

## (20) 東名足柄橋 (PC斜張橋) の施工管理

大成建設(株) 土木設計部 正会員 ○関 文夫  
 日本道路公団 東京第一建設局 正会員 木村 秀夫  
 大成建設(株) 土木設計部 正会員 田中 茂義

### 1.はじめに

東名足柄橋は、東名高速道路(大井松田～御殿場間)改築工事の一環として、建設された橋梁<sup>1)</sup>で、PC斜張橋部(橋長370m)、5径間連続ラーメン橋部(橋長415m)より構成される。本稿で紹介するのは、中央支間185mの3径間連続PC斜張橋の施工管理である。

これまでのPC斜張橋の施工管理では、施工途中で現場のパソコンのデータを更新する場合大型電算までフィードバックした解析が必要であり、時間の都合上データの更新は不可能であった。また将来形状を予測するにしても、予め計算した単一の設計値を基に検討するため、補正係数を仮定するなどの簡易的な方法でしか扱えず、的確な誤差の調整量が把握できなかったのが現状である。

本橋で採用した施工管理のシステム<sup>2)~5)</sup>は、パソコン内に解析機能を保有し、実測データに基づいて誤差要因の分析、将来形状の予測、データの更新までを一連化したもので、的確な調整量を迅速に施工に支援できるようにしたものである。

本稿は、このシステムを用いた東名足柄橋(PC斜張橋)の施工管理<sup>6)</sup>について報告する。

図-1に、東名足柄橋一般構造図を示す。

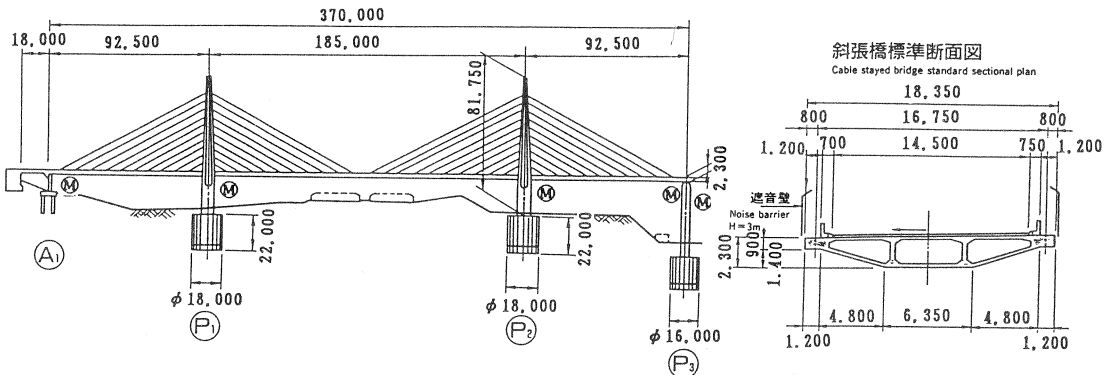


図-1 東名足柄橋一般構造図

### 2.施工管理

本橋の施工管理では、表-1に示す設計諸定数を用いて、カンチレバー施工の各施工ステップを正確にシュミレートした骨組み解析により設計値を求め、実測値と比較検討しながら施工を進めた。設計値算定の際考慮した荷重は、各部材重量(橋面工、遮音壁等含む)、移動式作業車重量、主桁内プレストレス、斜材緊張力、クリープ乾燥収縮(各施工ブロック毎)、温度変化による影響等で

表-1 設計諸定数

	主桁	主塔	橋脚
設計基準強度 $\sigma_{ck}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	400	300	300
弾性係数 $E_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$3.5 \times 10^5$	$3.0 \times 10^5$	$3.0 \times 10^5$
断面積	総断面	換算断面 (鉄筋考慮)	換算断面 (鉄筋考慮)
断面2次モーメント			
線膨張係数 (1/°C)	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$
単位重量 (t/m <sup>3</sup> )	2.5	2.5	2.5

ある。また、主塔、橋脚の設計諸定数に換算断面を採用した理由は、SRC構造<sup>6)</sup>として設計されているため鋼材の使用量が多く、鋼材鉄筋の剛性を無視することは不適切であると判断したためである。

本橋の施工管理の特徴は、各施工サイクル毎に設計諸定数の見直しを計り、設計諸定数を頻繁に更新することにより、誤差を最小に抑制する管理手法を採った点である。加えて、厳密な温度補正量の算定を実施したことにある。図-2にシステム概要図、図-3にシステムフローチャートを示す。

図中の電子スタッフ<sup>7)</sup>は、主桁レベルを自動計測できる機器であり、橋体温度と同時に計測できることから、主桁の変位量と温度の関係を厳密に分析できるようになったものである。また、張力測定も、強制振動法を利用することにより、パソコン内で瞬時に計測可能なシステムで構成されている。

表-2に本橋で実施した施工管理項目及び管理目標値を示す。

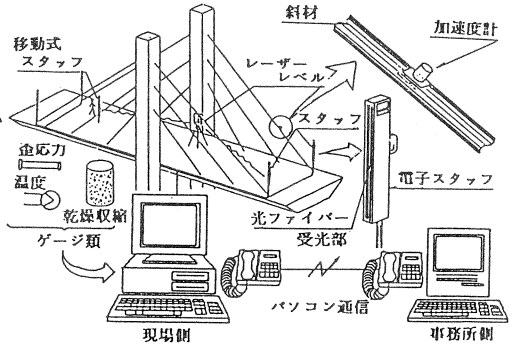


図-2 システム概要図

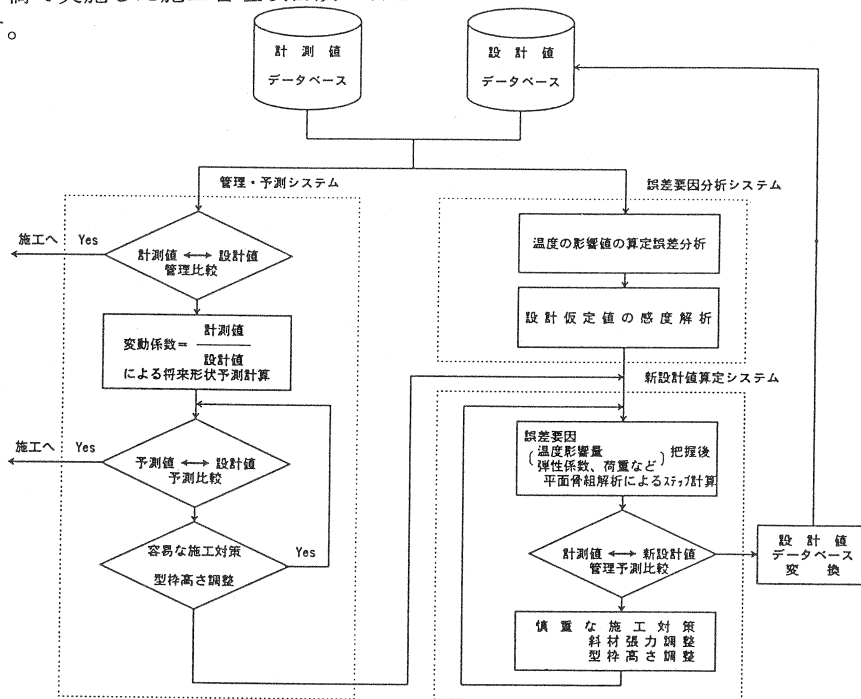


図-3 システムフローチャート

表-2 施工管理項目及び管理目標値

施工管理項目	計画値に対する管理目標値	
	カンパ-施工時	完成時
(1) 主桁の橋面高さ	±50m/m程度	±25m/m以内
(2) 斜材張力	±15%	±5%
(3) 橋体応力度	許容応力度以内 (誤差は±30kgf/cmを目安)	許容応力度以内 (誤差は±20kgf/cmを目安)

### 3.主桁の上げ越し管理

#### 3.1概要

主桁の上げ越し管理は、施工途中で計測値と設計値との間に生じる誤差を、迅速かつ定量的に把握することが重要な鍵となる(前述、図-3の誤差要因システム参照)。

誤差の生じる要因として、以下の項目が考えられる。

- ①設計諸係数の仮定値の違い：主桁の剛性 (E、I)、斜材の剛性 (A、E)、線膨張係数、等
- ②設計荷重の変動：コンクリート重量、作業車重量、斜材張力、等
- ③構造物のモデル化の相違：斜材定着間長、支承条件、等
- ④計測誤差：計測誤差、人的誤差、等

本橋では①～③の誤差要因を総括して「温度の影響値の算定誤差分析」と「設計仮定値の感度解析」により、計測データの分析検討を試み、誤差の定量的な把握を行った。④の誤差は、電子スタッフなど計測計器の自動化により対処した。

#### 3.2 温度補正の考え方

主桁の橋面高さは、本橋が完成し、橋体各部が基準温度になったときに、所定の計画高さとなるように管理した。具体的には、橋面高さの温度補正は次に示す考え方によって実施した。

- 1) 基準温度は架橋地点の年平均気温を採用するものとし、気象データから+15℃と設定した。
- 2) 上記の基準温度とは別に月別基準温度を設定し、これをカンチレバー施工の各施工段階と対応させた。月別基準温度は、架橋地点の月別平均気温とした。
- 3) 施工中に目標とする橋面計画高さは、2) で設定した月別基準温度に対して各施工段階毎に計算し設定した。これは、施工の各段階で同一の基準温度を用いて主桁橋面高さを管理することは、構造系の変化に伴い誤差が大きくなると考えられたためである。

- 4) 実測レベル値は、橋体および温度測定用ダミー

斜材に埋設された熱電対等のデータを基に、パソコン内で自動的に温度補正したものを用いた。影響量は、各部材毎(橋脚、主塔、主桁、斜材、床版温度差、主塔左右の温度差)に考慮した。算定方法を式-1に示す。

$$\Delta y = \sum_{i=1}^6 (T - t_i) [K_i] \text{ ----- (式-1)}$$

ここで

$\Delta y$  : 温度変化による計算補正量 (mm)

T : 月別基準温度 (°C)

[K<sub>i</sub>] : 各部材毎の温度変化による影響マトリックス

t<sub>i</sub> : 各部材毎の計測温度 (i=1~6)

- 5) しかし、図-4に示すように4) の補正量と実際の変動量と大きく差が生じたため、前掲図-

$$\Delta y = \sum_{i=1}^6 \alpha_i \cdot (T - t_i) [K_i] \text{ ---- (式-2)}$$

$\alpha_i$  : 各部材毎の補正係数

#### 3.3 設計仮定値の感度解析

本橋での誤差要因の分析は、感度解析による解析を行ったが、これは相互に依存し合う影響量の大きい設計諸定数のパラメータを仮定し、実際のたわみ量に近いたわみ量を逆解析にて求めたものである。

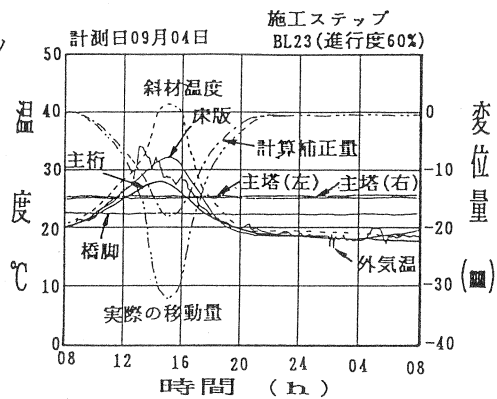


図-4 温度補正量と実際の変動量

3の温度影響値の誤差分析を行った。この分析は、各部材毎の影響量に、補正係数を乗じて実際の変動を把握するものである。算定方法を式-2に示す。

本橋では、影響量の大きいパラメータとして、コンクリートの弾性係数、コンクリート重量、作業車重量の3つに代表させ解析を行った。f(n)を骨組み解析として、式-3に示す。

$$y_{pi} = f(P^*_{ec} \cdot E, P^*_{wc} \cdot W, P^*_{wp} \cdot P) \quad \text{--- (式-3)}$$

ここで、

$y_{pi}$  : 各管理点毎の感度解析によるたわみ(mm)

$P^*_{ec}$  : 感度係数 (コンクリートの弾性係数)

$P^*_{wc}$  : 感度係数 (コンクリート重量)

$P^*_{wp}$  : 感度係数 (作業車重量)

これらのパラメータを同時に求めることは不可能であり、組み合わせは無限にあり得るため、何等かの仮定が必要となる。

そこで、斜材の緊張時におけるパラメータを、次式のように仮定した。

$$y_{pi} = f(P^*_{ec} \cdot E) \quad \text{--- (式-4)}$$

図-4に感度解析概念図を示す。

コンクリート打設時におけるパラメータ  $P^*_{ec}$  は、既知であるので  $P^*_{wc}$  を求める。

$$y_{pi} = f(P^*_{ec} \cdot E, P^*_{wc} \cdot W) \quad \text{--- (式-5)}$$

続いて、作業車移動時のパラメータは、既知の  $P^*_{ec}$  をもちいて、 $P^*_{wp}$  を求める。

$$y_{pi} = f(P^*_{ec} \cdot E, P^*_{wp} \cdot P) \quad \text{--- (式-6)}$$

以上、影響度の大きい3つのパラメータを容易に求めるための方法である。この感度解析で求めたパラメータの目的は、真の物性値を求めようとしたものではなく、施工管理におけるレベル張力等を設計値通りに施工するための係数である。表-5に、感度解析結果を示す。

### 3.4 修正量の決定

3.3により求められた感度係数を基に、パソコン内で残りの施工ステップから完成までの施工ステップを骨組み解析を実施し、現施工段階での本来の設計値を算定した。新しい設計値と現在の実測値との差が修正量となるが、次のブロックのコンクリート打設時で型枠高さの修正と斜材張力の修正により対処した。型枠高さの修正は、既設ブロックとの折れ角の生じない±20mm範囲以内とし、斜材張力は、完成時で返還可能な調整範囲で、主桁の応力度、主塔の応力度を確認した後、前設計値の±15%以内の範囲とした。

### 3.5 上げ越し管理の結果

斜材張力調整は、主桁の閉合後、主に形状改善を目的として2回実施したが、主桁の橋面高さは、±25mmの誤差範囲に収まった(図-5)。本橋の主桁はカンチレバー施工中には、コンクリートの打設、斜材緊張などで±240mm程度のレベル変化があることを考慮すると、設計値と実測値との誤差は1割程度であり、非常に精度の良い、上げ越し管理を実施できたものと考えられる。

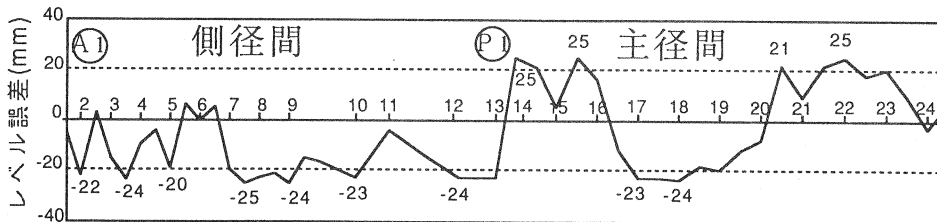


図-5 橋面高さの誤差 (斜材張力調整後)

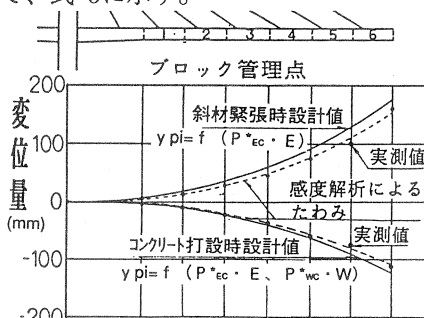


図-4 感度解析概念図

表-5 感度解析結果

施工ステップ	パラメータ	コンクリート弾性係数	作業車重量	コンクリート単位体積重量
斜材	1段	1.091	1.214	1.030
	2段	1.042	1.164	0.986
	3段	1.050	1.175	0.968
	4段	1.071	1.171	1.000
	5段	1.097	1.209	1.025
設計時での仮定値		$3.5 \times 10^5$ kg/cm <sup>2</sup>	162.0 t	2.5 t/m <sup>3</sup>

#### 4. 斜材の張力管理

##### 4.1 概要

斜張橋においては、張力導入の正確度が構造物全体の釣り合い状態を大きく左右し、形状および応力分布に直接影響を及ぼす。このため、張力管理は特に重点を置いて実施する必要がある斜材の張力管理の要点は次の3点である。

- ①張力測定法
- ②張力導入時の管理方法（緊張管理方法）
- ③張力調整方法

##### 4.2 張力測定法

斜材の張力測定は、ジャッキに取り付けたデジタルカウンタ（荷重計、0.1ton目盛り）および強制振動法を用いて行った。

斜材の張力管理で、強制振動法を用いるに当たり、斜材緊張時に各斜材毎の振動数と荷重計のキャリブレーションカーブを作成した（図-6）。また入力波形は、パソコン内で高速フーリエ変換され瞬時に卓越振動数が求められるようになっている。

キャリブレーションカーブを作成したのは、振動法による張力測定は、斜材のサグおよび曲げ剛性、振動時の端部の拘束条件、斜材長の影響等、張力算定式

自体に多くの誤差要因を含んでおり、これにより求めた張力を真の値とすることは危険であると判断したためである。埋殺しタイプの一般型ロードセルは、偏心荷重に対しては精度が落ちること、長期的な耐久性が不十分なこと、等の理由から使用しなかった。

##### 4.3 緊張管理方法

緊張管理は斜材1本毎の緊張管理図（マンオメータの読みとケーブル伸び量の関係）を用いて行った。緊張管理図は、主桁の変位主塔の変位の影響も考慮した見かけの伸びで管理した。緊張に先立ち、サグによる影響が無視できるまで、初期緊張（サグ取り）を行った。斜材の見かけの弾性係数は平均 $2.03 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ であった。

##### 4.4 張力調整方法

最近の斜張橋では、主桁のたわみと斜材張力の双方をそれぞれの許容値内に収めるための張力調整量を与える最適化手法が実施されている<sup>9)</sup>。本橋の場合には、現時点において、主桁の橋面高さが、若干誤差が生じていたため、斜材張力を許容値内で変動させ、主桁の橋面高さに着目した最適化解析を用いるものとした。この方法では、張力調整量はシム調整量、すなわち斜材定着点距離の相対的变化量という形で与えられる。この方法で設定した張力調整量に対し、主桁の変位、斜材張力、橋体応力度等の応答値を算出し、それ以降の施工ステップの状態に重ね合わせて、それぞれの許容値以内にあることを照査した。

##### 4.4 張力管理結果

以上に述べた張力管理を実施することにより、張力調整後での張力誤差は、全ての斜材に対して±5%以内に収まった（図-7）。張力調整量は、主桁の計画高さの改善を目的として2回行った。

表-6 張力測定法の使い分け

測定方法	荷重計	強制振動法
①緊張時斜材緊張	◎	○
②既設斜材緊張	×	◎
③張力調整時	○	◎

◎:主に実施,○:補助的に実施,×:実施せず

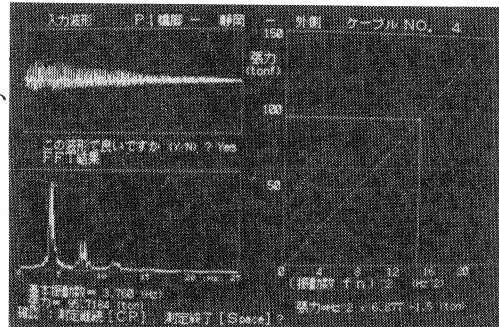


図-6 キャリブレーションカーブと張力測定状況

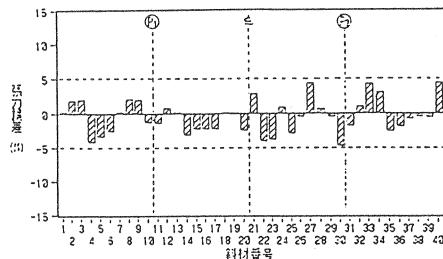


図-7 張力誤差（張力調整終了時）

## 5.まとめ

本橋の施工管理から得られた成果を以下に示す。

- 1) 上げ越し管理におけるを誤差問題が、コンクリート弾性係数、コンクリート重量、作業車重量の3つのパラメータとすることで、実用レベル(本橋の施工管理目標値)で十分に把握できた。要点は影響度の大きいコンクリートの弾性係数を、早期に把握することであった。
- 2) 温度補正に関する手法が、年格差を考慮した長期的な温度補正、日格差を考慮した短期的な温度補正、さらに補正係数による補正により確立できた。
- 3) 上述1) 2) を受けて、パソコン内での骨組み解析により、設計諸定の更新、データの更新が行え、迅速に的確な修正量(型枠高さの調整、張力調整)の算定が可能となった。
- 4) 自動計測が可能な電子スタッフ、迅速なデータ転送が可能なパソコン通信の有効性が実証された。

今後の課題として、コンクリートの弾性係数を一定の係数で評価したが、ある程度の区間で材令差を考慮した係数の設定がより高精度となると考えられる。また、カンチレバー施工が長期に亘る場合、温度補正の補正係数も季節的な変動も考慮した補正係数を、設定する必要があると思われる。

以上、本橋の施工管理の中で、主桁の上げ越し管理、斜材の張力管理についての管理手法、管理結果を報告したが、細部に関して説明不足の点はご容赦願いたい。また、紙面の都合上、橋体応力度の計測管理、使用材料の品質管理の報告については割愛した。

## 6.おわりに

1991年春、厳しい工期を克服し、東名足柄橋は無事完成を迎えた。PC斜張橋の施工管理は従来難しいものとされ、複雑な理論付けを重要視するあまり、現実の施工精度と不整合を生じたり、逆に経験と勘のみに頼る場当たりの施工例などもあり、適当な管理手法が確立されていなかったと言える。本橋で採用した施工管理システムは、実測データに基づき、簡易かつ理論的な分析、予測手法を導入したもので、上記の課題にひとつの実用的な解答を与えたものである。本稿の趣旨が正しく理解されPC斜張橋の施工管理の向上に役立てば幸である。

おわりに、本橋施工管理はもとより広く御指導、御検討を頂いた「東名足柄橋施工検討委員会」(委員長:伊藤 学、前東京大学教授)の委員並びに幹事の方々に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 木村、太田、他:東名高速道路(改築)東名足柄橋(PC斜張橋)の施工、橋梁と基礎、pp.2~9、1990.9
- 2) 関、田中:PC斜張橋の戦略的施工管理システム、プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム、1990.10
- 3) 関、田中:PC斜張橋の高機能施工管理システム、土木学会第45回年次学術講演会、1990.9
- 4) F. SEKI, S. TANAKA: A Construction Control System for Cable-stayed Bridges, IABSE in Leningrad, 1991.9
- 5) F. SEKI, S. TANAKA: Development of High Performances Construction Control System for Prestressed Concrete Cable-Stayed Bridges, Innovation in Cable-stayed Bridge FUKUOKA, 1991.4
- 6) 角谷、太田、他:東名足柄橋(PC斜張橋)の設計、プレストレストコンクリート、vol.32 No.4、pp.13~pp.33、1990
- 7) 内藤、大河内、他:光ファイバーを用いた橋梁レベル自動計測システムの開発、土木学会第45回年次学術講演会1990.9
- 8) 関、木村、他:PC斜張橋東名足柄橋の上げ越し管理、土木学会第46回年次学術講演会、1991.9
- 9) 市橋、前原:現場のパソコンを用いたPC斜張橋シム調整量算定プログラムの開発、プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム、1990.10