

論文 廃ガラスビン粉末を用いたコンクリートの耐久性に関する研究

小椋紀彦*¹・高木宣章*²・児島孝之*²

要旨: 廃ガラスビンのリサイクル工場で排出される微粉碎された廃ガラスビン粉末を、コンクリート用材料として有効利用することを目的として、ガラス粉末を細骨材として使用したコンクリートの強度、乾燥収縮および耐凍害性について実験検討を行った。その結果、水セメント比が小さい30%でガラス置換率が大きくなると、無混入時より10%程度の強度低下があったことを除けば、普通細骨材を用いたコンクリートと同等の強度、乾燥収縮特性および耐凍害性が得られた。

キーワード: 廃ガラスビン粉末, 耐凍害性, 乾燥収縮, リサイクル

1. はじめに

1995年のガラス製品生産量は551万トンであり、このうちガラスビンが最も多く約40%(223万トン)を占めている。ガラスビンのリサイクルは、リターナブルビンの再使用とカレット(ガラスを粉碎したもの)の再資源化の2つのルートで実施されている。1997年4月の「容器包装リサイクル法」の施行にともない、廃ガラスビンのリサイクルが積極的に行われている。しかし、カレット業者による回収カレットの受け入れ基準、更に回収カレットを再生処理(再商品化)した製品カレットのビンメーカーによる受け入れ品質基準は厳しい。また、無色透明と茶色以外のカレットはビン原料としての再資源化需要が少なく、余剰傾向にあるのが現状である¹⁾。そのため、廃ガラスビンのカレット以外の用途への利用技術の開発が望まれている。

一方、コンクリート用の良質な骨材の入手が困難となっている現在、安価でしかも大量に発生する廃ガラスビンコンクリート用材料として使用することは、環境問題および経済性の面からも有効な利用方法であると考えられる。微粉碎された廃ガラスビン粉末(以下、ガラス粉末と記す)による細骨材の代替あるいは混和材料としての利用に関する研究はいくつか報

告されている²⁾³⁾⁴⁾。本研究では、ガラス粉末を細骨材の一部として代替使用したコンクリートの力学的特性、乾燥収縮および耐凍害性について実験検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験項目

実験要因および試験項目を表-1に示す。本研究では、水セメント比およびガラス粉末による細骨材置換率を要因とした。水セメント比を30,40,50,60%の4水準とし、ガラス置換率 $[G1/(S+G1)]$ は質量百分率で0,5,10,20%の4水準とした。

強度試験用供試体は材齢1日で脱型後、所定材齢(7,28,91日)まで標準水中養生(20±1℃)を行った。乾燥収縮試験は、供試体(10×10×40cm)を材齢7日まで標準水中養生した後、20±

表-1 実験要因

試験項目	要因	
	水セメント比 (W/C), %	ガラス置換率 [G1/(S+G1)], %
圧縮強度	30, 40 50, 60	0, 5, 10, 20
乾燥収縮	30, 50	0, 5, 10, 20
	40, 60	0, 10, 20
凍結融解	30, 50	0, 5, 10, 20

注) G1: ガラス粉末, S: 川砂

*1 立命館大学大学院 理工学研究科環境社会工学専攻 (正会員)

*2 立命館大学教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

1°C, 60±5%RH の環境下で実施した。乾燥収縮ひずみの測定は、コンタクトゲージ法で行った。凍結融解試験は JSCE-G501-1999 に準じて行い、300 サイクルまで外観観察、質量変化率および動弾性係数の測定を行った。硬化コンクリートの空気量、気泡間隔係数および気泡径分布は、画像解析装置により測定した。供試体 (φ10×20 cm) の中央部から採取した厚さ 1.5~2.0 cm の試料 (φ10 cm) の研磨、試料表面へのシアノアクリレートの塗布、固化後の再研磨、乾燥の後に測定を行った⁵⁾。

2.2 使用材料および示方配合

使用材料を表-2 に示す。ガラス粉末は廃ガラスビンを微粉碎したものを使用した。マイクロトラック粒度分析装置で測定したガラス粉末の粒度分布を図-1 に示す。混和剤には AE 減水剤と高性能 AE 減水剤を使用し、空気量の調整に AE 助剤と消泡剤を使用した。

コンクリートの示方配合を表-3 に示す。コンクリートの目標空気量は 4±1%, 目標スランプは水セメント比 30, 40% 時には 10±2 cm, 水セメント比 50, 60% 時には 8±2 cm とした。単位水量および細骨材率 [(s+g1)/a] は各々の水セメント比で一定とした。ただし、水セメント比 30, 40% のシリーズでは、適切なワーカビリティが得られるように細骨材率を調整した。

水セメント比 30, 40% 時は高性能 AE 減水剤とタイプ A (変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤) の AE 助剤を使用した。水セメント比 50% 時は、AE 減水剤とタイプ B (アニオン系界面

活性剤) の AE 助剤を使用し、ガラス置換率の大きい 20% 時では水セメント比 30, 40% 時と同じ高性能 AE 減水剤を用いて、空気量およびスランプの調整を行った。水セメント比 60% 時は、水セメント比 50% と同じ AE 減水剤, AE 助剤を使用し、ガラス置換率 10, 20% 時には空気量が増加する傾向にあったので消泡剤により空気量の調整を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 強度試験

コンクリートの各種強度とガラス置換率の関係を図-2 に示す。乾燥収縮試験用供試体と凍結融解試験用供試体は作製日が異なるので、各試験ごとの強度を示した。W/C=30% の配合では、ガラス置換率が 10, 20% と大きくなると約 10% 程度強度が低下するものが観察された。しかし、W/C=40~60% の配合では、幾分の変動はあるものの、材齢 3 ヶ月までは強アルカリ環境下においても、ガラス置換率 20% までは無混入時と同等の強度が得られた。

ガラス粉末のポゾラン反応によりモルタルの圧縮強度が増大するとの報告がある⁶⁾。しかし、本研究で用いた程度の粉末度 (比表面積 580cm²/g) を有するガラス粉末では、ガラスのポゾラン反応によるコンクリートの強度増加を期待することはできない。

3.2 乾燥収縮特性

乾燥収縮ひずみの経時変化を図-3 に示す。ガラス粉末の混入により、W/C=50% の配合では

表-2 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント, 密度 3.16 g/cm ³ , 比表面積 3260 cm ² /g	
細骨材	野洲川産川砂, 吸水率 1.47%, 表乾密度 2.60 g/cm ³ , F.M.2.69	
粗骨材	高機産硬質砂岩碎石, 表乾密度 2.69 g/cm ³ , F.M.6.57, 最大寸法 20 mm, 吸水率 0.78%, 混合質量比 5~13 mm : 13~20 mm=1 : 1	
ガラス粉末	微粉碎された廃ガラスビン, 密度 2.48 g/cm ³ , 比表面積 580 cm ² /g	
混和剤	AE 減水剤	リグニンスルホン酸化合物およびポリオール複合体
	AE 助剤	A: 変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤 B: アニオン系界面活性剤
	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸 Ca 塩
	消泡剤	ポリアルキレングリコール誘導体

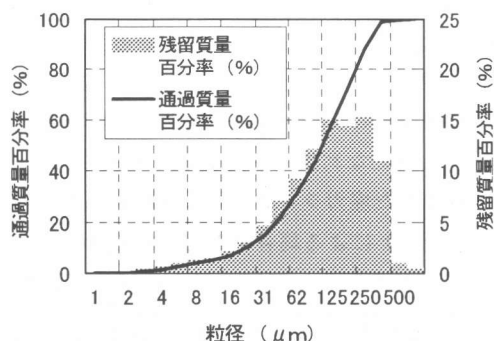


図-1 ガラス粉末の粒度分布

表-3 コンクリートの示方配合

配合名*	W/C (%)	(s+g1)/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤			スランブ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G1	G	AE減水剤 (cc/m ³)**	AE助剤 (A)**	SP (C×%)		
30-0	30	35	160	533	577	0	1104	—	A 2.5 (2.0)	1.0 (1.2)	11.5 (11.0)	3.5 (4.4)
30-5					547	29	1104	—	A 2.5 (1.9)	1.0 (1.2)	8.0 (8.0)	4.2 (5.2)
30-10		34.5			509	57	1112	—	A 2.5 (2.0)	1.5 (1.7)	9.1 (9.3)	4.4 (5.0)
30-20		33.5			437	109	1129	—	A 3.0 (2.3)	3.0 (3.3)	11.6 (11.5)	3.8 (5.0)
40-0	40	37	164	410	641	0	1129	—	A 2.5	0.5	10.2	4.2
40-5					607	32	1129	—	—	0.5	8.2	4.9
40-10		574			64	1129	—	A 2.5	0.8	9.1	4.7	
40-20		36			494	124	1129	—	A 2.0	1.2	8.9	4.4
50-0	50	40	170	340	712	0	1102	3400	B 3.5 (3.5)	—	10.0 (9.3)	4.8 (4.2)
50-5					675	36	1102	3400	B 3.5 (3.0)	—	9.0 (9.5)	5.7 (4.8)
50-10					638	71	1102	3400	—	—	7.5 (6.5)	4.4 (4.5)
50-20					564	141	1102	3400	B 2.5 (2.0)	0.5 (0.7)	7.4 (8.0)	4.0 (4.2)
60-0	60	45	172	287	816	0	1032	2870	B 2.0	—	9.5	3.9
60-5					773	41	1032	2870	—	—	10.7	5.0
60-10					731	81	1032	2870	C3.5T**	—	8.0	4.8
60-20					646	192	1032	2870	C3.5T**	—	8.3	3.7

注) G1 : ガラス粉末, SP : 高性能AE減水剤, ()内は, 凍結融解試験用供試体, その他は乾燥収縮試験用供試体作製時の値

*1 ; 配合名は, [(水セメント比) - (ガラス置換率)]を示す

*2 ; AE減水剤は25%溶液を使用

*3 ; AとBはAE助剤, Cは消泡剤

セメント1kg当たりタイプA(2%溶液)あるいはタイプB (1%溶液) のAE助剤を2cc使用した時を1Aとする

*4 ; セメント1kg当たりタイプC (1%溶液) の消泡剤を, 2cc使用する時を1Tとする

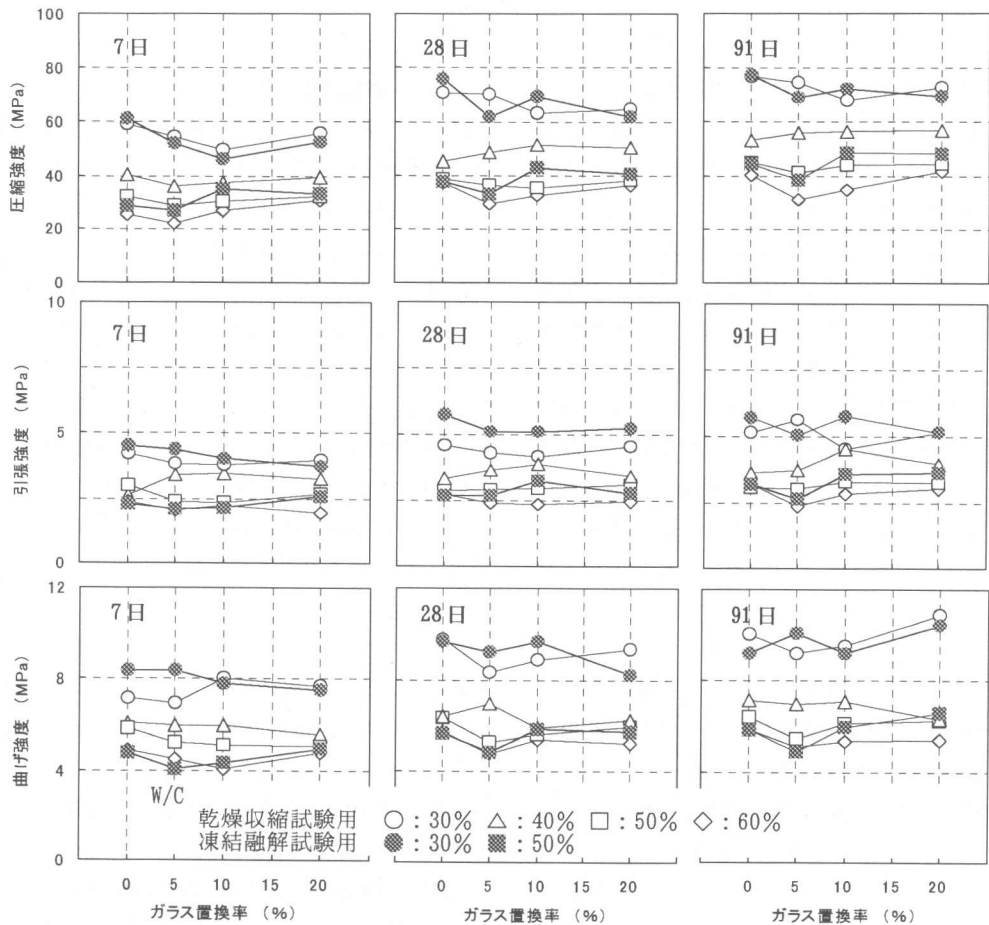


図-2 各種強度試験結果

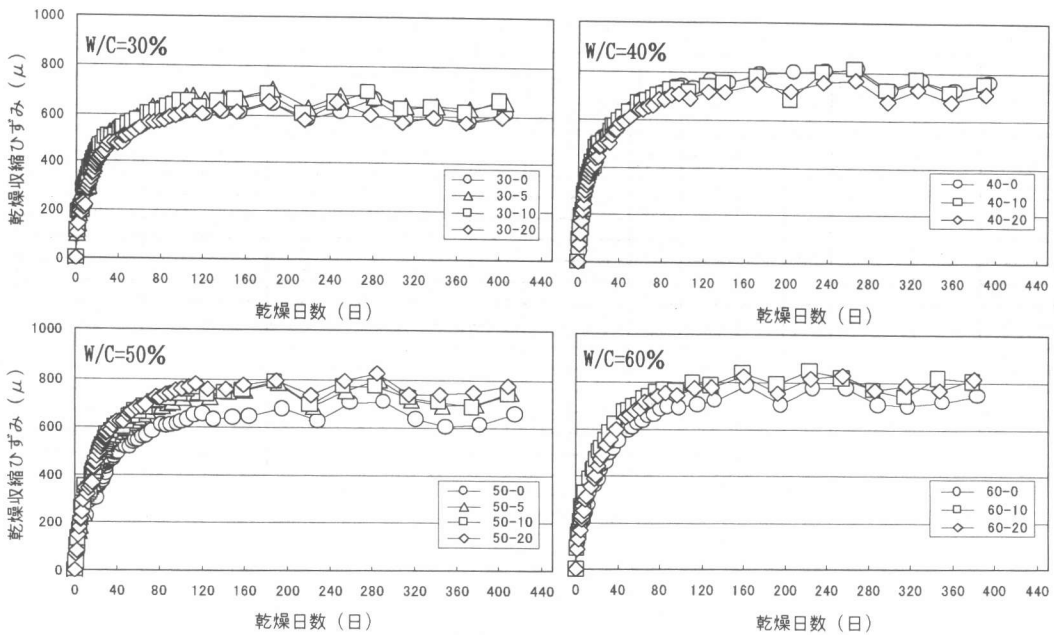


図-3 乾燥収縮ひずみの経時変化

乾燥収縮ひずみは無混入時より幾分大きくなった。W/C=60%時においても、乾燥日数4ヶ月あたりまではW/C=50%時と同じ傾向にあるものの、乾燥日数の進行に伴いガラス粉末混入の影響はW/C=50%時と比較すると少なくなった。ガラス粉末の混入による乾燥収縮の増加は、コンクリート中の細粒分量に起因しているものと考えられる。本研究で使用したガラス粉末の約90%が0.3mm以下であるため、ガラス粉末で細骨材を置換すると、ブリーディング率は減少した⁴⁾。それに伴い保水性が向上するため、水セメント比が大きい配合では、乾燥収縮ひずみが増加する。しかし、長期においては、乾燥収縮ひずみへのガラス粉末の影響は比較的少なくなる傾向にある。

W/C=30%、40%では、同一水セメント比でもガラス置換率により細骨材率を幾分変化させているものの、ガラス粉末を混入しても、乾燥収縮ひずみは無混入時と同程度であった。

一般にガラス置換率20%までは、乾燥収縮へのガラス粉末混入の著しい影響はなく、特にW/C≤40%の富配合コンクリートでは普通細骨材コンクリートと同等と考えて支障はないもの

と考えられる。

3.3 凍結融解試験

図-4と図-5に、質量減少率および相対動弾性係数の経時変化を示す。1例(W/C=50%、ガラス置換率20%時)を除けば、ガラス置換率が大きくなると凍結融解サイクルの進行に伴い、供試体の表面スケリングによる質量減少率が大きくなる傾向にあった。この傾向は、W/Cが大きいほど顕著であった。しかし、W/C=50%の配合では、凍結融解サイクルの進行に伴い相対動弾性係数は幾分低下するものの、300サイクルにおいても、ガラス置換率に関わらず95%以上の相対動弾性係数が得られた。また、W/C=30%では、300サイクルまで相対動弾性係数の低下は観察されなかった。

300サイクル終了後の残存曲げ強度試験結果を図-6に示す。凍結融解300サイクル後においても、標準水中養生材齢28日と同等あるいはそれ以上の残存曲げ強度が得られており、ガラス置換率あるいはW/Cに関わらず、凍害による強度低下は観察されなかった。

3.4 硬化コンクリートの気泡径分布

画像解析により測定したコンクリートの空気

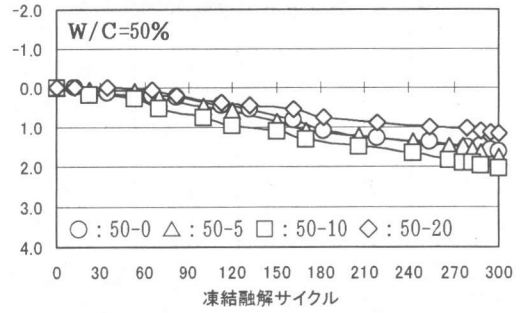
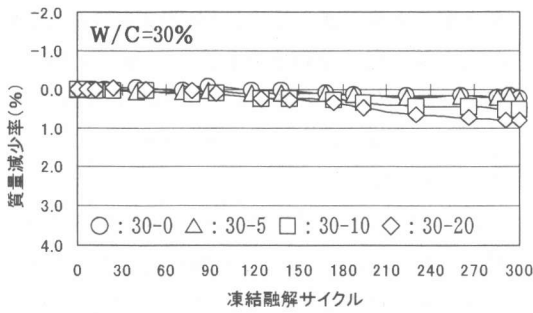


図-4 質量減少率の経時変化

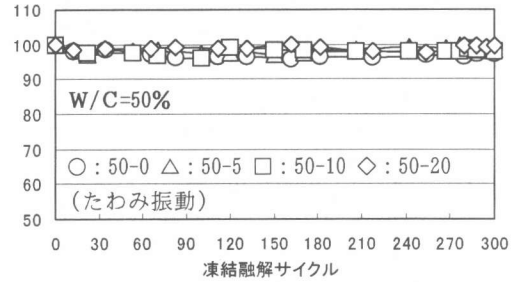
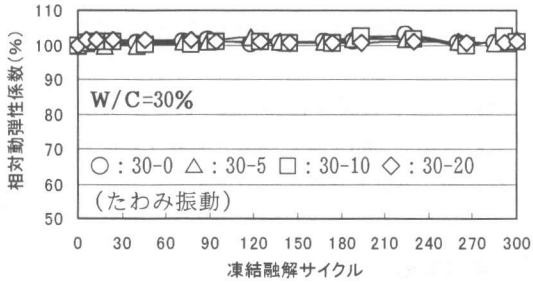


図-5 相対動弾性係数の経時変化

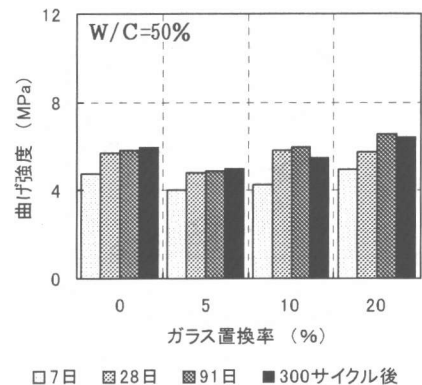
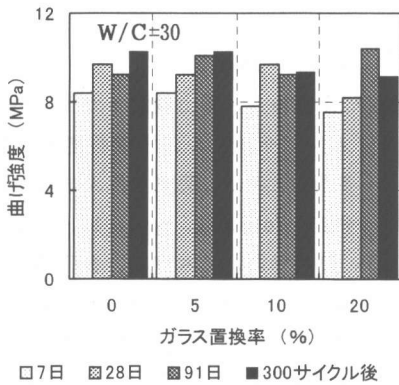


図-6 凍結融解後の曲げ強度比較

量および気泡間隔係数を表-4 に、気泡径分布を図-7 に示す。気泡径分布測定用供試体と凍結融解試験用供試体の作製時期が異なるために、同一配合であっても表-4 のフレッシュ時空気量は、表-3 の空気量と幾分異なる。フレッシュ時および硬化時の空気量は目標空気量の $4 \pm 1\%$ の範囲内にあるものの、画像解析により測定した硬化コンクリートの空気量は、フレッシュ時より小さい値を示す傾向にあった。

W/C=30%では、ガラス粉末を混入しても気泡間隔係数は無混入時より幾分小さく、気泡径分布も無混入時と同等以上であり、これらのこと

から十分な耐凍害性が得られたものと考えられる。

一方、W/C=50%ではガラス粉末の混入により大きな気泡が増加し、気泡間隔係数が大きくなる傾向にあった。しかし、相対動弾性係数の経時変化から判断すると、4%程度の空気が連行されておれば、耐凍害性に及ぼすガラス置換率の影響は少ないものと考えられる。

4. まとめ

(1) ガラス粉末をコンクリート用細骨材として使用すると、水セメント比が小さい30%でガ

表-4 空気量および気泡間隔係数

配合名	ガラス置換率 (%)	空気量 (%)		気泡間隔係数 (L, μm)
		フレッシュ時	硬化時	
30-0	0	4.7	3.1	272
30-5	5	5.0	3.0	259
30-10	10	4.7	4.4	229
30-20	20	5.0	5.2	256
50-0	0	4.3	4.4	252
50-5	5	5.1	4.6	280
50-10	10	3.9	3.2	252
50-20	20	4.7	4.2	300

注) フレッシュ時: 空気室圧力法

硬化時: 画像解析法

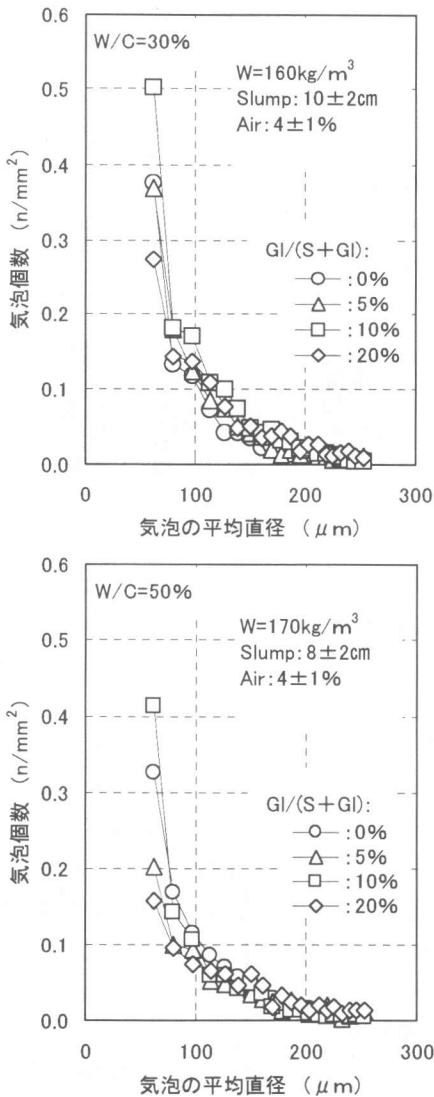


図-7 硬化コンクリートの気泡径分布

ラス置換率が大きくなると、無混入時より 10% 程度の強度低下が観察された。しかし、 $W/C \geq 40\%$ のコンクリートでは、ガラス置換率 20% までは、その影響は少なく、無混入時と同等の強度が得られた。

(2) 水セメント比が比較的大きい配合では、ガラス粉末の混入により、乾燥収縮ひずみは幾分増加する傾向にあった。しかし、 $W/C \leq 40\%$ のコンクリートでは、ガラス置換率が 20% 以下であれば、乾燥収縮ひずみは無混入時と同等であった。

(3) ガラス置換率 20% 以下のコンクリート ($W/C=30\%$, 50% 時) では、ガラス置換率に関わらず、十分な耐凍害性が得られた。

参考文献

- 1) 財団法人クリーン・ジャパンセンター: 再資源化技術の開発状況調査報告書, pp.185, 1997.3
- 2) 出雲淳一, 影山俊文: ガラス微粉末がセメントモルタルの圧縮強度発現に及ぼす影響について, 関東学院大学工学部研究報告書, Vol.40-1, pp.13-17, 1996
- 3) 児島孝之, 高木宣章, 春田健作ほか: 廃ガラスビン粉末を用いたモルタルの膨張特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.1, pp.37-42, 2000
- 4) 児島孝之, 高木宣章, 春田健作ほか: 廃ガラスビン粉末を用いたコンクリートの力学的特性に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.54, pp484-489, 2000
- 5) 西山考ほか: シアノアクリレートによる硬化コンクリート中の気泡組織の染色と観察, セメント技術年報, No.42, pp.212-214, 1988
- 6) 西川直宏, 高津學, 大門正機: ガラス粉末を用いたモルタルの強度特性, セメント技術大会講演集, No.49, pp114-119, 1995