

SD490Head-bar の適用範囲拡大に向けた取り組み

吉田 昂平*1・山本 悠人*1・畑 明仁*2・村田 裕志*1・藍谷 保彦*3

Keywords : mechanical anchorage of high-strength rebar, pull-out test, cyclic loading test, plastic hinge, productivity improvement
 高強度 Head-bar, 引抜き試験, 正負交番載荷, 塑性ヒンジ, 生産性向上

1. はじめに

機械式鉄筋定着工法は、鉄筋コンクリート構造物の鉄筋端部に取り付けられたプレート等の定着具で機械的に定着を確保する鉄筋を用いることで、従来の半円形フックまたは鋭角フックを有する鉄筋の代替として効率的に配筋が可能となる工法である。当社ではその工法の一つである摩擦圧接型の機械式鉄筋定着工法「Head-bar」を他社に先んじて開発し、1999年に国内で初めて(財)土木研究センター(現在、一般財団法人)より民間開発建設技術の技術審査・証明事業認定規定に基づく認証¹⁾を受けて以来、現在にわたり多くの出荷・施工実績を有している(図-1)。機械式鉄筋定着工法は Head-bar の認証後に建設会社・鉄筋メーカーから様々な工法が開発され、2007年に土木学会より国内初の指針である鉄筋定着・継手指針²⁾が発刊された。その後、国交省のコンクリート工の生産性向上施策の

一環で日建連より「機械式鉄筋定着工法の配筋ガイドライン」³⁾が発刊されて以降急激にその普及が進んでいる。2020年には土木学会の鉄筋定着・継手指針⁴⁾が改定され、性能照査型設計の成熟を鑑み、適切に性能が照査できる範囲においては幅広い適用が可能となる指針になっている。そのためますます機械式鉄筋定着工法の幅広い適用が進んでいくものと考えられる。Head-bar はこのような背景もあり、幅広い適用範囲への要望

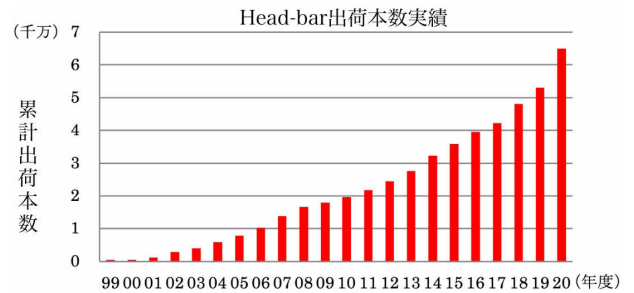


図-1 Head-bar の出荷実績

Fig.1 Shipping Record of Head-bar

表-1 Head-bar の適用範囲 (2021年改訂時)

Table 1 Range in application of Head-bar

a)せん断補強鉄筋または中間帯鉄筋として使用する場合

呼び名	D13	D16	D19	D22	D25	D29	D32	D35	D38	D41	D51
鉄筋の種類	SD295	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	SD345	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	SD390	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	SD490	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○

○：適用可、—：適用不可、疲労部材への適用はSD345のD13~D19に限る

b)軸方向鉄筋として使用する場合

呼び名	D13	D16	D19	D22	D25	D29	D32	D35	D38	D41	D51
鉄筋の種類	SD295	—	○	○	○	○	○	—	—	—	—
	SD345	○	○	○	○	○	○	—	—	—	—
	SD390	○	○	○	○	○	○	—	—	—	—
	SD490	—	—	—	—	○	○	○	—	—	—

○：適用可、—：適用不可

*1 技術センター 社会基盤技術研究部 材工研究室
 *2 技術センター 社会基盤技術研究部
 *3 プイ・エス・エル・ジャパン (株)

にこたえるため、鉄筋母材の材質 SD390,490 の適用性、様々なせん断補強鉄筋比での適用性、小型円形プレートの適用性等、各種の性能を実験的・解析的に照査されてきた⁵⁾。表-1 に(一財)土木研究センターによる建設技術審査証明における Head-bar の適用範囲(2021年改訂時)⁵⁾を示す。

近年、土木構造物において耐震性能向上を目的に RC 構造物の配筋が複雑化・高密度化し、高強度鉄筋の利用等による配筋の省力化、コンクリート打設を含めた施工性の向上が必要になる場合が増えている。高強度鉄筋を用いる配筋条件における部材の性能照査は鉄筋工・コンクリート工の施工性・生産性向上の観点から非常に重要である。そこで高強度鉄筋である材質 SD490 の鉄筋を用いた SD490Head-bar に関して軸方向鉄筋および塑性ヒンジ部への適用範囲拡大に向けて各実験を通じてそれぞれの性能照査を実施した。本稿では 2 章において高応力繰返し引抜き試験を、3 章において RC 壁の正負交番載荷実験の内容とその照査結果について示す。



a)D51 SD490 の Head-bar 定着具



b)試験体配筋状況

図-2 引抜き試験の試験体概要
Fig.2 Specimens of pull-out test

2. SD490Head-bar の高応力繰返し引抜き試験

2.1 実験概要

SD490Head-bar の定着部について拔出し変位量を確認するため、コンクリートブロックに埋め込まれた SD490Head-bar の高応力繰返し引抜き試験を実施した。対象は D38 および D51 の太径鉄筋とした。また、比較のため、半円形フックの場合についても同様の引抜き試験を実施した。試験体概要および荷重装置をそれぞれ図-2,3 に示す。荷重パターンは鉄筋定着・継手指針に準拠し、鉄筋母材の規格降伏強度の 95%を上限、2%を下限として静的に 30 回繰返し荷重を行った。その後、規格引張強度まで荷重した。定着具の拔出し量については、定着プレートの背面に溶接したワイヤーをシースを通してブロックから出して計測した。半円形フックによる定着では鉄筋の折り曲げ加工の開始点にワイ

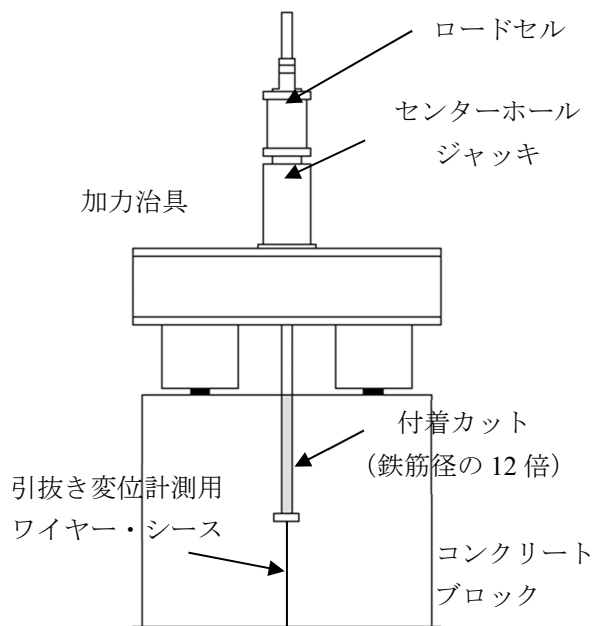


図-3 荷重装置

Fig.3 Loading set-up in pull-out test

表-2 引抜き試験における実験ケースおよび材料試験結果

Table 2 Experiment cases and material properties in pull test

実験ケース	材質	呼び名	定着部	コンクリート強度 (N/mm ²)	鉄筋降伏強度 (N/mm ²)	鉄筋引張強度 (N/mm ²)
D38 Hook	SD490	D38	半円形フック	31.2	519	706
D38 Hb	SD490	D38	Head-bar	31.2	518	690
D51 Hook	SD490	D51	半円形フック	29.3	571	740
D51 Hb	SD490	D51	Head-bar	28.4	571	722

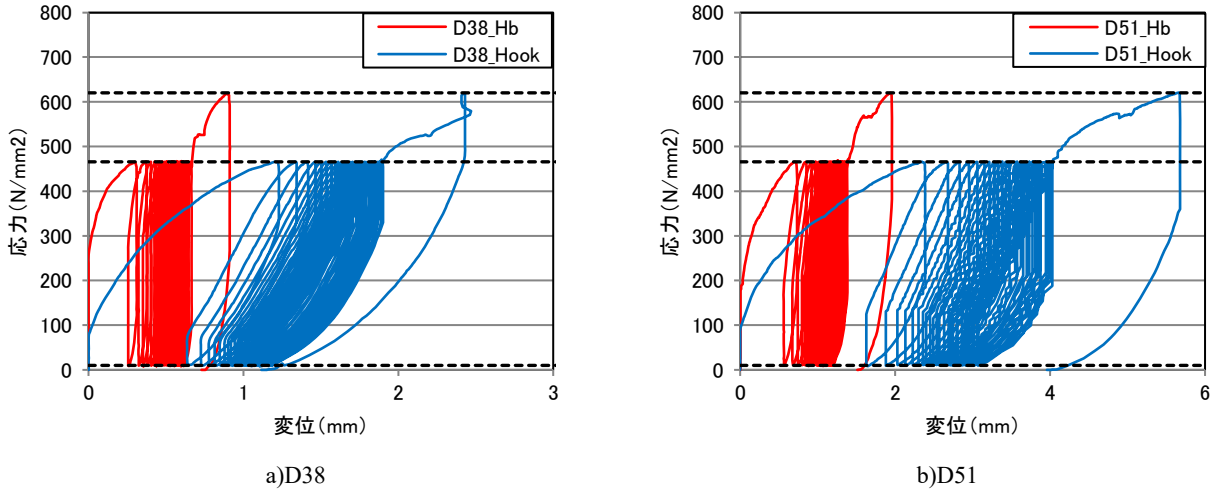


図-4 応力 - 抜き変位関係
Fig.4 Stress-displacement relationship

表-3 抜き変位量の比較

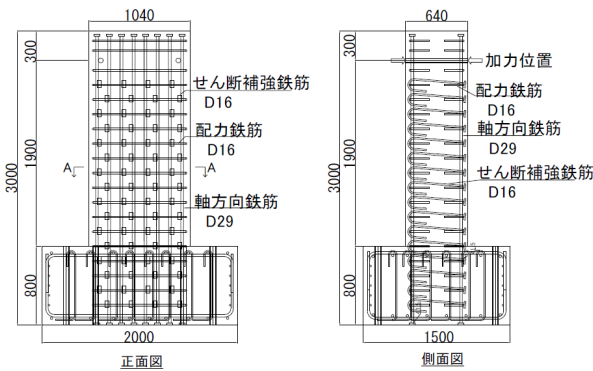
Table 3 Comparison of displacement

実験ケース	δ_1 (mm)	δ_{30} (mm)	$\delta_{30}-\delta_1$ (mm)
D38 Hook	1.202	1.890	0.688
D38 Hb	0.298	0.662	0.364
D51 Hook	2.344	4.026	1.682
D51 Hb	0.702	1.380	0.678

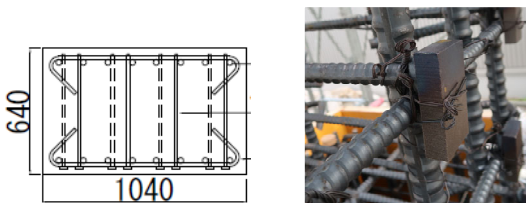
ヤーを溶接し、同様の手法で抜き量を計測した。実験ケース一覧および使用したコンクリートと鉄筋の材料試験結果を表-2 に示す。

2.2 実験結果

ロードセルの荷重から換算した鉄筋に発生している応力と、鉄筋の定着位置での抜き変位関係を図-4 に、Head-bar とフック定着の抜き変位量の比較を表-3 に示す。鉄筋定着・継手指針において、高応力繰返し引抜き試験における評価指標は、①30 回繰返し時の抜き変位量 (δ_{30}) および②30 回繰返し時の抜き変位量と 1 回繰返し時の抜き変位量の差 ($\delta_{30}-\delta_1$) の 2 つが定められている。D38 と D51 のいずれのケースにおいてもこれら指標の値は Head-bar の方が小さく、半円形フックよりも定着性能が優れていたことが確認された。また、鉄筋母材の規格引張強度まで載荷した場合にも定着具の破断やコンクリートの破壊は確認されなかった。以上の結果より、太径の SD490Head-bar が半円形フックと同等以上の高応力繰返し加力に対する定着性能を有することが確認された。



a)正面図・側面図



b)壁部 A-A 断面図および配筋状況

※図はせん断補強鉄筋が Head-bar の場合

図-5 試験体の配筋および形状

Fig.5 Outline of specimen

3. せん断補強鉄筋に SD490Head-bar を適用した壁部材の正負交番載荷

3.1 実験概要

SD490Head-bar を塑性ヒンジ部のせん断補強鉄筋に適用した場合の RC 部材の靱性性能を確認するため、RC 壁部材をモデル化した試験体による正負交番載荷を実施した。

3.1.1 試験体概要

試験体はせん断補強鉄筋に半円形フックを使用した

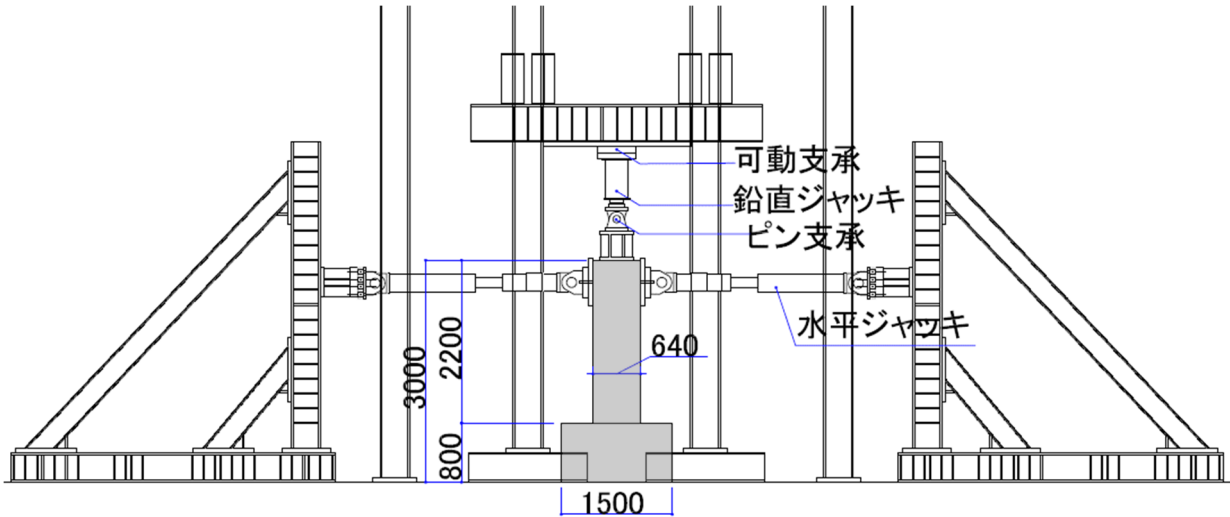


図-6 荷重装置

Fig.6 Loading set-up in cyclic loading test

表-4 試験体諸元

Table 4 Condition of specimens

実験ケース		Case1	Case2
荷重幅方向 (mm)		640	
荷重直角方向 (mm)		1040	
荷重高さ (mm)		1900	
軸方向鉄筋	材質・仕様	SD390 Head-bar	
	本数一呼び名	16-D29	
	軸方向鉄筋比	1.54	
配力鉄筋	材質・仕様	SD345 両端 135° フック	
	鉄筋径@間隔	D16@150	
せん断補強鉄筋	材質・仕様	SD490 半円形 フック	SD490 Head-bar
	本数一呼び名	4-D16	
軸力 (kN)		1331	
【基部応力 (N/mm ²)】		【2.0】	

表-5 コンクリートの物性値

Table 5 Material properties of concrete

実験ケース	弾性係数 (MPa)	圧縮強度 (N/mm ²)
Case1	30900	38.9
Case2	30600	40.2

表-6 鉄筋の物性値

Table 6 Material properties of reinforcing bars

	材質	呼び名	降伏強度 (N/mm ²)	弾性係数 (MPa)
軸方向鉄筋	SD390	D29	434	185000
せん断補強鉄筋	SD490	D16	554	180000
配力鉄筋	SD345	D16	385	182000

試験体とせん断補強鉄筋に Head-bar を使用した試験体の計 2 体を製作した。図-5 に試験体の配筋および形状を示す。試験体の配筋は擁壁やボックスカルバート等における一般的な配筋を想定している。横方向鉄筋には、配力鉄筋とせん断補強鉄筋を用いており、これらが試験体断面内で閉合するように配置されることによって、コアコンクリートの拘束および軸方向鉄筋の座屈の抑制に寄与するものとした。また、せん断補強鉄筋は試験体高さ方向に千鳥状に配置した。試験体諸元および使用したコンクリートと鉄筋の材料試験結果を表-4～表-6 に示す。

3.1.2 荷重方法

図-6 に荷重装置の側面図を示す。水平方向の加力は試験体のねじれを抑制するため、2 つの水平ジャッキ

で双方向から荷重を行う対向加力とした。

試験体への水平荷重は以下のステップで行った。まず、実材料強度から算出した降伏荷重の計算値 P_y ($P_y = 739.5\text{kN}$) を基準に $\pm 1/3P_y$ と $\pm 2/3P_y$ までそれぞれ 1 回ずつ荷重した。その後、軸方向鉄筋のひずみを確認しながら降伏変位 ($1\delta_y$) まで荷重した。降伏変位が 15mm と得られた後は、降伏変位の整数倍 ($2\delta_y$, $3\delta_y$, $4\delta_y$, ...) 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。

鉛直方向には基部応力が 2.0N/mm^2 となるように軸力を荷重した。軸力は水平荷重中一定となるように制御した。

3.2 実験結果

3.2.1 荷重—変位関係および包絡線

図-7 に荷重点における水平荷重—水平変位関係を示

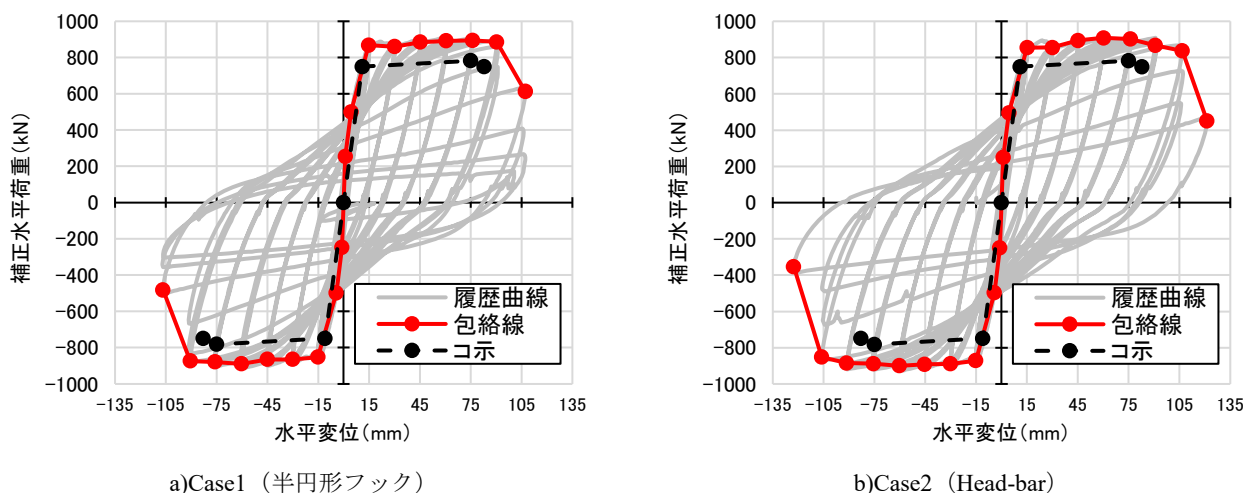


図-7 水平荷重—水平変位関係
Fig.7 Load-displacement relationship

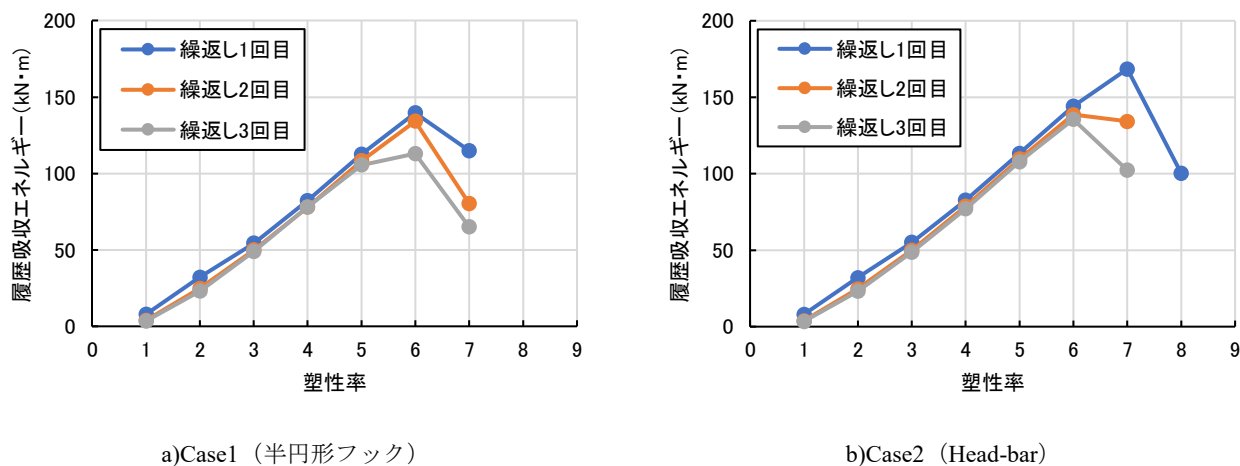


図-8 履歴吸収エネルギー
Fig.8 Historical absorption energy

す。なお、図-7 における縦軸の補正水平荷重は、基部における軸力による偏心モーメントを水平荷重に換算し、水平ジャッキの荷重に累加したものである。また、図-7 には包絡線（水平荷重—水平変位関係において、繰返し 1 回目の最大荷重点を結んだ曲線）および実材料強度を用いてコンクリート標準示方書⁶⁾（以下、コ示）に基づき算出した骨格曲線を併せて示している。最大荷重は両試験体ともほぼ同程度であった。鉄筋定着・継手指針では、水平荷重が降伏荷重 ($P_y=739.5\text{kN}$) を下回らない最大水平変位を終局変位としている。本実験において、繰返し 1 回目に着目した場合、Case1 および Case2 における終局変位はそれぞれ $6\delta_y$ および $7\delta_y$ であり、Case2 の方が靱性に優れる結果となった。また、両試験体の実験値は、コ示に基づく伸びだしを考慮した骨格曲線における最大荷重および終局荷重の計算値とともに満足した。

3.2.2 履歴吸収エネルギー

図-8 に各ケースにおける履歴吸収エネルギーを示す。ここで、履歴吸収エネルギーは荷重—変位曲線における履歴曲線に囲まれた面積により算定した⁷⁾。Case1 では $6\delta_y$ の繰返し 3 回目で履歴吸収エネルギーの増加が鈍化し、その後減少に転じた。一方で、Case2 では $7\delta_y$ の繰返し 2 回目で履歴吸収エネルギーが減少に転じた。

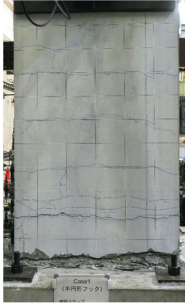
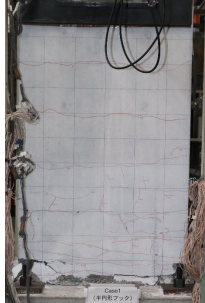
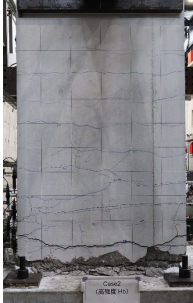
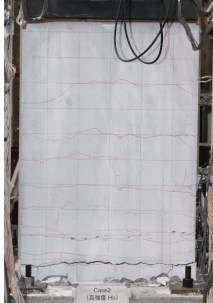
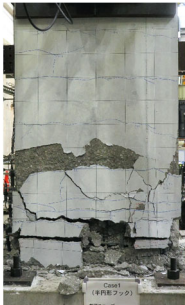



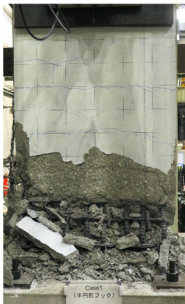


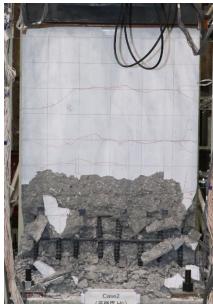
以上より、Case2 の方がエネルギー吸収について優れる結果となった。

3.2.3 損傷状況

表-7 に $5\delta_y \sim 7\delta_y$ における各試験体の損傷状況を示す。 $5\delta_y$ 終了時までの損傷状況は概ね同程度であり、基部の損傷が進行し、かぶりコンクリートの剥落が生じた。一方、 $6\delta_y$ において、Case1 では軸方向鉄筋の座屈により基部のかぶりコンクリートが大きくはらみだし、広い範囲にわたりかぶりコンクリートが剥落した。Case2

表-7 損傷状況

Table 7 Damage to specimens

荷重ステップ	Case1 (半円形フック)		Case2 (Head-bar)	
	正荷重時圧縮側	負荷重時圧縮側	正荷重時圧縮側 (半円形フック側)	負荷重時圧縮側 (定着プレート側)
水平変位 -75mm (-5 δ_y)				
水平変位 -90mm (-6 δ_y)				
水平変位 -105mm (-7 δ_y)				

※写真はすべて繰返し 3 回目終了時のもの

では、7 δ_y で軸方向鉄筋の座屈により壁部のかぶりコンクリートが広範囲にわたり剥落した。また、かぶりコンクリートの広範囲の剥落のタイミングは水平荷重が低下したタイミング、吸収エネルギー量が低下したタイミングと同時であった。Case1 と Case2 におけるこれらの差異は半円形フックより Head-bar の方が軸方向鉄筋の座屈を抑制する拘束力が大きいために生じたものと考えられ、Head-bar を用いた部材の十分な靱性性能を確認することができた。

4. まとめ

本稿では、SD490Head-bar の適用範囲拡大のため実施した高応力繰返し引抜き試験および RC 壁の正負交

番荷重実験について示した。また、本稿で示した実験結果より以下の知見を得た。

- (1) 高応力繰返し引抜き試験において、半円形フックと Head-bar の抜き出し変位量を比較した結果、Head-bar の方が引抜き量が小さく、定着性能が優れていることが確認された。また母材の規格引張強さまで加力した結果、定着部の破壊や周辺コンクリートの破壊が生じず、健全な状態であることが確認された。
- (2) RC 壁の正負交番荷重実験において、半円形フック試験体と Head-bar 試験体の水平荷重—水平変位関係を比較した結果、水平荷重は同程度となり、終局変位は Head-bar 試験体の方が大きくなった。また、履歴吸収エネルギーを比較した結果、Head-bar

試験体の方がエネルギー吸収について優れる結果となった。以上より、Head-bar を適用した RC 部材の靱性性能は従来配筋（半円形フック）の RC 部材より靱性性能が優れていることが確認された。

また、Head-bar の建設技術審査証明は 2022 年 12 月に改訂された⁵⁾。改訂では、2 章で示した高応力繰返し引抜き試験の内容が反映され、D35 以上の太径鉄筋について軸方向鉄筋への適用が可能となった。また、今後は 3 章で示した RC 壁の正負交番載荷実験の内容も追加し、SD490Head-bar の塑性ヒンジ部への適用も可能とする予定である。

以上の内容が Head-bar の建設技術審査証明に反映され、SD490Head-bar の利用が広まることで、土木工事におけるさらなる施工性・生産性向上が期待される。

参考文献

- 1) (財) 土木研究センター：プレート定着型せん断補強鉄筋「Head-bar」, 土木系材料技術・技術審査証明報告書, 1999.
- 2) 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.
- 3) (一社) 日本建設業連合会：機械式鉄筋定着工法の配筋設計ガイドライン, 2016
- 4) 土木学会：鉄筋定着・継手指針[2020 年版], コンクリートライブラリー156, 2020
- 5) (一財) 土木研究センター：プレート定着型せん断補強鉄筋「Head-bar」, 建設技術審査証明報告書, 2022.
- 6) 土木学会：2022 年制定 コンクリート標準示方書[設計編], p291-294, 2023.
- 7) 運上茂樹, 星隈順一, 西田秀明：橋の耐震性能の評価に活用する実験に関するガイドライン (案), 土木研究所資料 4023 号, 2006.