

〔論文〕

コンクリート充填鋼管柱の中心圧縮性状に関する実験的研究

(その1 正方形断面)

松本 豊^{*1}・上原 修一^{*1}・野口 聡仁^{*2}

Experimental Study on Central Compression Properties of Concrete Filled Steel Tubular Column (Part 1 Square Cross-section)

Yutaka MATSUMOTO^{*1}, Shuichi UEHARA^{*1}, Akihito NOGUCHI^{*2}

Abstract

The structural performance of concrete-filled steel tubular columns (CFT) has been widely investigated. However, most of these studies have been performed on columns with circular or square sections.

The present study reports a central compression experiment of rectangular CFT columns. The basic structural performance of the rectangular CFT columns is inspected. In a pilot experiment, the experimental method was tested on square CFT columns, similar to the existing studies. Equal axial compression was applied to three CFT columns on a concrete part. The effect of cross-section on the compression performance in the central compression experiment was then determined.

Key Words : CFT column, square cross-section, confined concrete

1. はじめに

コンファインド効果に優れた耐力と靱性を持つコンクリート充填鋼管（以下、CFTと呼ぶ）柱は、円形・正方形断面が一般的に多く使用されている。これまでもコンファインドコンクリートの強度、その時のひずみおよび応力-ひずみ関係は、多くの研究者により各々の式が提案されている。しかしながら、これらの式は円形・正方形断面に対するものであり、著者らが知る限り長方形断面に対する研究はほとんどなく、その構造性能は十分に解明されていない。

2016年の日本建築学会大会のパネルディスカッション⁽¹⁾において2008年改訂版のコンクリート充填鋼管構造設計施工指針⁽²⁾（以下、CFT指針と呼ぶ）では、柱の耐力算定式は円形と正方形断面のみである。その為、長方形断面柱を用いる場合、個々の設計者などが各自で判断し、正方形断面柱の耐力算定式を準用して設計を行っている。それが妥当であるかを確認する必要があるものの前述の通り長方形断面の実験的研究は非常に少ないことが指摘された。

著者らは、Vecchioらにより柱・はり部材の断面解析に適用できるように拡張された修正圧縮場理論⁽³⁾の解析モデルを用いて、正方形および長方形断面CFT極短柱の曲げせん断耐力について解析を行い、解析モデルのCFT短柱のせん断耐力解析への適用性について限られた範囲ではあるが、検討を行った^{(4),(5)}。しかし、長方形CFT極短柱の既往実験が少ない為、本解析モデルの長方形CFT極短柱への適用性については十分な検討に至っていない。また、自由度が高い構造計画を可能にするために、長方形CFT柱のコンファインド強度を明確にすることは重要と考える。

そこで、本論では長方形CFT柱の基本的な構造性能を把握するため、CFT柱の中心圧縮実験を行う。まず、予備実験として、崎野ら⁽⁶⁾が行った正方形CFT柱と同様の形状を用いて実験方法の検証を行う。次に、正方形CFT柱3体の中心圧縮実験により、断面全体に均等な軸方向圧縮力が作用する場合の断面寸法の違いによる圧縮性能への影響を検討する。また、面外ひずみ-軸ひずみの関係性および破壊性状についても併せて検討を行う。

^{*1} 建築・設備工学科
令和3年10月27日受理

^{*2} ものづくりセンター

2. 実験概要

2・1 試験体計画

試験体として、実大の1/3スケールものを4体製作する。図1に試験体の寸法を示す。本研究で用いる試験体4体の諸元を表1に示す。No. 1Pは、崎野らと同じ試験体諸元を用いて予備実験を行う。試験体変数はB/tとした。試験体の高さHはDの3倍とした。試験体数は予備試験体1体を含め、合計4体とした。鋼材の材種とコンクリート設計基準強度は、一般的に用いられているSTRK400、Fc18とした。(検長150mm)は、鋼管表面に開けた有効長さ30mmの長孔に通した通しボルトにナットで固定された鋼製の等辺山形鋼の測定治具と試験体にボルトで固定した4個の変位計で測定した。

鋼管のひずみは、拘束効果の影響を受ける、x、z方向ひずみ(以下、周ひずみと呼ぶ)を計測する。鋼管の曲げ応力の影響を少なくするため鋼管の辺長の1/4位置にひずみゲージを貼り付けた。なお、鋼管の軸方向およびコンクリート拘束への主応力方向の影響は少ないと考えられるが、ダミーとして計測した。

Table 1 List of specimens

Specimen	B×D (mm)	t (mm)	B/t	B/D	Volume ratio*1	H (mm)	Fc (MPa)	Steel material
No. 1P	175×175	6.0	29.2	1.0	0.15	350	18	STKR400
No. 1	75×75	4.5	16.7		0.27	225		
No. 2	100×100		22.2		0.20	300		
No. 3	150×150		33.3		0.13	450		

* 1 Volume of the steel tube/Volume of the concrete

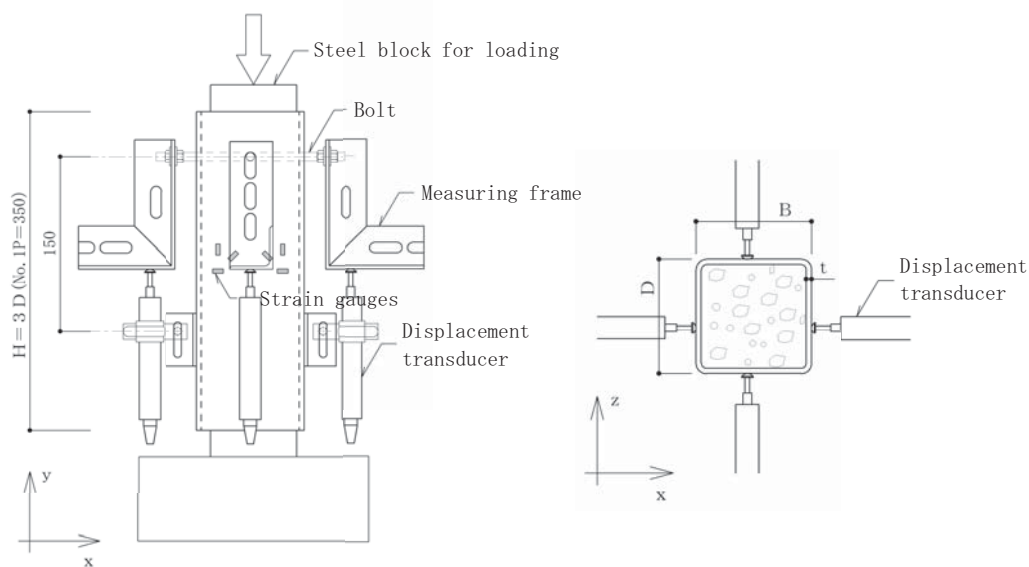


Fig. 1 Test set-up and Instrumentation

図1に示すように、鋼管の膨らみを計測するために軸方向の変位計に干渉しない位置に、4個の変位計を取り付けた。なお、コンクリートのコンファインド効果の性状を捉えるため、鋼管に軸方向応力が伝わらない様に、ラップフィルムで縁切りした。これにより、鋼管と充填したコンクリートとの間に付着力を小さくできるものとする。

2・2 材料試験結果

(1) 鋼管

表2に、鋼材の材料試験結果を示す。鋼材の材料試験片は、本学内ものづくりセンターのフライス盤を用いて正方形鋼管から3本切り出した。なお、材料試験片は5号試験片とした。

(2) コンクリート

表2に、コンクリートの材料試験結果を表3に、コンクリートの調合表を示す。調合設計は、次報の長方形シリーズ

とも同じである。使用される充填コンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いている。スランプは180mm、骨材の最大寸法は15mmとした。

一連の実験を13日間で実施した。この期間中の材齢の違いでシリンダー強度に 3.2N/mm^2 差が生じていることが確認できる。

Table 2 Material test results

Specimen	σ_y (MPa)	E_s (GPa)	$\sigma_{0.1}$ (MPa)	$c\sigma_B$ (MPa)	ϵ_0 (%)	E_c (GPa)
No. 1 P	355	169.0	421.6	30.6	0.26	24.8
No. 1	378	235.9	415.3	32.3	0.29	22.9
No. 2	349	219.3	406.4	33.8	0.26	29.0
No. 3	360	224.9	427.7	32.3	0.29	22.9

Table 3 Mix proportion

W/C (%)	Unit mass (kg/m ³)				
	Water (W)	Cement (C)	Coarse aggregate	fines	Super plasticizer
64.1	195	305	909	1018	3.05

2・3 載荷方法

載荷方法においては、前節の図1試験体形状に示すように、試験体下端の回転を拘束する材端条件で、中心圧縮力を2000kN 万能試験機により載荷する。また、中心圧縮力を充填コンクリートのみに負担させるため試験体の上下端に鋼管の内法断面より5mm 小さい正方形断面の加力ブロックを用いる。全試験体は、軸方向ひずみが6.0%になるまで載荷を行う。載荷プログラムは、弾性領域において荷重20kN ずつ漸増させ、コンクリート圧壊以降は変位制御とした。

3. 実験結果

3・1 拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係

正方形鋼管で拘束されたコンクリートが、中心圧縮を受ける場合、鋼管から受ける側圧分布が断面内で一様でないため軸方向応力分布も断面内で一様とはならないと考えられる。しかしながら、軸方向応力の真の分布を解析的に求めることは現時点では困難である。そこで、本研究においては、平均的な軸方向応力とひずみの関係を考察の対象にする。表4には主な実験結果を示している。鋼管で拘束されたコンクリートの応力度 $c\sigma_{CB}$ をコンクリートのシリンダー強度 $c\sigma_B$ で除して（以下、平均軸方向応力度比と呼ぶ）、無次元化した拘束されたコンクリートの平均軸方向応力度比-ひずみ関係の実験結果を図2(a), (b)に示す。図中には、L-Seriesの $c\sigma_{CB}$, $c\sigma_B$ を示す。平均軸方向応力度はコンクリートの負担軸力 N_c をコアコンクリートの断面積 A_c で割って求めた。試験体の軸方向ひずみ ϵ_{c0} は、試験体に取り付けた4個の変位計で測定した平均値を用いた。

まず、実験精度を検討する為、文献(6)の既往の試験体 L-Series と同様の設計条件とした No. 1 P 試験体を製作した。

図2(a)から分かるように、初期剛性は、文献(6)の L-Series と概ね同じ値を示していることが分かる。コンクリートの圧壊開始以降の強度上昇率は、シリンダー強度の小さい L-Series の方が No. 1 P より大きくなっていることが分かる。これは、シリンダー強度19%の差異が影響しているものと考えられる。しかしながら、本論ではシリンダー強度をパラメータとしていない為、今後の研究課題とする。以上より、本実験方法は、既往の実験結果を概ね捉えているものと考えられる。

図2(b)は、幅厚比 B/t をパラメータにして各々の実験結果を表したものである。この図から分かるように、拘束されたコンクリートの強度は鋼管の幅厚比が小さくなるにしたがって上昇していくことが分かる。図2(c)は、強度上昇率と体積率の関係を示したものである。この図から分かるように体積比が大きくなる（鋼材量が増える）にしたがって上昇していることが分かる。

図2(c)は、強度上昇率と体積率の関係を示したものである。この図から分かるように体積比が大きくなる（鋼材量が増える）にしたがって、上昇していることが分かる。

Table 4 Experimental result

Specimen	$c\sigma_{CBmax}$ (MPa)	ϵ_{c0} (%)	$c\sigma_{CBmax}/c\sigma_B$
No. 1P	40.5	1.76	1.32
No. 1	77.3	1.50	2.39
No. 2	57.5	1.70	1.70
No. 3	35.5	1.76	1.10

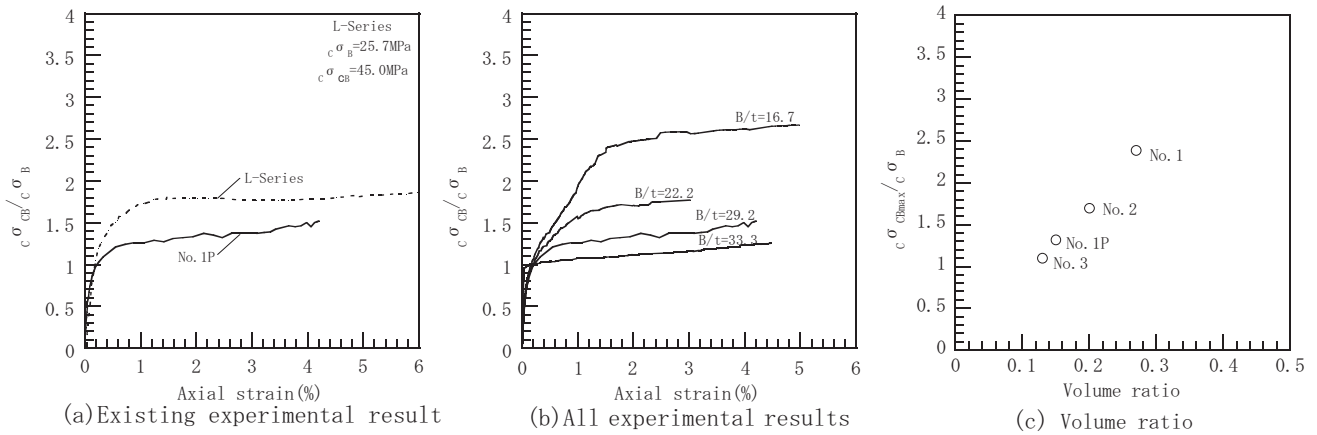


Fig. 2 Experimental Results of stress-strain Curves of Concrete Confined by Square tube

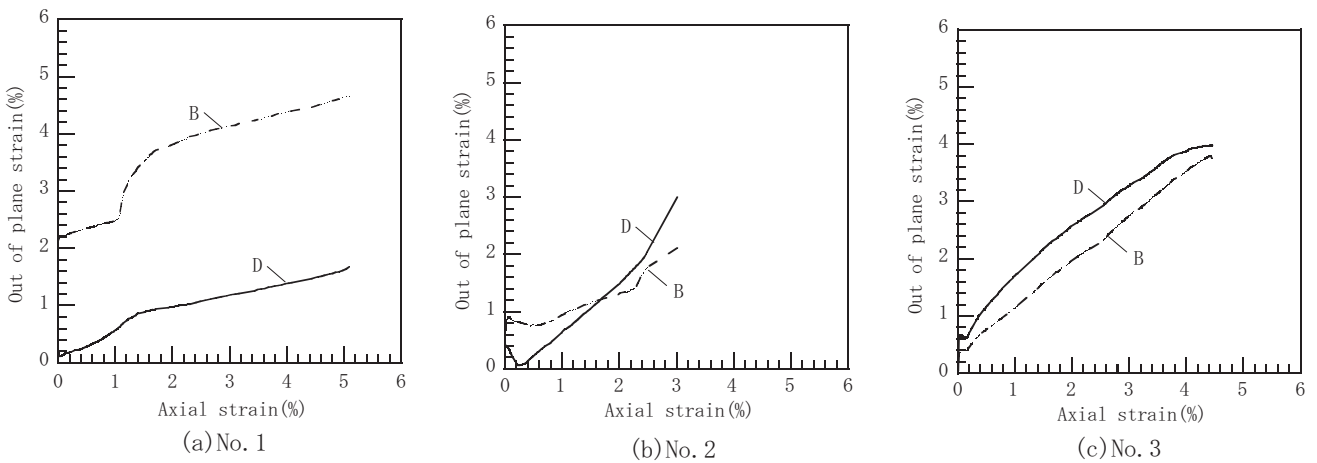


Fig. 3 Out of plane strain-Axial strain Curves

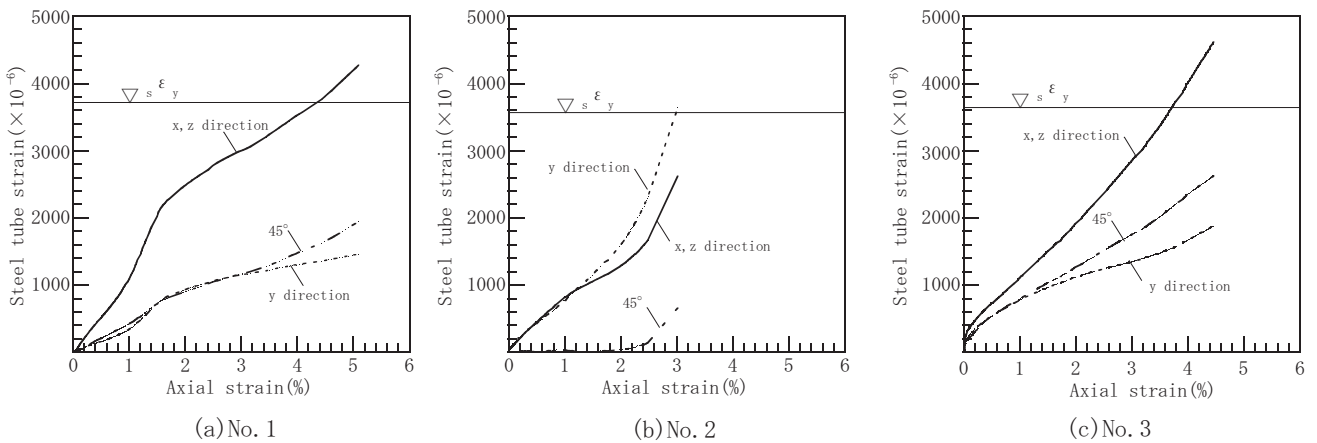


Fig. 4 Square steel tube strain-Axial strain Curves

3. 2 面外ひずみについて

図3は、断面外ひずみ（面外方向の変位を辺長で割ったもの）と軸ひずみの関係を示したものである。この図から分かるように、軸方向のひずみが増加にしたがい鋼管にふくらみが生じていることが分かる。なおNo. 1は、各辺の面外ひずみに差が生じており、側圧が一定でないことが分かる。これは、内部コンクリートの強度の差異によるものと考えられ強度が小さい方向に膨らんでいるものと考えられる。一方、No. 2, No. 3の各辺の面外ひずみは、概ね同程度となっていることが分かる。

3. 3 鋼管のひずみについて

図4は、鋼管の周ひずみ、y方向ひずみ、45°方向ひずみ-軸ひずみの関係を示したものである。なお、鋼管の表面に貼られたひずみゲージ4枚から得られた各方向のひずみを平均したものをを用いた。正が引張、負が圧縮である

この図から分かるように、各試験体とも軸方向のひずみの増加にしたがい、周ひずみも増加し降伏ひずみに達していることが分かる。また、辺長が大きいNo. 3は、軸ひずみ2.4%あたりから、著しく増加している。一方、y方向は引張ひずみを示しており、ラップフィルムによる縁切りは十分に行われていることが分かった。

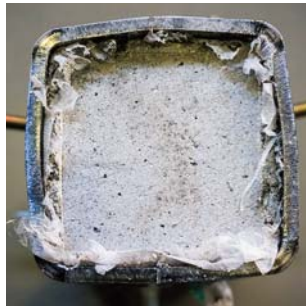
4. 破壊性状について

写真1に試験体の破壊状況を示す。この写真から分かるように、各試験体共に降伏後の鋼管はフランジ中心部分で大きくふくらみ全体的に円形状態に近くなりコアコンクリートは同程度の拘束を受けるものと考えられる。

次に、降伏後の軸方向については、下側(写真右側)が面外にふくらんでいることが確認できる。これは、コンクリートを下側から打設しており、自重および養生の影響でコンクリート強度に差が生じているためと考えられる。また、コンクリート部分のみ載荷しているため、鋼管に著しい局所的な座屈は生じていないことが確認できる。

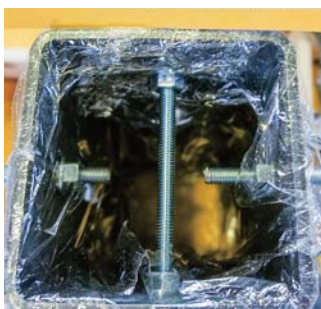


(Before)

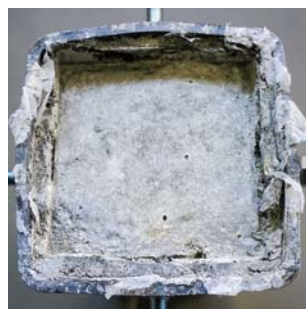


(After)

(a) No. 1



(Before)



(After)

(b) No. 2



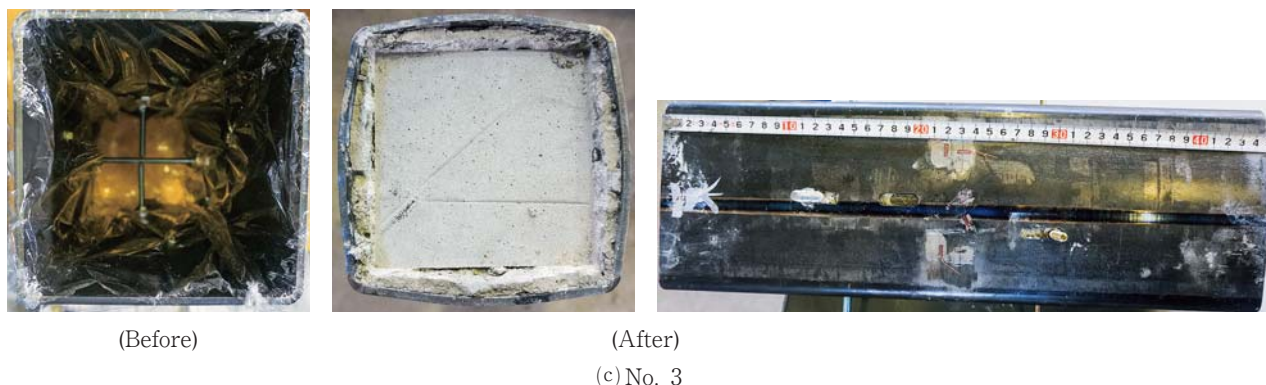


Photo 1 Failure mechanism square CFT column

5. まとめ

本論では、長方形 CFT 柱の基本的な構造性能を把握するため、予備実験として、正方形 CFT 柱の中心圧縮試験を行った。本検討により得られた結果を以下に述べる。

- (1) 予備試験体 N1P は、既往実験の応力-ひずみ関係の挙動を概ね捉えていた。
- (2) 拘束されたコンクリートの強度は鋼管の幅厚比が小さくなるにしたがって上昇していく。
- (3) 降伏後の鋼管はふくらみ、円形状態に近くなり、コアコンクリートは同程度の拘束を受けるものと考えられる。

謝 辞

本論は、今泉勝己学長、巨海玄道名誉教授に貴重なご助言を頂きました。本実験は元久留米工業大学学部生の福永大輝氏、松崎聖亜氏、永田晴也氏の卒業研究として実施されました。また、2019年度の学長裁量経費の支援を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- (1)日本建築学会：CFT 構造計算規準化に向けて－長周期地震動も考慮した規準－，2016年度日本建築学会大会（九州）構造部門（SCCS）パネルディスカッション資料，pp. 18-25
- (2)日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針，pp. 54-60，pp. 244-246，2008
- (3)Vecchio, F.J. and Collins, M.P.: Predicting the Response of Reinforced Concrete Beams Subjected to Shear Using Modified Compression Field Theory, ACI Structural Journal, May-June, pp.258-268, 1988
- (4)松本豊，栗原和夫，大嶺斎，島津勝：拡張された修正圧縮場理論によるコンクリート充填鋼管短柱のせん断耐力についての検討，構造工学論文集，Vol. 60B，pp. 73-80，2014. 3
- (5)松本豊，栗原和夫，上原修一：拡張された修正圧縮場理論による各種断面を有するコンクリート充填鋼管短柱のせん断耐力についての検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 42，No. 2，pp. 949-954，2020
- (6)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，No461，pp95-104，1994

付 録

本論に登場する記号を列举する

- σ_y : yield strength of steel tube
- σ_u : ultimate strength of steel tube
- σ_B, ϵ_0 : stress and strain of concrete at peak point
- $\sigma_{cB}, \epsilon_{c0}$: stress and strain of confined concrete at peak point
- E_s : Young's modulus of steel tube
- E_c : Young's modulus of concrete