

論文 コンクリートの乾燥収縮ひずみの早期予測方法に関する一検討

福田 道也*1・鈴木 康範*2・齋藤 尚*3・福岡 紀枝*4

要旨：JIS A 1129 附属書 A で規定された温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$ の標準的な条件と、温度 80°C で乾燥を促進した条件において、コンクリートの乾燥収縮ひずみを測定した。次に、乾燥期間 28 日までの短期データを組み合わせて用いることにより、温度 20°C の標準的な条件における乾燥期間 6 ヶ月のコンクリートの乾燥収縮ひずみを推定する方法について検討した。その結果、コンクリートの種類を高・中流動コンクリートと普通コンクリートに分けて、コンクリートの乾燥収縮ひずみの短期データを整理することにより、乾燥期間 6 ヶ月のコンクリートの乾燥収縮ひずみの推定精度を向上させる可能性を見出した。

キーワード：乾燥収縮ひずみ、早期予測、乾燥温度、コンクリートの種類、粗骨材の種類

1. はじめに

設計段階においては、コンクリートの乾燥収縮ひずみを試験や実績に基づいて定め、収縮ひび割れの制御に用いるのが原則となっている¹⁾²⁾。乾燥収縮ひずみは、コンクリートの材料および配合を確定した上で、JIS A 1129 附属書 A 等によって測定するのが最も精度が良いと思われる。しかし、その試験結果が判明するのに少なくとも 6 ヶ月の期間を要する。しかも、一般的なコンクリート工事では、6 ヶ月以上前にコンクリートの品質確認を行うことは比較的少なく、上記のコンクリートの乾燥収縮ひずみの試験結果をそのまま反映できないおそれがある。

このため、短期間で得たコンクリートの乾燥収縮ひずみデータから長期間での乾燥収縮ひずみを推定するための方法が種々提案されている^{例えば、3),4),5),6)}。しかしながら、既提案の方法では、比較的短期の乾燥期間 28 日における実測データから求めた乾燥期間 6 ヶ月の乾燥収縮ひずみの推定値はやや精度が低いといった問題が未だ残されている。場合によっては、乾燥期間 6 ヶ月後の乾燥収縮ひずみの実測値と推定値との差が、 $100 \sim 200 \times 10^{-6}$ となる⁴⁾。例えば日本建築学会 JASS5⁷⁾による乾燥収縮ひずみの規制値が 8×10^{-4} であることを考慮すると、推定値の実測値に対する誤差の $100 \sim 200 \times 10^{-6}$ は無視できない数値と思われる。

本研究では、JIS A 1129 附属書 A で規定された温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$ の標準的な条件（以下、温度 20°C ）と、温度 80°C （湿度は制御していないが、その測定値はほぼ 0% である）で促進させた条件（以下、温度 80°C ）において、コンクリートの乾燥収縮ひずみを測定した。次に、乾燥期間 28 日までの短期データを組み合わせて用いることにより、温度 20°C における乾燥期間 6 ヶ月のコ

ンクリートの乾燥収縮ひずみを推定する方法について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

実験に使用した材料は表-1 に示すとおりであり、11 種類の粗骨材と 6 種類の細骨材を組み合わせて使用した。粗骨材のうち、石灰石は 4 種類である。ここでは、同種類の骨材に番号を付けて分類した。いずれの骨材も、JIS A 5308 附属書 A に規定される絶乾密度および吸水率を満足する良質なものであり、コンクリート製品工場またはレディーミクストコンクリート工場で実際に使用されている。粗骨材は最大寸法 20mm のものを用い、粗骨材、細骨材ともに、単独または混合後の骨材が標準粒度を満足するように調整して用いた。混和剤は、ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤、または AE 減水剤を用いた。

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-2 に示す。配合 No.1~4 は、目標スランプフローを $65 \pm 5\text{cm}$ または $75 \pm 5\text{cm}$ とした高流動コンクリートであり、w/p（水粉体容積比）=90.6~103.0%、W/C=44.0~50.0% である。配合 No.5~6 は、目標スランプを $23 \pm 2\text{cm}$ とし、比較的高い流動性と材料分離抵抗性を兼ね備えたコンクリートであり（以下、中流動コンクリート）、w/p=102.4%、W/C=42.7% である。なお、高・中流動コンクリートの目標空気量は全て 2.0% 以下である。一方、No.7~12 は普通コンクリート配合であり、目標スランプを $18 \pm 2.5\text{cm}$ 、目標空気量を $4.5 \pm 1.5\%$ とした。

粗骨材の種類がコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響を比較できるように、配合 No.1~2, No.3~4, No.5

*1 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 工修 (正会員)

*2 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所技師長 工博 (正会員)

*3 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 修(工) (正会員)

*4 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 修(工)

～6, No.7～12 はそれぞれモルタル部分の配合を同一とし、粗骨材に石灰石とそれ以外の骨材を使用した。

2.3 コンクリートの乾燥収縮ひずみ測定方法

コンクリートの乾燥収縮ひずみ測定用として、10×10×40cmの角柱供試体を1配合につき6本作製し、打込み後1日で脱型し材齢7日まで20±2℃で水中養生を行った。その後、角柱供試体を3本ずつ、それぞれ温度20℃の恒温恒湿室内および温度80℃の乾燥炉内で乾燥させた。温度80℃では、硬化後に102℃ガラス転移点温度を示す耐熱性の常温硬化型エポキシ樹脂接着剤を用いて、ゲージプラグを貼り付け、乾燥収縮ひずみを測定した。温度20℃の条件では乾燥期間6ヶ月まで、温度80℃の条件では乾燥期間28日まで、コンクリートの乾燥収縮ひずみをJIS A 1129-2に準拠して測定した。温度80℃の条件で乾燥した供試体は、乾燥収縮ひずみ測定の前夜に温度20±2℃、湿度60±5%の環境下で恒温となるまで静置した後に測定した。これは、温度80℃の乾燥炉内で保存した同一形状の角柱供試体が、その中心に設置した熱電対によって約8時間で20℃恒温になることを事前に確認したためである。なお、温度80℃の乾燥期間は、温度80℃の乾燥炉内に存置している期間のみを示し、乾燥収縮ひずみの測定に要する期間を含めていない。

2.4 粗骨材の細孔径分布測定

粗骨材がコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響を検討するために、水銀圧入式ポロシメータによって粗骨材の細孔径分布を測定した。試料は、粗骨材を2.5～

表-1 使用材料

材料名	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	産地ほか
普通ポルトランドセメント (C)	3.15	-	-
石灰石微粉末 (LSP)	2.70	-	-
川砂 1 (S1)	2.60	1.70	岐阜県安八郡産
川砂 2 (S1)	2.60	1.20	茨城県小川地内産
川砂 3 (S2)	2.57	2.00	霞ヶ浦産
山砂 1 (S1)	2.62	1.26	静岡県河東小笠山産
山砂 2 (S1)	2.57	1.37	静岡県掛川産
高炉スラグ細骨材 (BFS)	2.72	0.40	-
石灰石 1 (G)	2.70	0.24	滋賀県米原市産
石灰石 2 (G)	2.68	0.67	栃木県佐野市産
石灰石 3 (G)	2.69	0.77	栃木県葛生産
石灰石 4 (G)	2.69	0.29	埼玉県横瀬産
川砂利 (G)	2.64	1.06	岐阜県安八郡産
硬質砂岩 1 (G)	2.64	0.84	静岡県河東小笠山産
硬質砂岩 2 (G)	2.63	0.63	栃木県下柏尾産
硬質砂岩 3 (G)	2.66	0.54	茨城県岩瀬産
硬質砂岩 4 (G)	2.65	0.55	茨城県笠間産
硬質砂岩 5 (G)	2.67	0.42	東京都青梅産
石英安山岩質凝灰岩 (G)	2.63	0.58	兵庫県西島産

表-2 コンクリートの配合

配合 No.	粗骨材の種類	細骨材の種類	スランプ (フロー) (cm)	W/C (%)	w/p (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m ³)							
							W	C ^{*1}	LSP ^{*1}	S			G ^{*1}	Ad ^{*2}
										S1 ^{*1}	S2 ^{*1}	BFS ^{*1}		
1	川砂利	川砂 1 BFS	61.0	44.0	103.0	47.7	185	420	125	619	-	155	852	3.99
2	石灰石 1		64.0										871	
3	硬質砂岩 1	山砂 1	78.0	50.0	90.6	53.0	180	360	228	844	-	-	752	6.18
4	石灰石 1		79.0										770	
5	硬質砂岩 2	川砂 2,3	23.5	42.7	102.4	44.0	175	410	110	434	288	-	934	4.10
6	石灰石 2		23.0										952	
7	硬質砂岩 3	山砂 2	18.5	50.0	-	45.0	180	360	-	764	-	-	967	0.90
8	石英安山岩質凝灰岩		18.5										956	
9	硬質砂岩 4		19.0										963	
10	石灰石 3		18.5										974	
11	石灰石 4		19.5										978	
12	硬質砂岩 5	19.0	970											

*1: 略語は表-1 参照

*2: 高性能 AE 減水剤または AE 減水剤

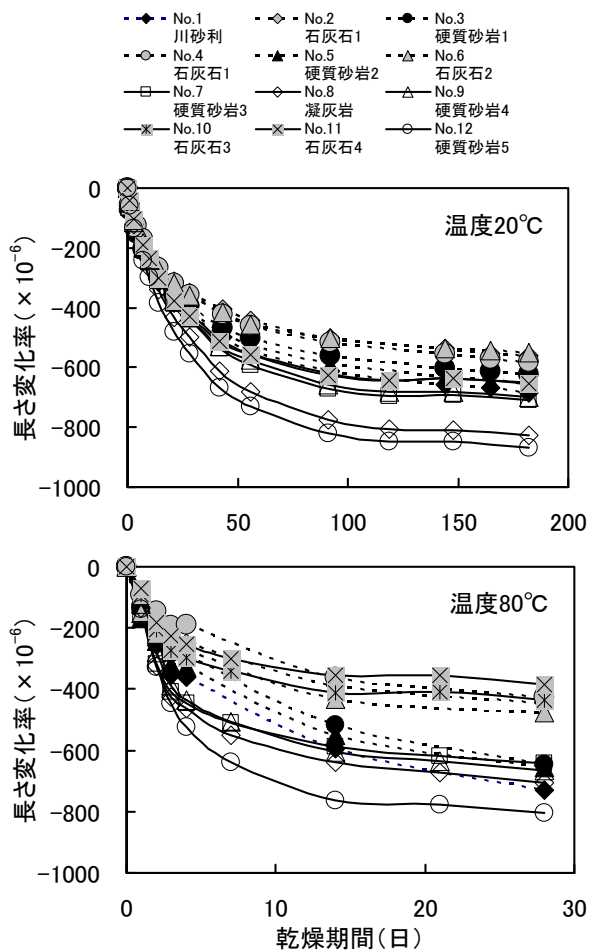


図-1 乾燥収縮ひずみ

5.0mm に粉砕して 105°C で 24 時間炉乾燥し、デシケータ内で常温まで冷却したものを用いた。1 種類の粗骨材に対して、2 試料を用いて細孔径分布を測定し、その平均値によって評価した。細孔径分布の測定には、Quantachrome Instrument 社製の全自動細孔径分布測定装置 (Pore Master60-GT) を使用した。細孔径の測定範囲は 7nm~270 μ m とした。なお、水銀の接触角は 140 度、水銀の表面張力は 0.480N/m および細孔の形状はすべて円筒形と仮定して、細孔径を算出した。

3. 乾燥収縮ひずみの早期予測方法

3.1 温度 20°C と 80°C の乾燥収縮ひずみおよび質量変化

図-1 に温度 20°C と 80°C の条件下で乾燥させた供試体の乾燥収縮ひずみの測定結果を示す。骨材の JIS 規格を十分に満足する骨材であっても、JIS A 1129 附属書 A に規定された標準的な条件下の乾燥収縮ひずみが 800×10^{-6} を超えるものが存在した。

温度 20°C で乾燥させたデータに着目すると、点線で示された配合 No.1~6 の高・中流動コンクリートの乾燥収縮ひずみが比較的小さく、実線で示された配合 No.7~

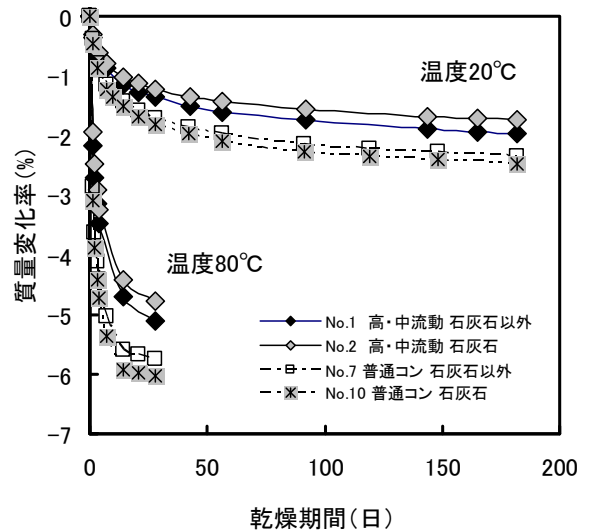


図-2 質量変化率

12 の普通コンクリートは比較的大きくなった。また、点線で示された配合 No.1~6 の高・中流動コンクリートの乾燥収縮ひずみは、実線で示された配合 No.7~12 の普通コンクリートと比較して、値自体およびその増加割合も小さく、収束する期間が長くなる傾向が認められる。これは、配合によってコンクリート硬化体の緻密さが異なり、より緻密な高・中流動コンクリートは乾燥による水の逸散が遅れたためと思われる。一方、配合 No.10, 11 の石灰石を使用した普通コンクリートの乾燥収縮ひずみはやや小さく、石灰石以外の粗骨材を用いた高・中流動コンクリートとほぼ同等の値となった。

温度 80°C で乾燥させた乾燥収縮ひずみは、温度 20°C と比較して短期間で収束する傾向が明らかに認められた。しかしながら、乾燥収縮ひずみの測定毎に温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温室において常温に戻るまで約 8 時間静置したので、乾燥収縮ひずみは乾燥期間 28 日において収束していないものもあった。また、乾燥期間が数日以内と短い場合には、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$ の条件下で測定している期間の影響が現れ、一部の乾燥収縮ひずみデータが停滞し、場合によっては前回の測定値より大きくなった。しかしながら、乾燥期間が長くなると、そのような傾向は少なくなり、漸増後ほぼ一定値に収束している。角柱供試体 3 本間の乾燥収縮ひずみデータのばらつきは、JIS A 1129 附属書に規定された条件である温度 20°C とほぼ同等であり、しかも角柱供試体には微細なひび割れは目視で認められなかった。このような事実を勘案すれば、温度 80°C の乾燥収縮ひずみデータは一定の精度を有すると考えられる。なお、乾燥期間が短い場合の測定間隔については、今後更に検討する必要がある。

図-2 には、温度 20°C と 80°C の条件下で乾燥させた供試体の質量変化率の代表例を示す。温度 80°C では、質量

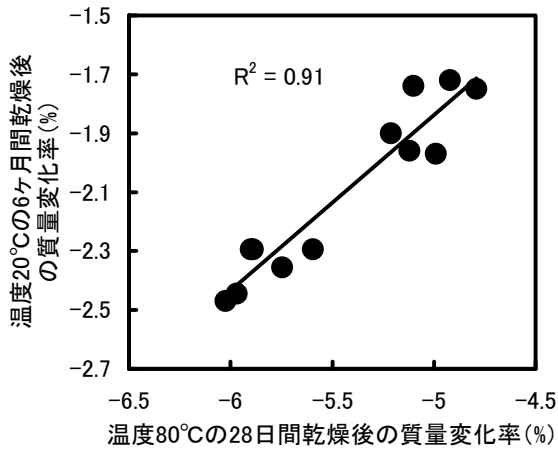


図-3 温度 20℃と 80℃の質量変化率の関係

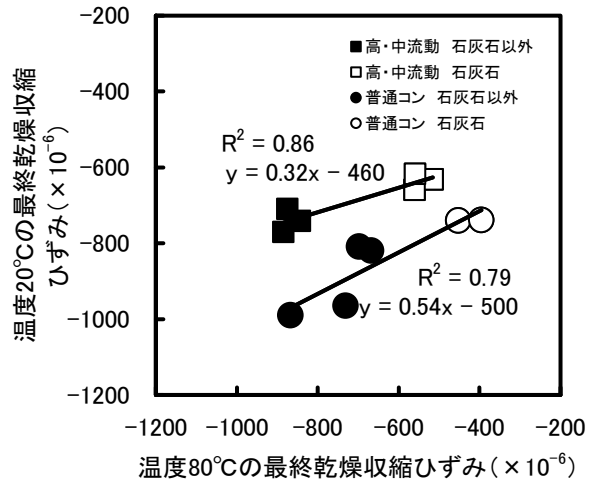


図-4 温度 20℃と 80℃の最終乾燥収縮ひずみの関係

変化率が温度 20℃と比較して大きく、質量変化率がほぼ一定値になるまでの時間も短い。温度 80℃の条件では、セメント水和物のうちエトリンガイトなどからの結晶水およびセメント水和物の層間の吸着水が一部逸散するとともに、骨材からの水の逸散も促進される可能性があるため、温度 20℃の条件と比較して乾燥収縮ひずみの経時変化が異なる。しかし、図-3 に示した温度 20℃の乾燥期間 6 ヶ月と 80℃の乾燥期間 28 日の質量変化率には、ある程度の相関性が認められる。したがって、温度 20℃と 80℃の長期における乾燥収縮ひずみデータを関連付けることは可能と思われる。

3.2 乾燥収縮ひずみの近似

コンクリートの乾燥収縮ひずみを早期予測するために、温度 20℃と 80℃で乾燥収縮ひずみのデータを日本建築学会の式(1)によって先ず近似した。なお、実測値に対する式(1)による近似精度を高めるために、3つの係数は未知数として扱った。最終乾燥収縮ひずみとは、温度 20℃において乾燥期間 6 ヶ月までの乾燥収縮ひずみの実測値、また温度 80℃において乾燥期間 28 日までの乾燥収縮ひずみの実測値を用いて、式(1)によって近似した時の係数 $\varepsilon_{sh\infty}$ を指す。次に、最終乾燥収縮ひずみについて温度 20℃と 80℃の関係を、図-4 に示すように検討した。両者の関係は、水分逸散速度、硬化体の細孔構造、ヤング

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \varepsilon_{sh\infty} \cdot \left(\frac{t - t_0}{\alpha + (t - t_0)} \right)^\beta \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$: 乾燥材齢 t_0 日における材齢 t 日の収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

$\varepsilon_{sh\infty}$: 最終乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

α, β : 乾燥の進行度を表す係数

係数などが異なるので³⁾、全データに対しては良好な相関性は得られなかった。そこで、コンクリートの種類による緻密さの程度が温度 20℃の最終乾燥収縮ひずみと 80℃の最終乾燥収縮ひずみの関係において一要因になると仮定して、コンクリートの種類を高・中流動コンクリートと普通コンクリートに分けて、相関性を検討した。その結果、温度 20℃と 80℃の最終乾燥収縮ひずみの関係において、ある程度の相関性が認められた。温度 20℃と 80℃の最終乾燥収縮ひずみの関係において、理論上適切な関数形を著者らは把握していないので、最も単純に一次式で近似することにした。

温度 80℃の最終乾燥収縮ひずみがほぼ同一であっても、温度 20℃の最終乾燥収縮ひずみは高・中流動コンクリートの方が普通コンクリートと比較して小さい。高・中流動コンクリートは普通コンクリートと比較して、水セメント比が小さく緻密であるため水の逸散に対する抵抗が増したためと思われる。また、温度 20℃と 80℃の最終乾燥収縮ひずみを比較すると、普通コンクリートでは温度 20℃の最終乾燥収縮ひずみが温度 80℃より小さい傾向にあった。これは、温度 80℃では急激な水の逸散によって緻密な硬化体が形成されず、硬化体に作用する毛細管張力が温度 20℃ほど増加しなかった可能性がある。ここでは、コンクリートの種類を上述のように分類した。しかし、水セメント比、単位セメントペースト量などによっても乾燥収縮ひずみは変化するので、分類方法の最適化については今後検討する必要がある。

図-4 において、粗骨材に石灰石を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみがそれ以外の骨材を用いたものより、小さい傾向にあった。そこで、粗骨材自体の収縮に関係すると云われている 50nm 以下の細孔容積⁸⁾と温度 20℃の最終乾燥収縮ひずみの関係を求めてみた。今回の実験に用いた粗骨材の吸水率は、表-1 に示すように川砂利の

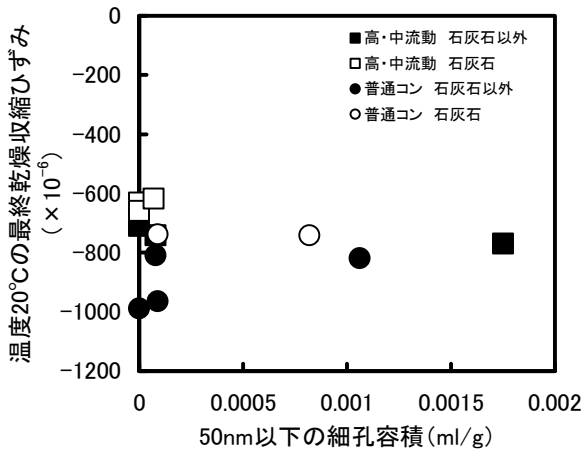


図-5 50nm以下の細孔容積と温度20°Cの最終乾燥収縮ひずみの関係

1.06%を除き、砕石では岩種によらず 0.29~0.84%程度と比較的小さな値であった。また、図-5に示すように、粗骨材の50nm以下の細孔容積も比較的狭い範囲に分布しており、岩種による顕著な差は認められなかった。しかし、粗骨材の50nm以下の細孔容積と、温度20°Cの最終乾燥収縮ひずみの関係において、ほぼ同一な細孔容積の粗骨材に対するコンクリートの最終乾燥収縮ひずみは、コンクリートの種類に関わらず、石灰石の方がそれ以外の骨材を用いた場合よりやや小さい傾向が認められた。これは、特定の範囲内の粗骨材の細孔容積に起因する骨材自体の収縮量の差だけでなく、石灰石骨材は比較的ヤング係数が大きく、モルタルの収縮に対する拘束効果も大きい⁹⁾ことによる。

3.3 早期予測方法

今回提案する乾燥収縮ひずみの早期予測方法は、長期間の乾燥収縮ひずみを予測するに際して、温度20°Cと80°Cの乾燥期間28日までの乾燥収縮ひずみという貴重な情報を最大限に生かすという観点から構築されている。まず、早期予測方法を行うためのデータベース構築の手順を図-6に示す。具体的には、第1段階として10×10×40cmの角柱供試体を作製して材齢7日まで20°C水中養生する。第2段階として温度20°Cと80°Cのそれぞれの条件下で複数の乾燥期間（測定は5回以上）において乾燥収縮ひずみを測定する。第3段階として温度20°Cでは乾燥期間6ヶ月までのデータ、温度80°Cでは乾燥期間28日までのデータを使用して式(1)中の最終乾燥収縮ひずみ($\epsilon_{sh\infty}$)、乾燥の進行度を表す係数(α , β)を最小二乗法によりそれぞれ算定する。第4段階として、コンクリートの種類を高・中流動コンクリートと普通コンクリートに分けて、図-4に示すように、温度20°Cの最終乾燥収縮ひずみを温度80°Cの最終乾燥収縮ひずみの一次式で近似する。

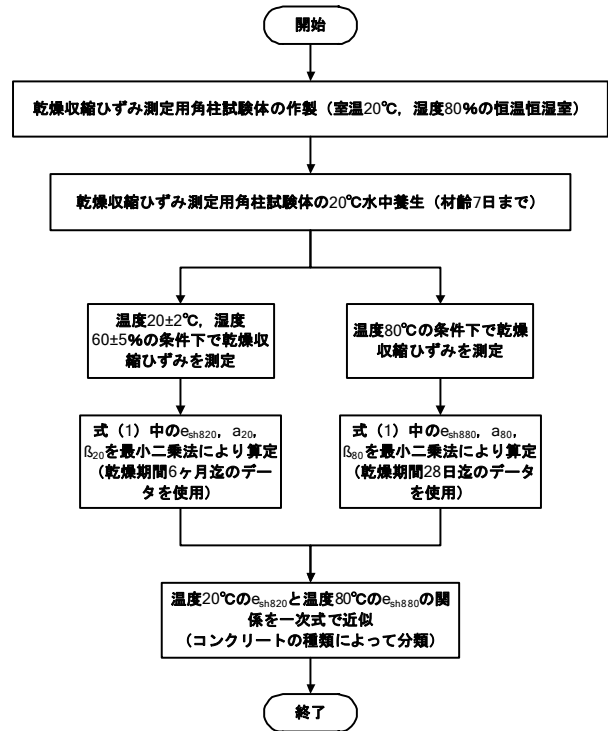


図-6 データベース構築手順

乾燥収縮ひずみの推定においては、そのデータベース構築と同様に、温度20°Cと80°Cにおいて乾燥収縮ひずみを測定する。ただし、乾燥期間は28日とする。温度80°Cの乾燥収縮ひずみデータを式(1)で近似し、最終乾燥収縮ひずみ $\epsilon_{sh\infty 80}$ を始め、 α_{80} , β_{80} などの係数を得る。この最終乾燥収縮ひずみ $\epsilon_{sh\infty 80}$ を図-4中の式に代入して、温度20°Cの最終乾燥収縮ひずみ $\epsilon_{sh\infty 20}$ を算定した上で、温度20°Cの乾燥収縮ひずみデータを式(1)によって近似する。この場合、式(1)の係数のうち、 α_{20} と β_{20} が未知数となる。この一連の手順によって、温度20°Cの長期間の乾燥収縮ひずみが推定できる。

3.4 乾燥収縮ひずみの推定精度

3.3節に示した早期予測方法の手順に従って、温度20°Cにおける乾燥期間6ヶ月の乾燥収縮ひずみを推定した。温度20°Cにおける乾燥収縮ひずみの実測値と推定値の経時変化を図-7に、温度20°Cにおける乾燥期間6ヶ月の実測値と推定値の比較を図-8に示す。これらの図から、本論文で提示したコンクリートの乾燥収縮ひずみの早期予測方法は限定されたデータに対してであるが、ある程度の精度を有することが認められる。無論、コンクリートの分類方法の最適化を含めた数多くの検討課題を解決するとともに、より多くのコンクリートの乾燥収縮ひずみデータへの適用性を検討しなければならない。

4. まとめ

本研究では、JIS A 1129 附属書 A で規定された温度 20

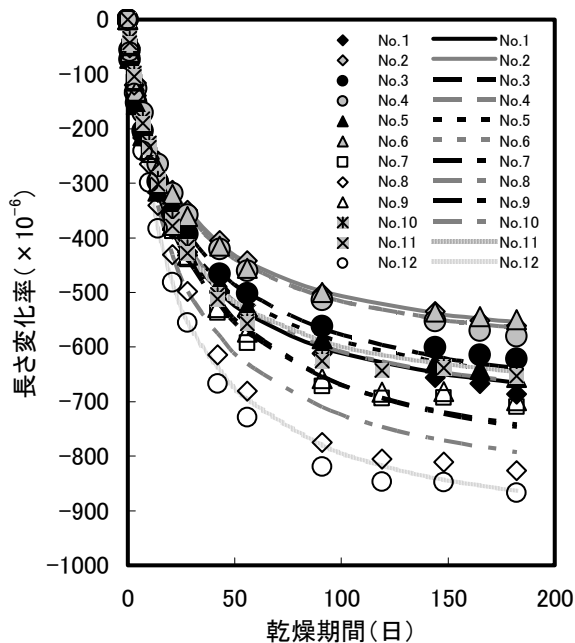


図-7 温度 20°Cにおける乾燥収縮ひずみの実測値と推定値の経時変化

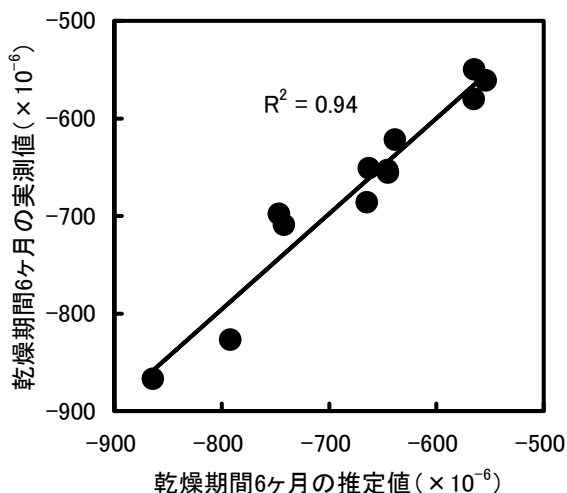


図-8 温度 20°Cにおける乾燥期間 6ヶ月の実測値と推定値の比較

±2°C, 湿度 60±5%の標準的な条件における乾燥期間 6ヶ月の乾燥収縮ひずみを推定するために, 上記条件における乾燥期間 28日までの乾燥収縮ひずみデータと, 温度 80°Cで促進した乾燥収縮ひずみデータを組み合わせて用いることを検討した。

今回の実験の範囲では, 以下の結果が得られた。

- (1) 温度 20°Cと 80°Cの最終乾燥収縮ひずみの間には, 水分逸散速度, 硬化体の細孔構造, ヤング係数などが異なるので³⁾, 全データに対しては直接良好な相関性は見られなかった。
- (2) コンクリートの種類による緻密さの程度が温度 20°Cと 80°Cの最終乾燥収縮ひずみの関係において

一要因になると仮定して, コンクリートの種類を高・中流動コンクリートと普通コンクリートに分けて, 相関性を検討してみると, ある程度の相関性が認められた。

- (3) 温度 20°Cの最終乾燥収縮ひずみを 80°Cの最終乾燥収縮ひずみの一次式で近似し, 温度 20°Cの乾燥期間 28日までの乾燥収縮ひずみを用いて, 乾燥期間 6ヶ月の乾燥収縮ひずみを推定すると, ある程度の精度で推定ができた。ただし, 上記の早期予測方法を確立するには, コンクリートの分類方法の最適化を含めた数多くの検討課題を解決すると共に, 多くのコンクリートの乾燥収縮ひずみデータへの適用性を今後検討しなければならない。

参考文献

- 1) 土木学会: コンクリート標準示方書 設計編, pp.45-49, 2007
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, pp.53-58, 2006
- 3) 小島正朗, 三井健朗: コンクリートの迅速乾燥収縮試験法の研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.417-422, 2002
- 4) 今本啓一, 石井寿美江, 閑田徹志, 百瀬晴基, 藤森啓祐: 短期データに基づくコンクリートの乾燥収縮ひずみ予測に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 602号, pp.15-20, 2006
- 5) 片平博, 渡辺博志: 骨材がコンクリートの乾燥収縮率に与える影響の簡易推定法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.97-102, 2009
- 6) 小田部裕一, 中村士郎: 乾燥収縮ひずみの発現における経時変化特性に関する基礎的検討, セメント・コンクリート論文集, No.64, pp.303-308, 2010
- 7) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 5, 鉄筋コンクリート工事, pp.11-12, 2009
- 8) 小幡雄一郎, 吉田亮, 矢野智也, 梅原秀哲: 粗骨材の吸水量および空隙構造に基づいたコンクリートの体積収縮変化に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.371-376, 2010
- 9) 兵頭彦次, 谷村充, 井坂幸俊, 杉山真悟: コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材物性の影響評価, セメント・コンクリート, No.777, pp.24-29, 2011