

[109] 実橋のひびわれ及び鉄橋の腐食状況調査

正会員 谷内田 昌 熙 (国鉄構造物設計事務所)
 正会員 石 橋 忠 良 (国鉄構造物設計事務所)
 正会員 長 田 晴 道 (国鉄構造物設計事務所)
 正会員 〇佐 藤 勉 (国鉄構造物設計事務所)

1. はじめに

コンクリート構造物の設計においては、一般に設計荷重時に対して許容応力度以下におさえることで破壊及び耐久性についての安全を確保している。しかし、最近では構造物の終局・使用・疲労限界についてそれぞれ検討を行なう限界状態設計法が採用されつつある。本報告は、使用限界状態の検討として、コンクリートのひびわれを鉄筋の腐食にもとなり耐久性の低下として関連づけ、ひびわれ制御のための設計を明らかにすることを目的とする。なお、本報告はコンクリート橋の実態調査結果に基づき、既成の研究との適応について分析したものである。また、ひびわれとしては曲げひびわれを扱ったものである。

2. 調査橋梁及び調査項目

コンクリート橋のひびわれ調査は、図-1に示すRC桁29橋梁、うちT形断面単純桁23橋・箱形断面単純桁4橋・ラーメン高架橋2橋(スパン $l=6\sim 275m$)について実施した。橋梁の経過年数は、図-1に記号で示したが、最も古い橋梁で経年58年である。また、環境条件としては一部工業地帯に存在しているが、腐食性環境ではないため一般環境として取扱いものとした。

調査項目¹⁾は、各橋梁ともひびわれ分布、ひびわれ長さ、ひびわれ幅、鉄筋のかぶり、鉄筋の腐食状況等である。(表-1)ひびわれ分布、長さ、幅の確認位置は、スパン中央及び $l/4$ 点の各1.5m区間における下縁及び腹部とした。なお、ひびわれ幅はクラックゲージにてひびわれ方向に対して直角に測った値である。鉄筋の腐食状況は、ひびわれ発生位置においてコンクリートを研り、目視により観察しその腐食程度を表-1に示すI~IVのランクに従って分類するものとした。

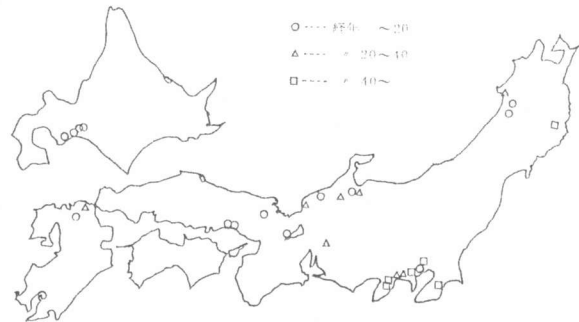


図-1 ひびわれ調査橋梁分布図

表-1 調査項目及び方法

調査項目	調査位置及び方法
ひびわれ分布 ひびわれ長さ ひびわれ幅	桁スパンの1/2, 1/4点における下縁及び腹部のひびわれ(巾0.05mm以上)を対象
コンクリート中性化深さ	桁下縁での最大ひびわれ部を対象 (フェノールフタレイン1希溶液を使用)
鉄筋のかぶり	中性化測定位置において、主鉄筋・スタッドのかぶり
鉄筋の腐食状況	中性化測定位置において、鉄筋の発錆状況を目視により観察し、その程度をI~IVに分類 I……発錆がない II……斑点又は部分的な赤錆がある III……全体に赤錆がある IV……黒錆又は浮き錆で断面欠損がある

3. 最大ひびわれ幅と平均ひびわれ幅

調査橋梁 29 橋のうち 22 橋について、スパン中央位置の桁下縁での最大ひびわれ幅と平均ひびわれ幅について、以下に示す方法で検討を行った。

平均ひびわれ幅は、橋軸直角方向に 20 cm 間隔に直線に区切り、この直線を横切るひびわれの度数： f_i 、ひびわれ幅： w_i として、平均ひびわれ幅 w_{mean} を次のように定義した。

$$w_{mean} = (w_1 + w_2 + \dots + w_i) / f_i$$

なお、ひびわれ測定間隔を 20 cm としたが、これ以下に細かく分割しても、曲げひびわれは一般に桁下縁全幅にわたって生じていること、また文献²⁾によりメッシュ間隔が 5~20 cm の範囲ではあまり変化がないことなどから間隔を決定した。

図-2 は、最大ひびわれ幅と平均ひびわれ幅について、総数 $n = 86$ についてプロットしたものである。この図より、最大ひびわれ幅と平均ひびわれ幅とは 1 次の相関関係がみられ、

$$\text{回帰式 } w_{max} = 1.91 w_{mean} - 0.03 \quad \text{変動係数 } 37\%$$

である。この結果より、最大ひびわれ幅は平均ひびわれ幅のほぼ 1.9 倍で代表することが可能と思われる。なお、CEB-FIP Model Code (1978) によると、平均ひびわれ幅に対して 1.7 倍した値を最大ひびわれ幅(特性値)としている。

4. ひびわれ幅の算定

ひびわれ幅の算定式は、すでに数多く発表されており、外国においては示方書に取り込まれているものもある。既応の算定式の中から、ここでは、角田式³⁾、限界状態設計法指針⁴⁾(土木学会)式、CEB-FIP³⁾式の 3 を取り上げ、今回の実橋によるひびわれ幅と比較検討を試みた。

(1) 角田式： $w_{max} = 3.72R(C + 0.18c) \{1/E_s(\sigma_{sd} - \sigma_{cm}/P_e) - \epsilon_{cp}\}$ ただし $R = (h - x)/(d - x)$

(2) 限界状態設計法指針式： $w_{max} = 1.2(\sigma_{sd} + K_1\sigma_{sl})/600 \times 10^3 \times \sqrt{C_\phi(C + \frac{\phi}{2})}$

(3) CEB-FIP (1978) 式： $w_{max} = 1.7 \{2(C + C_\phi/10) + 0.4 \times 0.125 \times \phi/\rho_f\} \times \sigma_{sd}/E_s \{1 - 0.5(\sigma_{ser}/\sigma_{sd})^2\}$

(1)~(3)式中の記号については参考文献によることとして省略するが、(1)~(3)式中の σ_{sd} は、死荷重時による鉄筋応力度(計算値)とした。また、角田式の $\sigma_{cm} = -0.21c1$ (頻りに繰り返す荷重を受ける部材)、 ϵ_{cp} は、乾燥収縮による影響として $\epsilon_{cp} = -3.00 \times 10^{-6}$ を計算に考慮した。限界状態設計法指針式において、 K_1 は死荷重と活荷重とのひびわれ幅と鉄筋の腐食に及ぼす影響の相違を考慮するための定数であり、指針では $K_1 = 0.5$ としているが、今回測定したひびわれ幅は死荷重時であるので $K_1 = 0$ として計算を行った。

以上の計算仮定に基づき、主鉄筋として異形鉄筋を使用した橋梁(総データ数 $n = 66$)についてのひびわれ幅の実測及び計算値を表-2に示す。表-2に示したデータは、鉄筋径 D 32、かぶり厚 4.8~12.4 cm、死荷重時の鉄筋応力 $700 \sim 1050 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲内におけるものである。鉄筋の許容応力度は、 $1600 \sim 1800 \text{ kgf/cm}^2$ である。また、表-2には限界状態設計法指針で示されている許容ひびわれ幅についても示した。

表-2より、実測最大ひびわれ幅(w_{max})と計算値($w_{(KAKUTA)}$ 、 $w_{(シソ)}$ 、 $w_{(CEB)}$)とは、かなりばらつきの大きい結果となった。(1)~(3)式の計算結果を比較すると、角田式、指針式、CEB式の順にひびわれ幅の計算値は低下している。これは、活荷重による影響と乾燥収縮による影響の評価の違いから生じているものと思われる。特に乾燥収縮として、角田式で $\epsilon_{cp} = -3.00 \times 10^{-6}$ を計算に考慮したことにより、角田式が他の 2 式に比較して大きなひびわれ幅となっている。なお、死荷重時応力レベルにおいて、乾燥収縮が全ひびわれ幅に占める割合としては、この角田式では 3.5~4.5% となっている。($\sigma_{sd} = 1050 \text{ kgf/cm}^2$ で 3.5%、 $\sigma_{sd} = 700 \text{ kgf/cm}^2$ で 4.5%)

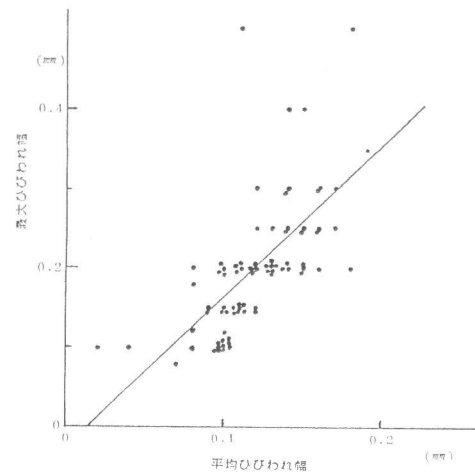


図-2 最大ひびわれ幅-平均ひびわれ幅

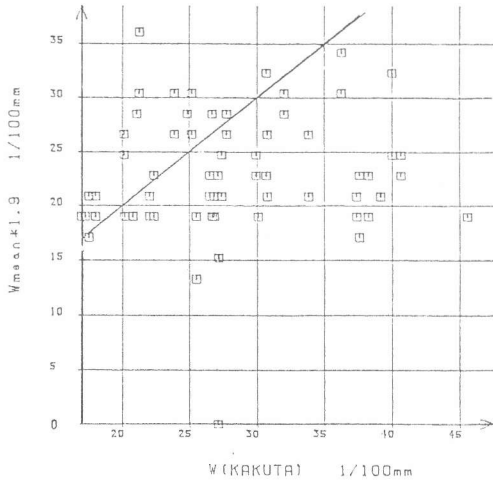


図-3

表-3は、乾燥収縮 ϵ_{ϕ} を -300×10^{-6} 、 -200×10^{-6} 、0とした場合の計算値に対して実測値が超過する確率であるが、 $\epsilon_{\phi} = -300 \times 10^{-6}$ では27.5%（最大ひびわれ幅に対して）、 $\epsilon_{\phi} = -200 \times 10^{-6}$ で40.0%、 $\epsilon_{\phi} = 0$ で66.5%である。

また、図-3は角田式による計算値（ $\epsilon_{\phi} = -300 \times 10^{-6}$ ）と平均ひびわれ幅 $w_{mean} \times 1.9$ との関係を示す。この図より、ひびわれ幅の計算値が0.35mmを超える場合に、特に実測値に対する適応が悪くなっていることが伺える。これは、かぶりによる影響であり、かぶりが大きい場合に計算値と実測値との適応が悪くなっている。したがって、かぶりの大きな場合のひびわれ幅の算定には、さらに検討する必要があると思われる。

5. 鉄筋の腐食と許容ひびわれ幅

鉄筋コンクリート構造物の許容ひびわれ幅は、鉄筋の腐食が耐用期間において、構造物としての機能が損なわれないように決める必要がある。

図-4は、建設後10~25年経過した橋梁22橋について、横軸に実測かぶり、縦軸にひびわれ幅を取り、目視により観察した鉄筋の腐食状況を4種類に分類してプロットしたものである。図中の●が錆により鉄筋が断面欠損を生じている場合であるが、かぶり厚1.5cm以下においては、ひびわれ幅に関係なくすべての鉄筋に断面欠損がみられる。また、同図において限界

表-2

Wmax (mm)	Wmean	Wlim	W(KAKUTA)	W(シシ)	W(CEB)	かぶり (cm)	死荷重比力 (kgf/cm ²)	Wmax/Wk	Wmean/Wk	Wlim/Wk
0.00	0.00	0.38	0.27	0.15	0.18	7.6	860	0.0	0.0	0.0
0.25	0.12	0.38	0.27	0.15	0.18	7.6	860	0.9	1.7	1.4
0.10	0.10	0.36	0.26	0.14	0.17	7.1	860	0.4	0.7	0.6
0.08	0.07	0.36	0.26	0.14	0.17	7.1	860	0.5	0.6	0.5
0.25	0.17	0.44	0.31	0.16	0.20	8.7	860	0.8	1.6	1.3
0.20	0.12	0.44	0.31	0.16	0.20	8.7	860	0.7	1.3	1.0
0.25	0.15	0.39	0.28	0.15	0.18	7.8	860	0.9	1.7	1.4
0.20	0.14	0.39	0.28	0.15	0.18	7.8	860	0.7	1.3	1.1
0.25	0.14	0.35	0.25	0.14	0.17	7.0	860	1.0	1.8	1.4
0.30	0.16	0.35	0.25	0.14	0.17	7.0	860	1.2	2.1	1.7
0.25	0.16	0.33	0.24	0.14	0.17	6.6	860	1.0	1.8	1.5
0.25	0.14	0.33	0.24	0.14	0.17	6.6	860	1.0	1.8	1.5
0.10	0.10	0.30	0.21	0.13	0.15	6.0	879	0.5	0.8	0.7
0.10	0.10	0.30	0.21	0.13	0.15	6.0	879	0.5	0.8	0.7
0.15	0.12	0.33	0.22	0.14	0.16	6.5	879	0.7	1.1	0.9
0.12	0.10	0.33	0.22	0.14	0.16	6.5	879	0.5	0.9	0.7
0.15	0.10	0.32	0.22	0.13	0.16	6.4	879	0.7	1.1	0.9
0.15	0.11	0.32	0.22	0.13	0.16	6.4	879	0.7	1.1	0.9
0.10	0.10	0.26	0.18	0.12	0.14	5.1	879	0.6	0.8	0.7
0.15	0.11	0.26	0.18	0.12	0.14	5.1	879	0.8	1.3	1.1
0.20	0.15	0.31	0.21	0.13	0.15	6.1	879	0.9	1.5	1.3
0.10	0.10	0.29	0.20	0.13	0.15	5.8	879	0.5	0.8	0.7
0.15	0.10	0.62	0.38	0.17	0.21	12.4	769	0.4	0.9	0.7
0.20	0.12	0.62	0.38	0.17	0.21	12.4	769	0.5	1.2	0.9
0.15	0.11	0.64	0.39	0.17	0.22	12.7	769	0.4	0.9	0.7
0.15	0.11	0.64	0.39	0.17	0.22	12.7	769	0.4	0.9	0.7
0.10	0.10	0.61	0.37	0.17	0.21	12.1	769	0.3	0.6	0.5
0.15	0.11	0.61	0.37	0.17	0.21	12.1	769	0.4	0.9	0.7
0.10	0.10	0.26	0.17	0.10	0.12	5.1	769	0.6	1.0	0.8
0.15	0.10	0.26	0.17	0.10	0.12	5.1	769	0.9	1.4	1.2
0.15	0.10	0.43	0.27	0.14	0.17	8.5	769	0.6	1.1	0.9
0.50	0.11	0.43	0.27	0.14	0.17	8.5	769	1.9	3.6	3.0
0.20	0.11	0.51	0.34	0.17	0.21	10.2	879	0.6	1.1	0.9
0.30	0.14	0.51	0.34	0.17	0.21	10.2	879	0.9	1.7	1.4
0.10	0.10	0.40	0.27	0.15	0.18	7.9	879	0.4	0.7	0.6
0.20	0.15	0.40	0.27	0.15	0.18	7.9	879	0.7	1.3	1.1
0.25	0.15	0.34	0.32	0.17	0.20	6.8	1050	0.8	1.5	1.2
0.25	0.16	0.34	0.32	0.17	0.20	6.8	1050	0.8	1.5	1.2
0.15	0.11	0.33	0.31	0.17	0.20	6.5	1050	0.5	0.9	0.8
0.40	0.14	0.33	0.31	0.17	0.20	6.5	1050	1.3	2.4	2.0
0.15	0.13	0.29	0.27	0.15	0.19	5.7	1050	0.5	1.0	0.8
0.15	0.11	0.29	0.27	0.15	0.19	5.7	1050	0.5	1.0	0.8
0.20	0.13	0.32	0.30	0.16	0.20	6.3	1050	0.7	1.2	1.0
0.30	0.12	0.32	0.30	0.16	0.20	6.3	1050	1.0	1.8	1.5
0.60	0.15	0.35	0.25	0.16	0.19	6.9	856	2.4	3.8	3.2
0.20	0.12	0.37	0.27	0.14	0.18	7.4	850	0.8	1.4	1.1
0.20	0.11	0.37	0.27	0.14	0.18	7.4	850	0.8	1.4	1.1
0.18	0.08	0.38	0.27	0.15	0.18	7.6	850	0.7	1.2	1.0
0.20	0.08	0.38	0.27	0.15	0.18	7.6	850	0.7	1.4	1.1
0.20	0.13	0.56	0.40	0.19	0.24	11.2	895	0.5	1.0	0.8
0.25	0.17	0.56	0.40	0.19	0.24	11.2	895	0.6	1.3	1.0
0.20	0.13	0.57	0.41	0.19	0.24	11.4	895	0.5	1.0	0.8
0.15	0.12	0.57	0.41	0.19	0.24	11.4	895	0.4	0.8	0.6
0.20	0.10	0.66	0.46	0.25	0.30	13.1	967	0.4	0.8	0.7
0.20	0.10	0.46	0.30	0.15	0.18	9.2	756	0.7	1.3	1.1
0.20	0.11	0.25	0.17	0.11	0.13	4.9	756	1.1	1.8	1.6
0.20	0.10	0.24	0.17	0.11	0.12	4.8	756	1.2	1.8	1.6
0.15	0.09	0.25	0.17	0.11	0.13	4.9	756	0.9	1.4	1.2
0.20	0.16	0.52	0.36	0.19	0.23	10.4	947	0.6	1.1	0.9
0.50	0.18	0.52	0.36	0.19	0.23	10.4	947	1.4	2.6	2.1
0.20	0.12	0.54	0.38	0.19	0.24	10.8	947	0.5	1.0	0.8
0.15	0.09	0.54	0.38	0.19	0.24	10.8	947	0.4	0.8	0.6
0.35	0.19	0.34	0.21	0.11	0.13	6.8	696	1.6	3.2	2.7
0.30	0.16	0.34	0.21	0.11	0.13	6.8	696	1.4	2.7	2.3
0.20	0.13	0.32	0.20	0.11	0.12	6.4	696	1.0	1.9	1.6
0.30	0.14	0.32	0.20	0.11	0.12	6.4	696	1.5	2.8	2.4

表-3

	$\epsilon_{\phi} = -300 \times 10^{-6}$	$\epsilon_{\phi} = -200 \times 10^{-6}$	$\epsilon_{\phi} = 0$
$\Pr(w_{max}/w_k > 1)$	27.5%	40.0%	66.5%
$\Pr(w_{mean}/w_k > 1)$	0.1%	0.3%	2.0%
$\Pr(1.9w_{mean}/w_k > 1)$	30.5%	50.0%	82.0%

w_k : 角田式による計算値

状態設計法指針(案)で示されている許容ひびわれ幅(一般環境)を示した。

図-5は、建設後40~60年経過した橋梁5橋について、図-4と同様に整理したものである。データとしては少ないが、かぶり厚2.5cm以下においては、ひびわれ幅に關係なく鉄筋の断面欠損がみられる。また、図-4に比較して構造物の経年により、鉄筋の発錆確率としては高くなる傾向がみられることから、時間の経過によりコンクリートの品質の低下や鉄筋の腐食膨張によるひびわれ幅の増加等が考えられるため、許容ひびわれ幅やかぶり厚の設定に際しては構造物の耐用期間を考慮することも必要と思われる。

6 結論

鉄筋コンクリート鉄道橋29橋についてのひびわれ調査により、ひびわれ及び鉄筋の腐食性状について以下の事柄がいえる。

- 曲げによるひびわれにおいて、最大ひびわれ幅は平均ひびわれ幅のほぼ1.9倍で代表することができる。
- 角田式において、乾燥収縮の影響として $\epsilon_s = 300 \times 10^{-6}$ を計算に考慮することにより、実測値が計算値を超える確率が30%程度に対応する。
- 許容ひびわれ幅をかぶりの関数として決める方法は、調査結果を比較的良く説明できるが、構造物の耐用期間を考慮して決める必要がある。

7 おわりに

鉄筋の腐食に対する評価法として、かぶりとひびわれ幅のほかに鉄筋応力(活荷重の影響)、経年、コンクリートの品質等をも考慮して行なう必要があり、今後これらの要因も含めた分析を行ない、設計に取り込めるように検討していきたいと思う。

〔参考文献〕

- 1) 「経年した鉄筋コンクリート構造物の調査結果について」土木学会年講1983 佐藤・石橋・長田
- 2) 「ひびわれ数量化表示法とその適応性について」セメントコンクリートNo.422 1982 河村・浜田
- 3) 「鉄筋コンクリートの力学」新体系土木工学32 池田・小柳・角田
- 4) 「コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)」コンクリートライブラリー第52号 土木学会

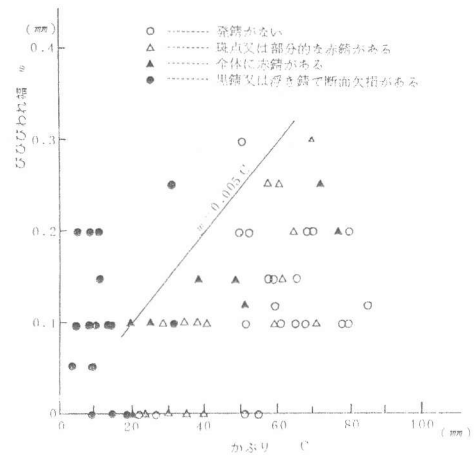


図-4 かぶり及びひびわれ幅による鉄筋の腐食 (経年10~25年)

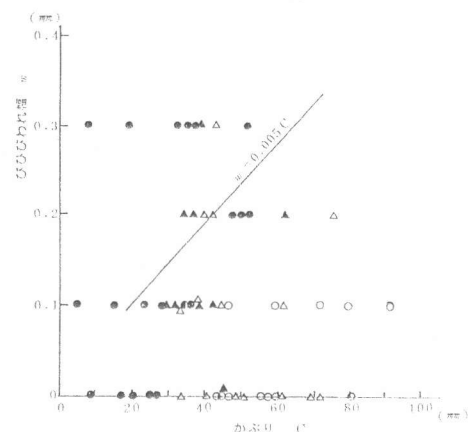


図-5 かぶり及びひびわれ幅による鉄筋の腐食 (経年40~60年)