

電力中央研究所 正会員 金 津 努
電力中央研究所 正会員 青 柳 征 夫
防衛大学校 正会員 佐 藤 良 一

1 はじめに

本報告は、前報で報告した付着も考慮したRC曲げ部材の変形解析法を、さらに圧縮域コンクリートの非線形性と付着破壊現象およびひびわれ先端での引張応力分布も考慮した解析法に発展させ、実験結果との比較も行なったものである。本解析で用いる仮定は、コンクリートの非線形性と付着破壊の仮定を除いて、すべて前報のものと同じである。また、本解析は軸力を受ける部材への適用性も考慮している。

2 コンクリートの応力-ひずみ関係

コンクリートの応力-ひずみ曲線として図1に示す破物線と仮定した。この曲線式を用いて任意断面における軸方向の力のつりあいと曲げモーメントは、次の(1)(2)により表わされる。(図2参照)

i) つりあい

$$b\sigma_{cu}\left\{\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cu}} - \frac{1}{3}\left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cu}}\right)^2\right\}y = A_s E_s \epsilon_s + b(h-y_{xt})E_c \epsilon_t + \frac{1}{2}b y_{xt}^2 E_c \frac{\epsilon_c}{y} + P \quad (1)$$

ii) 曲げモーメント

$$b\sigma_{cu}\left\{\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cu}} - \frac{1}{3}\left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cu}}\right)^2\right\}y(d-y) + b\sigma_{cu}\left\{\frac{2}{3}\left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cu}}\right) - \frac{1}{4}\left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cu}}\right)^2\right\}y^2 - b(h-y_{xt}) \times \left\{d - \frac{1}{2}(h+y_{xt})\right\}E_c \epsilon_t - \frac{1}{2}b y_{xt}^2 E_c \frac{\epsilon_c}{y} (d-y - \frac{2}{3}y_{xt}) = M + P e' \quad (2)$$

ひずみの適合条件から $\epsilon_c = \epsilon_s \cdot y / (d-y)$ ここで h : 部材高, d : 有効高, ϵ_{cu} : コンクリートの限界引張ひずみ

式(1)(2)を x で微分して整理すると、任意断面における中立軸高 y 、鉄筋ひずみ ϵ_s 、引張部コンクリートひずみ ϵ_t の軸方向への変化率が次の2つの関係式で表わされる。

$$i) \text{ つりあい } \alpha_1 \frac{dy}{dx} + \alpha_2 \frac{d\epsilon_s}{dx} - \alpha_3 \frac{d\epsilon_t}{dx} = 0$$

$$ii) \text{ 曲げモーメント } \beta_1 \frac{dy}{dx} + \beta_2 \frac{d\epsilon_s}{dx} - \beta_3 \frac{d\epsilon_t}{dx} = 0$$

 $\alpha_1 \sim \alpha_3, \beta_1 \sim \beta_3$ は以下に示されるものである。

$$\alpha_1 = \frac{b\sigma_{cu}}{b\sigma_{cu}} \left\{ \frac{y}{(d-y)^2} \epsilon_s \left[(d-y)(2d-y) - \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cu}} y (d-\frac{1}{3}y) \right] + b E_c \epsilon_t + \frac{1}{2} b y_{xt}^2 E_c \epsilon_s \left(\frac{1}{d-y} \right)^2 \right\}$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{3} b \frac{\sigma_{cu}}{\epsilon_{cu}} \left(\frac{y}{d-y} \right)^3 \left[3(d-y) - 2 \frac{1}{\epsilon_{cu}} y \epsilon_s \right] - A_s E_s - \frac{1}{2} b y_{xt}^2 E_c \frac{1}{d-y}$$

$$\alpha_3 = b(h-y_{xt})E_c$$

$$\beta_1 = \frac{1}{6} b \frac{\sigma_{cu}}{\epsilon_{cu}} \left(\frac{y}{d-y} \right)^2 \epsilon_s \left[4(d-y)(3d^2-3yd+y^2) + \frac{1}{\epsilon_{cu}} y (-6d^2+4yd-y^2) \epsilon_s \right] + b(d-y_{xt})E_c \epsilon_t + \frac{1}{3} b y_{xt}^3 E_c \frac{\epsilon_s}{(d-y)^2}$$

$$\beta_2 = \frac{1}{6} b \frac{\sigma_{cu}}{\epsilon_{cu}} \left(\frac{y}{d-y} \right)^2 \left[2(d-y)(3d-y) + \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cu}} y (y-4d) \right] - \frac{1}{2} b y_{xt}^2 E_c (d-y_{xt}) \frac{1}{d-y}$$

$$\beta_3 = b(h-y_{xt}) \left\{ d - \frac{1}{2}(h+y_{xt}) \right\} E_c$$

式(6)~(11)中の ϵ_s, ϵ_t は式(1)~(3)を整理することにより y の関数として与えられる。式(6)(8) $\epsilon \frac{dy}{dx}, \frac{d\epsilon_s}{dx}$ について解くと

$$\frac{d\epsilon_t}{dx} = \frac{\alpha_1 \beta_2 - \alpha_2 \beta_1}{\beta_1 \beta_3 - \alpha_3 \beta_1} \cdot \frac{d\epsilon_s}{dx}$$

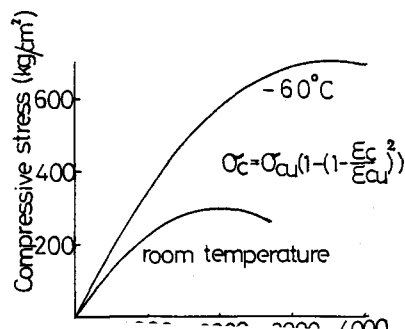


図1 コンクリートの応力-ひずみ関係

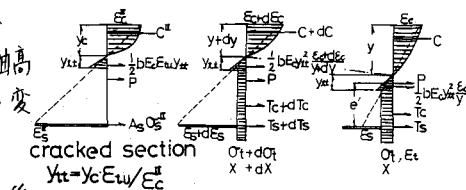


図2 任意断面における応力、ひずみ分布

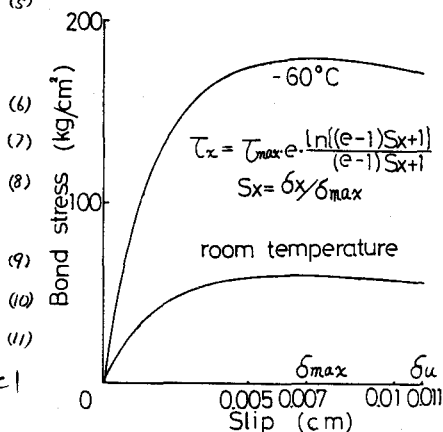


図3 付着応力-相対すべり関係

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\sigma_2 \beta_2 - \sigma_3 \beta_3}{\sigma_1 \beta_1 - \sigma_2 \beta_2} \cdot \frac{d\epsilon_s}{dx}$$

以上より付着基礎微分方程式および任意断面位置における鉄筋ひずみと、次の式(14)(15)が導かれる。

$$\frac{d^2 \sigma_x}{dx^2} = \frac{d\epsilon_s}{dx} - \frac{d\epsilon_t}{dx} = \left\{ 1 - \left(\frac{\sigma_1 \beta_1 - \sigma_2 \beta_2}{\sigma_1 \beta_1 - \sigma_3 \beta_3} \right) \right\} \frac{d\epsilon_s}{dx} = k_m \{ 1 - P(y) \} \epsilon_x \quad (14)$$

$$\epsilon_s = \epsilon_s^I + \int_{y_1}^y \left(\frac{\sigma_1 \beta_1 - \sigma_2 \beta_2}{\sigma_1 \beta_1 - \sigma_3 \beta_3} \right) dy \quad (15)$$

3 付着応力-相対すべり関係 -付着破壊-

付着応力-相対すべり曲線として、図3に示すように六車らが採用した式を用いた。付着破壊の扱いは、付着応力-相対すべり曲線においてすべり量の限界値 δ_u を定め、計算過程で任意断面位置の相対すべり量が δ_u を超えた時、その位置からひびわれ断面までは付着応力が零、鉄筋応力はひびわれ断面での鉄筋応力に等しいとする。したがって、付着破壊が生じている時のひびわれ断面の相対すべり量は式(16)で与えられる。

$$\sigma_{sx} = \sigma_s^I \quad a \leq x \leq l \quad l: \text{付着破壊が生じている位置} \quad (16)$$

$$\tau_x = 0 \quad a \leq x \leq l \quad \sigma_s^I: \text{ひびわれ断面鉄筋応力} \quad (17)$$

$$\delta_{x=a} = \delta_u + (a-l) \epsilon_s^I \quad (18)$$

4 数値解析

式(14)の微分方程式は任意断面で式(16)も満足し、さらに次に示す境界条件を満たすことにより解くことができる。本解析では、ルンゲフック法を適用して数値計算を行なった。(図4参照)

$$x=0 \quad ; \quad S_x=0 \quad (19)$$

$$x=a \quad ; \quad \left\{ \frac{dS_x}{dx} \right\} = \frac{\epsilon_s^I}{\delta_{max}} \quad \text{付着破壊なし} \quad (20)$$

$$x=l \quad ; \quad \left\{ \frac{dS_x}{dx} \right\} = \frac{\epsilon_s^I}{\delta_{max}} \quad \text{付着破壊あり}$$

5 解析結果

図5図6には、M-φ関係と平均ひびわれ幅の実験結果と解析結果の比較の一例を示した。低温の場合、解析結果は実験値と比較的良好一致を示している。特に前報に示した平均ひびわれ幅を過小評価するという解析法の欠点も、付着破壊を導入することで改善できた。しかし常温の実験結果は、小さな荷重段階から縦ひびわれが発生しており、平均ひびわれ幅、曲率ともに解析結果を上回っている。

以上のように、本解析はRC曲げ部材の変形に影響すると考えらる主要な要因を単純な形で解析過程へ導入したものである。現在、解析精度の向上をはかるため入力データの詳細な検討も行っている。さらに、本解析法の考え方は、外力荷重のみならず温度勾配による変形が拘束される場合にも適用することができる³⁾。

参考文献

- 1) 佐藤青樹内田: 付着に基づいたRC曲げ部材の変形解析理論の定式化について, 講義
- 2) 文車森田: 鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究, 建築学論集, 1967.4
- 3) 佐藤青樹, 全津: RC部材温度勾配による変形拘束モデルの解析法に関する研究, 年報1980

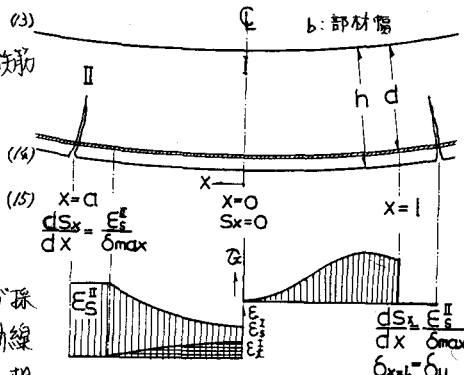


図4 境界条件, ひずみ分布, 付着応力分布

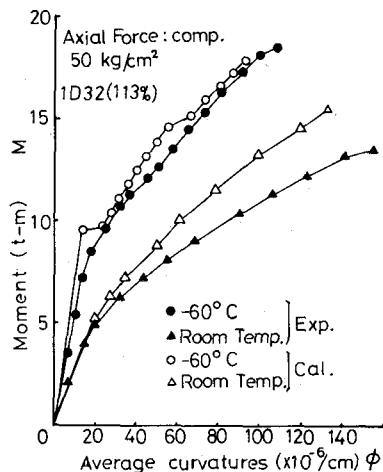


図5 モーメントと平均曲率の関係

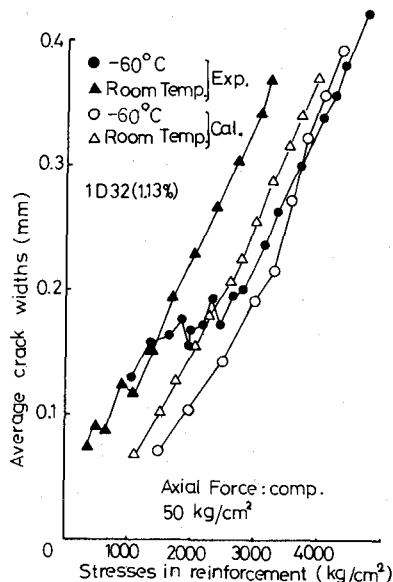


図6 鉄筋応力と平均ひびわれ幅の関係