

論文 各種コンクリート及びポリマーセメントモルタルの燃焼特性及び熱伝導特性に関する評価検討

安藤 祐太郎*1・Sanjay PAREEK*2

要旨: 本研究では、鉄筋コンクリート構造物に用いられる材料のコンクリート及び近年、コンクリート構造物の補修・修復材として広く使用されているポリマーセメントモルタルの火災時の熱的性状を把握するために、各種コンクリート及び数種類のポリマーセメントモルタルを作製し、発熱性試験及び熱伝導率試験より評価した。その結果、ポリマーセメントモルタルの一部で爆裂を確認し、その要因として、熱伝導率の測定から、ポリマーセメントのポリマーセメント比の増加に伴い熱伝導率の上昇が確認され、結果として爆裂を誘発した可能性を示唆した。

キーワード: ポリマーセメントモルタル, 爆裂, 発熱性試験, 熱伝導率, 発熱速度, 総発熱量

1. はじめに

日本は、昔から震災が多く、火災とは身近な国である。そのため、日本は地震国であり、地震発生時の火災による被害は甚大である。阪神大震災において、多くの建物で火災が発生した。また、新宿歌舞伎町でのビル火災時には、建物内に居住していた多くの人が逃げ遅れ、ガス中毒により死亡するという事例も存在する。

現在、地球環境問題に対する「持続可能な開発 (Sustainable Development)」という基本理念が定着している。これに伴って、建築物を長寿命化させることが必要である。1998年の建築基準法の改正によって、建築用材料の使い方も、「仕様規定」から「性能規定」に大きく変化した。「平成17年国土交通省告示第567号」に基づく、「平成13年国土交通省告示第1372号」の改正によって、劣化した鉄筋コンクリート構造物の断面補修・修復材として広く使用されるポリマーセメントモルタルが認知されるようになった。しかし、鉄筋コンクリート (RC) 構造物の材料として広く普及しているコンクリート及び RC 構造物用断面補修・修復材として広く使用されているポリマーセメントモルタル (以下、PCM) は火災発生時に高温加熱を受けた場合、急激な応力の作用に伴いコンクリート表面が爆発的に剥離する爆裂現象が発生する。爆裂は、火災時の加熱による部材の温度の急上昇に伴うコンクリート内の水蒸気圧応力の増加及び熱応力に起因し、それぞれの応力が複合作用により爆裂が発生すると考えられている¹⁾。しかし、爆裂発生機構は未だ未解明な部分が多い。このような爆裂のメカニズム解明のためには各種コンクリート及び PCM 材料の弾性係数、熱膨張率、熱伝導率、比熱、透気係数等の熱及び力学的特

性を考慮した分析が必要となる²⁾。また、PCM は、普通モルタルに比べ、引張り及び曲げ強さ、接着性、防水性、耐衝撃性、耐薬品性などに優れており、建築分野の修復用材料として広範囲に使用されている³⁾。しかしながら、PCM はその構成成分として合成樹脂やゴムのような可燃性ポリマーを含んでおり、火災時の性状に関する問題が指摘されるため、火災時や高温下での性状について把握した上で使用する必要がある。

以上から本研究では、RC 構造物に使用されるコンクリート (比較用として高密度コンクリート及び気泡モルタル) 及び建築・土木構造物の補修・修復用材料として各種ポリマーセメントモルタルの燃焼特性及び熱的特性を評価する上で重要な、発熱性試験及び熱伝導率に関する実験的な検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本試験で使用したセメントは、JIS R 5210 (ポルトランドセメント) に規定される普通ポルトランドセメントを使用した。**Table 1** にコンクリートの配合を示す。コンクリートは、呼び強度 24 の普通強度レディーミクストコンクリートを使用した。普通骨材の細骨材 (粒径: 5mm 以下) として白河市表郷梁森産砕砂及び須賀川市小倉産砕砂、粗骨材 (粒径: 5~20mm) として、いわき市好間産砕石を使用した。また、混和剤には AE 減水剤 (AE) を使用した。**Table 2** に重量コンクリートの配合、**Photo 1** に重量骨材の写真を示す。重量骨材の細骨材 (粒径: 2mm 以下) 及び粗骨材 (粒径: 8~20mm) として、スウェーデン産磁鉄鉱を使用した。また、混和剤として高性能 AE 減水

*1 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 日本大学 工学部建築学科 准教授 博士(工学) (正会員)



Photo 1 High-Density Aggregate($\mu = 4.5\text{g/cm}^3$)

剤(AE-H)を使用した。Table 3 に軽量気泡モルタルの配合を示す。細骨材として、豊浦珪砂(S)を使用した。起泡剤として、主成分がアルキルエーテル系化合物の複合体(FA)を使用した。Table 4 に普通モルタル(PCMの比較用)の配合を示す。細骨材として山形珪砂(S)を使用した。Table 5 に各種PCMの配合を示す。PCMは、JIS A 1171(実験室におけるポリマーセメントモルタルの作り方)を参考に、Table 5 に示す調合で、PCMを練混ぜた。なお、本研究で用いたポリマー(P)の構成成分は液体であり、Table 5 に示すポリマー(P)の50%が水(W)であることを考慮し算出したものとする。細骨材として山形珪砂を使用し、ポリマー(P)には、スチレンブタジエンゴム(SBR)、エチレン酢酸ビニル(EVA)及びポリアクリル酸エステル(PAE)を使用した。Table 6 に、ポリマーディスパージョンの性質を示す。また、消泡剤として、シリコーンエマルジョン系消泡剤(AF)を使用した。消泡剤をポリマーディスパージョンの全固形分に対して、その有効シリコーン分として0.5%添加した。なお、各供試体の密度(μ)は供試体脱型時に計測したものである。

以上の、各供試体を $100 \times 100\text{mm}$ 、長さ400mmにコンクリート及びモルタル角柱に成形した。

2.2 供試体概要

Fig.1 に供試体形状及び寸法を示す。供試体は、発熱性試験(ISO 5660-1:2002 [Reaction to fire tests-Heat release, smoke production and mass loss-Part 1:Heat release rate(cone calorimeter method)])⁴⁾に従って、下地材に仕上げ材を接着し、寸法 $99 \times 99\text{mm}(\pm 1\text{mm})$ 、厚さ50mm以下になるように作製($100 \times 100\text{mm}$ 、長さ400mmのコンクリート角柱を $100 \times 100\text{mm}$ 、長さ50mmになるよう切断)した。なお、熱伝導率測定試験も同様に寸法 $99 \times 99\text{mm}(\pm 1\text{mm})$ 、厚さ50mmとした。供試体の養生として、打込みから2d湿空[20°C 、90% (RH)]養生、5d水中(20°C)養生し、21d気中[20°C 、90% (RH)]を行い合計28dになるようにした。また、供試体の高温環境における爆裂を考慮し、 60°C の乾燥機で各供試体の質量が一定(質量変化が0.2%/d以下)になるよう調整した。なお、発熱性試験及び熱伝導率試験の供試体個数は各水準2体とした。

Table 1 Mix Proportions of Normal Concrete

G_{\max} (mm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	μ (g/cm^3)	Unit Amount(kg/m^3)				
					W	C	S	G	AE
20	57.9	4.5	48.8	2.3	184	318	855	963	3.180

Table 2 Mix Proportions of High-Density Concrete (HC)

G_{\max} (mm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	μ (g/cm^3)	Unit Amount(kg/m^3)				
					W	C	S	G	AE-H
20.0	53.1	1.0	40.4	3.9	186	350	1356	2003	1.320

Table 3 Mix Proportions of Light-Weight Aerated Mortar (LM)

W/C (%)	Air (%)	C/S	μ^* (g/cm^3)	Unit Amount(kg/m^3)			
				W	C	S	FA
58.2	20 \leq	1:2	0.9	291	500	1000	10.0

Note*; Measured Value

Table 4 Mix Proportions of Ordinary Cement Mortar

W/C (%)	Air (%)	C/S	μ (g/cm^3)	Unit Amount(kg/m^3)			
				W	C	S	AE
58.2	7.0	1:3	2.1	285	490	1470	-

Table 5 Mixing of Polymer-Modified Mortar

P/C (%)	W/C (%)	C/S	$\mu^*(\text{g/cm}^3)$			Amount of Unit(kg/m^3)				
			SBR	EVA	PAE	W	C	S	P	FA
5	35.0	1:3	2.0	2.1	2.1	150	500	1500	50	2.5
10			2.1	2.1	2.1	125	500	1500	100	2.5
15			2.1	2.1	2.1	100	500	1500	150	2.5
20			2.2	2.0	2.1	75	500	1500	200	2.5

Note*; Measured Value

Table 6 Properties of Polymer Dispersions

Type of Polymer Dispersion	Density (20°C , g/cm^3)	pH (20°C)	Viscosity (20°C , mPa/s)	Total Solids (%)
SBR Latex	1.02	8.9	118	46.9
EVA Emulsion	1.06	4.9	748	45.4
PAE Emulsion	1.03	8.1	1205	44.5

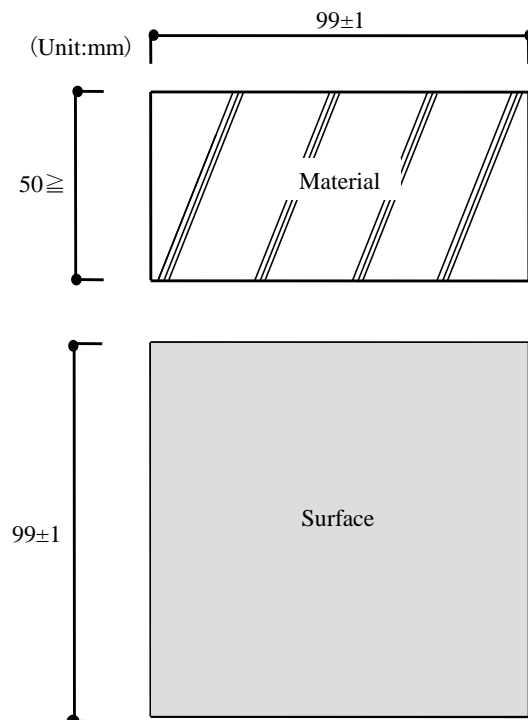


Fig.1 Shape and Dimension of Test Specimen

2.3 実験方法

(1) 発熱性試験

建築基準法第2条第九号に基づく防火性能評価のための発熱性試験[ISO 5660-1:2002 [Reaction to fire tests-Heat release, smoke production and mass loss-Part 1:Heat release rate(cone calorimeter method)]]に従って、コーンカロリメータ試験機を用いて行った。Fig.2に供試体燃焼部を示す。試験体をロードセル上に水平に設置し、その上方から点火器により輻射熱量 50kW/m²で供試体表面を均一に加熱し、酸素の消費量から発熱量を測定した。また、試験時間は「不燃材料」の20min間として行った。その間に発熱速度及び総発熱量の測定を行った。

(2) 判定方法

Table 7に判定基準を示す。建築基準法(法)及び建築基準法施行令(令)に従って、発熱性試験の結果が、「不燃材料」(法2条九号/令108条の2)、「準不燃材料」(令1条五号/令108条の2)、「難燃材料」(令1条六号/令108条の2)のいずれかであるかを判断した。判定基準として、「不燃材料」は加熱開始後20min、「準不燃材料」は10min、「難燃材料」は5min間で、以下の3つの要件すべてを満たす場合とした。①加熱開始後、要求時間の総発熱量が8MJ/m²以下であること。②加熱開始後、要求時間内に亀裂及び穴等が裏面まで達しないこと。③加熱開始後、要求時間の最大発熱速度が、10s以上継続して200kW/m²を超えないこと。また、以上の条件を満たさない場合は「区分外」とした。

(3) 熱伝導率試験

JIS A 1412-2(熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法)に従い、定常熱線法により、供試体の熱伝導率試験を行った。Fig.3に定常熱線法概念図を示す。熱伝導率測定装置のプレート内部に高温及び低温の熱流量測定用の熱流センサー及び温度測定用の熱電対が埋め込まれており、両プレート間に試料をセットし、温度(高温及び低温)を加え各プレートの温度差から熱伝導率(λ)を測定する。なお、熱伝導率(λ)は以下の式(1)で求める。

$$\lambda = \frac{Qh + Qc}{2} \cdot \frac{L}{\Delta T} \quad (1)$$

ここに、λは熱伝導率(W/mK)、Qhは高温側熱流量(W/m)、Qcは低温側熱流量(W/m)、Lは試料の厚さ(m)であり、ΔTは高温側サンプル表面温度(Th)及び低温側サンプル表面温度(Tc)との差である。なお、低温側の温度を20℃、高温側の温度は30℃とし、温度差を10℃とした。

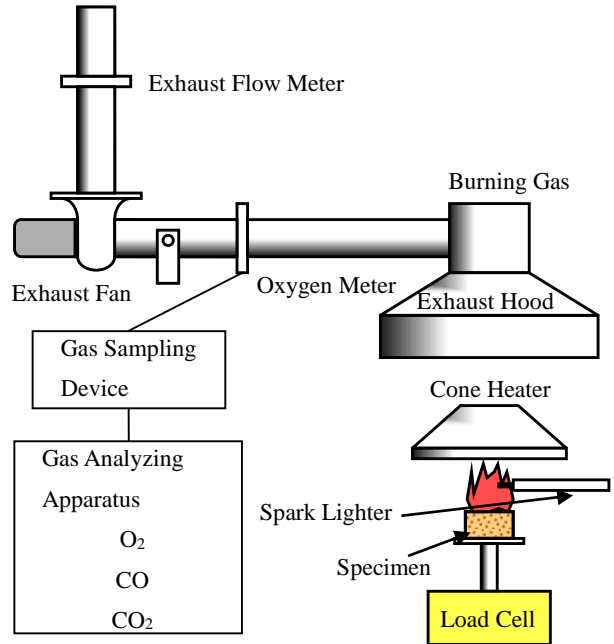


Fig.2 Schematic View of Cone Calorimeter

Table 7 Quality Grading Based on Building Standard Law

Grading for Fire-Preventive Material	Total Heat Release(MJ/m ²)	Heat Release Rate(kW/m ²)
Failed	Total heat release exceeds 8MJ/m ² or more within 5minutes from the start of heating.	Maximum heat release rate within 5minutes from the start of heating exceed 200kW/m ² for longer than 10s.
Flame-Retardant Material	Total heat release shall be 8MJ/m ² or less for 5min from the start of heating.	Maximum heat release rate for 5min from the start of heating shall not exceed 200kW/m ² for longer than 10s.
Quasi-Noncombustible Material	Total heat release shall be 8MJ/m ² or less for 10min from the start of heating.	Maximum heat release rate for 10min from the start of heating shall not exceed 200kW/m ² for longer than 10s.
Noncombustible Material	Total heat release shall be 8MJ/m ² or less for 20min from the start of heating.	Maximum heat release rate for 20min from the start of heating shall not exceed 200kW/m ² for longer than 10s.
Common	Cracks and holes penetrating through the specimen are absent from the start of heating.	

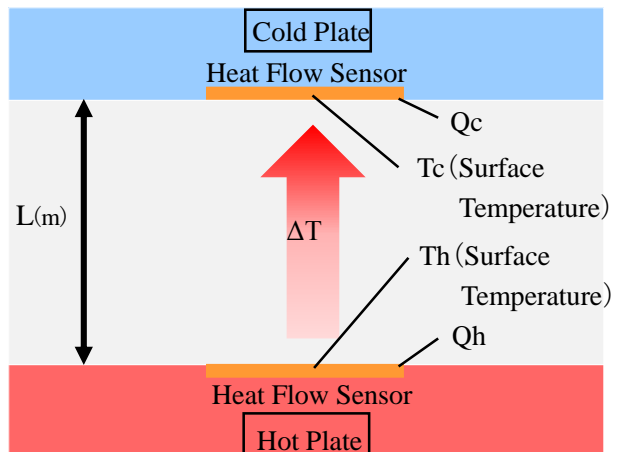


Fig.3 Conceptual Diagram of Thermal Conductance by Stationary Hot Wire Method

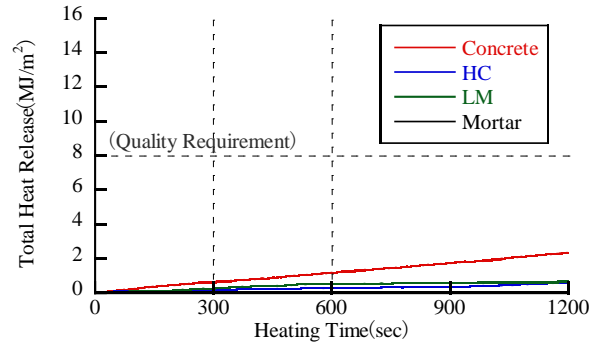
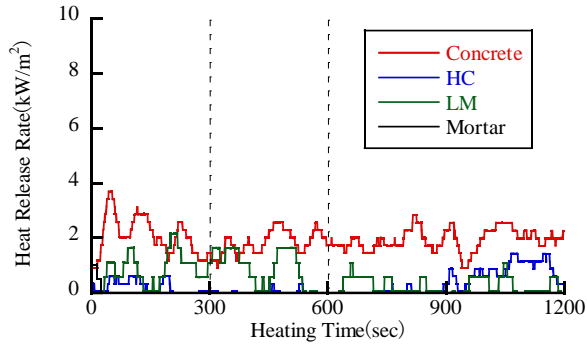


Fig.4 Heating Time vs. Heat Release Rate and Total Heat Release of Normal Concrete, High-Density Concrete, Light-Weight Aerated Mortar and Ordinary Cement Mortar

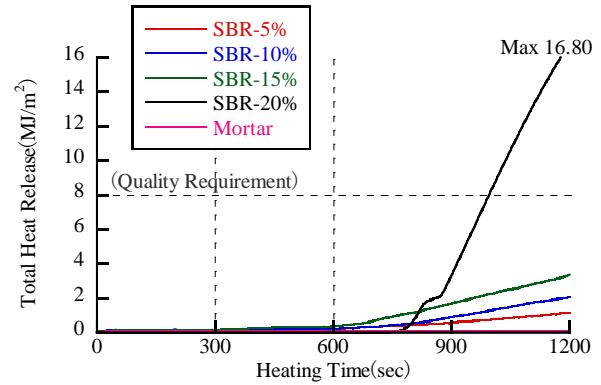
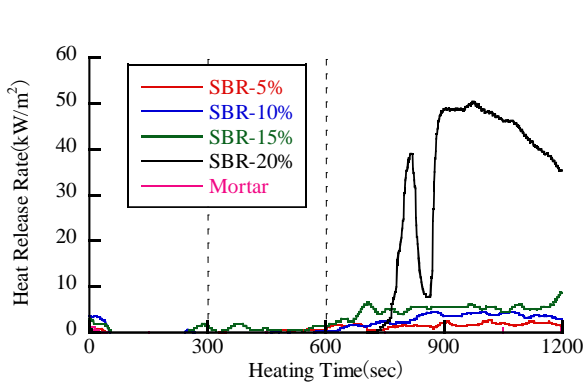


Fig.5 Heating Time vs. Heat Release Rate and Total Heat Release of SBR-5%, SBR-10%, SBR-15% and SBR-20% Polymer-Modified Mortars

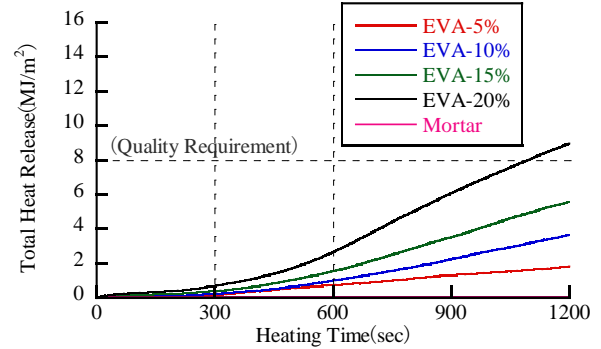
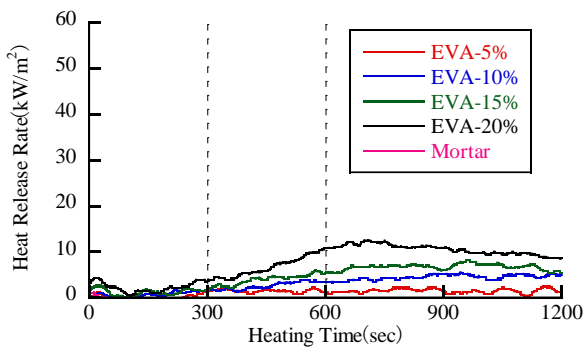


Fig.6 Heating Time vs. Heat Release Rate and Total Heat Release of EVA-5%, EVA-10%, EVA-15% and EVA-20% Polymer-Modified Mortars

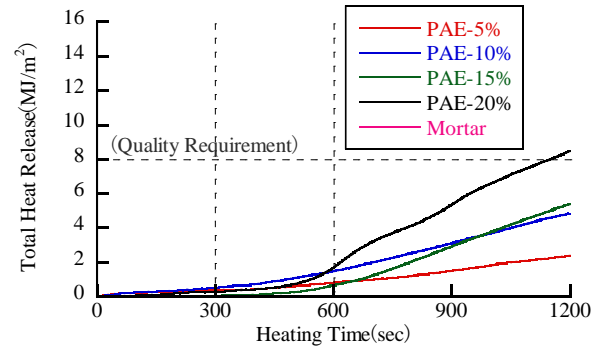
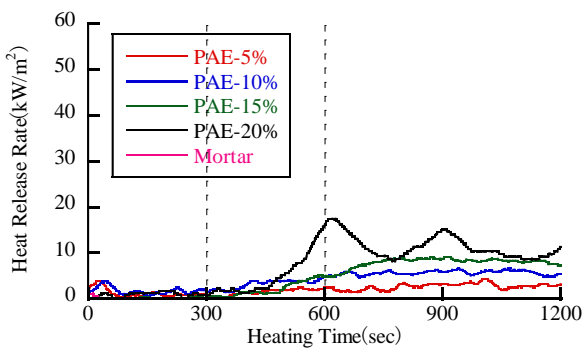


Fig.7 Heating Time vs. Heat Release Rate and Total Heat Release of PAE-5%, PAE-10%, PAE-15% and PAE-20% Polymer-Modified Mortars

3. 試験結果

3.1 発熱性試験

Fig.4 に各種コンクリート, Fig.5 に SBR (PCM), Fig.6 に EVA (PCM), Fig.7 に PAE (PCM) の発熱速度及び総発熱量の結果を示す。また, Table 8 に発熱性試験の試験及び判定結果を示す。Fig.4 より, 各種コンクリート系では, 発熱速度及び総発熱量を見ると発熱速度が 200kW/m^2 以下となり総発熱量が 8MJ/m^2 以下であることから不燃材料であると判定された。また, 爆裂も確認されなかった。

Fig.5 より SBR 系ポリマー混入の PCM では, ポリマーセメント比 (以下、P/C) の増加に伴い発熱速度及び総発熱量が増加する傾向が見られた。また, P/C20%時の供試体に限り総発熱量が 20min 以内に 8MJ/m^2 を超え, 同時に表面の爆裂 (試験開始後 820s 経過時) も確認されたため性能区分としては準不燃材料と判定された。これは, SBR 系ポリマーには多くの炭素及び水素を含有しているため, 可燃性ガス (炭化水素) の放出量の多さに起因しているためと考えられる。

Fig.6 より EVA 系ポリマー混入の PCM では, SBR 系ポリマー混入 PCM と同様に, P/C の増加に伴い発熱速度及び総発熱量が増加する傾向であった。また, P/C20%時の供試体に限り総発熱量が 20min 以内に 8MJ/m^2 を超えたため性能区分としては準不燃材料と判定された。しかし, EVA 混入 PCM では SBR 混入 PCM と異なり P/C20%で爆裂は確認されなかった。EVA 混入 PCM で比較的良好的な結果となった理由として, 大濱らによる JIS A 1321 (建築物の内装材料及び工法の難燃性試験方法) に基づく基材試験の結果⁵⁾からも推察できる通り, ポリマーの構成成分として, 酢酸ビニルを含有するため, 酢酸ビニル系ポリマーの熱分解では, 主鎖が切断するよりも低い温度で, 側鎖と隣接水素が脱離反応を起こし, 酢酸, 水などが多量に生成するため⁶⁾と推察される。

Fig.7 より PAE 系ポリマー混入の PCM では, SBR 及び EVA 系ポリマー混入 PCM と同様に, P/C の増加に伴い発熱速度及び総発熱量が増加する傾向であった。また, P/C20%時の供試体に限り総発熱量が 20min 以内に 8MJ/m^2 を超え, 表面の爆裂 (試験開始後 630s 経過時) も確認され性能区分としては準不燃材料と判定された。

以上の結果をまとめると, 各種コンクリート系では, 発熱速度が 200kW/m^2 以下であり総発熱量が 8MJ/m^2 以下であることから不燃材料と判定され, 爆裂も確認されなかった。SBR, EVA 及び PAE 系ポリマー混入 PCM では, P/C の増加に伴い発熱速度及び総発熱量が増加する傾向であった。しかし, SBR 及び PAE 系ポリマー混入の P/C20%で爆裂が確認された。本試験で確認された爆裂についての一考察を次節に述べる。

3.2 熱伝導率試験

3章 3.1 節で示したように, SBR 及び PAE 系ポリマー混入の P/C20%で爆裂が確認されたが, 爆裂機構の解明は未だ未解明の部分が多いのが現状である。そのため, 1 章にも述べた通り, 一般的な爆裂機構の解明には材料の熱及び力学的特性の考慮が必要なため, 爆裂機構の解明のための研究の一環として, 本試験で用いた供試体 (主に PCM) の熱伝導率を測定した。Fig.8 に熱伝導率測定結果を示す。試験結果より, コンクリートを基準値とした場合, 密度の高い HC は熱伝導率が約 33%高い結果となり, 逆に密度の低い CM では約 72%低い値となったため, 本試験の結果は正常に測定されていると言える。PCM の結果を見ると, SBR 及び PAE 系ポリマー混入の P/C15 及び 20%の供試体は P/C5 及び 10%に比べ高い値となり, P/C の増加に伴う熱伝導率の上昇傾向が確認された。EVA 系ポリマー混入では, P/C の増加に関わらず熱伝導率の変化が少ないことから, 上昇傾向は確認されなかった。

発熱性試験で爆裂が確認された P/C20% (SBR 及び PAE) の供試体熱伝導率が高い結果となったことから, P/C の増加に伴い, 熱の伝わりやすさの向上が爆裂の一因となりうる。しかし, これらの関係性を統一的に評価するためには, 同様の試験における試験個体数を増加し, 検討する必要がある。

Table 8 Experimental Results and Grading of Materials

Identification	Total Heat Release (MJ/m ²)	Max. Heat Release Rate (kW/m ²)	Grading	
Concrete	Normal Concrete	1.95	3.45	Noncombustible
	High-Density Concrete	0.60	1.43	Noncombustible
Mortar	Light-Weight Aerated Mortar	0.75	2.06	Noncombustible
	Ordinary Cement Mortar	0.48	3.23	Noncombustible
SBR	P/C 5%	1.13	2.94	Noncombustible
	10%	3.57	3.34	Noncombustible
	15%	3.34	8.73	Noncombustible
	20%	16.80	50.27	Quasi-Noncombustible
Polymer-Modified Mortar	P/C 5%	1.81	3.56	Noncombustible
	10%	3.65	5.49	Noncombustible
	15%	5.55	8.59	Noncombustible
	20%	8.95	12.97	Quasi-Noncombustible
EVA	P/C 5%	2.38	4.28	Noncombustible
	10%	4.83	7.71	Noncombustible
	15%	5.38	9.88	Noncombustible
	20%	8.47	17.39	Quasi-Noncombustible
PAE	P/C 5%	1.81	3.56	Noncombustible
	10%	3.65	5.49	Noncombustible
	15%	5.55	8.59	Noncombustible
	20%	8.95	12.97	Quasi-Noncombustible

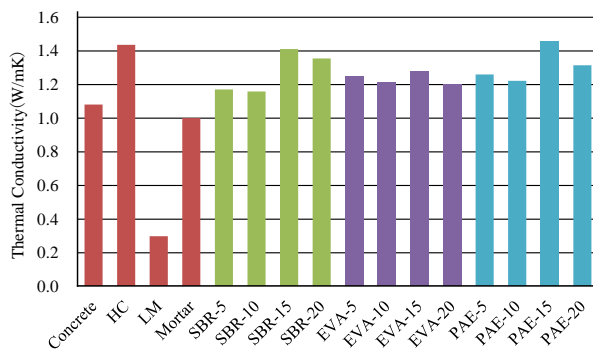


Fig.8 Thermal Conductivity of Various Concretes and Mortars

4. まとめ

本研究では、各種コンクリート及び PCM の燃焼特性及び熱的特性を評価するために、発熱性試験及び熱伝導率試験を評価した。

得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 発熱性試験により、普通コンクリート、重量コンクリート、気泡モルタル及び普通モルタルは不燃材料であり爆裂は確認されなかった。
- (2) 発熱性試験により、各種 PCM では、SBR 及び PAE 系ポリマー混入の P/C15%及び EVA 系ポリマー混入の P/C20%までは不燃材料と判定されたが、SBR 及び PAE 系ポリマー混入の P/C20%に限り、試験開始 20min 以内に爆裂が確認されたため準不燃材料と判定された。
- (3) 爆裂機構の解明のための研究の一環として、熱伝導率を測定し、爆裂が確認された SBR 及び PAE 系ポリマー混入の P/C20%と P/C5%及び 10%を比較した結果、P/C 増加に伴い熱伝導率が高い値となり、熱の伝わりやすさが爆裂の一因となりうる。

参考文献

- 1) 王 若平, 川上 寛正, 小澤 満津雄, 森本 博昭: コンクリートの爆裂現象に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1703-1708, 2006
- 2) Lee Jae-Young, Kwon Young-Jin, Harada Kazunori: 各種強度コンクリートの高温時の熱伝導率の推算方法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), pp.61-62, Sep.2010
- 3) 濱崎 仁, 野口 貴文, 王 徳東, 金亭俊, 吉田 正志, 成瀬 友宏: ポリマーセメントモルタルの燃焼特性および熱伝導率に関する研究 その 1 発熱性試験の結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp.159-160, Sep.2008
- 4) ISO 5660 "Fire Test-Reaction to Fire" Part1 Heat Release (Cone calorimeter method)
- 5) 大濱 嘉彦, 鈴木 清司, 尾澤 秀夫: ポリマーセメントモルタルの難燃性, コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.253-256, May 1981
- 6) 大沢 善次郎: プラスチックの熱分解, 都市と廃棄物, Vol. 1, No.1, pp.20-25, 1971