

高炉スラグ微粉末を混入した軽量コンクリートの 遮塩性および耐凍害性に関する基礎研究

技術本部	技術研究所	川畑智亮
技術本部	技術研究所	鈴木雅博
技術本部	技術部	諸橋克敏

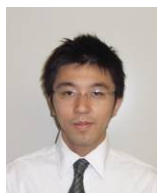
概要：寒冷地の内陸部や沿岸部に建設された鋼道路橋の鉄筋コンクリート床版では、凍害および塩害、疲労等による複合劣化の損傷事例が多く報告されている。その際、床版の軽量化による鋼主桁および下部工への応力負担軽減が求められることも少なくなく、その対策の1つとして耐塩害性、耐凍害性を高めた高強度軽量コンクリートによる床版の軽量化が考えられる。ここでは、工場製品のプレキャスト PC 床版を対象に、高炉スラグ微粉末を混入した高強度繊維補強軽量コンクリートにおいて、高炉スラグ無混入の軽量コンクリートと普通コンクリートとの比較により耐塩害性、耐凍害性を検討した。塩水凍結融解試験と塩水浸せき試験を実施した結果、塩水凍結融解 300 サイクルでの相対動弾性係数におおむね低下はなく、高炉スラグの混入は軽量コンクリートにおいても遮塩性に効果的であることが認められた。

Key Words：高炉スラグ微粉末、軽量コンクリート、凍結融解、塩水浸せき、プレキャスト、床版

1. はじめに

高度経済成長期に寒冷地の内陸部や沿岸部に建設された鋼道路橋の鉄筋コンクリート床版（RC 床版）では、凍害および凍結防止剤の大量散布に伴う塩害、活荷重や交通量の増大による疲労等、複合劣化による損傷事例が多く報告されている。このような RC 床版の抜本的な対策として、近年、高品質高耐久な床版への取替え需要が高まっている。一方で、活荷重の増加にともなう鋼主桁および下部工への負担軽減のため、床版の取替え時において床版の軽量化が求められるケースも少なくない。そこで、軽量コンクリート床版とすることが有効な手段として考えられるが、軽量化コンクリートは一般的に耐凍害性が低いことが知られており¹⁾、寒冷地の内陸部や沿岸部の耐久性では耐塩害性も重要となる。このうち耐凍害性に関しては、ポリビニールアルコール繊維（PVA）を混入することが軽量コンクリートにおいても効果的であることは、既報で明らかにしてきた²⁾。しかし遮塩性に関しては、高炉スラグ微粉末の混入が一般的には優れていることが知られているが³⁾、軽量コンクリートでの事例はほとんど無いのが現状である。

こうした背景から、工場製品のプレキャスト PC 床版を対象に、リサイクル材料の1つである高炉スラグ微粉末を混入した高強度繊維補強軽量コンクリートに関して塩分浸せき試験および凍結融解試験を実施し、耐塩害性、耐凍害性を検討した。



川畑智亮



鈴木雅博



諸橋克敏

2. 試験概要

2.1 コンクリートの仕様

コンクリートのフレッシュ性状の仕様はスランプ $12 \pm 2.5\text{cm}$, 空気量 $5.0 \pm 1.5\%$ とした。硬化コンクリートの仕様は、設計基準強度は 50N/mm^2 , ヤング係数は 22kN/mm^2 以上とした。

2.2 使用材料および配合

使用材料を表-1に、示方配合を表-2に示す。軽量粗骨材の密度は式(1)を用いて算出した値とした。

入荷状態の軽量骨材密度 = 絶乾状態密度 $\times (1 + \text{製品含水率})$ (1)

配合 BFS-GL では、早強セメントの 50mass%をブレン値 $6000\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末で置換し、骨材には高性能軽量骨材を使用した。BFS-GL の比較配合として、高炉スラグ微粉末無混入の軽量コンクリートと普通コンクリートを、それぞれ配合 H-GL, 配合 H とした。軽量コンクリートの単位容積質量は 1.9t/m^3 以下となるように単位細骨材量と単位粗骨材量を決定した。H-GL の配合は単位粗骨材量が同一になるよう決定したが、凍結融解試験時ではコンクリートの単位容積質量が同一になるよう決定した。そのため、凍結融解試験時の材料のロットによる違いや、変更後の配合は表中の () 値で示す。なお、本配合には、骨材修正係数の加算は行っていない。

表-1 使用材料

種類	材料	銘柄, 仕様等	記号
結合材	早強ポルトランドセメント	密度 3.14g/cm^3	H
	高炉スラグ微粉末	比表面積 $5900\text{cm}^2/\text{g}$ ($6200\text{cm}^2/\text{g}$), 密度 2.91g/cm^3	BFS
細骨材	石灰石砕砂 (一関産)	表乾密度 2.66g/cm^3 , 吸水率 1.19% (1.22%), F.M.2.65	S
粗骨材	高性能軽量骨材	絶乾密度 1.27g/cm^3 , 製品密度 1.29g/cm^3 , 製品含水率 1.5%, 骨材修正係数 3.0 (絶乾密度 1.33g/cm^3 , 製品密度 1.34g/cm^3 , 製品含水率 1.0%, 骨材修正係数 2.3)	GL
	砕 石	表乾密度 2.92g/cm^3 , 吸水率 0.88%, F.M.6.55	G
混和剤	高性能減水剤	マイティ 21LV-S	SP
	A E 剤	ヴィンソル	AE
繊維	PVA (ポリビニールアルコール)	繊維径 $100\mu\text{m}$, 繊維長 12mm, 密度 1.3g/cm^3	PVA

表-2 示方配合

配合	W/B	s/a	Air	単位量 (kg/m³)							混和剤		密度 (kg/m³)
	(%)	(%)	(%)	W	B		細骨材	粗骨材		PVA	SP	AE	
					H	BFS	S	GL(気)	G		(B×%)	(B×%)	
BFS-GL	32	48.6 (47.0)	5.0	155	242	242	819 (784)	419 (454)	—	1.95	0.50 (0.80)	0.05 (0.09)	1880
H-GL	32	49.1 (45.7)	5.0	155	484	—	835 (768)	419 (471)	—	1.95	0.70 (0.80)	0.05 (0.09)	1896 (1880)
H	36	45.9	5.0	155	431	—	803	—	1040	—	0.50	0.01	2428

2.3 練混ぜ方法

ミキサは2軸強制練り試験練りミキサを使用し、図-1の方法で練混ぜた。

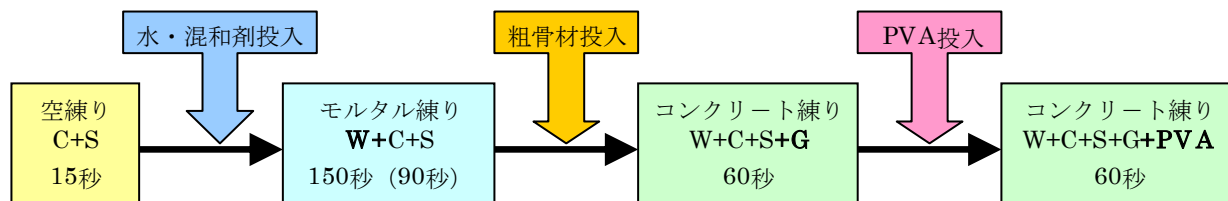


図-1 コンクリートの練混ぜ方法

2.4 養生方法

蒸気養生の温度設定を図-2に示す。蒸気養生供試体の養生は4時間の前養生後に1時間あたり10℃の上昇で50℃まで上昇し、5時間50℃を保持し、その後1時間あたり10℃下降とした。蒸気養生後、HおよびH-GLは気乾養生とし、BFS-GLは湿らせた養生マットで覆う湿潤養生を材齢4日（凍結融解試験時は7日）まで行い、その後気乾養生とした。

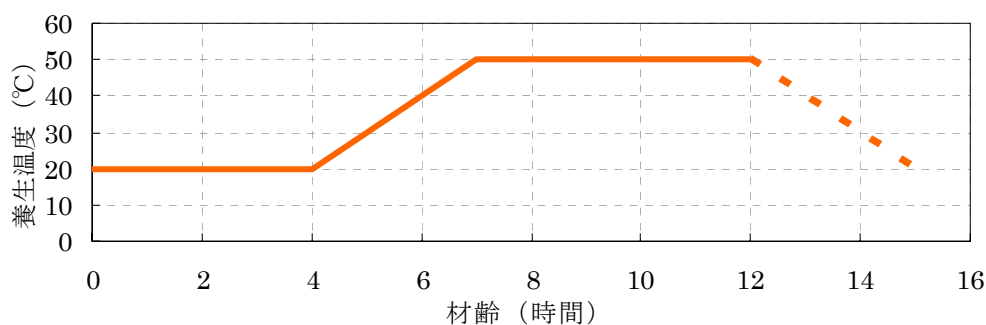


図-2 蒸気養生設定

2.5 供試体一覧

供試体一覧を表-3に示す。遮塩性はJSCE-G 572-2007（塩水浸せき試験）に準拠して行い、全塩化物イオン分布は電子線マイクロアナライザ（EPMA）法により測定した。凍結融解の試験方法は、JIS A 1148 の水中凍結融解試験（A法）に準拠し、A法での試験と真水の代わりに3%massのNaCl溶液を用いた塩水凍結融解試験の2種類を実施した。空気量の規格値が $5 \pm 1.5\%$ の範囲とするため、凍結融解試験供試体はAE剤にて空気量を調整し、危険側である空気量の下限値を目標に製作し、試験を実施した。

表-3 供試体一覧

配合	試験名	目標空気量 (%)	試験開始材齢 (日)
H	塩水浸せき試験	5.0	14
H・GL	塩水凍結融解試験	3.5	
	塩水浸せき試験	5.0	
BFS・GL	標準凍結融解試験	3.5	
	塩水凍結融解試験		
	塩水浸せき試験	5.0	

3. 試験結果

3.1 フレッシュ性状

フレッシュコンクリートの性状を表-4、表-5に示す。スランブはJIS A 1101に、空気量はJIS A 1128に準拠して実施した。軽量骨材は予め骨材修正係数を測定し、空気量の算出に使用した。

表-4 フレッシュ性状（塩水浸せき試験時）

配 合	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)
H	12.0	4.5	20.9
H-GL	12.5	4.9(7.9)	22.8
BFS-GL	13.5	4.2(7.2)	22.2

表-5 フレッシュ性状（凍結融解試験時）

配 合	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)
H-GL	12.0	3.6(5.9)	27.0
BFS-GL	13.5	3.6(5.9)	26.5

※ ()値は見掛けの空気量

3.2 圧縮強度、静弾性係数および単位容積質量

圧縮強度試験はJIS A 1108に、静弾性係数試験はJIS A 1149に準拠して実施し、供試体寸法は $\phi 100 \times 200\text{mm}$ とし、各材齢3本、塩水浸せき試験体と同一の養生方法とした。表-6に結果を示す。圧縮強度は材齢1日で 35N/mm^2 、材齢28日で 50N/mm^2 を満足する結果となった。

表-6 強度試験結果

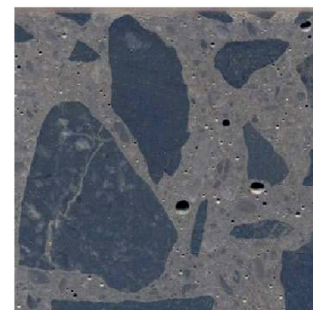
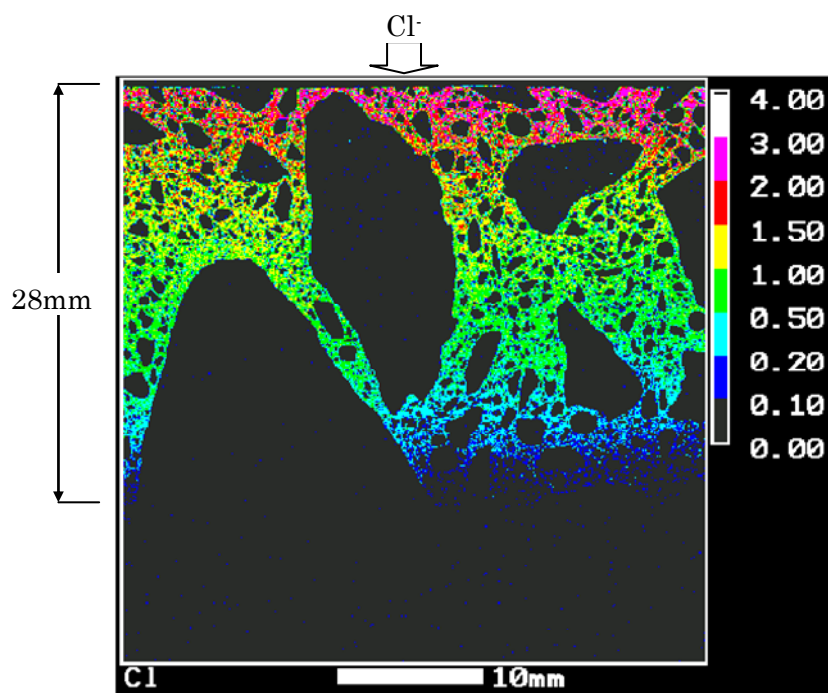
材 齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)		静弾性係数 (kN/mm ²)		単位容積質量 (t/m ³)	
	1	28	1	28	1	28
H	51.1	74.0	35.7	42.0	2.48	2.47
H-GL	62.1	69.6	23.5	25.3	1.92	1.92
BFS-GL	62.9	72.3	24.0	25.3	1.93	1.91

3.3 遮塩性

遮塩性は拡散係数で評価した。浸せき期間365日とし、浸せき状況を写真-1に示す。浸せき後、全塩化物イオン分布をEPMA法により測定した。分析面は接液面から深さ方向に $40\text{mm} \times 40\text{mm}$ とし、面分析結果を図-3から図-5に示す。

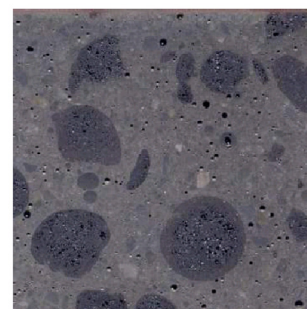
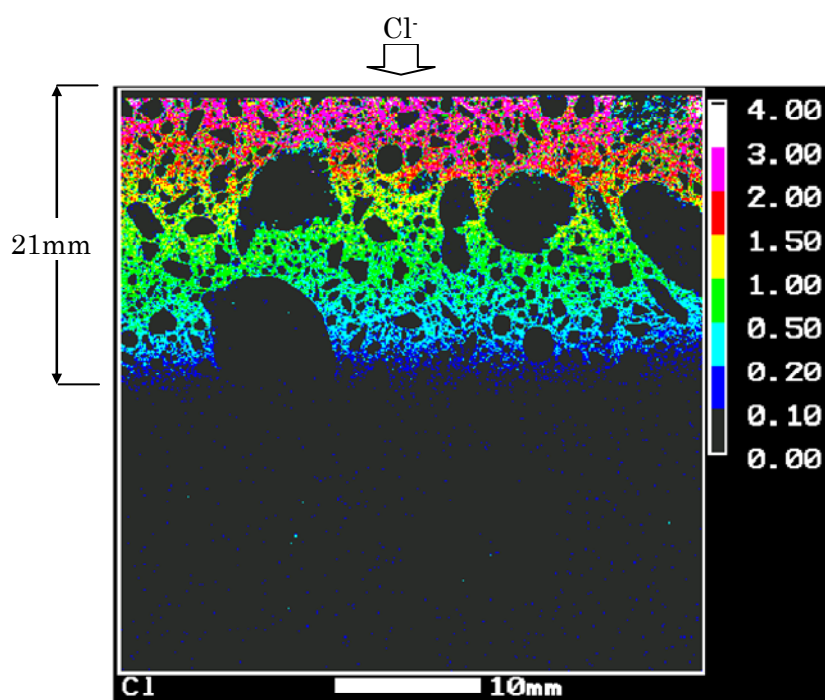


写真-1 塩水浸せき状況



研磨試料

図-3 面分析結果：H



研磨試料

図-4 面分析結果：H-GL

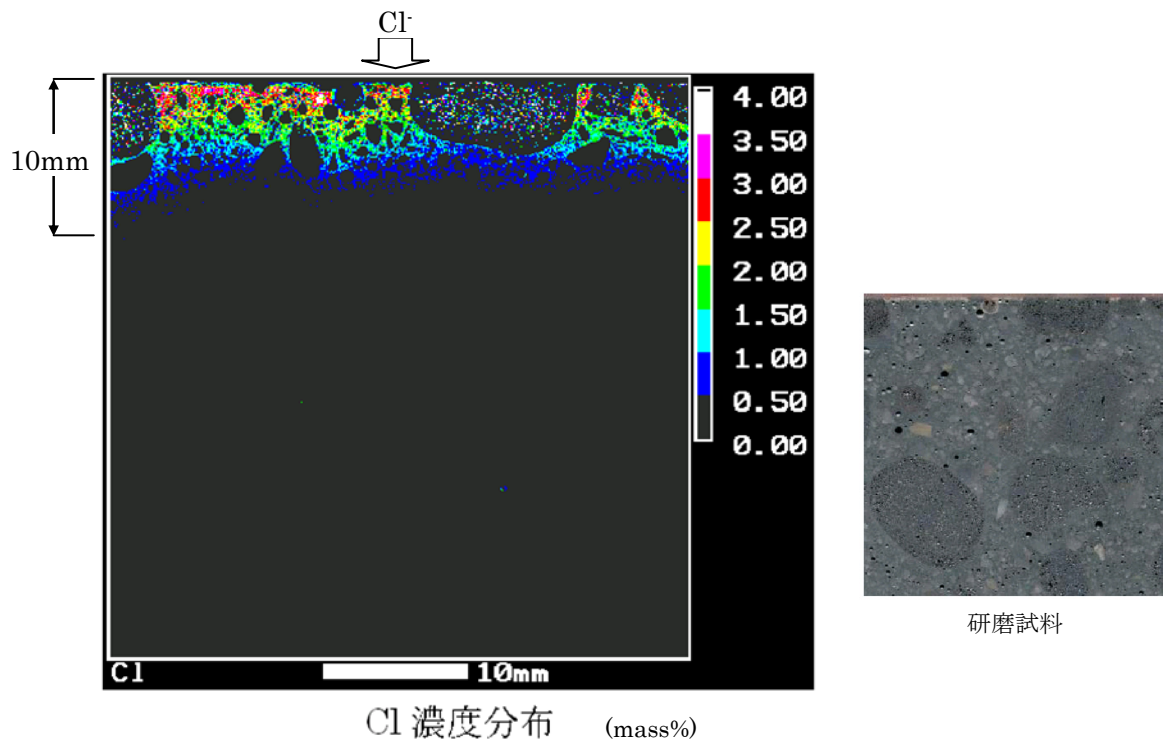


図-5 面分析結果：BFS-GL

この結果を用いて、最適化分析により、式(2)の拡散係数 D_c 、表面塩化物イオン濃度 C_0 を算出した。塩化物イオン濃度と接液面からの深さの関係を図-6 から図-8 に、算出した見かけの拡散係数を表-7 に示す。

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c \cdot t}} \right) \right) + C_i \quad (2)$$

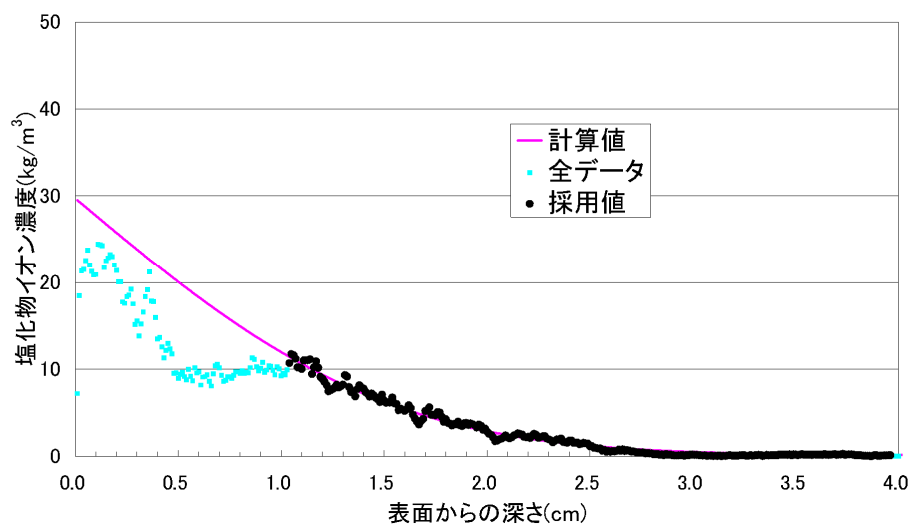


図-6 塩化物イオン濃度：H

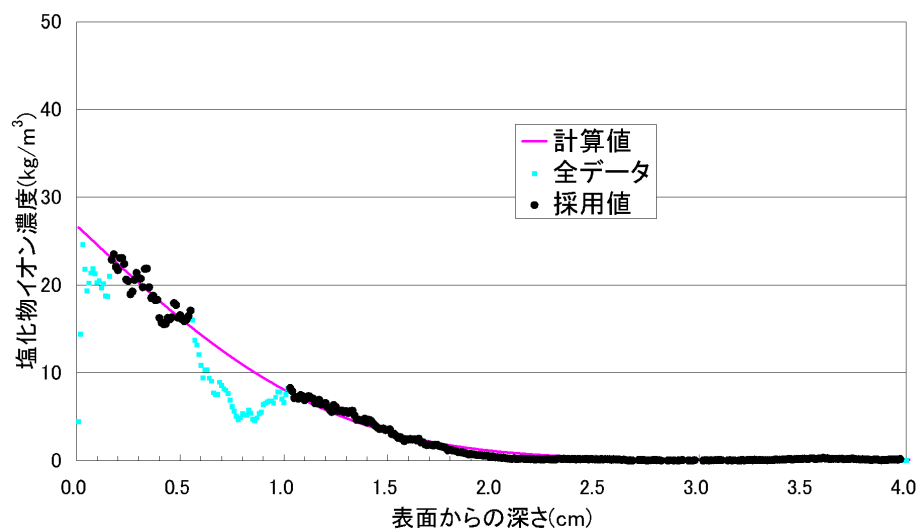


図-7 塩化物イオン濃度：H-GL

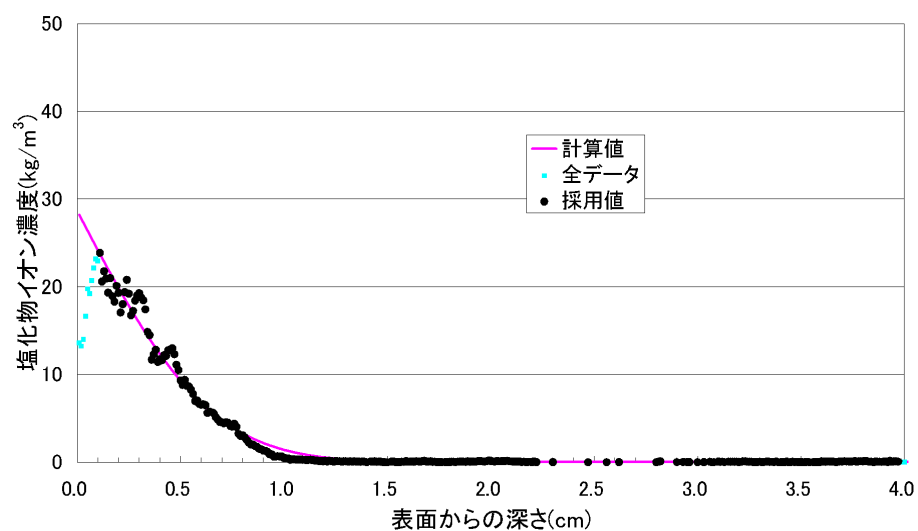


図-8 塩化物イオン濃度：BFS-GL

表-7 浸せき材齢 365 日における拡散係数

配合	W/B	見かけの拡散係数 D_c (cm ² /年)	表面塩化物イオン濃度 C_0 (kg/m ³)	初期塩化物イオン濃度 C_i (kg/m ³)
H	0.36	0.705	29.6	0.146
H-GL	0.32	0.464	26.7	0.114
BFS-GL	0.32	0.128	28.6	0.019

表-7 に示すとおり，塩化物イオン浸透性は軽量粗骨材を使用した H-GL が H と比較して低くなった．これは，H-GL が H と比較して水結合材比が小さく，組織が緻密になったため，浸透性が低くなったと考えられる．また，高炉スラグ微粉末を混入した BFS-GL では H-GL に比べて見かけの拡散係数が 72%減となり，高炉スラグ微粉末の混入による遮塩性効果が認められた．

3.4 凍結融解抵抗性

凍結融解試験結果，質量減少率を図-9 に，相対動弾性係数を図-10 に示す．また，300 サイクル後の供試体写真を写真-2，写真-3 に示す．相対動弾性係数はいずれも 300 サイクルまで低下がなく，規格 85%以上を十分に満足する結果となった．

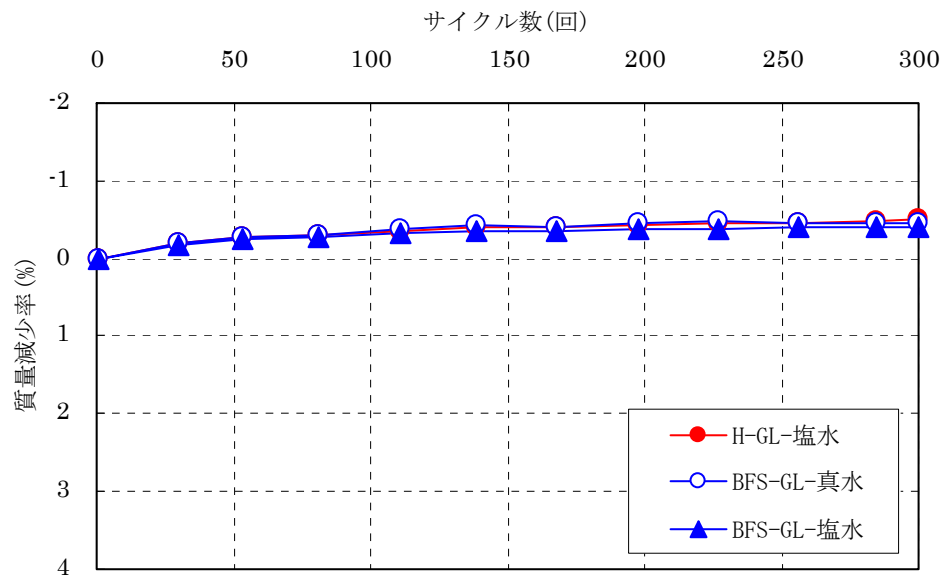


図-9 質量減少率

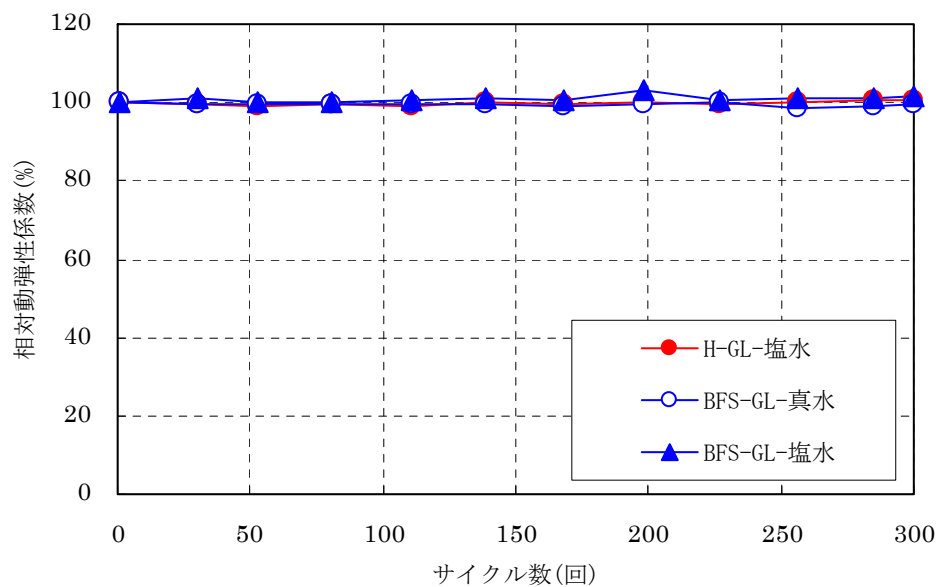


図-10 相対動弾性係数



写真-2 凍結融解 300 サイクル後の供試体状況：H-GL



写真-3 凍結融解 300 サイクル後の供試体状況：BFS-GL

4. まとめ

本研究において、高炉スラグ微粉末を混入した繊維補強高強度軽量コンクリートの耐塩害性、耐凍害性を検討した結果、次の知見が得られた。

高炉スラグ微粉末の混入により見かけの拡散係数が72%減となり、軽量コンクリートにおいても高炉スラグ微粉末の混入による遮塩性効果が認められた。

一般的に耐凍害性が低いと言われている軽量コンクリートにおいて、0.15%vol 程度のPVAを混入した場合、空気量を規格下限値とした場合でも、塩水凍結融解試験の結果、凍結融解300サイクルでの相対動弾性係数は低下することなく、優れた耐凍害性を有していた。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書「施工編」，p.244，2007
- 2) 鈴木雅博・桐川潔・諸橋克敏・加賀谷誠：PVA 繊維補強高強度軽量コンクリートの耐凍害性，第14回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.143-146，2005.11
- 3) 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針，コンクリート・ライブラリー，第86号，p.109，1996
- 4) 栗村直樹・渡辺浩良・熊田正次郎：主桁コンクリートに軽量骨材コンクリートを使用したPC桁橋の施工ー井桁歩道橋ー，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.247-252，2007.7
- 5) 土木学会：人工軽量骨材コンクリート設計施工マニュアル，コンクリート・ライブラリー，第56号，1985