

**投稿論文 (和文)**  
**PAPERS**

# コンクリート桁の表面の曲げひび割れ幅の算定法に関する研究

石橋忠良\*・津吉 毅\*\*

コンクリート桁の表面のひび割れ幅は、初期ひび割れ発生後ひびわれ面近傍の局所的な乾燥収縮の影響で増大する。また、曲げひび割れ幅の支配的因子である鉄筋応力度は、コンクリートの乾燥収縮・クリープの影響で変動する。本文は、乾燥影響下における供試体試験、および、実橋によるひび割れ測定結果から、ひび割れ断面における鉄筋応力度算定法、および、表面近傍の乾燥収縮ひずみの実用的な評価法について考察を加え、ひび割れが発生する時の材令の影響を考慮したコンクリートの表面の曲げひび割れ幅算定法を提案するものである。

**Key Words** : concrete girder, surface, crack width, drying shrinkage

## 1. はじめに

従来、鉄道構造物における曲げひび割れに対する検討は、ひび割れ断面における永久荷重時の鉄筋応力度を、ひび割れを検討する場合の許容応力度以下とすることにより行われてきた<sup>1)</sup>。一方、土木学会標準示方書においては、基本的には、最大曲げひび割れ幅の計算値を、耐久性、あるいは、外観（美観）などから定まるひび割れ幅の制限値以下とすることにより、検討を行うこととしている。

ひび割れ幅に対する設計を行う場合には、その算定精度が、より合理的な設計を行うために重要となる。一般に、乾燥の影響を受ける環境下においては、コンクリート表面の曲げひび割れ幅は、乾燥収縮の影響により増大し、その割合はかなり大きい<sup>2)</sup>が、学会示方書においては、鋼材腐食に対する配慮を中心とした設計法となっており、乾燥の影響を考慮した表面のひび割れ幅の算定法を示していない。

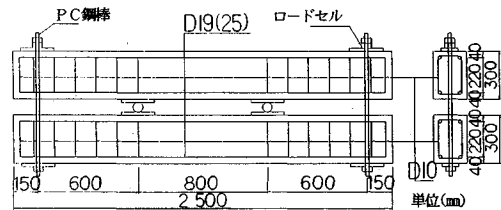
しかしながら、表面のひび割れ幅が、構造物の保守指標の一つとなっている現状、あるいは、外観（美観）に対する使用性の検討は、あくまでも表面幅の絶対値による制限によることを考慮すると、表面の曲げひび割れ幅を精度よく算定し、制限することは、鋼材腐食（耐久性）に関する検討と同様、重要な価値を持つといえる。

そこで、著者らは、乾燥の影響を考慮した曲げひび割れ幅算定式の精度向上のため、供試体試験および実橋測定を行い、比較的精度よい算定法を見いだしたので報告するものである。

表一 供試体諸元

供試体	寸法(cm)	鉄筋	載荷時材令(日)	緊張力(t)	$\sigma_{ss}$ (MPa)	備 考
A-I	20×30×230	D19	14	3.9	7.64 (78kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{ss}=23.5$ MPa (240kgf/cm <sup>2</sup> )
A-II	20×30×230	D19	135			
B-I	20×30×230	D25	14	4.0	7.84 (80kgf/cm <sup>2</sup> )	C=280(kg/m <sup>3</sup> ) W=154(kg/m <sup>3</sup> )
B-II	20×30×230	D25	135			

$\sigma_{ss}$ : 荷重載荷時のコンクリート引張り応力度計算値(全断面有効)



図一 載荷装置

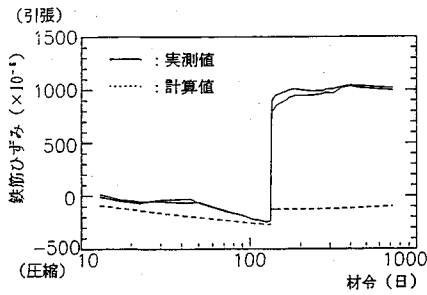
## 2. 供試体試験の結果<sup>3),4)</sup>と考察

コンクリートの乾燥収縮が、曲げひび割れ性状に及ぼす影響を把握するため、RCはりを用いた静的載荷試験を行い、供試体にひび割れを発生させたあと、そのままの状態、約2年間放置し、ひび割れ幅、モーメント均一区間のほぼ中央に取り付けた鉄筋ひずみ計の経時変化を測定した。表一に供試体諸元を示す。供試体は、ひび割れが発生したときのコンクリート材令を違えるため、2体ずつ、約4か月ずらして作製し、A供試体と、B供試体では、鉄筋比に相違をもたせた。図一に、載荷装置を示す。供試体は、材令の異なるI供試体と、II供試体をそれぞれ組み合わせ、両端に配したPC鋼棒を緊張することにより荷重を載荷し、ひび割れを発生させた。ひび割れの発生後は、ロードセルにより鋼棒の張力が変動しないよう緊張力を管理したうえで、室内に放置した。なお、II供試体は、打設後2週間目程度からは、

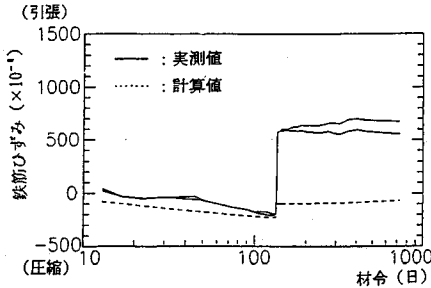
\* 正会員 工博 東日本旅客鉄道(株) 東京工事事務所工事管理室長

(〒151 渋谷区代々木2-2-6)

\*\* 正会員 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部構造技術プロジェクトチーム



図—2 A-II 供試体引張鉄筋ひずみの経時変化



図—3 B-II 供試体引張鉄筋ひずみの経時変化

室内に保管し、乾燥環境下に置いた。

(1) 鉄筋応力度

図—2, 3に、II 供試体の鉄筋ひずみの経時変化の実測値と計算値を示す。

計算は、コンクリートの全断面を有効とし、コンクリートの乾燥収縮に対する鉄筋の拘束を考慮したうえで、平面保持の仮定に基づき鉄筋位置でのひずみの適合条件から算定した<sup>3)</sup>。なお、コンクリートの乾燥収縮度、クリープひずみ、弾性係数の計算には、阪田らの提案式<sup>5),6)</sup>を用い、湿度は70%として計算した。載荷試験後、ひび割れを発生させた後は、コンクリート全断面を有効とした計算値と実測値は、当然のことながら大きく異なる結果となっているが、ひび割れ発生までは比較的よく適合しており、ひび割れ発生までの鉄筋応力度経時変化は、計算でほぼ妥当に算出できるようである。

表—2は、ひび割れ発生までに進行するコンクリートの乾燥収縮に対する鉄筋の拘束応力を考慮したうえで、コンクリートの引張を無視し、平面保持の仮定に基づき計算したひび割れ発生による引張鉄筋応力度増加量(鉄筋位置のコンクリート応力度が「0」の時から応力度増加量)の計算値<sup>3)</sup>と実測値である。

ひび割れ発生までに進行する乾燥収縮ひずみは、載荷材令の遅いII 供試体のほうがかなり大きい。そのため、II 供試体のほうが、載荷時点で大きな鉄筋圧縮力が生じており、従って、ひび割れ発生による鉄筋応力度の増加量は、II 供試体のほうがかなり大きな値を示しており、計算値と実測値は比較的適合している。

表—2 ひび割れ発生による鉄筋応力度増加量 (MPa)

	計算値	実測値	$\phi_{c1}$	$\varepsilon_{c1}$
A-I	193.7(1977kgf/cm <sup>2</sup> )	188.7(1926kgf/cm <sup>2</sup> )	1.13	121
A-II	229.2(2339kgf/cm <sup>2</sup> )	234.6(2394kgf/cm <sup>2</sup> )	2.59	355
B-I	124.2(1267kgf/cm <sup>2</sup> )	134.1(1368kgf/cm <sup>2</sup> )	1.13	121
B-II	161.4(1647kgf/cm <sup>2</sup> )	159.5(1628kgf/cm <sup>2</sup> )	2.59	355

$\phi_{c1}$ : ひび割れ発生までのクリープ係数計算値  
 $\varepsilon_{c1}$ : ひび割れ発生までに進行する乾燥収縮ひずみ計算値 ( $\times 10^{-6}$ )

表—3 ひび割れ発生後の引張鉄筋応力度変化量  $\Delta\sigma_s$  (MPa)

	実測値	$\phi_{c2}$	$\varepsilon_{c2}$
A-I	4.8(49kgf/cm <sup>2</sup> )	2.52	312
A-II	13.2(135kgf/cm <sup>2</sup> )	1.15	78
B-I	-1.1(-11kgf/cm <sup>2</sup> )	2.52	312
B-II	9.9(101kgf/cm <sup>2</sup> )	1.15	78

$\phi_{c2}$ : ひび割れ発生後のクリープ係数計算値  
 $\varepsilon_{c2}$ : ひび割れ発生後に進行する乾燥収縮ひずみ計算値 ( $\times 10^{-6}$ )

一方、ひび割れ発生後も、コンクリート有効断面のクリープ・乾燥収縮の進行により、鉄筋応力度も変動することとなる。しかしながら、その変化量は、計算上もそれほど大きくなく<sup>7)</sup>、表—3に見られるように、実測値の変化量も比較的小さい。

以上より、ひび割れが発生した後に進行するコンクリートの乾燥収縮・クリープが鉄筋応力度に与える影響は比較的小さいので、ひび割れ断面における鉄筋応力度増加量を算定する際には、ひび割れ発生まで(全断面有効時)に進行するコンクリートの乾燥収縮・クリープに対する鉄筋の拘束応力を考慮すればよい。

(2) ひび割れ幅・間隔

図—4に、載荷直後のひび割れ発生状況を、表—4に載荷直後の平均ひび割れ間隔、平均ひび割れ幅の測定値を示す。

なお、ひび割れの測定は、支点近傍を除き、モーメント均一区間の曲げひび割れを対象に、はり底面において、軸方向に設けた2本の基準線との交点において行った。また、測定点数が比較的少ないことと、定性的な傾向をより適切にとらえるため、ひび割れは平均値で評価した。

表—4より、材令の大きいII 供試体のほうが、平均ひび割れ間隔が小さい結果となっている。しかし、載荷直後のひび割れ幅の大小関係については、材令の差による定量的な傾向は現れていない。

表—5は、ひび割れを発生させてから598日までの平均ひび割れ幅の経時変化を示す。

平均ひび割れ幅は、約2年間でかなり大きくなる結果となっている。

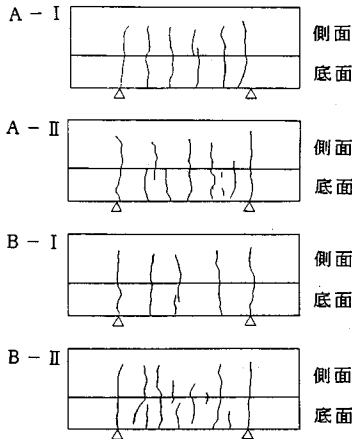


図-4 各供試体のひび割れ図

表-4 ひび割れ間隔・ひび割れ幅実測値

	平均ひび割れ間隔(mm)	平均ひび割れ幅(mm)
A-I	146	0.09
A-II	132	0.10
B-I	164	0.10
B-II	117	0.07

表-5 ひび割れ幅の経時変化

t (日)	ひび割れ幅(mm)	A-I	A-II	B-I	B-II
0	w <sub>1</sub>	0.09	0.10	0.10	0.07
140	w <sub>2</sub>	0.20	0.18	0.19	0.13
288	w <sub>3</sub>	0.21	0.19	0.20	0.15
589	w <sub>4</sub>	0.21	0.19	0.21	0.15
Δw=w <sub>4</sub> -w <sub>1</sub> (mm)		0.13	0.09	0.11	0.08

t: ひび割れ発生後の経過日数(日)

一般に、ひび割れ幅は、概ね式(1)のようにひび割れ間隔と、ひび割れ間でのコンクリートと鉄筋のひずみ差の積の形で表すことができる<sup>8)</sup>。

$$w = \ell \cdot \Delta \epsilon \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $\ell$ : ひび割れ間隔

$\Delta \epsilon$ : ひび割れ間におけるコンクリートと鉄筋のひずみ差

ここで、式(2)に示すように、ひずみ差の項としては、ひび割れ間のコンクリートの引張は無視し、鉄筋ひずみとひび割れ近傍の局部的な乾燥収縮ひずみの影響を考慮した数値の和で表すこととした。

$$\Delta \epsilon = \sigma_{SE} / E_s + \epsilon_{SH} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $\sigma_{SE} / E_s$ : 鉄筋ひずみ

$\epsilon_{SH}$ : ひび割れ近傍の局部的な乾燥収縮ひずみを考慮するための数値

各供試体とも、時間の経過に伴い、ひび割れ間隔は変

表-6  $\epsilon_{SH}$ の逆算値 ( $\times 10^{-6}$ )

	A-I	A-II	B-I	B-II
w(mm)	0.21	0.19	0.21	0.15
$\ell$ (mm)	146	132	164	117
$\epsilon_{SH}$ : 逆算値	517	348	675	491
$\epsilon_{SH}$ : 計算値①	312	78	312	78
$\epsilon_{SH}$ : 計算値②	446	214	441	217

w: 平均ひび割れ幅実測値  $\ell$ : 平均ひび割れ間隔実測値

表-7 PRC 桁の諸元

	緊張力 (t)	配 合		$\sigma_{sk}$ (MPa)	かぶり (mm)	鉄筋 間隔 (mm)	鉄筋 径 (mm)	スパン (m)
		W(kg/m <sup>2</sup> )	C(kg/m <sup>3</sup> )					
A 桁	240	164	280	23.5	66	110	32	25.8
B1桁	1000	163	330	29.4	46	100	32	30.0
B2桁	800	163	330	29.4	46	100	32	30.0
C1桁	800	163	330	29.4	46	100	32	30.0
C2桁	600	163	330	29.4	46	100	32	30.0

化しておらず、また、鉄筋応力度の実測値の変化量もあまり大きくないため、ひび割れ幅の経時増加は、ほとんどがひび割れ近傍における局部的な乾燥収縮に起因するものであると考えられる。表-6に、ひび割れ幅、ひび割れ間隔として実測値を、ひび割れ断面での鉄筋応力度増加量として計算値を用い、式(1)(2)により算定した $\epsilon_{SH}$ の逆算値を示す。

なお、表-6に示した乾燥収縮度の計算値は、阪田らの提案式<sup>5)</sup>を用いた、ひび割れを発生させた材令以降に進行する乾燥収縮ひずみの計算値である。計算値①は乾燥収縮度を計算する際の断面定数として供試体寸法を用いたものであり、計算値②は、断面定数を、ひび割れにより分割された小部材(部材高さ=はり高/5<sup>9)</sup>)とし、それぞれ湿度70%として計算した値である。逆算値は、純粋に表面近傍の乾燥の影響のみである、とは言えないものの、その値は、供試体断面定数を用いた場合の乾燥収縮よりもかなり大きな値となったが、ひび割れにより分割された小部材として考えることにより、やや近い値となった。また、逆算値は、若材令でひび割れを発生させた供試体のほうが大きな値となった。

### 3. 実橋の測定結果と考察

#### (1) PRC 桁の実橋測定<sup>10)</sup>

表-7に、実橋測定を行ったPRC桁の諸元を示す。PRC桁は、すべて外ケーブル方式の箱形桁であり、いずれの桁も供用開始から、2~3年経過後に測定を行った。ひび割れの測定は、スパン中央付近桁底面の、橋軸方向幅3.0m区間について行い、ひび割れ幅の測定は、30cm間隔で桁に設けた橋軸方向の基準線とひび割れの

表—8 測定結果および計算値

	A 桁	B 1 桁	B 2 桁	C 1 桁	C 2 桁
平均ひび割れ幅 (mm)	0.11	0.05	0.07	0.05	0.05
平均ひび割れ間隔 (mm)	196	183	349	246	592
最大ひび割れ幅 (mm)	0.25	0.15	0.25	0.15	0.20
ひび割れ間隔* (mm)	195	175	300	213	413
ofhh測定点数 (個)	127	279	152	184	79
鉄筋応力度 (MPa)	35.0 [ 357 ]	68.6 [ 700 ]	102.7 [ 1048 ]	45.7 [ 466 ]	70.2 [ 716 ]
計 最大ひび割れ幅 (mm)	0.17	0.12	0.15	0.14	0.16
算 最大ひび割れ間隔 (mm)	319	232	232	232	232
値 鉄筋応力度 (MPa)	77.9 [ 795 ]	78.7 [ 803 ]	105.7 [ 1079 ]	80.8 [ 824 ]	107.1 [ 1093 ]
ひび割れ発生時材令 (日)	23	49	134	50	100

\* 最大ひび割れ位置でのひび割れ間隔 (ひび割れを挟む左右間隔の平均値) ( ) : kgf/cm<sup>2</sup>

交点において、クラックスケールにて行った<sup>11)</sup>。なお、これら PRC 桁においては、ひび割れの発生本数、形状等は、通常の RC 桁とほぼ類似している。

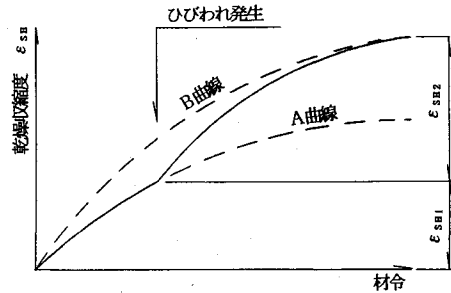
表—8 は、ひび割れ等の測定結果と、計算値の比較を示す。最大ひび割れ幅の実測値は、測定点に対して 95% 個を包括するひび割れ幅である (以下、本文における最大ひび割れ幅の実測値は、同義である)。また、鉄筋応力度は、スパンセンター付近に取り付けた鉄筋ひずみ計から読みとったものである。

最大ひび割れ幅の算定式は、土木学会標準示方書に示された式 (3) を用い、鉄筋応力度は、ひび割れ断面における永久荷重時の鉄筋応力度増加量とし、プレストレスによる偏心軸力を外力として作用させうえで、ひび割れ発生までに進行する、クリープ・乾燥収縮に対する鉄筋の拘束応力を考慮して算定し、ひび割れ発生時のコンクリート材令は、支保工撤去時とし、施工記録より判断 (表—8) した。また、 $\epsilon'_{cs} = 150 \times 10^{-6}$  とした<sup>12)</sup>。なお、B1 桁、C1 桁では、支保工撤去後に、B2 桁、C2 桁では、支保工撤去前にプレストレスが導入されている。

$$w = k_1 \{ 4c + 0.7(c_s - \phi) \} \times (\sigma_{SE} / E_s + \epsilon'_{cs}) \dots \dots \dots (3)$$

- ここに、 $k_1$  : 附着を考慮する係数     $c$  : かぶり
- $c_s$  : 鉄筋間隔     $\phi$  : 鉄筋径
- $\sigma_{SE}$  : 鉄筋応力度増加量
- $E_s$  : 鉄筋のヤング係数
- $\epsilon'_{cs}$  : コンクリートの乾燥収縮およびクリープによる曲げひび割れ幅の増加を考慮するためのひずみ

ひび割れ幅は、ひび割れ間隔、コンクリートと鉄筋のひずみ差の積で表されるため、算定式の精度を論じるためには、それぞれの項を関連づけて検討を行う必要があるが、乾燥の影響を受けた表面の曲げひび割れ幅に関しては、その算定誤差要因のもっとも大きな因子が、乾燥収縮の評価であると考えられる<sup>10)</sup>ので、その影響に焦点を絞りを、以下の検討を行った。



図—5 ひび割れ発生後の乾燥収縮度の経時変化モデル

表—9 ひび割れ幅の計算値

	A 桁		B 1 桁		B 2 桁		C 1 桁		C 2 桁	
湿度 (%)	6 0	7 0	6 0	7 0	6 0	7 0	6 0	7 0	6 0	7 0
$\epsilon_{sh} (\times 10^{-4})$	454	368	430	368	353	324	417	356	359	321
$\sigma_{SE}$ (MPa) (kgf/cm <sup>2</sup> )	85.7 874	77.9 795	92.3 942	78.7 803	125 1275	106 1079	93.9 958	80.8 824	123 1253	107 1093
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
w (mm) : 実測値	0.25		0.15		0.25		0.15		0.20	
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

供試体試験の結果から、表面のひび割れ幅を増大させる乾燥収縮ひずみは、く体断面定数を用いて算定した乾燥収縮ひずみの計算値よりもかなり大きく、また、その値は、若材令でひび割れが発生したほど大きくなる。そこで、これらの現象を表現するため、表面近傍の乾燥収縮ひずみの経時変化曲線として図—5 に示すものを考えた。

すなわち、A 曲線は、く体断面定数を用いて算定した場合の乾燥収縮ひずみの経時変化の計算値、B 曲線は、ひび割れにより、分割された小部材としての乾燥収縮ひずみ経時変化の計算値であり、表面近傍の乾燥収縮ひずみの経時変化は、ひび割れの発生に伴い、A 曲線から、B 曲線へと移行する、というモデルを考えた。図中の  $\epsilon_{sh2}$  を式 (2) の  $\epsilon_{sh}$  に相当する、表面近傍の局所的な乾燥収縮によるひび割れ幅の増大を考慮する数値とした。この数値は、図からも明らかのように、ひび割れ発生が早期であるほど、その値は大きくなり、供試体試験で見られたような定性的傾向を評価することができる。

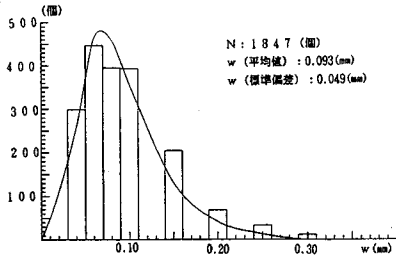
表—9 には、この考え方により算定した最大ひび割れ幅の計算値を示す。分割部材の長さは、式 (3) のひび割れ間隔に相当する項の値とし、高さは、下床版厚とした。乾燥収縮ひずみの計算には、阪田らの提案式<sup>5)</sup>を用い、湿度は、60% と、70% の 2 通りで計算した。

湿度 60% とした場合には、計算値のほうが実測値よりもやや大きめ、湿度 70% とした場合には、比較的精度よく算定できる結果となった。

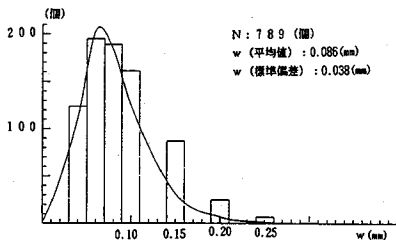
表—10 RC 桁の諸元

	配 合		$\sigma_{cs}$ (MPa)	かぶり (mm)	鉄筋 間隔 (mm)	鉄筋 径 (mm)	$\sigma_{SE}$ (MPa)	スパン (m)	測定 連数
	W(kg/m <sup>3</sup> )	C(kg/m <sup>3</sup> )							
D桁	166	325	23.5	66	80	32	128.9 [1295]	19.1	17
E桁	166	325	23.5	66	84	32	103.9 [1060]	14.1	6

$\sigma_{SE}$ : 鉄筋応力増加量。[ ]内は、kgf/cm<sup>2</sup>



図—6 D桁のひび割れ幅の分布



図—7 E桁のひび割れ幅の分布

以上より、ひび割れ近傍の乾燥収縮ひずみを上記のよ  
うに、ひび割れ間の平均ひずみとして評価することで、  
表面の最大曲げひび割れ幅の算定精度は向上した。

(2) RC 桁の実橋測定<sup>13)</sup>

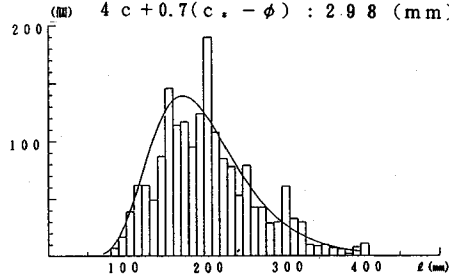
測定を行った RC 桁の諸元を表—10 に示す。

これらの桁は、ほぼ同一位置、同時期に建設された東  
北新幹線の桁である。ひび割れの測定方法は、前述の  
PRC 桁の場合と同様である。

図—6、図—7 には、ひび割れ幅の分布を示す。また、  
図—8、および、図—9 にひび割れ間隔の分布を示す。  
ひび割れ間隔の最大値から 5% 目を最大ひび割れ間隔  
の実測値として、式 (3) によるひび割れ間隔の算定値  
と比較すると、その誤差は、5% 程度であり、式 (3)  
により、かなり精度よく算定できることが確認された。

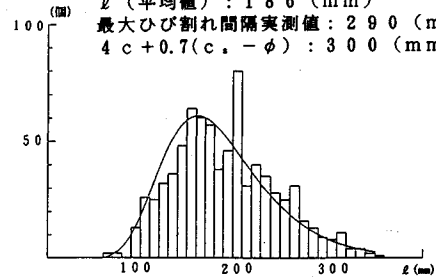
次に、各ひび割れ間隔に対する最大ひび割れ幅の実測  
値と計算値との比較を行った。乾燥収縮の影響の計算モ  
デルは前述の方法により、湿度を 70%、ひび割れによ  
り分割された小部材の高さとしては、D 桁で 30 cm、E  
桁で 26 cm とした (桁高の 1/5<sup>9)</sup>)。また、ひび割れ発生  
は、全断面有効として計算したコンクリート下縁応力度  
と、設計曲げ強度の比較により (表—11)、全死荷重載  
荷時と考え、通常の施工工程から勘案して、その時点  
での材令を 100 日とした。

N : 1847 (個)  
 $\ell$  (平均値) : 200 (mm)  
最大ひび割れ間隔実測値 : 310 (mm)  
 $4c + 0.7(c - \phi)$  : 298 (mm)



図—8 D桁のひび割れ間隔の分布

N : 789 (個)  
 $\ell$  (平均値) : 186 (mm)  
最大ひび割れ間隔実測値 : 290 (mm)  
 $4c + 0.7(c - \phi)$  : 300 (mm)



図—9 E桁のひび割れ間隔の分布

表—11 コンクリート縁引張応力度 (MPa)

	自重作用時	全死荷重作用時	設計曲げ強度
D桁	2.14 [21.8]	4.17 [42.5]	2.62 [26.7]
E桁	2.12 [21.6]	4.29 [43.8]	2.62 [26.7]

[ ]内は、kgf/cm<sup>2</sup>

表—12  $\epsilon'_{cs}$  の計算値 ( $\times 10^{-6}$ )

$\ell$ (mm)	D桁	E桁	$\ell$ (mm)	D桁	E桁
100	426	415	210	336	328
110	415	405	220	330	322
120	405	395	230	324	317
130	395	386	240	319	312
140	386	377	250	314	307
150	378	368	260	309	302
160	370	361	270	304	297
170	362	354	280	299	293
180	355	347	290	295	289
190	348	340	300	291	285
200	342	334			

各ひび割れ間隔ごとのひび割れ発生後に進行するひび  
割れにより分割された小部材としての乾燥収縮ひずみの  
計算値を表—12 に示す。

計算値は、概ね  $300 \sim 400 \times 10^{-6}$  程度となった。この  
値を、式 (3) における  $\epsilon'_{cs}$  とし、 $\sigma_{SE}$  として RC 計算  
によるひび割れ断面における永久荷重時の鉄筋応力度を  
用いて算定した各ひび割れ間隔に対する最大ひび割れ幅  
の計算値と、最大ひび割れ幅実測値との比較を図—10、

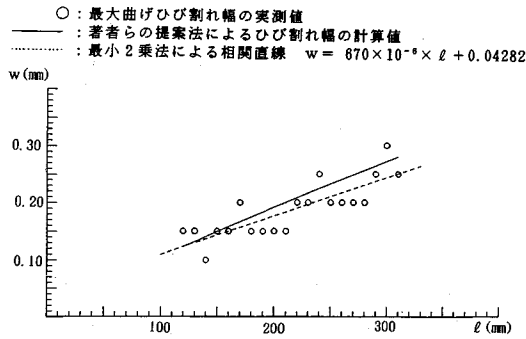


図-10 D 桁のひび割れ間隔とひび割れ幅の関係

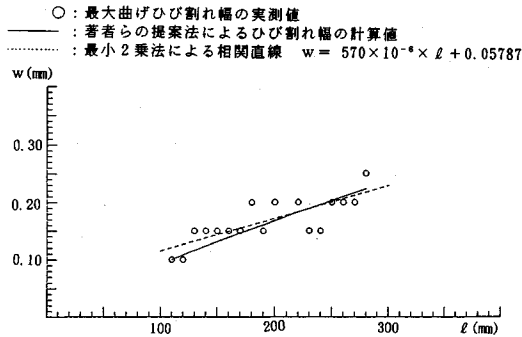


図-11 E 桁のひび割れ間隔とひび割れ幅の関係

11 に示す。

一方、別の実橋における測定結果より、尾坂らは、各ひび割れ間隔に対する最大ひび割れ幅との関係は、精度よく、一次の正の相関関係を用いて表すことができることを見いだしている<sup>11)</sup>。今回の測定結果についても、同様に最小 2 乗法により、一次の相関直線を求め、結果を図中に点線で示した。

表-13 は、計算値の実測値に対するひび割れ幅の算定精度を比較したものである。

表からも、著者らの提案した算定法を用いても、表面の最大ひび割れ幅は、比較的精度よく算定できることがわかる。

次に、表-14 に示す橋梁について、同様の考え方で最大曲げひび割れ幅を算定し、実測値との比較を行った。結果を表-15 に示す。

ひび割れ発生時の荷重条件としては、自重作用時（支保工撤去時）を想定し、F~K 桁については、材令 30 日、L 桁については、移動式支保工にて施工されているため、材令 7 日とし、ひび割れ発生後に進行する小部材としての乾燥収縮ひずみを算定し、式(3)により、ひび割れ幅を計算した。なお、湿度は、60% および 70% で計算した。

乾燥収縮ひずみは、環境（湿度）の影響を大きく受けるため、異なった環境下に位置する橋梁に対して一律に湿度を評価した場合には、計算値と実測値との比は、か

表-13 最大ひび割れ幅の計算値と実測値との誤差

	著者らの提案法		最小 2 乗法	
	分散(mm <sup>2</sup> )	標準偏差(mm)	分散(mm <sup>2</sup> )	標準偏差(mm)
D 桁	0.0011	0.0324	0.0007	0.0267
E 桁	0.0006	0.0252	0.0005	0.0234

表-14 RC 桁の諸元

形式	型式	配 合		$\sigma_{s1}$ (MPa)	$\sigma_{s2}$ (MPa)	$\sigma_{s3}$ (MPa)	$l$ (mm)	スパン (m)
		W(kg/m <sup>3</sup> )	C(kg/m <sup>3</sup> )					
F 桁	T 形桁	153	290	23.5	75.8 [ 773 ]	125.2 [1277]	300	19.0
G 桁	T 形桁	147	300	18.6	65.5 [ 668 ]	114.6 [1169]	225	12.9
H 桁	T 形桁	160	319	23.5	84.1 [ 858 ]	153.0 [1560]	298	15.8
I 桁	T 形桁	181	315	20.6	79.7 [ 813 ]	122.4 [1248]	210	14.0
J 桁	T 形桁	150	288	23.5	106.5 [1087]	159.8 [1630]	312	14.1
K 桁	T 形桁	145	314	26.5	88.2 [ 900 ]	126.9 [1294]	307	19.1
L 桁	箱形桁	145	314	26.5	128.6 [1322]	178.9 [1824]	307	24.1

$\sigma_{s1}$  : (永久荷重) による鉄筋応力度増加量。 [ ]内は、kgf/cm<sup>2</sup>  
 $\sigma_{s2}$  : (永久荷重+列車荷重+衝撃) による鉄筋応力度増加量。 <EA-17>を載荷した計算値

表-15 ひび割れ幅の計算結果

湿 度 (%)	F 桁		G 桁		H 桁		I 桁		J 桁		K 桁		L 桁	
	6.0	7.0	6.0	7.0	6.0	7.0	6.0	7.0	6.0	7.0	6.0	7.0	6.0	7.0
$\epsilon_{sh} (\times 10^{-4})$	392	310	380	301	394	314	486	406	377	297	382	303	544	395
w (mm) : 計算値	0.23	0.20	0.16	0.14	0.24	0.22	0.18	0.17	0.28	0.25	0.25	0.22	0.36	0.31
w (mm) : 実測値	0.35	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.35	0.25	0.25	0.25	0.35	0.25
計算値/実測値	0.66	0.57	0.80	0.70	1.20	1.10	0.90	0.85	1.40	1.25	0.71	0.63	1.44	1.24

なり大きなばらつきを持つこととなった。しかしながら、その平均値は、湿度 70% と仮定した場合には、0.91, 60% とした場合には、1.04 となり、全体的には比較的よく対応している、と考えられる。

#### 4. 表面の最大曲げひび割れ幅算定法の提案

##### (1) ひび割れ幅の算定法

以上の考え方で、実橋の永久荷重時の表面の最大ひび割れ幅が比較的精度よく算定できることが確認できた。これらの考え方による、学会式<sup>12)</sup>を基本とした表面の最大曲げひび割れ幅の算定式を示す(式(4))。

$$w_2 = k_1 \{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \times (\sigma_{SE} / E_S + \epsilon'_s) \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $w_2$  : 表面の最大曲げひび割れ幅  
 $k_1$  : 付着を考慮する係数  $c$  : かぶり  
 $c_s$  : 鉄筋間隔  $\phi$  : 鉄筋径  
 $\sigma_{SE}$  : 鉄筋応力度増加量  
 $E_S$  : 鉄筋のヤング係数  
 $\epsilon'_s$  : コンクリートの乾燥収縮等による曲げひび割れ幅の増加を考慮するためのひずみ  
 $\sigma_{SE}$  を計算する時には、荷重の載荷条件とコンクリート縁応力度との比較から、曲げひび割れが発生する際の材令を予想し、ひび割れ発生までに進行するコンクリー

表-16 設計に用いる $\epsilon'_s$ の提案値 ( $\times 10^{-6}$ )

t (日)	$\epsilon'_s$
30	450
100	350
200以上	300

t: ひびわれ発生時の  
コンクリート材令

トのクリープ・乾燥収縮に対する鉄筋の拘束応力を考慮すればよく、ひび割れ断面における荷重としては、永久荷重を考慮すればよい。

また、 $\epsilon'_s$ は、同様にひび割れ発生材令を予測し、ひび割れ発生以降に進行するひび割れにより分割された小部材の乾燥収縮ひずみとすればよい。

## (2) 設計実務に用いる $\epsilon'_s$

設計実務に用いる $\epsilon'_s$ の値について、試算を行った。パラメーターとしては、ひび割れが発生するときのコンクリート材令を与えることとした。すなわち、荷重条件として、自重の作用、全永久荷重の作用、変動荷重の作用を考え、それぞれの荷重作用時に、縁応力度から、ひび割れの発生が想定できるものは、その時点を生ひび割れの発生材令とした。材令は、通常の施工工程から勘案して、それぞれ、30日、100日、200日以上と仮定した。なお、この分類を通常の鉄道構造物にあてはめると、材令30日でひび割れが発生すると考えられるものに、RC桁、ラーメン高架橋のほり、100日としては、外ケーブルを用いたPRC桁（自重作用時に、曲げひび割れが発生しないよう縁応力度を制限している。）、200日以上としては、付着あるケーブルを用いたPRC桁（変動荷重が載荷されるまでは、ひび割れが発生しないよう縁応力度を制限している。）が考えられる。表-16は、ひび割れ発生後に進行するひび割れで分割された小部材としての乾燥収縮ひずみを、実橋測定で対象とした桁の断面寸法を用いて、阪田らの提案式により算定し、全体を包括するよう与えた値である。

設計実務上は、 $\epsilon'_s$ として、表に示した値を使用すればよい、と思われる。

## 5. ま と め

本文をまとめると以下のとおりである。

### (1) 供試体試験の結果

(1) ひび割れ発生前（全断面有効時）のコンクリートの乾燥収縮に対する鉄筋の拘束応力は、平面保持の仮定により、鉄筋位置でのひずみの適合条件より、ほぼ適正に算定できる。

(2) ひび割れ発生後のコンクリートのクリープ、乾燥

収縮による鉄筋応力度の変化量は、比較的小さい。

(3) 従って、コンクリートの乾燥収縮、クリープの影響を考慮して、ひび割れ断面における鉄筋応力度増加量を算定する際には、ひび割れ発生までに（全断面有効時）進行するクリープ、乾燥収縮の影響を考慮すれば、実用上は、ほぼ妥当である、と思われる。

(4) ひび割れ面近傍での乾燥収縮の影響によるひび割れ幅の増加量は、かなり大きい。また、その増分を、ひび割れ間隔での平均ひずみで考慮すると、く体断面を用いた乾燥収縮ひずみの計算値よりもかなり大きく、その値は、早期にひび割れが発生したほうが大きくなることが確認された。

### (2) 実橋測定の結果

(1) ひび割れ間隔は、土木学会標準示方書に示された式により、ほぼ妥当に表現できる。

(2) ひび割れ間のコンクリートと鉄筋のひずみ差として、ひび割れ断面における永久荷重時の鉄筋ひずみに、ひび割れ発生後に進行するひび割れにより分割された小部材としての乾燥収縮ひずみを加えることにより、表面のひび割れ幅は、比較的精度よく算定できる。

(3) 以上の考えに基づき、ひび割れ発生時におけるコンクリート材令をパラメーターとした表面の曲げひび割れ幅算定法を提案した。

## 6. おわりに

供試体試験および実橋の測定結果に基づき、乾燥の影響を考慮した比較的精度のよい表面の曲げひび割れ幅の算定法を提案した。この方法を用いることにより、RC桁からPRC桁まで、同一の考え方で、曲げひび割れに対する設計が行える。

最後に、提案式をまとめるにあたり、鉄道構造物設計標準改訂のため設置された『コンクリート構造物設計標準委員会幹事会（幹事長：岡村甫東京大学教授）』の幹事各位に、御助言、御指導いただいたことを記し、謝辞とさせていただきます。

## 参 考 文 献

- 1) 国鉄建造物設計標準・同解説 鉄筋コンクリート構造物および無筋コンクリート構造物：土木学会，1983年。
- 2) 谷内田昌熙・石橋忠良・佐藤 勉：鉄筋コンクリート橋梁のひびわれと鉄筋腐食に関する調査・研究，土木学会論文集，1987年2月。
- 3) 石橋忠良・斉藤啓一・津吉 毅・大庭光商・末弘 保：RC梁の曲げひびわれ性状におよぼすひびわれ発生材令の影響，構造工学論文集，Vol. 37A，1991年3月。
- 4) 津吉 毅・大庭光商・石橋忠良：RC梁の曲げひびわれ幅の経時変化に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 14，No. 2，1992年。
- 5) 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，第43回セメント技術講演集。



- 6) 綾野克紀・楢垣 智・大西幸雄・阪田憲次：応力履歴を受けたコンクリートのクリープ特性に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.12，No.1，1990年.
- 7) 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年7月.
- 8) 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年9月.
- 9) 津吉 毅・石橋忠良：最大曲げひびわれ幅算定式に関する一考察，土木学会第45回年次学術講演集，V-142，1990年
- 10) 石橋忠良・鎗石和雄・津吉 毅：PRC 桁のひびわれ幅に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.12，No.2，1990年.
- 11) 大庭光尚・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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.11，No.2，1989年.
- 12) 土木学会コンクリート標準示方書設計編：土木学会，1987年，および1991年.
- 13) 石橋忠良・斉藤啓一・津吉 毅：コンクリート表面の曲げひびわれ幅に対する乾燥収縮の影響についての一考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.13，No.1，1991年.
- 14) 尾坂芳夫・大塚浩司・松本英信：RC 桁橋の部材引張部におけるひびわれ性状，土木学会論文集，第390号，1988年2月.

(1993.1.29 受付)

## A STUDY ON THE ESTIMATION OF BENDING CRACK WIDTH ON THE SURFACES OF CONCRETE GIRDERS

Tadayoshi ISHIBASHI and Takeshi TSUYOSHI

Crack width on the surfaces of concrete girders is increased by partial drying shrinkage near the surfaces after initial cracking. And, reinforcement stress, that is the main factor of bending crack width, is varied by the influence of drying shrinkage and creep. We examined the practical method of the estimation of reinforcement stress in disregard of concrete tensile stress, and the partial drying shrinkage near the surfaces through the results of experiments by RC beams under drying circumstances, and of measurements of crack width, spacing and reinforcement stress on real concrete girders. This paper reports the practical method of calculation of the bending crack width on the surfaces of concrete girders.