

論文 SD490 のプレート定着型せん断補強鉄筋を用いた RC 壁部材の靱性評価

吉田 昂平*1, 村田 裕志*2, 山本 悠人*1, 藍谷 保彦*3

要旨：近年、耐震性能向上の観点から RC 構造物の配筋が高密度化する傾向にあり、このような場合において生産性向上を目的に機械式鉄筋定着工法は広く利用されている。機械式定着鉄筋の鉄筋母材を SD490 などの高強度な材質とすることで、さらに配筋を省略することが可能となり、さらなる生産性向上が見込まれる。本研究では、鉄筋母材に SD490 を使用した高強度のプレート定着型せん断補強鉄筋を適用した RC 壁の正負交番載荷実験を実施し、靱性性能について確認した。

キーワード：機械式定着鉄筋, プレート定着型せん断補強鉄筋, 正負交番載荷

1. はじめに

RC 構造物の耐震性能を評価する場合には、部材耐力とともに変形性能が重要となる。RC 構造物が十分な変形性能を有するためには、損傷時においても横拘束鉄筋によるコアコンクリートの拘束効果を十分に確保する必要がある。ここで、横拘束鉄筋の定着は重要な要件であり、各種基準類では鋭角フックや半円形フックに関して余長や半径について規定することで、鉄筋の確実な定着を図っている。

一方、近年耐震性能向上を目的に土木構造物における配筋は複雑化・高密度化しており、このような条件下で鉄筋端部に上記のフック形状を適用した場合、配筋時における鉄筋工の複雑化やコンクリートの未充填などが問題となる。これらの解決策として、機械式鉄筋定着工法が挙げられる。機械式鉄筋定着工法とは、鉄筋端部に取り付け定着体によって鉄筋を機械的に定着する工法であり、現在までに様々な種類の定着体が開発され、数多くの構造物に適用されてきている。また、2007 年には土木学会より機械式鉄筋定着工法に関する指針として鉄筋定着・継手指針¹⁾が発刊され、2020 年の改訂により、現在では性能照査型設計法に対応した幅広い適用が可能となっている。さらに、国土交通省が i-Construction の一環として「機械式鉄筋定着工法の配筋設計ガイドライン」²⁾を策定し、コンクリート工の生産性向上を目的とした機械式鉄筋定着工法の活用が積極的に図られている。以上のことから、機械式鉄筋定着工法は今後も広く適用されていくものと考えられる。また、高強度鉄筋の普及が進む中で SD490 を用いた高強度せん断補強鉄筋の活用による配筋の省略化の需要が高まっている³⁾。しかし、高強度せん断補強鉄筋を適用した RC 部材の構造性能について十分な実験データが得られていないため、

現状、高強度せん断補強鉄筋の適用は限定的なものとなっている。

機械式鉄筋定着工法と高強度鉄筋を組み合わせる配筋の省略化を行うことにより、さらなる施工性の向上および充填性向上によるコンクリートの品質向上が期待される。そのためには、高強度鉄筋を母材とした機械式定着鉄筋を用いた RC 部材の性能を現行の照査体系で評価可能であることが重要である。

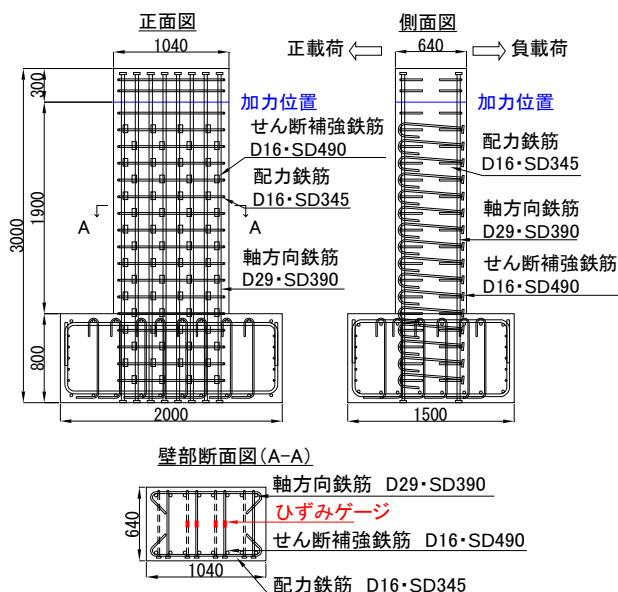
機械式鉄筋定着工法において種々の工法が開発される中で、筆者らは主に鉄筋端部に定着プレートを摩擦圧接したプレート定着型せん断補強鉄筋⁴⁾について検討を進めてきた。機械式定着鉄筋を塑性ヒンジ区間に適用した場合の靱性性能については、各種基準類において半円形フック定着と同等の靱性性能を有することを実験等で確認することとされており、プレート定着型せん断補強鉄筋についても、これを適用した RC 部材について正負交番載荷実験が行われ、性能照査が行われている。これらの検討では、塑性ヒンジ区間にプレート定着型せん断補強鉄筋を適用した場合にも従来の半円形フックと比較して、同等以上の靱性性能を有していることが確認されている。一方で、これらの検討において試験体に適用したプレート定着型せん断補強鉄筋の鉄筋母材の材質は SD345 や SD390 に限定されており、SD490 以上の高強度の材質を使用した場合の実験による性能確認は実施されていない。

以上を踏まえ、本論文ではせん断補強鉄筋に高強度のプレート定着型せん断補強鉄筋を適用した RC 部材の靱性性能を評価することを目的に、SD490 のせん断補強鉄筋を従来型配筋（鉄筋端部が半円形フック）とした RC 壁試験体（以下、半円形フック試験体）と SD490 を母材とするプレート定着型せん断補強鉄筋を適用した

*1 大成建設（株） 技術センター社会基盤技術研究部材工研究室 修（工）（正会員）

*2 大成建設（株） 技術センター社会基盤技術研究部材工研究室 博（工）（正会員）

*3 ブイ・エス・エル・ジャパン（株）



図－1 試験体形状・配筋（単位：mm）

表－1 試験体諸元

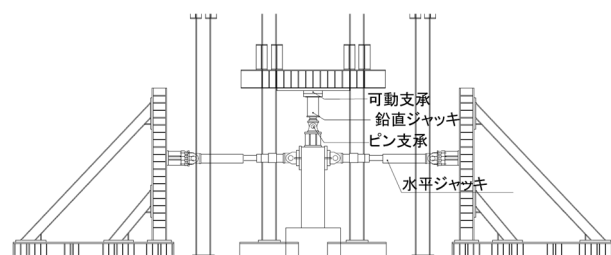
実験ケース		Case1	Case2
荷重幅方向（mm）		640	
荷重直角方向（mm）		1040	
荷重高さ（mm）		1900	
軸方向鉄筋	材質・仕様	SD390	
	本数－呼び名	16-D29	
	軸方向鉄筋比	1.54	
配力鉄筋	材質・仕様	SD345 両端 135° フック	
	鉄筋径@間隔	D16@150	
せん断補強鉄筋	材質・仕様	SD490 半円形フック	SD490 プレート定着
	本数－呼び名	4-D16	
	鉄筋比（%）	0.509	
軸力（kN）		1331	
【基部応力（N/mm ² ）】		【2.0】	

RC 壁試験体（以下、プレート定着型試験体）の 2 体について、それぞれ正負交番荷重を実施し、靱性性能について比較・検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体は試験区間となる壁部に両端半円形フックのせん断補強鉄筋を適用した半円形フック試験体（Case1）とせん断補強鉄筋にプレート定着型せん断補強鉄筋を適用したプレート定着型試験体（Case2）の計 2 体を製作した。図－1 に試験体の形状および配筋を、表－1 に試験体の諸元を示す。なお、図－1 に示す配筋は Case2 のものであり、Case1 の配筋は Case2 でせん断補強鉄筋に使用したプレート定着型せん断補強鉄筋を両端半円形フ



図－2 荷重装置

表－2 コンクリートの物性値

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

表－3 鉄筋の物性値

	材質	呼び名	降伏強度（N/mm ² ）	弾性係数（N/mm ² ）
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

ックに置換したものである。試験体の配筋は擁壁やボックスカルバートなどにおける配筋を想定しており、壁部には配力鉄筋とせん断補強鉄筋を試験体断面内で閉合するように 150mm 間隔で配置することによって、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。

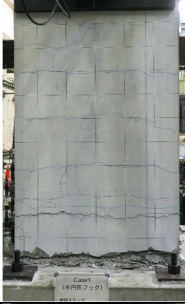
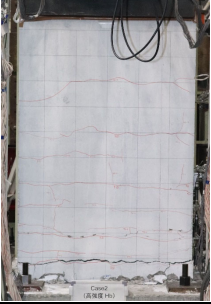
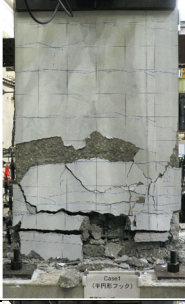
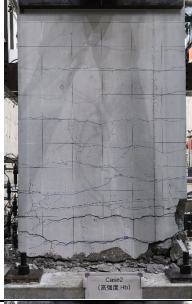
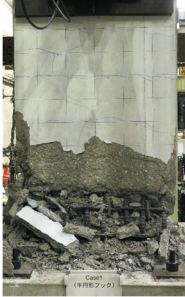
2.2 使用材料

表－2 および表－3 に試験区間に使用したコンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を示す。鉄筋の材質はそれぞれ、軸方向鉄筋に SD390、せん断補強鉄筋に SD490、配力鉄筋に SD345 を使用した。また、Case2 でせん断補強鉄筋に使用したプレート定着型せん断補強鉄筋は片端に矩形の定着プレートを有しており、プレートの材質・形状は SM490、幅 40mm×高さ 70mm×厚さ 16mm とした。試験結果における鉄筋の弾性係数はコンクリート示方書⁵⁾（以下、コ示）に示されている値 200GPa と比較すると小さかった。これは試験時の表面研磨による断面欠損などの影響であると考えられる。

2.3 荷重方法

図－2 に荷重装置の側面図を示す。加力は、プレート定着型試験体において定着プレート側が引張となる加力方向から開始した。

表－4 損傷状況

載荷 ステップ	Case1（半円形フック試験体）		Case2（プレート定着型試験体）	
	正載荷時圧縮側	負載荷時圧縮側	正載荷時圧縮側 （半円形フック側）	負載荷時圧縮側 （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

試験体への水平載荷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 $\pm 2/3P_y$ まですそれぞれ 1 回ずつ載荷した。その後、軸方向鉄筋のひずみを確認しながら降伏変位 ($1\delta_y$) まで載荷した。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載荷を行った。

鉛直方向は基部応力が 2.0N/mm^2 となるように軸力を与えた。軸力は載荷中に一定となるように制御した。

3. 実験結果

3.1 損傷状況

表－4 に $5\delta_y \sim 7\delta_y$ における各試験体の損傷状況を示す。なお、表－4 では各載荷ステップの負側繰返し 3 回目の状況を示している。 $5\delta_y$ 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、基部からの高さ 0～150mm の範囲において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、基部からの高さ 150～750mm の範囲でかぶりコンクリートが剥落した。Case2 では、 $7\delta_y$ 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基部からの高さ 150～750mm の範囲で剥落した。以上より、プレート定着型試験体の方が、軸方向鉄筋の座屈によるかぶりコンクリートの剥落が生じる載荷変位が大きいことが確認された。この理由として、プレート定着型試験体では定着プレートによって軸方向鉄筋の座屈によるはらみだしをより強く抑制していたことが考えられる。

また、写真－1 に両試験体の実験終了後における基部の損傷状況を示す。なお、写真－1 では座屈した軸方向鉄筋の状況を確認するため、基部のコンクリートを研っている。基部において軸方向鉄筋の破断等の損傷は確認されなかった。また、座屈長は両試験体ともに 400mm～450mm となり、同程度であった。この値は、コシに基づき算出した塑性ヒンジ長 380mm と比較して近い値となった。以上より、本実験においては RC 部材にプレート定着型せん断補強鉄筋を適用した場合にも、塑

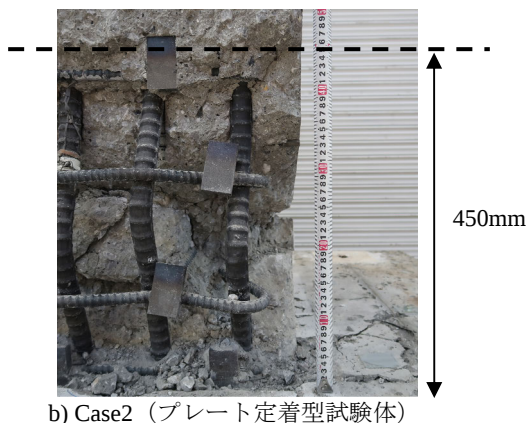
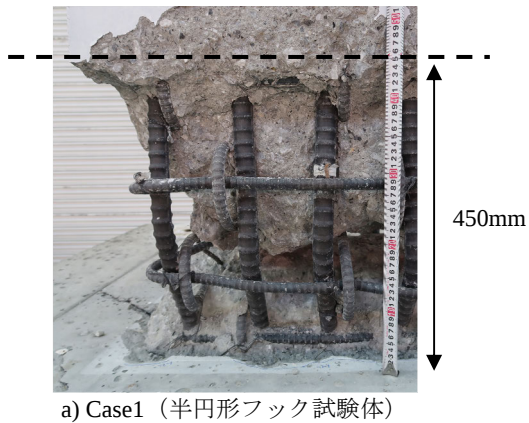


写真-1 基部の損傷状況（実験終了時）

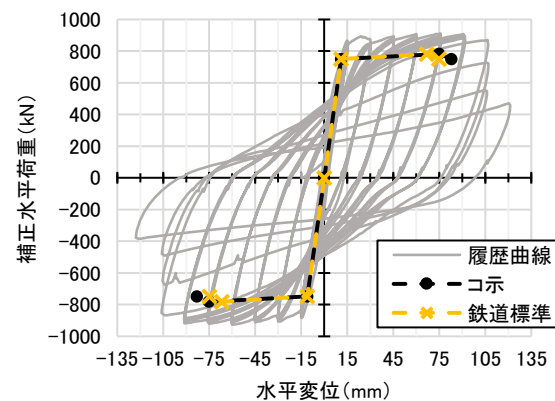
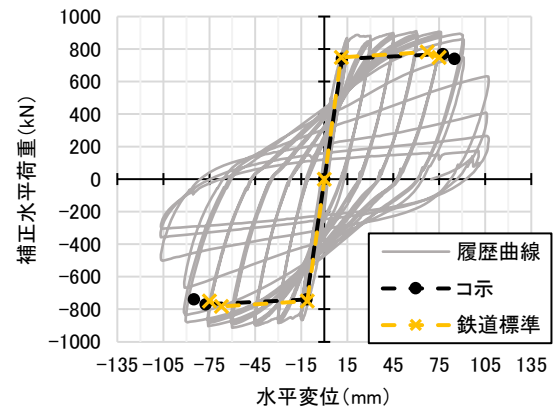


図-3 水平荷重—水平変位の履歴曲線

性ヒンジ長は半円形フックを適用した場合と同程度であった。

3.2 荷重—変位関係

図-3 に載荷点における水平荷重—水平変位の履歴曲線を示す。また、図-4 にこの履歴曲線において、繰返し1回目の最大荷重点を結んだ包絡線を示す。なお、図-3 と図-4 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、実材料強度を用いてコ示⁵⁾および鉄道構造物等設計標準⁶⁾に基づきそれぞれ算出した骨格曲線を併せて示している。

Case1 では、 $+8\delta_y$ の繰返し1回目載荷中に鉛直方向の軸力を保持できなくなったため、載荷終了とした。Case2 では、 $-8\delta_y$ の繰返し1回目の水平荷重が最大水平荷重の半分以下となったため、載荷を終了した。最大荷重は両試験体ともほぼ同程度であった。また、両試験体の最大水平荷重は、コ示および鉄道構造物等設計標準に基づく2つの骨格曲線における最大荷重および終局荷重の計算値をともに満足した。

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

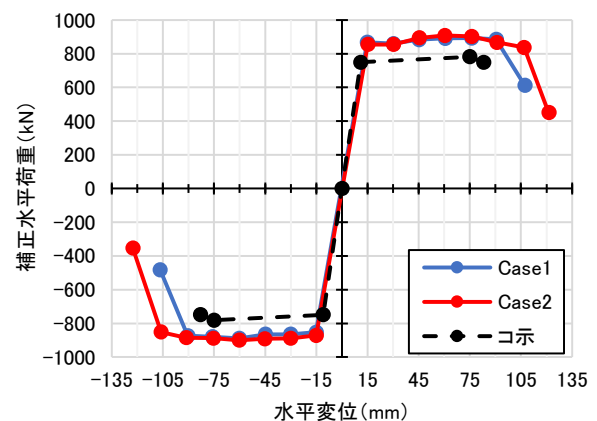
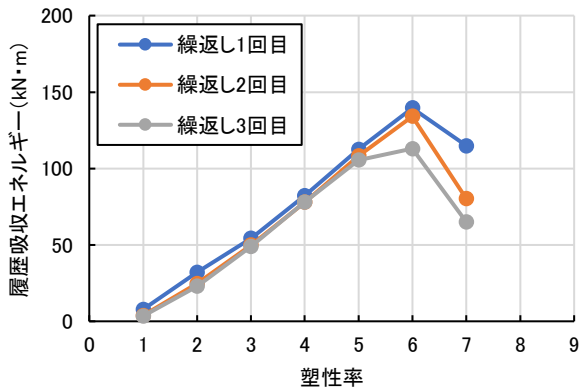


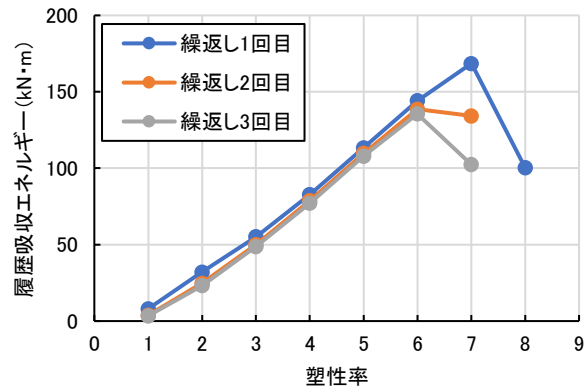
図-4 包絡線

よび $7\delta_y$ であり、プレート定着型試験体の方が靱性に優れる結果となった。また、これらの終局変位はそれぞれの試験体において、基部のかぶりコンクリートが広範囲にわたり剥落した載荷ステップと一致しており、軸方向鉄筋の座屈により水平荷重の低下が生じたと考えられる。

以上より、本試験に類似する配筋条件においてはプレート定着型せん断補強鉄筋を適用した場合、半円形フックのせん断補強鉄筋を適用した場合と同等の水平耐力を有し、靱性性能については、高い座屈抑制効果によりすることによって変形性能が向上することが期待される。



a) Case1 (半円形フック試験体)



b) Case2 (プレート定着型試験体)

図-5 履歴吸収エネルギー

3.3 履歴吸収エネルギー

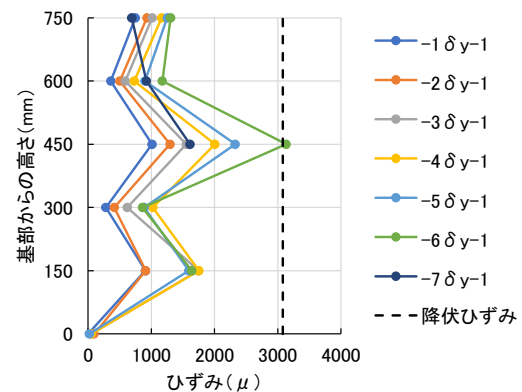
図-5 に各ケースにおける履歴吸収エネルギーを示す。ここで、履歴吸収エネルギーは載荷点における水平荷重—水平変位の履歴曲線(図-3)に囲まれた面積により算定した。半円形フック試験体では $6\delta_y$ の繰返し3回目で履歴吸収エネルギーの増加が鈍化し、その後減少に転じた。一方で、プレート定着型試験体では $7\delta_y$ の繰返し2回目で履歴吸収エネルギーが減少に転じた。

以上より、プレート定着型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。

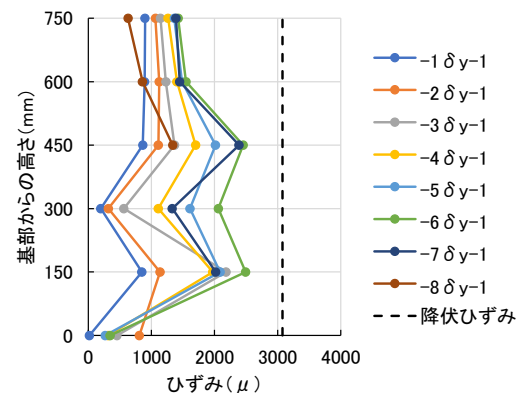
3.4 セン断補強鉄筋のひずみ

図-6 に各試験体の各載荷サイクル繰返し負側1回目(Case2 ではプレート側が圧縮側)における基部からの高さ750mmまでのセン断補強鉄筋(高さ方向に150mm間隔で配置)のひずみ分布を示す。なお、セン断補強鉄筋のひずみの値は鉄筋中央で計測(図-1を参照)しており、図-6では計測したセン断補強鉄筋2本のひずみの内、最大値をプロットしている。

半円形フック試験体では、基部からの高さ450mmでセン断補強鉄筋のひずみが大きくなっており、終局変位となった $6\delta_y$ 時にはひずみの値が 3000μ 程度となった。これは材料試験結果から得られた降伏強度と弾性係数から算出した降伏ひずみ 3078μ と近い値であった。また、2.2で指摘した通り、材料試験における鉄筋の弾性係数が小さいことを考慮し、コ示の設計値 200GPa を用いると降伏ひずみは 2770μ となるため、実験時にはセン断補強鉄筋が降伏していたと推察される。一方、プレート定着型試験体では、基部からの高さ150mmと300mmのセン断補強鉄筋のひずみが大きくなり、 $6\delta_y$ 時には 2500μ 付近の値となった。また、 $7\delta_y$ 以降については、両ケースとも一部のひずみゲージが断線し、計測不能となった。これは、 $7\delta_y$ 以降では基部からの高さ0mm～450mmにかけて、壁部の損傷が進み、セン断補強鉄筋が降伏したためと考えられる。



a) Case1 (半円形フック試験体) 負側載荷時



b) Case2 (プレート定着型試験体) 負側載荷時

図-6 セン断補強鉄筋のひずみ分布

4. プレート定着型セン断補強鉄筋の材料強度の終局変位への影響

コ示の骨格曲線において、最大荷重点における塑性ヒンジ部の回転角 θ_{mp} は下式で算出される。

$$\theta_{mp} = \frac{(0.021k_{w0}p_w + 0.013)}{(0.79p_t + 0.153)} \quad (1)$$

ここで、 p_w : 帯鉄筋比、 p_t : 引張鉄筋比である。また、 k_{w0} は帯鉄筋の強度による横拘束効果を考慮する係数であり、SD390で1.15、SD490で1.4である。ここでSD490の k_{w0} の値は2017年に行われたコ示の改訂時に追記されており、この値は過去の実験データに基づいて

SD345 の k_{w0} の値を規格降伏強度の比で線形補間した直線によって定められている⁹⁾。また、終局における回転角 θ_n は以下の式で算出した回転角の増分 $\Delta\theta$ を θ_{mp} に加えることで算出される。

$$\Delta\theta = \eta \left(\frac{M_m - M_n}{M_m} \right) \quad (2)$$

ここで、 η ：一般に 0.1、 M_m ：最大曲げモーメント、 M_n ：終局時の曲げモーメントであり、一般に降伏時の曲げモーメントである。以上を踏まえると、コ示では k_{w0} によりせん断補強鉄筋の材料強度による RC 部材の終局変位の差異を考慮している。ここで、プレート定着型せん断補強鉄筋を適用した場合にも k_{w0} で靱性性能を評価可能であるかは重要である。

府川らの研究⁹⁾では、鉄筋母材の材質が SD390 のプレート定着型せん断補強鉄筋を適用して、本実験と同様の正負交番載荷実験を行っている。（以下、SD390 実験とする。）なお、SD390 実験の試験体は道路橋脚を対象とした配筋としており、横拘束鉄筋について本実験の試験体配筋と若干の差異があるが、試験体寸法や鉄筋比、プレート定着型せん断補強鉄筋の仕様等は同様である。SD390 実験と本実験（Case2）について、荷重包絡線および実材料強度から算出したコ示の骨格曲線を比較した結果を図-7 にそれぞれ示す。両実験の荷重包絡線を比較すると、最大荷重は同程度となった。また、終局変位は SD390 実験で 90mm（負側の荷重包絡線を参照）、本実験で 105mm となった。一方、コ示の設計式により算出した終局変位は、それぞれ SD390 実験で 71.5mm、本実験で 75mm となり、コ示より実験における終局変位の方が大きかった。実験とコ示の設計式における終局変位に着目すると、コ示の設計式が安全側であることが確認された。

以上より、本実験の配筋条件に近い状態の範囲では、プレート定着型せん断補強鉄筋を適用した RC 部材の靱性性能について、現行のコ示における k_{w0} を用いて安全側に評価できることを確認した。

5. 結論

本論文では、プレート定着型と両端半円形フック型をそれぞれせん断補強鉄筋として適用した RC 壁試験体に対して正負交番載荷を行い、その挙動を比較した。本検討より、以下のことが示された。

- (1) 両試験体において最大荷重は同程度であった。一方、終局変位はプレート定着型試験体の方が、 $1\delta_y$ 分大きく、履歴吸収エネルギーについても優れる結果となった。

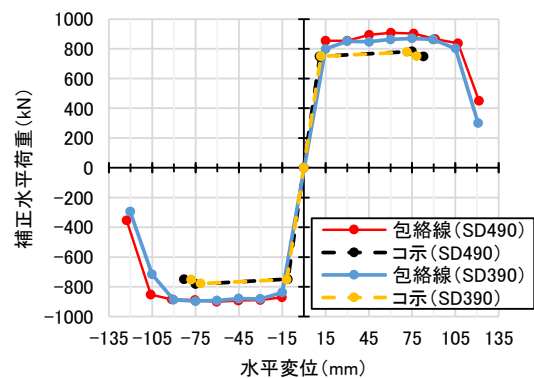


図-7 荷重包絡線の比較

- (2) 両試験体において座屈長は同程度であった。したがって、プレート定着型せん断補強鉄筋を適用した場合の塑性ヒンジ長は半円形フックと同程度と考えられる。
- (3) 本実験の配筋条件に近い状態の範囲では、SD490 のプレート定着型せん断補強鉄筋を適用した RC 部材の靱性性能について、現行のコ示の設計式で安全側に評価できることを確認した。

参考文献

- 1) 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
- 2) 国土交通省：機械式鉄筋定着工法の配筋設計ガイドライン，2016
- 3) 土木学会：コンクリート構造物における品質向上を確保した生産性向上に関する提案，コンクリートライブラリー，2016
- 4) 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.
- 5) 土木学会：2022 年制定 コンクリート標準示方書[設計編]，2023.
- 6) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造，丸善，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.
- 8) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書改訂資料 設計編・施工編，コンクリートライブラリー149，2018
- 9) 府川徹，福浦尚之：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.2，2013.