

膨張材の効果を検討した場所打ちPC床版の施工時FEM解析

An Analytic approach by FEM to the concrete stress during construction Considering Effects of the Expansive Admixture for the Cast-in-Place PC Deck Slab.

倉田幸宏*, 河西龍彦*, 高瀬和男*, 小林 潔*, 橘 吉宏*, 丸山久一**

Yukihiro KURATA, Tatuhiro KASAI, Kazuo TAKASE, Kiyoshi KOBAYASHI, Yoshihiro TACHIBANA,
and Kyuichi MARUYAMA,

*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丁目2番18号)

**ph.d.工博 長岡技術科学大学教授 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-12)

The hysteresis of thermal change and stress of the deck slab concrete due to the heat of hydration can be analyzed precisely with the nonlinear thermal stress analysis. We devise the method of taking the effect of expansive admixture into the analysis. And validity of the method was examined by comparing it with the results of full-scale model test. Moreover, the stress of the deck slab concrete through the construction can be analyzed precisely in combination with linear structural analysis about the working loads by FEM.

Key Words: the early age concrete, thermal stress, FEM

キーワード：コンクリート材齢初期，非線形温度応力解析，立体有限要素法解析，初期ひび割れ

1. まえがき

現在，国内において移動型枠を用いた長支間場所打ちPC床版を有する鋼2主桁橋の計画・建設が数多く行われている。これらの橋梁形式の場合，床版支間が従来の多主桁と比較して大きい床版厚が厚くなりコンクリート材齢初期の水和熱の温度降下による床版応力の増加が課題として考えられた。またPC鋼材の緊張により床版コンクリート橋軸方向の引張応力の増加や移動型枠のリバウンドおよび隣接径間施工時の負曲げに起因する引張応力の増加も課題として考えられた。

筆者らはこれらの課題を解決する目的で実物大試験体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を実施し，この実験を再現する目的で有限要素法による施工時における応力解析を実施した。応力解析を実施する際の膨張材の効果を実験的に把握するために施工検証実験と同時に1m供試体による実験を実施した。

解析の目的は床版施工時の床版に発生する応力を把握すること，特に先行ブロックによる収縮拘束の影響を実験的に把握することにあつた。この目的のために床版の打設から約1ヶ月の期間に集中的な計測を実施した。

本論文では，この実物大供試体実験における計測結果について報告するとともに，解析結果と比較する事により解析モデルの妥当性を検証し，場所打ちPC床版の材齢初期における温度応力を解析的に評価することを行うことを目的とした。

2. 施工検証実験の概要

図-1に実物大供試体の一般図を示す。床版の温度応

力や鋼桁による拘束等の影響を正確に評価するため，供試体は床版，鋼桁とも実物大として，床版支間長は現在国内における最大の床版支間を想定して11mとした。また1回の床版打設ブロック長は移動型枠施工の標準的な施工数量と考えている90~100m³のコンクリート打設

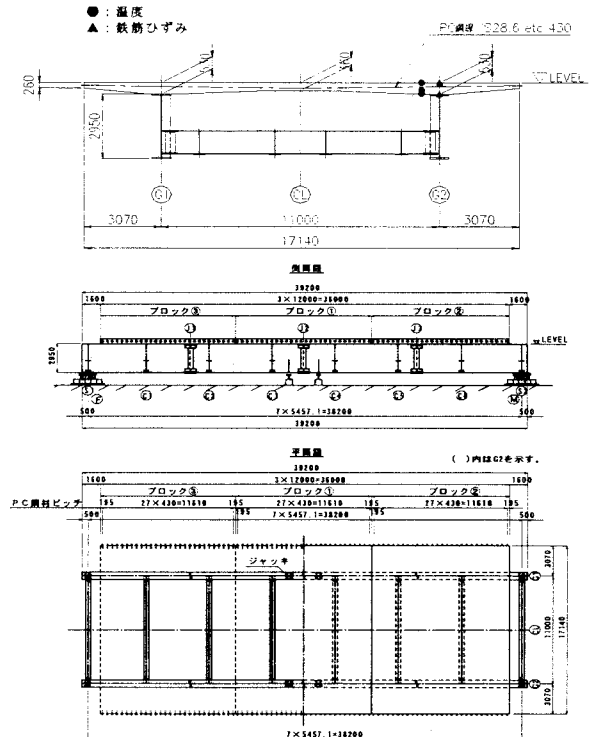


図-1 実物大供試体一般図

体積で、200m²程度の仕上げ面積となる12mとした。

ブロック①を先行してコンクリートの打設を実施して、その2週間後にブロック②およびブロック③床版を同日施工で打ち継ぐ施工を実施した。実物大実験における概略ステップ図を図-2に示す。STEP 7に示すように隣接径間施工時の負曲げについては単純桁である模型の支間中央部をジャッキアップすることにより再現し、床版にひび割れを発生させないためにSTEP 2及びSTEP 5において材齢1日ないしは1.5日において緩くプレストレスを与える2回緊張方式を採用した。

ここで、ブロック①および③に使用するコンクリートは移動型枠施工における標準的なコンクリートと考えている「早強コンクリート（膨張材を添加）」を使用した。一方、ブロック②は本検証実験が暑中施工であることに配慮して「普通コンクリート（膨張材を添加）」を使用した。表-1に実物大供試体に用いたコンクリートの配合を示す。

張材の有無で計4種の配合に対して計測を行った。また、実橋での主桁上の床版モデルおよび支間中央の床版モデルを想定して2種の床版厚で、実橋と同様な配筋量のモデルとプレーンコンクリートのモデルで試験を行った。ここで、コンクリートの配合と供試体一覧を表-2、3に示し、図-3に供試体の製作概要を示す。なお、供試体に配置した鉄筋量は一般的なPC床版を想定して、橋軸および橋軸直角方向ともに鉄筋比を1.4%とした。

表-2 1m供試体コンクリートの配合

セメント種類	水結合 材比%	細骨材 率 %	単位量 kg					
			水	セメント	細骨材	粗骨材	膨張材	混和剤 g
1) 普通+膨張材	42.6	44.3	160	346	783	991	30	3384
2) 早強+膨張材	42.6	44.3	160	346	783	986	30	3760
3) 普通	42.6	44.3	160	376	783	991	-	3384
4) 早強	42.5	47.1	161	379	830	936	-	4169

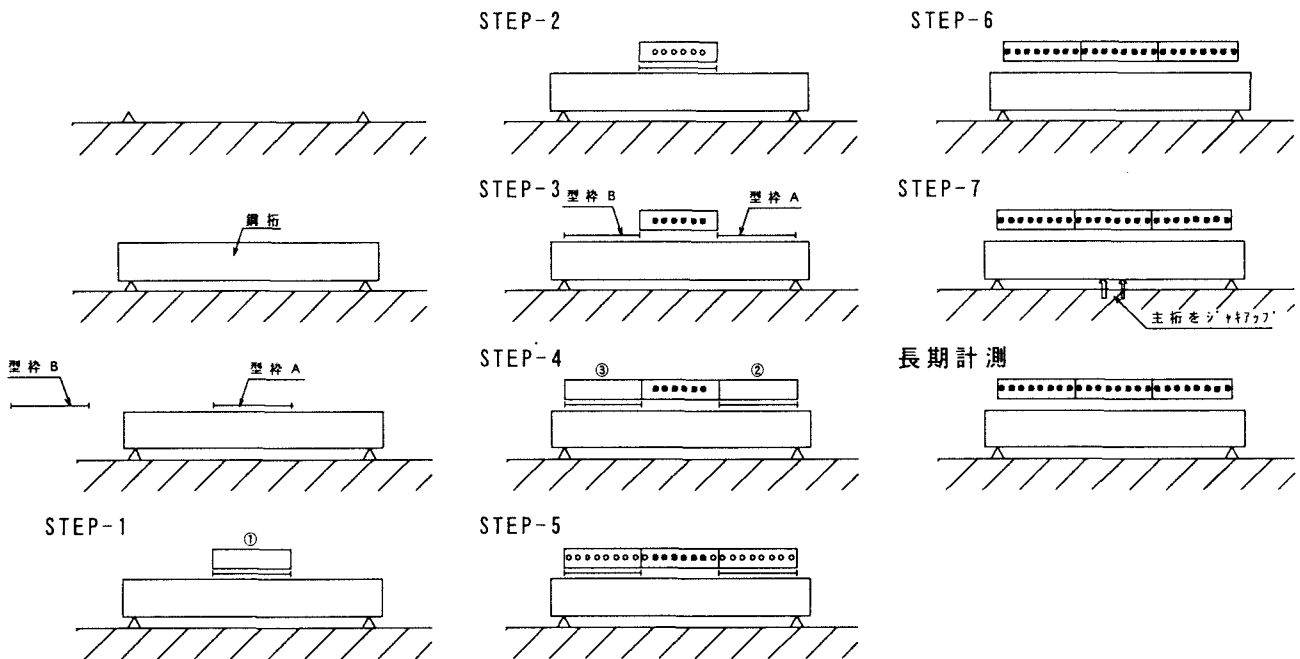


図-2 実物大供試体実験概略ステップ図

表-1 コンクリートの配合表

セメント種類	水結合 材比%	細骨材 率 %	単位量 kg					
			水	セメント	細骨材	粗骨材	膨張材	混和剤
②ブロック(普通+膨張材)	42.6	44.3	160	346	783	991	30	3384
①、③ブロック(早強+膨張材)	42.6	44.3	160	346	783	986	30	3760

3. 1m供試体実験の概要

膨張材の効果を定量的に把握するために、1m×1mの床版供試体を用いてセメントの種類、膨張材の有無、鉄筋の有無、床版厚をパラメータとして膨張量の測定を行った。

膨張量の測定では、普通セメントと早強セメントで膨

表-3 供試体一覧

No.	供試体 記号	セメント 種類	床版厚	配筋		
1	A 1	普通+膨張材	3.6 cm	橋軸方向	橋軸直角方向	
2	A 2	早強+膨張材		上段 D19 ctc100	上段 D19 ctc100	
3	A 3	普通		下段 D19 ctc100	下段 D19 ctc100	
4	A 4	早強	5.3 cm	橋軸方向	橋軸直角方向	
5	B 1	普通+膨張材		上段 D19 ctc100	上段 D19 ctc100	
6	B 2	早強+膨張材		下段 D19 ctc100	下段 D19 ctc100	
7	B 3	普通		(下段は2段配置)	(下段は2段配置)	
8	B 4	早強	3.6 cm	プレーンコンクリート		
9	PA 1	普通+膨張材		鉄筋なし	プレーンコンクリート	
10	PA 2	早強+膨張材			プレーンコンクリート	
11	PA 3	普通			プレーンコンクリート	
12	PA 4	早強			プレーンコンクリート	
13	PB 1	普通+膨張材		5.3 cm	プレーンコンクリート	
14	PB 2	早強+膨張材			プレーンコンクリート	
15	PB 3	普通			プレーンコンクリート	
16	PB 4	早強	プレーンコンクリート			

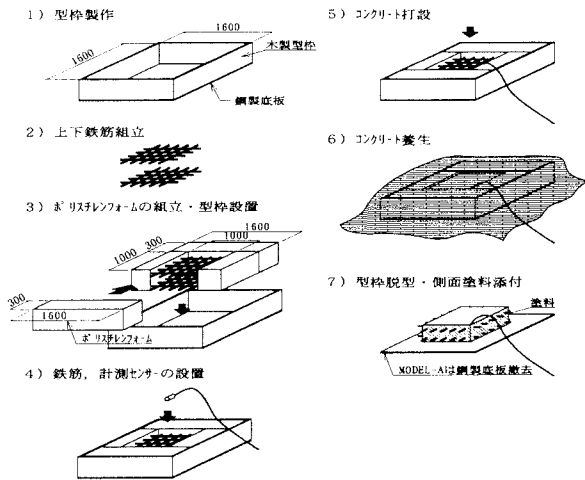


図-3 供試体の製作概要

4. 有限要素法による施工時応力解析の概要

4.1 解析概要

解析は実験開始前の事前解析と実験後の事後解析を実施する事として、事前解析は温度解析については実物大供試体試験開始前に、与えられた条件（形状、配合条件、施工条件）を用いて実施し、内部温度発熱量に伴って発生する温度応力分布をシュミレートする事を目的とした。

事後解析については実物大供試体試験によって得られた実測値（温度データ、強度データ）より、熱物性、強度物性を合わせた解析を実施し、床版の実挙動に近いシュミレートを行う。施工段階における FEM 解析は各施工ステップにおける荷重載荷ごとに、事前解析のみの実施とした。解析プログラムについては、PC 緊張やジャッキアップ、床版（型枠）自重などの外力については汎用ソフトの NASTRAN を使用し、温度応力および乾燥収縮応力の算出には非線形温度解析プログラムの Astea-Max を使用した。なお、施工時における床版応力を評価するために、これら解析モデルの節点はすべて統一して、最終的に各解析で得られた応力を重ね合わせる事を実施した。

4.2 解析モデル

解析モデルは図-4 に示したように実験供試体を再現した立体モデルとした。なお、鋼桁上フランジと床版下面は同一節点としてモデル化し、鋼桁については板要素として実物大供試体の鋼版厚と一致させ、床版についてはリッド要素として形状を忠実にモデル化した。

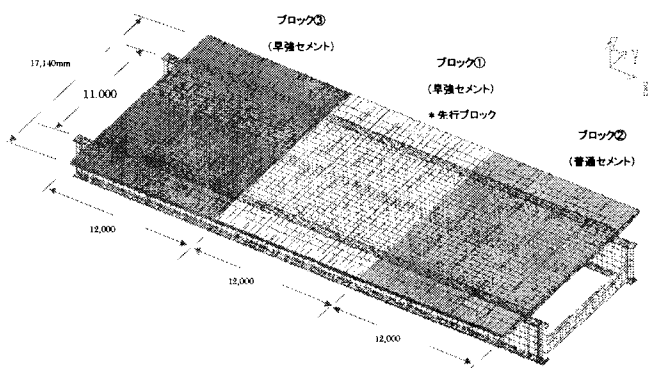


図-4 実物大供試体解析モデル図

4.3 解析諸元

4.3.1 断熱温度上昇量と熱伝達率

温度解析で用いた諸物性値を表-3 に示す。ここで断熱温度上昇量とはコンクリート内部温度算出の際の最も重要な基礎データとなるものであり事前解析ではコンクリート標準示方書式を、事後解析では断熱温度上昇試験結果を用いた。（図-5）

熱伝達率は大気との間に熱の出入りがある境界での特性値で部材表面部の温度に大きな影響を及ぼすため型枠の有無、種類、養生方法、周囲の風速など考慮して決定する必要がある。事前解析では既往の測定結果などから推定し、事後解析については実験結果を反映して決定した。

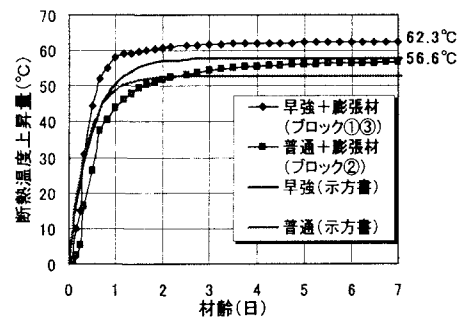


図-5 断熱温度上昇量

4.3.2 ひずみ特性

コンクリートの乾燥収縮や膨張材を添加したことによる膨張材の効果は床版の各節点が一樣に収縮/膨張するとして解析に反映した。事前解析における乾燥収縮は表-4 に示したようにコンクリート標準示方書の算定式を用いた。また膨張材の効果については拘束膨張試験の気中養生の結果から推定して最大膨張ひずみを 80×10^{-6} とした。事前解析ではこれらの収縮・膨張ひずみを重ね合わせて評価した値を入力値とした。（図-6）

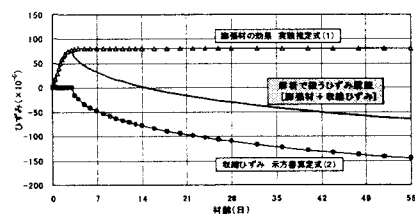


図-6 収縮・膨張ひずみ（事前解析）

事後解析での収縮・膨張ひずみは 1m 供試体の実験結果からデータをそれぞれ早強/普通と分けて整理し、床版厚 36cm と 53cm の結果の平均値を入力値として用いた。（図-7）

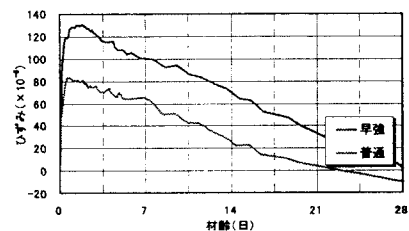


図-7 収縮・膨張ひずみ（事後解析）

表一三 解析で用いた諸物性値

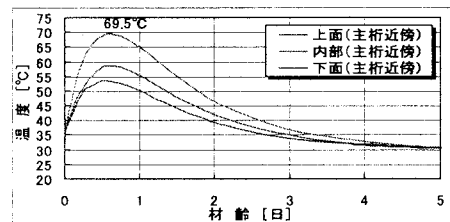
	項目		単位	解析入力値		
				事前	事後	
温度解析で扱う熱物性値	断熱温度上昇量	コンクリート		コンクリート標準示方書より算出	断熱温度上昇試験結果より算出	
	熱伝導率	鋼桁	W/m°C	51.3	25.0	
	比熱	鋼桁	kJ/kg°C	0.473	0.4	
	外気温			30°C一定	現地測定温度	
	熱伝達率	床版上面	養生なし	W/m ² °C	12.0	14.0
			養生マット+散水		9.0	12.0
シート被覆			10.0		12.0	
	床版側面および下面	鋼製型枠		12.0	6.0	
応力解析で扱う力学的特性	線膨張係数	早強コンクリート	温度上昇時	10 ⁻⁶ /°C	10.0	4.65(1m供試体試験結果より)
			温度下降時	10 ⁻⁶ /°C	10.0	8.70(1m供試体試験結果より)
		普通コンクリート	温度上昇時	10 ⁻⁶ /°C	10.0	6.55(1m供試体試験結果より)
			温度下降時	10 ⁻⁶ /°C	10.0	8.25(1m供試体試験結果より)
	圧縮強度	コンクリート	N/mm ²	コンクリート標準示方書より算出	材料試験結果より	
	引張強度	コンクリート	N/mm ²	コンクリート標準示方書より算出	材料試験結果より	
	弾性係数	コンクリート	N/mm ²	コンクリート標準示方書より算出	材料試験結果より	
	ひずみ特性	コンクリート		コンクリート標準示方書および拘束膨張試験結果より推定	1m供試体試験結果より	

5. 解析結果と計測値の比較

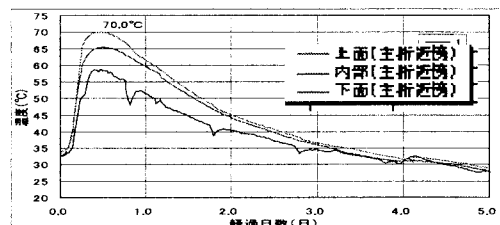
5.1 温度履歴—事前解析値と実測値

床版の各節点における温度履歴を算出する際に事前解析ではコンクリートなどの熱伝達率を推定しているため事後解析の熱伝達率を決定する参考に供試体温度履歴と比較検討する必要があった。図-8にブロック③主桁近傍(早強セメント)の実測値と事前解析値を示す。床版内部の最高温度は実測値と事前解析値は良く一致しているが、実測値は内部、下面、上面の順に温度が高くなっているのに対して解析値は内部、上面、下面の順である。これは、本実験の床版下面から地面までの距離が3.5m程度と通常の実橋と比較して熱が蓄積しやすい条件であったためと考察され、事後解析ではこの事を踏まえ床版下面の熱伝達率を小さくして解析を実施した。また、温度上昇/下降の勾配について事前解析値と比較して実測値の方が急激に変化しており、これは事前解析の入力値である断熱上昇量をコンクリート標準示方書の推定式を

用いたことに原因があると考え、事後解析では断熱温度上昇試験の結果をテーブルデータとして直接入力した。



a) 解析値



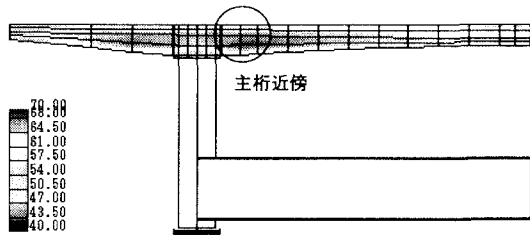
b) 実測値

図-8 床版の温度経過(事前解析)

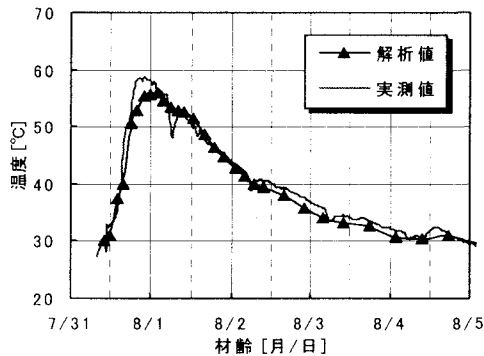
5.2 温度履歴—事後解析値と実測値

早強セメントの事後解析値と実測値の比較を以下に示す。事後解析値と実測値は一致しており、以下の項目に留意すればコンクリート打設による床版温度履歴は温度解析により再現できる事がわかる。

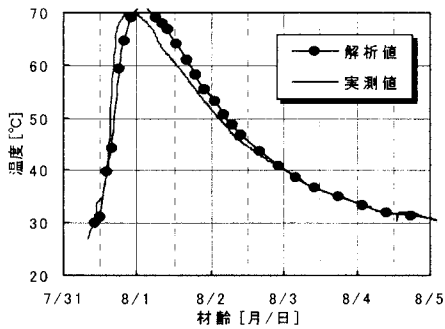
- (1) コンクリートの断熱温度上昇量をコンクリートの種類毎に試験結果等などから正確に定め入力する。
- (2) 熱伝達率を現場の状況や養生方法毎に適切な値を入力する。



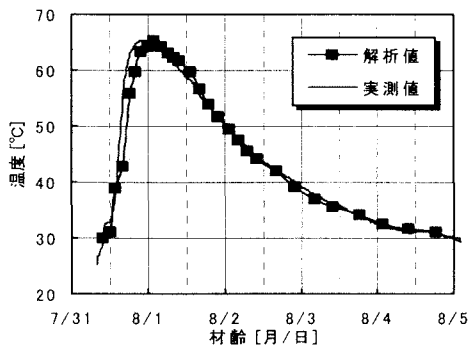
a) 温度分布



b) 床版上面



c) 床版中段面



d) 床版下面

図-9 床版の温度経過 (事後解析)

5.3 床版の実ひずみ—解析値と実測値

実ひずみについて床版支間中央の上段鉄筋位置での早強セメントの計測値と解析結果を図-10に示す。解析値と計測値は概ね一致しており、特に熱諸元などを精査した事後解析で良好な一致がみられた。

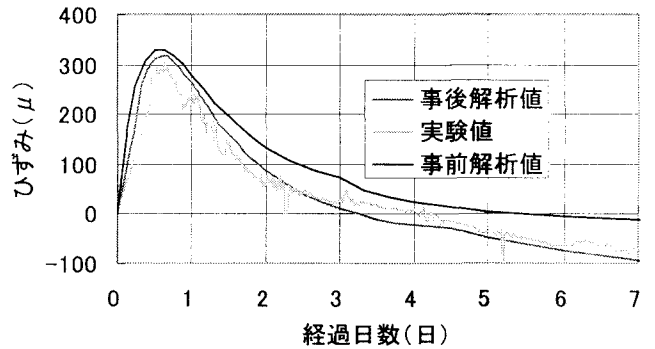


図-10 解析値と計測値の実ひずみの比較 (早強コンクリート)

5.4 床版の発生応力—事後解析値と実測値

有効応力計による計測値と事後解析結果の比較を図-11、図-12に示す。有効応力計による計測結果は橋軸直角方向、橋軸方向ともに計測ノイズも少なく解析結果とも概ね一致している。橋軸直角方向については二次緊張(脱型・型枠移動)以降、有効応力計の計測値と解析値に開きがあるが、これらについてはP C鋼材が偏心配置されている影響や有効応力計自身が断面積を持っているため偏心による曲げモーメントによる応力が正確に計測できていないなどの理由が考えられる。

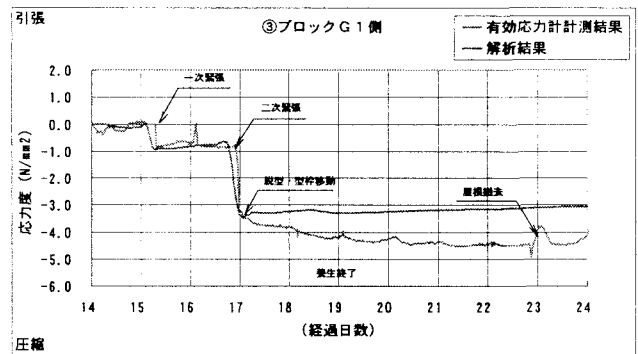


図-11 橋軸直角方向床版の中段応力履歴

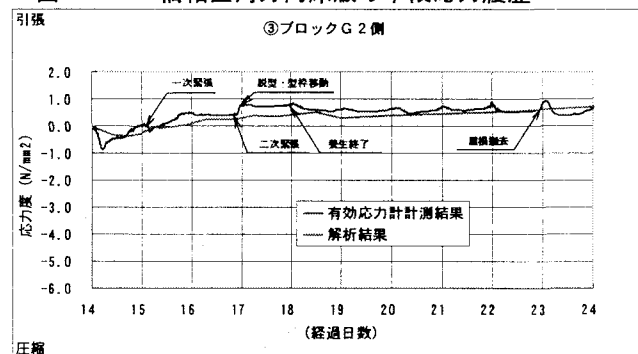


図-12 橋軸方向床版の中段応力履歴

5. 4 床版の変位—事後解析値と実測値

床版の鉛直たわみについて事後解析値と実測値の比較を図-13に示す。床版中央の変位については概ね解析値と実測値は概ね合っている。

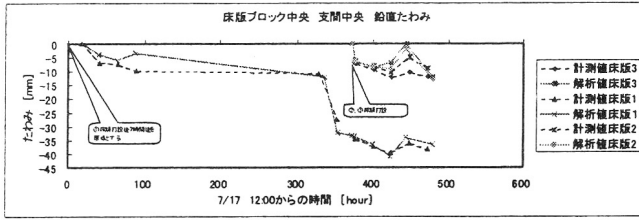


図-13 床版鉛直たわみ事後解析値と実測値の比較

6. PC床版の施工時における床版応力

移動型枠による場所打ちPC床版の施工において発生する可能性の高いひび割れとして以下の2タイプについて着目して解析結果を総括する。

- ・タイプ① 打継目に発生する橋軸方向ひび割れ
- ・タイプ② 主桁と横桁交差部から発生する橋軸直角方向ひび割れ

タイプ①のひび割れは橋軸直角方向の応力が卓越した時に発生するひび割れで、プレストレスを導入すれば圧縮応力が支配的となり発生の可能性はほぼないが、プレストレスを導入するまでに水和熱などにより床版に引張応力が卓越する場合発生する。実物大供試体試験ではプレストレス導入直前が床版中段面の応力が最大となっている(図-14)。膨張材の効果は拘束の大きなこの位置で最も発揮されており、③ブロック(早強)については1.5 N/mm²程度の効果が確認される。グレードアップとして実施した1次緊張の効果は床版中段位置では0.36 N/mm²の圧縮応力が確認される。

タイプ②のひび割れは主桁と横桁の交差部に橋軸直角方向応力が卓越する時に発生すると考えられ、実物大供試体試験ではジャッキアップ時に床版中段の引張応力が最大となっている(図-15)。この位置における膨張材の効果は、③ブロック(早強)について0.5 N/mm²程度の効果が確認される。

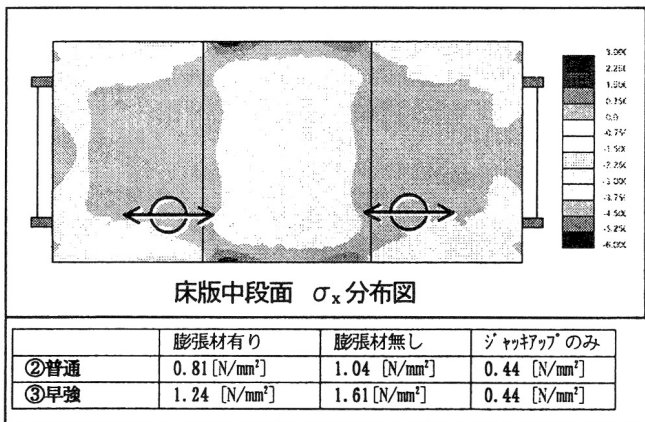


図-14 床版中断面橋軸方向応力分布図

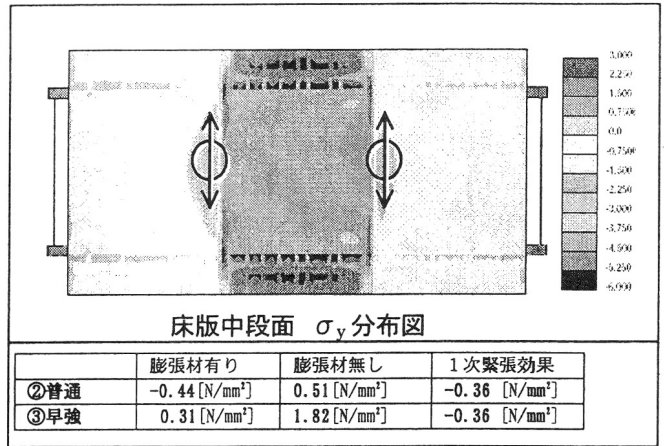


図-15 床版中断面橋軸直角方向応力分布図

7. 考察

本実験では、温度応力に着目する非線形温度応力解析と、荷重作用に着目する立体FEM解析を重ね合わせるという数値解析手法を用いた。さらに、非線形温度応力解析においては1m供試体での実測値をベースにして膨張材の効果を検討する手法を誘導した。

そして、このような数値解析の値実測における計測値と対比した結果、水和反応に起因する床版コンクリートの温度履歴や温度応力、プレストレスの導入や脱型による床版自重の載荷、そして隣接区間施工時の主桁作用による負の曲げモーメントの影響で床版コンクリートに作用する引張応力について、本解析法は実用上十分な精度で再現できることが確認できた。

参考文献

- 1) 玉置一清, 寺田典生, 本間淳史: 場所打ちPC床版温度応力解析に関する一考察, 土木学会年次講演会CS4-020, 2002.9
- 2) 橘吉宏, 高瀬和夫, 白水晃生: 1m供試体を用いた膨張材の効果に関する実験的検証, 土木学会年次講演会, CS4-013, 2002.9
- 3) 八部順一, 小林潔, 竹中裕文: 移動型枠を用いた場所打ちPC床版の施工検証実験, 土木学会年次講演会, CS4-010, 2002.9
- 4) 倉田幸宏, 江頭慶三, 和内博樹: 膨張材の効果を検討した場所打ちPC床版の施工時FEM解析, 土木学会年次講演会, CS4-012, 2002.9
- 5) 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
- 6) 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