

論文 変動軸力と曲げを受ける RC 部材の解析モデルの検討

木村 暁子*¹・真田 靖士*²・前田 匡樹*³・壁谷澤 寿海*⁴

要旨: 鉄筋コンクリート造部材では、鉄筋とコンクリートの付着劣化に伴って鉄筋の拔出変形が生じるが、断面の平面保持仮定に基づく既存のマクロモデル(MSモデル)では、これを直接扱うことができない。本研究では、接合部および部材からの拔出変形を鉄筋の復元力特性のなかで合理的に評価することにより、MSモデルで拔出変形を間接的に扱う方法について検討する。本方法に従い、筆者らによる RC 梁の逆対称載荷実験と比較したところ、実験値と解析値がよい対応を示した。

キーワード: 鉄筋コンクリート部材, 拔出変形, MSモデル, 鉄筋の復元力特性

1. はじめに

鉄筋コンクリート造建物の地震時の挙動を検討するために、部材を簡単なマクロモデルに置き換えて解析を行う方法が一般に使用されている。特に部材に作用する曲げと軸力の相互作用を扱えるモデルとして、MSモデル、ファイバーモデルなどがあげられるが、これらのモデルは断面の平面保持仮定に立脚しているため、付着劣化等により生じる主筋のすべり現象をそのまま扱うことはできない。

本研究では、筆者らが行ったRC梁の逆対称載荷実験^[1]及び前田らが行ったRC梁の逆対称実験^[2]から、鉄筋コンクリート部材では危険断面主筋の拔出変形が無視できないほど大きいことを示し、拔出変形を適切に評価する必要性を指摘する。また、鉄筋の拔出変形を鉄筋の復元力特性のなかで合理的に評価することにより、断面の平面保持仮定に基づく既存のマクロモデルで拔出変形を間接的に扱う方法について検討する。

2. RC部材の挙動

2.1 実験概要

本研究で検討する試験体は、軸方向拘束を

表1 試験体一覧

試験体	b×D	L	K	主筋	横補強筋
2-0	20×30	120	0	4-D13	2-D6@75
1-0		60			4-D6@50
2-400	30×45	180	392	4-D19	2-D10@100
2-100			98		
1-400		90	392		4-D10@75
1-100			98		

L: 内法スパン(cm), K: 軸変形拘束剛性(MN/m)

表2 鉄筋の材料特性

鉄筋径	E_s	σ_y	ϵ_y	σ_u	ϵ_u
D6	174	330	1940	502	14.5
D10	162	362	2280	513	17.8
D13	181	338	1890	481	22.7
D19	183	374	2090	516	21.1

※D6, D13の鉄筋種はSD295, D10, D19の鉄筋種はSD345

E_s : 初期剛性(GPa), σ_y : 降伏強度(MPa),

ϵ_y : 降伏歪(μ), σ_u : 引張強度(MPa), ϵ_u : 破断歪(%)

表3 コンクリートの材料特性

試験体	σ_B	ϵ_{cu}	E_c	F_t
2-0	31.1	2020	27.0	2.75
1-0	34.5	2270	27.1	2.77
2-400	33.3	2100	27.3	2.79
2-100	37.2	2270	28.2	2.88
1-400	38.9	2210	28.7	2.93
1-100	38.6	2260	27.4	2.80

σ_B : 圧縮強度(MPa), ϵ_{cu} : 圧縮強度時歪(μ),

E_c : $\sigma_B/3$ 割線剛性(GPa), F_t : 割線引張強度(MPa)

*1 横浜国立大学大学院 工学研究科 計画建設学専攻

(正会員)

*2 東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻

(正会員)

*3 横浜国立大学 助教授 工学部 建設学科 博士(工学)

(正会員)

*4 東京大学地震研究所 教授 工博

(正会員)

受ける試験体を含むせん断スパン比(1, 2)と軸方向変形拘束剛性(0tf/cm, 100tf/cm, 400tf/cm)をパラメータとした計6体^{[1], [2]}である。(以下, 例えば, せん断スパン比 2, 軸方向拘束剛性が100tf/cm の試験体ならば 2-100 のように表す) 各試験体の一覧を表1に示す。表2, 表3には, 材料試験より得られた鉄筋およびコンクリートの材料特性をそれぞれ示す。

2.2 曲率分布

図1に, 主筋降伏時の材軸に沿った曲率分布を示す。図中には, 危険断面曲率を断面解析による降伏時曲率 ϕ_y とした三角形曲率分布も示した。実験による危険断面近傍曲率は断面解析による曲率よりも著しく大きい。これは, コンクリートと鉄筋の付着劣化による鉄筋の部材または接合部からの抜出を断面解析で考慮していないことが原因であり, 鉄筋コンクリート造部材の解析では, 鉄筋の抜出を適切に評価する必要があることを示している。

また, 表4に鉄筋降伏時の全体変形に対する各変形成分の割合を示す。いずれの試験体とも, 鉄筋の抜出変形が全体変形の30%~50%を占め, 無視することのできない値となっていることがわかる。

表4 鉄筋降伏時の各変形成分の割合

	2-0	1-0	2-400	2-100	1-400	1-100
曲げ変形(%)	45.0	7.78	41.1	27.0	10.6	19.9
抜出変形(%)	36.2	52.4	32.0	49.4	50.8	52.2
せん断変形(%)	18.8	39.8	26.9	23.6	38.6	27.9

2.3 抜出変形の評価

主筋の抜出量は, 接合部からの主筋の抜出量と部材からの主筋の抜出量の2つに分類し検討を行った。2つの抜出量について実験値を算出し, それらの評価法を一例ずつ挙げ, 実験値と計算値の比較を行う。

2.3.1 接合部からの主筋の抜出量

図2に実験において測定した主筋降伏時のひずみ度分布を示す。また, 危険断面位置を降伏ひずみ度とした三角形分布も併せて示した。

実験値: 図2に示すように, 実験により得られたスタブ内ひずみ測定区間の主筋のひずみ度 ε を材軸方向に積分したものを, 接合部からの主筋の抜出量 S_j として式(1)で求める。得られた上端, 下端筋の接合部からの抜出量の平均値を接合部からの抜出量 S_j とする。

$$S_j = \int_0^l \varepsilon dx \quad (1)$$

ε : スタブ内ひずみ測定区間での主筋ひずみ度

l : スタブ内のひずみ測定区間

計算値: 主筋の接合部からの抜出量 S_j は「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針」^[3](以下, 靱性指針)の評価式を用いた。式(2)~(4)は, 十字型柱梁接合部に通し配筋された主筋の抜出量を評価する式であり, 本来, 本実験のようなスタブ内に定着された主筋は対象外であるが, 以下の仮定を設けて適用した。すなわち, 図2に示すように, スタブ内の主筋の定着長さが概ね梁せい D に等しいことから, 式(3)により附着

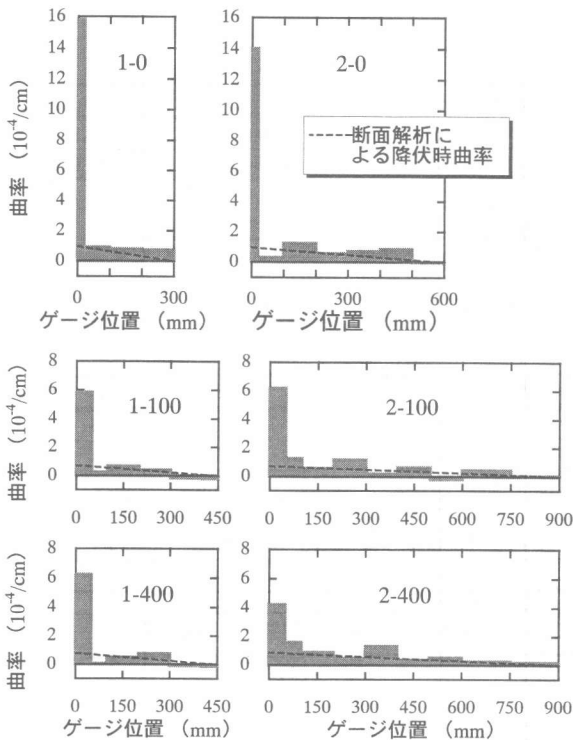


図1 鉄筋降伏時の曲率分布

指標 u_b を求める際には、柱せい $D_c = 2D$ ，式(4) によって ΔS を求める際には $D_c = D$ とした。

$$S_y = \begin{cases} (0.368u_b / \sigma_B^{2/3} + 0.733) \cdot \Delta S (\text{上端筋}) \\ (0.321u_b / \sigma_B^{2/3} + 0.463) \cdot \Delta S (\text{下端筋}) \end{cases} \quad (2)$$

$$u_b = (1 + \gamma) \cdot (\sigma_y \cdot d_b) / 4D_c \quad (3)$$

$$\Delta S = \varepsilon_y \cdot D_c / 2 \quad (4)$$

ただし、 d_b : 主筋径、 γ : 腹筋比、 D : 梁せい、 D_c : 柱せい、 ε_y : 主筋の降伏ひずみ

図 3 に接合部からの主筋拔出量の実験値 S_j と計算値 S_y の比較を示す。いずれの試験体についても実験値と計算値が概ねよい対応を示している。

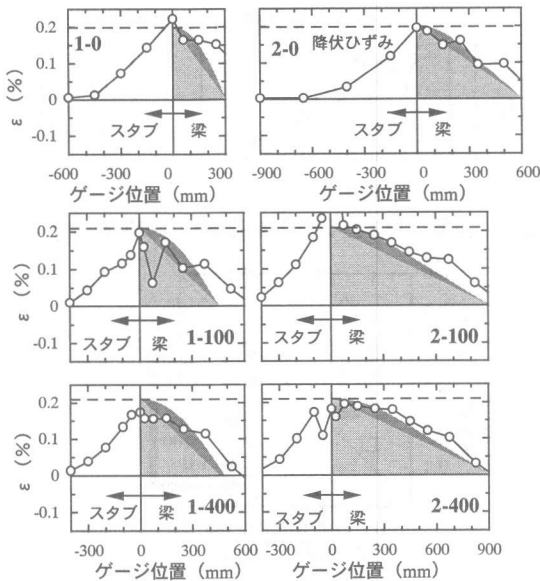


図 2 降伏時の主筋ひずみ分布

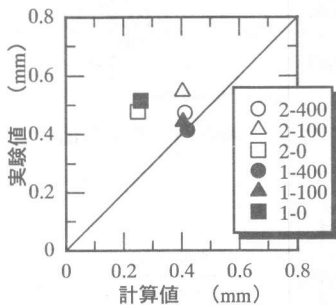


図 3 接合部からの主筋の拔出量の比較

2.3.2 部材内主筋ひずみシフトによる拔出量

寺岡ら^[4]、姜・北山^[5]は、梁部材内の引張主筋のひずみ分布が曲げ解析によるひずみ分布に対して引張側にシフトし、これにより部材に付加変形が生じることを指摘している。主筋ひずみシフトは、ヒンジ領域におけるトラス機構の角度の変化や部材内の付着割裂による付着応力度の低下により生じると考えられる。図 2 に示すように、本実験の各試験体でも主筋のひずみシフトが生じていた。本研究では、主筋ひずみシフト（危険断面を降伏ひずみ ε_y とした三角形分布に対するひずみの増分と定義）による主筋の伸びを危険断面に集中させて、ひずみシフトによる主筋の拔出量と定義する。

実験値：部材内主筋ひずみシフトによる主筋の拔出量 S_b ^[4] は実験により得られた主筋のひずみ度を材軸方向に積分したのから主筋の降伏ひずみ度（材料試験値）を危険断面ひずみ度とした三角形ひずみ分布の面積を差引いたものとし、式(5)で表される。

$$S_b = \int_0^a \varepsilon dx - \varepsilon_y \cdot \frac{a}{2} \quad (5)$$

ただし、 d_b : 部材からの主筋の拔出量、 ε : 部材内の主筋のひずみ度、 ε_y : 主筋の降伏ひずみ度（材料試験値）、 a : せん断スパン、 d : 有効せい、 x_n : 断面解析より求まる中立軸距離

計算値：ひずみシフトによる主筋の拔出量 S_s は、市之瀬の研究^[6]を参考に部材内の付着応力度分布を仮定して求めた。市之瀬は、危険断面での平面保持曲げ解析による圧縮力の釣り合いから、図 4 に示すようにヒンジ領域でトラス機構の傾斜角が変化し、危険断面付近で付着応力度が低下するせん断抵抗機構を提案している。本研究では、これを参考に図 4 に示した付着応力度分布を仮定した主筋のひずみ分布を求め、ひずみシフトによる主筋の拔出量を算出する。すなわち、図 4 のように危険断面では付着応力度がゼロ、危険断面から j_i の位置で τ_b に達するような付着応力度分布を仮定する。危険断面のひずみ度を降伏ひずみ度 ε_y 、反曲点位置のひずみ度を 0 とし、主筋のひずみ度分布を求めてひずみシフトによる主筋の拔出量

S_s を以下の式(6)~(7)により算定した。

$$\tau_b = \frac{\varepsilon_y \cdot A_{st} \cdot E_s}{\varphi(a - j_t/2)} \quad (6)$$

$$S_s = \frac{\tau_b \cdot \varphi}{E_s A_{st}} \left(\frac{3a^2 - j_t^2}{6} \right) - \frac{\varepsilon_y \cdot a}{2} \quad (7)$$

A_{st} : 引張鉄筋の断面積, φ : 鉄筋の周長

ただし、式(5)による付着応力度 τ_b が付着割裂強度 τ_{bu} を上回る場合には、付着割裂により付着すべりが生じひずみシフトがさらに増加すると考える。すなわち、付着応力度 τ_b が付着割裂強度 τ_{bu} を上回る場合には、付着応力度を付着割裂強度 τ_{bu} として付着長さ a' を求めひずみシフトによる主筋の抜出量 S_s を以下の式(8)~(10)により算定した。ここで、付着割裂強度 τ_{bu} には靱性指針^[3]の付着信頼強度 τ_{bu} を用いた。

$$\tau_{bu} = \frac{\varepsilon_y \cdot A_{st} \cdot E_s}{\varphi(a' - j_t/2)} \quad (8)$$

$$a' = \frac{\sigma_y \cdot A_{st}}{\tau_{bu} \cdot \varphi} + \frac{j_t}{2} \quad (9)$$

$$S_s = \frac{\tau_{bu} \cdot \varphi}{E_s A_{st}} \left(\frac{3a'^2 - j_t^2}{6} \right) - \frac{\varepsilon_y \cdot a}{2} \quad (10)$$

図6にひずみシフトによる主筋の抜出量の実験値 S_b と計算値 S_s の比較を示す。図6に示したように式(7)、(10)による主筋の抜出量 S_s の計算値は、実験値を過小評価している。

3. RC部材の解析

3.1 解析仮定

軸拘束を受ける梁部材の復元力特性について、軸伸び変形および曲げと軸力の相関を考慮できるマルチスプリングモデル(MSモデル)^[7]を材端バネに用いた解析モデルにより解析を行った。

3.1.1 部材のモデル化

試験体を図7に示すようにモデル化した。部材両端危険断面付近(ヒンジ領域)の曲げ非線形挙動を表わすため、部材端部にMSバネを配置した。せん断およびヒンジ領域以外の軸方向の非線型挙動は別途配したせん断バネ、軸バネにより表す。ヒンジ領域の長さはせん断スパンの1/8と仮定した。

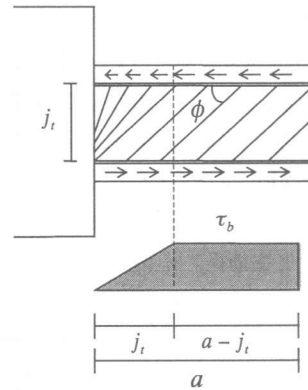


図4 主筋の付着応力度分布

鉄筋のひずみ分布

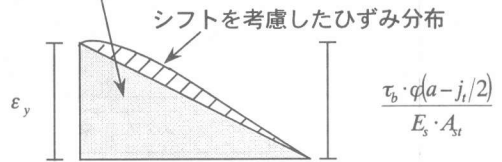


図5 主筋のひずみシフトを考慮したひずみ分布

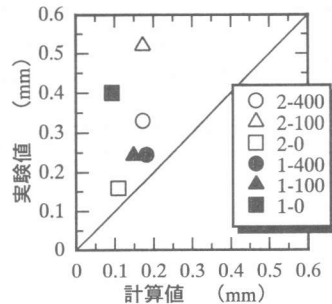


図6 ひずみシフトによる主筋の抜出量の比較

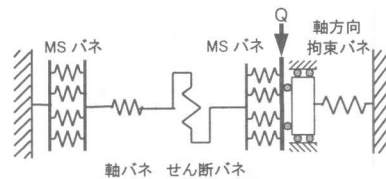


図7 梁部材のモデル化

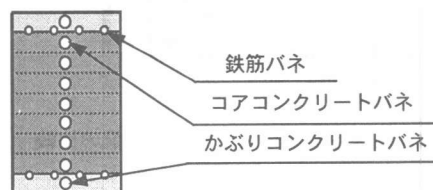


図8 鉄筋バネおよびコンクリートバネの配置

MSパネの鉄筋パネおよびコンクリートパネの配置を図8に示す。鉄筋パネは試験体の配筋と同位置に配し、コンクリートパネは軸方向拘束剛性400tf/cm, 100tf/cmでは断面をせい方向に9層に, 0tf/cmでは10層に分割して配置した。

3.1.2 コンクリートパネの復元力特性

コンクリートパネの復元力特性は、図9に示すように、応力度が圧縮強度 σ_B の1/3で剛性低下し、圧縮強度 σ_B 以降は耐力低下するモデルとした。ひび割れ強度は圧縮強度の1/10とした。圧縮側第一折れ点の変形 D_{cd} は、部材の初期剛性を弾性剛性と一致させるよう以下の式(11)によった。

$$D_{cd} = \frac{\sigma_B/3}{E_c} \cdot L_p \quad (11)$$

ただし、 L_p ：ヒンジ長さ ($L_p = a/8$ とした)

また、降伏変形 D_{cy} は曲げ解析による降伏時のコンクリート圧縮ひずみ度を危険断面ひずみ度とした三角形ひずみ分布を仮定して以下の式(12)により算出した。

$$D_{cy} = \varepsilon_{cy} \cdot a/2 \quad (12)$$

ただし、 ε_{cy} ：引張鉄筋降伏時の曲げ解析によるコンクリートの圧縮ひずみ度

圧縮強度以降の耐力低下は、コアコンクリートとかぶりコンクリートを区別して考え、終局変位 μD_{cy} ($\mu = 3$ とした)に対する耐力低下率 λ をそれぞれ0.9および0.7とした。コンクリートの圧縮強度およびヤング係数には材料試験値を用いた。

3.1.3 鉄筋パネの復元力特性

2.2に示したように、実験結果で計測された曲

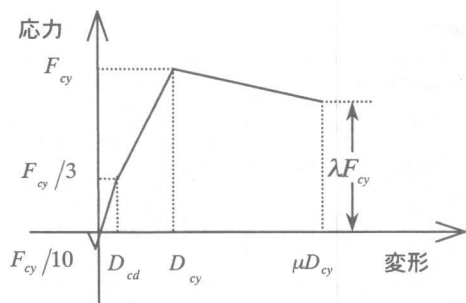


図9 コンクリートの復元力特性

率分布では危険断面近傍に曲率が集中していたことから、鉄筋パネの降伏変形に主筋の拔出による変形を加算し、部材の軸伸び変形を鉄筋パネに集約して評価することとした。

図10に鉄筋パネの復元力特性を示す。鉄筋パネは降伏強度の1/3程度で主筋の拔出しが生じ始めると想定し、降伏強度の1/3で剛性を低下させた。第一折れ点の変形 S_{sr} は、部材の初期剛性を弾性剛性と一致させるよう以下の式(13)によった。

$$S_{sr} = \frac{\varepsilon_y}{3} \cdot L_p \quad (13)$$

ただし、 ε_y ：鉄筋の降伏ひずみ

降伏変形 S_{sy} は式(14)に示すように、曲げ変形のみを考えたときの主筋の伸び S_f (式(15))に、主筋降伏時のスタブからの主筋の拔出量 S_y 、部材内主筋ひずみシフトによる拔出量 S_s を加算することにより算出した。

$$S_{sy} = S_f + S_y + S_s \quad (14)$$

$$S_f = \varepsilon_y \times a/2 \quad (15)$$

スタブからの主筋の拔出量および主筋ひずみシフトによる拔出量には、それぞれ2.3に示した実験値を用いた場合と、計算値を用いた場合の2種類の解析を行った。鉄筋の降伏強度およびヤング係数は材料試験値を用いた。

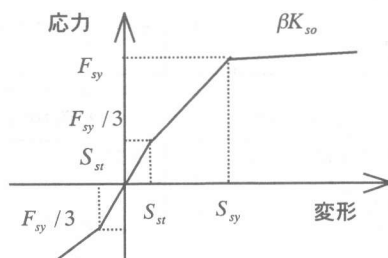


図10 拔出変形を考慮した鉄筋の復元力特性

3.2 解析結果の検討

2.1で述べた6体の試験体について、梁端にMSパネを設定した解析モデルにより、一方単調荷重解析を行った。解析には非線形解析プログラム「CANNY-C」^[7]を用いた。

各試験体のせん断力-部材角の関係の解析結果および実験結果の正側包絡線の比較を図11に

示す。各試験体とも、初期剛性および主筋降伏時の耐力・変形は実験結果と概ねよく一致する。主筋の拔出量に実験値を用いた場合と、計算値を用いた場合で解析結果の荷重-変形角関係にはあまり顕著な差は認められなかった。降伏点以降は、特にせん断スパン比が2の試験体 2-100, 2-400の解析結果は実験のせん断耐力よりも低かった。これは、図12の軸方向変形と部材角の関係に示したように、降伏点以降の軸方向変形を解析が実験値と比較してやや低いため、梁部材に生じる軸力を実験結果よりも低く評価するためである。実験結果では、軸方向拘束剛性 400tf/cm の試験体は部材角 2%程度で、100tf/cm の試験体は部材角 3%程度で、0tf/cm の試験体は 4%程度で繰り返し载荷中にコンクリートの圧壊やせん断破壊（付着割裂破壊）が生じて軸方向に縮み始め、耐力低下した。実験では最大耐力以降急激に耐力低下するのに対して、解析結果はほぼ一定の耐力を維持するのは、くり返し载荷による影響を考慮していないこと、また、解析を安定させるため、コアコンクリートの耐力低下率 $\lambda=0.9$ と緩やかに耐力低下させているためである。

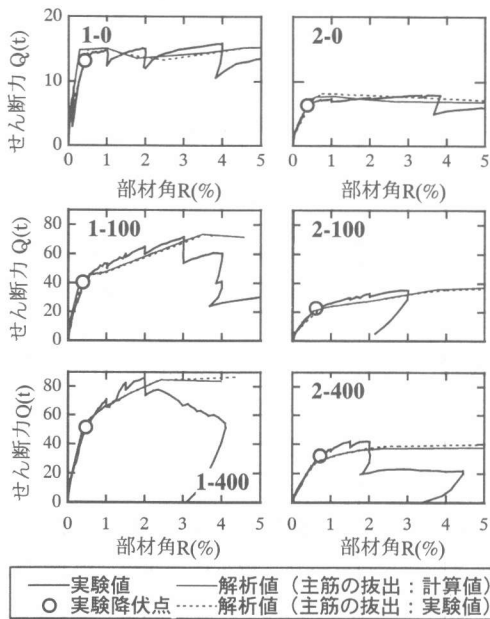


図11 せん断力-部材角関係

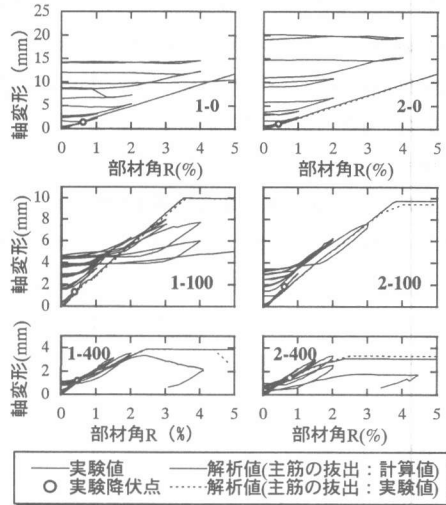


図12 軸変形-部材角関係

4. まとめ

- (1) RC造部材の逆対称载荷実験により得られた全体変形のなかで主筋の拔出しによる付加回転変形の占める割合は30~50%程度であった。
- (2) 本研究で算定した付着応力度分布に基づく主筋のひずみシフトによる拔出量（部材からの拔出変形）は実験値を過小評価した。
- (3) 鉄筋の復元力特性の中で鉄筋の拔出変形を間接的に評価する方法について検討した。本方法を用いて実験で用いた試験体を解析したところ、主筋降伏時の耐力および変形を比較的精度よく追跡することができた。

【謝辞】

本研究で行った実験の一部は、文部省科学研究費・基礎研究A1「鉄筋コンクリート造建築物の終局強度型性能設計法」(研究代表者：小谷俊介 東京大学大学院教授，課題番号：08305022)によるものである。また、実験全般を通して大成建設株式会社・幸村信行氏，横浜国立大学文部技官・中村雄一氏，同大学大学院生・文野正裕氏の多大な協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

【参考文献】

- [1] 文野正裕他：軸方向変形拘束を考慮したRC梁部材の挙動に関する実験研究，コンクリート工学年次論文報告集，1999年。
- [2] 前田匡樹他：鉄筋コンクリート梁部材の変形評価法に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，第19巻，2号，1997年。
- [3] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の靱性保証型耐震設計指針(案)・同解説，1997年7月。
- [4] 寺岡勝他：RC造内柱・梁部分架構における梁部材の降伏変形の評価，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.16, No.2, 1994。
- [5] 北山和宏：主筋拔出しを考慮した柱・梁部材の降伏変形推定法，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，1990.5。
- [6] 市之瀬敏勝：RC部材の危険断面近傍でのトラス機構，日本建築学会構造系論文報告集，No.475, 1995.9。
- [7] Li Kang-Ning: 「Canny-CJ, A Computer Program for 3D Nonlinear Dynamic Analysis of Building Structure, November 1993.