

論文

[2026] PRC桁のひびわれ幅に関する一考察

正会員 石橋忠良 (JR東日本東北工事事務所)

正会員 舘石和雄 (JR東日本東北工事事務所)

正会員○津吉 毅 (JR東日本東北工事事務所)

1. はじめに

旧国鉄時代から、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。また、昭和62年には「PRCけた設計指針(案)」を作成するに至っており、その適用は今後さらに一般化するものと思われる。PRC桁は、その使用状態でひびわれ発生を許容する。現在、設計法が、許容応力度設計法から限界状態設計法に移行段階であるが、限界状態設計法において、使用限界状態は、ひびわれとたわみで制御される。従って、ひびわれに関する設計法は非常に重要であり、そのためにも曲げひびわれ幅の適切な算定法の確立が望まれるが、現在までのところ曲げひびわれ幅を適切に評価する手法は必ずしも確立しているとはいえない。そこで、RC桁に若干のプレストレスを導入した実在のPRC桁(アウトケーブル)でひびわれ調査を行い、その結果をもとに、より精度の高い最大ひびわれ幅算定手法を確立するために、ひびわれ幅におよぼす乾燥収縮の影響を中心に考察を行った。

2. 調査橋梁、高架橋

調査対象桁は、奥羽本線のA桁、東北新幹線のB1桁、B2桁、埼京線のC1桁、C2桁、東北新幹線のD桁の計6桁である。A桁、B2桁、C2桁は、桁自重載荷前(支保工撤去前)にプレストレスが導入されており、B1桁、C1桁は、桁自重載荷後(支保工撤去後)にプレストレスが導入されている。D桁は、移動式型枠により施工されたRC桁である。表-1に桁の諸元を、図-1に桁の断面図を示す。

表-1 桁の諸元

	鉄筋量 (cm ²)	プレストレス力 (t)	配 合		設計基準強度 (kg/cm ²)	かぶり (mm)	鉄筋間隔 (mm)	鉄筋径 (mm)	スパン (m)
			W(kg/m ³)	C(kg/m ³)					
A 桁	428.9	240	164	280	240	66	100	32	25.8
B 1 桁	905.7	1000	163	330	300	66	110	32	30.0
B 2 桁	905.7	800	163	330	300	46	100	32	30.0
C 1 桁	869.5	800	163	330	300	46	100	32	30.0
C 2 桁	869.5	600	163	330	300	46	100	32	30.0
D 桁	1331.3	—	145	314	270	46	100	38	24.08

3. 測定方法と結果

測定は、スパン中央付近の下スラブ底面およびウェブで行った。測定方法とデータの処理方法は、文献1)の手法と同一であるが、今回は下スラブ底面のデータのみをとりまとめた。D桁の測定結果は、過去のデータによった。表-2にひびわれと鉄筋応力度(鉄筋ひずみの実測値から計算)の測定結果を示す。

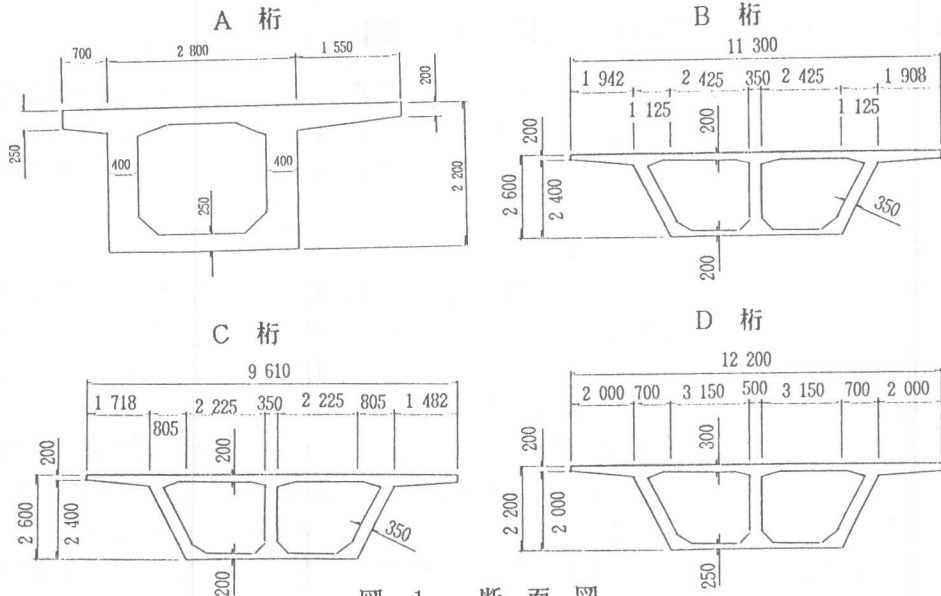


図-1 断面図

4. 考察

4-1. 測定結果の解析

(1). 土木学会の方法

一般に、曲げひびわれ幅は、ひびわれ間隔とその間の鉄筋とコンクリートのひずみ差の積で表される。土木学会標準示方書には最大曲げひびわれ幅算定式として、上記の考え方に基づき、また、ひずみ差の項にコンクリートの乾燥収縮の影響をとりこんだ下記の(1)式が示されている。

$$w = k_1 \{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \left(\frac{\sigma_s}{E_s} + \epsilon'_{cs} \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 k_1 : 定数 (丸鋼 $k_1 = 1.3$ 、異形鉄筋 $k_1 = 1.0$)

c : かぶり c_s : 鉄筋の中心間隔 ϕ : 鉄筋径

σ_s : 鉄筋応力の増加分 E_s : 鉄筋の弾性係数

ϵ'_{cs} : コンクリートの乾燥収縮の影響 (150×10^{-6})

(1)式を用いて、今回の調査対象桁の最大曲げひびわれ幅の試算を行った。鉄筋応力の増加分は、文献2)により、ひびわれ発生時点までに生じるコンクリートの乾燥収縮による鉄筋反力を考慮し、

表-2 測定結果

	A 桁	B 1桁	B 2桁	C 1桁	C 2桁	D 桁
最大ひびわれ幅(mm)	0.25	0.15	0.25	0.15	0.20	0.35
ひびわれ間隔*(mm)	202	183	313	218	500	276
平均ひびわれ幅(mm)	0.11	0.05	0.07	0.05	0.05	0.15
平均ひびわれ間隔(mm)	196	183	349	246	592	237
鉄筋応力度(kg/cm ²)	357	700	1048	466	716	—

*) 最大ひびわれ幅に近接するひびわれ間隔のうち最大のもの

表-3 土木学会標準示方書による最大曲げひびわれ幅wの計算値

	A 桁	B 1桁	B 2桁	C 1桁	C 2桁	D 桁
ひびわれ発生材令(日)	23	49	134	50	100	7
$4c + 0.7(c_s - \phi)$ (mm)	319	232	232	232	232	311
σ_s (kg/cm ²)	795	803	1079	824	1093	1322
w (mm)	0.17	0.12	0.15	0.13	0.16	0.26
実測最大ひびわれ幅(mm)	0.25	0.15	0.25	0.15	0.20	0.35

鉄筋位置のコンクリート応力度が「0」の時の鉄筋応力度を原点として、コンクリートの引張部分を無視して計算した。なお、ひびわれ発生材令は、支保工撤去時とした。結果を表-3に示す。いずれの桁においても計算値は、実測値よりもかなり小さめとなっている。この原因を追求するためには、(ア) ひびわれ間隔の項、(イ) 鉄筋ひずみの項、(ウ) コンクリートの乾燥収縮の影響の項を関連づけて検討を行う必要があるが、今回は、どの項に新たな検討を加えることが、最大ひびわれ幅の計算値と実測値の適合性の向上に結びつきやすいかを調べるために、別個に検討を行った。

(2) ひびわれ間隔として実測値を用いた場合

ひびわれ間隔として、 $4c + 0.7(c_s - \phi)$ のかわりに、最大ひびわれ幅発生点での実測ひびわれ間隔を用い、ひずみ差の項は、(1)と同様の計算値とした場合の計算結果を表-4に示す。ひびわれ間隔の実測値は、B2桁、C2桁の2桁については、 $4c + 0.7(c_s - \phi)$ を上回っており、ひびわれ間隔の実測値がかなり大きいC2桁では最大曲げひびわれ幅の計算値が実測値を上回った。しかしながら、ひびわれ間隔の実測値が計算値よりも大きいB2桁でも最大曲げひびわれ幅の計算値は実測値を下回り、ひびわれ間隔の実測値が計算値よりも小さい他の桁は、最大曲げひびわれ幅の計算値は、実測値をかなり下回っている。このように、ひびわれ間隔を実測値を用いても、表-3の計算結果よりも、よい結果が得られたとは言えない。

表-4 ひびわれ間隔として実測値を用いた最大曲げひびわれ幅 w_1 の計算値

	A 桁	B 1桁	B 2桁	C 1桁	C 2桁	D 桁
$4c+0.7(c_s - \phi)$ (mm)	319	232	232	232	232	311
実測ひびわれ間隔 (mm)	202	183	313	218	500	276
w_1 (mm)	0.11	0.10	0.21	0.12	0.34	0.22
w (学会式) (mm)	0.17	0.12	0.15	0.13	0.16	0.26
実測最大ひびわれ幅(mm)	0.25	0.15	0.25	0.15	0.20	0.35

表-5 鉄筋応力度として実測値を用いた場合の最大曲げひびわれ幅 w_2 の計算値

表-5 鉄筋応力度として実測値を用いた場合の最大曲げひびわれ幅 w_2 の計算値

	A 桁	B 1桁	B 2桁	C 1桁	C 2桁	D 桁
σ_s (計算値) (kg/cm ²)	795	803	1079	824	1093	1322
σ_s (実測値) (kg/cm ²)	357	700	1048	466	716	—
w_2 (mm)	0.10	0.11	0.15	0.09	0.10	—
w (学会式) (mm)	0.17	0.12	0.15	0.13	0.16	0.26
実測最大ひびわれ幅(mm)	0.25	0.15	0.25	0.15	0.20	0.35

表-6 乾燥収縮の影響を 300×10^{-6} とした場合の最大曲げひびわれ幅 w_3 の計算値

表-6 乾燥収縮の影響を 300×10^{-6} とした場合の最大曲げひびわれ幅 w_3 の計算値

	A 桁	B 1桁	B 2桁	C 1桁	C 2桁	D 桁
w_3 (mm)	0.22	0.16	0.19	0.16	0.19	0.29
w (学会式) (mm)	0.17	0.12	0.15	0.13	0.16	0.26
実測最大ひびわれ幅(mm)	0.25	0.15	0.25	0.15	0.20	0.35

(3) 鉄筋ひずみとして実測値を用いた場合

表-3で用いた鉄筋応力の計算値と、鉄筋応力度の実測値(鉄筋ひずみの実測値より計算)の比較を、表-5に示す。実測値が計算値よりもかなり小さい値となっている桁も多く、(1)式の計算に鉄筋応力度として実測値を用いると、かえって実橋の測定結果にそぐわない。

鉄筋応力度の実測値が計算値より小さな値となっているのは次のような原因が考えられる。

1. 計算値は、鉄筋位置のコンクリート応力度が「0」の状態からの鉄筋応力度の増加分であり、その原点はコンクリートの乾燥収縮の影響で圧縮側となっているのに対し、実測値は鉄筋の応力度が「0」の点が原点となっている。

2. 計算値は、コンクリートの引張を無視しているが、実際にはコンクリートもある程度は引張をもっていると考えられる。

(4) コンクリートの乾燥収縮の影響 ϵ'_{cs} の値を変えた場合

実橋における乾燥収縮度の値はかなり大きいという報告³⁾もあり、また、ひびわれ発生による新たな乾燥面の出現で、乾燥収縮ひずみも増加することが考えられるので、乾燥収縮の影響として 300×10^{-6} を与えて計算を行った。結果を表-6に示す。乾燥収縮の影響を大きくすることで、ひびわれ間隔や、鉄筋ひずみの正確な評価手法についての問題は残るが、最大曲げひびわれ幅の計算値は、実橋の測定結果により近いものとなった。

以上のような結果から、今回は、ひびわれ幅に影響を与える要因のうち、最も影響の大きいと思われる乾燥収縮の影響について検討を行うこととした。なお、 w 、 w_1 、 w_2 、 w_3 の計算結果と最大ひびわれ幅の実測値の比較を図-2に示す。

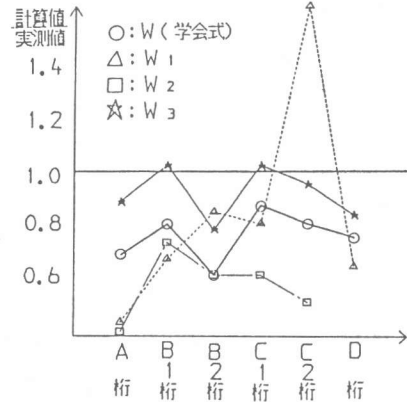


図-2 ひびわれ幅の計算値と実測値の比較

4-2. 乾燥収縮の影響 ϵ'_{cs} の評価法の提案

ひびわれの発生により新たな乾燥面が出現することにより、ひびわれ断面における乾燥収縮は、桁全体でみた場合の挙動と異なり、ひびわれ断面で細分化された小部材としての挙動となるものとする(図-3)。部材が小さくなると体積と表面積の比が小さくなり、基本乾燥収縮度が大きくなる。図-4において、A曲線を桁全体として進行する乾燥収縮ひずみの経時変化、B曲線をひびわれで分割された部材として進行する乾燥収縮ひずみの経時変化とし、ひびわれ発生後にはひびわれ面でのコンクリートの乾燥収縮がA曲線からB曲線へ近づくように進行するものとする。すなわち、図中に示す ϵ_{sh1} をひびわれ発生までに進行する乾燥収縮ひずみ、 ϵ_{sh2} をひびわれ発生後に進行する乾燥収縮ひずみであるとする。ひびわれ幅に影響を与える乾燥収縮度としては、ひびわれ発生材令以降に進行する乾燥収縮ひずみ ϵ_{sh2} を用いるものとする。実際には、コンクリートと鉄筋の付着が完全に切れていない区間があるものと考えられ、乾燥収縮によるひびわれ幅への影響度は、 ϵ_{sh2} よりも小さくなるものと考えられるが、ここではその影響を無視する。

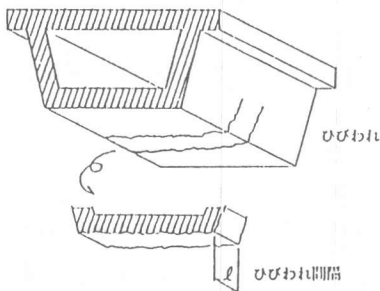


図-3 ひびわれにより分割された部材の考え方

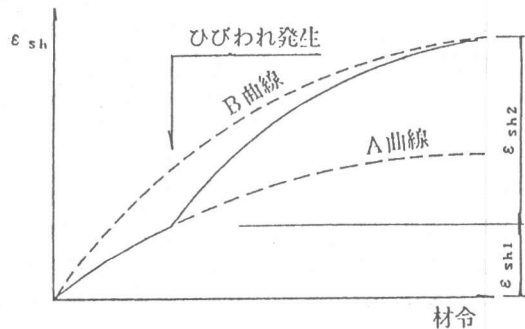


図-4 ひびわれ発生後の乾燥収縮度の経時変化モデル

この手法により、各桁についてひびわれ発生後に進行する乾燥収縮度を計算した。乾燥収縮度の計算は、阪田らの提案⁴⁾の(2)、(3)式を用いて行った。箱型断面の内空表面積は、0.5倍して外表面積に加えて求め、湿度は計測データがなかったため、60%と70%の2通りを考えた。また、ひびわれ発生後の小部材の橋軸方向の長さ l 、つまりひびわれ間隔として、

(1) 式中の $4c + 0.7(c_s - \phi)$ を用いた。

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = (1 - \exp(-0.108(t - t_0))) \cdot \varepsilon_{sh\infty} \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$\varepsilon_{sh\infty} = -60 + 78(1 - \exp(RH/100)) + 38 \log_e W - 5(\log_e(V/S))^2 + 4 \log_e t_0 \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$: 乾燥収縮予測値 ($\times 10^{-5}$) RH : 環境湿度 (%)

$\varepsilon_{sh\infty}$: 乾燥収縮最終値 ($\times 10^{-5}$) W : 単位水量 (kg/m^3)

t_0 : 乾燥開始材令 (日) $t_0 \geq 28$ のとき $t_0 = 28$

$t_0 \leq 7$ のとき $t_0 = 7$

t : 乾燥期間 (日)

乾燥収縮度の計算結果を表-7に示す。ひびわれ発生後に進行すると考えられる乾燥収縮ひずみは、 $300 \sim 500 \times 10^{-6}$ 程度となる。図-3からもわかるとおり、

表-7 乾燥収縮度の計算値

	A 桁		B 1 桁		B 2 桁		C 1 桁		C 2 桁		D 桁	
ひびわれ発生材令	23		49		134		50		100		(7)	
湿度 (%)	60	70	60	70	60	70	60	70	60	70	60	70
$\varepsilon_{sh1} (\times 10^{-6})$	140	77	203	116	280	160	219	131	277	166	0	0
$\varepsilon_{sh2} (\times 10^{-6})$	454	368	430	368	353	324	417	356	359	321	544	395

この値はひびわれ発生材令が早い程大きな値となり、したがって、ひびわれ発生が早期である程ひびわれ幅の計算値も大きくなる。D桁は、施工後、ひびわれ幅

表-8 新しい手法による最大ひびわれ幅の計算値

	A 桁		B 1 桁		B 2 桁		C 1 桁		C 2 桁		D 桁	
$4C + 0.7(C_s - \phi)$ (mm)	319		232		232		232		232		311	
湿度 (%)	60	70	60	70	60	70	60	70	60	70	60	70
$\varepsilon'_{cs} (\times 10^{-6})$	454	368	430	368	353	324	417	356	359	321	544	395
σ_s (kg/cm^2)	874	795	942	803	1275	1079	958	824	1253	1093	1322	1322
w (mm) : 計算値	0.28	0.24	0.20	0.17	0.22	0.19	0.20	0.17	0.22	0.20	0.36	0.32
w (mm) : 実測値	0.25		0.15		0.25		0.15		0.20		0.35	
計算値/実測値	1.12	0.96	1.33	1.13	0.88	0.76	1.33	1.13	1.10	1.00	1.03	0.91
w (mm) : 学会式	0.18	0.17	0.14	0.12	0.18	0.15	0.14	0.13	0.17	0.16	0.26	0.26

た桁であり、この原因は、ひびわれ発生が非常に早期であったため、ひびわれ発生後の乾燥収縮度の影響がかなり大きくなったことが一因であると考えられる。

4-3. 新しい算定法による乾燥収縮度を用いた最大ひびわれ幅の算定

表-8に最大ひびわれ幅の計算値を示す。計算は(1)式を用い、乾燥収縮の影響 ε'_{cs} として 150×10^{-6} のかわりに、表-7に示した ε_{sh2} の値を用いた。乾燥収縮の影響として表-7の ε_{sh2} を用いた計算結果及び、 150×10^{-6} に固定した場合の計算結果と最大ひびわれ幅の実測値の比較を図-5に示す。PRC桁の場合、B2桁を除き、湿度60%としたときの計算値は実測値を上回っており、湿度70%としたときの計算値は、実測値とよく一致している。

また、D桁のように施工後ひびわれが問題となったようなRC桁においても、計算値と実測値は比較的一致しており、ひびわれ幅算定式中の乾燥収縮の影響を今回のように考えることで、最大曲げひびわれ幅の精度は、現状よりも高いものになったといえる。

5. まとめ

- ・現在の土木学会標準示方書による最大曲げひびわれ幅の試算を行ったところ、

$\epsilon'_{cs} = 150 \times 10^{-6}$ と固定した場合には実橋による測定値よりも小さめの評価となった。

- ・実橋のひびわれを解析した結果、乾燥収縮の影響の値が、最大曲げひびわれ幅の計算値が実測値を下回る大きな原因となっていることが予想された。
- ・今回の検討対象桁の場合、ひびわれ幅に影響を及ぼすひびわれ発生後の乾燥収縮の値は、新しい計算手法によると、 $300 \sim 500 \times 10^{-6}$ 程度となった。
- ・曲げひびわれ幅におよぼす、乾燥収縮度として今回の算定法を用いることによりPRC桁だけでなく、D桁のように施工後ひびわれが問題となったようなRC桁においても、ひびわれ間隔や鉄筋応力度の評価法には問題が残るものの、最大曲げひびわれ幅の計算値が実橋での測定値と比較的一致することが分かった。
- ・ひびわれ発生材令を考慮し、かつ、ひびわれ発生後は、ひびわれにより分割された小部材としての乾燥収縮度を考慮することによりひびわれを幅を算定することは、ほぼ妥当であると思われる。

今回は、箱桁のみを検討したが、今後、I桁、T桁においてもひびわれの調査、検討を行う予定である。

〔参考文献〕

- 1) 大庭光商・米内昭夫・竹内研一・石橋忠良；PRC桁のひびわれに関する調査研究、第11回コンクリート工学年次論文報告集
- 2) 角田与史雄；断面の応力算定とひびわれの制御、コンクリート工学Vol.25, No.7, 1987
- 3) 石橋忠良・浦野哲司；PRC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, 3
- 4) 阪田憲次・綾野克紀；コンクリートの乾燥収縮ひずみ予測式の提案、セメントコンクリート論文集No.43, 1989
- 5) 鎗石和雄・大庭光商・竹内研一・津吉 毅；PRC桁の設計における乾燥収縮度の影響について、構造工学論文集Vol.36A, 1990, 3
- 6) PRCけた設計指針(案)、東日本旅客鉄道(株)、1987, 2

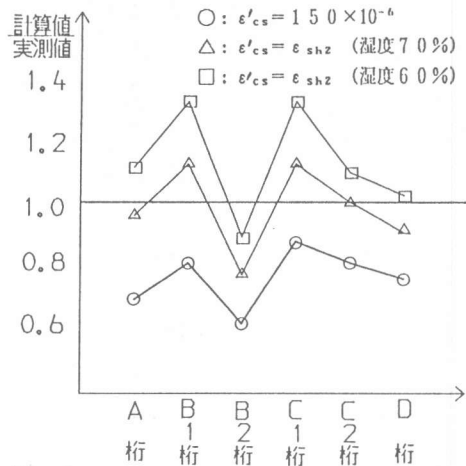


図-5 ひびわれ幅の計算値と実測値の比較