

材齢初期の膨張コンクリートにおける現場計測ひずみからの応力度評価について

The evaluation of stress from the measurement strain in the early age expansive concrete

高瀬和男*, 本間淳史**, 中本啓介***, 丸山久一****

Kazuo Takase, Atsushi homma, Keisuke Nakamoto, Kyuichi Maruyama

* 駒井鉄工(株), 工事計画部次長(〒552-0003 大阪市港区磯路 2-20-21)

** 工修 日本道路公団静岡建設局, 静岡工事事務所, 構造工事長(〒420-0804 静岡県静岡市竜南 1-26-20)

*** 工修 駒井鉄工(株), 技術研究室(〒293-0011 富津市新富 33-10)

**** Ph.D. 長岡技術科学大学教授, 環境・建設系(〒940-2188 長岡市上富岡町 1603-1)

Cast-In-Place PC slabs for highway bridges should suffer thermal stress problems and cause cracks due to large amount of hydration heat of concrete. The use of expansive concrete is one of the very possible solutions for such problems. However, the evaluation of effectiveness of expansive concrete is not easily accomplished because both the analysis of generation of thermal stress and the analysis of induced stress due to expansion should be simultaneously done. It is discussed in this paper how to conduct the stress analysis in such a complicated system. The estimation by the proposed method was compared with the measured data of a prototype structure resulting in a very good agreement.

Key Words: slab, the early age concrete, thermal stress, expansive additive

キーワード: 床版, コンクリート材齢初期, 温度応力, 膨張材

1. はじめに

現在, 国内で数多くの建設が進められている鋼橋の場所打ち 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。

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, コンクリート材齢初期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。筆者らはその評価の一提案として, 材齢初期のコンクリートひずみの簡便な算出方法について提案し, 実際の床版を模した 1 m × 1 m × 床版厚(以下 1 m 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¹⁾。

上記の方法は, 鉄筋比 1.5% 程度の拘束状態における鉄筋コンクリート単体での膨張コンクリートの膨張ひずみを評価したものである。そして, この膨張ひずみを入力値とする, 鋼桁とコンクリートの合成を考慮した実物大供試体の温度応力解析による解析ひずみと, 計測ひずみが精度良く一致することを確認し, 解析により膨張材の評価を行った。しかし, この解析手法を用いた温度応力解析では, コンクリートの硬化過程における鉄筋の拘束により発生する内的拘束力が考慮されていない。

筆者らは, 場所打ち PC 床版において, 上記に示した材齢初期に生じる膨張材の膨張作用を鉄筋が拘束(内的拘束)することによるコンクリートに作用する圧縮応力度, コンクリート水和熱降下時の体積収縮や長期的な乾燥収縮が, 鋼桁や既設床版によって拘束(外的拘束)さ

表-1 コンクリートの配合表

TYPE	圧縮強度 (N/mm ²)	セメント	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C+E (%)	S/a (%)	単体量 (kg/m ³)					
							水	セメント	膨張材 ²⁾	細骨材	粗骨材	混和剤
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-A2	上下段:橋軸 D19(100)	膨張コンクリート
TYPE-A3	上下段:橋直 D13(125)	
TYPE-B	上下段:橋軸 D19(100) 上下段:橋直 D16(125) 中段:橋軸 D19(100) 中段: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

れることによる引張応力度²⁾に対して、膨張材の膨張作用がどのように効果を発揮するのかを応力度として定量的に評価したいと考えている。そのため、簡便な計測方法による応力度評価方法が必要であると考えている。簡便な計測方法としては、ひずみ計による構造物の計測が構造物に大きな異物を埋め込むことなく、最も安価で容易に行うことができると考えている。しかし、コンクリート構造物の応力度評価を行っている論文^{3,4)}の多くは、直接応力度を荷重検出器により測定する有効応力計⁵⁾を用いて評価しており、計測されたひずみから評価している例は少ない。

そこで本論文では、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、1m供試体、および無応力計の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提案を行う。その評価の中には膨張材が膨張する際に鉄筋が拘束することによる内的拘束による応力度評価も行うこととした。

2. 供試体の概要

2.1 1m供試体の概要

試験に用いた1m供試体の床版厚は、TYPE-A が次に示す実物大供試体の床版支間中央をモデルとした37cm、TYPE-B が床版主桁上をモデルとした56cmである。表-1 に1m供試体に用いたコンクリートの配合、表-2 に1m供試体の試験体の一覧、図-1 に1m供試体の構造概要、図-2 に計測センサー配置を示す。温度およびひずみの計測間隔は、コンクリート打ち込みから3日間は10分、それ以降は30分間隔とした。養生期間

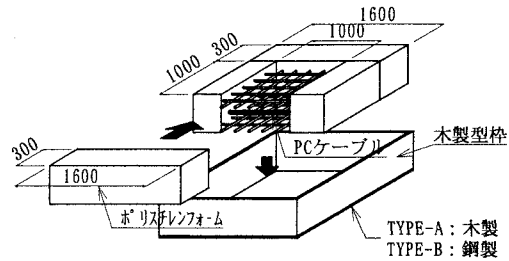


図-1 1m供試体の構造概要

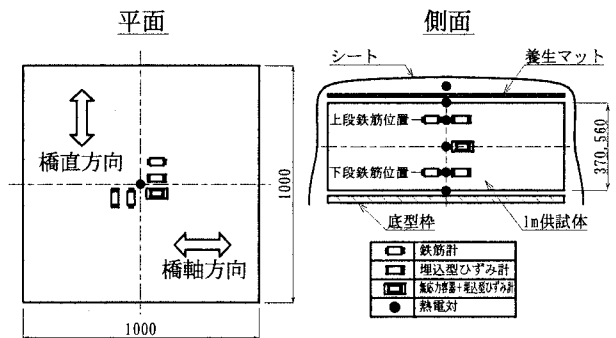


図-2 計測センサー配置図

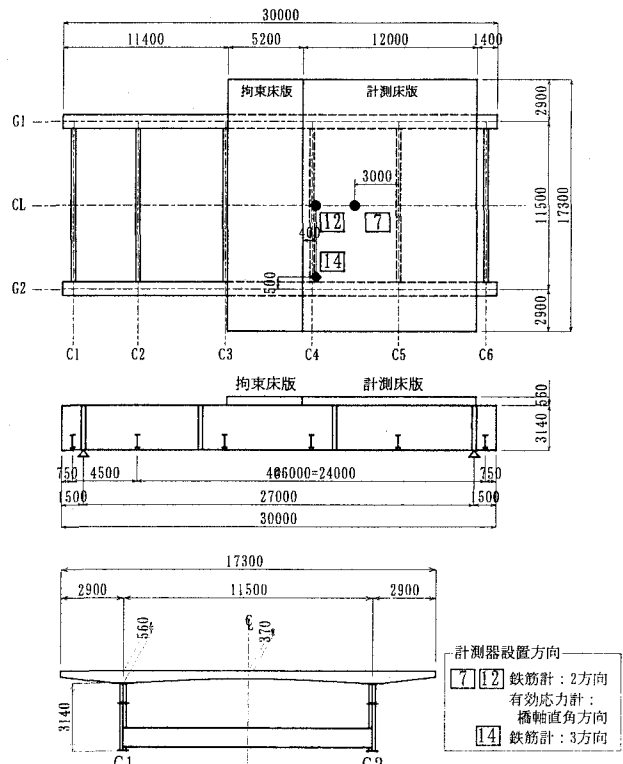


図-3 実物大供試体一般図と計測センサー配置図

は実際の床版施工と同様に、養生マットにシートを被せ7日間の湿潤養生を行った。

2.2 実物大供試体の概要

図-3 に実物大供試体の一般図および計測位置を示す。床版および鋼桁は実橋と同じ構造寸法とし、床版の打ち継ぎ目による拘束を再現するために、中央部に拘束床版部分を設置した。使用するコンクリートの配合は1m供試体のTYPE-A2と同じである。

3. 計測センサーによるコンクリートの応力度評価方法

膨張材によってコンクリートに生じる圧縮応力度は、鉄筋などの拘束体が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。図-4 に計測されるコンクリート実ひずみの経時変化を模式的に示す。この場合、計測される実ひずみには、コンクリートの温度ひずみ、膨張ひずみおよび自己収縮や乾燥収縮などの収縮ひずみが含まれる。

式(1)、(2)および(3)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。

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

$$E_c(t_i+t_{i-1})/2 = (E_c(t_i) + E_c(t_{i-1}))/2 \quad (2)$$

$$\Delta \varepsilon(t_i-t_{i-1}) = (\varepsilon_i(t_i) - \varepsilon_m(t_i)) - (\varepsilon_i(t_{i-1}) - \varepsilon_m(t_{i-1})) \quad (3)$$

ここに、 $E_c(t_i)$ は初期クリープを含んだ有効弾性係数、 $\Delta \varepsilon(t_i-t_{i-1})$ は単位時間あたりの拘束ひずみ増分、 $\varepsilon_i(t_i)$ 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

ここに示すコンクリートの実ひずみは、コンクリートと計測センサーとの付着の発現を考慮して、凝結集結時間($t=9.56hr$)を初期値とした。そして、凝結終結までに発生するひずみを見掛けの線膨張係数と温度差を用いて初期値の補正を行った¹⁾。

本論文では、無拘束状態と仮定するコンクリートの実ひずみ $\varepsilon_m(t_i)$ については、着目箇所、打設時間、および

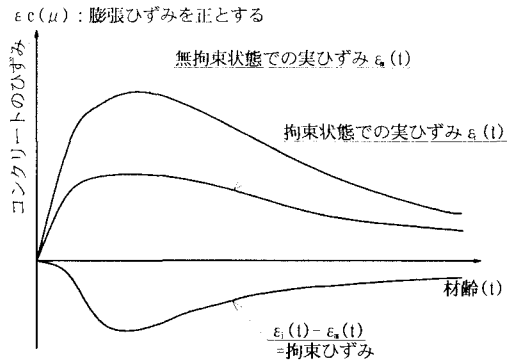


図-4 実ひずみと拘束ひずみの経時変化

水和発熱特性などの条件を統一のために、計測センサーにより得られる見掛けの線膨張係数を用いて時間関数に変換した。ここで、経時的に変化するコンクリートの見掛けの線膨張係数は、温度上昇時と下降時の2段階に仮定した。それは、温度上昇時のコンクリート中の温度ひずみは、温度により自由に伸びるのではなく材齢初期のコンクリートの自己収縮により拘束されるため、線膨張係数としては温度下降時より小さな値となるためである。温度上昇時の $\varepsilon_m(t_i)$ を式(4)、下降時を式(5)に示す。

$$\varepsilon_m(t_i) = \alpha_a \times (T_i(t_i) - T_0) \quad (4)$$

$$\varepsilon_m(t_i) = \alpha_a \times (T_{max} - T_0) + \alpha_b \times (T_i(t_i) - T_{max}) \quad (5)$$

ここに、 α_a は無拘束ひずみを仮定する計測センサーによる温度上昇時のコンクリートの見掛けの線膨張係数、 α_b は無拘束ひずみを仮定する計測センサーによる温度下降時のコンクリートの見掛けの線膨張係数、 $T_i(t_i)$ はコンクリートの打ち込みから t_i 時間後コンクリート温度($^{\circ}C$)、 T_0 は初期値の温度($^{\circ}C$)、 T_{max} は最大温度($^{\circ}C$)

各供試体の計測センサーにて計測される実ひずみから算出できる応力度の内訳を表-3に示す。この表は、式(1)~(3)における拘束ひずみの種類により鉄筋拘束による成分を内的拘束、鋼桁、既設床版などによる成分を外的拘束と分別している。

表-3のA欄では、1m供試体において無拘束状態の実ひずみを1m供試体に設置した無応力計の実ひずみと仮定することにより、鉄筋による内的拘束応力度が算出されることを示す。つぎに、B欄は、実物大供試体において無拘束状態の実ひずみを1m供試体の鉄筋拘束の実

表-3 各供試体の計測センサーにて計測されるひずみから算出される応力度の内訳

	本論文で示す応力度評価			比較対照	
	A	B	C	D	E
供試体と計測センサー 応力成分	[1m 供試体] 埋込・鉄筋 【膨張】	[実物大供試体] 埋込・鉄筋 【膨張】		[実物大供試体] 温度応力解析 ¹⁾ 【膨張】	[実物大供試体] 有効応力計 ⁵⁾ 【膨張】
内的拘束	○	-	○	-	○
外的拘束	-	○		○	
無拘束ひずみを 仮定する計測センサ	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：鉄筋計，無応力：無応力容器+埋込み型ひずみゲージ



鋼桁，コンクリートともソリッド要素
対称性を考慮して1/2をモデル化

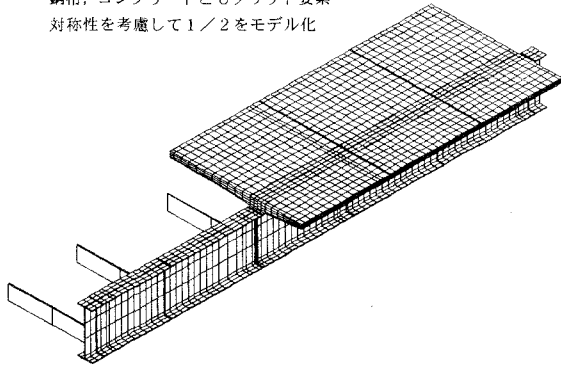


図-5 温度応力解析モデル図

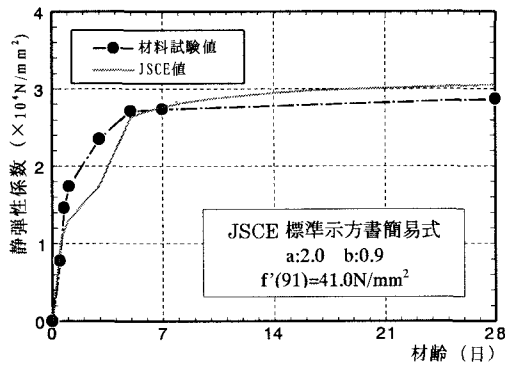


図-6 設定した有効弾性係数

ひずみと仮定すると，既設床版および鋼桁などの外的拘束応力度が算出されることを示す．この値はD欄の温度応力解析¹⁾の結果と比較できる．さらに，C欄は無拘束状態の実ひずみを1m供試体の無応力計の実ひずみと仮定した場合には，内的拘束と外的拘束の合わせられた応力度が算出されることを示し，この値はE欄の実際大供試体に設置した有効応力計⁵⁾の値と比較できることを示している．

温度応力解析は汎用の温度応力解析プログラム (ASTEAMACS) を用いた．図-5に解析のモデル図を示す．解析のモデルは，床版，鋼桁ともにソリッド要素で断面を構成した三次元モデルである．しかし，モデル化の節点数の関係から，床版内の鉄筋は考慮されていない．そのため，解析に用いる膨張ひずみや線膨張係数などの諸数値としては，鉄筋による拘束された値を用いている．解析における外気温度の入力間隔などの計算間隔は，コンクリート打ち込みから1日目までは3時間毎，1～3日目までは6時間毎，3日目以降は12時間毎とした．

本論文では，計算に用いる静弾性係数 $E_c(t_i)$ を，コンクリート標準示方書施工編に示される初期クリープを考慮した有効弾性係数⁶⁾とした (図-6)．また，膨張材の特性を考慮した場合，無拘束と仮定した実ひずみに無応力計で計測されたひずみを用いることは，有効自由膨張⁷⁾の考え方から膨張ひずみ差を過大に評価しすぎているとの議論があるが，ここでは膨張材の添加量が 30kg/m^3

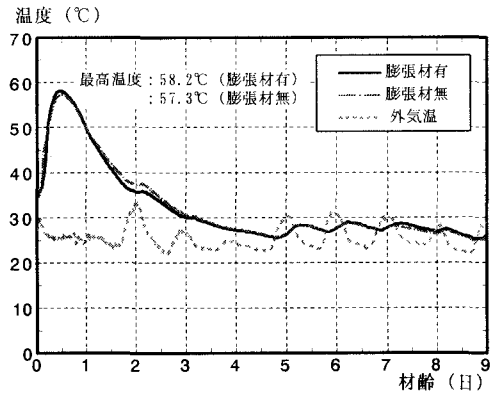


図-7 1m 供試体での膨張材の有無による温度履歴

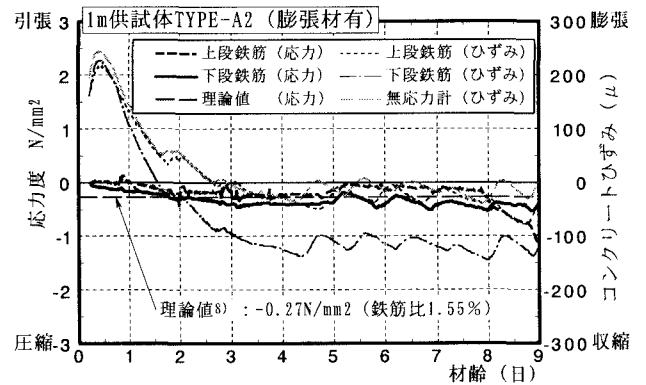


図-8 膨張材を添加した1m 供試体の応力とひずみ履歴

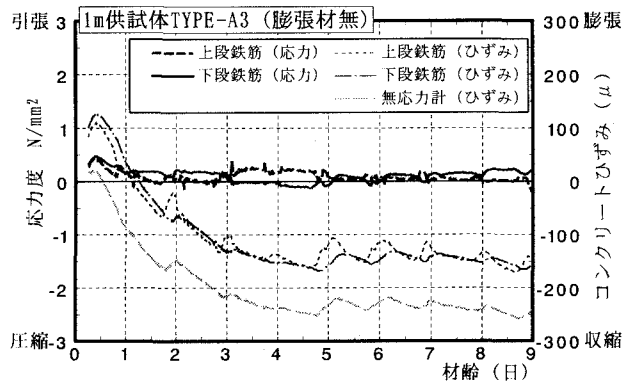


図-9 膨張材を添加しない1m 供試体の応力とひずみ履歴

(セメント量に対する膨張材の混入量8.8%)であれば無応力計で計測された膨張ひずみと有効自由膨張ひずみにおいて応力度評価に大きな差を与えないと考えている．

4. 計測結果

4.1 鉄筋拘束による応力度評価

(1m 供試体による内的拘束の評価)

3. 項の応力度評価方法に従い，表-3のA欄の結果を示す．図-7に1m 供試体のコンクリート温度および外気温度の経時変化，図-8,9にコンクリートに作用する

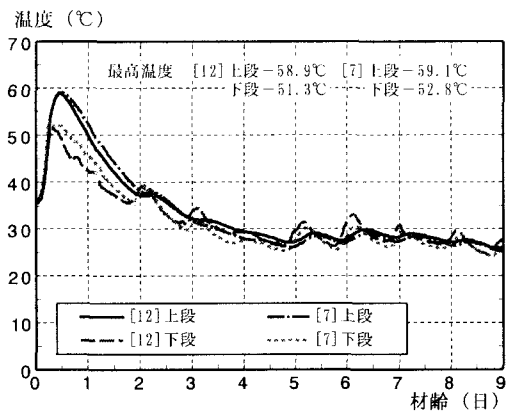


図-10 実物大供試体の温度履歴

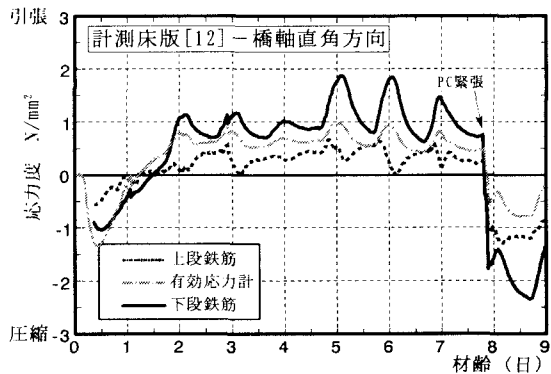


図-13 実物大供試体における内的拘束と外的拘束を合わせた応力度と有効応力計の比較
計測点 [12] 橋軸直角方向

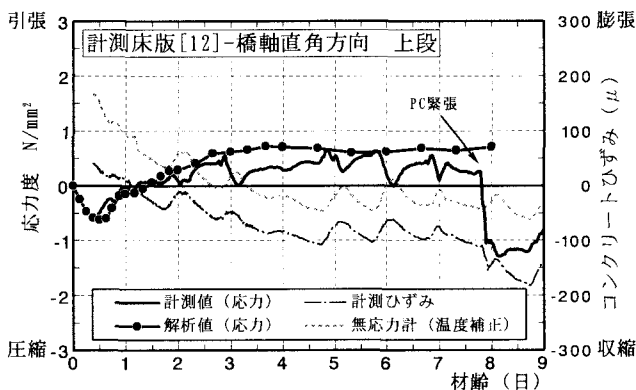


図-11 実物大供試体における外的拘束の評価
計測点 [12] 橋軸直角方向上段鉄筋位置

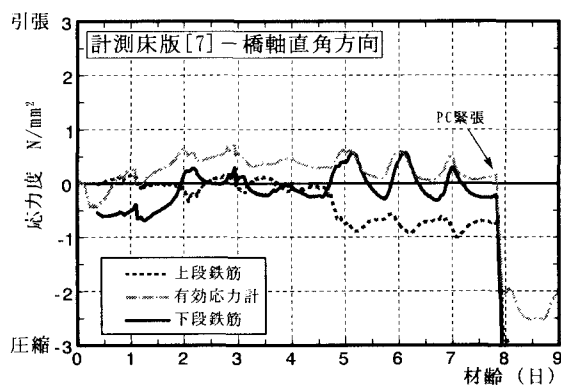


図-14 実物大供試体における内的拘束と外的拘束を合わせた応力度と有効応力計の比較
計測点 [7] 橋軸直角方向

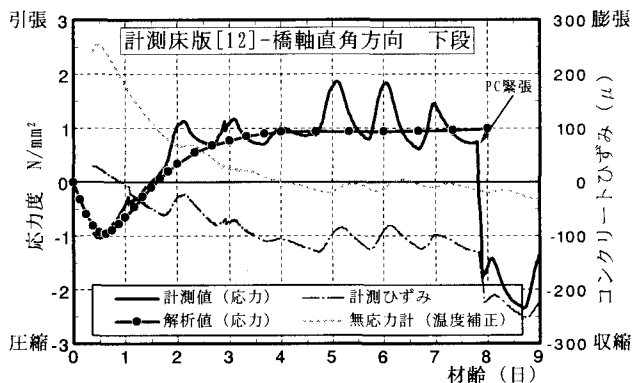


図-12 実物大供試体における外的拘束の評価
計測点 [12] 橋軸直角方向下段鉄筋位置

内的拘束による応力度を示す。図-8,9 の差は膨張材の有無による差であり、膨張材を入れてい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日目以前から膨張ひずみ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⁸⁾に基づくケミカルプレストレスの理論値にほぼ近似した。

4.2 既設床版および鋼桁の拘束による応力度評価

(1) 実物大供試体による外的拘束の評価

図-10 に実物大供試体のコンクリート温度および外気温の経時変化を示す。表-3 のB欄に示す実物大供試体の外的拘束による応力度の計測結果の一例を図-11,12 に示す。ここで、床版支間中央の計測点 [12] は 1m 供試体 TYPE-A2 と比較している。また、実物大供試体の温度応力解析の結果も図内に併記する。

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。

(2) 実物大供試体による内的拘束および外的拘束の重ね合わせた評価

表-3 のC欄に示す実物大供試体の内的拘束および外的拘束の重ね合わせた応力度を図-13,14 に示す。また、実物大供試体に設置した有効応力計の計測値も図内に併記する。

ひずみ計は鉄筋位置、有効応力計は床版厚中央と計測センサーの設置位置に差があるため、計測結果には若干の差が生じているが経時履歴はほぼ同様な傾向を示している。

(3) 実物大供試体による内的拘束の評価

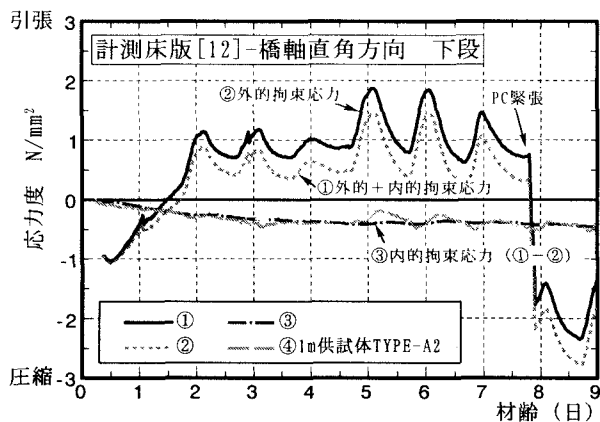


図-15 既設床版近傍の内的拘束と外的拘束による応力

既設床版による拘束の大きな計測点 [12] の橋軸直角方向応力度において、実物大供試体による内的拘束の評価を図-15に示す。1m供試体による鉄筋の内的拘束の結果と同様に、実物大供試体の計測からも約 0.3N/mm^2 の鉄筋拘束による圧縮応力度を評価することができる。

5. まとめ

鋼橋の場所打ち PC 床版における材齢初期の水和熱による温度応力度について、1m供試体の計測ひずみ、実物大供試体の計測ひずみ、および無応力計からの計測ひずみにより、拘束ひずみを算出し、単位時間あたりの拘束ひずみの増分とその時点の静弾性係数から拘束応力度の増分を示し、その時間増分の累計によりコンクリートに発生する材齢初期の応力度評価方法について提案した。また、各供試体による現場計測から得られるひずみの種別を整理し、それにより無拘束と仮定するひずみと拘束を受けるひずみを比較することにより、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の評価する方法を提案した。その上で、1m供試体、実物大供試体により得られた計測ひずみから応力度の評価を行った。

①膨張材の有無による1m供試体試験結果から、膨張材によるコンクリートの膨張作用を鉄筋が拘束することによりコンクリート内に生じる圧縮応力度、つまり膨張材による内的拘束の効果を確認した(表-3のA欄)。膨張材の添加量を 30kg/m^3 とした今回の配合および鉄筋比 1.5% の条件では、材齢 2 日目以降に約 0.3N/mm^2 の圧縮応力度を確認した。この圧縮応力度の大きさは、鉄筋比 0.95% の拘束膨張試験結果を用いた膨張エネルギー一定則に基づく理論値とほぼ等価であった。

②実物大供試体試験結果から、無拘束状態の実ひずみを無応力計で計測されたひずみと仮定することにより、鉄筋の内的拘束による応力度と既設床版および鋼桁の外的拘束による応力度の合計が評価される(表-3のC欄)。

外的拘束と内的拘束の合計応力度は、有効応力計の結

果と比較し、精度良い結果を得ることができた。この結果から、有効応力計により計測していたコンクリート内部の材齢初期における応力度を、埋込み型ひずみ計などにより計測ひずみから適切に評価することができることを示した。

③また、無拘束状態の実ひずみを1m供試体の埋込み型ひずみ計で計測されたひずみの値と仮定することにより、既設床版および鋼桁の外的拘束による応力度が評価される(表-3のB欄)。さらに、温度応力解析による応力度が、外的拘束による応力度を精度良く評価していると確認できた。

参考文献

- 1) 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
- 2) 寺田典生, 福永靖雄, 本間淳史, 會澤信一, 高瀬和男, 福田長一郎: 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, pp.36-45, 2002.9
- 3) 中村時雄, 齊藤文男, 湯室和夫, 佐野隆行: 高ピーライト系低発熱セメントと水和熱抑制型膨張材を併用した高度浄水処理施設の側壁部マスコンクリート対策, コンクリート工学, Vol.36, No.9, pp.28-34, 1998.9
- 4) 北澤 真, 羽瀧貴士, 村松道雄, 守分敦郎: 膨張材によるマスコンクリートの温度ひび割れ対策に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.1117-1122, 2001.
- 5) たとえば, 夏目忠彦, 徳山清治, 日紫喜剛啓: 新型のコンクリート応力計と PC 斜張橋のクリープ測定への応用, プレストレスコンクリート, Vol.27, pp.56-67, No.1, 1985.1
- 6) 土木学会: 2002 年度制定コンクリート標準示方書, 施工編, pp.52-53, 2002.3
- 7) 岡田 清, 六車 熙編: コンクリート・ハンドブック, pp.666-667, 朝倉書店, 1981.
- 8) 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, 第 235 号, pp.111-124, 1975.3