

論文 機械式定着具を用いた定着部の損傷時における静的定着性能

長井 宏平*1・大胡 賢一*2

要旨：過密配筋により生じる問題を緩和させることを目的に施工性の優れた機械式定着具が使用される場合があるが、損傷を受けた際の機械式定着具の定着性能は明確になっていない。そこで本研究では、損傷として機械式定着具により定着された鉄筋と平行にひび割れを与えた状態での機械式定着具の静的定着性能を検討する一軸引張載荷試験を行った。その結果、損傷後の静的引張定着性能は定着具の有無に関わらず低下することが確認された。また定着具がある場合には、定着具近傍の横方向鉄筋のひずみが増加し、ひび割れ開口が抑制され、その役割が重要であることを明らかにした。

キーワード：機械式定着具, 損傷後定着性能, 横方向鉄筋

1. はじめに

耐震性能への要求の高まりに伴い、特に鉄道高架橋の柱梁接合部などにおいて過密配筋となるケースが増加し、コンクリートの施工不良の危険性や鉄筋組み立て時間が増している。鉄筋の配置や曲げに関する規定はコンクリート標準示方書¹⁾に記載されているが、数値の根拠が不明確なまま仕様規定的な扱いとして残っている項目が多くあることが指摘されており²⁾、これが改善されないことが過密配筋の一因ともなっている。過密配筋の改善に向けた一策として、近年せん断補強鉄筋の定着部において標準フックの代わりに施工性の優れた機械式定着具が使用されるケースが増加しており数種類の定着具が開発され土木学会より設計指針が発刊されるに至っている³⁾。しかしここでの機械式定着具の使用はマッシュなコンクリートにおける適用に限定されており、また機械式定着具からの応力の伝達範囲も未解明であり、かぶりが薄い場合の機械式定着具の合理的な設計法は示されていない。さらに、柱梁接合部の過密配筋を機械式定着具により改善する場合、複雑な配筋条件下で地震動などにより損傷を受けた際の、残存定着性能を把握することが構造物の崩壊に直結しえる部材としての定着性能を担保するために重要である。既往の研究では接合部に機械式定着具を用いた場合を対象に田所らがかぶりをパラメータとした検討を行い、かぶりが耐力に影響することを示しているが、かぶりが薄い場合に損傷を受けた場合の残存定着性能に関する研究は過去に見当たらない⁴⁾。

そこで本研究では機械式定着具の基礎的な定着性能として、かぶりが薄い場合に定着部に損傷を受けた場合の残存引張定着性能を、定着具を用いないケースと比較検討することで評価することを実験により試みた。なお本実験では地震動のような高応力が定着部に作用した

場合を想定しているが、実現象で想定される損傷のパターンは複雑であるため、最も基本的なケースとして、**図-1**のように鉄筋軸に沿ったひび割れを損傷として導入し、静的引張試験により残存定着性能を検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

本研究ではかぶりが薄い箇所に機械式定着具が配置され損傷が与えられた場合を想定し実験を行う。損傷は曲げ載荷により鉄筋軸に沿ったひび割れを試験区間に導入した。また定着長を長く確保した定着具のない試験体の一軸引張試験を同様に行い、定着部の静的引張特性について比較検討した。

試験体の形状の例を**図-2**に示す。試験体の寸法は定着具のない場合は600×600×150mm、ある場合は350×600×150mmである。一軸引張試験には直径25mm(D25)の鉄筋を用い、かぶりを40mmとした。ねじ筋鉄筋を用い側面にひずみゲージを張ることで、ゲージの存在による付着力低減を可能な限り避けた。機械式定着具には清水建設の開発したTヘッドバー⁵⁾を用いた(**写真-1**)。拡径部の直径は63mm(=2.5φ, φ:定着される鉄筋径)、厚さ25mm(=1φ)である。鉄筋の埋め込み長さの決定には、定着具が無い場合に対し、土木学会標準示方書²⁾に示される定着長算定式の基であるOrangunら⁶⁾の提案式を用い、鉄筋の降伏強度を330N/mm²として算出した値を参考に450mmとした。試験に用いた鉄筋降伏強度は、破壊形態を検討するために、後述のようにこれより高強度(SD490)である。定着具がある場合は指針³⁾に従いこれより10φを減じて200mmとした。載荷端近傍の拘束条件の影響をなくすために、鉄筋を粘土で覆い機械的な付着と化学的な付着を除去した150mmの非定着区間を設けた⁷⁾。この鉄筋と直交するようにD13の横方

*1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 講師 (正会員)

*2 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 (正会員)

向鉄筋を 100mm 間隔で配置した。また、初期損傷を与える際にせん断破壊を防ぐために D6 のせん断補強鉄筋をせん断スパン内に 50mm 間隔で配置した。使用した鉄筋の材質は D25, D13, D6 それぞれ SD490, SD345, SD295A であり、試験に使用した鉄筋と同じロッドの直接引張試験による降伏強度は 547N/mm², 397N/mm², 374N/mm² であり、D25 のヤング係数は 190kN/mm² であった。コンクリートは W/C=51% で設計し、圧縮強度は 52N/mm², 割裂引張強度は 3.7N/mm² であった。

2.2 荷重方法

損傷を与える試験体 (S8, T5, T15) にはまず図-3 のように曲げ荷重によりひびわれを導入した。引張試験を行う鉄筋が下面にくるように試験体をセットし、純曲げ区間を 200mm とし変位制御で約 0.2mm/min のスピードで荷重した。下面のコンクリートに設置したワイヤ式の変位計により平均ひずみを確認しながら所定の損傷を与え、除荷した。導入するひび割れが鉄筋軸直下かつ平行となる位置にくるように、損傷を与える試験体には厚さ 1mm のテフロンシートを用いて鉄筋直下のかぶり 40mm 側のコンクリートに高さ 1cm のノッチを導入した。初期荷重では曲げ区間内にはノッチから発生した鉄筋直下のひび割れ以外に、ひび割れは確認されなかった。

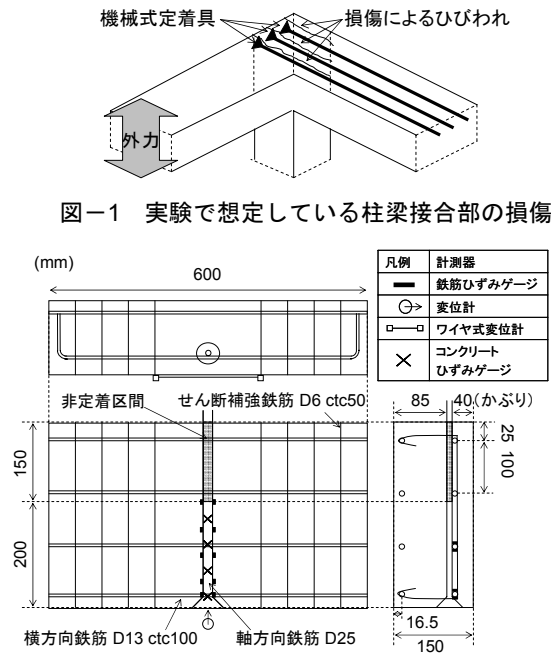


図-2 試験体形状 (定着具ありのケース)



写真-1 機械式定着具 (Tヘッドバー)

損傷後の引張荷重は、図-4 に示すように鉄筋軸方向にセットした手動のセンターホール型油圧ジャッキにより約 10kN/min で行い、適宜、除荷および再荷重した。

2.3 試験パラメータおよび計測事項

本研究では初期損傷荷重の曲げ区間 200mm のコンクリート表面に設置したワイヤ式変位計により計測したコンクリート表面ひずみによって表現される損傷の程度と定着具の有無をパラメータとして実験を行った。試験体一覧を表-1 に示す。曲げ区間には鉄筋軸直下以外にひび割れが確認されなかったため、変形をひび割れ幅に換算した値も合わせて示す。本実験では鉄筋位置でのひび割れ幅を直接計測していないが、梁高が小さいことを勘案すると、鉄筋位置でのひび割れ幅はコンクリート表面のおよそ半分であると推定される。

計測は引抜き荷重、拔出し変位、鉄筋ひずみ、試験体表面のコンクリートひずみについて行った。拔出し変位は定着具端部または鉄筋端部で計測した。引抜き鉄筋 (軸方向鉄筋) にはひずみゲージを横方向鉄筋と直角方向に対して左右に 50mm 間隔で設置した。なお定着具がある場合は端部で計測できないため端部より 25mm の位置で計測した。また定着区間の横方向鉄筋には軸方向鉄筋との交差位置に、軸方向鉄筋直角方向に対して左右に

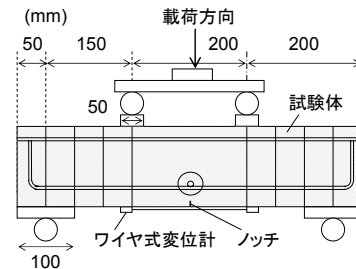


図-3 損傷を与える曲げ荷重

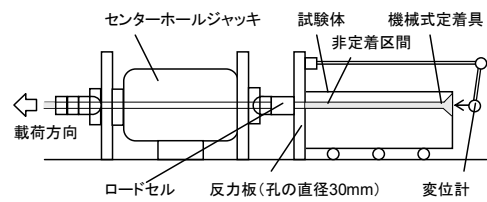


図-4 一軸引張試験の荷重装置

表-1 試験体一覧

| case | 定着具 | 下面ひずみ(μ) | ひび割れ幅(mm) | |
|------|-----|----------|-----------|------|
| | | | 最大 | 除荷後 |
| S0 | なし | 0 (損傷なし) | 0 | 0 |
| S8 | なし | 8248 | 1.75 | 1.18 |
| T0 | あり | 0 (損傷なし) | 0 | 0 |
| T5 | あり | 5202 | 1.04 | 0.63 |
| T15 | あり | 15248 | 3.00 | 2.52 |

ひずみゲージを張り、横方向鉄筋の挙動を計測した。コンクリートひずみは軸方向鉄筋に沿って端部から 25mm の位置を起点として 50mm 毎の 4 点に軸方向鉄筋軸方向にゲージ長 30mm のひずみゲージを用いて計測した。

3. 実験結果

3.1 全体挙動と引張鉄筋ひずみ分布

引抜き試験により計測された、引抜き荷重と鉄筋端部または定着具端部の拔出し量の関係を、定着具がない場合とある場合についてそれぞれ図-5及び図-6に示す。また最大引抜き荷重と破壊形態を表-2に示す。定着具の有無に関わらず、損傷がある場合、引抜きの最大荷重及び初期剛性が低下した。即ち、定着のかぶり側のコンクリートに鉄筋軸と平行にひび割れが入った場合、定着具の静的定着性能が低下することが示された。なお、材料試験により得られた引張鉄筋の降伏荷重は268kNであったのに対し、S0の最大荷重は258kNであるが、ジャッキにより引抜き量を増加させても端部拔出しに変化しなかったため鉄筋降伏と判定した。一方 T0 は降伏し

ていた可能性があるが端部の拔出しが増加し続け、破壊パターンも他の定着具ありの試験体と同様であったためコーン破壊と判定した。なお本研究では定着具端部よりかぶり方向に斜めひび割れが入る破壊パターンをコーン破壊と定義した。ひび割れパターンを写真-2及び写真-3に示す。赤線は曲げ載荷による初期損傷ひび割れであり、引張引抜き試験により生じたひび割れは黒線で示されている。定着具がない場合では、鉄筋の抜け出しによる鉄筋軸方向のひび割れと、付随した斜め方向のひび割れが確認された。一方、定着具を用いたいずれのケースも、写真-3のように定着具付近からかぶり方向に斜めひび割れが発生しコーン破壊に至った。

図-7に、導入した損傷程度と最大引抜き荷重の関係を示す。本実験のようにかぶりが薄く損傷程度が大きい場合、損傷度が大きいほうが荷重が低下し、本実験の範囲では30%もの低下が生じ、その程度は定着具を用いない場合のほうが大きいことが示された。

この定着性能の低下を検証するために軸方向鉄筋のひずみの進展を分析する。図-8に定着具が無い試験体

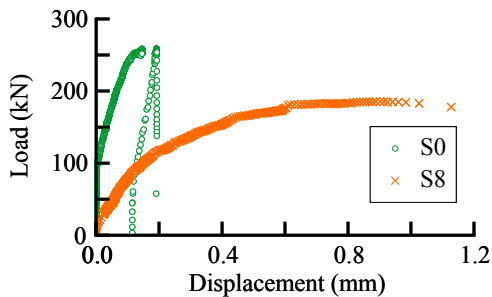


図-5 引抜き荷重—拔出し変位関係（定着具なし）

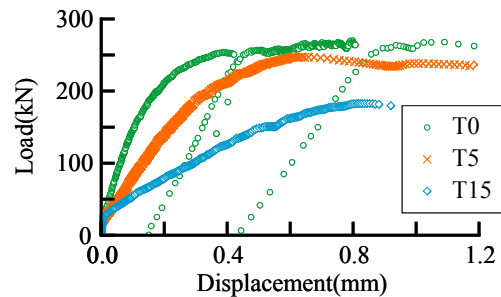


図-6 引抜き荷重—拔出し変位関係（定着具あり）



写真-2 破壊時の様子（左：S8, 右：T15）



写真-3 定着具周辺の破壊の様子（左：T0, 右：T15）

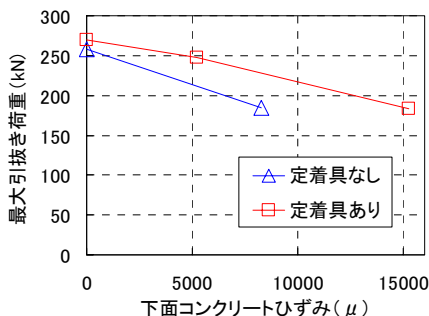


図-7 最大引抜き荷重の比較

表-2 最大引抜き荷重と破壊形態

| case | 最大荷重(kN) | 破壊形態 |
|------|----------|-------|
| T0 | 270 | コーン破壊 |
| T5 | 247 | コーン破壊 |
| T15 | 183 | コーン破壊 |
| S0 | 258 | 鉄筋降伏 |
| S8 | 185 | 鉄筋拔出し |

における軸方向鉄筋のひずみの変化を自由端からの距離ごとに示す。なお、本論文でのひずみデータの左右の定義は、かぶり側から軸方向鉄筋をみて荷重端を上とした左右のデータである。S0の場合、荷重の増加に伴い荷重端に近い箇所から順に鉄筋左右のひずみが順に増加し進展していることが確認される。損傷を与えた S8 でも同様に荷重の増加と共にひずみが自由端に向かい進展するが、それは S0 に比べ早い。これは初期損傷ひび割れにより鉄筋とコンクリートの付着が破壊され付着力が低下しているためであり、これが引抜き荷重—拔出し変位の初期剛性と引抜け耐力の低下の原因である。ここで左右のひずみの値について考察を加える。曲げ荷重においては下縁から発生したひび割れが鉄筋に達した時、左右どちらかにひび割れが進み付着が破壊されひび

割れが開く。S8 においては自由端においては左側にひび割れが確認された。鉄筋全長に渡って左右どちらかにひび割れが進展したかは不明であるが、進展しなかった側の付着は健全であったと推定される。しかし、ひずみのデータではこの差異は確認されず、片側の付着が破壊されても本実験における鉄筋径の引張試験においてはひずみの偏心は小さく、付着力低下は鉄筋全体が平均的に伸びることで表されることが分かった。

図-9 に定着具がある場合(T0, T5, T15)の軸方向鉄筋の左右に付けたひずみの変化を定着具からの距離毎に示す。損傷を与えない T0 の場合、定着具を用いない場合と同様に荷重端に近い箇所から順にひずみが増加し、定着具までひずみが達する。一方損傷がある T5, T15 の場合、定着具に近い軸方向鉄筋のひずみが左右で

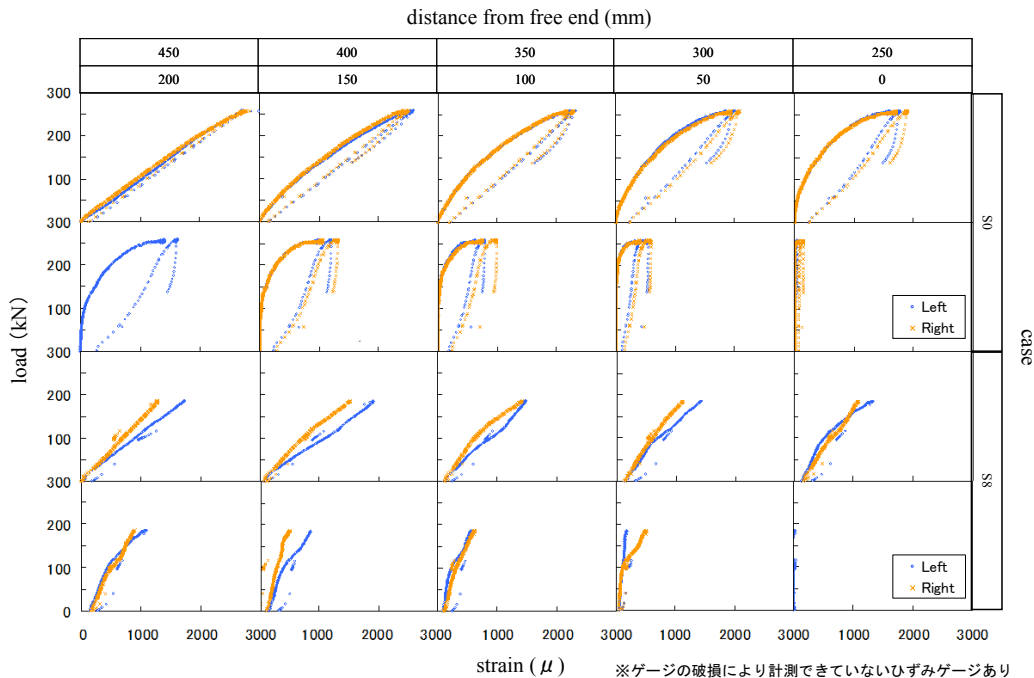


図-8 引抜き荷重と軸方向鉄筋ひずみの関係（定着具なし）

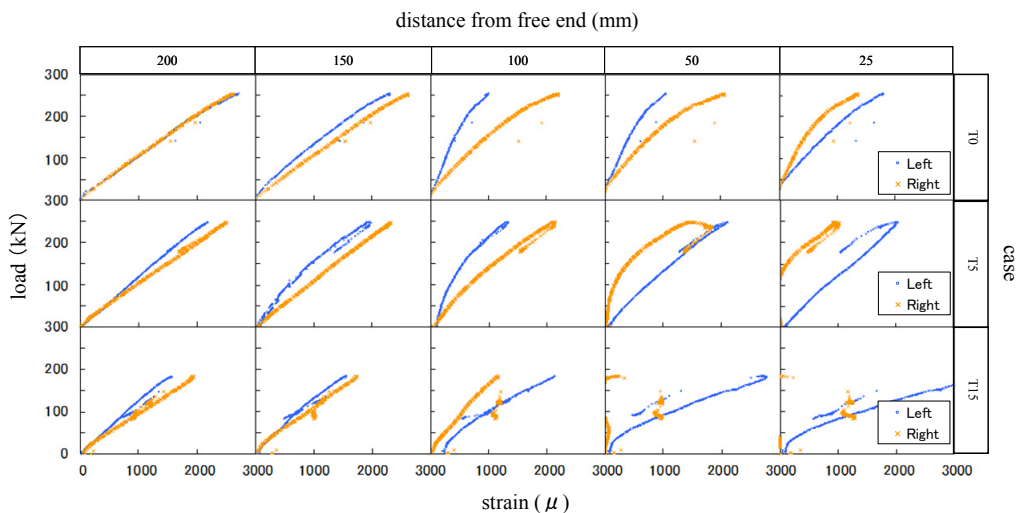


図-9 引抜き荷重と軸方向鉄筋ひずみの関係（定着具あり）

大きく異なる。いずれの場合も鉄筋右側のひずみの増加が遅れており、左側の増加は損傷が大きいほど速い。定着具から遠い 200mm~100mm のひずみは左右で大きな差はない。初期载荷によるひび割れは T5, T15 いずれも定着具の右側に確認されており、この付着破壊のために自由端に近い位置の右側のひずみは増加せず自由端の拔出しが生じていると考えられる。一方、健全な付着力の残る左側はひずみが増加しており、その結果、定着具近傍で鉄筋断面にひずみ分布が生じ曲げ応力が発生している。定着具により定着を確保する場合、設計において定着長を短くするため定着端部にまでひずみが達するので、本実験のような損傷が生じた場合、定着具に曲げ応力が発生する可能性があるが、その疲労性能は明らかにされておらず、今後検証が必要であると考えられる。

図-10 に試験体 T0, S0 のコンクリート表面に軸方向鉄筋と平行に貼付したひずみゲージの引抜き荷重 25kN 毎に 250kN までの値を示す。S0 ではコンクリート表面の圧縮ひずみは引抜き荷重 250kN 以下ではほとんど変化していない。S0 に代表される定着具のない場合では鉄筋からコンクリートに伝達される応力は比較的小さいために、鉄筋の降伏や鉄筋コンクリート間の付着破壊による拔出しといった破壊形態になると考えられる。一方 T0 のケースでは引抜き荷重が 150kN となる辺りから、端部から 75mm および 175mm でのコンクリート表面の圧縮ひずみが大きくなり、250kN 時には 500 μ を越える箇所も存在する。定着具がある場合では定着具からコンクリートへコーン状の応力が伝達され、その影響範囲である定着体が形成される。この定着体の定量的な大きさは明らかにされていないが、本研究の試験体のひずみのデータでは、かぶり 40mm の位置で、圧縮ひずみが局所的に大きくなっている 75mm~175mm に定着体の存在が確認された。なお、自由端付近では、引張りひずみが確認された。これは定着体の形成により、かぶりコンクリート表面に対し面外方向にはらみ出した部分に対し、定着体と自由端の間で引張りひずみが発生していると考えら

れる。

3.2 横方向鉄筋の影響

本研究における実験では、曲げ载荷により引張鉄筋軸沿いに損傷ひび割れを導入しており、これにより引抜け耐力が低下することが確認された。このとき損傷ひび割れを抑制しうる横方向鉄筋の影響が大きいと考えられるため、ここでは計測されたひずみから拘束効果について考察する。

図-11 に定着具がない場合の横方向鉄筋のひずみの変化を拔出し端部からの距離ごとに示す。ここでひずみの値は曲げ载荷後の引抜き载荷時に初期化し 0 としている。S0 では横方向鉄筋のひずみの増加が引抜け端部から遠い 350mm から始まり (約 100kN)、引抜き荷重の増加と共に引抜け端部に近づいていく。これは载荷端から順に引抜け端部まで軸方向鉄筋とコンクリートの付着が切れ、横方向鉄筋による拔出しに対する拘束が発生していることを示している。一方、損傷を与えた S8 のケースでは引抜き荷重に関わらず横方向鉄筋のひずみが小さく、軸方向鉄筋が拔出す際の横方向鉄筋による拘束効果は非常に小さい。即ち、初期損傷ひび割れが更に開口することなく鉄筋は拔出し破壊に至っており、定着具がない場合では軸方向鉄筋と平行にひび割れが入り軸方向鉄筋とコンクリートの間の付着が破壊された場合、横方向鉄筋による拘束が小さいことが確認された。

図-12 に定着具がある場合の横方向鉄筋のひずみの値を定着具なしの場合と同様に引抜き試験開始時のひ

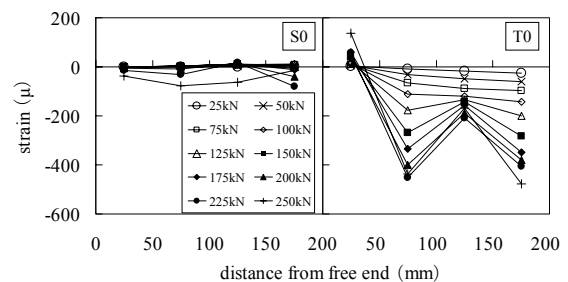


図-10 25kN 毎のコンクリート表面のひずみ

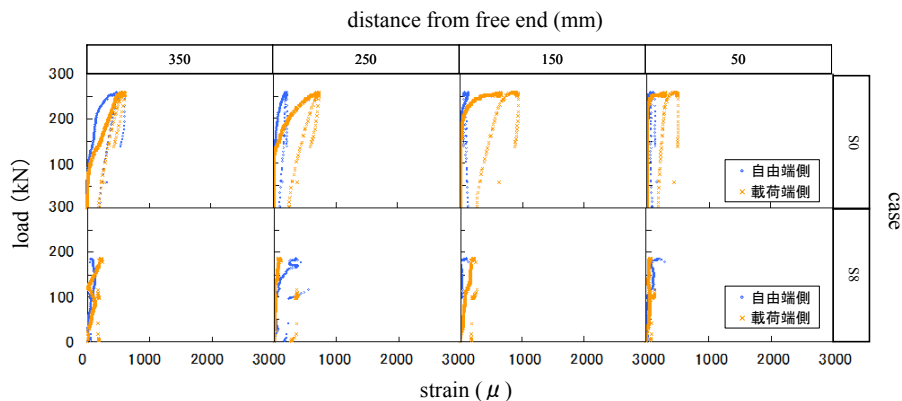


図-11 横方向鉄筋のひずみ (定着具なし)

ずみを0と補正した値を用いて示す。定着具を用い損傷がないT0では定着具付近の横方向鉄筋のひずみが引抜き荷重と共に増加しており、ひび割れ開口を抑制する応力が発生していることが確認できる。定着具がない場合の引抜け端部付近に発生する拘束応力と比較してこの値は大きく、横方向鉄筋の効果は大きい。定着具から遠い125mmの鉄筋では25mmの鉄筋と比較しひずみの値は小さく拘束力は働いておらず、定着具近傍の横方向鉄筋の影響が大きいことが分かる。損傷を与えたT5も25mm位置の鉄筋のひずみが増加しひび割れ開口を抑制している。初期損傷ひび割れにより引抜き荷重-拔出し変位の初期剛性は低下するが、横方向鉄筋のひび割れ開口により耐力の低下が抑えられたと考えられる。一方、損傷の大きいT15の場合は、引抜き荷重ピーク付近までひずみの増加は確認されず、ひび割れ開口効果は他のケースに比べ小さく、引抜き荷重-拔出し変位の初期剛性が低下すると共に、耐力も大幅に低下する。即ち、軸方向鉄筋に平行なひび割れが大きい場合は横方向鉄筋の拘束効果が低下する可能性があるといえる。

以上より、定着具の有無と初期損傷程度により横方向鉄筋の挙動は異なり、定着具がある場合はその近傍の横方向鉄筋によるひび割れ抑制効果が引張定着性能に影響を与えていると考えられる。

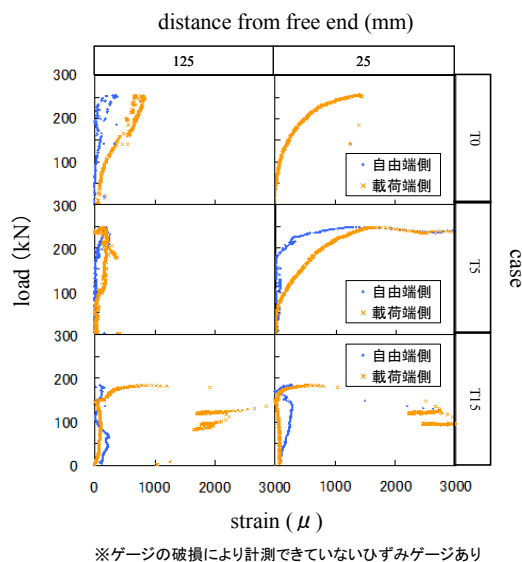


図-12 横方向鉄筋のひずみ（定着具あり）

4. 結論

機械式定着具を用いた定着部に軸方向鉄筋と平行に損傷を与えられた際の静的定着性能を検討した本研究より得られた知見を以下に纏める。

- (1) 機械式定着具の有無に関わらず、鉄筋と平行に損傷ひび割れが入った場合、引抜きの初期剛性及び静的定着耐力は低下する。

- (2) 損傷により鉄筋とコンクリートの付着力が低下し、ひずみの自由端への進展が早いことが計測から確認された。また、損傷による鉄筋左右の付着力低下の違いによるひずみ増加の偏心は定着具付近以外は小さく、付着力低下は平均的に表される。定着具近傍では偏心が大きく、そこでは鉄筋に曲げ応力が発生するため、疲労性能を含め更なる検証が必要であることを指摘した。
- (3) 機械式定着具の有無によりかぶり側のコンクリートに作用する応力が異なり、その結果、破壊形態が異なることをひずみゲージの値より示した。
- (4) 横方向鉄筋のひび割れ開口拘束効果は機械式定着具がある場合に定着具付近にて大きい。また、損傷を与えられた場合では、定着具がない場合では横方向鉄筋の効果は小さく、定着具がある場合でも損傷が大きくなるとその効果は小さくなることが確認された。

謝辞

本研究は国土交通省建設技術研究開発費補助金「コンクリート構造物長寿命化に資する品質保証/性能照査統合システムの開発」（代表：石田哲也）より研究補助を得て実施しました。また、実験に使用した鉄筋は清水建設（株）より提供頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書・設計編【2007年制定】，2007
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書の役割と将来像，コンクリート技術シリーズ 68，2005
- 3) 土木学会：鉄筋定着・継手指針【2007年度版】，コンクリートライブラリー126，2007
- 4) 田所敏弥，谷村幸裕，徳永光宏，米田大樹：高架橋接合部における機械式定着具を用いた定着部の静的引張特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.31，No.2，pp.691-696，2009
- 5) 塩谷俊幸，中澤春生，長澤保紀，高岸正章：Tヘッドバー工法の開発，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.3，pp.1291-1296，2000
- 6) Orangun, C.O., Jirsa, J.O. and Breen, J.E.: A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices, Journal of ACI, Proceedings Vol.74, No.3, pp.114-122, 1977.3
- 7) 島弘，周礼良，岡村甫：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係，土木学会論文集 第378号，V-6，pp.165-174，1987.2