

廃ガラスカレットを用いた気泡混合軽量土の開発

大阪工業大学工学部 教授 日置和昭

1. はじめに

気泡混合軽量土 (FCB : Foamed Cement Banking) は、①軽量で硬化後は自立する、②流動性に優れ施工が容易 (ポンプで最大 500m 程度の圧送が可能)、③一軸圧縮強さ (300~1,000kN/m²) や単位体積重量 (5.0~15.0kN/m³) の調節が可能、④現地発生土など建設副産物の利用が可能などの特長を有し、我が国の社会資本整備には欠かせない工法の一つとなっている。気泡混合軽量土 (以下、FCB) は、2019 年度末までに累計で約 630 万 m³ の施工実績があり、その大半はエアミルク (水+セメント+気泡) であるが、近年は河川等の改修工事などにも用途が拡大し、湿潤密度が 1.000g/cm³ を超えるエアモルタル (水+セメント+砂質土+気泡) の需要が増加傾向にある。

一方、建設材料としての有効利用・大量消費が期待されているリサイクル材料の一つに、廃ガラスカレットがある。ここで取扱う廃ガラスカレットは、廃ガラス瓶残渣などを破碎・エッジレス加工したもので、素手で強く握っても痛くないとされる、鋭利度 : 0.5 以下、円形度 : 0.75 以上を満足し、かつ土壤環境基準 26 項目も満足するリサイクル材料であり、エコマーク商品認定に加え、大阪府認定リサイクル製品にも登録されている。また、廃ガラスカレットは、突固めによる破碎はほとんど認められず、すり減りに対する抵抗力も再生路盤材の品質規格値を十分に満足し得るリサイクル材料であることも確認されており¹⁾、今後、建設分野での適用拡大が期待されている。

本研究課題では、廃ガラスカレットの FCB (エアモルタル) への適用性を把握するため、廃ガラスカレットを用いた FCB の配合試験 (密度試験、コンシステンシー試験、一軸圧縮試験) と、X 線 CT 撮影による FCB 供試体の内部構造観察、さらに ASR (アルカリシリカ反応) 試験を実施した。また、比較検討のため、自然砂を用いた FCB についても、同様の試験を実施した。

2. 自然砂を用いた FCB の配合試験

配合試験に用いた自然砂は、石灰砕砂、熊野川砂、丹波山砂、丹波川砂、北九州砂、西宮砂、海砂、西島砕砂の 8 種類であり、それらの粒度特性を表 1 に示す。土粒子の密度は JSF T 111-1990 『土粒子の密度試験方法』に準拠し求め、礫分から細粒分までの各含有率 (%) と 60% 粒径から 10% 粒径までの各通過粒径 (mm) は JIS A 1204-2009 『土の粒度試験方法』に準拠し求めた。また、コンクリート分野において、骨材の大きさの概略値を示す指数として用いられる粗粒率は JIS A 1102-2014 『骨材のふるい分け試験方法』に準拠し求めた。

FCB (エアモルタル) の配合仕様は表 2²⁾ に示す K3-10 とし、供試体の作製方法は NEXCO 試験法 117-2015 『気泡混合軽量土の供試体作製方法』に従った。セメントは住友大阪セメント (株) 製の高炉セメント B 種を用い、起泡剤も同社製のスミシールド As1 を 24 倍希釈、25 倍発泡として用いた。

密度試験は、NEXCO 試験法 127-2015 『フレッシュな気泡混合軽量土の密度・コンシステンシー試験方法』に従い実施した。コンシステンシー試験は、NEXCO 試験法 127-2015 『フレッシュな気泡混合軽量土の密度・コンシステンシー試験方法』に従い実施した。一軸圧縮試験は、JIS A 1216 (直径 : 5cm, 高さ : 10cm の供試体を使用) に従い実施した。なお、各々の品質管理基準は、表 3²⁾³⁾ に示すとおりとした。

自然砂を用いた FCB (以下、自然砂 FCB) の配合試験結果 (密度試験結果、コンシステンシー試

表 1 配合試験に用いた自然砂の粒度特性

		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
		石灰砕砂	熊野川砂	丹波山砂	丹波川砂	北九州砂	西宮砂	海砂	西島砕砂
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)		2.717	2.702	2.697	2.699	2.671	2.646	2.649	2.681
含有率 (%)	2mm以上 (礫分)	6.2	16.2	1.1	21.6	16.8	12.6	6.3	10.6
	0.85~2mm (粗砂)	21.6	34.3	31.1	30.6	12.7	25.9	16.0	44.1
	0.25~0.85mm (中砂)	37.3	36.8	45.5	31.5	32.3	40.2	53.8	34.3
	0.075~0.25mm (細砂)	25.5	9.1	17.1	12.1	31.6	17.2	20.9	7.0
	0.075mm以下 (細粒分)	9.4	3.6	5.2	4.2	6.6	4.1	3.0	4.0
通過粒径 (mm)	60%粒径 D_{60}	0.56	1.09	0.73	1.19	0.51	0.82	0.55	1.11
	50%粒径 D_{50}	0.40	0.86	0.59	0.91	0.35	0.63	0.44	0.93
	30%粒径 D_{30}	0.22	0.52	0.34	0.47	0.20	0.35	0.29	0.59
	20%粒径 D_{20}	0.16	0.37	0.22	0.30	0.15	0.24	0.23	0.41
	10%粒径 D_{10}	0.08	0.20	0.13	0.17	0.10	0.15	0.17	0.23
均等係数 U_c		6.9	5.3	5.73	6.85	4.83	5.47	3.33	4.81
曲率係数 U'_c		1.03	1.22	1.27	1.07	0.77	1.01	0.92	1.35
粗粒率 FM		2.48	2.95	1.95	2.76	2.40	2.75	2.08	2.92

験結果, 一軸圧縮試験結果) を図 1~図 3 に示す。これらの図から, 密度試験では, 全ての自然砂で管理基準値を満足し, コンシステンシー試験では, 丹波川砂, 西宮砂を除く 6 種類の自然砂で管理基準値を満足していることが見て取れる。一方, 一軸圧縮試験 (材齢 28 日) では, 全ての自然砂で管理基準値を満足していないことが確認できる。

表 2 FCB (エアモルタル) の配合仕様 (K3-10)²⁾

単位量 (kg/m ³)					空気量 A (%)	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)
セメント C	砂 S	混練水 m_1	起泡剤 m_2	希釈水 m_3		
199	597	226	0.81	18.63	46.5	1.04

表 3 FCB の品質管理基準^{2),3)}

湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	フロー値 F (mm)	一軸圧縮強さ (材齢28日) q_u (kN/m ²)
1.04±0.1	180±20	1,200以上

3. 廃ガラスカレットを用いた FCB の配合試験

配合試験に用いた廃ガラスカレット (GC) は, GC-a~GC-g の 7 種類であり, それらの粒度特性を表 4⁴⁾に示す。粒子密度や粒度特性は自然砂と同様の方法で求め, また, FCB (エアモルタル) の配合仕様や供試体の作製方法なども自然砂を用いた場合と同様 (砂の代替材として廃ガラスカレットを用いたこと以外は全て同様) とした。

廃ガラスカレットを用いた FCB (以下, ガラスカレット FCB) の配合試験結果 (密度試験結果, コンシステンシー試験結果, 一軸圧縮試験結果) を図 4⁴⁾~図 6⁴⁾に示す。これらの図から, 密度試験では, GC-g の湿潤密度が管理基準値の上

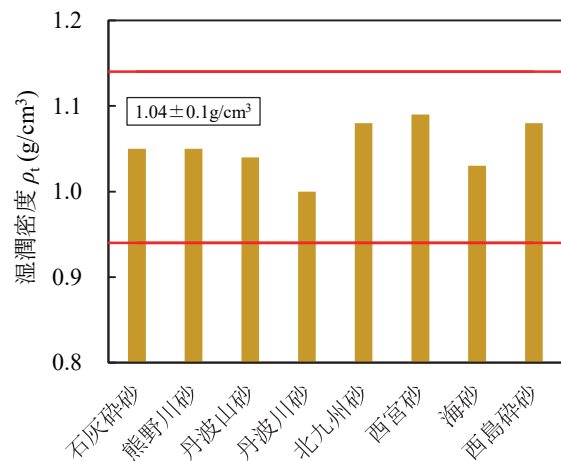


図 1 密度試験結果 (自然砂)

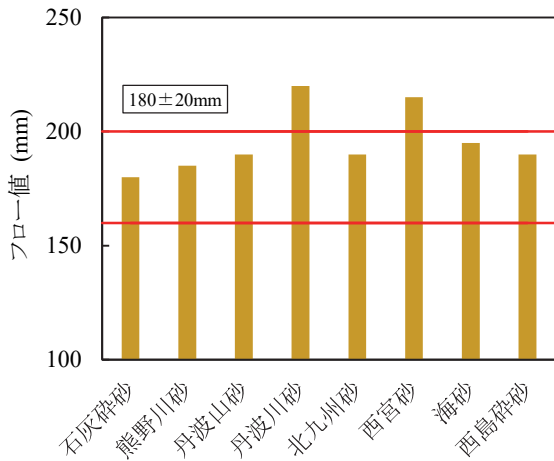


図2 コンシステンシー試験結果(自然砂)

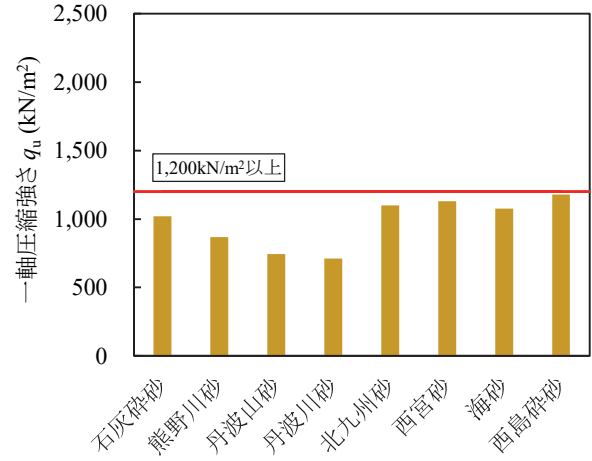


図3 一軸圧縮試験結果(自然砂)

表4 配合試験に用いた廃ガラスカレットの粒度特性⁴⁾

		No.1 GC-a	No.2 GC-b	No.3 GC-c	No.4 GC-d	No.5 GC-e	No.6 GC-f	No.7 GC-g
粒子密度 ρ_{cc} (g/cm ³)		2.508 ~ 2.519						
含有率 (%)	2mm以上 (礫分)	13.5	13.9	0.0	0.0	1.8	0.3	0.0
	0.85~2mm (粗砂)	35.9	33.4	41.5	38.8	26.3	11.9	0.0
	0.25~0.85mm (中砂)	37.9	36.0	43.8	41.7	46.7	58.3	11.6
	0.075~0.25mm (細砂)	8.7	9.7	10.1	11.3	12.5	22.0	40.8
	0.075mm以下 (細粒分)	4.0	7.0	4.6	8.1	12.6	7.5	47.6
通過粒径 (mm)	60%粒径 D_{60}	1.04	1.01	0.88	0.84	0.67	0.48	0.13
	50%粒径 D_{50}	0.84	0.80	0.74	0.70	0.53	0.40	0.08
	30%粒径 D_{30}	0.51	0.47	0.44	0.42	0.31	0.25	0.06
	20%粒径 D_{20}	0.36	0.31	0.30	0.26	0.19	0.19	0.04
	10%粒径 D_{10}	0.21	0.14	0.18	0.11	0.06	0.11	0.01
均等係数 U_c		4.96	7.15	4.89	7.64	10.53	4.17	9.52
曲率係数 U'_c		1.17	1.59	1.22	1.91	2.21	1.16	1.67
粗粒率 FM		2.95	2.78	2.70	2.54	2.13	2.11	0.51

限に近い値を示しているものの、GC-a~GC-g の全てで管理基準値を満足し、コンシステンシー試験では、GC-g を除く GC-a~GC-f で管理基準値を満足していることが見て取れる (GC-g は GC-a ~GC-f と比較し細粒分が多いため、水・セメント・GC-g で練り上げたモルタルは粘性が高い状態にあったものと考えられる)。また、一軸圧縮試験 (材齢 28 日) では、GC-a~GC-b は管理基準値に到達していないものの、GC-c~GC-g は管理基準値を満足していることが確認できる。特に、GC-g は管理基準値を大きく超えているが、これ

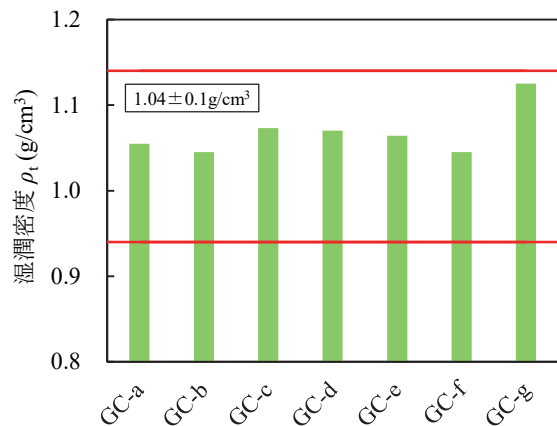


図4 密度試験結果 (廃ガラスカレット)⁴⁾

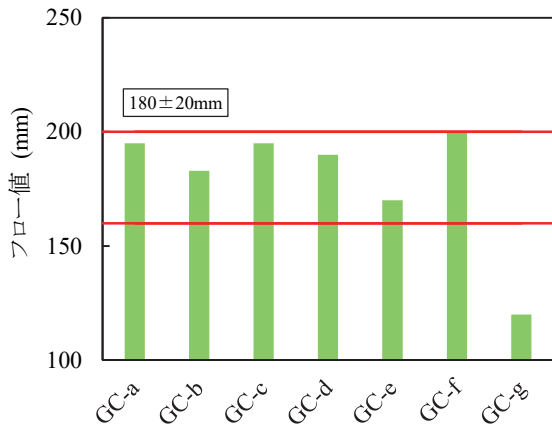


図5 コンシステンシー試験結果(廃ガラスカレット)⁴⁾

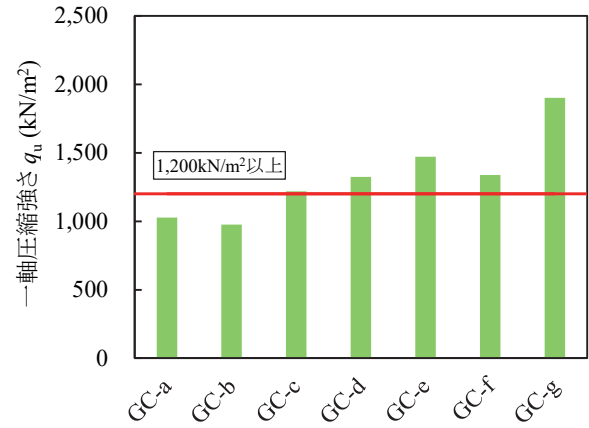


図6 一軸圧縮試験結果(廃ガラスカレット)⁴⁾

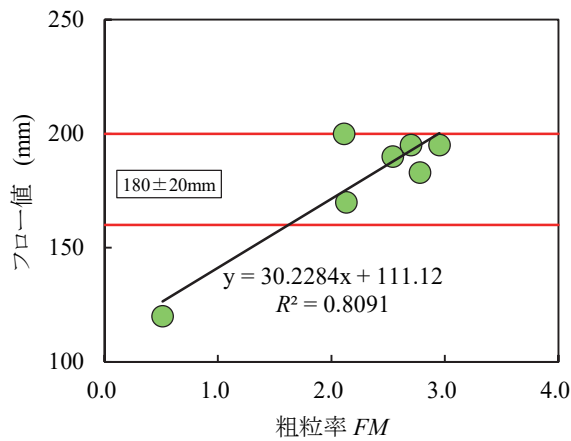


図7 フロー値と粗粒率 FM の関係
(廃ガラスカレット)⁴⁾

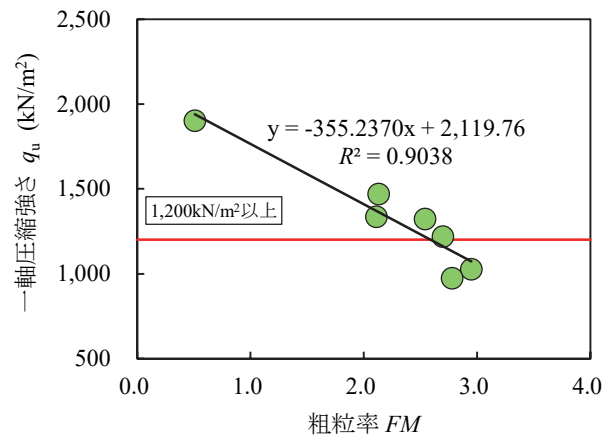


図8 一軸圧縮強さ q_u と粗粒率 FM の関係
(廃ガラスカレット)⁴⁾

はモルタルの粘性が高いことに起因して、気泡の混合過程で消泡・破泡が生じたためと考えられる（このことは、GC-gの湿潤密度が管理基準値の上限に近い値を示していることと調和的である）。

次に、配合試験結果に基づき、ガラスカレット FCB のフロー値と粒度特性（礫分含有率，粗砂含有率，中砂含有率，細砂含有率，細粒分含有率，60%粒径 D_{60} ，50%粒径 D_{50} ，30%粒径 D_{30} ，20%粒径 D_{20} ，10%粒径 D_{10} ，均等係数 U_c ，曲率係数 U'_c ，粗粒率 FM ）との線形回帰を試みた結果，決定係数 R^2 （回帰式の精度，すなわち，回帰式によってデータをどれくらい説明できているかを表す値）は，細粒分含有率：0.9407，粗粒率 FM ：0.8091（図7⁴⁾参照），中砂含有率：0.7247の順に大きい値を示した。同様に，ガラスカレット FCB の一軸圧縮強さと粒度特性との線形回帰では，決定係数 R^2 は，20%粒径 D_{20} ：0.9181，粗粒率 FM ：0.9038（図8⁴⁾参照），30%粒径 D_{30} ：0.8732の順に大きい値を示した。すなわち，フロー値，一軸圧縮強さともに，決定係数 $R^2 > 0.800$ を示したのは粗粒率 FM との回帰式のみであり，ガラスカレット FCB のフロー値や一軸圧縮強さは，粗粒率 FM との回帰式から比較的高い精度で予測可能と思われる。これらの回帰式を活用すると，粗粒率 FM が1.7～2.6程度（フロー値の観点からは粗粒率 FM が1.7～3.0程度，一軸圧縮強さの観点からは粗粒率 FM が2.6程度以下）のガラスカレット FCB は品質管理基準（表3参照）を全て満足し，FCB に適用可能と判断できる。なお，自然砂 FCB についても，同様の線形回帰を試みたが，フロー値，一軸圧縮強さと

もに、決定係数 $R^2 > 0.250$ となる回帰式はほぼ見当たらなかった（フロー値と礫分含有率の回帰式のみ決定係数 R^2 が 0.2513 を示した）。

4. X線 CT 撮影による FCB 供試体の内部構造観察

配合試験の結果、ガラスカレット FCB の方が自然砂 FCB よりも強度面で有利になることが明らかとなった。この要因としては、両者の内部構造の違いが考えられる。ここでは、両者の内部構造を X 線 CT 撮影により観察した。大阪工業大学が所有する X 線 CT 装置の基本スペックを表 5 に、また外観を写真 1 に示す。なお、X 線 CT 装置の撮影条件は、表 6 に示すとおりである。

X 線 CT 撮影に用いた供試体（直径：5cm，高さ：10cm）は、自然砂（西島砕砂）を用いた 3 供試体（S-1, S-2, S-3）と廃ガラスカレット GC-f を用いた 3 供試体（G-1, G-2, G-3）である。両者の配合仕様は、表 2 に示したとおりである。なお、X 線 CT 撮影は材齢 28 日で行い、その直後に、JIS A 1216 に従い、一軸圧縮試験を実施した。

X 線 CT 撮影の結果として、自然砂 FCB 供試体（S-1, S-2, S-3）1/2 高さの水平断面画像を写真 2 に、またガラスカレット FCB 供試体（G-1, G-2, G-3）1/2 高さの水平断面画像を写真 3 に示す。X 線 CT 画像の特徴としては、密度の高い物質ほど白く、逆に密度の低い物質は黒く撮影される。従って、自然砂や廃ガラスカレットは白く撮影され、気泡は黒く撮影される。これらの写真によると、ガラスカレット FCB 供試体（G-1, G-2, G-3）の方が自然砂 FCB 供試体（S-1, S-2, S-3）よりも均質かつ密実であることを確認できる。

X 線 CT 撮影後の供試体を用いた一軸圧縮試験結果を表 7 に示す。これによると、ガラスカレット FCB 供試体（G-1, G-2, G-3）の方が自然砂 FCB 供試体（S-1, S-2, S-3）よりも一軸圧縮強さが大となることを再確認でき、X 線 CT 撮影画像の様子を裏付ける結果が得られている。

表 5 X 線 CT 装置の基本スペック

型式	ScanXmate-D150SS270
X線管	密閉型マイクロフォーカスX線管
方式	反射型密封管
X線管電圧	40-150kV
X線管電流	10-500 μ A
最大出力	30W
画像マトリックス	258 \times 253
	516 \times 506
	1,032 \times 1,012
外形寸法	1,460W \times 1,140D \times 1,600H
	重量
焦点寸法	5 μ m/4W未満
	7 μ m/4-10W(小焦点)
	20 μ m/10-30W(中焦点)
X線出射角	約43°
スキャン&再構成	CTハーフ/フルスキャン
	CTノーマル/オフセットスキャン
	CT連続スキャン
	透視連続スキャン(16fps/8fps)



写真 1 X 線 CT 装置の外観(大阪工業大学)

表 6 X 線 CT の撮影条件

X線管電圧	150kV
X線管電流	200 μ A
ビニングモード	1 \times 1
ピクセルサイズ	0.1270mm
画素数	1,856 \times 1,472
幾何学的拡大率	3.24621
プロジェクション	3,000枚
撮影方法	多段撮影(2段)

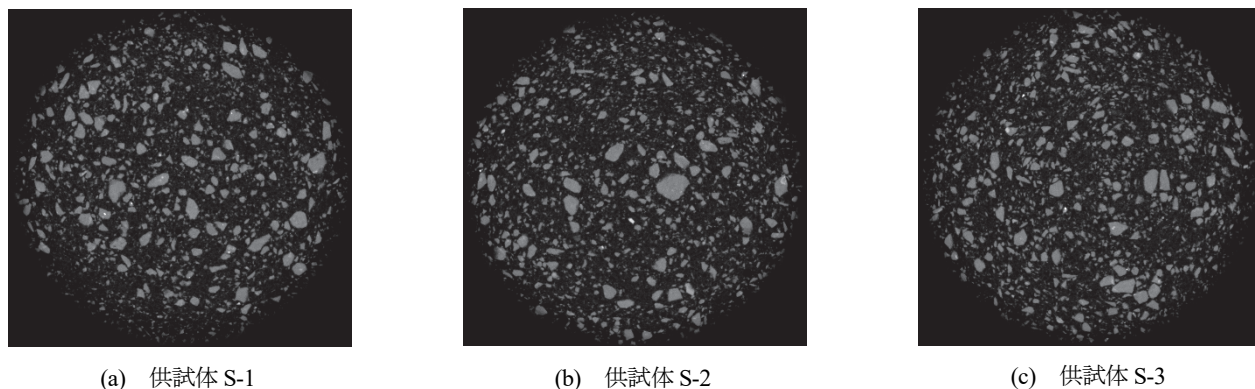


写真 2 自然砂(西島砕砂)を用いた FCB 供試体 1/2 高さの水平断面画像

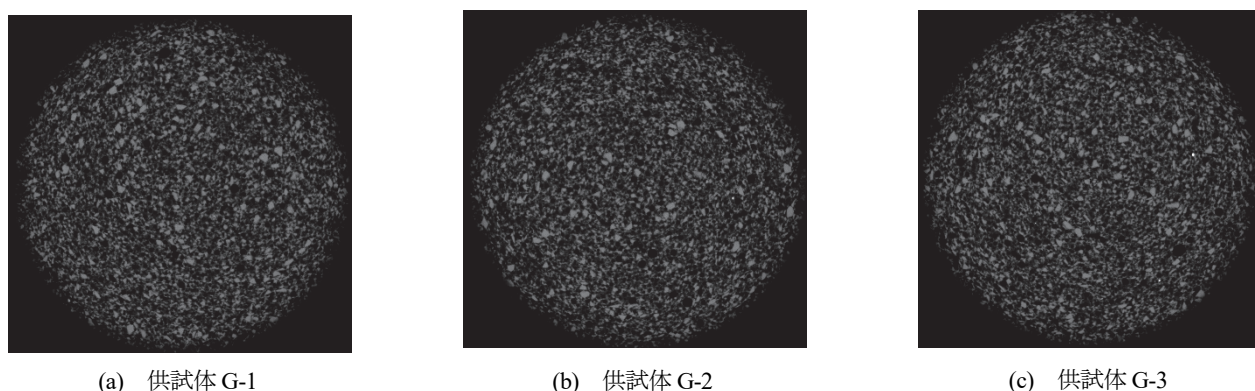


写真 3 廃ガラスカレット GC-f を用いた FCB 供試体 1/2 高さの水平断面画像

5. 廃ガラスカレットを用いた FCB の ASR 試験

廃ガラスカレットは、シリカ成分を多く含む廃ガラスの破碎・加工品であるため、それを用いた FCB の ASR (アルカリシリカ反応) 劣化については、その可能性の有無について検討しておく必要がある。ここでは、ガラスカレット FCB を対象に ASR 試験 (JIS A 1146-2017 : モルタルバー法を抛り所とした ASR 試験) を実施し、その膨張特性を確認した。

JIS A 1146-2017 の概略を表 8 に示す。ガラスカレット FCB の ASR 試験は、この JIS 規格を抛り所に実施した。続いて、ASR 試験に用いた供試体の配合仕様と実施条件を表 9⁵⁾に示す。まず、case1~case2 では、廃ガラスカレットの粒径の違いが ASR による膨張特性に与える影響を把握するため、廃ガラスカレットを用いたモルタルの ASR 試験を実施した。JIS A 1146-2017 との違いは、砂の代替材として廃ガラスカレット (GC-c, GC-f) を用いたこと、高炉セメント B 種を用いたことである。次に、case3~case5 では、配合仕様の違いが ASR による膨張特性に与える影響を把握するため、ガラスカレット FCB の ASR 試験を実施した。JIS A 1146-2017 との違いは、砂の代替材として廃ガラスカレット (GC-f) を用いたこと、高炉セメント B 種を用いたこと、FCB の配合仕様 (K1-10, K3-10, K5-10) ²⁾で実施したこと、脱型を練上り後 7 日

表 7 X 線 CT 撮影した供試体の湿潤密度および一軸圧縮強さ

供試体	湿潤密度 ρ_t (g/cm^3)	一軸圧縮強さ q_u (kN/m^2)
S-1	0.960	908
S-2	0.953	961
S-3	0.955	928
G-1	0.987	1,652
G-2	0.980	1,604
G-3	0.981	1,622

で実施したことである。また、ASR による膨張特性を比較検討するため、case6～case7 では、自然砂 FCB の ASR 試験も実施した。JIS A 1146-2017 との違いは、試料調整していない自然砂（西宮砂，西島砕砂）を用いたこと，高炉セメント B 種を用いたこと，FCB の配合仕様（K3-10）で実施したこと，脱型を練上り後 7 日で実施したことである。

JIS A 1146-2017 では、供試体 3 本の平均膨張率が練上がりからの材齢 26 週で 0.100%未満の場合は“無害”と判定し、0.100%以上の場合は“無害でない”と判定する。これを参考に、case1～case2 では供試体 3 本の平均膨張率を求め、また case3～case7 では供試体 6 本の平均膨張率を求めた（FCB を対象とした ASR 試験は前例がないため、case3～case7 では供試体を各々 6 本作製した）。なお、case6 については試験の開始が遅れ、材齢 26 週の結果が得られていない。

ASR 試験結果を図 9⁵⁾に示す。同図より、全てのケースにおいて、材齢 26 週（case6 は材齢 13 週）の平均膨張率が 0.100%未満であること [case1～case7]，モルタルの場合、平均粒径 D_{50} の小さい廃ガラスカレットを使用した方が平均膨張率は小となる傾向にあること [case1～case2]，モルタルと FCB を比較すると、配合仕様に起泡剤が含まれる FCB の方が平均膨張率は大となること（これは JIS

表 8 JIS A 1146-2017 の概略

	試料粒度分布表		
	ふるいの公称目開き (通過)	残留 (残留)	質量分率(%) (粒度区分B)
試料調整	4.75mm	2.36mm	-
	2.36mm	1.18mm	5 ^{※1}
	1.18mm	600 μ m	35
	600 μ m	300 μ m	40
	300 μ m	150 μ m	20
セメント	普通ポルトランドセメント		
配合	水+NaOH水溶液 ^{※2} (ml)	300 \pm 1	
	セメント(g)	600 \pm 1	
	表乾試料(g)	1350 \pm 1	
脱型	24h \pm 2hで実施		
測定	練上がりから 材齢2週，4週，8週，13週，26週で測定		

※1 粒径2.5～1.2mmの試料を質量分率で5%採取できない場合は、粒径1.2～0.6mmの試料を40%としてもよい。

※2 NaOH水溶液の量は、セメントの全アルカリがNa₂Oeqで1.2%とする。

表 9 ASR 試験に用いた供試体の配合仕様と実施条件⁵⁾

case	1	2	3	4	5	6	7
種類	モルタル		FCB(エアモルタル)				
試料(砂，廃ガラスカレット) ^{※1}	廃ガラスカレット			自然砂			
	GC-c	GC-f			西宮砂	西島砕砂	
セメント	高炉セメントB種						
仕様	モルタル	K1-10	K3-10	K5-10	K3-10		
水+NaOH水溶液 ^{※2} (ml)	300 \pm 1	—	—	—	—		
セメント(g)	600 \pm 1	—	—	—	—		
表乾試料(g)	1350 \pm 1	—	—	—	—		
配合	セメント C (kg/m ³)	—	278	199	153	199	
	砂(廃ガラスカレット) S (kg/m ³)	—	278	597	765	597	
	混練水 m ₁ (kg/m ³)	—	236	226	237	226	
	起泡剤 m ₂ (kg/m ³)	—	0.95	0.81	0.70	0.81	
	希釈水 m ₃ (kg/m ³)	—	21.85	18.63	16.10	18.63	
	空気量 A (%)	—	54.5	46.5	41.5	46.5	
	湿潤密度 ρ_1 (g/cm ³)	—	0.82	1.04	1.17	1.04	
脱型	24h \pm 2hで実施		練上がり後7日で実施				
測定	練上がりから材齢 2週，4週，8週， 13週，26週で測定		脱型から材齢2週，4週，8週，13週，26週で測定				

※1 各試料は粒度区分分けせずに使用した。

※2 NaOH水溶液の量は、セメントの全アルカリがNa₂Oeqで1.2%とした。

1146-2017 に準拠し、供試体を 40℃で養生したことにより、供試体内部の気泡が膨張したためと考えられる) [case2～case4]，ガラスカレット FCB の膨張特性は配合仕様の影響をほとんど受けないこと [case3～case5]，自然砂 FCB の膨張特性はガラスカレット FCB のそれとは異なり、膨張後に収縮する傾向があること [case6～case7]，などが見て取れる。

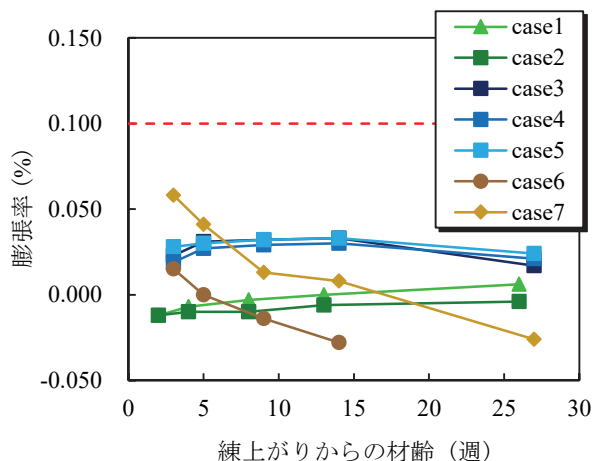


図9 ガラスカレット FCB の ASR 試験結果⁵⁾

6. まとめ

本研究課題では、社会資本整備における廃ガラスリサイクルの推進と、FCB（エアモルタル）の品質向上・安定化を目的に、ガラスカレット FCB の配合試験，X 線 CT 撮影，ASR 試験を実施した。得られた成果を要約すると、以下のとおりである。

- (1) 8 種類の自然砂を対象とした、自然砂 FCB の配合試験（配合仕様：K3-10）では、湿潤密度は全ての自然砂が、またフロー値は 6 種類の自然砂が品質管理基準を満足するものの、一軸圧縮強さについては全ての自然砂が品質管理基準を満足しないことが確認された。
- (2) ガラスカレット FCB の配合試験（配合仕様：K3-10）では、粗粒率が 1.7～2.6 程度の廃ガラスカレットが FCB に適しており、粗粒率がこの範囲内にある廃ガラスカレットを用いれば、湿潤密度、フロー値、一軸圧縮強さの品質管理基準を全て満足できる可能性が確認された。
- (3) X 線 CT 撮影による FCB 供試体の内部構造観察では、ガラスカレット FCB 供試体の方が自然砂 FCB 供試体と比較し、均質かつ密実であることが確認された。
- (4) ガラスカレット FCB の ASR 試験（JIS A 1146-2017：モルタルバー法を拠り所とした ASR 試験）では、材齢 26 週の平均膨張率を 0.100%未満に抑えられることが確認された。

今後は、ガラスカレット FCB の試験打設を行い、その品質を確認するとともに、同 FCB の長期耐久性についても検討する必要がある。なお、この開発は、大阪工業大学、㈱エステック、藤野興業㈱の共同開発であり、早期の実用化に向けて 3 者で技術研鑽を重ねていきたい。

最後に、FCB 供試体の X 線 CT 撮影では、大阪工業大学の三方康弘教授にご協力を頂いた。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日置和昭，橋本篤，服部健太，中岡明，山本剛一：廃ガラス再生砂礫およびその混合土の物理・力学特性について，第 12 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，pp.59-64，2017.
- 2) 三嶋信雄，益村公人：FCB 工法，理工図書，p.69，2000.
- 3) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：土工施工管理要領，p.4-4，2017.
- 4) 谷内建吾，小川恒郎，岡本郁也，吉原正博，日置和昭，山本剛一：廃ガラスカレットの気泡混合軽量土への適用性について，第 14 回地盤改良シンポジウム論文集，pp.311-314，2020.
- 5) 谷内建吾，日置和昭，小川恒郎，岡本郁也，吉原正博，山本剛一：廃ガラスカレットを用いた FCB の ASR 試験について，第 56 回地盤工学研究発表会，2021. (投稿中)