

論文 インターロッキングスパイラル鉄筋柱のインターロック部せん断伝達機構に関する一考察

柳下文夫*1・田中仁史*2・R. Park*3・東山浩士*4

要旨：本研究は、インターロッキングスパイラル帯鉄筋を有するRC柱部材のインターロック部近傍におけるせん断伝達メカニズムを実験的に検討したものである。せん断ひび割れの角度および各種の配筋の組み合わせをパラメーターとした直接せん断実験を行い、インターロッキングバーに作用するダウエル抵抗力、スパイラル帯鉄筋に生じる幾何学的抵抗力、付加的に配筋したせん断補助筋の効果等に関する評価を試み、さらにそれらの相関性を明らかにした。

キーワード：RC柱部材、インターロッキングバー、スパイラル帯鉄筋、せん断、ダウエル作用

1. はじめに

兵庫県南部地震以来、構造物の設計に際しては部材の強度を向上させることはもとより、じん性を高めることにより、粘りをもって地震に耐えうる構造系とすることが要求項目の大きな柱の一つとなっている。このことは、同地震後に改訂された各種設計規準における耐震設計編¹⁾において、鉄筋コンクリート構造物の耐震性改善の現実的な手段として、帯鉄筋の増量や中間帯鉄筋の配置を原則的に義務づける等構造細目の大幅な改善に至った。他方、近年の建設コストの節減要求は既存の施工法の範囲のみでは達成が困難となり、省力化と急速施工をキーワードに合理的な新構造形式の研究・開発が活発に行われている現状がある。

米国西海岸を中心に建設実績のあるインターロッキング式の橋脚²⁾は、上述の諸問題を解決でき得る構造形式³⁾の一つとして位置付けることできる。筆者らの最近の研究⁴⁾でも、インターロッキングスパイラル帯鉄筋柱は、柱脚近傍部においてコンクリートを効果的に拘束し、中間帯鉄筋を配さずとも十分なじん性を確保できる

構造形式であるという知見を得ている。しかし、せん断破壊の卓越が予測される構造体への適用

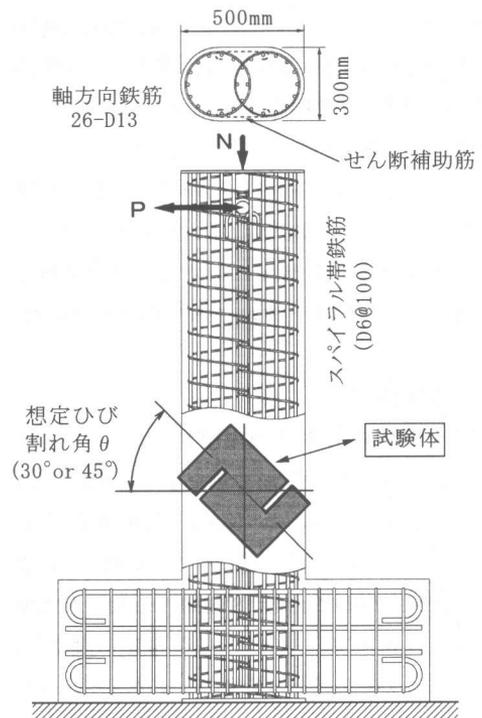
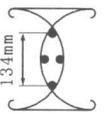
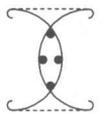
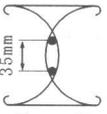
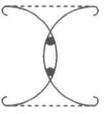
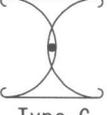
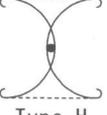


図-1 直接せん断試験体とインターロッキングスパイラル鉄筋柱の配筋詳細

*1 近畿大学助教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)
 *2 京都大学防災研究所教授 地震災害研究部門 Ph. D. (正会員)
 *3 ニューゼーランド・カンタベリー大学名誉教授 Ph. D.
 *4 近畿大学助手 理工学部土木工学科 博士(工学) (正会員)

表-1 試験体一覧

		スパイラル帯鉄筋 (あり) せん断補助筋 (あり)	スパイラル帯鉄筋 (あり) せん断補助筋 (なし)	スパイラル帯鉄筋 (なし) せん断補助筋 (なし)
インターロッキングバーの本数	4			
		Type-A	Type-B	Type-C
		2		
	Type-D		Type-E	Type-F
	1			
		Type-G	Type-H	Type-I

を考えた場合、それに関連する情報の不足は否めない。例えば、インターロック部における配筋状態とせん断伝達の関係には検討すべき課題が存在し、実験的な解明が急務となっている。そこで本研究は、図-1に示すように、インターロッキングスパイラル帯鉄筋柱に斜めせん断ひび割れが生じた場合を想定し、インターロック部の配筋状態を再現した断面に対する直接せん断実験を通してその伝達メカニズムの検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体および使用材料

表-1に各試験体の配筋詳細を示す。試験体は、参考文献4)の柱型試験体(図-1: 基準断面)からインターロック部を切り出す形で、同材質・同サイズの材料を用いて合計18体製作した。せん断ひび割れ角 θ を 30° と 45° の2種類に設定し、インターロッキングバーを4本、2本、1本とした3種の配筋状態に、それぞれにスパイラル帯鉄筋とせん断補助筋を配筋したものである。なお、スパイラル帯鉄筋とインターロッキングバーは軟鋼結束線を用いて連結させた。また、インターロッキングバー、スパイラル帯鉄筋、せん断補助筋等の定着端は、それぞれ半円形フック

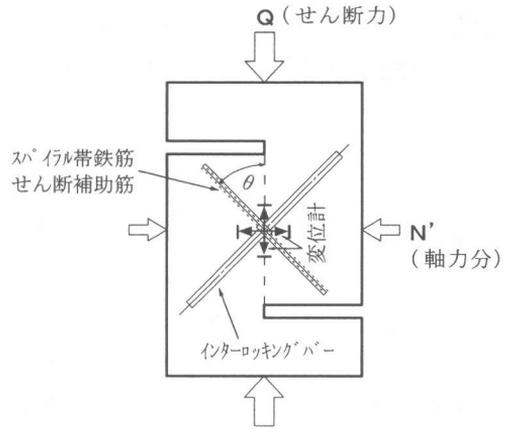


図-2 直接せん断実験の荷重方法

表-2 試験体に加えられた一定横力(N': 軸力分)

θ	インターロッキングバーの本数 & Type		
	4本	2本	1本
	A, B, C	D, E, F	G, H, I
30°	3.08	1.56	0.78
45°	2.51	1.27	0.64

単位: kN

とし、抜け出しが生じぬよう対処した。打設されたコンクリートは早強セメントを使用したレディーミクストコンクリート(実圧縮強度 32N/mm^2)である。また、鉄筋はいずれもSD295を使用し、D13(インターロッキングバー)の実降伏点強度は 341N/mm^2 、D6(スパイラル帯鉄筋&せん断補助筋)の実降伏点強度は 355N/mm^2 である。

2.2 実験方法

図-2に荷重方法を示す。実験にはプッシュオフ型の試験体を用い、一定横力下において漸増の静的圧縮力を与えた。横力は、柱型試験体の基準断面においてインターロッキングバーの本数のみを変化(4本、2本、1本)させ、同試験体に作用させた一定軸力(0.98N/mm^2)から換算したインターロッキングバー1本当たりの弾性圧縮軸方向応力を同一にするという条件の基で決定した。なお、横力荷重後の同鉄筋の軸方向ひずみは、柱型試験体のものとほぼ同一であることが確認されている。一方、インターロッキングバーが斜めに配筋されているため、横力による曲げ成分が同鉄筋に作用することになるが、その値

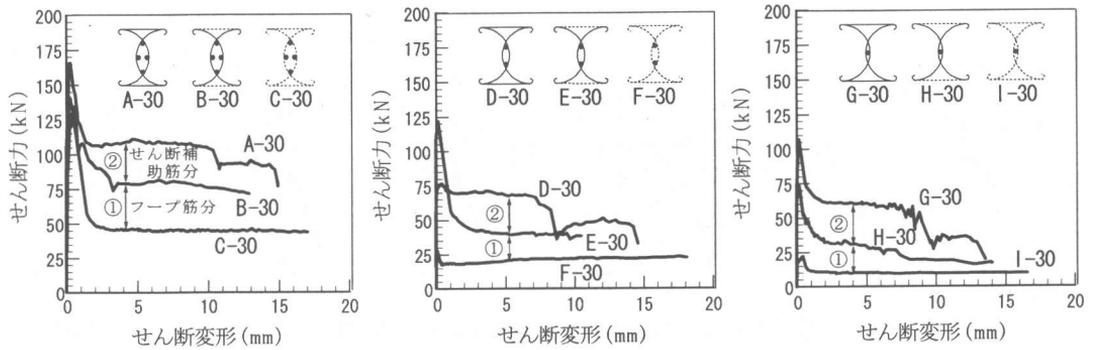


図-3 せん断力とせん断変形の関係(想定ひび割れ角: 30°)

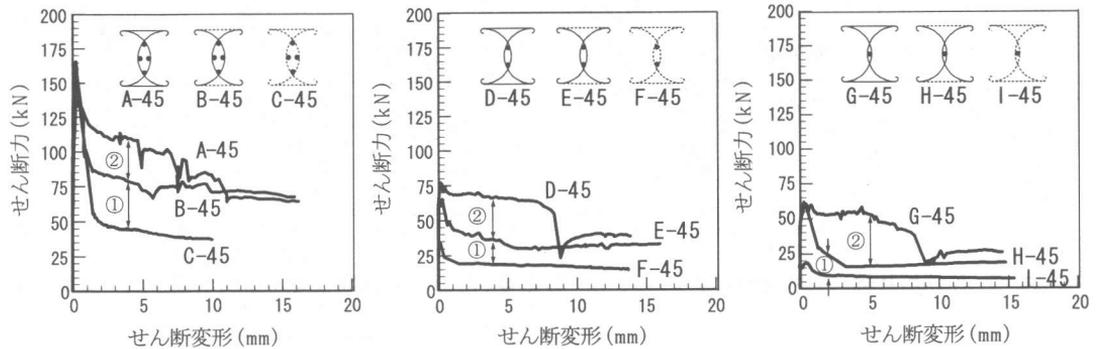


図-4 せん断力とせん断変形の関係(想定ひび割れ角: 45°)

は小さく、実験結果に及ぼす影響は軽微であると判断した。各試験体に与えられた横力を表-2に示す。なお、一定横力の制御は、荷重計からのフィードバック信号を利用した高圧サーボジャッキ制御システムにより行った。荷重はロードセルにより、また、試験体中央部の表裏面の鉛直ずれ(せん断変形)および開き(ひび割れ幅)を高感度変位計によりそれぞれ計測した。インターロッキングバー、スパイラル帯鉄筋、せん断補助筋等の想定ひび割れ面での軸方向ひずみはひずみゲージにより測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 せん断力とせん断変形の関係

図-3および図-4に、実験から得られた全試験体のせん断力-せん断変形関係を示す。同図は、インターロッキングバーの本数を同じくした断面に、スパイラル帯鉄筋、せん断補助筋を順に付加させたものを同群として表した。すなわち、同図からは、3者それぞれの分担傾向が直接

得られることになる。なお、配筋が複雑となる試験体については、仮想ひび割れ面において左右のコンクリートが完全に縁が切られておらず、骨材のかみ合いによるせん断力の上昇が見られた。したがって、実験結果の考察は、このかみ合いが切れた段階(せん断変形1.0~1.5mm)以降のせん断力が比較的安定した領域において平均値をもって行った。なお、同図の傾向は、後述のインターロッキングバー、スパイラル帯鉄筋、せん断補助筋等々の負担せん断力の検討に対して反映させる。

3.2 ひび割れ幅

図-5および図-6に、全試験体のせん断変形-ひび割れ幅の関係を示す。同図より、せん断変形の増加に伴いひび割れ幅が大きくなる傾向が示された。また、ひび割れ角はインターロッキングバーの剛性に関係し、ひび割れ角(図-2中の θ)が大きくなる(試験体では、せん断力の作用線方向に対して角度が小さく配筋された場合は剛性が大きくなる意)ほどせん断変形は抑制され

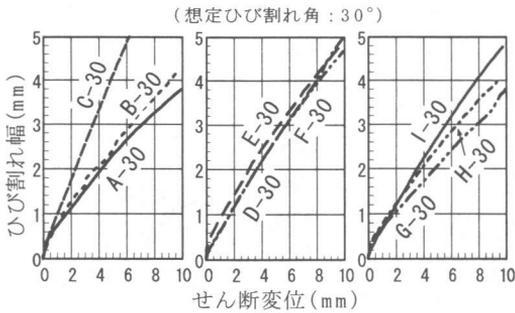


図-5 ひび割れ幅に対するスパイラル鉄筋とせん断補助筋の寄与(各インターロッキングバー：同一本数)

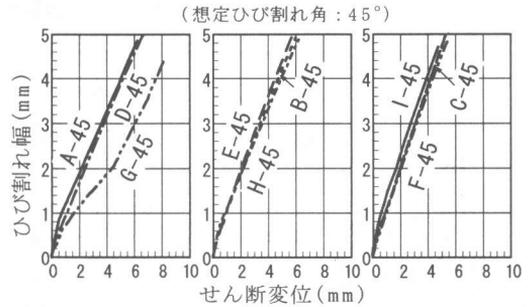
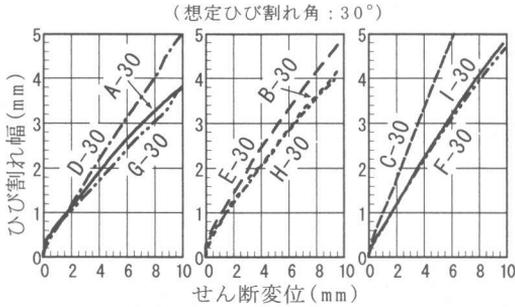
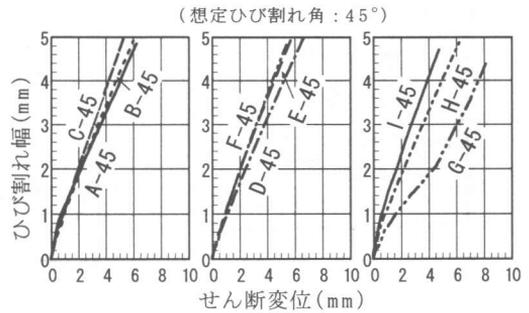


図-6 ひび割れ幅に対するのインターロッキングバーの寄与(各スパイラル鉄筋&せん断補助筋：同一条件)

た。しかし、その場合、ひび割れ幅の開口が大きくなる傾向が示された。せん断補助筋の存在はひび割れ幅の抑制に繋がった。しかし、その程度は小さい。

3.3 せん断補助筋の負担せん断力

図-7に、せん断補助筋の負担せん断力を示す。せん断補助筋は、せん断変形およびひび割れ幅の開口がともに僅かな段階で降伏に至り、破断に至るまで大きなせん断力を負担した。同図から、関係する試験体のせん断補助筋の作用強度は、全て実降伏強度から実引張強度間のひずみ硬化域に存在することがわかる。なお、ひび割れ角に対する相関性は認められなかった。

3.4 インターロッキングバーの負担せん断力

図-8に試験体C, F, Iシリーズのインターロッキングバーの負担せん断力を示す。同図より、負担せん断力は同鉄筋の本数にほぼ比例して増加していることがわかる。また、ひび割れ角度についてはその影響は僅かである。図-9には、せん断変形と開き(ひび割れ開口幅)から求めた、インターロッキングバーの変形角 α を示す。同図より、ひび割れ角 θ が45°の場合、インター

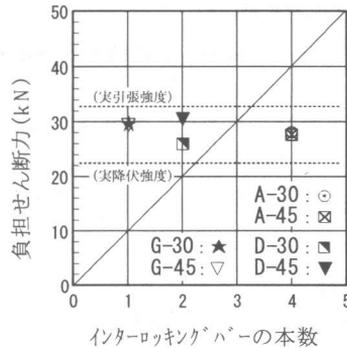


図-7 せん断補助筋の負担せん断力

ロッキングバーの本数に関係なく変形角はほぼ同様の値を示した。しかし、 θ が30°の場合、インターロッキングバーの本数に比して変形角が大きくなる傾向(図-12参照：実際の変形は小さい)が示された。また、図-10は、ダウエル作用のメカニズムの一つであるKinkingの抵抗原理⁵⁾(図-12)から算出した実験値 V_d を用いて求めたインターロッキングバーの降伏比率(f_s / f_{sy} , ここで f_s :同鉄筋の換算軸方向応力)を示したものである。同図は、同鉄筋量が多いほど、また、ひび割れ角が大きいくほど降伏率が高くなる傾向を示した。これらの傾向と図-8の傾向を総合する

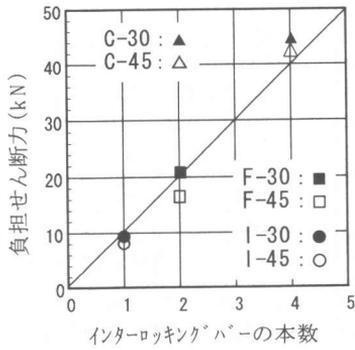


図-8 インターロッキングバーの負担せん断力

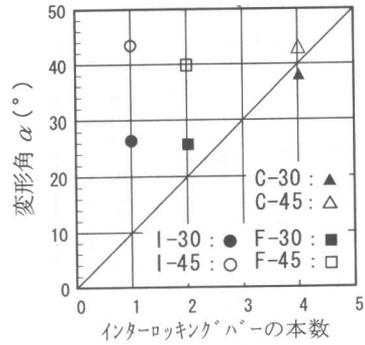


図-9 せん断変形と開きから求めたインターロッキングバーの変形角： $\alpha = \tan^{-1}$ (開き/せん断変形)

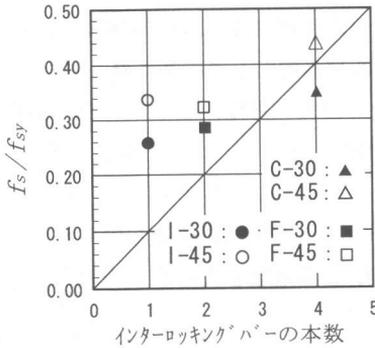


図-10 Kinkingのメカニズムから求めた f_s/f_{sy}

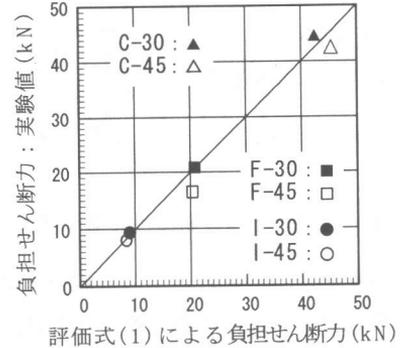


図-11 評価式によるインターロッキングバーの負担せん断力

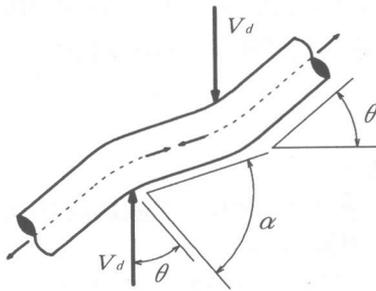


図-12 Kinkingメカニズムによるタワール抵抗力

と、インターロッキングバーの剛性はせん断変形に対して有効に働くが、その分、ひび割れの開口幅は大きくなるということになる。この傾向は、インターロッキングバーの実測軸方向ひずみのデータと整合した。図-11に、以上の傾向を基にして得た評価式(1)による値と実験値との比較を示す。

3.5 スパイラル帯鉄筋の負担せん断力

表-1から判るように、断面に配したインターロッキングバーの本数により、双スパイラルの

$$V_d = n A_s \eta f_{sy} \cos \alpha \cos \theta \quad (1)$$

ただし、

$$\eta = 0.165(\sqrt{n+2}) \sin \theta \quad (2)$$

ここに

n : インターロッキングバーの本数

A_s : 同 1本当たりの断面積 (mm^2)

f_{sy} : 同 降伏応力度 (N/mm^2)

α : 同 変形角

θ : ひび割れ角

交点における接線と双円中心軸との角度(図-14中の θ_s)が異なる。ここで、各試験体のスパイラル帯鉄筋の負担せん断力を図-14に示すように、スパイラル鉄筋の引張分力が幾何学的に前出の θ_s の関数(試験体Bシリーズ： $\theta_s=50^\circ$ ，Eシリーズ： $\theta_s=65.84^\circ$ ，Hシリーズ： $\theta_s=68.13^\circ$)として表わせるなら、図-13に示す各試験体におけるスパイラル帯鉄筋の負担するせん断力の傾向とは整合が取れる。図-15にこの幾何学的評価と実験値との比較を示す。これらの結果から、イン

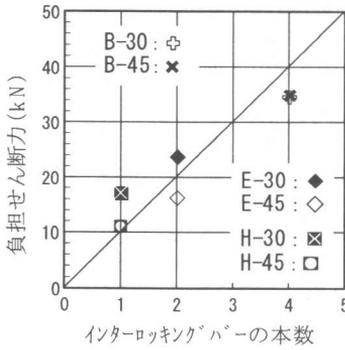


図-13 スパイラル鉄筋の負担せん断力

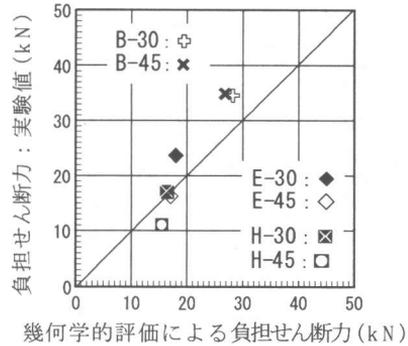


図-15 スパイラル鉄筋の負担せん断力の比較

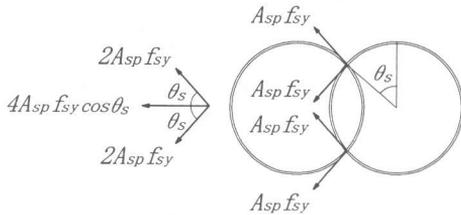


図-14 スパイラル鉄筋に生じる引張力

ターロック部にひび割れが生じた場合、スパイラル鉄筋を介して伝達されるせん断力は、角度 θ_s で補正した単スパイラル鉄筋の降伏強度のほぼ2倍となることがわかった。なお、両スパイラル鉄筋の接合点近傍(ひび割れ発生点)の実軸方向ひずみは全て引張降伏値を越えている。また、双スパイラル鉄筋の中心間距離を大きく取るほど同鉄筋のせん断補強筋としての機能を低下させるということを示された。

4. まとめ

インターロッキングスパイラル鉄筋柱のインターロック部を対象とした直接せん断実験を行い、インターロッキングバーを中心としたせん断伝達のメカニズムを検討した。実験結果をまとめると以下ようになる。

- (1) インターロッキングバーはダウエル作用によりせん断力を伝達し、その抵抗力はKinkingのメカニズムにより評価ができる。なお、同鉄筋は終局域まで降伏に達しなかった。
- (2) インターロッキングバーの負担せん断力は、概ねその本数に比例して増加する。また、同負担

- 力に対するせん断ひび割れ角の影響は小さい。
- (3) スパイラル帯鉄筋は、斜めひび割れ発生後、直ちにせん断補強筋として有効に働く。ただし、負担せん断力の大きさは、双スパイラル帯鉄筋の交差角が浅い(インターロック部が小さい)ほどその値は小さい。なおこの傾向は、インターロッキングスパイラル鉄筋柱における双スパイラル鉄筋の中心間距離を決めるための重要な指標となる。
 - (4) せん断補助筋はひび割れ幅が小さな段階で降伏点に達し、破断に至るまでの間、比較的大きなせん断力を負担した。また、同鉄筋のひび割れ幅の抑制に関する効果は認められるものの、その程度は小さい。

【参考文献】

- 1) 例えば、(社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，1996。
- 2) CALTRANS(1998), "Bridge Design Specifications Manual," California Department of Transportation, Division of Structures, Sacramento, California.
- 3) 藤倉修一，川島一彦，庄司 学，張建東，武村浩志：インターロッキング式帯鉄筋を有するRC橋脚の耐震性，土木学会論文集，No. 640/I-50, pp. 71-88, 2000.1
- 4) 柳下文夫，田中仁史，Park, R.：インターロッキングスパイラル鉄筋を有する鉄筋コンクリート橋脚の耐震性能，土木学会論文集，No. 662/V-49, pp. 91-103, 2000.11
- 5) Park, R. and Paulay, T.：Reinforced Concrete Structures, John Wiley and Sons, New York, 1975, pp. 769.