

プレート定着型せん断補強鉄筋Head-bar 工法の実績及び高度化

三桶 達夫*¹・趙 唯堅*²・加納 宏一*¹

Keywords : capacity of earthquake resisting, shear reinforcement bars, effect on confinement of principal bars, effect on confinement of concrete, cyclic loading test

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

当社が開発したプレート定着型せん断補強鉄筋「Head-bar」（製造・販売元：VSL JAPAN 株式会社）の販売実績が平成 16 年度中に 400 万本を達成する勢いである。

同工法は既に（財）土木研究センターによる建設大臣技術認定を取得済みであり、ボックス・カルバートや地中構造物の壁や床版の従来のフック定着のせん断補強筋の代わりに配筋され、配筋作業効率化による工期短縮や、施工品質の画期的な向上に寄与してきた。

また、今回Head-barの新たな適用性の確認を目的として、現在鉄道の開削トンネルで多く用いら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の代わりに、Head-barを用いた試験体による実験を実施した。その結果、Head-barを用いた場合でもコの字かぶせ配筋と同等の性能を有することが確認され、（財）鉄道総合技術研究所の技術評価を受けた。

Head-bar は、従来の半円形フックと同等以上の定着性能を持つせん断補強鉄筋で、半円形フックでは主鉄筋組立後の施工が困難であった場所にも簡単に施工することができる。主鉄筋や帯鉄筋の間に後から挿入するだけで済むため、工期の大幅な短縮を可能となった。

Head-bar は、従来のフック定着の代りに、せん断補強鉄筋の端部にプレートを取りつけてコンクリートに定着させるものである。プレートと鉄筋の接合には、高速回転させているプレートに鉄筋を押しつけて接合する摩擦圧接方式を用いている。プレートの寸法は鉄筋径とコンクリート強度から決まり、両端プレートタイプと片端プレート・他端鋭角フックタイプを配筋に応じて選択する事が出来る。Head-bar を用いた配筋例を図-1 に示す。

Head-bar の施工性は実績によって証明されている。

Head-bar を適用した実施工例によると、鉄筋の組立て時間がおおよそ 20～40%短縮され、鉄筋工費も 5～10%削減出来た。

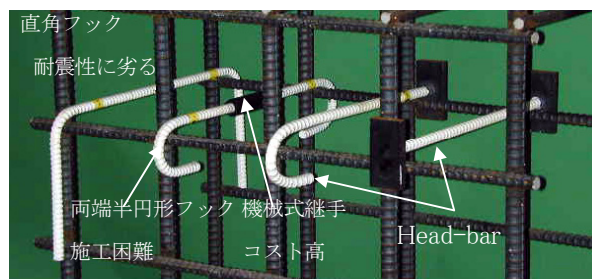


図-1 横方向鉄筋配筋例
Shear reinforcement bars

Head-bar は平成 11 年 9 月の建設大臣技術認定をはじめ、平成 13 年 3 月に鉄道 ACT 研究会 PR 対象工法に認定され、土木学会コンクリート標準示方書（2002 年度版）改定資料に、鉄筋の定着方法として付着力またはフックによる定着以外の定着構造例（プレート定着）として、試験で判定が出来ている例として紹介された。また、平成 14 年 1 月に国土交通省新技術提供システム

（NETIS）に登録され、広く一般工事に活用できる工法となった。適用構造物も鉄道・道路橋梁下部工、シールド発進立坑、トンネル、ボックスカルバート、LNG 地下タンクと多くの土木構造物で採用されるまでに至っており、施工先は、国土交通省、首都高速道路公団、J R 東日本、鉄建公団、日本道路公団、下水道事業団、東京都、等で採用されている。

開発の段階で実施した壁部材の繰返し載荷実験では、半円形フックと比較しても遜色のない耐震性能をもつことが現在までに確認されていた。しかし、それらの実験は、両端が半円形フックで 1 本ものの横方向鉄筋を対象にしており、他の形状をもつ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。

* 1 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室

* 2 技術センター土木技術開発部ダクトル事業推進室

そこで今回新たに、現在鉄道の開削トンネルで用いら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の代わりに、Head-bar を用いた時の効果を確認するため、コの字かぶせ配筋と Head-bar を用いた壁試験体による繰り返し載荷実験を行った。

以下に今回行った実験について報告する。

2. 実験目的

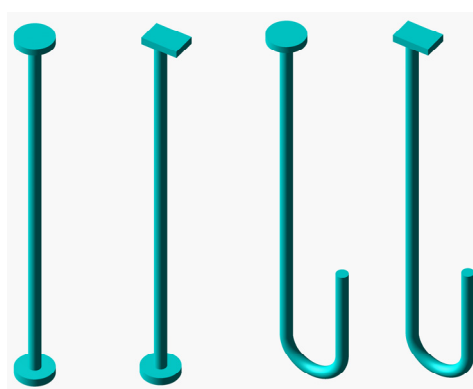
阪神大震災以後、コンクリート標準示方書等の諸指針が改訂され、横方向鉄筋や中間帯鉄筋の構造細目では、鋭角フックか半円形フックを用いることが標準とされている。しかし、壁や床などの面部材では、両端に鋭角曲げ加工を施した横方向鉄筋や中間帯鉄筋を、既に組み立てられた縦・横鉄筋にかけることは困難である。

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-2 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従来の半円形フックと比較して、優れていることが確認されていた¹⁾。



両端プレート 片端プレート・片端フック

図-2 Head-bar 概念図
Images of Head-bars

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、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 体実施しました。

3. 実験方法

3.1 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なった。

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

3.2 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-3 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¹⁾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）

3.3 供試体諸元

断面は 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。

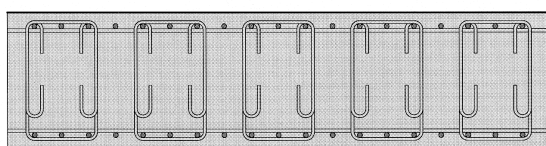
横方向鉄筋は D16@125、軸方向鉄筋を囲い込み、供試体高さ方向には千鳥配置し、せん断鉄筋比は 0.006、軸力比で 0.1 とした。

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

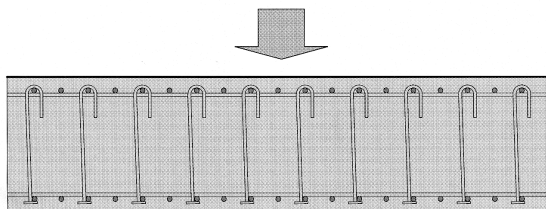
試験体を代表して CASE1 の試験体概要図、計測位置図を図-4、5 に示す。

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-4、5 中 TNE、TSE 等の印は計測を行ったゲージ位置を示す。

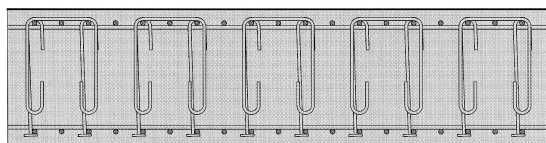
せん断補強鉄筋の配置形状



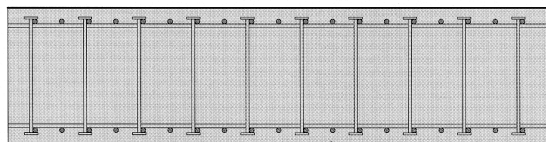
CASE1：鉄道構造物の代表的配筋例（コの字+かぶせ）



CASE2：片端Head-bar



CASE3：片端Head-bar+かぶせ



CASE4：両端Head-bar

図-3 横方向鉄筋配筋比較

Cases of shear reinforcement bars

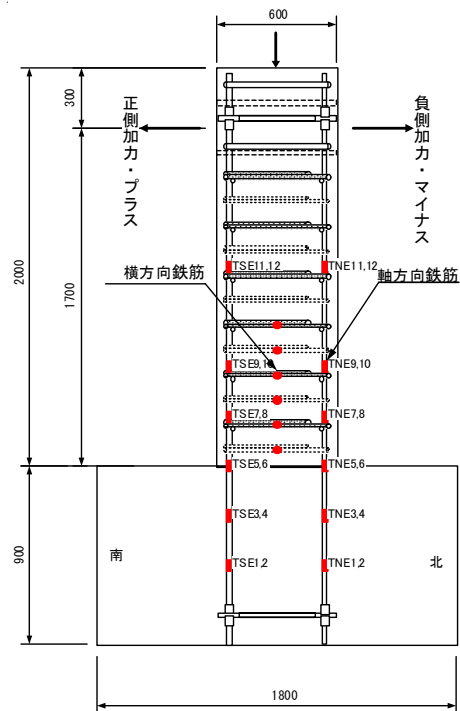


図-4 CASE1 試験体側面及びゲージ図
Specimen of case1

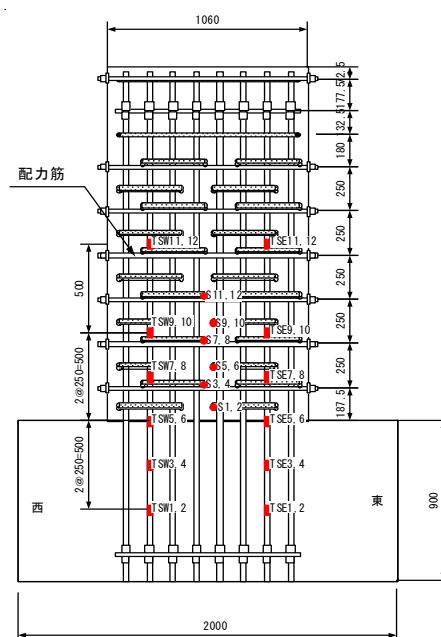


図-5 CASE1 試験体正面及びゲージ図
Specimen of case1

3.4 加力方法

載荷は軸力を先行載荷後、水平交番荷重（変位）を加える。降伏変位 $\pm \delta y$ 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 $\pm \delta y$ の整数倍変位で3回ずつ繰り返して行った。降伏変位 $\pm \delta y$ は引張側鉄筋のひずみの平均が降伏値に達した時点を降伏変位とした。

ここに、図-6 中 P_{cr} はひび割れ発生荷重を示す。

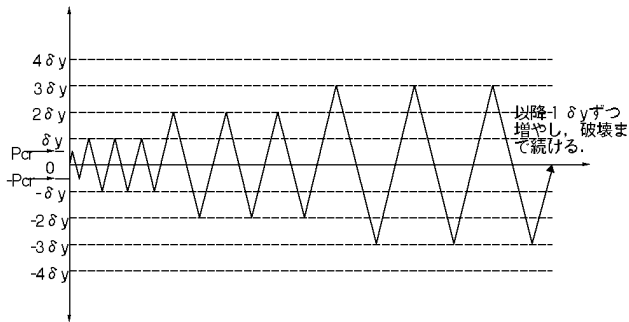


図-6 水平加力パターン
Pattern of cyclic loading

3.5 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。

3.6 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
Characters of materials

	f_c' (N/mm ²) コンクリート強度	f_y (N/mm ²) 軸方向鉄筋 降伏強度	E_s (kN/mm ²) 軸方向鉄筋 弾性係数	f_{wy} (N/mm ²) 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

4. 実験結果および考察

荷重－変位曲線の実験結果および、CASE1、2 について実験終了時の基部の損傷状況写真を代表して示す。

4.1 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-7 に示す。

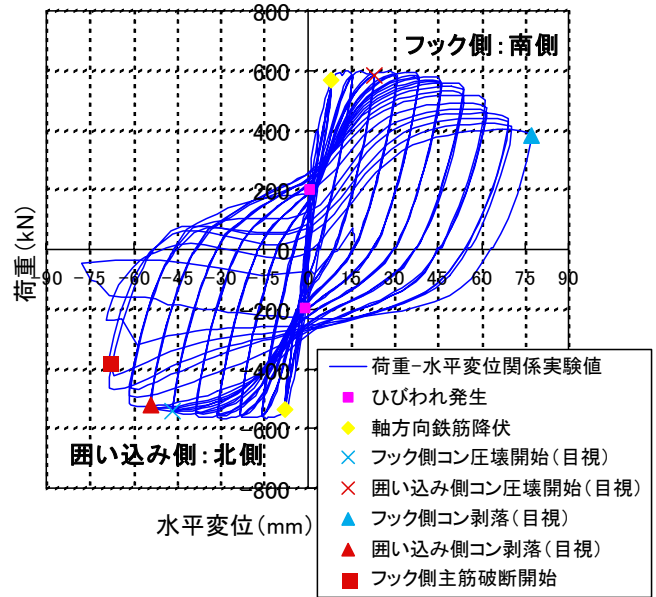


図-7 荷重-水平変位曲線 (CASE1)
Typical load-lateral displacement curve

ひび割れ発生荷重は、±200kN、降伏変位は平均で 7.7mm であった。

7δy 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、±8δy の頃から耐力が低下し始め、-9δy で南面軸方向鉄筋が 4 本破断し±10δy 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±10δy (1/22) であった。耐力低下の開始時期は、かぶりコンクリートの圧壊が顕著になり、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。

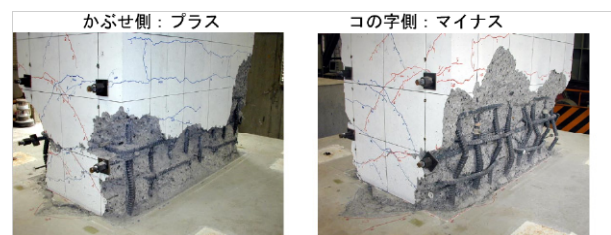


写真-1 基部破壊状況
Failure of specimen

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 200mm 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。

4.2 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-8 に示す。

ひび割れ発生荷重は、南面で-200kN、北面で+120kN、降伏変位は平均で 7.1mm 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。 $\pm 6 \delta y$ で軸方向鉄筋が座屈しはじめ、 $-7 \delta y$ 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、 $\pm 8 \delta y$ で南北両面のコンクリートの剥落が開始、軸方向鉄筋が座屈し耐力が低下し始め、 $\pm 10 \delta y$ 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 $\pm 10 \delta y$ (1/24) であった。

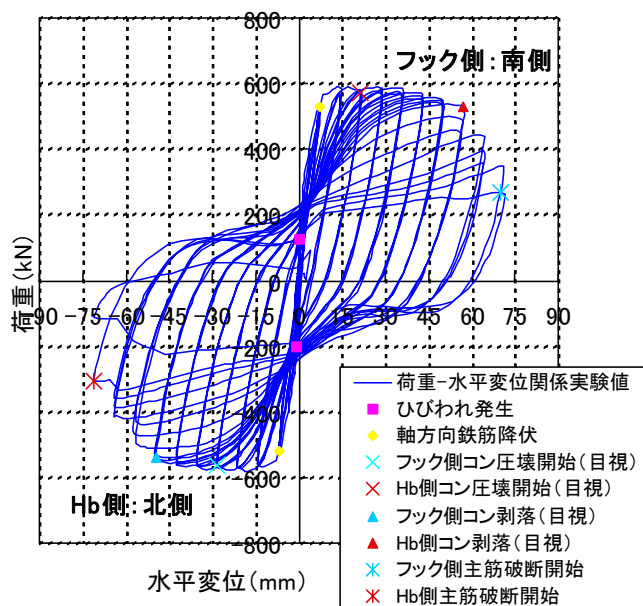


図-8 荷重-水平変位曲線(CASE2)
Typical load-lateral displacement curve

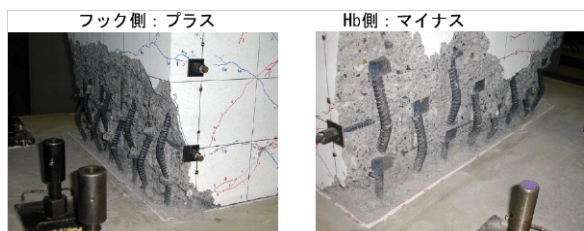


写真-2 基部破壊状況
Failure of specimen

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。

4.3 CASE3

CASE3 について、各イベントの発生時点を整理したものを、図-9 に示す。

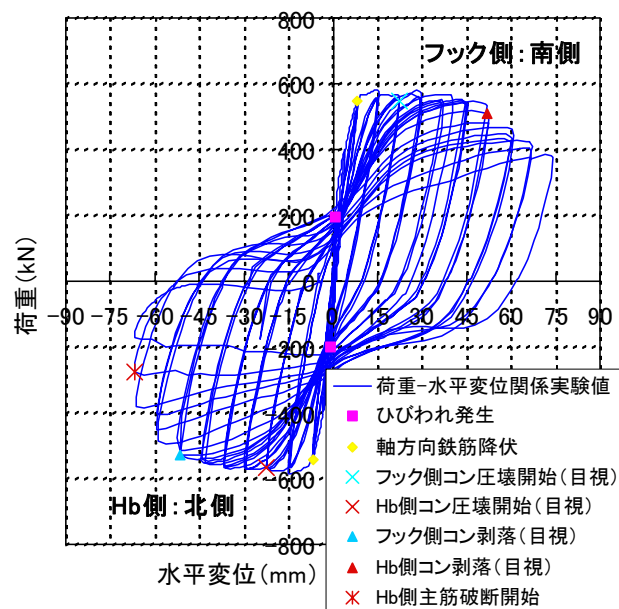


図-9 荷重-水平変位曲線(CASE3)
Typical load-lateral displacement curve

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

$6 \delta y$ 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。 $6 \delta y \sim 7 \delta y$ で軸方向鉄筋が座屈し始め、 $\pm 8 \delta y$ で耐力が低下、 $-9 \delta y$ 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。

4.4 CASE4

CASE4 について、各イベントの発生時点を整理したものを、図-10 に示す。

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。

$+5 \delta y$ で下から 2 段目の横方向鉄筋が降伏を開始し、 $\pm 8 \delta y$ で軸方向鉄筋が座屈し始め、それに伴い耐力が低下し、 $-9 \delta y \sim +10 \delta y$ 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 $\pm 7\delta y$ 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。

表-2 降伏荷重
Yield load

	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
Final lateral displacement

	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

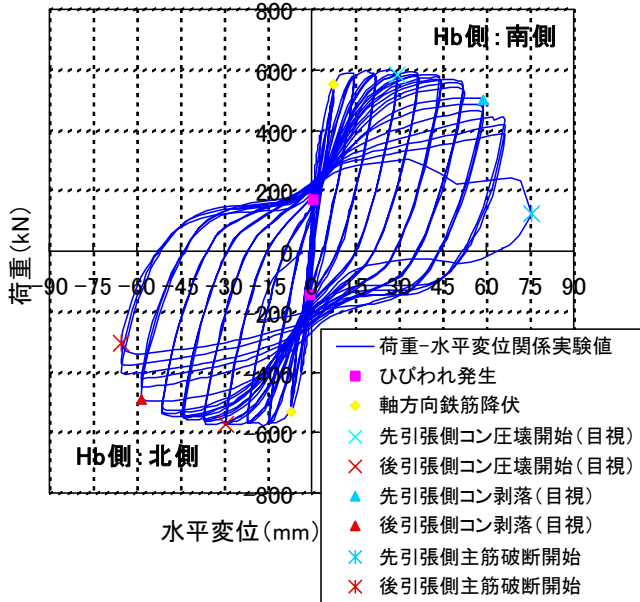


図-10 荷重-水平変位曲線(CASE4)
Typical load-lateral displacement curve

5. 比較検討

5.1 終局変位およびM- θ 関係について

図-11 に実験値と鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計²⁾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、 $P-\delta$ 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、 $P-\delta$ 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た。

M- θ 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-11 に実験結果と鉄道標準による計算値を示す。図中の降伏荷重平均値は全ケースの $\pm 1\delta y$ 時の降伏荷重の平均値を示す。

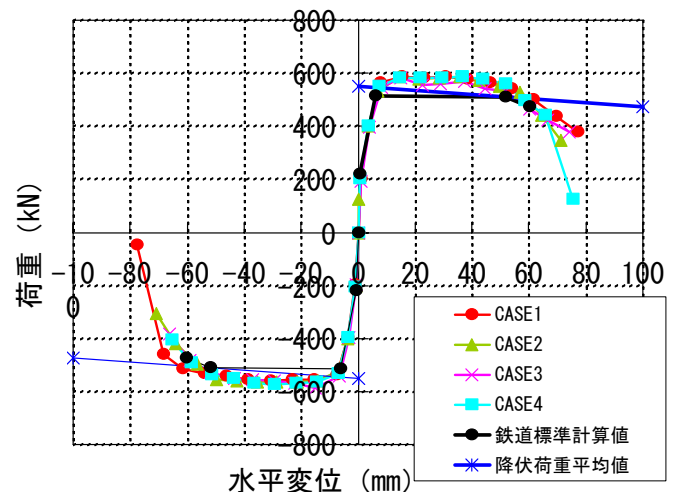


図-11 実験値と鉄道標準計算値比較²⁾
Comparison design value with experimental value

5.2 エネルギー吸収性能について

各载荷ステップにおいて、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³⁾。ただし、実験では変位制御で载荷しているため、各载荷ステップにおいて、载荷開始点と1サイクルの载荷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-12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。

表 4 より、7δy-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た。これは降伏変位の大きさに依存していたものと考えられる。

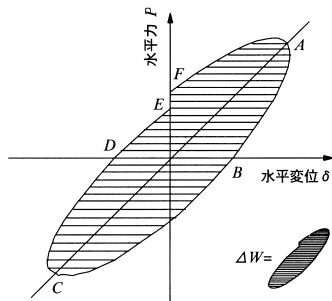


図-12 吸収エネルギーの算定方法³⁾
Method of energy absorptency calculation

表-4 履歴吸収エネルギー
Energy absorptency

塑性率	繰返し回数	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
1	1	2.222	1.846	2.040	2.186
	2	1.273	1.218	1.226	1.265
	3	1.147	1.036	1.073	1.140
2	1	9.381	8.713	9.544	8.614
	2	6.547	6.118	6.480	6.407
	3	5.970	5.508	5.770	5.653
3	1	15.642	14.698	15.391	15.171
	2	14.012	12.768	13.398	13.496
	3	13.681	12.425	12.650	12.599
4	1	24.274	22.129	22.407	22.600
	2	23.036	20.534	21.986	21.537
	3	22.428	20.455	20.588	21.038
5	1	33.667	30.583	34.091	31.490
	2	33.124	28.922	29.534	30.235
	3	31.984	28.697	29.320	30.081
6	1	43.760	39.132	39.088	40.647
	2	42.811	38.200	40.038	39.952
	3	42.432	36.972	39.222	38.990
7	1	53.861	47.906	50.355	50.401
	2	53.830	46.660	50.228	48.692
	3	52.953	45.843	47.007	48.395
8	1	62.059	56.310	55.129	57.221
	2	56.181	52.096	50.102	53.794
	3	49.677	46.952	46.511	50.746
9	1	57.507	51.986	53.065	57.115
	2	52.596	46.789	45.935	53.559
	3	47.810	43.940		50.256
10	1	42.133	48.464		
	2		36.086		
	3				
累積値 (7δy-3まで)		528.035	470.363	491.437	490.588

図-13 に各サイクル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。

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うことができると思われる。

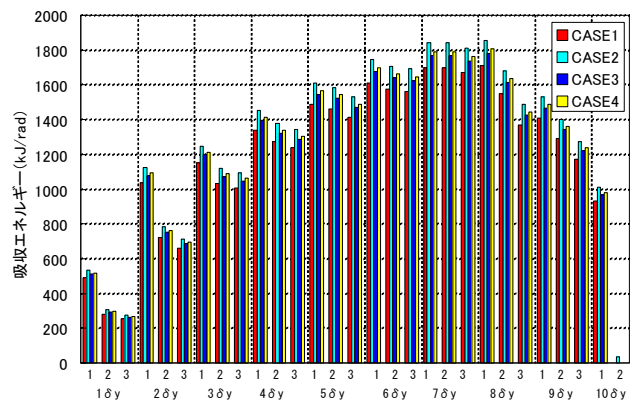


図-13 単位変形角あたりの履歴吸収エネルギー
Energy absorptency per deformation angle

6. 結論

今回の実験により以下の結論が得られた。

載荷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。

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-9 より実験で得られた部材の非線形特性 (M-θ 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。

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及び寸法効果の影響に関する共同研究報告書, p.91, 1999.10