

## 第2章 レジンコンクリートの硬化収縮のモデル化

### 2.1 目的

RECの結合材料である不飽和ポリエステル樹脂は、硬化に伴う大きな容積変化を起こすという欠点を有する。このRECの収縮による製品への不具合が、ひび割れという現象となって顕在化されてきた。本研究では、RECの硬化収縮に起因する不具合を解消することを目的として、このRECの硬化中の収縮挙動に着目し、モデル化とモデルの適応性についての検討を行った。

### 2.2 コンクリートの発熱モデル

RECの主剤である不飽和ポリエステル樹脂の硬化収縮は、樹脂の重合反応に起因している。硬化時のRECの収縮挙動を予測する手法を確立するため、硬化収縮のモデル化を試みた。モデル化にあたっては、不飽和ポリエステル樹脂の重合反応は発熱反応であり、重合速度は温度の影響を受けるため、反応中の温度が高くなれば重合反応も早くなると推測される。RECの硬化収縮挙動を予測するには、反応途中の発熱をも同時にモデル化する必要があると考えた。

本研究では、コンクリートの発熱モデルとして既に実用化されているセメントコンクリートの水和発熱モデルのモデル化の手法を応用することにした。内田ら<sup>1)</sup>は、コンダクションカロリメータを用い、セメントペーストの水和発熱速度の測定および水和セメントペーストの比熱の測定を通して、水和発熱速度の定量化を行い、あらゆる温度履歴を有するコンクリートの温度上昇の予測方法を提案した。また、鈴木ら<sup>2)</sup>は、コンクリートの断熱上昇温度試験機を用い、異なる練上がり温度のコンクリートについて、積算発熱量をパラメータとする温度活性と基準発熱速度の同定を行い、コンクリートの発熱モデル式を提案した。

本研究では、鈴木ら<sup>2)</sup>の研究を参考に、RECの収縮モデルの検討を実施することにした。

### 2.3 モデル化の方針

モデル化に当たり、発熱・収縮モデルの仮想計算フローを図2-1に示す。このフローでは、重合のパラメータを積算発熱量で代替する考えでスタートした。

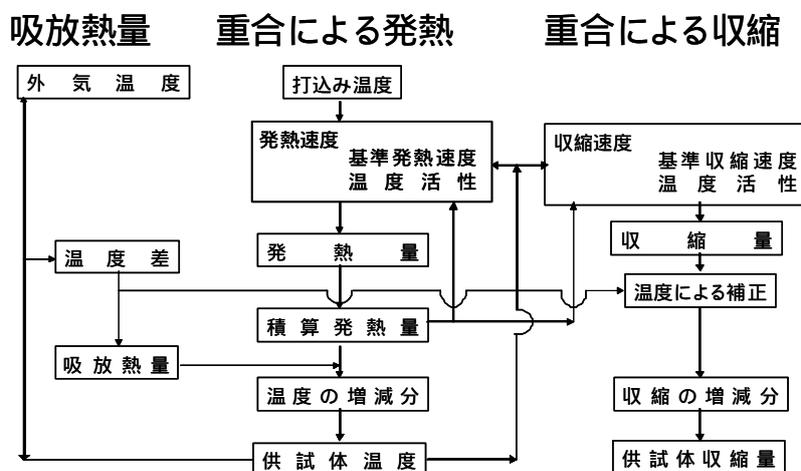


図2-1 発熱・収縮モデル仮想計算フロー

不飽和ポリエステル樹脂の硬化収縮は、モノマーがラジカル重合を繰り返して分子量を増し、3次元網目構造を形成する際に分子間距離が縮むことに起因していると考えられる<sup>3)</sup>。さらに、不飽和ポリエステルの重合反応は発熱反応で、ラジカル重合の速度は温度の影響を受けるため、反応中の温度が高いほど、重合反応が速やかに進み、同時に発熱速度、収縮速度ともに大きくなると推測される。したがって、レジンコンクリートの硬化収縮挙動を予測するためには、反応途中の発熱をも同時にモデル化する必要がある。

不飽和ポリエステルの重合反応を



$\Theta$  : 発熱量, 収縮量

と捉え、発熱速度および収縮速度を重合度の関数で表される基準反応速度項と温度依存項の積で表すことにした。

$$\Theta = \int \theta \, dt \quad (2)$$

$$\theta = \theta_{s(p)} \exp\left\{-\frac{E_{(p)}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s}\right)\right\} \quad (3)$$

$\Theta$  : 結合材質量当りの発熱量, 収縮量

$\theta$  : 結合材質量当りの発熱速度, 収縮速度

$\theta_s$  : 結合材質量当りの基準発熱速度, 基準収縮速度

$p$  : 重合度

$E$  : 気体定数 (J/K·mol)

$R$  : 活性化エネルギー (J/mol)

$T_s$  : 基準温度 (K)  $T$  : 絶対温度 (K)

このようなモデルでは、重合度と発熱量の関係、重合度と収縮量の間を測定して、基準反応速度項と温度依存項を定量化する必要がある。しかし、硬化途中の重合度を直接測定することは極めて困難であるため、重合度を一意的に表現できるパラメータが必要となる。不飽和ポリエステルの重合反応では、共有結合に伴い発熱するため、その積算値は重合度の進行を表現できると考えられる。また、分子同士の結合によって生じる収縮量も重合度を表すパラメータとなり得ると考えられる。したがって、収縮モデルを構築する際に重合度を表すパラメータとして積算発熱量と収縮量のどちらも用いることが可能ではないかと考えられる。よって式(3)は以下のように書くことができる。

$$\theta = \theta_{s(\Theta)} \exp\left\{-\frac{E_{(\Theta)}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s}\right)\right\} \quad (4)$$

ここで(4)式は、発熱反応速度の一般式(5)と基準温度一定における発熱速度の式(6)によって求まる式である。

$$\theta = \theta_{\infty(\Theta)} \exp\left\{-\frac{E_{(\Theta)}}{RT}\right\} \quad (5)$$

$$\theta(T_s, \Theta) = \theta_{\infty(\Theta)} \exp\left\{-\frac{E_{(\Theta)}}{RT_s}\right\} \quad (6)$$

2.4 実験概要

2.4.1 実験方法

鈴木ら<sup>2)</sup>の手法に倣い、打ち込み温度を変化させて断熱環境下で REC の断熱上昇温度と収縮量を測定し、発熱速度および収縮速度の対数と絶対温度の逆数との関係（アレニウスプロット）から基準反応速度項と温度依存項の定量化を行った。

本実験では、骨材を予熱して打ち込み温度を 28, 34, 39 の3水準に変化させた。各試験における供試体数は1体とし、それぞれの水準において3回の実験を行った。

2.4.2 使用材料および配合

使用材料を表-2.1 に、配合を表-2.2 に示す。

表-2.1 使用材料

使用材料	種類	絶乾密度	吸水率	樹脂吸着量
		(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(%)
結合材	不飽和ポリエステル樹脂	1.12	-	-
充填材	スラグ粉末	3.35	-	37.8
	フライアッシュ	2.32	-	45.4
細骨材	5号ケイ砂	2.55	1.0	-
	3号ケイ砂	2.53	1.2	-
粗骨材	砕石 1005	2.64	0.8	-

表-2.2 配合

				(kg/m <sup>3</sup> )
結合材	充填材(スラグ粉末)	細骨材	粗骨材	空気量(%)
290	400	1,106	440	1.0

2.4.3 実験装置および供試体

実験装置を写真-2.1 に、供試体図を図-2.1 に示す。



写真-2.1 実験装置

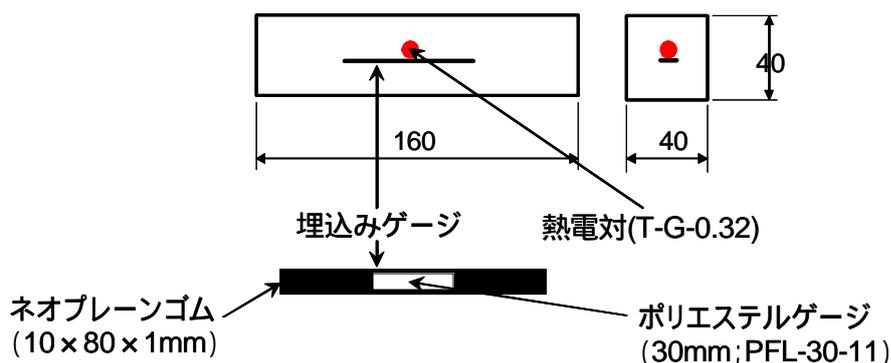


図-2.1 供試体図

JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に定める鋼製型枠を使用し、その中央に REC を打設した .40×40×160mm の供試体の中心に、ネオプレーンゴム (10×80mm, t=1mm, 弾性係数: 1.5MPa) にポリエステルゲージ (ゲージ長 30mm) を貼付した埋込みケーシングと熱電対を設置した。供試体の中心の温度と同じ温度になるように乾燥機内 (エスペック (株) 製熱風循環式乾燥機 LC-114) の温度を制御して断熱環境を再現した。

#### 2.4.4 定量化の手順

定量化の手順を図 2-3 に示す。

断熱環境下において、打ち込み温度、経過時間、槽内温度、供試体温度、長さ変化を測定し、その中の断熱上昇温度から積算発熱量と発熱速度を求める。長さ変化から積算収縮量と収縮速度をアレニウスプロットから同定した。

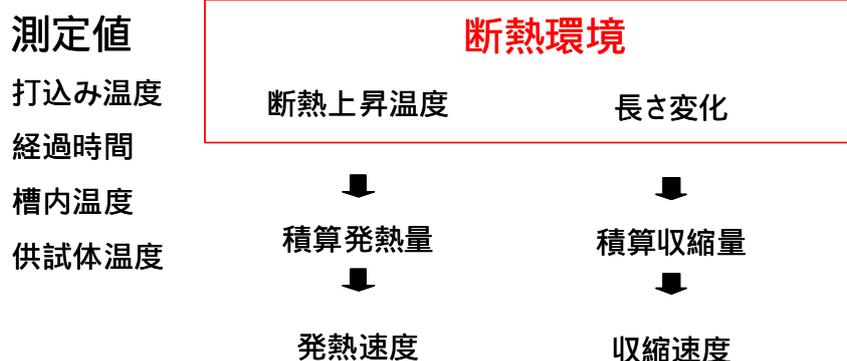


図 2-3 定量化のフロー

#### 2.4.5 実験結果

図-2.2, 2.3 に断熱温度上昇量と収縮ひずみの測定結果を示す。

収縮ひずみは、同程度の樹脂量を持つ REC の線膨張係数 ( $16 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) を参考<sup>4)</sup>にして温度変化による長さ変化を差引いている。この結果から断熱温度上昇量および収縮ひずみの終局値が打ち込み温度によって異なることが分かった。セメントコンクリートの断熱温度上昇量との相違点として認められる。

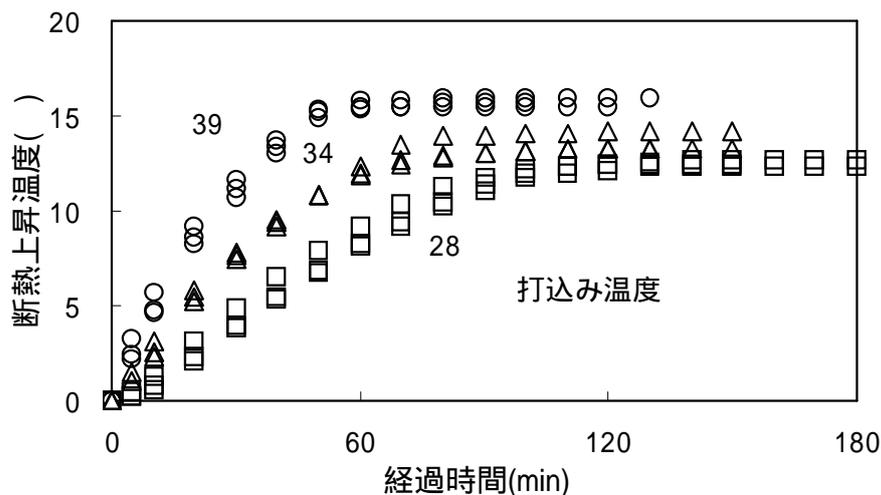


図-2.2 断熱上昇温度

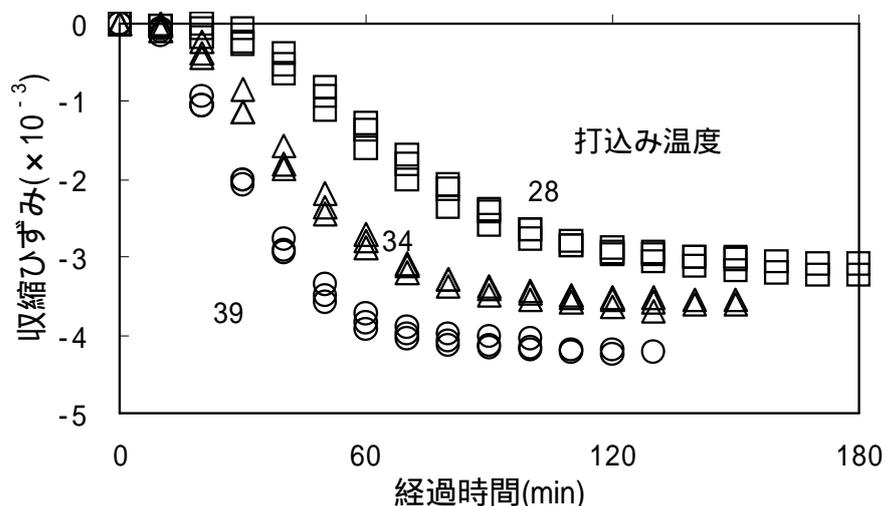


図-2.3 収縮ひずみ

## 2.5 発熱モデルの構築

### 2.5.1 発熱速度の求め方

図-2.2 から樹脂質量当りの発熱速度と積算発熱量を求めた。REC の比熱は、樹脂の比熱を  $1.26\text{J/g}\cdot\text{K}$ 、骨材の比熱を  $0.96\text{J/g}\cdot\text{K}$  として、配合の質量比率より求めた。

また、発熱速度の計算は、島ら<sup>5)</sup>が付着応力を算出した際に使用したデータ処理方法に倣い、対象点温度 (T) と断熱温度上昇量が  $T\pm 1$  なる合計 3 点を含む二次曲線を求め、温度 T における二次曲線の勾配をもって、発熱速度とした。そのようにして求めた発熱速度と積算発熱量の関係を図-2.4 に示す。

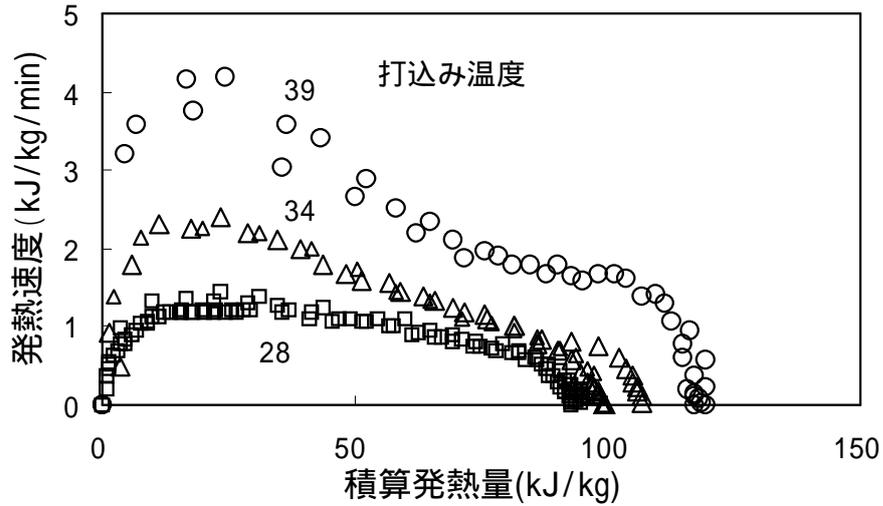


図-2.4 積算温度と発熱速度の関係

2.5.2 温度活性と基準発熱速度の同定

積算発熱量の終局値が打込み温度によって異なるため、アレニウスプロットから基準発熱速度と温度活性を求めることができる積算発熱量の範囲は約 90kJ/kg までである。この範囲で積算発熱量 10kJ/kg 毎にアレニウスプロットを作成した結果を図-2.5 に示す。

ここでいうアレニウスプロットとは、スウェーデンの科学者アレニウスが提案した化学反応の予測式の中で、絶対温度の逆数と反応速度の対数目盛で描いたグラフをアレニウスプロットという。この両者の関係は、一次式で表され、その傾きが温度活性である。

アレニウスプロットの傾きとして求めた温度活性と積算発熱量の関係を図-2.6 に示す。積算発熱量が 80kJ/kg 付近まではほぼ一定で、それ以降では急激に減少している。REC の場合、積算発熱量の終局値に温度依存性があるため、打込み温度が低いものは積算発熱量が小さな段階で発熱速度がゼロとなる。一方、同じ積算発熱量であっても打込み温度が高いものは、発熱を継続して

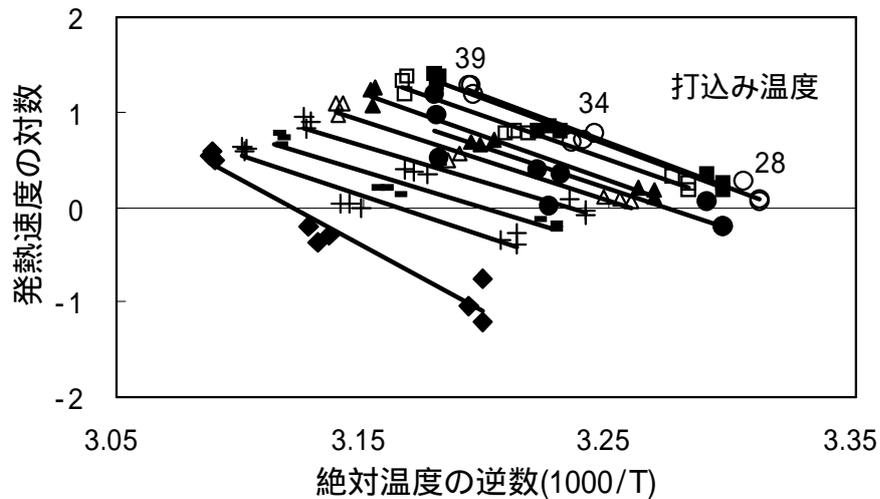


図-2.5 アレニウスプロット

いるため発熱速度が非ゼロとなり、発熱速度ゼロの対数 ( $-\infty$ ) に対するアレニウスプロットの傾きが無限大に近づき 結果として反応の終盤で温度活性が見かけ上減少していることがわかる。このような現象を考慮して、本研究では図-2.6 に実線で示すように 80kJ/kg までの平均値を延長した温度活性を採用し、図-2.7 に示す基準発熱速度がゼロとなる積算発熱速度の範囲まで、この平均値(-8800)を用いて計算を行うことにした。この温度活性を用いて、基準温度を 30 (303K) としたときの基準発熱速度と積算発熱量との関係を図-2.7 に示す。積算発熱量が 20kJ/kg までは図-2.7 の実線で示される基準発熱速度のモデルを求めた。

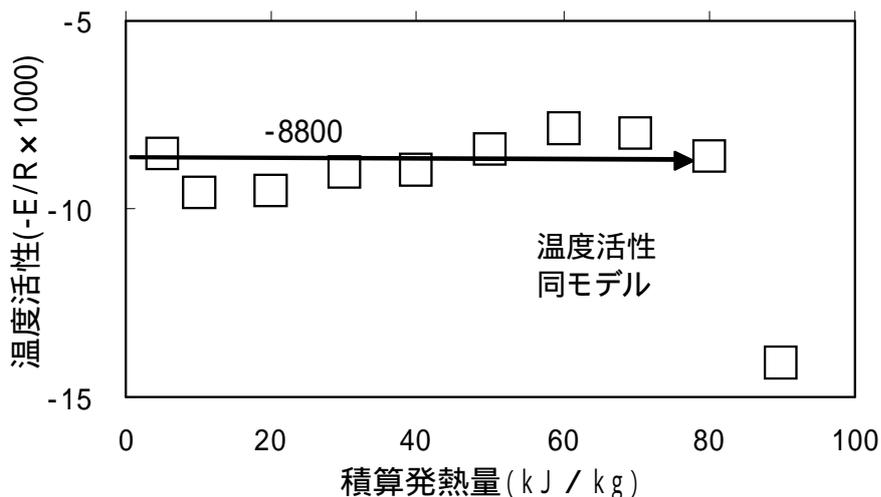


図-2.6 積算発熱量と温度活性

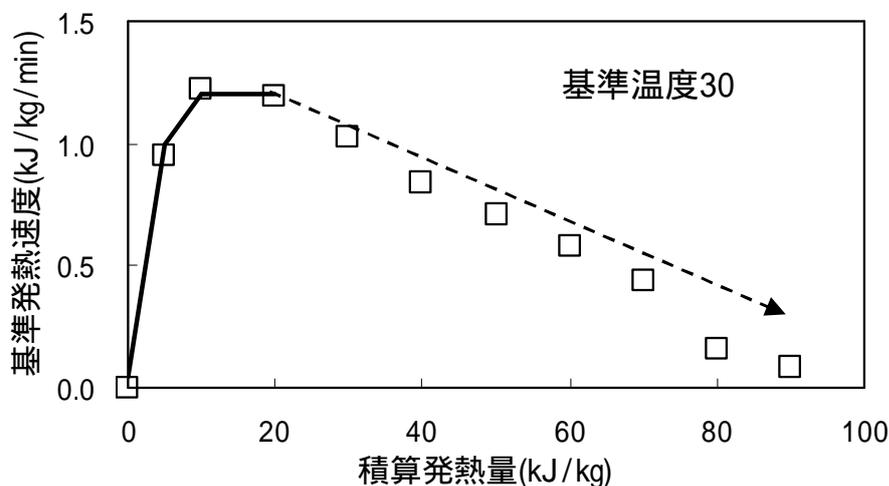


図-2.7 基準発熱速度

### 2.5.3 積算発熱量の終局値の求め方

図-2.7 において、発熱モデルの基準発熱速度は、積算発熱量が終局値に達した時点でゼロとする必要がある。しかしながら、前述のように REC の場合、積算発熱量の終局値に温度依存性が認められるため、セメントコンクリートの発熱モデルとは異なる処理が必要となる。そこで本研究では、図-2.4 から反応途中の発熱速度が大きいほど積算発熱量の終局値が大きくなっていること

に着目し、図-2.8 に示される両者の関係を用いて、積算発熱量が20kJ/kg 時の発熱速度から積算発熱量の終局値を算出した。本研究では、反応開始時の温度条件ではなく反応途中の反応状態によって積算発熱量の終局値を設定するモデルを採用したものである。つまり、積算発熱量が20kJ/kg までは図-2.7 の基準発熱速度式で計算し、そのときの発熱速度から積算発熱量の終局値を図-2.8 の関係式から終局値を求め、図-2.7 の破線で示される基準発熱速度（図中破線の部分）のモデル式を求めた。

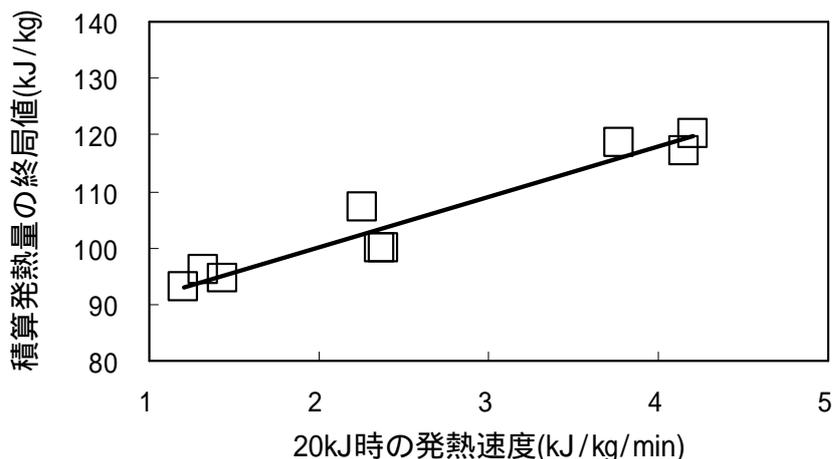


図-2.8 20kJ 時の発熱速度と積算発熱量の終局値

#### 2.5.4 モデルによる断熱上昇温度の計算

今回提案する発熱モデルを用いて断熱温度上昇量を算出した。計算は、式(7)を用いて、結合材質量当りの発熱速度を計算し、時間で積分して積算発熱量を算出した。その積算発熱量から断熱上昇温度を求めた。計算結果を図-2.9 に実線で示す。実験結果を概ね再現することができた。

$$\theta = \theta_{s(p)} \exp\left\{-8800\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{303}\right)\right\} \quad (7)$$

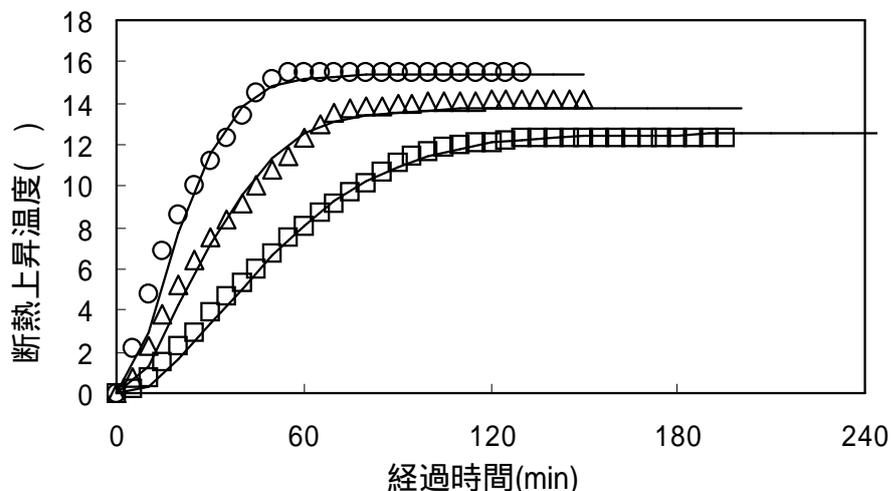


図-2.9 断熱上昇温度の計算結果

## 2.6 収縮モデルの構築

硬化収縮に伴う発熱と収縮はともに重合反応によって生じるため、収縮反応の反応率を表すパラメータとして積算発熱量を採用することが合理的であると考えられる。そこで、収縮反応を表わすパラメータとしての積算発熱量の適応性について検討を行った。発熱速度と収縮速度の経時変化を図-2.10 に示す。まず反応の開始段階において収縮は発熱よりも反応の開始が遅延していることが分かる。ひずみゲージと REC との剛性の違いも考えられるが、発熱速度が最大に近く時間においても収縮速度は小さいままである。したがって、積算発熱量が増加しても収縮速度はほとんど上昇していないことを示している。次に反応の終盤において、発熱速度が十分ゼロに近づき、積算発熱量が終局値に達した時点でも収縮速度はゼロにならず、収縮が進行していることが認められる。このような傾向はその他の打込み温度でも観測された。したがって、収縮挙動を予測するモデルで収縮反応の反応率を表すパラメータとして積算発熱量は必ずしも適当ではないと考えられる。そこで本研究では、収縮反応の反応率を表すパラメータに積算収縮量を用いることにした。積算収縮量は温度変化に伴う体積変化を差引けば、温度のように逸散することがないので、収縮ひずみで表すことができる。

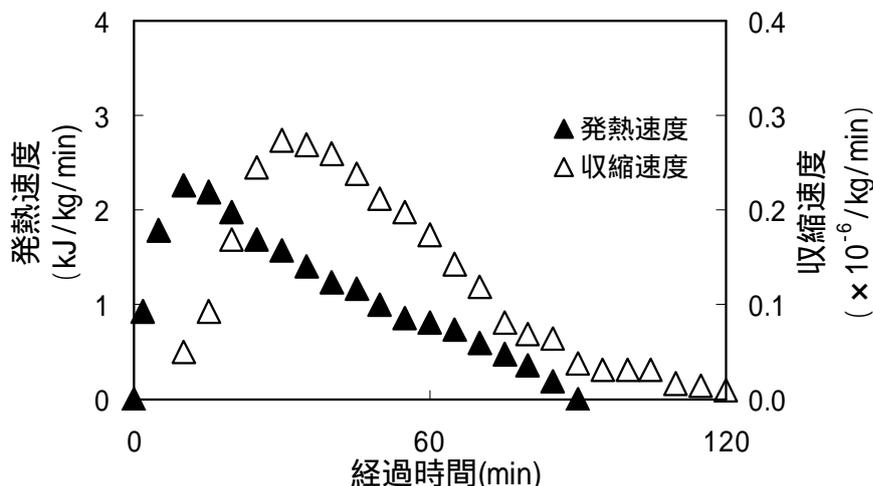


図-2.10 発熱速度と収縮速度の経時変化

## 2.6.1 収縮速度の求め方

発熱モデルと同様に図-2.3の結果から、収縮速度を求めた。

収縮速度の計算は、発熱速度同様、対象積算収縮量の温度 ( $T$ ) と断熱上昇温度が  $T_{\pm 1}$  を通過する3点の二次曲線を求め、対象点における二次曲線の勾配をもって、収縮速度とした。そのようにして求めた積算収縮量と収縮速度の関係を図-2.11 に示す。この図に示された関係は、積算発熱量と発熱速度との関係と非常に良く似ており、反応途中の収縮速度だけでなく反応が停止する収縮ひずみの終局値も温度に影響されていることが読み取れる。

## 2.6.2 温度活性と基準収縮速度の同定

図-2.11 をもとに、収縮ひずみが  $10 \times 10^{-6} \text{kg}$  までの範囲で、 $1 \times 10^{-6} \text{kg}$  ごとのアレニウスプロットを作成した。結果を図-2.12 に示す。アレニウスプロットから基準収縮速度と収縮反応の温度活性を求めた。

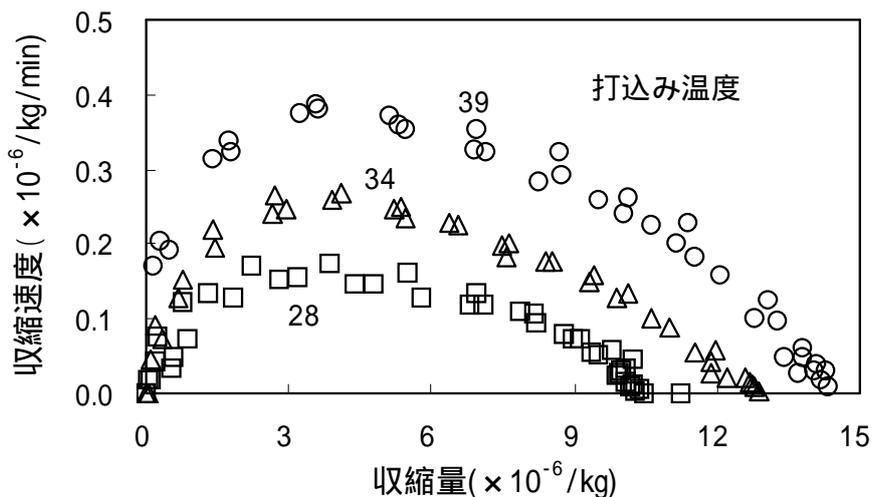


図-2.11 積算収縮量と収縮速度の関係

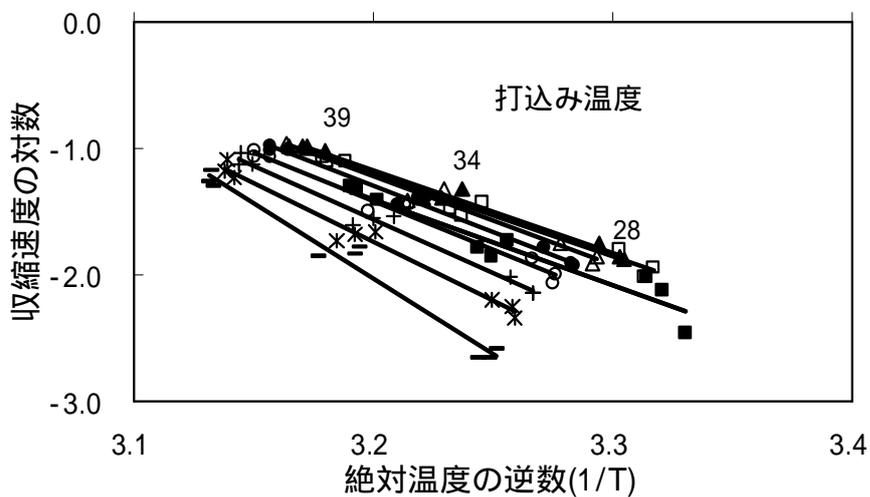


図-2.12 収縮速度に関するアレニウスプロット

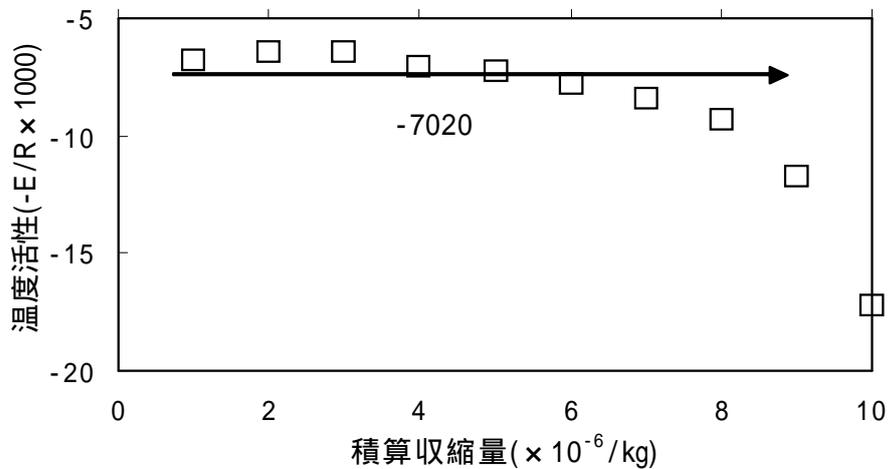


図-2.13 積算収縮量と温度活性

アレニウスプロットの傾きから求めた積算収縮量と温度活性の関係を図-2.13 に示す．温度活性は，積算収縮量が  $8 \times 10^{-6} / \text{kg}$  以下は比較的なだらかな下降現象を示しているが，それ以上では大きく減少している．REC の場合，積算収縮量の終局値に温度依存性があるため，打込み温度が低いものは積算収縮量が小さな段階で収縮速度がゼロとなる．同じ積算収縮量であっても打込み温度が高いものは，収縮を継続しているため収縮速度が非ゼロとなり，収縮速度ゼロの対数 ( $-\infty$ ) に対するアレニウスプロットの傾きが無限大に近づき，結果として反応の終盤で温度活性が見かけ状，減少しているのである．このような現象を考慮して，本研究では図-2.14 に実線で示すように  $8 \times 10^{-6} / \text{kg}$  までの平均値を延長した温度活性を採用し，図-2.14 に示す基準収縮速度がゼロとなる積算収縮速度の範囲まで，この平均値(-7020)を用いて計算を行うことにした．

この温度活性を用いて，基準温度を 30 (303K) としたときの積算収縮量と基準収縮速度との関係を図-2.14 に示す．積算収縮量が  $3 \times 10^{-6} / \text{kg}$  までは図-2.14 の実線で示される基準収縮速度のモデルを求めた．

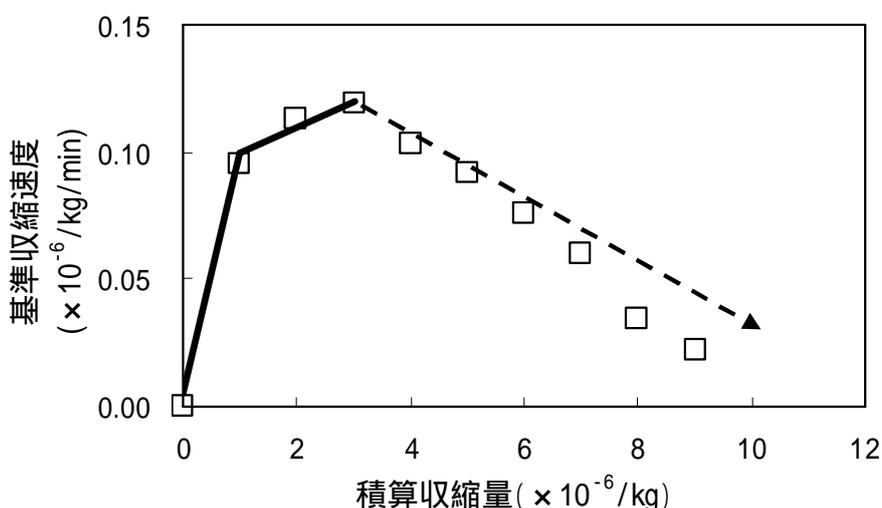


図-2.14 基準収縮速

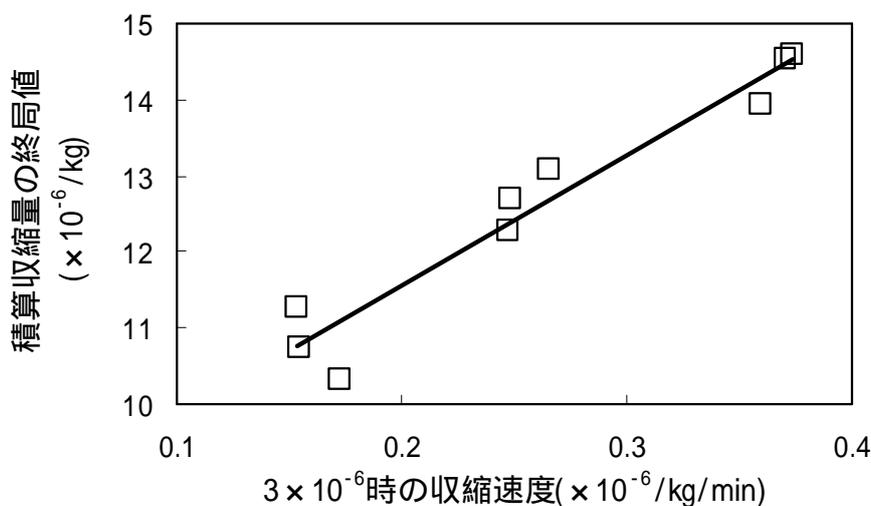


図-2.15  $3 \times 10^{-6}$ 時の収縮速度と積算収縮量の終局値

## 2.6.3 積算収縮量の終局値の求め方

ここで、図-2.11 に示すように、発熱モデルと同様に積算収縮量の終局値の温度依存性を再現する必要がある。積算収縮量が  $3 \times 10^{-6}$  /kg 時の収縮速度から積算収縮量の終局値との関係を用いて、反応途中の温度依存性を修正するモデルを採用した。つまり、積算収縮量が  $3 \times 10^{-6}$  /kg までは図-2.14 の基準収縮速度式で計算し、そのときの収縮速度から積算収縮量の終局値を図-2.15 の関係式から求め、図-2.14 の破線で示される基準収縮速度（図中破線の部分）のモデル式を求めた。

## 3.6.4 モデルによる収縮ひずみの計算

まず、今回提案する発熱モデルを用いて断熱温度上昇量を計算し、その温度を用いて、今回提案する収縮モデルによって収縮ひずみを計算した。

計算は、式(8)を用いて、結合材質量当りの収縮速度を計算し、時間で積分して積算収縮量を算出し、収縮ひずみを求めた。計算結果を図-2.16 に実線で示す。実験結果を概ね再現することができた。

$$\theta = \theta_{s(p)} \exp\left\{-7020\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{303}\right)\right\} \quad (8)$$

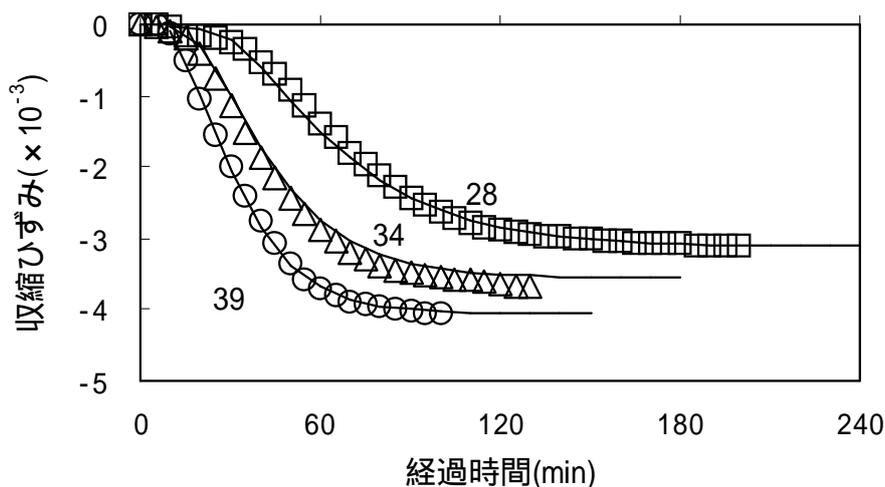


図-2.16 収縮ひずみの計算結果

## 2.7 単位樹脂量の違いによる各速度の検証

## 2.7.1 目的

今回のモデル化の同定試験においては、表-2.3 に示す単位樹脂量  $290 \text{ kg/m}^3$  の配合についてのみ実施し、単位樹脂量で除した値、つまり、樹脂質量当りの各速度を同定した。そこで、単位樹脂量が異なった場合にでも、単位樹脂量あたり同様の速度が得られるかについて、確認試験を実施した。

## 2.7.2 実験方法

今回の実験は、表-2.3 に示す配合について、練り上がり目標温度を 34 とし、2.4.3 の実験方法に準じて実験を行った。

表-2.3 配合 (kg/m<sup>3</sup>)

単位樹脂量	結合材	充填材	細骨材	粗骨材
270	270	410	1,130	453
290	290	400	1,106	442
330	330	389	1,078	431

2.7.3 実験結果

断熱温度上昇量および収縮量から 2.5.1 発熱速度の求め方および 2.6.1 収縮速度の求め方に準じて発熱速度と収縮速度を求めた。結果を図-2.17, 2.18 に示す。この結果, 単位樹脂量 270~330kg/m<sup>3</sup> の範囲での単位樹脂量当りの発熱速度および収縮速度は, 樹脂量の大小によって影響されないことがわかった。

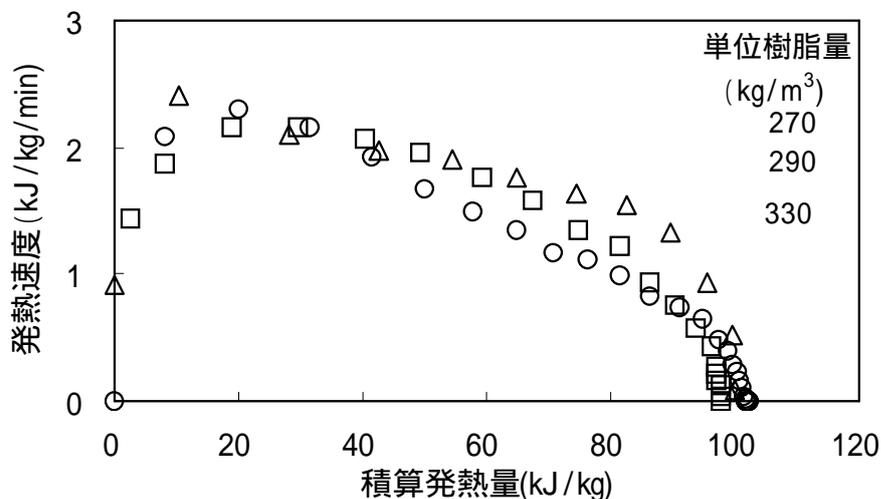


図-2.17 単位樹脂量の違いによる積算発熱量と発熱速度

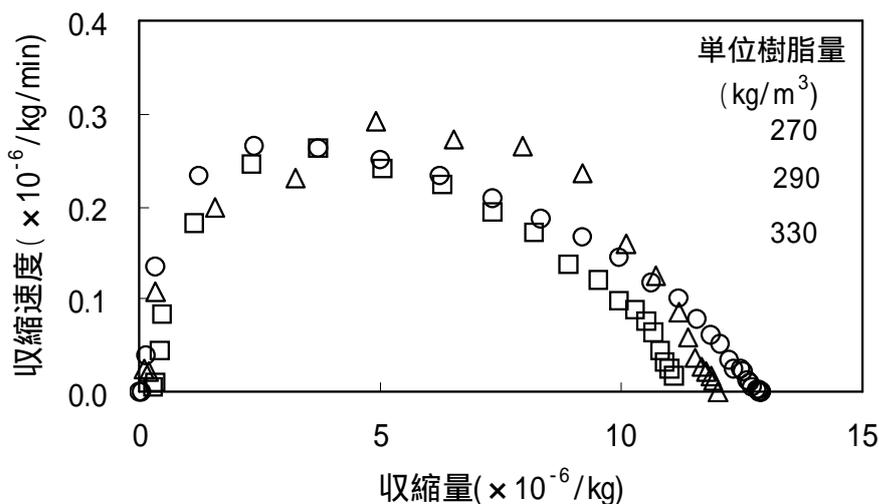


図-2.18 単位樹脂量の違いによる収縮量と収縮速度

## 2.8 基準速度の検証

## 2.8.1 目的

断熱環境下での発熱モデルでは基準発熱速度と温度活性を，収縮モデルでは基準収縮速度と温度活性を同定し，両者を連成させたモデルにより，収縮ひずみを解析することができた．その結果を，図-2.16 に示す．しかし，この結果はあくまでも断熱環境下での解析結果である．

そこで，REC 製造工場で一般的に採用されている養生条件における温度履歴で，このモデルが適用できるか否かについての検証が必要となる．今回，提案した連成モデルがこれらの条件化で十分実用に耐えるものであるかについて，解析モデルと測定値を比較し，各基準速度，各積算量の終局値について検証を行った．

## 2.8.2 実験方法

実験は，2.4.1，2.4.2 に示す方法で実施した．

養生方法は REC の生産部門で採用されている一般的な養生方法の中から，図-2.19 に示す A，B 二つのパターンの養生条件で実施した．

ここで，基準速度の計算に必要な熱伝達係数を求めるため，既に硬化した REC 供試体（ダミー供試体）を準備し，発熱供試体温度と同時にダミー供試体の温度を測定することによって，発熱供試体の吸放熱量の補正を行い，発熱温度の上昇分から基準速度を逆算した．基準速度の検証フローを図-2.20 に示す．

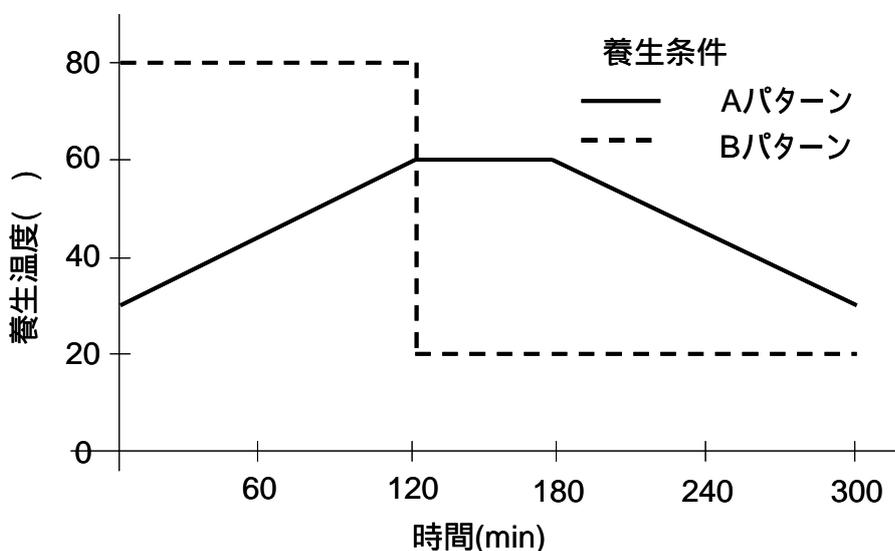


図-2.19 養生パターン

## 2.8.3 基準速度項の算定方法

図-2.20 の基準速度検証フローに基づいて計算を行った，計算手順を以下に示す．

まず，ダミー供試体と乾燥機内の温度測定値から型枠を含む REC の熱伝達係数を求める．つまり，次の式(9)を用いて熱伝達係数を算出した．

$$\delta = \frac{W\gamma(T_{D(i)} - T_{D(i-1)})}{S(T_R - T_D)} \quad (9)$$

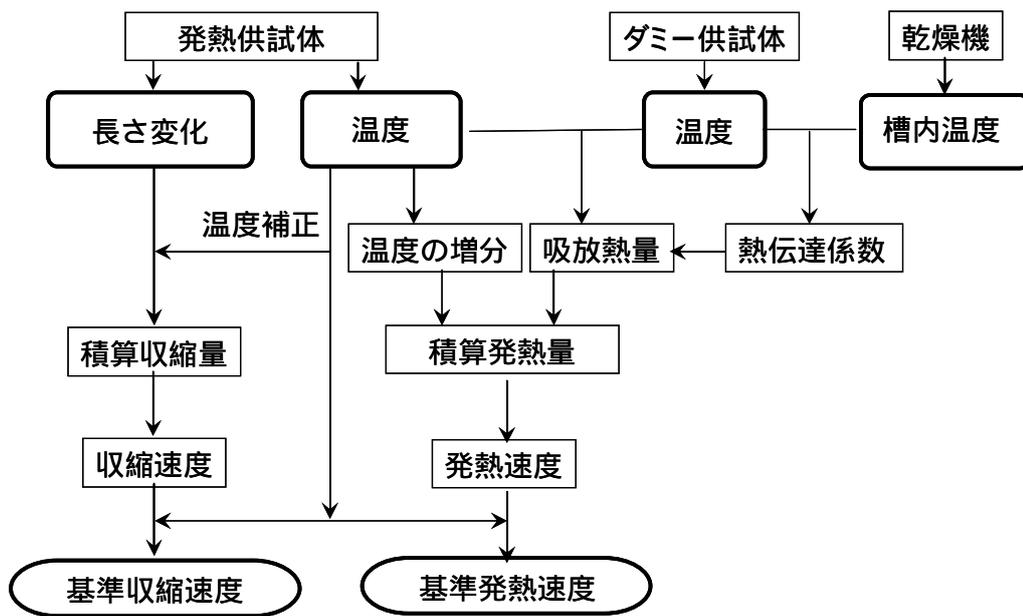


図-2.20 基準速度検証フロー

ここで、

$\delta$  : 熱伝達係数  $\text{kJ/m}^2\text{hr}$

$W$  : 供試体質量(kg)

$\gamma$  : 比熱( $\text{kJ/kg}$ )

$T_d$  : ダミー供試体温度( )

$T_r$  : 槽内温度( )

$S$  : 供試体表面積( $\text{m}^2$ )

次に、式(9)で求めた熱伝達係数を用いて、積算発熱量を求めるが、検証モデルの熱量収支を考え、同支配方程式(12)を導入した。

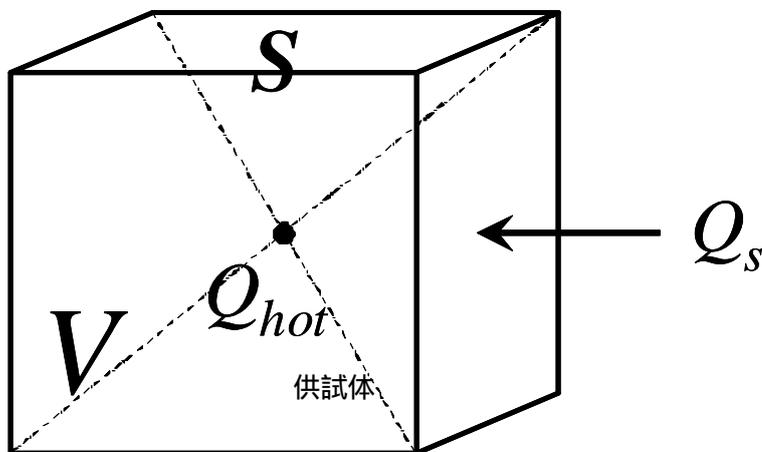


図 - 21 熱収支の概念図

図-2.21 の熱収支の概念図で、時間  $\Delta t$  間に供試体の温度は、 $\Delta T$  だけ変化すると仮定すると、供試体の熱量の変化は、式(10)で表される。

$$\Delta Q = \gamma \rho V \Delta T \quad (10)$$

ここで、養生槽内における供試体の熱量変化は、発熱量と吸放熱量の総和で表されるから、

$$\Delta Q = \Delta Q_S + \Delta Q_{hot} \quad (11)$$

であらわされ、発熱量は、式(12)で計算できる。

$$\Delta Q_{hot} = H \Delta t V = \gamma \rho V \Delta T - \delta (T_R - T_H) S \Delta t \quad (12)$$

ここで、

$\Delta Q$  : 熱量の増分 (kJ/hr/kg)

$\Delta Q_S$  : 放熱量 (kJ/hr/kg)

$\Delta Q_H$  : 発熱量 (kJ/hr/kg)

$H$  : 発熱速度 (kJ/hr/kg)

$\rho$  : 密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$\Delta t$  : 微小時間 (hr)

この式(12)を用いて、以下の手順で積算発熱量の同定を行った。

ダミー供試体から求めた熱伝達係数を用いて、発熱供試体の吸放熱量を以下の手順で計算した。

- 1) 発熱供試体の温度増分と吸放熱量から、発熱供試体の積算発熱量を算出した。
- 2) 2.5.1 に示す発熱速度の求め方に準じて、発熱速度を求めた。
- 3) 求めた発熱速度と供試体温度を式(7)に代入して、基準発熱速度を算出した。

また、基準収縮速度は、以下による。

- 4) 発熱供試体で測定した長さ変化は、文献<sup>4)</sup>の線膨張係数  $16 \times 10^{-6}$  を参考にして、温度変化による長さ変化を補正し、積算収縮量を求めた。
- 5) 積算収縮量をもとに、2.6.1 の収縮速度の求め方に準じて収縮速度を求めた。
- 6) 求めた収縮速度と供試体温度を式(8)に代入して、基準収縮速度を求めた。

以上の計算手順で求めた基準発熱速度を図-2.23, 2.24 に、基準収縮速度を図-2.25, 2.26 に示した。図中実線は、解析に用いた各基準速度を示す。

また、この温度履歴による供試体温度の解析結果との比較を図-2.27, 2.28 に、収縮ひずみの解析結果との比較を図-2.29, 2.30 に示す。

#### 2.8.4 検証結果

##### (1) 熱伝達係数

ダミー供試体を用いて、槽内温度と供試体温度の差から熱伝達係数を算出した結果を図-2.22, 2.23 に示した。図に示すように、供試体の温度履歴によって熱伝達係数がかなり変動することがわかった。その変動について一意的な関係は見つからなかった。

以下の基準速度および温度履歴の解析には、A パターンの温度履歴時の熱伝達係数の平均値  $20.1 \text{ kJ/m}^2 \text{ hr}$  を用いた。

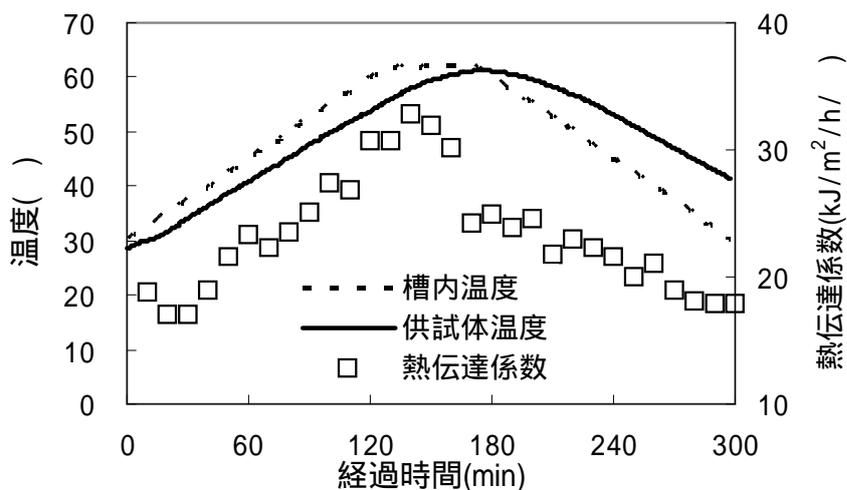


図-2.22 熱伝達係数(Aパターン)

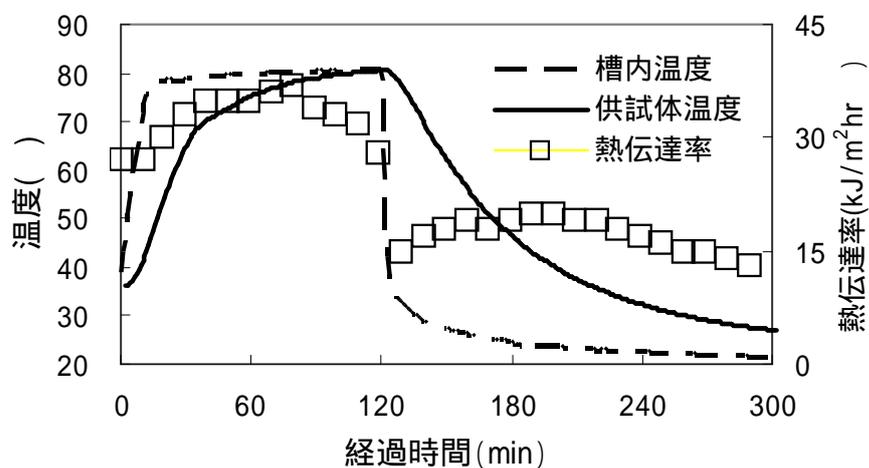


図-2.23 熱伝達係数(Bパターン)

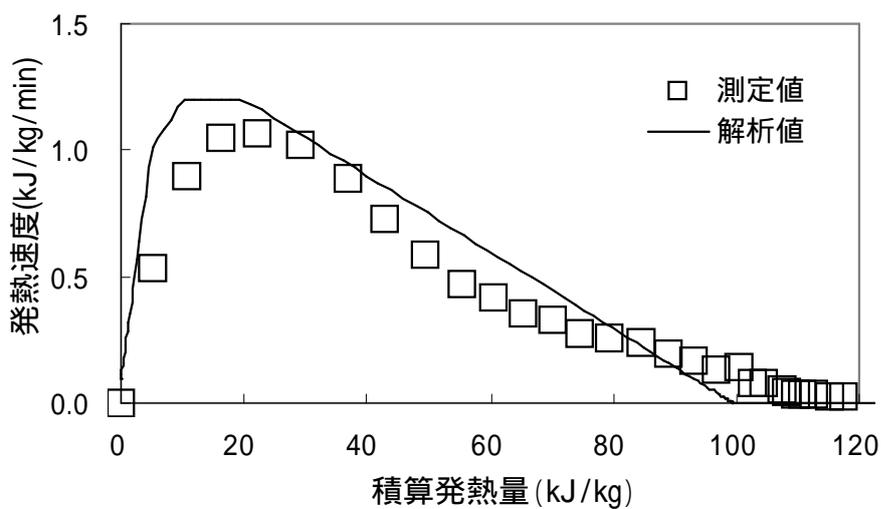


図-2.24 基準発熱速度の比較(Aパターン)

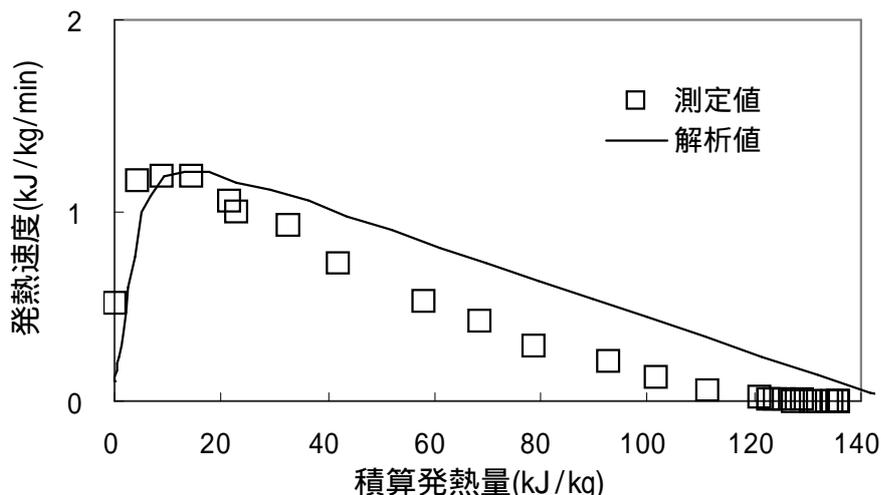


図-2.25 基準発熱速度の比較(Bパターン)

(2) 基準発熱速度

基準発熱速度の検証は、温度履歴の異なる環境下においてもモデル化した時の基準発熱速度が得られるか否かである。つまり、積算発熱量が 10~20kJ/kg 時で基準発熱速度が最大値を示すこと、それをピークに漸次減少していること。あわせて、20kJ/kg 時での発熱速度から求めた積算発熱量の終局値が解析値と一致することである。今回の実験結果から、以上のことを検証すると、図-2.24, 2.25 に示すように A,B パターンともに、発熱速度の最大値の発生する積算発熱量の位置、また、その発熱速度から予測する積算発熱量の終局値の位置について、その傾向は良く一致していることが判った。

(3) 基準収縮速度

基準収縮速度の検証結果を図-2.26, 2.27 に示す。温度履歴の緩やかな A パターンの場合、実測値がモデルよりやや小さく、一方、温度変化の大きい B パターンではその逆で、実測値が大きくなる傾向が見られた。しかし、A, B パターンともに、モデル化したときの積算収縮量が  $3 \times 10^{-6}$  kg の時点で収縮速度が最大になるという過程は、十分に反映していた。

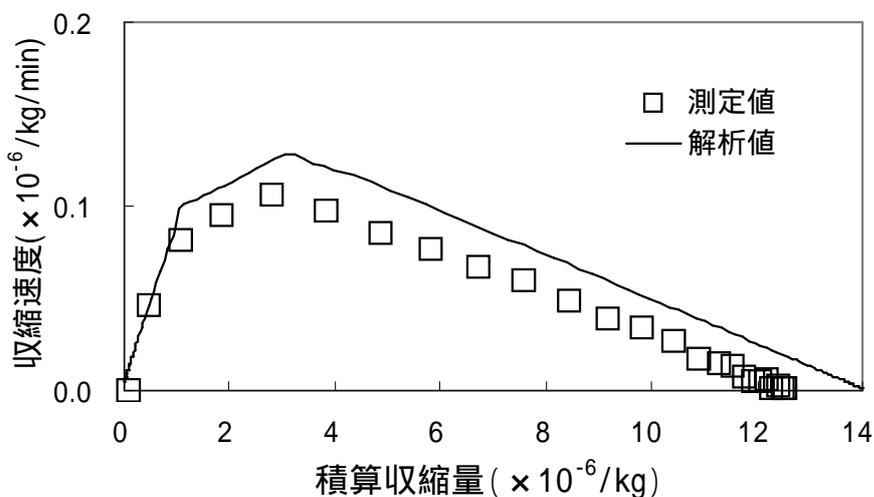


図-2.26 基準収縮速度の比較(Aパターン)

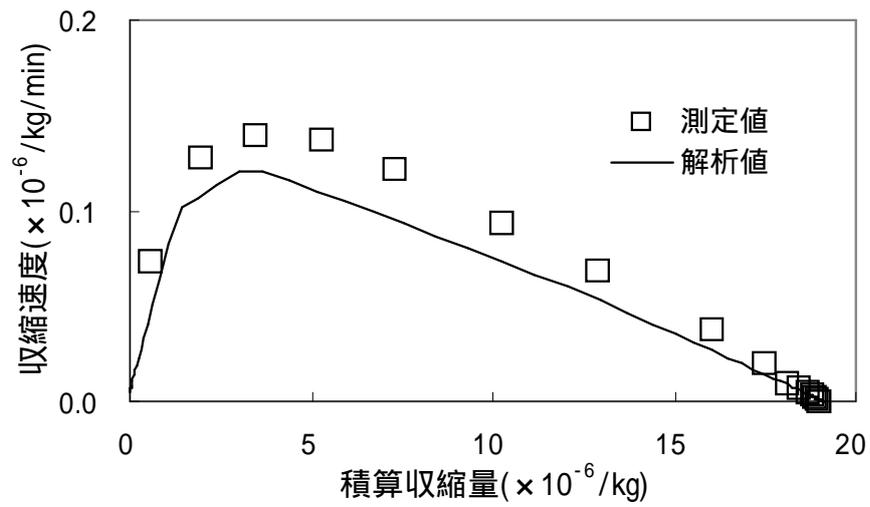


図-2.27 基準収縮速度の比較(Bパターン)

(4) 温度履歴時の解析結果

本研究で構築した発熱・収縮の連成モデルと、図-2.21 の熱伝達係数を用いた発熱・収縮モデルの計算フローを図-2.28 に示す。同計算フローを用いて計算した供試体温度と収縮の解析結果を図-2.29~2.32 に示す。この比較図から明らかなように供試体温度、収縮ひずみともに、各養生パターンにおいて測定値と解析値の一致が確認できた。

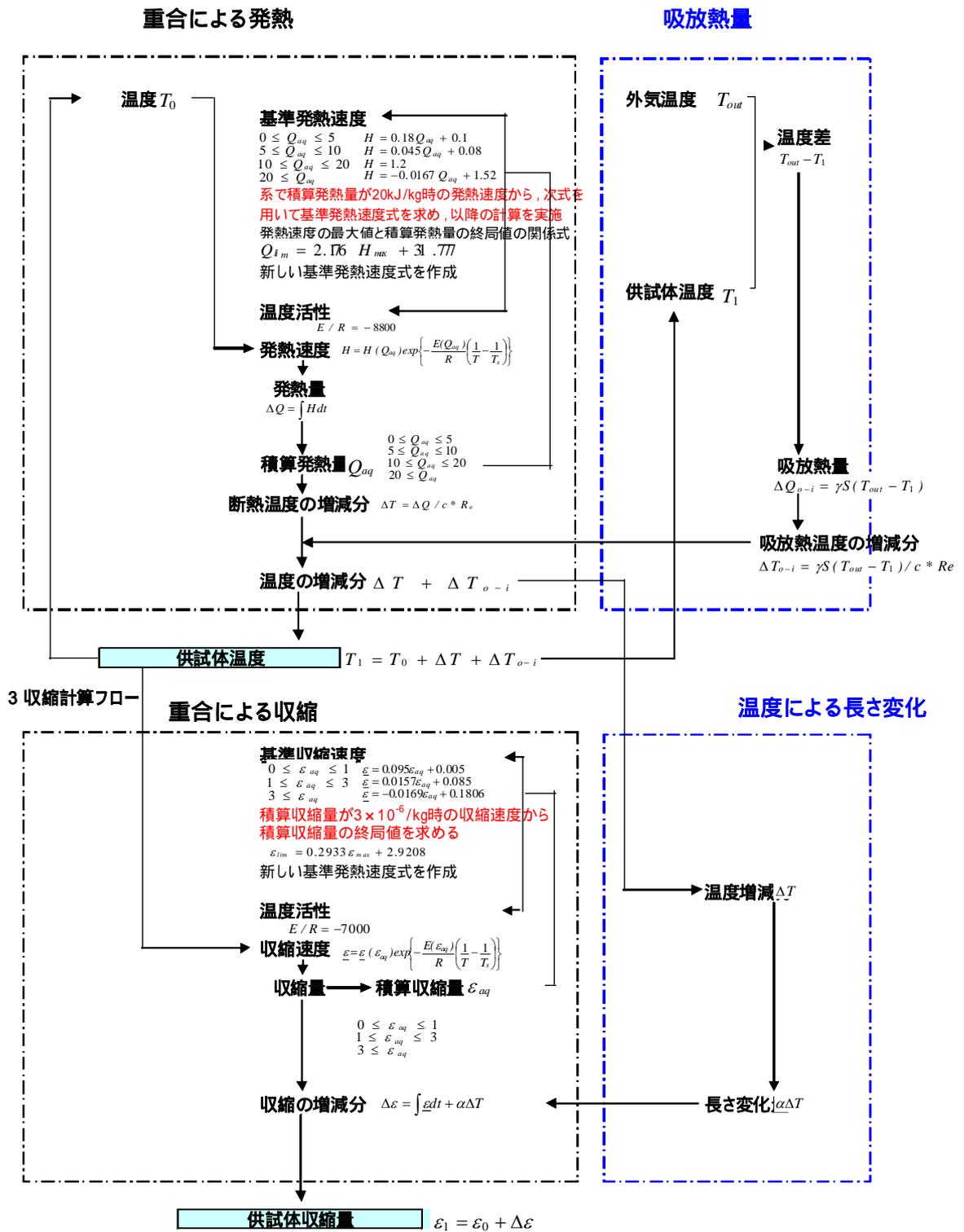


図-2.28 発熱・収縮モデル計算フロー

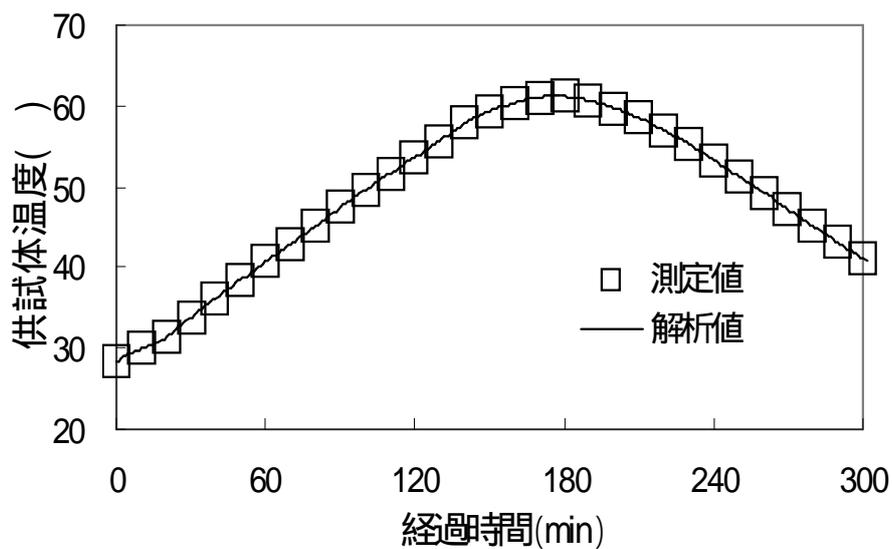


図-2.29 供試体温度の比較 (Aパターン)

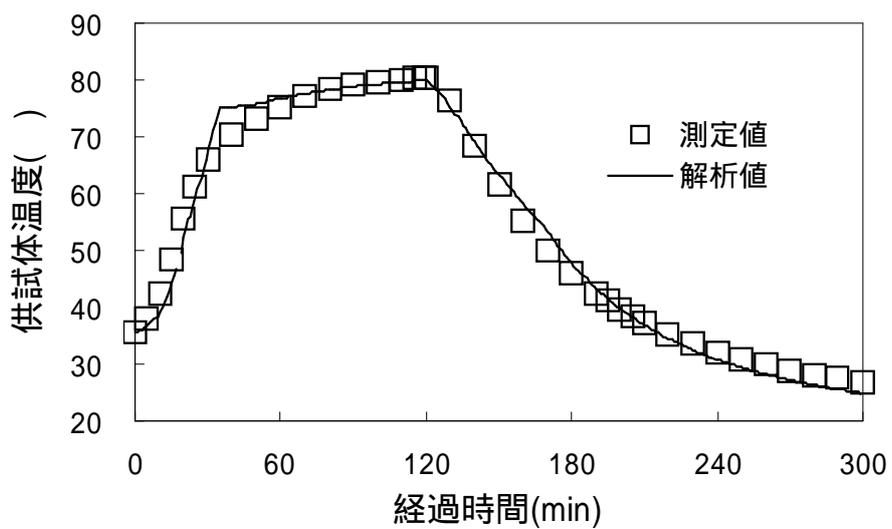


図-2.30 供試体温度の比較 (Bパターン)

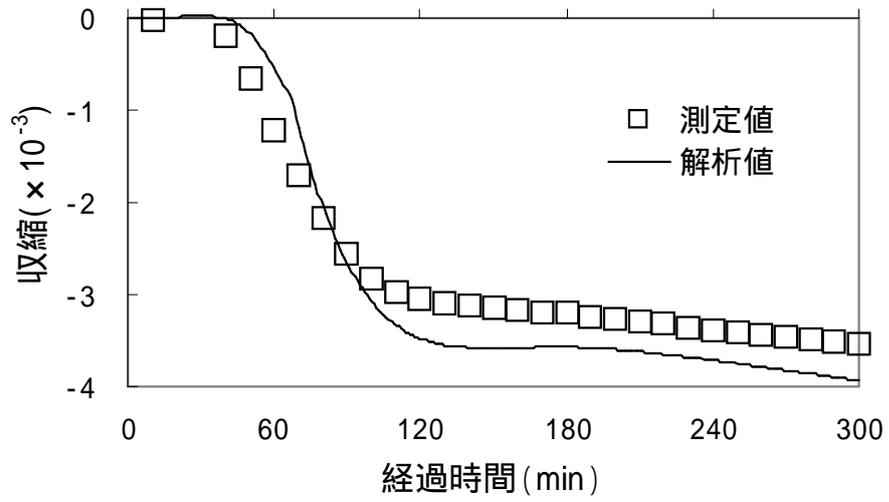


図-2.31 収縮ひずみの比較 (Aパターン)

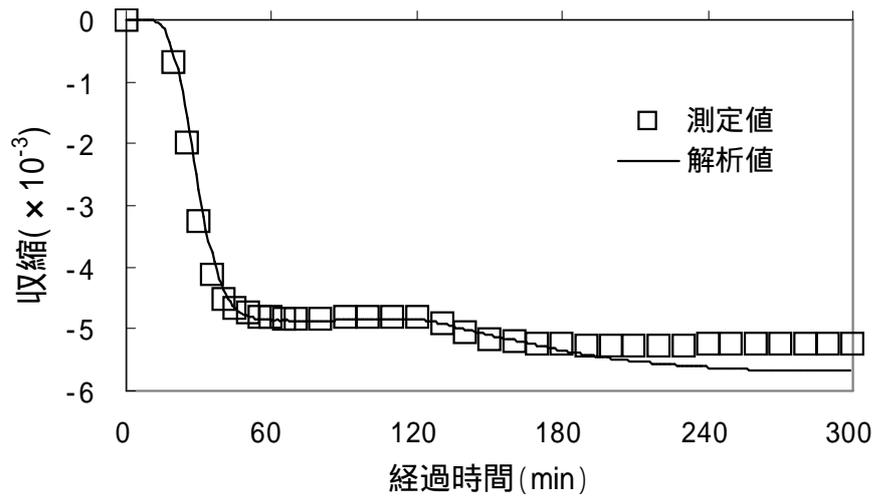


図-2.32 収縮ひずみの比較 (Bパターン)

## 2.9 まとめ

RECの硬化収縮を予測するため、発熱反応と収縮反応の反応速度を基準反応速度項と温度依存項の積で表現するモデルの構築を試みた。その定量化の方法として、断熱環境下で温度上昇量と収縮ひずみを測定し、それぞれの温度活性と基準速度の同定を行った。このモデルの一般的な養生条件下での適用を確認する目的で、各基準速度および積算量の終局値の検証を行った。

本研究の範囲で、以下のことが明らかとなった。

- (1) 打込み温度を変化させ、断熱環境下で温度上昇量と収縮ひずみを測定して、アレニウスの式から基準温度に対する反応速度項と反応の温度活性を定量的に同定することができた。
- (2) RECの硬化過程において、発熱反応および収縮反応の反応速度とそれぞれの反応率の終局値は温度依存性を有することが確認できた。この現象は、発熱、収縮モデル共に反応途中の反応速度を用い、反応率の終局値を修正することによって、反応率の終局値の温度依存性を再現することができた。
- (3) 単位樹脂量を  $270 \sim 330 \text{kg/m}^3$  と変化させた REC において、打込み温度が同様であれば単位樹脂量当りの発熱速度、収縮速度とも同じであることが検証できた。各基準速度の検証において、ダミー供試体を用いて求めた熱伝達係数を用いることによって、基準発熱速度・基準収縮速度共に概ねモデルを再現できることがわかった。
- (4) 今回の提案モデルは、発熱反応と収縮反応を個別にモデル化し、反応温度を共有させることで連成して計算を進める手法を提案した。一般的に採用されている養生条件下においても、実験結果から逆算した各基準速度と各積算量の終局値を検証した結果、各基準速度と各積算量の終局値は、連成モデルを概ね再現することができた。また、モデルから計算した供試体温度と収縮ひずみにおいても、実験結果を概ね再現することができた。

## 参考文献

- 1) 内田清彦，榊原弘幸，斉藤豊：積算発熱量に基づくセメントの水和発熱速度の定式化と温度上昇の予測，コンクリート工学，Vol.24，No.4，pp.105-113，1986.4.
- 2) 鈴木康範ほか：コンクリート中に存在するセメントの水和発熱過程の定量化，土木学会論文集，No.414/V-12，pp.155-164，1990.2.
- 3) 滝山栄一郎：ポリエステル樹脂ハンドブック，p.250-253，日刊工業新聞社，1988.
- 4) 清水茂夫：実用レジンコンクリート，山海堂，pp.36，1986.2
- 5) 島弘ほか：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力 - すべり - ひずみ関係，土木学会論文集，第378号/V-6，pp.165～174，1987.2.