

角形 CFT 柱の変形能力に関する研究

— 限界部材角の考察 —

日大生産工(院) ○助川 海都
日大生産工 藤本 利昭

1. まえがき

近年、建物形状や意匠設計上の要求から、コンクリート充填鋼管構造 (Concrete Filled Steel Tube, 以下 CFT と略称) は、柱の断面に矩形断面を採用する場合や、超高層ビルのエントランスを開放的な吹き抜け空間とするため、座屈長さ径比の大きい細長い柱として設計する場合など、多様なニーズに対応している。

CFT 柱の変形能力は、現行の日本建築学会「コンクリート充填鋼管構造設計施工指針」¹⁾ (以下、CFT 指針と略称) では、図 1 に示すようにせん断力が最大耐力以降で 5% 低下した点を限界部材角 R_u と定義し評価している。その変形能力の評価式は、正方形断面を対象に構築されており、更に座屈長さ径比 $L_k/D=10$ を境に低減係数を乗じて評価するため式が不連続となる。

そこで、本研究では座屈長さ径比 6~20 の正方形、矩形断面 CFT 試験体を対象として角形 CFT 柱の変形能力について考察を行う。

2. 検討方法

2.1 検討内容

CFT 柱の変形能力を表す限界部材角 cR_u は、CFT 指針の以下の評価式が適用される。

$$cR_u = \frac{\gamma_r}{0.15 + 3.79 \frac{N}{N_0}} \cdot \frac{t}{D(B)} \cdot \beta \quad \dots (1)$$

$$N_0 = sA \cdot F_y + cA \cdot F_c, \quad \beta = 1.0 - \frac{F_c - 40.3}{566} \leq 1.0$$

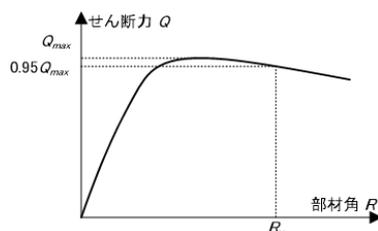


図 1 限界部材角の定義図

ここで、 N : 作用軸力、 N_0 : 軸圧縮耐力、 t : 鋼管の板厚、 $D(B)$: 角形鋼管のせい(幅)、 F_y : 鋼管の降伏強さ、 F_c : コンクリート強度、 sA : 鋼管の断面積、 cA : コンクリートの断面積である。

CFT 指針の評価式は、 $L_k/D \approx 6$ の比較的短い柱の実験データに基づき構築された日米共研の提案式²⁾³⁾に柱長さを考慮し、 $L_k/D \leq 10$ の場合 $\gamma_r=1.0$ 、 $L_k/D > 10$ の場合 $\gamma_r=0.8$ と低減係数を乗じた式である。CFT 指針式は幅厚比、コンクリート強度、軸力比が因子の一部となる式であり、これらが大きくなるほど限界部材角が小さくなるという物理現象を表している。しかしながら、CFT 指針は低減係数 γ_r により $L_k/D=10$ を境に評価式が不連続となっている。

よって、評価式の因子である座屈長さ径比 L_k/D 、幅厚比 $D(B)/t$ 、軸力比 N/N_0 に焦点をあて検討を行う。

2.2 検討に用いた試験体

表1は、CFT 柱の部材種別(部材ランク)を示している。構造設計で算出される必要保有水平耐力は部材種別が一要素となっており、CFT 構造の部材種別は限界部材角により評価される。

表2に試験体概要を示す。試験体、実験概要は、参考文献4)~11)に記されている。試験体は、座屈長さ径比 $L_k/D=6.00 \sim 20.0$ 、幅厚比 $D(B)/t=17.6 \sim 44.6$ 、軸力比 $N/N_0=0 \sim 0.67$ 、材料強度 ($F_y=313 \sim 449 \text{ N/mm}^2$ 、 $F_c=33.1 \sim 76.7 \text{ N/mm}^2$) の正方形28体、矩形12体、計40体である。

表1 CFT 柱の部材種別

部材種別	限界部材角 R_u (%)
FA	$0.02 \leq R_u$
FB	$0.15 \leq R_u < 0.02$
FC	$0.01 \leq R_u < 0.15$
FD	$R_u < 0.01$

Study on the Deformability of Square Concrete Filled Steel Tube Columns

— Consideration of definition of deformation capacity —

Kaito SUKEGAWA and Toshiaki FUJIMOTO

表2から、ほとんどの試験体の部材種別はFAとなっており靱性を確保できている。また限界部材角の実験値と計算値の比 eR_u/cR_u から、多くの試験体の実験値が計算値を上回る事が分かる。正方形断面の eR_u/cR_u の平均値は1.30(標準偏差:0.27)となっており、計算値は約3割大きい事が分かる。また、矩形断面において長辺の eR_u/cR_u の平均値は1.17(標準偏差:0.18)で約1.7割増しの評価となり、短辺では平均値は0.72(標準偏差:0.15)と計算値は実験値を上回っている。

3. 検討結果

3.1 軸力比における検討

図2に軸力比-限界部材角関係を示す。図中の破線は部材種別の境界値を示している。また、矩形断面の限界部材角計算値には、長辺の値を使用している。

図2より、軸力比が大きくなるほど、限界部材角実験値が小さくなる右肩下がりの傾向が見られる。実験結果から分かるように、軸力比0.5を下回る試験体の部材種別はFAとなっている。

表2 試験体概要

論文	番号	試験体名称	L (mm)	L _k (mm)	L _k /D	B (mm)	D (mm)	t (mm)	B/t	D/t	F _y (N/mm ²)	F _c (N/mm ²)	N/N ₀	eR _u (%) (部材種別)	cR _u (%)		eR _u /cR _u						
															長辺	短辺	長辺	短辺					
福元ら ⁴⁾	1	LD20n15-M	1500	3000	20.0	150	5.97	25.1	378	55.1	0.15	0.047(A)	0.043	1.09									
	2	LD20n30-M	1500	3000						61.6	0.30	0.031(A)	0.024	1.30									
	3	LD20n45-M	1500	3000						60.8	0.45	0.023(A)	0.017	1.39									
	4	LD20n60-M	1500	3000						59.7	0.60	0.019(B)	0.013	1.50									
	5	LD14n0-M	1050	2100	14.0					73.6	0.00	0.120(A)*	0.200	0.60									
	6	LD14n15-M	1050	2100						76.2	0.15	0.050(A)	0.042	1.19									
	7	LD14n30-M	1050	2100						76.0	0.30	0.033(A)	0.023	1.42									
	8	LD14n45-M	1050	2100						75.9	0.45	0.022(A)	0.016	1.37									
	9	LD14n60-M	1050	2100	10.0					76.7	0.60	0.018(B)	0.012	1.46									
	10	LD10n30-M	750	1500						55.2	0.30	0.036(A)	0.030	1.20									
	11	LD10n45-M	750	1500						55.8	0.45	0.030(A)	0.021	1.44									
	12	LD10n60-M	750	1500						57.3	0.60	0.020(B)	0.016	1.22									
松井ら ⁵⁾	13	R22C30M	500	1000	10.0	100	4.40	22.7	407	36.3	0.30	0.047(A)	0.034	1.37									
	14	R22C50M	500	1000							0.50	0.032(A)	0.022	1.49									
	15	R31C30M	500	1000			3.21	31.2	449		0.30	0.029(A)	0.025	1.16									
	16	R31C50M	500	1000							0.50	0.023(A)	0.016	1.47									
	17	R43C30M	500	1000			2.24	44.6	415		36.0	0.30	0.022(A)	0.017	1.26								
	18	R43C50M	500	1000							0.50	0.015(C)	0.011	1.32									
山田ら ⁶⁾⁷⁾	19	/	1400	1400	11.2	125	4.50	27.8	313	33.1	0.17	0.043(A)	0.037	1.17									
	20		1400	1400							0.33	0.043(A)	0.020	2.11									
	21		1400	1400							0.67	0.018(B)	0.011	1.67									
	22		1400	1400			6.00	20.8	421		0.17	0.045(A)	0.049	0.92									
	23		1400	1400							0.33	0.029(A)	0.027	1.07									
	24		1400	1400							0.67	0.021(A)	0.014	1.46									
筆者ら ¹⁰⁾	25	900N20	900	900	6.00	150	4.22	35.5	417	38.7	0.20	0.030(A)	0.031	0.96									
	26	900N30	900	900							0.30	0.025(A)	0.022	1.14									
	27	1250N20	1250	1250							8.33	0.20	0.032(A)	0.031	1.04								
	28	1600N20	1600	1600							10.7	0.20	0.037(A)	0.025	1.49								
今井ら ⁸⁾⁹⁾	29	100s20	900	900	6.00	100	150	4.19	23.9	35.8	382	38.7	0.20	0.035(A)	0.031	0.046	1.12	0.75					
	30	100s30	900	900		0.30							0.027(A)	0.022	0.033	1.23	0.82						
	31	75s20	900	900		75.0							150	4.25	17.6	35.3	418	0.20	0.035(A)	0.031	0.062	1.12	0.56
	32	75s30	900	900														0.30	0.027(A)	0.022	0.044	1.24	0.62
	33	100w20	900	900	9.00	100	4.19	35.8	23.9	382	0.20		0.026(A)	0.031	0.046	0.85	0.57						
	34	100w30	900	900							0.30		0.022(A)	0.022	0.033	1.01	0.68						
	35	75w20	900	900	12.0	75.0	4.25	35.3	17.6	418	0.20		0.025(A)	0.025	0.050	0.99	0.50						
	36	75w30	900	900							0.30		0.022(A)	0.018	0.035	1.27	0.64						
筆者ら ¹¹⁾	37	1200s	1200	1200	8.00	100	150	4.32	23.2	34.8	379	33.1	0.20	0.036(A)	0.032	0.048	1.14	0.76					
	38	1200w	1200	1200	12.0	150	100		34.8	23.2				0.029(A)	0.025	0.038	1.13	0.75					
	39	1600s	1600	1600	10.7	100	150		23.2	34.8				0.040(A)	0.025	0.038	1.58	1.05					
	40	1600w	1600	1600	16.0	150	100		34.8	23.2				0.034(A)	0.025	0.038	1.35	0.90					

L:部材長さ,L_k:座屈長さ,eR_u:限界部材角実験値,cR_u:限界部材角計算値

*変形能力が大きく計測できた数値までとする

また、実験値と計算値(CFT指針式)で部材種別が異なっている試験体は、9体で7体が軸力比0.4を上回る試験体であった。

表3に限界部材角の実験値と計算値(CFT指針式)の差異を示す。試験体数に差はあるものの、軸力比 $0.1 < N/N_0 \leq 0.2$ の範囲で実験値と計算値の平均差のばらつきは、他の軸力比範囲よりも小さくなっている。逆に、軸力比 $0.3 < N/N_0 \leq 0.4$ の範囲では、最大差、平均差共に他の軸力比範囲よりも大きくなっている。

表3 限界部材角の実験値と計算値の差異

N/N_0	試験体数	計算値を下回る数	eR_u/cR_u (CFT指針式)(%)	
			最大差	平均差
$0.1 < N/N_0 \leq 0.2$	15	4	0.015	0.004
$0.2 < N/N_0 \leq 0.3$	11	0	0.013	0.006
$0.3 < N/N_0 \leq 0.4$	2	0	0.023	0.012
$0.4 < N/N_0 \leq 0.5$	6	0	0.010	0.007
$0.5 < N/N_0 \leq 0.6$	3	0	0.006	0.005
$0.6 < N/N_0 \leq 0.7$	2	0	0.007	0.007

3.2 座屈長さ径比における検討

図3に限界部材角の実験値 eR_u と計算値 cR_u の比較を示す。a)は日米共研式、b)にはCFT指針式を用いており、a)とb)を比較することで低減係数の働きを確認できる。また、点線は eR_u/cR_u の平均値を表している。

図3a)より低減係数 γ_r が考慮されていない日米共研式では、実験値が計算値を下回った試験体数は9体で $L_k/D > 10$ の試験体は6体であった。全体の eR_u/cR_u の平均値は1.12%で $L_k/D > 10$ の eR_u/cR_u の平均値は1.04%となった。

図3b)の低減係数 γ_r を考慮したCFT指針式では、実験値が計算値を下回った試験体数は5体で $L_k/D > 10$ の試験体は2体であった。全体の eR_u/cR_u の平均値は1.24%で $L_k/D > 10$ の eR_u/cR_u の平均値は1.30%となった。

図3a), b)を比較すると、低減係数 γ_r によって4体の試験体の計算値が実験値を下回り安全側の評価となった。しかし、低減係数 γ_r の影響で全体の eR_u/cR_u は約0.12%増え1.24%となり、 $L_k/D > 10$ の eR_u/cR_u は約0.26%増え1.30%と評価式の精度は落ちている。

図4に eR_u/cR_u -座屈長さ径比関係を示す。図の eR_u/cR_u の cR_u はCFT指針式値を用いており、実線は評価式の低減係数 γ_r を示す。

図4より、 $L_k/D > 10$ の正方形断面において多くの試験体が $eR_u/cR_u = 1.1 \sim 1.6$ に分布しており、安全側で評価されていることが分かる。しかしながら、 $L_k/D > 10$ の正方形断面2体、矩形断面1体の実験値は計算値を下回っており、 eR_u/cR_u のばらつきも0.60~2.11と大きくなってしまっている。

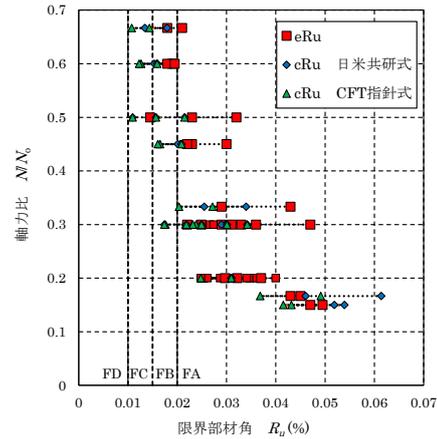
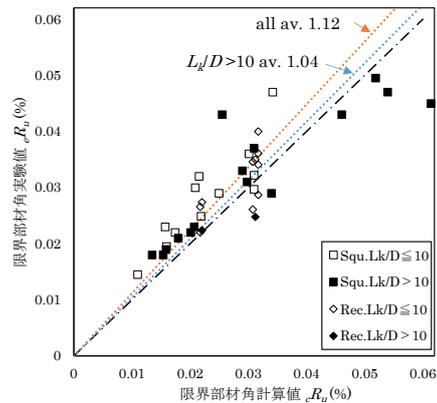
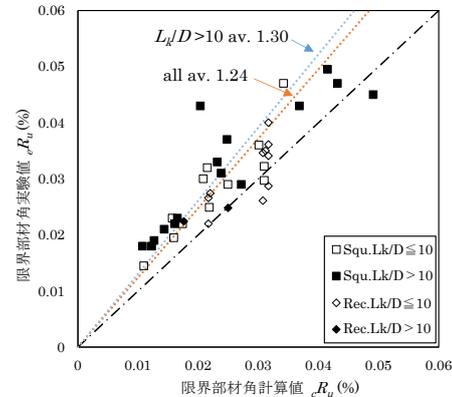


図2 軸力比-限界部材角関係



a) 日米共研式



b) CFT指針式

図3 限界部材角の実験値と計算値の比較

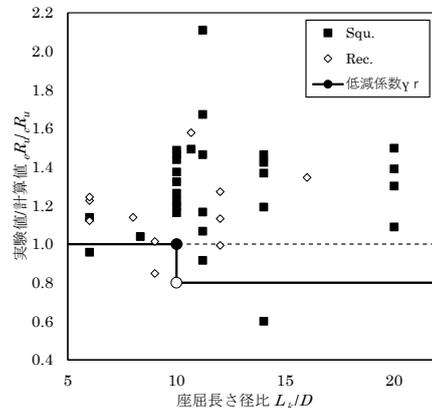


図4 eR_u/cR_u -座屈長さ径比関係

3.3 幅厚比における検討

図5に、限界部材角実験値と幅厚比関係を示す。図中の点線は、正方形、矩形断面の回帰直線である。

軸力比 $N/N_0 \leq 0.3$ の正方形断面の相関係数は -0.43 (標準偏差: 0.022)と負の相関が確認でき、軸力比 $N/N_0 > 0.3$ 正方形断面の相関係数は -0.32 (標準偏差: 0.007)と弱い負の相関が確認できた。相関係数と回帰直線から、軸力比が小さいと限界部材角に幅厚比が大きく影響することが分かる。矩形断面の相関係数は -0.54 (標準偏差: 0.006)と負の相関が確認できたが、幅厚比が $34.8 \sim 35.8$ と限られた範囲の結果である。

図6に eR_u/cR_u と幅厚比の関係を示す。図中の点線が正方形断面の $N/N_0 \leq 0.3$ 、 $N/N_0 > 0.3$ の平均値で、実線は正方形断面の軸力比 $N/N_0 \leq 0.3$ 、 $N/N_0 > 0.3$ の回帰直線である。

正方形断面において、 $N/N_0 > 0.3$ の範囲で平均値 1.46 、 $N/N_0 \leq 0.3$ の平均値 1.15 と軸力が高いほど eR_u/cR_u が大きくなった。また、正方形断面において軸力比が 0.3 以下の試験体は相関係数 0.13 (標準偏差: 0.21)、軸力比 $N/N_0 > 0.3$ の試験体の相関係数は 0.07 (標準偏差: 0.23)と若干の正の相関があるものの幅厚比の大きさは eR_u/cR_u に影響が少なく評価式は精度よく評価できている。

4. まとめ

限界部材角評価式の因子である軸力比 N/N_0 、座屈長さ径比 L_k/D 、幅厚比 $D(B)/t$ に着目し、計40体の実験値と計算値の比較を行い、以下の結論を得た。

- 軸力比 $N/N_0 \leq 0.2$ の範囲のみ計算値が実験値を上回る試験体が確認できたが、その試験体の実験値から十分な変形能力を確保できていることが分かった。
- 軸力比 $N/N_0 > 0.3$ の eR_u/cR_u が大きくなったことから、軸力比が大きい試験体の評価式の精度は落ちている。
- 評価式の低減係数 γ_r は全体的に良好な対応を示した。しかしながら、 $L_k/D > 10$ の範囲では、実験値のばらつきが大きかった。
- 幅厚比が大きいほど限界部材角は小さくなり、軸力が低い試験体の方が、軸力が高い試験体に比べ、幅厚比の影響を強く受けることが分かる。また、幅厚比の大きさは、 eR_u/cR_u には影響が少なく、評価式の精度が高いことが分かった。
- 矩形断面においては、評価式に長辺の値を代入したとき、対応がよく低減係数 γ_r も効果的に機能している。

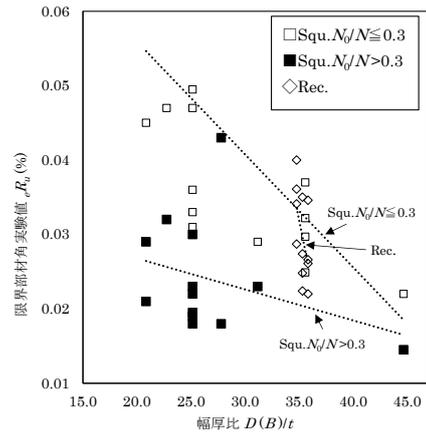


図5 限界部材角実験値—幅厚比関係

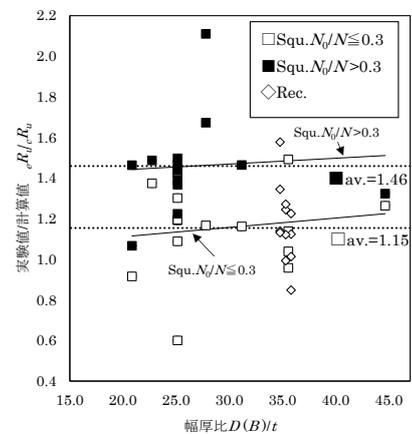


図6 eR_u/cR_u —幅厚比関係

参考文献

- 1) 日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針，第2版，2008
- 2) 森修 他：ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究(CFT-33)CFT柱の復元力特性モデル，日本建築学会大会学術講演概要集，pp.1225-1226，1998.9
- 3) 森修 他：ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究(CFT-23, 24)コンクリート充填鋼管柱の変形性能（その1，2），日本建築学会大会学術講演集，pp.929-932，1997.9
- 4) 福元敏之，城戸將江，津田恵吾，森田耕次：単調載荷におけるコンクリート充填角形鋼管長柱の変形性能，日本建築学会構造系論文集，Vol.83，No.743，pp.211-219，2018.1
- 5) 松井千秋，津田恵吾，山地雄二郎，藤永隆：コンクリート充填角形鋼管柱の構造性能と軸力制限値，日本建築学会構造系論文集，No.504，pp.103-110，1998.2
- 6) 山田聡，河村広，塩谷弘治：軸圧をうける角形鋼管コンクリート部材の弾塑性曲げ変形性状に関する研究(I 一方向曲げ：軸圧比の影響)，日本建築学会大会学術講演概要集，pp.1205-1206，1975.10
- 7) 山田聡，河村広，塩谷弘治：軸圧をうける角形鋼管コンクリート部材の弾塑性曲げ変形性状に関する研究(II 一方向曲げ：幅厚比の影響)，日本建築学会近畿支部研究報告集，pp.73-76，1976.6
- 8) 助川海都，藤本利昭，今井 皓己，三浦智美，大石琴：矩形CFT柱の曲げ性状に関する実験的研究 -その1 実験概要-，日本建築学会関東支部研究報告集I，pp.197-200，2021.3
- 9) 今井 皓己，藤本利昭，助川海都，三浦智美，大石琴：矩形CFT柱の曲げ性状に関する実験的研究 -その2 実験結果の考察-，日本建築学会関東支部研究報告集I，pp.201-204，2021.3
- 10) 助川海都，藤本利昭，今井 皓己，大石琴：角形CFT柱の変形能力に関する実験的研究 -座屈長さ径比の影響-，日本大学生産工学部第54回学術講演会講演概要，pp.79-82，2021.12
- 11) 助川海都，藤本利昭：矩形CFT柱の構造性能に関する実験的研究 -限界部材角に対する部材長さの影響-，日本建築学会大会学術講演概要集，pp.1165-1166，2022.9