

# 軸方向鉄筋の座屈抵抗特性を変化させた RC 柱のポストピーク挙動に関する検討

植村 佳大<sup>1</sup>・高橋 良和<sup>2</sup>・山本 伸也<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>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: yamamoto.shinya.28e@st.kyoto-u.ac.jp

曲げ破壊卓越型の RC 柱のポストピーク領域における耐震安全性を確保するためには、軸方向鉄筋の座屈発生を抑制することが重要である。そこで本研究では、RC 柱における軸方向鉄筋の座屈挙動に対する新たな抵抗特性としてヘッド付きフック(先端部にヘッドを設けたフック状の鉄筋)を提案し、ヘッド付きフックによる座屈制御効果を正負交番載荷実験により検証した。その結果、ヘッド付きフックによる座屈制御手法が帯鉄筋による従来手法以上の座屈抑制効果を示すことが確認され、ヘッド付きフックを配筋した RC 柱において荷重低下を大幅に改善させることに成功した。さらに、軸方向鉄筋の座屈を抑制するという働きをヘッド付きフックが帯鉄筋と分担することで、通常の場合に比べ帯鉄筋の持つコアコンクリート拘束効果が維持されることにつながることがわかった。

**Key Words :** RC column, buckling, buckling resistance, cyclic loading test

## 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<sup>1)</sup>。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。

また、現在の RC 柱の耐震設計では、靱性的な破壊形態を示す曲げ破壊を発生させることが基本となっている。そして、曲げ破壊卓越型の RC 柱では、ポストピーク領域においてかぶりコンクリートの剥落および軸方向鉄筋の座屈が生じて急激な荷重が低下が発生するため、柱基部の帯鉄筋により軸方向鉄筋の座屈発生を抑制している。しかし、曲げ破壊卓越型の RC 柱における帯鉄筋は、軸方向鉄筋の座屈発生を抑制する働きに加え、コアコンクリートを拘束しコンクリートの変形性能を向上させる働

きも同時に担っている。道路橋示方書・同解説-耐震設計編<sup>2)</sup>でも、RC 柱におけるコアコンクリートのモデル化の際は、帯鉄筋の拘束効果を考慮した応力-ひずみ関係を用いることとされており、帯鉄筋の持つコアコンクリート拘束効果の維持が前提の上で RC 柱の耐震安全性が照査されている。しかし、実際は軸方向鉄筋の座屈が発生すると帯鉄筋も同時に軸方向鉄筋ともに外側にはらみ出してしまうため、その時点でコアコンクリートの拘束効果は喪失してしまう。すなわち、帯鉄筋に軸方向鉄筋の座屈制御効果とコアコンクリート拘束効果の複数の機能を期待しているが故に、帯鉄筋のコアコンクリート拘束効果が過大評価されており、ポストピーク領域における挙動が設計での想定と異なる危険性があるといえる。これは危機耐性の確保の観点からも好ましくなく、帯鉄筋の持つコアコンクリート拘束効果は、たとえ設計上の想定を超える外力が発生した場合でも確保されているべきであるといえる。

これらの現状を踏まえ、筆者らは、軸方向鉄筋の座屈発生を抑制する機構を RC 柱に導入して帯鉄筋の持つ軸方向鉄筋の座屈抑制効果を肩代わりすることで、帯鉄筋への負担を軽減することが、RC 柱の危機耐性向上

に効果的であると考えた。そこで本研究では、軸方向鉄筋の座屈に抵抗するエレメントを軸方向鉄筋に直接配筋することで、新たな座屈抵抗特性を RC 柱に導入するという手法を検討する。具体的には、先端部にヘッドを設けたフック状の鉄筋を、軸方向鉄筋を挟む形で外側から差し込み、軸方向鉄筋の座屈変形を拘束させる(図-1)。以下、本研究ではこのフック状のエレメントを「ヘッド付きフック」と称することとする。そして、ヘッド付きフックによる座屈制御効果および、それに伴う RC 柱の荷重低下改善効果を正負交番載荷実験により検討する。

## 2. 正負交番載荷実験の概要

### (1) ヘッド付きフックの特長

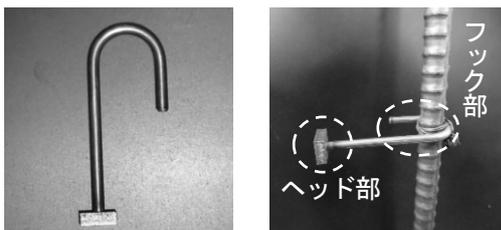
本研究では、ヘッド付きフックにより RC 柱に新たな座屈抵抗特性を導入する手法を検討する。以下に、ヘッド付きフックの特長を示す。

#### a) 帯鉄筋の負担を軽減させる

先述したように、帯鉄筋はコアコンクリートを拘束する働きを担っている。設計においてもコアコンクリートが帯鉄筋から拘束されているという前提で耐震安全性が検討されており、帯鉄筋に拘束されたコアコンクリートは RC 柱のポストピーク挙動において非常に重要な働きを持っているといえる。ところが、帯鉄筋は軸方向鉄筋の座屈を抑制するという働きも担っており、軸方向鉄筋の座屈が発生すると、コアコンクリートの拘束効果も失われてしまう。しかし、ヘッド付きフックは軸方向鉄筋に直接配筋され帯鉄筋とは独立して軸方向鉄筋の座屈に抵抗するため、帯鉄筋の座屈抑制効果を肩代わりする形となり、結果として帯鉄筋の負担を軽減させ、コアコンクリートの拘束効果の維持につなげることができる。

#### b) 帯鉄筋よりも高い座屈抵抗特性を示す

帯鉄筋の座屈抵抗特性は曲げ剛性により支配的に与えられる一方、ヘッド付きフックの座屈抵抗特性は引張剛性が支配的である。さらに、ヘッド付きフックは帯鉄筋と違い、軸方向鉄筋一本一本に対し個別に座屈抵抗特性を発揮する。そのため、帯鉄筋よりも高い座屈抵抗特性を示すと考えられる。



(a) ヘッド付きフック (b) 配筋されている様子

図-1 本研究で提案する新たな座屈抵抗特性

### c) 配筋箇所の自由度が高い

ヘッド付きフックは、配筋する軸方向鉄筋の本数や配筋する高さなどを自由に選択することができる。そのため、軸方向鉄筋の座屈時にははらみ出しのピークになると考えられる位置に配筋してヘッド付きフックの座屈抵抗特性を最大限に活かしたり、軸方向鉄筋のはらみ出しが生じてしまうと耐震安全性が著しく損なわれるような位置に重点的に配筋するなど、使用用途によって様々な箇所に配筋することができる。

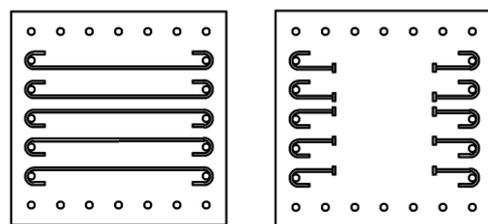
### d) 中子筋に比べて鉄筋の過密化につながりにくい

軸方向鉄筋に直接配筋するという手法は、中間帯筋を軸方向鉄筋に配筋することでも実現することができる。しかし、中子筋は RC 柱の断面を貫通して配筋するため、本数が増加すると柱断面における配筋が煩雑になり、打設時のコンクリートの充填性の低下につながってしまう。一方、ヘッド付きフックは柱断面を貫通せずに軸方向鉄筋の座屈に抵抗するため、たとえ配筋箇所が増加しても鉄筋の過密化にはつながりにくいと考えられる(図-2)。そのため、鉄筋の過密配筋問題に左右されることなく、自由に配筋箇所の個数や高さを決定することができる。

### (2) ヘッド付きフックの設計

#### a) ヘッド付きフックのヘッド部分の設計

ヘッド付きフックのヘッド部分は、塩屋ら<sup>3)</sup>により提案されている T ヘッドバーと府川ら<sup>4)</sup>により提案されている Head-bar を参考に設計した。ここで、T ヘッドバーとは、加熱成形によって鉄筋端部に拡径部を設けた部材であり、Head-bar とは、異形鉄筋の先端にプレートを摩擦圧接で接合した部材である。図-3 に T ヘッドバーを、図-4 に Head-bar を示す。T ヘッドバーおよび Head-bar は両者とも、鉄筋コンクリート部材の帯鉄筋、中子筋および軸方向鉄筋の定着において、従来の標準フックの代わりに使用することを目的とした部材であり、引張力が作用した場合、半円形フック鉄筋と同等の定着性能を示すことが部材試験の結果により保証されている<sup>7)</sup>。また、T ヘッドバーや Head-bar は、ヘッド部分を鉄筋に定着させ帯鉄筋または中子筋として用いる場合と、ヘッド部分をフーチング部のコンクリートに定着させ軸方向



(a) 中子筋の場合 (b) ヘッド付きフックの場合

図-2 鉄筋の過密化への影響

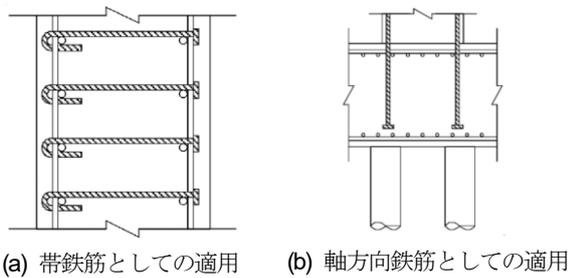
鉄筋として用いる場合がある。図-5に Head-bar の適用例を示す<sup>7)</sup>。そのような中、ヘッド付きフックは、ヘッド部分をコアコンクリートに定着させることで鉄筋の座屈変形に対する拘束効果を発揮させることを狙っている。一方で T ヘッドバーや Head-bar では、ヘッド部分をコアコンクリートに定着させて軸方向鉄筋の座屈に抵抗させるという適用例は示されていないが、T ヘッドバーにおいてヘッド部分をコンクリートへ定着させるという適用例が示されていることから、本検討におけるヘッド付きフックの使用法でも十分な定着性能が得られると判断した。また、ヘッド付きフックのヘッド部分は Head-bar を参考にしてプレートを溶接することで作製し、ヘッド部径やヘッド部厚などの寸法は T ヘッドバーの規格<sup>8)</sup>を参考にして鉄筋部の公称断面積から算出した。図-6に T ヘッドバーにおけるヘッド部径やヘッド部厚の規定を示す。またヘッド付きフックの定着長については、T ヘッド部分が半円形フック鉄筋と同等の定着性能を示すことが知られていることから、半円フックと同様の規定に従うこととした。



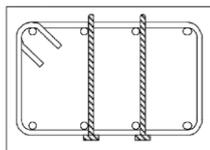
図-3 Tヘッドバー<sup>5)</sup>



図-4 Head-bar<sup>6)</sup>



(a) 帯鉄筋としての適用 (b) 軸方向鉄筋としての適用



(c) 中子筋としての適用

図-5 Head-bar の適用例<sup>7)</sup>

## b) ヘッド付きフックのコンファインドコンクリートへの定着

ヘッド付きフックの座屈抵抗特性を十分に発揮させるためには、ヘッド部分を帯鉄筋による拘束効果を期待できるコンファインドコンクリートに定着させる必要がある。コンファインドコンクリートとは、帯鉄筋で囲まれているコアコンクリートの中で帯鉄筋による拘束効果が期待できる部分のコンクリートであり、無拘束のコンクリートに比べて優れた耐力や靱性が得られることが知られている。そのような中、Mander<sup>9)</sup>らの研究において、高さ方向および断面のコンファインドコンクリートの分布が式(1)および式(2)を用いて提案されている。

$$f(x) = \frac{1}{S} x^2 - x \quad (1)$$

$$g(x) = \frac{1}{W} x^2 - x \quad (2)$$

ここに、 $f(x)$  は高さ方向のコンファインドコンクリートの分布、 $S$  は帯鉄筋と帯鉄筋の間隔、 $g(x)$  は断面のコンファインドコンクリートの分布、 $S$  は軸方向鉄筋と軸方向鉄筋の間隔である。図-7にコンファインドコンクリートの分布の概略図を示す。この仮定を用いると、帯鉄筋間隔  $S$ 、軸方向鉄筋間隔  $W$  としたとき、高さ方向については帯鉄筋配筋部の間におけるコンファインドコンクリートのかぶりが  $S/4$ 、断面については軸方向鉄筋配筋部の間におけるコンファインドコンクリートかぶりが  $W/4$  となる。本検討においても、Mander らの仮定を用いて、コンファインドコンクリートの帯鉄筋からの最大かぶりを算出し、その値を参考にしてヘッド付きフックの寸法を決定することとした。

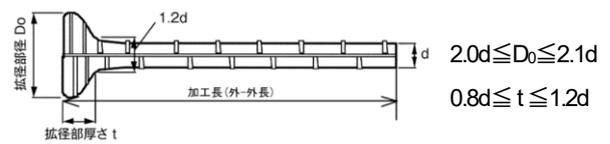
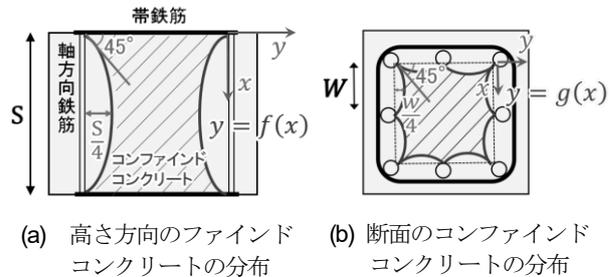


図-6 Tヘッドバーの形状寸法<sup>8)</sup>



(a) 高さ方向のファインド (b) 断面のコンファインド  
コンクリートの分布 コンクリートの分布

図-7 コンファインドコンクリートの分布<sup>9)</sup>

### (3) 軸方向鉄筋の座屈抵抗特性を不均一にするという試み

2. (1) で述べた「配筋箇所の自由度が高い」というヘッド付きフックの特長を活かして、軸方向鉄筋の座屈抵抗特性を不均一にするという試みを検討する。通常、帯鉄筋やかぶりコンクリートによる座屈抵抗特性はすべての軸方向鉄筋に対してある程度一様に作用しているため、RC 柱における各軸方向鉄筋の座屈抵抗特性は同程度の大きさを示していると考えられる。そのため、RC 柱の変形が進む中で、ある軸方向鉄筋が座屈したとき、その他の軸方向鉄筋も座屈しやすい状況であるといえる。さらに、1本の軸方向鉄筋が座屈すると帯鉄筋およびかぶりコンクリートの座屈抵抗特性は低下するため、1本の鉄筋の座屈が発生すると他の鉄筋の座屈が連鎖して発生する可能性があると考えられる。そのような中、一部の鉄筋にのみヘッド付きフックを配筋し、軸方向鉄筋の座屈抵抗特性を積極的に不均一にすれば、軸方向鉄筋の座屈が連鎖して発生する現象が抑制され、RC 柱のポストピーク領域における荷重低下が緩やかになる可能性が推測される(図-8)。そこで本研究では、軸方向鉄筋の座屈抵抗特性を不均一にする軸方向鉄筋の座屈挙動にどのような影響が生じるかを検討し、軸方向鉄筋の座屈抵抗特性を不均一にするという手法が RC 柱のポストピーク領域における荷重低下改善に効果的かを検証することとした。

### (4) 実験供試体

本実験では、軸方向鉄筋の座屈抵抗特性を異ならせた RC 柱を計 4 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 32.6MPa と算出した。ここで、図-9 に実験供試体の断面図、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 1000mm となっている。

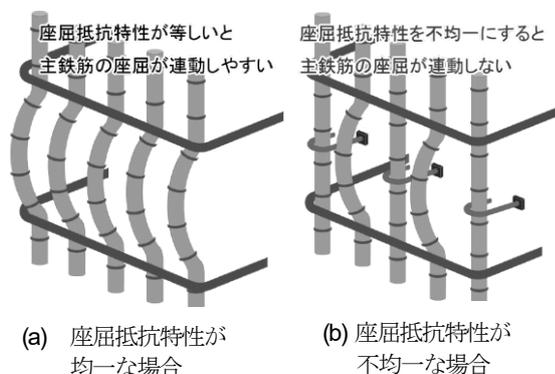


図-8 軸方向鉄筋の座屈抵抗特性を不均一にするという試み

#### a) C100-ST

C100-ST は無対策の供試体であり、軸方向鉄筋の座屈による曲げ破壊で終局を迎えるよう設計した。なお、帯鉄筋間隔は 100mm、帯鉄筋比は 0.2%、帯鉄筋間隔有効高さ比は 0.345 となっている。図-10 に道路橋示方書・同解説-耐震設計編<sup>2)</sup>に基づいて算出した骨格曲線を示す。図中のプロットは原点に近い方から設計上の降伏変位  $\delta_1$ 、耐震性能 2 の限界状態に相当する変位  $\delta_{k2}$ 、耐震性能 3 の限界状態に相当する変位  $\delta_{k3}$  を表している。ここで、耐震設計 2 の限界状態はエネルギー吸収が安定して期待できる限界であり、耐震性能 3 の限界状態はかぶりコンクリートの剥落や軸方向鉄筋の座屈が発生する点であるとされている。そして、通常の耐震設計では耐震性能 3 に至るまでの挙動における安全性を照査しており、それ以降の挙動に関しては耐震安全性が検討されていない。そのため、耐震性能 3 の限界状態を超える挙動は、耐震設計において想定外の挙動であるといえ、本研究ではこの領域において各供試体の耐震安全性の検討を行っていく。なお、その他のすべての供試体は、この C100-ST に対して座屈制御対策を施した供試体となっている。

#### b) C50

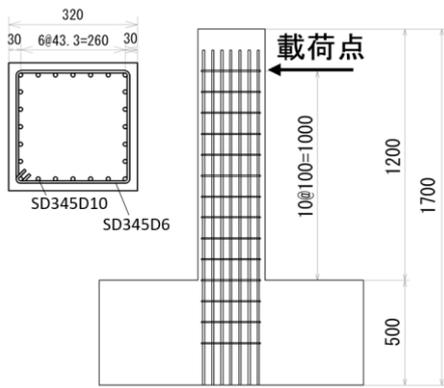
C50 は C100-ST に対する座屈制御対策として帯鉄筋を用いた供試体となっており、一般的な座屈制御対策を施した供試体である。帯鉄筋間隔については、柱基部から 1D の高さである柱高さ 300mm までの区間が 50mm、それより上の区間が 100mm となっている。なお、柱基部周辺における帯鉄筋比は 0.4%、帯鉄筋間隔有効高さ比は 0.172 となっている。C100-ST と同様に、図-10 に道路橋示方書・同解説-耐震設計編<sup>2)</sup>に基づいて算出した骨格曲線を示す。

#### c) C100-WH-ALL

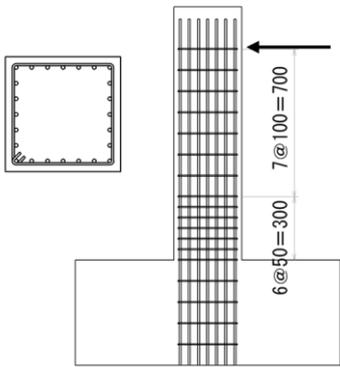
C100-WH-ALL は C100-ST に対する座屈制御対策としてヘッド付きフックを用いた供試体である。帯鉄筋間隔は 100mm であり、ヘッド付きフックは、柱基部から 1D の高さである柱高さ 300mm における帯鉄筋配筋部の中間の軸方向鉄筋に配筋されている。なお、C100-WH-ALL においては、載荷面のすべての鉄筋にヘッド付きフックを配筋しており、その他の供試体と比較することで、ヘッド付きフックの座屈抵抗特性などについて検討する。

#### d) C100-WH

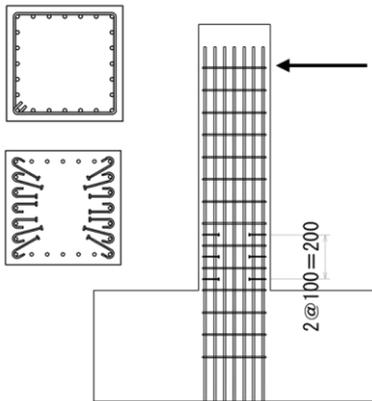
C100-WH は C100-ST に対する座屈制御対策としてヘッド付きフックを一部の軸方向鉄筋にのみ配筋した供試体となっており、RC 柱の中に座屈抵抗特性が異なる鉄筋をあえて配置し、軸方向鉄筋の座屈抵抗特性を積極的に不均一にした供試体である。ヘッド付きフックは、C100-WH-ALL と同様に柱基部から 1D の高さである柱高さ 300mm における帯鉄筋配筋部の中間の軸方向鉄筋に配筋されている。なお、C100-WH とその他の供試体と比



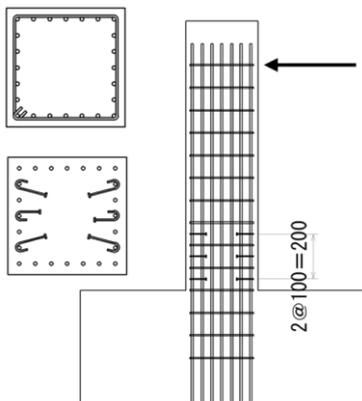
(a) C100-ST



(b) C50

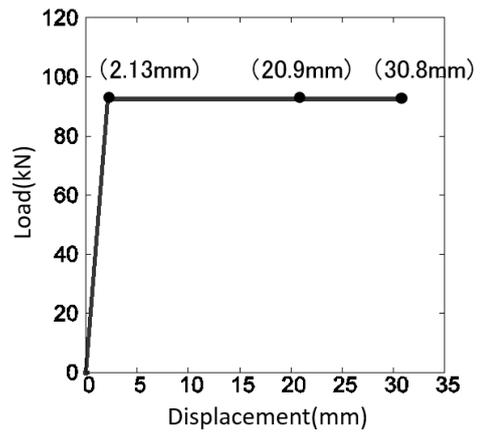


(c) C100-WH-ALL

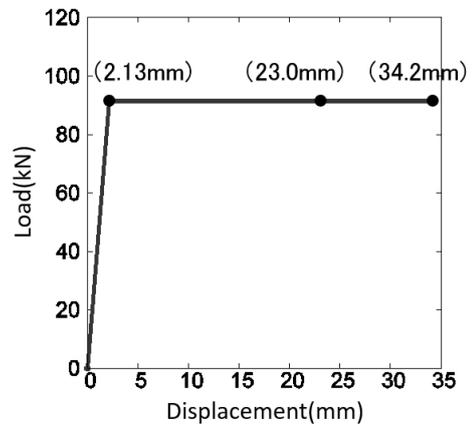


(d) C100-WH

図-9 実験供試体の断面図および配筋図



(a) C100-ST



(b) C50

図-10 骨格曲線 (H24 道路橋示方書・同解説・耐震設計編<sup>2)</sup>)

較することで、座屈抵抗特性を不均一にすることが RC 柱のポストピーク挙動に与える影響を検討する。

### (5) ヘッド付きフックの寸法

ヘッド付きフックについては、式(1)、式(2)を用いて算出したコンファインドコンクリートの帯鉄筋からのかぶりの値 (=33mm) と半円フックの定着長の規格を踏まえて、2種類の寸法を採用した(図-11)。そして図-11の C100-WH-ALL および C100-WH の断面図のように、中央の3本の軸方向鉄筋に配筋する場合はタイプ1のヘッド付きフックを、両外側の2本の軸方向鉄筋に配筋する場合はタイプ2のヘッド付きフックを用いた。また、ヘッド付きフックのフック部分には SS400 の  $\phi 4$  の丸鋼を、ヘッド部には SS400 の 4t の平鋼を用いた。

### (6) 荷重方法と測定データ

荷重方法は正負交番荷重とし、荷重変位は柱基部の軸方向鉄筋のひずみをモニターしながら荷重を行い、軸方向鉄筋の降伏した点を降伏変位  $\delta_y$  (=4mm) とし、それを基準として、その整数倍の変位振幅での繰り返し荷重を

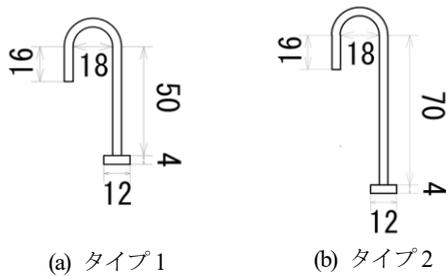


図-11 ヘッド付きフックの寸法

行った。荷重回数は、最低繰り返し回数を3回とし、軸方向鉄筋の座屈が発生したサイクルにおいては10回の正負繰り返し荷重を行った。また荷重軸応力は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。

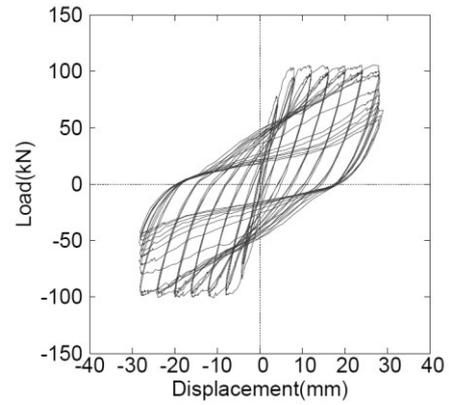
### 3. 実験結果及び考察

#### (1) 荷重-変位関係

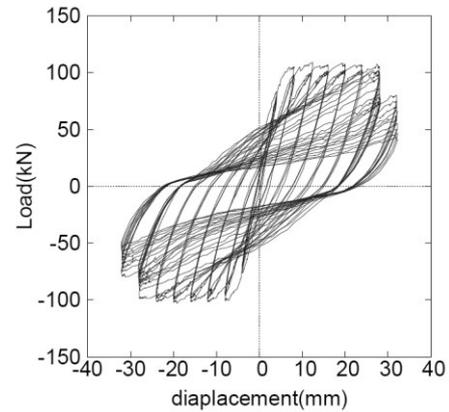
図-12 に実験により得られた各供試体の荷重 - 変位関係を示す。図-12 を見ると、すべての供試体において履歴ループが紡錘型であり、典型的に曲げ挙動を示していることがわかる。また、C100-ST および C50 の供試体において、設計時に算出した骨格曲線と荷重 - 変位関係を比較すると、縮小模型を用いた実験であるため完全に一致はしていないものの、荷重低下が発生している変位振幅28mmは、耐震性能3の限界状態に相当する変位付近の値であることがわかる。耐震性能3以降の挙動の耐震安全性の照査は設計上行わないため、本実験において変位振幅28mm以降の挙動は、設計で安全性が照査されていない、想定を超える挙動であったと判断することができる。

#### (2) 最大荷重の推移

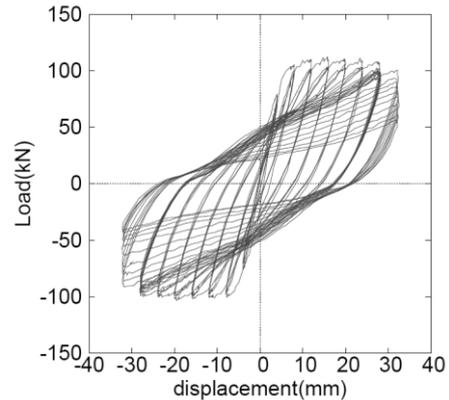
図-13 に各供試体の最大荷重の推移を示す。図-13 を見ると、変位振幅4mmから変位振幅24mmの間では、各供試体間の最大荷重の推移に違いは見られないことがわかる。しかし、変位振幅28mmの荷重になると、各供試体間で荷重低下挙動に差が見られることがわかる。ここで、24mm振幅の1サイクル目での荷重を最大荷重としたときの28mm振幅終了時における荷重保有率を比較すると(表-1)、C100-WH-ALLはC100-STに比べ、42.8%の荷重低下改善が見られ、C50と比べても、14.1%の荷重



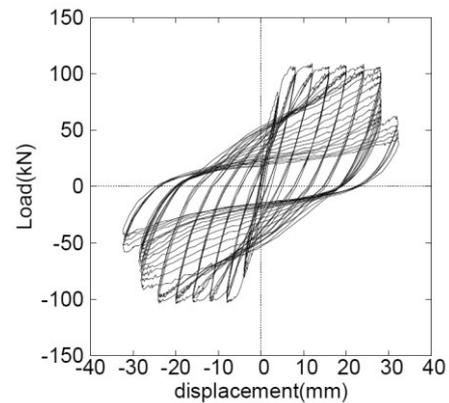
(a) C100-ST



(b) C50

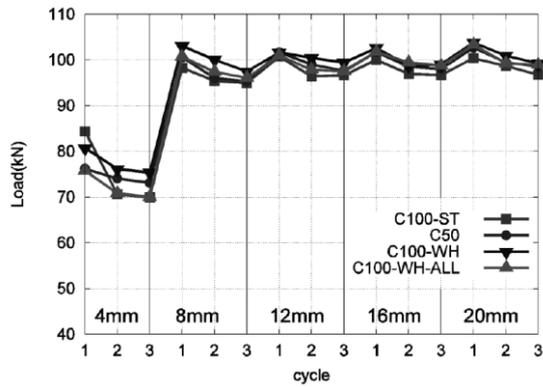


(c) C100-WH-ALL

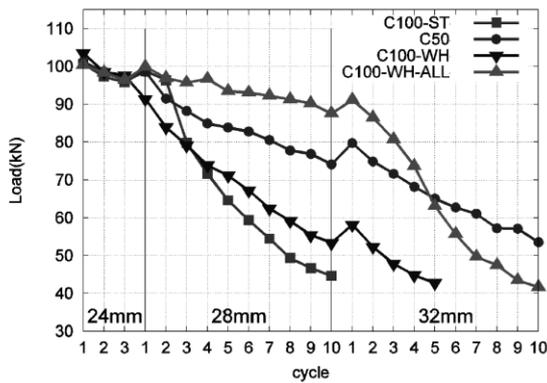


(d) C100-WH

図-12 荷重-変位関係



(a) 変位振幅 4mm ~ 20mm



(b) 変位振幅 24mm ~ 28mm

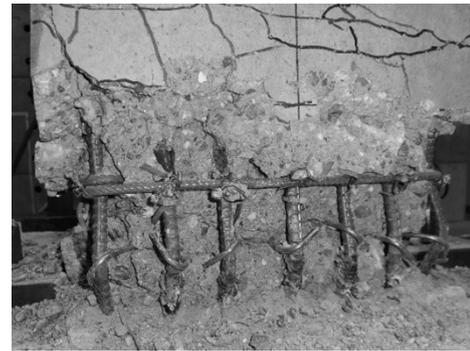
図-13 各供試体の最大荷重の推移の比較

表-1 24mm 振幅の 1 サイクル目での荷重を最大荷重としたときの 28mm 振幅終了時における荷重保有率

| 供試体         | 24mm-1cycle時の荷重 (kN) | 28mm-10cycle時の荷重 (kN) | 荷重保有率 (%) |
|-------------|----------------------|-----------------------|-----------|
| C100-ST     | 100.4                | 44.7                  | 44.5      |
| C50         | 101.2                | 74.1                  | 73.2      |
| C100-WH-ALL | 100.4                | 87.6                  | 87.3      |
| C100-WH     | 103.5                | 53.4                  | 51.6      |

低下改善が見られることがわかる。3.(1)で述べたように、本実験では変位振幅 28mm の荷重で生じた荷重低下挙動は、設計上安全性が照査されていない想定外の挙動であると判断している。そのため、本実験結果から、座屈時にははらみ出しのピークになると考えられる位置にヘッド付きフックを配筋することで、既存の耐震設計の照査範囲内の挙動は変化させない形で、設計上の想定を超える範囲の挙動を改善させることができることがわかった。

一方で、C100-WH-ALLにおける変位振幅 32mm の繰り返し荷重における荷重低下の割合は、無対策の供試体である C100-ST と同程度であることがわかる。ここで、図-14 に荷重終了後の C100-WH-ALL の軸方向鉄筋のはらみ出し状況の写真を示す。これを見ると、軸方向鉄筋に配筋されたすべてのヘッド付きフックのフック部が、軸



(a) 荷重終了後の C100-WH-ALL (正面から)



(b) 荷重終了後の C100-WH-ALL (フック部を拡大)

図-14 荷重終了後の C100-WH-ALL の軸方向鉄筋のはらみ出し状況の写真



図-15 フック部が開かず軸方向鉄筋の座屈に抵抗している様子

方向鉄筋の座屈によるはらみ出しの力を受けて曲げ変形し、開いていることがわかる (比較として図-15 にフック部が開かず軸方向鉄筋の座屈に抵抗している様子を示す)。このことから、今回の実験においてヘッド付きフックは、軸方向鉄筋の座屈発生を抑制するものの、座屈が発生し鉄筋のはらみ出し始めた後は軸方向鉄筋の変形に抵抗することができないことがわかる。そのため、単に座屈を抑制するだけでなく、座屈発生後の RC 部材の安全性を保つことも考えると、ヘッド付きフックのフ

ック部分のより最適な形状を検討する必要があるといえる。

### (3) 各供試体における軸方向鉄筋の座屈発生サイクル

表-2 に各供試体の載荷面および載荷面裏側における軸方向鉄筋の座屈発生時の載荷サイクルを示す。以下、無対策の供試体である C100-ST と座屈制御対策を施した C50, C100-WH-ALL, C100-WH の座屈発生時の載荷サイクルを比較していく。

#### a) C50 と C100-ST の比較

C50 の載荷裏面では、軸方向鉄筋の座屈が C100-ST よりも早期に発生していることがわかる。また、載荷面においても、座屈抑制効果は見られたものの、C100-ST と比べて座屈発生点が 2~3 サイクルほど遅れたのみであった。本実験において C50 は、帯鉄筋比が 0.2 %、帯鉄筋間隔有効高さ比が 0.345 である C100-ST に対し、帯鉄筋比が 0.4 %、帯鉄筋間隔有効高さ比が 0.172 となるように帯鉄筋を配筋し座屈制御対策を施した供試体であった。しかし、座屈という現象は、材料の不均一性や荷重の偏心作用、部材の持つ残留応力や初期変形などの影響を受ける非常に不安定な現象である。そのため、C50 で著しい座屈抑制効果が得られなかったことから、C50 に施した程度の帯鉄筋による座屈制御効果では、必ずしも軸方向鉄筋の座屈抑制につながるとは限らないことがわかった。

#### b) C100-WH-ALL と C100-ST の比較

C100-WH-ALL においては、載荷面、載荷裏面の両面とも、載荷振幅 28mm の繰り返しでは軸方向鉄筋の座屈は発生せず、載荷振幅 32mm の 2 サイクル目に座屈が発生した。そのため、ヘッド付きフックの持つ座屈抵抗特性が十分に発揮されているといえる、また a) での検討を踏まえると、その座屈抵抗特性が帯鉄筋による座屈抵抗特性に比べて大きな値を示していると判断できる。

#### c) C100-WH と C100-ST の比較

表-2 を見ると、C100-WH において C100-ST と比べて座屈発生が遅れるという現象は確認されなかった。これは、C100-WH の座屈制御対策を施していない軸方向鉄筋が

表-2 軸方向鉄筋の座屈発生時の載荷サイクル

| 供試体         | 座屈発生面 | 座屈が発生したサイクル |
|-------------|-------|-------------|
| C100-ST     | 載荷面   | 28mm-4      |
|             | 載荷面裏側 | 28mm-3      |
| C50         | 載荷面   | 28mm-6      |
|             | 載荷面裏側 | 28mm-2      |
| C100-WH-ALL | 載荷面   | 32mm-2      |
|             | 載荷面裏側 | 32mm-2      |
| C100-WH     | 載荷面   | 28mm-4      |
|             | 載荷面裏側 | 28mm-1      |

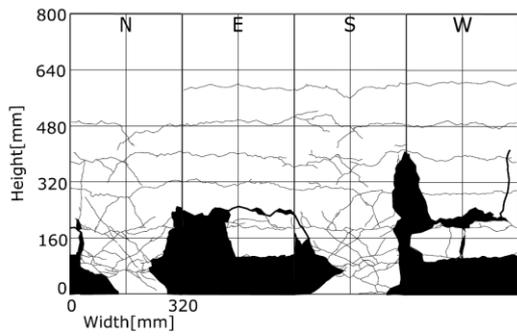
C100-ST の軸方向鉄筋と同一の力学的特性を示すことから、ヘッド付きフックを配筋していない軸方向鉄筋が早期に座屈しやすい状態であったためであると考えられる。

以上、a), b), c) の比較により、繰り返し回数 10 回の 28mm 振幅の載荷において C100-WH-ALL のみ軸方向鉄筋の座屈が発生せず、ヘッド付きフックによる座屈制御対策が従来の帯鉄筋による座屈制御対策と比べて非常に高い効果を示すことがわかった。一般的に、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の多い海洋型の地震動に対応するとされている 1)。そしてその海洋型の地震動において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。本実験においても、28mm 振幅の載荷終了時の各供試体の破壊性状を見ると(図-16)、C100-ST, C50, C100-WH の供試体では、軸方向鉄筋の座屈により基部周辺のかぶりコンクリートが剥落している一方、C100-WH-ALL では軸方向鉄筋の座屈が発生していないため、他の供試体に比べ基部周辺の損傷が大きく軽減されていることがわかる。以上から、ヘッド付きフックによる座屈制御手法は、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十分な効果を示すことができ、RC 柱の危機耐性向上の観点からも有効な手段であるといえる。

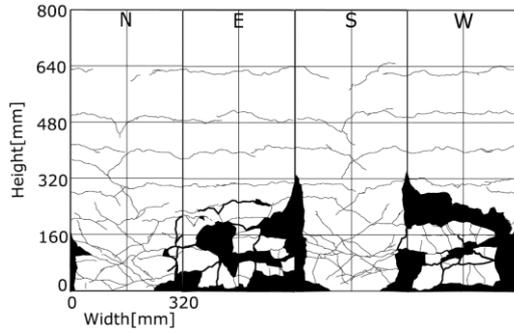
### (4) 帯鉄筋によるコアコンクリート拘束効果の維持

1 章でも述べたように、帯鉄筋はコアコンクリートを拘束する役割を担っており、帯鉄筋に拘束されたコアコンクリートは RC 柱のポストピーク挙動において非常に重要な働きを担っている。しかし、早期に軸方向鉄筋の座屈が発生した C100-ST, C50, C100-WH では、軸方向鉄筋の座屈変形により帯鉄筋がはらみ出しているため、RC 柱のポストピーク領域においてコアコンクリートの拘束効果が失われている。特に C50 においては、柱基部において帯鉄筋量を多く配筋したにもかかわらず、その帯鉄筋がコアコンクリートを拘束するための鉄筋として十分に機能せず、無対策の供試体である C100-ST と同程度のコアコンクリート拘束効果しか発揮されていないと考えられる。すなわち、C50 では、帯鉄筋に対してコアコンクリート拘束効果と軸方向鉄筋の座屈制御効果の複数の効果を期待しているが故に、帯鉄筋の持つコアコンクリート拘束効果を十分に活かすことができていないと判断できる。

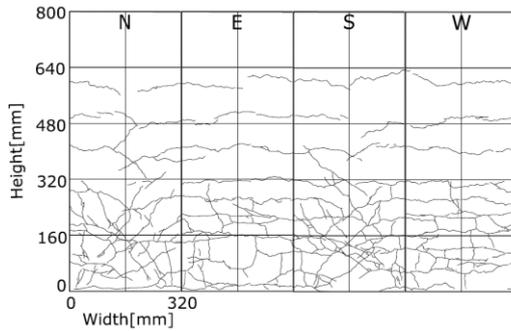
一方、C100-WH-ALL ではヘッド付きフックの座屈抵抗特性により、帯鉄筋量が増大していないにもかかわらず、C100-ST や C50 の供試体よりも帯鉄筋のコアコンクリート拘束効果が発揮されていると判断できる。1 章でも述べたように、設計において RC 柱のポストピーク領



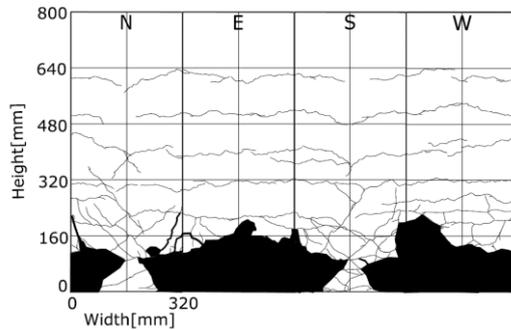
(a) C100-ST



(b) C50



(c) C100-WH-ALL



(d) C100-WH

図-16 28mm 振幅の荷重終了時の各供試体の破壊性状

域の耐震安全性を検討する際、帯鉄筋によるコアコンクリート拘束効果は維持されていることが前提となっている。そのため、帯鉄筋に複数の役割を期待すると、帯鉄筋のコアコンクリート拘束効果が維持できず、RC 柱のポストピーク挙動が設計上の想定と異なる危険性が高まってしまう。そのため、ヘッド付きフックが軸方向鉄筋の座屈を抑制するという働きを帯鉄筋と分担すれば、帯

鉄筋の持つコアコンクリート拘束効果の維持につながり、実際の RC 柱のポストピーク挙動を設計上の想定に近づけることができると考えられる。

#### (5) 座屈抵抗特性を不均一にすることによる RC 柱の荷重低下挙動への影響

2.(3) で述べたように、本研究では、「配筋箇所の自由度が高い」というヘッド付きフックの特長を活かして、ヘッド付きフックを一部の軸方向鉄筋にのみ配筋した C100-WH を作製し、軸方向鉄筋の座屈抵抗特性を不均一にするという手法を検討した。本手法では、軸方向鉄筋の座屈が連動せず、複数のサイクルにわたって発生することで、RC 柱のポストピーク領域における荷重低下が緩やかになることを期待している。ここで、表-3 に各供試体の荷重面および荷重面裏側の軸方向鉄筋を「左側」「中央部」「右側」と大まかに分けたとき (図-17) の軸方向鉄筋の座屈発生サイクルを示す。なお、軸方向鉄筋の座屈発生は柱基部のコンクリートのはらみ出しにより判断し、「左側」「中央部」「S 側」の鉄筋に対して、座屈が発生した場合を「×」として表内に示した。表-3 を見ると、C100-ST および C50 において、すべての軸方向鉄筋の座屈が 1 サイクルで発生しているのに対し、ヘッド付きフックにより軸方向鉄筋 1 本 1 本に対して個別に座屈制御対策を施した C100-WH-ALL および軸方向鉄筋の座屈抵抗特性を不均一にした C100-WH において、軸方向鉄筋の座屈が複数のサイクルにわたって発生していることがわかる。また、C100-WH の軸方向鉄筋の座屈発生後の様子を見ると (図-18)、ヘッド付きフックを配筋した軸方向鉄筋とそうでない軸方向鉄筋で座屈時のはらみ出し形状に違いが確認できる。これにより、ヘッド付きフックは確かに軸方向鉄筋の座屈抵抗特性を積極的に不均一にし、それが実際の軸方向鉄筋の挙動にも現れていると判断することができる。しかし、各供試体の最大荷重の推移 (図-13) を見ると、C100-WH においてポストピーク領域における荷重低下改善効果は確認することができない。そのため、軸方向鉄筋の座屈抵抗特性を積極的に不均一に不均一にするという手法は、RC 柱の

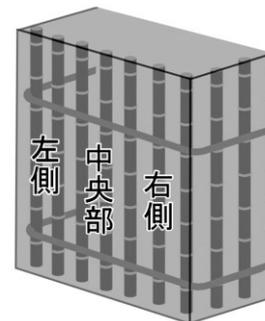


図-17 荷重面および荷重裏面の軸方向鉄筋を大まかに分類した

表-3 軸方向鉄筋の座屈発生時の載荷サイクル

(a) C100-ST(載荷面)

|     | +28mm-2 | +28mm-3 | +28mm-4 | +28mm-5 | +28mm-6 |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| 左側  |         | ×       | ×       | ×       | ×       |
| 中央部 |         | ×       | ×       | ×       | ×       |
| 右側  |         | ×       | ×       | ×       | ×       |

(b) C100-ST(載荷面裏側)

|     | -28mm-3 | -28mm-4 | -28mm-5 | -28mm-6 | -28mm-7 |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| 左側  |         | ×       | ×       | ×       | ×       |
| 中央部 |         | ×       | ×       | ×       | ×       |
| 右側  |         | ×       | ×       | ×       | ×       |

(c) C50(載荷面)

|     | +28mm-5 | +28mm-6 | +28mm-7 | +28mm-8 | +28mm-9 |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| 左側  |         | ×       | ×       | ×       | ×       |
| 中央部 |         | ×       | ×       | ×       | ×       |
| 右側  |         | ×       | ×       | ×       | ×       |

(d) C50(載荷面裏側)

|     | -28mm-1 | -28mm-2 | -28mm-3 | -28mm-4 | -28mm-5 |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| 左側  |         |         | ×       | ×       | ×       |
| 中央部 |         | ×       | ×       | ×       | ×       |
| 右側  |         |         | ×       | ×       | ×       |

(e) C100-WH-ALL(載荷面)

|     | +32mm-1 | +32mm-2 | +32mm-3 | +32mm-4 | +32mm-5 |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| 左側  |         |         | ×       | ×       | ×       |
| 中央部 |         | ×       | ×       | ×       | ×       |
| 右側  |         |         |         |         | ×       |

(f) C100-WH-ALL(載荷面裏側)

|     | -32mm-1 | -32mm-2 | -32mm-3 | -32mm-4 | -32mm-5 |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| 左側  |         | ×       | ×       | ×       | ×       |
| 中央部 |         |         |         |         | ×       |
| 右側  |         |         | ×       | ×       | ×       |

(g) C100-WH(載荷面)

|     | +28mm-3 | +28mm-4 | +28mm-5 | +28mm-6 | +28mm-7 |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| 左側  |         |         |         | ×       | ×       |
| 中央部 |         |         | ×       | ×       | ×       |
| 右側  |         | ×       | ×       | ×       | ×       |

(h) C100-WH(載荷面裏側)

|     | -24mm-3 | -28mm-1 | -28mm-2 | -28mm-3 | -28mm-4 |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| 左側  |         |         |         | ×       | ×       |
| 中央部 |         | ×       | ×       | ×       | ×       |
| 右側  |         |         | ×       | ×       | ×       |



図-18 C100-WHの軸方向鉄筋の座屈発生後の様子

耐震性能を大幅に向上させるには至らないことが分かった。

## 5. まとめ

本研究では、RC柱のポストピーク挙動を改善することを目的に、軸方向鉄筋の座屈抵抗特性に着目した。具体的には、従来の座屈抵抗特性である帯鉄筋、かぶりコンクリートに加えて、新たにヘッド付きフックによる座屈抵抗特性をRC柱に導入し、積極的に座屈抵抗特性を高める効果を正負交番載荷実験により検討した。以下に、本研究で得られた知見を示す。

- ヘッド付きフックにより座屈制御対策を施した供試体では、無対策の供試体や帯鉄筋で座屈制御対策を施した供試体に比べ、軸方向鉄筋の座屈発生が大幅に抑制された。これにより、ヘッド付きフックが帯鉄筋に比べて非常に高い座屈抵抗特性を持つことがわかり、ヘッド付きフックによる座屈制御対策がRC柱のポストピーク挙動の改善に向けて有効な手段であることが示された。
- 帯鉄筋により座屈制御対策を施した供試体では、柱基部において帯鉄筋量を多く配筋したにもかかわらず、軸方向鉄筋の座屈が早期に発生したため、その帯鉄筋がコアコンクリートを拘束するための鉄筋として十分に機能せず、無対策の供試体と同程度のコアコンクリート拘束効果しか発揮されていなかった。一方、ヘッド付きフックを配筋した供試体では、ヘッド付きフックの座屈抵抗特性により、帯鉄筋量が増大していないにもかかわらず、他の供試体に比べ帯鉄筋のコアコンクリート拘束効果が発揮されていると判断できた。そのため、軸方向鉄筋の座屈を抑制するという働きをヘッド付きフックが帯鉄筋と分担することで、帯鉄筋の持つコアコンクリート拘束効果の維持につながるということがわかった。
- 設計においてRC柱のポストピーク領域の耐震安全性を検討する際、帯鉄筋によるコアコンクリート拘束効果は維持されていることが前提となっている。ヘッド付きフックによる座屈制御は、軸方向鉄筋の座屈を抑制することに加えて帯鉄筋のコアコンクリート拘束効果を維持させることにつながるため、RC柱のポストピーク挙動を設計上の想定に近づける効果があると考えられる。
- ヘッド付きフックの特長である配筋時の高い自由度を活かす例として、ヘッド付きフックを一部の鉄筋にのみ配筋して軸方向鉄筋の座屈抵抗特性を不均一にさせるという手法を提案した。その結果、

本手法により、鉄筋の座屈が複数のサイクルにわたって発生する現象が確認され、座屈発生直後の荷重低下改善につながった。しかし、その数サイクル後には通常の場合と同等の荷重低下が見られたため、軸方向鉄筋の座屈抵抗特性を不均一にさせるという手法は、RC 構造物の耐震性能を大幅に向上させるには至らないことがわかった。

- しかし、ヘッド付きフックの持つ「配筋箇所の自由度が高い」という特長により、既存の座屈制御手法では成し得なかった新たな方法で RC 柱の荷重低下改善に取り組めることは事実である。そのため、ヘッド付きフックによる座屈制御手法は、新たな着眼点により RC 柱の耐震安全性を向上させる可能性を秘めているといえ、今後さらなる検討を行っていく意義が十分にあると考えられる。

#### 参考文献

1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解

説 耐震設計，2012

- 2) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 耐震設計編, 2012.3
- 3) 塩屋俊幸,樋口義弘,塩川英世,高岸正章：T ヘッドバーをせん断補強筋として用いた曲げせん断実験,コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 3, pp.799-804, 2001.
- 4) 府川徹,福浦尚之：中間帯鉄筋にプレート定着型せん断補強鉄筋を用いた単柱試験体の正負交番繰返し載荷試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp529-534, 2013.
- 5) <http://www.mk-suishin.or.jp/sinkouhou/data/0131.htm> (2017年2月10日閲覧)
- 6) <http://orient.wda.jp> (2017年2月10日閲覧)
- 7) 建設技術審査証明事業（土木系材料・製品・技術、道路保全技術）概要書「Head-bar」, 2012.8
- 8) 建設技術審査証明事業（土木系材料・製品・技術、道路保全技術）概要書「T ヘッド工法鉄筋」, 2013.11
- 9) J.B.Mander, M.J.N.Priestley, R.Park : THEORETICAL STRESS-STRAIN MODEL FOR CONFINED CONCRETE, Journal of Structural Engineering, Vol.114, Issue 8, pp.1804-1826, 1988.

## CYCLIC LOADING TEST OF RC COLUMNS WITH VARIOUS BUCKLING RESISTANCE OF LONGITUDINAL BARS

Keita UEMURA and Yoshikazu TAKAHASHI

In seismic design of RC columns, it is necessary to improve its ductility and prevent rapid load deterioration of RC columns. In this research, hook with head is suggested as a new buckling resistance of longitudinal bars in order to decrease burden of hoop. Hook with head is an element which directly arranges to longitudinal bars so as to restrain bar buckling, and the advantage effect of hook with head was examined by cyclic loading test. As a result, it was effective to introduce hook with head as a new buckling resistance to improve load deterioration. Additionally, it was found that hoops' confined effect on core concrete was maintained without arranging additional hoops by sharing of buckling resistance between hook with head and hoops.