

V-101 中心軸圧縮を受けるRC柱の非線形モデルと既往の実験結果との比較

東急建設技術研究所 正会員○石川雅美
 武蔵工業大学学生 原木智広
 武蔵工業大学工学部 正会員 吉川弘道
 東急建設技術研究所 山本俊彦

1. はじめに

中心軸圧縮載荷を受ける鉄筋コンクリート柱に関して、その応力～ひずみ関係および最終的な耐力と横補強筋との関係明らかにするため、多くの実験的研究がなされてきた(例えば、文献[1],[2],[3],[4]など)。これらの研究では、横補強筋量およびその形状・ピッチ、あるいはコンクリートの強度などを影響因子として実験を実施し、その評価を行なうとともに、それぞれの実験結果に基づいたいくつかの数学モデルが提案されている。これらの数学モデルは、対象とする実験の範囲内においては、実験結果を精度良く表わしているが、より汎用的な数学モデルの構築を目指すのであれば、拘束状態のメカニズムに基づいたモデルの導出が必要であろう。

そこで本研究では、実験的な立場とは異なり、連続体力学で用いられる平衡方程式および構成方程式などからRC柱の力学状態を記述することによって、汎用性の高い非線形モデルの構築を試み、各種の実験結果との比較から提案したモデルの評価を行なったものである。

2. 解析モデルの定式化

中心軸圧縮載荷を受けるRC柱のコアコンクリートは、横補強筋を配することによって3次元応力状態となり、複雑な挙動を呈することが知られている。連続体力学の立場から見ると、コンクリート材料におけるこのような応力状態は、次式に示すような直交異方性材料に対する構成方程式によって(1-1)式のように記述できる。また鉄筋についても、横補強筋比： p_x 、軸方向鉄筋比： p_z 、として配筋状態を考慮すると(1-2)式で表わすことができる。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x^c \\ \sigma_y^c \\ \sigma_z^c \end{Bmatrix} = \frac{1}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu)E_x^c & \nu E_{xy}^c & \nu E_{xz}^c \\ \nu E_{xy}^c & (1-\nu)E_y^c & \nu E_{yz}^c \\ \nu E_{xz}^c & \nu E_{yz}^c & (1-\nu)E_z^c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} \quad (1-1)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x^s \\ \sigma_y^s \\ \sigma_z^s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} p_x E_x^s & 0 & 0 \\ 0 & p_y E_y^s & 0 \\ 0 & 0 & p_z E_z^s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} \quad (1-2)$$

ここで、 ν はポアソン比、そして $\sigma_x^c, \sigma_y^c, \sigma_z^c$ 、および E_x^c, E_y^c, E_z^c はそれぞれx、y、z方向のコンクリートの応力と弾性係数である(ただし、 E_{xy} などの非対角成分は $E_{xy} = (|\sigma_x^c| E_x^c + |\sigma_y^c| E_y^c) / (|\sigma_x^c| + |\sigma_y^c|)$ として算出した)。また、鉄筋の弾性係数をそれぞれ E_x^s, E_y^s, E_z^s であり、 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ は鉄筋とコンクリートで共通のひずみ成分である。そして外荷重 σ_z の作用と、鉄筋とコンクリートの応答応力のつりあいを考えれば、次のようになる。

$$\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sigma_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sigma_x^c \\ \sigma_y^c \\ \sigma_z^c \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \sigma_x^s \\ \sigma_y^s \\ \sigma_z^s \end{Bmatrix} \quad (2)$$

(2)式に(1)式の構成関係を代入し、外荷重 σ_z と ε_z について整理すると、次式が導出される。

$$\sigma_z = \left[\frac{(1-\nu) - \frac{2\nu^2 m_1 m_2}{1+n p_x}}{(1+\nu)(1-2\nu)} E_z^c + p_z E_z^s \right] \varepsilon_z \quad (3)$$

ただし、 m_1, m_2, n はそれぞれ次式で表される。

$$m_1 = \frac{E_{yz}^c}{E_x^c} = \frac{E_{xz}^c}{E_y^c}, \quad m_2 = \frac{E_{yz}^c}{E_x^c} = \frac{E_{xz}^c}{E_y^c}, \quad n = \frac{E_x^s(1+\nu)(1-2\nu)}{E_x^c} \quad (4)$$

(3)式は横補強筋によって拘束を受ける鉄筋コンクリート部材の作用応力～応答ひずみ関係を表すモデルである。このモデルに対して、図1に示す応力～ひずみ関係(曲線oab)を組み込み、コンクリートの弾性係数の非線形性を考慮する。この応力～ひずみ関係は一軸圧縮応力下の応力～ひずみ関係として文献[5]に示されているものである。詳細は文献[7]あるいは著者らの既報[8]を参照されたい。

横補強筋の拘束効果によって、コアコンクリートは多軸応力状態となり、その強度・弾性係数は増加する。すなわち、多軸応力場では、一軸応力下の最大圧縮強度 f_{c0} と終局強度 f_{c00} は、それぞれ f_c と f_{cu} に、また、最大圧縮強度時のひずみ ε_{c0} と終局強度時のひずみ ε_{c00} は ε_c と ε_{cu} におき換えられる(図1に示す一軸の応力～ひずみ曲線oabは

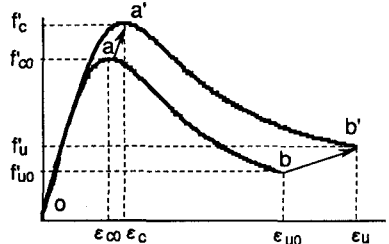


図1 多軸場と一軸の応力～ひずみ曲線

oa'b)に移動する。)この横補強筋による拘束効果を表わすため西山[1]らの提案した拘束係数を導入すると、一軸応力下の圧縮強度、終局強度、およびそれらに対応するひずみは次式から求められる。

$$f'_c = (1 + k_1 \cdot C_c) f'_{c0} \quad f'_u = (1 + k_2 \cdot C_c) f'_{u0} \quad \epsilon_c = (1 + k_3 \cdot C_c) \epsilon_{c0} \quad \epsilon_{cu} = (1 + k_4 \cdot C_c) \epsilon_{cu0} \quad (5-1)$$

$$C_c = p_x \left(\sqrt{f_y / f'_c} \right) (1 - 0.5 S / D) \quad (5-2)$$

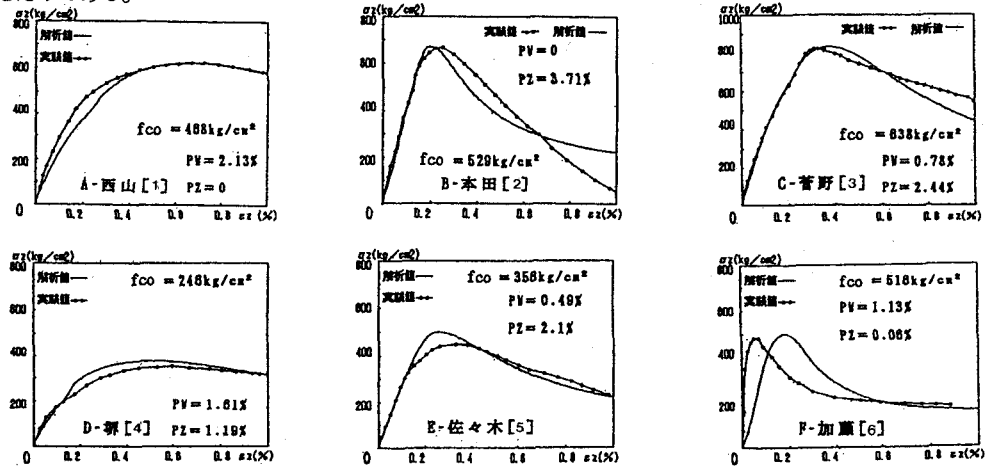
ここで、 C_c は拘束係数、 $k_1 \sim k_4$ は定数、 S は補強筋間隔、 D は断面寸法、また、 f_y は横補強筋の降伏強度である。また、コンクリートのポアソン比は圧縮強度の80%程度の応力レベルから増加し始めることが知られている。このポアソン比の変化を次式によってモデルに導入した。

$$v = 0.1 \left\{ e^{(0.8 \sigma_c / f'_{c0})^3} - 1 \right\} + v_0 \quad (6)$$

3. 実験結果との比較

前節で定式化した非線形モデルを用いて、既往の実験結果に対する解析を行い、モデルの評価を行う。ここで、本モデルの入力データは、標準供試体の一軸圧縮強度、およびそれに対応するひずみ、さらに、初期弾性係数、ポアソン比、軸方向および横方向鉄筋比、鉄筋の降伏強度、横筋の間隔、断面寸法である。図2に、西山ら[1]、本田ら[2]、菅野ら[3]、境ら[4]、佐々木ら[5]、そして加藤[6]の実験結果とそれに対する解析結果との比較を示す。

まず、軸方向筋を配しない西山らの実験との比較において、本モデルによる解析結果は、良好な対応を示している。一方、これとは対比的に横補強筋を配していない本田らの実験との比較では、下降域の対応が十分とはいえないが、横補強筋のない試験体では破壊が急激に起こるため、この領域の測定は極めて難しく厳密な比較検討には無理であろう。菅野らの高強度コンクリートを高強度鉄筋で補強した試験体との比較では、ピークひずみが実験と解析とで多少異なっているものの、両者はよく一致しているものと思われる。以下、本モデルによる解析結果は、境ら、および佐々木らの実験結果とも良く合致していると言えるであろう。しかし、加藤の実験結果との比較では、ピークひずみが著しく異なっている。この理由は、解析の入力データとして必要な標準供試体のピークひずみの値が明らかでなかったためである。



4. まとめ

図2 各実験結果と本モデルによる解析値

連続体力学で用いられる3つの方程式を基に中心軸圧縮をうけるRC柱に対する非線形モデルを導出し、既往の実験結果との比較を行った。その結果、加藤らの実験結果を除いて、いずれの実験結果とも良好な対応を示した。ここで、強調しておきたいことは、これらの解析で用いた拘束係数 $k_1 \sim k_4$ の値はそれぞれの実験ごとに定めたものではなく、すべて同じ値を用いていることである。また、コンクリートの一軸圧縮強度試験から得られるデータや、鉄筋比などといったごく一般に用いられている値だけを入力データとしていることも本モデルの特長であり、比較的汎用性のあることが示されたものと思われる。

参考文献 [1] 西山、六車、渡辺：横拘束コンクリート系部材の曲げじん性改善、コンクリート構造物の靱性とその評価法に関するコロキウム論文集、1988；[2] 本田、山本、白都、大滝：高強度コンクリート柱に関する実験、東急建設技術研究所報、No.16、1990；[3] 菅野、田村、長嶋、木村：超高層RC建物における柱に関する実験的研究、竹中技術研究報告第38号 1987；[4] 堺、角田、能町：鉄筋コンクリート柱における帯筋の拘束効果に関する実験、土木学会論文集、第354、1985；[5] 佐々木、狩野、寺岡、藤原：RC造短柱の中心圧縮性状に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集 1990；[6] 加藤：高強度材料を用いたRC角柱の軸方向加力実験に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集 1990；[7] Klaus-jurgen Bahe, Jan Walczak, Alan Welch, Nagin Mistry：Nonlinear Analysis of Concrete Structures, Computers and Structures Vol.32 No.3/4, 1989；[8] 吉川、石川、山本、相馬：中心軸圧縮を受けるRC柱の非線形モデル、コンクリート工学年次論文報告集 1990