

# 報告 蒸気養生を行うケミカルプレストレストコンクリートにおける円筒型枠を用いた拘束膨張試験の適用

柄澤 英明\*1・田所 雄治\*2・奥山 厚志\*3

**要旨** : JCI 規準にて、円筒型枠による拘束膨張量の計測方法が基準化されている。一方、プレキャストコンクリート二次製品（以下、PCa 製品）では、常圧蒸気養生を行いケミカルプレストレスの導入を目的として膨張材を使用しているが、従来から用いられている JIS A 6202 附属書 2 の方法では、試験方法の煩雑さなどから日常管理レベルでの適用は難しい状況にある。そのため本報告では、蒸気養生下での円筒型枠を用いた拘束膨張試験の計測を行うとともに、JIS A 6202 附属書 2 に示される試験方法との相関性、また PCa 製品工場での適用の確認を行った。その結果、 $500\sim 700\times 10^{-6}$  程度で JIS B 法との相関性を示すことが確認された。

**キーワード** : 円筒型枠, 拘束膨張試験, 蒸気養生, プレキャストコンクリート, ケミカルプレストレス

## 1. はじめに

円筒型枠を用いたコンクリートの拘束膨張試験(以下、円筒型枠法と略)が JCI 規準<sup>1), 2), 3)</sup>として制定されている(図-1)。この試験方法では、拘束膨張ひずみ  $600\times 10^{-6}$  程度までとされ、材齢 7 日における JIS A 6202 附属書 2 A 法(以下、JIS A 法)と高い相関性があるとされている。

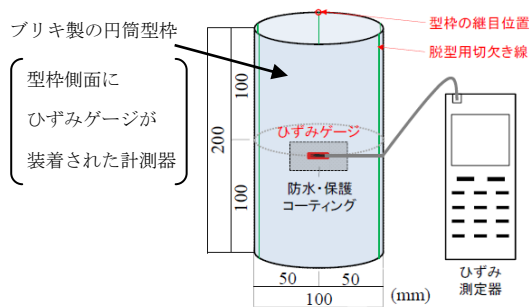


図-1 円筒型枠を用いた拘束膨張測定器<sup>1), 2), 3)</sup>

一方、プレキャストコンクリート製品(以下、PCa 製品)の中でも、特に暗きょ類を中心としたボックスカルバートでは、膨張材を積極的に使用した“ケミカルプレストレスの導入”による曲げ耐力向上を目的として膨張材が使用されている<sup>4), 5)</sup>。これらの PCa 製品では、常圧蒸気養生による促進養生が一般的となっていて、JIS A 法では専用の試験治具や恒温室での計測を行うことから、JIS A 法での計測は試験練り時などでの利用となっている。そのため PCa 製品工場での膨張量管理としては、実製品への載荷試験、供試体での圧縮強度試験、使用計量記録に代え管理を行っている<sup>6)</sup>。また、JIS A 法では供試体の標準養生、および恒温試験室での計測と規定されていて、PCa 製品のような蒸気養生を行ったコンクリート

に関しては、養生条件にあった拘束膨張量の管理手法に関する資料が少ない状況にある。

これらの背景から、本報告では蒸気養生を行った供試体について、JCI 規準とされた円筒型枠を用いた拘束膨張試験と JIS A 6202 附属書 2 での計測結果との相関性、ならびに PCa 製品工場での適用について述べる。

## 2. 円筒型枠法による拘束膨張試験

円筒型枠法による拘束膨張試験については、円筒型枠と拘束膨張ひずみを計測する、ひずみゲージがセットとなったものが現在市販されていることから、今回はそれらを利用し計測を行った(図-2)。

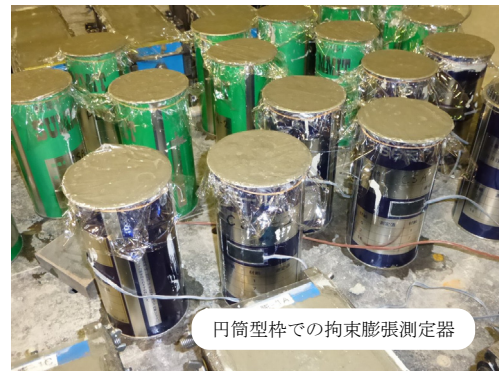


図-2 円筒型枠法による計測状況

## 3. 実験方法

### 3.1 実験概要

膨張材量の違う同一配合の供試体に対し、PCa 製品製造時に行う常圧蒸気養生を行い、JIS A 6202 附属書 2 の拘束膨張試験と円筒型枠を用いた拘束膨張試験との比較を行い、これらの相関性について確認を行った。なお今

\*1 全国ボックスカルバート協会(鶴見コンクリート株式会社 技術部 研究課)(正会員)

\*2 全国ボックスカルバート協会(興産産業株式会社 技術部)(正会員)

\*3 全国ボックスカルバート協会(ジオスター株式会社 技術開発チーム 技術研究所)(正会員)

回は、蒸気養生に伴う供試体の収縮も想定し、JIS A 6202 附属書 2 に示される B 法（拘束膨張及び収縮試験）（以下、JIS B 法）により計測を行った<sup>7)</sup>（図-3）。



図-3 JIS B 法 拘束膨張試験治具

### 3.2 材料・配合

基本となる配合は、PCa 製品として使用される設計基準強度 35 N/mm<sup>2</sup> 以上<sup>8)</sup> とし、以下の配合とした（表-1）。

表-1 配合

配合名	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )					
	W	C <sup>*1</sup>	Ex <sup>*2</sup>	S	G	Ad <sup>*3</sup>
PL	168	373	0	779	1044	1.80
CSA-30	168	343	30	779	1044	1.90
CSA-50	168	323	50	779	1044	1.94
CSA-60	168	313	60	779	1044	1.86

\*1；普通ポルトランドセメント，\*2；エトリンガイト系膨張材，

\*3；減水剤 標準形（ポリカルボン酸系）

いずれも SL=8±2.5cm, Air=2.0±1.0%, Gmax=25mm, W/B=45%, s/a=43%, 砂(S)・砂利(G)は川砂・川砂利を使用。

### 3.3 測定項目と供試体の種類

拘束膨張量の計測にあたり、4 配合について JIS B 法供試体用を 6 本、円筒型枠用を 3 本、そしてダミー缶用（試料を入れないもの）を 3 本とした。この他に圧縮強度用として、計測材齢毎に各 3 本とした。各計測材齢は、長

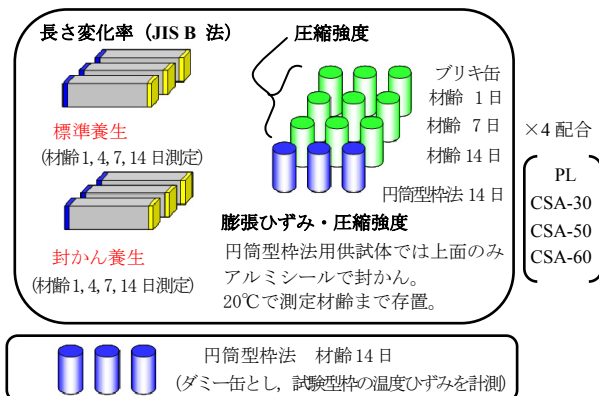


図-4 測定項目と供試体

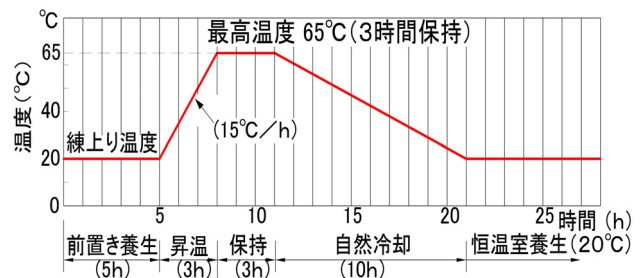
さ変化率では 1, 4, 7, 14 日（円筒型枠法のみ連続計測）、圧縮強度では 1, 7, 14 日とした。ここで材齢 1 日の圧縮強度確認を行う理由は、PCa 製品工場での蒸気養生後の脱型強度確認のため実施している。また各供試体の計測終了後に、JIS B 法用供試体では曲げ強度試験を、円筒型枠法供試体では圧縮強度試験をあわせて行った（図-4）。

### 3.4 蒸気養生

供試体の蒸気養生（図-5）は、下記養生条件にて行った（図-6）。なお前置き養生時間は、今回の実験では全供試体の打設が完了してから、最低 2 時間の前置き養生を確保する時間とし 5 時間と設定した。



図-5 供試体の蒸気養生



\*1；測定開始時期（円筒型枠法）は、打設完了後 5 時間後

\*2；脱型時期（JIS B 法）は、24 時間後

図-6 蒸気養生条件

### 3.5 蒸気養生後の各供試体の養生

各種配合に対する養生条件は、表-2 に示す条件として行った。

表-2 養生条件

計測項目と試験方法	養生条件
長さ変化率（JIS B 法）	蒸気養生 ⇒ 標準養生 <sup>*1</sup>
長さ変化率（JIS B 法）	蒸気養生 ⇒ 封かん養生 <sup>*2</sup>
膨張ひずみ（円筒型枠法）	蒸気養生 ⇒ 封かん養生 <sup>*2</sup>
圧縮強度計測用	蒸気養生 ⇒ 封かん養生 <sup>*2</sup>

\*1；20°C 水中養生，\*2；アルミシールによる封かん養生（恒温室）

表-3 フレッシュ性状・各種強度結果の一覧

配合名	スランブ (cm)	空気量 (%)	練上り温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )				曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )*2	
				1日	7日	14日	14日*1	標準養生	封かん養生
PL	7.5	1.6	22.7	25.5	37.8	42.5	41.9	5.35	5.28
CSA-30	10.5	1.8	22.8	25.9	37.7	44.5	43.2	5.80	5.90
CSA-50	10.0	1.7	23.0	25.1	36.6	41.9	43.4	6.20	6.08
CSA-60	8.0	2.2	23.0	23.9	34.6	40.6	41.3	6.84	6.15

\*1; 円筒型枠法供試体での計測結果, \*2; 材齢14日におけるJIS B法拘束治具入り供試体での計測結果(参考値)

#### 4. 実験結果と考察

##### 4.1 フレッシュ性状・各種強度

各配合におけるフレッシュ性状, 各材齢における圧縮強度・曲げ強度の結果を表-3に示す。

その結果, 材齢14日では目標とする設計基準強度以上の強度を, また材齢1日強度として20 N/mm<sup>2</sup>以上の強度を確認することができ, 脱型強度として十分な強度を有していることを確認した。曲げ強度については, 参考値ではあるがJIS B法計測治具入りでの曲げ試験を行い, 膨張材添加量の増加に伴う曲げ強度の向上を確認することができた。

##### 4.2 温度履歴

温度履歴曲線を図-7に示す。

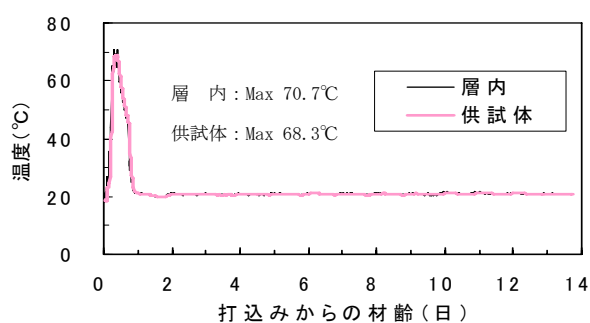


図-7 温度履歴

##### 4.3 長さ変化率の計測結果

各養生条件, および各材齢における長さ変化率の計測結果を図-8, 9, 10に示す。

その結果, 材齢1日で蒸気養生の影響による, 膨張材の添加量に比例した膨張発現性を示した。特に円筒型枠法(材齢1日まで)で急速な $100 \times 10^{-6}$ 程度の膨張が見られるが, これは温度履歴曲線とダミー缶の長さ変化から, 円筒型枠が熱変形の影響を受けたものと推測される。また, その後の材齢でJIS B法(標準養生)供試体では, 蒸気養生後の水中養生による水和反応の促進により, 膨張の継続を確認した。一方, JIS B法(封かん養生)供試体と円筒型枠法では, 蒸気養生後の養生が封かん養生であったため, 水和反応に必要な水分の供給が少なかったことから蒸気養生後の膨張量は一定となり, これらは

既往の成果<sup>9)</sup>とも一致する結果となった。

次に, 円筒型枠法PLについて $150 \sim 170 \times 10^{-6}$ 程度の膨張を確認した。この膨張については, JIS B法での計測結果(標準養生・封かん養生)と比べ, 2倍程度の膨張

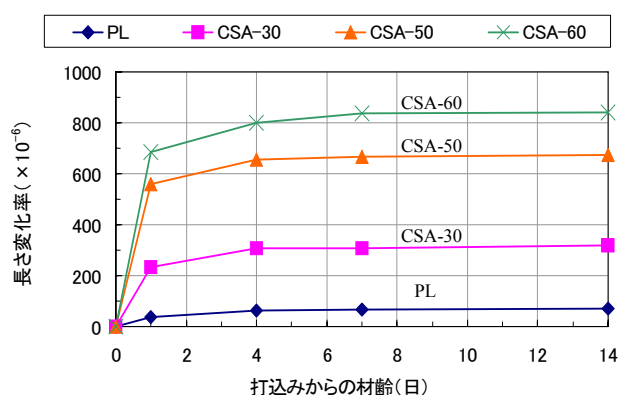


図-8 JIS B法での長さ変化率結果(標準養生)

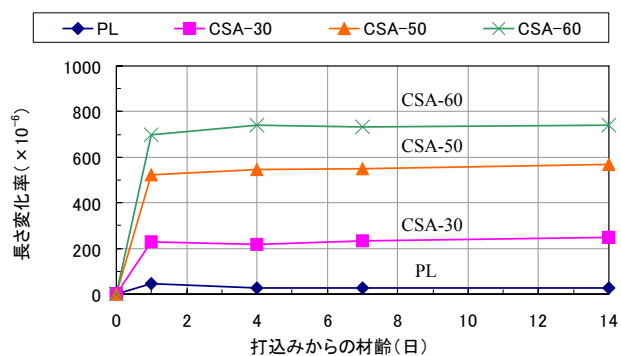


図-9 JIS B法での長さ変化率結果(封かん養生)

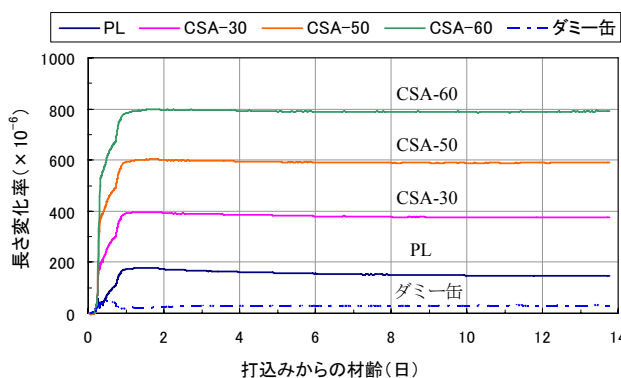


図-10 円筒型枠法での長さ変化率結果(封かん養生)

量となった。しかし円筒型枠法で計測したダミー缶では、 $20 \sim 30 \times 10^{-6}$  程度の膨張であったことを考慮すると、コンクリートと円筒型枠の線膨張係数の違いによる影響が出たものと推測されるが、詳細は今後の課題とする。

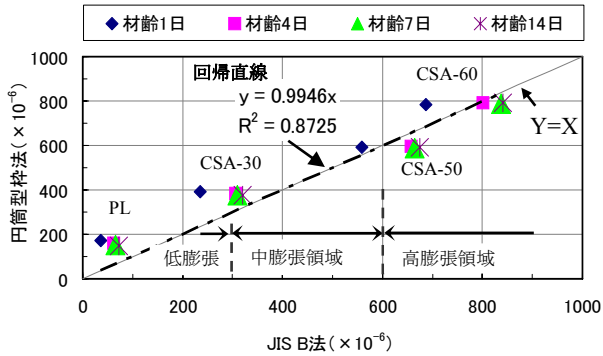


図-11 円筒型枠法と JIS B 法との相関図 (標準養生)

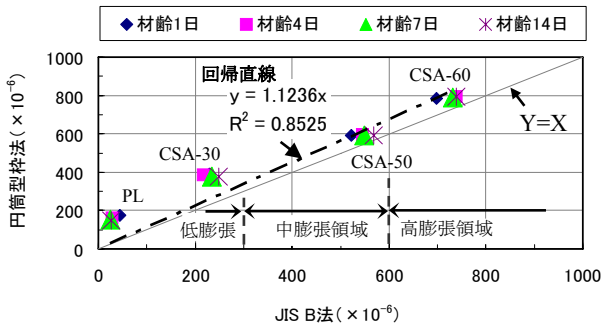


図-12 円筒型枠法と JIS B 法との相関図 (封かん養生)

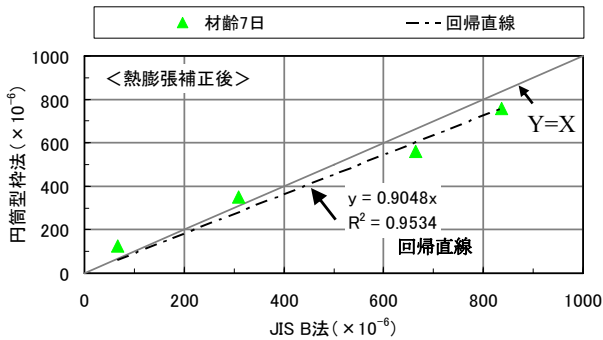


図-13 円筒型枠法と JIS B 法との相関図 (標準養生, 材齢 7 日, 円筒型枠法での熱膨張を考慮)

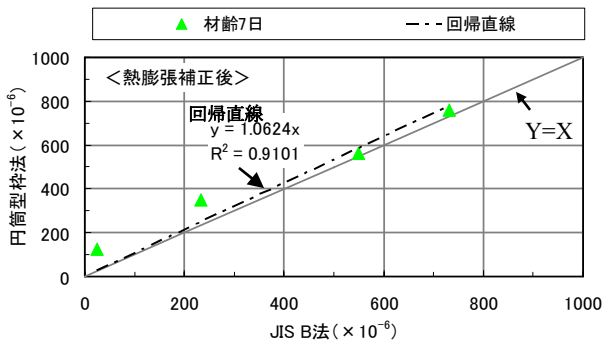


図-14 円筒型枠法と JIS B 法との相関図 (封かん養生, 材齢 7 日, 円筒型枠法での熱膨張を考慮)

#### 4.4 長さ変化率に対する相関性の検証

円筒型枠法計測結果を基準とし、JIS B 法 (標準養生)、および JIS B 法 (封かん方法) との計測結果 (各材齢別) の相関図を図-11, 12 に示す。

その結果、JIS B 法 (標準養生) では低・中膨張領域 (約  $400 \times 10^{-6}$  以下) で円筒型枠法の結果の方が大きく、中・高膨張領域 (約  $500 \times 10^{-6}$  以上) では、JIS B 法の結果の方が大きく計測された。結果を材齢別で見ると、JIS B 法 (標準養生) 材齢 1 日での結果が他材齢と比べて、乖離傾向 ( $\pm 130 \sim 150 \times 10^{-6}$  程度以上) を示す傾向となった。これらの要因として養生条件の違い、高膨張領域 (約  $600 \times 10^{-6}$  以上) では特に膨張材の添加量が多くなると材齢 1 日以降の膨張量伸びが大きくなったと考えられる。

一方、JIS B 法 (封かん養生) では、高膨張領域で円筒型枠法との相関性が見られるが、低膨張領域 (約  $300 \times 10^{-6}$  以下) では円筒型枠法の方が大きく計測される結果となった。これらは養生条件が同じであることから、低膨張領域では蒸気養生による型枠の線膨張係数の違いによる影響が現れたものと推測される。

次に、JIS B 法における低・中膨張領域での相関性を見るため、コンクリートと型枠の線膨張係数の違いから缶自体の熱膨張量 (ダミー缶の膨張量) を差し引き、JIS B 法の管理材齢とする材齢 7 日のみを抽出した相関図を図-13, 14 に示す。

その結果、JIS B 法 (標準養生) では低・中膨張領域における相関性が高いことを示せた。また JIS B 法 (封かん養生) では中・高膨張領域において、より相関性が見られるようになるものの、低・中膨張領域での相関性については、乖離傾向を示す結果となった。

### 5. PCa 製品工場での適用

#### 5.1 実験概要

先の実験と同様に、JIS B 法 (標準養生・封かん養生) と円筒型枠法での計測結果を比較し、その相関性と計測方法の適用について確認を行った。

#### 5.2 材料・配合

配合は先の実験と同様に、設計基準強度  $35 \text{ N/mm}^2$  以上

表-4 配合

配合名	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
	W	C* <sup>1</sup>	Ex* <sup>2</sup>	S	G	Ad* <sup>3</sup>
PL	168	420	0	774	1034	2.10
CSA-50	168	370	50	774	1034	2.31

\*1; 普通ポルトランドセメント, \*2; エトリンサイト系膨張材

\*3; 減水剤 標準形 (ポリカルボン酸系)

いずれも SL=8±2.5cm, Air=2.0±1.0%, Gmax=20mm, W/B=40%, s/a=43%

とし、砂(S)・砂利(G)は砕砂・砕石を使用。

として、膨張材無混入のものと PCa 製品工場として一般的に使用されるケミカルプレストレスの導入を目的とした配合での比較を行った (表-4)。

### 5.3 蒸気養生

蒸気養生条件を図-15 に示す。前回との相違点とし、前置き養生時間を供試体打設後から3時間とした。

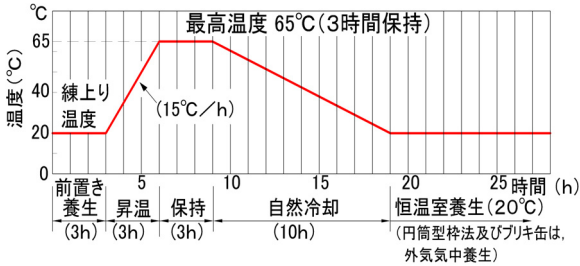


図-15 蒸気養生条件

### 5.4 養生条件と測定材齢

各供試体の蒸気養生条件と測定材齢を表-5 に示す。

表-5 各養生条件と測定材齢一覧

測定項目	養生条件	測定材齢
JIS B 法 ・長さ変化率 ・曲げ強度	蒸気養生後に 標準養生*1	・長さ変化率 (材齢 2,4,7,14 日) ・曲げ強度 (材齢 14 日)
JIS B 法 ・長さ変化率 ・曲げ強度	蒸気養生後に 封かん養生*2	・長さ変化率 (材齢 2,4,7,14 日) ・曲げ強度 (材齢 14 日)
円筒型枠法 ・膨張ひずみ ・圧縮強度	蒸気養生後に 封かん養生*3	・膨張ひずみ (材齢 14 日連続計測) ・圧縮強度 (材齢 14 日)
ブリキ缶 ・圧縮強度	蒸気養生後に 封かん養生*3	・圧縮強度 (材齢 14 日)

\*1 ; 自然冷却後の材齢 2 日 (運搬) で脱型後、20°C水中養生

\*2 ; 自然冷却後の材齢 2 日 (運搬) で脱型後、恒温室 20°C封かん養生 (封かん養生には、アルミシールを使用)

\*3 ; 自然冷却後、工場屋内での気中養生

### 5.5 フレッシュ性状・各強度計測結果

各供試体のフレッシュ性状を表-6、圧縮強度および曲げ強度の結果を表-7 に示す。なお、各圧縮強度および曲げ強度の結果は、各供試体の 3 本平均とする。

その結果、材齢 14 日では目標とする設計基準強度以

表-6 フレッシュ性状・各種強度結果の一覧

配合名	スランプ (cm)	空気量 (%)	練上り温度 (°C)
PL	6.0	1.0	14.5
CSA - 50	7.1	1.0	15.7

上の強度を確認した。曲げ強度については、先の実験と同様、参考値ではあるが JIS B 法計測器具入りでの曲げ試験を行い、膨張材添加量の増加に伴う曲げ強度の向上を確認することができた。

表-7 各強度の計測結果の一覧

配合名	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )*2	
	14 日	14 日*1	標準養生	封かん養生
PL	38.1	37.6	5.82	5.86
CSA - 50	44.7	42.8	7.33	7.00

\*1 ; 円筒型枠法供試体での試験結果

\*2 ; 材齢 14 日における、JIS B 法拘束器具入り供試体での計測結果 (参考値)

### 5.6 温度履歴

温度履歴曲線を図-16 に示す。

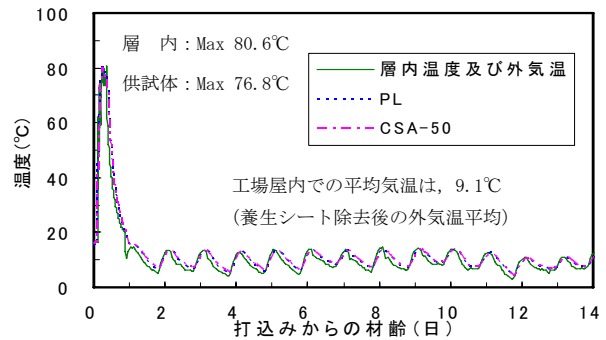


図-16 温度履歴と外気 (円筒型枠法)

### 5.7 長さ変化率の計測結果

各養生条件、および各材齢における長さ変化率の計測結果 (各供試体の 3 本平均) を図-17 に示す。なお円筒型枠法の結果は、外気温による温度補正後の値とし、JIS B 法の計測が 2 日以降としているのは、JIS B 法計測場所への運搬移動したため、材齢 2 日からの計測とした。

その結果、先の実験と同様に PL にて、JIS B 法で  $100 \times 10^{-6}$  程度の膨張ひずみが計測されたが、円筒型枠法では  $230 \times 10^{-6}$  程度が計測された。また CSA-50 では、JIS B

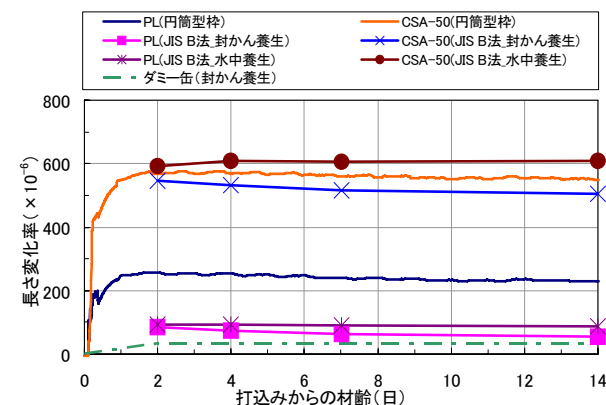


図-17 長さ変化率計測結果

法（標準養生）で  $600 \times 10^{-6}$  程度、JIS B 法（封かん養生）では  $530 \times 10^{-6}$  程度、円筒型枠法では  $560 \times 10^{-6}$  程度の膨張ひずみが計測された。

以上の結果、先程と同様に円筒型枠法 PL では、コンクリートと円筒型枠での線膨張係数の違いの影響が出たものと推測される。

### 5.8 長さ変化率に対する相関性の検証

円筒型枠法結果を基準とした JIS B 法（標準養生）、および JIS B 法（封かん養生）の相関図を図-18 に示す。

その結果、PL（低・中膨張領域）では JIS B 法（標準養生・封かん養生）結果と乖離傾向を示し、CSA-50（中・高膨張領域）では JIS B 法（標準養生・封かん養生）との相関性が見られた。また先程の実験結果では、円筒型枠法での熱膨張を考慮することで、低・中膨張領域でも JIS B 法（標準養生）との相関性は見られたが、今回の実験では乖離傾向を示した（図-19）。

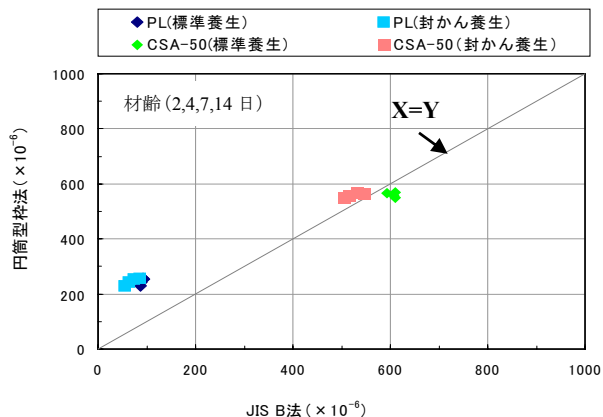


図-18 円筒型枠法と JIS B 法との相関図

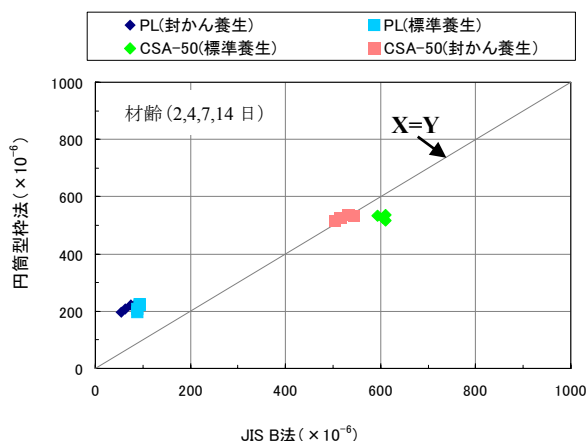


図-19 円筒型枠法と JIS B 法との相関図  
(円筒型枠法での熱膨張を考慮)

## 6. まとめ

蒸気養生を行う円筒型枠法による拘束膨張量の計測を行った結果、拘束膨張ひずみの計測が可能であり、特に中・高膨張領域では JIS B 法（封かん養生）での相関性

を示す結果を得た。また円筒型枠法における型枠自体の熱膨張を考慮することで、低・中膨張領域においても、ある程度の相関性を見ることができた。

PCa 製品工場適用実験では、 $500 \sim 600 \times 10^{-6}$  程度で JIS B 法（標準・封かん養生）との相関性を示す結果となった。

全体の相関性については、計測サンプル数が少ない事や低膨張領域でのコンクリートと円筒型枠との線膨張係数の違いによる影響なども含め、今後の課題とする。

今後は、蒸気養生を行う PCa 製品工場における、ケミカルプレストレストコンクリートの膨張ひずみの管理および計測に対して、より簡易な計測手法である円筒型枠法の計測精度向上について検討していきたい。

謝辞：本実験にあたり、電気化学工業株式会社 栖原様をはじめ青海工場の関係各位に多大なご協力をいただいたことを記し、ここに謝辞を表します。

### 参考文献

- 1) JCI-S-009-2012, 円筒型枠を用いた膨張コンクリートの拘束膨張試験方法
- 2) 辻 真人, 橋田 浩, 湯浅 竜貴, 高橋 圭一: 膨張コンクリートの簡易拘束膨張試験方法, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp. 437 - 442, 2011
- 3) 辻 真人, 橋田 浩, 湯浅 竜貴, 菊地 俊文: 軽量型枠を用いた膨張コンクリートの拘束膨張試験による品質管理, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No. 1, pp. 520 - 525, 2012
- 4) 栖原 健太郎, 李 春鶴, 芦田 公伸, 辻 幸和: 膨張コンクリートを用いた CPC はりの曲げひび割れ幅の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 2, pp. 229 - 234, 2009
- 5) 栖原 健太郎, 田所 雄治, 柄澤 英明, 辻 幸和: 膨張コンクリートの引張ひずみの終局値に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No. 1, pp. 172 - 177, 2012
- 6) 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. 33, 1993
- 7) 辻 幸和: 膨張コンクリートの一軸拘束膨張および収縮試験方法に関する研究, 土木学会論文集, 第 378 号/V-6 (ノート), 1987. 2
- 8) JIS A 5372 プレキャスト鉄筋コンクリート製品, 附属書 C-4 鉄筋コンクリートボックスカルバート, pp. 40, 80, 2010
- 9) 高性能膨張コンクリートの性能評価とひび割れ制御システムに関する研究委員会 報告書, pp. 131, 2011 年 9 月