

3次元 FEM 解析と CP はり要素法による場所打ち PC 床版の温度応力解析

Thermal Stress Analysis for Cast-In-Place PC Slabs by 3D FEM Analysis and CP Method

橋本保則*，松村寿男**，織田博孝***

Yasunori HASHIMOTO, Toshio MATSUMURA, Hirotaka ODA

* 工修 瀧上工業(株) 技術開発グループ (〒454-8517 名古屋市中川区清川町 2-1)

** 工修 瀧上工業(株) 技術設計グループ (〒454-8517 名古屋市中川区清川町 2-1)

*** 工博 瀧上工業(株) 技術設計グループ (〒454-8517 名古屋市中川区清川町 2-1)

There are internal and external restraint stresses on the thermal stress. Internal restraint stress is caused by the thermal gradient within cross section of the slab. On the contrary, external restraint stress is caused by the restraint of the joint between the existing slab and the slab under installation at the present, as well as main girder. Generally, thermal stress analysis is carried out by the three-dimensional finite element analysis. Much labor has been spent in making the analytical model as well as calculation time.

In the present study, the simplification of thermal stress analysis using the method combined CP method with beam element is verified comparing the three-dimensional finite element analysis results. Furthermore, by separating internal and external restraint stress, their effect to the thermal stress is investigated.

Keywords : Heat Transfer Analysis, Thermal Stress Analysis, 3D FEM, CP Method, Beam Element

1. はじめに

近年，橋梁の合理化・省力化を図る構造として，場所打ち PC 床版を有する長支間の少数主桁橋が盛んに建設されている。一方，長支間化に伴う床版の厚肉化やコンクリートの高強度化によって温度応力が増大し，マスコンとしての取り扱いが必要となってきた。若材齢時の温度応力によるひび割れは貫通ひび割れとなることが多く，床版の耐久性を確保するためには施工段階でのひび割れを防止することが重要である。温度応力には，床版断面内の温度差によって生じる内部拘束応力と，主桁や旧床版ブロック打継目の拘束によって生じる外部拘束応力がある。加えて，床版自重や移動型枠等の施工時の荷重が床版に引張応力を生じさせる¹⁾。

一般に温度応力解析は 3 次元 FEM 解析によって行われるが¹⁻⁴⁾，解析モデルが複雑になる上，計算時間も極めて長くなることで，多大な労力を費やしているのが現状である。このような背景から FEM による温度応力解析を省略するために，実橋の計測結果と 3 次元 FEM 解析結果を統計的に調べ，床版の温度履歴や温度応力を推定する手法が検討されている^{4) 5)}。また，コンクリート標準示方書では，温度応力解析の手法として簡便な CP 法を推奨している。文献 6) では，CP 法を導入したはり要素

による変形解析（以下，CP はり要素法と呼ぶ）を提案しており，鋼 2 主桁橋については 3 次元 FEM 解析に近い結果が得られることが示されている。そこで本研究では，場所打ち PC 床版を有する鋼 3 主桁橋を対象として，CP はり要素法と 3 次元 FEM 解析の結果と比較し，CP はり要素法による温度応力解析の簡便化を検証する。

この結果，CP はり要素法が 3 次元 FEM 解析の結果とほぼ同様の傾向を示したことから，CP はり要素法を用いて橋軸方向の温度応力を外部拘束応力と内部拘束応力に分離し，2 種類の拘束が温度応力に与える影響を検討する。

2. 対象橋梁の諸元

今回解析の対象とした橋梁の一般図を図-1 に示す。橋梁形式は 4 径間連続合成 3 主桁橋（支間 47.100m+2×55.600m+47.100m）である。床版の打設順序を図-2 に，標準断面図を図-3 に示す。床版形式は橋軸直角方向にプレストレスを導入する PRC 床版で，床版支間は 6m，床版厚は支間中央で 270 mm，主桁上で 370 mm である。床版の打設ブロックは 16 ブロックで，7 日間サイクルの打設を想定している。

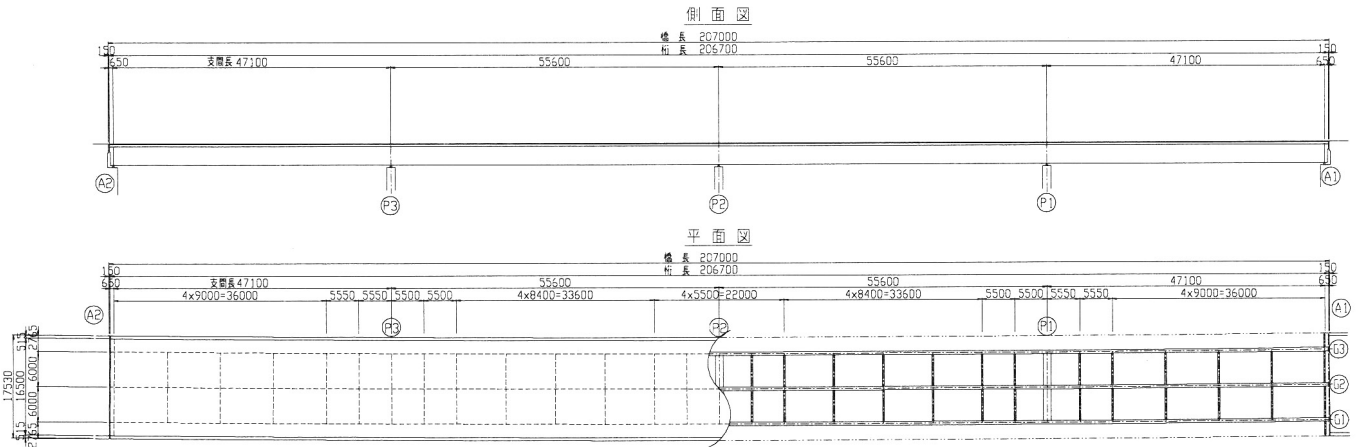


図-1 構造一般図

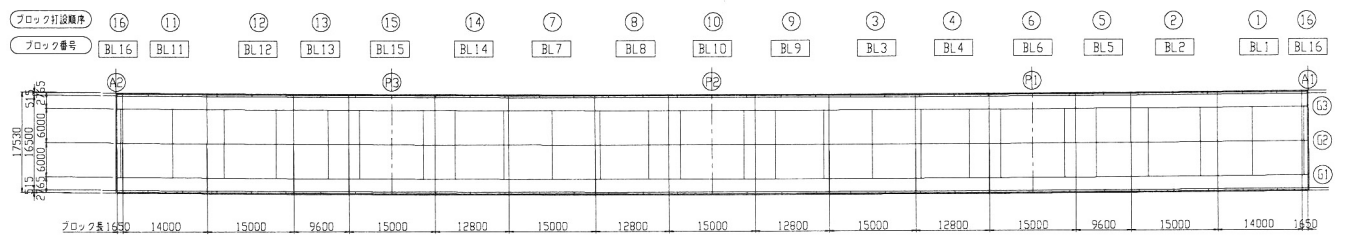


図-2 床版打設順序

3. 3次元 FEM 解析

3.1 解析モデル

3次元の熱伝導解析ならびに熱応力解析には汎用解析コード DIANA (ver.8.1.2) を用いた。解析モデルを図-4 に示す。解析モデルは全橋を 1/4 モデルで作成し、中間支点 P1 近傍の床版打設サイクルに着目した。鋼桁および床版の断面は橋軸方向に一樣断面とし、横桁もモデル化している。温度応力に着目するため、自重、プレストレス、ジャッキダウンは考慮しないことにする。

熱伝導解析では、コンクリートと鋼桁に 20 節点ソリッド要素 (CHX60) を使用し、熱境界には 4 節点平面境界要素 (BQ4HT) を使用した。熱応力解析においても同様に、コンクリートと鋼桁に 20 節点ソリッド要素 (CHX60) を使用した。節点数は 27475、要素数は 10195 である。解析は熱伝導解析から熱応力解析の順に進行し、熱応力解析においては床版の逐次合成を考慮した段階別応力解析を行っている。

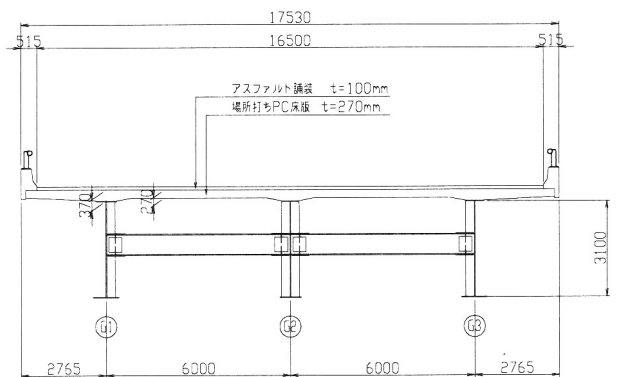


図-3 標準断面図

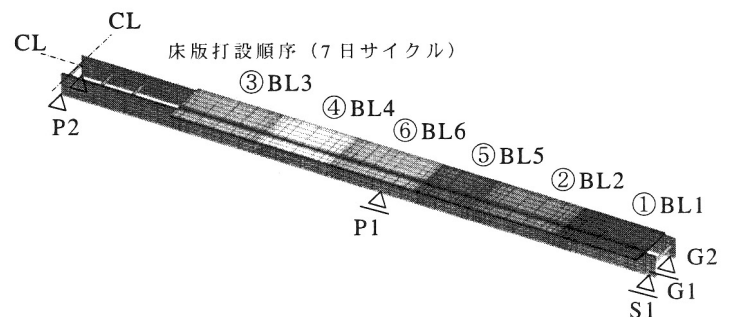


図-4 3次元 FEM 解析モデル

解析に用いた各材料の物性値を表-1に示す。コンクリートおよび鋼桁の熱物性値はコンクリート標準示方書[施工編]⁷⁾、[構造性能照査編]⁸⁾に示される標準的な値とした。

コンクリートの断熱温度上昇式は、最近の研究により、床版の温度履歴を再現するためには初期のS字勾配を考慮した式を用いた方が良いことが指摘されているが⁹⁾、今回は文献7)で示される断熱温度上昇式を用いた。

床版の打設時期は2月~3月を想定し、外気温を10℃、コンクリートの打ち込み温度を20℃と設定した。単位セメント量370kg(早強セメント)、打ち込み温度20℃の条件に対して、文献7)で示される断熱温度上昇特性を図-5に示す。温度上昇時のクリープの影響を考慮した有効弾性係数を図-6に示す。膨張材および乾燥収縮によるひずみ履歴を図-7に示す。膨張材の効果は1m試験体で計測された値¹⁰⁾に余裕をみて80μとし、乾燥収縮ひずみとの足し合わせとして解析に入力した。

養生方法は打設後3日間を養生マット+散水とし、4日目以降は外気に露出とした。熱伝達率の値は、文献11)の事後解析の結果より引用している。型枠は木製の固定型枠とし、全ブロック打設終了まで取り外さない条件とした。

3.2 解析結果

3.2.1 温度履歴

3次元熱伝導解析による床版の温度履歴を図-8に示す。

図中の温度履歴は最大温度上昇を示した位置Aの節点の値で、コンター図は最大温度の時の温度分布である。最大温度は、打設後9時間において37.9℃である。

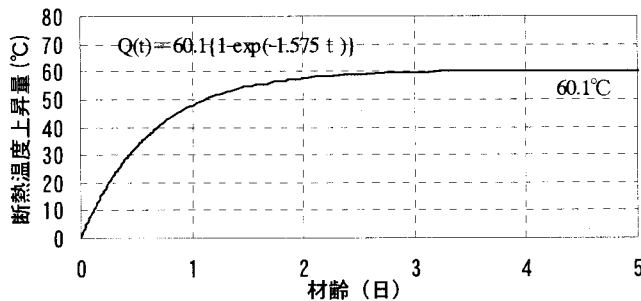


図-5 断熱温度上昇特性

表-1 物性値

コンクリート物性値	熱伝導率	2.7 W/m℃
	密度	2300 kg/m ³
	比熱	1.31 kJ/kg℃
	熱容量	(密度×比熱)
	打ち込み温度	20℃
	単位セメント量	370 kg (早強セメント)
	断熱温度上昇特性	Q(t) = Q _∞ {1 - exp(-rt)} (早強, Q _∞ =60.1, r=1.575)
	弾性係数式	E(t) = φ(t) × 4700 × √(fc'(t)) (t < 3; φ = 0.73, t > 5; φ = 1.00)
	圧縮強度式	fc'(t) = t / (a + bt) × fc'(28) × d (a = 2.9, b = 0.97, fc'(28) = 36, d = 1.07)
	引張強度式	ft = c × √(fc'(t)) (c = 0.35)
	ポアソン比	0.167
	線膨張係数	10 μ/℃
鋼桁物性値	膨張ひずみ	80 μ (24hrまで線形, その後一定)
	乾燥収縮ひずみ	ε'cs(t) = {1 - exp(-0.108t) ^{0.56} } · 200 μ
	熱伝導率	25.0 W/m℃
	密度	7850 kg/m ³
	比熱	0.4 kJ/kg℃
	熱容量	(密度×比熱)
	初期温度	10℃
	弾性係数	2.0 × 10 ⁵ N/mm ²
	ポアソン比	0.3
	線膨張係数	12 μ/℃
熱伝達率	養生マット+散水 (3日間)	12 W/m ² ℃
	外気 (4日目以降)	14 W/m ² ℃
	型枠	7 W/m ² ℃
	鋼桁	12 W/m ² ℃
	外気温	10℃ ± 5℃

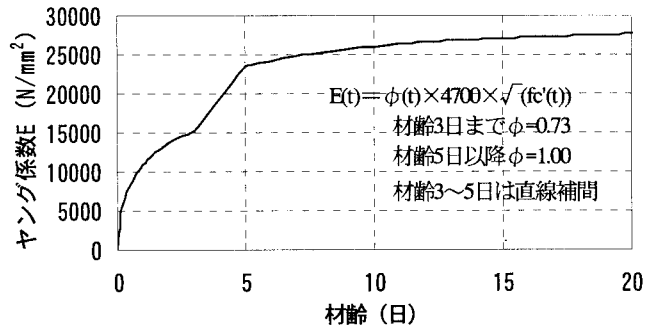


図-6 有効弾性係数

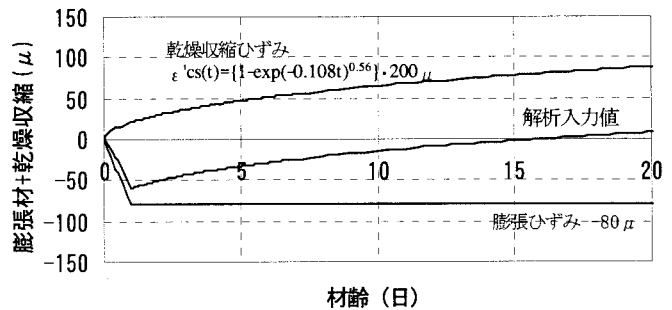


図-7 膨張材および乾燥収縮によるひずみ

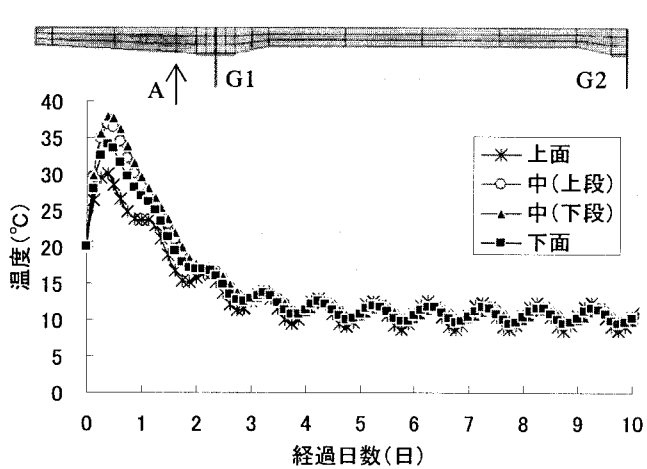


図-8 床版の温度履歴

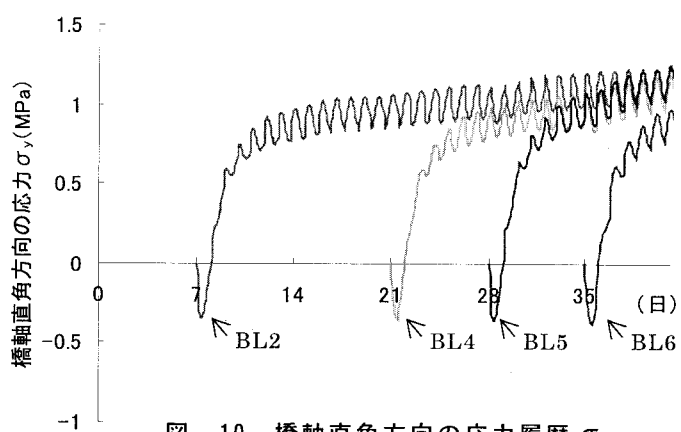


図-10 橋軸直角方向の応力履歴 σ_y

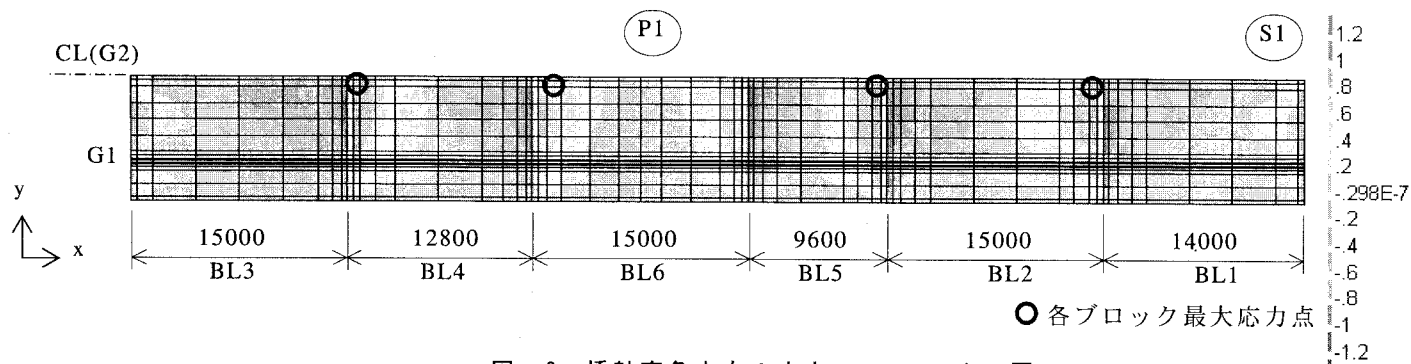


図-9 橋軸直角方向の応力 σ_y のコンター図

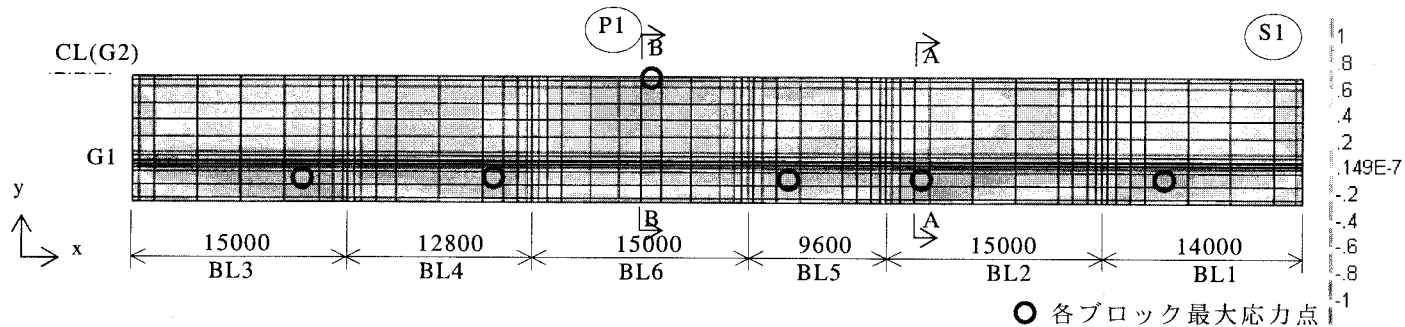


図-11 橋軸方向の応力 σ_x のコンター図

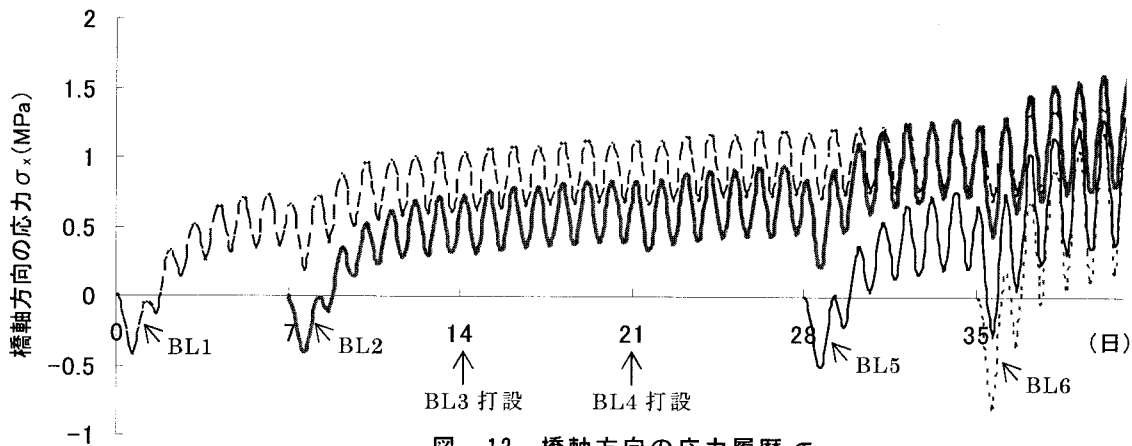


図-12 橋軸方向の応力履歴 σ_x

3.2.2 橋軸直角方向の応力

3次元FEM解析による橋軸直角方向の応力 σ_y のコンター図を図-9に示す。これは各ブロックで最大応力を示したBL1打設後41日目の応力分布である。図中の○は、各ブロックの打継目において最大引張応力が生じた位置である。

σ_y は床版打継目において、新ブロック側のG2桁上で大きい。これは旧床版ブロックによる外部拘束の影響が大きいためと推測される。図中に○で示す位置の応力履歴を図-10に示す。

σ_y の応力履歴は隣接ブロックの打設による影響が小さく、どのブロックも同程度の応力が生じている。したがって、橋軸直角方向の応力 σ_y は床版の打設順序に関係なく、打継目の構造のみで評価できると考えられる。

3.2.3 橋軸方向の応力

3次元FEM解析による橋軸方向の応力 σ_x のコンター図を図-11に示す。これは各ブロックで最大応力を示したBL1打設後41日目の応力分布である。図中の○は、各ブロックの最大引張応力が生じた位置である。中間支点上以外のブロック(BL1~BL5)では床版張り出し部のG1桁近傍で σ_x が最大となり、この位置は図-8に示した最大温度上昇を示す位置と一致している。中間支点上のブロックBL6ではG2桁上で σ_x が最大となる。BL1, BL2, BL5, BL6に関して、図中に○で示す位置の応力履歴を図-12に示す。BL3, BL4については省略している。

BL1の σ_x は、隣のBL2が打設されるとBL2の膨張・収縮の影響を受け、引張応力が増加する。BL2についても、隣のBL5が打設されると引張応力が増加する。したがって、橋軸方向の応力 σ_x は隣接ブロックの打設による影響が大きい。また、中間支点上ブロックが打設されると全てのブロックにおいて σ_x が増加する。このことから、最後に打設される中間支点上のブロックを解析ステップに含めて温度応力を評価した方がよい。

4. CPはり要素法

4.1 CPはり要素法の概要

CP法の概念図を図-13に示す。CP法は各節点での温度履歴を初期ひずみとして入力し、軸力0、曲げモーメント0を表すCompensation Planeと呼ばれる平面から内部拘束応力を算出する計算手法である。コンクリート標準示方書で示されるCP法は外部拘束力を等価な軸力と曲げモーメントに置換し、それぞれに外部拘束係数を掛けて外部拘束応力を算出する。一方、今回用いたCPはり要素法は外部拘束係数を用いずに、時間ごとに変化する剛性方程式から外部拘束応力を直接算出する方法で、しか

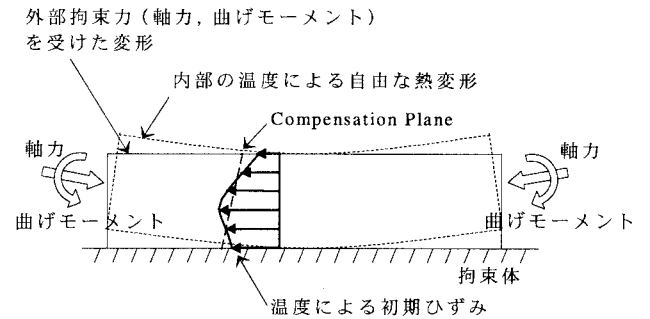


図-13 CP法の概念図

も橋軸方向の応力分布も求めることができる。なお、やはり要素であることから橋軸直角方向の応力は算出できない。

4.2 解析モデル

解析モデルは図-1の4径間全体をモデル化した。やはり要素の節点数は65、要素数は64である。解析条件は3次元FEM解析と同じ表-1に示す通りである。温度履歴には図-8に示す3次元熱伝導解析で得られた値を用いた。膨張材および乾燥収縮によるひずみは線膨張係数を用いて温度に変換し、各断面節点の温度履歴として入力した。図-8の位置Aにおける、膨張材と乾燥収縮を考慮した温度履歴を図-14に示す。CPはり要素法は橋軸方向にどの要素も同じ温度履歴を仮定したが、3次元熱伝導解析においても打継目近傍を除いて一様な温度分布を示していたため、この仮定に問題はないと考える。

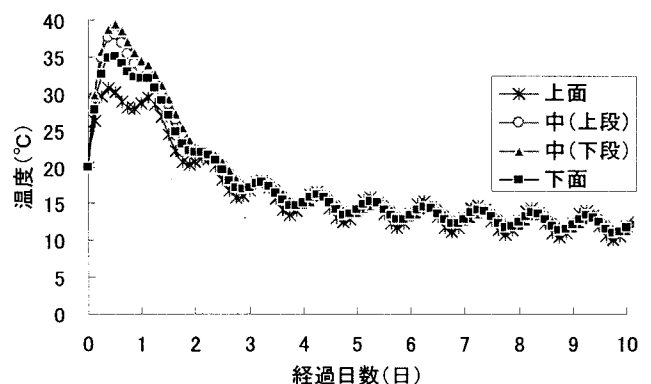


図-14 膨張材と乾燥収縮を考慮した温度履歴

4.3 CPはり要素法と3次元FEM解析の比較

4.3.1 断面内の応力分布の比較

CPはり要素法と3次元FEM解析による橋軸方向の応力 σ_x を比較するために、図-11の断面A-Aおよび断面B-Bの応力分布を図-15に示す。図中の応力分布はBL1打設後41日目の応力分布で、コンター図は3次元FEM解析によるものである。

CPはり要素法の結果と3次元FEM解析の結果の傾向はよく一致しているが、断面A-Aの引張応力が最大となる位置では0.3MPa程度の差がある。また、中間支点上の断面B-Bでは、最大引張応力の生じる位置に違いがある。

4.3.2 応力履歴の比較

図-11のBL2, BL6の○で示した位置の応力履歴に関して、CPはり要素法と3次元FEM解析の比較を図-16に示す。CPはり要素法の結果は3次元FEM解析の結果とおおよそ一致しており、中間支点上のBL6の打設による応力増加もとらえている。しかし、両者の差は周辺のブロックが打設されるに従って大きくなる傾向にある。

したがって、図-15に示した3次元FEM解析とCPはり要素法の結果の差は周辺ブロックの打設による3次元的な影響が考えられるが、その理由は明らかでなく今後検討していく予定である。

4.4 解析所要時間

解析時間は42日間(336ステップ)を3次元FEM解析で5.5日必要としたが、CPはり要素法はわずか2分程度であった。したがってCPはり要素法を用いることで解析時間を大幅に短縮することができる。

5. CPはり要素法による外部拘束応力と内部拘束応力の分離

前節において、CPはり要素法は3次元FEM解析の結果とほぼ同様の傾向を示し、解析所要時間も大幅に短いことを示した。そこで、CPはり要素法を用いて橋軸方向の応力を内部拘束応力と外部拘束応力に分離する。解析モデルは単純ばりと連続ばりの2ケースとした。

5.1 解析モデル

5.1.1 合計応力モデル

本文では、内部拘束と外部拘束を含めた解析モデルを合計応力モデルと呼ぶ。単純ばりの合計応力モデルは、図-3の標準断面を有する支間40mの単純ばりである。連続ばりの合計応力モデルは支間50mの2径間連続ばりである。解析条件は表-1に示す通りであるが、床版自重、膨張材、乾燥収縮および気温変動は考慮しない。図-8の位置Aに関する温度履歴を図-17に示す。

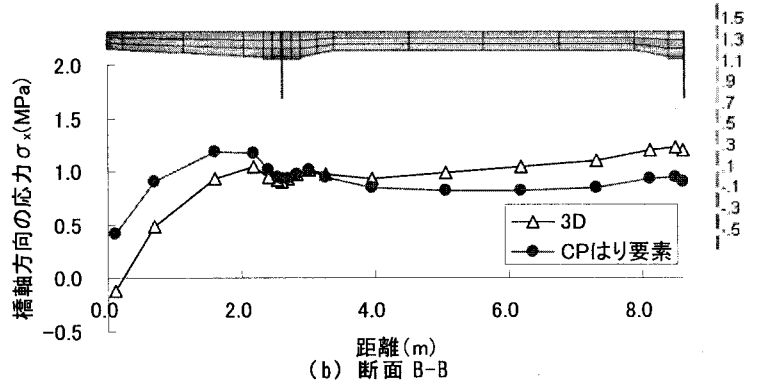
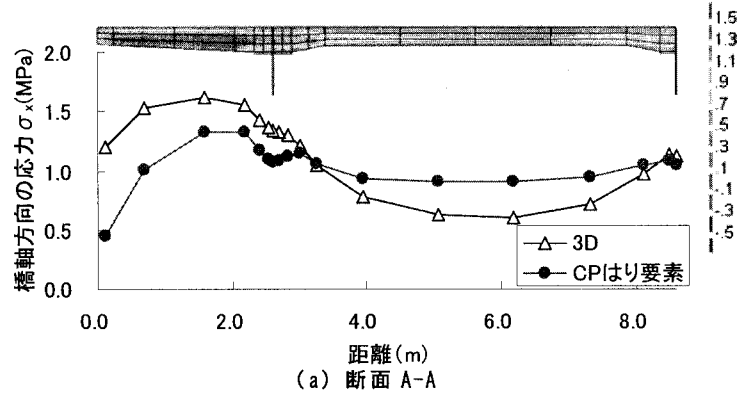


図-15 σ_x の断面内分布(41日目)

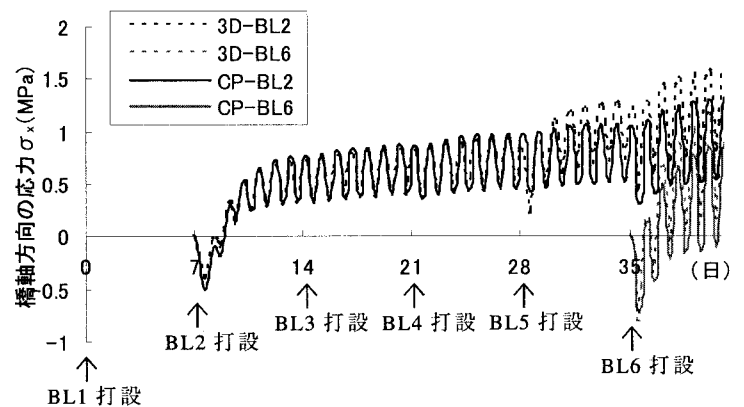


図-16 応力履歴の比較

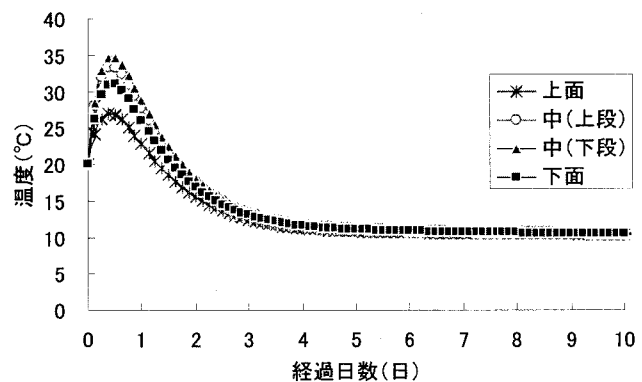


図-17 合計応力モデルの温度履歴

5.1.2 内部拘束モデル

内部拘束応力は床版断面内の温度差によって生じるため、床版の断面のみを支間 40m の単純ばりでモデル化した。温度履歴は図-17 と同じである。連続ばりについては、床版の断面のみをモデル化した場合でも不静定力による外部拘束応力が生じるため、単純ばりの内部拘束モデルの値をそのまま用いることにした。

5.1.3 外部拘束モデル

外部拘束応力は合計応力から内部拘束応力を差し引いて算出する。もう1つの手法として、床版の最大温度点の温度履歴を床版全断面にわたって一様に入力し、床版と鋼桁の温度差による外部拘束応力を算出する。温度履歴は図-17 の最大温度を示している履歴である。

5.2 解析結果

5.2.1 単純ばり

単純ばりの支間中央の位置における、外部拘束応力と内部拘束応力の履歴を図-18 に示す。外部拘束応力は、合計応力から内部拘束応力を差し引いて算出した結果と床版の温度履歴を一様とした結果がほぼ同じである。合計応力の成分は、41 日目において内部拘束応力が 58%、外部拘束応力が 42% である。したがって、今回モデル化した単純ばりの構造及び温度履歴では外部拘束応力よりも内部拘束応力の方が大きい。

5.2.2 連続ばり

連続ばりの正曲げ区間中央の位置における、外部拘束応力と内部拘束応力の履歴を図-19 に示す。単純ばりと同様に、外部拘束応力は合計応力から内部拘束応力を差し引いて算出した結果と床版の温度履歴を一様とした結果がほぼ同じである。合計応力の成分は、41 日目において内部拘束応力が 43%、外部拘束応力が 57% である。したがって、2 径間連続ばりの場合には内部拘束応力よりも外部拘束応力の方が大きく、単純ばりに比べて外部拘束の影響が大きいことが分かる。

これらの結果は、支間長、温度履歴、鋼桁の剛性などによって変わると考えられるが、一般的に内部拘束応力を低減するためには床版内部と表面の温度差を小さくするような養生を行なうこと、外部拘束応力を低減するためには床版の最大温度と鋼桁の温度差を小さくすることや温度下降時の勾配を小さくすることが考えられる。

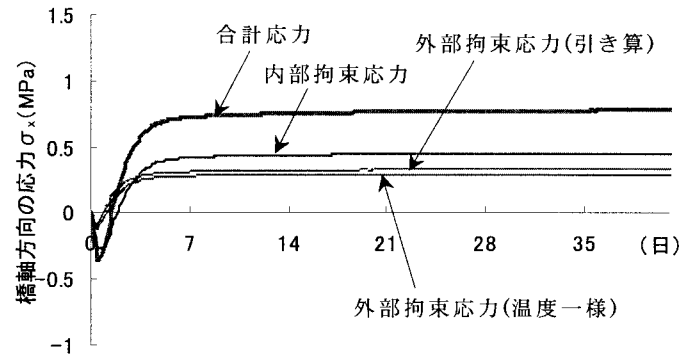


図-18 単純ばりの内部拘束応力と外部拘束応力

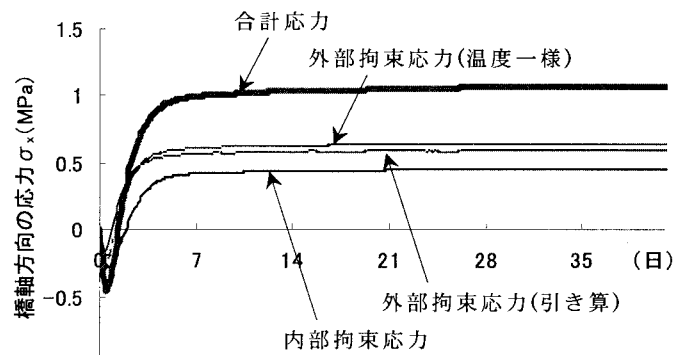


図-19 連続ばりの内部拘束応力と外部拘束応力

6. まとめ

- 1) 床版打継目の橋軸直角方向の応力は、床版の打設順序に影響されず、各ブロックで同程度の応力が生じる。
- 2) 今回解析の対象とした3主桁橋の橋軸方向の応力は、中間支点上以外のブロックで床版張り出し部の主桁近傍で大きく、中間支点上のブロックで中桁上が大きい。
- 3) 橋軸方向の応力は、隣接ブロックが打設されると増加する。また、中間支点上のブロックが打設されると全てのブロックで応力が増加する。したがって、連続桁の解析モデルは中間支点上のブロックを解析ステップに含めた方がよい。
- 4) 3主桁橋の温度応力解析に対して、CP はり要素法が適用できることを明らかにした。CP はり要素法を用いることによって温度応力解析を簡便に行なうことができ、解析時間を大きく短縮することができる。
- 5) CP はり要素法を用いて、ある温度履歴を有する支間長 40m の単純ばりと支間 50m の2径間連続ばりに対して、温度応力を内部拘束応力と外部拘束応力に分離した。今回解析したモデルにおいて外部拘束応力の占める割合は、単純ばりで 42%、連続ばりで 57%であった。

参考文献

- 1) 倉田幸宏, 河西龍彦, 高瀬和男, 小林潔, 橘吉宏, 丸山久一: 膨張材の効果を考慮した場所打ち PC 床版の施工時 FEM 解析, 第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.127-132, 2003
- 2) 長谷俊彦, 坂根秀和, 河西龍彦, 永山弘久, 小塚正博: 3 主桁橋における長支間場所打ち PC 床版の温度応力解析 (第二東名高速道路中ノ郷第一高架橋), 土木学会第 58 回年次学術講演会, pp.273-274, 2003.9
- 3) 師山裕, 倉田幸宏, 雪田憲子: 長支間場所打ち PC 床版実物大試験体のひび割れに対する日照変化の影響に関する解析的検討, 土木学会第 58 回年次学術講演会, pp.195-196, 2003.9
- 4) 稲葉尚文, 嶽下裕一, 塩永亮介, 武藤英司, 津田久嗣, 室田敬: 場所打ち PC 床版の温度計測と応力評価に関する検討 (下), 橋梁と基礎 2004-4, pp.32-38
- 5) 安川義行, 丸山久一, 倉田幸宏, 中村隆志, 師山裕, 大浴昭則: 場所打ち PC 床版の温度計測と応力評価に関する検討 (上), 橋梁と基礎 2004-3, pp.43-49
- 6) 石川靖晃, 西垣義彦, 田辺忠顕: 移動型枠支保工による PC 厚肉床版施工時ひび割れ評価法の提案, プレストレストコンクリート Vol.45, No.5, pp.97-107, May.2003
- 7) 土木学会: コンクリート標準示方書[施工編], 2002.3
- 8) 土木学会: コンクリート標準示方書[構造性能照査編], 2002.3
- 9) 寺田典生, 本間淳史, 益子博志, 玉置一清: 場所打ち PC 床版の温度応力解析に関する一考察, 土木学会第 57 回年次学術講演会, pp.149-150, 2002.9
- 10) 橘吉宏, 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, pp.135-136, 2002.9
- 11) 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 床版の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, pp.825-832, 2003.3