

論文 3次元 FEM 解析を用いた腐食鉄筋を有する RC 造柱の構造性能評価

新藤 辰典*1・堀川 真之*1・田嶋 和樹*2・白井 伸明*3

要旨: 経年劣化が生じた RC 構造物の構造性能評価を目的として、鉄筋腐食が RC 部材の構造性能に及ぼす影響に着目した 3 次元非線形有限要素解析を実施する。鉄筋が腐食すると、健全部断面積の減少により RC 部材の最大耐力の低下を引き起こす。さらに、腐食生成物の生成に伴う鉄筋の体積膨張により、鉄筋とコンクリート間の付着劣化やかぶりコンクリートのひび割れが生じる。本研究では、これらの複合的な劣化作用の影響を考慮した 3 次元 FEM 解析モデルを構築し、腐食鉄筋を有する RC 造柱の正負水平繰返し載荷実験結果との比較を通じてその妥当性を確認した。さらに、帯筋の破断現象のモデル化も試みた。

キーワード: 3次元 FEM 解析, 腐食鉄筋, 断面積分布, 付着応力度低減, 圧縮強度低減, 破断現象

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、鉄筋コンクリート（以下、RC）造建物に対する耐震診断・耐震補強が急速に実施され、国策としてこれらの対策が推進された公立小中学校の耐震化率は平成 28 年に 90%まで進捗する見込みである。

一方、学校施設に関する重大な問題点として、老朽化問題は避けられない。文部科学省は平成 25 年 3 月に「学校施設の老朽化対策について」¹⁾を公表した。その背景には、第二次ベビーブームを契機として、一斉に整備された公立小中学校の RC 造校舎の大半が今後一斉に老朽化問題に直面し、施設の維持管理費が大幅に増加するという事情がある。厳しい財政状況の中、効率的に学校施設の維持管理を継続していくためには、耐久性能を適切に評価し、財政支出の優先順位を明確にした上で老朽化対策を施す必要がある。

本研究では、RC 構造物の耐久性に影響を及ぼす要因として、RC 構造物の構造性能を直接的に低下させる可能性が高い鉄筋腐食に着目した²⁾。本報では、鉄筋腐食に伴う健全鉄筋断面積の減少、またそれに伴う鉄筋の破断現象、腐食生成物の発生に伴う鉄筋とコンクリート間の付着劣化およびかぶりコンクリートのひび割れ発生に着目し、3次元 FEM 解析モデルを構築する。

2. 解析対象実験

山川らは、曲げ破壊が先行するように設計した RC 柱試験体を海岸沿いに自然暴露した後、正負繰返し水平載荷実験を実施している³⁾。本研究では、試験室内に放置された健全試験体 NC0、5 年間暴露した腐食試験体 NC2（軸力比=0.2）および NC3（軸力比=0.4）を解析対象とした。図-1 に試験体概要、表-1 に載荷試験前における主筋の腐食状況、表-2 に材料特性を示す。実験では、NC0 試験体は変形角 1%近傍で引張側主筋の降伏に

よる曲げ破壊、NC2 は変形角 1.5%付近で柱頭のせん断破壊が生じた。また、NC3 試験体は、最大耐力後、変形角 0.5%近傍でせん断破壊と同時に高軸力によるコンクリートの脆性的な圧壊破壊が起きた。

3. 健全試験体 (NC0) のモデル化

腐食試験体の解析モデルを構築する前に、基準となる健全試験体の解析モデルを構築する。図-2 に要素分割図を示す。コンクリートは 8 節点ソリッド要素を用い、回転ひび割れモデルでモデル化した。主筋は梁要素で離散化し、あばら筋は埋め込み鉄筋要素とした。コンクリートと主筋間の付着は、節点界面要素を用いてモデル化した。また、柱頭・柱脚には水平載荷時における曲げひび割れの開口を模擬するため、離散ひび割れモデルを導入し、鉄筋の抜け出しを節点界面要素でモデル化した。

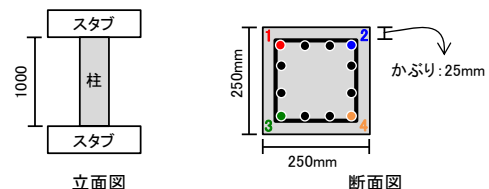


図-1 解析対象試験体概要

表-1 実験における鉄筋の腐食状況

●NC2の鉄筋腐食状況				
鉄筋番号(断面図参照)	1	2	3	4
重量減少率(%)	3.7	1.0	6.7	5.8

●NC3の鉄筋腐食状況				
鉄筋番号(断面図参照)	1	2	3	4
重量減少率(%)	2.0	0.9	1.5	4.0

表-2 実験パラメータおよび材料特性

試験体	NC0	NC2	NC3
コンクリートの圧縮強度 (N/mm ²)	35.8		39.6
軸力比 (N/bDσ)		0.2	0.4
暴露期間		5年	

鉄筋	主筋(D10)	帯筋(D6)
断面積 (mm ²)	0.71	0.32
降伏強度 (N/mm ²)	389	388
ヤング係数 (N/mm ²)	1.81 × 10 ⁵	1.84 × 10 ⁵

*1 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 日本大学 理工学部建築学科助教 博士 (工学) (正会員)

*3 日本大学 理工学部建築学科教授 工博 (正会員)

解析に用いた構成則を図-3に示す。コンクリートの1軸圧縮応力度-ひずみ度関係は上昇域と下降域からなる2つの放物線で近似し、下降域は圧縮破壊エネルギー G_{fc} を考慮した軟化モデルとした。なお、 G_{fc} は中村らの提案式⁴⁾を用い、要素代表長さ L_c は要素体積 V と等価な体積を持つ球の直径($= (3V/4\pi)^{1/3}$)とした。また、帯筋による拘束効果の影響を考慮するため、①無拘束、②破壊エネルギーのみを増大させるParkら⁵⁾の手法、③コンクリート強度および破壊エネルギーを増大させるMander⁶⁾の手法を採用し、拘束効果のモデル化の検討を行う。一方、引張側の上昇域は引張強度 f_t までを線形弾性と仮定し、下降域は大岡らの3直線モデル⁷⁾を採用した。なお引張破壊エネルギー G_f は大岡らの提案式⁷⁾から求め、要素代表長さ L_c は圧縮の場合と同様とした。鉄筋の応力度-ひずみ度関係は、降伏点を折点とするbi-linearモデルとし、降伏後の2次勾配は初期剛性の1/100とした。なお鉄筋の座屈現象については考慮していない。また、鉄筋とコンクリート間の付着応力度-すべり関係には、CEBモデル⁸⁾を採用した。

境界条件はスタブ下面を全面ピンとし、上スタブはz軸方向の自由度を拘束した。加力は柱に逆対称モーメントが発生するように、上側スタブの上下面を変位制御することで行った(図-2)。また、非線形反復手法には、一定剛性法を用いた。収束判定は、エネルギーノルム比が0.1%以下とし、反復数20回の反復計算でも収束条件が満たされない場合には、不釣り合い力を当該ステップで解除し、次ステップに移行するものとした。なお、解析には汎用解析コードDIANA9.4.3⁹⁾を用いた。

図-4に解析結果を示す。帯筋の拘束効果としてManderの手法を用いた結果は、実験の耐力並びにポストピーク挙動を良好に模擬した。よって、これらのモデル化を次章に述べる腐食試験体のモデル化の基準とする。

4. 腐食試験体(NC2)のモデル化および解析結果

腐食試験体のモデル化に際しては、健全試験体のモデル化を基準とし、腐食試験体で確認された①鉄筋腐食に伴う鉄筋断面積の減少、②腐食生成物の生成に伴う鉄筋-コンクリート間の付着劣化、③かぶりコンクリートのひび割れ発生の影響を考慮した解析モデルを構築する。

4.1 腐食鉄筋の腐食量分布

鉄筋の腐食は一様ではなく、腐食した鉄筋の健全部の断面積も材軸方向に複雑に変化する。斎藤ら¹⁰⁾はこのような腐食鉄筋の断面積分布を、正弦波を用いてモデル化する手法を提案している。本研究では、斎藤らの手法を参考にして、次式に示すような正弦波の重ね合わせにより主筋の腐食量分布をモデル化した²⁾。その概念図を図-5に示す。

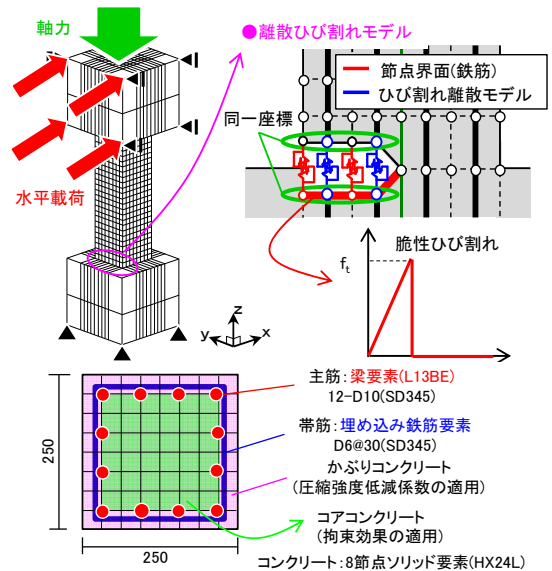


図-2 要素分割図

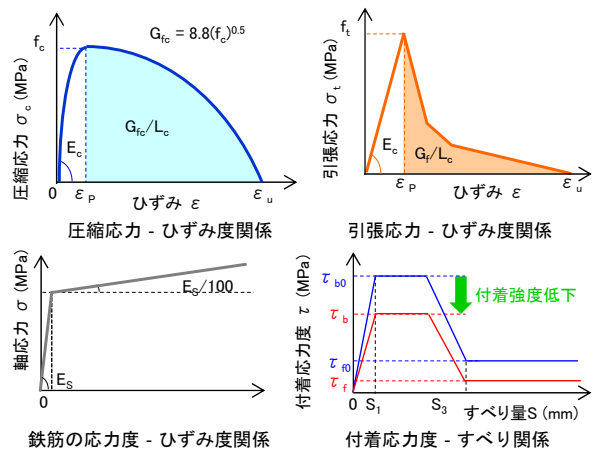


図-3 使用した構成則

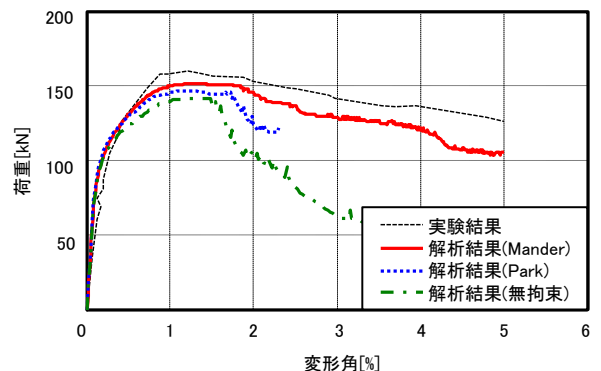


図-4 NC0(健全試験体)の解析結果

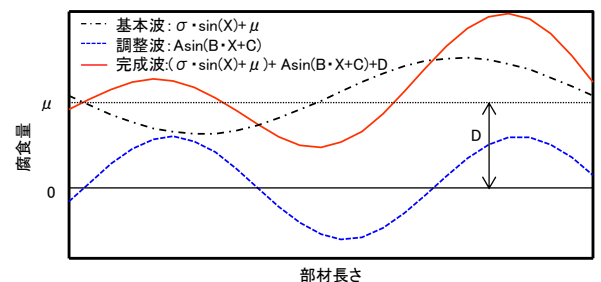


図-5 腐食量分布作成の概念図

$$W_D = (\sigma \cdot \sin(X) + \mu) + A \sin(B \cdot X + C) + D \quad (1)$$

$$X = \frac{2\pi x}{L} + \alpha \quad (2)$$

ここで、 W_D ：腐食量(mg/mm^2)、 σ ：腐食量の標準偏差(mg/mm^2)、 μ ：平均腐食量(mg/mm^2)、 X ：断面位置(mm)、 L ：部材長(mm)、 α ：最大腐食位置の調整係数である。また、係数 A , B , C , D は、腐食量分布に対して設定する3つの許容誤差(最大腐食量、平均腐食量、変動係数)を満足するように設定する。なお、これらの目標値に関して、平均腐食量は実験で計測された腐食率を平均腐食率として求め、最大腐食量は平均腐食量に腐食量の標準偏差(σ)を 1σ または 2σ 加えて求め、変動係数は岡崎らの研究¹¹⁾より 0.34 と設定した。なお、鉄筋の断面積分布においては、最小径が柱頭と柱脚に位置するように設定した。式(1)により作成した鉄筋径分布を図-6に示す。一方、帯筋の腐食率は、断面図のコーナー部で接する主筋の腐食率の最大値を採用し、断面積分布は一様とした。

4.2 腐食に伴う鉄筋とコンクリート間の付着劣化

コンクリートと鉄筋間の付着は健全試験体と同様に CEB モデルを適用するが、腐食鉄筋の体積膨張に起因する鉄筋周囲のひび割れによる付着応力度の低減を考慮するため、次式の付着応力度低減式¹²⁾を採用する。

$$\frac{\tau_b}{\tau_{b0}} = \exp(-0.0607 \frac{W_{S0} - W_S}{W_{S0}}) \quad (3)$$

ここで、 τ_b ：腐食後の付着強度(N/mm^2)、 τ_{b0} ：腐食前の付着強度(N/mm^2)、 W_S ：腐食後の鉄筋重量(N)、 W_{S0} ：腐食前の鉄筋重量(N)である。

4.3 かぶりコンクリートのひび割れ

腐食試験体では、かぶりコンクリートの剥落や浮きが顕著であったと報告されている(図-6)³⁾。そのため、曲げ破壊が先行するように設計された本試験体においては、圧縮側コンクリートの強度が低下する恐れがあり、かぶりコンクリートの圧縮強度を低減する効果を検討する必要がある。また、かぶりコンクリートのひび割れ発生に伴い、帯筋による拘束効果が低下することが想定される。本研究では、かぶりコンクリートに対する圧縮強度の低減係数と拘束効果のモデル化に関するパラメトリック解析を通じて検討する(図-7)。なお、ひび割れを考慮したコンクリートの引張構成則は健全なコンクリートと同様なものを用いた。

4.4 解析結果

図-8に NC2 試験体の解析結果を示す。図-8(a)は、かぶりコンクリートに対する圧縮強度の低減係数 ν について整理した結果である。図中には、 $\nu=0, 0.75, 1.0$ の結果を示している。なお、拘束効果は Park らの手法でモデル化している。これより、ひび割れが生じたかぶりコンクリートに $\nu=0.75$ を設定することにより、解析結果

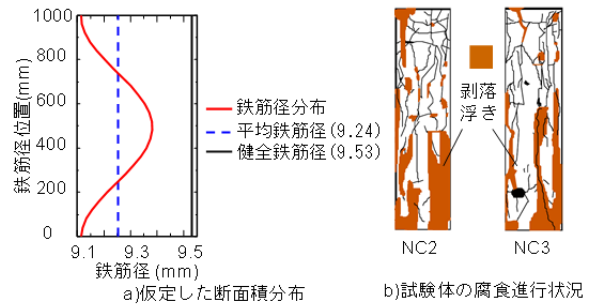


図-6 鉄筋径分布及び試験体の腐食ひび割れ状況

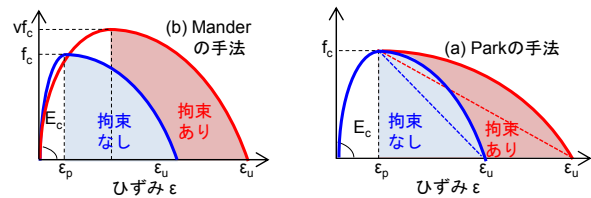
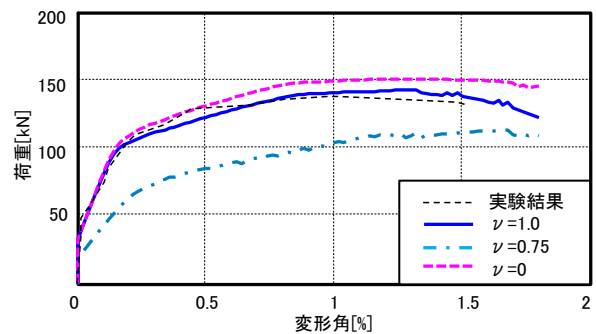
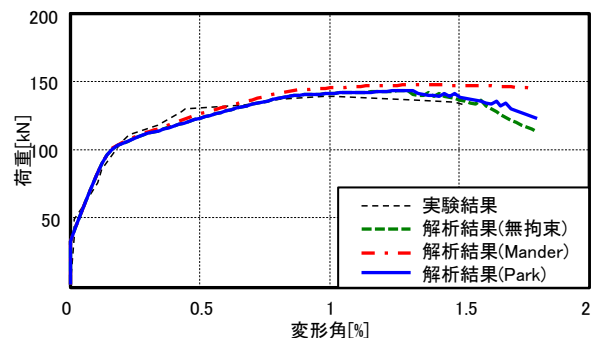


図-7 仮定した拘束効果



(a) 圧縮強度の低減の検討 (NC2)



(b) 拘束効果の検討 (NC2)

図-8 NC2 試験体の解析結果

が実験結果と良好に対応することが確認できる。したがって、かぶりコンクリートのひび割れによって圧縮抵抗が低下し、RC 造柱の最大耐力の低下を引き起こす可能性があることが確認できた。しかし、この 0.75 という値はひび割れの程度により変化することが予想されるため、今後ひび割れ量との対応について検討する余地がある。

一方、図-8(b)は、拘束効果のモデル化に関して整理した結果である。なお、かぶりコンクリートに対しては、 $\nu=0.75$ を設定している。

いずれも実験結果と良好な対応を示しているが、特にポストピーク挙動に着目すると、無拘束あるいは Park らの手法を用いた結果が実験結果と良い対応を示している。

いずれにせよ、健全試験体の場合と異なり、拘束効果のモデル化が解析結果に及ぼす影響が小さい。これは帯筋自体が腐食によって断面減少したことに加えて、かぶりコンクリートの圧縮強度を低減したことにより、帯筋による拘束効果が低下したためであると考えられる。

以上の結果より、腐食鉄筋を有する RC 造柱においては、健全鉄筋断面の減少、鉄筋-コンクリート間の付着劣化およびかぶりコンクリートのひび割れ発生の影響といった複合的な劣化作用を考慮することによって構造性能を評価できると考えられる。

5. 腐食試験体 (NC3) のモデル化および解析結果

図-9 に NC2 と同様のモデル化を行った NC3 試験体の解析結果を示す。なお前章と同様に、拘束効果は Park らの手法を、圧縮強度低減は $v=0.75$ を与えた。解析結果は耐力・変形ともに実験結果を大幅に上回る結果となった。この原因として、実験において設定された軸力比の違いおよび実験において確認された帯筋の破断の2つの要因が考えられる。

5.1 高軸力の影響

NC3 試験体は軸力比が 0.4 の高軸力下で荷重実験が行われている。健全試験体であれば、この高軸力に伴って拘束効果が発揮され、耐力・変形性能が向上することが推測される。しかし、腐食試験体においては、NC2 試験体の解析結果より拘束効果が発揮されない可能性が高い。したがって、高軸力の影響は、NC2 試験体に比べてかぶりコンクリートに顕著な浮きや剥落を生じさせる形で現れると考えられる。そこで、かぶりコンクリートの圧縮強度の低減係数を $v = 0, 0.25, 0.75$ と変動させたパラメトリック解析を実施した。なお、圧縮破壊エネルギー $G_{fc} \approx 0$ と仮定し、最終ひずみが最大耐力時ひずみとほぼ同じになるような状態を設定した(図-10)。また拘束効果の影響は考慮していない。図-11 に解析結果を示す。 $v = 0.25$ を仮定した場合の解析結果が実験結果の傾向を良好に模擬した。したがって、かぶりコンクリートのひび割れ発生に伴う圧縮強度の低減を行う際には、軸力比に応じて低減係数を変化させる必要があると考えられる。

5.2 帯筋破断の影響

既往の研究¹³⁾では、せん断補強筋の腐食が RC 部材の耐力に影響を与えることが指摘されている。せん断補強筋は主筋と比べて径が細く、主筋の外側に配筋されており、かぶりコンクリートに近接しているため、外的要因による腐食の影響が主筋と比較して大きいと考えられる。

5.2.1 帯筋の破断に関する要素解析

帯筋の破断現象を FEM 解析において連続体として扱うために、断面欠損を有する鉄筋の引張試験を解析対象とした要素解析を実施した。要素解析概要を図-12 に示

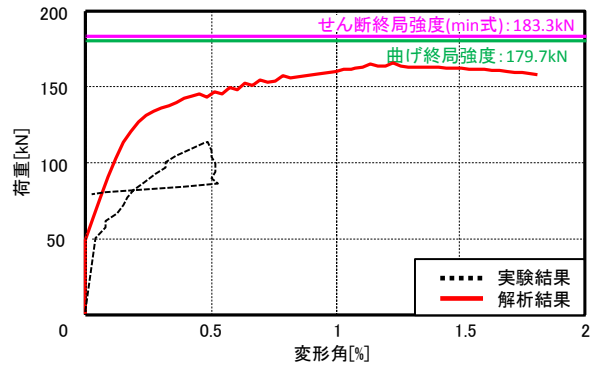


図-9 NC3 試験体の解析結果

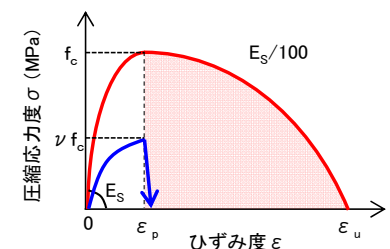


図-10 かぶりコンクリートの構成則

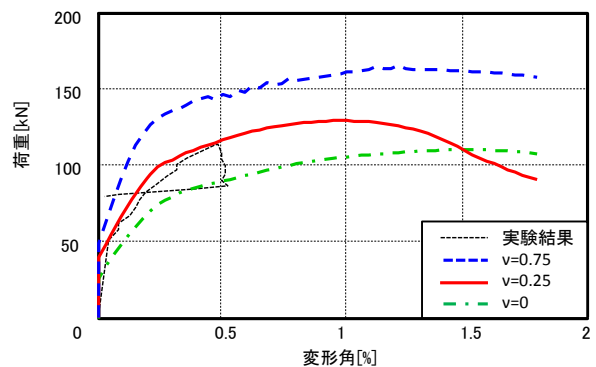


図-11 解析結果

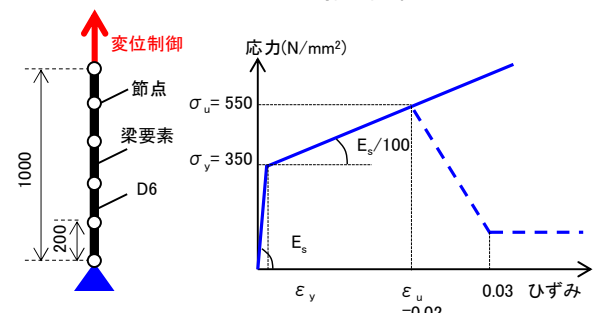


図-12 破断を仮定した構成則

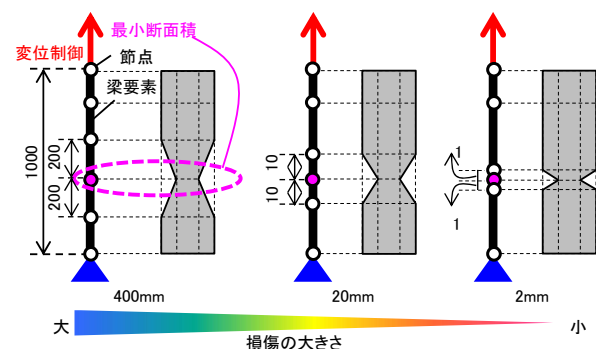


図-13 仮定した断面積分

す。検討に用いる鉄筋は D6 とし、全長を 5 つの要素に分割した。応力度 - ひずみ度関係は Multi-linear モデルとし、引張強度到達後の軟化挙動を仮定することにより、破断現象のモデル化を試みた。降伏応力までは弾性剛性とし、2 次勾配は初期剛性の 1/100 とした。また、最大応力時のひずみは全体変形の 0.2% とし、破断後の挙動を想定した 3 次勾配は、最大応力時ひずみの 1.5 倍のひずみで応力を負担しなくなるように仮定した。

図-13 に要素解析において設定した 3 つの仮定断面積分布を示す。解析に際しては、節点に断面積を入力し、節点間の断面積分布は線形に仮定した。また、最小断面は断面減少率が 50% になるように設定した。

図-14 に解析結果を示す。なお、帯筋の応力度は解析結果より得た引張力を公称断面積で除すことで求めた。各 Case で降伏点、最大強度および変形性能が異なるが、特に変形性能の差は著しく、最も局所的に断面積が減少している case1 は極めて脆性的な破壊を示した。これは、最小断面位置にひずみが集中したためである。これより、鉄筋の断面積分布を適切に考慮することで、鉄筋の強度、変形性能の低下を表現することが可能と考える。

5.2.2 鉄筋の引張試験に基づく妥当性の確認

金久保らの鉄筋の単調引張試験¹⁴⁾を解析対象に、解析モデルの妥当性を確認する。使用した応力度 - ひずみ度関係は図-11 に示したとおりであり、降伏・最大応力とその時のひずみは実験値とした。図-15 に実験で切削した 2 本の鉄筋の断面積分布と、解析で仮定した断面積分布を示す。Case1 および Case2 は実状に即した断面積分布の仮定であるが、断面欠損の程度の表現を変えている。また、Case3 では、最小断面位置を含めて断面積分布に対応するような直線を仮定した。解析結果を図-16 に示す。Case1 と Case2 を比較すると、断面欠損をより局所的に表現した Case2 の方が変形性能の低下が顕著である。一方、実際の断面欠損状況に近い Case1 では、実験結果と同等の変形性能が得られた。したがって、断面欠損をモデル化するには、断面欠損の状況を的確にモデル化する必要がある。また、Case3 では、実験において確認された変形性能の低下を表現することができなかった。今後さらに検討が必要であるが、極めて局所的な断面欠損が鉄筋の変形性能を左右する可能性が考えられる。

5.2.3 帯筋の破断を考慮した NC3 試験体の解析

本報における柱の解析モデルでは、帯筋を埋め込み鉄筋要素でモデル化している。そのため、断面積は一様分布となる。そこで、要素解析によって得られた応力度 - ひずみ度関係を帯筋の構成則として入力することにより、帯筋の破断を表現する(図-17)。なお、帯筋に対する損傷は腐食による孔食を想定し、より局所的な損傷幅 2mm を与え、解析を行った。

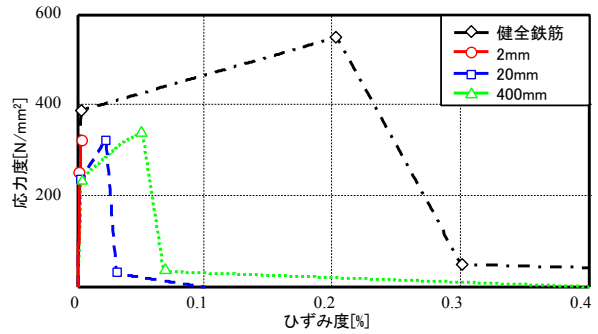


図-14 解析結果

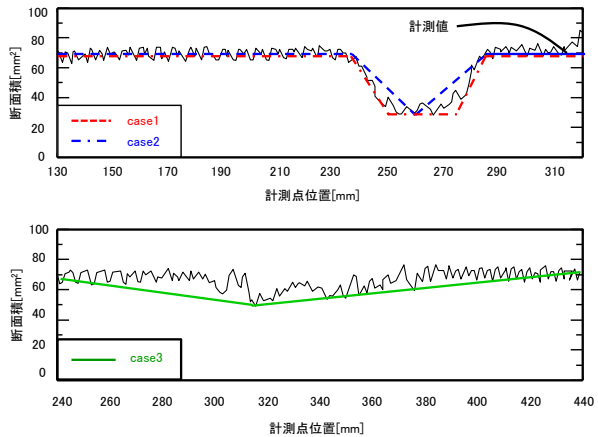


図-15 断面積の測定値と仮定

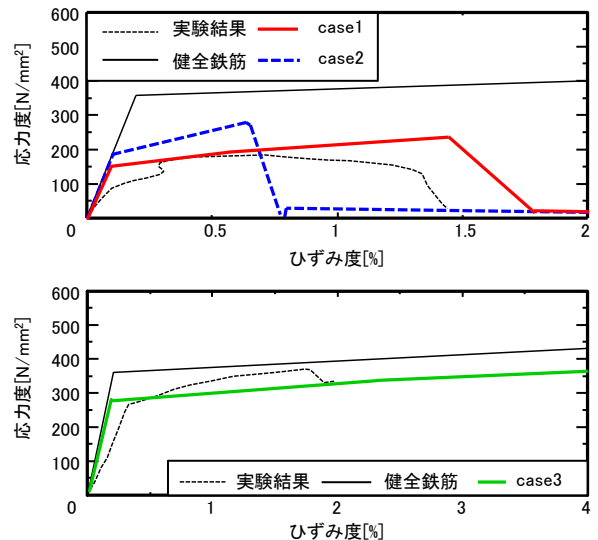


図-16 解析結果

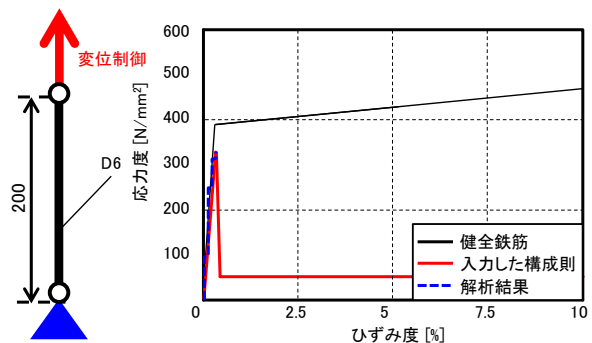


図-17 解析結果の導入

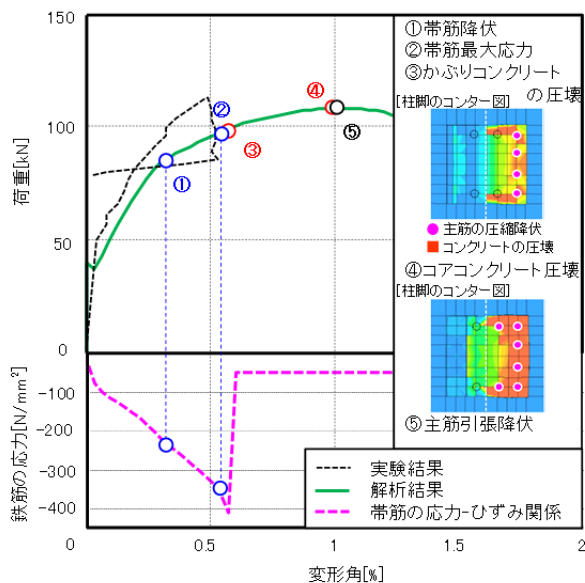


図-18 破断現象を考慮した RC 柱の解析

図-18にRC柱全体の荷重-変形角関係および、破断鉄筋の負担応力-RC柱の変形角関係を示す。ここでは、かぶりコンクリートに対する圧縮強度の低減係数として、 $\nu=0.25$ を与えている。また、図中には併せて柱脚部断面の圧縮主ひずみ分布の変遷を示す。変形角1%時に圧縮側および引張側の鉄筋がそれぞれ降伏し、最大耐力を迎えた。また、帯筋は変形角0.3%で降伏した後、0.5%近傍で最大応力度に達している。これにより、引張主筋が降伏する前に、帯筋の破断現象を表現することができた。しかし、建築構造物は複数の主要部材の破壊によって崩壊形を形成する。そのため、構造物全体の構造性能を評価するためには、個々の部材のポストピーク挙動まで表現することが必要である。今後の課題として、実験で観察されたようなせん断破壊に伴うスナップバック挙動を表現可能な弧長制御法の適用についても検討する必要がある。

5.2.3 まとめ

- (1) 鉄筋腐食に伴う健全部断面の減少、付着劣化およびかぶりコンクリートのひび割れの影響を考慮した3次元FEM解析モデルを構築した。これにより、実現象で確認された剛性・耐力・変形性能の低下を良好に模擬することができた。
- (2) 腐食鉄筋の強度ならびに変形性能の低下は、断面分布を適切に考慮すれば自動的に表現可能である。
- (3) かぶりコンクリートのひび割れの影響は、圧縮強度と破壊エネルギーを低減することで考慮できる。
- (4) 鉄筋の応力度-ひずみ度関係において軟化挙動を組み込むことにより、腐食した帯筋の破断のタイミングを解析的に求めることができた。今後、脆性的な柱のポストピーク挙動の表現が課題である。

謝辞

本研究の一部は科学研究補助金(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る。

参考文献

- 1) 文部科学省:学校施設の老朽化対策について,2013.3
- 2) 堀川真之, 秋山洋輔, 新藤辰典, 田嶋和樹, 白井伸明:「FEMを用いた鉄筋が腐食したRC造部材及び構造物の構造性能評価」,日本建築学会学術講演会梗概集, pp.471-476,2013
- 3) 新里洋基, 山川哲雄, 森下陽一, 玉寄幸直:自然暴露により損傷したRC柱の耐震性能に関する実験的研究,コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.259-264, 2003
- 4) Nakamura, H., and Higai, T.:Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Intelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471-487, 1990. 10
- 5) D.C.Kent and R.Park:Flexural Members with Confined Concrete, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.97, No. 7, pp. 1969-1990, 1971.7
- 6) J.B.Mander : Teoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, Journal of Structural Engineering, Vol.114, No.8, pp.1804-1826, 1988.
- 7) 大岡督尚ほか: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,99.1-6.2000.3
- 8) CEB:CEB-FIP MODEL CODE1990 DESIGN CODE, Thomas Telford Service Ltd,1993
- 9) TNO Building and Construction Reserch,2010 : DIANA Foundation Expertise Center for Computational Mechanics: DIANA Finite Element Analysis User's Manual
- 10) 齊藤成彦, 高橋良輔, 檜貝勇:鉄筋の腐食分布がRC梁の曲げ耐荷性状に及ぼす影響,土木学会論文集,E,Vol.64,No.4,pp.601-611,2008.11
- 11) 岡崎雅弘, 下村匠, 松尾洋:鉄筋軸方向の非一様性に着目したコンクリート中の鉄筋腐食と腐食ひび割れに関する検討,コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp857-862, 2003
- 12) 日本コンクリート工学協会:コンクリート構造物の長期調査支援に関するシンポジウム, pp.251,2004
- 13) 佐藤吉孝, 服部篤史, 山本貴志, 宮川豊章:「RC部材中におけるせん断補強筋の腐食がせん断補強筋がせん断耐荷特性に与える影響」,土木学会大57回年次各術講演会, pp.273-274, 2002
- 14) 金久保利之, 大屋戸理明, 齋藤祐哉, 八十島章, 山本泰彦:鉄筋の腐食を模擬したRC柱の構造性能に関する研究(その1)切削鉄筋の力学的性状,土木学会第61回年次学術講演会, pp529-530,2006