

論文 変動軸力を受けるコンクリート充填円形鋼管柱の静加力実験

福島 正樹^{*1}・村山 双美^{*2}・土井 希祐^{*3}・尹 航^{*2}

要旨：地震時における中高層建物の下層階外柱を想定し、水平力に比例した変動軸力を受けるコンクリート充填円形鋼管柱の静加力実験を行った。本実験結果、および角形鋼管柱試験体を用いた既報の実験結果に基づいて、変形性能とエネルギー吸収性能に及ぼす断面形状、シアスパン比の影響について比較を行い、以下の知見を得た。圧縮軸力下では、円形断面柱の限界変形角は角形断面柱の場合と比較して非常に大きく、変動軸力下において高い変形性能を有している。また、鋼管に局部座屈が発生した後、等価粘性減衰定数の増加傾向が低下しており、局部座屈発生時期が大変形時のエネルギー吸収性能に影響を及ぼした。

キーワード：CFT 柱部材, 円形鋼管, 変動軸力, 変形性能, エネルギー吸収性能

1. はじめに

一般的に、コンクリート充填鋼管（以下、CFT）構造建物は中高層であり、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。

しかし、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が少ない¹⁾。中でも、変動軸力を受ける円形鋼管を用いた CFT（以下、円形 CFT）柱の実験は非常に数が少ない状況である。

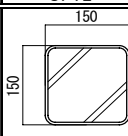
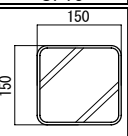
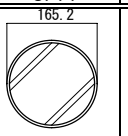
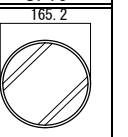
そこで本研究では、既報²⁾に引き続き円形 CFT 柱試験体を製作し、変動軸力下における静加力曲げせん断実験を行い、その変形性能、およびエネルギー吸収性能に関する基礎的なデータを得るとともに、既報²⁾において報告した角形鋼管を用いた CFT（以下、角形 CFT）柱試験体の実験結果と比較・検討を行うことを目的とする。

2. 実験

2.1 試験体

表-1に既報²⁾と本研究における試験体一覧、図-1に試験体概観図、表-2に使用材料の力学的特性を示す。CFT2 と CFT3 の試験体柱部には STKR400 の角形鋼管を、CFT4 と CFT5 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 ($F_c=24\text{N/mm}^2$) を充填した。加力スタブには SS400 の BH-200×300×16×16 を用いた。また、試験体製作にあたり、柱部分と加力スタブの接合部は柱通しとした。

表-1 試験体一覧

試験体	CFT2	CFT3	CFT4	CFT5
断面形状	 □150×150×4.5 (STKR400)	 □150×150×4.5 (STKR400)	 ○165.2×5.0 (STK400)	 ○165.2×5.0 (STK400)
D(mm)	150.0	150.0	165.2	165.2
t(mm)	4.5	4.5	5.0	5.0
L(mm)	600.0	1200.0	600.0	1200.0
A(mm ²)	22500.0	22500.0	21434.3	21434.3
A _s (mm ²)	2619.0	2619.0	2516.4	2516.4
D/t	33.3	33.3	33.0	33.0
a/D	2.0	4.0	1.8	3.6
A _s /A(%)	11.6	11.6	11.7	11.7
備考	既報 ²⁾	既報 ²⁾	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

*1 新潟大学大学院自然科学研究科 (正会員)

*2 新潟大学大学院自然科学研究科

*3 新潟大学教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

表-2 使用材料の力学的特性

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 ($\times 10^5$ Mpa)	圧縮強度 (Mpa)	ヤング係数 ($\times 10^4$ Mpa)	材齢 (日)
CFT2	367	443	2.05	23.0	2.17	44
CFT3				22.3	2.22	28
CFT4	365	462	2.27	26.1	2.15	57
CFT5				25.4	2.12	43

2.2 載荷方法

図-2 に載荷装置を示す。L形フレームを介して、980kN 圧縮油圧ジャッキ①により試験体柱部分に圧縮軸力を作用させる。また、294kN 圧縮引張油圧ジャッキ②により、試験体柱頭の回転を制御するとともに、試験体柱部分に引張軸力を作用させる。さらに、490kN 圧縮引張油圧ジャッキ③により試験体に水平力を作用させる。

図-3 に終局耐力と載荷経路を示す。終局耐力は SRC 規準³⁾ に従って求めたものである。地震時に中高層建物下層階の外柱は、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、地震時の下層階外柱を想定し、まず試験体に長期軸力に相当する $0.1 N_y$ を載荷し、その後、式 (1) に示す軸力比 $+0.5 N_y \sim -0.3 N_y$ の水平力に比例した変動軸力を作用させ、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。

$$N = 0.1 N_y + 0.4 N_y \frac{H}{H_{0.5 N_y}} \quad (1)$$

ここに、 N : 軸力, N_y : 累加圧縮耐力³⁾, H : 水平力, $H_{0.5 N_y}$: $N = 0.5 N_y$ の時の断面耐力³⁾ から決まる水平力である。

載荷履歴は、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、本論文においては、軸力変動に伴い、柱軸力が圧縮となるときの水平力載荷方向を正加力側、柱軸力が引張となるときの水平力載荷方向を負加力側と表記する。

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

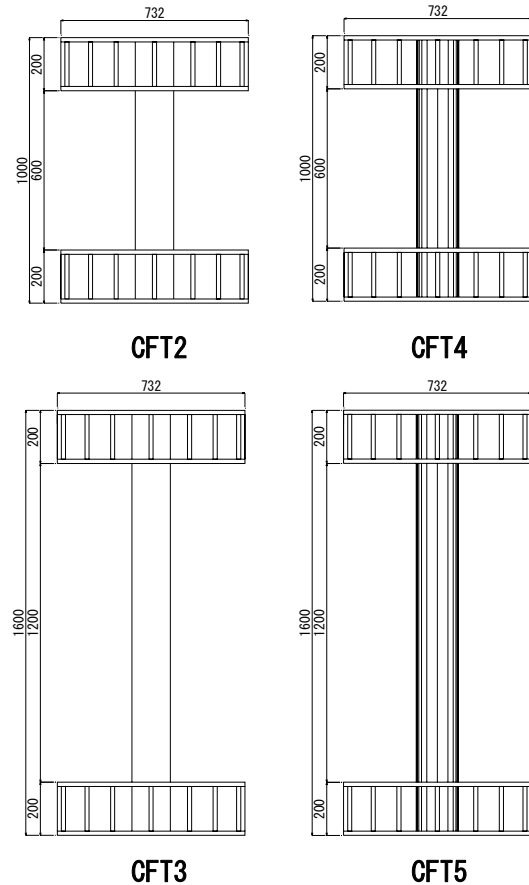


図-1 試験体概観図

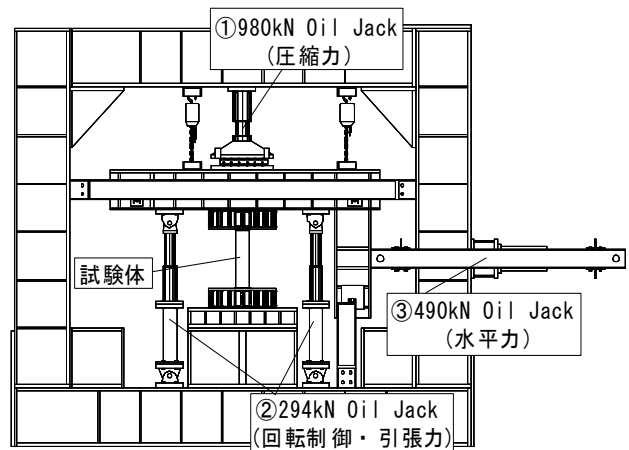


図-2 載荷装置

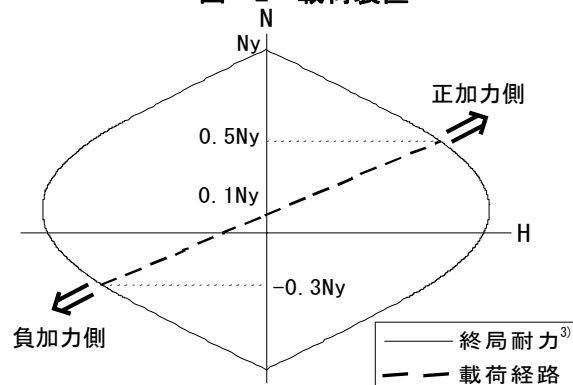


図-3 終局耐力と載荷経路

表-3 実験結果

試験体ナンバー		水平力(kN)				変形(×10 ⁻² rad)[サイクル]			
		CFT2	CFT3	CFT4	CFT5	CFT2	CFT3	CFT4	CFT5
終局耐力計算値	正	162.2	80.7	165.5	82.9	-	-	-	-
	負	-143.0	-71.7	-139.9	-70.1	-	-	-	-
最大耐力	正	160.7	77.9	156.1	66.4	1.50[+5]	1.25[+5]	3.84[+9]	3.67[+9]
	負	-156.6	-76.7	-158.0	-78.4	-3.02[-9]	-3.84[-9]	-3.34[-8]	-4.00[-9]
初期降伏発生荷重	正	124.5	69.8	85.5	39.2	0.46[+1]	0.67[+3]	0.27[+1]	0.33[+1]
	負	-103.3	-41.3	-111.1	-48.5	-0.32[-1]	-0.38[-1]	-0.39[-1]	-0.44[-1]
局部座屈発生荷重		149.5	77.9	93.8	65.4	0.73[+3]	1.25[+5]	0.51[+4]	1.42[+5]
鋼管亀裂発生荷重		-149.9	-69.1	-146.5	-	-1.26[-5]	-1.50[-6]	-1.00[-3]	-
限界変形角R _{0.95}	正	152.7	74.0	148.3	63.1	1.90	2.36	4.87	4.18
累積塑性変形R _{70.95}	正	152.7	74.0	148.3	63.1	3.43	3.25	6.09	13.24

の実験値を終局耐力計算値とともに表-3に示す。限界変形角 R_{0.95} は、CFT 構造で一般的に用いられる最大強度の 95%における部材角とした。また、荷重に P-Δ 効果を考慮していない。

正加力側において、何れも終局耐力計算値を下回っている。この要因として、圧縮～引張と軸力が変動することにより、充填コンクリートの材軸方向と直交方向の体積膨張が一定圧縮軸力下の場合と比べ小さく、鋼管による充填コンクリートの拘束効果が十分に発揮されなかったことが考えられる。また、シアスパン比の小さな CFT2, CFT4 は、シアスパン比の大きな CFT3, CFT5 に比べ、変位振幅の小さい段階で局部座屈が発生した。

一方、負加力側においては、鋼管に亀裂が発生しなかった CFT5 を除き、各試験体とも亀裂発生後に最大耐力に達した。また、負加力側の最大耐力は、全ての試験体が終局耐力計算値を上回った。これは歪硬化により耐力が上昇したと考えられる。角形 CFT 柱試験体である CFT2 と CFT3 については、材端部引張側の鋼管コーナ一部に発生した亀裂が鋼管平坦部へと伸展した。円形 CFT 柱試験体で亀裂の発生した CFT4 においては、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(写真-1 参照)。

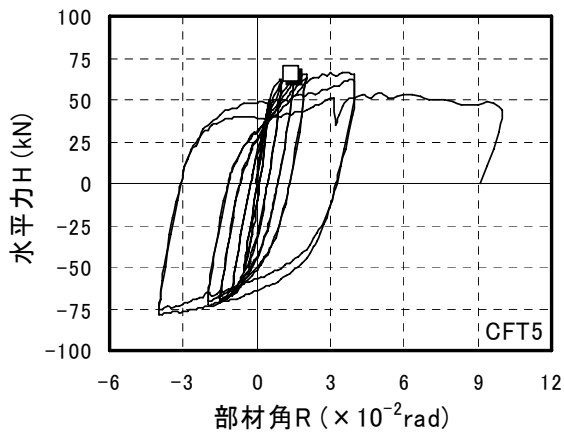
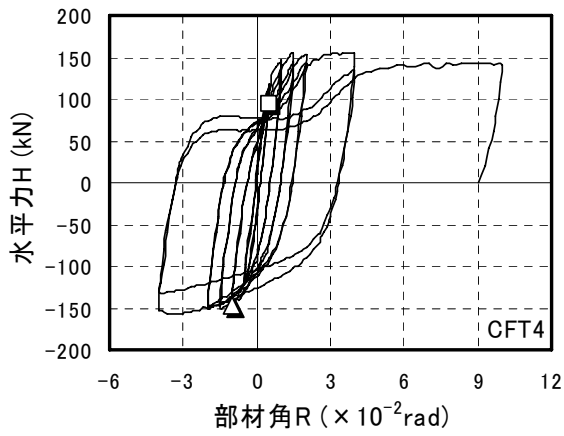
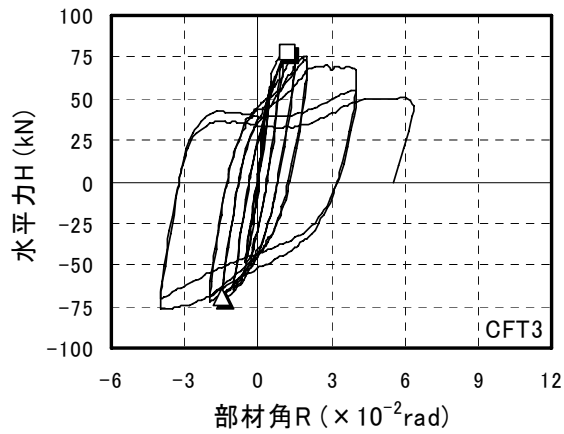
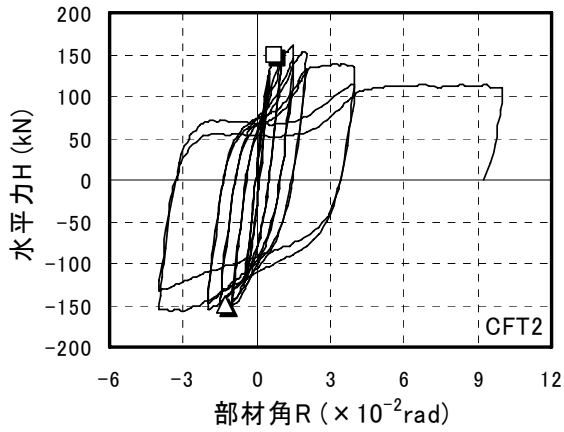
3.2 荷重-変形関係

図-4 に各試験体の水平力-部材角関係を示す。CFT2~CFT4 は、±7~±8 サイクル(変位

振幅 R=±0.015rad) 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いる。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 CFT5 は、±9 サイクル(変位振幅 R=±0.040rad) 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。よて、圧縮～引張の変動軸力下では、負加力側における鋼管の亀裂が、正加力時の挙動に影響を与えているといえる。

4. 変形性能

図-5 に各試験体の水平力-部材角関係の包絡線(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、荷重は試験体毎に水平力を最大耐力で除して基準化している。正加力側において、角形 CFT 柱試験体である CFT2 と CFT3 は、変位振幅 R=+0.015rad 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、円形 CFT 柱試験体である CFT4 と CFT5 は、変位振幅 R=+0.015rad 前後で最大耐力付近まで耐力が上昇し、その耐力を維持したまま変形が進み、R=+0.040rad で最大耐力に到達し、その後耐力が低下した。このことは限界変形角 R_{0.95} から見ても明らかであり(表-3 参照)、変動軸力下で正加力側において円形 CFT 柱は、角形 CFT 柱より変形性能に優れているといえる。



□ : 局部座屈発生 △ : 亀裂発生

図-4 水平力H-部材角R関係

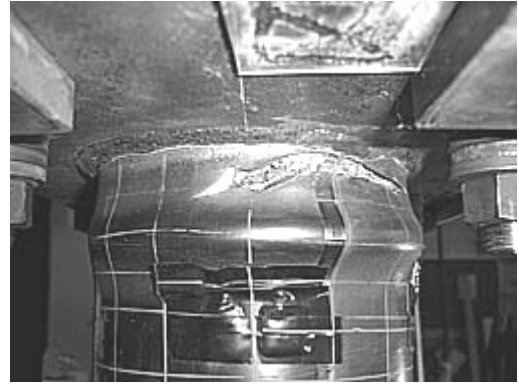


写真-1 最終状態 (CFT4)

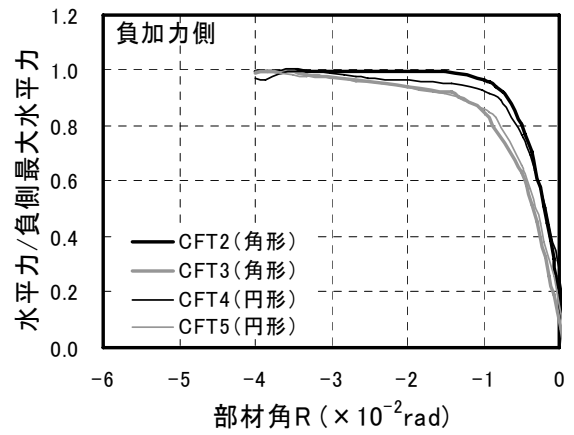
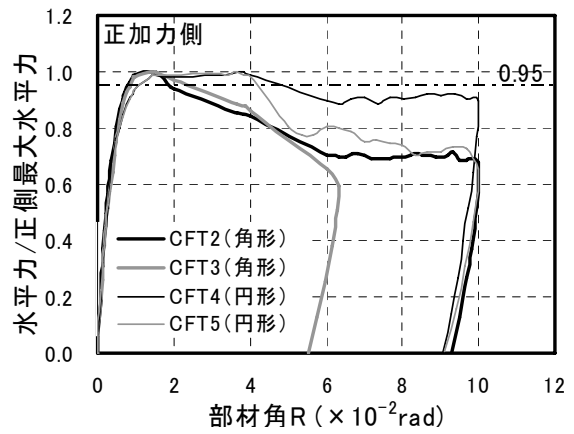


図-5 包絡線 (限界変形角 $R_{0.95}$)

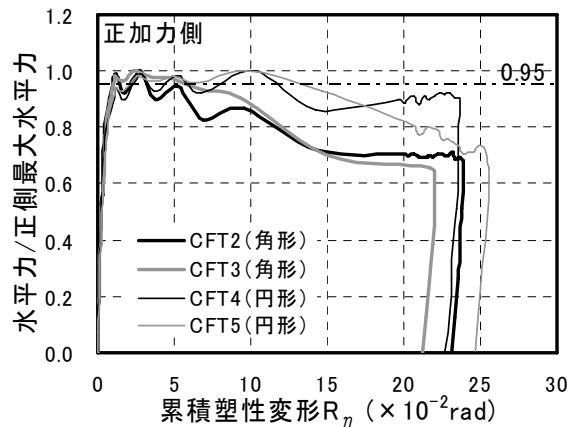


図-6 包絡線 (限界変形角 $R_{\eta 0.95}$)

累積塑性変形能力 $R_{\eta,0.95}$ (累積塑性変形⁴⁾ (付録 [1] 参照) を考慮した包絡線上で、耐力が最大耐力の 95% に低下した時点の変形角) で比較した場合も同様に円形鋼管柱試験体は高い変形能力を示している (図-6 参照)。これは、円形鋼管が角型鋼管に比べ、充填コンクリートの拘束力が大きく、大変形時においても耐力を維持することができたことによると考えられる。

負加力側では、シアスパン比の小さな CFT2, CFT4 は、シアスパン比の大きな CFT3, CFT5 に比べ、早期に耐力が上昇した (図-5 参照)。また、本実験で設定した荷重履歴の範囲では、角形 CFT 柱試験体、円形 CFT 柱試験体共に耐力の低下はみられなかった。

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、繰返し荷重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 (付録 [2] 参照) と部材角 R との関係を図-7 に示す。なお heq は、定常 1 サイクルに対して定義されるものであるが、変動軸力の場合、正加力側と負加力側における性状に大きな差異が見られるために、正加力側と負加力側に分けて heq を求めた。

正加力側において比較すると、シアスパン比の大きい CFT3, CFT5 は、変位振幅 $R = \pm 0.040\text{rad}$ までほぼ直線的に heq が増加しているのに対し、変位振幅の小さい段階で局部座屈が発生したシアスパン比の小さい CFT2, CFT4 は、変位振幅 $R = \pm 0.015\text{rad}$ 前後から heq の増加傾向の低下が大きく、変位振幅 $R = \pm 0.040\text{rad}$ では CFT3, CFT5 を下回っている。また、断面形状の違いによる heq の差は正加力側においては見られない。

負加力側においては、変位振幅 $R = \pm 0.020\text{rad}$ までは、シアスパン比の小さい CFT2, CFT4 の heq がシアスパン比の大きい CFT3, CFT5 を上回っている。しかし、変位振幅 $R = \pm 0.020\text{rad}$ 以降は角形 CFT 柱試験体の CFT2, CFT3 の heq の増加傾向が低下し、変位振幅 $R = \pm 0.040\text{rad}$ においては、円形 CFT 柱試験体の CFT4, CFT5 の heq

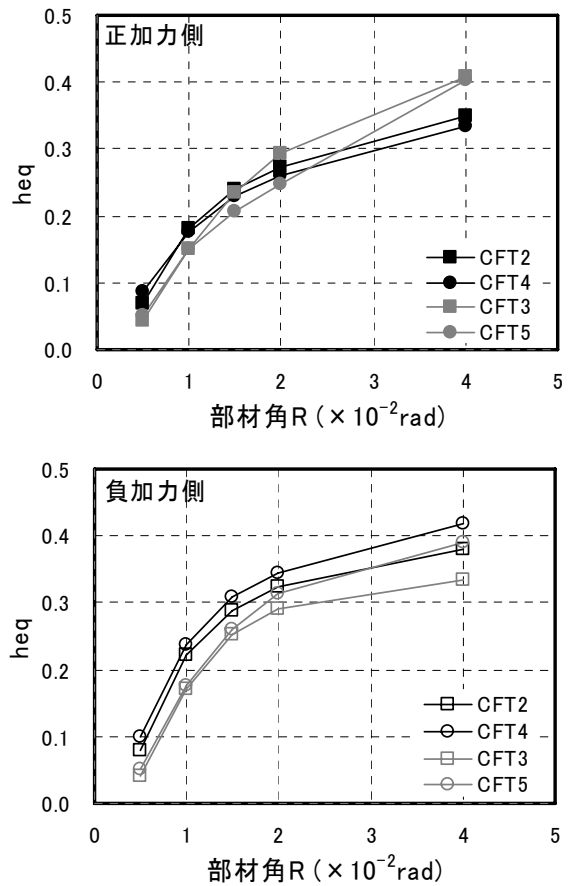


図-7 等価粘性減衰定数 heq —部材角 R 関係

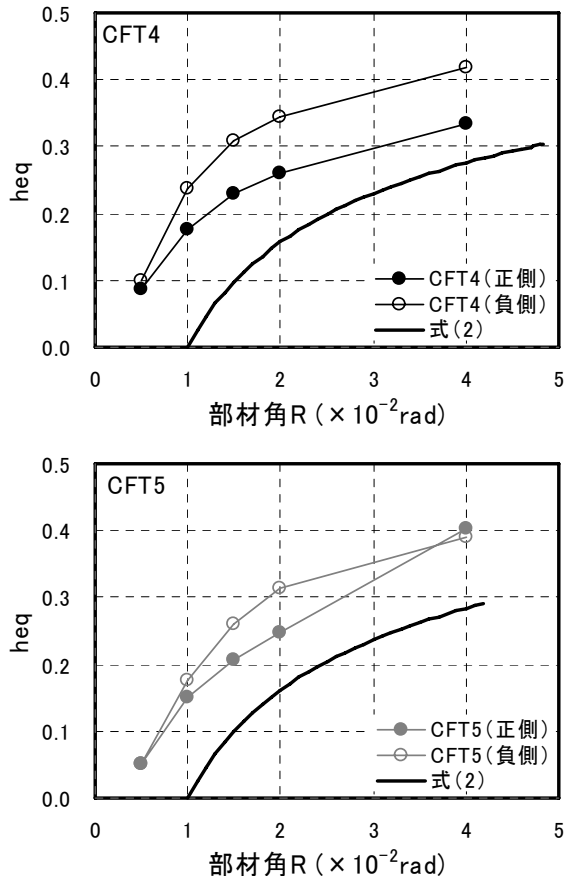


図-8 heq 推定式

を下回っている。

また、曲げ破壊する充腹形 SRC 部材の heq の推定式⁵⁾において、 $R_{0.80}$ を $R_{0.95}$ とした式 (2) と本実験の CFT4, CFT5 の heq —部材角 R 関係を併せて図-8 に示す。

$$heq = 1.5(1 - \frac{q}{\sqrt{R}}) / \pi \quad (2)$$

$$q = 1 - 0.2(R - 1) / (R_{0.95} - 1)$$

ここに、 R : 部材角, $R_{0.95}$: 限界変形角

式 (2) において、実験結果から求めた限界変形角 $R_{0.95}$ を用いた場合、式 (2) は、変位振幅 $R = \pm 0.020\text{rad}$ 以後の大変形時において、実験値の heq の傾向をよく捉えているが、その評価はかなり安全側である。

6. 結論

地震時の中高層建物の下層階外柱を想定した、圧縮～引張の変動軸力下で繰返し水平力を受ける円形鋼管を用いた CFT 柱の静加力曲げせん断実験を行った。次いで、既報²⁾における角形鋼管を用いた CFT 柱の実験結果を含めて、変形性能とエネルギー吸収性能の比較・検討を行った。

本論文の範囲内で、変形性能の指標である限界変形角 $R_{0.95}$ について比較すると、圧縮軸力下では、円形 CFT 柱試験体は角形 CFT 柱試験体より大きく、大変形時に至るまで耐力を維持している。変動軸力下において円形 CFT 柱は、角形 CFT 柱に比べ高い変形性能を有している。

エネルギー吸収性能の指標である等価粘性減衰定数 heq については、SRC 部材の場合の推定式によると、変動軸力下の円形 CFT 部材の heq を大変形時に至るまで推定することができたがその評価はかなり安全側である。また、鋼管の局部座屈が発生すると、等価粘性減衰定数の増加傾向が低減し、局部座屈発生時期が大変形時のエネルギー吸収性能に影響を及ぼすといえる。

謝辞

本研究の一部は、平成 17 年度文部科学省科学研究費補助金基盤研究 (B) (2) (代表者：加藤

大介新潟大学教授) により行った。

付録.

【1】累積塑性変形評価法⁴⁾

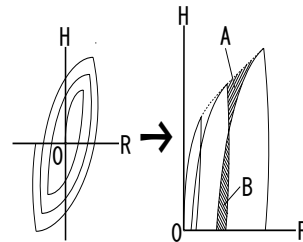
モーメント振幅が拡大するごとにループが拡大してゆく履歴曲線 (鉄骨型) の場合、各履歴曲線を連結してゆく方法。本論文では、バウシinger 効果を含めた除荷域での変形軟化現象を考慮するために、付図-1 の A と B の面積が相殺されるような連結方法をとった。

【2】等価粘性減衰定数 heq

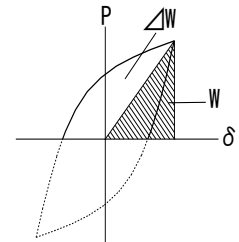
エネルギー吸収性能の指標である等価粘性減衰定数 heq の定義式として付 (1) 式を用いた。

$$heq = \frac{\Delta W}{2\pi \cdot W} \quad \text{付 (1)}$$

ここに、 ΔW : 半サイクルで吸収するエネルギー、 W : 等価弾性剛性に置き換えた弾性エネルギー (付図-2 参照) である。



付図-1 累積塑性変形



付図-2 heq

参考文献

- 1) 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
- 2) 土井希祐ほか: 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, 2005.7
- 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, 2001.1
- 4) 日本建築学会: コンクリート充填鋼管構造設計施工指針, pp.170-176, 1997.10
- 5) 称原良一, 土井希祐: SRC 造建物の変形性能と D_s 値, 日本建築学会構造系論文集, No.540, pp.149-154, 2001.2