

# 論文 場所打ちPC床版の材齢初期における膨張材効果の評価方法に関する一提案

高瀬 和男<sup>\*1</sup>・寺田 典生<sup>\*2</sup>・福永 靖雄<sup>\*3</sup>・石川 敏之<sup>\*4</sup>

要旨：場所打ち PC 床版に添加されている膨張材は，材齢初期のコンクリートの水和反応による体積膨張収縮に大きな影響を与えるが，その材齢初期のコンクリートひずみを評価することは困難である。そこで，コンクリートの材齢初期における膨張材の評価方法について提案し，その方法により実橋の PC 床版を模した 1 m 供試体を用いて膨張量を定量的に評価した。さらに，実物大供試体を用いてコンクリートのひずみを計測し，1 m 供試体で評価した膨張量を考慮した温度応力解析結果と計測ひずみとから本論文で提案した評価法の妥当性を確認した。

キーワード：場所打ち PC 床版，若材齢，膨張材，膨張量，線膨張係数

## 1. はじめに

現在，建設を進めている第二東名高速道路の鋼 2 主桁橋は，3 車線の広幅員を有する橋梁であり，床版支間は 11.5m と従来の鋼 2 主桁橋よりも広い場所打ち PC 床版を採用している。床版厚は，主桁上で 560 mm，床版支間中央で 370 mm と従来の PC 床版と比べ，非常に厚く，高強度のコンクリートを用いている。そのため，水和熱による床版コンクリートの温度上昇および下降にともなう体積収縮および温度応力が大きくなると考えられる。

場所打ち PC 床版では，床版の打継ぎ目付近において，打設された床版の水和熱による体積収縮が起こる際に，先に打設された床版が拘束することにより打設された床版に引張応力（温度応力）が発生する。さらに，床版と鋼桁とはスタッドジベルによって結合されているため，鋼桁の拘束によっても温度応力が発生する。

この温度応力を抑制するためには，養生方法などの床版施工に係わる方法の他にコンクリートに膨張材の添加する方法が有効である。し

かし，若材齢の床版コンクリートにおける膨張材の効果については，その定量的評価方法が確立されてはいなかった。

材齢初期における膨張材の効果の評価する方法について研究されている論文<sup>1)</sup>が数少ないため，本論文では，若材齢時のコンクリートひずみの評価方法について簡便な方法を提案し，実橋の PC 床版を模した 1 m × 1 m × 床版厚の供試体（以下 1 m 供試体）を用いて膨張材による膨張量を定量的に評価した。さらに，実物大供試体試験において，提案した評価方法を用いて算出した計測ひずみと，温度応力解析により算出したひずみとを比較し，提案した評価方法の妥当性を示す。

## 2. 1 m 供試体による床版再現試験

### 2.1 1 m 供試体の概要

本実験で用いた 1 m 供試体の寸法は，TYPE-A は 1m × 1m × 0.37m，TYPE-B は 1m × 1m × 0.56m である。TYPE-A は，実橋の床版支間中央を再現した供試体であり，TYPE-B は，主桁

\*1 駒井鉄工(株) 工事計画部次長 (正会員)

\*2 日本道路公団 静岡建設局 建設部 構造技術課課長 工修

\*3 日本道路公団 静岡建設局 富士工事事務所 構造工事区工事長 工修

\*4 駒井鉄工(株) 技術研究室 工修

表 - 1 コンクリートの配合表

TYPE	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	セメント	スラブ <sup>°</sup> (cm)	空気量 (%)	W/C+E (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
							水	セメント	膨張材 <sup>*2)</sup>	細骨材	粗骨材	混和剤
A1, A2, B	40	N <sup>*1)</sup>	10 ±2.5	4.5 ±1.5	42.0	46.6	156	341	30	834	962	2.789
A3	40	N <sup>*1)</sup>	10 ±2.5	4.5 ±1.5	42.0	46.6	156	371	-	834	962	2.789

\*1: 普通ポルトランドセメント(比重 3.15) \*2: 水和熱抑制型膨張材(石灰系, 比重 2.85)

表 - 2 1 m 供試体一覧

1m供試体	鉄筋(ピッチmm)	備考
TYPE-A1	上下段:橋軸 D19(100)	膨張コンクリート
TYPE-A2		
TYPE-A3	上下段:橋直 D13(125)	膨張材無しの 普通コンクリート
TYPE-B	上下段:橋軸 D19(100)	H=560mm 膨張コンクリート
	上下段:橋直 D16(125) 中段:橋軸 D19(100) 中段:橋直 D13(125)	

上下鉄筋位置:コンクリート面から 48mm

中段鉄筋位置:下段鉄筋位置から 100mm 上鉄筋側

直上を再現した供試体である。TYPE-A の底型枠には、実橋で用いる木製型枠を使用し、TYPE-B の底型枠には鋼桁フランジを再現するために厚さ 40 mmの鋼板を用いた。側面は、温度境界を設けるために、300 mm厚の断熱材(ポリスチレンフォーム)を用いた。1 m 供試体の設置位置は底型枠の熱の伝達を考慮して、地面から高さ 300 mmの位置に設置した。1 m 供試体の構造概要を図 - 1 に示す。

養生期間は実橋と同じ 7 日間とし、それ以後はシートおよび養生マットを取り外した状態とした。底型枠は実橋の環境を再現するために、養生終了後 TYPE-A は撤去し、TYPE-B は鋼フランジを再現しているため撤去しなかった。さらに、養生終了後の側面からの乾燥を防ぐために、断熱材を取り外し側面に防水塗料を塗布し、再度断熱材を設置した。

## 2.2 試験方法

1 m 供試体の温度およびコンクリートのひずみを計測するために、図 - 2 に示す計測センサーを用いて計測を行った。熱電対は 1 m 供試体中央の厚さ方向に 5 段埋込み、床版の温度分布の計測を行った。鉄筋計および埋込み型ひずみ計は上下段の橋軸方向、橋軸直角方向(以下

表 - 3 再現供試体の打設状況

再現供試体	打設日	打込み温度(°C)	打込み時の外気温(°C)
TYPE-A1	H13.04.06	23.0	18.5
TYPE-A2,B	H13.06.29	33.7	29.5
TYPE-A3	H13.06.29	33.5	29.0

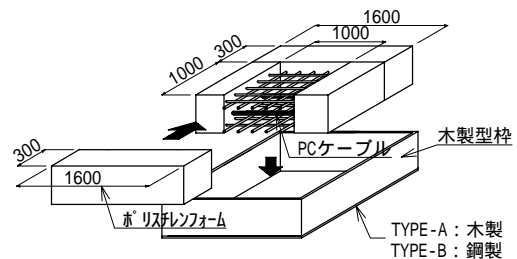


図 - 1 1 m 供試体の構造概要

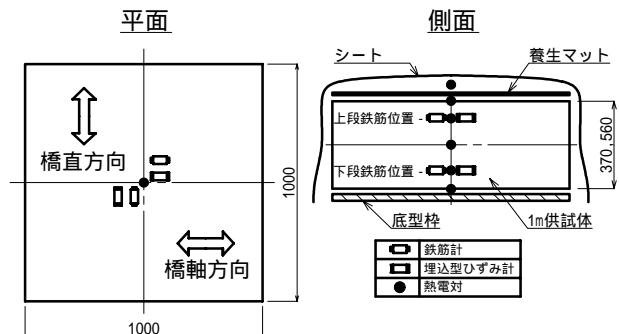


図 - 2 計測センサー配置図

橋直方向) 鉄筋位置に設置し、それぞれの位置でのコンクリートのひずみを計測した。1 m 供試体に用いたコンクリートの配合を表 - 1 に示す。1 m 供試体の試験体一覧を表 - 2 に示す。コンクリートの打設日、コンクリート打込み温度およびその時の外気温を表 - 3 に示す。

## 3. 1 m 供試体試験結果

### 3.1 コンクリートの温度

床版厚中心位置のコンクリートの温度履歴を図 - 3 に示す。TYPE-A1 は、打込み温度が、他の TYPE と異なるため、コンクリートの最高温度に差が生じたが温度上昇量は同程度であ

った。床版厚の厚いTYPE-Bは、TYPE-A2、A3に比べ、最高温度が約5℃高くなった。同時に施工を行った実物大供試体のコンクリートの温度分布と1m供試体(TYPE-B)のコンクリートの温度分布を図-4に示す。この図より、1m供試体により実橋のコンクリートの温度分布が再現されていることがわかる。

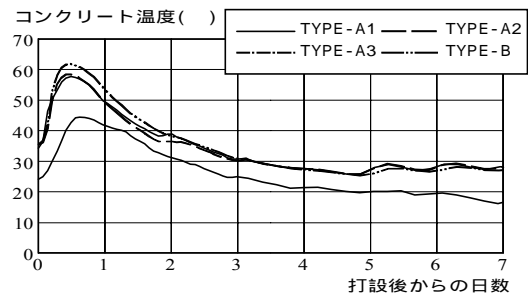


図-3 コンクリートの温度履歴

### 3.2 計測ひずみ

一般に、埋込み型ひずみ計に発生している実ひずみは式(1)を用いて算出する。

$$\epsilon_i = C \times \epsilon_m + \alpha \times (T_i - T_0) \quad (1)$$

ここに、 $\epsilon_i$ : コンクリートの実ひずみ( $\mu$ )、 $C$ : 校正係数、 $\epsilon_m$ : ひずみ計の指示値( $\mu$ )、 $\alpha$ : 埋込み型ひずみ計線膨張係数  $=11.7(\mu/^\circ\text{C})$ 、 $T_i$ : コンクリート温度( $^\circ\text{C}$ )、 $T_0$ : コンクリート打込み温度

$\epsilon_i$ は計測されたひずみを示し、その中には、温度による線膨張(自由)ひずみ、膨張材による膨張ひずみ、乾燥収縮による収縮ひずみ、弾性ひずみ、クリープひずみが含まれると考え、本論文では実ひずみと定義する。つまり、コンクリート凝結前にコンクリートの温度変化による体積変化については、計測器では正確に計測されてはいないため、コンクリート中の全てのひずみが示されているとは考えられない。

材齢初期のコンクリートにおける膨張材の膨張効果に係わるひずみの評価については、鉄筋とコンクリートとの付着がどの時点から確実に拘束ひずみが発生しているかが問題となる。したがって、ここでは、式(1)を用い、材齢初期の実ひずみをより明確な値とすることを試みた。

鉄筋とコンクリートとの付着の発現については、コンクリート打込み後、数時間経過した時点初期値とするのが望ましい<sup>2)</sup>。そこで、今回は別途 JIS A 6204 にて実施した凝結終結時間( $t=9.56\text{hr}$ )をコンクリートのひずみの初期値とした。これは図-5に示すように、膨張コンクリートの式(1)による実ひずみとコンクリート

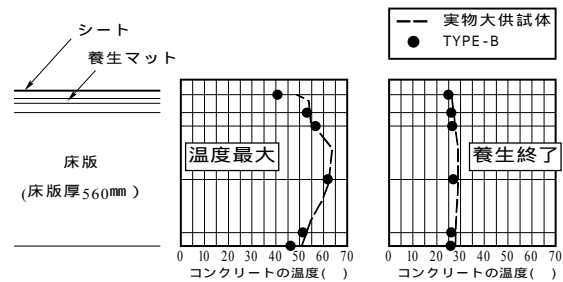


図-4 TYPE-Bの温度分布

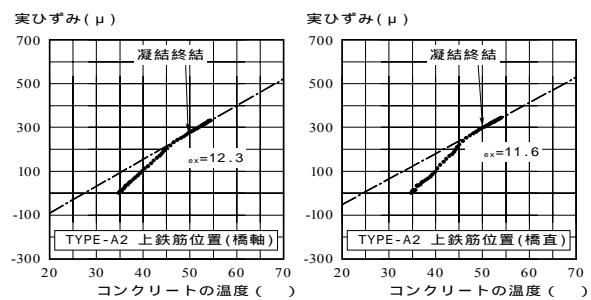


図-5 温度上昇時のコンクリートの実ひずみと温度との関係

温度との関係に線形性が表れるのが、凝結終結時間付近となっていることより、凝結終結時間以前については、コンクリートの線膨張(自由)ひずみと、膨張ひずみが鉄筋とは別に体積変化を生じていると考えられる。そのため、凝結終結までの式(1)による計測値については、コンクリート内の膨張効果を評価するには不確かな値と考えた。

しかし、凝結終結時を初期値とすると実ひずみには、コンクリート打込み時から凝結終結時間までの水和熱によるコンクリートの温度膨張が考慮されていない。そこで、式(1)より求めたコンクリートの実ひずみとコンクリートの温度との関係より、膨張材の膨張ひずみが含まれた温度上昇時の見かけの線膨張係数  $\epsilon_{ex}$  ( $\mu/^\circ\text{C}$ )を算出し、この  $\epsilon_{ex}$  にコンクリート打込み

時から凝結終結までのコンクリートの温度差  $T_1 - T_0$  ( ) を乗じた値をコンクリート打設から凝結終結時間までに発生したコンクリートのひずみとして式(1)に加え実ひずみ  $\epsilon_{il}$  とした。ここで用いる温度上昇時の見かけの線膨張係数  $\alpha_{ex}$  は、図 - 5 の膨張コンクリートの実ひずみと温度との関係に示すように、温度と実ひずみの関係が線形性を示す範囲において、最小二乗法を用いて算出した。提案する実ひずみ  $\epsilon_{il}$  を式(2)に示す。

$$\epsilon_{il} = C \times \epsilon_{ml} + \alpha_{ex} \times (T_1 - T_0) \quad (2)$$

ここに、 $\epsilon_{ml}$  : 凝結終結時を初期値としたひずみ計の指示値 ( $\mu$ )、 $T_1$  : 凝結終結時のコンクリート温度 ( )

また、ここでは鉄筋計においても埋込み型ひずみ計と同様な計測処理が可能でないかと考え、式(2)の計測器の線膨張係数  $\alpha_{ex}$  を鉄筋計の線膨張係数  $\alpha_{ex} = 11.0 (\mu / )$  として計算を行った。

鉄筋計および埋込み型ひずみ計により計測したコンクリートの実ひずみの履歴を図 - 6 (a) ~ (d) に示す。この図に示すように鉄筋計と埋込み型ひずみ計との値は、ほぼ同じ履歴を示した。

### 3.3 膨張量

1 m 供試体から得られたコンクリートの実ひずみを用いて膨張量 (膨張ひずみ) を算出する。膨張ひずみは、実ひずみから水和熱によるコンクリートの自由ひずみを差し引いた値である。ただし、この膨張ひずみには自己収縮および乾燥収縮によるひずみも含まれている。

コンクリートの温度変化による自由ひずみの算出は、膨張材無し普通コンクリートを用いた TYPE-A3 の埋込み型ひずみ計から図 - 5 と同様な方法で線膨張係数を求めた。上下鉄筋位置の平均値を用いて算出した温度上昇時・下降時の線膨張係数  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  は、橋軸方向、橋直方向それぞれ  $\alpha_1 = 5.8, 4.2 (\mu / )$ 、 $\alpha_2 = 9.3, 8.8 (\mu / )$  であり、水和反応による温度上昇時と下降

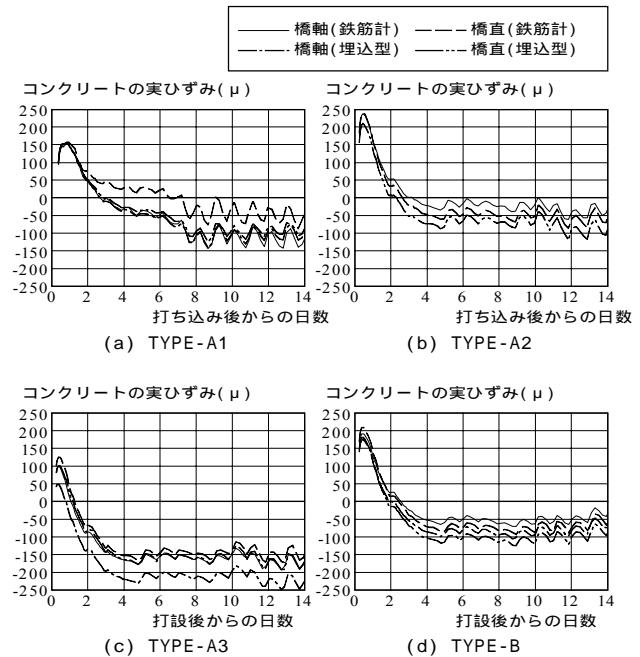


図 - 6 コンクリートの実ひずみ

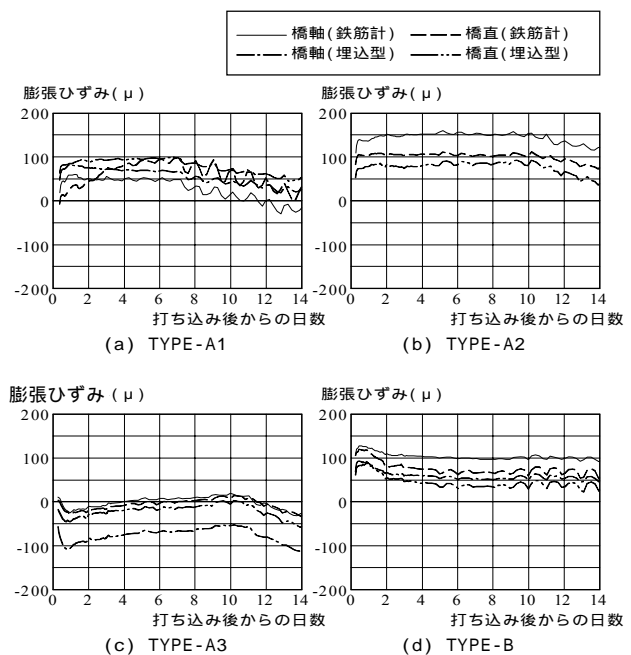


図 - 7 コンクリートの膨張量

時で線膨張係数が変化した。つまり、温度上昇時のコンクリート中における埋込み型ひずみ計は、温度により自由に伸びるのではなく、若材齢時の自己収縮が発生しているコンクリートに拘束されることにより、埋込み型ひずみ計の自由膨張ひずみとコンクリートの収縮ひずみとの差が計測器にひずみとして計測され、温度降下時より小さくなったものと考えられる。したがって、温度上昇時と下降時で線膨張

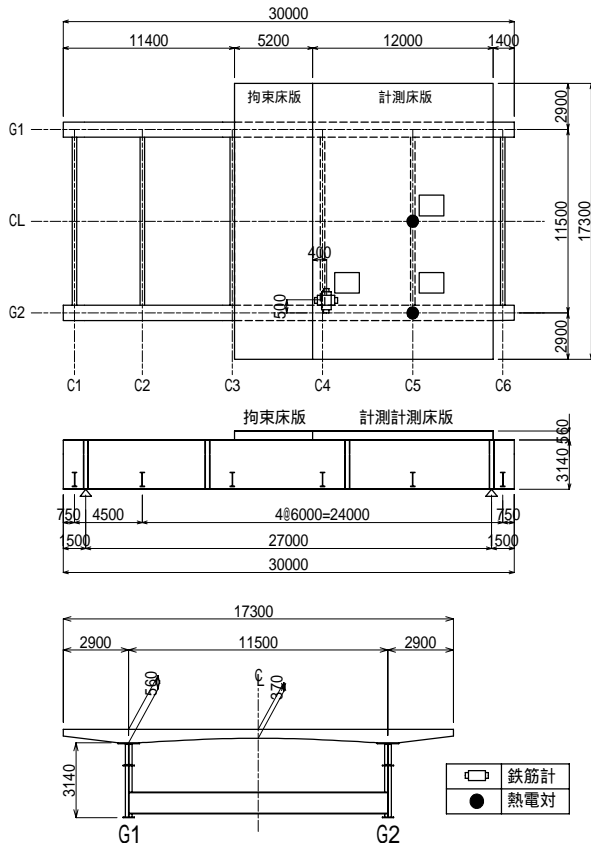


図 - 8 実物大供試体一般図

係数が変化すると仮定すれば、膨張ひずみ  $\epsilon_{ex}$  は温度上昇時には式(3)、下降時には式(4)により算出できる。

$$\epsilon_{ex} = \alpha_{11} \times (T_i - T_0) \quad (3)$$

$$\epsilon_{ex} = \alpha_{11} \times (T_{max} - T_0) - \alpha_{22} \times (T_i - T_{max}) \quad (4)$$

式(3)、(4)より算出したコンクリートの膨張ひずみの履歴を図 - 7 (a)~(d)に示す。この配合の場合では、材齢初期の段階から約  $100 \mu$  の膨張ひずみが発生していることが評価できる。この膨張ひずみは鉄筋による拘束を含んでいるため、鉄筋をモデル化しない温度応力解析では、この膨張ひずみを解析の膨張量として与える。

#### 4. 実物大供試体試験

##### 4.1 実物大供試体

図 - 8 に実物大供試体寸法を示す。床版および鋼桁は実橋と同じ構造とし、使用するコンクリートの配合は表 - 1 に示す TYPE-A2, B と同じである。実物大供試体は、床版の打継ぎ目による拘束を再現するために、中央部分に先行し

表 - 4 温度応力解析条件

モデル	解析モデル	実物大供試体		
	モデル部分	全橋半断面モデル		
鋼桁		板厚考慮、横桁考慮		
物性値	コンクリートの種別	普通コンクリート(膨張材入り)		
	熱伝導率	2.7 W/m <sup>2</sup> C (2.6~2.8 W/m <sup>2</sup> C) <sup>※1</sup>		
	密度	2300 kg/m <sup>3</sup>		
	比熱	1.31 kJ/kg <sup>2</sup> C		
	断熱温度上昇特性	Q <sub>∞</sub>	62.0 °C	
		γ	1.752	
	ヤング率	JSCE 標準示方書簡易式		
		E=4700 × σ <sub>c</sub> <sup>0.5</sup> N/mm <sup>2</sup>		
	圧縮強度	JSCE 標準示方書実験式		
		a	2.0	
		b	0.9	
	f(91)	41.0 N/mm <sup>2</sup>		
	引張強度	JSCE 標準示方書実験式		
	ポアソン比	0.167		
線膨張係数	10 μ/°C			
温度	コンクリート温度	拘束床版: 32°C	計測床版: 34°C	
	外気温	実物大供試体試験の計測温度		
乾燥収縮	膨張材の効果を含む (TYPE-A2,B の平均膨張量を入力)			
鋼主桁	熱伝導率	25 W/m <sup>2</sup> C		
	密度	7850 kg/m <sup>3</sup>		
	比熱	0.4 kJ/kg <sup>2</sup> C		
	ヤング率	2.0 × 10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup>		
	ポアソン比	0.3		
	線膨張係数	12 μ/°C		
熱伝達率	養生マット	14 W/m <sup>2</sup> C (5 W/m <sup>2</sup> C) <sup>※1</sup>		
	外気	養生マット+シートの熱伝達率		
	底面型枠	13 W/m <sup>2</sup> C (12~14 W/m <sup>2</sup> C) <sup>※1</sup>		
		6.5 W/m <sup>2</sup> C (8 W/m <sup>2</sup> C) <sup>※1</sup>		

※1 ( )内はコンクリート標準示方書<sup>3)</sup>標準値

て拘束床版を打込み、9 日後に計測床版を打込んだ。また、1 m 供試体 TYPE-A2, B も計測床版と共にコンクリートを打込んだ。実物大供試体の計測センサーの配置箇所も図 - 8 に示している。

##### 4.2 解析条件

実物大供試体の解析条件を表 - 4 に示す。解析には汎用の温度応力解析プログラム(ASTEAMACS)を用いた。ただし、PC 床版の鉄筋および PC 鋼材はモデル化をしていない。

##### 4.3 実物大供試体試験結果と温度応力解析結果の比較

実物大供試体試験結果から得られた床版の温度履歴および分布を図 - 9 に示す。この図より、床版支間中央および主桁上の温度履歴が温

度応力解析により精度よく評価されていると  
こがわかる。

実物大供試体試験結果から得られたコンクリ  
ートの実ひずみの履歴を図 - 10 に示す。この  
図からも明らかなように、拘束床版や鋼桁の拘  
束を受けた橋軸方向・橋直方向それぞれのコン  
クリートの計測ひずみと温度応力解析により  
計算されたひずみとが一致した。

### 5. まとめ

本論文では、コンクリートの材齢初期におけ  
る膨張効果の評価方法を提案した。この方法を  
用いて、1 m 供試体を用いた床版の再現試験に  
より得られたコンクリートのひずみを整理し、  
今回の配合であればコンクリート材齢初期か  
ら膨張材による膨張量として約 100  $\mu$  のひず  
みの発生が評価された。さらに、実物大供試  
体試験の計測結果と温度応力解析結果の比較  
から、本論文で提案したひずみの評価方法に  
より、実ひずみを精度良く評価できることを  
示した。これらにより、温度応力解析に用い  
るコンクリートの膨張量を明らかにし、膨張  
効果を温度応力解析により評価できることを  
示した。

最後に、本提案に関して長岡技術科学大学の  
丸山久一教授、大阪大学松井繁之教授から多  
くの貴重な助言を頂きましたことを記し謝意  
を表します。

### 参考文献

- 1) 国森亮平，島崎磐，六郷恵哲，森本博昭：  
若材齢コンクリートの熱膨張係数に関する  
実験的研究，コンクリート工学年次論文集，  
Vol.22，No.2，pp.1033-1038，2000
- 2) 竹下治之，浅沼潔，横田季彦：マスコン  
クリート中の計器特性について，第 2 回マ  
スコンクリートの温度応力発生メカニズム  
に関するコロキウム論文集，pp.1-8，1984.3
- 3) 土木学会：[平成 8 年制定]コンクリート  
標準示方書施工編，1996

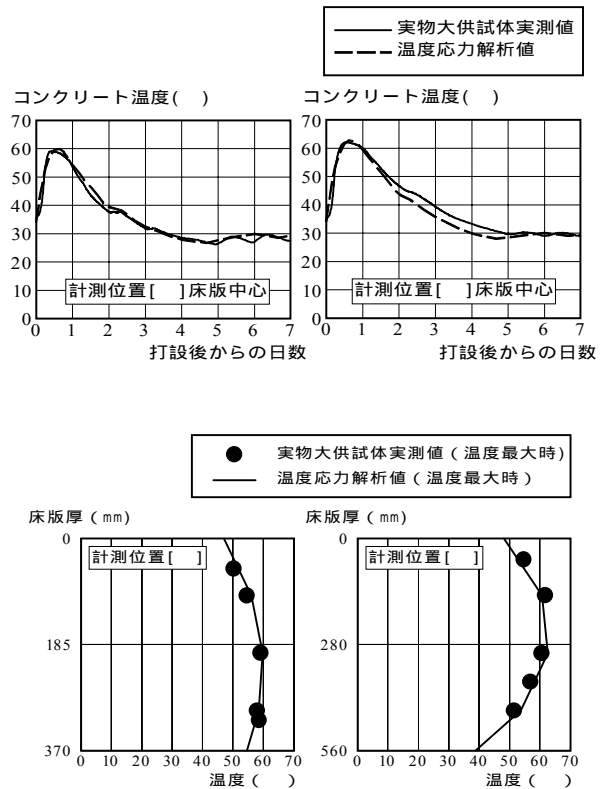


図 - 9 実物大供試体実測値と  
温度応力解析値の温度比較

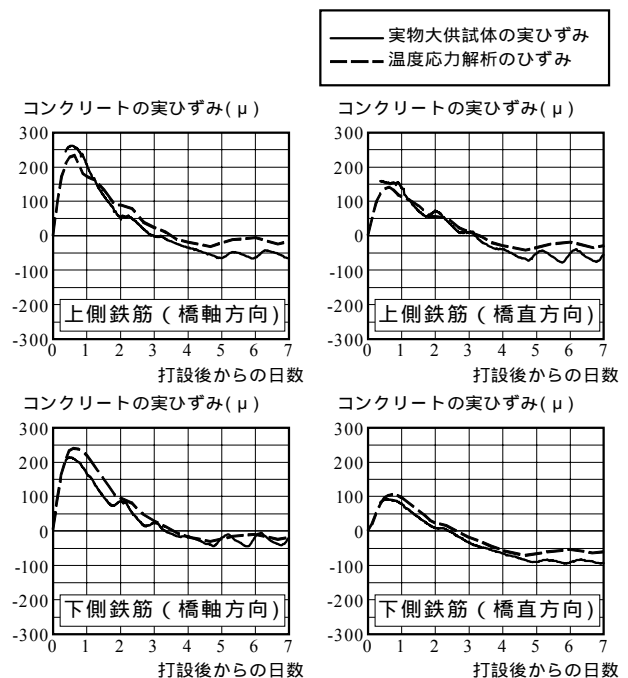


図 - 10 実物大供試体の実ひずみ [ ]  
と温度応力解析のひずみとの比較