

# [116] 持続引張荷重を受けるRC部材の変形・ひびわれ解析に関する一考察

正会員 長 滝 重 義(東京工業大学工学部)

正会員 ○佐 藤 良 一(防衛大学校土木工学教室)

## 1 まえがき

現在、土木学会ではコンクリート構造物の設計法として限界状態設計法の採用が検討されているが、ひびわれに関しては、ひびわれ幅におよぼす持続荷重の影響が今後の検討課題の一つとしてあげられている<sup>1)</sup>。持続荷重下における曲げひびわれ幅におよぼす影響要因としては ①圧縮部コンクリートのクリープによる引張鉄筋応力度の増大、②引張鉄筋とコンクリート間の付着応力の緩和(付着クリープ)、③ひびわれ間のコンクリートの引張応力に対するクリープ、④ひびわれ間コンクリートの乾燥収縮などが考えられ、これらの影響の程度もある程度明らかにされている<sup>2), 3)</sup>。しかし、さらにこの問題を解明しより合理的な設計法を確立するためには、詳細な実験を重ねると共にRC部材のクリープ挙動の解析方法の検討も重要と思われる。

本研究は、この種の変形・ひびわれ挙動解析の第一歩として、静的引張荷重によりひびわれが分散したあとに持続引張荷重を受ける状態を想定し、RC部材の変形・ひびわれ解析すなわち上述した要因②と③を考慮したクリープ解析の一方法を示し、かつ解析値と既往の実験値を比較した結果を主として定性的な面に主眼を置いて考察したものである。

## 2 材料特性

### 2.1 コンクリートのクリープ特性

コンクリートのクリープひずみを表示する式として載荷初期での予測精度の改善を試み、米国開拓局の式とRossの式<sup>4)</sup>を組み合わせて構成された次式<sup>5)</sup>を採用した。

$$\epsilon_{cr}(t) = \frac{\alpha\beta t}{1+\alpha t} + K(\ln(t+1)) \quad (1)$$

ただし、 $t$ は載荷日数、 $\epsilon_{cr}(t)$ は単位応力あたりのクリープひずみ、 $\alpha$ 、 $\beta$ および $K$ は実験定数である。ここでは $\alpha = 23.8/\text{日}$ 、 $\beta = 0.93 \times 10^{-6}/\text{kg/cm}^2$ 、 $K = 1.03 \times 10^{-6}/\text{kg/cm}^2$ とした(温度 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 、湿度 $50 \pm 3\%$  RHの恒温恒湿室内、載荷材令28日)。なお、引張応力下のクリープひずみは圧縮応力下の場合より大きいという結果<sup>6)</sup>もあるがここでは同一とした。

### 2.2 付着応力-すべり量曲線

解析に用いた付着応力-すべり量曲線は静的載荷時および持続載荷時共に六車らにより提案された式<sup>7)</sup>に従うものとし、ひびわれ近傍部分を除いた部分(一般部)の最大付着応力は静的および持続載荷時下とも $\tau_{\max}(t_i, x) = 60 \text{ kg/cm}^2$ 、最大付着応力時のすべり量は静的載荷時下で $\delta_{\max}(t_i, x) = 0.3 \text{ mm}$ とした。

ひびわれ近傍部分の付着の劣化は、黒正らの実験<sup>8)</sup>に基づいて、静的、持続載荷時下ともに $\tau_{\max}(t_i, x)$ がひびわれ断面から $3.5 \times D_s$ ( $D_s$ :鉄筋径)の範囲でひびわれ断面に向かって直線的に低下する(ひびわれ断面では $\tau_{\max}(t_i, x) = 0$ )として考慮した。

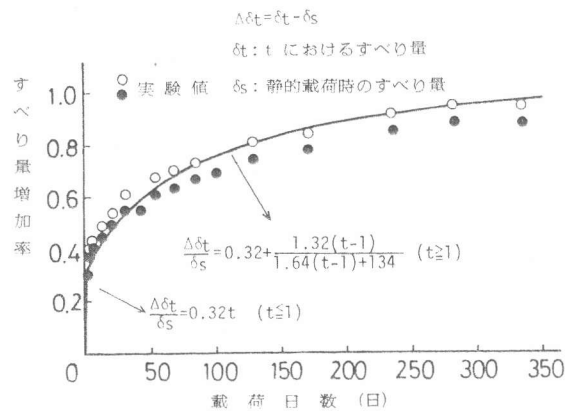


図-1 すべり量増加率 - 載荷日数

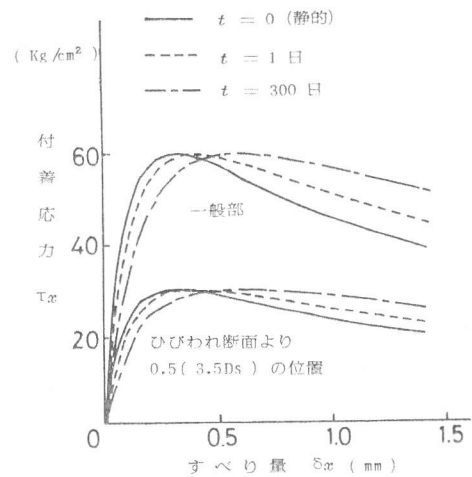


図-2 付着応力 - すべり量曲線

付着のクリーブ特性は、図-1に示すように、載荷直後に急激に増大するすべり量を予測できるように配慮した式<sup>9)</sup>に基づいて次式で表わした。

$$\delta_{\max}(t_i, x) = (1 + 0.32 t_i) \delta_{\max}(t_i, x) \quad (t_i \leq 1) \\ = \left\{ 1.32 + \frac{1.32(t_i - 1)}{1.64(t_i - 1) + 1.34} \right\} \delta_{\max}(t_i, x) \quad (t_i > 1) \quad (2)$$

以上により得られた付着応力-すべり量曲線の一例を示せば図-2のとおりである。

### 3. 基礎方程式

#### 3.1 仮定

- i) コンクリートの瞬間弾性係数  $E_c$  は一定である。
- ii) コンクリートは断面内において一様に変形する。
- iii) 乾燥収縮は無視する。

#### 3.2 コンクリートおよび鉄筋の合力

載荷後の経過日数  $t_i$ 、座標  $x$  における任意断面のコンクリートの全ひずみは、コンクリートの応力を  $\sigma_c(t_i, x)$  とし、重ね合せ法<sup>10)</sup>を適用すれば、次のようになる。

$$\varepsilon_c(t_i, x) = \frac{\sigma_c(t_i, x)}{E_c} + \frac{1}{2} \sum_{j=2}^i f(\Delta t_{j-1}) \{ \sigma_c(t_{j-1}, x) + \sigma_c(t_j, x) \} \quad (3)$$

ただし、 $f(\Delta t_{j-1}) = \varepsilon_{cr}(t_j) - \varepsilon_{cr}(t_{j-1})$  である。

上式のコンクリート応力を用い、鉄筋の応力とひずみを  $\sigma_s(t_i, x)$ 、 $\varepsilon_s(t_i, x)$  とすれば、コンクリートおよび鉄筋の各合力  $T_c(t_i, x)$ 、 $T_s(t_i, x)$  は次のように示される。

$$T_c(t_i, x) = A_c g(t_i) \{ \varepsilon_c(t_i, x) - \varepsilon_{cr}(t_{i-1} + \Delta t_{i-1} / 2, x) \} \quad (4)$$

$$T_s(t_i, x) = A_s \sigma_s(t_i, x) = A_s E_s \varepsilon_s(t_i, x) \quad (5)$$

ここで、 $\Delta t_{j-1} = t_j - t_{j-1}$  であり、また

$$g(t_i) = 1 / \{ 1 + E_s / E_c + \frac{1}{2} f(\Delta t_{i-1}) \} \{ \varepsilon_{cr}(t_{i-1} + \Delta t_{i-1} / 2, x) + \frac{1}{2} \sigma_c(t_{i-1}, x) f(\Delta t_{i-1}) + \frac{1}{2} \sum_{j=2}^{i-1} f(\Delta t_{j-1}) \{ \sigma_c(t_j, x) + \sigma_c(t_{j-1}, x) \} \}$$

#### 3.3 釣り合い条件

釣り合い条件式(6)に式(4)、(5)を代入すれば、式(7)に示すように、 $\varepsilon_c(t_i, x)$  と  $\varepsilon_s(t_i, x)$  の関係が得られる。

$$T_c(t_i, x) + T_s(t_i, x) = P \quad P: \text{引張荷重} \quad (6)$$

$$\varepsilon_c(t_i, x) = \{ A_s E_s / (A_c g(t_i)) \} \varepsilon_s(t_i, x) + \varepsilon_{cr}(t_{i-1} + \Delta t_{i-1} / 2, x) + P / \{ A_c g(t_i) \} \quad (7)$$

#### 3.4 基礎方程式の誘導

持続荷重を受ける場合、時間経過に伴う合力などの変化は図-3に示すとおりであり、所望の解はそれぞれの時刻における定常状態の解の集合となる。

さて、釣り合い条件より軸方向の微小長さ変化  $dx$  に対し合力の微小増分は次式を満足する。

$$dT_c(t_i, x) / dx + dT_s(t_i, x) / dx = 0 \quad (8)$$

上式に式(4)、(5)を代入すればコンクリートと鉄筋の変化率に関する次式が得られる。

$$\frac{d\varepsilon_c(t_i, x)}{dx} = \frac{A_s E_s}{A_c g(t_i)} \frac{d\varepsilon_s(t_i, x)}{dx} + \frac{d\varepsilon_{cr}(t_{i-1} + \Delta t_{i-1} / 2, x)}{dx} \quad (9)$$

一方、すべり量  $\delta(t_i, x)$  とひずみの関係式に式(9)を代入し、かつ付着応力とひずみの関係を用いれば、最終的に、コンクリートと付着のクリーブを考慮したRC引張部材のひびわれ間要素の基礎方程式として次式が得られる。

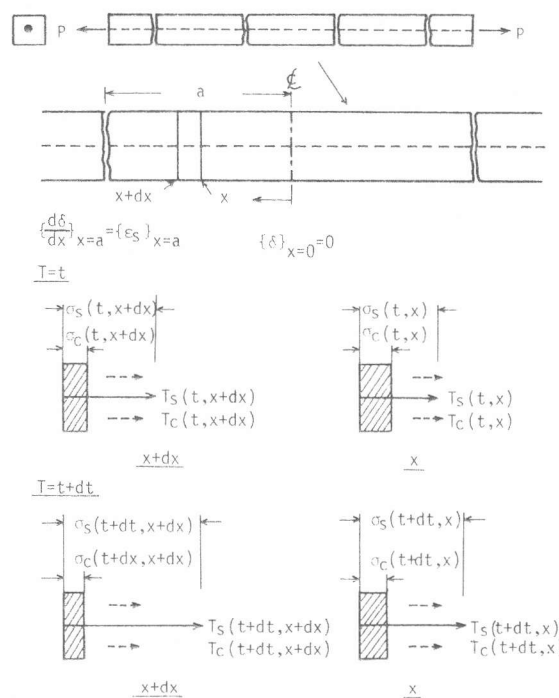


図-3 時間経過に伴う応力変化

$$\frac{d^2 S(t_i, x)}{dx^2} = A(t_i, x) \frac{\ln\{(e-1)S_x + 1\}}{(e-1)S_x + 1} - B(t_i, x) \quad (10)$$

ただし、鉄筋の周長を  $U_s$  とすれば

$$A(t_i) = \frac{U_s}{A_s E_s} \left[ 1 + \frac{A_s E_s}{A_c g(t_i)} \right] \frac{\tau_{\max}(t_i, x)}{\delta_{\max}(t_i, x)} e, \quad B(t_i) = \frac{1}{\delta_{\max}(t_i, x)} \frac{d\epsilon_{cr}(t_{i-1} + \Delta t_{i-1}/2, x)}{dx}, \quad S(t_i, x) = \frac{\delta(t_i, x)}{\delta_{\max}(t_i, x)}$$

式(10)においてクリープひずみの項  $B(t_i, x)$  を削除すればいわゆる付着の基本式と一致する。

ひびわれの分散が安定した領域を対象とした場合は図-3に示した境界条件を用いれば式(10)を解くことができる。式(10)を解けば  $S(t_i, x)$  が求まり、これより付着応力が得られる。鉄筋のひずみは次式で求まり、コンクリートのひずみ、応力も式(7)、(3)より明らかになる。

$$\epsilon_s(t_i, x) = \epsilon_s(t_i, 0) + \{U_s / (A_s E_s)\} \int_0^x \tau(t_i, x) dx \quad (11)$$

#### 4. 解析結果の考察

本解析法により得られた計算値を、スラブ部材端の上端鉄筋のはり接合部内からの抜け出しがスラブの長期たゆみにおよぼす影響を解明するために行なわれた偏心両引き実験より得られた値<sup>9)</sup>と比較した。供試体の形状、寸法は図-4に示すとおりであり、図中の斜線部分を引張応力負担部分として近似した。使用鉄筋はD10SD30、 $E_s = 1.89 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ である。なお、以下記述べる実験値(図-5~図-8)はいずれも乾燥収縮の補正は行なわれていないものであり、荷重による付着性能の低下がこの理由として指摘されている<sup>9), 11)</sup>。

図-5は供試体中央断面の鉄筋ひずみの載荷日数の経過に伴う推移について示したものである。解析値は、供試体長さが短い場合実験値より全体的に小さいが、載荷後初期の間に急増しその後漸増もしくはほぼ一定値を保つという実験値の傾向をかなりよく表わしているといえよう。これは、載荷直後に急増しその後漸増するといったすべりの性質(図-1参照)とコンクリートの引張クリープ特性を解析に取り入れたことによると考えられる。

図-6および図-7は長さ40cmの供試体の持続荷重下における鉄筋平均ひずみの静的載荷時のそれに対する増加率を2種類の荷重の大きさの場合について示したものである。これらの図から2種類の場合とも載荷初期以後の増加率の傾向については解析値と実験値はおおむね一致しているのがわかる。しかし、載荷直後の増加率については、実験値の方が解析値よりおよそ2倍大きく、その差は載荷日数が経過してもほぼ一定である。この理由の一つとして、図-1に示した載荷日数に伴うすべり量増加率が片引き供試体の加力端での抜け出し量から得られたも

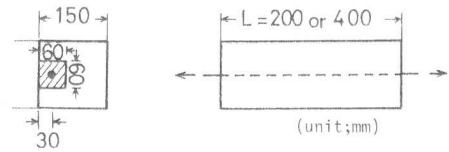


図-4 供試体の形状寸法

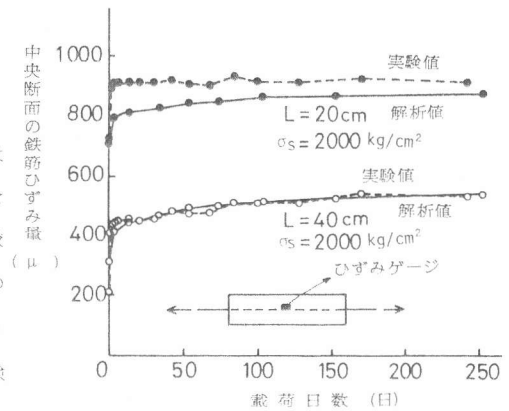


図-5 鉄筋ひずみ量 - 載荷日数

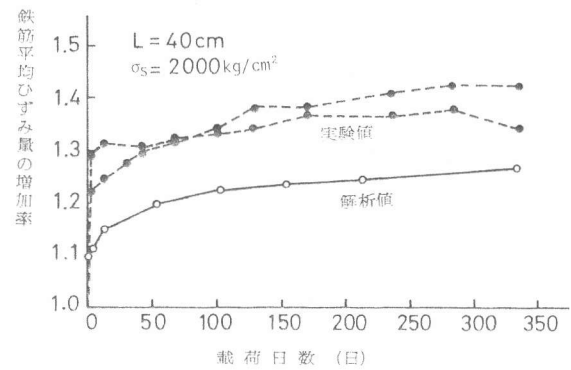


図-6 鉄筋平均ひずみの増加率 - 載荷日数

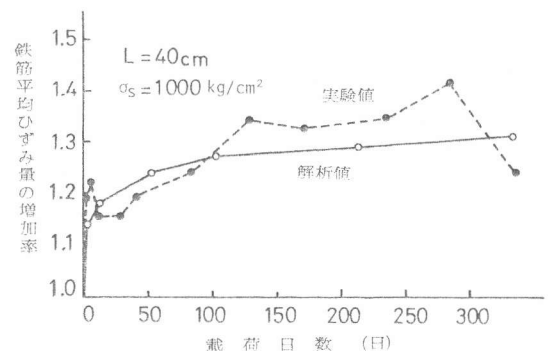


図-7 鉄筋平均ひずみの増加率 - 載荷日数

のであるのに対し、本解析の場合この実測値をそのまま付着応力-すべり量曲線に適用していること、また最大付着応力が載荷日数の経過にかかわらず静的載荷時の場合と同一であるとしていることなどが考えられる。

図-8は、図-6に示したのと同じの供試体の鉄筋およびコンクリートの応力とひずみ、付着応力の材軸方向分布の載荷日数に伴なり変化を示したものである。この図から、本解析法は日数の経過とともに鉄筋の平均ひずみが増大することや付着応力が減少することなどこれまで指摘されてきたRC部材のクリープ現象を説明し得ることがわかる。

図-9は、あらかじめ1.4cmのひびわれ間隔が設けられたRC引張部材(供試体寸法 7×7×56cm, 使用鉄筋 D13の異形鉄筋)のひびわれ幅について実験値<sup>12)</sup>と解析値を比較したものである。ここで、ひびわれ幅は、実測ひびわれ幅から供試体の表面乾燥収縮ひずみ( $\sigma_s = 2200 \text{ kg/cm}^2$ の場合自由乾燥収縮ひずみの100%,  $\sigma_s = 1000 \text{ kg/cm}^2$ の場合70%)とひびわれ間隔の積を差し引いて補正したものである。この図によれば、ひびわれ幅は載荷日数が経過してもほとんど増加しないが、解析値はこの性質を比較的よく表わしているといえる。これは、ひびわれ間隔が小さく静的載荷時の段階で鉄筋のひずみが相当平均化しているためと考えられる。また、長期荷重によるひびわれ幅の増加は、RC引張部材の場合、主として乾燥収縮に起因することも意味していると思われる。

### 5. 結論

持続引張荷重を受けるRC部材の変形・ひびわれ解析を目的として、コンクリートおよび付着のクリープを考慮して基礎方程式を誘導しそれを数値解析した結果、定性的には、本解析法は既往の実験値と比較的によく一致することがわかった。

今後は、付着クリープの性質を詳細な実験によって明らかにするとともに、乾燥収縮の影響を解析にとりいれてより実際の現象を定量的に評価したいと考えている。最後に、本研究を行なうに際して協力いただいた大林組技研 小柳光生氏に感謝の意を表します。

(参考文献)

- 1) 土木学会：ひびわれに関する資料，コンクリート構造の限界状態設計法試案，土木学会コンクリートライブラリー，第18号，昭和56年4月
- 2) Lutz, J. A. et al: Increase in Crack Width in Reinforced Concrete Beams Under Sustained Loading, Jour. of ACI, 1967
- 3) 鈴木計夫ほか：プレレスト鉄筋コンクリートはりの長期曲げひびわれ幅とたわみについて，セメント技術年報 33，昭和54年
- 4) Ross, A. D.: Concrete Creep Data, The Struct. Eng., 15, London, 1937
- 5) 河角誠ほか：高温度下におけるコンクリートのクリープ，電力中央研究所報告：72018 昭和48年
- 6) Illston, J.M.: The Creep of Concrete Under Uniaxial, Mag of Conc. Research, 1965

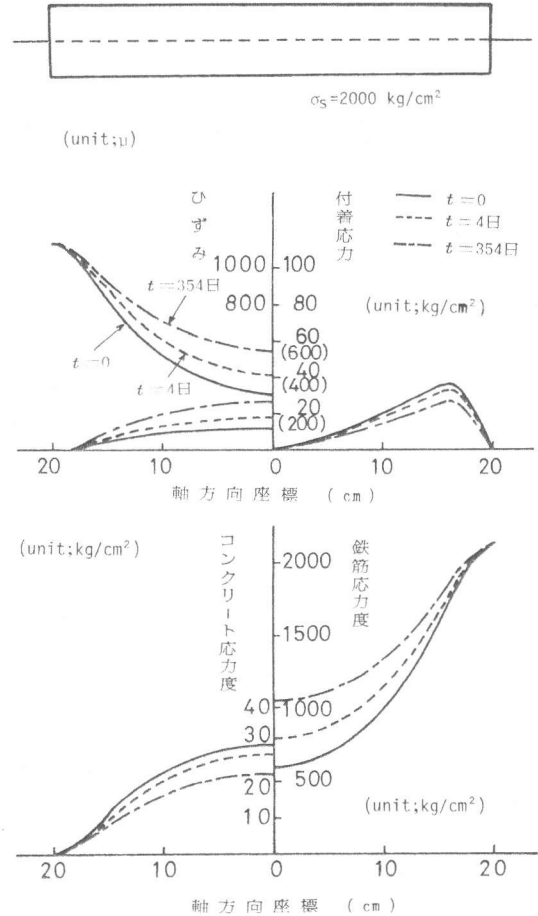


図-8 各種応力ひずみ分布の時間的推移

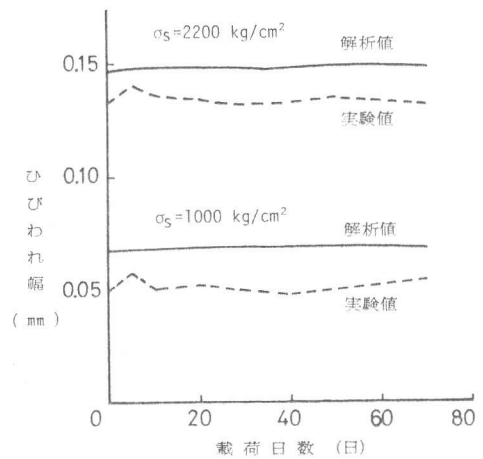


図-9 ひびわれ幅の推移

- 7) 大車野ほか：鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究，日本建築学会論文報告集，昭和42年
- 8) 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，昭和57年
- 9) 高橋久雄ほか：床スラブの長期における角裂・変形に関する研究，大林組技研報告，昭和53年
- 10) Neville, A.M.: Creep of Concrete, Plain, Reinforced and Prestressed, North-Holland Publishing Company, 1970
- 11) 高橋久雄ほか：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，昭和54年
- 12) 鈴木計夫ほか：持続荷重下の両引張試験体のひびわれ幅に及ぼす付着の時間的低下と乾燥収縮の影響について，日本建築学会大会，昭和55年