

論文 せん断面に斜交配筋された鉄筋の正負交番载荷実験

鬼頭 宏明*1・高橋 孝輔*2・岩永 圭悟*3・大内 一*4

要旨: 斜交配筋された鉄筋のせん断伝達メカニズム及び履歴特性を調査するため、模型寸法が異なる大小2シリーズの試験体に対し、正負交番载荷試験を行った。試験により以下を得た；1)小型試験体の場合、ひび割れの影響を受けない微小変位振幅では鉄筋が弾性に留まり、エネルギー吸収能に乏しい結果となった。一方、大型試験体では鉄筋が塑性域に達し、エネルギー吸収能の大きな塑性挙動を捕らえることができた。2)せん断伝達メカニズムに関して、直交配筋した場合は曲げと軸力の組合せにより伝達されるが、斜交配筋した場合、軸力が支配的となった。特に、鉄筋の弾性域ではせん断面に近い傾斜角を有する鉄筋の軸力負担が卓越した。

キーワード: ダウエル作用, せん断

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材のひび割れ面におけるせん断伝達要素には、主にひび割れ面の骨材によるかみ合わせ作用や、ひび割れ面を通る鉄筋のせん断力負担がある。また、ひび割れ面の凹凸が顕著になる程、鉄筋の軸方向反力が増大し、骨材のかみ合わせは増大する。本研究は、鉄筋のせん断力負担に着目した実験的研究であり、せん断面は平滑とする。

せん断面に対し、直交に配筋されたダウエル作用に関する既往研究では、一方向载荷による実験が多くなされてきた。しかし、一般に観察されるひび割れ面は、鉄筋軸方向に対して垂直ではなく傾きをもつ。このような条件下におけるせん断伝達挙動、さらには繰返しせん断力が作用する場合の伝達挙動は十分に明らかにされていない。

そこで、斜交配筋された鉄筋のせん断伝達メカニズムの解明及び正負履歴特性の把握を目的に、大小2シリーズの Push-off 型試験体に対して、せん断面に対する鉄筋斜角をパラメータとした正負交番载荷実験を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

(1) 小型試験体

小型試験体は、図-1に示すようにL型の2つのコンクリートブロックからなり、2本の鉄筋で両ブロックが接合されている。なお、鉄筋にはSD295 D16を、補強筋にはSD295 D10を使用している。また、厚さ2mmの亚克力板をせん断面に配置することにより、せん断伝達における鉄筋のダウエル作用以外の要素を取り除いた。実験変数は、図-1に示すようにせん断面に対する鉄筋

の角度 α であり、せん断面に対して斜交配筋された鉄筋のせん断伝達メカニズムを調べるために設けた。詳細を表-1に示す。試験体名については、载荷方法(単調Mまたは交番R)、試験体の大きさ(小Sまたは大L)、鉄筋角度 α の順で示している。また、本実験で用いた鉄筋とコンクリートの各材料定数をそれぞれ表-2、3に示す。なお、割裂ひび割れが生じないように考慮し、コンクリートかぶりは鉄筋径の5倍とした。

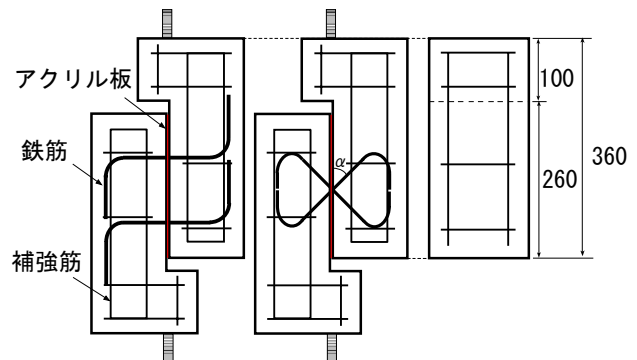


図-1 試験体形状

表-1 実験変数

試験体	角度 α	载荷方法
MS-90	90°	単調
RS-90	90°	交番
RS-45	45°	
RS-30&60	30, 60°	

表-2 鉄筋材料定数

呼び名	公称直径	降伏強度	引張強度	弾性係数	降伏ひずみ
	d [mm]	σ_{sy} [MPa]	σ_{su} [MPa]	E_s [GPa]	ϵ_{sy} [μ]
D16	15.9	349	511	183	1909

*1 大阪市立大学大学院 工学研究科 工博 (正会員)

*2 大阪市立大学大学院 工学研究科 都市系専攻

*3 大阪市立大学 工学部 都市基盤工学科

*4 大阪市立大学大学院 工学研究科 工博 (正会員)

表-3 コンクリート材料定数

圧縮強度	引張強度	弾性係数	ポアソン比
σ_c [MPa]	σ_t [MPa]	E_c [GPa]	ν_c
37.6	2.58	28.6	0.21

(2) 大型試験体

大型試験体は図-2に示すように下凹型の側面形状をもつ上部ブロックと、小さな下部ブロックからなり、2本あるいは4本の鉄筋により両ブロックが接合されている¹⁾。なお、鉄筋および補強筋にはSD295 D10を使用した。また、小型試験体と同様に接合面には厚さ2mmの亚克力板を配置した。さらに、鉄筋の降伏前にコンクリートのひび割れが生じないようにするため、鉄筋のコンクリートかぶりを鉄筋径の32倍と十分に与えた²⁾。

実験変数は鉄筋角度であり、試験体名については小型試験体と同様である。その詳細を表-4に示す。ここで、鉄筋数は、 $\alpha=90^\circ$ の試験体においては2本、その他は4本とした。

また、本実験で用いた鉄筋とコンクリートの各材料定数をそれぞれ表-5、6に示す。

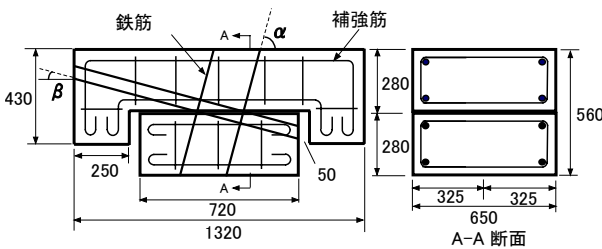


図-2 試験体形状

表-4 実験変数

試験体	角度 α	角度 β	荷重方法
ML-90	90°	-	単調
RL-90	90°	-	交番
RL-15&75	75°	15°	

表-5 鉄筋材料特性

呼び名	公称直径 d [mm]	降伏強度 σ_{sy} [MPa]	引張強度 σ_{su} [MPa]	弾性係数 E_s [GPa]	降伏ひずみ ϵ_{sy} [μ]
D10	9.53	355	500	196	1805

表-6 コンクリート材料特性

圧縮強度	引張強度	弾性係数	ポアソン比
σ_c [MPa]	σ_t [MPa]	E_c [GPa]	ν_c
25.0	2.30	25.0	0.21

2. 2 荷重方法

荷重は両試験体とも変位制御で行い、加力線とせん断面が一致するよう荷重した。なお、小型試験体の変位振幅は0.5mm、1.0mm、1.5mmであり、一方、大型試験体は0.25mm、0.5mm、1.0mmである。ただし、大型試験体については、変位振幅1.0mm以降も変位を1.0mmずつ増加させ、荷重は変位振幅最大10mmまで継続した。

2. 3 計測項目

両試験体とも以下の項目に関して計測を行った。

(1) 荷重

小型試験体については、MTS製試験機の出力により、大型試験体はロードセルによって荷重を測定した。

(2) 変位

各試験体とも、試験体中央付近に変位計を取り付け、両ブロックの相対変位(ずれ)を測定した。

(3) 鉄筋ひずみ

ひずみゲージを鉄筋の中心軸に対して加力側と、その反対側に位置するよう縦リブに貼付し、ずれ変位を伴う鉄筋の曲げひずみと軸ひずみの両者を検出できるようにした。小型試験体については鉄筋径 d に対して、せん断面から $0d$ 、 $3d$ の位置に、大型試験体については $0d$ 、 $1.5d$ 、 $3.5d$ 、 $5d$ 、 $10d$ の位置にそれぞれ貼付した。

3. 実験結果

3. 1 小型試験体

(1) ひび割れパターン

観察されたひび割れパターンを図-3に示す。図-3(a)のように、直交配筋した試験体については、鉄筋に沿って試験体の表裏の両方に割裂ひび割れが発生していることが確認できた。一方で、図-3(b)より、鉄筋が角度 α を有する試験体においては、鉄筋に沿ったひび割れは観察されなかった。

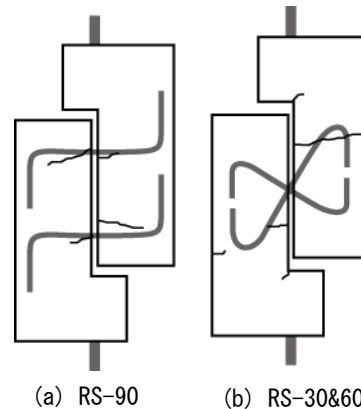


図-3 ひび割れパターン

(2) 履歴特性

試験により得られた全試験体の荷重-変位関係を図

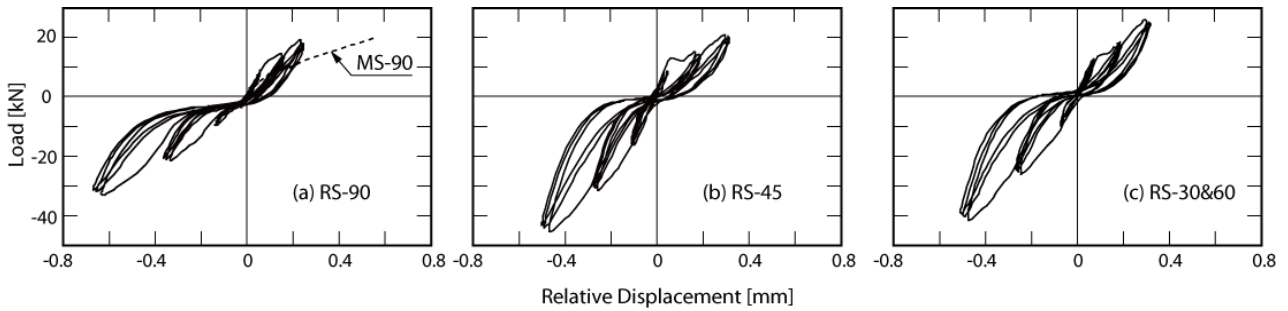


図-4 履歴曲線

図-4に示す。なお、せん断力により両コンクリートブロックが互いに垂直方向に離れる方向を正方向とし、その方向の荷重を引張荷重と定義する。

図-4より、全ての試験体において、履歴曲線が非対称となっていることがわかる。これは、引張荷重に対するコンクリートかぶりが不十分であったため、引張載荷時に割裂ひび割れが開口してしまう一方で、圧縮載荷時にはひび割れが閉じる方向に働くためである。また、引張載荷時において測定された相対変位には、必然的にひび割れ開口量が含まれるため、その結果、非対称性が現れることとなる。また、図-4(a)において単調載荷の結果(MS-90)が交番載荷の包絡線となっていないことは、微小変位域でひび割れ発生荷重に差異のあることが考えられる。

さらに、履歴曲線はいずれもピンチングモードが顕著に現れており、エネルギー吸収能に乏しいものとなった。これは、ひび割れの進展や開口が支配的になる一方で、鉄筋が塑性挙動を示さなかったことによるものと考えられる。

(3) せん断伝達メカニズム

図-5は、鉄筋の変形に伴い、せん断面付近のコンクリートが圧砕されることで、鉄筋が片持ち梁のように振る舞うと仮定し、界面から固定端までのコンクリートのめり込みによる中間反力が存在しないとしたモデルである。このモデルにより、作用せん断力の伝達メカニズムについて考える。なお、試験体には2本の鉄筋を配筋しているが、それぞれの鉄筋において、圧縮・引張によらず同程度のひずみが検出されており、その傾向は、一軸降伏ひずみ直前の値まで認められていたことから、1本の鉄筋が作用せん断力Pの1/2ずつ負担しているものとして簡易的に検討した。また、ここでは、式(1)により算出された固定端までの距離が、3d位置のゲージまで達していないこと、さらには、3d位置でのひずみの値が小さかったことから、せん断面近傍のひずみゲージでの測定値についてのみ検討することとした。

図中Qは、せん断面近傍に貼付したひずみゲージの測

定値から、その位置でのせん断力（モーメント分布の傾き）と軸力を式(2)~(3)により算出し、式(4)のように各々の加力方向成分を足し合わせたものである。このQと作用せん断力Pを比較したものが図-6であり、両荷重一変位関係は良く一致していることがわかる。従って、試験体RS-45において、加えたせん断力は、鉄筋の曲げ作用と軸力作用として伝達されていたと言える。同時に、仮定したモデルが妥当であったことも検証できた。さらに、前途のゲージ位置でのせん断力 Q_M と軸力 Q_N を、作用せん断力Pで正規化した場合の各々の比は、図-7に示すように概ね15:85で分担していたことがわかる。

$$L_B = \sqrt[3]{\alpha EI \frac{\delta}{P}} \quad (1)$$

$$Q_M = M_{exp.} / x \quad (2)$$

$$Q_N = \epsilon_N E_s A_s \quad (3)$$

$$Q = Q_M \sin \alpha + Q_N \cos \alpha \quad (4)$$

ここに、

P：作用せん断力

δ ：測定相対変位

L_B ：せん断面から固定端までの距離

Q_M ：ゲージ位置でのせん断力

Q_N ：ゲージ位置での軸力

$M_{exp.}$ ：曲げひずみより算出されるモーメント

x：せん断面からひずみゲージまでの距離

ϵ_N ：せん断面近傍ひずみゲージの軸ひずみ

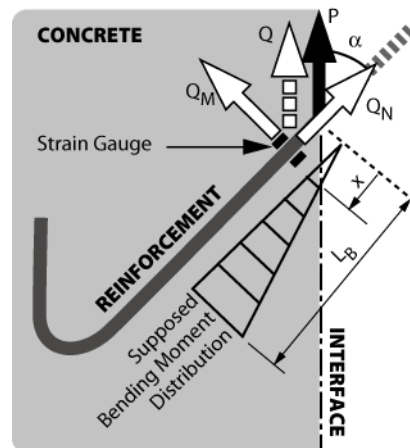


図-5 算定荷重Qの定義

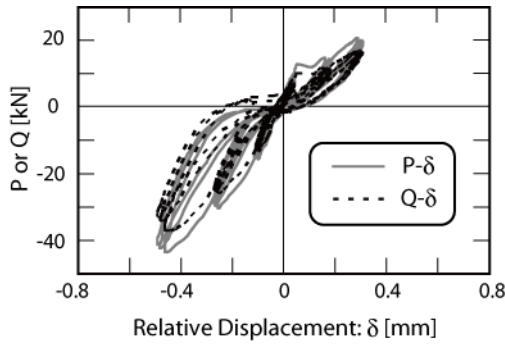


図-6 P、Q-変位関係

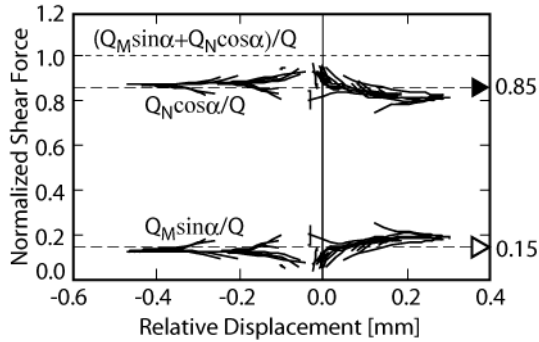


図-7 曲げ、軸力分担比

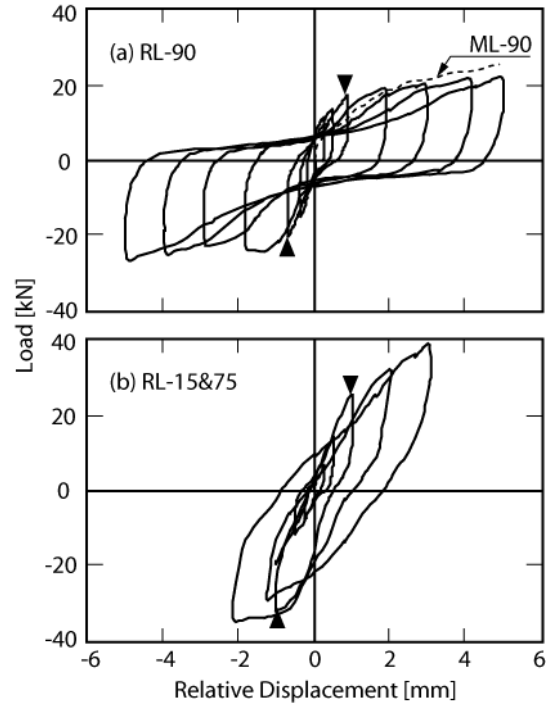


図-8 荷重-変位関係

3. 2 大型試験体

(1) 履歴特性

はじめに、接合面に対して直交配筋された試験体 RL-90 から得られた履歴曲線を図-8 (a) に示す。なお、図-8 (a) 中の▼点は剛性が低下している点を示している。また、破線は単調載荷試験体 ML-90 の試験結果を示しており、履歴曲線の包絡線にほぼ対応していた。

履歴曲線は、除荷時においてスリップ型の挙動を示しており、鉄筋角度を同じとする小型試験体 RS-90 から得られた図-4 (a) と同様の傾向を示した。ただし、与えた正負荷重に対しては履歴曲線は対称性を有しており、大きな履歴面積を描いていた。これは、十分なコンクリートかぶりを与えたことにより鉄筋の周りに大きなひび割れが生じなかったことによるものと考えられる。

次に、接合面に対して斜交配筋された試験体 RL-15&75 から得られた履歴曲線を図-8 (b) に示す。図-8 (b) 中の▼点は、図-8 (a) と同様の点を表している。前述の直交配筋に比べて、剛性が顕著に増加した。また、包絡線の形状がすべり挙動のない紡錘型となり、配筋角度により履歴曲線形状に変化が見られた。これらは、斜交配筋することでもたらされた重要な差異である。

ここで、図-9 に示される方法で算出される等価粘性減衰定数 h_{eq} を求めると表-7 のようになり、大型試験体の値は小型試験体の値より非常に大きくなっている。これは、十分なコンクリートかぶりが鉄筋周りに存在している場合、鉄筋が減衰装置として利用できる可能性を示していると言える。なお、表-7 の値は、小型試験体、

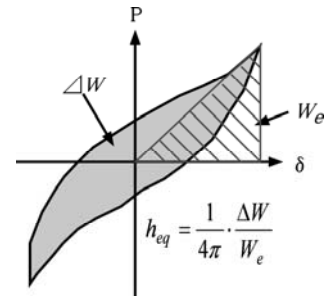


図-9 等価粘性減衰定数 h_{eq} の定義

表-7 各供試体の h_{eq} 値

供試体	h_{eq}	変位振幅[mm]
RS-90	4.1	0.3
RS-45	5.6	0.3
RL-90	22.7	0.5
RL-15&75	19.8	0.5

大型試験体の変位振幅がそれぞれ 0.3mm, 0.5mm の時の値を示している。

(2) せん断伝達メカニズム

図-10 (a) は、試験体 RL-90 における、各振幅での鉄筋軸方向のひずみ分布を示したものである。また、図-10 (b) は対応する曲げひずみ、軸ひずみの分布を示している。図-10 より、曲げの最大点は、常にせん断面から鉄筋径の 1.5 倍の位置にあり、鉄筋径の 10 倍の位置でひずみが収束していることがわかる。これは、文献 3) において示されている実験結果と良く一致している。ただし、本実験においては、ひずみゲージ貼付の都合上、1.5d よりせん断面に近い位置での測定は行わなかったが、

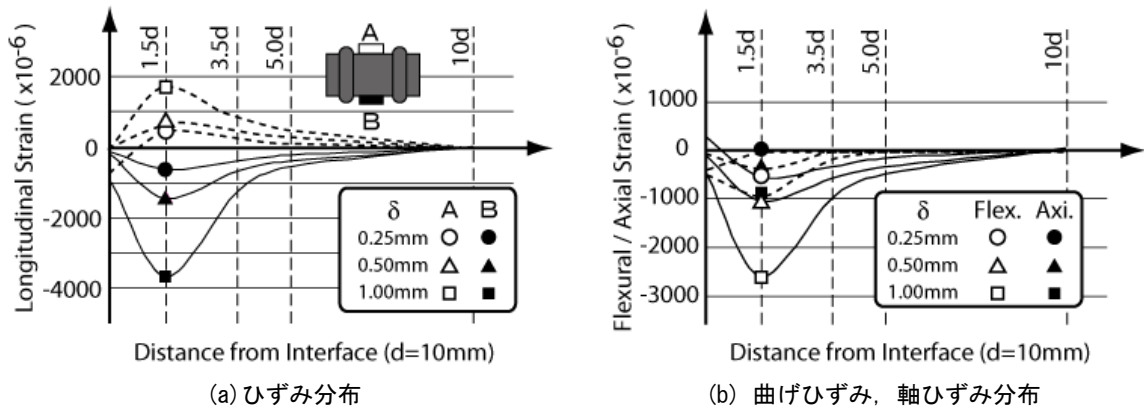


図-10 ひずみ分布 (RL-90)

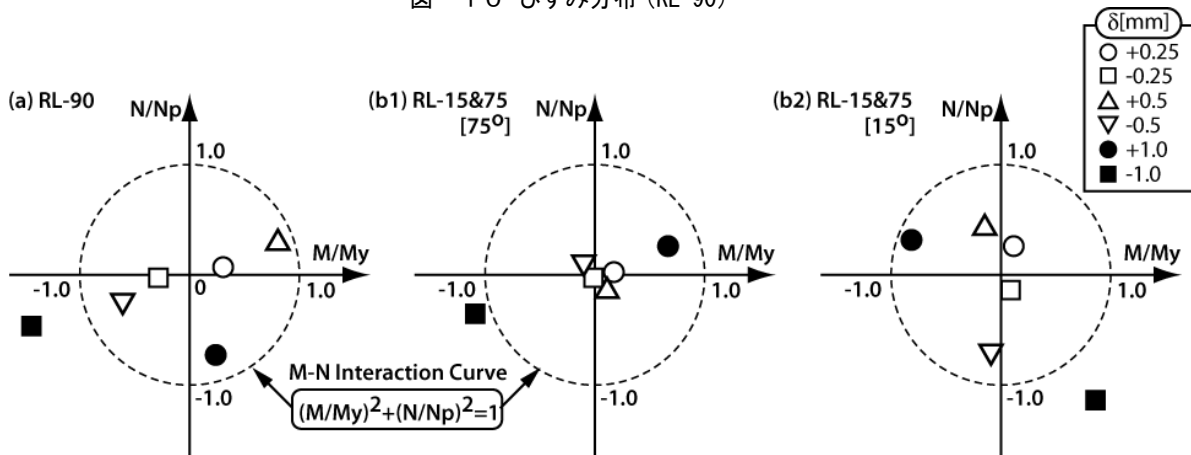


図-11 M-N 相関曲線

測定を行ってれば、ひずみの最大点がせん断面により近い位置で確認されていた可能性もある。しかし、ここでは、図-10と文献3)の成果を踏まえ、接合面から1.5dの深さが両端固定梁型のせん断伝達機構における端点、すなわち固定点であるとみなし、この地点のひずみ挙動に以下では着目する。

図-11(a)は試験体 RL-90 の組み合わせ力の履歴について、降伏モーメントと軸降伏力で正規化した双方2次の相関曲線上にプロットしたものである。なお、測定ひずみから算出される曲げモーメントと軸力は、鉄筋の降伏を簡便に捉えるため、弾性計算により算出しており、相関曲線の外側に出ることや履歴に乱れが生じることで、鉄筋の降伏やその他の変状があったものとみなしている。図-11(a)より、変位振幅が1.0mmより小さい時、ある傾きを伴って、原点に対称の履歴を描いている。その後、変位振幅が1.0mmに到達すると、履歴は乱れ、相関曲線の外へ出る、すなわち、鉄筋が降伏した状態となる。この変位振幅1.0mmでの現象により、図-8(a)で着目した剛性低下の点を説明できる。

さらに、斜交配筋された試験体 RL-15&75 に対して、同様の方法で履歴を調べたものを図-11(b1)~(b2)に示す。なお、(b1)がせん断面に対して75度傾いた鉄

筋を、(b2)が15度傾いた鉄筋を示している。図-11より、変位振幅が1.0mmより小さい場合、せん断面に近い傾きを持つ後者(b2)が、与えられたせん断力のほとんどを軸力により負担していたことがうかがえる。一方、前者(b1)は原点付近で留まっているため、ほとんど力が作用していないことがわかる。ここで、図-11(a)より直交配筋した試験体 RL-90 と比較すると、RL-90 は曲げと軸力の両方が生じているのに対し、斜交配筋した試験体 RL-15&75 は主に軸力で負担することが確認できることから、両者のせん断伝達メカニズムの違いが明らかに現れている。

その後、変位振幅が1.0mmに達すると、RL-90と同様、履歴に乱れが生じ、相関曲線の外側にプロットされ、曲げと軸力の両方が生じるようになり、ここでようやく75度筋に力が作用する。以上のことから、図-8(b)で示した着目点についても、説明可能であると考えられる。

4. まとめ

せん断面に斜交配筋された鉄筋を有する2つのシリーズからなる試験体に対して、せん断伝達メカニズム、せん断力-せん断変位履歴特性を調べるために、正負交番荷重実験を行った。得られた結果を以下に示す。

4. 1 小型試験体

- (1) ひび割れの進展，開口など試験体自身への軸引張力の影響が大きく，鉄筋の弾性範囲内での挙動のみ有効な実験となったため，履歴曲線はピンチングモードを呈し，エネルギー吸収能は乏しいものとなった。
- (2) 斜交配筋した鉄筋に対して与えられたせん断力は，曲げ作用と軸力作用により伝達され，その比は斜角45度の試験体で15：85であった。

4. 2 大型試験体

- (1) 荷重方法を変え，コンクリートかぶりを十分に設けたことで，ひび割れ貫通まで至らず，比較的大きな変位まで荷重可能となった。
- (2) 直交配筋した試験体では，履歴曲線に対称性が見られ，その面積も大きくなった。
- (3) 斜交配筋した試験体では，直交配筋した場合より剛性，耐力とも向上し，エネルギー吸収が期待できる紡錘型の履歴を示した。
- (4) せん断伝達メカニズムに関して，直交配筋試験体では曲げと軸力の組合せにより伝達するのに対し，斜

交配筋試験体では，主に軸力で伝達する。特に，鉄筋の弾性範囲内の変位振幅では，せん断面と小さな角をなす鉄筋による軸力負担が圧倒的に大きくなった。

謝辞

試験体作製にあたり，鉄筋の提供等，協力いただいた成信基工（株）に謝意を表す。

参考文献

- 1) 古屋則之，竹本靖：コンクリート打ち継ぎ面でのせん断伝達（その1. 交番繰り返し荷重実験），日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），pp.1645-1646，1976
- 2) E.N.Vintzeleou and T.P.Tassios：Behavior of Dowels under Cyclic Deformations，ACI Structural Journal，pp.18-30，January-February，1987
- 3) 篠田佳男，河野一徳，田中伯明，大野琢海：平滑な接合面における鉄筋のせん断伝達に関する研究，土木学会論文集，No.571，pp.57-67，1997