

論文 コンクリートの自己収縮ひずみ量の予測に関する一考察

新井 淳一*1・仙場 亮太*1・尾内 陽介*2・溝淵 利明*3

要旨: コンクリートの自己収縮によって生じるひずみ量の予測式は、有効材齢で評価する式が提案されている。有効材齢で評価を行う場合には、自己収縮ひずみの発生速度の違いを考慮することが困難である。このため、温度を制御した高炉セメントを使用したコンクリートの自己収縮ひずみに関する実験を行って、経験温度を考慮した材齢による自己収縮ひずみの予測式を定式化することを試みた。この結果、高炉セメントを使用したコンクリートの自己収縮ひずみの発生には停滞期間があることが確認され、この期間を考慮することによって材齢による自己収縮ひずみの予測の可能性を見いだした。

キーワード: 自己収縮ひずみ, 自己収縮ひずみ停滞域, 温度ひずみ, 温度応力シミュレーション, PSO

1. はじめに

我が国における社会インフラの多くは、今後急速な老朽化が見込まれており、2013年をメンテナンス元年と位置付けて、社会インフラの維持管理・更新を主体とした政策がとられている。一方で、災害リスクの回避や経済活性化のために必要な社会インフラ整備は必要不可欠であることから、ライフサイクルコストの低減を目的とした高度な耐久性能を有する構造物が求められている。

このため、二酸化炭素や塩化物イオンの侵入抑制を目的とした水セメント比の小さいコンクリートの適用が多くなった。しかし、セメント量の多いコンクリートは、水和反応時に高温となるため温度降下に伴って生じる温度ひずみや自己収縮ひずみが増加し、ひび割れが発生しやすくなるリスクがあり、一旦ひび割れが発生すると劣化因子の侵入が容易となり、早期に構造物の要求性能を満足することはできなくなる。このような背景から、近年ではコンクリートのひび割れを抑制する必要性が高まっており、ひび割れの発生を予測する解析方法¹⁾²⁾の高度化が求められている。

これまで、水セメント比の大きいコンクリートにおける自己収縮ひずみは、乾燥収縮ひずみと比較して影響が小さかったことから、事実上無視されることが多かった。しかし、最近では水セメント比の小さいコンクリートを適用する事例が増えており、自己収縮ひずみの予測に関する研究成果が報告³⁾⁷⁾されてきている。寺元ら⁷⁾は、同配合のコンクリート自己収縮ひずみは、有効材齢を用いて評価した場合、最高到達温度の高低にかかわらず一定値になると報告している。しかし、材齢で評価する場合には、自己収縮の進行速度は最高到達温度が高いほど速くなり、有効材齢で評価する式では考慮することが難しい。このため、本研究ではコンクリート温度を制御して

温度ひずみが発生しない条件下における自己収縮ひずみ量から、コンクリート温度と自己収縮ひずみの発生速度の関係を確認して定式化を試みた。また、実際の温度履歴を模擬した場合に発生するひずみを利用して、予測式の検討を行った。

2. 実験概要

2.1 自己収縮ひずみの測定方法

自己収縮ひずみの測定は、写真-1 および図-1 に示す温度応力シミュレーション装置 (Thermal Stress Testing Machine, 以後 TSTM 試験法と称す) を用いた。TSTM 試験法は、型枠面に配置されている通水パイプの水温をコントロールして、コンクリート温度を強制的に設定温度に制御することができる装置⁵⁾である。本試験法と日本コンクリート工学会の自己収縮ひずみ試験法による測定値の影響はないこと昨年度に報告を行った。

また、供試体に乾燥収縮が生じないようにするために、型枠の内面にビニールシートを設置してコンクリートを打ち込んだ後にアルミテープを用いて封緘養生とし、実験を行った。

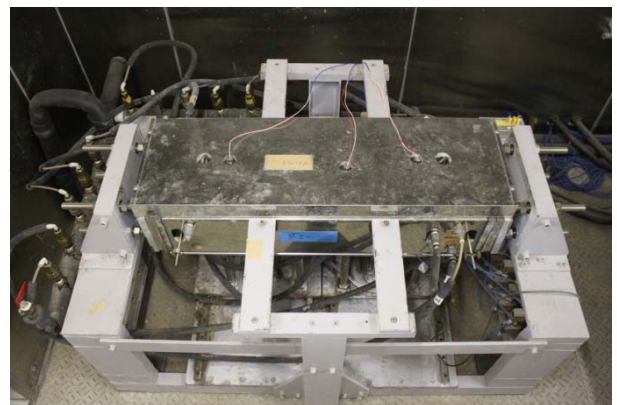


写真-1 TSTM 無拘束試験装置

*1 法政大学大学院 デザイン工学研究科都市環境デザイン工学専攻 (学生会員)

*2 法政大学 デザイン工学部都市環境デザイン工学科

*3 法政大学 デザイン工学部都市環境デザイン工学科 教授 博士 (工学) (正会員)

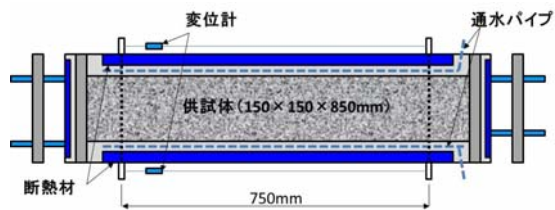


図-1 TSTM 試験装置による測定方法概念図 (平面図)

2.2 実験水準

実験は表-1 に示すように、コンクリート温度を一定にした状態および最高到達温度 50℃と設定した場合 (打込み温度 20℃) の温度履歴をトレースした際のひずみ量を測定した。

なお、温度履歴は図-2 に示すような壁状構造物の中心位置において最高到達温度が 50℃となるように外気温を設定して、図-3 に示すような温度履歴を算出し、TSTM 試験装置の設定温度とした。

2.3 配合

今回の実験に用いた配合は、全て同じとした。また、セメント種別は高炉セメント B 種とした。表-2 に本検討での配合を示す。

表-1 TSTM 試験法による自己収縮ひずみ測定結果

実験条件	水準数	実験水準
温度一定	5水準	20℃, 30℃, 40℃, 50℃, 60℃
温度履歴	1水準	打込み温度20℃, 最高到達温度50℃

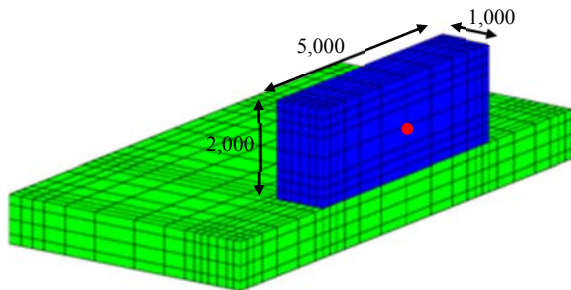


図-2 水和温度履歴算出用解析モデル

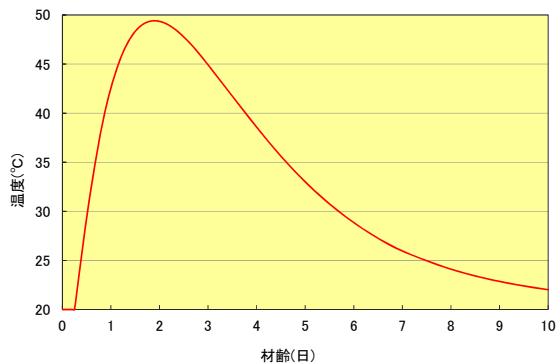


図-3 解析モデルによる水和温度算出結果

3. 実験結果

3.1 温度一定条件下における自己収縮ひずみ測定結果

コンクリート温度を一定条件下に制御した場合の自己収縮ひずみ測定結果と材齢の関係を図-4 に示す。なお、コンクリート温度を 20℃に制御した場合の実験は、設定した実験期間が短かったことから、実験を 2 回行った。

材齢と自己収縮ひずみの関係から、コンクリート温度が高くなるほど自己収縮ひずみの発生速度が速くなることが確認できる。また、20℃に制御した場合の自己収縮ひずみを除いて、自己収縮ひずみの発生には 90~100μ で停滞する区間があることが確認できる。

3.2 温度履歴を模擬したひずみ測定結果

設定したコンクリート温度と供試体の温度計測結果を図-5 に、ひずみ量の計測結果を図-6 に示す。

コンクリート温度は、設定した温度を再現する結果となった。計測したひずみは、温度ひずみと自己収縮ひずみが複合して発生したものであるため、コンクリート温度が上昇している際には圧縮側、温度降下に伴って収縮側のひずみが生じる結果となった。

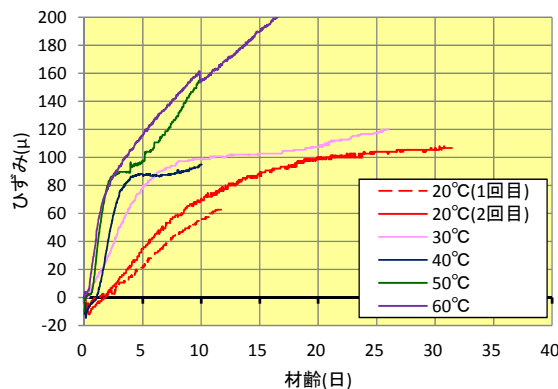


図-4 温度一定条件下における自己収縮ひずみ計測結果

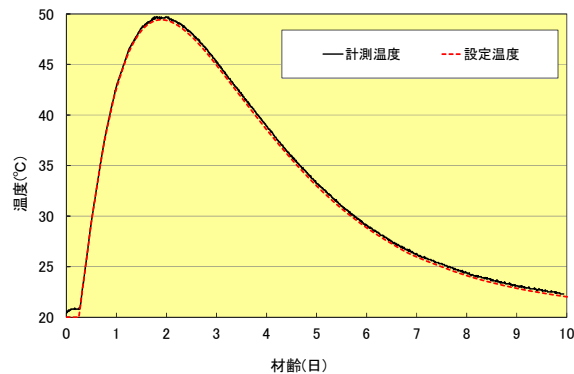


図-5 温度設定値と温度履歴計測結果との比較

表-2 供試体の配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スラブの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤 (C×%)	AE剤 (C×%)
20	10±2.5	4.5±1.0	50	44	154	308	798	1043	1.0	0.005

4. 考察

4.1 自己収縮ひずみ予測式の定式化

温度一定条件下における自己収縮ひずみは、停滞する区間があることが確認された。高橋ら⁸⁾によると、コンクリートの自己収縮が停滞する傾向は、セメントと水とが反応して生じた水和生成物と密接な関係があると報告している。まず、間隙相と石膏との反応によって生じたエトリンガイトの成長圧によってペースト内部に膨張力が働いたため、自己収縮ひずみは一時的に停滞傾向となる。その後、毛細管張力などにより圧縮応力を受けていたエトリンガイト結晶が、モノサルフェートへの転化や再結晶化などにより空隙が生じる。この空隙がファンデルワールス力によって閉じるため、再び収縮傾向が見られるとしている。

今回の実験結果も同様の傾向が確認されたため、予測式の定式化において図-7に示すような変曲点を設定して、材齢を区間①と②に分類して自己収縮ひずみの予測式を定式化することを試みた。

予測式は河野らの研究⁹⁾を参考に式(1)~(3)を用いることとした。

$$\epsilon_{as} = \epsilon_{as1} + \epsilon_{as2} \quad (1)$$

ここに、

$$\begin{aligned} \epsilon_{as} &: \text{自己収縮ひずみ } (\mu) \\ \epsilon_{as1} &: \text{区間①の自己収縮ひずみ } (\mu) \quad (0 \leq t < t') \\ \epsilon_{as2} &: \text{区間②の自己収縮ひずみ } (\mu) \quad (t' < t) \end{aligned}$$

$$\epsilon_{as1} = 1 / \{1 + \alpha \times \exp(-\alpha \times (t - t_0))\} \times \epsilon_{\infty} \times \{1 - \exp(-A \times (t - t_0)^B)\} \quad (2)$$

ここに、

$$\begin{aligned} \epsilon_{\infty} &: \text{区間①の自己収縮ひずみ終局値 } (\mu) \\ t &: \text{材齢 (日)} \\ t_0 &: \text{凝結始発材齢 (日)} \\ \alpha, A, B &: \text{定数} \end{aligned}$$

$$\epsilon_{as2} = 1 / \{1 + \alpha' \times \exp(-\alpha' \times (t - t'))\} \times \epsilon_{\infty}' \times \{1 - \exp(-A' \times (t - t')^B')\} + \epsilon_{\infty} \quad (3)$$

ここに、

$$\begin{aligned} \epsilon_{\infty}' &: \text{区間②の自己収縮ひずみ終局値 } (\mu) \\ t' &: \text{変曲点の材齢 (日)} \\ \alpha', A', B' &: \text{定数} \end{aligned}$$

4.2 予測式における係数の同定

式(2)および(3)における各係数を定めるために、本研究では粒子群最適化¹⁰⁾(Particle Swarm Optimization, 以降 PSO と称す)と呼ばれる逆解析手法を適用することとした。PSO とは、多次元空間を多数の粒子が移動して目的関数の最適値を得る解を探索するアルゴリズムである。図-8に PSO による同定アルゴリズムの処理手順を示す。PSO は目的関数の微分値の情報を必要としないため、目的関数値を与えることによって最適値となる解を探索することができる。このため、自己収縮ひずみの終局傾向が確認できないデータなども計測値と合致する最適値を同定することが可能である。

今回は、温度一定条件下で各区間の自己収縮ひずみ計

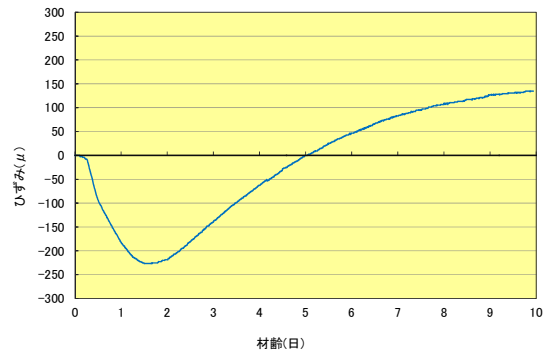


図-6 温度履歴時のひずみ計測結果

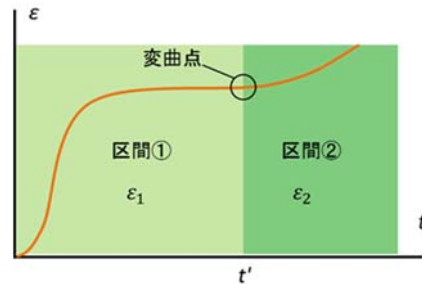


図-7 変曲点を考慮した区間設定の概念図

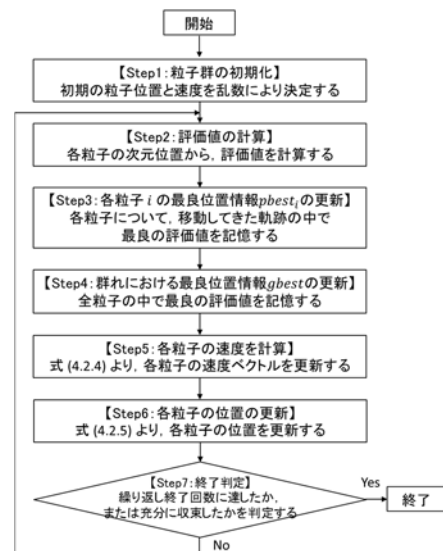


図-8 PSOによる同定アルゴリズムの処理手順

表-3 各温度における変曲点材齢と終局ひずみ

設定温度 (°C)	変曲点材齢 (日)	区間①の終局ひずみ(μ)	区間②の終局ひずみ(μ)	終局ひずみ合計(μ)
20	31.00	88.9	—	88.9
30	15.70	101.8	32.7	134.5
40	7.25	87.5	41.4	128.9
50	3.95	88.3	57.9	146.2
60	2.60	92.9	70.0	162.9

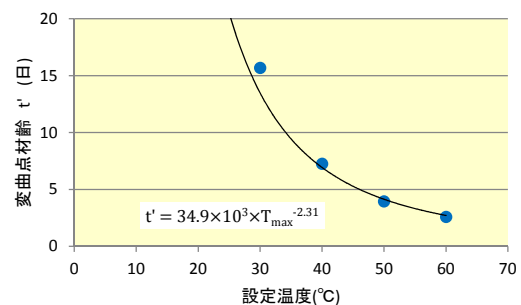


図-9 変曲点材齢と設定温度の関係

測値と式(2)または(3)によって算出された自己収縮ひずみ予測値との残差平方和 S (式(4))¹⁾が最小となる定数を同定した。なお、20℃では変曲点が確認できなかった。水和温度の影響により低温時特優の現象であるのか、計測値が変曲点まで到達していないためであるのか今回の実験だけでは判断が困難であることから、後者の現象であると仮定して、計測期間である31日目を変曲点と設定した。

表-3にPSOによって同定した各温度における変曲点材齢と終局ひずみを示す。また、PSOにより同定した各係数を図-9~15に、PSOにより同定した結果の例を図-16示す。

終局ひずみは、最高到達温度の大きさに拘わらず一定になるとされているが、本実験では20℃で89μ、30~50℃で129~146μ、60℃で163μとなった。60℃では自己収縮ひずみが収束していない傾向であることから、自己収縮ひずみ以外のひずみが生じている可能性、例えば急激な温度上昇に伴う空隙構造の変化などが影響しているのではないかとと思われる。

$$S = \sum_{i=1}^n (\epsilon_{si}' - \epsilon_{si})^2 \quad (4)$$

ここに、

S : 残差平方和

ϵ_{si}' : 計測した自己収縮ひずみ (μ)

ϵ_{si} : 算出した自己収縮ひずみ (μ)

変曲点の材齢は、図-9に示すように設定温度に応じた関係が確認された。変曲点材齢と設定温度の関係を式(5)に示す。

$$t' = 34.9 \times 10^3 \times T_{max}^{-2.31} \quad (5)$$

区間①における係数 α は設定温度に拘わらず概ね一定となり、平均で6.88となった。また、係数AおよびBは設定温度に応じた関係が確認された。設定温度との関係を式(6)および(7)に示す。

$$A = 0.0184 \times T_{max} - 0.327 \quad (6)$$

$$B = 0.0342 \times T_{max} + 0.533 \quad (7)$$

区間②における係数 α' および A' は、終局していないと思われる20℃および60℃を除くと、設定温度に拘わらず概ね一定となり、平均で α' は7.19、 A' は0.0387である。係数B'は設定温度に応じた関係が確認された。設定温度との関係を式(8)に示す。

$$B' = 0.0225 \times T_{max} + 0.71 \quad (8)$$

4.3 温度履歴時の自己収縮ひずみの再現

温度一定条件下の実験結果より同定した自己収縮ひずみの予測式を利用して、温度履歴時の自己収縮ひずみ量を再現することを試みた。予測式は温度一定条件下のものであることから、一定の材齢期間における最高温度履歴に応じて Step-By-Step 法によって算出することとした。

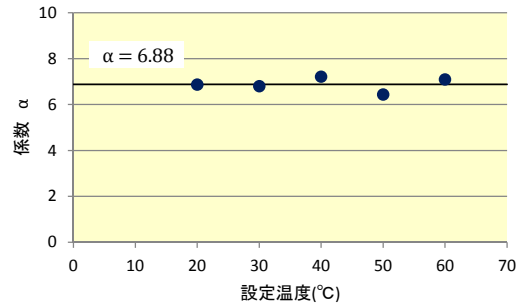


図-10 区間①における係数 α

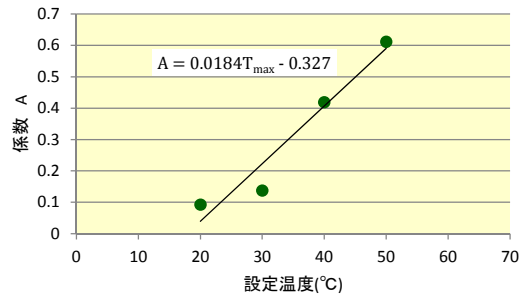


図-11 区間①における係数 A

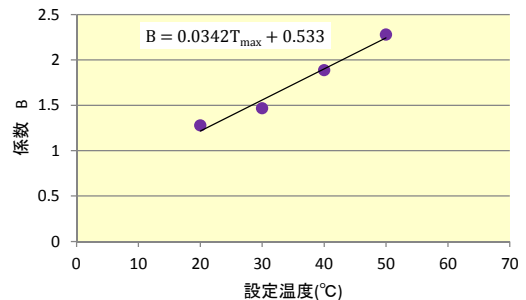


図-12 区間①における係数 B

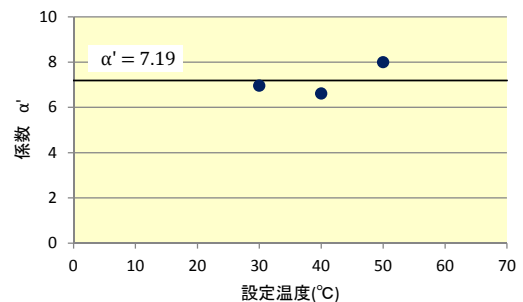


図-13 区間②における係数 α'

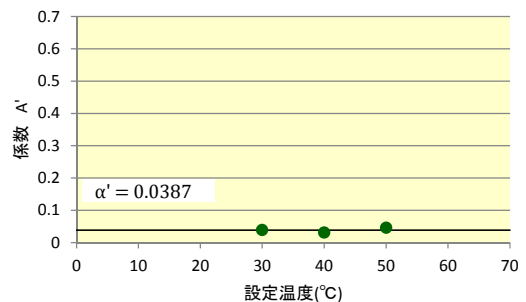


図-14 区間②における係数 A'

Step-By-Step 法とは図-17 に示すように、温度履歴を異なる経過時間 t_i を有する一定養生温度 $dT(t_i)$ の集合によって構成されていると考え、自己収縮ひずみは式(9)に示すように、それぞれの一定養生温度 $dT(t_i)$ のもとで生じた自己収縮ひずみの総和として表現する方法である。

$$\epsilon_{as}(t) = \sum \varphi(t, t_i) dT(t_i) \quad (9)$$

ここに、

- $\epsilon_{as}(t)$: 経過時間 t における自己収縮ひずみ
- $\varphi(t, t_i)$: 自己収縮関数 $T(t_i)$ が作用した場合の経過時間 t における自己収縮ひずみ
- $T(t_i)$: 材齢 t_i における養生温度

また、自己収縮ひずみの予測式は、日本コンクリート工学会より式(10)~(14) (以降、JCI 予測式と称す) が提案されている²⁾。これは、有効材齢を用いて評価する方法であり、材齢と自己収縮ひずみの関係を確認するためには、温度履歴から材齢を算出し直す必要がある。今回の材齢を用いた自己収縮予測式の推定結果と JCI 予測式による推定結果を図-18 に示す。

$$\epsilon_{sh}(t_e) = \eta_c \times \epsilon_{sh,\infty} \times \beta_{sh}(t_e) \quad (10)$$

$$\epsilon_{sh,\infty} = 2350 \exp\{-5.8(W/C)\} + 80 \times \{1 - \exp[-1.2 \times 10^{-6} \times (T_{max} - 20)^4]\} \quad (11)$$

$$\beta_{sh}(t_e) = 1 - \exp\{-a_{sh}(t_e - t_{e,set})^{b_{sh}}\} \quad (12)$$

$$a_{sh} = 3.7 \exp\{-6.8 \times (W/C)\} \times (0.060 T_{max} - 0.20) \quad (13)$$

$$b_{sh} = 0.25 \exp\{2.5 \times (W/C)\} \times (-0.0075 T_{max} + 1.15) \quad (14)$$

ここに、

- t_e : 有効材齢 (日)
- $t_{e,set}$: 凝結の始発 (有効材齢 (日))
- $\epsilon_{sh}(t_e)$: 有効材齢 t_e における自己収縮ひずみ量
- $\epsilon_{sh,\infty}$ (μ)
- $\beta_{sh}(t_e)$: 終局自己収縮ひずみ量 (μ)
- : 有効材齢 t_e における自己収縮ひずみの進行量を表す関数
- η_c : セメント種類に関する係数 (1.0)
- W/C : 水セメント比 (%)
- T_{max} : 最高到達温度 (°C)
- a_{sh}, b_{sh} : 自己収縮進行速度に関する係数

JCI 予測式によって算出された材齢 9 日の自己収縮ひずみ量は 165μ となり、本研究で予測した材齢 9 日の自己収縮ひずみ量 83μ よりも大きく上回る結果となった。これは、JCI 予測式を用いてひび割れの予測解析を行った場合、かなりの安全率を見込んだ評価を行うこととなる。

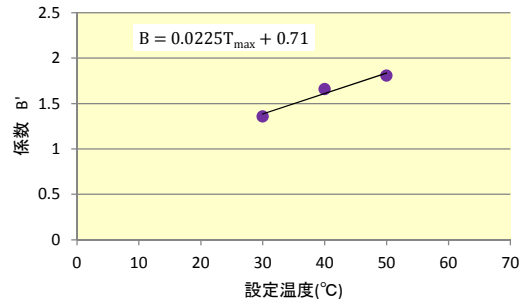


図-15 区間②における係数 B'

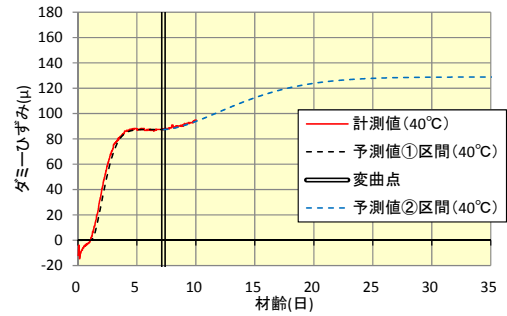


図-16 PS0 による同定結果 (40°C)

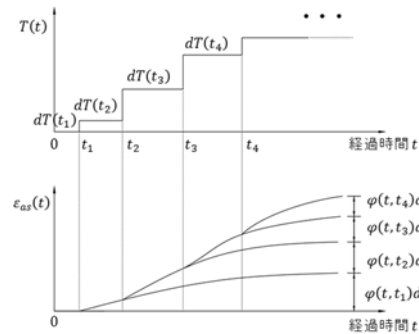


図-17 Step-By-Step 方の概念

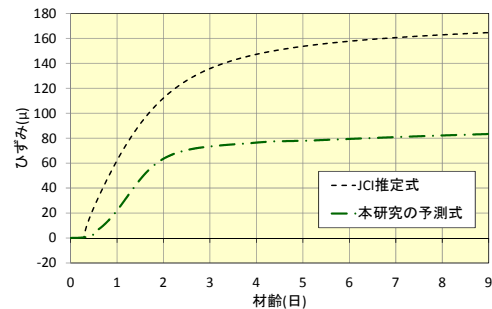


図-18 本研究の予測式と JCI 予測式による推定値

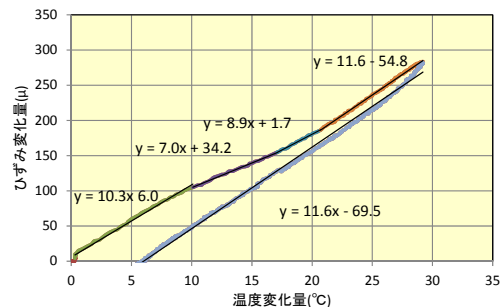


図-19 温度変化時における線膨張係数

このため、本研究による予測式の妥当性を検証するために、コンクリートの線膨張係数に計測した温度変化量に乗して算出した温度ひずみに本研究の予測式で算出した自己収縮ひずみを加えて、計測したひずみ量との比較を行った。ここで、高炉セメントを使用したコンクリートの線膨張係数は $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ が一般的である²⁾。しかし、温度履歴を模擬したひずみ測定結果より、温度変化量に対するひずみ変化量を確認すると、図-19 に示すように線膨張係数に相当する近似式の傾きは 7.0~11.6 となり、平均で 9.9 となった。この線膨張係数は自己収縮によるひずみ変化も含まれているが、暫定的に $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定した。

この結果、図-20 に示すように材齢 9 日における全ひずみの計測値 127μ に対して、本研究で予測した全ひずみ(自己収縮ひずみ予測値+ $\Delta T \times 10\mu/^{\circ}\text{C}$)は 100μ となり、計測値に近い値となることが確認された。

以上の結果より、温度一定条件下で計測した自己収縮ひずみを用いて、材齢による自己収縮ひずみ量を推定できる可能性があることが確認された。

5. まとめ

コンクリートの自己収縮ひずみ量を予測する場合に発生速度を考慮することを目的に、材齢によって評価することを試みた。

温度ひずみが生じないように制御した実験では、高炉セメントを使用したコンクリートに発生する自己収縮ひずみの発生には、温度により停滞期間があることが確認された。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの自己収縮研究委員会 報告書，2002.09
- 2) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008，2008.11
- 3) 田澤栄一，宮澤伸吾：コンクリートの自己収縮ひずみの予測法に関する研究，土木学会論文集，NO.571，V-36，pp.211-219，1997.08
- 4) 宮澤伸吾，佐藤良一，杉山淳司：高温履歴を受ける高炉セメントコンクリートの自己収縮予測式，コンクリート工学協会，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，2008
- 5) 溝渕利明，横関康祐，信田佳延：一軸拘束試験装置を用いた温度ひび割れ試験方法に関する検討，日本コンクリート工学協会，コンクリートの品質評価試験方法に関するシンポジウム論文集，pp.61-68，1998.12
- 6) 小田部裕一，鈴木康範，稲葉洋平，溝渕利明：温度応力の抑制対策に対する材料評価方法に関する一

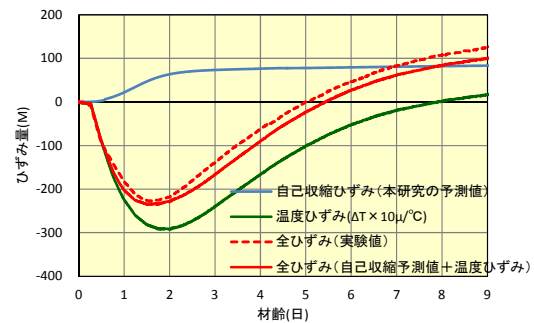


図-20 計測された全ひずみと本研究の推定値

停滞期間を考慮した自己収縮ひずみの予測値に対して JCI 予測式で算出した自己収縮ひずみは大きく上回ることが確認された。

停滞期間を考慮した自己収縮ひずみに温度ひずみ(線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定)を加算して、温度履歴を再現した際に計測したひずみと比較すると比較的近似することが確認された。

以上の結果より、温度一定条件下で計測した自己収縮ひずみを用いて、材齢による自己収縮ひずみ量を推定する可能性が確認された。今後は、 20°C に制御した場合の自己収縮ひずみの長期データを確認するとともに、 60°C に制御した場合の細孔構造の確認などを行い、予測式の高度化に努める必要があると考える。

謝辞

本研究に際して、山口大学の中村教授、江本助教には、多くの助言を頂きました。ここに謝意を表します。

考察，第 24 回コンクリート工学講演会，No.1，pp.1113-1118，2002.6

- 7) 寺元篤史：セメント系材料の水和反応に依存する体積変化に関する研究，名古屋大学大学院環境学研究科博士論文，2012
- 8) 河野政典，榊田佳寛，上西隆，荻原伸治：自己収縮の温度依存性を考慮した高強度コンクリート柱部材の初期材齢時発生応力の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，2000
- 9) 河野政典，榊田佳寛，上西隆，荻原伸治：自己収縮の温度依存性を考慮した高強度コンクリート柱部材の初期材齢時発生応力の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，2000
- 10) 進藤卓也：粒子群最適化法の動特性解析と応用，2014.3
- 11) 中村秀明，王桂萱，江本久雄，宮本文穂：Particle Swarm Optimization によるマスコンクリートの熱伝導逆解析，土木学会論文集 E，Vol.62，No.1，107-118，2006.2