

# 論文 曲げ降伏後にせん断破壊する RC 柱の非弾性挙動をシミュレートする改良ファイバーモデルの構築

尾崎 英介<sup>\*1</sup>・今井 究<sup>\*2</sup>・田嶋 和樹<sup>\*3</sup>・白井 伸明<sup>\*4</sup>

要旨：曲げ降伏後にせん断破壊する RC 柱の弾塑性変形性状を推定するために，RC 柱部材の静的繰返し載荷実験を対象として，FEM 解析を通じて破壊メカニズムを解明し，ファイバーモデルの改良点を検討した。簡易で汎用性のあるファイバーモデルの利点を活かすために，ヒンジ領域のせん断挙動と接合部の回転挙動を単純な材端パネで表現することにした。また，各材端パネの特性は，画像計測結果から求められることを確認し，併せてそれらの推定方法についても検討した。その結果，単調解析により復元力特性を良好に評価できた。一方，繰返し解析では履歴を模擬するための課題について検討した。

キーワード：鉄筋コンクリート柱，画像計測，変形分離，3次元 FEM，ファイバーモデル，サブ要素

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 造建物において，崩壊に直結する柱部材の軸力支持能力の喪失は，建物の安全性を検討する上で極めて重要である。しかし，RC 造柱の残存耐震性能に関する研究は限られている。例えば，田村ら<sup>1)</sup>の研究など，実験的な研究を中心に RC 造柱の残存耐震性能が確認されているものの，実験の制約上，実験データが不足しているのが現状である。

本研究の目的は，簡易で汎用性のある数値解析モデルを構築し，解析的な検討を通じて RC 造柱の残存耐震性能の評価手法を確立することである。RC 造柱の残存耐震性能の評価方法は現在，耐震性能評価指針<sup>2)</sup>に提案されており，復元力特性に基づきエネルギー量を評価する。そのため，RC 造柱の代表的な弾塑性変形性状(曲げ，せん断，曲げ降伏後のせん断)を精度良く模擬できる解析モデルを構築し，復元力特性を評価することが重要になる。

本研究では，ユーザーが容易に入手可能な汎用コードの利用と可能な限り単純な解析モデルの構築という2つの方針を掲げ，オープンソースである汎用コード OpenSees<sup>3)</sup>を利用し，ファイバーモデルを基本とした解析モデルの構築を試みる。

本報では，曲げ降伏後にせん断破壊する RC 柱部材の静的繰返し載荷実験を対象として，3次元非線形 FEM 解析を通じて RC 柱部材の破壊メカニズムを解明し，ファイバーモデルに付加すべきモデルとそのモデル化の具体的な方法について検討する。最後に，一連の検討によって改良したファイバーモデルを検証するために，単調解析および繰返し解析を行い，復元力特性の評価の妥当性と今後の課題について確認する。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

RC 造柱の静的繰返し載荷実験<sup>4)</sup>を解析対象とする。作用軸力は 250kN(軸力比 0.15)で一定とした。本報では，曲げ降伏後にせん断破壊した試験体のみを解析対象とする。図 - 1 に試験体概要，表 - 1 に試験体強度計算値を示す。なお，せん断余裕度は，せん断強度を曲げ強度で除して求めた。せん断強度は荒川(mean)式<sup>5)</sup>を用いて算出した。曲げ強度は，RC 規準<sup>5)</sup>(P.115, 式 15.11)より求まる降伏曲げモーメントをせん断スパンで除して算出した。

### 2.2 載荷装置および測定方法

図 - 2 に載荷装置全体図を示す。供試体の上下に設けた加力用のスタブを反力床に固定したベースおよび加力用 L 字ビームに PC 鋼棒で圧着し，鉛直および水平方向に追従する機構とした。軸力は，鉛直方向に取り付け

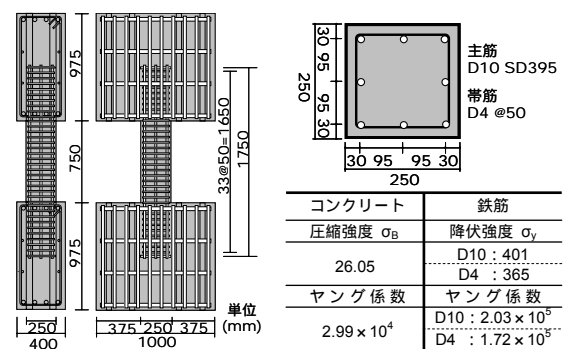


図 - 1 試験体概要

表 - 1 試験体強度計算値

せん断強度(kN)	曲げ強度(kN)	せん断余裕度
122.4	116.1	1.05

\*1 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (正会員)

\*2 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (正会員)

\*3 日本大学 理工学部建築学科助教 博士 (工学) (正会員)

\*4 日本大学 理工学部建築学科教授 工博 (正会員)

た 2 機の軸力用アクチュエータ (400kN) を用い、上下のスタブに回転が生じないように定軸力を作用させた。水平加力は反力壁に取り付けたアクチュエータ (400kN) を使用し、加力用 L 字ビームを介して水平変位  $\pm 1\text{mm}$  (部材角  $\pm 0.13\%$ ) の増分変位を順次与え、軸力保持能力の喪失に至るまで、供試体に逆対称曲げとなる正負繰返しせん断力を作用させた。なお、アクチュエータの水平加力による加力 L 字ビームの回転を防ぐため、パンタグラフを設けた。

荷重は、アクチュエータに組み込まれたロードセルを用いて検力した。水平方向の変位はレーザー変位計を用いて上下スタブ間の相対変位を測定し、軸方向の伸縮量は巻取変位計により測定した。

### 2.3 実験結果

図 - 3 に水平荷重 ( $P$ ) - 水平変位 ( $\delta_H$ ) 関係を示す。 $\delta_H = 1.0\text{mm}$  へ向かうサイクル時に柱脚に曲げひび割れが発生し、 $\delta_H = 3.9\text{mm}$  の時に柱端部の主筋の引張降伏が起こり、柱頭に曲げせん断ひび割れが発生した。その後、主筋の圧縮降伏 ( $\delta_H = 5.2\text{mm}$ )、帯筋の降伏 ( $\delta_H = 6.4\text{mm}$ ) が起こり、付着割裂ひび割れが柱頭に発生した。正負ともに  $\delta_H = 10\text{mm}$  の時に最大耐力に達しており、正側で  $120.2\text{kN}$ 、負側で  $-121.7\text{kN}$  であった。最大耐力到達後は緩やかな耐力低下を示し、 $\delta_H = 23\text{mm}$  へ向かうサイクル時に柱頭のかぶりコンクリートが崩れ落ちた。

## 3. FEM 解析によるファイバーモデルの改良点の考察

### 3.1 ファイバーモデルの検証

ファイバーモデルは曲げに卓越した RC 構造物の解析手段として高い適用性がある。一方、平面保持を仮定するため、鉄筋とコンクリート間の付着を直接考慮できない。また、せん断変形が卓越する部材の場合、せん断挙動を考慮するためのモデル化が別途必要となる。このような特徴を有するファイバーモデルに関して、曲げ降伏後にせん断破壊する RC 柱部材への適用性を検証する。

ファイバーモデルを用いた解析は、汎用コード OpenSees を用いて行う。図 - 4 に解析モデルの概要を示す。11 個のセグメントを設け、試験体を 12 の要素に分割した。柱の断面は  $20 \times 20$  のファイバーに分割した。コンクリート要素には、Fedees マテリアル<sup>6)</sup>を付与した。ただし、引張側は考慮していない。また、鉄筋要素には bi-linear 型の応力 - ひずみ関係を付与した。なお、スタブ部分は剛体としてモデル化した。境界条件は、柱脚を完全固定とし、柱頭では回転のみを固定した。加力は、柱頭に  $250\text{kN}$  の一定軸力を負荷させ、変位制御による一方向水平荷重を行った。

図 - 5 に水平荷重 ( $P$ ) - 水平変位 ( $\delta$ ) 関係を示す。解析結果は、曲げ破壊型の傾向を示しており、実験結果

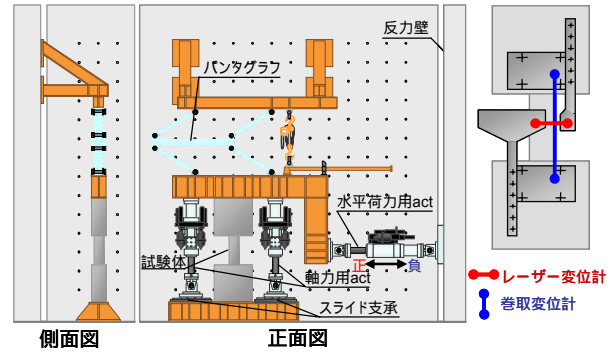


図 - 2 载荷装置全体図

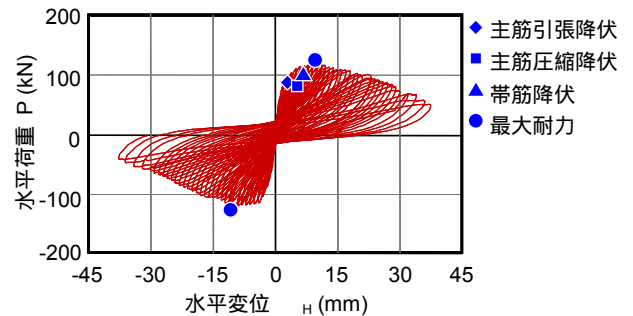


図 - 3 水平荷重 ( $P$ ) - 水平変位 ( $\delta_H$ ) 関係

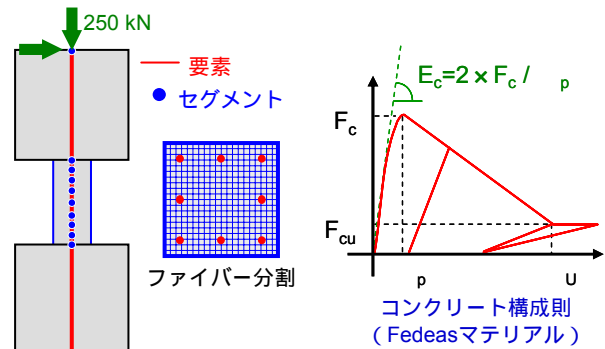


図 - 4 解析モデルの概要

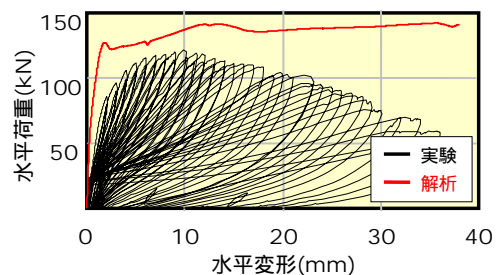


図 - 5 水平荷重 - 水平変位関係

を模擬していない。具体的には、 $20\text{kN}$  近傍からの剛性の低下傾向、最大耐力値および最大耐力以降の耐力低下の傾向を模擬できておらず、これらの事象を表現可能なモデル化について検討する必要がある。

### 3.2.3 次元非線形 FEM 解析による分析

ファイバーモデルの改良点について、より詳細な数値解析法である 3 次元非線形 FEM 解析のモデル化と破壊メカニズムの分析を通じて考察する。

図 - 6 に要素分割図を示す。自重を負荷し、 $250\text{kN}$  の

定軸力をスタブ上部に負荷した後、上部スタブの上下部分に変位制御による一方向水平加力を行った。境界条件は、試験体下面をピン支持とした。表 - 1 に解析モデル一覧を示す。最も単純な Model1 を基本として、主筋 - コンクリート間の付着すべり挙動 (Model2) と実験で発生したスタブ - 柱間のひび割れ (Model3) のモデル化に着目して検討を行った。また、それらを組み合わせることで、スタブ - 柱間の開口部に主筋の抜け出しも考慮した (Model4)。なお、解析には汎用コード DIANA9.3<sup>7)</sup> を用いた。

図 - 7 にコンクリートの構成則を示す。圧縮側は Parabolic で表現し、下降域で囲まれる面積は、圧縮破壊エネルギー  $G_{fc}$  を要素代表長さ  $L_c$  で除した値である。 $G_{fc}$  は中村らの提案式<sup>8)</sup>より求めた。引張側は下降域に大岡ら<sup>9)</sup>の 3 直線モデルを用い、下降域で囲まれる面積は、引張破壊エネルギー  $G_f$  を要素代表長さ  $L_c$  で除した値である。 $G_f$  は大岡らの提案式<sup>9)</sup>より求めた。要素代表長さ  $L_c$  は、要素体積  $V$  と等価な体積をもつ立方体の 1 辺の長さ ( $L_c = V^{1/3}$ ) とした。鉄筋の応力 - ひずみ関係は bi-linear 型モデルとし、降伏後の 2 次剛性は初期剛性の 1/100 とした。コンクリート - 主筋間の付着すべりモデルには、図 - 8 に示す CEB モデル<sup>10)</sup>を用いた。靱性指針<sup>11)</sup>から柱梁接合部内の主筋の付着強度  $\tau_u$  の算出式を適用し、最大付着応力  $\tau_{max}$  を求めた。 $S_1, S_2, S_3, \tau_f$  の値は CEB で定められた値を用いた (Confined concrete, Bond conditions・Good)。図 - 9 にスタブ - 柱間のコンクリートおよび鉄筋のモデル化を示す。スタブ - 柱間の離散ひび割れは、柱せいの半分まで離散化した。離散ひび割れを跨ぐ主筋は節点界面要素でモデル化し、垂直方向では鉄筋の応力 - ひずみ関係を模擬し、せん断方向は弾性を仮定した。一方、離散ひび割れは平面界面要素でモデル化する。垂直方向にはコンクリートの引張応力 - 開口変位関係を付与し、せん断方向には骨材の噛み合い効果などを考慮して、ひび割れ開口後にせん断剛性の 5% を保有させた。

図 - 10 に水平荷重 ( $P$ ) - 水平変位 ( $\delta_H$ ) 関係を示す。最大耐力までの挙動を比較すると、Model1 の場合は剛性・耐力ともに過大評価している。それに対し、鉄筋の付着すべり挙動のみをモデル化した Model2 とスタブ - 柱間のひび割れによる回転挙動のみをモデル化した Model3 の場合、60kN 近傍からの剛性低下の傾向を捉えている。さらに、それらを組み合わせた Model4 の場合、最大耐力まで実験結果を包絡した。なお、最大耐力以降、解析結果は著しい耐力低下を示すが、これはスタブ - 柱間の離散ひび割れを跨ぐ主筋のダボ抵抗のモデル化が不足しているためであると考えられる。図 - 11 に水平変形  $H=10$ mm 時における試験体の破壊状況と主引張りずみ

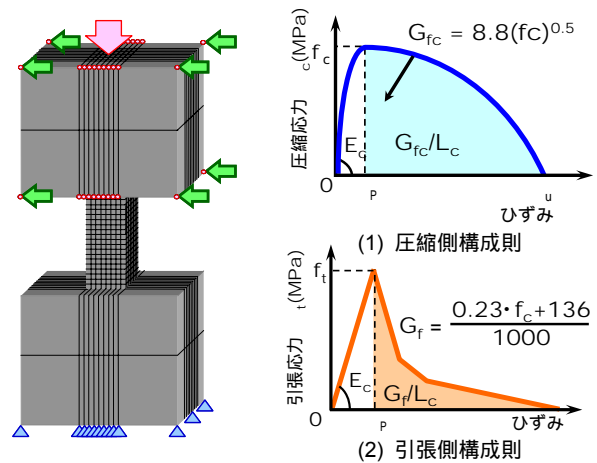


図 - 6 要素分割図

図 - 7 コンクリート構成則

表 - 1 検討した解析モデルの一覧

	Model1	Model2	Model3	Model4
コンクリート	ソリッド要素			
主筋	埋め込み鉄筋要素	トラス要素		
帯筋	埋め込み鉄筋要素			
界面	なし	線分界面要素	なし	線分界面要素
コンクリート - 主筋間	完全付着		完全付着	
界面	なし		平面界面要素	
スタブ - 柱間				

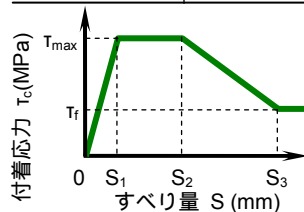


図 - 8 付着すべりモデル

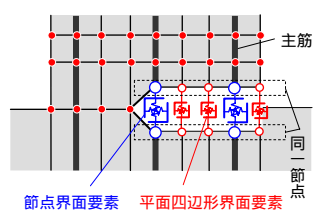


図 - 9 スタブ - 柱間詳細

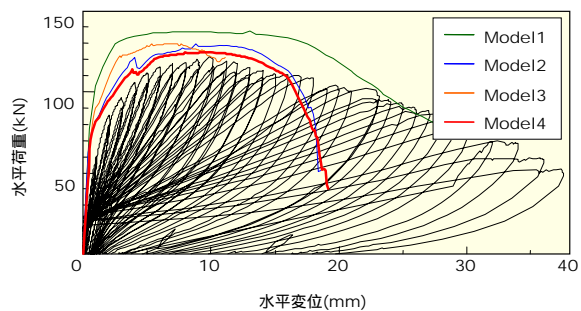


図 - 10 水平荷重 ( $P$ ) - 水平変位 ( $\delta_H$ ) 関係

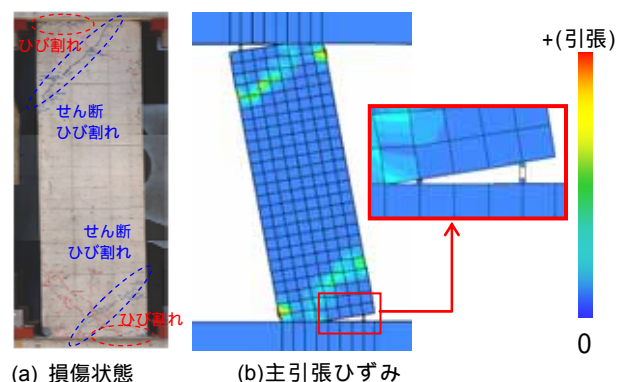


図 - 11 実験と解析の損傷状態の比較 ( $H = 10$ mm 時)

み分布 (Model4) を示す。試験体の損傷状態は、ヒンジ領域のせん断ひび割れとスタブ - 柱間のひび割れが顕著であり、スタブおよび柱からの主筋の抜け出しも確認できる。一方、主ひずみ分布は、主引張ひずみが実験で確認された柱頭柱脚のひび割れによく対応しており、試験体に見られた損傷状態を良好に模擬している。なお、Model2 では主筋のすべり量が柱頭・柱脚で最大となり、Model3 では離散ひび割れによる回転挙動を再現した。両者の組み合わせによって、主引張ひずみ分布と変形挙動が実験結果に対応したことから、Model4 の妥当性が確認できた。

以上のことから、スタブからの主筋の抜け出し挙動およびスタブ - 柱間のひび割れによる回転挙動のモデル化が重要である。さらに、ヒンジ領域のせん断ひび割れが顕著なため、ヒンジ領域におけるせん断挙動のモデル化も必要である。

#### 4. ファイバーモデルの改良と検証

##### 4.1 せん断および接合部サブ要素の導入

3次元非線形 FEM 解析を通じて、ヒンジ領域におけるせん断挙動のモデル化およびスタブ - 柱間のひび割れによる回転挙動と主筋の抜け出しのモデル化が必要であることを確認した。これらのモデル化を行うにあたり、本研究ではファイバーモデルに Filippou ら<sup>12)</sup>のせん断サブ要素(せん断パネ)および接合部サブ要素(回転パネ)を導入する(図 - 12)。なお、これらのサブ要素は、OpenSees 内に組み込まれている。

##### 4.2 実験に基づくサブ要素の特性

せん断サブ要素にはせん断力 - せん断変形関係を、接合部サブ要素には曲げモーメント - 回転角関係を付与する。これらの特性を求めるために、新たに RC 柱部材の静的繰返し水平載荷実験を実施した。さらに、画像計測によって変形成分を分離し、直接実験からサブ要素の特性を求める。実験内容は2章で示した既往の実験と同様である。画像計測方法も既往の研究<sup>4)</sup>と同様であるが、計測区間と変形成分分離の方法が異なっている。ヒンジ領域のせん断変形成分を詳細に求めるため、計測区間は図 - 13 に示すような6区間とした。曲げ変形成分( $\delta_F$ )およびせん断変形成分( $\delta_S$ )を画像計測から求め、全体変形からそれらを差し引いて回転変形成分( $\delta_R$ )を求めた。図 - 14 に計測区間における曲げ変形成分およびせん断変形成分の算出方法を示す。

図 - 15 にせん断サブ要素ならびに接合部サブ要素の特性を示す。ここでは、画像計測から求めた  $H=10\text{mm}$  までの関係をいずれも3直線でモデル化し、サブ要素に付与した。図 - 16 にサブ要素を組み込んだファイバーモデルの解析結果を示す。解析結果が実験結果の包絡線を

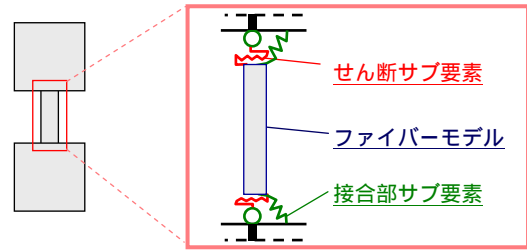


図 - 12 せん断サブ要素と接合部サブ要素

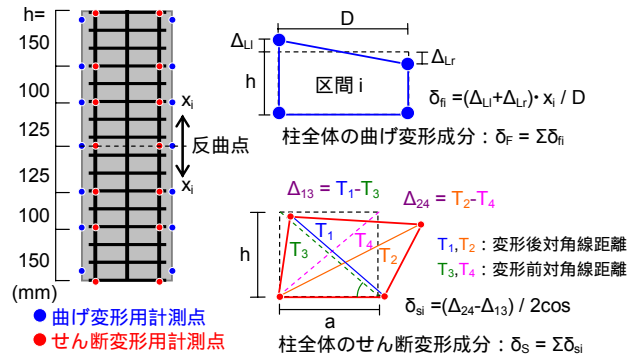


図 - 13 計測区間

図 - 14 変形成分算出法

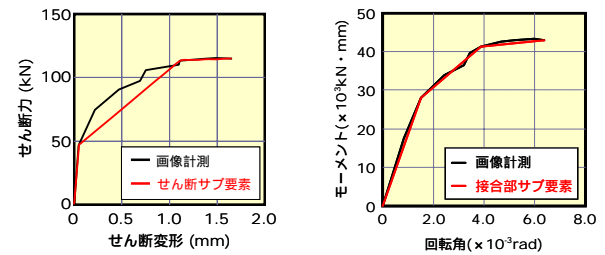


図 - 15 画像計測から求めたサブ要素の特性

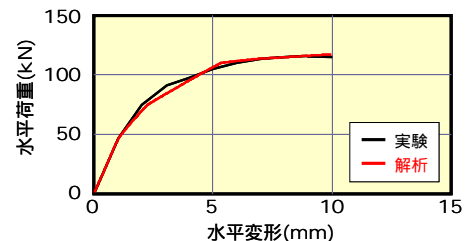


図 - 16 サブ要素の特性の検証

良好に模擬していることから、変形成分に基づいてサブ要素の特性を決定できることが確認できた。しかし、実際の建物の柱では、変形成分の分離は困難である。そのため、サブ要素の特性の算出法を構築する必要がある。

##### 4.3 せん断サブ要素の特性の算出法

Collins らによる修正圧縮場理論<sup>13)</sup>を用いて、鉄筋とコンクリートの材料特性および鉄筋比から、せん断力 - せん断ひずみ関係を求め、せん断サブ要素の特性を導く。さらに、Elwood ら<sup>14)</sup>が提案するせん断および軸力限界曲線を導入し、最大耐力以降の軟化挙動も追従可能とする。限界状態曲線は、せん断力または軸力と水平変位の関係において、柱の応答値との交点により破壊点を与える。せん断限界状態曲線は(2)式により定義される。

$$\frac{\Delta_s}{L} = \frac{3}{100} + 4\rho'' - \frac{1}{500} \frac{v}{\sqrt{f'_c}} - \frac{1}{40} \frac{P}{A_g f'_c} \geq \frac{1}{100} \quad (2)$$

ここで、単位系は psi units である。また、 $L$ ：柱の長さ、 $\rho''$ ：帯筋比、 $v$ ：せん断応力、 $f'_c$ ：コンクリート強度、 $P$ ：軸力、 $A_g$ ：断面積である。一方、軸限界状態曲線は(3)式により定義される。

$$\frac{\Delta_a}{L} = \frac{4}{100} \frac{1 + (\tan \theta)^2}{\tan \theta + P \left( \frac{s}{A_{st} f_{yt} d_c \tan \theta} \right)} \quad (3)$$

ここで、 $\theta$ ：臨界ひび割れ角度（65°に仮定）、 $s$ ：帯筋間隔、 $A_{st}$ ：帯筋断面積、 $f_{yt}$ ：帯筋降伏強度、 $d_c$ ：帯筋の中心から中心までの距離である。なお、 $\Delta_s$  および  $\Delta_a$  はせん断破壊または軸破壊が生じる際の水平変形であり、全体変形として与えられる。これをせん断サブ要素に組み込むために、全体変形に対するせん断変形成分の割合を乗じ、せん断変形成分に変換した。図 - 17 にせん断サブ要素の特性を示す。修正圧縮場理論に基づいて求めたせん断力 - せん断変形関係は画像計測結果と近似しており、せん断サブ要素の特性を求める手法として妥当であると考えられる。なお、最大荷重到達後の勾配は、せん断破壊点と軸破壊点を結ぶ直線の傾きとした（図 - 18）。

#### 4.4 接合部サブ要素の特性の算出法

接合部サブ要素の特性は、降伏前剛性および降伏時の回転角を算出して求める。図 - 19 に降伏前剛性の算出手法の概念図を示す。鉄筋の定着領域において三角形の付着応力分布を仮定し、以下の式から決定した。

$$K_{joint} = \frac{M}{\theta}, \quad \theta \approx \frac{s}{h} \quad (4)$$

$$F = k \cdot s = \frac{E_s \cdot 4\pi \cdot \mu \cdot d_b \cdot s}{2f_y} \quad (5)$$

ここで、 $F$ ：抜け出し力、 $s$ ：抜け出し量、 $k$ ：鉄筋の線形付着剛性、 $E_s$ ：鉄筋の弾性係数、 $\mu$ ：定着領域の平均付着応力、 $d_b$ ：鉄筋径、 $f_y$ ：鉄筋の降伏応力、 $\theta$ ：抜け出しによる回転角、 $h$ ：鉄筋間の距離、 $K_{joint}$ ：接合部降伏前剛性、 $M$ ：降伏時モーメントである。なお、降伏時モーメントは RC 規準<sup>5)</sup>(P.115 式 15.11)から求め、付着応力は CEB<sup>10)</sup>より  $\mu = 2.5\sqrt{f_c}$  ( $f_c$ ：コンクリート強度)を用いて算出した。一方、降伏時の回転角は、靱性指針<sup>11)</sup>より柱梁接合部からの主筋の抜け出し量を定量化する式を利用して求めた。図 - 20 に接合部サブ要素の特性を示す。本手法により求めた接合部サブ要素の特性は、画像計測結果を近似していることが確認できる。なお、降伏以降の勾配については、画像計測結果を包絡するような傾きを仮定した。この傾きは降伏前剛性の 1/25 である。

#### 4.5 単調解析によるモデル化の検証

前項で示したサブ要素の特性の算出手法を検証するため、ファイバーモデルにサブ要素を組み込んだ解析を

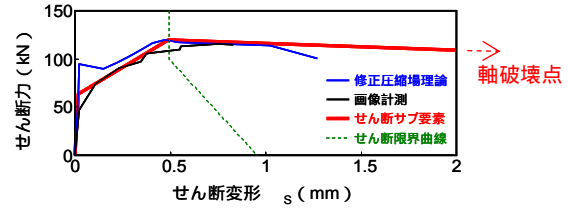


図 - 17 せん断サブ要素の特性

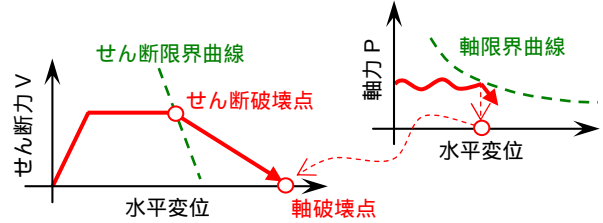


図 - 18 せん断および軸限界曲線の導入

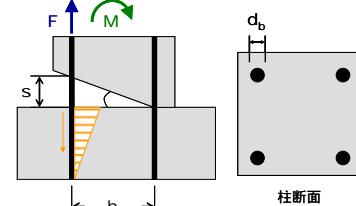


図 - 19 降伏前剛性の算出手法の概念<sup>12)</sup>

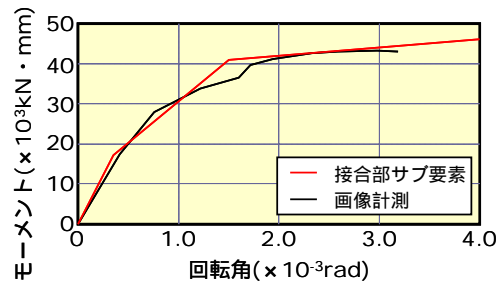


図 - 20 接合部サブ要素の特性

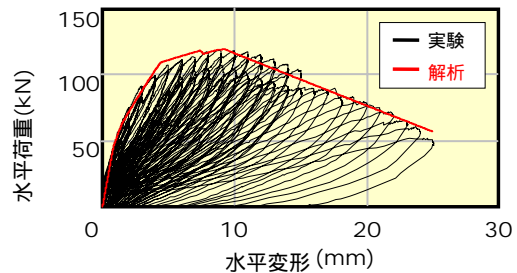


図 - 21 サブ要素の特性の算出方法の検証

実施した。図 - 21 に解析結果を示す。なお、軸支持能力を喪失するまで載荷した試験体では初期の計測に不備があったため、残存軸耐力を確認するために  $\delta_H = 15\text{mm}$  まで載荷した同一形状・配筋の試験体の結果を重ねた。解析結果は、実験結果を良好に模擬しており、サブ要素の特性の算出方法の妥当性が確認できた。また、ファイバーモデルを用いて、曲げ降伏後にせん断破壊する RC 柱の復元力特性を評価できることを確認した。

#### 4.6 繰返し解析結果と今後の課題

最後に、サブ要素を組み込んだファイバーモデルを用いて、繰返し解析を実施する。接合部サブ要素に対して

は、除荷時剛性を初期剛性と等しくし、最大荷重点を指向する履歴特性を付与する。せん断サブ要素に関しては、OpenSees に組み込まれた履歴モデルを利用する。除荷時剛性は図 - 22、ピンチングに関しては図 - 23 に示すように設定した。係数  $p_x, p_y$  は画像計測から得られたせん断力 - せん断変形関係の履歴曲線から同定し、 $\mu = 0.74$ ,  $p_x = 0.78$ ,  $p_y = 0.54$  となった。解析結果を図 - 24 に示す。解析結果は、実験結果の骨格曲線、降伏挙動を良好に捉えているが、塑性域では除荷の傾向に差異が見られる。この影響により、解析結果は実験結果よりも膨らみのある履歴となっている。以上のことから、今後、除荷時剛性のモデル化について検討が必要であると考えられる。

## 5. まとめ

- 1) FEM 解析による破壊メカニズムの分析を通じ、ヒンジ領域のせん断挙動とスタブ - 柱間のひび割れによる回転挙動および主筋の抜け出しのモデル化が重要であることを確認した。
- 2) ファイバーモデルにサブ要素を組み込み画像計測による変形分離結果を特性として付与した結果、復元力特性を良好に評価できた。
- 3) せん断サブ要素の特性は修正圧縮場理論より、接合部サブ要素の特性は付着応力などから算出する手法を構築し、その妥当性を確認した。
- 4) 繰返し解析においては除荷時剛性およびピンチングのモデル化について検討する必要がある。

## 謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金（基盤研究(C) 代表者:白井伸明)の助成を受けて行われたものであり、一部は文科省学術フロンティア推進事業（日本大学理工学部）: 研究課題「環境・防災都市に関する研究（研究代表者:石丸辰治）」の一環として実施したものである。また、研究の遂行にあたり、日本大学理工学部の安達洋教授、中西三和教授より多くの助言を受けた。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 岩本純一, OUSALEM Hassane, 田才晃, 壁谷澤寿海: 柱の軸力保持限界に関する影響因子の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.349-354, 2003.7
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説, 2004.1
- 3) Open System for Earthquake Engineering Simulation <http://opensees.berkeley.edu/index.php>
- 4) 田嶋和樹, 白井伸明, 石森昭行: 破壊モードが異なる鉄筋コンクリート柱部材の画像計測に基づく損傷評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3,

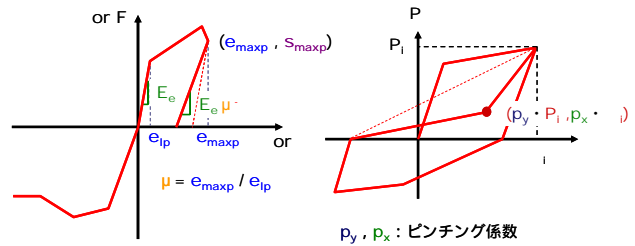


図 - 22 除荷時剛性の設定 図 - 23 ピンチング係数

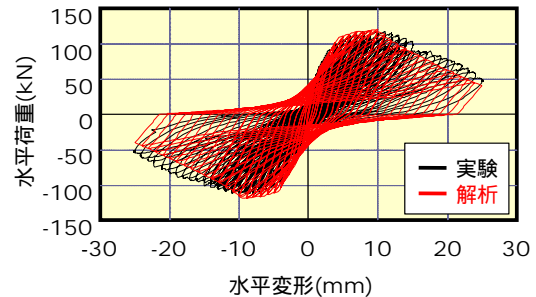


図 - 24 繰返し解析結果

pp. 169-174

- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1999
- 6) Concrete01-Material <http://opensees.berkeley.edu/OpenSees/manuals/usermanual/index.html>
- 7) DIANA Foundation Expertise Center for Computational Mechanics: DIANA Finite Element Analysis User's Manual, TNO Building and Construction Research., 2002
- 8) Nakamura, H., and Higai, T.: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471 ~ 487, 1999.10
- 9) 大岡督尚, 橋高義典, 渡部憲: コンクリートの破壊パラメータに及ぼす短繊維混入および材齢の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 529 号, pp.1-6, 2000.3
- 10) CEB: CEB FIP MODEL CODE 1990 DESIGN CODE, Thomas Telford Service Ltd, 1993
- 11) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 2003
- 12) Filip C. Filippou: Nonlinear Static and Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Subassemblages, UBC/EERC-92/-8, 1992.8
- 13) Frank J. Vecchio, Michael P. Collins: The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI JOURNAL, 1986
- 14) Kenneth John Elwood and Jack P. Moehle: Shake Table Tests and Analytical Studies on the Gravity Load Collapse of Reinforced Concrete Frames, 2003.11