

## 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

オリエンタル白石(株) 正会員 工修 ○俵 道和  
 オリエンタル白石(株) 正会員 博(工) 杉田 篤彦  
 オリエンタル白石(株) 正会員 博(環境) 二井谷 教治

Abstract : In this study, with reference to the concrete using 100% blast-furnace slag fine aggregate, we examined the influence of cement type, admixture, and curing conditions on freeze-thaw resistance. As a result, regarding the cement type, high-early-strength portland cement showed a little higher freeze-thaw resistance than ordinary portland cement. As for the curing conditions, it was verified that the freeze-thaw resistance became higher with the longer days of curing in water after steam curing when the maximum temperature of the steam curing was set low. Furthermore, it was observed that the use of thickener had a very positive effect on the freeze-thaw resistance.

Key words : Blast-furnace slag fine aggregate, Freezing and thawing resistance, Curing, Thickener

### 1. はじめに

近年、凍結防止剤が使用される寒冷地域において凍結融解作用によるコンクリート床版など補修や取替えが必要な構造物が増加しており、塩分が供給される環境では凍結融解作用による劣化の進行が促進されることが報告されている<sup>1)</sup>。道路橋床版の取替工事において、工事期間の短縮が可能なプレキャストコンクリート床版の需要が拡大しているが、使用されるコンクリートに関して塩分が供給される環境において、より高い凍結融解抵抗性が求められている。

高炉スラグ細骨材（以下、BFS）のコンクリート用骨材への利用については様々な研究機関で研究が行われており、プレストレストコンクリート（以下、PC）を想定した水結合材比30～45%程度でBFSを25～50%程度置換したコンクリートについては、天然細骨材のみを使用したコンクリートと同等のフレッシュ性状を示し、乾燥収縮および自己収縮が低減し、耐久性状として凍結融解抵抗性および中性化抵抗性も増加することが確認されている<sup>2)</sup>。さらに、BFSを用いたコンクリートは、骨材界面に析出する水酸化カルシウム量が少なくなるために凍結融解抵抗性が向上すること、BFSの使用量を多くするほど凍結融解抵抗性が向上することが報告されている<sup>3)</sup>。しかしながら、BFSをPC部材へ適用した際の凍結融解抵抗性については、結合材種類、増粘剤の有無、AE剤の添加方法、蒸気養生の最高温度および蒸気養生後の後養生などの条件によって変化すると考えられる。

そこで本稿では、PC部材を想定した水結合材比30%または35%の配合でBFSをコンクリート用細骨材として100%使用した配合について、使用材料および養生条件を変化させた際の凍結融解抵抗性に与える影響について検討を行った。さらに、凍結融解抵抗性が向上すると判断された条件を用いて、PC部材を製造する際に使用する実機ミキサで製造したコンクリートについて凍結融解抵抗性を評価した結果を報告する。

### 2. 試験概要

#### 2.1 使用材料

高炉スラグ細骨材は、JIS A 5011-1 コンクリート用スラグ骨材  
 第1部：高炉スラグ細骨材に適合し、倉敷の製鉄所で製造され

表-1 細骨材の物性値

	BFS	砕砂
表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.77	2.63
吸水率 (%)	0.22	0.84
粗粒率	2.11	2.85

表-2 コンクリートの配合

配合 番号	結合材 種類	細骨材 種類	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
						W	C	S	G
①	普通	砕砂	30.0	4.5	42.0	153	510	708	985
②	早強	砕砂	35.0	4.5	42.0	153	437	732	1018
③	普通	BFS	30.0	4.5	42.0	153	510	745	985
④	早強	BFS	35.0	4.5	42.0	153	437	771	1018

表-3 試験水準

試験 水準	配合 番号	AE 剤の 添加方法	増粘剤 の有無	蒸気養生の 最高温度 (°C)	蒸気養生後の 水中養生日数 (日)	SP/C (%)	AE/C※ (%)	消泡剤/C※ (%)	増粘 剤/C (%)	空気 量 (%)	圧縮 強度 (MPa)
A	①	先添加	無し	50	7	0.60	0.5	-	-	5.0	75.8
B	②	先添加	無し	50	7	0.55	0.5	-	-	4.4	72.9
C	③	先添加	無し	50	7	0.95	4.0	2.0	-	4.2	90.5
D	③	後添加	無し	50	7	1.00	4.0	2.0	-	4.0	83.1
E	④	後添加	無し	40	7	0.80	4.0	2.0	-	4.7	80.5
F	④	後添加	無し	50	0	0.80	4.0	2.0	-	4.7	71.2
G	④	後添加	無し	50	3						77.8
H	④	後添加	無し	50	7						84.8
I	④	後添加	有り	50	0	0.70	3.5	2.0	0.04	4.6	71.7
J	④	後添加	有り	50	3						76.3
K	④	後添加	有り	50	7						82.0

※100倍希釈液

た BFS を使用した。砕砂は、茨城県桜川市大泉産の硬質砂岩砕砂を使用した。表-1 に細骨材の物性値を示す。結合材は、早強ポルトランドセメント（密度：3.13g/cm<sup>3</sup>）および普通ポルトランドセメント（密度：3.16 g/cm<sup>3</sup>）を使用した。粗骨材は、茨城県桜川市大泉産の硬質砂岩砕石（密度：2.65g/cm<sup>3</sup>）を使用した。混和剤は、ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤，AE 剤および消泡剤を使用した。増粘剤として、液体タイプの高機能特殊増粘剤（アルキルアリルスルホン酸塩，アルキルアンモニウム塩）を使用した。

## 2.2 配合

表-2 にコンクリートの配合を示す。コンクリートの水結合材比は、早強ポルトランドセメントを使用した場合は一般的なプレテンション方式の PC 部材に用いられる 35%とし、普通ポルトランドセメントを使用した場合は、材齢 18 時間後のプレストレス導入強度を確保するため、30%に設定した。高性能 AE 減水剤の使用量は、スランプが 12±2.5cm になるように調整した。砕砂を用いた場合は、AE 剤のみを使用し空気量を 4.5±1.5%に調整した。BFS を用いた配合は、消泡剤と AE 剤の両方を使用し空気量を 4.5±1.5%に調整した。

## 2.3 試験水準

BFSを用いたコンクリートについて、結合材種類，増粘剤の有無，AE剤の添加方法，蒸気養生の最高温度および蒸気養生後の後養生が凍結融解抵抗性に及ぼす影響について評価を行った。表-3 に試験水準と練混ぜ直後の空気量および凍結融解試験体と同じ条件で養生を行った材齢28日の圧縮強度を示す。結合材種類については、一般的なプレキャスト製品に使用されている早強ポルトランドセメント（以下，HPC）と普通ポルトランドセメント（以下，OPC）の2種類について検討を行った。BFSを用いたコンクリートはブリーディングが生じ易くなることが知られており，ブリーディング量が増加すると凍結融解抵抗性が低下することが報告されている<sup>4)</sup>。本稿では，増粘剤を使用することでブリーディングを抑制し，フレッシュ性状の改善を行うとともに凍結融解抵抗性に与える影響について検討

を行った。AE剤の添加方法としては、練混ぜ時のAE剤の添加順序によってコンクリート中に生成される気泡が変化することを想定し、AE剤の投入順序が凍結融解抵抗性に与える影響を検討した。AE剤を先添加した場合と後添加した場合のコンクリートの練混ぜ手順を図-1に示す。コンクリートは、強制練りパン型ミキサを用いて製造した。蒸気養生の影響については、蒸気養生時の最高温度を40℃と50℃とした場合について検討を行った。蒸気養生の温度履歴を図-2に示す。後養生の影響については、蒸気養生後の後養生として水中養生の日数を0日、3日および7日と変化させた場合について検討を行った。水中養生終了後は、材齢12日まで温度20℃、湿度60%の恒温恒湿室で保管し、材齢13日で24時間水中養生を行った後に材齢14日から凍結融解試験を開始した。

2.4 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、本試験では、塩害との複合劣化を想定し、試験体を浸漬する水には、塩化ナトリウム水溶液を用いた<sup>1)</sup>。塩化ナトリウム水溶液の濃度は、JSCE-G 572-2003「浸漬によるコンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数試験法 (案)」を参考に質量パーセント濃度で10%とし、試験体の浸漬に用いた塩水は測定毎に全量入れ替えた。試験体は、100×100×400mmの角柱試験体を用いた。試験開始時から35サイクル間隔で、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変化率を式 (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サイクルにおける試験体質量 (g) である。

3. 試験結果および考察

3.1 結合材種類が凍結融解抵抗性に与える影響

結合材種類が凍結融解抵抗性に与える影響について、BFSを用いた配合として、試験水準DとHを比較した。BFSを用いた場合の結合材種類が相対動弾性係数に与える影響を図-3に示す。細骨材としてBFSを用いて、結合材にHPCを用いた場合は、約300サイクルで相対動弾性係数が60%程度を示している。一方、OPCを用いた場合は、約300サイクルで相対動弾性係数が90%程度であり、BFSを用いた場合は、HPCよりOPCを用いた方が若干ではあるが高い凍結融解抵抗性が確認された。

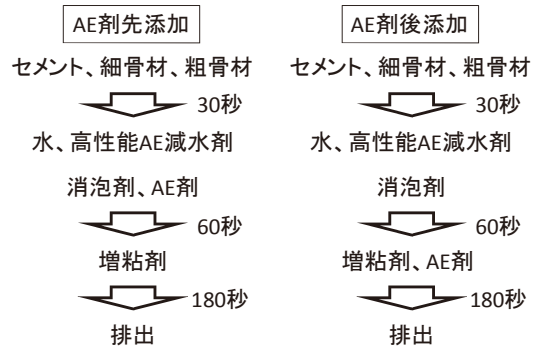


図-1 コンクリートの練混ぜ手順

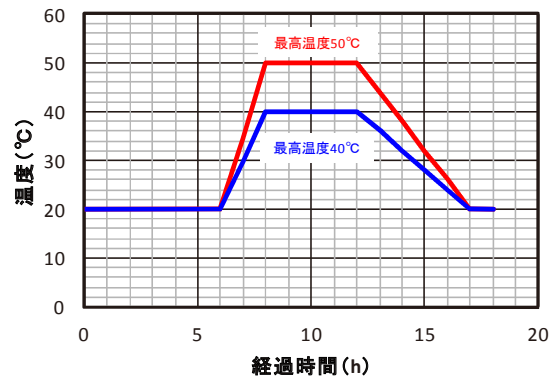


図-2 蒸気養生の温度履歴

写真-1に結合材種類による300サイクル時点の試験体の外観性状を示す。いずれの試験体についても、質量変化率は減少することなくわずかに増加傾向であったが、表面のスケーリングは結合材の種類にかかわらず砕砂よりBFSを用いた場合が小さくなる傾向が確認された。BFSを使用することで、骨材とペーストの界面が強固になりスケーリングが抑制されたと考えられる。

### 3.2 AE剤の添加方法が凍結融解抵抗性に与える影響

BFSを使用した場合に、フレッシュコンクリートに巻き込まれるエントラップトエアが増加することが知られている。本試験では、AE剤を投入する順序を変化させた場合の凍結融解抵抗性に与える影響を評価した。本稿では、フレッシュコンクリートの空気量を調整する際に、消泡剤のみを添加して空気量を2.0%以下に調整し、さらにAE剤を添加して空気量を4.5%に調整するように消泡剤およびAE剤の添加量を決定した。AE剤を後添加した場合と先添加した場合の凍結融解抵抗性に与える影響について、試験水準CとDを比較した。フレッシュコンクリートの空気量は、AE剤を先添加した場合は4.2%であり、後添加した場合は4.0%であり、空気量は同程度の値を示している。AE剤の添加方法が相対動弾性係数に与える影響を図-4に示す。AE剤の添加方法が相対動弾性係数に与える影響について大きな違いは確認されなかった。

### 3.3 蒸気養生の最高温度が凍結融解抵抗性に与える影響

蒸気養生の最高温度が凍結融解抵抗性に与える影響について、試験水準EとHを比較した。蒸気養生を模擬した温度履歴の最高温度は40℃と50℃の2種類に設定した。蒸気養生の最高温度が相対動弾性係数に与える影響を図-5に示す。本稿では、蒸気養生温度の最高温度が50℃の場合は、250サイクルから相対動弾性係数の低下が確認されたが、蒸気養生温度の最高温度が40℃の場合は、600サイクルまで相対動弾性係数の低下は確認されなかった。

### 3.4 後養生および増粘剤の有無が凍結融解抵抗性に与える影響

蒸気養生後の後養生および増粘剤の有無が凍結

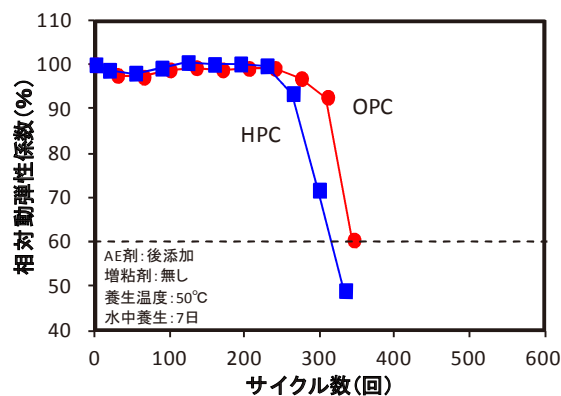


図-3 結合材種類が相対動弾性係数に与える影響

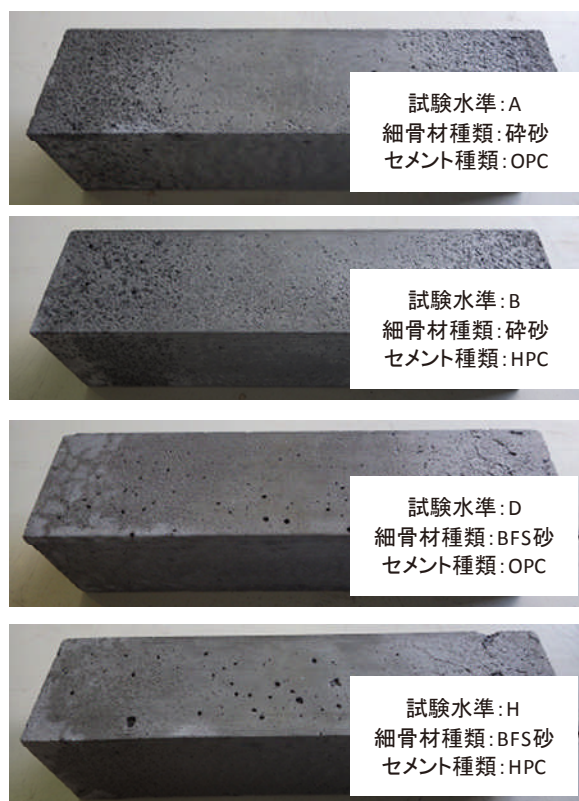


写真-1 300サイクル時の試験体の外観

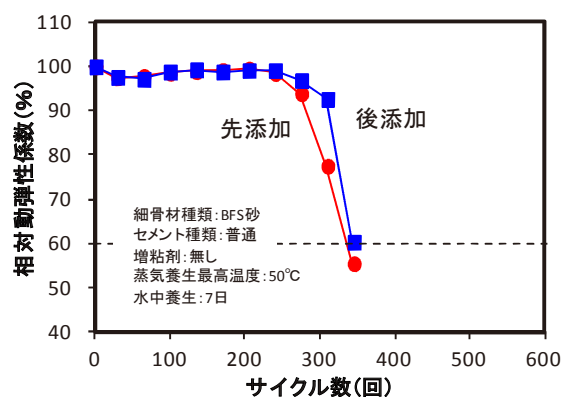


図-4 AE剤の添加方法が相対動弾性係数に与える影響



融解抵抗性に与える影響について、試験水準 F, G, H (増粘剤無し) と I, J, K (増粘剤有り) を比較した。蒸気養生後の後養生として、水中養生日数を 0 日, 3 日および 7 日と変化させた際の影響について検討を行った。水中養生日数および増粘剤の有無が相対動弾性係数に与える影響を図-6 に示し、質量変化率に与える影響を図-7 に示す。水中養生日数を変化させた場合は、水中養生日数を長くするほど相対動弾性係数が低下する凍結融解サイクルが長くなり、凍結融解抵抗性が向上することが確認された。また、増粘剤を使用した場合は、増粘剤を使用しない場合より相対動弾性係数が低下する凍結融解サイクルが 2 倍程度長くなることを確認された。以上より、BFS を用いたコンクリートは、後養生としての水中養生の重要性が確認された。さらに、増粘剤を適用することによる凍結融解抵抗性の向上効果が確認された。質量変化率と相対動弾性の関係については、質量変化率が増加するにつれて相対動弾性係数が小さくなる傾向が確認された。この要因は、凍結融解サイクルが進展するに従ってスケーリングが大きくなるよりも微細なひび割れが進展しコンクリートの吸水量が大きくなり、凍結融解抵抗性が低下したと考えられる。

#### 4. 実機ミキサを用いて製造したコンクリートの凍結融解抵抗性

BFS を用いたコンクリートについて、結合材の種類は普通ポルトランドセメントを用いること、養生条件として蒸気養生の最高温度は 50℃より 40℃に設定し蒸気養生後の後養生として水中養生を 7 日程度実施すること、混和剤として増粘剤を適用することなどを条件とすることで、凍結融解抵抗性について良好な結果が得られることが確認された。そこで、凍結融解抵抗性が向上すると判断された条件を用いて、実際の PC 部材を製造する際に使用する実機ミキサで製造したコンクリートについて凍結融解抵抗性を評価した。表-4 に実機ミキサを用いて製造したコンクリートの配合を示し、表-5 に実機ミキサを用いて製造したコンクリートの試験水準を示す。試験水準 L と M について、実機ミキサ (公称容量 1.2m<sup>3</sup>) を用いてコンクリートを製造し試験体を採集した。実機ミキサを用いて製造したコンクリートの相対動弾性係数を図-8 に示す。その結果、BSF 砂を用いた配合は、試験条件 M を採用することで、空気量が 3.5%と低い値であっても高い凍結融解抵抗性を確保できることが確認された。実機ミキサで製造した砕砂および BFS のコンクリートについて、どちらも良好な凍結融解抵抗性を示したが、中性化抵抗性や塩分浸透抵抗

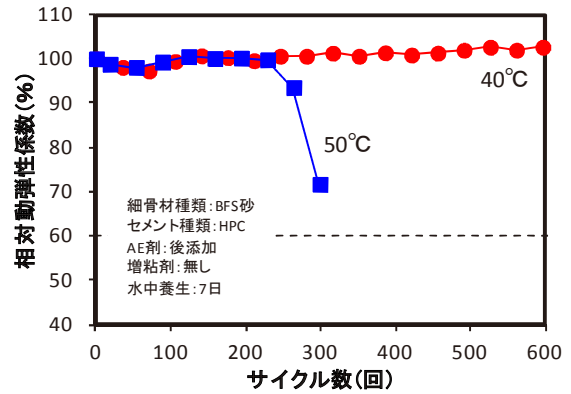


図-5 蒸気養生の最高温度が相対動弾性係数に与える影響

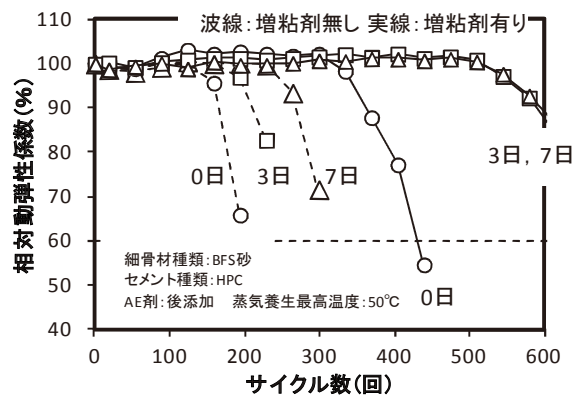


図-6 水中養生日数および増粘剤の有無が相対動弾性係数に与える影響

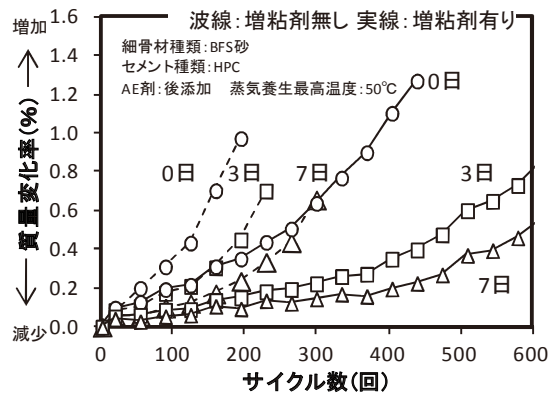


図-7 水中養生日数および増粘剤の有無が質量変化率に与える影響

表-4 実機ミキサを用いて製造したコンクリートの配合

配合 番号	結合材 種類	細骨材 種類	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
						W	C	S	G
⑤	早強	砕砂	35.0	4.5	41.0	155	443	718	1030
⑥	普通	BFS	30.0	4.5	41.0	155	517	725	995

表-5 実機ミキサを用いて製造したコンクリートの試験水準

試験 水準	配合 番号	AE 剤の 添加方法	増粘剤 の有無	蒸気養生の 最高温度 (°C)	蒸気養生後の 水中養生日数 (日)	SP/C (%)	AE/C※ (%)	消泡剤/C※ (%)	増粘 剤/C (%)	空気 量 (%)	圧縮 強度 (MPa)
L	⑤	後添加	無し	40	7	0.60	0.5	-	-	5.0	77.3
M	⑥	後添加	有り	40	7	0.75	7.0	4.0	0.04	3.5	91.5

※100倍希釈液

性については BFS を用いた配合が向上するため<sup>5)</sup>、  
 厳しい環境におかれる構造物については、BFS を  
 用いたコンクリートが優れた耐久性を示すと考え  
 られる。

5. まとめ

高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの凍  
 結融解抵抗性について以下の知見が得られた。

- (1) 水結合材比が 35%で早強ポルトランドセメ  
 ントを用いた配合より水セメント比が 30%  
 で普通ポルトランドセメントを用いた配合の  
 方が凍結融解抵抗性が多少高くなる効果が確認された。
- (2) 結合材の種類にかかわらず、砕砂より BFS の方がスケーリングを抑制する効果が確認された。
- (3) 蒸気養生の最高温度は、50°Cより 40°Cに設定することで高い凍結融解抵抗性が確認された。
- (4) 後養生として、蒸気養生後の水中養生を 3~7 日間行うことで、後養生を行わない場合よりも高  
 い凍結融解抵抗性が確認された。
- (5) 増粘剤を使用することで凍結融解抵抗性を向上させる効果が期待できる。

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)の一部として実施した。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  
 リート工学論文集, Vol.23, No.2, pp.427-432, 2009.6
- 2) 齊藤和秀, 木之下光男, 伊原俊樹, 吉澤千秋: 高炉スラグ細骨材を使用した耐久性向上コンクリ  
 ートの性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.139-144, 2009.
- 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) 堤嵩示, 吉野公, 黒田保, 吉澤千秋: 高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの凍結融解抵抗  
 性に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.38, No.1, pp.69-74, 2016.
- 5) 藤井隆史, 細谷多慶, 杉田篤彦, 綾野克紀: 高炉スラグを用いたコンクリートの中酸化, 塩化物  
 イオン浸透性および時間依存性変形に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1,  
 pp.637-642, 2015.

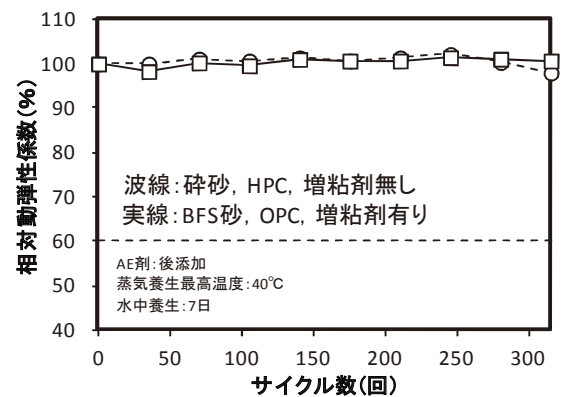


図-8 実機ミキサを用いて製造したコンクリ  
 ートの相対動弾性係数