

論文 セン断補強鉄筋の配置形状を変えた壁状部材の交番載荷実験

渡部 太一郎*1・藤原 寅士良*2・津吉 毅*3・石橋 忠良*4

要旨：壁式橋脚の中間帯鉄筋やボックスカルバートのせん断補強鉄筋の配筋方法として、先端に135°フックを有する閉合型の帯鉄筋による配筋方法に代えて、コの字型の鉄筋2組を内部コンクリートで重ね継手として定着する簡易な配筋方法を用いた場合の変形性能を確認するために、壁状の部材を模した試験体を用いて、水平交番載荷実験を行った。

その結果、中間帯鉄筋として、2組の鉄筋を部材内部で重ね継手とし、先端を半円形フックとして部材内部に定着した試験体において、従来の閉合型の中間帯鉄筋を用いた試験体と同等程度の変形性能が得られることがわかった。

キーワード：中間帯鉄筋、重ね継手、フック、壁状部材、靱性率

1. はじめに

鉄道構造物では、柱部材のような地震時の変形性能が要求される部材のせん断補強鉄筋の配筋方法として、閉合型の配筋とし、先端には135°以上のフックを設けて内部のコンクリートに定着する方法によることを規定している。このような配筋方法の場合、例えば壁式橋脚やボックスカルバートなどの配筋では、配筋時に帯鉄筋を予め軸方向鉄筋の上から落とし込んで配置する必要があり、帯鉄筋が複雑に入り組んでいるため、その施工性の悪さが問題となっている。

一方、土木学会で、平成8年に制定されたコンクリート標準示方書〔耐震設計編〕²⁾では、帯鉄筋の継手が内部コンクリートにある場合には、帯鉄筋の端部を標準フックとした重ね継手を用いてよいと規定されている。しかし、そのように帯鉄筋を部材内部で重ね継手とした場合の部材の変形性能についてのデータは、少ないのが現状である。

そこで、本研究では、帯鉄筋の配筋方法に着目して、中間帯鉄筋の配置形状を変化させた壁状の模型試験体を製作し、水平交番載荷実験を行った。本文は、その結果に基づき、中間帯鉄筋の配置形状が部材の破壊性状と変形性能に与える影響について、考察を行ったものである。

2. 実験概要

2. 1 試験体形状

図-1に試験体形状を、図-2に各試験体の断面寸法を、表-1に各試験体のせん断補強鉄筋の配筋状況をそれぞれ示す。試験体は、実験装置の制約上可能な最大幅900mmの壁状部材としており、その軸方向鉄筋は壁部材と同幅を有するフーチングに定着されている。今回は、帯鉄筋の配筋方法に着目しているため、軸方向鉄筋等、帯鉄筋以外の配筋は全ての試験体で一定とした。

No.1試験体は、中間帯鉄筋を配置していない基準試験体であり、先端に135°フックを有する閉合型の帯鉄筋を1組配置している。No.2試験体は、これに加え、従来から鉄道構造物で用いられている閉合型の加工形状を有する中間帯鉄筋を断面内に4組配置したものである。No.3、4試験体は、No.2試験体とせん断補強鉄筋量を同じにして、中間帯鉄筋の配筋方法のみを変えたものである。これらは、2組のコの字型の中間帯鉄筋を部材内部で長さ20φ(φ：帯鉄筋径)の重ね継手としたもので、No.3試験体は中間帯鉄筋の先端に半円形フックを有するもの、No.4試験体はフックの無いものである。なお、帯鉄筋は、全ての試験体で、フーチング天端から50mmの位置から100mmピッチで壁部材上部まで配置しており、No.2~4試験体では、中間帯鉄筋を

*1 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部 構造技術センター 課員 工修 (正会員)

*2 東日本旅客鉄道(株) 東京工事事務所 工事管理室 課員 工修

*3 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部 構造技術センター 副課長 (正会員)

*4 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部 構造技術センター 所長 工博 (正会員)

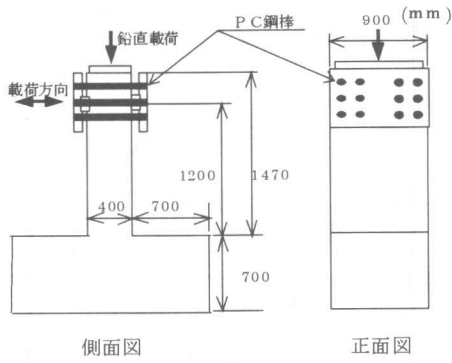


図-1 試験体形状

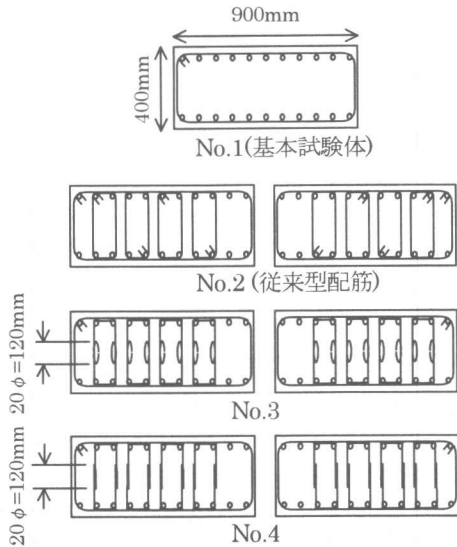


図-2 試験体断面寸法

表-1 せん断補強鉄筋の配筋状況

試験体番号	帯鉄筋		中間帯鉄筋			配筋方法
	径	配置間隔	径	組数	配置間隔	
No.1	D6	100mm	なし	—	—	—
No.2			D6	4組	100mm	閉合型+135°フック
No.3						重ね継手+半円形フック
No.4						重ね継手

図-2の左右の断面図に示すような千鳥配置としている。また、変形性能に影響を与える耐力比 (V_y/V_{mu} 、 V_y : 部材のせん断耐力、 V_{mu} : 部材が曲げ耐力に達する時の部材各断面のせん断力) は、試験体 No.1 が 1.2、試験体 No.2~4 は兵庫県南部地震以降の標準的な値として 2.0 としている。鉄筋には SD345 を使用しており、コンクリートの目標強度は 30N/mm^2 とした。

2.2 荷重方法

荷重方法は、図-1に示すように、980kNの水平方向のアクチュエータにより、一定軸力下で柱頭部(せん断スパン 1200mm)に水平交番荷重した。軸力は、門型の反力フレームに荷重方向に試験体の変位に伴い移動可能な 980kN の鉛直ジャッキを取り付け、ヒンジを介して、試験体に対して常に鉛直方向に一定軸力を荷重するようにした。なお、全ての試験体において、軸方向圧縮応力度は 0.98N/mm^2 としている。

フーチングには、あらかじめシース等で孔を開けておき、4本の PC 鋼棒をセンターホールジャッキで緊張することにより、反力床に固定している。また、試験体の幅が広いので、水平荷重時に壁に均等に荷重されるように、壁部材上部にもあらかじめ孔を水平方向 4 箇所×鉛直方向 3 箇所の計 12 箇所開けておき、試験体と同幅を有する荷重板に PC 鋼棒によって固定している。

交番荷重は、以下に示すようなサイクルで行った。まず、柱基部の主鉄筋が材料試験から求まる降伏ひずみに達した時点を実験における降伏荷重とし、その時点まで荷重制御で正負 1 回の交番荷重を行う。以後は、降伏荷重時の荷重点水平変位を降伏変位 ($1\delta_y$) とし、変位制御にてその整数倍の変位 ($n\delta_y$) で順次各変位 1 サイクルずつの正負交番荷重を行った。

測定項目は、荷重点水平変位と同水平荷重、軸方向鉄筋・帯鉄筋・中間帯鉄筋のひずみである。ひずみゲージは、軸方向鉄筋はフーチング天端位置、帯鉄筋および中間帯鉄筋は、各段の帯鉄筋の荷重方向に配置している。

3. 実験結果と考察

(1) 荷重-変位関係

図-3に各試験体の荷重-変位関係を、図-4に各試験体の荷重-変位包絡線を比較したものを示す。これらの図の横軸は、各試験体の柱頭部荷重点水平変位を降伏変位の計算値³⁾で除したものを、縦軸は水平荷重を各試験体の降伏荷重の計算値で除して無

次元化したものを表している。なお、降伏荷重と降伏変位の計算値は、材料試験から求めた鉄筋の降伏強度・ひずみおよびコンクリートの圧縮強度を用いて算定した。

図-4より、各試験体における最大荷重の降伏荷重に対する比に有意差はあまり見られない結果となっているが、せん断補強鉄筋比や中間帯鉄筋の配筋方法の差異によって、変形性能に差が出ている。変形性能を靱性率 μ で評価すると、各試験体の靱性率は、No.1 試験体で $\mu=3.8$ 、No.2 試験体で $\mu=13.7$ 、No.3 試験体で $\mu=11.2$ 、No.4 試験体で $\mu=10.0$ となっている。なお、靱性率 μ の定義としては、降伏荷重を下回らない最大変位の、降伏変位に対する比としている³⁾。本文では、終局変位として、降伏変位(計算値³⁾)のときの荷重を下回らない最大変位としており、これを降伏変位(計算値)で除すことにより、靱性率 μ を算定している。

No.1 試験体は、閉合型の帯鉄筋1組のみで中間帯鉄筋を配置していない基準試験体であるが、せん断補強鉄筋量が少ないために、部材の曲げ降伏後にせん断破壊し、そのため急激に耐力を失っている。

これに対し、No.2 試験体は、帯鉄筋1組に加えて、従来の配筋方法である閉合型の中間帯鉄筋を4組配置したもので、大きな変形性能を有している。

No.3 試験体は、No.2 試験体の中間帯鉄筋を2組の鉄筋による部材内部での 20ϕ (ϕ : 中間帯鉄筋径)のフック付き重ね継手としたもので、No.2 試験体と比べて、少し変形性能が劣る結果となっているが、中間帯鉄筋を内部コンクリートに定着しているために、実験の終局状態になっても、中間帯鉄筋があまり抜け出すこともなく、包絡線を見ても、その耐力の低下度合いは非常に緩やかである。破壊形態は、No.2 試験体と同様の曲げ破壊型であり、良好な変形性能を有していると思われる。

No.4 試験体は、No.3 試験体の中間帯鉄筋のフックを無くしたもので、実験途中まではNo.2、3 試験体と同等の耐力を有しているが、 $10\delta_y$ 程度で、中間帯鉄筋が内部コンクリートから抜け出すことによりせん断破壊へと移行しており、その耐力の低下度合いもNo.1 試験体と同様、急激なものとなっている。

(2) 破壊状況

写真-1に、各試験体の破壊状況を示す。以下に、

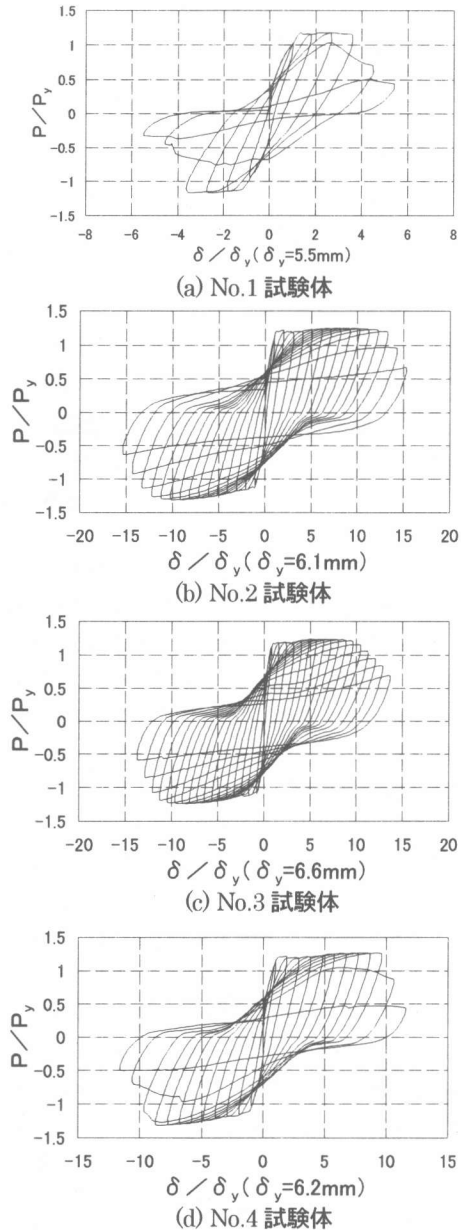


図-3 荷重-変位関係

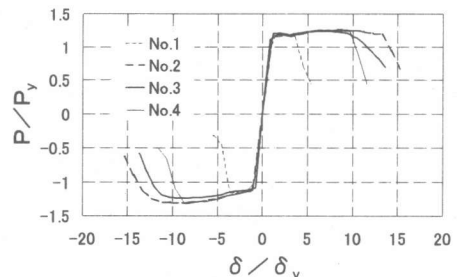


図-4 荷重-変位包絡線



(a) No. 1 試験体
(5 δ_y 時)



(b) No. 2 試験体
(14 δ_y 時)



(c) No. 3 試験体
(15 δ_y 時)



(d) No. 4 試験体
(11 δ_y 時)

写真-1 破壊状況

各試験体の破壊進行状況について記述する。

No.1 試験体は、1 δ_y 時において、曲げひび割れから斜め方向のせん断ひび割れへの進展具合が、中間帯鉄筋を配置した他の3つの試験体に比べて大きく、この斜めひび割れが順次進展して、4 δ_y 時に壁側面上部から壁部材の基部付近に到達した。5 δ_y 時にこの斜めひび割れが大きく開くことにより、せん断破壊し、脆性的な破壊性状を示した。

No.2 試験体は、柱基部から0.8h (h: 断面高さ) までの範囲に生じたX字状の斜めひび割れが10 δ_y 時に大きく開き、以後鉄筋のはらみ出し、かぶりコンクリートの剥落へと進展し、14 δ_y 時にせん断補強鉄筋のフックが多数外れることによって、柱基部のせん断き裂面に沿って破壊し、耐力を失った。

No.3 試験体の破壊性状も、基本的にNo.2 試験体と同様、柱基部0.8h 区間における曲げ破壊であった。しかし、4 δ_y 以降、軸方向鉄筋に沿って、部材側面に縦方向のひび割れが多数発生しており、このひび割れは7~8 δ_y 時に部材上部まで進展しており、最終的に軸方向鉄筋のはらみ出す範囲は、No.2 試験体より大きくなっている。この理由は、中間帯鉄筋が2組の鉄筋に分かれており、フック先端付近の斜めひび割れが開くことにより、これらの鉄筋が内部コンクリートと一緒に載荷方向の断面外側にそれぞれ押し出されることにより、鉄筋のはらみ出し範囲が大きくなっているものと推測される。しかしながら、中間帯鉄筋が内部コンクリートに定着されているため、最後まで中間帯鉄筋の内部コンクリートからの顕著な抜け出しは見られず、No.2 試験体の

ようにフックが外れることがなく、これが耐力の低下度合いが緩やかだった要因と考えられる。

No.4 試験体は、2 δ_y というNo.2、3 試験体に比べて早い段階で、柱側面中央部の柱基部から350~650mm の位置に、斜めひび割れが発生した。7~9 δ_y で柱基部から1.5h の位置にかけて、斜めひび割れがつながるとともに、載荷装置反対側の軸方向鉄筋に沿う柱側面の縦ひび割れが顕著となった。そして、10 δ_y 押し側載荷時に急激に圧縮側コンクリートが、柱基部から1.5h までの範囲ではらみ出し、同引き側載荷時にかぶりコンクリートではらみ出し範囲の最上部から基部に向かって、大きく斜めひび割れが開き、急激に耐力が低下した。これは、せん断力と圧縮側鉄筋のはらみ出しの影響により、中間帯鉄筋の定着が切れ、内部コンクリートから抜け出したことによるものと考えられ、中間帯鉄筋の定着が不足していたものと思われる。

(3) せん断補強鉄筋のひずみ

ここでは、せん断補強鉄筋(帯鉄筋、中間帯鉄筋)のひずみを示し、各試験体の破壊性状との比較を行った。

図-5に、No.1 試験体の交番載荷による帯鉄筋のひずみ分布の変化を示す。図において、横軸は、帯鉄筋の載荷方向の辺に配置している2つのゲージの平均ひずみを材料試験から得られた降伏点ひずみで除して無次元化したものを示し、縦軸は、各帯鉄筋の配置位置を示している。なお、せん断補強鉄筋のひずみの測定位置は、No.1 試験体では50~550mm の範囲、No.2~4 試験体では50~450mm の範囲で

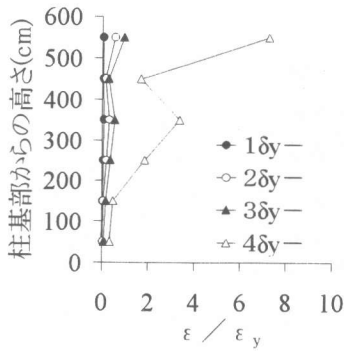
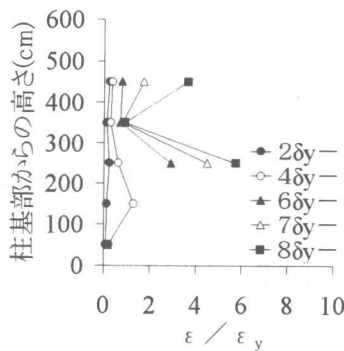
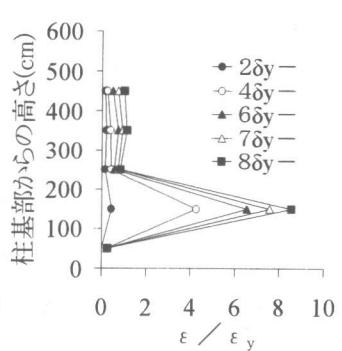


図-5 帯鉄筋ひずみ
(No.1 試験体引側載荷時)

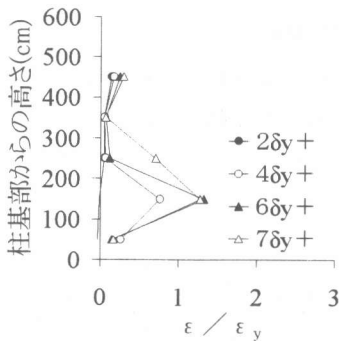


(a) 帯鉄筋 (引側)

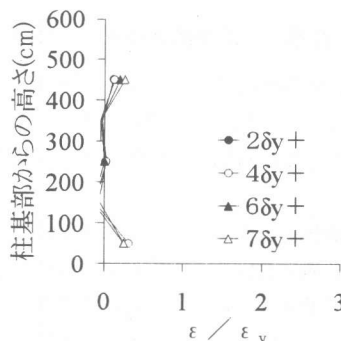


(b) 中間帯鉄筋 (引側)

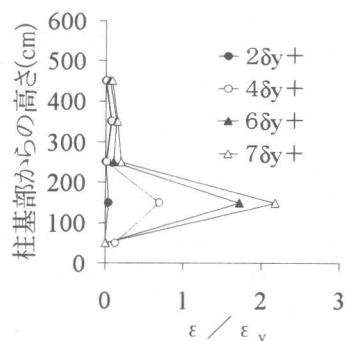
図-6 帯鉄筋・中間帯鉄筋ひずみ (No.2 試験体)



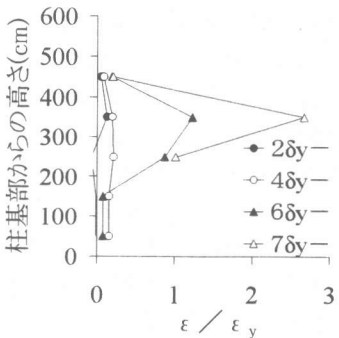
(a) 帯鉄筋 (押側)



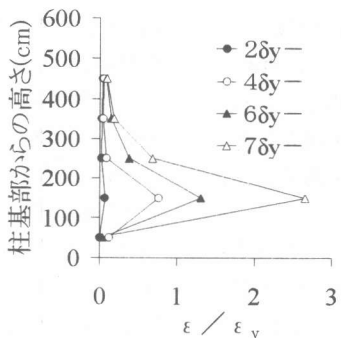
(b) 中間帯鉄筋 a (押側)



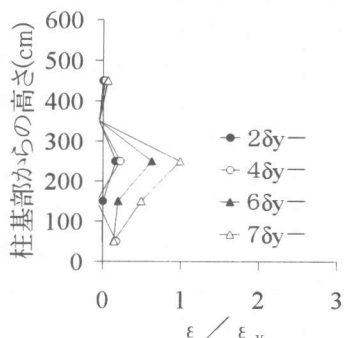
(c) 中間帯鉄筋 b (押側)



(d) 帯鉄筋 (引側)



(e) 中間帯鉄筋 a (引側)



(f) 中間帯鉄筋 b (引側)

図-7 帯鉄筋・中間帯鉄筋ひずみ (No.3 試験体)

あり、試験体の損傷が大きくなると、ゲージ結線の断線等により測定不能となるケースが多く生じた。帯鉄筋のひずみは、交番載荷が進むにつれ順次大きな値となっており、4 δ_y 時に柱基部より 350、550mm の高さでそれぞれ大きな値を示している。この位置は、斜めひび割れが壁部材の側面中央部に顕著に発生している部分に対応しており、斜めひび割れの発生により、帯鉄筋の負担する応力が大きくなる様子がわかる。柱基部付近では、顕著な斜めひ

び割れは発生しておらず、帯鉄筋のひずみもあまり発生していない。

図-6~8には、No.2~4 試験体の帯鉄筋および中間帯鉄筋のひずみ分布を示す。

No.2 試験体におけるひずみ分布から、交番載荷が進むにつれ斜めひび割れが卓越する柱基部から 150mm の位置において、帯鉄筋、中間帯鉄筋のひずみが共に最大値となっている。また、図-6中の帯鉄筋と中間帯鉄筋の 2、4 δ_y 時におけるひずみ

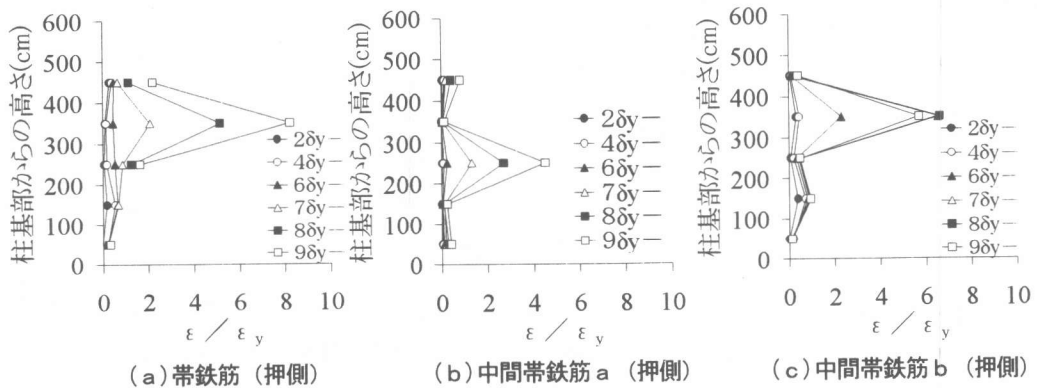


図-8 帯鉄筋・中間帯鉄筋ひずみ (No.4 試験体)

を比較すると、中間帯鉄筋のひずみは、外周の帯鉄筋のひずみの3倍以上となっている。また、それ以外のひずみ分布も、斜めひび割れが発生している部分でひずみが大きくなる傾向がある。

No.3 試験体のひずみ分布も、No.2 試験体と同様の傾向が見られ、柱基部から 150mm の位置における中間帯鉄筋のひずみが大きい。また、各サイクルの押し側・引き側載荷において、中間帯鉄筋 a、b (a : 載荷装置側、b : 載荷装置反対側) が応力 (ひずみ) を負担する割合に変化が見られ、断面内で載荷方向によってせん断応力の影響を大きく受けると予想される側の中間帯鉄筋に大きなひずみが生じている。すなわち、例えば押し側の載荷では、柱基部付近では、載荷装置と反対側に位置する中間帯鉄筋 b が a に比べて、大きい応力を負担する。

No.4 試験体のひずみは、4 δ_y 程度までは柱基部から 150mm の位置のせん断補強鉄筋のひずみが大きくなっているが、それ以降のひずみの増加はわずかである。それに代わり、柱基部から 250、350mm 位置のひずみが 6 ~ 7 δ_y の段階で急激に増加している。しかしその後、外側の閉合型帯鉄筋のひずみは増加しているにも関わらず、中間帯鉄筋のひずみは 350mm の位置の中間帯鉄筋 b において、減少に転じている。この理由は、中間帯鉄筋の付着が斜めひび割れ等の影響で失われたことによるものと思われる。これがその後の載荷点反対側のコンクリートのはらみ出しとそれに続くせん断破壊に結び付いたものと考えられる。

全体的には、せん断補強鉄筋のひずみ分布は、各試験体の破壊状況に対応しており、No.2、3 試験体

では、柱基部にひずみが局所化する傾向があるのに対し、No.1、4 試験体では、柱基部よりも上部でひずみが大きくなっている。

4. まとめ

壁式橋脚のような、中間帯鉄筋を配置する部材における中間帯鉄筋の配筋方法に着目して行った模型交番載荷実験より、得られた知見を述べると次の通りである。

- (1) 2つのコの字型の鉄筋を部材内部で 20 ϕ の重ね継手として、先端に半円形フックを設けて 1 組の中間帯鉄筋とした試験体は、従来の閉合型で先端を鋭角フックとして軸方向鉄筋に中間帯配筋をかけて定着した試験体と同等程度の変形性能が得られ、耐力の低下度合いも緩やかな曲げ破壊性状を示した。
- (2) (1)と同様の中間帯鉄筋を重ね継手とした試験体で、先端にフックを設けなかった場合、軸方向鉄筋のはらみ出しとともに中間帯鉄筋が抜け出すことにより、せん断破壊し、変形性能も従来配筋の試験体と比べて劣る結果となり、20 ϕ の重ね継手長では、フックが必要なことがわかった。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物、丸善、1992年11月。
- 2) 土木学会：[平成8年制定] コンクリート標準示方書 耐震設計編、1996年7月。
- 3) 海原卓也・小林薫・石橋忠良：帯鉄筋比の大きいRC柱の地震時降伏変位算定法に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、pp.1171-1176、Vol.21、No.3、1999年6月。