

マッシブなコンクリートに定着された鉄筋の応力-伸び出し履歴モデル

Stress-pullout hysteresis model for reinforcing bars anchored in massive concrete

村山八洲雄* 一宮利通** 須田久美子***

Yasuo Murayama Toshimichi Ichinomiya Kumiko Suda

*工博 次長 鹿島建設(株)技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

**工修 主任研究員 鹿島建設(株)技術研究所土木技術研究部 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

***工博 主任研究員 鹿島建設(株)技術研究所 LCE プロジェクトチーム (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

In order to accurately analyze the nonlinear behavior of reinforced concrete piers or reinforced concrete towers during earthquake strong motions, it is necessary to consider the pullout of reinforcing bars from the footing. In this study, an experiment was conducted by using reinforcing bars anchored in massive concrete to propose a steel stress - pullout history model. An experiment on columns was also conducted to verify the model's applicability.

Key Words: hysteresis model, pullout, reinforcing bar, RC pier, RC tower

キーワード: 履歴モデル, 伸び出し, 鉄筋, RC橋脚, RC主塔

1. はじめに

橋梁の設計は新しい道路橋示方書¹⁾に従えば、内陸直下型地震による大きな地震動も想定し、斜張橋のような複雑な応答を示すものには動的解析によって検討することになる。このような地震動に対する応答解析には、一般に部材の塑性化を考慮した非線形応答解析が用いられる。そして解析を精度良く行うためには、部材の荷重と変位の非線形履歴特性をできるだけ正確に解析に取り入れる必要がある。橋体の自重を支持する橋脚や主塔では、その非線形特性が橋梁全体の応答性状に大きな影響を与えるので、このことは特に重要となる。

RC橋脚やRC主塔では、多くの場合下端がフーチングなどのマッシブなコンクリートに固定されている。これらの柱部材に上部桁の大きな地震時慣性力が作用すると柱頭部は変位し、その水平変位量は柱の弾性変形分、柱基部の塑性変形分、および固定端からの柱筋の伸び出しに伴う基部回転分から成ることが一般に知られている。特に、部材の塑性化が進むと柱頭部変位量の大半が後2者で占められるようになる。

部材のこのような塑性化を考慮できる応答解析法には、FEM、経験的モデル、塑性ヒンジモデルおよびファイバーモデルを用いる方法などいくつかあるが、このうち、部材諸元や部材力ベクトルに対して汎用性がありかつ経済的なものとしては、ファイバーモデルによる方法が挙げられる。そのためこれを用いた解析的研究が過去多く行われてきた²⁾。最近ではその利用面から鉄筋モ

デルの違いを検討したもの³⁾や鉄筋の座屈モデルを提案したもの⁴⁾も報告されている。しかし、柱頭部変位の構成要素のうち固定端からの鉄筋の伸び出しの問題をファイバーモデルの観点から研究したものは極めて少ない。

ここで鉄筋の伸び出しに着目した研究を概観すると、それらは次のように大別することができる。

- ① 建築の柱梁接合部における鉄筋の伸び出し特性を調べたもの^{5) 6) 7) 8) 9) 10) 11)} および橋脚基部の柱筋の伸び出し特性を調べたもの^{12) 13)}
- ② 柱梁接合部を対象に、局部付着応力-局部滑り($\tau-s$)関係と鉄筋応力-ひずみ($\sigma-s$)関係を用いて伸び出しの解析方法を提案したもの^{6) 7) 8) 14)}
- ③ 柱梁接合部を想定した $\tau-s$ 関係を提案したもの^{6) 7) 8) 15) 16)} および橋脚基部を想定した $\tau-s$ 関係を提案したもの^{17) 18) 19)}
- ④ 柱梁接合部における鉄筋応力-伸び出し($\sigma-s$ slip)関係を提案したもの^{5) 20) 21) 22)} および橋脚における $\sigma-s$ slip関係を提案したものもしくはこれに類似するもの^{13) 23) 24) 25) 26)}

復元力特性を解析的に検討する場合、柱筋の伸び出し量を $\tau-s$ モデルと $\sigma-s$ モデルを用いて計算する②の方法は、実橋脚の場合、鉄筋の本数が非常に多いため、コンピュータの計算時間や作業量の面で適用が極めて困難である。そのため、直接 $\sigma-s$ slip関係で表現する④の方法が望ましい。

しかし、 $\sigma-s$ slipに関する既往の研究をみると、

Brown ら⁵⁾のは過去の履歴が表現されていない。Park ら²¹⁾のは単調加力でかつ鉄筋降伏の影響が考慮されていない。島, 周, 岡村²³⁾²⁴⁾のは, 交番加力にする場合, 鉄筋の応力ひずみ履歴モデルを併用する必要がある。また, 宮下ら²²⁾のは, 鉄筋降伏と鉄筋の圧縮抵抗が考慮されていない。

そこで, 本研究では, $\sigma s-\delta slip$ 履歴モデルを提案することを目的として, マッシュなコンクリートに定着された柱筋の模型実験を行うこととした。マッシュなコンクリートからの柱筋の伸び出し量は, 終局変位に達する頃には, その大部分が鉄筋の塑性部分の伸びによってもたらされることが知られているため, 実験では主として鉄筋の降伏後に着目する。また, $\sigma s-\delta slip$ 関係を直接支配する鉄筋の局所 $\tau-s$ 関係と $\sigma s-\epsilon s$ 関係は, 一般に載荷履歴の影響を受けることが知られているため, 実験では鉄筋の応力度を直接測定してこれらの関係を把握し, $\sigma s-\delta slip$ 関係と関連づけて考察する。

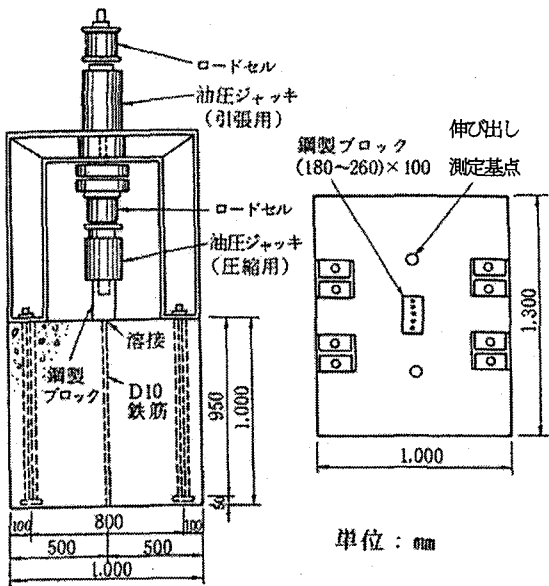


図-1 鉄筋の伸び出し実験の概要

表-1 材料特性

実験時期	コンクリート					
	最大骨材寸法 (mm)	供試体寸法 (cm)	28日強度(N/mm ²)		実験時強度(N/mm ²)	
			標準養生		現場水中	
			圧縮	引張	圧縮	
冬	20	φ10×20	28.3	2.8	36.8	34.4
種類	鉄筋					
	公称径 (mm)	支圧面積係数BA (%)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	ひずみゲージの読み	
					降伏ひずみ (×10 ⁻⁶)	ひずみ硬化点ひずみ (%)
D10	9.53	8.1	362	514	2,031	3.0

表-2 試験体の種類

略称	戴荷パターン	測定項目による分類
GM1	Ⓜ	ひずみ試験体
GM2		応力試験体
GR1	Ⓡ	ひずみ試験体
GR2		応力試験体
GR'1	Ⓡ'	ひずみ試験体
GR'2		応力試験体
GR'3		(ひずみ・応力)混合試験体

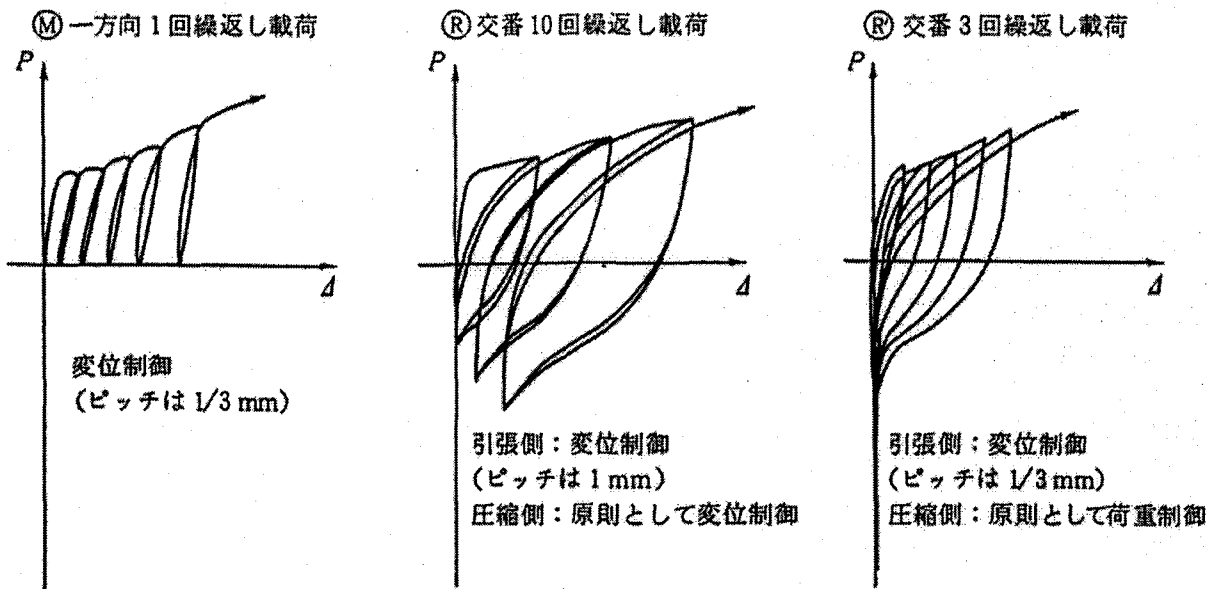


図-2 載荷パターン

2. 伸び出し実験

(1) 実験概要

試験体の諸元を図-1に示す。試験体はD10鉄筋を5本1組で使用し、コンクリートの上面位置で予め鋼製ブロックに溶接して固定した²⁷⁾。鉄筋の中心間隔が鉄筋径の3倍以上あれば伸び出し量に対する鉄筋間隔の影響がほとんど無くなることから²⁸⁾、ここでは、鉄筋間隔を鉄筋径の4倍(4cm)とした。使用したコンクリートと鉄筋の材料特性を表-1に示す。

試験体の種類を表-2に、载荷パターンを図-2に示す。試験体は、測定の目的に応じて、鉄筋のひずみ分布、応力分布、ひずみと応力の両方をそれぞれ対象にしたものの3種類を準備した。载荷パターン(M)は他の载荷パターン(R)、(R')の対比用として一方の繰返し引張荷重を加力したものである。(R)は、軸応力が0N/mm²の柱部材に対応するもので、交番加力において引張荷重と同じ大きさの圧縮荷重を加力するものである。(R')は、1.0N/mm²程度の軸圧縮応力を受ける柱部材に対応するものである。加力は、鉄筋降伏前は荷重制御方式で、降伏後は変位制御方式で行った。

伸び出し量は、鋼製ブロックとブロック端から20cm離れたコンクリート面との相対変位を変位計で測定して求めた。鉄筋のひずみ分布と応力分布は、塑性ひずみゲージと鉄筋ロードセル(鉄筋を局部的に焼き入れて降伏強度を高めた部分)を中央の3本の鉄筋に、深さ30cmまでに20~100mmピッチで千鳥に配置し、重ね合わせるによって求めた。すべり量は、鉄筋ロードセルの位置にすべり計測用ワイヤーを取り付け、試験体下面との相対変位を変位計で測定して求めた²⁷⁾。

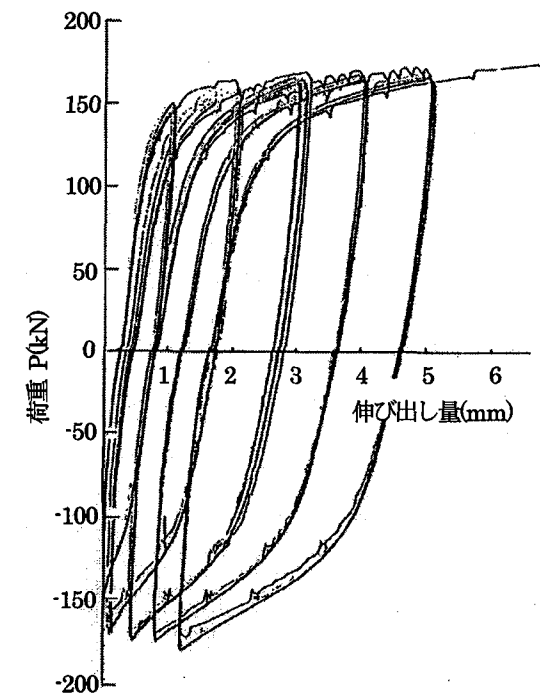


図-3 荷重-伸び出し量関係(GR1 試験体)

(2) 実験結果

図-3は、一例として(GR1)試験体で測定された荷重-伸び出し量(P-δslip)関係を示したものである。この図から、各ステップでの载荷の繰返し(10回)が荷重の大きさや履歴の広がりを与える影響は小さいことが分かる。このことは、(GR' 1)においても同様であったため、荷重-伸び出し量関係の実験結果として、繰返し载荷の1サイクル目に着目して整理した(図-4)。

図-5は(GM2)、(GR2)、(GR' 2)試験体のτ-s曲線で

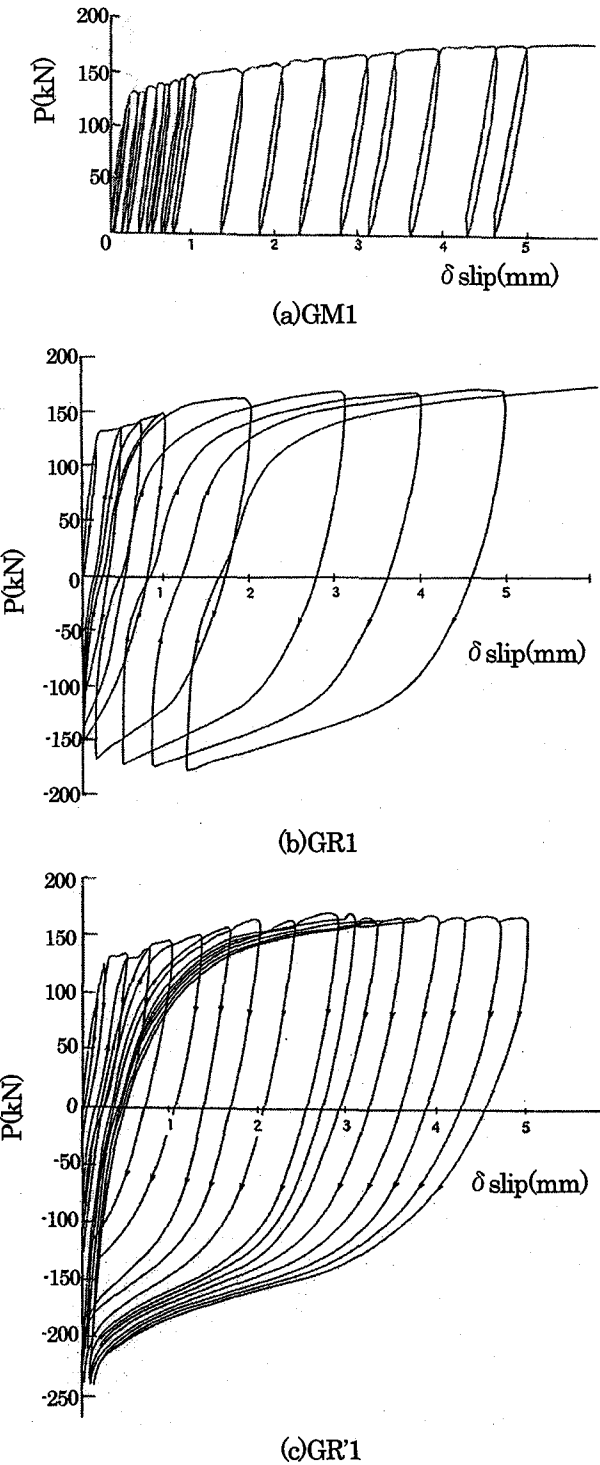


図-4 荷重伸び出し量関係

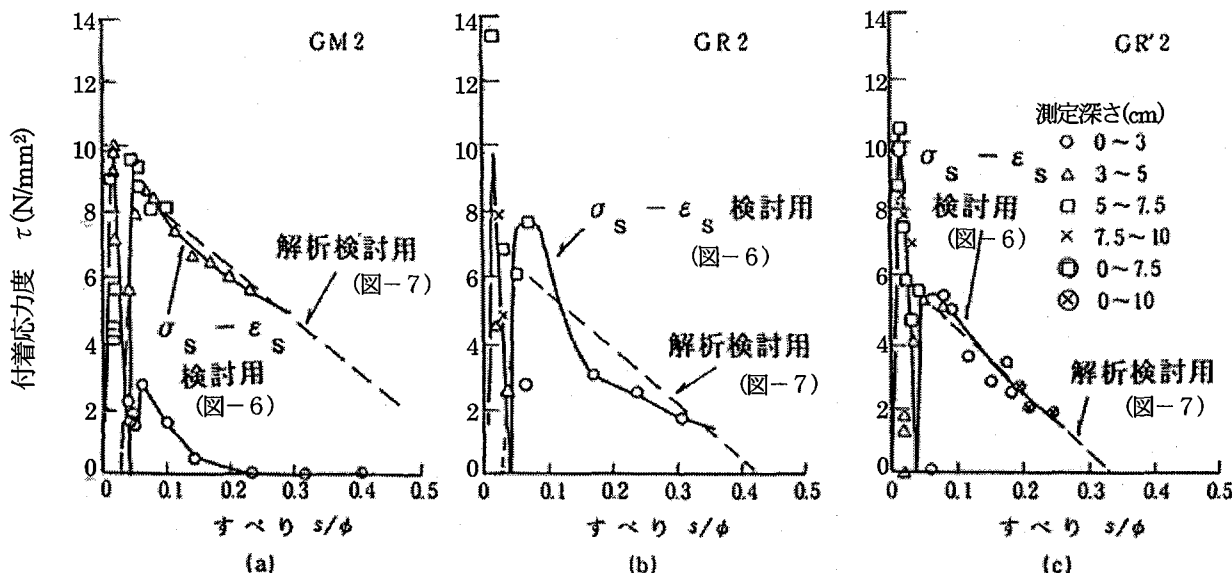


図-5 付着応力度とすべり量の関係

ある。付着応力度は応力分布の隣り合った測定値の差から求め、すべり量はすべり分布の隣り合った測定値の平均値として求めた。図-5 (a)~(c)を比較すると、(R)と(R')では鉄筋降伏後の同じすべり量に対する付着応力度の大きさは同程度となっているが、(M)と(R) (またはR')では交番载荷を受けた後者の方が明らかに小さく前者の1/2程度となっている。

鉄筋応力度とひずみ量の関係を図-6に示す。鉄筋応力度はひずみ分布を深さ方向に積分して求めたすべり分布から上記の付着応力度とすべり量の関係を用いて付着応力度分布を求め、さらにこれを深さ方向に積分して応力分布を求めた。また、この推定方法の精度を把握するために、特に深さ1φ (φは鉄筋径) の $\sigma_s - \epsilon_s$ 関係については鉄筋応力度として载荷端応力度を用いたものも併記した (図-6 (a)~(c)中の●印)。図-6の(a)~(c)を比較すると、一方向载荷(M)に比べて交番载荷(R)の場合は、同一応力度でもひずみが減少し、たとえば降伏応力度の1.1倍の応力度では約2/3となっている。更に交番加力でも圧縮力の小さい場合(R)に比べて圧縮力の大きい場合(R')の方が減少の程度が著しい。

これまで述べたように、 $\tau - s$ 関係と $\sigma_s - \epsilon_s$ 関係はいずれも载荷履歴の影響を大きく受けるが、これらは互いに相殺するように作用している。その結果、引張り側での $\sigma_s - \delta_{slip}$ スケルトンに対する载荷履歴の影響は少なく、 $\sigma_s - \delta_{slip}$ スケルトンは図-7に示されるようにほぼ同じ曲線を描いている。これに関しては、解析的方法によって次に検討する。

(3) $\sigma_s - \delta_{slip}$ 関係に及ぼす影響の検討

図-5および図-6の破線で示されるように $\tau - s$ 関係と $\sigma_s - \epsilon_s$ 関係を直線の組み合わせで近似して引張り側 $\sigma_s - \delta_{slip}$ スケルトンを計算した結果、図-7に示されるように、実測値をほぼ再現できた。

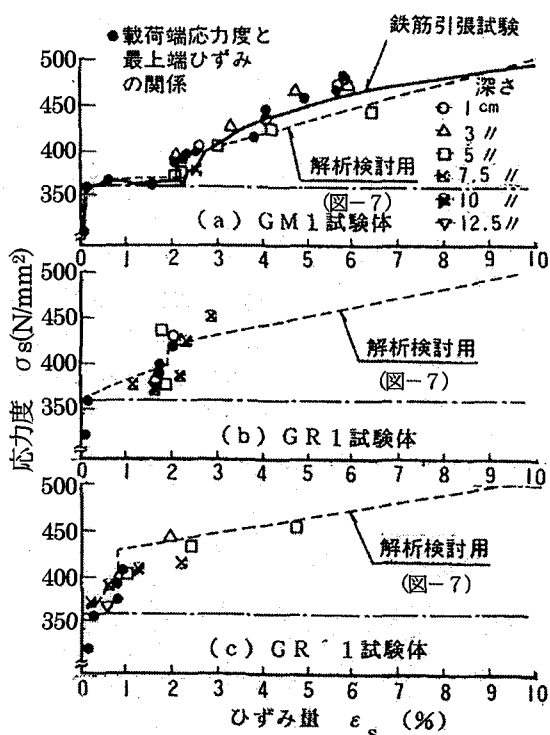


図-6 鉄筋応力度とひずみの関係

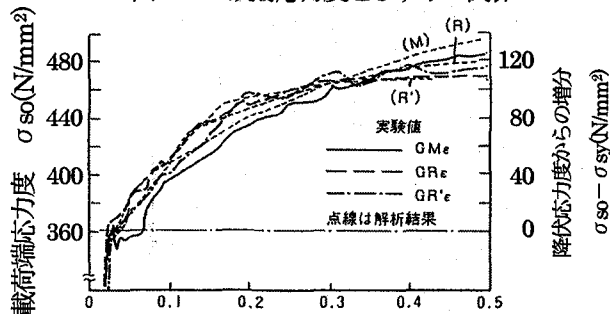


図-7 载荷端応力度-伸び出し量関係 (解析結果)

つぎに、降伏後の最大付着応力度 τ_2 、降伏後の $\tau-s$ 曲線における軟化勾配 k_3 、および $\sigma_s-\varepsilon_s$ 曲線における第2勾配 E_{s2} の諸定数の変化が伸び出し量に及ぼす影響を調べた。図-8の(a)には τ_2 のみを変化させた場合の荷重端応力度と伸び出し量の関係($\sigma_{s0}-\delta slip$ 関係)を実線で、 E_{s2} のみを変化させた場合については破線で示した。また、図-8の(b)には、 τ の軟化勾配 k_3 のみを変化させたものを実線で、 E_{s2} のみを変化させたものを破線で示した。

τ_2 を小さくして(または k_3 を大きくして)、 E_{s2} を大きくすると、それぞれの影響が相殺するように作用する。相殺しあって $\sigma_{s0}-\delta slip$ 関係がほぼ同じになる時の諸定数の目安は、 τ_2 (k_3)の 1N/mm^2 ($0.5\text{N/mm}^2/\text{mm}$)の変化に対して、 E_{s2} の $1,000\text{N/mm}^2$ (500N/mm^2)の変化であった。相殺する程度は伸び出し量の大きさによって若干異なるが、これは τ_2 、 k_3 、 E_{s2} の変化に応じた付着応力度の分布の違いによって生じるものである。

通常、鉄筋の引抜き付着試験における付着強度(鉄筋降伏前)は 10N/mm^2 以上、また、鉄筋の引張り試験から得られる $\sigma_s-\varepsilon_s$ 関係のひずみ硬化点での勾配は $6,000\text{N/mm}^2$ 前後である。これらの値と比較すると、鉄筋が降伏し付着応力度が低下したあとではあるが、 τ_2 の変化量約 1N/mm^2 程度、 E_{s2} の変化量 $1,000\text{N/mm}^2$ 程度は、非常

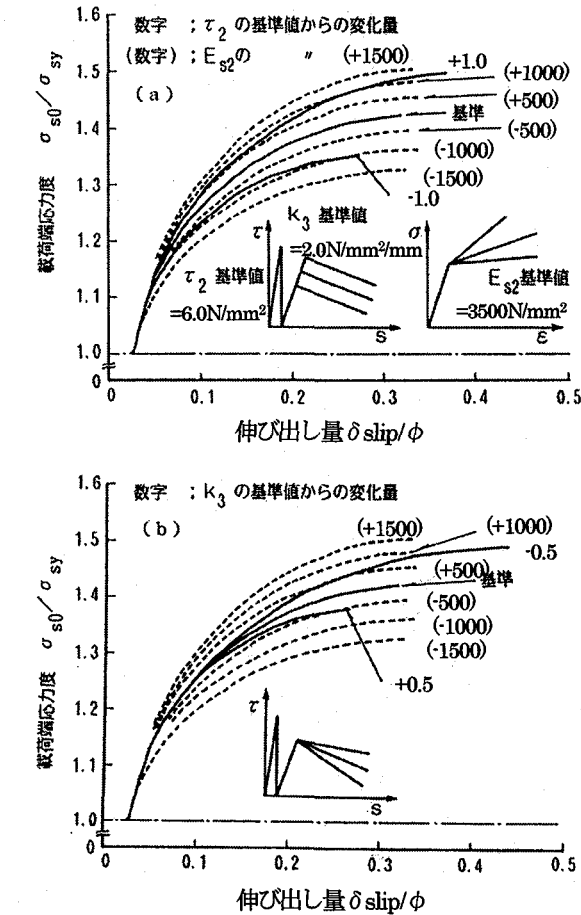


図-8 伸び出し量に関するパラメータ計算

に小さい変化量であるといえる。しかし、この程度の変化量によっても、 $\sigma_{s0}-\delta slip$ 関係は大きく相違したものになる。

すなわち、 $\sigma_s-\varepsilon_s$ モデルと $\tau-s$ 測定データを用いて $\sigma_{s0}-\delta slip$ 関係を解析的に推定する場合は、入力データの僅かな相違により $\sigma_{s0}-\delta slip$ 関係がかなり異なったものになる可能性があり、入力データの選定に当たっては極めて慎重な検討が必要になることを示唆している。しかし、 $\sigma_{s0}-\delta slip$ スケルトンに対しては、互いに相殺するように作用するため、荷重履歴の影響は $\sigma_{s0}-\delta slip$ スケルトンにほとんど現れない。

3. $\sigma_s-\delta slip$ 履歴モデルの提案

(1) モデルの基本的な考え方

マッシブなコンクリートに定着された柱筋の模型実験から、引張り側 $\sigma_s-\delta slip$ スケルトンが荷重履歴によらずほぼ同一の曲線を描くことを示したが、次に、履歴曲線に着目して検討する。

図-9の(a)は、(GM1)と(GR1)の履歴曲線を重ね合わせたもので、図-9の(b)は、同様に(GR1)と(GR'1)を重ね

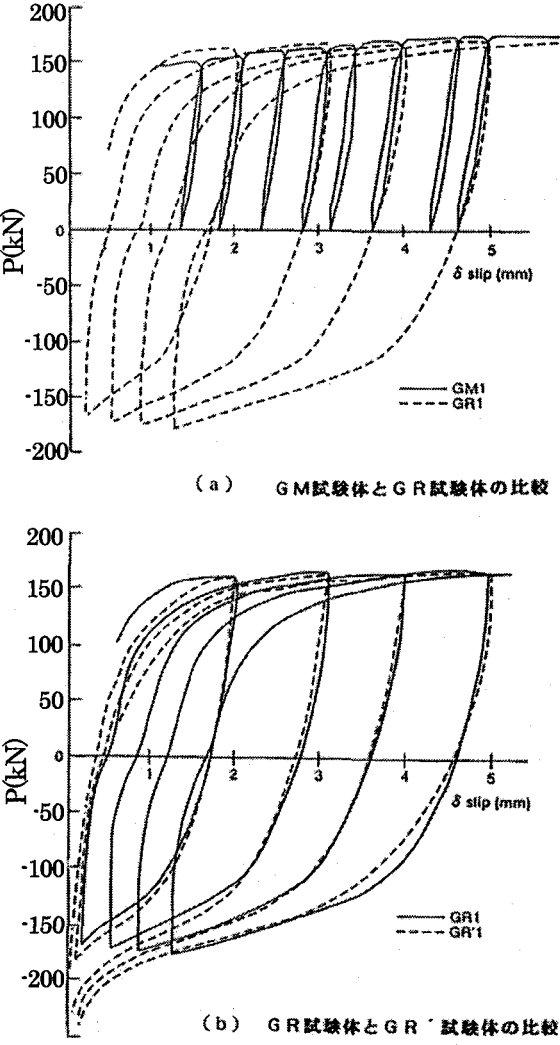


図-9 荷重-伸び出し履歴曲線の比較

合わせたものである。図-9(a)によれば、 $\sigma_s-\delta_{slip}$ スケルトンにおける最大伸び出し量がほぼ同じならば、除荷曲線も(GM1)と(GR1)の間でほぼ同じになっていることが分かる。また、図-9(b)によれば、スケルトンからの除荷曲線や、除荷後の圧縮側への載荷曲線、および圧縮側スケルトンからの除荷曲線は、(GR1)と(GR'1)との間でほぼ同じになっていることが分かる。このことから、内部履歴の基本的な曲線形状は、載荷履歴の相違にかかわらず類似したものであるといえる。

図-9に示した $\sigma_s-\delta_{slip}$ 履歴曲線において、伸び出し側の特性は鉄筋とコンクリートの付着という相互作用の結果であり、食い込み側では主としてコンクリートの抵抗による結果であると考えられる。そのため、ここで検討する伸び出しモデルとしては、図-10に示すように、部材が柱筋の直径と同じ長さで、かつ鉄筋とコンクリートで構成されるものを考えた。すなわち、伸び出し側に対しては、コンクリートとの付着の影響が考慮された鉄筋で抵抗し、食い込みに対しては、そのほとんどをコンクリートが抵抗するというモデルである。

一般の橋脚の場合は作用する軸応力度が小さいので、橋脚が交番水平力をうけた場合には、鉄筋の引張りずみが増加する方向にあり、フーチング側への鉄筋の食い込み現象は起こらない。また、高橋脚や斜張橋塔部材のように軸応力度が比較的大きい場合でも、柱筋がマッシュパなコンクリートに定着されているので、この部分の付着強度は柱部でのそれよりも大きい。そのため、鉄筋に圧縮ひずみが生じて柱側で付着劣化が先行し、フーチング側への鉄筋の食い込み量は非常に小さいと考えられる。また、部材の基部の回転に対しては食い込みよりも伸び出しによる影響が支配的であるので、鉄筋の食い込み側での履歴モデルとしては単純なモデルを設定した。このように、鉄筋モデルとコンクリートモデルを併用することにより、通常ファイバーモデルと全く同じ方法で、鉄筋の伸び出し挙動を表現することができる。

(2) 伸び出し履歴モデル

伸び出し履歴モデルの概要を図-11に示す。この伸び出し履歴モデルの各領域に関する説明を以下に述べる。ただし、ここでは、伸び出し量を鉄筋径で除した一般化伸び出し量 δ_{slip}/ϕ を単に伸び出し量と呼び、 ϵ_{sl} で表現することとする。こうすることにより、鉄筋径の異なるものに対して同一の方法で検討が可能となる。

(a) 基本曲線

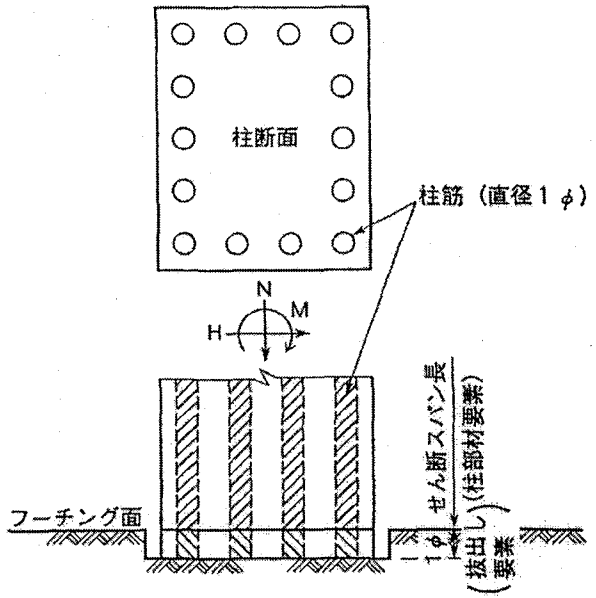
①スケルトン曲線

$0 \leq \epsilon_{sl} \leq \epsilon_{sl,y}$ の場合、伸び出し量の2/3乗に比例する曲線とする。

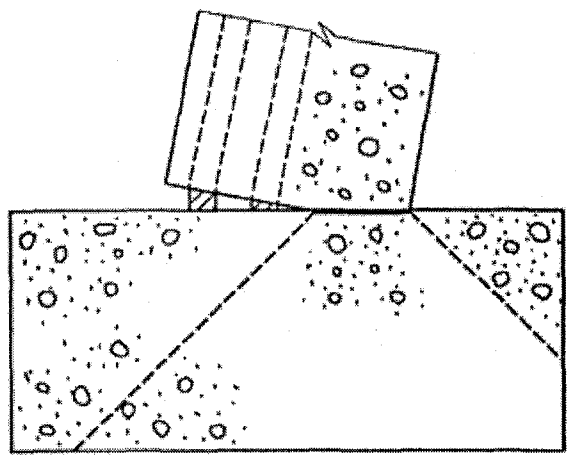
$$\sigma_s = k_0 \cdot \epsilon_{sl}^{2/3} \dots\dots\dots (1)$$

$$k_0 = \sigma_{sy} / \epsilon_{sl,y}^{2/3} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 σ_s : 加力端での鉄筋応力度
 σ_{sy} : 鉄筋の降伏強度
 $\epsilon_{sl,y}$: 鉄筋降伏時の伸び出し量



(a)ファイバーモデルにおける伸び出し部材



(b)コンクリートの圧縮変形の領域

図-10 ファイバーモデルにおける柱筋伸び出し

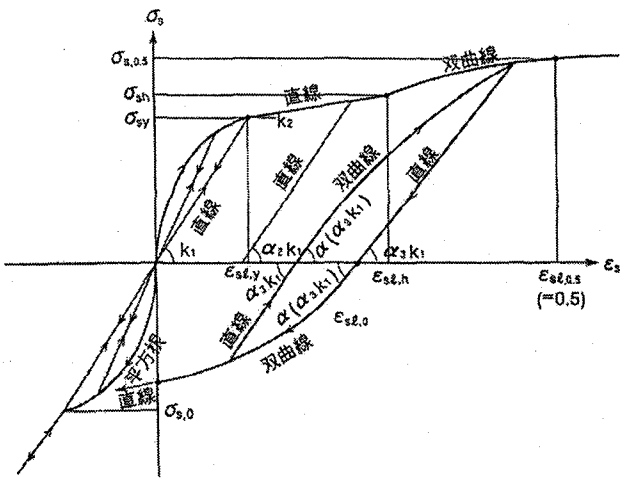


図-11 鉄筋応力度-伸び出し履歴モデル

$\epsilon_{sl,y} \leq \epsilon_{sl} \leq \epsilon_{sl,h}$ の場合、座標 $(\epsilon_{sl,y}, \sigma_{sy})$ と座標 $(\epsilon_{sl,h}, \sigma_{s,h})$ を結ぶ直線とする。

$$\sigma_s = k_2 \cdot (\epsilon_{sl} - \epsilon_{sl,y}) + k_0 \cdot \epsilon_{sl,y}^{2/3} \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{ただし、} k_2 = (\sigma_{sh} - \sigma_{sy}) / (\epsilon_{sl,h} - \epsilon_{sl,y}) \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 $\epsilon_{sl,h}$: 応力-ひずみ曲線の性質が変化する伸び出し量
 $\sigma_{s,h}$: $\epsilon_{sl,h}$ に対応する鉄筋応力度

$\epsilon_{sl,y}$ から $\epsilon_{sl,h}$ まで僅かではあるが σ_s が直線的に増加していく理由は、複数の鉄筋間で降伏現象が均一に生じないこと、コンクリートの表面付近では付着強度が小さいため、降伏進展長さ l_y が 3ϕ 程度まで一気に進んでしまうこと、などを考慮したものである。

$\epsilon_{sl,h} \leq \epsilon_{sl} \leq \epsilon_{sl,0.5}$ の場合、 $(\epsilon_{sl,h}, \sigma_{s,h})$ と $(\epsilon_{sl,0.5}, \sigma_{s,0.5})$ を通る双曲線とする。

$$(y - k_3) \{x - (1 - k_3)\} = k_3 (1 - k_3) \dots\dots\dots(5)$$

$$\text{ただし、} y = (\sigma_s - \sigma_{s,h}) / (\sigma_{s,0.5} - \sigma_{s,h}) \dots\dots\dots(6)$$

$$x = (\epsilon_{sl} - \epsilon_{sl,h}) / (\epsilon_{sl,0.5} - \epsilon_{sl,h}) \dots\dots\dots(7)$$

ここで、 $\epsilon_{sl,0.5} = 0.5$
 $\sigma_{s,0.5}$: $\epsilon_{sl,0.5}$ に対応する鉄筋応力度

②引張側除荷曲線

$0 \leq \epsilon_{sl} \leq \epsilon_{sl,y}$ の場合、原点指向の直線とする。 $\epsilon_{sl,y} \leq \epsilon_{sl} \leq \epsilon_{sl,0.5}$ の場合直線とし、その勾配は降伏時の割線勾配、またはこれを低減させたものを用いる (図-12)。

③圧縮側除荷曲線

ϵ_{sl} 軸上の圧縮側除荷開始点 $(\epsilon_{sl,0}, 0)$ と σ_s 軸上の点 $(0, \sigma_{s,0})$ を結ぶ双曲線を用いる。初期勾配は、引張側での除荷勾配と同じ値かこれを低減させた値とする。ここで、 $\sigma_{s,0}$ は双曲線が目指す σ_s 軸上の鉄筋応力度であって、 $\epsilon_{sl,0}$ が 0.1 以下では $\epsilon_{sl,0}$ の3乗根に比例し、 $\epsilon_{sl,0}$ が 0.1 以上では $\epsilon_{sl,0}$ に比例する値である (図-13)。

ϵ_{sl} が 0.1 程度を境にして $\sigma_{s,0} - \epsilon_{sl,0}$ 関係が変化するの、 $\epsilon_{sl,h}$ の項で述べた現象が関係している。

④圧縮側除荷曲線

引張側除荷直線と平行な直線とする (図-14)。

⑤引張側再載荷曲線

$\sigma_s - \epsilon_{sl}$ 曲線上の過去最大伸び出し点を指す双曲線とし、その初期勾配は、引張り側の除荷勾配と同じか低減させた勾配とする。また、引張り側再載荷曲線からの除荷は、スケルトンからの除荷直線と平行な直線とし、さらに、圧縮側再載荷曲線は双曲線とする。

⑥食い込み側での曲線

鉄筋の食い込み側のモデルについては、先に述べた理由により、図-11に示すようにできるだけ単純なものにした。

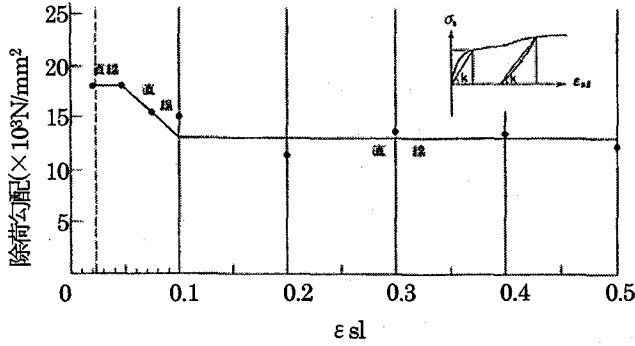


図-12 引張り側除荷勾配の大きさ

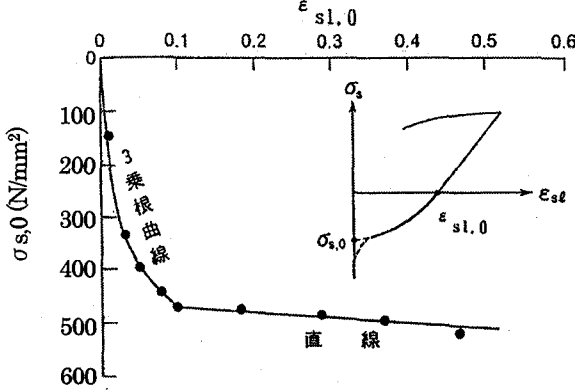


図-13 ゼロひずみ応力度とゼロひずみ伸び出し量の関係

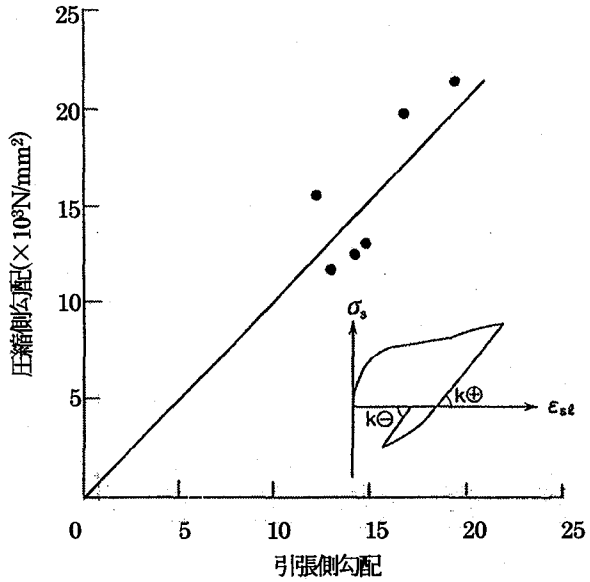


図-14 引張り側と圧縮側の除荷勾配の比較

⑦圧縮力を負担するコンクリート要素について

柱部材のコンクリート部から伝達される圧縮力は、図-10の模式図に示すように広がるため、接合面における沈下量を長さ 1ϕ (柱筋の直径に等しい伸び出し部材長) のコンクリート要素で表現するためには、コンクリートのヤング係数を低下させておく必要がある。また、伸び出し部材における鉄筋応力度は、本来、柱部材の下端での鉄筋応力度と同じ値になっていなくてはならない。そのため、柱部材の中立軸と伸び出し部材における中立

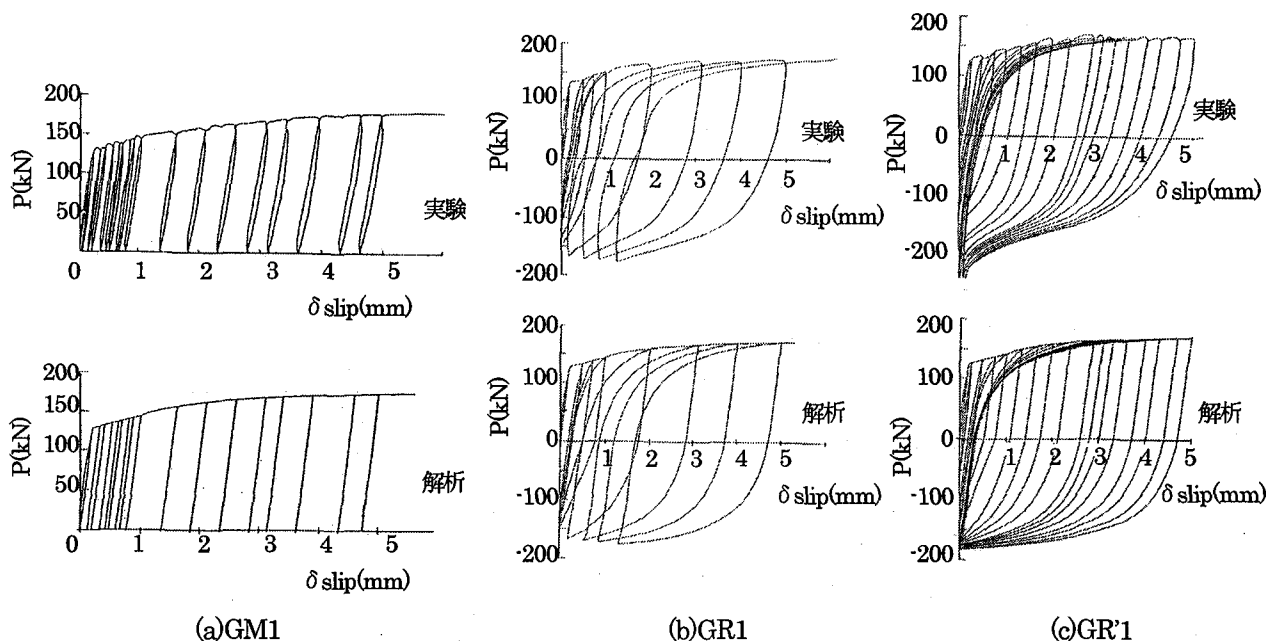


図-15 荷重-伸び出し関係の実験と解析の比較

軸がほぼ同じ位置になるように、柱部コンクリートの $\sigma_c - \varepsilon_c$ 関係においてひずみ軸を引伸ばしたものを使用する。その倍率としては、 $\sigma_s - \varepsilon_{sl}$ 関係が $\sigma_s - \varepsilon_s$ 関係の横軸をほぼ 10 倍に引伸ばしたものに類似することから、10 倍とする。

(b) 曲線の補正

モデル化の基にした実験の場合と材料特性が異なる場合は、スケルトンを以下のように補正する。

①コンクリート強度に関する補正

$\tau - s$ 関係曲線の縦軸方向の高さは、コンクリートの圧縮強度の $2/3$ 乗に比例することが島ら²³⁾によって示されている。これは、 $\tau - s$ 関係の剛性がコンクリートの圧縮強度の $2/3$ 乗に比例することを意味している。 $\tau - s$ 関係が直線である単純な場合を考えると、載荷端での同一鉄筋応力度に対する伸び出し量は、 $\tau - s$ 関係の剛性の $1/2$ 乗に反比例することを、微分方程式の解から説明することができる。そのため、 $\sigma_s - \varepsilon_{sl}, y$ の補正は、横軸をコンクリート強度の $-1/3$ 乗倍に補正するものとする。

②鉄筋降伏強度に関する補正 ($0 \leq \varepsilon_{sl} \leq \varepsilon_{sl, y}$)

鉄筋の降伏強度が大きい場合の降伏前の $\sigma_s - \varepsilon_{sl}$ 関係は、 $\sigma_s - \varepsilon_{sl}, y$ 関係の基本曲線を外挿したような曲線形状を呈するので、(1)式をそのまま使用し、外挿させるものとする。

③鉄筋の硬化点ひずみに関する補正 ($\varepsilon_{sl, y} \leq \varepsilon_{sl} \leq \varepsilon_{sl, h}$)

$\varepsilon_{sl, y} \leq \varepsilon_{sl} \leq \varepsilon_{sl, h}$ 間の勾配は変更せずに、 $\varepsilon_{sl, y} \sim \varepsilon_{sl, h}$ の長さを降伏棚の長さに比例するよう補正するものとする。

④鉄筋のひずみ硬化点接線剛性に関する補正 ($\varepsilon_{sl, h} \leq \varepsilon_{sl}$)

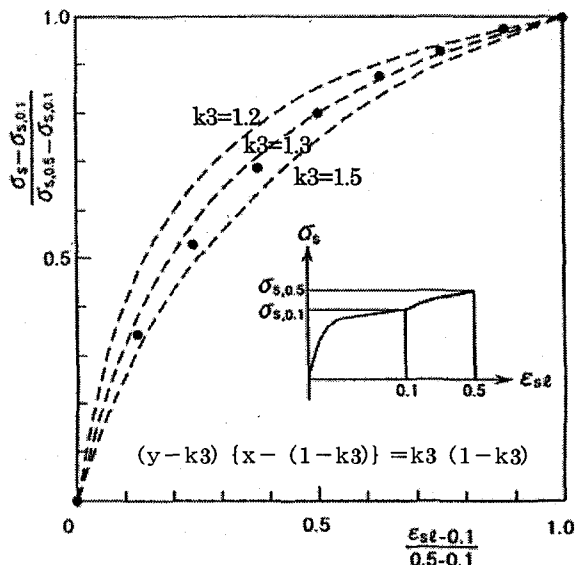


図-16 スケルトンの双曲線近似

上述①で述べた線形の微分方程式の解から、伸び出し量は鉄筋のヤング係数の $1/2$ 乗に反比例するので、 $\varepsilon_{sl, h} \leq \varepsilon_{sl}$ の曲線の横軸を硬化点接線剛性の $-1/2$ 乗倍に補正するものとする。

⑤鉄筋の引張強度に関する補正 ($\varepsilon_{sl, h} \leq \varepsilon_{sl}$)

鉄筋のひずみ硬化点以降の応力度を柱部の鉄筋応力度と同等となるよう、 $\sigma_{s, 0.5}$ を鉄筋の引張強度に比例させて補正する。

(3) 伸び出し履歴モデルの適合性

図-15は、スケルトン曲線に関して、つぎのように条件設定したときの、モデルと実験結果を比較したものである。

$$\sigma_y = 362 \text{ N/mm}^2$$

$\sigma_h = 402 \text{ N/mm}^2$
 $\sigma_{0.5} = 480 \text{ N/mm}^2$
 $\varepsilon_{sl,y} = 0.021$
 $\varepsilon_{sl,h} = 0.1$
 $\varepsilon_{sl,0.5} = 0.5$
 $k_0 = 5.0 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$
 $k_1 = 1.7 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
 $k_2 = 5.1 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$
 $k_3 = 1.3 \text{ (図-16)}$

ただし、圧縮側・引張り側除荷勾配の比 α は 0.55、スケルトンからの除荷勾配はすべて k_1 と等しい ($\alpha_2 = \alpha_3 = 1.0$) とした。

図-15 から、伸び出しモデルで設定した曲線形状などは、実験結果をほぼ反映していることが分かる。

4. 鉄筋応力度—伸び出し量履歴モデルの適用性

提案した解析モデルをファイバーモデル・プログラムに組み込み、これを用いて、軸方向筋の伸び出しに関する既往の実験をシミュレーション解析した。コンクリートに定着された柱筋の伸び出し履歴曲線の実測例として、島、篠原、森岡²⁹⁾の実験、柱部材の交番曲げ・引張り実験の例として、鈴木ら¹⁹⁾の実験および著者らが行った実験を対象とした。

(1) 島らの実験

① 実験概要

島ら²⁹⁾の実験は、マッシュなコンクリートに定着された群鉄筋を交番加力したもので、筆者の実験と類似の方法で行われている。ただし、加力端の伸び出し量は、アンボンド・ワイヤを介して測定された変位量である。伸び出し量は、鉄筋直径の約 1 倍まで測定されている。試験体の主な諸元を、以下に示す。

鉄筋径： D13
 鉄筋の降伏強度： 325 N/mm^2
 鉄筋の引張り強さ： 534 N/mm^2
 定着長： 90cm (70φ)
 コンクリート強度： 19.4 N/mm^2

② 解析結果

解析結果を実験結果と比較して、図-17 に示す。解析結果は、実験結果を比較的良好に模擬できているといえる。ただし、伸び出し量の大きい範囲（鉄筋直径の 0.4 倍前後）で、解析は圧縮応力度を幾分か大きめに評価しているようである。

(2) 鈴木らの実験

① 実験概要

鈴木ら¹⁹⁾の実験は、フーチングを有する柱部材の水平交番加力実験におけるフーチングからの柱筋の伸び出し量を測定したものである。伸び出し量は、フーチング内の柱筋に貼付けたひずみゲージによるひずみ量の測定値を高さ方向に積分することによって求められたものであり、鉄筋直径の約 0.1 倍まで測定されている。試験体の

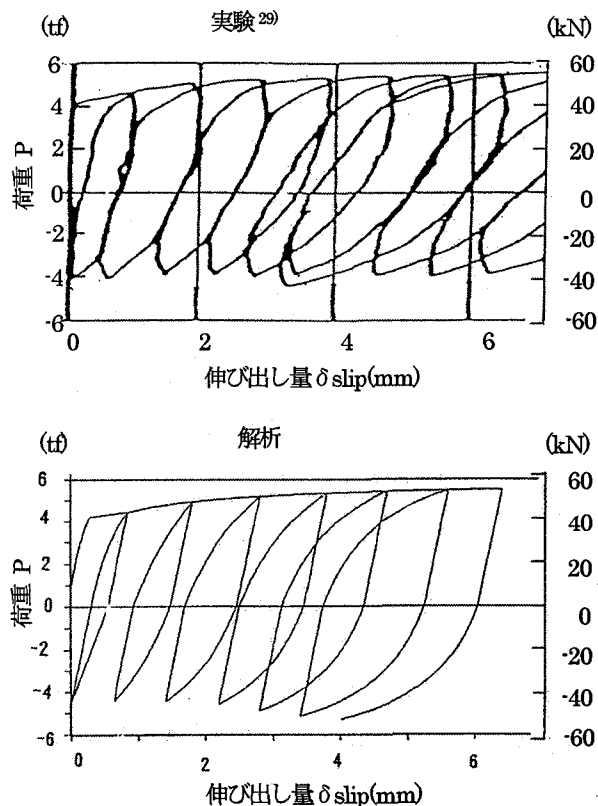


図-17 鉄筋引張り力—伸び出し量関係の比較

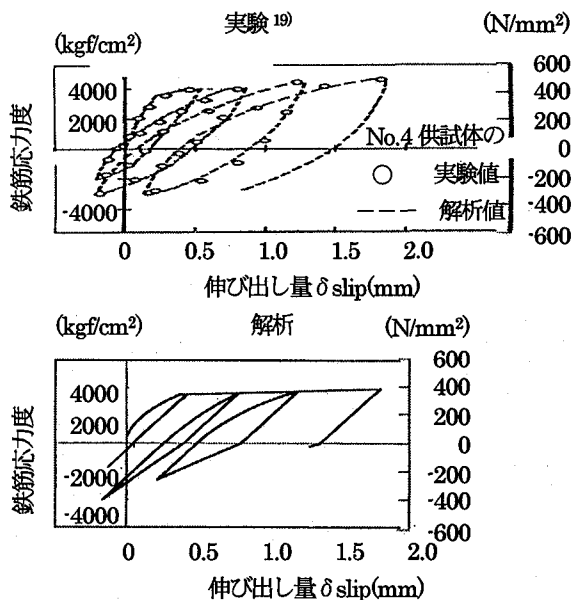


図-18 鉄筋応力度—伸び出し量関係の比較

主な諸元を、以下に示す。

鉄筋径： D19
 鉄筋の降伏強度： 342 N/mm^2
 鉄筋の引張り強さ： 389 N/mm^2
 鉄筋間隔： 10cm (5.2φ)
 定着長： 約 57cm (30φ)、別途フック有り
 コンクリート強度： 32.2 N/mm^2

② 解析結果

解析結果を実験結果と比較して、図-18示す。解析結果は、傾向は模擬できているといえる。ただし、伸び出し量が小さい範囲のためか実験値に比べて、解析は履歴吸収エネルギーを少なめに評価している。

(3) 著者の実験

(a) 実験概要

試験体諸元を図-19に示す。試験体は、断面が $40 \times 50\text{cm}$ 、せん断スパン長が 200cm の柱部材である。柱筋には、D19 (SD35) を、帯筋にはD6 (SD30 相当) を使用しており、柱筋比は 2.6% 、帯筋比は 0.25% である。

柱筋の降伏強度は 389N/mm^2 、引張り強さは 588N/mm^2 、帯筋の降伏強度は 361N/mm^2 、引張り強さは 492N/mm^2 であった。コンクリートには、最大骨材寸法 20mm のレディミクストコンクリートを使用した。実験時 (材齢 65 日) のコンクリート円柱供試体の圧縮強度は、標準養生で 39.8N/mm^2 、現場養生で 37.7N/mm^2 であった。

軸心力度 2.9N/mm^2 相当の鉛直方向の一定軸力を加力したのち、柱頭部に水平交番荷重を加力した。柱筋降伏前は、荷重制御方式で繰返し数 1 回ずつの漸増交番加力とし、降伏以降は、変位制御方式により、降伏変位の整数倍の変位ステップで、繰返し数 1 回ずつの漸増交番加力とした。

実験では、柱頭部における水平変位量 δ 、柱筋の伸び出し量 δslip 、柱下端における回転角 θ などを測定した。測定位置を図-20に示す。

(b) 実験結果

実験で得られた加力点での $P-\delta$ 曲線、 $M-\delta\text{slip}$ 曲線、および $M-\theta$ 曲線を、それぞれ、図-21、図-22、および図-23に示す。ここで、 P は水平力、 M は柱下端における曲げモーメントである。 $6\delta y$ 載荷途中で柱筋が座屈したため、 $7\delta y$ 以降耐力が低下している。

(c) 解析の概要

解析には、部材解析用ファイバーモデル・プログラムに伸び出しモデルを組み込んだものを使用した。柱部の鉄筋モデルとしては、bilinear モデルを使用した。bilinear モデルの第2勾配は、鉄筋の引張り試験結果を基に、 $4,900\text{N/mm}^2$ とした。

伸び出し部材におけるコンクリート要素には、柱部材と伸び出し部材間で鉄筋応力度がほぼ同じになるようにするため、柱部材と同様、軟化を考慮したコンクリートモデルを使用した。また、解析にあたっては、幾何学的非線形すなわち $P-\Delta$ 効果を考慮した。

(d) 解析結果

解析で得られた $P-\delta$ 曲線、 $M-\delta\text{slip}$ 曲線、および柱基部における $M-\theta$ 曲線を、それぞれ、図-21、22、23に併記した。

$P-\delta$ 曲線、 $M-\delta\text{slip}$ 曲線、および $M-\theta$ 曲線などの解析結果は、座屈時期の塑性率程度までは、実験結果を比較的良くシミュレートできている。すなわち、荷重だけでなく、伸び出し量やそれに伴う回転角なども精度

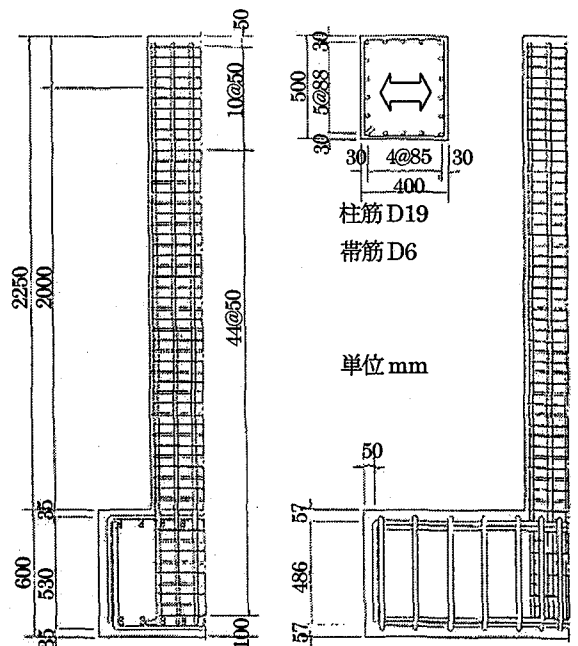


図-19 試験体諸元

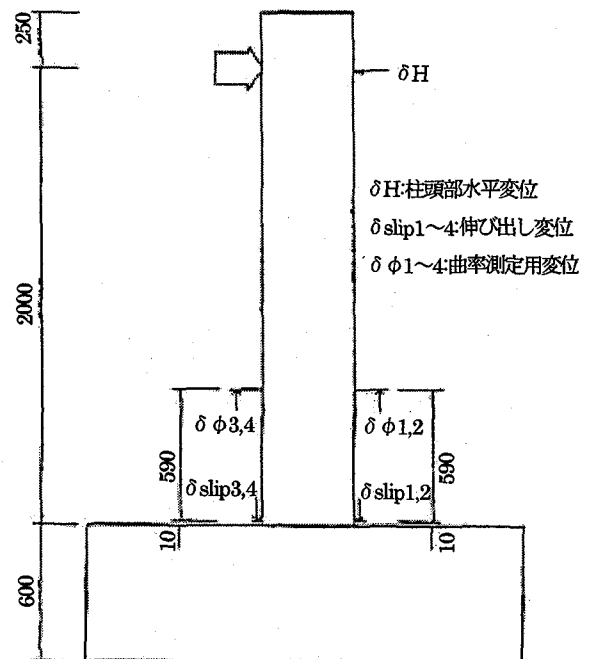
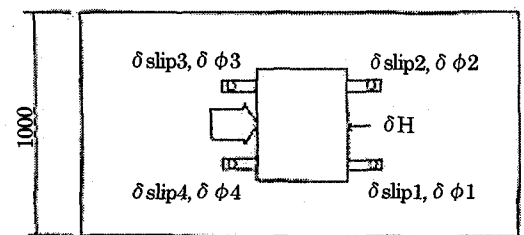


図-20 測定位置

よく予測できていることが分かる。

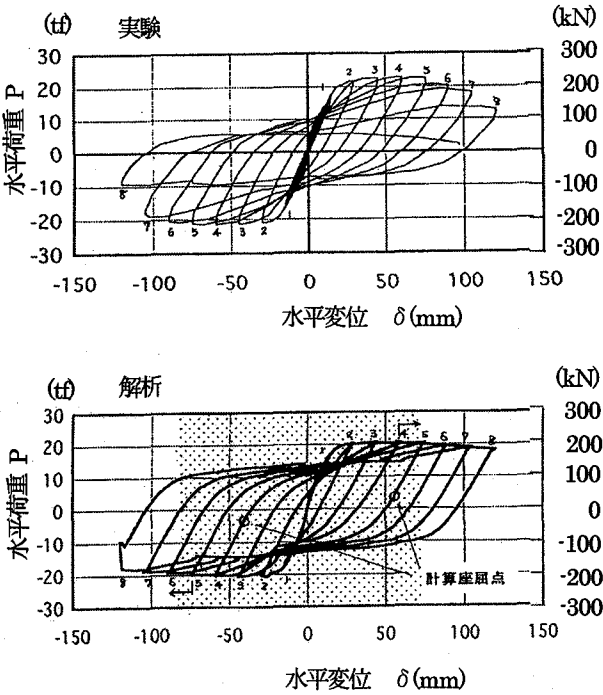


図-21 加力点の荷重-変位関係

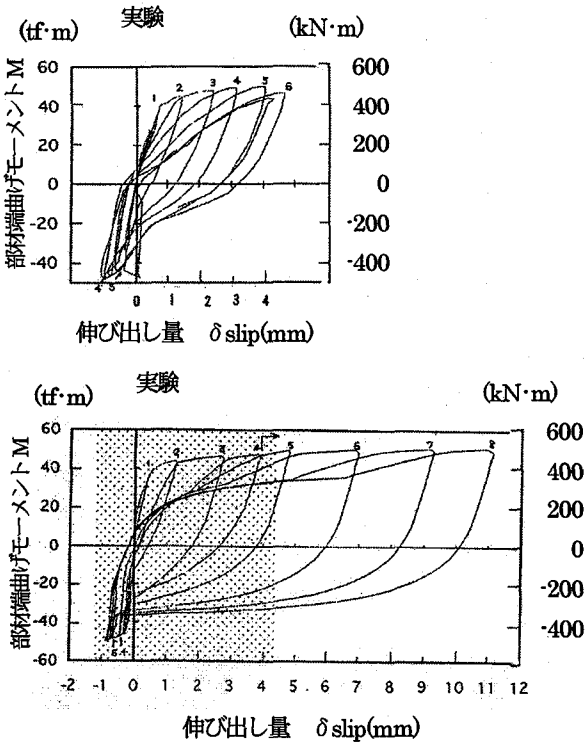


図-22 部材端曲げモーメント-伸び出し量関係

5. まとめ

本研究では、マッシブなコンクリートに定着された柱筋の模型実験をもとに応力度-伸び出し量履歴モデルを提案し、その適用性を確認した。本研究で得られた結論

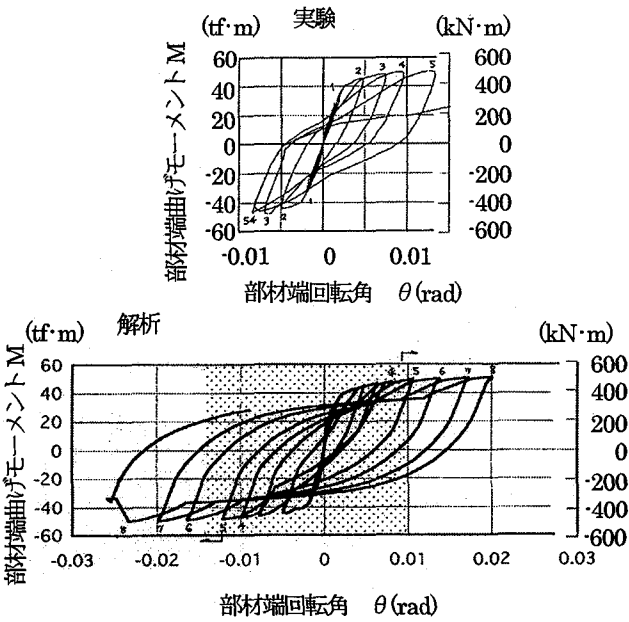


図-23 部材端曲げモーメント-回転角関係

は以下のとおりである。

①鉄筋の応力度-ひずみ関係、付着応力度-すべり関係は載荷履歴の影響を大きく受けるため、これらを用いて応力度-伸び出し関係を解析的に推定する場合、それぞれのモデルのわずかな相違が推定した応力度-伸び出し関係に大きな相違をもたらす場合がある。しかし、応力度-伸び出し量の包絡曲線に対しては載荷履歴の影響はほとんど現れない。

②マッシブなコンクリートに定着された柱筋の模型実験をもとに応力度-伸び出し量履歴モデルを提案し、鉄筋およびコンクリートの材料特性が異なる場合の補正方法を示した。

③提案した鉄筋の伸び出しモデルによって、交番加力を受けるRC柱部材における柱筋の定着端からの伸び出し履歴特性、および、伸び出しによる柱基部の回転履歴を比較的良く推定することができる。

なお、鉄筋間隔が密に配置されるものに対しては、補正方法を別途考える必要がある。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、九州大学大学院工学研究科彦坂熙教授のご指導を戴きました。謹んでお礼申し上げます。

参考文献

1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，平成8年12月
2) Yamada, Y. et al. : Stress-strain based inelastic earthquake response analysis of reinforced concrete frame structure, Proc. IABSE Int. Symp.,

- Delft, 1987
- 3) 村山, 古市, Sivasubramanyam, S., Maihin, S.A.: 鉄筋モデルの相違がRC柱部材のM- Φ 解析結果に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No. 2, 1994, pp.165-170
 - 4) 須田, 村山, 一宮, 新保: 交番繰返し荷重下における柱筋の座屈モデル, 鹿島技術研究所年報, 第42号, 1994, pp.93-98
 - 5) Brown, R.H. and Jirsa, J.O.: Reinforced Concrete Beams Under Load Reversals, ACI Journal, May 1971, pp.380-390
 - 6) Ma, S.M., Bertero, V.V. and Popov, E.P.: Experimental and Analytical Studies on the Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Rectangular and T-Beams, Report No. UCB EERC-76/2, May 1976
 - 7) Viwathanatepa, S., Popov, E.P. and Bertero, V.V.: Effects of Generalized Loadings on Bond of Reinforcing Bars Embedded in Confined Concrete Blocks, Report No. UCB EERC-79/22, Aug. 1979
 - 8) Filippou, F.C., Popov, E.P. and Bertero, V.V.: Effect of Bond Deterioration on Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Joints, Report No. UCB EERC-83/19, Aug. 1983
 - 9) 森田, 角: 鉄筋コンクリート柱はり接合部におけるはり軸筋の接合部からの抜け出しについて, 日本建築学会学術梗概集 昭和47年10月, pp.1099-1100
 - 10) 森田, 角, 木口: 繰返し荷重下での定着部鉄筋の付着性状 (その1. 定着域での鉄筋応力分布), 日本建築学会学術梗概集 昭和50年10月, pp.1015-1016
 - 11) 森田, 角, 木口: 繰返し荷重下での定着部鉄筋の付着性状 (その2. 荷重-たわみ履歴への影響), 日本建築学会学術梗概集, 昭和50年10月, pp.1017-1018
 - 12) 玉置, 秋元, 横溝: フーチング中における柱主鉄筋の定着に関する実験的研究, 土木学会第28回年次講演会, 昭和48年 pp.105-106
 - 13) 太田: 繰返し荷重下における鉄筋コンクリート橋脚の挙動に関する実験的研究, 土木学会論文報告集 No.292 1979年12月 pp.65-74
 - 14) Filippou, F.C.: A Simple Model for Reinforcing Bar Anchorages under Cyclic Excitations, Report No. UCB EERC-85/05, March 1985
 - 15) 森田, 角: 繰返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究, 建築学会論文報告集 第229号, 昭和50年3月, pp.15-24
 - 16) Noguchi, H.: Analytical Models for Reinforced Concrete Members Subjected to Reversed Cyclic Loading, JCI, Seminar on Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, Vol.2, May 1985, pp.93-112
 - 17) 周, 山尾, 岡村: 定着長が長い場合の局部付着応力-すべり関係について, 第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集, 1983年, pp.401-404
 - 18) 山尾, 周, 二羽: 付着応力-すべり関係に関する実験的研究, 土木学会論文報告集 第343号 1984年3月 pp.219-228
 - 19) 鈴木, 張, 綿貫, 尾坂: フーチングからの軸方向主鉄筋の抜け出し量評価法に関する研究, コンクリート工学論文集 第3巻 第1号 1992年1月 pp.33-42
 - 20) Hassan, F.M. and Hawkins, N.M.: Anchorage of Reinforcing Bars for Seismic Forces, Publication SP-53, American Concrete Institute, 1977 pp.387-417
 - 21) Park, Y.J., Ang, A.H-S. and Wen, Y.K.: Seismic Damage Analysis and Damage-Limiting Design of RC Buildings, Report UILU-ENG-84-2007, University of Illinois, October 1984
 - 22) 宮下, 高橋: ファイバーモデルによるRC骨組の弾塑性解析 (その2 柱・はり主筋の抜け出し解析), 日本建築学会大会学術講演梗概集 1991年9月 pp.503-504
 - 23) 島, 周, 岡村: マッシブなコンクリートに埋め込まれた異型鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文報告集 第348号/V-6 1987年2月 pp.165-174
 - 24) 島, 周, 岡村: 異形鉄筋の鉄筋降伏後における付着特性, 土木学会論文報告集 第378号/V-6 1987年2月 pp.213-220
 - 25) 石橋, 吉野, 斉藤: 鉄筋コンクリート部材のじん性評価, 第7回コンクリート工学年次講演会論文集, 1985, pp.621-624
 - 26) 出口, 松本: 交番載荷を受ける鉄筋の引抜性状について, 第7回コンクリート工学年次講演会論文集, 1985, pp.489-492
 - 27) 村山, 須田, 三村: マッシブなコンクリート中に定着された鉄筋の降伏以後の拔出し特性, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, 1986, pp.597-600
 - 28) 三村, 村山, 日紫喜, 須田: RC橋脚における柱筋のフーチングからの拔出し特性, 鹿島建設技術研究所, 第33号, 昭和60年6月, pp.21-26
 - 29) 島, 篠原, 森岡: フーチングに定着した鉄筋の引抜け量に及ぼす鉄筋間隔の影響, コンクリート構造物の靱性と配筋方法に関するシンポジウム論文集, 1990年5月, pp.109-114

(2000年9月14日 受付)