

電力中央研究所 正会員 金 津 男
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 まえがき

本報告は、常温および一樣低温下において曲げを受ける鉄筋コンクリート部材（以下R/C部材）のひびわれ発生から鉄筋の降伏までの変形状とともひびわれ性状を系統的に解析する方法について検討を加えたもので、既に報告している圧縮部コンクリートの非線形性、軸圧縮力、付着すべり曲線の非線形性および付着破壊を考慮できる解析法¹⁾をさらに改良し、引張部コンクリートの非線形性および極低温下において先ず鉄筋とコンクリートの線膨張係数差に起因するアレストレス効果を考慮できるようにしたものである。本解析法によるアレストレス効果の考え方は、アレストレストコンクリート部材の変形解析へも適用が可能なものである。

2 基本仮定

i) 圧縮、引張両域のコンクリートの応力-ひずみ曲線は放物線とする。 ii) 圧縮部コンクリート、中立軸近傍引張部コンクリートおよび鉄筋はひずみ分布に関して平面保持が成立する。 iii) 中立軸近傍引張部コンクリートの高さは任意断面で等しく、ひびわれ断面における値と同じとする。 iv) ひびわれ断面における引張部コンクリートの最大ひずみは荷重レベルに拘らず一定とする。 v) 任意断面における引張部コンクリートひずみは中立軸からの距離に比例する。 vi) ひびわれはひびわれ向中央断面に対して対称であり、解析対象領域で等間隔に生ずる。 vii) ひびわれは引張縁ひずみがコンクリート引張終局ひずみに達した時発生する。 viii) 付着応力-相対すべり曲線は六車、森田²⁾提案式に従う。

3 アレストレス効果

本解析で扱うアレストレス効果は、鉄筋とコンクリートが完全に一体となっている領域を対象としている。軸圧縮力が存在するR/C部材のアレストレス効果について説明する。図1は一樣低温状態におかれたR/C部材の全ひずみ分布とコンクリートの応力に関するひずみ分布を示している。この状態における上縁コンクリートおよび鉄筋応力に関するひずみは次式で与えられる。

$$\text{上縁コンクリート: } \epsilon_{prc} + \epsilon_c - \epsilon_{c\Delta T} = \epsilon_c - \epsilon_{c\Delta T} \quad (1) \quad \text{鉄筋: } \epsilon_{prs} + \epsilon_s' - \epsilon_{s\Delta T} = \epsilon_s - \epsilon_{s\Delta T} \quad (2)$$

ここで $\epsilon_{prc}, \epsilon_{prs}$: 軸圧縮力によるコンクリートと鉄筋のひずみ ϵ_c', ϵ_s' : 軸圧縮力導入後から最終状態までに变化したコンクリートと鉄筋のひずみ ϵ_c, ϵ_s : 軸圧縮力導入前から最終状態までに变化したコンクリートと鉄筋のひずみ $\epsilon_{c\Delta T}, \epsilon_{s\Delta T}$: コンクリートと鉄筋の自由収縮ひずみ

図1の座標に従えば、断面の任意高さのコンクリートの応力に関するひずみおよび圧縮応力は次式で与えられる。

$$\epsilon_c(z) = (\epsilon_c - \epsilon_{c\Delta T}) \cdot z/y \quad (3) \quad \xi = (\epsilon_c - \epsilon_{c\Delta T}) / \epsilon_{cu}$$

$$\sigma_c(z) = \sigma_{cu} \xi \cdot z/y \cdot (2 - \xi \cdot z/y) \quad (4) \quad \alpha(\xi) = \sigma_{cu} \{1 - (1 - \xi/\epsilon_{cu})^2\}$$

$\sigma_{cu}, \epsilon_{cu}$: コンクリートの圧縮強度と終局圧縮ひずみ

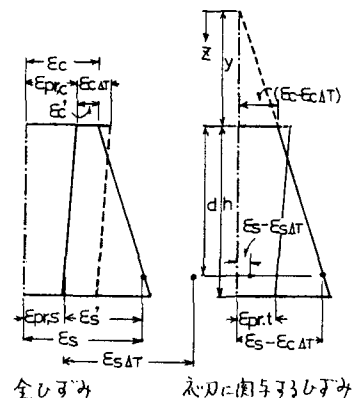
$$\text{式(3)(4)より圧縮合力 } C = b \int_y^y \sigma_c(z) dz - A_s \sigma_c(y+d) \quad (5)$$

$$\text{鉄筋の引張力 } T = A_s \epsilon_s (\epsilon_s - \epsilon_{s\Delta T}) \quad (6)$$

鉄筋まわりのコンクリートのモーメント M_{cc} と軸力によるモーメント M_{pi} は

$$M_c = b \int_y^y \sigma_c(z)(d+y-z) dz \quad (7) \quad M_p = P \cdot e' \quad (8) \quad e': \text{偏心距離}$$

断面の軸方向力と鉄筋まわりのモーメントに関するつり合い条件より、図1一樣低温下におけるひずみ分布



$$P = C + T \quad (9) \quad P \cdot e' = M_c \quad (10)$$

平面保持の仮定より $(E_s - E_{c\Delta T})/(y+d) = (E_c - E_{c\Delta T})/y \quad (11)$

式(11)を用い(9)(10)を連立させて解けば y と d が得られる。これにより RC 部材の上下縁に導入されるアレストレ量は次式で与えられる。

$$\text{上縁: } \sigma_d(y)_p = \sigma_{cu}(2 - \xi) - \sigma_{prc} \quad (12)$$

$$\text{下縁: } \sigma_c(y+h)_p = \sigma_{cu} \xi \{2 - \xi(y+h)/y\}(y+h)/y - \sigma_{prt} \quad (13)$$

4 基礎方程式の定式化

図3はある断面とこの断面から微小距離 dx 離れた断面およびひびわれ断面。図2 ひびわれ断面の比較。面における応力に因するひずみ分布を示したものである。中立軸から z の距離 z の位置での応力に因するひずみと応力は次のように与えられる。

圧縮部コンクリート:

$$E_c(z) = -(E_s - E_{c\Delta T})z/(d-y) \quad (14) \quad \sigma_c(z) = \sigma_{cu} \{1 - (E_c(z)/E_{cu})^2\} \quad (15)$$

中立軸近傍引張部コンクリート:

$$E_t(z) = (E_s - E_{c\Delta T})z/(d-y) \quad (16) \quad \sigma_t(z) = \sigma_{tu} \{1 - (E_t(z)/E_{tu})^2\} \quad (17)$$

$$\text{引張部コンクリート: } E_c(z) = (E_t - E_{c\Delta T})z/(d-y) \quad (18) \quad \sigma_t(z) = \sigma_{tu} \{1 - (E_t(z)/E_{tu})^2\} \quad (19)$$

軸方向力と鉄筋すべり δ のつり合い条件式に式(15)(17)(19)を代入して E_s, E_t について整理すれば、

$$F_1(y)E_s^2 + F_2(y)E_s + Q_1(y)E_t^2 + Q_2(y)E_t + F_3(y) = 0 \quad (20) \quad F_4(y)E_s^2 + F_5(y)E_s + P_1(y)E_t^2 + P_2(y)E_t + F_6(y) = 0 \quad (21)$$

式(20)(21)は y が与えられると E_s, E_t を解くことができる。また、両式は任意断面において成立するので、微小距離 dx に対する増分形 dE_s, dE_t, dy で表示すれば

$$\alpha_1(y, E_s) dE_s + \alpha_2(y, E_s, E_t) dy + \alpha_3(y, E_t) dE_t = 0 \quad (22) \quad \beta_1(y, E_s) dE_s + \beta_2(y, E_s, E_t) dy + \beta_3(y, E_t) dE_t = 0 \quad (23)$$

E_s, E_t は y が与えられると解けるので、結局 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ はすべて y の関数と考えることができる。両式 dx で除して $dE_s/dx, dE_t/dx, dy/dx$ について整理すれば次の関数式が得られる。

$$\frac{dE_s}{dx} = Q(y) \frac{dy}{dx} \quad (24) \quad \frac{dE_t}{dx} = G(y) \frac{dE_s}{dx} \quad (25) \quad Q(y) = \frac{\alpha_2(y)\beta_3(y) - \alpha_3(y)\beta_2(y)}{\alpha_1(y)\beta_3(y) - \alpha_3(y)\beta_1(y)} \quad (26) \quad G(y) = \frac{\alpha_2(y)\beta_1(y) - \alpha_1(y)\beta_2(y)}{\alpha_3(y)\beta_3(y) - \alpha_2(y)\beta_1(y)} \quad (27)$$

微小距離 dx における相対すべり (δx) の増分および鉄筋とコンクリートの付着応力 (τx) と鉄筋ひずみとの関数は、

$$\frac{d\delta x}{dx} = E_s - E_t \quad (28) \quad \frac{dE_s}{dx} = \frac{U_s}{A_s E_s} \cdot \tau x \quad (29) \quad U_s: \text{鉄筋1周長}$$

式(28)を x で微分して式(25)(29)を代入し、付着応力 τ に対する相対すべり関数に六車森田の提案式を用いれば、相対すべりに関する次の支配微分方程式が得られる。

$$\frac{d^2 S_x}{dx^2} = K_m \{1 - G(y)\} \frac{\ln \{(e-1)S_x + 1\}}{\{(e-1)S_x + 1\}} \quad (30) \quad K_m = \frac{U_s}{A_s E_s} \cdot \frac{\tau_{max}}{\delta_{max}} e \quad (31) \quad S_x = \frac{\delta x}{\delta_{max}} \quad (32)$$

式(30)には $G(y)$ が含まれるため y が決定されないと解くことができない。式(24)より E_s と y の関数は次式で与えられる。

$$\{E_s\}_x = \{E_s\}_{x=0} + \int_{y_{x=0}}^{y_x} Q(y) dy \quad (33) \quad x=0: \text{付着応力が作用する位置}$$

y, E_s が決定されると式(20)(21)より E_t が決定され、相対すべりの変化率は y の関数と考えられる。式(28)の条件のもとに式(30)を解くことができる。

5 実験結果との比較

式(30)は Runge-Kutta 法を用い境界条件に付着破壊の有無、完全定着領域の有無を考慮して解くことができる。図2, 4はそれぞれ本解析法によるひびわれ発生荷重および剛性残存率、計算結果を実験結果と比較したものである。線形弾性係数を考慮した本解析結果は実験値と非常によく評価しており、本解析法の妥当性が検証されたものと考えられる。

参考文献: ①金野、コンクリート非線形弾性係数とRC曲げ部材の解析法、年報1980、20頁、鋼材の付着に付する理論的検討、1967建築論文集

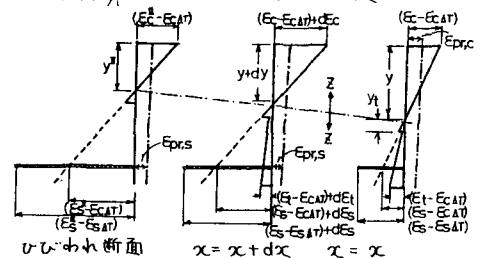
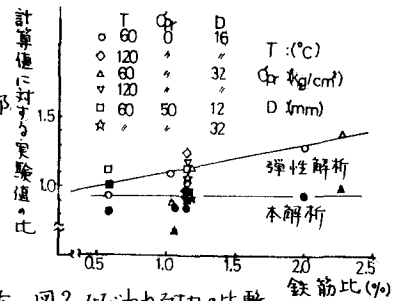


図3 任意断面における応力に因するひずみ分布

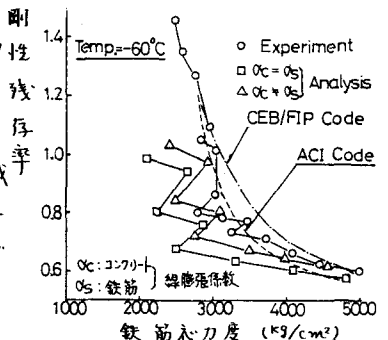


図4 鉄筋応力度と剛性残存率の関係