

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：27101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560694

研究課題名(和文)多様な要求性能に対応できる鋼・コンクリート合成部材の新しい損傷限界クライテリア

研究課題名(英文) New damage limit criteria of steel-concrete composite members which can correspond to various required performance

研究代表者

城戸 将江 (KIDO, Masae)

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授

研究者番号：10453226

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：普通鋼材(STKR400)、高強度鋼材(H-SA700)を用いた角形CFT柱の曲げせん断実験を、軸力比(その断面が保持している圧縮耐力に対する軸力の比)、コンクリート充填の有無をパラメータとして行った。実験では、損傷限界と定義づけられる部材角を示した。また、実験より得られた局部座屈発生限界部材角と、既往の高強度CFT柱の文献調査から得られた局部座屈発生限界部材角を、普通鋼材を用いたものと比較した。円形断面の場合は、実験値は普通強度の場合よりも局部座屈発生限界部材角は大きい。角形断面の場合は、大きくなる場合も小さくなる場合もあった。

研究成果の概要(英文)：Experimental study of square CFT columns subjected to axial load and cyclic lateral load was carried out. Test specimens were square CFT column with normal strength steel tube (STKR 400) and high strength steel tube (H-SA700). Test parameters are axial load ratio (ratio of the axial force to the compressive strength), the presence or absence of infilled concrete. Limit rotational angles are shown obtained by the test results. Local buckling limit angle of the CFT column with high strength steel tube obtained by the test results and past experimental studies were compared with those of the CFT column with normal strength steel tube. Local buckling limit angle of the circular CFT column with high strength steel tube are greater than those of the CFT column with normal strength steel tube. However, when the cross section is square, local buckling limit angle of the CFT column with high strength steel tube are not always greater than those of the CFT column with normal strength steel tube.

研究分野：建築構造

キーワード：鋼・コンクリート合成構造 性能設計

## 1. 研究開始当初の背景

兵庫県南部地震(1995)では、建物が倒壊・崩壊し貴重な人命が失われただけでなく、倒壊・崩壊を免れても、継続して使用するためには大規模な修復とコストが必要となることから、やむを得ず取り壊しとなる建物もあった。このような背景から、性能規定型の設計(性能設計)の導入が行われ、2000年には従来の耐震設計に加え、性能設計の考えを取り入れた限界耐力計算法が導入された。

性能設計の大きな特徴の一つとして、構造設計者とクライアントの対話と合意がある。構造設計者は、対話を通じて建築物に対する要求性能を把握し、合意に基づいて目標性能を定め、設計された建物が目標性能を満たしているか検定を行うのである。この対話に用いられるのが、性能メニューと呼ばれるツールである。設計においては、把握したクライアントの要求性能を表すための工学量で示す必要がある。

この工学量に関する研究は、これまでにいくつもある。たとえば、「日本建築構造技術者協会編：建築の構造設計」では、大地震に対し、鉄骨系構造部材では累積塑性変形倍率が、主要機能確保のためには安全限界累積塑性変形倍率よりも小さいことを確かめることとされている。また、「社団法人日本鋼構造協会：CFT柱を用いた鉄骨骨組の動的耐震設計法ガイドライン(以後、動的設計ガイドライン)」では、CFT部材の保有性能として、使用限界状態、修復不要限界状態、軽微な修復が必要となる限界状態、安全限界状態の4つの限界状態に対し、それぞれ、降伏曲げモーメントの値、軸力比(軸方向累積縮み量)の制限、累積軸方向縮みあるいはせん断力が95%に低下したときの状態、鋼管に亀裂が発生した状態、が挙げられている。

修復不要限界状態に対する工学量である軸方向縮みについては、「松井千秋、津田恵吾ほか：コンクリート充填円形鋼管柱の構造性能と軸力比制限値、日本建築学会構造系論文集、第512号、pp.181-188、1998-10」などによりその根拠となる実験結果が示されている。しかし、材料は高強度のものは使用されていない。また、軽微な修復が必要となる限界状態(本研究でも対象となる状態)については、CFT部材の累積軸方向縮みを解析的に評価する手法はすでに提案されている(中原浩之、蜷川利彦、崎野健治：コンクリート充填鋼管柱の一定軸力下における繰返し曲げ性状、日本建築学会構造系論文集、第568号、pp.139-149、2003.6)。文献中では、実験値と解析値の比較が行われ、解析値が実験値とおおむね良い対応を示すことが記されているが、鋼材については高強度のものは使用されておらず、今後高強度材料の使用が進むことを考えると、適用範囲を広くとれるかどうか検討する必要がある。また、動的設計ガイドラインでは「この限界状態に対するCFT部材の保有性能をどのような工学

量で評価するかについては、今後研究を進めコンセンサスを得る必要がある。」とされており、いまだ工学量およびその値のコンセンサスが得られていない状況にある。

構造物を取り巻く環境も変化している。まず、鋼・コンクリート合成構造については、以前よく使用されていた鉄骨鉄筋コンクリート構造(SRC構造)、現在超高層建築物によく使用されているコンクリート充填鋼管構造(CFT構造)などが代表的な構造形式である。しかし、CFT構造の柱を例にとると、角形鋼管や円形鋼管にコンクリートを充填した充填型に加え、最近では、鉄筋を内蔵したものについても研究が進んでいる。また、高強度材料の開発が行われ、利用されつつある。鋼材については「革新的構造材料を用いた新構造システム建築物研究開発」において建築構造用高強度鋼H-SA700が開発され実際の構造物に使用された(例えば一般社団法人日本鉄鋼連盟：スチールデザインNo.18)。鋼・コンクリート合成構造や高強度材料を適切に建築物に使うことは合理的な設計、建設が可能となり、ひいては省資化につながると期待される。

ところで、2011年3月に発生した東北地方・太平洋沖地震では、甚大な被害が生じた。津波による被害が最も顕著であったが、地震そのものによる被害も報告されている(日本建築学会、2011年東北地方太平洋沖地震災害調査報告)。兵庫県南部地震では、1階部分が柱のみで支えられるピロティ建築に多く被害が見られたことから、剛性が高さ方向に急激に変化するような構造物は避けるように設計されてきた。しかし、今回の地震被害を受け津波に対する「避難建物」としての性能が求められ、下層部分は水を受け流すことができるような、形状としてはピロティ形式の建物も提案されている。このように、これまでにない性能が建物に要求されるようになり、ここでも、安全性を高めるには高強度材料が活用されるものと思われる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、CFT部材を対象とし、高強度材料を用いた場合も適用範囲に含めた損傷限界クライテリアを提案することである。使用限界状態、修復不要限界状態、軽微な修復が必要となる限界状態、を対象とし、すでに提案されている、CFT部材の降伏曲げモーメント、軸方向累積縮み量という工学量が、高強度材料を用いた場合でも各限界状態に対応する工学量として適切かどうかを、実験的に検討する。局部座屈発生限界部材角に着目し、すでに提案されている普通強度の場合の局部座屈発生限界と、本研究から得られた局部座屈発生限界と既往の高強度CFT柱の実験に関する文献調査から得られた局部座屈発生限界とを比較し、高強度の場合との違いを示す。

### 3. 研究の方法

#### (1) 実験概要

##### ① 実験計画

一定軸力 $N$ と繰返し水平力 $Q$ を受けるコンクリート充填角形鋼管柱の、耐力ならびに鋼管降伏時、局部座屈発生時、軸縮み0.2%時の部材角（本論文ではこれらを総称して損傷時部材角と呼ぶ）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)鋼材種別、2)軸力比、3)コンクリート充填の有無、である。実験変数の範囲は以下のとおりである。

1) 鋼材種別：STKR400, H-SA700

2) 軸力比：0.15, 0.3

3) コンクリート充填の有無：有, 無

漸増繰返し載荷実験の載荷プログラムを図2に示す。柱の部材角 $R$  ( $=\delta/L$ ,  $\delta$ : 柱頭の水平変位)を、0.25%を初期値とし0.25%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載荷を行った。表1に試験体一覧を示す。ただし、STKR400を用いた試験体（STKR試験体）のみ、載荷プログラムは約0.31%を初期値とし、0.31%刻みで増加させている。

##### ② 試験体および材料特性

試験体の形状および寸法を図3に示す。鋼管は $\square$ -125 $\times$ 125 $\times$ 6のSTKR400の角形鋼管とH-SA700の板厚 $t=6$ 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。なお、H-SA700の角部の曲げ寸法は、図(c)に示すように内径の半径を12mmとしている。

鋼管の上側には、厚さ25mmのエンドプレ

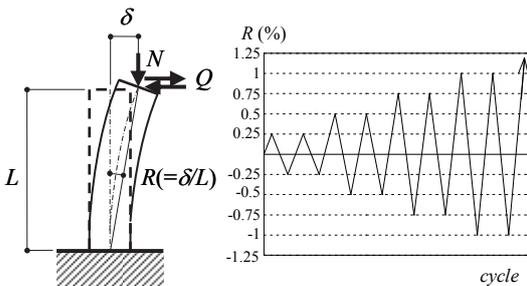


図1 荷重条件

図2 載荷プログラム

表1 試験体一覧（実験パラメータ）

試験体名称	材質	$n$	$c\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )
1 STKR-L-03C	STKR400	0.3	53.8
2 HSA-L-015C	H-SA700	0.15	
3 HSA-L-03C		0.3	52.0
4 HSA-L-03S			—

$n$ : 軸力比 ( $=N/N_0$ ,  $N_0 = s\sigma_y + cA \cdot c\sigma_B$ ,  $sA$ : 鋼管断面積,  $s\sigma_y$ : 鋼管降伏強さ,  $cA$ : コンクリート部分断面積,  $c\sigma_B$ : コンクリート圧縮強度)

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。その際、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である。コンクリート充填鋼管設計施工指針における区分では、長柱に対応する。コンクリートの充填は、図3(b)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。

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。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。

コンクリートは2度打設している。コンクリートの呼び強度は54とし、スランプフローの実測値は、第1回目、2回目がそれぞれ

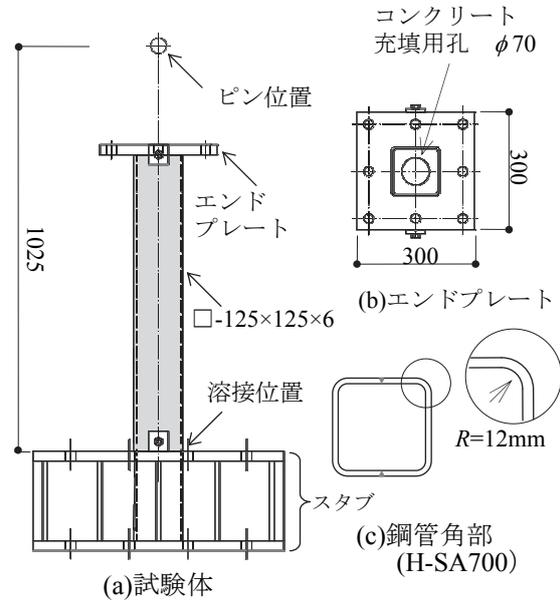


図3 試験体形状

表2 引張試験結果

	$E$ (N/mm <sup>2</sup> )	$s\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	降伏比 ( $\sigma_y/\sigma_u$ )
STKR400	212909	393	479	0.82
H-SA700	205227	685	779	0.88

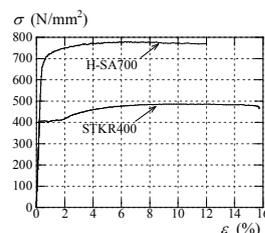


図4 鋼材の応力-ひずみ関係

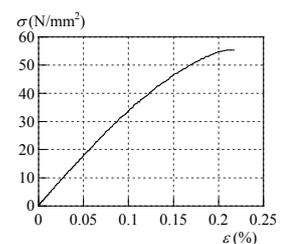


図5 コンクリートの応力-ひずみ関係

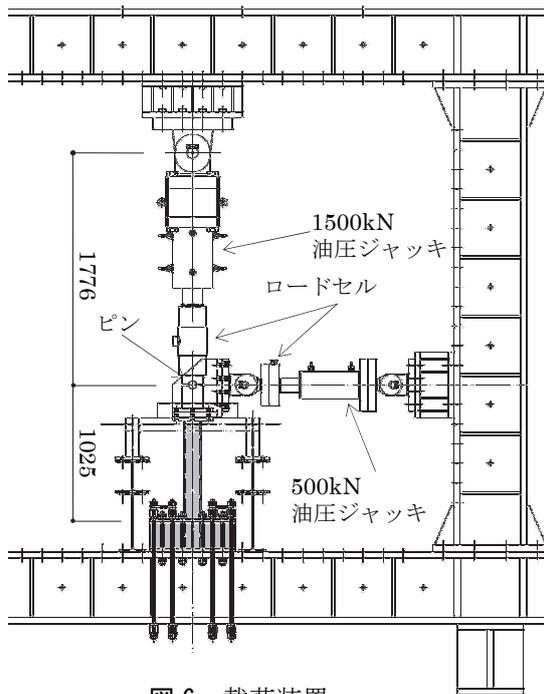


図6 荷重装置

48×45cm, 47×44cmであった。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。

### ③ 実験方法

荷重装置を図6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。変位の測定は、ピン位置で水平変位を測定する水平方向変位計2台と試験体の伸びあるいは縮みを測定する鉛直方向変位計2台で行う。

#### (2) 実験結果

##### ① 荷重-変形関係

水平力 $Q$ を、水平ジャッキに取り付けたロードセルにより測定された値と軸力ジャッキのロードセルで測定された値の水平分力を足し合わせて求めた。図7に水平力 $Q$ -部材角 $R$ 関係を示す。また、実験終了後の試験体の全体写真を各図の右に示している。図中の点線は初期剛性を示している。また、荷重装置のピンに生じる摩擦力の影響については差し引いていない。

STKR-L-03Cは、部材角約3%時にフランジ面に局部座屈が発生し、3.71%時にウェブ面にも局部座屈が発生し、0.31%×14回(≒4.34%)正側2回目2.21%時に水平力が急激に低下し荷重を終了した。

試験体HSA-L-015Cは、3.5%時に柱脚の溶接部分に亀裂が発生し、4.75%亀裂の進行により水平力が急激に低下し荷重を終了した。局部座屈は認められなかった。

試験体HSA-L-03Cは、3.25%時に柱脚角部の溶接部分に亀裂が確認され、3.75%時にフランジ面に局部座屈が発生し、4.5%時にウェブ面局部座屈発生後0.25%×18回正側1回目4.65%時に水平力が急激に低下し荷重を終了

した。ただし、局部座屈の変形は比較的小かった。

試験体HSA-L-03Sは、3.25%時にフランジ面に局部座屈が発生し、その後4.5%時にウェブ面に局部座屈が発生し、0.25%×17回目負側2回目2.9%時に水平力および軸力が維持できなくなり荷重を終了した。

H-SA700鋼材のCFT柱は、座屈発生よりも先に溶接部分に亀裂が発生した。本実験で使用したH-SA700鋼材はA材であり溶接には適さない材料である。予熱を行わず隅肉溶接を行ったため、亀裂が生じたものと考えられる。また、H-SA700鋼材の柱の除荷剛性が大きいので今後検討が必要である。

##### ② 荷重-軸縮み関係

図8に部材角 $R$ -軸縮 $\epsilon_a$ 関係を示す。軸縮 $\epsilon_a$ は変位計で測定した縮み量をその測定する元の長さで除して求めた。また、図9に軸縮み-荷重サイクルの図を示す。図8によれば、STKR400鋼材の柱よりもH-SA700鋼材の柱の方が縮みが小さい。H-SA700では、CFT柱の方が中空鋼管柱よりも軸縮みが小さい。また、CFT柱は部材角の各ピークに近づくとやや伸びていることが観察される。また、軸力比が低い方が軸縮みが小さい。

図9によれば、軸縮みが0.2%を超えると、急激に縮み量が大きくなるのが分かる。これは、普通強度の場合とおおむね同じ傾向であった。しかし、HSA-L-015Cは、軸縮みはほとんど進まず0.2%に達しなかった。

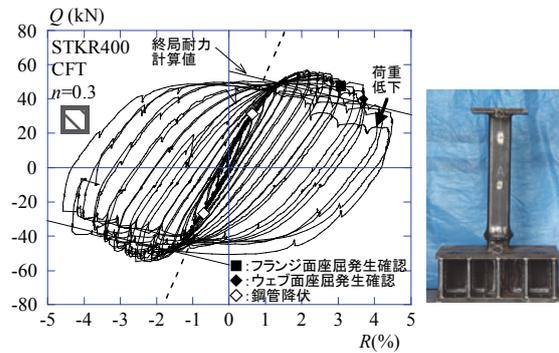
##### ③ 破壊状況

図10に、柱脚部の破壊状況を示す。STKR試験体の局部座屈による変形が最も大きく続いて、中空試験体であるHSA-L-03Sの局部座屈変形が大きくなっている。HSA-L-03CおよびHSA-L-015Cは母材に亀裂が生じていることがわかる。

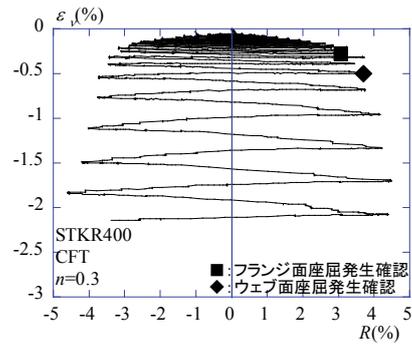
##### (3) 高強度鋼材を用いたCFT柱の損傷限界

高強度鋼材が用いられたCFT柱の実験結果の文献調査を行った。文献リストを下記に示す。

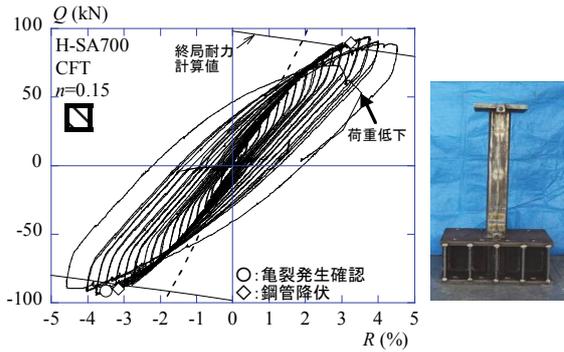
- ① 松本修一, 成原弘之, 小室努, 安田聡, 中尾文彦, 佐藤英佑: 超高強度鋼を用いたコンクリート充填鋼管柱の構造性能に関する実験的研究, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.1113-1114, 2008.9
- ② 藤井睦, 鈴井康生, 寺沢太沖, 宇佐美徹, 飯塚信一: 超高強度鋼を用いたコンクリート充填鋼管柱の構造性能に関する実験的研究, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.1155-1156, 2007.8
- ③ 鈴井康正, 藤井睦, 寺沢太沖, 宇佐美徹, 飯塚信一: 超高強度鋼を用いたコンクリート充填鋼管柱の構造性能に関する実験的研究, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.1157-1158, 2007.8
- ④ 松本修一, 佐藤英佑, 成原弘之, 小室努, 安田聡: 超高強度材料を用いたCFT柱の構造性能, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.1219-1220, 2009.8



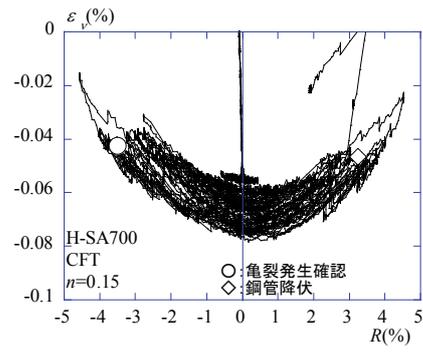
(a) STKR-L-03C



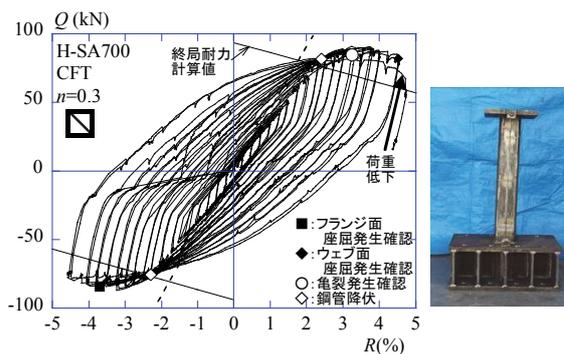
(a) STKR-L-03C



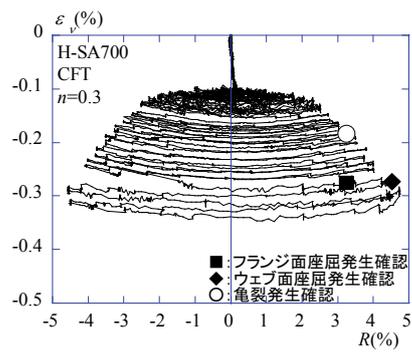
(b) HSA-L-015C



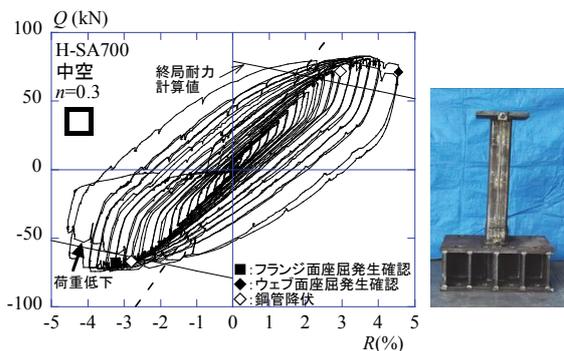
(b) HSA-L-015C



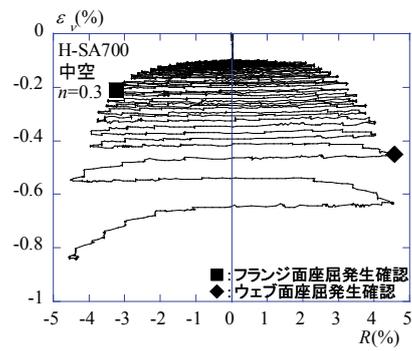
(c) HSA-L-03C



(c) HSA-L-03C



(d) HSA-L-03S



(d) HSA-L-03S

図7 水平力  $Q$ —部材角  $R$  関係

- ⑤ 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, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.1409-1412, 2014.9
- ⑥ 平田寛, 鈴井康正, 時野谷浩良: H-SA700

図8 部材角  $R$ —軸縮み  $\epsilon_y$  関係

- を用いた超高強度 CFT 長柱の曲げせん断性状, 鋼構造年次論文報告集, pp.577-582, 2014.11
- ⑦ 石岡拓, 中原理揮, 菊田繁美: 超高強度材料を用いた CFT 柱の研究開発, 技術研究報告第 39 号, pp.6-1-6-7, 2013.10

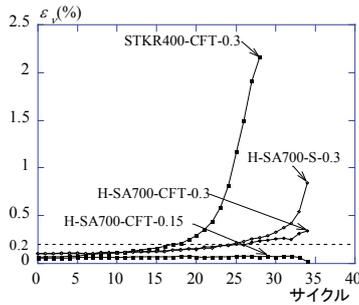


図9 軸縮み一載荷サイクル

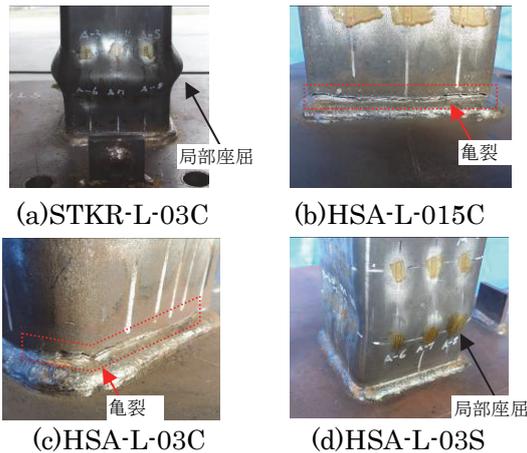
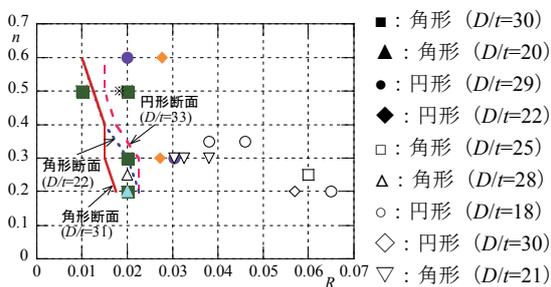


図10 破壊状況 (柱脚部)



※変動軸力だが軸力比が最大のときをプロットした

図11 軸力比  $n$  と局部座屈発生時の部材角  $R$  の関係

これらの文献の、局部座屈発生限界を読み取った。図11に局部座屈発生時の軸力比と部材角の関係を示す。図中凡例に各試験体の幅厚比ならびに径厚比を記している。実線ならびに点線は、既往の研究において示されている、普通強度の鋼材とコンクリートを用いた場合の局部座屈発生限界である。図11より、円形の場合、角形の場合いずれも軸力比が高いほど局部座屈発生限界が小さくなる。また、円形断面の場合、実験値は普通強度の局部座屈発生限界よりも上回っており、安全側となっているが、角形断面は安全側となるものと危険側になるものがある。このことから、角形断面においては、普通強度を用いた場合と高強度材料を用いた場合では局部座屈発生限界が異なる。今後も実験資料の集積を行い、新たに限界値を定める必要がある。

#### 4. 研究成果

本研究では、高強度鋼材を用いた角形 CFT 柱の曲げせん断実験を一定軸力のもと行った。また、高強度鋼材を用いた CFT 柱の文献調査を行った。研究成果をまとめると以下のようなになる。

- ① STKR400 の CFT 柱並びに H-SA700 鋼材の中空柱は局部座屈が進展し、耐力が低下した。H-SA700 鋼材の CFT 柱は亀裂により荷重が急激に低下した。
- ② 試験体 HSA-L-015C を除く 3 つの試験体において、軸縮みが 0.2% を超えると急激に軸縮み量が大きくなった。
- ③ STKR400 鋼材の柱の方が H-SA700 鋼材の柱よりも早く局部座屈が発生し、H-SA700 鋼材では、フランジ面の局部座屈発生は CFT 柱の方が遅くなっているが、ウェブ面の局部座屈発生はほぼ変わらなかった。
- ④ 高強度鋼材を用いた CFT 柱の文献調査を行い、局部座屈発生限界を読み取り、今回行った実験結果も含め、普通鋼材を用いたものと比較した。円形断面の場合は、実験値は普通強度の場合よりも局部座屈発生限界部材角は大きい。角形断面の場合は、大きくなる場合も小さくなる場合もあった。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 2 件)

- ① カクオツキン, 内彩, 城戸将江: 高強度材料を用いた角形 CFT 柱の損傷限界に関する実験的研究 その 1, 日本建築学会九州支部研究報告, 査読無, 第 54 号, pp. 597-600, 2015. 3
- ② 内彩, カクオツキン, 城戸将江: 高強度材料を用いた角形 CFT 柱の損傷限界に関する実験的研究 その 2, 日本建築学会九州支部研究報告, 査読無, 第 54 号, pp. 601-604, 2015. 3

〔学会発表〕 (計 1 件)

- ① カクオツキン, 城戸将江: 高強度鋼材を用いた角形 CFT 長柱の曲げせん断実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2015. 9 月 4 日～6 日, 発表会場 東海大学

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

城戸 将江 (KIDO, Masae)

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授  
研究者番号: 1 0 4 5 3 2 2 6

(2) 研究分担者

津田 恵吾 (TSUDA, Keigo)

北九州市立大学・国際環境工学部・教授  
研究者番号: 5 0 1 1 2 3 0 5