

重ね継手部対応型の Head-bar[®]を用いた RC 柱部材の靱性に関する検討

川端 康平*¹・村田 裕志*¹・藍谷 保彦*²

Keywords : lap splices, plate anchorage type shear reinforcement bars, intermediate hoop reinforcement, positive and negative cyclic loading tests
重ね継手部, プレート定着型せん断補強鉄筋, 中間帯鉄筋, 正負交番載荷実験

1. はじめに

RC 柱部材の耐震性能の向上のためには、断面耐力とともに変形性能の確保が重要である。変形性能を向上させるためには、帯鉄筋量を増やし、それらを中間帯鉄筋により確実に拘束することが必要であり、各基準において中間帯鉄筋による拘束方法として鋭角フックや半円形フックが規定されている¹⁾²⁾。

一方、近年の土木構造物における配筋の高密度化に伴い、配筋の施工性の低下、コンクリートの充填性の低下などの種々の課題が生じている。

これらの課題に対して、国土交通省が進める i-Construction の一環として、機械式鉄筋定着工法技術検討委員会において「機械式鉄筋定着工法の配筋設計ガイドライン」³⁾が策定され、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進められている。

従来の標準フックを有する中間帯鉄筋を重ね継手部に適用する場合、標準フックを継手部を構成する 2 本の鉄筋に掛けることが標準となるため、機械式定着鉄筋においても、同様に 2 本の鉄筋に掛けることが原則となる。したがって、2 本の鉄筋に掛けるために十分な長さの定着プレートを保有する機械式定着鉄筋（以下、重ね継手部対応型の Head-bar）が必要となる。

重ね継手部対応型の Head-bar は、重ね継手部の鉄筋 2 本分に掛けることが可能な長さのプレートを有するものであり、2 本の帯鉄筋両方を拘束するため、塑性ヒンジ部に適用した場合も十分な靱性が得られると考えら

れる。しかし、帯鉄筋は軸方向鉄筋の座屈によるはらみ出しにより強制的に変形が生じるものであるため、図-1 に示すように下側の帯鉄筋の変形量の方が大きくなった場合、Head-bar のプレート部において、通常の鉄筋 1 本に掛けた場合よりも力が加わる位置が摩擦圧接部から遠くなる。その結果、プレートに作用する曲げモーメントが大きくなり、プレートの変形が早期に発生することが懸念される。したがって、特に塑性ヒンジ部において部材変形が進行した際に、端部プレートの変形状況およびそれが部材の変形性能に及ぼす影響を確認しておく必要がある。

本研究では、重ね継手部対応型の Head-bar を中間帯鉄筋に適用した RC 柱部材の靱性について評価することを目的に半円形フックを適用した RC 柱部材と Head-bar を適用した RC 柱部材の耐力および変形性能を比較・検討する。特に RC 柱部材の塑性ヒンジ部において変形が進行した際の、Head-bar の端部プレートの変形状況及びその変形が部材の変形性能に与える影響について検

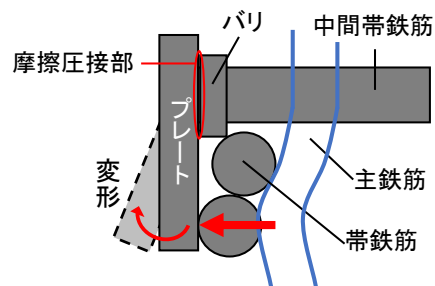


図-1 重ね継手部における変形予測

Fig.1 Deformation Prediction at Overlap Joints

* 1 技術センター 社会基盤技術研究部 材工研究室

* 2 プイ・エス・エル・ジャパン株式会社

表-1 各試験体の中間帯鉄筋の仕様

Table 1 Specifications of intermediate rebar for each specimen

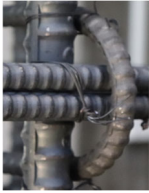


	Case1	Case2	Case3
中間帯鉄筋の種類	両端半円形フック	Head-bar 厚さ : 9mm 長辺長 : 70mm, 短辺長 : 40mm	Head-bar 厚さ : 12mm 長辺長 : 70mm, 短辺長 : 40mm
写真			

表-2 試験体諸元 (3体共通)

Table 2 Specifications of the specimen
(common to all three specimens)

荷重方向幅(mm)		600
荷重直角方向幅(mm)		1050
荷重高さ(mm)		1900
せん断スパン比(a/d)		3.61
軸方向鉄筋	本数-径@間隔(mm)	14-D32@150
	総断面積(mm ²)	5559
	軸方向鉄筋比(%)	1.76
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@150
	総断面積(mm ²)	794.4
軸力(kN) (基部応力(N/mm ²))		1260(2.0)

表-3 鉄筋の材料試験結果

Table 3 Specifications of rebar

ケース	径	材質	ヤング係数 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)
Case1	D32	SD345	1.88×10 ⁵	377
Case2	D16	SD345	1.88×10 ⁵	369
Case3	D32	SD345	1.79×10 ⁵	389
	D16	SD345	1.84×10 ⁵	378

※ D32 : 軸方向鉄筋, D16 : 帯鉄筋・中間帯鉄筋

表-4 コンクリートの材料試験結果

Table 4 Specifications of concrete

ケース	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比
Case1	31.9	2.99×10 ⁴	0.21
Case2	36.2	3.34×10 ⁴	0.20
Case3	27.7	2.83×10 ⁴	0.18

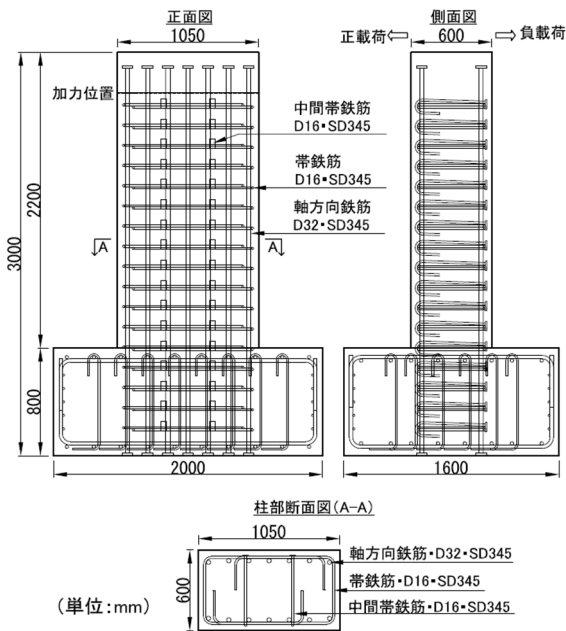


図-2 試験体の形状および配筋

Fig.2 Shape and reinforcement of the specimen

討する。また端部プレートを厚くして強度を向上した場合の影響についても検討する。なお、対象とする中間帯鉄筋の径は D16 とする。まず、D16 の Head-bar で多く用いられるプレート厚さで重ね継手部対応型の矩形プレートの寸法 (プレート厚 : 9mm, 長辺長 : 70mm, 短辺長 : 40mm) を有する Head-bar を中間帯鉄筋として適用した RC 柱部材と両端半円形フックを中間帯鉄筋として適用した RC 柱部材の正負交番荷重実験を実施し、結果について比較・検討した。その結果を踏まえ、プレート厚を 12mm に変更した場合のプレートの発生応力と変形状態を 3 次元 FEM 解析にて確認した後、前述の実験と同じ緒元の RC 柱部材にて再度正負交番荷重実験を行い、試験体全 3 体の性能を比較・検討した。

2. 実験条件

2.1 実験ケース

全3体の試験体を Case1, Case2, Case3 としてそれぞれの中間帯鉄筋の仕様を表-1 に示す。中間帯鉄筋に両端半円形フックを適用した試験体を Case1, プレート厚 9mm の重ね継手部対応型の Head-bar を適用した試験体を Case2, プレート厚 12mm のものを適用した試験体を Case3 とした。プレートは長辺が 70mm, 短辺が 40mm の矩形のものを採用した。

2.2 試験体諸元

表-2 に試験体の主な諸元を, 図-2 に試験体の形状・配筋を示す。3体の試験体は中間帯鉄筋の種類以外は全て同一である。次に, 使用材料の物性値として, 表-3 に鉄筋の材料試験結果を, 表-4 に載荷試験当日のコンクリートの材料試験結果を示す。鉄筋の材質は軸方向鉄筋, 帯鉄筋, 中間帯鉄筋の全てを SD345 とした。

3. 実験結果～Case1 と Case2 の比較

3.1 概要

半円形フックを適用した RC 柱部材と D16 の Head-bar で一般的に用いられるプレート厚さを有する重ね継手部対応型の Head-bar を適用した RC 柱部材の靱性を比較するため, Case1 と Case2 の正負交番載荷実験結果について示す。

3.2 載荷方法

鉛直荷重は基部応力が 2N/mm^2 になるように 1260kN の軸力を作用させ, 試験中に一定値になるように制御を行った。水平荷重は 2000kN ジャッキを加力位置(基部から高さ 1900mm) に 1 基取り付け片側からの載荷とした。制御用の変位測定位置は加力位置と同じ高さとして, 水平変位は両側面に設置した 2 つの変位計の平均値を用いた。

水平載荷は以下に示すステップで実施した。まず始めに, 実材料強度に基づく降伏荷重の計算値 ($P_y=660\text{kN}$) を基に, $\pm 1/3P_y$ と $\pm 2/3P_y$ までそれぞれ正負 1 回ずつ載荷し, その後, 軸方向鉄筋のひずみを確認しながら降伏変位(以下, $1\delta_y$) まで載荷した。 $1\delta_y$ が 13mm と得られた後は, $1\delta_y$ の整数倍の強制変位を与え, 各載荷ステップで 3 回の正負繰り返しの載荷を行った。

3.3 荷重－変位関係

図-3 に 2 体の荷重－変位関係を示す。なお, 水平荷重は基部に発生する軸力による偏芯モーメントを水平

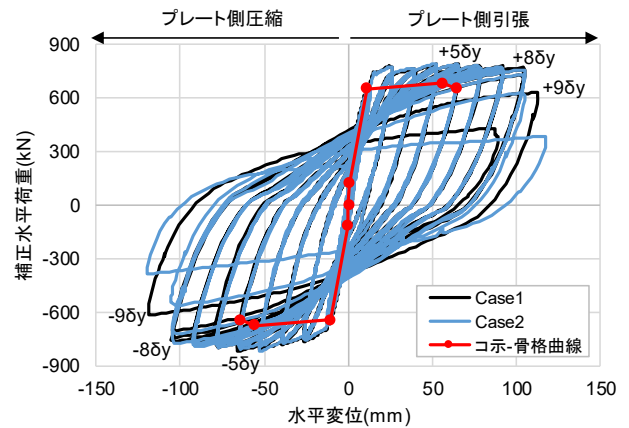


図-3 荷重－変位関係(Case1, Case2)

Fig.3 Load-displacement relationship

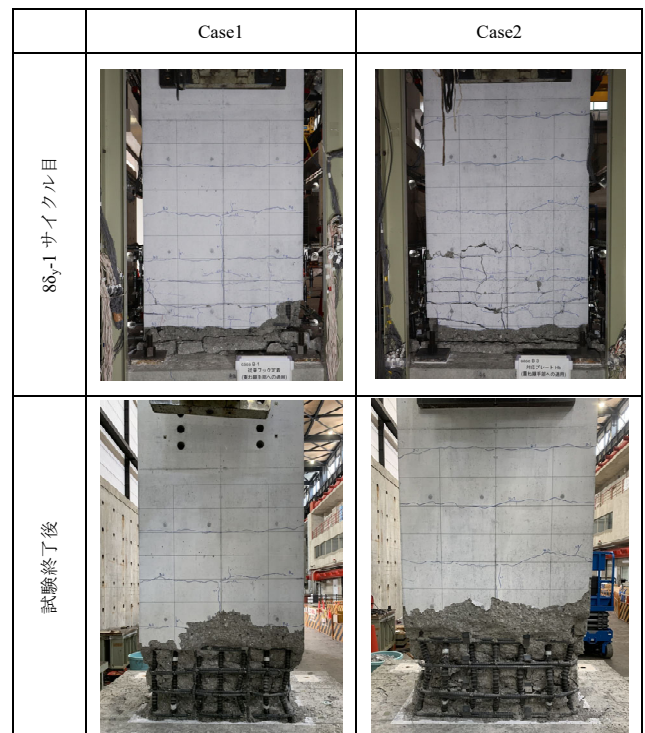


写真-1 試験体損傷状況(Case1, Case2)

Photo.1 Damage to specimens (Case 1, Case 2)



写真-2 プレート損傷状況(Case2)

Photo.2 Damage to plate (Case 2)

荷重に換算した値を水平荷重に累加した補正水平荷重である。また、実材料強度を用いてコンクリート標準示方書（以下、コ示）に基づき算出した骨格曲線を併せて示す。

両試験体の最大荷重はほぼ同程度であった。1サイクル目の水平荷重が降伏荷重 $P_y=660\text{kN}$ を下回らない最大水平変位を終局変位としたところ、終局変位は Case1, Case2 とともに $8\delta_y$ となった。一方で、コ示の終局点は降伏点相当の水平抵抗を維持する最大変位であり、両試験体の実験値はともに $5\delta_y$ 程度で荷重・変位ともにコ示の終局点を上回っており、コ示に基づく伸出しを考慮した骨格曲線における耐力・変形性能ともに十分満足することを確認した。

Case1 は $5\delta_y-1$ サイクル目からかぶりコンクリートが徐々に剥落し始めたが、 $8\delta_y-3$ サイクル目まで荷重を維持した。その後、 $9\delta_y-1$ サイクル目において軸方向鉄筋が大きく座屈し、荷重低下が確認された後、 $9\delta_y-2$ サイクル目の正載荷において荷重が大きく低下したため載荷を終了した。Case2 は $4\delta_y-3$ サイクル目から徐々にかぶりコンクリートが剥落し始めたが、 $8\delta_y-3$ サイクル目の正載荷まで荷重を維持した。その後、 $8\delta_y-3$ サイクル目の負載荷において、軸方向鉄筋が大きく座屈したことにより基部から高さ 300mm の位置の Head-bar のプレートに曲げ変形が生じ、横拘束効果が失われたため荷重が低下、 $9\delta_y-1$ サイクル目においてさらに荷重が低下したため載荷を終了した。

3.4 試験体の損傷状況

写真-1 に $8\delta_y-1$ サイクル目と試験終了後の負載荷時に圧縮側となる試験体の損傷状況を示す。両試験体のコンクリート剥落範囲はそれぞれ $8\delta_y-1$ サイクル目では基部から高さ約 150mm 、試験終了後では基部から高さ約 450mm とほぼ同程度であった。目視により軸方向鉄筋が座屈している範囲を確認し、スケールを用いて塑性ヒンジ長を計測したところ両試験体ともに帯鉄筋 3 段分の約 450mm であった。写真-2 に試験終了後における Case2 の曲げ変形したプレート状況を示す。写真-2 から、軸方向鉄筋の座屈により重ね継手の下側の帯鉄筋が上側の帯鉄筋よりも変形量が大きくなっていることが分かる。 $8\delta_y-2$ サイクル目まではこの変形をプレート部で拘束することにより耐力を維持していたが、 $8\delta_y-3$ サイクル目の負載荷において軸方向鉄筋が大きく座屈したことに伴い下側の帯鉄筋が大きく変形し、プレート部が曲げ変形したと考えられる。これは、鉄筋 1 本に掛けた場合よりも力が加わる位置が摩擦圧接部から遠く、プレートの先端付近に大きな荷重が作用したことによ

りプレートの摩擦圧接部に発生する曲げモーメントが卓越したことが原因であると考えられる。

4. Head-bar のプレート厚の検討

4.1 検討の概要

3章で示した Case1 と Case2 の正負交番載荷実験結果から、Case2 は Case1 と比較して耐力および変形性能に関して同程度であり、また、コ示に準じて算出した耐力と変形性能を十分に満たしていることを確認した。その後、コ示に準じて算出した終局点以降の破壊領域において軸方向鉄筋の座屈に伴う帯鉄筋の変形によりプレート部に曲げ変形が生じる可能性が示された。そこで、さらなる安全性を重視し、終局点以降の破壊領域においてもプレート部に変形が生じないことを目的にプレート厚を 12mm へ増厚することとした。

本章ではプレート厚 12mm のプレート定着型せん断補強筋を適用した RC 柱部材の靱性を確認するにあたり、まず、プレート厚 9mm と 12mm の Head-bar をモデル化して 3 次元 FEM 解析を実施し、破壊状態にプレート先端に力が加わる状態におけるプレート部の変形状態および発生応力について比較・検討を行った。その後、プレート厚 12mm のプレート定着型せん断補強筋鉄筋を適用した RC 柱部材の正負交番載荷実験を実施し、実験結果を Case1, Case2 の結果と比較し部材の靱性について評価を行った。

4.2 3次元 FEM 解析

4.2.1 解析の概要

FEM 解析ツールは DIANA10.5 を使用した。解析モデルを図-4 に示す。幅方向の対称性を考慮して $1/2$ の範囲について 3 次元ソリッド要素でモデル化した。材料特性を表-5 に示す。プレート部の材質は SM490、鉄筋母材の材質は SD345 であり、降伏強度をそれぞれの規格降伏強度とし、降伏後はヤング係数を $1/100$ とするバイリニアモデルとした。プレートの寸法は実験と同様の長辺長 70mm 、短辺長 40mm とし、鉄筋母材の長さは鉄筋径の 10 倍とした。荷重は重ね継手部の下側の帯鉄筋が変形することによりプレート先端に力が加わる状態を模擬するため、鉄筋径(D16)の 2 倍にバリ量 10mm を考慮した位置に、鉄筋母材降伏強度の 1.0 倍の荷重を作用させた。また、実際の間帯鉄筋として適用されるプレート定着型せん断補強筋鉄筋の鉄筋母材がコンクリートに拘束されている状況を模擬するため、鉄筋母材後方のプレート上部を境界ばねで支持することで鉄筋母材の大きな変形を抑制した。

4.2.2 変形状態及び発生応力

変形状態及び発生応力を確認するため、解析から得られた Mises 応力分布のコンター図を図-5 に示す。なお、変形倍率は 1.0 倍である。

変形状態について、プレート厚 9mm では実験時と同様に摩擦圧接部周辺のプレート部の変形が大きくなった。一方で、プレート厚 12mm ではプレート厚 9mm と比較してプレート部の変形が抑えられた。発生応力について、プレート厚 9mm では変形の大きい摩擦圧接部を中心に大きな応力が生じた。一方で、プレート厚 12mm では摩擦圧接部周辺に多少大きい応力が生じているもののその範囲は狭いことが分かる。以上から、プレート厚 12mm であれば、終局点以降の荷重低下時に軸方向鉄筋が座屈し帯鉄筋が大きく変形する状況においても、プレート部が曲げ変形することを抑制できると考えられる。

4.3 実験結果～Case3

プレート厚 12mm のプレート定着型せん断補強鉄筋を適用した Case3 の正負交番載荷実験結果について示す。

4.3.1 荷重－変位関係

図-6 に Case3 の荷重－変位関係を示す。なお、実材料強度を用いてコ示に基づき算出した骨格曲線を併せて示す。

Case3 の終局変位は Case1, Case2 と同様に $8\delta_y$ となった。また、コ示の終局点を $5\delta_y$ 程度で荷重・変位ともに上回っており、コ示に基づく伸出しを考慮した骨格曲線における耐力・変形性能ともに十分満足することを確認した。

試験体の載荷については、 $4\delta_y-3$ サイクル目からかぶりコンクリートが徐々に剥落し始めたが、 $8\delta_y-2$ サイクル目の正載荷まで荷重を維持した。その後、 $8\delta_y-2$ サイクル目の負載荷において軸方向鉄筋が座屈し、荷重低下が確認された後、 $8\delta_y-3$ サイクル目において荷重が大きく低下したため載荷を終了した。Case1, Case2 と比較して試験終了時の塑性率が $1\delta_y$ 小さいが、水平耐力および荷重低下時の塑性サイクルがほぼ同程度であることから有意な差ではないと考えられる。

4.3.2 試験体の損傷状況

写真-3 に $8\delta_y-1$ サイクル目と試験終了後の負載荷時に圧縮側となる試験体の損傷状況および試験終了後のプレート状況を示す。コンクリートの剥落範囲は $8\delta_y-1$ サイクル目では基部から高さ約 150mm、試験終了後では高さ約 450mm であり、Case1, Case2 と同程度の損傷状況であった。塑性ヒンジ長についても、Case1, Case2

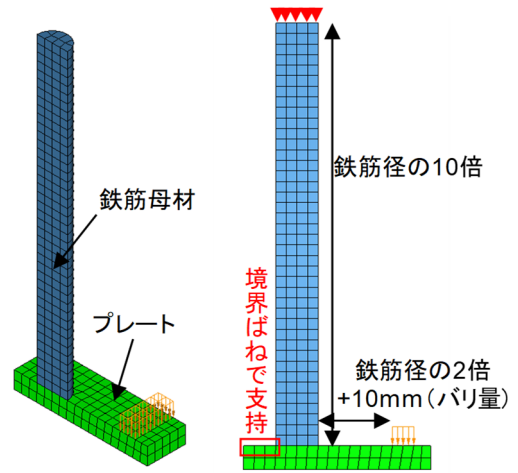


図-4 解析モデル
Fig.4 Analysis Model

表-5 材料特性

Table 5 Maerial Properties

	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比
プレート SM490	325	2.0×10^5	0.3
鉄筋母材 D16・SD345	345	2.0×10^5	0.3

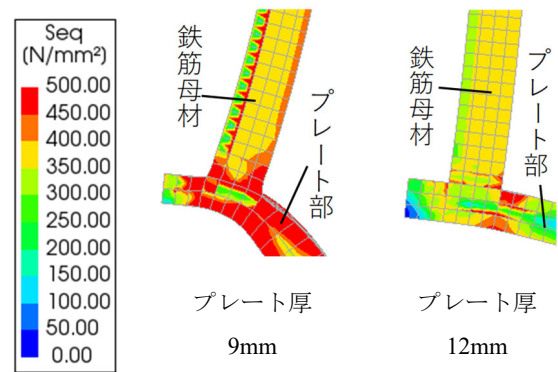


図-5 摩擦圧接部周辺の Mises 応力分布
Fig.5 Mises stress distribution around friction weld

と同様に、帯鉄筋 3 段分の約 450mm であった。プレート状況に関して、試験終了後においても、Case2 で曲げ変形が生じた高さ 300mm の位置のプレート定着型せん断補強鉄筋のプレート部に大きな曲げ変形は生じなかった。

4.4 試験体 3 体の実験結果の比較

4.4.1 骨格曲線および履歴吸収エネルギーによる比較

図-7 に試験体 3 体の各載荷ステップの 1 サイクル目における最大荷重値を用いて作成した荷重－変位関係の包絡線による比較を示す。また、Case1, Case2 の実

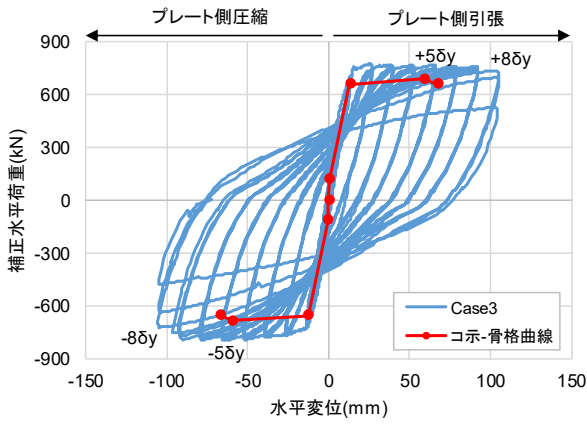


図-6 荷重-変位関係(Case3)

Fig.6 Load-displacement relationship(Case3)

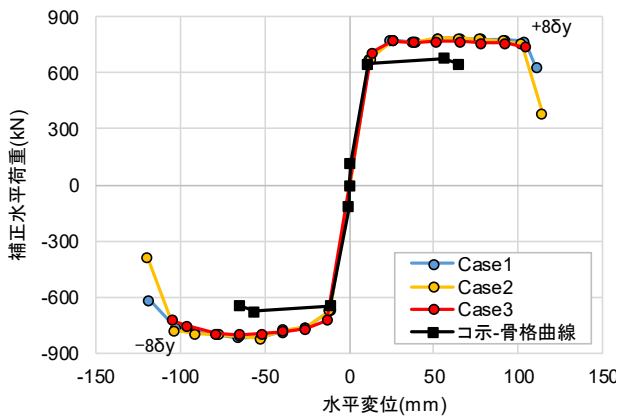


図-7 荷重-変位関係の包絡線

Fig.7 Envelope of load-displacement relationship

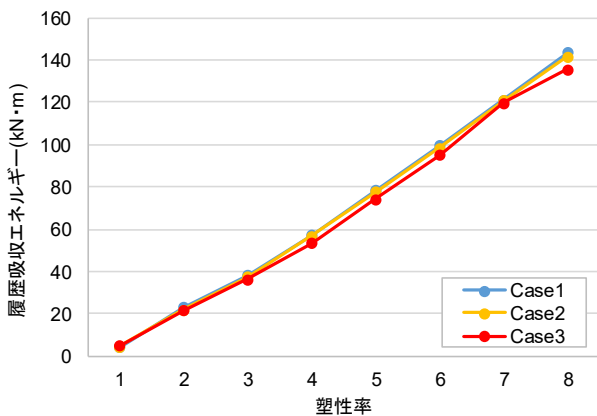


図-8 履歴吸収エネルギー

Fig.8 Historical Absorption Energy

材料強度を用いてコ示に基づき算出した骨格曲線も併せて示す。

3体ともにほぼ同程度の耐力を保有していることが確認できる。また、コ示に基づく骨格曲線と比較しても、最大荷重は 100kN 程度上回る結果となっている。変形性能についても、3体の終局変位が $8\delta_y$ 、コ示の終局点

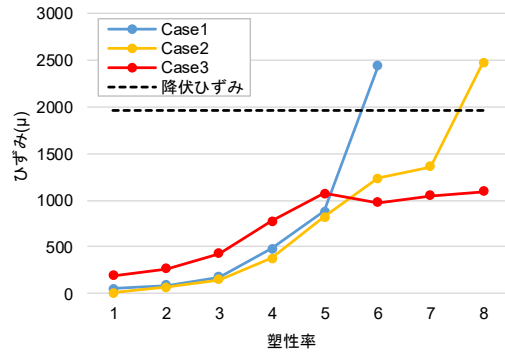


図-9 中間帯鉄筋のひずみ

Fig.9 Strain on intermediate rebar

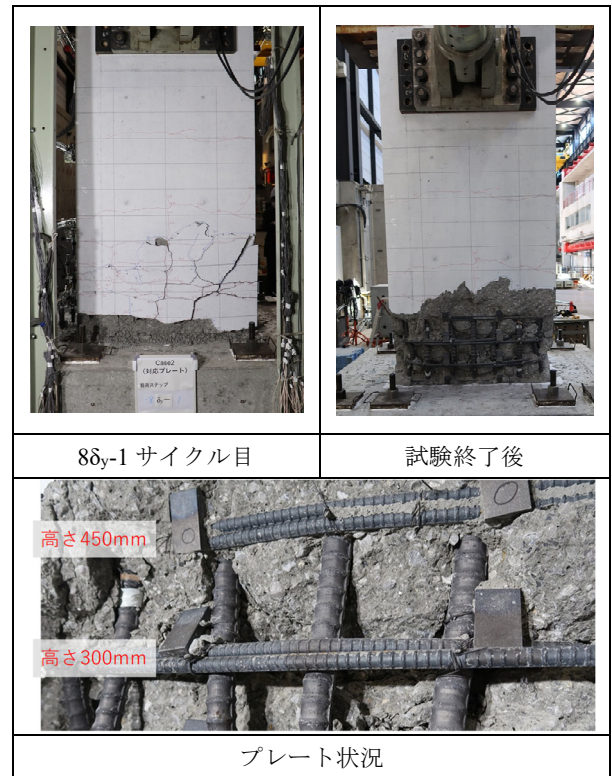


写真-3 試験体損傷状況(Case3)

Photo.3 Damage to specimen(Case3)

が $5\delta_y$ 付近であることから、十分に満足していることが確認できる。

次に、図-8 に試験体 3 体の $8\delta_y$ までの各载荷ステップの 1 サイクル目における履歴吸収エネルギーを算出した結果を示す。ここで、履歴吸収エネルギーは荷重-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⁴⁾。3 体の履歴吸収エネルギー量はほぼ同程度であることが分かる。

上記の内容から、厚さ 9mm, 12mm のプレートを用意するプレート定着型せん断補強鉄筋と半円形フックを比較した結果、部材としての挙動に有意な差は無いことが確認できた。

4.4.2 中間帯鉄筋のひずみ

図-9に $8\delta_y$ までの各載荷ステップにおける正載荷1サイクル目の最大変位時の基部から高さ300mmに位置する中間帯鉄筋の鉄筋中央のひずみを示す。3体ともに $5\delta_y$ までは同程度にひずみが増加していることが分かる。その後、Case1は $6\delta_y$ でひずみが急増して降伏ひずみ(図-9中の黒色破線)に到達し、ゲージが断線したため計測不能となった。Case2は $8\delta_y$ でひずみが急増して降伏ひずみに到達している。一方で、Case3は載荷終了まで降伏ひずみに到達していない。

3体の試験体の中間帯鉄筋のひずみ挙動を比較すると、Case1>Case2>Case3の順にひずみが大きくなっている。この理由として、1)半円形フックでは軸方向鉄筋のはらみ出しの影響がプレート定着型せん断補強鉄筋より大きい、2)載荷に伴うコンクリートが分担するせん断力(V_c)の低下分が、中間帯鉄筋の分担するせん断力の増加となることから、半円形フックの方が V_c の低下度合いが大きい、などが推察される。1)、2)の推察からHead-barの方が半円形フックよりも横拘束効果が大きいと、せん断補強効果が大きいと考えられる。しかし、半円形フックの方がHead-barよりもひずみが小さいという実験結果が得られた既往の研究⁵⁾もあるため、今後さらなる検討が必要である。

5. 結論

本研究では、重ね継手部対応型のHead-barを中間帯鉄筋に適用したRC柱部材において耐力および変形性能を確認することを目的に、正負交番載荷実験を行った。そして、その結果を半円形フックを適用したRC柱部材の実験結果およびコ示に準じて算出した耐力・変形性能と比較をし、最適なプレート厚さについての検討を行った。その結果から得られた結論を以下に示す。

(1) 両端半円形フック、プレート厚9mm、12mmのHead-barを中間帯鉄筋に適用したRC柱部材について正負交番載荷実験を実施した結果、耐力、変形性能および履歴吸収エネルギーについて、3体と

もにほぼ同程度の性能を有していることを確認した。

- (2) RC柱試験体3体の荷重-変位関係を、それぞれの実強度を用いてコンクリート標準示方書に基づいて算出した骨格曲線と比較した。その結果、耐力、変形性能ともに3体すべてコ示による計算値を十分に満足する性能を保有していることを確認した。
- (3) プレート厚9mmの重ね継手対応型のHead-barを適用したRC柱部材では、コ示に準じて算出した終局点以降の荷重低下時においてプレート部が曲げ変形した。これは、プレート部に作用する曲げモーメントが大きくなったためと考えられる。
- (4) プレート厚12mmの重ね継手部対応型のHead-barを適用したRC柱部材では、コ示に準じて算出した終局点以降の荷重低下時においてもプレート部に曲げ変形が生じないことを実験により確認した。
- (5) コンクリートの剥落範囲及び塑性ヒンジ長について、3体共に同様の破壊性状を示した。一方で、中間帯鉄筋のひずみについては、増加量に差が見られ、拘束効果の発現に違いが見られた。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V[耐震設計編]，2017。
- 2) 土木学会：2017年制定 コンクリート標準示方書[設計編]，p276-279，2018。
- 3) 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。
- 4) 運上茂樹，星限順一，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。
- 5) 山本悠人，畑明仁，大宮正弘：プレート定着型せん断補強鉄筋のプレート定着状態の相違に着目した壁部材の正負交番載荷試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.2，2017。