

(V-7) 重ね合わせの原理に基づくRC曲げ要素のクリープ解析法について

宇都宮大学大学院 学生員 阿部 司
宇都宮大学 正会員 佐藤良一
オリエンタル建設(株) 正会員 手塚正道

1. はじめに

これまで、コンクリートの物性(弾性係数、収縮、クリープ)や温度の変化、載荷時材齢や荷重履歴の影響を包含した時系列によるコンクリート構造物の理論的構造評価の確立には至っていない。

そこでコンクリート構造物の初期から長期にわたる連続した変形解析理論をつくることを最終目的とし、本研究ではコンクリートひずみとすべり量に対して重ね合わせを用いた解析を行い、RC部材における変動荷重の影響を実験的、解析的に検討した。

2. 解析方法

2. 1 仮定

解析対象はRCはりの曲げ要素である。任意断面 x におけるひずみ分布を以下のように仮定し、それに基づくひずみ分布・応力分布を図-1に示す。1) 圧縮応力域コンクリートと鉄筋の間にはひずみの直線性が成立する。2) 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。3) ひび割れ断面のコンクリートは引張応力を負担しない。4) すべてのひび割れ間隔、ひび割れ幅は同一である。5) 要素はひび割れ間中央に対して対称である。

2. 2 基本的考え方

本解析は、コンクリートのクリープ、および付着クリープに及ぼす載荷時材令の影響を考慮し、コンクリートひずみ、および引張鉄筋とコンクリート間のすべり量に対して重ね合わせを用いた。部材上縁からの距離 z の位置の考慮している時点 t_i でのコンクリート応力は式(1)のように表すことができる。

$$\sigma_{c,i}(z) = Ee(t_i, \bar{t}_{i-1}) \left[\varepsilon_{c,i}(z) - J(t_i, t_i) \sigma_{c,i}(z) - \sum_{j=2}^{i-1} \left\{ \sigma_{c,j}(z) - \sigma'_{c,j-1}(z) \right\} J(t_i, \bar{t}_{j-1}) + \sigma_{c,i}(z) J(t_i, \bar{t}_{i-1}) - \varepsilon_{fr,i} \right] \quad (1)$$

ただし、 t_j , $\bar{t}_{j-1}$: j 番目のタイムインターバルの終点と中間の材齢、 $\varepsilon_{fr,i}$: t_i における収縮ひずみ、 $J(t_i, \bar{t}_{j-1}) = 1/Ee(t_i, \bar{t}_{j-1}) = 1/\bar{E}_{c,j-1} + \phi(t_i, \bar{t}_{j-1})/E_{c28}$, $\bar{E}_{c,j-1}$, E_{c28} : 材齢 $\bar{t}_{j-1}$ および標準養生されたコンクリートの弾性係数、 $\phi(t_i, \bar{t}_{j-1})$: $\bar{t}_{j-1}$ に載荷されたときの t_i におけるクリープ係数である。

式(1)を用いて、任意位置 x における断面の軸方向力、曲げモーメントの釣り合いから式(2), (3)が得られる。

$$0 = \int_{Ac'} \sigma_{c,i}(z) dA + \int_{Ac} \sigma_{c,i}(z) dA + A_s' \sigma_{s',i} + A_s \sigma_{s,i} \quad (2)$$

$$M = \int_{Ac'} \sigma_{c,i}(z)(z-d) dA + \int_{Ac} \sigma_{c,i}(z)(z-d) dA + A_s' \sigma_{s',i}(d'-d) \quad (3)$$

ただし、 M : 作用モーメント、 $Ac' \cdot Ac$: 圧縮・引張域コンクリート断面積、 $A_s' \cdot A_s$: 圧縮・引張鉄筋断面積である。式(2), (3)から鉄筋とコンクリートの間のすべり量の勾配が中立軸の関数として式(4)を得る。

$$d\delta_{x,i}/dx = t_{s,i} - \varepsilon_{t,i} = f(yi) \quad (4)$$

また式(2), (3)の微小増分、鉄筋ひずみと付着応力の関係から付着に関する基礎方程式として式(5)を得る。

$$\frac{d^2 \delta_{x,i}}{dx^2} = \frac{U_s}{A_s E_s} \{1 - G(yi)\} \tau_{x,i} + Q(yi) \quad (5)$$

ただし、 $\delta_{x,i}$, $\tau_{x,i}$: 時点 t_i の断面 x におけるすべり量・付着応力、 $U_s \cdot A_s \cdot E_s$: 引張鉄筋周長・断面積・弾性係数である。ここで式(5)を数値解析するためには付着応力-すべり関係式が必要になる。断面 x における考慮して

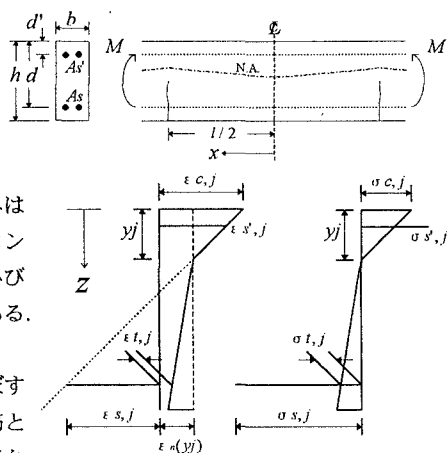


図-1 ひずみ分布・応力分布

いる時点 t_i での付着応力は式(5)のように表すことができる。

$$\tau_{x,i} = Ke(t_i, \bar{t}_i - 1) \left[\delta_{x,i} - \tau_{x,1} J_k(t_i, \bar{t}_1) + \sum_{j=2}^{i-1} \left\{ \tau_{x,j} - \tau_{x,j-1} \right\} J_k(t_i, \bar{t}_j - 1) + \tau_{x,i-1} J_k(t_i, \bar{t}_i - 1) \right] \quad (6)$$

ただし、 $J_k(t_i, \bar{t}_j - 1) = 1/Ke(t_i, \bar{t}_j - 1) = 1/\bar{K}_j - 1 + \phi_b(t_i, \bar{t}_j - 1)/K_{28}$ 、 $\bar{K}_j - 1$ 、 K_{28} ：載荷材齢 $\bar{t}_j - 1$ および 28 日の付着剛性、 $\phi_b(t_i, \bar{t}_j - 1)$ ： $\bar{t}_j - 1$ に載荷されたときの t_i における付着クリープ係数である。

式(4)と式(5)を連立すれば、以下の境界条件の下で数値解析することができる。

$$x = 0 : \quad \delta_{x,i} = 0$$

$$x = l/2 : \quad d\delta_{x,i}/dx = \varepsilon_{x,i} - \varepsilon_n(y_i)$$

3. 実験概要

コンクリートは、水セメント比 60%，単位セメント量 $290\text{kg}/\text{m}^3$ であり、鉄筋は、SD295 呼び名 D19、D16 の異形鉄筋を用いた。載荷実験に供した供試体の断面諸元、載荷状況を図-2、3 に示す。材齢 34 日に載荷し、同時に乾燥を開始した。以後、温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 60(700 日以降 $70 \pm 5\%$ R.H.) の恒温恒湿室に静置された。

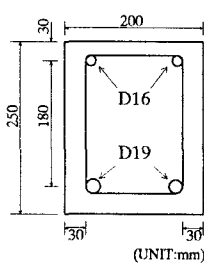


図-2 断面図

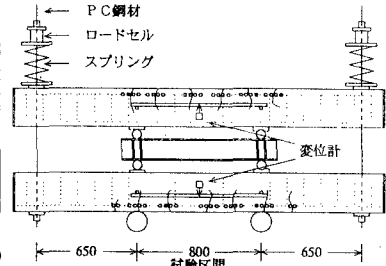


図-3 載荷状況図

コンクリートの圧縮強度、引張強度、弾性係数は、標準養生 28 日で $32.5, 2.88, 28.4 \times 10^3$ 、載荷時材令で $34.2, 3.00, 28.3 \times 10^3 (\text{N}/\text{mm}^2)$ である。付着特性として、ひび割れ断面近傍の付着の劣化は黒正らの実験、付着クリープ特性は高橋らの実験式を参考にして求めた[1]。

4. 結果および考察

供試体 CS20CR の引張鉄筋ひずみ分布から得られた付着応力-すべり量関係を図-4 に示す。図中の実線は実験値を一次近似したものであり、解析にはこの付着剛性 K_1 を用いた。また解析では、載荷 1100 日間に 10 のタイムインターバルを設定した。ひび割れ間隔は、本来構造解析の結果として得られるものであるが、今回は実験で得られた実測のひび割れ間隔を用いて計算している。

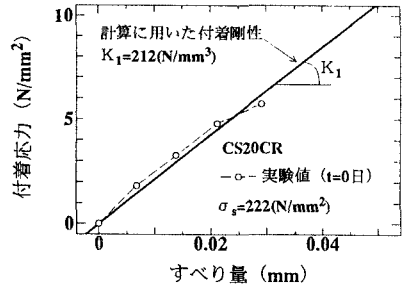


図-4 付着応力-すべり量関係

図-5、6 には、載荷経路が違う部材の平均曲率の実験値と計算値を示す。図-5 における供試体 CS20CR は、持続荷重を与えたものであり、計算値は実験値をよく評価している。図-6 における供試体 VS101520CR は、21 日および 210 日に持続荷重を増加させたものである。鉄筋応力が低い場合、ひび割れが十分に進展していないと思われるため、静的載荷時($t=0$)に計算値は実験値を約 73% 過大評価している。しかし荷重を増加させた 21 日目以降は概ねよく評価している。

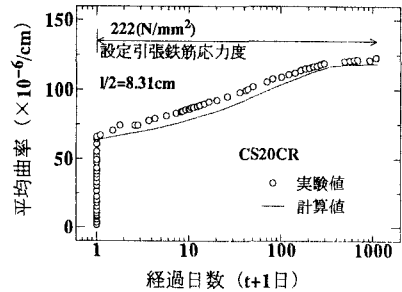


図-5 平均曲率の経時変化

5. まとめ

限られた実験の範囲内ではあるが、重ね合わせを用いた本解析方法は RC 部材の変形を精度よく予測することができた。今後、ひび割れ断面の引張軟化、付着応力-すべり量関係モデルについて、検討する必要がある。

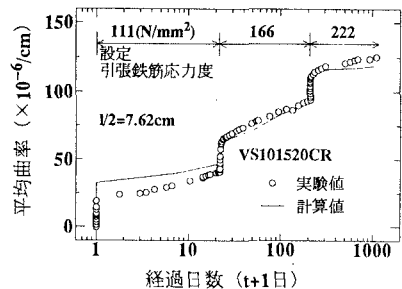


図-6 平均曲率の経時変化

〈参考文献〉[1]T.Abe et al.:Basic Bond Equations for Reinforced Concrete Beam Element Subjected to Bending Moment Changing Linearly, URBAN ENGINEERING IN ASIAN CITIES IN THE 21ST CENTURY, Vol.1, pp.D122-D127, 1996