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

SHEAR-FLEXURAL BEHAVIOR OF CONCRETE FILLED STEEL TUBULAR BEAM-COLUMNS USING HIGH STRENGTH MATERIALS

藤本利昭*¹, 向井昭義*², 西山 功*³, 稲井栄一*⁴, 甲斐 誠*⁵

時野谷 浩良*⁶, 馬場武志*⁷, 福元敏之*⁸, 森 浩二*⁹

崎野健治*¹⁰, 森野捷輔*¹¹

Toshiaki FUJIMOTO, Akiyoshi MUKAI, Isao NISHIYAMA,

Eiichi INAI, Makoto KAI, Hiroyoshi TOKINOYA,

Takeshi BABA, Toshiyuki FUKUMOTO, Koji MORI,

Kenji SAKINO and Shosuke MORINO

Recently, higher strength materials both for structural steel and concrete are frequently used for building structures. In this study, the effects of the material strengths on the beam-column behavior of concrete filled steel tube are experimentally studied. The selected test parameters are steel tube shapes (circular or square), material strength of structural steel and concrete, width (diameter)-to-thickness ratio of steel tube, axial load ratios (constant or variable), and loading directions (uniaxial or biaxial). The test results can be generally summarized that higher strength steel tube brought better overall behavior of beam-columns, while higher strength concrete brought adverse effect on the behavior.

Keyword : concrete filled steel tube, high strength material, beam-column test, variable axial load, biaxial bending

コンクリート充てん鋼管, 高強度材料, 柱の曲げせん断実験, 変動軸力, 2軸曲げ

1. はじめに

近年、コンクリート充てん鋼管(以下 CFT とする)構造に関する研究が盛んに行われ、その優れた性能が注目されている。

一般に CFT 柱の構造性能を把握するために、実構造物の柱を模擬した実験として、部材に一定の軸圧縮力を載荷し、繰り返しの水平力を加えることで曲げモーメントとせん断力を作用させる加力形式による実験、いわゆる柱の曲げせん断実験が行われており、現在までに数 100 体に及ぶ実験データが蓄積されている。それらの研究によれば CFT 柱は充てんコンクリートの存在により鋼管の局部座屈が拘束され、逆に鋼管の存在により充てんコンクリートは拘束を受け、曲げ耐力および変形性能が向上することが報告されている¹⁾。しかしながら、近年の高強度材料の普及に伴い、色々な材料強度の組み合わせが可能となった今日では、高強度材料を含めた材料強度の組み合わせによる CFT 柱の構造性能の把握が必要となってきた。

一方、阪神・淡路大震災では、構造物の様々な破壊現象が発生し、実際の地震入力に対して更なる検討が必要であることが表面化して

おり、特に地震時の軸力変動による影響および地震力の入力方向の影響に関しては不明点が多い。

実構造物においては、地震時に作用する転倒モーメントの影響により軸力変動が生じ、場合によっては圧縮軸力のみならず、引張軸力が作用する場合もある。しかしながら CFT 柱に関しては、軸力を変動させた実験、ましてや引張軸力の作用する柱の曲げせん断挙動に関する研究は皆無であり、その性能は明らかにされていない。

地震力の入力方向に関しても、2軸曲げに関する研究は、CFT 角形柱に関しては解析的研究として文献 2)があるものの、実験研究はほとんど行われていないのが現状である。

そこで本研究は、今日においても明らかにされていない CFT 柱の挙動に着目し、材料強度の組み合わせが構造性能へ与える影響、一定軸力を受ける柱と変動軸力を受ける柱の構造性能の差異、および水平力の載荷方向の違いが構造性能に与える影響を比較検討するため、CFT 柱の曲げせん断実験を実施し、軸方向力と繰り返し水平力を受ける CFT 柱の挙動を把握することを目的とした。³⁾

本論文は、日本建築学会大会学術講演梗概集(1996)「ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究(CFT9-16)」に加筆、修正したものである。

*¹ 安藤建設(株)技術研究所 研究員・工修

*² 建設省建築研究所 耐風研究室長・工修

*³ 建設省建築研究所 住宅建設研究室長・工博

*⁴ ハザマ技術研究所 主任研究員・博士(工学)

*⁵ 俵松村組技術研究所

*⁶ 俵大林組技術研究所 研究員・工修

*⁷ 俵大本組建築本部

*⁸ 鹿島建設(株)技術研究所 主任研究員・工博

*⁹ 俵浅沼組技術研究所

*¹⁰ 九州大学工学部建築学科 教授・工博

*¹¹ 三重大学工学部建築学科 教授・工博

Research Engineer, Research Center, Ando Corporation, M. Eng.
Head, Building Research Institute, Ministry of Construction, M. Eng.
Head, Building Research Institute, Ministry of Construction, Dr. Eng.
Senior Research Engineer, Technical Research Institute, Hazama Corporation, Dr. Eng.
Technical Research Institute, Matsumura Gumi Corporation
Technical Research Institute of Obayashi Corporation, M. Eng.
Ohmoto Gumi Co., Ltd.
Senior Research Engineer, Kajima Technical Research Institute, Dr. Eng.
Technical Research Institute, Asanuma Corporation
Prof., Department of Architecture, Faculty of Engineering, Kyushu University, Dr. Eng.
Prof., Department of Architecture, Faculty of Engineering, Mie University, Dr. Eng.

2. 実験概要

2.1 実験体

試験体の一覧を表-1 に示す。試験体は、断面形状、鋼管の材料強度、コンクリート強度、鋼管の幅厚比(径厚比)、軸力比および荷重方向を実験変数とした円形断面試験体 13 体、正方形断面を有する角形断面 1 軸曲げ試験体 16 体、および 2 軸曲げ試験体 4 体の計 33 体である。

鋼管強度は、400(SN400B)、590(SA440)、780(SHY685)MPa 級鋼の 3 種類、コンクリート強度 F_c は 40、90MPa の 2 種類とした。また、鋼管の幅厚比(径厚比)は、日本建築センター「建築物の構造規定」⁴⁾により、材料の降伏強度を考慮した幅厚比により FA と FC クラスの 2 種類とした。軸力は長期軸力を想定した一定軸力 $0.4N_u(N_u$:軸圧縮耐力)と変動軸力 $-0.3N_u(N_u$:鋼管部分の軸圧縮耐力) $\sim 0.7N_u$ の 2 種類とした。なお、2 軸曲げ試験体は軸力一定 $0.4N_u$ とし、加力方向(45 度、22.5 度)および材料強度を変化させた。

試験体形状を図-1 に示す。試験体は試験部分の柱頭、柱脚部分の上下に加力スタブを取り付けた形状である。試験部分の柱長さは柱径 D の 6 倍(せん断スパン比は 3)である。柱内部へのコンクリートの打

表-1 試験体一覧

試験体名称	断面形状	鋼管強度 (MPa)	D (mm)	t (mm)	Fc (MPa)	軸力			
SC4-A-4-C	円形断面	400	240	4.5	40	0.4N _o			
SC4-A-9-C					90				
SC6-A-4-C				9.0	40			0.7N _o ～-0.3N _i	
SC6-A-9-C					90				
SC6-C-4-C		590	240	4.5	40	0.4N _o			
SC6-C-9-C					90				
SC6-C-9-V				9.0	40			0.7N _o ～-0.3N _i	
SC8-A-4-C					90				
SC8-A-9-C		780	160	9.0	40	0.4N _o			
SC8-A-9-V					90				
SC8-C-9-C				4.5	40			0.4N _o	
SC8-C-9-V					90				
SR4-A-4-C	角形断面	400	210	6.0	40	0.4N _o			
SR4-A-9-C					90				
SR4-C-4-C				4.5	40			0.7N _o ～-0.3N _i	
SR4-C-9-C					90				
SR6-A-4-C		590	210	9.0	40	0.4N _o			
SR6-A-9-C					90				
SR6-C-4-C				6.0	40			0.7N _o ～-0.3N _i	
SR6-C-9-C					90				
SR6-C-9-V		780	180	9.0	40	0.4N _o			
SR8-A-4-C					90				
SR8-A-9-C					90				
SR8-A-9-V					90				
SR8-C-4-C				6.0	40	0.4N _o			
SR8-C-9-C					90				
SR8-C-9-C					90				
SR8-C-9-V					90				
試験体名称	断面形状	鋼管強度 (MPa)	D (mm)	t (mm)	Fc (MPa)	軸力	水平力の 載荷角度		
SR6-A-9-C-45	角形断面	590	210	9.0	90	0.4N _o	45°		
SR6-C-9-C-45				6.0					
SR8-A-9-C-45		780	180	9.0				22.5°	
SR8-A-9-C-22.5									

- SR6-A-9-C-45 ①: 断面形状: R - 角形 C - 円形
 ②: 鋼管強度: 4-400MPa, 6-590MPa, 8-780MPa
 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
 ⑤: 軸力比: C-一定($0.4N_u$), V-変動($0.7N_u \sim -0.3N_u$)
 ⑥: 加力方向: 45-45°, 22.5-22.5°

軸力の符号: 圧縮を正、引張を負とする

D, t : 断面せい(径)および鋼管板厚

N_u : 軸圧縮耐力($N_u = \sigma_{yc} \cdot A_c + \sigma_{as} \cdot A_s$)

N_{us} : 鋼管部分の軸圧縮耐力($N_{us} = \sigma_{ys} \cdot A_s$)

σ_{yc}, A_c : 鋼管の圧縮降伏強度および断面積

σ_{as}, A_s : コンクリートの圧縮強度および断面積

設は縦打ちとし、上スタブの上面に設けた孔から行った。

CFT 柱鋼管の製作は冷間曲げ加工で行い、円形鋼管は 1 シームとし、鋼板をほぼ円形と見なせる程度の多角形に曲げ加工して継ぎ目を溶接した。角形鋼管は 2 シームとし、鋼板を 2 つのコ形に曲げ加工して継ぎ目を溶接した。角形鋼管のコーナー部外側の曲率半径 R は板厚の 3 倍とした。なお、鋼管の応力除去焼鈍は行っていない。

加力スタブは厚さ 22mm の冷間成形の角形鋼管に剛性を高めるためにコンクリートを充てんした。なお、柱の鋼管は加力スタブ内を貫通し、柱鋼管と加力スタブ鋼管は溶接されている。

図-1 試験体形状

2.2 使用材料

使用した鋼管およびコンクリートの機械的性質を、コンクリートについては表-2 に、鋼材については表-3 に示す。

コンクリート強度用供試体は、 $\phi 100 \times 200$ とし、圧縮試験用供試体は軽量型枠、割裂試験用供試体は鋳鋼製型枠により製作し、封かん養生とした。試験は端面研磨処理後に実施した。

鋼材引張試験片は冷間加工する前の鋼板より切り出した 1 号 A 試験片を用いた。鋼管の圧縮試験は、試験体と同一断面の鋼管について行った。ただし、角形鋼管で局部座屈により降伏耐力が確認でき

表-2 コンクリートの材料試験結果

	圧縮強度 σ_c (MPa)	ヤング係数 E (GPa)	ポアソン比 ν	割裂強度 σ_t (MPa)
40MPa	35.5~42.4	31.3~33.8	0.18~0.23	3.12~3.26
90MPa	84.5~94.5	36.2~38.6	0.21~0.24	4.85~5.01

ない場合は、幅厚比の小さい試験体の試験結果を用いた(文献 5 参照)。なお、降伏強度(σ_y および σ_{yc})は0.2%オフセット耐力である。

表-3 鋼材の材料試験結果

		板厚 t (mm)	素材の引張試験結果				鋼管の圧縮 降伏強度 σ_{yc} (MPa)
			降伏強度 σ_y (MPa)	引張強度 σ_t (MPa)	降伏比 YR	破断伸び ϵ (%)	
円形 鋼管	400MPa	4.71	284	449	0.633	24.7	338
	590MPa	4.52	504	662	0.761	23.6	530
	780MPa	9.00	482	618	0.780	24.0	508
	780MPa	4.76	771	788	0.979	10.0	785
角形 鋼管	400MPa	9.12	820	833	0.984	11.7	806
	400MPa	4.50	276	412	0.669	29.0	326
	590MPa	5.84	295	434	0.679	29.0	323
	590MPa	5.95	540	669	0.808	12.9	609
角形 鋼管	780MPa	8.83	537	673	0.797	14.1	588
	780MPa	6.66	824	851	0.968	11.0	805
	780MPa	9.45	825	865	0.954	11.9	837

2.3 加力および計測方法

図-2 に加力方法を示す。加力は、軸力を载荷しながら上下加力スタブの平行度を保つと同時に上部スタブを下部スタブに対して水平移動するようにせん断力を加える方法である。

図-2 加力方法

载荷は正負繰り返し加力とし、所定の軸力を载荷後、せん断力を図-3 に示す载荷ルールに従い载荷した。最終サイクルは、せん断力を一方方向漸増载荷し、材端の曲げモーメントが最大曲げモーメントの80%に低下することを確認するか、もしくは部材角が6%に達するまで継続することを原則とした。

また、変動軸力試験体の軸力载荷ルールは、図-4 に示すように、圧縮軸力0.7 N_o を正方向、引張軸力-0.3 N_o を負方向とし、圧縮側、引張側でそれぞれ軸力を一定とした。軸力の切り替えは、せん断力が0の時にを行い、この際のP- δ 効果による部材角の変動は許容した。

計測は、変位について、水平変位、材軸方向変位および柱頭、柱

図-3 载荷ルール

脚の局部変位を測定した。また、ひずみは鋼管表面に貼付した塑性2軸および3軸ひずみゲージにより鋼管各部のひずみを測定した。

図-4 変動軸力試験体の载荷ルール

3. 実験結果の概要

実験結果の一覧を表-4 に示す。ここで、計算曲げ耐力 M_u は日本建築学会SRC規準⁹⁾による一般化累加式により、コンクリート強度の低減係数 $\gamma_c=1.0$ として求めた値である。なお、鋼管の降伏強度には鋼管の圧縮降伏強度を用いた。曲げ耐力実験値 M_u は軸力による付加曲げモーメントを考慮した材端モーメントである。

図-5(a)~(c)に各試験体の曲げモーメント-部材角関係、軸方向ひずみ-部材角関係を示す。ここでの曲げモーメント M は、P- δ 効果を考慮した値である。また部材角 R は水平変位 δ_h を、軸方向ひずみ ϵ は部材の軸方向変位 δ_a を部材長さ L で除した値である。

表-4 実験結果一覧

試験体	D mm	t mm	D/t	α	σ_{yc} MPa	σ_{yc} MPa	N/N_o	N kN	eMu kN·m	cMu kN·m	eMu cMu
SC4-A-4-C	241	4.70	51.3	0.08	338	39.2	0.37	1034	173	128	1.35
SC4-A-9-C	238		50.6			88.2	0.38	1784	202	174	1.16
SC6-A-4-C	241	9.00	26.7	0.07	508	35.5	0.38	1809	371	255	1.45
SC6-A-9-C			26.8			84.4		2567	422	313	1.35
SC6-A-9-V			26.7			91.7	0.67	4682	274	223	1.23
SC6-C-4-C	238		52.6			35.5	0.45	1462	220	151	1.45
SC6-C-9-C	240	4.52	53.1	0.14	530	84.4	0.39	2086	254	218	1.16
SC6-C-9-V	241		53.2			91.7	0.68	3874	153	168	0.91
SC8-A-4-C	161	9.12	17.7	0.07	806	35.5	0.41	1612	245	153	1.60
SC8-A-9-C						71		1988	261	175	1.49
SC8-A-9-V						93.9	0.71	3457	173	109	1.59
SC8-C-9-C	160		33.6			39.3	0.39	1347	151	112	1.35
SC8-C-9-V	159	4.76	33.4	0.12	785	93.9	0.69	2359	110	75	1.48
SR4-A-4-C	210	5.80	36.2	1.37	323	39.2	0.40	1162	187	145	1.29
SR4-A-9-C	210		46.7	1.71	326	88.2	0.39	1895	225	197	1.14
SR4-C-9-C	209	4.50	46.4	1.70	326	39.2	0.40	1021	151	128	1.18
SR6-A-4-C	211	8.83	23.9	1.22	588	39.3	0.38	1959	373	306	1.22
SR6-A-9-C			23.8	1.21		88.3		2649	402	363	1.11
SR6-A-9-V	210		23.8	1.21		91.7	0.70	4880	259	243	1.07
SR6-C-4-C	211	5.95	35.5	1.82	609	39.3	0.38	1545	263	244	1.08
SR6-C-9-C	210		35.3	1.81		93.7		2368	295	303	0.97
SR6-C-9-V	212		35.6	1.82		91.7	0.69	4326	163	217	0.75
SR8-A-4-C	178	9.45	18.9	1.19	837	42.3	0.43	2576	345	275	1.25
SR8-A-9-C	179					94.5	0.42	3077	377	322	1.17
SR8-A-9-V	178					94.5	0.72	5294	217	182	1.19
SR8-C-4-C	180	6.66	27.0	1.71	805	42.3	0.42	2003	240	217	1.11
SR8-C-9-C						94.5	0.41	2540	264	262	1.01
SR8-C-9-V	180					94.5	0.71	4437	146	149	0.98
SR6-A-9-C-45	210	8.83	23.8	1.21	588	88.3	0.38	2644	374	343	1.09
SR6-C-9-C-45	211	5.95	35.5	1.82	609	88.3	0.39	2358	270	284	0.95
SR8-A-9-C-45	181	9.45	19.2	1.21	837	91.7	0.40	2965	371	326	1.14
SR8-A-9-C-22.5	180	9.45	19.0	1.20	837	84.4	0.39	2782	390	324	1.20

α :一般化幅厚比 $\alpha = D/t \cdot \sqrt{\sigma_{yc} / \sigma_{yc}}$

3.1 一定耐力下で曲げとせん断を受ける部材の実験結果

(a) 円形断面柱

円形断面試験体は、圧縮フランジに局部座屈を確認した後曲げ耐力を示した。変形能力は非常に大きく、曲げ耐力時の部材角 R_{max} は、400MPa 鋼・Fc90MPa 試験体(SC4A9C)は 1.5%であったが、他の試験体は 3.0%を越えていた。曲げ耐力後の耐力劣化は、780MPa 鋼試験体(SC8A4C, SC8A9C, SC8C9C)は、部材角 $\pm 4\%$ の繰り返しサイクル途中で材端部の引張フランジが破断し、耐力低下を示したものの、他の試験体では激しい耐力劣化はほとんど認められず、非常に安定した挙動を示した。590MPa 鋼・Fc90MPa 試験体(SC6A9C, SC6C9C)は、最終サイクル時に材端部の引張フランジに部分的な破断が生じたが、その影響による急激な耐力低下は認められなかった。各試験体の曲げ耐力は計算耐力の 1.16~1.60 倍を示した。

図-5(a) 材端モーメントおよび軸方向ひずみと部材角の関係(円形断面試験体)

図-5(b) 材端モーメントおよび軸方向ひずみと部材角の関係(角形断面試験体)

図-5(c) 荷端モーメントおよび軸方向ひずみと部材角の関係(2軸曲げ試験体)

一方、軸方向ひずみと部材角の関係は、400, 590MPa 鋼試験体(SC4-, SC6-)では、下に凸の形状を示すのに対して、780MPa 鋼試験体(SC8-)では、上に凸の形状を示している。断面に曲げモーメントが作用すると鋼管による力の負担が軸力から曲げモーメントに大きく変動するため、鋼管の軸力負担割合が大きい780MPa 鋼試験体は、400MPa 鋼試験体に比べ軸変形の増加が著しくなる。曲げモーメントを解除すると、780MPa 鋼試験体は、コンクリートの塑性化による軸剛性の劣化に比べ、鋼管の軸力負担割合の回復が大きく、軸方向の変形が戻る傾向を示すが、400MPa 鋼試験体は、鋼管の軸力負担割合がもともと小さいため、コンクリートの軸剛性の劣化により、軸変形が進展するものと考えられる。

(b) 角形断面管

各試験体とも圧縮側フランジに局部座屈を確認した後、繰り返し载荷の度に曲げ耐力が低下した。なお、鋼管の亀裂は発生しなかった。曲げ耐力は計算耐力に対して0.95~1.29であった。

曲げ耐力時の部材角 R_{max} は、400MPa 鋼試験体(SR4-)が1.0%~1.5%、590MPa 鋼試験体(SR6-)が1.5%~2.0%、780MPa 鋼試験体(SR8-)が2.0%~3.0%であり、鋼管の材料強度が高い試験体ほど R_{max} が大きくなる傾向が認められた。幅厚比の比較では、FAクラス試験体の R_{max} がFCクラスに比べ大きくなっている。また、他のパラメータが等しくコンクリート強度が異なる場合には、Fc40MPa 試験体に比べ、Fc90MPa 試験体の R_{max} が若干小さい値を示していた。特に、400MPa 鋼・Fc90MPa 試験体(SR4A9C, SR4C9C)の R_{max} は1.0%と小さく、その後の耐力劣化も著しくなっている。

一方軸方向ひずみは、軸力载荷後の水平変形の繰り返しにより、軸方向ひずみが累積し、局部座屈の発生後その累積割合が増加していく。軸方向ひずみの累積は、円形断面試験体に比べ顕著である。

3.2 変動軸力下で曲げとせん断を受ける部材の実験結果

(a) 円形断面管

引張軸力下において、全試験体の鋼管に亀裂が発生した。780MPa 鋼試験体(SC8A9V, SC8C9V)は引張軸力時の部材角-2%の繰り返しサイクル途中で材端部の引張フランジが破断し曲げ耐力が低下した。590MPa 鋼試験体(SC6A9V, SC6C9V)においても、引張軸力時の部材角-3~4%の繰り返しサイクル途中で材端部の引張フランジが破断し曲げ耐力が低下した。圧縮軸力時には、590MPa 鋼試験体では局部座屈を確認した後曲げ耐力を示したが、780MPa 鋼試験体では局部座

屈は発生しなかった。圧縮軸力時の曲げ耐力は計算耐力に対して、590MPa 鋼・FCクラス試験体(SC6C9V)が0.91、他の3体は1.23~1.59であった。また引張軸力時の曲げ耐力は、計算耐力に対して590MPa 鋼試験体は1.38~1.40倍、780MPa 鋼試験体は0.94, 0.97であった。

圧縮軸力時の曲げ耐力時の部材角 R_{max} は、SC6A9Vが4.0%、SC6C9Vが1.5%、SC8A9V, SR8C9Vが2.0%で、引張軸力時の R_{max} は、SC6A9Vが3.0%、SC6C9V, SC8A9Vが2.0%、SC8C9Vが1.5%で、同一断面の一定軸力試験体に比べ小さい値であった。

(b) 角形断面管

角形断面試験体は、圧縮軸力時に圧縮フランジに局部座屈が生じた後、引張軸力時の部材角-2%の繰り返しサイクル途中で材端部の引張フランジが破断し、曲げ耐力が急激に低下した。圧縮軸力下においては、幅厚比FCクラス試験体(SR6C9V, SR8C9V)の耐力低下が大きく、圧縮軸力時の曲げ耐力は、計算耐力の0.75, 0.98と達していない。また引張軸力時の曲げ耐力は590MPa 鋼試験体(SR6A9V, SR6C9V)が計算耐力の1.09, 1.08倍、780MPa 鋼試験体(SR8A9V, SR8C9V)は1.01, 1.04倍であった。

圧縮軸力時の曲げ耐力時の部材角 R_{max} は、SR6A9Vが1.5%、SR6C9Vが1.0%、SR8A9Vが2.0%、SR8C9Vが1.5%で、同一断面の一定軸力試験体に比べ小さい値であった。一方引張軸力時の R_{max} は、一定軸力試験体と同等であった。

3.3 2軸曲げを受ける部材の実験結果

4体とも圧縮側の平板部に局部座屈が生じた後、曲げ耐力を示した。590MPa 鋼・FCクラス試験体(SR6C9C45)を除く3体は、曲げ耐力後の繰り返し载荷中に引張側となる材端の鋼管フランジコーナー部に亀裂が発生したが、激しい耐力低下は認められなかった。曲げ耐力は計算耐力の0.95~1.20であった。

曲げ耐力時の部材角 R_{max} は、同一断面の1軸曲げ試験体の R_{max} とほぼ対応しており、加力方向の違いによる差異は認められなかった。しかし、曲げ耐力後の耐力劣化は、1軸曲げ試験体に比べ2軸曲げ試験体が大きくなっていた。また、2軸曲げの場合、22.5°に比べ45°の劣化割合が大きい傾向があった。

軸方向ひずみの累積は、1軸曲げ試験体に比べ2軸曲げ試験体の軸方向ひずみの累積が少なく、2軸曲げ試験体では、22.5°試験体に比べ45°試験体の軸方向ひずみの累積が少ない傾向を示した。

4. 実験変数が柱の挙動に及ぼす影響

実験結果より、実験変数である断面形状、材料強度、軸力、加力方向の違いによる CFT 柱の曲げ耐力および変形性能への影響を考察する。なおここでは曲げ耐力時の部材角 R_{max} をもって、試験体の変形能力として評価した。

4.1 断面形状（円形・角形）の比較

円形断面は角形断面に比べ鋼管の局部座屈および充てんコンクリートの拘束効果に対して有利であり、著者らが行った中心圧縮⁵⁾および純曲げ実験^{7,8)}と同様に、本実験においても変形性能、曲げ耐力とも、角形断面に比べ円形断面が優れていた（図-6、図-7 参照）。

角形断面は、局部座屈の発生により軸方向ひずみが増加し、耐力低下を示す。円形断面は、局部座屈発生後の耐力低下は僅かであり、軸方向ひずみも急激な増加は認められない。その結果、円形断面では断面圧縮縁の破壊が進行しないため断面引張縁に大きな変形能力が必要になる。よって 590MPa、780MPa 鋼を用いた円形断面試験体では変形能力が他の試験体に比べ大きい部材角 4%~9%といった大変形時に、鋼管の破断が発生しているものと考えられる。

4.2 材料強度の組み合わせの影響

図-6 に一定軸力試験体の最大耐力時の部材角 R_{max} と材料強度との関係を示す。変形性能は鋼管の材料強度による影響が大きく、鋼管の材料強度が高いほど変形能力が大きくなる。一方コンクリート強度の違いによる傾向は、高強度が低強度に比べ変形能力が劣っている。しかしこのコンクリート強度による影響は、鋼管の材料強度が低い場合には顕著に現れるが、高強度の鋼管を用いた場合には、僅かとなる。この結果は、文献 5) の中心圧縮実験結果と同様であり、高強度コンクリートと低強度の鋼管の組み合わせになるほど変形性能が劣る。コンクリートは高強度になるほど耐力後の劣化が著しいため、その劣化を拘束するためには、鋼管による拘束力が必要となり、その拘束力の向上には鋼管に高張力鋼を用いることが有効であることを示している。一方でこの傾向は、コンクリートによる鋼管の局部座屈を抑制する効果は充てんコンクリートの存在自体が重要であり、コンクリートの高強度化による局部座屈の抑制効果の向上はあまり期待できないことを示している。

図-7 に一定軸力試験体の材料強度と曲げ耐力比との関係を示す。計算耐力に対する実験曲げ耐力の比（以下、曲げ耐力比とする）は、円形断面試験体では鋼管が高強度になるほど大きく、角形断面では鋼管強度の違いによる影響はほとんど認められない。一方で、コンクリート強度が異なる場合には、Fc40MPa 試験体に比べ Fc90MPa 試験体の曲げ耐力比が小さい傾向を示している。本実験のような加力形式の場合、耐力上昇の要因としては、鋼管によるコンクリートの拘束効果、鋼管のひずみ硬化および加力治具等の拘束による影響が考えられる。前出の文献 5), 7), 8) によれば、円形断面については鋼管によるコンクリートの拘束効果による耐力上昇が認められるものの、角形断面の場合拘束効果による耐力上昇は殆ど見込めないことがわかっている。また加力治具の拘束による影響は、せん断スパン比および軸力比を等しく設定している本実験では、各試験体にほぼ等しいレベルで含まれていると考えられる。ひずみ硬化による影響は、曲げ耐力時の変形量が小さい角形断面試験体ではあまりなく、曲げ耐力時の変形量が大きい円形断面試験体では、やや大きいと考えられる。

円形断面について、コンクリートの拘束効果を考えると、コンファインドコンクリートの強度は、(1)式で示される。⁹⁾

$$c\sigma_{cB} = \sigma_p + 2t \cdot \kappa \cdot s\sigma_{\theta} / (D - 2t) \quad \dots\dots (1)$$

ここで、 $c\sigma_{cB}$: コンファインドコンクリートの軸圧縮強度
 σ_p : プレーンコンクリートの軸圧縮強度
 κ : 拘束係数
 $s\sigma_{\theta}$: 鋼管の周方向応力

コンファインドコンクリートの強度上昇は鋼管の周方向応力により決まり、その周方向応力は鋼管の 1 軸降伏強度 $s\sigma_y$ に係数 α_0 を乗じた $\alpha_0 \cdot s\sigma_y$ で表される。文献 9) によれば、係数 α_0 はほぼ一定とされており、円形断面では高張力鋼を用いることで拘束効果の上昇が期待できるものと考えられる。

また、コンクリート強度の違いによる曲げ耐力比の差異は、高強度コンクリートほど耐力劣化の拘束に鋼管の拘束力が必要となるものが影響しているものと考えられ、更に円形鋼管では(1)式によるコンクリートの強度上昇はプレーンコンクリートの強度とは無関係なことから、高強度コンクリートの場合強度上昇の割合が小さくなるためと考えられる。図-7 には、(1)式を用いて算定した曲げ耐力に対する実験値の比も併せて示してある。その結果材料強度の影響がほぼ説明できるものと考えられる。

図-6 変形性能の比較(材料強度の影響)

図-7 曲げ耐力比の比較

4.3 軸力の載荷方法（一定・変動）による影響

変動軸力の場合、圧縮軸力時には断面圧縮縁の破壊、引張軸力時には断面引張縁の破壊により曲げ耐力および変形性能が決定した。

図-8 に、柱末端断面の歪み分布の模式図を示す。一定軸力下で正負繰返し曲げを受ける場合は、断面最外縁に同レベルの歪みが生じ、ほぼ均等に劣化すると考えられる。しかし変動軸力下においては、圧縮軸力時の引張縁(=引張軸力時の圧縮縁)は、ひずみの変動が僅かとなるものの、圧縮軸力時の圧縮縁(=引張軸力時の引張縁)は、大きな繰返しひずみを受ける。

図-8 柱端のひずみ分布の模式図

変動軸力試験体は、圧縮軸力時の変形性能は軸力比が一定軸力の場合に比べ高いため、断面形状に関わらず一定軸力に比べ劣る。曲げ耐力に関しては、円形断面では、一定軸力の場合と同様に拘束効果により耐力が上昇するが、幅厚比が大きい場合には局部座屈により耐力を発揮できない場合がある。角形断面では、曲げ耐力は局部座屈による影響が大きいいため、一定軸力試験体に比べ曲げ耐力比は低くなり、特に幅厚比が大きくなるとその傾向が顕著になるものと考えられる。

図-9 変形能力の比較(軸力の影響)

一方引張軸力時には、円形断面では鋼管が繰返しによるひずみの変動と同時に拘束効果による周方向ひずみを受けるため、変形性能は一定軸力の場合に比べ劣る。しかし曲げ耐力は、その拘束効果により耐力上昇するが、鋼管の伸び能力が小さい場合、計算耐力を発揮する前に破断により曲げ耐力が決定することがある。角形断面では、引張軸力側では局部座屈は発生せず、断面引張縁で変形性能および曲げ耐力が決定するため、変形性能は一定軸力とほぼ同等であり、曲げ耐力に関しても計算耐力を発揮できたものと考えられる。

4.4 断面に対する水平力の作用方向の違いによる影響

2軸曲げを受ける柱においては、変形性能は1軸曲げの場合とほぼ同等であった。しかしながら鋼管の破断現象は2軸曲げ試験体のみに発生した。2軸曲げ試験体は、冷間成形により塑性加工を受けた鋼管コーナー部が断面の引張縁となり、応力状態が最も厳しくなることから発生したものと考えられる。ただし、2軸曲げ試験体は、鋼管の破断が発生したにもかかわらず、変形性能は1軸曲げ試験体とほぼ同等であった。

2軸曲げ試験体の曲げ耐力の局面を図-10に示す。図中の実線は一般化累加による耐力曲線である。2軸曲げ試験体の曲げ耐力比は同一断面の1軸曲げ試験体と同等である。よって、角形断面柱の曲げに対する変形性能および耐力は、加力方向が異なっても主軸方向に対する性能と同等であるといえる。

図-10 2軸曲げ試験体の曲げ耐力の比較

5. 結論

以上、CFT柱の曲げせん断実験により、以下の結論を得た。

- 1) 変形性能は、高強度材料を用いた場合でも角形断面に比べ円形断面試験体が優れている。
- 2) 角形断面CFT柱の曲げ耐力は材料強度の組み合わせに関わらず、拘束効果による耐力上昇は認められない。円形断面CFT柱の曲げ耐力は鋼管による拘束効果が認められ、特に高強度の鋼管を用いた場合の拘束効果による耐力上昇が大きい。
- 3) 円形断面では鋼管の低強度化やコンクリートの高強度化が変形性能の低下をもたらす傾向がある。
- 4) 変動軸力を受ける柱は、ひずみが断面の片側に累積するため、一定軸力を受ける柱に比べ変形性能が劣る。
- 5) 2軸曲げを受ける角形断面CFT柱は曲げ耐力、変形性能の両者に関して、1軸曲げを受ける場合と同等の性能を有する。

謝辞

本研究は、ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究(技術調整委員会委員長:青山博之 東京大学名誉教授)の下で実施されたものであり、コンクリート充てん鋼管構造に関する研究は、CFT分科会の下で行われたものである。CFT柱の曲げせん断実験は、建設省建築研究所と(社)建築業協会とで分担して実施されたものであり、鋼管は(社)鋼材倶楽部にて製作されたものである。ここに関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 例えば、斉藤豊、他：充てん型鋼管コンクリート柱に関する研究(その1)～(その6)、日本建築学会大会梗概集、pp.1613～1624、1989.10
- 2) 川口淳、森野捷輔：軸力と2軸曲げを受ける鋼-コンクリート複合断面の終局強度相関曲線(その1)、日本建築学会大会梗概集、1992年8月
- 3) 向井昭義、他：ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究(CFT-9～16)コンクリート充てん鋼管柱の曲げせん断性状 その1～8、日本建築学会大会梗概集、1996年9月
- 4) 日本建築センター：建築物の構造規定、1994年9月
- 5) 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短柱の軸圧縮性状、日本建築学会構造系論文集、1997年8月、No.498
- 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、1987年
- 7) 崎野健治、松本勝憲：ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究(CFT-7～8)コンクリート充てん円形鋼管柱の純曲げ実験、日本建築学会大会梗概集、pp.747～750、1995.8
- 8) 藤本利昭、他：高強度材料を用いたコンクリート充てん角形鋼管短柱の偏心圧縮実験、日本建築学会構造系論文集、1997年11月、No.501
- 9) 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年10月

(1997年9月8日原稿受理、1998年2月3日採用決定)