

〔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3 B/D=2の場合)

松本 豊<sup>\*1</sup>・上原修一<sup>\*1</sup>・野口聡仁<sup>\*2</sup>

## Experimental Study on Central Compression Properties of Concrete Filled Steel Tubular Column (Part 3 B/D = 2)

Yutaka MATSUMOTO<sup>\*1</sup>, Shuichi UEHARA<sup>\*1</sup>, Akihito NOGUCHI<sup>\*2</sup>

### Abstract

Several studies have been performed on the structural performance of concrete filled steel tubular columns(CFT). However, a lot of circle and square sections were used. In this study, to understand the structural performance of rectangular CFT columns, six rectangular CFT columns with a length ratio of 2.0 between the long and short sides (hereafter aspect ratio) were subjected to centre-compression tests to investigate the effect of basic compression performance when axial compression forces act uniformly on the entire cross-section. Furthermore, the annealing effect on the elasto-plastic behaviour of the steel pipes investigated.

**Key Words** :CFT colimn,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<sup>(1)</sup>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<sup>(2)</sup>（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.

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<sup>(2)</sup>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」,「設備空間への収納性」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」<sup>(3)</sup>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.

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な要因の一つである.そこで,松本ら<sup>(4)~(6)</sup>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,崎野ら<sup>(7)</sup>が行った正方形 CFT 柱と同様の形状を用いて実験の再現性を概ね確認した.さらに,正方形 CFT 柱 3 体および長方形 2 体

<sup>\*1</sup> 建築・設備工学科

<sup>\*2</sup> ものづくりセンター

令和4年10月30日受理

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断面形状の違いによる圧縮性能への影響を検討した。

本論においては長方形 CFT 柱の構造性能を把握するため、長辺と短辺との長さの比(以下、アスペクト比と呼ぶ)が 2.0 の長方形 CFT 柱 6 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基本的な圧縮性能の影響を検討する。さらに、鋼管に焼鈍を施した場合、弾塑性挙動の影響についても検討を行う。

## 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 6 体製作する。図 1 に試験体の形状を示す。本研究で用いる試験体 6 体の諸元は表 1 に示す。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,  $F_c18$  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。焼鈍は、炉内温度を 850 度まで 3.5 時間をかけ上昇させた、その後 24 時間かけて自然徐冷とした。

鋼管のひずみは、拘束効果の影響を受ける周方向のひずみを計測する。鋼管の曲げ応力の影響を受けないように鋼管の周方向辺長の 1/4 位置にひずみゲージを貼り付けた。

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。

Table1 List of specimens

Specimen	B×D(mm)	t(mm)	B/t	B/D	H(mm)	annealing	$F_c$ (MPa)	Steel material
N22-47-2	150×75	3.2	46.8	2.0	225	No	18	STKR400
N22-33-2		4.5	33.3					
N22-25-2		6.0	25.0					
A22-47-2		3.2	46.8			Yes		
A22-33-2		4.5	33.3					
A22-25-2		6.0	25.0					

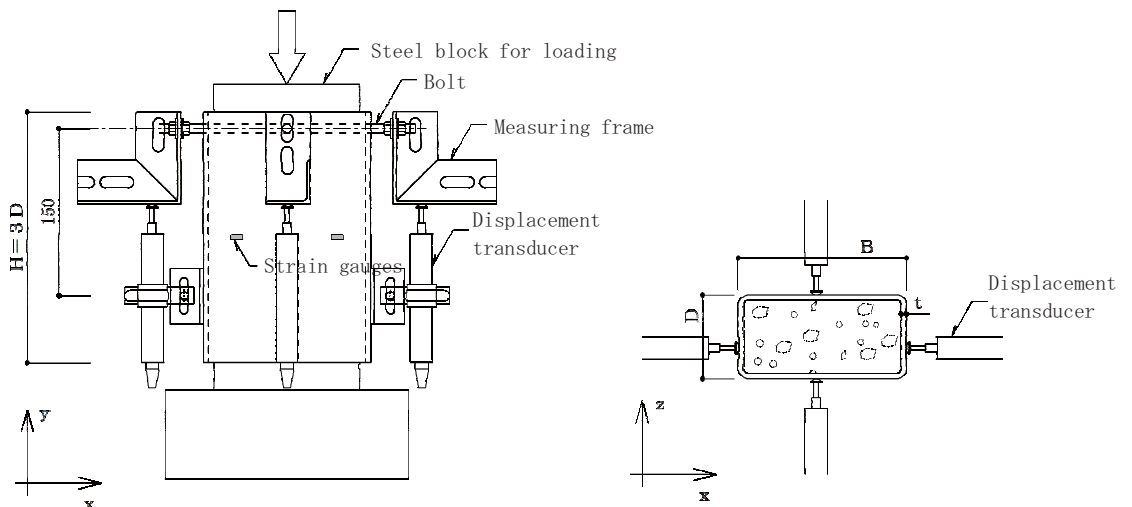


Fig.1 Test set-up and Instrumentation

## 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, 久留米工業大学ものづくりセンターのフライス盤を用いて長方形鋼管から 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. 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. スランブは 180mm, 骨材の最大寸法は 10mm とした. 打設の際は 3 層に分け, セメントスコップで生コンを鋼管に挿入しながら付棒にて攪拌させた.

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  $2.5\text{N/mm}^2$  差が生じていることが確認できる.

Table2 Material test results

Specimen	$\sigma_y$ (MPa)	$E_s$ (GPa)	$\sigma_u$ (MPa)	$\sigma_B$ (MPa)	$\epsilon_0$ (%)	$E_c$ (GPa)
N22-47-2	410	202.5	459.8	20.7	0.29	24.8
N22-33-2	363	218.2	440.0	22.0	0.25	20.0
N22-25-2	369	185.1	459.4			
A22-47-2	236	172.8	326.1	21.5	0.22	21.9
A22-33-2	213	176.6	296.8			
A22-25-2	233	189.0	333.9	23.2	0.28	23.0

Table3 Mix proportion

W/C (%)	Unit mass (kg/m <sup>3</sup> )				
	W	C	Coarse aggregate	finer	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, 試験体両端の回転を拘束する材端条件で, 中心圧縮力を 2000 kN 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側の断面よりやや小さい正方形断面の加力ブロックを用いる. 正方形シリーズ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

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, 本報においては, 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. 拘束されたコンクリートの平均軸方向応力—ひずみ関係の実験結果を図 2(a), (b) に示す. 平均軸方向応力  $\sigma_{CB}$  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  $\epsilon_{c0}$  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. なお, 図中の▽印は降伏強度を示す.

図 2(a), (b) から分かるように, 拘束されたコンクリートの強度は, 幅厚比が小さくなる (鋼材量が増える) にした

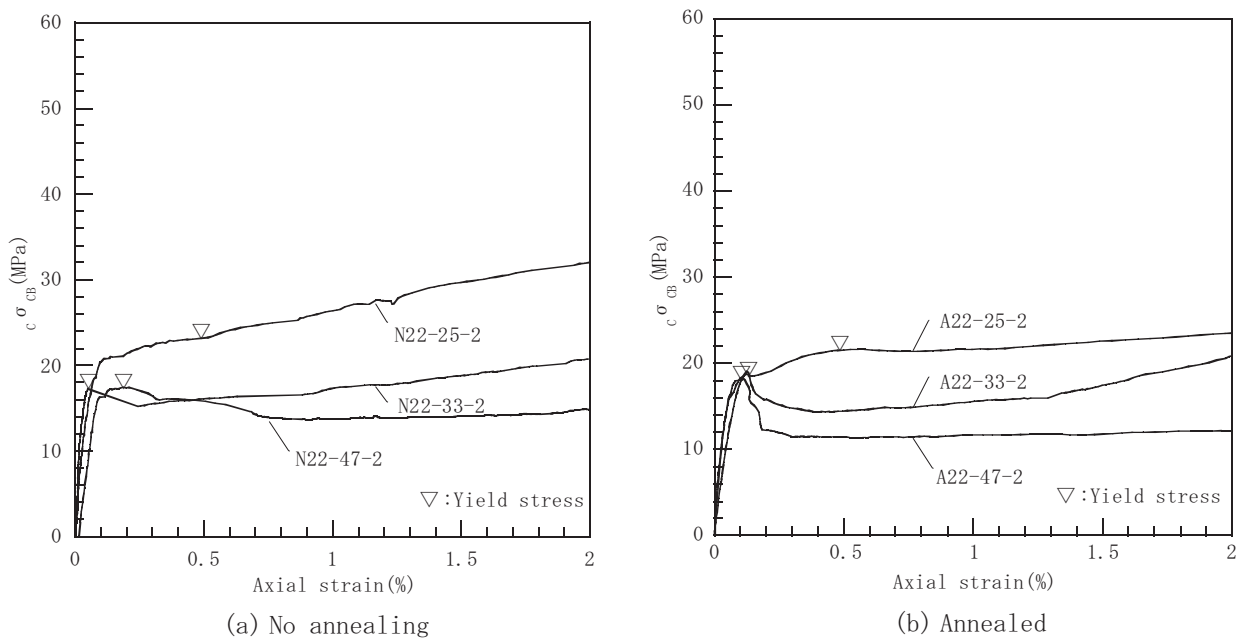


Fig.2 Experimental Results of stress-strain Curves of Concrete Confined by Square

がって上昇している。焼鈍有の場合は、無の場合と比較すると、降伏強度にはほとんど差はないものの、軸ひずみの挙動が安定していることが分かる。

### 3・2 長方形CFTとシリンダー強度との比較

表4は、長方形鋼管で拘束されたコンクリートの最大平均軸方向応力度  $c\sigma_{CB}$ 、軸ひずみ  $\epsilon_{c0}$  およびシリンダー強度  $c\sigma_B$ 、その時のひずみ  $\epsilon_0$  を示している。この表から分かるように長方形鋼管で拘束された平均軸方向応力度の最大値は、シリンダー強度より小さくなる傾向を示した。これは、アスペクト比の影響と考えられる。今後は、長方形の圧縮強度試験を行う必要がある。

Table4 Experimental result

Specimen	$c\sigma_{CB}$ (MPa)	$\epsilon_{c0}$ (%)	$c\sigma_B$ (MPa)	$\epsilon_0$ (%)	$c\sigma_{CB}/c\sigma_B$
N22-47-2	17.40	0.21	20.7	0.29	0.84
N22-33-2	17.25	0.05	22.0	0.25	0.78
N22-25-2	23.25	0.52			1.06
A22-47-2	18.35	0.10	21.5	0.22	0.85
A22-33-2	19.06	0.12			0.89
A22-25-2	21.56	0.50	23.2	0.23	0.92

### 3・3 鋼管のひずみ

図3は、鋼管のひずみ-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周方向貼られたひずみゲージ2枚から得られたひずみを平均したものである。○、□、●、■は、それぞれ北、南、西、東面の鋼管のひずみを示している。正が引張、負が圧縮である。

この図から分かるように、各試験体共に周ひずみは、西、東(短辺)より北、南面(長辺)が大きくなり降伏ひずみに達していることが分かる。また、焼鈍有のひずみの増加量は、無しと比較すると、著しい傾向を示した。

焼鈍有の各試験体北面○、南面□のひずみは、幅厚比が大きいほど、すなわち、鋼管の厚さが小さくなるにつれ、ひずみの増加量が大きくなることが分かる。一方で、焼鈍無の試験体の北面○、南面□のひずみの増加量は、幅圧比に関係なく一定であることを示している。

3・4 面外方向のひずみ

図4は、z方向(短辺)とx方向(長辺)の面外ひずみと軸ひずみの関係を示したものである。実線は焼鈍無、破線は有の試験体である。

この図から分かるように、各試験体のz方向の面外ひずみは、軸ひずみの増加とともに大きくなっていることが確認できる。また、焼鈍有のz方向の面外ひずみが大きくなる傾向を示した。

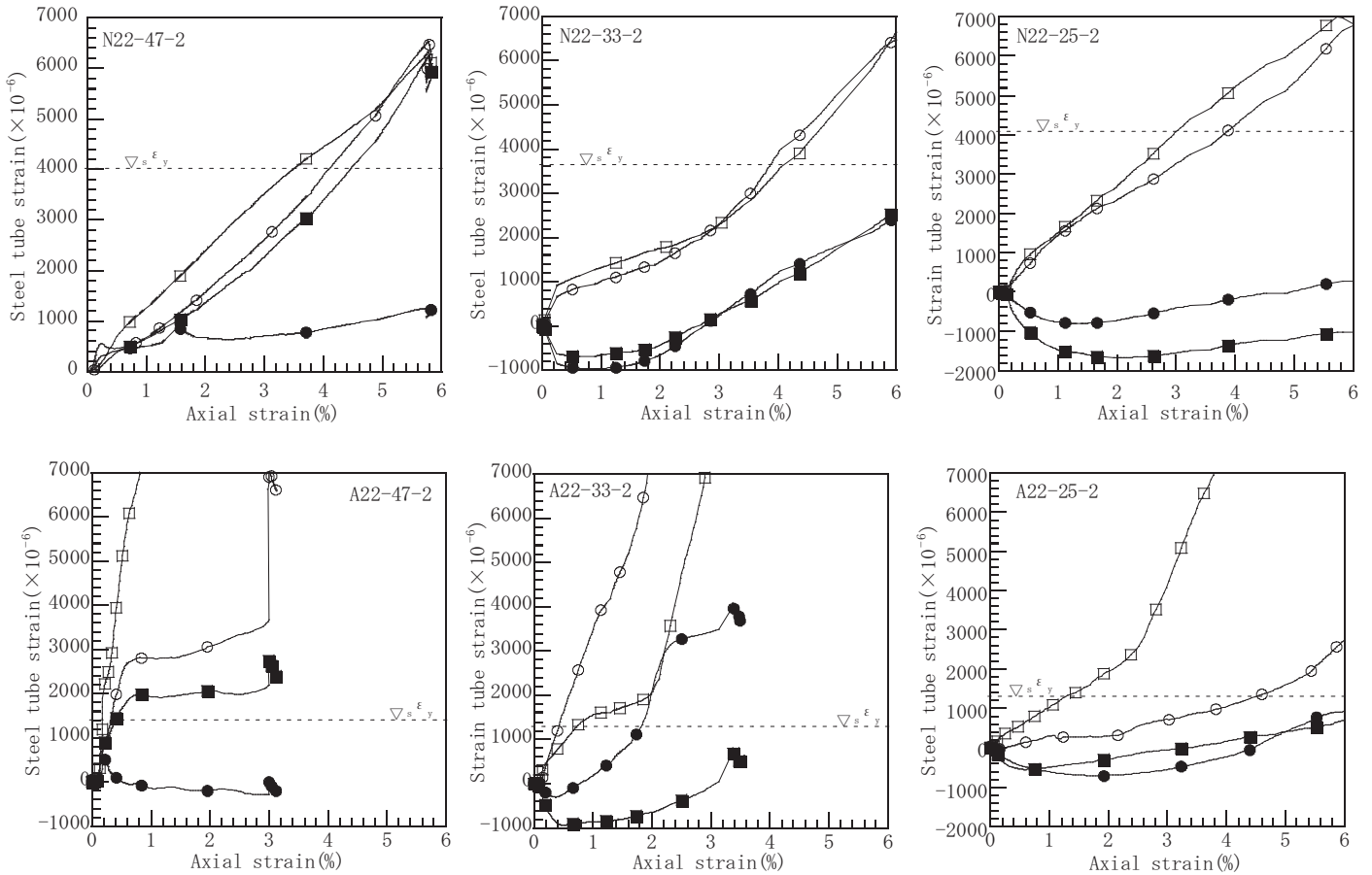


Fig.3 Steel tube strain - axial strain

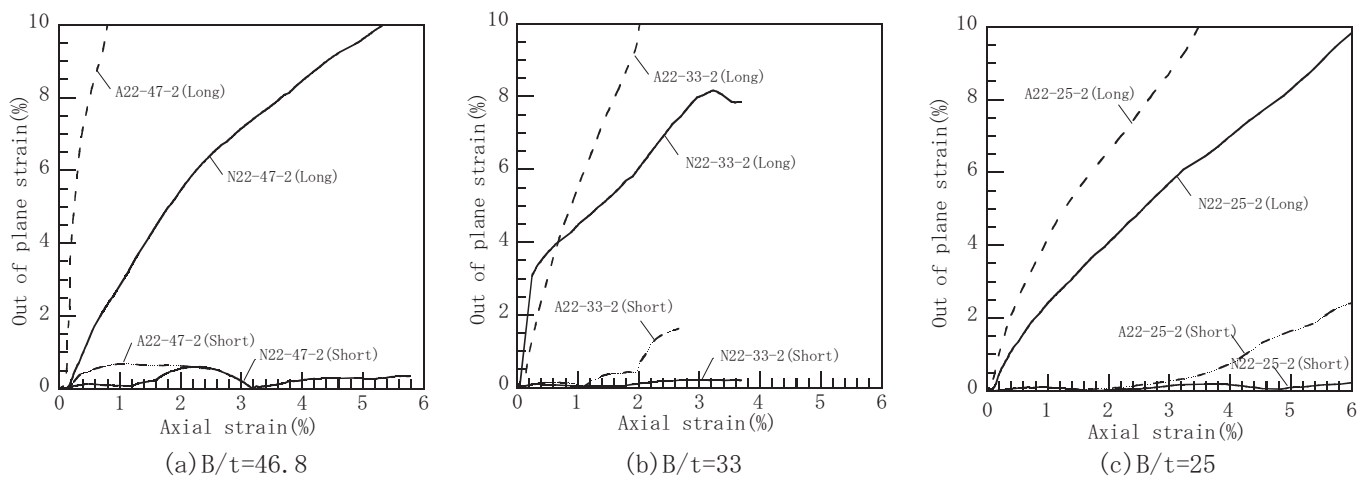


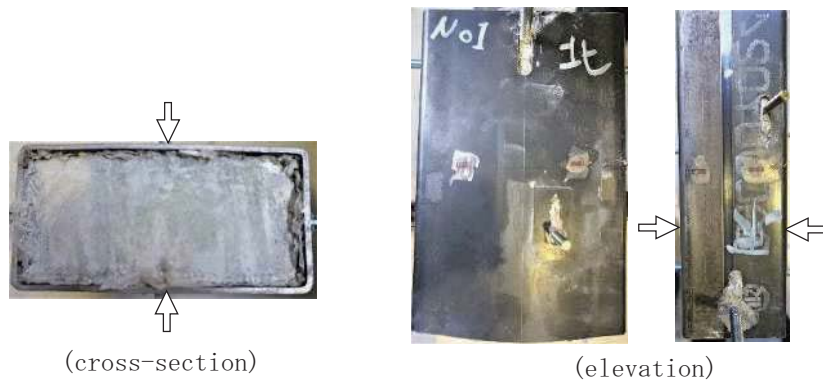
Fig.4 Out of plane strain-Axial strain Curves

#### 4. 破壊性状について

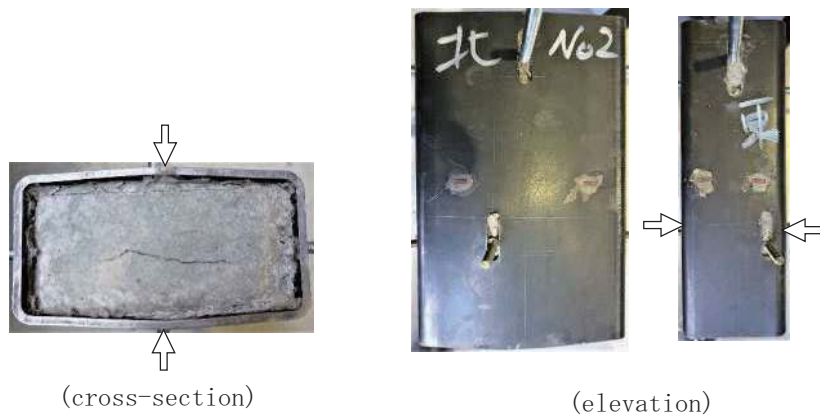
##### 4.1 鋼管

写真1, 2は, 焼鈍有無に関する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凸状変形(写真上下に矢印にて示す.)全体的に円形状態に近くなりコアコンクリートに均等な側圧を与えていることが確認できた.

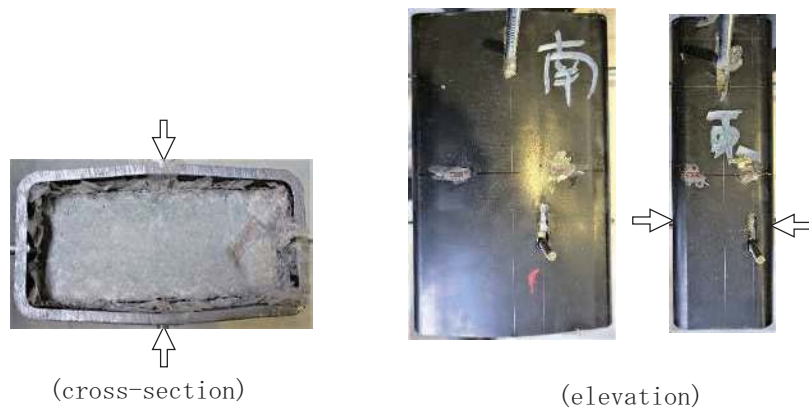
次に, 降伏後の軸方向については, 下側(写真右側)がふくらんでいることが確認できる. これは, コンクリートを下側から打設しており, 自重および養生の影響で材料分離を生じて為, シリンダー強度と試験体の強度に差が生じているためと考えられる. また, コンクリート部分のみ載荷しているため, 鋼管に著しい局所的な座屈は生じていないことが確認できる.



(a) N22-47-2



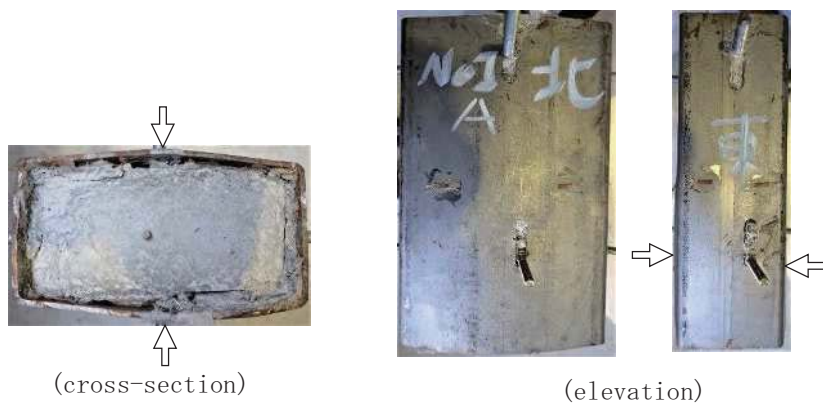
(b) N22-33-2



(c) N22-25-2

Photo1 Failure mechanism of square CFT columns(No annealing)





(a) A22-47-2



(b) A22-33-2

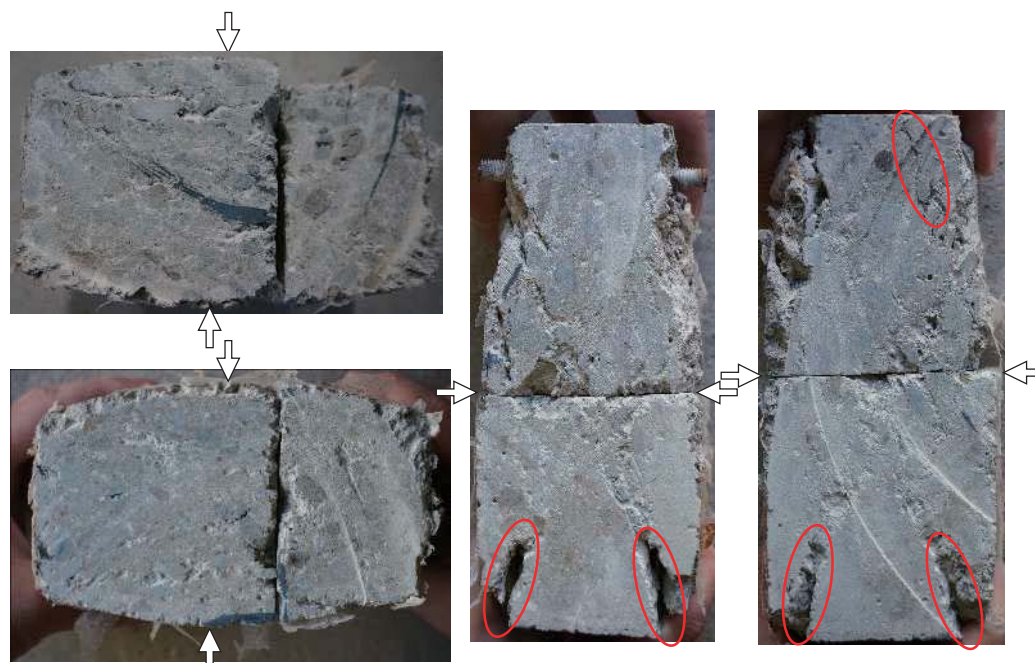


(c) A22-25-2

Photo2 Failure mechanism of square CFT columns (Annealing)

## 4・2 コンクリート

写真 3(a), (b)は、実験終了後の試験体 N22-33-2 を水平 X, 垂直 Y 方向に切断し充填コンクリートの状態を確認した。この写真から分かるように、X方向の断面は、中央部分が凸状変形(写真横に矢印にて示す。)が確認された。Y方向の断面は、概ね中央部分が凸状に変形および圧壊が確認された。加力ブロック部分から斜めに約 70° に亀裂が生じ圧壊していることが分かる。前 3.2 節で述べた、長方形鋼管で拘束された平均軸方向応力度は、シリンダー強度より小さくなる理由としては、加力ブロック部分から破壊が先行しているためシリンダー強度より小さくなったと考えられる。この主要因については、上部と下部のコンクリート材料分離と併せて、全試験体の内部コンクリートを確認し考察する必要がある。



(a) Cross-section in X-direction      (b) Cross-section in Y-direction

Photo3 Inside Concrete

## 5. まとめ

本論では、アスペクト比が 2.0 の長方形 CFT 柱 6 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基本的な圧縮性能の影響を検討する。

- (1) 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する傾向を示した。
- (2) 鋼管の周方向のひずみは、短辺方向より長辺方向が大きくなり、降伏ひずみに達した。また焼鈍有のひずみの増加量は、無しと比較すると、著しい傾向を示した。
- (3) 面外のひずみは、x 方向に比べ z 方向が、軸ひずみの増加とともに大きくなった。また、焼鈍有の長辺側のひずみが大きくなる傾向を示した。

## 謝辞

本論は、久留米工業大学学部生の 2021 年度卒業研究として実施されました。国際会議原稿の投稿手続きにあたっては、事務局の豊福浩基氏、江寄由美子氏、江島由佳氏には、忙しい中、ご対応頂きました。また、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。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) 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梗概集, pp. 1295-1296, 2021. 9
- (5) 齋藤由祐, 坂口翔, 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実験的研究, 日本建築学会九州支部研究報告第 61 号. pp. 349-352, 2022. 3
- (6) 松本豊, 上原修一, 野口聡仁: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, 2), 久留米工業大学研究報告, No. 44, pp. 99-110, 2022. 3
- (7) 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挙する

${}_s\sigma_y$ :yield strength of steel tube

${}_s\sigma_u$ :ultimate strength of steel tube

${}_c\sigma_B, \varepsilon_0$ :stress and strain of concrete at peak point

${}_c\sigma_{cB}, \varepsilon_{c0}$ :stress and strain of confined concrete at peak point

$E_s$ :Young' s modulus of steel tube

$E_c$ :Young' s modulus of concrete

W:water

C:cement