

(32) 高強度鋼材を用いた角形CFT長柱の曲げせん断 実験

城戸 将江¹・郝 乙鑫²

¹正会員 北九州市立大学准教授 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

²正会員 北九州市立大学大学院 大学院生 (〒808-0135 福岡県北九州市若松区ひびきの 1-1)

E-mail: w5mbb007@eng.kitakyu-u.ac.jp

本研究の目的は、建築構造用高強度鋼材H-SA700を用いたコンクリート充填角形鋼管長柱が、一定軸力のもと一定振幅載荷を受ける場合の挙動を示すことである。試験体は1体で振幅は2%とし繰り返し回数100回を限度として載荷を行ったが、荷重の低下はほとんど見られなかった。しかし、軸縮み現象は観察された。また、既往の一定振幅繰り返し載荷を受けるCFT柱の文献調査を行い、鋼材強度以外の実験変数が近い試験体が最大耐力の90%に低下したときの繰り返し回数を比較した。

Key Words : long-period, steel concrete composite structure, H-SA700, high-strength material, axial shortening

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。超高層建築物にはCFT柱が使われることが多い。

これまでに、“長周期地震動に対する鉄骨造超高層建築物の安全検証方法の検討”として、一連の研究がおこなわれており、H22年度の全体研究計画が文献1)に示されている。H26年度までに数多くの研究成果が報告されており、柱部材に関する研究もおこなわれている。文献2)~5)では中空鋼管柱を対象に多数回繰り返し実験が、柱長さ、軸力比、変位振幅をパラメータとしておこなわれている。最大荷重到達後、その荷重が90%に低下したときの繰り返し回数と変位振幅の関係を示している。また、文献6)~10)では、490N級鋼材、Fc60コンクリートを用いた試験体と590N級鋼材、Fc100コンクリートを用いた試験体に関する一定あるいは変動軸力比を受ける実験が行われている。実験変数は、柱長さ、軸力比、振幅、幅厚比であり、最大荷重からの低下率と繰り返し回数の関係を示している。このように長周期地震動を受けるCFT柱の実験はすでにいくつか行われている。

一方、文献11)では長時間多数回繰り返し水平力を受けるCFT柱の疲労特性に関する研究がおこなわれている。

そこでは、既往の研究成果に基づき、単調載荷の限界部材角に対する部材角の比、幅厚比、一般化幅厚比、軸力比、コンクリート圧縮強度、座屈長さ比の影響を考慮した限界繰り返し回数評価式を提示している。文献10)では、疲労性能評価ひずみという指標を用い、疲労特性に関する評価方法が示されている。しかしながら、CFT柱材が長時間多数回繰り返しを受ける場合の設計法が確立されている状況とは言えない。

一方、著者らは建築構造用高強度鋼材H-SA700を用いたCFT長柱の損傷限界を明らかにする目的で一定軸力のもと正負漸増繰り返し載荷を受ける実験を、コンクリート充填の有無、軸力比をパラメータとして行い、荷重—変形関係および軸縮みに及ぼす各パラメータの影響について示している^{12), 13)}。また、H-SA700鋼材を用いたCFT実験が、断面形状と鋼材の種類を実験変数として行われ、曲げ変形挙動と終局状態の検証が行われている^{14), 15)}。

しかしながら、高強度鋼材を用いたCFT柱が、長周期地震動を想定した長時間多数回繰り返し受ける場合の実験的研究はほとんどない。

本研究は、一定軸力を受ける、鋼管に高強度鋼材を用いた角形CFT長柱が、一定振幅で繰り返し載荷を受ける際の挙動を明らかにすることを目的としている。本報は、パイロット試験の報告である。

2. 実験概要

(1) 実験計画

高強度鋼材を用いた角形CFT柱が、一定軸力 N のもと繰返し水平力 Q を受ける場合の挙動を調べるために、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。実験変数は以下のとおりである。

1) 鋼材種別：STKR400, H-SA700

2) 荷重プログラム：漸増繰返し、一定振幅繰返し

一定振幅試験体は、部材角 R ($=\delta/L$, δ : 柱頭の水平変位) を0.25%を1サイクル行い、その後は $R=2\%$ にて繰返し荷重を100回を限度として行った。漸増繰返し荷重では、柱の部材角 R を、約0.31%を初期値とし0.31%刻みで増加させ、各変位振幅で2回ずつ正負交番の繰返し水平力の荷重を行った（0.31%の値は本来0.25%とする予定であったが、諸般の事情でこのようになった）。

荷重プログラムを図2に示す。表1に試験体一覧を示す。軸力比はいずれも0.3である。

試験体の形状および寸法を図3に示す。鋼管は□-125×125×6のSTKR400の角形鋼管とH-SA700の板厚 $t=6\text{mm}$ の鋼板をコの字に曲げ、それらを溶接して角形とした断面のものを使用した。幅厚比は20.8、一般化幅厚比

($=D/t\sqrt{F/E}$, D は断面せい, t は板厚, F は基準強度, E はヤング係数) は、H-SA700鋼材は F 値が定められていないが、 $E=205000\text{N/mm}^2$, $F=700\text{N/mm}^2$ として算定すると約1.2である。鋼管の上側には、厚さ25mmのエンドプレートを溶接した。また、試験体下部にはスタブを設け、スタブと鋼管は隅肉溶接で溶接した。図(d), 図(e)に溶接詳細と写真を示す。スタブは上フランジの上下と下フランジの上側と溶接している。余熱は行っていない。試験体の長さ L は、スタブ上面からピン位置まで1025mmで、座屈長さ・断面せい比は16.4となり、コンクリート充填鋼管設計施工指針¹⁰⁾における区分では、長柱に対応する。

(2) 材料特性

材料特性を調べるため、引張試験、コンクリート圧縮試験と短柱圧縮試験を行った。

a) 鋼材

引張試験はSTKR400は鋼管より切り出したJIS5号試験片により、H-SA700は板材より切り出したJIS5号試験片により3片ずつ行った。引張試験の結果を表2に、引張試験片による代表的な応力-ひずみ関係を図4に示す。またH-SA700試験片については、0.2%オフセット法により耐力を求めた。

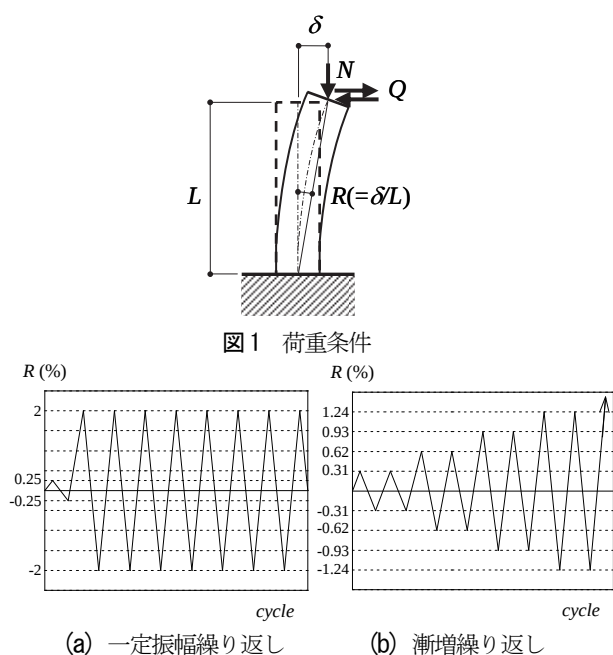


図2 荷重プログラム

表1 試験体一覧 (実験パラメータ)

試験体名称	材質	荷重プログラム	軸力 (kN)	コンクリート圧縮強度 σ_B (N/mm ²)
STKR-L-03C	STKR400	漸増	525	53.8
HSA-L-03C-LP	H-SA700	一定	782	55.8

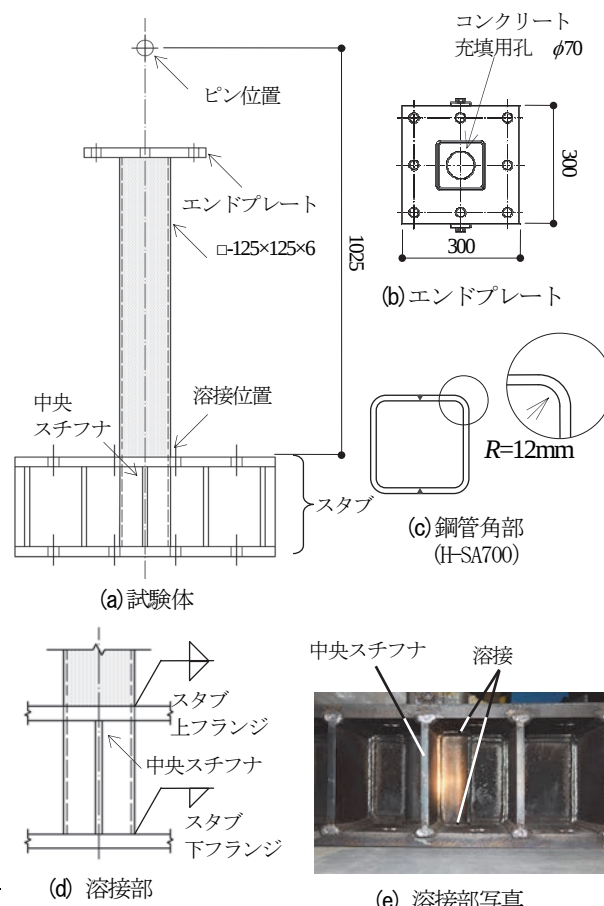


図3 試験体形状

b) コンクリート

実際に使用したコンクリートの調合を表3に示す。コンクリートの打設時期は分かれているが、いずれもコンクリートの呼び強度は54とした。コンクリート圧縮強度を表1に、代表的な応力-ひずみ関係を図5に示す。

c) 短柱圧縮試験

短柱圧縮試験は、中空鋼管とコンクリート充填角形鋼管についてそれぞれ行った。試験体の材長は断面せいの3倍とした。表4、5にそれぞれ中空およびCFT試験体の

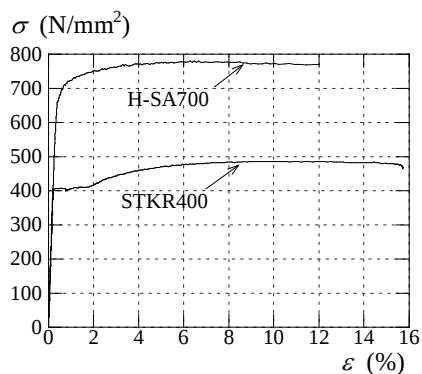


図4 鋼材の応力-ひずみ関係

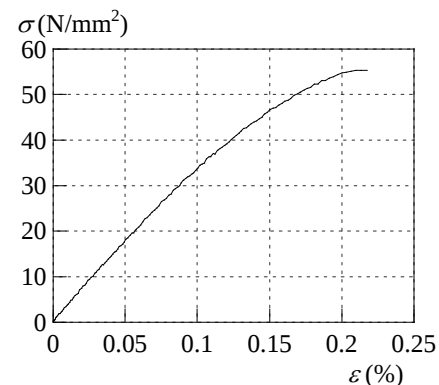


図5 コンクリートの応力-ひずみ関係

表2 引張試験結果

	E (N/mm ²)	降伏応力度 σ_y (N/mm ²)	最大応力度 σ_u (N/mm ²)	降伏比 (σ_y/σ_u)	ϵ_s (%)
STKR400	212909	393	479	0.82	0.186
H-SA700	205227	685	779	0.88	0.534

表3 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)	混和材 (kg/m ³)
35.8	475	170	850	886	6.89

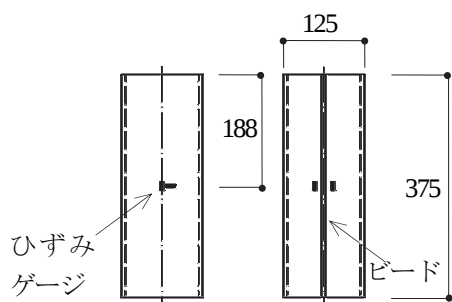


図6 短柱圧縮試験試験体 (H-SA700)

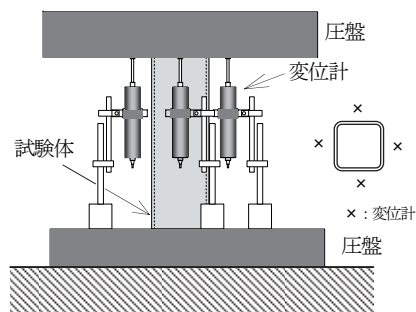


図7 短柱圧縮試験加力装置

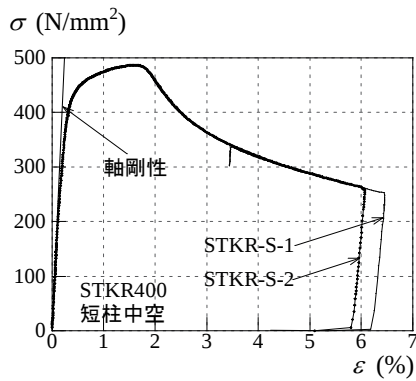
表4 短柱圧縮試験体一覧ならびに実測値 (中空試験体)

	試験体名称	材質	断面寸法 D (mm)	板厚 t (mm)	降伏応力度 σ_y (N/mm ²)	最大応力度 σ_u (N/mm ²)	最大荷重時のひずみ (%)
1	STKR-S-1	STKR400	124.9	5.76	434	488	1.63
2	STKR-S-2		124.9	5.77	435	487	1.64
3	H-SA-S-1*	H-SA700	125.5	6.22	734	805	1.03
4	H-SA-S-2		125.9	6.20	741	795	1.11
5	H-SA-S-3		126.1	6.25	741	791	0.99

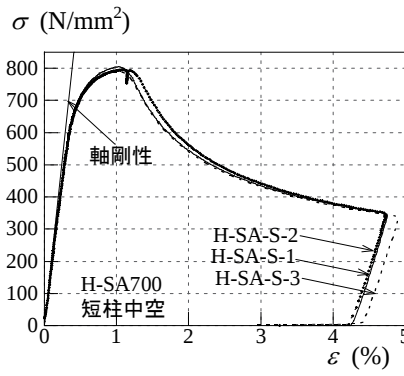
*H-SA-S-1のみ1か所の角部が $R=7\text{mm}$ である。

表5 短柱圧縮試験体一覧ならびに実測値 (充填試験体)

	試験体名称	材質	断面寸法 D (mm)	板厚 t (mm)	コンクリート 圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	最大荷重 (kN)	最大荷重時のひずみ (%)
1	STKR-C-1	STKR400	124.9	5.77	52.1	1853	0.47
2	H-SA-C-2	H-SA700	126.0	6.23	52.1	2999	0.97

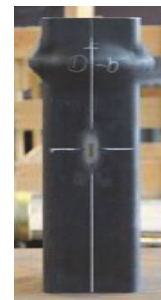


(a) STKR400



(b) H-SA700

図8 短柱圧縮試験結果（中空鋼管）

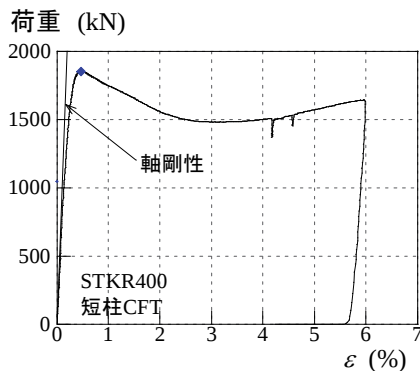


(a) STKR400

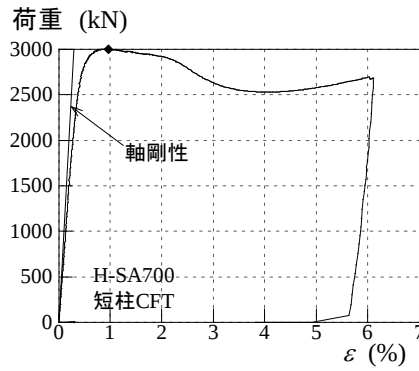


(b) H-SA700

図9 試験後写真（中空）



(a) STKR400



(b) H-SA700

図10 短柱圧縮試験結果（CFT）



(a) STKR400



(b) H-SA700

図11 試験後写真（充填）

実測寸法を、図6に試験体を示す。加力装置を図7に示す。また図に示すように4箇所に変位計を設置し、軸方向縮量を測定した。

表4に中空鋼管の短柱圧縮試験結果を、表5にCFTの短柱圧縮試験結果を示す。図8は中空鋼管短柱の応力－ひずみ関係である。図8の応力－ひずみ関係のひずみは、変位計により測定された軸方向縮量を加力前の試験体長さで除した値を用いている。図によれば、H-SA700試験体のほうがSTKR400試験体と比較して、最大耐力後の荷重低下が著しい。図9に試験後の写真を示しているが、座屈モードが異なっていることがわかる。

図10にCFT試験体の荷重－ひずみ関係を示す。図によればSTKR400試験体のほうが、最大荷重後の耐力低下が著しく、いずれの場合も荷重の再上昇がみられた。図11に試験後の写真を示す。

(3) 実験方法

載荷装置を図12に示す。鉛直方向に1500kNの油圧ジャッキを、水平方向に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う。水平変位は図12中のピン位置にて測定した。また、軸方向縮量も測定している。図13にH-SA700試験体の柱脚部のひずみゲージ貼り付け位置を示す。

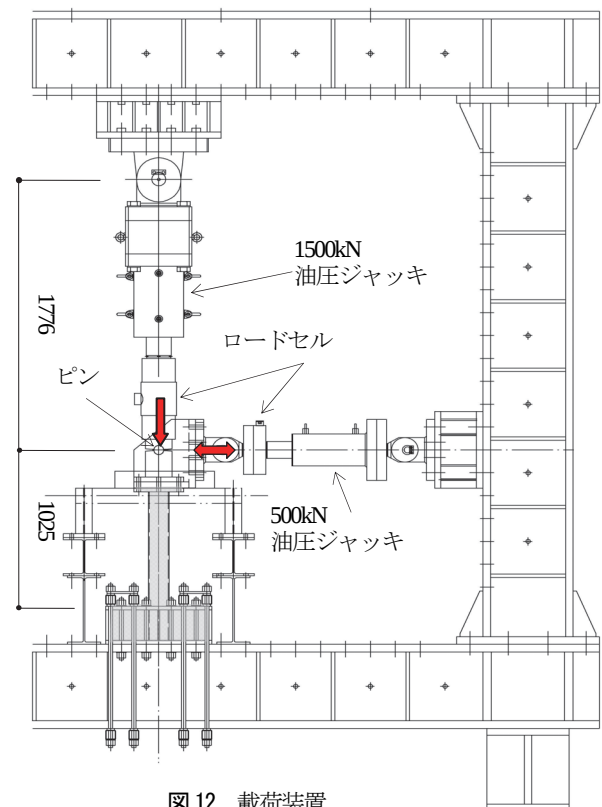


図12 載荷装置

3. 実験結果と考察

(1) 実験結果

実験より得られたせん断力 Q —部材角 R 関係を図14に示す。なお、ピン位置に生じる摩擦の影響は差し引いていない。図14(a)がSTKR400試験体、図14(b)がH-SA700試験体である。STKR試験体については、初期剛性はおおむね解析値と実験値は対応しており、最大耐力は、全塑性モーメントを超えていた。図中の◇が貼りつけたひずみゲージの値が、引張試験により得られた降伏ひずみの値に達したとき、■がフランジ面に局部座屈が発生が確認された箇所、◆がウェブ面に局部座屈が確認された箇所である。フランジ面に続きウェブ面に局部座屈が発生

し、部材角 $R=4.34\%$ 正側に向かう途中で急激に荷重が低下し実験を終了した。

H-SA700試験体については、ほとんど荷重の低下は見られなかった。数日にわたり実験を行ったため、38サイクル目に軸力ジャッキ先端のピン部分の潤滑油を追加した際に7.1%荷重が低下した。しかしその後の荷重低下は見られなかった。また、 $R=2\%$ 時には全塑性モーメントには到達していなかった。表6に、全塑性モーメントの計算値および実験結果を示している。

図15に軸縮み ε —部材角 R 関係を示す。軸縮みは、試験体柱脚ウェブ両面に貼り付けたひずみゲージ下段の中央2枚の平均値である。STKR試験体の場合は、部材角が大きくなるにつれ軸縮みが大きくなり、特に、軸縮みが0.2%を超えるあたりから急激に軸縮みが大きくなってい

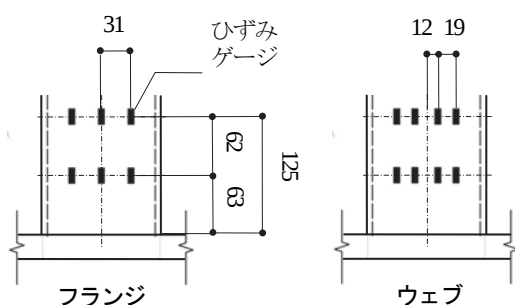


図13 ゲージ貼り付け位置 (柱脚 H-SA700)

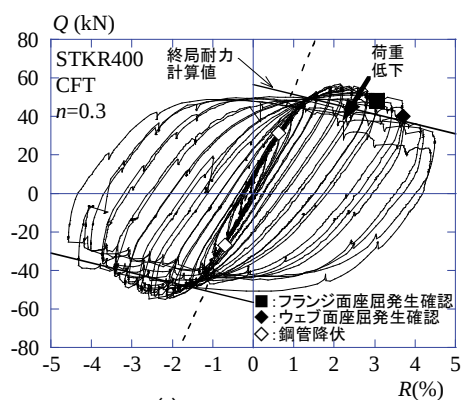
表6 実験結果

	試験体名	M_p (kN・m)	Q_p (kN)	Q_{max} (kN)
1	STKR-L-03C	56.6	53.9	56.8 (54.9)
2	HSA-L-03C-LP	93.5	91.2	62.6 (58.1)

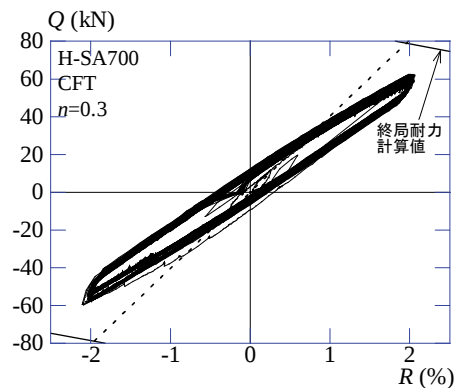
M_p : 全塑性モーメント (計算値)

Q_p : 軸力を考慮しない柱脚部が全塑性モーメントとなるときの水平力 ($=M_p/L$)

Q_{max} : 最大荷重 (表中かっこ内は負側)

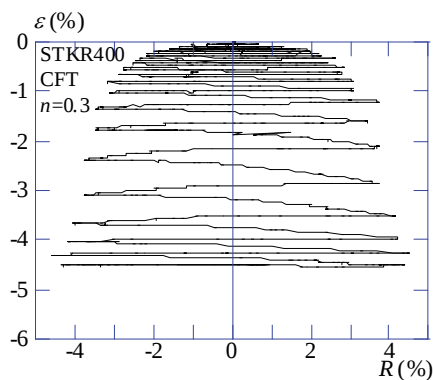


(a) STKR-L-03C

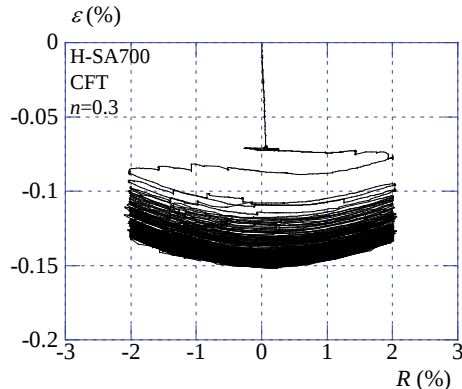


(b) HSA-L-03C-L

図14 せん断力 Q —部材角 R 関係図

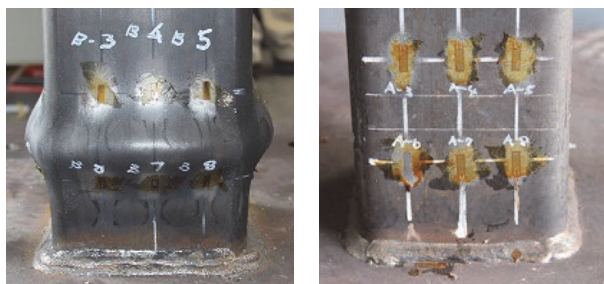


(a) STKR-L-03C



(b) HSA-L-03C-LP

図15 軸縮み ε —部材角 R 関係図



(a) STKR-L-03C

(b) HSA-L-03C-LP

図 16 柱脚部の損傷状況

た。一定振幅繰返し载荷の場合、サイクル数が増えるにしたがって、軸縮み量が増加する傾向が見られた。軸縮みの増加量はSTKR試験体と比較して小さいが、繰返し载荷を受ける過程で、充填コンクリートが損傷し軸縮みが増加したものと考えられる。

実験後試験体破壊状況を図16に示す。図によれば、STKR試験体は局部座屈が発生しているが、H-SA700試験体は局部座屈も発生しておらず損傷も見られなかった。

フランジ面の水平力 Q —ひずみ ε の関係を図17に示す。図によれば、ひずみは約0.4%以内であり、表2に示した0.2%オフセット耐力時のひずみ0.534%には達していなかった。

せん断力 Q とサイクル数との関係を図18(a)に示す。図によれば、潤滑油を追加した際に荷重が低下しているが、それ以降は荷重低下はほとんど見られない。また、軸縮みとサイクル数との関係を図18(b)に示す。軸縮みは、それぞれ正側ピーク時の値を示している。図によれば、10サイクルまでに軸ひずみが急激に大きくなり、その後の増加は緩やかになっていることがわかる。

(2) 既往の研究との比較

文献6)～9)では、一定軸力あるいは変動軸力を受ける長周期地震動を想定した一定振幅下でのCFT柱の構造実験が行われている。その中で、繰返し回数と耐力低下の関係が示されている。本節では報告で示した繰返し回数100回と、既往の研究の試験体パラメータとの関連を示すこととする。

CFT試験体に使用されている材料強度の組み合わせは、490N級鋼材とFc 60、590N級鋼材とFc100コンクリートである。試験体総数は、CFT柱25体、中空鋼管柱10体である。中空鋼管柱は文献2)～5)に示されたもので、それも含めて示す。

図19に試験体パラメータを示す。図によれば、幅厚比は、20のものが最も多く、一般化幅厚比は0.8～1.4程度に分布しており最も多いものが0.93程度である。また、軸力比は一定のものよりも変動軸力のほうが多い。座屈長さ・断面せい比は8のものが最も多く、最大の値は15であった。重要なパラメータである振幅については、

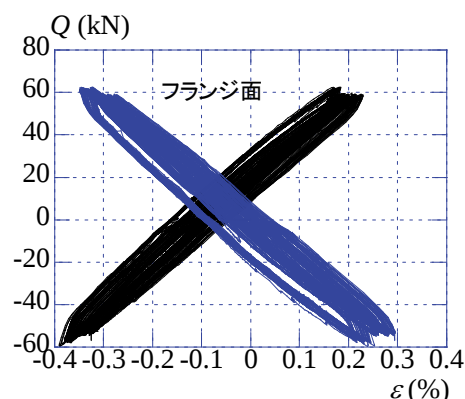
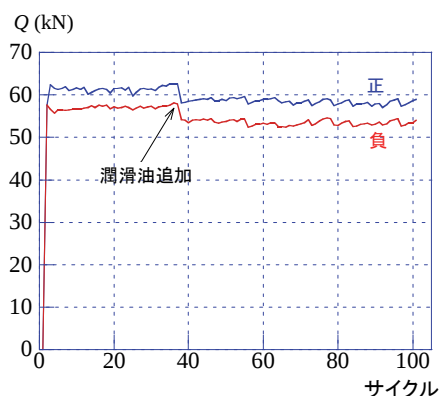
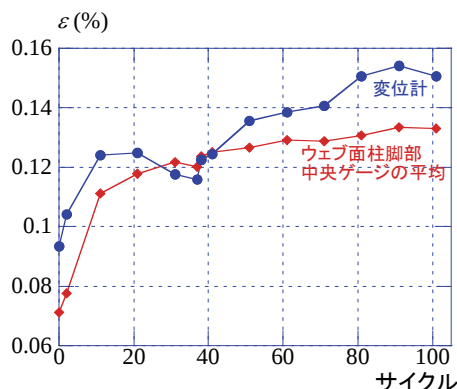


図 17 水平力—ひずみ関係 (柱脚フランジ面)



(a) せん断力 Q —サイクル数



(b) 軸縮み ε —サイクル数関係

図 18 水平力・軸縮み—サイクル数関係図

CFTの場合は1/100のものが最も多かった。図中、本報告で示したH-SA700試験体と同一あるいは近いパラメータに○印を付けている。座屈長さ・断面せい比は16であるため、○印はつけていない。

これらの文献では、最大荷重到達後の荷重低下の割合と繰返し回数の関係を示している。

まず、パラメータが近い試験体と比較してみる。今回の軸力比0.3、一定振幅の部材角2.0%と同じの実験は590N級鋼材とFc100の組み合わせの中に一体のみ存在した。しかし、その試験体は柱頭・柱脚における圧縮フランジの局部座屈の進展およびそれにともなう充填コンクリートの損傷で荷重低下しており、90%荷重低下したと

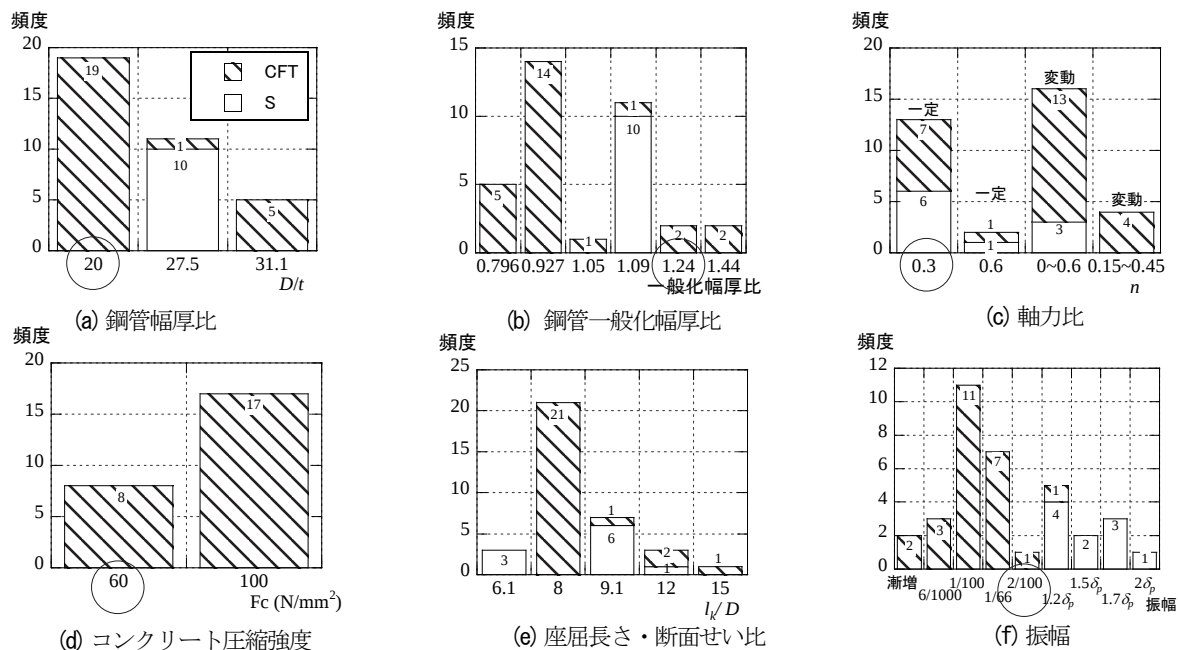


図 19 文献 2)～9)の試験体資料

表 7 比較する試験体 9)～9)

試験体	α_y	F_c	振幅	n	$N_{90\%}$ 繰り 返し回数
MM-14M-C1	490	64.8	0.01	0.3	80
HH-14M-C1	590	104	0.01	0.3	421
HH-14M-C2	590	109	0.015	0.3	94
HH-14M-VL1	590	105	0.01	0.15~0.45	132

きの繰り返し回数 $N_{90\%}$ は17回であった。よって、同じ振幅であっても鋼材強度が異なる場合は繰り返し回数も異なる。

次に、 $N_{90\%}$ 時繰り返し回数が80回以上の試験体を探してみたところ、4体存在した。それらの試験体のパラメータおよび $N_{90\%}$ 時繰り返し回数を表7に示す。試験体の幅厚比はすべて $D/t=20$ で、軸力比もほぼ同様であるが、振幅が0.01もしくは0.015であり本実験の0.02と異なっていた。

4. まとめ

高強度鋼材を用いた角形CFT長柱が部材角2%の一定振幅で繰返し荷重を受けた場合の荷重－変形関係ならびに軸縮み量について示した。今後も引き続き実験変数を増やし実験を行う予定である。

謝辞：本研究は、平成25年度文部科学省科学研究費補助金（基盤研究（C））、課題番号24560694、代表者：城戸將江）の援助を受けた。関係各位に感謝します。

参考文献

- 1) 長谷川 隆, 福元 敏之, 時野谷 浩良, 寺田 岳彦, 成原 弘之, 金子 洋文, 小鹿 紀英: 長周期地震動に対する鉄骨造超高層建築物の安全性検証方法の検討 (その 1) 全体研究計画, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1013-1014, 2011.8
- 2) 清川 貴世, 澤本 佳和, 久保田 淳, 田上 淳, 福元 敏之, 長谷川 隆, 岩田 善裕: 長周期地震動に対する鉄骨造超高層建築物の安全性検証方法の検討, (その 6) 柱部材の多数回繰り返し載荷実験 (実験計画及び結果概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1023-1024, 2011.8
- 3) 澤本 佳和, 清川 貴世, 久保田 淳, 田上 淳, 福元 敏之, 長谷川 隆, 岩田 善裕: 長周期地震動に対する鉄骨造超高層建築物の安全性検証方法の検討, (その 7) 柱部材の多数回繰り返し載荷実験 (結果と考察), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1025-1026, 2011.8
- 4) 澤本 佳和, 清川 貴世, 久保田 淳, 田上 淳, 福元 敏之, 長谷川 隆: 長周期地震動に対する鉄骨造超高層建築物の安全性検証方法の検討, (その 13) 柱部材の多数回繰り返し載荷実験 (実験計画及び結果概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1057-1058, 2012.9
- 5) 清川 貴世, 澤本 佳和, 久保田 淳, 田上 淳, 福元 敏之, 長谷川 隆: 長周期地震動に対する鉄骨造超高層建築物の安全性検証方法の検討 (その 14) 柱部材の多数回繰り返し載荷実験 (結果と考察), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1059-1060, 2012.9
- 6) 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検証方法の検討, その 27 C F T 柱部材の多数回繰り返し載荷実験 (実験概要: 490N 級鋼材, $F_c 60$ コンクリート試験体), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp.1251-1252, 2014.9
- 7) 佐藤 英佑, 成原 弘之, 安田 聡, 宇佐美 徹, 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

- 検証方法の検討, その 28 C F T 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(近畿), pp.1253-1254, 2014.9
- 8) 宇佐美徹, 山崎賢二, 牛渡ふみ, 成原弘之, 鈴井康正, 長谷川隆: 長周期地震動に対する鉄骨造超高層建築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(近畿), pp.1255-1256, 2014.9
 - 9) 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築物の安全検証方法の検討, 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(近畿), pp. 1257-1258, 2014.9
 - 10) 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築物の安全検証方法の検討, 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(近畿), pp.1259-1260, 2014.9
 - 11) 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
 - 12) カクオツキン, 内彩, 城戸將江: 高強度鋼材を用いた角形 CFT 柱の損傷限界に関する実験的研究 その 1 実験概要, 日本建築学会九州支部研究報告第 54 号, pp.597-600, 2015.3
 - 13) 内彩, カクオツキン, 城戸將江: 高強度鋼材を用いた角形 CFT 柱の損傷限界に関する実験的研究 その 2 実験結果, 日本建築学会九州支部研究報告第 54 号, pp.601-604, 2015.3
 - 14) 林和宏, 西亮祐, 蕭博謙, 中島正愛: コンクリート充填鋼管構造柱の曲げ変形・破壊性状に及ぼす鋼材種別および断面形状の影響 その 1 実験概要と設計法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1409-1410, 2014.9
 - 15) 西亮祐, 林和宏, 蕭博謙, 中島正愛: コンクリート充填鋼管構造柱の曲げ変形・破壊性状に及ぼす鋼材種別および断面形状の影響 その 2 実験結果と考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1411-1412, 2014.9
 - 16) 日本建築学会: コンクリート充填鋼管設計施工指針・同解説, 2008.10

EXPERIMENTAL STUDY ON A SQUARE CFT COLUMN WITH HIGH STRENGTH STEEL TUBE

Masae Kido and Yixin Hao

The purpose of this study is to show the test results of the slender square CFT column with high strength steel (H-SA700) subjected to constant cyclic loading under constant axial load. The amplitude of the drift angle is two percent. The decrease of the load does not occur after one hundred times cyclic loading. However, the axial shortening is observed. The test result is compared with the past experimental data with similar test parameters. The numbers of the cyclic loading when the load decreased 90% of the maximum strength are compared.