

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

吉武 謙二 小倉 大季 小川 晃 出羽 克之
(技術研究所) (技術研究所) (土木事業本部) (土木事業本部)

Development of Oval-shaped T-Headed Bars for Improvement of Deformation Capacity

by Kenji Yoshitake, Hiroki Ogura, Akira Ogawa and Katsuyuki Dewa

Abstract

The authors have developed new anchorage element; oval-shaped T-headed bars in addition to the circular T-headed bars applied to many actual structures. The purpose of development of oval-shaped T-headed bars is to improve the deformation capacity beyond the ultimate displacement. Pullout analysis using 3D-RBSM (Rigid-Body-Spring Model) and high-stress cyclic pullout tests were carried out to determine the shapes and dimensions of the anchorage element. In order to evaluate the reinforcing effect of transverse reinforcing bars with oval shaped T-headed bars, RC walls were also tested under reversely cyclic loadings. It was confirmed that oval-shaped T-headed bars function sufficiently as anchorage elements for transverse reinforcing bars beyond the ultimate displacement.

概 要

現状の定着具が円形状のTヘッド鉄筋を用いた部材の靱性は、現行の各種耐震設計基準における終局限界状態まで半円形フックを用いた部材と同等である。本研究では、円形状のTヘッド鉄筋に加え、終局限界以降の靱性向上を目的として定着具が楕円形状のTヘッド鉄筋を開発した。3次元剛体-ばねモデルによる解析および高応力繰返し引き抜き実験を実施し、定着具の形状および寸法を定めた。次に、定着具のRC部材内における性能を評価するため、柱部材の正負交番曲げ実験を実施した。楕円形状のTヘッド鉄筋を中間帯鉄筋として用いた場合、軸方向鉄筋およびコアコンクリートの拘束効果が高く、部材の靱性が終局限界以降も半円形フックを用いた場合と同等であることを確認した。

§ 1 . はじめに

兵庫県南部地震におけるRC橋脚の被害により、RC柱部材の耐震性能に関して、断面耐力とともに変形性能の重要性が認識された。変形性能向上のために横方向鉄筋量の増加が有効であることが示された¹⁾ことから、横方向鉄筋の拘束効果を考慮した設計がされるようになった。また、横方向鉄筋の確実な定着のため、諸基準において中間帯鉄筋の定着方法として135度フックや半円形フックが規定された^{2)、3)}。

このため、橋梁やカルバートなどの土木構造物ではせん断補強鉄筋や中間帯鉄筋などの横方向鉄筋が増加している。鉄筋の高強度化や太径化も進み、曲げ半径も増加しているため、鉄筋の組立が非常に難しくなっている。また、横方向鉄筋が増加することにより半円形フックなどの曲げ加工部分がコンクリート打設面に多く存在することとなり、ホースなどの吐出口や締め用の棒形振動機の配筋内部への挿入が困難となる。鉄筋の高密度化は配筋の施工性

低下、コンクリートの充填性低下の要因となり、土木構造物の生産性および品質の確保が大きな課題である。

このような背景から、新しい機械式定着工法が数多く開発され、「鉄筋定着・継手指針【2007年版】」⁴⁾(以下、指針と称する)が発刊された。著者らも、高周波誘導加熱により端部に円形状の定着具を形成したTヘッド鉄筋を、半円形フックの代替として用いる工法を開発してきた。良好なせん断補強性能⁵⁾、せん断疲労性能⁶⁾などを確認し、施工性の向上に寄与してきた⁷⁾(写真-1)。ここで、定着具とは機械式定着において、鉄筋に作用する引張力をコンクリートに伝達するために鉄筋端部に設けた拡径部のことである。

定着具形状が円形状のTヘッド鉄筋は、半円形フックによる定着の代替として、せん断補強鉄筋に用いた場合、現行の各種耐震設計基準における終局限界状態まで半円形フックを配筋した部材と同等の靱性を有している⁸⁾。本研究では、円形状の従来製



(a) 標準フックの場合



(b) Tヘッド鉄筋の場合

写真 - 1 Tヘッド鉄筋施工例



写真 - 2 Tヘッド鉄筋

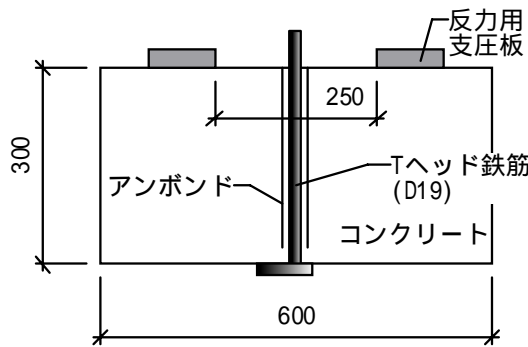


図 - 1 解析対象

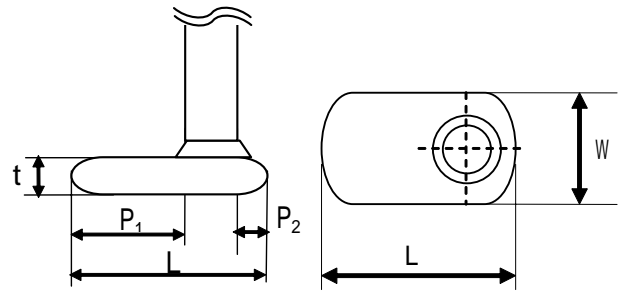


図 - 2 定着具の定数の定義

品に加え、終局限界以降の靱性向上を目的として、定着具が楕円形状のTヘッド鉄筋を開発した。

定着具の形状および寸法を定めるため、定着具による支圧応力に着目した検討を解析および実験により実施した。解析においては、定着具による支圧応力を直接捉えることが可能な剛体 - ばねモデル (RBSM)^{9)、10)}を用いた。定着具の性能評価実験では、横方向鉄筋に用いる場合を想定し、指針⁴⁾に準じた高応力繰返し試験を実施した。次に、柱部材の中間帯鉄筋として部材内でTヘッド鉄筋を適用した場合の性能を確認するため、変形性能、履歴吸収エネルギー量に着目し、一定軸力下 (3.5N/mm²) における正負交番曲げ実験を実施した。

§ 2 . 定着具形状の検討

定着具による局部荷重が作用するコンクリートの破壊機構は、(1)定着具と接するコンクリートの局所的な圧縮破壊、(2)コンクリートのコーン状破壊、(3)コンクリートの割裂破壊である。指針⁴⁾による試験方法はマッシュパなコンクリート中に埋め込まれた定着具を引抜くものである。既往の研究では、割裂ひび割れやコーン状のひび割れは発生せず、定着具と接するコンクリートの圧縮破壊が定着性能に影響を与えることが報告されている^{11)、12)}。よって、機械式定着具の定着性能を検証するためには、定着具による支圧応力に着目する必要があるが、既往の研究では引抜き荷重と支圧面積による平均的な支圧応力の

評価が主体であり、支圧応力の詳細な検討は行われていない。楕円形状のTヘッド鉄筋は定着具に対して母材鉄筋が偏心しているため、鉄筋に引抜き力が作用した場合、形状によっては応力集中の程度が大きく、支圧応力が平均的に分布しない可能性がある。よって、定着具の形状および寸法を定めることを目的として、定着具による支圧応力に着目した解析および実験を実施した。

2 . 1 解析による検討

Tヘッド鉄筋の定着具形状がコンクリートの支圧応力に及ぼす影響を把握することを目的として、定着具の形状および寸法を要因とした3ケースの解析を実施した。

2 . 1 . 1 解析概要

解析対象を図 - 1 に示す。定着具形状の影響を顕在化させるため、鉄筋の直線部におけるコンクリートとの付着は除去した。使用鉄筋はD19の楕円形状のTヘッド鉄筋である。楕円形状のTヘッド鉄筋の定着具形状を図 - 2 に、解析ケースを表 - 1 に示す。Case1は P_2 寸法が0.6 (以下、 t :鉄筋の呼び径) 厚さ t が0.7 の基準タイプ、Case2は定着具厚さを0.5 と薄くしたものの、Case3は P_2 寸法がゼロのものである。図 - 2 の P_1 寸法は主鉄筋や帯鉄筋への掛かりを確保するため2 t とした。幅寸法 W は既往の文献¹¹⁾を参考に定着性能を確保するため2 t とした。

解析モデルを図 - 3 に、各ケースの定着具形状を

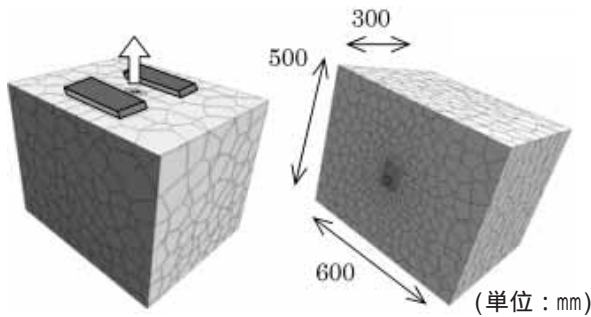
表 - 1 解析ケース

解析ケース	P_2 (mm)	厚さ t (mm)
Case1	11 (0.6)	13 (0.7)
Case2	11 (0.6)	9.5 (0.5)
Case3	0	13 (0.7)

注) P_2 および t は図 - 2 による。

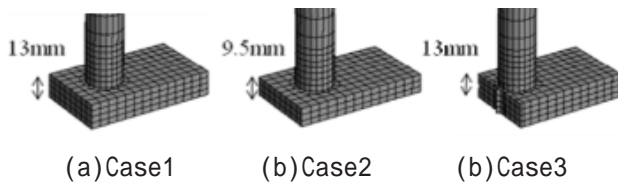
表 - 2 材料定数

コンクリート	圧縮強度 (N/mm ²)	24
	弾性係数 (kN/mm ²)	25
鉄筋および定着具	弾性係数 (kN/mm ²)	200
	降伏強度 (N/mm ²)	390
コンクリートと定着具界面	弾性係数 (kN/mm ²)	25



(a) 上面からの視点 (b) 下面からの視点

図 - 3 解析モデル

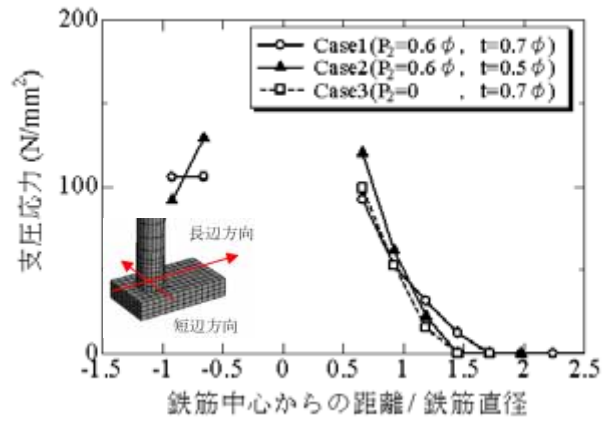


(a) Case1 (b) Case2 (c) Case3

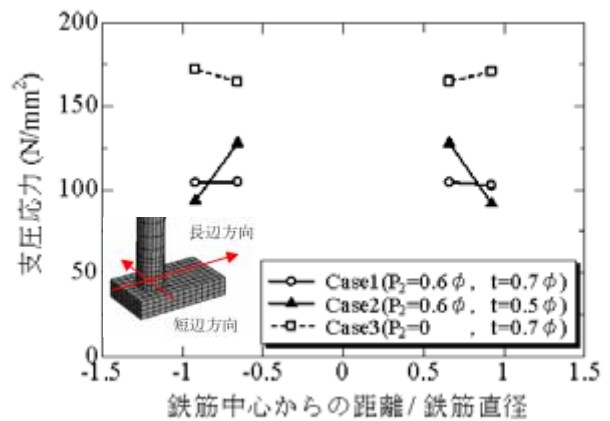
図 - 4 解析パラメータ

図 - 4 に示す。母材鉄筋とコンクリート界面は付着を切っているため、鉄筋の節はモデル化していない。反力用支圧板位置におけるコンクリート要素を完全固定とし、Tヘッド鉄筋の上端要素に鉛直上向き方向の強制変位を与えた。解析は鉄筋母材が降伏するまで実施した。

材料諸元を表 - 2 に示す。コンクリートは弾性とし、コンクリートのコーン状のひび割れや割裂ひび割れは考慮しなかった。コンクリートの弾性係数は圧縮強度 24N/mm² に相当する 25kN/mm² である。鉄筋および定着具と、コンクリート間に配置した垂直ばねの弾性係数はコンクリートと同等である。定着具とコンクリート間の平行ばねは、弾性係数を 1N/mm² と小さい値に設定し、支圧面の付着および摩擦を無視した。鉄筋母材とコンクリート界面のアンボンドは、平行ばねの弾性係数を 1N/mm² として表現した。



(a) 長辺方向



(b) 短辺方向

図 - 5 支圧応力分布 (母材鉄筋降伏時)

2. 1. 2 解析結果

母材鉄筋降伏時における定着具による支圧応力の分布を図 - 5 (a)、(b)に示す。図はそれぞれ、長辺方向、短辺方向における支圧応力の分布をプロットしたものである。横軸は、鉄筋母材の中心からの距離を鉄筋直径で正規化した値である。鉄筋中心からの距離が 1.5 以上の領域は支圧にほとんど寄与していないこと、定着具厚さが薄くなると母材と定着具の境界近傍における支圧応力が局所化することが確認できる。また、 P_2 寸法がゼロの場合は短辺方向の支圧応力が局所化し、基準タイプの 1.5 倍程度の支圧応力が発生した。全てのケースにおいて定着具のひずみは、母材鉄筋が降伏強度に至るまで弾性範囲であった。

以上の結果から、 P_2 寸法および厚さ t が支圧応力の分布形状に影響を及ぼすことが確認できたため、Tヘッド鉄筋の定着具形状に関する実験要因を P_2 寸法は 0.3 ~ 1.1 、厚さ t は 0.5 、0.7 と設定した。

2. 2 実験による検討

Tヘッド鉄筋の定着具形状が定着性能に与える影響を把握すること、半円形フックと同等以上の定着

表 - 3 試験体一覧

試験体名	鉄筋径	定着方法	定着具形状		圧力測定フィルム
			P ₂	厚さt	
T19-0.3	D19	Tヘッド鉄筋	0.3	0.7 ~ 0.8	あり
T19-0.5			0.5		なし
T19-0.6			0.6		
T19-0.7			0.7		
T19-0.8			0.8		
T19-1.0			1.0		あり
T19-1.1			1.1	なし	
J19			半円形フック	-	-
T25-0.4	D25	Tヘッド鉄筋	0.4	0.7 ~ 0.8	あり
T25-0.5			0.5		なし
T25-0.7			0.7		
T25-0.8			0.8		
T25-0.9			0.9		あり
T25-1.0			1.0		なし
T25-A			0.5	0.5	
J25			半円形フック	-	-

注) P₂およびtは図 - 2 による。

性能を満足するための定着具形状を選定することを目的として高応力繰返し実験を実施した。

2.2.1 試験体概要

試験体一覧を表 - 3 に示す。実験要因は、鉄筋径、鉄筋端部の定着方法、および定着具形状である。定着具形状は、P₂寸法を0.3 ~ 1.1 の範囲で変動させるとともに、厚さtを2種類設定した。各試験体に配置したTヘッド鉄筋の定着具寸法を表 - 4 に示す。横方向鉄筋としてD35まで適用可能とするため、鉄筋径は指針⁴⁾に準じて、D25 ~ D35のグループの代表としてD25を、D13 ~ D22のグループの代表としてD19を選定した。

試験体の概略を、試験体 T19-0.3、試験体 J19 を例として図 - 6 に示す。試験体寸法は、Tヘッド鉄筋がD19の場合は600 × 600 × 300mm、D25の場合は800 × 800 × 400mmである。半円形フックおよびTヘッド鉄筋は軸方向鉄筋に掛けて配置した。軸方向鉄筋径はTヘッド鉄筋がD19の場合はD22、D25の場合はD29である。鉄筋の直線部（半円形フックはフックの開始点から荷重面まで、Tヘッド鉄筋は定着具上面から荷重面まで）は、コンクリートとの付着を除去した。半円形フックの曲げ半径は2.5、余長は8である。付着は鉄筋の節間を油粘土で埋め、ラップフィルムで包み除去した。

使用した鉄筋の材質はSD390であり、降伏強度は

表 - 4 定着部寸法一覧

試験体名	P ₂ (mm)	厚さt (mm)	幅W (mm)	長さL (mm)
T19-0.3	6	14	40	66
T19-0.5	9	13	42	67
T19-0.6	11	14	42	75
T19-0.7	13	14	43	73
T19-0.8	16	15	44	69
T19-1.0	19	15	43	71
T19-1.1	20	15	42	72
T25-0.4	10	18	51	84
T25-0.5	13	19	55	86
T25-0.7	18	20	54	81
T25-0.8	19	20	55	81
T25-0.9	23	18	55	84
T25-1.0	25	19	54	84
T25-A	12	13	54	92

注) P₂およびtは図 - 2 による。

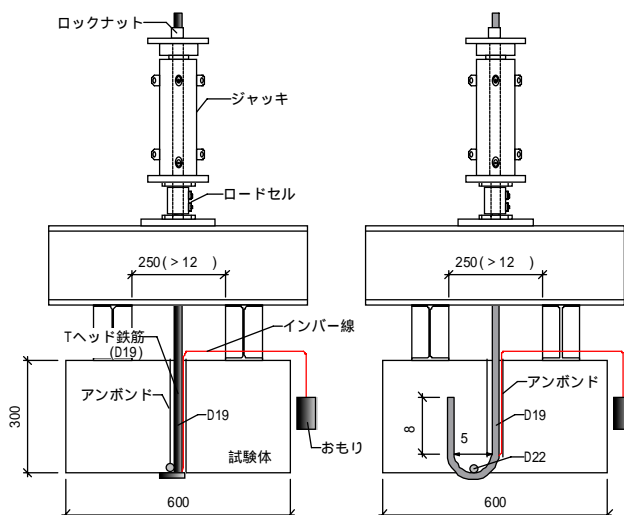


図 - 6 試験概要 (左: T19-0.3、右: J19)

D19、D25でそれぞれ458N/mm²、474N/mm²である。コンクリート強度は表 - 5 のように実構造物の設計基準強度 24N/mm²に相当するものである。

2.2.2 荷重および計測方法

荷重装置を図 - 6 に示す。鉄筋の上限応力を0.95f_y (f_y:鉄筋の規格降伏強度)、下限応力を0.02f_yとして30回の繰返し荷重をした後、鉄筋の規格引張強度 (560N/mm²) まで単調漸増荷重を実施した。

計測項目は、鉄筋の拔出し量、引抜き荷重、定着具下面のひずみ、および定着具による支圧応力である。鉄筋の拔出し量は、Tヘッド鉄筋および半円形

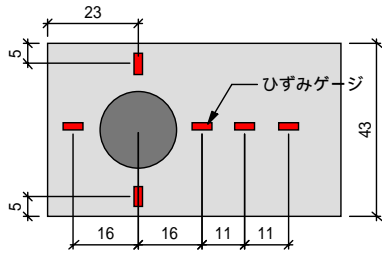
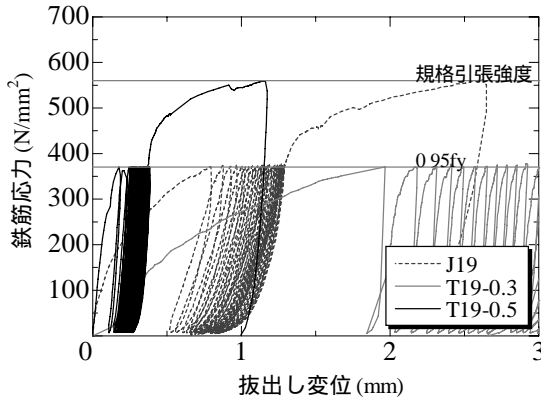
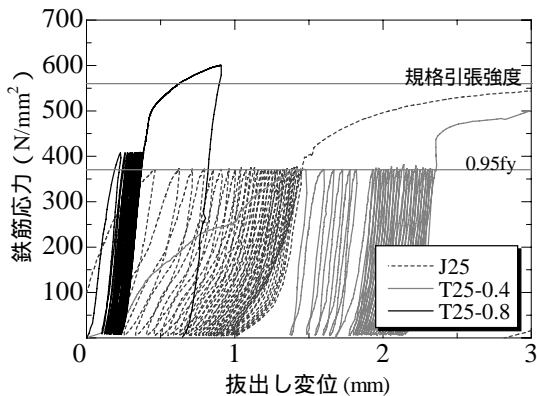


図 - 7 ひずみゲージ設置位置 (試験体 T19-0.7)



(a) D19 の場合



(b) D25 の場合

図 - 8 鉄筋応力 - 拔出し変位関係

フックに固定したインバー線 (図 - 6 参照) の先端に取り付けたおもりの鉛直変位である。インバー線の取り付け位置は、Tヘッド鉄筋の場合は定着具の根元位置、半円形フックの場合はフックの曲げ開始点である。インバー線はコンクリートとの付着を除去するため金属パイプに通し試験体上部に延ばした。試験体 T19-0.3、T19-0.7、T25-0.4、T25-0.9 には、定着具下面のひずみ測定のため、鉄筋ひずみゲージを貼付した (図 - 7)。試験体 T19-0.3、T19-1.0、T25-0.4、T25-0.9 には、定着具による支圧応力を計測する目的で、定着具とコンクリート界面に圧力測定フィルムを設置した。圧力測定フィルムは、圧力を受けると赤く発色し、圧力の大きさに応じて濃度が変わるため、圧力の分布、大きさを目視で確認することができる。

表 - 5 実験結果一覧

試験体名	最大応力 (N/mm^2)	$_{95fy}$ (mm)	1 (mm)	30 (mm)	$_{30}^{-1}$ (mm)	コンクリート 圧縮強度 (N/mm^2)	
T19-0.3	561	1.97	1.97	3.58	1.61	26.0	
T19-0.5	560	0.18	0.18	0.37	0.19		
T19-0.6	560	0.13	0.13	0.26	0.13		
T19-0.7	560	0.09	0.09	0.13	0.04		
T19-0.8	562	0.06	0.06	0.12	0.06		
T19-1.0	561	0.22	0.22	0.31	0.09		
T19-1.1	560	0.09	0.09	0.16	0.07		
J19	561	0.79	0.79	1.29	0.5		
T25-0.4	609	1.45	1.45	2.36	0.91		28.9
T25-0.5	580	0.35	0.67	1.36	0.69		
T25-0.7	591	0.21	0.28	0.41	0.13		
T25-0.8	601	0.19	0.23	0.38	0.15		
T25-0.9	580	0.42	0.52	0.75	0.23		
T25-1.0	602	0.16	0.19	0.3	0.11		
T25-A	561	1.02	1.02	4.34	3.32		
J25	553	0.47	0.47	1.45	0.98		

2.2.3 実験結果

1) 実験結果概要

実験結果一覧を表 - 5 に、鉄筋応力 - 拔出し変位関係の一例を図 - 8 に示す。鉄筋応力は、載荷荷重を鉄筋の公称断面積で除したものである。ここで、 $_{95fy}$ は鉄筋応力が規格降伏強度の 95% ($371N/mm^2$) に達した時点の拔出し量、 $_1$ 、 $_{30}$ は高応力繰返し載荷時における 1 回目および 30 回目の上限応力時の拔出し量である。試験体 T25-0.5、T25-0.7、T25-0.8、T25-0.9、T25-1.0 では高応力繰返し時の載荷荷重が上限応力 $371N/mm^2$ を超えた。このため、 $_1$ 、 $_{30}$ は高い応力レベルでの拔出し量となったが、高応力繰返し性能の評価として安全側になるため、補正は行わなかった。

全ての試験体において、コンクリートの割れひび割れやコーン状のひび割れは発生しなかった。しかし、定着具寸法 P_2 が小さい試験体では写真 - 3 のように定着具直上における局所的な圧壊が観察された。試験体 T25-0.4、T19-0.3 では局所的な圧壊が顕著であり、特に点線内の損傷が大きかった。解析結果と同様に、 P_2 寸法が小さくなることにより、 P_2 領域での支圧応力が卓越したことが原因であると考えられる。試験体 T25-0.4、T19-0.3 は拔出し量も大きく、損傷の大きさと拔出し量は対応している。一方、図 - 12(b) に示す試験体 T25-0.7 のように P_2 寸法の大きい場合は局所的な圧壊は見られなかった。

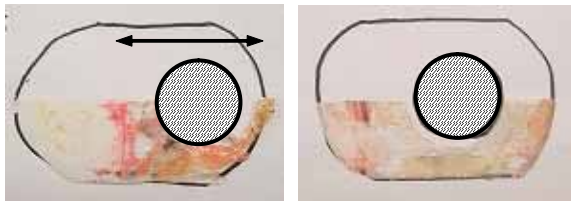
写真 - 4 は、定着具とコンクリート界面に挿入した圧力測定フィルムの発色状況である。フィルムは、感圧範囲が $50 \sim 130N/mm^2$ のフィルムと $10 \sim 50N/$



(a) 試験体 T25-0.4 (b) 試験体 T25-0.7
写真 - 3 拡径部近傍コンクリート状況



感圧範囲 10 ~ 50N/mm²



感圧範囲 50 ~ 130N/mm² 感圧範囲 50 ~ 130N/mm²

(a) 試験体 T25-0.4 (b) 試験体 T25-0.9
写真 - 4 感圧フィルム発色状況

mm²のフィルムを、左右対称に支圧面に挿入した。試験体T25-0.4では図中の矢印の領域において、100 ~ 130N/mm²の範囲の支圧応力が確認された。矢印の領域外である鉄筋中心からの距離が1以上の領域においては、フィルムは発色せず、支圧応力は50N/mm²以下であった。一方、試験体 T25-0.9は発色領域が広く、支圧応力が定着具全体に分布した。支圧応力の大きさは試験体 T25-0.4 に比べて小さく、40 ~ 90N/mm²の範囲であり最大値は90N/mm²程度であった。試験体 T25-0.9において、コンクリートの圧壊が生じなかったことから、コンクリートの支圧強度は90N/mm²以上であった。

2) 定着具のひずみ分布

定着具下面のひずみ分布を図 - 9 に示す。いずれも鉄筋応力が規格引張強度 (560N/mm²) に達した時点の結果である。ひずみ値は引張を正側、圧縮を負側にプロットした。図より、いずれの試験体においても鉄筋中心からの距離が1以内の領域で圧縮ひずみが卓越していることがわかる。ひずみは弾性範囲内の値であり、規格引張強度に相当する荷重作用下においても定着具は降伏していないことが確認された。試験体 T19-0.6 を対象とした解析より求めたひずみ分布を図 - 9 に併記した。解析結果は実験で得られた結果とほぼ同様の傾向を示した。

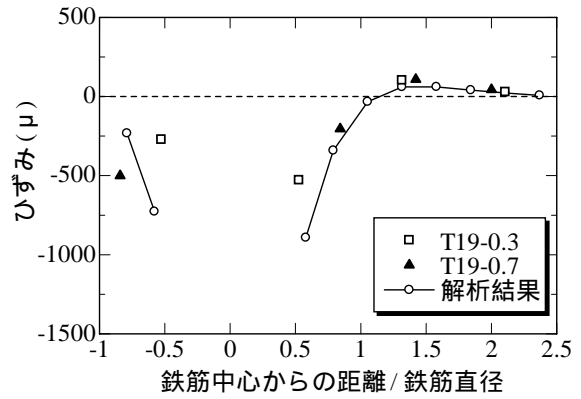


図 - 9 拡径部下端ひずみ分布

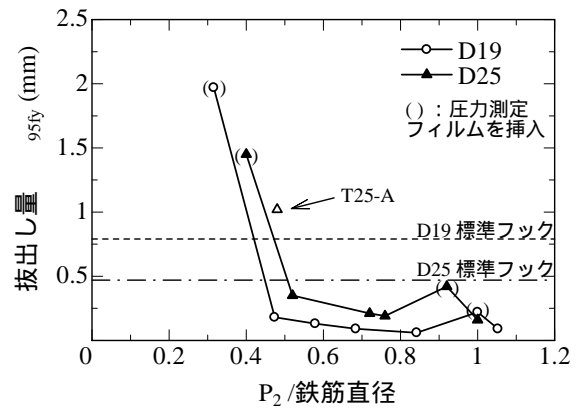


図 - 10 拡径部寸法と静的定着性能の関係

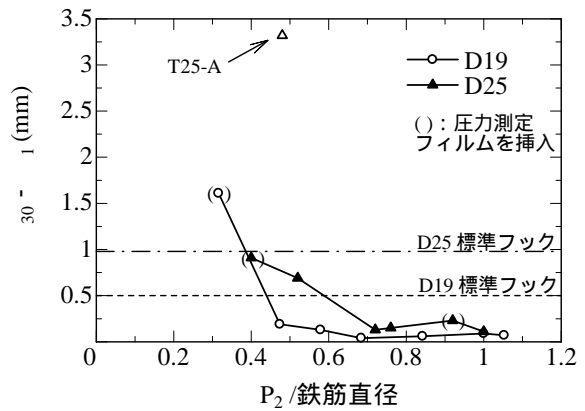


図 - 11 拡径部寸法と応力繰り返し性能の関係

3) 指針⁴⁾に基づく評価

定着具の高応力繰返し性能の評価は、指針⁴⁾に準じ、 $\frac{30}{95fy}$ および $\frac{30}{30-1}$ を半円形フックと比較することにより実施した。定着具寸法 P₂ と拔出し量 $\frac{95fy}{30}$ の関係を図 - 10 に、P₂ 寸法と $\frac{30}{30-1}$ の関係を図 - 11 に示す。図中の点線および一点鎖線は、半円形フックの場合の拔出し量を示したものである。 $\frac{30}{95fy}$ に関しては試験体 T19-0.3、T25-0.4、T25-A が、 $\frac{30}{30-1}$ に関しては試験体 T19-0.3、T25-A が半円形フックの拔出し量より大きく、要求性能を満足しない。

P₂ 寸法が小さいほど、拔出し量 $\frac{95fy}{30}$ および高応力

表 - 6 試験体およびコンクリート特性一覧

試験体名	中間帯鉄筋仕様	コンクリート材料試験結果		
		圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
No.1	閉合型 半円形フック	25.2	2.4	26.1
No.2	楕円形状 Tヘッド鉄筋	28.2	2.8	29.1
No.3	円形状Tヘッド鉄筋 (重ね継ぎ)	27.5	2.9	29.5

繰返し性能を表す $\sigma_{30} - \sigma_{1}$ は大きく、 P_2 寸法が0.5 以下の場合には拔出し量が半円形フック以上である。定着具の厚さが薄い試験体 T25-A は、 $\sigma_{30} - \sigma_{1}$ が他の試験体と比較して大きく、高応力繰返し性能が大幅に低減した。また、試験体 T19-0.3、T19-1.0、T25-0.4、T25-0.9 (図中、() で囲んだプロット点) では、圧力測定フィルムの挿入により拔出し量が増加した。以上の結果より、D19、D25 のいずれにおいても P_2 寸法が0.5 以上、定着具の厚さが0.7 以上であれば半円形フックと同等以上の定着性能を有することを確認できた。

§ 3 . 柱部材実験による検討

3 . 1 試験体概要

試験体一覧を表 - 6 に、試験体形状および配筋を図 - 12、図 - 13 に示す。試験体は削トンネル側壁等の構造物をモデル化しており、配力筋の外側に軸方向鉄筋を配置し、軸方向鉄筋を拘束するように中間帯鉄筋を配置したものである。

試験体 No.1 は半円形フック鉄筋を閉じた基準試験体、試験体 No.2 は楕円形状の Tヘッド鉄筋を軸方向鉄筋に掛けて配筋した試験体、試験体 No.3 は円形状の Tヘッド鉄筋をコアコンクリート内で10 重ね継いだ試験体である。今回実施した実験では、部材最外縁の中間帯鉄筋に、試験体 No.2 では楕円形状の Tヘッド鉄筋を、試験体 No.3 では円形状の Tヘッド鉄筋を配置している。通常の施工ではかぶりコンクリートが剥落した場合の定着性能低下が懸念されるため、部材最外縁に配置する中間帯鉄筋には Tヘッド鉄筋を用いない。試験体 No.2、試験体 No.3 では、安全側の評価になるため、配筋の都合により部材最外縁の中間帯鉄筋として Tヘッド鉄筋を使用した。試験体 No.2 では柱基部の塑性ヒンジ部 (基部から 950mm の範囲) のみ楕円形状の Tヘッド鉄筋を用い、それ以外では円形状の Tヘッド鉄筋を用いた。中間帯鉄筋の 135 度フック部分の余長は、道路橋示方書 耐震設計

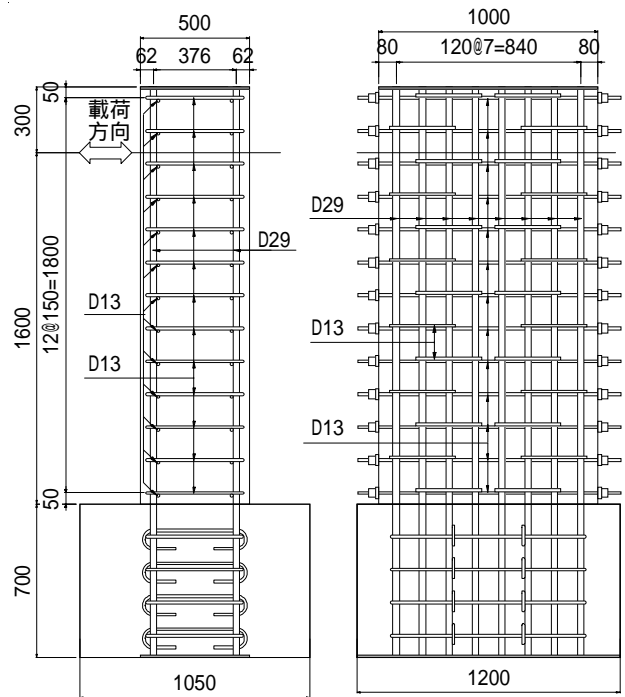


図 - 12 試験体形状および寸法 (試験体 No.1)

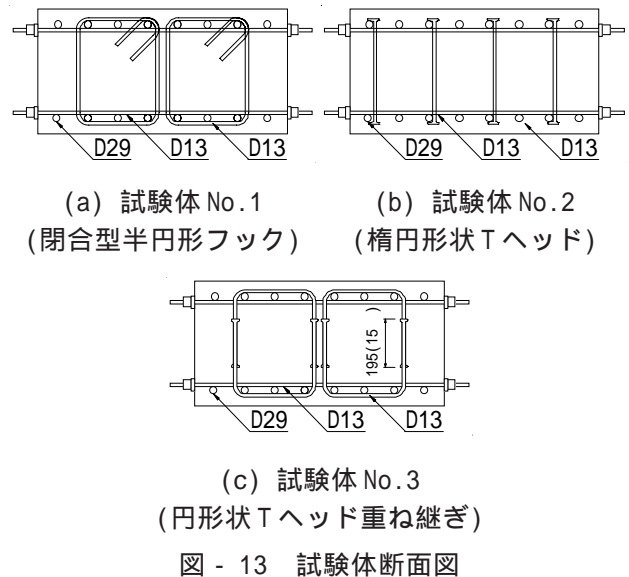


図 - 13 試験体断面図

編²⁾に準じて10 である。配力鉄筋は、定着板によって試験体側面に定着した。

断面寸法は1,000mm x 500mm、せん断スパン比は3.7である。引張鉄筋比は1.2%、せん断補強鉄筋比は0.34%である。各試験体の有効高さ、横方向鉄筋量や材質は統一した。変形性能と密接な関係がある横方向鉄筋の効果¹⁾をより顕在化させるため、試験体に作用する軸力は一般土木構造物における作用軸力より大きい3.5N/mm²であり、横方向鉄筋を考慮しない場合は、せん断破壊先行の設計である。試験体のせん断耐力 V_y は1,056kN ($V_c=564$ kN、 $V_s=492$ kN)、曲げ降伏荷重は686kNである。

楕円形状定着具の P_2 寸法は $0.75d \leq P_2 \leq 1.2d$ (d



(a) 試験体 No.1 (閉合型半円形フック) (b) 試験体 No.2 (楕円形状Tヘッド) (c) 試験体 No.3 (円形状Tヘッド重ね継ぎ)

写真 - 6 6 y 負側 2 回目時における試験体破壊状況 (上: 正側、下: 負側)

表 - 7 鉄筋の材料試験結果

鉄筋種類	適用部位	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
D29 (SD345)	軸方向鉄筋	389	586	200
D13 (SD345)	中間帯鉄筋	366	574	179
D13 (SD345)	帯鉄筋	390	545	189

は鉄筋の公称直径) 幅 W は $2.0d$ W $2.4d$ 、厚さ t は $0.7d$ t $1.0d$ である (図 - 2)。また、円形状のTヘッド鉄筋の定着具径 D_0 は $2.5d$ D_0 $2.8d$ 、厚さ t は $0.8d$ t $1.2d$ である。試験体 No.2 では中間帯鉄筋の両端をTヘッド鉄筋に加工した。片端をTヘッド鉄筋加工、片端を半円形フックとした場合は、帯鉄筋およびコアコンクリートの拘束性能が弱い側に損傷が集中し、定着具の性能を適切に評価できない可能性があるためである。使用したコンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を表 - 6、表 - 7 に示す。試験時のコンクリート強度は $25 \sim 28\text{N/mm}^2$ である。

3.2 荷重および計測方法

荷重状況を写真 - 5 に示す。試験体は試験体固定部をPC鋼棒によって荷重フレームに固定した。鉛直荷重用串型ジャッキにて $1,750\text{kN}$ (3.5N/mm^2) を荷重し

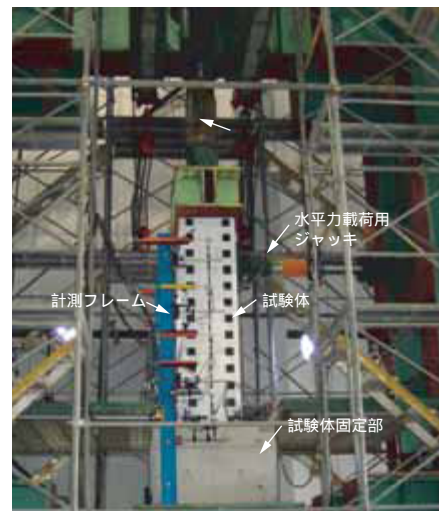


写真 - 5 荷重状況

軸力を一定に保ち、水平荷重用串型ジャッキにて水平力を橋軸方向に変位制御にて正負交番荷重した。荷重はひび割れ発生荷重における予備荷重と、制御変位の整数倍での正負交番荷重であり、同一制御変位による繰返し回数は3回である。制御変位は各試験体を絶対変位で比較するため、試験体 No.1 の正側、負側の降伏変位を平均した 13mm とした。降伏変位は柱中央基部の軸方向鉄筋に設置したひずみゲージの測定値が、引張試験による降伏ひずみに達した時点である。

計測項目は、鉛直および水平荷重、試験体各位置における水平変位および鉛直方向の区間変位、軸方

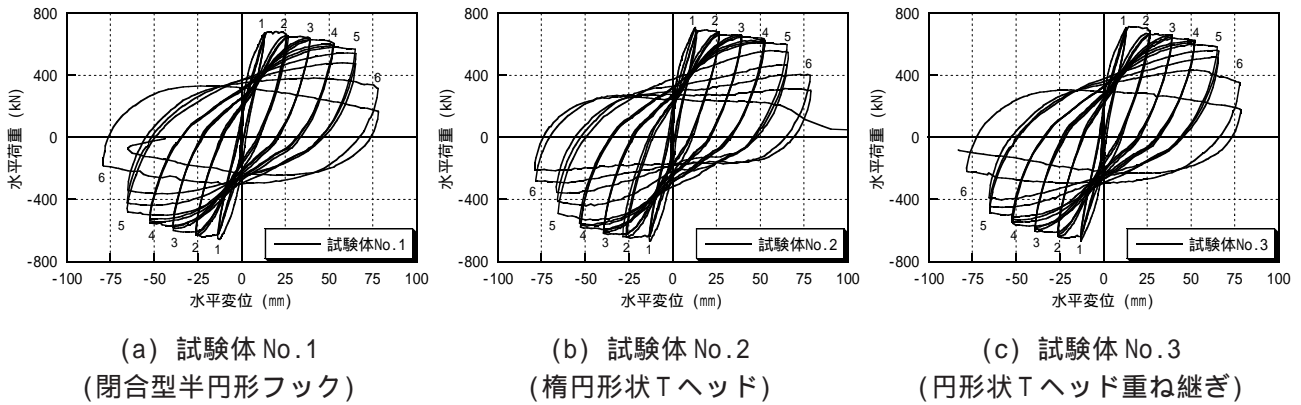


図 - 14 荷重 - 変位関係

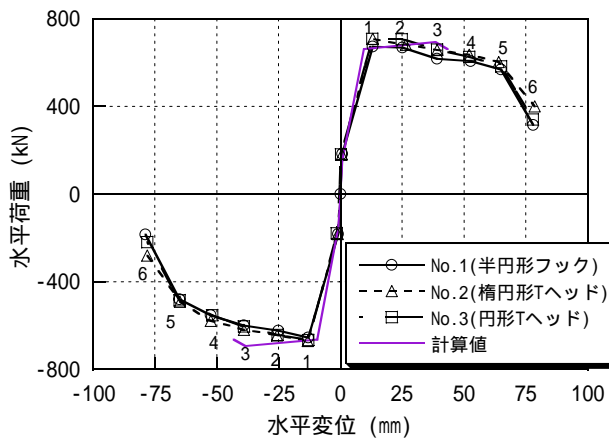


図 - 15 荷重 - 変位関係の包絡線

表 - 8 各塑性率における耐荷性能比較

	塑性率	1	2	3	4	5	6		
		正側荷重 (kN)	No. 1	673	669	618	607	570	315
	No. 2		710	680	658	637	603	401	
			(106)	(102)	(106)	(105)	(106)	(127)	
		No. 3	709	706	659	625	583	341	
	No. 3		(105)	(105)	(107)	(103)	(102)	(108)	
		負側荷重 (kN)	塑性率	-1	-2	-3	-4	-5	-6
		No. 1	-655	-623	-599	-553	-482	-185	
	No. 2		-671	-644	-618	-579	-491	-280	
			(102)	(103)	(103)	(105)	(102)	(151)	
		No. 3	-665	-643	-604	-553	-485	-220	
		(101)	(103)	(101)	(100)	(101)	(119)		

注) 表中の () 内の値は試験体No.1との荷重比率(%)である。

向鉄筋、帯鉄筋および中間帯鉄筋のひずみである。水平変位は試験体固定部に設置した計測フレームから計測した。

3.3 実験結果

3.3.1 試験体の破壊進展状況比較

6 y の負側 2 回目終了時における試験体破壊状況を写真 - 6 に示す。水平荷重載荷点における水平荷重 - 水平変位関係を図 - 14 に示す。水平荷重は軸力による付加曲げモーメントによる影響を補正した値である。いずれの試験体も 350kN 程度で初期ひび割れが発生した。その後、4 y でかぶりコンクリートの浮きが生じ、5 y で軸方向鉄筋が座屈し、かぶりコンクリートが剥落した。

試験体No.1では6 y の負側2回目で、試験体No.2では6 y の正側3回目で、試験体No.3では6 y の負側2回目で、コアコンクリートの損傷が進み軸力が保持できなくなり載荷を終了した。

試験体No.1では、6 y の2回目載荷時にコアコンクリートに定着されていた半円形フックの開き出しが、No.2では5 y の3回目載荷時に軸方向鉄筋からの楕円形定着具の外れが観察された。試験体

No.3では、6 y の1回目載荷時に試験体側面において定着具の支圧応力によるコーン状のひび割れが観察された。これは、最外縁の鉄筋に円形状Tヘッド鉄筋を用いたためであり、適用範囲内でTヘッド鉄筋を使用すればコーン状のひび割れは発生しないと考えられる。

3.3.2 変形性能比較

実験により得られた各試験体の水平荷重 - 水平変位の包絡線を図 - 15 に、各塑性率における耐荷性能を表 - 8 に示す。図中にはコンクリート標準示方書(文献3)に基づいて求めた計算値を示した。計算から求めた終局限界は43mmである。

いずれの試験体の耐荷性能も5 y まではほぼ同等であったが、6 y では半円形フックを使用した試験体No.1の耐荷荷重が小さかった。試験体No.1では半円形フックの開き出しによりコアコンクリートの損傷が進んだためであると考えられる。

3.3.3 履歴吸収エネルギー量比較

履歴吸収エネルギーの比較を図 - 16 に示す。履歴吸収エネルギーは水平荷重 - 水平変位関係において

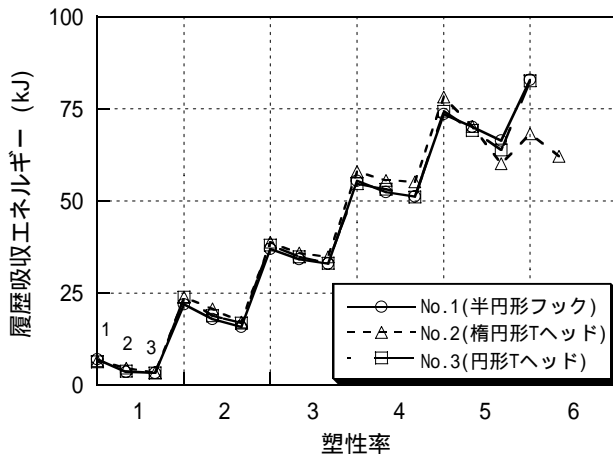


図 - 16 履歴吸収エネルギー

各載荷サイクルの履歴曲線に囲まれた面積である。各塑性率における全ての繰返し載荷時の値をプロットした。いずれの試験体の履歴吸収エネルギーは終局限界を大きく超えた5 yまではほぼ同等であった。試験体No.2は、6 yの1回目における履歴吸収エネルギーが他の試験体と比較して小さいが、6 yの2回目においても十分なエネルギー吸収があり、総エネルギー吸収量は他の試験体と同等であった。

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ります。ここに記して、関係の方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) 星隈順一, 川島一彦, 長屋和宏: 鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査に用いるコンクリートの応力 - ひずみ関係, 土木学会論文集, No.520/V-28, pp.1-11, 1995.8
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書(耐震設計編), 2002.
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書【設計編】, 2007.
- 4) 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.
- 5) 塩屋俊幸, 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集, Vol.22, No.3, pp.1291-1296, 2000.
- 6) 吉武謙二, 小川晃, 出羽克之, 阿部忠: 高サイクル繰返し荷重を受けるRCはり部材におけるTヘッド鉄筋のせん断疲労性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.859-864, 2008.
- 7) 瀧論, 梶隆, 熊田昭彦: Tヘッドバーを用いた鉄筋工事の生産性, 第57回土木学会年次学術講演会, VI-273, pp.545-546, 2002.9
- 8) 土木研究センター: 建設技術審査証明書 拡径部による機械式定着筋「Tヘッドバー」, 2008.
- 9) 川井忠彦, 竹内則雄: 離散化極限解析プログラミング - コンピュータによる極限解析法シリーズ2, 培風館, 1990.6
- 10) Bolander, J.E. Yoshitake, K. & Thomure, J.1999.Stress Analysis Using Elastically Homogeneous Rigid-Body-Spring Networks, Journal of Structural Engineering, JSCE, Vol.16, No.2, 125-132
- 11) 木村克彦, 小川晃, 出羽克之, 吉武謙二, 前之園司: Tヘッド鉄筋の拡径部径および埋込長さが定着性能に及ぼす影響, 土木学会第61回年次学術講演会, V-574, pp.1143-1144, 2006.9
- 12) 米田大樹, 島弘, 宮田勝治, 伊藤始: 鉄筋端部に雄ネジを切削加工して定着版を取り付けた機械式定着の性能評価, 土木学会第63回年次学術講演会, V-558, pp.1115-1116, 2008.9

§ 4 . 結論

本研究では、終局限界以降の靱性向上を目的として定着具が楕円形状のTヘッド鉄筋を開発した。定着具の形状を設定するため、3次元剛体 - ばねモデルによる解析および高応力繰返し引抜き実験を実施した。また、定着具のRC部材内での性能を確認するため、柱部材の正負交番曲げ実験を実施した。本研究から得られた知見を以下に示す。

- 1) 定着具の形状および寸法が定着性能に与える影響は大きく、楕円形状のTヘッド鉄筋が半円形フックと同等以上の性能を有するために必要な定着具の P_2 寸法は0.5以上、厚さは0.7以上である。
- 2) 中間帯鉄筋として楕円形状のTヘッド鉄筋を用いた場合、現状の円形状のTヘッド鉄筋をコアコンクリート内で10重ね継いで用いた場合とともに、軸方向鉄筋およびコアコンクリートの拘束効果が高く、部材の靱性は終局限界以降も半円形フックを用いた場合と同等である。
- 3) 3次元剛体 - ばねモデルによる解析により、定着具によるコンクリートの支圧分布や定着具のひずみ分布を妥当に表現することができた。