

長方形断面を対象としたコンクリート充填鋼管材の 相互作用効果に関する技術開発

松本 豊^{*1}

Concrete Filled Steel Tubular Column for rectangular cross-sections
Technical developments on Confined effects.

Yutaka MATSUMOTO^{*1}

Abstract

A lot of study has been executed on the structural performance of concrete filled steel tubular column(CFT). However, a lot of circle, square sections are used. In this study, the structural performance of rectangular CFT columns is investigated. We examine the effect of basic compressive performance of 15 rectangular CFT columns and 5 square CFT columns, in which axial compressive force is equally applied to the entire cross section, by using the ratio of the lengths of the long and short sides (hereinafter referred to as "aspect ratio") and the width-to-thickness ratio as parameters in center-compression tests. Furthermore, the effect of annealing on the elasto-plastic behavior of the steel pipes is also investigated. Finally, the fracture behavior inside the concrete section is discussed.

Key Words :CFT colimm,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.

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」⁽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.

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

^{*1} 久留米工業大学 建築・設備工学科

要因の一つである。そこで、松本ら^{(4)~(6)}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⁽⁷⁾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。

本研究においては長方形 CFT 柱の構造性能を把握する。そこで、長辺と短辺との長さの比(以下、アスペクト比と呼ぶ)および幅厚比をパラメーターとし長方形 CFT 柱 12 体、正方形 CFT 柱 5 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。最後に、コンクリート断面内部の破壊性状に関する考察を行う。

2. 実験概要

2.1 試験体計画

試験体は実大の 1/3 スケールものを長方形および正方形併せて 17 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 17 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, 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。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。なお、A25-29-1 シリーズはラップフィルムによる影響を検証する。

Table1 List of specimens

Specimen	B×D(mm)	t(mm)	B/t	B/D	H(mm)	annealing	Wrap film	Steel material
N22-47-2	150×75	3.2	46.8	2.0	225	No	Yes	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					
A25-39-1.6	125×75	3.2	39.1	1.6	300	Yes	STKR400	
A25-28-1.6		4.5	27.7					
A25-21-1.6		6.0	20.8					
A25-47-1.5	150x100	3.2	46.8	1.5	300	Yes	STKR400	
A25-33-1.5		4.5	33.3					
A25-25-1.5		6.0	25.0					
A25-47-1	150x150	3.2	46.8	1.0	450	Yes	STKR400	
A25-33-1		4.5	33.3					
A25-25-1		6.0	25.0					
A25-29-1	175x175	6.0	29.2	1.0	525	No	STKR400	

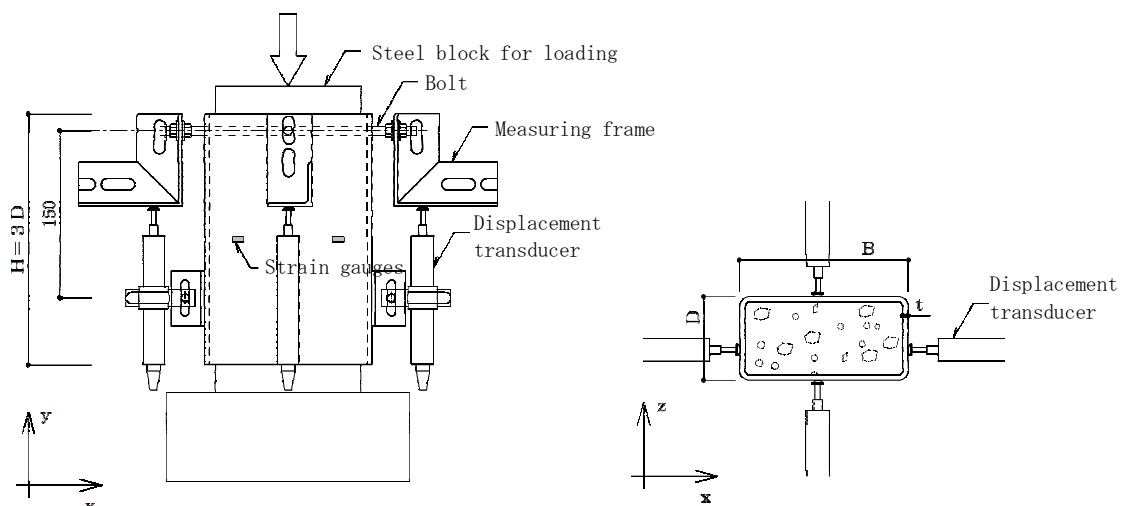


Fig.1 Test set-up and Instrumentation

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.

Table2 Material test results

Specimen	$s\sigma_y$ (MPa)	E_s (GPa)	$s\sigma_u$ (MPa)
N22-47-2	410	202.5	459.8
N22-33-2	363	218.2	440.0
N22-25-2	369	185.1	459.4
A22-47-2	236	172.8	326.1
A22-33-2	213	176.6	296.8
A22-25-2	233	189.0	333.9

$s\sigma_y$: yield strength of steel tube, $s\sigma_u$: ultimate strength of steel tube

Table3 Mix proportion

W/C (%)	Unit mass (kg/m ³)				
	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のり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. 長方形鋼管により拘束されたコンクリートの平均軸方向応力度-ひずみ関係の実験結果を図2(a), (b)に示す. 平均軸方向応力度 $c\sigma_{cb}$ 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 ϵ_{∞} 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。

図3(a)~(d)は、アスペクト比1.0~1.6およびラップフィルム有無の拘束されたコンクリートの平均軸方向応力度-ひずみ関係の実験結果を示す。図3(a)~(c)から分かるように、先ほどと同様に 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）にしたがって上昇していることが分かる。アスペクト比による拘束されたコンクリートの平均軸方向応力度の差異は、殆どない結果となった。

次に、図3(d)は、ラップフィルムによる影響について検討するため、試験体 A25-29-1 の鋼管の内側にラップフィルムを貼り付けた場合と無い場合の平均軸方向応力度-ひずみ関係を比較したものを示している。この図から分かるように初期剛性は、ほぼ同じになったものの、ラップフィルム有の降伏応力度が、無い場合に比べて、1.6 倍程度大きくなった。この差の要因は、ラップフィルムでコンクリートと鋼管の付着力が小さくなることで、CFT の降伏応力度も小さくなったと考えられる。

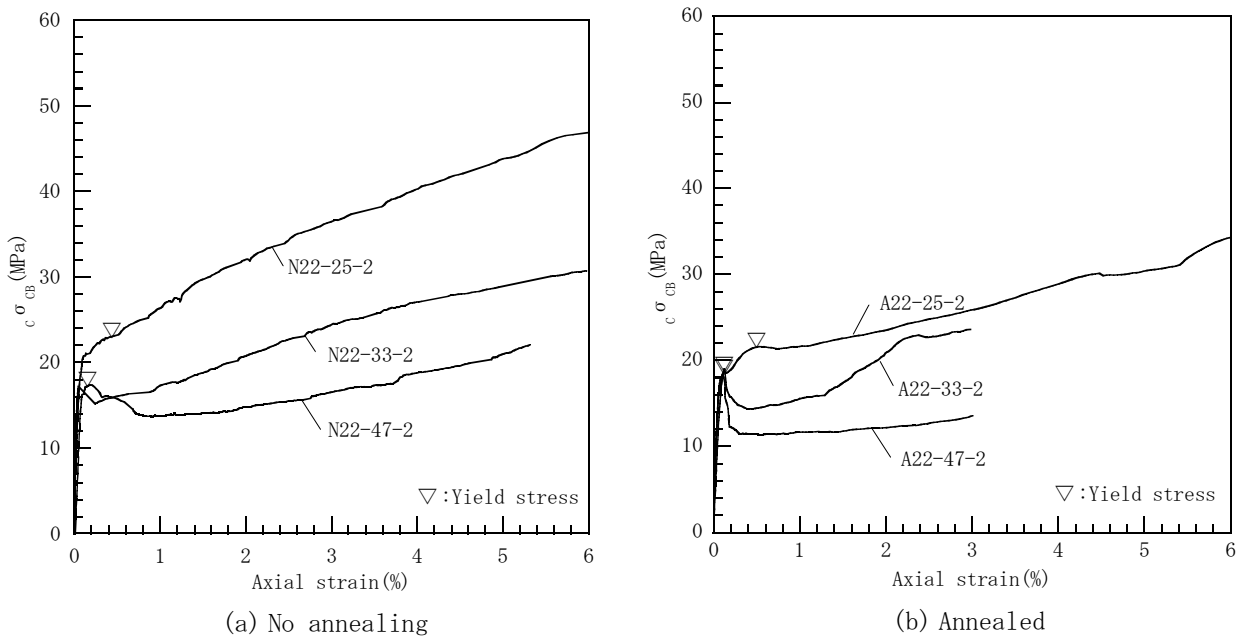


Fig.2 Experimental Results of stress-strain Curves of Concrete Confined by Square

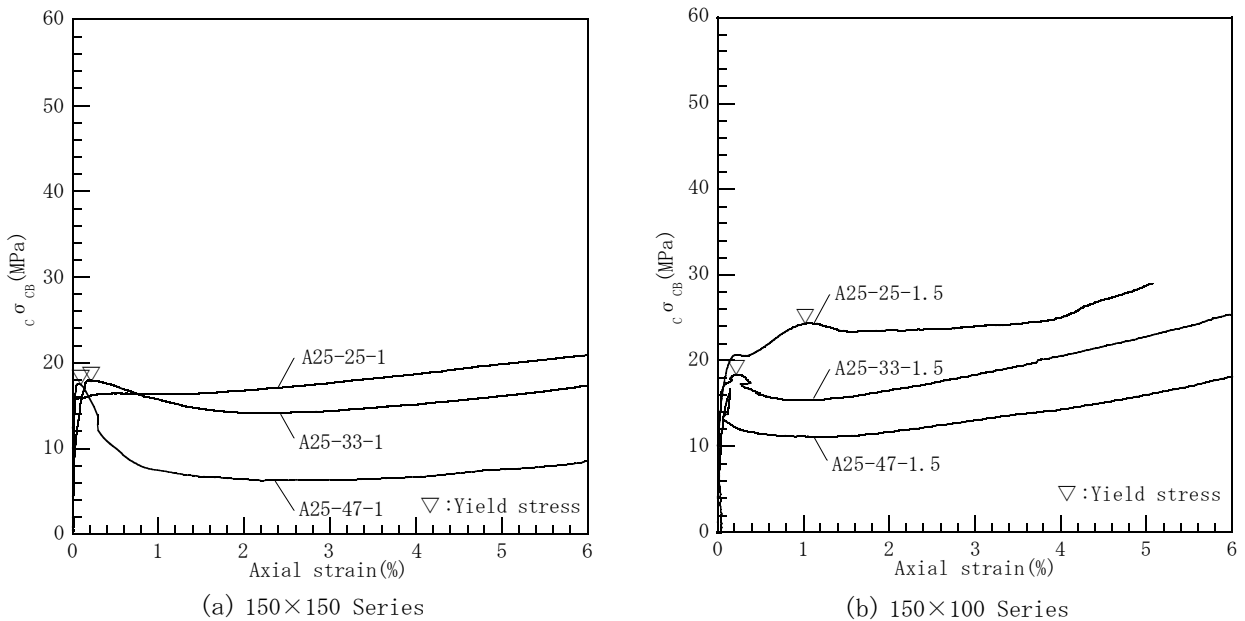


Fig.3 Experimental Results of stress-strain Curves of Concrete Confined by Square

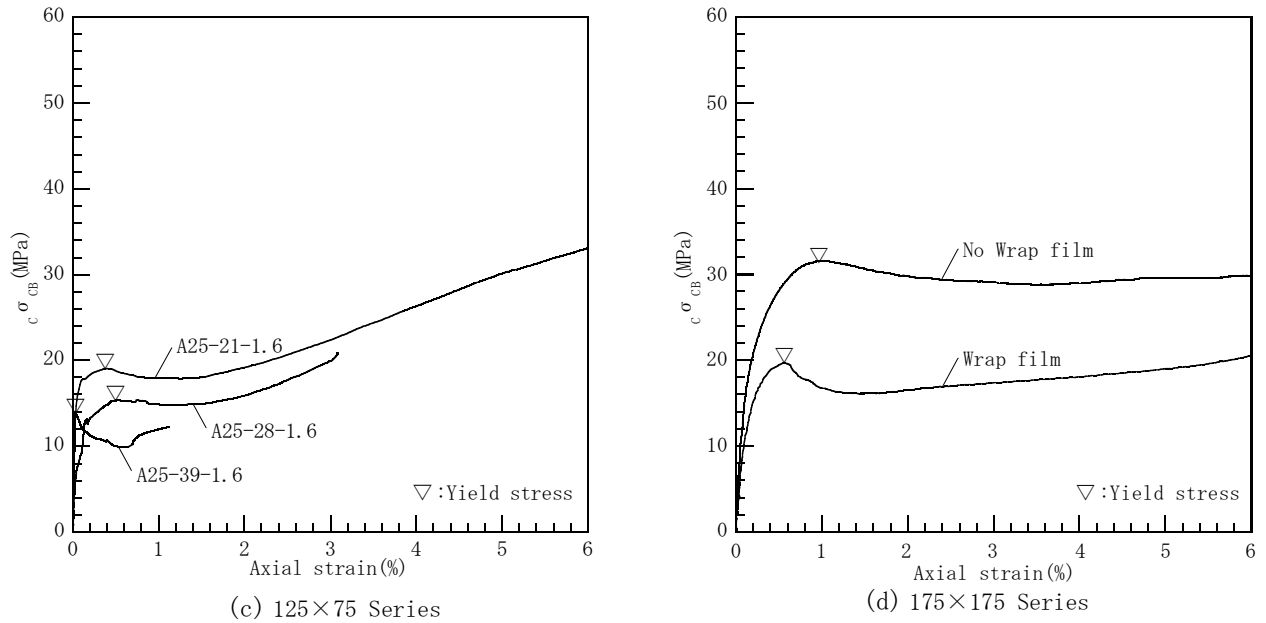


Fig.3 Experimental Results of stress-strain Curves of Concrete Confined by Square

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 ϵ_{c0} およびシリンダー強度 $c\sigma_B$ 、その時のひずみ ϵ_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、コンクリートが十分に充填できておらず、特に鋼管のコーナー部分に3~5mm程度の間隙があった。鋼管を立てた状態でコンクリートを充填しているため、下部の方が、自重により密実になり、上部と材料分離が生じたものと考えられる。これらの要因については、第4章で詳細に述べるとする

Table4 Experimental result

Specimen	Wrap film	$c\sigma_{CB}$ (MPa)	ϵ_{c0} (%)	$c\sigma_B$ (MPa)	ϵ_0 (%)	$c\sigma_{CB}/c\sigma_B$
N22-47-2	Yes	17.40	0.21	20.7	0.29	0.84
N22-33-2		17.25	0.05			
N22-25-2		23.25	0.52	22.0	0.25	1.06
A22-47-2		18.35	0.10			
A22-33-2		19.06	0.12	21.5	0.22	0.85
A22-25-2		21.56	0.50			
A25-39-1.6		12.80	0.16	25.5	0.23	0.50
A25-28-1.6		15.40	0.75			
A25-21-1.6		19.04	0.40			
A25-47-1.5		16.70	0.14	26.5	0.25	0.63
A25-33-1.5		18.37	0.22			
A25-25-1.5		24.29	1.14			
A25-47-1		17.51	0.10	26.1	0.25	0.67
A25-33-1		17.92	0.18			
A25-25-1		16.30	1.00			
A25-29-1		19.63	0.55	26.9	0.22	0.73
	No	31.53	1.00			

$c\sigma_B, \epsilon_0$: stress and strain of concrete at peak point, $c\sigma_{CB}, \epsilon_{c0}$: stress and strain of confined concrete at peak point

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事が分かる。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。

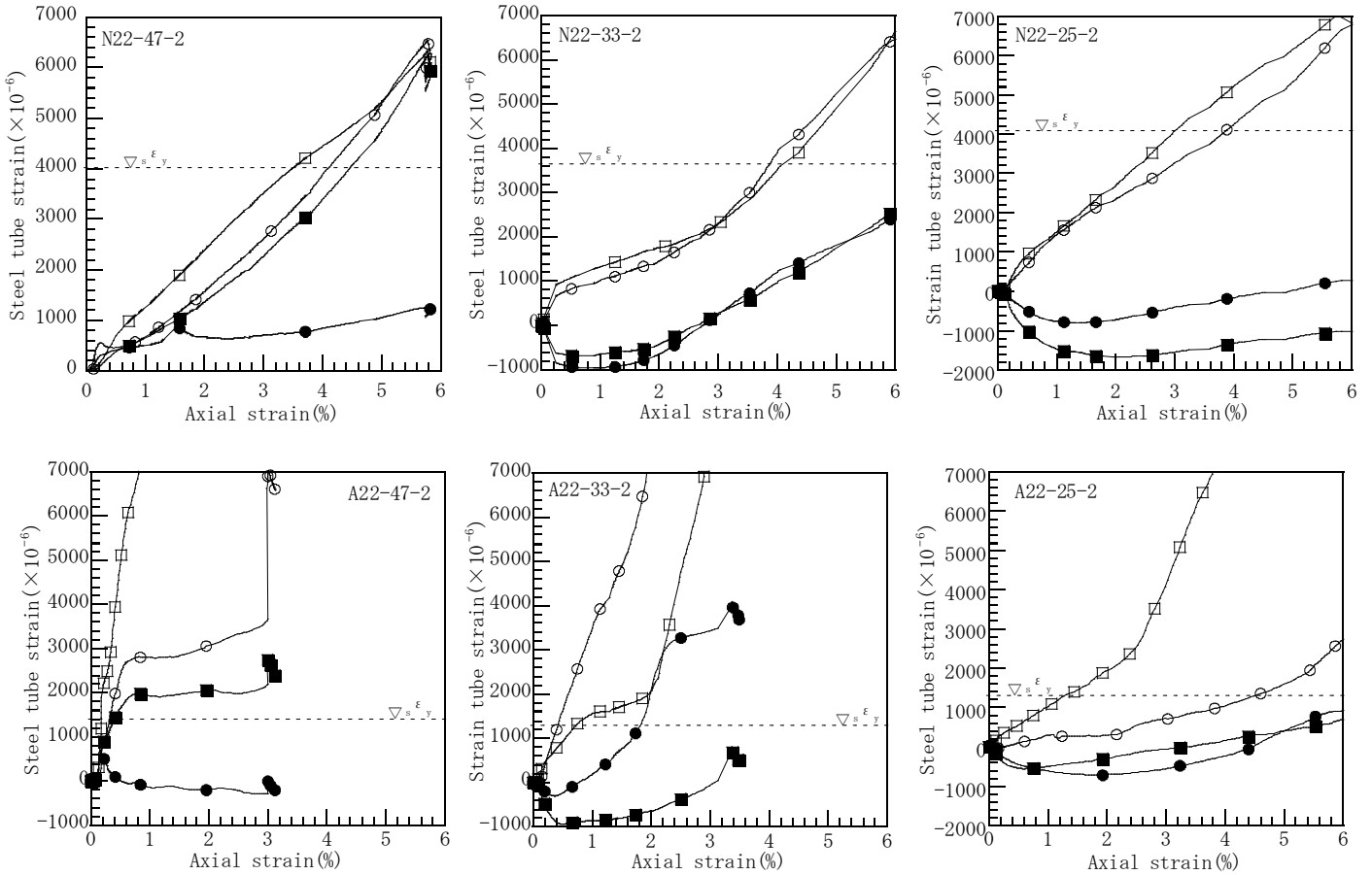


Fig. 3 Steel tube strain - axial strain

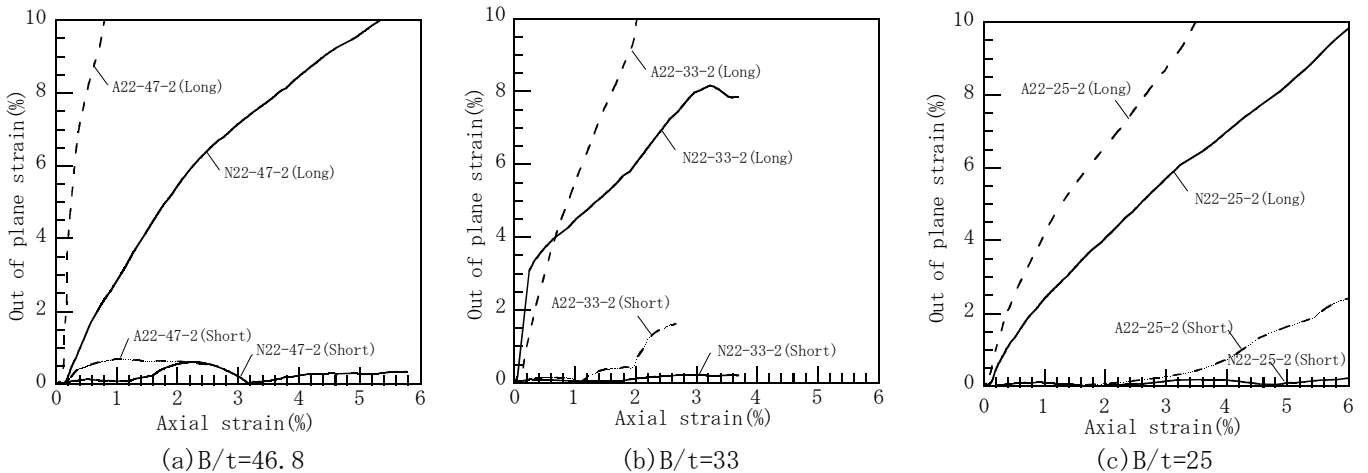


Fig. 4 Out of plane strain-Axial strain Curves

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。

4. 破壊性状について

4・1 鋼管

写真1は、焼鈍有の試験体破壊状況を示す。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。

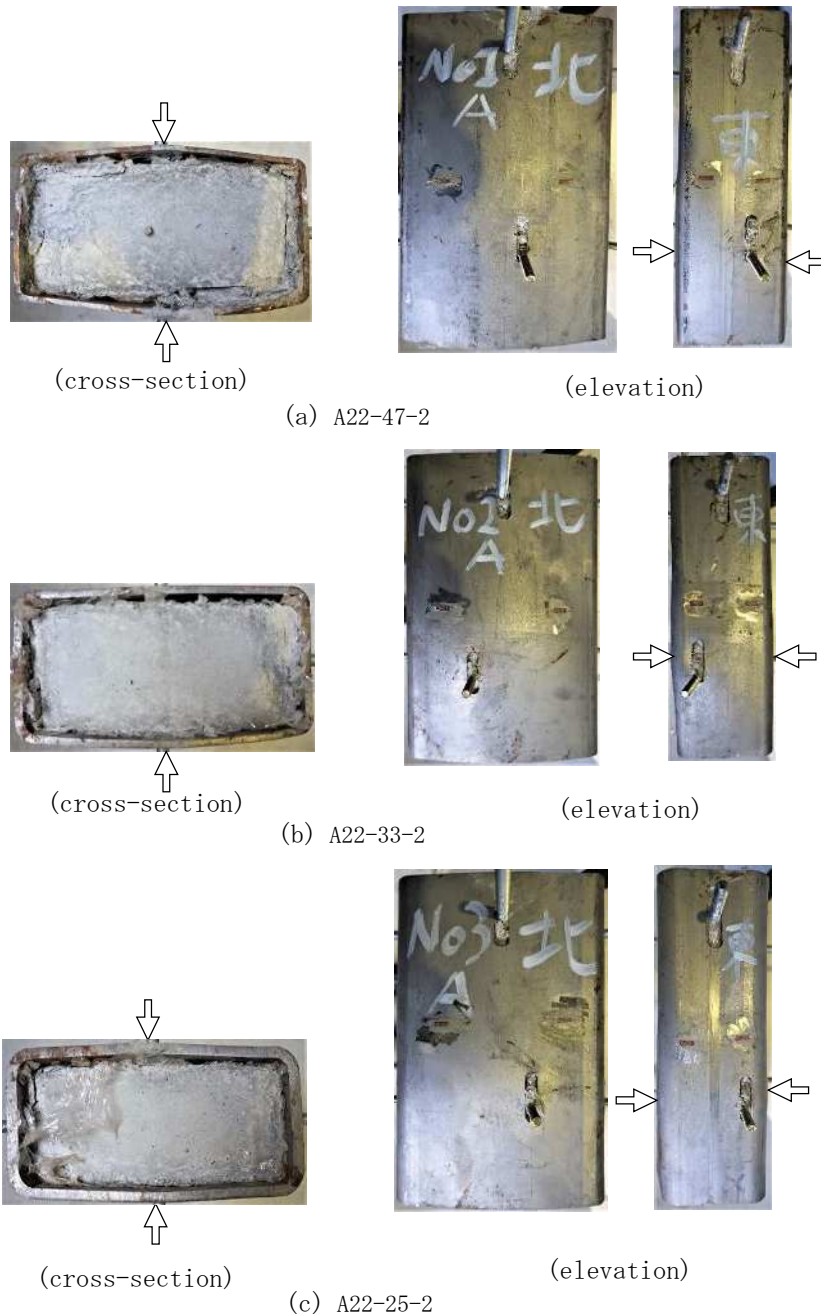
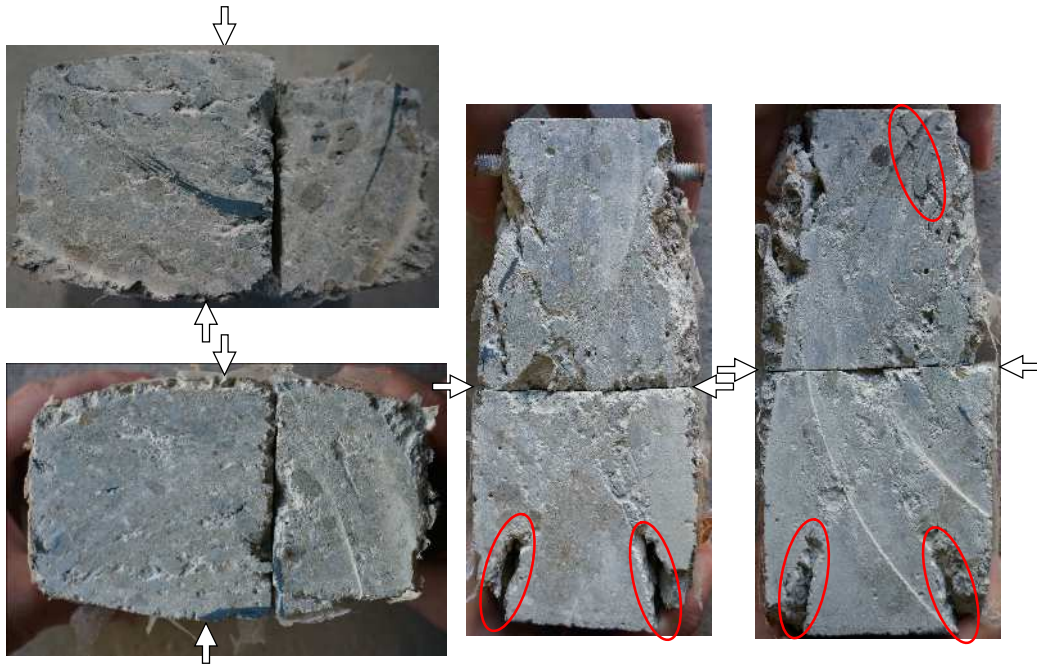


Photo1 Failure mechanism of square CFT columns (Annealing)

4.2 コンクリート

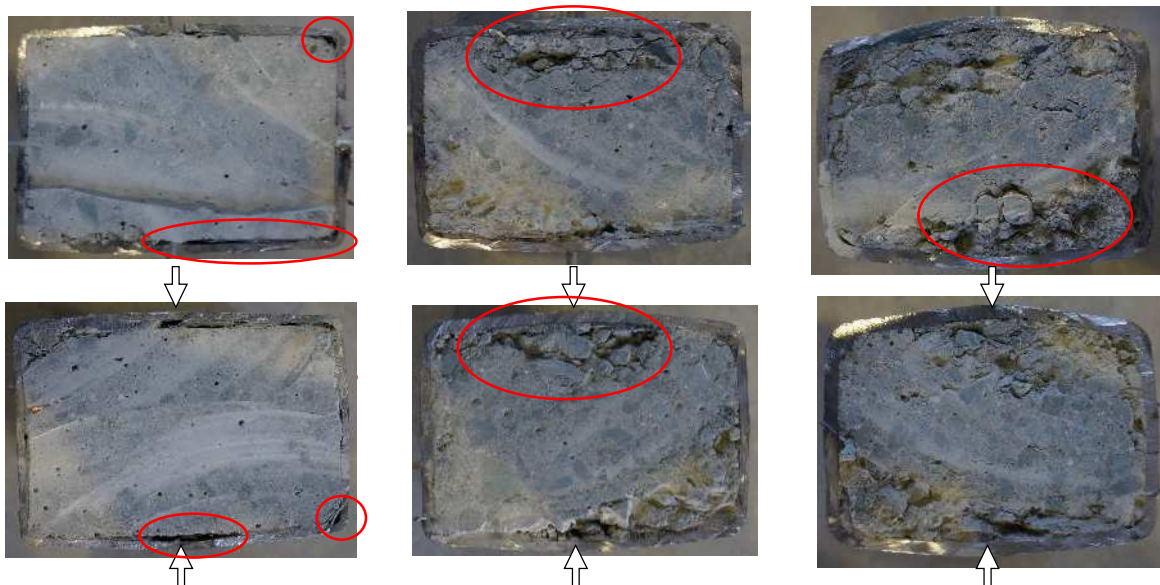
写真2(a), (b)は、実験終了後の試験体 N22-33-2 を水平 X, 垂直 Y 方向に切断し充填コンクリートの状態を確認した。この写真から分かるように、X方向の断面は、中央部分が凸状変形(写真横に矢印にて示す。)が確認された。Y方向の断面は、概ね中央部分が凸状に変形および圧壊が確認された。加力ブロック部分から斜めに約 70° に亀裂が生じ圧壊していることが分かる。前 3.2 節で述べた、長方形鋼管で拘束された平均軸方向応力度は、シリンダー強度より小さくなる理由としては、加力ブロック部分から破壊が先行しているためシリンダー強度より小さくなったと考えられる。

写真3(a)~(c)は、実験終了後のアスペクト比が 1.5 の試験体 3 体を中央部分からコンクリートカッターで切断したものである。なお写真上が上部、写真下が下部の断面である。この写真の矢印から分かるように、上部に比べ下部の方が凸上に変形していることが分かる。写真3(a)は、コーナーなどに間隙が生じている。写真3(b), (c)は、ジャンカが発生しており、これらの欠陥が圧縮強度を小さくした要因と考えられる。



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

Photo2 Inside Concrete(N22-33-2)



(a) A25-47-1.5

(b) A25-33-1.5

(c) A25-25-1.5

Photo3 Cutting surface of the central part

5. 再載荷

前章において、コンクリート破壊性状に関して考察した結果、材料分離によって上部と下部に材料分離を生じており、上部が下部より先行して降伏していることが分かった。そこで、材料分離が生じていない下部の試験体を再度、載荷しどの程度の強度を示すか試みる。図5(a)～(c)は、アスペクト比1.5の試験体3体を再度載荷した平均軸方向応力度－ひずみ関係の実験結果を示す。図中の実線が再載荷、破線が初期載荷の実験結果を示す。この図から分かるように全ての試験体共に初期剛性は、小さいものの初期載荷の試験体より大きな圧縮強度となった。また、幅厚比47,33の拘束されたコンクリートの強度は、降伏強度以降において低下して行くことを示した。一方で、幅厚比25の試験体の降伏強度以降では、上昇していることを示した。

表5は、再載荷した最大圧縮強度とシリンダー強度を比較したものである。この表から分かるように、材料分離していない試験体は、シリンダー強度より概ね1.1割程度、圧縮強度が上昇していることが分かった。以上より、試験体製作するにあたり、材料分離が生じていない中央部分の試験体を抜き出して試験体として使用する。さらに、鋼管とコンクリートには間隙やジャンカができないよう十分配慮してコンクリートを充填する必要がある。

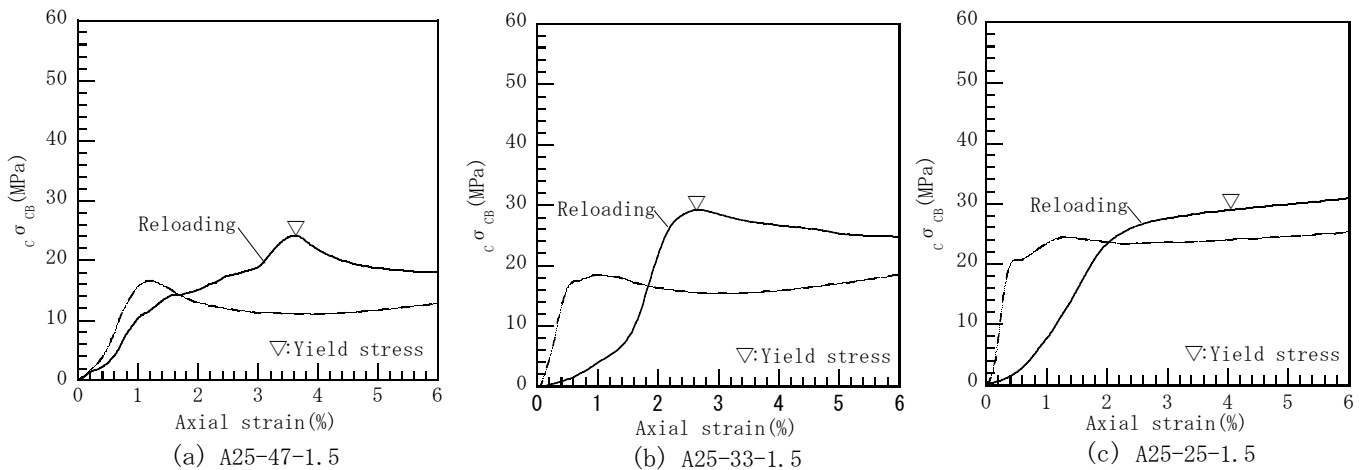


Fig.5 Reloading Results of stress-strain Curves of Concrete Confined by Square

Table5 Reload result

Specimen	$c\sigma_{CB}$ (MPa)	ϵ_{c0} (%)	$c\sigma_B$ (MPa)	ϵ_0 (%)	$c\sigma_{CB}/c\sigma_B$
A25-47-1.5	24.16	3.62	26.1	0.25	0.92
A25-33-1.5	29.24	2.68			1.12
A25-25-1.5	29.00	4.11			1.11

$c\sigma_B, \epsilon_0$: stress and strain of concrete at peak point, $c\sigma_{CB}, \epsilon_{c0}$: stress and strain of confined concrete at peak point

5. まとめ

本論では、アスペクト比が長辺と短辺との長さの比(以下、アスペクト比と呼ぶ)および幅厚比をパラメーターとし長方形CFT柱12体、正方形CFT柱5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したその結果を以下に示す。

- (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) ラップフィルム有の降伏応力度が、無い場合に比べて、1.6倍程度大きくなった。これは、コンクリートと鋼管の付着力により鋼管の引張に抵抗しているためと考えられる。
- (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。
- (4) 鋼管の破壊性状はフランジ中心部分で大きくふくらみ凸状変形、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。

- (5) 断面内部のコンクリートの破壊性状は、上部に比べ下部の方が凸状に変形していることが確認できた。鋼管のコーナーなどに間隙が生じておりコンクリートが充填されていないことが確認できた。これらの欠陥が圧縮強度を小さくした要因と考えられる。
- (6) アスペクト比 1.5 の試験体はを再載荷した結果、全ての試験体共に初期剛性は、小さいものの初期載荷の試験体より大きな圧縮強度となった。
- (7) 再載荷した最大圧縮強度とシリンダー強度を比較した結果、シリンダー強度より概ね 1.1 割程度、圧縮強度が上昇していることが分かった。

参考文献

- (1) 日本建築学会: CFT 構造計算規準化に向けてー長周期地震動も考慮した規準ー, 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