

論文 各種ポリマーセメントモルタルで作製したリング拘束供試体の高温下の爆裂性状に関する検討

杉野 雄亮*1・小澤 満津雄*2・谷辺 徹*3・祐川 真紀帆*4

要旨: リング拘束供試体法は、コンクリートの爆裂試験方法である。本論文は、この試験方法を用い、各種ポリマーを添加したセメントモルタルの高温下の爆裂性状を評価した。使用したポリマーは、ポリアクリル酸エステル、エチレン酢酸ビニルおよび酢酸ビニル・ビニルバーサテートの3種類とした。加熱曲線は、RABT30とした。試験の結果、各種ポリマーセメントモルタルは、ポリマー無添加のモルタルに比べ、爆裂規模が大きくなった。また、爆裂発生時に拘束応力の変動と水蒸気圧の急激な減少が確認され、コンクリートの高温下の爆裂発生時と類似した傾向を示した。

キーワード: 火災、爆裂、ポリマーセメントモルタル、リング拘束供試体法、拘束応力、水蒸気圧

1. はじめに

ポリマーセメントモルタル (PCM) は、RC 部材の補修材として用いられている¹⁾²⁾。PCM のポリマーは、母材コンクリートとの一体化を図るため、付着強度の向上を目的に添加される³⁾。PCM に添加されるポリマーは、セメント混和用ポリマーディスパージョン及び再乳化形粉末樹脂 (JIS A 6203:2015) の適合品である。再乳化形粉末樹脂として実用化されているポリマーには、ポリアクリル酸エステル、エチレン酢酸ビニルおよび酢酸ビニル・ビニルバーサテートがある⁴⁾。一方、建築耐火の分野では、PCM はポリマー無添加のモルタル (NCM) に比べて、高温下で爆裂が発生しやすいことが報告されている⁵⁾。

既報では、PCM の爆裂評価を部材レベルの耐火試験により確認している⁶⁾。しかし、材料の耐爆裂性を評価する配合検討段階においては、部材レベルの試験では大規模になってしまう。そのため、PCM の爆裂性状の評価方法として、小型供試体による簡易爆裂試験方法が提案されている⁵⁾。簡易爆裂試験方法は、壁部材の耐火試験と一定の相関を示すことが確認されている。一方、簡易爆裂試験方法では、深さ方向の損傷の進行を把握することは難しい。また、爆裂発生メカニズムについて不明な点が多く、これらの課題に対する検討が必要であると考えられる。

リング拘束供試体法⁷⁾は、コンクリートの爆裂試験方法である。この試験方法は、小型供試体で拘束の影響を考慮できる点に特徴がある。リング拘束供試体は1面加熱することで、爆裂深さの進行を内部温度から推定できる。また、加熱中の拘束応力と水蒸気圧を測定し、爆裂発生時の状態を評価できる。加熱冷却後の爆裂規模は、

爆裂深さよりグレーディング評価される。上述の試験方法は、コンクリート配合の耐爆裂性に関するスクリーニングの試験方法と位置付けられる。これまでに、著者らは、リング拘束供試体法を用いてポリアクリル酸エステルを添加したモルタル (PAE) の爆裂性状の評価を試みた⁸⁾。その結果、PAE は、NCM に比べて爆裂規模が大きくなることを確認した。また、加熱中の拘束応力と水蒸気圧を測定し、これらの作用により爆裂が発生する可能性があることを確認した。本論文は、PAE に加え、エチレン酢酸ビニルを添加したモルタル (EVA) および酢酸ビニル・ビニルバーサテートを添加したモルタル (VVA) の高温下の爆裂性状をリング拘束供試体により評価した。各種 PCM のポリマーセメント質量比 (P/C) は10%とした。また、加熱条件は JCI 規準に示される加熱曲線²⁾ (RABT30 相当) とした。

2. モルタルの仕様

2.1 使用材料および配合

表-1 に使用材料を示す。ポリマーは、セメント混和用ポリマーディスパージョン及び再乳化形粉末樹脂 (JIS A 6203:2015) に適合する市販品を用いた。これらのポリマーは、いずれも補修材として用いられる再乳化形粉末樹脂であることを確認している。セメント、細骨材およびポリマーはプレミックスした。表-2 に配合を示す。配合は、補修材として用いられる一般的な PCM の配合範囲²⁾を参考に設定した。モルタルの砂セメント比 (S/C) は、2.5 とした。また、水セメント比 (W/C) は、0.5 とした。P/C は10%とし、外割添加した。モルタルは、パン型強制練りミキサーで3分間攪拌して製造した。

*1 太平洋マテリアル (株) 開発研究所 修士(工学) (正会員)

*2 群馬大学 理工学府環境創生部門 社会基盤防災コース 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 太平洋マテリアル (株) 開発研究所 博士(工学) (正会員)

*4 群馬大学大学院 理工学府環境創生理工学領域 (学生会員)

2.2 フレッシュ性状および強度特性

表-3 にフレッシュ性状および強度特性を示す。弾性係数および圧縮強度の測定は、供試体を2ヶ月間封かん養生した後、実施した。含水率は、供試体を105℃で乾燥させたときの乾燥前後の質量から算出した。測定結果より、各種PCMおよびNCMの圧縮強度は同程度であることが分かる。一方、弾性係数については、やや低下する傾向がみられた。

3. 加熱試験概要

3.1 リング拘束供試体の形状寸法

図-1 にリング拘束供試体の概要を示す。供試体は、リング拘束供試体法⁷⁾に準じて作製した。鋼製リングの高さは100mm、直径は300mmとした。鋼製リングの外周にひずみゲージを設置した。また、鋼製リングを貫通するステンレスパイプを設置した。ステンレスパイプの一端は、供試体中心に位置するようにし、同じ位置に熱電対を設置した。また、パイプのもう一端には、圧力計を接続した。ひずみゲージ、ステンレスパイプおよび熱電対は、加熱面からの深さ5,10,25,40mmの位置にそれぞれ設置した。上述の鋼製リングにモルタルを充填した後、2ヶ月間封かん養生した。加熱試験は、モルタルの養生後に実施した。

表-1 材料仕様

名称	仕様
ポリアクリル酸 エステル	再乳化形粉末樹脂 密度 0.4~0.6 g/cm ³
エチレン酢酸 ビニル	再乳化形粉末樹脂 密度 0.5~0.6 g/cm ³
酢酸ビニル・ ビニルバーサテート	再乳化形粉末樹脂 密度 0.5~0.7 g/cm ³
セメント	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³
細骨材	珪砂(絶乾) 密度 2.64 g/cm ³ , 吸水率 0.3%

3.2 リング拘束供試体の加熱方法

図-2 に設定温度と炉内温度を示す。炉内温度の設定は、リング拘束供試体法の加熱曲線²⁾(RABT30相当)とした。図より、設定温度と炉内温度は概ね一致することを確認した。図-3 にリング拘束供試体の加熱状況を示す。リング拘束供試体は、水平炉の開口部に設置し、下面側の一面を加熱した。その際、鋼製リングの下端が直接加熱されないように断熱材で被覆した。

3.3 測定項目および測定方法

(1) 音の確認および剥落の観察

試験時は、爆裂発生時の音を確認した。また、水平炉の炉窓からモルタルの剥落を観察した。

(2) 内部温度

モルタルの内部に設置した熱電対により、内部温度を測定した。熱電対の設置位置は、加熱面から5,10,25,40mmとした。

(3) 拘束応力

鋼製リングのひずみは、加熱面から5,10,25,40mm位置にて測定した。拘束応力は、リング拘束供試体法の付属書A(参考)コンクリートの爆裂試験A法(リング拘束供試体法)における各種測定方法⁷⁾に準じて算出した。

(4) 水蒸気圧

水蒸気圧は、リング拘束供試体法の付属書A(参考)コンクリートの爆裂試験A法(リング拘束供試体法)における各種測定方法⁷⁾に準じて測定した。加熱面から5,10,25,40mm位置の水蒸気圧を測定した。

表-2 配合

水準	S/C	W/C	P/C(%)	ポリマー量 (kg/m ³)
NCM	2.5	0.5	-	-
PAE			10	56
EVA				
VVA				

表-3 フレッシュ性状および強度特性

材齢	項目	NCM	PAE	EVA	VVA
-	15打フロー(mm)	159	181	180	135
	空気量(%)	5.2	6.2	4.4	4.0
	温度(°C)	25.5	26.0	16.7	16.8
2ヶ月	圧縮強度(MPa)	45.3	43.0	47.3	47.0
	弾性係数(GPa)	26.3	22.0	20.5	22.4
	含水率(%)	6.1	6.1	7.4	7.2

4. 試験結果の分析項目

4.1 加熱冷却後の爆裂規模

表-4 に爆裂規模のグレーディング指標⁷⁾を示す。爆裂深さは、加熱冷却後の加熱面を10mmメッシュ交点で測定した。爆裂規模は、最大爆裂深さ、爆裂面積率、爆裂容積率の3種類の指標により評価した。

4.2 爆裂深さの経時変化

爆裂深さの経時変化は、内部温度から推定した。爆裂発生時は、モルタルの断面欠損と同時に熱電対が直接炉内に晒されるため、温度が急上昇すると考えられる。5,10,25,40mm位置の内部温度から爆裂発生時間を推定し、各位置の爆裂発生時間のプロットをつなぎ、爆裂深さの経時変化とした。

4.3 爆裂発生時の拘束応力および水蒸気圧

図-4 にコンクリートの爆裂発生イメージ⁹⁾を示す。谷辺らは、リング拘束供試体によりコンクリートの高温下の拘束応力と水蒸気圧を測定している⁹⁾。拘束応力は、コンクリートの熱膨張により、加熱面と平行に生じる。一方、水蒸気圧は、モルタルの空隙中にある自由水が100°C以上になり生じる。本研究グループでは、コンク

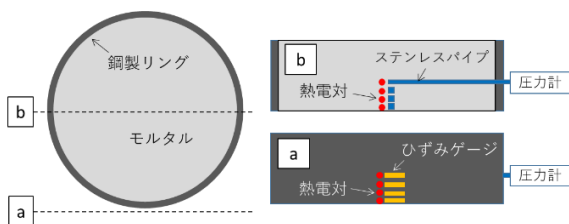


図-1 リング拘束供試体の概要

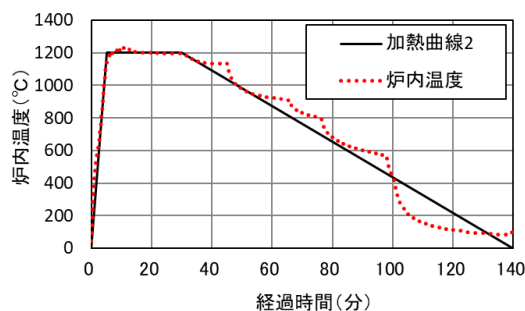


図-2 温度設定と炉内温度

リートの爆裂は、拘束応力のポアソン効果による引張りひずみ破壊により水平方向にひび割れが生じ、その破壊面に水蒸気圧が作用して、破壊片を面外に吹き飛ばすことで生じると仮定している。既報⁸⁾では、PAEの爆裂性状を評価し、拘束応力に起因する引張りひずみ破壊と水蒸気圧が作用して爆裂が発生する可能性があることを確認している。本論文は、PAEに加え、EVAおよびVVAの5mm位置の爆裂発生時の拘束応力と水蒸気圧を確認することとした。

5. 試験結果

5.1 爆裂継続時間

PAE, EVA および VVA は、最初の爆裂が確認されて以降、爆裂発生時の音が繰り返し生じ、水平炉の炉窓からはモルタルの剥落が観察された。加熱中に爆裂の継続は止まらず、供試体上面から火炎漏れが起こる恐れがあったため、加熱を中止した。PAEは加熱開始後14分で加熱を中止し、EVA および VVA は加熱開始後16分で加熱を中止した。一方、NCMは、加熱開始後7.3分で爆裂の発生が止まり、加熱を中止することは無かった。

5.2 内部温度と爆裂深さの経時変化

図-5 に爆裂深さの経時変化を示す。爆裂深さは、加熱時間の経過に従い、徐々に深くなった。爆裂が繰り返していることから、爆裂による断面欠損を繰り返し、徐々に爆裂深さが大きくなったと推察される。爆裂発生時の内部温度は水準間で差異はみられなかった。一方、5mm位置の爆裂発生時間は最初に爆裂音が確認された時間と同時であり、VVAはPAEやEVAに比べてやや早

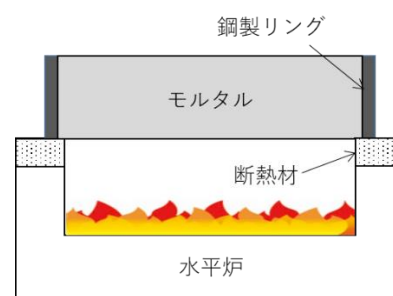


図-3 リング拘束供試体の加熱状況

表-4 爆裂規模のグレーディング指標⁷⁾

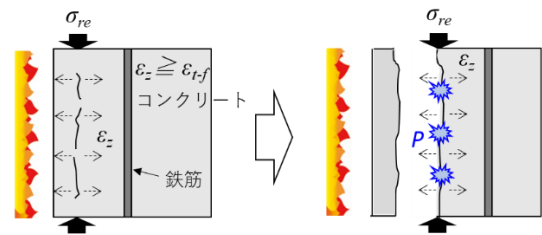
グレード	指標 1 : 最大爆裂深さ	指標 2 : 爆裂面積率	指標 3 : 爆裂容積率
A	爆裂無し, ひび割れ無し	爆裂無し, ひび割れ無し	爆裂無し, ひび割れ無し
B	爆裂は無いが, 亀甲状のひび割れあり	爆裂は無いが, 亀甲状のひび割れあり	爆裂は無いが, 亀甲状のひび割れあり
C	10mm 未満	総面積の 10% 未満	総容積の 10% 未満
D	10~30mm 未満	総面積の 10~50% 未満	総容積の 10~20% 未満
E	30mm 以上	総面積の 50% 以上	総容積の 20% 以上

い傾向がみられた。爆裂発生時の内部温度は同程度であることから、VVA は、PAE や EVA よりも 5mm 位置の内部温度が早く上昇したことが原因と推察される。VVA の 10mm 位置の爆裂発生時間は、PAE や EVA と比較して変わらないが、5mm と 10mm 位置が近いため、5mm 位置の爆裂の影響を受けた可能性があると考えられる。さらに、VVA の 25,40mm 位置の爆裂発生時間は PAE や EVA よりも早く、5mm 位置と同じ傾向を示している。これらの位置においても、爆裂発生温度は各種 PCM で同程度であり、VVA の内部温度上昇は PAE や EVA に比べて早いことが分かる。VVA の内部温度が PAE や EVA よりも早く上昇する原因は現状では不明である。既往の知見では、ポリマー種類の異なる PCM は燃焼特性が異なっており¹⁰⁾、燃焼特性の違いが加熱時の内部温度に影響した可能性があると考えている。一方、NCM については、5,10mm 位置では爆裂が生じたが、25,40mm 位置では爆裂が発生しなかった。

5.3 試験後の加熱面および爆裂規模

図-6 に加熱試験後の加熱面と爆裂深さ分布を示す。目視観察では、加熱面の表面状態に差異はみられなかった。表-5 に爆裂規模のグレーディング結果を示す。指標 2 については、いずれの水準も加熱面全面に損傷がみ

られるため、差はみられなかった。一方、指標 1 と指標 3 については、NCM のグレードが D および C であるのに対し、PAE、EVA および VVA のグレードはすべて E であった。これらの結果から、ポリマーを添加したモルタルは、ポリマー無添加のモルタルに比べ、爆裂規模が大きくなる傾向を示した。これらの結果は、PAE、EVA および VVA に共通しており、既往の研究と同じ傾向を示すと考えられる⁹⁾。さらに、PAE、EVA および VVA は、



- ・加熱面に平行な拘束応力 (σ_{re}) が発生する
 - ・拘束応力のポアソン効果により加熱面に垂直な引張ひずみ (ϵ_z) が発生する
 - ・引張ひずみ (ϵ_z) がコンクリートの引張破壊ひずみ (ϵ_{tf}) を超え、水平方向にひび割れが発生する
 - ・水平方向に生じたひび割れが起点となり破壊面を形成する
 - ・破壊面に水蒸気圧 (p) が作用し、破片を面外に吹き飛ばす
- ⇒爆裂が発生する

図-4 コンクリートの爆裂発生イメージ⁹⁾

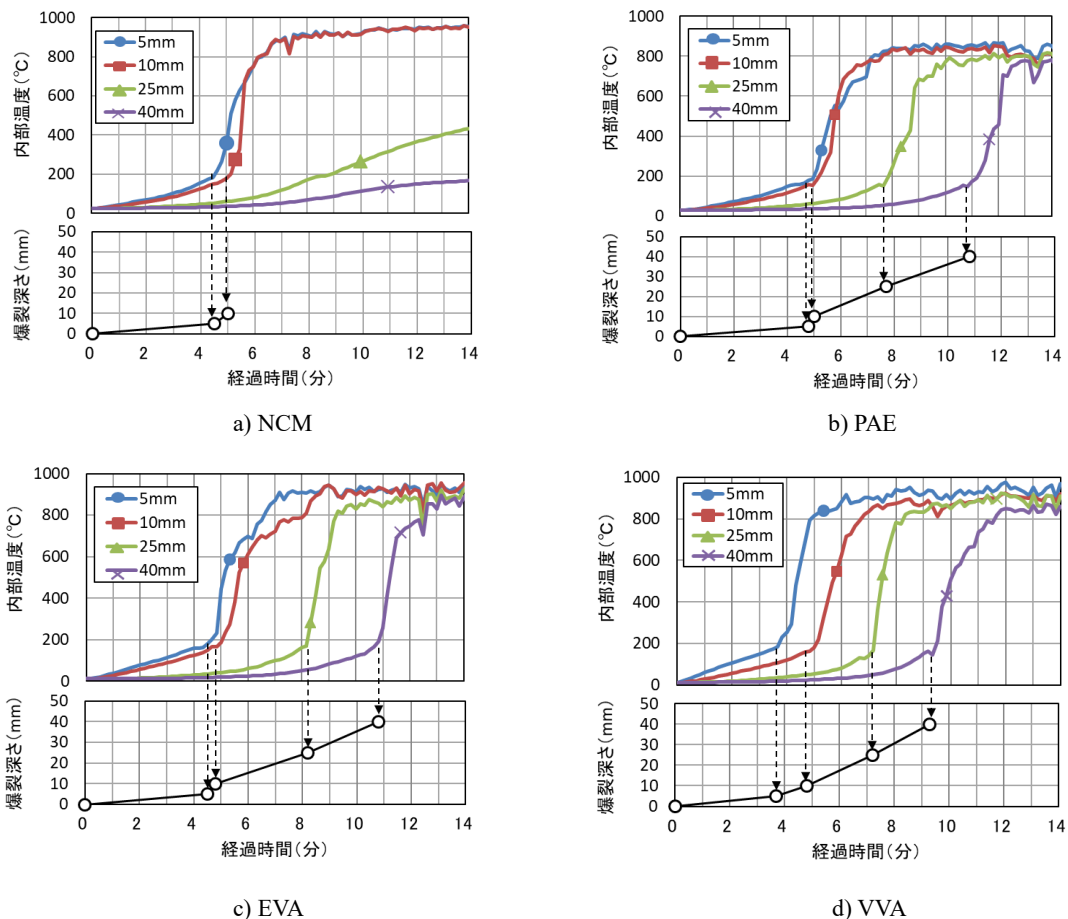


図-5 内部温度と爆裂深さの経時変化

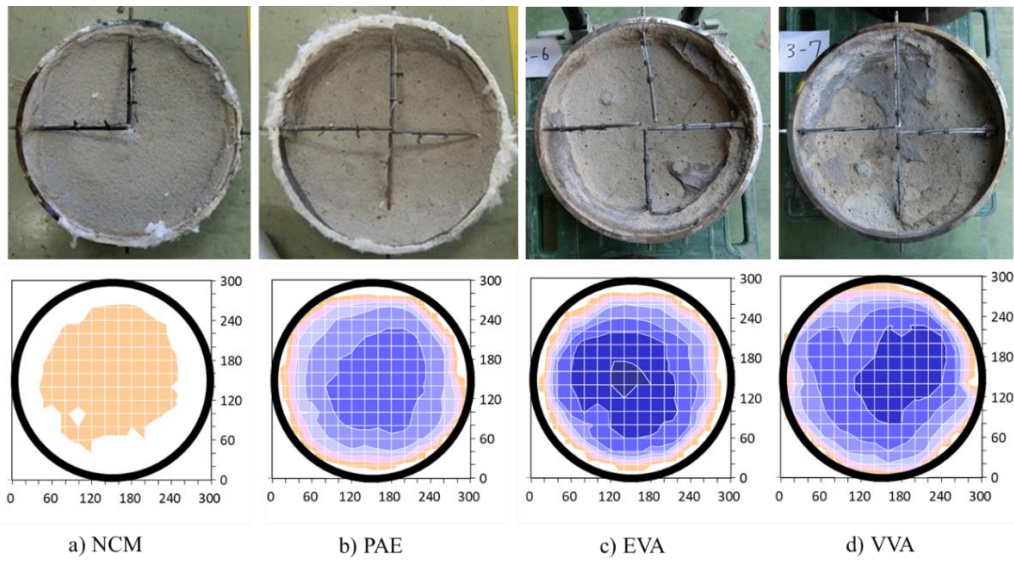


図-6 加熱試験後の加熱面と爆裂深さ分布

表-5 爆裂規模のグレーディング結果

水準	爆裂状況			グレード ⁷⁾		
	最大爆裂深さ (mm)	爆裂面積率 (%)	爆裂容積率 (%)	指標 1	指標 2	指標 3
NCM	18	93	9	D	E	C
PAE	56	98	36	E	E	E
EVA	73	90	41	E	E	E
VVA	69	91	44	E	E	E

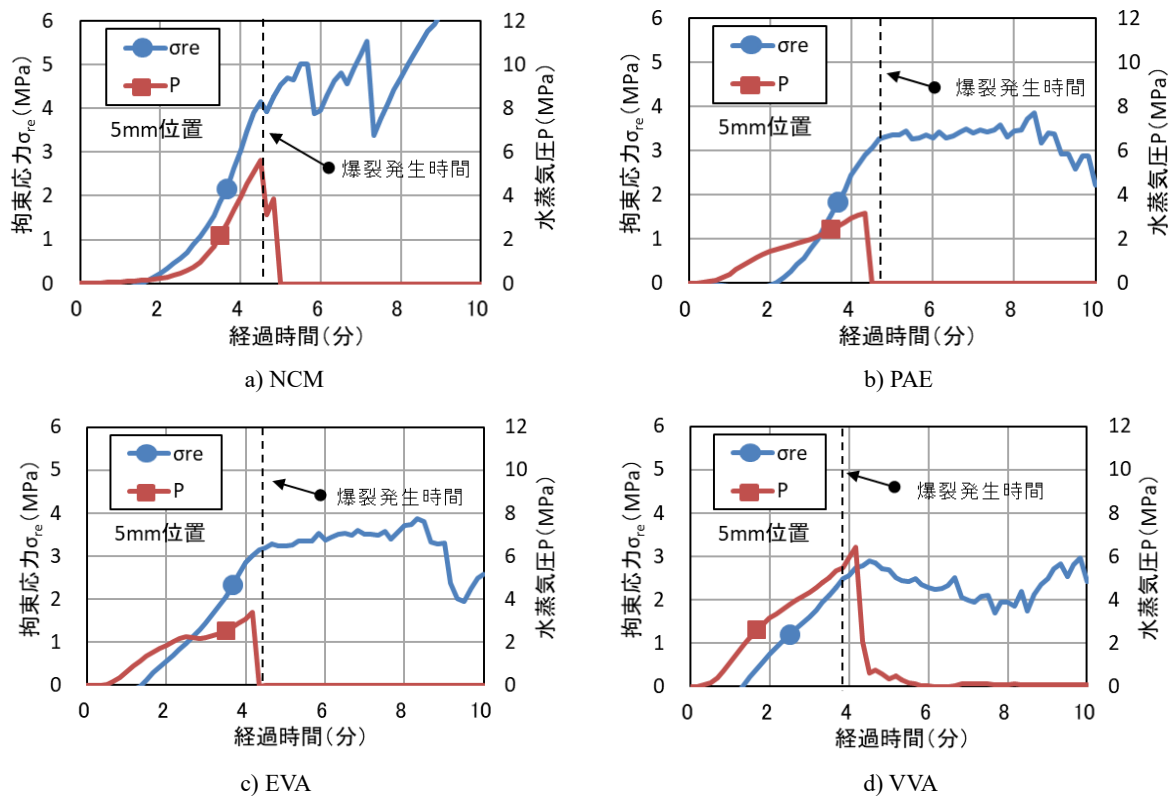


図-7 拘束応力と水蒸気圧の経時変化

いずれも加熱を中止しており、加熱を継続すると爆裂深さはさらに大きくなる可能性が示唆された。なお、PAEはEVAやVVAより最大爆裂深さが小さいが、これは加熱を早く中止したため、加熱時間が短くなった影響が含まれると考えられる。

5.4 爆裂発生時の拘束応力および水蒸気圧

図-7に5mm位置の拘束応力と水蒸気圧の経時変化を示す。NCMは、爆裂発生前まで熱膨張に伴い拘束応力が増加する。さらに、爆裂の発生時にモルタルの断面欠損により拘束応力が変動することが分かる。この現象は、PAE、EVAおよびVVAにおいても同様の現象が確認される。一方、PAE、EVAおよびVVAの爆裂発生時の拘束応力はいずれもNCMに比べて小さい傾向がみられる。その原因は、高温下の残存弾性係数やポアソン比が影響している可能性があり、さらに検証が必要であると考えている。一方、PAE、EVAおよびVVAの水蒸気圧は爆裂発生まで増加し、爆裂発生時に急激な減少がみられた。この現象は、NCMにおいても同様であった。コンクリートの高温下の爆裂発生時は、拘束応力と水蒸気圧の複合作用が確認されており¹¹⁾、各種PCMの爆裂発生現象は、コンクリートと類似した傾向を示したと考えられる。

以上より、PAE、EVAおよびVVAの爆裂性状をリング拘束供試体により評価した。その結果、各種PCMの爆裂規模はNCMより大きくなり、既往の研究と同じ傾向を示した。また、爆裂発生時は、拘束応力と水蒸気圧の複合作用が確認された。すなわち、各種PCMの爆裂現象はコンクリートと類似しており、リング拘束供試体法を各種PCMに適用できる可能性があると考えられた。

6. まとめ

- (1) PAE、EVAおよびVVAの爆裂規模は、NCMの爆裂規模よりも大きくなった。これらの試験結果は、既往の研究と同じ傾向を示した。
- (2) VVAは、PAEおよびEVAよりも5,25,40mm位置の爆裂発生時間が早まった。ポリマーの種類が、PCMの爆裂深さの経時変化に影響する可能性があると考えられる。
- (3) PAE、EVAおよびVVAは、爆裂発生時に拘束応力の変動と水蒸気圧の作用が確認され、コンクリートと類似した現象を示した。すなわち、補修材として汎用される各種PCMに対し、リング拘束供試体法を適用できる可能性があると考えられた。

謝辞

本研究は科学技術研究補助金基盤研究C(番号:19K04546:代表小澤)の補助を受けて実施した。また、

公益財団法人鹿島学術振興財団研究助成金による支援を受けた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) コンクリートライブラリー150 セメント系材料を用いたコンクリート構造物の補修・補強指針:土木学会, pp.30-39, 2018
- 2) 鉄筋コンクリート造建築物の耐久性評価・診断および補修指針(案)・同解説:日本建築学会, pp.105-111, 1997
- 3) 河野俊夫:ポリマーセメントモルタルおよびコンクリートの特性, コンクリートジャーナル, 11巻, 4号, pp.18-26, 1973
- 4) 大濱嘉彦, 出村克宣:ポリマーセメントコンクリート/ポリマーコンクリート, CMCテクニカルライブラリー121, シーエムシー出版, 2002
- 5) コンクリートの高温特性とコンクリート構造物の耐火性能に関する研究委員会報告書:日本コンクリート工学会, 2012
- 6) 濱崎仁, 茂木武, 野口貴文, 王徳東, 金享俊:ポリマーセメントモルタルを用いて補修した部材の耐火性能に関する研究 その1 耐火試験における補修部の損傷および温度分布, 日本建築学会構造系論文集, 第75巻, 第672号, pp.1065-1071, 2010
- 7) 日本コンクリート工学会 JCI 規準・指針画面参照:<http://www.jci-net.or.jp/jci/study/standard.html> (閲覧日:2021年1月5日)
- 8) 杉野雄亮, 谷辺徹, 六本木日菜子, 小澤満津雄:リング拘束供試体を適用したアクリル系ポリマーセメントモルタルの火災時の爆裂性状に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1001-1006, 2019
- 9) 谷辺徹, 小澤満津雄, 鎌田亮太, 内田裕市, 六郷恵哲:高温環境下での高強度コンクリートの耐爆裂性評価における爆裂発生指標の提案, 土木学会論文集E2, Vol.70, No.1, pp.104-117, 2014
- 10) 鈴木好幸, 濱崎仁, 関田徹志, 安田正雪, 小島正朗, 野中英, 山田人司:補修用ポリマーセメントモルタルの耐久性実験および吸発熱特性に関する実験 その3 熱分析の結果, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.281-282, 2011
- 11) 鎌田亮太, 小澤満津雄, 明石孝太, 谷辺徹:リング拘束試験方法における高強度コンクリートの爆裂性状に及ぼす養生期間の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1305-1310, 2016