

# 塑性ヒンジ領域に用いる T ヘッド工法鉄筋の配置誤差が柱部材の変形性能に与える影響の評価

小倉 大季 吉武 謙二 吉村 友季 荒木 尚幸  
(技術研究所) (技術研究所) (土木技術本部) (土木技術本部)

## Effect of construction errors on ductility of RC columns when using mechanical anchorages in the plastic hinge zone

Hiroki Ogura, Kenji Yoshitake, Yuuri Yoshimura and Naoyuki Araki

機械式定着鉄筋の配置誤差が鉄筋コンクリート部材の変形性能に及ぼす影響を評価するために、柱部材の正負交番繰返し載荷試験を行った。柱部材の中間帯鉄筋に、標準フックを有する鉄筋を配置した場合、機械式定着鉄筋の一つである T ヘッド工法鉄筋を通常位置に配置した場合、ならびに同様の T ヘッド工法鉄筋を用いるが配置誤差を考慮して定着具と帯鉄筋を 9 mm 離間させて配置した場合の 3 ケースに対して変形性能を評価した。その結果、配置誤差を考慮した試験体の荷重-変位関係は他の試験体との顕著な差異はなく、耐震設計における限界状態以降も同等の靱性が発揮された。本検討の範囲内では、T ヘッド工法鉄筋の配置誤差が柱の変形性能に与える影響は小さいことが確認された。

Reversed cyclic loading tests were carried out on column members in order to evaluate the effect on ductility of errors in arranging mechanical anchorages used as intermediate ties in the plastic hinge zone. Ductility was evaluated for various cases: using intermediate ties with standard hooks; using intermediate ties with anchorage elements in their normal position; and using the same mechanical anchorages with errors in arrangement. The load-displacement relationship for the case with arrangement errors was not remarkably different from the other cases, and the same ductility was obtained even after the ultimate limit state in seismic design.

### 1. はじめに

コンクリート構造物に用いる鉄筋の定着は、コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>で古くから規定されている半円形フックなどの標準フックのほかに、定着具によって機械的に鉄筋を定着させる機械式定着がある。機械式定着の定着具は、例えば図-1 のようなものであり、標準フックの代替として用いることで、配筋が効率化できるだけでなく、配筋内部へ棒状パイプやポンプの筒先を挿入することが容易になるため、コンクリート施工の品質向上が期待できる<sup>2)</sup>。

当社では、この機械式定着に関する研究開発に早くから着手し、1999年に T ヘッド工法鉄筋 (TH25) を第一高周波工業と共同開発した<sup>3)</sup>。以来、ボックスカルバートや地下タンクの側壁および床版のせん断補強鉄筋、ならびに高架橋や建築物の柱・梁の軸方向鉄筋などに積極的に適用されてきた。さらに筆者ら<sup>4),5)</sup>は、T ヘッド工法鉄筋の



図-1 T ヘッド工法鉄筋の定着具形状

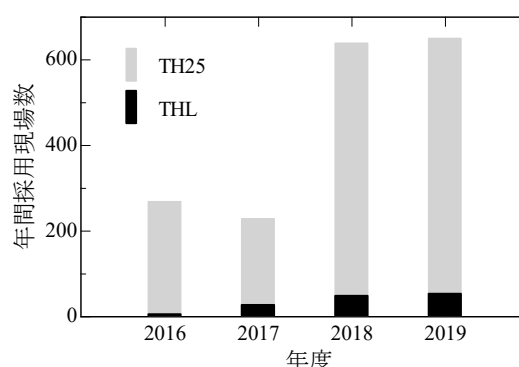


図-2 T ヘッド工法鉄筋の年間採用現場数

適用範囲拡大を目指して、TH25よりも靱性補強性能が優れたTHL(図-1)を2010年に開発した。図-2は、Tヘッド工法鉄筋の適用現場数であるが、THLの適用も近年は増加傾向にあり、2019年度までの累計の適用現場数は5072件、Tヘッド加工箇所数は5539万に至っている。

近年の機械式定着を取り巻く状況としては、2016年に国土交通省が進めるi-Constructionの一環として「機械式鉄筋定着工法の配筋設計ガイドライン」<sup>6)</sup>が策定されるとともに、2020年には鉄筋定着・継手指針<sup>7)</sup>が改訂されるなど、さらなる利用促進が図られているところである。建設現場の生産性向上に貢献する技術として、機械式定着への期待がますます高まっている状況といえる。

このように、本技術は今後も広く適用されていくことが見込まれているが、すべての鉄筋に対して適用できるわけではなく、適用箇所によっては注意が必要となる。例えば、塑性ヒンジの形成が想定される領域の帯鉄筋や中間帯鉄筋に機械式定着を適用する場合には、鉄筋端部の定着体に高い性能が求められる。これは、塑性ヒンジ領域に配置される帯鉄筋や中間帯鉄筋には、せん断補強の目的だけでなく、軸方向鉄筋の座屈防止、応力の分散およびコアコンクリートの拘束などの役割(横拘束鉄筋としての働き)を期待しているためである<sup>1)</sup>。つまり、地震荷重が繰返し作用してコンクリートに多数のひび割れが入った状態においても、軸方向鉄筋や帯鉄筋をつなぎとめる性能が要求される。したがって、こうした鉄筋に機械式定着を適用するためには、部材の性状を適切に反映した検証試験データによる見極めが重要であるといえる。

筆者らはこれまでに、前述したTヘッド工法鉄筋(THL)を塑性ヒンジ領域に配置した柱部材を用いて検証試験<sup>8)</sup>を行い、その靱性が標準フックを用いた場合と同等であることを確認してきたが、これらの試験は配筋が理想的な状態であることを仮定して行ったものであり、現場で起こりうる施工誤差については考慮しなかった。実際の鉄筋組立作業においては、鉄筋の加工寸法や配置の誤差をゼロにすることは難しく、帯鉄筋などの拘束される鉄筋(以下、被拘束鉄筋)と定着具が離間する場合も考えられる。例えば、コンクリート標準示方書<sup>9)</sup>では、加工寸法の許容誤差として、帯鉄筋やスターラップの場合は $\pm 5\text{ mm}$ 、そのほかのD25以下の異形鉄筋の場合は $\pm 15\text{ mm}$ を目安に

するとよいとしている。また、組み立てた鉄筋の配置の許容誤差としては、有効高さを設計寸法の $\pm 3\%$ または $\pm 30\text{ mm}$ のうち小さい値とするのがよいとしている。つまり、このような許容誤差の範囲内で配筋したとしても、定着具と被拘束鉄筋が $10\text{ mm}$ ほど離間することは起こりうる。せん断補強鉄筋としてTヘッド工法鉄筋(TH25)を適用する場合であれば、定着具と被拘束鉄筋に離れが生じた場合でも性能が確保されることを確認しているが<sup>9)</sup>、より高い性能が要求される横拘束鉄筋として適用する場合には、その働きの低下することが懸念された。

そこで本研究では、塑性ヒンジ領域に配置するTヘッド工法鉄筋の施工誤差が柱部材の変形性能に与える影響を評価することにした。具体的には、柱部材の中間帯鉄筋に、標準フックを有する鉄筋を配置した場合、およびTヘッド工法鉄筋を通常位置に配置した場合に加えて、現場で起こりうる施工誤差を考慮してTヘッド工法鉄筋を帯鉄筋に接触させずに配置した場合の3ケースに対して正負交番荷重試験を行い、終局挙動を含めた変形性能を評価した。なお、標準フックを有する鉄筋においても、加工寸法や配置の誤差が部材の靱性に影響を及ぼす可能性が考えられたが、本研究では機械式定着鉄筋の施工誤差のみに着目することにした。

本論文は、文献<sup>10)</sup>にすでに掲載されたものを再構成、加筆修正したものである。

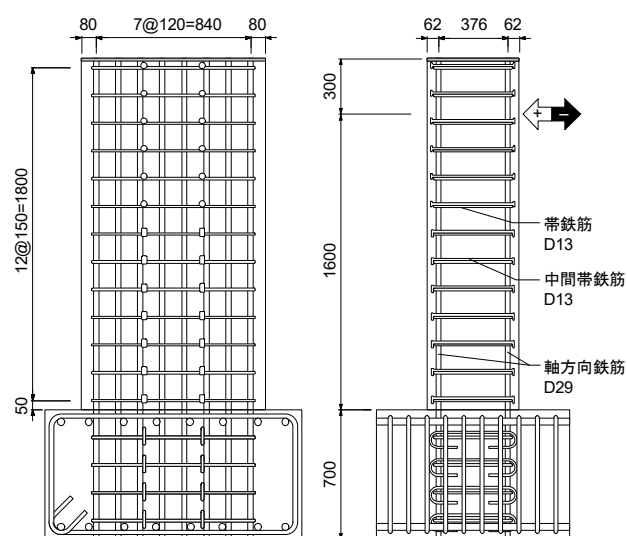


図-3 部材寸法と配筋仕様 (P1 試験体)

表-1 柱の断面諸元と材料諸元

|               |             |
|---------------|-------------|
| 軸圧縮応力         | 3.0 MPa     |
| 断面幅           | 1000 mm     |
| 断面奥行          | 500 mm      |
| 有効高さ          | 438 mm      |
| せん断スパン        | 1600 mm     |
| せん断スパン比       | 3.7         |
| 軸方向鉄筋の径/鋼種    | D29 / SD345 |
| 軸方向引張鉄筋比      | 1.2%        |
| 横方向鉄筋の径/鋼種    | D13 / SD345 |
| 横方向鉄筋の配置間隔    | 150 mm      |
| 横拘束鉄筋の体積比     | 1.1%        |
| コンクリートの設計基準強度 | 24 MPa      |

表-2 コンクリートの材料試験結果

| 試験体 | 材齢<br>(日) | 圧縮強度<br>(MPa) | 引張強度<br>(MPa) | 弾性係数<br>(GPa) | 破壊エネルギー<br>(N/m) |
|-----|-----------|---------------|---------------|---------------|------------------|
| P1  | 33        | 31.1          | 2.5           | 30.1          | -                |
| P2  | 36        | 31.7          | 2.6           | 30.6          | -                |
| P3  | 41        | 32.5          | 2.4           | 30.7          | 93               |

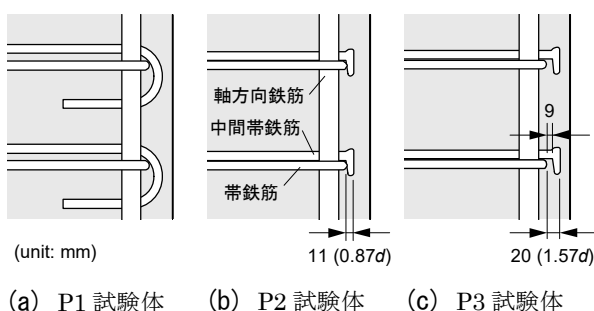


図-4 中間帯鉄筋の配筋詳細

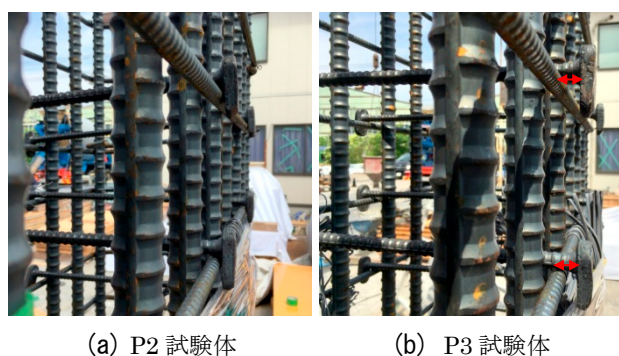


図-5 実際の配筋状況

定した。コンクリートは、設計基準強度が 24 MPa の配合を使用した。

この諸元の試験体を中間帯鉄筋の定着方法のみ変化させて 3 体作製した。定着具の違いが部材靱性に与える影響を評価するために、軸方向鉄筋と帯筋の配置や加工寸法は、いずれの試験体も同一とした。中間帯鉄筋の定着方法の違いは、図-4 に示すとおりである。P1 試験体は定着に標準フックである半円形フックを用いた基準試験体であり、P2、P3 試験体は T ヘッド工法鉄筋を使用した試験体である。P2 試験体は、T ヘッド工法鉄筋の端部から被拘束鉄筋である帯鉄筋までの距離  $h$  を 11 mm ( $0.9d$ 、 $d$ : 鉄筋の公称直径) として、T ヘッド工法鉄筋と帯筋との間に隙間がないように配筋した。一方、P3 試験体は T ヘッド工法鉄筋の配置に施工誤差を考慮した試験体であり、T ヘッド工法鉄筋の端部から帯鉄筋までの距離  $h$  を 20 mm ( $1.6d$ ) として、定着具が帯鉄筋に接触しないように (離間 9 mm として) 配置した。この距離は、建設技術審査証明報告書<sup>12)</sup> で規定している値 ( $h \leq 1.5d$ ) よりも大きい値である。なお、P1 試験体の半円形フックは、曲げ内半径を 35 mm、余長を 104 mm ( $8.0d$ ) とした。

図-5 は、P2 および P3 試験体における実際の配筋状態である。コンクリート標準示方書<sup>1)</sup> では、定着方法によって抜き出し量や疲労特性が異なるため、疲労の影響を受ける部材の横方向鉄筋に両端が異なる定着方法を用いるのは避けるのがよいとされている。正負交番荷重を行う本研究においても、柱試験体の片側のみが偏って破壊することを回避するために、両端に定着具を形成させた T ヘッド工法鉄筋を使用するとともに、上述の施工誤差を両端部ともに考慮することで、両側の定着方法と条件を同一にした。

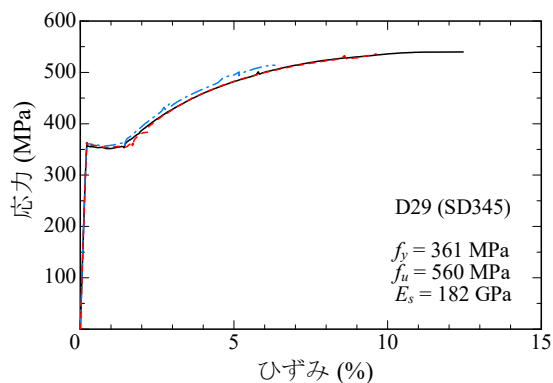
## 2. 実験概要

### 2.1 柱試験体の概要

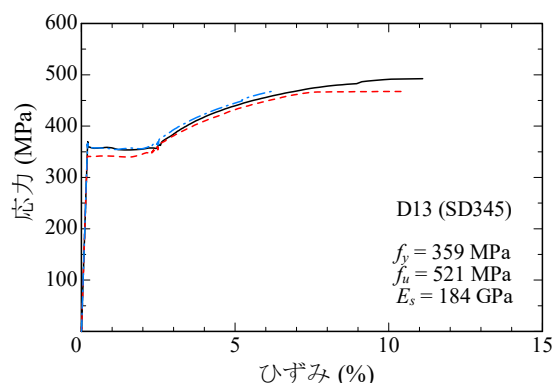
図-3 に、本実験で用いた試験体の形状と配筋を示す。試験体は、幅 1000 mm、奥行き 500 mm の長方形断面の柱部材を対象とした。試験体の諸元は、表-1 に示すとおりである。軸方向鉄筋には D29 (SD345) を配置し、軸方向引張鉄筋比を 1.2% に設定した。帯鉄筋の配置間隔は、道路橋示方書<sup>1)</sup> で示されている上限値の 150 mm とした。各断面内には、2 本の中間帯鉄筋を配置した。帯鉄筋と中間帯鉄筋には D13 (SD345) を用い、せん断補強筋比を 0.34%、横拘束鉄筋の体積比<sup>1)</sup> を 1.1% に設

### 2.2 使用材料

表-2 に、柱試験体に使用したコンクリートの材料試験結果を示す。材料試験は、それぞれの柱試験体を荷重した日と同じ材齢で実施した。各値は



(a) D29 (SD345)



(b) D13 (SD345)

図-6 鉄筋の引張応力-ひずみ関係

3体の試験体から得られた結果の平均値である。破壊エネルギーは、材齢41日にJCI-S-001-2003<sup>13)</sup>に準拠した曲げ試験を行って算出した。

図-6に、使用した鉄筋の材料試験から得られた引張応力-ひずみ関係を示す。ひずみは、鉄筋に貼り付けたゲージ長6mmのひずみゲージで測定した値である。D29およびD13の降伏強度 $f_y$ はそれぞれ361 MPa、359 MPa、破断強度 $f_u$ はそれぞれ560 MPa、521 MPaであった。なお、破断強度は、ひずみゲージを貼り付けていない鉄筋3本の引張試験から算定した値である。

中間帯鉄筋に使用したTヘッド工法鉄筋は、加熱成形によって鉄筋端部に図-7に示す定着具を設けたTHLである。本研究で使用した定着具の各寸法は $t$ : 11~12 mm、 $w$ : 27~28 mm、 $l_1$ : 28~30 mm、 $l_2$ : 12~13 mmであった。なお、塑性化しないことが想定された領域(柱基部から1000 mm以上離れた領域)では、中間帯鉄筋に前述の横拘束鉄筋としての働きが必要ないため、定着具を鉄筋母材の2.5倍に拡張したTヘッド工法鉄筋TH25<sup>12)</sup>を用いた。

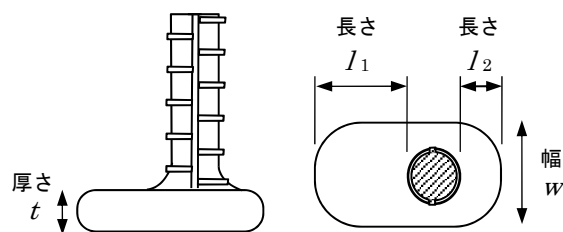


図-7 THLの定着具形状

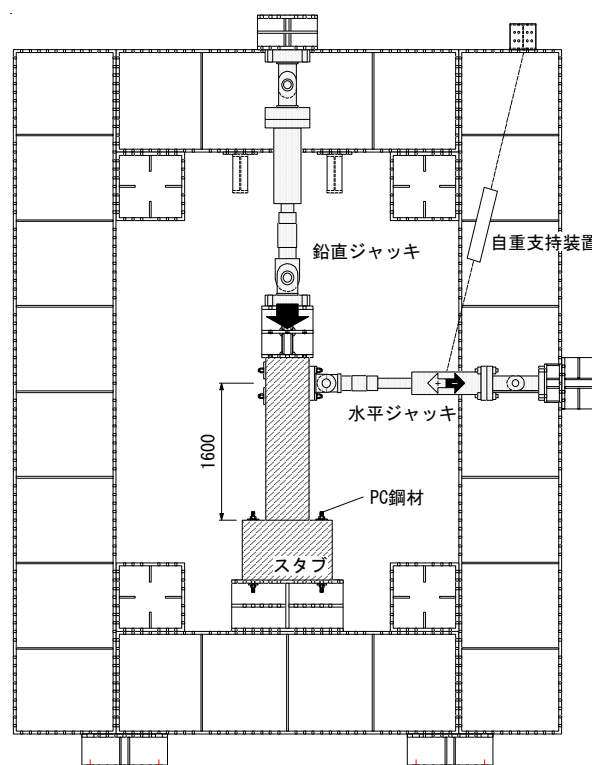


図-8 試験体のセットアップ状況

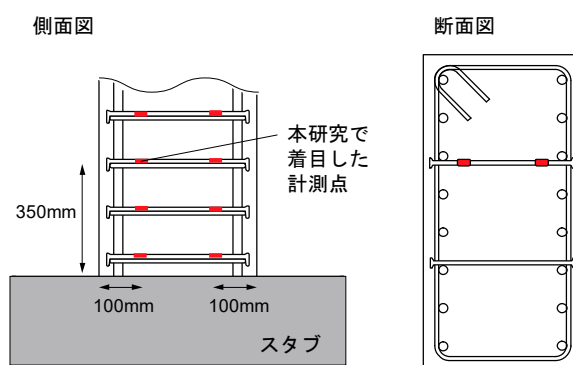


図-9 鉄筋ひずみの計測位置

## 2.3 荷重および計測方法

図-8に、荷重装置の概要を示す。試験は、スタブをPC鋼棒で荷重フレームに剛結した状態で、鉛直ジャッキ(最大容量: 2 MN)により軸力を一

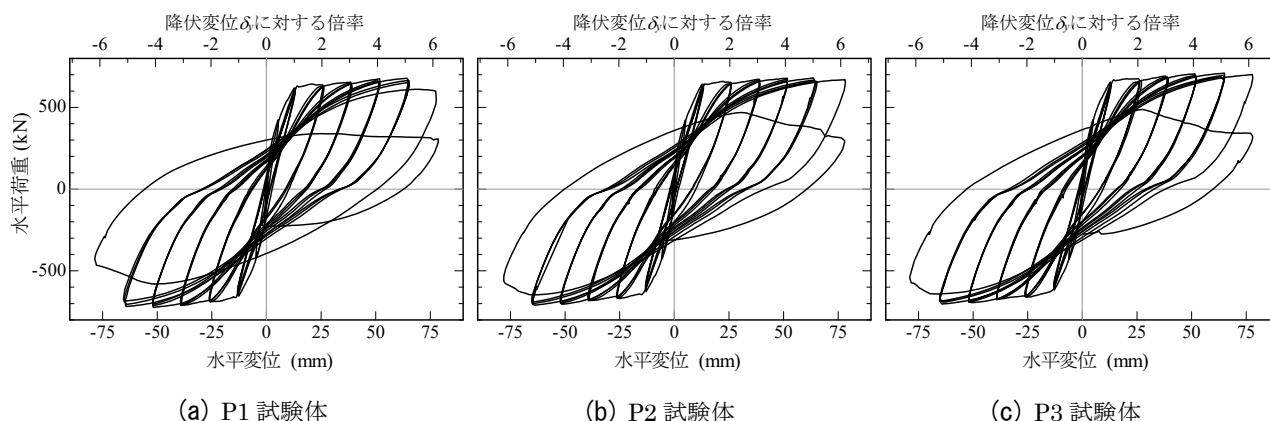


図-10 水平荷重－水平変位関係

定に保持しながら、柱基部から 1600 mm の高さに設置した水平ジャッキ（最大容量：1 MN）により水平変位を制御した。荷重方法は、変位制御による正負交番繰返し荷重を採用した。制御変位は降伏変位  $\delta_y$  の整数倍として、同一制御変位での繰返し回数は 3 回とした。降伏変位  $\delta_y$  は、柱基部の軸方向鉄筋に貼り付けたひずみゲージの測定値が降伏ひずみに達したときの変位から 12.7 mm に決定した。軸力は、道路橋脚で一般的に作用する軸応力 (1.0 MPa) よりも大きな 3.0 MPa を想定して、1.5MN を導入した。荷重の終了は、軸方向鉄筋の座屈およびかぶりコンクリートの剥落が生じて、荷重が最大耐力の 1/2 まで低下した時点とした。

計測項目は、荷重、変位および鉄筋ひずみである。荷重は、鉛直および水平ジャッキによって荷重される荷重をロードセルによって計測した。変位は、スタブに固定した計測フレームから水平ジャッキ位置の水平変位を計測した。鉄筋ひずみは、図-9 に示す位置の中間帯鉄筋のひずみを計測した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 水平荷重－水平変位関係

図-10 に、柱試験体の正負交番繰返し荷重試験から得られた水平荷重－水平変位関係を示す。なお、ここで示す荷重は、軸力による付加曲げモーメントを考慮して補正した値である。いずれの試験体も、水平変位が  $5\delta_y$  に至るまでは安定した耐荷機構を有し、 $5\delta_y$  の荷重ステップ時に最大荷重に至った。最大荷重の正側と負側の平均値は、P1 試験体が 705 kN、P2 試験体が 695 kN、P3 試験体が 706 kN であった。その後、 $6\delta_y$  の正側 2 回目の荷重ステップで最大荷重の 1/2 まで荷重低下したため、荷重を終了した。

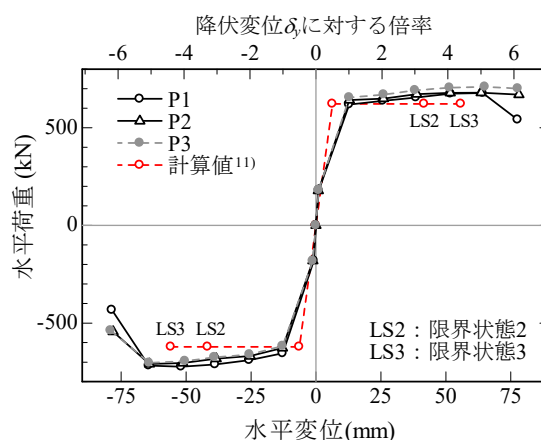


図-11 水平荷重－水平変位関係の包絡線

試験体間の差異は、 $6\delta_y$  の荷重ステップにおいて確認された。中間帯鉄筋に半円形フックを用いた P1 試験体では、 $6\delta_y$  の正側 1 回目の荷重ステップ時に荷重が低下し始め、負側 1 回目の荷重ステップ時に荷重が 447 kN まで低下した。中間帯鉄筋に T ヘッド工法鉄筋を用いた P2 および P3 試験体では、 $6\delta_y$  の 1 回目の荷重ステップでは安定した耐荷機構を示し、 $6\delta_y$  の正側 2 回目の荷重ステップ時に荷重が低下した。このことから、中間帯鉄筋に T ヘッド工法鉄筋を用いた試験体の変形性能は、半円形フックを用いた試験体と同等以上であるといえる。また、P2 と P3 試験体はおおむね同様の挙動を示し、施工誤差が与える影響は小さいことが確認された。

図-11 は、水平荷重－水平変位関係の包絡線である。図には、平成 29 年道路橋示方書<sup>11)</sup>に基づき計算した限界状態に対応する耐力および変位の結果を併記した。限界状態 3 に相当する変位の特性値と比べて、実験の最大荷重時の変位はいずれの試験体も大きいことがわかる。このことから、施工誤差を考慮した試験体を含むいずれの試験体も、十分な変形性能を有しているといえる。

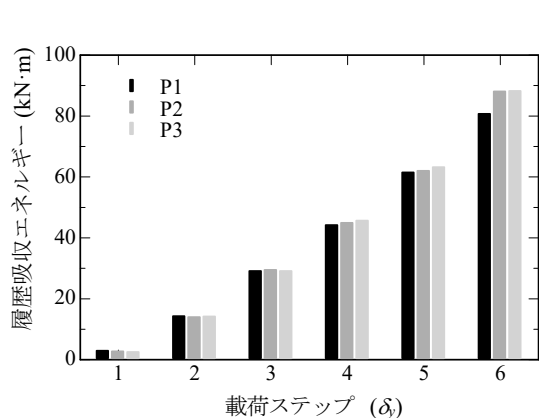


図-12 履歴吸収エネルギー

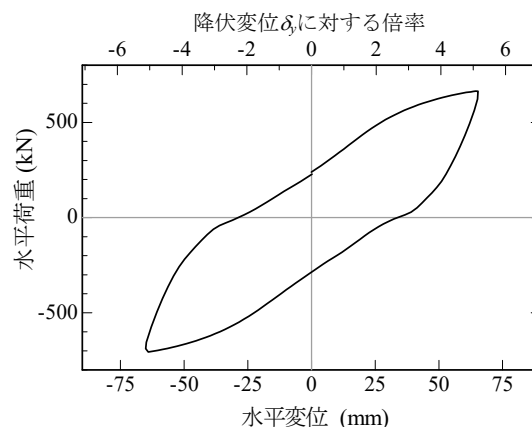


図-13 履歴ループ (P1、荷重ステップ  $5\delta_y$  の場合)

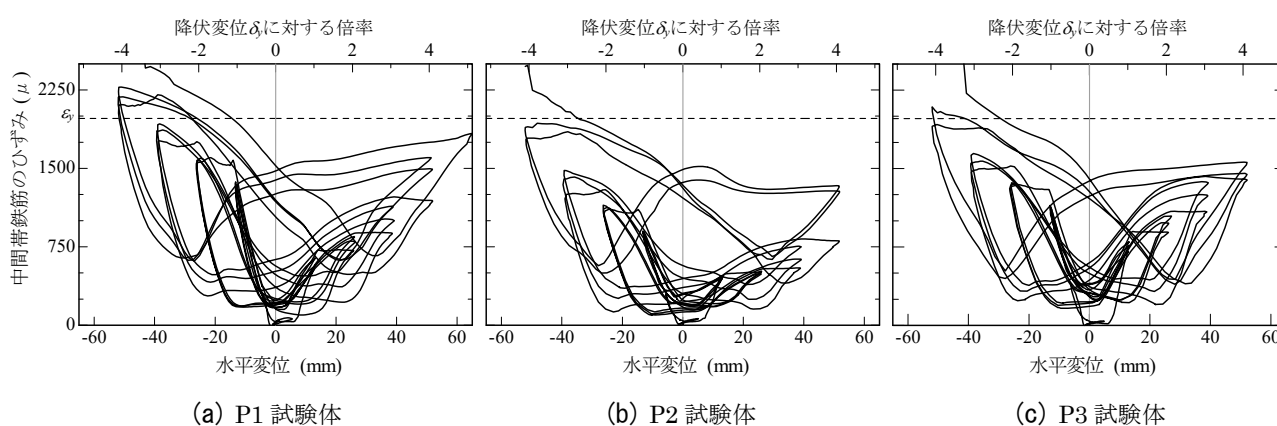


図-14 中間帯鉄筋のひずみ

### 3.2 履歴吸収エネルギー

図-12に、履歴吸収エネルギーの比較を示す。履歴吸収エネルギーは、それぞれの荷重ステップの正側2回目～負側2回目のループ(図-13参照)で囲まれた面積から算出した。なお、 $6\delta_y$ の荷重ステップにおいては、負側2回目の荷重前に試験を終了したため、負側1回目～正側2回目のループで囲まれた面積から算定した。

履歴吸収エネルギーは、 $5\delta_y$ まではそれぞれの試験体で大きな差異は認められなかったが、 $6\delta_y$ の吸収エネルギーはTヘッド工法鉄筋を用いたP2およびP3試験体のほうが半円形フックを用いたP1試験体よりも大きい。P2およびP3試験体はおおむね同様の挙動を示し、施工誤差の影響は小さいことが確認された。

### 3.3 中間帯鉄筋のひずみ

図-14に、中間帯鉄筋のひずみ挙動を示す。ここに示したひずみは、柱基部から350mmに位置する

中間帯鉄筋に貼り付けたひずみゲージ(図-9)から得られた値である。いずれの試験体も、負側 $4\delta_y$ の荷重ステップ時にひずみが降伏ひずみ $\epsilon_y$ に至っており、おおむね同様の挙動を示している。塑性ヒンジ領域の中間帯鉄筋には、帯鉄筋やコアコンクリートのはらみ出しを拘束する効果によって生じるひずみに加えて、せん断力の作用によるひずみが発生する。このため、拘束効果だけを分離して評価することができないが、半円形フックと同様のひずみ挙動を示していることから、Tヘッド工法鉄筋も横拘束鉄筋として機能したことが推察できる。また、Tヘッド工法鉄筋の配置誤差がない場合(P2試験体)と誤差がある場合(P3試験体)との差異も小さいことが確認された。

### 3.4 破壊進展状況

図-15に試験体の破壊状況を示す。ひび割れ進展挙動、かぶりコンクリートが剥落するタイミングおよびその剥落範囲は、それぞれのケースでおおむね

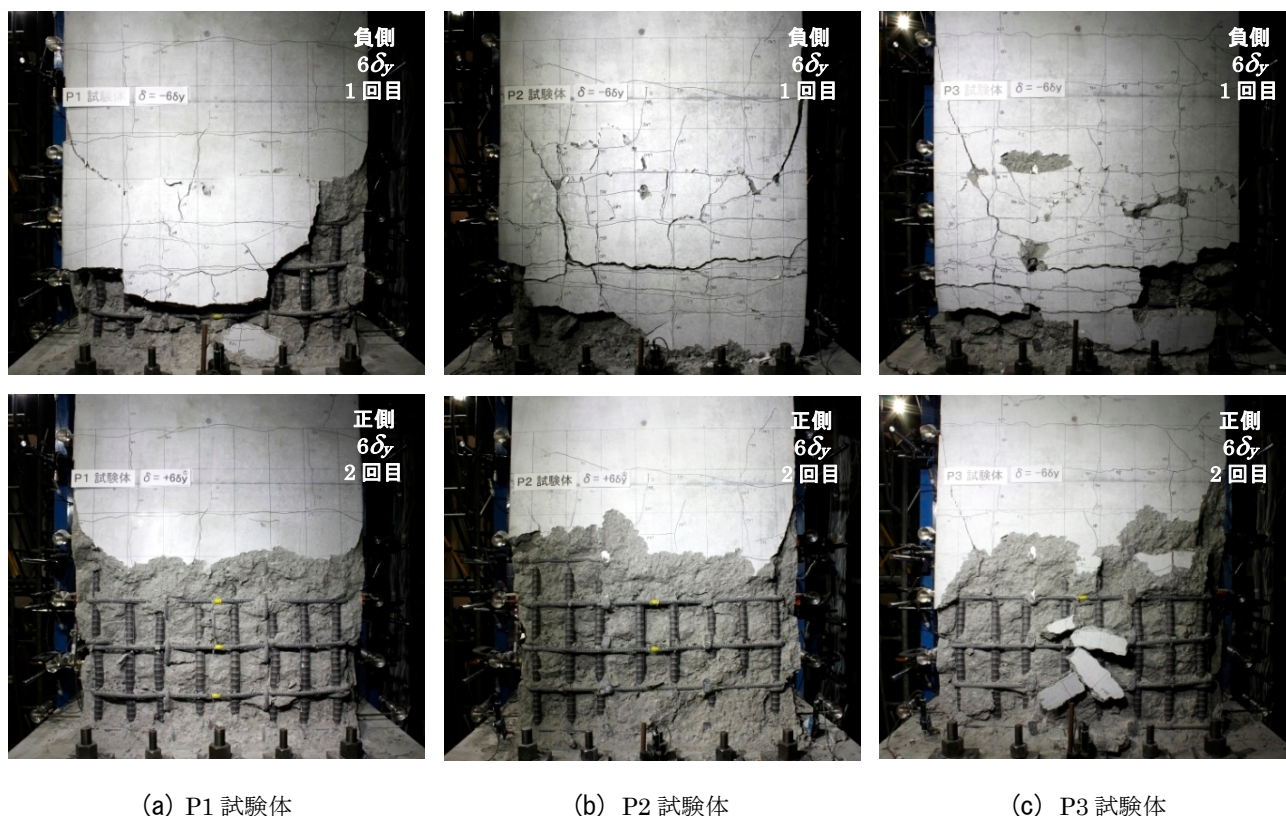


図-15 試験体の破壊状況

同様の傾向を示した。負側  $6\delta_y$  の1回目の荷重ステップ時に、かぶりコンクリートが剥落しはじめ、このときに軸方向鉄筋の座屈が目で観察された。正側  $6\delta_y$  の2回目の荷重ステップ時には、柱基部から約  $600\text{ mm}$  の範囲のかぶりコンクリートが剥落した。各ケースの詳細のひび割れ状況は、付録Aにまとめている。

Tヘッド工法鉄筋を中間帯鉄筋に用いたP2およびP3試験体では、 $6\delta_y$  の2回目の荷重ステップ時に、柱基部から  $350\text{ mm}$  に位置するTヘッド工法鉄筋の定着具が帯鉄筋から外れる挙動が観察された。試験後に鉄筋を観察したところ、いずれのケースも鉄筋の破断は認められなかった。

#### 4. おわりに

本研究では、機械式定着鉄筋の施工誤差が部材靱性に与える影響を評価するために、柱試験体の正負交番繰返し荷重試験を行った。塑性ヒンジ領域に配置する中間帯鉄筋として、標準フックを有する鉄筋を配置した場合、およびTヘッド工法鉄筋を通常位置に配置した場合に加えて、配置誤差を考慮してTヘッド工法鉄筋の定着具を帯鉄筋に接触させずに

配置した場合の3ケースを対象に評価した。得られた結果を以下に示す。

- (1) Tヘッド工法鉄筋の配置に施工誤差を考慮した試験体の水平荷重-水平変位関係や履歴吸収エネルギーは、ほかの試験体との大きな相違は認められず、耐震設計における限界状態以降も同等の変形性能が発揮された。本研究で検討した範囲内では、Tヘッド工法鉄筋の配置誤差が柱の変形性能に与える影響は小さいことが確認された。
- (2) かぶりコンクリートが剥落するタイミングや剥落範囲、ならびに中間帯鉄筋のひずみを総合的に判断すると、配置誤差を考慮した試験体でもTヘッド工法鉄筋によって帯鉄筋およびコアコンクリートを拘束する効果が適切に機能したと推察された。

#### 謝辞

本研究は、第一高周波工業株式会社との共同研究として実施したものであり、第一高周波工業株式会社からTヘッド工法鉄筋を提供いただいた。ここに記して謝意を表す。

<参考文献>

- 1) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書【設計編】，2017.
- 2) 橋本道代，瀧論，木村克彦，高岸正章：“Tヘッドバーを用いた施工の合理化について”，土木建設技術シンポジウム 2004，pp.187-192，2004.
- 3) 長澤保紀，塩屋俊幸，塩川英世，高岸正章，前之園司：“Tヘッドバーの定着性状”，土木学会第54回年次学術講演会，VI-256，pp.512-513，1999.
- 4) 小倉大季，吉武謙二，小川晃，前之園司：“Tヘッド鉄筋の定着具形状が高応力繰返し性能に与える影響”，コンクリート工学年次論文集，vol.31，No.2，pp.649-654，2009.
- 5) 吉武謙二，小倉大季，小川晃，出羽克之：“部材靱性向上を目的とした定着具が楕円形状のTヘッド鉄筋の開発”，清水建設研究報告，vol.87，pp.1-10，2010.
- 6) 国土交通省：機械式定着工法の配筋設計ガイドライン，2016.
- 7) 土木学会：鉄筋定着・継手指針[2020年版]，コンクリートライブラリー156，2020.
- 8) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書【施工編】，2017.
- 9) 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，vol.24，No.3，pp.799-804，2001.
- 10) 小倉大季，吉武謙二，吉村友李，荒木尚幸：“塑性ヒンジ領域の中間帯鉄筋に用いる機械式定着鉄筋の配置誤差が柱の靱性に及ぼす影響評価”，コンクリート工学年次論文集，vol.41，No.2，pp.145-150，2019.
- 11) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2017.
- 12) 土木研究センター：建設技術審査証明報告書 拡径部による機械式定着鉄筋「Tヘッド工法鉄筋」内容変更・更新 平成30年11月，2018.
- 13) 日本コンクリート工学会：切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法(JCI-S-001-2003)，2003.

<付録A ひび割れ性状>

図-16に、 $5\delta_y$ の3回目の荷重ステップ時点における各ケースのひび割れ図を示す。

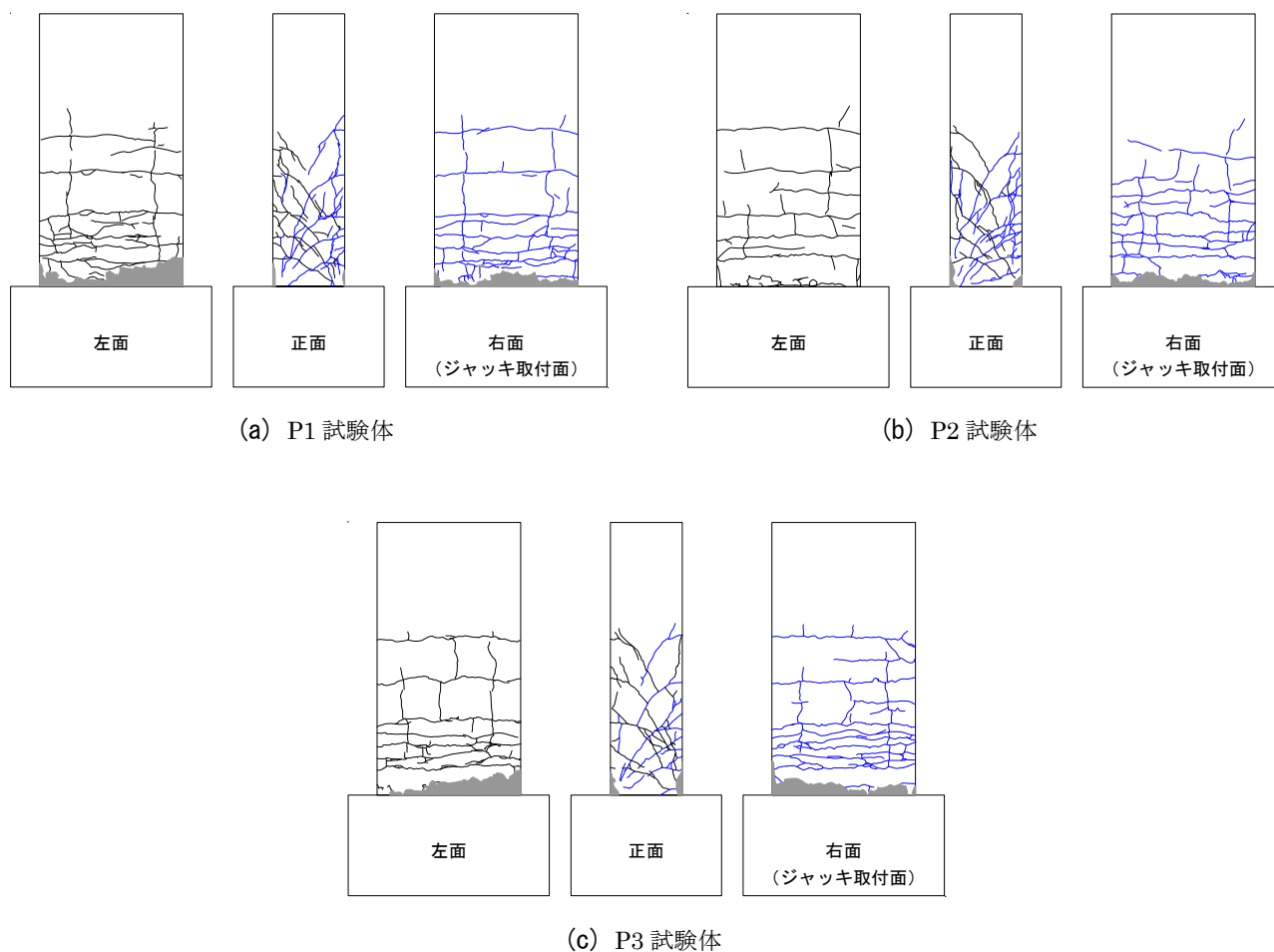


図-16 ひび割れ図 ( $5\delta_y$ の荷重ステップ時点)