

## 場所打ちPC床版の温度応力に関する解析的研究

Analytical Study on Thermal Stress for Cast-in-place PC slab

河西龍彦\*, 本間淳史\*\*, 長谷俊彦\*\*\*, 坂根秀和\*\*\*\*, 松井繁之\*\*\*\*\*

Tatsuhiko Kasai, Atsushi Homma, Toshihiko Nagatani, Hidekazu Sakane, Shigeyuki Matsui

\* (株)宮地鐵工所, 設計部, 設計一課長 (〒290-8580 千葉県市原市八幡海岸通り3)

\*\* 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)

\*\*\* 日本道路公団静岡建設局, 構造技術課 (〒420-0857 静岡県静岡市御幸町11-30)

\*\*\*\* 工修 (株)宮地鐵工所, 設計部, 設計一課 (〒290-8580 千葉県市原市八幡海岸通り3)

\*\*\*\*\* 工博 大阪大学大学院, 工学研究科教授 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

Thermal stress is perceptible as a predominant of cracking which was recognized in a cast-in-place PC slab in a large girder space two plate girder system bridges. The result from the thermal analysis for the slab restricted with the preceding cast slab and steel girders, the direction of the principal stress and the condition of cracks occurrence recognized to correspond with the observed ones. The maximum thermal stress occurred at the case considering the maximum temperature and variation at the construction period and the variation of temperature at the same time from the parameter analysis. The results from the analysis counting on the effect of the expansive additive showed the use of it very effective against tensile stress occurrence caused by the thermal stress in the young age concrete.

**Key Words :** cast-in-place PC slab, crack, thermal stress, expansive additive

### 1. はじめに

橋軸直角方向にプレストレスを導入した耐久性の高いプレレストレストコンクリート床版(以下、PC床版という)に鋼2主桁橋を組み合わせる橋梁形式は、鋼橋における有力な構造形式のひとつとして活発な技術開発が進められている。

筆者らは約18mの広幅員橋に鋼2主桁橋形式を採用するため、床版支間長11mという国内では例を見ない長支間場所打ちPC床版の技術開発に取り組んだ。このような長支間床版は道路橋示方書<sup>1)</sup>(以下、道示という)の活荷重による設計曲げモーメント式の適用範囲(PC床版の場合で床版支間長6m以下)を超えていることもあり、設計段階で様々な技術検討を行った<sup>2), 3)</sup>。

一方、同規模の場所打ちPC床版の施工を行った工事において、図-1に示すようなひび割れが発生した<sup>4)</sup>。この橋梁は床版支間長11.5m、鋼桁の支間長約50mの2径間連続桁で、床版厚は床版支間中央で37cm、主桁上は56cmである。場所打ちPC床版の施工は移動式型枠支保工により行われ、1回の床版施工ブロック長は約12mであった。ひび割れは、先に施工したブロック(以下、旧ブロックという)に打ち継がれるブロック(以下、新ブ

ロックという)の床版下面を中心に、1ヶ月未満の材齢初期に発生しており、その一部は貫通ひび割れとなっていた。

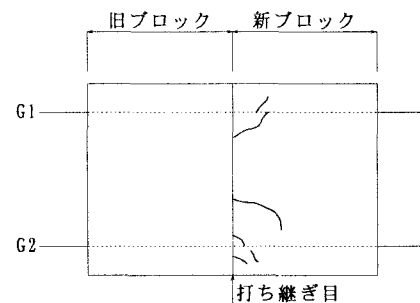


図-1 床版のひび割れ状況(床版下面)

このようなひび割れを発生させた原因として温度応力による影響が考えられる。これは、水和反応によって上昇したコンクリート温度が降下する際に、コンクリートの収縮を鋼桁および既設床版が拘束することによって床版コンクリートに引張応力が発生するもので、温度応力に起因するひび割れは床版内部から発生するため貫通ひび割れとなる可能性が高い。また風防や保温といった適切な養生を行っていないと床版内部と表面の温度差が大きくなり、この傾向が助長される。

場所打ちPC床版を有する鋼2主桁橋の場合、床版には、高強度の早強コンクリートが使用されるため、このような傾向がより強く現れるが、広幅員の場合は床版厚が厚くなるために水和熱による上昇温度が高く、温度応力の影響がより顕著に現れたものと推察される。

PC床版を有する鋼2主桁橋の優れた構造特性を成立させるためには、高い耐久性が確保された床版を作り上げることが必要不可欠で、このようなひび割れを施工時に発生させることは床版のみならず橋梁全体の耐久性を低下させる要因となり、これを防止する必要がある。

本論文は、材齢初期における床版コンクリートの温度変化特性、床版コンクリートに作用する引張応力度、ならびに温度応力に起因するひび割れを防止する対策としての膨張材の効果について解析的研究を行った結果より主に橋軸直角方向の応力度に着目して報告する。

## 2. 温度解析

### 2.1 解析対象橋梁の構造諸元

図-2に本研究で解析対象とした橋梁の断面図を示す。全幅員は18.05m、床版支間長は11m、床版の張出し長は3.525mである。床版厚は床版支間中央で36cm、主桁上で53cmで、桁間部の床版下面は放物線形状となっている。鋼桁は支間長約40mの7径間連続鋼2主桁橋である。主桁の桁高は約3mで、中間横桁が約6m間隔で下段に設置されている。

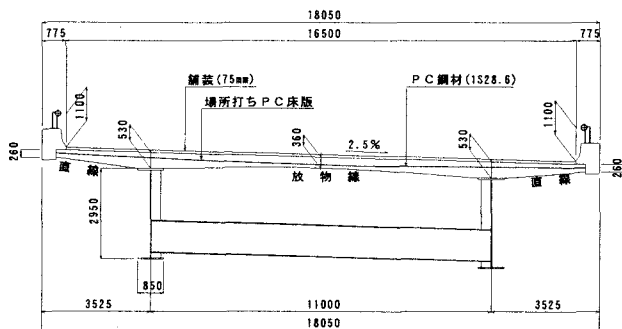


図-2 解析対象橋梁(藁科川橋)断面図(単位: mm)

### 2.2 解析方法

温度応力の影響を把握するために有限要素法による3次元非線形温度応力解析(以下、温度解析という)を実施した。解析モデルを図-3に示す。モデルは橋軸方向に1径間(約40m)、橋軸直角方向は幅員の半分とし、2ブロック分の床版をモデル化した。要素は床版、鋼桁ともに8節点 solid 要素を用い、床版は厚さ方向に4等分した。床版と鋼桁との接続部は節点共有とした。

使用ソフトは「コンクリートの非線形温度応力解析プログラム, ASTEA-MACS Ver.2, (株)計算力学研究センター」で、温度は8節点の平均値、応力は8積分点の平均値を、何れも要素の重心点における値として算出する。

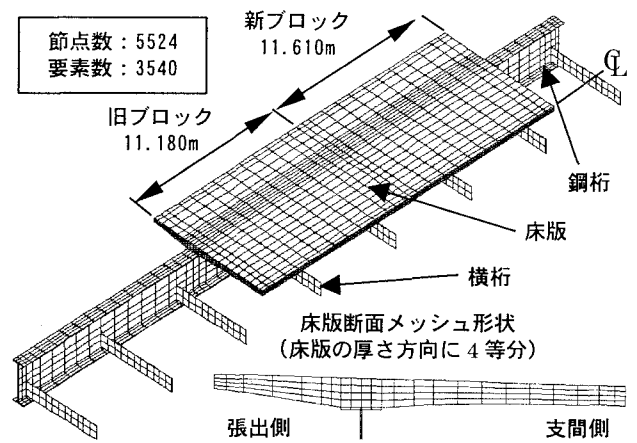


図-3 解析モデル

解析に用いた物性値等を表-1に示す。コンクリートの断熱温度上昇量は、コンクリート標準示方書<sup>5)</sup>(以下、コ示という) [施工編] に示される値を使用した。床版上面の熱伝達率は、材齢6時間~3日までのマット+散水養生期間を12 W/m<sup>2</sup>°C、他は14 W/m<sup>2</sup>°Cとした。

表-1 解析に用いた物性値等

項目	物性値	備考	
セメント配合	セメント種類	早強セメント	
	単位セメント量	335kg/m <sup>3</sup>	膨張材30kg/m <sup>3</sup> は同量のセメントに置換
	単位水量	160kg/m <sup>3</sup>	
	設計基準強度	40N/mm <sup>2</sup>	
コンクリート	熱伝導率	2.7W/m°C	コ示[施工編]より
	密度	2300kg/m <sup>3</sup>	
	比熱	1.31kJ/kg°C	コ示[施工編]より $C_c=3.03 \times 10^3 / \rho$
	断熱温度上昇量	コ示[施工編]の推定式 $Q(t)=Q_m(1-e^{-\gamma t})$ $Q_m, \gamma$ はコ示[施工編]の計算式より	
	線膨張係数	10μ/°C	
	ポアソン比	0.167	
	乾燥収縮の最終値	-245μ	コ示の算定式より (RH=65%, V/S=214mm)
膨張材の効果	80μ	図-15参照	
自己収縮	考慮しない		
鋼桁	熱伝導率	25W/m°C	
	密度	7850kg/m <sup>3</sup>	
	比熱	0.473kJ/kg°C	
	線膨張係数	12μ/°C	
熱伝達率(上面)	0日~6時間	14W/m <sup>2</sup> °C	養生なし
	6時間~3日	12W/m <sup>2</sup> °C	マット+散水養生
	3日以降	14W/m <sup>2</sup> °C	養生なし
	床版下面・側面	12N/mm <sup>2</sup> °C	下面・側面の熱伝達率は一定
解析時間ピッチ	材齢12日までは2時間ピッチ 以降は、1ヶ月・2ヶ月・3ヶ月・6ヶ月・12ヶ月の時点で計算		

解析に使用したコンクリート配合は藁科川橋で使用したものと同一とした。セメント量は335 kg/m<sup>3</sup>(早強)であるが、膨張材(30 kg/m<sup>3</sup>)を同量のセメントに置換したためセメント量は合計365 kg/m<sup>3</sup>として解析した。

解析時間ピッチは、各ブロックの材齢12日までは2時間、以下は表-1に示すとおりとした。また、先に施工する旧ブロックと、後から施工する新ブロックの材齢差は、藁科川橋における施工サイクルより12日とした。

### 2. 3 解析ケース

解析は、施工時期の違いとして暑中施工、通常期（春季あるいは秋季）施工、寒中施工の3つに着目し、各々外気温を一定とした場合と、外気温を変化させた場合について行った（表-2）。

表-2 解析ケース

	施工時期	外気温	
		一定	変化
Case1	暑中	○	
Case2			○
Case3	通常期	○	
Case4			○
Case5	寒中	○	
Case6			○

### 2. 4 外気温の設定

外気温一定の場合は、外気温およびコンクリートの打込み温度を表-3に示すように設定した。なお、コンクリートの打込み温度は外気温+5℃とした。

表-3 外気温一定の場合の温度設定（単位：℃）

	外気温	コンクリートの打込み温度
暑中	25.0	30.0
通常期	17.5	22.5
寒中	10.0	15.0

外気温を変化させる場合については、表-4に示す静岡市内における過去1年間の気象観測結果より、暑中については最高気温の平均値が最も高い8月を、寒中については最低気温の平均値が最も低い1月を、また通常期（春季、秋季）については最高温度の平均値と最低温度の平均値の差が最も大きい4月のデータをピックアップし、図-4および表-5に示すように温度変化カーブを設定した。

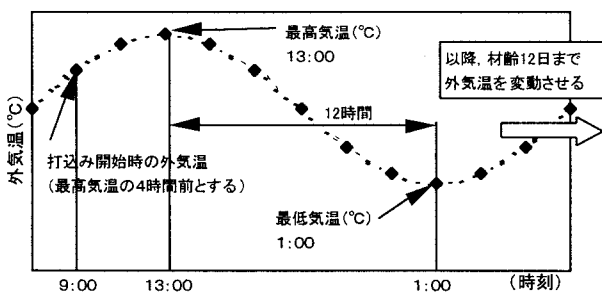


図-4 外気温を変化させる場合の温度変化カーブ

表-5 外気温を変化させる場合の設定値（単位：℃）

	最高気温	最低気温	打込み開始時の外気温	コンクリートの打込み温度
時刻設定	13:00	1:00	9:00	
暑中	31.0	24.0	29.3	34.3
通常期	20.3	10.2	17.8	22.8
寒中	10.4	1.5	8.2	13.2

注) コンクリートの打込み温度は、打込み開始時の外気温+5℃とした。

### 3. 材齢初期における床版コンクリートの温度変化特性

#### 3. 1 床版コンクリートの温度分布

温度解析の結果より、図-5に Case1（暑中施工、外気温一定）において床版コンクリートの温度上昇がピークを迎える材齢14時間（0.58日）の床版内部温度分布を示す。床版コンクリートの温度は床版厚の厚い主桁近傍部の床版厚中央部分（“a”部）で高くなっていることがわかる。

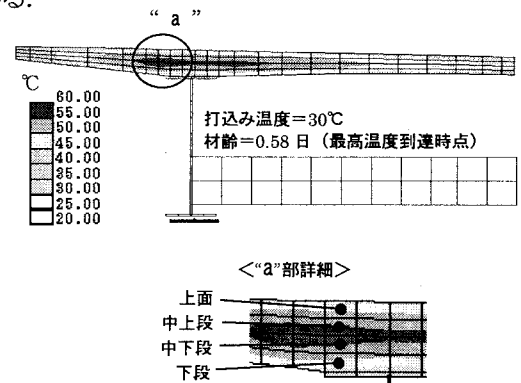


図-5 床版の温度分布 (Case1)

温度が最も高くなる“a”部における、床版の上面、中上段、中下段、下面の床版コンクリート温度の経時履歴を図-6に示す。床版コンクリート内部温度がピークを迎える時間（材齢）は何れもほぼ同じであるが、床版の中上段と床版上面では最高温度に7℃の差がある。

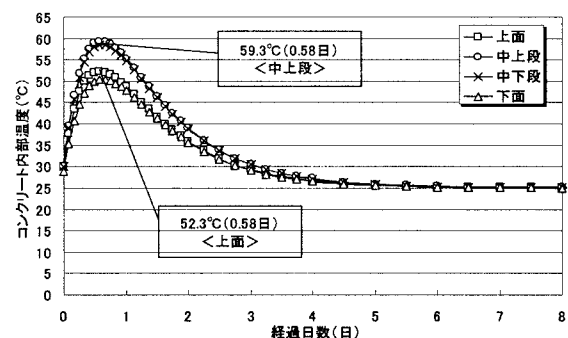


図-6 “a”部における温度変化 (Case1)

表-4 静岡市内における過去1年間の気象観測結果

年	2000年						2001年					
	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月
①最高気温の平均 (°C)	30.4	31.0	28.4	22.8	18.8	13.9	10.4	12.2	15.3	20.3	22.9	27.3
②最低気温の平均 (°C)	23.0	24.0	20.9	15.9	10.9	4.5	1.5	2.3	5.5	10.1	15.5	19.8
②-① (°C)	7.4	7.0	7.5	6.9	7.9	9.4	8.9	9.9	9.8	10.2	7.4	7.5

### 3.2 施工時期の違いによる温度履歴

次に、施工時期が異なる場合の床版コンクリート温度履歴の違いを示す。図-7は、外気温一定の場合における”a”部の床版中上段での床版コンクリート温度の経時変化履歴である。外気温が高いほど最高温度は高く、最高温度に到達するまでの時間(材齢)も早くなっている。

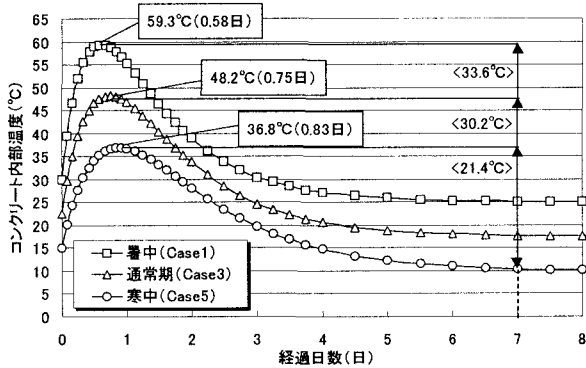


図-7 外気温一定の場合 (Case1, Case3, Case5)

### 3.3 外気温を変化させた場合

外気温を変化させた場合の”a”部における床版中上段での床版コンクリート温度の経時変化履歴を図-8に、また暑中施工の場合において外気温一定の場合 (Case1) と外気温を変化させた場合 (Case2) を比較したグラフを図-9に示す。

外気温を一定とした場合に比べ、外気温を変化させた方が最高温度は高くなり、最高温度から外気温まで降下する温度量 (以下、降下温度という) も大きくなった。

なお、この降下温度は、外気温一定の場合よりも外気温を変化させた場合の方が、施工時期の違いによる差が縮小する傾向にある。

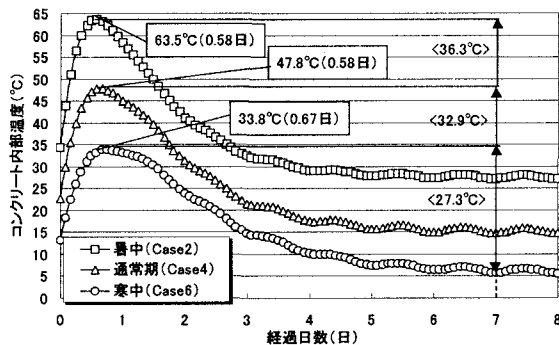


図-8 外気温を変化させた場合 (Case2, Case4, Case6)

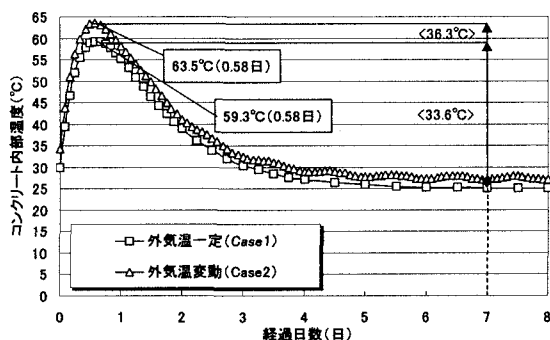


図-9 外気温一定と変化の比較 (Case1, Case2)

## 4. 床版コンクリートに作用する引張応力度

### 4.1 温度変化に起因する引張応力度の分布

図-10に、Case1における新ブロックの材齢3日時点の主応力分布 (床版中上段) を示す。

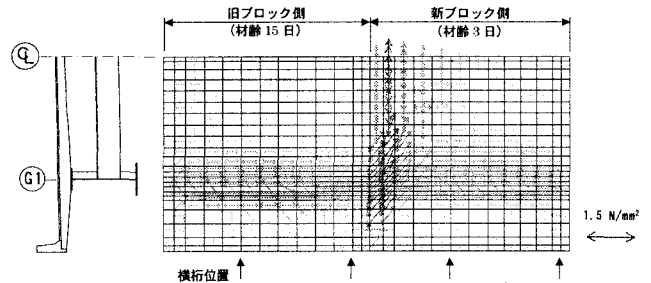


図-10 主応力分布 (Case1, + : 引張)

打ち継ぎ目の新ブロック側の床版に、床版支間中央部で橋軸直角方向に  $1.3 \text{ N/mm}^2$  程度、主桁近傍部で斜め方向に  $1.5 \text{ N/mm}^2$  程度 (橋軸直角方向  $= 1.2 \text{ N/mm}^2$  程度、橋軸方向  $= 0.9 \text{ N/mm}^2$  程度) の引張応力が作用している。この引張応力は、ひび割れを生じさせる大きさではないが、主応力の方向が図-1に示したひび割れの発生方向と直交している点に注目されたい。

打ち継ぎ目の新ブロック側における床版支間中央部の橋軸直角方向応力について、床版内の着目位置の違いによる経時変化 (Case1) を図-11に示す。

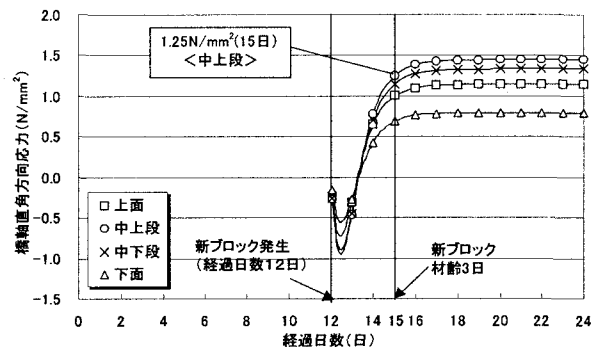


図-11 床版支間中央部の橋軸直角方向応力 (Case1)

床版表面より床版内部の方が、引張応力が大きく発生していることがわかる。

図-11に示した応力の経時変化によれば、引張応力がピークを迎えるのは新ブロックの材齢3日以降である。しかし実際には材齢3日時点で橋軸直角方向にプレストレスが導入されるため、材齢4日以降の橋軸直角方向応力は大きく圧縮に転ずるはずであるが、本温度解析ではプレストレスを考慮していないため、このような結果になっている。

### 4.2 施工時期の違いによる引張応力度の比較

次に、打ち継ぎ目の新ブロック側における床版中上段の橋軸直角方向応力に着目して、施工時期の違いによる

差異をみる。図-12は外気温一定の場合、図-13は外気温を変化させた場合である。また、外気温を一定とした場合と変化させた場合の比較を暑中施工で代表して図-14に示す。

温度変化に起因して床版コンクリートに作用する引張応力度は暑中施工の場合が最も大きかった。しかしながら、通常期（春季、秋季）や寒中施工の場合においてもそれほど小さくはならなかった。

また、外気温を一定とした場合より外気温を変化させた場合の方が引張応力も大きくなるのがわかった。

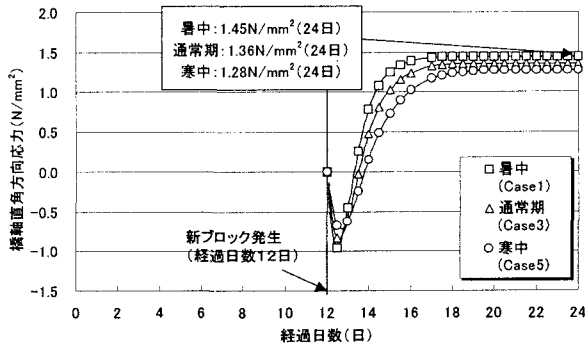


図-12 外気温一定 (Case1, Case3, Case5)

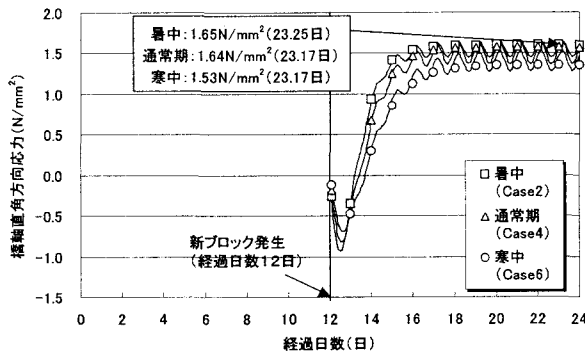


図-13 外気温変化 (Case2, Case4, Case6)

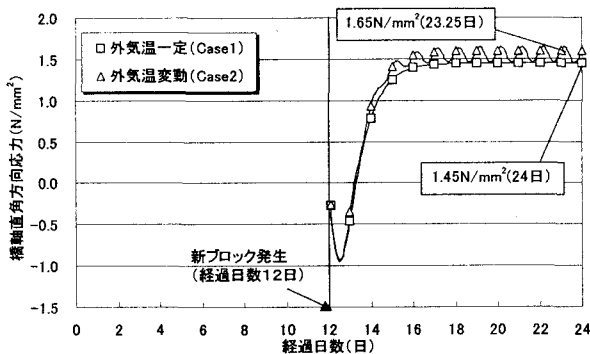


図-14 外気温一定と変化の比較 (Case1, Case2)

## 5. 膨張材の効果

場所打ちPC床版を有する鋼2主桁橋において、床版コンクリートの乾燥収縮を鋼桁が拘束することに起因する床版下面の橋軸直角方向ひび割れを予防するため、床

版コンクリートに膨張材を添加する事例が増えている。ここでは温度応力に起因するひび割れ防止に対しても膨張材が有効かどうかを検討する。

### 5.1 膨張材の効果の解析的評価方法

温度解析において、膨張材の効果はコンクリートの収縮と組み合わせて評価することとした（図-15）。ここで、膨張材の効果として80 $\mu$ を使用したのは、建設機械化研究所（施工技術総合研究所）で実施した実物大実験結果<sup>6)</sup>を参考に、若干安全側（小さめ）に設定したためである。なお、膨張材の効果を検討する解析は、暑中施工（外気温変化）のケースにおいて、乾燥収縮および膨張材の効果の有無をパラメータとして行った（表-6）。

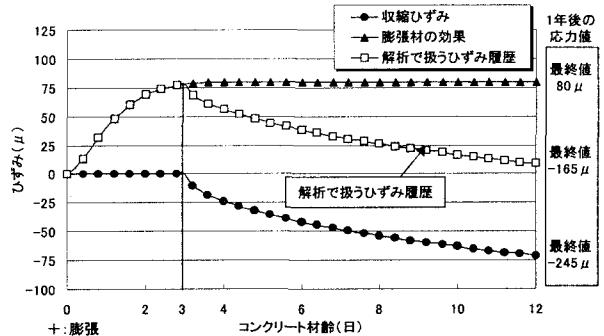


図-15 解析に使用した膨張材の効果

表-6 膨張材の効果を検討する解析ケース

施工時期	外気温		乾燥収縮	膨張材の効果
	一定	変化		
Case2	○	○	-	-
Case7	○	○	○	-
Case8	○	○	○	○

### 5.2 解析結果

解析結果より、打ち継ぎ目の新ブロック側の床版支間中央における床版中上段の応力変化について、新ブロックの材齢12日までのものを図-16、旧ブロックの材齢1年後までのものを図-17に示す。橋軸直角方向プレストレス導入直前の材齢3日において、膨張材は床版支間中央部の床版中上段に作用する橋軸直角方向の引張応力度を0.5 N/mm<sup>2</sup>程度低減する効果を有していることがわかった。

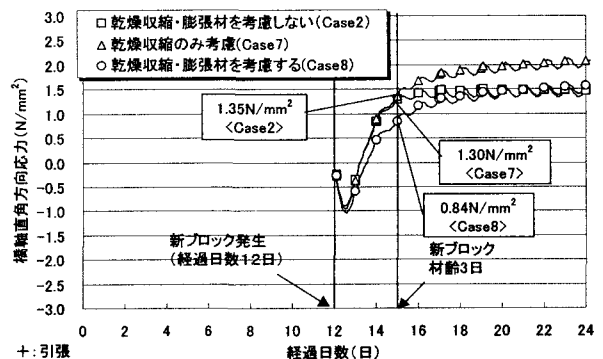


図-16 新ブロック材齢12日までの応力変化

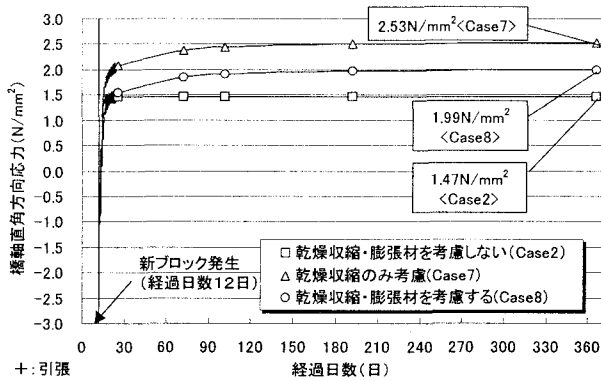


図-17 旧ブロック材齢1年までの応力変化

## 6. まとめ

図-1に示したひび割れを発生させた原因としてコンクリートの温度応力に着目し、広幅員鋼2主桁橋の場所打ちPC床版をモデル化した温度解析による応力検討を行った。その結果、以下のようなことがわかった。

- ① コンクリートの水和熱に起因する床版コンクリートの内部温度は、暑中施工の場合が最も高くなる。また、外気温を変化させた場合の方が最高温度、および最高温度からの降下温度ともに大きくなる。
- ② 温度応力に起因する引張応力の主応力分布は、図-1に示したひび割れの発生方向と直交しており、ひび割れの主たる原因と考えられる。施工時期による違いに着目すると、引張応力は暑中施工の場合が最も大きいものの、通常期(春季, 秋季)ならびに寒中施工の場合においてもそれほど変わらない。また、外気温を変化させた場合の方が引張応力は大きい。
- ③ このような引張応力に対して、膨張材の使用は効果的であり、橋軸直角方向プレストレス導入直前の材齢3日において床版支間中央部の床版中上段に作用する橋軸直角方向の引張応力度を0.5 N/mm<sup>2</sup>程度低減できる。

図-1に示したひび割れが発生した工事は、本解析におけるCase7(膨張材なし)が実情に近いケースとなっていると思われるが、図-16に示したように橋軸直角方向プレストレスを導入する直前(新ブロックの材齢3日)の引張応力はひび割れを発生させるにはやや小さい。したがって、本解析に使用したものより過酷な条件、例えば日中と夜間の温度差が大きかったとか、保温や風防が不十分で床版表面の熱伝達率が大きく床版内部と表面の温度差が大きくなったといったことが予想される。

温度応力に起因して床版コンクリートに作用する引張応力を低減するためには、低熱ポルトランドセメントを使用するなどしてコンクリートの水和反応による温度上昇量を抑制することが効果的であるが、床版内部と表面の温度差を少なくする、あるいは温度を緩やかに降下させるといった観点から養生も重要なポイントになると考えられる。

なお、今回の検討は床版コンクリートの新ブロック打ち継ぎ目近傍における橋軸直角方向応力に着目したものであるが、図-10に示した主応力分布図によれば主桁近傍で小さな値ではあるが橋軸方向の引張応力も発生している。施工中の床版コンクリートに作用する橋軸方向の引張応力としては、これ以外にも乾燥収縮やクリープの影響、床版施工時の主桁作用による負の曲げモーメントの影響等が考えられるので、温度応力のみならずこれらの影響まで考慮した照査が必要になってくると思われる。

本研究は(財)高速道路技術センター「長支間場所打ちPC床版の設計施工に関する技術検討」において審議を受けながら進めたものであるが、同委員会ではその成果を「長支間場所打ちPC床版の設計・施工マニュアル(案)」<sup>7)~9)</sup>として取りまとめており、このマニュアルと合わせ、本報告がこれからの長支間場所打ちPC床版の設計・施工の一助になれば幸甚である。

## 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2002.3
- 2) 猪熊康夫・本間淳史・丸山勝・河西龍彦：長支間場所打ちPCの設計と施工計画(第二東名高速道路藁科川橋)：土木学会第二回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.1~6，2000.10
- 3) 本間淳史・長谷俊彦・榎原和成・中村和己・上原 正・河西龍彦：長支間場所打ちPC床版の設計と施工-第二東名高速道路藁科川橋-，橋梁と基礎，pp.2~10，2002.10
- 4) 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，pp.36~45，2002.9
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書，2002.3
- 6) 橋吉宏・高瀬和男・白水晃生・立川則久：1m供試体を用いた膨張材の効果に関する実験的検証，土木学会第57回年次学術講演会講演概要集，共通セッション，CS4-013，pp.135~136，2002.9
- 7) (財)高速道路技術センター：平成13年度第二東名高速道路長支間場所打ちPC床版の設計施工に関する技術検討報告書，2002.3
- 8) 寺田典生・本間淳史・河西龍彦・松井繁之：長支間場所打ちPC床版の設計・施工マニュアル(上)，橋梁と基礎，pp.21~28，2002.11
- 9) 寺田典生・本間淳史・河西龍彦・松井繁之：長支間場所打ちPC床版の設計・施工マニュアル(下)，橋梁と基礎，pp.29~38，2002.12