

論文 高温を受けた補修材料の残存強度

王 徳東^{*1}・野口 貴文^{*2}・濱崎 仁^{*3}・朴 同天^{*4}

要旨: ポリマーセメントモルタルは、鉄筋コンクリート構造物の補修材料として、建築、土木分野で多く使用されている。最近、火災時の高温加熱下におけるこのような補修材料及び補修した鉄筋コンクリート構造部材の安全性については、未だ不明な点が多く、材料面および構造面からの検討が必要とされている。本研究では、高温環境下での補修材料の力学特性を明らかにすることを目的として、3種類のセメント混和用再乳化形粉末樹脂を用いて、ポリマーセメント比を変化させ断面補修用供試体を作製し、強度試験を行い、その加熱前後の外観変化、質量変化および強度の変化について検討、考察した。

キーワード: 高温、補修材料、残存強度、再乳化形粉末樹脂、ポリマーセメントモルタル

1. はじめに

ポリマーセメントモルタルは、普通セメントモルタルと比較して、接着性が良い、硬化が速い、収縮が小さい、防水性が高い、耐摩耗性・耐薬品性が優れる等の利点を有している。現在、建築、土木分野において、鉄筋コンクリート構造物の断面補修対策用の修復材として積極的に使用されている。

ポリマーセメントモルタルに用いるセメント混和用ポリマーは、水性ポリマーディスパージョン、水溶性ポリマー、液状ポリマー及び再乳化形粉末樹脂等の種類がある。再乳化形粉末樹脂は、合成樹脂エマルジョンを噴霧乾燥して製造されるが、常温で保存した場合に固まらないように、粘着防止剤が配合される。また、他のセメント混和用ポリマーに比較して、再乳化形粉末樹脂は、缶を使用せず、取り扱いが良く、ポリマーセメントモルタルの生産時には、セメント及び細骨材とドライミックスして商品化されている。

建築基準法では、補修時においてかぶりコンクリートを構成する材料として、ポリマーセメントモルタル、またはエポキシ樹脂モルタルの使用が位置付けられている。しかしながら、ポリマーセメントモルタルは、その構成成分として合成樹脂やゴムのような有機物を含有しているため、防火上の性能が明確ではなく、補修した鉄筋コンクリート構造部材の耐火性能に関する材料面及び構造面からの検討例は少ない。そのため、補修した鉄筋コンクリート構造部材火災加熱環境下での安全性が懸念される。また、補修した実大建築構造部材の荷重加熱試験の実施は困難であり、火災加熱後の残存耐力は解析的研究による解明が必要と考えられる。そのために

は、補修材料及びコンクリートが高温にさらされた場合の力学的特性に関する研究が、重要と考えられる。コンクリートについては多くの国内外の研究がなされているが、補修材料についてはわずかな研究報告しかみられないのが現状である。

そこで本研究では、現在市販されているエチレン・酢酸ビニル、酢酸ビニル・ベオバ・アクリルおよびポリアクリル酸エステル3種類の再乳化形粉末樹脂を選び、ポリマーセメント比を変化させ、普通セメントと大井川水系陸砂とを用いて断面修復用モルタルを作製し、火災を想定して、200℃から1000℃までの高温加熱を受けたポリマーセメントモルタルの強度試験を行い、その加熱前後の外観変化、質量変化及び強度変化について検討、考察した。

2. 試験体概要

2.1 セメント

セメントは、JIS R 5210 (ポルトランドセメント) に規定する普通ポルトランドセメントを使用した。

2.2 細骨材

細骨材は、JIS A 5308 (レディーミクストコンクリート) 付属書 1 を満たす大井川水系陸砂を使用した。表-1 に細骨材の試験結果を示す。

2.3 セメント混和用再乳化形粉末樹脂

セメント混和用再乳化形粉末樹脂は、JIS A 6203 (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) に規定するエチレン・酢酸ビニル (略称: EVA)、酢酸ビニル・ベオバ・アクリル (略称: VVA) およびポリアクリル酸エステル (略称: PAE) を使用した。一例

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻大学院生	修士 (工学)	(正会員)
*2 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻准教授	博士 (工学)	(正会員)
*3 独立行政法人建築研究所 材料研究グループ主任研究員	博士 (工学)	(正会員)
*4 韓国海洋大学校 海洋空間建築学部専任講師	博士 (工学)	(正会員)

表-1 細骨材の試験結果

List of items	Absolute density (g/cm ³)	Saturated density (g/cm ³)	Water absorption (%)	Fineness modulus (-)
Land sand from Ooi in Japan	2.54	2.59	2.03	2.65
Specified value(JIS A 5308)	No less than 2.5	-	No more than 3.5	-

表-2 セメント混和用再乳化形粉末樹脂の試験結果

Type of polymer	Appearance	Volatile portions (%)	Acid number (mgKOH/mg)	Apparent density (g/ml)	Glass transition temperature(°C)	Particle diameter (%)*
EVA	Milkly white powder without coarse particles	0.5	No more than 2.0	0.52	10	No more than 2.0
VVA		0.9	No more than 2.0	0.39	14	No more than 2.0
PAE		0.6	No more than 2.0	0.49	8	No more than 2.0

*Particle residue on the 300µm flour bolter

表-3 ポリマーセメントモルタルの調合

Type of polymer	Polymer-cement ratio (%)	Cement : Sand (By mass)	Water-cement ratio (%)	Defoamer (%)	Air content (%)	Flow (mm)
NON	0	1 : 3	50	1.0	3.6	151
EVA	5				4.7	191
	10				7.0	199
	20				8.5	208
	VVA				5	5.2
10					6.1	192
20					6.7	198
PAE					5	4.2
	10				6.8	188
	20				7.2	194

として、走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した EVA 再乳化形粉末樹脂の写真を図-1 に示す。球体状のものはポリマーであり、その上に付着しているものは粘着防止剤などの添加剤である。なお、各種類の再乳化形粉末樹脂には、粉末樹脂に対消泡剤が 1%添加されている。表-2 に再乳化形粉末樹脂の試験結果を示す。

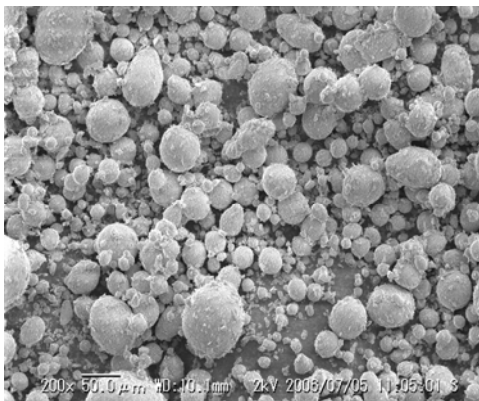


図-1 PAE 再乳化形粉末樹脂の SEM 写真

2.4 作製方法

試験体は JIS A 1171 (ポリマーセメントモルタルの試験方法) に従って、表-3 に示すポリマーセメントモルタルの調合で、水セメント比およびセメント対砂を一定にしてポリマーセメントモルタルを練り混ぜ、寸法 40×40×160 (mm) と φ50×100 (mm) の試験体を作製した。試験体は 2 日間湿空[20°C, 90% (RH)], 5 日間水中 (20°C), 21 日間乾燥[20°C, 50% (RH)]条件下で養生した後、材齢の違いによる試験体間の強度差ができるだけ少なくなるように、さらに 63 日間乾燥[20°C, 50% (RH)]養生を行った。

3. 試験方法

3.1 試験因子

試験因子は、ポリマーの種類、ポリマーセメント比、加熱温度及び試験体形状とした。ポリマーの種類は前述 (2.3) した 3 水準とした。ポリマーセメント比 (P/C) は、普通セメントモルタル[ポリマー無混和 (0%)] を含めて、5%、10%及び 20%とした。加熱温度は、常温 (20°C)

表-4 各水準の試験体の含水率(%)

Artificial drying	Polymer-cement ratio(%)										
	NON	EVA				VVA			PAE		
	0	5	10	20	5	10	20	5	10	20	
Moisture content(%)	2.9	3.2	3.1	3.0	3.1	3.3	3.7	3.2	3.3	3.4	

を含めて、200℃、400℃、600℃、800℃および1000℃の6水準とした。試験体形状は、40×40×160 (mm) およびφ50×100 (mm) とし、各水準の試験体を3体ずつ準備した。また、試験体の含水率がほぼ一定になるよう、高温加熱の前に、60℃、RH50%の環境下で3日間強制乾燥した。各水準試験体の含水率は3本の平均値として、式(1)を用いて算出した。表-4に各水準の試験体の含水率を示す。

$$W = [(M_{60} - M_{105}) / M_{105}] \times 100(\%) \quad (1)$$

W：試験体の含水率 (%)

M₆₀：試験体強制乾燥後の質量 (g)

M₁₀₅：試験体絶乾状態の質量 (g)

3.2 加熱方法

加熱プログラムは試験体の中心温度と表層温度および各試験体間の温度差ができるだけ少なくなるよう決定する必要がある。しかし、強度試験用の試験体に熱電対を設置すると断面欠損が生じるため、圧縮強度に影響する恐れがある。従って、加熱プログラムは、事前に実施した予備試験から決めた。

試験体の加熱は、プログラム調整機能を有した箱型電気炉を使用した。図-2に1000℃まで加熱プログラムの一例を示す。加熱プログラムは、昇温速度を200℃/hとし、200℃毎の停滞時間を1時間とし、各目標温度に到達してから1時間停滞させることとした。試験体は試験体と試験体との間に20mmの間隔が得られるように配置した。

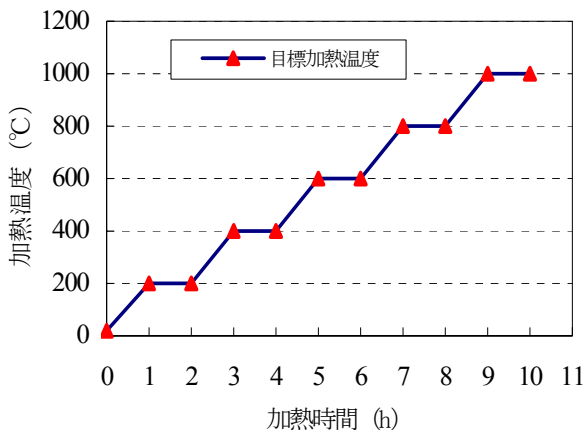


図-2 加熱プログラム (1000℃)

3.3 質量の測定

電子天秤を用い、加熱前後の試験体の質量を1/100gまで測定した。

3.4 曲げ強度試験

曲げ強度試験は、JIS A 1171 に準じて実施した。測定は、500KNアムスラー型の万能試験機を利用し、毎秒50Nの荷重速度で載荷して最大荷重を求めた。

3.5 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、JIS A 1171 に準じて実施した。測定は、曲げ強度試験を行った一組3個の試験体の折片6個を用いて、500KNアムスラー型の万能試験機を利用し、毎秒800Nの荷重速度で載荷して最大荷重を求めた。

静弾性係数の測定は、φ50×100 (mm) の試験体を用いて、JIS A 1149 (コンクリートの静弾性係数試験方法) に準じて実施した。測定は、5000KN 万能試験機のロードセルによる荷重及びコンプレッソメーターによる試験体のひずみとし、時間ごとの値により各試験体の応力-ひずみ曲線を求めた。また、求めた応力-ひずみ曲線から、圧縮強度時のひずみを読み取った。

4. 試験結果及び考察

4.1 外観観察

外観観察は、目視により観察した。ポリマーの有無に関わらず、全試験体で爆裂を生じなかった。このことから、緩やかな加熱の場合には、試験体の含水率をコントロールすることにより、20%のポリマーを混入してもポリマーセメントモルタルは爆裂を生じない可能性があるかと推測された。

普通セメントモルタル (P/C 0%) は、加熱温度600℃以下では、試験体の表面にひび割れは生じなかった。しかしながら、800℃以上の加熱では、ほとんどの試験体において表面にひび割れが生じた。ポリマーセメントモルタルはポリマーの種類により顕著な相違が認められなかった。しかし、混入したポリマーの量 (ポリマーセメント比) により試験体表面の状態が異なる結果となった。ポリマーセメント比5%の場合、加熱温度600℃では0.05mm以上のひび割れが試験体表面に目立ち始め、800℃では全面にわたりひび割れが細かく生じた。ポリマーセメント比10%と20%の場合、加熱温度200℃で試験体の一部にひび割れが生じ、400℃以上では全面にわたり0.1mm以上のひび割れが網状に細かく生じた。ま

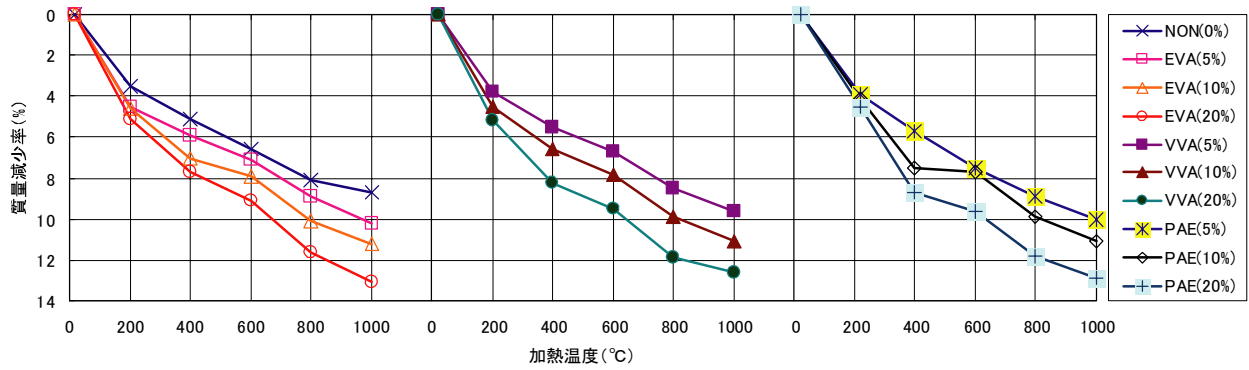


図-3 加熱温度と質量減少率の関係

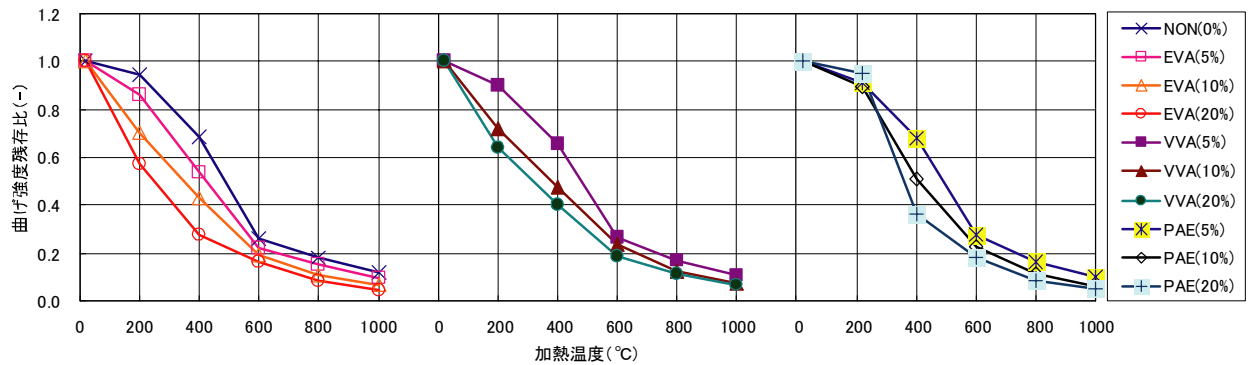


図-4 加熱温度と曲げ強度残存比の関係

た、ひび割れ幅は加熱温度が高いほど大きく、加熱温度 800℃では 0.5mm を超えるものも多数発生した。1000℃ではポップアウト現象が発生する試験体もあった。特に、PAE 粉末樹脂を混入した試験体では激しいポップアウトが生じた。

4.2 質量変化

図-3 に加熱温度と試験体の質量減少率の関係を示す。各水準の試験体加熱後の質量減少は、加熱温度が高いほど、ポリマーセメント比が大きいほど大きくなっている。また、温度の上昇に伴う試験体の質量減少率は直線的になっている。ポリマーの種類により顕著な差は見られなかった。加熱温度 200℃までは各水準のポリマーセメントモルタルとも急激に質量が減少し、200℃以上ではやや緩やかに減少した。これは、200℃までに試験体中の自由水が加熱により水蒸気として放出されたためと推察される¹⁾。加熱温度 1000℃までの質量減少率に関しては、ポリマーセメントモルタルは普通セメントモルタルより 2~5%多かった。

加熱温度 200℃以上ではポリマーの混和量によって各試験体の質量減少に差が見られる。これは 200℃程度からポリマーセメントモルタル中のポリマー自身が加熱により熱分解し、燃焼などの化学反応を起こしている²⁾と考えられる。

4.3 曲げ強度残存比

図-4 に加熱温度と曲げ強度残存比（常温時の曲げ強

度に対する各加熱温度における曲げ強度の比) の関係を示す。曲げ強度残存比は、ポリマーの有無に関わらず加熱温度の上昇とともに低下を示している。これは、加熱温度の上昇に伴い細骨材とセメントペーストとの界面の破壊エネルギーが減少する³⁾ためと推察される。ポリマーセメント比 5%以下の場合、ポリマーの種類に関係なく、20~200℃において緩やかな低下を示し、200~400℃においては急激な低下を示している。また 600℃を超えると再び緩やかな低下を示している。ポリマーセメント比 5%以上の場合、20~600℃において急激な低下を示し、600~1000℃においては緩やかな低下を示している。全体として、ポリマーセメント比が大きいほど曲げ強度残存比は小さくなっている。

4.4 応力-ひずみ曲線

例としてポリマーセメント比 5%および 20% (VVA) の応力-ひずみ曲線を図-5 および図-6 に示す。ポリマーセメント比 20%では加熱温度が 200~600℃において載荷初期の低応力時にひずみが増加する傾向を示した。これは、200℃程度からポリマーセメントモルタル中のポリマー自身が高温加熱により熱分解、燃焼などの化学反応を起こし、空隙が増大したこと、また加熱中および冷却期間におけるセメントペーストおよび細骨材の膨張・収縮、温度勾配によって引き起こされる熱応力による試験体内部の微細亀裂の発生したことによるもの⁴⁾と考えられる。800℃を超えると試験体の強さが極め

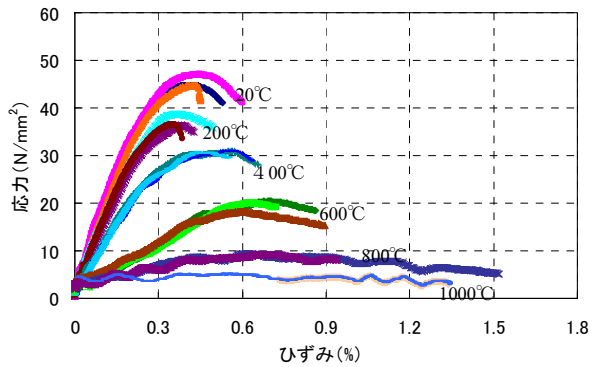


図-5 応力-ひずみ曲線 (VVA5%)

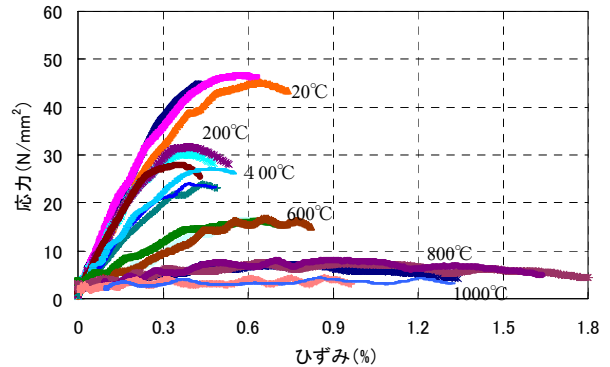


図-6 応力-ひずみ曲線 (VVA20%)

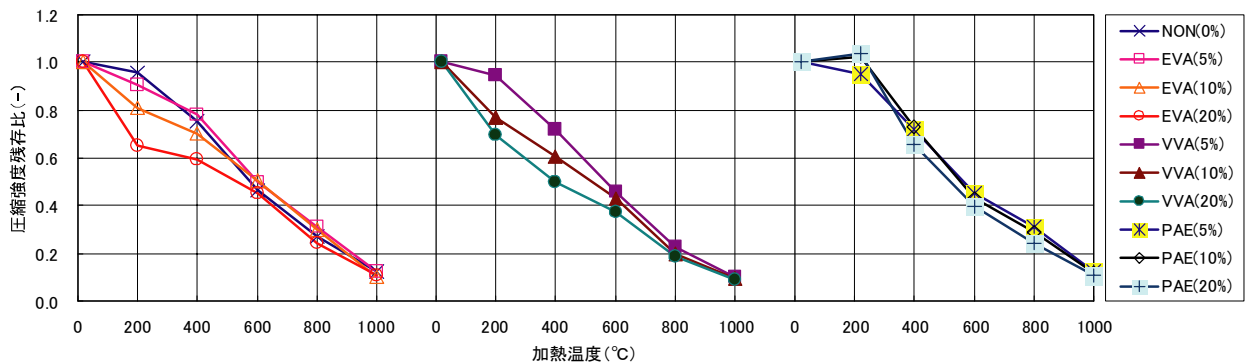


図-7 加熱温度と圧縮強度残存比の関係

て小さいため、ポリマーの混和量に関わらず波状の応力-ひずみ曲線を示している。

4.5 圧縮強度残存比

図-7 に加熱温度と圧縮強度残存比（常温時の圧縮強度に対する各加熱温度における圧縮強度の比）の関係を示す。加熱温度 200°C までは PAE シリーズの圧縮強度は、温度の上昇に伴って若干増大している。他の試験体はポリマーセメント比が大きいほど急激な圧縮強度の低下を示した。これは、この温度段階で細骨材が膨張するのに対してセメント水和物が収縮するため、モルタル内部に微細ひび割れが生じ強度を低下させたものと推察される³⁾。200°C 以上ではポリマーの種類及びポリマーセメント比の違いにかかわらず、直線的な圧縮強度の低下を示した。加熱温度 400°C では、ポリマーセメント比 5% の場合約 0.7、10% の場合約 0.6、20% の場合約 0.5 である。さらに加熱温度 400°C 以上における強度低下は、水酸化カルシウムの分解、細骨材との付着力の低下によりモルタル強度が低下したものと考えられる⁶⁾。加熱温度 600°C 以上では、ポリマーの種類及びポリマーセメント比により顕著な差は無かった。しかし、ポリマーセメント比 20% のシリーズは他のシリーズより若干小さな圧縮強度残存比であった。全体として、圧縮強度残存比は、曲げ強度残存比の 1.1~2 倍の値であり、両者の差は加熱温度の上昇とともに減少する傾向にあった。試験体の表面およ

び内部のひび割れの増加によって、曲げ強度残存比の低下は圧縮強度残存比より激しいと考えられる。

加熱温度 600°C では、ポリマーセメントモルタルの曲げ強度は常温時の 20% 程度であり、圧縮強度は常温時の 40% 程度であった。この温度で補修材料の力学特性が激しく低下することから、部材の構造安全性に影響を与えられられる。

4.6 弾性係数残存比

試験体の弾性係数は試験体の応力-ひずみ曲線から、最大荷重の 1/3 に相当する応力と試験体の縦ひずみ 50×10^{-6} のときの応力を結ぶ線分勾配として得られた値である。

図-8 に加熱温度と弾性係数残存比（常温時の弾性係数に対する各加熱温度における弾性係数の比）の関係を示す。全体として、弾性係数残存比は加熱温度とともにほぼ直線的に低下している。加熱温度 200°C までは PAE5% 及び 10% では、温度の上昇に伴って緩やかな弾性係数の増加を示したが、他のものは急激に低下する傾向であった。これは PAE 試験体からの水分蒸発が抑制されているためと推測される²⁾。加熱温度が 200~600°C の範囲では、試験体は急激な弾性係数の低下を示し、600~1000°C の範囲では緩やかな低下を示した。ポリマーの種類およびポリマーセメント比の違いにより弾性係数残存比に大きな差が生じたが、全体として、ポリマーセ

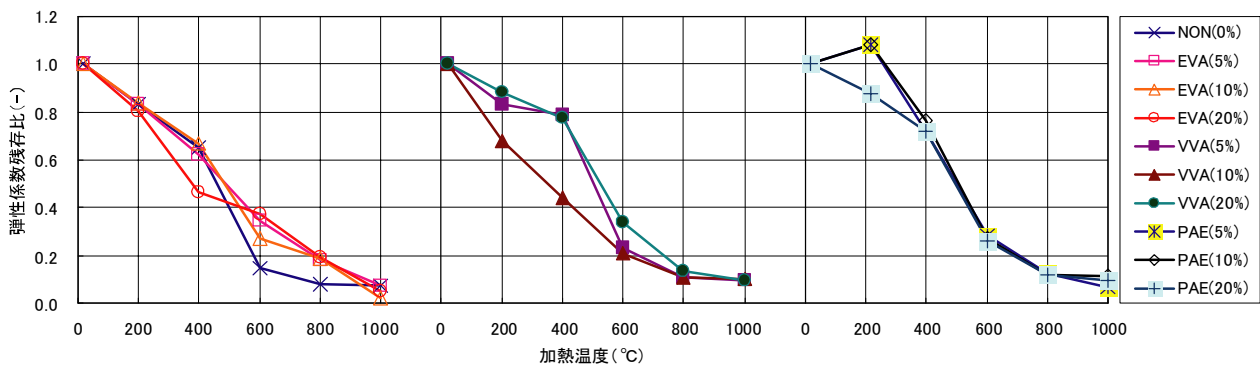


図-8 加熱温度と弾性係数残存比の関係

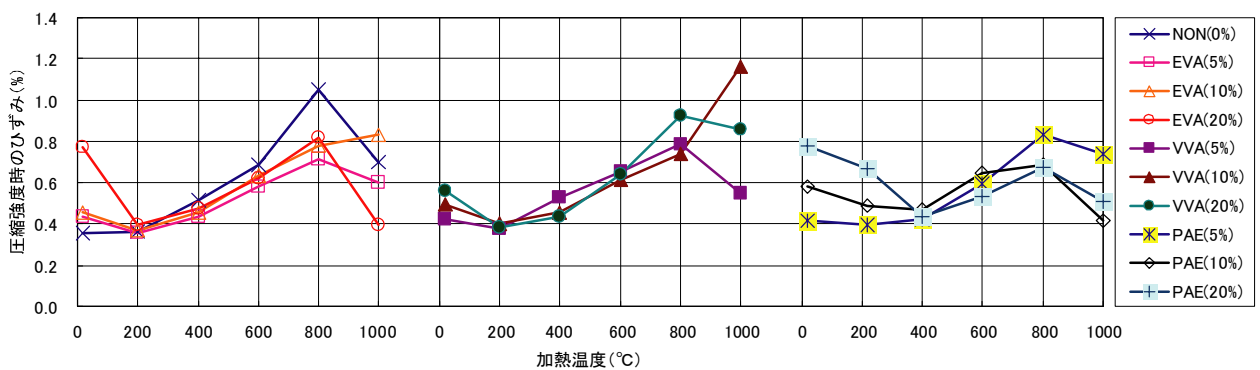


図-9 加熱温度と圧縮強度時のひずみの関係

ント比が10%以下であれば、普通セメントモルタルと同等あるいは若干大きな値となった。

4.7 圧縮強度時のひずみ

図-9 に加熱温度と圧縮強度時のひずみの関係を示す。圧縮強度時のひずみは、加熱温度 200°C まではポリマーセメント比が大きいほど減少量が大きくなった。加熱温度 200~800°C の範囲では、ポリマーの種類およびポリマーセメント比によらず加熱温度の増大に伴って圧縮強度時のひずみも増大する結果が得られた。しかしながら、800~1000°C においては圧縮強度時のひずみが再び低下する傾向を示した。これは試験体の熱劣化が極度に進行し、組織崩壊が生じたためであると考えられる。

5. 結論

本研究では、補修材料に用いられるポリマーセメントモルタルの高温加熱後の力学特性を実験により調べた結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 高温加熱後の残存強度は、加熱温度の上昇及びポリマーセメント比の増加とともにほぼ直線的に低下する。
- (2) 高温加熱後の曲げ強度の低下率は圧縮強度の低下に比較して大きい。
- (3) 加熱温度 600°C で補修材料の力学特性が激しく低下し、部材の構造安全性に影響をおよぼす可能性がある。

謝辞

本研究は、「国土交通省・建設技術研究開発助成金」を受けて実施した。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 一瀬賢一，長尾覚博：高温加熱を受けた高強度コンクリートの力学的性質に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 541 号，pp.23-30，2001.3
- 2) 王徳東，野口貴文，下山淳一：高温加熱下におけるセメント混和用再乳化形粉末樹脂の挙動，第 44 回燃焼シンポジウム講演論文集，pp.410-411，2006.12
- 3) Jianzhuang, Xiao and H. Falkner : On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevated temperatures, Fire Safety Journal, Vol.41, No.2, pp115-121, 2006.3
- 4) 安部武雄ほか：高温における高強度コンクリートの力学的特性に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，第 515 号，pp.163-168，1999.1
- 5) 一瀬賢一，長尾覚博，川口徹：高温加熱状態における高強度コンクリートの力学的性質に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 557 号，pp.23-28，2002.7
- 6) U. シュナイダー著：コンクリートの熱的性質，技報堂出版，1983.12