

# 論文 初期材齢から乾燥を受ける膨張コンクリートのひずみ成分について

宮本 圭介<sup>\*1</sup>・吉武 勇<sup>\*2</sup>・蛭谷 祐至<sup>\*3</sup>・吉岡 国和<sup>\*4</sup>

要旨：膨張コンクリートによるケミカルプレストレスの定量化には、時系列の膨張ひずみ特性を適切に把握しておく必要がある。そこで本研究では、初期材齢からの膨張コンクリートのひずみ特性を求めため、乾燥・水中環境下におけるひずみ挙動について実験的に調べた。特に、ひずみの重ね合わせ則が成り立つと仮定した上で、初期材齢の膨張コンクリートの乾燥収縮ひずみと純膨張ひずみの成分分離を試み、各ひずみ特性について考察を加えた。その結果、標準添加量  $20\text{kg/m}^3$  の膨張コンクリートでは、純膨張ひずみが環境湿度に依存しないこと、および乾燥収縮ひずみはプレーンコンクリートと同等レベルにあることが分かった。

キーワード：膨張コンクリート，初期材齢，体積変化，重ね合わせ則

## 1. はじめに

膨張コンクリートは、乾燥収縮等の体積変化に起因するコンクリートのひび割れ抑止策として用いられてきた。近年の低添加型膨張材等の開発により膨張コンクリートは、従来の工場製品に留まらず、マスコンクリート構造物の初期ひび割れ対策などの工事用途へと適用範囲の拡大が図られている。しかしながら、このような膨張材を添加したコンクリートの諸性状は、必ずしも十分に定量化されていないのが実情である。例えば、初期材齢における強度発現性や体積変化特性、あるいはこれらに非常に密接した関係にある温度・湿度の影響などは、特に十分な検討・定量化が望まれるところであろう。

膨張コンクリートの体積変化特性には、環境温度や湿度は少なからず影響を与えるものであり、特に初期材齢におけるこれらの要因は、その後の体積変化や強度特性に大きな影響をおよぼすものである。また、膨張コンクリートのひび割れ抑制効果を十分に発揮させるためには、その膨張体積変化を鉄筋等で拘束することで、いわゆるケミカルプレストレス作用をもたらすことにある。このケミカルプレストレス

作用の定量化を行うには、膨張コンクリートと拘束材の時系列な相互作用関係が明らかにされる必要があると考えられる。そのためには、初期材齢からの膨張コンクリートのひずみ挙動を求め、その過程において生じる膨張ひずみや温度ひずみ、乾燥収縮ひずみといった各ひずみ成分の特性を適切に評価しなければならない。

本研究では、近年開発された低添加型膨張材による膨張コンクリートのひずみ特性を求めため、初期材齢を中心とした長さ変化挙動を実験的に求めた。特に、各ひずみ成分に分離を行うことを目的とし、配合条件や周辺環境のおよぼす影響をパラメータとした系統的な実験を行った。本論文は、これらの系統的な実験を基に、初期材齢からのひずみの重ね合わせ則を用いて、膨張コンクリートの各ひずみ成分を求め、その特性について考察を加えたものである。

## 2. 実験概要

### 2.1. 使用材料および配合

本研究で作製したコンクリートの(基本)構成材料は、普通ポルトランドセメント(密度

\*1 山口大学大学院 理工学研究科社会建設工学専攻 (正会員)

\*2 山口大学 工学部社会建設工学科 助教授 博(工) (正会員)

\*3 前田建設工業株式会社 東北支店 修(工) (正会員)

\*4 萩森興産株式会社 (山口大学大学院 博士後期課程 所属) (正会員)

3.15g/cm<sup>3</sup>) 北九州若松産海砂(密度 2.6g/cm<sup>3</sup>) , 山口県宮野産の安山岩砕石(密度 2.7g/cm<sup>3</sup>)である。膨張材には標準添加量 20kg/m<sup>3</sup>とする石灰系低添加型膨張材(密度 3.17g/cm<sup>3</sup>)を採用した。

本研究で作製したコンクリートの配合条件を表-1に示す。シリーズ A は、膨張材を一定の粉体量(セメント + 膨張材)に内割添加したものである。すなわちシリーズ A では、粉体量 P=300kg/m<sup>3</sup> , 水粉体比 W/P=55%と一定条件のもと、標準添加量 20kg/m<sup>3</sup>を中心に、同 1.5 倍の 30kg/m<sup>3</sup>を添加したもの、および膨張材無添加のもの(以下プレーンコンクリート)を作製した。また、シリーズ B では、膨張材をセメント量に対して外割添加したものであり、セメント量 C=280kg/m<sup>3</sup>および水粉体比 W/P=55%と一定条件のもと、シリーズ A 同様に膨張材添加量を 0, 20, 30kg/m<sup>3</sup>と変えたコンクリートを作製した。

### 2.2. 供試体作製方法

本研究では、初期材齢において自由膨張・収縮する膨張コンクリートの長さ変化(ひずみ)挙動を調べるため、図-1に示すような 100×200mm 形状の低剛性の塩化ビニルパイプ型枠を用いた。この型枠には、コンクリートの側面方向への体積変化を過度に拘束しないよう、十分にグリス塗布するとともに、軸方向に一線上の切断面を設けた。コンクリート打設の際には、図-1に示すように上下 2 箇所をリング状留め具で一時的に固定し、打設 2 時間後に完全に開放することで、以降の型枠側面拘束の影響を小さくした。なお、供試体は打設直後より温度・湿度を制御した恒温恒湿器内に静置し、材齢 24 時間で脱枠を行った。本研究における主な(計測)作業フローを図-2に示す。

### 2.3. 計測方法および養生方法

本研究では、初期材齢からのひずみ挙動を求めるため、図-3に示すように测温機能を有する埋め込み型ひずみゲージを供試体の中央に配置し、打設直後から材齢 14 日までひずみの計測を行った。ひずみの計測は、フレッシュ状

表-1 配合条件

シリーズ	W/P (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			C	W	E	S	G
A	55	55	300	165	0	849	998
		59	280		20		
		61	270		30		
B	55	55	280	154	0	870	1022
		59		165	20	849	998
		61		171	30	838	985

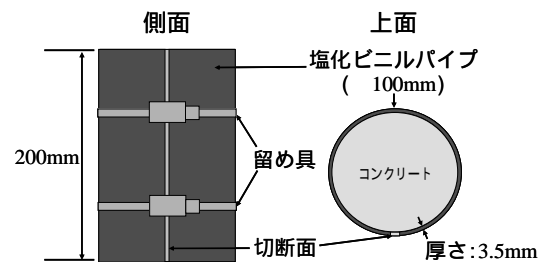


図-1 供試体型枠

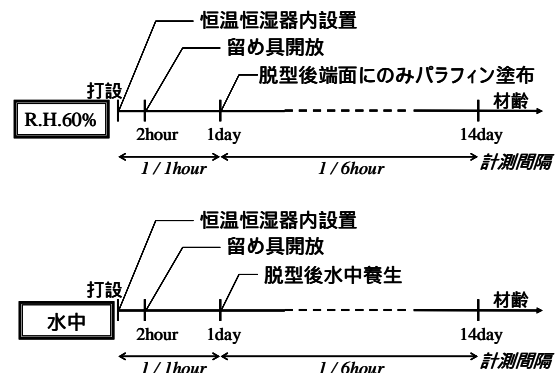


図-2 (計測)作業フロー

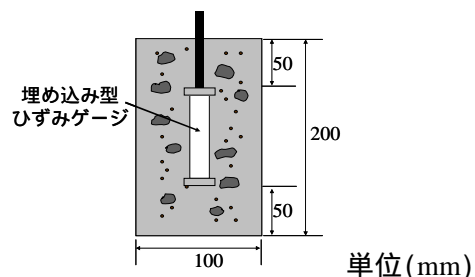


図-3 埋め込み型ひずみゲージの設置

態から硬化に至る材齢 1 日までは 1 時間毎に、以降試験終了(材齢 14 日)まで 6 時間毎に実施した。なお、ひずみの経時変化のばらつきを考慮するため、各試験について供試体 2~4 体の

ひずみの計測を行った。

打設温度や水和熱等の影響より、設定温度との差異が生じる場合においては、計測されるひずみ値より、線膨張係数を  $10 \times 10^{-6}/$  と仮定して得られる温度ひずみを差し引くことで便宜的に長さ変化(ひずみ)量を求めた。膨張コンクリートの(極)初期材齢の線膨張係数の設定方法には、意見が分かれるところであるが、温度変化量が比較的小さい本研究の範囲内では、その影響はあまり大きくないものと判断し、一定の線膨張係数  $10 \times 10^{-6}$  を用いて評価を試みた。

本研究で設定した環境温度・湿度を表-2に示す。環境温度の影響に関する実験では、5, 20, 35 の3水準とし、湿度の影響に関する実験では、乾燥(環境湿度 R.H.60%)・水中環境下の2水準とした。ここで水中環境下における実験は、材齢 24 時間まで湿度制御の上限能力(R.H.80%)に設定した恒温恒湿器内に十分な湿布養生を施し、以降は同機内で水中養生を行ったものである。

#### 2.4. 各ひずみ成分について

本研究では、軸方向の長さ変化(ひずみ)に対して、各ひずみの成分分離を行うことを目的とするものである。そこで、ひずみの重ね合わせ則が成立すると仮定した上で、本研究で用いる各ひずみの定義を以下に示す。

本研究においては、図-4に示すように、同環境下における膨張材を添加したコンクリートのひずみから、ほぼ同等の配合で膨張材0(ゼロ)のコンクリートのひずみを差し引いたものを便宜的に「純膨張ひずみ」と定義する。また、同配合・同温度条件下において、環境湿度(R.H.60%, 水中)の差異から生じるひずみ差を、各コンクリートの「乾燥収縮ひずみ」として評価を行った。

なお、本論文では埋め込み型ひずみゲージがコンクリート内に十分に定着し、ひずみ計測が可能と考えられる材齢 12 時間のひずみを基準(ゼロ)として、以降のひずみ特性について評価

表-2 環境温度および湿度(シリーズ A・B)

膨張材	環境湿度	R.H.60%	水中
0 kg/m <sup>3</sup>	5, 20, 35		20
20 kg/m <sup>3</sup>			
30 kg/m <sup>3</sup>		20	

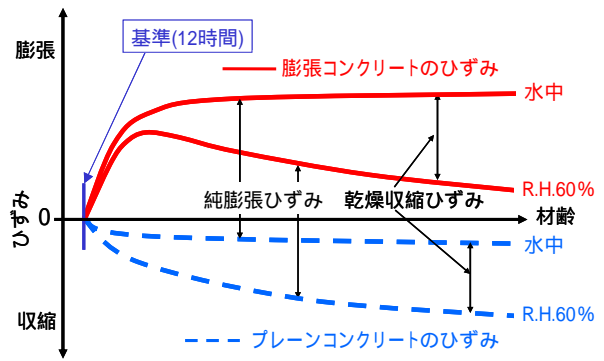


図-4 重ね合わせに基づく各ひずみ成分

記号例: F  $\frac{20}{\text{膨張材量}}$  -  $\frac{20}{\text{環境温度}}$  -  $\frac{100}{\text{環境湿度}}$  -  $\frac{A}{\text{シリーズ}}$  (単位膨張材量: 20kg/m<sup>3</sup>, 環境温度: 20, 環境湿度: 水中, シリーズ: A)

図-5 図表記号の意

を試みた。

図-5に図表記号の例を示す。ここで、環境湿度を示す数字が100の場合は、水中のことを表している。

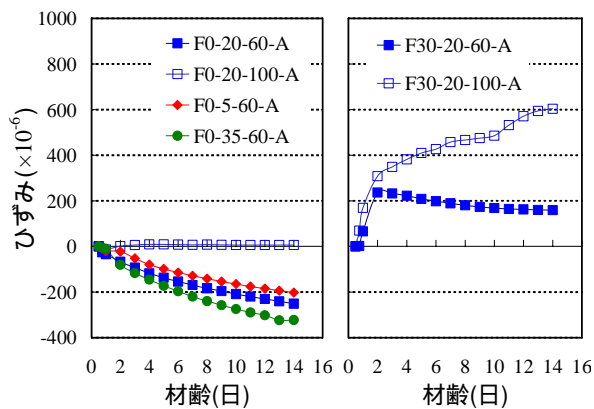
### 3. 実験結果と考察

#### 3.1. 各コンクリートの全ひずみ変化

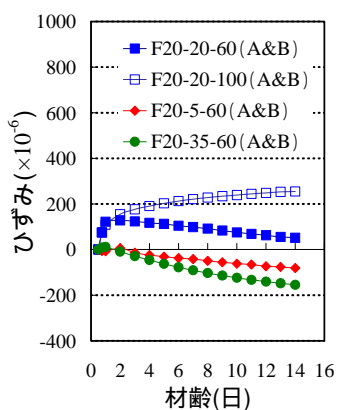
図-6に各環境下におけるひずみ変化を示す。なお、図中に示すひずみは、温度ひずみ補正を施しており、その他の自由長さ変化のひずみ成分として、膨張ひずみと乾燥収縮ひずみ、自己収縮ひずみが含まれている。

#### 3.2. 純膨張ひずみ

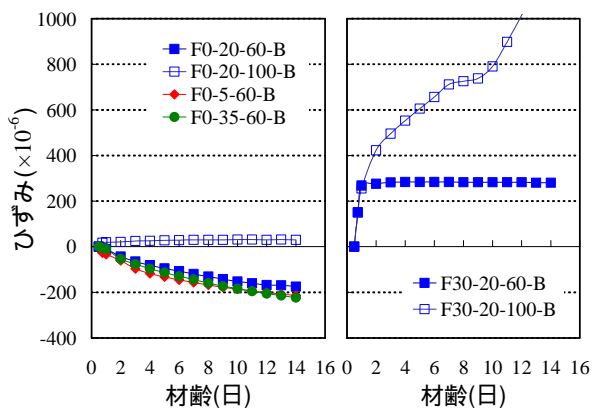
先述のように、本研究では膨張材を添加したコンクリートのひずみから、ほぼ同等の配合で膨張材0(ゼロ)のコンクリートのひずみを差し引いて純膨張ひずみを求めた。各条件における純膨張ひずみを図-7に示す。なお、同図の環境温度が異なる場合(5, 20, 35)につい



a) F0- \*- \*- A      b) F30-20- \*- -A

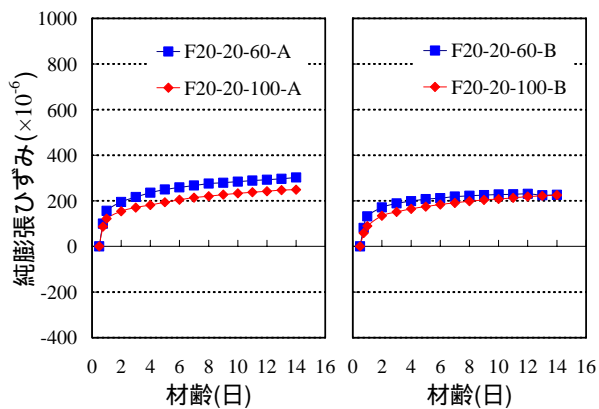


c) F20- \*- \*- A & B

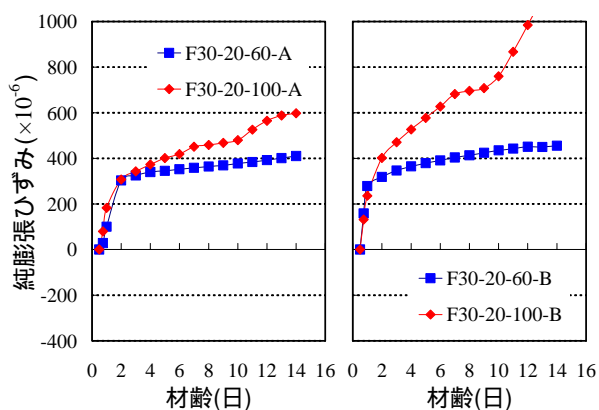


d) F0- \*- \*- B      e) F30-20- \*- -B

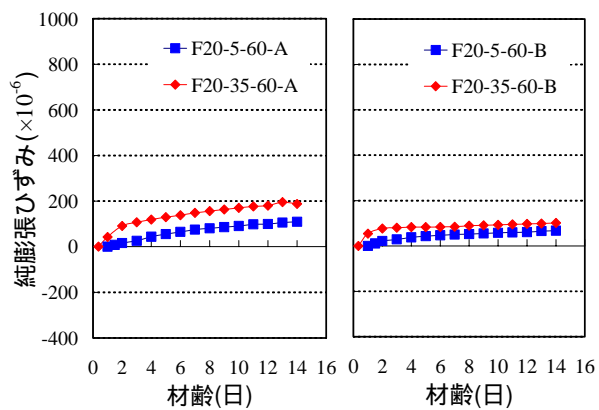
図-6 全ひずみ(\*:パラメータ)



a) F20-20- \*- -A      b) F20-20- \*- -B



c) F30-20- \*- -A      d) F30-20- \*- -B



e) F20- \*- -60-A      f) F20- \*- -60-B

図-7 純膨張ひずみ(\*:パラメータ)

ては、計測開始までの水和反応進行度の影響を考慮するため、積算温度則にて換算した有効材齢 12 時間を基準(ゼロ)としている。

水中環境下における膨張材添加量  $30\text{kg/m}^3$  のコンクリートの場合を除いて、膨張材を内割・外割添加したコンクリートの純膨張ひずみの挙動および量はほぼ同程度であることが分かる。このことは、膨張材の添加方法(内割添加

と外割添加)は、純膨張ひずみ特性に影響をほとんど与えないことを表している。但し、膨張材を標準添加量の 1.5 倍にあたる  $30\text{kg/m}^3$  を添加したコンクリートでは、水中環境下の場合において、純膨張ひずみの差異がみられる。同条件下のコンクリートでは、いずれも材齢 10 日程度で膨張ひずみが急増していることから、上記の差異は内割・外割添加の両コンクリート間

で必然的に生じたものではなく、連続的に外部から供給される水分と膨張圧によって内部に生じた微細なひび割れの進展が関与している可能性が考えられる。

図-6のc)に示す膨張材  $20\text{kg/m}^3$  を添加した環境温度 20 における膨張コンクリートの全ひずみ量は、乾燥環境下(R.H.60%)と水中環境下の違いにより差異がみられる。このひずみ差は環境湿度の違いによって生じているが、図-7のa)およびb)に示す同環境温度・同膨張材添加量の膨張コンクリートにおける純膨張ひずみは、ほぼ同様の挙動を示し、その差異は、最大でも  $50 \times 10^{-6}$  程度であった。このことから、材齢 12 時間を基準とした場合、膨張材を標準添加量の  $20\text{kg/m}^3$  添加した膨張コンクリートの(純)膨張ひずみ能力は、環境湿度にあまり影響を受けない物性であると考えられる。

環境温度 5, 20 および 35 の場合の材齢 14 日時点における純膨張ひずみは、5 および 35 よりも 20 の場合が大きいことが分かる。これは、膨張材による膨張反応そのものが温度依存性を示すものであるが、環境温度の高温化に伴いセメントの水和反応も活性化しコンクリートの組織構造が強固となることから、両者の相反する作用がもたらした結果と考えられる。既往の研究<sup>1),2)</sup>において、材齢 14 日の(JIS A 6202 規定による)膨張率は環境温度が 20 の時、環境温度が 5 以下あるいは 35 以上の場合よりも大きくなることが報告されている。本研究で得られた結果は、これらの既報の傾向とほぼ一致するものである。

また、環境温度が高くなると膨張作用の発現は早くなることも多くの研究<sup>1),2),3)</sup>により報告されているが、本研究における環境温度 5 および 35 の純膨張ひずみにおいても同様に、膨張ひずみ発現性の差異が認められる。しかしながら、材齢 3 日を基準にとった膨張材添加量  $20\text{kg/m}^3$  における環境温度別の純膨張ひずみ(図-8参照)は、環境温度に拘らずほぼ同様の挙動を示している。これらのことから、環境温

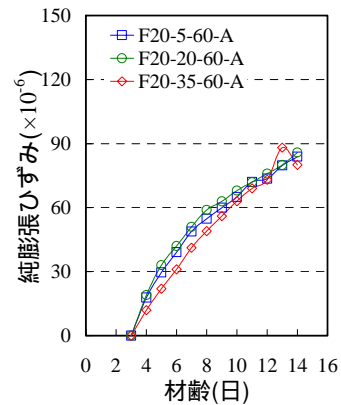


図-8 材齢3日を基準とした純膨張ひずみ

度は膨張材による膨張作用に対して比較的早期の(初期)材齢においてのみ大きな影響を与えるものと推察される。

### 3.3. 乾燥収縮ひずみ

一般に、乾燥収縮ひずみは乾燥開始材齢の(供試体の)長さを基準として、以降の長さ変化より決定される。膨張コンクリートの乾燥収縮ひずみも同様の手段をもって表現されるのがしばしばである<sup>4),5)</sup>。しかしながら、初期材齢にある膨張コンクリートでは、乾燥下において自身の膨張反応と乾燥収縮の双方が同時に作用しており、ひずみ成分を定量化するには、乾燥の有無における長さ変化の差異として乾燥収縮ひずみを表現する必要がある。そこで、本研究では乾燥環境下(R.H.60%)における膨張コンクリートの乾燥収縮ひずみを、同コンクリートの水中環境下における(膨張)ひずみとの差異をもとに算定した。A・B シリーズの各コンクリートの乾燥収縮ひずみを図-9に示す。

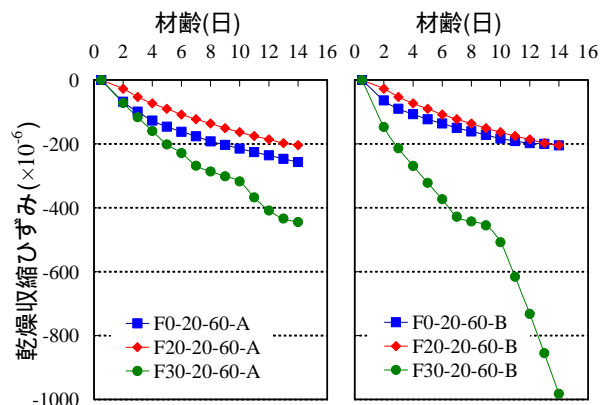


図-9 乾燥収縮ひずみ

膨張材添加量  $30\text{kg/m}^3$  の乾燥収縮ひずみが著しく大きくなっているが、これは水中環境下で膨張材を標準添加量の1.5倍( $30\text{kg/m}^3$ )添加すると膨張ひずみが著しく発現するためである。これに対して、膨張材を標準添加量の  $20\text{kg/m}^3$  添加した膨張コンクリートと膨張材無添加のプレーンコンクリートの材齢 14 日時点における収縮量はほぼ同程度となっている。これは、上記のひずみ定義に基づけば、膨張コンクリートとプレーンコンクリートの乾燥収縮特性に差異がないことを示唆している。

前節に示したように、標準添加量  $20\text{kg/m}^3$  の膨張コンクリートの純膨張ひずみは、環境湿度にあまり影響を受けないものであった。さらに、本節において示すように、同コンクリートの(本研究の定義による)乾燥収縮ひずみは、プレーンコンクリートと同等なものである。これらを勘案すると、環境湿度 R.H.60%の標準添加量  $20\text{kg/m}^3$  とする膨張コンクリートのひずみ変化量は、純膨張ひずみにプレーンコンクリートの乾燥収縮ひずみを重ね合わせても、ある程度予測できる可能性が考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、石灰系の低添加型膨張材による膨張コンクリートの長さ変化特性に対し、環境温度や湿度の影響について実験的な検討を試みた。特に、各ひずみ成分の重ね合わせ則が成立すると仮定することで、初期材齢からの各ひずみ特性を調べた。本研究の範囲内で得られた結論を以下に要約する。

- (1) 標準添加量  $20\text{kg/m}^3$  の膨張コンクリートでは、膨張材の添加方法の違い(外割添加と内割添加)による純膨張ひずみの差異はほとんどみられない。
- (2) 標準添加量  $20\text{kg/m}^3$  を添加した膨張コンクリートの(純)膨張ひずみ能力は、環境湿度にあまり影響を受けないものであった。
- (3) (極)初期材齢においては、セメントの水和反応と膨張材の膨張反応の双方の影響に

より、環境温度 20 で純膨張ひずみの発現が最も大きくなるが、材齢 3 日以降の純膨張ひずみ特性は、環境温度によらずほぼ同様の挙動を示す。

- (4) 環境湿度の違いから定める乾燥収縮ひずみを用いると、標準添加量  $20\text{kg/m}^3$  の膨張コンクリートでは、膨張コンクリートとプレーンコンクリート間には乾燥収縮ひずみ特性に差異はみられない。
- (5) (2)および(4)より、環境湿度 R.H.60%の標準添加量  $20\text{kg/m}^3$  とする膨張コンクリートの(自由)ひずみ変化量は、純膨張ひずみにプレーンコンクリートの乾燥収縮ひずみを重ね合わせても、ある程度予測可能であることを示した。

#### 参考文献

- 1) 戸川一夫，中本純次：膨張コンクリートの拘束膨張特性に及ぼす温度の影響，土木学会論文報告集，No.321，pp.177-187，1982.5.
- 2) 辻 幸和，横田紀男，鈴木康範，森本宏：膨張コンクリートの強度および膨張性状に及ぼす養生温度の影響，コンクリート工学年次講演会講演論文集，No.3，pp.5-8，1981.
- 3) 三谷裕二，谷村 充，佐久間隆司，佐竹紳也：膨張材を混和したコンクリートの拘束膨張特性に及ぼす養生温度の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.155-160，2003.
- 4) 土木学会：膨張コンクリート設計施工指針，コンクリートライブラリー 75，pp.104-107，1993.
- 5) 戸川一夫，中本純次：膨張コンクリートの拘束膨張，収縮特性に及ぼす使用材料の影響，土木学会論文報告集，No.326，pp.129-140，1982.10.