

(12) PC 鋼材と鉄筋を併用した PRC 鉄道橋

谷内田 昌熙* 石橋 忠良*

小須田 紀元* 金森 真*○

目 次

- 1 はじめに
- 2 PRC 橋の設計法
 - (1) 概要
 - (2) 終局限界状態
 - (3) 疲労限界状態
 - (4) ひびわれの検討
 - (5) プレストレッシング中
- 3 PRC 橋設計例
 - (1) 設計条件
 - (2) 断面形状及び断面力
 - (3) 曲げ応力度
 - (4) 材料の疲労
 - (5) ひびわれ(曲げ及びせん断)
- 4 PRC 橋の実橋測定
- 5 PRC 橋の経済性
- 6 おわりに

表-1 PRC 橋一覧表

線名	構 造	桁長	桁高	連数	記 号
桜井線	単線2主桁橋	17 ^m	1.1 ^m	1	施工中(ウラボ)
東北 新幹線	複線2室箱橋	25 ^m	2.2 ^m	8	施工中(田端地区)
"	"	25 ^m	2.35 ^m	3	設計済(田端地区)
"	"	30 ^m	2.6 ^m	2	施工中(戸田地区)
通称線	複線2室箱橋	30 ^m	2.6 ^m	2	施工中(戸田地区)

2 PRC 橋の設計法

(1) 概要

現在行っている設計法の検討項目を示す。

- (a) 終局限界状態-----曲げ耐力, せん断耐力
- (b) 疲労限界状態-----材料の疲労
- (c) 使用限界状態-----ひびわれ, ひびわれ
- (d) プレストレッシング中-----応力上り限値

(2) 終局限界状態

終局限界状態の荷重の組合せは次式による。

$$1.7 \times (\text{死荷重} + \text{列車荷重} + \text{衝撃})$$

曲げ及びせん断に対する設計方法は従来の PC 橋と同じであるので省略する。

(3) 疲労限界状態

材料の疲労を検討する場合には実荷重を用いる。PC 鋼材, 鉄筋について応力変動の繰返しによる疲労の検討を行う。この場合複線橋でも単線載荷とし衝撃係数も $3/4$ とし平均に近い値とする。応力変動は全死荷重作用時と列車荷重作用時の差として求める。コンクリートに引張応力が生じる場合はその部分のコンクリートを無視して応力計算を行う。次に橋軸方向の繰返し回数について説明する。鉄道構造物では一列車の通過によりさまざまな応力変動が鋼材に生じる。これを独立波の繰

1 はじめに

従来のコンクリート橋は鉄筋コンクリート(RC), あるいはひびわれを許さないプレストレストコンクリート(PC)が用いられてきた。最近このRCとPCの中間的な構造であるPRC構造の研究が進められ, その経済的なメリットが明らかになってきた。国鉄でも昭和53年から本格的に研究課題として取り上げてきた。その結果ひびわれの設計方法等, 若干の研究項目はあるが, 安全性については問題がないと判断し徐々に実橋に適用していくこととした。昭和57年度に最初の実橋を設計・施工し引続き表-1に示す橋梁についてPRC橋とする予定である。

* 国鉄 構造物設計事務所

返しに換算するのにレジンベア法を用いている。この方法により一列車の応力波形をいくつかの独立した応力波形の回数に換算する。この各々の回数を、実荷重による最大応力波形の回数(等価繰返し回数 N_{eq} と称する)にマイナー則と鋼材のS-N線図を用いて換算する。マイナー則によると(実荷重独立波形)(実回数)(破断繰返し回数)

S_1	n_1	N_1
S_2	n_2	N_2
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
S_n	n_n	N_n

とすると $\sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = 1$ で破断する。

ここで、実荷重の繰返し回数もある一定の荷重の繰返し回数 N_f に換算する。この N_f を使って S-N 線図上で完全片振り時の疲労を考慮した許容応力度 σ_{ra} を求め、さらに静荷重時の応力と合せてグットマン線図より次式により疲労を考慮した鋼材の許容応力度 σ_{ra} を求める。

$$\sigma_{ra} = \sigma_{min} + (1 - \sigma_{min}/\sigma_B) \times \sigma_{rao}$$

ただし、 σ_{min} : 最小引張応力度

σ_B : 鋼材の引張強度

コンクリートの疲労強度は設計基準強度の $1/2$ 程度であるので設計荷重時の許容値を設計基準強度の $1/3$ 程度としている限り特に検討する必要はないとおもわれる。

次にアレストレスが導入されている断面で、引張側コンクリートにひびわれが生じている場合の鉄筋、PC 鋼材の増加応力度 σ の求め方について述べる。記号は図-1 を参照して水平力及びモーメントのつり合いから次の式が成り立つ。

$$C - T_p - T_s - P_0 = 0$$

$$M - C \cdot Z_c - T_p \cdot Z_p - T_s \cdot Z_s - P_0 \cdot Z_p = 0$$

途中の計算は省略するか最終的に次式により中立軸 X を求め各材料の増加応力度を求めることがで

きる。文献(1)

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

ただし、

Q_{cx}, I_{cx} : 中立軸に関する圧縮側コンクリートの面積モーメント, 二次モーメント

Q_{ax}, I_{ax} : 中立軸に関する鉄筋及び PC 鋼材の換算断面面積モーメント, 二次モーメント

d_p : 圧縮縁から PC 鋼材重心までの距離

P_0 : PC 鋼材位置のコンクリート応力が 0 となる時の PC 鋼材緊張力で次式による。

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

ただし、

σ_{pd} : 全死荷重時鋼材応力度

σ_{cdp} : 全死荷重作用時の PC 鋼材位置のコンクリート応力が圧縮を $+$ とし引張り $-$ とする。

n_p : PC 鋼材とコンクリートのヤング係数比

(4) ひびわれの検討

PRC 橋は従来の PC 橋に比べてコンクリートに大きな引張応力が生じるため、環境条件に応じたひびわれ中の制限が必要である。ひびわれ中の算定式についていくつかの提案がされているが、実橋での調査の主目的がこのひびわれの設計方法の確認であるので設計上の参考にとめている。ここで、いくつかの提案式を紹介する。

(a) 曲げひびわれ

(i) CP-110 文献(3)

コンクリートの全断面を有効とし弾性理論により仮想引張応力度を算出し、この値からひびわれ中を推定するもので表-2 が示されている。

(ii) CEB-FIP (1978年) 文献(1)

$$W_{max} = 1.7 \left\{ 2 \left(c + \frac{s}{10} \right) + k_1 \cdot k_2 \frac{f}{f_r} \right\} \frac{\sigma_s}{E_s} \left\{ 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \right\}$$

ただし、

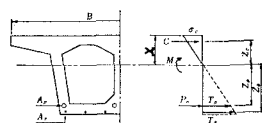


図-1 設計荷重時応力状態

表-2 Ⅲ種PC部材に対する仮想引張応力の制限値 (CP110)

	許容ひびわれ幅 (mm)	コンクリートの等級に対する制限値 (N/mm ²)		
		30	40	50 以上
(a) プレテンション	0.10	—	4.1	4.8
	0.20	—	5.0	5.8
(b) ボンド有りの ポストテンション	0.10	3.2	4.1	4.8
	0.20	3.8	5.0	5.8
(c) 断面引張縁に近い位置に鋼材を分散配置したアレテンション	0.10	—	5.3	6.3
	0.20	—	6.3	7.3

上表の制限値の部材高さに応じた修正係数 (CP110)

部材高さ (mm)	200 以下	400	600	800	1 000 以上
修正係数	1.10	1.0	0.90	0.80	0.70

C: かぶり

S: 鉄筋間隔

φ: 鉄筋直径

k₁: 異径鉄筋 0.4k₂: 図-2 によるρ_r: A_s / A_{cef}A_s: 断面積 A_{cef} 内に配置されている鉄筋断面積A_{cef}: 鉄筋かひわれ制御上有効に作用するコンクリート区分断面積σ_s: 鉄筋の引張応力度σ_{sr}: 全断面有効として引張縁コンクリートの応力度が平均コンクリート引張応力度となる曲げによるひびわれ断面として求めた鉄筋引張応力度β₁: 1 / (2.5 k₁)β₂: 荷重の降下レガ多数の場合 β₂ = 0.5

(b) セン断ひびわれ

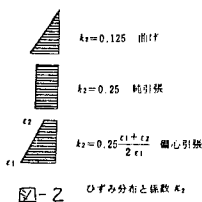
(i) CP-110 文獻(3)

CP-110 では、セン断力 S_c 次の S_{scw} よりいさければ良いとしている。

$$S_{scw} = 0.67 bh \sqrt{\sigma_1^2 + 0.8 \sigma_1 \cdot \sigma_{cp}}$$

ただし、

b: 断面の中 h: 断面の高さ

σ₁: 0.24 √f_{cu}f_{cu}: コンクリートの立上体圧縮強度 (N/mm²)σ_{cp}: 断面図心における軸方向プレストレス (—)

(ii) 斜引張応力度による方法

特にウェブ「セン断ひびわれ」が生じやすいので、ウェブに生じる斜引張応力度を次式で求める。

$$\sigma_x = -\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau^2}{4}}$$

ただし、

σ_x, σ_y: 軸方向及び鉛直方向プレストレス応力度
τ: 曲げせん断応力度設計荷重作用時にウェブ「セン断ひびわれ」を生じさせないためには σ_x がコンクリートの引張強度以下であれば良い。

FIP (1982年) によると (コンクリートの引張り強度) / (材料安全係数) の値として 図-3 を提案している。文獻(6)

(5) プレストレッシング中

プレストレッシング中及び直後の各材料の許容値については、従来のPC橋の設計と同じである。

3 PRC橋設計例

東北新幹線田端地区K 施工中のPRC橋の設計の一部を紹介する。

(1) 設計条件

スパン 28.6m (桁長 25m)

列車荷重 新幹線 N-18, P-19

衝撃係数 i = 0.214

コンクリート

設計基準強度 σ_{ck} = 300 kgf/cm²

クリープ係数 φ = 2.6

乾燥収縮率 ε = 20 × 10⁻⁵

PC鋼材 12T12.7 (SWPR7B)

引張強度 σ_{pu} = 190 kgf/mm²降伏点強度 σ_{py} = 160 kgf/mm²弛ラクセーション率 δ₀ = 3%

鉄筋 SD-35

降伏点応力度 σ_{sy} = 3500 kgf/cm²引張強度 σ_{su} = 5000 kgf/cm²

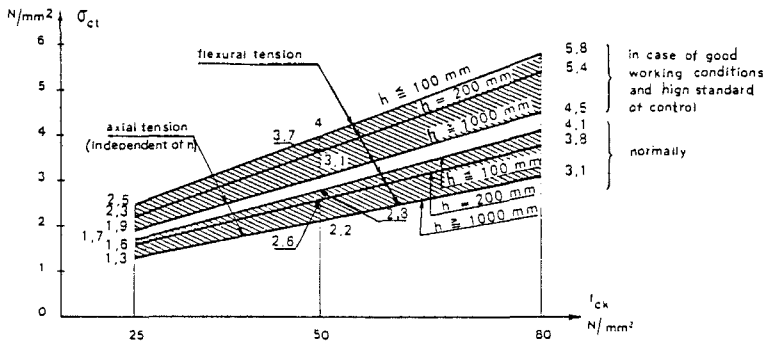


図-3 Admissible concrete stresses [N/mm²]

いる。断面にひびわれが生じるまでは従来の計算方法と変わらない。結果を表-4に示す。PC鋼材、鉄筋の応力度についてはひびわれを考慮して応力度を求めた。結果を表-5に示す。

表-5 PC鋼材・鉄筋応力度 (kgf/cm²)

	PC鋼材応力度	鉄筋引張応力度
全死荷重作用時	96,900	243
設計荷重作用時	112,300	1,806
応力変動幅	15,400	1,563

(2) 断面形状及び断面力

図-4に断面図を示し計算結果のPC鋼材配置及び鉄筋配置を示す。表-3に断面力を示す。

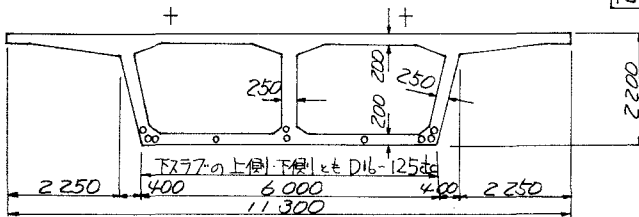


図-4 断面形状

導入プレストレスは、コンクリートのクリープ、乾燥収縮及び鋼材のリラクセーションにより減少する。リラクセーションはPRC桁の場合、初期導入力が小さいので通常の場合より小さくなる。

表-3 断面力

	せん断力(t)	曲げモーメント(tm)
自重	179.9	1,069.0
版上荷重	194.8	1,196.5
列車荷重	196.3	929.0
合計	571.0	3,194.5

(3) 曲げ応力度

PRC桁ではかなりの鉄筋が配置されているので鉄筋はコンクリートに換算して有効断面として

表-4 コンクリートの曲げ応力度 (kgf/cm²)

位置	自重	自重+プレストレス	版上荷重	鉄筋圧縮	有効プレストレス	死荷重合成
上縁	22.6	-8.7	25.0	0.5	-8.2	39.9
PC鋼材圆心	-32.6	62.2	-34.9	-3.4	58.8	-12.1
鉄筋圆心	-33.4	63.3	-35.9	-3.5	59.9	-12.9
下縁	-36.1	66.8	-38.8	-3.6	63.1	-15.4

(注) 引張応力をマイナスとする。

今回の設計例では見掛けのリラクセーション率 $\sigma = 0.028$ であった。クリープ及び乾燥収縮によるPC鋼材応力減少量と、鉄筋に生じる圧縮力はクリープ、乾燥収縮によるコンクリートのひずみが鋼材にそのまま生じるとして求める。この場合クリープひずみは初期導入力と最終プレストレス力の平均によって生じるものとする。途中計算を省略して結果のみを記す。

PC鋼材応力減少量 $\sigma = 4.8 \text{ kgf/mm}^2$

鉄筋圧縮応力 $\sigma = 61 \text{ kgf/cm}^2$

今回の有効緊張応力度 σ_{pe} は初期導入力を 95 kgf/mm^2 として

$$\sigma_{pe} = 95 - (95 \times 0.028) - 2.48 = 89.86 \text{ kgf/mm}^2$$

なので有効係数は 0.946 となる。ここで求めた鉄筋の圧縮力により桁には曲げが働くと考えられる。このためのコンクリート応力を表-4に、

「鉄筋圧縮」として示す。

(4) 材料の疲労

PC鋼材及び鉄筋には列車荷重による繰返し応力が生じるので疲労の検討を行う。ここでは橋軸方向について記すが横方向についても同様な検討が必要である。ここで使用する鉄筋、PC鋼より線のS-N線図を図-5、図-6に示す。

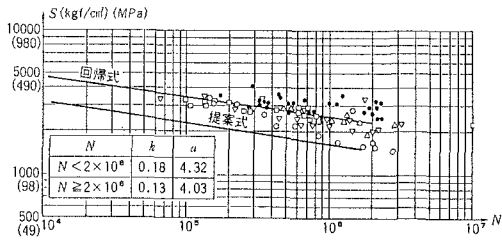


図-5 鉄筋SD-35のS-N線図

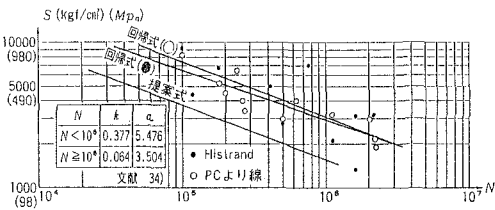


図-6 PC鋼より線のS-N線図

(条件)

設計耐用年数：100年、疲労設計列車荷重：「あおば」12両編成上下各130本（250%乗車39本，100%乗車91本の割合とする）鉄筋：SD-35，PC鋼材：12T12.7

計算はS-N線図を利用して行うが応生応力と断面力と列車荷重の関係により、各列車荷重をKS相当値に換算して計算する。

N=18 KS相当値 14.81 } いづれも衝撃を含む
あおば（250%乗車） 10.52 }
あおば（100%乗車） 9.52 }

等価繰返し回数 N_{eq} 1回

荷重負担比：0.57：2線以上を支持する構造物において、列車が全線に載荷された場合の検討断面の断面力に対する検討部材側のみに載荷された場

合の検討断面の断面力の比

(a) 鉄筋

便宜的に最も回数の多い「あおば（100%乗車）」に全通過列車を換算する。（以下図-7参照）

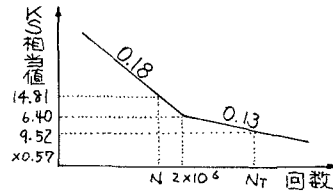


図-7

$N_T = 7,111,000$ 回

ここで 2×10^6 回に相当するKS相当値に換算すると、 $M_{200} = 9.52 \times 0.57 \times \left\{ 7,111,000 / 2 \times 10^6 \right\}^{0.13} = 6.40$

この M_{200} の点を基準にしてKS相当値14.81に相当する回数を求めると

$$N = 2 \times 10^6 \times (6.40 / 14.81)^{1/0.18} = 18,912 \text{ 回}$$

この値よりSD-35の完全片振り時の疲労を考慮した許容値 σ_{ra0} は次式で求められる。

$$\sigma_{ra0} = 10^{4.32} / 18,912^{0.18} = 3550 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_{min} = 243 \text{ kgf/cm}^2 \text{ なので}$$

$$\sigma_{ra} = 243 + (1 - 243 / 5000) \times 3550 = 3620 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\text{kgf/cm}^2$$

σ_{sa} を 2000 kgf/cm^2 に制限しているので問題ない。

(b) PC鋼材

PC鋼材もS-N線図の傾きが異なるだけで同様に求め

$$\sigma_{ra0} = 3872 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_{ra} = 9460 + (1 - 9460 / 19000) \times 3872 = 11400 \text{ kgf/cm}^2$$

設計荷重作用時に $0.6 \sigma_{pu} = 11400 \text{ kgf/cm}^2$ に制限しているので問題ない。

(5) ひびわれ

(a) 曲げひびわれ

(i) CP-110による検討

仮想引張応力度を実荷重について求める。実荷重は「あおば」とし100%車車で、衝撃係数は通常の値の3/4とし平均に近い値とする。

複線載荷仮想引張応力度 -34.7 kgf/cm^2
表-2によると、ひびわれ巾は 0.2 mm をこえたとおもわれる。

(ii) CEB-FIPによる検討

実荷重時の応力変動は $\delta_s = 1250 \text{ kgf/cm}^2$

$$W = 1.7 \left\{ 2 \times (38 + \frac{125}{10}) + 0.4 \times 0.236 \times \frac{16}{0.01515} \right\} \times \frac{1250}{21 \times 10^5} \times \left\{ 1 - 1 \times 0.5 \cdot \left(\frac{94.3}{1250} \right)^2 \right\} = 0.15 \text{ mm}$$

(b) セン断ひびわれ

(i) CP-110による検討

$$S_{cw} = 0.67 \times 750 \times 2200 \sqrt{31^2 + 0.8 \times 1.31 \times 1.3} \\ = 1.94 \times 10^6 \text{ N} \approx 194 \text{ t}$$

実荷重の複線載荷によるセン断力 $S = 178 \text{ t}$ なのでセン断ひびわれは生じない。

(ii) 斜引張応力度による検討

実荷重による斜引張応力度 $\sigma = 17.6 \text{ kgf/cm}^2$ であり、FIP (1982年)によるとコンクリートの許容引張応力度は次の値を与えている。(図-3)

普通のコンクリート 15 kgf/cm^2

良いコンクリート 22 kgf/cm^2

従って、比較的良いコンクリートであればセン断ひびわれは発生しない。

4 PRC桁の実橋測定 文献(5)

鉄道橋として最初のPRC桁である株井線ボケラB(奈良県)において各種測定を実施中であるのでその一部を紹介する。桁はスパン 16.2 m で列車荷重はKS-16である。断面図を図-8、PC鋼材、鉄筋配置を図-9に示す。コンクリート

の施工は昭和

57年12月で現在まだ使用開始していない。

プレストレス導入直後と

高らんを施工した現在の応力状態の計算

値を表-6に示す。また、

表-7に桁のたわみの実測

値と計算値を示す。計算値は実測値より大きく、これは桁が上向きにそり上るのを下側鉄筋がつっぱって(圧縮材として働き)いるためと考えられる。

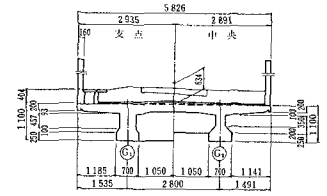


図-8 断面図

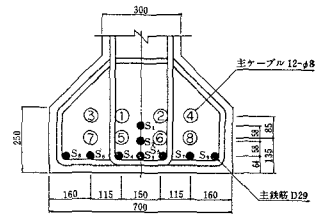


図-9 中央断面主鋼材配置

表-6 コンクリート応力 (kgf/cm^2)

位置	プレストレス導入直後	現在
上縁	- 0.3	11.9
PC鋼材図心	93.7	64.4
鉄筋図心	103.4	69.8
下縁	111.9	74.6

表-7 たわみ量 (mm)

	実測値	計算値
プレストレス	- 10.0	10.3
高欄	2.0	2.1
フリーゾ	- 2.5	- 6.0*

(注) *フリー係数を1.2とした。

次に鉄筋応力であるが現在のところ桁には圧縮力が全面に働いている。桁の下側鉄筋の応力測定によると主梁中央下側(下縁から 6.4 cm 上)の鉄筋の応力測定結果を図-10に示し、計算上の応力変化を、列車荷重が乗らないものとするとも図-11のようになる。

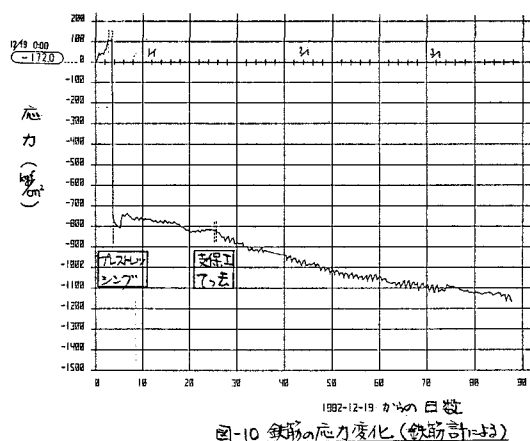


図-10 鉄筋の応力変化(鉄筋計-03)

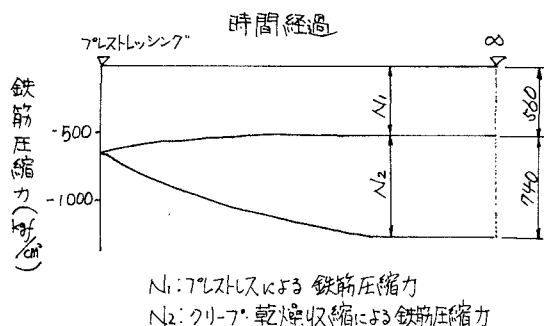


図-11 鉄筋圧縮力の計算値

5 PRC 橋の経済性

今回の設計と、フルプレストレスの場合の数量比較を表-8に示す。その他の数量はほぼ同じである。実際の工事費にすると8% (桁-連当り約200万円) の減となる。また、PRC 橋のプレストレス力は従来のPC 橋に比べて小さいためクリープ変形量(そり)が少くなり軌道を直結しているスラブ軌道等では保守管理上も好ましい。ただしスパンが短い場合には材料の疲勞により使用強度が定まる場合があり、この場合にはPRC 橋としない方が有利な事がある。

表-8 数量比較 (L=25m 当り)

材料	PC 鋼材	下スラブ 橋軸方向鉄筋
桁別		
PRC	12T12.7 10本	166 cm ²
フルプレスト	12T12.7 17本	46 cm ²
差	7本	120 cm ²

6 おわりに

PRC 橋は実施段階の初期にあつたため実橋での各種測定を実施し設計方法の確認をしていく予定である。特にひびわれ性状について妥当な設計方法を確認することを主たる着眼点としている。今回設計の桁には許容できないようなひびわれが生じた場合に、将来的にもケーブルを追加できるように配慮している。

最後に設計方法等について各文献に発表された研究者の皆様へ厚く御礼申し上げます。

(参考文献)

- 猪股俊司：Ⅲ種プレストレストコンクリート，コンクリートジャーナル第12巻9号(1974年)
：Ⅲ種プレストレストコンクリート部材設計法，プレストレストコンクリート第17巻3号(1975年)
：プレストレストコンクリート技術の現況，プレストレストコンクリート技術協会(1982年)
- 横道英雄：コンクリート橋，技報堂
- 岡田 清，藤井 学，小林和夫：プレストレストコンクリート構造学，国民科学社
- F. L. オンハルト (横道英雄監訳)：プレストレストコンクリート，鹿島出版会
- 小畑田紀元：Ⅲ種PC 鉄道橋実施設計例，プレストレストコンクリート第25巻1号(1983年)
- FIP RECOMMENDATIONS on PRACTICAL DESIGN of reinforced and prestressed concrete structures based on the CEB/FIP MODEL CODE (MC78)

Prestressed Reinforced Concrete Railway Bridges

M.YACHIDA *	T.ISHIBASHI *
N.KOSUDA *	M.KANAMORI *

INTRODUCTION

The prestressed reinforced concrete (PRC) girder is situated in the design between the reinforced concrete (RC) girder and the prestressed concrete (PC) girder. They are to be designed with a common procedure. In designing the PRC girder, care must be taken of the fatigue of materials and the concrete cracks. Japanese National Railways (JNR) has already constructed one PRC girder and is planning to construct 15 girders in the near future.

METHOD OF DESIGN FOR PRC GIRDERS

The bending moment and the shearing force at the ultimate limit state are calculated under the following loads;

1.7 (Dead load + Live load + Impact)

The fatigue of materials and the concrete cracks is checked under the following loads;

1.0 (Dead load + Live load + Impact)

Estimating that design life of a railway structure at 100 years, the admissible tensile stress of the wire for prestressing the concrete must be limited to less than $0.6 \sigma_{pu}$.

where, σ_{pu} : ultimate tensile strength of the wire for PC.

The widths of concrete cracks calculated according to various proposed formulas are different from each other. So we are planning to observe the width of cracks of an actual bridge.

MEASUREMENT OF ACTUAL BRIDGE

Now we are measuring the stress and the deflection of bridge completed in december, 1982, but not in use yet.

From the result of measurement, it was found that the deflection was less than the calculated one, and as for the compressive stresses of the reinforcing bars arranged at the bottom of the girders, the measured values were larger than the calculated ones. From these values, it can be assumed that the reinforcing bars arranged at the bottom of the girders resist an upward warping of the girders which is caused by the creep and shrinkage of concrete due to the prestressing force.

ECONOMIC EFFECT

According to the result of trial design of a PRC girder bridges of 25 meters in length and 2.2 meters in height, it was found to be cheaper than a full prestressed PC girder bridge by 8 percent.

* Structure Design Office , Japanese National Railways