

論文 軸方向鉄筋の内側にスパイラル筋を配置した RC 円形柱の高軸圧縮力下における水平交番載荷実験

隈部 佳^{*1}・築嶋 大輔^{*2}

要旨：高架橋上に建築物を付加する場合、通常の高架橋と比較して高架橋柱の断面に高い軸圧縮力が発生するが、そのような場合、最大荷重到達後に脆性的な破壊形態を示す。そこで、高軸力下における RC 柱の変形性能を向上させる方法として軸方向鉄筋の内側にスパイラル状の高強度鉄筋（以下、内巻き帯鉄筋とする）を配置して交番載荷実験を行った。その結果、内巻き帯鉄筋を適切なピッチで配置すれば変形性能の向上を期待できることを明らかにした。

キーワード：RC 柱, 水平交番載荷実験, 内巻き帯鉄筋, 高軸力, 変形性能

1. はじめに

近年、都市部のターミナル駅においては鉄道用地の高度利用を目的として、線路上空にビル等の建築物を設置する事例が増えてきている。高架橋構造上に建築物を付加する場合は、特に地震時には従来に比べて高架橋柱に高い軸力が発生することとなる（図-1）。

軸力が高くなることに対する対応としては柱断面寸法を大きくすることが考えられるが、駅部高架橋の利用の仕方によっては旅客流動の障害が少なくなるよう、柱断面寸法は極力小さくすることが求められる。既往の研究¹⁾では、軸力比（軸圧縮応力度/コンクリート圧縮強度）が高くなるほど変形性能が低下し、軸力比 0.5 の場合には最大荷重到達後極めて脆性的な破壊形態となったことが記されている。

一方、RC 柱の変形性能を向上させる方法として、軸方向鉄筋の内側に円形スパイラル状に加工した高強度鉄筋（以下、内巻き帯鉄筋とする）を配置する方法がある²⁾。しかし、この方法は、これまで鉄道高架橋で一般的な範囲の軸力を受ける RC 柱を対象として研究されてきた。

そこで、本研究においては、高軸力下における RC 柱

の変形性能を向上させるために内巻き帯鉄筋を配置した RC 柱で交番載荷実験を行い、内巻き帯鉄筋を有する RC 柱の高軸力下（軸力比 0.44~0.67）での変形性能について明らかにする。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

供試体概要図を図-2、諸元を表-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とし、直径 300mm の円形断面とした。軸方向鉄筋は SD345-D19 とし、内巻き帯鉄筋(SBPDN1275)を柱全高に配置した。使用材料の材料試験値を表-2 に示す。なお、コンクリートの圧縮強度は実験時点のものである。鉄筋については、供試体に使用したものと同ロットの鉄筋について3本ずつ引張試験を行った結果の平均値である。

軸方向鉄筋外周に配置する帯鉄筋（以下、外巻き帯鉄筋

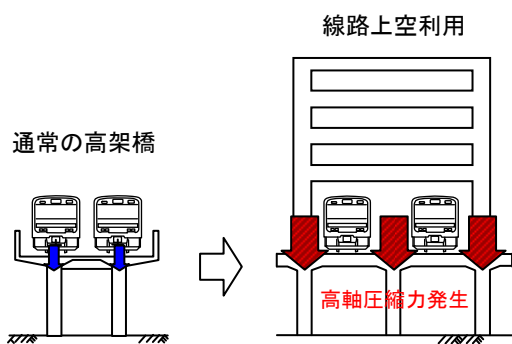


図-1 線路上空利用時に発生する高軸圧縮

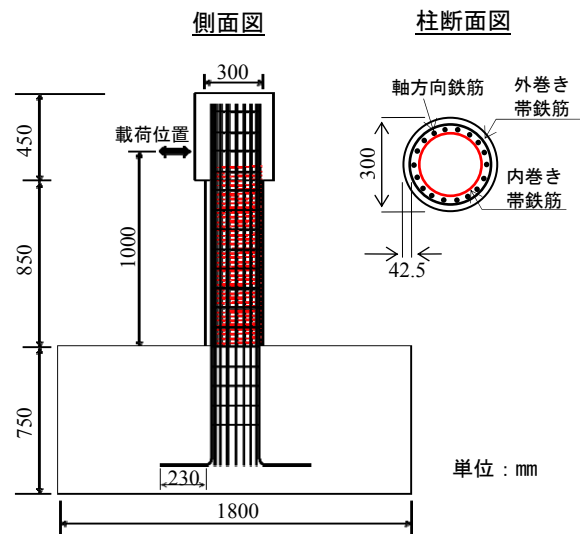


図-2 供試体概要

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

*2 東日本旅客鉄道株式会社 建設工事部 構造技術センター課長 工修 (正会員)

表-1 供試体諸元

記号	柱断面寸法 (mm)	せん断スパン (mm)	軸方向鉄筋種類×本数	内巻き帯鉄筋種類-ピッチ(mm)	外巻き帯鉄筋種類-ピッチ(mm)	軸方向圧縮応力度 (N/mm ²)	内巻き帯鉄筋比 (%)
CB-1	φ 300	1000	D19×18	RB6.2-12	D13-100	30	1.57
CB-2	φ 300	1000	D19×18	RB6.2-24	D13-100	30	0.79
CB-3	φ 300	1000	D19×18	RB6.2-36	D13-100	30	0.52
C0-1	φ 300	1000	D19×18	—	D13-100	30	0

表-2 材料試験値

記号	コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)	軸力比	軸方向鉄筋降伏強度 (N/mm ²)	内巻き帯鉄筋降伏強度 (N/mm ²)	外巻き帯鉄筋降伏強度 (N/mm ²)
CB-1	67.5	0.44	396.7	1386	387.7
CB-2	54.0	0.56	396.7	1386	387.7
CB-3	44.7	0.67	403.3	1386	387.7
C0-1	58.7	0.51	389.7	1423	402.0

筋という)は、耐力比(せん断耐力 V_{yd} / 曲げ耐力に達する時のせん断力 V_{mu})を1.0以上として供試体のせん断破壊を防止した。なお、柱基部から柱断面高さ D までの区間(以下、1D区間という)の外巻き帯鉄筋の定着は重ね継手で1D区間外はフレア溶接とした。さらに、1D位置の外巻き帯鉄筋についてはフレア溶接で定着したものを2本密着して配置した。

実験のパラメータは内巻き帯鉄筋比(内巻き帯鉄筋の断面積/柱断面幅/内巻き帯鉄筋のピッチ)で0~1.57%とし、軸圧縮応力度として30N/mm²となる軸力を载荷した。

2.2 交番载荷実験概要

実験は交番载荷試験装置を用いて行い、柱頭部に鉛直ジャッキにより軸方向圧縮応力度(30N/mm²)を導入しながら、水平アクチュエータにより正負水平交番荷重を与えた。軸力用鉛直ジャッキは、供試体が水平変位しても常に所定軸力が供試体に鉛直载荷できるようにジャッキ下部がヒンジとなり、ジャッキ上部がスライドするような構造である。実験装置の概要図を図-3に示す。

一般に柱部材の耐震性能を評価する試験においては、軸方向鉄筋が降伏するまで荷重制御で载荷し、軸方向鉄筋降伏時点の変位を降伏変位としてそれ以降降伏変位の整数倍となるよう、载荷変位を徐々に大きくしていくことが多い。しかし、今回の実験のように高軸力を受ける柱部材においては、軸方向鉄筋の降伏より圧縮側コンクリートの圧壊が先行する場合がある。そのため、降伏変位を基準とした交番载荷を行うことが不可能であることから、部材角(载荷点変位/せん断スパン)が0.005と

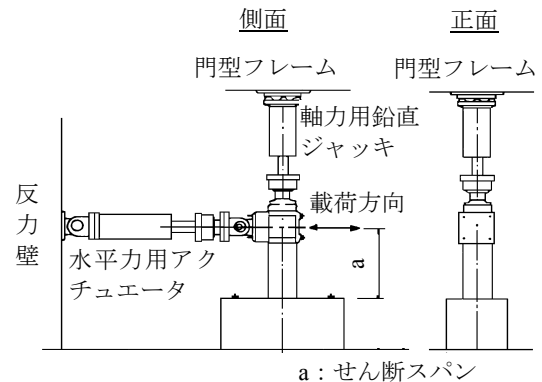


図-3 実験装置概要図

なる変位である5mmを基準とし、以降、変位が10mm(部材角0.01)、20mm(部材角0.02)、30mm(部材角0.03)、40mm(部材角0.04)、50mm(部材角0.05)、60mm(部材角0.06)、80mm(部材角0.08)、100mm(部材角0.10)の順に、供試体が鉛直荷重を保持できなくなるまで各1回ずつ正負交番载荷を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 各供試体の損傷状況

本実験においては、いずれの供試体においてもほぼ同様に以下に示すような損傷を示した。

まず、部材角0.01程度で引張側コンクリートに曲げひび割れが発生し、部材角0.01~0.02程度で引張鉄筋降伏前もしくはほぼ同時に圧縮側基部コンクリートの圧壊が

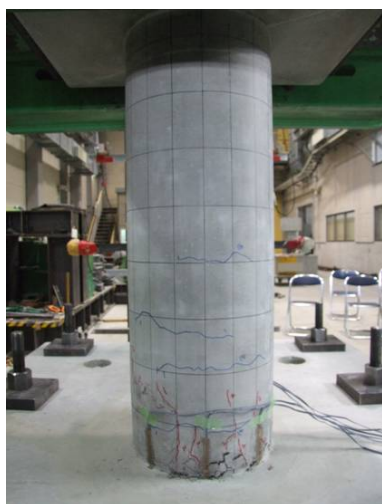


図-4 圧縮側基部コンクリートの圧壊 (CB-2, 部材角 0.02)



図-5 圧縮側コンクリートの圧壊・剥離 (CB-2, 部材角 0.03)



図-6 軸方向鉄筋の座屈による大規模な剥落 (CB-2, 部材角 0.06)

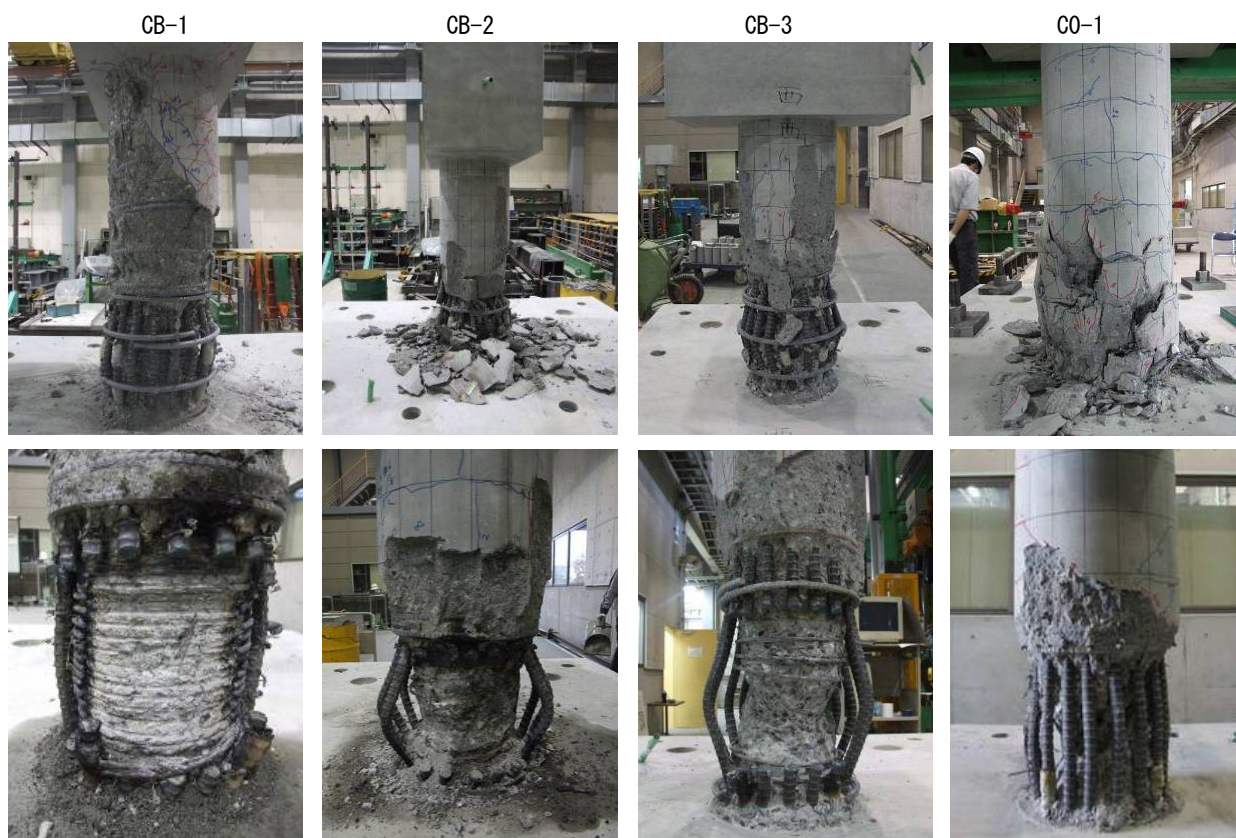


図-7 各供試体の載荷終了後状況

始まった (図-4)。その後、部材角 0.02~0.04 程度で引張鉄筋の降伏が始まった。さらに載荷を進めると柱基部付近の圧縮側コンクリートの圧壊・剥離が進行した (図-5)。部材角が 0.04~0.06 程度になると外巻き帯鉄筋を重ね継手としている 1D 区間で軸方向鉄筋が座屈してかぶりコンクリートの大規模な剥離が発生した (図-6)。

これにより、大きな軸圧縮力に対してはほぼ内巻き帯鉄筋に囲まれたコンクリート (以下、コアコンクリートという) のみで荷重を負担することになる。その後、耐力力を失い軸力のみで変形が進行する形となった時点で載荷を終了した。図-7 上段に各供試体の載荷終了後の損傷状況を、下段には柱基部付近の剥離・剥落したコンクリ

ート片および脆弱化したコンクリートを取り除いた状態の写真を示す。なお、図-7 下段の写真において、CB シリーズはコアコンクリートの損傷状況を観察しやすくするため、試験終了後に一部の軸方向鉄筋および内巻き帯鉄筋を切断している。

内巻き帯鉄筋比が最も大きい CB-1 供試体のコアコンクリート断面にはほとんど損傷が見られなかったが、それ以外の供試体ではコアコンクリート断面の一部が粉砕化して欠損していた。

3.2 各供試体の履歴特性

各供試体の正負水平交番荷重実験による履歴特性（モーメント M-部材角 θ 関係）を図-8 に示す。図には水平アクチュエータの反力から算定した曲げモーメント M-部材角 θ の履歴を細線で、軸圧縮力による 2 次モーメントを加えて補正した曲げモーメント M-部材角 θ の履歴を太線で示している。なお、2 次モーメント Mh は次の式で求めた。

$$M_h = \delta \times N$$

δ : 載荷点における水平変位

N : 軸力

水平力から算出したモーメントは、圧縮側コンクリートの圧壊や軸方向鉄筋の降伏が生じた後に最大値に達するが、その後は荷重が低下した。最終的には水平力によるモーメントが回転方向と逆符号になっており、軸力による付加モーメントのみで破壊が進行する状態となった。

各供試体の圧縮側最外縁に配置したひずみゲージの値は最大で 0.35~0.40%程度に達した後、コンクリートが圧壊し応力解放されると急激に低下した。この時をかぶりコンクリートの圧壊開始 (A) とし、軸方向鉄筋の引張降伏開始を (B)、また、かぶりコンクリート圧壊開始 (A) 時の荷重を基準 (図中破線) とし、その後荷重増加して再びその荷重まで低下した時点を終局時 (C) として図-8 中に記号で示す。なお、本研究において、これ以降のモーメントについては Mh を加えた補正モーメントについて記述する。

いずれの供試体においても、圧縮側のコンクリート圧壊開始時 (A) 点ではほぼ最大荷重に近い値となり、その荷重をしばらく維持するか、もしくは微増した後に減少した。その後、かぶりコンクリートの剥落が進行し、(B) 点で軸方向鉄筋が降伏した後、座屈を開始した時点で大

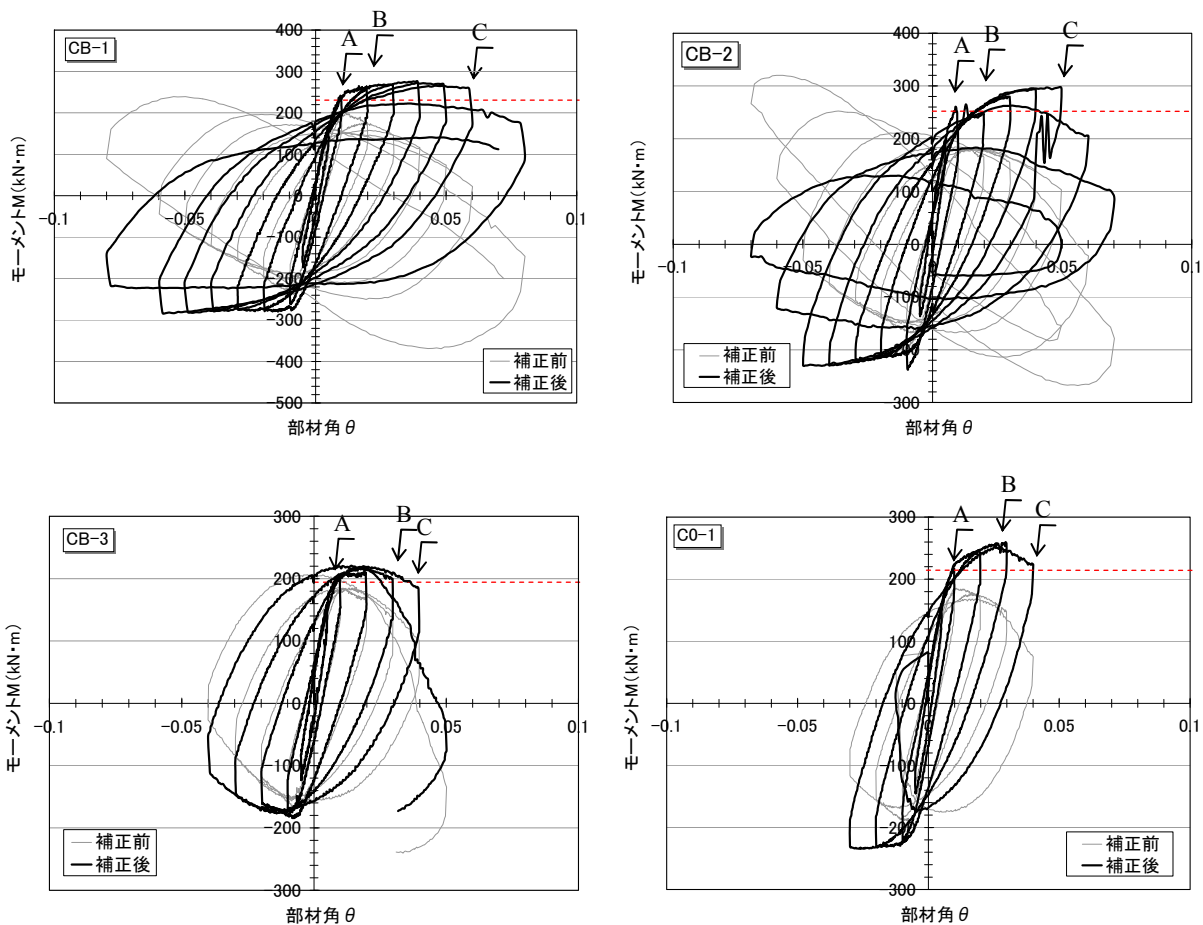


図-8 各供試体の M- θ 関係

きくモーメントが低下した。この段階では、軸方向鉄筋が周辺のかぶりコンクリートを大きく剥離させ、なおかつ鉄筋の負担する圧縮力が減少することから、部材の抵抗モーメントが減少するものと考えられる。

3.3 降伏変位・降伏荷重

本実験においては全ての供試体が圧縮側コンクリートの圧壊開始まで弾性的な挙動を示した後に塑性化した。そこで、本研究においては各供試体におけるコンクリートの圧壊開始を降伏と定義するのが妥当であると考えられる。

各供試体におけるコンクリート圧縮ひずみは、最大で0.35～0.40%程度に達した後、コンクリートが圧壊し応力解放されると急激に低下した。この時の変位を降伏変位 (δy) とし、また、その時の荷重を降伏荷重 P_y として表-3に示す。 P_y にせん断スパン a を乗じたものを降伏モーメント M_y 、 δy をせん断スパン a で除したものを降伏部材角 θy とする。

表-3 降伏変位 δy および降伏荷重 P_y

記号	降伏変位 δy (mm)	降伏荷重 P_y (kN)
CB-1	9.42	234
CB-2	8.70	254
CB-3	8.22	196
C0-1	9.85	217

3.4 じん性率

本研究においては、3.3に記した降伏モーメント M_y および降伏部材角 θy を基準として塑性率 μ を定義する

こととした。図-9に各供試体の塑性率 μ (=部材角 θ / 降伏部材角 θy) と曲げモーメント比 (=曲げモーメント M / 降伏モーメント M_y) の関係を示す。すなわち、図-9において降伏荷重後に M/M_y が再び1.0まで低下する点をその供試体の終局塑性率とし、その時点での μ をじん性率と定義する。

内巻き帯鉄筋比が比較的大きいCB-1, CB-2 供試体は、部材降伏後も降伏モーメント以上を保持し、じん性率は7～8程度であった。一方、CB-3, C0-1 供試体のじん性率は3～4程度であり、有意差は見られなかった。

内巻き帯鉄筋を適切なピッチで配置した供試体でじん性率が大きくなるのは、粉砕化された骨材やモルタルが内巻き帯鉄筋から外に漏れ出にくくなること、また、内巻き帯鉄筋によるコアコンクリートの拘束効果により軸方向鉄筋内部のコアコンクリートの圧縮強度が大きくなることから、高軸圧縮力下においても大変形時の耐力低下が小さくなるためだと考えられる。しかし、内巻き帯鉄筋のあきがコンクリートの最大粗骨材寸法20mmよりも大きくなると、内巻き帯鉄筋がコアコンクリート内部の骨材を保持できなくなるため、内巻き帯鉄筋による変形性能の向上効果は少なくなると考えられる。

4. まとめ

内巻き帯鉄筋を有するRC円形柱で高軸力下において交番載荷実験を行った。今回の実験範囲で得られた知見を以下に示す。

- ・ 荷重を進めるに従い、まず圧縮側かぶりコンクリートが圧壊した後、引張側軸方向鉄筋の降伏が発生する。その後、塑性ヒンジ部の損傷が進行し、圧縮側

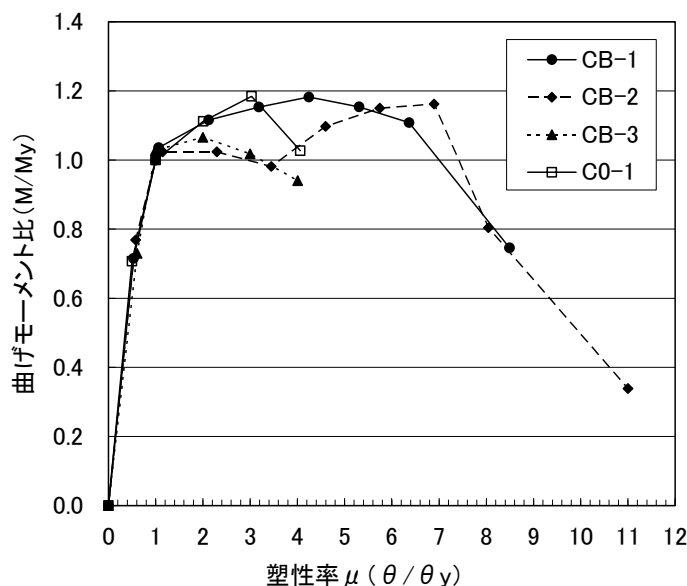


図-9 曲げモーメント比と塑性率の関係

軸方向鉄筋の座屈が発生したときに荷重が低下する。

- 通常の RC 柱においては高軸力条件下では最大荷重後に急激な耐力低下を示すが、軸方向鉄筋の内側に内巻き帯鉄筋を配置することにより、高軸力条件下においても、急激な耐力低下を防ぐことが可能である。
- 内巻き帯鉄筋比が多いほど、荷重保持可能な部材角は増加する。ただし、内巻き帯鉄筋ピッチがコンクリートの最大粗骨材寸法以上になると内巻き帯鉄筋の効果は少なくなる。

参考文献

- 1) 岡西努, 林静雄, 香取慶一: 高軸力を受ける鉄筋コンクリート柱の曲げ降伏後の限界変形に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.15, No.2, pp.519-524, 1993.6
- 2) 小林薫, 木野淳一, 菅野貴浩: 軸方向鉄筋の内側にせん断補強鉄筋を配置した RC 柱の交番載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.1135-1140, 2002.6
- 3) 隈部佳, 杉田清隆, 木野淳一, 岩田道敏, 石橋 忠良: 軸方向鉄筋の内側にスパイラル筋を配置した RC 柱の高軸力下での正負水平交番載荷実験, SED, No.39, pp.130-139, 2012.5
- 4) 木野淳一, 隈部佳, 岩田道敏: 軸方向鉄筋の内側にスパイラル筋を配置した RC 柱の高軸力下での変形性能について, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.829-834, 2012.6
- 5) 星隈順一, 川島一彦, 長屋和宏: 鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査に用いるコンクリートの応カーひずみ関係, 土木学会論文集, No.520/V-28, pp.1-11, 1995.8