# 論文

# [2074] 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

孫 玉平\*1·崎野健治\*2·渡辺慶一\*3·田 福勝\*4

# 1. はじめに

鉄筋コンクリート純ラーメン構造物は、通常、靭性に富む全体曲げ降伏機構を想定して耐震設 計されることが望ましいとされているが、その場合に、部材の塑性ヒンジ領域に十分な塑性変形 能力を保有することが保証されなければならない。梁・柱部材の変形能力を高める手法としては、 主筋と直交して配筋される鉄筋(横補強筋と呼ぶ)により横補強する方法が有効であることが知 られている。建築学会の終局強度型耐震設計指針には、横補強筋の配筋形式、間隔等の詳細設計 によって、曲げまたは曲げと軸力を受ける部材のヒンジ部の塑性変形能力を間接的に保証してい る。一方、より直接的に柱・梁部材のヒンジ領域の塑性変形能力を保証・確認するには、部材断 面の曲げ解析に必要なコンクリート、特に横補強筋により拘束されたコンクリート(以下コンフ ァインドコンクリートと書く)の応力ーひずみ関係を適切に決定することが重要である。

本研究では、降伏点が約10000kgf/cm<sup>2</sup>級の高強度横補強筋により拘束された高強度コンクリート(設計強度 FC=600kgf/cm<sup>2</sup>)短柱の中心圧縮実験を行い、横補強筋の量の他、横補強筋の配筋 形式および太さ(直径)がコンファインドコンクリートの圧縮応力-ひずみ関係に及ぼす影響を 実験的に調べた。また、著者らが提案した、横補強筋の配筋形式および直径等の影響を考慮にい れたコンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係式の適応性についての検討も行った。

#### 2. 実験概要

試験体は 200x200x500mmの正方形断面短柱で ある。コンクリートの圧縮強度(設計基準強度 が600kg/cm<sup>2</sup>)、主筋量(D13異形鉄筋を8本配筋、 主筋比が2.54%)、鋼材の降伏強度を一定とした。 試験体の実験変数は、横補強筋の量(体積比で 表す)、配筋形式および横補強筋の直径の3種 類である。横補強筋には、直径が6mmの高強度異 形鉄筋D6と直径が10mmの高強度異形鉄筋D10を使 用した。横補強筋端部の定着は 135度フックで、 余長を直径の8倍を取った。使用した高強度横 補強筋と普通強度の主筋の力学的性質を表1に、 引張応力ーひずみ関係の実験結果を図1に示す。 計12体の鉄筋コンクリート柱は、使用した横 補強筋の直径によってD6シリーズとD10シ

- \*1 九州大学助手 工学部建築学科、工博(正会員)\*2 九州大学教授 工学部建築学科、工博(正会員)
- \*3 九州大学大学院 工学研究科建築専攻
- \*4 九州大学研究生 工学部建築学科、工修

表1 鋼材の力学的性質

名称 項目	HD6	HD10	D 1 3
断面積(cm <sup>2</sup> )	0.32	0.71	1. 27
降伏点(kgf/cm <sup>2</sup> )	104601>	88901>	3690
降伏点ひずみ(%)	0.68	0.77	0.21
ヤング係数(kgf/cm²)	1.80×10 <sup>6</sup>	1.88×10 <sup>6</sup>	1.83×10 <sup>6</sup>
破断伸び(%)	8.3	10.0	17.3

1) 0.2%オフセット降伏強度



リーズに分けられ、各シリーズ内では横補強筋 の配筋形式と配筋量が変動因子となっている。 試験体の配筋詳細を図2に、試験体一覧を表2 に示す。また、実際の柱に用いるコンクリート の強度(無筋コンクリート強度と記す)とシリ ンダー強度との違いを見るために、主筋と横補 強筋を配筋していない無筋コンクリート桂を2 体製作した。

コンクリートに使用したセメントは普通ポル トランドセメントで、粗骨材に最大粒径13mmの 砂利を用いた。実験時材令でのコンクリートの シリンダー圧縮強度は表2に示されている。

載荷は単調載荷で、試験体両端の回転を拘束 して、500ton試験機を使用して中心圧縮力を試 験体に加えた。試験体中央部(検長34cm)にお けるコンクリートの軸方向縮みを試験体に埋め 込んだボルトに取り付けた変位計(各面2個、 計8個)により測定した。変位計の取り付け詳 細を図3に示す。また、主筋および横補強筋の ひずみを図3に示す位置に貼付したひずみゲー ジにより測定した。試験体は、無筋コンクリー ト柱を除き、いずれも軸方向ひずみが約6.0%に なるまで載荷を行った。



図2 試験体の配筋詳細



図3 加力および測定方法

### 3. 実験結果

図4に各試験体の荷重ー軸方向縮み量関係を横補強筋の量をパラメーターに示す。軸方向縮み が大きい領域に見られる荷重の急減点では、横補強筋の定着フックの緩みまたは破断が明瞭に観 察された。図4より分かるように、横補強筋の配筋形式と直径が同じ試験体の場合は、横補強筋 量の増加に伴い柱の最大軸耐力および靭性が高くなる。これは横補強筋により拘束されたコア部 分のコンファインドコンクリートの強度と靭性が横補強筋の量の増加によって高くなったことに よるものと考えられる。D6Mシリーズの試験体D6M35では、測定ボルトの埋め込み部分が試験体部 分より弱く(横補強筋の間隔が大きく)なり、大変位ピーク点を過ぎてから主筋の座屈が他の試 験体と異なって試験体の上端部に集中して発生した。そのため、ピーク点後の耐力低下は上端部 の主筋の座屈が顕著になるにつれて激しくなり、拘束効果があまり大きく現れなかった。

横補強筋の配筋形式および直径(太さ)がコンファインドコンクリートの圧縮性状に及ぼす影響を調べるために、コンファインドコンクリートの応力ーひずみ関係の実験結果を図5と図6に 示す。コンクリートの応力は、主筋が負担する軸力を完全弾塑性材料と仮定して全荷重から差し 引いたコンクリートの負担する軸力を断面積で割って求めた。ただし、断面積は、コンクリート のひび割れが始めて観察された軸ひずみε<sub>01</sub>(実測値が0.16%~0.20%)までは全断面積(400 cm<sup>2</sup>) を、軸ひずみが0.4%以上になる域ではコア断面積(324 cm<sup>2</sup>)を取った。その間の応力は3次曲線で

		<b>武</b> (2):	横補強筋の詳細			<b>第十</b> 部十	単純	コンファイント・コンクリートの結果					
試験体名	сØв	脱去	直径	С	間隔	ρ <sub>h</sub>	0 hy	(tonf)	累加耐力1	сб <sub>св</sub>	E co	計算	直
	(kg/cm <sup>2</sup> )	1010	(82)	(22)	(==)	(%)	(kg/c∎²)	(cont)	(tonf)	実験値	(%)	c O cB	比率2
D6S20			6.0	162	20	3.48	10460	238.4	211. 5	640	0.46	621	1.03
D6S30	525				30	2.32		224.0	211. 5	596	0.40	587	1.02
D6S40					40	1.74		213. 4	211. 5	562	0.40	570	0.99
D6M35	525	<b>57</b>	6.0	81	35	3.39	10460	268.5	211. 5	739	1.01	706	1.05
D6M50		K X			50	2.38		255.1	211. 5	693	1.26	645	1.07
D6M70					70	1.70		225. 3	211. 5	599	0.79	606	0.99
D10S35		<b>N</b>			35	4.41	8890	260.0	218.8	712	0.43	742	0.96
D10S47	547		10.0	158	47	3.28		249.5	218.8	678	0.50	687	0.99
D10S60					60	2.57		247.6	218.8	671	0.43	653	1.03
D10M60		6.4.1	10.0	79	60	4.39	8890	308.0	213.4	862	1.69	889	0.97
D10M80	531	531			80	3.29		270.4	213.4	746	0.86	783	0.95
D10M100					100	2.64		253.0	213.4	687	0.63	710	0.97
PL-1	<b>5</b> 21	プレーン	-	-	-	-	-	185.5	180.5	464	0.21	531	0.87
PL-2	331		-	-	-	-	-	214.5	180.5	536	0.26	531	1.01
注 1)単純果加耐力=0.85 <sub>c</sub> σ <sub>b</sub> (A <sub>a</sub> -A <sub>b</sub> )+ <sub>o</sub> σ <sub>y</sub> A <sub>b</sub> 2)比率=実験値/計算値 平											平均値	1.00	
3)試験	体名凡例	: <u>D6</u> ]	<u>M 3</u>	<u>5</u> (	DD6	:横	補強筋の呼	び直径(I	)6:6mm、D10	:10mm)		標準偏差	0.05
① ② ③ ② M:配筋形式(M:複合、S:単純) ③ 3 5:横補強筋間隔(										(35:35mm)	ect)		



近似して求めた。

図5に示す結果は、同体積比の横補強筋を配筋した場合は、周辺横強筋のみによる拘束よりも サブタイーを併用した複合配筋による拘束の方がコンファインドコンクリートにもたらす強度上 昇および靭性改善の度合いが高いことを示唆している。また、図6より、横補強筋の量と配筋形 式が同じである場合は、直径が太い方がコンファインドコンクリートの強度にもたらす上昇量が 高いことが見られる。しかし、応力ーひずみ関係のピーク点後の下り勾配に関しては逆の現象が 見られた。その理由としては、次の2点が挙げられる。①高強度横補強筋による拘束の場合は、 通常、応力ーひずみ関係のピーク点に達する際には横補強筋は降伏していないが(図7を参照)、 変位が大きくなるにつれて降伏していくので、下り勾配域の形状は降伏強度の影響を受けること が考えられる。本実験では直径が太い方のD10異形鉄筋の降伏点が8890kgf/cm<sup>2</sup>であるのに対して、



荷重ー軸縮み関係の実験結果 図4



D6異形鉄筋のそれが10460kgf/cm<sup>2</sup>と約1500kgf/cm<sup>2</sup>高く、その影響が出たためと考えられる。②横 補強筋の量を同一にするため、D10鉄筋で横補強した試験体の横補強筋の間隔がD6で横補強した試 験体のそれの2倍以上となり、主筋の座屈後挙動に差が出たためと考えられる。

コンファインドコンクリートの応力ーひずみ関係のピーク点に達するときの各試験体の中央断 面における外周横補強筋に生じる横方向ひずみと横補強筋の間隔 s との関係を図7 に示す。図中 の○と□はそれぞれ単純配筋形式を有するD6とD10鉄筋で横補強された試験体の実験結果を、●と ■は複合配筋形式を有する試験体の実験結果を表す。図7 より、いずれの試験体においても横補 強筋は応力ーひずみ関係がピーク点に達する際に降伏していないこと、同じ太さの横補強筋を使 用した場合間隔が大きいにも関わらず複合配筋形式の方が単純配筋形式よりも横補強筋のひずみ が大きい、すなわち拘束効果が高いことなどが分かる。また、横補強筋のひずみは間隔が大きく なるにつれて減少する傾向が見られるが、その負勾配は配筋形式によって大きく異なることも図 7 より伺える。ただし、このような現象を定量的に定式化するにはさらなる実験データの蓄積が 必要となるので、今後の研究課題にしたい。

## 4. 実験結果の評価

まずコンファインドコンクリートの応力ーひ ずみ関係のピーク点における最大応力である強 度の評価について述べる。著者らは、横補強筋 の量の他に、横補強筋の配筋形式および直径の 影響を考慮にいれた、横補強筋あるいは角型鋼 管により拘束されたコンファインドコンクリー トの強度の統一的な算定式として式(1)を提 案している[1]。



-452-

$${}_c\sigma_{cB} = {}_c\sigma_B + 11.5\rho_h\sigma_{hs}(\frac{d''}{C})(1-\frac{s}{2D_c})$$

$$\tag{1}$$

ここで、。 $\sigma_{B}$ :コンクリートのシリンダー強度、 $\rho_{b}$ :横補強筋の体積比、 $\sigma_{b}$ :横補強筋の応力、 d:横補強筋の公称直径、C:横補強筋の横支持長さ、s:間隔、Dc:周辺横補強筋の中心間距離。横補 強筋の横支持長さCの定義は、2本以上の周辺筋またはサブタイによって固定される鉄筋の中心間 距離である(図2参照)。ただし、式(1)を用いて高強度横補強筋により拘束されたコンファ インドコンクリートの強度を評価する際に、最大強度時に横補強筋が降伏していない(前節図7 を参照)ことから、横補強筋の応力 $\sigma_{b}$ に上限値を設ける必要があると思われる。ここで、文献 1 で述べた実験と本実験における外周横補強筋ひずみの平均値(0.33%)を参考にして、強度算定 式中の横補強筋の応力 $\sigma_{b}$ の上限値を7000kgf/cm<sup>2</sup>とする。

式(1)で求めたコンファインドコンクリート強度の計算値は表2に示されている。表2より、 強度の実験値と計算値との比率の平均値は1.00で、標準偏差が0.05と(1)式による計算結果は 精度よく実験結果を評価していることが分かる。また、比較のため、Sheikhら[2]と鈴木ら[3]に よって提案されている、横補強筋の配筋形式の影響を反映した強度算定式を用いて実験結果を評 価した。紙面の都合で詳細を示すことができないが、結果のみを述べると、Shiekhらの式を用い た場合は強度の実験値と計算値との比率の平均値が1.11で、標準偏差が0.17となり、鈴木らの式 を用いた場合は平均値が0.98で、標準偏差が0.16となっている。

次にコンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係について述べる。応力-ひずみ関係の実 験結果と計算結果との比較を図8に示す。計算結果は、式(2)で求めたものとSheikhらの提案 式[2]を用いて求めたものである。

$$Y = \frac{AX + (D-1)X^2}{1 + (A-2)X + DX^2}$$
(2)

 $\mathbb{C} \subset \mathbb{C} \quad X = \varepsilon \circ (\varepsilon \circ A) = \mathbb{E} \circ \varepsilon \circ (\varepsilon \circ C) \circ (\varepsilon \circ B) = \varepsilon \circ (\varepsilon \circ B) \circ (\varepsilon \circ B)$ 

式(2)は、著者らが(正方形鋼管を含む)直線型横補強筋により拘束されたコンファインド コンクリートの応力ーひずみ関係式として構成した実験式 [1,4]である、式中の他の記号の持つ 意味については文献4を参照されたい。

図8から分かるように、Sheikh式で求めた計算結果は単純配筋形式を有する試験体の応力ーひずみ関係のピーク点後の下り勾配域を良く評価しているが、複合配筋形式の試験体の実験結果を 過小評価する傾向にある。一方、式(2)による計算結果は、いずれの試験体に対しても、応力 ーひずみ関係の最大応力と、横補強筋の定着フックがほどけたり破断したりするまでの下り勾配 域を比較的良く捉えている。

5. まとめ

高強度横補強筋により拘束された高強度コンクリート柱の中心圧縮実験を行い、横補強筋の配 筋形式と直径がコンファインドコンクリートの圧縮性状に及ぼす影響を調べ、次の結論を得た。

1) コンファインドコンクリートの強度と靭性が横補強筋量の増加に伴い顕著に上昇する。また、横補強筋量が等しい場合は、複合配筋の方が外周横補強筋のみの配筋よりも拘束効果(強度



図8 応力-ひずみ関係の比較

の上昇および靭性の改善の度合い)が高い。

2) 同量横補強筋で拘束する場合、横補強筋の太さが拘束効果、特に靭性改善効果に及ぼす影響については、間隔による影響と相互関連しているため、今後の課題となる。

3) 異なる配筋形式で拘束されたコンファインドコンクリートの強度および圧縮応力ーひずみ 関係を、著者らがすでに提案している式(1)と式(2)で比較的良く評価できる。

[謝辞] 本実験の実施にあたっては、九州大学文部技官藤原文夫氏、川口晃氏、津賀山健治氏 および九州大学学生池田崇氏の多大な協力を得た。ここに深く感謝します。

[参考文献]

- 1) Sun, Y.P. and Sakino, K., : Ductility Improvement of Reinforced Concrete Columns with High-Strength Materials, Transactions of the JCI, Vol. 15, pp. 455-462, 1993
- 2) Sheikh, S.A. and Uzumeri, S.M., : Analytical Model for Concrete Confinement in Tied Columns, Proceedings, ASCE, V.108, ST 12, pp. 2703-2722, Dec. 1982
- 3) 鈴木計夫・中塚佶・菅田昌宏:角形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報告集, Vol.11, No. 2, pp. 449-454, 1989
- 4) 孫玉平:直線型横補強材により拘束された鉄筋コンクリート柱の弾塑性性状,九州大学学位 論文,1992年3月