

(41) PRC 桁のプレストレス導入度について

東日本旅客鉄道株式会社 東北工事事務所 ○齊藤 開  
 東日本旅客鉄道株式会社 東北工事事務所 大庭 光商

1. はじめに

近年、鉄道橋において、PRC 桁の採用が一般的になってきている。一般に PRC 桁は、構造物がおかれる環境条件、クリープ変形などの使用性およびコストなどを考慮して採用される。しかし PRC 桁を設計する場合、桁高のほかに、プレストレスの導入度、つまり PC 鋼材量と鉄筋量の鋼材の組合せには、比較的大きな自由度のあるのが現状である。

そこで本研究では、鉄道橋における PRC 単純箱形桁について、スパン、桁高、PC 鋼材量をパラメータにして試設計を行い、プレストレスの導入度と鋼材量の関係、桁高スパン比と鋼材量の関係、およびそれらとコストの関係などについて検討したので報告する。

2. 検討概要

2.1 設計

検討対象は、鉄道橋の単線 1 室箱形桁とした。設計条件と断面形状をそれぞれ表 1、図 1 に示す。設計は、鉄道 1, 2 級線を対象に限界状態設計法<sup>1)</sup>により行い、鋼材量などの算出にあたっては、曲げに関する検討のみとした。

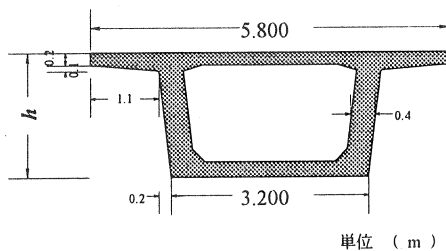


図 1 断面形状

表 1 設計条件

列車荷重	EA-17 (1.2 級線)	
軌道形式	弾性バラスト軌道	
コンクリート	クリープ係数	$\phi = 3.0$
	乾燥収縮度	$\epsilon'_{cs} = 400 \mu$
	圧縮強度	$f_{ck} = 400 \text{ kgf/cm}^2 \text{ ※1}$
	曲げ圧縮	$0.4 f_{ck}$
コンクリート	曲げ引張	$0.9 f_{ck}^{2/3} / 1.3 k_b$ $k_b = 0.5 / (h/2)^{1/3}$
	種別	12T15.2mm(SWPR7B)
PC 鋼材	引張強度	190 kgf/mm <sup>2</sup>
鉄筋		D32mm(SD345)

※1 終局で決定時のみ  $f_{ck} \leq 600 \text{ kgf/cm}^2$

なお、PRC 桁の部材断面の有効プレストレスは、鉄筋の影響を考慮して計算する必要がある。乾燥収縮およびクリープによって、PC 鋼材の緊張力は減少し、鉄筋には圧縮力が生じる。これらの値は次の二式を解くことにより求まる。

$$\epsilon_p \cdot E_p + n_p \cdot \phi (\sigma_{csp} + \sigma_{csp}) = \left[ 1 + n_p \cdot \frac{\sigma_{csp}}{\sigma_{pt}} \left( 1 + \frac{\phi}{2} \right) \right] \cdot \Delta \sigma_p (\phi + s) + n_p \cdot \frac{A_s}{A_p} \cdot \frac{\sigma_{cse}}{\sigma_{pt}} \cdot \left( 1 + \frac{\phi}{2} \right) \cdot \Delta \sigma_s (\phi + s)$$

$$\varepsilon_s \cdot E_s + n_s \cdot \varphi \cdot (\sigma_{cds} + \sigma_{cts}) = n_s \cdot \frac{\sigma_{ctc}}{\sigma_{pt}} \left( 1 + \frac{\varphi}{2} \right) \cdot \Delta\sigma_p(\varphi + s) + \left[ 1 + n_s \cdot \frac{A_s}{A_p} \cdot \frac{\sigma_{csp}}{\sigma_{pt}} \cdot \frac{1 + e_s^2 / r^2}{1 + e_p^2 / r^2} \cdot \left( 1 + \frac{\varphi}{2} \right) \right] \cdot \Delta\sigma_s(\varphi + s)$$

$\Delta\sigma_s(\varphi + s)$  : 乾燥収縮およびクリープにより鉄筋に生じる圧縮応力

$\Delta\sigma_p(\varphi + s)$  : 乾燥収縮およびクリープによる PC 鋼材の応力減少量

$\sigma_{pt}$  : PC 鋼材初期緊張応力度

$\sigma_{cdp}$  : 永久荷重時の PC 鋼材位置のコンクリート応力度

$\sigma_{cds}$  : 永久荷重時の鉄筋位置のコンクリート応力度

$\sigma_{csp}, \sigma_{cts}$  : 上記「永久荷重時」を「プレストレス導入直後」と読み替える

$e_p, e_s$  : PC 鋼材および鉄筋の偏心距離

$r$  : 断面二次半径

求めた  $\Delta\sigma_s(\varphi + s)$  , およびレラクセーションによる PC 鋼材応力減少量から, 有効プレストレスを求める. また疲労を検討するための応力変動は, 永久荷重作用時および設計荷重作用時の応力状態を計算するが, コンクリートに引張応力が生じる場合にはひびわれを考慮した計算を行う. 計算は, 圧縮側コンクリートの圧縮力, プレストレス, 鉄筋と鋼材の引張力, 設計外力の五つの力がつり合うものとして, 水平力およびモーメントのつり合いから求めた次式により中立軸  $x$  を算定する.

$$\frac{M + N(d_p - d_s)}{P_0 - N} = \frac{I_{cx} - I_{ax}}{Q_{cx} - Q_{ax}} + (d_p - x)$$

ここで  $P_0$  は PC 鋼材位置のコンクリート応力度が 0 になるときの PC 鋼材緊張力で, その時の鋼材応力は,

$$\sigma_{p0} = \sigma_{pd} + n_p \cdot \sigma_{cdp}$$

$\sigma_{pd}$  : 全永久荷重作用時鋼材応力度

$\sigma_{cdp}$  : 全永久荷重作用時の PC 鋼材位置のコンクリート応力度 (圧縮を+とする)

で示される.

## 2.2 検討内容

本検討では, スパン, 桁高, PC 鋼材量を変数とし, その場合の必要鉄筋量を算出し, 各種比較を行った. 表 2 に検討を行ったスパンと桁高の組合せを示す.

表 2 試設計一覧

スパン $L$ (m)	25.0		30.0			40.0			50.0	
桁高 $h$ (m)	1.50	1.70	1.50	1.75	2.00	2.00	2.35	2.65	2.50	2.90
$L/h$	16.7	14.7	20.0	17.1	15.0	20.0	17.0	15.1	20.0	17.2

検討は, 最小桁高  $h=1.5\text{m}$  とし, スパン桁高比を 15~20 程度に変化させることとした. 検討項目を以下に示す.

- ① PC 鋼材量と鉄筋量の組合せにおける自由度
- ② プレストレスの導入度と鋼材量(PC 鋼材+鉄筋)の関係
- ③ 鋼材の直接工事費とプレストレス導入度の関係
- ④ 桁製作費とスパン/桁高の関係

### 3. 検討結果

スパン  $L=25m, 30m, 40m$  において、鋼材量は、疲労限界状態(PC 鋼材の疲労)により決定された。また、 $L=50m$ で桁高 $h=2.5m$ の場合は、終局限界状態で決定され、設計基準強度 $f_{ck}=600kgf/cm^2$ のコンクリートが必要となった。

#### ① PC 鋼材量と鉄筋量の組合せにおける自由度

PRC 桁では、PC 鋼材量と鉄筋量の組合せは、幾通りかあり、最小 PC 鋼材量は、使用限界状態における永久荷重作用時のコンクリートの縁引張応力度を制限値内におさめることにより決定される。順次 PC 鋼材本数を増加させると、鉄筋量は減少し、最終的にはフルプレストレスの状態になる。今回の検討では、PC 鋼材と鉄筋の組合せに着目しており、最大の PC 鋼材量は最小鉄筋量となった時の本数とした。

図 2 に各スパンにおける桁高別の PC 鋼材本数と鉄筋量の関係を示す。同一のスパン・桁高でも PC 鋼材と鉄筋の組合せは概ね 2~4 通りあることがわかる。

#### ② プレストレスの導入度と鋼材量の関係

図 3 に、 $L/h=17$  におけるプレストレスの導入度( $M_o/M_s$ )と鋼材量(PC 鋼材+鉄筋)の関係を示す。ここでプレストレスの導入度は下式により求めた。

$$\lambda = \frac{M_o}{M_s}$$

$M_o$ : 有効プレストレス作用時の引張縁コンクリート強度が 0 となる曲げモーメント (デコンプレッションモーメント)

$M_s$ : 使用状態モーメント

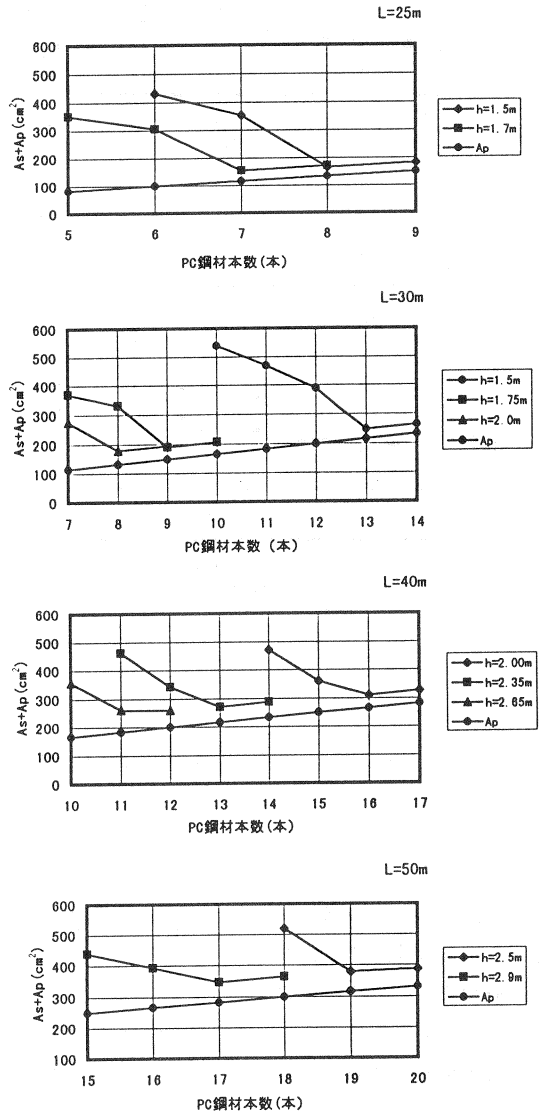


図 2 各スパンにおける PC 鋼材本数と鉄筋量の関係

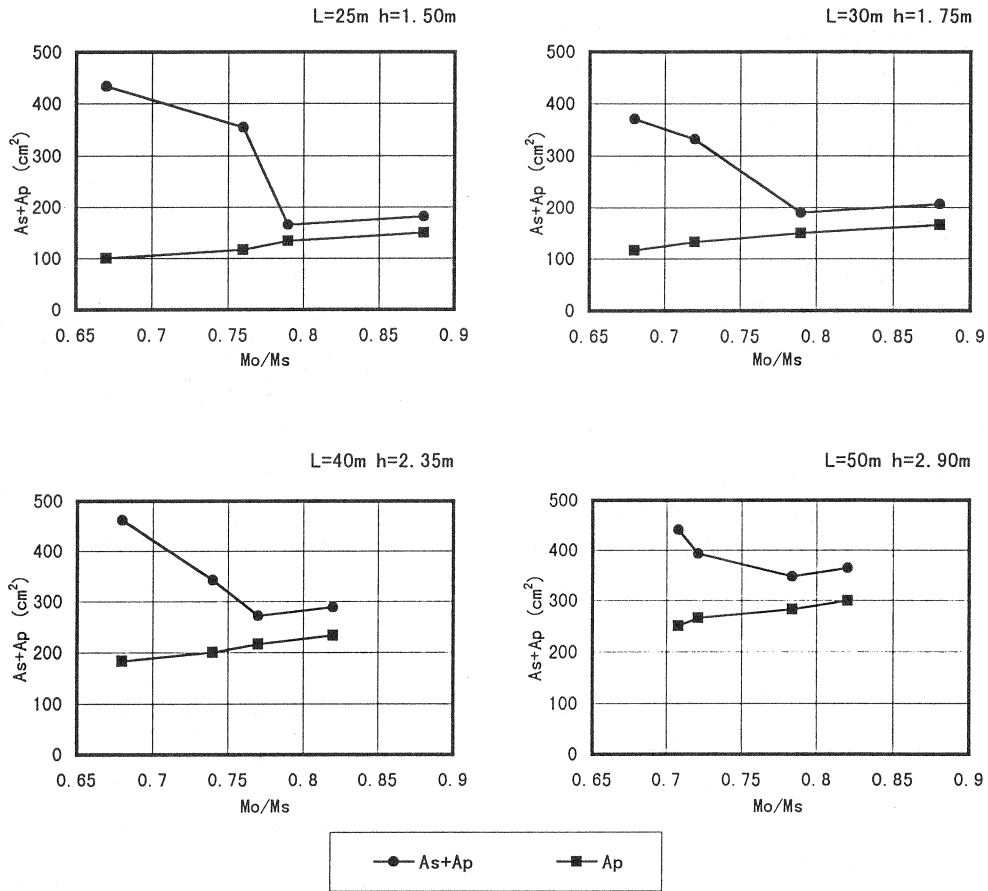


図 3 プレストレスの導入度と鋼材量の関係

各スパンと桁高に対する PC 鋼材本数とプレストレスの導入度を表 3 に示す。表中の Mo/Ms の最大値は、最小鉄筋量となった時の値を示している。最小鉄筋量となるとき Mo/Ms は、いずれも 0.8 程度となっている。また、永久荷重作用時のコンクリートの縁引張応力度の制限値から定まる最小の Mo/Ms は、概ね 0.7 程度となっている。

表 3 プレストレスの導入度

スパン (m)	桁高 (m)	PC 鋼材本数	Mo/Ms
25	1.50	6 ~ 8	0.67 ~ 0.79
	1.70	5 ~ 7	0.64 ~ 0.82
30	1.50	10 ~ 13	0.70 ~ 0.85
	1.75	7 ~ 9	0.68 ~ 0.79
	2.00	7 ~ 8	0.73 ~ 0.80
40	2.00	14 ~ 16	0.73 ~ 0.79
	2.35	11 ~ 13	0.68 ~ 0.77
	2.65	10 ~ 12	0.71 ~ 0.81
50	2.50	18 ~ 20	0.73 ~ 0.78
	2.90	15 ~ 17	0.70 ~ 0.78

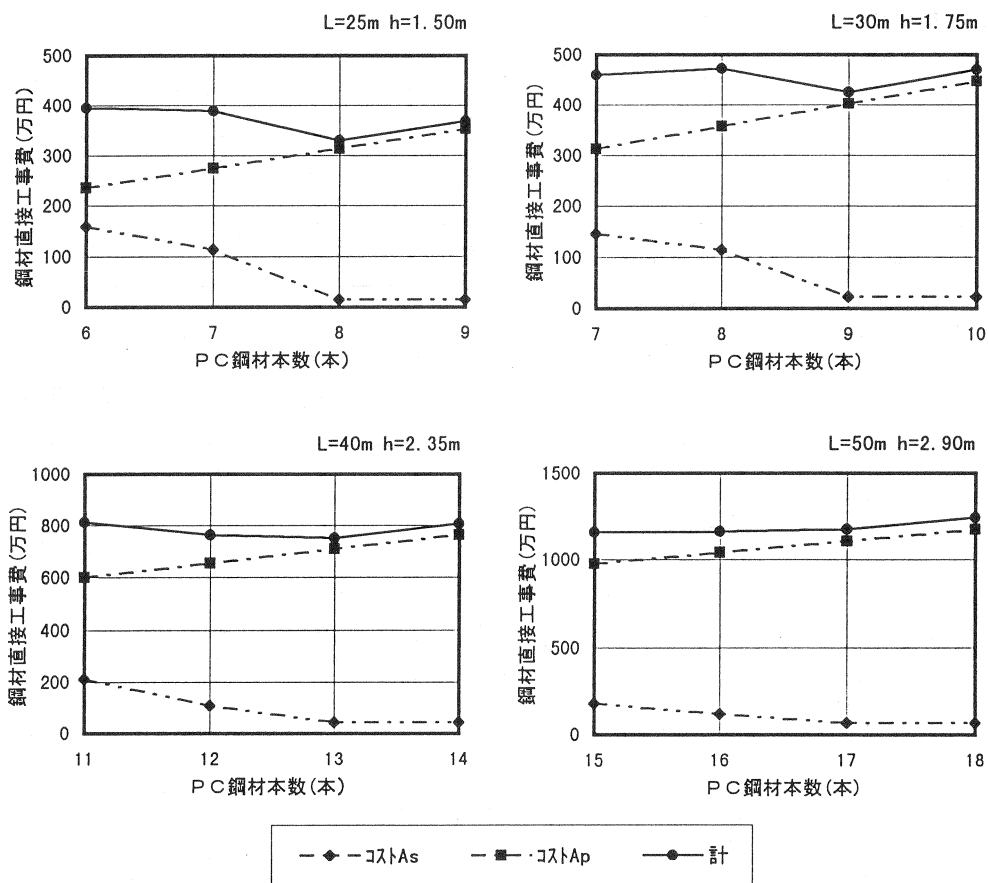


図 4 鋼材の直接工事費と PC 鋼材本数の関係

### ③ 鋼材の直接工事費とプレストレス導入度

鋼材の直接工事費と PC 鋼材本数との関係を図 4 示す。また、検討に用いた PC 鋼材および鉄筋の単価を表 4 に示す。図より、鋼材の直接工事費が最小となるのは、いずれも最小鉄筋量のときであり、PRC 桁のコスト上の優位性は小さくなっている。その要因としては、今回仮定した PC 鋼材と鉄筋のコストの差が小さいことによる。鋼材の単価は、その時々を経済情勢によって異なるが、仮に PRC 桁がコスト上の優位性を保つための PC 鋼材と鉄筋の単価比は、試算によると 6.7 程度以上必要となる。

表 4 各工種の単価

		単価
鉄筋		235 円/kg
コンクリート		25,000 円/m <sup>3</sup>
型枠		15,000 円/m <sup>2</sup>
PC 鋼材	L=25 m	1,150 円/kg
	L=30 m	1,080 円/kg
	L=40 m	1,000 円/kg
	L=50 m	960 円/kg

④ 桁製作費とスパン／桁高の関係

図5に鋼材の直接工事費とスパン／桁高の関係を示す。スパン／桁高が大きくなるに連れて(桁高が小さくなる), 当然ながら鋼材の直接工事費は高くなる。しかしながら, 図6に示すように桁製作費においては, スパン／桁高の変化による顕著な差は認められない。その理由は, 図7に示すように桁製作費の割合の中で, PC鋼材と鉄筋を合わせた鋼材費が30%程度であるのに対し, 型枠費が50%程度と大きいためである。

また, 桁製作費全体で見ると, スパンと桁高を一定とし, 鋼材量の組合せの違いのみによるコスト差は, 5%程度であった。

4. まとめ

PRC 単純箱形桁の試設計の結果, 以下の事項がわかった。

- ① 同一スパン・桁高の場合, PC鋼材と鉄筋の組合せは, 最小鉄筋量となるまでの比較で2~4通りとなる。
- ② 永久荷重時におけるコンクリートの縁引張応力度の制限値から定まるプレストレスの導入度 ( $M_o/M_s$ ) の最小値は, 0.7程度であった。また, 最小鉄筋量となる  $M_o/M_s$  は0.8程度となった。
- ③ PRC 桁が, コスト上の優位性を保つためには, PC鋼材と鉄筋の単価費で6.7程度以上必要である。
- ④ 桁製作費に占める型枠費が大きくなると, スパン／桁高の変化によるコスト差は小さくなる。

PRC 桁は, 経済性のほか, 桁高制限を受ける場合や, クリープ変形を小さくしたい場合などに用いることにより, その特性を発揮する。プレストレスの導入度については, 部材がおかれる環境条件や使用性をも考慮し, 適切に決定すれば良いと思われる。

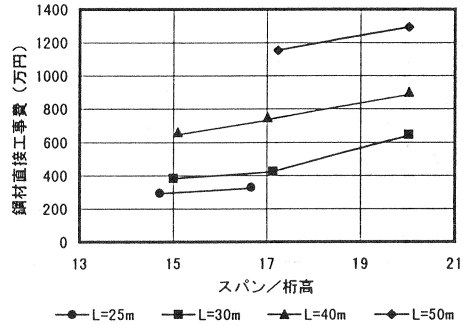


図5 鋼材の直接工事費とスパン／桁高の関係

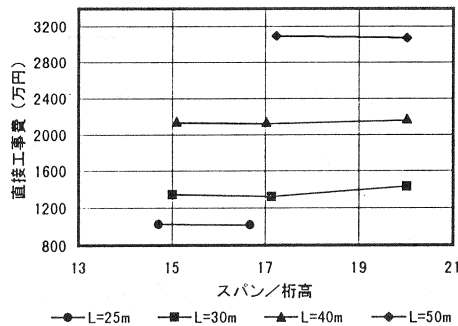


図6 桁製作費とスパン／桁高の関係

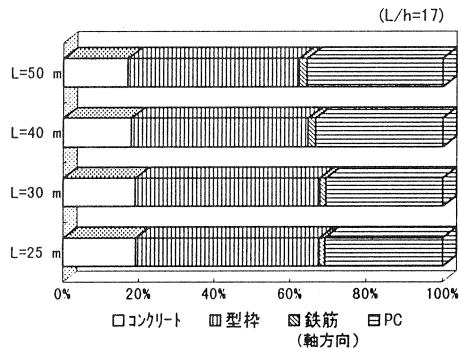


図7 桁製作費に占める各工種の割合

参考文献

1) 東日本旅客鉄道株式会社: 鉄道建造物設計標準解説 RC・PC設計資料 (限界状態設計法), 1995.04