

報告 軸方向鉄筋内側に配置したスパイラル鉄筋の間隔が変形性能に及ぼす影響

木野 淳一^{*1}・岩田 道敏^{*2}

要旨：軸方向鉄筋の内側に円形スパイラル鉄筋を配置することで、大きな地震時変形性能を得られることが確認されている¹⁾。この方法におけるスパイラル鉄筋の鉄筋間隔が RC 部材の変形性能に及ぼす影響について、交番載荷実験を行った。実験の結果、鉄筋のあきを最大粗骨材寸法の 2 倍としても、降伏変位の 20 倍以上の領域で若干変形性能の低下が見られたものの、大きな変形性能を得ることがわかった。

キーワード：交番載荷実験，帯鉄筋，変形性能，鉄筋間隔

1. はじめに

大規模地震時における鉄筋コンクリート（以下，RC という）構造物の耐震設計方法として、十分な変形性能を取ることで安全性を確保するという考え方がある。また、道路・鉄道等の交通インフラでは、大規模地震を構造物が経験した後、早期に復旧できるレベルの損傷となることが必要である。

阪神・淡路大震災における被害を教訓として、RC 柱部材については軸方向鉄筋を取り囲むように配置した帯鉄筋（以下，外巻き帯鉄筋という）を多量に使用して変形性能を高めている。しかし、外巻き帯鉄筋量を多量に配置した柱供試体においては、大変形領域において軸方向鉄筋のはらみ出しにより外巻き帯鉄筋のフックが外れ、急激に耐力力が低下する挙動を示した²⁾。また、破壊形態は曲げ破壊となるものの、柱の損傷状況としては、柱基部圧縮縁とフーチング天端から高さ 1D 付近（D：柱断面高さ）を結ぶせん断ひび割れにより軸方向鉄筋の内側のコンクリートが完全に分断され、このひび割れに挟まれるコンクリートがクサビ状に欠損する形態となった³⁾。このため、変形性能の向上に限界があった。

そこで、少量の外巻き帯鉄筋に加え、軸方向鉄

筋の内側に円形スパイラル鉄筋を配置する（以下，内巻きスパイラル筋という）ことを考案し、従来の配筋方法に比べ飛躍的に変形性能を向上できることを実験により確認している¹⁾。

今回は、この内巻きスパイラル筋を使用した RC 柱について、内巻きスパイラル筋の鉄筋間隔が変形性能に及ぼす影響について、交番載荷実験を行った結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

供試体の諸元を表 1 に示す。また、供試体の概要図を図 1 に示す。

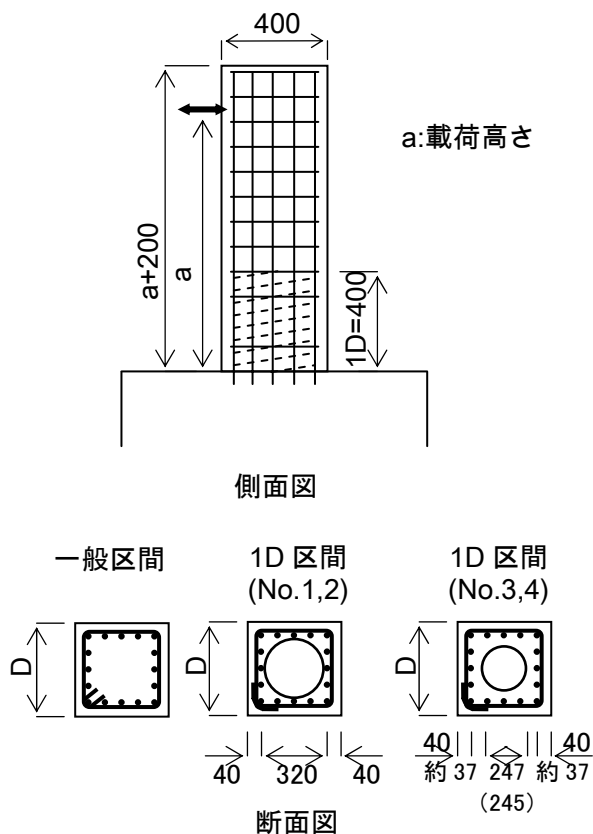
供試体は、フーチングを有する片持ち形式の柱部材で、柱断面は 400mm×400mm の正方形断面とした。内巻きスパイラル筋は、図 1 に示すように、RC 部材降伏後に塑性ヒンジが発生する、柱基部から柱断面高さ D までの区間（以下，1D 区間という）に配置している。また、供試体 No.3, No.4 は、内巻きスパイラル筋を軸方向鉄筋よりも、終局時有効高さが有効高さの 85%程度になるよう、内側に離して配置している。ここで、終局時有効高さとは、圧縮側の内巻きスパイラル筋位置から引張側の最外縁軸方向鉄筋までの長さをいう。これは、既往の研究¹⁾におい

*1 東日本旅客鉄道株式会社 東京工事事務所工事管理室 工修（正会員）

*2 東日本旅客鉄道株式会社 東京工事事務所工事管理室副課長 工修（正会員）

表－１ 供試体諸元

記号	内巻きスパイラル筋				載荷高さ (mm)	コンクリート強度 (N/mm ²)	
	公称径 (mm)	間隔 (mm)	降伏強度 (N/mm ²)	らせん半径 (mm)		フーチング	柱
No.1	5.1	13	1262	296	900	30.0	29.0
No.2	10.7	61	1384	290		37.5	34.7
No.3	6.4	26	1360	247	1150	27.1	32.0
No.4	7.1	50	1380	245		29.5	24.3



図－１ 供試体概要図

て、内巻きスパイラル筋を配置した RC 柱の終局時の損傷状況が露出した軸方向鉄筋と内巻きスパイラル筋に囲まれたコンクリートのみとなると報告されていることによる。なお、終局時有効高さを変化させたのは、軸方向鉄筋が 2 段配筋されている場合や、現場での施工時において、内巻きスパイラル筋が軸方向鉄筋より小さく加工された場合についての影響を確認するために行ったものである。

外巻き帯鉄筋は、内巻きスパイラル筋を配置している 1D 区間とそれ以外の区間（以下、一般

区間という）で配置量を変化させている。一般区間では、部材が計算上曲げ耐力に達するときのせん断力 V_{mu} に対して、せん断耐力 V_{yd} が $V_{mu}/V_{yd} \leq 1.0$ となる外巻き帯鉄筋量を配置し、鋭角フックによりコアコンクリート内に定着した。フーチングから上の 1D 区間では、外巻き帯鉄筋の定着を直角フックとし、内巻きスパイラル筋と外巻き帯鉄筋をいずれもせん断補強鉄筋として計算したせん断耐力が、 $V_{mu}/V_{yd} \leq 1.0$ となるように配置した。ここで、外巻き帯鉄筋のフックを直角フックとした理由は、軸方向鉄筋の内側に内巻きスパイラル筋が配置されていること、また、本実験が、内巻きスパイラル筋の鉄筋間隔が変形性能に及ぼす影響の把握を主な目的としているため、軸方向鉄筋のはらみ出し・かぶりコンクリートのはく落により容易に外れ、軸方向鉄筋の座屈長を長くすることにより、軸方向鉄筋はらみ出し後の低サイクル疲労による軸方向鉄筋破断により変形性能が決定されないようにするためである。

軸方向鉄筋は SD345 D19 を一列あたり 5 本、外巻き帯鉄筋は SD345 D13、柱・フーチングのコンクリート設計基準強度は 27N/mm^2 、内巻きスパイラル筋は SBPDN1275/1420 を使用している。

今回の実験で主として着目したパラメータは、内巻きスパイラル筋の間隔である。No.1,3 供試体は、内巻きスパイラル筋の鉄筋間隔を、純あきで最大粗骨材寸法程度としたもの、No.2,4 供試体は、内巻きスパイラル筋の鉄筋間隔を、純

あきで最大粗骨材寸法の 2 倍程度をあけたものである。ただし、内巻きスパイラル筋の鉄筋径は、降伏変位の 20 倍程度まで載荷しても内巻きスパイラル筋内側のコンクリート（以下、コアコンクリートという）に水平ひび割れは生じるが、断面欠損がほとんど生じないとされる量⁴⁾を配置するため、内巻きスパイラル筋の間隔に応じて鉄筋径を変化させている。

2.2 交番載荷概要

水平力はアクチュエーターにより柱頭部付近に載荷し、軸方向圧縮力は鉛直ジャッキにより柱頭部に与えた。なお、鉛直ジャッキはスライド機能により供試体水平変位に追従させており、また、柱頭部付近はヒンジ機能を有し、常に鉛直に加力するようになっている。

載荷手順は、以下の通りである。

- ①鉛直ジャッキにより所定の軸方向圧縮応力度 (0.98N/mm^2)を導入する。
- ②最外縁の軸方向鉄筋ひずみの測定値が材料試験の結果から求まる降伏ひずみに達するまで正側に荷重制御で載荷する。引き続き、負側について同様に載荷する。（この時の正側載荷、負側載荷の載荷点変位量の平均値を降伏変位 δ_y とする。）
- ③アクチュエーターを変位制御に切替え、正負交番で 1 サイクルずつ載荷する。
- ④以下の条件に達した時点で、載荷を終了とする。

・鉛直ジャッキの水平移動量の限界に達した場合

・軸方向鉄筋が破断した場合

・荷重が降伏荷重の 20%以下となった場合

通常の交番載荷実験では、各変位での載荷サイクルを 3 回、整数倍ごとに載荷するのが一般的である。しかし、この方法では、 $10\delta_y$ 載荷付近で軸方向鉄筋が低サイクル疲労の影響により破断してしまう可能性が非常に高い。本実験では、過去の地震でこのような破壊形態があまり確認されておらず、その可能性も小さいという指摘もあること⁵⁾、また、部材としての変形性能

を評価する目的から、降伏変位以後は $20\delta_y$ 載荷までに 7 回程度の交番載荷となるよう、実験状況を観察しながら載荷パターンを決定した。

3. 実験結果および考察

3.1 損傷状況

交番載荷実験による供試体の損傷過程を、No.3 供試体を代表として以下に記す。

軸方向鉄筋が降伏ひずみに達する $1\delta_y$ までの載荷では曲げひび割れが発生し、一部の曲げひび割れは斜めひび割れに移行した。（写真－1）

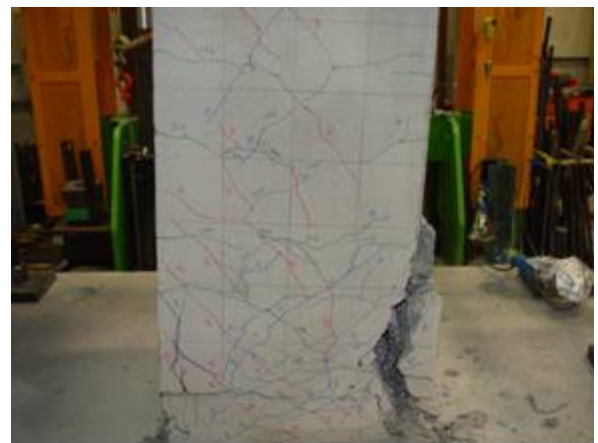


写真－1 $1\delta_y$ 載荷時点の損傷状況

$2\delta_y$ 載荷時点は同様の傾向で、既存ひび割れ幅の拡大・伸展、ひび割れの増加が見られた。

$4\delta_y$ 載荷時点で、柱基部にコンクリート圧壊の兆候が見られ、柱側面に縦方向のひび割れも確認された。

$8\delta_y$ 載荷では軸方向鉄筋のはらみ出しにより、1D 区間のかぶりコンクリートのはく離が発生し始めた。これに伴い、負側載荷では荷重の低下



写真－2 $8\delta_y$ 載荷時点の損傷状況

が発生している。(写真－２)

その後、載荷が進むにつれてかぶりコンクリートのはく離・はく落が進行し、荷重低下が進行していく。

16 δ_y 載荷時点では、軸方向鉄筋と内巻きスパイラル筋の間のコンクリートのはく離・はく落も発生し、徐々に内巻きスパイラル筋が露出していった。(写真－３)



写真－３ 16 δ_y 載荷時点の損傷状況

この後、載荷が進むに従い、内巻きスパイラル筋外側のコンクリートはく落範囲が広がり、1D 区間内の内巻きスパイラル筋がほぼ露出した状態で実験終了となった。(写真－４)



写真－４ 28 δ_y 載荷時点の損傷状況

なお、かぶりコンクリートのはく落は、1D 区間に集中して発生した。これは、1D 区間内に損傷を集中させるために、外巻き帯鉄筋の定着方法を 1D 区間と一般区間で変えているため、軸方向鉄筋のはらみ出しが 1D 区間内に集中したことによるものと考えられる。

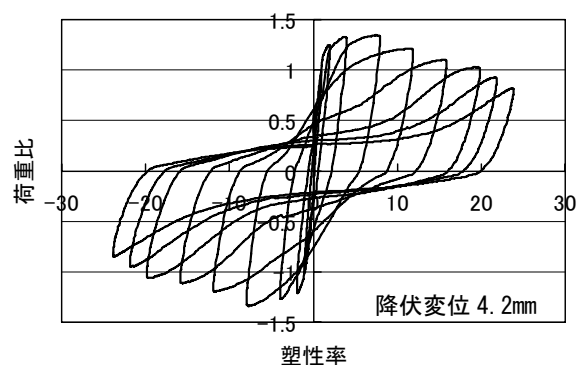
また、一般区間の損傷状況は、4 δ_y 載荷程度までは斜めひび割れの増加・ひび割れ幅の拡大などが見られたものの、1D 区間かぶりコンクリートのはく離・はく落が発生した 8 δ_y 載荷以降は損傷が進行せず、大変形時の損傷は、内巻きスパイラル筋を配置した 1D 区間部分に集中する結果となった。

3.2 荷重－変位曲線

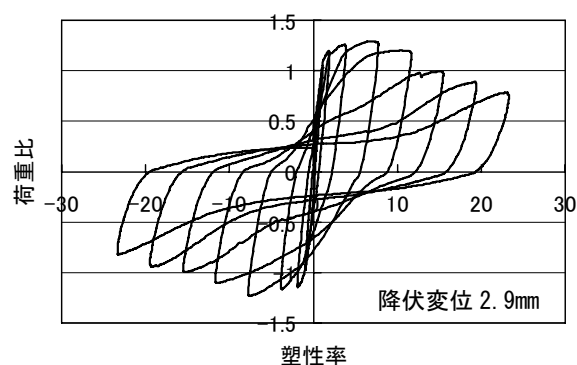
図－２，３，４，５に、No.1, No.2, No.3, No.4 各供試体の無次元化した荷重－変位履歴曲線を示す。ここで、塑性率とは、実験で得られた変位を降伏変位で除したもので、荷重比は実験で得られた荷重を降伏荷重で除したものである。

いずれの供試体も、降伏変位以後、8 δ_y 載荷程度で最大荷重に達している。この傾向は、供試体寸法、材料物性、軸方向鉄筋量を同一とし、内巻きスパイラル筋の代わりに外巻き帯鉄筋を鉄筋比で 0.8%程度と密に配置した、従来配筋の実験結果と同様である²⁾。

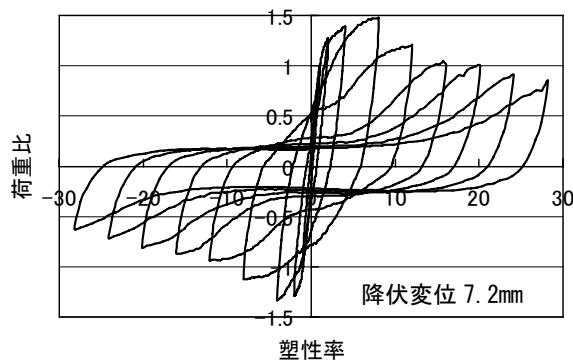
しかし、最大荷重到達後の荷重低下は、外巻き帯鉄筋のみで構成された従来配筋の場合と大



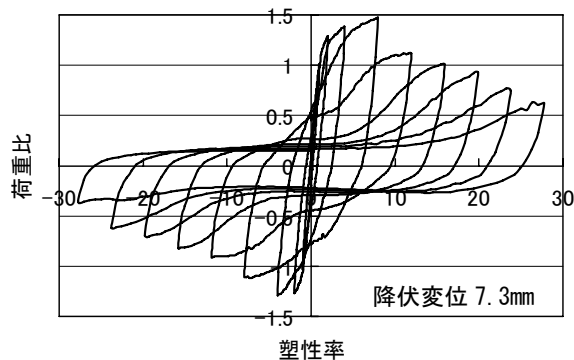
図－２ No.1 荷重－変位履歴曲線



図－３ No.2 荷重－変位履歴曲線



図－4 No. 3 荷重－変位履歴曲線



図－5 No. 4 荷重－変位履歴曲線

大きく異なる。既往の研究²⁾では、外巻き帯鉄筋を鉄筋比で1.27%と密に配置した場合でも、最大荷重以降荷重の低下は荷重が進むに従い割合が徐々に大きくなっているのに対し、内巻きスパイラル筋を使用した場合は荷重低下の割合が10～20%と、一定で緩やかな勾配となっている。これは、外巻き帯鉄筋のみで構成されている場合には、軸方向鉄筋のはらみ出しにより外巻き帯鉄筋が押し出され、軸方向鉄筋部分に鋭角フックで定着した部分が定着能力を失うことでせん断補強鉄筋としての能力を果たせなくなり、軸方向鉄筋内側のコンクリート部分に大きな損傷が発生してしまうのに対して、内巻きスパイラル筋を使用した場合は、軸方向鉄筋のはらみ出しに影響を受けない内巻きスパイラル筋とその内部コンクリートが、大変形領域においてもその形状・機能をほぼ維持し続けることにより、大きな耐力低下を生じることを防ぐ役割を果たしていることによるものと考えられる。

また、No.1, No.2と比較して、No.3, No.4 供試体は、最大荷重以後の荷重低下が、若干急激に発生した後、荷重低下が緩やかになる傾向が

見られた。この原因としては、No.3, No.4 の両供試体では、内巻きスパイラル筋を軸方向鉄筋に内接した形で配置せず、若干隙間を空けていたことに起因していると考えられる。最大荷重発生後の荷重低下は、かぶりコンクリートのはく離・はく落によりコンクリートの圧縮縁位置が変わることにより発生していることが大きな要因であるが、軸方向鉄筋と内巻きスパイラル筋が離れている場合には、かぶりコンクリートのはく離・はく落後、荷重が進むに従い軸方向鉄筋と内巻きスパイラル筋の間のコンクリートのはく離・はく落も発生することから、さらにコンクリートの圧縮縁位置が柱断面内部へ変化することで、内巻きスパイラル筋を軸方向鉄筋に内接させた場合よりも荷重低下が大きく発生していると考えられる。

しかし、いずれの場合においても、降伏変位の20倍程度の変形状態においても、降伏荷重程度の耐力を保持していることから、今回の供試体ではすべて、非常に優れた変形性能を有していることがわかる。

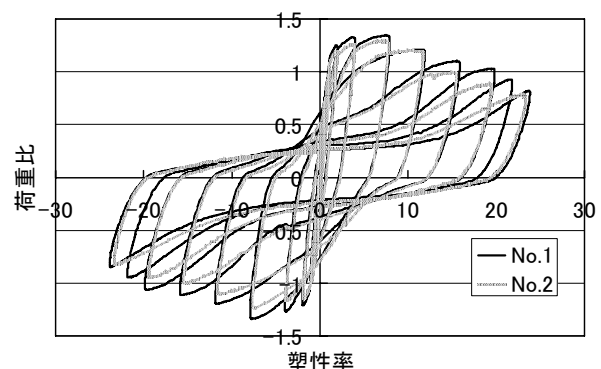
3.3 内巻きスパイラル筋間隔の影響について

(1) No.1 と No.2 の比較

内巻きスパイラル筋を軸方向鉄筋に内接させたNo.1, No.2 供試体の変形性能について比較を行う。

図－6に、No.1 と No.2 各供試体の無次元化した荷重－変位曲線を示す。

降伏変位から12δ_y 載荷までは、ほとんど同様の履歴を示している。また、荷重途中段階では、



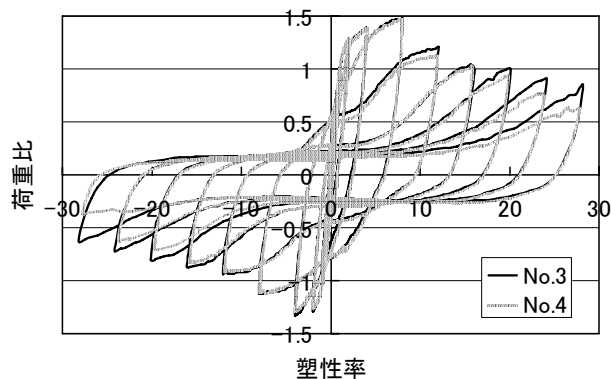
図－6 No.1, No.2 の荷重－変位曲線

若干 No.1 供試体の方が，荷重が若干大きい結果となっているが， $20\delta_y$ 荷重前後ではほぼ同程度の荷重を維持している。このことから，内巻きスパイラル筋の補強量が同程度であれば，最大粗骨材寸法の 2 倍程度まで鉄筋の純あきをあけた場合でも，変形性能は同等であると考えられる。

(2) No.3 と No.4 の比較

内巻きスパイラル筋と軸方向鉄筋を内接させず，終局時有効高さが 85%程度となるよう内巻きスパイラル筋を離して配置した No.3, No.4 供試体の変形性能について比較を行う。

図－7 に，No.3 と No.4 各供試体の無次元化した荷重－変位曲線を示す。



図－7 No. 3 と No. 4 の比較

荷重－変位履歴は，降伏変位 δ_y から $20\delta_y$ 荷重まで，ほぼ同一の履歴を示している。また，いずれの実験においても，最大荷重以降の荷重低下は，最大直後の荷重低下が若干急激であるが，その後の低下が緩やかである。 $20\delta_y$ 荷重時点ではほぼ降伏荷重を維持しており，十分な変形性能を有する結果となった。

$20\delta_y$ 荷重以降は，内巻きスパイラル筋の純あきが大きい No.4 供試体の方が，No.3 供試体より荷重の低下が若干大きい結果となっている。これは，内巻きスパイラル筋の間隔の影響のほか，補強度，コンクリート強度に若干の相違があったことも影響していると考えられる。

4. まとめ

軸方向鉄筋の内側にスパイラル鉄筋を配置し

た RC 柱の交番荷重実験を行った。内巻きスパイラル筋の純あきを，コンクリートの細骨材寸法～最大粗骨材寸法の 2 倍の範囲で変化させた実験を行った結果，以下のことがわかった。

- (1) 補強量算定式から定まる鉄筋量を確保した供試体では，鉄筋間隔の大小にかかわらず，外巻き帯鉄筋を 0.8～1.3%配置した RC 柱と比較していずれも良好な変形性能を確保することができた。
- (2) 鉄筋の純あきが内巻きスパイラル筋を使用した RC 柱の変形性能に及ぼす影響は，降伏変位の 20 倍程度まではほとんど影響がないことがわかった。
- (3) 降伏変位の 20 倍以上の領域では，終局時有効高さが 85%程度になるよう離隔をとった場合において，内巻きスパイラル筋の純あきが大きい場合に荷重が若干低下する傾向にあった。

参考文献

- 1) 石橋忠良，菅野貴浩，木野淳一，小林薫，小原和宏：軸方向鉄筋の内側に円形帯鉄筋を配置した鉄筋コンクリート柱の正負交番荷重実験，土木学会論文集，No.795/5-68，pp.95-110，2005.8
- 2) 中山弥須夫，石橋忠良，鎌田則夫，鬼柳雄一：帯鉄筋を密に配置した RC 柱の変形性能，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp.783-788，1997.7
- 3) 石橋忠良，津吉毅，小林薫，小林将志：大変形正負交番荷重を受ける RC 柱の損傷状況及び補修効果に関する実験的研究，土木学会論文集，No.648/5-47，pp.55-69，2000.5
- 4) 土木学会コンクリート委員会示方書小委員会：コンクリートライブラリー118 土木学会コンクリート標準示方書に基づく設計計算例「鉄道構造物編」，土木学会，2005.3
- 5) 日本コンクリート工学協会：「塑性域の繰り返し劣化性状」に関するシンポジウム委員会報告，pp.108，1988.8