

# 論文 三次元有限要素法における RC 部材の主筋座屈とかぶり剥落

奥野太志郎\*1・佐藤裕一\*2・長沼一洋\*3・金子佳生\*4

**要旨:** 三次元有限要素法において, (1) RC 部材の主筋座屈とかぶり剥落の判定に必要なプログラム内処理を自動化した。(2) 線材要素主筋に対し, モデル作成時の入力情報の制約を考慮した座屈長さ等の算定式を提案し, 座屈後の圧縮漸減経路と再引張時の回復経路からなる平均応力-ひずみ関係を適用した。(3)かぶり剥落については, かぶり部分の自動認識機能とともに, 消費エネルギーに基づく剥落基準を適用した。以上の方法を, 梁試験体とフラットスラブ架構試験体の解析において検証し, 適切に動作することを確認した。

**キーワード:** 三次元非線形有限要素法, 分散ひび割れモデル, 疑似離散型ひび割れモデル (DLCM)

## 1. はじめに

RC 部材の曲げ耐力の低下, 曲げ降伏後のせん断破壊, 主筋破断等の現象に先行してしばしば主筋座屈やかぶりコンクリートの剥落が観察される<sup>1)</sup>。主筋座屈は, 圧縮負担能力を低下させ, 変形反転後も座屈たわみが解消されるまで引張負担能力が回復しない。また塑性座屈たわみによる疲労が主筋破断を早める可能性も考えられる。さらに主筋座屈と同時に観察されるかぶりコンクリート剥落も, 部材圧縮縁の応力負担能力減退をもたらす要因の一つである。これらの現象を詳細に追跡しようとする場合, 実験的手法による変形やひずみ計測の観測には制約が多いため<sup>例えば 2)</sup>, ファイバーモデルによる曲げ解析や有限要素法が併用されることが多い。ファイバーモデルは幅広く使われているが, 主筋座屈発生時には鉄筋周囲の付着劣化も進行しており, 平面保持仮定の適用限界に注意を要する。有限要素法であれば付着劣化を考慮できるが, これまでのところ二次元の適用例しか見られない<sup>3,4)</sup>。現在では三次元有限要素法 (3DFEM) による建物全体のモデル化も一般的になっており<sup>5)</sup>, ファイバーモデルによる簡易な取り扱いと並行して, 詳細な 3DFEM における主筋座屈への対応も求められつつある。本研究は既往研究による主筋座屈発生基準, 座屈長さ評価法, 座屈主筋の応力-ひずみ関係の各種モデルを検討し, これらを 3DFEM プログラムにおいて自動処理する手法を再構築し, さらにかぶり剥落判定機能を加えて, その適用性を検証する。

## 2. 既往研究と課題

### 2.1 主筋座屈の既往研究

本来座屈は力と変形の全履歴を追跡しなければ再現できない現象であるが, RC 部材の主筋座屈長さは概ねせん断補強筋間隔の複数倍に収斂することが知られてお

り, 部材寸法と配筋条件に基づく座屈長さ・応力の予測式が提案されている<sup>4,6,7)</sup>。また部材ないし架構レベルの解析において, 鉄筋を細分割して座屈挙動を再現するようなことも通常は行われず, 座屈部分の応力-ひずみ関係を平均化したものが用いられている。この平均応力-ひずみ関係についても複数のモデル<sup>3,6,7,8)</sup>が提案されている。Gomes<sup>6)</sup>は Menegotto-Pinto 式に修正を加えた曲線を構築している。Gomes の解析では, 座屈発生条件の一つとしてコンクリートかぶりの剥落が用いられている。

座屈と配筋を本格的に関連付けたのは浅津ら<sup>6)</sup>であり, 鉄筋コンクリート橋脚の主筋座屈について, 非線形 FEM による座屈解析の結果に基づき, モデル式を提案した。矩形断面部材の場合, 主筋の座屈長さ $l_b$ と座屈応力 $\sigma_b$ は (1)~(5)式により与えられている。

$$l_b = 4.4^4 \sqrt{E_{sr} I_s / \beta} \quad (1)$$

$$\sigma_b = -3.3 \frac{\sqrt{\beta E_{sr} I_s}}{A_s} (\geq -\sigma_{sy}) \quad (2)$$

$$\beta = \frac{1}{1/\beta_1 + 1/\beta_2} \quad (3)$$

$$\beta_1 = \frac{N_w E_w A_w}{s_w D N_s} \quad (4)$$

$$\beta_2 = \frac{384 E_w I_w}{s_w N_{st} D_w^3} \quad (5)$$

ここに,  $A_s$ =主筋断面積,  $E_{sr}$ =主筋の座屈算定用剛性,  $I_s$ =主筋断面二次モーメント,  $N_s$ =主筋本数,  $N_{st}$ =1組の横補強筋に挟まれる主筋の本数,  $\sigma_{sy}$ =主筋降伏応力,  $A_w$ =横補強筋断面積,  $b_w$ =横補強の断面内の間隔,  $E_w$ =横補強筋弾性係数,  $I_w$ =横補強筋断面二次モーメント,  $N_w$ =横補強筋の本数,  $s_w$ =横補強筋間隔,  $D$ =部材せいである。

一方, 田上ら<sup>7)</sup>は繰り返し応力を受けて座屈する鉄筋単体の挙動を有限変形理論に基づく有限要素解析により検討し, 任意の応力履歴下の軸応力-平均ひずみ関係

\*1 京都大学大学院 工学学研究科建築学専攻 (学生会員)

\*2 京都大学大学院 工学研究科建築学専攻助教 博士 (工学) (正会員)

\*3 日本大学 理工学部建築学科教授 博士 (工) (正会員)

\*4 京都大学大学院 工学研究科建築学専攻教授 ph.D. (正会員)

を提案している。筆者らの一部<sup>2)</sup>はFRPシートに拘束された柱主筋の座屈たわみを実測したほか、シートにかぶり剥落が防止されている状態でも主筋座屈が生じることを確認している。この実験結果に基づき、浅津らや田上らのモデルの修正を試みて2DFEMに適用している<sup>4)</sup>。

## 2.2 かぶり剥落の既往研究

鉄筋腐食に起因するかぶり剥落予測モデル<sup>例えば<sup>9)</sup></sup>が精力的に提案されているほか、付着割裂ひび割れ発生モデル<sup>例えば<sup>10)</sup></sup>も提案されている。本稿が主に対象とする塑性ヒンジ域のかぶり剥落については、Dhakarらが圧縮ひずみ下の損傷指標と破壊エネルギーを組み合わせた判定指標を提案している<sup>3)</sup>。このほか、曲げ解析やFEMにおける簡易法として、かぶりコンクリートの圧縮軟化を調整する手法もよく用いられている<sup>例えば<sup>11)</sup></sup>。

## 2.3 現状の課題

既往研究において行われてきたような、ユーザー自らが座屈関連数値を算定して入力する手法は、決して軽くはないモデル作成の負荷をさらに増やし、汎用性にも欠ける。本研究は基本的に上記の既往研究を踏襲するものの、ユーザー入力を必要とせず、プログラム内での自動算定を目指す。その場合、下記3点の課題が生じる。

- (1) (1)~(5)式が示すように座屈式は部材寸法の関数となっている。しかしFEMプログラムはモデルのどの部分が部材せいであるか等を認識している訳ではない。
- (2) 座屈式はまた、配筋条件(図-1(a))の関数でもある。線材要素によってこれらの鉄筋群をモデル化しても(図-1(b)), FEMプログラムは主筋・せん断補強筋の区別やその間隔・本数を認識する訳ではない。
- (3) 分散埋込鉄筋(smeared reinforcement)のような簡略法を用いた場合(図-1(c)), 情報がさらに不足する。

## 2.4 課題への対処

上記の課題に対し、本研究は次の方法で対処する。

- (1) 線材要素でモデル化された鉄筋が少なくとも2要素以上が直線上に連続している場合、これらを座屈候補主筋として認識する。線材鉄筋要素が直線上に並

んでいない場合、あるいは分散埋込鉄筋が用いられている場合は、座屈候補から除外する。横補強筋については、線材の場合(図-1(b))ないし分散埋込鉄筋の場合(図-1(c))のいずれも使用可能とする。

- (2) 座屈候補主筋と直交し、かつ鉄筋重心を含む平面内でコンクリート要素の自由表面を探索する。ここで自由表面とは、他のコンクリート要素と接しない表面を言う。最も近い自由表面までの距離 $d_{cmin}$ を「かぶり厚」として認識する。また最も遠い自由表面までの距離を $d_{cmax}$ と認識する(図-1(d))。
- (3) 座屈候補主筋と直交し、かつその径の7.5倍<sup>16,17)</sup>の直径の円内に入る線材鉄筋要素ないし埋込鉄筋を、その主筋の座屈に拘束効果を及ぼす横補強筋と認識させる。横補強筋の本数、間隔の認識は困難であるため、体積比のみを算定し記憶する(図-1(e))。また同じ領域内にあり、かつ自由表面に接するコンクリート要素を「かぶり」と認識させる。

## 3. 主筋座屈とかぶり剥落の提案モデル

### 3.1 座屈長さや座屈応力の修正式

前章の認識処理から得た情報のみで極力(1)~(5)式に近い値を算定する方法を検討した結果、主筋径 $d_b$ 、横補強筋比 $\rho_w$ 、主筋から自由表面までの距離 $d_{cmin}$ 、 $d_{cmax}$ を用いることにより、ある程度代替できるものと判断したため、(6)~(10)式を提案する。図-2に1~2章において参照した研究の試験体の(1)~(5)式による算定値(横軸)と(6)~(10)式による算定値(縦軸)との関係を示す。

$$l_b = 1.2d_b/\beta'^{0.25} \quad (6)$$

$$\sigma_{b0} = -0.3 \cdot 200000 \cdot \sqrt{\beta'} (\geq -\sigma_{sy}) \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (7)$$

$$\beta' = \frac{1}{1/\beta'_{r1} + 1/\beta'_{r2}} \quad (8)$$

$$\beta'_{r1} = 1.5\rho_w \frac{d_{cmin}}{d_{cmax}} \quad (9)$$

$$\beta'_{r2} = 800\rho_w^2 \left(\frac{d_{cmin}}{d_{cmax}}\right)^3 \quad (10)$$

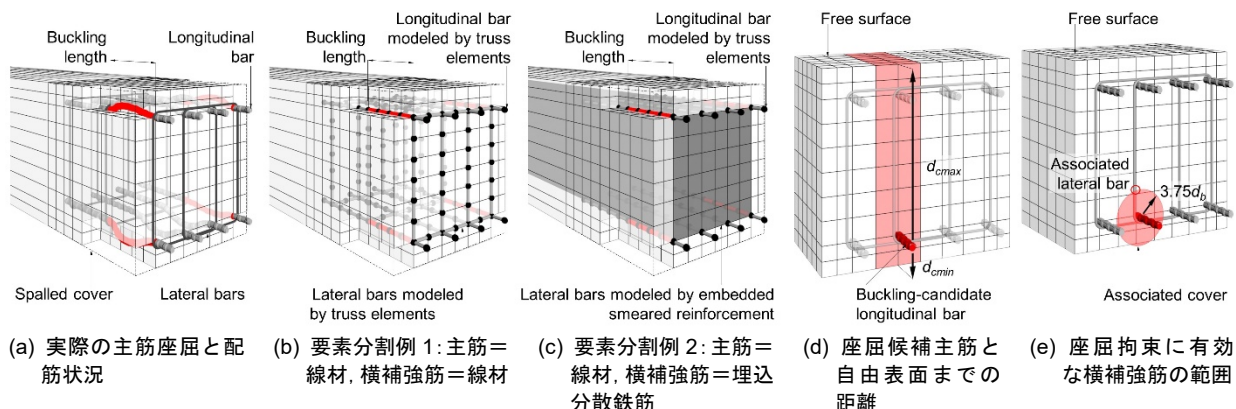


図-1 本研究が対象とする要素分割条件および部材の認識方法

座屈発生基準として次の3つの条件を用いる。

- (1) 主筋が引張降伏から除荷され、圧縮状態にあること。
- (2) 主筋が除荷直前に経験した引張塑性ひずみ $\epsilon_{stp}$ が、(11)式を満たすこと。(11)式は、座屈主筋のたわみ変形を三角形分布と仮定し、その横たわみがかぶり $d_{cmin}$ の $c_c$ 倍以上となることを意味している。

$$\epsilon_{stp} > \sqrt{\left(\frac{2 \cdot c_c \cdot d_{cmin}}{l_b}\right)^2 + 1} - 1 \quad (11)$$

係数 $c_c$ について、本研究の段階では一貫した設定基準を見出せなかったため、今回は0.25~0.30の間で個別事例ごとに試行して決定した。

- (3) 主筋と直交するかぶりの割裂方向のひび割れ幅が1.0mm以上であること。ひび割れ幅は付着応力分布を考慮した疑似離散型ひび割れモデル(DLCM)<sup>16,17</sup>により算定する。

### 3.2 座屈主筋の応力—ひずみ履歴モデル

座屈発生後の圧縮応力漸減経路(図-3の経路BC)について、筆者らの一部の既往研究<sup>4)</sup>においては田上らのモデル<sup>7)</sup>を用いたが、3DFEMへの適合性を再検討し、本研究は主筋断面の塑性化進展と変形を合理的に結び付けたGomesらのモデル<sup>8)</sup>を採用する。漸減経路上の応力 $\sigma_s$ は(12)式により与えられる。

$$\sigma_s = \frac{4\sqrt{2} \cdot d_b \cdot \sigma_{sy}}{3\pi \cdot l_b} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_s}} \cdot \sin^3 \theta \quad (12)$$

$\theta$ は鉄筋断面内の塑性化部分を示す角度(図-4)であり、(13)式により $\theta$ を数値的に決定する。

$$|P| = A_s |\sigma_s| = r^2 \cdot (\pi - 2\theta + \sin 2\theta) \cdot \sigma_{sy} \quad (13)$$

したがって

$$0 = f(\theta) = \pi \left(1 - \frac{|P|}{A_s \sigma_{sy}}\right) - 2\theta + \sin 2\theta \quad (14)$$

ここに、 $\epsilon_s$ =主筋ひずみ、 $P$ =主筋軸力、 $A_s$ =主筋断面積である。(14)式の求解区間( $0^\circ < \theta < 90^\circ$ )において勾配の正負が反転する場合があります、ニュートン法等を使えないため、本研究においては二分法を用いた。

Gomesモデルにおいて実際に主筋が座屈するのは図-3に示すように、引張降伏側からの除荷経路の正負が反転するひずみ $\epsilon_{b0}$ と、(7)式の $\sigma_{b0}$ により与えられるO点を起点とする漸減曲線が、除荷経路と交わるB点となる。

圧縮側から引張側への回復経路には、しばしば座屈していない鉄筋の応力—ひずみ履歴がそのまま用いられるが<sup>1,3,8)</sup>、座屈たわみが再引張により完全に引き延ばされるまではある程度の不整が残るはずであり、この点において田上らの提案する回復経路モデル<sup>7)</sup>が合理的である。同モデルにおいては、図-3のように圧縮側除荷開始点Cから引張降伏回復点Hまでの経路が多折線により表現される。圧縮漸減時の残留応力が比較的大きな場合は図-3(a)の経路CDGHにより、相対的に小さな場合は図

-3(b)の経路CDFGHにより与えられる。

### 3.3 かぶり剥落条件

かぶりについて、Dhawalらの基準<sup>3)</sup>を参考に、三次元解析条件下において計算を試行しながら、以下の5つを剥落の条件として設定した。

- (1) 自由表面が存在し、節点拘束、荷重、強制変位等が一切加えられていないこと。
- (2) 自由表面とほぼ平行なひび割れ面が生じていること(自由表面法線とひび割れ面法線のなす角度を数値上の閾値として $30^\circ$ 以内とする(図-5(a)))。かつひび割れが開口していること。
- (3) 最小主ひずみの絶対値が、コンクリート強度時ひずみ絶対値を上回ること。
- (4) かぶり要素に横補強筋がある場合、最大主ひずみがひび割れひずみの100倍を超えていること(普通強度鉄筋の損傷指標基準値を1%とした既往研究<sup>18)</sup>に基づき、これに近い値として設定)。また横補強筋がない場合は、最大主ひずみがひび割れひずみの10倍を超えていること(横補強筋がある場合の1/10として設定)。

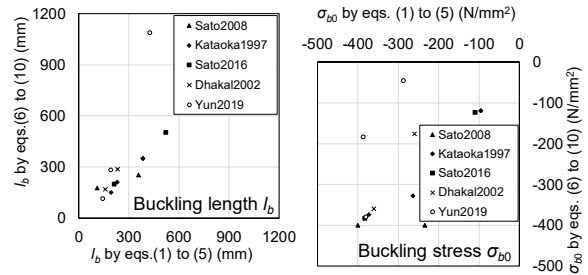
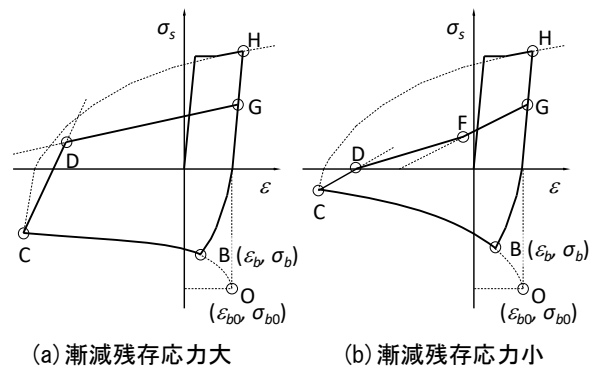


図-2 座屈長さ $l_b$ と座屈応力 $\sigma_{b0}$ の近似



(a) 漸減残存応力大 (b) 漸減残存応力小

図-3 座屈した鉄筋の履歴モデル<sup>7, 8)</sup>

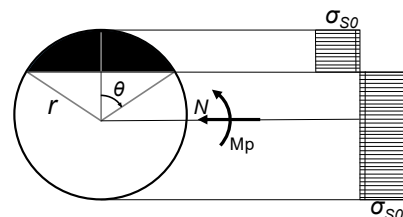


図-4 主筋断面の塑性応力分布<sup>8)</sup>

5) 累積ひずみエネルギー<sup>18)</sup>が図-5(b)において定義される基準値 $W_{c0}$ の75%を超過していること(かぶり剥落が圧壊で粉砕に至る以前の段階から観察されることを考慮)。

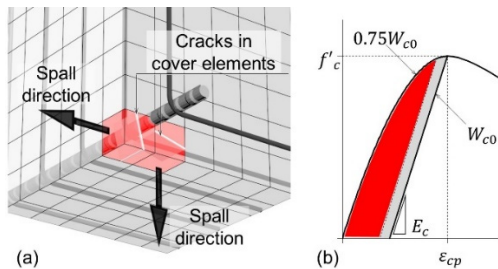


図-5 かぶり剥落条件

#### 4. 適用例

##### 4.1 モデル化方法と材料構成則

本章においては梁試験体と架構試験体への2つの適用例を示す。コンクリートは六面体要素、主筋は2節点線材要素、せん断補強筋は埋込鉄筋とする。コンクリートの圧縮側応力-ひずみ関係は修正 Ahmad 式<sup>12)</sup>、引張側のひび割れ発生後はテンションステイフニング特性<sup>13)</sup>、せん断伝達特性<sup>14)</sup>、およびコンクリートの圧縮劣化特性<sup>14)</sup>を考慮した。鋼材の応力-ひずみ関係はバイリニア型とし、降伏後のひずみ硬化率を0.01とした。正負繰り返し履歴として Ciampi モデル<sup>15)</sup>を用いる。ひび割れは非直交分散型とし、前述の通り疑似離散型ひび割れモデル<sup>16, 17)</sup>を適用した。ひび割れの最小角度は $20^\circ$ <sup>14)</sup>とした。剥落判定されたかぶり要素は、数値的安定性を考慮して剛性方程式からは除外せず、応力と剛性を零近くまで低減する形で処理する。

##### 4.2 計算例1：梁試験体

杉本らの実験<sup>19)</sup>における B6 梁試験体の計算を試みる。シアスパン比は5.0、コンクリート強度 $36.4 \text{ N/mm}^2$ 、主筋比1.26% (SD345)、せん断補強筋比0.64% (SD295)であり、正負交番で逆対称曲げせん断加力が行われた。図-6に試験体の形状および配筋と要素分割を示す。解析モデルは対称性を考慮した1/4モデルとした。主筋要素とコンクリート要素の間には4節点接合要素を挿入し、付着劣化<sup>16, 17)</sup>を考慮する。(11)式の係数 $c_c$ は0.25とする。図-7(a)に実験観察結果を示す。部材角4%を超えてから主筋に沿った割裂ひび割れと剥落が発生し、梁幅方向の膨張が観察された。座屈の露出は見られなかったものの、この変形状況から座屈たわみが生じていたと推定される。図-7(b)に解析によりひび割れ分布、剥落分布、および主筋座屈状況を示す。図-8(a)に座屈・剥落判定のない場合のせん断力-部材角関係を、図-8(b)に座屈・剥落を判定した場合の関係を比較する。座屈・剥落判定により、最終部材角5%における荷重低下の状況が実験

に近づく。図内に座屈と剥落の発生時点を赤い点で示す。座屈は3か所で発生し、その位置を図-7(b)に、座屈部の平均応力-ひずみ関係の例を図-9に示す。座屈発生前を黒色、発生後を赤色で表示する。(6)式により算定される座屈長さ $l_b$ は115 mm、座屈応力 $\sigma_b$ は $253 \text{ N/mm}^2$ である。主筋要素1本あたりの長さは73 mmであり、座屈判定された要素およびその前後の連続する計3本、全体で計9本に平均応力-ひずみ関係が適用される。この主筋は3%以上の引張ひずみに達した後、除荷過程で座屈が発生し、8%の圧縮ひずみに達するまで Gomes モデルの応力漸減経路を辿る。その後載荷方向の反転に伴い図-3(b)型の回復経路に乗ることが示されている。

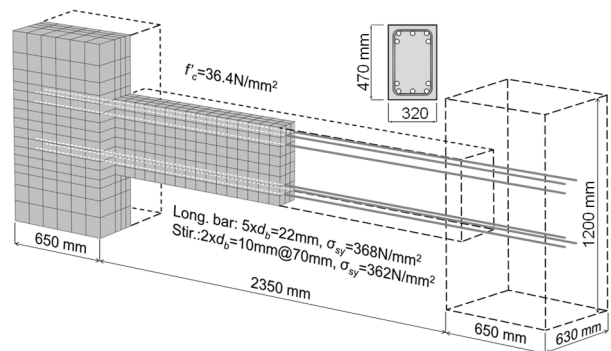


図-6 計算例1：B6 梁試験体<sup>18)</sup>

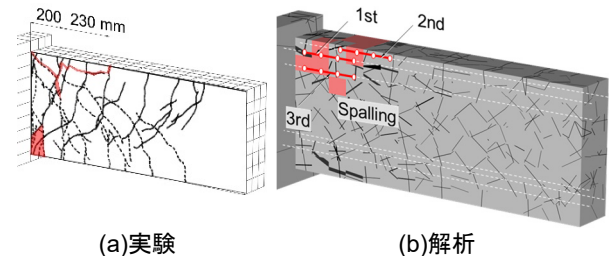


図-7 B6 梁のひび割れ状況

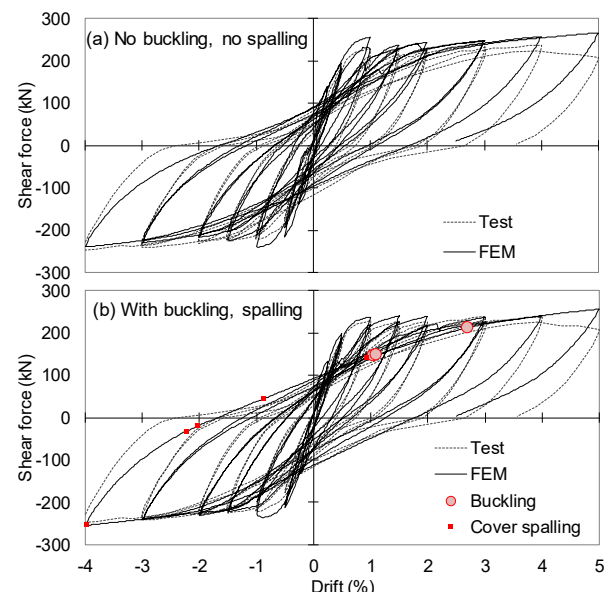


図-8 B6 梁のせん断力-部材角関係

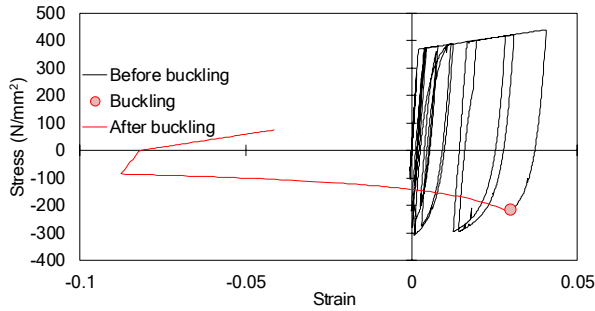


図-9 B6梁の座屈主筋平均応力-ひずみ関係

なお、かぶり剥落のみを判定し、座屈判定をしない条件で計算した場合、剥落したかぶりは図-7(b)と同一となる一方、せん断力一部材角関係は剥落・座屈を考慮しない図-8(a)とほぼ同じとなった。逆に、かぶり剥落を判定せず、座屈のみを判定した場合、主筋周辺の変形状態やひび割れ状態が座屈発生条件に至らず、せん断力一部材角関係は図-8(a)と同一となった。この結果より、数値計算上、異なる応力・ひずみの条件下でも同一の剥落位置となり得ること、その一方でかぶり剥落は座屈の誘発に一定の影響を与えることが確認された。

#### 4.3 計算例 2：フラットスラブ架構試験体

次にフラットスラブ架構を想定した試験体<sup>20)</sup>を計算する。柱シアスパン比は 9.0、コンクリート強度 56.9 N/mm<sup>2</sup>、主筋比 1.57% (SD345)、せん断補強筋比 0.25% (4mm 丸鋼) であり、スラブに正負交番水平荷重を加えている。図-10 左に試験体形状と 1/2 要素分割モデルを、

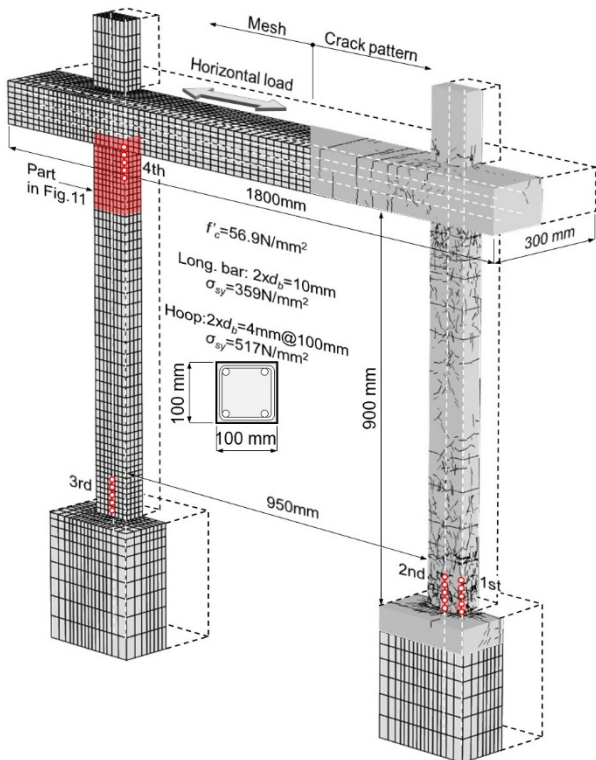


図-10 計算例 2：フラットスラブ架構試験体<sup>19)</sup>

右に解析終了時のひび割れ状況と座屈主筋位置を示す。(11) 式の係数  $c_c$  は 0.30 とする。図-10 の左側柱上端の赤色の部分の実験観察結果を図-11 に示す。部材角 4% の 2 回目サイクル時点ではまだかぶり剥落、主筋座屈とも観察されない。6% の 1 回目サイクルでかぶりが剥落し、主筋座屈を確認した。その後 8% の最終時まで徐々に剥落域が拡大し、座屈たわみが増加した。座屈長さは 50 mm 以上 100 mm 未満であった。

図-12(a)に座屈・剥落判定のない場合のせん断力一部材角関係を、図-12(b)に座屈・剥落を判定した場合の関係を比較する。座屈・剥落判定により、最終部材角(8%)におけるピーク変位からの除荷剛性が低下し、実験との乖離が拡大する形となったが、ループの縮小により履歴面積は減少した。図-10 に示す 4 か所の座屈主筋のうち代表的な平均応力-ひずみ関係を図-13 に示す。(6)式により算定される座屈長さ  $l_b$  は 77.4 mm、座屈応力  $\sigma_b$  は 200 N/mm<sup>2</sup> である。主筋要素 1 本あたりの長さは 12.5 mm であり、座屈判定された要素の前後計 5 本、全体で計 20 本に平均応力-ひずみ関係が適用される。約 6% の引張ひずみからの除荷過程で座屈が発生し、漸減経路と図-3(b)型回復経路を辿り、引張回復を経験した後に載荷終了に至っている。

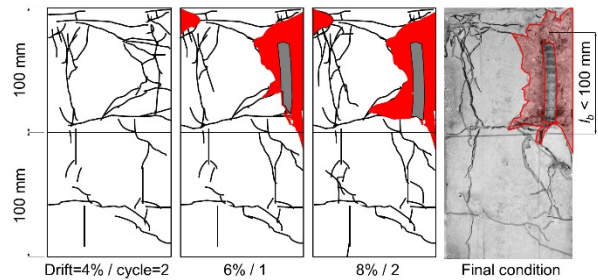


図-11 架構試験体柱上端部の実験観察状況

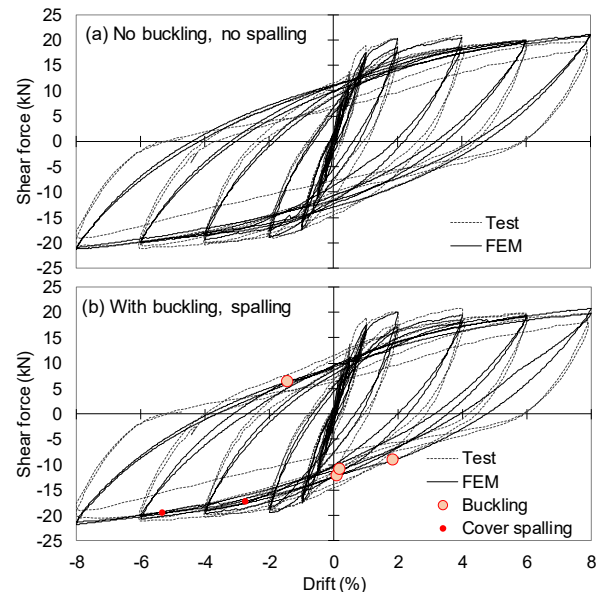


図-12 架構試験体の水平力一部材角関係

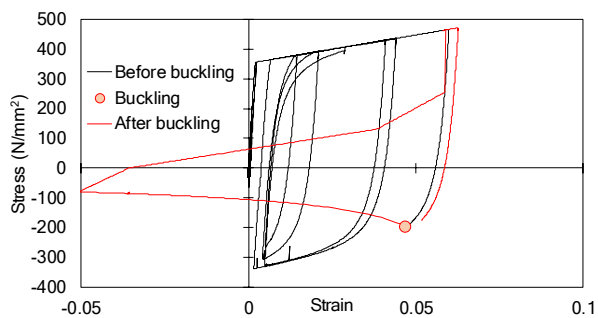


図-13 架構試験体の座屈主筋平均応力-ひずみ関係

## 5. まとめ

3DFEMにおいてRC部材の部材寸法、かぶり、配筋を自動認識し、主筋座屈とかぶり剥落を判定する手法を構築した。またモデル入力時に鉄筋径、本数、間隔等の情報の不足を想定し、既往座屈モデルの修正式を提案した。座屈主筋には平均応力-ひずみ履歴モデルを適用する。以上を梁と架構の解析に適用し、座屈と剥落が再現できることを確認した。なお座屈判定基準に関する係数 $c_c$ については今後の検討課題である。

## 参考文献

- 1) 尹ロク現, 真田靖士, 赤堀巧, パラダン スーザン, 河村英里子: コンクリート系梁の主筋座屈に基づく安全限界性能の定量化, 日本建築学会構造系論文集, Vol.84, No.736, pp.1259-1269, 2019.9; DOI: 10.3130/aijs.84.1259
- 2) Sato, Y. and Ko, H.: Experimental investigation of conditions of lateral shear reinforcements in RC columns accompanied by buckling of longitudinal bars, Journal for Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.36, pp.1685-1699, 2007; DOI: 10.1002/eqe.712.
- 3) Dhakal, R. P. and Maekawa, K.: Reinforcement stability and fracture of cover concrete in reinforced concrete members, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.128, No.10, pp.1253-1262, 2002; DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:10(1253)
- 4) Sato, Y. and Ko, H.: Modeling of Reinforcement Buckling in RC Columns Confined with FRP, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.6, No.1, pp.195-204, 2008.
- 5) Jankowski, R.: Non-linear FEM analysis of earthquake-induced pounding between the main building and the stairway tower of the Olive View Hospital, Engineering Structures, Vol.31, pp.1851-1864, 2009
- 6) 浅津直, 運上茂樹, 星隈順一: 鉄筋コンクリート橋脚における軸方向鉄筋座屈長算定式, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.1477-1482, 2000
- 7) 田上和也, 中村光, 斉藤成彦, 檜貝勇: 座屈を考慮した鉄筋の繰り返しモデル, コンクリート工学年次

論文集, Vol.24, No.2, pp.223-228, 2002

- 8) Gomes, A. and Appleton, J.: Nonlinear cyclic stress-strain relationship of reinforcing bars including buckling, Engineering Structures, Vol.19, No.10, pp.822-826, 1997
- 9) 荒木弘祐, 服部篤史, 宮川豊章: 鉄筋の腐食膨張によるかぶりコンクリートの剥離減少とその予測, 土木学会論文集 No.802, Vol.69, pp.209-222, 2005.11
- 10) 佐藤裕一, 長沼一洋: 分散ひび割れ型 FEM によるひび割れ幅の予測(その8) 付着割裂ひび割れのモデル化, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) C-2, pp.241-242, 2011.
- 11) 熊谷仁志: 超高強度 RC 柱のかぶりコンクリート圧縮破壊に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.499-504, 2012
- 12) 長沼一洋: 三軸圧縮下のコンクリートの応力-ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, Vol.474, pp.163-170, 1995.8
- 13) 出雲淳一, 島弘, 岡村甫: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学論文, Vol.25, No.9, pp.107-120, 1987.9
- 14) 長沼一洋: 平面応力場における鉄筋コンクリート板の非線形解析モデル, 日本建築学会構造系論文集, Vol.412, pp.39-48, 1991.3
- 15) Ciampi, V, et al.: Analytical Model for Concrete Anchorages of Reinforcing Bars Under Generalized Excitations, Report No. UCB/EERC-82/23, Univ. of California, Berkeley, Nov., 1982
- 16) 佐藤 裕一, 長沼 一洋: 分散ひび割れモデルによる鉄筋コンクリートのひび割れ幅の予測, 構造工学論文集 Vol.61B, pp.1111-124, 2015.3
- 17) Sato, Y. and Naganuma, K.: Discrete-Like Crack Simulation of Reinforced Concrete Incorporated with Analytical Solution of Cyclic Bond Model, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.140, Issue 3, Mar. 2014; DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000864.
- 18) 赤井冬来, 田嶋和樹, 長沼一洋, 佐藤裕一: 塑性ひずみエネルギーに基づくコンクリート構造物の損傷指標, 日本建築学会構造系論文集, No.742, pp.1925-1933, 2017.12.
- 19) 杉本訓祥, 柏瀬 孝子, 江戸 宏彰: 鉄筋コンクリート造建物の性能評価手法に関する研究(その2) AIJ 大会梗概集 C-2, 2003, pp.143-144
- 20) Makita, K., Uda, Y., Yoshikado, H., Mori, K., Sato, Y., Naganuma, K. and Kaneko, Y.: Drop-Weight Test For RC Frame Made Of Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete, Advanced Concrete Technology Vol.16, pp.36-45, Jan. 2018; DOI: 10.3151/jact.16.36.