

# 論文 プレート定着型横方向鉄筋 Head-bar 技術の高度化に関する研究

三桶 達夫\*<sup>1</sup>・趙 唯堅\*<sup>2</sup>・谷村 幸裕\*<sup>3</sup>・田所 敏弥\*<sup>4</sup>

要旨：プレート定着型横方向鉄筋（以下 Head-bar と略す）は両端が半円形フックで 1 本ものの横方向鉄筋を対象としており，他の形状を有する横方向鉄筋の場合に対してその効果は必ずしも明確ではなかった。そこで，現在鉄道の開削トンネルで多用されている軸方向鉄筋を囲い込んだコの字形状の横方向鉄筋に対しても，Head-bar の効果の程度を確認する目的で，コの字かぶせ配筋案とそれに代わる Head-bar 代替案を選定し，壁試験体による交番載荷実験を 4 体実施した。その結果，Head-bar 代替案はコの字かぶせ配筋案と同等の性能を有することが確認された。

キーワード：耐震性能，横方向鉄筋，軸方向鉄筋拘束効果，コンクリート拘束効果，交番載荷実験

## 1. はじめに

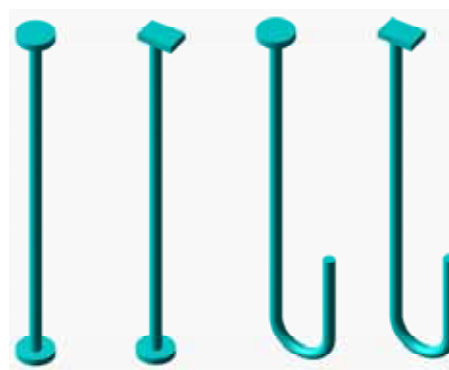
阪神大震災以後，コンクリート標準示方書等の諸指針が改訂され，横方向鉄筋や中間帯鉄筋の構造細目では，鋭角フックか半円形フックを用いることが標準とされている。しかし，壁や床などの面部材では，両端に鋭角曲げ加工を施した横方向鉄筋や中間帯鉄筋を，既に組み立てられた縦・横鉄筋にかけることは困難である。

そのため，機械式継手を用いたり，組立て手順の変更が必要になり，特に高密度配筋の場合，施工が困難となり，コスト高が生じている。

そのため，施工現場では，優れた施工性と確実な定着性能を持つ横方向鉄筋が強く求められていた。

そこで，配筋が容易で，定着性能が半円形フックと同等の性能をもつプレート定着型横方向鉄筋「Head-bar」を開発した。図-1 に Head-bar の概念図を示す。

開発に伴い過去に実施した壁部材の交番載荷実験では，半円形フックに比べ，Head-bar の定着性能，軸方向鉄筋座屈抑止性能，コアコンクリートに対する拘束効果，およびこれらを含む耐震性能は優れていることが確認された<sup>1)</sup>。



両端プレート 片端プレート・片端フック  
図-1 Head-bar 概念図

しかし，上述の比較実験は，両端が半円形フックである 1 本ものの横方向鉄筋を対象にしており，他の形状を有する横方向鉄筋の場合に対しては，その効果は必ずしも明確ではなかった。

現状では鉄道の開削トンネルにおいて，数本の軸方向鉄筋を囲い込んだコの字形状の横方向鉄筋と，そのフック側の定着・拘束効果を補完するためのコの字形状かぶせ鉄筋との組合せが多用されている。そこで，軸方向鉄筋を囲い込んだコの字形状の横方向鉄筋に対して，

\*1 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室 工修 (正会員)

\*2 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室主任研究員 工博 (正会員)

\*3 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造主任研究員 工修 (正会員)

\*4 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 工博 (正会員)

Head-bar の効果を確認する目的で、現状のコの字配筋と、それに代わる Head-bar 代替案を選定し、新たに壁供試体による交番載荷実験を 4 体実施した。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験概要

壁供試体の横方向補強筋として、現状案（コの字型横方向鉄筋+コの字かぶせ筋）1 体、Head-bar 代替案 3 タイプ 1 体ずつの合計 4 体を用意し、他の諸元を同一とした比較実験を行った。

性能比較にあたって、既往の研究から、本実験は特に、コアコンクリートへの拘束効果の違いによる大変形領域での部材変形性能に着目した。また、この理由から、供試体は曲げ破壊するように設計した。具体的には、以下の諸点を着目して比較評価を行った。

- (1) 軸方向鉄筋座屈
- (2) コアコンクリート損傷状況
- (3) 部材耐力及び部材変形性能
- (4) 履歴吸収エネルギー

### 2.2 実験ケース

本実験は壁構造を対象とし、横方向鉄筋の種類と形状のみをパラメータとし、図-2 に示す通り、供試体数（実験ケース数）を以下の 4 体とした。尚、CASE 1 が現在鉄道の開削トンネルで多用されている配筋で、CASE 2 が Head-bar の標準的な適用例である。CASE 3 は CASE 2 のフック側をコの字かぶせ筋で補強したもので、既往の実験<sup>1)</sup>により、コンクリート拘束効果が大きいと考えられるものとして CASE 4 を選定した。

- CASE 1：現状案（コの字型横方向鉄筋+コの字かぶせ筋）・基準供試体
- CASE 2：Head-bar 代替案 1（片端 Head-bar）
- CASE 3：Head-bar 代替案 2（片端 Head-bar+コの字かぶせ筋）
- CASE 4：Head-bar 代替案 3（両端 Head-bar）

### 2.3 供試体諸元

断面寸法は 600mm×1060mm の壁部材とし、せん断スパン比  $a/d=3.15$  とした。

軸方向鉄筋は D22@125、芯かぶり 60mm、全断面に対する軸方向鉄筋比は 0.01 とした。

配力筋は D16@250、軸方向鉄筋の内側に配置した。

横方向鉄筋は D16@125、軸方向鉄筋を囲い込み、供試体高さ方向には千鳥配置し、せん断鉄筋比は 0.006、軸力比で 0.1 とした。

コンクリート設計基準強度は  $24\text{N/mm}^2$  とし、軸力は 1272kN（軸圧縮応力は  $2.0\text{N/mm}^2$ ）とした。

試験体を代表して CASE1 の試験体概要図、計測位置図を図 3、4 に示す。

ここで、横方向鉄筋とは、コの字型筋・かぶせ筋・Head-bar 等のせん断補強鉄筋のことを示す。また、図 3、4 中 TNE、TSE 等の印は計測を行ったゲージ位置を示す。

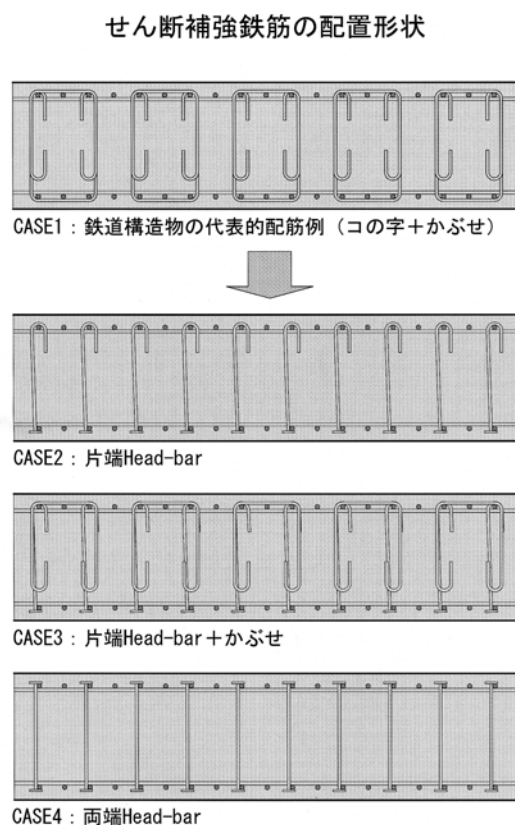


図-2 横方向鉄筋配筋比較

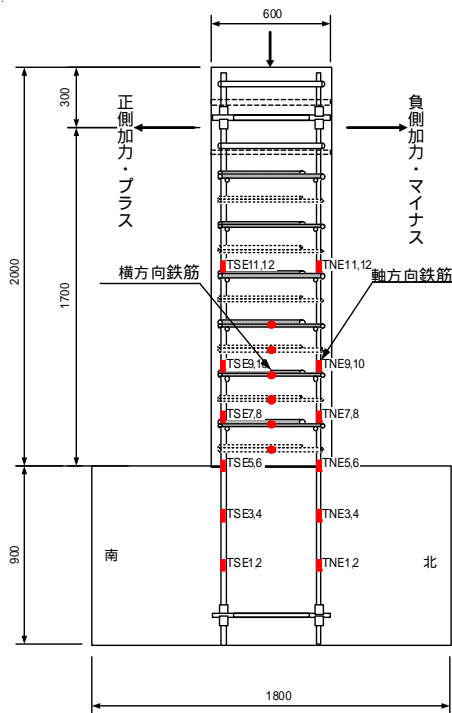


図-3 CASE1 試験体側面及びゲージ図

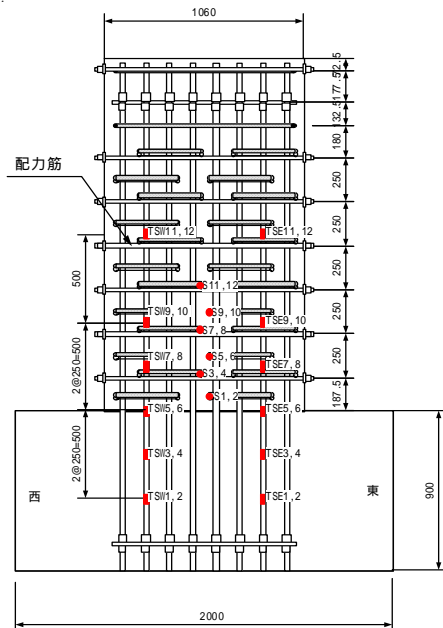


図-4 CASE1 試験体正面及びゲージ図

## 2.4 加力方法

荷重は軸力を先行荷重後、水平交番荷重(変位)を加える。降伏変位  $\pm y$  手前までは荷重制御、その後は変位制御とした。水平加力はフック側先行引張を正とし、パターンは  $\pm y$  の整数倍変位で3回ずつ繰り返して行った。降伏

変位  $\pm y$  は引張側鉄筋のひずみの平均が降伏値に達した時点以降降伏変位とした。

ここに、図-5中  $P_{cr}$  はひび割れ発生荷重を示す。

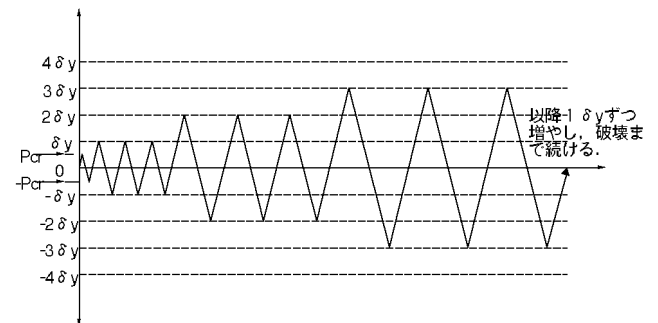


図-5 水平加力パターン

## 2.5 計測項目

計測項目としては以下の通りとした。

- ・鉛直荷重(軸力): 1点
- ・水平荷重: 2点
- ・柱頭水平変位: 2点
- ・区間変位: 20点
- ・軸方向鉄筋および横方向鉄筋のひずみ: 30箇所 60点

その他ひび割れ状況、コンクリート圧壊、かぶりコンクリート剥落、軸方向鉄筋座屈等の挙動を観察した。

## 2.6 使用材料の力学的性質

今回の実験で使用した材料の強度試験結果を表-1に示す。

表-1 使用材料特性

	$f_c'$ (N/mm <sup>2</sup> ) コンクリート強度	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> ) 軸方向鉄筋 降伏強度	$E_s$ (kN/mm <sup>2</sup> ) 軸方向鉄筋 弾性係数	$f_{wy}$ (N/mm <sup>2</sup> ) 横方向鉄筋 降伏強度
case1	33.2	382	200	383
case2	34.9	382	200	408
case3	32.6	382	200	408
case4	35.6	382	200	408

## 3. 実験結果および考察

実験結果について、CASE1, 2 について荷重 - 変位曲線のグラフおよび、実験終了時の基部の状況写真を代表して示す。

### 3.1 CASE1

CASE1 について、各イベントの発生時点を整理したものを、図-6 に示す。

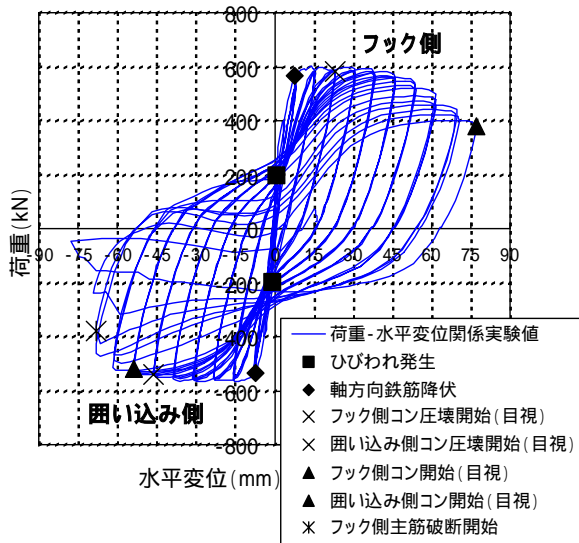


図-6 荷重 水平変位曲線

ひび割れ発生荷重は、 $\pm 200$  kN、降伏変位は平均で 7.7 mm であった。

7 y の頃から南面のコンクリートの圧壊が顕著になり、下から 2 段目の横方向鉄筋が降伏、南面軸方向鉄筋が座屈し、 $\pm 8$  y の頃から耐力が低下し始め、-9 y で南面軸方向鉄筋が 4 本破断し  $\pm 10$  y で北面のコンクリートが剥落し終局を迎えていた。破壊モードは曲げ破壊で実験終了時の部材変形角は  $\pm 10$  y ( $1/22$ ) であった。耐力低下の開始時期は、南面でかぶりコンクリートの圧壊、剥落および軸方向鉄筋の座屈した時点とほぼ一致しており、破断した軸方向鉄筋は南面で 4 本であった。

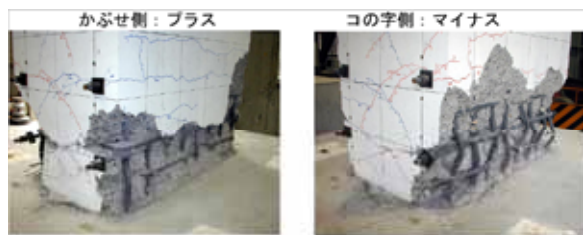


写真-1 基部破壊状況

写真より、軸方向鉄筋の座屈の腹は、1 段目と 2 段目の横方向鉄筋位置のほぼ中間である

基部より高さ約 200 mm の位置で発生しているものが多く、軸方向鉄筋の座屈が横方向鉄筋により拘束され座屈の節になっていることが分かる。

### 3.2 CASE2

CASE2 について、各イベントの発生時点を整理したものを、図-7 に示す。

ひび割れ発生荷重は、南面で -200 kN、北面で +120 kN、降伏変位は平均で 7.1 mm であった。北面でひび割れ荷重が低下していたのは、乾燥収縮の影響だと思われる。 $\pm 6$  y で軸方向鉄筋が座屈しはじめ、-7 y で南北両面のコンクリートの圧壊が顕著になり、横方向鉄筋が降伏、 $\pm 8$  y で南北両面のコンクリートの剥落が開始し、耐力が低下し始め、 $\pm 10$  y で軸方向鉄筋の破断が開始し、終局を迎えた。破壊モードは曲げ破壊で、耐力低下の開始時期はかぶりコンクリートの剥落および軸方向鉄筋の座屈した時点とほぼ一致していた。実験終了時の部材変形角は  $\pm 10$  y ( $1/24$ ) であった。

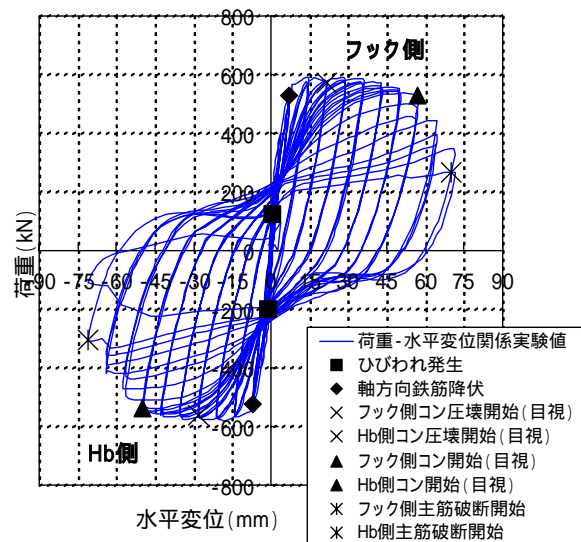


図-7 荷重 水平変位曲線

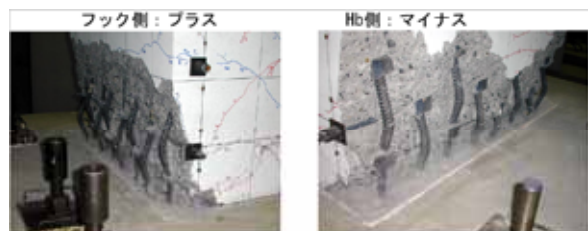


写真-2 基部破壊状況

破断した軸方向鉄筋は南面で7本、北面で1本であった。

写真より、軸方向鉄筋の座屈の腹は、基部より高さは約100mmと200mmと横方向鉄筋位置の中間位置にあり、軸方向鉄筋の座屈が横方向鉄筋により拘束され座屈の節になっていた。

### 3.3 CASE3

CASE3 について、ひび割れ発生荷重は、±200kN、降伏変位は平均で7.4mmであった。

6 y の頃から部材かどのかぶりコンクリートが縦方向に剥離し始め、横方向鉄筋が降伏を開始した。6 y ~ 7 y で軸方向鉄筋が座屈し始め、±8 y で耐力が低下、-9 y で南面軸方向鉄筋の破断が開始し終局を迎えていた。破壊モードは曲げ破壊であった。南面の軸方向鉄筋は最終的に6本破断していた。耐力低下の開始時期は、CASE1 2 の場合とほぼ一致していた。

### 3.4 CASE4

CASE4 について、ひび割れ発生荷重は、プラス側で+160kN、マイナス側で-140kN、降伏変位は平均で7.3mmであった。ひび割れ発生荷重の違いは、乾燥収縮の影響によるものと考えられる。

+5 y で下から2段目の横方向鉄筋が降伏を開始し、±8 y で軸方向鉄筋が座屈し始め、それに伴い耐力が低下し、-9 y ~ +10 y で南面軸方向鉄筋の破断が開始し、終局を迎えていた。破壊モードは曲げ破壊であった。破断した軸方向鉄筋の本数は南面で1本、北面で6本であった。コンクリートは±7 y から圧壊が顕著になりはじめ、終局時の南北面の損傷の程度はほぼ同じであった。耐力低下の開始時期は、CASE1, 2 の場合とほぼ一致していた。

## 4. 比較検討

### 4.1 終局変位および M - 関係について

図-8 に実験値と鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計<sup>2)</sup>による計算値の包絡線を比較したグラフを示した。

降伏変位については、ケース間の差が7.7mm

から7.1mmまで0.6mmあった。終局変位の算定については、P - 効果による補正を行った。荷重 - 水平変位曲線において降伏荷重を保持できる最大変位を終局変位とした。

各実験の降伏荷重を表-2に示す。

なお、鉄道標準計算値に対しても、P - 効果による水平荷重の減少量を考慮して算出を行った。表-3より、終局変位の大きさについては、CASE1 が一番大きく、CASE4 CASE2 CASE3 の順に小さくなっていった。

表-2 降伏荷重

	正側降伏荷重 (kN)	負側降伏荷重 (kN)	平均値 (kN)
CASE1	565.4	-535.5	550.45
CASE2	530.5	-522.2	526.35
CASE3	547.0	-541.1	544.05
CASE4	552.8	-533.0	542.9

表-3 終局変位

	正側終局変位 (mm)	負側終局変位 (mm)	平均値 (mm)
CASE1	+62.09	-64.33	63.21
CASE2	+59.80	-56.39	58.10
CASE3	+56.03	-57.87	56.95
CASE4	+58.91	-57.76	58.34

計算値：60.35mm

M - 関係については各試験体の荷重 - 変位曲線の実験値と「鉄道構造物等設計標準 耐震設計」により求めた骨格曲線は、いずれのケースにおいても概ね整合していた。

図8に実験結果を代表してCASE1, CASE2の実験結果と鉄道標準計算値を示す。図中の降伏荷重平均値は全ケースの±1 y時の降伏荷重平均値を示す。

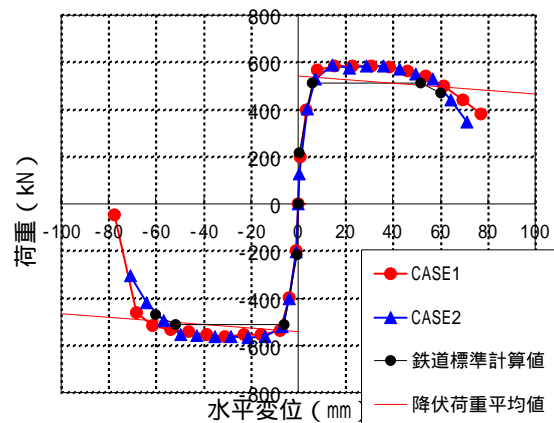


図-8 実験値と鉄道標準計算値比較<sup>2)</sup>



#### 4.2 エネルギー吸収性能について

各荷重ステップにおいて、供試体が吸収した履歴吸収エネルギーの算定を行った。ここで、履歴吸収エネルギーは荷重-水平変位関係において、履歴曲線に囲まれた面積により算定した<sup>3)</sup>。ただし、実験では変位制御で荷重しているため、各荷重ステップにおいて、荷重開始点と1サイクルの荷重を終えて戻ってきた点の水平荷重が一致しない。このため、ここでは図-9に示される定義に基づき、図中の曲線 ABCDEFA に囲まれる部分の面積を履歴吸収エネルギーとして算定した。7 y-3 サイクルまでの履歴エネルギー吸収性能は CASE1 が一番大きく CASE3 と CASE4 がほぼ同等で CASE2 が一番小さくなっていった。これは降伏変位の大きさに依存しているものと考えられた。

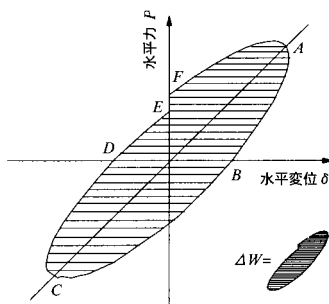


図-9 吸収エネルギーの算定方法<sup>3)</sup>

図-10に各1サイクル目における履歴吸収エネルギーを各々の変形角で除した、単位変形角あたりの履歴吸収エネルギーを示した。

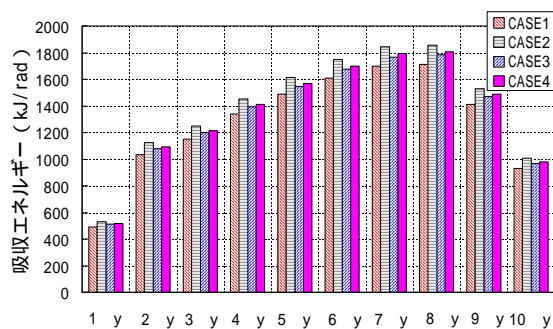


図-10 単位変形角当りの履歴吸収エネルギー

履歴エネルギー吸収性能は CASE2 CASE4 CASE3 CASE1 の順に小さくなっているが、

CASE2に対して全般的に92%~97%とほぼ同等であったといえることができると思われる。

#### 5. 結論

今回の実験により以下の結論が得られた。

- (1) 荷重初期から部材終局に至るまでの、個々の事象の発生時期や程度などには若干差はあるが、バラツキの範囲にあるものと思われる。すなわち、部材の耐力や、変形性能、コアコンクリートの損傷状況、横方向鉄筋による軸方向鉄筋の座屈防止効果について言えば、各ケースの間では有意な差が認められなかった。
- (2) 本実験の諸元では、各ケースともに終局時の部材のじん性率は約8程度、部材変形角では1/30程度と優れた変形性能を有していた。また、図-8より実験で得られた部材の非線形特性(M- 関係など)は「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計」に基づいて算定される変形性能を満足していることが確認された。
- (3) 各試験体の変形角で無次元化して求めた単位変形角あたりの履歴吸収エネルギーの比較を行ったが、各ケースの間では、有意な差は認められなかった。

よって、本実験に用いた部材形状、配筋、軸力比等の条件下においては、横方向鉄筋の定着方法に「コの字+かぶせ」配筋の代替としてHead-barを用いても、同等の部材耐力および変形性能が確保出来ることが確認された。

#### 参考文献

- 1) 小林 昭男, 趙 唯堅, 田中良弘: プレート定着型せん断補強鉄筋を用いた部材の耐震性能, 第21回コンクリート工学年次大会論文集, pp.1309-1314, 1999.7
- 2) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, pp.141-149, 丸善, 1999.11
- 3) 建設省土木研究所ほか: 鉄筋コンクリート橋脚の耐震性に及ぼす寸法効果の影響に関する共同研究報告書, p.91, 1999.10