

論文 全断面がソリッド式二重 CFT 柱の中心圧縮性状

李 文聰*1

要旨: 本研究では、径が異なる二つの鋼管を同心円上に配置し、全断面がソリッド式である二重 CFT 柱、両鋼管の間だけにコンクリートを充填した中空式である二重 CFT 柱および従来の CFT 柱について、中心圧縮実験を行った。その結果、ピーク荷重に達した後、二重 CFT 柱の耐力低下の度合いは従来の CFT 柱より小さくなり、二重 CFT 柱はピーク荷重を發揮した後の塑性領域での耐力低下を抑止するように寄与する効果があることを検証し、全断面がソリッド式である二重 CFT 柱は最も高い軸支持能力を示し、超高層建築物や超々高層建築物の建物内の周辺に設置するメガ柱の応用に有利であると考えられる。

キーワード: 二重鋼管柱, メガ柱, ソリッド式断面, 中空式断面, 中心圧縮性状

1. 序

コンクリート充填鋼管 (Concrete Filled Steel Tube, 以下, CFT と略記) は耐荷能力と変形能力に優れる合成構造として、現在の超高層建築物と超々高層建築物では柱部材に不可欠な構造要素となっている。

一方、超高層建築物または超々高層建築物の構造システムの中、建物内の周辺に設置された巨大柱 (以下メガ柱という) はメガフレームの一部であるため、比較的大きなせん断力と曲げモーメントを受けることになる。そのため、建物内の周辺に設置されたメガ柱は重要な構造部材である。

著者は将来の超々高層建築物に応用でき、さらに巨大地震・強風に耐えられるシンプルなメガ柱の開発を目的として、Fig. 1 に示すような従来の CFT 柱を發展させた長方形断面を有する日の字 CFT 柱を提案した¹⁾。日の字 CFT 柱について縮小試験体を用いた実験的研究を行って、耐荷性能は従来メガ SRC 柱を想定した縮小 SRC 柱試験体に比べて同等以上であることを確認したものの、軸力比 0.3 の一定軸圧縮力下の正負繰り返し水平力載荷実験において、軸縮みの進展が顕著となることが明らかになった¹⁾。このことから軸縮みの進展を抑制することを目的として、著者は続いて Fig. 2 に示すような直径が異なる

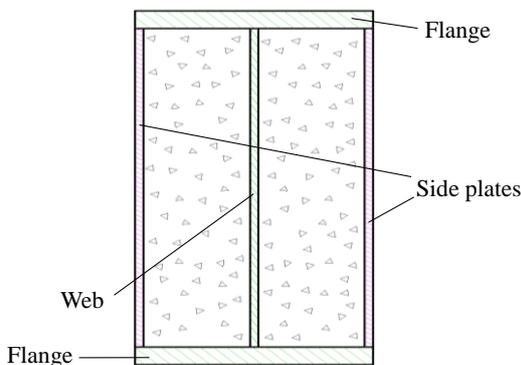


Fig. 1 Boxed I-shaped sectional CFT column

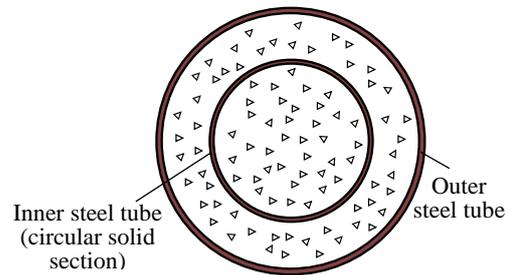


Fig. 2 Cross-Section of column with concrete-filled double-layer steel tubes (CFDLT)

る二つの鋼管を同心円上に配置し、全断面にコンクリートを充填した二重鋼管合成柱 (全断面がソリッド式コンクリート充填二重鋼管柱) を提案した²⁾。全断面がソリッド式コンクリート充填二重鋼管柱では軸力比 0.5 の一定軸圧縮力下の正負繰り返し水平力載荷実験結果で軸縮みの進展が遅くなり、耐力低下の度合いが小さくなることが確認できた²⁾。ただし、全断面がソリッド式コンクリート充填二重鋼管柱の圧縮性状についてはまだ明らかにされていない。

一方、超高層建築物の建物内の周辺に設置されたメガ柱は建物の高さに比例する自重、および風荷重と地震荷重などの水平力による転倒モーメントにより生じた付加軸力を支え、巨大な鉛直荷重が作用する場合がある。本研究は全断面がソリッド式コンクリート充填二重鋼管柱の中心圧縮実験を計画し、その柱の中心圧縮性状を明らかにすることを課題とする。また、比較するために、コンクリート充填中空式二重鋼管柱および従来型の CFT 柱も各 1 体ずつを用意した。

2. 実験計画

試験体総数は 4 体である。全ての試験体は直径が 190.7mm の円形断面で、高さが 572.1mm で、高さ直径比 (H/D) が 3 である。本研究の試験体に用いた円形鋼管

*1 東洋大学 理工学部建築学科准教授 博士 (工学) (正会員)

Table 1 Mechanical properties of materials

a) Steel tubes

Categories	f_y (MPa)	ε_y (%)	E_s (GPa)	σ_u (MPa)	%EL	Diameter-to-Thickness ratio (d/t)
$\phi 190.7 \times 6$	389	0.174	223	457	41.1	31.8
$\phi 190.7 \times 4.5$	387	0.181	213	458	40.3	42.4
$\phi 89.1 \times 3.2$	394	0.198	199	450	34.1	27.8

Note : f_y = yield strength of steel, ε_y = yield strain of steel, E_s = modulus of elasticity for steel, σ_u = ultimate strength of steel, %EL = percentage elongation of steel, d = outer diameter of steel tube, t = thickness of steel tube

b) Concrete

σ_B (MPa)	ε_c (%)	E_c (GPa)
68.8	0.238	40.6

Note : σ_B = compressive strength of cylinder for concrete, ε_c = the strain corresponding to peak stress of concrete, E_c = initial tangent stiffness of concrete

Table 2 Column specimens

Specimens	H/D	Outer steel tube	Inner steel tube	p_s (%)
15-CFT-C	3	$\phi 190.7 \times 6$	$\phi 89.1 \times 3.2$ filling with concrete (solid section)	12.2
15-CFDLT'-C		$\phi 190.7 \times 4.5$		
15-CFDLT-C		$\phi 190.7 \times 6$	$\phi 89.1 \times 3.2$ with hollow section	15.2
15-CFDST-C				18.7

Note : H = height of column, D = diameter of cross-section of column, p_s = steel ratio

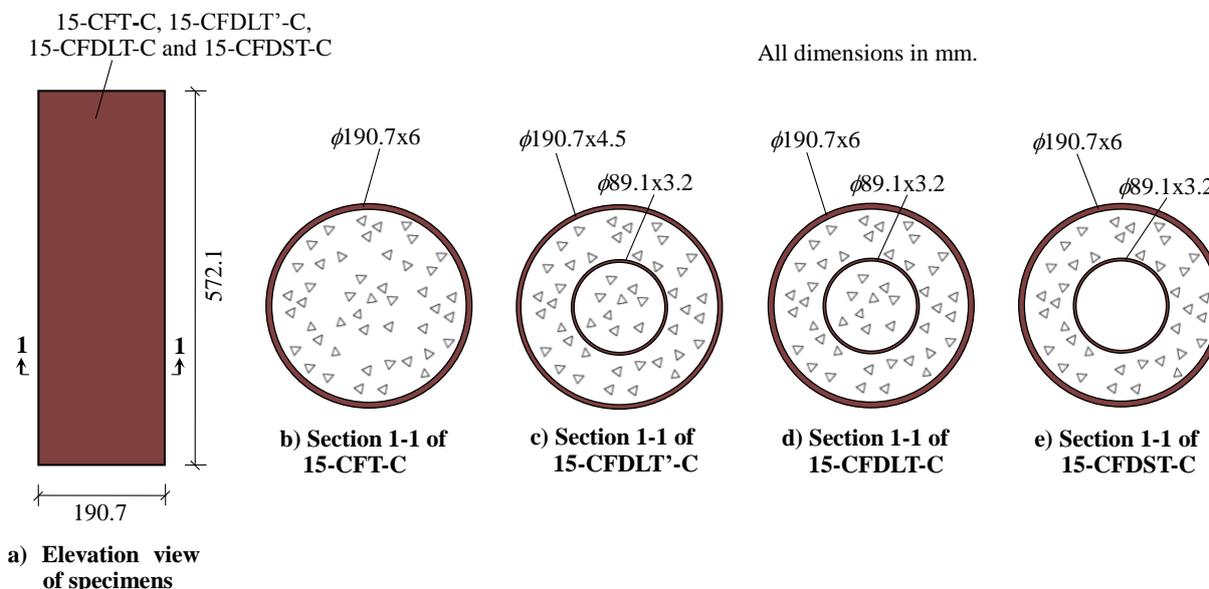


Fig. 3 Details of specimens

およびコンクリートの力学的材料定数を **Table 1** に、試験体一覧表を **Table 2** に、各試験体の詳細を **Fig. 3** に示す。

試験体 15-CFT-C は従来の CFT 柱試験体である。本試験体の鋼管は加力装置の荷重容量に基づいて、更に実建

物のメガ柱³⁾を勘案して、JIS の規定及び輸送制限による最大級レベルである $\phi 3400 \times 100$ (直径が 3400mm、厚さが 100mm の円形鋼管) の約 1/17.8 に縮小した $\phi 190.7 \times 6$ (材質 : STK) とし、鉄骨比 (鋼管断面積の比) が 12.2%

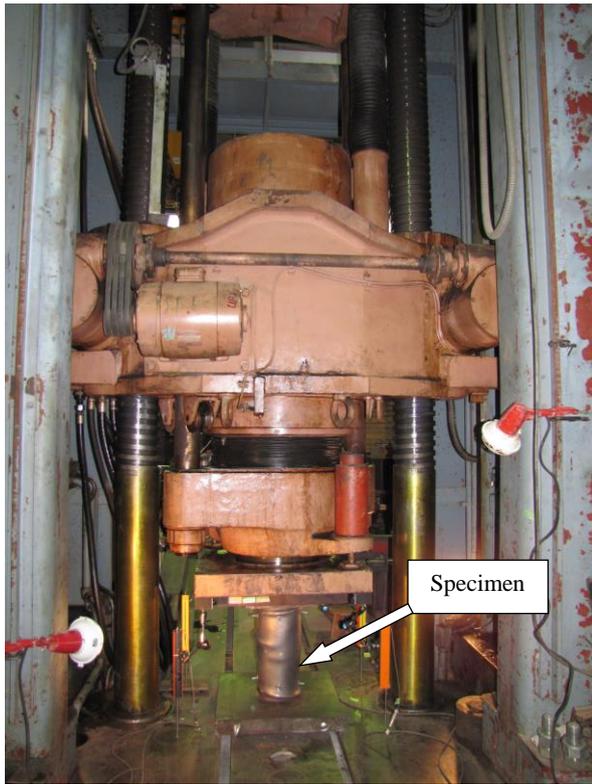


Fig. 4 Photograph of test setup

である。

試験体 15-CFDLT'-C と 15-CFDLT-C は直径が異なる二つの鋼管を同心円上に配置した全断面がソリッド式コンクリート充填二重鋼管柱試験体である。ただし、15-CFT-C と比較するため、試験体 15-CFDLT'-C は 15-CFT-C と鉄骨比が同じになるように設定し、外側と内側の鋼管はそれぞれ $\phi 190.7 \times 4.5$ (材質: STK) と $\phi 89.1 \times 3.2$ (材質: STK) とした。ピーク荷重とピーク荷重後の挙動は 15-CFT-C よりどのように改善されていることを検証するために、 $\phi 190.7 \times 6$ の内部にさらに $\phi 89.1 \times 3.2$ を設置する試験体 15-CFDLT-C を計画した。なお、ピーク荷重に関して、第 3 章で定義する。試験体 15-CFDLT-C の内側鋼管の内部にコンクリートを充填しない場合の軸支持能力の劣化状況を明らかにする為、 $\phi 89.1 \times 3.2$ の内部に中空とする柱試験体 15-CFDST-C も計画した。15-CFDLT-C と 15-CFDST-C の鉄骨比はそれぞれ 15.2% と 18.7% である。

Fig. 4 に示す福岡大学所有の 5000kN 構造物試験機により、繰返し中心圧縮実験を行った。荷重プログラムは、海外のメガ柱における圧縮実験的研究⁴⁾を参考にして、荷重および変位の組合せによる制御を採用した。荷重初期段階で、柱は弾性状態であり、荷重による制御を採用し、鋼管の座屈が生じないとした場合の鋼管の実降伏点強度とコンクリートのシリンダー強度から算定した圧縮強度の 1/10 を漸増荷重とした。外側の鋼管が明確に圧縮降伏

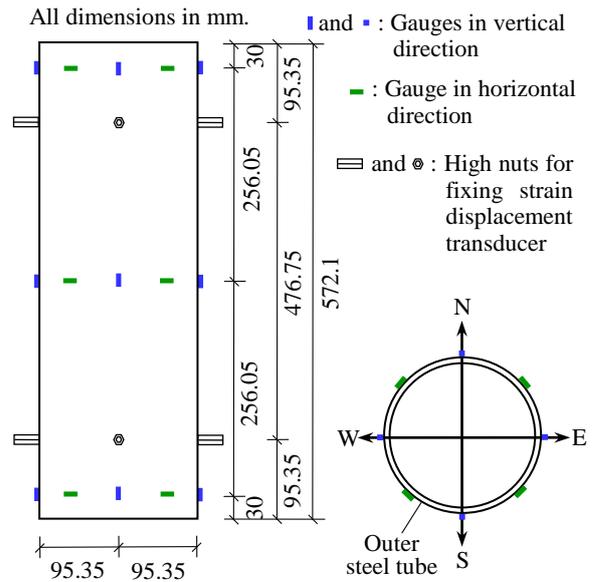


Fig. 5 Presentation of strain gauges and high nuts

を経験した時点（柱頭部と中央部および柱脚の何れの東西南北の鉛直方向に貼り付けたひずみゲージが全て降伏ひずみに達する際）から後の荷重は変位による制御を採用した。外側の鋼管が明確に圧縮降伏を経験した時点から更に続けて外側の鋼管が明確に圧縮降伏を経験した時点の変位 δ を強制的に与えた後除荷した。その後の制御変位は δ の 2 倍とした。なお、各試験体におけるひずみゲージの貼り付け位置は同じであり、その位置については Fig. 5 を参照されたい。全断面がソリッド式コンクリート充填二重鋼管柱について、大変形までのデータがないため、本研究では、文献 8) の実験方法を参考にして、大変形までの荷重も行い、大変形までのデータを集めた。ただし、変位計の測定容量により、柱全高さにおける鉛直変位の平均値は 180mm 以降の荷重を中止した。また、実験をスムーズに進めるため、および柱が十分な安定の状態を保つために、毎回の除荷から再荷荷に変更する際に、各柱に約 157kN (算定した圧縮強度の約 5%) の軸力を保持した。

3. 実験結果と考察

Fig. 6 に第一段階で測定した鉛直荷重 N と鉛直変位 δ の関係を示す。なお、 δ は柱の四隅に設置した 4 箇所の変位計により測定した柱全高さにおける変形量の平均値である。また、本研究で、第一段階は $\delta \leq 30\text{mm}$ の領域とする。Fig. 7 に第一段階での各試験体の変形状況を示す。Table 3 に第一段階での各試験体の実験結果および鋼管の座屈が生じないとした場合の鋼管の実降伏点強度とコンクリートのシリンダー強度から算定した圧縮強度 N_c を示す。 N_c は以下の式(1)で定義される。

$$N_c = f_{y,outer} \cdot A_{st,outer} + f_{y,inner} \cdot A_{st,inner} + \sigma_B \cdot A_{concrete} \quad (1)$$

ここで、 $f_{y,outer}$ は外側鋼管の降伏強度、 $A_{st,outer}$ は外側鋼管の断面積、 $f_{y,inner}$ は内側鋼管の降伏強度（15-CFT-C の

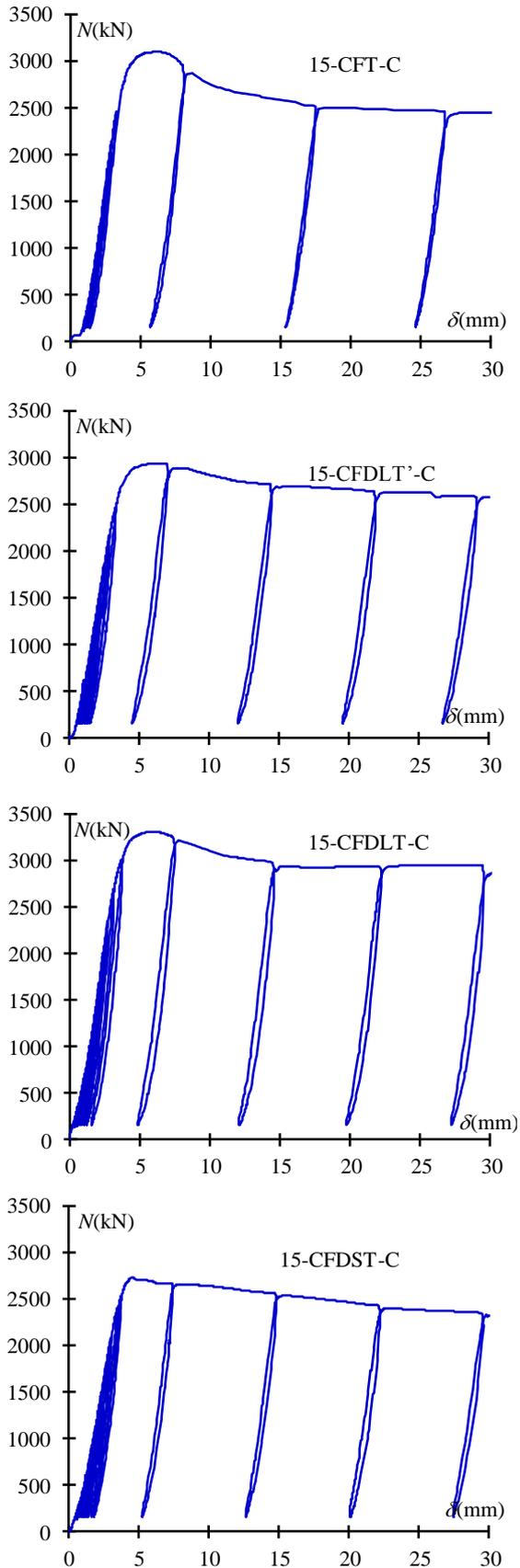


Fig. 6 Measured N - δ relationships ($\delta \leq 30\text{mm}$)

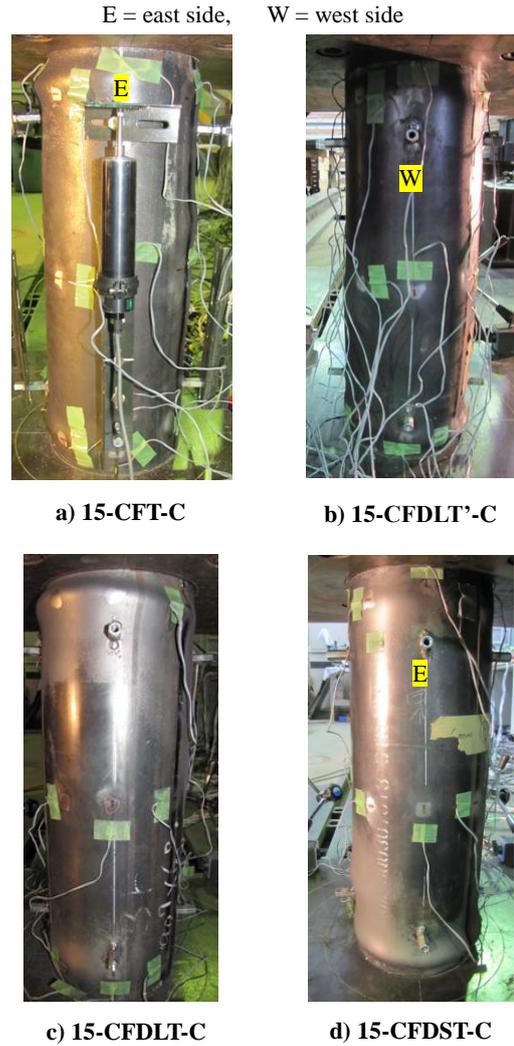


Fig. 7 Photographs of specimens ($\delta \leq 30\text{mm}$)

場合、 $f_{y,inner}$ はゼロとする)、 $A_{st,inner}$ は内側鋼管の断面積（15-CFT-Cの場合、 $A_{st,inner}$ はゼロとする）、 σ_B はコンクリートのシリンダー強度、 $A_{concrete}$ は柱断面のコンクリートの面積である。

いずれの試験体は第一段階での最大耐力実験値（以下

Table 3 Experimental results and calculated strength of each specimen

Specimens	N_p (kN)	N_c (kN)	N_{30} (kN)	N_p/N_c	N_{30}/N_p
15-CFT-C	3099	3078	2448	1.007	0.790
15-CFDLT'-C	2939	3082	2577	0.954	0.877
15-CFDLT-C	3308	3359	2857	0.985	0.863
15-CFDST-C	2727	2990	2317	0.912	0.850

Note : N_p = peak load (maximum load at first loading stage when δ is not larger than 30 mm) defined in this study, δ = average axial deformation of column based on overall height, N_c = calculated axial strength, N_{30} = axial load corresponding to δ at 30 mm

ピーク荷重として定義する) を迎えた際に、柱の外側鋼管の座屈は観察されなかった。

試験体 15-CFT-C は δ が 6.3mm の時に鉛直荷重がピーク荷重の 3099kN を迎えた。その後、顕著な耐力低下が確認された。続いて、 δ が 8.2mm の時に柱頭部の南側に軽微な膨らみが認められ、 δ が 17.5mm の時に柱脚部の南側に局部座屈が認められ、 δ が 30mm の時のピーク荷重に対する低下率が約 21.0% となっている。

試験体 15-CFDLT'-C は δ が 6.0mm の時に鉛直荷重がピーク荷重の 2939kN を迎えた。ピーク荷重について、15-CFDLT'-C は 15-CFT-C より小さくなった。このことから、鉄骨比が同じの場合、鋼材が周辺に設置すれば、ピーク荷重は上昇することが分かった。しかし、ピーク荷重後の耐力低下度合いについては、15-CFDLT'-C の方が 15-CFT-C より小さくなっている。試験体 15-CFDLT'-C は δ が 7.0mm の時に柱に目視で確認できる膨らみが生じていなくて、 δ が 14.4mm の時に柱脚部の南側・東南側・西南側に局部座屈が認められ、 δ が 21.9mm の時に柱頭部の東南側に軽微な局部座屈が生じたと共に柱脚部の局部座屈変形が進展し、 δ が 29.2mm の時に柱中央部の北側に軽微な膨らみが生じた。 δ が 30mm の時のピーク荷重に対する低下率が約 12.3% となっている。

試験体 15-CFDLT-C は δ が 5.7mm の時に鉛直荷重がピーク荷重の 3308kN を迎えた。続いて、 δ が 7.4mm の時に手触りで柱頭部の東側に非常に軽微な膨らみが感じられ、 δ が 14.6mm の時に柱頭部の東側・東南側に局部座屈が確認され、南側に目視で軽微な膨らみが確認され、 δ が 22.2mm の時に柱頭部の東側・東南側・南側の局部座屈変形が進展し、手触りで柱脚部の東南側に軽微な膨らみが感じられ、 δ が 29.6mm の時に柱中央部の西北側に膨らみが生じた。 δ が 30mm の時のピーク荷重に対する低

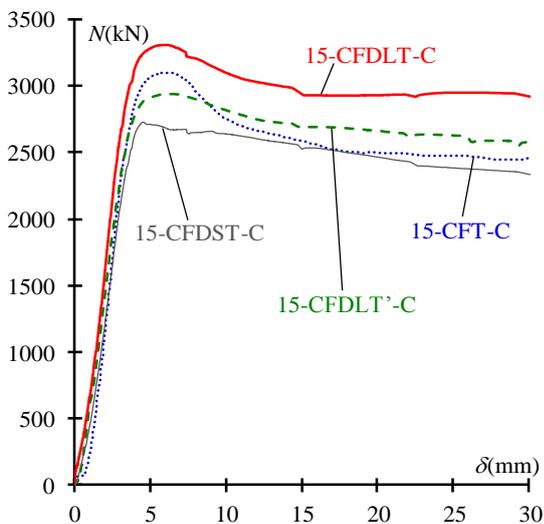


Fig. 8 Measured skeleton curves of N - δ relationships ($\delta \leq 30$ mm)

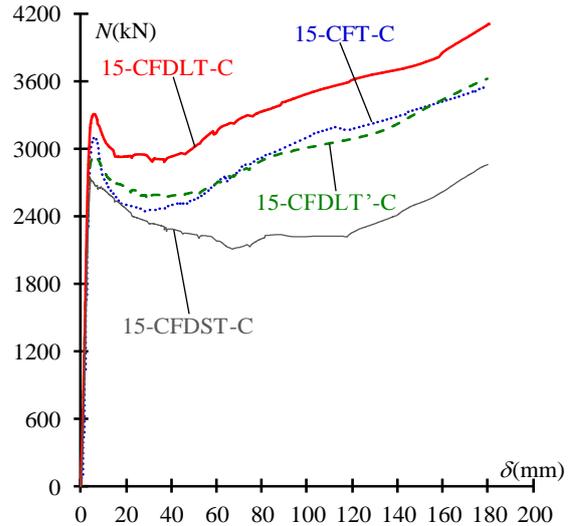


Fig. 9 Measured skeleton curves of N - δ relationships (including large deformation)

下率が約 13.7% となっている。

一方、試験体 15-CFDST-C は δ が 4.5mm の時に鉛直荷重がピーク荷重の 2727kN を迎えた。続いて、 δ が 7.4mm の時に目視で柱頭部の東側に非常に軽微な膨らみが確認され、 δ が 14.8mm の時に柱脚部の北側・東側・南側に局部座屈が観察され、柱頭部の東南側に軽微な膨らみが観察され、柱中央部の北側・柱脚端部から約三分の一の高さ部分に膨らみも観察され、 δ が 22.2mm の時に柱脚部の局部座屈変形が進展し、 δ が 29.6mm の時に内部鋼管柱が中空のため、柱脚部の局部座屈が顕著に現れた (Fig. 7 d) 参照)。 δ が 30mm の時のピーク荷重に対する低下率が約 15.0% となっている。

Fig. 8 に第一段階で得られた各試験体の N - δ 関係におけるスケルトンカーブの比較を示す。ピーク荷重について、試験体 15-CFDLT-C は最も大きい、内側鋼管の内部にコンクリートを充填しない試験体 15-CFDST-C は最も小さい。試験体 15-CFDST-C は内側鋼管の内部にコンクリートを充填しないため、最も早い段階でピーク荷重を迎えた。ピーク荷重に達した後、本試験体は耐力がほぼ線形的に低下する挙動を示した。一方、試験体 15-CFT-C と 15-CFDLT'-C および 15-CFDLT-C は、ピーク荷重に達する際における δ には大きな差が見られなかった。ピーク荷重に達した後、試験体 15-CFDLT'-C および 15-CFDLT-C は従来の CFT 試験体 15-CFT-C と同様に耐力が曲線的に低下する傾向が確認された。 δ が 30mm の時の耐力のピーク荷重に対する低下率は、二重 CFT 柱より従来の CFT 柱の方が大きい (Table 3 参照)。二重 CFT 柱はピーク荷重を発揮した後の塑性領域での耐力低下を抑止するように寄与する効果があることを実験的に検証した。

Fig. 9 に大変形まで得られた各試験体の N - δ 関係にお

けるスケルトンカーブの比較を示す。何れの試験体は、耐力が低下した後、耐力が上昇し、ある大変形を超えた後の耐力がピーク荷重を超え、 δ が 180mm まで载荷しても、鋼管の亀裂が生じなかった。試験体 15-CFDLT-C は最も高い耐力を示したが、試験体 15-CFDST-C は最も低い耐力を示した。 N - δ 関係におけるスケルトンカーブを比較すると、大変形時において、内側鋼管の内部にコンクリートを充填する試験体 15-CFDLT-C は、内側鋼管の内部にコンクリートを充填しない試験体 15-CFDST-C より、軸支持能力が大幅に優れていることが分かった。

各 δ における耐力とピーク荷重を發揮した以後の塑性領域での耐力低下の度合いおよび靱性能などに着目して、15-CFDLT-C は他の試験体より優れていることが分かった。超高層建築物や超々高層建築物が高ければ高いほど、一般に建物内の周辺に設置するメガ柱の横断面が大きくなる。それに伴い、メガ柱に応用する外側の鋼管の厚さも厚くする必要がある。しかし、鋼管製造工場の製造能力および極厚の鋼管の溶接の大変さなどの要因により、鋼管の厚さは無限に増やせない。建築物の十分な安全性を期待するため、横断面の大きなメガ柱の内部に他の鋼材を設置する必要があり、メガ柱の内部にコンクリートを充填した鋼管は良好な選択肢の一つである。本研究の実験結果により、従来の円形 CFT 柱の内部にさらに円形 CFT 要素を設置した全断面がソリッド式二重 CFT 柱は、最も高い軸支持能力を示し、超高層建築物や超々高層建築物の建物内の周辺に設置するメガ柱の応用に有利であると考えられる。

4. まとめ

本研究で全断面がソリッド式のコンクリート充填円形二重鋼管柱試験体、コンクリート充填中空式円形二重鋼管柱試験体および従来の円形 CFT 柱試験体について、中心圧縮実験を行った結果、以下の事が分かった。

- (1) 何れの試験体は、耐力が低下した後、耐力が上昇し、ある大変形を超えた後の耐力がピーク荷重を超える現象が確認できた。
- (2) 鉄骨比が同じの場合、鋼材を周辺に設置すれば、ピーク荷重は上昇する。
- (3) コンクリート充填中空式円形二重鋼管柱試験体は内側鋼管の内部にコンクリートを充填しないため、最も早い段階でピーク荷重を迎え、大変形まで最も低い耐力を示した。
- (4) ピーク荷重に達した後、コンクリート充填二重鋼管柱試験体の耐力低下の度合いは従来の CFT 柱試験体より小さい。コンクリート充填二重鋼管柱はピーク荷重を發揮した以後の塑性領域での耐力低下を抑止するように寄与する効果があることを実験的に検証した。
- (5) コンクリート充填中空式円形二重鋼管柱試験体は、ピーク荷重に達した後、耐力がほぼ線形的に低下する挙動を示した。一方、全断面がソリッド式のコンクリート充填円形二重鋼管柱試験体は、ピーク荷重に達した後、従来の CFT 柱と同様に耐力が曲線的に低下する挙動を示した。
- (6) 大変形時において、内側鋼管の内部にコンクリートを充填する試験体は、内側鋼管の内部にコンクリートを充填しない試験体より、軸支持能力が大幅に優れている。
- (7) 従来の円形 CFT 柱の内部にさらに円形 CFT 要素を設置した全断面がソリッド式二重 CFT 柱は、最も高い軸支持能力を示し、超高層建築物や超々高層建築物の建物内の周辺に設置するメガ柱の応用に有利であると考えられる。

謝辞：試験体の作製にあたっては、卒論を担当した福岡大学学部学生吉村健太氏ほか、李研究室の学生、および福岡大学工学部建築学科技術職員石橋宏一郎氏の協力を得た。実験にあたっては、福岡大学学部学生吉村健太氏にお世話になった。ここに、謝意を表します。

参考文献

- 1) 李文聰：日の字断面 CFT 柱の耐震性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 38, No. 2, pp.121-126, 2016
- 2) 李文聰：高軸力を受ける二重 CFT 柱の耐震性能に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 39, No. 2, pp.139-144, 2017
- 3) Zhou J., Chen K., Zhang Y., Shi H., Wang D., Zhou J., Ji J., Zhao J., Wang H., Jiang D., Wu J., Fang R. and Jiang K. : Structural Design on Wuhan Center Tower, Building Structure, Vol.42, No.5, pp.8-12, 2012 (in Chinese)
- 4) Cao W., Wang Z., Peng B., Dong H., Wu H., Yin C. and Chen L. : Experimental Study on Axial Compression Performance of Multi-Cell CFST Mega-Columns with Steel Reinforcement Cage Inside, Structural Engineers, Vol.28, No.3, pp.135-140, 2012 (in Chinese)
- 5) Cao W., Wu H., Yin C. and Qiao Q. : Axial Compression Behavior of Special-Shaped Concrete Filled Steel Tube Columns with Multiple Cavities, 第十一回日中建築構造技術交流会論文集 (中国武漢), pp.379-186, 2015 (in Chinese)
- 6) Wang L., Cao W., Xu M., and Wu H. : Experimental Research on Compression Behavior of Pentagonal Cross-Section CFST Mega-Columns, Journal of Building Structures, Vol.35, No.1, pp.77-84, 2012.1 (in Chinese)
- 7) Cao W., Yang G. and Qiao Q. : Study of Compressive Behavior for Multi-Cavity Mega-Bifurcated Concrete Filled Steel Tubular Columns, 第十一回日中建築構造技術交流会論文集 (中国武漢), pp.550-554, 2015 (in Chinese)
- 8) Zhao X., Tong L. and Wang X. : CFST Stub Columns Subjected to Large Deformation Axial Loading, Engineering Structures, Vol. 32, Issue 3, pp.692-703, 2010