

論文 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

土井 希祐*¹・稲田 輝巳*²・村山 双美*²・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鋼管柱の静加力実験を行った。本実験の結果、および既往研究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及ぼす軸力比、シアスパン比、および鋼管幅厚比の影響について検討を行い、以下の知見を得た。変形性能は、軸力比と負の相関があり、圧縮側平均軸力比により概ね評価できる。なお、引張軸力による鋼管亀裂の進展により変形性能が著しく低下する場合がある。また、エネルギー吸収性能は、鋼管の局部座屈および引張力による亀裂により大変形時に低下する場合がある。

キーワード：CFT 柱部材, 角形鋼管, 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、CF T と表記)構造等の鋼コンクリート合成構造建築物は高層であり、地震時において下層階の外柱は大きな変動軸力を受ける。従って、変動軸力の下で繰り返し水平力を受ける CFT 部材の変形性能とエネルギー吸収性能の評価法を確立することは、鋼コンクリート合成構造建物の合理的な耐震設計を行う上で重要であると考えられる。しかし、既報¹⁾において報告したように、一定軸力を受ける場合の実験研究が大半を占め、変動軸力を受ける場合の研究は数少ない^{2)~7)}。その中で、角形鋼管を用いた CFT 柱部材については、圧縮～引張の変動軸力を受ける場合、引張力による鋼管の亀裂により変形性能が大きく低下する場合があることが報告されている。そこで角形鋼管を用いた CFT 柱部材が、水平力に比例した軸力変動の下で正負交番繰り返し水平力を受ける場合の静加力実験を行い、基礎的な実験資料の整備を行うとともに、本実験結果、および既往の実験資料に基づいて実験データベースを整備し、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、およびエネルギー吸収性能について検討を行った。

2. 実験

2.1 試験体

表-1および**図-1**に試験体の柱部断面および外観を示す。試験体は3体である。試験体柱部には STKR400 の角形鋼管(□-150×150×6, または□-150×150×4.5)を使用し、 $F_c=21\text{N/mm}^2$ の普通コンクリートを充填した。加力スタブには、SS400 のBH-200×300×16×16を使用した。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で製作した。試験体柱部に使用した鋼管およびコンクリートの力学的特性を**表-2(a)~2(b)**に各々示す。

2.2 載荷方法

図-2に載荷装置を示す。980kN 圧縮油圧ジャッキ A により試験体柱部分に圧縮軸力を作用させた。また、294kN 圧縮引張油圧ジャッキ B により、試験体上部加力スタブを水平に保持するとともに、試験体柱部分に引張軸力を作用させた。さらに、490kN 圧縮引張油圧ジャッキ C により試験体に水平力を作用させた。

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、地震時の外柱を想定し、試験体に式(1)に示す軸力比 $+0.5N_y \sim -0.2N_y$

*1 新潟大学教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

*2 新潟大学大学院自然科学研究科

表-1 試験体断面

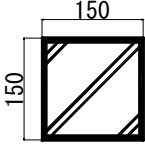
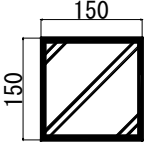
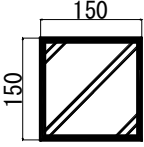
試験体名	CFT-1	CFT-2	CFT-3
断面形状			
	□- 150×150×6	□- 150×150×4.5	□- 150×150×4.5
D mm	150	150	150
t mm	6.0	4.5	4.5
L(=2a) mm	600	600	1200
A mm ²	3456	2619	2619
As mm ²	532	400	400
D/t	25.0	33.3	33.3
a/D	2.0	2.0	4.0
As/A %	15.4	11.6	11.6

表-2(a) 鋼管の力学的特性

降伏点 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	備考
395	443	212	CFT-1
367	443	205	CFT-2 CFT-3

表-2(b) コンクリートの力学的特性

圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	材齢 (日)	備考
25.1	2.59	25.1	34	CFT-1
23.0	2.04	21.7	44	CFT-2
22.3	2.04	22.2	28	CFT-3

注) D: 断面幅, t: 鋼管厚, L: 材長 (=2a, a: シアスパン), As: 鋼材部, 断面積, A: 断面積, D/t: 幅厚比, a/D: シアスパン比, As/A: 鋼材断面積比

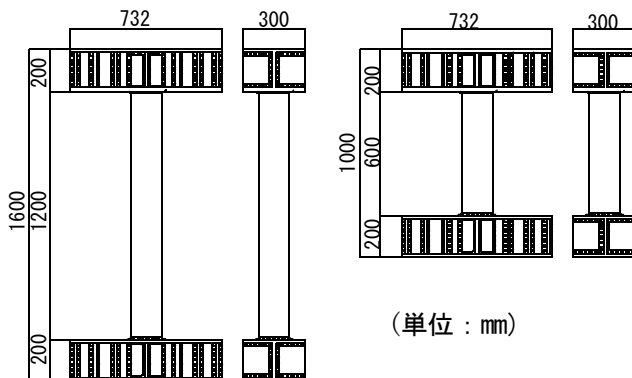


図-1 試験体

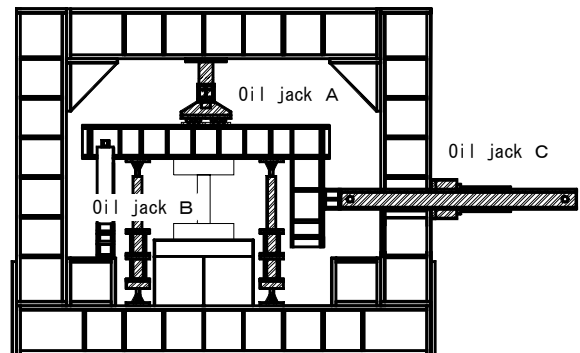


図-2 荷重装置

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。

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

ここに、N: 軸力, N_y : 累加圧縮耐力⁸⁾, H: 水平力, $H_{0.5N_y}$: $N=0.5N_y$ の時の断面耐力⁸⁾ から決まる水平力である。

荷重履歴は、部材角 $R=5, 10, 15, 20$, および $40 \times 10^{-3} \text{rad}$ の各変位振幅において正負2回ずつ交番繰り返し荷重を行なった後、正方向へ加力装置の限界まで荷重した。

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時の水平力荷重方向を正加力側、柱軸力が引張となる時の水平力荷重方向を負加力側と表記する。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

実験により得られた各試験体の最大耐力、初

期降伏発生荷重、局部座屈発生荷重、鋼管亀裂発生荷重、限界変形角を終局耐力計算値とともに表-3に示す。なお、本論文においては、荷重に $P-\Delta$ 効果を考慮していない。また、限界変形角は、CFT 構造で一般的に用いられる、最大強度の 95% の強度点における部材角 R_{95} とした。各試験体とも、正加力側において局部座屈の発生後に最大耐力に達しているが、幅厚比の大きい CFT-2, および CFT-3 においては終局耐力計算値をやや下回っている。一方、負加力側においては、何れも終局耐力計算値を上回っている。また、負加力側においては、材端部において角形鋼管コーナー部より発生した亀裂が徐々に平坦部へと進展し、その影響により、 $R=0.02 \text{rad}$ 以降において CFT-1 は曲げ耐力が急激に低下した(写真-1参照)。

3.2 荷重-変形関係

水平力-部材角関係を図-3に示す。各試験体とも、±7 サイクル(変位振幅 $R=\pm 0.015 \text{rad}$)

表-3 実験結果

試験体名	水平力 (kN)			変形 ($\times 10^{-2}$ rad)[サイクル]			
	CFT-1	CFT-2	CFT-3	CFT-1	CFT-2	CFT-3	
終局耐力 計算値	正	213.0	162.2	80.7	-	-	-
	負	-198.0	-143.0	-71.7	-	-	-
最大耐力	正	224.4	160.7	77.9	1.40 [+5]	1.50 [+5]	1.25 [+5]
	負	-217.1	-156.6	-76.7	-1.50 [-5]	-3.02 [-9]	-3.84 [-9]
初期降伏 発生	正	161.6	124.5	69.8	0.49 [+1]	0.46 [+1]	0.67 [+3]
	負	-184.3	-103.3	-41.3	-0.48 [-3]	-0.32 [-1]	-0.38 [-1]
局部座屈 発生		164.4	149.5	77.9	0.60 [+5]	0.73 [+3]	1.25 [+5]
鋼管亀裂 発生		-217.1	-149.9	-69.1	-1.50 [-5]	-1.26 [-5]	-1.50 [-6]
限界変形 点 $R_{0.95}$	正	213.2	152.7	74.0	2.04 -	1.90 -	2.36 -
	負	-206.9	-148.8	-72.9	1.56 -	-	-

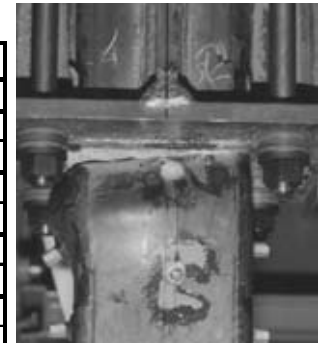


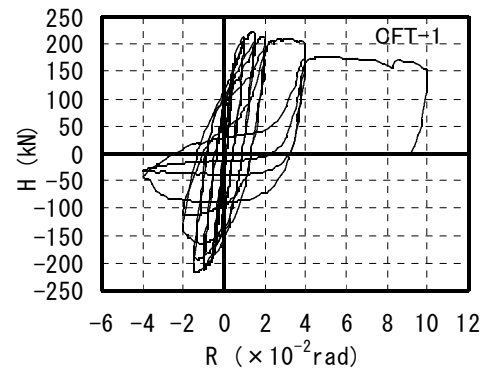
写真-1 最終状態 (CFT-1)

まで紡錘形に近い履歴ループを示すが、それ以降、特に正加力側においてスリップ形の履歴ループへと変化する。これは、正加力時における鋼管の局部座屈、および負加力側における柱端部鋼管の亀裂の影響であると考えられる。特に、CFT-1は、引張力による鋼管の亀裂が進展し、部分的に破断した影響も加わり、大変形時におけるスリップ形の履歴ループが顕著であった。一定軸力下でのCFT柱の繰り返し曲げせん断実験では、一般的に正加力側、負加力側ともに形の等しい紡錘形、もしくは逆S字形の履歴ループを描くのに対して、変動軸力下では、正加力側と負加力側で大きく形の異なった履歴ループを描く特徴がある。

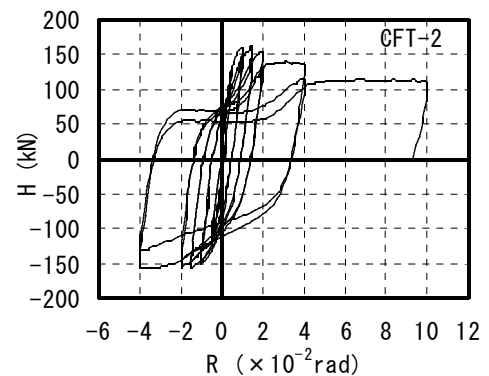
4. 変形性能

本研究のCFT柱試験体3体、および文献^{2)~4)}の角形鋼管を用いたCFT柱試験体8体、計11体の一覧を表-4に示す。変形性能の指標として、限界変形角 R_{95} を取り、最大圧縮軸力比 η_c 、シアスパン比 a/D 、鋼管幅厚比 D/t の影響について分析した。その結果を、図-4~図-6に各々示す。なお、図-4の横軸は R_{95} の下限推定式との関連から $\eta_c/2$ としている¹⁾。また、本論文で対象とした圧縮~引張の軸力変動を受けるCFT柱部材の場合、正加力側と負加力側において非対称の荷重-変形関係を示すことから、正加力側と負加力側に分けて分析を行った。

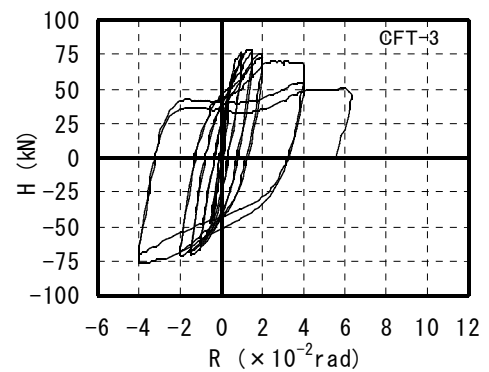
図-4より、 R_{95} は $\eta_c/2$ と負の相関があり、正加力側において、その傾向は明瞭である。図-4には



(a) CFT-1



(b) CFT-2



(c) CFT-3

図-3 水平力 H-部材角 R関係

表-4 実験資料一覧

研究者	試験体名	鋼管 (mm)	a (mm)	$s\sigma_y$ (MPa)	$c\sigma_B$ (MPa)	η_c	η_t	a/D	D/t	備考
本研究	CFT-1	□- 150×150×6	300	395	25.1	0.50	-0.28	2.00	25.0	
	CFT-2	□- 150×150×4.2	300	367	23.1	0.50	-0.25	2.00	35.6	
	CFT-3	□- 150×150×4.2	600	367	22.3	0.50	-0.25	4.00	35.6	
2) 甲斐他	SR6-A-9-V	□- 210×210×9	630	536	91.7	0.70	-0.30	3.00	23.8	
	SR6-C-9-V	□- 210×210×6	630	540	91.7	0.70	-0.30	2.98	35.6	骨格曲線のみ
3) 稲井他	SR8-A-9-V	□- 210×210×9	630	824	94.5	0.70	-0.30	3.03	18.9	
	SR8-C-9-V	□- 180×180×6	630	823	94.5	0.70	-0.30	3.00	27.0	骨格曲線のみ
4) 辻他	CFT45v/12-2	□- 125×125×4.5	700	324	37	0.50	-0.33	5.60	27.8	
	CFT45v/6-3	□- 125×125×4.5	700	324	37	0.33	0.00	5.60	27.8	
	CFT60v/12-2	□- 125×125×6.0	700	354	37	0.33	-0.17	5.60	20.8	
	CFT60v/6-3	□- 125×125×6.0	700	354	37	0.50	-0.33	5.60	20.8	

注) 表-4中の記号は下記のとおりである。

D : 断面成, t : 鋼管厚,
a : シアスパン,
 $s\sigma_y$: 鋼管降伏応力度,
 $c\sigma_B$: コンクリート圧縮強度,
 η_c : 圧縮側最大軸力比
(= N_{cmax}/Nu),
 η_t : 引張側最大軸力比
(= N_{tmax}/Nu).
ただし, Nu : 軸圧縮強度。

一定軸力を受ける SRC 部材の限界変形角 R_{80} の下限推定式^{9),10)}を修正した式(2)を実線で示している。

$$R_{95}(\times 10^{-2} \text{ rad}) = 4 - 10 \cdot (\eta_c / 2) > 0.5 \quad (2)$$

ここに, η_c : 最大圧縮軸力比

図-4より, 式(2)は, CFT 柱部材の R_{95} の実験結果の下限値を押さえており, R_{95} の下限推定式として概ね適用可能であると考えられる。

図-5より, R_{95} とシアスパン比は, 正加力側において正の相関を示しているが, 負加力側においては明瞭な相関は認められない。シアスパン比が大きい試験体は, 軸力比が比較的低いものが多ことから, 見かけ上 R_{95} が大きくなっていると思われる。

図-6より, 同一実験シリーズにおいて比較すると, 鋼管幅厚比が大きい試験体の場合, 若干 R_{95} が小さい傾向が認められるが, ばらつきが大きく, 明瞭な相関は認められない。

ただし, 限られたデータに基づくものであり, 実務への適用を含めて, 今後さらに, 材料強度をはじめとする諸要因の影響について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, 本論文の

試験体 3 体について, 繰り返し载荷の各変位振幅における 2 回目の繰り返しループに対する等価粘性減衰定数 heq を取り, 部材角 R との関係を図-7に示す。各試験体とも, 鋼管の局部座屈や引張亀裂が顕著となる前の, 部材角 $R=0.02$ rad 前後までは heq が増大しているが, それ以降の大変形時においては, heq の増加傾向は頭打ちとなっている。特に, 引張軸力による鋼管の亀裂が顕著であった CFT-1 においては, 負加力側における急激な耐力低下に伴い, 大変形時に heq は減少しており, その傾向は正加力側において顕著であった。

図-7には, 曲げ破壊する充腹形 SRC 部材の heq の推定式^{9),10)}において, R_{80} を R_{95} とした式(3)を破線で示している。式(3)は最大点指向型の履歴ループを仮定して導かれたものであり, 鉄骨による履歴ループの膨らみの影響を考慮している。

$$heq = 1.5 \cdot (1 - q \sqrt{R}) / \pi \quad (3)$$

ここに, R : 部材角 ($\times 10^{-2}$ rad.)

$$q = 1 - 0.2 \cdot (R - 1) / (R_{95} - 1)$$

R_{95} : 限界変形角(式(2)による)

式(3)による heq の推定値は, 変動軸力を受ける CFT 柱部材に対してはかなり安全側の評価となっているが, CFT-1 に見られるように, 大

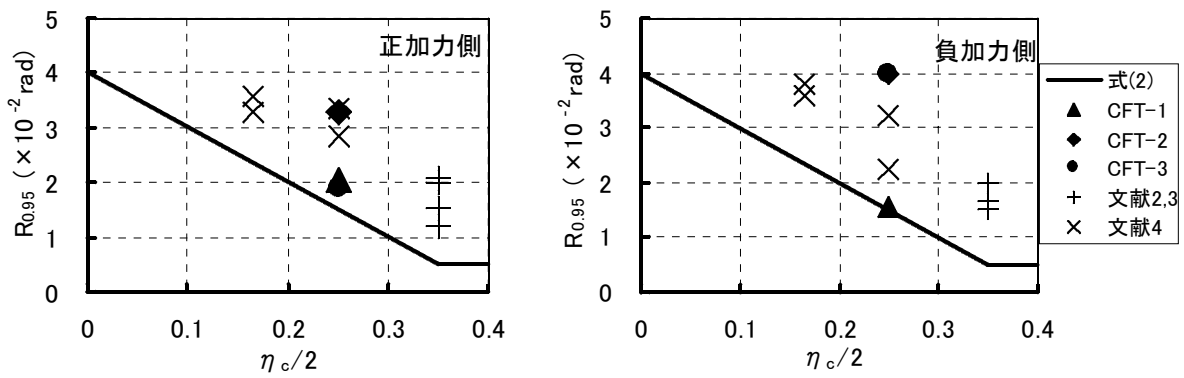


図-4 限界変形角 R95—平均圧縮軸力比 $\eta c/2$ 関係

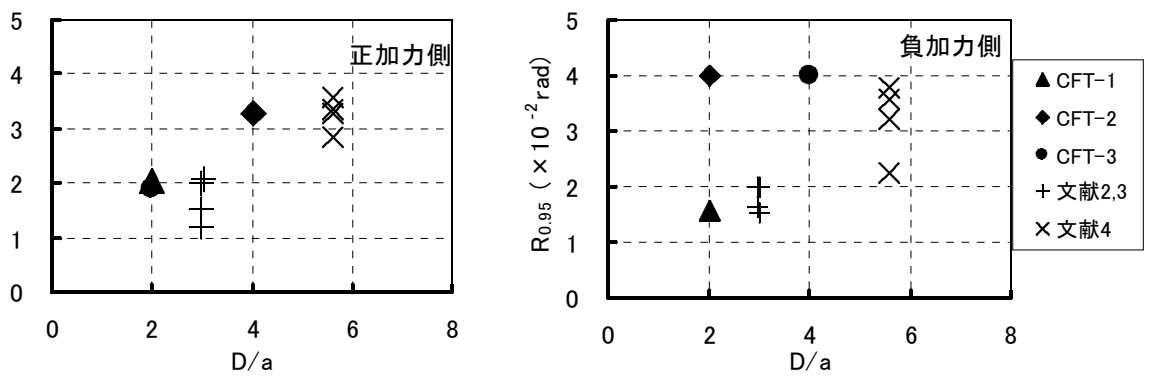


図-5 限界変形角 R95—シアスパン比 a/D 関係

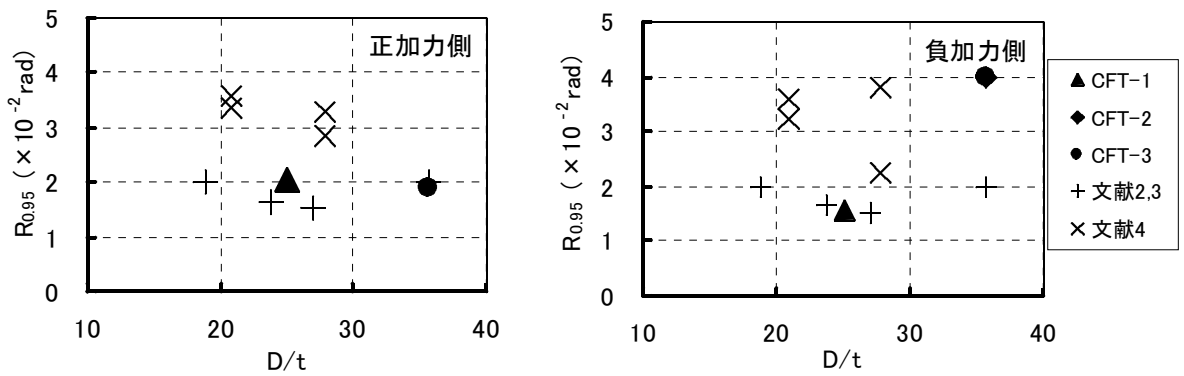


図-6 限界変形角 R95—幅厚比 D/t 関係

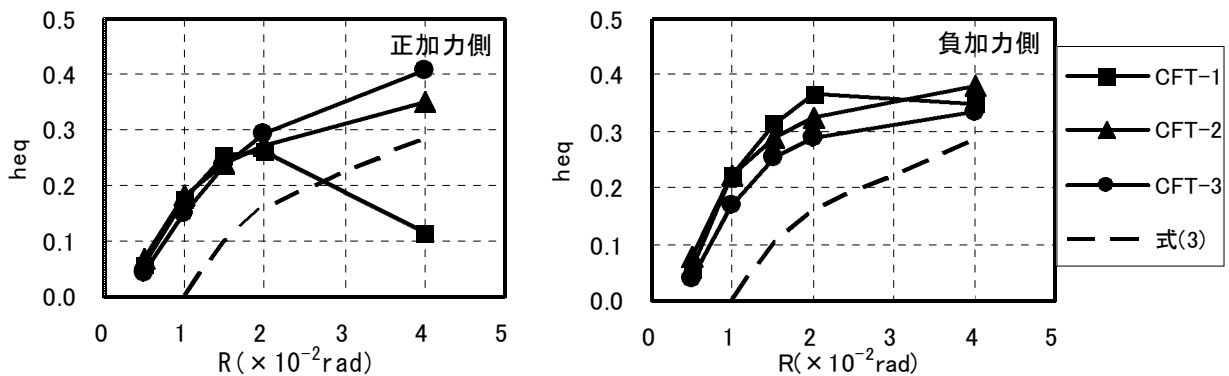


図-7 等価粘性減衰定数 heq —部材角 R 関係

変形時に鋼管の引張力による亀裂の進展により危険側の評価となる場合もあり，さらに検討が必要と考えられる。

6. 結論

圧縮～引張の変動軸力下で繰り返し水平力を受ける CFT 柱の静加力実験を行った。次いで，既往の実験資料を含めた実験データベースに基づいて，変形性能とエネルギー吸収性能について検討を行った。

本論文の範囲内では，変形性能の指標である限界変形角 R_{95} は，圧縮側平均軸力比 $\eta_c/2$ と負の相関があり，SRC 部材における下限推定式を修正することにより，変動軸力を受ける CFT 柱部材にも概ね適用可能であることが明らかとなった。

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，CFT 部材の heq をかなり安全側に評価するが，引張力による鋼管亀裂の進展によっては危険側の評価となる場合もあり，さらなる検討が必要と考えられる。

なお，変形性能，およびエネルギー吸収性能とも，限られたデータ数に基づくものであり，実務への適用を含めて，今後さらに，材料強度をはじめとする諸要因を組み合わせた評価法を検討して行く必要があると考えられる。

謝辞

本研究の一部は，日本鉄鋼連盟平成16年度鋼構造研究助成により行った。ここに記して謝意を表す。

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) 甲斐誠ほか：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4．590 N/mm² 鋼を用いた角形柱の実験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp.1029-1030，1996.9

- 3) 稲井栄一ほか：ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究(CFT-14)，コンクリート充填鋼管柱の曲げせん断性状 その6．780 N/mm² 鋼を用いた角形柱の実験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp.1033-1034，1996.9
- 4) 辻文三ほか：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2 曲げせん断実験)，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp.1265-1266，1999.9
- 5) 藤本利昭ほか：ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究(CFT-13)，コンクリート充填鋼管柱の曲げせん断性状その5．590 N/mm²鋼を用いた円形柱の実験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp.1031-1032，1996.9
- 6) 福元敏之ほか，ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究(CFT-15)，コンクリート充填鋼管柱の曲げせん断性状 その7．780 N/mm² 鋼を用いた円形柱の実験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp.1035-1036，1996.9
- 7) 河野昭彦ほか：繰り返し水平力と変動軸力を受けるコンクリート充填円形鋼管柱の実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第547号，pp.193-198，2001.9
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 土井希祐：十字形鉄骨を用いた SRC 部材の変形性能とエネルギー吸収性能，鋼構造年次文報告集，第9巻，pp.193-198，2001.11