

論文 中間帯鉄筋にプレート定着型せん断補強鉄筋を用いた単柱試験体の正負交番繰返し載荷試験

府川 徹^{*1}・福浦 尚之^{*2}

要旨：プレート定着型せん断補強鉄筋を中間帯鉄筋として使用した場合の単柱試験体の破壊までの挙動を，両端半円形フックを有する中間帯鉄筋の場合のそれと比較した。断面寸法 640mm×1040mm，載荷スパン 1900mm，軸方向鉄筋比 1.52%，横拘束鉄筋体積比 1.55%，軸応力 2N/mm²の同一条件下における載荷試験結果から，本実験においてはプレート定着型中間帯鉄筋試験体の最大荷重，終局変位，および破壊と判断した状態での水平変位と水平荷重は半円形フック中間帯鉄筋試験体のそれらとほぼ同程度であった。

キーワード：中間帯鉄筋，プレート定着，半円形フック，最大荷重，終局変位，破壊

1. はじめに

帯鉄筋，中間帯鉄筋などの横拘束鉄筋の配置は，RC柱部材の変形性能を改善するのに有効であるが，そのためにはコアコンクリートの拘束効果が低下しないように横拘束鉄筋を確実に定着させることが重要である。中間帯鉄筋の場合には，両端で帯鉄筋を確実に拘束しつつ定着するために，種々の規準で鋭角フックや半円形フックの曲げ半径や余長などを規定し，確実な拘束と定着を図っている。

しかし，これらのフックによる確実な定着と引き換えに，横拘束鉄筋の配置量が多い場合には，配筋の難度や配筋密度の増大によるコンクリートの打込みの難度が上がることが懸念される。近年，配筋作業の容易さや鉄筋コンクリートの品質に影響を与えるこれらの問題を解決するために，機械式定着¹⁾を有するせん断補強鉄筋の比較²⁾などが報告されている。

プレート定着型せん断補強鉄筋³⁾（以下，プレート定着型鉄筋と略記）は，従来の半円形フック等を鉄筋に摩擦圧接した定着プレートで置き換えたものである。通常は片端を定着プレートに置き換え，その大きさは半円形フックよりも小さいことから，軸方向鉄筋・配力鉄筋を組んだ後に一方から差し込む形でせん断補強鉄筋を組み立てることができる。その配筋作業の容易さから新設RC構造物のせん断補強鉄筋として，これまでボックスカルバートや立坑など地中構造物の壁・スラブや，橋梁下部工のうちフーチングなどへ適用されてきた。

しかし，比較的大きな変形性能が必要とされる橋脚などに対しては，プレート定着型鉄筋を横拘束鉄筋として使用した柱部材への載荷試験³⁾による耐荷・変形性能などの確認は実施されているものの，適用が十分に進んで

いるとは言えない。また，平成 24 年度に改訂された道路橋示方書 V 耐震設計編⁴⁾では，プレート定着型鉄筋などのように端部に定着体を取り付けた鉄筋の中間帯鉄筋への適用に際しては，「正負交番繰返しの作用を受ける場合に，鉄筋コンクリート橋脚としての破壊までの挙動も含めて鋭角フックや半円形フックと同等の効果が期待できることが実験により確認されていること等に留意する必要がある」と記されている。

このような背景から，本論文では，破壊までの挙動を含めた載荷を行い，横拘束鉄筋を有する単柱式橋脚を模した試験体において，プレート定着型鉄筋を中間帯鉄筋として使用した試験体（以下，プレート定着型試験体と略記）の水平荷重－水平変位関係，損傷状態などを，両端に半円形フックを有する中間帯鉄筋を使用した試験体（以下，半円形フック試験体と略記）のそれらと比較した。なお，破壊までの挙動とは，終局変位以降に水平方向の復元力が失われる状態までの挙動⁴⁾とされていることから，これを念頭に載荷を計画した。このような領域までを対象として，従来の半円形フックを使用した部材との比較を行った例は数少なく，設計を大きく上回る地震作用に対する破壊までの挙動について実験的に比較検討することは重要であると考えられる。

2. 実験概要

本実験では，中間帯鉄筋にプレート定着型試験体 1 体と半円形フック試験体 1 体の計 2 体について静的正負交番繰返し載荷を行い，載荷試験結果を比較，検討した。

2.1 試験体の主な諸元

表－1 に試験体の主な諸元を，表－2 に試験体のせん断耐力等を，図－1 に試験体の形状および配筋を各々示

*1 大成建設株式会社 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 大成建設株式会社 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 博 (工) (正会員)

す。両試験体は中間帯鉄筋の種類以外は同一である。

試験体の諸元は、単柱式橋脚を対象としつつ、コアコンクリートの中央部に両側をプレート定着型鉄筋に挟まれたセルを配置することで、単柱式橋脚以外にも壁式橋脚への適用性も検討対象に含めることを考慮して定めた。

断面寸法、鉄筋径、鉄筋間隔などについては概ね標準的な値とし、軸方向鉄筋径と横拘束鉄筋径については実構造物における組合せを考慮した。また、標準的な橋脚に作用する軸力として基部軸応力を 2 N/mm^2 とした。

中間帯鉄筋の仕様は道路橋示方書に準じ、両試験体の半円形フックの余長は、 128mm (8ϕ : ϕ は鉄筋径) とし、プレート定着型試験体では、プレート定着型鉄筋は基本的には軸方向鉄筋・帯鉄筋の一方にかける³⁾ことから、その両端を帯鉄筋に鉛直にかける配置とした。また、道路橋示方書では帯鉄筋とともに軸方向鉄筋にもかけるようにするのがより効果的であるとされている⁴⁾ことから、半円形フック試験体ではその配置を採用した。

2.2 使用材料の物性値

表-3 に鉄筋の降伏強度と弾性係数を、表-4 に試験区間に打設したコンクリートの載荷試験時の圧縮強度と弾性係数を、表-5 に同コンクリートの配合を各々示す。

鉄筋の材質は軸方向鉄筋・横拘束鉄筋ともに SD390 とした。また、プレート定着型鉄筋の定着プレートは、材質 SM490、幅 40mm ×高さ 72mm ×厚さ 12mm の矩形プレート³⁾とした。

2.3 載荷方法

試験体への鉛直載荷は、基部軸応力が 2 N/mm^2 となるように 1331.2kN の軸力を作用させ、水平載荷中に一定値

となるよう制御した。制御用の変位測定位置は、加力位置と同じく柱基部から高さ 1900mm の位置とした。

図-2 に試験体の載荷装置の側面図を示す。正載荷は水平加力機のスロークが伸びる方向とし、正方向から載荷を開始した。

水平載荷は次に示すステップで実施した。まず、 $\pm 500\text{kN}$ までは荷重制御により正負 1 回載荷した。その後、軸方向鉄筋のひずみを確認しながら変位制御により

表-1 試験体の主な緒元

載荷方向幅(mm)		640	
載荷直角方向幅(mm)		1040	
載荷高さ(mm)		1900	
せん断スパン比 (a/d)		3.33	
軸方向鉄筋	本数－径@間隔(mm)		20-D25@100
	総断面積(mm ²)		5067
	軸方向鉄筋比(%)		1.52
横拘束鉄筋	帯鉄筋	径@間隔(mm)	D16@150
	中間帯鉄筋	本数－径@間隔(mm)	2-D16@300
	総断面積(mm ²)		794.4
	体積比 ρ (%)		1.55
基部応力(N/mm ²)		2.0	

表-2 試験体のせん断耐力

せん断耐力 (kN)	コンクリート負担分 (V_c)	468
	鉄筋負担分 (V_s)	1179
	全せん断耐力 ($V_c + V_s$)	1647
曲げ耐力時のせん断力 (V_{mu} : kN)		800
V_{mu} に対する各種せん断耐力の比	$V_c + V_s$	2.06
	$V_c + \text{帯鉄筋負担分}$	1.32
	V_c	0.59

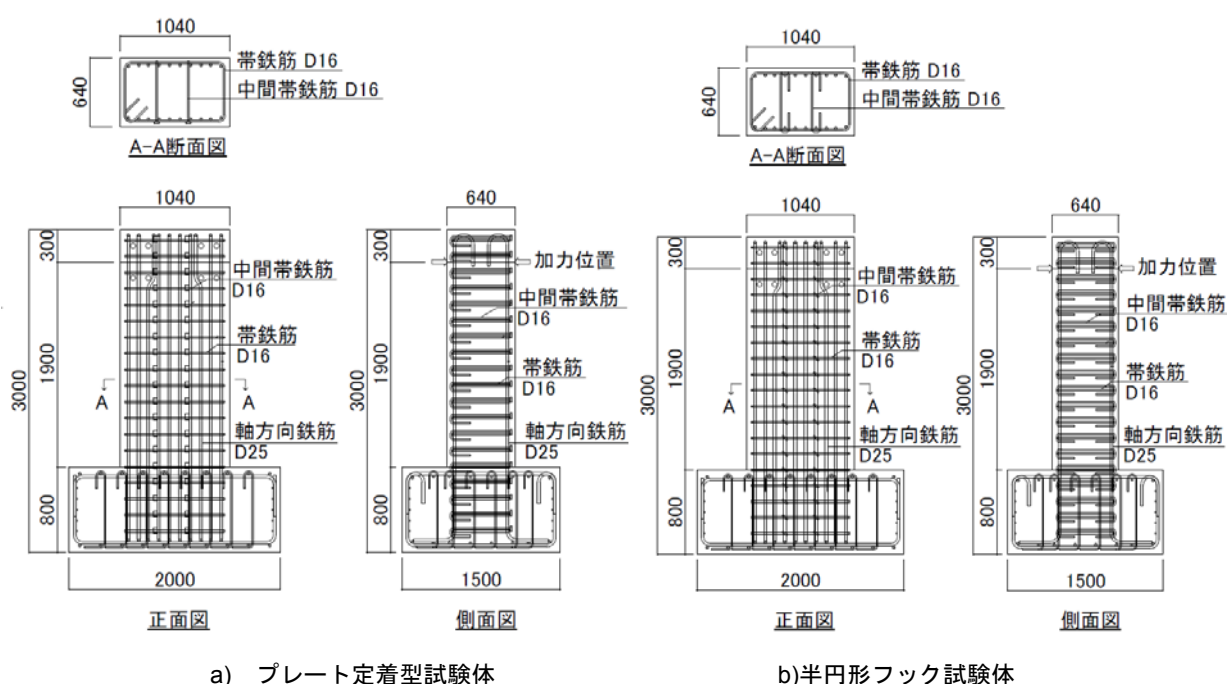


図-1 試験体の形状および配筋

表-3 鉄筋の降伏強度と弾性係数

鉄筋種	径	材質	降伏強度 (N/mm ²)	弾性係数 ($\times 10^5$ N/mm ²)
軸方向鉄筋	D25	SD390	449	1.82
帯鉄筋 中間帯鉄筋	D16		433	1.81

表-4 コンクリートの圧縮強度と弾性係数

(現場封緘養生)

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	材齢 (日)	弾性係数 ($\times 10^4$ N/mm ²)
半円形フック	27.3	24	3.40
プレート定着型	27.9	33	3.35

表-5 コンクリート配合表

Gmax (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	セメント 種別	単位量(kg/m ³)				
						セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
20	15 $\pm$ 2.5	4.5 $\pm$ 1.5	62.4	45.0	H	261	163	842	1053	2.35

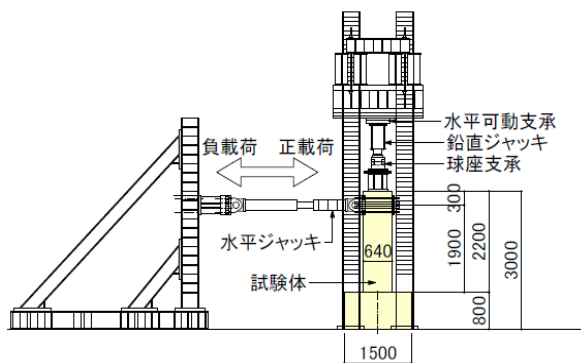


図-2 荷重装置側面図

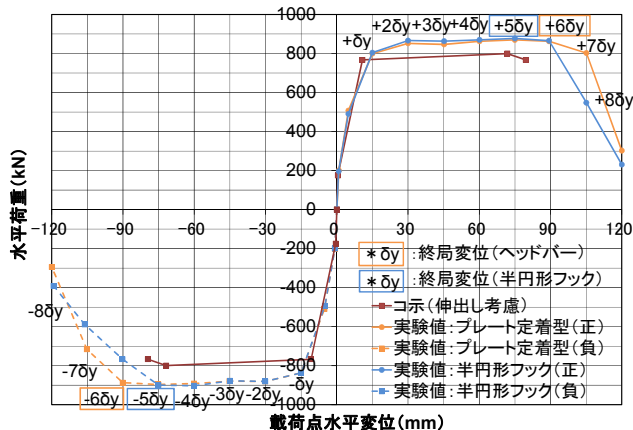


図-4 荷重包絡線

荷重した。降伏変位が15mmと得られた後は、変位制御にて降伏変位の整数倍の強制変位を与え、各荷重ステップで3回の正負繰返しを伴う漸増荷重を行った。両試験体とも $\pm 7\delta y$ の荷重終了状態で最大水平荷重の半分以下となり、 $\pm 8\delta y$ の1回目の荷重でも荷重がさらに低下したことから試験体の破壊と判断し、試験を終了した。

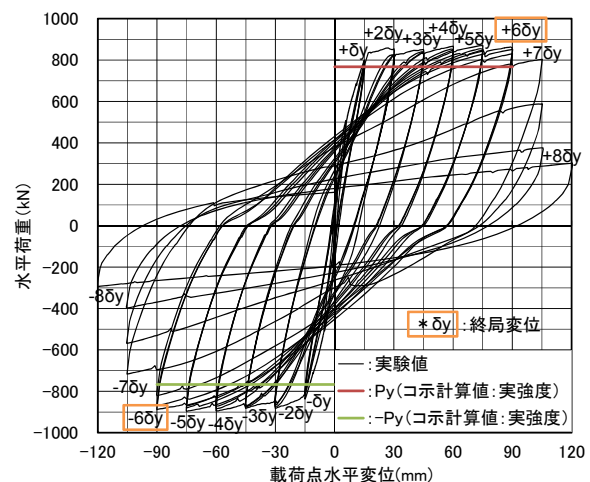
3. 実験結果

3.1 終局変位までの挙動

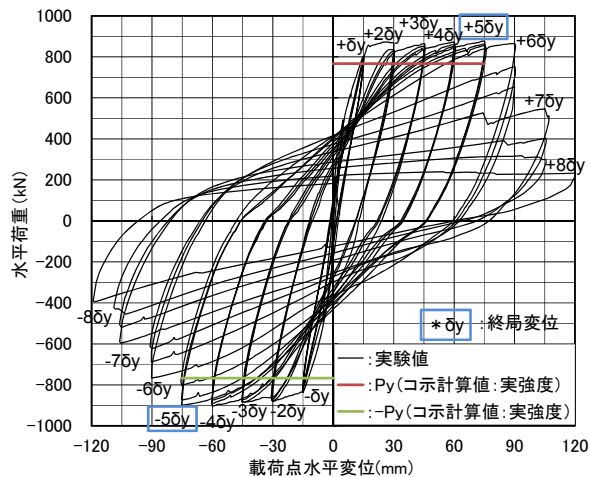
図-3に水平荷重-水平変位関係における、図-4に荷重包絡線におけるプレート定着型試験体と半円形フック試験体との比較を各々示す。

最大荷重は両試験体でほぼ同程度であった。

鉄筋定着・継手指針¹⁾では、最大荷重以降の荷重低下



a) プレート定着型試験体



b) 半円形フック試験体

図-3 水平荷重-水平変位関係

領域において、降伏荷重を下回らない最大変位を終局変位としている。本論文では、繰返し3回目の水平荷重が実材料強度に基づく降伏荷重の計算値($P_y=767$ kN)⁵⁾を下回らない最大水平変位を終局変位とした。これより、図-3に示すようにプレート定着型試験体の終局変位は $\pm 6\delta y$ 、半円形フック試験体では $\pm 5\delta y$ となった。

また、図-4に示すように、両試験体の実験値は、コンクリート標準示方書に基づく伸出しを考慮した骨格曲線⁵⁾における最大荷重および終局変位の計算値とともに

満足した。

表－6 に、各試験体の終局変位とした載荷サイクルにおける1回目と3回目の両試験体の基部の損傷状況を示す。

負載荷時圧縮側の3回目終了時に、基部の損傷が進展しているものの、両試験体に明確な損傷状況の違いは見られず、終局変位状態における損傷の性状はほぼ同程度と判断した。

また、中間帯鉄筋のひずみについて、各載荷サイクルの正負1回目におけるひずみの試験体高さ方向の分布を図－5に示す。図中の各高さにおけるひずみの値は、正負載荷および同一高さで最大2本の中間帯鉄筋のひずみ計測値の最大値とした。これより、両試験体において、1) 中間帯鉄筋がせん断力を分担しており、2) 載荷の進行に応じて分担するせん断力（ひずみ値）が増加していることがわかる。両者のひずみ値を比較すると、半円形フック試験体の方が定着プレート試験体に比べて大きくなっている。この理由については、次章で検討する。

3.2 終局変位以降の挙動

(1) プレート定着型試験体

表－7 に終局変位以降のプレート定着型試験体の基部の損傷状況を示す。

正載荷時圧縮側（半円形フック側）の基部では、 $\pm 7\delta y$ 時1回目でかぶりの一部が、同3回目でかぶりの過半が剥落した。負載荷時圧縮側（定着プレート側）の基部では $\pm 6\delta y$ 時3回目（終局変位時）にかぶりの浮き・剥離が見られ、 $\pm 7\delta y$ 時1回目以降でかぶりの過半が剥落した。また、図－3a) より、 $\pm 7\delta y$ 時1回目の荷重は およそ+800kN および-720kN、同3回目の荷重はおよそ+380kN および-400kN となった。

(2) 半円形フック試験体

表－8 に終局変位以降の半円形フック試験体の基部の損傷状況を示す。

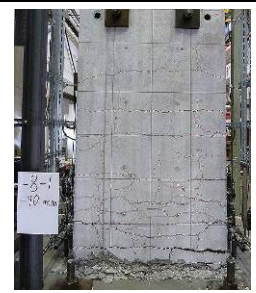
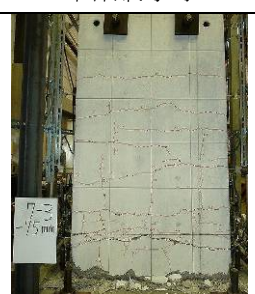
正載荷時圧縮側では、 $\pm 6\delta y$ 時3回目でかぶりの一部が剥落し、過半が剥離、 $\pm 7\delta y$ 時3回目でかぶりの過半が剥落した。負載荷時圧縮側の基部では $\pm 6\delta y$ 時3回目でかぶりの過半が剥落し、 $\pm 7\delta y$ 時3回目でかぶりの剥落範囲が拡大した。また、図－3b) より、 $\pm 6\delta y$ 時1回目の荷重はおよそ+870kN および-770kN、同3回目の荷重はおよそ+680kN および-640kN となった。 $\pm 7\delta y$ 時1回目の荷重はおよそ+550kN および-600kN、同3回目の荷重はおよそ+300kN および-450kN となった。

(3) 両試験体の比較

(1)(2) より、両試験体とも終局変位以降の載荷ステップでの正負繰返し載荷ごとにかぶり等の損傷が進行し、耐荷力が低下したことがわかる。プレート定着型試験体は、 $\pm 7\delta y$ の1回目で終局変位 ($\pm 6\delta y$) 時3回目の荷重の約95%および87%（およそ800kN および-720kN）

以上を保持した後に、 $\pm 7\delta y$ の1ステップの間に $\pm 8\delta y$ の1回目に同荷重の約36%および35%（およそ+300kN および-290kN）まで荷重が低下した。半円形フック試験体は、 $\pm 6\delta y$ 時1回目で終局変位 ($\pm 5\delta y$) 時3回目の荷重の約99%および88%（およそ+870kN および-770kN）を保持した後に、 $\pm 6\delta y$ から $\pm 7\delta y$ の2ステップの間に $\pm 8\delta y$ の1回目に、同荷重の約27%および47%（およそ+230kN、および

表－6 終局変位時の基部損傷状況

正載荷時圧縮側	
プレート定着型試験体 (半円形フック側)	半円形フック試験体
$\pm 6\delta y (\pm 90\text{mm})$	$\pm 5\delta y (\pm 75\text{mm})$
	
1 回目終了時	1 回目終了時
	
3 回目終了時	3 回目終了時
負載荷時圧縮側	
プレート定着型試験体 (定着プレート側)	半円形フック試験体
$\pm 6\delta y (\pm 90\text{mm})$	$\pm 5\delta y (\pm 75\text{mm})$
	
1 回目終了時	1 回目終了時
	
3 回目終了時	3 回目終了時

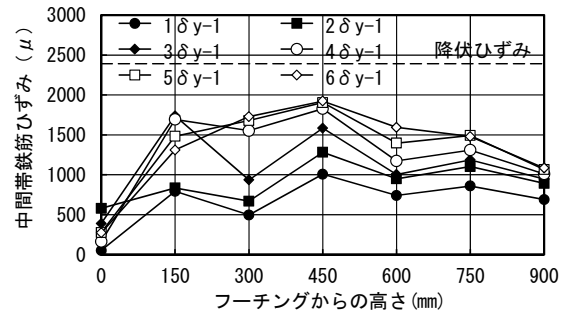
-390kN) まで荷重が低下した。

なお、プレート定着型試験体では、+7 δy の 1 回目から -7 δy の 1 回目への载荷中に、定着プレートが帯鉄筋から外れたが、軸方向鉄筋は破断しなかった。これに対して、半円形フック試験体では、-6 δy の 3 回目から +7 δy の 1 回目への载荷中に、負荷荷時圧縮側の軸方向鉄筋が破断した。終局変位以降の荷重低下時の挙動は、半円形フック試験体の方がプレート定着型試験体よりも終局変位は小さかったものの、破壊と判断して载荷を終了した $\pm 8\delta y$ における両試験体の耐力力はほぼ同程度であった。これらの挙動については、次章で検討する。

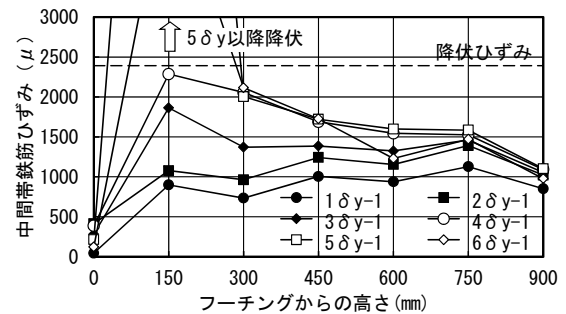
4. 考察

4.1 終局変位までの中間帯鉄筋のひずみについての考察

3.1 で述べた中間帯鉄筋のひずみ量に差が生じた理由については、1) 半円形フック試験体では帯鉄筋・軸方向鉄筋にフックをかけていることで、軸方向鉄筋のはらみ出しの影響がプレート定着型試験体より大きい、2) 载荷の進行にともなうコンクリートが分担するせん断力 (Vc) の低下分が、中間帯鉄筋の分担せん断力の増加と



a) プレート定着型試験体



b) 半円形フック試験体

図-5 中間帯鉄筋のひずみ

表-7 終局変位以降の状況 (プレート定着型試験体)

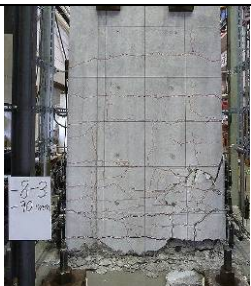
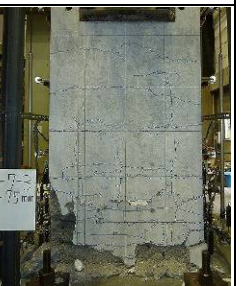
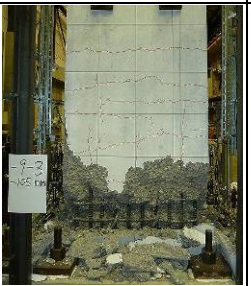
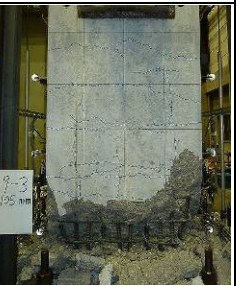
	正载荷時圧縮側 (半円形フック側)	負载荷時圧縮側 (定着プレート側)
$\pm 6\delta y$ (90 mm)	 3 回目終了時	 3 回目終了時
$\pm 7\delta y$ (105 mm)	 1 回目終了時	 1 回目終了時
$\pm 7\delta y$ (105 mm)	 3 回目終了時	 3 回目終了時

表-8 終局変位以降の状況 (半円形フック試験体)

	正载荷時圧縮側	負载荷時圧縮側
$\pm 5\delta y$ (75 mm)	 3 回目終了時	 3 回目終了時
$\pm 6\delta y$ (90 mm)	 3 回目終了時	 3 回目終了時
$\pm 7\delta y$ (105 mm)	 3 回目終了時	 3 回目終了時

なることから、前者の方が V_c の低下度合いが大きい、
3) 実験データのばらつき、などが推察される。しかし、
明確な判断はできず、今後検討が必要と考える。

4.2 荷重低下過程についての考察

プレート定着型試験体では、定着プレートは終局変位を超える $+7\delta y$ の1回目まで外れることなく帯鉄筋を拘束し、終局変位時3回目の荷重の約95%を保持した。その後、横拘束効果の低下とともに耐力力が低下した。軸方向鉄筋の拘束が弱くなったことで、軸方向鉄筋の破断が生じなかったと考えられる。

中間帯鉄筋を帯鉄筋と軸方向鉄筋の両方に掛けた半円形フック試験体では、 $+7\delta y$ の1回目に軸方向鉄筋の破断が生じた。この破断は、中間帯鉄筋に直接拘束された、先に降伏を生じた正載荷時引張側の2本の軸方向鉄筋から生じ始めた。図-6に半円形フック試験体における代表的な軸方向鉄筋のひずみ履歴を示す。図-6c)に示すように $+5\delta y$ の1回目で 10000μ を超えるような大きな引張ひずみ(4NW)が軸方向鉄筋(N側)で生じた。次に、かぶりの剥落などにより軸方向鉄筋が徐々にはらみ出し、 $\pm 6\delta y$ の載荷過程において耐力力が低下した。その後の載荷においても、軸方向鉄筋が強く拘束されたことによって、軸方向鉄筋の拘束位置の柱軸方向の間隔が広がらず、軸方向鉄筋(N側)の圧縮時に曲率が大いいはらみ出しとなった。このように、大きな引張ひずみ履歴を受けた軸方向鉄筋が曲率が大いいはらみ出しを生じたことで、 $+7\delta y$ において鉄筋破断に至ったと考えられる。

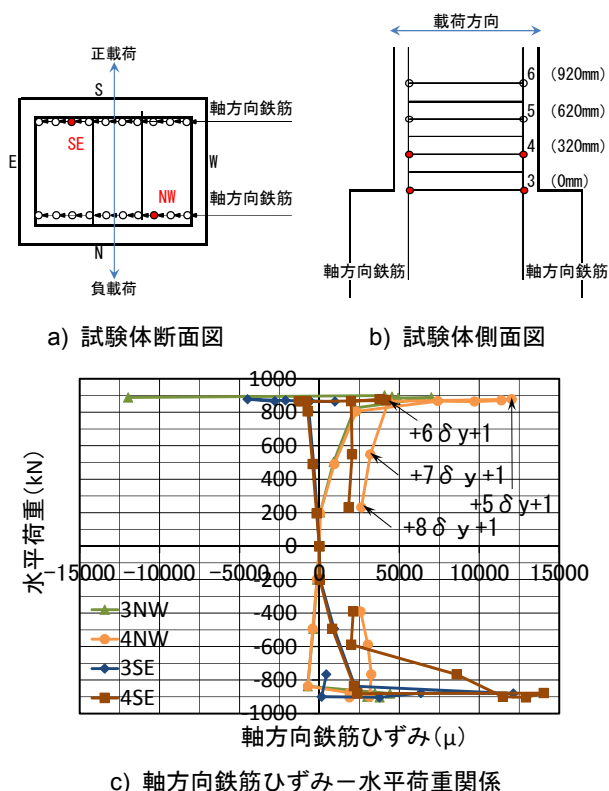


図-6 軸方向鉄筋のひずみ履歴(半円形フック試験体)

両試験体においては、鉄筋破断の有無に差があるものの、破壊と判断して載荷を終了した $\pm 8\delta y$ における両試験体の耐力力は、最大荷重の半分以下であった。このことは、このような状態では軸方向鉄筋のはらみ出しも大きく、かぶりコンクリートのみならずコアコンクリートにも損傷が広がっていることから、中間帯鉄筋のフック・定着プレートによる拘束効果自体が小さくなっている事によるものと推察される。

5. まとめ

本論文では、プレート定着型せん断補強鉄筋と両端フックのせん断補強鉄筋を中間帯鉄筋に用いた試験体に対して、破壊までの載荷を行い、その挙動を比較した。本実験結果の範囲において、以下のことが示された。

- ①両試験体とも、軸方向鉄筋の伸出しを考慮したコンクリート標準示方書の骨格曲線の最大荷重および最大変位を満足した。また、プレート定着型試験体の最大荷重と終局変位は半円形フック試験体のそれとほぼ同程度であった。
- ②終局変位以降において、水平方向の復元力が低下して破壊の状態と判断した両試験体の最終載荷ステップである $\pm 8\delta y$ における耐力力は、ほぼ同程度であった。
- ③破壊の状態では、基部のコンクリートの損傷、軸方向鉄筋のはらみ出しが大きく、中間帯鉄筋の先端定着機構の差は明瞭には現れにくいものと考えられる。

本論文で実施した実験結果においては、半円形フック試験体の終局変位はプレート定着型試験体よりもわずかに $1\delta y$ 小さかった。このことは、フックをかける位置の影響による拘束の程度の差や、フック定着とプレート定着の定着機構の違い、実験のばらつきなどが考えられるが、現時点では明確ではない。今後検討を進める必要がある。

参考文献

- 1) 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, pp.55-109, 2007.8
- 2) 小林雅彦，山東徹生，進藤良則：機械式定着工法を用いたせん断補強鉄筋の耐震性能の検討，土木学会第63回年次学術講演会，V-560, pp.1119-1120, 2008.9
- 3) 土木研究センター：建設技術審査証明報告書 プレート定着型せん断補強鉄筋「Head-bar」，2012.8
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編 平成24年3月
- 5) 土木学会：2007 年制定 コンクリート標準示方書【設計編】，pp.83-87, 2008.3