## 論文 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

吉武 謙二\*1・小川 晃\*2・出羽 克之\*3・阿部 忠\*4

要旨:耐震設計規定の厳格化により土木構造物のせん断補強筋量が増加している。特に鉄道高架橋では鉄筋が高密度化し,配筋作業の施工性およびコンクリートの充填性の向上が課題となっている。そこで,配筋の施工性改善に実績のある拡径部を有する異形鉄筋(以下,Tヘッド鉄筋と称す)を高サイクル繰り返し荷重が作用する部材のせん断補強筋として適用することを目的としてRCはりのせん断疲労実験を実施した。その結果,Tヘッド鉄筋をせん断補強筋として用いた場合,Tヘッド鉄筋加工部で疲労破断は生じず,コンクリート標準示方書の疲労強度に基づく載荷回数に対して安全側であることが確認できた。 キーワード:RCはり,Tヘッド鉄筋,高サイクル繰り返し荷重,せん断疲労,高周波誘導加熱

1.はじめに

兵庫県南部地震以後,耐震設計規定の厳格化に伴い, 橋梁やカルバートなどの土木構造物ではせん断補強筋お よび中間帯鉄筋が増加している。鉄筋が高密度化するこ とにより,せん断補強筋の標準フック部など,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おり,配 筋の施工性低下を招いている。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固め用の棒形振動機の 配筋内部への挿入が困難となる。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向上が 大きな課題となっている。また,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<sup>1)</sup>。

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<sup>2)</sup>,道路カルバートや LNGタンクなどに適用し,配筋およびコンクリート打設 の施工性の向上に寄与してきた(写真-2)<sup>3),4)</sup>。

ここでは,特に鉄筋の高密度化が顕著である鉄道高架 橋のはり部材にTヘッド鉄筋を適用することを目的とし て検討を実施した。列車荷重が作用するはり部材は設計 断面力における変動荷重の占める割合が大きく,かつ繰 り返し回数が多い。よって,Tヘッド鉄筋を列車荷重が 作用する部材のせん断補強筋に用いる場合は,疲労に対 する安全性の検討を行う必要がある。

スターラップを有するRCはりの高サイクル繰り返し荷 重によるせん断疲労耐力については上田<sup>5),6)</sup>や佐藤<sup>7)</sup>ら によって研究が行われており,スターラップの疲労強度 は,鉄筋母材の疲労強度と曲げ加工された部分の疲労強 度との間にあること,スターラップの疲労破断位置は主 鉄筋に沿って曲げられた部分や直線部,圧縮側のフック 部の3箇所であることなどが確認されている。また,こ れらの研究をもとにコンクリート標準示方書<sup>8)</sup>では折り 曲げ部を有する鉄筋の疲労強度は母材の場合の50%に低 減するように規定されている。

コンクリート中に定着されたTヘッド鉄筋は,単体で は鉄筋母材が疲労破断するため鉄筋母材の疲労強度式を 満足することを確認しているが<sup>9)</sup>,部材内でのせん断補 強筋としての疲労性能が明らかでなかった。そこで,本



\*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 都市基盤統括部 課長 (非会員)
\*3 清水建設(株) 土木事業本部 都市基盤統括部 部長 (非会員)
\*4 日本大学 生産工学部 土木工学科教授 博(工)(正会員)

|           | 試験体概要                 |                 |            | 載荷荷重       |            | 鉄筋変動                              | 破壞時                |                              | スターラップの<br>破断本数 <sup>*1</sup> |                  |            |    | コンクリート                                 |
|-----------|-----------------------|-----------------|------------|------------|------------|-----------------------------------|--------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------|------------|----|--|
| 試験体<br>名称 | 配筋<br>仕様              | 主鉄筋<br>比<br>(%) | 継手長<br>(d) | 下限<br>(kN) | 上限<br>(kN) | 応力<br>Swr<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 繰り返し<br>回数 Nu      | 破壊<br>モード                    | フック<br>加工部<br>(H)             | 曲げ<br>加工部<br>(B) | 直線部<br>(S) | 合計 | エンシックト<br>圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |
| F-S       | -<br>半円形<br>フック<br>配筋 | 1.5             | -          | 静的単調載荷     |            | -                                 | 静的せん断耐力<br>(560kN) | せん断破壊<br>なお,鉄筋は未破断           | 0                             | 0                | 0          | 0  | 29.1                                   |
| F-1       |                       | 1.5             | -          | 10         | 290        | 148                               | 1.231E+06          | フック加工部および<br>曲げ加工部での破断       | 3                             | 4                | 0          | 7  | 31.6                                   |
| F-2       |                       | 1.2             | -          | 10         | 300        | 186                               | 1.794E+05          | 曲げ加工部<br>での破断                |                               | 2                | 0          | 2  | 27.1                                   |
| LT-1      | 1.5                   |                 | 12         | 10         | 290        | 150                               | 1.973E+05          | 曲げ加工部<br>での破断                | -                             | 4                | 0          | 4  | 30.6                                   |
| LT-2      | ラップ型                  | 1.5             | 12         | 10         | 295        | 160                               | 2.322E+05          | 曲げ加工部<br>での破断                | -                             | 5                | 0          | 5  | 29.1                                   |
| LT-3      | 1ヘッド 配筋               | 1.5             | 12         | 10         | 300        | 164                               | 5.954E+05          | 曲げ加工部<br>での破断                | -                             | 5                | 0          | 5  | 29.9                                   |
| LT-4      |                       | 1.2             | 20         | 10         | 300        | 181                               | 2.131E+06          | 2.131E+06曲げ加工部および<br>直線部での破断 |                               | 4                | 1          | 5  | 29.0                                   |
| T-1       |                       | 1.5             | -          | 10         | 290        | 155                               | 2.500E+06          | 疲労では<br>未破壊                  | -                             | 0                | 0          | 0  | 28.4                                   |
| T-2       | U型<br>Tヘッド<br>配筋      | 1.5             | -          | 10         | 295        | 158                               | 1.074E+05          | 曲げ加工部<br>での破断                | -                             | 4                | 0          | 4  | 29.9                                   |
| T-3       |                       | 1.5             | -          | 10         | 300        | 166                               | 3.221E+05          | 曲げ加工部<br>での破断                | -                             | 4                | 0          | 4  | 29.0                                   |
| T-4       |                       | 1.5             | -          | 10         | 300        | 164                               | 1.936E+06          | 曲げ加工部および<br>直線部での破断          | -                             | 4                | 1          | 5  | 29.9                                   |
| T-5       |                       | 1.2             | -          | 10         | 300        | 177                               | 1.354E+05          | 曲げ加工部<br>での破断                | -                             | 2                | 0          | 2  | 30.8                                   |

表 - 1 試験体および結果一覧

\*1) H:Hook portion, B:Bent portion, S:Straight portion



(a) 標準フックを用いた場合



(b) T ヘッド鉄筋を用いた場合 写真 - 2 配筋状況



図-1 想定配筋仕様(ラップ型Tヘッド配筋)

報ではTヘッド鉄筋のRC部材におけるせん断疲労性能を 確認することを目的として,配筋仕様および変動応力を 実験要因とした高サイクル繰り返し載荷実験を実施し た。なお,Tヘッド鉄筋は部材最外縁のスターラップや 帯鉄筋の定着には用いないため,今回の検討対象は図-1に示す鉄筋のうち中間帯鉄筋のみである。

- 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 - 2 に示す。試験体は静的単調載荷を含む,載荷荷重および配筋仕様の異なる12 体である。配筋仕様は基準となる半円形フック配筋とラップ型Tヘッド配筋,U型T



\*2)試験体LT-4では重ね継手長さを200mmとした。





ヘッド配筋の3種類である。

ラップ型Tヘッド配筋とは,図-1に示すように2つ のコの字型のTヘッド鉄筋をコアコンクリート内で重ね 継いで閉合するタイプであり,RC部材のせん断補強性能 および軸方向鉄筋の座屈防止性能を期待している。なお, ラップ型配筋では良好な静的せん断補強性能を確認して いる<sup>10)</sup>。この場合,下側の中間帯鉄筋にもTヘッド鉄筋 を使用するため,半円形フックと比較して主鉄筋間を通 しやすくなること,上側の中間帯鉄筋を下側の主鉄筋に 掛ける必要がないことなどから中間帯鉄筋の施工性が大 幅に改善されるという利点がある。

U型Tヘッド配筋とは, コの字型のTヘッド鉄筋を上 側の軸方向鉄筋からかぶせて, Tヘッド鉄筋拡径部を下 部の軸方向鉄筋付近に配置する配筋である。Tヘッド鉄 筋の軸部は,図-3に示すように軸方向鉄筋に接触する ように配置した。

試験体のせん断スパン比は2.6とし,試験体 F-2, LT-

表 - 2 鉄筋の材料試験結果

| 使用<br>試験体           | 鉄筋<br>種類       | 適用部位          | 降伏点<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 引張強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 弾性係数<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) |  |  |
|---------------------|----------------|---------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|--|--|
| F-S<br>F-1<br>LT-1  | D10<br>(SD345) | せん断補強筋<br>配力筋 | 384                         | 574                          | 176                           |  |  |
| LT-2<br>LT-3<br>T-1 | D32<br>(SD490) | 引張鉄筋          | 526                         | 687                          | 202                           |  |  |
| T-2<br>T-3<br>T-4   | D19<br>(SD345) | 圧縮鉄筋          | 384                         | 561                          | 182                           |  |  |
|                     | D10<br>(SD345) | せん断補強筋<br>配力筋 | 376                         | 573                          | -                             |  |  |
| F-2<br>LT-4<br>T-5  | D29<br>(SD490) | 引張鉄筋          | 522                         | 692                          | 197                           |  |  |
|                     | D19<br>(SD345) | 圧縮鉄筋          | 376                         | 557                          | -                             |  |  |
| 表 - 3 コンクリートの配合     |                |               |                             |                              |                               |  |  |

| W/C | 空気量<br>(%) | s/a<br>(%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |                    |  |  |
|-----|------------|------------|-------------------------|-----|-----|-----|--------------------|--|--|
| (%) |            |            | W                       | С   | S   | G   | $\mathrm{Ad}^{*1}$ |  |  |
| 70  | 4.5        | 47.3       | 185                     | 265 | 832 | 979 | 2.84               |  |  |

\*1) AdはAE減水剤である。

4, T-5の主鉄筋比は1.2%, それ以外は1.5%とした。

今回の実験では中間帯鉄筋のみを検討対象としている が,本来は部材最外縁のスターラップなどが存在するた め,側面かぶりは剥落しないことから,側面かぶりを大 きく設定した。また,Tヘッド鉄筋の拡径部が底面のか ぶりコンクリートに及ぼす影響を把握するため,底面の かぶり厚さは実構造物のスターラップの直径とかぶりの 比率がほぼ等しくなるように設定した。

ラップ型Tヘッド配筋では直線部の重ね継手長さを12

( は鉄筋の呼び径)とした。ただし,試験体LT-4で は20 とした。

Tヘッド鉄筋の拡径部径 Do は 2.5d Do 2.8d, 拡径 部厚さtは 0.8d t 1.2d (d は鉄筋の公称直径) である (図-3)。

使用したコンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を表 - 1,2に示す。粗骨材の最大寸法は13mmである。半円 形フックの曲げ内半径は2 とした。コンクリートは表 - 3に示す配合とし,セメントは普通ポルトランドセメ ントを用いた。載荷はコンクリート打設後,4週以降に 実施した。

## 2.2 加力および計測方法

加力は300kN疲労試験機を用い,写真-3のように載 荷はりを介して実施した。疲労実験時の上限荷重は 290kN,295kN,300kNの3水準とし,下限荷重は10kNとし た。上限荷重はコンクリート標準示方書<sup>8)</sup>のせん断補強 鋼材を用いない棒部材の設計せん断耐力V<sub>cd</sub>以上に設定し た。試験体は丸鋼を溶接した鋼板により単純支持した。



写真 - 3 加力状況

載荷板および支承の幅は100mmとした。

計測項目は,試験体の鉛直変位,せん断補強筋ひずみ およびせん断ひび割れ幅である。せん断補強筋のひずみ は引張側主鉄筋から上側に50mmの位置の内側で計測し た。せん断ひび割れ幅については,写真-3に示すよう に主たるせん断ひび割れが試験体の高さ方向中央部に達 した後に型変位計を設置して計測した。計測は載荷回 数が1,3,10,30,10<sup>2</sup>,3 × 10<sup>2</sup>,10<sup>3</sup>,3 × 10<sup>3</sup>,10<sup>4</sup>,3 × 10<sup>4</sup>, 10<sup>5</sup>,3 × 10<sup>5</sup>,10<sup>6</sup>,2 × 10<sup>6</sup>,に達したときに試験機の運転 を停止し,上限荷重までの静的載荷時に実施した。

## 3. 実験結果

実験終了時の試験体破壊状況を図 - 4 に,実験結果一 覧を表 - 1 に示す。せん断補強筋の変動応力はコンク リート標準示方書の式を基に算定した。表には実験終了 後に試験体をはつって確認したスターラップの破断位置 および本数も記した。破断本数は試験体前後面の合計で ある。いずれの試験体も1回目の載荷で曲げひび割れお よびせん断スパンにひび割れが発生した。250万回の載 荷においても疲労破壊をしなかった試験体T-1以外は, 最終的に主たるせん断ひび割れが載荷点または支承方向 に進展し,所定の荷重が載荷できなくなり実験を終了し た。

今回の実験ではスターラップの破断はせん断ひび割れ と交差した直線部で破断した2箇所を除けば,全て曲げ 加工部やフック部などで生じ,Tヘッド鉄筋加工部では 破断しなかった(写真-4)。スターラップは破断位置 において伸びがほとんど生じていないことから,全て疲 労破断と判断した。また,U型Tヘッド配筋を用いた場 合は,せん断ひび割れがTヘッド鉄筋加工部近傍を通過 しているにもかかわらず,鉄筋の破断は上部の曲げ加工 部で生じた。また,U型Tヘッド配筋を用いた試験体も, 250万回載荷終了後においても底面かぶり部にひび割れ は発生しなかった。



図-4 試験体破壊状況(図中の 印は鉄筋破断位置)



試験体F-1,LT-3,T-4における最大荷重時のせん断補強 筋のひずみ分布と繰り返し回数の関係を図 - 5 に示す。 グラフのX軸は試験体の長軸方向における計測位置であ り,原点は試験体左端を示している。なお,載荷回数が 10万回を超えた時点でそれぞれの試験体において計測不 能となったひずみゲージがあったため,グラフでは10万 回までのデータとした。せん断スパン中央付近ではせん 断補強筋ひずみは繰り返し回数とともに増加している様 子が伺える。

試験体F-1,LT-3,T-4におけるせん断スパン中央付近に おけるせん断ひび割れ幅と繰り返し回数の関係を図 - 6 に示す。ひび割れ幅は写真 - 3に示すように試験体の高



a) 曲げ加工部(B)





b) フック加工部(H) c) 直線部(S) 写真 - 4 鉄筋破断状況



図-7 部材破壊時の載荷回数と計算値

さ方向中央でせん断ひび割れと直交する方向に計測した。 これより,載荷回数が3万回を過ぎたあたりからせん断 ひび割れ幅が増加している様子が確認できる。

Tヘッド鉄筋を用いた場合も半円形フックを用いた場

合も, せん断補強筋のひずみやせん断ひび割れ幅の挙動 は同様な傾向を示し顕著な差異は見られなかった。

部材破壊時の載荷回数と変動応力との関係を図 - 7 に 示す。試験体 T3 と試験体 T4 は,同じ実験条件であるに もかかわらず,破壊時の載荷回数にはばらつきが見られ た。しかし,半円形フック配筋とラップ型Tヘッド配筋, U型Tヘッド配筋のいずれの部材も破壊時載荷回数は, 鉄筋母材の疲労強度計算値に基づく載荷回数をやや下回 るが,コンクリート標準示方書に示されている折り曲げ 部を有する鉄筋の疲労強度(鉄筋母材の50%低減値)に 基づく載荷回数に対しては安全側であった。

## 4.まとめ

T ヘッド鉄筋の RC 部材内でのせん断補強筋としての 疲労性能を確認することを目的として,2種類の配筋仕 様のT ヘッド鉄筋と半円形フックを用いたはり部材のせ ん断疲労実験を実施した。その結果,得られた知見を以 下に示す。

- (1) 破壊時の載荷回数にはばらつきが見られたが,半円 形フック配筋とラップ型Tへッド配筋,U型Tへッ ド配筋のいずれの部材も破壊時載荷回数は,コンク リート標準示方書に示されている折り曲げ部を有す る鉄筋の疲労強度に基づく載荷回数に対しては安全 側であった。
- (2) 今回の実験ではスターラップの破断はせん断ひび割れと交差した直線部で破断した2箇所を除けば,全て曲げ加工部やフック部などで生じた。
- (3) 試験体上部のみに曲げ加工部を有する∪型Tヘッド 配筋を用いた場合は,せん断ひび割れが近傍を通過 しているにもかかわらず,Tヘッド鉄筋加工部での 鉄筋破断は生じなかった。
- (4) Tヘッド鉄筋を用いた場合も半円形フックを用いた 場合も,せん断補強筋のひずみやせん断ひび割れ幅 の挙動は同様な傾向を示し顕著な差異は見られな かった。
- (5) 拡径部が底面かぶり部にあるU型Tヘッド配筋を用 いた試験体も、250万回載荷終了後においても底面 かぶり部にひび割れは発生せず、拡径部はかぶりコ ンクリートに有害な影響を及ぼさなかった。

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) 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 128,2007.
- 2) 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
- 3) 瀧諭・椚隆・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
- 4)加藤秀紀・降矢昌時・木村克彦・大塚敏哉:高架橋 下部工におけるTヘッド鉄筋工法による鉄筋組立の 生産性評価,第60回土木学会年次学術講演会,VI-073,pp.145-146,2005.9
- 5) H.OKAMURA S.A.FARGHALY T.UEDA :Behavior of Reinforced Concrete Beams with Stirrups Failing in Shear under Fatigue Loading, Proc.of JSCE, No.308,pp.109 ~ 122,1981.4
- 6) T.UEDA H.OKAMURA:BEHAVIOR IN SHEAR OF REINFORCED CONCRETE EAMS UNDER FATIGUE LOADING,CONCRETE LIBRARY OF JSCE NO.2,pp.37 ~ 69,1983.12
- 7) 佐藤勉・斉藤啓一・宮本征夫:せん断補強鉄筋を有 するRCはりの疲労設計,コンクリート工学年次論文 報告集,12-2,pp.339 ~ 344,1990.
- 8) 土木学会:コンクリート標準示方書〔構造性能照査 編〕,2002.
- 9) 出羽克之・小川晃・木村克彦・吉武謙二・阿部忠・ 前之園司: T ヘッド鉄筋定着部の疲労性能確認試 験,第61回土木学会年次学術講演会, V-573, pp.1141-1142,2006.9
- 10) 吉武謙二・小川晃・木村克彦・出羽克之: せん断 補強筋比の異なる RC はりにおける T ヘッド鉄筋の せん断補強効果に関する研究,コンクリート工学 年次論文集, Vol.29, No.3, pp.721-726,2007.6