

講座

PC 工事の施工管理について

(その 4. たわみ管理)

板井 栄次*
佐久間 隆夫**

1 はじめに

一般にコンクリートの桁は上方よりの荷重により下方へたわみ、温度の昇降により橋軸方向へ伸縮する。この点についてはプレストレストコンクリート(PC)桁についても同様であるが、PC桁の場合、プレストレスによる影響、プレストレス力を考慮したクリープによる影響も考えなければならず、変形計算はやや複雑となる。

PC桁における変形計算では、プレストレス導入時と設計荷重時(時間無限大時)の2つの荷重状態を考える必要がある。すなわちプレストレスを与えたとき、どの程度たわむ(反る)か、どの程度縮むか、また、橋梁完成後活荷重が作用したときの合成たわみ量・合成伸縮量等を把握しておき、所定の計画高になるよう管理しなければならない。

なお、これらの値は桁の上げ(下げ)越し量、伸縮継手の大きさや構造、支承の設計等に必要であるが、コンクリートの材料条件・施工条件などにより影響されやすい値であるので、物件毎に適切な判断が必要である。

2 単純桁のたわみ管理

一般的な橋梁形式の場合に発生するたわみの方向、および種類は次のようなものである。

[下方向へのたわみ]

- ① 主桁自重および横組荷重(前死荷重)
- ② 橋面荷重(後死荷重)
- ③ 活荷重

[上方向へのたわみ]

- ① プレストレス力
- ② クリープ

なお、たわみ計算では(+)を下方向、(-)を上方向として行っている。

(1) プレテンション桁

ベントアップ方式で製作された一部のT桁を除き、通常のプレテンション桁はPC鋼材を桁下側に直線配置しており(図-1, 2 参照)、これによる偏心モーメントにより桁は上反りとなる。

プレテンション桁を製作するための工場の製作台は一

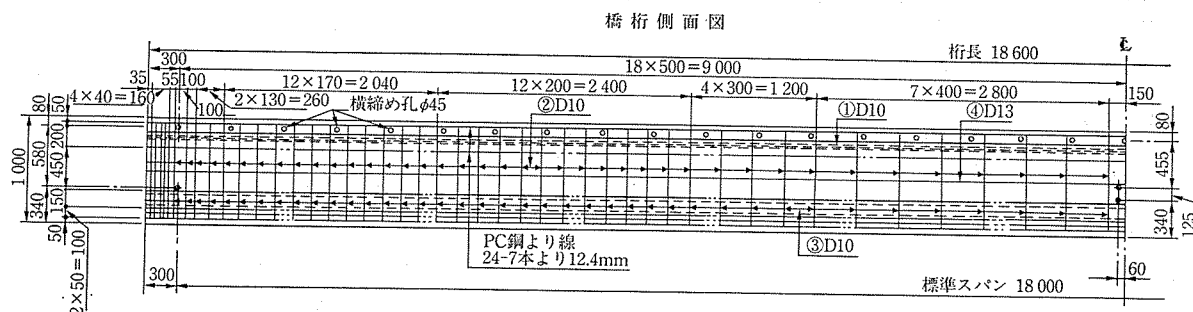


図-1 通常のPC鋼材配置例

* 住友建設(株)

** 富士ピー・エス・コンクリート(株)

橋桁側面図

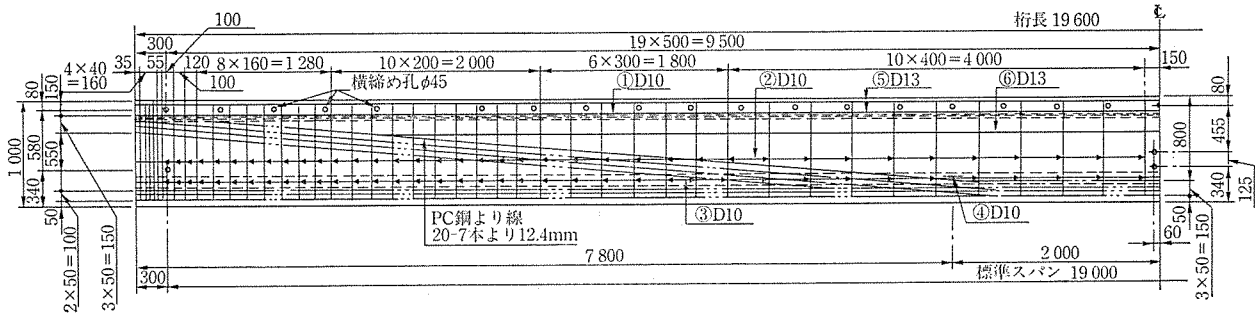


図-2 ベントアップ桁の PC 鋼材配置例

般に 50~100m のロングラインとなっており、ポストテンション桁の製作台のように下方に湾曲させることが困難である。これに対する対策としては、一般に支承部および橋面舗装を調整する方法がとられており、プレストレスによる反り上りの影響が小さい I 形桁、ホロー桁についてはこの方法がよく用いられている。しかし、反

りの影響が大きい T 形桁、特に支間の大きいものについては 図-3 に示すような余盛り方式により調整する場合もある。

次に各荷重別のたわみの計算式について説明する。

1) 各上載荷重によるたわみの計算式

主桁自重・横組荷重・橋面荷重および活荷重によるたわみ量 (δ) は、支間中央の曲げモーメント (M) が放物線形状となるような弾性荷重として式 (1) により求めている。

$$\delta = \frac{5 M \cdot l^2}{48 E \cdot I} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、

M : 曲げモーメント

l : 支間

E : 弾性係数

I : 断面 2 次モーメント

2) プレストレスによるたわみの計算式

前述したとおり、プレテンション桁の PC 鋼材の配置は桁の種類に関係なく通常支間一様にわたって直線配置となっている。このため、たわみの算出に当たっては等分布形状となるような弾性荷重として式 (2) により求めている。

$$\delta_i = \frac{M \cdot l^2}{8 E_i \cdot I_i} \dots\dots\dots(2)$$

なお、T 形プレテンション桁の一部に採用されているベントアップ方式による場合の算出式については、(社)プレストレストコンクリート建設業協会より発行されている「JIS による PC けた橋設計・製造便覧」を参照されたい。

3) クリープによるたわみ

クリープによるたわみ量は、コンクリートの材料条件、施工条件、自然条件などによりその値が変動するものであり、物件ごとの条件に合せ適切に対処する必要がある。

(2) ポストテンション桁

ポストテンション桁における PC 鋼材の配置は、設計

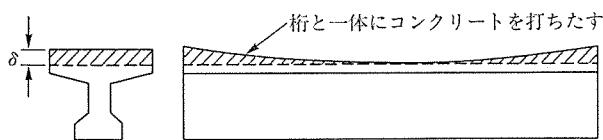


図-3 桁製造時の余盛り方法

表-1 T 形桁 (JIS A 5316) の場合の標準余盛り量

| 一 等 橋 | | | 二 等 橋 | | |
|------------|-------------|-------------------|------------|-------------|-------------------|
| 呼 び 名 | 支 間 l (m) | 反 り δ (cm) | 呼 び 名 | 支 間 l (m) | 反 り δ (cm) |
| BS 110- 60 | 10 | 2.0 | BS 210- 60 | 10 | 1.5 |
| BS 111- 70 | 11 | 2.0 | BS 211- 60 | 11 | 2.0 |
| BS 112- 70 | 12 | 2.5 | BS 212- 60 | 12 | 3.0 |
| BS 113- 80 | 13 | 2.5 | BS 213- 70 | 13 | 3.0 |
| BS 114- 80 | 14 | 2.5 | BS 214- 70 | 14 | 3.0 |
| BS 115- 90 | 15 | 2.5 | BS 215- 80 | 15 | 3.0 |
| BS 116- 90 | 16 | 3.0 | BS 216-80 | 16 | 3.0 |
| BS 117-100 | 17 | 3.0 | BS 217- 90 | 17 | 3.0 |
| BS 118-100 | 18 | 3.5 | BS 218- 90 | 18 | 3.0 |
| BD 119-100 | 19 | 5.5 | BS 219-100 | 19 | 3.0 |
| BD 120-100 | 20 | 6.0 | BS 220-100 | 20 | 3.0 |
| BD 121-100 | 21 | 7.0 | BD 221-100 | 21 | 5.0 |

[注]

① 標準反りの調整量は桁製作後、架設まで 90 日間ごとに算出する。

② 余盛りによるコンクリート体積

$$V = B \delta L / 3$$

V : 余盛りによるコンクリート体積

δ : 反りの高さ (桁端)

L : 桁長

B : PC 桁の上幅 (≒0.71m)

③ 余盛りについて

(a) 橋台、橋脚の計画高は、反り量を考慮して決定することが必要である。

(b) 桁端部付近においては、余盛りのため床版厚さが厚くなり、横締め PC 鋼材の位置および鉄筋の形状の検討を要する。

④ 反りの範囲は非常に大きく、±30~50% は避け得られないので、各工場によってそれぞれ標準値を定めて余盛り量を決定することが大切である。

荷重により発生する曲げモーメントに近似した放物線状に行うのが一般的である。また、ポストテンション桁の場合は物件ごとに桁の製作台を造ることから、必要に応じて製作台を上げ(下げ)越し処置することによりたわみに対処することができるため、プレテンションのような、余盛りなどによる調整は必要としない。

1) 各上載荷重によるたわみの計算式

本項のたわみ計算は、プレテンション桁で記述したものと同様である。

2) プレストレスによるたわみの計算式

ポストテンション桁のPC鋼材は、前述したとおり、支間方向にほぼ放物線状に配置されているため、通常“1) 各上載荷重によるたわみの計算式”を使用して算出している。

3) クリープによるたわみ

本項については、プレテンション桁の項で述べたとおり各種要因により変動する値であり、特に現地において製作する関係上一層の注意が必要である。

3 連続桁のたわみ管理

単純桁のたわみ管理の項においては、架設工法としてプレキャスト桁架設を対象とし、たわみ管理の基本的概念について述べている。

連続桁の架設は、① 支保工施工、② 張出し架設工法、③ 大型移動支保工施工、④ 押出し工法などで行われている。架設工法により管理方法に違いがあるが、基本的には予め計算上の変形を的確に把握し、実橋での変形の挙動を計測し、計算値と実測値の誤差の要因を分析し、必要により計算値を補正することにある。

変形の計算は、単純桁の場合、式(1)に示す簡略式で計算されているが、連続桁では剛性、荷重状態を評価し、電算により一般的には計算されている。また、計算に際し、架設方法によっては構造形変化があり、その場合、構造形変化を追った形で計算を行っている。

ここでは、たわみ管理が最も繁雑であるとされる張出し架設工法による連続桁について、そのたわみ管理手法を以下に述べる。

(1) 張出し架設におけるたわみ管理

たわみ管理の流れを以下に示すと、

[step 1 上げ越し計算]

架設段階を追って変形を計算する。また、step 3での誤差の要因分析に必要な予備計算を行う。

[step 2 計測]

step 1での計算値により施工し、一般的にはレベルにより出来形を計測する。

[step 3 分析]

計算値と実測値との比較をし、その誤差の要因を分析するとともに、次ブロック施工への判定を行い、必要により上げ越し値を補正する。

以下、step に沿って述べる。

1) 上げ越し計算

上げ越し量を決定するうえで、次の計算を行う。

[桁本体の変形]

- ・変化する構造形を考慮した主桁自重による変形
- ・変化する構造形を考慮したプレストレスによる変形
- ・架設作業車の組立、移動据付け、解体による変形
- ・橋面荷重(地覆、高欄、舗装など)による変形
- ・塑性変形(クリープ、乾燥収縮による変形)
- ・その他(桁の温度差、活荷重による変形)

[支保工設備の変形]

- ・架設作業車の変形(フレームの変形、ボルト・ナットのおそび、型枠のおそび)
- ・支保工の変形(地盤の沈下、支保工材の縮み、型枠のおそび)

なお、支保工設備の変形は過去の実績を踏まえ、計算により算出する。

2) 計 測

一般的に行われている計測は、図-4に示すように、橋面上の高さ測定は柱頭部センターに仮ベンチを設置し、施工ブロックにポイントを設け、レベルにより測定する。橋脚の倒れは橋脚にポイントを設置し、トランシットで傾斜を測っている。

注意する事項を以下に示す。

- ・仮ベンチは定期的にチェックし、基礎の沈下・傾斜の状況を把握する。
- ・測量する時間帯は、日照による桁の温度差の影響が少ない早朝を選ぶ。
- ・測定データには、施工状態とともに天気・時間も記入しておく。
- ・予め上げ越し計画表を作成し、計算値と実測値の対比を即座にできるように準備しておく。

3) 分 析

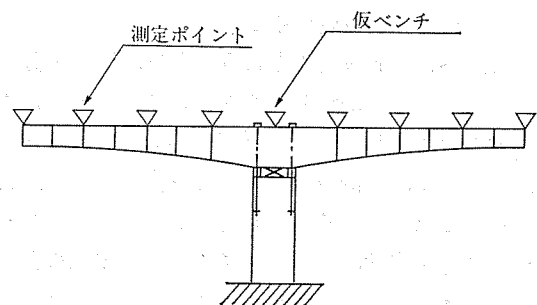


図-4 主桁測定ポイント

◇講 座◇

計算値と実測値との対比を行い、発生している誤差の要因を的確に把握し、補正の必要性を判断し、必要により次ブロックの上げ越し値へフィードバックすることが施工精度を高めるうえで重要である。

対比をするに際し、数値だけでなく視覚的にとらえるため、図-5 に示すように図化しておくことは有効である。

誤差の要因としては、下記の項目が挙げられる。

- ・主桁の重量（単位重量，出来形誤差に起因する）
- ・主桁の剛性（コンクリートの弾性係数，出来形誤差に起因する）
- ・プレストレスの誤差
- ・橋脚の剛性の誤差
- ・桁の温度差の補正誤差
- ・クリープ・乾燥収縮による変形の想定誤差
- ・基礎の沈下・傾斜
- ・積載荷重の想定誤差，等。

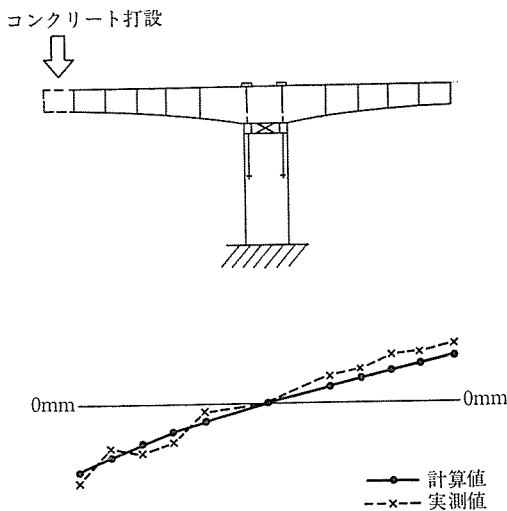


図-5 変位対比図

(2) 最近のたわみ管理手法

前項で述べたたわみ管理を行うことは、計測・分析が非常に複雑であり、かつリアルタイムに対応するために多大な労力を費やしている。近年、エレクトロニクス技術の進歩により、計測技術は大きく進歩しており、自動計測が可能となっている。自動計測システムとコンピューターをリンクさせ、リアルタイムに誤差要因の分析を行い、計測・分析の複雑さを軽減することが考えられている。

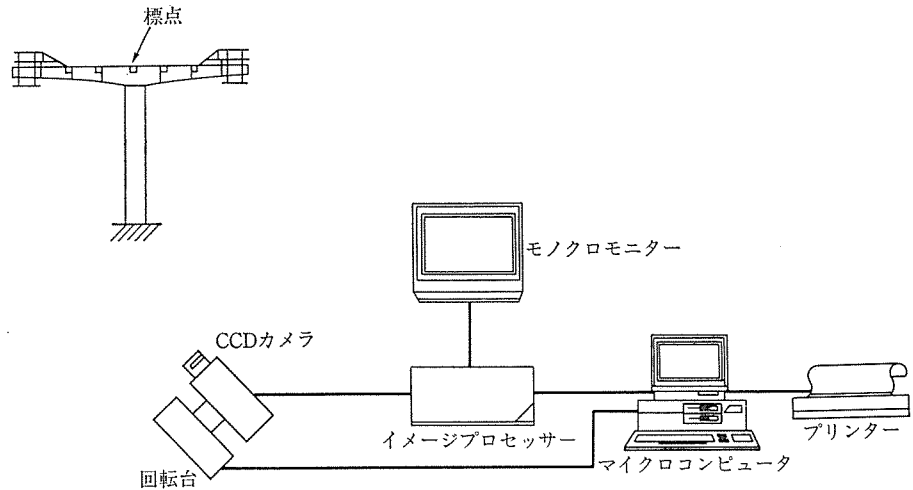


図-6 自動計測システム

自動計測システムは一般化していないため、ここでは自動計測システムの一例として、図-6 に示す光源あるいは標点を測定ポイントにおき、TVカメラによりとらえ、その画像を処理し、測定するシステムを示すに留める。

4 橋軸方向の伸縮

桁の伸縮量の計算は、製作桁長の決定、支承の設計、伸縮装置の設計等に必要なものであり、一般には（社）日本道路協会より発刊されている各種便覧に示された方法により行っている。

一般的な橋梁の場合に発生する伸縮の方向、および種類は次のようなものである。

[縮む方向へのもの]

- ① プレストレス導入による弾性短縮
- ② 乾燥収縮およびクリープ
- ③ 活荷重による桁のたわみ

[両方向へのもの]

- ① 温度変化
- ② 余裕量

(1) プレストレス導入による弾性短縮

プレストレス導入時における弾性短縮量 Δl_p は、式(3)により求まる。

$$\Delta l_p = - \int_0^l \frac{\sigma_c}{E_c} dx \doteq - C \cdot l \cdot \frac{\sigma_c}{E_c} \dots\dots\dots(3)$$

ここに、

l : 短縮を考えるスパン

E_c : プレストレス導入時のコンクリートのヤング係数

σ_c : コンクリートの圧縮応力度

断面中立軸の短縮 Δl_n を求める場合は、

$$\sigma_c = \frac{P_t}{A_c}$$

支承位置の短縮 Δl_u を求める場合は、

$$\sigma_c = \sigma_{ct} + \sigma_{do}$$

C: 係数で一般に近似値として

Δl_n を求める場合は、

$C \doteq 1$ (桁軸方向の σ_c の分布一定)

Δl_u を求める場合は、

$C \doteq 2/3$ (σ_c の分布が桁軸方向に放物線)

をとればよい。Cの仮定ができない場合は、式(3)の積分による。

式(3)の積分式を計算するには l を分割して、数値積分によればよい。一般の場合、1mにつき0.2~0.4mm程度の部材の短縮を生じる。

(2) 各要因による伸縮量

支承および伸縮装置を設計する場合に定める伸縮量は、式(4)により求まる。

$$\Delta l = \Delta l_t + \Delta l_s + \Delta l_c + \Delta l_r \dots\dots\dots(4)$$

ここに、

- Δl : 計算移動量 (cm)
- Δl_t : 温度変化による移動量 (cm)
- Δl_s : コンクリートの乾燥収縮による移動量 (cm)
- Δl_c : コンクリートのクリープによる移動量 (cm)
- Δl_r : 活荷重による桁のたわみによる移動量 (cm)

1) 温度変化による伸縮量

温度変化による伸縮量は、式(5)により求まる。

$$\Delta l_t = \Delta T \cdot \alpha \cdot l \dots\dots\dots(5)$$

ここに、

- ΔT : 温度変化 (表-2 参照) (度)
- α : 線膨張係数 (表-2 参照)
- l : 伸縮桁長 (cm)

表-2 移動量算定に用いる温度変化および線膨張係数

| 橋 種 | 温 度 変 化 | | 線膨張係数 |
|--------------|-------------|-------------|---------------------|
| | 普通の地方 | 寒冷な地方 | |
| PC 橋・RC 橋 | -5°C~+35°C | -15°C~+35°C | 10×10 ⁻⁶ |
| 鋼橋(上路橋) | -10°C~+40°C | -20°C~+40°C | 12×10 ⁻⁶ |
| *(下路橋および鋼床板) | -10°C~+50°C | -20°C~+40°C | 12×10 ⁻⁶ |

2) コンクリートの乾燥収縮およびクリープによる短縮量

コンクリートの乾燥収縮およびクリープによる短縮量は式(6)、(7)により求まる。

$$\Delta l_s = 20 \cdot \alpha \cdot l \cdot \beta \dots\dots\dots(6)$$

$$\Delta l_c = \frac{P_t}{E_c \cdot A_c} \cdot \phi \cdot l \cdot \beta \dots\dots\dots(7)$$

ここに、

- E_c : コンクリートの弾性係数 (kg/cm²)
- P_t : プレストレスを与えた直後の PC 鋼材に作用する引張力 (kg)
- A_c : コンクリート断面積 (cm²)
- ϕ : コンクリートのクリープ係数 (通常 $\phi=2$ とする)
- β : 乾燥収縮、クリープのてい減係数 (表-3 参照)
- 20: 乾燥収縮に相当する温度変化 (度)

表-3 乾燥収縮・クリープのてい減係数

| コンクリート打設後の材令 (月) | 0.25 | 0.5 | 1 | 3 | 6 | 12 | 24 |
|-----------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 乾燥収縮・クリープのてい減係数 (β) | 0.8 | 0.7 | 0.6 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | 0.1 |

3) 活荷重による桁のたわみによる短縮量

一般の桁橋の場合には、桁のたわみによる影響は桁端において回転による移動量についてのみ考慮すればよく、その算出式は式(8)により求まる。

$$\Delta l_r = \sum (h_i \cdot \theta_i) \dots\dots\dots(8)$$

ここに、

- θ_i : 支承中の桁の回転角。
コンクリート橋の場合 $\theta_i=1/300$
- h_i : 桁の中立軸から支承の回転中心までの距離。
通常桁高の 2/3

(3) 余 裕 量

支承および伸縮装置の移動量を算出する場合には(2)に示した値のほかに、余裕量を見込む必要がある。なお、その値については構造により差があるので、(社)日本道路協会より発刊されている各々の便覧を参照されたい。

5 おわりに

PC 橋のたわみ管理手法について、その概要を述べてきた。

出来形の精度を向上させることは、PC 橋の信頼性を得るうえで重要なことである。本稿がその一助になれば幸いであると考えている。

参 考 文 献

- 1) (社)日本道路協会: コンクリート道路橋施工便覧
: 道路橋支承便覧
: 道路橋伸縮装置便覧
- 2) (社)全日本建設技術協会: 建設省制定構造物標準設計の手引
- 3) (社)プレストレストコンクリート建設業協会: JIS による PC けた橋設計・製造便覧
- 4) (社)プレストレストコンクリート技術協会: 21 世紀に向けての PC 技術