

論文 ポーラスコンクリートにおける細骨材の種類が耐久性に与える影響

葛西 博文*1・小田島 勉*2・山田 登志夫*3・橋本 親典*4

要旨: 本研究では、ポーラスコンクリートの細骨材種類が耐久性に与える影響を明らかにするため、砕石サイズ7号と6号の配合を基に、細骨材種類が強度特性、凍結融解作用や乾湿繰返し作用に対する抵抗性について実験的検討を行った。その結果、7号砕石と比較し6号砕石ポーラスコンクリートの強度や耐久性は、細骨材種類の影響が大きく、海砂よりスラグ系細骨材を用いたほうが圧縮強度や凍結融解抵抗性が高かった。一方、砕石サイズや細骨材種類に関係なく、ポーラスコンクリートの乾湿繰返し抵抗性は高かった。

キーワード: ポーラスコンクリート、骨材特性、空隙率、圧縮強度、耐久性、凍結融解、乾湿繰返し

1. はじめに

ポーラスコンクリートは、内部に水や空気を自由に通す連続空隙をもつ多孔質で環境配慮型のコンクリートである¹⁾。土木工学の分野では、透排水機能、吸音機能²⁾、騒音低減効果から舗装材料とされており、自然・生態系の保全³⁾、水質浄化^{4) 5)}、景観性向上効果から河川護岸材料としても活用されている。建築工学の分野では、屋上緑化をはじめとする都市部におけるヒートアイランド現象の緩和を目的とした研究も進められている。地球温暖化などの環境問題が深刻化している現在、自然環境と調和できる社会が求められており、多機能な建設材料であるポーラスコンクリートに対する期待が高まっている。

ポーラスコンクリートの耐久性改善に関する既往の研究では、ポーラスコンクリート用特殊混和材が耐久性に与える影響について検討を行った結果、混和材混入により耐久性および圧縮強度が向上することが確認でき、その影響は特に砕石サイズが大きい場合に高いことが報告されている⁶⁾。また、骨材特性が異なる砕石を使用したポーラスコンクリートの耐久性に関する実験的検討において、乾湿繰返し抵抗性は粗骨材の岩種による影響が小さく高い抵抗性を有することが報告されている⁷⁾。

一方、ポーラスコンクリートの特徴として、一般的なコンクリートよりも水セメント比が小さいことが挙げられる。水セメント比が小さいため、モルタル（砂を未使用の場合はセメントペースト）自体の強度は高く、耐久性の観点からみても有利である。しかしポーラスコンクリートは、透水性・透気性が向上するという性能から、水際環境で利用されることが多い。その場合、雨水や河川水による乾湿繰返し作用および寒冷地においては凍結融解作用による早期劣化が生じることが懸念される。

これらの作用によって生じるポーラスコンクリートの劣化はモルタル部分に大きく依存していると考えられているが、ポーラスコンクリートは粗骨材とセメントペーストのみで製造されているものも多く、細骨材特性の観点から検証した実験事例は少ない。その中でポーラスコンクリートに100~200kg/m³程度の細骨材（陸砂）を混入することでダレの抑制、乾燥収縮量の低減等が明らかとなっている⁸⁾。

現在、著者らが細骨材として使用している海砂は、入手困難な状態であり、価格も上昇していることから代替砂となる細骨材の検討が必要となっている。また、金属精錬の際に副産物として発生するスラグの処理が問題となっており、近年循環型社会形成への寄与を目的としコンクリート材料として利用されている。

本研究では、7号砕石と6号砕石の2種類のポーラスコンクリートの配合をベースに、細骨材として海砂代替を目的に産業副産物であるスラグ系細骨材を使用した場合に、細骨材種類が強度特性、凍結融解作用や乾湿繰返し作用の抵抗性に及ぼす影響を実験的に検討した。

2. 実験概要

本研究では、ポーラスコンクリートの構成材料として体積比で60%程度占める粗骨材には、7号砕石（砕石粒径2.5~5mm）と6号砕石（砕石粒径5~13mm）を用いた。7号砕石の実験をシリーズ1、6号砕石の実験をシリーズ2とした。また、シリーズ2において環境配慮の観点から再生粗骨材を使用したポーラスコンクリートについても比較検討を行った。なお、7号砕石は通常のコンクリートでは、細骨材に属するが、著者が勤務する工場では、7号砕石を粗骨材としてポーラスコンクリートの製品を製造している。そのため、本論文では、7号砕石

*1 株式会社総合開発 開発営業部 (正会員)

*2 株式会社総合開発 開発営業部 部長

*3 株式会社総合開発 開発営業部 水環境室 室長 工博

*4 徳島大学大学院 社会生物理工学研究部社会基盤デザイン系教授 工博 (正会員)

を粗骨材として配合設計をした。

2.1 使用材料および配合

7号砕石のシリーズ1に使用した細骨材の物性値を表-1に、配合を表-2に、6号砕石のシリーズ2に使用した細骨材の物性値を表-3、配合を表-4に示す。なお、表中のWは水道水、Cは普通ポルトランドセメント、Sは細骨材、G7は7号砕石、G6は6号砕石、混和材は減水剤を含むポーラスコンクリート用の複合混和材を意味する。海砂の代替砂として産業副産物である高炉スラグ(BFS)、フェロニッケルスラグ(FNS)、銅スラグ(CUS)を使用した(右の数字は最大粒径mmを意味する)。

表-1 シリーズ1の細骨材物性値

	海砂	BFS 1.2	BFS5	FNS 1.2	CUS 2.5
表乾密度(g/cm ³)	2.61	2.73	2.74	3.08	3.60
吸水率(%)	1.15	1.14	0.49	0.31	0.11
単位容積質量(kg/L)	1.61	1.55	1.53	1.78	2.20
微粒分量(%)	0.60	3.60	2.70	1.60	3.20
粗粒率	2.16	2.12	2.53	1.56	2.76

表-2 シリーズ1の配合表(目標空隙率20%)

配合	W/C (%)	単位量(kg/m ³)			
		W	C	S	G7
海砂	25	92	370	97	1491
BFS1.2				102	
BFS5				102	
FNS1.2				115	
CUS2.5				134	

表-3 シリーズ2の骨材物性値

	海砂	珪砂 7号	BFS5	FNS 1.2	CUS 2.5	再生 粗骨材
表乾密度(g/cm ³)	2.61	2.64	2.74	3.08	3.60	2.54
吸水率(%)	1.15	—	0.49	0.31	0.11	3.67
粗粒率	2.16	0.63	2.53	1.56	2.76	6.52

表-4 シリーズ2の配合表(目標空隙率22%)

配合	W/C (%)	単位量(kg/m ³)				
		W	C	S	G6	混和材
海砂	23	56	224	233	1517	20
珪砂7号				238		
BFS5				247		
FNS1.2				278		
CUS2.5				325		
細骨材なし				0	1765	
再生粗骨材(BFS5)	247	1427				

シリーズ1は、海砂の配合を基準とし細骨材全量を各スラグ細骨材に置換した。水セメント比(W/C)は25%、粗骨材は7号砕石のみを用いた。

シリーズ2は、海砂の配合を基準とし細骨材全量を各スラグ細骨材に置換し、さらに粒径が均一で粗粒率の小さい珪砂7号と細骨材を使用しない配合を追加した。水セメント比(W/C)は23%、粗骨材は6号砕石を基本とし1配合のみ再生粗骨材と細骨材にBFS5を用いた。

また、型枠への詰め込み量を変化させることで目標空隙率をシリーズ1は16%、18%、20%、22%、シリーズ2は22%、24%、26%、28%を設定し1配合につき4段階設けた。

2.2 供試体の作製方法

供試体寸法はφ100×150mmとし、4種類の空隙率の供試体を作製した。練り混ぜ方法は、容量55Lの強制2軸ミキサを使用し、セメントおよび骨材を投入して空練りを30秒間行い、水を加えてさらに150秒間練り混ぜた。供試体の詰め込みは、目標空隙率になるように材料を測り取り型枠に投入後、φ100×50mmの錘を乗せ、高さが150mmになるまで上部より手持式振動機、下部よりテーブル振動機を用い締固めを行った。写真-1に振動締固めの状況を示す。供試体は打設後24時間後に脱型を行い、養生は標準養生とした。



写真-1 供試体作製時の振動締固めの状況

2.3 実験項目および方法

(1) 空隙率、透水係数、単位容積質量および一軸圧縮強度試験

空隙率は「ポーラスコンクリートの空隙率試験方法(案)」⁹⁾、透水係数(シリーズ1のみ実施)は「ポーラスコンクリートの透水試験方法(案)」⁹⁾に準じて試験を行った。また、供試体の単位容積質量は24時間以上水中で飽水させた供試体を水中より取り出し24時間自然放置した後の質量(以下表乾状態)と容積より算出した。

一軸圧縮強度試験はJIS A 1108「コンクリートの圧縮

試験方法」に準じて材齢 14 日で試験を行った。

(2) 簡易急速凍結融解試験

試験方法の詳細は、参考文献 7)に記載する。この試験方法は急激に凍結融解作用を繰り返させる非常に厳しい条件での試験である。まず液化窒素用容器に供試体を投入し、液化窒素を数秒間吹き付け、蓋をして 30 秒間供試体の底面を凍結させる。その後約 40℃の温水に浸漬し 5 分間融解させる。融解後水分を拭き取り、凍結した底面から約 15mm の位置に超音波センサーをあて、供試体の直径 (100mm) の超音波伝播速度を計測した (写真-2)。この作業を 1 サイクルとし、10 サイクルに達した時点で試験終了とした。以下の式(1)から相対動弾性係数を求めた¹⁰⁾。なお、ポーラスコンクリートの場合は側面に凹凸があるため、平滑度が通常のコンクリートよりも低い。そのため、ポーラスコンクリートでは、接触媒質の量を通常のコンクリートの場合よりも増やし、超音波センサーの接触面と試験体表面に間に接触媒質を付着させて計測することとした。

$$\text{相対動弾性係数 (\%)} = \left(\frac{v_{L0}}{v_{Ln}}\right)^2 \times 100 \quad (1)$$

ここに、

v_{L0} : 試験開始前における超音波伝播速度(km/s)

v_{Ln} : n サイクル後の超音波伝播速度 (km/s)

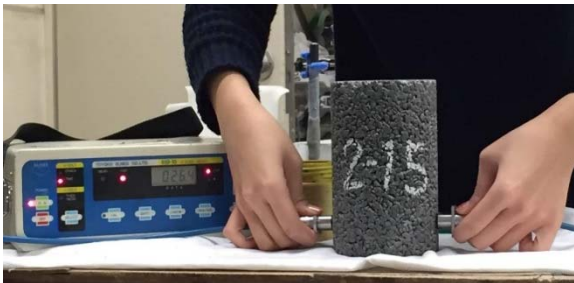


写真-2 超音波伝播速度計測状況

(3) 乾湿繰返し試験

湿潤条件を 20℃水中、乾燥条件を 40℃の乾燥炉内とし、サイクルタイムは乾燥期間 3 日、湿潤期間 1 日、乾燥期間 2 日、湿潤期間 1 日を 2 サイクルとした。試験開始前および試験開始後 2 サイクルごとに超音波伝播速度と供試体質量を測定した。測定は、湿潤期間工程終了直後に行い、水中から取り出した後 1 時間、気中で内部の水抜きをし、表面の水を抜き取り測定した。以下の式(1)から相対動弾性係数を、式(2)から質量減少率を求めた。

$$\text{質量減少率 (\%)} = \frac{w_0 - w_n}{w_0} \times 100 \quad (2)$$

ここに、

w_0 : 試験開始前における供試体質量(g)

w_n : n サイクル後の供試体質量 (g)

3. 実験結果および考察

3.1 全空隙率について

図-1 にシリーズ 1 の単位容積質量と全空隙率の関係を示す。単位容積質量が大きくなるにつれて空隙率は低下しており供試体作製は妥当であった。同一単位容積質量において比較すると細骨材密度が大きくなるにつれて、空隙率は高くなる傾向であった。なお実際の空隙率と目標空隙率と差異が見られるのは材料詰込み時の供試体質量と表乾状態の供試体の質量が違うためと考えられる。

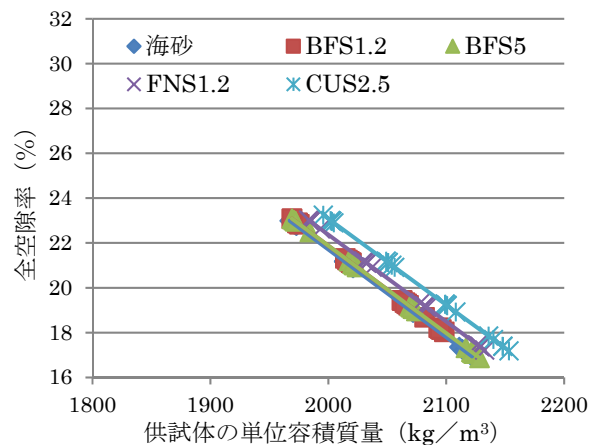


図-1 単位容積質量と全空隙率 (7号砕石)

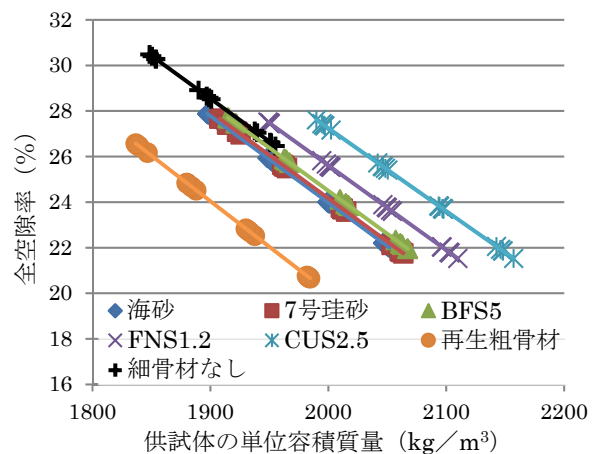


図-2 単位容積質量と全空隙率 (6号砕石)

図-2 にシリーズ 2 の単位容積質量と全空隙率の関係を示す。シリーズ 1 と同様に供試体作製は妥当であり、同一単位容積質量において細骨材密度の差による空隙率の傾向は大きくなっていくことが確認できた。再生粗骨材(BFS5)においては、粗骨材自体の密度が小さいため、同一単位容積質量において大幅に低い空隙率になった。細骨材なしの場合、粗骨材間を細骨材で埋めることができず、単位容積質量を 1950kg/m³ 以上とすることが困難で空隙率の低い供試体は作成できなかった。

3.2 圧縮強度試験及び透水係数試験

図-3にシリーズ1の空隙率と圧縮強度の関係を示す。同一空隙率において、スラグ系細骨材を用いた供試体の圧縮強度は、海砂を用いた供試体より大きかった。どの配合においても空隙率が大きくなるにつれて、圧縮強度は低下する傾向であった。BFS1.2とFNS1.2は、空隙率の増加に伴う強度の低下傾向がやや大きく、BFS5とCUS2.5は、その傾向がやや小さかった。粒径(粗粒率)が大きい細骨材のほうが、空隙率の影響を受けにくいと考えられる。

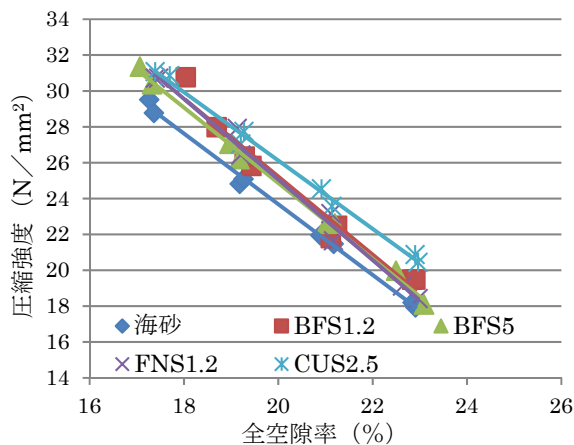


図-3 全空隙率と圧縮強度 (7号砕石)

図-4にシリーズ1の連続空隙率と透水係数の関係を示す。連続空隙率20%付近において粗粒率の小さい細骨材を用いた供試体の透水係数は小さくなる傾向であった。

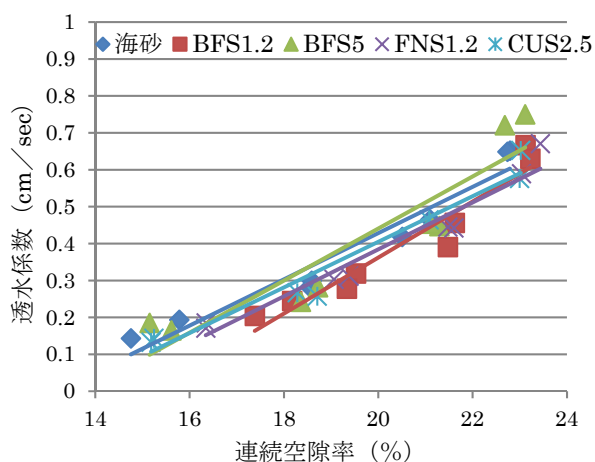


図-4 連続空隙率と透水係数 (7号砕石)

図-5にシリーズ2の全空隙率と圧縮強度の関係を示す。空隙率の増加に伴って、圧縮強度は低下し、その傾きはどの細骨材の場合もほぼ一定であった。同一空隙率においてスラグ系細骨材を用いた供試体の圧縮強度は、

海砂を用いた供試体より大きかった。再生骨材を除く配合において、天然骨材の珪砂7号や海砂の圧縮強度は低く、粗粒率が大きいCUS2.5の圧縮強度は高い値となった。再生粗骨材の圧縮強度は、同一空隙率に対して他の細骨材より最も低くかつばらつきも多かった。細骨材なしは、全空隙率28%付近において他の配合と比較して圧縮強度は高い結果であった。

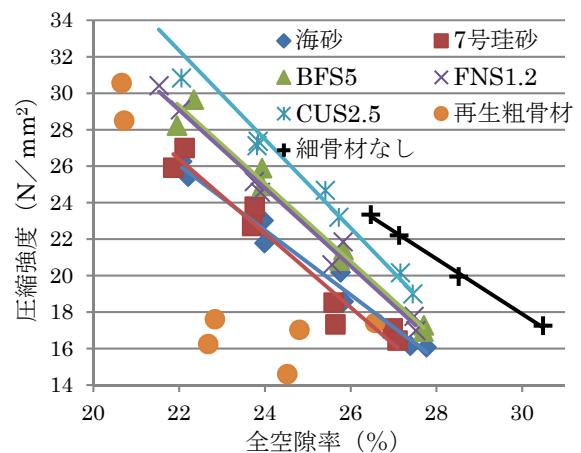


図-5 全空隙率と圧縮強度 (6号砕石)

3.3 簡易急速凍結融解試験

図-6にシリーズ1の空隙率と10サイクル目の相対動弾性係数の関係を示す。

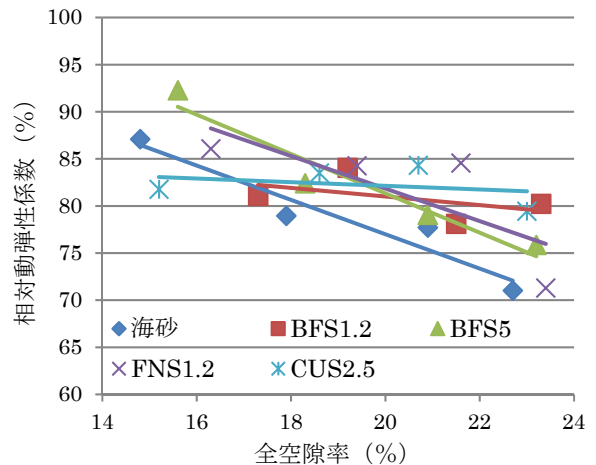


図-6 10サイクル後の凍結融解試験結果
全空隙率と相対動弾性係数 (7号砕石)

すべての配合において相対動弾性係数は70%以上であり、30%程度の低下であった。全体的な傾向として空隙率が大きくなるほど相対動弾性係数の低下が大きくなる傾向であった。空隙率17から23%において海砂より全てスラグ系細骨材の相対動弾性係数は大きかった。このことよりスラグ系細骨材を用いたポーラスコンクリート

の方が凍結融解のような厳しい劣化形態に対して抵抗性が高いことが示唆された。

図-7 にシリーズ 2 の各種配合における空隙率と凍結融解試験 10 サイクル後の相対動弾性係数の関係を示す。シリーズ 1 の同一細骨材の配合と比較して相対動弾性係数の低下率は大きい傾向であった。要因としては粗骨材粒径が大きくなり、空隙率が大きく点接触部分におけるモルタル中の細骨材の影響が大きくなったものと考えられる。スラグ系骨材を使用した供試体では空隙率 20～28%の範囲において相対動弾性係数はほぼ同程度で 60%以上であった。海砂を使用した配合は、相対動弾性係数が 60%以下に低下した。細骨材なしの場合、スラグ系骨材の配合より空隙率は高かったが、高い耐久性を示した。再生骨材は空隙率 20～25%の範囲において相対動弾性係数は 60%以上であった。

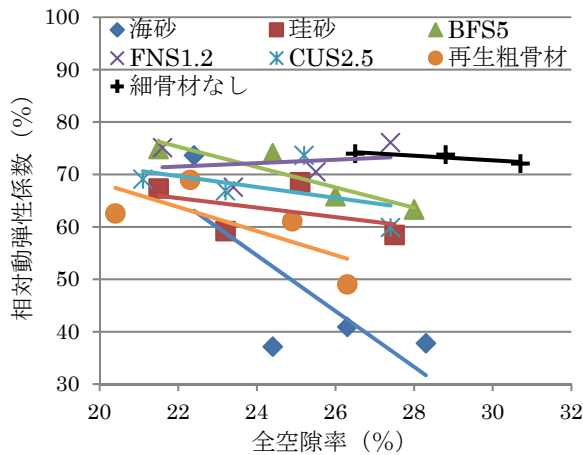


図-7 10 サイクル後の凍結融解試験結果
全空隙率と相対動弾性係数 (6号砕石)

3.4 乾湿繰り返し試験

図-8 と図-9 にシリーズ 1 の空隙率と乾湿繰り返し試験 20 サイクル後の相対動弾性係数および質量減少率を示す。すべての配合において相対動弾性係数はほぼ 100%を維持し、相対動弾性係数の低下は、5%程度であった。また、質量減少率においてはすべての配合において 0.6%以下であった。目視観察においても、乾湿繰り返しによる劣化は確認できなかった。これらの数値は、乾湿繰り返しにおける健全度の閾値を意味するものではないが、乾湿繰り返しへの抵抗性は十分に確保できていると思われる。よって、乾湿繰り返しのような緩やかな劣化形態においては、細骨材の違いが耐久性に与える影響は極めて軽微であることが明らかとなった。

図-10 と図-11 にシリーズ 2 の空隙率と乾湿繰り返し試験 20 サイクル後の相対動弾性係数および質量減少率を示す。

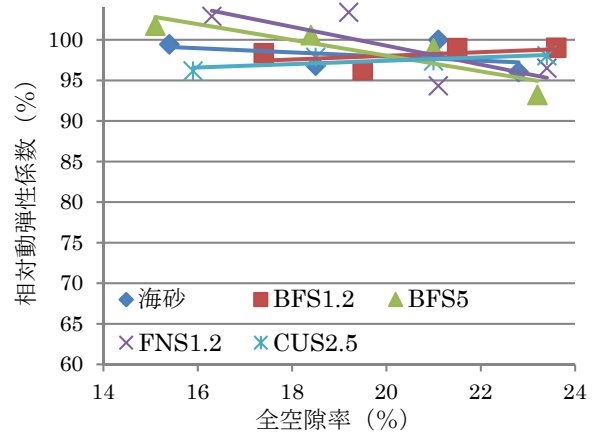


図-8 20 サイクル後の乾湿繰り返し試験結果
全空隙率と相対動弾性係数 (7号砕石)

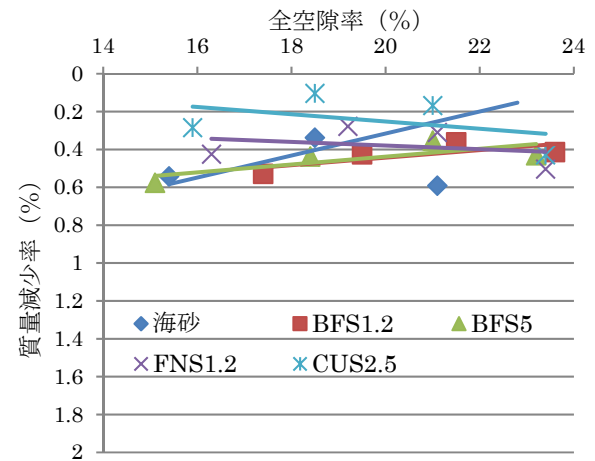


図-9 20 サイクル後の乾湿繰り返し試験結果
全空隙率と質量減少率 (7号砕石)

すべての配合において相対動弾性係数は 85%以上であり、海砂とスラグ系細骨材 90%以上と同程度であった。また、質量減少率においては、再生粗骨材 (BFS5) を除く配合は 0.6%以下であった。シリーズ 1 と比較して相対動弾性係数の低下が大きくなっており、粗骨材まわりのモルタルおよびセメントペースト部分の耐久性が影響しているものと考えられる。再生粗骨材 (BFS5) は、特に質量減少率が大きく、粗骨材の物性値が影響し、劣化がほかの配合よりも早く進んでいることが示唆された。細骨材なしは、海砂やスラグ系細骨材と比べて僅かではあるが相対動弾性係数の低下が大きかった。なお、相対動弾性係数が 100%以上のデータがある。100%以上ということは、初期の伝播時間よりも n サイクル時の伝播時間が短くなったことを意味する。乾湿繰り返しによって、ポーラスコンクリートの強度が増進する可能性は小さく、計測誤差と判断される。これは、ポーラスコンクリートの表面の凹凸によって、超音波伝播速度を計測するセン

サー表面と供試体面との接触の影響によるものであると考えられる。

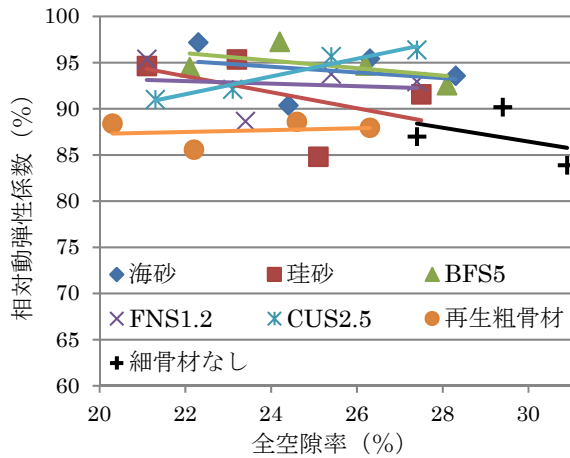


図-10 20 サイクル後の乾湿繰り返し試験結果
全空隙率と相対動弾性係数 (6号砕石)

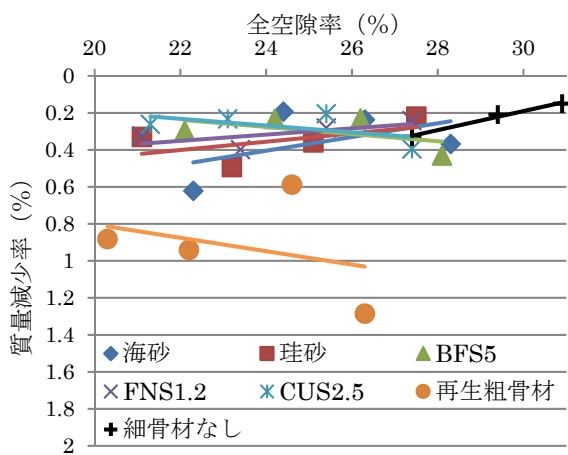


図-11 20 サイクル後の乾湿繰り返し試験結果
全空隙率と質量減少率 (6号砕石)

4. 結論

本研究では、ポーラスコンクリートの耐久性に与える細骨材種類の影響を明らかにするため、7号と6号の砕石サイズの配合を基に、細骨材種類が強度特性、凍結融解作用や乾湿繰り返し作用に対する抵抗性について実験的検討を行った。本研究の範囲内で明らかになったことを以下に記す。

- 1) 従来使用していた海砂よりもスラグ系細骨材を用いたポーラスコンクリートのほうが圧縮強度や凍結融解抵抗性が高い。
- 2) 7号砕石と比較して6号砕石ポーラスコンクリートは、細骨材種類が強度や耐久性に与える影響が大きい。
- 3) 海砂やスラグ系細骨材の種類の影響は受けず、ポーラスコンクリートの乾湿繰り返しに対する抵抗性は高い。

謝辞

本研究は、徳島大学工学部建設工学科のコンクリート研究室の平成26年度の石川美波氏(現、徳島県庁)および平成27年度の岡野真弥氏(現、倉敷市役所)の卒業研究の一部として実施されたものである。ここに付記し、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会四国支部：環境配慮型コンクリート構造物設置後の機能変化に関する調査研究委員会報告書，2011
- 2) 葛西博文，松田洋明，松本伸介，小田島勉，山田登志夫：ポーラスコンクリート製壁体の騒音低減効果に関する研究(その3)，農業農村工学会大会講演会講演要旨集，pp.748-749，2013
- 3) 葛西博文，山田登志夫，田中基博，増馬義裕，佐藤周之：ポーラスコンクリートを活用した生態系支援のための水路に関する基礎的研究，農業農村工学会大会講演会講演要旨集，pp.398-399，2010
- 4) 山田登志夫，西村文武，田中基博，葛西博文，松枝直人，逸見彰男：床材としてのゼオライト含有ポーラスコンクリートのアンモニア除去および生物学的硝化特性，土木学会論文集G(環境)，Vol.72，NO.7，pp.III_29-III_36，2016
- 5) 田村生弥，山本裕史，葛西博文，山田登志夫 他：多機能生態系支援コンクリートによる水質浄化効果の評価，第46回環境工学研究フォーラム講演集，pp.53-55，2009
- 6) 葛西博文，橋本親典，田中美里，小田島勉，山田登志夫：ポーラスコンクリートの耐久性改善に関する研究，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.68，pp.203-204，2013.9
- 7) 田中美里，橋本親典，小田島勉，葛西博文：骨材特性がポーラスコンクリートの耐久性に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.730-735，2014
- 8) 梶尾聡，宇治公隆，国府勝郎：ポーラスコンクリートの配合設計法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1427-1432，2006
- 9) 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，pp.330-332，pp.336-338，2015.6
弓場上有沙，橋本親典，渡邊 健，石丸啓輔：再生骨材コンクリートによるJISの凍結融解試験方法(A法)と液化窒素を用いた簡易急速凍結融解試験方法の比較，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.941-946，2011