

主鉄筋の節の一部を高くすることによる RC 柱の耐力劣化改善効果の検討

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）
uemura.keita.35a@st.kyoto-u.ac.jp

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）
takahashi.yoshikazu.4v@kyoto-u.ac.jp

今日、危機耐性という考え方のもと、RC 柱の急激な耐力劣化を改善させることが重要となっている。本研究では、RC 柱の耐力劣化改善に向けて、主鉄筋の節の一部を高くしたことによる付着特性向上が、RC 柱の耐力劣化挙動にどのように影響するかを正負交番載荷実験により検討した。その結果、主鉄筋の節の一部を高くすることにより付着割裂ひび割れの進展が抑制され、鉄筋の付着特性が向上すること、そして、付着特性の向上が主鉄筋の両端固定条件の維持や座屈長の増大の軽減につながり、主鉄筋の座屈発生が抑制され、同一振幅での耐力劣化が改善されることを示した。また実験結果を受けて、鉄筋の座屈長をパラメータとした RC 柱のプッシュオーバー解析を行い、一般的な鉄筋の座屈モデルでは、同一振幅での耐力劣化挙動を正確に再現できないことを示した。

Key Words: RC columns, longitudinal bar' lug, bond, bond splitting crack, buckling

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べき、という考え方である。現在の耐震設計では、この危機耐性という考え方のもと、RC 柱の急激な耐力劣化を改善させることが重要となっている。従来、RC 柱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 柱の耐力劣化を改善する方法が必要とされている。

そのような中、既往の研究において、RC 柱の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いる¹⁾。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ことが知られている。そのた

め、付着割裂ひび割れの発生により生じる鉄筋の急激な付着劣化を改善することで、RC 柱の耐力劣化が改善される可能性が示唆されている。そこで本研究では、帯鉄筋に頼ることなく RC 柱の耐力劣化改善を目指すにあたって、鉄筋の主鉄筋の付着特性の向上が、RC 柱の耐力劣化挙動にどのように影響するかを正負交番載荷実験により考察した。

2. 正負交番載荷実験の概要

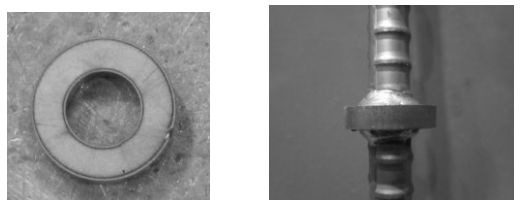
(1) 節の一部を高くした主鉄筋

本研究では、主鉄筋の付着特性を向上するために、主鉄筋の節の一部を高くすることを試みた。具体的には、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主鉄筋の節を高くした。しかし、鉄筋の節を高くするとコンクリートのかぶりが小さくなり、付着割裂ひび割れが発生しやすくなることが考えられる(図-2)。そのため、主鉄筋の節を過度に高くすると、結果として鉄筋の付着劣化につながる可能性が考えられる。そこで、高くする節の高さや節厚を、帯鉄筋を配筋した場合に主鉄筋へ付与される凹凸と同じ寸法となるようにし、節を高くすることによるコンクリートのかぶりの減少を最小限にとどめた(図-3)。溶接する円形中空リングの具体的

な寸法については、図-4 の平面図及び立体図に示した。なお、以下の a), b) の理由から、主鉄筋のすべての節を高くするのではなく、一部の節にのみ節加工を行い、さらに節を高くする区間を非塑性ヒンジ領域のみに限定した。

a) 公称断面積増大の影響を軽減する

主鉄筋の節を高くすると、主鉄筋の公称断面積が増大し、RC 柱の曲げ耐力が向上してしまう。表-1 を見ると、D13 の鉄筋のすべての節を高くした場合、その鉄筋は



(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

付着割裂ひび割れがコンクリート表面に達しやすくなる



図-2 節加工によるかぶりコンクリートの減少

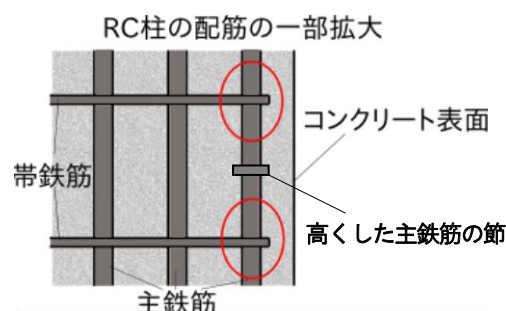
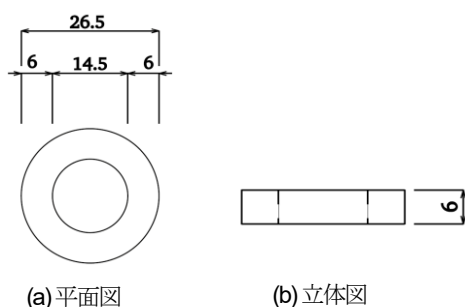


図-3 帯鉄筋による主鉄筋表面への凹凸の付与と
高くした主鉄筋の節



(a) 平面図 (b) 立体図

図-4 円形中空リングの寸法

表-1 節を高くしたことによる
公称断面積及び公称直径の変化

	D13	D13のすべての 節を高くした場合	D22
公称断面積(mm ²)	126.7	387.2	387.1
公称直径(mm)	12.7	22.2	22.2

D22 の鉄筋と同程度の公称断面積及び公称直径を持つことがわかる。そのため、一部の節にのみ節加工を行い、節を高くしたことによる公称断面積及び公称直径の変化を軽減した。

また、RC 柱の曲げ耐力は柱基部における鉄筋量に依存することが知られている。そこで、節を高くする区間を非塑性ヒンジ領域のみに限定することで RC 柱の曲げ耐力を変化させないように留意した。

b) 高くした節間でのひずみの局所化を軽減する

一般的に、鉄筋の付着劣化を過度に抑制すると、コンクリートひび割れ発生部において鉄筋のひずみの局所化が生じ、鉄筋が破断しやすくなることが知られている。そのため、高くした鉄筋の節の間においてコンクリートのひび割れが発生した場合、節を高くしていない場合に比べ、ひび割れ発生部における鉄筋のひずみの局所化が顕著になり、鉄筋が破断してしまう可能性が考えられる。そのため、変形が大きくなると予想される塑性ヒンジ区間においては、鉄筋の節を高くしないこととした。

(2) 高くした節に期待する効果

高くした鉄筋の節には、以下の a)~c) に示す効果を期待している。

a) 付着破壊後の主鉄筋のすべりを止める

RC 柱における鉄筋の付着強度は、鉄筋の節間のコンクリート強度に依存することが知られており、RC 柱における付着強度の特性値に関して、以下の設計式が提案されている²⁾。

$$f_{bok} = 0.28 f_{ck}^{2/3} \quad (1)$$

ここに、 f_{bok} は付着強度の特性値、 f_{ck} はコンクリートの圧縮強度の特性値である。そのような中、主鉄筋の節を高くすると、主鉄筋の節とコンクリートがかみ合う面積が大きくなり、主鉄筋のすべりに対する抵抗力が大きくなる。そのため、主鉄筋の節の一部を高くすることで、たとえ主鉄筋の節間で付着破壊が発生したとしても、高くした節の位置で主鉄筋のすべりを止めることができ、主鉄筋の付着特性の向上につながることを期待される(図-5)。

b) 高くした節間でのひずみの局所化を軽減する

鉄筋周囲のコンクリートには、鉄筋の節の前面から斜め方向に力が作用するため、コンクリートが押し広げられるかたちとなり、鉄筋の周囲にリングテンションと呼ばれる周方向の引張力が発生する(図-6)。付着割裂ひび割れは、このリングテンションによりコンクリートが鉄筋に沿って割裂することで発生する。そして付着割裂ひび割れが発生すると、主鉄筋の付着劣化が生じ、主鉄筋がすべることでさらにコンクリートが押し広げられ、付着割裂ひび割れが進展していく。

そのような中、a) で述べたように、主鉄筋の節の一部を高くすることにより、その部分で主鉄筋のすべりが止まっている。そのため、主鉄筋の節の一部を高くすることで、たとえ付着割裂ひび割れが発生したとしても、主鉄筋がすべることでコンクリートがさらに押し広げられる現象が緩和され、付着割裂ひび割れの進展が抑制される効果が期待される。

c) 主鉄筋の座屈発生時における鉄筋の両端固定条件の維持と座屈長の増幅の抑制

RC 柱において、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。

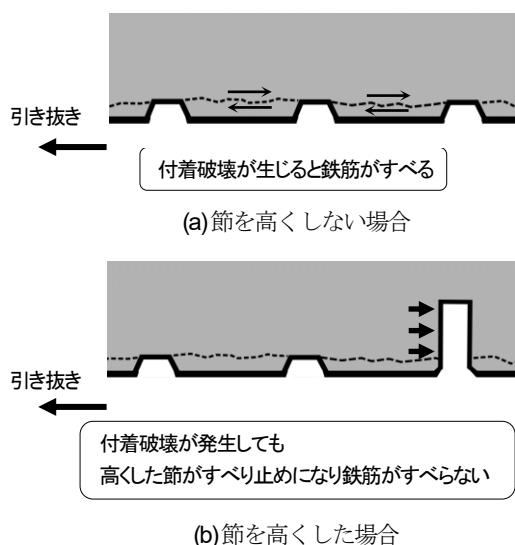


図-5 高くした節が鉄筋のすべりを止める様子

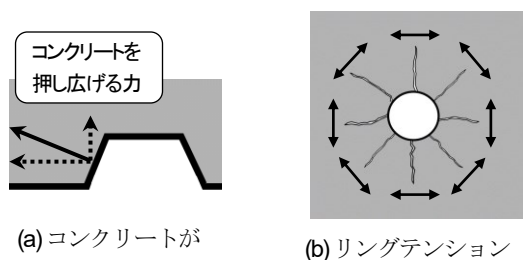


図-6 コンクリートが鉄筋から受ける力

この中で、主鉄筋自体の抵抗特性は、オイラーの座屈理論式に由来しており³⁾、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³⁾。しかし、これらは主鉄筋とコンクリートが完全に付着していることを前提としたものである。そのため、鉄筋ですべりが生じているとき、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。さらに、鉄筋の定着が弱まることで、鉄筋の座屈長も長くなっていると考えられる。このように、主鉄筋で付着劣化が生じている場合、鉄筋の両端固定条件が維持できなくなり、座屈長も長くなっていることが予想され、主鉄筋が座屈しやすくなっていると考えられる。そこで、主鉄筋の節を高くすることで、座屈発生時における鉄筋の両端固定条件を維持し、さらに鉄筋の定着を保つことで座屈長が増幅するのを抑制し、結果として主鉄筋の座屈発生を抑制することが期待される。

(3) 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-7 に実験供試体の断面図、図-8 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。なお、供試体 C100 は鉄筋の節を高くしていない無対策の供試体であり、供試体 C100-p100 及び C100-p50 の主鉄筋の節を高くし、それぞれの供試体名を[C 帯鉄筋間隔-p 高くした節のピッチ]により特徴づけた。

(4) 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 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。なお本実験では、特に 24mm 振幅時における荷重に着目し、主鉄筋の付着特性の向上による耐力劣化改善効果について検討していく。また軸応力は 2.0MPa とした。

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

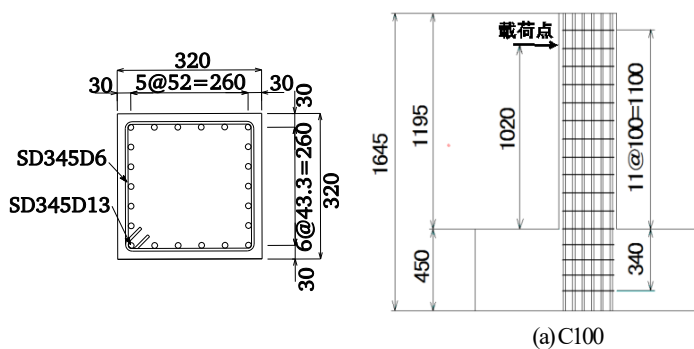


図-7 断面図 (Unit[mm])

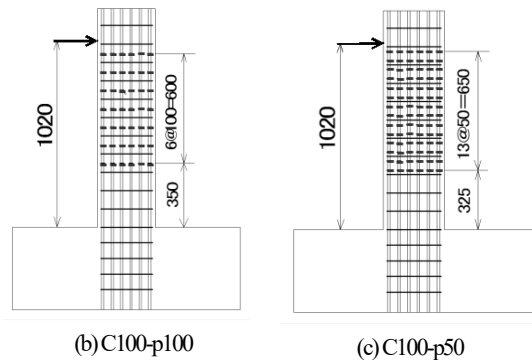


図-8 実験供試体の配筋図 (Unit[mm])

軸力を測定した。また、供試体の載荷位置における水平変位を計測するため、供試体の載荷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-9 に実験により得られた各供試体の荷重-変位関係を、図-10 に各供試体の正負最大荷重の推移を示す。図-10 より、振幅 24mm の載荷における各供試体の耐力劣化の推移を比較すると、C100 で著しい耐力劣化が発生している一方、節を高くした C100-p100 と C100-p50 は、その耐力劣化が C100 に比べて緩やかであることがわかった。

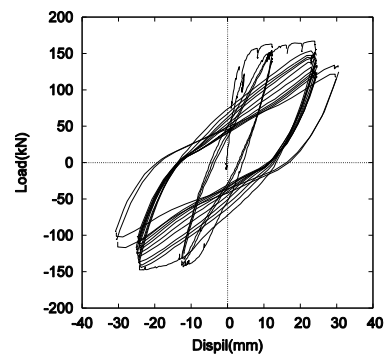
ここで、C100 に顕著な耐力劣化が生じた載荷振幅 24mm の 1 サイクル目から 8 サイクル目までの各供試体の正負最大荷重の低下を比較すると(表-2)、正最大荷重は C100 と比べて、C100-p100 は 11.6%、C100-p50 は 9.3% 耐力劣化が改善し、負最大荷重は、C100-p100 は 7.7%、C100-p50 は 9.5% 耐力劣化が改善していることがわかる。

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。節を高くした供試体において、同一振幅載荷での耐力劣化が通常の場合に比べて緩やかになったという結果は、破壊後も直ちに危機的状況に陥らないようにするべき、という危機耐性の実現に向けて、主鉄筋の付着特性の向上が有効な手段であることを示しているといえる。

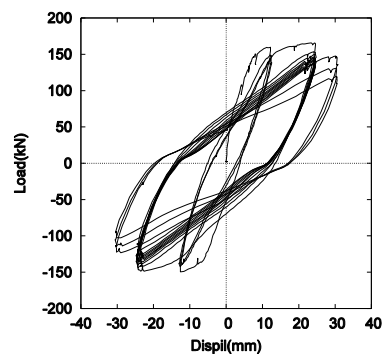
(2) ひび割れ性状

図-11 に 24mm 振幅終了時の各供試体のひび割れ状況を示す。なお、ひび割れ図には各供試体の配筋図を併せて示した。図-11 から、節を高くしていない C100 では載荷面・裏面において付着割裂ひび割れ(載荷面・載荷裏面の太線)が柱上部まで進展していることがわかる。

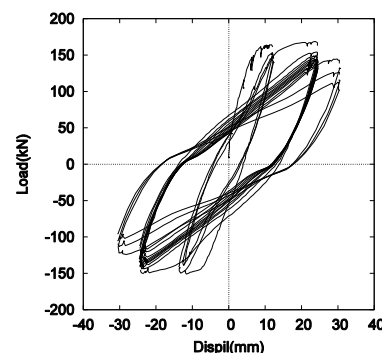
一方、節を高くした C100-p100、C100-p50 では付着割裂ひび割れ(載荷面・載荷裏面の太線)が発生はするものの、



(a) C100

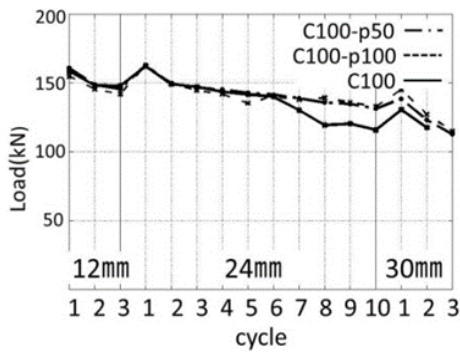


(b) C100-p100

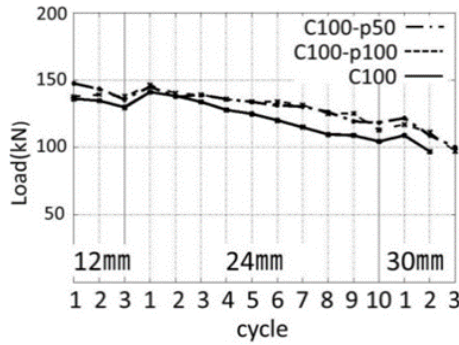


(c) C100-p50

図-9 荷重-変位関係



(a) 正最大荷重



(a) 負最大荷重

図-10 正負最大荷重の推移

表-2 1cycle時と8cycle時の正負最大荷重の比較
(載荷振幅 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

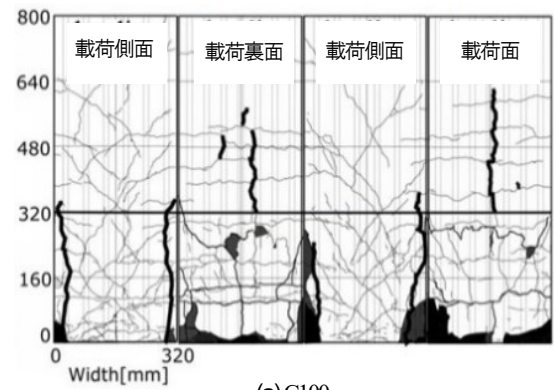
(b) 負最大荷重

	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

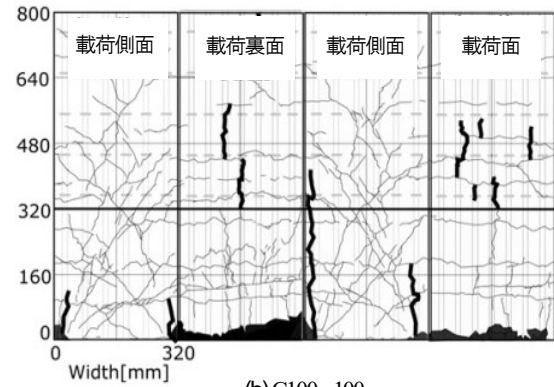
その進展が節の位置で止まっていることがわかる。先述したように、高くした主鉄筋の節には、付着割裂ひび割れの進展を抑制させる効果を期待していた。実験結果から、高くした主鉄筋の節は、確かに付着割裂ひび割れの進展を止める働きをすることがわかった。

(3) 主鉄筋の付着応力の分布

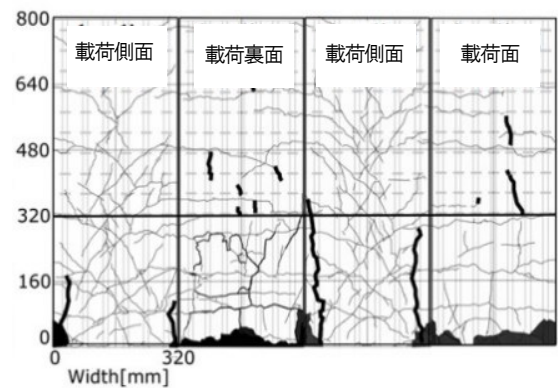
コンクリートの中の鉄筋において、軸方向に応力の変化がある場合、その応力差 $\Delta \sigma_{xs}$ による鉄筋のずれに抵抗するように鉄筋の表面には付着応力が働いている。付着応力は鉄筋表面単位面積あたりに生じる平均応力で表



(a) C100



(b) C100-p100



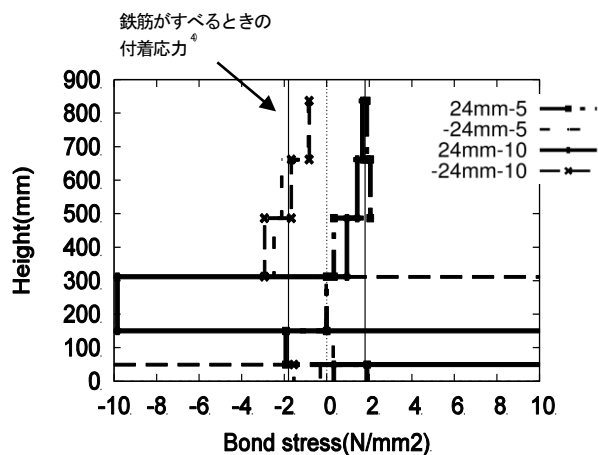
(c) C100-p50

図-11 ひび割れ図

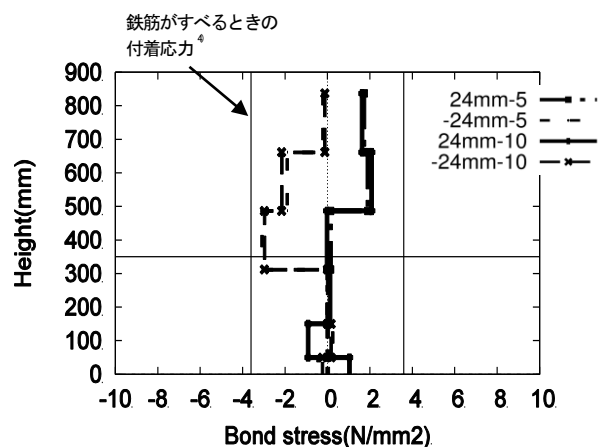
され、式(3)のように求められる。

$$\tau_x = \frac{A_s \cdot \Delta \sigma_{xs}}{\pi \cdot D \cdot \Delta x} = \frac{D}{4} \cdot \frac{\Delta \sigma_{xs}}{\Delta x} \quad (3)$$

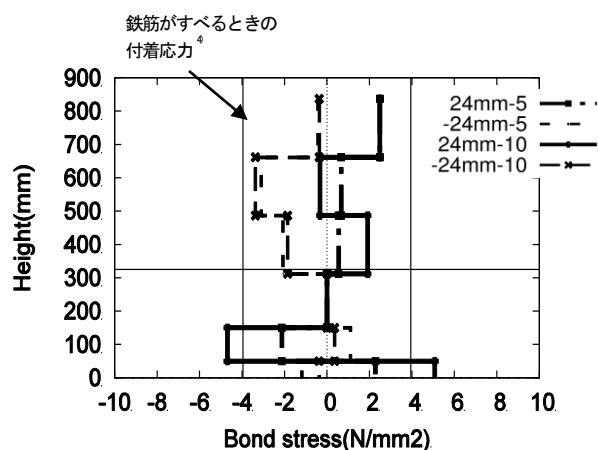
ここに、 A_s は鉄筋断面積、 D は鉄筋直径、 Δx は鉄筋の微小長さである。この付着応力の柱高さ方向の付着応力分布を図-12に示す。ここで、鉄筋の応力-ひずみ関係はバイリニアと仮定しており、データ欠損の少なかった計測区間のデータを平均して付着応力を算出した。また、グラフの縦線は、後藤ら⁴⁾による引き抜き試験で得られた、鉄筋とコンクリートの付着が喪失するときの付着応力であり、鉄筋の付着応力がこの値を超えると、その区間で主鉄筋のすべりが発生している可能性が高いことを意味



(a) C100



(b) C100-p100



(c) C100-p50

図-12 主鉄筋の柱高さ方向の付着応力分布

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、主鉄筋のすべりが発生しているかを考察していく。

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、鉄筋とコンクリートの付着

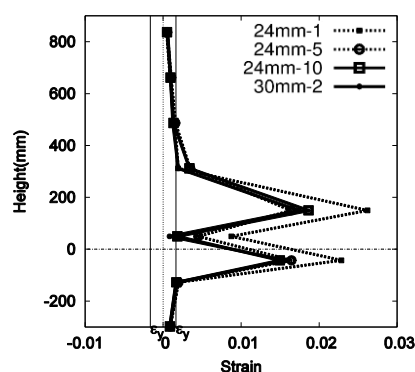
が喪失するときの値を超える付着応力が発生していることがわかる。そのため、主鉄筋全体ですべりが発生しており、付着劣化が生じていると判断することができる。

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、付着応力が鉄筋とコンクリートの付着が喪失するときの値を超えていないことがわかる。そのため、どの区間も主鉄筋のすべりは生じていないと判断することができる。

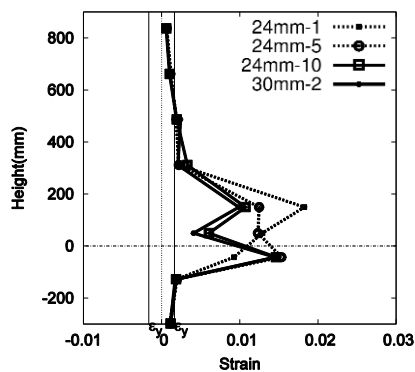
以上から、高くした主鉄筋の節が主鉄筋のすべりを止め、結果として主鉄筋の付着特性が向上していることがわかる。

(4) 主鉄筋のひずみの分布

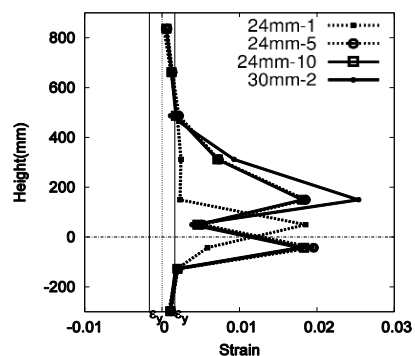
図-13 に各供試体の主鉄筋のひずみ分布を示す。一般



(a) C100



(b) C100-p100



(c) C100-p50

図-13 主鉄筋のひずみ分布

に、主鉄筋の付着劣化が生じると、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する現象が見られることがある。しかし、図-13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かったことがわかる(なお、グラフにおける縦線は、主鉄筋の降伏ひずみを表す)。

(5) 付着割裂ひび割れと付着応力分布の比較

ここでは、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特性向上の関係を考察する(図-14)。なお、図-14(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、付着割ひび割れが発生したサイクルの付着応力を示し、図-14(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と判断することができる。

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可能性がある。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。

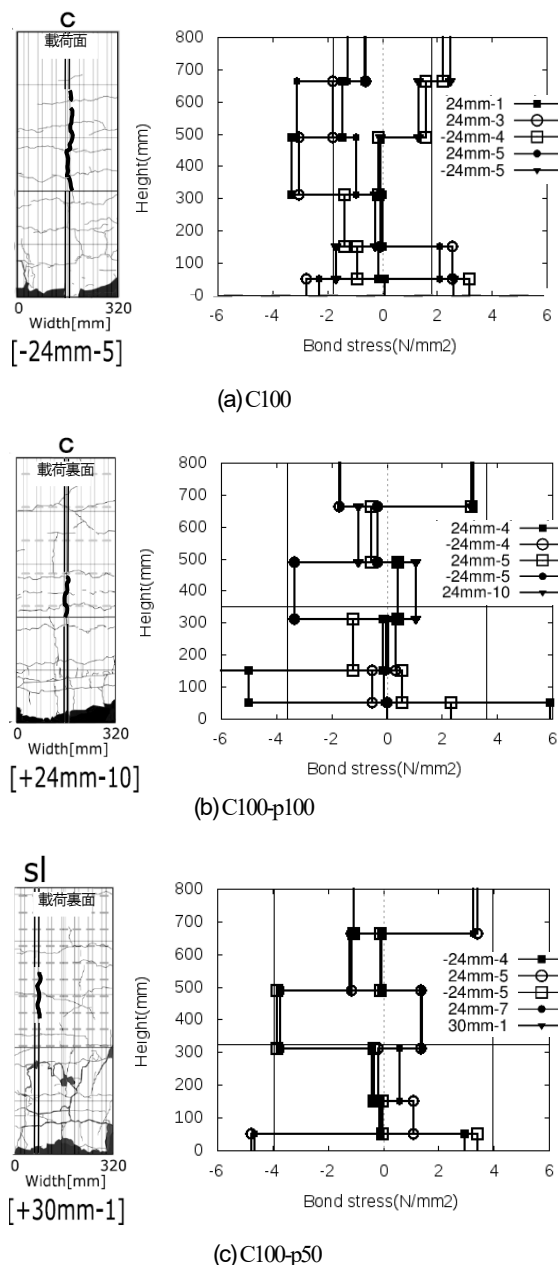
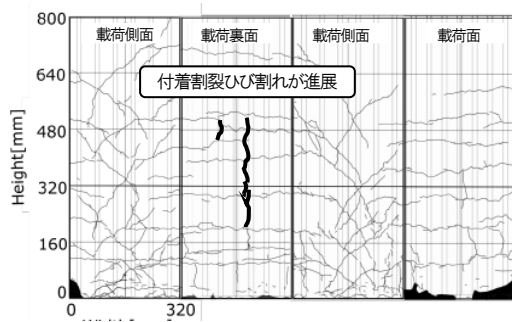


図-14 付着割裂ひび割れと付着応力分布の比較

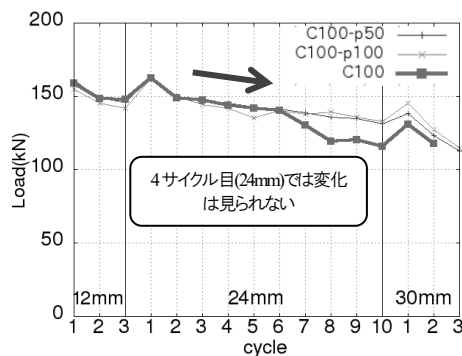
a)~c) から、主鉄筋の節を高くすることによる付着割裂ひび割れ進展の抑制が、鉄筋全体のすべりを防ぎ、鉄筋の付着特性を向上させていることがわかる。

(6) 付着割裂ひび割れと耐力劣化の推移の比較

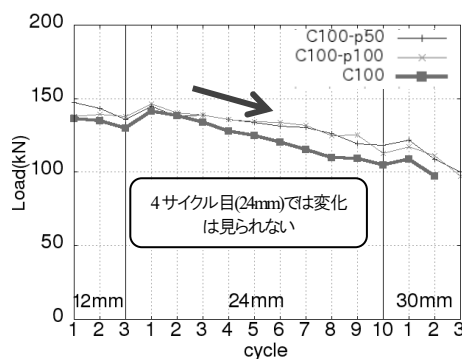
本実験結果において、主鉄筋の節を高くすることで、付着割裂ひび割れの進展が抑制され、その結果、主鉄筋の付着特性が向上されることがわかった。そして、耐力劣化が改善されたC100-p100、C100-p50と、著しい耐力劣化が生じたC100の違いは、この付着特性の向上のみである。しかし、C100での付着割裂ひび割れの進展と耐力劣化の推移を比較すると(図-15)、付着割裂ひび割れが急激に進展したサイクルで、顕著な耐力劣化が生じていないことが分かる。そのため、付着割裂ひび割れの進



(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



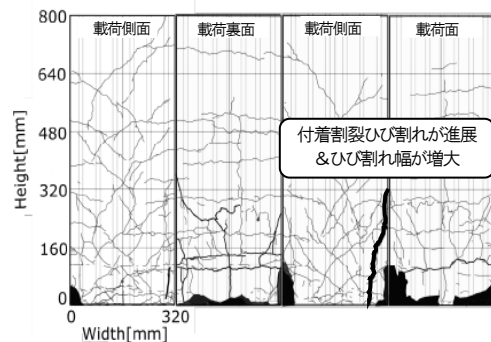
(c) 負最大荷重

図-15 付着割裂ひび割れと耐力劣化の推移比較

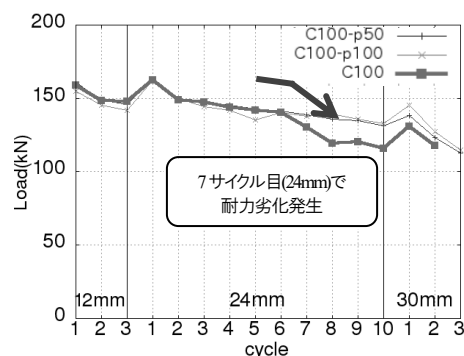
展による付着劣化は、RC 柱の耐力劣化には直接結びついてはいないと言え、主鉄筋の付着特性の向上のみでは、本実験で確認された耐力劣化改善効果のメカニズムは説明できないことがわかった。

(7) 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-11 のひび割れ図を見ると、すべての供試体で載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、実験中の観察により、基部付近の主鉄筋の座屈により発生したものであることがわかった。ここで C100 について、この載荷側面における縦ひび割



(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-16 載荷側面の縦ひび割れと耐力劣化推移の比較

れと耐力劣化の推移を比較すると(図-16)、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特性の向上が主鉄筋の座屈抑制につながったと考えることができる。

先述したように、高くした主鉄筋の節には、鉄筋の両端固定条件の維持と座屈長の増幅の抑制による座屈抑制効果を期待していた。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、節部では固定状態が維持されていた。以上から、高くした鉄筋の節には、鉄筋の両端固定条件を保ち、座屈長の増幅を軽減することで、主鉄筋の座屈を抑制する効果があると考えられる。

5. 座屈長をパラメータとした RC 柱のプッシュオーバー解析

本実験では、鉄筋の付着特性向上により、座屈時にお

ける鉄筋の両端固定条件が維持され、座屈長の増大を軽減されたことで、耐力劣化改善効果が見られた。そこで本章では、本実験の供試体を対象にプッシュオーバー解析を行い、一般的な鉄筋の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。なお、RC 柱のモデル化には、ファイバーモデルを採用した。

(1) 鉄筋の応力-ひずみ履歴モデル

本解析では、座屈長をパラメータとし解析を行う。座屈長がパラメータ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⁹⁾や Dhakal らが提案したモデル¹⁰⁾が挙げられる。そのような中、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おり⁷⁾、本解析ではこの履歴モデルを採用した。

$$\sigma_b = f_u - \frac{\Omega_b + \gamma}{1 + \gamma} (f_u - \sigma) \quad (4)$$

$$\Omega_b = \beta \frac{\sqrt{32}}{3\pi l_{SR} \sqrt{\varepsilon_s - \varepsilon_o}} \quad (5)$$

ここで、図-17 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である。また γ は座屈時の応力に関するパラメータであり、応力曲線は応力 f_u に向かって減少する。

本解析では、本モデルにおいて、パラメータ r 、 γ 、 β の値を再現性の高い結果が得られるとされている $r=0.4$ 、 $\gamma=0.5$ 、 $\beta=1.0$ とし、解析を行った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の値は、既往の研究¹⁰⁾を参考にした。

ここで、本解析では、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ことを目的とした。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³⁾を参考に算出し、その値 ($l_{SR}=153\text{mm}$) を基準として、
モデル 1 : $l_{SR}=150\text{mm}$
モデル 2 : $l_{SR}=75\text{mm}$
モデル 3 : $l_{SR}=225\text{mm}$ として解析を行った。以下、鉄筋の応力-ひずみ履歴モデルにおける各物性値を表-3 に示す。

(2) コンクリートの応力-ひずみ履歴モデル

コンクリートの応力-ひずみ履歴モデルには、図-18 に示す履歴モデル⁷⁾を採用した。なお、帯鉄筋による拘束

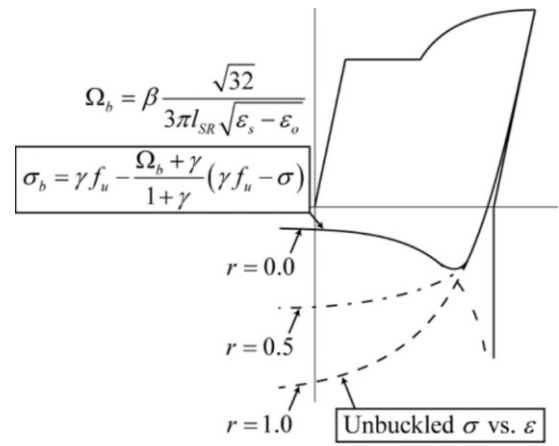


図-17 鉄筋の履歴モデル⁷⁾

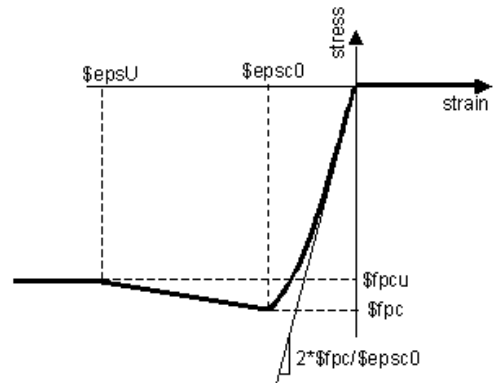


図-18 コンクリートの履歴モデル⁷⁾

表-3 鉄筋の履歴モデルにおける物性値

降伏強度 (kN/mm ²)	345
引張強度 (kN/mm ²)	500
初期ヤング率 (kN/mm ²)	2.1×10^5
ひずみ硬化開始時のヤング率 (kN/mm ²)	4.4×10^3
ひずみ硬化開始時のひずみ	0.0133
最大応力時のひずみ	0.133

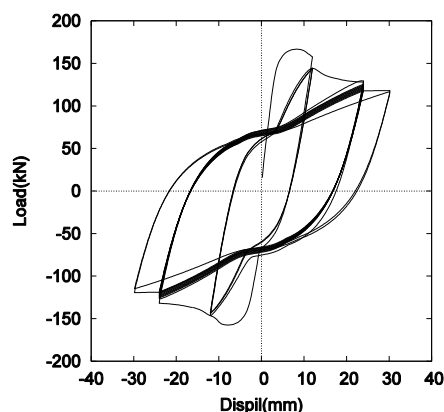
表-4 コンクリートの履歴モデルにおける物性値

	かぶりコンクリート	コアコンクリート
f _{pc} (kN/mm ²)	-27.90	-29.18
f _{pcu} (kN/mm ²)	0	-14.59
ε _{sc0}	-0.0020	-0.0028
ε _{scU}	-0.0050	-0.0056

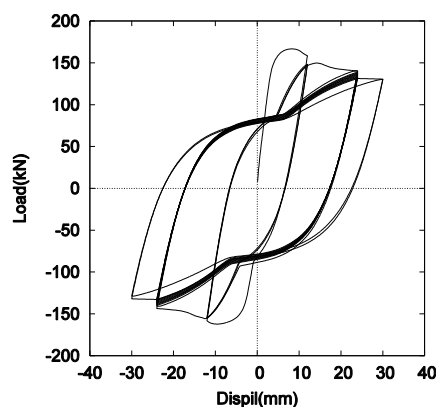
効果を考慮し、かぶりコンクリート及びコアコンクリートそれぞれに対してパラメータを設定した。履歴モデルにおける各パラメータの値を表-3 に示す。

(3) 解析結果

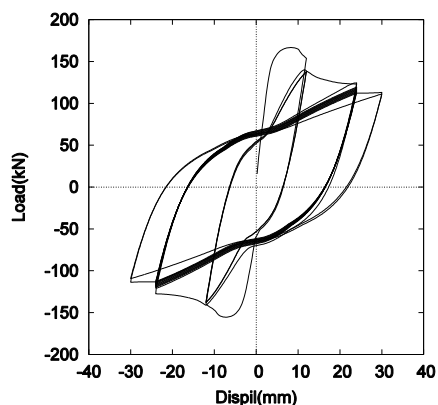
図-19 に各モデルの荷重-変位関係を示す。図-19 より、座屈長を変化させることで荷重-変位関係の骨格曲線が変化し、座屈長が長くなることで耐力劣化の度合いが大きくなっていることがわかる。しかし、各モデル間で、同一振幅時の耐力劣化には違いが見られない。本実験では、各供試体間で同一振幅時の耐力劣化挙動に違いが見られたことから、従来の鉄筋の座屈モデルを用いて座屈長をパラメータとした解析では、本実験のような、耐力劣化挙動を再現することはできないことがわかった。し



(a) モデル 1 : $l_R=150\text{mm}$



(b) モデル 2 : $l_R=75\text{mm}$



(c) モデル 3 : $l_R=150\text{mm}$

図-19 各モデルの荷重-変位関係

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 柱の耐力劣化改善に向けて、主鉄筋の節の一部を高くした供試体に対し正負交番載荷実験を行い、主鉄筋の付着特性の向上が、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。

- 主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。
- 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、主鉄筋の付着特性が向上した。
- 主鉄筋の節を高くすることで、主鉄筋の両端固定条件が維持され、さらに座屈長の増大を軽減することで、主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。
- 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、座屈長の変化が同一振幅載荷の挙動に与える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) 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
- 2) 土木学会, コンクリート標準示方書・設計編, pp34-37, 2007
- 3) 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, pp167-178, 2014
- 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 Engineer-

- ing, 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.
- (?)

IMPROVEMENT OF STRENGTH DETERIORATION FOR RC COLUMNS USING LONGITUDINAL BARS WITH PARTIALLY LARGE LUG

Keita UEMURA, and Yoshikazu TAKAHASHI

In order to improve seismic performance, it is important to prevent rapid strength deterioration of RC columns. In this research, longitudinal bars with partially large lug were proposed for improvement of strength deterioration of RC columns, and the cyclic loading tests for RC columns were conducted. As the results, large lugs could control the occurrence of bond splitting cracks on RC columns surface, and bond characteristics of longitudinal bars with partially large lug was well-improved. Furthermore, by large lugs, both ends fixed boundary condition was maintained, and buckling length was prevented from becoming longer. In consequence, buckling of longitudinal bars became hard to occur, and rapid strength deterioration was prevented. Based on this result, pushover analysis of RC columns was conducted using buckling length as a variable. As a result, it was found that a general model of reinforcement buckling model wasn't able to reproduce strength deterioration with the same amplitude.