

氏名	松本英信
授与学位	工学博士
学位授与年月日	平成元年1月11日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最終学歴	昭和19年9月 仙台工業専門学校土木科卒業
学位論文題目	鉄筋コンクリート桁橋のひびわれ挙動と使用限界状態 の研究
論文審査委員	東北大学教授 尾坂 芳夫 東北大学教授 福田 正 東北大学教授 三浦 尚 東北大学助教授 平井 和喜

論文内容要旨

第1章 緒 論

鉄筋コンクリートのひびわれは、構造物の耐久性の低下に大きい影響を及ぼすが、環境条件に応じてひびわれ幅に許容できる限界値が存在すると考えられる。したがって、コンクリート構造物の設計においてはコンクリートのひびわれ幅の算定を行ない、この値が予期される環境条件にたいして許容できるひびわれ幅を越えないように設計を行うことが必要と考えられる。

現在、ひびわれ幅の算定式は多くが提案されているが、これらの式はすべて供試体による実験結果や理論計算から導かれたもので、実際の構造物におけるコンクリートのひびわれ挙動を左右する種々の因子の影響が考慮されていない。

このため、本研究においては、まず長期間に亘って実際の鉄筋コンクリート橋梁の主桁のひびわれ挙動を詳細に測定解析するとともに、種々の環境条件の下に供試体の乾燥がひびわれの性状に及ぼす影響を測定し、その結果を比較検討することにより、実構造物におけるコンクリートのひびわれ挙動には、コンクリートの乾燥の影響が大きいことを明らかにした。つぎに、乾燥の影響を受ける鉄筋コンクリート部材のひびわれ間隔および最大ひびわれ幅の算定式を求め、これに基づいて、実用的なひびわれ制御設計方法を提案した。

第2章 鉄筋コンクリート鉄道橋におけるひびわれ挙動

東北新幹線におけるT形桁(スパン14.1m)と箱形桁(スパン24.08m)について、建設後、前者

は2年時、後者は8ヶ月時と、それぞれ、その5年後および在来線T形桁（スパン7.0 m）について建設後14年時に、ひびわれの測定を行った。

ひびわれのスパン方向の変化をみると、図-1の新幹線T形桁の例に示すように、支点からスパン中央に向かってひびわれ数および幅が増加するが、 a/d （支点からの距離/有効高さ）=3.5付近から中央部に向かってその変化の割合が小さくなり、この区間を曲げ区間、 $a/d < 3.5$ の区間をせん断区間とし、両区間についてひびわれ間隔、幅の分布を求めた。これらの分布は、図-2に示すように、対称形分布を示さずに偏りがみられる。

T形桁の外桁は内桁に比較して、ひびわれ数および幅が大きく、これは日射や風などによる乾燥の影響が大きいと考えられる。また、5年後の測定では前回の測定に対して、ひびわれ数および間隔の変化は比較的小さいが、ひびわれ幅の増加が大きい。これは荷重履歴の他に経時的な乾燥の影響と考えられる。

新幹線のT形桁の列車荷重によるひびわれ幅の振動は、スパン中央部およびスパン1/4点部において、図-3に示すように0.015mm前後で、これはスパン中央部においては、死荷重時のひびわれ幅の20%程度で、鉄筋応力度の増分約50%に対してひびわれ幅の増分は小さい。

曲げ区間のひびわれ間隔とひびわれ幅の関係をみると、新幹線T形桁では図-4に示すようである。図中の二重丸は、ひびわれ間隔5 cm 毎のひびわれ幅の分布を対数正規分布とみなし、それぞれ超過確立5%の点を求めたのである。これよりひびわれ

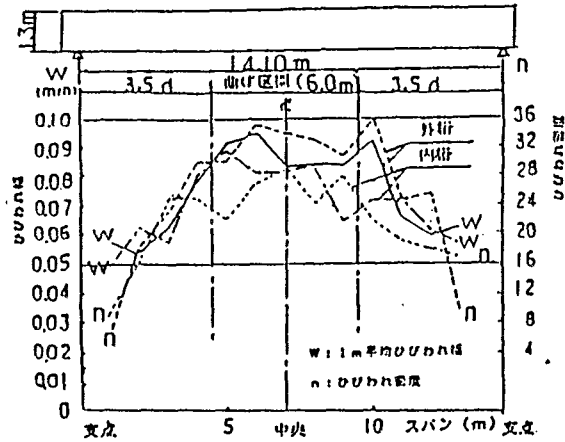


図-1 T桁のスパン方向のひびわれ変化

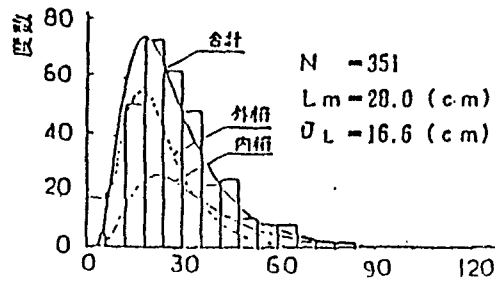


図-2 T桁のひびわれ間隔分布

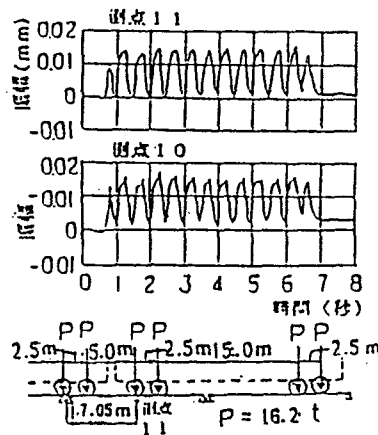


図-3 列車通過時のひびわれ幅の振動

間隔40cmまでは、ひびわれ幅の95%最大値は間隔にたいして直線的に変化するとみなすことができる。このようにそれぞれのひびわれ間隔Lについての95%最大ひびわれ幅Wは、ひびわれ間隔約40cm以下では $W = aL + b$ に適合する。a, bは定数である。ひびわれ間隔の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が定常状態に達していないためと考えられる。他の橋梁についても同傾向の結果が得られ、これらから、ひびわれ幅に影響を及ぼす因子には、ひびわれ間隔に関するものと関係しないものがあることが考えられる。

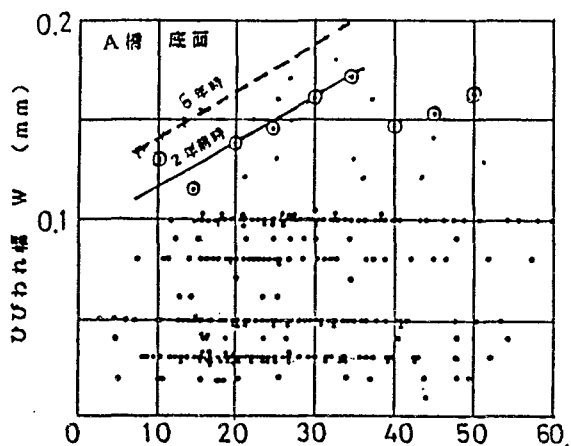


図-4 ひびわれ間隔とひびわれ幅の関係

せん断区間における桁側面のひびわれ間隔および幅の分布は、曲げ区間と同じ傾向がみられる。ひびわれ数は桁断面の厚さの小さい箇所に多い。中立軸上のひびわれの橋軸方向に対する角度は新幹線T形桁および箱形桁の支点付近で約 70° 、在来線T形桁で約 60° で、はりの実験結果より一般に考えられている 45° にたいして非常に大きい。

第3章 乾燥の影響を受ける鉄筋コンクリート供試体のひびわれ挙動

断面 10×10 cm, 鉄筋比(ρ_r) 0%, 5.1%, 断面 15×15 cm, $\rho_r = 0\%$, 1.3%, 1.5%, 5.1%, 断面 20×20 cm, $\rho_r = 0\%$, 5.1%, 長さ1.5mの供試体8本を2組作成し、1組は恒温・恒湿室($T = 20^\circ \text{C}$, $\text{RH} = 60\%$)に、1組は露天に設置し、それぞれの長さ変化率およびひびわれ発生状況を調査した。恒温・恒湿室内の供試体は、 $\rho_r = 0\%$ (無筋)のものは乾燥期間とともに長さが変化し、断面の小さいものほど長さ変化率は大きく、乾燥期間2000日で長さ変化率 $-1000 \sim 1200 \times 10^{-6}$ を示した。鉄筋供試体は $\rho_r = 1.3\%$ で -300×10^{-6} 程度、 $\rho_r = 3.5\%$, 5.1%では乾燥期間20日頃にそれぞれ最大値 -50×10^{-6} , -30×10^{-6} を示したが、100日経過時頃から長さ変化率が+となり、2000日でそれぞれ $+20 \times 10^{-6}$, 40×10^{-6} を示した。これはひびわれ発生によるためと考えられる。供試体の鉄筋両により長さ変化率に差があり、を示した。これはひびわれ発生によるためと考えられる。供試体の鉄筋両により長さ変化率に差があり、これから実行拘束率を求めると、乾燥期間約170日で $\rho_r = 1.3\%$ で0.6, $\rho_r = 3.5\%$ 以上で1.0となり、完全に拘束されている。実行拘束率は乾燥の進行とともに増加する。部材寸法の小さいものほど、長さ変化率が大きい、乾燥の進行とともにその差が小さくなり、また鉄筋比が大きくなると、断面寸法の相違による長さ変化率の差は殆ど見られなくなる。

露天設置の供試体の長さ変化は、無筋のものでも恒温・恒湿室内の場合のような単調な進行はせず、収縮・膨張を繰返し、変動しながら進行する。この変動は季節変動と数日間の間隔の変動があ

り、これは実効湿度の変化に相関性をもって変動しており、このことはコンクリートの水分の供給と長さ変化の進行との関連を示している。無筋供試体の長さ変化率は、恒温・恒湿室内供試体の同期間における長さ変化率の約70%である。ひびわれは恒温・恒湿室内では14日頃から鉄筋比の大きい供試体に発生したが、露天設置供試体のひびわれ発生は約1ヶ月後とかなり遅く、供試体の日射を受ける面に多く発生し、乾燥とコンクリート表面および内部の温度差の影響が考えられる。

ひびわれ間隔分布には偏りがみられ、間隔の最小値 L_{min} は最大 L_{max} の $1/2$ よりもはるかに小さい。恒温・恒湿室内供試体のひびわれ幅は0.04~0.06mmが多く、最大で0.12mm程度である。

両引供試体については、種々の乾燥状態において含水量を測定し、乾燥の程度を変化させた場合の鉄筋応力度と最大ひびわれ間隔 L_{max} およびひびわれ幅 W の関係を求めた。

コンクリートの含水量が L_{max} の値に及ぼす影響は比較的小さく、湿潤と気乾の供試体の差は約8%である。含水量を変化させた供試体の鉄筋応力度 σ_s と W との関係は、含水量の小さいものほど、同じ鉄筋応力度でのひびわれ幅が大きく、湿潤(含水量8%程度)と気乾(含水量4%程度)の供試体のひびわれ幅の差は0.03mm程度であるが、この値は湿潤供試体における $\sigma_s=2000\text{kg}/\text{cm}^2$ のときのひびわれ幅の46%に相当する大きな値であり、ひびわれ幅に及ぼすコンクリートの乾燥の影響が大きいことを示している。

湿潤供試体のひびわれ間隔の分布は偏りがあるが、ほぼ対称形で正規分布に近い。

梁供試体については、せん断区間におけるひびわれ間隔およびひびわれ角度を検討した。

第4章 ひびわれ特性に及ぼす乾燥の影響

実橋における経年によるひびわれ間隔とひびわれ幅の変化を分布歪度(平均値のまわりの3次の積率/標準偏差の3乗)により比較した。ひびわれ間隔と幅の分布歪度は、時間経過によって変化する。その変化は、ひびわれ間隔で比較的小さいが、ひびわれ幅では大きく、特に底面における変化が著しい。

両引供試体について、含水量の変化によるひびわれ間隔および幅の分布歪度を求めた結果、乾燥の程度が大きいほど歪度が大きい。

このことから実橋におけるひびわれ間隔および幅の分布の偏りは、乾燥の影響が大きいことを示している。

供試体におけるコンクリートの乾燥によって生ずるひびわれの最大間隔と、鉄筋の引張応力度によって生ずるひびわれの最大間隔を比較すると、乾燥による最大ひびわれ間隔が大きい。両者のひびわれ間隔の分布を対数正規分布と考えた場合、鉄筋の引張応力によるひびわれの間隔は、乾燥によるひびわれ間隔の超過確率3~7%に相当している。

このことは、鉄筋コンクリート部材においては、荷重による鉄筋の引張応力によらなくてもコンクリートの乾燥収縮によって数多くのひびわれが発生し、その間隔は鉄筋の引張応力によるものとほぼ同様になることを示している。

第5章 ひびわれ制御設計の提案

曲げ区間における最大ひびわれ間隔の影響を及ぼす因子としては、コンクリートの引張強度、鉄筋径、コンクリートの有効断面積、鉄筋比、鉄筋間隔、かぶり、鉄筋の付着性能などが考えられるが、本研究から最大ひびわれ間隔 L_{max} は、 $L_{max} = 6.0 C$ (C : かぶり) が得られた。

実橋における最大ひびわれ間隔は、鉄筋比 ρ_r 、鉄筋間隔 $C\phi$ 、鉄筋径 Φ および鉄筋の付着による係数 K を考慮する必要があることから、これらの影響因子を線形近似の形で加算して次式が得られた。

$$L_{max} = K \left\{ 5C + 0.5(C\phi - \Phi) + \frac{\Phi}{10}\rho_r \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ひびわれ幅 W は、 $W = L \cdot \epsilon_{smr}$ (ϵ_{smr} : 鉄筋の平均ひずみの増加量) から求められるが、これにコンクリートの乾燥収縮ひずみ、 $\epsilon_{\phi c}$ およびひびわれ間隔に無関係の項 (K_c) を考慮し次式が得られた。

$$W_{max} = K_a \left\{ 5C + 0.5(C\phi - \Phi) + \frac{\Phi}{10}\rho_r \right\} \left(\frac{\sigma_s}{E_s} + \epsilon_{\phi c} \right) + K_c \dots\dots\dots (2)$$

(式中、 σ_s : 鉄筋の応力度、 E_s : 鉄筋の弾性係数)

$\epsilon_{\phi c}$ と K_c の値は、構造物の部材の条件によって異なるが、本研究における両引供試体のひびわれ間隔とひびわれ幅および実橋における測定結果とから、異形鉄筋使用の構造物においては、 $K_a = 0.6$ 、 $\epsilon_{\phi c} = 85 \times 10^{-6}$ 、 $K_c = 0.009$ (cm)、普通丸鋼使用の構造物では、 $K_a = 0.8$ 、 $\epsilon_{\phi c} = 20 \times 10^{-6}$ 、 $K_c = 0.004$ (cm) の値とするのが適当と考えられる。

実測した橋梁の最大ひびわれ間隔およびひびわれ幅の(1)式および(2)式による計算値と、実測値の93%~99%限界値の適合性は非常に良く、一般の場合、(2)式で求められる W_{max} は $W_{0.95}$ としてよいと考えられ、この提案指摘はひびわれ制御設計に実用されるものと考えられる。

第6章 結 論

本章においては、本研究で明らかにされた事項を述べている。

審査結果の要旨

鉄筋コンクリート構造物は、長期間、耐久であるために、普通の使用状態で生ずるひびわれが使用条件や環境条件に対応する有害な大きさとならないように設計することが必要である。本論文は、鉄筋コンクリートのひびわれ挙動を、実際の鉄筋コンクリート桁橋および種々の乾燥環境下の供試体で長期間測定し、実構造物におけるひびわれ挙動の機構を明らかにし、実用的なひびわれ制御設計方法を提案したもので、全編6章よりなる。

第1章は緒論であり、本研究の意義と目的を述べている。

第2章では、実際の鉄筋コンクリート鉄道橋におけるひびわれ挙動について述べている。すなわち、ひびわれ挙動は、桁の曲げ区間（支点からの距離 a / 有効高さ $d \geq 3.5$ の区間）と $a/d < 3.5$ の区間で大きく相違し、曲げ区間では、ひびわれの間隔と幅の経年毎の分布が湿じゅん供試体の実験結果と異なり、歪度が大きいことを明らかにしている。また、数年の使用期間を経たのち、ひびわれ密度と間隔は変化が小さいが幅の増加は大きいこと、列車荷重によるひびわれはスパン中央で幅0.015 mm にすぎないことから、ひびわれ幅の増加には荷重よりも経時的な乾燥の影響が大きいことを論じている。またひびわれの間隔と幅の間には、既往の研究結果と全く異なり一意の関係がなく、曲げ区間で、幅95%最大値は、間隔40cm程度以下で干拓と直線の関係にあるとみなし得ること、などを論じている。これらは極めて貴重な成果である。

第3章では、種々の断面寸法と鉄筋比の供試体を用い、鉄筋応力度とひびわれの間隔および幅との関係は、コンクリートの乾燥の影響が大きいことを示している。

第4章では、両引供試体による試験結果から、実橋における分布歪度は、乾燥の影響によると考えられること、種々の乾燥状態のコンクリート部材のひびわれ性状は鉄筋の引張応力によってあまり影響を受けないこと、などを明らかにしている。これは貴重な知見である。

第5章では、以上の結果からコンクリートの乾燥の影響を考慮した最大ひびわれ間隔および最大ひびわれ幅の算定式を求め、その計算値は実橋における値とよく適合し、設計に実用できることを示している。

第6章は結論である。

以上ようするに、本論文は、鉄筋コンクリート構造物のひびわれは、コンクリートの乾燥の影響を大きく受けることを明らかにし、ひびわれの間隔と幅の実用的な算定式を求め、ひびわれ制御設計方法の基礎を与えたもので、土木構造工学の発展に寄与するところが極めて大きい。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。