

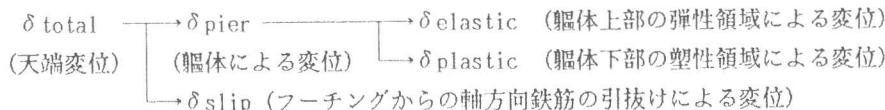
## [149] RC橋脚の荷重変位履歴曲線のモデル化

正会員 ○橋本 親典 (東京大学大学院)  
 正会員 鈴木 正治 (東京大学工学部)  
 正会員 前田 詔一 (西松建設土木設計部)

### 1. 序論

構造物の耐震性に関する実験の方法として、建築分野では実物大に近い供試体による実験が行われているが、土木分野ではRC橋脚など大型構造物に対しては、その規模や形状等の点で実物大実験を行うことが困難であるために、縮小モデル実験をせざるを得ないのが現状である。このため、実物大実験と同様に、縮小モデル実験から得られた実験結果をそのまま直接に設計へと反映することには、規模や形状に関する点から問題がある。したがって、設計に適用する際には、縮小モデル実験から得られる情報に対し、個々の現象レベルにさかのぼり、その影響を定量化しておく必要がある。このような観点に基づき、著者らはこれまでに実験的研究(1)(2)を行い、RC橋脚の天端変位について以下の点を明らかにしている。

(1). 軸方向鉄筋が降伏すると、実際の天端変位には、軸体の曲げ変形による変位の他に、フーチングからの軸方向鉄筋の引抜きによる変位と、軸体下端付近で形成される塑性ヒンジ領域による変位が加わる。つまり、天端変位は次のように分解される(図1)。



(2). 変形が進み、終局状態に近づくにつれて、この3成分の内、軸体の曲げ変形による変位の天端変位に占める比率が小さくなり逆に塑性ヒンジ領域における変形の比率が大きくなってくる。

そこで、本研究はRC橋脚の荷重変位履歴曲線のモデル化にあたり、RC橋脚の天端変位を上記の3成分に分解し、この3成分を縮小モデル実験の結果に基づいて定式化することを試みたものである。

本研究の定量化のフローチャートを図2に示す。 $\delta_{\text{slip}}$ の定量化において軸体下端での軸方向鉄筋のひずみ履歴(引張側、圧縮側)が必要であるため、入力データは軸体下端での鉄筋のひずみ履歴とした。

### 2. 解析に用いた実験例

解析の対象として文献(2)の実験例(2例)を用いた。この2例は、荷重変位履歴曲線の形状が、逆S字型と紡錘型の特徴をよく表わしており、軸力による2次モーメントの影響や軸体の帶筋による塑性ヒンジ領域への影響が入っておらず、このためモデル化の要因を簡単にすることができます。静的交番載荷により求めた荷重変位履歴曲線を同一変位で第一サイクルのみで示すと図3のとおりである。なお、実際の載荷は、軸方向鉄筋が降伏するまでは荷重で制御し、その後は軸方向鉄筋が降伏した時の変位(以後、降伏変位と称す)の整数倍の変位で、2回ずつ繰り返す変位制御とした。

### 3. 解析に用いた仮定

基本的には、 $\delta_{\text{pier}}$ には曲げ理論すなわち材料特性の仮定、平面保持の仮定及び力の釣合条件等を適用し、 $\delta_{\text{slip}}$ には、定着長の十分長い場合の局部付着

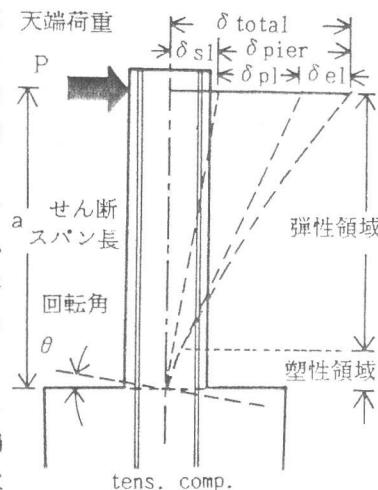


図1 天端変位の分解

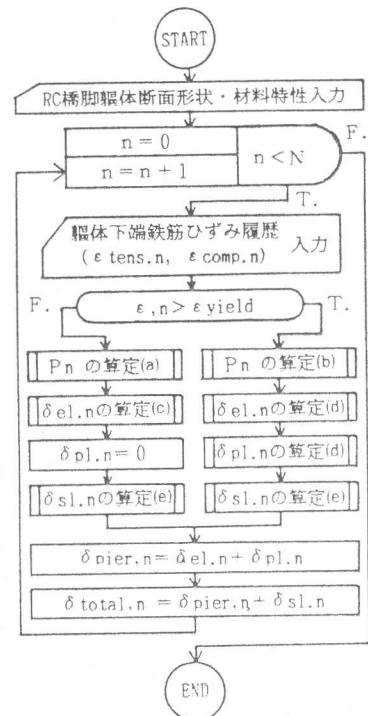


図2 計算のフローチャート

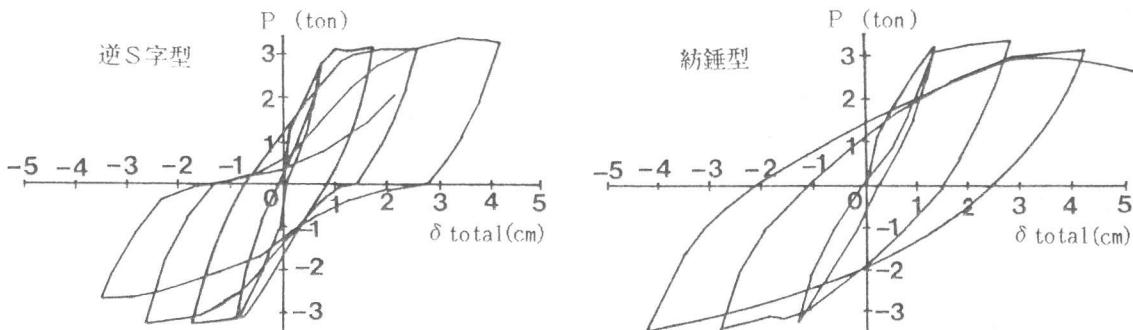


図3 実験例での荷重変位履歴曲線（実験結果）

応力-すべり関係モデル(3)を用いた。初期状態から終局時まで、包絡線だけでなく除荷曲線及び再載荷曲線（以後、これらを内部曲線と称す）に対しても定量化を行うために、図2の各サブルーチンにおいて次のような仮定を新たに追加した。ただし、図2中の英字と下記の英字が対応している。

(a) 一般に、RC橋脚の船体断面の引張鉄筋比はその断面での釣合鉄筋比より小さく、引張鉄筋が降伏するまでは、最大モーメントを受ける断面内の最大圧縮縫ひずみは、0.1%前後である。よって、コンクリートの応力-ひずみ関係はほぼ直線と見なすことができるので、軸方向鉄筋が降伏するまでは、コンクリート、鉄筋の応力-ひずみ関係は完全弾塑性体 ( $E_c = 15100\sqrt{f'c}$ ,  $E_s = f_y/\epsilon_y$ ) と仮定した。

(b) 交番繰返しの影響を考慮するために、コンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ関係として、各々加藤モデル(4)、前川モデル(5)を用いた。かぶりコンクリートの圧壊条件 ( $\epsilon_c \geq 0.5\%$  で  $\sigma_c = 0$ ) と、かぶりコンクリートの剥離後の圧縮鉄筋の座屈条件 ( $\sigma'_s \geq \sigma'_b$  で  $\sigma'_s = 0$ ) を設け、包絡線の最大荷重以後の荷重下降域を、荷重-曲率履歴関係の中で表わした。なお、この0.5%は、コンクリートの応力-ひずみ関係（包絡線）において最大応力以後の応力下降域で応力が最大応力の半分になるひずみとして定めた。また座屈荷重  $\sigma'_b$  は、両端固定のオイラーの座屈式（①式）により求めることとした。

$$\sigma'_b = \pi^2 \phi^2 E' b / (64L_b^2) \quad \text{--- ①}$$

ただし、 $\phi$ ：鉄筋径 (cm),  $L_b$ ：剥離長さ (cm),  $E'b$  :  $\sigma'_s$  のバウシング効果を考慮した弾性係数 (kg/cm<sup>2</sup>) とする。

なお、 $L_b$  は実験の観察より、3ループ目で 5 cm とした。

(c) 図4に示すように、包絡線にはBransonの式を用い、除荷曲線はBransonの式と同様に見掛けの曲げ剛性を変化させてモデル化した。さらに再載荷曲線については、包絡線、除荷曲線で得られた変曲点を結ぶ直線とした。

(d) 塑性ヒンジ領域 ( $L_p$ ) は、包絡線、内部曲線にかかわりなく、軸方向鉄筋の降伏荷重 ( $P_y$ )、供試体が過去に経験した最大荷重 ( $P_{max}$ ) 及びせん断スパン長 ( $a$ ) によって、外力による作用モーメントと内力による抵抗モーメントが一致すると仮定し、一義的に②式のように決定された。

$$L_p = (1 - P_y / P_{max}) a \quad \text{--- ②}$$

また、曲率分布は図5に示すように仮定し、③、④式で求めることとした。ただし、せん断ひびわれが入るのは終局時ループとし、それまでのループでは曲げひびわれだけが発生しているとした。

$$\delta_{pier} = \phi_y (P/P_y) \left( \frac{a^2}{3} + [\phi - \phi_o - \phi_y (P/P_y)] (L_p/2)(a - L_p/3) + \phi_o (L_p/2)(a - L_p/3) \right) \quad \text{--- ③} \quad (\text{曲げひびわれのみ発生})$$

$$\delta_{pier} = \phi_y (P/P_y) \left( \frac{a^2}{3} + [\phi - \phi_o - \phi_y (P/P_y)] L_p (a - L_p/2) + \phi_o (L_p/2)(a - L_p/3) \right) \quad \text{--- ④} \quad (\text{せん断ひびわれ発生後})$$

(e) 艦体下端での軸方向鉄筋のすべり量と艦体の回転角の関係は図6に示すように仮定する。ただし、今回用いた

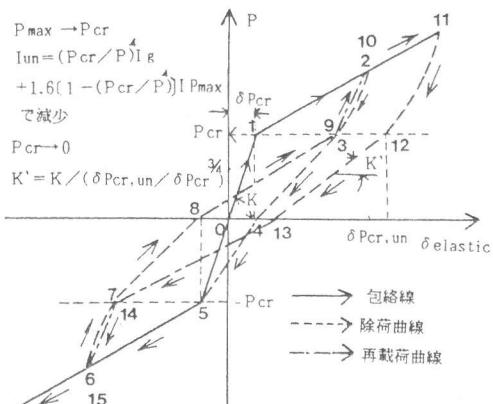


図4  $\delta_{elastic}$  に関するモデル化  
荷重

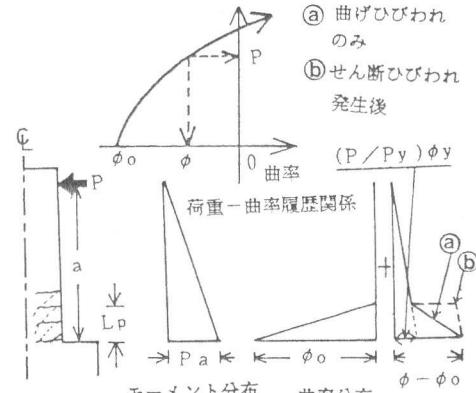


図5  $\delta_{pier}$  (降伏後) に関するモデル化

すべりモデルは、一方向繰返し載荷モデルであるため、軸方向鉄筋の降伏後に圧縮力を受けることによって生じる鉄筋の押込み量は算定できない。そこで、軸方向鉄筋の降伏後の交番載荷による相対すべり量（両側鉄筋のすべり量の差） $\Delta S$ を⑤式で求めることとした。

$$\Delta S = (P/P_y) \Delta S_1 - (1-P/P_y) \Delta S_o \quad \text{----- ⑤}$$

ただし、 $\Delta S_1$ ：一方向載荷での再載荷時のすべり量、 $\Delta S_o$ ：逆方向側の残留すべり量

#### 4. 実験結果との適合性

図7に軸方向鉄筋が降伏する前の $\delta_{pier}$ の計算値（ $\pm 3/4 P_y$ ループ）を、図8に軸方向鉄筋降伏後の $\delta_{pier}$ の計算値を、図9に $\delta_{slip}$ の計算値をそれぞれ実験結果と比較して示す。また、軸方向鉄筋降伏後の $\delta_{pier}$ の算定に用いた荷重-曲率関係、及びその時の鉄筋の $\sigma - \varepsilon$ 関係を図10に示す。

軸方向鉄筋の降伏前は、図7,9より $\delta_{pier}$ 、 $\delta_{slip}$ とも、解析値は実験結果の傾向をよく表していると言える。しかし、 $\delta_{slip}$ に関しては、図9に示されるように軸方向鉄筋降伏後には、逆S字型及び紡錘型の両者とも解析値と実験結果では大幅に違っていた。これは軸方向鉄筋の降伏後、実験では、軸体下端から変角測定棒を取り付けた位置までの軸体の変形による変位が鉄筋の引抜けによる変位よりも大きくなつたためであると考えられる。

図8に示されるように、 $\delta_{pier}$ に関しては、逆S字型の実験例であっても解析では紡錘型になった。これは、図10に示すように、解析に用いた荷重-曲率関係において、せん断ひびわれの発生やその後の軸方向鉄筋の付着劣化による影響を考慮していないため、両解析例とも類似の荷重-変位関係を示したものと考えら

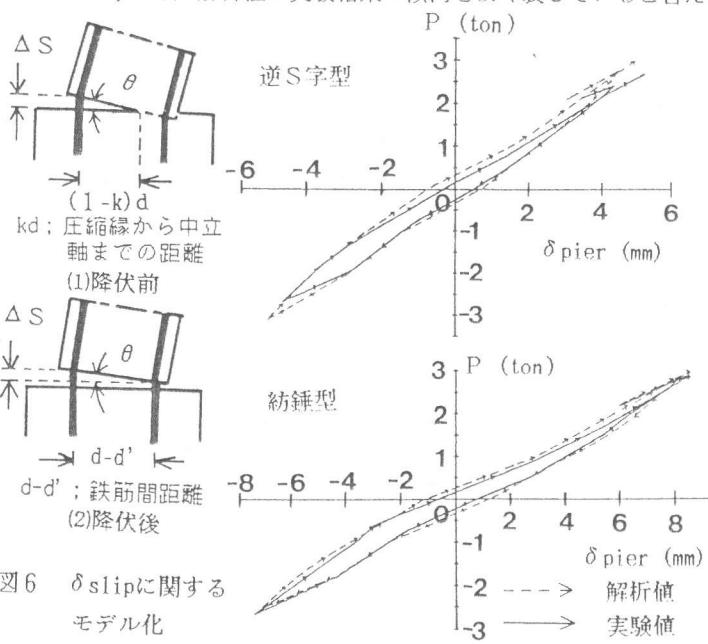


図6  $\delta_{slip}$ に関する  
モデル化

図7  $\delta_{pier}$ （降伏前）の実験結果との比較

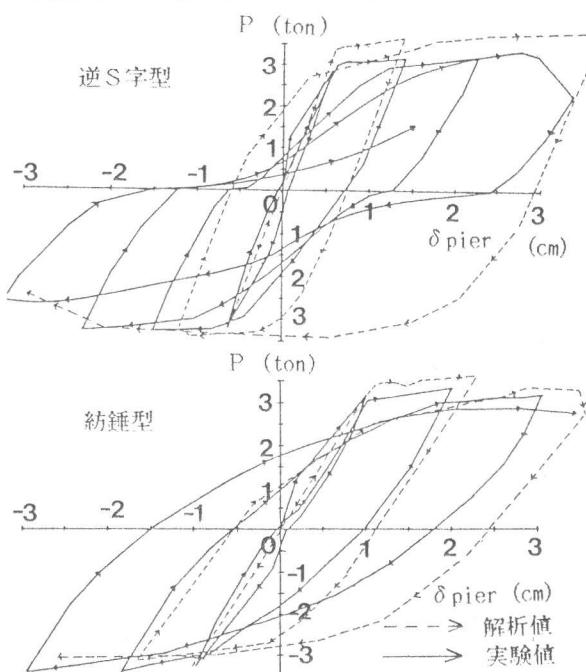


図8  $\delta_{pier}$ （降伏後）の実験結果との比較

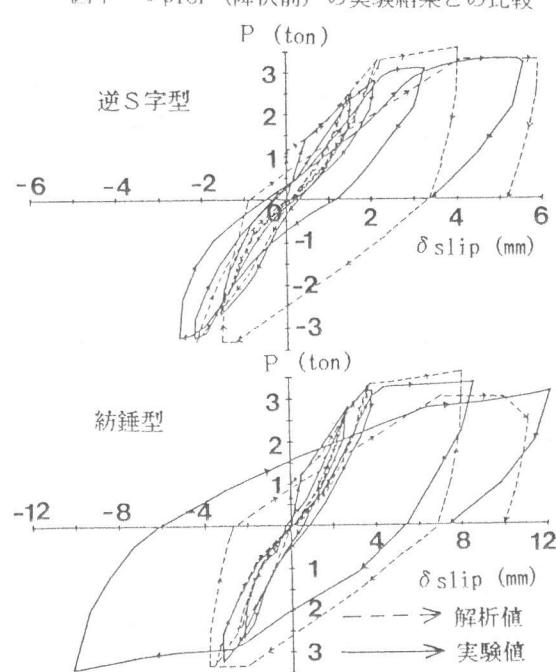


図9  $\delta_{slip}$ の実験値との比較

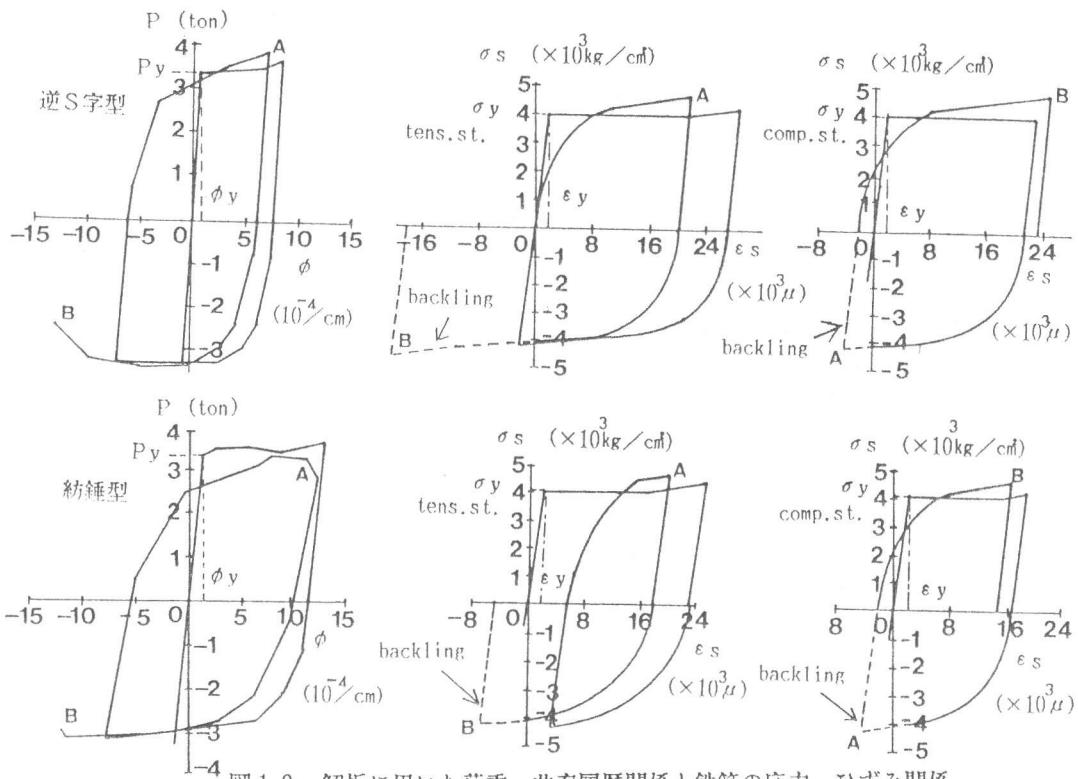


図10 解析に用いた荷重-曲率履歴関係と鉄筋の応力-ひずみ関係

れる。なお解析は、第1ループとして土 $\phi_y$ を与える、第3ループで終局状態に達するように、圧縮力を受ける鉄筋が座屈するまで曲率を増加させた。また、解析によって、包絡線の最大荷重以降の下降域の状態まで実験結果を追隨することができた。

## 5. 結論

本研究は、軸体下端位置での軸方向鉄筋のひずみ履歴を与えて、RC橋脚の荷重変位履歴曲線を算定する方法を提案し、その方法による計算結果と縮小モデル実験結果との適合性を比較検討したものである。その結果、以下の結論を得た。

- (1)かぶりコンクリートの圧壊及び圧縮側の軸方向鉄筋の座屈等を解析モデルに取り入れることにより、実験結果に近い荷重変位履歴曲線を算定することが可能となった。
- (2)軸体の軸方向鉄筋が降伏するまでは、軸体の変形による変位及びフーチングからの引き抜けによる変位をかなり精度よく算定できた。
- (3)軸体の軸方向鉄筋が降伏した後の軸体の変形に関しては、紡錘型のループにおける解析値は実験結果の傾向を表現することができたが、降伏後の早い時期からせん断の影響が出てくる逆S字型のようなループの場合、その傾向を表現することはできなかった。今後は、今回提案した計算手法において、せん断の影響を考慮できるように改良する必要がある。

本研究は、昭和58年度科学研究費補助金（課題番号 57850151）を受けて行ったものである。

〔参考文献〕(1)浦上他、「静的交番載荷を受けるRC橋脚の変位分解に関する研究」、第38回土木学会年次講演会梗概集、昭和58年10月

(2)橋本他、「静的交番載荷を受けるRC橋脚の終局変位に関する研究」、第38回土木学会年次講演会梗概集、昭和58年10月

(3)Lie - Liung CHOU、「ANALYTICAL MODEL FOR BOND OF DEFORMED BAR EMBEDDED IN MASSIVE CONCRETE」、東京大学学位論文、昭和59年

(4)Ben Kato、「Mechanical properties of steel under load cycles idealizing seismic action」、CEB Symposium, 1979年

(5)前川他、「二軸応力下のコンクリートの構成方程式」、第4回コンクリート工学年次講演会論文集、昭和57年