

(7) 一定軸力下において多数回繰返し载荷を受ける 円形 CFT 長柱の曲げせん断実験

西村 拓真¹・阿部 真士²・城戸 将江³

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: d2mbb013@eng.kitakyu-u.ac.jp

²大旗連合建築設計株式会社 (〒730-0051 広島県広島市中区大手町 3-8-24)
E-mail: s_abe@oohata-arch.co.jp

³正会員 北九州市立大学教授 国際環境工学部建築デザイン学科 (〒808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの 1-1)
E-mail: kido-m@kitakyu-u.ac.jp

本研究では、変位振幅が一定または変動する繰返し荷重を受ける座屈長さ・断面せい比 $l_k/D=14$ 、径厚比 $D/t=45$ の円形 CFT 柱の構造性能を明らかにすることを目的とし、曲げせん断実験を行った。実験パラメータは、载荷プログラム(一定変位振幅、変動変位振幅)、軸力比、振幅ならびに振幅の組合せである。基本的な構造性能として水平力-部材角関係を示し、耐力劣化挙動と実験変数の関係について考察した。その結果、以下のことが分かった。同じ軸力比、振幅の場合、径厚比が大きい試験体の方が耐力が低下していた。また、一定変位振幅繰返し载荷において変位反転点における水平荷重が、最大荷重の 95%、90%、85%、80%に低下した時のサイクル数を限界繰返し回数と定義し、各試験体の限界繰返し回数を示し、軸力比、振幅の影響を示した。

Key Words: *Cyclic behavior, Long-period ground motion, Fatigue, Slender column*

1. はじめに

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への影響が懸念され、長周期地震動による建物の安全性検証方法の確立が望まれてきた。このことから角形CFT柱を対象とした実験的研究が多数実施されてきた^{例えば1)~6)}。一定軸力あるいは変動軸力下で一定変位振幅繰返し载荷を受ける曲げせん断実験が、座屈長さ・断面せい比、鋼管厚比、軸力比、変位振幅(部材角)、材料強度を実験変数として行われ、これらが角形CFT柱の耐力劣化挙動に及ぼす影響について考察がなされている。その結果、軸力比が大きいほど、座屈長さ・断面せい比が小さいほど、繰返しによる耐力劣化が大きいこと、変位振幅が大きくなるほど耐力劣化が大きいことなどが示されている。また、最大荷重の 95%、90%、85%、80%に荷重が低下したときのサイクル数として定義した限界繰返し回数と実験変数との関係を示しており、軸力比が大きくなるにつれ限界繰返し回数が小さくなること、同じ部材角の場合、座屈長さ・断面せい比が大きい方が、鋼管厚比が小さく鋼管降伏応力度が大きい方が限界繰返し回数が大きいことなどが示されて

いる⁵⁾。その後、変動変位振幅繰返し载荷も実施され、耐力劣化性状が示されている⁷⁾⁸⁾。これらの繰返し実験結果に基づき、一定軸力下における限界繰返し回数の評価式が提案されている⁹⁾。

円形CFT柱についても、一定軸力のもと一定変位振幅および変動変位振幅繰返し载荷を受ける柱の曲げせん断実験が、軸力比、変位振幅を実験変数として行われ、耐力劣化挙動が示されている^{10)~12)}。しかしながら、径厚比 D/t は 37 の 1 種類のみと限定されていた。径厚比は耐力劣化挙動に影響を及ぼす因子の一つであり、径厚比が耐力劣化に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

本研究は、既往の研究^{10)~12)}よりも径厚比が大きい $D/t=45$ で、座屈長さ・断面せい比 $l_k/D=14$ の円形 CFT 柱が、一定軸力下で一定あるいは変動変位振幅繰返し水平力を受ける場合の耐力劣化挙動とサイクル数の関係に及ぼす、軸力比および部材角の影響について示すことを目的とし、曲げせん断実験を行ったものである。また、一定変位振幅繰返し载荷における限界繰返し回数を示し、軸力比、部材角の影響を示す。さらに、既往の研究で示された $D/t=37$ の場合^{10),11)}との比較を行い耐力劣化挙動に及ぼす径厚比の影響を示す。

表-3 引張試験結果

降伏応力度 $\sigma_s(N/mm^2)$	引張強さ $\sigma_t(N/mm^2)$	降伏比 (%)	破断伸び $EL(\%)$	降伏ひずみ $\epsilon_s(\%)$
330	451	73.2	38.2	0.161

表-4 コンクリート調合表

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)
37.8	450	170	845	886	6.30

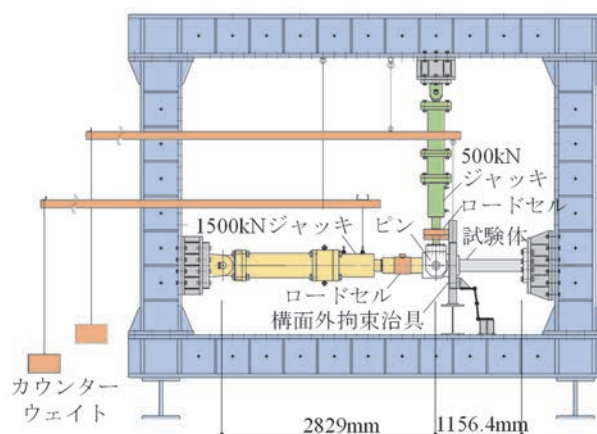


図-8 加力装置

表-5 実験結果

No.	試験体名	繰返し回数	Q_{max}, Q_{min} (kN)	M_{pc} ($kN \cdot m$)	M_{max} ($kN \cdot m$)
1	LD14n30R1	150	正 320	524	43.6
			負 -330		-44.8
2	LD14n30R15	150	正 364	527	52.1
			負 -37.1		-52.8
3	LD14n30R24	85	正 38.1	522	57.7
			負 -39.3		-56.0
4	LD14n45R1	150	正 31.5	542	47.2
			負 -34.7		-50.8
5	LD14n60R1	60	正 294	450	46.9
			負 -302		-48.1
6	LD14n30Rv1	150	正 32.9	53.7	32.7
			負 -33.0		-32.8
7	LD14n30Rv2	150	正 33.1	53.1	33.0
			負 -31.9		-31.9
8	LD14n30-M	-	35.1	51.9	61.8

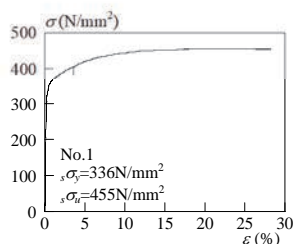


図-4 鋼管の
応力-ひずみ関係

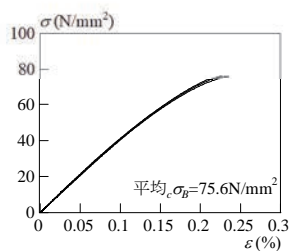
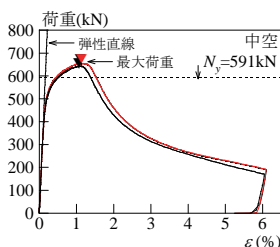
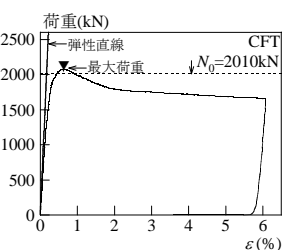


図-5 コンクリートの
応力-ひずみ関係

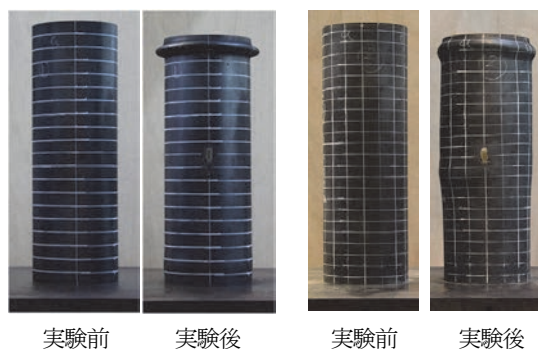


(a) 中空



(b) CFT

図-6 短柱圧縮試験結果



(a) 中空

(b) CFT

図-7 短柱圧縮試験実験前後の写真

(4) 実験方法

図-8に加力装置を示す。荷重装置の都合により、柱材軸が水平位置となるように試験体を設置した。図に示すように、水平方向に軸力荷重の1500kNの油圧ジャッキを、鉛直方向に水平力荷重の500kNの油圧ジャッキを取り付け、ロードセルにて荷重の測定を行った。荷重は、まず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、構面外変位拘束治具を設けている。

変位の測定は、柱頭ピン位置で水平変位を測定する水

平変位計2台と試験体の伸びあるいは縮みを測定する軸方向変位計2台で行った。変位の制御は、2台の変位計で測定した水平変位の平均値で行った。また、円周の4等分点にひずみゲージを貼布しひずみを測定した。

3. 実験結果

(1) 実験結果概要

表-5に実験より得られた最大(最小)荷重 $Q_{max}(Q_{min})$ 、柱脚の最大(最小)曲げモーメント $M_{max}(M_{min})$ 、全塑性モーメントの計算値 M_{pc} を、図-9に水平力 Q -部材角 R 関係を示す。図-9(a)~(c), (f), (g)中に単調荷重の結果を第一象限に示している。図中△印は最大荷重の位置を、右下の四角で囲まれた数値は繰返し回数を示している。図より、すべての試験体において荷重が低下していることが観察される。

同一軸力比において、振幅の違いについてみると、振幅 $R=1\%$ 試験体(図(a))と $R=1.5\%$ 試験体(図(b))を比較すると繰返し回数は同じであるが、 $R=1.5\%$ のほうが耐力低下が大きい。これらは、変位反転点の耐力が最大耐力となっていたが、振幅 $R=2.4\%$ 試験体(図(c))

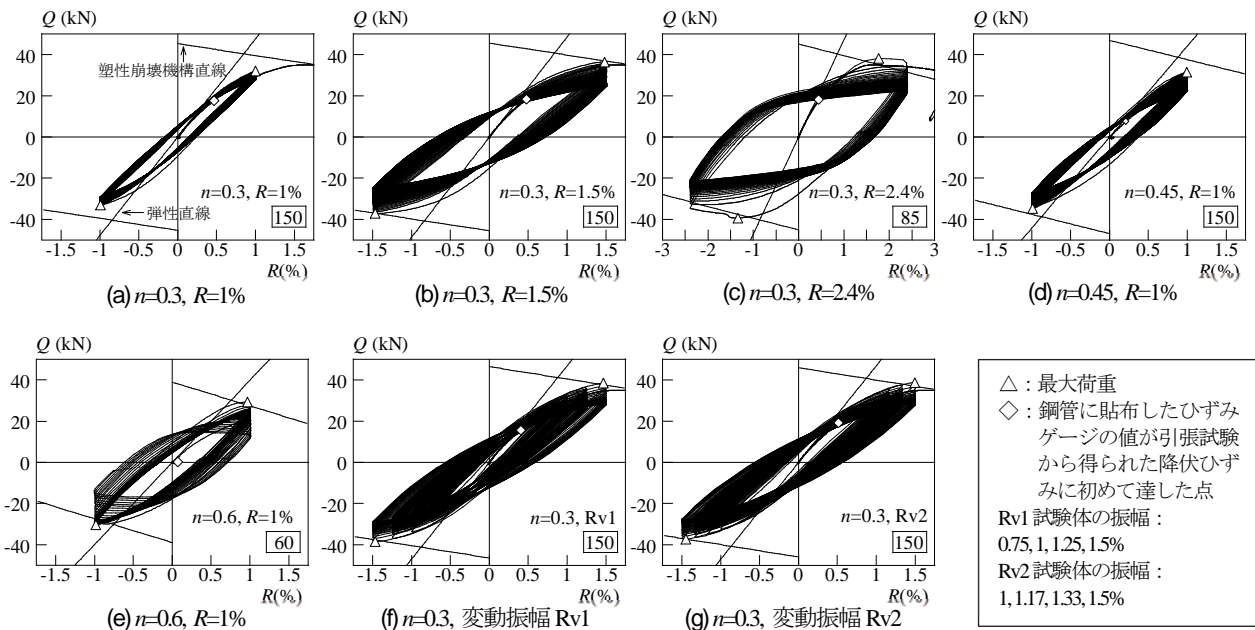


図-9 水平力 Q - 部材角 R 関係

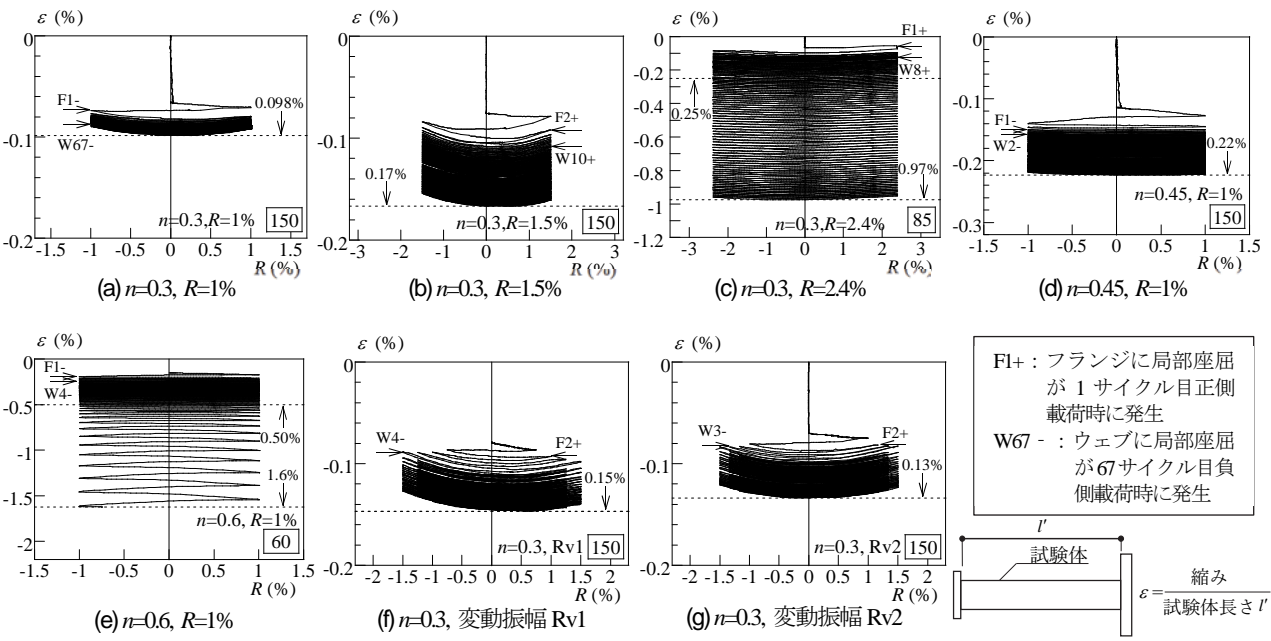


図-10 軸ひずみ ε - 部材角 R 関係

では、正側、負側共に変位反転点に向かう途中で最大荷重が観察された。また、 $R=2.4\%$ 試験体の繰返し回数は85サイクルで $R=1\%$ 、 1.5% と比較して少ないが、耐力は最大荷重の50~60%程度まで低下していることが分かる。

また、変動変位振幅の場合(図(f), (g))を比較すると、いずれも同様の履歴を示していることが分かる。

次に、同一振幅で軸力比の違いについてみると $n=0.6$ 試験体(図-9(e))は繰返し回数が60回と他の試験体より少ないにもかかわらず、 $n=0.3$ 試験体(図-9(a))、 $n=0.45$ 試験体(図-9(d))より耐力が低下しており、軸力比が高くなるにつれて荷重の低下が大きくなることが分かる。このように部材角、軸力比が大きいほど、繰返しによる耐力低下が大きくなる。

(2) 軸ひずみ ε - 部材角 R 関係

図-10に軸ひずみ-部材角関係を示す。軸ひずみは、実験時に変位計により計測した軸縮み量を試験体のベースプレート上端からエンドプレート下端までの距離で除して求めた(図中模式図参照)。図によれば、一定変位振幅において、軸ひずみは $n=0.3$ の場合、 $R=1\%$ 、 1.5% 、 2.4% に対しそれぞれ最大で0.098%、0.17%、0.97%となっていた。 $n=0.45$ 、 $R=1\%$ では0.22%、 $n=0.6$ 、 $R=1\%$ では1.6%となっていた。軸力比が0.45以下の場合にはひずみの累積はそれほど大きくないが、 $n=0.6$ 試験体では、ひずみが0.50%辺りを超えると、各サイクルにおけるひずみ量が急激に大きくなっていくことが観察される。また、変動変位振幅の場合、軸ひずみの最大値はそれぞれ

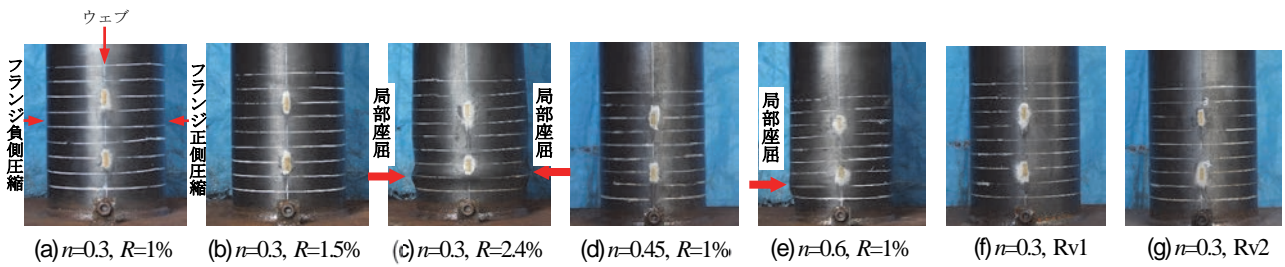


図-11 実験後の試験体柱脚の様子（ウェブ）

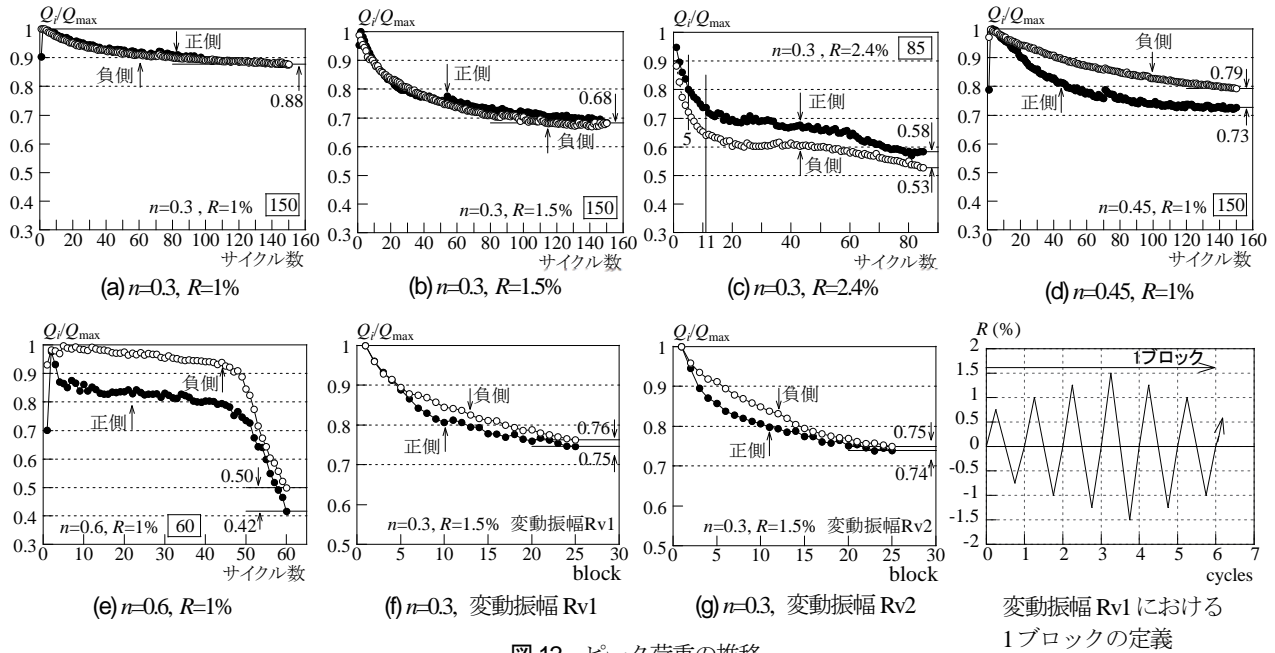


図-12 ピーク荷重の推移

0.15%, 0.13%で変位振幅の組合せの違いは見られず、また、一定変位振幅試験体 $R=1.5\%$ の場合 ($\varepsilon=0.17\%$) と比較すると小さくなっていた。

図-10 中に、目視により局部座屈発生が確認されたときのサイクル数を矢印で示している。本研究では、加力したときに圧縮（引張）となる面（図-3において上下）をフランジ、側面をウェブとし、図中のFはフランジ、Wはウェブに局部座屈が発生したことを表している。また数字は局部座屈発生時のサイクル数で、+は正側、-は負側を表す。フランジ面については、いずれの試験体も1サイクル目あるいは2サイクル目と早期に発生しているが、ウェブ面については、一定変位振幅においては $n=0.3$, $R=1\%$, 1.5% , 2.4% はそれぞれ67サイクル、10サイクル、8サイクル目で、フランジ面と比較して部材角の違いによる影響が大きいことが分かる。

図-11 に実験後の柱脚部ウェブ面の写真を示す。図-11(a)中に示すように、写真右側、左側はそれぞれ、正側加力、負側加力で圧縮となる時のフランジ面である。全ての試験体で局部座屈が発生したが、 $n=0.3$, $R=1\%$, 1.5% （一定・変動変位振幅）、 $n=0.45$ 試験体では局部座屈変形は小さく目立たない。一方で $n=0.3$, $R=2.4\%$, $n=0.6$ 試験体では、フランジ面に大きな局部座屈変形が

確認できる（図中赤い太い矢印で指し示している）。また、鋼管が大きく膨らんでいる様子も観察される。

(3) 耐力劣化挙動

a) ピーク荷重の推移

図-12(a)~(e)に一定変位振幅繰返し载荷における耐力低下（変位反転点における i サイクル時の水平力 Q_i ）の推移を示す。 Q_i は水平力の最大値 Q_{max} （最小値 Q_{min} ）で無次元化している。いずれの試験体も荷重が低下していることが観察される。まず、部材角の違いについて考察する。振幅 $R=1\%$ 試験体（図(a)）では、150サイクル繰返し時に最大耐力の約88%までしか低下しなかったのに対し、 $R=1.5\%$ 試験体（図(b)）では、最大耐力の約68%程度まで荷重が低下していることがわかる。 $R=2.4\%$ 試験体（図(c)）は、初期の荷重の低下が $R=1\%$, 1.5% の試験体と比較して顕著であり、正側で5サイクル目には最大耐力の80%まで荷重が低下している。しかし、11サイクルを超えるあたりから荷重の低下は緩やかになり、28~35サイクルのように荷重がほぼ一定の区間も見られる。またその後さらに荷重は低下しているが最初の数サイクルと比較すると緩やかであった。

また、軸力比の違いについて考察すると、 $n=0.45$ 試験

表-6 限界繰返し回数

No.	試験体名		$N_{95\%}$	$N_{90\%}$	$N_{85\%}$	$N_{80\%}$
1	LD14n30R1	正	24	86	150+※ ¹	150+※ ¹
		負	20	80	150+※ ¹	150+※ ¹
2	LD14n30R15	正	5	9	15	25
		負	3	9	16	31
3	LD14n30R24	正	※ ²	1	3	5
		負	※ ³	※ ³	1	2
4	LD14n45R1	正	12	20	30	47
		負	18	42	79	140
5	LD14n60R1	正	2	3	8	38
		負	33	48	49	51

※¹試験体 No.1 は荷重が低下する前に 150 サイクルで試験を終了したことを示す。
 ※²試験体 No.3 の正側において最大荷重は変位反転点ではなく、変位反転点に向かう途中で発生していたため $N_{95\%}$ が存在しない。
 ※³試験体 No.3 の負側において、最大荷重は変位反転点ではなく、変位反転点に向かう途中で発生し 1 サイクル目に最大荷重の 88% まで低下したため、 $N_{95\%}$ 、 $N_{90\%}$ が存在しない。

表-7 限界ブロック数

No.	試験体名	振幅 (%)		$B_{95\%}$	$B_{90\%}$	$B_{85\%}$	$B_{80\%}$
6	LD14n30Rv1	1.25	正	2	4	7	10
			負	1	3	7	12
		1.5	正	3	5	7	13
			負	3	5	10	18
7	LD14n30Rv2	1.33	正	2	3	5	10
			負	2	4	9	13
		1.5	正	2	3	6	11
			負	3	6	10	15

体 (図(d)) は試験開始時から荷重が低下し続け、正側は 73%、負側は 79% まで低下した。 $n=0.6$ 試験体 (図(e)) は、48 サイクル以降はそれ以前と比較して荷重の低下が激しいことが分かる。

図-12(f), (g) に変動変位振幅繰返し载荷における耐力低下の推移を示す。図-2 の载荷プログラムで示したように、変位振幅は 4 段階に設定しているが、最大振幅のみを示している。横軸はブロック数 (1 ブロックの定義は図-2 および図-12 中模式図参照) としている。図によれば、一定変位振幅試験体と同様に、荷重が徐々に低下する傾向がみられたが、振幅の違いによる影響は見られず、最終サイクル時に最大耐力の 74~76% まで荷重が低下していた。また、1 ブロックは 6 サイクルであるから、25 ブロック目の $R=1.5\%$ 時のサイクル数は 148 サイクルである。ここで、変動変位振幅試験体の最大振幅 $R=1.5\%$ を振幅とした、 $n=0.3$ 、 $R=1.5\%$ の一定変位振幅試験体にお

ける 148 サイクル時と比較してみると、一定変位振幅繰返し载荷のほうが、耐力が低下していることが分かる。

b) 限界繰返し回数

一定変位振幅繰返し载荷において変位反転点における水平荷重が、最大荷重の 95%、90%、85%、80% に低下した時のサイクル数を限界繰返し回数と呼び、 $N_{95\%}$ 、 $N_{90\%}$ 、 $N_{85\%}$ 、 $N_{80\%}$ と表す。表-6 に限界繰返し回数を示す。また、変動変位振幅繰返し载荷においては、正側、負側の各振幅における最大荷重の絶対値がそれぞれ 95%、90%、85%、80% に低下した時のブロック数を限界ブロック数と呼び、 $B_{95\%}$ 、 $B_{90\%}$ 、 $B_{85\%}$ 、 $B_{80\%}$ と表す。表-7 に、実験で得られた最大振幅と 2 番目に大きな振幅における限界ブロック数を示す。表-6 によれば、軸力が一定の場合は部材角が大きくなるにつれ限界繰返し回数は少なくなる。部材角が一定の場合は、正側と負側の限界繰返し回数の小さいほうを見ると、軸力比が大きくなるにつれ限界繰返し回数は少なくなる。

また、変動変位繰返し载荷の場合は、変位振幅の組合せによらず限界ブロック数はほぼ同じで、また、1 ブロック内の最大振幅と 2 番目に大きな振幅における限界ブロック数もおおむね同様の値となっていた。

(4) 耐力劣化挙動に及ぼす径厚比の影響

図-13 に本研究と同じ実験変数 (軸力比、振幅)、断面径であり径厚比 D/t が 37 の試験体で行った実験結果^{10),11)} との比較を示す。黒色の●印、○印はそれぞれ本研究の正側、負側、赤色の●印、○印はそれぞれ既往の研究の正側、負側を示している。

図より全ての試験体において繰返し回数が増えるにつれて $D/t=45$ の試験体の耐力がより低下していることが観察される。また、 $n=0.3$ のとき $D/t=37$ と $D/t=45$ 試験体の Q/Q_{max} の差はそれほど大きくないが、 $n=0.45$ 、 $n=0.6$ の場合は差が大きくなっていることが観察される。すなわち、繰返し回数の増加に伴い、軸力比が大きくなるにつれ、径厚比が大きい試験体の方がより耐力が低下しており、軸力比が大きい方が径厚比の違いによる耐力劣化挙動に及ぼす影響が大きくなる事が分かる。

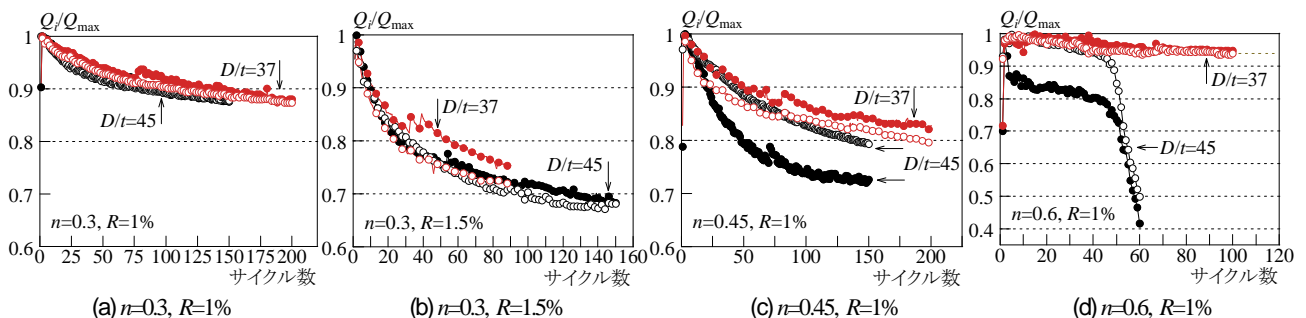


図-13 ピーク荷重の推移 (径厚比の影響)

4. まとめ

一定軸力下で一定あるいは変動変位振幅繰返し水平力を受ける座屈長さ・断面せい比 $l/D=14$ の円形 CFT 柱の曲げせん断実験を、軸力比および部材角を実験変数として行い、耐力劣化挙動に及ぼす軸力比および部材角の影響について示した。また、最大荷重の 95%、90%、85%、80% に荷重が低下したときのサイクル数として定義されている限界繰返し回数を示した。さらに、既往の径厚比 $D/t=37$ の実験結果^{10),11)} と比較を行い耐力劣化挙動に及ぼす径厚比の影響を示した。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 部材角が大きいくほど、軸力比が大きいくほど、繰返しによる耐力低下が大きくなる。
- 2) 部材角が大きくなるにつれ、軸力比が大きくなるにつれ限界繰返し回数は少なくなる。
- 3) 繰返し回数の増加に伴い、軸力比が大きくなるにつれ、径厚比が大きい試験体の方がより耐力が低下し、径厚比が及ぼす耐力劣化挙動に対する影響は、軸力比が 0.45 以上の比較的高い範囲において顕著であった。

謝辞：本研究は科研費（課題番号 19K04715）の助成を受けたものである。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) 建築研究所：長周期地震動に対する超高層鉄骨造建築物の耐震安全性に関する検討，建築研究所資料 No.160, 2014.
- 2) 成原弘之ほか：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 27-31，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），構造 III, pp.1251-1260, 2014.
- 3) 城戸將江，福元敏之，津田恵吾，一戸康生，森田耕次：委員会報告 長周期地震動に対する CFT 柱部材の保有性能に関する研究，鋼構造論文集，Vol.24, No.94, 2017.
- 4) 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荷重を受ける角形 CFT 柱の耐力劣化性状，日本建築学会構造系論文集，Vol.84, No.759, pp.725-735, 2019.
- 5) 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荷重を受ける角形 CFT 柱の限界繰返し回数，日本建築学会構造系論文集，Vol.85, No.773, pp.981-991, 2020.
- 6) 長谷川隆，福元敏之，澤本佳和，黒川泰嗣，上瀧敬太，鈴木芳隆，安本宏，城戸將江，森田高市，岩田善裕，三木徳人：長周期地震動に対する超高層鉄骨造建築物の耐震安全性検証方法に関する検討，建築研究資料，No.206, 2023.
- 7) 薄拓己，城戸將江，久島俊也，長谷川隆：変動変位振幅を受ける角形 CFT 柱の構造性能に関する研究 その1 実験概要および水平力一部材角関係，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），構造 III, pp.1275-1276, 2022.
- 8) 久島俊也，城戸將江，薄拓己，長谷川隆：変動変位振幅を受ける角形 CFT 柱の構造性能に関する研究 その2 耐力劣化挙動，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），構造 III, pp.1277-1278, 2022.
- 9) 福元敏之，森田耕次，津田恵吾，城戸將江，一戸康生：定変位振幅繰返し荷重に於けるコンクリート充填角形鋼管柱の繰返し特性，鋼構造論文集，Vol.28, No.110, pp.73-82, 2021.
- 10) 城崎康太，城戸將江，津田恵吾，宇津宮遥奈，藤岡大二郎：一定変位振幅繰返し荷重を受ける円形 CFT 長柱の耐力劣化性状に関する研究 その 1，その 2，日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），構造 III, pp.1433-1436, 2018.
- 11) 崔剛，城戸將江，藤岡大二郎，城崎康太，津田恵吾：一定変位振幅繰返し荷重を受ける円形 CFT 長柱の耐力劣化性状に関する研究 その 3 実験結果—多数回繰返し特性 ($l/D=14$ の場合)，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），構造 III, pp.1341-1342, 2019.
- 12) 久島俊也，城戸將江，阿部真士：多数回繰返し荷重を受ける円形 CFT 柱の曲げせん断実験，第 14 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム，pp.41-1-41-8, 2021.

(Received August 25, 2023)

STUDY ON FLEXURAL AND SHEAR BEHAVIOR OF SLENDER CIRCULAR CFT COLUMNS UNDER CONSTANT AXIAL FORCE

Takuma NISHIMURA, Shinji ABE and Masae KIDO

The objective of this study was to clarify the cyclic behavior of circular concrete-filled steel tube (CFT) beam-columns subjected to lateral loads with constant or varying cyclic displacement under constant axial load. The test parameters included loading program, axial compression ratio, and rotation angle amplitude. The diameter-thickness ratio was 45. The relationship between the lateral load and the rotation angle is indicated along with the load deterioration behavior. The load deterioration behavior is examined and compared with the results of the previous study with diameter-thickness ratio 37 specimens. The results of this study indicate that the strength deterioration increased as the value of the diameter-thickness ratio increased. The limit cycle was defined as the number of cycles that the lateral load at the peak rotation angle decreases to 95%, 90%, 85%, and 80% of the maximum load, and the limit cycles of each specimen were shown.