

〔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2 長方形断面)

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 2 Rectangular Cross-section)

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

Abstract

This study investigates the basic structural performance of concrete-filled steel tubular (CFT) columns with rectangular cross-sections in a central compression experiment. The influence of rectangular CFT columns on the compression performance was evaluated while applying a uniform axial compression force on two rectangular CFT columns. In addition, the concrete and distortion of the steel tube were quantified by examining the distortion in each axial direction of the steel tube part. The method for estimating the strength of confined concrete appears to be applicable to rectangular cross-sections.

Key Words : rectangular cross-section, confind concrete, stress-strain curve, effective lateral pressure factor

1. はじめに

コンクリート充填鋼管（以下、CFT と呼ぶ）柱は、円形・正方形断面が多く使用されている。前報でも述べられたように、多くの研究者により、拘束されたコンクリートの中心圧縮実験が行われ、コンファインドコンクリートの推定強度式を提案されている。文献⁽¹⁾の提案式については、コンファインドコンクリートの強度上昇量は、見かけ上の平均側圧に比例する考えに基づいている。したがって、正方形鋼管により拘束されたコンクリートの実験結果に基づいて構成されているものの、正方形鋼管のみならず、各種の断面形状を有する従来型横補強筋で拘束されたコンクリートの応力-ひずみを推定できる汎用性のあるモデルと述べられている。

しかしながら、この提案式は正方形 CFT 柱および鉄筋コンクリート柱との比較検討で留まっており、長方形 CFT 柱との適用性の検討までは至っていない。長方形断面の CFT 柱は、前報においても述べられたように、実験的研究はほとんどなく、その構造特性については十分に検討されたとは言い難い。

一方で、長方形 CFT 柱を適用した建築物の事例も多くみられる。例えば、大手フィナンシャルシティグランキューブ⁽²⁾の外周柱は、主柱を14.4m スパンで配置し、十分な耐力と剛性を確保するため最大550×1100mm の短辺と長辺の比1:2の長方形 CFT 柱が使用されている。長方形 CFT 柱を使用した理由および目的は、「剛性の確保」、「鉄骨量の削減」および「室内空間の確保」、「無柱空間の実現」、「設備空間の収納性」である。この事例から分かるように、長方形 CFT 柱のニーズは十分あり、鉄筋コンクリート造のように柱断面を長方形とすることができれば、より合理的な設計が可能となる。しかしながら、長方形 CFT 柱の設計を行う場合、日本建築学会「コンクリート充填鋼管構造設計施工指針」⁽³⁾においては適用可能とされているものの、角形断面の設計式は正方形断面を対象に記述されており、その適用にあたっては明確な記述はない。

以上のような背景より、本研究の目的は長方形 CFT 柱の基本的な構造性能を把握するため、長方形 CFT 柱の中心圧縮実験⁽⁴⁾を行う。前報に続き長方形 CFT 柱2体を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長方形 CFT 柱による圧縮性能への影響を検討する。また、鋼管部分の各方向のひずみ-軸ひずみ関係について

^{*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

検討を行うことで、コンクリートと鋼管のひずみを定量的に評価する。さらに、長方形断面にも適用可能な拘束されたコンクリートの推定強度式を新たに提案する。

2. 実験概要

2・1 試験体計画

試験体は実大の1/3スケールものを2体製作する。図1に試験体の形状を示す。本研究で用いる2つの試験体の諸元は表1、力学的材料特性を表2に示す。試験体変数はD/tとした。試験体の高さHはDの3倍とした。鋼材の材種とコンクリート設計基準強度は、一般的に用いられるSTKR400、Fc18とした。

Table 1 List of specimens

Specimen	B×D (mm)	t (mm)	B/t	B/D	H (mm)	Fc (MPa)	Steel material
No. 4	150×75	4.5	33.3	2.0	225	18	STKR400
No. 5	150×100			1.5	300		

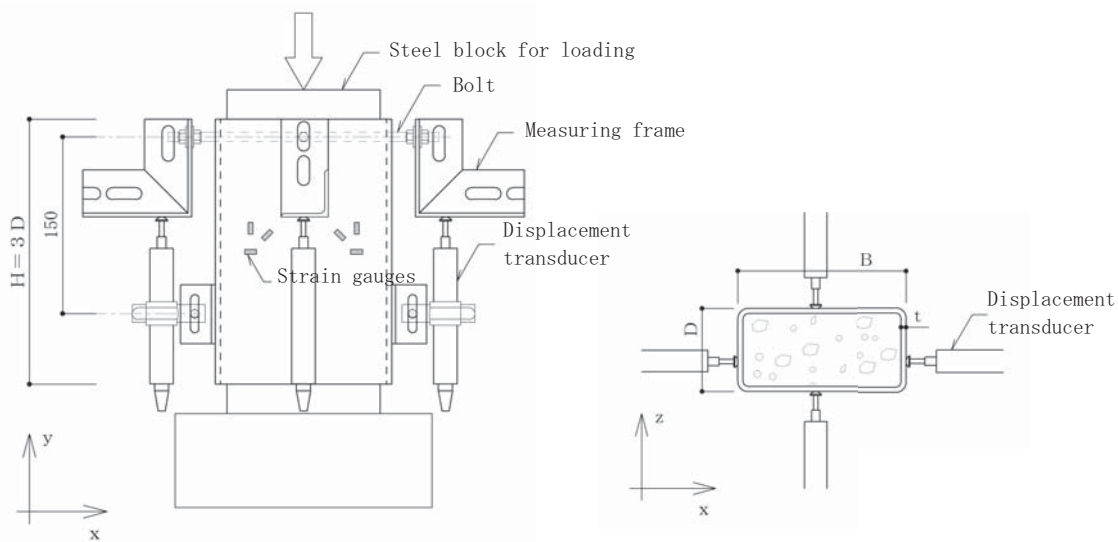


Fig. 1 Test set-up and Instrumentation

図1に示すように、コンクリートの軸方向のひずみ（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が少ないように鋼管の辺長の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主応力の影響は少ないと考えられるが、ダミーとして計測した。

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に鋼管と充填したコンクリートとの間に付着応力をできるだけ小さくするため、ラップフィルムで縁切りした。

Table 2 Material test results

Specimen	$s\sigma_y$ (MPa)	E_s (GPa)	$s\sigma_u$ (MPa)	$c\sigma_B$ (MPa)	ϵ_0 (%)	E_c (GPa)
No. 4	381	141	454	32.6	0.29	24.8
No. 5	370		449	33.8	0.26	22.9

2・2 積載方法

積載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（上はユニバーサルジョイント）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のり断面より5 mm 小さい正方形断面の加力ブロックを用いる。長方形断面の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、弾性領域では荷重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

長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ので、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3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強度 $c\sigma_{CB}$ 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に示す。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_{co} 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。なお、図中の三角印は降伏応力度時を示す。

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、降伏後も上昇している。これは、長辺側の鋼管が面外方向の応力に抵抗しているためと考えられる。この様に長方形断面の場合も、鋼管のコンファインド効果があるものと考えられる。しかしながら、本論では限られた範囲での評価であるため、今後、鋼管およびコンクリート強度、鋼管厚さをパラメータとした実験を行い長方形断面のコンファインド効果を定量的に検討したい。

Table 3 Experimental result

Specimen	$c\sigma_{CBmax}$ (MPa)	ϵ_{co} (%)	$c\sigma_{CBmax}/c\sigma_B$
No. 4	33.8	0.55	1.03
No. 5	39.0	0.55	1.15

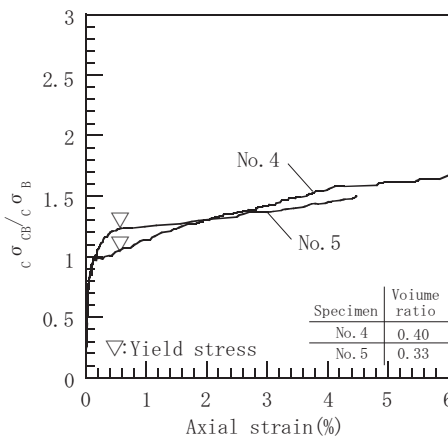


Fig.2 Experimental Results of stress-strain Curves of Concrete Confined by Rectangular

3・2 破壊性状について

写真1に試験体の破壊状況を示す。図3には、長辺と短辺側の面外方向のひずみと軸ひずみの関係を示した。この写真から分かるようにNo. 4における降伏後のふくらみを確認すると短辺側が殆どふくらんでいない。図3からも分かるように、短辺側の面外ひずみが極小でほとんど変化していないことが定量的に確認できる。したがって、鋼管の短辺側がコンクリートの側圧に対して殆ど抵抗せず、長辺側の鋼管が大きくふくらんで降伏している。

No. 5における降伏後のふくらみを写真より、確認すると短辺側もふくらんでいることが確認できる。図3においても、短辺側の面外ひずみは、軸ひずみの増加とともに大きくなっており定量的に確認できる。長辺側、短辺側ともに面外ひずみは、軸ひずみ4%あたりから顕著となり鋼管が降伏に至った。

なお、内部のコンクリート破壊状況に関しては、コンクリートが圧壊していることが写真1からも想定できる。しかしながら、鋼管をグラインダー等で切断し、鋼管を外してコンクリートの圧壊状況を詳細に考察する必要があるが今後の検討課題としたい。

3・3 周方向と軸方向のひずみ関係

図4は、鋼管の周ひずみと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枚から得られた周ひずみを平均したものをを用いた。

この図から分かるように、No. 4およびNo. 5の周ひずみは、軸ひずみの増加とともに大きくなるのが分かる。また、長辺側の周ひずみは、短辺側よりも大きくなっていることが分かる。これは、鋼管の長辺側がコンクリートの側圧に対して大きく抵抗し、長辺側の鋼管が大きくふくらむと同時に周方向も大きく引張られていることを示している。

今後は、鋼管の内外側の両面にひずみゲージを貼ることで、曲げモーメント成分の検討を行うことで、鋼管の降伏メカニズムを定量的に評価する予定である。

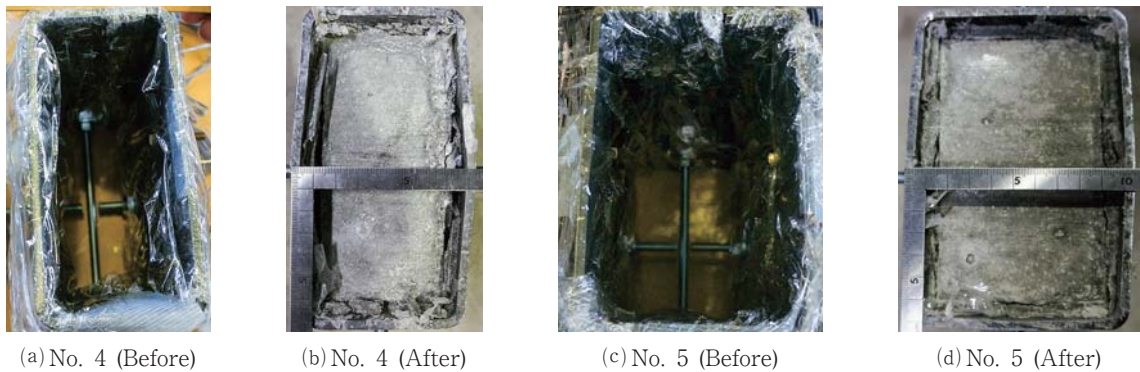


Photo 1 Failure mechanism rectangular CFT column

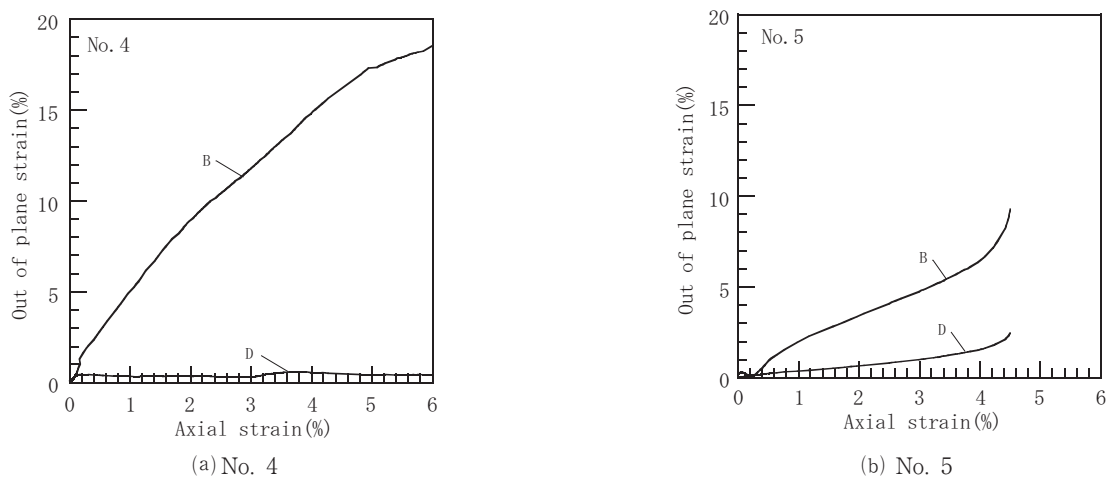


Fig.3 Out of plane strain-Axial strain Curves

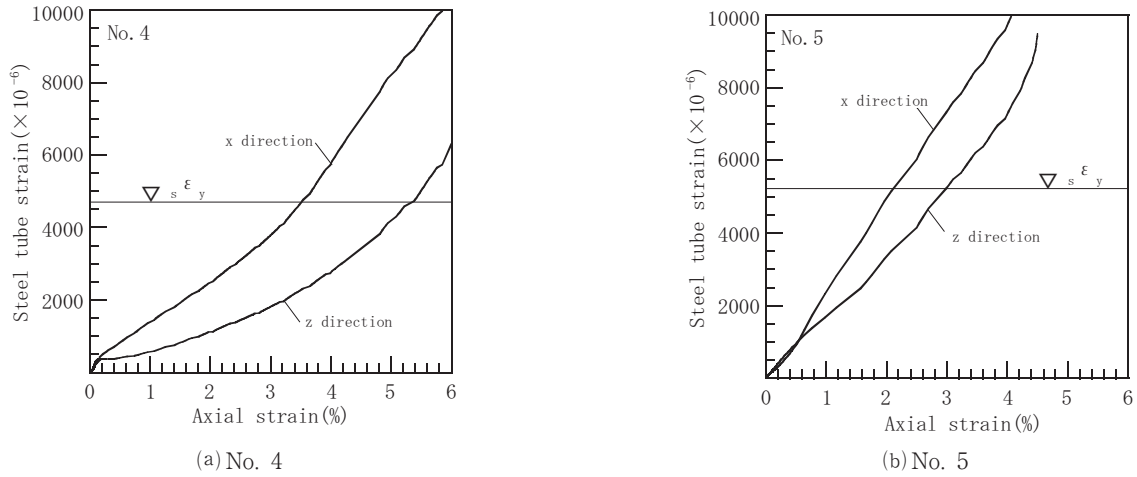


Fig.4 Rectangular steel tube strain-Axial strain Curves

4. 拘束されたコンクリートの強度式について

文献(1)に、鋼管によって拘束されたコンクリートの強度の算定式として(1)式が示されている。

$$\begin{aligned} \sigma_{cb} &= \sigma_B + k_e \sigma_{re} \\ &= \sigma_B + k_e \frac{1}{2} \rho_{hs} \sigma_y \left(\frac{t}{C} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、

σ_B : コンクリートのシリンダー強度

k_e : 拘束係数 (=23)

σ_{re} : 有効側圧因子

ρ_h : 鋼管の体積比

$$\text{正方形} : \frac{4t}{(D-2t)}, \quad \text{長方形} : \frac{4t \{ (D-2t) + (B-2t) \}}{(D-2t)(B-2t)}$$

t : 鋼管厚, D : 鋼管せい, B : 鋼管幅

C : 鋼管の内法幅, σ_y : 鋼管の降伏強度

式(1)のCは鋼管の内法幅と記載されているが、長方形断面の場合、長辺と短辺のどちらを用いるかについては明確に記載されておらず設計者の判断に委ねられている。

そこで、一つの試みとして、長方形断面にも適用可能なように内法幅を長辺と短辺の平均値とした式(2)を提案する。

$$\sigma_{cb} = \sigma_B + k_e \frac{1}{2} \rho_{hs} \sigma_y \frac{1}{2} \left(\frac{t}{D-2t} + \frac{t}{B-2t} \right) \quad (2)$$

5. 計算結果と実験結果との比較

前章で提案した式(2)の計算結果と実験結果を表4に示す。文献(1)に記載されている式(1)の内法幅を長辺および短辺方向の内法幅を用いた計算結果も併せて示した。なお、拘束係数 k_e は、暫定的に23を用いた。

この表から分かるように内法幅を長辺側に用いた式(1)の計算結果は、実験値より大きくなっていることが分かる。その傾向は、幅厚比が小さいと顕著になっている。一方で、内法幅に短辺側を用いた場合は、実験値より大きくなり危険側の評価を示した。この理由は、有効側圧因子 σ_{re} が著しく大きくなった為であると考えられる。

次に、式(2)の計算結果と実験結果とを比較した結果、計算結果は、大きくなっている。なお、鋼管の内法幅を長辺と短辺の平均値を用いているため、幅厚比が変化しても、評価は可能である。また過大評価した理由は、正方形断面から求められた拘束効果係数23を用いているためである。長方形は、正方形に比べて拘束効果が小さくなることが分かった。

Table 4 Comparison of calculation result experimental result

Specimen	B/D	①	②	③	④	①/②	①/③	①/④
		(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)			
No. 4	2.0	33.8	50.1	112.4	51.7	0.67	0.30	0.65
No. 5	1.5	39.0	51.5	75.8	46.6	0.76	0.51	0.83

①: Experimental result, ②: eqs. (1)-long side, ③: eqs. (1)-short side, ④: eqs. (2)

今後は、コンクリートおよび鋼管強度、管厚をパラメータとした実験を行い、式(2)の適用性を検討する。また、暫定的に用いた拘束係数 k_c の評価については、長方形鋼管により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係のピーク点時の強度上昇率 ($=c\sigma_{CB}/c\sigma_B$) と有効側圧因子 σ_{re} の関係から回帰分析を行う。

6. まとめ

本論では、中心圧縮実験により、長方形 CFT 柱の圧縮性能への影響を検討した。また、長方断面にも適用可能なコンファインドコンクリートの推定強度式を提案した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 拘束されたコンクリートの強度は、降伏後も上昇していることを確認できた。よって、長方形断面の場合も、鋼管のコンファインド効果があるものと考えられる。
- (2) 破壊性状は、コンクリートによる側圧の増加にしたがい、鋼管が大きく変形し、長辺側の鋼管が膨らんで降伏する性状となった。
- (3) 提案したコンファインドコンクリートの推定強度式の計算結果は実験結果より大きくなった。これは、正方形断面の拘束効果係数を用いているためである。

謝 辞

本論は、元久留米工業大学学部生の福島将吾氏、友利亮太氏、新ヶ江虎太郎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) 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, No. 461, pp. 95-104, 1994
- (2) 鋼構造出版: 大手門フィナンシャルシティグランキューブ, 鉄構技術, Vol. 30, No. 347, pp. 68-76, 2017. 3
- (3) 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
- (4) 松本豊, 上原修一, 野口聡仁, 栗原和夫: 長方形 CFT 柱の中心圧縮性状に関する予備的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), pp. 1295-1296, 2021. 9

付 録

本論に登場する記号を列挙する

- σ_y : yield strength of steel tube
- σ_u : ultimate strength of steel tube
- $c\sigma_B, \epsilon_0$: stress and strain of concrete at peak point
- $c\sigma_{CB}, \epsilon_{co}$: stress and strain of confined concrete at peak point
- E_s : Young's modulus of steel tube
- E_c : Young's modulus of concrete