

# 論文 廃耐火レンガ細骨材を使用したコンクリートの力学的性状と中性化抵抗性

鶴田 浩章\*1・中村 健二\*2・山田 岳史\*3

**要旨:** 本研究は製鉄所で廃棄された廃耐火レンガのコンクリート用細骨材としての使用の可能性を明確にするための検討である。この廃耐火レンガには水分と反応して膨張し砂状に崩壊する「消化」と呼ばれる特性がある。本研究では廃耐火レンガ細骨材を、消化前にレンガを破砕して製造した未消化のものと、砂状に消化した後の消化済のもの 2 種類に分けて、モルタル及びコンクリートの細骨材に置換し、その力学的性状と中性化抵抗性の検討を行った。その結果、流動性、強度の点から置換率 10%程度であれば十分使用可能であり、廃耐火レンガ細骨材を置換することで高い中性化抵抗性を発揮することがわかった。

**キーワード:** 廃耐火レンガ, 消化, 細骨材, 強度, 中性化

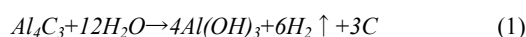
## 1. はじめに

製鉄所では転炉等に大量の耐火レンガが使用されている。この耐火レンガは操業中に摩耗や疲労によって損傷が進行し、操業の安定性が確保できなくなると、入れ替えのために解体され廃棄されている。近年、この大量に廃棄された耐火レンガの処理が問題となっている。

製鉄所の中には、廃耐火レンガを新たなレンガの材料として再利用するシステムを持ったものもあり、そのリサイクル率は95%である<sup>1)</sup>。しかし、転炉用耐火レンガの一つである MgO-C レンガのリサイクルは確立されていない。それは、そのレンガが有する「消化」という性質が影響している。MgO-C レンガの有効利用に関する報告もいくつかあるが、それらは高温特性<sup>2),3)</sup>や消化抵抗性<sup>4)</sup>に関するものである。粘土レンガを骨材としてリサイクルした例<sup>5)</sup>はあるが、MgO-C レンガ廃材をコンクリート用骨材としてリサイクルした事例はない。

そこで、本研究では各種耐火レンガの中で、比較的安価で大量に使用されている MgO-C レンガを対象とし、廃棄後の利用手段として、コンクリート用細骨材（廃耐火レンガ細骨材：MgO-C Bricks Fine Aggregate, 以下 MBFA と略）として使用することの可能性を明確にするための検討を行った。

この廃耐火レンガの特性として以下の式(1)のように、水分と反応して膨張し砂状に崩壊する「消化」と呼ばれる特性がある。一般に、廃棄された耐火レンガは数カ月で砂状に消化する。



そこで本研究では、消化前の MBFA を「未消化 MBFA」、

表-1 使用材料とその特性値

材料名	種類	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	粗粒率	破砕値 (%)
セメント (C)	普通ポルトランドセメント	3.15	-		
細骨材 (S)	川砂 (RS)	2.58*	1.20	2.74	15
	未消化 MBFA08	3.00*	1.75	2.59	22
	消化済 MBFA08	2.73*	1.74	2.96	20
	消化済 MBFA07	2.88*	1.07	2.85	17
粗骨材 (G)	砕石	2.68*	1.16	6.54	-
水 (W)	上水道水	1.00	-		
高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系	1.07	-		

消化後の MBFA を「消化済 MBFA」として、天然細骨材に置換してモルタル、コンクリートに使用することにより、力学的性状と中性化抵抗性の検討を行った。また、未消化 MBFA と消化済 MBFA の特性の違いが流動性及び強度性状にどのような影響を与えるかを検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 MBFA 及び使用材料

本研究では、2008 年度の同時期にサンプリングした廃耐火レンガを破砕した「未消化 MBFA08」、消化後の MBFA 「消化済 MBFA08」、2007 年度にサンプリングした消化後の MBFA を「消化済 MBFA07」として、これら 3 種類を検討対象とした。これらの MBFA と実験に使用したその他の材料の特性値を表-1 に示す。\*印の密度は表乾密度を示す。破砕値試験は BS812 を参考にして、粒径 5.0-2.5mm の粒子を使用し、10 分間で 100kN を載荷後、600 μm 以下の骨材の占める割合を測定した。

### 2.2 MBFA の製造及び使用方法

写真-1 は、廃耐火レンガブロックであり、写真-2

\*1 関西大学 環境都市工学部都市システム工学科准教授 博士(工学) (正会員)

\*2 大阪府都市開発 (株) 修士(工学)

\*3 (株)神戸製鋼所 機械研究所 主任研究員 博士(工学) (正会員)



写真-1 廃耐火レンガブロック (2007年採取)



写真-2 未消化 MBFA08



写真-3 消化済 MBFA08



写真-4 消化済 MBFA07

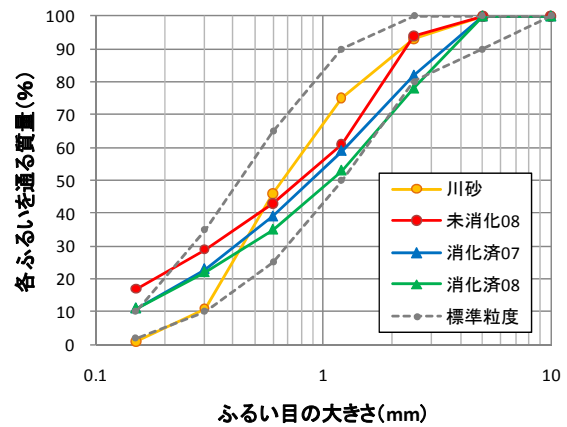


図-1 使用した細骨材の粒度分布

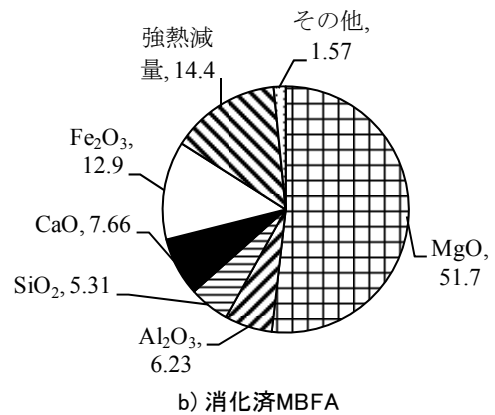
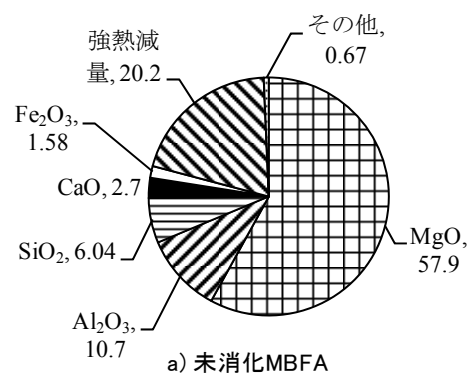


図-2 MBFAの化学成分 (単位 ; %)

は未消化 MBFA08, 写真-3は消化済 MBFA08, 写真-4は消化済 MBFA07である。未消化 MBFAは廃耐火レンガブロックをハンマーで粗割し、破砕機、粉砕機を用いて細骨材の状態にして使用した。消化済 MBFAは膨張崩壊を起こしているため、粒子の大きさは様々である。これらのうち、5mmふるいを通過するものを細骨材として使用した。それぞれの粒度分布は、図-1に示すように、土木学会のコンクリート用細骨材の標準粒度範囲内にほぼ収まり、未消化 MBFA08の0.15mmふるいを通過

量が少し多い程度であった。なお、MBFAは川砂の体積に対して内割置換とし、表乾状態で使用した。

図-2は、MBFAの化学成分を蛍光X線法で測定した結果である。分析した試料は2005年に採取し作製した未消化および消化済MBFAである。今回実験に使用した試料とは、採取時期が異なるが、MBFAの化学成分の一例として示す。消化の有無により化学成分に違いが生じているが、特に、 $Fe_2O_3$ に大きな違いが見られ、消化に関係すると考えられる $Al_2O_3$ にも違いが見られる。その他の成分としては、 $P_2O_5$ 、 $SO_3$ 、 $K_2O$ 、 $TiO_2$ 、V、MnOが定量された。

### 2.3 実験項目

本研究では、MBFAのコンクリート用細骨材としての特性を把握するために以下の検討を行った。

- (1) MBFAを使用したモルタルの流動性、強度性状
- (2) MBFAを使用したコンクリートの流動性、強度性状
- (3) モルタル及びコンクリートの流動性へのMBFAの表面粗さの影響
- (4) MBFAの「消化」の特性がモルタル及びコンクリートに与える影響
- (5) MBFAを使用したコンクリートの中酸化抵抗性

## 3. MBFAモルタルの流動性と強度性状

### 3.1 実験方法

モルタルの流動性及び強度性状の試験には、未消化MBFA08、消化済MBFA08、消化済MBFA07を使用した。モルタルの流動性を評価するためにモルタルのフロー試験を実施し評価した。モルタルは試験室におけるモルタルの作り方(JSCE-F 505-1999)にしたがって作製し、モルタルフロー試験はJIS R 5201にしたがって測定した。モルタルの流動性は15打フロー値を $190 \pm 5$ と設定し、MBFAの置換率は0%、10%、30%、50%とした。置換率0%の配合を基本配合とし、残りの置換率に関してはS/Cを変化させて所要の流動性が得られる配合を決定した。

モルタルの強度試験は、モルタルのフロー試験で決定した配合を用いて、モルタル供試体(4×4×16cm)を作製し、置換率0、10、30、50%の圧縮強度および曲げ強度を測定した。モルタルはJIS R 5201にしたがって材齢7日、28日、91日で強さ試験を行った。

### 3.2 実験結果

実験によって得られた各MBFAのモルタルの配合を表-2に、置換率と単位水量の関係を図-3に示す。フロー試験の結果より、全てのMBFAで所要の流動性を確保するには、置換率が増加するほど単位水量が増加する傾向が読み取れる。流動性の低下は未消化08、消化済08、消化済07の順で大きいことがわかる。また図-3より、同じ消化済MBFAでも流動性が大きく違うことがわか

表-2 モルタルの配合

置換率 (%)	S/C	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	RS	MBFA	
Plain	0	2.6	50	273	547	1421	0
未消化08	10	2.3	50	294	588	1200	153
	30	2.2		305	610	901	442
	50	2.0		324	647	604	691
消化済08	10	2.3	50	293	586	1196	153
	30	2.2		302	604	891	463
	50	2.1		318	637	593	679
消化済07	10	2.4	50	287	574	1226	153
	30	2.4		291	582	943	453
	50	2.4		294	589	666	747

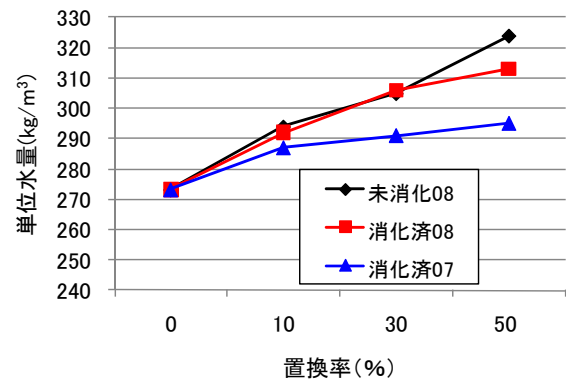


図-3 MBFAの置換率と単位水量の関係

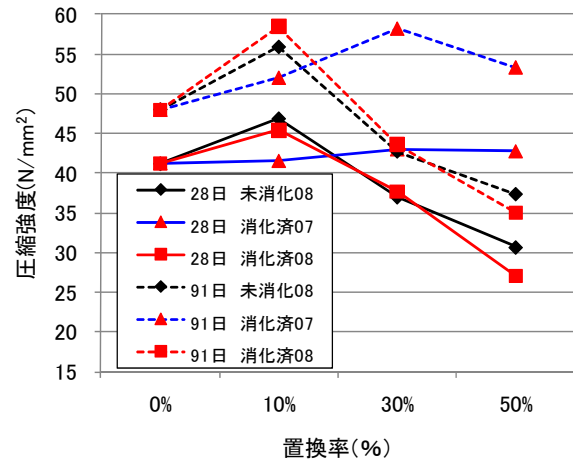


図-4 MBFAの置換率とモルタルの圧縮強度

った。

各MBFAの置換率と28日及び91日圧縮強度の関係を図-4に示す。未消化MBFA08と消化済MBFA08を置換したモルタルの圧縮強度は同じような傾向を示し、ともに置換率が10%の場合の28日及び91日強度では置換率0%に比べて10~20%程度の強度増加となる。しかし、置換率が30%以上となると、著しく強度が低下した。消化済MBFA07は置換率10%での強度上昇は未消化MBFA08、消化済MBFA08と比べて小さいが、置換率が30%、50%となっても強度は低下せず、置換率0%の場

表-3 コンクリートの配合

置換率 (%)	s/a (%)	SP 添加率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
			W	C	G	S		SP (g)
						RS	MBFA	
0	46.0	0.9	145	290	1032	846	0	2793
10	44.0	0.9	153	306	1050	715	92	2947
30	46.0	1.2	166	332	982	564	281	4263

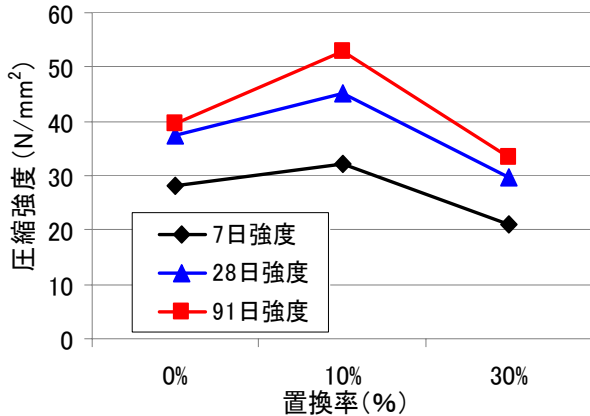


図-5 未消化 MBFA08 を使用したコンクリートの圧縮強度

合と同等以上の強度があった。この理由は明確にはわかっていないが、表-1 に示した MBFA の破砕値の値から消化済 MBFA07 が他の MBFA よりも若干骨材自体の強度が大きいことが影響しているのではないかと考えている。

#### 4. MBFA を使用したコンクリートの流動性と強度性状

##### 4.1 実験方法

コンクリートは未消化 MBFA08 を使用し、置換率は 0, 10, 30% とした。スランブ 8±1cm, 空気量 5±0.5%, 水セメント比 50% と設定し、所要の流動性を確保できるように単位水量, 細骨材率, SP 添加率を変化させながら配合を検討した。スランブ, 空気量は JIS A 1101, JIS A 1116 にしたがって測定した。

所要の流動性が確保できる配合が決定した後、強度試験用供試体を作製し、置換率ごとに材齢 7 日, 28 日, 91 日強度を JIS A 1106, JIS A 1113, JIS A 1108 にしたがって測定した。

##### 4.2 実験結果及び考察

未消化 MBFA08 を使用したコンクリートの配合を表-3 に、圧縮強度と材齢の関係を図-5 に示す。表-3 より置換率が増加するにつれて所要の流動性を確保するために単位水量が増加する傾向が読み取れる。図-5 より置換率 10% では置換率 0% 以上の強度があり、長期強度の伸びも置換率 0% より大きいことがわかる。この理由については、微粉やセメントペースト量の影響の他 MBFA の強度等にも関係していると考えているが、明確に

表-4 粒度別の十点平均粗さ (単位: μm)

粒度	川砂	砕砂	未消化08	消化済07	消化済08
2.5-1.2(mm)	11.9	14.3	18.2	14.4	19.2
1.2-0.6(mm)	15.5	16.4	24.0	17.4	23.3

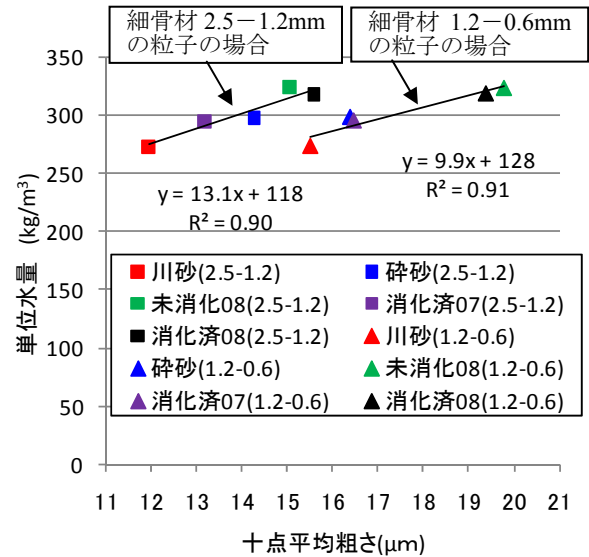


図-6 十点平均粗さとモルタルの単位水量の関係 (置換率 50% の場合)

は把握できていない。置換率 30% では置換率 0% よりも強度が低く、MBFA の骨材強度が低いことが影響していると考えられる。これは、表-1 の破砕値の値からそのように推測しているが、今後検討を要する事項である。

#### 5. MBFA の骨材表面粗さが流動性に与える影響

##### 5.1 実験方法

3 章及び 4 章において、MBFA の置換率の増加に伴いモルタル及びコンクリートの単位水量が増加した。ここでは、その理由を明らかにするための検討を行った。既往の研究より、細骨材の表面の粗さとモルタルの流動性には相関があると言われている<sup>6)</sup>。そこで MBFA の使用による流動性の低下と MBFA の表面粗さの関係を明らかにするために、デジタルマイクロスコープを用いて細骨材表面の十点平均粗さを測定することによって評価した。十点平均粗さとは、骨材表面を拡大して、その画像から表面の凹凸を測定して得た骨材断面曲線から基準長さだけを抜き取った部分において、骨材断面曲線の最高点から 5 番目までの山頂の標高の平均値と、最深から 5 番目までの谷底の標高の平均値との差の値をマイクロメートル (μm) で表わしたものである。十点平均粗さの測定距離は 500 μm, 各粒度の測定個数は 20 個と設定した。測定サンプルは川砂, 砕砂, 各 MBFA の 5 種類にし、測定粒度を 2.5-1.2mm, 1.2-0.6mm とした。

##### 5.2 実験結果及び考察

粒度別の十点平均粗さを表-4 に示す。また MBFA の



置換率 50% (モルタルの配合) 時の単位水量と十点平均粗さを比較するため、各 MBFA の十点平均粗さは川砂の値と各 MBFA の値の平均値とした。各細骨材の十点平均粗さとそれらを用いたモルタルの単位水量の関係を図-6 に示す。十点平均粗さの測定結果より、どちらの粒度においても未消化 MBFA08 と消化済 MBFA08 の表面が粗いこと、川砂の表面が最も滑らかであることがわかる。また単位水量と比較することで表面が粗い骨材ほど流動性が低下していることが読み取れ、骨材の表面粗さとモルタルの流動性には既往の文献の知見と同様高い相関性があると言える。したがって、MBFA の使用によるモルタル及びコンクリートの流動性の低下は骨材の表面が粗いことが一要因だと考えられる。

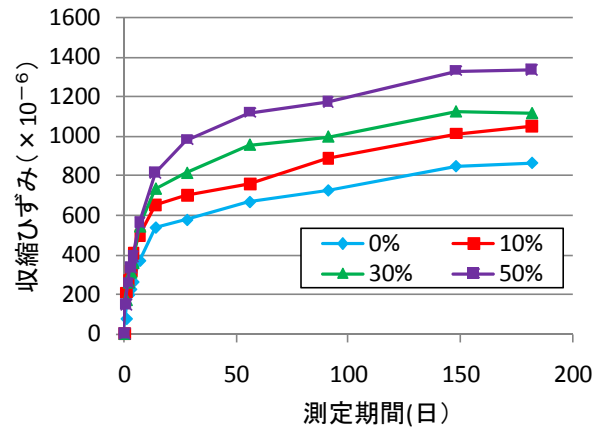


図-7 未消化 MBFA08 を使用したモルタルの収縮ひずみ

## 6. 「消化」がモルタル及びコンクリートに与える影響

### 6.1 実験方法

MBFA を細骨材として使用した場合、モルタル及びコンクリート内部で MBFA が「消化」の反応を起こし、膨張による強度低下を引き起こす可能性が考えられる。そこで消化による影響を調べるためモルタルの乾燥収縮試験及びコンクリートの超音波伝播速度測定を実施した。

モルタルの乾燥収縮試験は JIS A 1129-2 にしたがって行った。モルタル供試体の置換率は 0, 10, 30, 50% とし、配合は表-2 の配合とした。試験に使用する MBFA は未消化 MBFA08 と消化済 MBFA08 とした。

コンクリートの超音波伝播速度測定は、超音波伝播速度測定器を使用し、未消化 MBFA08 を使用したコンクリート内部の超音波伝播速度を測定し、材齢の進行に伴う伝播速度の変化を測定した。消化による膨張が発生すればコンクリート内部にひび割れや小さな空隙が発生し、超音波伝播速度に変化が見られると考えられる。MBFA の置換率は 0, 10, 30% とし配合は表-3 と同様とした。測定材齢は 7 日, 28 日, 91 日とし、測定する供試体は角柱 (100×100×400mm) を 3 本, 円柱 (直径 100mm 高さ 200mm) を 2 本とした。

### 6.2 実験結果及び考察

乾燥収縮試験により得られた未消化 MBFA08 を使用したモルタルの収縮ひずみを図-7 に示す。図-7 より MBFA の置換率が高いと収縮量が大きいことがわかる。また、消化済 MBFA08 を置換したモルタルでも同じ傾向となった。これは置換率が高くなるにつれて単位水量が多くなるため、乾燥収縮量が大きくなったと考えられる。

未消化 MBFA を使用したコンクリートの超音波伝播速度測定結果を図-8 に示す。どの置換率においても、材齢が進むにつれて伝播速度は上昇していく傾向が見られた。これは材齢が進むにつれてコンクリート内部の

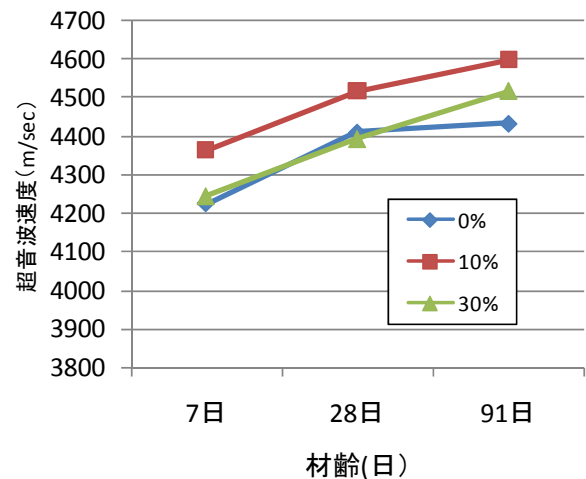


図-8 未消化 MBFA08 を使用したコンクリートの超音波伝播速度

水和反応が進み密実なコンクリートになっているからだと考えられる。本実験により得られた超音波伝播速度約 4200~4600m/s は ASTM C 597 の規格によるとコンクリートの品質として「優れている」に該当する。

以上の検討結果より MBFA を置換したモルタル及びコンクリートで「消化」による膨張性は確認できず、本検討で使用したブロックに対しては消化がモルタル及びコンクリートに与える悪影響はなかったと言える。

## 7. MBFA を使用したコンクリートの中性化抵抗性

### 7.1 実験方法

MBFA を使用したコンクリートの中性化性状を把握するために、JIS A 1153 にしたがって促進中性化試験を行った。中性化試験用供試体 (10×10×40cm) は未消化 MBFA08 を使用し、置換率 0, 10, 30% で表-3 の配合で作製し、材齢 4 週まで水中養生した後、材齢 8 週まで恒温室で静置した。材齢 9 週目から温度 20℃, 湿度 60%, 二酸化炭素濃度 5% の条件で促進中性化試験機を使い中

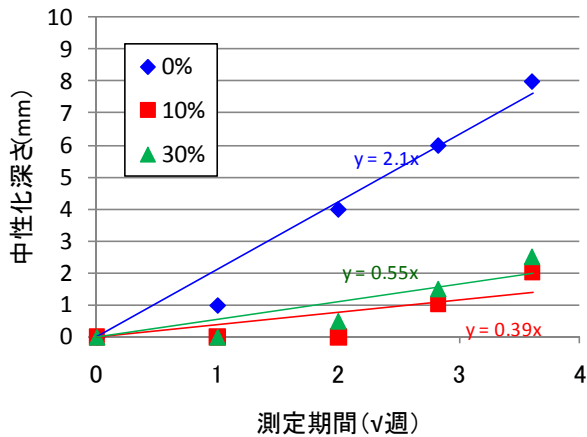


図-9 MBFA の置換率とコンクリートの中性化深さの関係

性を促進させた。中性化深さの測定は JIS A 1152 にしたがって測定した。

## 7.2 実験結果及び考察

促進期間 13 週までの結果を図-9 に示す。試験結果より、置換率 0% と比べ置換率 10, 30% では中性化速度が著しく遅くなり、置換率 10, 30% と比べて置換率 0% は 4~5 倍の中性化速度であることがわかる。

これは超音波伝播速度の結果(図-8)からもわかるように MBFA を使用することで、8 週間の前養生の間に置換率 0% よりも緻密なコンクリートになり、炭酸ガスが浸透しにくくなったと考えられる。しかし、図-5 の圧縮強度については、置換率 30% の場合が置換率 0% の場合よりも強度が低くなっている。これは、4.2 でも述べたように MBFA 自体の強度が低いことの影響であると考慮しており、さらに未消化 MBFA08 に関して実験中に消化が発生し影響を及ぼしていることを示す状況が観察されていないことや MBFA には微粉分が多めであることから、コンクリートはある程度緻密になっているものと考えている。ただし、MBFA の化学成分から何らかの形でアルカリが供給されたことも考えられ、この中性化抑制の効果がどのような影響で生じているかは詳細にはわかっていないので、今後追及していく必要があると考えている。

## 8. 結論

本研究の結果を以下にまとめる。

- (1) MBFA を置換したモルタル及びコンクリートの流動性は置換率が増加するにつれて低下した。
- (2) MBFA を置換したモルタル及びコンクリートの強度は置換率 10% において置換率 0% 以上の強度があった。
- (3) 未消化 MBFA を 10% 置換して使用した場合にはモルタルもコンクリートも長期強度の伸びが置換率 0% と比較して大きかった。
- (4) 細骨材の表面粗さの検討から 未消化 MBFA08, 消化済 MBFA07, 消化済 MBFA08 の骨材の表面粗さの違いが流動性に影響を与えていることが考えられる。
- (5) MBFA を使用したコンクリートは組織が緻密になることにより高い中性化抵抗性を有する。しかし、その詳細な影響メカニズムは明確ではなく、今後の検討が必要である。

以上のように流動性、強度性状、中性化抵抗性の検討より、未消化及び消化済 MBFA をモルタル及びコンクリート用細骨材として使う場合、置換率 10% 程度であれば十分使用可能であると言える。また、MBFA の消化の悪影響については、本研究の範囲内では認められなかった。ただし、未消化 MBFA が実験の過程の中で消化したかどうかは明確でなく、今後さらに検討する必要がある。

## 参考文献

- 1) 松田強志, 大坪浩昭, 天野正彦, : 使用後耐火物のリサイクル技術開発, 耐火物, Vol.58, No.3, p.158, 2006.4
- 2) Uchida, S and Ichikawa, K.: High-Temperature Properties of Unburned MgO-C Bricks Containing Al and Si Powders, Journal of American Ceramic Society, Vol.81, pp.2910-2916, Nov. 1998.
- 3) 内田茂樹, 市川健治, 山村 隆, 中村良介: 不焼成 MgO-C 煉瓦の加熱時の物理的特性変化, Journal of the Ceramic Society of Japan, Vol.104, pp.723-728, Aug. 1996.
- 4) 藤 正次郎, 杉本泰崇, 岡田裕直, 有吉駿三郎: MgO 含有原料の耐消化性と耐アルカリ性の比較, 耐火物技術協会原料専門委員会報告集, 65, pp.36-46, 2005.
- 5) Khalaf, F. M. and DeVenny, A. S.: Properties of New and Recycled Clay Brick Aggregates for Use in Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, pp.456-464, Aug. 2005.
- 6) 高海克彦ほか: 砕砂の粒子形状改善がモルタルフローに及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.67-72, 2005.