

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結合材および養生の影響

杉田 篤彦^{*1}・白川 輝^{*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結合材の種類および養生方法が与える影響を検討した。結合材に早強ポルトランドセメントを用いた場合、普通ポルトランドセメントを用いた場合に比べて養生期間が短いと高い凍結融解抵抗性は得られない。しかし、長期間の水中養生を行えば、質量減少も少なく高い凍結融解抵抗性が得られる。また、早強ポルトランドセメントを用いた場合にも、高炉スラグ微粉末を結合材の一部に用いることで、4週間程度の水中養生で凍結融解抵抗性を確保できる。一方、蒸気養生後に気中養生を行った場合には、質量減少率が大きくなる場合があり、とくに高炉スラグ微粉末を用いた場合にその傾向が顕著になる。

キーワード：高炉スラグ細骨材、凍結融解抵抗性、スケーリング、耐久性指数、結合材の種類、養生方法

1. はじめに

凍結融解作用によってコンクリートには、内部ひび割れによる劣化と、コンクリート表面の剥離であるスケーリングが生じる。JIS A 1148: 2010 に規定される試験では、前者は相対動弾性係数の低下として、また、後者は質量減少で測定がされる。

工場で製造される PC 部材等の工場製品のかぶりは、現場打ちコンクリート構造物のかぶりに比べて一般的に小さい。したがって、とくに工場製品では、スケーリングによるかぶり部の損傷が、構造物の耐久性、部材性能および耐荷性能等に与える影響が大きくなる。プレテンション方式で製造されるプレキャストコンクリート部材は、プレストレス導入に必要な強度を早期に得るため、結合材に早強ポルトランドセメントが使用され、冬期には部材製造の生産性を確保するために蒸気養生が行われている。蒸気養生後は気中養生としていることが多く、十分な湿潤養生が行われていない場合がある。既往の研究¹⁾²⁾では、蒸気養生を行う場合や塩分が供給される環境において、凍結融解抵抗性が低下することも報告されている。一方で、細骨材すべてを高炉水砕スラグとする、または、高炉スラグ微粉末をコンクリートに質量比で結合材の 60%用いることで、蒸気養生を行い、塩水で凍結融解試験を行った場合にも、凍結融解抵抗性が向上することが報告されている²⁾³⁾。

本研究では、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を行い、凍結融解抵抗性の中でも、とくにスケーリングに及ぼす結合材の種類、混和剤、養生方法の影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

高炉スラグ細骨材は、製造される製鉄所により粒度やガラス化率が異なり、製鉄所が異なれば、その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も異なる。図-1 に示す 10×10×10mm のモルタル小片を質量パーセント濃度 10%の塩化ナトリウム水溶液に浸漬し、-20℃で 12 時間凍結させた後、12 時間で 30℃に融解させる工程を 1 サイクルとし⁴⁾、各々の製鉄所で製造された高炉スラグを用いて、モルタルの凍結融解抵抗性を確認した結果を図-2 に示す。このうち、本実験では、中間的な試験結果の得られる A 製鉄所の高炉スラグ細骨材（表乾密度：2.77g/cm³、吸水率：0.69%、粗粒率：2.14）を使用し、実験を行った。

細骨材には、比較のために硬質砂岩砕砂（表乾密度：2.64g/cm³、吸水率：2.00%、粗粒率：2.93）も用いた。粗骨材には、硬質砂岩碎石（最大寸法：20mm、表乾密度：2.75g/cm³、吸水率：0.56%）を用いた。結合材には、早強ポルトランドセメント（密度：3.13g/cm³、ブレン値：4,600cm²/g）、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を用いた。高炉スラグ微粉末は、普通ポルトランドセメントと混合して使用したものには、密度が 2.89g/cm³で、ブレン値が 4,150cm²/g のものを、早強ポルトランドセメントと混合して使用したものには、密度が 2.91g/cm³で、ブレン値が 6,000cm²/g のものを用いた。混和剤には、ポリカルボン酸系高性能減水剤、AE 剤、消泡剤および増粘剤を用いた。

*1 オリエンタル白石(株) 大阪支店施工・技術部 (正会員)

*2 岡山大学大学院 環境生命科学研究科資源循環学専攻 (学生会員)

*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 博士(工学) (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 早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートの配合

記号	W/B (%)	GGBF/B (%)	空気量 (設計値) (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					AE 剤 (B×%)	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		
						HPC	GGBF	SS	BFS									
HN	35	0	4.5	39.8	155	443	0	682	0	1,086	0.01	0.8	0.00	0.00	4.0	58.3		
H0T1			2.0	42.0				0	795		1,056	0.00	0.01	0.04	3.5	72.1		
H0T2									797				0.6		1.8	71.6		
H10		10		153	393	44	796		1,055	0.5	0.02		0.00	2.2	69.7			
H20		20			349	88	794		1,053	0.4				2.1	67.9			

HPC：早強ポルトランドセメント，GGBF：高炉スラグ微粉末，SS：硬質砂岩砕砂，BFS：高炉スラグ細骨材

表-2 普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの配合

記号	W/B (%)	GGBF/B (%)	空気量 (設計値) (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)				AE 剤 (B×%)	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/mm²)	
					W	B		BFS							G
						OPC	GGBF								
N0T	35	0	2.0	42.2	175	500	0	755	1,027	0.00	0.5	0.01	0.08	4.8	48.2
N15T		15		42.0		425	75	750						3.5	55.3
N30T		30		41.8		350	150	744						2.9	61.1
N45T		45		41.6		275	225	738						2.2	64.8
N60T		60		41.4		200	300	732						1.3	53.2
N0		0		42.2		500	0	755					0.00	1.4	65.3
N10		10		42.1		450	50	751						1.6	69.2
N20		20		41.9		400	100	748						1.3	71.0
N30		30		42.2		350	150	744						1.0	71.6
N40		40		41.7		300	200	740						1.0	72.0

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

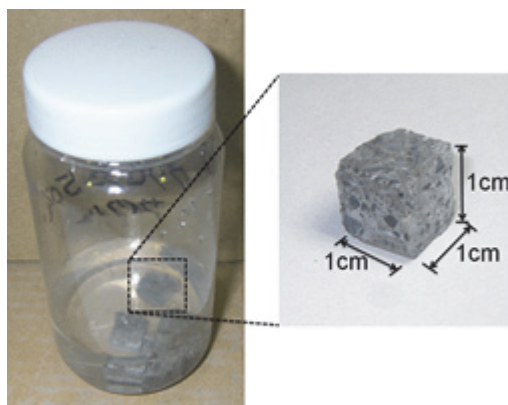


図-1 モルタル小片を用いた凍結融解試験

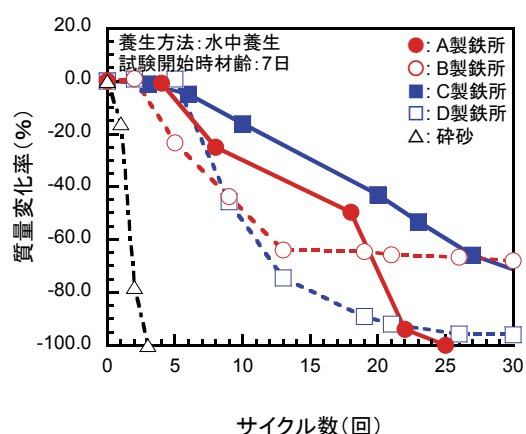


図-2 製鉄所の異なる高炉スラグ細骨材を用いたモルタルの凍結融解抵抗性

2.2 コンクリートの配合

結合材に早強ポルトランドセメントを用いた配合を表-1に示す。高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートには、質量比でセメントの10%および20%を高炉スラグ微粉末に置換した配合も使用した。結合材に普通ポルトランドセメントを用いた配合を表-2に示す。細骨材にはすべて高炉スラグ細骨材を用い、質量比で0%~60%の割合で高炉スラグ微粉末を混合した。いずれの結合材を用いた配合も、水結合材比は35%で一定とした。

2.3 養生方法

養生方法は、水中養生、蒸気養生後水中養生および蒸

気養生後気中養生の3種類で比較を行った。水中養生は、コンクリートを打込み後、型枠内にて常温で養生し、20±2時間で脱型後、20±2℃の水中で試験開始まで養生を行った。蒸気養生は、コンクリートを打込み後、前養生として20±2℃で6時間静置した後、15℃/時間で昇温させた。早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートは、最高温度50±2℃を5時間保持した後に、また、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートでは、最高温度60±2℃を3時間保持した後に、自然放冷で温度を下げた。蒸気養生後は、コンクリートの打込みから20±2時間で脱型し、20±2℃の水中もしくは、温度20±2℃、

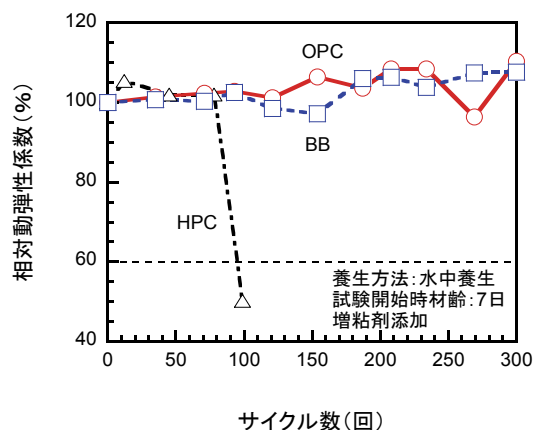


図-3 結合材の種類が相対動弾性係数に与える影響
(試験開始時材齢 7 日の場合)

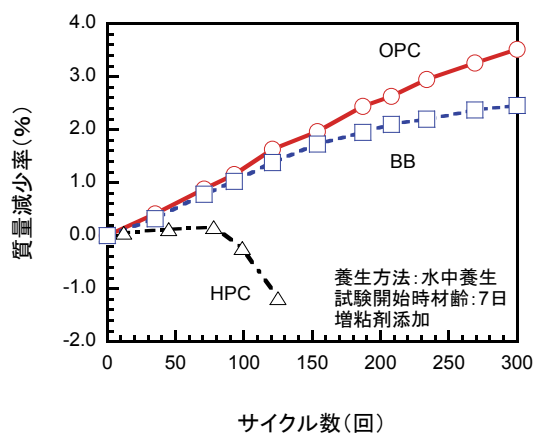


図-5 結合材の種類が相対動弾性係数に与える影響
(試験開始時材齢 7 日の場合)

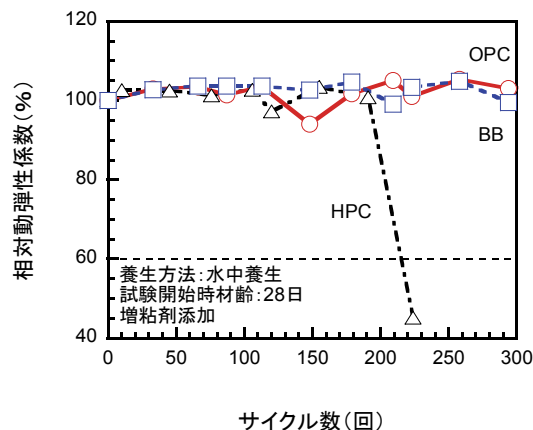


図-4 結合材の種類が相対動弾性係数に与える影響
(試験開始時材齢 7 日の場合)

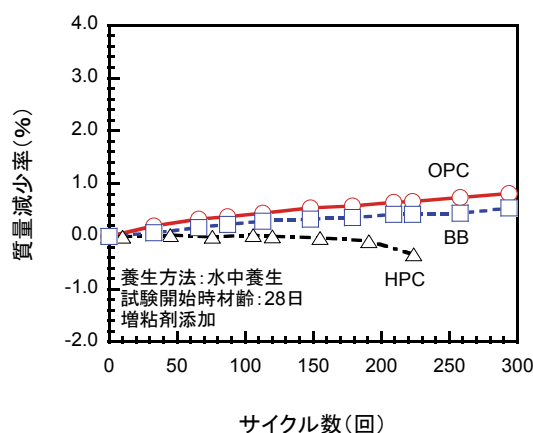


図-6 結合材の種類が相対動弾性係数に与える影響
(試験開始時材齢 28 日の場合)

相対湿度 60±5%の気中で養生を行った。

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。ただし、凍結水には、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た。供試体は、100×100×400mm の角柱供試体を用いた。試験開始時から 36 サイクルを超えない間隔で、たわみ振動の一次共鳴振動数と質量を測定し、相対動弾性係数と質量減少率を式(1)および式(2)により求めた。

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

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。

$$W_n = \frac{w_0 - w_n}{w_0} \times 100 \quad (2)$$

ここに、 W_n は、凍結融解 n サイクル後の質量減少率(%)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。

また、耐久性指数は式(3)により計算して求めた。

$$DF = \frac{P \times N}{M} \quad (3)$$

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。

3. 実験結果および考察

3.1 結合材の種類および養生期間の影響

図-3 は、結合材の種類が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影響を示したものである。試験は、材齢 7 日まで水中養生を行った後、直ちに開始した。図中の HPC は表-1 中の H0T1 に示す早強ポルトランドセメントを用いたもの、OPC は表-2 中の N0T に示す普通ポルトランドセメントを用いたもの、BB は表-2 中の N45T に示す普通ポルトランドセメントに高炉セメント B 種に相当するように、結合材の 45%に高炉スラグ微粉末を用いたものの試験結果をそれ

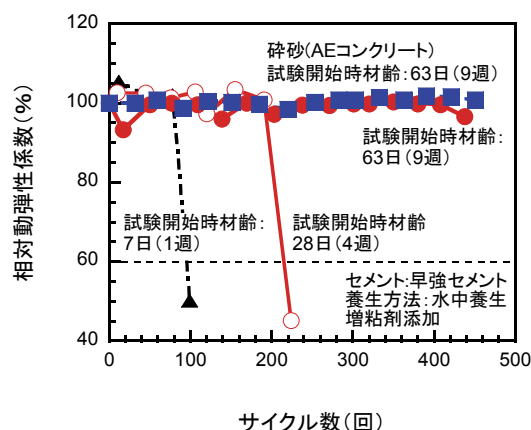


図-7 早強セメントを用いたコンクリートにおける養生期間の影響

それぞれ示している。なお、これらのコンクリートには、AE 剤は添加せず、高性能減水剤、消泡剤および増粘剤を用いている。OPC および BB を用いたコンクリートは、凍結融解 300 サイクルまで相対動弾性係数が 100%を保っている。一方、HPC を用いたコンクリートは、凍結融解試験 99 サイクルで相対動弾性係数が 60%を下回っている。図-4 は、図-3 に示したコンクリートを材齢 28 日まで水中養生を行った後に凍結融解試験を行った結果である。HPC を用いたコンクリートは、OPC および BB を用いたものに比べて、早いサイクルで相対動弾性係数が 60%を下回っているが、試験開始時材齢を 28 日まで水中養生を行ったものは、相対動弾性係数が 60%を下回るサイクル数が 224 サイクルになっている。

図-5 および図-6 は、それぞれ、図-3 および図-4 に示したコンクリートの質量減少率を示したものである。なお、図-5 に示す HPC を用いたコンクリートは、125 サイクルにおけるたわみ振動の一次共鳴振動数の計測ができなかったため、質量のみを測定している。質量減少率は、試験開始時の供試体質量に対する凍結作用により減少した質量の割合で、スケーリングによる表面の剥離等の質量の減少は正の値になり、供試体の表面や内部に生じたひび割れへの水分の浸入による質量の増加は負の値になる。試験開始時材齢が 7 日の OPC および BB を用いたコンクリートは、凍結融解試験 300 サイクル後における質量減少率は 3%程度である。一方、試験開始時材齢が 28 日の場合には、質量減少率は 1%未満と小さくなっている。これに対して、HPC を用いたコンクリートでは、相対動弾性係数は、他の結合材と比較して早期に低下しているが、質量減少率は極めて小さいことが分かる。

図-7 は、HPC を用いた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。比較のために、表-1 中 HN で示す普通砕砂を用いた AE コンクリートの結果も示している。高炉スラグ細骨材と

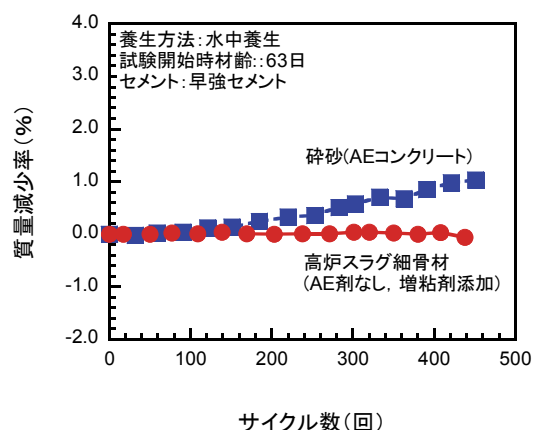


図-8 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートと普通砕砂を用いた AE コンクリートの質量減少率

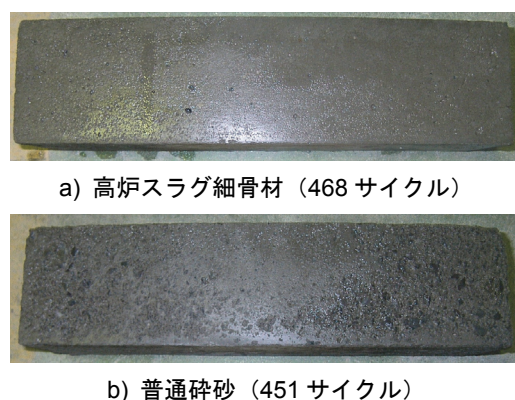


図-9 凍結融解試験後の供試体の表面状態

HPC を用いたコンクリートでも、材齢 63 日まで水中養生を行えば、300 サイクルを超えても相対動弾性係数の低下はない。HPC を用いたコンクリートで高い凍結融解抵抗性を得るためには、他の種類のセメントを用いた場合よりも、長い養生期間が必要となる。

図-8 は、図-7 に示した試験開始時材齢が 63 日のコンクリートの質量減少率を比較し示したものである。高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、普通砕砂を用いた AE コンクリートと比べて、質量減少率が小さいことが分かる。また、図-9 は、図-8 に示した凍結融解試験終了時の供試体を撮影したものである。普通砕砂の AE コンクリートでは、一部に粗骨材の露出が確認できるのに対し、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートでは、粗骨材の露出も見られず、スケーリングが少ないことが分かる。

以上のことから、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、AE 剤を用いた砕砂コンクリートよりもスケーリングを小さく抑えられること、また、早期に強度発現の可能な早強ポルトランドセメントを用いる場合ほど、十分な水中養生を行わなければ、期待する凍結融解抵抗性は得られないことがいえる。

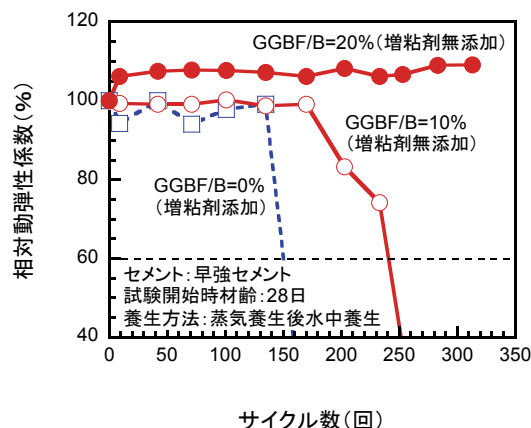


図-10 早強セメントを用いたコンクリートの相対動弾性係数に与える高炉スラグ微粉末の効果

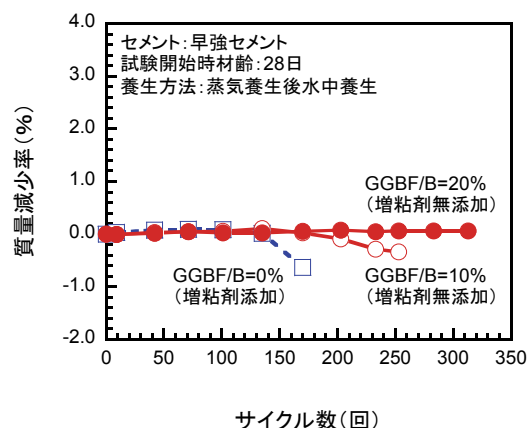


図-11 早強セメントを用いたコンクリートの質量減少率に与える高炉スラグ微粉末の効果

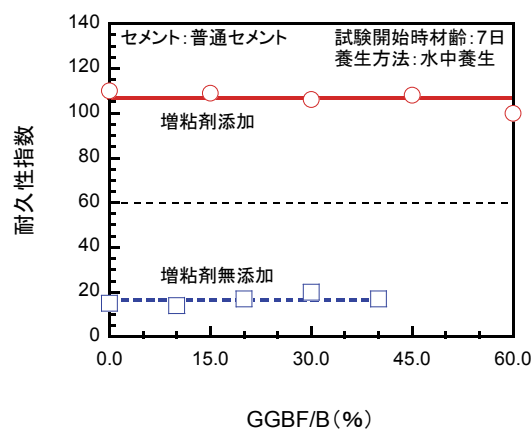


図-12 増粘剤が耐久性指数に与える影響（試験開始時材齢 7 日の場合）

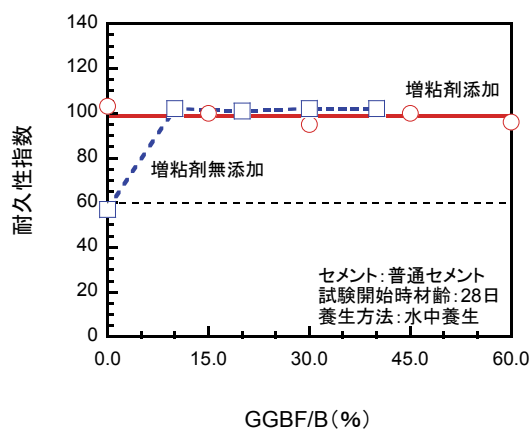


図-13 増粘剤が耐久性指数に与える影響（試験開始時材齢 28 日の場合）

3.2 高炉スラグ微粉末の影響

図-10 は、早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に高炉スラグ微粉末が与える影響を示したものである。これらは、表-1 中の H0T2, H10 および H20 で示される配合もので、蒸気養生を行った後、材齢 28 日まで水中養生を行った後に試験を開始している。高炉スラグ微粉末を質量比で結合材の 20%用いることで、300 サイクルまで相対動弾性係数が低下していないことが分かる。高炉スラグ微粉末を混合することで、早強ポルトランドセメントを用いても、試験開始時材齢 28 日で高い凍結融解抵抗性を得ることができる。また、図-11 は、図-10 に示すコンクリートの質量減少率を示したものである。高炉スラグ微粉末を混合しても、質量減少率は小さいことが分かる。

3.3 増粘剤の影響

図-12 は、増粘剤がコンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響を示したものである。図中に示される結果は、表-2 に示される配合のものである。材齢 7 日まで水中養生を行った後に、試験を開始した場合では、増粘剤を添加することで、高炉スラグ微粉末の混合割合によらず、

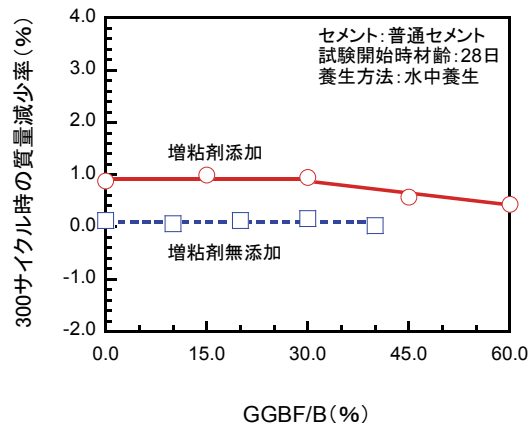


図-14 増粘剤が質量減少率に与える影響（試験開始時材齢 28 日の場合）

耐久性指数は 100 程度に向上している。しかし、増粘剤を添加していない場合には、高炉スラグ微粉末の混合割合を高くしても耐久性指数は低い。一方、図-13 は、材齢 28 日まで水中養生を行った後に試験を開始した結果を示したものである。材齢 28 日まで養生を行えば、増粘剤を使用しなくても、十分な凍結融解抵抗性が得られている。図-14 は、図-13 の試験を行ったコンクリート

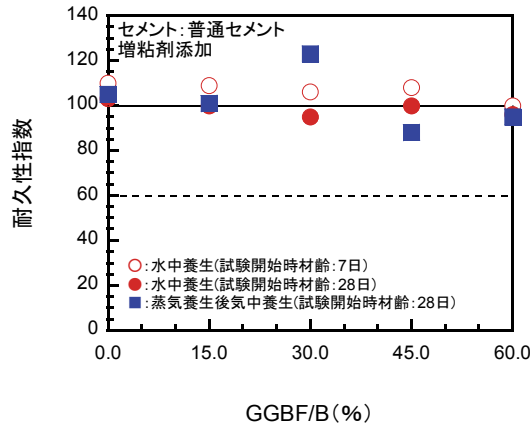


図-15 養生方法が耐久性指数に与える影響

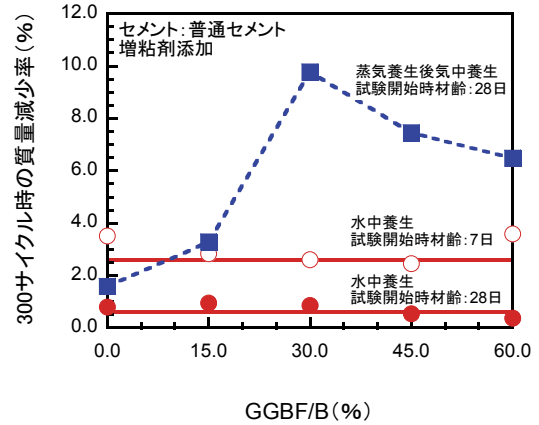


図-16 養生方法が質量減少率に与える影響

の凍結融解試験 300 サイクル時における質量減少率を示したものである。増粘剤を添加しないコンクリートでは、質量減少率はほぼ 0%であるが、増粘剤を添加したコンクリートでは、質量減少率が 1%程度と多くなっている。増粘剤を用いることで、若材齢でも高い耐久性指数を得ることができるようになるが、スケーリングは多くなる傾向となる。

3.4 養生方法の影響

図-15 は、養生方法が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影響を耐久性指数で示したものである。これらは、表-2 中の N0T, N15T, N30T, N45T および N60T の配合のものである。この図より、いずれの養生方法および高炉スラグ微粉末量であっても耐久性指数は、ほぼ 100 であることが分かる。一方、図-16 は、図-15 に示したコンクリートの凍結融解 300 サイクル終了後における質量減少率を示したものである。材齢 28 日まで水中養生を行ったものの質量減少率は、ほぼ 0%であるが、蒸気養生後気中養生のみを行ったものは、質量減少率は大きくなり、とくに高炉スラグ微粉末の混合割合が多いものほど、その傾向は顕著である。蒸気養生によって早期に強度発現を得て高い耐久性指数の得られるコンクリートであっても、十分な水中養生が行われていないと、コンクリート表面で水和反応に必要な水分が不足し、緻密な組織が形成されないため、スケーリングによる質量損失が大きくなると考えられる。

4. まとめ

以下に本論文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に早強ポルトランドセメントを用いると、高い耐久性指数を得るためには、普通ポルトランドセメントを用いる場合よりも長い水中養生期間を必要とする。ただし、スケーリングは水中養生期間に関係なく小さくなる。

- (2) 早強ポルトランドセメントを用いても、高炉スラグ微粉末を併用することで、試験開始時材齢が 28 日の場合でも、高い凍結融解抵抗性を得ることができる。
- (3) 増粘剤を用いれば、7 日の若材齢で試験を開始しても、高い耐久性指数を得ることができる。ただし、耐久性指数が改善されても、スケーリングは大きくなる。
- (4) 蒸気養生により早期に強度発現を行えば、その後の養生が気中養生であっても、高い耐久性指数は得られる。しかし、スケーリングは大きくなり、とくに、高炉スラグ微粉末が多く含まれている場合には、その傾向は顕著である。

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
- 2) 藤井隆史ほか：コンクリートの耐久性に及ぼす高炉スラグ細骨材の影響，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 13 巻，pp.1-6, 2013.11
- 3) 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
- 4) 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