論文 中子筋末端部が異なるRC柱の軸圧縮性状に関する実験研究

伊藤 嘉則^{*1}· 槇谷 榮次^{*2}· 渡部 洋^{*3}· 斎 煒^{*4}

要旨:軸圧縮力を受ける RC 柱において,同じ横補強筋量でも,拘束鉄筋配筋形状が異なると強度・ 変形性状に影響を及ぼすとものと考えられる。特に中子筋が示す役割は,軸圧縮性状のみならず, せん断破壊の延滞や主筋の座屈防止といった観点からも重要とされる。そこで本論では,中子筋端 部の定着方法に着目し,横補強筋の間隔及び量等の違いも含めた配筋形状が,軸圧縮性状に及ぼす 影響について検証を行った。その結果,中子筋の定着方法がより優れているタイプが,強度・靭性 性状ともに改善された。

キーワード:中子筋,端部定着,配筋詳細,拘束効果,軸圧縮性状

1. はじめに

横補強筋による拘束効果に関する研究は、これま で数多くの研究がなされてきた。それらの研究成果 から、RC柱の強度・靭性性状を確保する上で、拘 束効果の役割は、広範囲にわたって重要である。そ のため、更なる多面的な検討を積み重ねていく必要 があると思われる。

近年,鉄筋の配筋詳細は重要視されており,特に, 中子筋が示す役割は,重要視されている。そこで本 論では,中子筋が拘束効果に与える有用性の1つと して,同鉄筋の端部定着方法に着目し,横補強筋の 径及び間隔の差異も含めた配筋詳細の違いが,軸圧 縮性状に及ぼす影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の概要を図-1 に,試験体詳細を表-1 に 示す。本研究に用いた試験体の形状は,240×240 ×660mm(コアコンクリート断面寸法:190× 190mm)からなる正方形断面の短柱である。

共通要因は、コンクリート設計基準強度 (Fc24N/mm²),主筋量(12-D16)及び鋼材降伏強度 (SD295A)である。変動要因は、中子筋末端部形状, 横補強筋量(径及び間隔)及び中子筋の有無である。

シリーズ		中子筋	横補強筋径		間隔	Рс
番号	試験体 名 称	タイプ の記号	帯筋	中子筋	S [mm]	$[N/mm^2]$
1	10-10-100	C, H, M, S	D10	D10	100	5.02
2	10-13-100	C, H, M, S	D10	D13	100	7.14
3	13-13-100	C, H, M, S	D13	D13	100	9.25
4	10-13-80	C, H, M, S	D10	D13	80	8.92
5	13-10-80	C, H, M, S	D13	D10	80	8.92
6	10-10- 56	C, H, M, S	D10	D10	56	8.97
	10-0-100		D10	_	100	2.51
7	10-0-80	Ν	D10		80	3.14
	13-0-100		D13		100	4.63
	10-0- 56		D10		56	4.48
	13-0-80		D13		80	5.78

表-1 試験体一覧

(注)横補強筋量は、コア寸法(帯筋の中心間距離によって 囲まれた部分)により算出した。 ここでPw:横補強筋量、owy:横補強筋の降伏強度とする。

変位計取り付け用ボルト 8 275 試験区間 460 660 38 38 240C-Type 00 -1 H-Type M-Type S-Type N-Type 図-1 試験体

*1 建材試験センター 中央試験所 構造グループ 工修(正会員) *2 関東学院大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

*3 東京工業大学大学院 工学研究科博士後期課程 工修 (正会員)

*4 関東学院大学大学院 工学研究科博士後期課程 工修(正会員)

中子筋末端部形状は、1)溶接閉鎖型、2)学会 指針等で規定される標準フック(曲げ径 135 度,余 長 6d)の形状に対して,本実験では,曲げ径 180 度, 余長 7d としたもの、3)本来フックは、主筋に対 して用いられるが、これを主筋と帯筋の双方をまた がってフックを用い、両者を緊結したもの4)皿状 (鉄筋径の3倍)のものを鉄筋の両端部に溶融接合 し、末端部にスタッドを有するものの計4タイプと した。但し、帯筋は全て溶接閉鎖型とした。また、 横補強筋に使用した鉄筋は D10 及び D13 の 2 種類 で,間隔は100mm,80mm,56mmの3種類とした。 これに中子筋を使用しない比較用の試験体 5 体を 含め、試験体は総計29体とした。なお本論では、 鉄筋径及び間隔が同じ試験体を同一シリーズとし て扱い、表-1中のシリーズ名の記号は、帯筋径-中子筋径-間隔の順に表したものである。ここで, 使用した鉄筋の機械的性質を表-2 に示す。また, 実験時のコンクリート強度は、表-3中に記載した。

2.2 加力方法

実験は、容量 3MN の大型構造物試験機を用いて、 上部球座、下部固定のもと、一軸圧縮単調載荷によ って行った。軸方向変形は、試験体内に埋め込んだ ボルト(図-1)に電気式変位計を 6 本取り付けて測 定し、得られた値の平均を軸方向変形とした。

3. 実験結果

コンファインドコンクリートの負担軸力は,全荷 重より主筋の負担軸力を完全弾塑性モデルによっ て差し引いた値とした。またコンクリートの断面積 は,被りコンクリートの限界点を,軸歪度で0.2~ 0.4%時と仮定し,崎野・孫¹⁾等の手法を用いて応力 度-歪度曲線を求めた。なお表-3を見ると,最大 応力時軸歪度が,いずれのシリーズもばらついてい た。これは,最大応力度が明確な点として存在して いなく,最大応力度近傍で曲線が頭打ちとなった。 そのため緩やかな曲線の中で最大応力度が得られ たため,見掛け上の数値にばらつきが生じた。従っ て以下では,曲線中の特定歪度時の応力度を取り上 げ,強度性状について比較検討を行った。

表-2 鋼材の機械的性質

鉄筋径	降伏強度 [N/mm ²]	降伏歪 [μ]	ヤング係数 [MN/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]
D10	336	1912	176	471
D13	346	2209	157	499
D16	343	2070	166	491

表-3 実験結果一覧

シリーズ			コンクリート	最大時		
番号	試験体 名 称	中子筋 タイプ	強 度 σ _B [N/mm ²]	応力度 の _{cc} [N/mm ²]	軸歪度 E_{cc} [%]	強 度 上昇率 Ks
1	10-10-100	С	26.2	36.4	0.15	1.39
		Н	25.8	36.1	0.93	1.40
		М	26.2	36.8	0.77	1.40
		S	23.3	35.8	0.74	1.54
2	10-13-100	С	26.6	40.2	0.64	1.51
		Н	23.5	35.7	0.65	1.52
2		М	26.6	41.0	0.98	1.54
		S	24.9	43.1	0.54	1.73
	13-13-100	С	23.5	36.0	1.02	1.53
3		Н	23.5	37.5	1.05	1.60
5		М	23.5	38.0	0.82	1.62
		S	26.6	49.9	0.39	1.88
	10-13- 80	С	27.0	45.3	0.78	1.68
4		Н	26.1	40.8	0.41	1.56
-		М	27.0	42.5	2.10	1.57
		S	27.0	53.1	1.16	2.00
	13-10- 80	С	27.0	41.0	0.61	1.52
5		Н	27.0	40.4	0.23	1.50
5		М	27.9	43.5	0.27	1.56
		S	22.0	41.3	2.41	1.88
	10-10- 56	С	26.1	51.5	2.80	1.97
6		Н	27.9	53.3	1.01	1.91
0		М	26.1	50.3	1.43	1.93
		S	22.0	45.8	4.06	2.08
7	10-0-100	Ν	24.9	33.3	0.41	1.34
	10-0- 80	Ν	23.5	32.1	0.75	1.37
	13-0-100	Ν	23.5	33.2	0.42	1.41
	10-0- 56	Ν	24.9	37.6	0.36	1.51
	13-0-80	Ν	23.5	35.7	0.49	1.52

3.2 最大応力度

最大応力度(σ_{cc})をコンクリート強度(σ_{B})で無次 元化し、コンクリート強度に比を強度上昇率($K_{s} = \sigma_{cc} / \sigma_{B}$)とする。これと横補強筋降伏レベル($P_{w} \sigma_{wy}$) 及びこれに間隔比(1-S/D),(但し、S:横補強筋間隔, D:コア寸法)からなるパラメータを乗じたものとの 関係をそれぞれ図-2及び図-3に示す。

表-3及び図-2より、K_sを横補強筋降伏レベルの違いで見ると、いずれの試験体も、中子筋末端部形状としては、スタッド型のSタイプが1番高い値



を示した。他の C, H, M タイプについては, 末端 部形状による違いは、殆ど見られなかった。また、 この3タイプと中子筋を使用しないNタイプを, 中子筋の有無の違いによる他は,帯筋径及び間隔が 同一条件の試験体について比較すると,中子筋を使 用しない場合,有する試験体に比して K_sは小さい 値となった。しかし同程度の横補強筋降伏レベルで 比較すると、3タイプの試験体と N タイプとで、 強度差はなく、中子筋有無の違いによる Ks の差異 は見られなかった。全体的には、いずれのシリーズ も横補強筋降伏レベルを増すことで K_sは大きくな ることが確認された。但し、同じ横補強筋降伏レベ ルで,帯筋と中子筋に異なる鉄筋径を使用したシリ ーズ番号4及び5の試験体を比較すると、帯筋と中 子筋に使用する鉄筋径の組合せとして、それぞれ D13 及び D10 とするより、その逆の D10 及び D13 と中子筋に太径の鉄筋を使用した時の方が, K。は, どの中子筋タイプに対しても改善されることが明 らかとなった。

一方,図-3より,ほぼ同程度の横補強筋降伏レ ベルで,異なる間隔とした試験体について見ると, 間隔を密にした試験体の方が,どのシリーズも, K_sが高くなることが確認された。このことは,同じ 横補強筋降伏レベルでも間隔を密にした時の方が, 拘束効果には有効であることが再確認される結果 となった。また,中子筋を使用しなくとも間隔を密 にすることで,中子筋を有する場合と同程度の(P_w σ_{wy})(1-S/D)とすることで,同じような K_sが得ら れた結果から,間隔の違いが最大応力度に与える影 響は大きいものと思われる。すなわち,Sheikh等²⁾ が唱えた非拘束圧によって生じるアーチの形成は, 横断面より縦断面に対するものの方が,影響を及ぼ すと考えられる。よって、これまで拘束効果を把握 する上で、横補強筋降伏レベルが1つの指標とされ てきた。しかし、これに間隔の違いによる因子も同 時に考慮したパラメータで判断した方が良いもの と考えられる。従って以下では、($P_w \sigma_{wy}$)(1-S/D) なる指標(以降、拘束レベルと呼ぶ)を用いて検証を 行った。

次に,最大応力度の検証として,コンファインド コンクリートの強度提案式^{2)~8)}と実験値の比較を 図-4 に示す。これより、C、H 及び M タイプにつ いて見ると,鈴木・中塚式が精度良く評価しており, Mander 式は、やや過大評価する傾向にあった。し かし、どの提案式もばらつきは多少あるが、実験値 は計算値に対して概ね±20%の範囲にあった。従っ て、これら3タイプの形状は、既往式で推定される 強度と同様な挙動を示し,端部定着方法は,拘束効 果に対して、何ら特別な効果を与えるものではない ことが分かる。一方 S タイプに関しては, Mander 式の適合性が非常に優れており, 崎野・孫式も比較 的精度が良かったが,全体的に計算値は,過小に評 価されていた。特に Sheikh 式, 修正 Park 式, 六車・ 渡辺式は、その傾向が著しかった。これより、Sタ イプの定着方法の場合,端部のスタッド部分に何ら かの拘束圧が付加的に作用し、既往のモデルより, 強度上昇をもたらしたものと考えられる。全体を通 して見ると、シリーズ名 10-10-56 の試験体は、 いずれの提案式も大きく過小評価される結果とな った。この試験体は、最も間隔を密としたものであ り,間隔をより密とした時に得られる更なる効果を, 今後、明確にする必要があると思われる。

3.3 圧縮靭性

ここでは、圧縮靭性の検証として軸歪度(ε)が



 (注)表中の記号のうち,σ_{cc},σ_B, D, F
 各文献中に記載された記号に従った。 本論で適用した記号を表すものとし、その他の記号については、

σ_B, D, P_w, σ_{wy}, S は, 本論で加 号に従った。なお, 紙面の都合上, それら記号は省略した また CGS 単位で提案されている強度式については,同単位で算出した後,変換係数 9.80665 を用いて SI 単位に変換した。

> 図—4 実験値と各強度提案式との比較

1.0, 2.0 及び 3.0%時の各応力度(σ_{1.0}, σ_{2.0}, σ_{3.0}) を取り上げ,これをコンクリート強度(ов)及び最大 応力度(o cc)で除したもの(それぞれ Kd = o 1.0, 2.0, 3.0/ σ_B 及び $K_h = \sigma_{1.0, 2.0, 3.0} / \sigma_{cc}$)との比較を行った。 なお、K_d及びK_mと拘束レベルとの関係をそれぞれ

図-5及び図-6に示す。なお同図中には、傾向を 把握しやすくするため,中子筋タイプごとに回帰分 析による近似式を示した。

図5のK_dは、コンクリート強度に対し各軸歪度 レベルでの強度分布を示したものである。これより, いずれの軸歪度時でも、中子筋端部形状として、S タイプの K_d が1番高く、 $\epsilon_c=3.0$ %時に至ってもコ ンクリート強度に対して1.0倍以上の強度を有して いた。他の3タイプについては、 $\epsilon_c=1.0\%$ 時は、 同程度の強度分布を示していが、 ε = 2.0% 以降は、 H, M, C の順に K_d が小さくなる傾向にある。 ε_c

=3.0%時を見ると C 及び H タイプにおいて, 拘束 レベルが4以上ある試験体のKaは,1.0以上の強度 分布があった。また全体的にどの中子筋タイプも, 拘束レベルが大きい時の方が Kd は高い値を示して いた。特に e e=3.0%時は、その傾向が顕著であっ た。一方,中子筋を使用しない N タイプに関して は,ε =2.0%時にはコンクリート強度より低い 1.0 以下の強度分布となり、ε =3.0%時になるとコン クリートが負担する軸圧縮応力は、ほぼ0であった。

次に図6では、各軸歪度時において、最大応力度 に対する強度低下率について示したものである。同 図によると、 $\epsilon_c=1.0%$ 時は、N タイプを除けば、 どの中子筋タイプも最大応力度とほぼ同等のレベ ルにある。 $\epsilon_c = 2.0\%$ 時になると、S タイプ以外の 試験体は、本実験変動要因中の拘束レベルが小さい 範囲のものは最大応力度から大きく強度低下して



いることが分かる。しかしSタイプは、拘束レベル に関係なく、強度低下率は概ね10%程度であった。 $\epsilon_c=3.0\%$ に至ると、図-5と同様に拘束レベルが 小さくなるにつれ、最大応力度に対する低下率は大 きくなる傾向を示した。

以上より,最大応力度に中子筋が与える影響は, Sタイプを除き殆ど見られなかったが,その後の靭 性に,中子筋の影響が関与してくることが明らかと なった。すなわち中子筋タイプとしてSタイプの靭 性性状が最も優れており,CタイプはSタイプと比 べると劣るものの,フック型のH及びMタイプよ りは,比較的靭性性状が改善されていた。一方,M タイプはHタイプよりその性状は良く,特に ε_c= 2.0%時までは,Cタイプとほぼ同様の性状を示した。

4. 提案モデルとの比較

RC 柱の終局強度設計において,設計時に骨組が 崩壊する時の部材のモーメント分布は,コンクリー トの応力度-盃度曲線に大きく依存する。そのため, 曲げ部材における圧縮ストレスブロック係数は,同 曲線形状から定義される。従って,コンファインド コンクリートの応力度-盃度特性を把握すること は重要であり,これまでに数多くの曲線モデルが提 案されている。よってここでは、応力度-盃度曲線 について、修正 Park³、中塚・鈴木⁷及び崎野・孫 ⁸⁾モデルとの比較を行った。但し、実験から得られ た曲線は、試験体による特異性を除くため、中子筋 タイプごとに、実験値を平均化したもので比較を行 った。なお、平均化したものとは、以下に示す手順 によって求めた。

1)各軸歪度に対応する応力度(0~3.0%間で,0.1% ごとに採取)と拘束レベルとの間で軸歪度ごとにプ ロットする。2)式(1)による回帰直線を中子筋タイ プごとに求め、係数 ϕ_s を求める。3)回帰直線に より得られた ϕ_s と軸歪度との間で最小二乗法によ り回帰分析を行う。4)得られた回帰式(2)~(5)を 式(1)に代入し、各軸歪度時の応力度を求めた。

$$\sigma_{cc}/\sigma_{B} = 1 + \phi_{s} \times (P_{w} \sigma_{wy})(1 - S/D)/\sigma_{B} \quad (1)$$
C-Type

$$\phi_{\rm s} = 0.3 \ \varepsilon_{\rm c}^3 - 1.9 \ \varepsilon_{\rm c}^2 + 3.1 \ \varepsilon_{\rm c} + 1.7$$
 (2)

<u>H-Type</u>

$$\phi_{\rm s} = 0.5 \ \varepsilon_{\rm c}^3 - 2.8 \ \varepsilon_{\rm c}^2 + 3.2 \ \varepsilon_{\rm c} + 1.6$$
 (3)

<u>M-Type</u>

$$\phi_{\rm s} = 0.3 \ \varepsilon_{\rm c}^{3} - 2.1 \ \varepsilon_{\rm c}^{2} + 3.7 \ \varepsilon_{\rm c} + 1.2$$
 (4)

<u>S-Type</u>

$$\phi_{s} = 0.5 \varepsilon_{c}^{3} - 3.8 \varepsilon_{c}^{2} + 6.8 \varepsilon_{c} + 0.5$$
 (5)



以上,実験結果の回帰分析により平均化して得ら れた応力度-- 歪度曲線と、各提案モデルとの比較を 図-7に示す。なお、仮定条件として、コンクリー ト強度は $\sigma_{\rm B}=24[\rm N/mm^2]$ とし、シリーズ番号1及び 6の場合について示した。同図において、どちらの シリーズも、得られた回帰式が、軸歪度 0~0.2%間 での適合性が悪かった。そのため、実験値より過大 な値が得られたため,各提案モデルより初期剛性が 大きくなった。しかし 0.2%以降を見ると、シリー ズ番号1は、Sタイプ以外は、崎野・孫モデル及び 鈴木・中塚モデルとほぼ同様な挙動を示しているこ とが分かる。しかし、シリーズ番号6は、両者のモ デルは,最大応力後,勾配が低下しないのに対して, 平均化して得られた実験値は,モデルより勾配が低 下していた。特に H タイプは, モデルより靭性性 状が劣る傾向を示した。一方 Park モデルは、いず れのタイプも過小評価されていた。また, Sタイプ に関しては、各モデルより圧縮性状が改善していた。

5. まとめ

以上より,軸圧縮力を受ける RC 柱の配筋詳細に よる違いも加味した中子筋端部形状が,軸圧縮性状 に及ぼす影響を調べた実験結果より,以下の知見が 得られた。

- (1) 中子筋端部形状が軸圧縮性状に与える影響として、スタッド型の S タイプが、強度・靭性性状ともに優れていた。また,最大応力度の推定は、 Mander 式により算出出来る。
- (2) C タイプ及び M タイプの試験体は、軸歪度で2.0%時までは、両者の挙動はほぼ同等であるが、

軸歪度 3.0%時になると, 閉鎖型とした C タイプ の方が靭性性状に優れていた。H タイプについ ては,他の中子筋タイプに比して,劣る傾向が あった。

- (3) S タイプを除けば、最大応力度に中子筋が与える影響は少なく、同程度の拘束レベルであれば、 中子筋の有無による違いもない。中子筋による 関与は、靭性性状に関与する。
- (4) 拘束効果は、横断面に作用する拘束圧より、縦断面に作用する拘束圧の方が、より影響を受ける。従って、横補強筋降伏レベルという量的な指標で考えるより、これに間隔を加味したパラメータで判断した方が適切である。

参考文献

- 孫 玉平,崎野 健治ほか:横補強筋の配筋形式がコンク リートの圧縮性状に及ぼす影響について、コンクリート工 学年次論文集, Vol.16, No.2, pp449~454, 1994
- A.Sheikh, et al : Analyticl Model Concrete Confinement In Tied Columns, Proceedings ASCE, Vol.108 ST12, pp2703~2722, Dec.1982
- B.D Scott, R.Park, M.J.N.Priestley: Stress-Strain Behavior Of Concrete Confined By Overlapping Hoops At low And High Strain Rates, ACI Journal, pp13~27, Jan/Feb 1982
- J.B.Mander, et al : Theoretical Stress-Strain Model For Confined Concrete, Proceedings ASCE, Vol.114 SE8, pp1804~1826, Aug.1988
- M.Saatcioglu, et al : Strength And Ductility Of Confined Concrete, Proceedings ASCE, Vol.118 SE6, pp1590~1607, Jun 1992
- 6) 六車 熙,渡辺 史夫ほか:横補強筋による高強度コンク リートの靭性改善に関する研究、コンクリート工学年次論 文集, Vol.5, No.2, pp317~320, 1983
- 7) 鈴木 計夫、中塚 佶ほか:角型横補強筋によるコンファ インドコンクリートの拘束機構と強度・変形特性、コンク リート工学年次論文集、Vol.11, No.2, pp449~454, 1989
- 8) 崎野 健治,孫 玉平:直線型横補強材により拘束された コンクリートの応力-ひずみ関係,日本建築学会構造系論文 集,第461号, pp95~104, 1994.7