

## 論文 高温を受けたポリマーセメントモルタルの力学性状

濱崎 仁<sup>\*1</sup>・野口 貴文<sup>\*2</sup>・王 徳東<sup>\*3</sup>・金 亨俊<sup>\*3</sup>

**要旨：**本論文では、ポリマーセメントモルタルが 1000℃までの高温を受けた場合の圧縮強度、曲げ強度、静弾性係数等の変化に関する実験の結果および考察を述べる。常温時においてはポリマーの混入量に伴い、圧縮強度および静弾性係数は低下し、曲げ強度は向上する。圧縮強度および曲げ強度は加熱温度に対して概ね直線的に低下し、静弾性係数は 600℃までの加熱により直線的に低下しその後の低下は緩やかである。また、圧縮強度および静弾性係数は、加熱後の時間経過により緩やかな回復傾向を示すが、1 年経過時点においても強度比で 0.1 程度以下の回復にとどまることなどが確認された。

**キーワード：**ポリマーセメントモルタル、力学性状、高温履歴、圧縮強度、曲げ強度、静弾性係数

## 1. はじめに

ポリマーセメントモルタルは、接着性、緻密性、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、補強に必要不可欠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。ポリマーセメントモルタルが建築物やトンネルなどに使用される場合、火災時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が、そのための基本的なデータとなる高温を受けた場合の力学性状については、著者らの研究<sup>1)</sup>、大濱らによる研究<sup>2)</sup>のほかその例は非常に少ない。

そこで本論文では、ポリマーの種類、ポリマー量、水セメント比の異なるポリマーセメントモルタルを作製し、硬化後において 1000℃までの異なる温度履歴を与えた場合の圧縮強度、曲げ強度および静弾性係数等の力学性状の変化および加熱後の時間経過による変化について実験を行った結果について述べる。

## 2. 実験概要

## 2.1 実験計画

本実験は、ポリマーセメントモルタルの調査および加熱温度による要因を実験の因子として表-1 に示す水準の実験を行った。また、力学性状の評価として、圧縮強度、曲げ強度および静弾性係数の測定を行った。なお、本実験におけるポリマーセメントモルタルの不燃性および発熱性試験の結果については、既報<sup>3)</sup>に示している。

## 2.2 試験体

## (1) 使用材料

試験体に使用した材料を表-2 に示す。ポリマーは、

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）、スチレン・ブタジエンラバー（略称：SBR）を使用した。また、それぞれの特性値を表-3 に示す。その他、EVA および VVA には消泡剤を質量比で 1%添加している。

表-1 実験の因子と水準

| 実験要因 |                           | 水準                  |
|------|---------------------------|---------------------|
| 調査条件 | ポリマー種類                    | 無し,EVA,VVA,SBR      |
|      | 水セメント比(%)                 | 45,50,60            |
|      | ポリマー量(kg/m <sup>3</sup> ) | 10,20,30,40,50,100  |
| 加熱条件 | 加熱温度(℃)                   | 常温,200,400,600,1000 |
|      | 加熱後の時間(日)                 | 1,28,91,365         |

表-2 使用材料

|      |                                                          |
|------|----------------------------------------------------------|
| セメント | 普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm <sup>3</sup> ）                  |
| 細骨材  | 大井川産川砂（粗粒率：2.97, 表乾密度：2.63g/cm <sup>3</sup> , 吸水率：1.81%） |
| ポリマー | 表-3 に示す 3 種類（EVA, VVA, SBR）                              |

表-3 ポリマーの特性値

| 再乳化形<br>粉末樹脂 | 揮発分<br>(%) | 粒子径*<br>(%) | 酸価<br>(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    |
| ディスパー<br>ジョン | 固形分<br>(%) | pH<br>(20℃) | 粘度<br>(mPa・s)    | 密度<br>(g/ml) |
| SBR          | 44.6       | 8.0～9.0     | 500～1500         | 1.0          |

\*：300 μm 以下の残分

\*1 （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）

\*2 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）

\*3 東京大学大学院 工学研究科建築学専攻大学院生 工修（正会員）

## (2) 調査

本実験におけるポリマーセメントモルタルの調査の水準とフレッシュ時のモルタルフローおよび空気量を表-4に示す。砂セメント比は1:3(質量比)で一定とし、ポリマーは外割り調合としている。ディスページョンであるSBRについては、固形分をポリマー量に算定し、残りは水と仮定している。なお、表-4において記号を枠囲みで表した調査(水セメント比50%で、単位ポリマー量を20 kg/m<sup>3</sup>および50kg/m<sup>3</sup>とした7種類)を本論文においては基本調査として表している。

ポリマーの混入量は一般的にP/C(ポリマーセメント比)で表される場合が多いが、高温時の特性を評価するためには、ポリマーの絶対量との関係が重要であると考え、本実験では、ポリマー量について単位ポリマー量(kg/m<sup>3</sup>)で表すこととした。なお、本実験の調査においては、単位ポリマー量10kg/m<sup>3</sup>は、概ねP/Cの2%に相当する。市販の既調査ポリマーセメントモルタルではP/Cが6~10%程度の製品が多いと言われており、単位ポリマー量に換算した場合、30~50kg/m<sup>3</sup>に相当する。

## (3) 形状および養生

圧縮強度および弾性係数測定用の試験体は、φ50×100mmの円柱供試体、曲げ強度測定用の試験体は、40×40×160mmの角柱供試体とした。

試験体の養生は、打設後2日間を湿空養生し、脱型後材齢28日まで標準養生、以降少なくとも材齢91日までを20℃・60%R.H.の気中養生とし、材齢120日までの間に所定の加熱および強度試験を行った。図-1に基本調査についての気中養生期間中の含水率の変化を示す。含水率は、同調査の供試体の吸水率を別途測定し、その値より推定したものである。本実験では、加熱前の予備乾燥は行っていないが、加熱前に含水率が概ね4~6%の範囲にあることを確認している。

## 2.3 試験方法

### (1) 加熱方法および加熱後の試験材齢

加熱温度の水準は、表-1に示す5水準とした。加熱方法は、箱形の電気炉を用い、炉内温度の昇温速度を200℃/hとして所定の温度に達した後1時間その温度を保ち、以降は炉内で徐冷し翌日に取り出した。試験材齢は、試験体を取り出した直後よりその日のうちに行った。時間経過による圧縮強度および弾性係数の変化を確認する場合のみ、加熱後28日、91日、1年経過時での強度および弾性係数試験を行った。

### (2) 強度および弾性係数の試験方法

圧縮強度試験は、JIS A 1108に準じて実施した。弾性係数は、JIS A 1149に準じ、コンプレッソメーターを用いて測定した。曲げ強度試験はJIS R 5201に準じて行った。

表-4 ポリマーセメントモルタルの調査およびフレッシュ性状

| 記号      | ポリマー種類 | W/C (%) | ポリマー量 (kg/m <sup>3</sup> ) | モルタルフロー (mm) | 空気量 (%) |
|---------|--------|---------|----------------------------|--------------|---------|
| N45-0   | 無し     | 45      | 0                          | 113          | 5.5     |
| N50-0   |        | 50      |                            | 150          | 2.1     |
| N60-0   |        | 60      |                            | 195          | 1.3     |
| E45-10  | EVA    | 45      | 10                         | 118          | 4.0     |
| E50-10  |        | 50      |                            | 166          | 4.3     |
| E60-10  |        | 60      |                            | 215          | 2.1     |
| E45-20  |        | 45      | 20                         | 128          | 4.6     |
| E50-20  |        | 50      |                            | 180          | 3.3     |
| E60-20  |        | 60      |                            | 213          | 2.7     |
| E45-30  |        | 45      | 30                         | 140          | 3.8     |
| E50-30  |        | 50      |                            | 183          | 3.8     |
| E60-30  |        | 60      |                            | 225          | 1.5     |
| E45-40  |        | 45      | 40                         | 138          | 3.7     |
| E50-40  |        | 50      |                            | 190          | 3.7     |
| E60-40  |        | 60      |                            | 215          | 1.1     |
| E45-50  |        | 45      | 50                         | 153          | 4.4     |
| E50-50  |        | 50      |                            | 160          | 3.0     |
| E60-50  |        | 60      |                            | 193          | 1.8     |
| E45-100 |        | 45      | 100                        | 148          | 2.6     |
| E50-100 |        | 50      |                            | 168          | 4.0     |
| E60-100 |        | 60      |                            | 198          | 2.1     |
| V50-10  | VVA    | 50      | 10                         | 185          | 5.1     |
| V45-20  |        | 45      | 20                         | 145          | 5.6     |
| V50-20  |        | 50      |                            | 185          | 5.5     |
| V60-20  |        | 60      |                            | 213          | 2.3     |
| V50-30  |        | 50      | 30                         | 190          | 5.8     |
| V50-40  |        |         | 40                         | 185          | 5.5     |
| V50-50  |        |         | 50                         | 195          | 4.9     |
| V50-100 |        |         | 100                        | 180          | 5.1     |
| S50-10  | SBR    | 50      | 10                         | 185          | 14.5    |
| S45-20  |        | 45      | 20                         | 155          | 14.2    |
| S50-20  |        | 50      |                            | 200          | 14.6    |
| S60-20  |        | 60      |                            | 228          | 10.7    |
| S50-30  |        | 50      | 30                         | 195          | 13.5    |
| S50-40  |        |         | 40                         | 197          | 10.5    |
| S50-50  |        |         | 50                         | 223          | 10.1    |
| S50-100 |        |         | 100                        | 測定不能         | 1.3     |

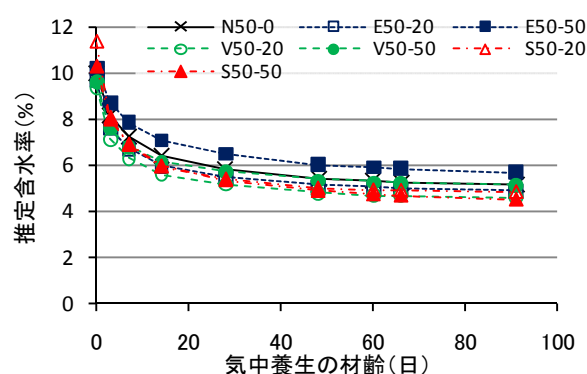


図-1 気中養生期間中の推定含水率

強度試験の対象とした試験体は、加熱直後の圧縮強度および静弾性係数についてはすべての調合（37種類）を対象とし、圧縮強度および静弾性係数の加熱後の時間経過による変化については、表-4における基本調合を対象とした。各試験水準における試験体数はそれぞれ3体ずつとした。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 常温時における強度、弾性係数

図-2 に常温時におけるポリマー種類ごとのポリマー量と圧縮強度の関係、図-3 に曲げ強度との関係、図-4 に静弾性係数との関係を示す。図中の記号は、ポリマーの種類と水セメント比の組合せで表している。

圧縮強度は、ポリマーの混入によって若干ではあるが低下する傾向にある。これに対して曲げ強度はポリマー量の増加とともに大きくなる傾向にある。また、静弾性係数は圧縮強度と同様に、ポリマーの混入に伴い低下する。SBRを混入したものについては、特にポリマー量の少ない調合で強度や静弾性係数の低下が著しいが、これは空気量が著しく増加したこと、低ポリマー量ではポリマーセメントモルタル中での安定剤の濃度が低下しポリマーディスパージョンの安定性が阻害されること<sup>4)</sup>などが要因であると思われる。

既往の研究においても、ポリマーの混入により圧縮強度や静弾性係数は増大せず、曲げ強度や変形性能が向上するという報告<sup>4),5)</sup>がなされており、本実験においてもそれらと同様の結果となっている。ポリマーの混入によってセメント硬化体中にポリマーフィルムが形成され、セメント硬化体の組織間の接着力が向上することによって曲げ強度や変形性能は増大するが、ポリマーフィルムは強度を負担するものではなく圧縮強度や弾性係数に対しては寄与しないものと思われる。また、ポリマーの種類や量によっては、水和時の組織形成を阻害する可能性があることも指摘されている<sup>4)</sup>。

#### 3.2 高温による圧縮強度、曲げ強度の低下

図-5 に EVA (W/C=45%)、図-6 に EVA (W/C=50%)、図-7 に EVA (W/C=60%)、図-8 に VVA (W/C=50%)、図-9 に SBR (W/C=50%) における加熱温度と残存圧縮強度比の関係を示す。残存強度比は、常温時における強度との比として表している。なお、図中には、Eurocode 4<sup>6)</sup>に示された、コンクリートを加熱後常温まで冷却した場合の最高温度と残存圧縮強度比の関係（図中 EC4）を加えている。また、図-10 に加熱温度と残存曲げ強度比の関係を示す。

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

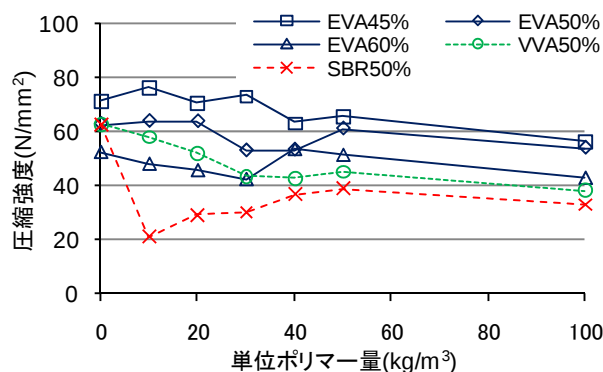


図-2 単位ポリマー量と圧縮強度の関係

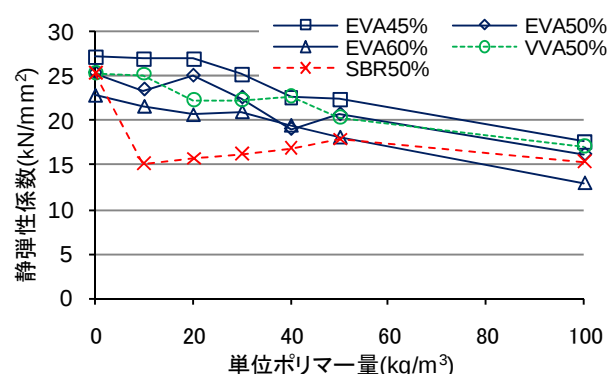


図-3 単位ポリマー量と曲げ強度の関係

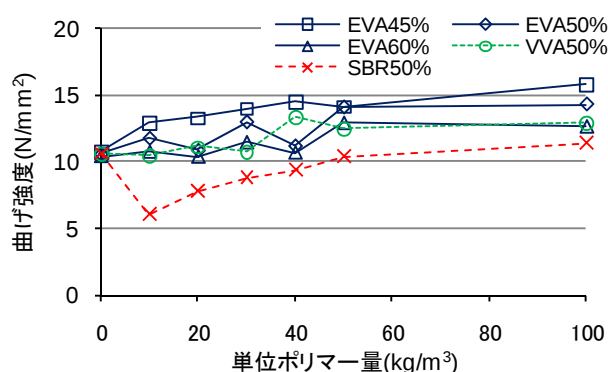


図-4 単位ポリマー量と静弾性係数の関係

い 100kg/m<sup>3</sup> の調合では、全体的に低い傾向を示すものの 50kg/m<sup>3</sup> 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。著者らのこれまでの検討<sup>1)</sup>においては、ポリマー量が多いほど同一加熱温度における残存強度比は小さい傾向にあったが、本実験ではそのような傾向は確認されていない。

加熱温度との関係に着目すると、Eurocode 4 に示されているコンクリートの場合と比較した場合、各温度の残存比について 20%程度低い値となっている。また、コンクリートの場合には、200℃程度までは強度低下が確認されないという報告<sup>7)</sup>も多く、コンクリートと比較すると、特に加熱温度が 200℃～400℃の領域における強度低下が大きい傾向にある。

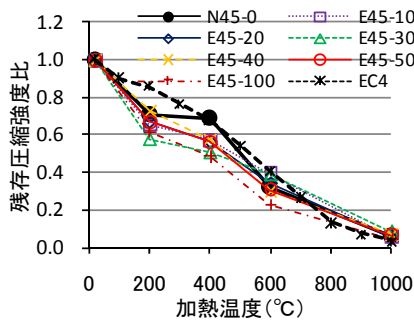


図-5 加熱温度と残存圧縮強度比の関係 (EVA・W/C=45%)

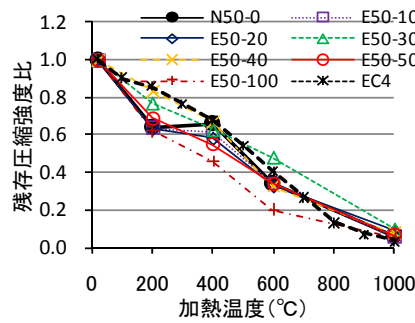


図-6 加熱温度と残存圧縮強度比の関係 (EVA・W/C=50%)

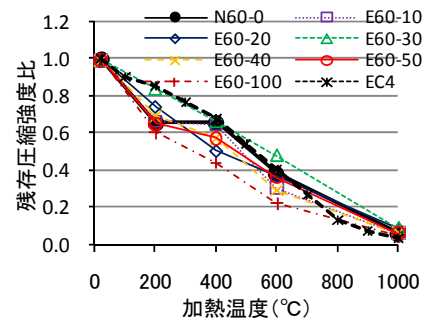


図-7 加熱温度と残存圧縮強度比の関係 (EVA・W/C=60%)

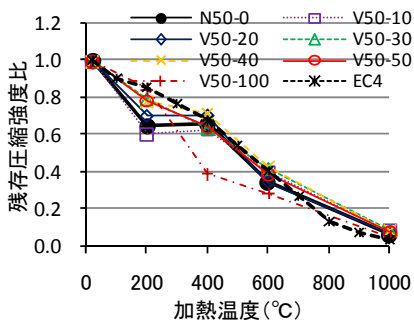


図-8 加熱温度と残存圧縮強度比の関係 (VVA・W/C=50%)

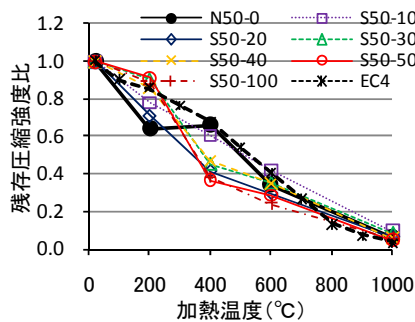


図-9 加熱温度と残存圧縮強度比の関係 (SBR・W/C=50%)

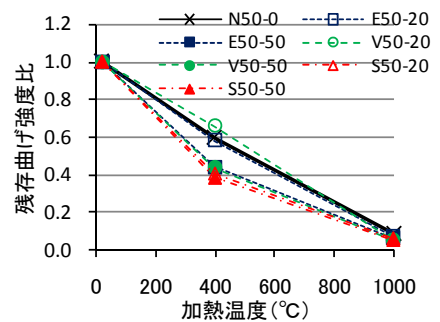


図-10 加熱温度と残存曲げ強度比の関係

ポリマーセメントモルタルの強度低下を考えた場合、400℃付近の領域では、結合水の分離が生じるとともにポリマーの燃焼による空隙量の増加などがその要因として考えられる。500℃を超える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などによる強度低下が生じるようになって考えられる。ただし、本実験では、普通モルタルの場合にも200℃の加熱において残存強度比が0.6~0.7程度になっており、細骨材の種類や粗骨材の有無による影響などについても確認する必要があると思われる。

曲げ強度の低下については、概ね直線的に低下しており、残存比の圧縮強度との比較については、400℃の加熱において、普通モルタルおよびポリマー量20kg/m<sup>3</sup>の調合では残存比は両者とも0.6程度であるが、ポリマー量が50kg/m<sup>3</sup>の調合については曲げ強度の残存比は0.4程度となり、ポリマー混入による付着力の増加に起因する曲げ強度の増加分がなくなったため、相対的に強度低下が大きくなったものと推測される。

### 3.3 高温による弾性係数の低下

図-11にEVA(W/C=45%)、図-12にEVA(W/C=50%)、図-13にEVA(W/C=60%)、図-14にVVA(W/C=50%)、図-15にSBR(W/C=50%)における加熱温度と残存静弾性係数比の関係を示す。ここでの残存比は、常温時における静弾性係数との比で表している。

静弾性係数の低下は、600℃までの範囲において急激

に低下し、600℃の加熱によって残存比は0.1~0.2程度まで低下している。EVAの場合は、特に400~600℃での低下が著しく、SBRの場合は、温度に対してほぼ直線的に低下している。VVAの場合は、ポリマー量100kg/m<sup>3</sup>の調合以外はEVAと同様の低下傾向を示す。また、ポリマー量が100kg/m<sup>3</sup>の場合の低下が大きく、それ以外は概ね普通モルタルと同等である。SBRは、EVA、VVAと比較して着火しやすく、より低い温度からポリマーの燃焼が起こること<sup>3)</sup>が400℃程度の加熱における低下の要因であると推測される。

図-16に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。図中には、ポリマーの種類ごとに記号を分け、それぞれ加熱温度、ポリマー量を区別せずにプロットしている。

図中の囲みで示したように、400℃までの加熱と600℃以上の加熱によって、圧縮強度と静弾性係数の関係が異なっている。加熱温度が500℃を超える場合には、水酸化カルシウムの分解が起こり、硬化体の組織が崩壊することから、剛性が極端に低下していることが伺える。

加熱後の静弾性係数の推定については、コンクリートではあるが、一瀬らによって、日本建築学会のRC規準式を適用し加熱後の単位容積質量と圧縮強度の関係から推定できることが提案されている<sup>8)</sup>。この考え方に倣い、基本調合について静弾性係数を推定した結果を図-17に示す。また、温度範囲は直線的な低下を示す加熱温度600℃までの温度範囲のデータとした。

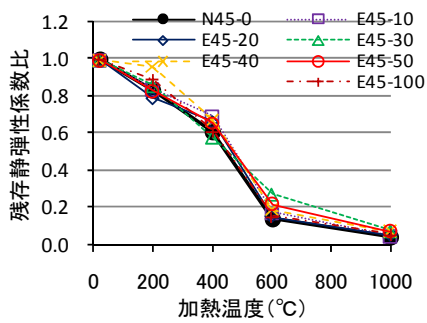


図-11 加熱温度と残存弾性係数比の関係 (EVA・W/C=45%)

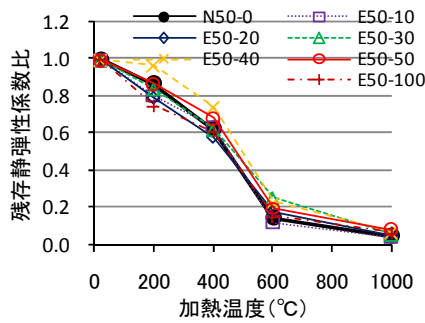


図-12 加熱温度と残存弾性係数比の関係 (EVA・W/C=50%)

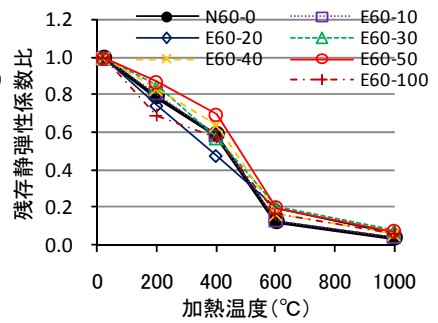


図-13 加熱温度と残存弾性係数比の関係 (EVA・W/C=60%)

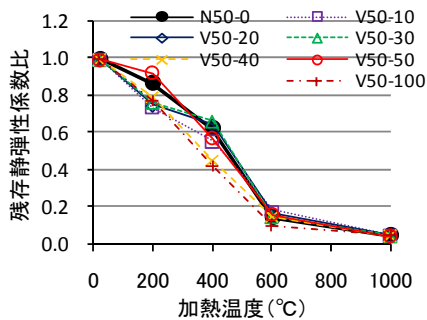


図-14 加熱温度と残存弾性係数比の関係 (VVA・W/C=50%)

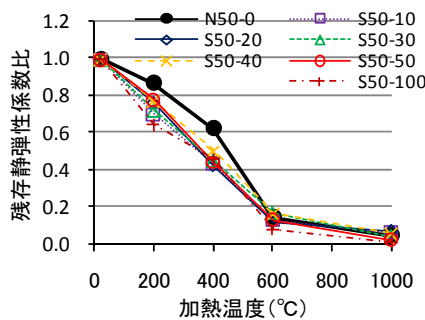


図-15 加熱温度と残存弾性係数比の関係 (SBR・W/C=50%)

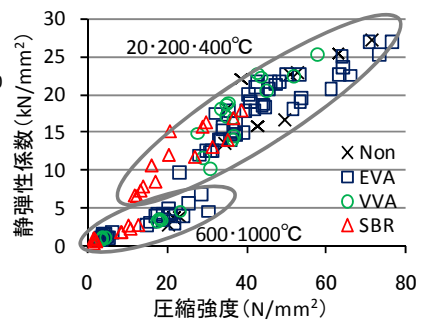


図-16 圧縮強度と静弾性係数の関係

一瀬らによって提案された推定式<sup>8)</sup>を式(1)に、加熱温度補正係数  $K(\theta)$  を式(2)に示す。 $K(\theta)$  は、実験結果から実験定数  $a$  および  $b$  を定めている。本実験の結果より求めた実験定数を表-5 に示す。ポリマーの種類や量により実験定数の値は異なるが、加熱後の単位容積質量と圧縮強度から加熱後の静弾性係数を概ね推定することが可能である。

$$E_{\theta} = K(\theta) \times 3.35 \times 10^4 \times (\gamma_{\theta} / 2.4)^2 \times (\sigma_{\theta} / 60)^{1/3} \quad (1)$$

$$K(\theta) = a \times \theta + b \quad (2)$$

ここに、

$E_{\theta}$  :  $\theta$  °C 加熱後の静弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)

$\gamma_{\theta}$  :  $\theta$  °C 加熱後の単位容積質量 (t/m<sup>3</sup>)

$\sigma_{\theta}$  :  $\theta$  °C 加熱後の圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$K(\theta)$  :  $\theta$  °C における加熱温度補正係数

### 3.4 加熱後の時間経過による強度、静弾性係数の回復

図-18 に 400°C 加熱後、図-19 に 1000°C 加熱後の経過日数による圧縮強度の残存比、図-20 に 400°C 加熱、図-21 に 1000°C 加熱後の経過日数による静弾性係数の残存比の変化を示す。残存比は、それぞれ常温時の値との比として表している。

一般に言われるように、圧縮強度、弾性係数ともに、加熱直後より 28 日まではいったん低下し、その後の時間経過によって回復傾向にある。しかしながら、回復の程度は加熱直後と同じか 1 年経過時点でも残存比で 0.1

以下の回復にとどまっており、回復は緩やかであることから、その後の大きな回復は見込めないと思われる。なお、ポリマーを含まない普通モルタルも概ね同じ傾向を示す。特に 1000°C の加熱を与えた場合には、組織が崩壊しており、それらが回復することはないと思われる。

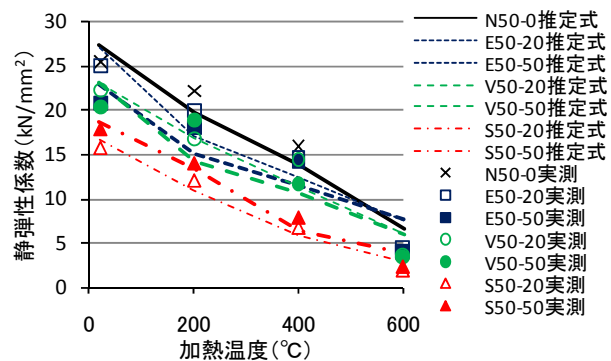
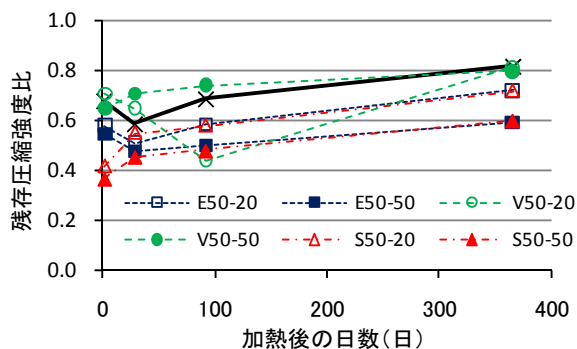


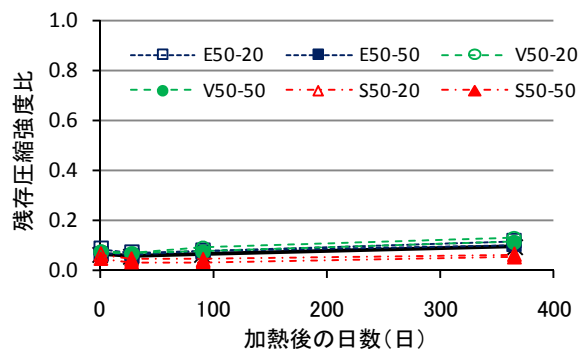
図-17 静弾性係数の推定

表-5 加熱温度補正係数  $K(\theta)$  における実験定数

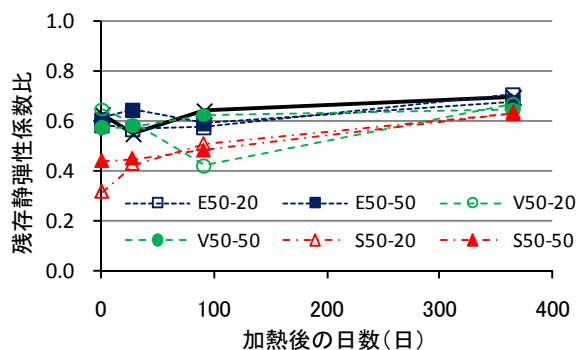
| 調査記号   | a ( $\times 10^{-3}$ ) | b    |
|--------|------------------------|------|
| N-50-0 | -1.19                  | 1.16 |
| E50-20 | -0.84                  | 1.06 |
| E50-50 | -0.58                  | 0.94 |
| V50-20 | -1.08                  | 1.10 |
| V50-50 | -0.99                  | 1.07 |
| S50-20 | -1.45                  | 1.22 |
| S50-50 | -1.06                  | 1.01 |



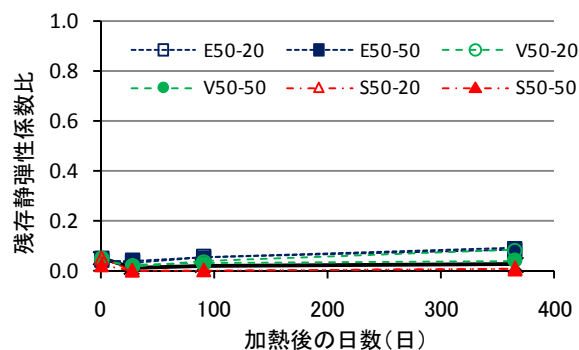
図一18 加熱後経過日数と残存圧縮強度比(400℃加熱)



図一19 加熱後経過日数と残存圧縮強度比(1000℃加熱)



図一20 加熱後経過日数と残存静弾性係数比(400℃加熱)



図一21 加熱後経過日数と残存静弾性係数比(1000℃加熱)

#### 4. まとめ

本研究では、ポリマーセメントモルタルの加熱後の強度、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) 圧縮強度は、加熱温度に対して直線的に低下し、コンクリートと比較すると残存比は小さくなる傾向にある。また、ポリマー量の違いによる明瞭な差違は確認されなかった。
- 2) 静弾性係数は、600℃までの加熱において急激に低下し、概ねコンクリートにおける傾向と同様である。
- 3) 圧縮強度と静弾性係数の関係は、600℃程度以下の範囲であれば一定の関係で表され、加熱後の単位容積質量、圧縮強度から静弾性係数を推定することも可能である。
- 4) 加熱後の時間経過によって、圧縮強度、静弾性係数は緩やかに回復するが、1年経過時点においても残存比で0.1以下の回復にとどまる。

#### 参考文献

- 1) 王徳東, 野口貴文, 濱崎仁, 朴同天: 高温を受けた補修材料の残存強度, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.571-576, 2008.7
- 2) 大濱嘉彦, 白石田和彦: ポリマーセメントモルタル

の曲げ及び圧縮強さの温度依存性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料・施工・防火・海洋, pp.165-166, 1982.10

- 3) 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
- 4) 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
- 5) 小川晴果, 大濱嘉彦, 出村克宣: 高曲げ強さを有するポリマーセメントモルタルの基礎的性質, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.1, pp.115-118, 1999.7
- 6) Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design, CEN, Oct.1994
- 7) 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, No.541, pp.23-30, 2001.3
- 8) 一瀬賢一, 川口徹, 長尾覚博: 高温加熱後の高強度コンクリートの力学的性質に及ぼす骨材の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp.51-54, 2002.8