

鉄筋の付着劣化を改善させることによる RC柱の危機耐性向上に関する研究

植村佳大¹・高橋良和²

¹学生会員 京都大学大学院工学研究科（〒615-9193 京都府京都市西京区京都大学桂）

²正会員 工(博) 京都大学准教授 京都大学工学研究科（〒615-9193 京都府京都市西京区京都大学桂）

1. はじめに

東日本大震災を機に、危機耐性という概念が提案された。この危機耐性とは、設計上想定する地震動に対し安全を確保することに加え、設計上の想定とは異なる地震動が発生したとしても、直ちに危機的状況に陥らないようにするべき、という考え方である。この危機耐性を実現するには、被災時の代替ルートの確保といった復旧戦略などのソフト対策も重要であるが、ハード対策として新たな構造技術を提案することも必要である。このハード対策としての構造技術戦略に鈍構造という考え方がある¹⁾。鈍構造とは「構造物が提供する機能の損失に対して鈍感な構造」を意味し、地震の規模・性質の変化に鈍感であり、設計上の想定とは異なる、ありとあらゆる地震動に対しても急激な崩壊に至らないような構造をさす。そしてこの鈍構造は「部材レベルでの鈍構造」と「構造システムレベルでの鈍構造」に分けることができ、それぞれにおいて地震に対する構造物の耐震性を検討する必要がある。その中で本研究はRC部材を対象に「部材レベルでの鈍構造」について検討を行った。

部材レベルでの鈍構造実現においては、想定と異なる地震発生時に、RC部材の破壊開始以降の耐力劣化をいかに抑制するかが重要になってくる。従来、RC部材の耐力劣化の改善には帯鉄筋の働きが重要視されており、これまでの耐震基準強化に伴い必要とされる帯鉄筋量は引き上げられてきた。そのような中、実務では鉄筋の過密化が進み、その結果としてコンクリートの充填性低下や、現場で鉄筋が組めないなどの過密配筋問題が生じている。そこで、この過密配筋問題が生じない形で危機耐性を高める手

法、すなわち帯鉄筋のみに頼ることなくRC部材の耐力劣化を改善する方法が必要とされている。

そこで本研究では、帯鉄筋に頼ることなくRC部材の耐力劣化改善を目指すにあたって、付着割裂ひび割れの制御による付着劣化改善と耐力劣化の関係を正負交番載荷実験により考察した。付着割裂ひび割れとは主鉄筋に沿った縦方向のひび割れであり、その発生により急激な付着劣化を引き起こすとされている。そして耐力劣化の進行に伴い付着割裂ひび割れが発生・進展している様子が確認されており²⁾、付着割裂ひび割れの制御による付着劣化の改善がRC柱の耐力劣化改善につながる可能性が示唆されている。

2. 正負交番載荷実験の概要

(1) 節を高くした主鉄筋

主鉄筋の節を高くすることで付着割裂ひび割れの発生が抑制されることが知られている³⁾。そのため、本研究では、図-1のように、主鉄筋に円形中空リングを溶接することにより節を高くした。その際、非塑性ヒンジ領域にて主鉄筋の節を高くし、RC柱の曲げ耐力及びせん断耐力を変化させないよう留意した。これにより、節の高さのみに着目した耐力劣化改善効果の検討を可能にした。



(a) 円形中空リング (b) リングを溶接した主鉄筋

図-1 節を高くした主鉄筋

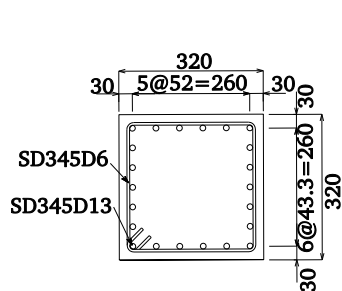


図-2 断面図 (Unit[mm])

(2) 実験供試体

本実験では、主鉄筋の節高さを変化させた RC 柱を計 3 本作製した。コンクリートには、セメントの種類が早強ポルトランドセメント、呼び強度 18[MPa]、スランプ 18cm、粗骨材の最大寸法 15mm のものを用いた。図-2 に実験供試体の断面図、図-3 に配筋図を示す。各供試体は、断面(320×320mm の正方形)、せん断スパン長 1020mm、帯鉄筋比 0.20%、主鉄筋比 2.72%で共通である。供試体間での違いは、高くした節のみである。それぞれの供試体名は[C 帯鉄筋間隔-p 高くした節のピッチ]により特徴づけた。

(3) 荷重方法と測定データ

荷重方法は正負交番荷重とし、荷重変位は主鉄筋の降伏が確認された 12mm 振幅を 3 回、その後変位振幅を 24mm にして 10 回、最後に変位振幅を 30mm にして顕著な耐力劣化が生じるまで繰り返し荷重を行った。また軸応力は 2.0MPa を与えた。

測定データについては、供試体の各変形状態における復元力を得るため、アクチュエータに設置されているロードセルにより供試体の荷重位置における復元力及び軸力を測定した。また、供試体の荷重位置における水平変位を計測するため、供試体の荷重位置にワイヤ式変位計を設置した。さらに主鉄筋及び帯鉄筋のひずみを、ひずみゲージを貼付することにより測定した。

3. 実験結果及び考察

(1) 荷重-変位関係と正負最大荷重の推移

図-4に実験により得られた各供試体の荷重-変位関係を、図-5に各供試体の正負最大荷重の推移を示す。図-5より、各供試体の耐力劣化の推移を比較すると、C100にのみ著しい耐力劣化が発生していることがわかる。一方、節を高くしたC100-p100とC100-p50は、繰り返し回数の増加に伴い、なだらかに耐力は劣化

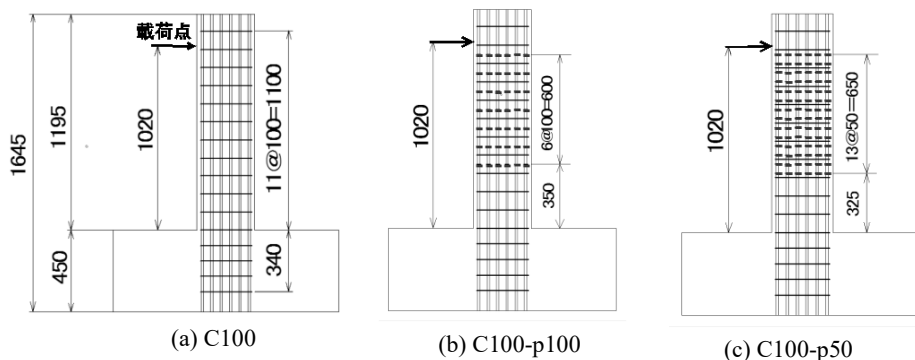


図-3 実験供試体の配筋図 (Unit[mm])

するものの、顕著な耐力劣化の発生がC100に比べて遅れることがわかった。ここで、C100に顕著な耐力劣化が生じた荷重振幅24mmの1サイクル目から8サイクル目までの各供試体の正負最大荷重の低下を比較すると(表-1)、正最大荷重はC100と比べて、C100-p100は11.6%、C100-p50は9.3%耐力劣化が改善し、負最大荷重は、C100-p100は7.7%、C100-p50は9.5%耐力劣化が改善していることがわかる。以上より、平均するとC100-p100、C100-p50ともに約10%の耐力劣化が改善されていることがわかった。

表-1 1cycle 時と 8cycle 時の正負最大荷重の比較
(荷重振幅 24mm)

(a) 正最大荷重

	荷重		割合
	1cycle目 (kN)	8cycle目 (kN)	8cycle目/1cycle目
C100	162.3	119.4	0.741
C100-p100	162.6	139.3	0.857
C100-p50	162.8	135.8	0.834

(b) 負最大荷重

	荷重		割合
	1cycle目 (kN)	8cycle目 (kN)	8cycle目/1cycle目
C100	141.1	109.6	0.777
C100-p100	146.4	125.0	0.854
C100-p50	145.0	126.4	0.872

(2) ひび割れ性状

図-6に24mm振幅終了時の各供試体のひび割れ状況を示す。図-6から、節を高くしていないC100では荷重面・裏面において付着割裂ひび割れ(荷重面・荷重裏面の太線)が柱上部まで進展していることがわかる。一方、節を高くしたC100-p100,C100-p50では付着割裂ひび割れ(荷重面・荷重裏面の太線)が発生はするものの、進展が節の位置で止まっていることがわかる。

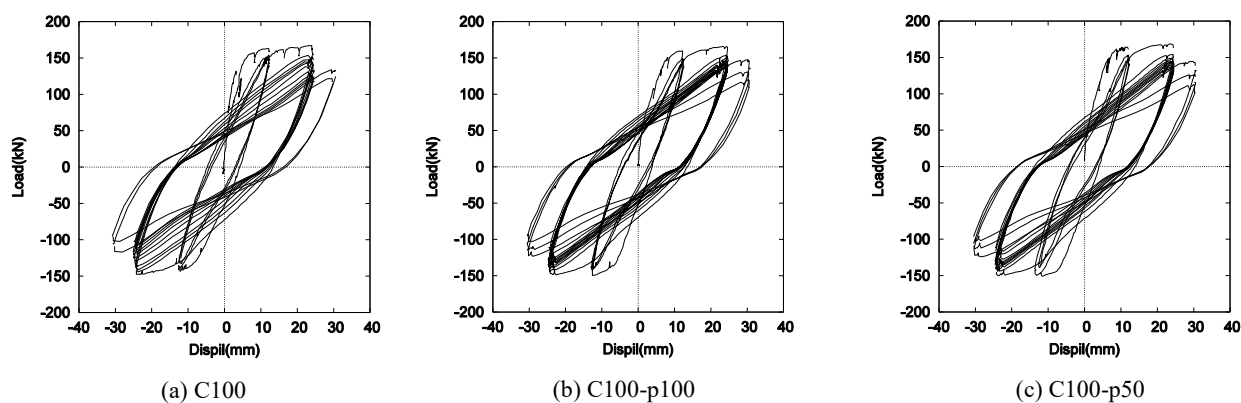


図-4 荷重-変位関係

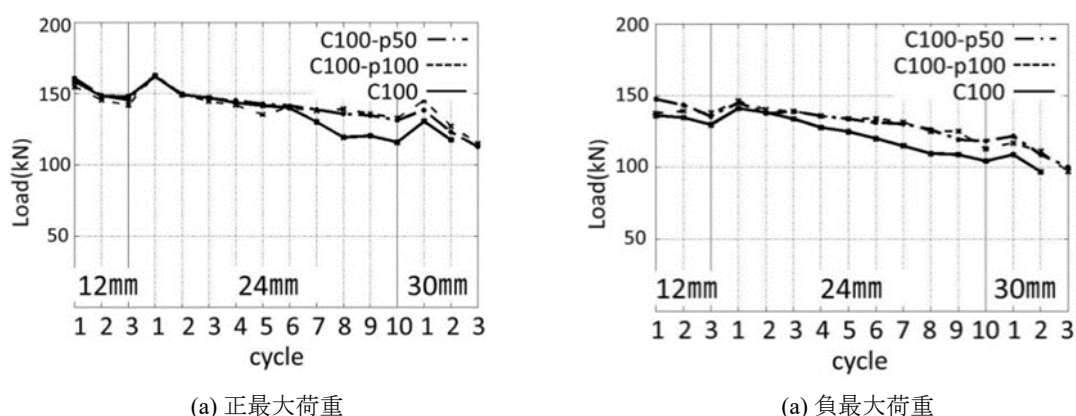


図-5 正負最大荷重の推移

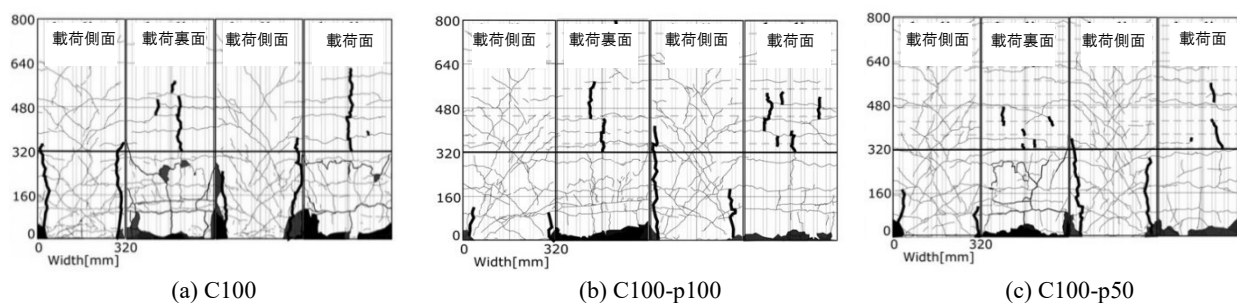


図-6 ひび割れ図

このことから、主鉄筋の節を高くすることで付着割裂ひび割れの進展が抑制されていることがわかる。

$$\tau_x = \frac{A_s \cdot \Delta \sigma_{xs}}{\pi \cdot D \cdot \Delta x} = \frac{D}{4} \cdot \frac{\Delta \sigma_{xs}}{\Delta x} \quad (1)$$

(3) 主鉄筋の付着応力の分布

コンクリートの中の鉄筋において、軸方向に応力の変化がある場合、その応力差 $\Delta \sigma_{xs}$ による鉄筋のずれに抵抗するように鉄筋の表面には付着応力が働いている。付着応力は鉄筋表面単位面積あたりに生じる平均応力で表され、式(1)のように求められる。

ここに、 A_s は鉄筋断面積、 D は鉄筋直径、 Δx は鉄筋の微小長さである。この付着応力の柱高さ方向の付着応力分布を図-7に示す。ここで、鉄筋の応力-ひずみ関係はバイリニアと仮定しており、データ欠損の少なかった計測区間のデータを平均して付着応力を算出した。また、グラフの縦線は、後藤ら⁴⁾による

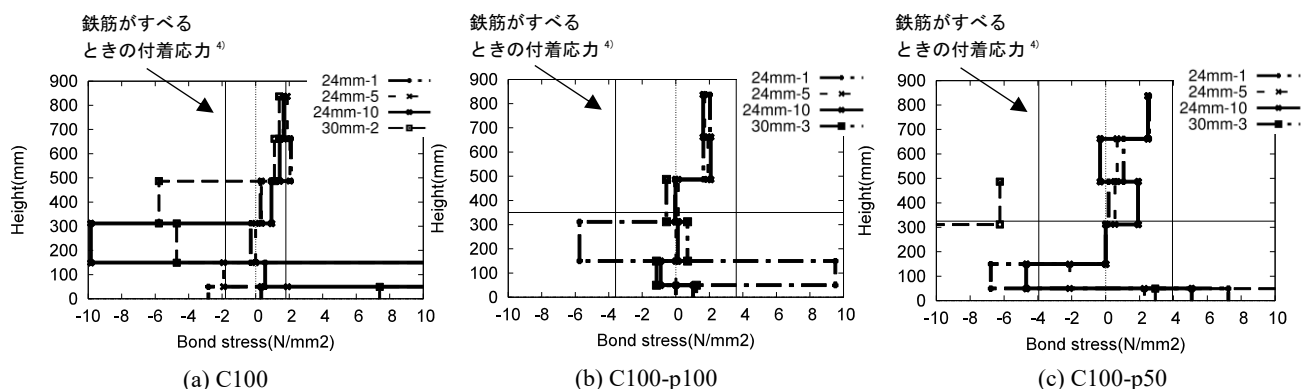


図-7 主鉄筋の柱高さ方向の付着応力分布

引き抜き試験で得られた、鉄筋とコンクリートの付着が喪失するときの付着応力であり、鉄筋の付着応力がこの値を超えると、その区間で主鉄筋のすべりが発生している可能性が高いことを意味する。グラフの横線はそれより上の区間 (C100-p100は350mm, C100-p50 は325mm)で節が高くなっていることを表している。今回は節高さの加工を行った区間(高さ300mm以上)に着目して考察を行っていく。

節を高くしていないC100については、高さ300mm以上のすべての区間において、主鉄筋のすべりが発生しており、付着劣化が生じている可能性が高いことがわかる。

一方、節を高くしたC100-p100とC100-p50については、高さ300mm以上のすべての区間において、載荷振幅24mmの段階ではどの区間も鉄筋のすべりは生じていないことがわかる。これにより、鉄筋の節を高くすることで、鉄筋の付着劣化が改善していることがわかる。

(4) 付着割裂ひび割れと付着応力分布の比較

ここで、実際に付着割裂ひび割れが発生した鉄筋について、その付着割裂ひび割れとその鉄筋の付着応力分布を比較し、付着割裂ひび割れ進展の抑制と鉄筋の付着劣化の改善の関係を考察する(図-8)。なお、図-8(a)では24mm振幅の1サイクル目と24mm振幅の3サイクル目に加え、付着割裂ひび割れが発生したサイクルの付着応力を示し、図-8(b)(c)では、節を高くしていない鉄筋と比較できるように、C100-p100及びC100-p50それぞれの鉄筋で付着割裂ひび割れが生じたサイクルに加え、C100の鉄筋で付着割裂ひび割れが生じたサイクルの付着応力も示している。

a) C100 (鉄筋 c)

C100の鉄筋cについて、24mm振幅の5サイクル目に付着割裂ひび割れが200mmほど進展した。その間、鉄筋cの付着応力は、320mmより高いすべての区間

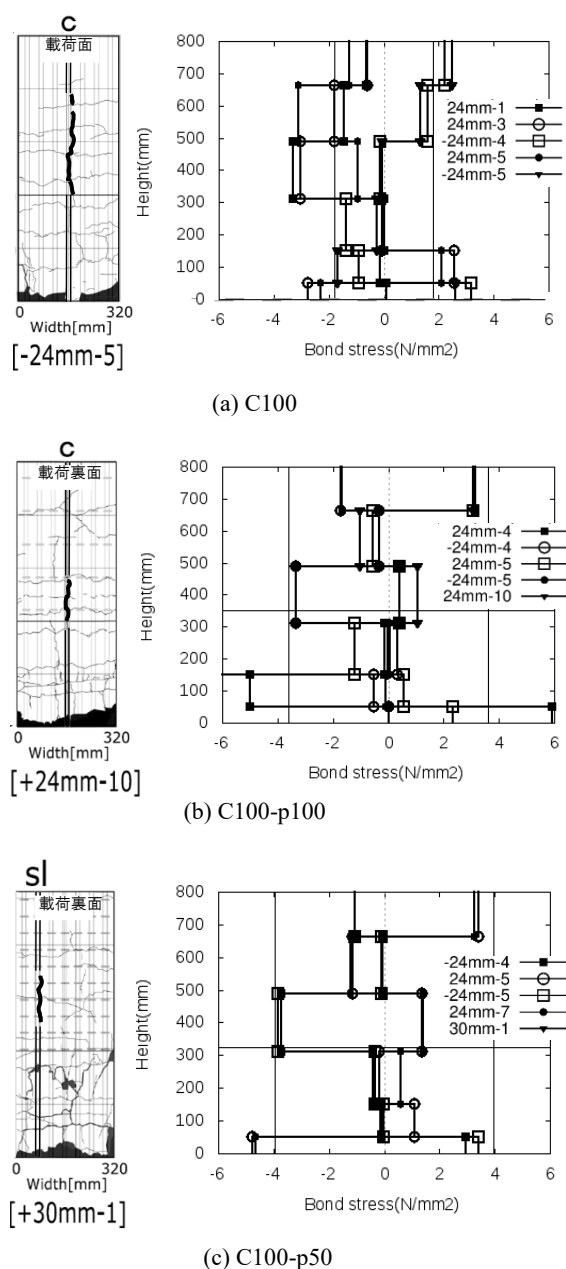


図-8 付着裂ひび割れと付着応力分布の比較

において、鉄筋のすべりが生じるときの付着応力を越えていることから、鉄筋全体ですべりが生じている可能性が高いと言える。

b) C100-p100 (鉄筋 c)

C100-p100の鉄筋cについて、付着割裂ひび割れは24mm振幅の4サイクル目に発生したが、その後進展せず、24mm振幅の10サイクル目になって65mmほど下方向に進展したのみであった。このときの鉄筋cの付着応力の分布から、付着割ひび割れが発生している区間における鉄筋cの付着応力が、すべりが生じる付着応力とほとんど同じ値を示していることから、この区間では鉄筋のすべりが生じていると考えられる。しかし、その上の区間の付着応力が小さいことから、鉄筋全体ではすべりが生じていないことがわかる。

c) C100-p50 (鉄筋 sl)

C100-p50の鉄筋slについて、付着割裂ひび割れは24mm振幅の7サイクル目に発生し、その後載荷振幅24mmの繰り返しでは進展せず、載荷振幅が30mmの1サイクル目で70mmほど進展した。このときの鉄筋slの付着応力の分布から、C100-p100のときと同じく、付着割裂ひび割れが発生している区間では鉄筋のすべりが生じているが、鉄筋全体ではすべりが生じていないことがわかる。

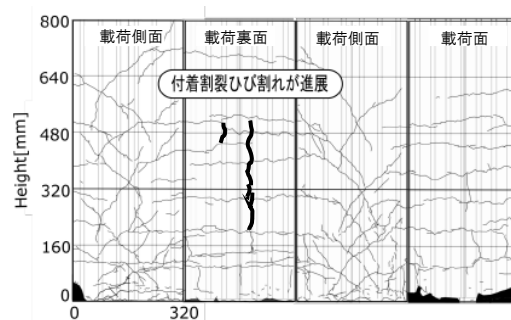
a)~c)から、付着割裂ひび割れ進展の抑制が、鉄筋全体のすべりを防ぎ、鉄筋の付着劣化を改善させていることがわかる。

(4) 付着割裂ひび割れと耐力劣化の推移の比較

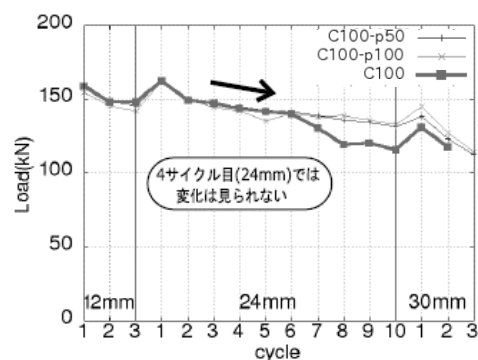
本実験結果において、主鉄筋の節を高くすることで、付着割裂ひび割れの進展が抑制され、主鉄筋の付着劣化が改善されることがわかった。そして、耐力劣化が改善されたC100-p100、C100-p50と、著しい耐力劣化が生じたC100の違いは、この付着劣化の改善のみである。しかし、C100での付着割裂ひび割れの進展と耐力劣化の推移を比較すると(図-9)、付着割裂ひび割れが急激に進展したサイクルで、顕著な耐力劣化が生じていないことが分かる。そのため、付着割裂ひび割れの進展による付着劣化は、RC柱の耐力劣化には直接結びついてはいないと言え、主鉄筋の付着劣化の改善のみでは、本実験で確認された耐力劣化改善効果のメカニズムは説明できないことがわかった。

(6) 載荷側面における縦ひび割れと耐力劣化の推移の比較

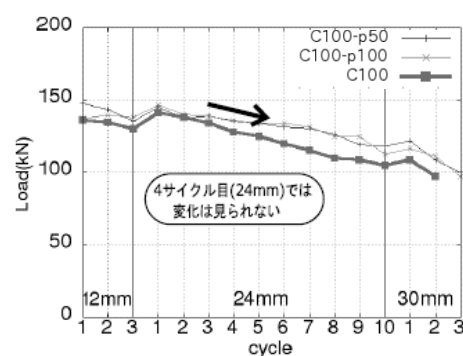
図-6のひび割れ図を見ると、すべての供試体で載



(a) C100 のひび割れ図 [4 サイクル目 (24mm 振幅)]



(b) 正最大荷重の推移

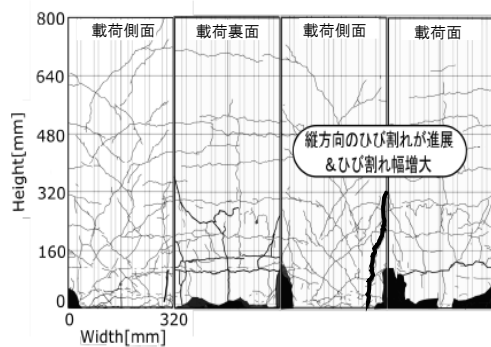


(c) 負最大荷重

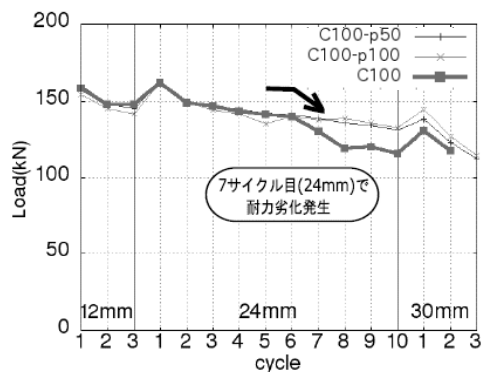
図-9 付着割裂ひび割れと耐力劣化の推移比較

荷側面において基部から320mmまでの区間に主鉄筋に沿った縦方向のひび割れが発生していることがわかる。そして、この主鉄筋に沿った縦方向のひび割れは付着割裂ひび割れではなく、基部周辺の損傷が顕著になると同時に発生していることや、載荷面及び載荷面裏側のひび割れとのつながりから考えると、基部付近の主鉄筋の座屈により発生したものであると言える。ここでC100について、この載荷側面における縦ひび割れと耐力劣化の推移を比較すると(図-10)、縦ひび割れの発生と耐力劣化の発生が対応していることがわかる。

以上より、本実験で生じた著しい耐力劣化は、主鉄筋の座屈に起因していたことがわかった。さら



(a) C100 のひび割れ図 [7 サイクル目(24mm 振幅)]



(b) 正最大荷重の推移

図-10 載荷側面の縦ひび割れと耐力劣化推移の比較

に、節を高くしていないC100において最初に主鉄筋の座屈が生じたことから、節を高くしたことによる付着劣化の改善が主鉄筋の座屈抑制につながったことがわかった。

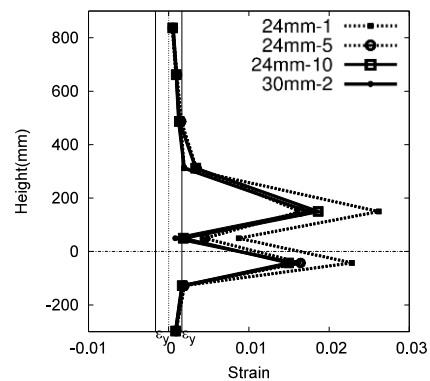
4. 主鉄筋の付着劣化改善による座屈制御のメカニズムの推定

本実験により、主鉄筋の付着劣化を改善させることにより、主鉄筋の座屈が制御されることがわかった。本章では、主鉄筋の付着劣化改善による座屈制御のメカニズムを推定する。

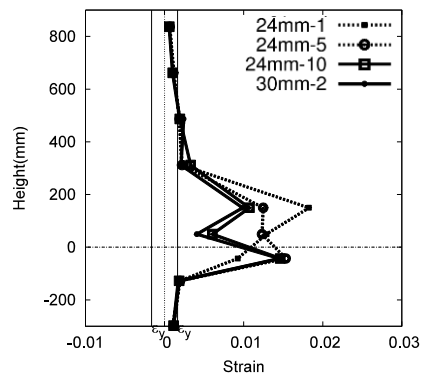
(1) 繰り返し載荷時における主鉄筋の座屈

一般に、繰り返し載荷中に鉄筋が引張時において塑性変形すると、変形量が増大し、圧縮側に転じた際に主鉄筋が座屈しやすくなると考えられている。そのため、主鉄筋の付着劣化が生じたC100において、付着劣化により柱の高さ方向に主鉄筋のひずみの平滑化が生じ、鉄筋が広範囲で塑性変形して鉄筋の変形量が増大したことで、他の供試体より座屈しやすい状態であった可能性が考えられる。

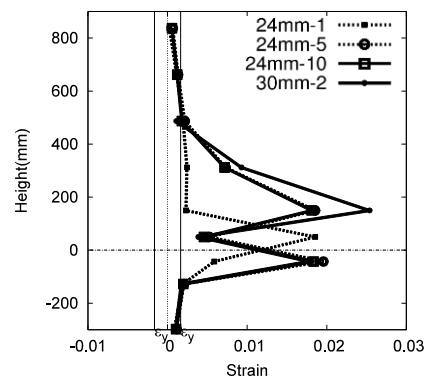
しかし、各供試体の主鉄筋のひずみ分布を示した



(a) C100



(b) C100-p100



(c) C100-p50

図-11 主鉄筋のひずみ分布

図-11を見ると、主鉄筋のひずみ分布について各供試体間で大きな差異はなく、C100においてのみ広範囲で塑性変形が生じ変形量が増大している様子は確認されない(なお、グラフにおける縦線は、主鉄筋の降伏ひずみを表す)。そのため、主鉄筋のひずみ分布からは、C100のみが座屈しやすい結果を説明できないことがわかる。

(2) 主鉄筋の座屈抵抗特性と付着劣化

主鉄筋座屈の抵抗特性には、主鉄筋自体による抵抗特性、帯鉄筋による抵抗特性、かぶりコンクリートによる抵抗特性の3つがあるとされている。ここ

で、帯鉄筋及びかぶりコンクリートによる抵抗特性に関しては、各供試体間で共通であることから、主鉄筋の付着劣化は、主鉄筋に自体による抵抗特性に何らかの影響を与えたと考えることができる。この主鉄筋の抵抗特性は、オイラーの座屈理論式に由来しており、式(2)で表される。

$$\sigma_{cr} = \frac{4\pi^2 E}{(L_{cr}/r)^2} \quad (2)$$

ここに、 σ_{cr} は座屈応力、 L_{cr} は有効座屈長、 r は断面二次半径、 E は弾性係数である。ここで、通常鉄筋コンクリート柱の主鉄筋の座屈を考えると、座屈時の両端固定条件は両端固定であり、座屈長はヒンジ長となることが知られている。

a) 主鉄筋の付着劣化と座屈時の両端固定条件

本実験結果より、主鉄筋の節を高くしたC100-p100及びC100-p50では、付着割裂ひび割れの進展が抑制され、ひび割れが発生している区間では鉄筋のすべりが発生しているものの、高くした節を越えるような損傷は発生しておらず、節部では固定状態のままと考えられる。一方、主鉄筋の節加工を行っていないC100では、載荷面及び載荷裏面に発生した付着割裂ひび割れが急激に進展し、鉄筋全体ですべりが生じていたと考えられる。そのため、C100では、鉄筋全体ですべりが生じ、鉄筋の定着が弱くなり、座屈が生じる場合の両端の拘束条件が完全な両端固定でなくなっている可能性が考えられる。

b) 主鉄筋の付着劣化と座屈長

C100のように鉄筋全体ですべりが生じ、鉄筋の両端固定条件が維持できなくなった場合、実際の鉄筋の座屈長は長くなり、より座屈しやすくなっていると推測できる。これに対し、C100-p100及びC100-p50では、鉄筋のすべりを高くした節で止めていることから、鉄筋が定着し両端固定が維持できていると考えられ、鉄筋の座屈発生応力がC100よりも大きなものになる可能性が考えられる。

5. 座屈長を変化させた数値シミュレーション

本章では、本実験の供試体を対象に数値シミュレーションを行い、一般的な座屈モデルにおいて、座屈長がRC柱に耐力劣化挙動にどのような影響を与えるかを示す。

(1) 解析モデル

解析モデルについてはファイバーモデルによりモデル化した。ここで、座屈長がパラメーターとなっている鉄筋の履歴モデルには、Gomesらが提案したモデル⁵⁾やDhakarらが提案したモデル⁶⁾がある。そし

て、Gomesらが提案したモデルに改良を加えたものが、以下の式および荷重-変位関係で提案されている⁷⁾。

$$\sigma_b = \gamma f_u - \frac{\Omega_b + \gamma}{1 + \gamma} (\gamma f_u - \sigma) \quad (3)$$

$$\Omega_b = \beta \frac{\sqrt{32}}{3\pi l_{SR} \sqrt{\varepsilon_s - \varepsilon_o}} \quad (4)$$

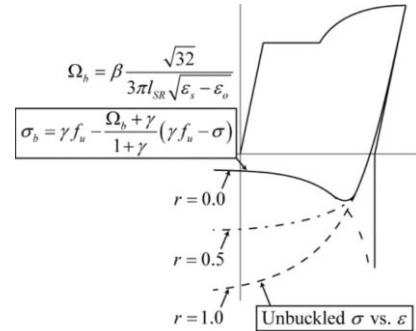


図-12 鉄筋の荷重-変位関係⁷⁾

ここで、図-12より σ_b は座屈時の鉄筋の応力、 σ は座屈しなかった場合の鉄筋の応力、 l_{SR} は座屈長、 f_u は鉄筋の強度、 ε_s は鉄筋のひずみ、 ε_o は鉄筋の降伏ひずみ、 r は非座屈曲線から座屈曲線への移行を調整するパラメーターである。また γ は座屈時の応力に関するパラメーターであり、応力曲線は応力 γf_u に向かって減少する。パラメーター r 、 γ 、 β の値については、再現性の高い結果が得られるとされている $r = 0.4$ 、 $\gamma = 0.5$ 、 $\beta = 1.0$ を用いた⁷⁾。また、鉄筋の低サイクル疲労について、Manson-Coffin則⁸⁾⁹⁾を適用した。Manson-Coffin則におけるパラメーターの値は、既往の研究¹⁰⁾を参考にした。

ここで、今回の解析では、一般的に用いられている解析モデルにおいて、座屈長の変化がRC柱の耐力劣化挙動にどのような影響を与えるかを示す。そこで、本実験の供試体の座屈長を道路橋示方書・同解説V 耐震設計編¹¹⁾を参考に算出し、その値($l_{SR} = 179.25\text{mm}$)を基準として、

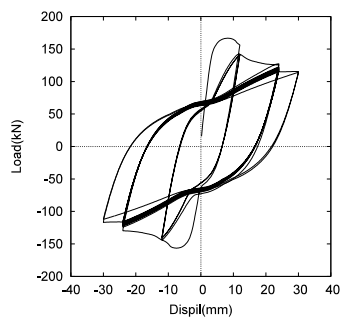
モデル1： $l_{SR} = 180\text{mm}$

モデル2： $l_{SR} = 90\text{mm}$

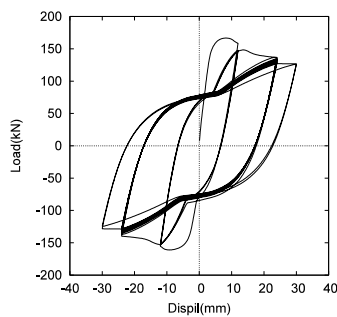
モデル3： $l_{SR} = 270\text{mm}$ として解析を行った。

(2) 解析結果

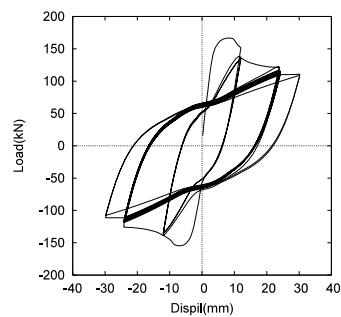
図-13に各モデルの荷重-変位関係を示す。図-13より、座屈長を変化させることで荷重-変位関係の骨格曲線が変化し、座屈長が長くなることで耐力劣化の度合いが大きくなっていることがわかる。しかし、各モデル間で、同一振幅時の耐力劣化には違いが見られない。本実験では、各供試体間で同一振幅時の耐力劣化挙動に違いが見られたことから、従来



(a) モデル 1 : $I_{SR} = 180\text{mm}$



(b) モデル 2 : $I_{SR} = 90\text{mm}$



(c) モデル 3 : $I_{SR} = 270\text{mm}$

図-13 各モデルの荷重-変位関係

の鉄筋の座屈モデルでは、本実験のような、耐力劣化挙動を再現することはできないことがわかった。しかし、実験中の状況や鉄筋のひずみデータから判断するに、主鉄筋の付着特性向上が座屈時の両端固定条件及び座屈長に影響を与えている可能性が高いと考えられる。そのため、主鉄筋の座屈によるRC柱の耐力劣化挙動をより正確に表現するためには、同一振幅時における座屈長の影響も考慮した座屈モデルの開発が必要であるといえる。

6. まとめ

本研究では、RC柱の危機耐性に向けて、主鉄筋の節を高くした供試体に対し正負交番載荷実験を行い、付着割裂ひび割れの制御による主鉄筋の付着特性向上が、RC柱の耐力劣化挙動にどのように影響するかを検討した。以下に、本研究で得られた結論と今後の課題を示す。

- 鉄筋の節を高くすることで、RC柱の耐力劣化が改善された。
- 鉄筋の節を高くすることで、付着割裂ひび割れの進展が抑制され、鉄筋の付着劣化が改善されたが、これは耐力劣化改善の直接的要因ではないことが分かった。
- 曲げ損傷で終局を迎えた本実験において、付着特性の向上が鉄筋の両端固定条件及び座屈長に影響を与え、鉄筋の座屈を抑制したことが耐力劣化を改善したメカニズムであると考えられる。
- 以上より、鉄筋の付着劣化を改善させることが、RC柱の危機耐性向上につながることを示した。
- 一般的に用いられている鉄筋の座屈モデルでは、本実験のような座屈長の変化により同一振幅時の耐力劣化に違いが生じる挙動を再現することはできないことがわかった。そのため、本実験で生じたような鉄筋の座屈長が変化することで生じる耐力劣化挙動をより正確に表現するため

には、同一振幅時における座屈長の影響も考慮した座屈モデルの開発が必要であるといえる。

参考文献

- 1) 高橋良和、日高拳：不確定性の高い地震作用に対する構造技術戦略としての鈍構造の提案とその適用事例に関する一考察，土木学会論文集A1, Vol.70, No.4 (地震工学論文集第33巻), I 535-I 544, 2014.
- 2) 後藤源太、高橋良和：2種類の帯鉄筋間隔を有するRC柱のせん断劣化特性に関する繰り返し載荷実験，第15回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp209-214, 2012
- 3) 近藤吾郎：鉄筋のふし形状が付着割裂特性に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 24, No. 2, 853 - 858, 2002
- 4) 後藤源太、高橋良和、澤田純男：主鉄筋の節高さを变化させたRC柱の正負交番載荷実験による耐力劣化改善効果に関する研究，第69回土木学会年次学術講演会梗概集，V-418, 2014
- 5) Augusto Gomes, Julio Appleton : Nonlinear cyclic stress-strain relationship of reinforcing bars including buckling, *Engineer Structures*, Vol.19, No.10, pp. 822-826, 1997.
- 6) Dhakal, R. P, Maekawa, K. : Modeling for postyield buckling of reinforcement. *Journal of Structural Engineering*, 128(9), 1139-1147, 2002.
- 7) http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Reinforcing_Steel_Material
- 8) L. F. Coffin and N. Y. Schenectady : A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal, *Transactions of the ASME*, pp. 931-950, 1954.
- 9) S.S.Manson : Behavior of Materials under Condition of Thermal Stress, *NACA Technical Note 2933*, 1953.
- 10) Brown, J. and Kunnath, S.K : Low Cycle Fatigue Behavior of Longitudinal Reinforcement in Reinforced Concrete Bridge Columns, *NCEER Technical Report 00-0007*, 2000.
- 11) 社団法人日本道路協会，道路橋示方書・同解説V耐震設計編，pp167-178, 2014