

(2) 一定振幅繰返し载荷を受ける角形 CFT 長柱 (幅厚比 $D/t=17$) の耐力劣化性状に関する研究

藤岡 大二郎¹・城戸 将江²・城崎 康太³・津田 恵吾⁴

¹正会員 北九州市立大学大学院 国際環境工学研究科（〒808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの 1-1）
E-mail: z8mbb024@eng.kitakyu-u.ac.jp

²正会員 北九州市立大学准教授 国際環境工学部（〒1808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの 1-1）
E-mail: kido-m@kitakyu-u.ac.jp

³正会員 北九州市立大学大学院 国際環境工学研究科（〒808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの 1-1）
E-mail: z8mbb012@eng.kitakyu-u.ac.jp

⁴正会員 北九州市立大学名誉教授（〒808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの 1-1）
E-mail: tsuda-keigo@kitakyu-u.ac.jp

現在、南海トラフを震源域とした巨大地震の発生による、固有周期の長い超高層建物などへの影響が懸念されており、長時間多数回繰返し水平力を受ける CFT 柱の安全性検証法を確立する必要がある。このような背景から、著者らは角形 CFT 柱の曲げせん断実験を行ってきたが、鋼管幅厚比は一種類（25）に限られていた。本研究は、一定軸力を受ける角形 CFT 長柱（幅厚比 $D/t=17$ ）が一定振幅で繰返し载荷を受ける際の挙動を明らかにすることを目的とし、材長 L で一端固定、他端自由の片持ち柱形式で、軸力比、変位振幅、コンクリート充填の有無を実験変数として曲げせん断実験を行った。実験結果を示し、既往の研究($D/t=25$)と比較し、耐力劣化挙動に及ぼす幅厚比の影響を明らかにした。また、多数回繰返し特性と重心軸ひずみ挙動の関係について考察した。

Key Words: *steel-concrete composite structure, long period ground motion, fatigue, cyclic behavior, beam-column*

1. はじめに

現在、南海トラフを震源域とした巨大地震の発生による、固有周期の長い超高層建物などへの影響が懸念されている。長周期地震動に対する CFT 柱部材の研究として、一定あるいは変動軸力のもと、曲げせん断実験が行われている^{1)~3)}。また、長時間多数回繰返し水平力を受ける CFT 柱の疲労特性に関する研究⁴⁾もあるが、長周期地震動に対する安全検証法は確立されていない。

このような背景から、著者らは座屈長さ・断面せい比 (l_b/D) が 14 の場合について、振幅（部材角）および軸力比を実験変数とした。曲げせん断実験を行い^{5)~7)}、CFT 柱が一定振幅繰返し载荷を受ける場合の耐力劣化性状に及ぼす、振幅、軸力比の影響について明らかにしている。ただし、これらの実験は鋼管幅厚比 $D/t=25$ のものに限定して実施されている。鋼管幅厚比は CFT 柱の構造性能に影響を及ぼす。今後、安全検証法を確立するためには、一定変位振幅繰返し载荷を受ける場合の耐力劣化性状におよぼす幅厚比の影響についても明らか

にする必要がある。

本研究は、一定軸力を受ける角形 CFT 長柱 ($l_b/D=14$, $D/t=17$) が一定振幅で繰返し载荷を受ける際の挙動を明らかにすることを目的とし、振幅、コンクリート充填の有無、载荷プログラムを実験変数として曲げせん断実験を行ったものである。また、既往の研究との比較を行い幅厚比の影響を示す。

2. 実験概要

(1) 実験計画

一定軸力 N のもと一定振幅繰返し水平力 Q を受けるコンクリート充填角形鋼管長柱 ($l_b/D=14$, $D/t=17$) の、疲労特性を調べるために、上記の荷重条件を代表するモデルとして、図-1 に示す材長 L で一端固定、他端自由の片持ち柱を想定し、曲げせん断実験を計画した。

実験変数は、1) 変位振幅（部材角 R ($=\delta/L$, δ : 柱頭の水平変位)）、2) コンクリート充填の有無、3) 载荷プ

ログラムである。実験変数の範囲は以下のとおりである。

- 1) 変位振幅 R : 1%, 15%, 2%
- 2) コンクリート充填の有無 : 中空, CFT
- 3) 荷重プログラム : 繰返し, 単調

なお、軸力比 $n (=N/N_0, N_0 = s\sigma_y \cdot A_s + c\sigma_B \cdot A_c)$ 、 $s\sigma_y$: 鋼管の降伏応力度、 $c\sigma_B$: コンクリートの圧縮強度) はすべて 0.3 とした。

変位振幅は柱の部材角 R で一定とし、200 サイクルを限度として繰返し荷重を行う。また、最大荷重（水平力 Q ）の 70% 程度まで荷重が低下した時には実験を終了する。表-1 に試験体一覧を示す。試験体名の命名則も表-1 に示している。

(2) 試験体

試験体の形状・寸法を図-2 に示す。鋼管は $\square-150 \times 150 \times 9$ の角形鋼管 (BCR295) を使用した。鋼管幅厚比 D/t は約 17 である。鋼管の柱頭側には、厚さ 40mm のエンドプレートと隅肉溶接で取り付け、試験体の柱脚側には

は厚さ 60mm のベースプレートを完全溶込溶接により取り付けた。

試験体の長さ L は、ベースプレート上面からピン位置までで 1050mm ($l_k/D=14$) である。CFT 指針¹⁰⁾における長さに関する区分では、長柱に対応する。コンクリートの充填は、図-2 に示したコンクリート注入口より行い、エンドプレート表面と充填コンクリートが同一面になるようキャッピングを施した。鋼管の実測寸法を表-2 に示す。実測寸法は、後述する短柱圧縮試験試験体の実測寸法の平均値としている。また、 R 部外径は自作のゲージにて測定し、 R 部内径は R 部外径から板厚を減じたものである。

(3) 材料特性

材料特性を調べるため、鋼材の引張試験、コンクリートシリンダーの圧縮試験および鋼管短柱、CFT 短柱の圧縮試験を行った。

引張試験は鋼管平板部分より溶接シーム部のない板要

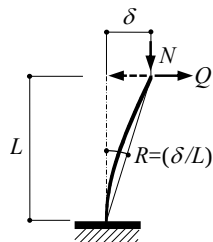


図-1 荷重条件

表-1 試験体一覧

No.	試験体名	振幅 R (%)	CFT/中空	コンクリート圧縮強度 $c\sigma_B$ (N/mm ²)	軸力 N (kN)
1	LD14Dt17n30R1-C	1	CFT	68.1	939
2	LD14Dt17n30R15-C	15		70.5	951
3	LD14Dt17n30R2-C	2		69.3	945
4	S-LD14Dt17n30R15-C	15	中空	-	584
5	LD14Dt17n30-M	-	CFT	66.8	932

凡例: S:中空 LD14: $l_k/D=14$ Dt17: $D/t=17$ n30: $n=0.3$ R15: $R=15\%$ C: 繰返し載荷
無印: CFT M: 単調載荷

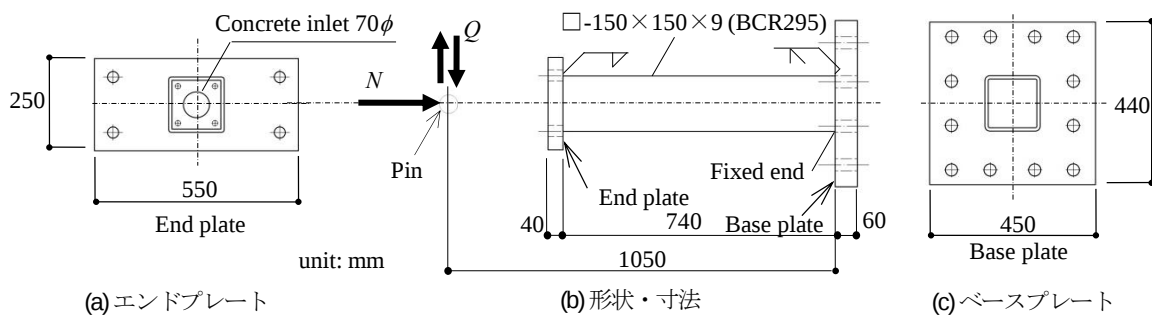


図-2 試験体形状・寸法

表-2 鋼管実測寸法

断面せい幅 D (mm)	板厚 t (mm)	幅厚比 D/t	断面積 A (mm ²)	R 部外径 R_o (mm)	R 部内径 R_i (mm)
150.0	8.95	16.8	4802	20.63	11.68

表-3 引張試験結果

降伏応力度 $s\sigma_y$ (N/mm ²)	引張強さ $s\sigma_u$ (N/mm ²)	降伏比 $s\sigma_y/s\sigma_u$	破断伸び EL	降伏ひずみ ε_y (%)	ヤング係数 E (N/mm ²)
406	449	90.2%	23.2%	0.19	2.14×10^5

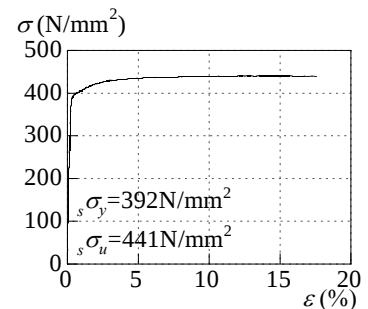


図-3 鋼材の応力-ひずみ関係

表-4 コンクリート調合表

指定強度 (N/mm ²)	水セメント比 (%)	セメント (kg/m ³)	水(kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	混和剤(kg/m ³)	スランプフロー (cm)
51	37.8	450	170	871	886	6.30	50

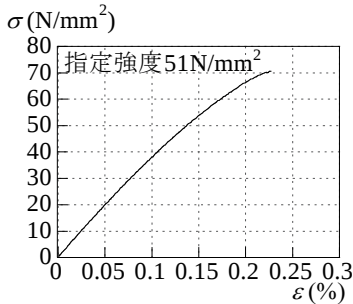
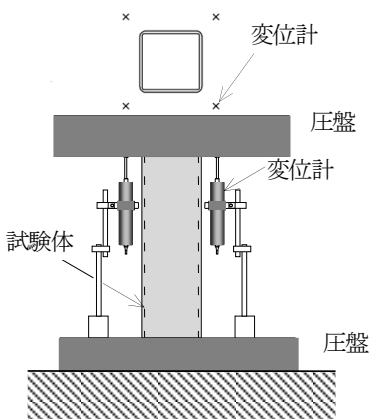
図-4 コンクリートの
応力-ひずみ関係

図-5 短柱圧縮試験

表-5 短柱圧縮試験体一覧と実測寸法

中空 /CFT	試験体	断面せい <i>D</i> (mm)	幅 <i>B</i> (mm)	板厚 <i>t</i> (mm)	材長 <i>L</i> (mm)	断面積 <i>A</i> (mm ²)	R 部外径 <i>R_o</i> (mm)	R 部内径 <i>R_i</i> (mm)
中空	No.1	150.2	149.9	8.95	449.0	4802	20.63	11.68
	No.2	150.2	149.9	8.94	448.5	4799		11.68
	No.3	150.1	149.9	8.95	449.0	4803		11.67
CFT	No.4	150.2	149.9	8.95	449.5	4803		11.68
	No.5	150.2	149.9	8.94	449.5	4800		11.68
	No.6	150.2	149.9	8.95	449.2	4805		11.67

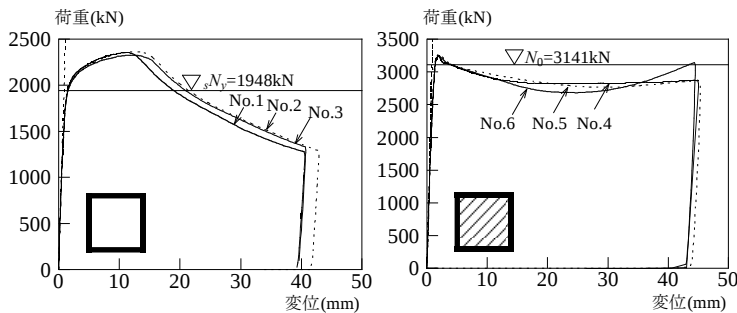
表-6 短柱圧縮試験結果

	試験体	<i>P_{max}</i> (kN)	<i>sN_y</i> <i>N₀</i> (kN)	<i>P_{max}sN_y</i> <i>P_{max}N₀</i>	<i>δ_{Pmax}</i> (mm)
S	No.1	2356	1948	1.21	11.1
	No.2	2367	1947	1.22	12.7
	No.3	2325	1948	1.19	12.0
CFT	No.4	3244	3141	1.03	1.94
	No.5	3266	3140	1.04	1.96
	No.6	3253	3141	1.04	1.94

P_{max}: 最大荷重, *sN_y*: 鋼管降伏軸力 ($=\sigma_y \cdot sA$),

N₀: CFT 柱圧縮耐力, $c\sigma_c=68.76\text{N/mm}^2$ として計算.

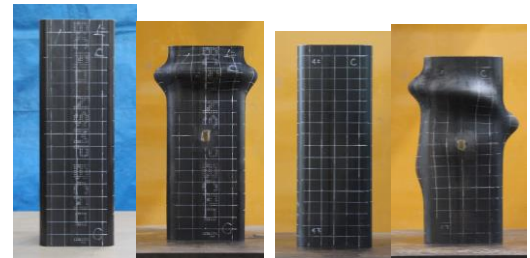
δ_{Pmax}: 最大荷重時の変位



(a) 中空試験体

(b) CFT 試験体

図-6 荷重-変位関係



(a) No.1 (中空) 試験体

(b) No.4 (CFT) 試験体

図-7 試験体写真

素より切り出した JIS1A 号試験片 3 片を用いて行った。しかし、1 本は破断位置が中央から離れており、試験片に貼り付けたひずみゲージの値が、ほかの試験片と比較して極端に小さかったため、新たに 3 片を追加し計 6 片の引張試験を行い、破断位置が中央から大きく離れた一片を除く 5 片の平均値とした。引張試験の結果を表-3 に、応力 σ -ひずみ ϵ 関係を図-3 に示す。図-3 に示すように降伏棚が明瞭に表れなかったため、0.2% オフセット法にて降伏応力度を求めた。

コンクリートの調合表を表-4 に示す。載荷実験時にコンクリートの圧縮強度がおおむね 60N/mm^2 となるよ

うに、指定強度 51N/mm^2 (調合強度 61.2N/mm^2) とした。シリンダー圧縮試験による圧縮強度 $c\sigma_c$ を表-1 に、代表的な応力 σ -ひずみ ϵ 関係を図-4 に示す。

短柱圧縮試験は、試験体の材長を断面せいの 3 倍の 450mm とし、中空鋼管短柱および CFT 短柱それぞれに対して、3 体ずつ行った。表-5 に試験体一覧と実測寸法を示す。載荷は図-5 に示すように平押しとし、軸方向縮み量を鋼管表面より 5cm 離れた 4 箇所に変位計を設置することにより測定した。

表-6 に試験結果を、図-6 に荷重-変位関係を示す。点線は軸剛性の計算値で実験結果と概ね対応している。

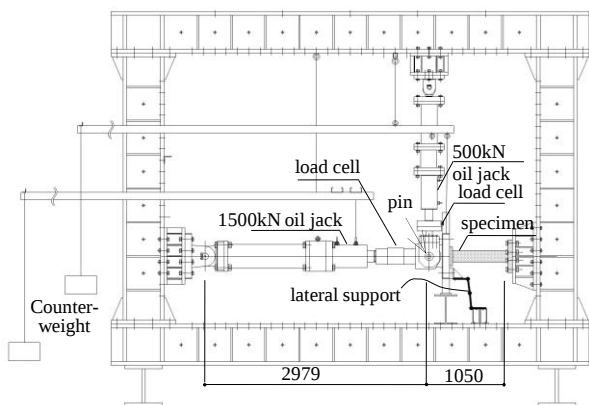


図-8 加力装置

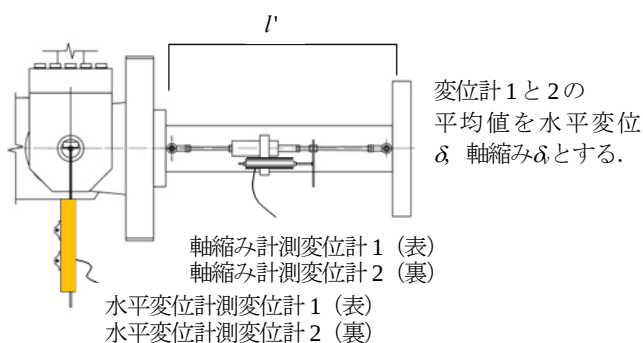


図-9 変位計取り付け位置

中空試験体および CFT 試験体は表-6 に示すようにそれぞれ 3 つの試験体とも最大荷重 P_{max} はほぼ同じであった。中空試験体は、降伏軸力よりもやや大きく（約 1.2 倍程度）CFT 試験体は、いずれも累加強度 N_0 ($=3141\text{kN}$) とほぼ同じ値であった。図-7 に試験体 No.1（中空），No.4（CFT）の実験前後の試験体写真を示す。

(4) 実験方法

加力装置を図-8 に示す。1500kN 油圧ジャッキによって所定の軸力を载荷したのち、500kN 油圧ジャッキによって水平力を加えた。载荷は、一定軸力を与えたのち水平力を加えた。また、構面外変位の発生を防止するため、試験体自由端側の軸力ジャッキと試験体を接続するための治具に、構面外変位拘束治具を設けている。変位の測定は図-9 に示すようにピン位置の 2 つの変位計で行い、変位の制御もこれらの平均値で行った。また、試験体にはひずみゲージを貼り付けひずみの測定を行った。

3. 実験結果

(1) 最大荷重

表-7 に繰返し载荷と単調载荷の最大荷重と曲げ耐力を示す。表-7 中の最大荷重は正側、負側における水平力 Q の最大値、 M_{max} は正側、負側における柱脚の曲げ

表-7 最大荷重と曲げ耐力

試験体名	最大荷重 (kN)	M_{max} (kN・m)	M_{pc} (kN・m)	M_d (kN・m)
LD14Dt17 n30R1-C	正 77.6 負 -78.7	91.5 -92.6	125.6	84.5
LD14Dt17 n30R15-C	正 97.5 負 -100.1	117.4 -120.1		
LD14Dt17 n30R2-C	正 105.9 負 -107.2	131.1 -132.3	126.1	84.8
S-LD14Dt17 n30R15-C	正 83.8 負 -85.7	97.2 -99.1		
LD14Dt17 n30-M	103.6	148.3	125.3	84.3

M_{max} :最大曲げモーメント、 M_{pc} :全塑性モーメント、 M_d :短期許容耐力

モーメントの最大値、 M_{pc} は軸力の存在を考慮した全塑性モーメントの計算値である。表-7 より $R=1\%$ 、 $R=1.5\%$ の CFT 試験体では正側、負側ともに全塑性モーメントに達していなかったことがわかる。

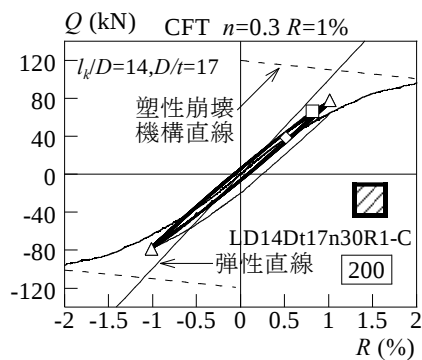
(2) 水平力一部材角関係

図-10 に水平力 Q 一部材角 R 関係を示す。図中◇印は最外縁のひずみが初めて引張試験により得られた降伏ひずみに達した点、△印は水平力最大の点である。□印は CFT 指針¹⁰⁾の長柱の短期許容曲げモーメントの値と水平力 Q とベースプレートからピン位置までの距離を乗じたもの（一次モーメント）が等しくなった点を示す。図-10 中の実線の曲線は、単調载荷時の水平力 Q 一部材角 R 関係を示す。図-10 中の点線の直線は塑性崩壊機構直線を示す。実線の直線は弾性直線であり、軸力、せん断変形の影響を考慮し、全断面有効で弾性として計算した初期剛性を表している。繰返し载荷の繰返し回数は、それぞれ図中に□印で囲まれた回数で、同一振幅にて繰返ししている。

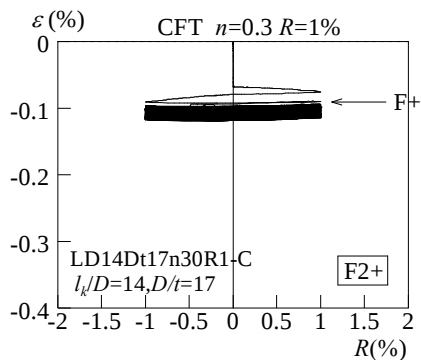
図によれば、LD14Dt17n30R1-C 試験体はあまり荷重の低下がみられないが（図-10 (a)）、ほかの試験体は徐々に荷重が低下している。振幅が大きくなると荷重の低下も大きくなることが観察される。図-10 (b)と図-10 (d)を比較すると、中空試験体である図-10 (d)の方が荷重の低下にかかるサイクル数が若干多いことが分かる。

(3) 軸縮み一部材角関係

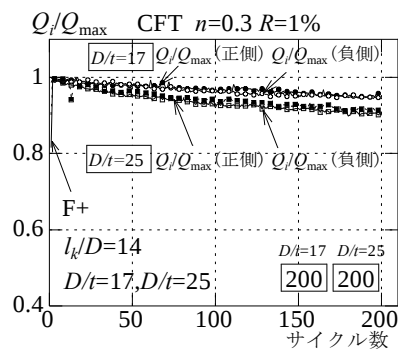
繰返し载荷の軸ひずみ ε 一部材角 R 関係を図-11 に示す。軸ひずみは、図-9 に示した変位形で測定した軸縮み δ を材長 l' で除して求めたものである。図-11 中に矢印で局部座屈発生点を示す。F はフランジ、W はウェブを示す。また、+は正側、-は負側で発生したことを示す。□で囲まれた数字は、局部座屈が発生したサイクル数である。図より、どの試験体も徐々に縮みが累積していることが分かる。 $R=1\%$ 、 1.5% 、 2% （図-11 (a)～(c)）



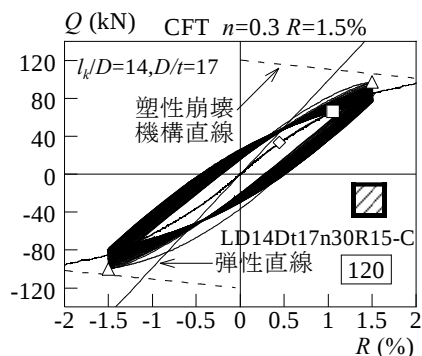
(a) CFT $n=0.3, R=1\%$



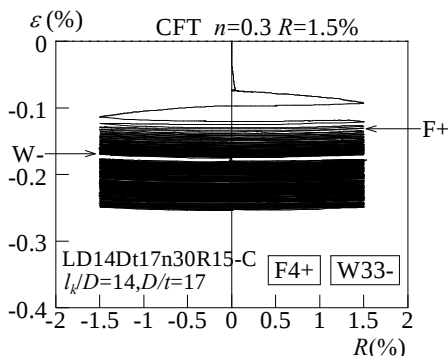
(a) CFT $n=0.3, R=1\%$



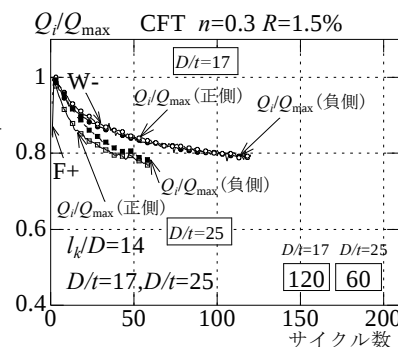
(a) CFT $n=0.3, R=1\%$



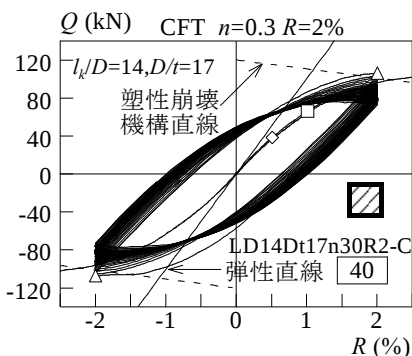
(b) CFT $n=0.3, R=1.5\%$



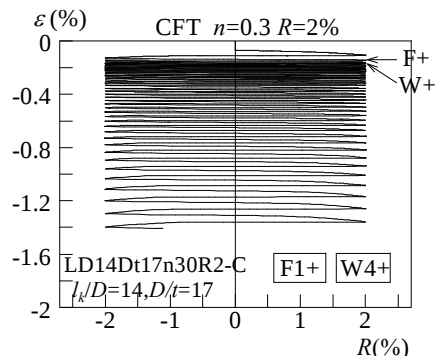
(b) CFT $n=0.3, R=1.5\%$



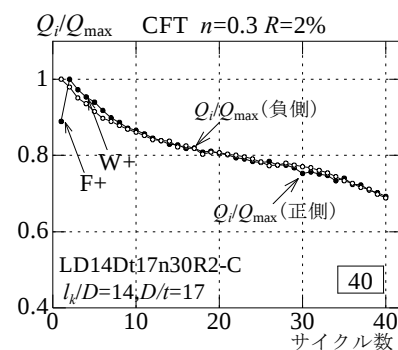
(b) CFT $n=0.3, R=1.5\%$



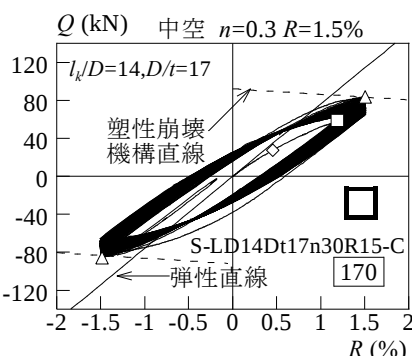
(c) CFT $n=0.3, R=2\%$



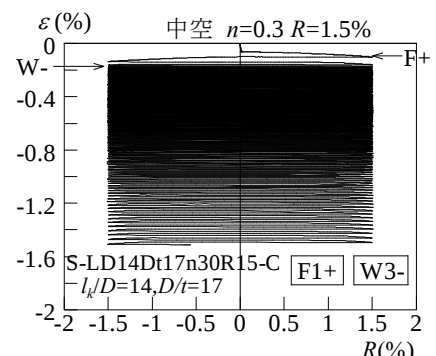
(c) CFT $n=0.3, R=2\%$



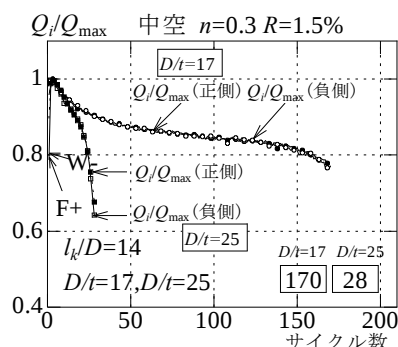
(c) CFT $n=0.3, R=2\%$



(d) 中空 $n=0.3, R=1.5\%$



(d) 中空 $n=0.3, R=1.5\%$



(d) 中空 $n=0.3, R=1.5\%$

図-10 水平力 Q —部材角 R 関係

図-11 軸ひずみ ε —部材角 R 関係

図-12 ピーク荷重の推移

を比較すると、振幅が大きいほど軸ひずみが大きい。また、CFT 試験体と中空試験体を比較すると（図-11 (b)と (d)），中空試験体のほうが軸ひずみが大きい。

(4) 多数回繰り返し特性

図-12 に、ピーク荷重の推移 ($Q_i/Q_{\max}$, Q_i : i サイクル時の変位反転点荷重, $Q_{\max}$: 最大荷重) を示す。図中●○はそれぞれ本研究 $D/t=17$ の正側、負側である。また、比較のために既往の研究⁹⁾ ($D/t=25$) のピーク荷重の推

表-8 限界繰返し回数 ($D/t=17$)

No.	試験体	$\theta_x(\%)$	$\mu(\theta/\theta_p)$		$N_{95\%}$	$N_{90\%}$	$N_{85\%}$	$N_{80\%}$
1	LD14Dt17 n30R1-C	1.1	0.9	正	176	200+	-	-
				負	172	200+	-	-
2	LD14Dt17 n30R15-C	1.11	1.35	正	7	17	38	95
				負	10	21	44	98
3	LD14Dt17 n30R2-C	1.09	1.83	正	4	6	11	21
				負	3	5	12	21
4	S-LD14Dt17 n30R15-C	1.13	1.33	正	12	29	90	160
				負	12	29	86	154

* 200+は、90%まで荷重が低下していない状態で実験を終了したことを示している。

表-9 限界繰返し回数 ($D/t=25$)⁹⁾

No.	試験体	$\theta_x(\%)$	$\mu(\theta/\theta_p)$		$N_{95\%}$	$N_{90\%}$	$N_{85\%}$	$N_{80\%}$
5	LD14Dt25 n30R1-C	0.93	1.07	正	65	200+	-	-
				負	54	200+	-	-
6	LD14Dt25 n30R15-C	0.92	1.63	正	8	15	26	44
				負	5	9	19	37
7	S-LD14Dt25 n30R15-C	0.92	1.63	正	10	16	21	24
				負	8	17	22	24

移を示しており、■□はそれぞれ正側、負側のピーク荷重を示す。なお、既往の研究⁹⁾では振幅2%の試験体が行われていないため、振幅2%は本研究のみの結果となっている。

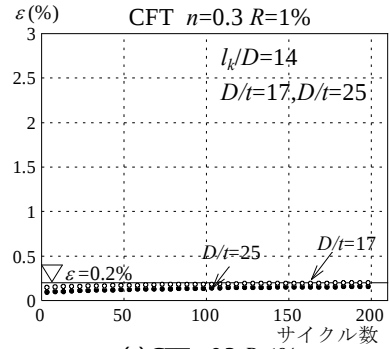
また、表-8および表-9に、 $D/t=17$ および $D/t=25$ 試験体の水平力が最大荷重の95%、90%、85%、80%に低下した時のサイクル数 $N_{95\%}$ 、 $N_{90\%}$ 、 $N_{85\%}$ 、 $N_{80\%}$ を示す。これらを、本論では限界繰返し回数と呼ぶ。表中 μ は塑性率(θ/θ_p : θ は変位振幅で R と同じ、 θ_p は塑性変位で弾性剛性と塑性崩壊機構直線の交点)を示す。

a) $D/t=17$ 試験体

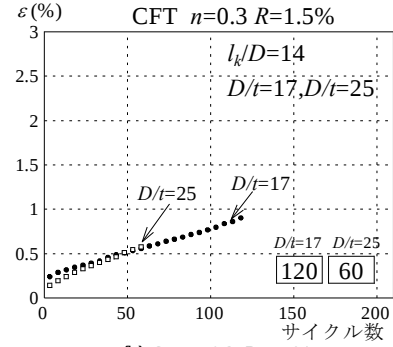
まず、 $D/t=17$ の試験体に着目して考察する。 $R=1\%$ (図-12 (a))の場合は、荷重の低下が緩やかで、200サイクル繰返しても、最大荷重の94.6%までしか荷重が低下していなかった。一方、CFT試験体の $R=1.5\%$ (図-12 (b))、 2% (図-12 (c))は、荷重の低下が比較的大きく、部材角が大きいくほど荷重の低下が大きくなっている。また、CFT試験体(図-12 (b))と中空試験体(図-12 (d))を比較すると、120サイクルまでのピーク荷重の推移はおおむね同じ傾向であったが、CFT試験体のほうが荷重低下が大きかった。

b) 幅厚比の影響

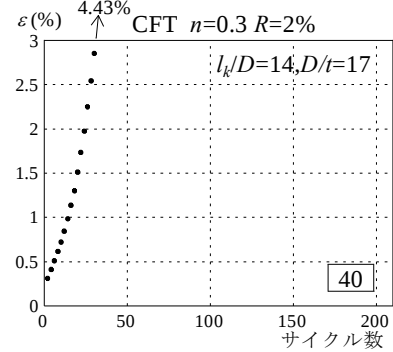
次に、幅厚比の影響について考察する。まず、 $R=1\%$ の試験体で $D/t=17$ と $D/t=25$ を比較すると、 $D/t=25$ のほうが耐力がより低下している(図-12 (a))。しかし、ピーク荷重の推移は同じ傾向を示していた。 $R=1.5\%$ の試験体では(図-12 (b)、図-12 (d))CFT、中空ともに幅厚比の大きい $D/t=25$ の試験体の方が少ないサイクル数で荷



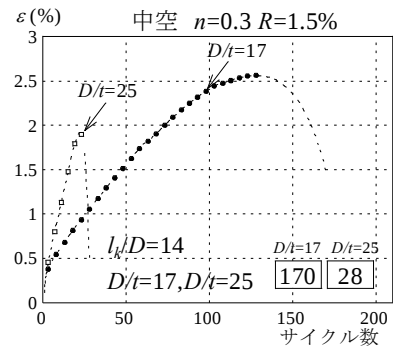
(a) CFT $n=0.3, R=1\%$



(b) CFT $n=0.3, R=1.5\%$



(c) CFT $n=0.3, R=2\%$



(d) 中空 $n=0.3, R=1.5\%$

図-13 重心軸ひずみの推移

重が低下しているが、幅厚比の影響は、図-12 (d)の中空試験体の方が顕著である。

表-8 および表-9 について、同じ部材角の試験体(No.1 と No.5, No.2 と No.6, No.4 と No.7)で比較すると、 $D/t=25$ のほうが限界繰返し回数は少ないことが分かる。

また、すでに示したように、 $D/t=17$ の場合はCFT試験体のほうが中空試験体と比較して荷重低下が大きかった

が、表-9 の No.6 と No.7 を比較すると、 $D/t=25$ の場合は中空試験体のほうが少ないサイクル数で $N_{85\%}$ 、 $N_{90\%}$ に達しており、逆の傾向が見られた。この理由については、今後検討したいと考えている。

(5) 重心軸ひずみ挙動

図-13 に $D/t=17$ と $D/t=25$ における各試験体の重心軸ひずみ ε とサイクル数の関係を示す。重心軸ひずみは、試験体のウェブ面にベースプレート上端から $D/2$ (D は断面せい) の位置に貼り付けたひずみゲージで計測された、変位反転点におけるひずみの値である。図中●は $D/t=17$ の正側、□は $D/t=25$ の正側の重心軸ひずみの推移を示す。

a) $D/t=17$ 試験体

まず、振幅の影響についてみる。 $R=1\%$ の場合は、ひずみの値の変化が小さいことが分かる。1 サイクル目の軸ひずみと 200 サイクル目の軸ひずみの違いは、0.1% 程度であった。 $R=1.5\%$ の場合は、重心軸ひずみとサイクル数はほぼ線形的な関係となっている。 $R=2\%$ の場合は、急激に重心軸ひずみが増加していることがわかる。このように、部材角の影響によって、重心軸ひずみの挙動が異なる。また、図-13 (d) の中空試験体については、130 サイクル以降にひずみの値が局部座屈変形の増大にともない減少する傾向が見られているが、1 サイクル目から 100 サイクル目までは CFT 試験体よりもひずみが増大していることが観察される。

b) 幅厚比の影響

次に、幅厚比の影響について考察する。図-13 (a) と (b) によれば、振幅が同じであれば、同様の傾向を示しており、軸ひずみの値も大きな差は見られない。しかし、図-13 (d) の中空試験体については、 $D/t=17$ と $D/t=25$ の試験体で大きな差が見られ、 $D/t=25$ 試験体のほうが、少ないサイクル数でひずみが増大している。

(6) 局部座屈

表-10 に $D/t=17$ の試験体、 $D/t=25$ の試験体の繰返し载荷中にフランジとウェブに局部座屈が発生した時のサイクル数を示す。No.1～4 が $D/t=17$ 試験体で、No.5～No.7 が $D/t=25$ 試験体である。また、図-14 に $D/t=17$ 、 $D/t=25$ 試験体の実験後の試験体柱脚部（フランジ面）を示す。表-10 と図-14 中の番号は対応している。図-14 は、比較のため、振幅が同じで幅厚比が異なる試験体を横に並べている。また、単調载荷試験体の写真を図-14 (h) に示している。

表-10 によると、どの試験体にも局部座屈が発生している。フランジ面は、どの試験体でも繰返し载荷を始めて数サイクルで局部座屈が発生している（1～5 回）。 $R=1\%$ の試験体では $D/t=17$ と $D/t=25$ のどちらの試験体もウェブ面には局部座屈が発生していなかった。

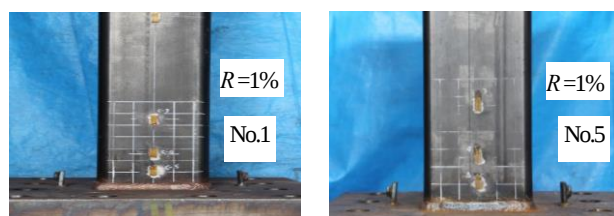
図-14 より、 $R=1\%$ のときはほとんど局部座屈変形が見られないが、部材角が大きい試験体のほうが、局部座屈変形が大きいことが分かる。また、 $R=1.5\%$ の場合は、 $D/t=25$ 試験体のほうが局部座屈変形が大きい。

(7) 多数回繰返し特性と重心軸ひずみの関係

図-12 と図-13 を照らし合わせてみると、 $R=1\%$ の場合

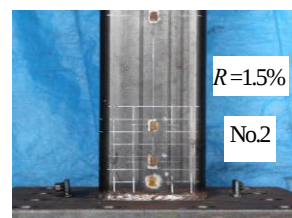
表-10 局部座屈発生サイクル数

No.	幅厚比	試験体名	フランジ	ウェブ
1	17	LD14Dt17n30R1	2回目正側	なし
2	17	LD14Dt17n30R15	4回目正側	33回目負側
3	17	LD14Dt17n30R2	1回目正側	4回目正側
4	17	S-LD14Dt17n30R15	1回目正側	3回目負側
5	25	LD14Dt25n30R1	5回目正側	なし
6	25	LD14Dt25n30R15	1回目正側	20回目負側
7	25	S-LD14Dt25n30R15	1回目負側	5回目負側

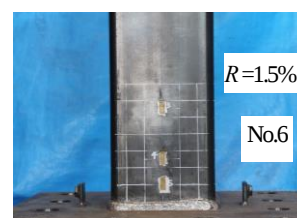


(a) LD14Dt17n30R1

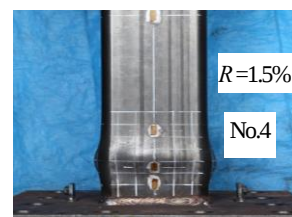
(b) LD14Dt25n30R1



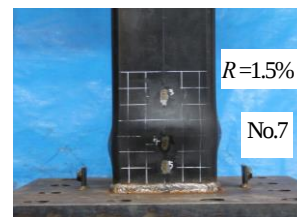
(c) LD14Dt17n30R15



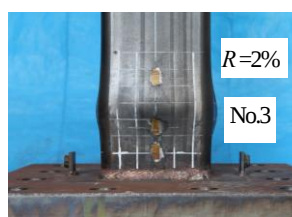
(d) LD14Dt25n30R15



(e) S-LD14Dt17n30R15



(f) S-LD14Dt25n30R15



(g) LD14Dt17n30R2



(h) LD14Dt17n30-M

図-14 実験後試験体柱脚部（フランジ面）

は、重心軸ひずみの増大が 0.1%程度と比較的小さいにもかかわらず耐力が低下していることが分かる。また、前項でみたように、ウェブには局部座屈は発生しておらずフランジの局部座屈変形も小さかった。

$R=1.5\%$ 、 2% の場合は、重心軸ひずみが大きいほうが、荷重の低下も著しいことが分かる。中空試験体の場合も同様で、重心軸ひずみが大きかった $D/t=25$ 試験体の方が、荷重低下が著しくなっていた。

このように、重心軸ひずみ挙動、局部座屈発生と耐力劣化挙動は密接な関連があると考えられる。今後は、より詳細に耐力劣化挙動に及ぼす影響と要因について検討を行っていく予定としている。

4. まとめ

幅厚比 $D/t=17$ の場合の、一定軸力を受ける角形 CFT 長柱($l/D=14$)の一定振幅繰返し載荷実験の結果として、最大荷重、軸ひずみ ε -部材角 R 関係、多数回繰返し特性、重心軸ひずみ挙動を示し、幅厚比 $D/t=25$ の既往の研究⁹⁾と比較を行い、耐力劣化挙動に及ぼす幅厚比の影響を明らかにした。

また、多数回繰返し特性と重心軸ひずみ挙動の関係について考察した。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 部材角が大きいほど荷重の低下が大きい。また、CFT 試験体と中空試験体を比較すると、120 サイクルまでのピーク荷重の推移はおおむね同じ傾向であったが、CFT 試験体のほうが荷重低下が大きかった。
- 2) $D/t=17$ と $D/t=25$ の試験体を比較すると、同じ部材角の場合は $D/t=25$ のほうが耐力がより低下していた。また、限界繰返し回数が少ないことが分かった。

謝辞：本研究は、一般社団法人日本鋼構造協会「長周期地震動に対する柱部材（CFT 柱、鉄骨柱）の保有性能に関する調査研究」委員会（委員長：千葉大学名誉教授、森田耕次先生）によるものである。また、本研究の一部は北九州市立大学平成 30 年度卒論生早川暉人氏の卒業研究としておこなった。コンクリートの打設に際しては、北九州宇部コンクリート株式会社にご協力いただいた。実験の遂行に当たり、北九州市立大学構造・施工講座、材料デザイン講座の協力を得た。関係各位に感謝します。

参考文献

- 1) 成原弘之，安田聡，佐藤英佑，宇佐美徹，鈴木康正，長谷川隆：長周期地震動に対する鉄骨造超高層建物の安全性検証方法の検討 その 27 CFT 柱部材の多数回繰返し載荷実験（実験概要：490N 級鋼材，Fc60 コンクリート試験体），日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 III，pp.1251-1252，2014.9.
- 2) 佐藤英佑，成原弘之，安田聡，宇佐美徹，鈴木康正，長谷川隆：長周期地震動に対する鉄骨造超高層建物の安全性検証方法の検討 その 28 CFT 柱部材の多数回繰返し載荷実験（結果と考察：490N 級鋼材，Fc60 コンクリート試験体），日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 III，pp.1253-1254，2014.9.
- 3) 宇佐美徹，山崎賢二，牛渡ふみ，成原弘之，鈴木康正，長谷川隆：長周期地震動に対する鉄骨造超高層建物の安全性検証方法の検討 その 29 CFT 柱部材の多数回繰返し載荷実験（実験概要：590N 級鋼材，Fc100 コンクリート試験体ほか），日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 III，pp.1255-1256，2014.9.
- 4) 牛渡ふみ，宇佐美徹，山崎賢二，成原弘之，長谷川隆：長周期地震動に対する鉄骨造超高層建物の安全性検証方法の検討 その 30 CFT 柱部材の多数回繰返し載荷実験（結果と考察：590N 級鋼材，Fc100 コンクリート試験体ほか），日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 III，pp.1257-1258，2014.9.
- 5) 山崎賢二，宇佐美徹，牛渡ふみ，成原弘之，長谷川隆：長周期地震動に対する鉄骨造超高層建物の安全性検証方法の検討 その 31 CFT 柱部材の多数回繰返し載荷実験（損傷評価），日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 III，pp.1259-1260，2014.9.
- 6) 福元敏之：コンクリート充填角形鋼管長柱の疲労特性，日本建築学会構造系論文集，第 78 巻，第 694 号，pp.2229-2235，2013.12.
- 7) 城戸將江，津田恵吾，福元敏之，一戸康生，森田耕次：一定変位振幅繰返し載荷を受ける角形 CFT 柱の構造性能，日本建築学会構造系論文集，第 84 巻 第 759 号，pp.725-735，2019.3.
- 8) 宇津宮遥奈，城戸將江，津田恵吾：一定振幅繰返し載荷を受ける角形 CFT 長柱の耐力劣化性状に関する研究，その 4 実験概要ならびに水平力-部材角関係($l/D=14$ の場合)，日本建築学会九州支部研究会，第 57 号，pp.625-628，2018.3.
- 9) 宇津宮遥奈，城戸將江，津田恵吾：一定振幅繰返し載荷を受ける角形 CFT 長柱の耐力劣化性状に関する研究，その 5 実験結果 ($l/D=14$ の場合)，日本建築学会九州支部研究会，第 57 号，pp.629-632，2018.3.
- 10) 日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針・同解説，2008.10.

(Received August 30, 2019)

STRENGTH DETERIORATION OF SLENDER SQUARE CFT COLUMNS
($D/t=17$ specimens) SUBJECTED TO CYCLIC LATERAL LOADING
UNDER CONSTANT LOTATIONANGLE

Daijiro FUJIOKA, Masae KIDO, Kota JYOZAKI and Keigo TSUDA

Currently, there is a concern about the impact of a Nankai Trough mega earthquake on high-rise buildings with long natural periods and establishing a safety verification method for CFT columns is necessary when the CFT columns are subjected to horizontal force repeatedly. From this background, the authors have carried out bending shear experiments of square CFT columns by varying the axial force ratio and amplitude of the rotation angle as the test parameters. However the value of the steel pipe width-to-thickness ratio was limited to one. The effect of the width-thickness ratio should be considered when the safety verification method for CFT columns is developed.

The purpose of this study is to clarify the structural behavior of a square CFT slender column (width / thickness ratio $D/t = 17$) subjected to the cyclic loading with constant rotation angle under the constant axial force. Bending shear experiments were carried out taking the axial force ratio, displacement amplitude, and whether concrete was filled or not as experimental parameters.

The experimental results are shown and compared with the results obtained by the previous study ($D/t = 25$) and the effects of the width-thickness ratio on the strength deterioration behavior is clarified. In addition, the relationship between the multi-cycle performance and the centroidal axis strain behavior was discussed.