

栃木県庁 正会員 林 真
 宇都宮大学 秋田 克彦
 宇都宮大学 正会員 佐藤 良一

1. まえがき

土木学会では、本年より、コンクリート構造物の設計法として、限界状態設計法が採用されることになっている。限界状態設計法によれば、長期にわたる変形・ひびわれについて検討しなければならない場合もあると考えられる。しかし、これらの予測理論は、まだ確立されているとはいえない。鉄筋コンクリート（RC）部材における長期の変形・ひびわれに及ぼす影響要因としては ①コンクリートのクリープ 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コンクリートの乾燥収縮 が主なものとして指摘されている。本研究は、この種の変形・ひびわれ予測方法の確立のための第一歩として、これらの要因のうち①及び②を考慮して、静的荷重により既にひびわれが分散した、持続荷重下におけるRC曲げ部材の変形・ひびわれ予測のための解析理論を定式化し、その数値解析結果と実験結果を比較し考察したものである。

2. 材料特性

コンクリートの単位応力当りのクリープひずみ $\bar{\epsilon}_{cr}(t)$ を表示する式として、次式¹⁾を採用した。

$$\bar{\epsilon}_{cr}(t) = \alpha \cdot \beta \cdot t / (1 + \alpha \cdot t) + K \cdot \ln(t+1) \quad \dots \dots (1)$$

ここで、 α , β , K は実験定数で、実験結果より $\alpha = 4.23 / \text{日}$, $\beta = 0.337 \times 10^{-6} (\text{kgf/cm}^2)$

$K = 0.171 \times 10^{-6} (\text{kgf/cm}^2)$ とした。

付着応力-すべり量曲線は、静的・持続載荷時下共に六車²⁾により提案された式²⁾に従うものとした。ひびわれ近傍の付着劣化領域を除く一般部の最大付着応力は、既往の実験結果³⁾に基づき、静的・持続載荷時下共に $\tau_{\max}(x, x) = 1/40 \text{ kgf/cm}^2$ とした。最大付着応力時のすべり量は、静的荷重下で $\delta_{\max}(x) = 0.4 \text{ mm}$ とし、持続荷重下では、高橋らの提案式⁴⁾に従って定めた。また、ひびわれ近傍における付着の劣化は、黒正らの実験⁵⁾に基づいて $\tau_{\max}(x, x)$ がひびわれ断面から 3.5D (D: 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として考慮した。

3. 基礎方程式

基礎方程式を定式化するうえで ①コンクリートの瞬間弾性係数 E_c は一定である ②ひびわれ断面のコンクリートは引張応力を負担しない ③圧縮部コンクリート、圧縮鉄筋及び引張鉄筋は同一平面上にある ④引張部コンクリートのひずみは中立軸からの距離に比例する ⑤気温変化はない などの仮定を設ける。以上の仮定から、任意断面の応力・ひずみ分布の推測の概念

図は Fig. 1 に示す通りである。

載荷日数 t_n における任意断面のコンクリートのひずみと応力は、重ね合わせの原理を用いれば、次式で示される。

$$\epsilon(x, z) = \sigma(x, z) / E_c + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \{ \sigma(x_{j-1}, z) + \sigma(x_j, z) \} \quad (2)$$

$$\sigma(x, z) = g(x) \{ \epsilon(x, z) - \frac{1}{2} f(x_{j-1}) \{ \sigma(x_{j-1}, z) + \sigma(x_j, z) \} \} \quad (3)$$

ただし、 $f(x_{j-1}) = \bar{\epsilon}_{cr}(x_j) - \bar{\epsilon}_{cr}(x_{j-1})$

$$g(x) = E_c / \{ 1 + \frac{1}{2} f(x_{j-1}) \}$$

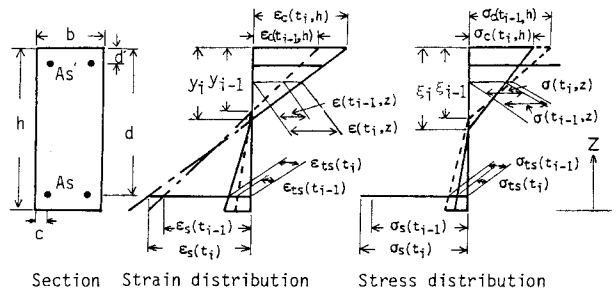


Fig.1 Stress and strain changes at an arbitrary section with the lapse of time after loading

任意断面において、軸方向力と曲げモーメントに関する釣り合い条件及び $x = a - s_i$ の位置では、コンクリートの応力は常に0である、ことから次の三式が成り立つ。

$$C_c + C_s' + T_c + T_s = P \quad (4), \quad M_c + M_s' + M_T + M_s = Pe' + M \quad (5)$$

$$T(x_i, a - s_i) = 0 \quad (6)$$

これら三式より δ_x を仮定すれば、 s_i , $\epsilon_s(x_i)$, $\epsilon_{ts}(x_i)$ が得られ次式の関係が δ_x の関数として求まる。

$$d\delta_x/dx = \epsilon_s(x_i) - \epsilon_{ts}(x_i) = f(\delta_x) \quad (7)$$

また、軸方向の変化に対しては次の三式が成り立つ。

$$dC_c/dx + dC_s'/dx + dT_c/dx + dT_s/dx = 0 \quad (8)$$

$$dM_c/dx + dM_s'/dx + dM_T/dx + dM_s/dx = 0 \quad (9)$$

$$d\{T(x_i, a - s_i)\}/dx = 0 \quad (10)$$

上記式(8)~(10)を整理し、すべり量とひずみの関係、付着応力とひずみの関係及び付着応力とすべり量の関係を適用すれば、最終的に次の形の基礎方程式が導かれる。

$$\frac{d^2\delta_x}{dx^2} = \frac{U_s}{A_s E_s} \cdot \tau_{\max} \cdot e^{\{1 - G_H(\delta_x)\}} \cdot \frac{\ln\{(e-1)\delta_x/\delta_{\max} + 1\}}{(e-1)\delta_x/\delta_{\max} + 1} - G_H(\delta_x) \quad (11)$$

$G_H(\delta_x)$ はクリープひずみを表わす項であり、静的問題の場合は $G_H(\delta_x)$ は0となる(U_s :鉄筋の周長)。

式(11)は、境界条件 $\{\delta_x/dx\}_{x=0} = \{\epsilon_s(x_i)\}_{x=0}$ (ひびわれ断面)、 $\{\delta_x\}_{x=a} = 0$ (ひびわれ間中央断面)を用い、かつ式(7)と連立することにより解くことができる。

4. 解析結果

F1 8.3は $b = 20$, $h = 30$, $d = 25$, $d' = 4$ (Unit: cm)
 $A_s = 3.97 \text{ cm}^2$ (2D16), $A_s' = 0.63 \text{ cm}^2$ (2D6)の部材についてのひびわれ間の応力、ひずみを解析した結果である。これより ①引張鉄筋の応力度が増大する ②圧縮縁コンクリートのひずみが増大する一方、応力度は低下する ③圧縮鉄筋の応力度が増大する など持続荷重を受けるRC部材特有の性状をよく表わしていることがわかる。F1 8.4及びF1 8.5は $A_s' = 2.53 \text{ cm}^2$ (2D13)とした時の平均曲率及びひびわれ幅の実験結果と解析結果を比較したものである。ここで、ひびわれ間隔は実測値を用いた。このことから、実験結果と解析結果とは、おおむね一致していると思われる。今後、さらに多くの実験結果と比較すると共に、乾燥収縮の影響を解析に取り入れ、適用範囲の拡大を計りたいと考えている。

(参考文献)

- 1) 河角 誠 et al.: 高温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
- 2) 六車 照 et al.: 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, B642, 昭和42年
- 3) 長連 重義 et al.: 若材令における鉄筋とコンクリートの付着特性, 東工大研究報告, B635, 昭和60年
- 4) 高橋 久雄 et al.: 床スラブの長期における亀裂変形に関する研究, 大林組技術報告, B635, 昭和53年
- 5) 黒田 清治 et al.: 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, 昭和57年

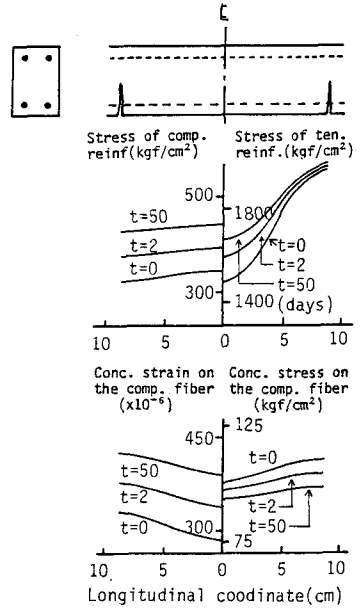


Fig.2 Calculated time-dependent changes of the distributions of stress and strain in concrete as well as stresses in compressive and tensile reinforcing bars in the longitudinal direction

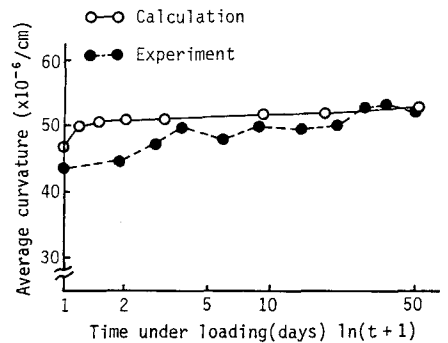


Fig.3 Time-dependent change of average curvature

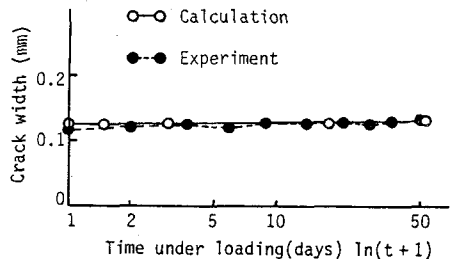


Fig.4 Time-dependent change of average crack width