

コンクリート床版における膨張材効果 の評価方法に関する考察

高瀬 和男* 中本 啓介**

現在、数多く施工されている鋼2主桁橋の場所打ちPC床版は、床版厚が大きいためマスコンクリート同様に硬化中におけるコンクリートの水和熱反応により大きな温度応力が働き、ひび割れなどの問題が生じることがある。この温度応力対策として膨張材を用いることは、長期的な体積収縮の改善と共に材齢初期のコンクリートの水和反応による体積収縮を抑制するために有効な手段の一つとして着目されている。そこで、本論文では、コンクリート床版に対する膨張材の有効性について実物大供試体からの各種計測ひずみ、温度応力解析を用いて温度応力のメカニズムと膨張材の効果を定量的に評価する方法について示す。さらに、計測されたひずみから部材に発生する応力を評価することで膨張材の温度応力に対する効果を定量的に評価した内容を示す。

キーワード：場所打ちPC床版、材齢初期、膨張材、温度応力、線膨張係数

まえがき

現在、国内で数多くの建設が進められている場所打ちPC床版を有する鋼橋は、主桁本数を少なくし、床版支間長を長くした合理化・省力化を図った橋梁である。場所打ちPC床版は、従来のRC床版に比べ床版厚が厚く、かつ高強度のコンクリートを用いている。そのため、コンクリートの水和反応による温度上昇量が大きくなり、その温度が下降する際にコンクリートの収縮を、鋼桁や既設床版が拘束することによって生じる引張応力（以下温度応力）が、従来のRC床版に比べ大きくなる。

筆者らは、第二東名高速道路の鋼2主桁橋の建設において、このコンクリートの水和熱による温度応力が主原因であるひび割れ現象を確認した¹⁾。この温度応力を抑制するためには、養生方法などの施工に係わる方法の他にコンクリートに膨張材を添加する方法が有効である。従来、床版コンクリートに膨張材を添加する目的としては、乾燥収縮によるひび割れを抑制する収縮補償として用いられることが一般的である。また、経験的に材齢初期のひび割れに対しても効果があることが知ら

れている。しかし、膨張材を添加した場合の定量的な評価方法については、確立されていない。材齢初期における膨張材の効果を定量的に評価する上で重要な点は、コンクリートの水和熱による温度ひずみ、および膨張ひずみを適切に評価することである。特に、材齢初期におけるコンクリートの自己収縮を含んだ線膨張係数や、コンクリートと計測機器の付着がどの時点から有効となるかを評価することが重要である。本論文は、平成14年度コンクリート工学年次論文集に投稿した材齢初期のコンクリートひずみの簡便な算出方法、実際の床版を模した1m×1m×床版厚の供試体（以下1m供試体）、および実物大供試体の計測により膨張材による膨張効果をひずみにより定量的に評価した方法²⁾を示すと共に、材齢初期の水和熱によって発生する応力度について、実物大供試体の計測ひずみ、1m供試体の計測ひずみおよび無応力計から計測ひずみを比較することにより床版に発生する材齢初期の応力度評価について示す。

1. 1m供試体による床版再現試験

(1) 1m供試体の概要

本試験で用いた1m供試体は、**TYPE-A**が実橋

*工事計画部次長 **技術研究室

表-1 コンクリートの配合表

TYPE	圧縮強度 (N/mm ²)	セメント	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C +E (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
							水	セメント	膨張材*2)	細骨材	粗骨材	混和剤
A1, A2, B	40	N ¹⁾	10 ±2.5	4.5 ±1.5	42.0	46.6	156	341	30	834	962	2.789
A3	40	N ¹⁾	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 1m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) 上下段:橋直 D16(125) 中斷:橋軸 D19(100) 中斷:橋直 D13(125)	H=560mm 膨張コンクリート

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

の床版支間中央を再現した 1m×1m×0.37m 供試体であり, TYPE-B は主桁直上を再現した 1m×1m×0.56m 供試体である。図-1 に 1m 供試体の構造概要を, 図-2 に計測センサーの配置を示す。1m 供試体に用いたコンクリートの配合を表-1, 1m 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。

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。

(2) 1m 供試体試験結果

1) 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。

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

ここに, ϵ_i : コンクリートの実ひずみ(μ), C : 校正係数, ϵ_m : ひずみ計の指示値(μ), γ : 埋込み型ひずみ計線膨張係数 $\gamma = 11.7(\mu/^\circ\text{C})$, 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 ϵ_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。

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($^\circ\text{C}$)	打込み時の外気温($^\circ\text{C}$)
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

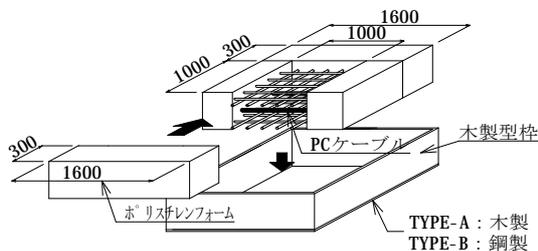


図-1 1m 供試体の構造概要

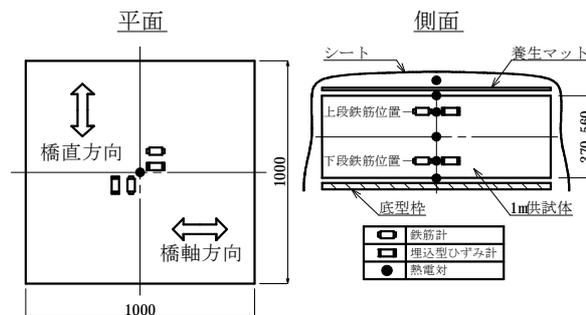


図-2 計測センサー配置図

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とされる³⁾。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-3 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 α_{ex} ($\mu/^\circ\text{C}$) を算出し、この α_{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 $T_1 - T_0$ ($^\circ\text{C}$) 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 ϵ_{ii} とした。ここで用いる温度上昇時の見かけの線膨張係数 α_{ex} は、図-3の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 ϵ_{ii} を式(2)に示す。

$$\epsilon_{ii} = C \times \epsilon_{m1} + \gamma \times (T_1 - T_1) + \alpha_{ex} \times (T_1 - T_0) \quad (2)$$

ここに、 ϵ_{m1} ：凝結終結時を初期値としたひずみ計の指示値 (μ)、 T_1 ：凝結終結時のコンクリート温度 ($^\circ\text{C}$)

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-4(a)～(d)に示す。

2) 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、膨張材無しの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-3と同様な方法で線膨張係数を用いて求める。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、橋軸方向および橋直方向それぞれ $\alpha_1 = 5.8, 4.2$ ($\mu/^\circ\text{C}$)、 $\alpha_2 = 9.3, 8.8$ ($\mu/^\circ\text{C}$) であり、水和反応による温度上昇時と下降時で線膨張係数が変化する。膨張ひずみ ϵ_{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。

$$\epsilon_{ex} = \epsilon_{ii} - \alpha_1 \times (T_1 - T_0) \quad (3)$$

$$\epsilon_{ex} = \epsilon_{ii} - \alpha_1 \times (T_{max} - T_0) - \alpha_2 \times (T_1 - T_{max}) \quad (4)$$

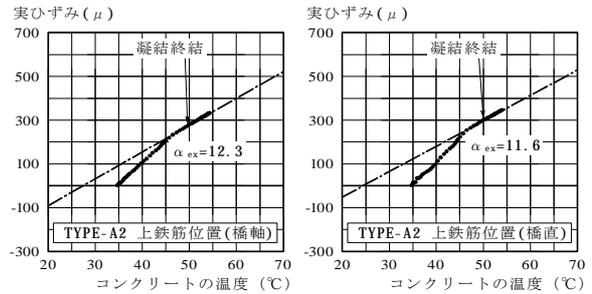


図-3 温度上昇時のコンクリートの実ひずみと温度との関係

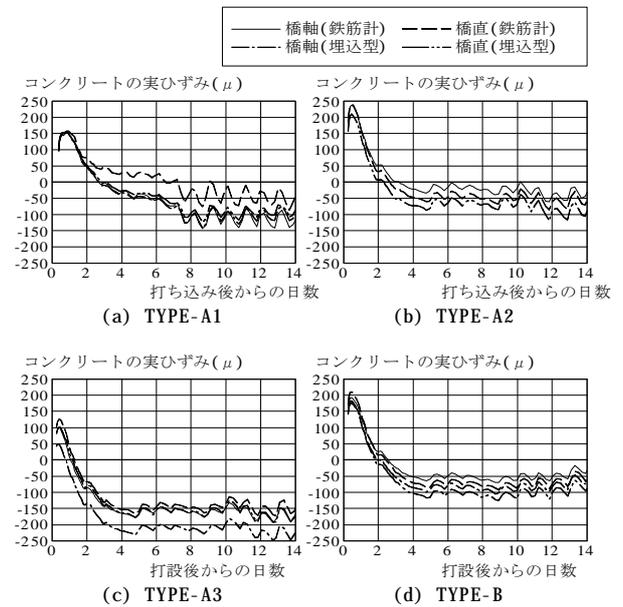


図-4 コンクリートの実ひずみ

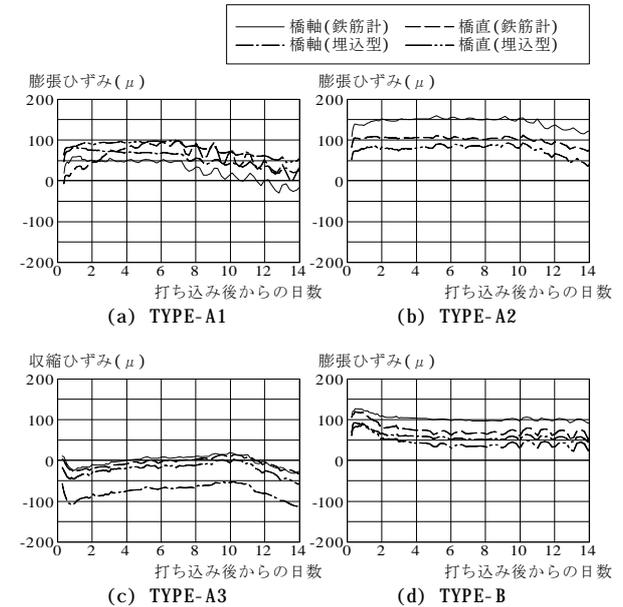


図-5 コンクリートの膨張量

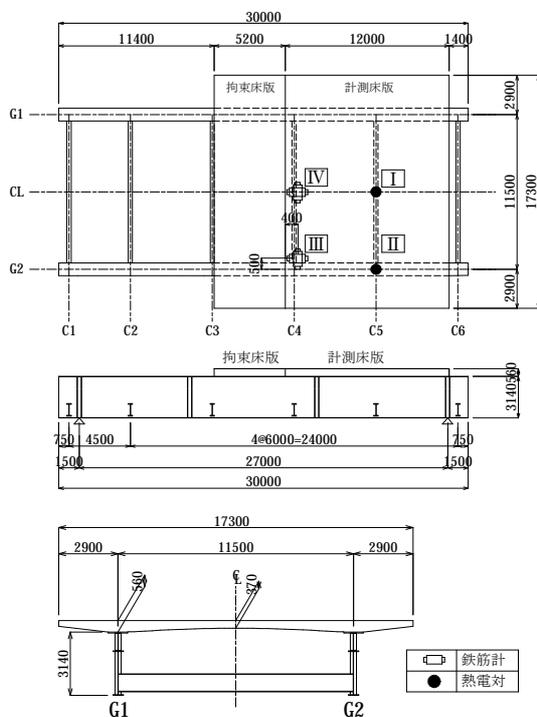


図-6 実物大供試体一般図

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-5(a)～(d)に示す。この配合の場合では、材齢初期の段階から約100μの膨張ひずみが発生していることが評価できる。

2. 実物大供試体試験

(1) 実物大供試体

図-6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、中央部分に先行して拘束床版を打込み、9日後に計測床版を打込んだ。

(2) 解析条件⁴⁾

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(ASTEA MACS)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。

(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-7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わかる。

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	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	2.7W/m°C (2.6~2.8W/m°C) ^{※1}		
		密度	2300 kg/m ³		
		比熱	1.31 kJ/kg°C		
		断熱温度上昇特性	Q _∞	62.0 °C	
			γ	1.752	
		ヤング率	JSCE 標準示方書簡易式		
			E=4700 × σ ^{0.5} N/mm ²		
		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 ²		
		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°C			
	密度	7850 kg/m ³			
	比熱	0.4 kJ/kg°C			
	ヤング率	2.0 × 10 ⁵ N/mm ²			
	ポアソン比	0.3			
熱伝達率	線膨張係数	12 μ / °C			
	養生マット	14 W/m ² C (5 W/m ² C) ^{※1} 養生マット+シートの熱伝達率			
	外気	13 W/m ² C (12~14 W/m ² C) ^{※1}			
	底面型枠	6.5 W/m ² C (8 W/m ² C) ^{※1}			

※1 ()内はコンクリート標準示方書標準値

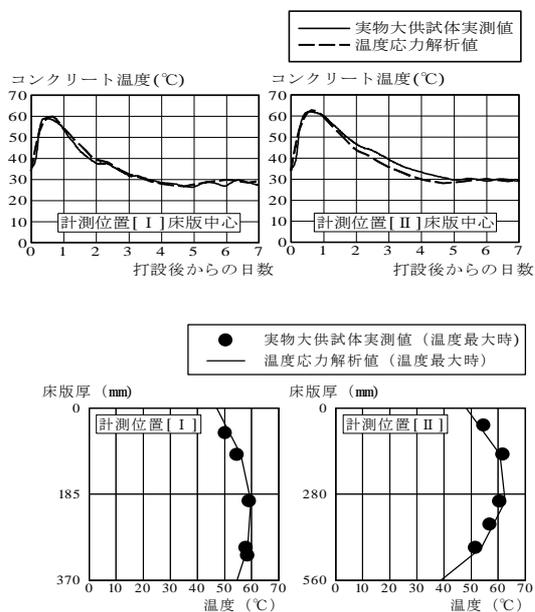


図-7 実物大供試体実測値と温度応力解析値の温度比較

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-8に示す。この図からも明らかのように、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。

3. 計測ひずみによるコンクリートの応力度評価

(1) 応力度評価方法

コンクリートに導入される膨張材による圧縮応力度は、鉄筋などの拘束体が膨張材の膨張ひずみを拘束することにより生じる。この圧縮応力度は拘束度に比例して大きくなるが、計測される実ひずみは小さくなる。ここでは、応力度をコンクリートの拘束ひずみ（拘束状態と無拘束状態のひずみ差）を用いて算出する。単位時間におけるコンクリートの拘束ひずみの増分量をその時点の弾性係数に乘じ、単位時間毎に累加し求める。

式(5)および(6)に計測ひずみを用いたコンクリートに発生する応力度 σ_c の算出方法を示す。

$$\sigma_c = \sum [E_c((t_i + t_{i-1})/2) \times \Delta \varepsilon (t_i - t_{i-1})] \quad (5)$$

$$\Delta \varepsilon (t_i - t_{i-1}) = (\varepsilon_i(t_i) - \varepsilon_m(t_i)) - (\varepsilon_i(t_{i-1}) - \varepsilon_m(t_{i-1})) \quad (6)$$

ここに、 $E_c(t_i)$ は初期クリープを含んだ有効弾性係数（JSCE標準示方書実験式）、 $\Delta \varepsilon (t_i - t_{i-1})$ は単位時間あたりの拘束ひずみ増分量、 $\varepsilon_i(t_i)$ は拘束を受けたコンクリートの打ち込みから t_i 時間後の実ひずみ、 $\varepsilon_m(t_i)$ は無拘束と仮定するコンクリートの打ち込みから t_i 時間後の実ひずみである。

各供試体の内的、外的拘束に対応する計測ひずみより算出される応力度の内訳を表-5に示す。

(2) 鉄筋拘束による応力度評価

(1 m 供試体による内的拘束の評価)

前項の応力度評価方法に従い、無拘束と仮定した 1 m 供試体に設置された無応力計の計測ひずみ、

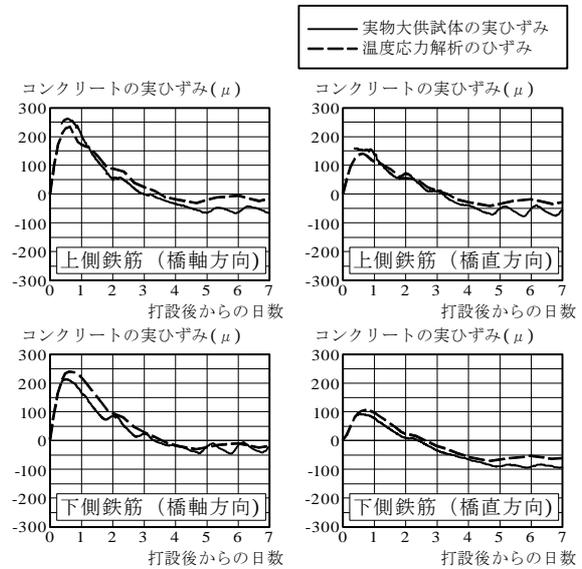


図-8 実物大供試体の実ひずみ [Ⅲ] と温度応力解析のひずみとの比較

1 m 供試体 TYPE-A2,A3 の鉄筋拘束によるひずみおよびその差によるコンクリートに作用する圧縮応力度の履歴を図-9, 10 に示す。この両図の差は膨張材の有無による差であり、膨張材を入れない場合はコンクリートに対し全く圧縮応力は導入されていないが、膨張材を添加した場合は温度降下が始まる材齢 1 日目以前から膨張材の膨張効果を鉄筋が拘束することにより、コンクリートに圧縮応力が作用し、その圧縮応力度は $0.3N/mm^2$ 程度であることがわかる。また、この値は鉄筋比 0.95% の拘束膨張試験結果（現場と同等な湿潤養生、膨張率 113μ ）を用いた膨張エネルギー一定則 5) に基づくケミカルプレストレスの理論値にほぼ近似する。

(3) 既設床版および鋼桁の拘束による応力度

(実物大供試体による内的・外的拘束の評価)

無拘束と仮定した 1 m 供試体の鉄筋に拘束された計測ひずみ、実物大供試体の計測ひずみより内的・外的拘束による応力度の計測結果の一例を図-11 に示す。ここで、床版支間中央の計測点 [Ⅳ]

表-5 各供試体の計測器にて計測されるひずみから算出される応力度内訳

供試体と計測センサー	[1m供試体] 埋込・鉄筋	[1m供試体] 埋込・鉄筋	[実物大供試体] 埋込・鉄筋		[実物大供試体] 有効応力計	[実物大供試体] 温度応力解析
応力成分	【普通】	【膨張】	【膨張】		【膨張】	【膨張】
内的拘束	○	○	—	○	○	—
外的拘束	—	—	○	○	○	○
無拘束ひずみを仮定する計測機器	無応力【普通】	無応力【膨張】	[1m供試体] 埋込・鉄筋【膨張】	無応力【膨張】	—	1m供試体の膨張ひずみを入力

埋込：埋込み型ひずみゲージ，鉄筋：鉄筋ゲージ，無応力：無応力容器+埋込み型ひずみゲージ

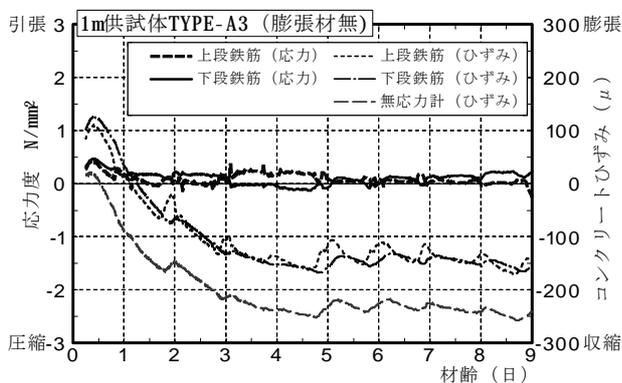


図-9 膨張材を添加しない1m供試体の応力とひずみ履歴

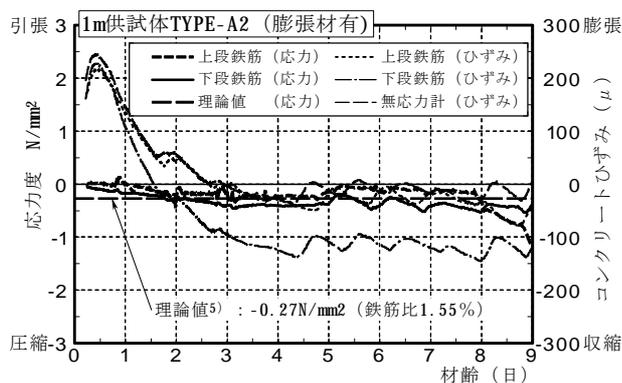


図-10 膨張材を添加した1m供試体の応力とひずみ履歴

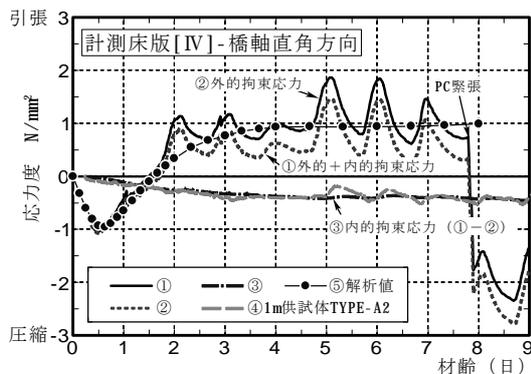


図-11 実物大供試体における内的・外的拘束の評価

は1m供試体 TYPE-A2 と比較している。解析結果は、外気温の入力間隔に差があるため日歴の変化までは評価されていないが、各計測ひずみからの応力度は、温度応力解析による解析応力度と概ね一致している。

4. 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。この方法を用いることにより、1m供試体を用いた床版の再現試験により、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 100μ のひずみを定量的に評価した。さらに、この1m供試体のひずみを入力値とする温度応力解析について示し、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、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。

つぎに、本来、計測による評価が困難とされていた膨張材を考慮した計測応力を算定する応力度評価方法について提案した。供試体毎の拘束ひずみとひずみの拘束度を整理し、鉄筋による内的拘束、既設床版および鋼桁などの外的拘束を評価し温度応力解析との整合性について確認し計測応力についても精度良く評価できることを示した。

謝辞

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をはじめ、JH 静岡建設局構造技術課寺田課長、構造技術課の皆様にも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) 寺田典生・福永靖雄・本間淳史・會澤信一・高瀬和男・福田長司郎：長支間場所打ち PC 床版における温度応力に関する考察，橋梁と基礎，Vol.36, No.9, pp.36-45, 2002.9.
- 2) 高瀬和男・寺田典生・福永靖雄・石川敏之：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考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.24, No.1, pp.549-554, 2002.6.
- 3) 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.
- 4) 倉田幸宏・河西龍彦・高瀬和男・丸山久一：有限要素法解析による長支間場所打ち PC 床版施工時における応力評価に関する研究，構造工学論文集，Vol.49A, 土木学会，2003.3.
- 5) 辻 幸和：コンクリートにおけるケミカルプレストレスの利用に関する基礎研究，土木学会論文報告集，No.235, pp.111-124, 1975.3.