

論文 中間帯鉄筋の定着体が RC 柱の変形性能に及ぼす影響

吉武 謙二^{*1}・小川 晃^{*2}・樋口 義弘^{*3}・前之園 司^{*4}

要旨：兵庫県南部地震以降，土木構造物の横方向鉄筋量が増加しており，配筋作業の施工性およびコンクリートの充填性の確保が課題となっている。そこで，拡径部を有する異形鉄筋（以下，Tヘッド鉄筋と称す）をRC柱部材の中間帯鉄筋として適用することを目的として，一定軸力下における正負交番曲げ実験を実施した。その結果，Tヘッド鉄筋を中間帯鉄筋として用いた柱部材は，半円形フックを用いた場合と同等の靱性率および終局限界までのエネルギー吸収性能を有し，鉄筋継手・定着指針に規定されている靱性補強性能を満足することが明らかになった。

キーワード：機械式定着，Tヘッド鉄筋，中間帯鉄筋，変形性能，正負交番曲げ実験

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，各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筋や中間帯鉄筋などの横方向鉄筋が増加しており，曲げ加工部分を有する鉄筋の組立が非常に難しくなっている。また，標準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棒形振動機の配筋内部への挿入が困難となることがある。このように，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となっている。加工においても鉄筋の高強度化や太径化により曲げ加工がしにくくなっている。

このような背景から，新しい定着工法が数多く開発され，鉄筋定着・継手指針〔2007年版〕が発刊された⁴⁾。

著者らも，写真-1に示す高周波誘導加熱により端部に拡径部を形成したTヘッド鉄筋を，従来の標準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⁾を確認し，施工性の向上に寄与してきた⁷⁾。

本研究では，道路橋脚などの柱部材の中間帯鉄筋としてTヘッド鉄筋を適用した場合の変形性能，履歴吸収エネルギー量や破壊メカニズムを把握することを目的とし

た。中間帯鉄筋の有無，および中間帯鉄筋として半円形フックとTヘッド鉄筋を用いた柱部材を対象として，一定軸力下（1.0N/mm²）における正負交番曲げ実験を実施し，性能を比較した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体一覧を表-1に，試験体形状および配筋を図-1，図-2に示す。試験体No.1は帯鉄筋のみで中間帯鉄筋のないもの，試験体No.2，試験体No.3はそれぞれ中間帯鉄筋として，半円形フック，Tヘッド鉄筋を用いたものである。柱の断面は1200mm×500mm，有効高さは450mm，せん断スパン比は4.0とした。

軸方向鉄筋比は1.0%とし，軸方向鉄筋にはD16を75mm間隔で配置した。帯鉄筋比は全て0.21%とし，D13を100mm間隔で配置した。試験体No.2，試験体No.3の中間帯鉄筋比は0.21%とし，帯鉄筋と同様にD13を100mm間隔で配置した。鉄筋の材質は全てSD345とした。

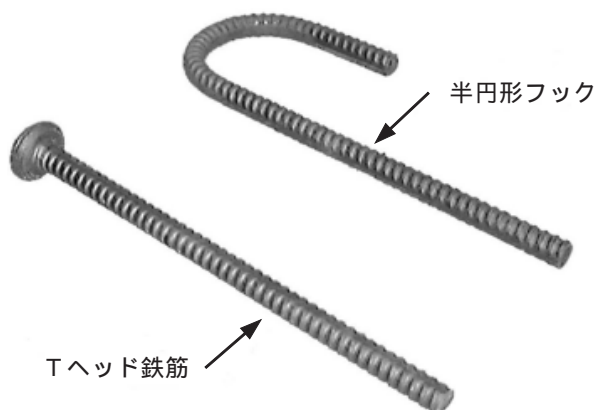


写真-1 Tヘッド鉄筋と半円形フック

*1 清水建設（株）技術研究所 安全安心技術センター 博（工）（正会員）

*2 清水建設（株）土木事業本部 設計第一部 課長

*3 清水建設（株）九州支店 沖縄吉の裏建設所 主査

*4 第一高周波工業（株）Tヘッド事業部 製造部 部長

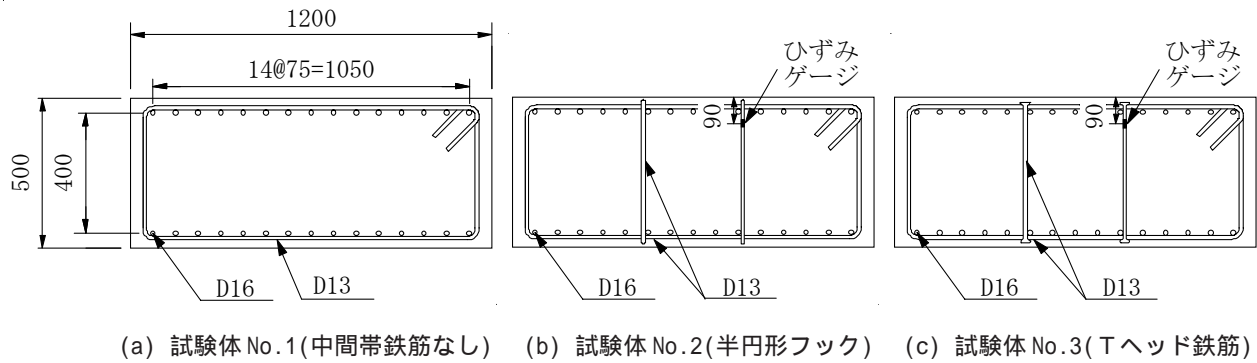


図 - 1 試験体断面形状及び寸法

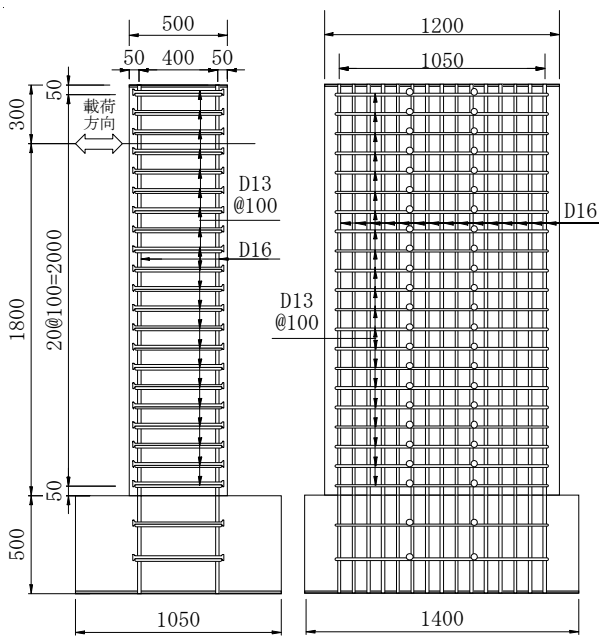


図 - 2 試験体形状および寸法 (試験体 No. 3)

表 - 2 コンクリート材料試験結果

試験体名	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
No. 1	35.2	2.8	31.4	0.22
No. 2	38.2	3.0	32.5	0.23
No. 3	36.2	2.7	31.3	0.20

表 - 3 鉄筋材料試験結果

鉄筋種類	適用部位	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
D16 (SD345)	軸方向鉄筋	381	570	194
D13 (SD345)	帯鉄筋 中間帯鉄筋	377	542	191

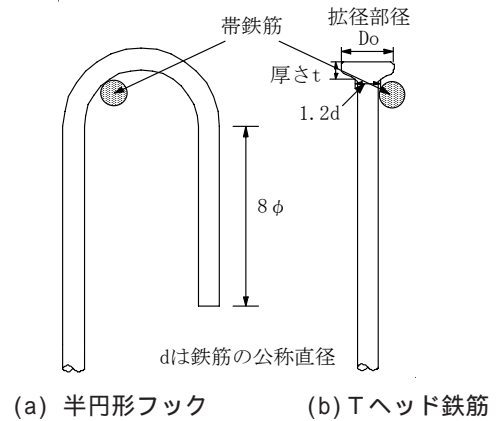


図 - 3 定着体詳細

表 - 1 試験体一覧

試験体名	中間帯鉄筋種類	中間帯鉄筋比 (%)	帯鉄筋比 (%)
No. 1	なし	0	0.21
No. 2	半円形フック	0.21	
No. 3	Tヘッド鉄筋		

定着体の詳細を図 - 3 に示す。中間帯鉄筋の半円形フック部分および帯鉄筋の 135 度フック部分の余長は、それぞれ道路橋示方書 下部構造編⁹⁾に準じて 8ϕ 、 10ϕ (ϕ は鉄筋の呼び径) とした。半円形フックの曲げ内半径は 2.5ϕ とした。Tヘッド鉄筋の拡径部径 D_o は $2.5d$ 、 $D_o \geq 2.8d$ 、拡径部厚さ t は $0.8d$ 、 $t \geq 1.2d$ (d は鉄筋の公称直径) である。

試験体 No. 3 では中間帯鉄筋の両端を Tヘッド鉄筋に加工した。これは片端を 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 - 2、表 - 3 に示す。試験時のコンクリート強度は $35 \sim 38\text{N/mm}^2$ 、鉄筋の降伏点は D16 で 381N/mm^2 、D13 で 377N/mm^2 であった。

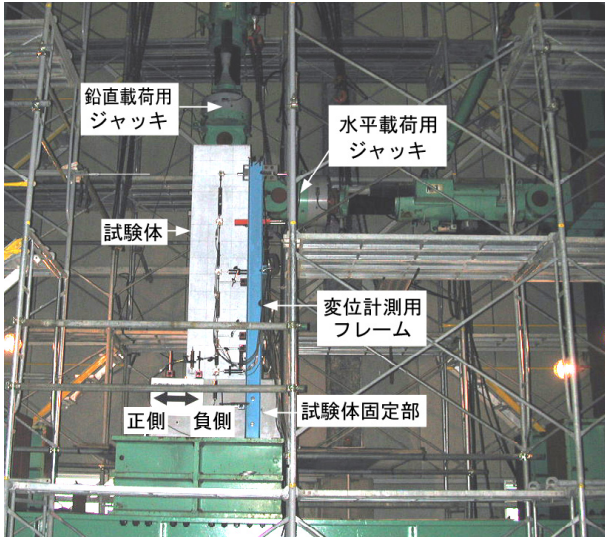


写真 - 2 荷重状況

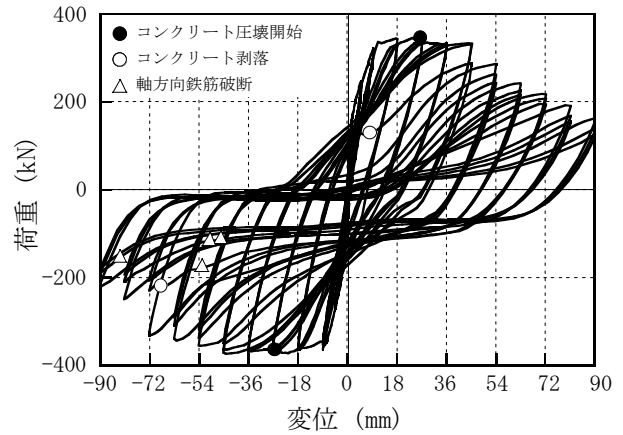
表 - 4 試験体損傷履歴

荷重サイクル	試験体No. 1 (中間帯鉄筋なし)	試験体No. 2 (半円形フック)	試験体No. 3 (Tヘッド鉄筋)
5 δ y	1		
	2		
	3	正側コンクリート剥落	
6 δ y	1		
	2	負側コンクリート一部剥落	
	3		
7 δ y	1		
	2	正側コンクリート剥落 負側コンクリート剥落	正側コンクリート剥落 負側コンクリート剥落
	3		
8 δ y	1		
	2	負側コンクリート剥落 正側鉄筋1本破断	
	3		
9 δ y	1	負側鉄筋1本破断	
	2	正側鉄筋2本破断	負側鉄筋1本破断
	3		正側鉄筋4本破断 負側鉄筋1本破断
10 δ y	1	負側鉄筋1本破断	
	2	正側鉄筋1本破断	正側鉄筋3本破断 負側鉄筋3本破断
	3		負側鉄筋1本破断 正側鉄筋2本破断

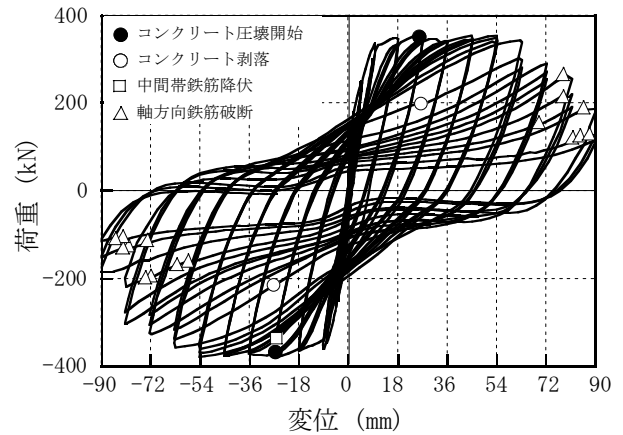
2.2 加力および計測方法

荷重状況を写真 - 2 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600kN(1.0N/mm²)を荷重し軸力を一定に保ち、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。荷重は計算降伏荷重の75%の予備荷重と、制御変位の整数倍での正負交番荷重とし、同一制御変位による繰り返し回数は3回とした。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9mmとした。試験体No.1の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(1986 μ)に達した時点とした。

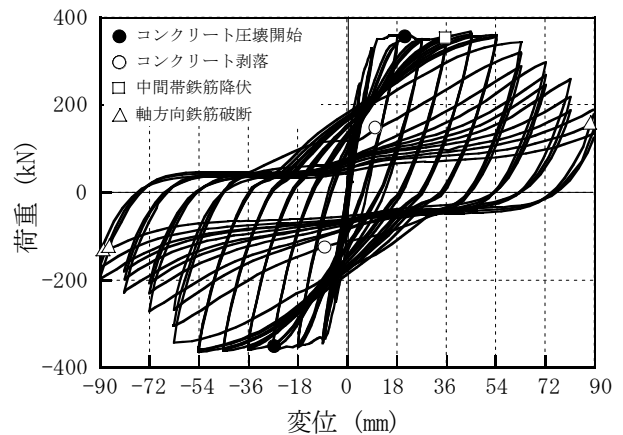
計測項目は、鉛直および水平荷重、試験体各所における水平変位および鉛直方向の区間変位、軸方向鉄筋、帯鉄筋および中間帯鉄筋のひずみである。水平変位は試験体固定部に設置した計測フレームから計測した。



(a) 試験体 No.1(中間帯鉄筋なし)



(b) 試験体 No.2(半円形フック)



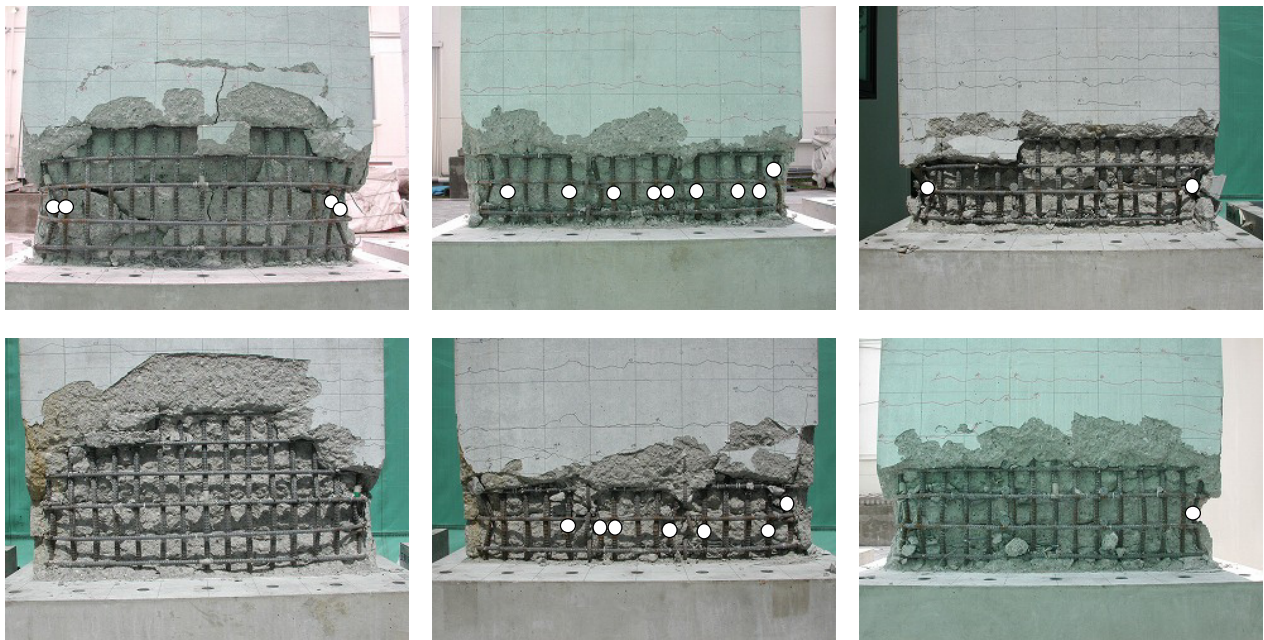
(c) 試験体 No.3(Tヘッド鉄筋)

図 - 4 荷重 - 変位関係

3. 実験結果および考察

3.1 試験体の破壊進展状況比較

試験終了時における試験体の破壊状況を写真 - 3 に、水平荷重荷重点における荷重 - 変位関係を図 - 4 に示す。水平荷重は荷重点における軸力による付加曲げモーメントを補正した値である。コンクリートの剥落や軸方向鉄筋の破断の発生時点を表 - 4 および図 - 4 に示す。コンクリートの剥落は軸方向鉄筋が座屈し、試験体の奥行き方向全長にわたって被りコンクリートが剥落した時点とした。



(a) 試験体 No.1(中間帯鉄筋なし) (b) 試験体 No.2(半円形フック) (c) 試験体 No.3(Tヘッド鉄筋)

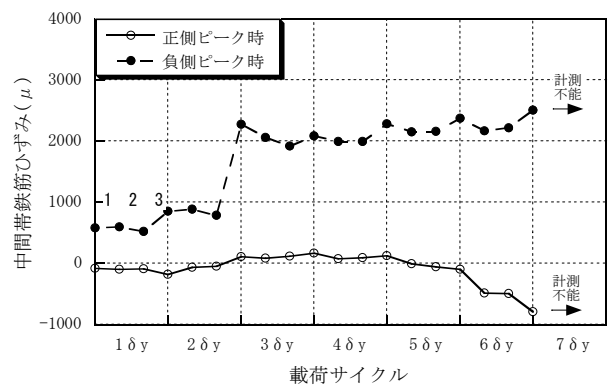
写真 - 3 実験終了時破壊状況(上:正側,下:負側) は鉄筋破断位置を示す。

いずれの試験体も荷重初期から4 yまでの破壊進展状況はほぼ同様であった。初期ひび割れが正側,負側ともに130~170kNで発生した。水平変位の増加に伴い,曲げひび割れ本数やひび割れ幅も増加した。3 yで試験体下端から20~30mm程度の領域で軽微なコンクリートの表面剥離が見られた。正側,負側ともに4 yの1回目で軸方向鉄筋に沿った縦方向のひび割れが発生した。

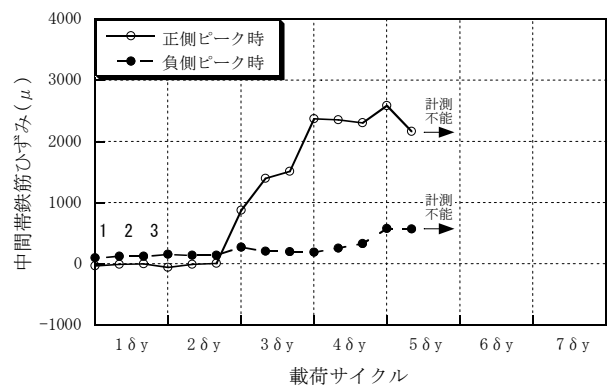
中間帯鉄筋のない試験体No.1では,5 yの正側3回目で軸方向鉄筋が座屈し被りコンクリートが剥落し,荷重が急激に低下した。8 yの負側2回目で隅角部の軸方向鉄筋が1本破断した後,負側の被りコンクリートも剥落した。最終的には4本の軸方向鉄筋が破断した。

中間帯鉄筋として半円形フックを用いた試験体No.2では,6 yの負側2回目で一部被りコンクリートが剥落したが,顕著な荷重低下は見られなかった。正側,負側ともに7 yの2回目で軸方向鉄筋が座屈し被りコンクリートが剥落し,荷重が低下した。9 yで7本,10 yで9本の軸方向鉄筋が破断し,荷重が急激に低下した。これは中間帯鉄筋の拘束により帯鉄筋が節となり,最下段および下端から2段目の帯鉄筋間という短い座屈区間で軸方向鉄筋が座屈を繰り返し受けたためと考えられる。

中間帯鉄筋としてTヘッド鉄筋を用いた試験体No.3も試験体No.2と同様に,正側,負側ともに7 yの2回目で軸方向鉄筋が座屈し,被りコンクリートが剥落し荷重が低下した。8 yではTヘッド鉄筋拡径部が下端から3段目までの帯鉄筋から外れていた。10 yで隅



(a) 試験体 No.2(半円形フック)



(b) 試験体 No.3(Tヘッド鉄筋)

図 - 5 中間帯鉄筋ひずみ

角部の軸方向鉄筋3本が破断した。試験体No.2と比較して軸方向鉄筋の破断本数が少ない理由は,Tヘッド鉄筋拡径部が帯鉄筋から外れるため,軸方向鉄筋の座屈長さが長くなったためであると推測される。試験体No.1,

表 - 5 各試験体の変形性能

試験体名	中間帯鉄筋	正側				負側				平均 靱性率
		降伏荷重 +Py (kN)	降伏変位 + δy (mm)	終局変位 + δu (mm)	靱性率 + μ	降伏荷重 -Py (kN)	降伏変位 - δy (mm)	終局変位 - δu (mm)	靱性率 - μ	
NO. 1	なし	320.9	9.4	47.1	5.0	-354.5	-8.2	-54.3	6.6	5.8
NO. 2	半円形フック	335.1	9.6	63.7	6.7	-346.6	-7.8	-63.7	8.2	7.4
NO. 3	Tヘッド鉄筋	329.6	8.9	66.1	7.4	-332.2	-8.0	-64.3	8.0	7.7

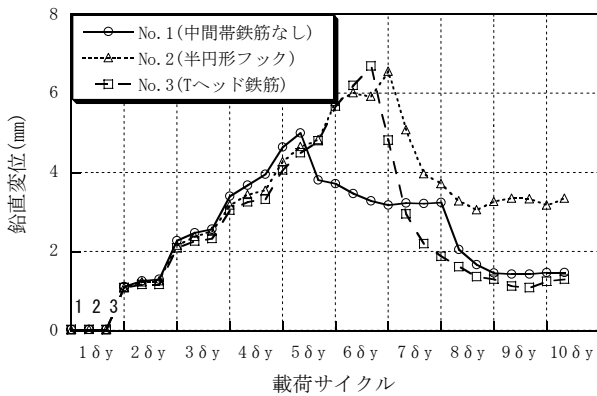


図 - 6 鉛直方向変位履歴(水平変位ゼロ時点)

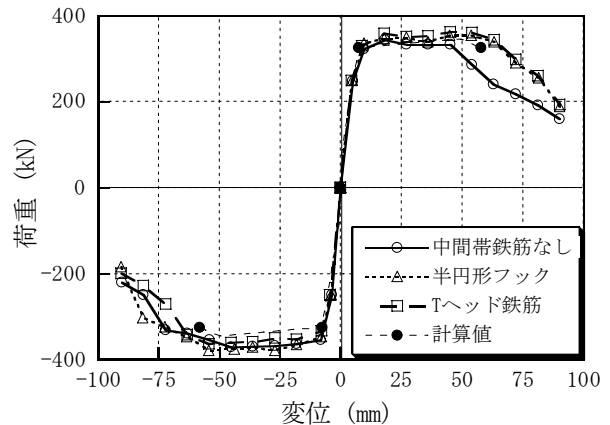


図 - 7 荷重 - 変位包絡線

試験体 No. 3 では隅角部の軸方向鉄筋のみが破断したが、これは帯鉄筋による拘束効果が高かったためであると考えられる。

正側および負側の荷重ピーク時における試験体最下段の中間帯鉄筋ひずみと荷重サイクルの関係を図 - 5 に示す。中間帯鉄筋のひずみ計測位置は図 - 1 に示している。中間帯鉄筋の降伏は、半円形フックを用いた試験体 No. 2 では 3 δy の負側 1 回目、Tヘッド鉄筋を用いた試験体 No. 3 では 4 δy の正側 1 回目であった。ひび割れ発生状況の相違により半円形フックでは負側、Tヘッド鉄筋では正側と降伏した荷重方向が異なると推測される。半円形フックの場合と同様にTヘッド鉄筋の場合も中間帯鉄筋が降伏していることから、帯鉄筋およびコアコンクリートの拘束効果を有することが確認できた。試験体の損傷が大きくなると、ゲージ線の断線などにより計測不能となった。

水平変位ゼロ時点における荷重点の鉛直方向変位と荷重サイクルとの関係を図 - 6 に示す。試験体 No. 1 では正側コンクリートが剥落した 5 δy の 2 回目、および負側コンクリートが剥落した 8 δy の 2 回目において、急激に試験体の軸方向縮みが生じている様子がうかがえる。試験体 No. 2、試験体 No. 3 では 7 δy 以降、急激に試験体の軸方向縮みが生じている。軸方向縮みは、被りコンクリートの剥落、軸方向鉄筋の座屈、コンクリートの損傷などによって生じると考えられる。試験体 No. 1 および Tヘッド鉄筋を用いた試験体 No. 3 は、被りコン

クリートの剥落以降も試験終了時まで軸方向縮みが大きいことから、コンクリートの損傷が主要因となり荷重が低下したと考えられる。一方、半円形フックを用いた試験体 No. 2 では 9 δy 以降、軸方向鉄筋縮みが小さいため、軸方向鉄筋破断が主要因で荷重低下が生じたと推測される。

試験終了時における試験体下端からのコンクリート損傷領域は、試験体 No. 1 では正側 450mm、負側 550mm、試験体 No. 2 では正側、負側ともに 250mm、試験体 No. 3 では正側、負側ともに 350mm であった。試験体 No. 2 と比較して試験体 No. 1、試験体 No. 3 のコンクリートがより損傷を受けた様子が確認できる。

Tヘッド鉄筋を中間帯鉄筋に用いた試験体 No. 3 の鉄筋破断本数は、半円形フックを用いた試験体 No. 2 と比較して 2 割程度と非常に少なかった。

3.2 変形性能比較

各試験体の水平荷重 - 水平変位の包絡線を図 - 7 に、変形性能に関する結果一覧を表 - 5 に示す。文献9)による計算値を図 - 7 に併記した。試験体の降伏変位 y 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(1986 μ)に達した時点とした。また、終局変位 u は包絡線において降伏荷重を下回らない最大変位とした。靱性率 μ は降伏変位に対する終局変位の比 (u / y) とした。

試験体 No. 2 と試験体 No. 3 の靱性率は 7.5 程度とほぼ

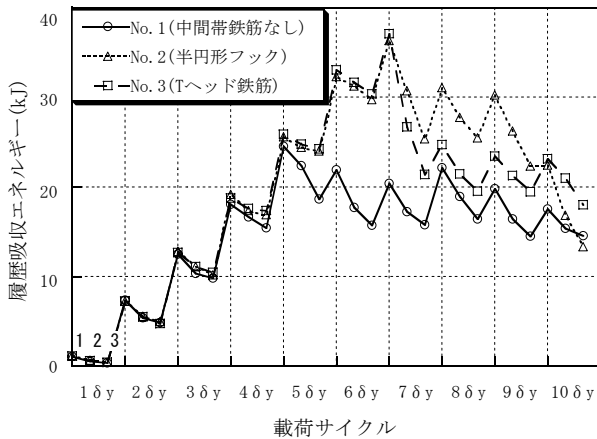


図 - 8 履歴吸収エネルギー

等しく、試験体 No. 1 の靱性率 5.8 に対して大幅に向上した。

中間帯鉄筋により靱性率が向上すること、Tヘッド鉄筋を用いた柱の靱性率は半円形フック鉄筋を用いた場合と同等であることが確認できた。また、鉄筋定着・継手指針⁴⁾では、靱性補強性能の評価基準として、終局変位まで半円形フックの95%以上の耐荷性能を有することと規定しているが、Tヘッド鉄筋を用いることにより指針の性能を満足することが確認できた。

3.3 履歴吸収エネルギー量比較

各試験体の履歴吸収エネルギーを図 - 8 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各載荷サイクルの履歴曲線に囲まれた面積とした。

中間帯鉄筋のない試験体 No. 1 では正側コンクリートが剥落した5 yの2回目、および負側コンクリートが剥落した8 yの2回目において履歴吸収エネルギーが低下した。

中間帯鉄筋として半円形フック、Tヘッド鉄筋を用いた試験体 No. 2、試験体 No. 3 ではともに正側、負側のコンクリートが剥落した7 yの2回目に履歴吸収エネルギーが低下した。試験体 No. 2、試験体 No. 3 の終局変位は7 yに相当するが、終局変位まではTヘッド鉄筋を用いた場合の履歴吸収エネルギーは半円形フックと同等であることが確認できた。

終局変位以降7 yから9 yまでは、半円形フックと比較してTヘッド鉄筋を用いた試験体の履歴吸収エネルギーは少なかった。一方、10 yではTヘッド鉄筋を用いた試験体の方が履歴吸収エネルギーは大きくなった。これは半円形フックを用いた試験体 No. 2 における9 y以降の軸方向鉄筋破断による荷重低下が、試験体 No. 3 におけるコンクリートの損傷による荷重低下と比較して大きかったためであると考えられる。

4. まとめ

道路橋脚などの柱部材の中間帯鉄筋としてTヘッド鉄筋を適用した場合の変形性能、履歴吸収エネルギー量や破壊メカニズムを把握することを目的として、中間帯鉄筋の有無、および中間帯鉄筋の定着体を実験要因として一定軸力下における正負交番曲げ実験を実施した。その結果、得られた知見を以下に示す。

- (1) Tヘッド鉄筋を中間帯鉄筋として用いた柱の靱性率は半円形フック鉄筋を用いた場合と同等であり、鉄筋定着・継手指針の靱性補強性能を満足する。
- (2) Tヘッド鉄筋を中間帯鉄筋として用いた柱の終局限界までのエネルギー吸収性能は半円形フックを用いた場合と同等である。
- (3) 終局変位以降の荷重低下の主要因は、中間帯鉄筋が半円形フックの場合は軸方向鉄筋破断、Tヘッド鉄筋の場合はコンクリートの損傷であった。
- (4) Tヘッド鉄筋を中間帯鉄筋に用いた場合の鉄筋破断本数は、半円形フックを用いた場合と比較して2割程度と非常に少なかった。

謝辞

本実験に当たり(有)塩屋企画の塩屋俊幸氏に貴重なご意見を頂きました。ここに記して謝意を表します。

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〔構造性能照査編〕, 2002.
- 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：高サイクル繰り返し荷重を受ける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) 日本道路協会：道路橋示方書(下部構造編), 2002.
- 9) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善, 1999.10