

ASR と凍結融解による複合作用がコンクリートの劣化に与える影響

鳥取大学大学院 学生会員 ○蓑島 大貴 鳥取大学大学院 正会員 黒田 保
 鳥取大学大学院 正会員 吉野 公 鳥取大学大学院 正会員 畑岡 寛
 鳥取大学大学院 正会員 金氏 裕也

1. はじめに

コンクリートは、複数の劣化現象が同時に発生することにより劣化が助長される可能性が示唆されている。既往の研究で、アルカリシリカ反応 (ASR) が、コンクリートの耐凍害性を低下させることが分かった¹⁾。ASR による膨張 (ASR 膨張) が非常に軽微である場合でも、凍結融解試験中の相対動弾性係数は大きく低下する。また、凍結融解試験直前の ASR 膨張が大きいほど、凍結融解試験中の膨張速度および相対動弾性係数に大きく影響を及ぼす。このように ASR が凍害に影響を与えることが分かっている。しかし、実環境下では ASR と凍害が交互に発生することが考えられる。そこで本研究では、コンクリート供試体を促進環境下で ASR 劣化させた後に凍結融解試験を行い、ASR 膨張、反応性骨材の使用率および添加アルカリの種類がコンクリートの耐凍害性に与える影響を比較検討した。さらに、コンクリート供試体に対して ASR 促進試験と凍結融解試験を繰り返し実施し、ASR と凍結融解作用がコンクリートの劣化に与える影響を検討した。

2. 実験概要

本研究では、2つの実験を行った。

実験①、②ともにセメントには、アルカリシリカ反応性試験用普通ポルトランドセメント (表乾密度 3.12g/m^3 , 全アルカリ量 0.48%) を使用した角柱 ($75\times75\times400\text{mm}$) コンクリート供試体を用いて実験を行った。また、空気量の調整には AE 剤 (アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤) を使用した。

表1 実験①のコンクリートの配合表

W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m^3)						
			W	C	S	K2S	K2G	NaOH	NaCl
40	40	6.5 ± 0.5	180	450	—	661	1002	4.309	—
					323	331	1002	4.309	—
					647	—	1002	4.309	—
					—	661	1002	—	6.313
					323	331	1002	—	6.313
					647	—	1002	—	6.313

実験①では、粗骨材に反応性骨材 (K2G) (表乾密度 2.73g/m^3) を使用し、細骨材に反応性骨材 (K2S) (表乾密度 2.71g/m^3) の使用率を変えたコンクリート供試体を用いて実験を行った。なお、細骨材に使用する非反応性骨材は、砕砂 (表乾密度 2.65g/m^3) と陸砂 (表乾密度 2.64g/m^3) を質量比で $8:2$ として混合した混合砂 (S) である。実験方法は、まず供試体を打設・脱型後、湿潤環境 (供試体に湿布を巻き付けてポリエチレン袋で密封する) を保ちつつ、温度 20°C 、相対湿度 60% の恒温槽で 28 日間養生を行なった。その後、温度 60°C の恒温槽で ASR 促進を行い、膨張率が 0 , 0.015 , 0.025 および 0.035% に達した時、JIS-A-1148 の A 法 (水中凍結水中融解) に従い凍結融解試験を行った。本研究では、アルカリ総量を 5.5kg/m^3 (NaOH または NaCl を混入して調整) とした。なお、以下の図中に記した記

号は、(反応性細骨材使用率)-(添加アルカリの種類)-(凍結融解試験開始時の膨張率)を表す。

実験②では、細骨材に K2S を使用したコンクリート供試体を用いて実験を行った。なお、粗骨材には

表2 実験②のコンクリートの配合表

W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m^3)				
			W	C	K2S	G	NaOH
40	40	6.5 ± 0.5	180	450	661	1013	4.309

キーワード アルカリシリカ反応, 凍害, 複合劣化

連絡先 〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南 4 丁目 101 鳥取大学大学院持続性社会創生科学研究科工学専攻 TEL 0857-31-5281

非反応性骨材の普通砕石（G）（表乾密度 2.76g/m³）を使用した。実験方法は、まず供試体を打設・脱型後、実験①と同様の養生を行なった。その後、水酸化ナトリウム水溶液（1mol/L）が入った容器に浸漬して温度 60℃ の恒温槽で ASR 促進、JIS-A-1148 の A 法（水中凍結水中融解）の凍結融解試験を交互に行った。そして、図 1 に示すように、ASR 促進日数の合計が 28 日、凍結融解試験のサイクル数の合計が 80 サイクルに達した時点で実験を終了した。本研究では、アルカリ総量を 5.5kg/m³（NaOH を混入して調整）とした。なお、以下の図中に記した記号は、ASR 促進試験から凍結融解試験を行う工程を 1 回とした時の繰り返し回数を示す。



図 1 実験②の条件

3. 実験結果および考察

3.1 実験①

図 2~4 は、NaOH を添加したのコンクリート供試体における凍結融解試験中の相対動弾性係数の経時変化を反応性細骨材使用率別に示す。なお、相対動弾性係数の基準は、凍結融解試験開始時とする。図 2~4 を見

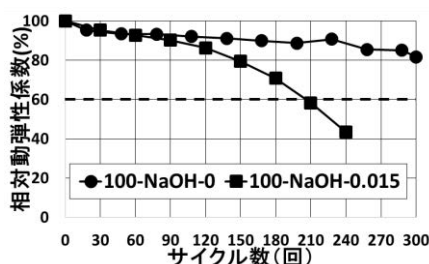


図 2 凍結融解試験中の相対動弾性係数の経時変化（反応性細骨材使用率 100%）

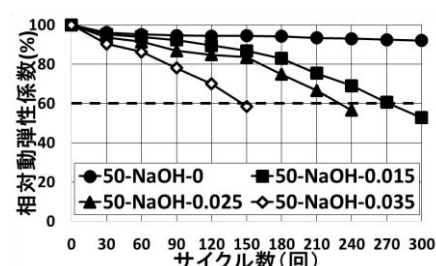


図 3 凍結融解試験中の相対動弾性係数の経時変化（反応性細骨材使用率 50%）

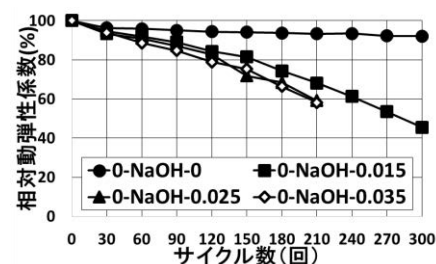


図 4 凍結融解試験中の相対動弾性係数の経時変化（反応性細骨材使用率 0%）

ると、ASR 促進を行ったコンクリートが健全なコンクリートよりも耐凍害性に劣ることが確認できる。健全なコンクリートである 100-NaOH-0、50-NaOH-0 および 0-NaOH-0 は 300 サイクル後も相対動 80%以上を保っているため十分な耐凍害性を有すると言える。その一方で、ASR 促進を行ったコンクリートは、膨張率が 0.015%のものでも相対動弾性係数は大きく低下しており、すべてが 300 サイクル終了までに 60%以下になっている。また図 3、4 を見ると、膨張率が 0.015%のコンクリートよりも 0.025%、0.035%の方が相対動弾性係数が低下していることが確認でき、ASR 促進を行ったコンクリートの中では、ASR 促進終了時の膨張率が大きいものほど耐凍害性が低くなることが分かる。

図 5~7 は、NaOH を添加したコンクリート供試体における凍結融解試験中の膨張率の経時変化を反応性細骨材使用率別に示す。なお、膨張率の基準は、ASR 促進開始時（材齢 28 日）の長さとする。ただし、ASR 促進を行っていない供試体の膨張率については、凍結融解試験開始時（材齢 28 日）の長さとした。図 5~7 を見ると、ASR によって劣化したコンクリートは健全なコンクリートと比べて凍結融解試験中の膨張率および膨張速度が大きくなることが確認できる。また、ASR 促進を行ったコンクリートの中では、ASR 促進終了時の膨張率が大きいものほど、凍結融解試験中の膨張速度は大きくなっている。

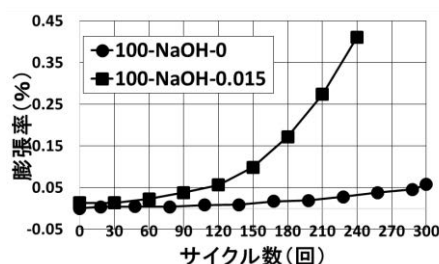


図 5 凍結融解試験中の膨張率の経時変化（反応性細骨材使用率 100%）

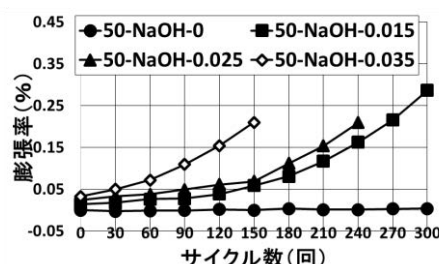


図 6 凍結融解試験中の膨張率の経時変化（反応性細骨材使用率 50%）

図 2~4 および図 5~7 の結果を見ると、実験①における ASR によって劣化したコンクリートの膨張率は最大でも 0.035%と小さい。本研究のように ASR の膨張が小さい場合でも、ASR による劣化の程度（膨張率）が大きいほど凍結融解試験中の相対動弾性係数は大きく低下し、凍結融解試験中の膨張速度および同一サイクルにおける膨張率は大きくなる。つまり、ASR による劣化が非常に軽微である場合でも、その劣化の程度の違いが耐凍害性に影響を及ぼすと言える。

図 8~10 は、NaOH と NaCl をそれぞれ添加して膨張率を 0.015%としたコンクリート供試体における凍結融解試験中の相対動弾性係数の経時変化を反応性細骨材使用率別に示す。なお、相対動弾性係数の基準は、凍結融解試験開始時とする。図 8~10 を見ると、ASR の劣化の程度（ASR 膨張）が同じコンクリートでは、NaOH 添加のコンクリートが NaCl 添加のコンクリートより耐凍害性に劣ることが確認できる。NaCl 添加のコンクリートである 100-NaCl-0.015、50-NaCl-0.015 および 0-NaCl-0.015 は 300 サイクル後も相対動弾性係数が 80%以上を保っており、十分な耐凍害性があることが分かる。一方で、NaOH 添加のコンクリートである 100-NaOH-0.015、50-NaOH-0.015 および 0-NaOH-0.015 は 300 サイクル終了までに相対動弾性係数が 60%以下になっている。

図 11~13 は、NaOH と NaCl をそれぞれ添加して膨張率を 0.015%としたコンクリート供試体における凍結融解試験中の膨張率の経時変化を反応性細骨材使用率別に示す。なお、膨張率の基準は、ASR 促進開始時（材齢 28 日）の長さとする。図 11~13 を見ると、NaOH 添加のコンクリートは NaCl 添加のコンクリートに比べて凍結融解試験中の膨張速度および同一サイクル時の膨張率が大きくなっていることが確認できる。

図 8~10 および図 11~13 の結果を見ると、ASR による劣化の程度（膨張率）が 0.015%と非常に軽微な場合において NaOH を添加したコンクリートの耐凍害性は大きく低下している。しかし、一方で同じように ASR により劣化している場合でも、NaCl を添加したコンクリートは相対動弾性係数、膨張率および膨張速度に大きな変化はなく十分な耐凍害性を保っている。この結果から、非常に軽微な ASR による劣化（膨張）が発生した場合において、NaOH を添加したコンクリートは NaCl を添加したコンクリートよりも大きく耐凍害性が低下すると言える。

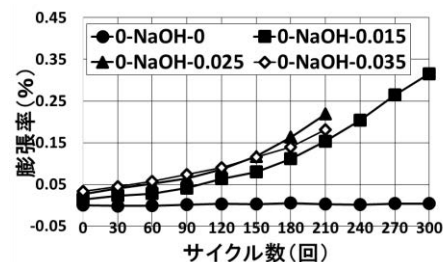


図 7 凍結融解試験中の膨張率の経時変化 (反応性細骨材使用率 0%)

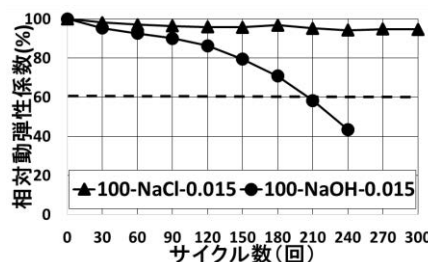


図 8 凍結融解試験中の相対動弾性係数の経時変化 (反応性細骨材使用率 100%)

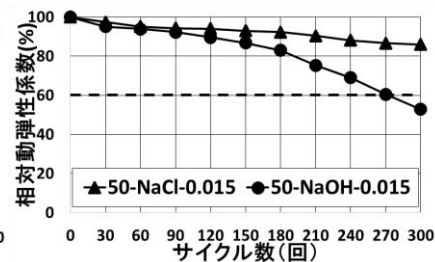


図 9 凍結融解試験中の相対動弾性係数の経時変化 (反応性細骨材使用率 50%)

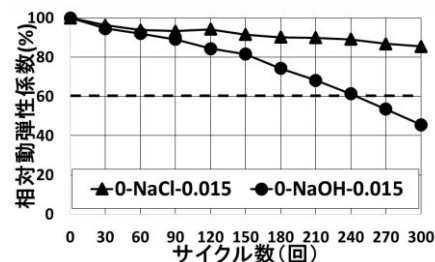


図 10 凍結融解試験中の相対動弾性係数の経時変化 (反応性細骨材使用率 0%)

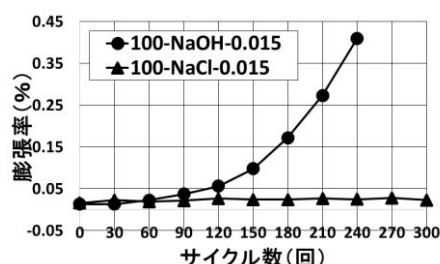


図 11 凍結融解試験中の膨張率の経時変化 (反応性細骨材使用率 100%)

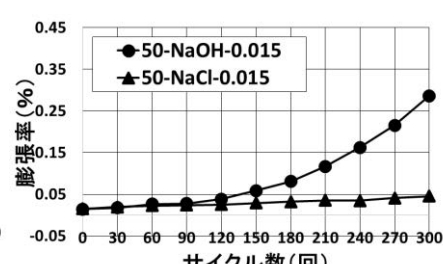


図 12 凍結融解試験中の膨張率の経時変化 (反応性細骨材使用率 50%)

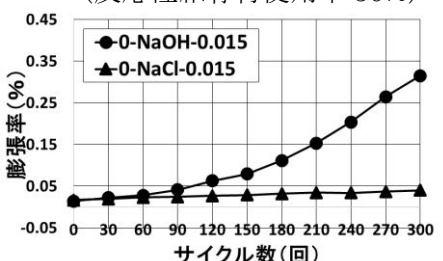


図 13 凍結融解試験中の膨張率の経時変化 (反応性細骨材使用率 0%)

3.2 実験②

図 14 は、凍結融解試験中の相対動弾性係数の経時変化を示す。また図 15 は、ASR 促進期間中の相対動弾性係数の経時変化を示す。なお、図 14、15 ともに相対動弾性係数の基準は ASR 促進開始時とする。図 14 を見ると、凍結融解試験終了時に最も相対動弾性係数が低下しているのが、ASR 促進から凍結融解試験のみを行った供試体（繰り返し回数 1 回）であり、ASR 促進と凍結融解試験の繰り返しの回数が多くなるほど凍結融解試験終了時の相対動弾性係数が高くなることを確認できる。図 15 を見ると、凍結融解試験後の ASR 促進時に相対動弾性係数が大きくなっていることが分かる。

図 16 は、凍結融解試験中の膨張率の経時変化を示す。また図 17 は、ASR 促進期間中の膨張率の経時変化を示す。なお、図 16、17 ともに膨張率の基準は ASR 促進開始時の長さとする。図 16 を見ると、ASR 促進から凍結融解試験のみを行った供試体（繰り返し回数 1 回）のほうが、ASR 促進と凍結融解試験を複数回繰り返した供試体（繰り返し回数 2 回、4 回）よりも凍結融解試験終了時の膨張率が大きくなっていることが確認できる。図 17 を見ると、ASR 促進と凍結融解試験を複数回繰り返した供試体（繰り返し回数 2 回、4 回）は、ASR 促進から凍結融解試験のみを行った供試体（繰り返し回数 1 回）に比べて膨張速度が小さくなっていることが分かる。

図 14~17 の結果を見ると、ASR と凍結融解作用の影響を受ける期間が一定の条件下で、ASR 促進から凍結融解のみを行った供試体（繰り返し回数 1 回）は、ASR 促進と凍結融解試験を複数回繰り返した供試体（繰り返し回数 2 回、4 回）よりも劣化の程度が大きい。また、ASR 促進と凍結融解試験の繰り返しの回数が多くなるほど劣化の程度が小さいことがわかる。これは、図 15 の凍結融解試験後の ASR 促進時に相対動弾性係数が大きくなっていることが要因である。この原因として、ひび割れに ASR ゲルが充填したことなどが考えられる。しかし、明確な原因が不明なため今後検討が必要である。

4. まとめ

- (1) 表面にひび割れが確認できないほど小さな ASR 膨張であっても、その膨張が生じたコンクリートの耐凍害性は低下する可能性があり、ASR 劣化の程度（ASR 促進終了時の膨張率）が大きいほど、耐凍害性が大きく低下した。
- (2) ASR による劣化（膨張）が非常に軽微である場合、NaOH を添加したコンクリートは NaCl を添加したコンクリートよりも、耐凍害性が大きく低下した。
- (3) ASR および凍結融解作用の影響を受ける期間が一定の場合、ASR と凍結融解作用を短く交互に繰り返すほどコンクリートの相対動弾性係数は低下せず、膨張率は小さくなる。

5. 参考文献

- 1) 蓑島大貴：ASR による膨張がコンクリートの凍害に与える影響，第 70 回土木学会中国支部研究発表会発表概要集，pp.517-518，2018 年

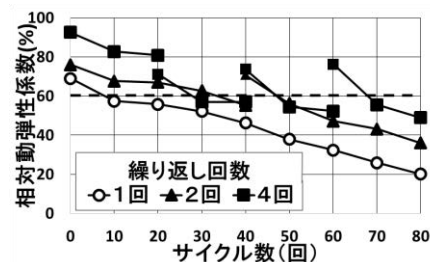


図 14 凍結融解試験中の相対動弾性係数の経時変化

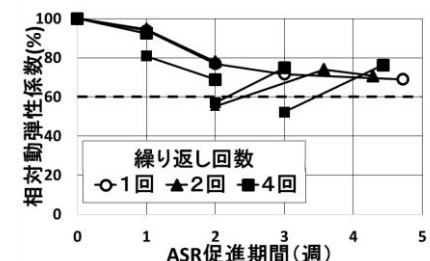


図 15 ASR 促進期間中の相対動弾性係数の経時変化

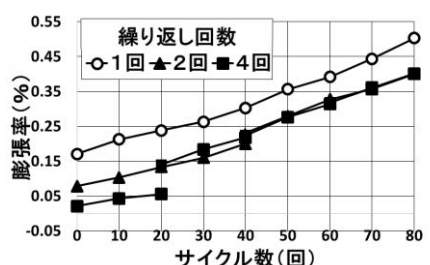


図 16 凍結融解試験中の膨張率の経時変化

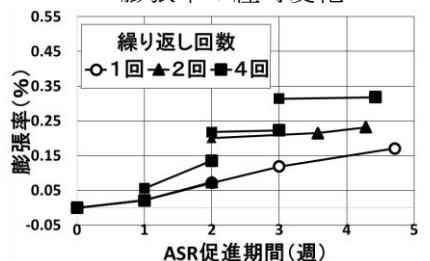


図 17 ASR 促進期間中の膨張率の経時変化