

I-A 114

鉄筋の座屈を考慮したRC柱の曲げ履歴挙動の解析

建設省 正 員 〇古川 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の非線形性を、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。

$$(K_{ep} + K_g) \cdot u = P - (T \cdot \bar{f} - \bar{P})$$

ここで、 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、 K_g :断面力を要素として含む初期応力マトリックス、 u :節点変位増分ベクトル、 P :節点外力増分ベクトル、 T :座標変換マトリックス、 f :部材座標による全断面力ベクトル、 $\bar{P}$:全外力ベクトル、 $T \cdot \bar{f} - \bar{P}$: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：^{1) 2)} コンクリートの応力-ひずみ関係としては、図-1及び図-2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Eまで直線的に減少する。さらに点Eを超えた後は、0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。

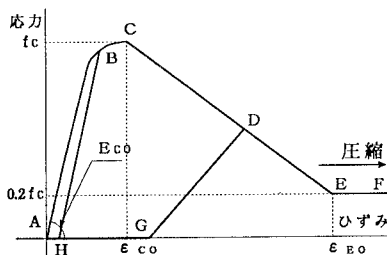


図-1 拘束コンクリートの応力-ひずみ

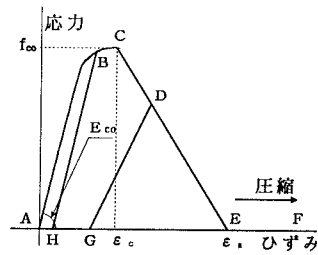


図-2 かぶりコンクリートの応力-ひずみ

4. 繰り返し荷重を受ける鉄筋の応力-ひずみ関係：^{3) 4) 5) 6)}

鉄筋の応力-ひずみ関係は、図-3 に示す。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、傾き $1/100 E_s$ で点B→Cのように増加する。点Cで除荷すると応力の符号が逆転するまで E_s で圧縮応力がC→Dのように減少する。逆転した後は、図中に示したバウシinger効果を考慮した $E_{B, i} (= -E_s \cdot \log |\epsilon_t - \epsilon_y| / 6)$ に加えて引き抜けの影響による剛性低下を考慮した傾きで点D→Eのように引張応力は増加

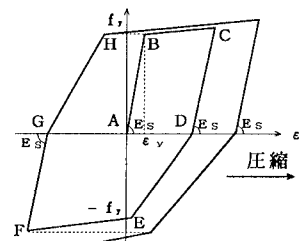


図-3 鉄筋の応力-ひずみ関係

し、 $-f_y$ に達した後は傾き $1/100E_s$ で $E \rightarrow F$ へと変化する。点Fで除荷すると応力の符号が逆転するまで傾き E_s で点F $\rightarrow$ Gのように応力は増加する。その後、圧縮側に転ずると傾き $E+1$ で応力は増加し、 f_y に達すると点Hから再び傾き $1/100E_s$ で増加する。その後、かぶりコンクリートの応力が図-1の点Eに到達すると、鉄筋は座屈による強度低下を生じるものとして下記の式(1)上を挙動するものとしている。⁴⁾

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

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

5. 解析モデル：解析モデルとして、本学で平成6年度に実施したRC柱の繰返し載荷実験供試体を考える。⁶⁾有限要素法を用い、部材を6分割し、断面は層状に52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、 $\cdots$ と増減する正負交番載荷とした。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。

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

6. 解析結果と実験結果との比較⁷⁾：繰返し載荷実験は、6種類につ

いて行っているが、ここではその一例を掲載した。図-5は軸力10 kgf/

cm²、繰返し回数3回、帯筋鉄筋間隔15.0cm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 $8\delta_y$ 以降で座屈及びコンクリートの剥落によって急激に強度が低下した。このような傾向は、他の供試体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（ただし、解析においては繰返し回数1回）と実験値を比較すると、強度はほぼ一致している。さらに解析値においては $9\delta_y$ から急激な荷重が低下しており実験値の $10\delta_y$ からの鉄筋の座屈による急激な荷重低下を良く説明している。

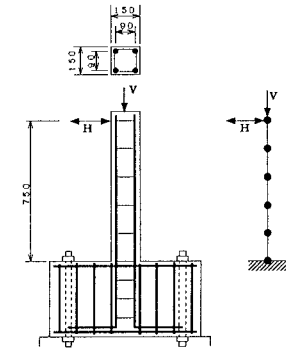


図-4 供試体とそのモデル化

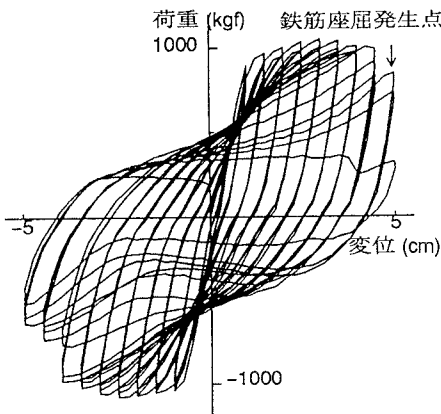


図-5 繰返し載荷実験結果履歴曲線⁷⁾

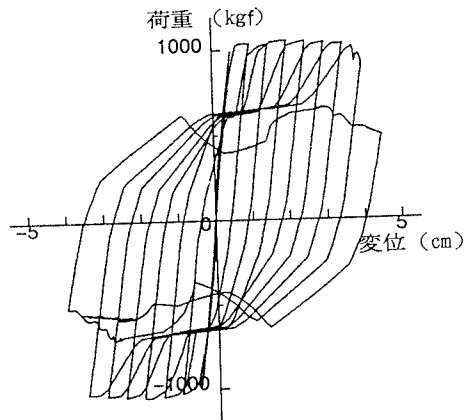


図-6 解析による履歴曲線

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) M. Saatciolu, S. R. Razvi: Strength and Ductility of Confined Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 6, pp1590-1607, June 1992.

3) 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

4) 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に及ぼす影響」コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 14, No. 2, 1992

5) 吉田徳男・畑中重光・上田英明：「RC柱・梁部材の圧縮筋の座屈開始時ひずみについて」コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 14, No. 2, 1992.

6) 加藤大介・金谷淳二：「繰返し加力を受けるRC造柱の主筋も座屈性状の評価に関する実験的研究」コンクリート工学年次論文報告集 13-2 1991.

7) 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