

鉄筋とコンクリートの荷重分担を考慮した RC 部材の履歴モデルの提案

Hysteretic model of reinforced concrete members considering contribution of concrete and reinforcement

瀧口将志*, 大塚久哲**, 池永貴史***

Masayuki Takiguchi, Hisanori Otuka, Takashi Ikenaga

*工修, 九州旅客鉄道(株), 施設部保線課(〒812-8566福岡市博多区博多駅前3-25-21)

** 工博, 九州大学大学院教授, 工学研究院 建設デザイン部門(〒819-0395福岡市西区元岡744番地)

*** 九州大学大学院, 工学府 建設システム工学専攻(同上)

In order to evaluate ductility capacity of reinforced concrete members under seismic loading, it is necessary to establish restoring force model, accurately. In this paper, hysteretic model for reinforced concrete members considering pull-out effect of steel, was developed. Based on the fiber analysis, bending moment hysteresis of steel and concrete were separated from each other. Steel hysteresis was modeled by concrete-encased steel columns type, and concrete hysteresis was modeled by slipping type.

It is found that the proposed model give better agreement with the load-displacement relationship obtained by the cyclic loading test.

Key Words: RC members, cyclic loading, hysteretic model, fiber model, pull-out effect

キーワード: RC部材, 交番載荷, 履歴モデル, ファイバーモデル, 鉄筋伸出し

1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下 RC)骨組構造の耐震設計実務においては, 部材の $M-\phi$ あるいは $M-\theta$ 関係に履歴復元力特性を与える部材モデルと, 材料の応力-ひずみ関係に履歴復元力特性を与えるファイバーモデルが一般的に用いられている. このうち部材モデルは 1) 解析の安定性が高い, 2) 実験結果の再現性が良い¹⁾, 3) モデルによってはポストピーク領域での耐力低下も考慮可能である, といった利点がある. 一方ファイバーモデルは, 1) 軸力変動の考慮が容易である, 2) 部材の履歴特性には材料の特性が自動的に反映される, という利点があるが, 大変形領域においても平面保持を仮定するために, その影響により実際には存在しない折れ点が荷重変位曲線上に生じるという問題もある(図-2の○部).

RC部材の履歴復元力モデルは, 1970年のTakedaモデル²⁾の提案をはじめとして, 深田³⁾・武藤⁴⁾のモデル等, いわゆる剛性低下型と呼ばれるモデルを中心に発展してきた. 今日では, 軸方向鉄筋の座屈やかぶりコンクリートの剥落等に起因するポストピークでの耐力低下を考慮できるモデルも提案されている⁵⁻⁷⁾.

ところで RC 部材の履歴特性は, 軸力や鉄筋量により吸収エネルギーの大きい紡錘型から, スリップの生じる逆 S 字型の履歴曲線まで複雑に変化する. しかし RC 部材の履歴復元力特性として一般的に用いられている Takeda モデルはこのような履歴ループの変化に追従できず, 特にスリップが生じるケースにおいては吸収エネルギーを過大に評価するといった問題も生じる. スリップ型の履歴性状を表現できるモデル^{8,9)}も開発され, RC 構造物の地震応答解析に応用した研究¹⁰⁻¹²⁾もあるが, スリップ部の剛性低下および硬化を決定するパラメータを追加したために比較的煩雑なモデルとなっており, そのパラメータの設定方法についてはいまのところ明確とはいえない. そこで本研究では, 鉄筋とコンクリートの荷重分担に着目することにより, 軸力や鉄筋量等のパラメータに応じて変化する RC 部材の履歴性状を連続的に表現できるような履歴復元力モデルの検討を行うこととする. ところで, 既存の履歴モデルは交番載荷実験の結果に基づいて, $P-\delta$, $M-\theta$, $M-\phi$ モデルとして提案されているものが多い. この場合, 実験で得られた荷重-変位関係と履歴モデルを対応させることで, その妥当性を容易に検証することができるといったメリットがあ

表-1 試験体諸元

	断面 B×D(mm)	せん断スパン La(mm)	引張鉄筋	帯鉄筋	軸力 N(kN)	引張鉄筋比 pt(%)	帯鉄筋比 pw(%)	軸力比 η	備考
KY07-1	400×400	2555	D13-5本	D6@60×2組	0	0.426	0.528	0.000	側方鉄筋なし
KY07-2	400×400	2555	D13-5本	D6@60×2組	960	0.426	0.528	0.126	側方鉄筋なし
KY07-3	400×400	2555	D13-5本	D6@60×2組	0	0.426	0.528	0.000	
KY07-4	400×400	2555	D13-5本	D6@60×2組	960	0.426	0.528	0.123	
H97-5	900×900	3300	D32-10本	D16@100×1.5組	784	1.075	0.662	0.032	
H97-6	900×900	3300	D32-10本	D16@100×1.5組	3136	1.075	0.662	0.122	
T97-1	800×800	3000	D25-9本	D13@80×2組	2354	0.783	0.792	0.123	
T97-2	800×800	3000	D25-9本	D13@80×2組	0	0.783	0.792	0.000	

表-2 コンクリート材料強度

	圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	割裂強度 f_t (N/mm ²)	ヤング係数 E_c (N/mm ²)
KY07-1	53.5	4.12	35800
KY07-2	47.8	3.35	31700
KY07-3	54.5	4.43	35000
KY07-4	48.9	3.58	33100
H97-5	30.7	2.86	25186
H97-6	31.8	2.88	24402
T97-1	30.0	2.74	22540
T97-2	32.6	2.84	22638

表-3 鉄筋材料強度

	鉄筋径	降伏強度 f_{ry} (N/mm ²)	破断強度 f_{ru} (N/mm ²)	ヤング係数 E_s (N/mm ²)
KY07-1~4	D13	325.0	478.0	185000
	D6	395.0	505.0	183000
H97-5, 6	D32	367.8	574.9	160720
	D16	409.1	582.8	152880
T97-1	D25	371.4	560.1	189140
	D13	373.4	550.8	182280
T97-2	D25	387.1	581.1	190120
	D13	373.4	550.8	182280

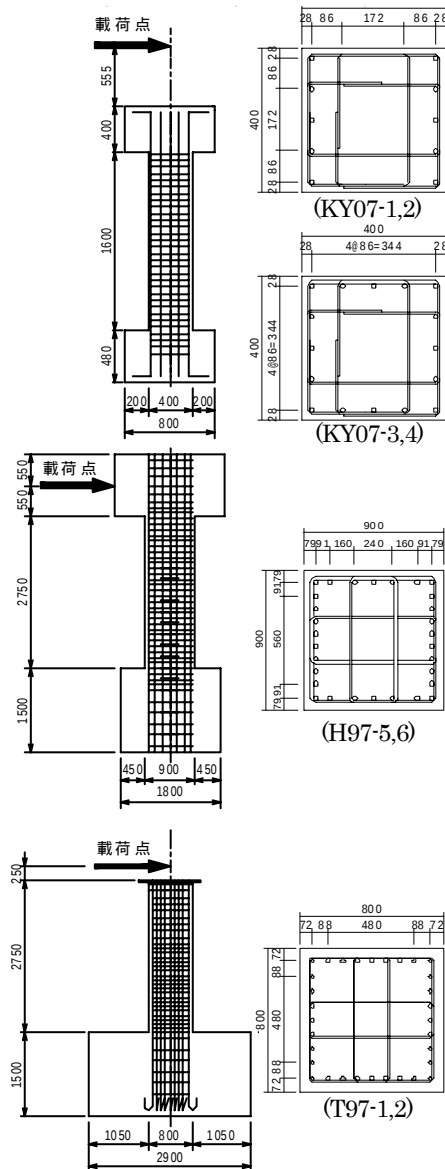


図-1 試験体形状 (単位: mm)

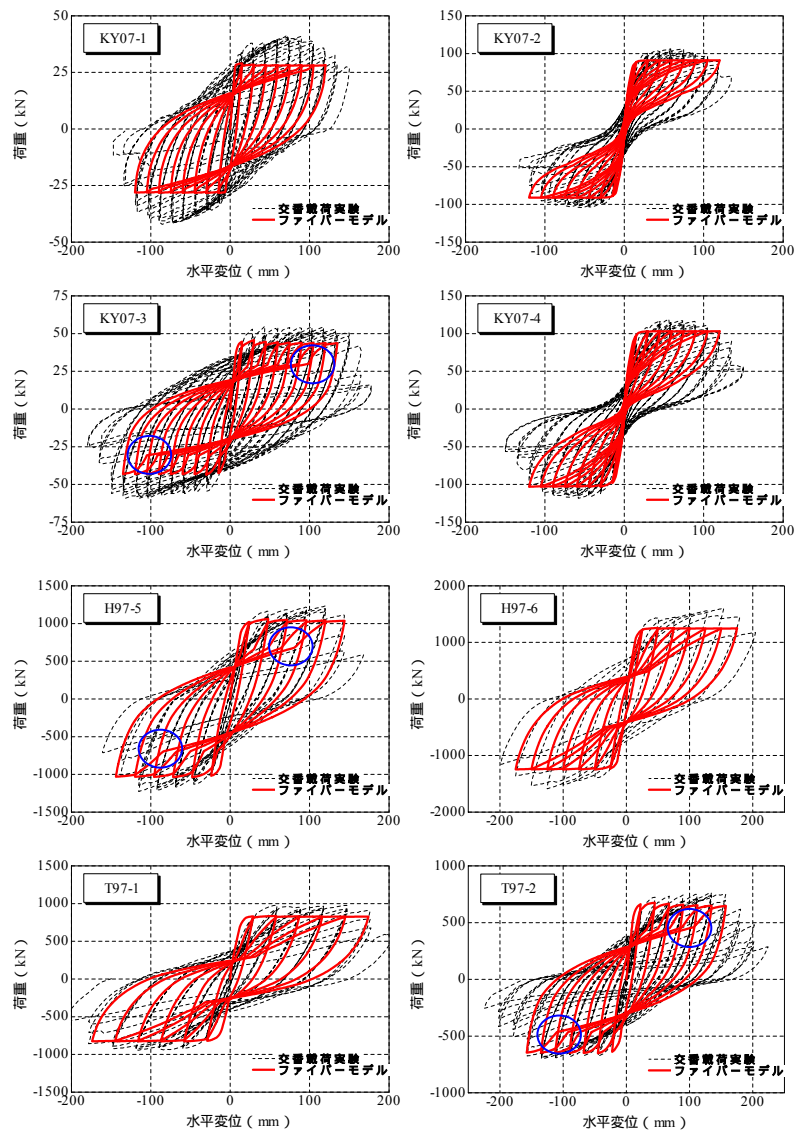


図-2 荷重-変位関係

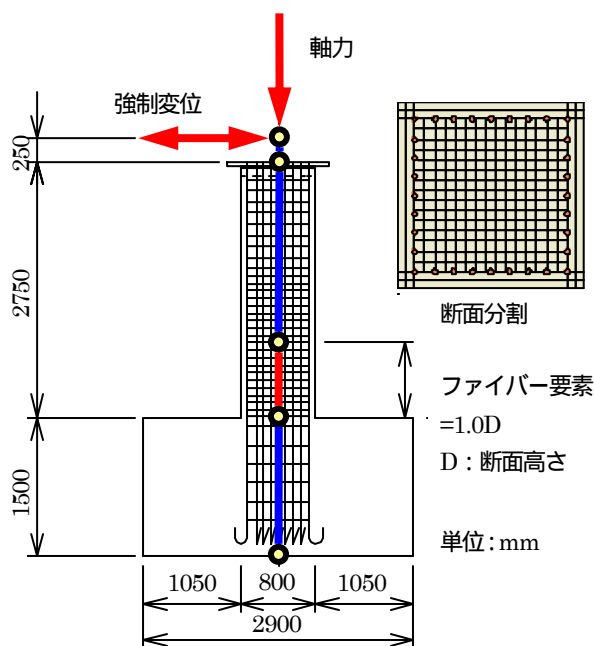


図-3 解析モデルの例

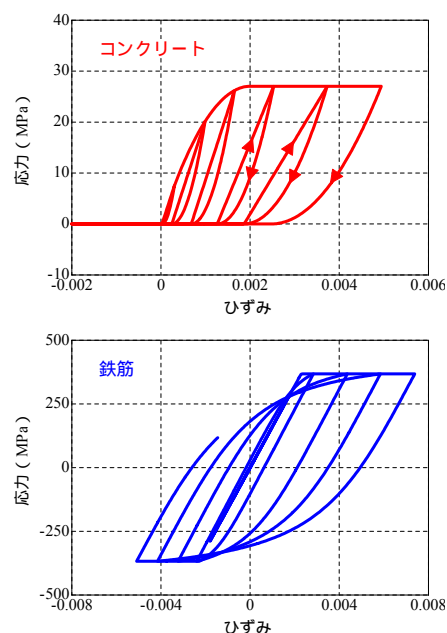


図-4 応力-ひずみ曲線

るが、実験パラメータの範囲外での適用については別途検討が必要であり、モデルが実験誤差を反映している可能性もある。このような背景から、本研究では交番載荷実験と数値解析の結果を組み合わせる検討を行うこととする。数値解析手法としては近年 RC の分野にさかんに導入されている FEM もあるが、本研究では解析の簡便さからファイバーモデルを用いることにした。

2. 研究の概要

内藤ら¹³⁾はファイバーモデルの解析結果を基に、コンクリート断面を無視した鋼材の再載荷曲線に補正係数を乗じることにより軸力や断面諸元の影響を考慮可能な RC 柱ならびに SRC 柱の履歴復元力モデルの提案を行っている。しかしながらこのモデルは、鋼材の $M-\phi$ 履歴をベースに作成されているため、除荷・再載荷部が外側に凸な、いわゆる紡錘型の履歴性状にのみ適用できるものと考えられる。

鋼材量が比較的少なく、かつ軸力が大きい場合にはコンクリート接触面積の増大に伴い、鉄筋履歴の影響は相対的に低下する。本研究ではまず、鉄筋比の小さい場合において、軸力が部材の履歴特性に大きな影響を与えることを実験により確認した。さらに、ファイバーモデルによる解析結果から、鉄筋とコンクリートがそれぞれ負担するモーメントを分離し、各々に対して適用する履歴モデルを検討した。最後に、作成した両者の履歴モデルを足し合わせることで部材の履歴モデルとし、既往の交番載荷実験の結果との比較を行った。

3. RC 柱部材の交番載荷実験の概要

3.1 試験体諸元と載荷ケース

試験体諸元を表-1 に、試験体形状および断面を図-1 に示す。またコンクリートと鉄筋の材料試験結果を表-2、表-3 にそれぞれ示す。試験体断面は KY シリーズ¹⁴⁾が $400 \times 400 \text{ mm}$ 、H シリーズ¹⁵⁾が $900 \times 900 \text{ mm}$ 、T シリーズ¹⁵⁾が $800 \times 800 \text{ mm}$ であり、軸力を主なパラメータとして載荷した。その他のパラメータの範囲は引張鉄筋比 $0.426 \sim 1.075\%$ 、帯鉄筋比 $0.528 \sim 0.792\%$ 、軸力比 $0 \sim 0.126$ である。KY シリーズは比較的軸方向鉄筋量の少ない試験体であり、うち KY07-1, 2 は側方鉄筋なしの試験体である。H、T シリーズは鉄道 RC ラーメン高架橋の柱部材を模した実物大試験体であり、軸方向鉄筋量が比較的多い。

載荷は柱頭部に鉛直ジャッキもしくはアクチュエータを用いて所定の軸力を入力し、水平ジャッキもしくはアクチュエータにより交番加力を行った。載荷方法は変位制御とし、降伏変位の整数倍で繰り返し載荷した。同一変位での載荷繰り返し回数は H97-6 のみ 1 回、その他の試験体は 3 回である。

3.2 実験結果

交番載荷実験で得られた載荷点での荷重-変位関係を図-2 に示す。H、T シリーズでは軸方向鉄筋座屈の進展およびかぶりコンクリートの剥落に伴い耐力が急激に低下した。履歴ループの形状は、軸方向鉄筋の座屈前は紡錘型を維持しているが、座屈後は逆 S 字型に移行している。

これに対し、KY シリーズでは軸方向鉄筋量が少ない

ために、座屈後の耐力低下は比較的緩やかであり、急激な耐力低下は軸方向鉄筋の破断を契機に生じた。履歴ループは軸力が無い場合には終盤に逆S字型への移行が僅かに認められるものの、ほぼ紡錘型である。軸力の大きいKY07-2, KY07-4では残留変位が小さく、PC部材に近い履歴性状を示した。

4. ファイバー要素を用いたRC柱の交番解析

4.1 解析モデル

図-3に解析モデルの例を示す。塑性ヒンジ長は道示¹⁶⁾の方法にならい、柱最下端より0.5D(D:断面高さ)とした。ファイバー要素長については、本研究で使用する要素が半区間で曲率一定となることを考慮し、1.0Dとしている。フーチングおよび塑性ヒンジ以外の躯体部分には弾性梁要素を使用している。

断面の分割は載荷方向にかぶりコンクリートを2分割、コアコンクリートを15分割とした。これ以上の分割数であれば解析結果に大きな影響を与えないことを確認している。コンクリートの応力-ひずみ関係のスケルトンにはコンクリート標準示方書[構造性能照査編]に示されているもの¹⁷⁾を用い、履歴ループについては除荷時に放物線、再載荷時に経験最大ひずみ点を指向する直線となるようなモデルとした。また鉄筋の応力-ひずみ関係にはBauschinger効果を考慮できるモデル¹⁸⁾を採用している(図-4)。なお、かぶりコンクリートとコアコンクリートには終局時のかぶりコンクリートの剥落を考慮して、別々の応力-ひずみ関係を与えるのが通常であるが、本研究では履歴曲線の定常ループを得ることを目的に、同一の応力-ひずみ関係を与えている。

ところで、RC単柱のファイバー要素解析では、フーチングからの鉄筋伸出しを表現するために、柱基部に非線形の回転パネを挿入することがある^{19,20)}。しかしながら、鉄筋伸出しの履歴については現状では不明な部分が多いため、本解析では考慮していない。これについては5章で検討を行う。

4.2 実験結果との比較

ファイバーモデル解析結果を図-2の荷重-変位関係に重ねて示す。図は載荷点に与えた強制変位と荷重の関係を、交番載荷実験の結果と比較したものである。本解析に使用した鉄筋の構成則が座屈を考慮できるものではないため、解析は耐力低下が生じる変位の直前で打ち切っている。

軸力の小さいKY07-1, KY07-3, H97-5, T97-2では、各ピークへの到達直前でコンクリートの効き始めに起因するピンチングを生じているが、履歴曲線全体としての再現性は概ね良好である。なお実験とファイバーモデル解析結果の包絡線に差を生じたのは、本解析ではひずみ硬化を考慮していないことによる。また軸力の大きい

KY07-2, KY07-4では、ファイバーモデルによる履歴曲線は実験ループをやや痩せ気味に評価しているものの、スリップ型の履歴の特徴をよくとらえている。

5. ファイバーモデル解析結果に基づくRC部材の履歴モデルの提案

5.1 既存の履歴モデルと実験結果の比較

履歴モデルの作成に入る前に、既存のRC履歴モデルの適用性を確認することとする。図-5はTakedaモデルと実験結果の比較を行ったものである。H, Tシリーズでは除荷勾配も含めて実験ループとの対応が良いが、KYシリーズでは除荷から再載荷の経路において、実験値とモデルの間に大きな差を生じている。Takedaモデルではピークで折り返した後、荷重ゼロに達するとただちに過去の最大変形点を指向するため、除荷・再載荷過程における履歴曲線の複雑な変化を表現できていない。

5.2 鉄筋およびコンクリート負担モーメントの分離

KYシリーズのように、鉄筋量が比較的少ない場合にはコンクリートの応力履歴が部材の挙動に大きな影響を与えることが予想される。そこでファイバーモデルの解析結果をもとに、コンクリートと鉄筋が負担するモーメントを分離し、それぞれの履歴が部材全体の履歴に与える影響を調べた。鉄筋モーメントの履歴は、ファイバー要素解析で得られる鉄筋の応力履歴に鉄筋断面積と図心軸からの距離を乗じて算出した。またコンクリートモーメントの履歴は、基部の全モーメントから鉄筋モーメントの総和を減じることで求めた。図-6に結果の例を示す。

軸力が小さいKY07-3およびH97-5では、鉄筋の荷重負担割合が大きく、紡錘型の鉄筋モーメント履歴が部材の履歴に強く現れている。逆に、軸力の大きいKY07-4ではコンクリートの荷重負担割合が大きく、原点近傍で生じるスリップ性状が部材全体の履歴に大きく反映されている。

5.3 スケルトンカーブに関する検討

提案モデルは、部材モデルでの使用を目的としていることにより、コンクリートおよび鉄筋履歴の骨格値には、断面解析の結果から得られる値を使用することとした。すなわち、ひび割れ点(C点)、引張最外縁の鉄筋が降伏する点(Y点)および繰返し載荷による耐力低下が顕著とならない最大変位点¹⁵⁾(M点)でのコンクリートおよび鉄筋の負担モーメントを結ぶトリリニアモデルとする。ここでM点の曲げモーメントは、コンクリート終局ひずみを0.0035としたときの曲げ耐力である。ところでKY07-1のように軸方向鉄筋量が少なく、かつ軸力が小さい場合には、Y点でのコンクリート負担モーメント M_{yc} がC点でのコンクリート負担モーメント M_{cr} を下回るときがある。そのような場合には第1折れ点C点に以下のような修正を行うものとする。

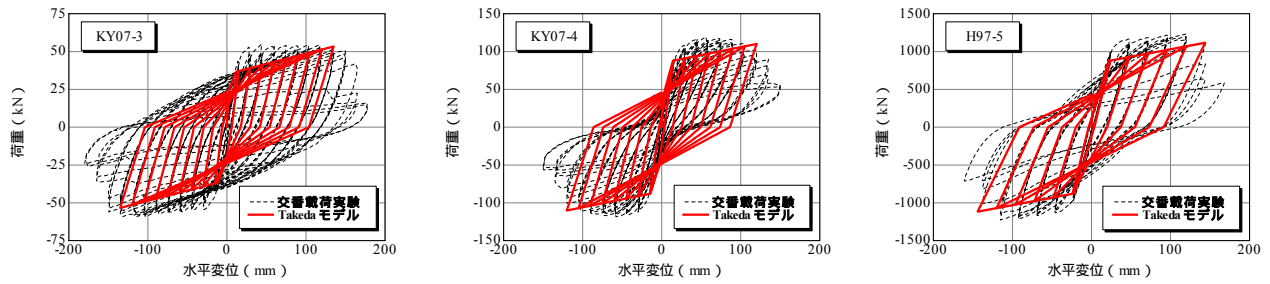


図-5 Takeda モデルの適用性

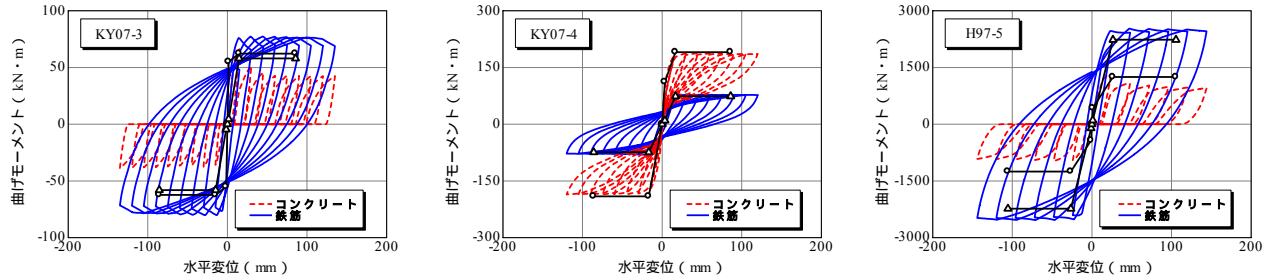


図-6 モーメント履歴の分離

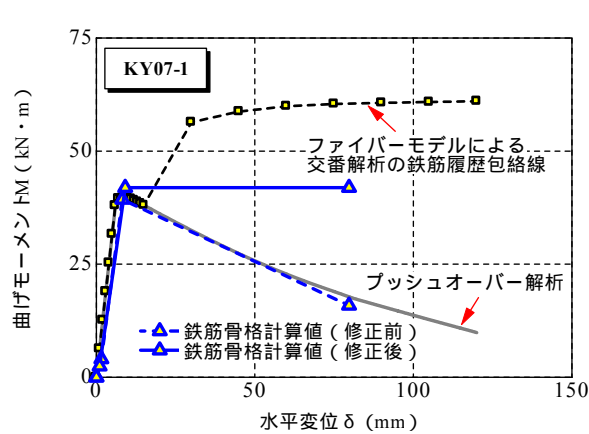


図-7 鉄筋履歴に及ぼす繰り返しの影響

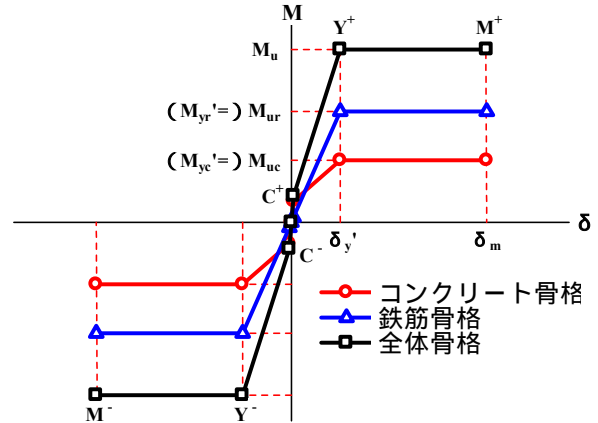


図-8 スケルトンカーブの設定

$$M'_{crc} = M_{yc} \quad (1)$$

$$M'_{crr} = \frac{M'_{crc}}{M_{crc}} M_{crr} \quad (2)$$

$$\delta'_{cr} = \left(1 + \frac{M_{crr}}{M_{crc}}\right) \frac{M_{yc}}{M_{cr}} \cdot \delta_{cr} \quad (3)$$

また実験では、鉄筋降伏後も $2\delta_y$ 程度までは荷重が増加することより、第2折れ点Y点に対し、C点(C'点)とY点を通るようにY'点に修正する。

$$M'_{yc} = M_{uc} \quad (4)$$

$$M'_{yr} = M_{ur} \quad (5)$$

$$\delta'_y = \delta'_{cr} + \frac{M'_y - M'_{cr}}{M_y - M_{cr}} (\delta_y - \delta'_{cr}) \quad (6)$$

ここに、 δ_{cr} 、 δ_y はそれぞれC点、Y点における変位であり、上添字の(')は修正後の値を示す。またモーメントの第2下添字のc、rはそれぞれコンクリート、鉄筋の負担分を表している。

ところで特殊な場合であるが、KY07-1のように軸方向鉄筋量が少なく、かつ軸力が小さい場合には、曲げ耐

力計算時に中立軸が圧縮側かぶり部分に移動するため、見かけ上鉄筋モーメントが減少する場合がある。図-7はKY07-1の鉄筋モーメントについて、ファイバーモデルによる交番解析の包絡線とプッシュオーバー解析の結果を比較したものである。断面解析による骨格計算値はプッシュオーバー解析の結果とよく一致しているが、実際には繰返し荷重下においてY点以降に鉄筋負担モーメントが低下することはないと考えられる。このような場合にはY点の鉄筋およびコンクリートモーメントを元に以下の修正を行えば、部材全体の骨格の変更を必要としない。

$$M'_{yc} = (M_u/M_y) M_{yc} \quad (7)$$

$$M'_{yr} = (M_u/M_y) M_{yr} \quad (8)$$

$$M_{uc} = M'_{yc} \quad (9)$$

$$M_{ur} = M'_{yr} \quad (10)$$

これらのコンクリートおよび鉄筋のスケルトンカーブの概要を図-8に示すとともに、その計算値を図-6のモーメント履歴に重ねて示した。

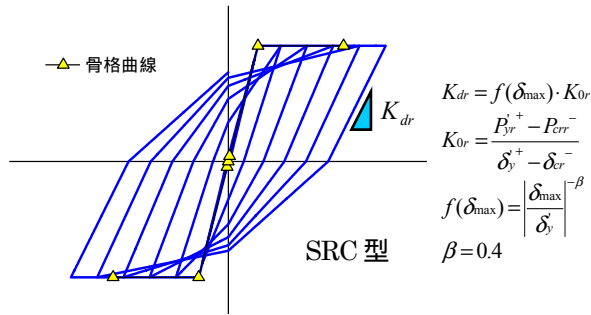


図-9 鉄筋モーメント履歴のモデル化

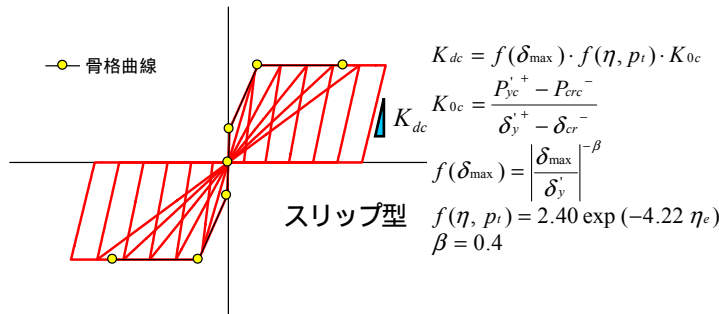


図-10 コンクリートモーメント履歴のモデル化

5.4 鉄筋負担モーメント履歴のモデル

図-6より鉄筋モーメント履歴は紡錘型であり、図-9に示す鉄骨鉄筋コンクリート部材（以下、SRC部材）の履歴モデル²¹⁾を用いることとする。SRC部材の履歴モデルは除荷後、荷重ゼロ点を経て、一旦反対側のY点を指向するため、鋼材の履歴における除荷・再載荷区間でのループの膨らみを表現するのに適している。

反転後の除荷勾配は式(11)で与える。

$$K_{dr} = f(\delta_{max}) \cdot K_{0r} \quad (11)$$

ここに、 $f(\delta_{max}) = \left| \frac{\delta_{max}}{\delta_y^+} \right|^{-\beta}$ 、 β ：除荷剛性低下係数（=0.4）である。また、 K_{0r} は剛性低下の基準勾配であり、次のようにとる。

$$K_{0r} = \frac{P_{yc}^+ - P_{cr}^-}{\delta_y^+ - \delta_{cr}^-} \quad (12)$$

ここで、 δ_{cr} ：ひび割れ発生時の変位、 $P_{cr} (=M_{cr} / L_a)$ ：C点における鉄筋負担荷重、 L_a ：せん断スパンであり、上添字の(+)および(-)はそれぞれ正側、負側を表している。その他のルールは文献²¹⁾の履歴法則に従う。

5.5 コンクリート負担モーメント履歴のモデル

図-6に示すように、コンクリートモーメントの履歴は鉄筋の履歴と比較すると多少複雑である。除荷後、荷重が低下すると原点を指向する傾向があり、この区間の部材全体の履歴はほぼ鉄筋の剛性により決定されることがわかる。このようなスリップ性状を表現するために、図-10のようなモデルを作成した。

ところで図-6に示されるように、コンクリート履歴の除荷剛性は、軸力や鉄筋比により大きく変化し、経験最

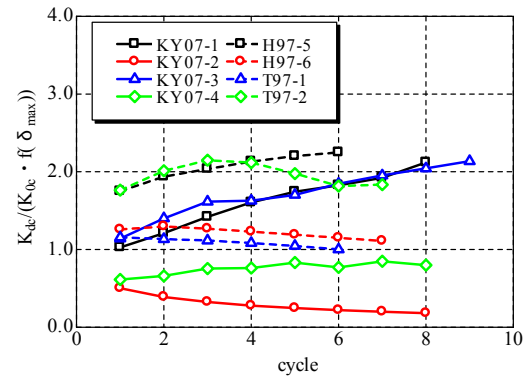


図-11 cycle-剛性低下係数の関係

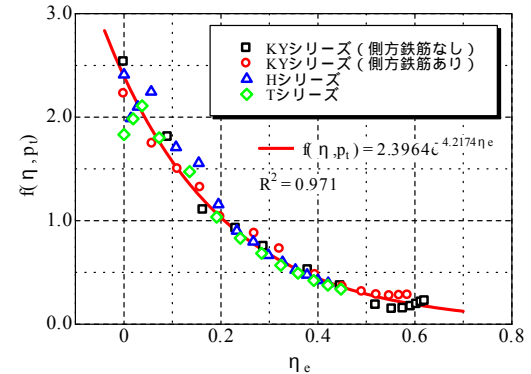


図-12 有効軸力比-剛性低下係数の関係

大変位に比例する剛性低下係数 $f(\delta_{max})$ だけでは除荷剛性の変化を表現できないことが想定される。そこでまず、 $f(\delta_{max})$ のみでどの程度除荷剛性を表現できるかの確認を行うこととする。図-11は、除荷剛性を $f(\delta_{max})$ と基準勾配 K_{0c} との積で除したもののサイクル毎の変化を示したものである。値は0.2～2.2と大きな差があり、 $f(\delta_{max})$ のみでは除荷剛性を十分に表現できないことが分かる。なお、経験最大変位の影響に関しては、軸力が小さく鉄筋量が少ないKY07-1、KY07-3では変形量が大きくなると値が幾分大きくなる傾向があるが、全体としては概ね除去できていると考えられる。

そこで、軸力および鉄筋量に比例する剛性低下係数 $f(\eta, p_t)$ を導入し、除荷勾配を式(13)で与えることとする。

$$K_{dc} = f(\delta_{max}) \cdot f(\eta, p_t) \cdot K_{0c} \quad (13)$$

K_{0c} は剛性低下の基準勾配であり、次のようにとる。

$$K_{0c} = \frac{P_{yc}^+ - P_{cr}^-}{\delta_y^+ - \delta_{cr}^-} \quad (14)$$

ここで、 $P_{cr} (=M_{cr} / L_a)$ はC点におけるコンクリート負担荷重である。 $f(\eta, p_t)$ は軸力比 η と引張鉄筋比 p_t の関数であるが、式(15)のようなパラメータ η_e を導入することで、図-12に示すようにほぼ η_e のみの関数とみなせる。

$$\eta_e = \frac{N}{A_c f_c + A_r f_r} \quad (15)$$

ここに、 $A_c' = A_c \cdot (x_{cu} / D)$ 、 A_c ：コンクリートの全断面積、 f_c ：コンクリートの圧縮強度、 A_r ：鉄筋の全断面積、

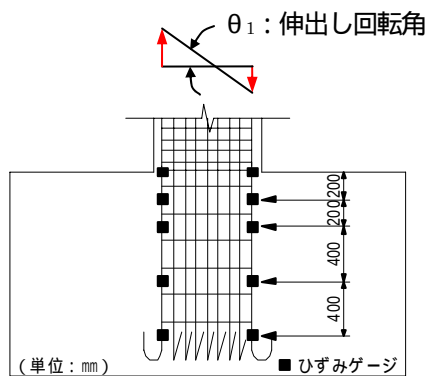


図-13 鉄筋伸出の計測方法

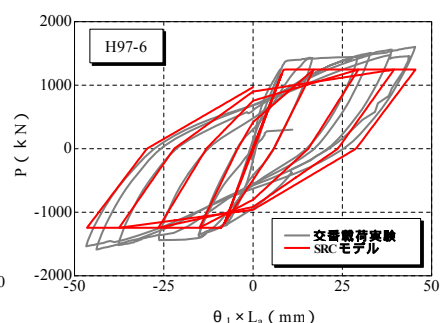
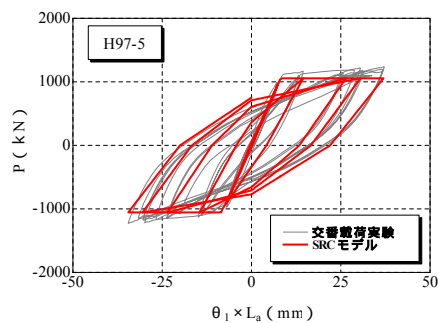


図-14 鉄筋伸出履歴の例

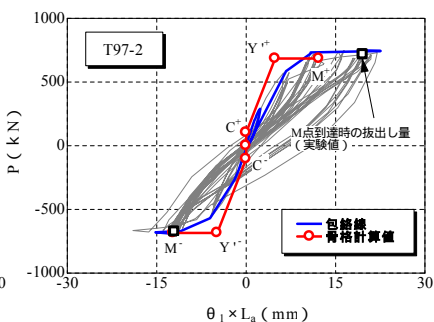
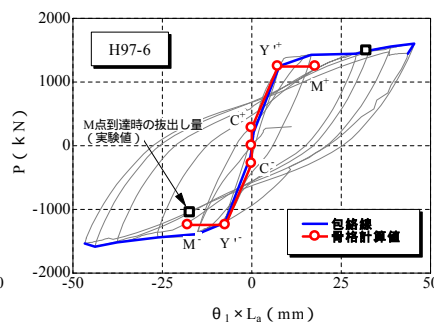
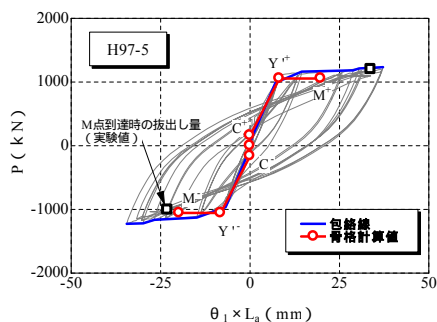


図-15 鉄筋伸出スケルトンの比較

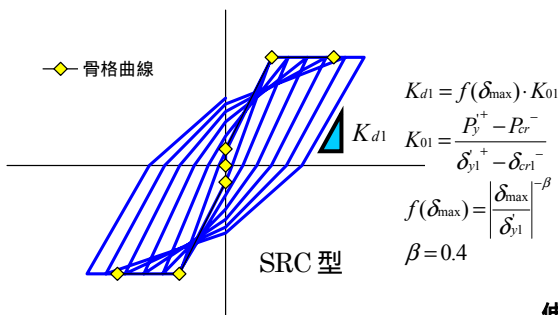


図-16 鉄筋伸出履歴のモデル化

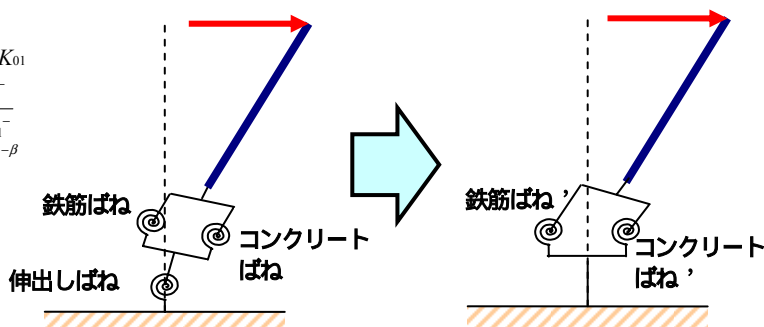


図-17 鉄筋伸出を考慮した履歴モデル

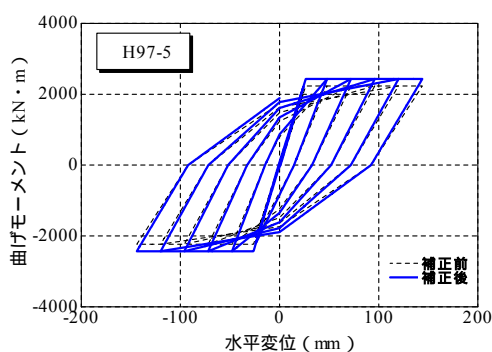


図-18 伸出を考慮した鉄筋の履歴

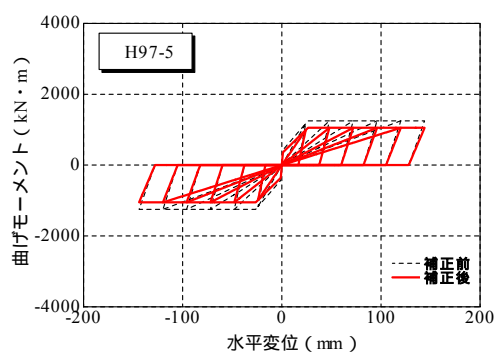


図-19 伸出を考慮したコンクリートの履歴

f_r : 鉄筋の降伏強度, x_{cu} : M点における圧縮縁から中立軸までの距離, N : 軸力である. $f(\eta, p_t)$ を指数関数で回帰すると式(16)が得られる.

$$f(\eta, p_t) = 2.40 \exp(-4.22 \eta_e) \quad (16)$$

K_{dc} で荷重ゼロに達した後は, 原点に向かい, 原点到達

後は過去の最大変形点を指向するモデルとすれば, コンクリート履歴のスリップ性状を概ね表現できる.

5.6 鉄筋伸出履歴のモデル

RC 部材では, フーチングおよび躯体から鉄筋が伸出し,

剛体回転による変形量が頂部変位に加算されることが知られている²²⁾。すなわち、RC部材の変形性能を精度よく求めるためには、鉄筋伸出し履歴のモデルが必要である。鉄筋伸出しの履歴を扱った研究としては、たとえば村山ら²³⁾、Jian Zhaoら²⁴⁾、Halil Sezenら²⁵⁾の研究が挙げられる。このうち文献23)および24)では伸出し量(δ_{slip})・鉄筋応力(σ_r)の関係が提案されているが、部材モデルで用いるためには伸出し回転角(θ)・モーメント(M)の関係が必要となる。そこで本研究では、交番載荷実験における鉄筋の伸出し量の計測結果をもとに、伸出し履歴のモデル化を試みた。

図-13に鉄筋伸出し量の計測方法を示す。基部フーチング内の軸方向鉄筋に貼り付けたひずみゲージの値を、材軸方向に積分して鉄筋の伸出し量を算出した。引張鉄筋での引き抜け量と圧縮鉄筋での押し込み量の差を鉄筋間隔で除して伸出し回転角 θ_1 に換算している。図-14に鉄筋伸出し履歴の一例を示す。

図-15は鉄筋伸出し履歴の包絡線と、既往の研究¹⁵⁾による骨格計算値を比較したものである。計算値はY点近傍の剛性変化点を精度よく予測しており、伸出し履歴に対する既往の実験式の妥当性が確認された。履歴法則については、既往の履歴モデルのうち、SRC型の履歴モデルの適合性が最も良いことを確認した。図-16に鉄筋伸出し履歴のモデルを示すとともに、図-14の実験での伸出し履歴にモデルを重ねて示している。

ところで、 $M-\theta$ モデルにおいて、伸出し履歴を表現する非線形の回転パネは図-17に示すように、鉄筋およびコンクリートの履歴を表現する回転パネとは直列に接続され、かつ載荷・除荷が連動して挙動するものと考えられる。しかしながら、実務上このモデルは取り扱いにくく、改良を要する。本研究では、鉄筋伸出しによる回転変位が部材全体の履歴に与える影響の程度を考慮して、鉄筋とコンクリートの履歴に伸出しの履歴を配分することを考えた。

いま、躯体(鉄筋+コンクリート)の履歴特性 E_{d0} への鉄筋とコンクリートの寄与をそれぞれ E_{dr} 、 E_{dc} とし、 E_{d0} を次式のように負担モーメントの荷重平均で与える。

$$E_{d0} = \frac{M_r}{M_r + M_c} E_{dr} + \frac{M_c}{M_r + M_c} E_{dc} \quad (17)$$

部材全体の履歴特性 E_d は、躯体変形による回転角 θ_0 と鉄筋伸出しによる回転角 θ_1 の平均で与える。

$$E_d = \frac{\theta_0 \cdot E_{d0} + \theta_1 \cdot E_{d1}}{\theta_0 + \theta_1} \quad (18)$$

ここに、 E_{d1} は伸出し履歴の履歴特性である。

式(18)に式(17)を代入すると、部材全体の履歴特性は、鉄筋・コンクリート・伸出しの各成分の和で表される。

$$E_d = \frac{M_r \cdot \theta_0}{(M_r + M_c)(\theta_0 + \theta_1)} \cdot E_{dr} + \frac{M_c \cdot \theta_0}{(M_r + M_c)(\theta_0 + \theta_1)} \cdot E_{dc} + \frac{\theta_1}{(\theta_0 + \theta_1)} \cdot E_{d1} \quad (19)$$

鉄筋伸出しの履歴はSRC型であるから、 $E_{dr} = E_{d1}$ とすると、

$$E_d = \frac{M_r \cdot \theta_0 + (M_r + M_c) \cdot \theta_1}{(M_r + M_c)(\theta_0 + \theta_1)} \cdot E_{dr} + \frac{M_c \cdot \theta_0}{(M_r + M_c)(\theta_0 + \theta_1)} \cdot E_{dc} \quad (20)$$

となる。式(17)と式(20)をと比較すると、鉄筋モーメント M_r 、コンクリートモーメント M_c の補正係数がそれぞれ以下のように得られる。

$$\alpha_r = 1 + \frac{M_c \cdot \theta_1}{M_r \cdot (\theta_0 + \theta_1)} \quad (21)$$

$$\alpha_c = \frac{\theta_0}{\theta_0 + \theta_1} \quad (22)$$

$$\alpha_r \cdot M_r + \alpha_c \cdot M_c = M_r + M_c \quad (23)$$

躯体のみ(鉄筋+コンクリート)の履歴モデルから得られるモーメント M_r 、 M_c に上式の補正係数 α_r 、 α_c をそれぞれ乗ずれば、SRC型とスリップ型の履歴の傾向を、躯体変形と伸出しによる変位を基準として補正できたことになる。

補正係数の算出に用いるモーメントおよび回転角には、大変形領域での適用性を考慮して、M点での値を用いることにする。すなわち、式(21)、(22)中の M_r 、 M_c 、 θ_0 、 θ_1 は、

$$M_r = M_{ur} \quad (24)$$

$$M_c = M_{uc} \quad (25)$$

$$\theta_0 = \theta_{m0} \quad (26)$$

$$\theta_1 = \theta_{m1} \quad (27)$$

とする。図-18,19はそれぞれ α_r 、 α_c を乗じて補正した鉄筋とコンクリートの履歴である。コンクリートのスリップ型の傾向が減じられ、鉄筋のSRC型の傾向が増加したことで、部材全体としてはSRC型の傾向が強くなる。

6. 提案モデルの妥当性の検証

提案モデルの妥当性を検証するため、表-1に示す交番載荷実験で得られた荷重-変位関係とモデルによる履歴曲線の比較を図-20に示す。

提案モデルでは、コンクリートモーメントと鉄筋モーメントの履歴を個別に与えたために折れ点の数が増え、除荷・再載部を滑らかに表現できている。特にH・Tシリーズでは、残留変位も含めて実験結果との対応がよい。KYシリーズでは原点近傍における急激な履歴曲線の変化を完全に再現するまでには至っていないが、紡錘型・逆S字型といった履歴特性の違いを十分表現できているものと考えられる。なお、軸力なしのKY07-1およびKY07-3では、計算値は実験値と比較して紡錘型のふくらみが小さい。これは図-7に示すように、断面解析による鉄筋の負担モーメントがファイバーモデルによる交番載荷解析より小さく算定されており、そのために、計算値では鉄筋モーメントの履歴特性であるSRC型の割合が小さくなっているためと考えられる。

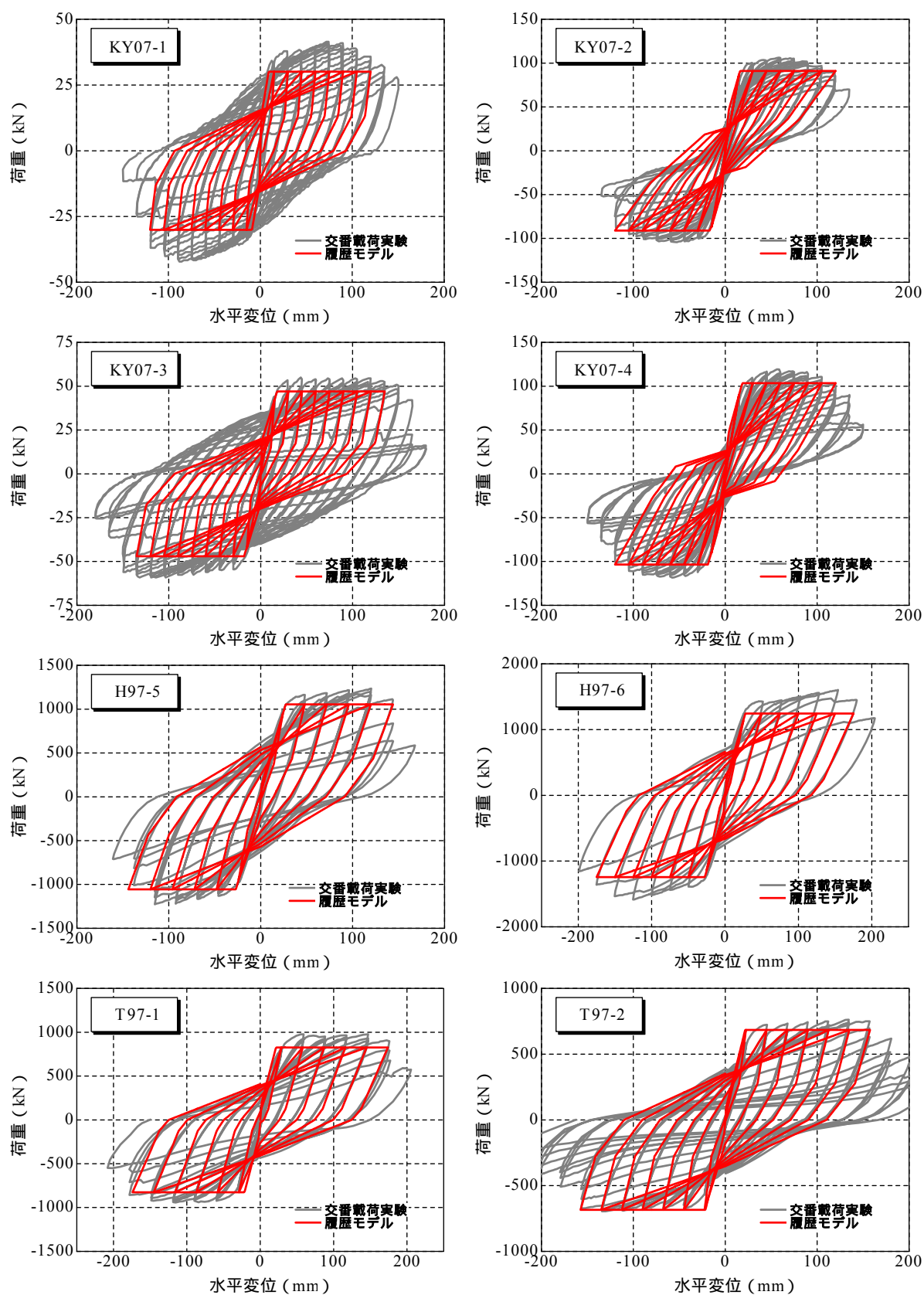


図-20 交番載荷実験と提案モデルの比較

7. まとめ

RC柱部材の交番載荷実験を対象にファイバーモデルによる解析を実施し、その結果を元に部材モデルで用いる履歴モデルの提案を行った。得られた知見を以下に示す。

す。

- (1) RC部材の履歴特性は、軸力が大きくなるにつれて紡錘型から逆S字型へと変化する。履歴特性の変化は鉄

筋量が少ないほど急激であった。

- (2) ファイバーモデル解析結果に基づいて、鉄筋とコンクリートが負担するモーメントの履歴について検討したところ、鉄筋はSRC型、コンクリートはスリップ型の履歴モデルで表現できることがわかった。
- (3) 鉄筋伸出しのための履歴は概ねSRC型の履歴モデルで表現できる。また伸出し変形が部材全体の変形に与える影響を考慮して躯体の履歴を補正することで簡単に伸出し履歴を評価できる。
- (4) 本研究による提案モデルは、紡錘型から逆S字型へと変化するRC部材の履歴特性を連続的に再現できる。

参考文献

- 1) (社)土木学会:コンクリート技術シリーズ50, コンクリート構造物の非線形解析技術研究小委員会 成果報告書, pp.139-140, 2003.1.
- 2) Toshikazu Takeda, Mete A. Sozen, N.Norby Nielsen: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.96, ST12, pp.2557-2573, 1970.12.
- 3) 深田泰夫:鉄筋コンクリート造建物の復元力復元力特性に関する研究(その1), 日本建築学会関東支部40回学術研究発表会, 1969.
- 4) 武藤清, 内田孝, 津川恒久, 大森信次, 本橋章平:鉄筋コンクリート造原子炉建家の地震時挙動に関する構造実験とその解析(その1~3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1727-1732, 1977.10.
- 5) 伊吉允, 梅村恒, 市之瀬敏勝, 松澤敦行:繰返し載荷により耐力低下する鉄筋コンクリート部材の復元力特性モデル, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.1297-1302, 2001.
- 6) 梅村恒, 市之瀬敏勝, 大橋一仁, 前川純一:耐力低下を考慮したRC部材の復元力特性モデルの開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.1147-1152, 2002.
- 7) 渡辺 英義, 是永 健好, 松崎 育弘:曲げ降伏後にせん断破壊するRC梁および柱の復元力特性モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第577号, pp.101-108, 2004.3.
- 8) 江戸宏彰, 武田寿一:鉄筋コンクリート構造物の弾塑性地震応答フレーム解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1877-1878, 1977.10.
- 9) 塩原等, 小谷俊介, 青山博之:縮約モデルによる構造物の弾塑性応答解析, 第28回構造工学シンポジウム, pp.101-112, 1982.2.
- 10) 鄭文淑, 前田匡樹, 長田正至:部材の履歴特性における耐力低下及びスリップ形状がRC構造物の地震応答に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.37-42, 2000.6.
- 11) 小出敏弘, 小谷俊介, 青山博之:鉄筋コンクリート造構造物の弾塑性地震応答に関する研究(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.2163-2164, 1984.10.
- 12) 小出敏弘, 小谷俊介, 永井潔:鉄筋コンクリート造構造物の弾塑性地震応答に関する研究(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.19-20, 1985.10.
- 13) 内藤英樹, 秋山充良, 鈴木基行:軸方向鉄筋の座屈を考慮したRC柱とSRC柱の履歴復元力モデル, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.1189-1194, 2003.
- 14) 大塚久哲, 瀧口将志, 池永貴史, 山崎智彦:軸力と側方鉄筋の有無がRC柱部材の変形性能に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.949-954, 2008.
- 15) 渡邊忠朋, 谷村幸裕, 瀧口将志, 佐藤勉:鉄筋コンクリート部材の損傷状況を考慮した変形性能算定手法, 土木学会論文集, No.683/V-52, pp.31-45, 2001.8.
- 16) (社)土木学会:道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002.
- 17) (社)土木学会:コンクリート標準示方書[構造性能照査編], pp.26-27, 2002.
- 18) 堺淳一, 川島一彦:部分的な除荷および再載荷を含む履歴を表す修正Menegotto-Pintoモデルの提案, 土木学会論文集, No.738/I-64, pp.159-169, 2003.7.
- 19) 右近八郎, 幸左賢二, 井上晋, 吉澤義夫:RC標準橋脚のファイバーモデルによる交番載荷実験シミュレーション解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.17, No.2, pp.463-468, 1995.
- 20) 堺淳一, 川島一彦:引張力を含む軸力変動がRC橋脚の変形性能に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.735-746, 2002.3.
- 21) 鉄道総合技術研究所編:鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善, 1999.10.
- 22) (社)土木学会:コンクリート技術シリーズNo.12, 阪神淡路大震災被害分析と靱性率評価式(阪神大震災調査研究特別委員会WG報告), pp.52-54, 1996.
- 23) 村山八洲雄, 一宮利通, 須田久美子:マッシブなコンクリートに定着された鉄筋の応力-伸び履歴モデル, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.673-684, 2001.3.
- 24) Jian Zhao, Sri Sritharan:Modeling of Strain Penetration Effects in Fiber-Based Analysis of Reinforced Concrete Structures, ACI Structural Journal, pp.133-141, 2007.3.
- 25) Halil Sezen, Eric J. Setzler: Reinforcement Slip in Reinforced Concrete Columns, ACI Structural Journal, pp.280-289, 2008.5.

(2008年9月18日受付)