

I-206 繰り返し水平力を受けるRC柱の履歴挙動

熊本大学 正員 渡辺 浩 ○住友建設 正員 新田 晃久
 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橋脚の終局耐力及び変形性能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-柱要素を用いた有限要素法を用いることとし、断面要素法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。

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

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、 $\bar{f}$: 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：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_n は圧縮強度、 f_t は引張強度で圧縮を正とする。主な性質は、①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を越えた後は、 $0.2f_n$ の圧縮応力を受け持つものとする。②圧縮領域にある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_{co} で点Hまで応力が減少し、その後引張強度の点Iまで直線的に変化する。また、引張から圧縮に転じると ϵ のみが変化し、点J $\rightarrow$ A $\rightarrow$ Hへと移動する。その後、引張力を受けたコンクリートの圧縮強度低下率(f_{n+1}/f_n)を乗じた二次曲線AC'上の点B'へと圧縮応力が直線的に上昇する。③ 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、同様に点Iへ直線的に変化する。さらに引張から圧縮に転じると②と同様に応力は点J $\rightarrow$ A $\rightarrow$ G $\rightarrow$ D'へと変化する。この時のD'はDと同じひずみのC'E'上の点とする。

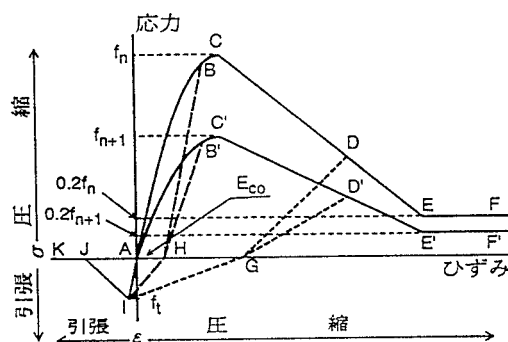


図-1 コンクリートの応力-ひずみ関係

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の弾性-ひずみ硬化モデルを採用する。圧縮応力を与えると、点A $\rightarrow$ 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 E_s で応力は点B $\rightarrow$ 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は傾き E_s で圧縮応

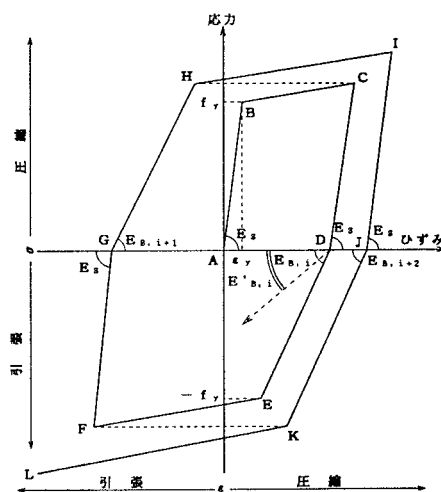


図-2 鉄筋の応力-ひずみ関係

力が点C→Dのように減少する。逆転した後は、図中に示した傾き $E_{s,i}$ ：
 $(-E_s \cdot \log |\varepsilon_i - \varepsilon_y| / 6)$ で点D→Eのように引張応力は増加し、 $-f_y$ に達したのち、再び傾き $E_{s,i}$ で応力は点E→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 $E_{s,i}$ 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 $E_{s,i+1}$ で応力は増加し、点Cでの応力に達すると点Hから再び傾き $E_{s,i}$ で応力は増加していく。今回、供試体基部での鉄筋の抜け出しによる剛性低下率を考慮するため、応力の符号が逆転するとき、図中の破線に示すように本来の傾き $E_{s,i}$ を $E'_{s,i}$ のように低下することを試みた。その低下率を $E'_{s,i}/E_{s,i}$ とする。

5. 実験概要と供試体のモデル化：本大学において、解析結果の検証のためにRC橋脚の繰返し載荷実験を行った。³⁾ 図-3(a)に示すような供試体を、帯鉄筋間隔 $S=7.5, 10, 15\text{cm}$ の3種類に分けて計11体作成した。載荷方法はフーチング部をアンカーボルトで固定した後、2台のActuatorによって、軸力 V は荷重制御で $0, 10, 20\text{kgf/cm}^2$ の3種の大きさに分け、水平力 H は変位制御によって理論値で求めた δ_y を、 $\pm \delta_y$ 、 (0cm) 、 $\pm 2\delta_y$ 、 $\dots$ のように、各々3回または10回繰り返した。解析モデルは図-3(b)に示すはり一柱要素の固定端モデルとして有限要素法を用い、部材を幾つかに分割し、断面は層状に分割する。数値解析法は、断面要素の図心にひずみ、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。

$$\overline{EA} = \sum E_s \cdot A_s \quad \overline{EI} = \sum E_s \cdot y_i^2 \cdot A_s + \sum E_s \cdot I_{0i} \quad N = \sum \sigma_i \cdot A_s \quad M = \sum \sigma_i \cdot A_s \cdot y_i$$

6. 実験結果と解析値の検証：実験と解析は単調載荷と繰返し載荷を計11体の供試体について行ったが、ここでは繰返し載荷の実験結果と解析結果の一例を掲載した。図-4は軸力 10kgf/cm^2 、繰返し載荷回数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繰返し実験についても確認された。図-5は繰返し載荷解析結果であるが、 $E'_{s,i}/E_{s,i}$ を考慮することにより、実験結果履歴曲線の剛性とほぼ一致した。また、図-6は解析値と実験値の比較を示した包絡線であるが、 f_{n+1}/f_n を考慮することによって、解析値は実験値の最大強度を妥当に評価していることが確認できる。よって、解析において $E'_{s,i}/E_{s,i}$ と f_{n+1}/f_n を考慮することは、実験値を評価する上で非常に有効な手段であると言える。しかし、解析においては主鉄筋の座屈等の影響を考慮していないため、実験値における急激な耐力の低下（終局耐力）を追跡することはできなかった。

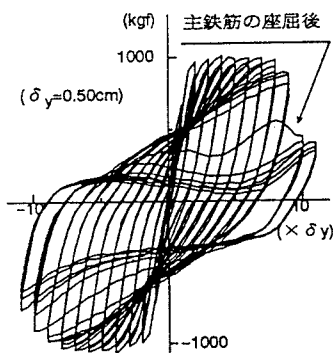


図-4 繰返し載荷実験結果

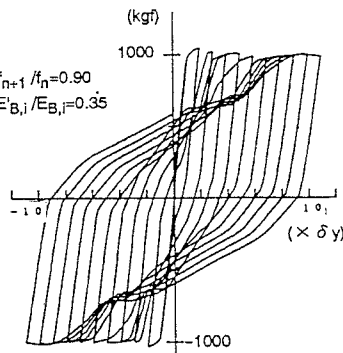


図-5 繰返し載荷解析結果

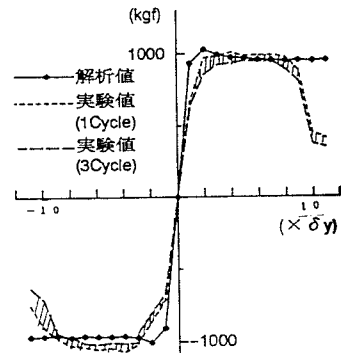


図-6 包絡線の比較

参考文献：1) 中村 光・二羽澤一郎・田辺忠順：「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 淳・池内智行・相澤 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) 崎元進郎他：「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要集，p46，47，1995年3月