

論文

[2020] PRC 桁のひびわれに関する調査研究

正会員 〇大庭光商 (J R 東日本 東北工事事務所)  
 米内昭夫 (J R 東日本 東北工事事務所)  
 正会員 竹内研一 (J R 東日本 東北工事事務所)  
 正会員 石橋忠良 (J R 東日本 東北工事事務所)

1. はじめに

鉄道橋において PRC 桁はすでに50連以上の施工実績がある。

RCやPRC部材の曲げひびわれ幅は、持続荷重下においてコンクリートの圧縮クリープ、乾燥収縮によって時間の経過とともに増加することが知られている。このため、鉄道橋においてこれら PRC 桁のひびわれ制御は、死荷重作用時のコンクリートの縁引張応力度や鉄筋の引張応力度を制限することにより行ってきた。<sup>1)</sup>

本研究は、RC桁のひびわれ制御を目的として、アウトサイドケーブルにより比較的少量のプレストレスを導入した PRC 桁と膨張コンクリートを用いた RC 桁について約3年間実橋調査を実施したので、これら実橋のひびわれ制御について検討を行ったものである。

なお、昨年は約2年間の実橋測定結果<sup>2)</sup>を報告した。

2. 調査橋梁

本調査橋梁の全体図と主桁断面を図-1に示す。本橋は、2連のアウトケーブルを用いた PRC 桁と、5連の膨張コンクリートを用いた RC 桁からなっており、桁長25.8m(スパン24.9m)、幅5.05mの単線一室箱形桁である。なお、PRC 桁はPCケーブル(SWPR7B 12T12.7)本数を各々、3本(B-1)、2本(B-5)使用し、120t/本のプレストレスを導入した。また、施工は支保工により場所打ち施工を行った。

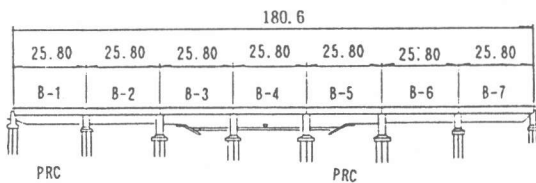
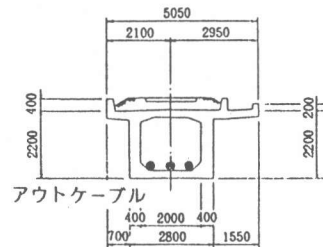


図-1 橋梁一般図



PRC 桁の設計は、曲げに対する検討以外は通常の RC 桁と同様である。

曲げ耐力の検討は、アウトケーブルに導入したプレストレスによる偏心軸力が作用する RC 構造として設計した。使用時の検討は、荷重による作用モーメント  $M$  からプレストレスの偏心軸力  $P$  によるモーメントを減じたモーメントを設計モーメント  $M_0$  として行った。この場合の設計曲げモーメント  $M_0$  は  $M_0 = M - P \cdot e$  となる(図-2)。

各橋桁の中央断面の応力度を表-1に示す。

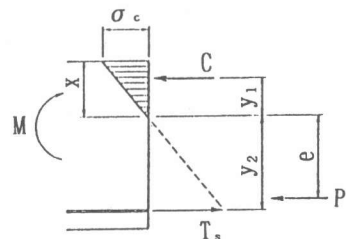


図-2 偏心軸力が作用する鉄筋コンクリート断面

### 3. 調査結果および考察

型枠脱型直後、膨張コンクリートを用いたRC桁はひびわれが見られたが、PRC桁はひびわれは見られなかった。このため、RC桁については供用開始初期にひびわれ幅の大きい(0.2mm以上)ものについては樹脂注入により補修を行っている。なお、ひびわれ調査は各桁のスパン中央付近における桁底面、および桁側面とし、調査範囲は橋軸方向3.0m(B-1 :B-2)、1.5m(B-5)である。

ひびわれ性状の調査結果を表-2に示す。また、ひびわれ幅の度数分布を図-3(a)~(d)に示す。

表-2 ひびわれの性状

測定	桁番号	RC(B-2)	PRC(B-5)	PRC(B-1)
		60年7月	60年12月	60年11月
	コンクリート打設月日	60年7月	60年12月	60年11月
	コンクリート下縁引張強度	$\sigma=46.4\text{kgf/cm}^2$	$\sigma=31.2\text{kgf/cm}^2$	$\sigma=23.7\text{kgf/cm}^2$
61年8月	平均ひびわれ幅 (mm)	0.41	0.61	0.99
	平均ひびわれ間隔 (m)			
	ひびわれ面積率 (%)			
	ひびわれ度数 (N)			
	0.04~0.19mm	214	143	79
	0.20~0.24	32	4	0
	0.25~0.29	4	0	0
	0.40~0.44	9	0	0
	0.60~0.64	4	0	0
	計	263	147	79
62年9月	平均ひびわれ幅 (mm)	0.13<0.15>	0.08	0.09
	平均ひびわれ間隔 (m)	0.31<0.28>	0.24	0.28
	ひびわれ面積率 (%)	0.42<0.54>	0.35	0.33
	ひびわれ度数 (N)			
	(中央値) 0.04mm	31	41	73
	(#) 0.06	11	14	13
	(#) 0.08	7	12	22
	(#) 0.10	48	56	47
	(#) 0.15	54	9	31
	(#) 0.20	28(10)	2	5
(#) 0.25	14	2	15	
(#) 0.30	2	0	0	
(#) 0.40	0	0(8)	0	
(#) 0.60	0(4)	0	0	
計	195(217)	136	206	
63年11月	平均ひびわれ幅 (mm)	0.13<0.15>	0.10	0.10
	平均ひびわれ間隔 (m)	0.29<0.26>	0.24	0.27
	ひびわれ面積率 (%)	0.45<0.58>	0.41	0.35
	ひびわれ度数 (N)			
	(中央値) 0.04mm	26	27	69
	(#) 0.06	11	8	12
	(#) 0.08	4	21	18
	(#) 0.10	60	50	53
	(#) 0.15	62	23	35
	(#) 0.20	29(10)	5	16
(#) 0.25	14	3	5	
(#) 0.30	2	0	0	
(#) 0.40	0(8)	0	0	
(#) 0.60	0(4)	0	0	
計	208(230)	137	208	

☆: ( ) の数字は61年8月に0.2mm以上のひびわれを補修した度数であり、< > の数字は補修したひびわれをも考慮したひびわれ性状である。

なお、供用開始初期の調査(S61.8)は、ひびわれの区分を大きく取りすぎている。このためひびわれの大部分がひびわれ幅0.04~0.19mmの範囲に区分され、平均ひびわれ幅、ひびわれ面積率が正しく評価できないことから表より除いた。

#### 3-1 ひびわれの経時変化

供用開始初期は、RC桁(B-2)、PRC桁(B-5)(B-1)の順にひびわれ度数が多かった。特に

表-1 応力度一覧

(単位: kgf/cm<sup>2</sup>)

桁番号	RC(B-2)	PRC(B-5)		PRC(B-1)		計算法		
		D32-60本		D32-54本(ケーブル2本)			D32-50本(ケーブル3本)	
		上線	下線	上線	下線		上線	下線
コンクリート	自重	27.3	31.2	25.4	15.8	24.5	8.0	全断面有効
	全死荷重	40.6	46.4	38.7	31.2	37.9	23.7	— " —
	設計荷重	70.0	80.0	68.1	65.3	67.5	58.2	全断面有効 引張無視
鉄筋	自重	—	824	—	642	—	546	引張無視
	全死荷重	—	1221	—	1089	—	1029	— " —
	設計荷重	—	2115	—	2077	—	2095	— " —

☆: 鉄筋応力度は最下段位置の引張応力度を示す。

ここに、

ひびわれ度数N: 桁底面および側面に対し橋軸方向(橋軸直角方向に約30cm間隔)に直線に区切り、それぞれの調査範囲におけるひびわれとこの直線の交差する総数  
ひびわれ幅f: 直線と交差するひびわれの幅

平均ひびわれ幅

$$= \sum(N \cdot f) / \sum N$$

平均ひびわれ間隔

$$= \sum L / \sum N$$

ひびわれ面積率

$$= \sum(N \cdot f) / \sum L$$

l: ひびわれ測定面における橋軸方向の直線の長さ(m)

n: 橋軸直角方向を約30cm間隔に区切った直線の本数

$\sum L$ : ひびわれ測定面における橋軸方向の直線の総長さ(m)

$$\sum L = l \cdot n$$

RC桁にはかなり大きいひびわれ幅のものがあった[図-3(a)]。

① ひびわれ幅

供用開始1～2年後の測定結果では、図-3における斜線部の度数が増加していることから、RC・PRC桁ともにひびわれ幅が大きくなっているのがわかる[図-3(b),(c),(d)]。

RC桁(B-2)はひびわれに注入し補修したにもかかわらず、0.2mm以上のひびわれ度数が増加している[図-3(b)]。

供用開始2年後(S.63.11)の調査でもPRC桁は、RC桁に比べると0.2mm以上の過大なひびわれは少なく、ひびわれの制御が比較的うまくいっているように思われる[図-3(c),(d)]。

② 平均ひびわれ間隔

当初、PRC桁はプレストレスの効果によりひびわれが少なく、平均ひびわれ間隔はかなり大きい。供用開始1年後には、RC桁・PRC桁ともほとんど同じ値となっている(表-2)。

③ ひびわれ面積率

ひびわれ面積率は材令とともにRC桁・PRC桁とも大きくなっている。

特に、PRC桁のひびわれ面積率の伸びがRC桁に比べて、供用開始1年後から供用開始2年後の調査の間に増加している。これより、PRC桁のひびわれの進行はRC桁に比べると、遅いようである。

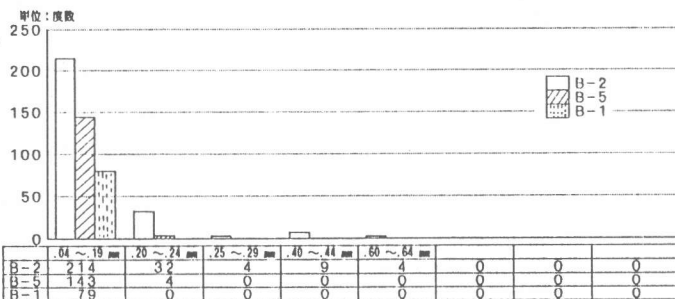


図-3(a) ひびわれ度数 (S.61.8時点の各桁のひびわれ度数)



図-3(b) ひびわれ度数 RC (B-2)

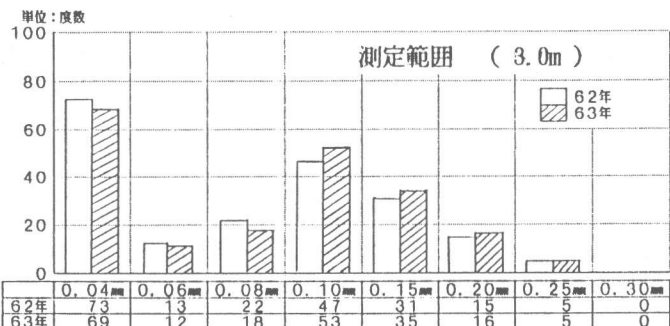


図-3(c) ひびわれ度数 PRC(B-1)

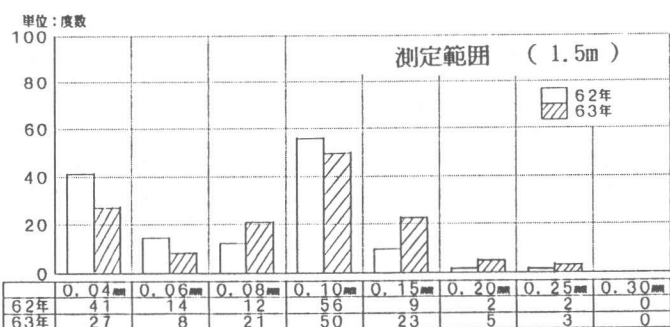


図-3(d) ひびわれ度数 PRC(B-5)

### 3-2 鉄筋の応力度とひびわれ発生時期の推定

RC桁を除いてひびわれ発生時期が明確でなかったため、桁下側の鉄筋の実測ひずみから鉄筋応力を求め、力のつり合い条件とコンクリート応力度の直線分布を仮定し、全断面有効としてコンクリートの縁引張応力度を計算することにより、ひびわれの発生時期を推定した。

なお、ひびわれ発生時のコンクリートの曲げ引張応力度は $\sigma_{ct} = 0.9f'ck^{2/3}$  ( $f'ck$ : 設計基準強度)として算出した。また、鉄筋ゲージの取付位置は桁中央・下スラブ中央で、最下段鉄筋の位置である。計算結果を図-4に示す。なお、PRC桁(B-1)については後荷重載荷時のデータがないことから除いている。

計算によると、RC桁は支保工撤去時(自重作用時)にコンクリートの縁引張応力度が、 $-44\text{kgf/cm}^2$ となっており、この時点でひびわれが発生した。(目視で確認)なお、この時の材令はコンクリート打設後30日である。

次に、PRC桁(B-5)はバラスト載荷時(死荷重作用時)に $-41\text{kgf/cm}^2$ の引張応力度となり、この時点でひびわれが発生したものと思われる。なお、この時の材令はコンクリート打設後107日であった。

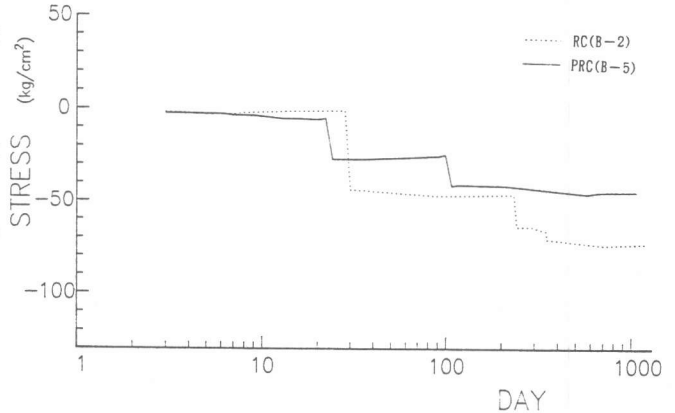


図-4 コンクリート縁引張応力度

### 3-3 鉄筋ひずみの検討

桁下側の鉄筋ひずみの実測データをクリープ・乾燥収縮の予測式を基にした逐次計算の結果との比較検討を行った。

なお、計算における乾燥収縮度 $\epsilon_s(t_n, t_1)$ は、次式<sup>3)</sup>を基にして求めた。

$$\epsilon_s(t_n, t_1) = \epsilon_{s0} \cdot (k_{s,t} - k_{s,t_1}) \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 $\epsilon_{s0}$  : 基本乾燥収縮度

$k_s$  : 有効材令および有効部材厚に関する係数

なお、基本乾燥収縮度 $\epsilon_{s0}$ の値として、ひびわれ発生前の各桁の実測鉄筋ひずみと適応するよう種々仮定して検討した結果 $\epsilon_{s0} = 400 \times 10^{-6}$ を採用した。

一方、クリープひずみについては、参考文献4)の方法により求めた単位応力当たりのコンクリートのクリープひずみ $Csp(t_n, t_1)$ により算定した。

これらの値を用いて材令毎の鉄筋位置のひずみの適合条件を(2)式により順次考慮することにより計算を行った。

$$\epsilon_s(t_n, t_1) + \sum [Csp(t_n, t_i) \cdot (\Delta N_i / A + \Delta M_i / Z)] = \sum \Delta \mu_{s,i} \quad \text{----- (2)}$$

ここに； $\Delta \mu_{s,i}$  : 材令 $t_i$ 日で鉄筋に付加されるひずみ(圧縮を正とする)

$t_i$  : 乾燥収縮開始材令

$\Delta N_i, \Delta M_i$  : 材令 $t_i$ 日で鉄筋に付加される軸方向力及び外力モーメント  
(荷重・プレストレス・鉄筋反力)

$A, Z$  : 断面積および桁下側鉄筋位置の断面係数

なお、計算値はひびわれ後も全断面有効として行ったものである。

以上により計算した桁下側鉄筋のひずみの解析結果を図-5に示す。

計算値は、その傾向が測定値と比較的あっている。特に、RC桁については、計算値が全断面有効と仮定しているにもかかわらず、ひびわれ発生後についても比較的似た傾向を示している。

これは、ひびわれ後も中立軸が余り上がっていないことによるものと考えられる。

また、ひびわれ発生後の鉄筋ひずみの測定値におけるその増加傾向はRC桁とPRC桁とでかなり異なりRC桁の方が増加の割合が大きい。

この違いは、桁下縁のひびわれの進行状況がRC桁の方がPRC桁より早いためと思われる。

一方、PRC桁はバラスト載荷後にひびわれが発生したと思われるが(図-5 B-5)、その後の鉄筋ひずみは余り増加していない。

RC桁に比べてコンクリートの縁引張応力度を低く抑えたPRC桁はひびわれの進行が遅いようである。

### 3-4 ひびわれ幅の増加分の検討

ひびわれ発生後から共用開始2年後までの実測による鉄筋ひずみの増分と乾燥収縮度の計算値<sup>3)</sup>により、ひびわれ幅の増分を算出した。

鉄筋ひずみの測定結果より、ひびわれ後の荷重等によるひずみの増分は材令約1200日までに於いてRC桁  $\epsilon_s = 198 \times 10^{-6}$ 、PRC桁は材令1060日で  $\epsilon_s = 50 \times 10^{-6}$ であった。

また、計算によるとひびわれ時点での乾燥収縮の進行度はRC桁10%、PRC桁24%程度となる。さらに供用開始2年後の乾燥収縮の進行度は、RC桁72%、PRC桁70%となっている。

したがって、ひびわれ発生後の乾燥収縮による増分は供用開始2年後(S. 63. 11)までに、RC桁  $\epsilon_s = 187 \times 10^{-6}$ 、PRC桁  $\epsilon_s = 139 \times 10^{-6}$ となる。

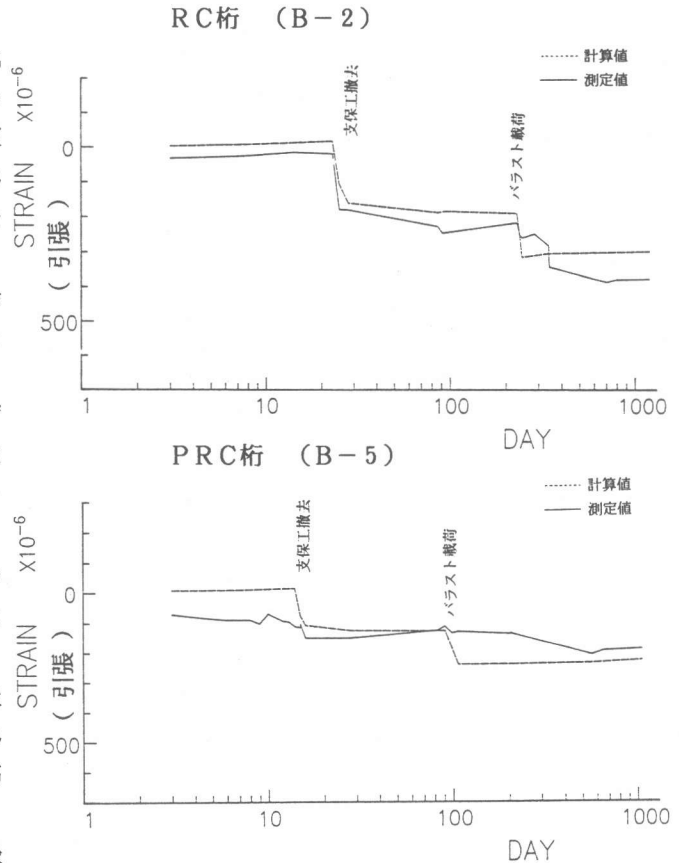


図-5 鉄筋ひずみの比較

表-3 ひびわれ幅の増加分

	RC(B-2)	PRC(B-5)
$\mu_s$	$198 \times 10^{-6}$	$50 \times 10^{-6}$
$\epsilon_s$	$187 \times 10^{-6}$	$139 \times 10^{-6}$
L(cm)	30	24
w(mm)	0.116	0.045

$\mu_s$  : 鉄筋ひずみの増分

$\epsilon_s$  : 乾燥収縮によるひずみの増分

L : 平均ひびわれ間隔

W : ひびわれ幅

ひびわれ発生後から供用開始2年後までのひびわれ幅の増分を鉄筋ひずみ $\mu$ と乾燥収縮ひずみ $\varepsilon$ による増分の和として計算した結果を表-3に示す。

計算上もPRC桁のひびわれ幅の増加割合の小さいことがわかる。これは、PRC桁の鉄筋応力度の増加が殆どなく、乾燥収縮量も小さいためである。

ひびわれが発生した桁は、その後、引張コンクリートの負担していた応力度が鉄筋に徐々に移行する。さらに、乾燥収縮の進行によりひびわれ幅が、拡大するものと想定される。

#### 4. まとめ

実橋における約3年間のひびわれ調査により以下のことがわかった。

- ① PRC桁、膨張コンクリートを用いたRC桁もひびわれ間隔に有意差はない。
- ② PRC桁、RC桁の鉄筋応力度は計算値よりもかなり小さい。
- ③ 鉄筋ひずみの測定値から、実橋ではひびわれ発生後も中立軸の上昇は遅い。特に、コンクリートの縁引張応力度が小さく、ひびわれ発生時期の遅いPRC桁は引張鉄筋のひずみの増加が遅い。
- ④ ひびわれ幅は鉄筋応力度に比例する分と、乾燥収縮分との和と考えられる。そのため、ひびわれ発生材令の遅い程乾燥収縮分が少なく、ひびわれ幅は小さくなると考えられる。

#### (参考文献)

- 1) PRC桁設計指針(案)：東日本旅客鉄道株式会社 S.62.2
- 2) 石橋忠良、佐藤収、米内昭夫：PRC桁のひびわれに関する研究、第10回コンクリート工学年次論文報告集 1988, PP. 45-50
- 3) H. リュッシュ、D. ユングビルド：コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮 鹿島出版
- 4) 阪田憲次、池田清：コンクリートのクリープの予測に関する研究、土木学会論文報告集 NO. 340、1983, PP. 185-191
- 5) 竹内研一、石橋忠良、米内昭夫：供試体によるPRC桁の応力度測定実験、土木学会第43回年次学術講演会 1988, PP. 560-561
- 6) 石橋忠良、浦野哲司：PRC桁の実橋測定とその考察、プレストレストコンクリート VOL. 29, NO. 2, 1987, PP. 18-26
- 7) 石橋忠良、金森真：鉄道橋におけるPRC桁、コンクリート工学、VOL. 25, NO. 7, 1987, PP. 96-102