

コンクリートに拘束された鉄筋の座屈に関する研究

熊本大学・学生員○古川 貴博

熊本大学 正 員 渡辺 浩

熊本大学 学生員 大石研一郎

熊本大学 正 員 崎元 達郎

1. はじめに：橋脚の多くは鉄筋コンクリート橋脚（以下RC橋脚と呼ぶ）であるため、RC橋脚の耐震性の検討が特に必要となってきた。1995年1月の阪神大震災においては、大規模な亀裂、剥離、主鉄筋の座屈等の被害がRC橋脚に多数生じた。従って、大地震時にも落橋等の致命的な被害を防止する設計を行うためには、非線形域におけるRC橋脚の終局耐力、変形性能及び鉄筋の座屈を適切に評価した解析プログラムを開発することが重要である。¹⁾

2. 解析理論：増分移動座標法により定式化する。1節点3自由度(u, v, θ)のはり一柱要素を用いた有限要素法を用いることとし、断面分割法を用い断面要素毎の降伏を考慮することにより材料的非線形性を、断面分割要素毎の応力を積分した断面力を要素とする初期応力マトリックスにより幾何学的非線形性を考慮する。増分つり合い方程式は次式で定義する。

$$(\mathbf{K}_{ep} + \mathbf{K}_g) \cdot \mathbf{u} = \mathbf{P} - (\mathbf{T} \cdot \bar{\mathbf{f}} - \bar{\mathbf{P}})$$

ここで、 $\mathbf{K}_{ep}$:塑性の影響を考慮した微小変位の接線剛性マトリックス、 $\mathbf{K}_g$:断面力を要素として含む初期応力マトリックス、 $\mathbf{u}$:節点変位増分ベクトル、 $\mathbf{P}$:節点外力増分ベクトル、 $\mathbf{T}$:座標変換マトリックス、 $\bar{\mathbf{f}}$:部材座標による全断面力ベクトル、 $\bar{\mathbf{P}}$:全外力ベクトル、 $\mathbf{T} \cdot \bar{\mathbf{f}} - \bar{\mathbf{P}}$:荷重または変位増分途中で生じる不釣り合い力、繰り返し計算によりこれが0になった時点が釣り合い状態となる。

3. 繰り返し荷重を受けるコンクリートの応力-ひずみ関係：コンクリートの応力-ひずみ関係としては、図-1に示すものを考える。 f_c は、圧縮強度を表している。主な性質は、①圧縮領域のみ応力を考え引張領域では、応力は全て0.とする。②圧縮領域では、応力は最大強度の点Cまで二次曲線上を増加し、それ以降は点Cまで直線的に減少する。さらに点Eを超えた後は、 $0.2 f_c$ の圧縮応力を受け持つものとする。③コンクリートが除荷されると、そのひずみ ϵ がAC上にあるときは傾き E_c で点Hまで応力が減少し、その後引張応力は0.のままで引張ひずみが増加する。また引張から圧縮に転ずるとひずみ ϵ のみが変化しHまで移動する。ひずみ ϵ がCE上にあるときには傾き $2 \cdot \sigma / E$ で点Gまで応力が減少し、引張応力が、0.のままで引張ひずみが増加する。

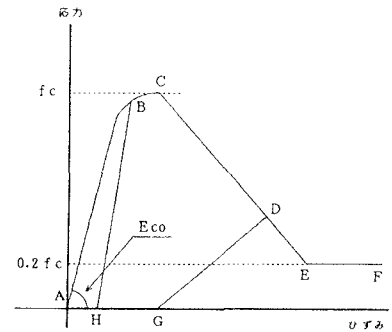


図-1 コンクリートの応力-ひずみ関係

4. 繰り返し荷重を受ける鉄筋の応力-ひずみ関係²⁾ 鉄筋の応力-ひずみ関係は、図-2 に示すバイリニア型を採用する。圧縮応力を与えると、点A→Bへと応力が上昇し直線AB上の弾性範囲内で除荷すると、応力はこの直線上で変化する。 f_y に達すると、式(1)上の応力で点B→Cのように減少する。点Cで除荷すると応力の符号が逆転するまでEで圧縮応力がC→Dのように減少する。逆転した後は、図中に示した傾き $E_{s,i} (= -E_s \cdot \log |\epsilon_i - \epsilon_y| / \delta)$ で点DEのように引張応力は増加し、 $-f_y$ に達した後は一定の応力でE→Fへと変化する。点

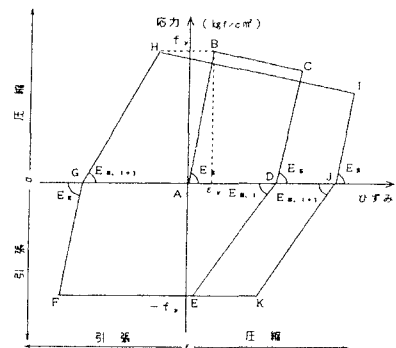


図-2 鉄筋の応力-ひずみ関係

Fで除荷すると応力の符号が逆転するまで傾きE,で点F→Gのように応力は減少する。その後、圧縮側に転ずると傾きE_{B, i+1}で応力は増加し、f_yに達すると点Hから再び式(1)で応力は減少する。

$$\sigma = \sigma_y \cdot \exp(0.17 \cdot (SR/DM)^2 \cdot (\varepsilon_b - \varepsilon)) \cdots (1)$$

SR: 帯筋間隔 DM: 鉄筋径 ε_b : 座屈開始時の平均軸方向ひずみ (ここでは鉄筋の降伏ひずみとする)

5. 解析モデル: 解析モデルとして、本大学において昨年までのRC柱の繰返し載荷実験供試体を考える。有限要素法を用い、部材を幾つかに分割し、断面は層状に分割した。載荷方法は、軸力Vを荷重制御で一定に保ちつつ、変位制御によって水平変位を、降伏変位 δ_y の1倍、2倍、3倍、…と増減する正負交番載荷とした。数値解析では、断面要素の図心でひずみ、応力度、接線係数を評価して、次式により断面剛性及び断面力を計算する。

$$\bar{EA} = \sum E_i \cdot A_i \quad \bar{EI} = E_i \cdot y_i^2 \cdot A_i + \sum E_i \cdot I_i \quad N = \sum \sigma_i \cdot A_i \quad M = \sum \sigma_i \cdot A_i \cdot y_i$$

6. 解析結果と実験結果との比較⁴⁾: 繰返し載荷実験結果と解析結果は、図-3 供試体とそのモデル化表-1に示す8種類について行っているが、ここではその一例として供試体Ⅱの結果を掲載した。図-4は軸力10 kgf/cm²、繰返し回数3回、帯鉄筋間隔10.0cmの供試体についての実験結果である。主鉄筋が引張降伏をしたと思われる $\pm 2\delta_y$ 以降については、最大強度はあまり変化せず、その後 $8\delta_y$ 以降で主鉄筋の座屈及びコンクリートの剥落によって急激に耐力が低下した。このような傾向は、他の実験についても確認された。

図-5に同ケースの解析結果を示しているが解析値と実験値を比較すると、強度はほぼ一致している。しかし、解析値においては $3\delta_y$ から徐々に荷重が低下しており実験値よりも低下開始点が高い。また実験の $10\delta_y$ からの急激な低下は考慮できていない。なお、その他の解析結果に関する詳細は当日発表する。

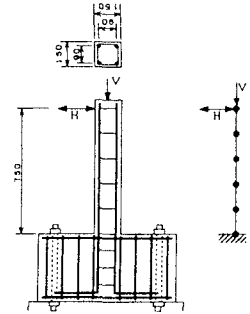


表-1

供試体の種類	I	II	III	IV	V	VI
軸力(kgf/cm ²)	10	10	10	0	20	10
帯筋間隔(cm)	7.5	10	15	10	10	15
繰返し回数	3	3	3	3	3	10

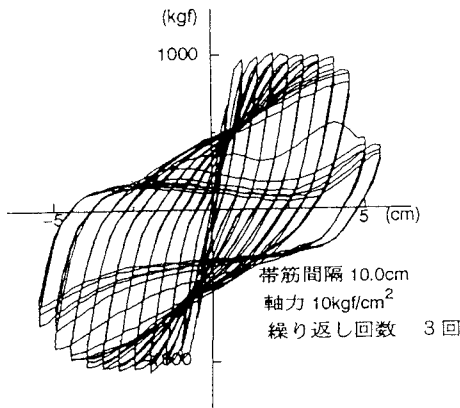


図-4 繰返し載荷実験結果履歴曲線

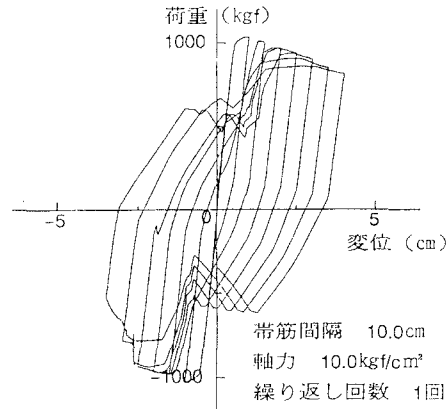


図-5 解析による履歴曲線

- 参考文献: 1) 中村 光・二羽淳一郎・田辺忠顕:「鉄筋コンクリート柱の終局変位に関する解析的研究」土木学会論文集, 第420号/V-6, pp. 115-124, 1990年8月
 2) 西村宜男・小野 潔・池内智行・親家 徹:「各種鋼材の繰返し塑性履歴特性に関する実験的研究」鋼構造論文集第1巻第1号, 1994年3月
 3) 中村 光・二羽淳一郎・田辺忠顕:「鉄筋の座屈がRC構造のポストピーク挙動に及ぼす影響」コンクリート工学会論文報告集, Vol. 14, NO. 2, 1992
 4) 崎元達郎他:「繰返し水平力を受けるRC柱の履歴特性に関する実験」平成6年度西部支部研究発表会