

論文 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

小倉 大季*1・吉武 謙二*2・吉村 友李*3・荒木 尚幸*4

要旨：塑性ヒンジ領域に配置する機械式定着鉄筋の配置誤差が部材の靱性に与える影響を評価するために、柱部材を対象に正負交番繰返し载荷試験を行った。柱部材の中間帯鉄筋として、標準フックを有する鉄筋を配置した場合、および機械式定着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機械式定着鉄筋の定着具と帯鉄筋を 9 mm 離間させて配置した場合の 3 ケースに対して試験を行った。その結果、配置誤差を考慮した試験体の水平荷重-水平変位関係は、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靱性が発揮され、配置誤差が及ぼす影響は小さいことが確認された。

キーワード： 機械式定着, 定着具, 中間帯鉄筋, 横拘束鉄筋, 正負交番繰返し载荷試験, 塑性ヒンジ

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物に用いる鉄筋の定着としては、コンクリート標準示方書で古くから規定されている標準フック¹⁾のほかに、定着具によって機械的にコンクリートに定着す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、配筋の効率化だけでなく、配筋内部へ棒状パイプまたはポンプの筒先を挿入することが容易となり、コンクリート施工の品質向上が期待できる²⁾。機械式定着は、2007年に土木学会より鉄筋定着・継手指針³⁾が発刊されて以降、その適用件数は年々増加しており、ボックスカルバートや地下タンクの側壁・床版のせん断補強鉄筋、または高架橋や建築物の柱・梁の軸方向鉄筋などに適用されてきている。近年では、国土交通省が進める i-Constructon 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」⁴⁾が策定され、建設現場の生産性向上が期待できる技術として、さらなる利用促進が図られているところである。

この機械式定着鉄筋は、マッシュなコンクリートに適切に定着された場合、標準フックと同等以上の定着性能を有することが確認されているが⁵⁾、適用箇所によってはその使用に注意が必要となる。例えば、機械式定着を塑性ヒンジの形成が想定される領域の帯筋や中間帯鉄筋として適用する場合には、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¹⁾。つまり、地震荷重が繰返し作

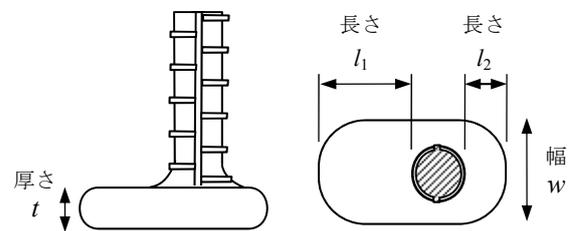


図-1 機械式定着鉄筋の定着具の一例

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といえ、筆者らはこれまでに、中間帯鉄筋に機械式定着を適用した柱部材を用いて検証試験を行い、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⁶⁾。

しかし、これらの検証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などを考慮したものではなかった。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などを避けることは難しく、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⁷⁾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。

*1 清水建設(株) 技術研究所 社会システム技術センター 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*2 清水建設(株) 技術戦略室 開発推進部 主査 博士(工学) (正会員)

*3 清水建設(株) 土木技術本部 設計部

*4 清水建設(株) 土木技術本部 設計部 主査 修士(工学)

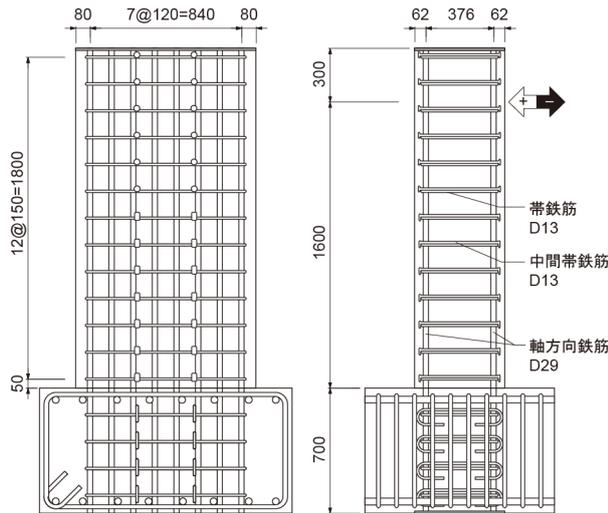


図-2 部材寸法と配筋仕様 (P1 試験体)

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

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 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機械式定着鉄筋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⁸⁾、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、その働きが低下することが懸念された。

そこで本研究では、塑性ヒンジ領域の中間帯鉄筋に配置する機械式定着鉄筋の施工誤差が部材の靱性に与える影響を評価することにした。具体的には、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、および機械式定着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機械式定着鉄筋を帯鉄筋に接触させずに配置した場合の 3 ケースの柱部材に対して正負交番載荷試験を行い、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。

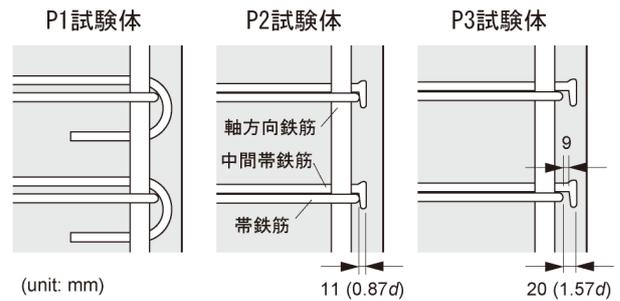


図-3 中間帯鉄筋の配筋詳細



(a) P2 試験体

(b) P3 試験体

図-4 実際の配筋状態

2. 実験概要

2.1 柱試験体の概要

図-2 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⁹⁾ 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) を使い、せん断補強鉄筋比を 0.34%、横拘束鉄筋の体積比⁹⁾ を 1.1% に設定した。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。定着具のみの違いが部材の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-3 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 試験体は機械式定着鉄筋を使用した試験体である。P2 試験体は、機械式定着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、機械式定着鉄筋と帯筋との間に隙間がないように配筋した。一方、P3 試験体は機械式定着鉄筋の配置に施工誤差を考慮した試験体であり、機械式定着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

表-2 コンクリートの材料試験結果

試験体	材齢 (日)	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	破壊エネルギー (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

表-3 鉄筋の材料試験結果

適用箇所	降伏強度 (MPa)	破断強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
D13 帯鉄筋/中間帯鉄筋	359	521	184
D29 軸方向鉄筋	361	560	182

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¹⁰⁾で規定されている値 ($h \leq 1.5d$) よりも大きい値である。

図-4 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¹⁾では、定着方法によって抜け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機械式定着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、両側の定着方法を同一にした。

2.2 使用材料

表-2、表-3 に、柱試験体に使用したコンクリートならびに鉄筋の材料試験結果を示す。各値は 3 体の試験体から得られた結果の平均値である。コンクリートの材料試験は、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。破壊エネルギーについては、材齢 41 日に JCI-S-001-2003¹¹⁾ に準拠した試験を行い算出した。

中間帯鉄筋に使用した機械式定着鉄筋は、加熱成形によって鉄筋端部に定着具を設けたものである¹⁰⁾。定着具形状は、図-1 に示したとおりで、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 である。なお、柱基部から 1000 mm 以上離れた塑性化を考慮しない領域では、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 倍に拡張した機械式定着鉄筋¹⁰⁾を用いた。

2.3 荷重および計測方法

図-5 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（最大出力: 2000 kN）により軸力を一定に保持しながら、

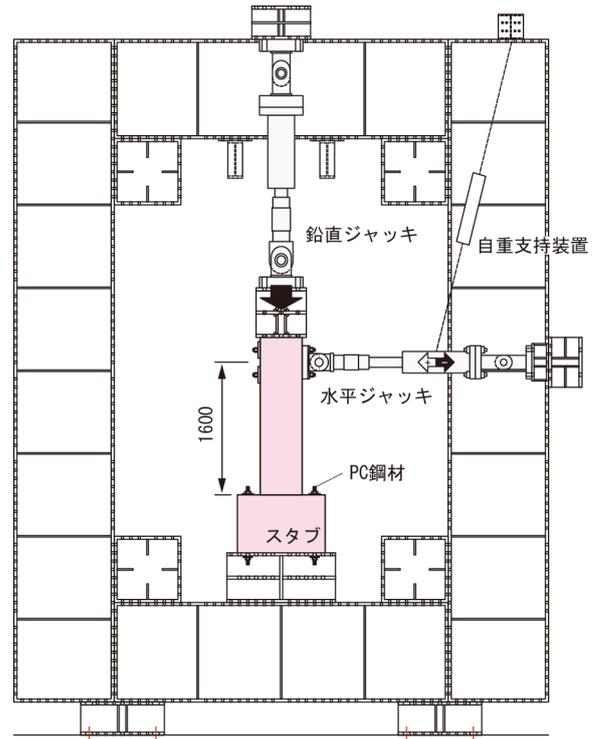


図-5 試験体のセットアップ状況

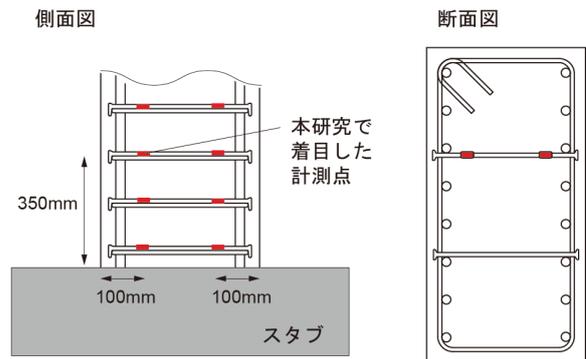


図-6 鉄筋ひずみの計測位置

柱基部から 1600 mm の高さに設置した水平ジャッキ（最大出力：容量 1000 kN）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 δ_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 δ_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荷重点変位から 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、1500 kN 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

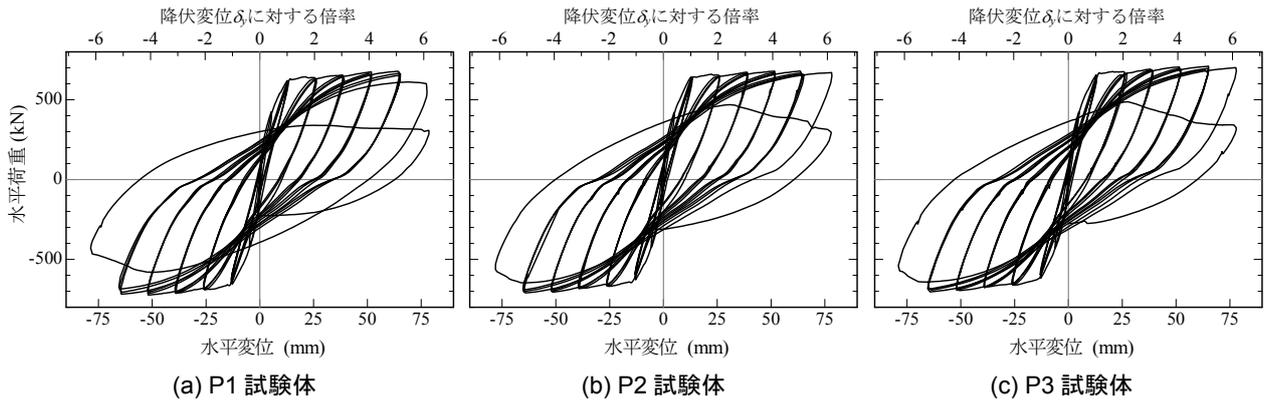


図-7 水平荷重-水平変位関係

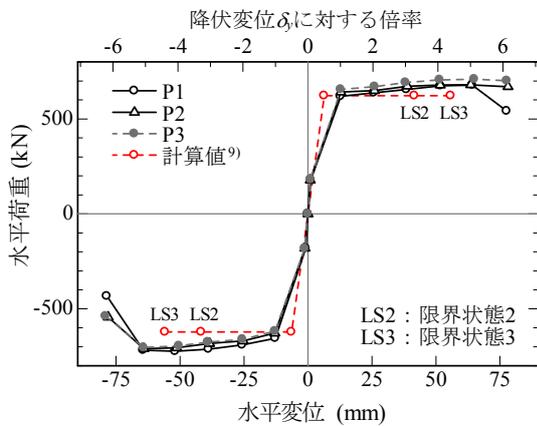


図-8 水平荷重-水平変位関係の包絡線

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-6 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-7 に、柱試験体の正負交番繰り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 $5\delta_f$ に至るまでは安定した耐荷機構を有し、 $5\delta_f$ 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、 $6\delta_f$ 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。

試験体間の差異は、 $6\delta_f$ 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、 $6\delta_f$ 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

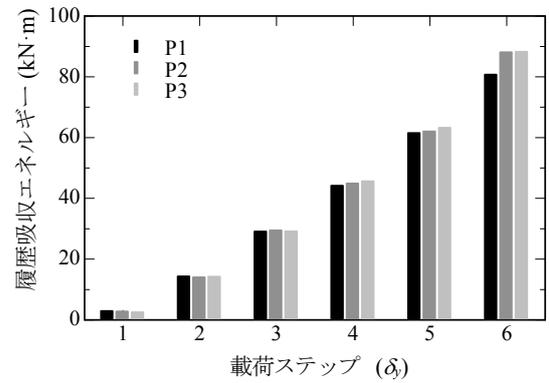


図-9 履歴吸収エネルギーと荷重ステップの関係

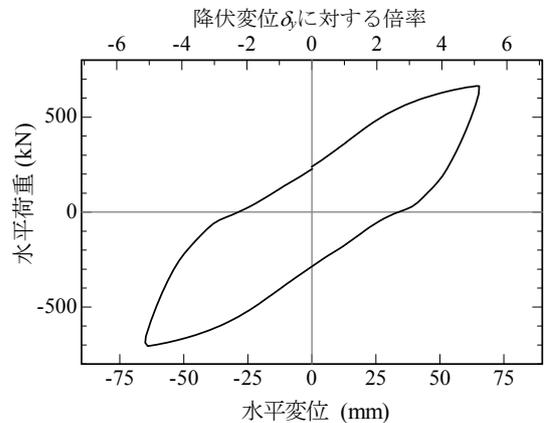


図-10 履歴ループ (P1, 荷重ステップ $5\delta_f$ の場合)

下した。中間帯鉄筋に機械式定着を用いた P2 および P3 試験体では、 $6\delta_f$ の 1 回目の荷重ステップでは安定した耐荷機構を示し、 $6\delta_f$ 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、中間帯鉄筋に機械式定着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 試験体は概ね同様の挙動を示し、施工誤差が及ぼす影響は小さいことが確認された。

図-8 は、水平荷重-水平変位関係の包絡線である。

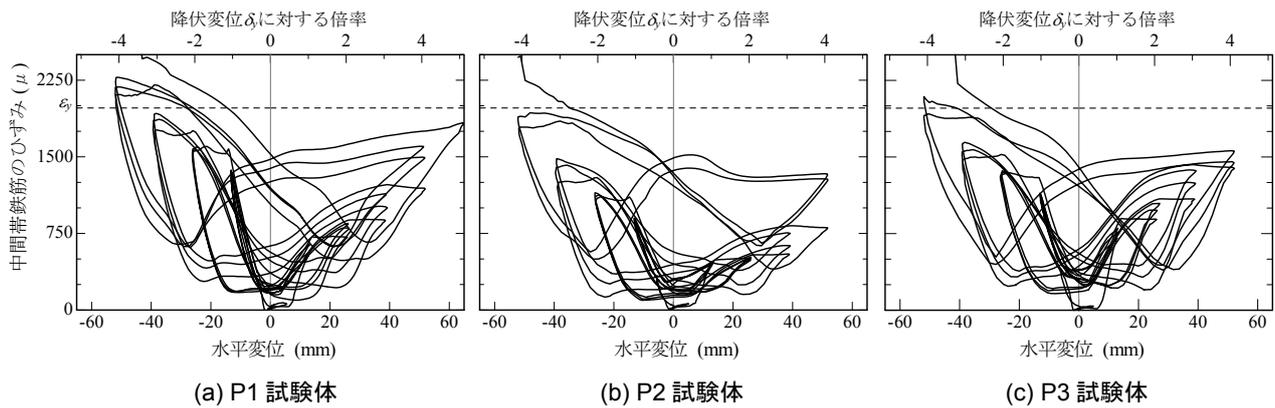


図-11 中間帯鉄筋のひずみ

図には、平成 29 年道路橋示方書⁹⁾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、配筋の施工誤差を考慮した試験体を含めたいずれの試験体も、十分な変形性能を有しているといえる。

3.2 履歴吸収エネルギー

図-9 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-10 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機械式定着を用いた 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 と P3 試験体は概ね同様の挙動を示し、施工誤差が及ぼす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-11 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 350 mm に位置する中間帯鉄筋に貼り付けたひずみゲージ (図-6) から得られた値である。いずれの試験体も、 $4\delta_y$ の負側の荷重ステップ時にひずみが降伏ひずみ ϵ_y に至っており、概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、機械式定着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、施工誤差がある場合とない場合の差異が小さいことも確認された。こ

のことから、施工誤差によらず変形性能の差異が軽微になったと考えられる。

3.4 破壊進展状況

図-12 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概ね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 mm の範囲のかぶりコンクリートが剥落した。機械式定着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 mm に位置する機械式定着鉄筋の定着具が帯鉄筋から外れる挙動が観察された。なお、試験後に観察を行ったところ、いずれの鉄筋にも破断は認められなかった。

4. まとめ

本研究では、機械式定着鉄筋の施工誤差が部材の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、および機械式定着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機械式定着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 ケースに対して正負交番荷重試験を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) 機械式定着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、配置誤差が及ぼす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

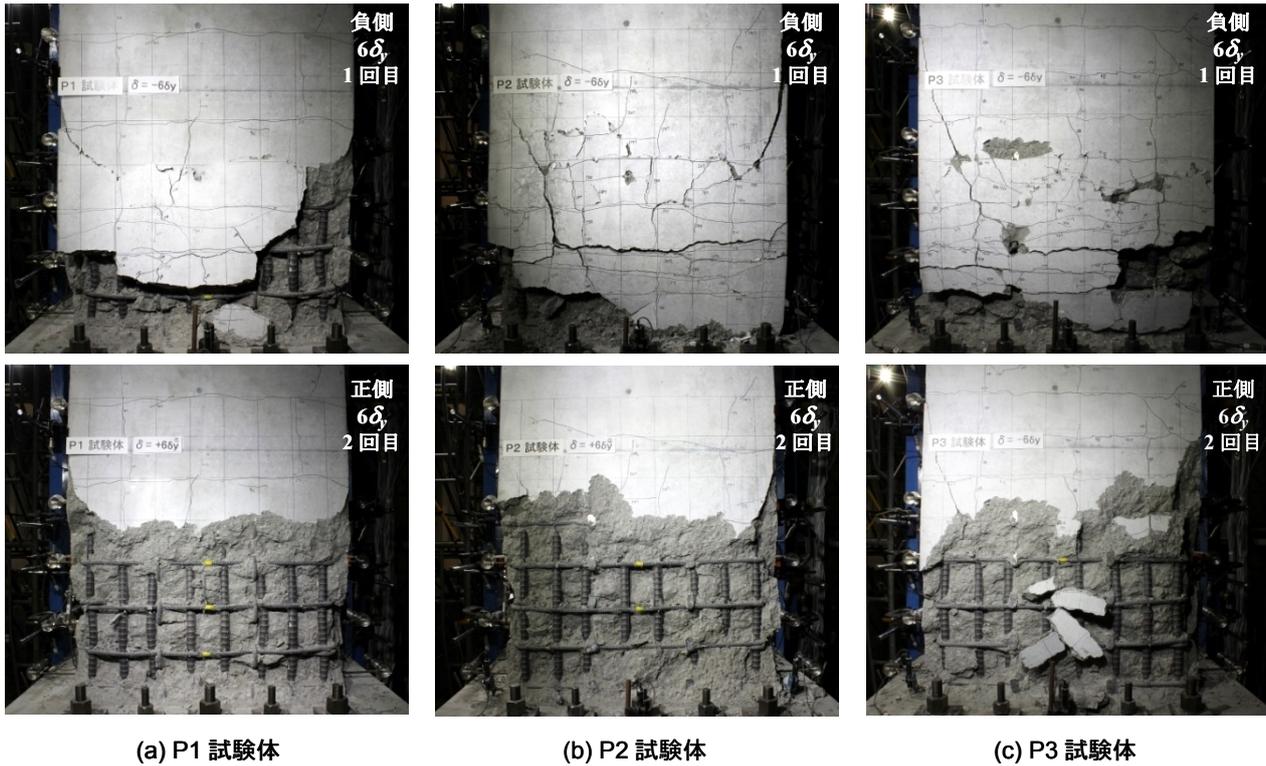


図-12 試験体の破壊状況

ると、いずれの試験体においても中間帯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ことが推察できる。このことから、定着方法や施工誤差によらず変形性能の差異が軽微になったと考えられる。

謝辞

本研究は、第一高周波工業（株）との共同研究として実施したものである。関係者の方々に感謝する。

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) 土木学会：鉄筋定着・継手指針 [2007年版]，コンクリートライブラリー128，2007
- 4) 国土交通省：機械式定着工法の配筋設計ガイドライン，2016
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書【施工編】，2017
- 8) 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
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2017
- 10) 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筋「Tヘッド工法鉄筋」内容変更・更新 平成25年11月，2013
- 11) 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