

# 変動軸力を受ける CFT 柱部材の変形性能とエネルギー吸収性能

- シアスパン比、軸力比、幅厚比の影響 -

Deformation Capacity and Energy Absorption Capacity of Concrete Filled Tube Beam-Column under Varying Axial Force

- The influence of shear span ratio, axial force ratio and width-thickness ratio -

福島 正樹<sup>\*1</sup> 尹 航<sup>\*1</sup> 村山 双美<sup>\*1</sup> 土井 希祐<sup>\*2</sup>

Masaki FUKUSHIMA<sup>\*1</sup> In KOU<sup>\*1</sup> Fumi MURAYAMA<sup>\*1</sup> Mareyasu DOI<sup>\*2</sup>

変動軸力の下で繰り返し水平力を受けるCFT柱部材の変形性能・エネルギー吸収性能に関する基礎的データ得ることを目的とし、CFT柱試験体の静加力実験を行った。さらに、本研究の実験結果および文献<sup>1), 2)</sup>のCFT試験体の実験データと併せて分析を行った。

その結果、変動軸力を受ける場合の CFT 柱の変形性能・エネルギー吸収性能は、一定軸力を受ける場合の SRC 柱の評価法で概ね評価できることが確認できた。

CFT 部材 変動軸力 限界変形角 変形性能 エネルギー吸収性能

CFT beam-column, varying axial force, limiting value for rotation angles, deformation capacity, energy absorption capacity

## 1. 研究目的

一般的に、中高層建物の下層階の柱は、地震時において大きな変動軸力を受ける。コンクリート充填鋼管(CFT)構造をはじめとする鋼コンクリート合成構造は高層建物に用いられることが多く、その力学的特性が明らかにされてきている。しかし、それらの研究のほとんどは一定軸力を受ける場合のものであり、変動軸力を受ける場合の研究は数が少ない<sup>1), 2)</sup>。このため、変動軸力下での柱部材の変形性能、エネルギー吸収性能を把握することが重要となる。

甲斐ら<sup>1)</sup>、辻ら<sup>2)</sup>によってCFT柱部材の変動軸力下における曲げせん断実験が行われている。

本研究では、CFT柱試験体を製作し、変動軸力下での曲げせん断実験を行い、基礎的実験資料を整備するとともに、文献<sup>1), 2)</sup>の実験結果と比較・検討し、変動軸力を受けるCFT柱部材の変形性能およびエネルギー吸収性能について考察する事を目的とする。

## 2. 実験方法

### 2.1 試験体

各試験体の諸元を表1に、鋼材およびコンクリートの力学的性状を表2に、試験体外観図を図1に示す。

加力スタブは、H-200×300×16×16(SS400)を用い、ウェブおよびフランジの面外変形を防ぐため16mm鋼板のリップを設けた。試験部分と加力スタブの接合部は柱通しとし、鋼管内には普通コンクリート( $F_c=24\text{N/mm}^2$ )を充填した。

表1 試験体諸元

試験体名	8	9	10
鋼管	-150×150×6 (STKR400)	-150×150×4.5 (STKR400)	-150×150×4.5 (STKR400)
柱背(mm)	600	600	1200
シアスパン比	2.00	2.00	4.00
幅厚比	25.0	33.3	33.3
鋼材断面積 ( $\text{mm}^2$ )	3459	2619	2619
鋼材断面積比率 (%)	15.4	11.6	11.6

\*<sup>1</sup>新潟大学大学院自然科学研究科

\*<sup>2</sup>新潟大学工学部建設学科 教授・博(工)

Graduate School of Science and Technology, Niigata Univ.

Prof., Dept. of Arch. And Civil Eng., Niigata Univ., Dr. Eng.

## 2.2 加力方法

加力装置を図2に、載荷経路を図3に、載荷履歴を表3に示す。

終局耐力はSRC規準<sup>3)</sup>に従って求めた。地震時に中高層建物の外柱は、転倒モーメントによる水平力に比例した変動軸力を受ける。そこで本実験では、地震時の下層階の外柱を想定し、各試験体に長期軸力に相当する  $0.1N_y$  を載荷し、その後、式(1)~(3)に示す軸力比  $+0.5N_y \sim -0.3N_y$  の、水平力に比例した変動軸力を作用させ、断面主軸方向に漸増振幅交番繰り返し水平力を作用させるように計画した。

$$(8) \quad N = 184.3 + 3.46 \times H \quad [\text{kN}] \quad \dots (1)$$

$$(9) \quad N = 140.5 + 3.48 \times H \quad [\text{kN}] \quad \dots (2)$$

$$(10) \quad N = 140.5 + 6.96 \times H \quad [\text{kN}] \quad \dots (3)$$

ここに、N : 軸力 H : 水平力

水平力は圧縮軸力を受ける側を正とする。

## 3. 実験結果

### 3.1 破壊性状

実験によって得られた各試験体の最大耐力等の実験値一覧を表4に示す。

8は+1、-3サイクルで鋼管が降伏(下端部圧縮側、上端部引張側)し、+5サイクルで局部座屈(上端部圧縮側、下端部圧縮側)が生じた。その後、+5サイクルのピーク直前で正加力側の

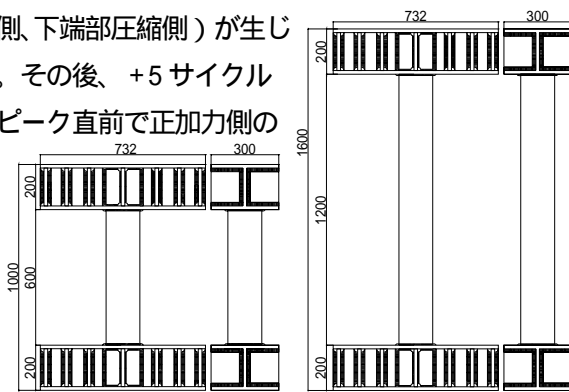


図1 試験体外観図

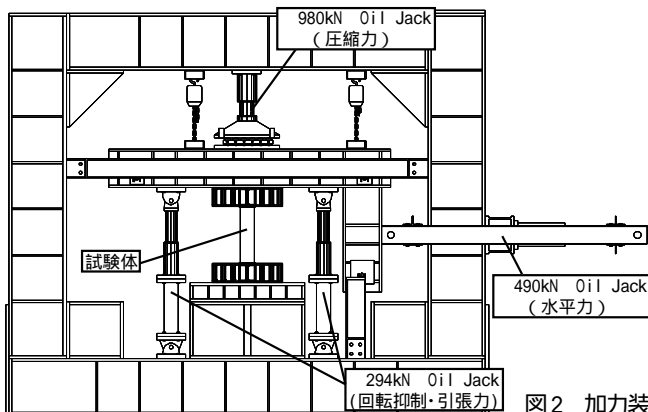


図2 加力装置

表2 鋼材およびコンクリートの力学的性状

試験体	鋼材			コンクリート			材齢 (日)
	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	$E_s$ ( $\times 10^5$ MPa)	$\sigma_c$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	$E_c$ ( $\times 10^4$ MPa)	
8	395	443	2.12	25.1	2.59	2.51	34
9	367	443	2.05	23	2.04	2.17	44
10	367	443	2.05	22.3	2.04	2.22	28

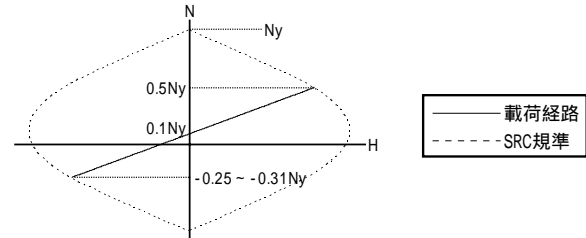


図3 載荷経路

表3 載荷履歴

サイクル	±1	±2	±3	±4	±5	±6	±7	±8	±9	±10	±11
全体水平変形 $8 \cdot 9$ $h$ (mm)	±3	±3	±6	±6	±9	±9	±12	±12	±24	±24	±60
全体水平変形 $10$ $h$ (mm)	±6	±6	±12	±12	±18	±18	±24	±24	±48	±48	±120
目標部材角 R ( $\times 10^{-2}$ rad)	±0.5	±0.5	±1.0	±1.0	±1.5	±1.5	±2.0	±2.0	±4.0	±4.0	±10

表4 実験値一覧

試験体ナンバー	水平力 (kN)			変形 ( $\times 10^{-2}$ rad) [サイクル]			
	8	9	10	8	9	10	
終局耐力計算値	正	213	162	80.7	-	-	-
	負	-198	-143.0	-72	-	-	-
最大耐力	正	224	161	77.9	1.40(+5)	1.50(+5)	1.25(+5)
	負	-217	-156.6	-76.7	-1.50(-5)	-3.02(-9)	-3.84(-9)
初期降伏発生荷重	正	162	125	69.8	0.49(+1)	0.46(+1)	0.67(+3)
	負	-184	-103.3	-41.3	-0.48(-3)	-0.32(-1)	-0.38(-1)
局部座屈発生荷重	164	150	77.9	0.60(+5)	0.73(+3)	1.25(+5)	
鋼管亀裂発生荷重	-217	-150	-69	-1.50(+5)	-1.26(-5)	-1.50(-6)	
限界変形点 $R_{0.95}$	正	213	153	74.0	2.04	1.90	2.36
	負	-207	-148.8	-73	1.56	-	-

\* $R_{0.95}, R_{0.8}$ : 耐力が最大耐力の95%、80%に低下した時の部材角

最大耐力に達した。続いて、-5サイクルで鋼管コーナー部に亀裂(上端部引張側、下端部引張側)が生じ、ほぼ同時に負加力側の最大耐力に達した。

9は+1、-1サイクルで鋼管の降伏(上端部圧縮側、下端部引張側)し、正加力側は+3サイクルで局部座屈(上端部圧縮側、下端部圧縮側)が発生、+5サイクルで最大耐力に達した。負加力側は-5サイクルで鋼管コーナー部(下端部引張側)に亀裂が生じ、-9サイクルで最大耐力に達した。

10は-1、+3サイクルで鋼管の降伏(下端部引張側、上端部圧縮側)し、+5サイクルで局部座屈(下端部圧縮側、上端部圧縮側)が発生、正加力側の最大耐力に達した。続いて、-6サイクルでの鋼管コーナー部に亀裂(下端部引張側)が生じた。-9サイクルで負加力側の最大耐力に達した。

8は最終状態で鋼管の上端部引張側、下端部引張側の亀裂が著しい。9、10は鋼管の亀裂は小さく、局部座屈が8よりも卓越している。9、10は鋼管厚が小

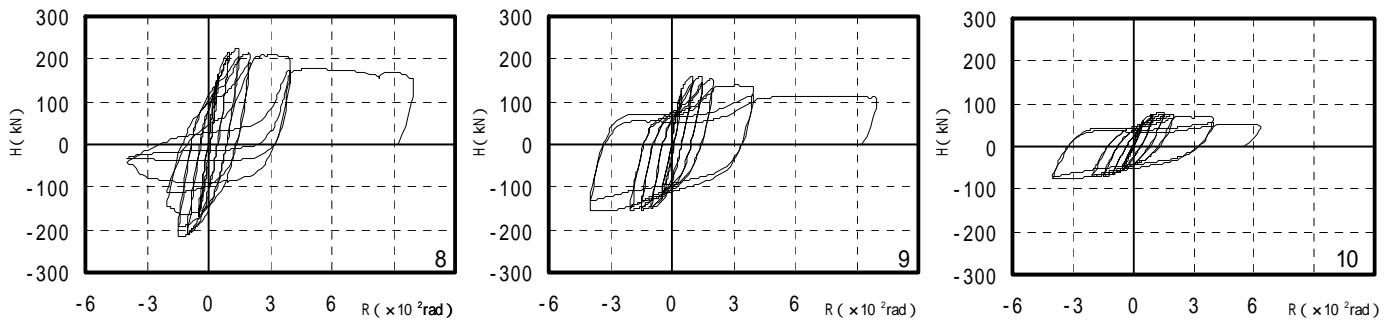


図4 水平力 - 部材角関係

さく、局部座屈が生じやすい。そのため、局部座屈箇所  
で塑性ヒンジが生じ、柱端部の応力が緩和され鋼管の破  
断が伸展しなかったと考えられる。逆に、鋼管厚が大き  
い 8 は局部座屈が起こりにくいため、逆に材端部に大  
きな引張応力が作用し、鋼管平坦部の破断に至ったと考  
えられる。

### 3.2 限界変形角 $R_{0.95}$

変形性能の指標となる限界変形角 $R_{0.95}$ （最大耐力の  
95%に耐力が低下したときの部材角）の比較を行った。  
図4に各試験体の水平力 - 部材角関係を示す。

8は、 $\pm 7$ サイクル以後、正加力側において逆S字の  
ループを描き、負加力側では鋼管の破断による耐力の低  
下が著しい。破壊が鋼管の亀裂による場合、破壊後の挙  
動は脆性的であり危険である。

9は、 $\pm 6$ サイクル以後、正加力側においては逆S字  
のループを示している。負加力側では耐力の低下がほと  
んど見られず、正加力側と負加力側で非対称な履歴ル  
ープとなっている。

10は、 $\pm 9$ サイクル以降、正加力側で逆S字の履歴ル  
ープを描いている。負加力側では耐力の低下が見られず  
正加力側、負加力側で非対称な履歴ループとなっている。  
耐力の低下について、 $R=0.1$ rad まで実験を行った 8と  
9を比較すると、 $R=0.25$ rad 以降、8が常に9の値  
を上回っていた。これは、局部座屈の影響により9の方  
が圧縮側の耐力低下が早いと考えられる。

限界変形角 $R_{0.95}$ について比較すると変形性能に大きな  
差はなかった。

### 3.3 等価粘性減衰定数 $heq$

エネルギー吸収性能の指標となる等価粘性減衰定数  
 $heq$ の比較を行った。図5に 8、9、10の $heq$ を示す。  
 $heq$ の値は正加力側、負加力側共に、 $R=2.00 \times 10^{-2}$ radま  
でほぼ同程度の値となった。そして、 $R=4.00 \times 10^{-2}$ rad  
で、8のみ $heq$ の低下が見られた。これは、鋼管平坦部  
が破断したことで急激な耐力低下が起こり、履歴ル  
ープ面積が小さくなったためだと考えられる。

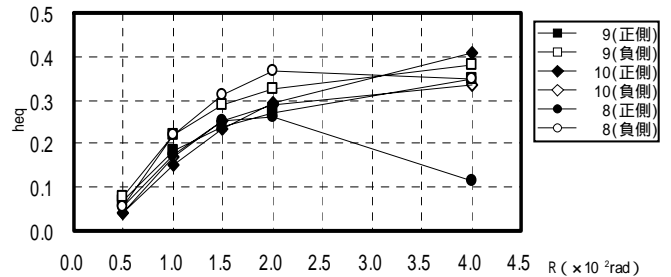


図5 等価粘性減衰定数  $heq$

## 4. 変形性能とエネルギー吸収性能

試験体 8~10 と、文献<sup>(1),(2)</sup>の実験資料一覧を表5に  
示す。

### 4.1 変形性能

図6に限界変形角 - シアスパン比関係を示す。本研究  
の 9、10は負加力側で耐力低下が見られなかったた  
め、最大変形である $R=4.00 \times 10^{-2}$ radを $R_{0.95}$ とした。

文献<sup>(4)</sup>より正加力側の $R_{0.95}$ の下限推定式(4)を与えた。

表5 実験資料一覧

試験体名	鋼管 (mm)	a (mm)	$s_v$ (N/mm)	$c_v$ (N/mm)	c	t	a/D	D/t	文献
8	-150 × 150 × 6	300	395	25.1	0.50	-0.31	2.0	25.0	本研究
9	-150 × 150 × 4.5	300	367	23.0	0.50	-0.25	2.0	33.3	
10	-150 × 150 × 4.5	600	367	22.3	0.50	-0.25	4.0	33.3	
SR6-A-9V	-210 × 210 × 9	630	536	91.7	0.70	-0.28	3.0	23.3	文献 <sup>(1)</sup>
SR6-C-9V	-210 × 210 × 6	630	540	91.7	0.70	-0.30	3.0	35.0	
SR8-A-9V	-180 × 180 × 9	540	824	94.5	0.70	-0.30	3.0	20.0	
SR8-C-9V	-180 × 180 × 6	540	823	94.5	0.70	-0.30	3.0	30.0	
CFT45v/12-2	-125 × 125 × 4.5	700	324	37.0	0.50	-0.28	5.6	27.8	文献 <sup>(2)</sup>
CFT45v/6-3	-125 × 125 × 4.5	700	324	37.0	0.33	-0.03	5.6	27.8	
CFT60v/12-2	-125 × 125 × 6	700	324	37.0	0.33	-0.31	5.6	20.8	
CFT60v/6-3	-125 × 125 × 6	700	324	37.0	0.50	-0.05	5.6	20.8	

注)  
a: シアスパン  
 $s_v$ : 鋼管降伏応力度  
 $c_b$ : コンクリート圧縮強度  
c: 圧縮側最大軸力比  
(=  $N_{cmax}/N_y$ )  
t: 引張側最大軸力比  
(=  $N_{tmax}/N_y$ )

$$R_{0.95} (\times 10^{-2} \text{rad}) = (2/3) \cdot (a/D) - 1 > 0.5 \quad \dots (4)$$

ここに、a/D:シアスパン比

負加力側において耐力低下の見られなかった 9、

10を除くと、シアスパン比が大きいほど限界変形角が大きくなる傾向がある。ただし、正加力側ほど明瞭ではなく、式(4)で下限値を推定するに至らない。

図7に限界変形角 - 平均圧縮軸力比( $c/2$ )関係を示す。文献<sup>5)</sup>におけるSRC部材の限界変形角 $R_{0.8}$ の下限推定式に基づいて、CFT部材の $R_{0.95}$ の下限推定式を以下のように与えることとした。

$$R_{0.95} (\times 10^{-2} \text{rad}) = 4 - 10 \cdot (c/2) > 0.5 \quad \dots (5)$$

ここに  $c$ : 最大圧縮軸力比

図7に下限推定式(5)を示した。式(5)はCFT部材の $R_{0.95}$ の実験結果とよく対応していると言える。

図8に限界変形角 - 幅厚比関係を示す。正加力側、負加力側ともに明瞭な傾向が見られない。幅厚比が限界変形角に与える影響は、シアスパン比、平均軸力比に比べて小さいと言える。

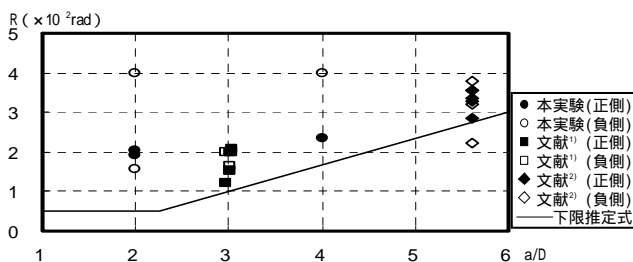


図6 限界変形角 - シアスパン比関係

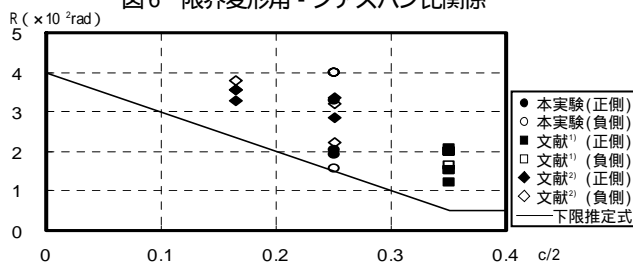


図7 限界変形角 - 平均圧縮軸力比関係

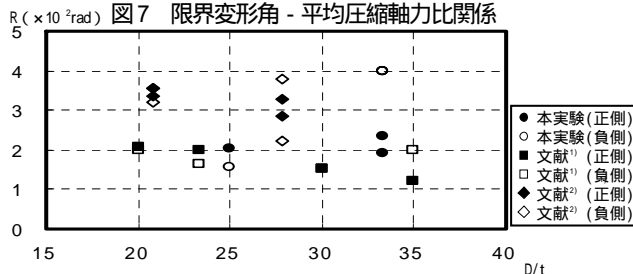


図8 限界変形角 - 幅厚比関係

## 4.2 エネルギー吸収性能

図9に、本実験と文献<sup>2)</sup>のCFT試験体の $heq$  - 部材角関

係を正加力側、負加力側に分けて示す。

文献<sup>5)</sup>より、式(6)に示すSRC部材の等価粘性減衰定数 $heq$ の下限推定式が与えられている。

$$heq = 1.5 \cdot (1 - q/R) \quad \dots (6)$$

ここに、R:部材角  $q = 1 - 0.2 \cdot (R - 1)/(R_{0.95} - 1)$

$R_{0.95}$ :限界変形角(式(5)による)

図9に $R_{0.95} = 4.00 \times 10^{-2} \text{rad}$ の場合の、式(6)による $heq$ の下限推定式を併せて示した。式(6)はSRC部材の推定式ではあるが、 $heq$ が低下するまでは比較的精度良く実験結果を評価している。

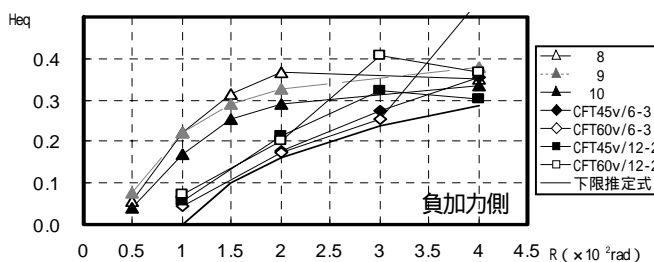
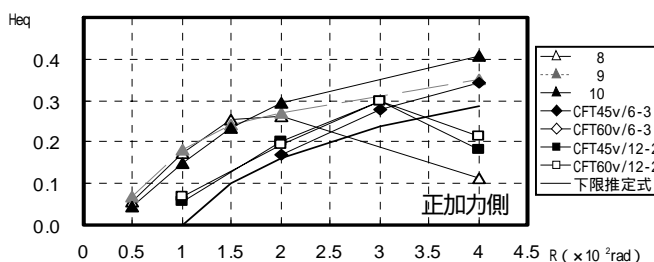


図9  $heq$  - 部材角関係

## 5. 結論

地震時の中高層建物の外柱を想定した、変動軸力を受けるCFT柱部材の静加力実験を行い、既往文献の実験資料を含めて、変動軸力下でのCFT柱部材の限界変形角、等価粘性減衰定数について分析を行なった。本研究によって得られた結果をまとめて以下に示す。

- 1) 変動軸力を受ける場合、CFT柱は引張側で鋼管の破断による急激な耐力低下を示す場合がある
- 2) CFT柱部材の限界変形角はシアスパン比とある程度正の相関が見られ、正加力側は式(4)により下限値が評価できる。また平均圧縮軸力比とは負の相関があり、SRC柱評価式に基づく式(5)により限界変形角の下限値を評価できる。
- 3) CFT柱部材の等価粘性減衰定数 $heq$ は式(6)により下限値を概ね評価できる。但し、大変形における鋼管破断による $heq$ の低下について今後検討する必要がある。

参考文献 1) 甲斐誠、西永雅一ら：ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究(CFT-12)コンクリート充填鋼管柱の曲げせん断性状 その4-その7 日本建築学会大会 1996.9  
 2) 浅井英克、辻文三：変動軸力を受けるコンクリート充填角形鋼管柱の弾塑性挙動 その1-2 日本建築学会大会 1999.9  
 3) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 1987  
 4) 稲田輝巳：変動軸力を受けるコンクリート充填角形鋼管柱の変形性能とエネルギー吸収性能 新潟大学大学院自然科学研究科修士論文 2005  
 5) 土井希祐、加藤大介：鋼コンクリート合成構造部材の変形性能とエネルギー吸収性能の評価法 コンクリート工学年次論文集 2004