

論文 機械式定着具からの応力伝達に着目した破壊形態及び定着体の検討

大胡 賢一*1・長井 宏平*2

要旨: 施工性に優れた機械式定着具をかぶりの薄い箇所に適用することを念頭に、その基礎的な挙動を実験及び解析により検討した。実験では定着具の有無、かぶり厚さ、付着の有無をパラメータとし定着具の影響範囲である定着体の大きさを円柱型試験体の引抜き試験により検討した。内部応力の再現を目的とし RBSM により 2 次元解析を実施した。かぶりが薄い場合の載荷端からのひずみの進展を実験と同様にシミュレーションすることができた。定着具から発生する応力を定量的に表現するには試験体円周方向に生じる応力を適切に表現することが必要であることが示された。

キーワード: 機械式定着具, 定着体, RBSM, 応力伝達, 付着

1. はじめに

耐震設計基準の厳格化に伴い、特に柱梁接合部において高密度配筋部を有する土木構造物が増加しているという背景から、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、土木学会より設計指針が発刊され、数種類のタイプの機械式定着具が開発されている¹⁾。しかしここでの機械式定着具の適用に関しては、せん断補強筋としての使用またはマッシブなコンクリート内での使用に限られており、複雑な配筋やかぶりが薄い箇所を有する柱梁接合部などでの機械式定着具の性能は未解明である。今後機械式定着具の適用範囲を広げていくには、機械式定着具からコンクリートへの応力伝達範囲や破壊形態といった基礎的な挙動を明らかにする必要がある。なお上記指針内¹⁾では、「定着される鉄筋端部（定着具やフックを含む）とその周囲の定着性能に寄与するコンクリート」と定義される“定着体”という応力伝達範囲が言及されているが、その定量的な範囲や伝達機構についての記述はない。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²⁾、また大森らは側面剥離破壊の検討を行い³⁾、かぶりが耐力に影響することを示しているが、かぶりが薄い箇所での鉄筋及びコンクリートの挙動は詳細には示されていない。建築分野では機械式定着具の適用方法をまとめた機械式鉄筋定着工法設計指針が発刊されているが⁴⁾、応力伝達に着目した基礎的な研究は過去に見当たらない。

そこで本研究では機械式定着具を用いた定着部の破壊形態と、その応力伝達範囲である定着体を、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、実験及び 2 次元 RBSM 解析により試みた。実験ではかぶりが薄い円柱型のコンクリート試験体の中心に配した鉄筋の静的引張試験を行い、鉄筋とコンクリート表面の

ひずみを計測し、さらに解析では円柱型試験体を擬似的に 3 次元化することで表現した上で、鉄筋のひずみの伝達と機械式定着具からの応力伝達の再現を試み、破壊形態と定着体について検討を行った。

2. 実験

2.1 実験方法

本研究では定着体の範囲を推定するために、機械式定着具を用いた定着部を有するかぶりが薄い試験体の一軸静的引張試験を行い鉄筋とコンクリート表面のひず

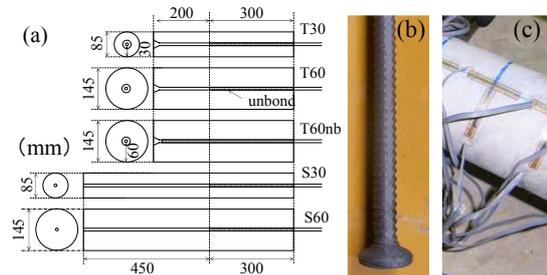


図-1 (a)試験体形状, (b)Tヘッドバー, (c)コンクリート表面のひずみゲージ

表 - 1 実験ケース一覧

試験体	定着具	かぶり (mm)
T30	あり	30
T60	あり	60
T60nb	あり	60 (鉄筋付着なし)
S30	なし	30
S60	なし	60

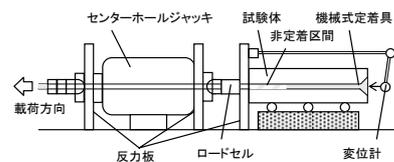


図-2 一軸引張試験の載荷装置

*1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 (正会員)

*2 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)

みを計測した。また定着具なしの試験体の引張試験も同様に行い、定着体の範囲について検討した。

試験体の形状を図-1(a)に、また一覧を表-1に示す。コンクリート表面のひずみを計測するために試験体は鉄筋を中心とした円柱型とし、かぶりは30mm または60mm とした。一軸引張試験には直径25mm (D25) のねじ筋鉄筋を用い、側面にひずみゲージを張る事で付着力低減を可能な限り避けた。機械式定着具として拡径部の直径63mm (=2.5φ, φ:定着される鉄筋径), 厚さ25mm (=1φ) の清水建設の開発したTヘッドバー⁵⁾を用いた(図-1(b))。定着具がない場合、鉄筋の埋め込み長さは450mm とした。定着具がある場合は指針¹⁾に従いこれより10φ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300mm の非定着区間を設けた⁶⁾。型枠にはアクリルパイプを用い未充填の部分がないように確認しながら打設を行った。

使用した鉄筋の材質はD25でSD490であり、降伏強度は547 N/mm², 弾性係数は190 kN/mm²であった。かぶり60mm の試験体のコンクリートの圧縮強度は52 N/mm², 割裂引張強度は3.7 N/mm²であり, かぶり30mm の試験体のコンクリートの圧縮強度は25N/mm², 割裂引張強度は2.4N/mm²であった。

載荷は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鉄筋に一軸引張力を加えた。試験装置を図-2に示す。載荷速度は荷重制御で約15kN/minとした。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。

表-2 試験結果一覧

ケース	最大荷重(kN)	破壊形態
T30	130	圧縮破壊
T60	223	コーン破壊
T60nb	252	コーン破壊
S30	86	鉄筋拔出し
S60	196	鉄筋拔出し

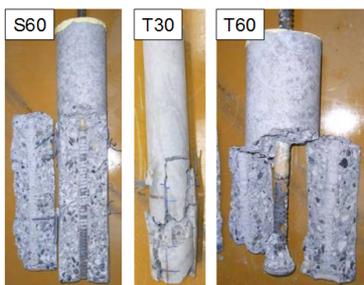


写真-1 破壊時の様子

鉄筋には引抜き方向と平行に左右に50mm 間隔でひずみゲージを貼付した。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。コンクリートひずみは図-1(c)のように鉄筋軸に沿って25mm の位置を起点として定着区間内の50mm 毎に, 定着具がある場合は4箇所, ない場合は9箇所の引張鉄筋軸方向とそれに垂直な方向の2方向のひずみを計測した。

2.2 実験結果

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図-3に示す。かぶりが薄い30mm の試験体の引抜き荷重は定着具の有無に関わらずかぶり60mm と比較し低い値となった。鉄筋付着を除いたT60nbは拔出しが早いのでT60より初期剛性が低下した。また定着具なしの場合に初期剛性が高い

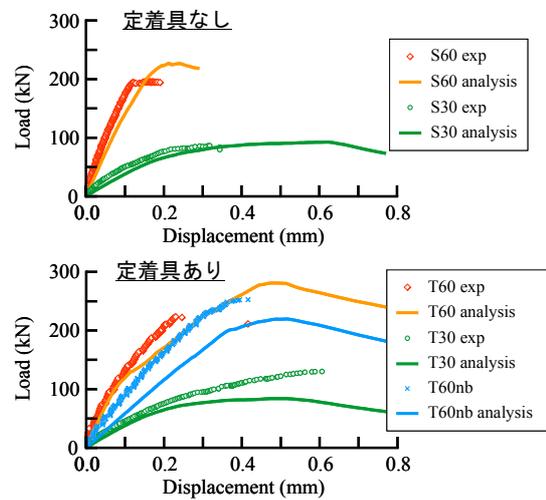


図-3 引抜き荷重-拔出し変位関係

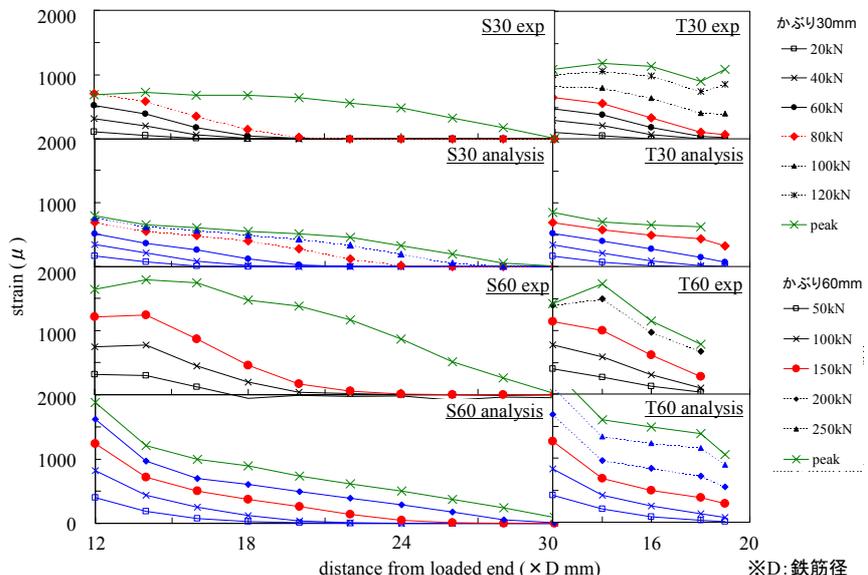


図-4 軸方向鉄筋のひずみ分布

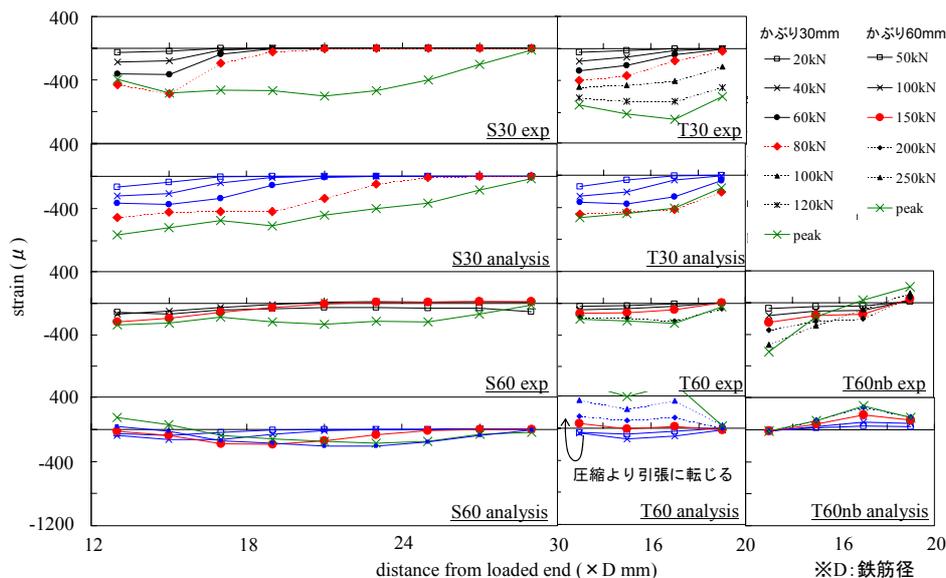


図-5 コンクリート表面の引張鉄筋軸方向ひずみ分布

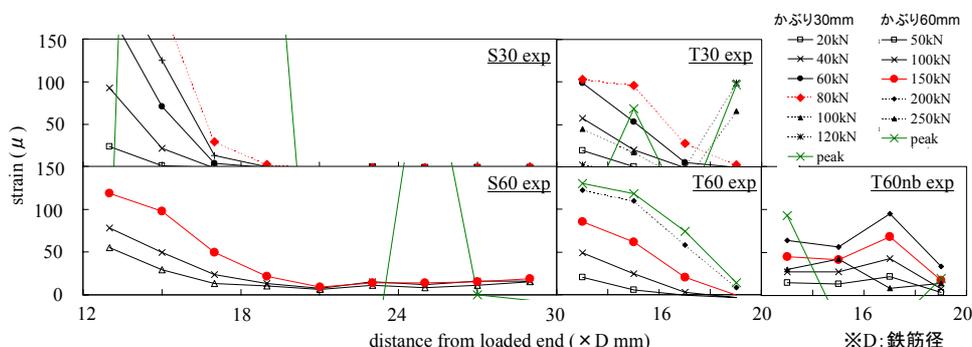


図-6 コンクリート表面の引張鉄筋と直角軸方向のひずみ分布

のは定着長が長いためである。最大引抜き荷重と破壊形態を表-2に、破壊時の様子を写真-1に示す。定着具がない場合ではかぶりの大きさに関わらず付着破壊に起因した鉄筋拔出し破壊となり割裂ひび割れが生じた。一方定着具がある場合では、かぶりが30mmの場合は定着区間のコンクリートの圧縮破壊、60mmの場合は定着具からの応力によるコンクリートのコーン破壊に至った。なお定着具あり、かぶり30mm、コンクリートの圧縮強度 52 N/mm^2 の供試体の引抜き試験を同様に行ったところ定着区間の圧縮破壊となったため、破壊パターンの違いは強度ではなくかぶり厚に起因するものである。

この破壊形態をより検討するために軸方向鉄筋のひずみの進展を分析する。図-4に軸方向鉄筋の左右のひずみゲージの平均値を、かぶり30mmの場合は10kN毎、かぶり60mmの場合は25kN毎に記したひずみ分布を示す。定着具がないS30およびS60どちらの試験体も荷重端の近くから順に鉄筋ひずみの増加がはじまり、引抜き荷重に伴い進展していることが確認できる。最大荷重付近で自由端までひずみが急速に進展し付着応力が小さくなり、拔出し破壊に至ることが確認された。定着具が

ある試験体(T30, T60)の軸方向鉄筋のひずみ分布によると、ひずみは定着具がない場合と同様に荷重端に近い箇所から順にひずみが進展し、定着具に達した後、定着域全長に渡りひずみが増加した。

図-5, 図-6に各試験体のコンクリート表面の引張鉄筋軸方向及びその直角軸方向に貼付したひずみ分布の変化を示す。定着具がないS30, S60ではひずみはいずれの方向にも荷重端付近から進展し、最大荷重時には急速に鉄筋軸方向の圧縮ひずみが増加し拔出し破壊に至っている。ひずみレベルはS30の方が高く、鉄筋からの応力が表面まで伝わっていることがわかる。一方定着具のある場合、ひずみは定着具付近にまで分布している。T30では軸方向のひずみが全長に渡って大きくなり、コンクリートの圧縮破壊に至っている。局所的な破壊となるため鉄筋軸と垂直なひずみは一部で減少に転じている。T60の軸方向のひずみはT30に比べて増加していないが、鉄筋軸と垂直なひずみは引抜き荷重に伴い増加し、コーン破壊に至っている。

コンクリート表面のひずみ分布より定着体の検討を行う。かぶり30mmの場合、かぶり60mmと比較して図

—5 の軸方向の表面ひずみレベルは高く、鉄筋からの応力が大きい。また定着具がある T30 では、自由端付近の鉄筋軸方向及び軸方向と垂直なひずみが S30 より大きく、かぶり 30mm の位置では特に定着具付近に定着体が存在すると考えられるが、試験体の破壊は鉄筋定着区間でのコンクリートの圧縮破壊であるので、定着具からの応力がかぶり部全体に渡っていると推定される。軸方向鉄筋の付着を除去した T60nb の図-6 で示した軸方向と垂直なひずみは自由端より 75mm(載荷端より 19D)で局所的に大きくなっており、鉄筋の定着を除いた定着具自体からの応力伝達の方法は鉄筋軸に対しておよそ 40 度方向であったと推定される。一方、付着のある T60 の図-6 に示される鉄筋軸と垂直なひずみの分布は、定着具のない S60 の載荷端からのひずみ分布 (12~20D) と比較し大きな差はなく、定着具からの明らかな応力伝達は確認できなかった。定着体は付着のある鉄筋近傍と定着具付近で構成されるため、定着具からの応力伝達は T60nb と比較しかぶり表面には顕著に現れない。このように定着体の推定には鉄筋の付着と定着具からの応力を把握する必要があるため、数値解析による再現を試みた。

3. 数値シミュレーション

3.1 解析手法

ひび割れの進展および応力の伝達を表現することに適した離散解析手法を用いて定着体の検討を行う。解析には川井により開発された剛体ばねモデル (RBSM) を用いる⁷⁾。これは離散化された要素間に設定したバネにより応力を伝える手法であり、長井らはこの手法を用いコンクリートの微視的破壊メカニズムを数値的に再現した⁸⁾。鉄筋や定着具の形状をモデル化した RBSM 微細構造解析には武藤ら⁹⁾、小倉ら¹⁰⁾による既往の研究があるが、マッシュパなコンクリート中における挙動に関するもので、かぶりの薄い場合の挙動に関する研究はない。本研究では長井らが構築した解析システムを、鉄筋要素

を加えた一軸引張試験に適用するために、以下の変更を行った。1) 要素に作用するモーメントを表現するため、要素の境界面の垂直方向、せん断方向それぞれ 2 つずつバネを要素の 4 等分点のうち中点を除いた箇所を設置した (図-7(a))、2) 2 次元の剛体ばねモデルを用いて円柱型の鉄筋コンクリートの 3 次元構造を仮想的にモデル化するため、武藤ら⁹⁾と同様に、鉄筋中心-各要素中心間の距離を半径としたときの円周長さを、各要素に連結したバネの弾性係数に乗じた。

コンクリートの垂直ばねおよびせん断ばねの構成則を図-7 (b), (c), (d)に示す。垂直ばねは圧縮領域で弾性挙動を示し、引張領域では要素の引張強度までは弾性挙動、その後はひび割れ幅で制御した。なお、 w_{max} は 0.03mm、 f_c 、 f_t はそれぞれ実験で計測されたコンクリートの圧縮強度と引張強度である。また弾性係数は圧縮強度より算定し、ポアソン比は 0.18 とした¹¹⁾。せん断強度は武藤ら⁹⁾の用いたモール・クーロン型の破壊基準を参考に式(1)で算出されるものと仮定した。なお $\phi=37^\circ$ 、 $c=f_t(1-\tan\phi)$ とした。

$$\tau = \begin{cases} (f_t - \sigma) \tan \phi + f_t & (\sigma \geq 0.5f_c) \\ (f_t - 0.5f_c) \tan \phi + f_t & (\sigma < 0.5f_c) \end{cases} \quad (1)$$

鉄筋の垂直ばね及びせん断ばねは弾性挙動を示すものとし、弾性係数は実験値、ポアソン比は 0.30 とした。

鉄筋-コンクリート界面の垂直ばねはコンクリートと同じ図-7(b)の構成則を用い、 f_t はコンクリートの引張強度とした。せん断ばねは圧縮領域で弾性挙動、引張領域では、 τ_{max} をコンクリートの引張強度の半分として図-7(d)と同様の弾塑性モデルにより計算した τ_t から、図-7(e)に示すひび割れ幅に応じせん断強度を線形に低下させるモデルを、 w_{max} を 0.01mm として使用した。以上解析に用いた入力値一覧を表-3 に示す。

3.2 解析モデル

本研究で用いた解析モデルの例と、境界条件を図-8 に示す。本研究では各要素がコンクリートを平均的に表

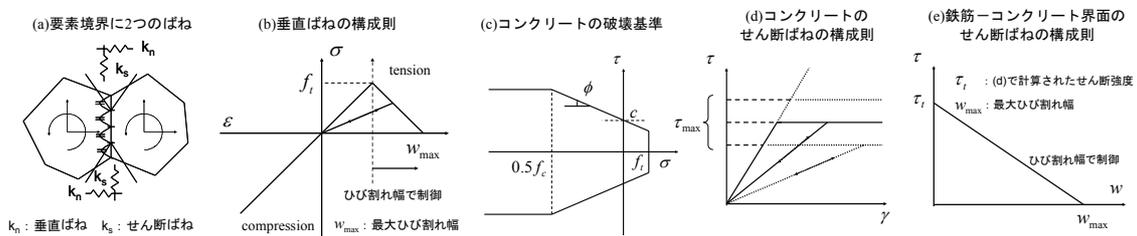


図-7 要素境界のばねと構成則

表-3 解析入力値一覧

case	f_c (N/mm ²)	f_t (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	ポアソン比(コンクリート)	E_s (kN/mm ²)	ポアソン比(鉄筋)
S30	25	2.4	25	0.18	190	0.30
S60	52	3.7	33	0.18	190	0.30
T30	25	2.4	25	0.18	190	0.30
T60	52	3.7	33	0.18	190	0.30
T60nb	52	3.7	33	0.18	190	0.30

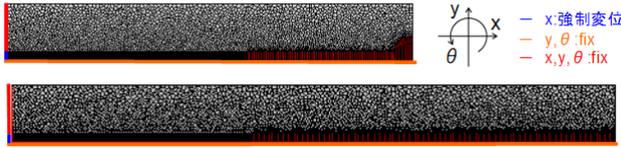


図-8 解析モデルと境界条件 (上 : T60, 下 S60)

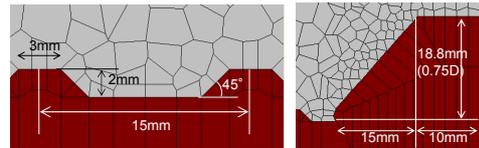


図-9 節と定着具の形状

現したものとし、サイズが 2mm~4mm となるよう Voronoi 分割によりランダムに要素を分割し、実験と同サイズの 5 ケースのモデルを作成した。図-8 の黒い部分は非定着区間の鉄筋要素である。また D25 の異形鉄筋および機械式定着具の形状を図-9 に示す^{5),11)}。

3.3 解析結果

解析結果より得られた引抜き荷重と鉄筋端部の拔出し量の関係を図-3 に、軸方向鉄筋のひずみ分布を図-4 に、コンクリート表面の鉄筋軸方向のひずみ分布を図-5 に、それぞれ実験結果と合わせて示す。引抜き荷重は定着具がない場合、S60 の最大耐力が実験に比べて約 15% 過大評価しているが、実験値と同等の引抜き荷重-拔出し変位の初期剛性を再現できた。終局時に発生する割裂ひび割れを表現できていないため、ピーク荷重と終局破壊形態については議論を残している。図-10 に S60 の各要素間のパネの垂直ひずみの値を引抜き荷重 50kN 毎に示す。荷重増加とともに鉄筋のふしから発生する応力により、鉄筋軸から斜め方向にひび割れが入りながら、ひずみが自由端まで進展していくことが確認できる。図-4 から同様に、定着具がない S30 及び S60 の軸方向鉄筋のひずみが載荷端近辺より徐々に進展していき、自由端端部に達していることが確認できるが、S30 及び S60 それぞれのケースで、解析のほうが低い荷重ステップでひずみが進展している。本研究の 2 次元 RBSM 解析では、

円周面外方向に変位が生じた際に受ける円周方向の応力を考慮していないために、かぶり側のコンクリートが Y 方向に動きやすくなっており、ひび割れが入り始めると、ひずみの進展が速くなると考えられる。定着具がある場合、T30、T60 の引抜き荷重-拔出し変位の初期剛性は解析で表現できているが、T30 の場合は約 60kN 以降、T60 の場合は約 120kN 以降で剛性が実験値より低下し、この荷重レベルで図-4 の軸方向鉄筋の自由端に近いひずみは増加し始めている。図-5 の T60 の鉄筋軸方向のコンクリート表面のひずみを見ると、100kN 以下では圧縮側だが、この荷重レベルより引張側に転じ始めている。即ちひずみが定着具まで達すると定着具からの応力を受け、コンクリートが円周面外にはらみだすのである。定着具がない場合に比べこのはらみだしは大きい。T60nb では載荷初期から顕著で、コンクリート表面が載荷初期から引張側となり初期剛性も実験より低い。かぶりが薄い円柱型の試験体の解析を 2 次元解析で行う際には、円周方向の応力の考慮が必要である。

今回の解析シミュレーションの範囲内で、応力伝達に着目し、定着体の検討を行う。図-11 にかぶりが 30mm の S30、T30 の引抜き荷重 20kN 毎と最大荷重時の各要素間のパネの垂直応力の分布を示す。荷重の増加に伴い、応力がかぶり部全体に広がり、図-5 のコンクリート表面のひずみは、かぶりが 30mm の場合、圧縮側に増加し

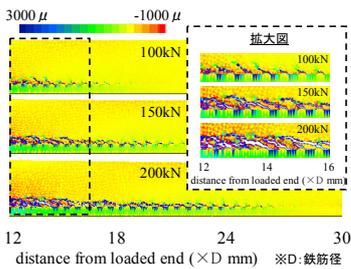


図-10 50kN 毎のひずみの進展図 (S60)

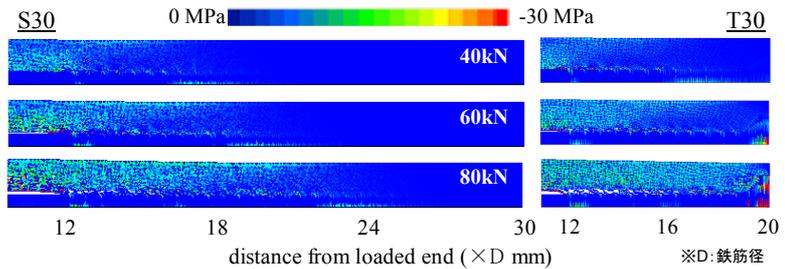


図-11 50kN 毎の応力分布 (左 : S30, 右 : T30)

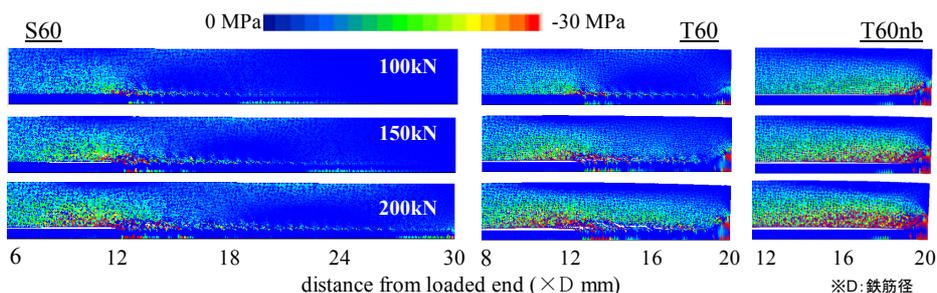


図-12 50kN 毎の応力分布 (左 : S60, 中央 : T60, 右 : T60nb)

ていることが確認できる。また 80kN 時の応力分布では、S30 の場合、ひずみが進展した鉄筋から応力が発生し、一方 T30 では鉄筋と定着具の両方から応力が発生しており、定着具の有無で定着体の形状に違いがあることが示された。図-12 に S60, T60, T60nb の引抜き荷重 50kN 毎と最大荷重時の各要素間のバネの垂直応力の分布を、かぶり 30mm の場合と同様に示す。S60 では S30 と同様に鉄筋ひずみの進展と共にコンクリートに応力伝達が行なわれるが、かぶり全厚に渡り応力が広がる S30 と異なり、表面への影響は小さい。T60 では 100kN までは定着鉄筋による定着体が形成されているが、150kN 以降に定着具からの応力が増加していき、定着鉄筋および定着具それぞれの応力により定着体が形成されていく。軸方向鉄筋の付着を除去した T60nb では荷重初期から定着具から応力が発生し、荷重増加と共に定着体が広がることが確認された。しかし解析ではコンクリート部がはらみだすため、主応力の角度は実験と一致せず、定量的な定着体の把握には至らなかった。S60, T60, T60nb を同じ荷重レベルで比較すると、S60 では鉄筋近傍を応力の伝達範囲である定着体が進展するのに対し、T60 では定着具からの応力も加わり、定着体は大きくなる。T60nb では引抜け荷重が全て定着具に伝わるため定着具からの応力が大きくなり、結果として定着体は S60, T60 より局所化されて大きくなる。このように定着具及び付着の有無で定着体の形状及び形成プロセスに違いがあることが数値解析により確認できた。

4. 結論

機械式定着具を用いた円柱型試験体の軸方向鉄筋のひずみ分布およびコンクリート表面のひずみ分布を、静的引張試験と RBSM 解析により検討した本研究より得られた知見を以下に纏める。

- (1) 機械式定着具の定着具のかぶりが非常に薄い場合、定着具からの応力によりコンクリートが圧縮破壊する可能性があることを確認した。
- (2) 鉄筋の付着がない場合の実験より、本実験で使用した形状の定着具から発生する応力により形成される主応力方向は、定着具より鉄筋軸方向におよそ 40 度であることが確認された。
- (3) 機械式定着具及び定着鉄筋の付着の有無により定着体の形状や形成プロセスは異なり、定着具があると定着体が大きくなることが数値解析により示された。
- (4) RBSM の 2 次元解析手法を用い、かぶりが薄い場合の引抜け端からのひずみの進展を実験と同様にシミュレーションすることができた。また定着体の推定には数値解析が有用であるこ

とを示した。しかしその定量的な評価には、試験体円周方向に生じる応力を考慮し割裂破壊まで表現することが必要である。

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: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
- 2) 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
- 3) 大森慎也, 内田祐市:鉄筋の機械式定着の側面剥離破壊に関する研究, 土木学会第 64 回年次学術講演会, pp987-988, V, 2009
- 4) 日本建築総合試験所:機械式鉄筋定着工法設計指針, 機械式鉄筋定着工法研究委員会, 2006
- 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) 島弘, 周礼良, 岡村甫:マッシブ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
- 7) Kawai, T.: New Discrete Models and Their Application to Seismic Response Analysis of Structures, Nuclear Engineering Design, 48, pp.207-229, 1978
- 8) Nagai, K., Sato, Y., Ueda, T.: Mesoscopic Simulation of Failure of Mortar and Concrete by Failure of Mortar and Concrete by 2D RBSM, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.2, No.3, pp.359-374, 2004.10
- 9) 武藤信太郎, Worapong Srisoros, 中村光, 国枝稔:メゾスケール解析による異形鉄筋の付着挙動解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol27, No.2, pp763-768, 2005
- 10) 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, Vol31, No.2, pp649-654, 2009
- 11) 岡村甫, 前田詔一:鉄筋コンクリート工学, 市ヶ谷出版, 1987