

論文 焼却主灰混入の無焼成レンガの重金属類溶出に対する安全性および細孔構造に関する実験的研究

藤沼 智洋*1・藤倉 裕介*2・Sanjay PAREEK*3・荒木 慶一*4

要旨：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重金属類に対する安全性と細孔構造について、養生方法、セメント使用量および焼却主灰の炭酸化処理の有無を実験因子とした実験的検討を行った。本実験の範囲における結論としては、下記の3項目が確認された。1) 蒸気養生を施すことで、所定強度が短時間で発現する。2) 焼却主灰に含まれる重金属類の溶出量は環境庁告示 46 号試験での規制値以内である。3) 微細な細孔径と粗大な細孔径の双方でバイモーダルな細孔径分布を示していた。

キーワード：無焼成レンガ、焼却主灰、炭酸化処理、蒸気養生、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。

インドにおける建材製造と CO₂ 排出量に着目すると、インドの建築物では、焼成レンガを用いるケースが多く、2007 年の報告¹⁾によると、3600 億個/年の焼成レンガが製造されている。一方、製造時の焼成工程においては、約 2 億 3000 万 t/年の CO₂ を排出しており、今後は環境配慮の一環として、「無焼成レンガ」の必要性が高まると予想¹⁾されている。なお、焼成行為が不要である反面、無焼成レンガには、セメントが使用されていることから、セメント使用を減らすことで更に CO₂ 削減が期待できる。

一方、インドにおけるエネルギーは、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。一方、インドでは約 60%の有効利用率³⁾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が、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、フライアッシュと

同様に、都市ゴミ由来の焼却灰（以下：焼却灰）のリサイクルについても重要性が高まると予想される。

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、主灰は飛灰の約 3 倍で主灰の発生量の方が圧倒的に膨大であり、主灰のリサイクルは大きな課題の一つであるといえる。主灰の主なリサイクル技術としては、セメント原料化、熔融スラグ利用⁴⁾があるが、製造エネルギーの消費等の諸問題を抱えており、リサイクル率の向上に向けては、建設資材への利用も有用であるといえる。建設資材への利用を目的とした研究事例として、主灰中に含有される重金属類を湿式物理選別で処理した後、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⁵⁾などがある。なお、上述の研究事例でも記したように、主灰中には、重金属類が含有されているため、リサイクルを図る際、物理選別⁵⁾や炭酸化による Pb の不溶化処理⁶⁾の種々の対策を講ずることが一般的である。

そこで、本研究では、インドにおける主要建材であるレンガを対象に CO₂ 削減と廃棄物の有効利用を目的に以下の 2 シリーズの基礎的検討により、無焼成レンガの製法や調合条件の検討を行った。

シリーズ 1 では、初期強度を早期に発現させるための養生条件について検討を行った。

シリーズ 2 では、主灰の炭酸化処理およびセメントの使用量等に焦点を当て、無焼成レンガの重金属類の溶出、初期強度の発現について測定を行うとともに、一般的に強度発現と相関性のある細孔径分布を測定し、各水準の強度発現について細孔構造の観点からの考察を行った。

*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)

*4 名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

2. 試験概要（シリーズ 1）

2.1 使用材料

使用材料および密度を **Table 1**、炭酸化処理していない主灰（以下：NA）の蛍光 X 線による半定量分析結果を **Table 2** に示す。将来的には、インドの主灰を対象にすることも検討しているが、本研究の範囲では、日本の O 市提供の主灰（ストーカ炉で 800℃以上の焼成で生成）を用いて基礎的検討を行った。なお、主灰の使用に際し、事前に 5 号珪砂の粒度調整を施した。

2.2 調査概略および無焼成レンガ供試体の製作手順

Table 3 の調査で材料を混練後、鋼製の専用治具を用い、W:50 × D:50 × H:60 mm の所定の寸法となるように、アムスラー型万能試験機で 10N/mm² の加圧成型を行い、直方体形状の供試体を作製した。

2.3 養生条件

養生条件を **Table 4** に示す。養生方法の選定に際し、初期強度の早期発現という目的に鑑みて、早期での初期強度発現が期待される蒸気養生、湿空養生、温水養生を対象とした。各養生における詳細条件を以下に示す。

(1) 蒸気養生＋気中養生

作製後、Autoclave を無圧力下で用いて 3h, 5h, 7h のいずれかの時間で 100℃の蒸気養生を行った。その後、20℃-60%rh の環境で材齢 24h まで気中養生を行った。

(2) 湿空養生＋気中養生

作製後、ポリ塩化ビニリデン製フィルムで各試験体を包装し、80℃-95%rh の環境で 3h, 5h, 7h のいずれかの時間で湿空養生を行った。その後、20℃-60%rh の環境で材齢 24h まで気中養生を行った。

(3) 湿空養生＋温水養生＋気中養生

作製後、ポリ塩化ビニリデン製フィルムで各試験体を包装し、80℃-95%rh の環境で 1h の湿空養生を行った。その後、包装を剥がし、2h, 4h, 6h のいずれかの時間で 80℃の温水養生を行った。その後、20℃-60%rh の環境で材齢 24h まで気中養生を行った。

2.4 試験項目および試験方法

シリーズ 1 では材齢 24h までの養生後、アムスラー型万能試験機を用いて、毎秒 0.6±0.4N/mm² の載荷速度で圧縮強度試験を行った。

2.5 圧縮強度試験の結果および考察

シリーズ 1 の試験結果を **Fig. 1** に示す。**Fig. 1** では、レンガの圧縮強度に関する規格値として、インド規格の Indian Standard (IS 1077 : Common Burnt Clay Building Bricks) の規定値 (7N/mm²) と併せ、参考・比較として JIS R 1250 (普通れんが及び化粧れんが) の普通れんが 2 種の規定値 (15N/mm²) を点線で示す。**Fig. 1** より、いずれの養生条件においても、JIS の基準を満たし、IS 基準の 2 倍程度の圧縮強度であった。本試験結果から、

Table 1 Materials for Series 1

Abbreviation	Materials	Density
W	Tap water	1.00 g/cm ³
SC	Slag cement (JIS Type B)	3.04 g/cm ³
FA	Fly ash (JIS Type II)	2.30 g/cm ³
SS	Silica sand (JIS Type 5)	2.63 g/cm ³
NA	Non-carbonated Incineration bottom ash	1.24 g/cm ³
SL	Slaked lime	2.24 g/cm ³
Ad	Na ₂ SO ₄	3.04 g/cm ³

Table 2 Chemical composition of Non-carbonated Incineration bottom ash
[Unit : %]

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	cl	ig.loss
18.01	13.67	6.09	30.04	2.32	3.34	1.72	17.06

Table 3 Mix proportions for Series 1

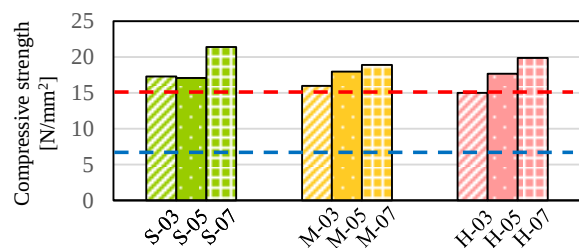
Mixing name	W/B [%]	Substitution [Wt %]	Weight Ratio[%]						
			W	SC	FA	SS	NA	SL	Ad
NA-50	22	50	13.0	14.8	44.0	10.5	10.5	6.2	1.0

B : Binder(SC and FA) Substitution: Ratio of NA for NA and SS

Table 4 Curing conditions for Series 1

Abbreviation	Pre Curing		Main Curing		Post Curing	
	Method	Time	Method	Time	Method	Time
S-03	—	—	Steam 100°C	3h	Air 20°C 60%rh	21h
S-05				5h		19h
S-07				7h		17h
M-03	—	—	Moisture 80°C 95%rh	3h	Air 20°C 60%rh	21h
M-05				5h		19h
M-07				7h		17h
H-03	Moisture 80°C 95%rh	1h	Hotwater 80°C	2h	Air 20°C 60%rh	21h
H-05				4h		19h
H-07				6h		17h

Ex) "S-03" means that Method is "Steam" and Time is "3h".



※) Curing time of Hot water curing is sum of Pre curing and Main curing time

Fig. 1 Result of Compressive Strength for Series 1

他の養生方法と比べ、蒸気養生の水準の圧縮強度が高いことがわかる。一方、蒸気養生に伴うエネルギー消費も考慮すると、最も短い 3 時間でも十分に強度発現が確認された。したがって、強度発現と養生時間の観点から、3h の蒸気養生 (S-03) が最も効率的であるといえる。

3. 試験概要（シリーズ 2）

3.1 主灰の炭酸化処理方法および使用材料

(1) 主灰の炭酸化処理方法

炭酸化処理の設定条件を **Table 5** に示す。本研究では、焼却灰の炭酸化処理に最適な含水率である 10~20%⁶⁾ に調整後、炭酸化処理を施した。炭酸化すると発熱反応が生じるため、**Photo 1** に示すように、主灰を充填した箱の表層温度を 4 方向からモニタリングする手法で管理した。

(2) 使用材料

シリーズ 2 では、**Table 6** に示すように、シリーズ 1 の材料に加え、セメント代替としての焼石膏、重金属対策として炭酸化処理を施した主灰（以下：CA）も使用した。CA の蛍光 X 線による半定量分析結果を **Table 7** に示す。

3.2 調合概略および無焼成レンガ供試体の製作手順

シリーズ 2 の調合を **Table 8** に示す。シリーズ 2 では、シリーズ 1 の NA-50 に対し、主灰を用いずに SS のみを用いた S-100、CA を用いた調合、セメントを 1/2 に減じ、焼石膏 CG を代わりに添加した調合を水準に加えた。供試体製作については、シリーズ 1 同様の手順をとった。

3.3 養生条件

シリーズ 1 の結果を受け、100℃・3h の蒸気養生および 20℃・60%rh の環境で 21h の気中養生（S-03）を採用した。

3.4 試験項目および試験方法

シリーズ 2 における試験項目一覧を **Table 9** に示す。

(1) 重金属類の溶出試験

主灰を使用した無焼成レンガの重金属類の溶出挙動の基礎検討という位置付けで、本研究では、環境庁告示第

46 号（以下：46 号試験）に準拠し、事前に振動ミルで 2mm アンダーに粉碎した試料を用い、後述の 7 種類の重金属類の溶出量を計測した。

(2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験についてはシリーズ 1 同様に実施した。

(3) 水銀圧入試験（細孔径分布試験）

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。細孔径の測定に際しては、水銀圧入式ポロシメータを用い、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、約 3nm~327μm（圧入圧力では 413MPa~0.0038MPa）とした。

Table 6 Materials for Series 2

Abbreviation	Materials	Density
W	Tap water	1.00 g/cm ³
SC	Slag cement (JIS Type B)	3.04 g/cm ³
CG	Calcined Gypsum	2.65 g/cm ³
FA	Fly ash (JIS Type II)	2.30 g/cm ³
SS	Silica sand (JIS Type 5)	2.63 g/cm ³
NA	Non-carbonated Incineration bottom ash	1.24 g/cm ³
CA	Carbonated Incineration bottom ash	1.60 g/cm ³
SL	Slaked lime	2.24 g/cm ³
Ad	Na ₂ SO ₄	3.04 g/cm ³

Table 7 Chemical composition of Carbonated Incineration bottom ash

【 Unit : % 】							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	cl	ig.loss
18.61	13.04	6.63	28.45	2.28	3.26	1.63	18.81

Table 5 Carbonated conditions of Incineration bottom ash

Incineration bottom ash			Carbon dioxide		
Filling amount [kg]	Filling height [mm]	Water content [%]	Concentration [%]	Quantity [L/min]	Hour [h]
124	270	17.47	100	20	5

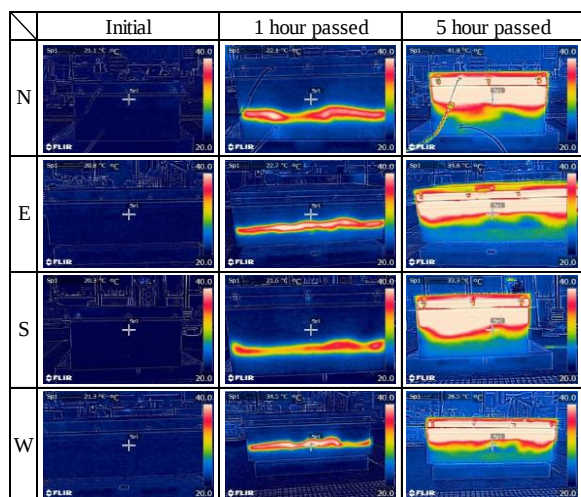


Photo 1 Progress of carbonation treatment

Table 8 Mix proportions for Series 2

Mixing name	W/B [%]	Substitution [Wt %]	Weight Ratio[%]								
			W	SC	CG	FA	SS	NA	CA	SL	Ad
S-100	22	0	13.0	14.8	—	44.0	21.0	—	—	6.2	1.0
NA-50	22	50	13.0	14.8	—	44.0	10.5	10.5	—	6.2	1.0
CA-50	22	50	13.0	15.0	—	44.0	10.5	—	10.5	6.2	1.0
NA-50-G	22	50	13.0	7.4	7.4	44.0	10.5	10.5	—	6.2	1.0
CA-50-G	22	50	13.0	7.4	7.4	44.0	10.5	—	10.5	6.2	1.0

Substitution: Ratio of NA for NA and SS or Ratio of CA for CA and SS

Table 9 Test Items for Series 2

Test Items	Object	
	(Incineration bottom ash and Non-Burn Brick)	
Elution amount of Heavy metal	NA, CA, S-100, NA-50, CA-50	
Compressive Strength	S-100, NA-50, CA-50, NA-50-G, CA-50-G	
Pore size distribution	S-100, NA-50, CA-50, NA-50-G, CA-50-G	

3.5 重金属類の溶出試験結果および考察

46 号試験による各重金属類の溶出結果を Table 10, Table 11 に示す。以下、主灰単体での試験結果と主灰を混入させた無焼成レンガでの試験結果に大別して結果と考察を記す。

(1) 主灰単体の溶出試験

本研究で使用した主灰は炭酸化处理の有無に限らず、Cr (VI) の溶出量が 46 号試験の規制値の約 30 倍程度であった。炭酸化处理による Cr (VI) の溶出については、これまでも様々な報告⁷⁻⁸⁾がされており、溶出抑制に寄与しないという同様の結果となった。他の 6 物質は、全て規制値を満足していた。

(2) 主灰を混入させた無焼成レンガの溶出試験

上述の主灰と同ロットの主灰を細骨材と同重量で混入させた無焼成レンガを対象にした結果、いずれの物質も規制値を満足していた。主灰単体とは異なり、本研究の無焼成レンガには、重量比 15% 程度のスラグセメントを使用している。セメントの固化作用によって重金属類の溶出抑制を図る手法は従来から採られているが、スラグセメントは普通ポルトランドセメントよりも溶出抑制が高いという報告⁹⁾もあり、無焼成レンガ供試体に用いたスラグセメントによって、十分な溶出抑制が作用したと推察する。

3.6 圧縮強度試験の結果および考察

シリーズ 2 の圧縮強度試験の結果を Fig. 2 に示す。

(1) 主灰の混入が圧縮強度に及ぼす影響

主灰未混入の水準 (S-100) に比べ、主灰を混入した各水準 (NA-50, CA-50, NA-50-G, CA-50-G) の圧縮強度はいずれも低強度であった。主灰混入に伴った圧縮強度の低下傾向については、対細骨材の主灰の置換率の増大に伴い、圧縮強度が線形的に低下する傾向を示した既往の報告¹⁰⁾と同様の挙動を示した結果によるものと推察する。

(2) 主灰の炭酸化处理が圧縮強度に及ぼす影響

主灰の炭酸化处理有無別に (NA-50, CA-50) および (NA-50-G, CA-50-G) の水準どうしで圧縮強度を比較すると、NA シリーズ (NA-50, NA-50-G) に比べて、CA シリーズ (CA-50, CA-50-G) では、約 10% の強度低下が生じていた。炭酸化处理による強度低下の要因としては、炭酸化处理により未反応の CaO や Ca(OH)₂ が CaCO₃ へ変化したことで、主灰の固結力の低下が生じたことによる¹¹⁾ものと推察する。

(3) セメント低減が圧縮強度に及ぼす影響

焼石膏の混入有無別に (NA-50, NA-50-G) および (CA-50, CA-50-G) どうしで圧縮強度を比較すると、焼石膏未混入の水準 (NA-50, CA-50) に比べ、焼石膏混入の水準 (NA-50-G, CA-50-G) では、約 15% の強度

Table 10 Elution amount of Heavy metal for Incineration bottom ash (NA and CA)

【 Unit : mg/l 】			
Object	Regulation Value	NA	CA
Cd	≦ 0.01	< 0.001	< 0.001
CN	ND	ND	ND
Pb	≦ 0.01	< 0.005	< 0.005
Cr (VI)	≦ 0.05	1.5	1.4
As	≦ 0.01	< 0.001	< 0.001
T-Hg	≦ 0.0005	< 0.0005	< 0.0005
Se	≦ 0.01	0.0093	0.0084

Colored Parts : ExcessValue / ND : NonDetection

Table 11 Elution amount of Heavy metal for Non-Burn Bricks

【 Unit : mg/l 】				
Object	Regulation Value	S-100	NA-50	CA-50
Cd	≦ 0.01	< 0.001	< 0.001	< 0.001
CN	ND	ND	ND	ND
Pb	≦ 0.01	< 0.005	< 0.005	< 0.005
Cr (VI)	≦ 0.05	< 0.005	< 0.005	< 0.005
As	≦ 0.01	< 0.001	< 0.001	< 0.001
T-Hg	≦ 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005
Se	≦ 0.01	0.0022	0.0034	0.0035

ND : NonDetection

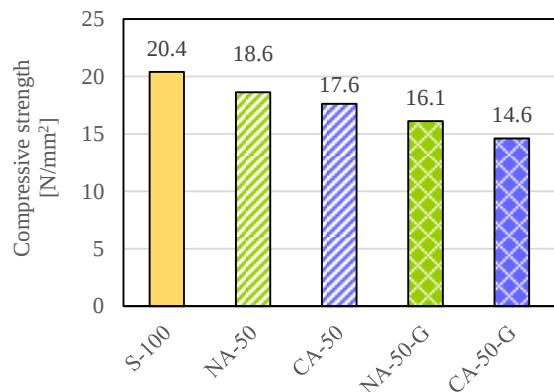


Fig. 2 Result of Compressive Strength for Series2

低下が生じていた。焼石膏の混入による強度低下の要因としては、焼石膏の混入により、セメントの水和反応が阻害されたものと推察する。すなわち、セメントを構成するクリンカー鉱物中のアルミネート相 (C₃A) の水和熱を抑制するために、セメントの製造過程においては、凝結調整剤として石膏が添加されているが、同様の抑制効果が作用し、強度低下が生じた可能性がある。一方、セメント重量に対し、焼石膏を 2~4 倍で多量に添加することで、強度増進するという報告¹²⁾もあり、今後、セメントと焼石膏の混入割合を変動させた種々の検討を実施する必要があると考える。

3.7 水銀圧入試験の結果および考察

(1) 細孔径分布および総細孔量

水銀圧入試験による細孔径分布と各測定値の結果を **Fig. 3**, **Table 12** に示す。全体的な傾向として、 $0.02\mu\text{m}$ 程度と $2\mu\text{m}$ 程度の細孔が多く、バイモーダルな分布であった。主灰未混入の水準 (S-100) に対して、主灰を混入した他の 4 水準の総細孔量は 2 割程度多く、粗大な細孔構造であった。主灰の炭酸化処理有無別に (NA-50, CA-50) および (NA-50-G, CA-50-G) の 4 水準を比較すると、NA シリーズと CA シリーズのあいだには顕著な差異は見受けられなかった。一方、焼石膏の混入有無別に (NA-50, NA-50-G) および (CA-50, CA-50-G) の水準で比較すると焼石膏混入の水準の総細孔量は 1 割程度多かった。

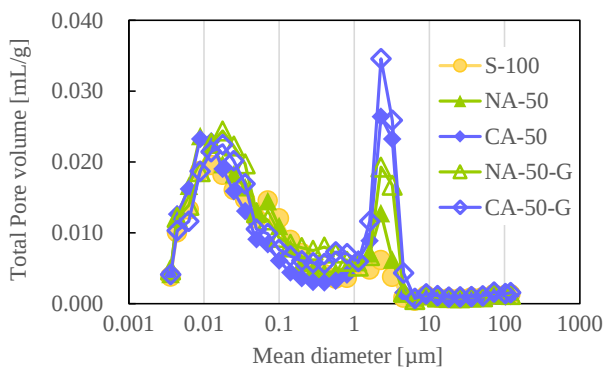


Fig. 3 Pore volume distribution

Table 12 Results of Mercury press-fit test

Mixing name	Total Pore volume [mL/g]	Specific surface area [m^2/g]	Average diameter [μm]
S-100	0.216	51.95	0.0166
NA-50	0.250	61.07	0.0164
CA-50	0.248	59.38	0.0168
NA-50-G	0.278	59.87	0.0186
CA-50-G	0.287	53.91	0.0214

(2) 細孔量と圧縮強度の関係に対する考察

圧縮強度と細孔径分布との間には、一般的に相関性があることが知られており、本研究での検討においても、**Fig. 4** に示すように細孔率の内訳を細孔径別に 6 つの群に区分し、圧縮強度と細孔径分布について考察を行うこととした。**Fig. 4** の区分設定に際して、 $0.1\mu\text{m}$ 以上の細孔径においてはオーダーごとの区分とした。一方、普通ポルトランドセメントを用いた場合のコンクリートおよびモルタルの圧縮強度は $0.05\mu\text{m}$ 以上の総細孔量と

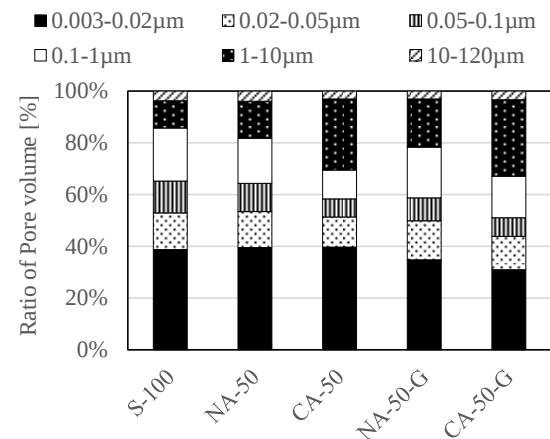


Fig. 4 Ratio of Pore volume

Table 13 Total pore volume by section and Contribution Rate

Section	Pore volume [mL/g]					R^2
	S-100	NA-50	CA-50	NA-50-G	CA-50-G	
below 0.02	0.084	0.099	0.098	0.097	0.089	0.05
above 0.02	0.132	0.151	0.150	0.181	0.198	0.94
above 0.05	0.102	0.116	0.121	0.139	0.161	0.97
above 0.1	0.075	0.089	0.103	0.114	0.140	0.98
above 1	0.031	0.046	0.076	0.060	0.094	0.79
above 10	0.008	0.010	0.008	0.009	0.010	0.15
Total	0.216	0.250	0.248	0.278	0.287	0.95

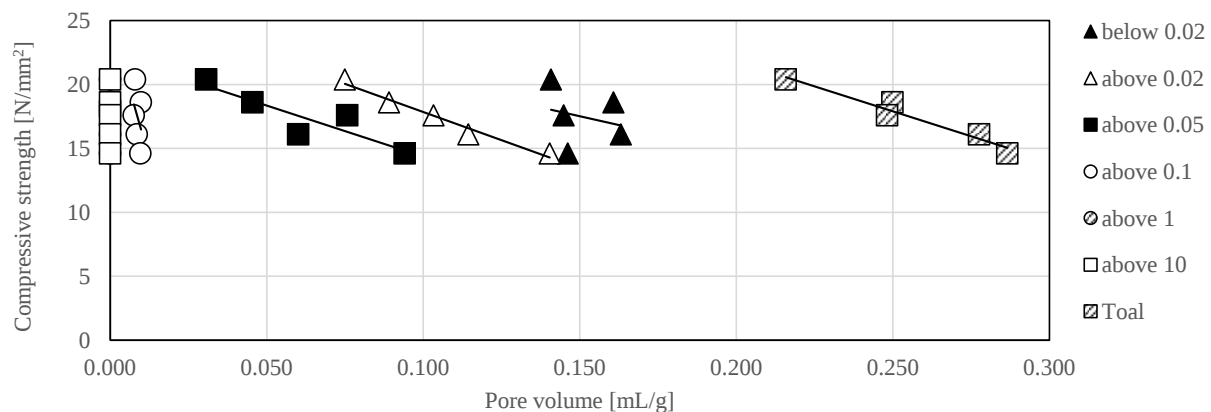


Fig. 5 Relation between Pore Volume and Compressive Strength

相関が高く、高炉セメントを用いた場合のコンクリートおよびモルタルの圧縮強度は $0.02\mu\text{m}$ 以上の総細孔量と相関が高いという報告¹³⁾もあるため、 $0.1\mu\text{m}$ 未満の細孔直径においては $0.05\mu\text{m}$ と $0.02\mu\text{m}$ を考慮して、ミクロな区分設定とした。本考察において、細孔量と圧縮強度の関係を直線近似した結果を **Fig. 4**、各区分の総細孔量と **Fig. 4**で直線近似した際の各寄与率を **Table 13**に示す。本検討方法では、 $0.02\mu\text{m}$ 未満および $10\mu\text{m}$ 以上の2区分以外では高い寄与率であり、とりわけ、 $0.02\mu\text{m}$ 以上、 $0.05\mu\text{m}$ 以上、 $0.1\mu\text{m}$ 以上の3区分の寄与率は約1.00であった。すなわち、**Fig. 3**でも示すように、細孔径分布のピークの1つである $2\mu\text{m}$ を含む $1\mu\text{m}$ 以上の区分で強度推定がおおむね可能であるものの、よりミクロな細孔も含めることで、より精度の高い強度推定ができることを示唆している。この点については、主灰の混入により、粗大な細孔構造が形成されるため、強度低下に対しての相関が考えられる反面、セメントの水和反応および蒸気養生によるフライアッシュのポゾラン反応等によって、微細な細孔構造が形成されるため、強度発現に対しての相関が考えられ、双方の区間を網羅するような区間での寄与率が高くなったと考える。

4. 結論

本研究の範疇で得られた知見を以下に示す。

- 1) 蒸気養生を施した水準は Indian Standard の2倍以上の圧縮強度が早期に発現した。
- 2) 焼却主灰混入の無焼成レンガでは、対象とした7種の重金属類の溶出量について、環境庁告示46号試験の規制値をすべて満たしていた。
- 3) 焼却主灰を混入させると圧縮強度が低下した。炭酸化处理の有無で比較すると、炭酸化处理を施した焼却主灰を混入した供試体の圧縮強度は低強度を示した。
- 4) セメントの代替材として焼石膏を用いた結果、圧縮強度が低下した。
- 5) $0.02\mu\text{m}$ 程度の微細な細孔と $2\mu\text{m}$ 程度の粗大な細孔が共に存在しており、微細な区間と粗大な区間の双方を網羅的に捉えることで、高精度な強度推定ができる。

謝辞

本研究は、科学技術振興機構-持続可能開発目標達成支援事業(Bタイプ-研究代表者:荒木慶一)の助成で実施した。本実験を行うにあたり、日本大学 建築学科卒業生の荒井 虎太郎 氏および日本大学大学院 建築学専攻 修了生の Sunjidmaa Sambuunjam 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) 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
- 4) 斉藤丈士ほか: ご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
- 5) 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
- 6) 本幡照文ほか: 焼却灰有効利用のための炭酸化による重金属の不溶化に関する基礎的研究, 環境工学研究論文集, 第41巻, p.459-467, 2004
- 7) 橋本敦美, 伊藤靖, 佐藤道生, 羽原俊祐: 合成したセメント水和生成物による微量元素(六価クロム, ヒ素, セレン, ホウ素, フッ素およびアルミニウム)の固定化について, セメント・コンクリート論文集, Vol.66, No.1, p.71-78, 2012
- 8) 黒田泰弘, 奥石直幸: セメントコンクリートからの六価クロム溶出に及ぼす各種要因の影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.650, p.715-722, 2010
- 9) 川戸喜実ほか: 焼却灰のセメント固化試験 I -模擬焼却灰の基本的固化特性-, JAEA Technology, p.1-48, 2010
- 10) 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
- 11) 野村弘ほか: 焼却灰の固結が重金属類の放出に与える影響, 第24回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集, p.617-618, 2013
- 12) 亀井健史, 小川靖弘, 志比利秀: 半水石膏を利用したセメント安定処理土の一軸圧縮特性に及ぼす養生期間の影響-廃石膏ボードの有効利用-, 地盤工学ジャーナル, Vol. 4, No.1, p. 99-105, 2009
- 13) 内川浩, 羽原俊祐, 沢木大介: 混合セメントモルタル及びコンクリートの硬化体構造が強度発現に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.44, p.330-335, 1990