土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol. 73, No. 4 (地震工学論文集第36巻), I_60-I_73, 2017.

軸方向鉄筋の節の一部を高くすることによる RC 柱の荷重低下改善効果の検討

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（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂）
E-mail: uemura.keita.35a@st.kyoto-u.ac.jp

[2]正会員　京都大学教授　京都大学工学研究科（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂）
E-mail: takahashi.yoshikazu.4v@kyoto-u.ac.jp

今日，危機耐性確保に配慮するために，RC 柱の急激な荷重低下を改善させることが重要となっている．本研究では，軸方向鉄筋の節の一部を高くすることによる付着特性向上が，RC 柱の荷重低下挙動にどう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，軸方向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，また，その付着特性の向上が同一振幅載荷での軸方向鉄筋の座屈抑制につながることを示した．そしてこの軸方向鉄筋の座屈抑制の要因が，座屈時の鉄筋の両端固定条件が維持されたこと，また，それにより座屈長増大が軽減したことであると推測した．そこで，座屈長の変化に着目した RC 柱の非線形静的解析を行い，本実験における RC 柱の挙動を再現するための今後の課題を示した．

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

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震の発生を機に，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，直ちに破局的状況に至るのを回避できる特性である．従来の設計基準においても，安全率などを導入することで想定以上の外力が作用した場合の構造物の安全性を確保していたが，ここでいう危機耐性とは，想定以上の外力が作用し，確保されるべき安全性が損なわれたとしても，直ちに危機的状況に陥らないような性能を指す．そして現在，この危機耐性の確保に配慮して耐震設計を行うための一つの手段として，RC 柱の急激な荷重低下を改善させることが重要であるといえる．従来，RC 柱の荷重低下の改善には帯鉄筋の働きが重要視されており，兵庫県南部地震以前と比べても，必要とされる帯鉄筋量は増大している．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 柱の荷重低下を改善する方法が必要とされている．

このような鉄筋過密配筋問題を解決する 1 つの切り口として，近年，軸方向鉄筋の付着を制御することによって RC 柱の耐震性能を向上させる研究が進められている．睦好らの研究[1), 2)]によれば，せん断破壊型の RC 柱に対して，付着を切ることによってせん断破壊が生じず，曲げ破壊が生じることで，RC 柱の変形性状が改善されることが明らかになっている．しかし，付着を切ることで RC 部材に発生するひび割れが基部周辺に局所化することや，履歴エネルギー吸収量の低下が生じることが示されており，それにより地震時に応答が大きくなる可能性があることも指摘されている．

そのような中，本研究では，配筋問題解決に向けて軸方向鉄筋の付着特性に着目するにあたって，付着割裂ひび割れ発生による鉄筋の付着劣化の改善を試みた．付着割裂ひび割れとは，軸方向鉄筋に沿って発生し，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ひび割れである．そして，後藤・高橋の研究[3)]において，RC 柱の荷重低下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，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 柱の荷重低下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 柱の荷重低下改善を目指すにあたって，鉄筋の軸

土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol. 73, No. 4（地震工学論文集第36巻），I_60-I_73, 2017.

方向鉄筋の付着特性の向上が，RC 柱の荷重低下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．上記で述べたように，過密配筋問題解決に向けて軸方向鉄筋の付着特性に着目している検討はいくつか見られるが，それらは軸方向鉄筋の付着を切ることで RC 柱の耐震性能向上を狙ったものである．そのため，付着割裂ひび割れの発生による軸方向鉄筋の付着劣化を改善することで RC 柱の荷重低下改善を試みるという本検討は，新たな着眼点であるといえる．

2. 正負交番載荷実験の概要

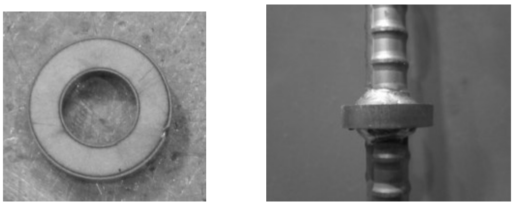
(1) 節の一部を高くした軸方向鉄筋

本研究では，軸方向鉄筋の付着特性を向上させるために，軸方向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** のように軸方向鉄筋に円形中空リングを溶接することにより軸方向鉄筋の節を高くした．しかし，本実験における供試体は，一般的な RC 橋脚に比べて断面寸法が小さい，鉄道ラーメン橋脚の柱を想定して設計しており，軸方向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ることで付着割裂ひび割れが発生しやすくなる (**図-2**)．そのため，軸方向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軸方向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を，**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，軸方向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の軽減

軸方向鉄筋の節を高くすると，軸方向鉄筋の公称断面積が増大し，RC 柱の曲げ耐力が増加してしまう．**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 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．一方で，軸方向鉄筋にリングを溶接することで柱基部の鉄筋量が増大したとしても，リングを溶接していない部分で鉄筋の変形が進むと考えられるため，リングの溶接による鉄筋量の増大は曲げ耐力には影響しないと考えることもできる．しかし，柱基部周辺のリングが RC 柱の曲げ耐力に影響を与えないと



(a) 円形中空リング　　(b) リングを溶接した軸方向鉄筋

図-1　節を高くした軸方向鉄筋

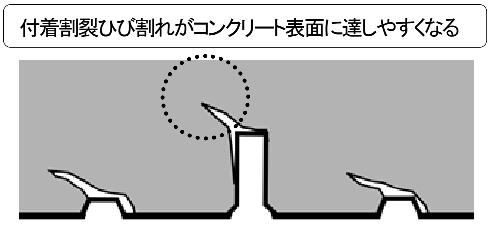


図-2　節加工によるかぶりコンクリートの減少

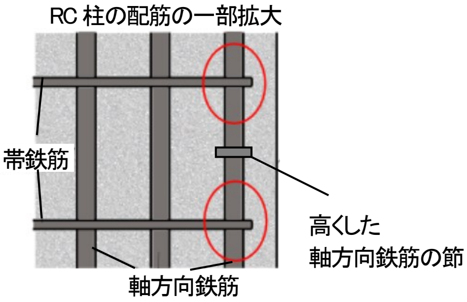
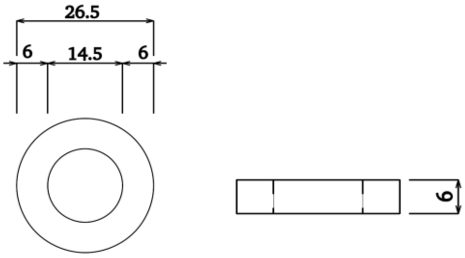


図-3　帯鉄筋による軸方向鉄筋表面への凹凸の付与と高くした軸方向鉄筋の節



(a) 平面図　　(b) 立体図

図-4　円形中空リングの寸法

表-1　節を高くする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

いう明確な根拠がないため，今回の実験では節を高くする区間を非塑性ヒンジ領域のみに限定し，RC 柱の曲げ耐力を変化させないよう留意した．

b)　高くした節間でのひずみの局所化の軽減

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，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)　付着破壊後の軸方向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 [4]．

$$f_{bok} = 0.28\, f'^{2/3}_{ck} \tag{1}$$

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，軸方向鉄筋の節を高くすると，軸方向鉄筋の節とコンクリートがかみ合う面積が大きくなり，軸方向鉄筋のすべりに対する抵抗力が大きくなる．そのため，軸方向鉄筋の節の一部を高くすることで，たとえ軸方向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軸方向鉄筋のすべりを止めることができ，軸方向鉄筋の付着特性の向上につながることが期待される(図-5)．

b)　付着割裂ひび割れの進展を抑制させる

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，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し，鉄筋周囲のコンクリートが押し広げられる (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，軸方向鉄筋の付着劣化が生じ，軸方向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．

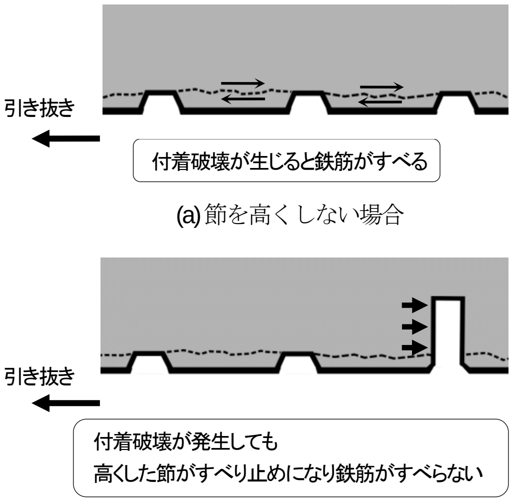
そのような中，a) で述べたように，軸方向鉄筋の節の一部を高くすることにより，その部分で軸方向鉄筋のすべりが止まっている．そのため，軸方向鉄筋の節の一部を高くすることで，たとえ付着割裂ひび割れが発生したとしても，軸方向鉄筋がすべることでコンクリートがさらに押し広げられる現象が緩和され，付着割裂ひび割れの進展が抑制される効果が期待される．

c)　軸方向鉄筋の座屈発生時における鉄筋の両端固定条件を維持させ，座屈長の増幅を抑制する

RC 柱において，軸方向鉄筋座屈の抵抗特性には，軸方向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．この中で，軸方向鉄筋の非弾性座屈を考えたとき，軸方向鉄筋自体の抵抗特性は，エンゲッサ・カルマンの理論式で表される (式(2))．

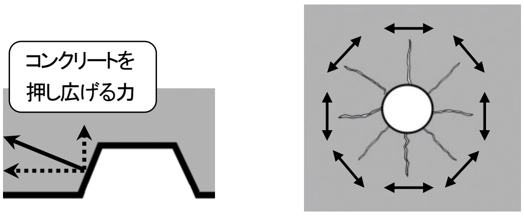
$$\sigma_{cr} = \frac{4\pi^2 T_k}{(L_{cr}/r)^2} \tag{2}$$

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，T_k は材料の塑性を考慮したヤング係数である [5]．ここで，通常鉄筋コンクリート柱の設計において軸方向鉄筋の座屈を考えるとき，座屈時の両端拘束条件は両端固定であり，座屈発生後は軸方向鉄筋の変形が座屈発生部に局所化し塑性ヒンジを形成するため，座屈長は塑性ヒンジ長と等しくなることが知られている [6]．しかし，これらは軸方向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．実際は，鉄筋ですべりが生じているとき，鉄筋の定着は弱くなっている．その



(b) 節を高くした場合

図-5　高くした節が鉄筋のすべりを止める様子



(a) コンクリートが節から受ける力　(b) リングテンション

図-6　コンクリートが鉄筋から受ける力

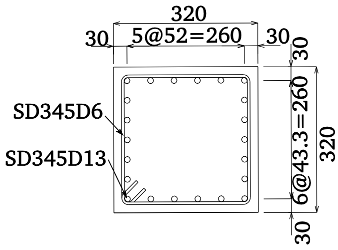
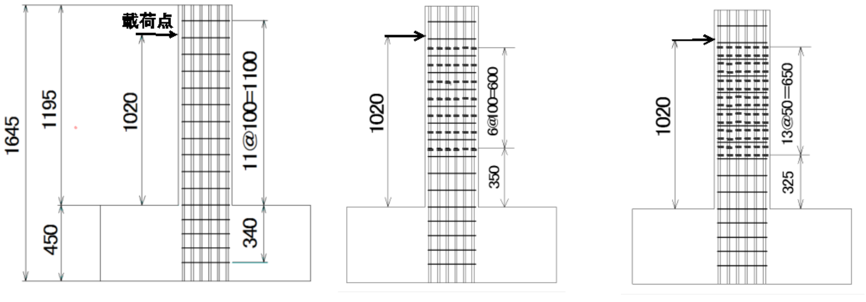


図-7　断面図 (Unit[mm])



(a) C100　(b) C100-p100　(c) C100-p50

図-8　実験供試体の配筋図 (Unit[mm])

ため，軸方向鉄筋とコンクリート間で付着劣化が発生しているとき，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．また，鉄筋の定着が弱まることで，鉄筋の拘束力も弱まり，その分鉄筋の座屈長も長くなると推測することができる．そこで本研究では，軸方向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が維持され，さらに鉄筋の定着を保つことで座屈長増幅が抑制されると推測し，結果として軸方向鉄筋の座屈発生の抑制につながると期待した．

(3)　実験供試体

本実験では，軸方向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，スランプ 18cm，粗骨材の最大寸法 15mm のものを用い，コンクリートの圧縮強度は，テストピースによる圧縮試験により 27.9MPa と算出した．ここで，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%，軸方向鉄筋比 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 の軸方向鉄筋の節の一部を高くし，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)　載荷方法と測定データ

載荷方法は正負交番載荷とし，載荷変位は既往研究 [3] を参考に 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 として繰り返し載荷を行った．なお，RC 柱の耐震性状を検討している数々の既往の研究において，荷重が最大荷重の 80%に低下した時を終局と定義しているものが多くみられる．その中で本研究では，RC 柱の破壊後の荷重低下挙動に着目していることから，載荷終了条件については，RC 柱の荷重が最大荷重の 80%を下回った後，さらに荷重低下が発生して最終的に荷重が最大荷重の 70%以下に低下したとき載荷終了とした．そしてその中で，特に 24mm 振幅時における載荷に着目して，軸方向鉄筋の付着特性の向上による荷重低下改善効果について検討していく．また載荷軸応力は 2.0MPa とした．

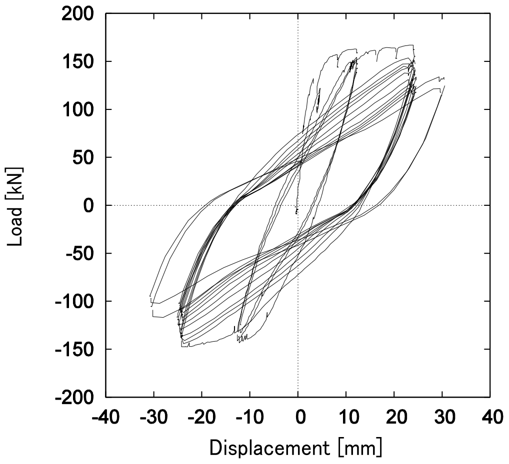
測定データについては，供試体の各変形状態における復元力を得るため，アクチュエータに設置されているロードセルにより供試体の載荷位置における復元力及び軸力を測定した．また，供試体の載荷位置における水平変位を計測するため，供試体の載荷位置にワイヤ式変位計を設置した．さらに軸方向鉄筋及び帯鉄鉄筋のひずみを，ひずみゲージを貼付することにより測定した．

3.　実験結果及び考察

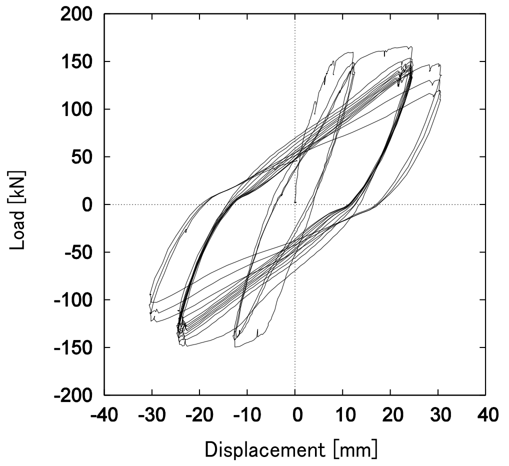
(1)　荷重−変位関係と正負最大荷重の推移

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荷重低下の推移を比較すると， C100 で著しい荷重低下が発生している一方，節の一部を高くした C100-p100 と C100-p50 は，その荷重低下が C100 に比べて緩やかであることがわかった．

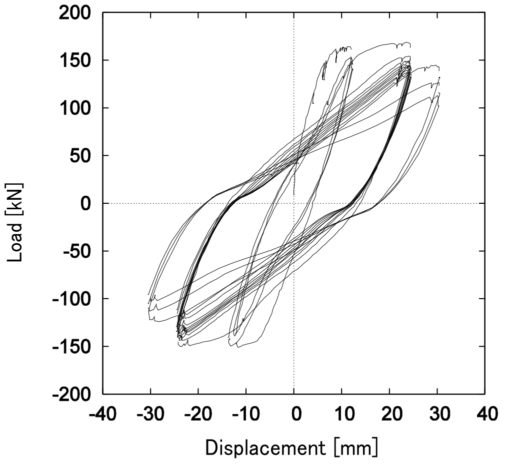
ここで，C100 に顕著な荷重低下が生じた載荷振幅 24mm の 1 サイクル目から 8 サイクル目までの各供試体の正負最大荷重の低下を比較すると(表-2)，正最大荷重は C100 と比べて，C100-p100 は 11.6%，C100-p50 は 9.3% 荷重低下が改善し，負最大荷重は，C100-p100 は 7.7%，C100-p50 は 9.5%荷重低下が改善していることがわかる．以上から，平均すると C100-p100，C100-p50 ともに約 10%の荷重低下が改善されていることがわかった．また，先述したように，既往の研究では荷重が最大荷重の 80%以下に低下したときを便宜上の終局と定義しているものが多い．そのような中，C100 においては，24mm 振幅の 7 サイクル目で荷重が最大荷重の 80%を下回っているのに対し，C100-p100 では，負最大荷重に対しては 24mm 振幅の 10 サイクル目で荷重が最大荷重の 80%以



(a) C100



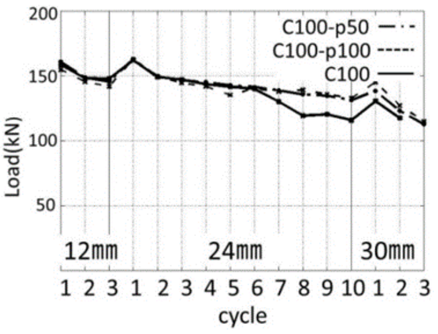
(b) C100-p100



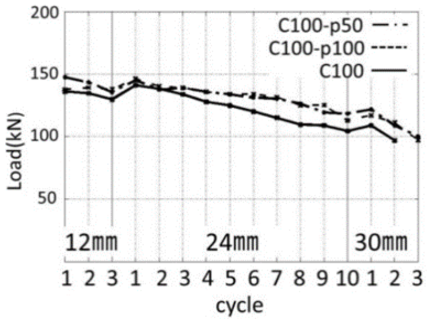
(c) C100-p50

図-9 荷重-変位関係

下に低下したものの，正最大荷重に対しては 24mm 振幅載荷時では最大荷重の 80%を下回らなかった．C100-p50 においては，正負最大荷重の両者において，24mm 振幅載荷中に荷重が最大荷重の 80%を下回らなかった．通常，本実験での 24mm 振幅の載荷のような，繰り返し回数 10 回程度の正負交番載荷は，主要動の繰り返し回数



(a) 正最大荷重



(b) 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

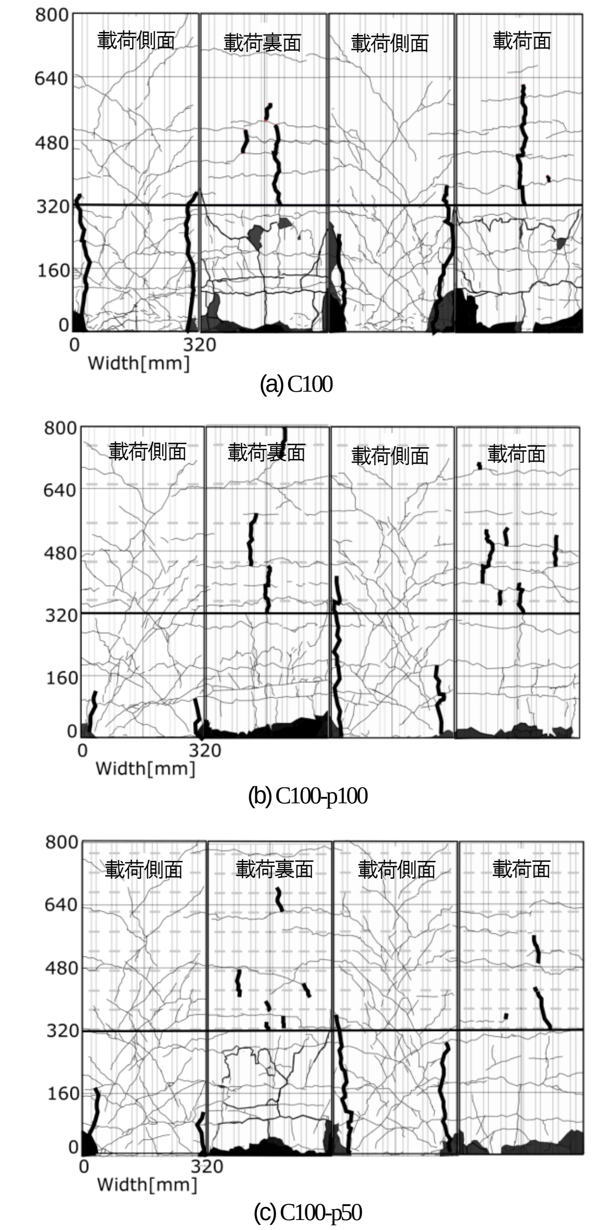
(b) 負最大荷重

	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

の多い海洋型の地震動に対応するとされている．そのため，節の一部を高くした供試体において，繰り返し回数 10 回の正負交番載荷の中で著しい荷重低下が発生せず，終局の目安とされる程度の荷重低下に至らなかったという結果は，主要動の繰り返し回数の多い海洋型地震に対する RC 柱の危機耐性の向上に向けて，軸方向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



(a) C100

(b) C100-p100

(c) C100-p50

図-11 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，その進展が高くした節の位置で止まっていることがわかる．先述したように，高くした軸方向鉄筋の節には，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，高くした軸方向鉄筋の節は，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) 軸方向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当たりに生じる平均応力で表され，式(3)のように求められる．

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

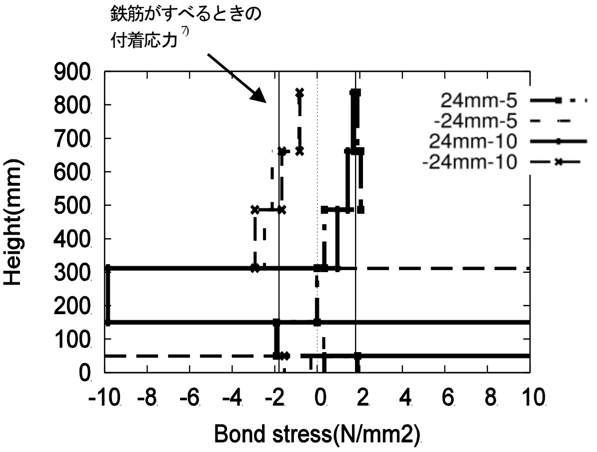
ここに，A_s は鉄筋断面積，D は鉄筋直径，Δx は鉄筋の微小長さである．この付着応力の柱高さ方向の分布を**図-12** に示す．ここで，鉄筋の応力-ひずみ関係はバイリニアと仮定しており，データ欠損の少なかった計測区間のデータを平均して付着応力を算出した．また，グラフの縦線は，後藤ら[7]による引き抜き試験で得られた，鉄筋とコンクリートの付着が喪失するときの付着応力であり，鉄筋の付着応力がこの値を超えると，その区間で軸方向鉄筋のすべりが発生している可能性が高いことを意味する．グラフの横線はそれより上の区間 (C100-p100 は 350mm，C100-p50 は 325mm) で節が高くなっていることを表している．また，すべての供試体において，基部から 800mm 近くの高さまでコンクリートひび割れが観察された．そのため，800mm の高さまでは鉄筋のすべりが発生している可能性があると考え，節高さの加工を行った区間のうち，コンクリートひび割れが観察された区間(高さ 300mm から 800mm) に着目して，軸方向鉄筋のすべりが発生しているかを考察していく．

まず，節を高くしていない C100 については，高さ 300mm から 800mm 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，基部から 800mm の高さまで軸方向鉄筋のすべりが発生し，付着劣化が生じていると判断することができる．

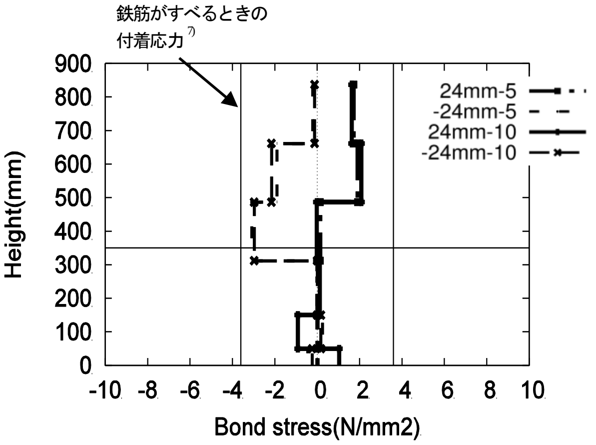
一方，節を高くした C100-p100 と C100-p50 については，高さ 300mm から 800mm のすべての区間において，付着応力が鉄筋とコンクリートの付着が喪失するときの値を超えていないことがわかる．そのため，どの区間も軸方向鉄筋のすべりは生じていないと判断することができる．以上から，高くした軸方向鉄筋の節が軸方向鉄筋のすべりを止め，結果として軸方向鉄筋の付着特性が向上していることがわかる．

(4) 軸方向鉄筋のひずみの分布

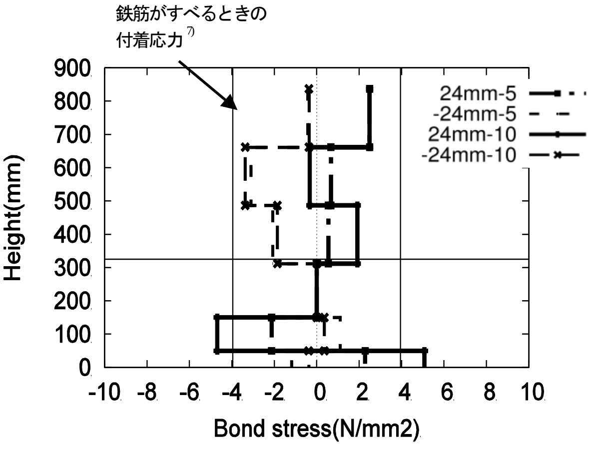
図-13 に各供試体の軸方向鉄筋のひずみ分布を示す(グラフにおける縦線 ε_y は，軸方向鉄筋の降伏ひずみを表す)．すべての供試体において，塑性ヒンジでのひずみが大きくなっており，それ以外の区間のひずみは小さい値となっている．これは，通常の RC 柱の曲げ挙動であり，軸方向鉄筋の節の一部を高くしても，塑性ヒンジ内の軸方向鉄筋ひずみには大きな影響を与えないことがわかった．また，軸方向鉄筋の付着劣化が発生すると，



(a) C100

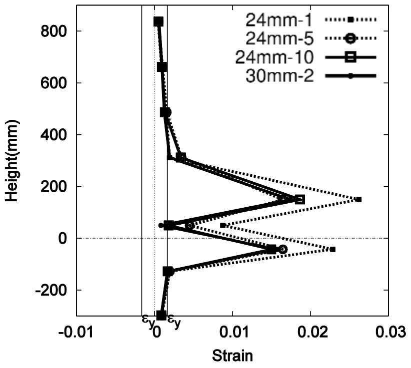


(b) C100-p100

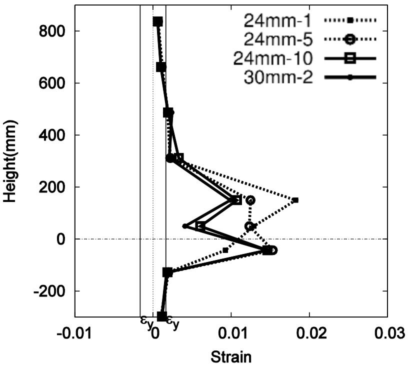


(c) C100-p50

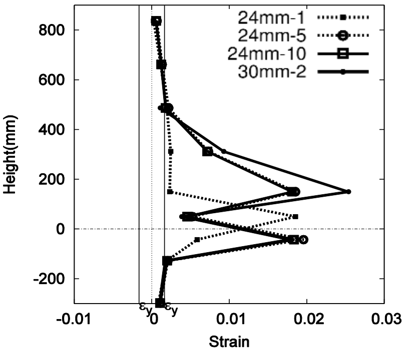
図-12　軸方向鉄筋の柱高さ方向の付着応力分布



(a) C100



(b) C100-p100



(c) C100-p50

図-13　軸方向鉄筋のひずみ分布

軸方向鉄筋のひずみが塑性ヒンジに集中せず，柱の高さ方向にひずみが平滑化する現象が見られることがあるが，そのような現象は本実験では確認されなかった．

(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，付着割裂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，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 から 800mm の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．そのため，基部から 800mm の高さまで鉄筋のすべりが生じており，鉄筋全体ですべりが発生し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，付着割裂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，その区間では鉄筋の定着が保たれており，鉄筋全体にわたってはすべりが生じていないことがわかる．

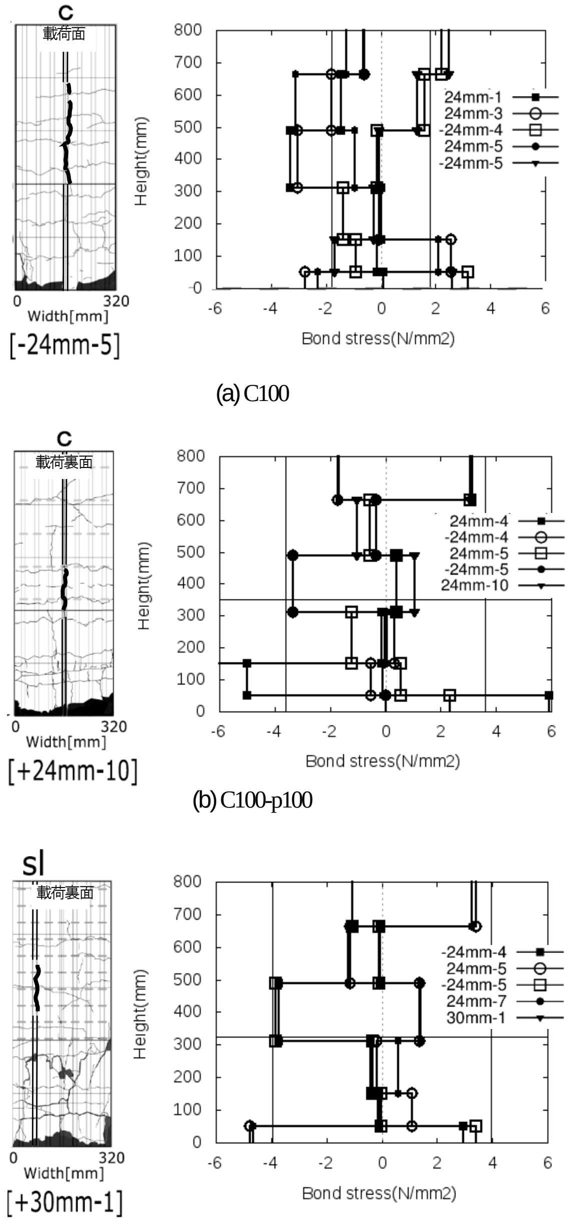
c)　C100-p50 (鉄筋 sl)

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 の場合と同じく，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，鉄筋全体にわたってはすべりが生じていないことがわかる．

a)～c) から，軸方向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，鉄筋全体にわたるすべりを防ぎ，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荷重低下の推移の比較

本実験結果において，軸方向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，軸方向鉄筋の付着特性が向上されることがわかった．そして，荷重低下が改善された C100-p100，C100-p50 と，著しい荷重低下が生じた C100 の違いは，この付着特性の向上のみである．ここで，C100 における付着割裂ひび割れの発生・進展と荷重低下の推移を比較していく．C100 において，付着割裂ひび割れは，24mm 振幅の 4 サイクル目で進展したことが確認された(図-15)．しかし，図-10 を見ると，24mm 振幅の 4 サイクル目では，C100 において顕著な荷重低下が発生していないことがわかる．そのため，付着割裂ひび割れの進展による付着劣化は，RC 柱の荷重低下には直接結びついてはいないと言え，軸方向鉄筋の付着特性の向上のみでは，本実験で確認された荷重低下改善効果のメカニズムは説明できないことがわかった．



(a) C100

(b) C100-p100

(c) C100-p50

図-14　付着割裂ひび割れと付着応力分布の比較

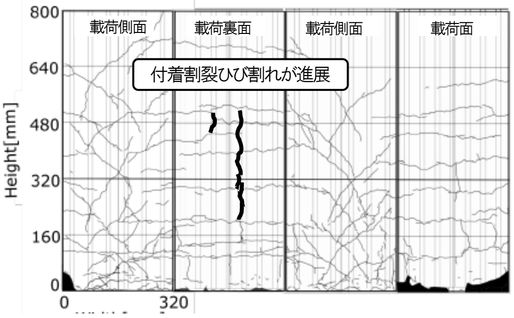


図-15　C100 のひび割れ図 [4 サイクル目(24mm 振幅)]

(7) 載荷側面における縦ひび割れと荷重低下の推移の比較

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 までの区間に軸方向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，この軸方向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，基部付近の軸方向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 における載荷側面の縦方向のひび割れの発生・進展と荷重低下の推移を比較していく．C100において，この縦ひび割れは，24mm 振幅の 7 サイクル目で進展し，同時にひび割れ幅が大きくなったことが確認された(図-16)．次に図-10 を見ると，24mm 振幅の 7 サイクル目は，C100 において顕著な荷重低下が発生したサイクルであることがわかる．よって，軸方向鉄筋の座屈により生じる縦ひび割れの発生と荷重低下の発生が対応していることから，本実験での著しい荷重低下は，軸方向鉄筋の座屈に起因していたことがわかった．

ここで，各供試体の軸方向鉄筋の座屈が確認されたサイクル数を表-3 に示す．表-3 より，C100-p50 に関しては，24mm 振幅の 10 サイクルの間で載荷面・載荷裏面ともに軸方向鉄筋の座屈が発生しなかったことがわかる．また C100-p100 に関しても，載荷裏面における軸方向鉄筋は 24mm 振幅の 10 サイクル目で座屈が発生したが，載荷面における軸方向鉄筋は 30mm 振幅の 2 サイクル目まで座屈が生じなかったことがわかる．以上から，軸方向鉄筋の節を高くしたことによる付着特性の向上が軸方向鉄筋の座屈抑制につながったと考えることができる．

東北地方太平洋沖地震のような主要動の繰り返し回数

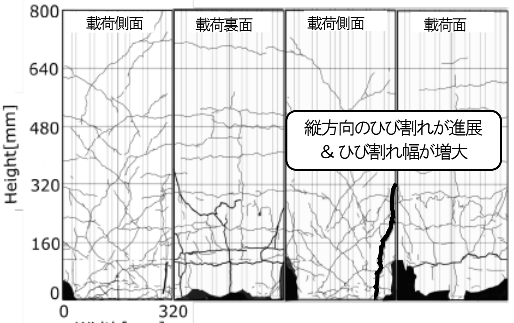


図-16 C100 のひび割れ図 [7 サイクル目(24mm 振幅)]

表-3 軸方向鉄筋の座屈が確認されたサイクル数

供試体	座屈が発生した面	軸方向鉄筋の座屈が確認されたサイクル
C100	載荷面	24mm振幅の7サイクル目
	載荷裏面	24mm振幅の4サイクル目
C100-p100	載荷面	30mm振幅の2サイクル目
	載荷裏面	24mm振幅の10サイクル目
C100-p50	載荷面	30mm振幅の2サイクル目
	載荷裏面	30mm振幅の2サイクル目

が多いとされる海洋型の地震動に対しては，軸方向鉄筋の座屈が早期に発生すると RC 部材の耐震安全性が大きく損なわれることにつながる．そのため軸方向鉄筋の節の一部を高くすることで，繰り返し回数が 10 回の正負交番載荷に対して，軸方向鉄筋の座屈発生が抑制されたという結果は，主要動の繰り返し回数が多いとされる海洋型の地震動に対する軸方向鉄筋の座屈制御手法として，軸方向鉄筋の節の一部を高くするという手法が有効な手段であることを示しているといえる．

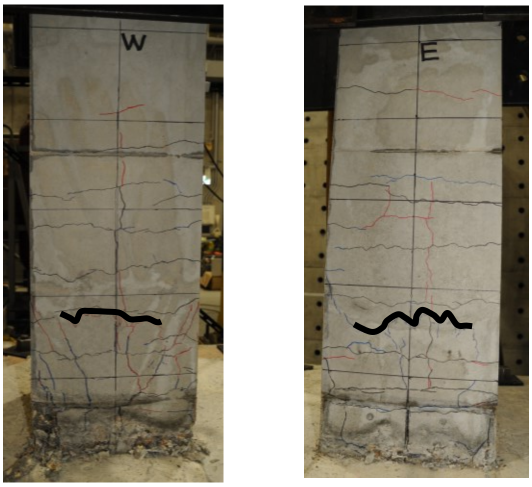
(8) 軸方向鉄筋の付着特性の向上による座屈制御のメカニズムの推定

先述したように，高くした軸方向鉄筋の節には，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．以下，軸方向鉄筋の付着特性の向上による座屈制御のメカニズムについて，実験結果を踏まえて推測する．

鉄筋の両端固定条件の維持に関しては，図-11 より，C100-p100 と C100-p50 において，付着割裂ひび割れの進展が高くした節の位置で止まっていること，さらに図-12 より，節の一部を高くしたことで付着応力が鉄筋がすべるときの値に達しておらず，鉄筋のすべりが生じていないと判断できることから，節の一部を高くすることで鉄筋の定着が保たれ，両端固定条件の維持につながったと推測できる．

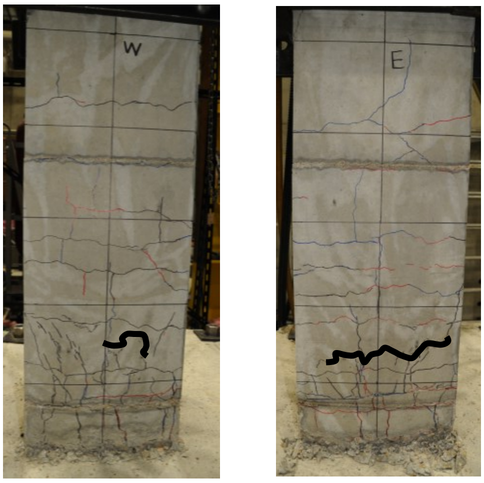
次に，座屈長の増幅の抑制について，図-17 に各供試体の座屈発生時におけるコンクリートの損傷状況を示す．なお図中では，軸方向鉄筋の座屈により発生したと考えられるひび割れの中で最上部に位置しているひび割れが太線で示されており，柱表面には 160mm 四方のグリッド線が描かれている．まず C100 のコンクリート損傷状況を見ると，載荷面・載荷裏面ともに基部から約 280㎜の高さにわたるコンクリートが，軸方向鉄筋の座屈によりはらみ出していることがわかる．C100-p100 では，載荷面・載荷裏面ともに基部から約 240mm の高さにわたりコンクリートがはらみ出している．C100-p50 では，載荷面について基部から約 200mm の高さにわたり，載荷裏面については約 240mm の高さにわたりコンクリートがはらみ出している．以上から，節の一部を高くした供試体のコンクリートのはらみ出し区間が狭小傾向にあるといえ，節を高くすることで座屈長が通常の場合と比べ短くなっている可能性が示唆される．

次に，載荷面・載荷裏面の断面幅中央部における帯鉄筋の平均ひずみ分布を図-18 に示す．載荷面及び載荷裏面の帯鉄筋のひずみは，軸方向鉄筋の座屈によるはらみ出しが生じた場合，大きな値をとると考えられる．なお，グラフ内の縦線は帯鉄筋の降伏ひずみを表し，グラフ内の横線は，図-17 で着目した軸方向鉄筋の座屈により発



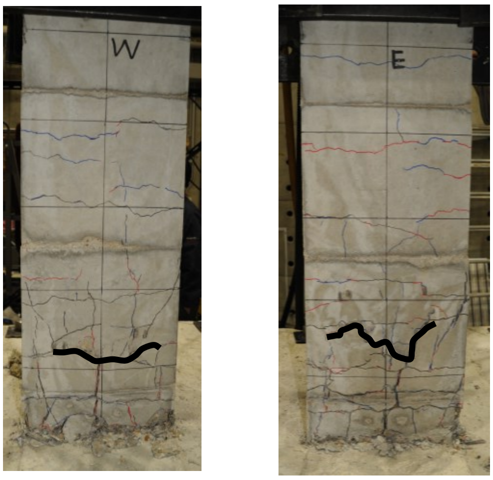
載荷面 (24mm-7cycle)　　載荷裏面 (24mm-4cycle)

(a) C100



載荷面 (30mm-2cycle)　　載荷裏面 (24mm-10cycle)

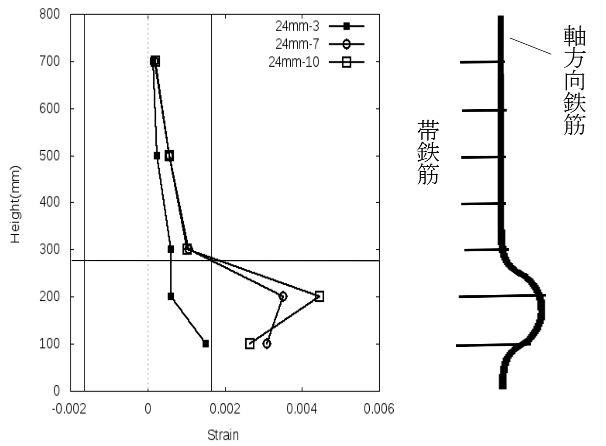
(b) C100-p100



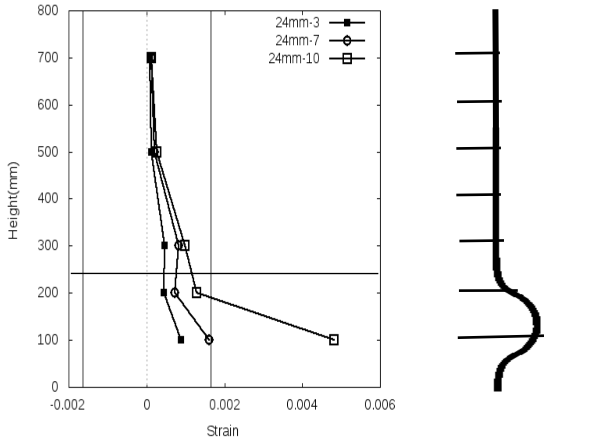
載荷面 (30mm-2cycle)　　載荷裏面 (30mm-1cycle)

(c) C100-p50

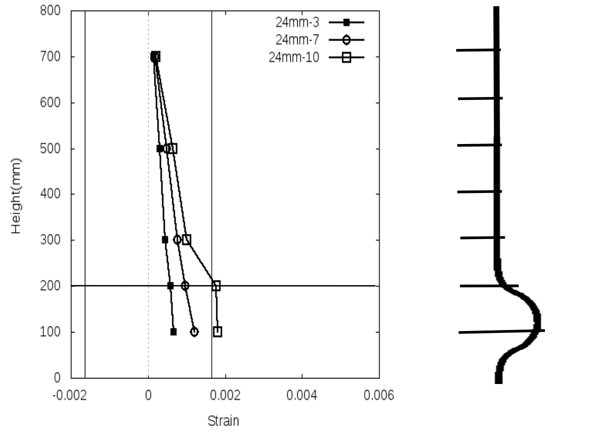
図-17　各供試体の座屈発生時における
コンクリートの損傷状況



(a) C100



(b) C100-p100



(c) C100-p50

図-18　載荷面・載荷裏面の断面幅中央部における帯鉄筋の平均ひずみ分布とコンクリートひび割れから推測される鉄筋の座屈形状

生したと考えられるひび割れの中で最上部に発生したひび割れ位置を表している．また，そのひび割れから推測される鉄筋の座屈形状も同時に示した．またグラフでは，すべての供試体で軸方向鉄筋の座屈が発生していない24mm振幅の3サイクル目と，C100の載荷面・載荷裏面の両面に座屈が発生している24mm振幅の7サイクル目，

C100-p100 の載荷裏面において座屈が発生した 24mm 振幅の 10 サイクル目のひずみ分布を示した (ひずみゲージのデータ欠損により，C100-p100 の載荷裏面および C100-p50 の載荷面・載荷裏面の軸方向鉄筋の座屈が発生時のサイクルの帯鉄筋のひずみ量を確認することはできなかった)．図-18 を見ると，C100 については，軸方向鉄筋の座屈が発生した 24mm 振幅の 7 サイクル目において，帯鉄筋ひずみが大きな値となっている区間が 200mm の高さまで及んでいることがわかる．一方，C100-p100 については，軸方向鉄筋の座屈が発生した 24mm 振幅の 10 サイクル目において，帯鉄筋のひずみが大きくなっている区間が 100mm の高さのみとなっている．また，C100-p50 においては，まだ軸方向鉄筋の座屈が発生していないサイクルであるため，帯鉄筋のひずみは他の 2 つの供試体に比べて小さな値となっている．ここで，コンクリートの損傷状況から推測できる鉄筋の座屈形状を見ると，コンクリートの損傷区間と帯鉄筋のひずみが大きくなっている区間に同一の傾向が見られることがわかる．このことから，軸方向鉄筋の節の一部を高くすることにより座屈長が短くなっている可能性が示唆される．

よって，以上の検討から，軸方向鉄筋の節の一部を高くすることにより座屈時の鉄筋の両端固定条件と座屈長に影響を与え，結果として座屈の抑制につながったと推測することができる．

ここで，RC 柱における軸方向鉄筋の座屈長については，RC 柱の危機耐性確保に向けて，鉄筋の破断を防ぐために座屈長を増大し，ひずみの局所化を防ぐことが必要であるという一面もある．そのため，過度に座屈区間を狭小化させることは，鉄筋の破断が通常の構造よりも早期に生じることにつながり，危機耐性の確保において望ましくないと考えられる．しかし，本実験において軸方向鉄筋の破断が発生していない点や，道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編[6]で示されている設計式により算出される座屈長(=153mm) と本実験供試体での座屈長との比較から，本研究で推測された座屈長増大の抑制は過度に座屈区間を狭小化させるものではなく，危機耐性確保の上で問題のない程度であると判断できる．

4. 座屈長をパラメータとした RC 柱の非線形静的解析

(1) 本解析の目的

実験での検討では，節の一部を高くすることによる軸方向鉄筋の付着特性向上により，軸方向鉄筋の座屈発生が抑制され，同一振幅載荷での荷重低下挙動が改善された．そしてこの座屈抑制は，付着特性の向上が座屈時の鉄筋の両端固定条件と座屈長に影響を与えたことが要因であると推測した．そこで本解析では，その中でも節の一部を高くすることによる座屈長の変化に着目し，座屈長の変化が座屈発生点及び座屈発生後の挙動に与える影響を検討する．

(2) 鉄筋の応力-ひずみ履歴モデル

本解析では，実験供試体を対象に，座屈長をパラメータとし解析を行う．しかし，実験における軸方向鉄筋の座屈発生は，同一振幅載荷時に発生したものであったが，現在広く用いられている鉄筋の座屈モデルの中で，同一振幅の繰り返し変形の中での応力低下が考慮できるものは見当たらない．そのため，今回の解析では，その中でも，座屈長をパラメータとしている Gomes and Appleton らが提案したモデル[8]に改良を加えたモデル[9]を用いることとした．このモデルでは，座屈発生前の応力 - ひずみ関係には， Menegotto-Pinto モデルが採用されており，座屈発生後の座屈曲線は式(4), (5)で表される．

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

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

ここで，図-19 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} は座屈長と鉄筋径の比，f_u は鉄筋の引張強度，ε_s は鉄筋のひずみ，ε_o は圧縮反転点における接線と (応力) ＝0 の直線との交点におけるひずみ， 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，γ は座屈時の応力に関するパラメータである． また，座屈発生点については，座屈曲線と座屈発生前の鉄筋の応力－ひずみ関係との交点として与える．

また本解析では，本モデルにおけるパラメータ 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, γ=0.5, β=1.0 とし解析を行った[9]．

また，この座屈モデルでは，帯鉄筋やかぶりコンクリートの座屈抵抗特性が直接的にパラメータとして反映さ

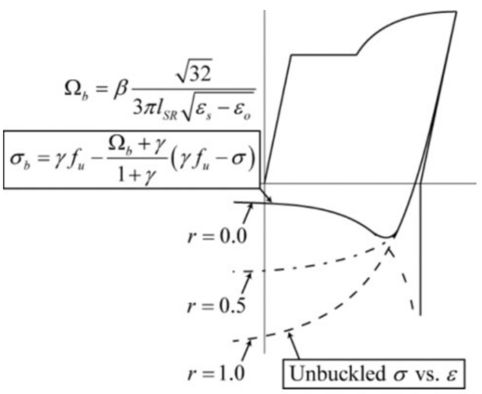


図-19 鉄筋の履歴モデル[8]

れていないが，道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編[6]で示されている座屈長算出の提案式を用いるなどして座屈長を適切に設定することで，帯鉄筋やかぶりコンクリートの座屈抵抗特性を考慮することができる．そこで本研究では，帯鉄筋やかぶりコンクリートの座屈抵抗特性や鉄筋の節の一部を高くしたことによる影響などの指標が**図-17** で見られた座屈発生時のコンクリートの損傷区間の高さに反映されていると考え，

モデル1：座屈長=280mm

モデル2：座屈長=240mm

モデル3：座屈長=200mm

として座屈長を設定し，解析を行った．ここで，モデル1〜モデル 3 の座屈長の設定値は，3.(8)で示した C100, C100-p100，C100-p50 のコンクリートはらみ出し長さに対応している．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-4** に示す．

(3) 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-20** に示す履歴モデル[9]を採用した．図中において，σ_{cc}は最大圧縮応力，σ_{ccl} は限界圧縮応力，ε_{cc} は最大圧縮応力時のひずみ，ε_{ccl} は限界圧縮応力に達するときのひずみである．なお，帯鉄筋による拘束効果を考慮し，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．以下，履歴モデルにおける各パラメータの値を**表-5** に示す．

表-4 鉄筋の履歴モデルにおける物性値

降伏強度 (kN/mm2)	345
引張強度 (kN/mm2)	500
初期ヤング率 (kN/mm2)	2.1×10^5
ひずみ硬化開始時のヤング率 (kN/mm2)	7.0×10^3
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

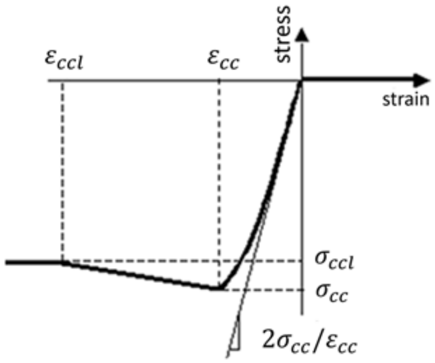


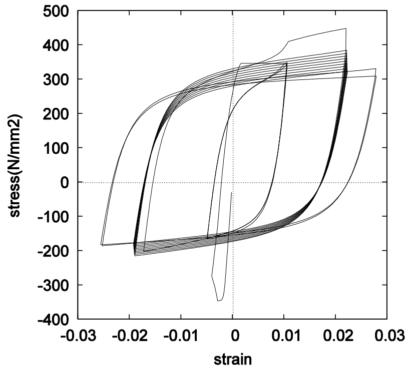
図-20 コンクリートの履歴モデル[9]

表-5 コンクリートの履歴モデルにおける物性値

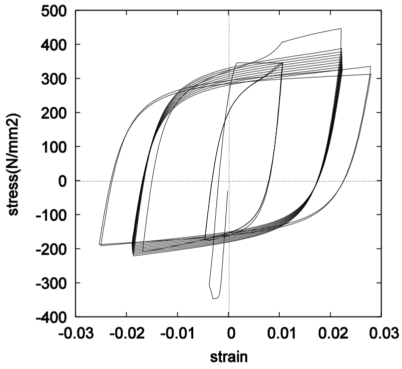
	かぶりコンクリート	コアコンクリート
最大圧縮応力 (kN/mm²)	−27.9	−29.2
限界圧縮応力 (kN/mm²)	0	−5.84
最大圧縮応力時のひずみ	−0.0020	−0.0028
限界圧縮応力に達するときのひずみ	−0.0070	−0.0073

(4) 解析結果

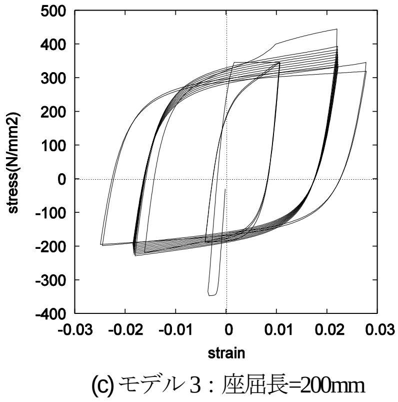
図-21 に各モデルの鉄筋の柱基部における応力 - ひずみ関係を，**表-6** に各モデルにおける鉄筋の座屈発生ひずみ及び座屈発生載荷サイクルを示す(引張を正とした)．式(4)，(5)から，座屈長が変化すると座屈発生点が早ま



(a) モデル1：座屈長=280mm



(b) モデル2：座屈長=240mm

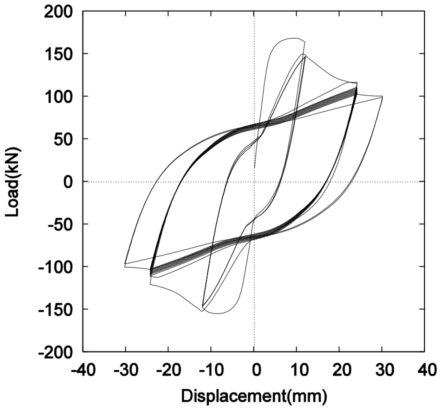


(c) モデル3：座屈長=200mm

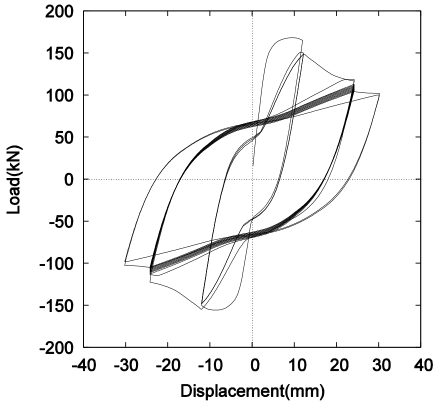
図-21 各モデルの鉄筋の柱基部における応力 - ひずみ関係

表-6　鉄筋の座屈発生ひずみ及び座屈発生載荷サイクル

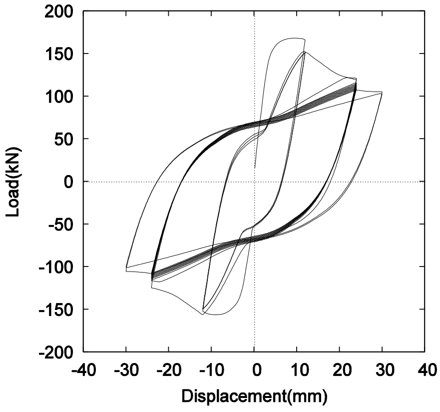
	座屈発生ひずみ	座屈発生載荷サイクル
モデル1	−0.00287	12mm−1サイクル目
モデル2	−0.00302	12mm−1サイクル目
モデル3	−0.00334	12mm−1サイクル目



(a) モデル1：座屈長=280mm



(b) モデル2：座屈長=240mm



(c) モデル3：座屈長=200mm

図-22　各モデルの荷重-変位関係

ることは明らかであるが，実験結果と比較すると，実験では軸方向鉄筋の座屈発生載荷サイクルは各供試体間で5サイクル以上の違いが見られたのに対し，解析結果では同一振幅載荷において座屈発生ひずみが変化した程度であった．また，図-22を見ると，各モデル間で荷重-変位関係は大きく変化しておらず，このことから，座屈長の変化による鉄筋の応力－ひずみ関係の変化が，RC柱の荷重 - 変位関係に影響を及ぼすほどの大きさではなかったといえる．この結果から，実験における座屈発生点の違いを再現するためには，座屈長の違いに加え，実験で推測された座屈抑制の要因の一つである座屈両端固定条件の変化による影響も考慮する必要があると推測される．

また，解析において，実験結果と比べて軸方向鉄筋の座屈が早期に発生していることがわかる．これは，本解析で用いた鉄筋の座屈モデルにおいて，帯鉄筋とかぶりコンクリートの座屈抵抗特性を反映させるための直接的なパラメータがなく，座屈抵抗特性の影響が過小に扱われているためであると考えらる．そのため，実験の結果を再現するためには座屈抵抗特性の影響を適切に評価することも重要であるといえる．

また，現在広く用いられている鉄筋の座屈モデルでは，同一振幅の繰り返し変形の中での応力低下が考慮できないため，実験で生じた各供試体間での同一振幅での荷重低下挙動の違いは，解析では再現できていない．実験で生じたような同一振幅の繰り返し変形において軸方向鉄筋の座屈が進行する現象を再現するためには，鉄筋の同一振幅の繰り返し変形時の応力低下を考慮した座屈モデルの開発が必要であるといえる．

5.　まとめ

本研究では，RC柱の荷重低下改善に向けて，軸方向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，軸方向鉄筋の付着特性の向上が，RC柱の荷重低下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．

- 軸方向鉄筋の節の一部を高くすることで，付着割裂ひび割れの進展が抑制され，軸方向鉄筋の付着特性が向上した．
- 軸方向鉄筋の節の一部を高くすることで，軸方向鉄筋の座屈発生が抑制され，RC柱の荷重低下が改善された．
- 軸方向鉄筋の付着応力の分布図，コンクリートの損傷状況，載荷面・載荷裏面の帯鉄筋のひずみ分布等の状況から，付着特性の向上により，鉄筋の両端固定条件が維持されたこと，また，座屈長が

増大しなかったことが，軸方向鉄筋の座屈発生の抑制の要因であると推測した.

- 実験で推測された軸方向鉄筋の座屈抑制の要因のうち，座屈長に着目した非線形静的解析を行った.その結果，座屈長が長くなるほど軸方向鉄筋の座屈発生点が早まるものの，実験で生じたほどの変化がみられないことがわかった.
- 解析結果から，実験での挙動を再現するためには,実験で推測された座屈抑制の要因の一つである両端固定条件の変化による影響も考慮する必要があると考えられる.
- 本実験で見られた，同一振幅での繰り返し載荷中において発生した軸方向鉄筋の座屈挙動を再現するためには，鉄筋の同一振幅の繰り返し変形時の応力低下を考慮した座屈モデルを開発する必要があるといえる.

参考文献

1) 杉田清隆，睦好宏史，Govinda Raj Pandey，内堀洋紀：鉄筋の付着を制御したRC部材の靭性改善に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 25, No. 2, pp. 1411-1416, 2003.
2) 睦好宏史，牧剛史，Govinda Raj Pandey, 杉田清隆：鉄筋の付着を制御することによるRC柱部材の耐震性状改善に関する研究，土木学会論文集，No. 802/V-69, pp. 155-169, 2005.
3) 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，pp. 209-214, 2012.
4) 土木学会，コンクリート標準示方書・設計編，pp. 34-37, 2007.
5) Papia, M., Russo, G. and Zingone, G. : Instability of longitudinal bars in RC columns, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 114, No. 2, pp. 445-461, 1988.
6) 日本道路協会，道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，pp. 167-178, 2014.
7) 後藤源太，高橋良和，澤田純男：主鉄筋の節高さを変化させた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.
8) Gomes, A. and Appleton, J. : Nonlinear cyclic stress-strain relationship of reinforcing bars including buckling, *Engineer Structures*, Vol. 19, No. 10, pp. 822-826, 1997.
9) http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Reinforcing_Steel_Material (2016 年 10 月 24 日閲覧)

(2016. 10. 29 受付，2017. 3. 2 修正，2017. 3. 3 受理)

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.