

RC 桁橋の部材引張部におけるひびわれ性状

TENSION CRACKING BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAM BRIDGES

尾坂 芳夫*・大塚 浩司**・松本 英信***

By Yoshio OZAKA, Koji OTSUKA and Yoshinobu MATSUMOTO

Studies were carried out to investigate the cracking properties of the tension zones of actual RC bridges. Crack spacings and crack widths of three different types of RC bridges were measured and statistically examined. Experiments using RC specimens were also carried out to evaluate the influences of tension and drying.

The spacing and the width in bending zone of actual RC bridges conform well to logarithmic normal distribution. A relation $W_{0.95}$ (95 % fractile in the distribution of crack width) $= aL + b$ was observed. Where a and b are coefficients and L is crack spacing. And according to the drying of concrete, both a and b increased. A formula giving the maximum crack spacing and maximum crack width of actual RC bridge was proposed.

Keywords: actual bridge, maximum crack spacing, maximum crack width, influence of drying, logarithmic normal distribution

1. ま え が き

RC 構造物の設計において、その使用限界状態を検討する際、部材引張部のひびわれ幅を算定することは重要であり、その算定式として種々のものが提案されている。しかし、実 RC 構造物のひびわれの発生状況を詳細に調査することは、實際上、かなり困難なため、提案されたひびわれ幅算定式のほとんどは供試体による実験結果や理論計算だけから導かれたものである。

実構造物の部材引張部のひびわれ性状には、部材に作用する荷重ばかりでなく、日光の直射、風、乾燥、乾燥・湿潤の繰り返し等、その環境条件が複雑に絡み合いながら大きく関係しているので、供試体の実験から得られたひびわれ性状は実橋のそれと大幅に異なったものとなっている。特に、乾燥が進むとひびわれの分布に偏りが生じることが、先に著者らの実験によって明らかにされている¹⁾。したがって、RC 構造物のひびわれ制御設計方法を確立するには、実際の RC 部材のひびわれを少なくとも数年の長期にわたって測定し、要因を制御して

行った供試体による実験の結果と突き合わせて検討し、実用的なひびわれ幅算定式を求める必要がある。

本文は、以上のことを考慮して、実 RC 構造物の中で比較的応力状態が単純な数種の RC 桁橋の部材引張部におけるひびわれを測定解析し、これまで著者らが行ってきた RC 供試体による研究結果^{1)~3)}と比較検討した結果を述べたものである。

2. 測定した実橋の諸元とひびわれ測定方法

図—1 はひびわれを測定した RC 桁橋の断面形状寸法を示し、表—1 はそれらの諸元を示す。A、B 橋は新幹線、C 橋は在来線のもので、いずれも設計は国鉄建造物設計標準による。また、A 橋、B 橋は盛岡地区、C 橋は仙台地区に建設されたもので、いずれの地区も「一般の環境」である。

各橋のすべての桁について、底面と両側面のひびわれを、幅の変化箇所ごとに主としてクラックスケールを用いて測定した。活荷重載荷時のひびわれ幅の測定 (A 橋のみ) には動ひずみ計を用いた。

測定の時期は次のようである。

A 橋：第一回はコンクリート打設の約 2 年後で初列車通過前 (以下 2 年・前時とよぶ)。第二回は打設の約 6 年後で列車荷重載荷後 (以下 6 年時とよぶ)。

* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科
(〒980 仙台市荒巻字青葉)

** 正会員 工博 東北学院大学助教授 工学部土木工学科
(〒985 多賀城市中央 1-13-1)

*** 正会員 東北学院大学助教授 工学部土木工学科 (同上)

表—1 測定した実橋の諸元

橋種	構造形式	竣工年次 年月	スパン m	桁高 m	コンクリート			主鉄筋				スター ラップ	
					σ_{ck} kg/cm ²	W/C	SLcm	種類	配置 cm	σ_{sd}	σ_{sl}	種類	配置 cm
A	単純T形	S.51.7	14.10	1.30	240	0.52	12	SD35, D32	C=6.6, C ϕ =8.4	1060	490	SD35, D16	C=5, ctc=25
B	単純箱桁	S.53.12	24.08	2.20	270	0.53	10	SD35, D32	C=6.6, C ϕ =7.8	1340	430	SD35, D19	C=5, ctc=12.5
C	単純T桁	S.35	7.00	0.75	200			SS41 ϕ 28	C=6.5, C ϕ =7.8	460	940	SS41, ϕ 13	C=5.2, ctc=20

注) SL;スパン値, C;かぶり, C ϕ ;鉄筋間隔, σ_{sd} ;設計死荷重作用時の鉄筋応力度, σ_{sl} ;設計活荷重作用時の鉄筋応力度

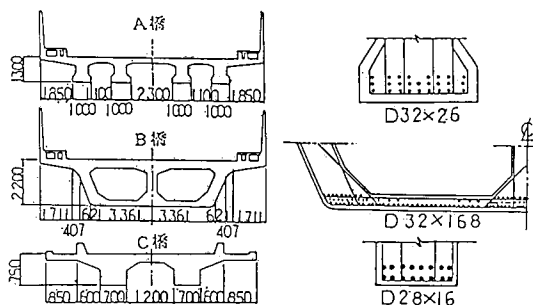


図-1 測定構造物の断面

B橋：第一回は打設の約8か月後で列車荷重載荷前（以下8か月・前時とよぶ）。第二回は打設の約5年後で列車荷重載荷後（以下5年時とよぶ）。

C橋：第一回のみ、打設の約14年後で供用中

3. ひびわれの一般的傾向

(1) ひびわれパターン

図-2は、A橋における6年時の外桁のひびわれパターンの一例を示す。桁の引張部側面のひびわれは、支点からほぼ1.5d（d：桁の有効高さ）の範囲では部材軸に対して45度～60度の斜め方向のものが多く、支点から3d程度離れるとほとんどがほぼ直角のものとなる。

図-3は、B橋の8か月・前時に得られたひびわれパターンの一例を示す。箱桁の側面では前述のT桁（A橋）の場合に比べてひびわれ間隔が小さい。また、底面には部材軸とほぼ直角に底面全幅を横切るひびわれがほぼ平行に数多く発生している。

図-4は、C橋のひびわれパターンを示す。この場合は他の2橋の場合に比べて、ひびわれ間隔が大きい。これは、他の2橋と異なり、軸方向主鉄筋として普通丸鋼を使用しているためと考えられる。

(2) ひびわれの軸方向分布

a) A 橋

図-5は、外桁および内桁におけるスパン方向の移動1m区間ごとのひびわれ数n（以下、ひびわれ密度という）と同1m区間の平均ひびわれ幅w（以下1m平均ひびわれ幅という）のスパン方向の変化を示す。これ

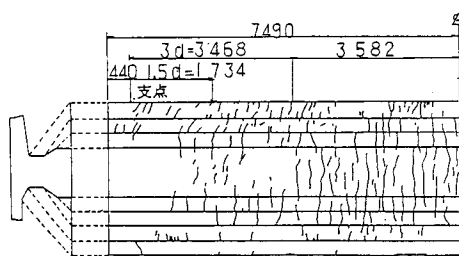


図-2 A橋のひびわれパターン例（6年時）

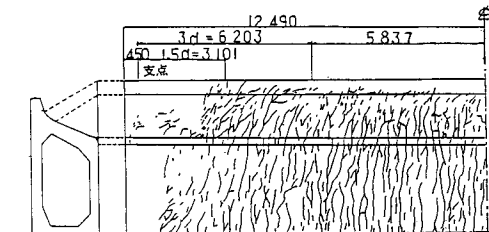


図-3 B橋のひびわれパターン例（8月・前時）

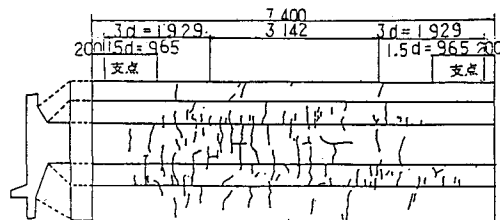


図-4 C橋のひびわれパターン例

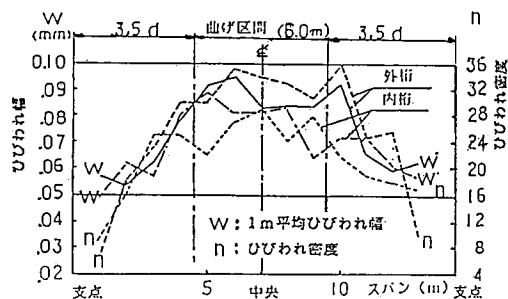


図-5 A橋のスパン方向ひびわれ変化

からわかるように、支点からスパン中央に向かって、ひびわれ密度および1m平均ひびわれ幅はしだいに大きくなる。これは桁の曲げモーメントの変化に対応するも

のと考えられるが、 a/d （支点からの距離／有効高さ） $=3.5$ 付近からスパン中央に向かってその変化の割合が、ばらつきはあるが、かなり小さくなる。外桁が内桁よりひびわれ密度と1m平均ひびわれ幅がともにやや大きいものの、スパン方向の変化の様子はほぼ相似している。

図-6は、桁両端 $a/d < 3.5$ の区間を除くスパンの区間（以下曲げ区間という）について、6年時における部材軸と平行な線を横切るすべてのひびわれの数 N （以下、曲げ区間ひびわれ数）、平均幅 W_m （以下、曲げ区間平均ひびわれ幅）、平均間隔 L_m （以下、曲げ区間平均ひびわれ間隔）を求めた結果の一例である。この図からわかるように、桁の底面から中立軸（図中の②）に向かうにつれて L_m は大きくなる。しかし、 W_m は、底面と下フランジの側面とではほとんど差がなく、さらにウェブにおいてもひびわれ間隔の増加や曲げひずみの分布から予想されるほど W_m は小さくない。これはウェブでは乾燥収縮を拘束する鉄筋の効果がないためと考えられる。

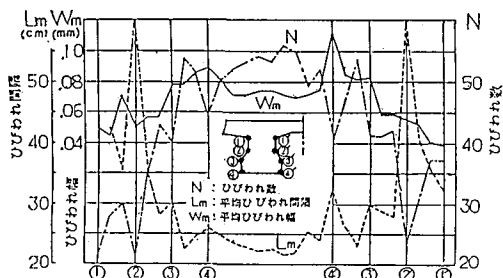


図-6 A橋曲げ区間断面各部の N , L_m および W_m

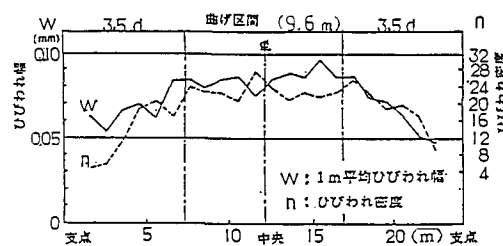


図-7 B橋のスパン方向ひびわれ変化

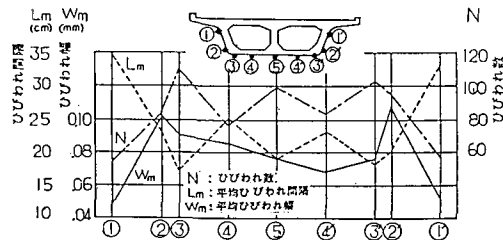


図-8 B橋曲げ区間断面各部の N , L_m および W_m

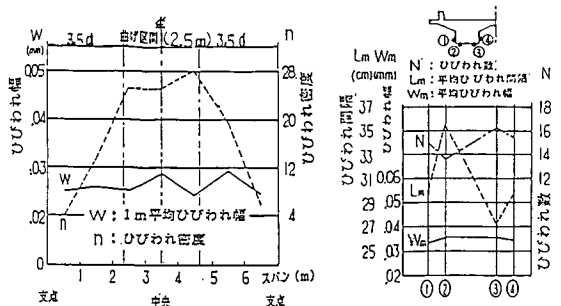


図-9 C橋の曲げ区間断面各部の N , L_m および W_m

b) B 橋

図-7は、B橋の8か月・前時における、ひびわれ密度 n と1m平均ひびわれ幅 w のスパン方向の変化を示す。支点からスパン中央に向かってひびわれ密度と1m平均ひびわれ幅とはともにしだいに大きくなっていくが、その割合はA橋の場合に比べて緩やかである。この場合も曲げ区間ではそれらはほぼ一定と考えることができる。

図-8は、同じ測定時で、曲げ区間（中央9.6m）において、図-6と同じ方法で求めた曲げ区間ひびわれ数 N 、同平均ひびわれ幅 W_m および同平均ひびわれ間隔 L_m を示す。底面と側面との関係はA橋とはほぼ同様であるが、広い底面では有効鉄筋比の大きい部分（両側部③、と中央部⑤）における方が小さい部分（中間部④）におけるよりも、ばらつきはあるが、ひびわれ数が多く幅が小さいことは注目に値する。

c) C 橋

図-9は、ひびわれの密度 n と1m平均ひびわれ幅 w のスパン方向の変化を示す。この場合も曲げ区間ではそれらの値は一定とみなすことができる。特に、曲げ区間以外の区間も1m平均ひびわれ幅 w の減少はみられない点は異形鉄筋を用いた橋の場合と異なり、注目に値する。

図-10は、桁断面における曲げ区間ひびわれ数 N 、同平均ひびわれ幅 W_m 、同平均ひびわれ間隔 L_m を示す。傾向はA橋の場合とほぼ同様である。

4. 曲げ区間におけるひびわれの統計解析

(1) ひびわれ間隔

a) A 橋

図-11および図-12は、A橋の、2年・前時において、それぞれ桁底面の最外側主鉄筋位置（以下底面・外という）と桁側面の最下段主鉄筋位置（以下側面・下という）とで得られた曲げ区間ひびわれ間隔の全8桁合計についての度数分布を示す。この度数分布には、従来いわれて

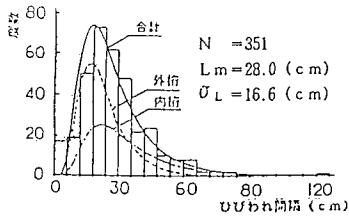
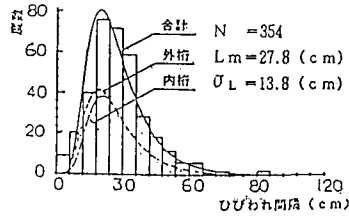
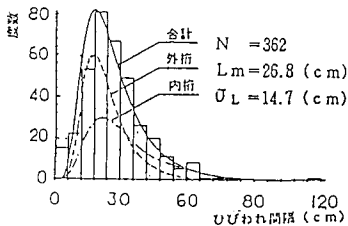
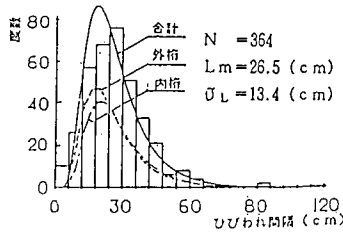
図-11 A橋底面・外ひびわれ間隔分布
(2年・前時)図-12 A橋側面・下ひびわれ間隔分布
(2年・前時)図-13 A橋底面・外ひびわれ間隔分布
(6年時)図-14 A橋側面・下ひびわれ間隔分布
(6年時)

表-2 A橋のひびわれ間隔測定結果

		N			L _m cm			σ _L cm			L _{0.95} cm		
		外桁	内桁	合計	外桁	内桁	合計	外桁	内桁	合計	外桁	内桁	合計
2年・前時	底面	207	144	351	23.8	33.6	28.0	12.0	19.5	16.6	46.0	69.9	58.5
	側面	182	172	354	26.9	28.7	27.8	13.9	13.7	13.8	52.7	54.1	53.4
6年時	底面	209	153	362	23.1	31.9	26.8	10.5	17.7	14.7	42.5	64.8	54.1
	側面	189	175	364	25.3	27.7	26.5	13.1	13.6	13.4	49.5	53.0	51.3

注) N: 曲げ区間ひびわれ数、L_m: 曲げ区間平均ひびわれ間隔、σ_L: 標準偏差、L_{0.95}: 95%最大値

いる正規分布ではなく、対数正規分布がよく適合することに注目すべきである。また、点線は外桁4本と内桁4本の別々に示した分布曲線である。著者らが引張RC供試体の実験で明らかにした結果¹⁾によれば、ひびわれ間隔は、湿潤供試体を用いた場合、対数正規分布によく適合するが、正規分布にかなり近い。しかし、乾燥供試体では、分布の形状が偏り、対数正規分布でないと当てはめができない。これは、コンクリートの乾燥によりひびわれ間隔の小さいものが増えるため、またひびわれ間隔は負にはならないためと考えられる。

ひびわれ間隔の全8桁の合計について、底面と側面とで分布や平均値にはほとんど差はないが、いずれにおいても内桁より外桁の方が曲げ区間ひびわれ数 N が大きく、同平均ひびわれ間隔 L_m は小さい。この傾向は底面で特に顕著である。これは、外桁の方が雨水・日射の影響を強く受けるためと考えられる。

図-13および図-14は、A橋の6年時における底面・外および側面・下の曲げ区間ひびわれ間隔の全8桁合計についての分布を示す。また、点線は外桁4本と内桁4

表-3 B橋のひびわれ間隔測定結果

		N	L _m cm	σ _L cm	L _{0.95} cm
8ヶ月・前時	底面	214	17.6	8.11	32.2
	側面	178	21.5	11.46	42.8
8ヶ月・前時 中央3m	底面	97	17.4	6.82	30.1
	側面	74	21.8	11.12	42.3
5年時 中央3m	底面	106	15.9	6.93	28.7
	側面	86	18.3	8.70	32.5

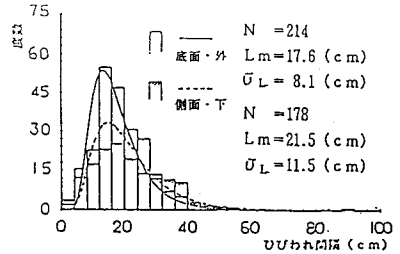
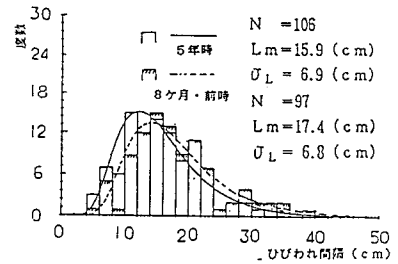
図-15 B橋底面・外、側面下ひびわれ間隔分布
(8か月・前時)

図-16 B橋底面・外(中央3m区間)ひびわれ間隔分布

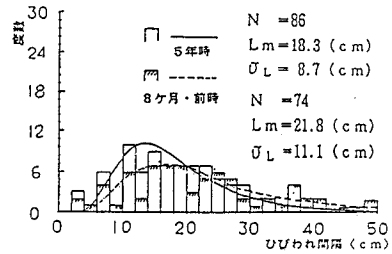
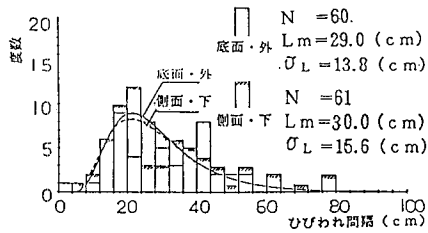


図-17 B橋側面・下ひびわれ間隔分布(中央3m区間)

本の別々に示した分布曲線である。表-2は、2年・前時と6年時とにおける、曲げ区間ひびわれ数 N 、同平均ひびわれ間隔 L_m 、標準偏差および超過確率5%のひびわれ間隔 $L_{0.95}$ を示す。これらからわかるように、分布の形状はほとんど変わらないが、6年時では N がわずかに(約3%)多く、 L_m がわずかに(約3%)小さい。このような2年・前時と6年時とにおけるひびわれ性状の変化には、4年間の列車通過履歴、コンクリートの乾湿の繰り返しなどの影響があったと考えられる。



図—18 C橋底面・外、側面・下ひびわれ間隔分布

b) B 橋

図—15は、B橋の、8か月・前時における、それぞれ桁底面・外(実線)および側面・下(点線)の曲げ区間ひびわれ間隔 L の分布を示す。箱桁の場合には、底面と側面でかなり分布形が異なり、底面の方が平均値(18%程度)も標準偏差(29%程度)も小さい。

図—16および図—17は、B橋の曲げ区間に含まれるスパン中央3mの区間の、それぞれ底面および側面における、5年時(実線)と8か月・前時(点線)のひびわれ間隔の分布を示す。

表—3は、8か月・前時曲げ区間、8か月・前時中央3m区間および5年時中央3m区間のひびわれ数 N 、平均ひびわれ間隔 L_m 、標準偏差および超過確率5%のひびわれ間隔 $L_{0.95}$ を示す。これより、8か月・前時と5年時とでは、 N で、底面・外9.3%、側面・下16.2%の増加があり、 L_m で底面・外9.0%、側面・下15.3%の減少があることがわかる。また、 $L_{0.95}$ も底面・外で4.7%、側面・下で23.2%減少している。これは、列車荷重載荷の繰り返しおよびコンクリートの乾湿の繰り返しによりしだいにひびわれが多く発生したためと考えられる。

c) C 橋

図—18は、C橋の、それぞれ底面および側面の曲げ区間ひびわれ間隔を示す。C橋は、A橋、B橋と異なり普通丸鋼を使用しており、ひびわれ間隔のばらつきが大きい。また、底面よりも側面の方がやや平均ひびわれ間隔が大きい。

(2) ひびわれ幅

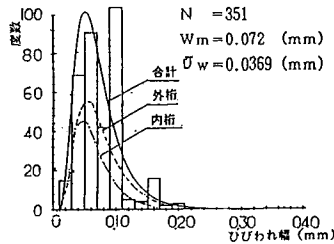
a) A 橋

図—19および図—20は、2年・前時における、それぞれ底面・外および側面・下の曲げ区間ひびわれ幅で、実線は全8桁の、また点線は外桁4本および内桁4本の

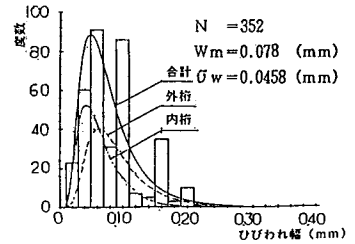
表—4 A橋のひびわれ幅測定結果

		N			Wm mm			σ_w mm			We.95 mm		
		外桁	内桁	合計	外桁	内桁	合計	外桁	内桁	合計	外桁	内桁	合計
2年・前時	底面	207	144	351	0.077	0.066	0.072	0.0369	0.0332	0.0369	0.15	0.13	0.14
	側面	181	171	352	0.090	0.065	0.078	0.0497	0.0368	0.0458	0.18	0.13	0.16
6年時	底面	209	153	362	0.093	0.075	0.085	0.0509	0.0426	0.0484	0.19	0.16	0.18
	側面	188	175	363	0.099	0.074	0.087	0.0502	0.0442	0.0490	0.19	0.16	0.18

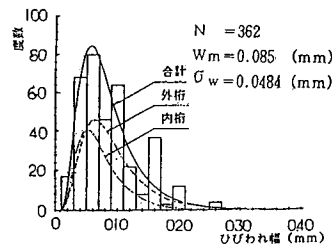
注) N: 曲げ区間ひびわれ数, Wm: 曲げ区間平均ひびわれ幅, σ_w : 標準偏差, We.95: 95%最大値



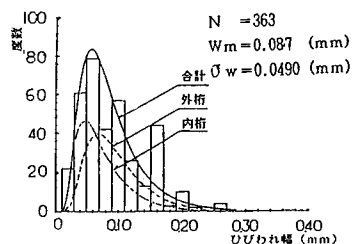
図—19 A橋底面・外ひびわれ幅分布 (2年・前時)



図—20 A橋側面・下ひびわれ幅分布 (2年・前時)



図—21 A橋底面・外ひびわれ幅分布 (6年時)



図—22 A橋側面・下ひびわれ幅分布 (6年時)

分布曲線である。ひびわれゲージによる読み取りのくせのため、ひびわれ間隔の場合よりばらつきが大きい、ひびわれ幅も従来いわれている正規分布ではなく対数正規分布にかなりよく適合する。曲げ区間ひびわれ幅の全8桁の合計について分布の平均値と標準偏差は底面と側面とではほとんど差はないが、外桁と内桁とを比べると、いずれも外桁の方がモードが大きく、かつひびわれ幅の大きいものが多い。4.(1)で外桁の方が内桁よりも曲げ区間ひびわれ数 N が大きく曲げ区間平均ひびわれ間隔 L_m が小さくなる傾向があることを示したが、これは、外桁の方が、分担する死荷重が大きいことのほかに、主として、日射や風雨により、内桁よりも乾湿の影響を大きく受けるためと考えられる。

図—21および図—22は、6年時、曲げ区間における、全8桁の、底面・外および側面・下のひびわれ幅の分布を示す。

表—4は、2年・前時および6年時、曲げ区間ひびわれ数 N 、同平均ひびわれ幅 W_m 、標準偏差および超過確率5%のひびわれ幅 $W_{0.95}$ を示す。

これから、2年・前時と6年時とでは N で底面・外、側面・下ともに僅か（3%）に増加しているのに比べて、 W_m で底面・外 19%，側面・下 12% とかなり大きく増加していることがわかる。これは注目すべき現象であり、列車荷重載荷の繰り返しによりひびわれの数が増加するが、発生したひびわれの長さや深さが同時に大きくなり、部材剛度が低下し、また、4年間にコンクリートの乾燥がかなり進んだ影響も大きいと考えられる。また、底面・外、側面・下ともに外桁と内桁とを比べると2年・前時と同様に6年時も外桁の方がひびわれ数、平均ひびわれ幅ともに大きい。平均ひびわれ幅の差は側面ではやや減少するが底面では大きく増加している。

図-23 は、桁底面におけるひびわれ幅が列車通過時に示す振動を測定した結果の一例として、同一桁の、スパン中央（測点11）、スパンの約1/4点（測点10）および支点近傍（測点12）でのものを示す。列車は12両編成で速度約180 km/h であった。

表-5 は、死荷重時と活荷重時におけるひびわれ幅の測定結果を示したものであり、ひびわれ幅は列車荷重によってスパン中央付近で0.01~0.02 mm 程度増加する。これは計算上鉄筋応力度の増分約30 MPaに相当する（荷重を図-23とし、衝撃係数を0.15と仮定し、断面を図-1として計算した値）。このように、ひびわれ幅が列車荷重によってスパン中央でも10~20%程度しか増大しないのは軌道スラブや路盤コンクリート等のために剛性がかなり大きくなっているためと考えられる。

b) B 橋

図-24 は、8か月・前時、曲げ区間における、それぞれ底面および側面に発生したひびわれ幅の分布を示す。この図からわかるように、側面が底面より、ひびわれ幅のばらつきが大きく、ひびわれ数が約20%少なく、逆に平均ひびわれ幅が約20%大きい。

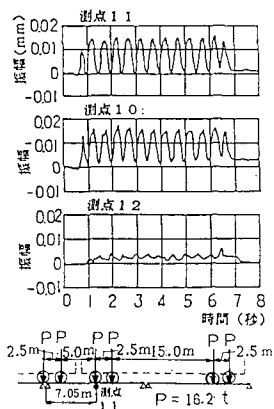


図-23 列車通過時のひびわれ幅の振動

表-5 ひびわれ幅の動的測定結果

	測点	支点からの距離m	ひびわれ幅 mm		
			Wd	Wl	Wd+Wl
No.1 外桁	1	1.05	0.10	0.003	0.103
	2	4.01	0.15	0.009	0.159
	3	7.29	0.15	0.010	0.160
	4	12.87	0.10	0.004	0.104
No.2 内桁	5	1.07	0.10	0.002	0.102
	7	7.39	0.10	0.017	0.117
	8	12.30	0.15	0.004	0.154
	10	4.45	0.08	0.019	0.099
No.3 内桁	11	7.05	0.15	0.014	0.164
	12	12.63	0.20	0.003	0.203
No.2 外桁	13	1.78	0.25	0.004	0.254
	15	7.05	0.15	0.011	0.161

図-25 は、曲げ区間9.6 m の内の中央3 m の区間における5年時のそれぞれ底面・外および側面・下のひびわれ幅の分布を示す。比較のため8か月・前時の同じ区間についてのひびわれ幅の分布を点線で示す。

表-6 は、8か月・前時曲げ区間、8か月・前時中央3 m 区間および5年時中央3 m 区間のひびわれ数 N 、平均ひびわれ幅 W_m 、標準偏差および $W_{0.95}$ を示す。

これらより、同じ中央3 m 区間において、8か月・前

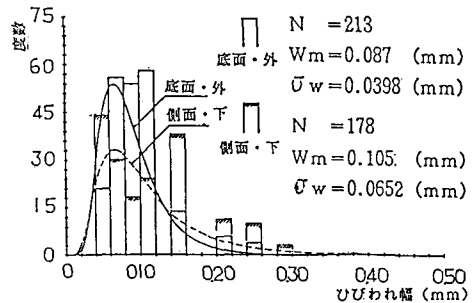


図-24 B橋底面・外、側面下ひびわれ幅分布（8か月・前時）

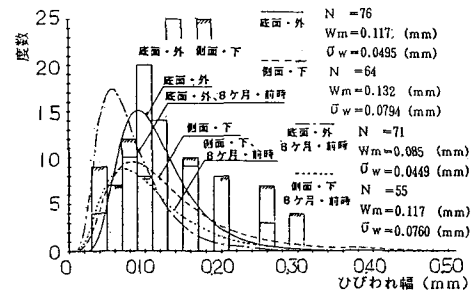


図-25 B橋底面・外、側面・下ひびわれ幅分布（中央3 m 区間）

表-6 B橋のひびわれ幅測定結果

		N	W_m mm	σ_w mm	$W_{0.95}$ mm
8ヶ月・前時	底面	213	0.087	0.0398	0.161
	側面	178	0.105	0.0652	0.227
8ヶ月・前時中央3m	底面	71	0.085	0.0449	0.169
	側面	55	0.117	0.0760	0.259
5年時中央3m	底面	76	0.117	0.0495	0.209
	側面	64	0.132	0.0794	0.280

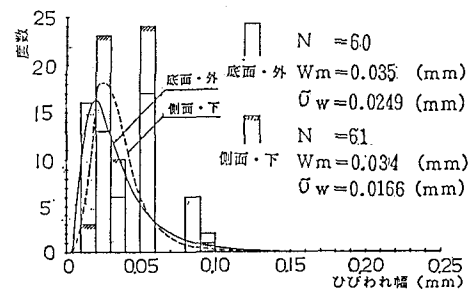


図-26 C橋底面・外、側面・下ひびわれ幅分布

時と5年時とでは N で底面・外9.2%, 側面・下17.8%の増加があり, W_m で底面・外38.4%, 側面・下12.8%の増加があることがわかる。また, $W_{0.95}$ は底面・外23.7%, 側面・下8.1%増加している。このように底面・外に比べて側面・下のひびわれ幅の増加が小さいのはひびわれ数の増加が側面で大きいためと考えられる。しかし, いずれにしても8か月・前時と5年時との間にはかなりのひびわれ幅の増加がみられる。これは, 4年間における列車荷重の履歴とコンクリートの乾燥の進行の影響が大きいためと考えられる。

c) C 橋

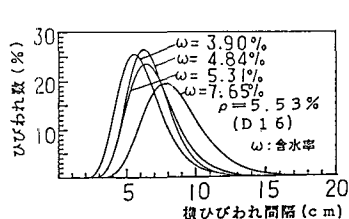


図-27 両引供試体の横ひびわれ間隔分布の変化

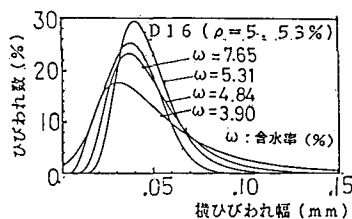


図-28 両引供試体の横ひびわれ幅分布の変化

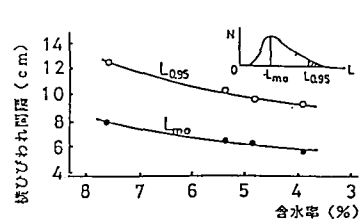


図-29 両引供試体の横ひびわれ間隔と含水率との関係

表-7 両引供試体のひびわれ間隔分布の代表値・ばらつき (cm) とひずみ度

		N	L _m	L _{0.95}	L _{m0}	L _m -L _{m0}	L _{0.95} -L _{m0}	σ _L	α _{3L}
含水率 ω %	7.85	258	8.57	12.5	7.79	0.78	4.71	2.212	0.137
	5.31	128	7.04	10.3	6.38	0.66	3.92	1.833	-0.183
	4.84	146	6.77	9.6	6.23	0.54	3.37	1.614	0.079
	3.90		6.18	9.2	5.53	0.65	3.67	1.717	0.136

表-8 両引供試体のひびわれ幅分布の代表値・ばらつき (mm) とひずみ度

			N	W _m	W _{0.95}	W _m	W _m -W _{m0}	W _{0.95} -W _{m0}	σ _w	α _{3w}
含水率 ω %	7.85	33	0.038	0.067	0.030	0.008	0.037	0.0158	0.271	
	5.31	125	0.047	0.075	0.040	0.007	0.035	0.0154	-0.193	
	4.84	140	0.048	0.088	0.037	0.011	0.077	0.0214	0.536	
	3.90	157	0.054	0.121	0.031	0.023	0.090	0.0358	1.030	

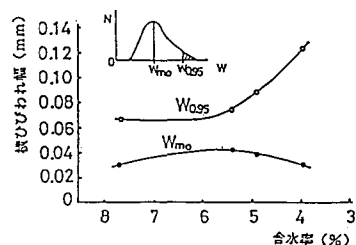


図-30 両引供試体の横ひびわれ幅と含水率との関係

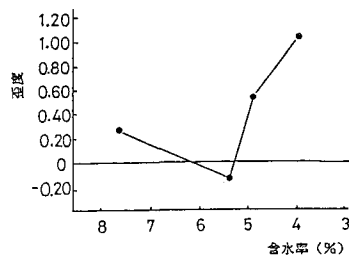


図-31 両引供試体の横ひびわれ幅分布のひずみ度と含水率との関係

表-9 A 橋のひびわれ間隔分布の代表値・ばらつき (cm) とひずみ度

		N		L _{MO}		L _{MO} -L _{MO}		L _{0.95} -L _{MO}		σ _L		α _{3L}	
		外桁	内桁	外桁	内桁	外桁	内桁	外桁	内桁	外桁	内桁	外桁	内桁
2年 前時	底面	207	144	16.9	21.7	6.9	11.9	29.1	48.2	12.0	19.5	0.541	1.265
	側面	182	172	18.9	21.1	8.0	7.6	33.8	33.0	13.9	13.7	1.320	0.926
6年 時	底面	209	153	17.4	21.3	5.7	10.6	25.1	43.5	10.5	17.7	0.576	1.214
	側面	189	175	17.7	20.0	7.6	7.7	31.8	33.0	13.1	13.6	1.209	1.058

注) N; ひびわれ数, Lm; モード, Lm; 平均値, L0.95; 95%最大値, σL; 標準偏差, α3L; 歪度

表-10 A 橋のひびわれ幅分布の代表値・ばらつき (mm) とひずみ度

		N		W ₀		W _m - W ₀		W _{0.95} - W ₀		σ _w		α _{3w}	
		外桁	内桁	外桁	内桁	外桁	内桁	外桁	内桁	外桁	内桁	外桁	内桁
2年 前時	底面	207	144	0.054	0.047	0.023	0.019	0.096	0.083	0.0399	0.0332	0.264	0.687
	側面	181	171	0.060	0.043	0.030	0.022	0.120	0.087	0.0497	0.0368	0.222	0.760
6年 時	底面	209	153	0.063	0.049	0.030	0.026	0.127	0.111	0.0509	0.0426	0.764	1.253
	側面	188	175	0.070	0.047	0.029	0.027	0.120	0.113	0.0502	0.0442	0.563	0.762

注) N; ひびわれ数, Wm; モード, Wm; 平均値, W0.95; 95%最大値, σw; 標準偏差, α3w; 歪度

図-26 は, それぞれ底面・外および側面・下における曲げ区間ひびわれ幅の分布を示す。分布にかなりのばらつきがみられるが, 側面・下の方が底面・外よりも平均ひびわれ幅が約3.5%小さい。

(3) ひびわれの間隔と幅の分布ひずみ度

これまでに述べたように, 実橋の部材引張部におけるひびわれの間隔と幅の分布は, 時間, 環境条件等によってしだいにひずむことが明らかとなった。この主な原因として, コンクリートの乾燥が考えられる。そこで, その基礎的性状を知るために, 種々の乾燥の柱状供試体で, ひびわれの間隔および幅を測定した。供試体は, 1本の

鉄筋 (D 16) を中心軸にもつ正方形断面の柱状のもの (6 cm×6 cm×180 cm) で、十分水中養生した後、恒温恒湿 (20°C, RH=50%) の下で棚にのせ、所要の含水率になるまで放置した。供試体の乾燥は、同じ乾燥条件下においた供試体 (同一断面、長さ 30 cm) によって定めた。ひびわれ幅は、鉄筋応力度 2000 kgf/cm² までの載荷を 10 回繰り返した後、鉄筋応力度を 2000 kgf/cm² に保ったまま、供試体断面の中心軸上で、マイクロスコプまたはコンタクトタイプひずみ計を用いて測定した。

図—27 は、ひびわれ間隔、図—28 は、ひびわれ幅の分布を示す。また、表—7 および表—8 は、それぞれひびわれ間隔とひびわれ幅の統計解析結果である。図—29 は、 $L_{0.95}$ および L_{m0} と含水率 (ω) との関係を示し、図—30 は、 $W_{0.95}$ および W_{m0} と含水率との関係を示す。ひびわれ間隔については、供試体コンクリートの含水率が減少すると $L_{0.95}$ や L_{m0} は緩やかに減少するが、 $(L_m - L_{m0})$ 、 $(L_{0.95} - L_{m0})$ およびひずみ度 (平均値のまわりの 3 次の積率/標準偏差の 3 乗) α_3 にはあまり変化がみられない。ひびわれ幅については、湿潤状態 ($\omega=7.65\%$) と少し乾燥した状態 ($\omega=5.31\%$) との間では、差はあまりないが、さらに乾燥が進むと、ひずみ度の値が大きくなり、分布が大きくなりひずんでいる。図—31 は、ひびわれ幅分布のひずみ度の一例である。

表—9 と表—10 は、A 橋の、ひびわれ間隔分布のひずみ度とひびわれ幅分布のひずみ度とを示す。また表—11 と表—12 は B 橋におけるひびわれの間隔と幅の分布ひずみ度を示す。これらを両引供試体の結果と比較すると、A 橋については、ほぼ同様に、ひびわれ間隔分布のひずみ度は測定時期によってあまり変化はないが、ひびわれ幅分布のひずみ度は測定時期によって変化し、乾燥が進むと分布のひずみが大きくなる傾向がみられる。

両引供試体と実橋におけるひびわれの間隔と幅の分布ひずみ度を比較検討した結果から次のような一般的な傾

表—11 B 橋のひびわれ間隔分布の代表値・ばらつき (cm) とひずみ度

	N	L_m	$L_{0.95}$	L_{m0}	$L_m - L_{m0}$	$L_{0.95} - L_{m0}$	σ_L	$\alpha_3 L$
8ヶ月・前時								
底面	97	17.4	30.1	14.0	3.4	16.1	6.82	0.854
中央3m								
側面	74	21.6	42.3	15.2	6.4	27.1	11.12	2.022
5年時								
底面	106	15.9	28.7	12.2	3.7	16.5	6.93	0.877
中央3m								
側面	86	16.	32.5	11.2	5.1	21.3	8.70	2.998

表—12 B 橋のひびわれ幅分布 (mm) のひずみ度

	N	W_m	$W_{0.95}$	W_{m0}	$W_m - W_{m0}$	$W_{0.95} - W_{m0}$	σ_w	$\alpha_3 w$
8ヶ月・前時								
底面	71	0.085	0.169	0.058	0.027	0.111	0.0449	2.116
中央3m								
側面	55	0.117	0.259	0.069	0.048	0.190	0.0760	0.736
5年時								
底面	76	0.117	0.209	0.092	0.025	0.117	0.0495	0.896
中央3m								
側面	64	0.132	0.280	0.083	0.049	0.197	0.0794	0.630

向を認めることができる。

① コンクリートが湿潤状態および乾燥のごく初期の状態では部材引張部に発生するひびわれ間隔および幅の分布は正規分布に近く、ひずみ度は零に近い。

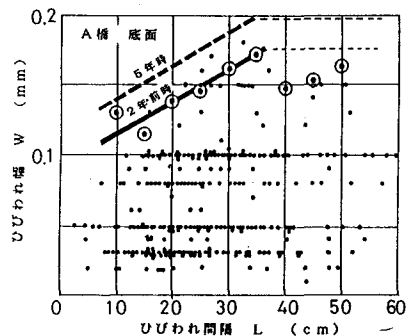
② 乾燥が進むと荷重の影響の大きい区間からひびわれ間隔が小さくなり、ひずみ度は大きくなる。

③ さらに乾燥が進むと荷重の影響が小さく、ひびわれ間隔の大きい区間にも乾燥のためにひびわれが生じ、ひずみ度が幾分小さくなる場合もある。

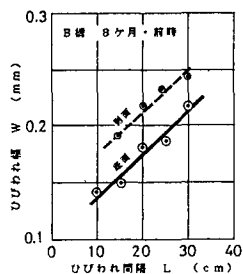
(4) ひびわれ間隔とひびわれ幅との関係

図—32 はひびわれ間隔とひびわれ幅との関係の一例として、A 橋の曲げ区間の底面における、2年・前時の測定結果を示す。このように、ひびわれ間隔とひびわれ幅との関係は、両引供試体の試験結果が示すような簡単な直線関係になく、かなりのばらつきをもつ。図中に示した二重丸は、ひびわれ間隔 5 cm ごとのひびわれ幅の分布 (この場合の分布も対数正規分布で近似できることが確かめられた) における、それぞれ超過確率 5% の点である。図中の直線 (実線) はそれらの点から求めたもので、測定値の 95% がそれ以下となる直線 (以下、95% 直線) である。また、図中の点線は、同様に求めた 5 年時の 95% 直線である。このように、それぞれのひびわれ間隔について 95% 最大ひびわれ幅 $W_{0.95}$ だけに注目すれば、それらは、ひびわれ間隔 40 cm 程度以下で、ほぼ直線 $aL + b$ に適合する。ひびわれ間隔が大きい領域でこの関係に適合しないのはこの領域ではまだひびわれ定常状態に達していないためと考えられる。また、8 か月・前時と 5 年時とでは、5 年時の方が a も b もともに大きくなる傾向があることは興味深い。これは、ひびわれ幅に及ぼす荷重履歴やコンクリートの乾燥の影響にはひびわれ間隔に関係するものと無関係のものがあることを示唆していると考えられる。

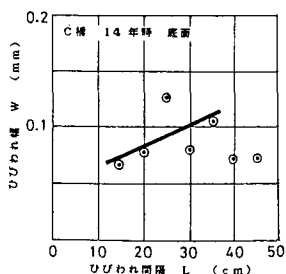
図—33 および 34 はそれぞれ、B 橋の曲げ区間の 8 か月・前時の底面と側面および C 橋底面におけるひびわれ間隔とひびわれ幅との関係から図—32 と同様にして



図—32 ひびわれ間隔とひびわれ幅との関係 (A 橋)



図—33 ひびわれ間隔とひびわれ幅との関係 (B 橋)



図—34 ひびわれ間隔とひびわれ幅との関係 (C 橋)

求めた 95 % 直線を示す (個々の測定結果は省略した)。C 橋の底面では、95 % 直線の勾配が、A, B 橋よりもやや小さい。これは鉄筋応力度が小さいためと考えられる。

5. ひびわれ間隔およびひびわれ幅の算定

(1) ひびわれ間隔の算定

最大ひびわれ間隔 L_{max} を算定する最も単純化した次の式が提案されている¹⁾。

$$L_{max} = K \cdot C \quad (1)$$

K の値については著者らは先に $K=6.0$ を提案した¹⁾。

3. (2) で述べたように、箱桁の広い底面では、有効鉄筋比の大きい部分における方が小さい部分におけるよりも平均ひびわれ間隔が小さくなる傾向がみられること、鉄筋比 (ρ_r) だけでなく鉄筋間隔 (C_ϕ) や鉄筋直径 (ϕ) の影響も考慮する必要があることなどから、式 (1) にそれらの影響因子を線形近似の形で加算すると次式が得られる。

$$L_{max} = K \{ \eta_1 C + \eta_2 (C_\phi - \phi) + \eta_3 \phi / \rho_r \} \quad (2)$$

ここで、 K は、異形鉄筋で 1、普通丸鋼では 1.3 とする。これまでに行われた両引供試体やはり供試体の結果および今回の実測結果を比較検討し $\eta_1=5$ 、 $\eta_2=0.5$ である。B 橋底面の外側部の有効鉄筋比の大きい部分 (10.2 %) の平均ひびわれ間隔が小さい部分 (5.1 %) のそれよりも約 25 % 小さくなっている (図—8 参照) ことなどから $\eta_3=0.1$ とした。したがって、式 (2) は次のようになる。

$$L_{max} = K \{ 5C + 0.5(C_\phi - \phi) + \phi / 10\rho_r \} \quad (3)$$

表—13 は、A, B, C 橋について L_{max} の計算値と実測ひびわれ間隔から求めた超過確率 $e=1 \sim 7\%$ の値 ($L_{0.99} \sim L_{0.93}$) とを示したものである。CEB の式は平均ひびわれ間隔を求める式であるので、 $L_{max}=1.7 S_{rm}$ として L_{max} を求めた。

これからわかるように、4 つの計算式で L_{max} に最大約 30 % 程度の差がある。計算値と実測値との関係は橋によってやや異なる。A 橋では、計算値は式 (3)

を除いて、いずれも、 $L_{0.93}$ より小さい。B 橋では式 (3) による計算値は $L_{0.97}$ (底面)、 $L_{0.93}$ (側面) に相当する。普通丸鋼を使用した C 橋では、計算値は式 (3) の値以外はいずれも実測値よりもかなり小さい。これらはすべて式 (3) が他の式に比べて優れていることを示している。

(2) ひびわれ幅の算定

ひびわれ定常状態におけるひびわれ幅とひびわれ間隔との間には、一般に、線形関係があると考えられている。しかし、4. (4) で述べたように、実橋のひびわれの幅と間隔との間には、一般に、非常に大きいばらつきがあり明瞭な線形関係はなく、あるひびわれ間隔に対応する最大ひびわれ幅 W_{max} とそのひびわれ間隔との間に $W_{max}=aL+b$ なる線形関係が認められる。 a, b の値はそれぞれの部材の鉄筋応力度、荷重履歴、コンクリートの乾燥状態などによって異なる。これより、 W_{max} に及ぼす乾燥の影響には L に関係する部分と無関係の部分とがあると考えられる。前者は、コンクリートの表面・内部に均等に生じた乾燥収縮の影響であり、後者は、ひびわれ付近の表面に内部より大きい乾燥収縮が生じた影響であると考えられる。

引張 RC 供試体の実験から W_{max} の算定式として著者らは先に次式を提案している¹⁾。

$$W_{max} = \gamma L_{max} (\zeta \sigma_s / E_s - \epsilon'_{\phi c}) \\ = k L_{max} (\sigma_s / E_s - \epsilon_{\phi c}) \quad (4)$$

ここに、 $\epsilon_{\phi c} = \epsilon'_{\phi c} / \zeta$ $k = \gamma \zeta$ ($k=0.6$)

式 (4) に上述の L に独立な項として K_c を加え $\epsilon_{\phi c}$ の符号を変え、 L_{max} に式 (3) を代入すると次式となる。

$$W_{max} = K_a \{ 5C + 0.5(C_\phi - \phi) + \phi / 10\rho_r \} (\sigma_s / E_s + \epsilon_{\phi c}) + K_c \quad (5)$$

ただし、 $K_a = kK = 0.6$: 異形鉄筋

$K_a = 0.8$: 普通丸鋼

$\epsilon_{\phi c}$ と K_c の値は部材の条件によって変える必要がある。

表—13 最大ひびわれ間隔 L_{max}

		実測値より求めた値 cm				計算値 cm				
		e				角田式	CEB-FIP式	土木学会式	提案式	
		1%	3%	5%	7%					
A 橋	底面	外筋	57.1	47.1	42.5	39.6	35.6	30.4	32.9	42.1
		内筋	92.4	73.3	64.9	59.4				
		合計	76.7	61.1	54.2	49.6				
	側面	外筋	69.1	55.7	49.7	45.7				
		内筋	72.7	59.5	53.2	49.2				
		合計	71.1	57.6	51.3	47.4				
B 橋	底面	合計	44.0	36.2	32.6	30.3	35.6	27.8	29.2	38.5
	側面	合計	60.2	48.2	42.8	39.3				
C 橋	底面	合計	74.4	60.8	54.6	50.6	---	32.0	38.4	51.0
	側面	合計	82.6	66.3	59.0	54.3				
角田式						CEB-FIP式		土木学会式		
$L_{max}=KC$						$S_{rm}=2(C\phi\phi/10)K1K2\phi/\rho_r$		$L_{max}=K1(C\phi\phi/7)(C\phi\phi)$		
ただし、 $e=0.25$ の場合は次式となる						ただし、 S_{rm} は平均ひびわれ間隔		$K1=1$ (異形鉄筋)		
KC						$K1=0.4$ (異形鉄筋)		$K2=1.3$ (普通丸鋼)		
$L_{max}=\frac{KC}{1.45}(1+0.18\frac{eS}{C})$						$K1=0.8$ (普通丸鋼)		C はかぶり		
						$K2=0.125$ (純曲げ)		ϕ は鉄筋間隔		
						$K2=0.25$ (純引張)		ϕ は鉄筋径		

表—14 最大ひびわれ幅 W_{max}

			実測値より求めた値 mm				計算値 mm						
			配筋率 e				角式	CEB-FIP式	土木学会式	提案式			
			1%	3%	5%	7%							
A 橋	底面	外桁	0.27	0.21	0.19	0.16	0.30	0.10	0.20	0.22			
		内桁	0.22	0.18	0.16	0.14							
		合計	0.25	0.20	0.18	0.16							
	側面	外桁	0.27	0.22	0.19	0.18							
		内桁	0.23	0.18	0.16	0.14							
		合計	0.26	0.20	0.18	0.16							
B 橋	底面	合計	0.22	0.18	0.16	0.15	0.28	0.05	0.25	0.27			
	側面	合計	0.34	0.26	0.23	0.21							
C 橋	底面	合計	0.13	0.10	0.08	0.07	----	0.08	0.15	0.14			
	側面	合計	0.09	0.07	0.07	0.06	----						
角式										CEB-FIP式			
Vmax=(σs/Es-σcm/EsPe-ε)Lmax										Vmax=1.7Wm			
										Wm=Srm csm			
土木学会式										csm =(σs/Es)(1-β1β2(σsr/σs))			
Vmax=K1(4C+0.7(Cφ-φ))(σse/Est+ε)										σsr=(fctm Ac,ef)/As			

式(3)、式(4)の L_{max} および W_{max} は、極値分布すると考えるべきものであろうが、ここでは、その代表値に相当する値を以下の検討によって求めた。

これまでにを行った引張 RC 供試体の結果と図—32, 33, 34 に示した実測結果とから比較検討して、それらの値を次のように定めた。

A 橋： $\epsilon_{pc} = 80 \times 10^{-6}$, $K_c = 0.008$ (cm)

B 橋： $\epsilon_{pc} = 90 \times 10^{-6}$, $K_c = 0.010$ (cm)

C 橋： $\epsilon_{pc} = 20 \times 10^{-6}$, $K_c = 0.004$ (cm)

表—14 は、A, B, C 橋について W_{max} の計算値と実測ひびわれ幅から求めた $W_{0.95} \sim W_{0.93}$ とを示したものである。この結果からわかるように、ごく一般の場合、式(4)で求まる W_{max} は、ほぼ $W_{0.95}$ としてよいと考えられる。また、この $W_{0.95}$ の値は、鉄筋の腐食の可能性を表す指標としても適当と考えられる。

実測値が死荷重時のものであることから計算値はすべて死荷重時の鉄筋応力度を用いて求めた。しかし、死荷重時のひびわれ幅に及ぼす活荷重の応力履歴の影響はかなり大きいと考えられ、また、周囲の条件や部材の使用の仕方によっては鉄筋の腐食に活荷重時の幅も影響すると思われるので、実際のひびわれ制御設計では、必要により、ひびわれ幅の算定に用いる鉄筋応力度は死荷重に活荷重の一部または全部を加えて求めるものとする必要がある。

6. 結 論

実 RC 桁橋の部材引張部におけるひびわれを測定解析し、これまで著者らが行ってきた RC 供試体による実験研究の結果と比較検討した結果、主として次のことがいえる。

(1) 実 RC 桁の引張部におけるひびわれ密度と 1 m 平均ひびわれ幅はともに支点から中央に向かってしだいに増加するが、 a/d (支点からの距離/有効高さ) = 3.5 付近からその変化はかなり小さくなる。

(2) 実 RC 桁引張部のひびわれ間隔およびひびわれ幅の分布は、従来いわれている正規分布ではなく、対数正規分布によく適合する。このことは著者らが引張 RC 供試体を用いた実験によって明らかにしたこと¹⁾と一致しており、これは、コンクリートの乾燥が大きく影響しているためと考えられる。

(3) T 桁橋のひびわれ幅の動的測定を行った結果、列車通過時にスパン中央付近で 0.01～0.02 mm 程度ひびわれ幅が増加するのがみられた。これは死荷重による幅の最大 20 % 程度で、鉄筋応力度の増分約 30 MPa に相当している。このように活荷重によるひびわれ幅増加が小さいのは、軌道スラブや路盤コンクリート等のため桁の剛性がかなり大きくなっているためと考えられる。

(4) 箱桁のひびわれを列車通過前の 8 か月時と列車通過後の 5 年時とを比べると、密度で 9～18 %、平均幅で 13～38 % の増加がみられた。この値は T 桁の同様の測定期間における密度で約 3 %、平均幅で 12～19 % の増加よりもかなり大きい。T 桁よりも薄いウェブとスラブとからなる箱桁の方が、内部からも乾燥する。

(5) ひびわれ定常状態における、ひびわれ間隔とひびわれ幅との関係は、両引供試体の試験結果が示すような簡単な直線関係になく、かなりのばらつきをもつが、ひびわれ間隔と 95 % 最大ひびわれ幅 $W_{0.95}$ との間には直線関係 $W_{0.95} = aL + b$ が存在する。このように、 $W_{0.95}$ に及ぼす乾燥の影響には L に関係する部分と無関係な部分があると考えられる。

(6) 実 RC 橋の実測結果と両引供試体の試験結果との解析から実橋のひびわれ制御設計に用いるべき L_{max} と $W_{0.95}$ の算定式が得られた。

7. あとがき

この研究には、東北学院大学教授 後藤幸正博士のご指導を頂いた。日本国有鉄道の前盛岡工務局および仙台鉄道管理局施設部の諸氏から積極的なご協力を頂いた。

参 考 文 献

- 1) 尾坂芳夫・大塚浩司・松本英信：乾燥の影響を受ける引張 RC 供試体のひびわれ性状，コンクリート工学，Vol.23, No.3, 1986.
- 2) 後藤幸正・植田紳治・満木泰郎：鉄筋コンクリート部材引張部のひびわれに関する研究，土木学会コンクリートライブラリー，No.14, 1965.
- 3) 後藤幸正・大塚浩司：引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひびわれに関する実験的研究，土木学会論文報告集，No.294, 1980.2.
- 4) 角田与史雄：鉄筋コンクリートの最大ひびわれ幅，コンクリートジャーナル，Vol.8, No.9, 1970.9.

(1986.12.25・受付)