

(17) CFT柱の変形能力の評価法に関する研究

柴田 知実¹・藤本 利昭²・城戸 基³

¹正会員 日本大学大学院 生産工学研究科建築工学専攻 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)
E-mail:cito17007@g.nihon-u.ac.jp

²正会員 日本大学教授 生産工学部建築工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)
E-mail:Fujimoto.toshiaki@nihon-u.ac.jp

³正会員 日本大学大学院 生産工学研究科建築工学専攻 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)
E-mail:haaaajime@gmail.com

現在、日本建築学会「コンクリート充填鋼管構造設計施工指針」では、水平力の低下を制限することによって CFT 柱の変形能力を確保する手法が示されている。しかし、CFT 柱の評価方法は他の構造形式と比べ、最も厳しいため、変形能力の評価を水平耐力が 95%に低下した点から 90%に低下した点へと緩和することが検討されている。そこで本研究では、日米共研と新都市ハウジングプロジェクトによる既往の CFT 曲げせん断実験を基に、CFT 指針で用いられている現行の評価式と実験値を 95%、90%耐力限界で評価した値との対応について検証した。更に、限界部材角と累積塑性変形倍率を評価手法とした場合の違いや、材料強度、幅（径）厚比、軸力比、座屈長さ径比が変形能力に及ぼす影響について検討を行った。

Key Words : Concrete Filled Steel Tube column, Deformation Capacity, Cumulative plastic deformation ratio,

1. 背景および目的

一般的なCFT構造の設計においては、崩壊機構として梁降伏先行型が想定される。よって梁の変形が卓越するため、梁の塑性変形能力が重要となる。一方、CFT柱は、最下階および最上階で降伏ヒンジが形成されることが想定されるが、その変形量はさほど大きくならない場合が多いため、CFT柱の変形能力はあまり問題とならない場合が多い。しかしながら、今後の長周期地震動等の様々な入力の影響を考えた場合、CFT柱にも大きな変形が生じる可能性があり、適切なCFT柱の変形能力の評価手法を確立することが重要になってきている²⁾。

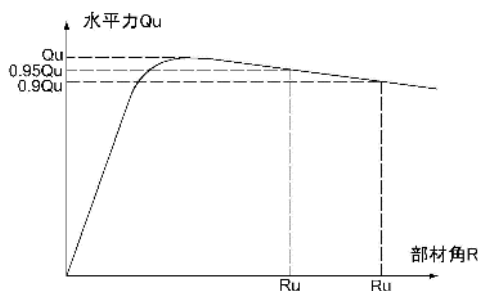


図-1 限界部材角の定義

現在、CFT柱の変形能力は、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）により、水平力の低下を制限する方法によって評価する方法が示されている。しかしながらこの評価方法で

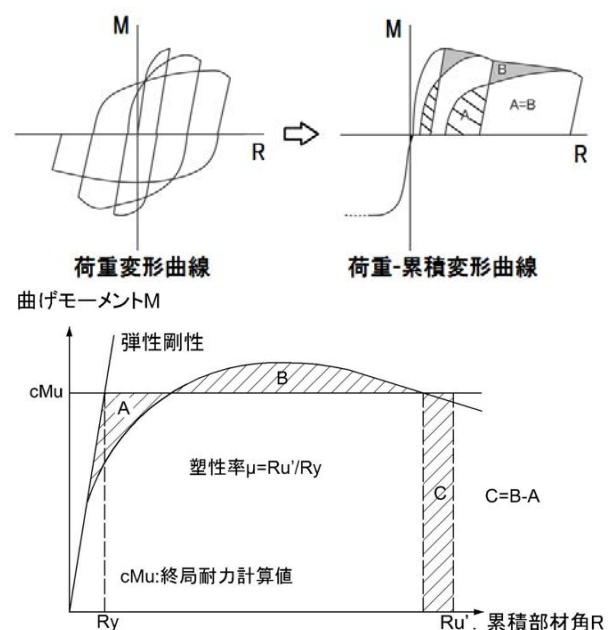


図-2 累積塑性変形倍率

は、部材長さによる評価式の不連続など、今後改善すべき点がまだ残されている。

そこで本研究では、CFT指針の評価手法構築の際に基となった日米共研³⁾と新都市ハウジングプロジェクト⁴⁾によるCFT柱の曲げせん断実験の実験結果を基に、変形能力の評価尺度として図-1に示す限界部材角と図-2に示す繰り返し履歴を考慮した累積塑性変形倍率（以下、塑性率）を取り上げ、それら変形能力に影響を及ぼすと考えられる各種変数との関係を明らかにするとともに、限界部材角と塑性率との関係について考察を行った。

2. 検討方法

(1) 検討内容

従来のCFT柱の変形能力は、軸力による水平力の低下を含んだ水平力-部材角関係において、水平力が95%に低下した時の部材角（95%耐力限界、以下 R_{95} ）を限界部材角と定義する新都市ハウジングプロジェクトの提案が基本となり、実験データの整理が行われてきた。

しかしながら、CFT柱の水平耐力の劣化勾配は他の構造形式と比べ緩やかであるのにも関わらず、最も厳しい評価方法であるため、現在では限界部材角の評価を90%耐力限界（以下、 R_{90} ）時に緩和することが検討されている²⁾。

このような背景から、本研究では日米共研と新都市ハウジングプロジェクトによるCFT柱の曲げせん断実験の実験結果を基に、以下の4点について検討を行うこととした。

- ①CFT柱の変形能力に影響すると考えられる各種変数と限界部材角（ R_{90} ）との関係
- ② R_{95} および R_{90} とCFT指針の評価式との関係
- ③CFT柱の変形能力に影響すると考えられる各種変数と塑性率との関係
- ④ R_{90} と塑性率との関係

(2) 検討に用いた試験体

a) 日米共研³⁾

検討に用いた試験体を表-1(a)に示す。

試験体は、座屈長さ径比 $L_b/D=6.0$ 、軸力比 $N/N_0=0.4$ の短柱試験体で、材料強度（ $\sigma_y=323\sim 837\text{N/mm}^2$ 、 $\sigma_b=35.5$

表-1 試験体概要

(a) 日米共研

試験体名		幅(径) B(D) [mm]	板厚 t [mm]	幅厚比 B/t(D/t)	一般化 幅厚比 α	鋼管圧縮 降伏強度 σ_{yc} M Pa	コンクリート 圧縮強度 σ_b M Pa	軸力比 N/N ₀	限界部材角(実験値)			塑性率 (実験値)
									95% 耐力限界時 R _u	90% 耐力限界時 R _u	95% 耐力限界時 R _u	
円形断面	C4-A-4	241	4.70	51.3	0.08	338	39.2	0.37	0.0411	0.0519	0.0380	14.7
	C4-A-9	238	4.70	50.6	0.08	338	88.2	0.38	0.0159	0.0210	0.0317	28.3
	C6-A-4	241	9.00	26.8	0.07	508	35.5	0.38	0.0469	0.0654	0.0476	18.3
	C6-A-9	241	9.00	26.8	0.07	508	84.4	0.38	0.0400	0.0429	0.0417	20.9
	C6-C-4	238	4.52	52.7	0.14	530	35.5	0.45	0.0304	0.0405	0.0325	23.1
	C6-C-9	240	4.52	53.1	0.14	530	84.4	0.39	0.0304	0.0358	0.0305	21.9
	C8-A-4	161	9.12	17.7	0.07	806	35.5	0.41	0.0409	0.0408	0.0492	10.4
	C8-A-9	161	9.12	17.7	0.07	806	93.9	0.41	0.0416	0.0412	0.0422	11.2
	C8-C-9	160	4.76	33.6	0.12	785	93.9	0.39	0.0320	0.0337	0.0372	7.4
角形断面	R4-A-4	210	5.80	36.2	1.37	323	39.2	0.40	0.0152	0.0156	0.0166	23.5
	R4-A-9	210	5.80	36.2	1.37	323	88.2	0.39	0.0147	0.0150	0.0155	15.0
	R4-C-4	210	4.50	46.7	1.71	326	39.2	0.40	0.0144	0.015	0.0129	24.6
	R4-C-9	209	4.50	46.4	1.70	326	88.2	0.40	0.0099	0.0113	0.0118	9.9
	R6-A-4	211	8.83	23.9	1.22	588	39.3	0.38	0.0288	0.0291	0.0263	21.3
	R6-A-9	211	8.83	23.9	1.22	588	88.3	0.38	0.0219	0.0225	0.0241	9.3
	R6-C-4	211	5.95	35.5	1.82	609	39.3	0.38	0.0205	0.0207	0.0177	11.4
	R6-C-9	210	5.95	35.3	1.81	609	93.7	0.38	0.0161	0.0200	0.0161	4.8
	R8-A-4	178	9.45	18.8	1.19	837	42.3	0.43	0.0306	0.0314	0.0297	13.9
	R8-A-9	179	9.45	18.9	1.20	837	94.5	0.42	0.0305	0.0363	0.0274	10.5
	R8-C-4	180	6.66	27.0	1.70	805	42.3	0.42	0.0202	0.0210	0.0212	7.1
	R8-C-9	180	6.66	27.0	1.70	805	94.5	0.41	0.0205	0.0206	0.0196	4.0

日米共研：C4-A-4 ①：断面形状：C-円形，R-角形 ②：鋼管降伏強度：4-400MPa，6-590MPa，8-780MPa

①②③④ ③：幅厚比：A-FAクラス，C-FCクラス ④：コンクリート強度：4-40MPa，9-90MPa

(b) 新都市ハウジングプロジェクト

試験体名		幅(径) B(D) [mm]	高さ L [mm]	板厚 t [mm]	座屈長さ 径比 L _b /D	幅厚比 B/t(D/t)	鋼管圧縮 降伏強度 σ_{yc} M Pa	コンクリート圧 縮強度 σ_b M Pa	軸力比 N/N ₀	限界部材角(実験値)			塑性率 (実験値)
										95% 耐力限界時 R _u	90% 耐力限界時 R _u	95% 耐力限界時 R _u	
円形断面	C24M 2	318.5	3800	10.26	24.0	31.0	368	52.3	0.2	0.0289	0.0315	0.0335	3.63
	C24M 4	318.5	3800	10.26	24.0	31.0	368	53.1	0.4	0.0235	0.0245	0.0254	2.31
	C18M 4	318.5	2900	10.26	18.0	31.0	368	56.1	0.4	0.0189	0.0203	0.0252	4.42
	C12M 4	318.5	1900	10.26	12.0	31.0	368	57.7	0.4	0.0202	0.0237	0.0251	6.25
	C12M 4M	318.5	1900	10.26	12.0	31.0	368	58.4	0.4	0.0254	0.0313	0.0251	10.00
	C12M 6	318.5	1900	10.26	12.0	31.0	368	58.8	0.6	0.0162	0.0194	0.0170	6.71
	C12T4	318.5	1900	5.75	12.0	55.4	402	58.8	0.4	0.0212	0.0243	0.0192	3.75
角形断面	R24M 1	250	3000	8.99	24.0	27.8	352	54.4	0.1	0.0370	0.0462	0.0530	5.77
	R24M 3	250	3000	8.99	24.0	27.8	352	55.1	0.3	0.0240	0.0270	0.0218	2.01
	R18M 3	250	2200	8.99	18.0	27.8	352	57.1	0.3	0.0239	0.0264	0.0217	2.60
	R12M 3	250	1500	8.99	12.0	27.8	352	58.8	0.3	0.0185	0.0252	0.0216	3.69
	R12M 3M	250	1500	8.99	12.0	27.8	352	58.8	0.3	0.0272	0.0334	0.0216	7.92
	R12M 5	250	1500	8.99	12.0	27.8	352	58.8	0.5	0.0155	0.0166	0.0136	2.33
	R12T3	250	1500	5.87	12.0	42.6	356	58.8	0.3	0.0187	0.0188	0.0141	2.65

新都市ハウジングプロジェクト：C24M2 ①：断面形状：C-円形，R-角形 ②：座屈長さ径比

①②③ ③：軸力比：1-0.1，2-0.2，3-0.3，4-0.4，5-0.5

～94.5N/mm²），幅（径）厚比（ $B/t=18.8\sim46.7$ ， $D/t=17.7\sim53.1$ ）を実験変数とした円形9体，角形12体の合計21体である。

b) 新都ハウジングプロジェクト⁴⁾

検討に用いた試験体を表-1(b)に示す。

試験体は， $L_k/D=12\sim24$ の長柱試験体で， $N/N_0=0.1\sim0.6$ ，材料強度（ $\sigma_y=352\sim402\text{N/mm}^2$ ， $\sigma_B=52.3\sim58.8\text{N/mm}^2$ ），幅（径）厚比（ $B/t=31.0\sim55.4$ ， $D/t=27.8\sim42.6$ ）を実験変数とした円形7体，角形7体の合計14体である。

3. 検討結果

(1) 実験変数と限界部材角（ R_{90} ）との関係

a) 日米共研

・FAクラス

図-3～5に実験変数と限界部材角との比較を示す。

図-3より，コンクリート圧縮強度が高くなると限界部材角が小さくなる傾向があり，この傾向は円形断面で顕著である。一方，鋼管降伏強度が高くなると，限界部材角は大きくなる傾向があるが，逆にこの傾向は角形断面では明確である。

径厚比および幅厚比に関しては，大きくなると限界部材角は小さくなる傾向にあるが，やはりこの傾向も角形断面が明確に表れている。

・FCクラス

図-4より，コンクリート強度が高くなると，限界部材角は小さくなる傾向があり，特に強度低い鋼管

を使用した場合において，その傾向が顕著に認められる。次に鋼管降伏強度が高くなると，限界部材角は大きくなる傾向がある。また，径厚比および幅厚比が大きくなると限界部材角は小さくなる傾向が認められる。

以上のとおり，座屈長さ径比 $L_k/D=6.0$ ，軸力比

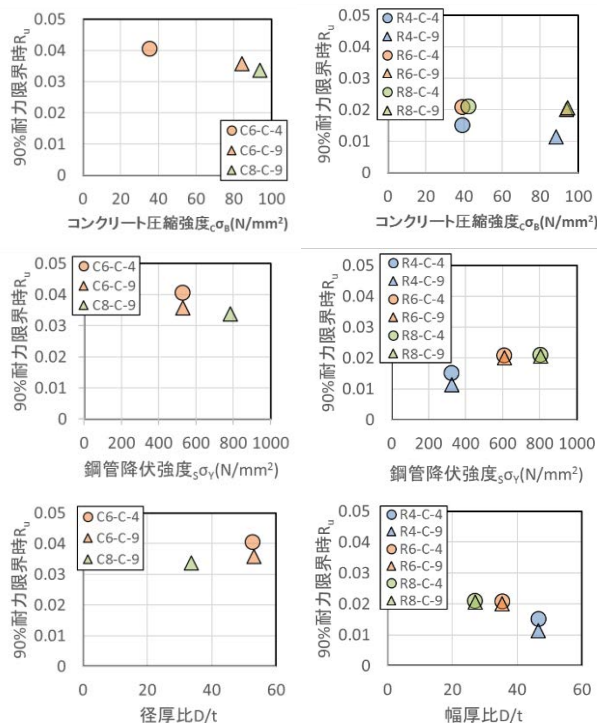


図-4 変数と R_{90} との関係（日米共研FCクラス）

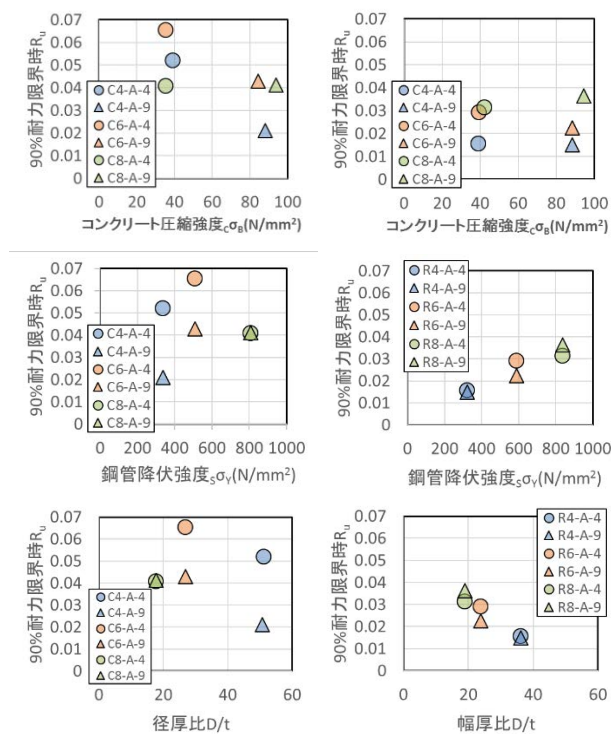


図-3 変数と R_{90} との関係（日米共研FAクラス）

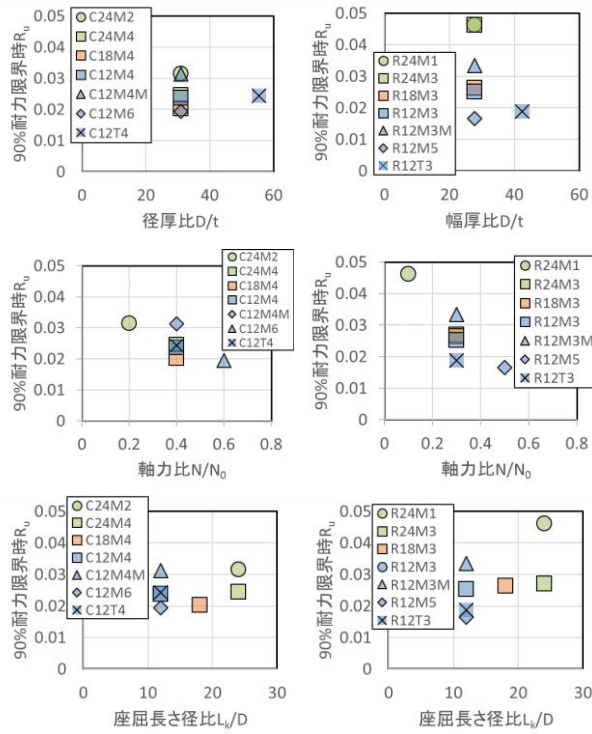


図-5 変数と R_{90} との関係（新都市）

$N/N_0 = 0.4$ で統一された短柱試験体である日米共研のデータからは、材料強度、径厚比および幅厚比による限界部材角への影響が認められ、各変数と限界部材角の関係は、角形断面で明確に表れる傾向が認められた。

b) 新都市ハウジングプロジェクト

円形断面の場合、径厚比の違いによる限界部材角への影響は認められなかったが角形断面の場合は、幅厚比が大きくなると限界部材角は小さくなった。

軸力比による影響に関しては、円形断面、角形断面ともに、軸力比が高くなると、限界部材角は小さくなった。特に座屈長さ径比24の試験体において顕著に認められた。

座屈長さ径比による影響については、円形断面、角形断面ともに認められなかった。

(2) 現行の評価式との対応

a) 円形断面

図-6に現行のCFT指針による限界部材角の評価式と実験値との比較を示す。CFT指針の円形断面の評価式は、以下の通りである。

$$R_u = \gamma_c \left(8.8 - 6.7 \cdot \frac{N}{N_0} - 0.04 \cdot \frac{D}{t} - 0.012 \cdot F_c \right) / 100$$

ここで、 γ_c は円形CFT柱の座屈長さ径比による低減係数で $L_k/D < 10$ の場合1.0、 $L_k/D \geq 10$ の場合0.6である。

図-6(a)より、評価式と R_{95} との対応はよく、ばらつきも少ない。 R_{90} では R_{95} に比べ、実験値値が若干大きくなっているもののその変化は小さく、評価式との対応はよい。

b) 角形断面

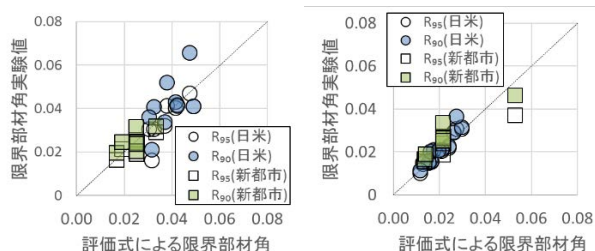
角形断面の評価式は、以下の通りである。

$$R_u = \frac{\gamma_r}{0.15 + 3.79 \cdot \frac{N}{N_0}} \cdot \frac{t}{D} \cdot \beta,$$

$$\beta = 1.0 - \frac{F_c - 40.3}{566} \leq 1.0$$

ここで、 γ_r は角形CFT柱の座屈長さ径比による低減係数で $L_k/D < 10$ の場合1.0、 $L_k/D \geq 10$ の場合0.8である。

図-6(b)より、角形断面においても評価式と R_{95} との対応はよく、円形断面よりばらつきも少ない。 R_{90} では R_{95} に比べ、実験値値が若干大きくなっているもののその変化は小さく、評価式との対応はよい。



(a) 円形断面

(b) 角形断面

図-6 限界部材角評価式との対応

これらのことから、円形・角形ともに R_{90} を適用した場合でも、概ね現行の評価式で評価できるものと考えられる。ただし、一部長柱試験体において危険側に評価されてしまう点があるので、今後評価式の精度を向上する必要がある。

(3) 実験変数と塑性率との関係

a) 日米共研

・FAクラス

図-7, 8, 9に実験変数と塑性率との比較を示す。

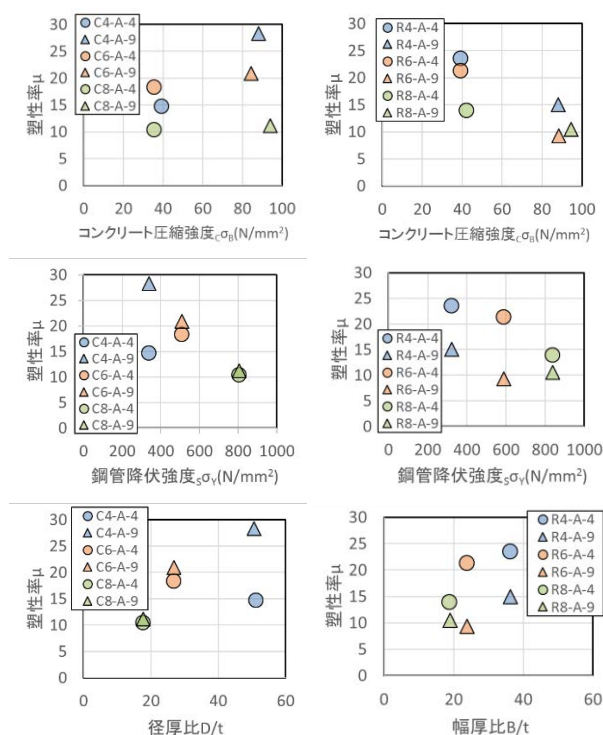
角形断面では、限界部材角と同様にコンクリート強度が高いほど塑性率が小さくなり、特に低強度の鋼管を用いた場合の変化が顕著であった。一方円形断面では、逆にコンクリート強度が高いほど塑性率が大きくなる傾向にあった。

鋼管降伏強度に関しては、強度が高くなるほど塑性率が小さくなる傾向があり、この傾向は限界部材角と逆の傾向である。

径厚比および幅厚比に関しては、一般的には径厚比及び幅厚比が大きくなると大きくなると、局部座屈の影響により変形能力が低下すると考えられるが、塑性率に関しては、あまり明確な傾向は認められなかった。

・FCクラス

FAクラスと同様に、角形断面では、限界部材角と同様にコンクリート強度が高いほど塑性率が小さくなる傾向が認められ、特に低強度の鋼管を用いた場合の変化が顕著であった。一方円形断面では、コンクリート強度の違いによる塑性率への影響は明確ではなかった。



(a) 円形断面

(b) 角形断面

図-7 変数と塑性率との比較（日米共研FAクラス）

また、鋼管降伏強度が大きくなると塑性率は小さくなる傾向にあった。

幅厚比による影響については、幅厚比および径厚比が大きくなると、塑性率が増加する傾向にあった。

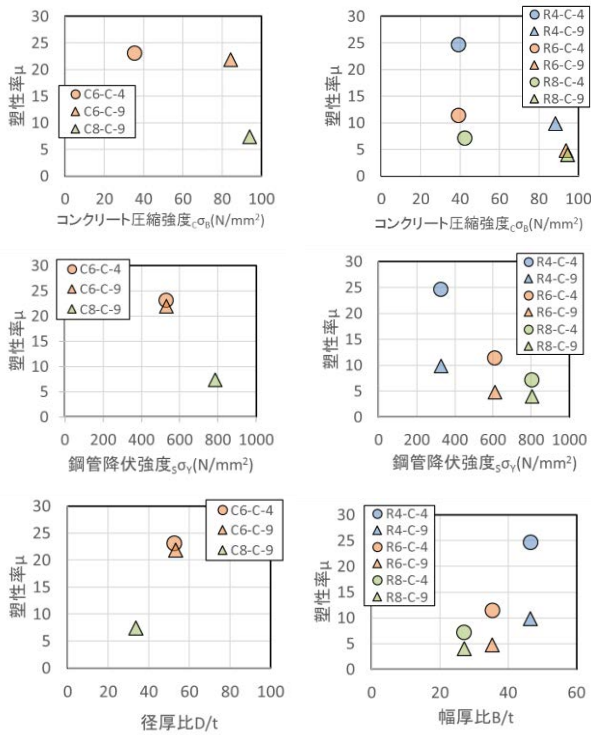


図-8 変数と塑性率との比較（日米共研FCクラス）

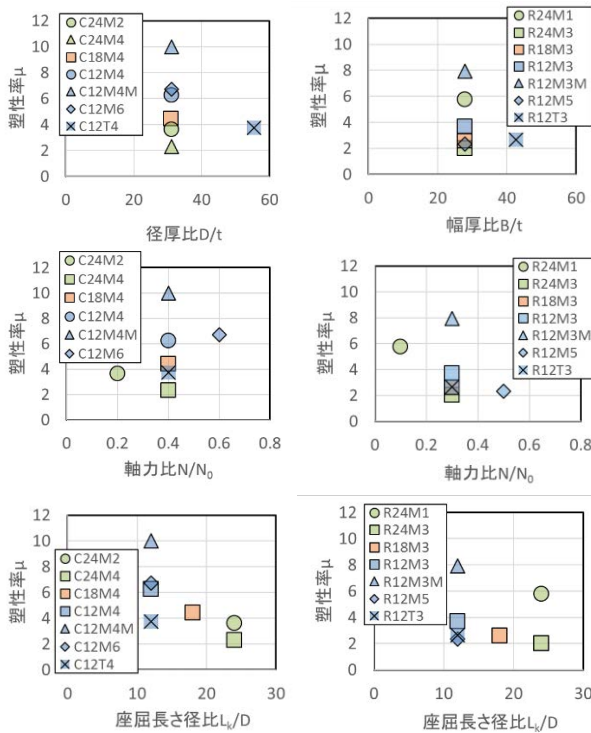


図-9 変数と塑性率との関係（新都市）

b) 新都市ハウジングプロジェクト

径厚比および幅厚比による影響については、幅厚比および径厚比が大きくなると、概ね塑性率は減少する傾向にあった。

軸力比については、軸力比が大きくなると概ね塑性率は減少する傾向にあり、この傾向は限界部材角と同様である。

座屈長さ径比による影響に関しても、座屈長さ径比が大きくなるに従い、塑性率は減少する傾向にあった。

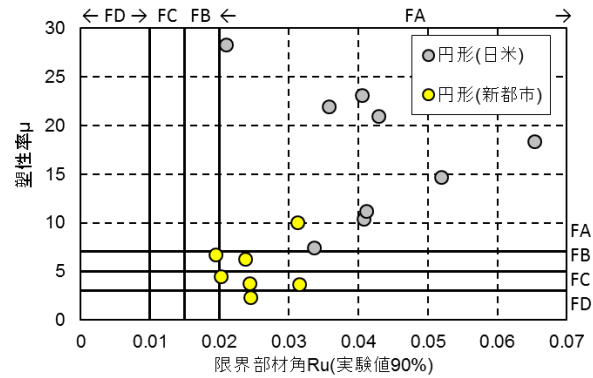
(4) 限界部材角と塑性率との関係

図-10に限界部材角と塑性率との比較を示す。

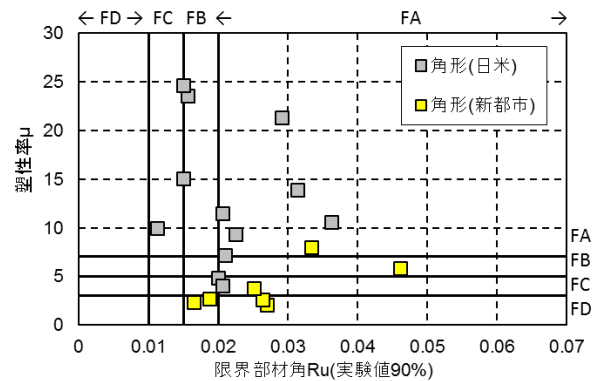
図中には、CFT指針における限界部材角に基づいたCFT柱部材の構造種別（FA～FD）と文献5)に示された塑性率に基づく鉄骨造の柱部材の構造種別（FA～FD）も併せて示している。

円形断面の場合、全体的には限界部材角が大きくなると塑性率が大きくなる傾向が認められ、日米共研に比べ、新都市の長柱の実験値が小さい。構造種別の判定では、円形断面は変形能力が大きく、日米共研の試験体は全て限界部材角、塑性率のどちらの評価法でもFAランクとなっている。しかし新都市の長柱では、限界部材角は概ねFAランクの評価となっているが、塑性率ではFB～FDの判定になっていることがわかる。

一方角形断面は、限界部材角と塑性率との相関はあまり認められず、大きくばらついている。特に新



(a) 円形断面



(b) 角形断面

図-10 限界部材角と塑性率との関係

都市の長柱試験体は、限界部材角に対し塑性率が小さくなっていることがわかる。日米共研のデータでは、限界部材角の評価では、FA～FCランクに試験体が分布しているが、塑性率の評価では、その多くの試験体がFAランクの評価になっている。逆に長柱の新都市の試験体においては、同様に限界部材角の評価では、FA～FBランクに試験体が分布しているが、塑性率の評価では、多くの試験体がFC～FDランクの評価になっている。

このように、限界部材角と塑性率では、必ずしも評価結果は一致していない。CFT柱の安全性を考えた場合、変形能力の評価方法については、今後更なる検討が必要である。

4. まとめ

既往の実験結果を基に限界部材角ならびに塑性率を検討した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 限界部材角 R_u の評価方法を95%耐力限界から90%耐力限界へと変えた場合においても、大きな変化は認められず、現行のCFT指針の評価式で概ね評価できる。ただし、評価式の不連続な点や一部長柱において危険側に評価されてしまう点があるため、今後評価精度の向上を検討する必要があると考えられる。
- 2) 材料強度、幅（径）厚比、軸力比および座屈長

さ径比等の変数と変形能力との関係は、限界部材角と塑性率では必ずしも同じ傾向とはならない。

- 3) 限界部材角と塑性率との関係は、円形断面では限界部材角が大きくなると塑性率が大きくなる傾向が認められるが、角形断面ではその傾向は認められない。
- 4) 限界部材角と塑性率との関係では、長柱では限界部材角に比べ塑性率が小さくなる傾向があり、両者の評価に基づく構造種別の判定結果は、必ずしも一致しない。

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，2008. 10.
- 2) 藤本利昭：CFT 柱材の変形能力，2016 年度日本建築学会大会（九州）構造部門（SCCS）パネルディスカッション資料「CFT 構造計算基準化に向けて一長周期地震動も考慮した規準一」，2016. 8
- 3) 藤本利昭，他：高強度材料を用いたコンクリート充てん鋼管柱の曲げせん断性状，日本建築学会構造論文集，No. 509，pp. 167-174，1998. 7
- 4) 山口種実，他：CFT 長柱の構造性能に関する研究—その 1 実験計画—，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 1185-1186，2000. 9
- 5) 広沢雅也、山内博之：新しい耐震設計法に基づく建築物の構造計算の実際，季刊カラム，No82，pp5-38，1981.10

A STUDY ON EVALUATION METHOD OF DEFORMATION CAPACITY OF CONCRETE FILLED STEEL TUBE COLUMN

Tomomi SHIBATA and Toshiaki FUJIMOTO and Hajime KIDO

Concrete filled steel tubular (CFT) columns have become popular as structural member used for buildings, moreover, a large number of beam-column specimens have been tested. This paper discusses the deformation capacity for CFT beam-columns under cyclic lateral loading. A design formula for deformation capacity of CFT columns was specified in the AIJ Recommendations for Design and Construction of Concrete Filled Steel Tubular Structures in 2008. The deformation capacity is defined as limit rotation angle in which the shear force is reduced to 95% of maximum strength. Therefore, in this study, evaluation method of the deformation capacity for CFT columns have been examined based on the review of existing studies.