

R C 梁の曲げひびわれ性状に及ぼす
ひびわれ発生材令の影響
THE INFLUENCES OF THE CRACKING AGE ON BENDING CRACKING BEHAVIOR
OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

石橋忠良* 齊藤啓一** 津吉 毅*** 大庭光商**** 末弘 保****

By Tadayoshi ISHIBASHI, Keiichi SAITO, Takeshi TSUYOSHI, Mitsuaki OBA and Tamotsu SUEHIRO

In serviceability limit states, the design of bending cracking is very important. Authors, from JNR days, about cracking, have had many investigations and studies, and, recently, proposed an equation to calculate the maximum crack width of actual railway structures precisely. The mainly characteristics of the equation are to estimate the influence of drying shrinkage bigger in the past, and to take the influence of cracking age into account.

This time, to investigate the influence of the cracking age on bending cracking behavior in detail, we carried out the static bending experiment by specimens with different ages. This paper reports the results obtained by this experiment and studies on them.

1. はじめに

ひびわれの発生を許容する構造形式のコンクリート鉄道構造物では、耐久性と美観上観点から、ひびわれの制御設計が行われている。

曲げひびわれに関しては、現在のところ、旧国鉄時代に制定された許容応力度設計法による建造物設計標準（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）では、ひびわれ断面における永久荷重時の鉄筋応力度の制限により、また、昭和62年に制定された「PRCけた設計指針（案）」においては、角田式¹⁾をもとにした最大ひびわれ幅算定式により求めた最大ひびわれ幅の計算値を、環境条件より定まる許容ひびわれ幅以下に制限することにより、ひびわれの制御設計を行っている。

一方、昭和61年に制定された限界状態設計法による土木学会のコンクリート標準示方書では、使用限界状態においては、曲げひびわれ幅の制御は、最大ひびわれ幅の制限により行うことが原則となっており、

* 工博	J R 東日本	東北工事事務所	次長	(☎980 仙台市青葉区五橋 1 ~ 1 ~ 1)
**	"	"	工事管理室	(")
***	"	"	"	(現 青森工事区)
****	"	"	青森工事区	(☎038 青森市篠田 1 ~ 7 ~ 3 2)

曲げひびわれに対する設計が使用限界状態のなかで重要な位置をしめている。

このように設計におけるひびわれ幅の制限に対する位置付けが明確化されつつあること、また、ひびわれの発生を許容するP R C桁の一般化に伴い、曲げひびわれ幅を適切に算出することが、設計上非常に重要な位置を占めるようになってきた。著者らは、旧国鉄時代から実橋での測定を中心に、ひびわれの調査・研究を行い、実橋での曲げひびわれの性状については、数々の報告を行ってきた^{2) 3) 4)}など。また、これらの実橋のひびわれの挙動にみられる特性を表現し、かつ、実鉄道橋のひびわれ測定結果と比して比較的精度の高いコンクリート表面のひびわれ幅算定法を提案した^{1) 5)}。この算定法の大きな特色は、従来より指摘されてきたとおり、コンクリートの乾燥収縮の影響を大きめ²⁾などに考えたことと、ひびわれ発生材令の差異によるコンクリート表面でのひびわれ性状への影響³⁾をとりこんだ点にある。

今回、ひびわれ発生材令の差が、ひびわれの発生性状、ひびわれ間隔や表面のひびわれ幅の進展などに与える影響についてより詳細な検討を加えるため、ひびわれ発生材令を違えた供試体により、静的曲げ載荷試験を行い、考察を加えたので報告する。

2. 実験概要

表－1に供試体の作製に用いたコンクリートの配合を示す。

供試体は、表－2に示したように、計6体作製した。A、B供試体の計4体には、軸方向鉄筋としてD－19を、C供試体の2体には、D－25を配置している。なお、鉄筋にはひずみ計を取付け、随時測定を行った。また、供試体には熱電対を取り付け、温度補正を行えるようにした。

表－1 コンクリートの配合

設計基準強度(kg/cm ²)		セメント種	粗骨材最大寸法(mm)
240		普通セメント	20
スランプ(cm)	空気量(%)	C(kg/m ³)	W(kg/m ³)
8±2.5	4.5±1.0	280	154

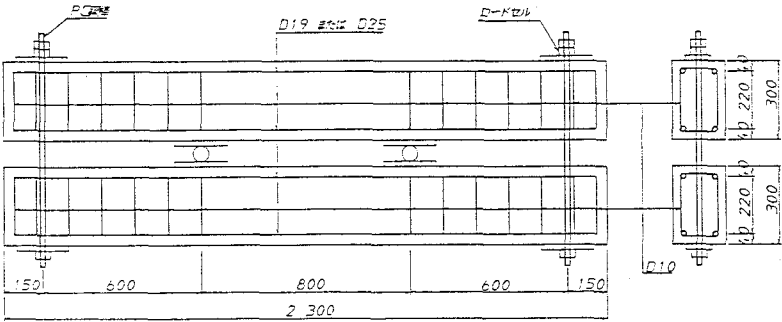
ひびわれ発生材令を違えるため、Ⅰ供試体とⅡ供試体で、コンクリート打設月日を約4か月ずらしている。

表－2 供試体諸元

コンクリートの打設は、屋外で行い、Ⅰ供試体は、載荷試験日まで屋外に放置、Ⅱ供試体は、打設後約1か月間、屋外に放置したあと、その後載荷試験日まで、屋内で保管した。載荷試験は、図－1に示した載荷装置を用い、両端に配置したP C鋼棒を緊張することにより、供試体にひびわれを発生させた。ひびわれを発生させた後も、ロードセルで荷重が一定となるよう緊張力管理を行い、屋内

供試体	寸法(cm)	鉄筋	ひびわれ発生材令(日)	緊張力(t)
A-Ⅰ	20×30×230	D19	14	2.5
A-Ⅱ	"	"	135	"
B-Ⅰ	"	"	14	3.9
B-Ⅱ	"	"	135	"
C-Ⅰ	"	D25	14	4.0
C-Ⅱ	"	"	135	"

(温度、湿度等の管理はなし。)に保管し、鉄筋ひずみとひびわれの計測を継続した。ひびわれ幅の測定は、原則として供試体に等間隔に記入した軸方向の基準線と、ひびわれとの交点付近で行った。



図－1 載荷装置

3. 実験結果の解析

3-1. 全断面有効時（無載荷時）の鉄筋ひずみの経時変化

無載荷時には、コンクリートの乾燥収縮と、それに対する鉄筋の拘束により、鉄筋には圧縮応力が、コンクリートには、引張応力が生じる。鉄筋位置のひずみの適合条件から導かれる式（a）⁶⁾を用い、材令ごとの鉄筋応力度の経時変化を計算した。

$$\varepsilon_{cs}(t_{i+1}, t_i) + \sum \{C_{sp}(t_{i+1}, t_i, t_j) \cdot \Delta\sigma_{co}(t_j)\} + C_{sp}(t_{i+1}, t_i, t_i) \frac{\Delta\sigma_{co}(t_i)}{2} - \frac{A_s \cdot \Delta\sigma_s(t_i)}{E_c(t_i) \cdot A_c} \left(1 + \frac{e_s^2}{\gamma^2}\right) = \frac{\Delta\sigma_s(t_i)}{E_s} \dots\dots\dots (a)$$

ここに、 $\varepsilon_{cs}(t_{i+1}, t_i)$: 時間 t_i から時間 t_{i+1} までに進行する乾燥収縮ひずみ
 $C_{sp}(t_{i+1}, t_i, t_j)$: 時間 t_j に載荷された荷重により、時間 t_i から時間 t_{i+1} までに進行する単位応力あたりのクリープひずみ
 $\Delta\sigma_{co}(t_i)$: 時間 t_i に付加されるコンクリート応力度
 $\Delta\sigma_s(t_i)$: 時間 t_i に付加されるクリープ、乾燥収縮による鉄筋応力度変動量
 A_c 、 A_s : コンクリート、鉄筋の断面積
 $E_c(t_i)$: 材令 t_i におけるコンクリートの弾性係数
 E_s : 鉄筋の弾性係数 e_s : 鉄筋の偏心距離 γ : 断面二次半径

式（a）を解く際に、コンクリートの乾燥収縮度、クリープひずみ、弾性係数の計算は、（Ⅰ）阪田らの提案式^{7) 8)}と、（Ⅱ）『CEB-FIP MODEL CODE 1990』に示された方法⁹⁾の、2通りで行い、断面係数は鉄筋換算断面を用いた。

図-2に、Ⅱ供試体3体の鉄筋ひずみの経時変化と、式（a）を使った計算値との比較を示す。コンクリートの乾燥収縮度の計算を行う際に、湿度は、62%、70%、77%の3通りで計算した。62%は、屋内の湿度の実測値の平均値、77%は、供試体を作製した場所の年平均湿度である。

阪田らの提案式を用いた方が、乾燥収縮度の計算値が大きくなるため、CEB-FIP MODEL CODE に示された式を用いた場合よりも、計算で求められる鉄筋の圧縮ひずみは大きくなる。

鉄筋ひずみの実測値と計算値を、比較してみると、今回の試験結果では、打設後1～2か月程度は、CEB-FIP MODEL CODE によりコンクリートの乾燥収縮、クリープを評価したほうが、また3か月以上経過後は、阪田らの提案式を用いたほうが整合性がよいようである。

通常、我々が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問題とするのは、構造形式としてはPRC構造、またはPC構造の場合であり、その場合、この拘束応力を問題として取り扱う時期は、材令がかなり経過した時点となる。従って、今回の試験から得られた結果によると、コンクリートのクリープ、乾燥収縮の評価は、阪田らの提案

表-3 載荷直前のコンクリート引張応力度の計算値 (kg/cm²)

	A-I	A-II	B-I	B-II	C-I	C-II
鉄筋ひずみとして計算値を用いた場合	3.0	11.1	3.0	11.1	4.6	16.8
鉄筋ひずみとして実測値を用いた場合	2.4	8.7	2.6	9.6	2.6	12.9
乾燥収縮ひずみの計算値 (×10 ⁻⁶)	90	355	90	355	90	355

式を用いたほうがよい結果を得ることができる、と言える。コンクリートの乾燥収縮、クリープひずみを阪田らの提案式を用いて算定した場合の式(a)による鉄筋ひずみの計算値と実測値を比較してみると、供試体は、打設当初比較的湿度の高い屋外に放置されていたため、鉄筋ひずみの実測値の経時変化は、湿度62%としてコンクリートの乾燥収縮度を計算した場合の鉄筋ひずみの計算値よりもやや小さめの値となっている。少々乱暴であるが、屋外と屋内の平均湿度70%としてコンクリートの乾燥収縮度を計算した場合の鉄筋ひずみの計算値は、打設後2～3か月以降は、実測値と比較的あっている。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効果は、阪田らの提案式でコンクリートの乾燥収縮、クリープを評価すれば、式(a)でほぼ評価できる、といえる。

以下、式(a)による計算を行う際には、コンクリートの乾燥収縮、クリープの評価は、すべて阪田らの提案式によった。

表-3には、載荷直前までに生じている鉄筋ひずみの実測値から算出した鉄筋反力を、コンクリート断面に作用する引張軸力として考えて計算したコンクリート表面の引張応力度と、式(a)による鉄筋ひずみの計算値を用いて、同様に求めたコンクリート表面の応力度を示す。乾燥収縮度を計算する際の湿度は、Ⅰ供試体では77%、Ⅱ供試体では70%とした。表には、載荷時の材令までに進行するコンクリートの乾燥収縮ひずみの計算値も付記した。載荷時の材令が大きいほどコンクリートの乾燥収縮ひずみが大きく、鉄筋の拘束効果により発生するコンクリートの引張応力度も大きい。また、載荷材令の遅いⅡ供試体では、鉄筋量が多い程、鉄筋の拘束効果が大きくコンクリートに大きな引張応力が発生している。

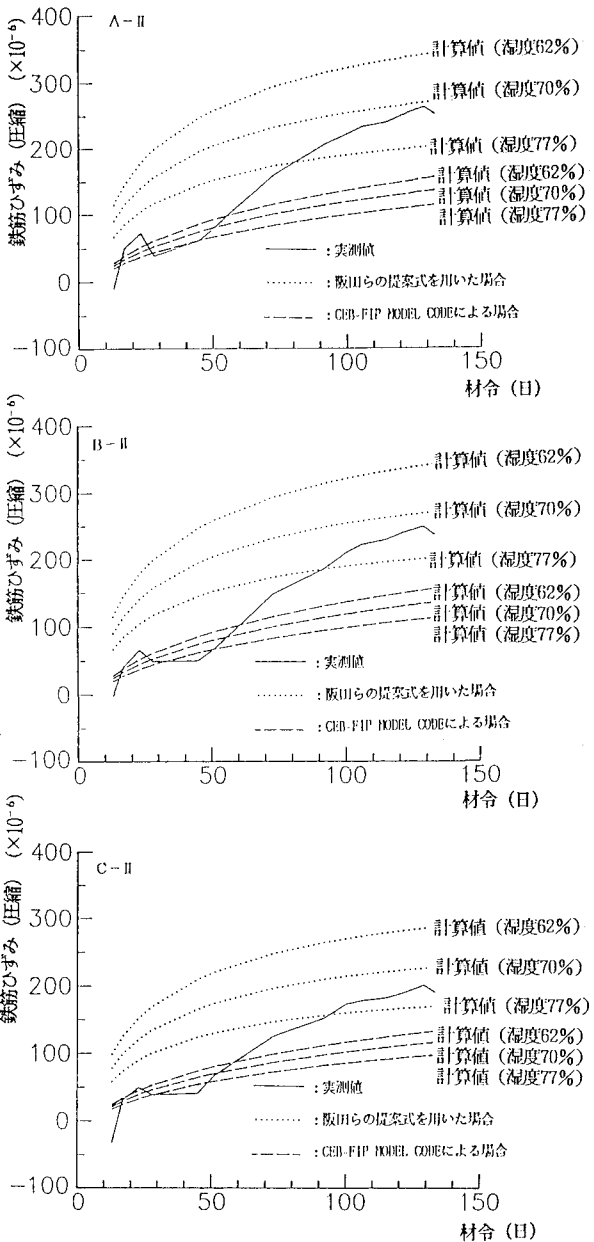


図-2 引張側鉄筋ひずみの経時変化

表-4 ひびわれ発生時の緊張力(I)

	A-I	A-II	B-I	B-II	C-I	C-II
計算値	1.4	1.3	1.4	1.3	1.5	1.1
実測値	1.8	0.9	2.3	1.0	2.8	0.7

3-2. 載荷試験直後

表-5 ひびわれ間隔(mm)

	A-I	A-II	B-I	B-II	C-I	C-II
平均ひびわれ間隔	126	114	160	114	184	120
最大ひびわれ間隔	210	210	170	180	270	170
角田式による計算値	181	181	181	181	166	166

(1) ひびわれ発生荷重

ひびわれ発生までにコンクリートの乾燥収縮に対する鉄筋の拘束により生じているコンクリートの引張応力度も考慮し、ひびわれ発生荷重を逆算した。ひびわれ発生までにすでに生じているコンクリート引張応力度としては、鉄筋ひずみの実測値から求まる鉄筋反力を、コンクリート断面に作用する引張軸力として考えて、計算した値を用い、計算は、鉄筋換算断面を用い、コンクリートの弾性係数は、阪田ら⁸⁾の提案式を用いて求めた。なお、ひびわれは、コンクリートの縁引張応力度が、式(b)で求まる引張強度に達したときに発生する、と考えた。

$$\sigma_{ct} = 0.58 \sigma_{ck}^{2/3} \dots \dots \dots (b)$$

ここに、 σ_{ct} : コンクリートの引張強度

σ_{ck} : コンクリートの圧縮強度

表-4にひびわれ発生荷重の実測値と、計算値との比較を示す。ひびわれの発生が、目視により確認された時点の緊張力をひびわれ発生荷重の実測値とした。

計算上も、ひびわれ発生材令が遅い方が、材令の経過に伴う引張強度の増大にも係わらず、コンクリートの乾燥収縮に対する鉄筋の拘束効果が増大し、コンクリート表面に大きな引張応力度が生じているため、ひびわれ発生荷重は小さな値となる。しかし、ひびわれ発生荷重の実測値と計算値との適合性はあまりよくなく、実測値においては、計算値に見られる以上に、材令によるひびわれ発生荷重の差異が顕著に現れている。若材令でひびわれを発生させたI供試体では、実測のひびわれ発生荷重が計算値より

大きめの評価となっており、ひびわれ発生材令を遅らせたII供試体では、実測値の方が計算値より小さな値となっている。これは、コンクリートの表面と内部では、乾燥収縮の進行度が異なるため、コンクリート表面には内部応力としての引張力が生じており、この応力が材令の経過と共に増大することなどが原因である、と考えられる。

(2) 載荷試験直後のひびわれの発生状態

図-3に、6体の供試体の緊張終了直後のひびわれ性状図を示す。また、ひびわれ間隔の実測値を表-5に示す。ひびわれ間隔は、支点間のモーメントの一定区間に発生しているひびわれの間隔を測定した。平均ひびわれ間隔は、ひびわれ発生材令が遅いII供試体の方が小さく、ひびわれ発生材令が遅く、鉄筋の拘束効果により、載荷開始時にすでに大きな引張力がコンクリートに生じている方が、多くのひびわれが発生している。しかし、尾坂らの研究¹⁰⁾にもあるように、最大ひびわれ幅に影響を与える最大ひびわれ間隔は、乾燥の多少の影響、すなわちひびわれ発生材令差による影響をあまり受けていない。最大ひびわれ間隔の計算値を、角田式¹⁾で求めた値も付記する。計算値は、実測値と比較的あっている。

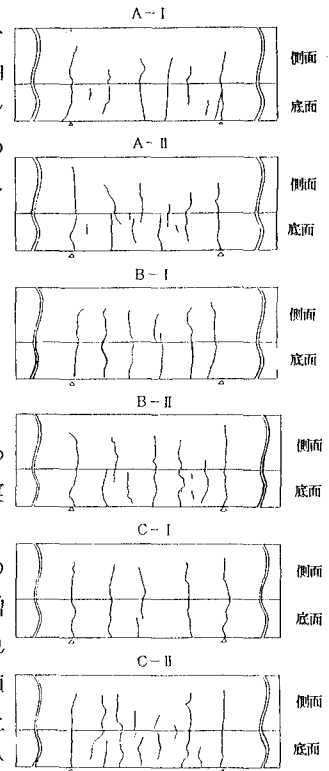


図-3 ひびわれ図

(3) ひびわれ発生後の鉄筋応力度

ひびわれ発生までに生じるコンクリートの乾燥収縮に対する鉄筋の拘束により生じる鉄筋反力を考慮し、平面保持の仮定に基づき、力とモーメントの釣合いから求まる式(c)、(d)¹¹⁾により、ひびわれ断面における引張側鉄筋応力度増加量を計算し、実測値との比較を行った。結果を表-6に示す。

$$\frac{M+N_1(d_{s1}-d_{s2})}{-N_2-N_1}=\frac{I_{cx}+I_{sx}}{Q_{cx}-Q_{sx}}+(d_{s2}-x)\dots\dots\dots(c)$$

$$\sigma_s=n_s\cdot\frac{-N_2-N_1}{Q_{cx}-Q_{sx}}\cdot(d_{s1}-x)\dots\dots\dots(d)$$

ここに、x：圧縮縁から中立軸までの距離

d_{s1}、d_{s2}：圧縮縁から、圧縮側鉄筋、引張側鉄筋までの距離

M：外力として作用する曲げモーメント

N₁：圧縮側鉄筋位置のコンクリート応力度が「0」の時の圧縮鉄筋反力

N₂：引張側鉄筋位置のコンクリート応力度が「0」の時の引張鉄筋反力

Q_{cx}、I_{cx}：中立軸に関する圧縮側コンクリートの断面一次モーメントおよび
断面二次モーメント

Q_{sx}、I_{sx}：中立軸に関する鉄筋のコンクリートに換算した断面一次モーメントおよび
断面二次モーメント

△供試体以外は、計算値と実測値は比較的あっている。△供試体において、実測値が計算値よりかなり小さくなっていることは、おもに計算上は無視しているコンクリートの引張部の寄与によるものである、と考えられる。

表-6 ひびわれの発生による鉄筋応力度増加量(kg/cm²)

	A-I	A-II	B-I	B-II	C-I	C-II
計算値	1336	1706	1977	2339	1267	1647
実測値	850	1189	1926	2394	1368	1628

ひびわれ発生材令が遅い方が、コンクリートの乾燥収縮の影響により大きな圧縮力が鉄筋に生じているため、計算上ひびわれの発生による鉄筋応力度の増加量は大きい。また、実測値もこの傾向を表しており、ひびわれ発生時の鉄筋応力度の増加量を、ひびわれの発生までに進行するコンクリートの乾燥収縮等により生じる鉄筋の圧縮力を考慮し、平面の保持を仮定し、コンクリートの引張部を無視して計算することは、妥当である、と思われる。

(4) 載荷試験直後の表面のひびわれ幅

載荷試験直後の表面のひびわれ幅は、ひびわれの発生による鉄筋応力度の増加量をσ_sとし、ひびわれ間でのコンクリートの伸び等を微小である、と仮定して無視¹²⁾すれば式(c)で表すことができる。

表-7 載荷試験直後のひびわれ幅

$$w=\ell\cdot\sigma_s/E_s\dots\dots\dots(e)$$

ここに、w：表面のひびわれ幅

ℓ：ひびわれ間隔

σ_s：鉄筋応力度増加量

E_s：鉄筋の弾性係数

	B-I	B-II	C-I	C-II
平均ひびわれ間隔実測値=ℓ _{ave} (mm)	160	114	184	120
平均ひびわれ幅w=ℓ _{ave} ×σ _s (mm)	0.15	0.13	0.12	0.09
平均ひびわれ幅計算値(mm)	0.10	0.10	0.10	0.07
最大ひびわれ間隔実測値=ℓ _{max} (mm)	170	180	270	170
最大ひびわれ幅w=ℓ _{max} ×σ _s (mm)	0.16	0.21	0.18	0.13
最大ひびわれ幅計算値(mm)	0.15	0.20	0.15	0.15

鉄筋応力度増加量 σ_s 、ひびわれ間隔 l として、実測値を用い、表面のひびわれ幅の計算を行い、実測値と比較を行った。結果を表-7に示す。なお、表-7に示したひびわれ間隔の実測値は、ひびわれ幅の測点に関するものだけであるので、表-5に示した数値と若干異なる。

最大ひびわれ間隔が、ひびわれ発生材令によりあまり影響を受けなかったB供試体では、ひびわれ発生材令が遅いほど、前述したように鉄筋応力度増加量が大きいので、表面の最大ひびわれ幅も大きくなっている。逆に、C供試体では、鉄筋応力度増加量はB供試体と同じくⅡ供試体の方が大きい、ひびわれ間隔がⅠ供試体のほうが相当大きいので、表面のひびわれ幅はⅠ供試体の方が大きくなっている。

鉄筋応力度増加量については、他の諸条件が同一であるなら、ひびわれ発生材令が遅い方が大きい、という定性的評価ができるが、最大ひびわれ間隔については今回の実験からは、ひびわれの発生材令の差による定性的傾向は見うけられなかった。

3-3. 載荷試験後

(1) 鉄筋応力度の経時変化

図-4にひびわれ発生後の引張鉄筋ひずみ実測値の経時変化を示す。圧縮側コンクリート有効断面のクリープ、乾燥収縮等の影響¹³⁾により、載荷直後に比べ引張応力が若干増加傾向にある。表-8には、ひびわれ発生後の約5ヶ月間で増加した鉄筋応力度を示す。引張側のコンクリートの寄与等によりひびわれ発生直後の鉄筋応力度増加量の実測値が計算値を大きく下回っているA供試体では、材令の経過にともなう鉄筋応力度の増加割合はかなり大きい。しかし、実測値と計算値の適合性が比較的良好であったB、C供試体においては、文献13)にも述べられているように、ひびわれ発生後のクリープ、乾燥収縮の影響による引張鉄筋応力度の変動は、割合からいくと比較的小さい、といえる。いずれにせよ、ひびわれ発生後5ヶ月程度では、材令の経過とともに、引張鉄筋の応力度が、ひびわれ発生までに進行する乾燥収縮等の影響を考慮して、平面保持とコンクリートの引張無視の仮定に基づいて計算した鉄筋応力度を大きく上回るこ

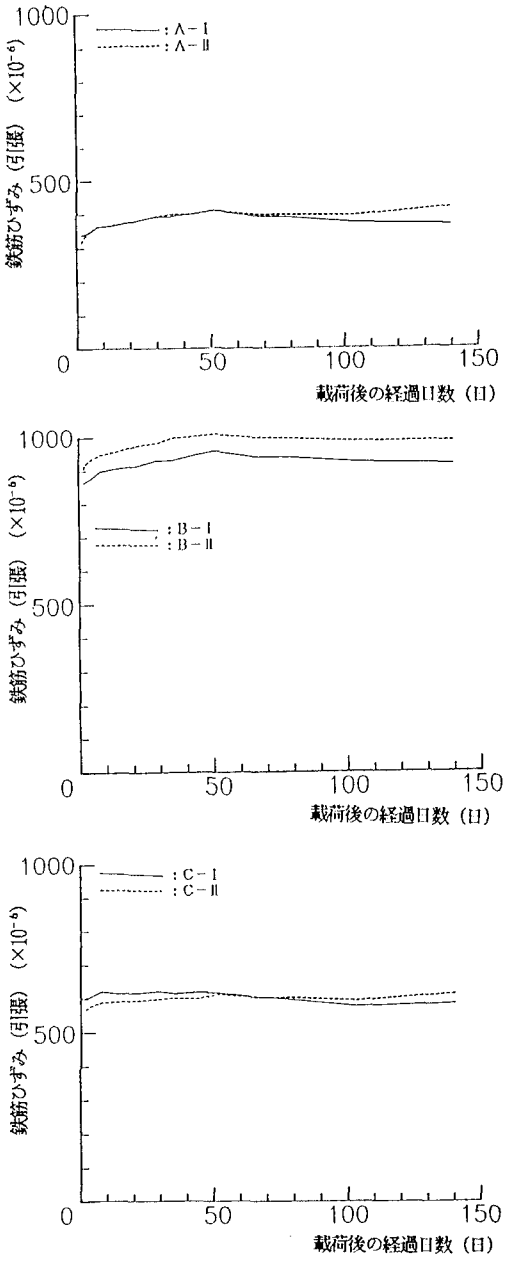


図-4 ひびわれ発生後の引張鉄筋ひずみの経時変化

はないようである。

(2) ひびわれ性状の経時変化

ひびわれ発生後5ヶ月程度では、表面のひびわれ幅の増大はかなり見られるものの、ひびわれの上縁への進展はわずかであり、ひびわれ性状に大きな変化は見られなかった。

表-8 鉄筋応力度の経時増加量実測値

	A-I	A-II	B-I	B-II	C-I	C-II
$\Delta\sigma$, (kg/cm ²)	96	248	132	200	-38	104
応力度変化率(%)	10.1	17.3	6.4	7.7	2.7	6.0

(3) 表面のひびわれ幅の経時変化

表面のひびわれ幅の経時増加量は、鉄筋応力度の経時増加分と、主としてコンクリートの乾燥収縮の直接的影響によるものに区別¹⁾して評価できる。表面のひびわれ幅の増加に影響を及ぼすコンクリートの乾燥収縮は、ひびわれ面近傍で局部的に大きくなっていることが予想されるが、ひびわれ間隔全長にわたりコンクリートの乾燥収縮が平均的に分布している、と仮定すれば、表面のひびわれ幅の経時増加量 Δw は、式(f)で与えられる。

$$\Delta w = \ell (\Delta\sigma_s / E_s + \epsilon_{cs}) \dots \dots \dots (f)$$

ここに、 ℓ : ひびわれ間隔
 $\Delta\sigma_s$: 鉄筋応力度の経時増加量
 E_s : 鉄筋の弾性係数
 ϵ_{cs} : 主としてコンクリートの乾燥収縮による影響

表-9 ひびわれ幅の最大増加量に対する乾燥収縮の影響 ϵ_{cs} の計算

	B-I	B-II	C-I	C-II
ひびわれ幅増加量の最大値 Δw_{max} , (mm)	0.17	0.10	0.16	0.12
ひびわれ間隔の実測値(mm)	140	160	135	165
鉄筋応力度の経時増加分によるひびわれ幅増加 Δw_s , (mm)	0.01	0.02	0.0	0.01
乾燥収縮の直接的影響によるひびわれ幅増加 Δw_{cs} , (mm)	0.16	0.08	0.16	0.11
逆算による乾燥収縮度 ϵ_{cs} ($\times 10^{-6}$)	1143	500	1185	667
[方法1]による乾燥収縮度計算値 ($\times 10^{-6}$)	381	160	381	160
[方法2]による乾燥収縮度計算値 ($\times 10^{-6}$)	479	265	480	285

表-10 ひびわれ幅の平均増加量に対する乾燥収縮の影響 ϵ_{cs} の計算

	B-I	B-II	C-I	C-II
ひびわれ幅増加量の最大値 Δw_{max} , (mm)	0.11	0.07	0.09	0.06
ひびわれ間隔の実測値(mm)	146	132	214	117
鉄筋応力度の経時増加分によるひびわれ幅増加 Δw_s , (mm)	0.01	0.02	0.0	0.01
乾燥収縮の直接的影響によるひびわれ幅増加 Δw_{cs} , (mm)	0.10	0.06	0.09	0.06
逆算による乾燥収縮度 ϵ_{cs} ($\times 10^{-6}$)	708	417	435	496
[方法1]による乾燥収縮度計算値 ($\times 10^{-6}$)	381	160	381	160
[方法2]による乾燥収縮度計算値 ($\times 10^{-6}$)	478	270	470	273

表-11 ひびわれ増加に占める乾燥収縮の影響の割合(%)

	B-I	B-II	C-I	C-II
ひびわれ幅増加に占める乾燥収縮の割合 α	91	73	100	85

B、C供試体の表面のひびわれ幅増加量の最大値、そのひびわれ近傍の実測ひびわれ間隔、鉄筋応力度経時増加量から、式(f)を用い ϵ_{cs} を逆算した。結果を、表-9に示した。

ϵ_{cs} の値は、ひびわれ発生材令が早期であるI供試体においては 1100×10^{-6} 程度、ひびわれ発生材令の遅いII供試体においては 500×10^{-6} 程度となる。また、表-9には湿度62%として阪田らの提案式⁷⁾を用いて、以下の考え方で計算した、ひびわれ発生後に進行する無筋コンクリートとしての乾燥収縮度の計算値を示す。

- [方法1] 乾燥収縮度を求めるときの部材を、く体全体として考えた場合。
[方法2] 乾燥収縮度を求めるときの部材を、ひびわれの発生後は、ひびわれにより分割された小部材として考えた場合。なお、小部材の高さは、主鉄筋かぶり、幅は実測ひびわれ間隔を用いた。

式(f)による ϵ_{cs} の逆算値は、上記の方法で求めた計算値よりもかなり大きい。また、ひびわれ発生

が早期であるほど、 ε_{cs} の値は大きく、乾燥の影響による表面のひびわれ幅増加量は大きくなっている。

表-10には、同様の解析を表面のひびわれ幅の平均増加量に対して行った結果を示す。ひびわれの発生が早期であるほど表面のひびわれ幅の増加量は大きい。B供試体のようにひびわれ間隔がほぼ同一である場合、逆算による乾燥収縮度の計算値は、ひびわれ発生が早期であるほど大きい。しかし、C供試体の場合は、ひびわれ間隔が大きく異なり、ひびわれ幅増加量の差は、この間隔の差が支配的である、と考えられる。

表-11に、式（g）で示される表面のひびわれ幅の増加量のうち、主として乾燥の影響による増加分の割合 α を示す。

$$\alpha = \frac{\Delta w - \Delta w_s}{\Delta w} \quad \dots\dots\dots (g)$$

ここに、 α ：表面のひびわれ幅の経時増加量に占めるコンクリートの乾燥収縮の直接的影響の割合
 Δw ：表面のひびわれ幅の経時増加量
 Δw_s ：表面のひびわれ幅の経時増加量のうち鉄筋応力度の経時増加によるもの

コンクリートの表面のひびわれ幅の経時増加に占めるコンクリートの乾燥収縮の直接的影響の割合は非常に高く、ひびわれの発生後は、鉄筋応力度の増加による要因ではなく、主としてコンクリートの乾燥収縮の影響により表面のひびわれ幅は増加する、といえる。

4. まとめ

載荷時の材令を違えた静的載荷試験により以下のことがわかった。

- (1) ひびわれの発生前（全断面有効時）に進行するコンクリートの乾燥収縮による鉄筋の拘束応力度は、乾燥収縮、クリープの評価を阪田らの提案式により行った場合、材令3か月以上では、理論式によりほぼ表現できる。
- (2) 他の諸条件が同一であるなら、ひびわれ発生材令の遅い方が、鉄筋の拘束効果によりコンクリートに大きな引張力が生じており、そのため、ひびわれの発生頻度は大きい。しかし、最大ひびわれ幅に影響を与える最大ひびわれ間隔と、ひびわれの発生材令差との相関は認められなかった。
- (3) ひびわれ時の鉄筋応力度増加量は、ひびわれ発生までに進行するコンクリートの乾燥収縮により生じる鉄筋の圧縮力を考慮し、平面保持、コンクリートの引張無視の仮定に基づいた計算式でほぼ妥当に表現できる。また、材令以外の諸条件が同一である場合、この値は、ひびわれ発生材令が遅く、載荷時に鉄筋に大きな圧縮力が生じている方が大きな値となる。
- (4) ひびわれ発生後、引張側鉄筋応力度は、徐々に微増していくが、5ヶ月経過後までは、ひびわれ発生までに生じる鉄筋の圧縮力を考慮し、平面保持、コンクリートの引張無視の仮定に基づいた計算値を、大きく上回ることにはなかった。
- (5) ひびわれ発生後は、主にコンクリートの乾燥収縮の影響により表面のひびわれ幅は増加する。その影響量は、供試体全体として計算した場合の乾燥収縮量よりもかなり大きく、ひびわれ発生材令が早期であるもの程、大きな値となる傾向にあり、ひびわれの発生が早期であるほど、ひびわれ発生後のコンクリートの乾燥収縮の影響による表面のひびわれ幅の増大量は著しい。
- (6) 載荷後5ヶ月経過した段階において、表面のひびわれ幅に占めるコンクリート乾燥収縮の直接的影

響度は、かなり大きく、この傾向はひびわれ発生材令が早期であるほど顕著である。

以上より、設計時においても以下の点を考慮し、表面の最大ひびわれ幅を算出することが必要である、と思われる。

- (1) ひびわれ発生後の乾燥収縮の直接的影響による表面のひびわれ幅の増大量はかなり大きい。
- (2) ひびわれ発生後の表面のひびわれ幅の増大量は、他の諸条件が同一である場合、ひびわれ発生材令が早期であるほど、大きな値となる。
- (3) 表面のひびわれ幅の増加に影響を与えるひびわれ発生後の乾燥収縮度は、く体としての乾燥収縮度の計算値よりもかなり大きい。

〔参考文献〕

- 1) 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
- 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、第378号、1987.2
- 3) 石橋忠良・浦野哲司；P R C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,
Mar. 1987
- 4) 石橋忠良・館石和雄・津吉 毅；P R C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 第12巻 1990
- 5) 津吉 毅・石橋忠良・斉藤啓一；P R C鉄道橋のひびわれ幅算定方法について、プレストレストコン
クリートの発展に関するシンポジウム 1990
- 6) 館石和雄・大庭光満・竹内研一・津吉 毅；P R C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年3月
- 7) 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
- 8) 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第340号
1983, 12
- 9) CEB-FIP MODEL CODE 1990
- 10) 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, Mar. 1985
- 11) P R Cけたの設計指針(案)；東日本旅客鉄道 昭和62年
- 12) 角田与史雄；ひびわれの制御設計—P CまたはP R C構造の場合—、コンクリートジャーナル、Vol.
11, No. 9, Sept. 1973
- 13) 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, July 1987

(1990年10月12日受付)