

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・兄父 貴浩*2・仙場 亮太*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、20℃一定条件下および高温履歴下におけるひずみ量から定式化されている。この予測式の高精度化を図ることを目的として、自己収縮ひずみの温度依存性、自己収縮試験方法の違いによる影響、自己収縮試験測定結果と予測式の推定値との差異について検討を行った。その結果、自己収縮ひずみは温度変化に伴う影響を考慮していく必要があること、自己収縮試験方法の違いによる影響はないこと、予測式の推定値は熱膨張係数の設定値が影響して実際に生じるひずみ量よりも大きくなる傾向を確認した。

キーワード: 自己収縮ひずみ予測式, 自己収縮試験方法, 温度依存性

1. はじめに

近年の社会情勢から、コンクリート構造物には高耐久性が求められるようになってきている。これまでは、温度収縮や乾燥収縮に比べて自己収縮が小さいことから、事前のひび割れ照査では十分に考慮されていなかった。しかし、コンクリートの高強度化および高耐久化が求められるようになると、それに伴って低水セメント比のコンクリートの適用や高流動コンクリートの適用が増加した。この結果、単位セメント量が増加する傾向となり、自己収縮を無視できない場合がある。

このため、自己収縮ひずみに関する研究も数多く行われており、そのメカニズムや制御方法に関する研究成果が報告されている^{1)~6)}。例えばコンクリート標準示方書¹⁾やマスコンクリートのひび割れ制御指針²⁾では、普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種に関する自己収縮ひずみの予測式が示されている。これは、20℃条件下や高温履歴条件下における水和過程で計測したひずみから、コンクリートの温度ひずみを差し引いたものを自己収縮ひずみとして定式化したものである。ただし、温度ひずみはコンクリート硬化後の熱膨張係数を適用していることから、若材齢時の温度ひずみを十分に反映できていないのが現状である。

このため、予測式の高精度化を図ることを目的に、自己収縮ひずみの温度依存性、自己収縮試験方法の違いによる影響、自己収縮試験測定結果と予測式の推定値との差異について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 自己収縮の測定方法

自己収縮ひずみの測定方法は、日本コンクリート工学会の自己収縮研究委員会が提案している「セメントペー

スト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法」³⁾(以後、JCI試験法と称す)が一般的である。JCI試験法は、**図-1**および**写真-1**に示す100×100×400mm 供試体を20℃±2℃の条件下で実施する方法である。

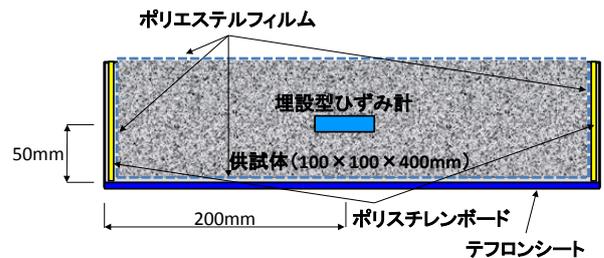


図-1 JCI試験法による測定方法概念図(縦断面)



写真-1 JCI試験法の供試体

これに対して、温度応力シミュレーション装置(Temperature Stress Testing Machine, 以後 TSTM 試験法と称す)は、**図-2**に示す150×150×850mmの供試体の温度を計測しながら、型枠面に配置されている通水パイプの水温を自動的に変化させて、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^{7)~10)}ある。

*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 博士後期課程 (学生会員)

*2 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 修士課程 (学生会員)

*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)

TSTM 試験法は、供試体に任意の拘束度を与えることができる拘束供試体と、写真-2 に示す無拘束供試体で構成される装置である。今回の実験では、無拘束装置を利用して実験を行った。

今回は TSTM 試験法による測定を基本として、JCI 試験法との測定方法の違いについても検討した。JCI 試験法は、材齢 24 時間まで雰囲気温度 20℃で養生を行い、脱枠後に乾燥防止用のアルミ箔粘着テープ(厚さ 0.05mm)でシールをして、各設定温度条件下で埋設型ひずみ計を利用して自動計測を行った。TSTM 試験法は、無拘束試験装置の内部にコンクリートを打ち込み、封緘養生下で各設定温度にコンクリート温度を制御して、変位計による自動計測を行った。また、無拘束試験装置を利用して、通水パイプに水を通水しない状態で 20℃の恒温室で断熱に近い状態における自己収縮ひずみの計測も行った。

2.2 試験水準

試験水準は、表-1 に示すように TSTM 試験法はコンクリート温度を 20℃、40℃および 60℃、JCI 試験法は雰囲気温度を 20℃および 60℃とした。

また、強制的に温度を制御しない状態の自己収縮ひずみの測定も TSTM 試験法で行った。

2.3 配合

今回の実験に供する供試体の配合は、全て同じ配合とした。また、セメント種別は高炉セメント B 種とした。表-2 に供試体の配合を示す。

2.3 既往の自己収縮ひずみ予測式

マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008²⁾の参考資料として示されている、高炉セメント B 種を使用したコンクリートの自己収縮ひずみ予測式⁴⁾⁵⁾を式(1)～式(5)に示す。

$$\varepsilon_{sh}(t_e) = \eta_c \varepsilon_{sh,\infty} \beta_{sh}(t_e) \quad (1)$$

ここに、

$\varepsilon_{sh}(t_e)$: 有効材齢 t_e における自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

t_e : 有効材齢 (日)

η_c : セメントの種類を表す係数 ($\eta_c = 1.00$)

$\varepsilon_{sh,\infty}$: 自己収縮ひずみの終局値 ($\times 10^{-6}$)

$\beta_{sh}(t_e)$: 自己収縮ひずみの経時変化を表す関数

$$\varepsilon_{sh,\infty} = 2350 \times \exp\{-5.8(W/C)\} + 80 \times [1 - \exp\{-1.2 \times 10^{-6} \times (T_{max} - 20)^4\}] \quad (2)$$

$$\beta_{sh}(t_e) = 1 - \exp\{-a_{sh}(t_e - t_{e,set})^{b_{sh}}\} \quad (3)$$

$$a_{sh} = 3.7 \times [\exp\{-6.8 \times (W/C)\}] \times (0.060T_{max} - 0.20) \quad (4)$$

$$b_{sh} = 0.25 \times [\exp\{2.5 \times (W/C)\}] \times (-0.007T_{max} + 1.15) \quad (5)$$

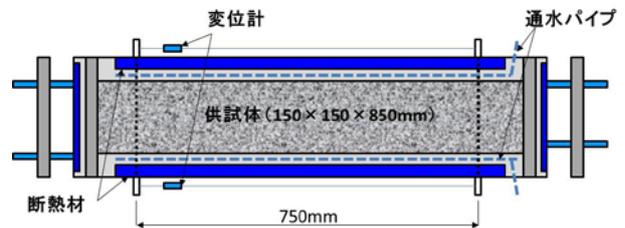


図-2 TSTM 試験装置による測定方法概念図 (平面図)

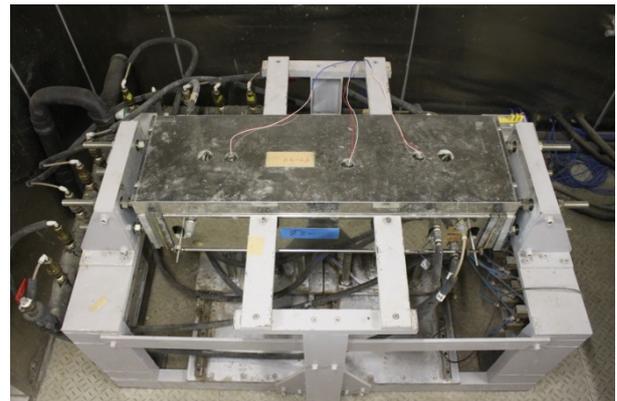


写真-2 TSTM 無拘束試験装置

表-1 試験水準一覧

| 試験方法 | コンクリート温度 | 養生温度 |
|---------|----------|---------------------------|
| TSTM試験法 | 20℃ | コンクリート温度が20℃になるように通水温度を可変 |
| | 40℃ | コンクリート温度が40℃になるように通水温度を可変 |
| | 60℃ | コンクリート温度が60℃になるように通水温度を可変 |
| | 設定なし | 設定なし |
| JCI試験法 | 20℃ | 20℃一定 |
| | 60℃ | 60℃一定 |

表-2 供試体の配合

| 粗骨材の最大寸法 (mm) | スランブの範囲(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 | 混和材 F | AE減水剤 (C×%) | AE剤 (C×%) |
| 20 | 10±2.5 | 4.5±1.0 | 50 | 44 | 154 | 308 | 798 | 1043 | 0 | 1.0 | 0.005 |

3. 実験結果および考察

3.1 自己収縮ひずみの温度依存性

TSTM 試験法によってコンクリート温度を 20℃、40℃ および 60℃ に制御した場合の自己収縮ひずみ測定結果を図-3 に示す。コンクリート温度が高いほど若材齢時における自己収縮ひずみの増加が顕著になるが、有効材齢を用いると温度にかかわらず一義的に自己収縮ひずみが定まることが報告されている。⁶⁾

今回の測定結果は、有効材齢 10 日までの若材齢時においてコンクリート温度が高くなるにつれて、自己収縮ひずみは大きくなる傾向を示している。これは、若材齢時における自己収縮ひずみに温度の影響があることを示唆していると思われる。

このため、走査型電子顕微鏡 (SEM : Scanning Electron Microscope) を利用して、供試体の水和生成物形状を観察した。各設定温度のコンクリート供試体観察結果を写真-3 に示す。設定温度 20℃ の供試体では、比較的大きな

六角板状の生成物が確認できたのに対して、設定温度 60℃ の供試体では、粒状の小さな生成物が確認された。また、4000 倍の画像から 60℃ 供試体の方が凹凸を多く確認する結果となった。これは、空隙が多いことを示しており、空隙量が自己収縮ひずみの違いに影響を与えているのではないかと考えられる。

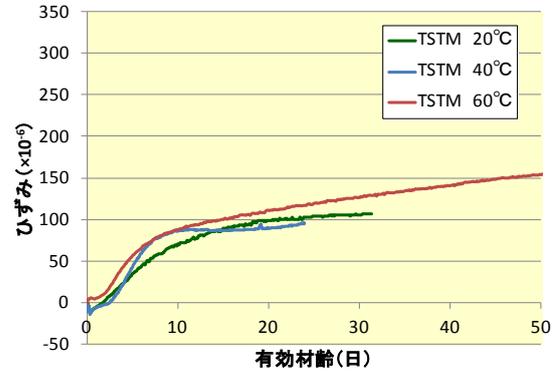


図-3 TSTM 試験法による自己収縮ひずみ測定結果

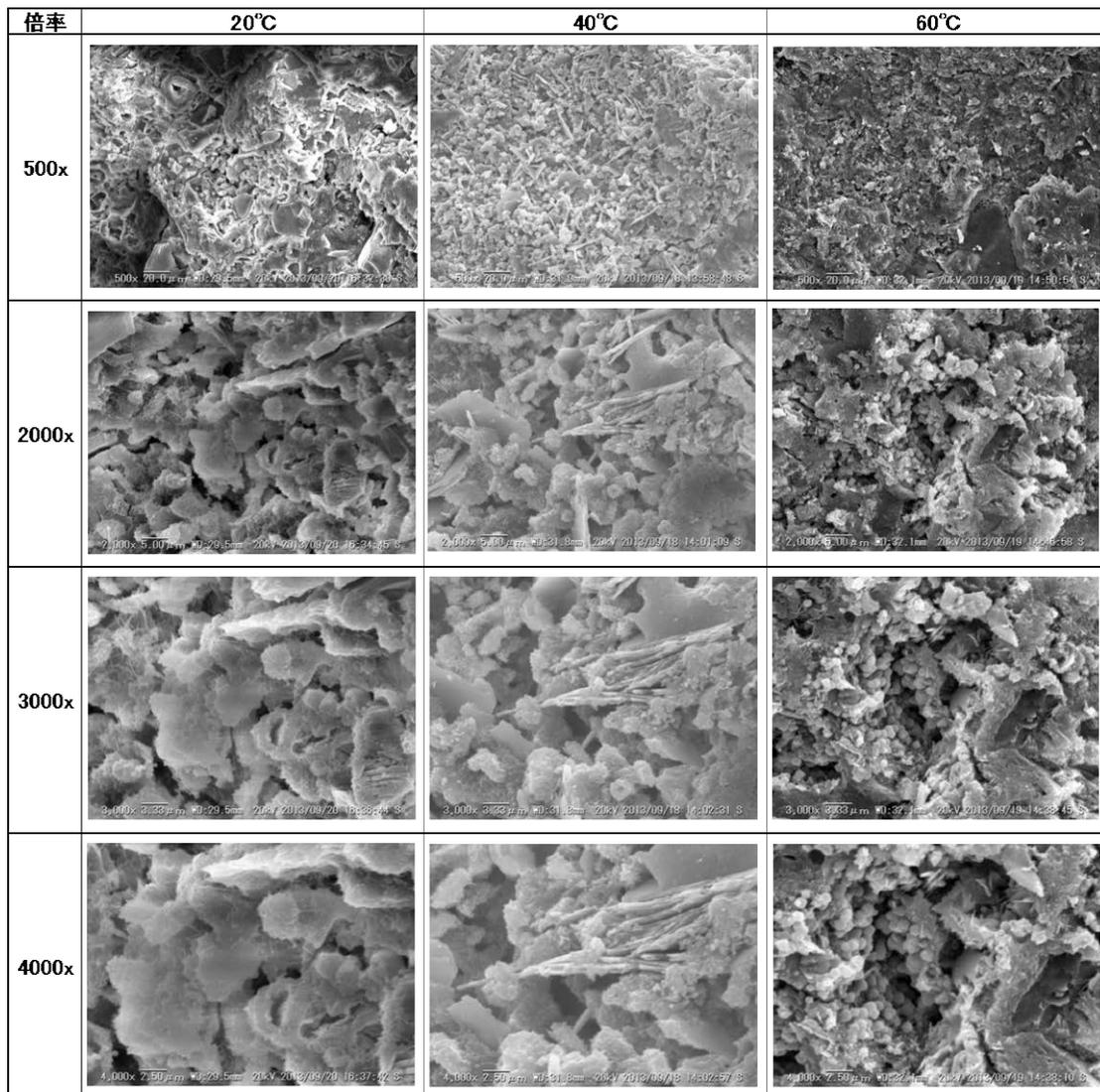


写真-3 SEMによる水和生成物観察結果

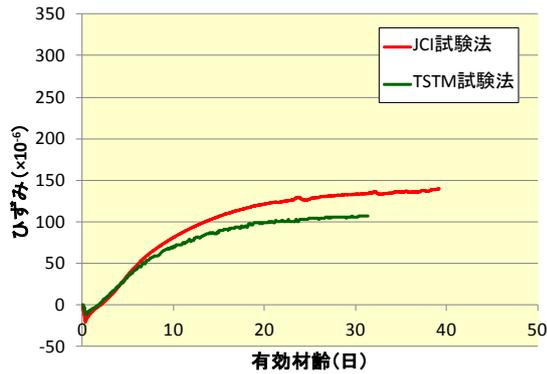


図-4 設定温度 20°Cの各試験法による測定値比較

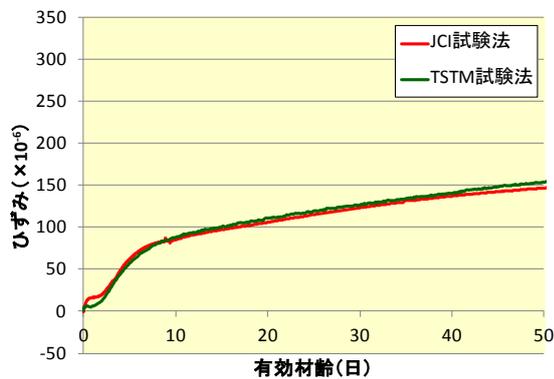


図-5 設定温度 60°Cの各試験法による測定値比較

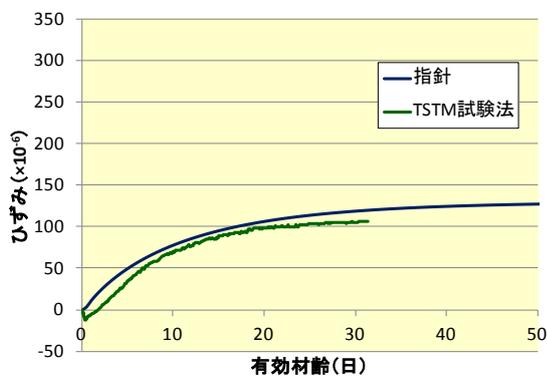


図-6 設定温度 20°Cの予測値と測定値の比較

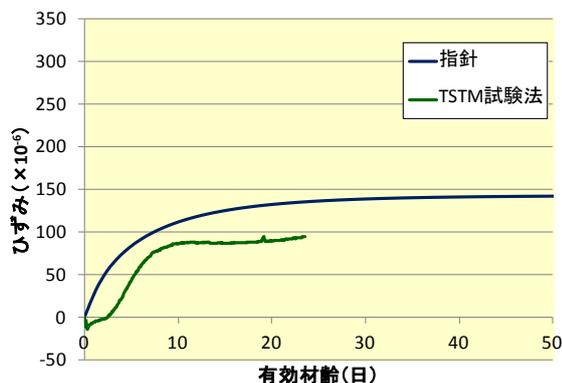


図-7 設定温度 40°Cの予測値と測定値の比較

3.2 試験法の違いによる影響

コンクリート温度を 20°Cおよび 60°Cに設定した場合の JCI 試験法および TSTM 試験法の自己収縮ひずみ測定結果を図-4 および図-5 に示す。

20°Cおよび 60°Cに制御した TSTM 試験法の自己収縮ひずみは、各養生温度に設定した JCI 試験法の自己収縮ひずみと概ね一致する結果となった。

以上の比較結果より、TSTM 試験法と JCI 試験法の試験方法の違いによる自己収縮ひずみ測定値への影響はないものと思われる。

3.3 自己収縮ひずみ予測式との比較

式(1)～式(5)に示した自己収縮ひずみ予測式のうち、式(2)のコンクリート最高温度 T_{max} を 20°C, 40°Cおよび 60°Cとして自己収縮ひずみ予測値を算出した。この自己収縮ひずみ予測結果と各設定温度における自己収縮ひずみ測定結果を図-6～図-8 に示す。

TSTM 試験法によって測定した自己収縮ひずみは、全ての設定温度において、予測式より算出した自己収縮ひずみよりも下回る結果となった。その差は 20°Cで $20\mu \sim 30\mu$, 40°Cで $20\mu \sim 70\mu$, 60°Cで $50\mu \sim 80\mu$ 程度であり、コンクリートの設定温度が高いほど差が大きくなる傾向となった。また、材齢初期のひずみ増加速度も、測定した自己収縮ひずみの方が小さくなる傾向であることが確認された。

自己収縮ひずみの予測式は、20°C条件下や高温履歴条件下における水和過程で計測したひずみからコンクリートの温度ひずみを差し引いたものを自己収縮ひずみとして定式化している。この温度ひずみは、設定した熱膨張係数と温度変化量の関係から算出している。この熱膨張係数の設定値が安全側に設定されている可能性があるものと推測される。

このため、自己収縮予測式における熱膨張係数の影響も検討することとした。

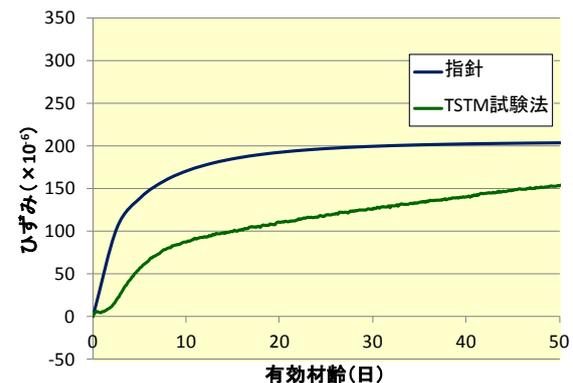


図-8 設定温度 60°Cの予測値と測定値の比較

3.4 自己収縮ひずみ予測式における熱膨張係数の影響

温度ひずみを含まない条件下において、予測式により算出した自己収縮ひずみは、TSTM 試験法によって測定した自己収縮ひずみよりも大きくなることが確認された。前述したように、温度ひずみはコンクリート硬化後の熱膨張係数を適用していることから、ここでは熱膨張係数の影響も併せて検討した。

今回は、通水パイプに水を通水しない状態で、20℃の恒温室で断熱に近い状態で計測したひずみと温度測定結果を利用して、温度上昇時および温度下降時の熱膨張係数を各々算定して平均値を熱膨張係数とすることとした。ひずみ変化量と温度変化量との関係を図-9に示す。温度上昇時の熱膨張係数が約 4.9 μ/℃、温度下降時の熱膨張係数が約 9.7 μ/℃、平均で 7.3 μ/℃となった。熱膨張係数の設定値による影響を確認するために、TSTM 試験法で測定したひずみから温度変化量と熱膨張係数の積を差し引いた自己収縮ひずみと予測式から算出した自己収縮ひずみを比較した、なお、適用する熱膨張係数は平均値 7.3 μ/℃と若材齢時で最も大きな値である 9.7 μ/℃とした。

熱膨張係数 7.3 μ/℃を適用した自己収縮ひずみと予測式から算出した自己収縮ひずみを比較した結果を図-10に示す。温度一定条件下の結果と同様に、TSTM 試験法による自己収縮ひずみの方が小さくなる傾向となることが確認された。

熱膨張係数 9.7 μ/℃を適用した自己収縮ひずみと予測式から算出した自己収縮ひずみを比較した結果を図-11に示す。TSTM 試験法の自己収縮ひずみと予測式から算出した自己収縮ひずみの差は、温度上昇時の熱膨張係数を考慮した場合よりも小さくなっていることが確認された。しかし、材齢初期のひずみ増加速度は予測式より算出した自己収縮ひずみよりも大きくなっている。これは、明らかに温度ひずみを過大に評価しているものと考えられる。

以上の結果から、自己収縮ひずみを算定する際に熱膨張係数の影響は、大きいと考えられる。このため、今回の TSTM 試験法で実施したような、温度ひずみを含まない自己収縮ひずみのみから予測式を構築していくこと、または温度上昇過程や温度降下過程で各々熱膨張係数を設定する予測式を構築する必要があるものと考えられる。

4. まとめ

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の高精度化を図ることを目的に、自己収縮ひずみの温度依存性、自己収縮試験方法の違いによる影響、自己収縮試験測定結果と予測式の推定値との差異について検討を行った。

従来、自己収縮ひずみは有効材齢を用いることで温度にかかわらず一義的に定まるとされていた。しかし、温度ひずみを含まないコンクリート温度一定条件下における若材齢時の自己収縮ひずみは、コンクリート温度が高いほど大きくなる傾向が確認され、自己収縮ひずみにコンクリート温度が影響を与えていると考えられる。また、今回適用した TSTM 試験法は、JCI 試験法による測定結果と概ね一致しており、試験法の違いによる影響はないことが確認された。

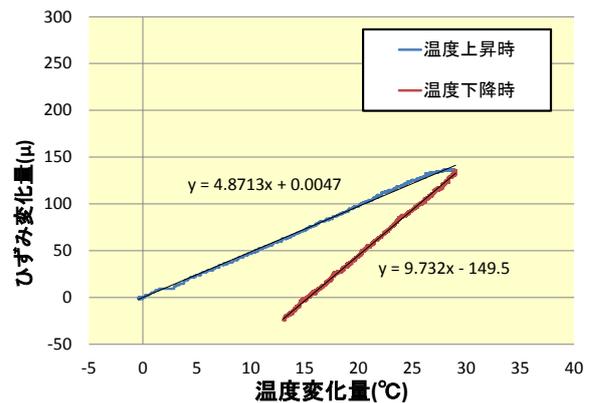


図-9 ひずみ変化量と温度変化量の関係

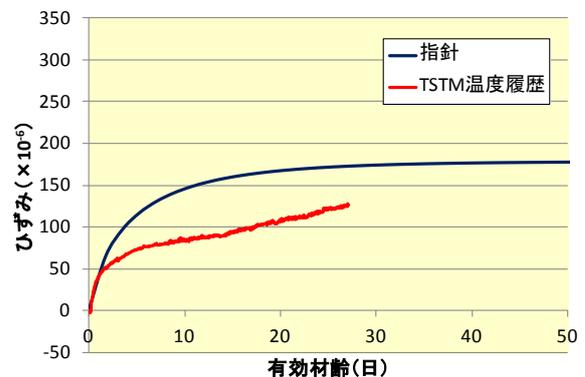


図-10 ひずみ予測値と測定値（係数 7.3 μ）の関係

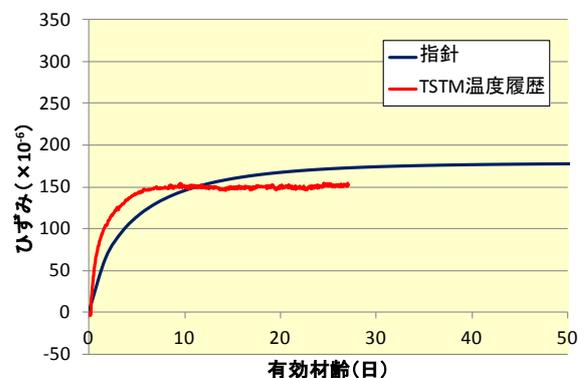


図-11 ひずみ予測値と測定値（係数 9.7 μ）の関係

温度ひずみを含むひずみから自己収縮ひずみを算出する際には、設定する熱膨張係数の影響が大きいことが確認された。自己収縮ひずみの予測式は、若材齢時の熱膨張係数のうち高めの値を適用されていることが確認された。

参考文献

- 1) 土木学会:コンクリート標準示方書[設計編](2007年制定), 2008.03
- 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) 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
- 4) 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
- 5) Toshiaki MIZOBUCHI, Kousuke YOKOZEKI and Yoshinobu NOBUTA : Control of Thermal Cracking by Pipe-Cooling System in Mass Concrete Structures, Control of Cracking in Early-Age Concrete, Swets & Zeitlinger Publishers, pp.333-342,2000.8
- 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考察, 第 24 回コンクリート工学講演会, No.1, pp.1113-1118,2002.6
- 7) Toshiaki MIZOBUCHI, Gorou Sakai, Toshio Ohno and Shinji Matsumoto:Control of Thermal Cracking Using Heat of Cement Hydration in Massive Concrete Structures, Concrete Durability and Service Life Planning (Concrete Life '06),2006.03
- 8) 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
- 9) 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
- 10) Tazawa.E, Matsuoka.Y, Miyazawa.S and Okamoto.S : Effect of autogenous shrinkage on self stress in hardening concrete, Proceeding of RILEM International Symposium on Thermal Cracking in Concrete at Early Ages,pp.221-228,1994

以上の検討結果より、若材齢時の自己収縮ひずみの予測式を高精度化するためには、コンクリート温度の影響や熱膨張係数の影響を適切に考慮する必要があることが確認された。