

V-364 繰返し曲げモーメントを受けるRC部材の構成方程式と変形挙動

武蔵工業大学大学院 学生員 小林 保之  
 武蔵工業大学学生 根本 直之  
 武蔵工業大学工学部 正会員 吉川 弘道

1. まえがき

曲げモーメントを受ける鉄筋コンクリート部材の変形挙動を支配する曲げモーメント～曲率関係のモデルを構築する際、重要なのは、引張部に生ずるひびわれの評価である。ひびわれ発生後は、鉄筋とコンクリート間の附着作用からコンクリートも引張力を負担し(引張硬化作用)、非線形挙動を呈する。加えて、繰返し曲げモーメントを受ける場合には、単調載荷と比較するとより複雑な非線形挙動を呈することが知られている。そこで、本研究は単調載荷時における曲げモーメント～曲率関係を解析的に取り扱ったモデル[1]を増分形式に展開するとともに、繰返し曲げモーメントを受ける場合に拡張し、その変形挙動を解析的に取り扱おうとするものである。

2. 増分形式による荷重変形関係

江夏らによって導出された単調載荷時における曲げモーメント～曲率関係[1]を柔性方程式の形に書きなおすと次式を得る。

$$\begin{Bmatrix} \kappa \\ \epsilon \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_c I_1 & 0 \\ 0 & E_c A_1 \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \lambda_c \begin{Bmatrix} s \\ t \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} d-a & 1 \\ I_2 & A_2 \end{bmatrix} \right\} \begin{Bmatrix} M \\ N \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ただし、  $s = b(h-a)^2/3(d-a)$  (2)、  $t = b(h-a)$  (3)

ここで、b:断面の幅、h:断面の高さ、d:断面の有効高さ、I<sub>1</sub>,I<sub>2</sub>:State I(全断面有効時)、State II(引張部のコンクリートを無視した状態)の断面2次モーメント、A<sub>1</sub>,A<sub>2</sub>:State I、State IIの断面積、a:圧縮縁から中立軸までの距離、κ:曲率、ε:軸ひずみ、M:曲げモーメント、N:軸力を表す。また、λ<sub>c</sub>は引張硬化係数と呼ばれ、ひびわれによる剛性低下を示す曲げモーメントの関数であり、本モデルで最も重要な無次元係数である。

式(1)の全量系(Total Deformation Theory)による記述を増分形式(Incremental Form)に書き換えるために、曲げモーメントMと軸力Nで微分すると次式を得る。

$$\begin{Bmatrix} d\kappa \\ d\epsilon \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} dM \\ dN \end{Bmatrix} \quad (4)$$

ここで、係数マトリックス [C] の各項を具体的に書くと、次式のように表すことができる。

$$C_{11} = \frac{1}{E_c I_1} \left\{ 1 + \frac{s}{n} \left( \frac{\partial \lambda_c}{\partial M} \sigma_s^* + \lambda_c \frac{\partial \sigma_s^*}{\partial M} \right) \right\} \quad (5) \quad C_{12} = \frac{1}{E_c I_1} \frac{s}{n} \lambda_c \frac{\partial \sigma_s^*}{\partial N} \quad (6)$$

$$C_{21} = \frac{1}{E_c A_1} \left\{ \frac{t}{n} \left( \frac{\partial \lambda_c}{\partial M} \sigma_s^* + \lambda_c \frac{\partial \sigma_s^*}{\partial M} \right) \right\} \quad (7) \quad C_{22} = \frac{1}{E_c A_1} \left\{ 1 + \frac{t}{n} \left( \lambda_c \frac{\partial \sigma_s^*}{\partial N} \right) \right\} \quad (8)$$

ただし、 $\sigma_s^* = \frac{nM}{I_2(d-a)} + \frac{nN}{A_2}$  であり、ひびわれ位置の鉄筋の応力を表す。(n:弾性係数比)

以上の操作によって、全量系による式(1)を増分形式(式(4))に書き換えることができた。

次に、両者(式(1)、式(4))による計算結果の比較を行い、これを図-1に示した。計算においては、曲げモーメントのみが作用した場合を想定し、従って、式(4)右辺の係数マトリックスの第1対角項のみ考慮したものである。

同図からState Iにおいては、全量系、増分形式とも一致し、非線形挙動を示すState IIへの遷移領域についても、ほぼ一致している。この領域における両曲線の差異は、Euler法の打切り誤差によるものと思われるが、十分に小さい

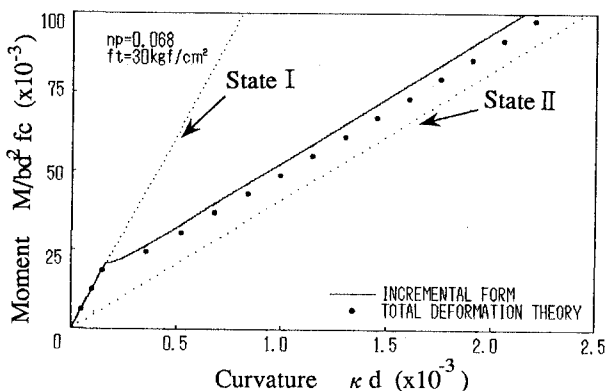


図-1 全量系と増分形式との比較

ので、工学上は無視し得るものとする。

表-1 引張硬化係数に関する提案モデルのまとめ

3. 繰返し曲げモーメントを受ける場合の引張硬化係数の提案

繰返し曲げモーメントを受ける部材のM- $\kappa$ 曲線は、包絡線では単調載荷と同様の挙動を示すが、除荷曲線と再載荷曲線は、ひびわれの開口・閉口により、複雑な様相を示しながら、閉じたループを形成する[3]。そこで、ひびわれ後の非線形挙動を一義的に支配している引張硬化係数 $\lambda_c$ を除荷・再載荷において、再定義することを考える。このため、単軸部材を対象とした著者ら[2]のモデルに基づき、表-1に示すような引張硬化係数を提案する。ここで、 $M_{max}$ は、除荷点のモーメントを表し、 $M_1$ は、引張部のひびわれが完全に閉じた状態のモーメントを表す。

	LOAD	UNLOAD	RELOAD
tension stiffening factor	$\lambda_c = \frac{\tanh(\mu_c)}{\mu_c}$	$\lambda_c = \Delta\lambda_c \frac{M_{max} - M}{M_{max} - M_1} + \lambda_c$	$\lambda_c = \Delta\lambda_c \frac{M - M_1}{M_{max} - M_1} + \lambda_c$
schematic figures			

4. 数値シミュレーションおよび実験結果との比較

図-2に3サイクルの繰返しを想定した数値シミュレーションの結果を示した。

次に、以上までの提案モデルの適応性を検討するために実験値(武藤ら[3])との比較を行ったものを図-3に示す。引用した実験は、25.4×50.8×350cmの供試体に2点集中載荷による1方向繰返し(片振り)を行ったものであり、軸力は載荷されていない。計算に用いた材料特性値のうち、コンクリートの引張強度については、乾燥収縮等の影響が大きいと考えられるため、実験結果から読みとった値を用いることにし、提案モデルの各パラメータは実験値と合うように設定した。また、実験値の荷重P~たわみ $\delta$ に合わせて計算を行うために、部材の材軸方向に20分割して、作用曲げモーメントおよび曲率を各要素で求めてから、スパン中央部のたわみを数値積分によって算出した。これは、任意の断面に作用する曲げモーメントが一定でなく、これによりひびわれの状態が一樣でないため、材軸方向の曲率の分布が異なるためである。

同図より、本手法による計算結果と実験結果は、よく一致していることがわかる。

5. まとめ

本研究では、単調載荷のモデルにおける引張硬化係数を新たに提案することにより、繰返し曲げモーメントを受ける場合の変形挙動を、精度よく表すことができた。しかし、提案モデルのパラメータの決定法などについては検討が必要である。

また、今後は各構成材料(コンクリート、鉄筋)の非線形性を考慮することにより、本提案モデルの精度が向上すると考えられ、次の課題とする。

<参考文献>

- [1]吉川弘道・江夏輝行・小玉克巳：クラックひずみ法によるRC部材の曲げ剛性に関する解析研究，土木学会第45回年次学術講演会講演概要集、第5部門、pp.572-573、平2.9
- [2]吉川弘道・小林保之：繰返し荷重を受けるRC部材の引張硬化係数と増分型構成則，日本コンクリート工学協会論文集投稿中
- [3]武藤清：耐震設計シリーズ3 構造物の強度と変形，丸善株式会社pp.1-pp.55

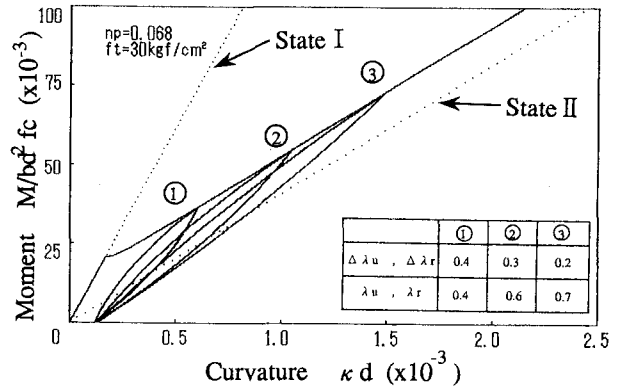


図-2 曲げモーメント~曲率関係

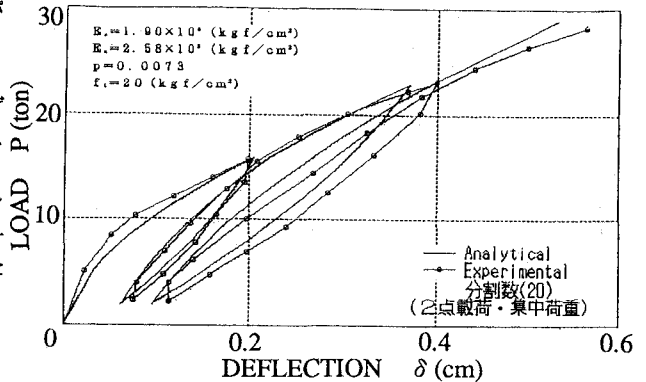


図-3 実験結果との比較(荷重~たわみ関係)