

論文 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

田中 美里*1・橋本 親典*2・小田島 勉*3・葛西 博文*4

要旨: 1997年の河川法改正から十数年が経過し、ポーラスコンクリートによる河川護岸の施工例において交換時期を検討すべき箇所が多く見受けられる。本研究では、骨材の特性がポーラスコンクリートの耐久性に及ぼす影響を明確するために、4種類の異なる岩種の骨材を用い、6段階に空隙率を変えたポーラスコンクリートを作製し、実験的検討を行った。その結果、同一空隙率における圧縮強度は、骨材のすり減り減量が最も小さい粘板岩骨材ポーラスコンクリートが一番大きかった。凍結融解抵抗性は空隙率に関係なく石灰石碎石ポーラスコンクリートが最も高く、乾湿繰返し抵抗性は骨材の岩種による影響は小さく高い抵抗性を有した。
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, 凍結融解試験, 乾湿繰返し試験

1. はじめに

ポーラスコンクリートは全体積の20%から30%を占める連続空隙構造を有する特殊なコンクリートである。従来のコンクリートに比べ透水性、透気性が飛躍的に向上することから、透水・排水・保水性能や吸音・遮音壁、調湿等の環境負荷低減材料として舗装構造物において幅広く利用されている。また、生物共生型のコンクリートとして、生物との共生を目的とし、植生基盤や海中構造物等への適応が可能であり、河川護岸、透排水性舗装など多岐にわたって利用されている。さらに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、温度上昇抑制についての研究も行われている。このように、ポーラスコンクリートは多機能な材料として注目されており、近年ではこの空隙構造を生かしたポーラスコンクリートの利用法が期待されている。

一方、その多孔質な構造から、ポーラスコンクリートは耐久性が低く、脆性的であるという特徴もある。また、1997年の河川法改正から十数年が経過し、ポーラスコンクリートによる河川護岸工事の施工例が多い四国地方においても、植生や生態系を復元させるという目的で施工されたポーラスコンクリートもある程度の経年変化を迎える時期に来ている。供用中のポーラスコンクリートを対象とした研究も報告されている^{1) 2)}。耐久性に影響を与える要因として、例えば寒冷地において、空隙内部に飽和した水が凍結する際に氷圧が生じるが、これが融解し、この繰返しによる凍結融解の作用においてポーラスコンクリートは著しく劣化し、普通コンクリートと比較して明らかに不利である。また、乾湿繰返しの緩やかな劣化作用においても普通コンクリートほどの耐久性を

維持することはできない。これらの作用において、ポーラスコンクリートの耐久性や強度はモルタル部分(セメントペーストと砂、ただし砂を未使用の場合はセメントペーストのみ)に大きく依存していると考えられており、モルタル部分に着目した研究は数多く報告されている^{3) 4)}。その反面、骨材特性の面から検討した研究事例は少ない。しかし、骨材の容積がコンクリート中の70%程度を占めていることから、モルタル部分のみならず骨材そのものの特性がポーラスコンクリートの耐久性に及ぼす影響も十分に大きいと考えられる。

本研究では、吸水率や密度が異なる3種類の普通骨材、および1種類の石灰石碎石を用いて実験を行い、骨材の特性がポーラスコンクリートの耐久性に与える影響を明確にすることを目的とし、耐久性について実験的検討および比較を行った。なお、本実験のポーラスコンクリートの配合は、実際に工場で用いられている実績のある配合を基準とした。そのため、骨材特性以外の配合条件をすべて統一していない。よって、本研究での知見はあくまで限定的範囲であると考えている。

2. 実験概要

本研究では、4種類の異なる岩種の骨材を用い、各種空隙率を6段階に変化させた供試体を作製し、圧縮強度試験の他、耐久性評価の検討項目として凍結融解抵抗性、乾湿繰返し抵抗性について実験的検討を行った。

2.1 使用材料

使用材料として、セメントは普通ポルトランドセメント(密度: 3.16kg/cm³)を使用した。また、骨材自体の影響を明らかにするためにNonAEとした。

表-1 に使用した粗骨材および細骨材の物理的性質を

*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム専攻 博士課程前期 (学生会員)

*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 株式会社総合開発 インフラ本部コンクリート事業部 開発営業部 部長 (非会員)

*4 株式会社総合開発 インフラ本部コンクリート事業部 開発営業部 水環境室長代理 (非会員)

表-1 使用材料

配合	粗骨材				細骨材		
	岩種	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	すり減り減量 (%)	砂種	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
A	輝緑岩	3.00	0.36	10.8	砕砂	2.91	0.97
B	安山岩	2.74	2.65	20.8	砕砂	2.73	1.72
C	粘板岩	2.69	1.30	8.9	海砂	2.62	0.88
D	石灰石	2.69	0.57	—	海砂	2.62	0.88

示す。粗骨材において、配合 A~C は、それぞれ物理的性質が異なる普通骨材、配合 D は石灰石砕石（以後、石灰石）を示す。配合 A~D の粗骨材の産地はそれぞれ愛媛県大洲市、佐賀県多久市、広島県呉市、高知県高知市である。また、粗骨材は全て粒径を 7 号砕石と一定とした。図-1 に粗骨材の粒度分布を 7 号砕石の粒度範囲とともに示す。配合 B, C, D の粗骨材は 7 号砕石の範囲内に入っているが、D は比較的粒径が小さい。配合 C の粗骨材は範囲を少し上回り、粒径は全ての骨材の中で最も大きい。

また、細骨材は結合材として使用した。本研究では数種類の骨材を使用しているが、それぞれの密度や吸水率から骨材の品質は確保されているため、各劣化作用において顕著な影響はないものとする。

2.2 配合

表-2 に配合を示す。配合 A, B, C は各種普通骨材、D は石灰石を用いた配合を意味する。供試体作製において、モルタルの垂れ下がりを防ぎ、骨材とモルタルを均質にさせるため、それぞれ用いた骨材の特徴から各配合において適切な水セメント比を設定している。目標空隙率は 16% とし、空隙率が 7%~20% の範囲で 6 通りとなるよう各配合において型枠への詰め込み質量を変化させた。

2.3 供試体の作製方法

供試体寸法は φ100×150mm とし、各配合において空隙率を 6 通りに変化させたものを 5 体ずつ作製した。練混ぜ方法は、容量 50L の強制 2 軸ミキサを使用し、セメ

表-2 配合

配合	W/C (%)	単体量(kg/m ³)			
		W	C	S	G
A	25.4	94	370	473	1398
B	28.1	101	360	269	1444
C	29.7	101	340	140	1555
D	28.0	98	350	202	1479

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 秒間練混ぜた。空隙率を 6 通りに変化させるにあたり、本研究では型枠への詰め込み質量を変化させる方法を用いた。まず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、φ100×200mm の型枠に供試体ごとの所定量を計りとり投入した。その上から φ100×50mm の重りを乗せ、高さが 150mm になるまで型枠バイブレータとテーブルバイブレータを用いて供試体上下から振動締固めを行った。写真-1 に締固めの様子を示す。供試体の容積を一定とし、詰め込み量を変化させることにより空隙率の変化を生じさせた。供試体は打設後 24 時間後に脱型を行い、養生は水中養生とした。

2.4 実験項目および方法

(1) 空隙率試験および一軸圧縮強度試験

空隙率試験は「ポーラスコンクリートの空隙率試験方法(案)」に準じて各配合 5 体ずつ測定を行った。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」に準じて各配合 2 体ずつ試験を行った。両試験とも材齢 14 日で実施した。



写真-1 振動締固めの様子

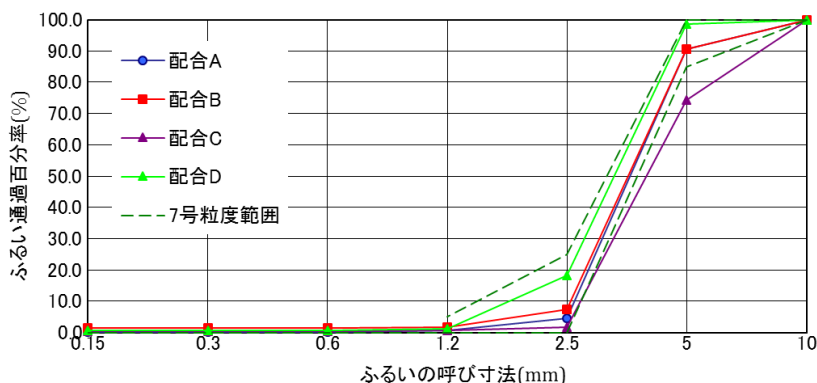


図-1 粒度分布

(2) 簡易急速凍結融解試験

本研究室が開発・提案している簡易急速凍結融解試験法を用いた⁵⁾。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。まず液化窒素用の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秒間底面を凍結させる。その後約40℃のお湯に浸漬し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、距離100mm間の超音波伝播速度を計測した。この作業を1サイクルとし、相対動弾性係数が60%以下になるか、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⁵⁾。

$$\text{相対動弾性係数 (\%)} = \left(\frac{VL_0^2}{VL_n^2} \right) \times 100 \quad (1)$$

ここに、

VL_0 : 試験開始前における超音波伝播速度 (km/s)

VL_n : n サイクル後の超音波伝播速度 (km/s)

(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サイクルとする。試験開始前および試験開始後2サイクルごとにJIS A 1127による一次共鳴振動数および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、表面の水を拭き取り測定した。以下の式(2)から相対動弾性係数を求めた。

$$P_n = \left(\frac{f_n^2}{f_0^2} \right) \times 100 \quad (2)$$

ここに、

P_n : 乾湿繰返し n サイクル後の相対動弾性係数 (%)

f_n : 乾湿繰返し n サイクル後のたわみ振動の一次共鳴振動数 (Hz)

f_0 : 試験開始前におけるたわみ振動の一次共鳴振動数 (Hz)

また、質量減少率を以下の式(3)から算出した。

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

ここに、

W_n : 乾湿繰返し n サイクル後の質量減少率 (%)

w_n : 乾湿繰返し n サイクル後の供試体の質量 (g)

w_0 : 試験開始前における供試体の質量 (g)

3. 実験結果および考察

3.1 空隙率試験および圧縮強度試験

図-2に圧縮強度と空隙率の関係を示す。全ての配合において空隙率が大きくなるに従い圧縮強度が小さくなることが確認できた。普通骨材と比較して、配合Dは全体

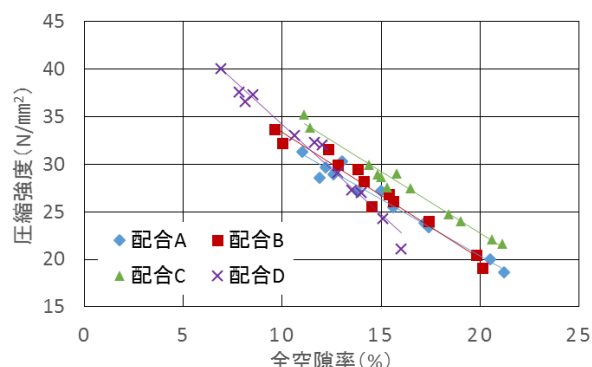


図-2 圧縮強度と全空隙率の関係

的に空隙率が小さくなった。原因として、図-1から分かるように石灰石の粒径が他の普通骨材に比べ全体的に小さかったことが考えられる。粒径が細かいため、型枠に詰まりやすくなり空隙が少なくなってしまった。また、図-2から配合Dの傾向として、空隙率の変化による圧縮強度への影響は他の普通骨材よりも比較的大きいことが分かる。これは、骨材強度の因子として挙げられるすり減り減量が影響しているものと考えられる。本実験で使用した石灰石のすり減り減量のデータはないが、一般的には18~27%の範囲と言われており⁶⁾、普通骨材よりも極めて大きいことから、石灰石は普通骨材よりも圧縮の作用による影響を受けやすいことが分かる。

同程度の空隙率で比較した場合、全空隙率15%において配合C、A、B、Dの順に圧縮強度が小さくなった。配合Cは特に他の骨材と比較して最も圧縮強度が大きくなったが、これはすり減り減量が最も小さいためであると考えられる。同様に、すり減り減量の点から配合A、Bの順に強度が小さくなることが確認できた。以上のことから、圧縮強度には骨材の特性、特にすり減り減量が影響することが確認できた。

3.2 簡易急速凍結融解試験

図-3~6に簡易急速凍結融解試験の結果を示す。それぞれ図中に6通りに変化させた空隙率を明記している。全ての配合において相対動弾性係数は60%以上を維持し、空隙率が大きいほど相対動弾性係数は小さくなるということが確認できた。

普通骨材を使用した配合A~Cにおいて、配合Aは普通骨材を使用した配合の中で比較的耐久性を維持することができている。これは、粗骨材の吸水率が最も小さいためであると考えられる。しかし、配合Bは配合Cと比較して粗骨材の2倍ほど吸水率が大きい、劣化の傾向はほぼ同様であった。このことから粗骨材の吸水率だけでは必ずしも耐久性との関係性は説明できないと考えられる。また、石灰石を使用した配合Dは全ての空隙率において相対動弾性係数は90%程度を保持し、普通骨材を使用したどの配合よりも最も耐久性を維持できている。

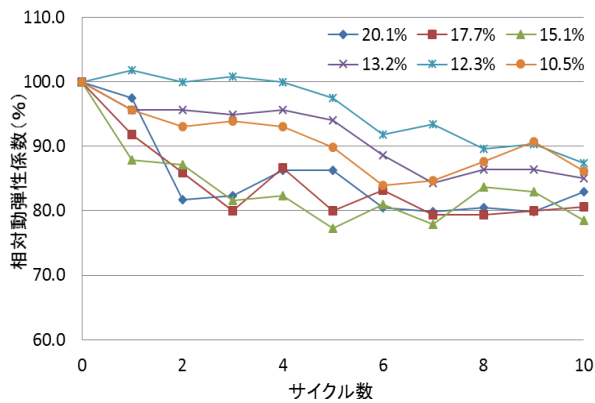


図-3 配合 A 簡易急速凍結融解試験結果

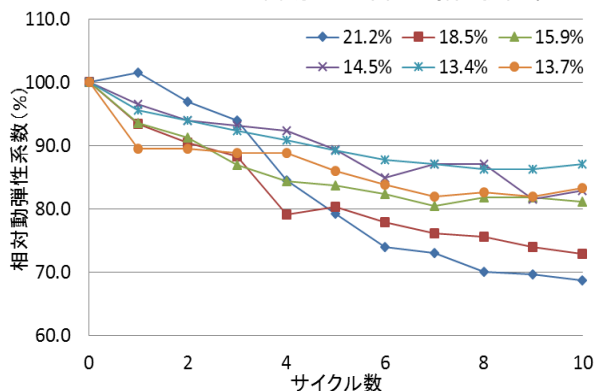


図-5 配合 C 簡易急速凍結融解試験結果

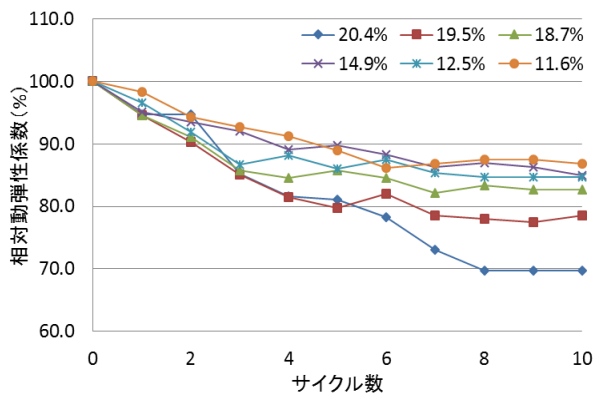


図-4 配合 B 簡易急速凍結融解試験結果

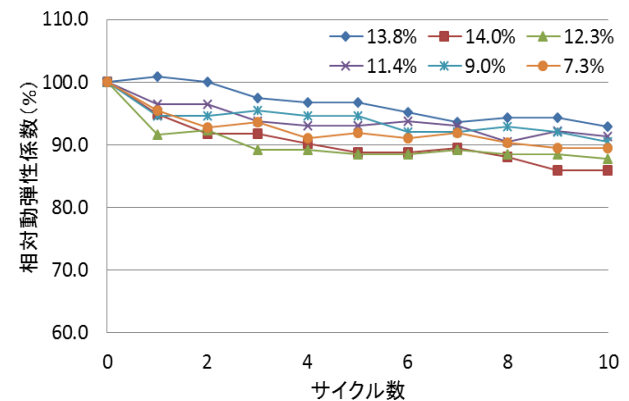


図-6 配合 D 簡易急速凍結融解試験結果

一般的に、石灰石を用いたコンクリートは耐凍害性が劣るという傾向があるが⁷⁾、本実験では高い耐久性を維持できているという全く逆の結果が得られた。ポーラスコンクリートという粗骨材の体積が大半を占める特殊な構造においては、吸水率が小さいために耐久性を維持できたことから、石灰石を用いたポーラスコンクリートにおける粗骨材の吸水率と耐久性にはよい相関性があると考えられる。

図-7 に空隙率と 10 サイクル目の相対動弾性係数の関係を示す。普通骨材を使用した配合において、配合 A は粗骨材の吸水率が小さいことから空隙率の変化に対しても耐久性を維持できている。配合 C は、空隙率の変化による劣化の度合いが最も大きくなった。一つの要因として、配合 C は結合材として使用した細骨材の量が少ないことが挙げられる。モルタル量が少ないため、粗骨材の粒子間の点接触を支えているモルタル部分の劣化がポーラスコンクリートの耐久性に影響を与えたと考えられる。配合 B は吸水率が最も高いにも関わらず、配合 A よりも劣化の度合いは小さく、配合 C ほどの劣化は確認できなかった。これは配合 C と比較して細骨材量が約 1.9 倍多く、モルタル量も増えたことからモルタル部分の劣化があまり反映されず、耐久性を維持できたと考えられる。配合 D は前述の通り、吸水率が小さいこと、さらに全体的に空隙率も小さく、また粗骨材の粒径も最も小さいこ

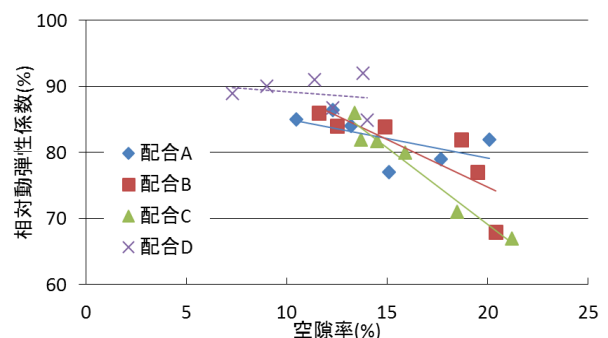


図-7 空隙率と相対動弾性係数の関係

とから高い耐久性を維持できている。以上のことから、粗骨材の吸水率だけでは必ずしもポーラスコンクリートの耐久性と粗骨材の因果関係は説明できない。また、本実験の配合においてモルタル量や粗骨材量を一定としていないため、粗骨材自体の特性だけでは耐久性の評価が難しく、モルタルによる耐久性への影響も受けているものと考えられる。

3.3 乾湿繰返し試験結果

図-8~11 に乾湿繰返し試験の結果を示す。それぞれ図中に 6 通りに変化させた空隙率を明記している。普通骨材、石灰石に関わらず全ての配合において、全ての空隙率で多少のばらつきはあるものの、ほぼ 100% を維持している。このことから、乾湿繰返しのような緩やかな劣化形態においては、粗骨材の違いが耐久性に耐える影響

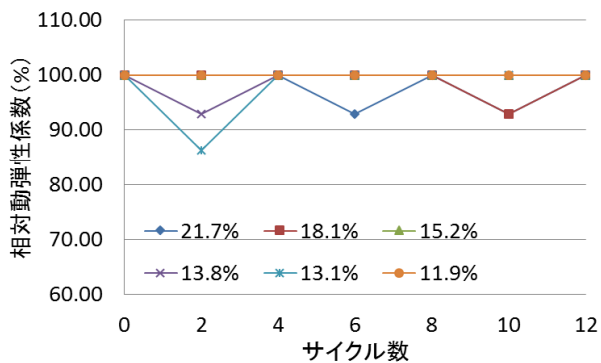


図-8 配合 A 乾湿繰返し試験結果

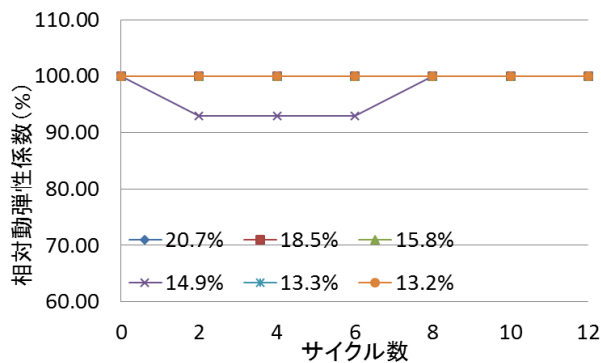


図-9 配合 B 乾湿繰返し試験結果

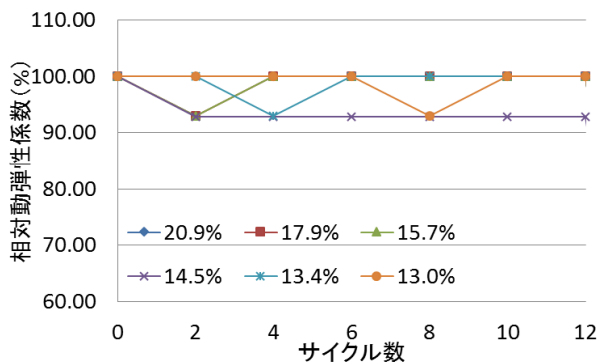


図-10 配合 C 乾湿繰返し試験結果

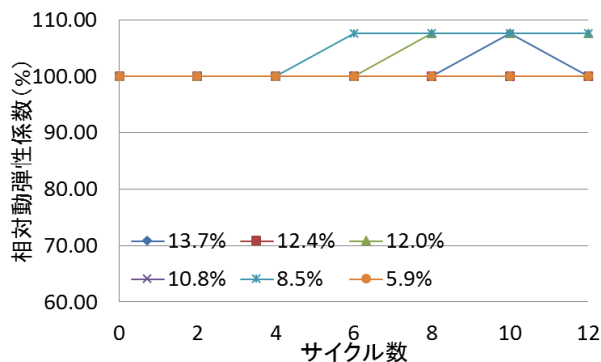


図-11 配合 D 乾湿繰返し試験結果

は極めて軽微である。乾湿繰返し試験による相対動弾性係数からの、骨材の違いによる評価は難しいようである。

図-12～15 に乾湿繰返し試験による質量減少率を示す。全ての配合において、空隙率が大きいほど質量減少率の低下も大きくなる傾向が確認できた。普通骨材を使用した配合において、乾湿繰返し試験による相対動弾性係数にはほぼ変化はなかったものの、質量減少率の度合いの違いから、耐久性には若干の影響を与えているものと考えられる。配合 A～C で質量減少率に違いが生じた原因として、細骨材の量が考えられる。配合 A は細骨材量が最も多いことから、セメントペーストに対する細骨材量が多すぎたため、粗骨材粒子をつなぐ結合剤の付着力が低下した可能性がある。これにより、乾湿を繰返す度に十分に付着していなかったモルタルが剥がれ落ちたと考えられる。配合 C は細骨材量が少ないため、モルタルが粗骨材に十分に付着した。そのため、モルタルの剥がれが少なく、質量減少があまりなかったと考えられる。

同様に、配合 D においても相対動弾性係数からは劣化は確認できなかったが、質量減少率の結果からは普通骨材を使用した全ての配合よりも若干の低下度合いを確認できた。これは、石灰石の乾燥収縮率は普通骨材よりも小さいため、モルタルの乾燥収縮率と大きな差が生じ、供試体内に微視的なひび割れが生じた可能性がある。また石灰石は表面が粉化しやすいため、測定前に供試体表

面の水を拭き取る際に、骨材表面が徐々に削られてしまったことも考えられる。配合 D は、簡易急速凍結融解の作用において高い耐久性を維持できていたが、乾湿繰返しの作用においては最も劣化が進んでいたと言える。このことから、石灰石は凍結融解のような極めて厳しい劣化作用よりも、乾湿繰返しのような緩やかな劣化作用において、普通骨材よりも耐久性に与える影響が大きくなることが分かった。以上のことから、本実験の配合ではモルタル量や粗骨材量を一定としていないため、ポーラスコンクリートの乾湿繰返し試験において、粗骨材特性の特性だけでは耐久性の評価は難しい。また急速凍結融解試験のような非常に厳しい繰返し作用とは異なり、緩やかな作用においては相対動弾性係数だけによる耐久性の確認は難しく、質量減少率の面からも検討することにより、耐久性の違いの評価が可能となることが確認できた。

4. 結論

本研究では、粗骨材の容積が多くを占める特殊な空隙構造を持つポーラスコンクリートにおいて、吸水率や密度が異なる 3 種類の普通骨材、および 1 種類の石灰石砕石を用いて実験を行い、骨材自体の特性がポーラスコンクリートの耐久性に与える影響を明確にすることを目的とし、耐久性について実験的検討を行った。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

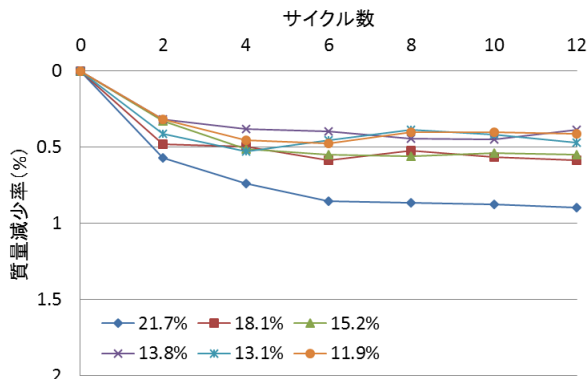


図-12 配合 A 質量減少率

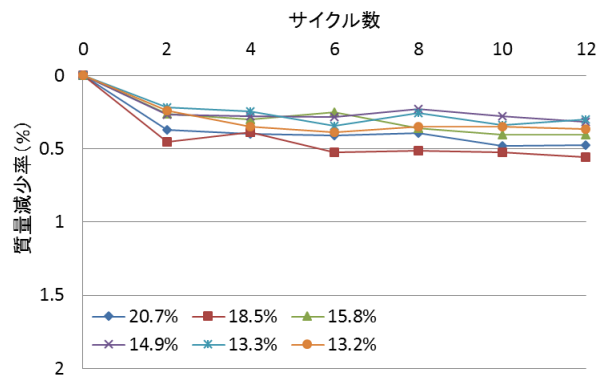


図-13 配合 B 質量減少率

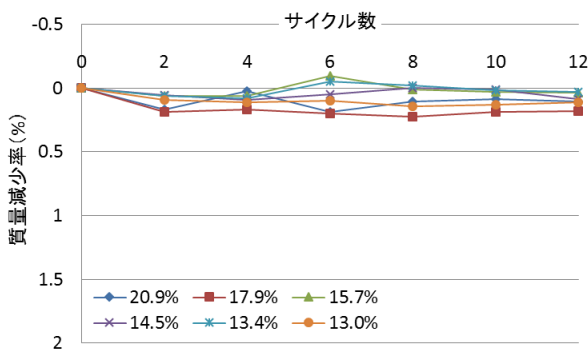


図-14 配合 C 質量減少率

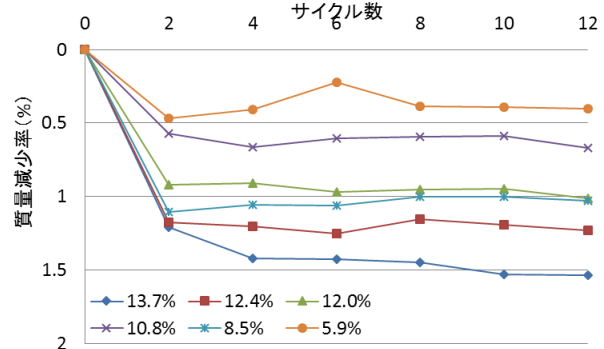


図-15 配合 D 質量減少率

- 同一空隙率における圧縮強度は、すり減り減量の最も小さい粘板岩を用いた配合で最も強度が大きく、すり減り減量が比較的大きい石灰石砕石は空隙率の変化に伴い圧縮荷重下において強度が大きく低下することが明らかになった。
- 石灰石砕石を用いた配合では、簡易急速凍結融解試験のような厳しい劣化作用においても高い耐久性を維持することが分かった。
- 乾湿繰返し試験において、相対動弾性係数から骨材特性の違いによる耐久性への影響を評価することは難しく、質量減少率により評価が可能となった。
- 石灰石砕石を用いた配合では、乾湿繰返しのような緩やかな劣化形態において普通骨材よりも耐久性に与える影響は若干大きくなるが、全ての配合において極めて軽微であることが明らかになった。

モルタル量や粗骨材量を一定としていない本実験の配合では、骨材の特性だけから耐久性を評価することは難しく一概には言えず、配合条件を等しくさせることにより耐久性への影響を確認できる可能性がある。

参考文献

- JCI 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」編：第4章 物性劣化の評価，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，

pp.4-1～4-14，2011.3

- 田中美里，橋本親典，渡辺健，石丸啓輔：河川護岸のポーラスコンクリートの経年劣化に関する研究，日本建築学会四国支部研究報告集，Vol.13，pp.11～12，2013.5
- 中村拓郎，堀口 敬，志村和紀，石井 剛：ポーラスコンクリートの凍害劣化に及ぼすスケリング抵抗性の影響，コンクリート工学論文集，第21巻第1号，pp.63-72，2010.1
- 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
- 弓場上有沙，橋本親典，渡辺 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.941-946，2011.1
- 石灰石工業協会，石灰石骨材とコンクリート，増補・改訂版，2005
- 千歩 修，浜 幸雄，松村光太郎，袴谷 秀幸：コンクリートの耐凍害性に及ぼす粗骨材の線膨張係数と石粉の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.787-792，2000.1