

報告 PC 斜張橋施工時の構造部材に対する温度の影響について

伊東 良浩^{*1}・伴 享^{*2}・児玉 敏雄^{*3}・里見 豪^{*4}

要旨：PC斜張橋を対象に、構造部材に対して温度計測を実施し、その影響の程度を調査した。各構造部材の温度変化は、日照ならびに季節の違いによる影響が大きなことが確認された。この影響は、主桁、斜材について顕著にあらわれた。主桁、斜材の温度変化による主桁コンクリートのたわみ変化量を調査したところ、施工管理において無視できない大きさであることが確認された。逆解析により主桁コンクリートの弾性係数を求め、斜材緊張時における主桁たわみ変化量を予測したところ、温度による補正が必要であることがわかった。

キーワード：PC斜張橋、計測管理、温度変化、逆解析

1. はじめに

PC斜張橋は主桁の張出し施工に伴いその不静定次数が逐次変化するため、橋体各部の応力度、斜材張力、主桁のたわみ性状が温度変化の影響により複雑な挙動を示す。そのため、施工中における橋体の挙動を把握しながら施工管理を行うことが、精度よく橋を架設する上で重要な要素となる。

ここでは、現在建設中のPC斜張橋においてこれらの施工管理のために実施した各種計測および斜材施工段階で行った逆解析の結果を報告する。

2. 橋梁概要

対象とした橋梁は、川幅約100mの河口部を横断する橋梁であり、港湾の整備構想のシンボルとして構築されるものである。

本橋梁の側面図を図-1に示す。また、基本条件ならびに構造諸元は以下の通りである。

構造形式：単区間PC斜張橋

橋 格：第4種2級（設計速度：V=50km/h）

橋 長：112m

幅 員：全幅員21.3m 有効幅員20.5m

主 塔 高：51m（A2橋台側へ15°傾斜）

主桁形式：3室PC箱桁

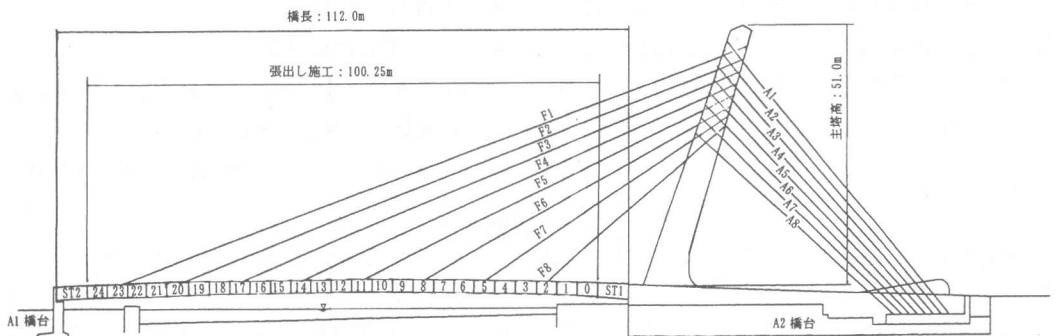


図-1 側面図

*1	佐藤工業（株）中央技術研究所	土木研究部門	主任研究員	工博（正会員）
*2	同	上	研究員	工修
*3	同	上	主任研究員	工博
*4	同	上		

主塔形式：独立1本柱

斜材形式：1面吊りファン形（8段2列）

斜材：ノングラウトタイププレハブ斜材

DINA アンカー SPWC283：A2～A8

SPWC397：F1～F8

SPWC499：A1

主桁の施工は、A2橋台からの片持ち張出し架設工法である。主桁ブロック割は図-1に示すように、A2橋台、A1橋台位置での支保工施工部（ST1、ST2）を除き25ブロックで施工され、張出し施工区間の主桁3ブロックに1回の割合で斜材が架設される。

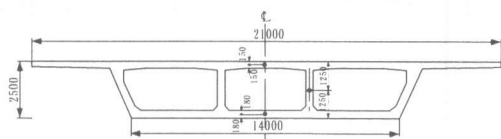
3. 計測内容

計測項目を表-1に、計測位置を図-2に示す。

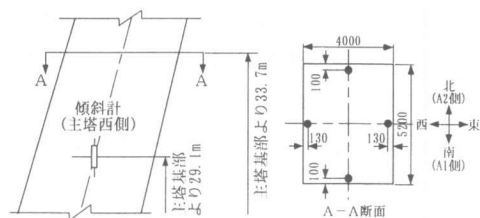
主桁の温度計測位置は、上下床版、中ウエブの3ヶ所である。主塔では、主塔基部から29.1m位置に傾斜計を、33.7m位置に熱電対を設置した。傾斜計は2方向タイプを用い、主塔の橋軸方向ならびに橋軸直角方向の変化を測定した。

斜材温度は、主桁上に斜材と平行に設置したダミーケーブルにより測定した。ダミーケーブルの傾斜角は斜材の架設角度の平均値30°とした。熱電対は斜材断面内の温度分布を推定するため、断面放射方向に9ヶ所設置した。

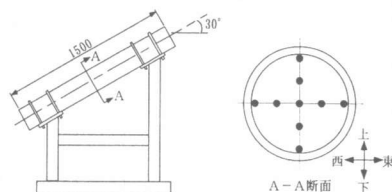
斜材張力の計測は、架設時ならびに架設後に実施した。架設時はジャッキ油圧と振動法により計測し、架設後においては振動法により計測を実施した。



(a) 主桁



(b) 主塔



(c) 斜材

●：熱電対

図-2 計測位置

4. 計測結果

図-3に秋季の晴天日の各計測値の経時変化を示す。図-4に冬季の晴天日の主桁温度経時変化を示す。図は、秋期の晴天日との違いが顕著に表れており、秋期の晴天、冬季の晴天の特徴的な結果である。

4.1 主桁の温度変化

主桁温度の日変化量は、秋期の晴天日が上床版、下床版、中ウエブそれぞれ5.7℃、1.6℃、0.6℃である。一方、冬季の晴天日は、上床版、

表-1 計測項目

構造部位	計測項目	計測方法	計測頻度	備考
主桁	温度 たわみ変位量	熱電対 レベル測量	1回/1時間 各施工段階	構造中心線
主塔	温度 傾斜角	熱電対 傾斜計	1回/1時間	
斜材	温度 張力 (ジャッキ・振動法)	熱電対 油圧 加速度計	1回/1時間 各施工段階	
その他	外気温	熱電対	1回/1時間	主桁上に設置

下床版, 中ウエブそれぞれ, 2.1℃, 0.8℃, 0.3℃
となっている。両日とも外気温の変化量が10℃

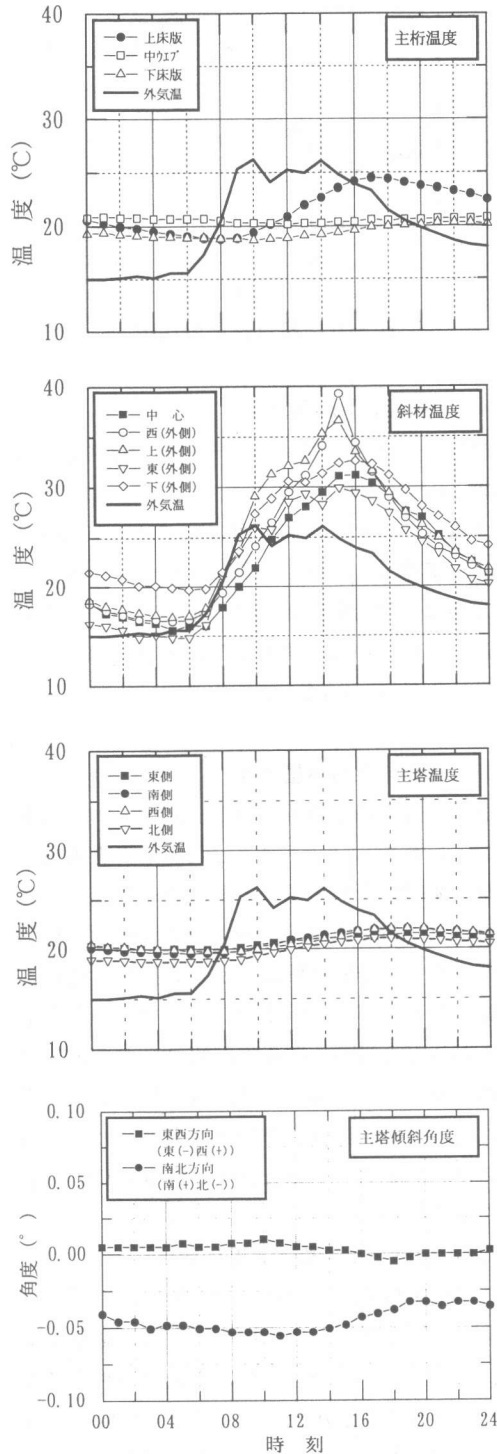


図-3 計測値の経時変化(秋期晴天)

程度とほぼ同じであるが, 上床版の温度変化量
は, 秋期が冬期の2.7倍程度大きくなっている。

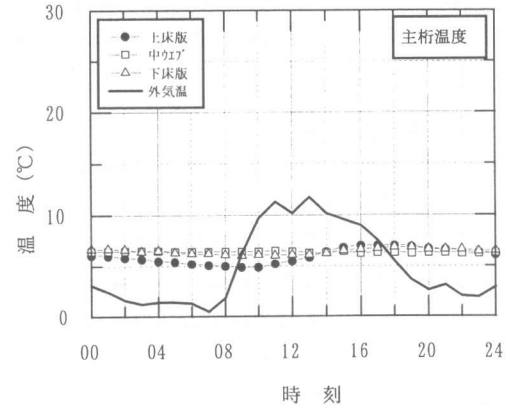


図-4 主桁温度の経時変化(冬期晴天)

これは, 季節の違いによる日照角度が異なるためであると考えられる。下床版, 中ウエブは, 各日の平均気温 19.4℃, 4.9℃とほぼ同様の温度で推移し, 外気温の日変化にあまり影響を受けない。

上床版の温度変化は, 外気温の変化に対して3~4時間の位相差が生じている。

4.2 斜材の温度変化

斜材の温度変化は, 主桁上床版と同様に, 外気温に対して3~4時間の位相差が生じている。斜材断面内の各計測位置における温度差は, 夜間, 日中を通して5℃程度生じ, 15:00で最大となり, 10℃程度の温度差となっている。

図-5に斜材内部温度差が最大となっている15:00の温度分布を示す。この時刻では, 日照の影響を受けている西側上部の面で温度が高くなり, 日照の影響を受けていない東側に向かって温度が低下していることがわかる。

斜材温度の評価方法として, 斜材中心部における計測値を用いる場合がある。先に示したように日中では斜材内部に温度差が生じる。秋期において10℃程度の温度差が生じることから, 夏期においてはさらに大きな差となると考えられる。そのため, 斜材温度を斜材中心部の温度で代表させた場合には, 挙動を適切に評価しな

い可能性がある。

ここでは、斜材内各点の計測値を斜材内部における分担面積で重みを付けて式(1)により平均化を行い、中心位置での計測値との比較を行った。

$$T_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^9 T_i \cdot A_i}{A} \quad \text{式(1)}$$

ここに T_{ave} : 平均化した斜材温度
 T_i : 各計測位置の斜材温度
 A_i : 各計測位置の分担面積
 A : 斜材断面積

図-6 に平均値と中心位置における温度の比較を示す。この図より、夜間においては、両者の違いはあまり見られないものの、日中では最高 3℃程度の温度差となっている。この温度差は、鋼材のひずみに換算すると 30 μ 程度であり、長さ 100m の斜材で 3mm 程度の伸縮量、応力で 6N/mm² 程度の変化量となる。値そのものは大きくはないが、橋体の挙動を分析する場合に、影響を及ぼすものと考えられる。

4.3 主塔の温度変化

主塔は総足場工法で施工しているため計測位置に直射日光が当たることが少ない。そのため、各測定位置とも最高、最低の温度差が 2℃程度と温度変化は微小なものとなっており、ほぼ、この日の平均気温 (19.4℃) と同程度の温度で変化している。

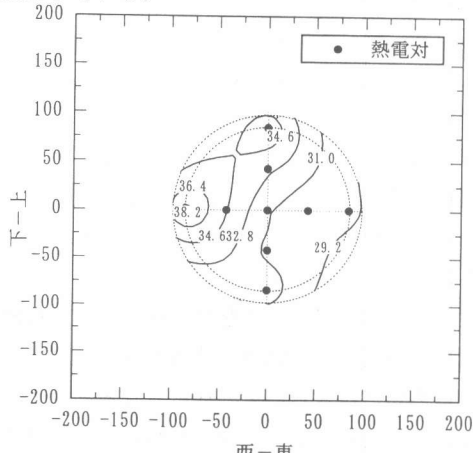


図-5 斜材温度分布

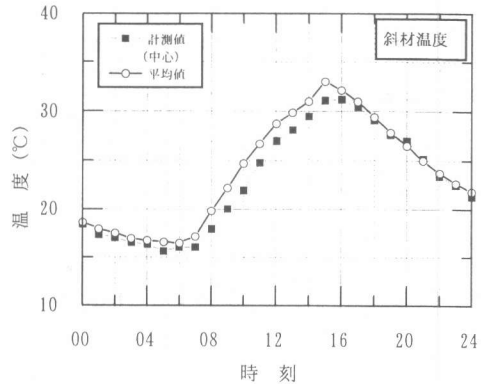


図-6 斜材温度の比較

4.4 主塔の傾斜角変化

図中の東西方向は橋軸直角方向、南北方向は橋軸方向である。

外気温の変化に伴い東西方向では、午前中、西側に変化し、午後、東側に変化している。南北方向は、午前中に北側に変化し、午後には南側に変化している。角度変化が大きい南北方向の日変化量は、0.02° である。

5. 主桁のたわみ量予測

2次元骨組構造解析プログラムを用い、主桁の弾性係数をパラメータとした逆解析を実施し斜材緊張時のたわみ量の予測を行った。パラメータは、主桁の鉛直たわみ量の実測値と計算値の残差平方和を評価関数とし、共役勾配法による最小化を行い¹⁾ 同定した。ここでは、まず主桁たわみ量と温度の関係を計測結果から示し温度補正値を設定する。次に、解析に用いる実測値に対して、温度補正を行う場合と行わない場合のたわみ量の予測値を比較し温度補正の重要性を示す。

5.1 主桁たわみ量と温度の関係

PC斜張橋では、主桁の上床版と下床版の温度差、斜材温度の変化等様々な要因の影響を受け、主桁コンクリートのたわみ量は短時間に变化し、張り出し長が大きくなるにつれ顕著となる。主桁の温度、斜材の温度が、主桁コンクリートのたわみ量に及ぼす影響を確認するため、

主桁の構造中心における一日のたわみ量の変化を測定した。測量は張出し施工 14BL の鉄筋組立後荷重条件に変化のない一日について行った。

作業開始前 8:00 の測量結果を初期値とし、それぞれの時間における桁のたわみ量との差を図-7に示す。また、各測量時間の気温、斜材温度（平均値）及び主桁の温度を表-2に示す。これらの結果から、温度変化によるたわみ量の変化は、張出し先端部で最大 40mm 程度となり、無視できないことがわかる。

たわみの補正量は 8:00 と 16:00 の各ブロックでのたわみの変化量を斜材の温度変化量で除すことにより求めた。1℃当たりのたわみの補正量を表-3に示す。補正量は、基準温度を 20℃とし、測定時における斜材温度との差分から表-3より求めた。2BL, 5BL, 8BL それぞれのコンクリート打設完了後のたわみの実測値および補正後の実測値を図-8, 9, 10に示す。

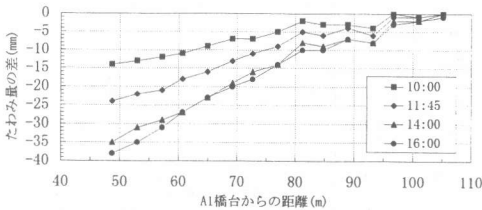


図-7 主桁たわみ測量結果

表-2 たわみ測量時の温度

測定時間	外気温 (°C)	斜材 (°C)	上床版 (°C)	下床版 (°C)
8:00	-0.4	-1.1	4.1	5.6
10:00	8.6	5.1	3.7	5.4
11:45	12.3	8.7	4.2	5.5
14:00	12.9	12.6	5.0	5.9
16:00	12.3	13.5	5.7	6.3

表-3 斜材温度変化 1℃当たりのたわみの補正量

主桁ブロック	ST1	OBL	1BL	2BL 斜材	3BL	4BL	5BL 斜材	6BL	7BL	8BL 斜材
主桁たわみ変化量 (8:00~16:00)	-1	-2	-3	-8	-7	-10	-10	-14	-18	-20
斜材温度変化 1℃ 当たりの変化量	-0.07	-0.14	-0.21	-0.55	-0.48	-0.68	-0.68	-0.96	-1.23	-1.37

単位: mm

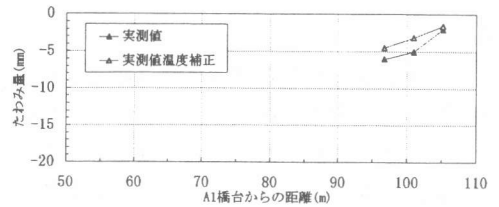


図-8 2BLコンクリート打設によるたわみ変化量

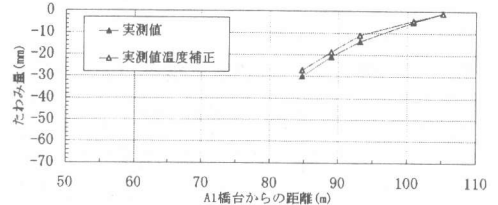


図-9 5BLコンクリート打設によるたわみ変化量

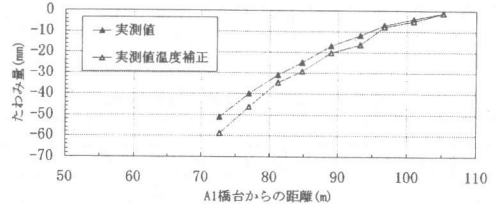


図-10 8BLコンクリート打設によるたわみ変化量

5.2 斜材緊張時のたわみ量の予測

斜材定着ブロック 2BL, 5BL, 8BL コンクリート打設時たわみ量の実測値を用いて逆解析を行い、それぞれの時点におけるコンクリートの弾性係数を推定する。次に得られた弾性係数を用いて 2BL, 5BL, 8BL コンクリート打設の次工程に対応する F8-A8, F7-A7, F6-A6 斜材緊張時のたわみ量をそれぞれ計算した。

温度補正を行わない場合と行う場合の逆解析により得られた弾性係数を表-4, 5にそれぞれ示す。ここでは、コンクリートの弾性係数をパラメータとした逆解析を実施したが、このパラメータは、コンクリートの乾燥収縮、クリープ、測量誤差等の要因を含み、値そのものが持つ物理的な意味については別途議論する必要がある。

ある。

温度補正を行わない場合と行った場合の斜材緊張時のたわみ量を図-1 1～1 6にそれぞれ示す。これらの比較より、温度補正を実施した場合は、実施しない場合に比べて予測精度が向上しており、温度補正の重要性が示唆されているものと考えられる。

表-4 弾性係数の逆解析結果（補正なし）

2BLコンクリート打設		5BLコンクリート打設		8BLコンクリート打設	
主桁	Ec	主桁	Ec	主桁	Ec
ST1	1.70	ST1～2BL	2.69	ST1～5BL	4.11
OBL	3.95	3BL	1.90	6BL	3.00
1BL	2.94	4BL	0.67	7BL	0.80

単位： $\times 10^4 \text{ N/mm}^2$

表-5 弾性係数の逆解析結果（補正あり）

2BLコンクリート打設		5BLコンクリート打設		8BLコンクリート打設	
主桁	Ec	主桁	Ec	主桁	Ec
ST1	2.21	ST1～2BL	3.34	ST1～5BL	3.41
OBL	5.53	3BL	0.84	6BL	2.13
1BL	3.42	4BL	2.25	7BL	0.62

単位： $\times 10^4 \text{ N/mm}^2$

6. おわりに

建設中のP C斜張橋において施工管理のための各種計測および逆解析を用いた主桁のたわみの予測を行った。

その結果、各構造部材は日照ならびに季節の違いによる温度変化の性状が異なることがわかった。また、逆解析を用いて主桁のたわみの予測を行う場合、たわみの実測値に対する温度補正が必要であることがわかった。今後、計測を継続し逆解析を主桁たわみ量予測の他に斜材張力の調整等へ適用して行きたい。

謝辞

長岡技術科学大学、長井正嗣教授には斜張橋の施工・計測についてご指導いただきました。岐阜大学工学部土木工学科 本城勇介助教授には、逆解析の手法、プログラミングについて貴重なご助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

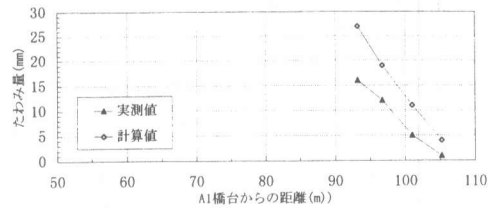


図-1 1 F8-A8 緊張時（補正なし）

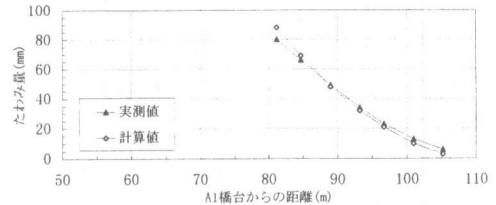


図-1 2 F7-A7 緊張時（補正なし）

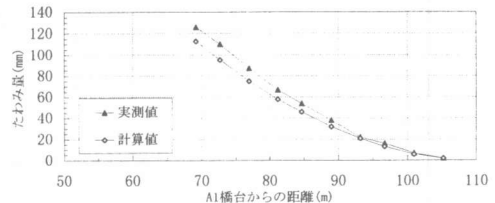


図-1 3 F6-A6 緊張時（補正なし）

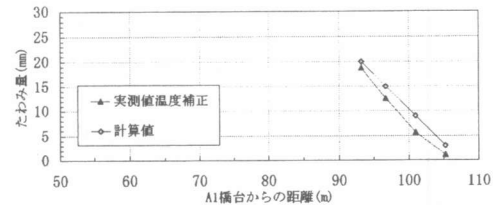


図-1 4 F8-A8 緊張時（補正あり）

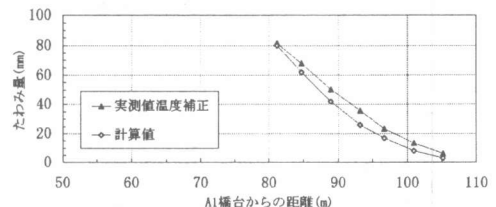


図-1 5 F7-A7 緊張時（補正あり）

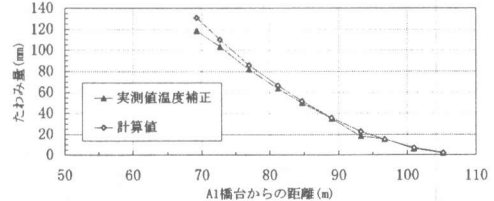


図-1 6 F6-A6 緊張時（補正あり）

参考文献

- 1) 本城勇介, 福井宏行, 小川正二: 拡張ベーズ法による広域地下水解析モデルの逆解析: 定常データに基づく場合, 土木学会論文集, No. 535/III-34, pp93-102