

論文 高軸力を受ける二重 CFT 柱の耐震性能に関する研究

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、両鋼管の間のみにコンクリートを充填した二重鋼管合成柱、および全断面がソリッド式であるコンクリートを充填した二重鋼管合成柱について、一定軸圧縮力下（軸力比=0.5）の正負繰り返し水平加力実験を行った。その結果、全断面がソリッド式二重鋼管柱は中空式二重鋼管柱より軸縮みの進展が遅くなり、耐力低下の度合いが小さくなり、超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。さらに、有限要素法による弾塑性解析を行い、二重 CFT 柱の内部鋼管要素は高軸力下での耐震性能に対する貢献を検証した。

キーワード：二重鋼管 CFT 柱、高軸力、耐震性能、中空式断面、ソリッド式断面、メガ柱、OpenSees

1. 序

鋼材・コンクリートによる複合構造の一種であるコンクリート充填鋼管（Concrete Filled Steel Tube, 以下、CFT と略記）構造は型枠の組立てを必要とせず、かつ強度・剛性・靱性能も優れている為、鉄骨造、鉄筋コンクリート造、鉄骨鉄筋コンクリート造に次ぐ第四の構造として近年世界中で注目されている。CFT の利用拡大に向けて、1995 年から一連の日米共同構造実験研究¹⁾やその他の多くの研究^{2)~7)}が行われてきた。

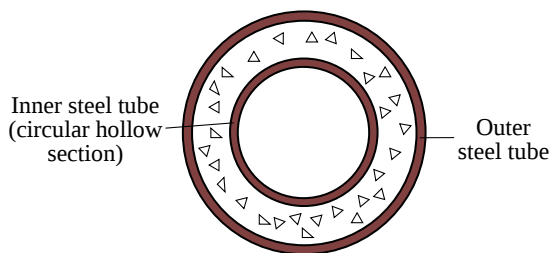


Fig. 1 Cross-Section of column with concrete-filled double-skin steel tubes (CFDST)

近年、従来の CFT の研究と共に、充填コンクリート量の低減による軽量化を目的とし、径が異なる二つの鋼管を同心円上に配置し、両鋼管の間のみにコンクリートを充填した二重鋼管合成柱（Fig. 1 参照）についての研究

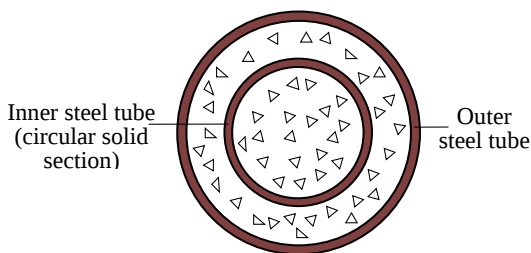


Fig. 2 Cross-Section of column with concrete-filled double-layer steel tubes (CFDLT)

8)~12)も進められており、コンクリート充填中空式二重鋼管柱が優れた構造性能を有することも明らかにした。本研究では、このようなコンクリート充填中空式二重鋼管柱の優れた構造性能を生かして、さらに断面の中空部にコンクリートも充填させて、全断面がソリッド式の二重鋼管柱（Fig. 2 参照）になるように変身して、変身した柱が超高層建築物の建物内の周辺に巨大柱（以下メガ柱）として設置する場合の耐震性能を検証することにある。

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、高軸力が作用する厳しい場合がある。本論文では、超高層建築物の建物内の周辺に設置されているメガ柱の低層部を対象にして、一定軸圧縮力下（軸力比=0.5）で、繰り返し水平荷重を受ける全断面がソリッド式の二重鋼管柱の弾塑性挙動を実験により明らかにする。また、比較するために、従来のコンクリート充填中空式二重鋼管柱も 1 体を用意した。

さらに、非線形有限要素法による弾塑性解析を行い、全断面がソリッド式の二重鋼管柱の内部に設置した鋼管要素は高軸力下での耐震性能に対する貢献を検証する。

2. 実験計画

試験体は、2 つの径の異なる鋼管を同心円上に配置したコンクリート充填二重鋼管柱が 2 体である。鋼管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。両試験体の柱は直径が 190.7mm で、内法高さが 800mm で、せん断スパン比が約 2.1 である。

試験体 15-CFDLT は本研究で提案した全断面がソリッド式のコンクリート充填二重鋼管柱であるが、試験体 15-CFDST は従来のコンクリート充填中空式二重鋼管柱である。両試験体の外側と内側の鋼管はそれぞれφ190.7x6

*1 福岡大学 工学部建築学科助教 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)	ε_u (%)	Diameter-to-thickness ratio (d/t)
$\phi 190.7 \times 6$	389	0.174	223	457	41.1	31.8
$\phi 89.1 \times 3.2$	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, σ_u = ultimate strength, ε_u = ultimate strain, d = diameter of steel tube, t = thickness of steel tube

b) Concrete

σ_B (MPa)	ε_c (%)	E_c (GPa)
59.4	0.230	40.4

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

Table 2 Column specimens

Specimens	$\eta_0=0.5$	Outer steel tube	Inner steel tube	p_s (%)
15-CFDLT	$N/(A_{so} \cdot f_{yo} + A_{si} \cdot f_{yi} + A_c \cdot \sigma_B)$	$\phi 190.7 \times 6$	$\phi 89.1 \times 3.2$ filling with concrete (solid section)	15.2
15-CFDST			$\phi 89.1 \times 3.2$ with hollow section	18.7

Note : η_0 = axial force ratio, N = axial load on column, A_{so} = area of outer steel tube, A_{si} = area of inner steel tube, f_{yo} = yield strength of outer steel tube, f_{yi} = yield strength of inner steel tube, A_c = area of concrete in cross-section, σ_B = compressive strength of concrete cylinder, p_s = steel ratio

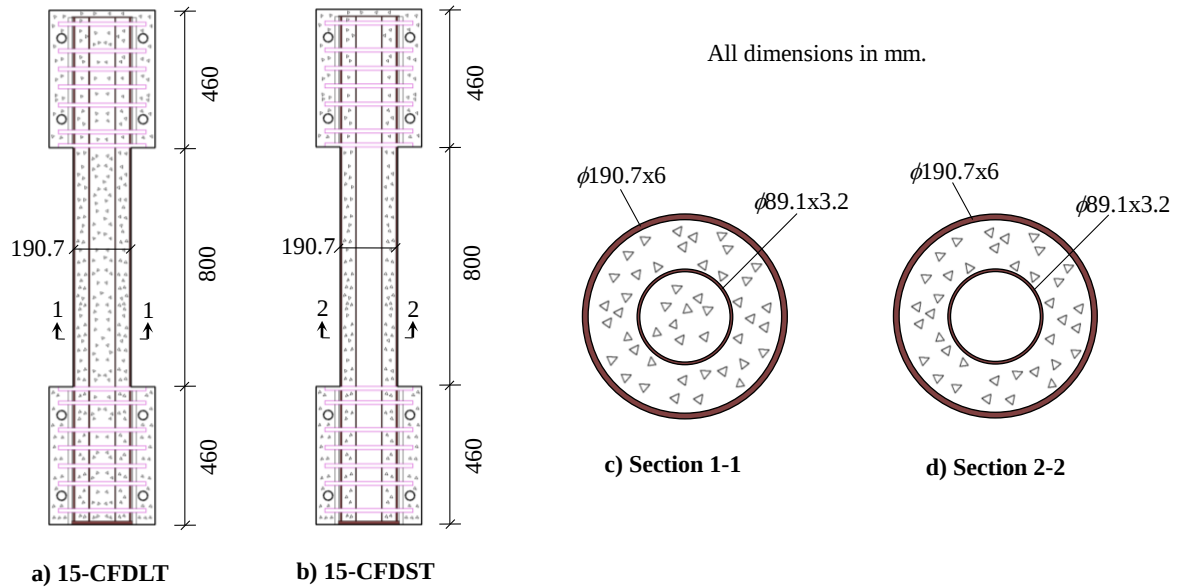


Fig. 3 Details of specimens

(材質 : STK) と $\phi 89.1 \times 3.2$ (材質 : STK) である。外側の鋼管は 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 に縮小したものとした。15-CFDLT と 15-CFDST の鉄骨比はそれぞれ 15.2% と 18.7% である。両試験体の軸力比 η_0 は 0.5 に設定したが, 15-CFDLT と 15-CFDST に作用する軸力はそれぞれ 1,566kN と 1,408kN

である。

Fig. 4 に示す建研式加力装置により, 一定軸圧縮力下の正負繰り返し水平加力実験を行った。載荷プログラムは, 部材角 R は 0.25% から 0.5% まで 0.25% の増分で, 0.5% から 3.0% まで 0.5% の増分で 3 回ずつ繰り返しの強制変形を与え, それでも靱性能が期待できる場合は $R=4.0\%$ と 6.0% を 1 回ずつ正負繰り返した。

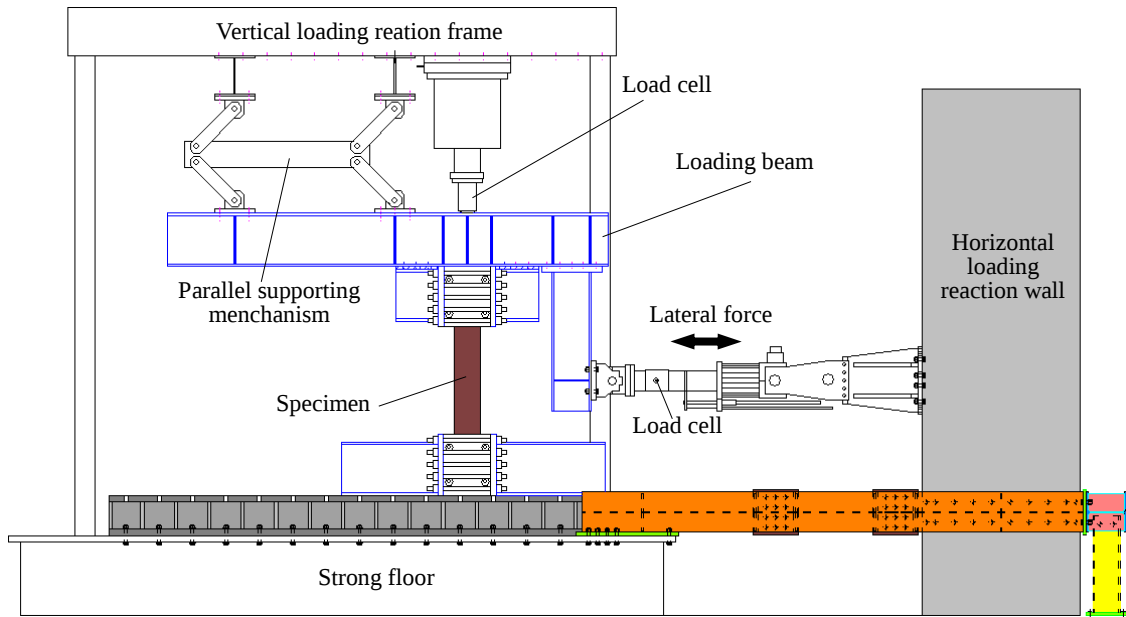


Fig. 4 Details of test setup

3. 実験結果

Fig. 5 に水平荷重 Q と部材角 R の関係および材軸方向の平均ひずみ ε_v と R の関係を示す。 R は柱部材の両端を結んだ直線が鉛直線となす角度であるが、 ε_v は柱の材軸方向の平均変位を柱高さで除した値である。但し、材軸方向の変位計の測定容量により、 ε_v は 5.0% 以降の測定を中止した。Fig. 5 の Q - R 関係図に破線で示した直線は、鋼材の降伏点強度及びコンクリートのシリンダー強度に基づく曲げ終局強度（略算値）によるせん断耐力である。両試験体は Fig. 6 に示すような仮定のストレスブロックに基づき、軸力の釣合い条件により中立軸を決めた後、曲げ終局時のせん断耐力を計算した。計算結果も Fig. 5 に

示す。Fig. 7 に実験終了後の両試験体の破壊状況を示す。

両試験体の最大耐力実験値は曲げ終局時のせん断耐力計算値を超えた。

試験体 15-CFDLT は部材角 2% の時に水平耐力は最大となった。部材角 2.5% の時に、柱頭と柱脚部分に局部座屈が生じ始め、水平耐力が徐々に低下してきた。但し、本試験体は 6% まで載荷しても、安定した紡錘形の履歴挙動を示している。

一方、試験体 15-CFDST は、部材角 1.5% の際に水平耐力が最大になり、部材角 2% 以降に柱頭と柱脚部分に局部座屈が生じ始め、水平耐力が徐々に低下してきた。本試験体は内側の鋼管の内部にコンクリートを充填してい

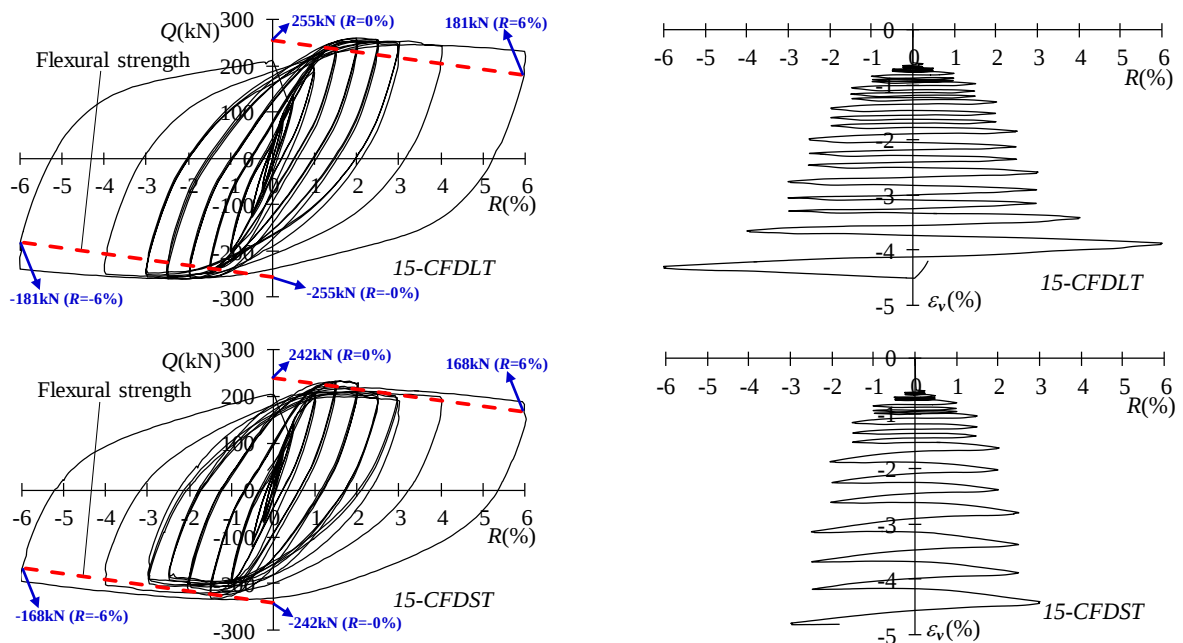


Fig. 5 Measured Q - R and ε_v - R relationships

where, D is the diameter of outer steel tube (or the diameter of column), Y is the distance between the neutral axis and axis of symmetry, f_{yo} is the yield strength of outer steel tube, f_{yi} is the yield strength of inner steel tube, σ_B is the compressive strength of concrete cylinder.

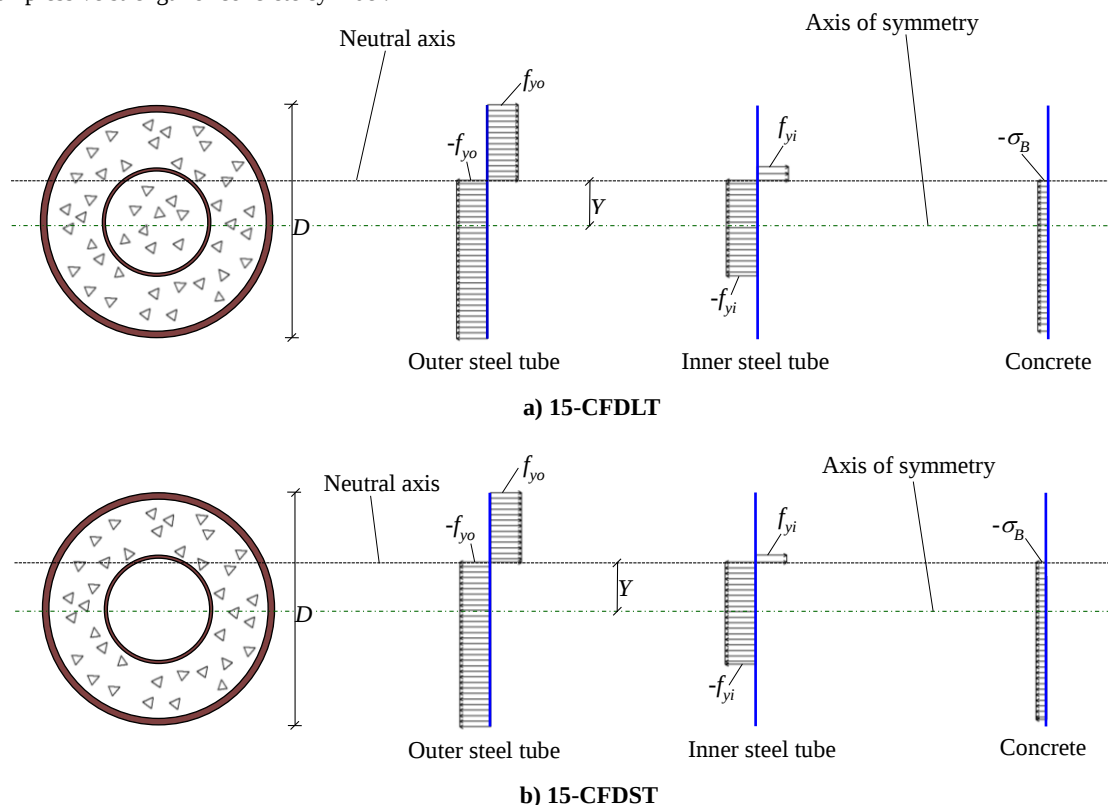


Fig. 6 Assumption of stress blocks for ultimate moment

ないため、柱頭と柱脚部分の局部座屈は試験体 15-CFDLT より早く生じ始め、水平耐力は 15-CFDLT の約 9 割程度であり、 δ_v - R 曲線における軸縮みの進展は 15-CFDLT より速い。試験体 15-CFDLT は内側の鋼管の内部にコンクリートを充填したため、試験体 15-CFDSST より、柱頭と柱脚の座屈変形量が小さくなり (Fig. 7 参照)、水平耐力の低下が緩やかであり、高軸力下での耐震性能が優れており、超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。

4. 非線形有限要素法による弾塑性解析的検討

本章では全断面がソリッド式のコンクリート充填二重鋼管柱試験体 15-CFDLT の非線形有限要素法による弾塑性解析モデルを構築し、実験結果と解析結果を比較検討して、その妥当性を検討する。また、従来のシングルの鋼管を有する CFT 柱についての FEM による解析も行い、内部に設置された鋼管要素は耐震性能に対する貢献を明らかにする。解析に用いた解析ソフトウェアは OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation)¹³⁾ である。

試験体 15-CFDLT における節点、部材要素および積分点の定義を Fig. 8 に示す。本試験体の実験領域は 2 節点・10 積分点を有する 2 次元の非線形梁・柱要素で定義した。両節点の自由度は試験体面内の水平、鉛直方向変位および回転変位の 3 つである。ただし、載荷実験の際に下スタブは固定であるので、実験の境界条件に基づき、本試験体の柱脚と下スタブの境界位置に対応している節点 1 は完全固定とした。また、加力装置にパンダグラフを有するため、載荷実験の際に試験体の上スタブと下スタブを平行に保っているため、本試験体における柱頭と上スタブの境界位置に対応している節点 2 の回転変位は拘束



a) 15-CFDLT b) 15-CFDSST

Fig. 7 Photographs of specimens after tests

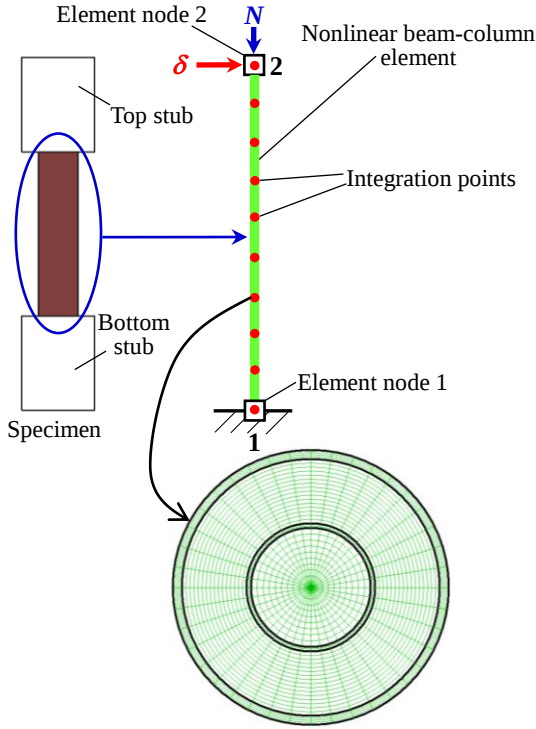


Fig. 8 OpenSees model for 15-CFDLT

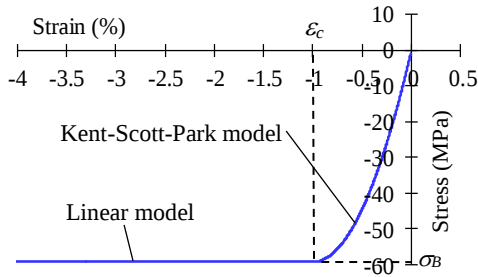


Fig. 9 Concrete compressive pre-peak and post-peak response

とした。柱断面はファイバー断面で定義し、各ファイバーには 1 軸応力状態を取り扱った。

Fig. 9 にコンクリートにおける解析用の応力度-ひずみ度関係を示す。コンクリート要素には引張側を考慮していない。コンクリートのプレピーク領域においては、Kent-Scott-Park モデル^{14),15)}を適用し、コンクリートのヤング係数 E_c は以下の式(1)によって定義されている。

$$E_c = 2\sigma_B / \varepsilon_c \quad (1)$$

ここに、 σ_B ：コンクリートのシリンダー強度、 ε_c ：コンクリートの圧縮強度時のひずみ度である。ただし、 ε_c の値は試験体 15-CFDLT の柱断面と同じ断面サイズを有する高さ外径比が 3 である柱試験体（全断面がソリッド式のコンクリート充填二重鋼管）の中心圧縮試験から得られた結果（0.01）を与えた。

コンクリートのポストピーク領域において、文献 16) に基づき、コンクリートの応力度は σ_B として一定の値で

where, f_y is the yield strength, f_u is the ultimate strength, ε_y is the strain at yield strength, ε_u is the strain at ultimate strength, E_0 is the initial elastic tangent, b is the strain-hardening ratio (ratio between post-yield tangent and initial elastic tangent). In this study, the values of f_y , f_u , ε_y , ε_u , E_0 are based on the results of tensile test.

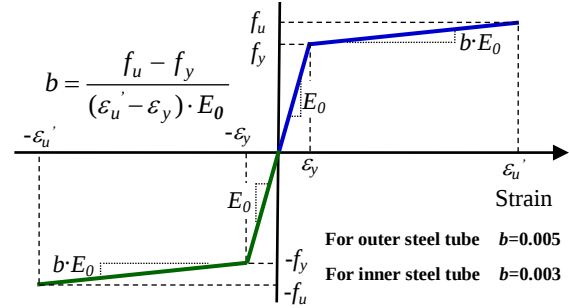


Fig. 10 Constitutive law of steel tube

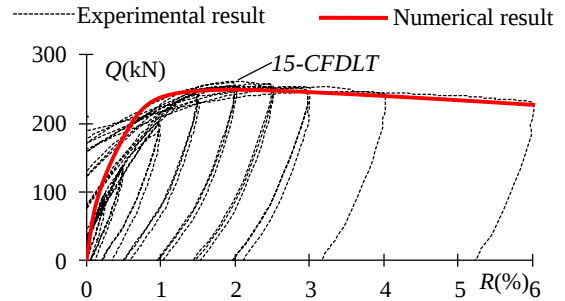


Fig. 11 Comparison of experimental result and numerical result (15-CFDLT)

あると仮定された。

鋼管には、Fig. 10 に示すバイリニアモデルである応力度-ひずみ度関係を用い、OpenSees に組み込まれている Steel01 を適用した。ただし、鋼管の座屈を考慮していない。また、コンクリートと鋼管の付着は完全付着であると仮定された。

載荷実験状況に基づき、節点 2 には柱軸力比 0.5 相当の一定鉛直荷重 N を加えた後、節点 2 に強制変位 δ を与えた (Fig. 8 参照)。解析する際には、 $P-\Delta$ 効果を考慮した。数値計算によって解くための反復解析手法は修正ニュートン・ラプソン法を採用した。

以上の解析モデルに基づき、静的・一方向変位漸増解析を実施し、計算した水平荷重 Q と部材角 R との関係は第一象限の実験結果と比較し、Fig. 11 に示す。試験体 15-CFDLT では、解析で得られた $Q-R$ 曲線と実験により得られたスケルトンカーブについて、部材角 1% までは実験値より解析値の剛性の方が高く推移している。それはコンクリートと鋼管の付着は完全付着であると仮定されたと考えられる。しかし、初期剛性及び部材角 1% 以降の解析値と実験値は良好な関係にあった。このことから分かるように、Kent-Scott-Park モデルを適用したプレピーク曲線、コンクリートのシリンダー強度としたポス

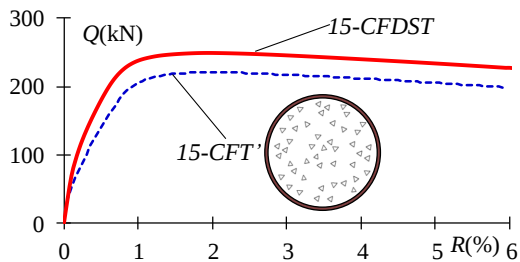


Fig. 12 Comparison of numerical results

トピーク関係（比較的単純なモデル）およびバイリニアモデルである鋼材の応力度-ひずみ度関係（比較的単純なモデル）の組み合わせによる解析値は試験体 15-CFDLT のスケルトンカーブを概ね評価できる。

15-CFT'は実験が行われていない仮想試験体である。本試験体は従来のシングルの鋼管を有する CFT 柱であり、軸力が試験体 15-CFDLT と同様である。仮想試験 15-CFT'の鋼管とコンクリートはそれぞれ試験体 15-CFDLT の外側鋼管とコンクリートと同じ力学的材料定数を有するものとする。試験体 15-CFDLT の解析モデルに基づき、15-CFT'における静的-方向変位漸増解析を実施し、得られた数値解析結果は試験体 15-CFDLT の解析結果と比較し、Fig. 12 に示す。Fig. 12 から分かるように、15-CFDLT は 15-CFT'より、曲げ剛性解析値が高く、曲げ耐力が大きく、耐震性能が優れている。全断面がソリッド式のコンクリート充填二重鋼管柱の内部に設置した鋼管要素は、高軸力下での耐震性能にも貢献していることが分かった。

5. まとめ

本研究で提案した全断面がソリッド式のコンクリート充填二重鋼管柱及びコンクリート充填中空式二重鋼管柱について、一定軸圧縮力下（軸力比=0.5）の正負繰返し水平力載荷実験を行った結果、および非線形有限要素法による弾塑性解析結果、以下の事が分かった。

- (1) 全断面がソリッド式のコンクリート充填二重鋼管柱の軸縮みの進展はコンクリート充填中空式二重鋼管柱より遅い。
- (2) 全断面がソリッド式のコンクリート充填二重鋼管柱の耐力低下の度合いはコンクリート充填中空式二重鋼管柱より小さい。
- (3) 全断面がソリッド式のコンクリート充填二重鋼管柱の内部に設置した鋼管要素は、高軸力下での曲げ剛性と曲げ耐力にも貢献している。
- (4) 全断面がソリッド式のコンクリート充填二重鋼管柱はコンクリート充填中空式二重鋼管柱より超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。

謝辞：実験にあたっては、卒論を担当した福岡大学学部学生吉村健太氏ほか、李研究室の学生の協力を得た。加力装置の組み立てにあたっては、福岡大学工学部建築学科技術職員石橋宏一郎氏にお世話になった。ここに、謝意を表します。

参考文献

- 1) 向井昭義ほか：ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究(CFT-1～CFT-35)，日本建築学会大会学術講演梗概集，1995.8～1998.9
- 2) 河野昭彦，松井千秋，中島隆裕，高木潤一：繰返し軸方向力を受けるコンクリート充填鋼管部材の座屈挙動とエネルギー吸収能力に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 482 号，pp.131-140，1996.4
- 3) 藤本利昭ほか：高強度材料を用いたコンクリート充填鋼管短柱の軸圧縮特性，日本建築学会構造系論文集，第 498 号，pp.161-168，1997.8
- 4) 山本貴正，川口淳，森野捷輔：コンクリート充填円形鋼管短柱の軸圧縮特性に及ぼす寸法効果に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 561 号，pp.237-244，2002.11
- 5) Georgios Giakoumelis and Dennis Lam : Axial capacity of circular concrete-filled tube columns, Journal of Constructional Steel Research, pp.1049-1068, 2004
- 6) 津田恵吾，松井千秋：一定軸力と変動水平力を受ける円形鋼管柱の弾塑性性状，日本建築学会構造系論文集，第 505 号，pp.131-138，1998.3
- 7) Nathan C. Gould and Thomas G. Harmon : Confined Concrete Columns Subjected to Axial Load, Cyclic Shear, and Cyclic Flexure—Part II: Experimental Program, ACI Structural Journal, Vol. 99, pp.42-50, 2002.1
- 8) Wei, S., Mau, S., Vipulanandan, C., and Mantrala, S. : Performance of New Sandwich Tube under Axial Loading: Experiment, Journal of Structural Engineering (ASCE), Vol. 121, Issue 12, pp.1806-1814, 1995.12
- 9) Zhong Tao, Lin-Hai Han and Xiao-Ling Zhao: Behaviour of concrete-filled double skin (CHS inner and CHS outer) steel tubular stub columns and beam-columns, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 60, Issue 8, pp.1129-1158, 2004.8
- 10) Lin-Hai Han, Hong Huang, Zhong Tao and Xiao-Ling Zhao : Concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) beam-columns subjected to cyclic bending, Engineering Structures, Vol. 28, Issue 12, pp.1698-1714, 2006.10
- 11) 上中広二郎，鬼頭宏明，園田恵一郎：二重鋼管合成短柱の圧縮特性に関する実験的研究，鋼構造論文集，第 14 巻，第 53 号，pp.67-75，2007.3
- 12) 林堂靖史，杉浦邦征，河野広隆，大島義信，出向井雄一：コンクリート充填中空式二重鋼管柱の曲げ特性に関する研究，構造工学論文集，Vol. 54A, pp.807-814，2008.3
- 13) The Regents of the University of California, OpenSees: Open System for Earthquake Engineering Simulation, Pacific Earthquake Engineering Research Center, <http://opensees.berkeley.edu>
- 14) Kent D. C. and Park R. : Flexural members with confined concrete, ASCE Journal of the Structural Division, Vol. 97, No. 7, pp. 1969-1990, July 1971
- 15) B. D. Scott, R. Park and M. J. N. Priestley : Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates, ACI Journal Proceedings, Vol. 99, Issue 1, pp. 13-27, January 1982
- 16) 中原浩之，花田達矢：CFT ブレースにより耐震補強を施した実在建物の耐震性能改善効果に関する解析的研究，日本建築学会構造系論文集，第 79 巻，第 703 号，pp.1355-1362，2014.9