

論文 空気量や細骨材・粗骨材の品質が塩分環境下の凍結融解抵抗性に与える影響

片平博*1・古賀裕久*2

概要: 空気量や細骨材, 粗骨材の品質が塩分環境下のコンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響について検討した。JIS A 1148 (A 法) の装置を用い, 供試体を格納するゴム容器内に 3% NaCl 溶液を入れることで塩分環境を模した。内部劣化(動弾性係数の低下)は空気量と粗骨材品質の影響が大きく, ゴム容器内を淡水で満たして行う通常の凍結融解試験結果とはほぼ同様の結果を示した。スケーリング劣化は主に空気量と細骨材品質の影響が大きい結果となり, 特にスケーリングの初期段階の劣化速度は空気量の影響が大きかった。粗骨材品質の影響はスケーリングがある一定以上進行した後に確認された。

キーワード: コンクリート, 凍結融解抵抗性, スケーリング, 空気量, 骨材品質

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などの塩分環境下の構造物において, 塩化物イオンが凍結融解による劣化を促進させ, 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関しては, 水セメント比や空気量の影響についての知見²⁾³⁾が増えつつあるが, 細骨材や粗骨材の品質の影響についての検討事例は少ない。

そこで今回, 空気量や, コンクリートに用いる細骨材および粗骨材の品質が塩分環境下の凍結融解抵抗性に与える影響について実験的な検討を行った。なお, コンクリートのスケーリング抵抗性を評価するための試験方法は, 国内では確立されていない。海外の規格として ASTM C672 等の試験方法があるものの, 特殊な試験装置を必要とし, 国内で実施可能な機関は限られている。このため今回は, 一般的に行われている JIS A 1148 コンクリートの凍結融解試験方法の A 法(水中凍結融解試験方法)の試験装置を用いることとした。JIS A 1148 の試験方法では, ゴム容器内に淡水を入れて試験を行うが, これとは別に, 塩水を入れた試験を実施した。

また, これらの凍結融解試験の結果をもとに塩分環境下の凍結融解抵抗性確保のための方策について考察した。

2. 実験方法

2.1 コンクリート材料および配合

コンクリートの材料および配合に関する要因は, 表—

1に示すように, 空気量を4水準, 細骨材の種類を3種類, 粗骨材の種類を4種類とした。

コンクリートの使用材料を表—2に示す。細骨材 a は吸水率の小さい石灰石砕砂, b は標準的な川砂, c は吸水率が大きく, JIS A 5308 付属書 A の規格値を満足しない川砂とした。粗骨材 A は良質な硬質砂岩, B, C および D は品質規格を満足しない低品質な粗骨材であり, B および C は碎石, D は川砂利とした。

コンクリートの配合は, 目標空気量 4.5%, 細骨材 b,

表—1 実験要因

練上り目標空気量(%)	1.5, 3.0, 4.5, 6.0
細骨材の種類	3種類
粗骨材の種類	4種類
凍結融解試験	淡水, 塩水

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: 石灰石砕砂, 粗粒率3.16, 絶乾密度2.66g/cm ³ , 吸水率0.61% b: 川砂(標準), 粗粒率2.67, 絶乾密度2.53g/cm ³ , 吸水率1.60% c: 川砂(低品質), 粗粒率3.33, 絶乾密度2.45g/cm ³ , 吸水率3.95%
粗骨材	A: 硬質砂岩(標準), 最大寸法20mm, 粗粒率6.70 絶乾密度2.69g/cm ³ , 吸水率0.50%, 安定性3.3% B: 花崗岩(低品質), 最大寸法25mm, 粗粒率6.90 絶乾密度2.53g/cm ³ , 吸水率1.47%, 安定性23.1% C: 凝灰岩質安山岩(低品質), 最大寸法25mm, 粗粒率7.06 絶乾密度2.29g/cm ³ , 吸水率5.58%, 安定性53.4% D: 川砂利(低品質), 最大寸法25mm, 粗粒率6.90 絶乾密度2.45g/cm ³ , 吸水率3.37%, 安定性12.9%
AE	標準型(I類)
減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
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

*1 土木研究所 先端材料資源研究センター 総括主任研究員 (正会員)

*2 土木研究所 先端材料資源研究センター 上席研究員 (正会員)

粗骨材 A を使用した配合 (表-3) を基本配合として、目標空気量、細骨材の種類、粗骨材の種類いずれか1つを変えることで各種コンクリートを練り混ぜた。水セメント比(W/C)55%、細骨材率(s/a)45%、単位水量173kg/m³は一定とし、空気量を変える場合は、表-3の各材料の計量値はそのままにして、AE 助剤の添加量のみを調整することで、練上りの空気量を調整した。ただし、空気量1.5%の配合に限っては、非空気連行型の減水剤を使用した。

練混ぜは20℃の試験室内において、55リットルの2軸強制練りミキサを用いて行った。練り上がったコンクリートのスランブと空気量を測定した後、φ100×200mmの円柱供試体2本と100×100×400mm角柱供試体を4本ずつ作製した。ただし、粗骨材Dを用いた配合のみは角柱供試体の作製本数を6本とした。粗骨材Dは様々な岩種の集合体である川砂利であることから、試験結果のばらつきが大きいと考えたためである。

作製した供試体は翌日に脱枠し、材齢28日まで20℃の水中養生を行い、その後、円柱供試体についてはJISA1108の方法に従って圧縮強度試験を実施し、角柱供試体については2.2の方法に従って凍結融解試験を実施した。

2.2 凍結融解試験方法

凍結融解試験は、JISA1148コンクリートの凍結融解試験方法のA法(水中凍結融解試験方法)に準じて実施した。JISA1148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淡水で満たして試験を行う(以下、淡水試験という)が、これとは別に3%NaCl水溶液で満たして、塩分環境下の

表-3 コンクリート配合
(細骨材b,粗骨材Aを使用、目標空気量4.5%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	4.5	173	314	794	1007	785	6

表-4 質量減少率とスケーリング量の関係

質量減少率 (%)	1	2	4	8
スケーリング量 (kg/m ²)	0.5	1.0	2.1	4.2

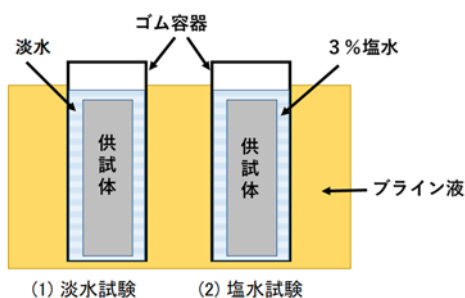


図-1 凍結融解試験の概要

凍結融解環境を模した試験(以下、塩水試験という)を行った(図-1参照)。なお、既往の研究⁴⁾において、供試体が顕著に劣化するまでは、淡水試験と塩水試験とで、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がほぼ同等であることを確認している。

淡水試験、塩水試験とも供試体本数は条件ごとに2本(粗骨材Dを用いた配合のみ3本)とした。凍結融解試験は300サイクルまで行い、数〜数十サイクルごとに供試体をゴム容器から取り出し、動弾性係数と質量を測定した。

塩分環境下では特にスケーリング劣化が問題となるが、本検討では、便宜的に試験開始からの質量減少率をスケーリングの指標値として整理した。なお、ASTMC672等のスケーリング劣化を対象とした1面凍結融解試験では、スケーリングの程度をスケーリング量(kg/m²)で表現する人が多い。式(1)より、今回の実験で得られる質量減少率から、それに対応するスケーリング量を試算すると概ね表-4に示すようである。

$$S = (\Delta w / 100) \cdot W_0 / A \quad (1)$$

ここに、S: スケーリング量(kg/m²)

Δw : 質量減少率(%)

W_0 : 試験開始時の供試体質量(kg)

A: 試験開始時の供試体の表面積(m²)

JISA1148では、試験中の供試体の質量と断面寸法の変化が僅かであることを前提に、これを無視して相対動弾性係数や耐久性指数を求めている。しかし、今回の塩水試験では、供試体の質量減少率が大きく、この影響が無視できない。そこで、質量減少率から断面寸法の変化量を算出し、これらの値を用いて各サイクルの動弾性係数を求め、これを試験開始前の動弾性係数で除して相対動弾性係数や耐久性指数を求めた。

3. 実験結果

3.1 フレッシュ性状と圧縮強度

フレッシュ性状であるスランブと空気量の測定結果を表-5に示す。スランブは7~20cmの範囲であった。空気量は目標値に近い値を示した。

圧縮強度試験結果を表-5および図-2に示す。圧縮強度は空気量が大きくなるほど低下する傾向を示した。また、良質な骨材を用いた配合と比較して低品質な骨材を用いた配合では圧縮強度が低下する傾向を示した。

3.2 凍結融解による内部劣化

淡水試験時の相対動弾性係数の変化を図-3に示す。空気量が少ない配合や低品質な粗骨材を使用した配合で、相対動弾性係数の低下がみられた。細骨材種類の影響は見られなかった。空気量が少ない場合はペーストの耐凍害性が低く、ペースト内にひび割れが発生すると考えら

れる。また、低品質な粗骨材を含む場合は、その粗骨材中に発生したひび割れが周囲のモルタル部分に発展して破壊に至るものと考えられる。今回用いた細骨材の品質

は内部劣化にほとんど影響を及ぼさなかったが、この点は、筆者らの過去の研究結果⁵⁾とも一致するものであった。

塩水試験時の相対動弾性係数の変化を図-4に示す。

図-3とほぼ同様に空気量が少ない配合や低品質な粗骨材を使用した配合で、相対動弾性係数の低下がみられた。淡水試験結果、塩水試験結果から得られる耐久性指数を比較すると図-5のようであり、双方は良く対応する結果となった。この結果より、内部劣化については、淡水試験と塩水試験とで結果が類似しており、そのメカニズムも同様と考えられる。

3.3 凍結融解によるスケーリング劣化

(1) 淡水試験結果と塩水試験結果との比較

淡水試験時の質量減少率を図-6に示す。空気量が少ない配合(Air1.5, Air3)や粗骨材Dを使用した配合で質量減少率がやや大きいものの、最大でも2%程度の値であり、淡水試験によるスケーリング量は総じて小さいといえる。

これに対して、塩水試験時の質量減少率は図-7に示すように、淡水試験と比較すると顕著に大きくなった。

図-8に塩水試験の50サイクルまでの結果を拡大して示す。淡水試験では、300サイクル経過時の質量減少率は1~2%程度であったが、塩水試験では、配合によって差があるものの、およそ目安として15サイクル程度でその質量減少率に達した。このように初期のスケーリングの進行速度は、塩水の場合は淡水に比較して20倍近

表-5 フレッシュ性状と圧縮強度

比較因子	配合			フレッシュ性状		強度 σ_{28} (N/mm ²)
	No.	細骨材の種類	粗骨材の種類	スランブ(cm)	空気量(%) ^{※2}	
空気量	1	b	A	7.5	1.4	41.9
	2	b	A	9.6	3.2	39.4 ^{※3}
	3	b	A	10.9	4.6	37.9
	4	b	A	15.8	5.9	33.4
細骨材	5	a	A	12.9	5.0	40.2 ^{※3}
	6 ^{※1}	b	A	10.9	4.6	37.9
	7	c	A	14.6	4.9	32.7 ^{※3}
粗骨材	8 ^{※1}	b	A	10.9	4.6	37.9
	9	b	B	9.6	5.6	30.8
	10	b	C	7.1	5.1	34.0
	11	b	D	19.6	4.4	26.3

※1:配合No.3と同じ ※2:骨材修正係数を考慮した値
 ※3:セメントの製造ロットの違いによる強度補正を実施

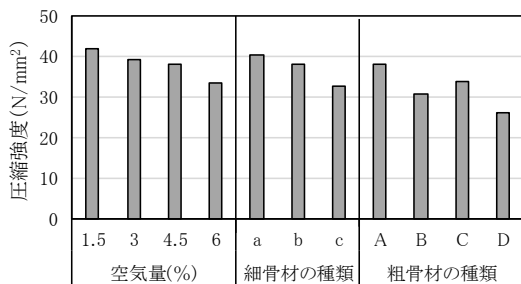


図-2 圧縮強度試験結果

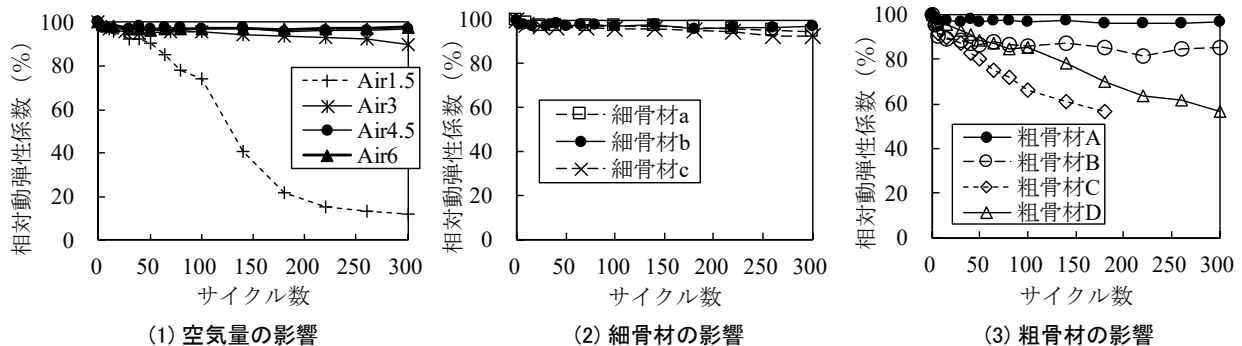


図-3 淡水試験の相対動弾性係数

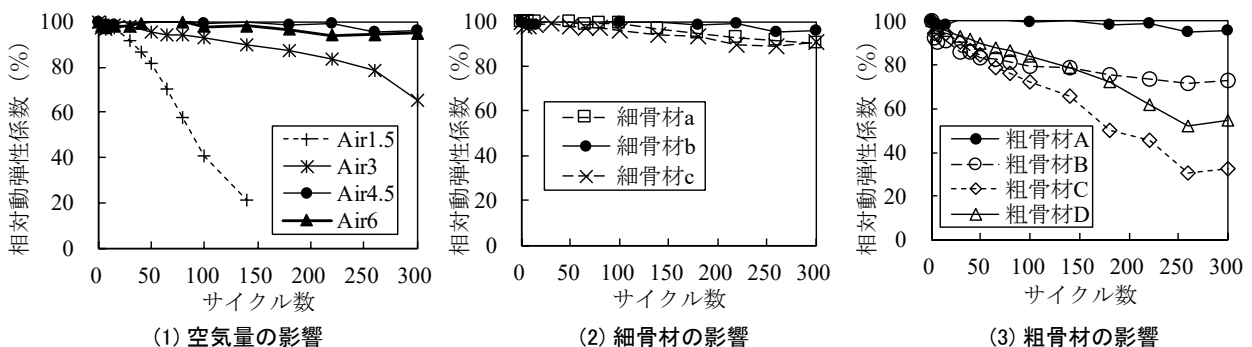


図-4 塩水試験の相対動弾性係数(質量減少の影響を考慮)

い速度であった。

以降、図-7および図-8から、塩分環境下の凍結融解によるスケーリング劣化の特徴について述べる。

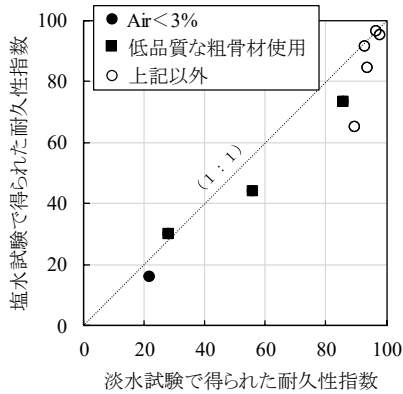


図-5 淡水試験と塩水試験の耐久性指数の比較

(2) 空気量の影響

図-8 (1)を見ると、空気量が3%以下の条件では質量減少率は大きく、空気量が4.5%、6%と大きくなるに従い質量減少率は小さくなる傾向を示した。ただし、30サイクル(質量減少率が3%)程度以降は、図-7 (1)に示すように、空気量4.5%と6%の配合は、スケーリング劣化がほぼ同等に継続し、質量減少率の差は、相対的に小さくなる傾向を示した。

空気量を4.5%よりも増やすことは、スケーリング劣化の初期の段階では劣化速度の抑制に有効であるが、スケーリングを完全に防止できるものではなく、ある一定以上にスケーリングが進行すると効果が小さくなると考えられる。今回の実験ケースでは1つの比較結果のみであるが、配合等が異なる同様の実験⁶⁾においても、空気量を4.5%以上に増加させる効果はさほど大きくない結果

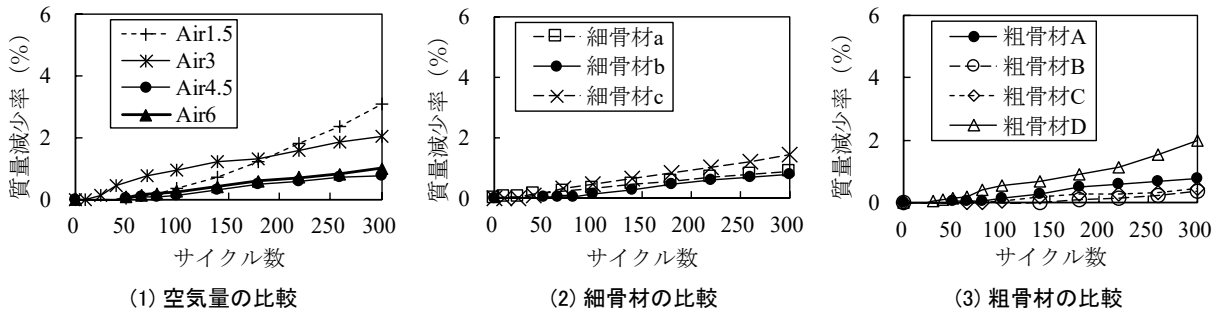


図-6 淡水試験の質量減少率

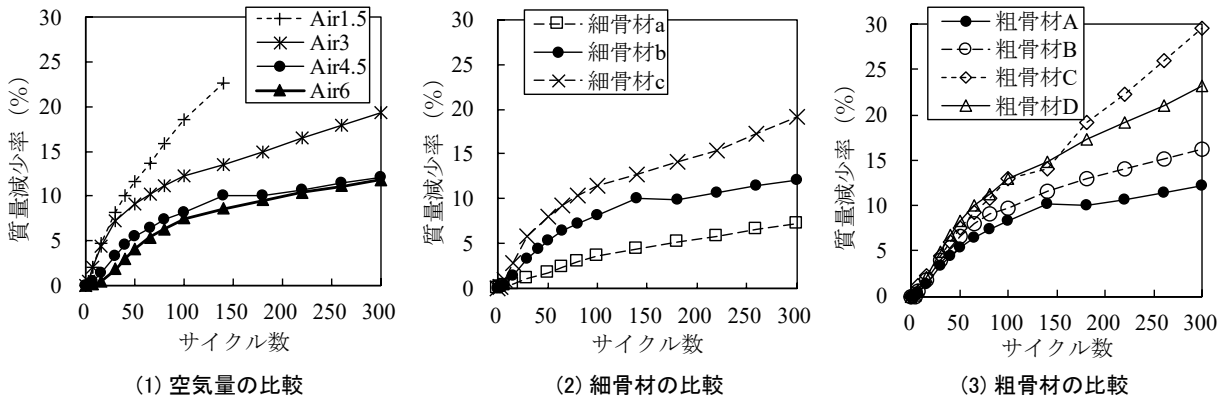


図-7 塩水試験の質量減少率

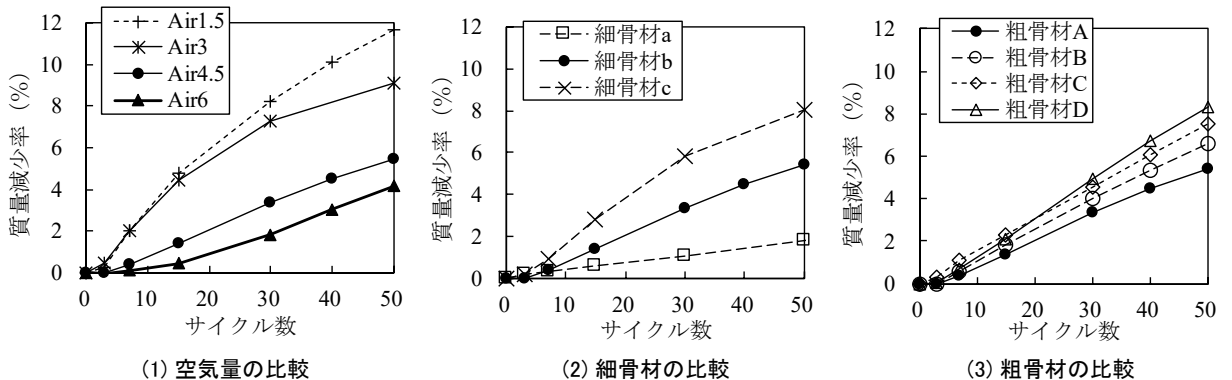


図-8 塩水試験の質量減少率 (50サイクルまで)

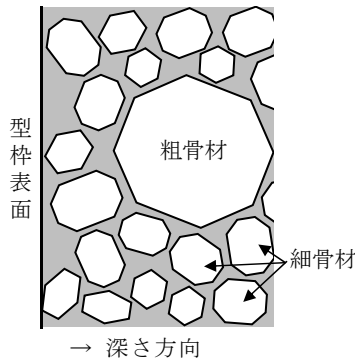


図-9 型枠表面付近の骨材の配置(イメージ)

が得られている。これらのことから、スケーリング劣化に対する空気量の影響を検討する際には、どの程度までのスケーリング劣化を対象とするかに、留意する必要があることがわかった。

スケーリングの段階によって空気量の効果が異なるように見える理由について考える。エントレインドエアはペースト中に存在し、ペーストの耐凍害性を高めている。図-9に示すようにコンクリート表面付近は型枠の存在によって骨材量が相対的に少なく、ペースト量が多いため、ペーストの耐凍害性の影響が顕著に表れやすい領域と考えられる。スケーリングが内部に進行すると骨材の存在によってペーストの容積割合が相対的に減少し、後述する細骨材の品質の影響等が顕在化してくることが一因として考えられる。

(3) 細骨材の品質の影響

図-7(2)および図-8(2)を見ると、吸水率の大きな細骨材ほど質量減少率が大きく、スケーリング劣化に対する細骨材の品質の影響が確認できた。なお、細骨材の品質の影響はスケーリングの初期の段階から、スケーリングが深部に至るまで確認された。

(4) 粗骨材の品質の影響

図-7(3)を見ると、良質な粗骨材Aを用いた場合に

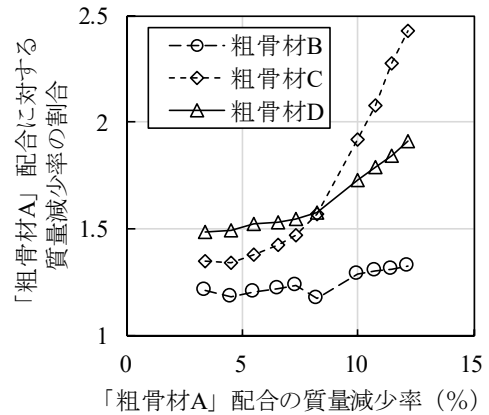
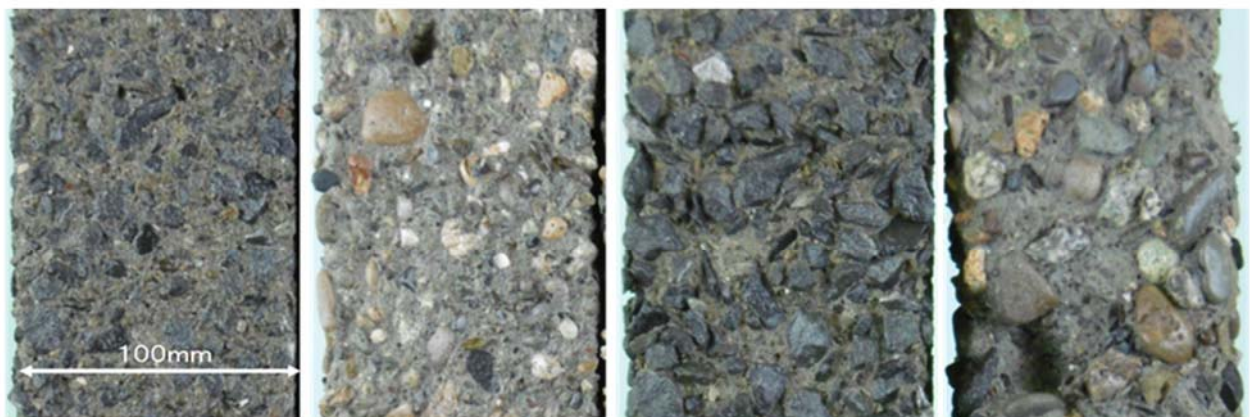


図-10 塩水の試験における質量減少率の比較 (低品質粗骨材の影響)

比較して、低品質な粗骨材B,C,Dを用いた場合は、質量減少率が大きくなった。ただし、50サイクルまでの比較(図-8(3))では、差はあるものの、その差は小さかった。そこで、粗骨材Aを用いた配合に対する粗骨材B,C,Dを用いた配合の質量減少率の比を求め、これを図-10に示す。粗骨材Aの配合の質量減少率が6%(50サイクル)程度までは、低品質粗骨材を使用しても質量減少率はさほど大きくならないが、質量減少率が6~8%を超える領域になると、低品質粗骨材を用いた配合では、質量減少率が急激に大きくなる傾向が認められた。

粗骨材Aの配合の質量減少率が概ね6%程度となる50サイクル時点と試験終了時の300サイクルの供試体表面の劣化状況の例を写真-1に示す。質量減少率6%程度までのスケーリング深さの場合には、粗骨材が低品質の場合、多少のポップアウト等によってスケーリング量がやや多くなる場合もあるが、その影響は大きくはなく、ペーストの性状(空気量)や細骨材の品質の影響が支配的な領域といえる(写真-1(1)および写真-1(2))。これに対して質量減少率が大きい領域になると、良質な粗



(1)粗骨材A:50サイクル 質量減少率 5.4% (2)粗骨材D:50サイクル 質量減少率 8.3% (3)粗骨材A:300サイクル 質量減少率 12.6% (4)粗骨材D:300サイクル 質量減少率 23.2%

写真-1 供試体表面の劣化状況の例

骨材はスケーリングに抵抗して残存する（写真－1（3））のに対して、低品質な粗骨材は、粗骨材そのものが劣化して剥落する（写真－1（4））などして、スケーリング量に差が生じることが分かった。

4. 塩分環境下における凍結融解抵抗性確保について

本実験結果の範囲内の知見ではあるが、塩分環境下における凍結融解抵抗性確保の方策について考察する。

4.1 内部劣化について

内部劣化に関しては、淡水試験と塩水試験とで結果に大きな差は無かったことから、塩分環境下であっても従来と同様な空気量、骨材品質の規準で良いと考えられる。

4.2 スケーリング劣化について

(1) 空気量について

スケーリング劣化に関しては、塩水試験結果において空気量3%以下と4.5%以上とで質量減少率に大きな差が生じていることから、空気量の特に下限値の設定が重要と考える。なお、空気量を4.5%より大きくした場合、スケーリングの初期段階（質量減少率が3%程度まで）では劣化速度を抑制できたが、スケーリングがさらに進行すると効果は限定的であった。空気量を高くすると強度が低下するばかりか空気量の変動幅も大きくなることも予想され、それによる弊害も考えられるので、慎重な対応が望まれる。

(2) 細骨材の影響について

スケーリング劣化に対しては、淡水試験では細骨材の品質の影響はほとんど確認されなかったが、塩水試験では、細骨材の品質の影響が無視できない結果となった。この実験結果のみから細骨材の品質規格に言及するのは難しいが、特に厳しい環境下で、高い耐久性を確保する必要がある場合には、細骨材の品質についても配慮するのが望ましいと考える。

(3) 粗骨材の影響について

スケーリングに対する粗骨材の影響は、スケーリング深さがある一定以上になった後に顕在化する傾向を確認した。よって、コンクリート表面からのスケーリング劣化の速度が遅くなるように空気量や配合、細骨材の品質等を設定しておけば、粗骨材の品質の良否がただちにスケーリング劣化の速度に影響を与えるおそれは小さいと考えられる。従って、粗骨材の品質に関しては塩分環境下であっても、従来と同様な品質規格（吸水率、安定性等）で良い可能性が示された。

上述したスケーリング劣化に対する考察結果を表－6

表－6 塩分環境下におけるスケーリング劣化に対する各種要因の影響と品質確保に向けた方向性

要因	スケーリング深さ			品質確保に向けた方向性
	浅い←		→深い	
空気量の増加(4.5%以上)	●	△	△	適切な空気量の設定
細骨材の品質	●	●	●	環境の厳しい地域では検討の余地あり
粗骨材の品質	△	△	●	淡水の地域と同じ品質規格で良い可能性

凡例 ●:影響を与える △:影響は少ない

に整理する。表中のスケーリング深さの程度は、本実験結果によれば、「浅い」は質量減少率として3%程度以下、「深い」は6～8%程度以上が目安と考えられる。

5. おわりに

JIS A 1148 の方法を用いて、淡水の凍結融解試験と塩水の凍結融解試験を実施した。その結果から、塩分環境下における凍結融解抵抗性確保の方策について考察した。限られた実験結果からの考察であるので、今後とも現地での劣化状況等を分析するなど、検討を進めていく必要がある。

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
- 6) 片平博，古賀裕久：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，pp.771-776，2018.7