

論文 細骨材に対する焼却主灰の置換率および養生条件が無焼成レンガの圧縮強度に及ぼす影響

藤沼 智洋*1・藤倉 裕介*2・Sanjay PAREEK*3

要旨: CO₂削減, フライアッシュおよび都市ゴミ由来の焼却主灰の有効活用の観点から, 本研究では, フライアッシュおよび焼却主灰を原料とした無焼成レンガの圧縮強度について, 焼却主灰の細骨材に対する置換率, 養生条件を変動因子として, 実験的検討を行った。本実験での研究範囲における結論としては, 焼却主灰の置換率が增大すると, いずれの養生でも圧縮強度が低下する傾向を示した。一方, 高温で養生を行った場合, 養生時間が延びるにつれ, 圧縮強度が増大する傾向を示した。また, 微細構造の空隙と圧縮強度の相関性も併せて確認された。

キーワード: 無焼成レンガ, フライアッシュ (石炭灰), 焼却主灰, 圧縮強度, 細孔径分布

1. はじめに

CO₂排出量の問題が様々な場面で叫ばれているなか, 2015年12月の国際会議(第21回気候変動枠組条約締約国会議:COP21)で採択された「パリ協定」では2020年以降の地球温暖化対策が定められ, 気候変動枠組条約に加盟する196ヶ国が批准している。とりわけ, 排出量の多いインドは2030年までにGDP当たりのCO₂排出量を33~35%削減(対2005年比)するという目標値を掲げた。また, インドのみならず, 今後の経済成長が期待されるアジア諸国においても, 削減努力が必要になってくる。

アジアにおける建材製造とCO₂排出量に着目すると, アジアの建築物では, 焼成レンガを用いるケースが多く, 例えば, インドでは2007年の報告¹⁾によると, 年間に3600億個の焼成レンガが製造され, 製造工程に伴って, 約2億3000万tの膨大なCO₂が年間に排出されており, 今後は環境配慮の促進の一環として, 「無焼成レンガ」の必要性が高まると予想¹⁾されている。

一方, アジア諸国でのエネルギーは, 石炭に依存する傾向が続くと予想²⁾され, 石炭灰の発生量の増大が予想される。石炭灰のうち約9割を占めるフライアッシュのリサイクルに関する研究業績は数多く, 日本の現状では, セメント分野を筆頭に土木分野, 建築分野等で用いられ, 有効利用率は99.0%である³⁾。一方, アジア諸国では, いまだに有効利用率は高くなく, インドでは, 約60%の有効利用率⁴⁾にとどまっており, フライアッシュの有効利用率の向上が求められるといえる。

また, 人口の増加や経済成長率の増大に伴って, 都市ゴミの発生量も増加するなか, 現時点では, 埋立処理が主流であるものの, 地域の衛生事情や埋立地の減容化に

鑑みると, 焼却処理の将来的な展開も見込まれている。したがって, フライアッシュのリサイクルだけでなく, 都市ゴミ由来の焼却灰(以下: 焼却灰)のリサイクルも将来的には重要性が高まることが予想される。

焼却灰は, 焼却炉の炉底に残存する主灰と煤塵である飛灰に大別され, ゴミの成分や焼却炉の条件によって, 多少の変動はあるが, 一般的な発生割合として, 主灰は飛灰の3倍程度で主灰の発生量の方が圧倒的に膨大である。主灰のリサイクルに関する研究業績として, セメント原料化⁵⁾, 溶融化によって生成される溶融スラグの骨材利用⁶⁾等の研究事例がある。また, 主灰中に含有の重金属を湿式物理選別で処理した主灰をコンクリートの細骨材や粗骨材として適用した研究事例⁷⁾, 原灰のまま主灰をコンクリート用骨材として, 有効利用することを検討した研究事例⁸⁾などがある。

このように, 焼却灰の有効利用を目的に様々な条件で研究されているものの, 主灰をレンガの原料とした研究事例は見受けられなかった。

そこで, CO₂削減およびフライアッシュ, 主灰の有効利用の観点から, 本研究では, フライアッシュと主灰を原料とした無焼成レンガの基礎的性状を把握するための検討を行った。本論文では, 既往研究⁹⁾で対象にした, 日本およびインド基準でのレンガの圧縮強度に対して, 養生条件と主灰が及ぼす影響について主に報告する。

なお, 本研究の位置付けは, 初期段階であることから, 本研究における実験の範疇では, 無害化処理等の特別な工程が作用する諸々の可能性を除するために, 主灰中に混在していた未燃焼物(金属片や陶磁器片等)のふるい分け選別のみを施した主灰を用いる方針とした。

*1 株式会社 フジタ 技術センター 企画調査部 博士(学術) (正会員)

*2 株式会社 フジタ 技術センター 企画調査部 博士(工学) (正会員)

*3 日本大学 工学部 建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

2. 実験概要

本研究では、細骨材に占める主灰の置換率および養生条件を変動因子とし、上記変動因子が圧縮強度に及ぼす影響の把握を主目的とした試験を行った。

2.1 使用材料

本研究の使用材料および密度を **Table 1** に示す。

本研究で使用したフライアッシュの材料特性および SEM 画像を **Table 2**, **Photo 1** に示す。主灰については、ストーカ炉で 800℃以上の焼成条件を与えた O 市提供の主灰を 5 号珪砂の粒度に事前調整したうえで使用した。

Materials	Density
Tap water	1.00 g/cm ³
Slag cement (JIS Type B)	3.04 g/cm ³
Fly ash (JIS Type II)	2.30 g/cm ³
Incineration bottom ash	1.80 g/cm ³
Silica sand (JIS Type 5)	2.63 g/cm ³
Slaked lime	2.24 g/cm ³
Na ₂ SO ₄	3.04 g/cm ³

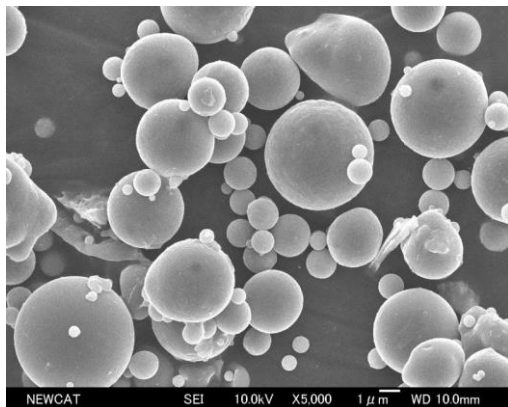


Photo 1 SEM Photo of Fly ash (×5000)

使用した主灰の SEM 画像および同定された成分を示す X 線回折の結果を **Photo 2**, **Fig. 1** に示す。

2.2 調合概略および試験体作製方法

(1) 調合概略

調合概略⁹⁾として、各材料の単位量および細骨材中に占める主灰の置換率を **Table 3** に示す。

(2) 試験体作製手順

圧縮強度の試験体については、レンガの基準を満たす調合確立のための基礎検討ということもあり、アムスラー型万能試験機での圧縮成型が可能な φ50 の鋼製モールドを利用した。試験体作製にあたっては、**Table 3** の調合で材料を混練後、φ50×60mm の寸法となるように、アムスラー型万能試験機で 10N/mm² のプレス加圧成型をしながら作製⁹⁾した。なお、JIS R 1250 (普通れんが及び化粧れんが)での圧縮強度の検討は今後の課題とする。

Table 2 Characteristics of Fly ash

SiO ₂ [%]	LOI [%]	Surface Area [cm ² /g]	Active Index			Percent Flow [%]
			7d [%]	28d [%]	91d [%]	
65.30	2.00	3630	79	85	104	105

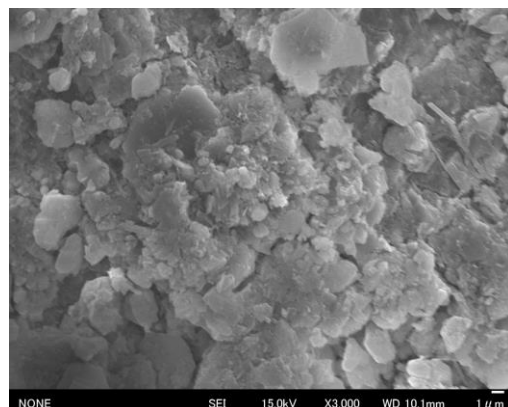


Photo 2 SEM Photo of Incineration bottom ash (×3000)

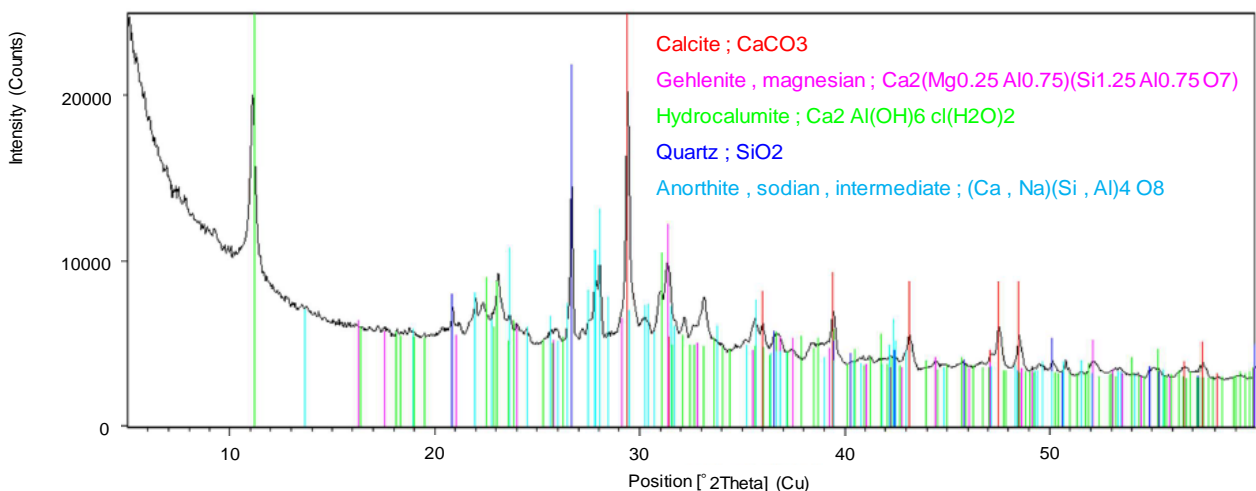


Fig. 1 Result of X-Ray Diffraction for Incineration bottom ash

Table 3 Mix Proportions of Non-Burn Bricks

Mixing Name	W/B [%]	Substitution [wt %]	Unit Weight [kg/m ³]						
			Water	Slag cement	Fly ash	Incineration bottom ash	Silica sand	Slaked Lime	Additive
IA 000	21	0	233	187	932	0	615	131	21
IA 025	21	25	227	181	906	149	448	128	21
IA 050	21	50	221	177	884	291	291	125	20
IA 075	21	75	216	172	862	426	142	122	20
IA 100	21	100	210	168	842	555	0	119	19

B: Binder (Slag cement and Fly ash) / Substitution: Ratio of Incineration bottom ash for Silica sand (the same hereinafter)

2.3 養生条件

養生条件を **Table 4** に示す。本研究での主要な養生条件として、ポゾラン反応の早期促進が期待できる温水養生、蒸気養生の2種類の養生条件⁹⁾を採択した。なお、両養生条件の比較対象として、標準養生である水中養生28dの試験体も併せて作製した。

(1) 温水養生

前養生として、成型後に1hの気中養生を施した後、80℃の温水に試験体を4h, 8h, 16hのいずれかの時間で浸漬させ、所定時間が経過した後、20℃-RH90%の環境で24hの湿空養生を行った。

(2) 蒸気養生

前養生として、成型後に1hの気中養生を施した後、Autoclaveを用いて3h, 5hのいずれかの時間で100℃の蒸気養生を行い、所定時間が経過した後、20℃-RH90%の環境で24hの湿空養生を行った。

(3) 水中養生

脱型後、20℃の水中で材齢28dまで水中養生を行った。

2.4 試験項目

本研究における試験項目を試験因子ごとに **Table 5** に示す。本研究では圧縮強度試験および細孔径分布試験の2項目について試験を行った。

(1) 圧縮強度

温水養生と蒸気養生の試験体は湿空養生終了後、水中養生の試験体は、材齢28dでアムスラー型万能試験機を用い、毎秒0.6±0.4 N/mm²の載荷速度で圧縮強度試験を行った。

(2) 細孔径分布

前処理として、試料中の水をアセトンで置換後、真空乾燥させ、試料外周部を除去し、約5mm角に加工した。細孔径分布に際し、水銀圧入式ポロシメーターを用い、Washburnの式により、水銀の表面張力を0.484N/m、水銀の接触角を130°として算定した。なお、測定範囲は、おおよそ3nm~327μm（圧入圧力では413MPa~0.0038MPa）とした。

Table 4 Curing Condition for Non-Burnt Bricks

ID	Pre Curing		Main Curing			Post Curing			
	Method	Time	Method	Temp.	Time	Method	Temp.	RH	Time
H-04	Air	1h	Hot Water	80℃	4h	Moist Air	20℃	90%	24h
H-08					8h				
H-16					16h				
S-03			Steam	100℃	3h				
S-05					5h				
W-28			Water	20℃	28d				

Ex.) H-04 : Hot Water Curing (4h)
S-03 : Steam Curing (3h)

Table 5 Test Items

Test Items	Curing		Substitution [wt. %]
	Methods	Time	
Compressive Strength	Hot-Water	4h,8h,16h	0,25,50,75,100
	Steam	3h,5h	
	Water	28d	
Pore Size Distribution	Hot-Water	16h	0,50,100
	Steam	5h	
	Water	28d	

Table 6 Standard Value of

Compressive Strength (JIS & IS)

Standard	Brick's Type	Compressive Strength [N/mm ²]
Japan JIS	2	≧ 15
	3	≧ 20
	4	≧ 30
India IS	—	≧ 7

3. 実験結果および考察

3.1 レンガの強度基準

レンガの圧縮強度に関する規格値として、日本規格のJIS R 1250（普通れんが及び化粧れんが）とインド規格の

IS 1077 (Common Burnt Clay Building Bricks) で規定されている圧縮強度の基準値⁹⁾を Table 6 に示す。

3.2 圧縮強度

圧縮強度試験の結果一覧を Table 7 に示す。各略称は、調合名と養生条件を組み合わせた記号で表現している。

(1) 養生条件と主灰の置換率が及ぼす影響

温水養生の養生時間と圧縮強度の関係を Fig. 2, 蒸気養生の養生時間と圧縮強度の関係を Fig. 3, 主灰の置換率と圧縮強度の関係を養生条件別に Fig. 4, Fig. 5 に示す。

Fig. 2 および Fig. 3 より、同一調合の場合、温水養生と蒸気養生のいずれの条件においても、養生時間の経過に伴って、圧縮強度が増大する傾向が確認された。

Fig. 4 および Fig. 5 より、同一養生の場合では、主灰の置換率の増大に伴って、線形的な圧縮強度の低下傾向が確認された。

また、温水養生と蒸気養生のいずれの条件においても、主灰の置換率の増大に伴い、同一置換率での圧縮強度の差が減少している傾向も併せて確認された。

(2) JIS および IS の強度基準値との比較

本研究で作製した圧縮強度用の試験体形状と JIS R 1250 および IS 1077 で規定される試験体形状は異なるが、将来的なレンガ適用を見据えて、本研究で得られた圧縮

Table 7 Results of Compressive Strength

Abbreviation	Substitution [wt.%]	Curing Method	Curing Time	Compressive Strength [N/mm ²]
IA000-H-04	0	Hot Water	4h	8.2
IA025-H-04	25			7.8
IA050-H-04	50			7.5
IA075-H-04	75			7.2
IA100-H-04	100			6.6
IA000-H-08	0		8h	10.8
IA025-H-08	25			9.5
IA050-H-08	50			8.8
IA075-H-08	75			7.8
IA100-H-08	100			7.3
IA000-H-16	0	16h	13.0	
IA025-H-16	25		12.0	
IA050-H-16	50		10.5	
IA075-H-16	75		10.1	
IA100-H-16	100		9.4	
IA000-S-03	0	Steam	3h	12.9
IA025-S-03	25			10.5
IA050-S-03	50			7.0
IA075-S-03	75			5.6
IA100-S-03	100			4.1
IA000-S-05	0		5h	18.2
IA025-S-05	25			15.3
IA050-S-05	50			13.1
IA075-S-05	75			7.7
IA100-S-05	100			5.2
IA000-W-28	0	Water	28d	14.4
IA050-W-28	50			10.5
IA100-W-28	100			10.4

Ex) IA000-H-04: Combination of Mixing of IA000 and Curing Condition of H-04

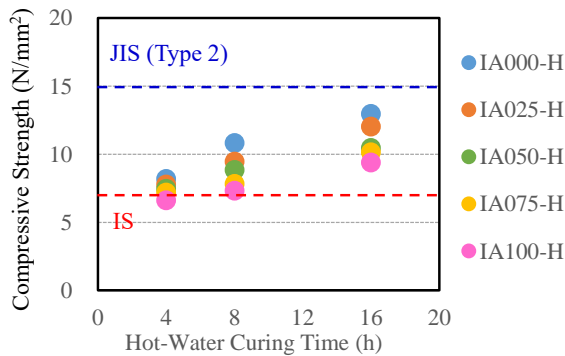


Fig. 2 Effect of Hot-Water Curing Time on Compressive Strength

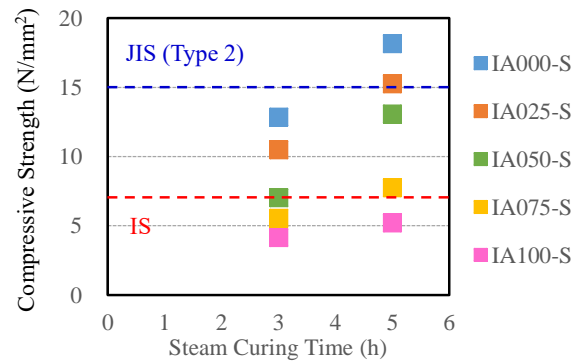


Fig. 3 Effect of Steam Curing Time on Compressive Strength

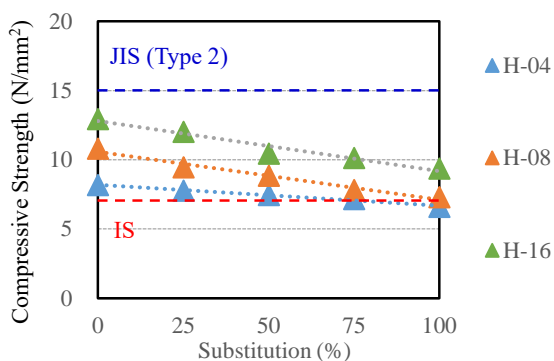


Fig. 4 Effect of Substitution on Compressive Strength (Hot-Water Curing)

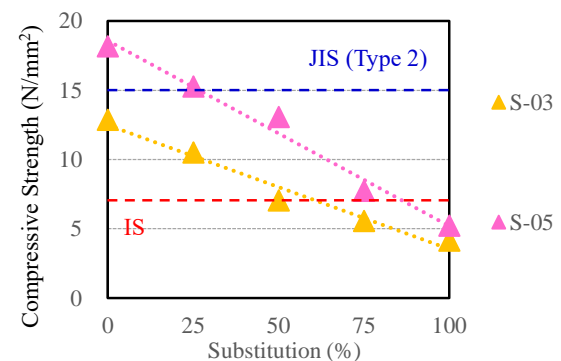


Fig. 5 Effect of Substitution on Compressive Strength (Steam Curing)

強度と JIS R 1250 および IS 1077 で規定されている圧縮強度の基準値の比較を行った。

JIS R 1250 の 2 種レンガの圧縮強度基準値 15N/mm² を上回った試験体は、主灰の置換率 25%以下かつ蒸気養生 5 時間を施した IA000-S-05 と IA025-S-05 で 18.2N/mm² と 15.3N/mm² であった。

IS 1077 のレンガの圧縮強度基準値 7N/mm² を上回った試験体は、養生条件によらず、主灰の置換率が 50%以下であれば全てが該当した。

温水養生および蒸気養生の比較対象である標準養生の試験体 IA000-W-28, IA050-W-28, IA100-W-28 は、いずれも 10N/mm² を超えた圧縮強度であり、IS 1077 に適合した。主灰の置換率 100%では、IA100-W-28 が最も高い圧縮強度を示した。

Table 8 Summary of Results of Pore Size Distribution

Abbreviation	Average Pore Diameter [μm]	Pore Volume [mL/g]	
		※ 1	※ 2
IA000-H-16	0.0272	0.215	0.165
IA050-H-16	0.0293	0.280	0.222
IA100-H-16	0.0257	0.319	0.249
IA000-S-05	0.0169	0.222	0.135
IA050-S-05	0.0274	0.290	0.225
IA100-S-05	0.0310	0.324	0.262
IA000-W-28	0.0238	0.205	0.157
IA050-W-28	0.0247	0.238	0.185
IA100-W-28	0.0247	0.295	0.229

※ 1 : All of Pore Volume on Specimens
 ※ 2 : Pore Volume over 20 nm Diameter on Specimens

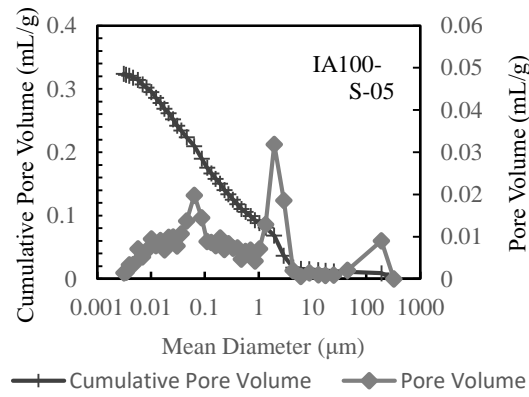
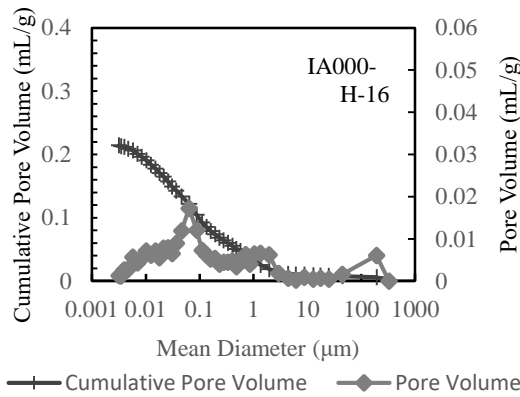
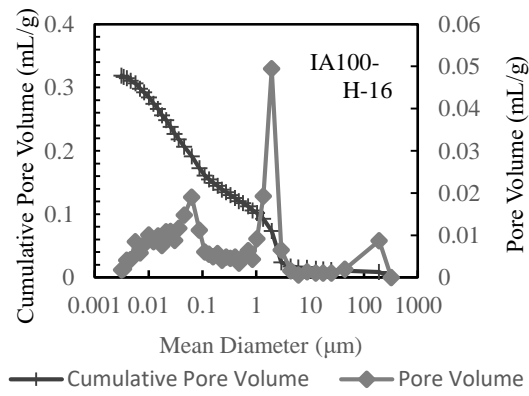
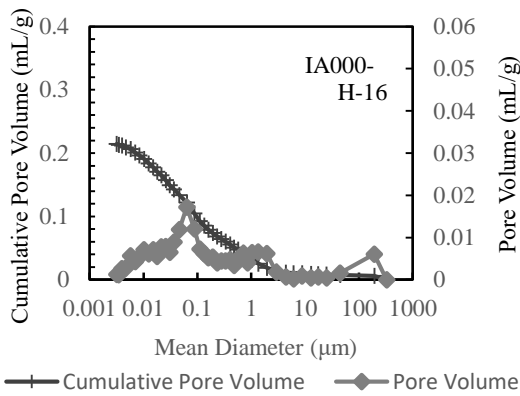


Fig. 6 Pore Volume and Pore Size Distribution

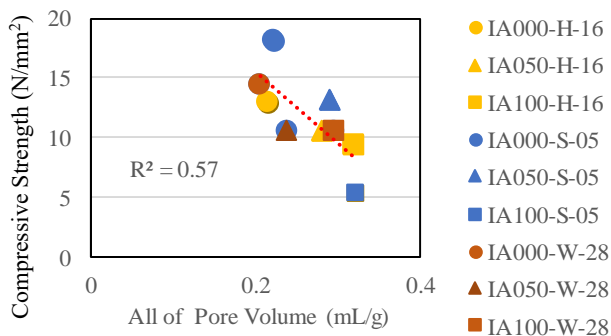


Fig. 7 Compressive Strength and Pore Volume

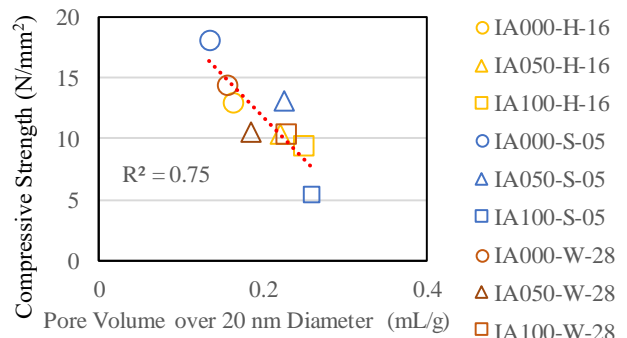


Fig. 8 Compressive Strength and Pore Volume over 20nm Diameter

3.3 細孔径分布および微細構造

水銀圧入試験の結果一覧を **Table 8** に示す。一般的に圧縮強度と細孔径分布には相関性があるが、なかでも、直径 20nm 以上の細孔が増加すると圧縮強度が低下することが知られている¹⁰⁾ ため、累積細孔容積と併せて、20nm 以上の累積細孔容積も記載する。

細孔径分布の結果の一例 (IA000-H-16, IA100-H-16, IA000-S-5, IA100-S-5 の 4 種類の累積細孔容積と各細孔容積) を **Fig. 6** にそれぞれ示す。

全体的な傾向としては、主灰の置換率の増大に伴い、平均細孔径および累積細孔容積が増大しており、粗大な空隙がレンガの組織内で形成したと推察できる。

Table 8 中の※1 の累積細孔容積と圧縮強度、**Table 8** 中の※2 の直径 20nm 以上の細孔径の累積細孔容積と圧縮強度の関係を寄与率 R^2 と共に **Fig. 7**, **Fig. 8** に示す。圧縮強度に対する寄与率は、累積細孔容積に比べ、直径 20nm 以上の細孔径の累積細孔容積の方が高く、当該累積細孔容積の多い試験体の圧縮強度は低い傾向にある。この傾向は既往研究¹⁰⁾ で示された知見と同様であり、本研究で得られた圧縮強度の試験結果の妥当性が確認された。

主灰の置換率 50%以下では、蒸気養生 (100°C-5h) が他の養生条件よりも圧縮強度が高かった要因としては、ポゾラン反応の促進⁹⁾ の可能性が考えられる。一方、置換率 100%のように、主灰を多量に混入させた場合、主灰は粗悪な形状⁷⁾ であるため、粗大な空隙が多く、圧縮強度が低かったと推察するが、本研究においては、ポゾラン反応と主灰形状および主灰成分の関係までは、明らかにできなかったため、今後の課題として、更なる実験・検討が必要である。

4. 結論

- 1) いずれの調合、いずれの養生条件の場合でも、養生時間が長くなると、圧縮強度が増大した。一方、細骨材に対する主灰置換率が増えると、養生条件によらず、圧縮強度が低下した。
- 2) 細骨材に対する主灰置換率 25%以下かつ蒸気養生(100°C-5h)の試験体は JIS 基準を満たし、主灰置換率 50%以下の試験体は養生条件によらず、IS 基準をすべて満たした。
- 3) 主灰置換率が増えると、圧縮強度を低下させる直径 20nm 以上の粗大な細孔径が生じる傾向を確認した。

謝辞

本研究の実施にあたり、日本大学 工学部 建築学科 卒業生の石山 慧 氏より、多大なご協力を頂きました。謹んでお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) CDM : インド・未利用資源を有効利用した無焼成レンガ製造事業調査, 亀井製陶(株), p.1-39, 2007.3
- 2) IEE JAPAN : IEEJ Outlook 2019 エネルギー変革と 3E 達成への茨の道, p.45-46, 2018.10
- 3) 石炭灰全国実態調査報告書, 一般財団法人石炭エネルギーセンター, p.5, 2019.3
- 4) インドの石炭政策, 石炭生産, 石炭輸出入, 石炭輸送, 石炭消費の動向調査, 独立行政法人, 石油天然ガス・金属鉱物資源機構, p10, 2019.3
- 5) 佐野奨ほか: 都市ごみ焼却灰および廃プラスチックの処理・有効活用技術に関する環境負荷の定量化, 廃棄物学会論文誌, Vol.13, No.3, p.131-140, 2002.5
- 6) 斉藤丈士ほか: こみ焼却灰溶融スラグを細骨材に用いたコンクリートの実大施工実験, 日本建築学会技術報告集, 第 20 号, p.1-6, 2004.12
- 7) 田浦靖知, 添田政司, 大和竹史: 物理選別処理した都市ごみ焼却灰の骨材への適用性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, p.1379-1384, 2003
- 8) 椎名貴快, 久田真, 羽原俊祐, 緑川猛彦: 災害がれき焼却灰を細骨材としたモルタルの諸物性, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, p.1609-1614, 2013
- 9) 斎藤雄仁, Sanjay PAREEK : インドにおける CO₂ 削減を目的とした実寸大無焼成フライアッシュレンガの養生条件及び長期耐水性の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, p.1921-1926, 2013
- 10) 森本丈太郎, 魚本健人: 初期高温養生したポルトランドセメントの細孔構造に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.7, No.1, p.153-159, 1996.