

ポストピーク挙動に着目したRC橋脚の 繰返し破壊挙動解析

黒田武大¹・目黒公郎²

¹中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail: kuroda@prelude.iis.u-tokyo.ac.jp

²東京大学生産技術研究所助教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail: meguro@iis.u-tokyo.ac.jp

RC橋脚などの構造物では、巨大地震に対しても崩壊は免れるような耐震性能が要求されるが、それにはポストピークでの挙動の定量的な把握が不可欠である。本研究では、RCのポストピークでの変形性能に大きな影響を及ぼす鉄筋の座屈とコンクリートの剥離現象を考慮した解析モデルを構築した。解析手法としては、構造物の微小変形領域から大変形崩壊領域までの挙動を統一的に取り扱うことのできる応用要素法(AEM)を採用した。AEMを用いることで本解析モデルは、取り扱うことのできる破壊モードや構造形態に特に制限を受けないものとなる。解析結果を既往の静的交番載荷実験と比較した結果、実験と調和的な結果が得られ、本解析モデルの適用性が示された。

Key Words : post-peak behavior, reinforcing bar buckling, cover concrete spalling, RC column, Applied Element Method

1. はじめに

橋脚などの鉄筋コンクリート(以下RC)構造物の耐震性能評価では、最大耐力以後、崩壊に至るまでの挙動を高精度に把握することが課題である。2003年にまとめられたコンクリート構造物のポストピーク挙動解析研究委員会による報告書¹⁾でも、構造物が真の終局状態、すなわち荷重ゼロの状態に至るまでの崩壊挙動を精度良く推定することの重要性が指摘されている。

RC橋脚の耐震設計では、変形性能の観点から曲げ破壊をするように設計することが望まれるが、曲げ破壊型のRC橋脚では、かぶりコンクリートの剥離や、軸方向鉄筋の座屈が、そのポストピーク挙動に大きく影響する²⁾。このような挙動を数値解析により精度良く予測することは、構造物の真の耐震性能を評価する上で有意義であると考えられる。

本研究では、応用要素法(Applied Element Method: AEM)³⁾による解析モデルに、かぶりコンクリートの剥離や、鉄筋の座屈といった一連の現象を考慮した材料モデルの適用を行った。AEMは、連続体から不連続体まで、すなわち振動の初めから構造物が崩壊に至るまでの挙動を、統一的に取り扱うことのできる解析手法であり、取り扱うことのできる破壊モードや構造形態にも特に制限を有しない。

本論文では、鉄筋の座屈とかぶりコンクリートの剥離を考慮した解析を行い、既往の静的交番載荷実験と比較する。そして本解析モデルの適用性を検討する。

2. 解析モデル

(1) 応用要素法によるRCのモデル化

本研究では、解析対象となるRC構造物を2次元応用要素法³⁾(以下2D-AEM)によりモデル化する。2D-AEMでは、対象構造物を仮想的に分割した矩形要素の集合体として考える。水平、鉛直、回転の三自由度を有する要素は、それ自体は剛体として取り扱い、解析において運動を追いかける最小単位となる。隣り合う要素同士は、図-1に示すように法線方向とせん断方向の2種類の分布バネで連結されていると考え、このバネが要素間での力の伝達を行う力学モ

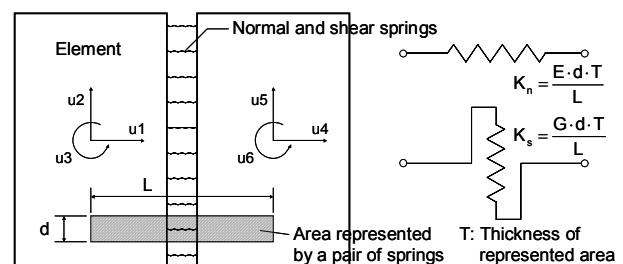


図-1 AEM要素と分布バネ

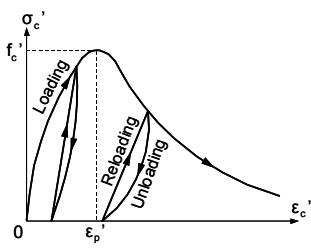
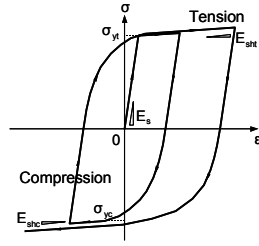
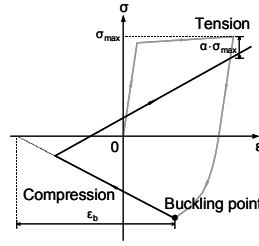


図-2 コンクリートの
- 関係(圧縮側)



(a) 座屈前



(b) 座屈後

図-3 鉄筋の - 関係

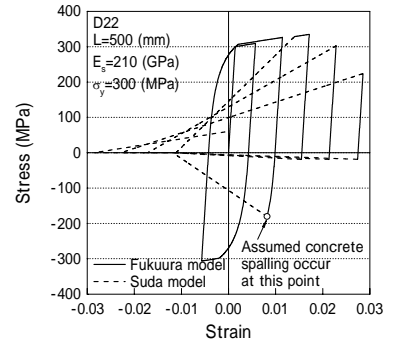


図-4 座屈を考慮した鉄筋の
- 関係

デルの最小単位となる．AEMをRCに適用する場合には，このバネにコンクリートおよび鉄筋の材料モデルをそれぞれ適用することでモデル化する．この際，鉄筋については，鉄筋位置にバネを配置することで，鉄筋の位置と量を直接考慮した解析が可能となる．またクラックは，各バネの代表する領域の主応力が，それぞれの材料の限界応力に達した際に，バネを切断することで表現される．

(2) コンクリートの材料モデル

a) コンクリートの - 関係

コンクリートバネの - 関係については，圧縮側は図-2 に示す前川によるモデル⁴⁾を使用した．このモデルは，繰返し荷重下でのコンクリートの非線形挙動を合理的に表現可能である．また引張側は，破壊点まで初期剛性を保つと仮定し，破壊後は応力，剛性ともにゼロとした．破壊に関しては，主応力が引張強度を上回った時点をもって破壊点とした．

b) かぶりコンクリートの剥離基準

塑性域に至る正負交番荷重を受けるRC柱に発生するかぶりコンクリートの剥離と，軸方向鉄筋の座屈の関係については，鉄筋がかぶりコンクリートを押しながら座屈し，その結果剥離が生じることが知られている⁵⁾．また既往の実験^{6),7),8),9)}による損傷状況を見ても，鉄筋の座屈範囲とかぶりコンクリートの剥離の範囲は，おおよそ一致している．そこで，本研究においても，かぶりコンクリートの剥離範囲と鉄筋の座屈範囲は一致するものと仮定し，かぶりコンクリートの剥離については，Dhakarらにより提案されたモデル¹⁰⁾に従うものとした．このモデルでは，コンクリート中の鉄筋が次式で与えられる圧縮限界ひずみ ϵ_{sp} に達すると，鉄筋を拘束していたかぶりコンクリートの剥離が発生する．

$$\epsilon_{sp} = \epsilon_y + \frac{a_{cr}^2 \pi^2}{4L^2} \quad (1)$$

ここで， ϵ_y は鉄筋の降伏ひずみ， L は鉄筋の座屈長， a_{cr} はコンクリート中の鉄筋の横方向たわみ量の最大値であり，コンクリートの力学的特性によって決定される値である．鉄筋の座屈長 L については，(3) b)で詳述する．

(3) 鉄筋の材料モデル

a) 座屈発生前の - 関係

繰返し荷重を受けた際に鉄筋に生じるバウシング効果などの非線形挙動は，座屈の発生に大きな影響を及ぼす⁵⁾．そこで，これらを高精度に表現する福浦らによるモデル¹¹⁾を，鉄筋の - 関係として使用した．このモデルは，加藤モデル¹²⁾と同等の精度と適用範囲を有し，また加藤モデルのように繰返し変形の進行に伴い，履歴変数の数が増加することなく一定であるため，複雑な繰返し荷重下での挙動を高い近似値で表現することができる．図-3(a)に採用した - 関係の概念図を示す．

b) 鉄筋の座屈長

鉄筋の座屈長は，須田ら²⁾の式を基に，鉄筋の非線形性を考慮した浅津ら⁵⁾による次式で決定する．

$$L_{cr} = 8.5 \sigma_{sy}^{1/5} \beta_n^{-1/3} \phi \quad (2)$$

ここで， σ_{sy} は軸方向鉄筋の降伏応力度， ϕ は軸方向鉄筋径， β_n は軸方向鉄筋の座屈に対する等分布バネ定数で，帯鉄筋およびかぶりコンクリートによる拘束力を考慮したものである．鉄筋の座屈は，柱基部から L_{cr} の範囲で発生するものとする．

c) 座屈発生後の - 関係

座屈発生後の鉄筋の - 関係については，座屈後の圧縮軟化及び再引張を直線でモデル化した須田ら²⁾によるモデルを採用した．このモデルは，鉄筋の材料非線形性および幾何学的非線形性が考慮され

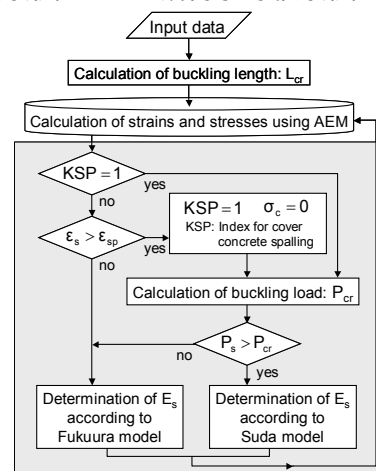


図-5 解析のフロー

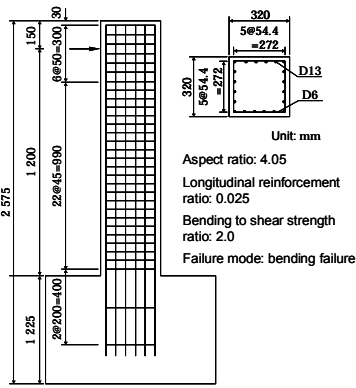


図-6 供試体概要

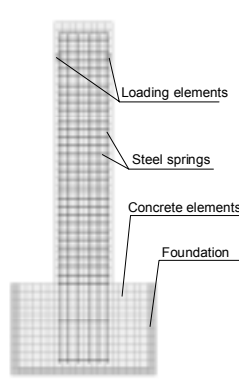


図-7 要素分割図

表-1 材料緒元

Concrete	Compressive strength (MPa)	28.4
	Young's modulus (GPa)	20.4
Longitudinal reinforcement	Yield strength (MPa)	356
	Young's modulus (GPa)	187
Tie reinforcement	Yield strength (MPa)	444
	Young's modulus (GPa)	192

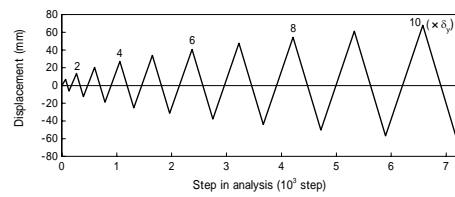


図-8 入力変位

ている．図-3(b)に - 関係の概念図を示す．実際の挙動は，ピンチング現象など，より複雑になると考えられるが¹³⁾，ここでは座屈前の - 関係に福浦らによるモデル¹¹⁾を採用しているように，数値計算上の安定性を重視し，座屈後についても単純な関数から成るモデルを選択した．

本研究では，先述の2つの鉄筋モデル間で履歴変数のやり取りを行うことにより，図-4に示すように任意の繰返し荷重下における鉄筋の挙動を表現した．図-5に本解析モデル全体のフローを示す．

3. 静的交番載荷実験の解析

(1) 対象実験概要

本研究で構築した解析モデルの適用性を検証するため，既往の静的交番載荷実験¹⁴⁾との比較を行う．実験供試体は，図-6に示すように320mm×320mmの正方形断面を有し，せん断スパン比4.05のRC単柱である．実験における荷重方法は，荷重制御および変位制御により，正側・負側それぞれで主鉄筋の降伏が観測された変位を降伏変位と定め，同一変位を3回づつ繰り返しながら，降伏変位の整数倍で変位振幅を漸増している．表-1に供試体材料の諸元を示す．実験では，7_y付近から耐力の低下が観測されているが，供試体の損傷状況¹⁴⁾より，柱基部でのかぶりコンクリートの剥離，および鉄筋の座屈がその主たる原因と推察される．

(2) 解析モデル

上記の供試体を2D-AEMにより，要素寸法4cm×4cm，総要素数512でモデル化した．図-7に解析モデルの要素分割図を示す．鉄筋は，供試体の配筋通りに，鉄筋パネを設けることでモデル化した．荷重は変位制御で行い，荷重履歴に関しては，同一変位を繰り返すことはせず，図-8のように1回だけの荷重とした．

(3) 解析結果と考察

図-9に座屈モデル導入前の解析による荷重-変位関係と，実験によって得られた包絡線を示す．変位40mm付近までは，概ね実験の挙動をよく追跡している．それ以降は，実験では耐力が徐々に低下しているのに対し，解析では耐力の低下は見られず，実験

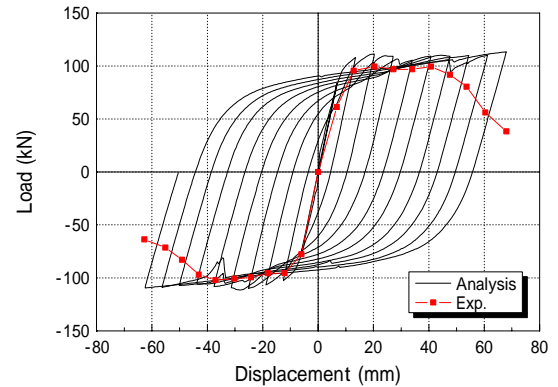


図-9 解析結果(剥離 座屈なし)

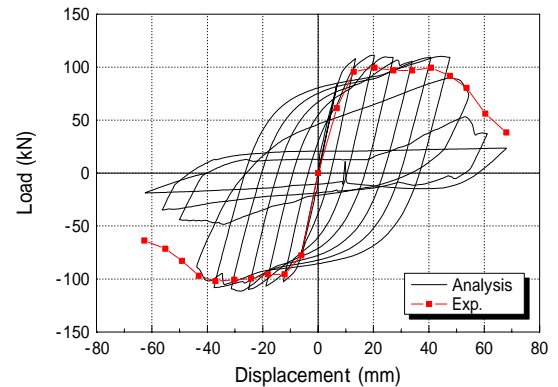


図-10 解析結果(剥離 座屈を考慮)

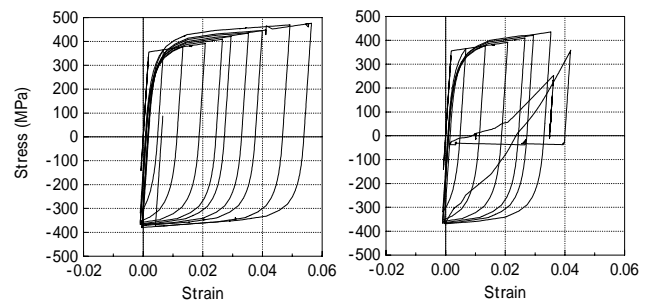


図-11 鉄筋の挙動 (座屈なし)

図-12 鉄筋の挙動 (座屈考慮)

とは大きく挙動が異なっている．また，解析結果は，実験と比較して，正負交番載荷によって描かれる荷重-変位関係の曲線の曲率が大きく，ループが広がる傾向が見られた．これは，採用した鉄筋モデルが，除荷時の剛性を応力の正負が反転するまでは，初期剛性を仮定していることによるものと考えられる．

次に座屈モデル導入後の荷重 変位関係を図-10に示す。モデルの導入によって耐力の低下が見られ、変位40mm以降の挙動が実験値に近づいている。また、耐力の低下が開始する時点、すなわち座屈の発生時点も概ね一致している。実験終盤において、解析の方が耐力がより低くなっているものの、コンクリートの剥離、鉄筋の座屈といった一連の破壊現象を含む構造物の挙動を、概ね良い精度で解析できている。図-11と図-12に座屈モデル導入前後の柱基部の鉄筋の挙動を示す。

5. まとめ

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 2D-AEMに鉄筋の座屈、かぶりコンクリートの剥離といった一連の現象を、材料モデルとして考慮した解析モデルを構築した。本解析モデルは、2次元問題においては、取り扱うことができる破壊モードや構造形態に、特に制限を有しない。
- (2) 座屈 剥離を考慮していない解析では、既往の静的交番載荷実験で見られた耐力の低下が表れないのに対し、座屈 剥離を考慮した解析では、耐力の低下が確認され、実験と調和的であった。
- (3) 解析では実験と比較して、座屈発生以前において繰返し載荷が進んでも高い剛性を保持する傾向が見られたが、これは採用した鉄筋モデルが、除荷時の剛性を応力の正負が反転するまでは、初期剛性を仮定していることによるものであり、修正が望まれる。

今後は、他の実験ケースの解析も行い、本解析モデルの更なる精度向上を目指す。また地震荷重下における実構造物を対象とした崩壊挙動の解析を行う予定である。

参考文献

- 1) コンクリート構造物のポストピーク挙動解析研究委員会: コンクリート構造物のポストピーク挙動評価と設計への応用, 日本コンクリート工学協会, 2003.8
- 2) 須田久美子, 村山八洲雄, 一宮利通, 新保 弘: RC橋脚における柱筋の座屈メカニズムの考察, 阪神・淡路大震災に

- 関する学術論文集, pp. 571-578, 1996.1
- 3) Meguro, K. and Tagel-Din H.: A new efficient technique for fracture analysis of structures, Bulletin of Earthquake Resistant Structure, IIS, The University of Tokyo, No.30, pp. 103-116, 1997.
 - 4) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991.5
 - 5) 浅津直樹, 運上茂樹, 星隈順一, 近藤益央: 軸方向鉄筋の座屈解析による鉄筋コンクリート橋脚の塑性ヒンジ長に関する研究, 土木学会論文集, No.682/I-56, pp. 177-194, 2001.7
 - 6) 星隈順一, 運上茂樹, 川島一彦, 長屋和宏: 載荷繰返し特性と塑性曲率分布に着目した曲げ破壊型鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形性能とその評価法, 構造工学論文集, Vol.44A, pp. 877-888, 1998.3
 - 7) 武村浩志, 川島一彦: 載荷履歴特性が鉄筋コンクリート橋脚の変形性能に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.43A, pp. 849-858, 1997.3
 - 8) 須田久美子: 中空断面鉄筋コンクリート高橋脚の地震時変形性能に関する研究, 博士論文, 東京大学, 1998.12
 - 9) 石橋忠良, 小原和宏, 菅野貴浩, 小林薫, 木野淳一: 矩形帯鉄筋を軸方向鉄筋の内側に配置した鉄筋コンクリート柱の正負水平交番載荷実験, 土木学会論文集, No.732/V-59, pp. 27-38, 2003.5
 - 10) Dhakal, R. P.: Enhanced Fiber Model in Highly Inelastic Range and Seismic Performance Assessment of Reinforced Concrete, Doctoral thesis, The University of Tokyo, 2000.9
 - 11) 福浦尚之, 前川宏一: RC非線形解析に用いる鉄筋の繰返し履歴モデル, 土木学会論文集, No.564/V-35, pp. 291-295, 1997.5
 - 12) Kato, B.: Mechanical Properties of Steel under Load Cycles Idealizing Seismic Action, CEB Bulletin D'Information, No.131, pp.7-27, 1979.
 - 13) 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返し履歴モデル, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp. 223-228, 2002.
 - 14) 吉川弘道ら: 平成9年度小型試験体によるRC単柱の実験結果報告書, 武蔵工業大学, 1997.

(2003.10.10受付)

NUMERICAL STUDY OF CYCLICLY LOADED RC BRIDGE PIERS CONSIDERING POST-PEAK BEHAVIOR

Takehiro KURODA and Kimiro MEGURO

For the design of RC structures, such as bridge piers, subjected to extremely high seismic loads, it is necessary to precisely estimate the structural post-peak behavior. This study proposes a numerical model considering reinforcing bar buckling and concrete cover spalling, that have a great influence on the structural post-peak behavior. The proposed model is based on the Applied Element Method, a numerical technique which can calculate to total collapse behavior of structures and can treat various failure modes and structural types. Experiments in which reinforcing bar buckling and concrete cover spalling are present were simulated with the model. The results showed a good agreement with the observations thus showing the accuracy of the proposed model.