

論文 空気量, 振動締固め時間および細骨材の品質がスケーリング抵抗性に与える影響

片平 博*1・古賀裕久*2

要旨: 寒冷地の沿岸地域や凍結防止剤散布地域では, 凍害によるコンクリート構造物のスケーリング劣化が問題となっている。そこで, 練上りの空気量, 振動締固め時間, 細骨材の品質を実験要因として, 塩水を用いたスケーリング抵抗性の試験を実施した。この結果, 空気量が多い配合ほどスケーリング量は小さくなる傾向を示し, 特に微細な気泡の量と良い対応を示すこと, 微細な気泡は振動締固めや凝結, 硬化の過程で抜けにくいこと等が確認された。さらに, 塩水が作用する場合には, 細骨材の品質もスケーリング量に大きな影響を与えることが分かった。

キーワード: 振動締固め, 空気量, エントレインドエア, 骨材品質, 凍結融解抵抗性, スケーリング抵抗性

1. はじめに

コンクリートの凍結融解抵抗性に関しては, 古くから様々な研究が行われている。その結果, フレッシュコンクリート中に空気量を 4.5%程度混入することで高い凍結融解抵抗性が得られることが分かっている¹⁾。しかし, 近年, 沿岸部や凍結防止剤散布地域の構造物において, コンクリート中に浸透した塩化物イオンが凍結融解による劣化を促進させ, それによるスケーリング劣化が問題となっている。

このスケーリング劣化に対しては, 単にコンクリート中の空気量のみならず, 微細な気泡の量が大きな影響を及ぼすことが知られている²⁾。

フレッシュコンクリート中の空気量は一般的には JIS A 1128 「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」によって測定されている。この試験方法では, コンクリートのスランブが 8 cm 以上の場合は, 締固めは突き棒によって行う。一方で, 構造体へのコンクリートの打込みには一般に棒状バイブレータが用いられており, この振動締固めの影響を受けた構造体中のコンクリートの空気量は JIS A 1128 の方法による測定値よりも低下することが知られている²⁾。

これらのことから, 練上りの空気量, 棒状バイブレータによる振動締固め時間を実験要因として, 真水または塩水を用いた凍結融解試験を実施し, スケーリング抵抗性を比較した。また, 硬化後のコンクリート供試体に対してリニアトラバース法による気泡分布の測定を実施し, 気泡分布の特性を確認した。さらに, コンクリートの凍結融解抵抗性には骨材品質も影響することが知られており³⁾, コンクリート表面から進行するスケーリングに対しては細骨材の品質が影響する可能性があると考え, 細骨材の種類も実験要因に加えて, これらがスケーリング

抵抗性に与える影響について検討した。

2. 実験方法

2.1 コンクリート配合と供試体の作製方法

表-1に示すように, コンクリートに用いる細骨材を3種類(吸水率の低いものから順に A,B,C), 練上りの目標空気量を3水準設定してコンクリートを練り混ぜた。コンクリートの使用材料を表-2に, コンクリートの標準的な配合を表-3に示す。表-3の配合を基本として, AE 助剤の量のみを変える(セメント量に対して 0.0004~0.004%の範囲)ことで, 目標空気量を3, 5および7

表-1 実験要因

凍結融解試験	真水, 塩水
細骨材の種類	3種類
練上りの目標空気量(%)	3, 5, 7
振動時間(秒)	0, 3, 10

表-2 使用材料

水	水道水
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm ³
細骨材	A: 石灰砕砂, 絶乾密度2.66g/cm ³ , 吸水率0.61% B: 川砂(標準), 絶乾密度2.53g/cm ³ , 吸水率1.60% C: 川砂(低品質), 絶乾密度2.45g/cm ³ , 吸水率3.95%
粗骨材	硬質砂岩, 最大寸法20mm, 絶乾密度2.69g/cm ³ , 吸水率0.50%
AE 減水剤	標準型(I類) リグニンスルホン酸化合物とポリオールの複合体
AE助剤	AE剤(I類) 変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

表-3 コンクリート配合
(細骨材B使用、目標空気量5%の例)

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	目標空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				化学混和剤 (ml/m ³)	
			水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤	AE 助剤
55	45	5.0	171	311	788	999	778	6

*1 (国研) 土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 総括主任研究員 (正会員)

*2 (国研) 土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 上席研究員 (正会員)

％にそれぞれ調整した。これらの配合で得られたコンクリートのスランブは10～17cmの範囲であった。

練り上がったコンクリートは、スランブ試験（JIS A 1101）と空気量試験（JIS A 1128）を実施後、100×100×400mmの鋼製型枠に詰め、JIS A 1132に従って突き棒による突き固めで供試体を作製した。振動を与える条件では、エアメータの容器内にコンクリート試料を詰め、そこに棒状バイブレータ（直径 28mm、振幅 1.8mm、振動数 210Hz、出力 460W）を鉛直に、容器の底面から約 2cm の深さまで挿入し、容器に接触しない状態で振動を 3 秒または 10 秒与えた。その後、容器から取り出した試料を鋼製型枠に詰め、突き棒による突き固めで供試体を作製した。なお、エアメータ容器内で振動を 3 秒または 10 秒与えたコンクリートの空気量も測定した。

角柱供試体は条件ごとに 4 本ずつ作製した。また、φ 100×200mm の円柱供試体も同様の方法で 3 本ずつ作製した。作製した供試体は翌日に脱型し、材齢 28 日まで水中養生を行った。

角柱供試体 4 本に対しては 2.2 の凍結融解試験を実施した。円柱供試体 2 本に対しては JIS A 1108 に従って圧縮強度試験を実施し、残り 1 本は 2.3 の気泡分布の測定に用いた。

2.2 凍結融解試験方法

凍結融解試験は JIS A 1148 コンクリートの凍結融解試験方法の A 法（水中凍結水中融解法）に準じて実施した。

JIS A 1148 では、ゴム容器内にコンクリート供試体を格納したうえで、ゴム容器と供試体との間の空間を水（以下、真水という）で満たして試験を行うが、これとは別に 3%NaCl 水溶液（以下、塩水という）で満たして、塩分環境下の凍結融解の条件を模した試験も行った。なお、既往研究⁴⁾で、塩水を用いた場合でも、供試体が顕著に劣化するまでは、凍結融解試験中のゴム容器内の水温や供試体の中心温度の履歴は、真水を用いた場合と同様であることを確認している。

真水の試験、塩水の試験とも供試体本数は条件ごとに 2 本とした。凍結融解試験は 300 サイクルまで行い、数サイクルごとに供試体をゴム容器から取り出し、動弾性係数と質量減少率を測定した。なお、本研究ではスケーリング抵抗性の検討が目的であり、以下では、質量減少率によってスケーリング抵抗性を評価することとした。

2.3 気泡分布の測定方法

円柱供試体は、高さ方向の中心付近 2 箇所を輪切りに切断し、その切断面を研磨した。この研磨面（φ 100mm、2 面）に対して、ASTM C 457 に従って、リアトラパス法による気泡分布の測定を行った。0.01～2mm の範囲の気泡の測定結果から、気泡間隔係数、気泡径ごとの空気量等を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ時の空気量測定結果

フレッシュ時に測定した空気量を図-1に示す。練上りの目標空気量は 3、5 および 7% であり、これに対して振動を 3 秒または 10 秒与えると空気量は減少した。振動を 10 秒与えた場合、目標空気量が 3% の配合は約 1/3 の 1% 程度まで低下したのに対して、目標空気量が 7% の配合では 1/2 程度までの減少に留まっており、練上りの空気量が多いほど、空気量の減少率は小さくなる傾向を示した。なお、振動による空気量の減少傾向について、細骨材の違いによる影響は、明確でなかった。

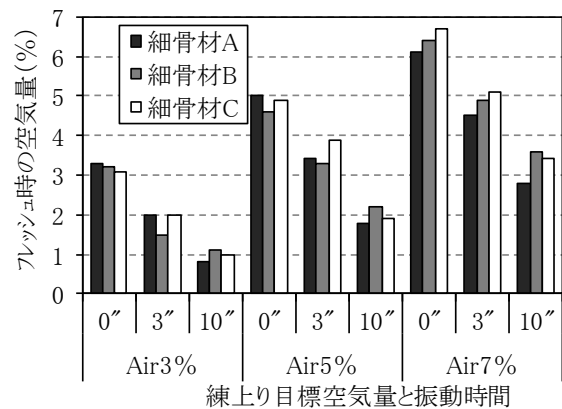


図-1 フレッシュ時に測定した空気量

3.2 圧縮強度試験結果

フレッシュ時に測定した空気量と圧縮強度の関係を図-2に示す。両者は良い対応を示し、空気量 1% 増に対して圧縮強度は約 5% 低下する傾向を示した。また、細骨材の品質によっても圧縮強度は異なり、細骨材 A,B,C の順で強度が低くなる傾向を示した。

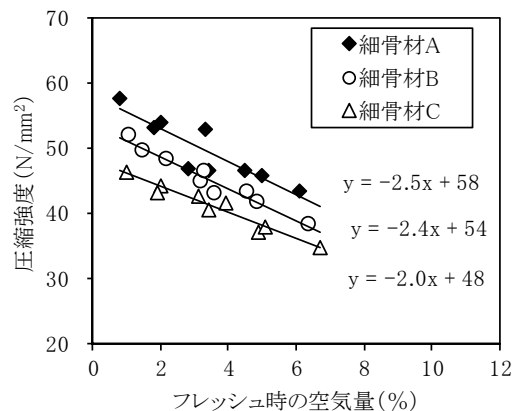
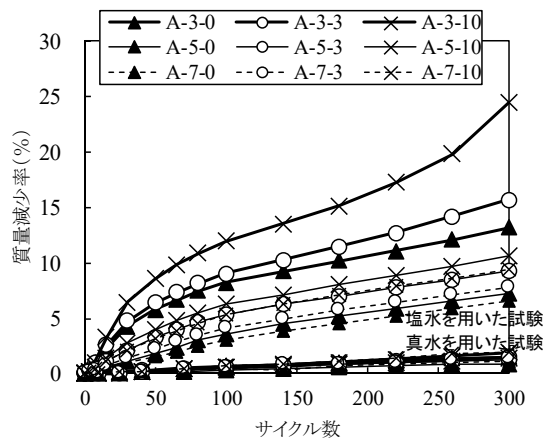


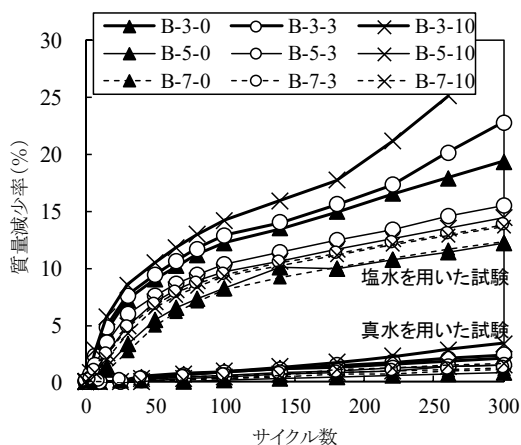
図-2 空気量と圧縮強度の関係

3.3 凍結融解試験結果

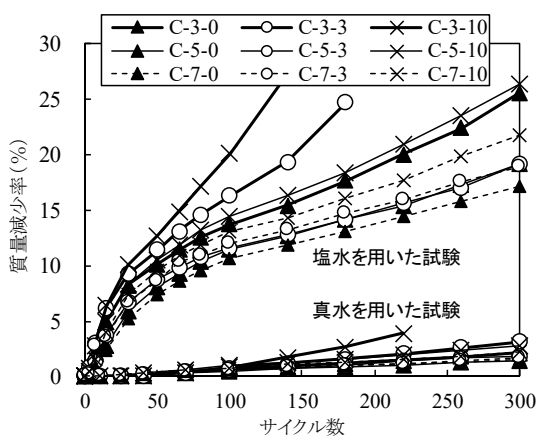
凍結融解試験から得られた質量減少率の測定結果を図



(1) 細骨材Aの配合



(2) 細骨材Bの配合



(3) 細骨材Cの配合

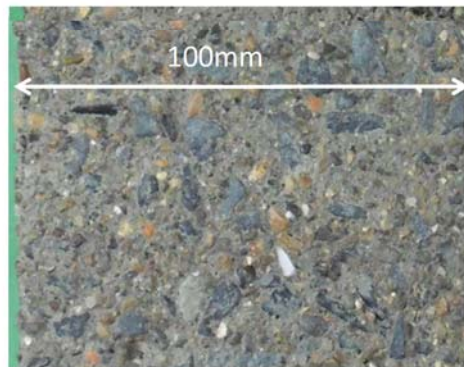
図-3 凍結融解試験結果

図-3に示す。図には真水の試験結果と塩水の試験結果とを合わせて示しているが、塩水を用いることで質量減少率が非常に大きくなる結果が得られた。

真水の試験と塩水の試験とで、質量減少率が同程度の場合の供試体の表面状態を比較した。その一例を図-4に示す。真水の試験では、粗骨材が露出する部分と表面の平滑面が残る部分とが混在しているが、塩水の試験ではほぼ均等にスケリングする傾向が見られた。



(1) 真水300サイクル (質量減少率3.1%)



(2) 塩水7サイクル (質量減少率3.0%)

図-4 供試体の表面写真の例(C-3-3)

質量減少率は、真水を用いた場合はサイクル数に概ね比例して増加したが、塩水を用いた場合は試験開始当初に大きな増加を示し、サイクル数が進むにつれて増加量がやや落ち着いた。これは、質量減少率が大きくなると供試体を格納するゴム容器内の塩水の量が多くなり、次第に凍結融解しにくくなるためと考えられる。筆者らは、既往の研究において、質量減少率が5%程度まではその影響はほとんどないが、10%を超えると融解しにくくなる傾向を確認している⁴⁾。そこで、以降は、真水の試験結果は300サイクル、塩水の試験結果は50サイクルの質量減少率を用いて評価することとした。

3.4 フレッシュ時の空気量と質量減少率の関係

フレッシュ時の空気量と真水を用いた凍結融解試験300サイクル時点の質量減少率との関係を図-5に示す。この図では同一バッチで、振動締め時間が異なる3点のデータを破線で繋げて示している。繋げた3点の空気量が多いもの(図中では右側)から順に振動締め0,3,10秒のデータである。これによれば、空気量が多い条件ほど、質量減少率は僅かながら小さくなる向を示し、練上りの設定空気量に関係なく、0,3,10秒振動後の空気量と質量減少率とは比較的良い対応関係を示した。また、細骨材の違いについては、細骨材Cで空気量が2%以下の領域で質量減少率がやや大きかったものの、それ以外の質量減少率の値は概ね3%以下と小さかった。すなわち、

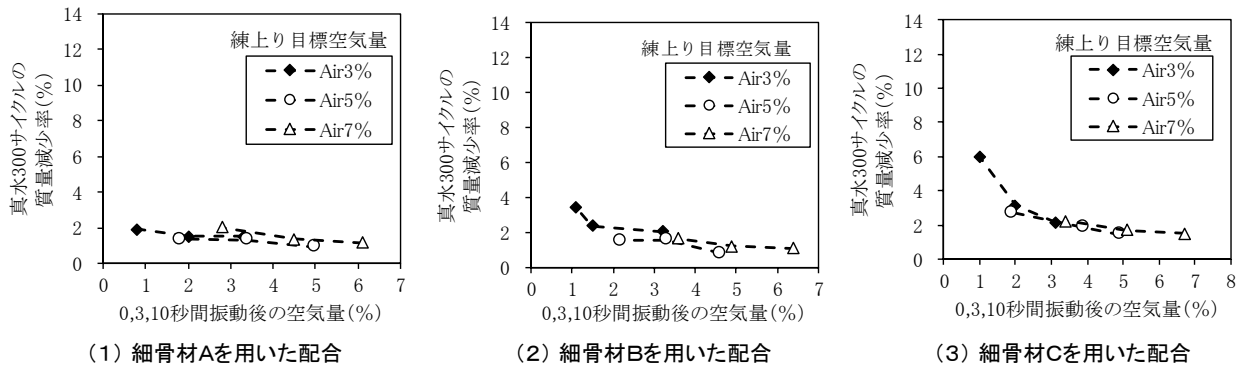


図-5 フレッシュ時の空気量と真水300サイクルの質量減少率との関係

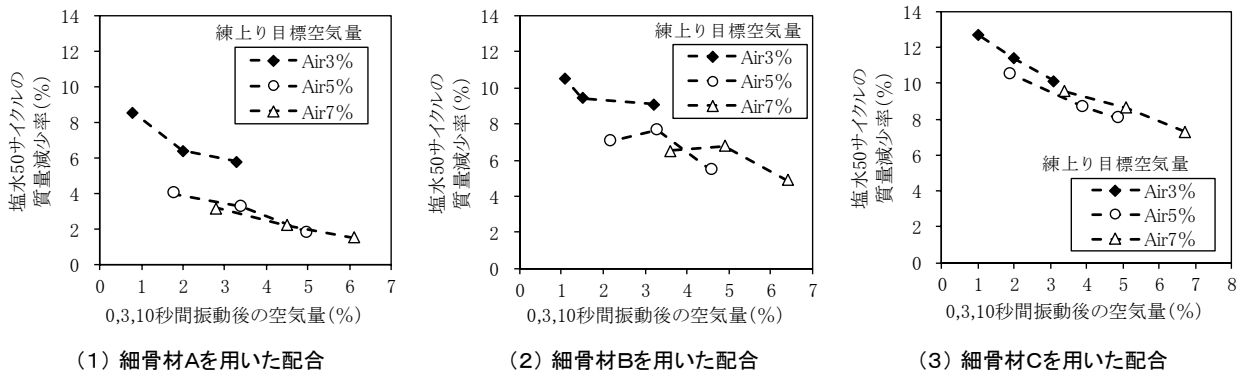


図-6 フレッシュ時の空気量と塩水50サイクルの質量減少率の関係

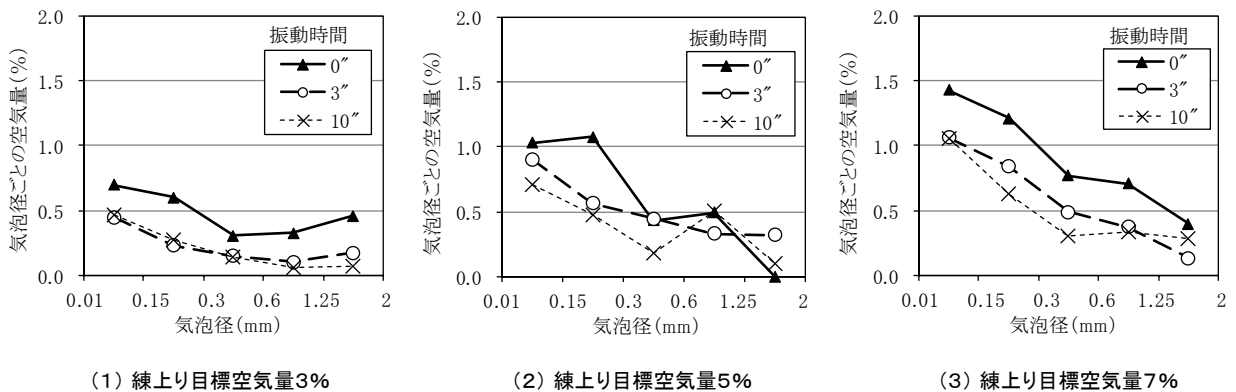


図-7 細骨材Bを用いた配合の気泡径ごとの空気量

真水を用いた凍結融解試験の場合は、細骨材の品質が質量減少率の与える影響は比較的小さく、この傾向はこれまでの研究成果⁹⁾と一致するものであった。

フレッシュ時の空気量と塩水を用いた凍結融解試験50サイクル時点の質量減少率との関係を図-6に示す。真水300サイクルの結果(図-5)と比較すると、サイクル数が1/6にもかかわらず、質量減少率は非常に大きい。空気量と質量減少率との関係としては、図-5と同様に、空気量が大きくなるほど質量減少率はやや小さくなる傾向を示したが、練上りの目標空気量が3%の配合(図中の◆)は、5または7%の配合と傾向が異なり、質量減少率がやや大きな値となった。また、細骨材の違いによって質量減少率が大きく異なる結果となった。

3.5 硬化後の気泡分布

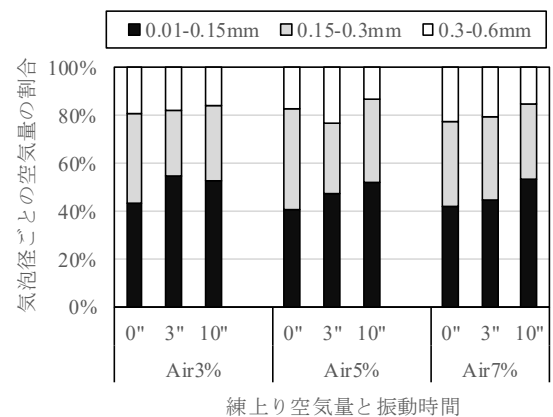


図-8 気泡径ごとの空気量の割合 (細骨材Bを用いた配合)

気泡分布の測定結果から、気泡径の範囲ごと（0.01～0.15mm, 0.15～0.3mm, 0.3～0.6mm, 0.6～1.25mm, 1.25～2mm）の空気量を求めた。例として、細骨材Bを用いた配合の分布図を図-7に示す。振動締め0"の場合、初期設定空気量が高いものほど、小さな径の空気量が多くなる傾向を示した。振動を3", 10"と与えると、空気量は各気泡径とも減少する傾向を示した。細骨材AとCを用いた配合も概ね同様の傾向であった。

気泡径0.6mm以下の範囲について、気泡径ごとの空気量の割合を比較した結果を図-8に示す。図-7では振動を与えることで各気泡径ともに空気量が減少しているが、図-8に示すように0.15mm以下の気泡の占める割合は増える傾向にあった。すなわち、粗い空気泡に比較して、0.15mm以下の微細な空気泡は、振動締めによって抜けにくい性質があると考えられる。

3.6 フレッシュ時と硬化後の空気量の比較

硬化後の気泡分布の測定結果から、硬化コンクリート中の空気量を求めた結果を図-9に示す。図-1のフレッシュ時の空気量と概ね同様のグラフとなったが、フレッシュ時に比較してやや空気量が少なく、また振動締めによる低下量は幾分小さいようであった。

そこで、フレッシュ時の空気量と硬化後の空気量を比較した。この結果を図-10に示す。フレッシュ時と硬化後とは空気量の測定方法が異なることから、絶対値の比較は必ずしも適当ではないが、相対的な傾向を見ると、振動を与えないもの（0秒）より、振動締めを3秒間または10秒間行ったもののほうが、フレッシュ時と硬化後の空気量の差が小さくなった。

すなわち3.5で述べたように、振動締めを行うことで粗大な空気泡は減少するが微細な空気泡は抜けにくく、この微細な空気泡は凝結、硬化過程でも抜けにくいことが考えられる。

3.7 硬化後の気泡分布と質量減少率の関係

硬化コンクリート中の気泡分布の測定結果から得られる気泡間隔係数と塩水50サイクルの質量減少率との関係

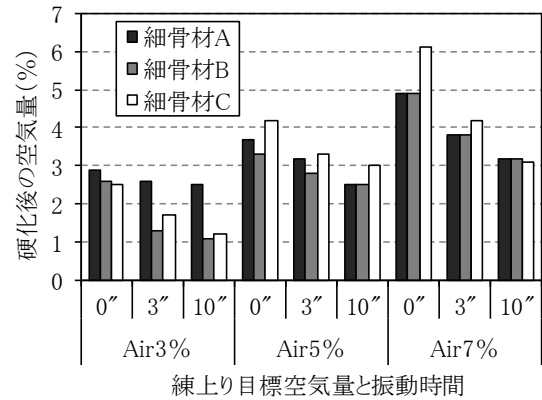


図-9 硬化後の空気量

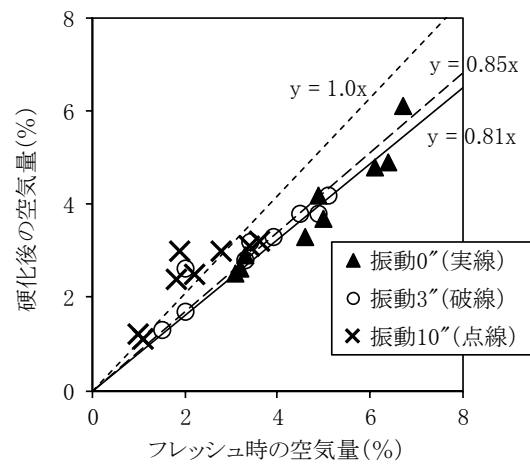


図-10 フレッシュ時の空気量と硬化後の空気量の比較

を图-11に示す。質量減少率は気泡間隔係数と良く対応する傾向を示した。また、スケーリング抵抗性は特に微細な空気泡の量に依存すると考えられる²⁾ことから、硬化コンクリート中の0.15mm以下の空気量と塩水50サイクルの質量減少率との関係を图-12に示す。これを图-6と比較すると、エアメータで測定したフレッシュ時の空気量を指標とした場合(图-6)は、練上り目標空気量が異なる配合では質量減少率が異なったが、0.15mm以下の空気量を指標とした場合(图-12)、配合にかかわらず同程度の質量減少率となる傾向を示した。以上のように、本実

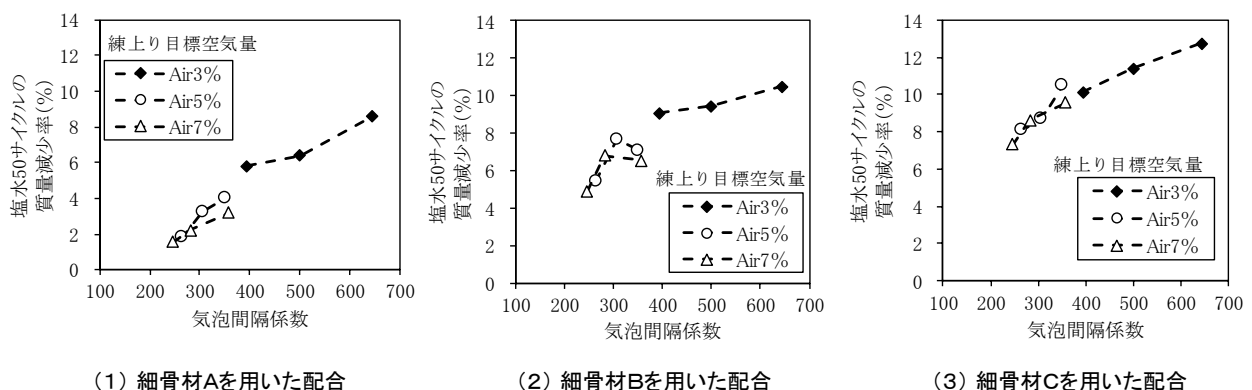


図-11 気泡間隔係数と塩水50サイクルの質量減少率との関係

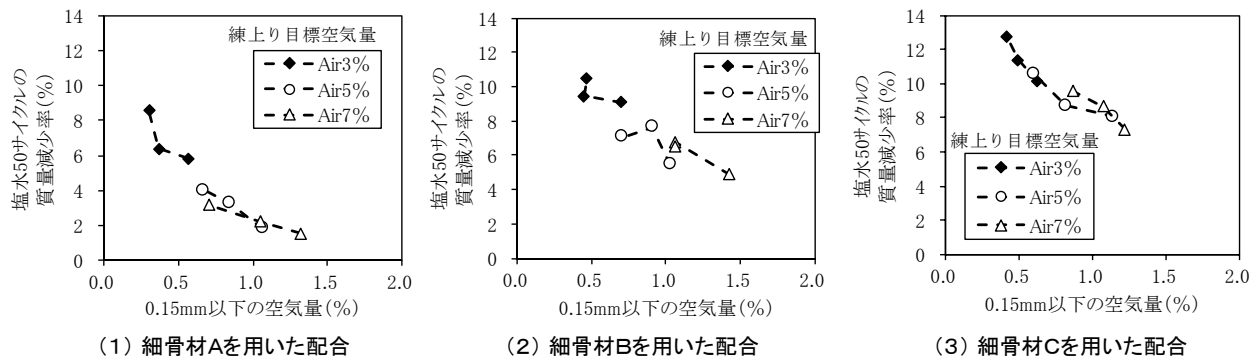


図-12 0.15mm以下の空気量と塩水50サイクルの質量減少率との関係

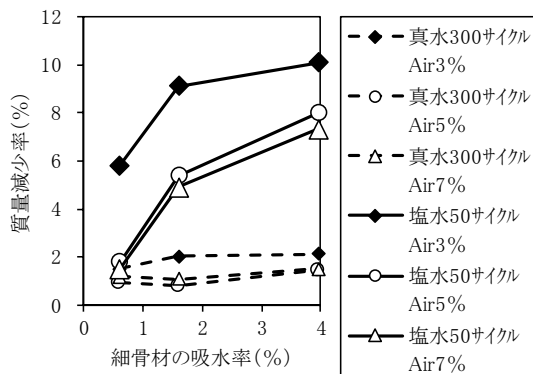


図-13 細骨材の吸水率と質量減少率の関係 (振動0秒の条件)

験の範囲では、スケーリング抵抗性は 0.15mm 以下の空気量に対応する結果となった。

3.8 細骨材の品質と質量減少率の関係

図-11 および図-12 の(1), (2), (3)を比較すると、気泡間隔係数や 0.15mm 以下の空気量が同程度であっても、使用した細骨材の違いによって質量減少率が異なっていた。そこで、細骨材の吸水率と振動 0 秒の条件における質量減少率との関係を図-13 に示す。

塩水 50 サイクルの条件では、細骨材の吸水率が大きいものほど質量減少率が大きい傾向があり、JIS A 5308 でレディーミクストコンクリート用骨材として使用が認められた範囲の骨材を用いても、質量減少率に大きな差が生じる可能性があることが明らかになった。ただし、今回の実験で用いた細骨材は 3 種類と限られており、今後、データを蓄積して確認する必要があると考える。

一方、真水 300 サイクルの条件では、細骨材の吸水率が大きくなると質量減少率が大きくなる傾向はあるものの、その差は僅かで明確ではなかった。従来の真水を用いた凍結融解試験では、細骨材の品質は問題になりにくかったものと考えられる。

4. まとめ

今回の実験結果から、以下のことが明らかとなった。

(1) JISA 1148A 法に従って、真水と塩水を使用した凍結

融解試験を実施した。塩水を用いた場合の質量減少率は真水の場合に比較して非常に大きくなった。

- (2) 塩水を用いた場合の質量減少率は空気量と対応があり、練上り空気量が 3% の実験条件では、質量減少率が大きくなった。練上り空気量が 5% と 7% とでは 7% のほうが僅かながら少なくなるものの、その差は僅かであった。
- (3) 棒状パイプレータによる振動締固めによって空気量は減少するが、0.15mm 以下の微細な空気泡は振動締固めや凝結、硬化の過程で抜けにくい傾向が確認できた。
- (4) 塩水を用いた場合の質量減少率は、硬化コンクリート中の 0.15mm 以下の微細な空気泡の量と対応する結果が得られた。
- (5) 塩水を用いた場合の質量減少率は、細骨材の品質によっても大きく異なり、吸水率が高い細骨材を用いた配合ほど、質量減少率は大きくなった。レディーミクストコンクリート用骨材として使用可能な骨材の吸水率の範囲でも、スケーリング抵抗性に大きな違いを生じる可能性を示した。

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書 [設計編], 土木学会, 2012.12
- 2) コンクリート中の気泡の役割・制御に関する研究委員会報告書, 日本コンクリート工学会, 2016.6
- 3) コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員会報告書, 日本コンクリート工学会, 2008.8
- 4) 片平博, 古賀裕久: 振動締固めが凍結融解・スケーリング抵抗性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, pp.999-1004, 2016.7
- 5) 片平博, 渡辺博志: 低品質細骨材がコンクリートのフレッシュ性状、強度および耐久性に与える影響, 骨材の品質と有効利用に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.45-50, 2005.12