

RC柱の耐力劣化を考慮した 解析手法に関する研究

金 裕錫¹・壁谷澤 寿海²

¹工修 東京大学大学院工学系研究科博士課程大学院生 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)
²工博 東京大学地震研究所教授 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)

The present paper proposes a macro analytical model for reinforced concrete column with three isoparametric plane elements along the column length, based on the constitutive law of concrete and reinforcement. The objectives of this study are to model the shear behavior of column and its interaction with axial force and bending moment, and to simulate the post peak behavior characterized by strength decay, which become to be important in the performance based design. For those purposes, the smeared rotating crack model is adopted for cracked concrete and compression softening and tension stiffening effect are considered in concrete constitutive model. Nonlinear solution algorithm which use two iterative procedures for the element is provided and the effect of iterative procedure to the analysis results is examined. Finally, the analytical results are compared to the experimentally observed response and the limitation as well as characteristic of proposed model is identified.

Key Words : reinforced concrete, column, macro analytical model, nonlinear analysis, post-peak behavior

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の構造解析手法には部材の実験結果に基づく部材レベルでのマクロモデルを用いたものと、鉄筋およびコンクリートの構成則に基づくミクロモデルを用いた有限要素法によるものがあり、それぞれ独立的に研究が行われて来た。一方、これらの研究の共通点としては、部材の降伏から破壊までの過程を解明する目的で耐力劣化のメカニズムを対象にしたモデルが提案されてきたのが挙げられる¹⁾。特に、柱モデルの場合は軸力と曲げモーメントの相互作用(ファイバモデル、マルチスプリングモデル)はもとより、せん断力との相互作用も対象にしているモデルが提案されている。

しかしながら、両モデル化手法はそれなりの研究成果を収めているものの、マクロモデルの場合はモデルの精度および信頼性を上げるためには膨大な実験結果データベースの拡充が必要であることと、ミクロモデルの場合は計算上非経済的であることが指摘されている。

そこで、本研究では両モデル化手法の長所を取り入れる目的でコンクリートおよび鉄筋の応力-歪関係に基づき、柱の挙動を支配する領域をマクロ的にモデル化することによって通常のFEMに比べ計算上経済的である柱モデルを提案すると

もにその解析手法を示す。本提案モデルは柱を材軸方向に3つのアイソパラメトリック平面要素を用いてモデル化し、その要素単位でせん断補強筋およびコンクリートの2軸応力の影響による耐力劣化を考慮している。また、解析手法として収束計算を用いている。

最後に部材モデルとしての適合性および解析上収束計算の安定性を検討する目的で本提案モデルを用いて偏心ピロティ震動実験を対象にする静的繰り返し載荷解析を行い、その結果と実験結果との対応関係を示すとともに解析手法の改善点を検討する。

2. 部材モデル

剛域を除いた長さ L_0 を持つ柱部材モデルを図-1に示す。通常、柱部材は線材として材軸の両端に2つの節点①、②(図-1(a))を設けてモデル化するのが一般的であるが、本研究ではせん断危険断面と言われる両端から αL_0 離れた位置に内部節点③、④を設けて一本の柱を3つの線材(1)(2)(3)に分割する(図-1(b))。さらに、2つの節点を持つ各線材を4節点面材に変換する(図-1(c))。以下に部材の剛性マトリクスの作成方法、線材から面材への変換および最小

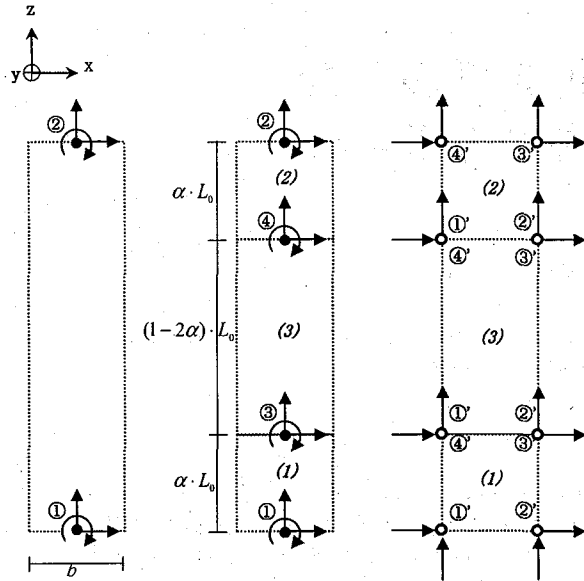


図-1 柱モデル

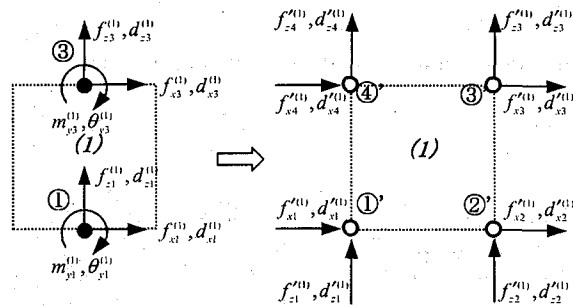


図-2 線材と面材の関係

解析単位である面材の解析手法について詳説する。

(1) 部材剛性マトリクス

図-1 (b) の節点での力の釣り合いおよび変位の適合条件を考慮して3つの線材に対する剛性マトリクスを合成したのが式(1)である。

$$\begin{Bmatrix} \{\Delta F_1\} \\ \{\Delta F_2\} \\ \{\Delta F_3\} \\ \{\Delta F_4\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [k_{11}^{(1)}] & 0 & [k_{13}^{(1)}] & 0 \\ & [k_{22}^{(2)}] & 0 & [k_{24}^{(2)}] \\ & & [k_{33}^{(3)}] + [k_{33}^{(1)}] & [k_{34}^{(3)}] \\ \text{symm.} & & & [k_{44}^{(4)}] + [k_{44}^{(1)}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\Delta D_1\} \\ \{\Delta D_2\} \\ \{\Delta D_3\} \\ \{\Delta D_4\} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで、下付きおよび上付き文字が表しているのはそれぞれ節点と線材の番号である。式(1)を外部節点(①, ②)と内部節点(③, ④)の関係で表し(式(2)), さらに内部節点③と④で与えられる外力が0であることから内部節点変位(式(3))を用いて外部節点のみの関係で縮約すると部材剛性マトリクス $[K_{6 \times 6}]$ が得られる(式(4))。

以上の内容は3つの線材の剛性マトリクスを節点での釣り合い条件および適合条件から直接作成法を用いて合成し、またそれを static condensation 法を用いて縮約し、1つの柱部材の剛性マトリクスを誘導したのに過ぎない。ここで、内部節点での外力が0である(式(5))ことは後述する解析手法において収束計算を必要とする条件となる。

$$\begin{Bmatrix} \{\Delta F_c\} \\ \{\Delta F_i\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [K_{cc}] & [K_{ci}] \\ [K_{ic}] & [K_{ii}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\Delta D_c\} \\ \{\Delta D_i\} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\{\Delta D_i\} = [K_{ii}]^{-1} \cdot (\{\Delta F_i\} - [K_{ic}] \{\Delta D_c\}) \quad (3)$$

$$\{\Delta F_{6 \times 1}\} = [K_{6 \times 6}] \{\Delta D_{6 \times 1}\} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \{\Delta F_{6 \times 1}\} &= \{\Delta F_c\} - [K_{ci}] \cdot [K_{ii}]^{-1} \cdot \{\Delta F_i\} \\ [K_{6 \times 6}] &= ([K_{cc}] - [K_{ci}] \cdot [K_{ii}]^{-1} \cdot [K_{ic}]) \end{aligned}$$

$$\{F_i\} = 0 \quad (5)$$

(2) 線材から面材への変換

図-1 (b), (c) の(1)番要素を取り出したのが図-2 である。線材と面材の変位関係は平面保持理論と中立軸直交方向の応力が0であるという2つの仮定に基づいて式(6)で表すことができ、それをマトリクス形として式(7)に示す。ここで、節点①', ②' (または ③', ④') の x 方向変位成分が同じであることが解析手法のもう1つの収束計算の原因となる。

$$\left. \begin{aligned} d'_{x1} &= d_{x1}^{(1)} \\ d'_{z1} &= d_{z1}^{(1)} + (b/2) \cdot \theta_{y1}^{(1)} \\ d'_{x2} &= d_{x1}^{(1)} \\ d'_{z2} &= d_{z1}^{(1)} - (b/2) \cdot \theta_{y1}^{(1)} \\ d'_{x3} &= d_{x3}^{(1)} \\ d'_{z3} &= d_{z3}^{(1)} - (b/2) \cdot \theta_{y3}^{(1)} \\ d'_{x4} &= d_{x3}^{(1)} \\ d'_{z4} &= d_{z3}^{(1)} + (b/2) \cdot \theta_{y3}^{(1)} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\{d'_{8 \times 1}\}^T = [T_{8 \times 6}] \cdot \{d_{6 \times 1}\}^T \quad (7)$$

(3) 面材の構成方程式

面材を1つの4節点アイソパラメトリック要素を用いてモデル化し、ガウス積分点の応力-ひずみ関係(式(8))から数値積分によって面材の構成方程式を求める。面材の4節点での変位とガウス積分点歪の関係を現す歪マトリクス, $[B_{3 \times 8}]$ を用

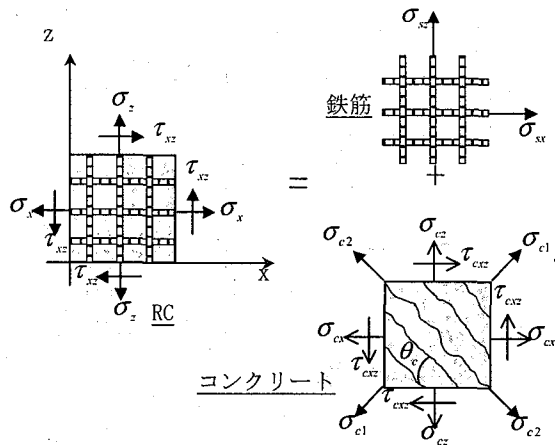
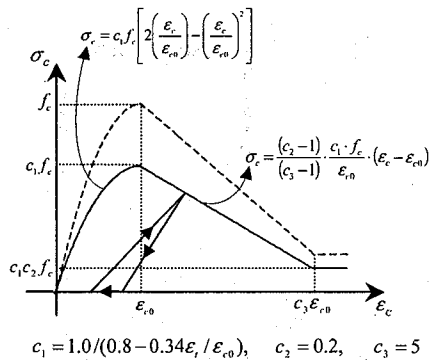
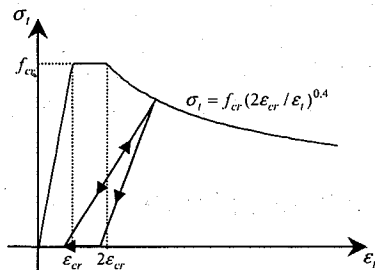


図-3 RC要素の応力



(a) 圧縮



(b) 引張

図-4 コンクリートの構成則

いても、本モデルでは前節の仮定によって式(9)のように $\Delta\epsilon_x$ はいつも0になるので直接求めるのは不可能である。したがって式(10)と式(11)の関係から $\Delta\epsilon_x$ を間接的に求める。

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_x \\ \Delta\sigma_z \\ \Delta\tau_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\epsilon_x \\ \Delta\epsilon_z \\ \Delta\gamma_{xz} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

$$\{0, \Delta\epsilon_z, \Delta\gamma_{xz}\}^T = [B_{3 \times 8}] \cdot \{\Delta d'_{8 \times 1}\} \quad (9)$$

$$\Delta\epsilon_x = -\frac{D_{12}}{D_{11}} \cdot \Delta\epsilon_z - \frac{D_{13}}{D_{11}} \cdot \Delta\gamma_{xz} + \frac{\Delta\sigma_x}{D_{11}} \quad (10)$$

$$\Delta\sigma_x = 0 \quad (11)$$

このようにして求めた歪を用いて、続いて応力を算定することになる。一般的に離散ひび割れモデルでは固定ひび割れあるいは回転ひび割れモデルがよく使われているが、本研究では Modified Compression Field Theory(MCFT)^{2), 3)}で代表される回転ひび割れモデルを用いる。つまり、図-3に示すようにコンクリートの歪を x-z 座標から回転するひび割れ角度(θ_c)による主歪(主応力)座標へ変換し、圧縮および引っ張り応力を求める。図-4に本研究で用いたコンクリートの圧縮(a)および引張(b)方向の構成則をそれぞれ示す。本研究ではコンクリート圧縮強度の直交する引張歪による軟化特性および鉄筋によるテンションスティフニング効果を考慮しており、鉄筋の構成則は文献(4)のモデル用いている。

3. 解析手順

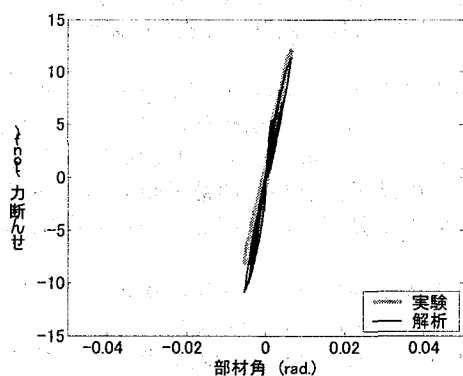
図-5に部材レベルでの解析手順を示している。その前後の全体解析の手順は通常の剛性法と同様である。ここで提案している解析手順の特徴は内部節点の不釣り合い力 ΔF_i^u およびガウス積分点でのx方向残留応力 σ_x^u の解除のため2つの内部イタレーションループを使用し、内部節点の増分変位 $\{\Delta D_i\}$ とガウス積分点の増分歪 $\Delta\epsilon_x$ を更新していくことである。まずイタレーションループ(1)は内部節点の釣り合い条件(式(12))と外部節点での適合条件によって式(3)を式(13)に現すことができる。またイタレーションループ(2)も同様にガウス積分点のコンクリートと鉄筋のx方向応力成分から求められる残留応力 σ_x^u (式(14))と適合条件から成り立つ式(15)を用いて $\Delta\epsilon_x$ を求める。ここで $[K_u]$ 、 D_{11} は繰り返し過程で更新される値を用い、最初の $\{\Delta D_i\}$ および $\Delta\epsilon_x$ はそれぞれ式(3)と式(10)から求める。

$$\{F_i^u\} = \left\{ \begin{Bmatrix} \{f_3^{(1)}\} + \{f_3^{(2)}\} \\ \{f_4^{(3)}\} + \{f_4^{(2)}\} \end{Bmatrix} \right\} \quad (12)$$

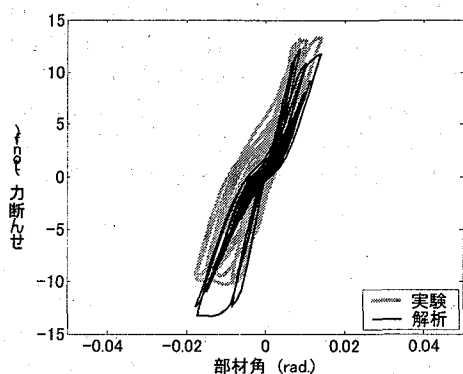
$$\{\Delta D_i\} = [K_u]^{-1} \cdot \{F_i^u\} \quad (13)$$

$$\sigma_x^u = \sigma_{cx} + \rho_{sx} \cdot \sigma_{sx} \quad (14)$$

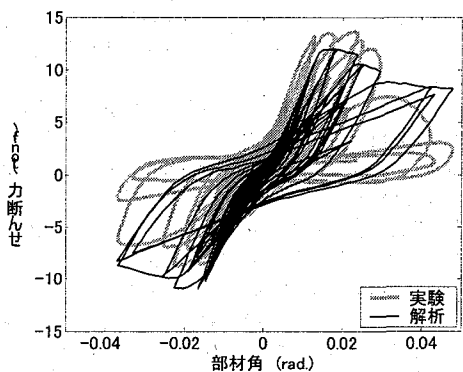
$$\Delta\epsilon_x = -\sigma_x^u / D_{11} \quad (15)$$



(a) ELC37.5



(b) JMA50



(c) CHI50

図-8 実験と解析結果の比較

既に評価している⁶⁾。しかしながら、本試験体の耐力が低下し始めた後、破壊に至るまでの過程については、既存部材モデルによって応答を再現することができなかった。

本研究で用いるモデルは降伏後の耐力低下まで再現できるように提案されたモデルであるが、その適用範囲は 2 次元の問題に限られるため、上記の試験体を立体解析するのは現段階では不可能である。そこで本研究では、提案したモデルの数値解析モデルとしての適合性および解析上の安定性を検討することに焦点を絞り、1 階ピロティ構面

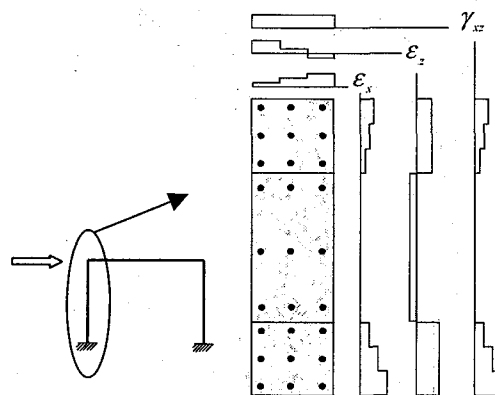


図-9 柱の歪分布

(柱 2 体からなる平面架構, 図-6, 7) を取り出して静的繰返し載荷解析を行うこととした。加力方法としては図-7 に示すように水平方向に 1 階ピロティ構面の水平変位の実験値を変位制御で与え、また鉛直方向には独立柱が負担する自重のみを軸力として与えることとした。また、解析に用いられた水平変位は ELC37.5kine, JMA50kine, CHI50kine 相当の入力に対する試験体の変位応答で残留変位を考慮し、連続に入力した。

5. 解析結果および考察

解析結果と実験結果を図-8 に比較して示す。ここで示している実験および解析結果は 3 つの入力段階に対するピロティ構面 1 階柱の加振方向の水平変位とせん断力の関係である。最大耐力に関する実験結果と解析結果は正側では解析のほうが実験より小さく、負側の耐力は解析のほうが実験より大きい、全体的に概ね対応しているのがわかる。また、CHI50 の入力段階では実験結果と解析結果ともに耐力劣化を示しているが、実験のほうが解析より早い段階でその耐力を失っていくのがわかる。これは解析では変動軸力の影響を考慮していないことと、実験結果には含まれているねじれ応答による 2 軸相互作用の影響が平面解析である本解析モデルには反映されていないことに一部の原因があると考えられる。そのほか、コンクリートおよび鉄筋の構成則とともに歪から応力を求める過程 (図-5 の灰色部分) に関する更なる検討が必要だと考えられる。

図-9 には引張側柱のガウス積分点での歪分布を、断面および材軸方向に対してそれぞれ示している。材軸方向のひずみ分布から、部材中央部の歪は両端部に比べ遥かに小さいレベルであり、ほとんど弾性範囲であることがわかる。また、断面方向に対するせん断歪が一様な分布になっているのは本モデルが前提にしている仮定に起因する特徴である。つまり、面材の上部または下部の 2 つの節点

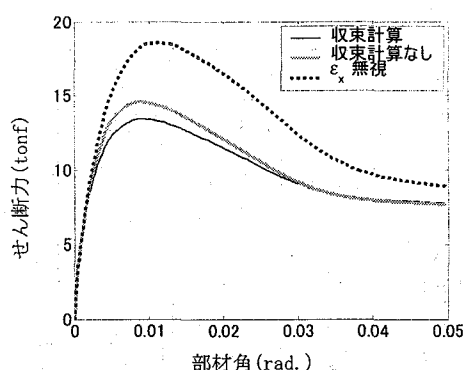


図-10 収束計算の影響

の x 方向変位が同じである仮定から、8つの節点変位から歪を求める際(式(9))前述したように $\Delta\epsilon_x$ が 0 になるとともにせん断歪 γ_{xz} が断面方向に一様分布になる。

図-10 では、解析手法として使われている2つの収束計算(図-5 参照)のうち、 x 方向の残留応力を解除するため $\Delta\epsilon_x$ を更新する収束計算を行う場合、収束計算の有無が解析結果に及ぼす影響について検討する目的で静的単調載荷解析の結果を示している。黒実線が収束計算を行う場合、薄黒実線が収束計算を行わない場合、すなわち残留応力を解除しない場合、黒破線が x 方向の歪自体を考慮しない場合である。3つのケースともに耐力低下の傾向には大きい差は見られないが、最大耐力には大きい差が生じていることが確認できる。これは本研究で用いているコンクリートの構成則が圧縮強度の直交する引張歪によって軟化する特性を持っていることに起因すると考えられる。つまり、圧縮強度は引っ張り歪の増加によって低下し、その引っ張り歪は他の歪成分が一定であれば ϵ_x と比例関係である。したがって、 ϵ_x を無視する場合は圧縮強度の軟化が鈍くなり、その結果、耐力を過大評価することになる。また、収束計算を行う場合(黒実線)がしない場合(薄黒実線)より耐力が若干低いことから、収束計算の過程で ϵ_x が増加していることも推定することができる。

6. まとめ

本研究では、コンクリートおよび鉄筋の応力-歪関係に基づいて、耐力劣化の考慮できる柱モデ

ルおよびその解析手法を提案した。実験結果と解析結果との比較から得られた内容を以下にまとめる。

- (1) 本研究で提案しているモデルを用いて過去に行われた震動実験の試験体を対象に、実験結果を入力とする静的繰り返し載荷解析を行った。その結果、試験体の最大耐力および耐力低下域の挙動が概ね対応しているのを確認した。
- (2) 本モデルが前提とする仮定を満足するために行われる収束計算について検討した結果、収束計算の有無および材軸直交方向の歪が解析結果、特に最大耐力に及ぼす影響が大きいことが明らかになった。
- (3) 本報では提案モデルの制限のため立体解析の対案として繰り返し載荷による平面架構の解析のみを行ったが、動的解析時の収束の安定性問題の解決、さらには3次元への拡張が今後の課題である。その他、コンクリートおよび鉄筋の構成則に関しても引き続き検討すべきであると考ええる。

参考文献

- 1) Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures Under Seismic Loads, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2001, 624pp.
- 2) Vecchio, F., Collins, M.P.: Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, Proceedings V.83, No.2, pp.219-231, 1986
- 3) Stevens, N.J., Uzumeri, S.M., Collins, M.P.: Reinforced Concrete Subjected to Reversed Cyclic Shear - Experiments and Constitutive Model, ACI Structural Journal, Vol.88, No.2, pp.135-146, 1991
- 4) 陣少華, 壁谷澤 寿海: 非線形解析における鉄筋コンクリート耐震壁モデル, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.763-768, 1999
- 5) 壁谷澤 寿海, 金 裕錫 他, 鉄筋コンクリート造偏心ピロティ建物の震動実験(その1)(その2)第3回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp.165-175, 2002
- 6) 金 裕錫, 壁谷澤 寿海: 鉄筋コンクリート偏心ピロティ造の非線形地震応答解析, 日本建築学会学術講演梗概集(C-2, 構造IV), pp.907-908, 2003