

横浜国立大学大学院 学生会員 府川 徹
 横浜国立大学工学部 正会員 椿 龍哉
 横浜国立大学工学部 正会員 池田 尚治

1. まえがき

正負繰返し荷重を受けるRC部材の力学的挙動を正確に把握することは、地震時のコンクリート構造物の安全性を考える上で不可欠である。RC曲げ部材が正負繰返し荷重のもとで示す挙動を解析的にシミュレーションすることは、力学的モデル化という過程を通してRC曲げ部材の特性を明らかにするという意味で、上記のような安全性を検討する場合に有効であると考えられる。シミュレーションの手法は種々のものがあるが、本研究では、比較的容量の小さい計算機でも可能にするため、伝達マトリックス法にもとづく手法を用いて行った。コンクリートおよび鉄筋の繰返し荷重下における材料非線形性も考慮した。

2. RC曲げ部材に関する伝達マトリックス式

軸力 N 、せん断力 S 、および曲げモーメント M が作用する部材に関するはり理論にもとづく剛性方程式を用いると、部材の要素の右端 R と左端 L に関する状態量を関係付ける伝達マトリックス式が次のように導かれる。^{1),2)}

$$\{D_R \ E_R \ 1\}^T = \tilde{T}_i \{D_L \ E_L \ 1\}^T ; \{D_L \ E_L \ 1\}_{i+1}^T = \tilde{T}_P \{D_R \ E_R \ 1\}^T \quad (1)$$

$$\tilde{D} = \{u \ v \ \theta\}^T ; \tilde{E} = \{N \ S \ M\}^T \quad (2)$$

$$\tilde{T} = \begin{bmatrix} \tilde{T}_{11} & \tilde{T}_{12} & 0 \\ \tilde{T}_{21} & \tilde{T}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} ; \tilde{T}_P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \bar{P} ; \tilde{K}_T = \begin{bmatrix} \tilde{K}_{T11} & \tilde{K}_{T12} \\ \tilde{K}_{T21} & \tilde{K}_{T22} \end{bmatrix} ; \tilde{K}_{T12} = \tilde{K}_{T21}^T \quad (3)$$

$$\tilde{T}_{11} = -\tilde{K}_{T12}^{-1} \tilde{K}_{T11} ; \tilde{T}_{12} = \tilde{K}_{T12}^{-1} ; \tilde{T}_{21} = \tilde{K}_{T21} - \tilde{K}_{T22} \tilde{K}_{T12}^{-1} \tilde{K}_{T11} ; \tilde{T}_{22} = \tilde{K}_{T22} \tilde{K}_{T12}^{-1} \quad (4)$$

$$\tilde{K}_{T11} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & -\frac{EG_x}{L} \\ \frac{12EI}{L^3} + \frac{6P}{5L} & \frac{6EI}{L^2} + \frac{P}{10} & \frac{4EI}{L} + \frac{2PL}{15} \\ \text{SYM.} & & \end{bmatrix} ; \tilde{K}_{T22} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & -\frac{EG_x}{L} \\ \frac{12EI}{L^3} + \frac{6P}{5L} & \frac{6EI}{L^2} + \frac{P}{10} & \frac{4EI}{L} + \frac{2PL}{15} \\ \text{SYM.} & & \end{bmatrix} ; \tilde{K}_{T12} = \begin{bmatrix} -\frac{EA}{L} & 0 & \frac{EG_x}{L} \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} - \frac{6P}{5L} & \frac{6EI}{L^2} + \frac{P}{10} \\ \frac{EG_x}{L} & \frac{6EI}{L^2} + \frac{P}{10} & \frac{2EI}{L} - \frac{PL}{30} \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここに、 u, v, θ は、各々、軸方向、軸と直角方向の変位、および回転角を表わす。また、 $\tilde{T}, \tilde{T}_P$ は、各々、格間伝達マトリックス、格点伝達マトリックスであり、 $\bar{P}$ は荷重を表わす。接線剛性マトリックス $\tilde{K}_T$ に含まれる E, A, G_x, I, L, P は、各々、ヤング率、断面積、断面1次モーメント、断面2次モーメント、要素の軸方向の長さ、および軸力を表わす。RC部材の場合は断面がコンクリートと鉄筋の2種類の材料から形成されるので、 E, A, G_x, I は各材料の剛性やコンクリートのひびわれを考慮した換算された値である。 G_x は断面各点における材料の接線剛性の变化やひびわれ等のために軸方向の変形と曲げによる変形が連成することを表わす。与えられたRC曲げ部材を細分割し、各要素 i 、各格点 j について式(1)を順次用いることにより、部材全体に関する伝達マトリックス式が組立てられ、部材の境界条件を考慮することにより、未知の状態量を求めることができる。はり要素を用いた有限要素法では、部材を細分割することにより、全体剛性マトリックスが大規模になるが、上記の手法では扱うマトリックスの大きさは常に小さくすむことになる。

繰返し荷重を受ける場合の材料の非線形性は図-1に示すようにモデル化した。コンクリートについてはバイリニアの応力-ひずみ関係を、また、鉄筋についてはハウシinger-効果を表現するための曲線モデル³⁾を用いている。計算上、荷重は作用点において曲率増分によって与えられ、各ステップで収束計算を行っている。

3. 数値計算例

対象としたRC曲げ部材の断面は図-2に示すとおりである。コンクリートは断面鉛直方向に30層に分割し、鉄筋は上下2層に対称に配置する。左右対称の単純はりであり、図-2(b)にその左側半分を示した。はりの軸方向には10要素に分割し、各要素中央における材料定数を用いて伝達マトリックスを計算している。シミュレーションの結果を図-3に示す。①および②はひびわれ荷重から降伏荷重に対する挙動である。③は除荷状態である。荷重がゼロに近づく付近で、スパン中央で全断面にひびわれが生じた状態となる。したがって、④の部分では、荷重は鉄筋のみによって受持たれており、鉄筋の応力・ひずみ関係の特性が荷重・変位曲線に顕著に現れている。しかし、この後⑤においてひびわれが断面下部で閉じると、部材の剛性が増加し、鉄筋のモデルの特性の影響は小さくなり、①および②の部分と類似の挙動を示すようになる。一方、はりのたわみの分布に関しては、スパン中央部に塑性変形が集中的に発生することが確認された。

4. あとがき

正負繰返し荷重を受けるRC曲げ部材の力学的挙動をシミュレーションするために、容量の小さな計算機でも可能なように伝達マトリックス法を用いた手法を示した。はり要素を用いた有限要素法と比較すると、小規模な連立1次方程式系を解くことになるという点が有利な点であると思われる。RC曲げ部材のように材料非線形性が著しい場合にも、伝達マトリックス法が適用可能であることが確認された。はり全体の変形を求めるためには有効な手法といえる。一方、マトリックスの乗算が繰返されるため、数値誤差が累積される傾向が見受けられた。これにより、解の精度が低下し、RC曲げ部材の挙動を正確にシミュレーションできないことになるが、これは倍精度演算や、伝達マトリックスの正規化によって防止できることが確認された。本解析では、簡単のため、コンクリートの引張強度やせん断変形の影響は無視されているが、これは容易に組み込むことができると思われる。

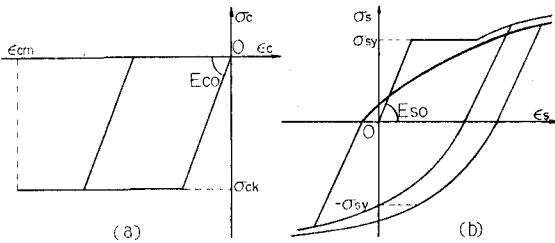


図-1 コンクリートおよび鉄筋の応力・ひずみ関係

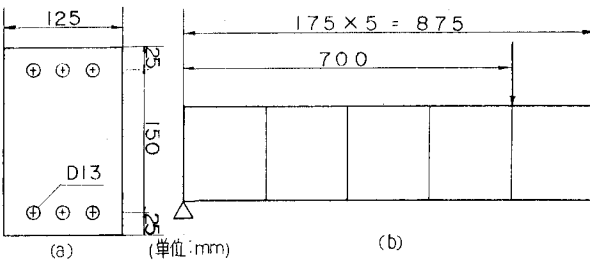


図-2 断面、載荷位置、および要素分割

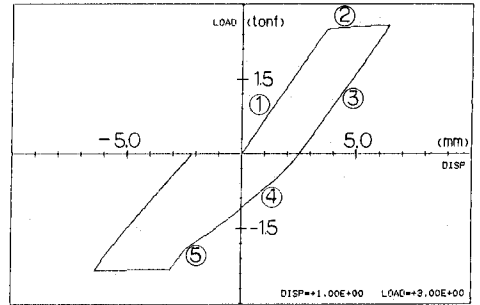


図-3 荷重・変位曲線

【参考文献】

- 1) 成岡 昌夫・遠田良喜：伝達マトリックス法，コンピュータによる構造工学講座I-2-B，培風館。
- 2) Bazant, Z.P., Tsubaki, T.: Nonlinear Creep Buckling of Reinforced Concrete Columns, Proc. of ASCE, Vol. 106, No. ST. 11, November, 1980, pp. 2235-2257.
- 3) Brown, R.H., Jirsa, J.O.: Reinforced Concrete Beams under Load Reversals, ACI Journal, Vol. 68, May, 1971, pp. 380-390.