

変動軸力を受けるコンクリート充填鋼管柱の性能評価に関する研究

F04D019H 村山双美
 指導教官 土井希祐教授

1.はじめに

一般的に、コンクリート充填鋼管（CFT）構造物は中高層であり、地震時において、下層階外柱は転倒モーメントによる大きな変動軸力を受ける。従って、変動軸力下における柱部材の変形性能、およびエネルギー吸収性能を把握することは、構造上、より安全な建物を設計する上で非常に重要である。また、近年、耐震設計は、耐力による設計法から、変形性能を考慮した設計法へと移り変わってきており、柱部材の性能を把握することが特に必要とされている。

CFT構造は、既往の研究では一定軸力下での実験が多く、変動軸力下で行われている実験は数少ない。中でも、変動軸力を受ける円形CFT構造の実験は、非常に数が少ない状況である。

昨年度までの研究¹⁾により、変動軸力を受ける角形CFT柱部材の静加力曲げせん断実験が行われ、その変形性能、およびエネルギー吸収性能に関するデータが得られている。そこで、本研究では、変動軸力を受ける円形CFT柱部材の静加力曲げせん断実験を行い、その変形性能、およびエネルギー吸収性能に関するデータを得ると共に、昨年度までのデータも含めて比較・検討を行う。

また、変形性能の指標である限界変形角に関して、コンクリート充填鋼管構造設計施工指針²⁾に示されている、一定軸力下でのCFT柱部材の限界変形角評価式が変動軸力下におけるCFT柱部材について適用可能であるか否か検討する。エネルギー吸収性能の指標である等価粘性減衰定数 heq に関しては、平成12年建設省告示で示された式³⁾（告示式）と、曲げ破壊する充腹形SRC部材の heq 推定式¹⁾について検討する。

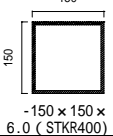
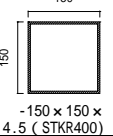
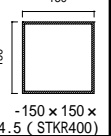
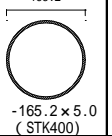
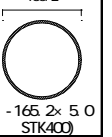
ここで、検討の対象とする実験資料は、昨年度までの研究及び本研究と、向井、吉岡ら⁴⁾、浅井、辻⁵⁾のCFT柱部材の曲げせん断実験の結果を用いる。

2.実験

2.1 試験体

表1に試験体一覧、図1に試験体外観を示す。試験体は5体である。No.8~No.10の試験体柱部にはSTKR400

表1 試験体一覧

試験体	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12
断面					
D (mm)	150.0	150.0	150.0	165.2	165.2
t (mm)	6.0	4.5	4.5	5.0	5.0
L (mm)	600	600	1200	600	1200
A (mm ²)	22500	22500	22500	21434	21434
A _s (mm ²)	3459	2619	2619	2516	2516
D/t	25.0	33.3	33.3	33.0	33.0
a/D	2.0	2.0	4.0	1.8	3.6
A _s /A (%)	15.4	11.6	11.6	11.7	11.7
備考	文献 ¹⁾	文献 ¹⁾	文献 ¹⁾	本研究	本研究

注) D:断面幅, t:鋼管厚, L:材長, A:断面積, A_s:鋼材部断面積, D/t:幅厚比(径厚比), a/D:シアスパン比, A_s/A:鋼材断面積比

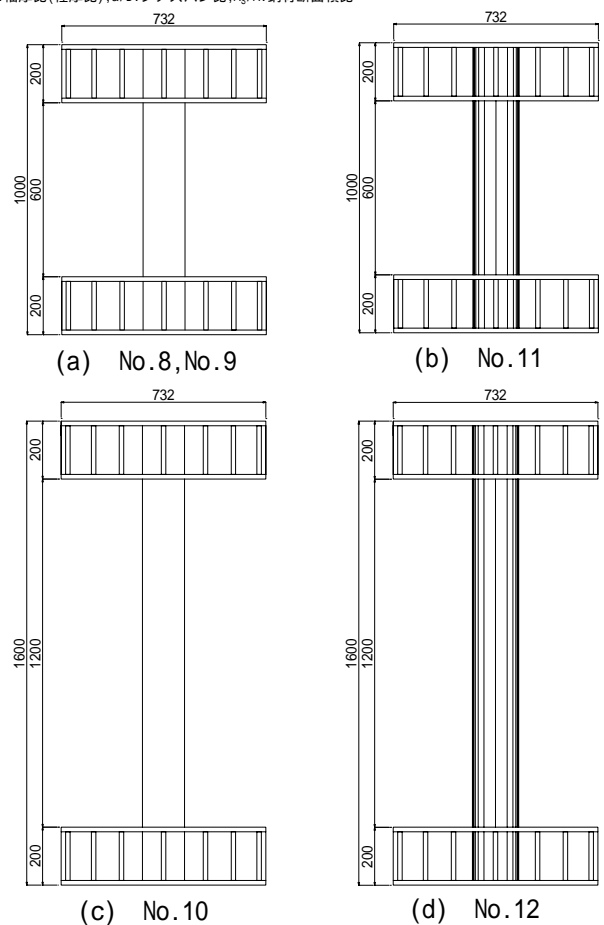


図1 試験体外観

の角形鋼管を、No.11、No.12 の試験体柱部にはSTK400の円形鋼管を使用し、普通コンクリート ($F_c=21N/mm^2$) を充填した。加力スタブはBH-200×300×16×16 (SS400) を使用し、ウェブ及びフランジの面外変形を防ぐため、16mm鋼板のリブを設けた。試験体柱部と加力スタブの接合部は柱通しとした。各試験体の鋼材及びコンクリートの力学的特性を表2に示す。

2.2 加力方法

図2に加力装置を示す。L型フレームを介して、のオイルジャッキにより、試験体に水平力を作用させる。軸力については、のオイルジャッキにより圧縮軸力を、のオイルジャッキにより引張軸力を作用させる。また、のジャッキは、試験体柱頭の回転を制御するためにも用いる。

図3に終局耐力と載荷経路を示す。終局耐力はSRC規準⁶⁾に従って求めたものである。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。そこで本研究では、地震時を想定し、まず試験体に長期軸力に相当する $0.1N_y$ を載荷し、その後(1)式に示す軸力比 $+0.5N_y \sim -0.3N_y$ 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返し水平力を作用させるように計画した。

$$N = 0.1N_y + 0.4N_y \times H/H_{0.5N_y} \text{ (kN)} \quad \dots (1)$$

ここに、N：軸力、 N_y ：累加圧縮耐力⁶⁾、H：水平力、 $H_{0.5N_y}$ ： $N=0.5N_y$ 時の断面耐力⁶⁾から決まる水平力である。

載荷履歴については、部材角 $R=0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 4.0 \times 10^{-2} \text{ rad}$ の各変位振幅において正負2回ずつ交番繰返し載荷を行った後、正方向へ加力装置の限界まで載荷した。なお、本研究においては、試験体が圧縮軸力を受ける時の水平力載荷方向を正加力側、引張軸力を受ける時の水平力載荷方向を負加力側とする。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

実験により得られた各試験体の最大耐力等の実験値を、終局耐力計算値とともに表3に示す。なお、限界変形角は、耐力が最大耐力の95%に低下した時の部材角とする。

正加力側において、各試験体とも局部座屈発生後に最大耐力に達しており、幅厚比の小さいNo.8のみ、最大耐力が終局耐力計算値を上回った。また、角形断面のNo.8～No.10は円形断面のNo.11、No.12よりも早期に最大耐力に達した。No.8については、他の試験体よりも比較的局部座屈の伸展が見られなかった。

一方、負加力側においては、鋼管に亀裂が発生しなかったNo.12を除き、各試験体とも鋼管亀裂発生後に最大耐力に達した。また、各試験体とも、最大耐力が終局耐力計算値を上回った。角形断面であるNo.8～No.10につ

いては、材端部引張側の鋼管コーナー部に発生した亀裂が鋼管平坦部へと伸展し、特にNo.8において、その現象が顕著であった。円形断面で亀裂の発生したNo.11については、材端部引張側で亀裂が発生し、その後円周方向へと亀裂が伸展した。

3.2 荷重 - 変形関係

図4に各試験体の水平力 - 部材角関係を示す。No.8～No.11は、 $\pm 7 \sim \pm 8$ サイクルまで紡錘型の履歴ループを示し、その後正加力側において、スリップ型の挙動を示しており、特にNo.8において、その現象が顕著である。これは正加力側における局部座屈と、負加力側における鋼管の亀裂に起因するものである。また、鋼管に亀裂が発生しなかったNo.12は、 ± 9 サイクルまで紡錘型の履歴ループを示した後、スリップ型の履歴ループへと移行しているが、その現象は他の試験体よりも明瞭ではない。よって、負加力側における鋼管の亀裂が、正加力時の挙

表2 材料の力学的特性

試験体	鋼材			コンクリート		
	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	ヤング係数 ($\times 10^5 \text{ MPa}$)	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 ($\times 10^4 \text{ MPa}$)	材齢 (日)
No.8	395	443	2.12	25.1	2.51	34
No.9	367	443	2.05	23.0	2.17	44
No.10				22.3	2.22	28
No.11	365	462	2.27	26.1	2.15	57
No.12				25.4	2.12	43

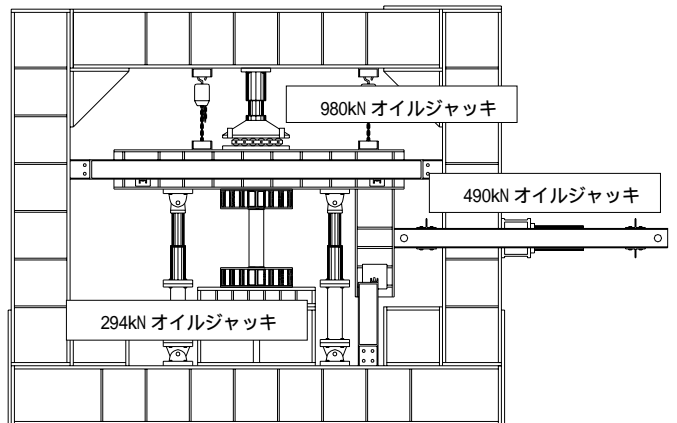


図2 加力装置

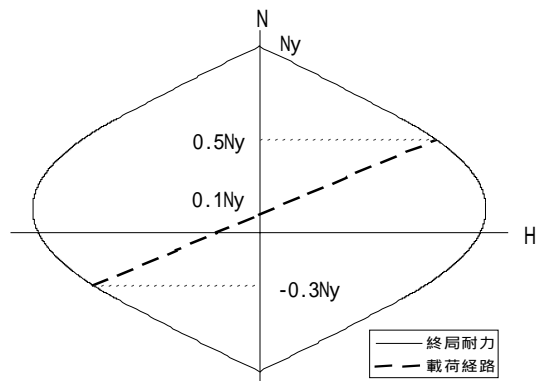


図3 載荷経路

表3 実験結果

試験体	水平力 (kN)					変形 ($\times 10^{-2}$ rad) [サイクル]				
	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12
終局耐力 計算値	正負 213.0 -198.0	162.2 -143.0	80.7 -71.7	165.5 -139.9	82.9 -70.1	-	-	-	-	-
最大耐力	正負 224.4 -217.1	160.7 -156.6	77.9 -76.7	156.1 -158.0	66.4 -78.4	1.40 [+5] -1.50 [-5]	1.50 [+5] -3.02 [-9]	1.25 [+5] -3.84 [-9]	3.84 [+9] -3.34 [-9]	3.67 [+9] -4.00 [-9]
初期降伏 発生	正負 161.6 -184.3	124.5 -103.3	69.8 -41.3	85.5 -111.1	39.2 -48.5	0.49 [+1] -0.48 [-3]	0.46 [+1] -0.32 [-1]	0.67 [+3] -0.38 [-1]	0.27 [+1] -0.39 [-1]	0.33 [+1] -0.44 [-1]
局部座屈発生	164.4	149.5	77.9	93.8	65.4	0.60 [+5]	0.73 [+3]	1.25 [+5]	0.51 [+4]	1.42 [+5]
鋼管亀裂発生	-217.1	-149.9	-69.1	-146.5	-	-1.50 [-5]	-1.26 [-5]	-1.50 [-6]	-1.00 [-3]	-
限界変形点 $R_{0.95}$	正負 213.2 -206.9	152.7 -	74.0 -	148.3 -	63.1 -	2.04 1.56	-	1.90 -	3.30 -	4.87 -

動に影響を与えているといえる。一方、負加力側においては、鋼管における亀裂の伸張が顕著であったNo.8の耐力が急激に低下しているのに対して、No.9~No.12は負加力側での耐力の低下はほとんど見られなかった。

図5に水平力 - 部材角関係包絡線（奇数サイクルの履歴ループを滑らかに結んだ線）を示す。なお、比較のため、試験体毎に水平力を各々の最大耐力で除して基準化している。正加力側において、No.8~No.10は $R=1.5 \times 10^{-2}$ rad前後で最大耐力に達した後耐力が低下しているのに対し、No.11、No.12は最大耐力に達した後も、 $R=4.0 \times 10^{-2}$ rad前後まで耐力を維持している。このことは限界変形角から見ても明らかである（表3参照）。これは、円形鋼管の拘束効果により、コンクリートの耐力が上昇したことに起因すると考えられる。一方、負加力側においては、鋼管の亀裂が顕著であったNo.8のみ早期に耐力が低下しているが、他の試験体は $R=-4.0 \times 10^{-2}$ radまで耐力の低下は見られなかった。

3.3 等価粘性減衰定数

エネルギー吸収性能の指標として、繰返し载荷の各変位振幅における2回目の繰返しループに対する等価粘性減衰定数 heq と部材角との関係を図6に示す。全体的に見て、各試験体とも、鋼管の局部座屈や亀裂が顕著となる前の、 $R=\pm 1.5 \times 10^{-2}$ rad前後までは heq はほぼ直線的に増加しているが、その後増加率は減少している。特に鋼管の亀裂が顕著であったNo.8は、耐力低下により heq も急激に減少しており、その傾向は正加力側において顕著である。

正加力側において比較すると、シアスパン比の大きいNo.10、No.12は、 heq が $R=4.0 \times 10^{-2}$ radまでほぼ直線的に増加しているのに対し、シアスパン比の小さいNo.9、No.11はその増加率が小さく、 $R=4.0 \times 10^{-2}$ radではNo.10、No.12の heq の値を下回っている。また、断面形状の違いによる差は、正加力側においては見られない。

一方、負加力側においては、 $R=-2.0 \times 10^{-2}$ radまでは、シアスパン比の小さいNo.9、No.11の heq が、シアスパン比の大きいNo.10、No.12の heq を上回っている。しかし、 $R=-2.0 \times 10^{-2}$ rad以後は、角形断面のNo.9、No.10の heq の増加率が減少し、 $R=-4.0 \times 10^{-2}$ radにおいては、円形断面のNo.11、No.12の heq の値を下回っている。

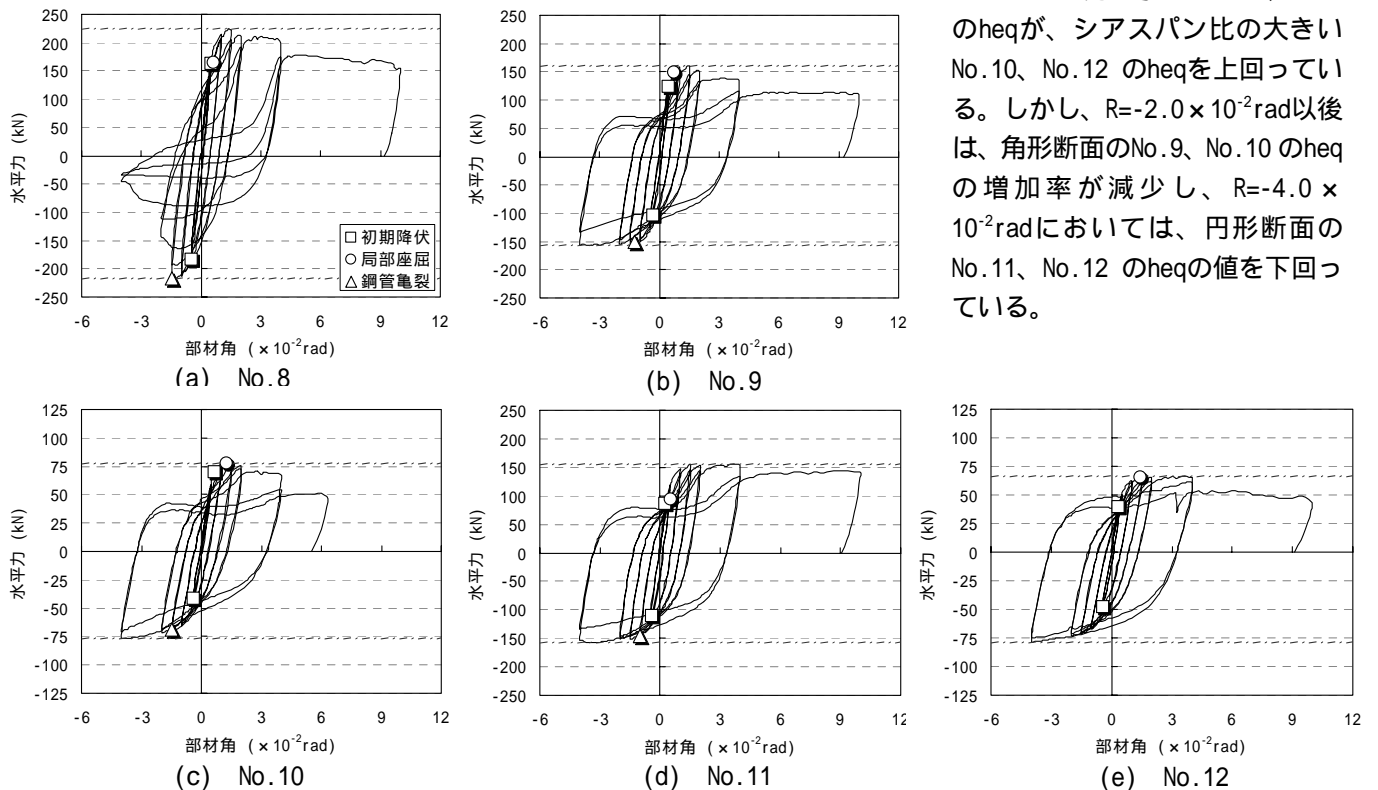


図4 水平力 - 部材角関係

4. 変形性能

4.1 限界変形角評価式

昨年度までの研究及び本研究と、文献^{4),5)}のCFT柱試験体を表4に示す。試験体は、角形断面のものが11体、円形断面のものが6体の、計17体である。

既往の研究により、実験データからの回帰式として、一定軸力下で繰返し荷重を受けるCFT柱部材の限界変形角評価式が文献²⁾にいくつか示されている。これらの評価式を変動軸力下におけるCFT柱部材に適用させるにあたり、本研究では軸力比に着目し、最大圧縮軸力比 $c_c (=N/N_0; N_0$ は累加強度式による中心圧縮耐力) を $1/2$ にした、平均圧縮軸力比 $c_c/2$ を軸力比として計算し、限界変形角を求めた。これは、限界変形角 $R_{0.95}$ の下限推定式との関連で、変動軸力下では、負加力側において引張軸力を受けるため、一定圧縮軸力を受ける場合よりもコンクリートの損傷が少なく、鋼管の局部座屈にも有利であると考えられるからである⁷⁾。これらの式により、変動軸力下におけるCFT柱部材の圧縮側限界変形角の評価について検討した。

各評価式による限界変形角の計算値と実験値の対応に関する統計値を表5に示す。ここでは、各評価式の統計値について、平均値が1、変動係数が0に近く、より安全側となった評価式(角形断面は林式、円形断面は吉野式)について、検討結果を以下に示す。

表4 実験資料一覧

断面	試験体	試験体形状			材料性状		c_c	D/t	a/D	実験結果		文献
		D (mm)	t (mm)	L (mm)	c_b (MPa)	s_y (MPa)				H_{max} (kN)	$R_{0.95}$ ($\times 10^{-2}$ rad)	
角形	No.8	150.0	6.0	600	25.1	395	0.50	25.0	2.0	224.0 -198.0 161.0 -157.0	2.04 -1.56 1.90 (-4.00)	本研究
	No.9	150.0	4.5	600	23.0	367	0.50	33.3	2.0	78.9 -76.7	3.30 (-4.00)	
	No.10	150.0	4.5	1200	22.3	367	0.50	33.3	4.0	410.5 -478.6	1.83 (-1.65)	
	SR6-A-9-V	210.0	8.8	1262	91.7	536	0.70	23.8	3.0	258.3 -358.2	1.11 (-2.00)	
	SR6-C-9-V	212.0	6.0	1262	91.7	540	0.70	35.6	3.0	402.2 -519.0	(2.00) -2.02	
	SR8-A-9-V	178.3	9.5	1079	94.5	824	0.70	18.9	3.0	270.1 -388.5	1.51 -1.53	
	SR8-C-9-V	179.9	6.7	1081	94.5	823	0.70	27.0	3.0	63.6 -53.5	2.80 -2.36	文献 ⁵⁾
	CFT45v/12-2	125.0	4.5	1400	37.6	324	0.50	27.8	5.6	75.6 -75.6	3.20 -3.70	
	CFT45v/6-3	125.0	4.5	1400	37.6	324	0.33	27.8	5.6	81.2 -76.4	3.10 -3.10	
	CFT60v/12-2	125.0	6.0	1400	37.6	355	0.50	20.8	5.6	95.1 -96.0	3.60 -3.60	
	CFT60v/6-3	125.0	6.0	1400	37.6	355	0.33	20.8	5.6	156.0 -158.0	4.87 (-4.00)	
円形	No.11	165.2	5.0	600	26.1	365	0.50	33.0	1.8	66.4 -78.4	4.18 (-4.00)	本研究
	No.12	165.2	5.0	1200	25.4	365	0.50	33.0	3.6	379.8 -447.7	(4.00) (-3.08)	
	SC6-A-9-V	241.0	9.0	1443	91.7	482	0.70	26.8	3.0	212.4 -256.8	(3.00) (-2.30)	文献 ⁴⁾
	SC6-C-9-V	241.0	4.5	1441	91.7	504	0.70	53.3	3.0	402.8 -342.3	(2.00) (-2.00)	
	SC8-A-9-V	161.0	9.1	859	93.9	819	0.70	17.7	2.7	230.1 -171.5	(2.00) (-1.51)	
	SC8-C-9-V	159.0	4.8	956	93.9	771	0.70	33.4	3.0			

表の記号は、D:断面幅、t:鋼管厚、L:材長、 c_c :コンクリート圧縮強度、 s_y :鋼材降伏強度、 c_c :最大圧縮軸力比、 c_t :最大引張軸力比、D/t:幅厚比(径厚比)、a/D:シアスパン比、 H_{max} :最大耐力、 $R_{0.95}$:限界変形角の通りである。
なお、()中の数値は、実験終了時まで耐力が95%に低下しなかったもので、最大変形時の部材角である。

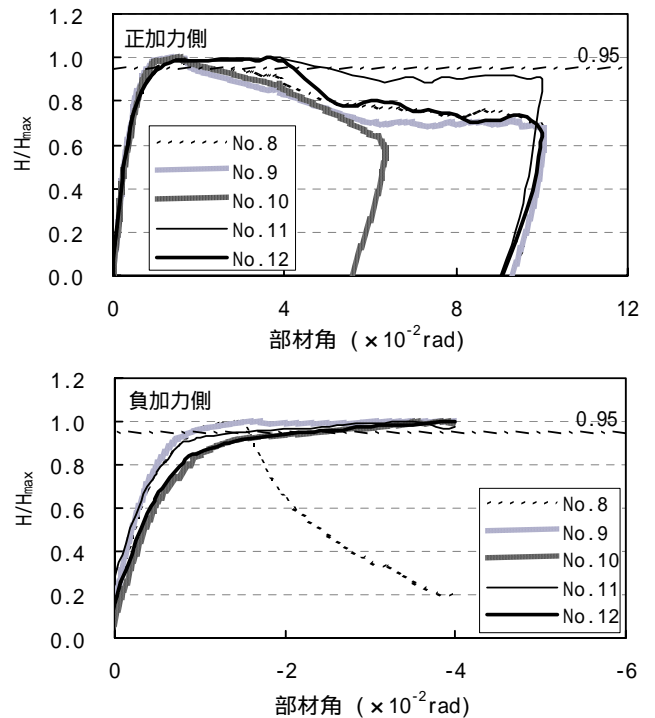


図5 水平力 - 部材角関係包絡線

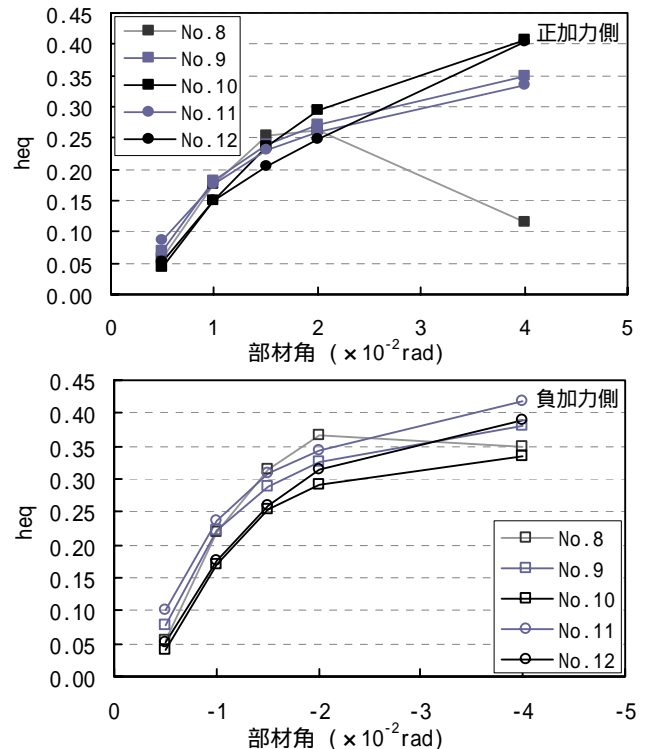
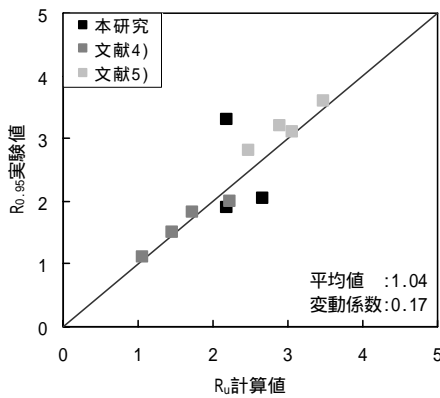


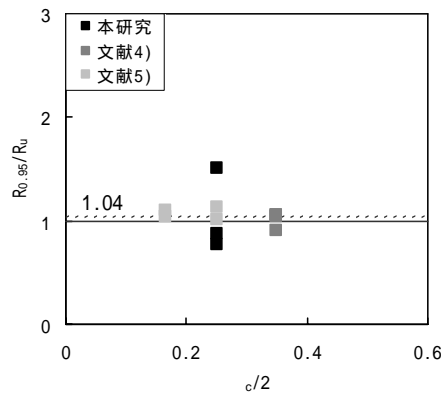
図6 等価粘性減衰定数 - 部材角関係

表5 限界変形角の実験値/計算値に関する統計値

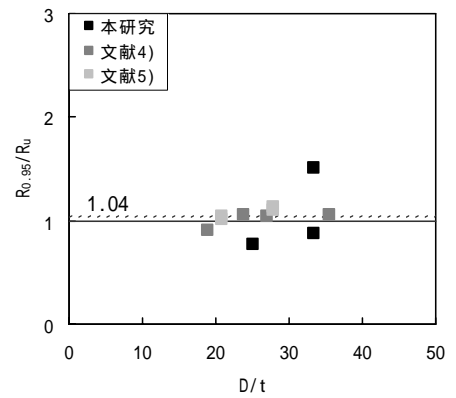
断面	評価式	平均値	標準偏差	変動係数
角形	センター式	0.85	0.16	0.19
	吉野式	0.94	0.15	0.16
	林式	1.04	0.18	0.17
	岡本式	1.09	0.25	0.23
	渡辺式	0.89	0.19	0.21
	佐藤式	1.04	0.38	0.36
円形	センター式	2.22	1.52	0.69
	吉野式	1.12	0.46	0.41
	佐藤式	0.75	0.55	0.73



(a) 計算値 - 実験値

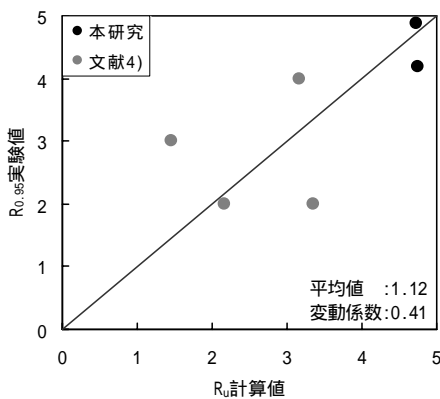


(b) 軸力比との比較

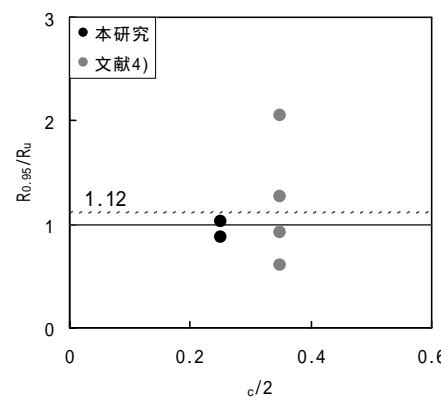


(c) 幅厚比との比較

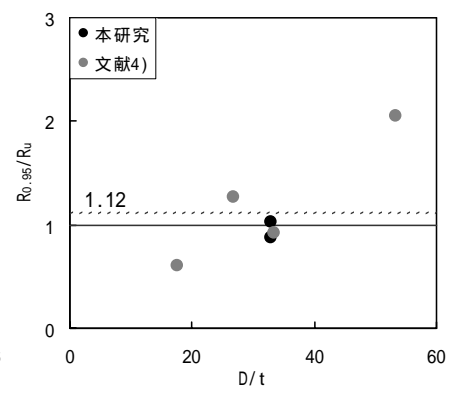
図7 実験値と計算値の比較（角形断面）



(a) 計算値 - 実験値



(b) 軸力比との比較



(c) 幅厚比との比較

図8 実験値と計算値の比較（円形断面）

まず、角形断面の評価式（林式）を(2)式²⁾に示す。

$$R_u = 2.50 + 48.0 \frac{t}{D} - 5.0 \frac{N}{N_0} - 0.50\alpha \quad \dots (2)$$

$$\alpha = \frac{c}{44.13} \geq 1.0$$

ここに、 t :鋼管厚、 D :断面幅、 N/N_0 :最大圧縮軸力比、 c 、 B :コンクリート圧縮強度である。

図7(a)に示すように、計算値と実験値はほぼ直線上に分布し、計算値は実験値の平均をよく捉えている。一部危険側になるものもあるが、平均値1.04、変動係数0.17とばらつきも小さい。

図7(b)、(c)において、 $R_{0.95}/R_u$ は軸力比、および幅厚比によらず、0.8~1.5にばらついており、軸力比、および幅厚比の違いによる評価のばらつきに明瞭な傾向は見られない。

次に、円形断面の評価式（吉野式）を(3)式²⁾に示す。

$$R_u = 7.5 - \frac{c}{55} - 0.05 \frac{D}{t} \sqrt{\frac{s_y}{324}} - 5.0 \frac{N}{N_0} \quad \dots (3)$$

ここに、 c 、 B :コンクリート圧縮強度、 D :断面幅、 t :鋼管厚、 s_y :鋼材降伏強度、 N/N_0 :最大圧縮軸力比である。

図8(a)において計算値と実験値を比較すると、計算値は実験値の平均を捉えているが、危険側となるものもある。また、平均値1.12、変動係数0.41となっており、大略平均を押さえているが、角形断面の場合と比較すると、ばらつきが大きくなっている。

図8(b)、(c)において、軸力比、および幅厚比と $R_{0.95}/R_u$ との関係を見てみると、軸力比、および幅厚比の違いによる評価のばらつきに明瞭な傾向は見られず、 $R_{0.95}/R_u$ は0.6~2.1にばらついている。

検討に使用した円形CFST柱部材に関しては、負加力側において鋼管が破断した時点で実験を終了しているものもあるため、最終状態まで耐力を保持しており、絶対変形による限界変形角 $R_{0.95}$ が取れないものが多かった。また、変動軸力下における円形CFST柱部材の実験資料も非常に数が少ない状況であり、そのため、評価のばらつきが大きくなるという結果となった。今回の検討においては、正加力側だけの検討を行った。しかし、負加力側において鋼管が破断することにより、正加力側の挙動にも影響を及ぼしていることから、累積塑性変形評価等により、正加力側と負加力側の両方を含めて評価し、検討していく必要があると考えられる。

5. エネルギー吸収性能

エネルギー吸収性能の指標として、等価粘性減衰定数 heq について検討する。図9に、本研究におけるNo.11、No.12の heq の実験値、計算値と部材角の関係を示す。計算値には、平成12年建設省告示で示された、建築物の減衰を表す式³⁾(告示式)と、曲げ破壊する充腹形SRC部材の heq 推定式¹⁾を使用する。なお、推定式に関しては、式中の限界変形角において、各試験体の実験結果から求めた限界変形角を使用したもの(exp)と、(3)式によって求めた限界変形角を使用したもの(cal)を共に示す。

告示式について見てみると、 $R=0.5 \sim 2.0 \times 10^{-2}$ radまでは実験値とよく対応しているが、大変形時には大きく安全側の評価となっている。一方、推定式について見てみると、 $R=2.0 \times 10^{-2}$ rad以後の大変形時において、実験値の傾向をよく捉えている。両式について比較すると、大変形時において、告示式の方は実験値に対して大きく安全側を包絡していることが分かる。ただし、どちらの式に関しても問題点があり、告示式については、構造形式によらず、全ての構造形式に対して塑性率のみで設定されていること、推定式については、 $R=1.0 \times 10^{-2}$ rad以前の変形においては評価不可能であること等が挙げられる。これらの問題点を含めて、大変形に至るまでの連続した減衰定数の評価について、今後さらに検討していく必要があると考えられる。

6. まとめ

変動軸力下で繰返し曲げせん断力を受けるCFT柱部材の静加力実験を行った。次いで、既往の実験資料に基づいて、変形性能、およびエネルギー吸収性能について検討した。

変形性能の指標である限界変形角については、正加力側において、円形CFT柱部材は角形CFT柱部材よりも大きく、大変形時に至るまで耐力を保持している。変動軸力下における角形CFT柱部材の限界変形角の評価については、一定軸力下における限界変形角評価式の軸力比を修正することで、精度よく評価することができる。円形CFT柱部材の場合は、角形CFT柱部材に比べてばらつきが大きくなる傾向にある。また、どちらの場合においても、危険側の評価となるものがある。

エネルギー吸収性能の指標である等価粘性減衰定数 heq に関して、告示式については、 $R=2.0 \times 10^{-2}$ rad前後までは実験値と対応している。SRC部材の推定式については、 $R=2.0 \times 10^{-2}$ rad以後、大変形時に至るまで、実験値とよく対応している。ただし、どちらの式に関しても問題点があり、今後さらに検討を要する。

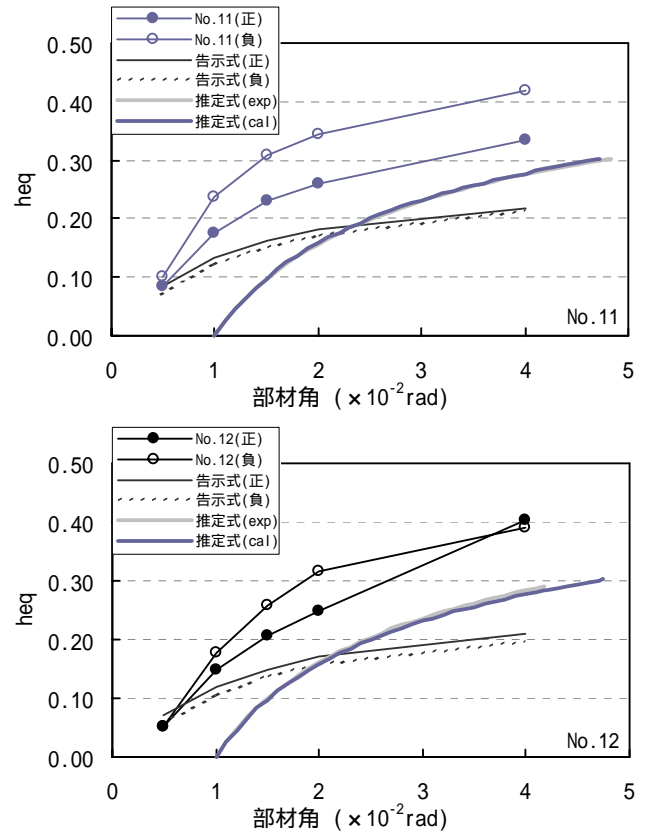


図9 heq の実験値、計算値と部材角の関係

参考文献

- 1) 土井希祐, 稲田輝巳, 村山双美, 尹航: 変動軸力を受けるコンクリート充填鋼管柱の静加力実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 2, pp. 1249-1254, 2005
- 2) 日本建築学会: コンクリート充填鋼管構造設計施工指針, 1997
- 3) 国交省住宅局建築指導課, 日本建築主事会議, 財団法人日本建築センター: 建築物の構造関係技術基準解説書, 工学図書株式会社, 2001
- 4) 向井昭義, 吉岡研三ら: ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究 コンクリート充填鋼管柱の曲げせん断性状(その1, その3~その7) 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1023-1024, pp. 1027-1036, 1996.9
- 5) 浅井英克, 辻文三: 変動軸力下におけるコンクリート充填角形鋼管柱の弾塑性挙動(その1~その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1263-1266, 1999.9
- 6) 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, 2001.1
- 7) 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, Vol. 26, No. 2, pp. 1405-1410, 2004, 7