

論文 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

春田健作^{*1}・児島孝之^{*2}・高木宣章^{*2}・柳澤美智代^{*3}

要旨：廃ガラスビン粉末がアルカリシリカ反応による膨張に及ぼす影響を明らかにするため、JIS A 5308 附属書 8 (モルタルバー法)に従って実験検討した。ガラス置換率を 5～6 水準(0～40%)、水セメント比を 2 水準(30, 50%)とし、ガラス粉末は細骨材またはセメントと置換した。ガラス粉末を多量に含有した供試体であっても、水セメント比 50%、等価アルカリ量 1.2%の促進条件下では、材齢 6 ヶ月の膨張率は、一般に無害であると判定される 0.1%以下であった。ガラス粉末は多量のアルカリを含有しているものの、アルカリシリカ反応による膨張を著しく促進しない。

キーワード：廃ガラスビン粉末、アルカリシリカ反応、膨張率、等価アルカリ量

1. はじめに

1997 年の「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。ガラスビンの再利用および再資源化の比率は、他の素材に比較すると高い。しかし、廃ガラスビンを有効利用するためには、ビン以外への再利用手段の確立が緊急の課題となっている。

廃ガラスビンの再利用の一つとして、コンクリート用材料としての利用が考えられる。ガラス粉末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が報告されている¹⁾²⁾。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では、安価でしかも大量に発生する廃ガラスビンを経済的にコンクリート用材料として利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。しかし、ガラス粉末をコンクリート用材料として用いる場合、アルカリシリカ反応による膨張の危惧が指摘されている^{3) 4)}。

そこで、本研究では JIS A 5308 附属書 8：骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(モルタルバー法)により、廃ガラスビン粉末がアルカリ

シリカ反応による膨張に及ぼす影響について実験検討した。また、廃ガラスビン粉末を用いたモルタルの強度試験も行った。

2. 実験概要

2.1 モルタルバー試験

モルタルバー試験の実験要因を表-1 に示す。ガラス粉末で細骨材を置換したものをシリーズ A、セメントを置換したものをシリーズ B とする。シリーズ A では水セメント比を 2 水準(W/C:30, 50%)とした。セメントの全アルカ

表-1 モルタルバー膨張試験の実験要因

	シリーズ A		シリーズ B
W/C ^{*1} (%)	30	50	50
C : S ^{*2} (質量比)	1 : 1.5	1 : 2.25	1 : 2.25
Na ₂ O _{eq} (%)	0.68, 1.2	0.68, 1.2, 2.0	0.68, 1.2, 2.0
ガラス粉末 置換率 (%)	0, 5, 10, 20	0, 10, 20, 30, 40	0, 5, 10, 15, 20, 30
フロー値 (mm)	160 ~ 200	180 ~ 220	190 ~ 220

^{*1} シリーズ B では W/(C+Gl) , Gl : ガラス量

^{*2} シリーズ A では C:(S+Gl) , S : 細骨材
シリーズ B では (C+Gl):S

*1 (株) 富士ビー・エス 工修 (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)

*3 阪神測建 (株)

表-2 ガラス粉末の化学成分

成分名	比率 (%)
ig. loss	0.40
SiO ₂	71.3
Al ₂ O ₃	2.70
Fe ₂ O ₃	0.40
CaO	10.3
MgO	0.40
SO ₃	0.00
Na ₂ O	12.48
K ₂ O	1.16
Total	99.14

$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0.658 \times \text{K}_2\text{O}$
 $= 13.24\%$

りは、等価アルカリ量($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$)で3水準(0.68, 1.2, 2.0%)になるよう1モル濃度のNaOH水溶液で調整し、ガラス粉末に含有されているアルカリは無視した。ガラス粉末による細骨材置換率は質量百分率で4~5水準[GI/(S+GI):0~40%]とした。水セメント比30%の配合では、高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系グラフトコポリマー、比重:1.10, $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=2.2\%$)を用いてモルタルのフロー値を調整した。この時、 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=1.2\%$ の配合では、高性能AE減水剤に含まれているアルカリを考慮した。

ガラス粉末でセメントを置換するシリーズBでは、水結合材比[W/(C+GI)]は50%とした。等価アルカリ量は、(セメント+ガラス粉末)質量に対するアルカリ量を $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ で示し、シリーズAと同じ3水準とした。等価アルカリ量算定時には、シリーズA同様ガラス粉末中のアルカリは考慮していない。ガラス粉末によるセメント置換率は6水準[GI/(C+GI):0~30%]とし、150 μm 以下のガラス粉末を用いた。

セメントはセメント協会製のアルカリシリカ反応試験用普通ポルトランドセメント[比重:3.16, $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}:0.68\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}:1.7$]を用いた。細骨材は、野洲川産川砂(比重:2.61)をJIS A 5308 附属書8に従い粒度を調整して用いた。ガラス粉末(比重:2.48, 比表面積:580 cm^2/g)はリサイクル工場で微粉碎されたものを用いた。ガラス粉末の化学成分を表-2, レ

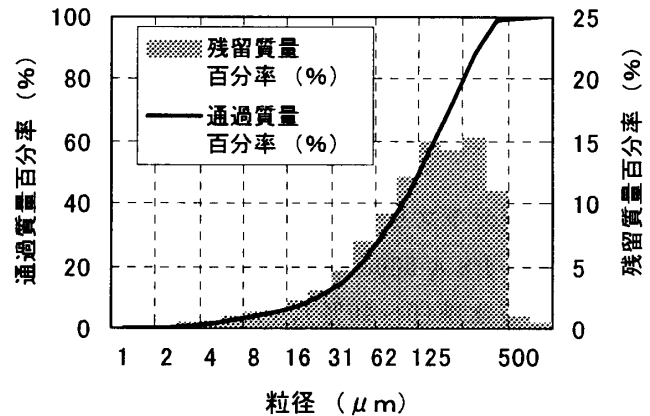


図-1 ガラス粉末の粒度分布

ーザー回折式粒度測定装置による粒度分布を図-1に示す。添加アルカリ化合物は1モル濃度のNaOH水溶液を用いた。モルタルバー供試体の作製、養生および膨張率計測は、JIS A 5308 附属書8に準じた。供試体は材齢1日から、湿度100%, 温度 $40 \pm 2^\circ\text{C}$ の試験環境下に保管した。

2.2 強度試験

ガラス粉末による細骨材あるいはセメントの置換率は、質量百分率で5または6水準[GI/(S+GI):0~40%, GI/(C+GI):0~30%]とした。水結合材比を50%とし、結合材細骨材比は1:2とした。GI/(S+GI)=30, 40%時には、高性能AE減水剤(ポリカルボン酸Ca塩、比重:1.06)を用いてフロー値を $190 \pm 10\text{mm}$ に調整した。

セメントは普通ポルトランドセメント(比重:3.16, 粉末度:3280 cm^2/g)を、細骨材に野洲川産川砂(比重:2.61, F.M.:2.69)を使用した。ガラス粉末はモルタルバー試験時と同じものを使用した。モルタル供試体(4×4×16cm)の強度試験はJIS R 5201に準じ、材齢1日で脱型後水中($20 \pm 2^\circ\text{C}$)養生した。強度試験は、材齢7, 28, 91日に行った。

3. 実験結果および考察

3.1 モルタルバーの膨張性試験

(1) ガラス粉末で細骨材を置換したモルタルバーの膨張特性 (シリーズA)

W/C=50%: 水セメント比50%時のモルタル

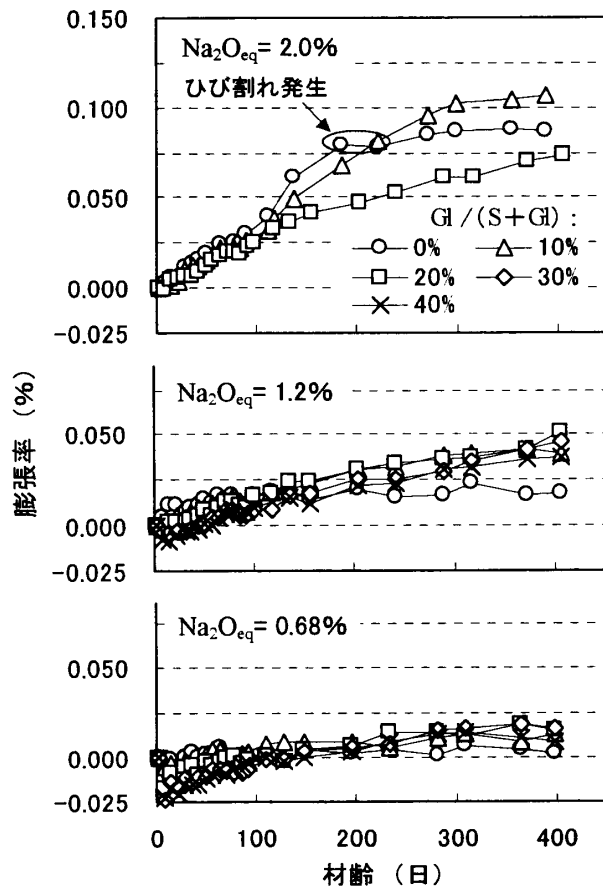


図-2 シリーズ A の膨張率の経時変化
(W/C=50%)

の膨張率の経時変化を図-2 に、膨張率とガラス置換率の関係を図-3 に示す。本実験ではガラス粉末中に含有されているアルカリは等価アルカリ量算定時に無視している。アルカリ量の少ない供試体($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=0.68\%$)では、ガラス粉末による細骨材置換率が大きいほど、初期材齢において収縮が観察された。

$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ が増加すると膨張率は大きくなる。JIS A 5308 附属書 8 に規定されている W/C=50%, $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=1.2\%$ の配合では、ガラス粉末により細骨材を置換しても、材齢 4 ヶ月までの膨張率はガラス粉末で置換していない基準モルタルと同等、あるいは置換率が増加するとかえって小さくなった。材齢 5 ヶ月でガラス置換した供試体の膨張率が基準モルタルを上回った。しかし、材齢 6 ヶ月における膨張率は約 0.03% と小さく、いずれの供試体も JIS の判定値 0.1% 以下であり、無害であると判定された。

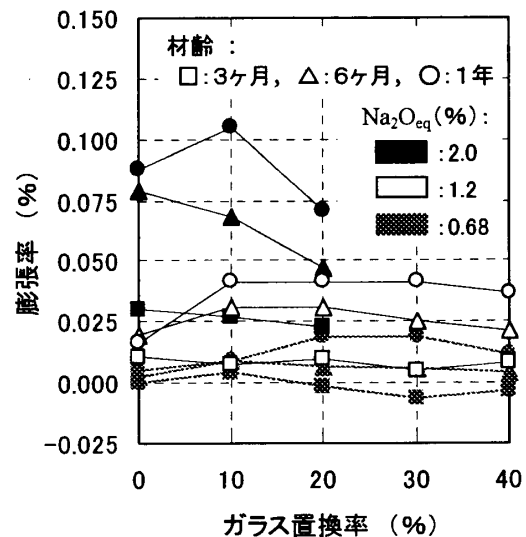


図-3 シリーズ A の膨張率とガラス置換率の関係 (W/C=50%)

表-3 モルタル 1m^3 当たりの $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ 量

(シリーズ A, W/C=50%, $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=1.2\%$)

Gl (S+Gl) (%)	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ 量 (kg/m ³)				
	C	A (NaOH)	C+A	Gl	計 (C+A+Gl)
0	3.9	2.97	6.87	0	6.9
10	3.9	2.96	6.86	17.0	23.8
20	3.9	2.96	6.86	33.9	40.7
30	3.9	2.95	6.85	50.7	57.5
40	3.8	2.94	6.74	67.4	74.1

(シリーズ A, W/C=50%, $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=2.0\%$)

	C	A	C+A	Gl	計
0	3.9	7.6	11.5	0.0	11.4
10	3.9	7.5	11.5	17.0	28.3
20	3.9	7.5	11.5	33.9	45.3

(シリーズ A, W/C=30%, $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=1.2\%$)

	C	A	SP	C+A+SP	Gl	計
0	5.4	3.5	0.7	9.5	0.0	9.5
5	5.4	2.8	1.3	9.5	7.8	17.3
10	5.4	2.4	1.6	9.4	15.6	25.1
20	5.4	1.0	3.1	9.4	31.2	40.7

C: セメント, A: NaOH, Gl: ガラス粉末,
SP: 高性能 AE 減水剤

表-3 にモルタル 1m^3 当たりのアルカリ量を示す。W/C=50%, $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=1.2\%$, ガラス置換

率 40%の配合では、ガラス粉末中のアルカリを考慮すると 74kg/m^3 のアルカリが含有されている。多量のアルカリが含有されていても、アルカリシリカ反応による著しい膨張は観察されていない。このことは、ガラス粉末のポゾラン反応により水和物が生成され、ガラスから溶出したアルカリはガラス周囲に生成されたこれらの水和物に捕捉されるために、アルカリシリカ反応による大きな膨張が生じないためであると説明されている⁴⁾。また、アルカリシリカ反応による膨張率は、使用骨材の粒子径の大きさに影響され、ベシマム粒度が存在することが報告されている^{5) 6)}。つまり、骨材粒子が非常に大きい時あるいは、 0.074mm 以下の粉末状態の時は、膨張率は非常に小さく、中間粒度において最大となる⁵⁾。本実験で用いたガラス粉末は、図-2に示すように粒子径 0.075mm 以下を約 40%含有している。ガラスの粒子が小さいことも、膨張率が小さい1つの原因と考えられる。

$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=2.0\%$ の供試体では、大きな膨張率が

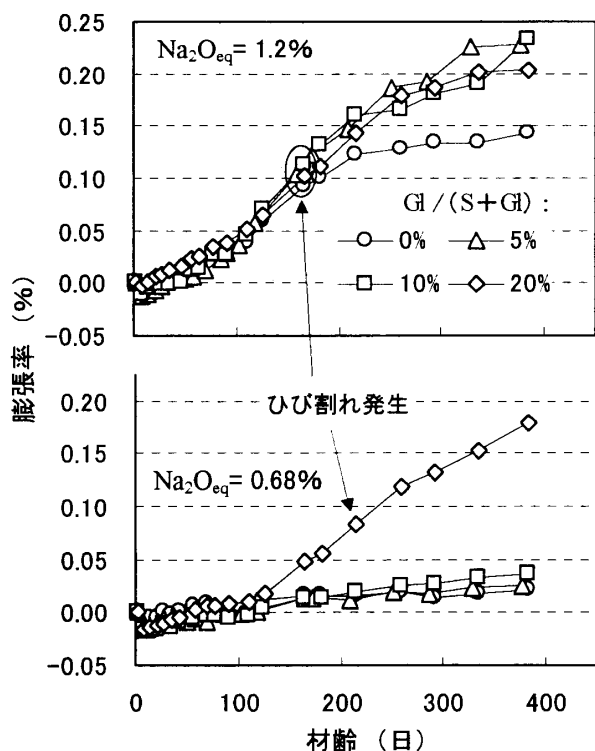


図-4 シリーズ A の膨張率の経時変化
($W/C=30\%$)

観察された。材齢 6 ヶ月までは、ガラス粉末を用いていない基準モルタルの膨張率が最も大きく、材齢 6 ヶ月でひび割れが観察され、その時の膨張率は約 0.075% であった。材齢 1 年では、ガラス置換率 10% 供試体の膨張率が基準モルタルを約 10% 上回った。しかし、材齢 1 年におけるガラス置換率 20% 供試体の膨張率は基準モルタルより幾分小さかった。一般的に、アルカリシリカ反応による膨張を抑制するために、コンクリート中のアルカリ総量を 3.0kg/m^3 以下にすることが推奨されている。しかし、 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=2.0\%$ 配合における $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ 量は、ガラス粉末中のアルカリを無視してもアルカリシリカ反応による膨張を抑制するために推奨されている量の約 4 倍にあたる 11.5kg/m^3 と非常に多いために、著しく膨張したと考えられる。

W/C=30%: 水セメント比 30% のモルタルの膨張率の経時変化を図-4 に、膨張率とガラス置換率の関係を図-5 に示す。 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=1.2\%$ の配合では、図-2 に示す水セメント比 50%， $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=2.0\%$ の配合より大きな膨張を示し、全ての供試体で材齢 6 ヶ月にひび割れが観察された。材齢 6 ヶ月における膨張率はガラス置換率にかかわらず $0.1\sim 0.13\%$ であった。しかし、材齢の進行に伴い、ガラス置換したモルタルの

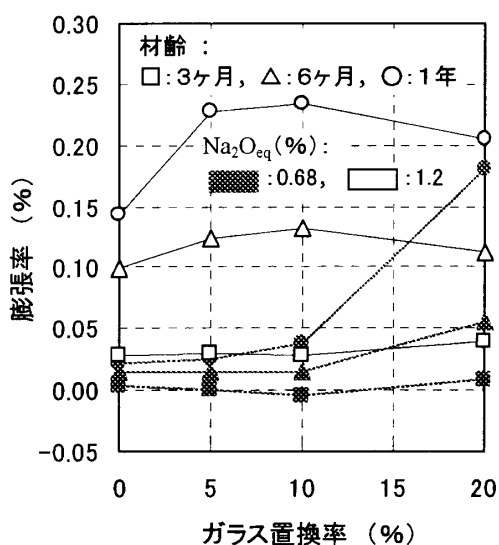


図-5 シリーズ A の膨張率とガラス置換率の関係 ($W/C=30\%$)

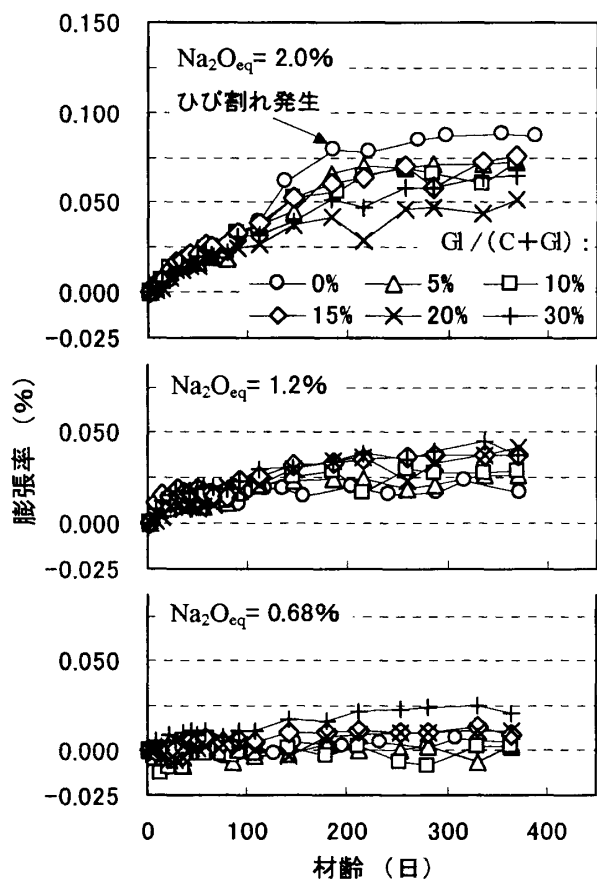


図-6 シリーズ B の膨張率の経時変化
(W/C=50%)

膨張率は、ガラス置換していない基準モルタルより増加し、材齢 1 年で 0.20~0.23% の大きな膨張率を示した。水セメント比 30% の配合は、セメント細骨材比 1:1.5 の富配合であり、フロー値調整のため、高性能 AE 減水剤を使用している。供試体に含有される全アルカリ量は、 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=1.2\%$ の配合では、ガラス粉末中のアルカリを無視しても約 $10\text{kg}/\text{m}^3$ と非常に多く含まれている。そのため、大きな膨張率を示したものと考えられる。また、原因は明らかではないが $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=0.68\%$ 、 $\text{GI}/(\text{S}+\text{GI})=20\%$ の供試体で大きな膨張を示した。非常に富配合な条件下では、長期にわたるモルタルバー試験の検討が必要である。

(2) ガラス粉末でセメントを置換したモルタルバーの膨張特性 (シリーズ B)

シリーズ B のモルタルの膨張率の経時変化を図-6 に、膨張率とガラス置換率の関係を図-7

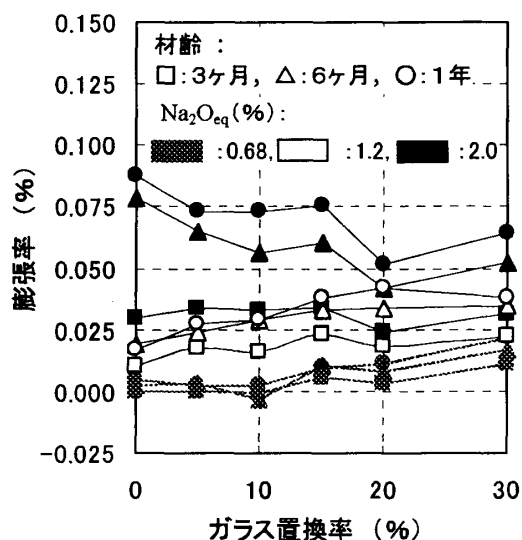


図-7 シリーズ B の膨張率とガラス置換率の関係 (W/C=50%)

に示す。シリーズ B では、(セメント+ガラス粉末)質量に対してアルカリ量を $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ で表す。シリーズ B 供試体の膨張率は、水セメント比が同じシリーズ A の W/C=50% 供試体と大きな相違は観察されなかった。 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ の増加に伴い膨張率は大きくなるものの、 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=1.2\%$ の配合では、材齢 1 年における膨張率は 0.05% 以下であった。JIS A 5308 のモルタルバー法に規定されている促進条件下 ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=1.2\%$) における実験結果より、ガラス粉末はセメント置換した場合であっても、アルカリシリカ反応による膨張を著しく促進する作用は少ないものと考えられる。

$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=2.0\%$ 時においては、ガラス粉末でセメント置換した供試体の膨張率は、ガラス粉末を使用していない基準モルタルより材齢 1 年においても小さい。

3. 2 強度試験

ガラス粉末で細骨材またはセメントを置換したモルタルの圧縮強度を各々図-8 と図-9 に示す。ガラス粉末で細骨材を置換すると圧縮強度、曲げ強度ともに強度低下が観察された。しかし、置換率の増加に伴う大きな強度低下は認められなかった。置換率の大きい 40% では、同

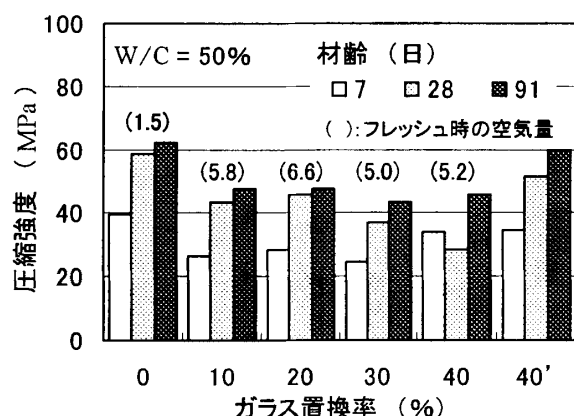


図-8 モルタルの圧縮強度とガラス置換率の関係（細骨材置換）

一配合であっても基準モルタルと同程度の強度を示すものがあった。一般的な傾向としては、ガラス粉末を用いることで幾分強度が低下する。これは、ガラス粉末の混入により空気連衡性が高まることが一因と考えられる。材齢 91 日において、ガラス粉末で細骨材を置換したモルタルの圧縮強度は、置換していない基準モルタルより約 30%程度、曲げ強度で約 20%程度低下した。

ガラス粉末でセメント置換した場合、置換率の増加に伴いモルタルの強度は直線的に低下した。粉末度の高いガラス微粉末（比表面積：4000cm²/g）を用いると、ガラスのポゾラン反応によりモルタルの圧縮強度が増加するとの報告がある⁷⁾。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、ガラス粉末のポゾラン反応によるモルタルの大きな強度増加は期待できない。

4. まとめ

多量のガラス粉末で細骨材あるいはセメントを置換（置換率 30～40%）しても、JIS A 5308 附属書 8：モルタルバー法に規定されている促進条件下（W/C=50%，Na₂O_{eq}=1.2%）では、アルカリシリカ反応による有害な膨張は観察されなかった。

廃ガラスビン粉末は多量のアルカリを含有しているものの、ガラス粉末中のアルカリはアルカリシリカ反応による膨張を著しく促進しない。廃

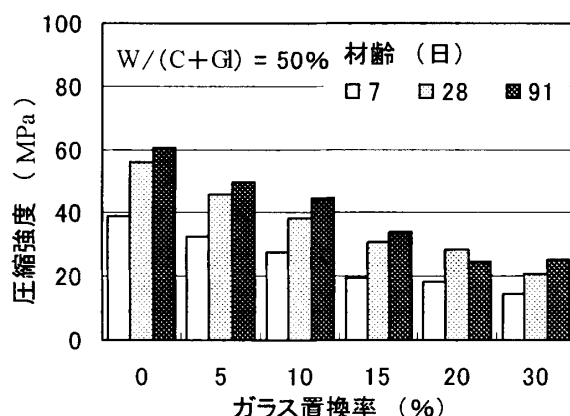


図-9 モルタルの圧縮強度とガラス置換率の関係（セメント置換）

ガラスビン粉末は、新たなコンクリート用材料としての可能性を有しているものと考えられる。

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，185p.，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) 浅賀喜与志，伊藤彰吾，廣島明男，鯉淵清，大門正機：びんガラス粉末を配合したポルトランドセメントの水熱反応，Inorganic Materials, Vol.2, No.259, pp.473-479, 1995
- 4) 廣瀬 哲，小澤尚志，浅賀喜与志，大門正機：ガラス粉末を混合したポルトランドセメントの硬化体特性，セメント・コンクリート論文集，No.50，pp.80-85，1996
- 5) 榎場重正，川村満紀，岡田光芳：アルカリ骨材反応に関する基礎的研究，材料，Vol.26，No.290，pp.1078-1084，1977.11
- 6) 伊在煥：コンクリート中のアルカリ・シリカ反応に関する基礎的研究，東京大学学位論文，pp.129-130，1985.12
- 7) 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，pp.114-119，1995