

論文 予熱炉を用いた高温加熱下におけるポリマーセメントモルタルの力学性状

金 亨俊*1・濱崎 仁*2・野口 貴文*3・長井 宏憲*4

要旨: ポリマーセメントモルタルは、接着性、緻密性、耐薬品性、施工性等に優れた材料であるため、コンクリート構造物の補修・補強材料として使用されている。しかし、混入されているポリマーが有機物であるため、高温時における力学的特性等を把握する必要があるが、従来の熱間試験は多大な時間と労力が必要である。本研究では、予熱炉を用いた熱間圧縮強度試験について、試験条件等の検討を行い、高温加熱下におけるポリマーセメントモルタルの圧縮強度および静弾性係数に関する実験的検討を行った。

キーワード: ポリマーセメントモルタル, 予熱, 熱間試験, 高温履歴, 圧縮強度, 静弾性係数

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べて接着性、緻密性、耐薬品性、施工性等に優れた材料であることから、コンクリート構造物の補修、補強に必要な材料として認識されている。しかしながら、混入されるポリマーは有機系の材料であり、高温を受けた場合の性状については、無機系の材料である一般的なモルタルやコンクリートとは異なる性質を示すことが予想される。そのため、ポリマーセメントモルタルが建築物の補修・補強に使用される場合、高温下における安全性や火災後の修復の要否等に関する評価を行う必要がある。そのためには、基本的なデータとなるポリマーセメントモルタルの高温にさらされた場合の力学性状に関する研究^{1), 2)}が重要であるが、その例は非常に少ない現状にあり、かつ冷間試験の結果がほとんどである。また、高温領域での試験(熱間試験)は加熱制御に多大な時間と労力が必要である。そこで、本論文では、ポリマーの種類、ポリマーセメント比を変化させたポリマーセメントモルタルを作製し、出口らが提案した予熱炉を用いた高温圧縮試験方法³⁾を参考にし、予熱炉で200℃~800℃までの異なる温度履歴を与えた場合の圧縮強度、静弾性係数などの力学性状の変化に対する実験を行い、その結果について検討、考察した。

2. 実験概要

2.1 実験計画

本実験ではポリマーセメントモルタルの調合および予熱炉での加熱温度を実験の因子として表-1に示す水準で実験を行った。力学性状として圧縮強度、静弾性係数を測定し、その結果について比較・考察した。また、加

熱方法や加熱時間に関する実験を行い、試験方法の妥当性について検討した。

2.2 実験体

(1) 使用材料および調合

セメントは、JIS R 5210に規定される普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は、JIS A 5308 附属書1を満たす大井川水系産川砂(粗粒率: 2.97, 表乾比重: 2.63 g/cm³, 吸水率: 1.81%)を使用した。セメント混和用ポリマーには、JIS A 6203に規定されるエチレン・酢酸ビニル共重合樹脂(略称: EVA), 酢酸ビニル・ビニルバーサテート共重合樹脂(略称: VVA), ポリアクリル酸エステル共重合樹脂(略称: PAE)を使用した。なお、再乳化形粉末樹脂には、粉末樹脂に対して消泡剤が1%添加されている。表-2に、セメント混和用ポリマーの特性値を示す。ポリマーセメントモルタルの調合の水準およびモルタルフロー値を表-3に示す。セメント砂比(質量比)はすべて1:3とし、ポリマー種類、単位ポリマー量を変化させた10調合とした。各水準の試験体は3本ずつ作製して実験を行った。本研究では、ポリマー量はポリマーセメント比として表している。なお、本実験の調合においてはポリマーセメント比2%は、概ね単位ポリマー量10kg/m³に相当する。

表-1 実験の因子と水準

実験要因		水準
調合条件	ポリマー種類	無し, EVA, VVA, PAE
	水セメント比(%)	50
	ポリマーセメント比(%)	5, 10, 20
加熱条件	予熱炉の加熱温度(℃)	常温, 200, 400, 600, 800

*1 東京大学大学院 工学研究科建築学専攻大学院生 修士(工学) (正会員)
 *2 (独) 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)
 *3 東京大学大学院 工学研究科建築学専攻准教授 博士(工学) (正会員)
 *4 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻助教 博士(工学) (正会員)

表-2 ポリマーの特性値

再乳化形粉末樹脂	揮発分 (%)	粒子径* (%)	酸価 (mgKOH/mg)	見掛け密度(g/ml)
EVA	2.0 以下	2 以下	2.0 以下	0.50±0.10
VVA	2.0 以下	2 以下	2.0 以下	0.53±0.10
PAE	2.0 以下	2 以下	2.0 以下	0.50±0.10

* : 300 μ m ふるい残分

表-3 ポリマーセメントモルタルの調合

Type of polymer	Polymer-cement ratio(%)	Water-cement ratio(%)	Air content(%)	Flow(mm)
NON	0	50	4.9	171
	5		6.2	207
EVA	10		7.6	217
	20		8.7	222
VVA	5		7.7	193
	10		7.6	201
	20		7.7	205
PAE	5		6.8	194
	10		8.2	203
	20		9.2	224

(2) 試験体の形状および養生

圧縮強度および静弾性係数測定用の試験体は、φ100×200mmの円柱試験体とした。試験体の養生は、2日間湿空(20℃, 90%R.H.)養生後脱し、材齢28日まで20℃水中養生とし、その後、20℃, 60%R.H.の環境下で少なくとも63日間気中養生を行った。試験実施前の養生として、60℃の乾燥炉内で1週間乾燥し、さらに室温までデシケータの中で冷却した。各試験体の含水率は別途用意した同調合の試験体の吸水率を求め、その値と表乾状態の質量および養生期間中の質量により推定し、1.5~2.0%の間にあることを確認した。

2.3 試験方法

(1) 従来の熱間加熱強度試験との比較

本論文における従来の熱間加熱強度試験とは、一瀬らの高温圧縮強度試験方法⁴⁾に準じて、強度試験装置に付設した加熱炉で試験体を目標温度まで加熱した後、そのまま圧縮強度試験を行う試験方法を指す。一方、本論文で採用した試験方法は、出口らの方法³⁾を参考とし、従来の熱間加熱強度試験方法と比較して実験回数を大幅に増加できる方法であり、予熱炉を用いて目標温度まで加熱した後、試験体を取り出し、圧縮装置まで移動して強度試験を行う方法である。したがって、従来の熱間加熱強度試験との比較および試験方法の妥当性を検討する必要がある。そこで、従来の熱間加熱強度試験方法で予備実験を行い、昇温速度や加熱後試験体が目標温度になる加熱維持時間を定めた。なお、予備実験では、EVA10%試験体を作製し、圧縮強度および静弾性係数を測定して、両者の差の有無について検討した。ここでのEVA10%とは、エチレン・酢酸ビニル共重合樹脂のポリ

マーおよびセメントに対するポリマーの質量比を指す。

(2) 加熱方法

図-1に熱電対の取り付け位置および予熱炉での試験体の位置を示す。試験体の加熱方法は、試験体の中心と表面および試験体の各位置による温度差ができるだけ少なくなるように定める必要がある。したがって、本実験では試験体の内部温度を測定するため、図-1に示す予備試験体にK型熱電対を挿入して試験体を別途作製して予備実験を行った。また、写真-1に本実験で用いた予熱炉と圧縮試験装置を示す。

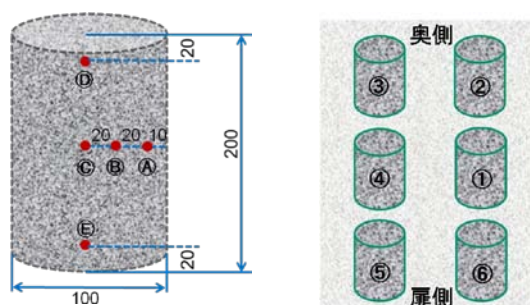


図-1 熱電対の取り付け位置及び予熱炉での位置



写真-1 予熱炉および熱間圧縮強度試験装置

従来の熱間加熱強度試験方法で予備実験を行った結果、昇温速度150℃/hの場合、加熱開始から約3時間後、加熱炉で試験体の爆裂が生じたが、昇温速度100℃/hの場合には、加熱炉で試験体の爆裂は生じなかった。その時の試験体の推定含水率は約3%であったので、本実験では、昇温速度は100℃/h、試験体の含水率は2.0%以下を目標とした。また、予熱炉を用いた熱間加熱強度試験の加熱プログラムは事前に実施した予備実験から決定した。試験体の加熱はプログラム調整を有した箱型電気炉を使用し、昇温速度100℃/hとして所定の温度に達した後0.5~2.5時間をその温度に保ち、以後、試験体を炉から取り出して近くに位置する圧縮強度試験装置に移して実験を行った。また、予熱炉での試験体加熱は最大6本とした。図-2に予熱炉での試験体の位置による温度分布を示す。なお、図-1中の試験体の番号は目標加熱温度まで加熱した後、予熱炉から取り出した試験体の順番を示す。予熱炉での試験体の位置による温度分布が

目標温度になるまでには 10 分程度遅れがあった。また、**図-3** に予備実験の結果による 800℃までの予熱炉加熱プログラムを示す。

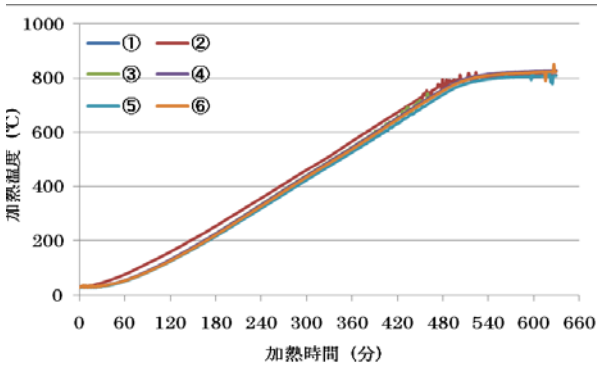


図-2 予熱炉での試験体位置による温度分布

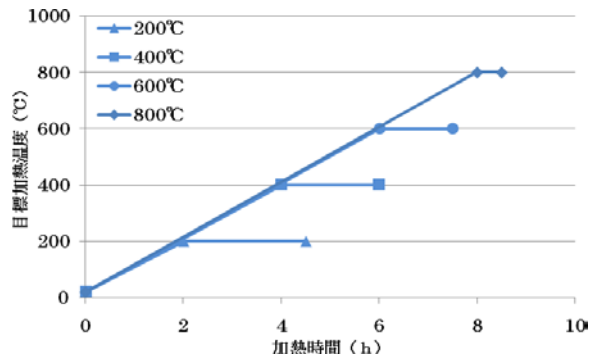


図-3 予熱炉での加熱プログラム

(3) 圧縮強度および静弾性係数の測定方法

本実験での圧縮強度試験は加熱炉が付設されている圧縮試験装置辺りに予熱炉を設置、予熱炉で試験体を目標温度まで加熱した後、予熱炉から試験体を取り出し、圧縮試験装置に移動して強度試験を行った。また、圧縮強度試験中には圧縮試験装置に付設されている加熱炉内で試験体の温度維持を行った。

なお、本実験における圧縮強度の測定は JIS A 1008 に準じ、静弾性係数の測定は、試験体が高温のため、試験装置の圧盤間の変位を測定し、これにより求めた応力-ひずみ曲線から線形区間における静弾性係数を求めた。各水準における試験体数は 3 本とした。

3. 実験結果および考察

3.1 従来の熱間加熱強度試験との比較

本実験では予熱炉を用いた熱間加熱圧縮強度試験方法との比較のため、同水準の試験体を用いて、試験方法の妥当性を検討した。本実験では、電気炉の昇温速度は 100℃/h とし、所定の目標温度に達した後 2.5 時間保ち、強度実験を行った。圧縮強度および静弾性係数の測定は予熱炉を用いた熱間圧縮強度試験方法と同様な方法で

測定した。各水準における試験体数は 1 本ずつとした。実験前の試験体の含水率は 2.0% とした。

図-4 に 600℃までの従来の熱間圧縮強度試験方法と予熱炉を用いた熱間圧縮強度試験方法での圧縮強度を、**図-5** に静弾性係数を示す。なお、**図-6** に従来熱間加熱強度試験および予熱炉を利用した熱間加熱強度試験との関係を示す。普通セメントモルタルは 200℃程度までは強度低下が見られなかったが、EVA10%の試験体では常温に比べ、200℃加熱において強度低下が生じ、400℃加熱で 200℃に比べやや回復し、600℃以上の加熱では低下した。静弾性係数は、加熱温度の増加とともに低下している。圧縮強度、静弾性係数ともに両者の試験方法は同様な傾向を示しており、関係性も概ね直線にあり、本実験における予熱炉を用いた試験方法と従来の試験方法との相関性は確保されているものと思われる。

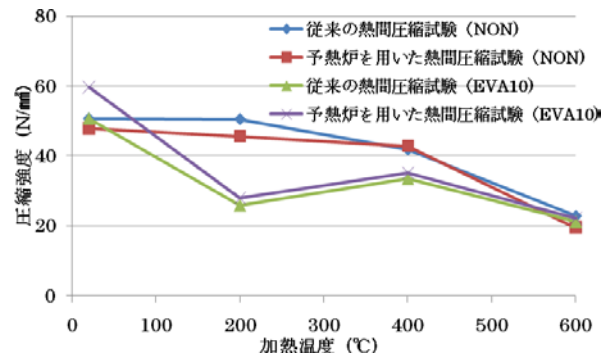


図-4 圧縮強度の比較

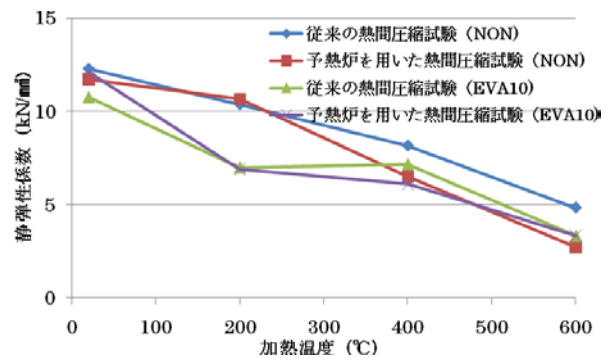


図-5 静弾性係数の比較

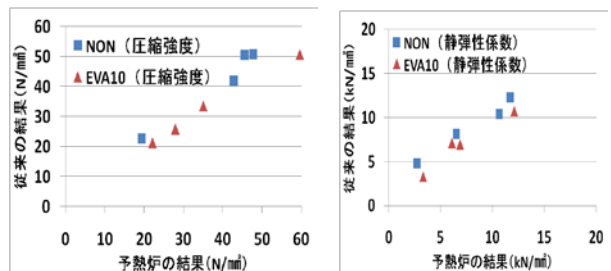


図-6 従来熱間加熱強度試験および予熱炉を利用した熱間加熱強度試験との関係

3.2 ポリマーセメントモルタル試験体の内部温度

本試験方法は、従来の試験方法とは異なり、多数の試験体を予熱炉で加熱し、強度試験装置まで移動する必要があるため、予熱炉から試験体を移動する際、試験体の温度低下が生じる可能性がある。そこで、図-1 に示した試験体の熱電対の取り付け位置による温度および移動中の温度低下を測定した。図-7 は 800℃に加熱した試験体を予熱炉で取り出した瞬間からの温度低下を測定した結果である。取り出した時間を 0 とした。本実験では、試験体を取り出した時間から 4 分以内に圧縮強度試験を行っており、その範囲内では、試験体の表層部を除けば温度低下は 30℃以下であった。

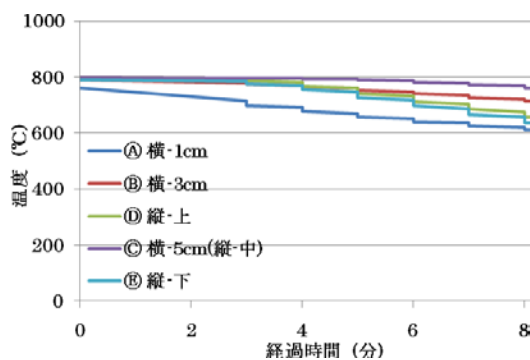


図-7 移動中の試験体の温度低下 (800℃の場合)

3.3 常温時における強度、静弾性係数

図-8 にポリマー種類ごとのポリマーセメント比と圧縮強度の関係を、図-9 に静弾性係数との関係を示す。VVA では、ポリマーセメント比の増加に関わらず圧縮強度は一定であり、EVA では、ポリマーセメント比 10%まで圧縮強度が増加するが、20%まで増加させても圧縮強度の増加は生じなかった。また、PAE でも、若干ではあるがポリマーセメント比の増加とともに圧縮強度は増加する傾向を示した。静弾性係数は、VVA および PAE では、ポリマーセメント比 10%までは低下するが、20%では 10%よりも若干増加する傾向を示した。EVA では、ポリマーセメント比 10%まで静弾性係数は増加するが、20%では低下する傾向を示した。既往の研究においてポリマーの混入により圧縮強度および静弾性係数は増加しないという報告⁹⁾がなされているが、本実験ではそのような傾向は確認されなかった。

3.4 高温時における圧縮強度

図-10、図-11 および図-12 にそれぞれ EVA, VVA および PAE における加熱温度と圧縮強度の関係を、図-13、図-14 および図-15 にそれぞれ EVA, VVA および PAE における加熱温度と圧縮強度の残存比の関係を示す。ここでの残存比は、20℃における圧縮強度に対する各加熱温度における圧縮強度の比として表している。加熱温度

200℃までは、ポリマーの種類に関わらず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、ポリマーセメントモルタルの試験体を加熱した場合、200℃領域では、加熱温度の上昇とともに結合水の分離が生じ、同時にポリマーの燃焼によって空隙量が増加することで強度低下が生じると考えられる。また、200℃から 400℃までの加熱区間では、EVA10 で圧縮強度が回復する傾向を示したが、200℃に比べ、EVA, VVA および PAE では、ポリマーセメント比に関わらず圧縮強度は穏やかな低下を示している。なお、400℃から 600℃までの加熱区間では、普通セメントモルタル (NON) の圧縮強度は、急激な強度低下を示しており、200℃~400℃区間に比べ、EVA, VVA および PAE では、セメントポリマー比 10%まで圧縮強度が低下するが、セメントポリマー比 20%では、圧縮強度の低下が穏やかに低下する傾向を示す。これは、加熱温度 400℃以上の領域では、コンクリートと同様に水酸化カルシウムの分解⁶⁾、細骨材との付着力の低下による圧縮強度低下が生じるからであると考えられる。また、著者らのこれまでの検討²⁾ (冷間試験) においては、圧縮強度は、加熱温度に対してほぼ直線的に低下しており、ポリマーの種類、水セメント比によらず概ね同様の傾向を示す。ポリマー量については、ポリマー量の多い 20%の調査では、全体的に低い傾向を示すものの 10%以下のポリマー量については明確な傾向は見られなかった。

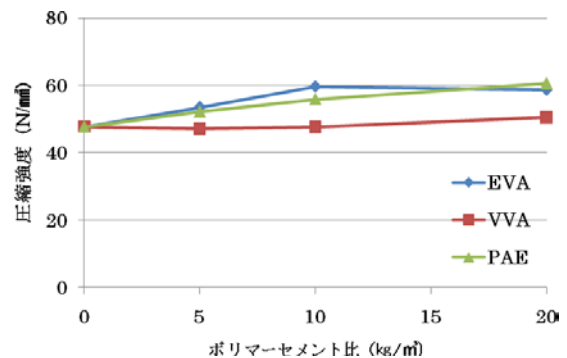


図-8 ポリマーセメント比と圧縮強度の関係 (常温時)

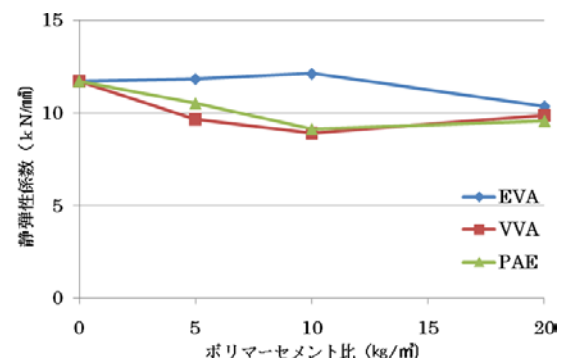


図-9 ポリマーセメント比と静弾性係数の関係 (常温時)

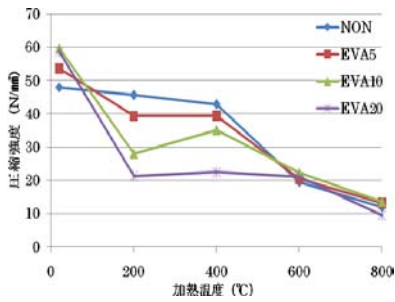


図-10 加熱温度と圧縮強度の関係 (EVAの場合)

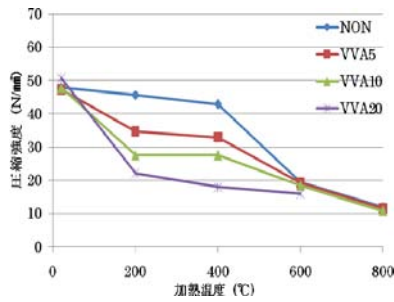


図-11 加熱温度と圧縮強度の関係 (VVAの場合)

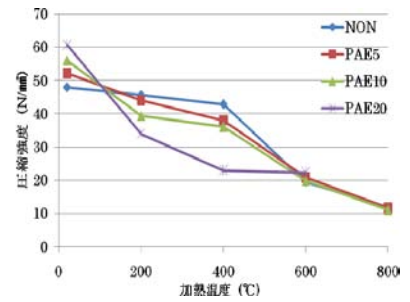


図-12 加熱温度と圧縮強度の関係 (PAEの場合)

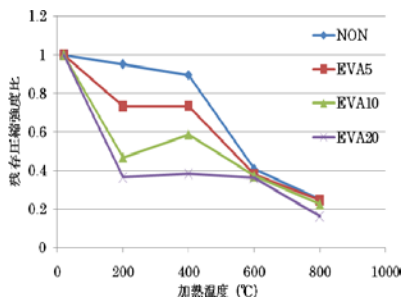


図-13 加熱温度と残存強度比の関係 (EVAの場合)

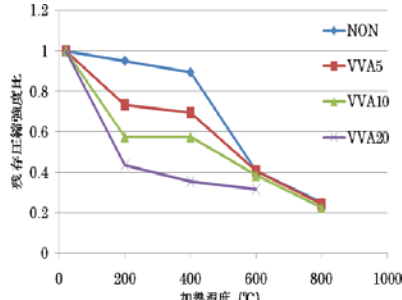


図-14 加熱温度と残存強度比の関係 (VVAの場合)

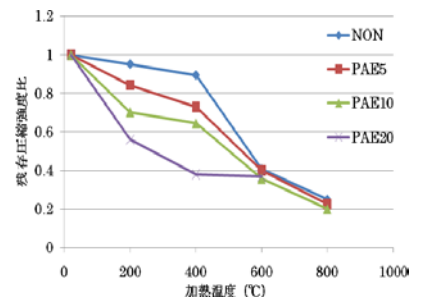


図-15 加熱温度と残存強度比の関係 (PAEの場合)

3.5 高温時における静弾性係数

図-16、図-17 および図-18 にそれぞれに EVA, VVA, および PAE における加熱温度と静弾性係数の関係を示す。ここでの残存比は、常温時 (20°C) の静弾性係数に対する各加熱温度における弾性係数の比として表した。本実験では静弾性係数は、全体的な傾向として、ポリマーの種類に関わらず、ポリマーセメント比の増加とともに低下する傾向を示している。加熱温度 200°C までの静弾性係数は、ポリマーの種類に関わらずポリマーセメント比が大きいくほど急激な低下を示した。特に、EVA では、ポリマーセメント比によって静弾性係数の急激な低下を示している。また、200°C から 400°C までの加熱区間では、200°C に比べ、VVA および PAE では、ポリマーセメント比 10% までは、ポリマーセメント比によって静弾性係数は低下を示している。また、EVA10% および EVA

20% においては、静弾性係数は一定の傾向を示したが、他の試験体では、加熱温度 600°C までの範囲でポリマーの種類およびポリマーセメント比によって急激に低下する傾向を示した。特に VVA では、ポリマーセメント比の増加とともに低下する傾向も示した。また、600°C の加熱を受けると静弾性係数は全試験体でほぼ同一であった。静弾性係数低下の原因は、圧縮強度低下の原因と同一であると考えられる。

3.6 応力-ひずみ曲線

例としてポリマーセメント比 10% の応力-ひずみ曲線を図-19 に示す。200°C ~ 600°C において载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°C 程度から試験体の中ポリマーが加熱による熱分解反応を起こし、空隙が増大したことが原因であると思われる。

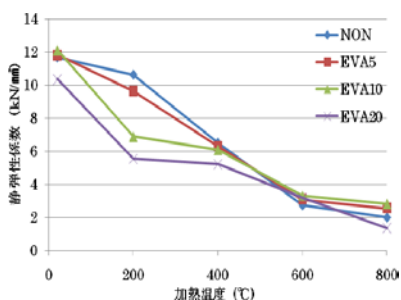


図-16 加熱温度と弾性係数の関係 (EVAの場合)

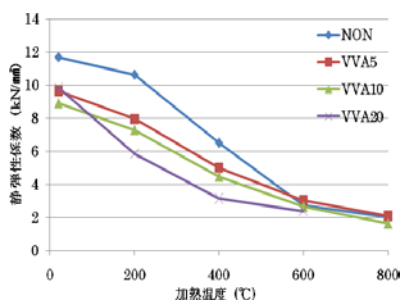


図-17 加熱温度と弾性係数の関係 (VVAの場合)

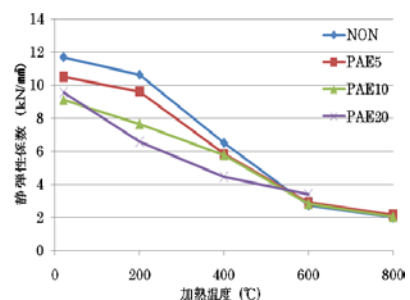


図-18 加熱温度と弾性係数の関係 (PAEの場合)

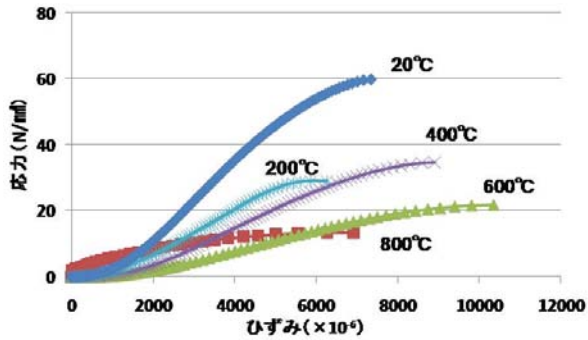


図-19 応力-ひずみ曲線 (EVA10%の場合)

4. まとめ

本研究では、予熱炉を用いてポリマーセメントモルタルの熱間加熱実験を行った結果、高温加熱下における圧縮強度、静弾性係数の力学性状の変化について、以下のような知見を得た。

- 1) 予熱炉で加熱時試験体の位置による温度分布、試験体内部の温度分布および試験体の移動中の温度低下について確認したところ、本実験方法は既往の加熱試験方法の代替方法として利用でき、短時間に多数の試験体を実験することも可能である。
- 2) 本実験方法の妥当性を検討するため、同水準の試験体を作製、圧縮強度および弾性係数を測定した結果、強度および静弾性係数低下の傾向は、従来方法で得られる結果とほぼ同一の傾向を示しており、本実験方法は、今後、高温加熱下における熱間圧縮実験方法として期待される。
- 3) ポリマーセメントモルタルが高温を受けると 200°C までの加熱区間において、加熱温度の増加とともに結合水の分離が生じ、同時にポリマーの燃焼による空隙量が増加することで強度低下が生じると考えられる。また、200°C から 400°C までの加熱区間では、コンクリートと同様に水酸化カルシウムの分解、細骨材との付着力の低下による圧縮強度低下が生じると考えられる。
- 4) 高温時における静弾性係数は、ポリマーの種類に関わらずポリマーセメント比の増加とともに低下する傾向を示した。

謝辞

本研究は、国土交通省・建設技術研究開発助成金「鉄筋コンクリート造建築物の補修後の性能解析技術の開発と最適補修戦略の策定」(2007~2009年度、代表：野口貴文)を受けて実施した。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 濱崎仁, 野口貴文, 王徳東, 金亨俊, 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~その3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp.159-164, 2008.9
- 2) 濱崎仁, 野口貴文, 王徳東, 金亨俊: 高温を受けたポリマーセメントモルタルの力学性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No1, pp.1927-1932, 2009.7
- 3) 出口嘉一, 三井健郎: 予熱したコンクリートを用いた高温圧縮試験方法の提案と結果, 日本火災学会論文集, Vol.59, No.1, pp.17-23, 2009.2
- 4) 一瀬賢一, 長尾覚博, 川口徹: 高温加熱下における高強度コンクリートの力学的性質に関する研究, 日本コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.1105-1110, 1999.7
- 5) 大濱嘉彦: 建築用ポリマーセメントモルタルの性状と調合設計に関する研究, 建築研究報告, No.65, 1973.10
- 6) U. シュナイダー著: コンクリートの熱的性質, 技堂出版, 1983.12