

場所打ち PC 床版における材齢初期の温度応力と膨張材の応力的評価

Thermal stress and stress evaluation of expansive additive at an early age of Cast-in-place PC slab concrete

高瀬和男*, 倉田幸宏**, 塩永亮介***, 下村匠****, 丸山久一*****

Kazuo Takase, Yukihiro Kurata, Ryousuke Shionaga, Takumi Shimomura, Kyuichi Maruyama

*工博 駒井鉄工株式会社, 技術部長 (〒293-0011 千葉県富津市新富 33-10)

**工修 石川島播磨重工業株式会社, 設計部技術開発グループ課長 (〒135-8731 東京都江東区豊洲 2 丁目 1-1)

***工修 石川島播磨重工業株式会社, 基礎技術研究所構造研究部 (〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町 1)

****工博 長岡技術科学大学助教授, 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

*****Ph.D 長岡技術科学大学副学長 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

A lot of researches on the thermal stress generated at an early age of Cast-in-place PC slab concrete used for two steel main girder bridge are announced. That research is the effective Young's modulus at an early age and the expansion strain history of the expansive concrete that considers the temperature dependency etc. This paper showed the quantitative value of the thermal stress and the effect of expansive additive as a referring to the papers that had been shown before. Slab span length 6m with a lot of construction results was examined. Moreover, the examination was advanced in consideration of the material condition and the construction environment. The thermal stress by the heat of hydration and the effect of the expansive additive can be quantitatively shown without analyzing the temperature stress to need a complex, special judgment as a result of this examination.

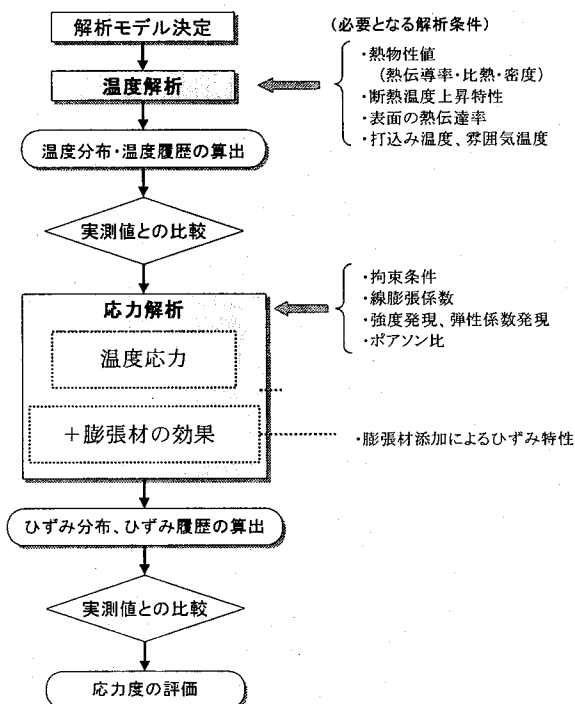
Key Words: Cast-in-Place PC Slab, Expansive Additive, Thermal Stress

キーワード: 場所打ち PC 床版, 膨張材, 温度応力

1. はじめに

近年, 鋼 2 主桁橋に用いられる場所打ち PC 床版の材齢初期に発生する温度応力に関する研究が数多く発表されている¹⁻⁸⁾。参考文献 1-3)は, 移動式型枠による長支間場所打ち PC 床版の施工において発生した温度応力を主要因としたひび割れの検証, およびその検討結果によるひび割れ対策の検証を目的として実施された実物大模型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, 移動式型枠の荷重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。また参考文献 4)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。その手順を図-1に示す。

参考文献 5)には, 文献 1-4)に示される熱物性値および力学物性値について, その設定理由および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, 温度応

図-1 温度応力解析の手順³⁾

力解析を行うための参考値として示している。

初期材齢の有効ヤング係数は、材齢初期における温度応力度を的確に示すため解析精度の上で最も重要な力学的特性値の1つである。参考文献 6)は、場所打ち PC 床版に用いる早強ポルトランドセメント（以下早強セメント）による膨張コンクリートにおける初期材齢の有効ヤング係数を一軸拘束供試体において拘束鋼材を解放する試験、およびインバー鋼を用いた一軸拘束供試体の試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係数について温度応力解析を用いて検討されている。その結果、土木学会コンクリート示方書に示される低減係数と異なり、材齢初期の温度ピークまでは 0.5 と小さな値を、また温度ピークから材齢 3 日目までの早期に低減効果が終了するとしたクリープの低減係数が提案されるとともに、実験供試体において計測された有効応力計の結果と比較することによりその妥当性を示している。図-2 に提案された材齢初期のヤング係数の低減率を示す。

参考文献 4)には、膨張材の効果を評価するために温度応力解析においてコンクリート要素に経時的な膨張材の膨張ひずみ履歴を解析入力値として用いる方法を示している。その膨張ひずみ履歴は環境温度にかかわらず一定の履歴を用いてきた。しかし膨張ひずみの発現性はセメントの水和反応と同様に温度依存性があることがわかってる。参考文献 7)には、夏期と冬期における 1m×1m×床版厚の供試体による膨張特性確認実験で得られた膨張ひずみデータを近似することで、ひずみの発現速度を関数として示すことが提案されている。その試験結果と提案式を図-3 に示す。

また、今まで示した論文における温度応力解析のモデルは、床版内部の鉄筋は詳細にモデル化せず膨張材の効果はコンクリート要素に鉄筋拘束下での膨張ひずみ履歴を与えた解析を行っている。つまり膨張材の効果には、内部鉄筋の拘束によるケミカルプレストレスが考慮されていないことになる。このように解析において鉄筋をモデル化しない理由としては、合成桁の施工では外部拘束として既設床版や鋼桁の拘束が主であること、鉄筋をモデル化した場合に無拘束下の有効自由膨張ひずみの設定が困難なこと、鉄筋要素のモデル化が非常に煩雑になることなどが挙げられる。しかし、膨張材の効果を適切に示すためには、やはり内部鉄筋の拘束によるケミカルプレストレスを考慮する必要があると考えられる。参考文献 8)では、鉄筋によるケミカルプレストレスを求めるために、床版に鉄筋のモデル化を行いそこから求まるケミカルプレストレスと、辻らの仕事量一定則⁹⁾の考え方を取り入れ床版の鉄筋のモデル化を行わずに鉄筋比により膨張ひずみを低減させた場合のケミカルプレストレスを比較し、その値がほぼ等価であることを確認し、それによって仕事量一定則により鉄筋拘束分のケミカルプレストレスを別途足し合わせることで、鉄筋をモデル化した

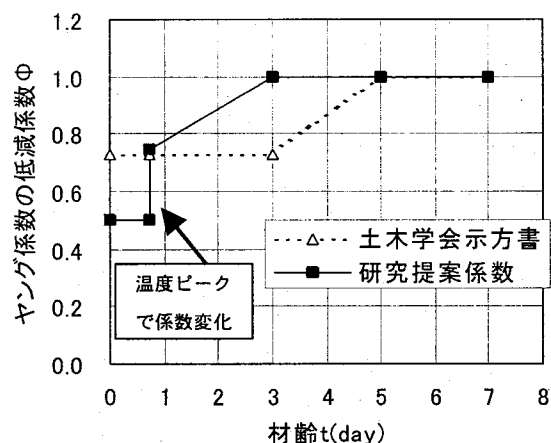
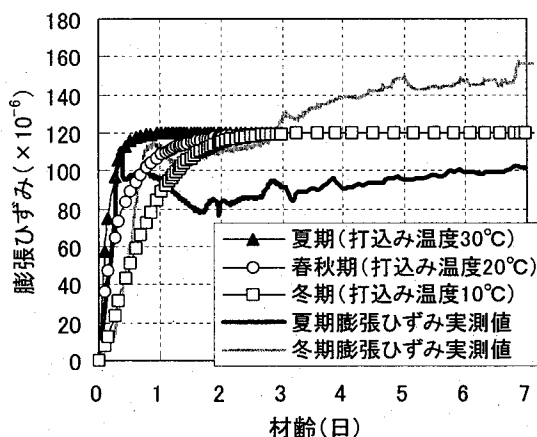


図-2 床版に適用した有効ヤング係数の低減率⁶⁾



季節における膨張ひずみ曲線算定式

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{夏期} & \varepsilon_{ex}(t) = 120 \times \{1 - \exp(-6.5 \cdot t^{1.0})\} \\ \text{春秋期} & \varepsilon_{ex}(t) = 120 \times \{1 - \exp(-2.3 \cdot t^{0.8})\} \\ \text{冬期} & \varepsilon_{ex}(t) = 120 \times \{1 - \exp(-1.3 \cdot t^{1.3})\} \end{array} \right.$$

図-3 膨張ひずみの特性⁷⁾

場合のケミカルプレストレスを示している。

このように鋼 2 主桁における早強セメントを用いた場所打ち PC 床版の材齢初期の温度応力解析に用いるコンクリートの材料物性値などの研究は数年前に比べかなり進歩していると考えられる。

ここに示した参考文献は、主に床版支間 10m 以上、床版厚も 53cm 以上の長支間の場所打ち PC 床版を対象にして温度応力の抑制対策として検討されてきた。しかし、実際に施工実績の多いものは道路幅員の関係から床版支間 6m 程度のものであるが、そのクラスの温度応力の大きさについてはほとんど検討されてなかった。しかし、長支間の床版において温度ひび割れの問題が発生したために施工時に注意はしていたが、その心配が適切なものであるかは判っていなかった。

本論文では、これらの研究成果を元に床版支間 6m の橋梁を対象として、材料条件や施工環境を考慮して温度応力および膨張材の効果がどの程度であるかを定量的に示した。ここでは実際の床版施工で想定される配合や施

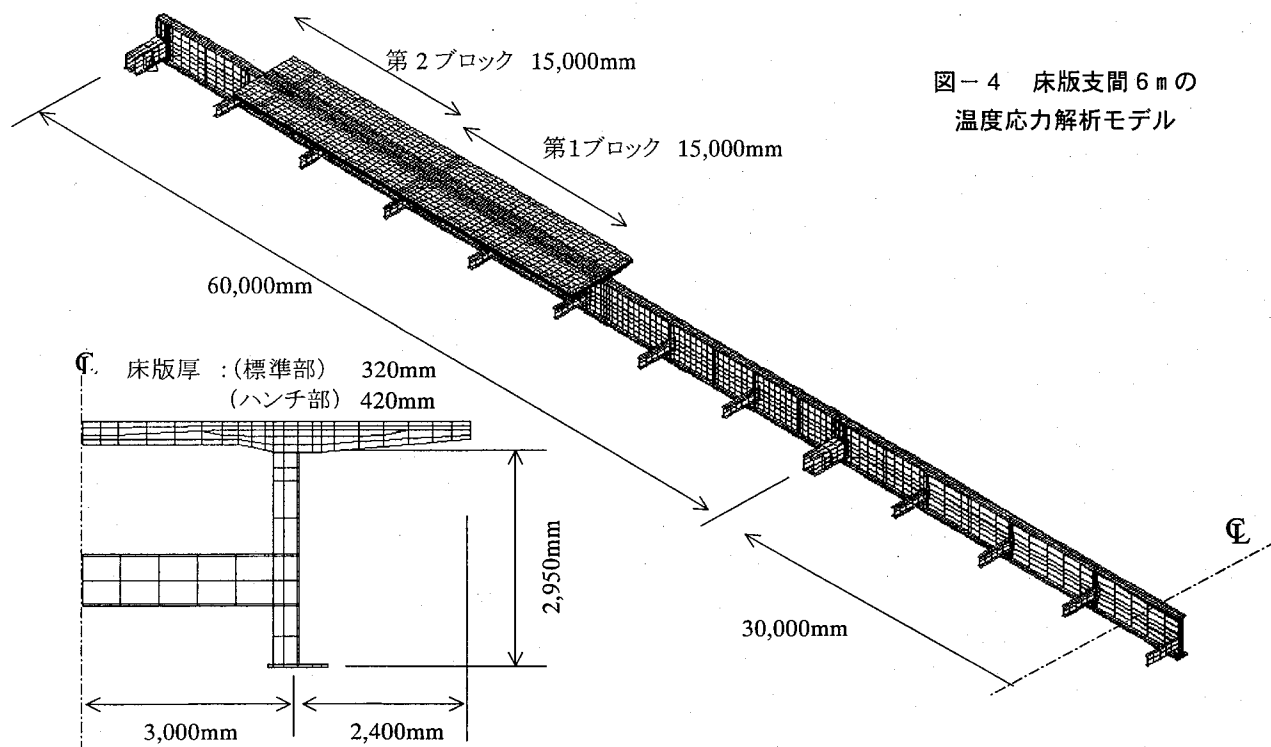


図-4 床版支間6mの
温度応力解析モデル

工時期についてケースに分け、初期材齢時（材齢7日程度まで）に発生する引張応力度（主桁近傍の橋軸方向応力： σ_x 、打継ぎ目近傍の橋軸直角方向応力： σ_y ）を一覧表にまとめる。さらに、それぞれのケースにおいて、膨張材を添加したケースと添加しないケースを解析し、応力解析結果を比較することにより、膨張材の使用による引張応力の低減効果を定量的に示した。

この温度応力解析の結果には、膨張ひずみの鉄筋拘束の影響が含まれていない。しかし、ここで研究を行っている材齢初期の温度応力による「ひび割れの対策」として、実際の現象として膨張コンクリートには材齢初期に

鉄筋拘束によりケミカルプレストレスが発生していることを考慮すれば、温度応力解析の結果だけで膨張材の効果とするには過小評価であると考えられる。よって、実務上の運用を考慮して、温度応力解析結果に、前述した参考文献8)で検討した仕事量一定則による鉄筋拘束の影響を加算することにより膨張材の効果を評価した。この結果により、施工実績の多い床版支間6mの鋼2主桁橋について、複雑でかつ専門的判断が必要となる温度応力解析を行うことなく、水和熱による温度応力および膨張材の効果が定量的に「概略応力値」として判断することができると考える。

表-1 材料条件・施工時期を考慮した解析ケース

橋梁形式	連続合成2主鈑桁橋 PC床版（3径間連続:径間長 60m）												
床版支間	6.0m												
床版厚さ	標準部:320mm ハンチ部:420mm												
セメント種類	早強ポルトランドセメント						普通ポルトランドセメント						
外気温	25℃		15℃		5℃		25℃		15℃		5℃		
打込み温度	30℃		20℃		10℃		30℃		20℃		10℃		
（施工時期）	（夏期）		（春秋期）		（冬期）		（夏期）		（春秋期）		（冬期）		
膨張材の有無	あり	なし	あり	なし	あり	なし	あり	なし	あり	なし	あり	なし	
単位 粉 体 量	300	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－
	350	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	400	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－
	450	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－

○：解析を実施したケース

2. 解析モデル

2.1 検討項目

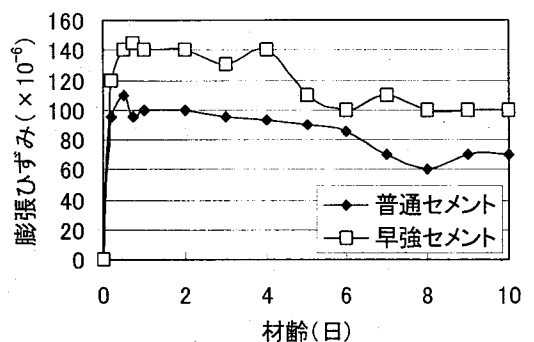
対象としたモデルは、床版支間 6.0m、床版厚は標準部で 320mm、主桁上で 420mm、3 径間連続合成桁橋（径間長 60m）の 1/2 の範囲に橋軸方向の対称性を考慮した 1/4 モデルを用いた。解析モデル図を図-4 に示す。解析においては標準的な施工（第 1, 2 ブロックのコンクリート打込み間隔は 7 日間）を考慮した。解析ケースを表-1 に示す。材料条件の違いとして早強セメントと普通セメントの 2 種類を挙げ、さらにそれぞれの配合について、膨張材の添加を行ったケースを「膨張材あり」、添加しなかったケースを「膨張材なし」として検討を行った。単位粉体量は 350 kg/m^3 を基本としているが、それ以外に 300 kg/m^3 , 400 kg/m^3 , 450 kg/m^3 のケースをそれぞれの条件で挙げ、単位粉体量の影響も把握することも検討対象とした。施工条件の違いとしては、外気温を 25°C （夏期）、 15°C （春・秋期）、 5°C （冬期）の 3 つの条件とし、コンクリートの打込み温度は外気温 $+5^\circ\text{C}$ に設定した。これらの外気温は、理科年表より東京地方の 8 月、5 月、2 月の月平均気温から設定した。

2.2 解析条件

材料条件（セメント種類、単位セメント量、膨張ひずみ）や環境条件（外気温、打込み温度）が異なることによって、温度応力解析で扱ういくつかのコンクリート物性値が変化する。断熱温度上昇特性については参考文献 10), 11) で提示された算定式をもとに打ち込み温度とセメント種類を考慮した温度上昇曲線を用いた。また、単位粉体量が変化した場合、終局断熱温度や発熱速度の係数がそれぞれ変化し断熱温度曲線も変化させている。

有効ヤング係数については、コンクリート標準示方書式により床版の温度履歴から積算温度による有効材齢を用い、参考文献 6) で提案された図-2 に示す低減係数を考慮した値とした。また、床版のような部材寸法の場合、セメントの反応速度が速くなり普通セメントにおいても温度上昇時期が材齢 1 日程度であり、温度下降が材齢 3 日で外気温に戻る事が判っている。そのような場合には普通セメントの場合も早強セメントと同様にセメントの種別に関係なく同様な有効ヤング係数の特性を示すものとして検討を行うこととした⁹⁾。

膨張ひずみのセメント種別による膨張特性については、参考文献 12) において示された早強セメントと普通セメントの鉄筋比 1.5% における膨張特性を図-5 に示す。試験の結果では普通セメントより早強セメントのほうが膨張ひずみの値が若干大きな値を示した。この結果については、他の試験¹³⁾でも同様な結果が報告されており、セメント種別、骨材、膨張材、混和剤によって異なるものと考えられる。よって、本解析の膨張ひずみは、普通セメントも早強セメントと同様に発現するとして取り扱う



鉄筋比 1.5%, 膨張材 30 kg/m^3 添加

図-5 セメント種別による膨張材の膨張特性¹²⁾

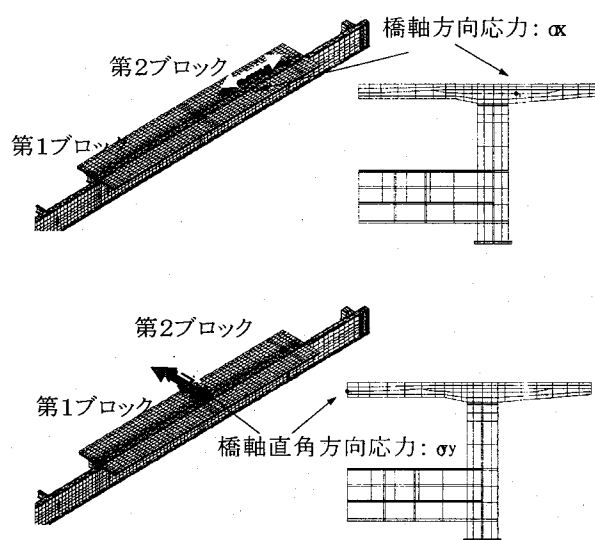


図-6 床版の発生応力の評価位置

こととした。膨張材添加における膨張ひずみの仮定は、収縮補償範囲の拘束膨張試験 A 法における膨張ひずみの最小値 150×10^{-6} とした。また、床版内部の鉄筋比は 1.5% とし、仕事量一定則を用いて入力する膨張ひずみの最終値を仮定した。膨張ひずみ履歴については、参考文献 7) で提示された実験データより図-3 に示す近似した季節ごとの膨張ひずみ曲線を用いた。

他の解析入力物性値については参考文献 5) を参照した。

2.3 応力評価の位置

温度応力解析による床版の発生応力の評価位置は、構造的に拘束が大きくひび割れ発生の危険性が高い箇所とし、具体的には図-6 に示す鋼桁による外部拘束が卓越する主桁近傍の床版厚中央の橋軸方向応力: σ_x と既設の床版ブロックによる外部拘束が卓越する打継目の床版厚中央の橋軸直角方向応力: σ_y の 2 箇所である。

3. 床版内部の評価応力度

3.1 環境温度の変化

早強セメントの温度応力解析結果、およびそこから得

表－２ 鉄筋拘束を考慮した場合の膨張材の効果（早強Ｃ：橋軸方向応力： σ_x ）

セメント種類	早強ポルトランドセメント（ $C=350\text{kg/m}^3$ ）		
外気温	25℃	15℃	5℃
打込み温度	30℃	20℃	10℃
温度応力 解析結果			
膨張材あり①*	0.7 N/mm ²	0.7 N/mm ²	0.5 N/mm ²
膨張材なし②*	1.3 N/mm ²	1.2 N/mm ²	1.0 N/mm ²
膨張材の効果 ①－②	-0.6 N/mm ²	-0.5 N/mm ²	-0.5 N/mm ²
ひび割れ指数 (引張強度／引張応力)の評価			
膨張材の効果*	2.0 → 3.5	2.1 → 3.9	2.2 → 4.8

表－３ 鉄筋拘束を考慮した場合の膨張材の効果（早強Ｃ：橋軸直角方向応力： σ_y ）

セメント種類	早強ポルトランドセメント（ $C=350\text{kg/m}^3$ ）		
外気温	25℃	15℃	5℃
打込み温度	30℃	20℃	10℃
温度応力 解析結果			
膨張材あり①*	1.6 N/mm ²	1.3 N/mm ²	0.9 N/mm ²
膨張材なし②*	2.2 N/mm ²	2.0 N/mm ²	1.6 N/mm ²
膨張材の効果 ①－②	-0.6 N/mm ²	-0.7 N/mm ²	-0.7 N/mm ²
ひび割れ指数 (引張強度／引張応力)の評価			
膨張材の効果*	1.1 → 1.6	1.2 → 1.9	1.4 → 2.5

拘束膨張試験（Ａ法）の最大ひずみは150 μ ，床版鉄筋比は1.5%（橋軸方向），0.8%（橋直方向）を想定。

*は，材齢7日の値を示す。

表-4 鉄筋拘束を考慮した場合の膨張材の効果（普通C：橋軸方向応力: σ_x ）

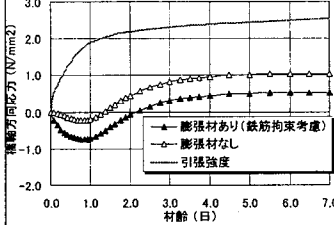
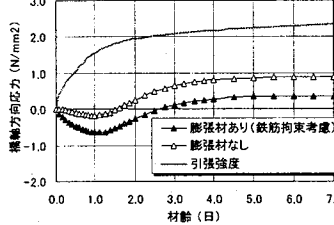
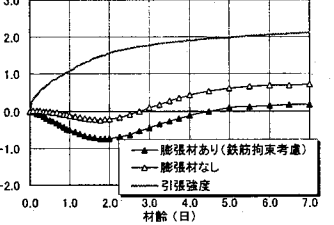
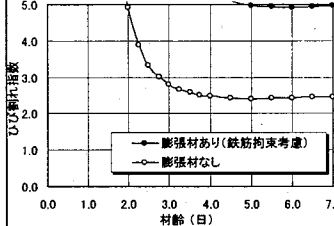
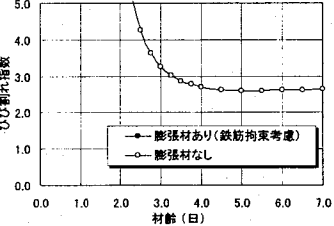
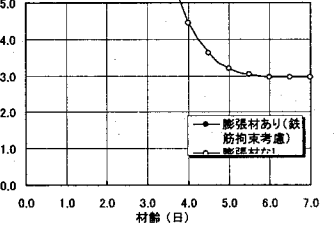
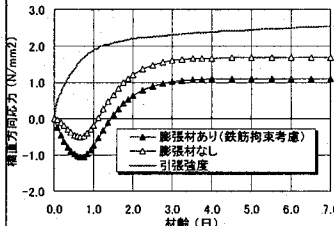
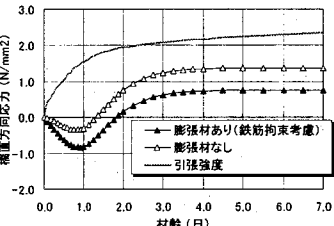
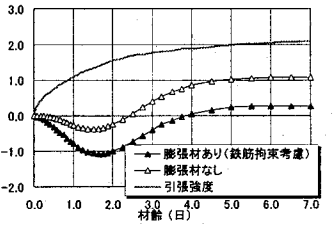
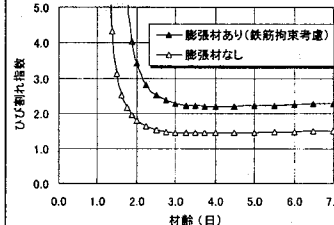
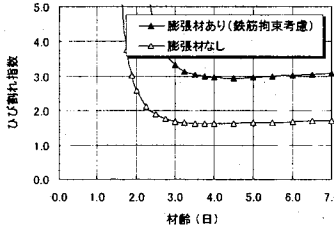
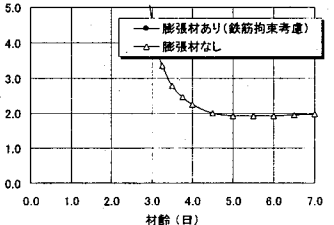
セメント種類	普通ポルトランドセメント（C=350kg/m ³ ）		
外気温	25℃	15℃	5℃
打込み温度	30℃	20℃	10℃
温度応力 解析結果			
膨張材あり①*	0.5 N/mm ²	0.4 N/mm ²	0.2 N/mm ²
膨張材なし②*	1.0 N/mm ²	0.9 N/mm ²	0.7 N/mm ²
膨張材の効果 ①-②	-0.5 N/mm ²	-0.5 N/mm ²	-0.5 N/mm ²
ひび割れ指数 (引張強度／引 張応力)の評価			
膨張材の効果*	2.4 → 4.9	2.6 → 6.4	2.9 → 12.3

表-5 鉄筋拘束を考慮した場合の膨張材の効果（普通C：橋軸直角方向応力: σ_y ）

セメント種類	普通ポルトランドセメント（C=350kg/m ³ ）		
外気温	25℃	15℃	5℃
打込み温度	30℃	20℃	10℃
温度応力 解析結果			
膨張材あり①*	1.1 N/mm ²	0.8 N/mm ²	0.3 N/mm ²
膨張材なし②*	1.7 N/mm ²	1.4 N/mm ²	1.1 N/mm ²
膨張材の効果 ①-②	-0.6 N/mm ²	-0.6 N/mm ²	-0.8 N/mm ²
ひび割れ指数 (引張強度／引 張応力)の評価			
膨張材の効果*	1.4 → 2.2	1.6 → 2.9	1.9 → 7.6

*拘束膨張試験（A法）の最大ひずみは150 μ ，床版鉄筋比は1.5%（橋軸方向），0.8%（橋直方向）を想定

*は，材齢7日の値を示す。

られる膨張材の効果の経時変化を表-2, 3に示す。また、普通セメントの結果についても表-4, 5に示す。なお、ここでは床版内部の鉄筋はモデル化せず鉄筋拘束下での膨張ひずみ履歴を考慮しているため、内部鉄筋拘束によるケミカルプレストレス（膨張材の効果）は、参考文献8)に従い別途仕事量一定則を用いて検討した値を示している。また、早強および普通セメントの膨張材有無による温度応力度の最大値およびそのときのひび割れ指数を図-7に示す。

3.2 単位粉体量の変化^{14),15)}

3.1 項の環境温度の計算は単位粉体量が 350 kg/m^3 、膨張材の膨張ひずみは 120μ の条件下での値である。変化単位粉体量を変化させた場合の早強セメント、普通セメントの温度応力解析結果およびそこから得られる膨張材の効果を図-8に示す。なお、ここでも内部鉄筋拘束によるケミカルプレストレスを考慮した値を用いている。

4. まとめ

施工実績が多かった床版支間 6m 構造においても、床版打継目付近の橋軸直角方向では、膨張材を添加しない早強セメントによる施工であれば打ち込み温度が 20°C 以上の標準的な施工に時期であっても 2.0 N/mm^2 以上の引張応力度が発生していることが予想された。また、普通セメントでの施工であっても打ち込み温度が 30°C では 1.7 N/mm^2 と大きな応力度であった。膨張材を添加した場合には、早強セメントで打ち込み温度 20°C において 1.3 N/mm^2 まで、 30°C においては 1.6 N/mm^2 までの応力緩和が図れることが予想された。普通セメントにおいては膨張材を添加することにより各温度共に 1.0 N/mm^2 程度以下と予想された。

鋼桁の拘束を大きく受ける主桁近傍の橋軸方向応力度も、橋軸直角方向と同様に膨張材を添加しない早強セメントによる施工であればどのような打ち込み時期であっても 1.0 N/mm^2 以上の引張応力度が発生していることが予想された。橋軸方向応力度の場合、コンクリートの応力照査において温度応力以外にコンクリート打ち込み時の施工ステップによる応力照査を行う必要があり、温度応力度を小さく抑えなければ施工が非常に困難を極めることになる。よって、膨張材を入れた場合にはどのような打ち込み時期であっても 1.0 N/mm^2 以下の引張応力度になることが予想され、温度応力の抑制には非常に効果があると考えられる。

解析の結果、膨張材を添加することによって主桁近傍の橋軸

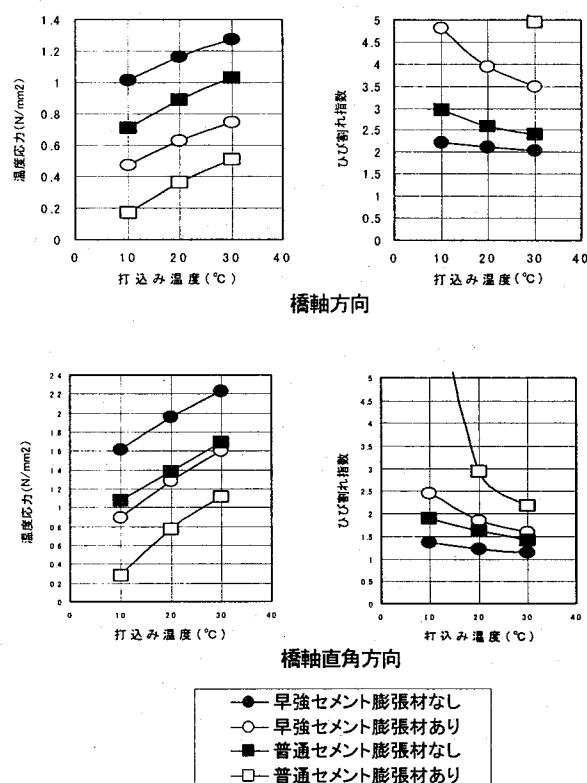
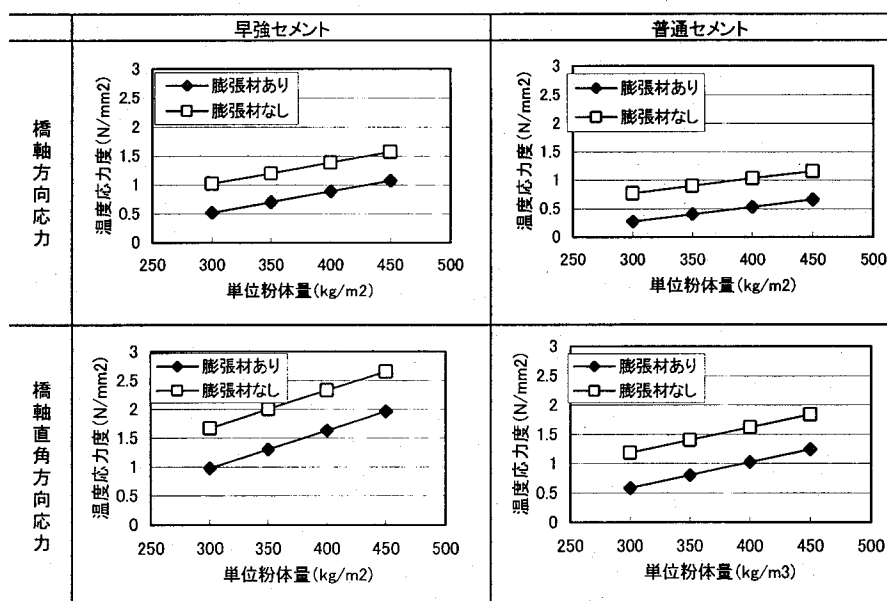


図-7 打ち込み温度別温度応力（最高値）とひび割れ指数

方向応力度で約 0.5 N/mm^2 、打継目近傍の橋軸直角方向応力で約 0.7 N/mm^2 の引張応力の低減がはかられていることが示された。同時に、「ひび割れ指数」で表すと、最も応力度が大きく発生した橋軸直角方向の早強セメントの打ち込み温度 30°C においては、膨張材を添加したことにより橋軸直角方向で 1.1 からひび割れを防止する程度の 1.6 へひび割れ指数が大きくなりひび割れ発生に対して安全側にシフトできることがわかった。よって、収縮補償程度の膨張材の添



参考文献 14) とは異なり、乾燥収縮は考慮していないが、鉄筋拘束影響を考慮している
図-8 単位粉体量の変化による温度応力（最高値）^{14),15)}

加では、ひび割れはかならずなくなるとは言い難いが、ひび割れを有効に制御する一つの方法ではあることがわかる。ここに「ひび割れ指数」は、材齢ごとにコンクリート引張強度を各材齢における最大主引張応力度で除した値であるが、ここでは作用方向別の影響を評価するために橋軸方向と橋軸直角方向の引張応力度の最大値で除した値を用いた。

また、今回の解析結果は、今までの経験と同様に打込み温度が高くなれば温度応力度が大きく発生することが数値として判った。よって、夏期に施工する場合には、早強セメントから普通セメントへ種別を変更するか、膨張材の添加を行うことが材料的な温度応力対策として採用され、その場合の温度応力の値もこの検討で判った。また、冬期においてはプレストレスの緊張時期の関係から早期の強度を期待するため早強セメントを使用する。そのため、やはり膨張材の添加が温度応力の対策として採用されると考えられる。しかし、膨張材だけでなく他の施工的な対策も検討することは、当然のことである。

また、図-8に単位粉体量の変化による温度応力値を示した。やはり、温度応力の大きく発生する部位では単位粉体量による変化が大きいことに注する必要がある。また、図-7、8により、地域における配合によって異なるセメント量の変化および施工時期の変化に対して、複雑でかつ専門的判断が必要となる温度応力解析を行うことなく、水和熱による温度応力および膨張材の効果が定量的に「概略応力値」として判断することができると考える。

本論文は日本橋梁建設協会の「場所打ちPC床版における膨張材の有効性評価検討報告書」¹⁵⁾を元に施工環境について追加解析を行い、打込み温度における変動について検討したものである。解析にあたり三井造船内田大介氏、宮地鐵工所坂根秀和氏、駒井鉄工中本啓介氏、三井住友建設玉置一清氏には大変なご協力をいただいた。紙面を借りて感謝申し上げる。

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, pp.36-45, 2002.9
- 3) 倉田幸広, 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
- 4) 塩永亮介, 内田大介, 中本啓介, 栖原健太郎, 玉置一清: 膨張コンクリートを用いた場所打ち PC 床版の温度応力解析, 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論文集, pp.143-148, 2003.9
- 5) 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: 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, 土木学会第四回道路橋床版シンポジウム, pp.99-104, 2004.11

- 6) 高瀬和男, 塩永亮介, 佐久間隆司, 鈴木康範, 丸山久一: 早強セメントを用いた膨張コンクリートの初期材齢における有効ヤング係数に関する考察, 土木学会論文集 No.802/V-69, pp.33-48, 2005.11
- 7) 高瀬和男, 八部順一, 小林潔, 橘吉宏: 場所打ち PC 床版における膨張材の有効性に関する研究, コンクリート工学 Vol.43, pp.26-33, 2005.7
- 8) 内田大介, 塩永亮介, 高瀬和男, 坂根秀和: 仕事量一定側に基づく鋼橋床版の膨張ひずみに関する一考察, 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論文集, pp.175-180, 2003.9.19
- 9) 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研究, 土木学会論文報告集, 第 235 号, No.5, pp.111-124, 1975.3
- 10) 小田部裕一, 鈴木康範, 高瀬和男, 橘吉宏: 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 No.58, 2004
- 11) 鈴木康範: コンクリート中のセメントの水和発熱過程と定量化に関する研究, 東京大学学位論文
- 12) 日本橋梁建設協会, プレストレスト・コンクリート建設業協会: 実物大模型による移動型枠を用いた場所打ち PC 床版の施工検証実験短期報告書, 2002.4
- 13) 小田部裕一, 小林隆芳, 百瀬晴基, 関田徹志: 各種セメントを用いた膨張コンクリートのひび割れ抵抗性, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.419-424, 2003.7
- 14) 玉置一清, 上坂康雄, 余国雄, 和内博樹, 野瀬智也: PC 床版に生じる若材齢時応力算定方法の標準化に関する一提案, 土木学会第 60 回年次学術講演会 CS10-008, pp.315-316, 2005.9
- 15) 社団法人日本橋梁建設協会, 膨張材協会: 場所打ち PC 床版における膨張材の有効性評価検討報告書, 2004.10

(2005 年 9 月 10 日受付)