

移動型枠施工における施工時を考慮した場所打ちPC床版の橋軸方向の設計

一 第二東名高速道路 中ノ郷第一高架橋（上り線）一

Design of cast-in-place PC slab in longitudinal direction considering installation by traveling support form

生駒 元*, 永山 弘久**, 亀子 学***, 西岡 浩一****, 河西 龍彦*****

Motoshi Ikoma, Hirohisa Nagayama, Manabu Kameko, Kouichi Nishioka, Tatsuhiko Kasai

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

** (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3)

*** 瀧上工業(株) 技術部 設計課 (〒454-8517 名古屋市中川区清川町2-1)

**** 日本道路公団 静岡建設局 静岡工事事務所 静岡中工事長 (〒420-0804 静岡県静岡市竜南1-26-20)

***** (株)宮地鐵工所 橋梁営業部 第三橋梁営業グループ 課長 (〒103-0011 東京都中央区日本橋大伝馬町7-5)

At the Nakanogoh No.1 viaduct in the New-Tohmei Highway is made from 10-span continuous steel 2-main-girder bridge with long span cast-in-place PC slab. The span of the slab is 10m, the thickness of the slab is 36cm at the center of the span and 55cm on the main girder. The slab is made of post-tensioned pre-stress is introduced in the transverse direction. While it is RC structure in the longitudinal direction. After the residual stress due to the construction order of the slabs, creep, drying shrinkage, different temperature, residual dead load, live load are checked out in the conventional slab design method. Thermal stress at the time of hardening concrete is added up later on. Expansive additive and reinforcing bars are added to cope with that. But in this project, making longitudinal slab design rational, slab action, the thermal stress and expansive additive effect at the time of construction are taken into account the practical design.

Key Words : design method, cast-in-place PC slab, traveling support form, thermal stress, expansive additive

1. はじめに

第二東名中ノ郷第一高架橋上り線は、長支間場所打ちPC床版を有する10径間連続鋼2主桁桁橋であり、床版支間長は10m、床版厚は床版支間中央で36cm、主桁上で55cmである(図-1)。床版は橋軸直角方向のみポストテンション方式でプレストレスを導入するPC床版であるが、橋軸方向にはプレストレスが導入されないため、RC構造として設計を行う必要がある。

従来、このような床版の橋軸方向の設計を連続合成桁としての挙動を考慮して行う場合は、クリープ、乾

燥収縮、温度差、後死荷重、活荷重などについて照査した後、コンクリート硬化時の温度応力の影響によって発生する引張応力度に対する照査などを別途実施して、膨張材や補強鉄筋を追加することで対処していた。しかしながら、本橋においては床版の橋軸方向の設計をより合理的に行うため、施工時にコンクリートに生じる温度応力や膨張材の効果を考慮した上で完成後の照査と重ね合わせるという、床版の設計の一連の流れを整理し直したので報告する。

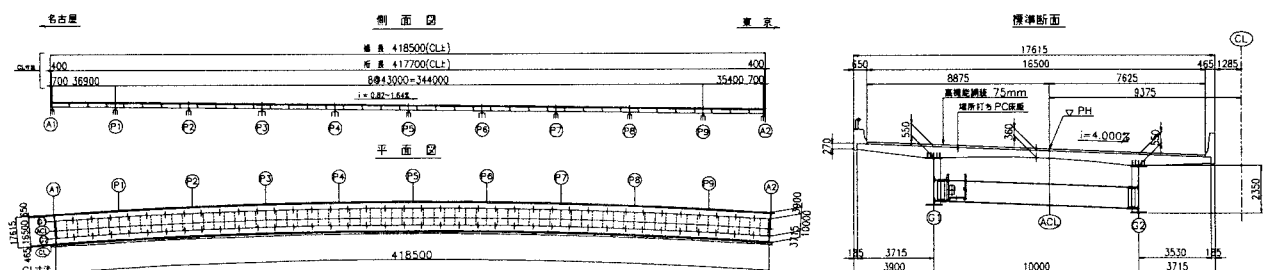


図-1 構造一般図

2. 設計フロー

ここでは、床版の施工が完了し橋面工事に引き渡すまでの時期を施工時の照査とし、その後の後死荷重、活荷重についての照査を完成時の照査と称している。図-2に一連の設計フローを示す。

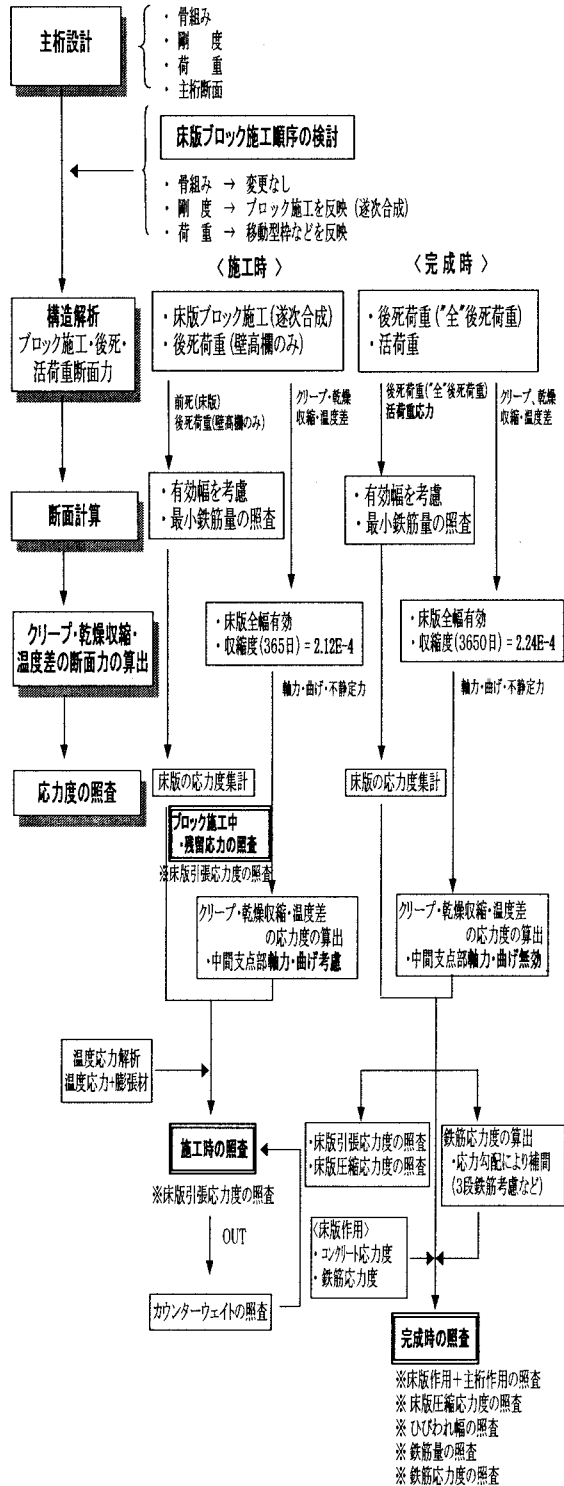


図-2 施工時を考慮した床版の橋軸方向の設計フロー

3. 施工時の照査

3-1. 照査項目

施工時ならびに完成時における床版の橋軸方向の照査対象は次の項目があげられる。

- ① 床版コンクリートの温度応力
- ② 膨張材の効果
- ③ 床版のブロック施工時に作用する主桁作用による曲げモーメントなど
- ④ 床版コンクリートの乾燥収縮、クリープ、温度差
- ⑤ 後死荷重（壁高欄、舗装など）
- ⑥ 活荷重

本橋では各施工段階で考えられる荷重によって床版コンクリートに発生する橋軸方向の引張応力がコンクリートの許容曲げ引張応力度以下になることを照査した。また床版施工時の初期ひび割れに対する照査を行うため、材齢3, 14, 28, 365, 3650日の各段階で材料特性および部材寸法を考慮したコンクリートの許容応力度を算出し、許容曲げ引張応力度に対する照査を追加した。

コンクリートの許容曲げ引張応力度は、本橋の床版下面が放物線形状であり床版厚が照査位置によって変化することから、曲げひび割れ強度の寸法効果が考慮できるコンクリート標準示方書¹⁾ 3.2 3.2.4 式を用いて各材齢ごとに算出することとした。(表-1)

表-1 コンクリートの許容曲げ引張応力度

材齢(t) (日)	3	14	28	365	3650
ヤング係数: E_e (N/mm ²)	16129	28340	29678	31093	31207
α	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44
d : 材齢28日に対する材齢91日の強度増加率	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07
温度上昇時におけるクリープの影響が大きいことによるヤング係数の補正係数: $\Phi(t)$	0.73	1	1	1	1
破壊エネルギー: G_F (N/m)	82.06	96.87	99.89	103.04	103.30
粗骨材の最大寸法: d_{max} (mm)	25	25	25	25	25
材齢t日におけるコンクリートの圧縮強度(N/mm ²): $f_c(t)$	22	36	40	44	44
材齢t日におけるコンクリートの引張強度(N/mm ²): $f_t(t)$	2.07	2.65	2.78	2.91	2.92
設計基準強度: f_{ck} (N/mm ²)	40	40	40	40	40
特性長さ $l_{ch} = G_F \cdot E_c / f_{tk}^2$ (m)	3.77	4.03	3.84	3.67	3.68
床版厚 h (m)	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
k_{ch}	1.66	1.68	1.67	1.66	1.65
k_{tb}	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
f_{bck} (N/mm ²)	2.20	2.85	2.96	3.08	3.09
$n = E_s / E_e$	12.4	7.1	6.7	6.4	6.4

本橋は移動式型枠支保工による場所打ちPC床版施工を行うため、床版コンクリートには材齢3日を目標にプレストレスが可能となる設計基準強度40 N/mm²の早強ポルトランドセメントを使用した。また床版コンクリートの温度ひび割れ、および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ひび割れの発生を防止することを目的として膨張材(標準型)を添加した。膨張材の使用量は収縮補償として30 kg/m³とした。

表-2 橋軸方向の照査項目一覧表

考慮する荷重	施工時の照査			完成系の照査			備考
	3日	14日	28日	※1 365日	供用前	3650日	
① 温度応力	○	○	○	○	○	※2 ○	温度応力による不静定力は無視
② 膨張材の効果	○	○	○	○	○	※2 ○	温度応力解析に膨張材の効果を検討して算出することで評価する
③ ブロック施工(一時的なもの)	×	○	○	×	×	×	若材齢に応じたコンクリートの許容引張応力度以下に抑える
③ ブロック施工によって残留するもの	×	×	×	○	○	○	1.0N/mm ² 以下に抑える
④ 乾燥収縮	×	○	○	○	○	○	3日までは湿潤養生を行うので考慮しない 各材齢における静弾性係数および収縮度を考慮する
⑤ クリープ ヤング係数比・クリープ係数	×	○	○	○	○	○	施工時に変化するクリープの影響を厳密に照査することが困難
⑥ 床版のコンクリートと鋼桁の温度差	×	×	×	○	○	○	
⑦ 後死荷重	×	×	×	△	○	○	△:壁高欄のみ ○:後死荷重
⑧ 活荷重	×	×	×	×	×	○	
ひび割れ幅の照査	×	×	×	×	○	○	
床版コンクリートの許容曲げ引張応力度(N/mm ²)	2.20	2.85	2.96	3.08	3.09	3.09	

具体的な設計照査項目および照査段階を表-2に示す。※1の365日は床版のブロック施工および壁高欄の施工が完了した時点を示す。※2の温度応力および膨張材の影響については、完成系の床版を照査するポイントが床版支間中央と地覆位置であり、ここについては温度応力による引張応力度が微小であることから、床版作用と主桁作用の重ね合せの照査では、照査項目から削除することとした。

3-2. 温度応力と膨張材の効果

コンクリート打込み後の水和熱によって上昇したコンクリート温度が低下する際に発生する温度応力により、床版には引張応力が発生する。そこで本橋においても非線形温度応力解析により、床版の橋軸方向の照査に用いる温度応力の算出を行った^{2),3)}。

- ・解析には株式会社計算力学研究センター社保有の非線形温

度応力解析専用プログラム「ASTEAMACS Ver.2」を使用した。

- ・モデル化は鋼桁1径間分、床版は2ブロック(ブロック長12m)とし、床版支間中央で対称モデルとした。
- ・床版コンクリートの施工は移動型枠支保工によるサイクル施工とし、1サイクル12日とした。
- ・施工時期は夏期を想定した。
- ・コンクリートは早強ポルトランドセメント+膨張材を使用した。
- ・材料の熱物性値および力学特性値は、コンクリート標準示方書に準じた。
- ・今回の解析では、膨張材のひずみ履歴を与えることで温度応力+膨張材の効果を検討した。

図-3に解析モデル、図-4,5に解析結果を示す。

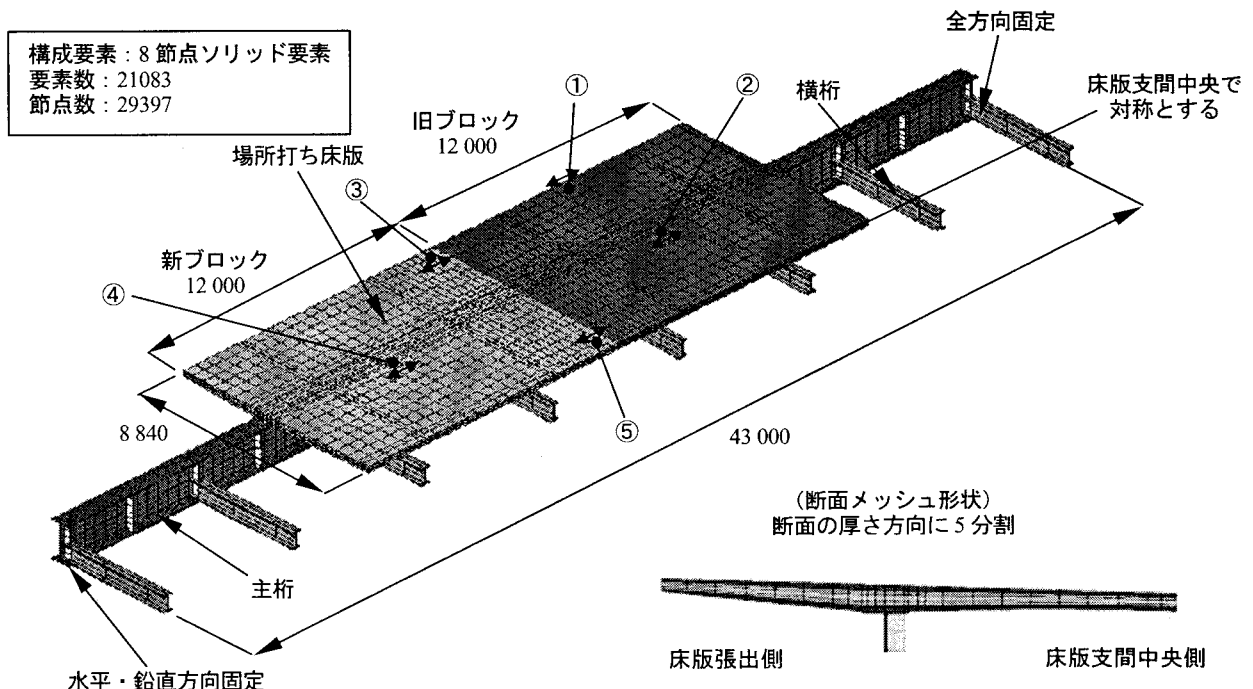


図-3 解析モデル

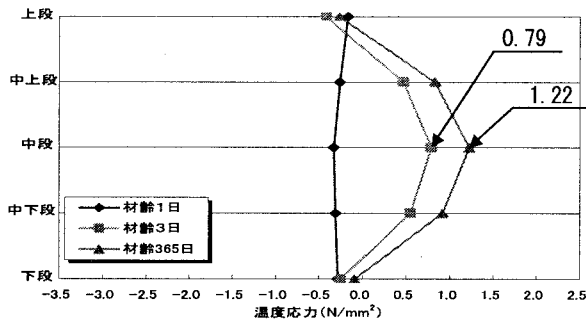


図-4 主桁直上の温度応力(④, 橋軸方向着目点)

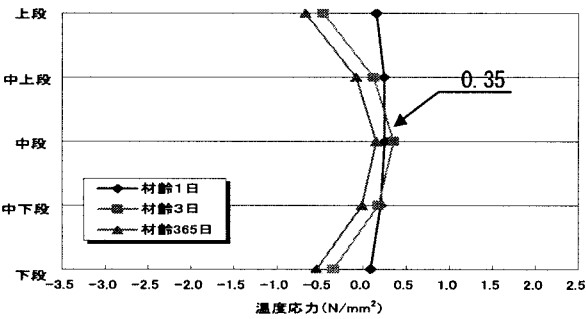


図-5 支間中央の温度応力(⑤, 橋軸方向着目点)

膨張材は、若材齢時の初期ひび割れを抑える重要な役割を果たしている。ここでは、その膨張材の効果と初期の乾燥収縮度を比較し若材齢時に生じる初期ひび割れ幅の照査が必要であるかを確認した。経時変化を考慮したコンクリートの収縮度についてはコンクリート標準示方書¹⁾(解 2.2.12)より算出した。膨張材の効果は実験値⁴⁾⁵⁾を用いることとした。

結果として、3日、14日の若材齢時は絶対値で収縮度より膨張材の効果の方が上回っていることから、乾燥収縮による引張応力は打ち消されていることになる。よって乾燥収縮に対する照査は材齢3日、14日については省略できることが判った。(図-6)

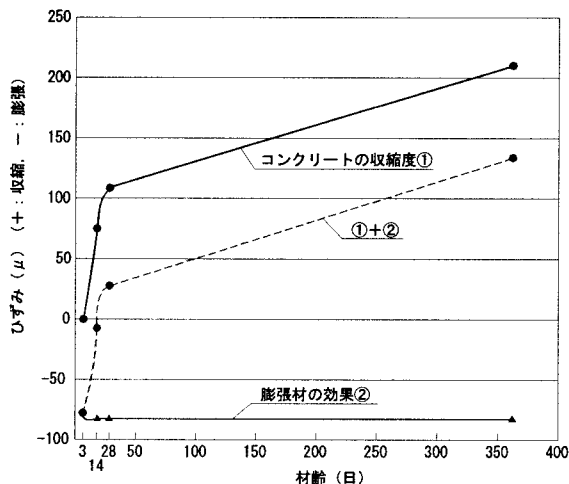


図-6 コンクリートの収縮度と膨張材の関係

3-3. ブロック施工順序の検討

床版のブロック施工順序は、床版に作用する引張応力が極力小さくなるように検討した。また、移動式型枠支保工を計4基使用することでカウンターウェイトを兼用する効果的なブロック施工が可能となり、最終的に床版に残留する引張応力を 1.0N/mm^2 以下⁶⁾⁷⁾に抑えることができた。(図-7)

さらに、各ブロックの施工段階で床版に一時的に発生する引張応力については、材齢に応じた許容曲げ引張応力度以下に抑えることができた。

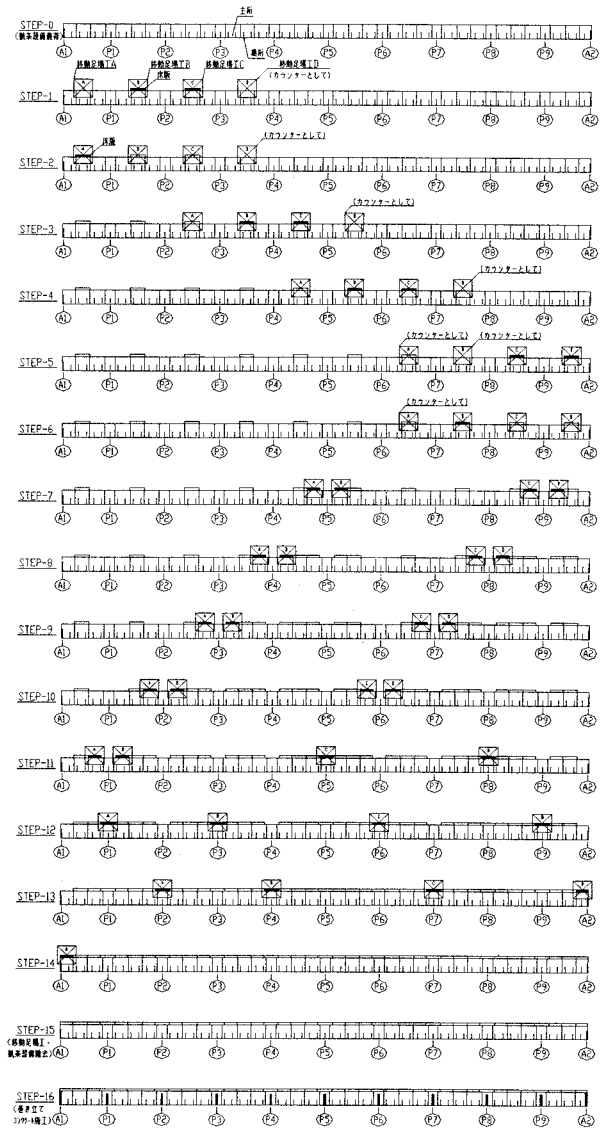


図-7 施工ステップ図

4. 完成系の照査との重ね合わせ

4-1. 床版の最小鉄筋量

床版の橋軸方向の最低鉄筋量は、一般部は1.4%以上、中間支点上は2.0%以上を床版厚に応じて確保することとした⁶⁾⁷⁾。その結果、床版厚の厚い主桁近傍では鉄筋を3段配置にすることとした。(図-8)

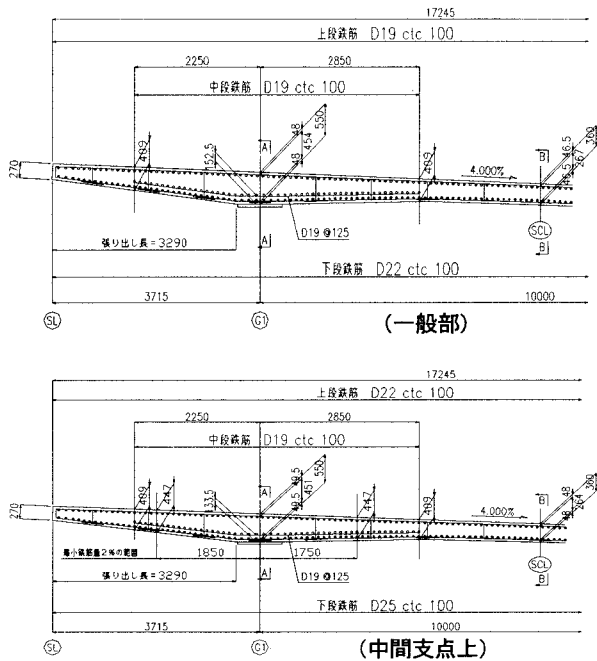


図-8 橋軸方向鉄筋の配筋図

4-2. 床版の照査結果

温度応力解析結果によると、温度応力に起因して床版に発生する橋軸方向の引張応力度は、床版厚が最も厚い主桁直上で最大値を示している。また乾燥収縮によって床版に引張応力が発生する部位も鋼筋の拘束を受ける主桁直上が最大になることから、床版の施工時にコンクリートに橋軸直角方向のひび割れが発生する可能性が高い部位としては、主桁上フランジ近傍であると予想される。

よって、施工時における照査は床版支間中央だけでなく主桁直上の位置についても行うこととした。また、温度応力によって発生する引張応力度は床版厚の中心部で最大を示していることから、発生応力度の分布を考慮して照査位置を床版上面、床版内部、床版下面の3カ所とした。(図-9)

図-9. ※3 で安全率は、施工時の安全率である1.25を適用することとした。

また、中間支点上付近では完成時にひび割れを許す設計となっており、膨張材の効果はひび割れた時点でキャンセルされてしまう。逆にコンクリートに生じたひび割れにより温度応力は鉄筋に伝達されると考えられるため、完成時の照査についてはコンクリートの単位面積当たりの温度応力による引張応力を鉄筋応力に換算し、その応力を主桁作用の応力に付加することとした。(表-3)

温度応力を考慮した鉄筋応力度の計算結果を表-4に示す。本橋では、照査対象とした各材齢における施工時の照査、ならびに施工後も残存する応力と完成時の応力との重ね合わせの照査の何れのケースにおいても、床版コンクリート、鉄筋ともに許容応力度を超過することはなかった。また、橋軸方向鉄筋は最小鉄筋量を満足する配置をしておけば安全であり、さらなる補強鉄筋を配置する必要はなかった。

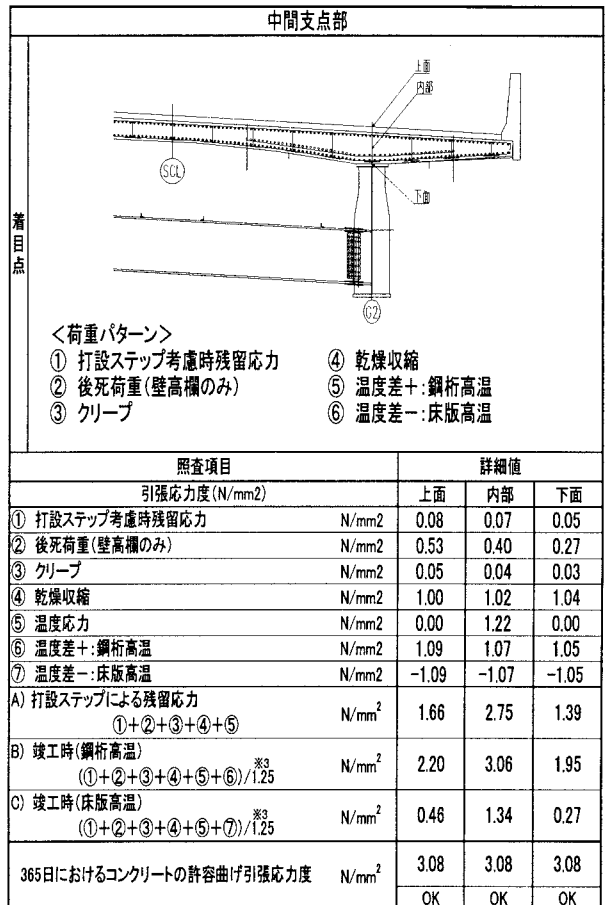


図-9 施工時の照査位置

表-3 温度応力分の鉄筋

膨張材あり		単位	支間部	支点部
温度応力	上段	N/mm ²	-0.27	
	中段		1.22	
	下段		-0.09	
	平均応力度		0.52	
床版厚	cm	55		
床版断面積 (1m単位幅あたり)	cm ²	5500		
配置鉄筋	上段	径×ピッチ	D19×100	D22×100
	中段		D19×100	D19×100
	下段		D22×100	D25×100
鉄筋断面積 (1m単位幅あたり)	cm ²	96.01	118.03	
鉄筋比(1.4%, 2%以上)	%	1.7	2.1	
鉄筋応力度	N/mm ²	16.4	13.3	

5. 実橋計測による温度応力解析の検証

床版コンクリート打込み時に床版内に熱伝対を埋め込み温度計測を行った結果と、「ASTEAMACS Ver.2」による温度応力解析を行った結果を比較した。

主桁直上部、床版厚中央の温度履歴を対比して図-10に示す。

図-10より、実測値と解析値は良好に一致しており、温度応力解析結果の妥当性が確認できた。

表-4 床版の橋軸方向の計算結果総括表

着目断面	支間部		中間支点部	
	上縁コンクリート 下段鉄筋	下縁コンクリート 上段鉄筋	上縁コンクリート 下段鉄筋	下縁コンクリート 上段鉄筋
活荷重載荷方法	床版作用 主桁作用 (影響線載荷)	---	床版作用 主桁作用 (影響線載荷)	---
設計基準強度	40 kN/mm ²		40 kN/mm ²	
床版コンクリート	活荷重	5.4 T荷重(正) 2.1 L荷重×0.6(正) 合計 7.5	---	5.1 T荷重(正) ---
	③ 後死荷重	0.8	---	---
	④ その他 ※4	0.0	---	---
	床版作用 ①	5.4	---	5.1
	判定	< 10 N/mm ² O.K	---	< 10 N/mm ² O.K
	主桁作用 ②+③+④	判定	---	---
	判定	判定	---	---
	活荷重(床版+主桁)+後死 ①+②+③	8.3	---	---
	判定	判定	---	---
	〃 + その他 ①+②+③+④	8.3	---	---
判定	< 14.0 N/mm ² O.K	---	---	
床版鉄筋	照査鉄筋	D22 ctc100	D19 ctc200	D22 ctc100
	活荷重	94.9 T荷重(正)	---	94.9 T荷重(正)
	② 主桁作用	---	---	---
	合計	---	---	54.5 L荷重(負) 54.5 P1上
	③ 後死荷重	---	---	2.56 9.95
	④ その他 ※4	---	---	20.27 22.1
	⑤ 温度応力	16.4	---	13.30 13.3
	床版作用 ①	94.9	---	94.9
	判定	< 140.0 N/mm ² O.K	---	< 140.0 N/mm ² O.K
	主桁作用 ②+③+⑤	判定	---	52.0 77.8
判定	判定	---	< 140.0 N/mm ² O.K < 140.0 N/mm ² O.K	
活荷重(床版+主桁)+後死+温度応力 ①+②×0.6+③+④+⑤	111.3	---	132.4 152.7	
判定	< 140.0 N/mm ² O.K	---	< 140.0 N/mm ² O.K < 168.0 N/mm ² O.K	
〃 + その他 ①+②×0.6+③+④+⑤	111.3	---	---	
判定	< 140.0 N/mm ² O.K	---	---	
ひび割れ幅	0.019	---	0.0151	
許容値	0.020 cm (= 0.005c)	---	0.0186 cm (= 0.0035c)	
判定	O.K	---	O.K	
最小鉄筋量	737.9 cm ² (1.87%)	---	929.5 cm ² (2.36%)	
配置鉄筋量	552.1 cm ² (1.40%)	---	788.7 cm ² (2.00%)	
判定	O.K	---	O.K	
決定事項	ひび割れ幅	引張側鉄筋の1/2 最小鉄筋量 1.4%	活荷重(床版+主桁)+後死	ひび割れ幅
配置鉄筋	D22 ctc100	D19 ctc200	D25 ctc100	D22 ctc100

※4 クリープ・乾燥収縮・温度差のうち、最も不利な組合せを示す。

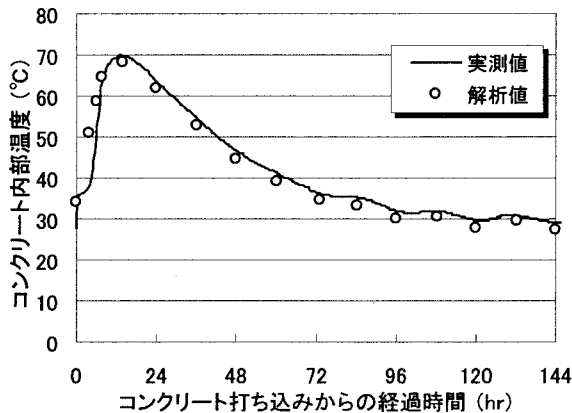


図-10 解析値と実測値の比較
(主桁直上 床版厚中央)

6. まとめ

今回報告した場所打ちPC床版の橋軸方向の設計では、完成系における照査以外に、施工時における温度応力の影響などをあらかじめ取り入れ、施工時に床版にひび割れを発生させない照査を追加した。その影響で橋軸方向鉄筋量が多くなると予想されたが、床版厚に応じた最小鉄筋量^{6),7)} (一般部は1.4%、中間支点部は2.0%)を配置しておけば安全であり、さらなる補強鉄筋は必要ない結果となった。

本橋は床版の現場施工をほぼ完了しているが、現時点で床版に有害なひび割れは発見されておらず、今回の施工時を含めた一連の設計手法の妥当性について一定の評価を与えることができると考えている。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書，構造性能照査編，施工編，2002.3
- 2) 本間淳史・長谷俊彦・榊原和成・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一，橋梁と基礎，pp.2~10，2002.10
- 3) 河西龍彦・本間淳史・長谷俊彦・坂根秀和・松井繁之：場所打ちPC床版の温度応力に関する解析的研究，第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.133~138，2003.6
- 4) 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回年次学術講演会講演概要集，共通セッション，CS4-013，pp.135~136，2002.9
- 5) 本間淳史・長谷俊彦・河西龍彦・坂根秀和：長支間場所打ちPC床版の非線形温度応力解析 (第二東名高速道路藁科川橋)，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，
- 6) 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
- 7) 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