

[2037] 持続荷重を受ける RC 曲げ部材の変形・ひびわれ

正会員 佐藤 良一 (宇都宮大学工学部)  
 正会員 氏家 勲 (宇都宮大学工学部)  
 正会員 手塚 政男 (宇都宮大学工学部)  
 正会員 吉本 徹 (宇都宮大学工学部)

1. まえがき

昨年、我が国の土木学会で限界状態設計法が採用されたが、これに伴い、今後、鉄筋コンクリート (RC) 部材の変形およびひびわれ幅が設計上検討されることになった。

静的荷重下における RC 曲げ部材の変形およびひびわれ幅の研究は、これまで数多く行われており、ACI<sup>[1]</sup>、CEB-FIP<sup>[2]</sup>などと共に我が国の示方書<sup>[3]</sup>においてもこれらの設計式が整備されるようになった。

しかし、持続荷重下の RC 曲げ部材の変形およびひびわれ幅に関する研究はそれほど多くなく、またコンクリートのクリープと乾燥収縮、鉄筋とコンクリートとの間の付着クリープなどが同時にかつ複雑に影響するため、荷重、環境、材料、部材断面などが様々に異なった条件下で、それらを正確に予測できるレベルには至っていない。したがって、これらのための既往の設計式も確立された段階にあるとは思われない。

RC 部材の変形とひびわれ幅の評価は、基本的には、ひびわれ間隔とひびわれ間要素の変形評価に帰着されるが、ひびわれ間隔をある程度の信頼性をもって予測できる現在、ひびわれ間要素の変形評価の重要性は、持続荷重下の場合、静的荷重下の場合に比べて、はるかに高いと考えられる。

そこで、本研究は、上述したことから、コンクリートのクリープと乾燥収縮および鉄筋とコンクリートとの付着とそのクリープ特性を分離・独立して取り入れて導いた方程式に基づき、ひびわれ間要素の時間依存性変形挙動の解析を行い、さらにこの結果から RC 曲げ部材の平均曲率や平均ひびわれ幅などの経時変化を予測し、実験結果と比較したものである。

2. 実験の概要

2.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。粗骨材は最大寸法 25mm、比重 2.62、F.M. 6.84、細骨材は比重 2.61、F.M. 2.85 であって、共に鬼怒川産である。混和剤にはリグニンスルホン酸塩系の AE 減水剤をセメント重量の 0.054% 用いた。コンクリートの配合を示せば表-1 のとおりである。

鉄筋には D19、D13、D10 で全て SD30 の 3 種類を用いた。弾性係数は  $200 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$  である。

2.2 供試体の作製

供試体は 4 体、併せてクリープおよび乾燥収縮の計測用供試体をそれぞれ 6 体作製した。

RC 曲げ部材の形状・寸法は 15 ×

22 × 240cm の矩形断面ばりで、そ

の配筋状況を図-1 に、全供試

体の諸元と実験条件を表-2 に

表1 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単重量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和材料 (g/m <sup>3</sup> )	
					W	C	S	G	減水剤	AE 助剤
25	10 ± 2	4 ± 1	4.8	4.5	160	333	81.5	100.0	1.80	1.5

示す。また、クリープおよび乾燥収縮用供試体を図-2に示す。これらの供試体には載荷日まで湿布を巻き、さらにそのうえをラップフィルムを巻きつけ水の逸散を防止した。この湿布に2日に一度注水することにより供試体を常に飽水状態に保った。表-2に示すWシリーズは載荷後も飽水状態を保持し、Dシリーズは載荷直前に湿布とラップフィルムをとり乾燥を開始したものである。

表2 供試体の諸元と実験条件

供試体の名称	引張鉄筋	引張鉄筋比 (%)	圧縮鉄筋	圧縮鉄筋比 (%)	鉄筋応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )	含水状態
W 19-13	2D19	2.12	2D13	0.94	1806	湿潤
D 19-13	2D19	2.12	2D13	0.94	1806	気乾
W 13-10	2D13	0.94	2D10	0.53	2206	湿潤
D 13-13*	2D13	0.66	2D13	0.66	2890	気乾

\*D<sub>13-13</sub>: 鉄筋ひずみの材軸方向分布測定用供試体

### 2.3 載荷方法および計測方法

載荷状況は図-3に示すとおりである。供試体のクリープ変形に伴う荷重の低下は、図中に示すスプリングで防止し、試験中は荷重を常に一定に保った。

計測は、鉄筋ひずみ、ひびわれ幅および平均曲率について行った。鉄筋ひずみの材軸方向分布を計測するため幅4mm、深さ3mmの溝を切削した鉄筋にゲージ長5mmのワイヤーストレインゲージを2cm間隔で中央部20cmにわたり鉄筋の両面に貼付した。接着剤はポリエステル系のもので貼付後加圧し60℃で6時間養生した。これにより長期間の計測が可能になる。

ひびわれ幅はコンタクトゲージ(精度1/1000mm)を用いて計測した。

部材の平均曲率は、中央部80cmの試験区間の中央点のたわみを1/100mmダイヤルゲージで計測することにより求めた。

コンクリートのクリープひずみおよび乾燥収縮ひずみはゲージ長60mm、ベース長120mmの両端つば付きのモールドゲージを用いて計測した。コンクリートのクリープひずみはPC鋼棒によりおよそ100kgf/cm<sup>2</sup>のストレスを導入し、クリープによるPC鋼棒の再緊張は行わず、実測値を補正し、載荷時の弾性係数を用いてクリープ係数を求めた。

なお、供試体の作製、養生、載荷実験はすべて温度20±1℃、湿度60±3%R.H.の恒温恒湿室で行った。

### 3. 材料の性質

#### 3.1 強度、弾性係数

コンクリートの圧縮強度、引張強度および弾性係数は標準養生材令28日で511、40.0、32.6×10<sup>4</sup>であり、

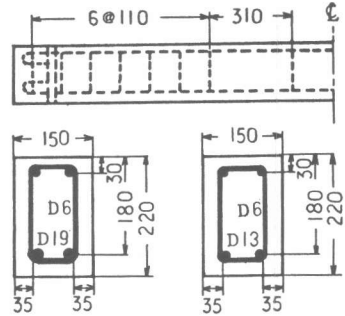


図1 供試体の配筋図

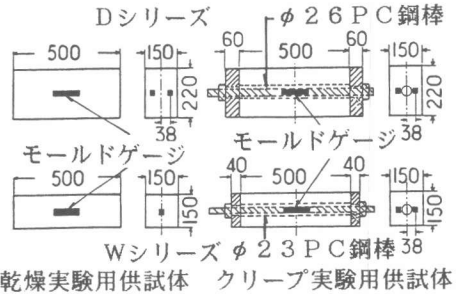


図2 物性実験用供試体

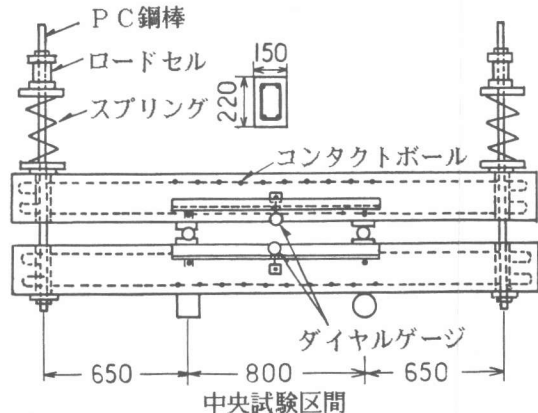


図3 載荷状況

載荷時で550、39.8、34.4×10<sup>4</sup>（単位は全てkgf/cm<sup>2</sup>）であった。

### 3.2 クリープ、乾燥収縮

実験により得られたクリープ係数及び乾燥収縮ひずみを示せば図-4、図-5のようであり、解析ではこれらの実測値を用いた。

### 3.3 付着

解析に用いる付着応力-すべり量曲線における付着剛性は図-6に示すようにRC曲げ部材で実測した値を参考にして定めた。ひびわれ断面近傍の付着の劣化は図-7に示すように、黒正らの実験<sup>[4]</sup>に従って定めた。付着のクリープは高橋らの実験<sup>[5]</sup>に従って定めた。付着応力-すべり量曲線の形は六車、森田らの式<sup>[6]</sup>を用いた。以上の仮定から得られる付着応力-すべり量曲線の一例を示せば図-6のとおりである。

## 4. 解析方法

### 4.1 仮定

持続荷重を受けるRC曲げ部材の変形およびひびわれ幅の時間的推移の解析に際し、以下の仮定を設ける。

- 1) ひびわれ断面のコンクリートは引張応力を負担しない。
- 2) 圧縮応力域のコンクリートのひずみと鉄筋ひずみとの間には平面保持の仮定が成立する。
- 3) 引張応力域のコンクリートひずみは応力に関する中立軸からの距離に比例する。
- 4) すべてのひびわれ幅およびひびわれ間隔は同一である。

この仮定4)から、1つのひびわれ間要素を解析することにより、平均ひびわれ幅および試験区間内の平均曲率を求めることができる。なお、ひびわれ間隔は試験区間内の両端の実測ひびわれ間距離を、その間に発生したひびわれ本数プラス1で除した値とした。

### 4.2 鉄筋およびコンクリートの応力・ひずみ

4.1の仮定に基づけば、ひびわれ間要素の任意の断面における応力、ひずみの断面内分布は図-8のように示される。引張縁からの距離をzとすれば、ひずみの適合条件として次の2式が得られる。

$$\frac{\epsilon_s - \epsilon_{sh}}{d-y} = \frac{\epsilon_{cc}(z) - \epsilon_{sh}}{z - (h-y)} \quad (\text{仮定2})$$

$$\frac{\epsilon_t - \epsilon_{sh}}{d-y} = \frac{\epsilon_{ct}(z) - \epsilon_{sh}}{(h-y) - z} \quad (\text{仮定3})$$

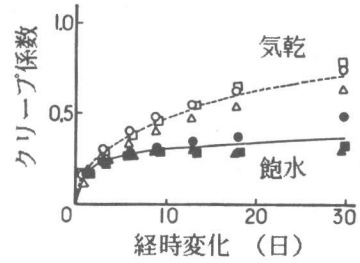


図4 クリープ係数の経時変化

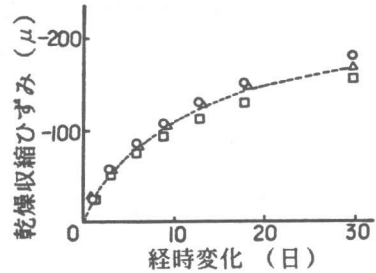


図5 コンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化

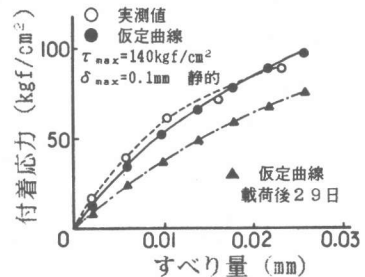


図6 付着応力とすべり量の経時変化

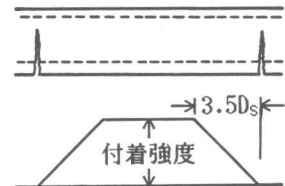


図7 付着強度の材軸分布

ここで、 $\epsilon_{sh}$ は乾燥収縮ひずみであり、他の記号は図-8による。

これから、 $z$ における圧縮応力域および引張応力域のひずみ $\epsilon_{cc}(z)$ 、 $\epsilon_{ct}(z)$ はそれぞれ次のようになる。

$$\epsilon_{cc}(z) = -(z - (h - y))(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) / (d - y) + \epsilon_{sh} \quad (1)$$

$$\epsilon_{ct}(z) = ((h - y) - z)(\epsilon_t - \epsilon_{sh}) / (d - y) + \epsilon_{sh} \quad (2)$$

したがって、クリープ係数 $\phi$ の影響を有効弾性係数 $E_e = E_c / (1 + \phi)$ として考慮すれば、温度変化がない場合コンクリートおよび鉄筋の応力は以下ようになる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{cc}(z) &= E_e(\epsilon_{cc}(z) - \epsilon_{sh}) \\ \sigma_{ct}(z) &= E_e(\epsilon_{ct}(z) - \epsilon_{sh}) \\ \sigma_s'(z) &= E_s \epsilon_{cc}(z) \\ \sigma_s(z) &= E_s \epsilon_{ct}(z) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

#### 4.3 基礎方程式

座標 $x$ において、軸方向力および曲げモーメントに関し、釣合条件を適用すれば次式が得られる。

$$C_c + C_s + T_c + T_s = 0 \quad (4)$$

$$M_c + M_s' + M_t + M_s = M \quad (5)$$

ただし、 $M_c$ 、 $M_s'$ 、 $M_t$ 、 $M_s$ は引張鉄筋図心

回りの $C_c$ 、 $C_s$ 、 $T_c$ 、 $T_s$ の曲げモーメントであり、(1)および(2)を(3)に代入し、(3)から合力をもとめて式(4)(5)に代入すれば次式が得られる。

$$\{Q_c(y) + Q_{cs1}(y) + Q_{s1}\}(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + Q_t(y)(\epsilon_t - \epsilon_{sh}) + Q_{cs2} + Q_{s2} = 0 \quad (6)$$

$$\{P_c(y) + P_{cs1}(y) + P_s(y)\}(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + P_t(y)(\epsilon_t - \epsilon_{sh}) + P_{cs2} = M \quad (7)$$

以上の2式は、未知変数が $y$ 、 $\epsilon_s$ 、 $\epsilon_t$ と3変数あり、式が2つあるから、 $y$ が求められれば $\epsilon_s$ 、 $\epsilon_t$ が求められることを意味する。このことは、 $\epsilon_s$ および $\epsilon_t$ が $y$ の関数であることも意味する。したがって次式が得られる。

$$d\delta_x/dx = \epsilon_s - \epsilon_t = f(y) \quad (8)$$

次に、上述の釣合条件は $x+dx$ においても成り立つから

$$dC_c + dC_s + dT_c + dT_s = 0 \quad (9)$$

$$dM_c + dM_s' + dM_t + dM_s = 0 \quad (10)$$

が成立する。 $\epsilon_s$ あるいは $\epsilon_t$ と $y$ の関数である各合力の $dx$ に対する増分を求め式(9)、(10)に代入すれば次の2式のように整理される。

$$d\epsilon_t/dx = G(y) d\epsilon_s/dx \quad (11)$$

$$d\epsilon_s/dx = Q(y) dy/dx \quad (12)$$

一方、すべりとひずみ、鉄筋ひずみと付着応力の間には

$$d^2\delta_x/dx^2 = d\epsilon_s/dx - d\epsilon_t/dx \quad (13)$$

$$d\epsilon_s/dx = (U_s/A_s E_s) \tau_x \quad (14)$$

の関係があるので式(11)(13)(14)から持続荷重下のRC曲げ部材のひびわれ間要素の基礎方

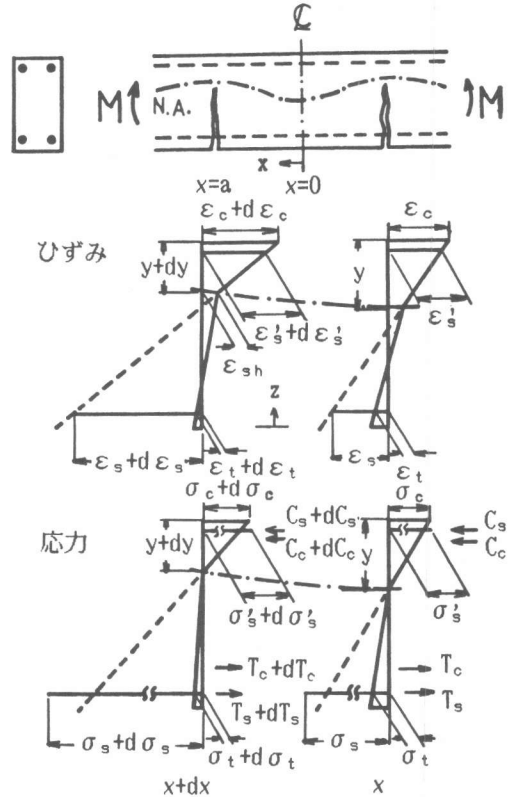


図8 微小区間 $dx$ におけるひずみと応力の変化

程式として次式が得られる。

$$d^2 \delta_x / dx^2 = (U_s / A_s E_s) \{1 - G(y)\} \tau_x \quad (15)$$

ここで、 $G(y)$ は $y$ の関数であり、また、 $\tau_x - \delta_x$ の関係として六車、森田らの式を用いることになっているので、式(15)は式(8)と連立させて次節に示す境界条件のもとで解くことができる。

#### 4. 4境界条件

境界条件は次のように定められる。

$$\begin{aligned} x=0 & : \delta_x = 0 \\ x=a & : d\delta_x/dx = \varepsilon_s - \varepsilon_t \\ & = \varepsilon_s - \varepsilon_{sh} \end{aligned}$$

#### 5. 考察

図-9は供試体D<sub>m</sub>13-13から得た引張鉄筋と圧縮鉄筋のひずみ、引張鉄筋ひずみから求めた付着応力のおおのの材軸方向分布の経時変化を示したものである。

引張鉄筋ひずみは、実測値および計算値とも時間経過に伴い増大する傾向を示すが、その程度は実測値のほうが大きい。これはコンクリートのクリープ、付着のクリープがおよぼす影響の程度以上にひびわれ断面でのコンクリートの引張応力負担が大きく（静的時では鉄筋応力度に換算して440kgf/cm<sup>2</sup>）、さらに時間経過と共に、その負担率が急激に減少したためと考えられる。

圧縮鉄筋ひずみも、引張鉄筋と同様、時間経過に伴い増加するが、材軸方向に対しほとんど変化しない。これは実測値および計算値ともに同様である。

付着応力度は実測値および計算値ともに静的載荷後1日で減少するが、その後ほとんど変化しない傾向を有している。

次に図-10、図-11はこの部材およびこれとほぼ同じ諸元を有する飽水状態にある部材W13-10の平均ひびわれ幅と平均曲率の推移について実測値と計算値を比較して示したものである。ただし、通常の計算によるD<sub>m</sub>13-13の鉄筋応力度は2890kgf/cm<sup>2</sup>であり、W13-10の場合は2206kgf/cm<sup>2</sup>である。

この図によれば、気乾状態にあり乾燥収縮の影響

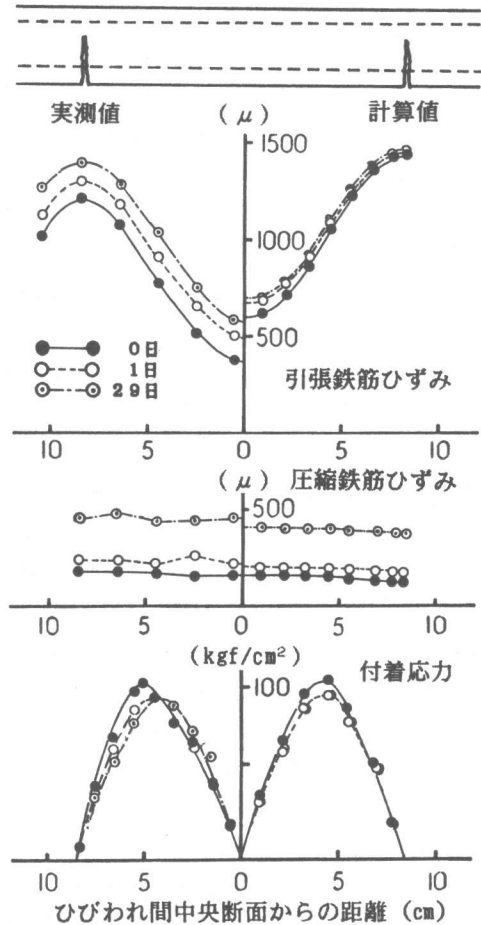


図9 引張および圧縮鉄筋ひずみ、付着応力の材軸方向分布

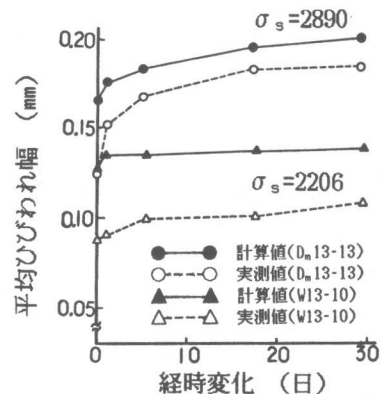


図10 平均ひびわれ幅の経時変化

を受ける場合、平均ひびわれ幅は載荷日数とともに増加する。一方、飽水状態にある場合その増加率は極めて鈍い。これらの時間依存ひびわれ挙動は計算においても予測されているが、その値は実測値の方が小さい。これは前述したようにひびわれ断面のコンクリートの引張応力負担によるものと思われる。しかし、平均曲率に対するひびわれ断面の引張部コンクリートの影響は小さく、実測値と計算値はかなりよく一致している。

最後に、図-12と図-13は、引張鉄筋比が2.12%の部材の平均ひびわれ幅と平均曲率の経時変化を示したものである。

この図に示されているように、気乾状態にある平均ひびわれ幅および平均曲率は経過日数とともに増加するが、この場合も飽水状態にある場合は両者ともその増加率は鈍く、変形、ひびわれ幅におよぼす乾燥収縮の影響の大きいことが認められる。また、この部材のように、鉄筋比が大きい場合、ひびわれ断面の引張部コンクリートの影響が相対的に低下したために、実測値と計算値はかなりよく一致しているといえよう。

## 6. 結論

コンクリートのクリープと乾燥収縮および付着とそのクリープ特性を考慮して導いた方程式に基づき、RC曲げ部材の材軸方向の鉄筋ひずみ分布、平均ひびわれ幅、平均曲率などの経時変化の予測を行い、実測値と比較した結果、かなりよく一致することがわかった。ただし、鉄筋比が小さい場合、ひびわれ断面の引張部コンクリートの鉄筋ひずみに及ぼす影響を考慮する必要性のあることも認められた。

## 参考文献

- [1]ACI: ACI Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83)、1983
- [2]CEB-FIP Model Code for Concrete Structures、1978
- [3]コンクリート標準示方書、設計編、土木学会、1986
- [4]黒正清治ほか：異形鉄筋とコンクリートの付着に関する基礎的研究、日本建築学会大会学術講演概要集、p.p.1327-1328、1982
- [5]高橋久男ほか：鉄筋とコンクリートの付着クリープ性状に関する研究、第1回コンクリート工学年次講演会論文集、p.p.465-468、1979
- [6]六車熙ほか：鋼とコンクリートの付着に関する研究、日本建築学会論文報告集、第131号、p.p.1-6、1967、第132号、p.p.1-8、1967

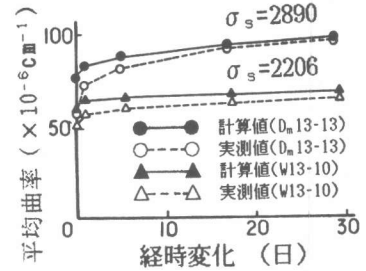


図 11 平均曲率の経時変化

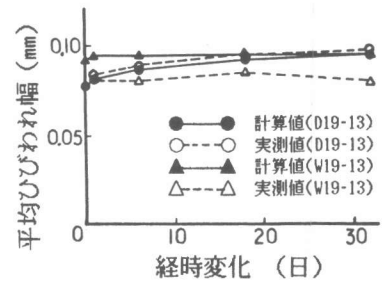


図 12 平均ひびわれ幅の経時変化

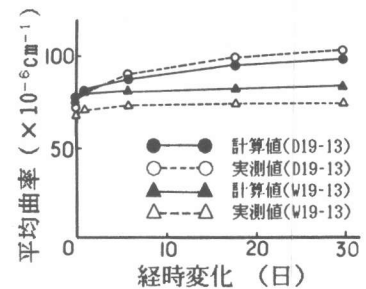


図 13 平均曲率の経時変化