材粒径の影響を検討した。シリーズ II では、POC の骨材飛散抵抗性の向上策の一つとしてビニロン繊維（以下、繊維と略記する）の混入に着目し、骨材粒径を

6 号に固定し、設計空隙率および繊維混入率の影響を検討した。なお、通常、POC を道路舗装に使用する場合は 15~20%程度の空隙率が設定³⁾されるが、本実験の設計空隙率では、一般的な POC を網羅するよう設定した。

2.2 使用材料および調査表

表-2 に使用材料を示す。粗骨材（碎石）は同一原石

表-1 要因と実験水準

(a) シリーズ I

要因	実験水準
設計空隙率(%)	15, 25, 35
骨材粒径	5号碎石(粒径:13~20 mm), 6号碎石(粒径:5~13 mm), 7号碎石(粒径:2.5~5 mm)

(b) シリーズ II

要因	実験水準
設計空隙率(%)	15, 25, 35
繊維混入率(%)	0, 0.5, 1.0

表-2 使用材料

材料	種類
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度:3.16 g/cm ³
粗骨材(碎石)	5号 粒径:13~20 mm, 表乾密度:2.66 g/cm ³ , 吸水率:0.74 %, 実積率:58.6 %
	6号 粒径:5~13 mm, 表乾密度:2.68 g/cm ³ , 吸水率:1.05 %, 実積率:58.8 %
	7号 粒径:2.5~5 mm, 表乾密度:2.64 g/cm ³ , 吸水率:0.90 %, 実積率:58.6 %
ビニロン繊維	長さ:18 mm, 直径:200 μm, 密度:1.30 g/cm ³ , 弾性係数:27 GPa
混和剤(SP)	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)

*1 広島工業大学 工学部建築工学科助教 博士(工学) (正会員)

*2 (株)まるせ 生産部生産部長 (正会員)

*3 広島地区生コンクリート協同組合 共同試験場場長 (正会員)

表-3 調合表

W/C (%)	骨材粒径 (号)	繊維混入率 (%)	設計空隙率 (%)	単位量 (kg/m ³)					SP/C (%)		
				W	C	G	F	Paste	シリーズI	シリーズII	
25	5	0	15	116	466	1558	0	582	0.24		
			25	72	289			361	0.26		
			35	28	113			141	0.23		
			15	116	463	1576		579	0.24	0.24	
			25	72	286			358	0.26	0.26	
			35	27	110			137	0.30	0.32	
	6	0.5	15	124	497	1511	7	621		0.23	
			25	80	321			401		0.25	
			35	36	144			180		0.27	
		1.0	15	134	536	1438	13	670		0.26	
			25	90	360			450		0.26	
			35	46	183			229		0.30	
		7	0	15	117	467	1544	0	584	0.23	
				25	73	290			363	0.25	
				35	28	114			142	0.31	

[註]W/C:水セメント比, W:水, C:セメント, G:粗骨材, F:ビニロン繊維, Paste:単位セメントペースト量(=W+C), SP:高性能AE減水剤

で、同一工場で製造されたものを粒度調整した。粗骨材の密度および吸水率試験は JIS A 1110 に、粗骨材の実積率試験は JIS A 1104 にそれぞれ準拠して行った。なお、シリーズ II における繊維混入時の実積率は、POC に対する混入繊維の容積百分率（以下、繊維混入率）が 0.5% および 1.0% でそれぞれ実積率試験を行い、混入繊維と粗骨材の容積比から求めた合成密度を用いて算出した。それらの結果に基づいた POC の調合表を表-3 に示す。表中の単位セメントペースト量とは、単位水量と単位セメント量の合計量と定義している。なお、高性能 AE 減水剤の添加率は、セメントペーストのフロー値が 170±10mm になるように事前に行った予備実験から目安を決めた。

2.3 練混ぜ方法

POC の練混ぜは揺動攪拌式ミキサを用いたペースト先練り方式とした。その手順は、まず、セメントおよび練混ぜ水（高性能 AE 減水剤を含む）を投入し、30 秒間練り混ぜてかき落としを行った後、180 秒間練り混ぜた。次に、粗骨材を投入し、120 秒間練り混ぜた後に練り舟に排出した。なお、繊維を混入する場合は、投入前に粗骨材と繊維を均質になるよう混合した。

2.4 供試体の作製方法

供試体は、圧縮強度試験用の円柱供試体（φ100×200mm）、曲げ強度試験用の角柱供試体（100×100×400mm）、カンタブロ試験用のカンタブロ供試体（φ100×63.5mm）を作製し、いずれも各水準 3 体とした。円柱供試体および角柱供試体は、型枠に 2 層で詰め、各層を突き棒で突き固めた後、鋼製のタンピング冶具（断面 95×200mm）および電動ハンマ（打撃回数 2900 回/分）を用いて、型枠上面を締固めた。突き棒の突き回数および締固め時間は、事前に予備実験を実施し、設計空隙率、骨材粒径、締固め時間および繊維混入率を要因として円

柱供試体および角柱供試体を作製し、底面および側面の目視観察と質量法による空隙率測定を行い、それらの結果を総合的に判断して決定した。カンタブロ供試体は、1 層で詰め、ZKT-214 に準拠して作製した鋼製のタンピング冶具（断面 φ95mm）および電動ハンマを用いて締固めた。打込みの際、調合表から型枠の容積に応じた POC 質量を算出し、所定量を型枠に打ち込むことにより空隙率の管理を行った。この他に、セメントペーストの圧縮強度および曲げ強度を得るため、POC のバッチとは別に W/C=25% のセメントペーストのみを練り混ぜ、φ50×100mm の円柱供試体および 40×40×160mm の角柱供試体をそれぞれ 6 体ずつ作製した。

2.5 試験環境

練混ぜから各種試験の環境温度は 20±3℃とし、全ての供試体を材齢 3 日で脱型し、材齢 26 日まで 20±2℃の水中で養生した。その後、材齢 28 日まで環境温度 20±3℃の室内に保管した。

2.6 試験方法

(1) 空隙率試験

POC の空隙率試験は、日本コンクリート工学会の「ポラスコンクリートの空隙率試験方法（案）」²⁾に基づき、全ての供試体の空隙率を質量法により測定した。

(2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験を行う円柱供試体は、材齢 27 日に両端面を硫黄でキャッピングした。セメントペーストの円柱供試体については、打込み面のみを研磨した。圧縮強度試験は、JIS A 1108 に準拠して材齢 28 日で実施した。

(3) 曲げ強度試験

曲げ強度試験（3 等分点載荷）を行う角柱供試体は、材齢 27 日に支点 2 カ所と載荷点 2 カ所をセメントキャッピングした。曲げ強度試験は、JIS A 1106 に準拠して材

齢 28 日で実施した。セメントペーストの曲げ強度試験は 2 等分点载荷とし、材齢 28 日で実施した。なお、曲げ強度試験では、いずれの供試体についても打込み面に対して側面を載荷面とした。

(4) カンタプロ試験

カンタプロ試験により骨材飛散抵抗性の評価を行った。カンタプロ試験とは、ロサンゼルス試験機にカンタプロ供試体（φ100×63.5mm）を入れ、鋼球を入れずに 300 回転させ、試験前後の質量差を計測する試験であり、式 (1) を用いて質量損失率を計算した。ZKT-214 に準拠し、材齢 28 日で実施した。

$$M = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (1)$$

ここに、 M ：質量損失率（%）、 m_1 ：試験前の供試体の質量（g）、 m_2 ：試験後の供試体の質量（g）

3. 実験結果および考察

3.1 シリーズ I：骨材飛散抵抗性の基礎特性の把握

シリーズ I では、POC の骨材飛散抵抗性の基礎特性を把握するため、設計空隙率および骨材粒径が圧縮強度、曲げ強度および質量損失率に及ぼす影響を検討した。

(1) 圧縮強度

図-1 に圧縮強度と実測空隙率の関係を示す。実測空隙率 0%の値は、セメントペーストの圧縮強度を示しており、6 体の平均値である 136.5 N/mm²をプロットしている。また、図中には指数関数により近似した曲線を示している。同図によれば、POC の圧縮強度は、実測空隙率が大きいほど、低下する傾向が見られる。これは、既往の研究^{2),8)}と同様の傾向である。また、骨材粒径が POC の圧縮強度に及ぼす影響はほとんどないことが分かる。既往の研究によれば、骨材粒径が POC の圧縮強度に及ぼす影響については統一した結論は得られていないが、本実験の傾向は文献⁹⁾と同様の結果となった。

(2) 曲げ強度

図-2 に曲げ強度と実測空隙率の関係を示す。実測空隙率 0%の値は、セメントペーストの曲げ強度を示しており、6 体の平均値である 16.0 N/mm²をプロットしている。また、図中には指数関数により近似した曲線を示している。同図によれば、POC の曲げ強度は、実測空隙率が大きいほど、低下する傾向が見られる。これは、既往の研究²⁾と同様の傾向である。また、骨材粒径が POC の曲げ強度に及ぼす影響は、既往の研究¹⁾によれば、骨材粒径が小さいほど、POC の曲げ強度は大きくなると報告されており、本実験の実測空隙率 15%程度では同様の傾向を示したものの、25%および 35%程度ではその傾向は

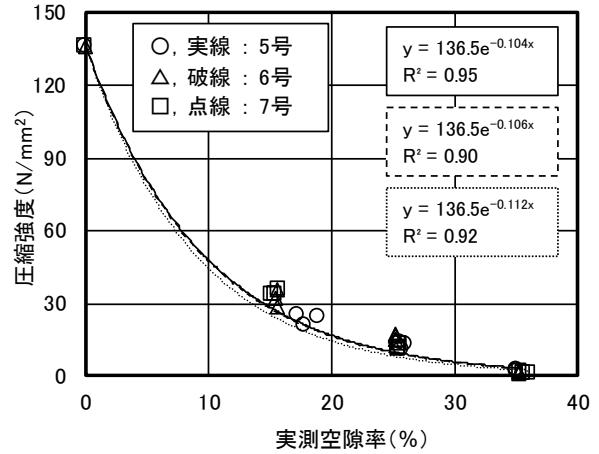


図-1 圧縮強度と実測空隙率の関係（シリーズ I）

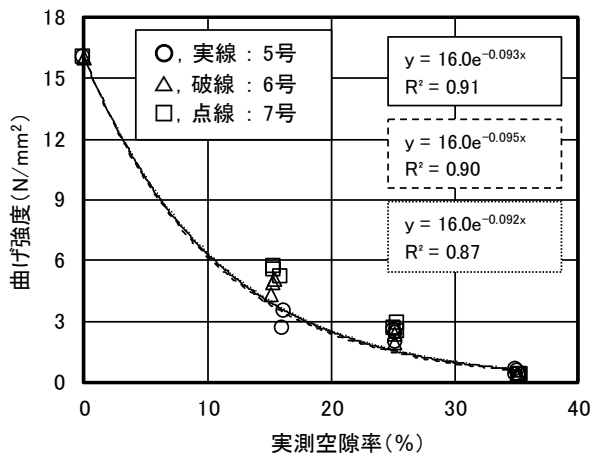


図-2 曲げ強度と実測空隙率の関係（シリーズ I）

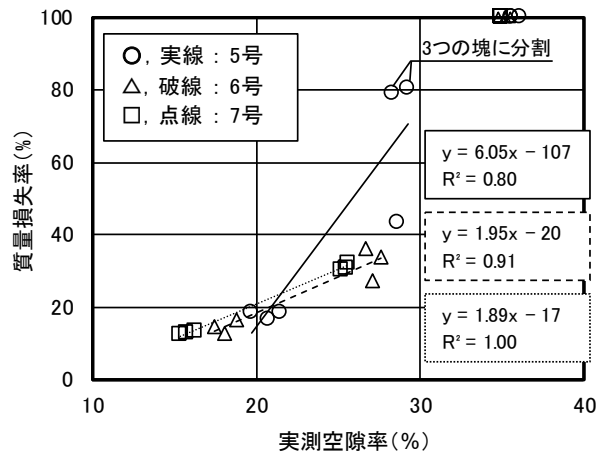


図-3 質量損失率と実測空隙率の関係（シリーズ I）

現れなかった。この原因は、本実験における実測空隙率 35%程度の曲げ強度の値が、骨材粒径によらず、極端に小さくなったためと考えられる。本実験の範囲では、POC の設計曲げ強度を確保する方法の一つとして、実測空隙率 15%程度であれば、骨材粒径を小さくすることは有効であると言える。

(3) 質量損失率

図-3 に質量損失率と実測空隙率の関係を示す。実測

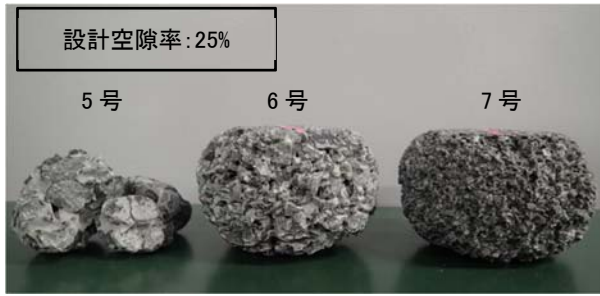


写真-1 試験後のカンタプロ供試体 (シリーズ I)

空隙率 35%程度では質量損失率が 100%となっているが、これは試験後のカンタプロ供試体が粉々に砕けてしまっていたためであり、参考値として併記する。また、5号の実測空隙率 25%程度の供試体では、3体中2体が試験後に3つの塊に分割されていたため、その合計質量から質量損失率を算出した。なお、図中の近似曲線は、実測空隙率 35%のプロットを除いた、実測空隙率 15%および 25%のプロットから求めたものである。

同図によれば、POCの質量損失率は、実測空隙率が大きいほど、大きくなる傾向が見られる。また、実測空隙率 15%程度では、骨材粒径が質量損失率に及ぼす影響はほとんどないことが分かる。実測空隙率 25%程度では、6号および7号で差はないが、5号では質量損失率が大きくなっている。これは以下のように考えられる。カンタプロ試験では、ロサンゼルス試験機の回転ごとに、カンタプロ供試体に衝撃荷重が作用し、徐々に丸みを帯びてくる(写真-1参照)。骨材粒径が小さい場合は、複数の粗骨材で面として衝撃荷重を受けるが、骨材粒径がある大きさを超えると、供試体の外形における凹凸部が大きくなり、凸部に局所的に衝撃荷重が作用し、供試体の欠け落ちや分割が起きやすくなるためと推察される。このことから、POCの質量損失率を基準値¹⁰⁾以下に収める際、高空隙率では骨材粒径に留意する必要があると言える。

3.2 シリーズ II: 骨材飛散抵抗性の向上策の検討

シリーズ II では、POCの骨材飛散抵抗性の向上策の一つとして繊維の混入に着目し、骨材粒径を6号に固定し、設計空隙率および繊維混入率が圧縮強度、曲げ強度および質量損失率に及ぼす影響を検討した。

(1) 圧縮強度

図-4に圧縮強度と実測空隙率の関係を示す。実測空隙率 0%の値は、セメントペーストの圧縮強度を示しており、6体の平均値である 125.4 N/mm²をプロットしている。また、図中には指数関数により近似した曲線を示している。同図によれば、繊維混入率によらず、POCの圧縮強度は、実測空隙率が大きいほど、低下する傾向が見られる。また、同一空隙率における POCの圧縮強度は、

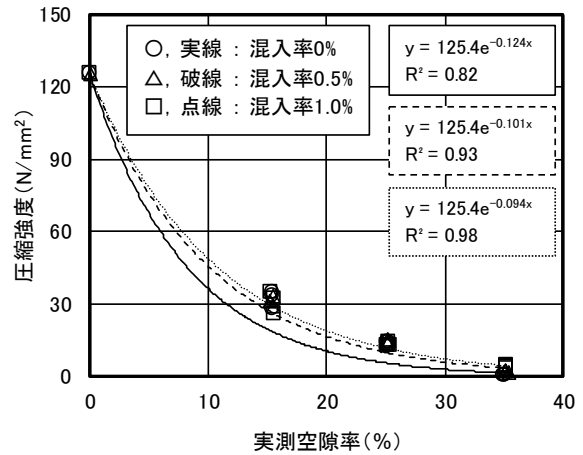


図-4 圧縮強度と実測空隙率の関係 (シリーズ II)

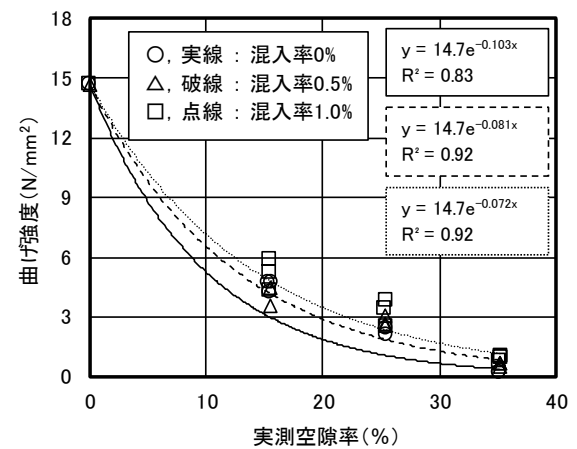


図-5 曲げ強度と実測空隙率の関係 (シリーズ II)

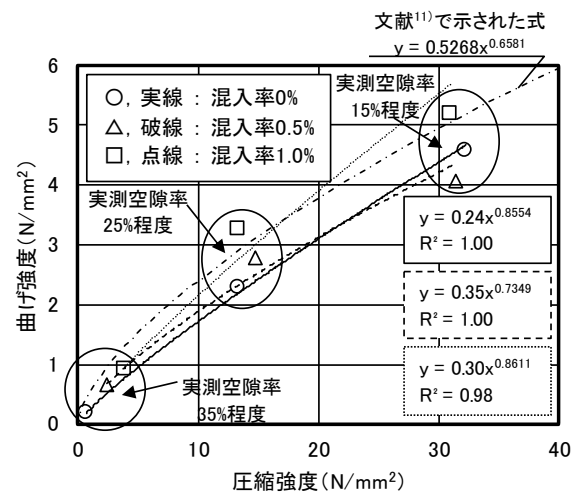


図-6 圧縮強度と曲げ強度の関係 (シリーズ II)

繊維の混入により、若干大きくなる傾向が見られる。この理由は、表-3に示す通り、繊維の混入により、単位セメントペースト量が増加するため、粗骨材とセメントペーストの付着性が改善されるとともに、繊維とセメントペーストの付着性による補強効果が生じたことによると考えられる。これらの傾向は、既往の研究⁶⁾と同様であった。

(2) 曲げ強度

図-5 に曲げ強度と実測空隙率の関係を示す。実測空隙率 0%の値は、セメントペーストの曲げ強度を示しており、6 体の平均値である 14.7 N/mm^2 をプロットしている。また、図中には指数関数により近似した曲線を示している。同図によれば、繊維混入率によらず、POC の曲げ強度は、実測空隙率が大きいくほど、低下する傾向が見られる。また、同一空隙率における POC の曲げ強度は、繊維混入率 1%において、若干大きくなる傾向が見られる。この理由は、前述した粗骨材および繊維とセメントペーストの付着性の改善効果と繊維による粗骨材間の架橋による補強効果によるものと考えられる。これらの傾向は、既往の研究⁶⁾と同様であった。このことから、POC の設計曲げ強度を確保する方法の一つとして、POC への繊維の混入が有効であることが示唆された。

(3) 圧縮強度と曲げ強度

図-6 に圧縮強度と曲げ強度の関係を示している。プロットは同一水準の円柱供試体と角柱供試体の 3 体ずつの平均値で示しており、各供試体間の実測空隙率の差を無視している。また、図中には累乗近似による曲線を示すとともに、既往の研究で示されている累乗による推定式¹¹⁾も併記した。同図から、繊維混入率によらず、圧縮強度と曲げ強度の関係は、累乗関数で近似できることが分かる。また、実測空隙率 35%程度では繊維混入率による影響はほとんどないが、実測空隙率 15%~25%程度では繊維混入率が高い 1.0%において、近似曲線が上側にシフトすることが分かる。これは、繊維混入率 1.0%では、繊維による曲げ強度の増進が大きいことが原因と考えられる。

(4) 質量損失率

図-7 に質量損失率と実測空隙率の関係を示す。なお、図中の近似曲線は、シリーズ I と同様に、実測空隙率 35%のプロットを除いた、実測空隙率 15%および 25%のプロットから求めたものである。実測空隙率 15%程度では、繊維混入率が質量損失率に及ぼす影響はほとんどないが、実測空隙率 25%程度では、繊維混入率 1.0%において、質量損失率が若干低下している。これは、前述した粗骨材および繊維とセメントペーストの付着性の改善効果と繊維による粗骨材間の架橋による補強効果が、質量損失率においては、実測空隙率 15%程度に比べて 25%程度の方が顕著になったためと考えられる。今後さらなる検討が必要だが、POC の質量損失率を低減する方法の一つとして、POC への繊維の混入が有効となる可能性が示唆された。

図-8 に強度と質量損失率の関係（設計空隙率 15%および 25%）を示す。図-8 (a) は、圧縮強度と質量損失率の関係を示しており、プロットは同一水準の円柱供試

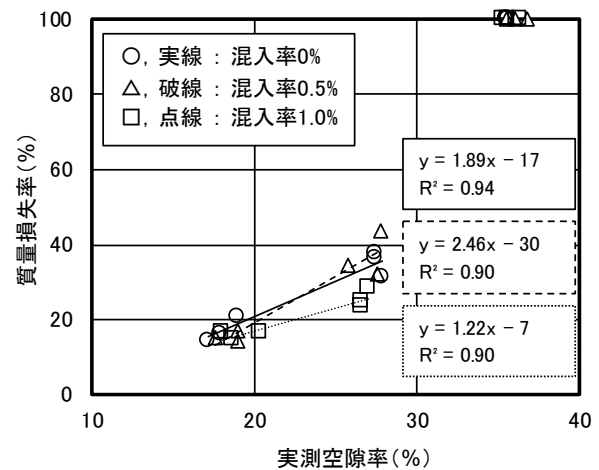
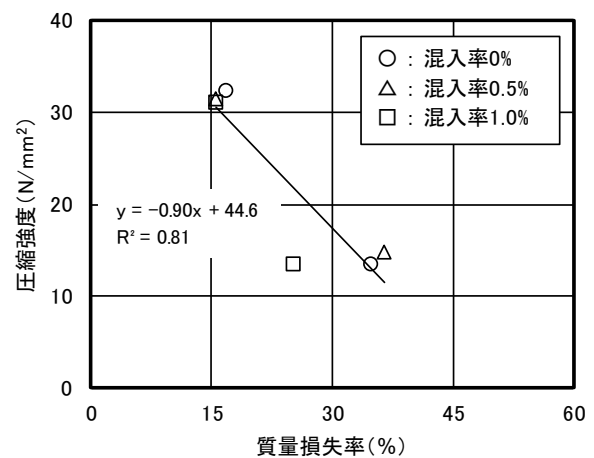
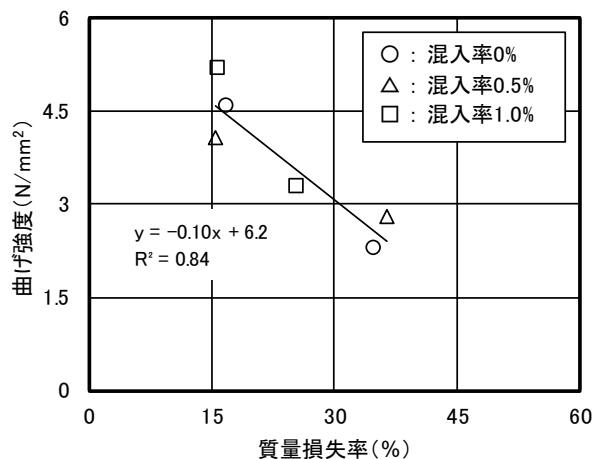


図-7 質量損失率と実測空隙率の関係（シリーズ II）



(a) 圧縮強度と質量損失率の関係



(b) 曲げ強度と質量損失率の関係

図-8 強度と質量損失率の関係 [設計空隙率 15%および 25%]（シリーズ II）

体とカンタプロ供試体の 3 体ずつの平均値で示している。図-8 (b) は、曲げ強度と質量損失率の関係を示しており、プロットは同一水準の角柱供試体とカンタプロ供試体の 3 体ずつの平均値で示している。いずれも各供試体間の実測空隙率の差を無視している。両図から、圧縮強度お

よび曲げ強度と質量損失率の間には、高い相関があることが分かる。

4. 結論

本研究では、POCの骨材飛散抵抗性の基礎特性の把握および繊維混入率が骨材飛散抵抗性に及ぼす影響を把握することを目的として、実験的な検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) POCの曲げ強度に及ぼす骨材粒径の影響は、実測空隙率25~35%程度においてはほとんどないが、実測空隙率15%程度においては骨材粒径が大きいほど、曲げ強度は低下する傾向にあった。
- (2) 実測空隙率が15%程度では、骨材粒径がPOCの質量損失率に及ぼす影響はほとんどなかった。
- (3) 同一空隙率におけるPOCの曲げ強度は、繊維混入率1%において、若干大きくなる傾向が見られた。
- (4) 繊維混入率によらず、POCの圧縮強度と曲げ強度の関係は、累乗関数で近似できる。
- (5) 実測空隙率15%程度では、繊維混入率が質量損失率に及ぼす影響はほとんどないが、実測空隙率25%では、繊維混入率1.0%において、質量損失率が若干低下した。
- (6) 圧縮強度および曲げ強度と質量損失率の間には、高い相関がある。

今後は、繊維混入率が圧縮強度、曲げ強度および質量損失率に及ぼす影響をさらに詳しく明らかにするため、繊維混入率が1.0%より大きな場合も含めて、水準をより細かく設定して検討する必要がある。

謝辞

本研究は、2015年度日本コンクリート工学会中国支部「ポーラスコンクリートの耐久性の把握およびその向上に関する研究委員会(委員長:坂本英輔)」において取り組んだ成果である。本研究を進めるにあたり、長森大征君、野口博孝君(いずれも広島工業大学卒業生)のご助力を得た。また、株式会社フローリックからは高性能AE減水剤、太平洋セメント株式会社からはセメント、株式会社みどりからは粗骨材をそれぞれ提供して頂いた。ここに付記して謝意を申し上げる。

参考文献

- 1) Hatanaka, S., Mishima, N., Maegawa, A. and Sakamoto, E. : Fundamental Study on Properties of Small Particle Size Porous Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.12, pp.24-33, Jan. 2014
- 2) 日本コンクリート工学会 : 性能設計対応型ポーラスコ

ンクリートの施工標準と品質保証体制の確立研究委員会報告書, 2015.6

- 3) 高田佳彦, 中山栄作, 佐々木一則, 鈴木威, 森重和, 鎌田修 : 都市高速トンネル用ポーラスコンクリート舗装の包括的検討, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.71, No.1, pp.19-35, 2015
- 4) 梶尾聡中村秀三, 野田悦郎, 中原大磯 : ポーラスコンクリート舗装の品質特性と供用性に関する報告, コンクリート工学, Vol.42, No.7, pp.24-31, 2004.7
- 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, 2005.7
- 6) 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, 2007.7
- 7) 泉尾英文, 小梁川雅, 梶尾聡, 加藤学 : 舗装用ポーラスコンクリートの骨材飛散抵抗性に関する研究, セメントコンクリート論文集, Vol.69, pp.355-362, 2014.7
- 8) 湯浅幸久, 畑中重光, 三島直生, 前川明弘, 宮本高秀 : ポーラスコンクリートの振動締固めに関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第552号, pp.37-44, 2002.2
- 9) 大谷俊浩, 村上聖, 佐藤嘉昭, 三井宜之, 平居孝之 : ポーラスコンクリートの圧縮強度特性に及ぼす影響因子に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第585号, pp.31-37, 2004.11
- 10) 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社 : 設計要領 第一集 舗装編, p.35, 2013
- 11) 梶尾聡, 國府勝郎, 上野敦, 宇治公隆 : 舗装用ポーラスコンクリートにおける空隙率と強度に関する研究, 第66回セメント技術大会講演要旨, pp.84-85, 2012.5