

論文 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与える養生方法および増粘剤の影響

山内 守*1・野口 光明*2・藤井 隆史*3・綾野 克紀*4

要旨: 本研究では、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、蒸気養生、高炉スラグ微粉末および増粘剤が与える影響を検討した。細骨材に高炉スラグ細骨材を用いれば、AE 剤を用いることなく高い凍結融解抵抗性が得られるが、製造方法によって高炉スラグ細骨材の効果が異なる。本論文では、普通ポルトランドセメントのみを用いた場合には、蒸気養生によって凍結融解抵抗性が低下し、結合材の一部に高炉スラグ微粉末を用いれば、反対に、蒸気養生によって凍結融解抵抗性が向上することを示した。また、増粘剤を用いることで、短い水中養生期間で高い凍結融解抵抗性が得られることを示した。

キーワード: 高炉スラグ細骨材, 高炉スラグ微粉末, 増粘剤, 耐久性指数, スケーリング, 蒸気養生

1. はじめに

凍結防止剤が散布される積雪寒冷地域においては、凍結融解作用によるコンクリートの劣化が著しく、道路橋コンクリート床版など、大規模な更新が必要とされる構造部材が増えている。既往の研究¹⁾においても、塩分が供給される環境では、凍結融解作用による劣化が、より著しくなることが報告されており、コンクリート部材の更新に用いられるコンクリートには、塩分環境下では特に高い凍結融解抵抗性が求められている。

道路橋床版の取替え工事等においては、交通規制の短縮化をはかる目的で、プレキャストコンクリート製品の活用が望まれている。工場で製造されるプレキャストコンクリート部材は、生産性を高める目的で蒸気養生が行われるのが一般で、品質管理によって AE 剤の連行による空気量の確保を行うことが重要である。

これに対して、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、高い凍結融解抵抗性が得られることが知られている²⁾。高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの耐久性が向上するのは、高炉スラグ細骨材が水和反応するため、結合材の種類や養生方法の影響を受ける³⁾。しかし、単位水量が大きくブリーディングの多い配合では、期待した効果が得られない場合もある⁴⁾。本研究は、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、蒸気養生、高炉スラグ微粉末および増粘剤が与える影響を検討したものである。高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートでは、結合材に、普通ポルトランドセメントのみを用いた場合には、蒸気養生を行うことで、凍結融解抵抗性が低下するが、結合材の一部に高炉スラグ微粉末を用いれば、反対に、蒸気養生によ

って凍結融解抵抗性が向上すること、蒸気養生によって低下した凍結融解抵抗性は水中養生によって回復すること、増粘剤を用いることで、短い水中養生期間でも、凍結融解抵抗性が得られることを示す。

2. 実験概要

2.1 使用材料

結合材には、普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm³、ブレン値：3,350cm²/g）および高炉スラグ微粉末（密度：2.89g/cm³、ブレン値：4,150cm²/g）を用いた。細骨材には、砂岩砕砂（表乾密度：2.64g/cm³、吸水率：2.00%、粗粒率：2.83）および高炉スラグ細骨材（表乾密度：2.73g/cm³、吸水率：0.66%、粗粒率：2.20）を用いた。粗骨材には、砂岩碎石（最大寸法：20mm、表乾密度：2.74g/cm³、吸水率：0.39%）を用いた。混和剤には、ポリカルボン酸系高性能減水剤、消泡剤および増粘剤を用いた。

2.2 コンクリートの配合

実験に用いたコンクリートの配合を表-1に示す。いずれの配合も、水結合材比は35%とし、単位水量は155kg/m³で一定とした。高炉スラグ微粉末を用いる場合には、質量比で結合材の50%を置換して用いた。各配合の練混ぜ直後の空気量および標準水中養生および50°Cで蒸気養生を行ったコンクリートの材齢28日における圧縮強度を併せて表-1に示す。

2.3 養生方法

コンクリートの打込み後から脱型までの養生は、図-1に示す温度履歴で行った。養生温度が20°C一定のものは、温度20±2°Cの恒温室内で養生した。養生温度が35°C

*1 岡山大学大学院 環境生命科学研究科環境科学専攻 (学生会員)

*2 岡山大学大学院 環境生命科学研究科資源循環学専攻

*3 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(工) (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(工) (正会員)

表-1 コンクリートの配合

W/B (%)	GGBF/B (%)	BFS/S (%)	空気量 (設計値) (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						高性能減水剤 (B×%)	消泡剤 (B×%)	増粘剤 (B×%)	空気量 (実測値) (%)	28日圧縮強度(N/mm ²)			
					W	B		S		G					20℃ 標準養生	50℃ 蒸気養生		
						OPC	GGBF	CSS	BFS									
35	0	0	2.0	42.2	155	443	0	762	0	1,084	0.5	0.01	0.00	1.9	66.0	52.3		
		100						0	788					0.8	2.7	69.7	61.0	
		0						806	0					0.04	3.8	67.3	55.9	
		50						410	410					0.00	1.8	72.4	66.4	
	50	0	221	221	45.0	155	221	221	0	833	1,022	1.0	0.01	0.04	1.3	76.1	69.1	
		100							0	833					2.6	63.0	55.3	
		0							806	0					0.00	2.8	71.4	58.2
		50							410	410					0.04	3.1	72.0	62.8
		100							0	833					4.6	58.0	54.2	

OPC：普通ポルトランドセメント，GGBF：高炉スラグ微粉末，CSS：硬質砂岩砕砂，BFS：高炉スラグ細骨材

および50℃のものは、蒸気養生を行った。コンクリートを型枠へ打込み、20±2℃で4時間静置した後、15℃/時間の速さで温度を上げた。最高温度の35℃または50℃を5時間または4時間保持した後、自然冷却により温度を下げた。脱型は18±2時間で行った。脱型後は、所定の期間20±2℃の水中もしくは温度20±2℃、相対湿度60±5%の気中で試験開始まで養生を行った。

2.4 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試験方法 (A 法) に準拠して行った。凍結水には、質量パーセント濃度が10%の塩化ナトリウム水溶液を用い、塩害との複合劣化環境下での耐久性について検討を行った。供試体は、100×100×400mmの角柱供試体を用いた。36サイクル以内に1回の間隔で、たわみ振動の一次共鳴振動数および質量を測定し、測定した値から、相対動弾性係数を式(1)により計算して求めた。

$$P_n = \frac{f_n^2}{f_0^2} \times 100 \quad (1)$$

ここに、 P_n は、凍結融解 n サイクル後の相対動弾性係数 (%) で、 f_n および f_0 は、それぞれ、凍結融解 n サイクル後および凍結融解 0 サイクルにおけるたわみ振動の一次共鳴振動数(Hz)である。

なお、耐久性指数は式(2)により計算して求めた。

$$DF = \frac{P \times N}{M} \quad (2)$$

ここに、 DF は、耐久性指数で、 M は、300サイクル、 N は、相対動弾性係数が60%になるサイクル数または300サイクルのいずれか小さいもの、 P は、 N サイクルの時の相対動弾性係数(%)である。

また、凍結融解作用によるスケーリングは、式(3)によって求められる質量が減少した場合に負の値となる質量変化率を用いて比較した。

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

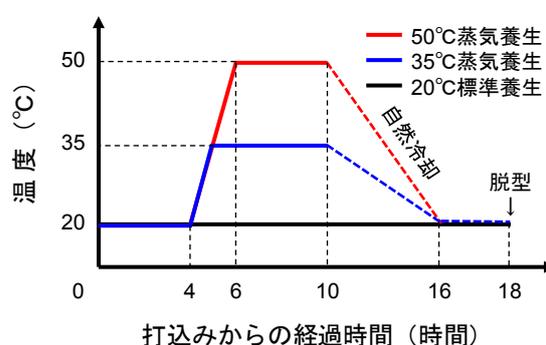


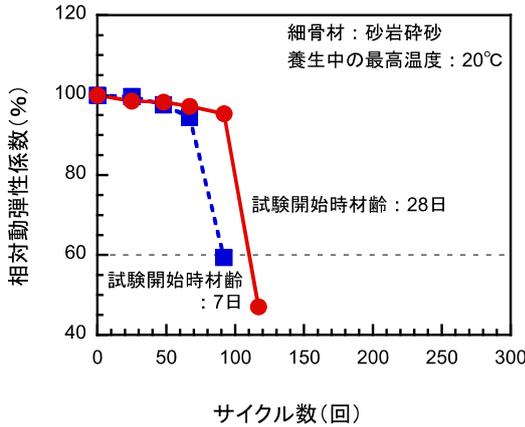
図-1 脱型までの養生温度

ここに、 W_n は、凍結融解 n サイクル後の質量変化率(%)で、 w_n および w_0 は、それぞれ、凍結融解 n サイクル後および凍結融解 0 サイクルにおける供試体質量(g)である。

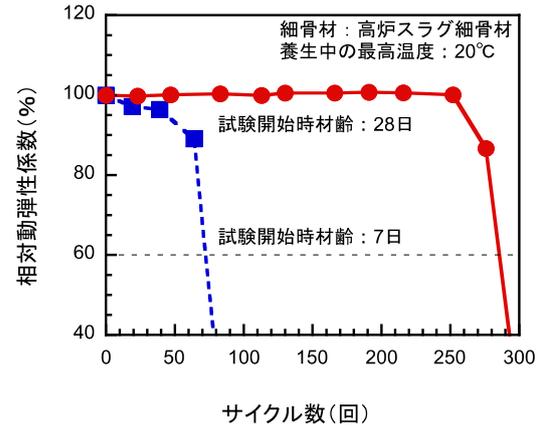
3. 実験結果および考察

3.1 細骨材の影響

図-2 および図-3 は、それぞれ、細骨材に砂岩砕砂および高炉スラグ細骨材を用いた Non-AE コンクリートの凍結融解抵抗性に、試験開始時材齢が与える影響を示したものである。いずれの供試体も、試験開始まで水中養生を行っている。砂岩砕砂を用いたものは、材齢7日で試験を開始したものも、材齢28日で試験を開始したものも、100サイクル前後で、相対動弾性係数が60%を下回っている。これに対して、高炉スラグ細骨材を用いたものは、材齢7日で試験を開始したものは、早期に相対動弾性係数が60%を下回っているが、材齢28日で試験を開始したものは、250サイクル付近まで相対動弾性係数の低下は見られない。水中養生期間を長くすることで、凍結融解抵抗性が著しく向上していることが分かる。また、図-4は、図-2および図-3に示した試験開始時材齢が28日の供試体の質量変化を示したものである。細骨材に砂岩砕砂を用いたものは、試験開始直後から質量が減少し、スケーリングを生じているが、細骨材に高



図一 試験開始時材齢が相対動弾性係数に与える影響
(細骨材：砂岩砕砂)



図二 試験開始時材齢が相対動弾性係数に与える影響
(細骨材：高炉スラグ細骨材)

炉スラグ細骨材を用いたものでは、破壊に至るまで、質量減少はほとんどない。十分な水中での養生を行えば、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いることで、コンクリートの凍結融解抵抗性が向上することが分かる。

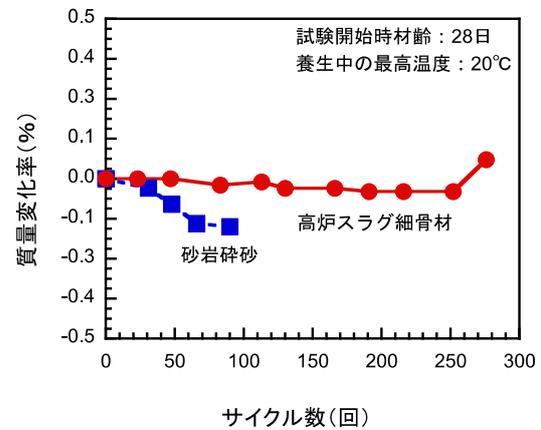
3.2 蒸気養生の影響

図一五は、結合材に普通ポルトランドセメントを用い、細骨材には、高炉スラグ細骨材を用いた Non-AE コンクリートの凍結融解抵抗性に、蒸気養生が与える影響を示したものである。いずれの供試体も、18 時間の型枠養生後、材齢 28 日まで水中養生を行った後、試験を開始している。蒸気養生を行っていないものは、250 サイクル付近まで相対動弾性係数の低下は見られないが、蒸気養生を行ったものでは、150 サイクル付近で相対動弾性係数が 60%を下回っている。普通ポルトランドセメントを用いた場合には、高い温度で蒸気養生を行ったものほど、凍結融解抵抗性が劣ることが分かる。

図一六は、図一五に示したコンクリートの質量変化を示したものである。材齢 28 日まで水中養生を行った全ての供試体に質量変化は少なく、スケーリングを生じることなく破壊に至っている。

図一七は、普通ポルトランドセメントと高炉スラグ細骨材を用いた Non-AE コンクリートの耐久性指数に、脱型後の水中養生期間が与える影響を示したものである。図の横軸は、脱型後の水中養生期間を示したもので、いずれの供試体も、水中養生後は、試験開始時材齢である材齢 28 日まで気中養生を行っている。養生中の最高温度に関係なく、水中養生期間が長くなるほど、耐久性指数が大きくなっている。すなわち、蒸気養生を行ったものでも、その後の水中養生によって凍結融解抵抗性が改善されていることが分かる。また、水中養生期間が同じ場合には、養生中の最高温度が高いものほど、凍結融解抵抗性が劣ることが、この結果からも言える。

図一八は、図一七に示した結果のうち、蒸気養生を行



図四 細骨材の種類が質量変化に与える影響

っていないコンクリートの質量変化を示したものである。水中養生期間が 7 日間の供試体のみ、質量が減少しており、スケーリングを生じているが、水中養生期間が 14 日間よりも長い供試体に質量変化は少なく、スケーリングは生じていない。また、図一九は、図一七に示した結果のうち、蒸気養生温度が 35℃および 50℃のコンクリートの質量変化を示したものである。蒸気養生を行った場合も、水中養生期間が 7 日間の供試体は、質量が減少しており、スケーリングを生じている。しかし、蒸気養生後の水中養生期間が 27 日間の供試体では質量変化は少なく、スケーリングは生じていない。すなわち、スケーリングを抑えるためには、蒸気養生に関係なく、試験開始までの水中養生期間が重要であることが分かる。

3.3 高炉スラグ微粉末の影響

図一十は、結合材に質量比で 50%の高炉スラグ微粉末を用い、細骨材には、高炉スラグ細骨材を用いた Non-AE コンクリートの凍結融解抵抗性を示したものである。20℃と示されているものは、蒸気養生を行っていない供試体で、50℃と示されているものは、最高温度 50℃で蒸気養生を行った供試体である。いずれの供試体も、18 時間の型枠養生後、試験開始時材齢である材齢 7

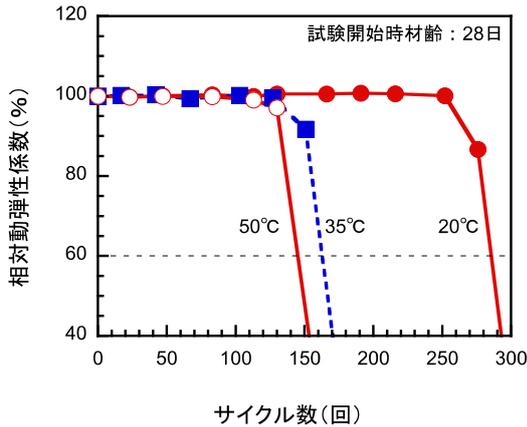


図-5 蒸気養生が相対動弾性係数に与える影響 (GGBF/B=0%)

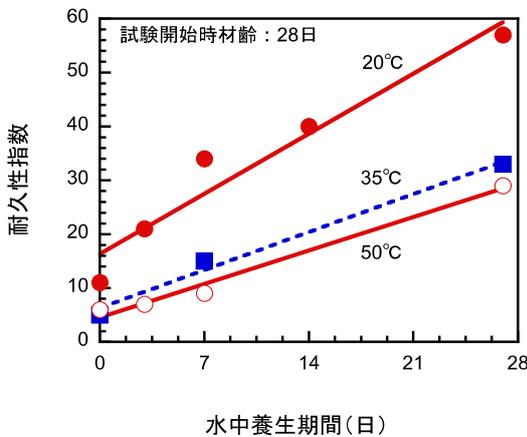


図-7 水中養生期間が耐久性指数に与える影響

日まで水中養生を行っている。図-5 との比較からも明らかのように、結合材に、普通ポルトランドセメントのみを用いた場合とは逆に、結合材に質量比で50%の高炉スラグ微粉末を用いたものは、蒸気養生を行ったものの方が、凍結融解抵抗性が向上していることが分かる。また、普通ポルトランドセメントのみを用いた場合には、材齢28日まで水中養生を行っても、300サイクルでの相対動弾性係数が60%を下回っているのに対し、高炉スラグ微粉末を質量比で結合材の50%用いた場合には、最高温度50°Cで蒸気養生後、材齢7日まで水中養生を行えば、300サイクルで相対動弾性係数が100%に保たれている。

図-11は、図-10に示したコンクリートの質量変化を示したものである。蒸気養生を行っていない供試体の破壊時における質量変化は、約-2.0%で、蒸気養生を行った供試体の試験終了時における質量変化は、約-1.0%である。高炉スラグ微粉末を用いることで、コンクリートのスケールは大きくなる傾向にあるが、蒸気養生を行うことで、スケールは抑えられることが分かる。写真-1は、図-11に示したコンクリートの凍結融解試験後の供試体表面を撮影したものである。質量変化率が-2.0%のスケールは無視できないほど大きい、質量

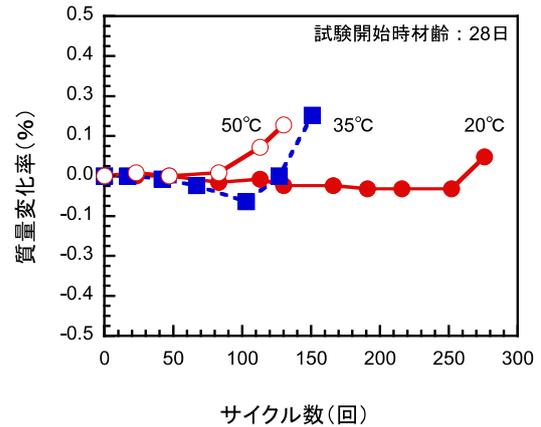


図-6 蒸気養生が質量変化に与える影響 (GGBF/B=0%)

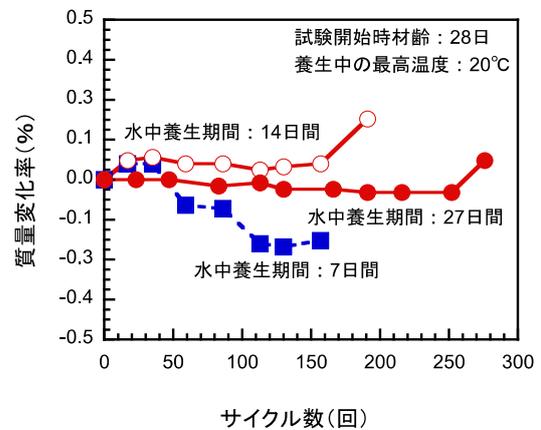


図-8 水中養生期間が質量変化に与える影響 (蒸気養生なし)

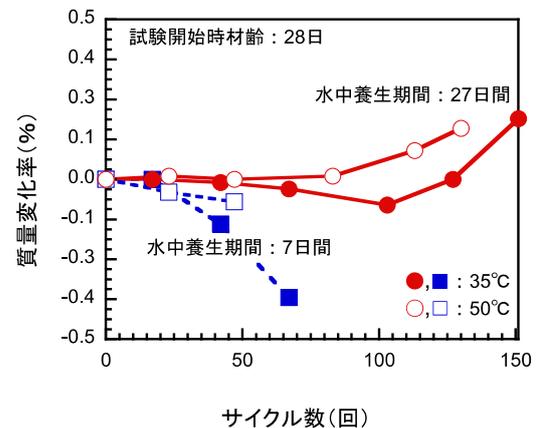


図-9 水中養生期間が質量変化に与える影響 (蒸気養生あり)

変化率が-1.0%では、それほど大きなスケールिंगではないことが分かる。

図-12は、結合材に質量比で50%の高炉スラグ微粉末を用いたNon-AEコンクリートの耐久性指数に、蒸気養生が与える影響を示したものである。いずれの供試体も、試験開始時材齢である材齢7日まで水中養生を行っている。高炉スラグ微粉末を結合材に質量比で50%用い

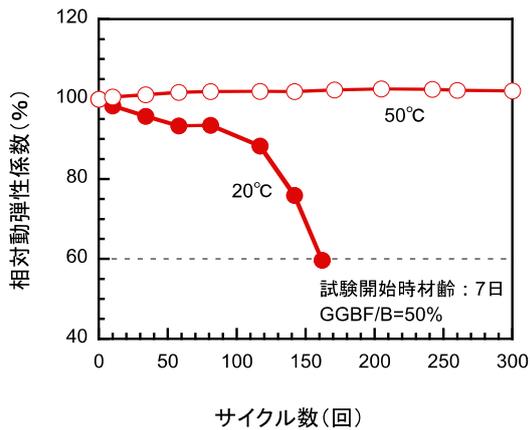


図-10 蒸気養生が相対動弾性係数に与える影響 (GGBF/B=50%)

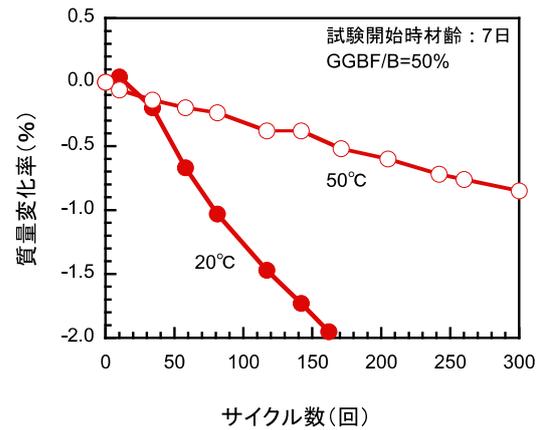


図-11 蒸気養生が質量変化に与える影響 (GGBF/B=50%)

質量変化率： -1.0%	
質量変化率： -2.0%	

写真-1 質量変化率とスケールング

た場合には、細骨材に占める高炉スラグ細骨材の量に関係なく、蒸気養生を行ったものの耐久性指数が高い。また、細骨材に占める高炉スラグ細骨材の量が増えるにつれ、耐久性指数が高くなることが分かる。

3.4 増粘剤の影響

図-13は、細骨材に高炉スラグ細骨材のみを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に、増粘剤が与える影響を示したものである。いずれの供試体も、結合材に普通ポルトランドセメントのみを用い、試験開始時材齢である材齢7日まで水中養生を行っている。増粘剤を用いていないものは、早期に破壊に至っているのに対し、増粘剤を用いたものは、材齢7日で試験を開始しても、300サイクルまで相対動弾性係数の低下は見られない。また、図-5に示したように、結合材に普通ポルトランドセメントのみを用いた場合には、蒸気養生を行うと早期に凍結融解抵抗性が低下するが、増粘剤を用いることで、蒸気養生を行っても、300サイクルまで相対動弾性係数の低下が見られないことが分かる。

図-14は、図-13に示したコンクリートの質量変化を示したものである。増粘剤を用いることで、300サイクルまで相対動弾性係数が100%であっても、蒸気養生を行っていない場合には、質量変化が約-4.0%と、スケールングは大きいことが分かる。しかし、蒸気養生を行えば、質量変化は約-1.0%となっており、増粘剤を用いた場合には、蒸気養生は、コンクリートの凍結融解抵抗性を改善していることが分かる。

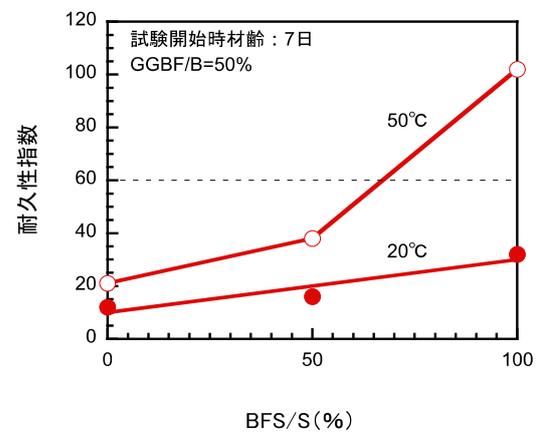


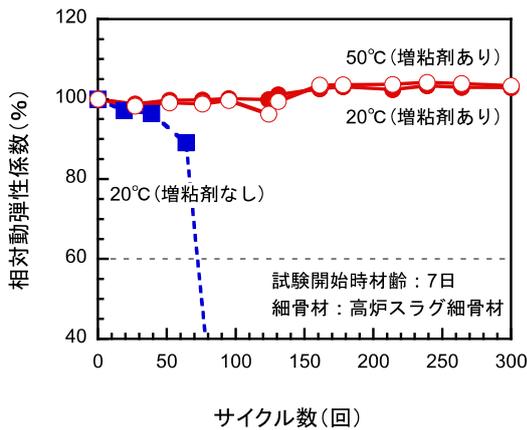
図-12 蒸気養生が耐久性指数に与える影響 (GGBF/B=50%)

図-15は、細骨材に砂岩砕砂のみを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に、増粘剤が与える影響を示したものである。いずれの供試体も、結合材に質量比で50%の高炉スラグ微粉末を用い、試験開始時材齢である材齢7日まで水中養生を行っている。増粘剤を用いていないものは、早期に破壊に至っているのに対し、増粘剤を用いたものは、300サイクルまで相対動弾性係数が70%を下回っていない。また、蒸気養生を行えば、300サイクルでも、相対動弾性係数は100%を保っている。図-16は、図-15に示したコンクリートの質量変化を示したものである。いずれの供試体も、質量減少はなく、スケールングを伴わずに、試験を終了していることが分かる。

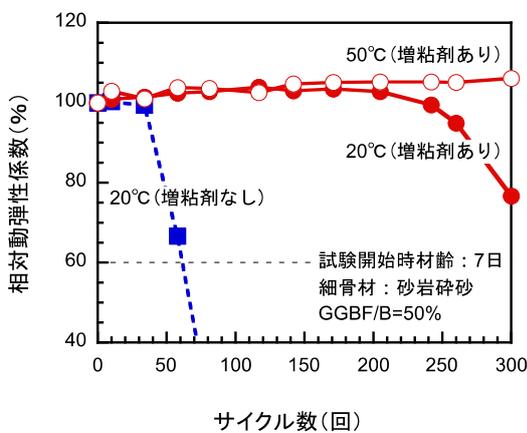
4. まとめ

本論文では、高炉スラグを細骨材として用いても、微粉末として用いても、コンクリートの凍結融解抵抗性を改善できることを示した。以下に実験で得られた知見を示し、本論文のまとめとする。

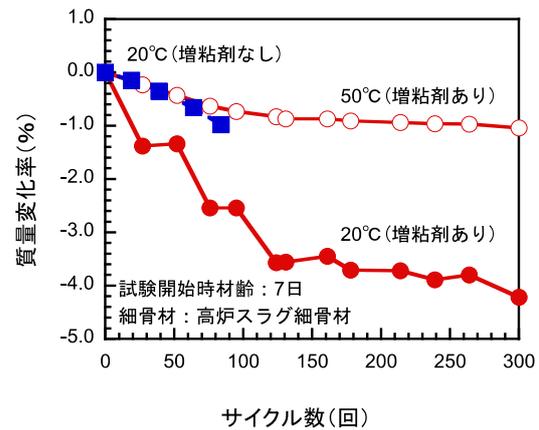
- (1) 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートでは、結合材に普通ポルトランドセメントのみを用いた場合



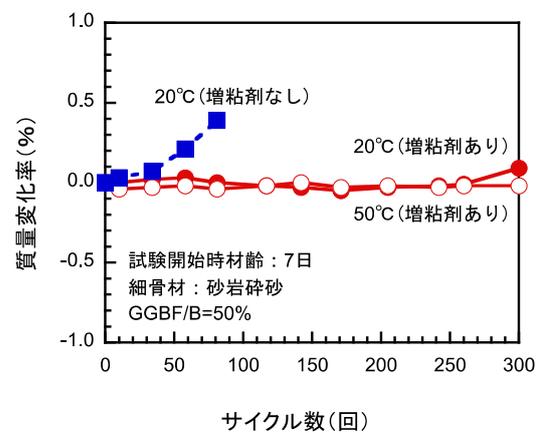
図一13 増粘剤が相対動弾性係数に与える影響
(GGBF/B=0%)



図一15 増粘剤が相対動弾性係数に与える影響
(GGBF/B=50%)



図一14 増粘剤が質量変化に与える影響
(GGBF/B=0%)



図一16 増粘剤が質量変化に与える影響
(GGBF/B=50%)

には、蒸気養生によって、凍結融解抵抗性が低下するが、結合材の一部に高炉スラグ微粉末を用いれば、蒸気養生によって、凍結融解抵抗性が改善される。

- (2) 蒸気養生によって凍結融解抵抗性が低下した場合でも、その後に水中養生を行えば、凍結融解抵抗性は改善される。
- (3) 増粘剤を用いることで、短い水中養生期間で高い凍結融解抵抗性を得ることができる。
- (4) 普通ポルトランドセメントと高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートでは、増粘剤を用いることで、相対動弾性係数の低下が抑えられても、スケーリングが大きくなる。これに対して、高炉スラグを微粉末として用いた場合には、増粘剤を用いることで、相対動弾性係数の低下が抑えられ、スケーリングも生じにくくなる。

謝辞

本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人：NEDO)によって実施した。ここに謝意を

表する。

参考文献

- 1) 竹田宣典, 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) 綾野克紀, 藤井隆史: 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関する研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 70, No. 4, pp. 417-427, 2014. 12
- 3) 杉田篤彦, 白川輝, 藤井隆史, 綾野克紀: 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与える結合材および養生の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No. 1, pp. 969-974, 2016. 6
- 4) 藤井隆史, 中溝翔, 細谷多慶, 綾野克紀: 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与えるブリーディングの影響, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第15巻, pp.101-104, 2015.10