# (45) SRC柱とCFT柱の特性を活かした 新形式の鉄骨コンクリート柱の弾塑性挙動

# 福原 実苗1・南 宏一2

1正会員 福山大学研究員 工学部建築学科(〒729-0929広島県福山市学園町一番地三蔵), ワイビーテクノ

E-mail:fukuhara@fuarc.fukuyama-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 福山大学教授 工学部建築·建設学科 (〒729-0929 広島県福山市学園町一番地三蔵) E-mail:minami@fucc.fukuyama-u.ac.jp

最近の建設コストの状況を反映して、従来のSRC構造の需要は減少している。この要因として、SRC構造はRC構造と比べて、鉄骨を使用することで材料・施工の両面でコスト高になり、本来のSRC構造がもつ 優れた力学的特性が反映できない状況が挙げられる。そこで、耐震性、施工性および経済性を兼ね備えた 構造として、SRC構造とCFT構造の特性を活かし、RC構造に対抗できる構造性能と構造コストを有した、 鉄骨を内蔵し、かつ、柱頭・柱脚部のみに鉄骨箱形部材を被覆した新しい形式の鋼コンクリート合成柱の 研究を行っている。本論文では、鉄骨を使用する最大の利点を生かし、鋼材の大半を鉄骨で構成する鉄骨 コンクリート構造の特性について基礎的実験を行い、耐力および靱性の評価について検討を行う。

## Key Words : SC Columns , SRC Columns , CFT Columns , Composite Columns , Elastic-Plastic Behavior

## 1. はじめに

日本の国土交通省が毎年実施している建築動向統計調 査<sup>1)</sup>による構造別着工棟数の推移の総計を図-1(a)に,10 ~15 階建築物の構造別着工棟数の推移を図-1(b)に示す。 ここで示す対象建築物数は,2005年1月~2005年12月 の集計を2005年計としている。

図-1(a)に示すように、日本における建築物の建設事情 が一変してきている。特に、図-1(b)に示す 10~15 階建 の中高層建築物に採用される構造形式の推移に着目する と、従来、活用されていた SRC 構造が急激に減少する のに対して、RC 構造が SRC 構造の減少分を補う形で急 激に採用されていることである。

特に、10~15 階建の中高層建築物は、2000年(平成12 年)以降 SRC 構造は減少し続けているにも関わらず、RC 構造については増加している。従来、6 階以上の中高層 建築物は、SRC構造と行政指導が行われ、SRC構造が活 用されてきた。しかし、2000年(平成12年)に建築基準法 の改正にともなって、限界耐力法、性能設計法の確立、 および RC 構造の鉄筋およびコンクリートの材料の高強 度化、さらに免震、制震技術の導入にともなって十分に 適正な構造計画および構造設計が、RC 構造で可能とな り、RC 構造の中高層建築物が比較的容易に建設できる ようになったことが、高層建築物の構造形式として RC 構造採用される理由の1つとしてあげられる。

このような状態になっている第一の要因として,SRC 構造は RC 構造と比べて,鉄骨を使用することによって 材料および施工の両面においてコスト高になり,本来の SRC 構造が RC 構造と比較して,保有する優れた力学的 特性の反映ができない状況になっていることが挙げられ る。



45 - 1

SRC構造とCFT構造の特性を生かして、RC構造に対抗 できる構造性能と構造コストを有した、鉄骨を内蔵し、 かつ、柱頭・柱脚部のみに鋼管を被覆した、鉄骨コンク リート(以下、SCと称す)構造を開発する。この構造シス テムの普及によって鋼コンクリート合成構造の普及を図 ることを目的とする。

# 2. 実験計画

## (1) 実験概要

本研究では、表-1に示すB-1からB-6の6体の試験体 を計画する。この試験体の特色は従来の十字形鉄骨に対 して、その主軸を45度回転させて従来の十字形鉄骨断面 と比べて、ほぼ2倍の曲げ耐力を発揮できるように計画 したものである。さらに、高圧縮力に対して、両端部に おける変形能力を大きくするために、補強板をリング状 に取り付けて(以下、箱形鋼管と称す)、内部のコンクリ ートを拘束するものである。また、鉄骨により分割され たコンクリートの一体性を図るために、鉄骨ウェブ部分 に孔を開け、孔あき鋼板ジベルによってコンクリートの 付着力を向上させる試験体(写真-1)もあわせて計画する。 変動因子は、載荷する軸力比、柱頭・柱脚部の補強板の 有無および内蔵する十字形鉄骨の角度である。試験体寸 法、材料強度は共通とし、B-5およびB-6の試験体形状お よび断面形状を図-2に示す。

#### (2) 載荷方法

載荷は、福山大学設置の建研式載荷装置を用いた。柱 頭の水平変位制御とし、水平変位および鉛直変位は各2 個ずつ取り付け測定し、平均値を用いる。加力サイクル は、変位部材各R(=る/H)による変位制御として、R=0.25 ×10<sup>2</sup>radを正負1サイクル載荷を行い、0.5×10<sup>2</sup>radを正負 2サイクル行う。その後、0.5×10<sup>2</sup>radづつ増加させる毎 に各2サイクルずつ繰返し載荷を行い、R=5.0×10<sup>2</sup>radま で載荷を行う。また、処女サイクルで最大耐力の70%に 耐力が低下した場合、このサイクルが終了した時点、ま たは軸力保持が不能になった場合は、その段階で実験を



写真-1 鉄骨孔あけ加工状況(孔あき鋼板ジベル)



図-2 試験体形状および断面形状[B-5,B-6]

終了する。

#### (3) 材料特性

耐力評価に用いる材料強度は、材料試験をした結果を 用いる。コンクリート強度は、実験前(材齢42日)と実験 後(材齢66日)の平均値 $\sigma_B$ =44.8N/mm<sup>2</sup>とした。鋼材の降伏 点は、鉄骨t6.5は353.3N/mm<sup>2</sup>、鉄骨t9は306.7N/mm<sup>2</sup>、鉄骨 t7は338.3N/mm<sup>2</sup>、鉄骨t11は305.0N/mm<sup>2</sup>となった。

# 3. 実験結果

## (1) 破壊状況

最大耐力時の破壊状況および終局時の破壊状況を, 図-3に示す。

最大耐力時においては、箱形鋼管を取付けていない試 験体は、柱頭・柱脚部に細かいひび割れが発生し、局所 的に剥離が生じた。また、箱形鋼管を取付けている試験 体については、ひび割れはほとんど発生しておらず、局

		_								
	断面 形状	軸力比	Fc	鉄骨			sp	補強板 (約 ts	箱形鋼管) Is	註 1) 軸力比 scn=N/(b・D・σв+sA・sσy)
	(mm)	(scn)	(N/mm <sup>2</sup> )	断面	角度	孔	(%)	(mm)	(mm)	$=cn/(1+s\phi)$
B-1 B-2	3-1 3-2 3-3 300 3-4 x300 3-5 3-6	0.3	30	2H-300x150x6.5x9 (十字形)	0°	- 40φ-@150	7.33		_	<ul> <li>註 2) *1 の鉄骨は</li> <li>*2 の規格鉄骨のフランジを 切断加工を行う</li> <li>註 3) 鉄骨角度は、主軸方向に 対する角度とする</li> </ul>
B-3 B-4				2H-350x75x7x11 <sup>*1</sup> 2H-350x150x7x11 <sup>*2</sup> (十字形)	45°	40φ-@150	13.22			
B-5 B-6		0.6						6	150	
				SS400				SS400		-

表-1 実験計画一覧

所的に箱形鋼管とコンクリートの境目の剥離が生じた。 全試験体において,鉄骨の座屈は生じなかった。

終局時においては、十字形鉄骨の角度が0度の試験体 は、最大耐力時以降に、柱頭・柱脚部のコンクリートの 剥落、鉄骨フランジの座屈、中央部のコンクリート剥落 の順に発生した。一方、十字形鉄骨の角度が45度の試 験体は、柱コーナー部に鉄骨フランジがあるため、十字 形鉄骨の角度が0度の試験体に比べ、コンクリートのひ び割れの発生が少なかった。

鉄骨フランジに孔を設けた試験体は、孔を設けること によりコンクリートが鉄骨フランジ部分と一体化し、初 期のひび割れの発生がおそかった。しかし、コンクリー トが一体化し鉄骨ウェブとともに変形するため、終局時 の鉄骨の座屈変形は大きくなった。

また,鉄骨の柱頭・柱脚に箱形鋼管を取り付けること により,曲げ圧縮域コンクリートを拘束しているため, 試験体にはほとんどひび割れの発生はなく,鉄骨ウェブ および柱頭・柱脚部の箱形鋼管の座屈は生じなかった。 同形状の試験体で高軸力(scn=0.6)の試験体については, 軸力比の小さい試験体と比べひび割れの発生,拡大,コ ンクリートの剥離は生じたが変位部材角 R=2.0×10<sup>2</sup>rad においても軸力を保持するだけの能力を有した。

#### (2) 履歴特性

図-4に履歴性状を示す。荷重-変形曲線では,縦軸に 水平荷重Q(kN),横軸に変位部材角R(10<sup>2</sup>rad)を示す。鉛 直変位の関係では,縦軸に水平荷重Q(kN),横軸に鉛直 変位δ<sub>N</sub>(mm)と縦軸に鉛直変位δ<sub>N</sub>(mm),横軸に変位部材角 R(10<sup>2</sup>rad)とを共に示し,圧縮力による縮みをマイナスと した。また,鉛直変位δ<sub>N</sub>が9mmの時,鉛直ひずみ度は 1%となる。

十字形鉄骨の角度0度の場合は、履歴曲線はひし形に 近い紡錘形となり、最大耐力以降の耐力低下の割合が小 さい。十字形鉄骨の角度が45度の場合は、履歴曲線は紡 錘形になり、十字形鉄骨の角度が0度の試験体に比べ最 大耐力は1割程度大きくなり、最大耐力以降の耐力低下 の割合が若干大きい。

鉄骨ウェブの孔の有無については、孔を設けることに より残留変形や鉛直変位が大きくなるが、最大耐力は 5%程度しか小さくなっていない。また、十字形鉄骨の 角度が45度で鉄骨ウェブに孔を設け、箱形鋼管を取付け た場合(B-5試験体)、最大耐力は箱形鋼管がない試験体(B



図-3 破壊状況



S:内蔵する十字形鉄骨角度(0°,45°), 孔:鉄骨ウェブの孔(40φ-@150)の有無, B:箱形鋼管の有無, scn:軸力比 図-4 履歴特性および鉛直変位

繰返し回数 K

-4試験体)に対して1割増となり、箱形鋼管および鉄骨ウ ェブの孔のない試験体(B-3試験体)に対して若干大きくなった。

鉄骨ウェブに孔を設け、箱形鋼管を取付けた高軸力を 受ける試験体は、軸力比が<sub>80</sub>n=0.6(コンクリート断面の みで軸力を負担した場合の軸力比に置換えると<sub>0</sub>n=1.0と なる)と高軸力にも関わらず、変位部材角R=1.5×10<sup>2</sup>rad (1/67)まで変形能力があった。これは、コンクリートが 圧壊するほどの高軸力下において、コンクリートの圧壊 防止として、柱頭・柱脚部に設けた箱形鋼管が有効に機 能したためと考える。

#### (3) 鉛直変位の累積状況

図-5に除荷完了時に生じている鉛直変位 $\delta_N$  (mm)と載荷 の繰返し回数Kを示す。横軸の各サイクルの繰返し回数 Kは,正載荷時を1/2,同一部材角の負載荷時を2/2とカウ ントする(R=+0.2510<sup>2</sup>rad 1回目はK=1/2, R=-0.2510<sup>2</sup>rad 1回 目はK=2/2, R=+0.510<sup>2</sup>rad 1回目はK=3/2)。また,縦軸は 鉛直変位 $\delta_N$ が9mmの時,鉛直ひずみ度は1%となる。

終局時の鉛直変位においては、断面の中央付近のコン クリートが剥落したため十字形鉄骨を45度にすることに より鉛直変位は3~4倍なった。また、鉄骨ウェブに孔を 設けることによりコンクリートと鉄骨の付着力が向上し、 コンクリートの変形に鉄骨が追随し鉄骨フランジが座屈 したため、鉛直変位は2倍になった。しかし、箱形鋼管 を取付けることにより、コンクリートの剥離や鉄骨フラ ンジの座屈が抑えられているため、鉛直変位は0.2倍と 大変小さくなった。



一方,最大耐力時付近に着目してみると,蓄積した鉛 直変位はほとんど変わらず,鉛直変位は4.5mm(鉛直ひず み度0.5%)程度に抑えられていた。高軸力を受ける試験 体(B-6)においても,鉛直変位は4.5mm(鉛直ひずみ度 0.5%)程度に抑えられており,箱形鋼管を取付けること により軸力保持能力の向上が見られた。

#### (4) 鉄骨のひずみ状況

図-6にピーク時におけるせん断応力度  $\tau$  (N/mm<sup>2</sup>)と変 位部材角R(10<sup>2</sup>rad)の関係を示す。せん断応力度は、鉄骨 ウェブに貼付けた3軸ゲージより算出を行っている。

十字形鉄骨を45度の場合,十字形鉄骨が0度の試験体 に比べ,鉄骨ウェブにせん断応力が生じるのが遅くなる 傾向がある。これより,十字形鉄骨が0度の試験体の方 が,負担するせん断力が早期にコンクリートから鉄骨に 移っているといえる。箱形鋼管を取付けることにより, 鉄骨ウェブのせん断応力度が急激に小さくなっているこ とがわかる。



また,鉄骨ウェブに孔がなく,箱形鋼管取付けていない試験体(B-1, B-3)に着目すると,最大耐力付近のせん 断応力度は,ほぼ同程度となっている。このことから, 十字形鉄骨が0度の試験体の強軸の鉄骨ウェブが負担するせん断力と十字形鉄骨が45度の試験体の鉄骨ウェブ1 枚が負担するせん断力はほぼ同程度であることが分かる。

#### 4. 終局耐力の算定

## (1) 鉄骨コンクリート柱の終局耐力

SRC部材では鉄骨部分とRC部分の付着力は極めて小さいことから、それぞれ別々に曲げモーメントとせん断力に抵抗する。SC部材においても同様になることから、文献2)、3)にもとづいて数式化して表すと、

$$Q_U =_c Q_U +_s Q_U \tag{1}$$

*cQu*:コンクリート部分の終局耐力 *sQu*:鉄骨部分の終局耐力

となる。ここで,SRC 部材と同様にコンクリート部分, 鉄骨部分の終局耐力は,破壊モードを考慮して求められ, それぞれ曲げ耐力とせん断耐力のいずれかの小さいほう の耐力の累加によって求められ,以下のようになる。

$$c Q_{U} = min(_{c} Q_{sU}, _{c} Q_{bU})$$

$$s Q_{U} = min(_{s} Q_{sU}, _{s} Q_{bU})$$

$$c Q_{sU}: \exists \sum f(y) = h \otimes f(y) \otimes f$$

sQbU:鉄骨部分の終局曲げ耐力

# (2) 終局曲げ耐力

文献4)にもとづいて、一般化累加強度理論により算定 を行う。鉄骨角度が0度の試験体については、コンクリ ート、強軸の鉄骨、弱軸の鉄骨の耐力の累加、鉄骨角度 が45度の試験体については、コンクリート、鉄骨フラン ジ、鉄骨ウェブの耐力の累加とした。鉄骨角度が45度の 試験体については、図-7に示すように、コンクリートは 等価な断面積となるよう正方形断面とし、鉄骨ウェブは 断面積が等しい角度が0度の断面に置換を行った。

#### (3) 終局せん断耐力

終局せん断耐力算定用断面を図-8に示す。コンクリートの終局せん断耐力については、図-8に示す鉄骨ウェブによって分割された断面について、それぞれアーチ機構が形成さるとして算定を行った。図-8(b)に示す鉄骨角度45度の試験体については、図-9(a),(b)に示すせん断抵抗





図-8 せん断耐力算定断面



コンクリートのせん断抵抗機構(アーチ機構)

機構を仮定した。中立軸は、断面積が等しくなる位置とし、各断面の重心位置に集中する力間でアーチ機構が形成されたときの角度をθとした。

#### (4) 終局耐力と実験値の比較

以上の耐力評価の方法により算定した終局耐力と実験 値を図-11に示す。鉄骨ウェブに孔がなく,箱型鋼管の ない試験体(B-1, B-3)については, scQu/Qepが1.20程度と ほぼ評価できているといえる。鉄骨ウェブに孔がある試 験体(B-2, B-3)については1.15程度,箱形鋼管を取付けた 試験体(B-4)については1.23とそれぞれの影響がでている。 これは,鉄骨ウェブに孔を設けることによる鉄骨ウェブ の耐力は減少し,箱形鋼管を取付けることによるコンク リートの拘束効果によりコンクリートの耐力が増加した ためと考えられる。

# 5. まとめ

十字形鉄骨を 45°に傾けることにより最大耐力および 最大耐力時の変位部材角が大きく,最大耐力時付近にお ける鉛直変位は,ほとんど変わらない。

鉄骨ウェブに孔をあけ、孔あき鋼管ジベルを設けるこ とで鉄骨とコンクリートの付着力は向上しているが、鉄 骨部の座屈も大きくなる。しかし、柱頭・柱脚部に箱形 鋼管を設けることにより、内蔵鉄骨の座屈は抑えられる。

箱形鋼管を取付けることにより、高軸力下においても 柱頭・柱脚部のコンクリートの圧壊を防止し、内蔵鉄骨 の座屈を防止するため、変位部材角R=1.5×10<sup>2</sup>rad (1/67) まで変形能力がある。また、箱形鋼管は、終局時におい ても座屈は生じていない。

十字形鉄骨の角度を考慮した耐力の評価については、 本論で提案する評価方法において評価できる。

鉄骨ウェブに孔を設けた(孔あき鋼管ジベル)の影響, 柱頭・柱脚部に箱形鋼管を取付けた影響を考慮した耐力



評価の確立が必要である。

謝辞:本研究は、(社)日本鉄鋼連盟「2005年度鋼構造研 究・教育助成事業 先導研究助成」を受けて行われたも のであり、藤井英希氏(現福山大学大学院)の卒業研究と して実施されました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 財団法人建設物価調査会:建築統計年報,第59表,2005.09
- 若林實,南宏一,谷資信,平野道勝:新構造学体系42 合成構造の設計4章 鉄骨鉄筋コンクリートの設計,pp.83-209,1986.8
- 日本建築学会:鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 5章 保有水平耐力の検討,2001年改訂第5版第3刷,pp.25-31, 165-194,2001.3
- 4) 日本建築学会:地震荷重と建築構造の耐震性, pp.340-355,1977.01
- 5) 福原実苗,南宏一:新しい形式の鉄骨コンクリート構造の開 発研究,日本建築学会大会学術講演集 C-1, pp.1073-1074, 2006.9
- 6) 福原,寺井,堺,倉本,宮内,西村,南:SRC柱とCFT柱の 特性を活かした新形式の鉄骨コンクリート構造の開発研究, 第11回建築構造研究助成事業 建築構造研究フォーラム梗概 集,pp.1-6,2007.3
- 7) 福原実苗,南宏一: SRC 柱とCFT 柱の特性を考慮した新形式 の鉄骨コンクリート柱の耐力と靭性,コンクリート工学年次 論文集,vol29, No.3, pp.1357-1362, 2007.7
- 藤井英希,福原実苗,南宏一:新しい形式の鉄骨コンクリート構造の開発研究(その2),(その3),日本建築学会大会学術講 演集 C-1, pp.1217-1220, 2007.08

# ELASTIC-PLASTIC BEHAVIOR OF NEW TYPE STEEL CONCRETE COLUMNS CONSIDERING CHARACTERISTIC BOTH SRC AND CFT COLUMNS

## Minae FUKUHARA and Koichi MINAMI

The demand for general SRC structures decreases, from the situation of a recent construction cost. This factor is that the excellent mechanical property of SRC structures cannot be demonstrated. That is because the iron frame is used, it is higher than that of RC structures on both sides of the material and construction. Then, it is researching the steel concrete composite columns of new systems as a structure to have the earthquake-resistant, the workability, and the economy. It is the best use of the characteristic of SRC columns and CFT columns. And it can oppose RC structures. In this paper, it experimented of the basic characteristic of steel-concrete structures, and the evaluation of ultimate strength and ductility of steel-concrete columns is examined.