

論 文

[2044] RC 梁の曲げひびわれ幅の経時変化に関する一考察

正会員○津吉 毅 (東日本旅客鉄道)

正会員 大庭光商 (東日本旅客鉄道)

正会員 石橋忠良 (東日本旅客鉄道)

1. はじめに

コンクリート鉄道桁の設計においては、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、曲げひびわれの検討を、永久荷重時の鉄筋応力度を制限することにより行われてきたが、限界状態設計法への移行にともない、原則として、最大曲げひびわれ幅を、耐久性、構造物の外観等から定まるひびわれ幅の制限値以下におさえることにより行うこととしている[1]。

この場合に、最大ひびわれ幅の算定精度が設計上重要となってくるが、著者らは、多くの実橋測定等の結果から、表面のひびわれ幅を増大させるコンクリートの乾燥収縮の影響量を従来よりも大きくし、さらに、ひびわれの発生するときのコンクリート材令をパラメーターとすることにより、比較的精度のよい表面の最大ひびわれ幅の算定法を提案してきた[2][3]。さらに、ひびわれの発生材令の差が、曲げひびわれに与える影響を検討するために、ひびわれ発生材令を離れた供試体を用いた静的曲げ載荷試験を行い、ひびわれを発生させた後、5か月程度経過時までの成果については報告を行った[4]。

今回は、ひびわれを発生させた後、約2年経過時までの、ひびわれ幅、鉄筋ひずみ等の経時変化の測定値について若干の考察を加えたので報告する。

2. 試験概要

表-1は、6体の供試体諸元である。A供試体、B供試体は、軸方向筋としてD19を、C供試体は、軸方向筋としてD25を用いた。載荷時（ひびわれ発生時）のコンクリート材令は、I供試体が14日、II供試体が135日であり、120日程度の材令差を与えた。

表-1 供試体諸元

供試体	寸 法 (c m)	鉄 筋	載荷時材令 (日)	緊張力(t)	σ_{et} (kgf/cm ²)	備 考
A - I	20×30×230	D 1 9	1 4	2. 5	5 0	σ_{ek} =240(kgf/cm ²) C=280 (kgf/m ³) W=154 (kgf/m ³)
A - II	20×30×230	D 1 9	1 3 5			
B - I	20×30×230	D 1 9	1 4	3. 9	7 8	
B - II	20×30×230	D 1 9	1 3 5			
C - I	20×30×230	D 2 5	1 4	4. 0	8 0	
C - II	20×30×230	D 2 5	1 3 5			

鉄筋ひずみ計は、圧縮側と引張側の計4本の鉄筋に、1箇所ずつ、それぞれスパン中央付近に

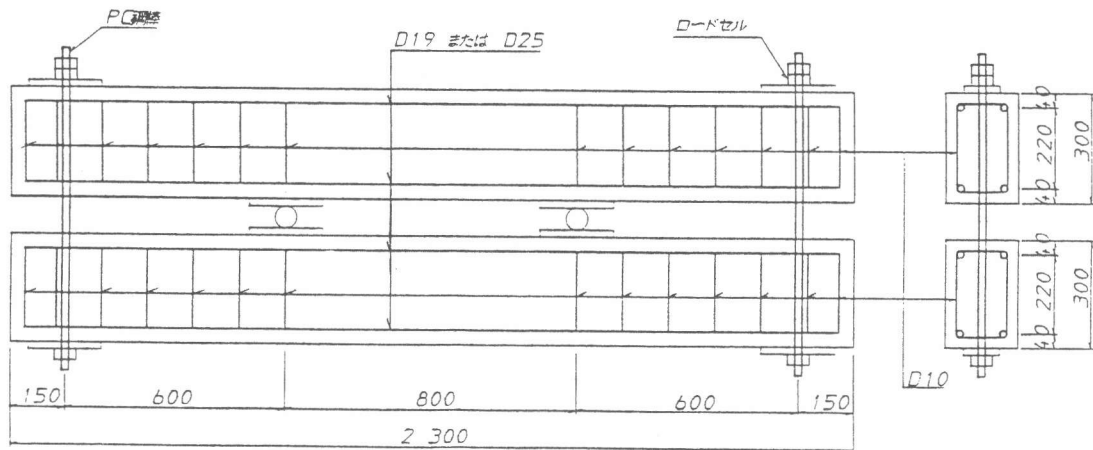


図-1 載荷装置 単位(mm)

取り付けた。図-1は、載荷装置である。材令の異なるⅠ、およびⅡ供試体を一組にして、両端に配したPC鋼棒を緊張することによりひびわれを発生させ、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鋼棒張力の管理を行った。表-1に、断面定数としてコンクリート純断面（全断面有効）を用いた場合の、モーメント均一区間におけるコンクリート引張縁応力度 σ_{ct} を示す。

Ⅰ供試体は、載荷直前まで屋外に、また、Ⅱ供試体は、打設後1か月は屋外に、その後載荷まで屋内に保管した。なお、載荷後は、供試体は屋内に保管し、湿度、温度を一定に保つ管理は行っていない。

3. 測定結果

3-1. 鉄筋ひずみの経時変化

図-2～4に、Ⅱ供試体の引張鉄筋のひずみ経時変化の測定値を示す。図中の点線は、コンクリート全断面を有効として、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、鉄筋位置でのひずみの適合条件から算定した鉄筋ひずみの計算値[4]である。なお、コンクリートの乾燥収縮度、クリープひずみ、弾性係数の算定には、阪田らの提案式[5][6]を用い、環

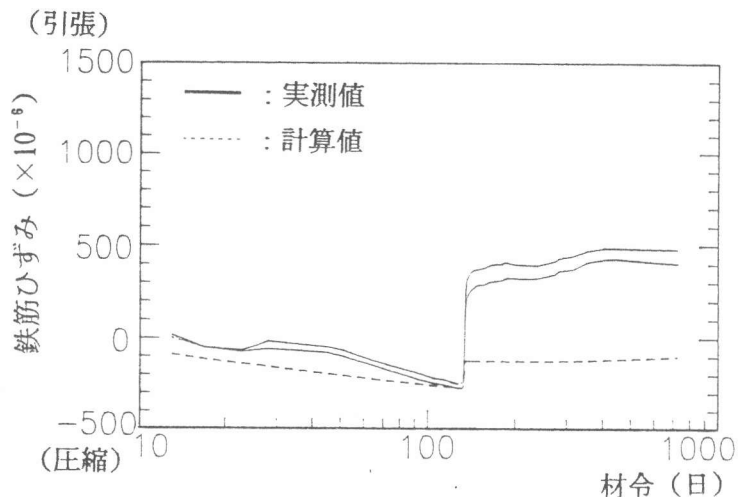


図-2 A-Ⅱ供試体引張側鉄筋ひずみの経時変化

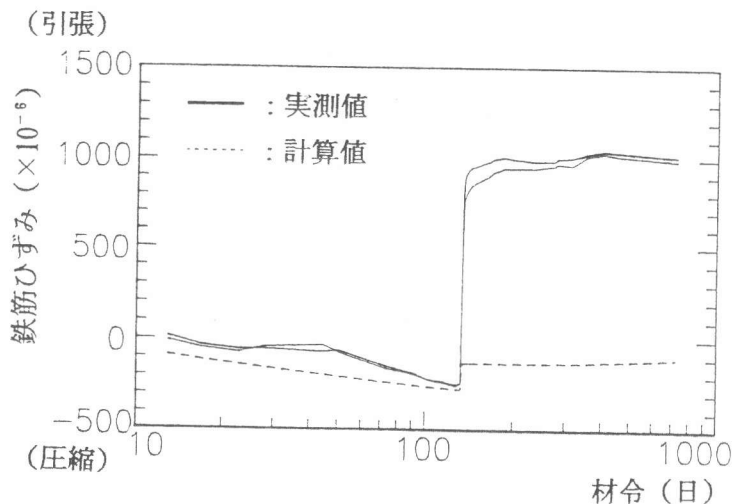


図-3 B-Ⅱ供試体引張鉄筋ひずみの経時変化

境湿度は、70%として計算している。計算値は、コンクリート全断面を有効とした場合のものであるので、ひびわれを発生させた後の実測値とは当然のことながら大きく異なっているが、ひびわれ発生までは、比較的対応している。

表-2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算定したひびわれ断面における引張側鉄筋応力度増加量の計算値[4]と、実測値である。ひびわれ発生までに進行する乾燥収縮ひずみは、載荷時材令の遅いⅡ供試体のほうがかなり大きい。そのため、Ⅱ供試体の方に、すでに大きな鉄筋反力が生じており、したがって、ひびわれの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数値を示している。

A供試体においては、実測値と計算値にかなりの相違がみられるが、B、C供試体では、実測値と計算値は、比較的よく対応している。これは、載荷直前での鉄筋の拘束応力がほぼ適正に評価されていることを考えれば、ひびわれ断面での計算上の仮定として、コンクリートの引張部を無視していることが主な原因であると考えられる。すなわち、A供試体では、応力レベルがB、C供試体に比べて低いために、ひびわれが完全に入りきらなかったため、または、ひびわれが完全に入りきっていたとしても、ひずみ計取り付け位置がひびわれとひびわれの中間に位置していたために、コンクリートの引張部の寄与の度合いがかなり大きかったためであると考えられる。

表-3には、コンクリートの引張部の影響を無視してもよいと考えられるB、C供試体のひびわれ発生後、最後の計測時までの約600日間に進行するコンクリートの乾燥収縮、クリープの

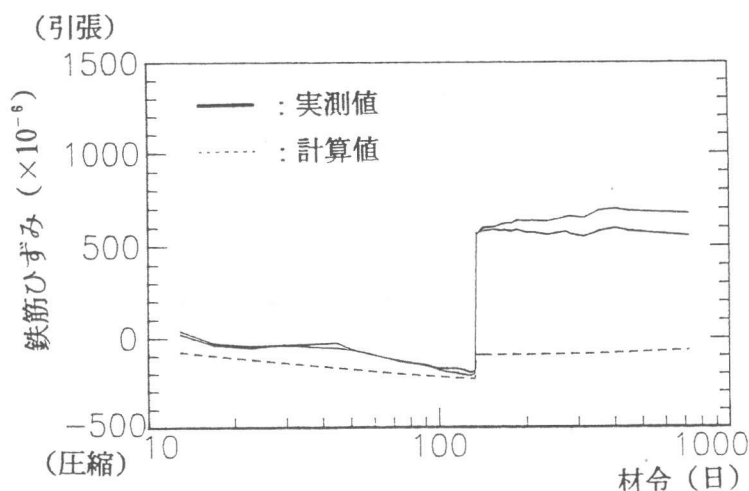


図-4 C-Ⅱ供試体引張側鉄筋ひずみの経時変化

表-2 ひびわれ発生による鉄筋応力度増加量(kgf/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
ϕ_{c1}	1.13	2.59	1.13	2.59	1.13	2.59
ε_{c1}	121	355	121	355	121	355

ϕ_{c1} : ひびわれ発生までに進行するクリープ係数

ε_{c1} : ひびわれ発生までに進行する乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

表-3 ひびわれ発生後の鉄筋引張応力度変化量 $\Delta\sigma$ (kgf/cm²)

	B-I	B-II	C-I	C-II
$\Delta\sigma$	49	135	-11	101
ϕ_{c2}	2.52	1.15	2.52	1.15
ε_{c2}	312	78	312	78

ϕ_{c2} : ひびわれ発生後に進行するクリープ係数

ε_{c2} : ひびわれ発生後に進行する乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

計算値と、鉄筋引張応力度変化量の実測値を示す。ひびわれ発生後も、有効断面コンクリートのクリープ、乾燥収縮の進行により、引張側の鉄筋応力度も変動するが、変動量は、計算上比較的少ないことが知られている[7]。実際にも、乾燥収縮量、クリープ値に相違があるⅠ供試体、Ⅱ供試体とも、その変動の割合は比較的少ない。

以上より、ひびわれ断面での鉄筋応力度を算定する際に、ひびわれ発生までに進行するコンクリートのクリープ、乾燥収縮に対する鉄筋の拘束を適切に考慮できれば、ひびわれの発生による鉄筋応力度の増分は、比較的精度よく算定でき、ひびわれ発生が遅いほうが、鉄筋の拘束効果により、ひびわれ発生による鉄筋応力度増加量は大きくなる。しかし、ひびわれの発生後は、今回のような応力レベルにおいては、材令の相違、すなわち、残された乾燥収縮、クリープ値の相違の影響は比較的少なく、鉄筋応力度の変化量は比較的小さいことが確認された。

3-2. ひびわれ間隔

図-5に、載荷直後のひびわれ発生状況を示す。ひびわれ発生時のコンクリート材令が大きいⅡ供試体のほうが、それまでに進行するコンクリートの乾燥収縮ひずみが大きいため、鉄筋の拘束により、コンクリート表面に大きな引張応力が生じている。そのため、ひびわれの発生頻度は高い。なお、ひびわれ本数には、今回の場合、載荷後約2年を経ても変動は生じなかった。

3-3. ひびわれ幅の経時変化

表-4に、B、C供試体の表面の平均ひびわれ幅の経時変化を示す。ひびわれが早期材令で発生したⅠ供試体のほうが、その増加量は大きい。ひびわれ幅の増加の原因としては、ひびわれ間でのコンクリートと鉄筋の付着の喪失等、種々の要因が考えら

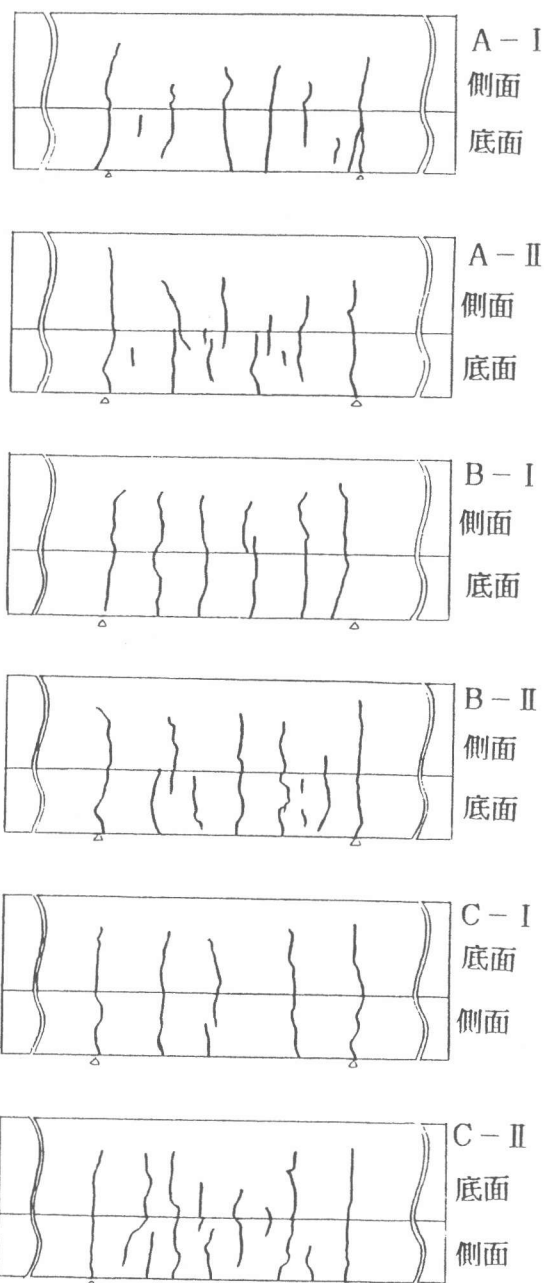


図-5 ひびわれ発生状況

表-4 ひびわれ幅の経時変化

t (H)		B-I	B-II	C-I	C-II
0	w_1 (mm)	0.09	0.10	0.10	0.07
140	w_2 (mm)	0.20	0.18	0.19	0.13
288	w_3 (mm)	0.21	0.19	0.20	0.15
589	w_4 (mm)	0.21	0.19	0.21	0.15
$\Delta w = w_4 - w_1$ (mm)		0.13	0.09	0.11	0.08
$\alpha = \Delta w / w_1$ (%)		143	89	113	115

れるが、ひびわれ断面での鉄筋応力度
 があまり変化していないことを考慮す
 れば、主として表面近傍に生じる乾燥
 収縮の直接的影響によるものである、
 と言える。表-4に示した α の値は、
 ひびわれ発生後の表面近傍の乾燥収縮
 の影響によるひびわれ幅の増加量と、
 初期ひびわれ幅との比率である。今回
 のような環境のもとでは、その比率は
 90～140%とかなり大きい。

表-5 ひびわれ幅増分の経時変化

	B-I	B-II	C-I	C-II
$\Delta w_1 = w_2 - w_1$ (mm)	0.11	0.08	0.09	0.06
$\Delta w_2 = w_3 - w_2$ (mm)	0.01	0.01	0.01	0.02
$\Delta w_3 = w_4 - w_3$ (mm)	0.00	0.00	0.01	0.00
$\alpha_1 = \Delta w_1 / \Delta w$ (%)	92	89	82	75
$\alpha_2 = \Delta w_2 / \Delta w$ (%)	8	11	9	25
$\alpha_3 = \Delta w_3 / \Delta w$ (%)	0	0	9	0

表-5は、表面のひびわれ幅増加量の経時変化である。ひびわれ発生後、140日間までのひ
 びわれ幅の増加量はかなり大きい。また、ひびわれ幅の増加は、ひびわれ発生後、約1年ではば
 終了し、その後はほとんど増加していない。このことは表面のひびわれ幅を増加させる主な原因
 である表面近傍に生じる乾燥収縮の進行が、今回の環境条件化においては、約1年程度で終了す
 ることを示している。

表面のひびわれ幅は、式(1)に示したようにひびわれ間隔と、その区間での鉄筋とコンクリ
 ートとのひずみ差との積の形で表示できる。

$$w = \ell \cdot (\sigma_s / E_s + \varepsilon_{cs}) \quad (1)$$

ここに、 ℓ : ひびわれ間隔 σ_s : ひびわれ断面での鉄筋応力度 E_s : ヤング係数
 ε_{cs} : 主として表面近傍のコンクリートの乾燥収縮によるひずみ差の増分

表-6に、 w 、 ℓ として、平均ひびわれ幅、およ
 び平均ひびわれ間隔の実測値を、 σ_s としては、表
 -2に示した計算値を用いて、式(1)により逆算
 した ε_{cs} の値を示す。鉄筋応力度として、コンクリ
 ートの引張を完全に無視したひびわれ断面での値を
 用いているため、つまり、ひびわれ間でのコンクリ
 ートの引張の寄与を考慮していないため、 ε_{cs} の逆
 算値は、かならずしも、表面近傍のコンクリートの
 乾燥収縮ひずみのみを評価しているとはいえないが、
 ひびわれ発生材令が早期であるI供試体のほうがその
 値は大きい。また、表-3に示したひびわれ発生後に
 進行する供試体としての乾燥収縮ひずみ(乾燥収縮ひ
 ずみを算定する際の、断面諸数として供試体の断面寸
 法を用いたもの)の値よりもかなり大きい。表-6に
 示した ε_{cs} の計算値は、ひびわれ発生後に進行する、
 ひびわれにより分割された小部材としてのコンクリ
 ートの乾燥収縮ひずみ[2]である。計算には、阪田らの

表-6 ε_{cs} の逆算値と計算値($\times 10^{-6}$)

	B-I	B-II	C-I	C-II
w (mm)	0.21	0.19	0.21	0.15
ℓ (mm)	146	132	164	117
ε_{cs} : 逆算値	517	348	675	491
ε_{cs} : 計算値	446	214	441	217

表-7 ε_{cs} の計算値の経過日数 t
 までの進行度合い(%)

t (日)	B-I	B-II	C-I	C-II
140	78	78	78	78
288	91	89	90	89
589	98	96	98	96
∞	100	100	100	100

提案式[5]を用い、湿度70%、小部材の高さは、主鉄筋かぶりとした。計算値よりも、逆算値のほうが大きめの値ではあるが、このように考えると若材令でひびわれが発生したほうが、ひびわれ発生後のひびわれ面近傍での乾燥収縮ひずみが大きいという傾向を、定性的には評価できる。

表-7は、 ε_{cs} のひびわれ発生後、経過日数 t (日)までの進行度合いである。計算上も、ひびわれ発生後の約1年程度で、その進行度合いは90%程度となっており、表-5に示したひびわれ幅増分の傾向と比較的一致している。

4. まとめ

載荷時のコンクリート材令を違えた供試体の鉄筋ひずみ、ひびわれ幅等の約2年間の測定により、以下のことがわかった。

(1) ひびわれ発生材令以外の諸条件が同一であるなら、ひびわれ発生までに進行するコンクリートの乾燥収縮、クリープの影響により、ひびわれ発生時の鉄筋応力度増分は、ひびわれ発生材令の遅い方が大きくなる。

(2) 今回のような応力レベルにおいては、ひびわれの発生後は、コンクリートの引張部が無視できるという条件のもとでは、ひびわれ発生時点でのコンクリート材令の影響、すなわち、残されたクリープ、乾燥収縮の多少に係わらず、鉄筋応力度の変化量は比較的少ない。

(3) ひびわれ発生材令が遅いほうが、コンクリートの乾燥収縮による鉄筋の拘束の影響が大きく、コンクリート表面に大きな引張応力が生じているために、ひびわれの発生頻度が高い。

(4) 表面のひびわれ幅は、ひびわれの発生後は、主として表面近傍の乾燥収縮の影響により増大し、その増加量は、載荷後約2年後には、初期ひびわれ幅に対して90~140%とかなり大きい。その影響によるひびわれ幅の増大は、今回の試験では、ひびわれ発生後、約半年間の間にそのほとんどが進行し、約1年でほぼ終了する。

(5) 表面のひびわれ幅を増加させる表面近傍の乾燥収縮ひずみを逆算すると、400~700 μ となり、供試体寸法を用いて算定した乾燥収縮ひずみよりもかなり大きい。また、その値は、ひびわれ発生材令が早期であるほど大きい。

[参考文献]

- 1) 鉄道構造物設計標準〔コンクリート構造物編〕；コンクリート鉄道構造物設計標準に関する委員会 pp.118-126 平成3年1月
- 2) 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 第2号 pp.167-172 1990.6
- 3) 石橋忠良・斎藤啓一・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 第13巻 第1号 pp.417-422 1991.6
- 4) 石橋忠良・斎藤啓一・津吉毅・大庭光商・末弘保；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、構造工学論文集 Vol.37A pp.1309-1318 1991.3
- 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 PP.338-343
- 6) 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 pp.185-191 1983.12
- 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, PP.26-31, 1987.7