

論文 プレート定着型せん断補強鉄筋のコンクリート拘束効果

田中 良弘*¹・加納 宏一*²・趙 唯堅*³

要旨：RC面材が地震時に面外せん断力を受ける時、耐震性能を維持するため、せん断補強鉄筋の定着法を半円形フックに規定している。これに対して施工性と耐震性能の向上を目指してプレート定着型せん断補強鉄筋が提案された。両者の性能を比較するため、面外せん断実験を実施し、プレート定着は円形フックに比べせん断ひび割れ幅が小さく、せん断耐力が増大する結果を得た。その理由は、プレートによるコンクリート拘束効果であると考え、せん断補強の機構を明らかにした。

キーワード：せん断補強鉄筋、定着、摩擦圧接、かぶりコンクリート、有限要素法

1. はじめに

阪神大震災の教訓を踏まえ、各指針・示方書^{1) 2)}では、せん断補強鉄筋の端部を半円形または鋭角フックにして、地震時にかぶりコンクリートが剥落しても十分に定着機能を保持できるように規定している。このようなせん断鉄筋を配筋する際、一方のフックを曲げ加工しておき、もう一方を現地で折り曲げたり、両端に半円形フックつきの鉄筋を2つに切断して、現地で機械継手や重ね継手で接続する方法がとられている。これらの方法では、施工が煩雑でコスト高となる。筆者らは容易にかつ安価に施工できるプレート定着型せん断補強鉄筋(Head bar)を提案^{3) 4)}してきた。本研究では、半円形フックとプレートによる定着法がせん断補強効果へ与える影響を調べるために、壁の面外せん断交番繰返し載荷実験と定着部の引き抜き実験を実施した。さらに、せん断実験におけるプレート定着をモデル化した解析を実施して、従来の半円形フックとプレートによる定着機構の相違を明らかにした。特にプレートによるコンクリート拘束効果がせん断斜ひび割れの発生を抑制しているものと考えられる。従来の研究では、面内せん断におけるプレート定着によるコンクリ

ト圧縮軟化への影響の研究⁵⁾がある。また面外せん断の研究⁶⁾では、Deep beamを対象に単調載荷を行い、従来の半円形フックに比べプレート定着ではひび割れの分散と耐力の増加が期待できることを求めている。

2. 面外せん断の交番繰返し載荷実験

2.1 実験概要

今回実験を行ったせん断補強鉄筋の定着法は、従来の半円形フックと、プレート定着である。実験供試体は、図-1に示すように、左右の区間を試験区間として、センターより右側に半円形フックのせん断補強鉄筋を、左側にプレート定着型せん断補強鉄筋を配置した。今回の部材実験は、壁部材の面外せん断を想定して行ったため、図-1のa-a方向には部材が連続しているものと考え、これを再現するために横拘束鉄筋D16を配置して平面歪み状態と仮定した。また、地震により部材のかぶりコンクリートが剥落した以降の状態では、せん断補強効果を比較するために、かぶりコンクリートがない供試体を作成した。さらにせん断補強鉄筋の定着部の影響を明確にするために、せん断補強鉄筋の定着部以外の部分はコンクリートとの付着が作用し

* 1 大成建設(株)技術研究所 土木研究部部長 Ph. D. (正会員)

* 2 大成建設(株)技術研究所 土木研究部土木構造研究室次長 (正会員)

* 3 大成建設(株)技術研究所 土木研究部土木構造研究室 工博 (正会員)

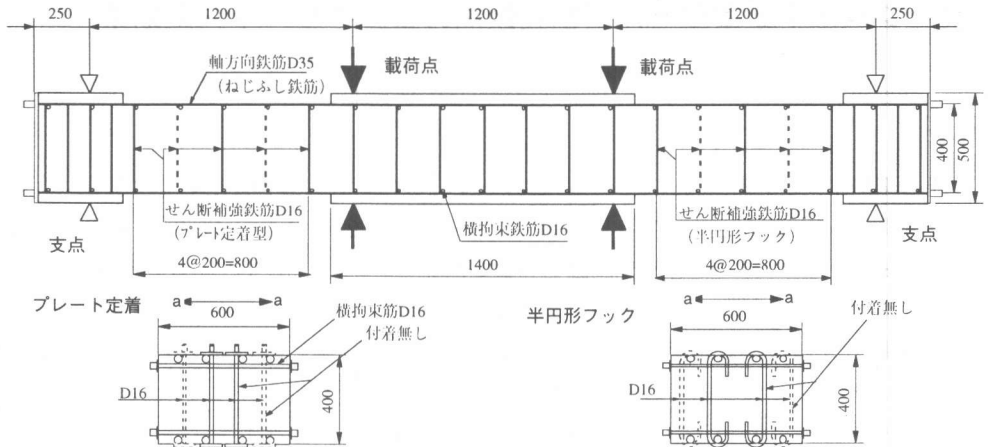


図-1 面外せん断実験供試体

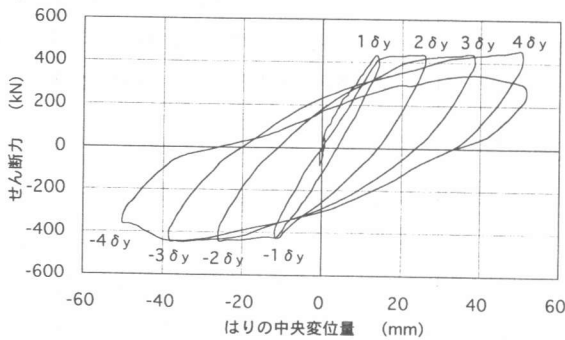


図-2 せん断力と変位

ないように処理をした。

荷重載荷方法は引張主鉄筋降伏時の変位(δ_y)を基準とした正負交番繰返し載荷とし、耐力が低下するまで降伏変位の整数倍の変位を繰返し載荷した。計測項目を表-1に示す。また、実験に使用した材料の特性を表-2に示す。

2.2 実験結果

作用せん断力とはり中央の変位量との関係を、図-2に示す。写真-1は、載荷実験終了時のはりのひび割れ状況である。試験体は変位量が $\pm 2\delta_y$ 、左右の試験区間に斜めひび割れが発生し、その後ひび割れ幅が増大した。 $\pm 3\delta_y$ のサイクルで半円形フック側(右側)の斜めひび割れ幅がプレート定着側(左側)の2倍程度に拡大し、両者の差が認められた。 $-4\delta_y$ の載荷サイクル

表-1 せん断実験の計測項目

	仕様	降伏強度	引張強度
せん断鉄筋	D16 (SD345)	382 MPa	581 MPa
主鉄筋	D35 (SD345)	380 MPa	589 MPa
プレート	100x50x16(SS40)	309 MPa	455 MPa
コンクリート	$f_{ck}' = 29.4 \text{ MPa}$	$f_c' = 32.0 \text{ MPa}$	

表-2 材料特性

計測項目	計測機器	点数
作用荷重	100tfロードセル	2
はり中央変位	300mm変位計	1
せん断鉄筋歪み	歪みゲージ	8
定着部拔出し	25mm変位計	8
斜めひび割れ	クラックスケール	—

へ向かう途中で、半円形フック側のせん断補強鉄筋の定着部が破壊して試験区間の斜めひび割れ幅が10mm程度と急激に大きくなり耐力が低下した。この時、プレート定着側の斜めひび割れ幅は最大で2.1mm程度であり定着部も健全であった。載荷サイクルごとにクラックスケールにより求めた斜めひび割れ幅を、表-3に示す。両者のひび割れ幅の相違の一原因に、定着部の拔出しが考えられる。せん断補強鉄筋の歪み測定から得られた鉄筋の引張応力と拔出し量との関係を、図-3に示す。図には後述する引抜き実験より得られた鉄筋引張応力と拔出し量の計測データを示す。これより、半円形フックはプレート定着に比較して、載荷サイクルごとの鉄筋拔出し量が増大していることが分かる。プレート定着のせん断鉄筋に発生する引張応力が半円形フックよりも大きい。半円形フックの場合は、引抜き実験より得られた引抜き量に比べて、交

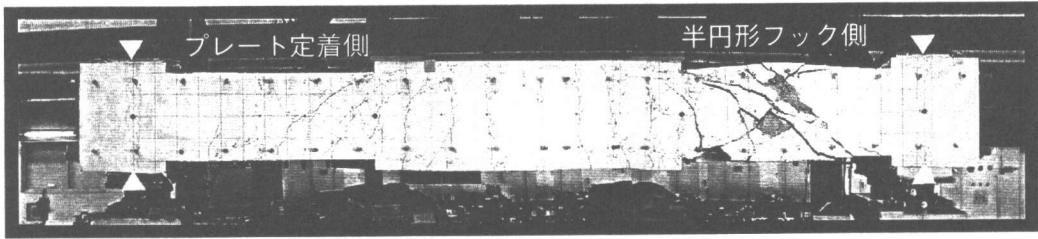


写真-1 斜めひび割れの状況

表-3 斜めひび割れ幅

はり中央の変位レベル	ひび割れ幅 (mm)			
	プレート定着側		半円形フック側	
	正	負	正	負
1 δy	なし	0.55	なし	0.55
2 δy	0.5	0.8	1.0	1.0
3 δy	0.6	1.0	1.8	1.2
4 δy	1.9	2.1	2.0	14.0

番載荷によるせん断補強鉄筋の引抜き量のほうが載荷サイクルごとに増大している。この理由として、はりの載荷により発生する曲げせん断ひび割れにより半円形フックの定着効果の減少が考えられる。一方、プレート定着の場合は定着部に曲げせん断ひび割れが発生しても、プレートの支圧効果により定着していると考えられたため定着部に発生する曲げせん断ひび割れの影響を受けず、引抜き量の減少は発生しない。

今回の実験では、異なる定着方法を同一の供試体により実験しているので、定着方法の相違によるせん断耐力への影響を定量的に評価できない。しかし、載荷の最終段階では明らかに半円形フック側のせん断区間がせん断破壊をした。また、その後プレート定着側のせん断区間にせん断載荷を実施したところ、せん断耐力として半円形フック側の部材のせん断耐力が451 kNに対してプレート定着側は535 kN (20%増) となった。

3. せん断鉄筋の定着部引抜き実験

3.1 実験概要

定着方法の違いにより面外せん断ひび割れ挙動への影響を明らかにするために、定着部の引

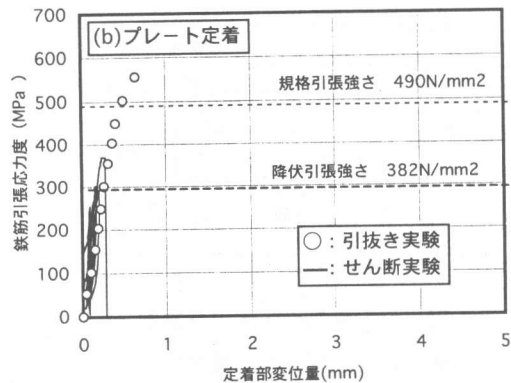
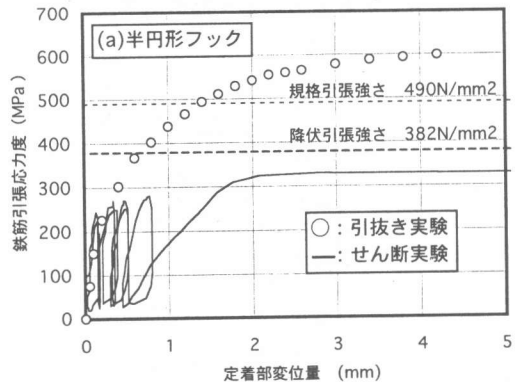


図-3 鉄筋引張応力度と抜き量

抜き実験を行った。供試体は、図-4に示すように500x500x250 mmのコンクリートブロック中にD22の主鉄筋にD16のせん断補強鉄筋を配置し、かぶりコンクリートをなくした。定着部の特性を明らかにするため、せん断補強鉄筋の定着部以外の直線部はコンクリートとの付着が作用しないように粘土およびテープにより処理した。引抜き載荷は、図-5に示すように、センターホール50tfジャッキを用い、定着部の抜き量はあらかじめ定着部に取り付けたワイヤー

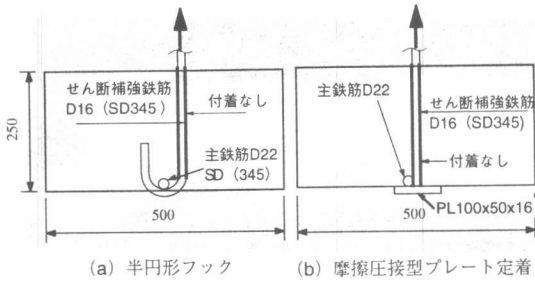


図-4 定着部引抜き実験供試体

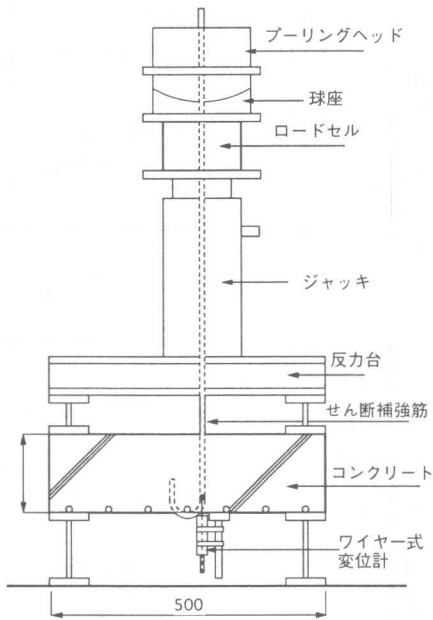


図-5 定着部引抜き実験装置

式変位計により計測した。実験ケースは、半円形フックでは定着部分の付着なしと有り(case 1, 2), またプレート定着では固定方法が摩擦圧接とロックナットによる固定(case 3, 4)である。

3.2 実験結果

鉄筋の引張応力と拔出し量の結果を、図-6に示す。半円形フックの定着部分の付着なし有り(case 1と2)の比較結果より、半円形フックの大部分の定着力は、内部の健全なコンクリートへ埋め込まれたフックの先端部分の付着抵抗力によるものであることが分かる。これに対してプレート定着の場合は拔出し量が小さく、特に鉄筋降伏以降の拔出し量に対して半円形フック

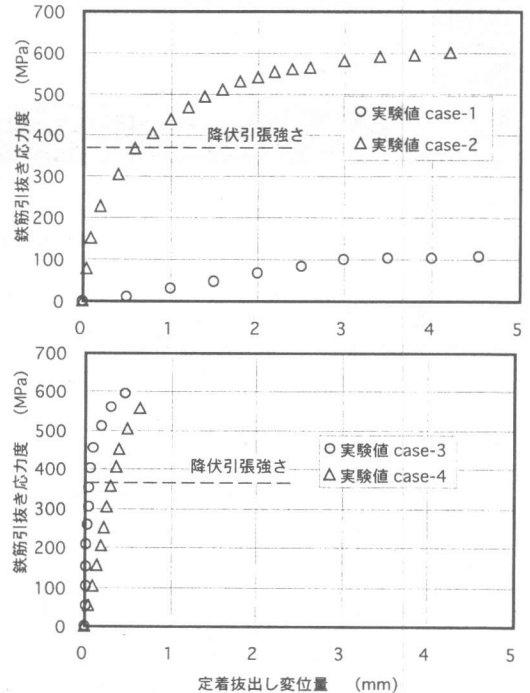


図-6 引抜き応力度と定着部拔出し量

と大きな差が認められる。ロックナット(case 4)による固定方法は、摩擦圧接(case 3)の固定方法に比較して、ねじふし鉄筋とナットとの間の若干のガタが初期の拔出し量に影響して大きくなっているようである。

4. プレート拘束効果の解析

4.1 仮説

プレート定着が面外せん断による斜めひび割れ発生を制御し、せん断耐力増加をした理由を以下のような仮説をたてて考える。

(1) 定着部の引抜き剛性：プレート定着の引抜き剛性が高いので、せん断区間に発生する斜め引張力は、載荷荷重の早い段階でせん断補強鉄筋に伝達される。つまりせん断区間のコンクリートが上下方向に拘束される状態が作り出される。従って、コンクリートが分担している斜め引張力が低減されることになり、そのためコ

ンクリートの斜めひび割れの発生が制御されることになる。

(2) プレートの支圧効果：せん断鉄筋に作用する引張力はプレートの支圧により定着されるために、プレート下面には圧縮応力場が形成される。そのため、せん断区間のコンクリート斜め引張応力度は緩和され、ひび割れ幅が抑制される。ちなみに今回のせん断実験では、せん断鉄筋が降伏する状態でコンクリートには平均的に1.6MPaの圧縮応力が発生する。

(3) 定着メカニズムの相違：半円形フックによる定着は、大部分がフックの先端における鉄筋とコンクリートとの付着による。そのため、定着部にひび割れが発生すると付着力が劣化するので定着性能が低下する。これに対してプレート定着の場合、プレートの支圧により定着するため、定着部に発生するひび割れは定着性能に影響されない。この相違は載荷荷重が大きいほど顕著に現われるから半円形フックとプレート定着の差がせん断耐力に差として現われる。

4.2 解析モデル

仮説で考えたせん断鉄筋の定着挙動を解析モデルとして簡易に取り入れて、せん断実験の挙動を追跡してみる。実験供試体を図-7に示すような材料非線形を考慮したFEMによりモデル化する。コンクリートの材料非線形を考慮するモデルとして、岡村・前川⁷⁾らの2次元平面RCモデルを用いる(WCOMD-SJ)。供試体への載

荷方法としては、載荷点に繰返し交番で強制変位を与える。ここで、モデル化の重要なポイントは、せん断試験区間においてせん断鉄筋の付着が無い状態と、せん断補強鉄筋端部においてプレート定着と半円形フックとの定着剛性の違いをどのようにモデル化するかである。まず、せん断鉄筋の付着が無いことのモデル化については、RC構成則における引張軟化勾配(付着係数C)を考慮する。せん断区間の内側のコンクリートについては、x, y軸方向に $C_x=1.0, C_y=1.0$ としてプレーンコンクリートとして扱う。また、載荷点付近と曲げ区間にはRC構成則($C=0.4$)を適用して解析を実施した。プレートによるの定着効果については、せん断区間の外側の要素について、y方向の引張軟化係数 $C_y=0.2$ とし、さらに鉄筋の弾性係数を実際より3倍大きくして解析した(その根拠は、図-6の定着部の抜出し剛性がプレート定着の場合3倍大きいから)。一方、半円形フックの場合は、定着効果が半プレート定着ほど期待できないから、せん断区間のコンクリートに対してy方向の引張軟化係数 $C_y=1.0$ としてモデル化した。

解析の結果、図-8に示すようなはり中央点の変形量と載荷点の荷重を示す。半円形フックの場合は、 $-2\delta_y$ の後にせん断破壊をしている。プレート定着の場合は、 $-3\delta_y$ の後に $+4\delta_y$ へ向かう途中で、せん断破壊をする結果を得てい

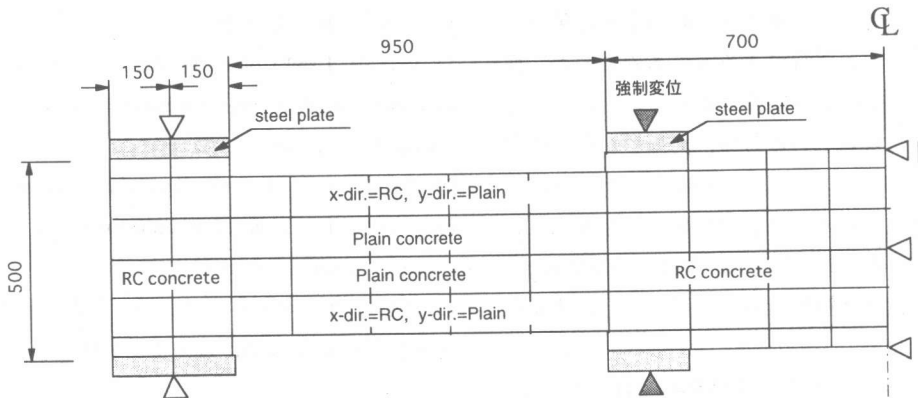


図-7 交番繰返し載荷実験の解析モデル

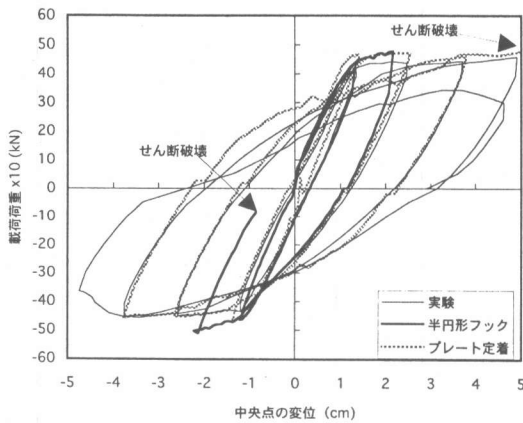


図-8 FEM解析の結果

る。直接比較できるものではないが、参考として実験による載荷荷重と変位量を示す。

今回の解析モデルは、プレートによるコンクリートへの拘束効果を完全に評価したものとは言い難い。もう一つの考え方としては、コンクリートの構成則をRC構成則ではなく、コンクリートのみの構成則を考えて、鉄筋とは別々に考える方法である。その場合は、プレート定着の鉄筋をREBAR要素として考えて、プレート部分のモデル化を直接的にモデル化してプレートの拘束効果を定量的に把握しようとするものである。

5. 結論

プレート定着によるせん断鉄筋の定着効果が当初の予想以上に期待できそうであることが、面外せん断実験により明かになった。ただし、実験条件が限られているので、実施した実験の範囲で言えることであり、今後は、プレートによる定着効果がせん断ひび割れ制御や靱性向上に寄与する効果をより普遍的に求める必要がある。以下に、実験と解析より明かになった、事項を箇条書に示す。

- 1) 今回使用したプレートの形状では、引抜き実験によりプレート定着によるせん断補強鉄筋は半円形フックと同等以上の定着性能を有

していることが明らかになった。またプレート定着の引抜き剛性は半円形フックよりも高いことが特徴である。

- 2) プレート定着のせん断補強鉄筋に引張力が作用することにより、プレートを介して支圧圧縮力が作用するために、下面のコンクリートに圧縮応力場が形成されて、せん断による斜め引張応力場に有利となる。
- 3) そのために、プレートの内側のコンクリートは拘束され面外に飛び出ようとするのを抑制されて、面外変形能力(靱性性能)が増大しているものと考えられる。

今後の課題としては、解析モデルをもう少し簡易なものにして、より合理的にプレート定着型せん断補強鉄筋の性能を確認する方法を実験と解析から進める予定である。

<参考文献>

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書，平成8年制定
- 2) 日本道路協会：道路示方書・同解説 耐震設計編，平成8年12月
- 3) 中村泰介，田中良弘，中野謙，山本平：プレート定着型せん断補強鉄筋，コンクリート工学，Vol 36, No.9, 1998.9
- 4) 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，JCI, Vol. 21, No. 3, 1999
- 5) Vecchio, J and Collins, P : Response of reinforced concrete to in-plane shear and normal stresses, University of Toronto, 1982
- 6) Bemer, D and Hoff, G : Headed reinforcement in disturbed strain regions of concrete members, Concrete International, 1994.1
- 7) 岡村 甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技法堂，1991