

論文 高炉スラグ細骨材によるコンクリートの凍結融解抵抗性改善に関する研究

森 雅聡*1・藤井 隆史*2・Paweena JARIYATHITIPONG*3・綾野 克紀*4

要旨: 一般的なコンクリートにおいて、AE 剤を用いない場合には、高強度のコンクリートであっても、十分な凍結融解抵抗性が得られない場合がある。しかし、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いれば、AE 剤を用いなくても、十分な凍結融解抵抗性が得られることを本論文では示す。また、高炉スラグ細骨材を用いた場合に凍結融解抵抗性が向上するメカニズムを、凍結融解試験後のコンクリート断面の観察結果から検討を行った。

キーワード: 凍結融解抵抗性, 高炉スラグ細骨材, 塩水, 凝固点降下, 水酸化カルシウム, 溶解度

1. はじめに

積雪寒冷地域におけるコンクリート構造物は、耐凍害性を確保することが不可欠である。凍害による劣化は、コンクリート中の水が凍結することで体積が膨張し、膨張圧により生じる。この対策としては、AE 剤を添加することより、直径が 30~250 μm の微細な空気泡をコンクリート中に混入し、水の凍結による膨張圧を緩和する方法が採られている。しかし、AE 剤を添加したコンクリート構造物であっても、寒冷地における沿岸部や、凍結防止剤として塩を撒く地域など、塩害が同時に発生する条件では、凍結融解作用による劣化が促進されるため、構造物の劣化が問題となっている。

土木学会発行「高炉スラグ骨材コンクリート施工指針」では、高炉スラグ細骨材を使用する場合は、エントラップトエアが多くなりがちであるため、気泡間隔係数を小さくし、十分な耐凍害性を付与させるために、コンクリートの空気量を大きくしなければならない場合があると述べている²⁾。これに対して、山崎らは、高炉スラグを用いたコンクリートは、耐凍害性が低下するものがあるが、その傾向を空気量や気泡間隔係数だけでは説明できないとしている³⁾。また、著者らは、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートでは、AE 剤を用いない場合にも、高い凍結融解抵抗性を示すことを、塩水を用いた凍結融解試験によって報告している⁴⁾。

本論文は、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性について検討を行ったものである。細骨材に高炉スラグ細骨材を用いることで、AE 剤を用いない場合にも、十分な凍結融解抵抗性が得られること、一般的なコンクリートにおいては、骨材界面の水酸化カルシウムが水に溶出することで生じる隙間を充填する水分の凍結融解作用により、劣化が生じやすくなる

こと、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、水酸化カルシウムが少なくなるため、凍結融解抵抗性が向上することを示す。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

セメントには、普通ポルトランドセメント(密度: 3.15g/cm³, ブレーン値: 3.350cm²/g)を用いた。細骨材には、硬質砂岩砕砂(表乾密度 2.65g/cm³, 吸水率: 1.70%)および高炉スラグ細骨材(表乾密度: 2.72 g/cm³, 吸水率: 0.61%)を用いた。粗骨材には、硬質砂岩砕石(最大寸法: 20mm, 表乾密度: 2.74g/cm³, 吸水率: 0.49%)を用いた。混和剤には、ポリカルボン酸系高性能減水剤、AE 剤および消泡剤を用いた。

本実験に使用したコンクリートの配合および練り混ぜ直後の空気量の測定値を表-1 に示す。コンクリートの水セメント比は 25%, 40%および 50%とした。単位水量は 175kg/m³ で一定とした。水セメント比が 25%のコンクリートでは、AE 剤を添加した AE コンクリートと、AE 剤を添加していないものを用いた。水セメント比が 40%のものは、AE コンクリートのみを、水セメント比が 50%のものは、AE 剤を添加していないもののみを用いた。水セメント比が 40%および 50%のものは、スランプが 3cm 程度、水セメント比が 25%のものは、スランプフローが 50cm 程度になるように高性能減水剤を添加した。また、実験には、質量比で、水:セメント:細骨材を、1:2:4.5 の割合で練り混ぜたモルタルも用いた。

2.2 コンクリートの凍結融解試験

凍結融解試験は、JIS A 1148: 2010 に規定される水中凍結融解方法 (A 法) に準拠して行った。なお、水セメント比が 25%および 40%のコンクリートの試験では、凍結

*1 岡山大学大学院 環境生命科学研究科資源循環学専攻 (学生会員)

*2 岡山大学大学院 環境生命科学研究科環境科学専攻准教授 博士(工学) (正会員)

*3 ランデス (株) 研究所 博士(環境学) (正会員)

*4 岡山大学大学院 環境生命科学研究科環境科学専攻教授 博士(工学) (正会員)

表-1 コンクリートの配合

G _{max} (mm)	W/C (%)	設計時の 空気量 (%)	s/a (%)	単用量(kg/m ³)					高性能 減水剤 (C×%)	AE 剤 (C×%)	消泡剤 (C×%)	空気量の 測定値 (%)
				W	C	S		G				
						CS	BFS					
20	25.0	4.5	50.0	175	700	739	0	764	0.90	0.018	0.000	3.6
						0	759		1.00			
		2.0			772	0	798	0.90				
					0	793		1.00				
	40.0	4.5	48.2	350	438	849	0	878	0.50			
					0	929	0	941	0.25			
	0	872										

CS：硬質砂岩砕砂，BFS：高炉スラグ細骨材

水に、質量パーセント濃度で10%の塩化ナトリウム水溶液を用い、水セメント比が50%のコンクリートの試験では、JISに示される通り、凍結水に水道水を用いた。試験は300サイクルまでを基本として、一部の供試体では最大で460サイクルまで行った。実験には、蒸気養生または標準水中養生を行った100×100×400mmの角柱供試体を用いた。蒸気養生は、2012年制定土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕に示される方法⁵⁾に従い、コンクリート打込み後3時間型枠内に静置した後、1時間あたりに20℃の速さで65℃まで昇温させ、その後4時間保持した後、自然冷却によりコンクリートの温度を下げた。蒸気養生後は水中養生および気中養生を材齢14日まで行った。水中養生を行った供試体は、コンクリート打込み後、24時間常温で型枠内養生を行った後に脱型し、材齢14日、28日および91日まで水中養生を行った。

コンクリート断面の観察には、凍結融解試験終了後の供試体から切り出した100×100×20mmの試験片を用いた。試験片表面に蛍光塗料を含浸させた後、表面を研磨した面に紫外線を照射し、デジタルカメラで記録した。

2.3 モルタル小片を用いた凍結融解試験

既報⁶⁾では、モルタル小片を用いた凍結融解試験は、ASTM C672法による凍結融解試験とある程度相関が見られると報告されている。本研究では、写真-1に示す一辺が1cmの立方体のモルタル小片試験体を用い、試験を行った。ポリプロピレン製容器に、凍結水を50mlと試験片4個(約11g)を浸漬させ、-17℃の冷凍庫に16時間静置後、8時間20℃の恒温槽に置くサイクルを1サイクルとして試験を実施した。融解行程終了時にモルタル小片を取り出し、崩れ落ちた部分を除いて質量を計った。試験は、凍結水に塩化ナトリウム水溶液を用いた試験と、グリセリン水溶液中で1週間凍結後、蒸留水を凍結水に用いた試験の2種類を行った。塩化ナトリウム水溶液は、質量パーセント濃度で0%、3%および10%のものを用い、グリセリン水溶液は、濃度が0%、13%、25%および50%

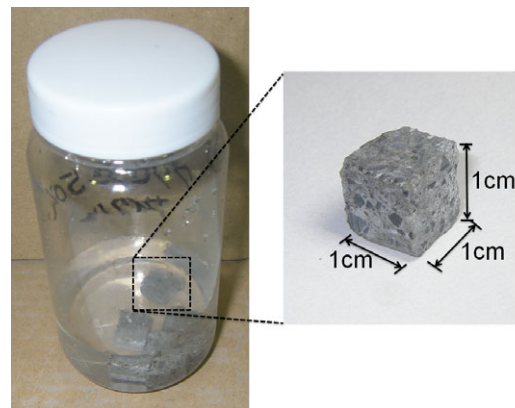


写真-1 モルタル小片試験体を用いた凍結融解試験の試験方法

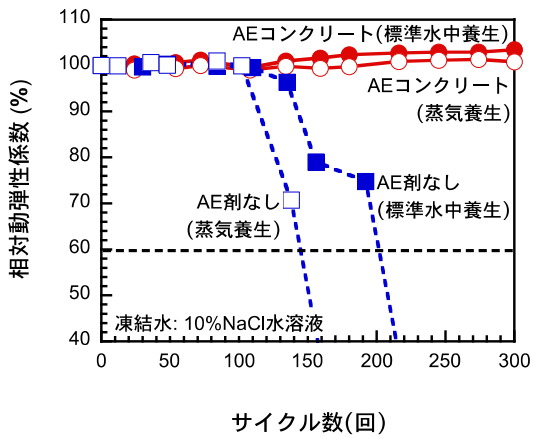
を用いた。

3 実験結果および考察

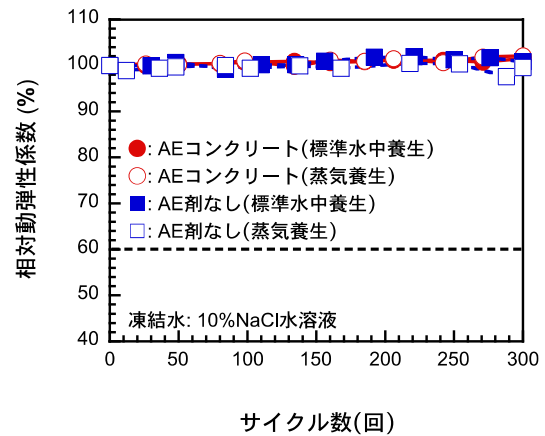
3.1 コンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす養生方法およびAE剤の有無の影響

図-1は、水セメント比が25%のコンクリートにおける養生方法およびAE剤の有無が、凍結融解抵抗性に及ぼす影響を調べた結果である。細骨材には、硬質砂岩砕砂を用い、凍結水には、質量パーセント濃度で10%の塩水を用いている。図中の●および○は、それぞれ、AE剤を用い標準水中養生および蒸気養生を行ったAEコンクリートの結果を示している。また、■および□は、それぞれ、AE剤を添加していないコンクリートの標準水中養生および蒸気養生を行ったコンクリートの結果を示している。いずれのコンクリートも、試験開始材齢は14日である。水セメント比が25%のコンクリートでは、AEコンクリートであれば、十分な凍結融解抵抗性が得られ、AE剤を添加しないと、150~200サイクル程度で相対動弾性係数が60%を下回り、劣化している。

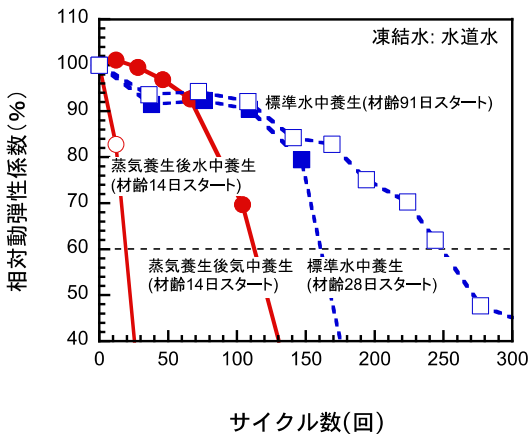
図-2は、細骨材に高炉スラグ細骨材のみを用いた水セメント比が25%のコンクリートの凍結融解試験結果で



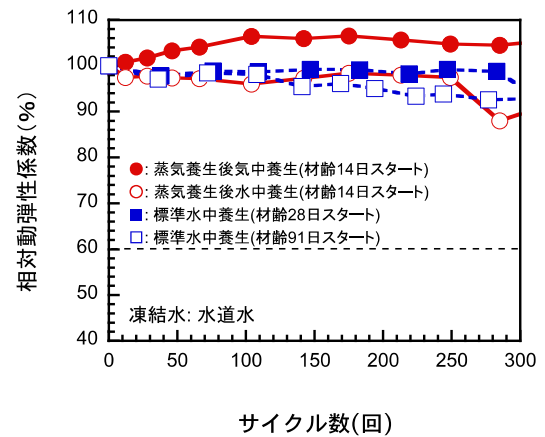
図一 養生方法および空気が凍結融解抵抗性に及ぼす影響(細骨材が硬質砂岩砕砂の場合)



図二 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性



図三 養生方法が凍結融解抵抗性に及ぼす影響(細骨材が硬質砂岩砕砂の場合)



図四 養生方法が凍結融解抵抗性に及ぼす影響(細骨材が高炉スラグ細骨材の場合)

ある。いずれのコンクリートも 300 サイクル以内には相対動弾性係数は低下せず、劣化していないことが分かる。

図-3 は、水セメント比が 50%で、細骨材に硬質砂岩砕砂を用いた AE 剤を添加していないコンクリートにおける、凍結融解抵抗性に及ぼす養生方法の影響を調べた結果である。凍結水には、水道水を用いている。図中の●および○は、それぞれ、蒸気養生後に気中養生および水中養生を材齢 14 日まで行った後、試験を行った結果を示している。また、■および□は、それぞれ、材齢 28 日および 91 日まで標準水中養生を行った後、試験を行った結果を示している。長く養生したものほど、劣化の進行が遅くなっている。しかし、いずれの養生を行ったものも、250 サイクル以内に相対動弾性係数が 60%を下回っており、細骨材に硬質砂岩砕砂を用いた水セメント比が 50%の AE 剤を添加していないコンクリートでは、十分な凍結融解抵抗性が得られないことが分かる。

一方、図-4 は、細骨材に高炉スラグ細骨材のみを用いた水セメント比が 50%の AE 剤を添加していないコンクリートの凍結融解抵抗性を調べた結果である。水セメ

ント比が 50%の場合でも、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いると、劣化していないことが分かる。既報⁴⁾で、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、消泡剤を用いて空気量を 2%程度にしても十分な凍結融解抵抗性が得られることを報告しており、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、養生方法および AE 剤の有無に関係なく、高い凍結融解抵抗性が得られることが分かる。

3.2 凍結融解試験後のコンクリート供試体の断面

写真-2 は、細骨材に硬質砂岩砕砂を用いた、水セメント比が 40%の AE コンクリートの凍結融解試験 300 サイクル終了後の断面を示したものである。試験体は、標準水中養生を材齢 14 日まで行った後、試験を開始したものであり、300 サイクルでの相対動弾性係数は 93%である。断面に存在するひび割れや気泡には、蛍光塗料が入り込むことにより、発光している。AE コンクリートであっても、300 サイクルの凍結融解試験後には、骨材周辺に隙間が生じていることが分かる。写真-3 は、写真-2 の点線で囲まれた部分を拡大したものである。凍結融解試験後のひび割れの多くは、骨材周辺に存在してい

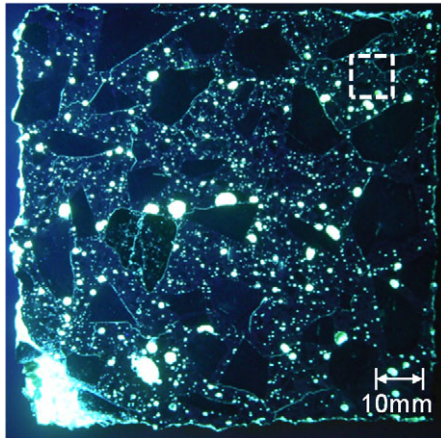


写真-2 硬質砂岩砕砂を用いた AE コンクリートの凍結融解試験後の断面(300 サイクル後)

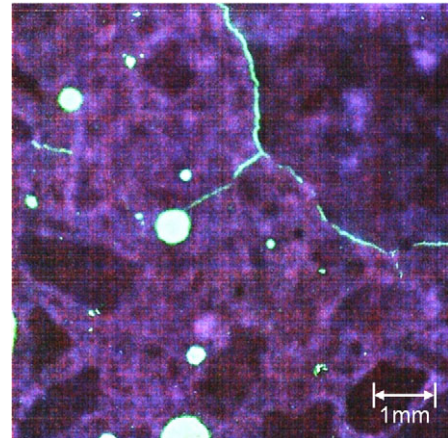


写真-3 細骨材に硬質砂岩砕砂を用いた AE コンクリートの拡大写真

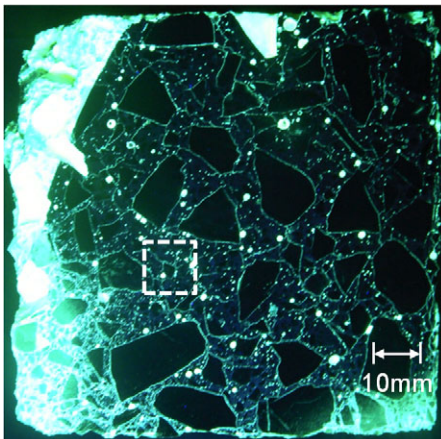


写真-4 細骨材に硬質砂岩砕砂を用いたコンクリートの凍結融解試験後の断面(219 サイクル後)

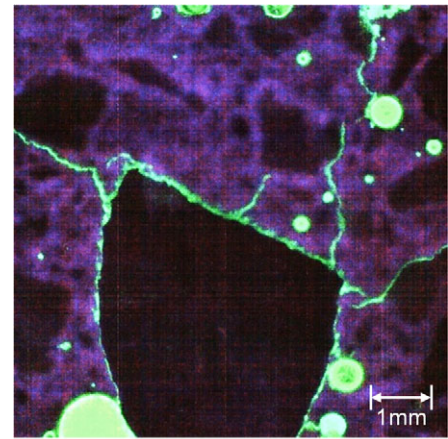


写真-5 細骨材に硬質砂岩砕砂を用いた AE 剤を添加していないコンクリートの拡大写真

ることから、骨材界面の隙間に入り込んだ水が凍結し、膨張することで、セメントペースト部分にひび割れを生じさせたものと考えられる。

写真-4 は、図-3 中の ■ で示す細骨材に硬質砂岩砕砂を用いた、AE 剤を添加していないコンクリートの凍結融解試験 219 サイクル終了後の断面を示したものである。標準水中養生を材齢 28 日まで行った後、試験を開始したものであり、219 サイクルでの相対動弾性係数は 22% である。AE 剤を添加していないコンクリートでは、写真-2 に示した AE コンクリートの結果と比較して、セメントペースト部分にも多くのひび割れが確認できる。写真-5 は、写真-4 の点線で囲まれた部分を拡大したものである。セメントペースト部分に、骨材周辺から生じたと考えられる長いひび割れが多く生じている。

一方、写真-6 は、図-4 中の ■ で示す細骨材に高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの凍結融解試験 460 サイクル終了後の断面を示したものである。このコンクリートも、AE 剤は用いていない。標準水中養生を材齢 28 日まで行った後、試験を開始したものであり、460

サイクルでの相対動弾性係数は 100% である。凍結融解を 460 サイクル行った後にも関わらず、断面全体において、骨材界面の隙間やセメントペースト部に大きなひび割れは見られない。写真-7 は、写真-6 の点線で囲まれた部分を拡大したものである。骨材界面に隙間はなく、セメントペースト部分にもひび割れが生じていないことが分かる。

3.3 骨材界面の水酸化カルシウムが凍結融解抵抗性に及ぼす影響

図-5 は、水酸化カルシウムの水への溶解度に及ぼす温度の影響を示したものである⁷⁾。水酸化カルシウムの水への溶解反応は、発熱反応であるため、その溶解度は、温度が下がるほど大きくなる。図-6 は、凍結水の塩化ナトリウム濃度が凍結融解抵抗性に及ぼす影響を、硬質砂岩砕砂を用いたモルタル小片を用いて調べたものである。図中の ●, ■ および ▲ は、それぞれ、凍結水に質量パーセント濃度で 0%, 3% および 10% の塩化ナトリウム水溶液を用いた凍結融解試験結果を示している。真水の凝固点が 0°C 付近であるのに対し、3% および 10% の塩化

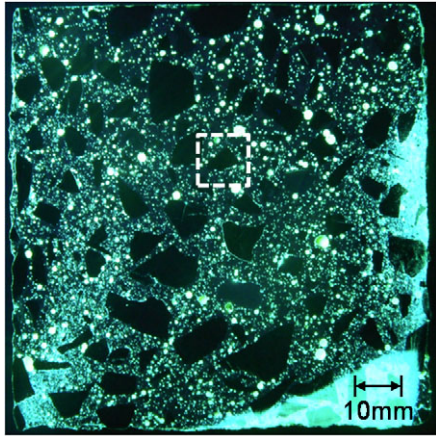


写真-6 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解試験後の断面(460 サイクル後)

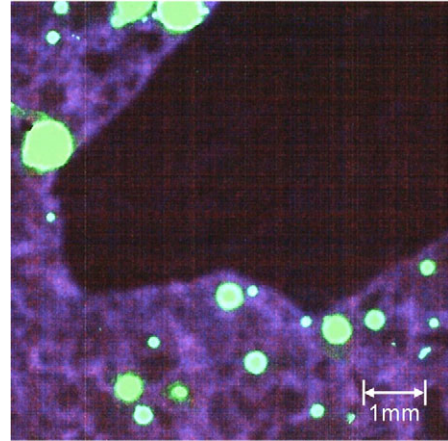


写真-7 高炉スラグ細骨材を用いた AE 剤を添加していないコンクリートの拡大写真

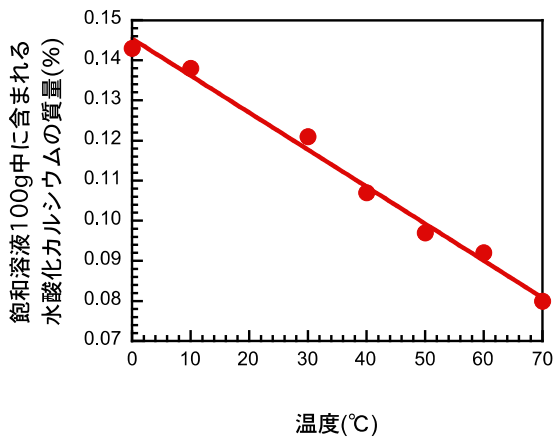


図-5 水酸化カルシウムの水への溶解度

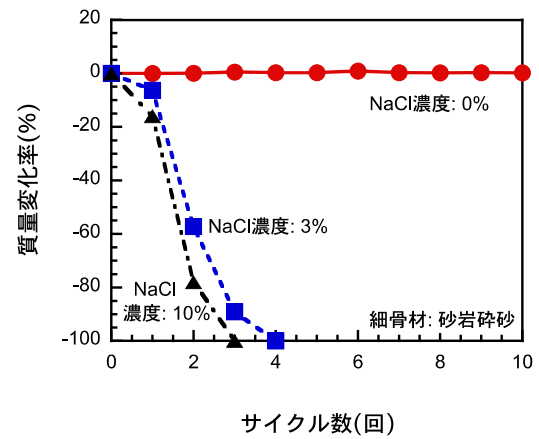


図-6 凍結水の塩化ナトリウム濃度が及ぼす影響

ナトリウム水溶液の凝固点は、それぞれ、 -2.0°C および -7.1°C である。既報では、塩化ナトリウム濃度が3%程度でスケーリングが大きくなると言われている⁸⁾が、今回の実験でも、塩化ナトリウム濃度が3%以上で劣化が著しくなっていることが分かる。水酸化カルシウムの水への溶解度は、 0°C を下回ると水溶液が凝結し、測定ができないため、 0°C 以下の値は一般に示されていない。しかし、 0°C 以下でも液体の状態が保たれれば、より多くの水酸化カルシウムが溶解することが考えられる。塩化ナトリウム水溶液は、真水より低い温度まで液体の状態であるため、より水酸化カルシウムが溶解しやすい状態になると考えられる。骨材界面に集積した水酸化カルシウムが、低温環境で水に溶け出すことで隙間が空き、隙間に入り込んだ水が凍結し膨張することで、ひび割れが生じると考えられる。

表-2 および図-7 は、硬質砂岩砕砂を用いたモルタル小片を、あらかじめ凝固点の異なるグリセリン水溶液に1週間浸漬させ、その後に蒸留水を用いて凍結融解試験を行った結果である。濃度が0%, 13%, 25%および50%のグリセリン水溶液の凝固点は、それぞれ、 0°C 、 -3.0°C 、

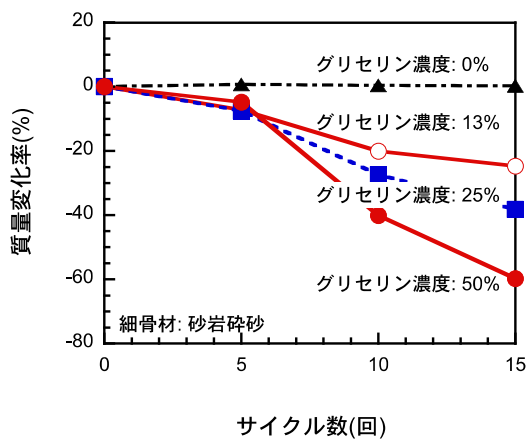
-6.7°C および -20.2°C である。これらの図表より、グリセリン濃度が高く凝固点の低い水溶液にあらかじめ浸漬させたものほど、早期に劣化していることが分かる。すなわち、低温で水酸化カルシウムが溶け出しやすい環境に置かれたものほど、早期に凍結融解作用によって破壊に至っていると言える。これに対して、表-3および図-8は、細骨材に高炉スラグ細骨材のみを用いたモルタル小片の結果である。いずれのものも破壊に至っていないことが分かる。高炉スラグ細骨材を用いると、ポズラン反応によるC-S-Hの生成により、骨材界面の水酸化カルシウムの析出が少なくなると考えられる。骨材界面の水酸化カルシウムを消費する高炉スラグ細骨材を用いれば、水酸化カルシウムが溶け出すことで生じる骨材周辺の隙間が少なくなるため、凍結融解抵抗性が向上すると考えられる。

4. まとめ

高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートでは、AE剤を添加しなくとも、十分な凍結融解抵抗性が得られることが分かった。一般的なコンクリートでは、骨材界面の

表一 凝結温度の異なる液体に浸漬させたモルタル小片の凍結融解後の状況(細骨材に硬質砂岩砕砂を用いた場合)

グリセリン濃度	1週凍結後	5サイクル後	10サイクル後	15サイクル後
0% (蒸留水) 凝固点: 0.0°C				
13% 凝固点: -3.0°C				
25% 凝固点: -6.7°C				
50% 凝固点: -20.2°C				



図一 凝結温度の異なる液体に浸漬させたモルタルの凍結融解抵抗性への影響(細骨材に硬質砂岩砕砂を用いた場合)

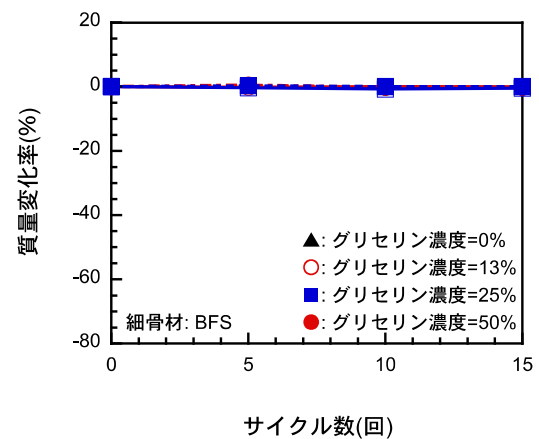
水酸化カルシウムが低温の環境下で水に溶出することで生じる隙間に、水が入り込み、凍結することで膨張し、セメントペースト部分にひび割れが生じ、耐力が低下すると考えられる。一方、高炉スラグ細骨材を用いると、骨材界面の水酸化カルシウムが少なくなるため、凍結融解に対する抵抗性が向上すると推察される。

参考文献

- 1) 竹田宜典, 十河茂幸: 凍害と塩害の複合劣化作用がコンクリートの耐久性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.427-432, 2001.6
- 2) 土木学会コンクリート委員会編: 高炉スラグ骨材コンクリート施工指針, 土木学会, pp.26, 1993.7
- 3) 山崎舞, 千歩修, 長谷川拓哉: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの耐凍害性に関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.65,

表三 凝結温度の異なる液体に浸漬させたモルタル小片の凍結融解後の状況(細骨材に高炉スラグ細骨材を用いた場合)

グリセリン濃度	1週凍結後	5サイクル後	10サイクル後	15サイクル後
0% (蒸留水) 凝固点: 0.0°C				
13% 凝固点: -3.0°C				
25% 凝固点: -6.7°C				
50% 凝固点: -20.2°C				



図二 凝結温度の異なる液体に浸漬させたモルタルの凍結融解抵抗性への影響(細骨材に高炉スラグ細骨材を用いた場合)

- pp.406-415, 2011
- 4) Paweena JARIYATHITIPONG, 藤井隆史, 細谷多慶, 綾野克紀: 高炉スラグを用いたコンクリートの塩害環境下における凍結融解抵抗性に関する研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.67, pp.427-433, 2014.2
 - 5) 土木学会コンクリート委員会編: 2012年制定コンクリート標準示方書[施工編], 土木学会, p.355, 2013.3
 - 6) 小山田哲也, 羽原俊祐, 高橋拓真, 高橋俊介: スケーリング劣化を考慮した新しい凍結融解試験法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.935-940, 2011.6
 - 7) 日本化学会編: 化学便覧基礎編 II 改訂 2 版, 丸善, pp.784, 1975
 - 8) John J. Valenza II. And George W. Scherer.: Mechanism for salt scaling, J. AM. Ceram. Soc., Vol.89, No.4, pp.1161-1179, 2006