

# 早強セメントを用いた膨張コンクリートの温度応力解析方法の再考

Reconsideration of the thermal stress analysis method of the expansive concrete with high-early-strength portland cement

高瀬和男\*, 倉田幸宏\*, 塩永亮介\*, 内田大介\*, 坂根秀和\*, 中本啓介\*, 丸山久一\*\*

Kazuo TAKASE, Yukihiro KURATA, Ryosuke SHIONAGA, Daisuke UCHIDA,  
Hidekazu SAKANE, Keisuke NAKAMOTO, Kyuichi MARUYAMA

\* (社) 日本橋梁建設協会 床版研究委員会 (〒104-0061 東京都中央区銀座2-2-18)  
\*\* Ph.D. 長岡技術科学大学副学長, 環境・建設系 (〒940-2188 長岡市上富岡町1603-1)

Several examination results of the thermal stress analysis in Cast-In-Place PC slabs were reported in the past several years. This paper reports a research result about a heat physical-properties value or a dynamics physical-properties value from the report of the past thermal stress analysis in recent years. The properties for the thermal analysis have been proposed.

*Key Words: slab, the early age concrete, thermal stress analysis, expansive additive, young's modulus*  
キーワード: 床版, コンクリート材齢初期, 非線形温度応力解析, 膨張材, 有効ヤング係数

## 1. はじめに

近年, 鋼橋の場所打ち PC 床版における材齢初期に発生する危険性の高い温度応力に伴うひび割れを, 未然に防ごうとした温度応力解析方法に関する研究が数多く発表されている. その代表的な論文は, 参考文献 1) に示す論文である. この論文は, 移動式型枠による長支間場所打ち PC 床版の施工検証を目的として実施された実物大モデルを用いた実験において, コンクリート材齢初期の水和熱による温度応力, 膨張材の効果, PC 緊張による影響, 移動式型枠の載荷除荷に伴う影響を解析において把握する方法について論じたものである. 温度応力および乾燥収縮応力の算出は, 非線形有限要素法温度応力解析プログラム (ASTEAMACS) を使用している. またこの参考論文では, 温度応力解析の手順および温度解析で扱う熱物性値, 応力解析で扱う力学物性値が示されている. 解析手順については, 筆者らが参考文献 2) にまとめたものを図-1 に示す.

本論文では, 参考文献 1), 2) に示される熱物性値および力学物性値について, その設定理由を示す. また, その後の研究により, 解析に取り扱う物性値の変更点をまとめ, 今後の温度応力解析を行うための参考として示すこととする.

## 2. 過去文献の熱物性値および力学物性値

温度解析に入力するコンクリートおよび鋼の熱物性値を表-1 に示す. そのうちコンクリートの熱伝導率, 密

表-1 熱物性値

項目	単位	コンクリート	鋼桁
熱伝導率	W/m°C	2.70	51.3
密度	kg/m <sup>3</sup>	2300	7850
比熱	kJ/kg°C	1.31	0.47
断熱温度上昇量	°C	試験データより	考慮しない
外気温	°C	現地計測データより	

度, 比熱は土木学会コンクリート標準示方書 (以下, コン示) に示される値を採用している. コンクリートの水和反応に伴う発熱特性を示す断熱温度上昇特性, およびコンクリート表面からの熱の放出度合いを示す熱伝達率については, コン示に示す推定式や参考値だけでなく, 下記に示す検討を加えた値を使用している.

### (1) コンクリートの断熱温度上昇特性

断熱温度上昇特性は, 水和反応に伴うコンクリート発熱の温度上昇量および温度上昇カーブの形状に影響を与える. 断熱温度上昇量はコン示による推定式から算出される方法と, 断熱温度上昇試験から得られる実験値がある. 論文では下記の断熱温度上昇特性から得られた床版の温度履歴と, 実物大供試体の床版温度計測結果を比較することにより断熱温度上昇量について検討を行っている (図-2).

- (1) 断熱温度上昇試験結果を忠実に直接入力した解析結果
- (2) 断熱温度上昇試験結果の最終値が合うように近似式で補間した解析

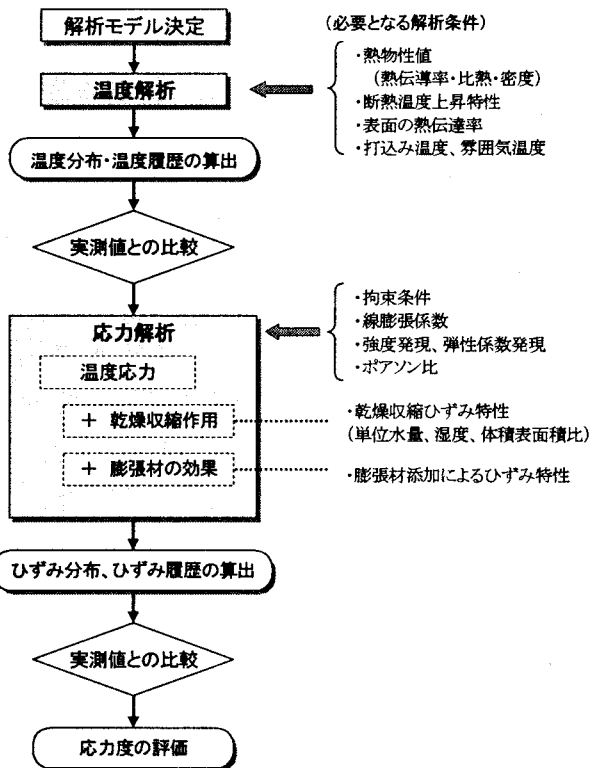


図-1 解析手順

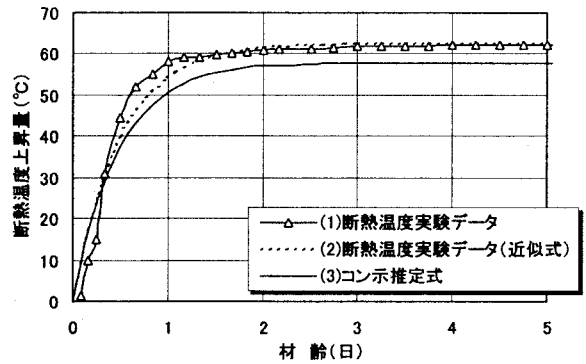


図-2 断熱温度上昇量の比較

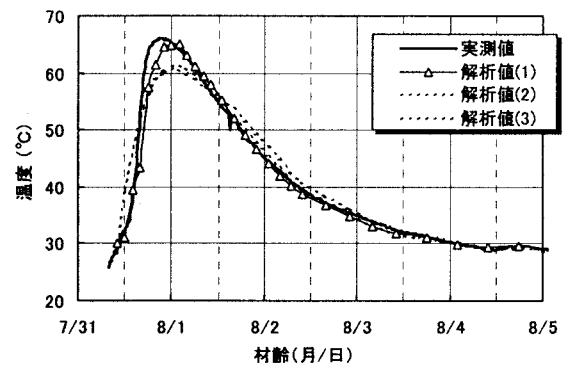


図-3 床版厚中央の温度履歴

(3) コンシによる推定式をそのまま入力した解析

上記の断熱温度上昇曲線をパラメーターとした主桁上の床版厚中央部の温度計測結果と解析結果との比較を図-3に示す。解析値(1)と(3)の差は、コンシ推定式や実験データの補間式では考慮されない「水和熱によってコンクリート温度が上昇し始める時点における“S字カーブ”を描く温度上昇特性」の有無が原因と考えられている。よって、過去の文献の解析においては、ほぼ断熱温度上昇試験を行った試験データを入力している。しかし、断熱温度上昇試験を行う試験機関は一般的に全国に分布しているわけではなく、一部の試験・研究機関に限られている、また配合ごとに断熱温度上昇試験を行うことは費用的にも作業的にも負担が大きく、適切な近似式の提案が待たれている。

(2) コンクリート表面の熱伝達率

表面の熱伝達率については、下記の解析結果から得られた床版の温度履歴と、実物大供試体の床版温度計測結果を比較することにより検討を実施した(表-2)。

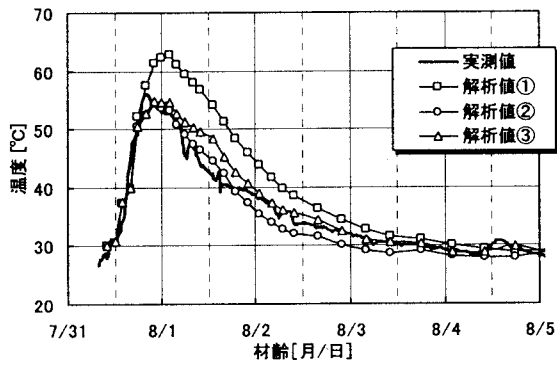
- (1) コンシに示されている熱伝達率の参考値を適用 → 解析ケース①
- (2) 床版コンクリートがマスコンなどと比較して体積表面積比が小さいことを考慮し、床版上面の熱伝達率を大きくした。 → 解析ケース②
- (3) 上記の理由から床版上面の熱伝達率を大きくし、さらに実物大供試体での施工時の状況(床版下面は

地面に近い対流しやすい、など)を考慮して床版下面の熱伝達率を小さくした。 → 解析ケース③

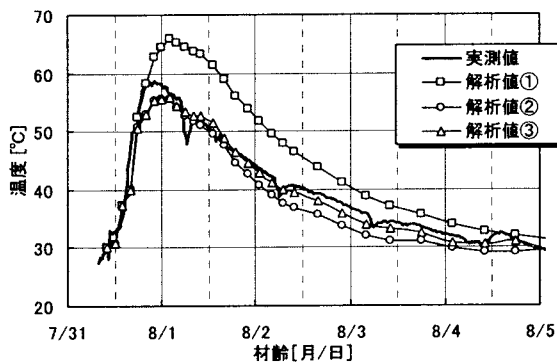
上記の熱伝達率をパラメーターとした主桁上の床版上面および下面の温度計測結果と解析結果との比較図を図-4、5に示す。解析ケース①は上面からの熱を逃がさないため、計算上上下面の温度を蓄えた結果となった。つまり、床版はマスコンに比べて非常に断面厚の薄い構造物であるため、表面の熱伝達率の影響を大きく受けやすい。さらに実験での施工時の状況(上面は風に当たりやすく下面は地面に近い対流しやすい、など)を考慮した③の解析ケースでは各点での温度履歴の良い一致を得た。ここで言う熱伝達率とはあくまでも見かけの熱伝達率であるので、上記のように養生方法によって様々に変化する。解析を行うにあたっては、実際の養生方法や環境条件に応じて表面の熱伝達率を適切に設定しなければならないことが確認されている。

表-2 施工時状態と熱伝達率の比較

部位	床版上面				床版下面・側面		鋼桁
	材齢(日)	0.25 0.25	3.0~ ~3.0	7.0 7.0	0~4.0	4.0~	
状態	養生なし	マット+散水	シート養生	養生なし	型枠設置	型枠取外し	-
解析ケース	①	14.0	5.0	6.0	14.0	14.0	12.0
	②	14.0	12.0	12.0	14.0	14.0	14.0
	③	14.0	12.0	12.0	14.0	6.0	14.0



図—4 床版上面温度履歴図

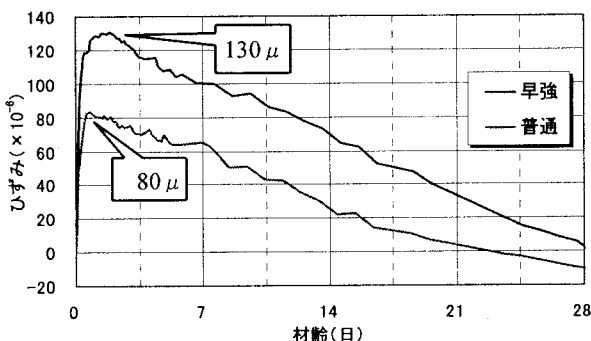


図—5 床版下面温度履歴図

(3)膨張材による膨張ひずみ量

コンクリートの乾燥収縮については、コン示[設計編]の算定式の乾燥収縮ひずみを解析に反映することで一般的な評価となる。しかし、膨張材を添加したことによる膨張材の効果については、そのひずみ特性を表す推定式等が整っていないため、1m供試体(床版切り出しモデル試験体)の実験結果からひずみデータをそれぞれ早強C/普通Cと分けて整理し、床版厚36cmと53cmのデータの平均値をひずみ入力値として用いた(図—6)。

膨張材の添加による膨張ひずみ量は、セメントの種類、鉄筋比、コンクリート温度および季節の影響などにより変化する。しかし、膨張材の添加量は収縮補償範囲(約30kg/m<sup>3</sup>)としているため、膨張ひずみ量の大きさにそれ



図—6 膨張・収縮ひずみ

ほど大きな差が生じるとは考えられない。それよりも、コンクリート温度に応じて膨張ひずみの発現スピードに変化が生じると予想されるため、解析にて適切に評価することが課題とされる。

(4)温度上昇時下降時の線膨張係数の設定

一般にコンクリートの線膨張係数は、通常一定値(10.0×10<sup>-6</sup>/°C)の物理量として考えられる。しかし、実物大供試体試験において、ひずみ計測値と解析値がなかなか一致せず、そこでコンクリート温度とコンクリートひずみ計の測定値の関係をグラフ化した。その結果、温度上昇時は材齢6時間ごろから線形性が現れること、温度上昇時と温度下降時において傾きが異なり温度上昇時は小さな値となっていることがわかった。よって、このコンクリート温度とひずみの関係を線膨張係数として取り扱うこととした。また、温度上昇時に線膨張係数が小さくなるのは、材齢初期の自己収縮の影響であると考えられている。

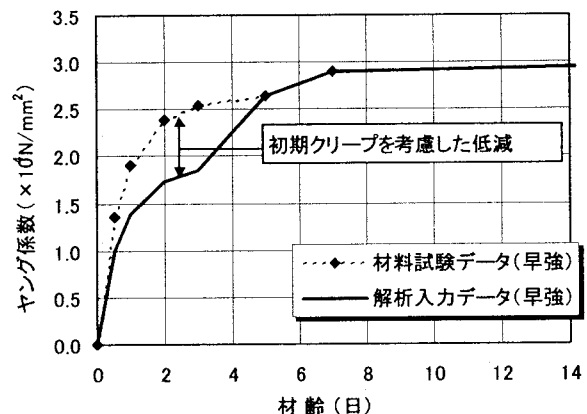
(5)初期材齢の有効ヤング係数

温度応力解析においてコンクリート初期材齢のヤング係数は力学特性値の中で、解析精度に重要な影響を与える入力値の一つである。論文においては、実物大供試体実験と平行して実施したコンクリート静弾性係数試験データに対し、コン示に示される初期クリープの影響(有効弾性係数法)を考慮することとしている(図—7)。

ヤング係数の設定において、初期クリープを考慮しない基礎的なヤング係数については、現在のところコン示に示すセメント種類毎の圧縮強度式から求める算定式で良いと考えられる。しかし、初期クリープを考慮した有効ヤング係数については、コン示に設定されている低減方法は主にマスコンクリートを対象としたものと考えられ、床版のようなマスコンクリートに比べ薄版構造であり、かつ高強度のコンクリートに対して、同様の初期クリープの設定方法で適切であるかは検討の余地がある。

3. 物性値の研究および入力値の見直し

筆者らは膨張材の有効性を適切に評価するべく、特に一般の技術者においても簡潔に理解されるように膨張材



図—7 初期材齢時の静弾性係数

の効果を応力度として示すことを研究してきた。また、上記のように設定した物性値が、一般的なコンクリートと比較して適切に設定されているか、さらに今後検討を進めていくうえで一般性があるか議論を進めてきた。以下に、検討結果の一部を紹介する。各検討結果は、筆者ら所属協会の報告書として出版するほか、各々論文として発表する。

(1)コンクリートの断熱温度上昇特性<sup>3)</sup>

断熱温度上昇特性については、前項で示したようにコンクリートの発熱時の温度上昇量および初期の温度上昇カーブを適切に相関させる場合に、コン示に示される値では若干相違いがあることが示された。そこで、筆者らは対象を場所打ちPC床版に限定し、膨張材を用いた早強セメントの断熱温度上昇試験を実施し、水和発熱モデルを用いてセメント量や打込み温度ごとの断熱温度上昇式における各係数を算出した。断熱温度上昇試験に用いた配合を表-3に示す。以下に断熱温度上昇量の推定式を示す。

$$Q(t) = Q_{\infty} \{1 - \exp(-\alpha t)\} \quad (1)$$

$$Q(t) = Q_{\infty} \{1 - \exp(-\gamma t^{\delta})\} \quad (2)$$

ここに、 $Q(t)$ はt日における断熱温度上昇量、 $Q_{\infty}$ は終局断熱温度上昇量、 $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$ は実験定数である。

表-3 コンクリート配合

スラ (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	細骨材	粗骨材	澱粉
14±1	47±0.5	44	44.3	156	325	30	799	1012	266

表-4 各係数と単位結合材量(B)との関係

打込み温度 (°C)	$Q_{\infty} = a \cdot B + b$		$\alpha = c \cdot B + d$		$\gamma = e \cdot B + f$		$\delta = g \cdot B + h$	
	A	b	C	d	e	f	g	h
5	0.158	1.943	0.0011	0.645	0.0034	-0.141	0.0038	1.424
10	0.160	1.200	0.0012	0.843	0.0061	-0.384	0.0031	1.483
15	0.160	1.200	0.0014	1.020	0.0099	-0.809	0.0028	1.422
20	0.164	-0.120	0.0013	1.327	0.0119	-0.511	0.0019	1.575
25	0.174	-3.403	0.0005	1.890	0.0058	2.590	-6E-05	2.089
30	0.158	2.460	0.0024	1.538	0.0250	-3.346	0.0027	0.950

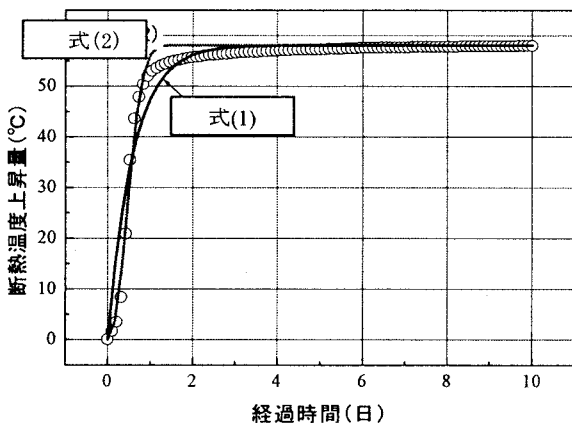


図-8 実測値と推定近似式との比較 (20°C)

表-4に近似式の各係数を打込み温度毎に単位結合材量 (kg/m<sup>3</sup>) との関係を示す。ここで、検討した単位結合材量は 320~380kg/m<sup>3</sup> の範囲であり多少外挿は可能であると考えている。

図-8に示すように推定近似式と実測値の適合性は若干劣る。しかしながら、解析方法の汎用性や既往の報告<sup>4)</sup>で指摘されている応力解析結果に与える影響を加味した場合、表-4で整理された値は作業性において有効である。

仕様規定型から性能照査型へと移行したコンクリート標準示方書の施工編では、コンクリートの温度解析に使用するコンクリートの発熱特性は、材齢と部位毎に異なるコンクリートの温度を考慮してモデル化するものとしている。この見解を受けて、JCI マスコンクリートプログラム作成委員会では、理論構成に信頼性が高く、適用範囲の広い複合水和発熱モデルなどを解析プログラムに組み入れられようとしていることを記述しておく<sup>5)</sup>。

(2) 膨張材による膨張ひずみ量

膨張材の膨張ひずみ量については、前項で示したようにセメントの種別、鉄筋比、コンクリート温度および季節の影響などにより変化する。しかし、添加量を収縮補償範囲としているため、膨張ひずみ量の大きさにそれほど大きな差が生じるとは考えられない。また、鉄筋比による膨張ひずみ量の変化について、辻らによる仕事量一定則によって予測することができる<sup>6)</sup>。よって、環境温度 (=打込み温度) をパラメータとして膨張ひずみ量の発現速度に変化が生じると予想し検討を行った。

実験は、実物床版を模した1m×1mの床版切り出し供試体を用いて、打込み時期を夏期と冬期として膨張コンクリートにおける膨張ひずみ量の測定を行った(図-9)。その結果、以下のことが確認された。夏期に打込みを行った供試体は打込み温度が29.5°Cであり、冬期に打込みを行った供試体は打込み温度が11.2°Cであった。いずれも材齢3日までには約100×10<sup>-6</sup>以上の膨張ひずみが発生するが、そのひずみ履歴は、夏期や冬期の内部温度履歴と対応しており、発熱速度の遅い冬期施工の方が夏期に比べて、膨張ひずみの発現もゆるやかな傾向で

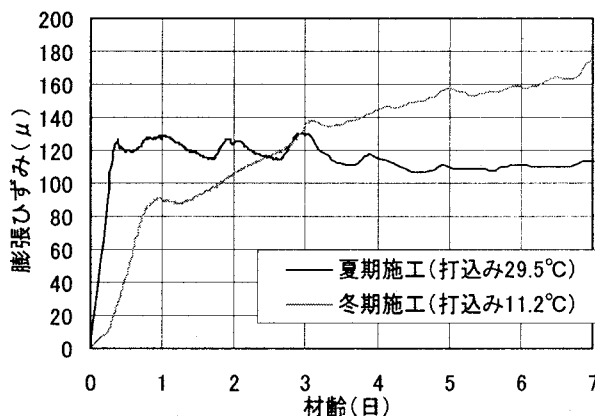


図-9 季節による膨張ひずみの差

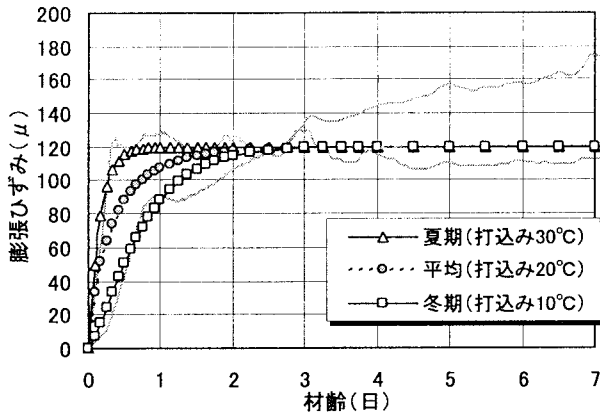


図-10 季節による膨張ひずみの差

あることが確認された<sup>7)</sup>。

これらの結果を基に解析で用いる季節毎の膨張ひずみ量を検討した。一般化としては、図-9で示した計測結果から、季節による最大ひずみ量の計測誤差はあるものの少なくとも  $120 \times 10^{-6}$  は補償できるとし、また季節(打込み温度)の違いによる膨張ひずみの発現履歴は、計測データの近似線から求め、図-10のように設定した。

一般にコンクリートの強度や収縮量には、積算温度による補正を行うことで示されるが、実験におけるひずみ計測データを積算温度によって補正したところ相関性は得られなかったため、上記のように季節において発現速度のみ違えた膨張ひずみ履歴を与えることとした。

### (3) 収縮ひずみ量の確認<sup>2,7)</sup>

実物大供試体による施工試験後、膨張材の効果が残存するのか、膨張コンクリートと普通コンクリートにおいて収縮ひずみ量は相違があるのかについて調査を行った。約1年間の膨張収縮ひずみの計測結果を図-11に示す。膨張コンクリートは、乾燥収縮に対して膨張材を混和しないコンクリートより収縮量が少なくなるのでは、との期待もあったが、収縮補償範囲内の膨張材の有無による乾燥収縮の有意差は顕著に現れないことが確認された。

また、膨張材の効果として着目すべき点は膨張材の有無によるひずみ差がほぼ一定値で確保されている点である。つまり、膨張コンクリートのケミカルプレストレインは材齢と共に消散してしまい、膨張材を混和した効果がすぐになくなってしまふような誤解をもたれていることが多い。しかし、膨張材によりコンクリートが初期に膨張ひずみを受けた効果が約1年後も残存していることが、明確に示された。参考文献<sup>2)</sup>にこの膨張材有無のひずみ履歴差を「有効ケミカルプレストレイン」と示された(図-12)。

### (4) 初期材齢の有効ヤング係数

膨張コンクリートの有効性を応力度として解析において推測する場合、初期材齢の有効ヤング係数は解析精度の上で最も重要な力学的特性値の一つである。初期材齢の有効ヤング係数は過去においていくつかの実験結果が報告されているが、一般性を示すためのデータは少な

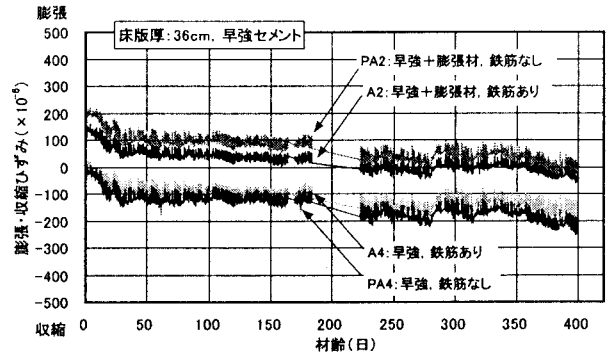


図-11 1m供試体の膨張収縮ひずみの経時変化

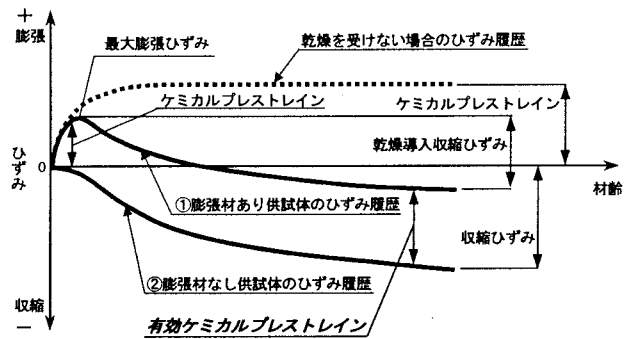


図-12 ひずみ履歴の模式図<sup>2)</sup>

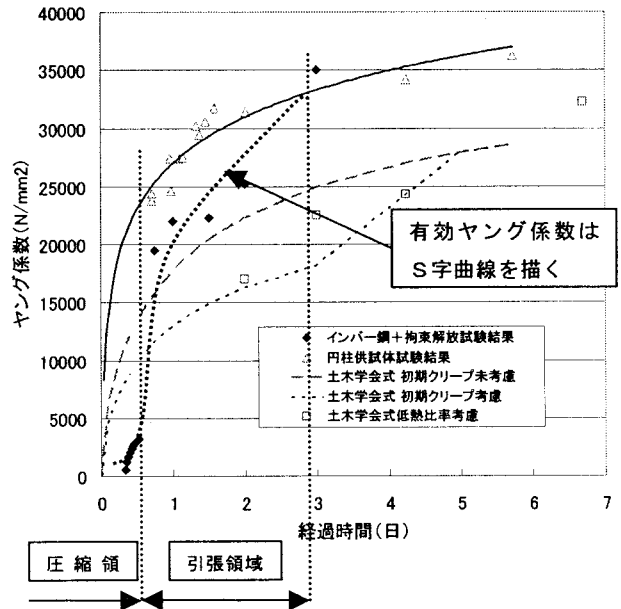


図-13 円柱供試体試験結果と有効ヤング係数試験結果の比較

い。よって、場所打ち PC 床版に用いる早強ポルトランドセメントによる膨張コンクリートの初期材齢の有効ヤング係数を、インバー鋼を用いた一軸拘束供試体の実験、および一軸拘束供試体において拘束鋼材を解放する実験から得られた結果から推測すると共に、初期材齢時に生じるクリープによるヤング係数の低減について FEM 温度応力解析を用いて検討した結果を示すものである。

インバー鋼試験、拘束開放試験の詳細については、参考文献2)を参照のこと。図-13に示すように本試験とコン示式とでは、初期材齢における有効ヤング係数がかなり大きくなっている。また、有効ヤング係数計測値は、有効材齢0.5日程度まではかなり小さく、その後立ち上がり、有効材齢3日目までには円柱供試体から計測したヤング係数に結びつくように変化した。これは、コン示に示されている初期クリープによる低減係数「材齢3日目までは $\Phi=0.73$ 、その後5日までに $\Phi=1.0$ 」と示されている計測結果とは大きく異なる。コン示で示される低減係数は、一般的なマスコンクリートを対象として設定されており、セメントは普通セメントおよび低熱セメントが主な対象であると思われる。よって、マスコンクリートの場合、本研究では検討している早強セメントに比べ躯体の温度上昇は非常に緩やかであり、材齢3日目まで躯体には温度上昇により圧縮応力が作用すると考えられ、その後ゆっくり温度が下がり、材齢5日目以降に引張応力が作用したと仮定するとコン示に設定された初期クリープの低減係数は良く理解できる<sup>8)</sup>。それに対して、早強セメントを用いた床版の場合、材齢0.5日~1日程度に最高温度を記録し、材齢3日目までには温度降下を終わってしまうため、それに対応した曲線を設定する必要がある。

ここで、温度上昇時および下降時に応じて有効ヤング係数の初期クリープの低減係数を提案する。ここでは、補正係数の設定範囲を温度上昇時（圧縮応力増加時）と温度下降時（圧縮応力減少時および引張応力増加時）の2段階に分けて有効ヤング係数がS字を描くように設定する。温度応力解析を行う場合は、事前に実物の温度計測結果を確認しているか、温度解析が終了している。よって、温度ピークとその温度については応力解析を行う前に判明しているため、積算温度により有効ヤング係数の補正、および温度をパラメーターとして低減係数の変化を行うことは可能である。そこで、コンクリートに圧縮応力度が増加している時は、ほぼコンクリート温度が上昇している期間であることから温度ピーク時に低減係数を変化させることが一般化において実務上問題ないと考えられる。以上より有効ヤング係数  $E_e$  の初期クリープ低減係数は以下のように提案する。

$$E_e = \Phi \times E \quad (\text{N/mm}^2) \quad (3)$$

ここに、 $\Phi$ は初期クリープの低減係数

打込み時~温度ピーク時： $\Phi=0.5$ 一定

温度ピーク~材齢3日： $\Phi=0.75\sim 1.0$ の直線変化

#### 4. まとめ

場所打ちPC床版の温度応力解析を行う場合、最近の研究を基に熱物性値および力学物性値の見直した。

① 解析に入力する熱物性値としては、熱伝導率、比熱、密度、断熱温度上昇特性、熱伝達率などがある。そのうち熱伝導率、比熱、密度については、コン示に

示す一般的な値を用いて良いと考えた。また、表面の熱伝達率については、過去の文献<sup>1)</sup>に示される検討の通り、コン示の参考値を一部見直した。

- ② 熱物性値については、断熱温度上昇特性について見直しを行った。過去、各配合および打ち込み温度で計測していた断熱温度上昇試験を、場所打ちPC床版に限定し膨張材を用いた早強セメントの断熱温度上昇特性を水和発熱モデルを用いて推定し、近似式にあてはめた場合の係数の推定方法を示した。
- ③ 解析に用いる力学特性値としては、コンクリートの線膨張係数については過去の文献<sup>1)</sup>の方法で妥当であると考えた。
- ④ 力学特性値として、膨張材の膨張ひずみ量、有効ヤング係数について見直しを行った。膨張材の膨張ひずみについては、膨張材の温度依存性に着目し季節ごとの膨張ひずみの発現特性を設定した。また、有効ヤング係数については、土木学会コンクリート標準示方書に示される初期クリープの設定はマスコンクリートに対してであり、高強度の床版のような版構造に対する設定ではない。よって、早期に強度が立ち上がる早強セメントを対象として初期クリープの提案を行った。

#### 参考文献

- 1) 倉田，河西，高瀬，丸山：有限要素法による長支間場所打ちPC床版施工時における応力度評価に関する研究，土木学会構造工学論文集，Vol.49A，pp.825-832，2003.4
- 2) 社団法人日本コンクリート工学協会；膨張コンクリートによる構造物の高機能化／高耐久化に関するシンポジウム委員会報告書，2003.9
- 3) 小田部，鈴木，高瀬，橘；膨張材を用いた早強セメントコンクリートの発熱特性，セメントコンクリート論文集，2004
- 4) 中村ほか；水和発熱過程および強度発現の温度依存性を考慮したマスコンクリートの温度応力解析，土木学会論文集，No.520/V-28，pp.235-247，1995
- 5) (社)日本コンクリート工学協会；マスコンクリートソフト作成委員会報告書，pp1-24，2003
- 6) 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
- 7) 高瀬，高嶋，河西，橘；膨張コンクリートを用いたPC床版試験体の長期計測結果，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，2004.7
- 8) 日本コンクリート工学協会；コンクリート構造物のクリープおよび収縮による時間的依存変形研究委員会報告書，2001.4