

# 論文 コンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす養生時の温度履歴の影響

藤井 隆史\*1・大石 幸紀\*2・沖花 智之\*3・綾野 克紀\*4

**要旨:** ポリ容器内に打ち込んだコンクリートに外部から様々な温度履歴を与え、採取したコア供試体の乾燥収縮ひずみを測定し、温度履歴が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響を調べた。その結果、コンクリートの乾燥収縮ひずみは、高い温度で養生されるほど、最終値は小さくなること、とくに、養生の初期に高い温度を受けるほど、乾燥収縮ひずみの最終値はより小さくなることを示した。また、温度が2段階で変化する場合の乾燥収縮ひずみの最終値のモデル化を行った。本研究で提案したモデルは、実験結果と近い値で表現できていることを示した。

**キーワード:** 乾燥収縮ひずみ, 最終値, 養生温度, 温度履歴

## 1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮ひずみは、コンクリート中の水分が外部に逸散することで生じ、その大きさや経時変化は、セメントや混和材、骨材等の使用材料、コンクリートの配合、部材の形状や寸法、周囲の温度および湿度等の環境条件の影響を受ける。実際のコンクリート構造物では、施工時の外気温に加え、セメントの水和熱により、橋梁の上部工のような、比較的薄い部材であっても、コンクリート温度は80℃以上に上昇する箇所もある。鎌田らは、シリカフェームを用いた高強度コンクリートにおいて、若材齢時に高温の温度履歴を受けると、乾燥収縮ひずみが小さくなることを報告している<sup>1)</sup>。また、著者らは、外部から高温の温度履歴を与えたコンクリートの乾燥収縮ひずみは小さくなることを示している<sup>2)</sup>。さらに、大型コンクリートブロックを用い、高温になる中心部から採取したコンクリートの乾燥収縮ひずみは、温度の低い表層から採取したコンクリートの乾燥収縮ひずみよりも小さくなることを示している<sup>3)</sup>。したがって、コンクリートの乾燥収縮ひずみは、養生時の外部温度やセメントの水和によって発生する熱による温度履歴によっても影響を受けるといえる。

コンクリートの乾燥収縮ひずみは、プレストレストコンクリート構造物のプレストレス力の減少や、コンクリート構造物にひび割れを生じさせる原因の一つである。安全で耐久性の高いコンクリート構造物にするためには、コンクリートに生じる乾燥収縮ひずみを適切に設計へ反映させることが重要である。そのためには、コンクリートに生じる乾燥収縮ひずみを、精度よく把握する必要がある。そこで、本研究では、コンクリートに様々な温度履歴を与え、乾燥収縮ひずみに及ぼす影響について検討

を行った。また、養生温度が2段階で変化した場合の乾燥収縮ひずみの最終値のモデル化の検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

本実験に使用したコンクリートの配合を、表-1に示す。セメントには、普通ポルトランドセメント(密度: 3.15g/cm<sup>3</sup>, 比表面積: 3,350cm<sup>2</sup>/g)を用いた。細骨材には、硬質砂岩砕砂(表乾密度: 2.65g/cm<sup>3</sup>, 吸水率: 1.77%)を、粗骨材には、硬質砂岩砕砂(最大寸法: 20mm, 表乾密度: 2.74g/cm<sup>3</sup>, 吸水率: 0.64%)を用いた。混和剤は、ポリカルボン酸系高性能減水剤を用いた。

### 2.2 試験方法

コンクリートは、練混ぜ後、ただちにポリ容器内へ打ち込み密閉し、気温25±2℃の室内で2時間静置した。コンクリートの打込みから2時間後より、写真-1に示すように、所定の温度に制御した水槽内に設置した。この状態で、所定の温度履歴を与えた後、材齢5日でコアドリルを用いて、φ50×100mmのコア供試体を採取した。採取したφ50×100mmの円柱供試体には、乾燥収縮ひずみの測定用ゲージを円柱供試体の上面および底面に取り付けた後、エポキシ樹脂で封かんし、側面のみが乾燥する状態とした。また、測定用ゲージを取り付けた後、温度20±2℃、相対湿度95%以上の湿潤環境下で、底面に水を張った密閉容器内に材齢7日まで保管し、ひずみに変化が生じないことで、測定器等に異常がなく、供試体の状態も安定していることを確認した。材齢7日より、温度20±2℃、相対湿度60±5%の条件で、リニアゲージ(検長: 100mm, 最小目盛り: 5/10,000mm)を用いて、長さ変化の測定を行った。供試体は、条件毎に1本である。

\*1 岡山大学 大学院環境生命科学研究科環境科学専攻准教授 博士(工学) (正会員)

\*2 岡山大学 大学院環境生命科学研究科資源循環学専攻

\*3 岡山大学 大学院環境生命科学研究科資源循環学専攻

\*4 岡山大学 大学院環境生命科学研究科環境科学専攻教授 博士(工学) (正会員)

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				高性能減水剤 (C×%)
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
20	50.0	2.0	46.0	175	350	846	1,027	0.2



写真-1 温度制御の方法

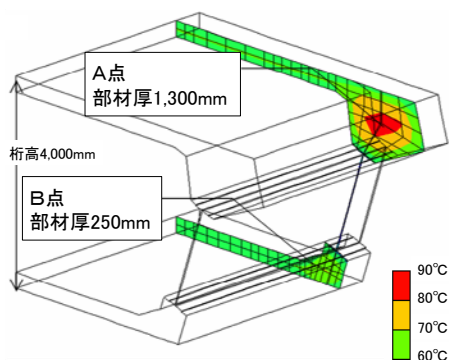


図-1 実構造物の養生時の最高温度分布

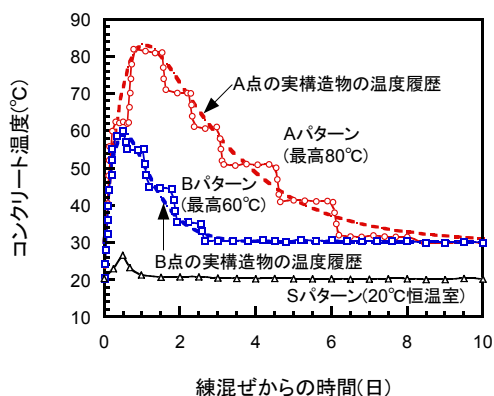


図-2 実構造物の温度履歴と実験に用いた温度履歴

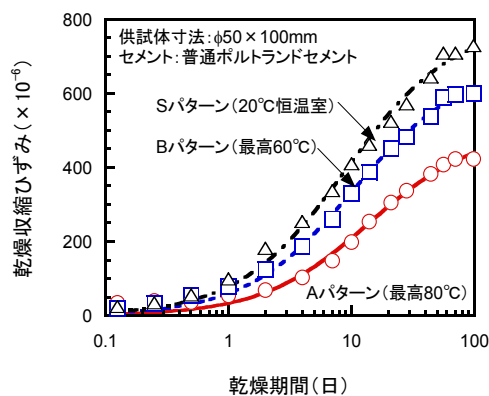


図-3 温度の異なるコンクリートの乾燥収縮ひずみ

なお、同一の条件で作製した3回の実験で得られた乾燥収縮ひずみの最終値の変動係数は5.8%であった。 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ のコア供試体で乾燥期間  $t$  日に測定される乾燥収縮ひずみは、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の供試体で乾燥期間 ( $t/4$ )日に測定される乾燥収縮ひずみとほぼ一致する<sup>4)</sup>。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 養生温度が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響

図-1は、橋梁上部工の養生時の最高温度の分布を示したものである。この図に示すように、部材厚によって異なる温度履歴を受ける。実構造物において、部材断面が厚く最も高温になるA点と、部材断面が比較的薄く温度の低い下床版のB点において測定した温度履歴を図-2に示す。図中の破線は、部材厚が1,300mmのA点および250mmのB点において測定された結果である。断面が厚くなる箇所では、80°Cを超える高温環境にさらされることが分かる。図-3は、実構造物で測定された温度履歴を模した、3種類の温度履歴を与えたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を示したものである。図中

の○、□および△は、それぞれ、Aパターン、BパターンおよびSパターンの温度履歴を与えたコンクリートの結果を示している。この図より、高温で養生されたものほど、乾燥収縮ひずみが小さくなっていることが分かる。図-4は、セメントに、早強ポルトランドセメント、普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種および低熱高炉セメントB種を用いたコンクリートの養生開始までの積算温度と、乾燥収縮ひずみの最終値との関係を示したものである。ただし、乾燥収縮ひずみの最終値は、乾燥収縮ひずみと乾燥期間の関係を次式に示される双曲線により回帰し、求めたものである。

$$\varepsilon_{sh}(t) = \frac{\varepsilon_{sh\infty} \cdot t}{\beta + t} \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon_{sh}(t)$ は、乾燥期間  $t$ (日)における乾燥収縮ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )で、 $\varepsilon_{sh\infty}$ は、乾燥収縮ひずみの最終値 ( $\times 10^{-6}$ )で、 $\beta$ は、乾燥収縮ひずみの経時変化を表す項である。

また、乾燥開始までの積算温度  $M$ は次式で与えられるものである。

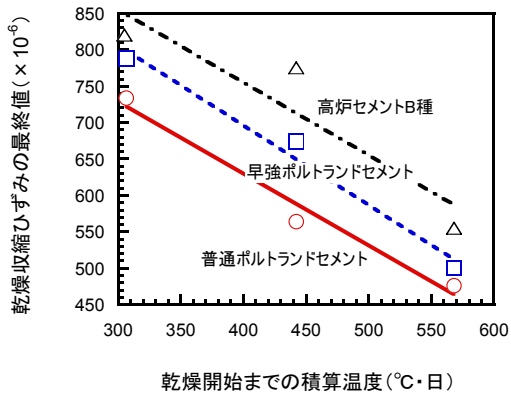


図-4 乾燥開始までの積算温度と乾燥収縮ひずみの最終値の関係

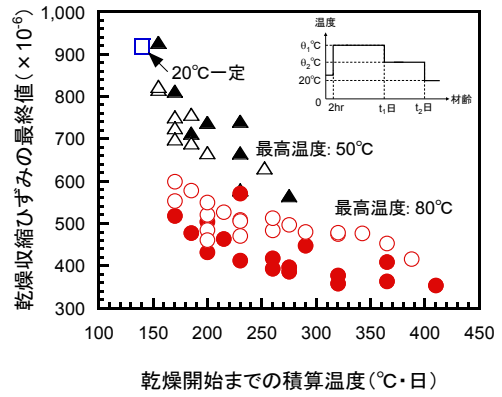


図-5 温度履歴の違いが乾燥開始までの積算温度と乾燥収縮ひずみの最終値の関係に及ぼす影響

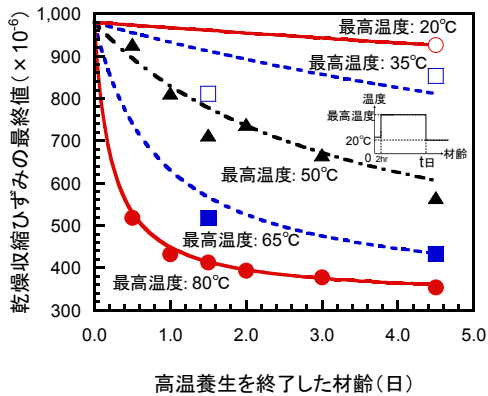


図-6 乾燥収縮ひずみの最終値と高温養生を終了した材齢の関係

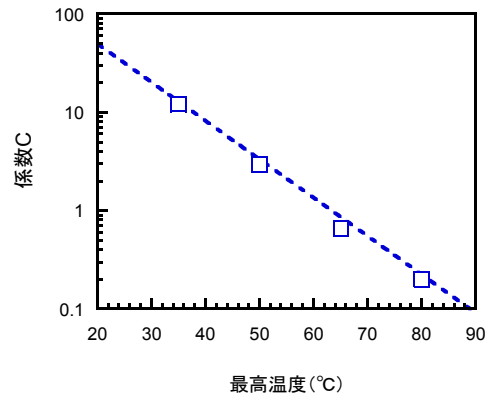


図-7 養生時の最高温度と係数 C の関係

$$M = \sum_{z=1}^Z \theta_z \quad (2)$$

ここに、 $M$  は積算温度(°C・日)で、コンクリートの平均養生温度 $\theta_z$ (°C)を材齢 $Z$ 日まで加算したものである。

いずれのセメントを用いた場合にも、乾燥収縮ひずみの最終値と積算温度との関係は、線形になっているように考えられる。一方、図-5は、様々な温度履歴を与えたコンクリートの乾燥収縮ひずみの最終値と乾燥開始までの積算温度の関係を示したものである。図中の□は、20°C一定の条件で養生を行ったコンクリートの結果である。▲および△は、最高温度が50°Cの様々な温度履歴を与えたコンクリートの結果で、●および○は、最高温度が80°Cの様々な温度履歴を与えたコンクリートの結果である。▲および●は、図中に示す温度履歴で $\theta_1$ (材齢2時間~ $t_1$ 日の温度) >  $\theta_2$ (材齢 $t_1$ 日~ $t_2$ 日の温度)となるような材齢の初期に高温で養生を行った結果で、△および○は、 $\theta_1 < \theta_2$ となるような養生の後半に高温で養生を行った結果である。同じコンクリートで積算温度が同じであっても、養生中の最高温度や、高温で養生を行う時期が異なる、すなわち、温度履歴が異なる場合には、乾燥収縮ひずみの最終値も異なっている。同じ積算温度

であっても、養生中の最高温度が高いものほど、乾燥収縮ひずみの最終値が小さくなる傾向になっている。とくに、養生初期に80°Cの高温で養生を行ったものの乾燥収縮ひずみの最終値が小さくなっている。

### 3.2 高温での養生期間が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響

図-6は、打込み後2時間後から35°C、50°C、65°Cおよび80°Cの高温で養生を所定の期間行った後、20°Cで養生を行ったコンクリートの乾燥収縮ひずみの最終値と高温養生を終了した材齢との関係を示したものである。この図より、養生時の最高温度が高いものほど、短い高温養生で乾燥収縮ひずみの最終値は小さくなることが分かる。また、比較的低い温度で養生を行った場合にも、温度を長く保持することで、高い温度で短い期間養生したのと同じ効果が得られていることが分かる。図中の曲線は、式(3)の $A$ 、 $B$ および $C$ を未定係数として、回帰し求めたものである。なお、乾燥開始時材齢が遅くなれば、乾燥収縮ひずみは小さくなる<sup>9)</sup>と言われていることから、式(3)は、いずれの温度で養生を行ったコンクリートも、養生期間が無限大になれば、乾燥収縮ひずみの最終値は同じとなると仮定して求めたもので、 $A$ および $B$ は、いずれの最高温度の場合でも同じ値になるように回帰を行っている。

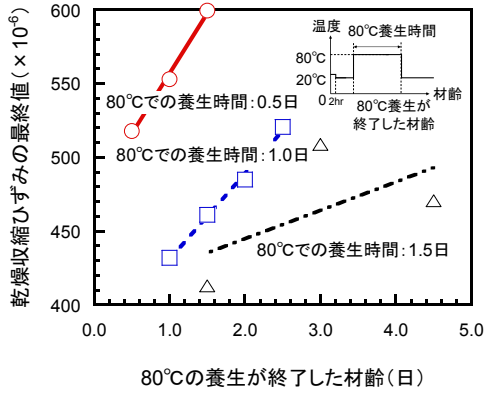


図-8 高温養生を行う材齢および時間が乾燥収縮ひずみの最終値に及ぼす影響

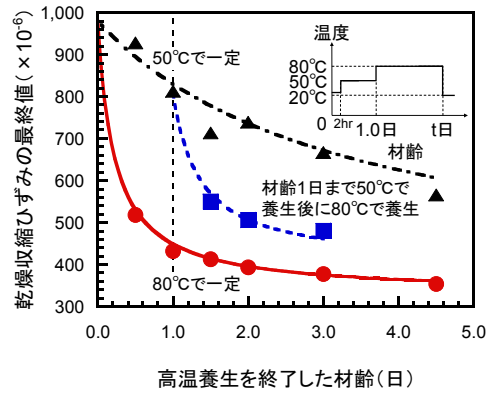


図-9 材齢1日より高温で養生を行った場合の乾燥収縮ひずみの最終値

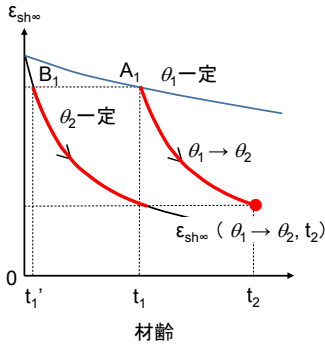


図-10 (1)のモデル

$$\varepsilon_{sh\infty}(t) = A - \frac{B \cdot t}{C + t} \quad (3)$$

ここに、 $\varepsilon_{sh\infty}(t)$ は、材齢  $t$  日まで高温で養生を行った場合の乾燥収縮ひずみの最終値である。

式(3)を用いた回帰によって得られた未定係数  $C$  と養生時の最高温度の関係を図-7 に示す。図中の点線は、以下の式の  $D$  および  $E$  を未定係数として回帰し求めた曲線である。

$$C(\theta) = D \cdot e^{-E \cdot \theta} \quad (4)$$

ここに、 $C(\theta)$ は、最高温度  $\theta$ (°C)で養生を行った場合の係数である。

式(4)に示される曲線は、係数  $C$  と養生時の最高温度  $\theta$ (°C)との関係とよく一致していることが分かる。また、図-6 中の曲線は、式(3)および式(4)によって実験結果を回帰して求めたものであるが、実験値の傾向とよく一致している。20°C以上で養生した場合の乾燥収縮ひずみの最終値は、式(3)および式(4)によって表されると思われる。

図-8 は、高温で養生された時期が乾燥収縮ひずみの最終値に及ぼす影響を示したものである。図中の○、□ および△は、それぞれ、80°Cで0.5日間、1.0日間および1.5日間養生を行った結果である。図の横軸は80°Cでの養生が終了した材齢を示している。高温で同じ時間養生

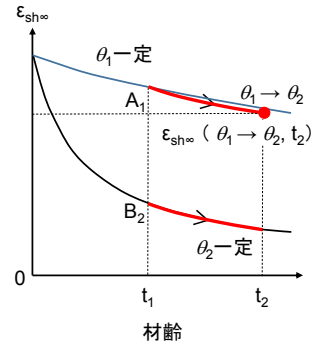


図-11 (2)のモデル

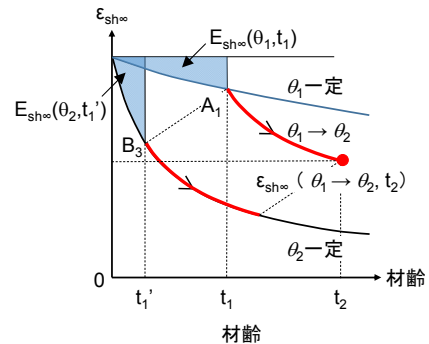


図-12 (3)のモデル

された場合でも、高温で養生される時期が遅くなると、乾燥収縮ひずみの最終値は大きくなる傾向にあることが分かる。80°Cでの養生時間が1.5日のデータでは、幾分ばらつきが大きくなっているように見えるが、 $450 \times 10^{-6} \times 5.8\% \approx 26 \times 10^{-6}$  程度の変動が見込まれることを考慮すれば、養生時間が1.5日のデータも概ね同様の傾向を示していると考えられる。

### 3.3 2つの温度で養生されたコンクリートの乾燥収縮ひずみの最終値

図-9 は、図中の温度履歴のように材齢1日まで50°Cで養生を行った後、80°Cで養生を行ったコンクリートの乾燥収縮ひずみの最終値と高温養生を終了した材齢との関係を、図-6 に示した材齢2時間から50°C一定または80°C一定で養生を行ったものと、比較示したものであ

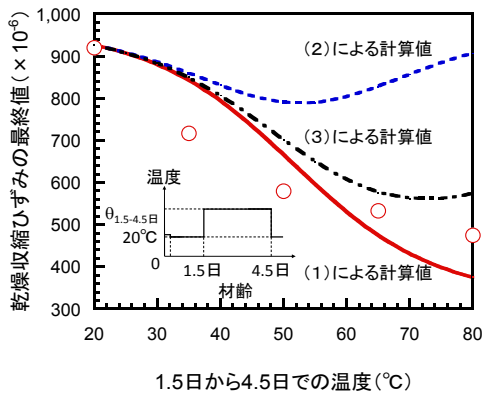


図-13 計算値と実験値との比較(初期温度 20°Cの場合)

る。図中の■は、材齢 1 日まで 50°C で養生を行った後、80°C で養生を行った結果を示している。▲および●は、それぞれ、図-6 に示した材齢 2 時間から 50°C および 80°C で養生を行ったものの結果を示している。この図より、初期に 50°C で養生を行った後、80°C で養生を行ったものの乾燥収縮ひずみの最終値は、50°C 一定で養生を行ったものと 80°C 一定で養生を行ったもの中間に位置することが分かる。

材齢 1 日まで温度 50°C で養生を行い、その後、80°C で養生を行ったコンクリートの乾燥収縮ひずみの最終値は、図-9 中の青点線で示されるようなモデルが考えられる。そこで、材齢  $t_1$ (日)まで温度  $\theta_1$ (°C)で養生を行い、その後、材齢  $t_2$ (日)までから  $\theta_2$ (°C)で養生を行ったコンクリートの乾燥収縮ひずみの最終値について、以下の 3 つのモデルの検討を行った。

(1) 曲線が水平に移動するモデル

図-10 に示すように、温度  $\theta_1$  で材齢  $t_1$  日まで養生を行い、 $A_1$  点に達した後に、温度  $\theta_2$  で養生を行った場合の乾燥収縮ひずみの最終値は、温度  $\theta_2$  一定で養生を行った場合の  $A_1$  点と同じ乾燥収縮ひずみの最終値である  $B_1$  点からの曲線と、平行な曲線上を移動すると仮定する。

(2) 曲線が上下に移動するモデル

図-11 に示すように、温度  $\theta_1$  で材齢  $t_1$  日まで養生を行い、 $A_1$  点に達した後に、温度  $\theta_2$  一定で養生を行った場合と同じ材齢である  $B_2$  点からの曲線と、平行な曲線上を移動すると仮定する。

(3) 乾燥収縮ひずみの最終値の低減量の総和が等しい位置に移動するモデル

図-12 に示すように、温度  $\theta_1$  で材齢  $t_1$  日まで養生を行い、 $A_1$  点に達するまでの乾燥収縮ひずみの最終値の低減量の総和が等しくなる点、すなわち、図中の  $E_{shoc}(\theta_1, t_1)$  で示す面積が等しくなる  $B_3$  点からの曲線と、平行な曲線上を移動すると仮定する。

図-13 は、材齢 1.5 日まで 20°C で養生を行った後に、

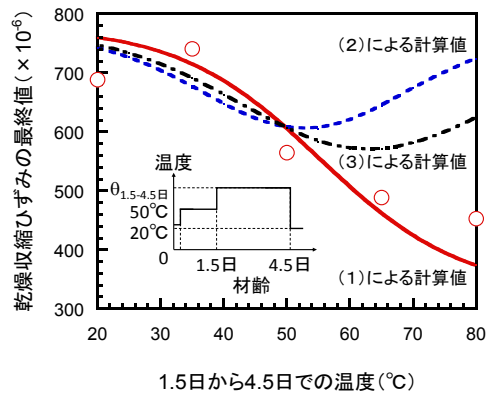


図-14 計算値と実験値との比較(初期温度 50°Cの場合)

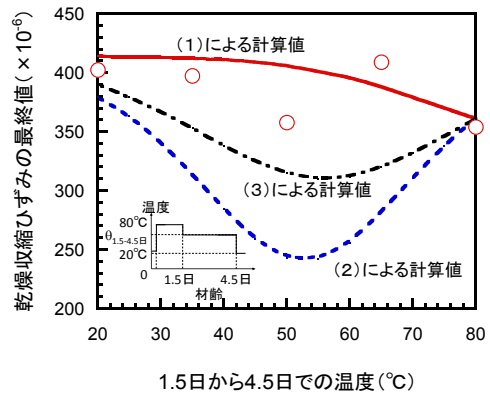
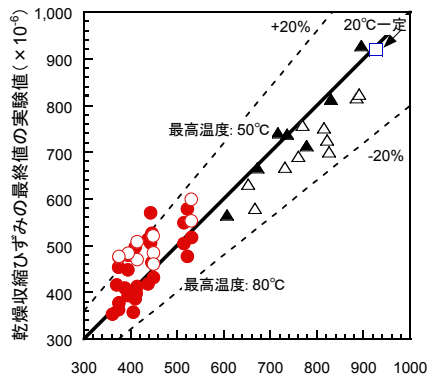


図-15 計算値と実験値との比較(初期温度 80°Cの場合)

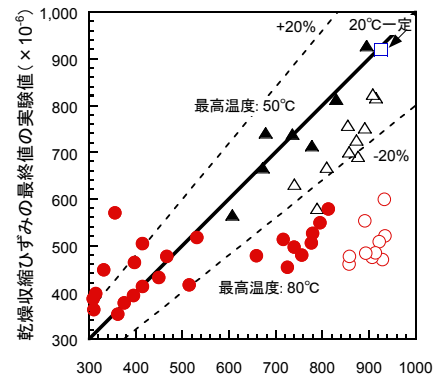
材齢 4.5 日まで 20°C、35°C、50°C、65°C および 80°C で養生を行ったコンクリートの乾燥収縮ひずみの最終値と、(1)、(2) および (3) のそれぞれのモデルにより計算した計算値とを比較し示したものである。各モデルでの計算値は、(1) < (3) < (2) の順になっている。(2) のモデルでは、1.5 日から 4.5 日での養生温度が高温になると、実験値と大きく外れてしまうことが分かる。一方、(1) および (3) のモデルでは、概ね実験値と近い傾向を示している。図-14 は、材齢 1.5 日まで 50°C で養生を行った後に、材齢 4.5 日まで 20°C、35°C、50°C、65°C および 80°C で養生を行ったコンクリートの乾燥収縮ひずみの最終値と、各モデルにより計算した計算値とを比較し示したものである。各モデルによる計算値は、1.5 日以降の養生温度が 1.5 日までの養生温度である 50°C よりも高い場合には、(1) < (3) < (2) の順になっているのに対し、50°C よりも低い場合には、(2) < (3) < (1) と逆順になっている。1.5 日まで 50°C で養生を行った場合には、(2) のモデルによる計算値は、50°C を超えると実験値と異なる傾向を示している。一方、(1) および (3) のモデルによる計算値は、実験結果と近い傾向となっている。また、図-15 に示す材齢 1.5 日まで 80°C で養生を行った後に、材齢 4.5 日まで 20°C、35°C、50°C、65°C および 80°C で養生を行ったコンクリートの乾燥収縮ひずみの最終値の各モデルによる計算値は、(2) < (3) < (1) の順になっている。○で示した実験値と比較すると、





(1)による計算値(×10<sup>-6</sup>)

図-16 (1)のモデルの精度



(2)による計算値(×10<sup>-6</sup>)

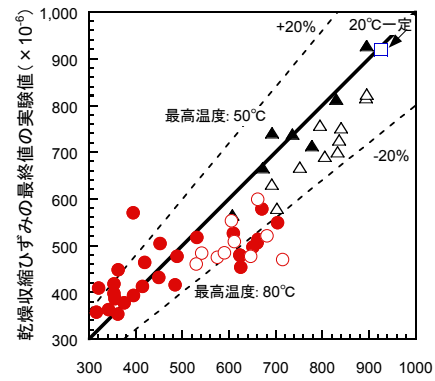
図-17 (2)のモデルの精度

(1)および(3)のモデルによって計算された計算値は、実験結果と近い傾向を示しているのに対し、(2)による計算値は、実験結果とは異なった傾向となっている。

図-16、図-17 および図-18 は、それぞれ、図-5 に示した種々の温度履歴を与えたコンクリートの乾燥収縮ひずみの実験値と(1)、(2)および(3)のモデルにより計算した計算値とを比較し示したものである。図-16 に示す(1)のモデルにより計算した計算値は、実験値と概ね一致している。一方、図-17 に示す(2)のモデルにより計算した計算値は、とくに後半に高温で養生を行った場合に、実験値と一致していないことが分かる。また、図-18 に示す(3)のモデルにより計算した計算値は、(1)に比べると実験値と計算値の差は大きいですが、概ね実験値に近い計算結果を示していると思われる。(1)のモデルが、最も実験値に近い傾向を示した。しかし、図-8 に示すように大きくなるのに対し、高温で養生を行った時間が同じ場合には、高温で養生を行った材齢が遅いほど、乾燥収縮ひずみの最終値の実験値は、(1)のモデルでは、同じ計算値になる。このことから、(1)のモデルが、乾燥収縮ひずみに及ぼす温度履歴の影響を完全に表現できていないため、今後さらなる検討が必要である。

#### 4. まとめ

材齢5日までの養生時の温度履歴が、コンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響について検討を行った。養生時の最高温度が高いものほど、乾燥収縮ひずみの最終値が小さくなる。とくに、養生時の最高温度が高いものほど、短い時間で乾燥収縮ひずみの最終値は小さくなる。また、養生の初期に高温で養生を行ったものほど、乾燥収縮ひずみは小さくなる。また、2段階で養生温度が変化する場合の乾燥収縮ひずみの最終値について、3種類のモデルの検討を行った。その結果、曲線が水平に移動するモデル、および、乾燥収縮ひずみの最終値の低減量と材齢との積が等しい位置に移動するモデルが実験値に



(3)による計算値(×10<sup>-6</sup>)

図-18 (3)のモデルの精度

近い傾向を示した。

#### 参考文献

- 1) 鎌田健太郎, 菅田紀之, 佐藤克俊: 高強度コンクリートの強度および収縮に及ぼす初期高温履歴の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 2, pp. 721-726, 2001. 6
- 2) 綾野克紀, 藤井隆史, 平喜彦: コンクリートの乾燥収縮ひずみの予測に関する研究, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.4, pp.421-437, 2013.12
- 3) 藤井隆史, 長嶋聡, 綾野克紀: 養生時の温度がコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響, 平成 25 年度土木学会全国大会年次学術講演会概要集, V-607, 2013. 9
- 4) 小林仁, 先本勉, 藤井隆史, 綾野克紀, 宮川豊章: 乾燥収縮ひずみに与える部材寸法の影響, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 69, No. 4, pp. 377-389, 2013. 11
- 5) 半坂昌広, 寺西浩司, 森下圭輔: コンクリートの乾燥収縮に対する外的要因の影響 (その 3. 乾燥開始材齢の影響), 日本建築学会大会学術講演概要集 (関東), pp.439-440, 2006. 9