建築構造用耐火鋼を使用した鋼管コンクリート柱の 耐火性能に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON FIRE RESISTANCE OF CONCRETE-FILLED STEEL TUBULAR COLUMNS USING FIRE-RESISTANT STEEL

作本好文^{*1}, 山口種美^{*2}, 岡田忠義^{*3}, 吉田正友^{*4}, 田坂茂樹^{*5}

Yoshifumi SAKUMOTO, Tanemi YAMAGUCHI, Tadayoshi OKADA,
Masatomo YOSHIDA and Shigeki TASAKA

This paper presents experimental results of full-scale loaded heat tests and small-size heat tests of concrete-filled steel tubular columns (CFST columns) using Fire-Resistant steel (FR steel). By covering the tube surface with protection having lower insulation property, CFST columns could get longer fire resistance time by its heat capacity of the inner concrete and could resist to the bending moment caused by eccentric load without reinforcement by keeping the steel temperature lower than 600°C.

Ceramic type protection, foaming type intumescent coating, gypsum plaster board, ceramic fiber and wet rockwool were used for the protection material.

Keywords : fire resistance, steel, high temperature, column, concrete, fire protection

耐火, 鋼材, 高温, 柱, コンクリート, 被覆

1. まえがき

鋼管コンクリート柱 (Concrete-Filled Steel Tube, 以下, CFST 柱) は, 鋼管の内部にコンクリートを充填し, 鋼とコンクリートの合成効果により荷重支持能力や変形性能を向上させた合成柱であるが, 耐火性能についても, 一般の鋼管柱と比較して優れている。

欧州では, CFST 柱も含めた各種合成柱の耐火性能に関する研究が実験的・解析的に行われ^{1),2)}, 耐火被覆 (以下, 被覆) をなくす, あるいは軽減できる耐火設計手法が実用化されている³⁾。

図-1 に無被覆の CFST 柱の模式図を示す。無被覆の CFST 柱が標準加熱曲線 (各国とも JIS A 1304 とほぼ同じ) および要求耐火時間に基づいた加熱を受けると, 鋼管が高温となり荷重支持能力を失うことから, コンクリートと補強鉄筋により鉄筋コンクリート柱として荷重を支持することとなる。ここで, 補強鉄筋は, 主として偏心荷重によって生じる曲げモーメントに抵抗する目的で挿入される。

我が国においても, CFST 柱の耐火性能に関する研

究が近年数多く実施されている^{4)~6)}が, このような設計法は実用化に至っていない。これは, 我が国では, 一般的に柱・梁接合部には耐震用のダイヤフラムが設けられ, 配筋が困難であることが理由のひとつと考えられる。

本研究は, 高温強度が従来の一般構造用鋼材 (以下, 一般鋼) と比較して高く, 鋼材温度 600°C における 0.2 % 耐力が常温時規格値の 2/3 以上 (長期許容応力度) を有する建築構造用耐火鋼⁷⁾ (FR 鋼: Fire Resistant Steel) を鋼管に使用した CFST 柱の耐火性能について,

図-1 CFST 柱の模式図

*1 新日本製鐵株式会社・工修

*2 新日本製鐵株式会社・工修

*3 新日本製鐵株式会社・工博

*4 日本建築総合試験所・工修

*5 日本建築総合試験所

Nippon Steel Corp., M. Eng.

Nippon Steel Corp., M. Eng.

Nippon Steel Corp., Dr. Eng.

General Building Research Corp., M. Eng.

General Building Research Corp.

載荷加熱試験により実験的に研究したものである^{8)~10)}。
FR鋼のCFST柱は、鋼管を被覆することで鋼材温度を600℃以下、すなわち鋼管が長期許容応力度に相当する荷重を支持できる温度以下で使用することとし、補強鉄筋なしで上記の曲げモーメントに抵抗する柱である。なお、比較を目的に一般鋼のCFST柱の載荷加熱試験も合わせて実施した。

被覆材料は、水酸化アルミニウム・炭酸カルシウム・セメント系被覆（厚さ5mm、以下、セラミック被覆）と耐火塗料（屋内用発泡性・ドイツ製）を使用した。これらの被覆はいずれも要求耐火時間1時間の性能に満たない軽微なものであるが、鋼管への直線の入熱を避けることで、コンクリートの熱容量を有効に利用でき、鋼管温度の上昇が少なく長時間の耐火性能が得られる。

CFST柱の熱容量については、上記の被覆材料に、無機繊維強化石膏ボード（以下、石膏ボード）、セラミックファイバー、湿式ロックウール（以下、ロックウール）を加えた5種類で、被覆厚さをパラメーターとした加熱試験を実施し、その効果を検証した¹¹⁾。

なお、載荷加熱試験および加熱試験は、各々、日本建築総合試験所の柱用、床梁用加熱試験炉で実施した。

2. 載荷加熱試験

2.1 試験体および試験条件

試験体は、角型鋼管（FR鋼のおよび一般鋼のSM490A、□-300×300×9、長さ3500mm）に普通コンクリートを充填したものである。試験体の形状および寸法を図-2に示す。鋼管には、コンクリートの水蒸気爆裂防止用に蒸気抜き孔（直径25mm）を26ヵ所設けた。鋼管およびコンクリートの機械的性質を表-1、2に、コンクリートの組成を表-3に示す。

図-2 載荷加熱試験の試験体の形状・寸法

表-1 鋼管の機械的性質

鋼種	温度(℃)	降伏点(kgf/cm ²)	引張強度(kgf/cm ²)	伸び(%)
一般鋼鋼管	常温	3680	5380	24
	600	1340	1990	60
FR鋼鋼管	常温	3650	5450	24
	600	2220	3300	46

表-2 コンクリートの機械的性質

	圧縮強度(kgf/cm ²)	引張強度(kgf/cm ²)	ヤング率(kgf/cm ²)	含水率(%)
一般鋼鋼管	392	31.5	2.93×10 ⁵	4.4
FR鋼鋼管	382	29.5	3.01×10 ⁵	4.9

表-3 コンクリートの組成

水セメント比	単位容積質量 (kg/m³)				
(%)	粗骨材	細骨材	水	セメント	AE減水剤
33.5	1068	585	171	510	1.275

試験条件を表-4に示す。試験体数は、鋼種、被覆の有無、種別、載荷荷重および載荷方法（中心載荷、偏芯載荷）をパラメーターとした9体である。ここで、載荷荷重 N （軸力）は、式（1）によった。

$$N = \eta \times (\sigma_y \times A_s + F_c \times A_c) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、各項は以下のとおりである。

η : 軸力比

σ_y : 鋼材の常温時降伏点（表-1）

F_c : コンクリートの常温時圧縮強度（表-2）

A_s : 鋼管断面積（104.76 cm²）

A_c : コンクリート断面積（795.24 cm²）

軸力比は、鋼管とコンクリートの累加強度（鋼管の降伏点およびコンクリートの圧縮強度に相当する荷重）に対する比率で、0.2、0.3をベースとした。また、表-4に示した $N/(F_c \times A_c)$ は、コンクリート圧縮強度に対する載荷荷重の比率である。なお、常温時の鋼管とコンクリートの軸力の分担は、鋼管：約55%，コンクリート：約45%であった。

偏芯量は、柱断面の1方向に柱幅の10%（30mm）とした。この値は、偏芯量をパラメーターとした研究¹⁾で規準値として採用された値である。偏芯量の大小の影響は、本研究の範囲に含んでいない。

被覆材には、セラミック被覆と耐火塗料を使用した。セラミック被覆の組成を表-5に示す。耐火塗料はアルキド系で、錆止層（塗布量150 g/m²×1層）・発泡層（900 g/m²×2層）・保護層（200 g/m²×1層）から構成されている。全体の塗膜厚は表-4に示した。

表—4 載荷加熱試験 (試験条件・試験結果)

鋼 種	試験体 番 号	試 験 条 件								試 験 結 果											
		試験体諸元・荷重(長さ3,500mm)					耐 火 被 覆			鋼材温度 到達時間 (分)		上段：伸び停止時 ¹⁾ 下段：試験終了時 ²⁾									
		軸力比	載荷荷 重 N (tonf)	累加強 度 (tonf)	N/ Fc*Ac	偏心量 (mm)	被覆 種別	厚さ (mm)	含水率 (%)			加熱 時間 (分)	平均鋼 材温度 (℃)	コンクリ ート温度 :℃ ① ³⁾ ④ ⁴⁾	軸方向 伸び量 (mm)	同左収 縮速度 mm/分	水平変 形量 (mm)				
		η								350℃	600℃										
F R 鋼	R3E0 -NI	0.3	205.8	686	0.45	0	無被覆	—	—	7	17	16	593	46	20	17.3					
												33	766	—	42	-18.7	6.0				
	R2E0 -CT	0.2	137.2	686	0.45	0	セラ ミッ ク被 覆	5.6	2.8	28	107	119	619	272	118	21.3					
													180	726	369	129	2.1	0.2			
	R3E0 -CT	0.3	205.8		0.68	0		5.7	2.6	29	110	96	560	256	133	16.7					
													166	—	424	136	-3.9	0.3			
	R2E1 -CT	0.2	137.2		0.45	30		5.8	2.5	30	103	121	639	260	—	21.9		6.2			
														148	702	314	119	14.8	4.4	91.7	
	R3E1 -CT	0.3	205.8		0.68			5.4	2.6	23	93	82	568	169	111	14.4		9.0			
														98	612	215	111	13.2	0.4	20.9	
R3E0 -FP	0.3	205.8	686	0.68	0	耐火塗料	1.0	—	34	130	123	582	—	—	18.2						
															188	733	—	—	-15.6	2.5	
R3E1 -FP	0.3	205.8			30				20	114	119	614	252	110	16.4		3.9				
															134	650	290	111	11.4	3.5	25.5
一 般 鋼	R3E0 -CTX	0.295	205.8	697	0.66	0	セラ ミッ ク被 覆	5.7	2.4	30	110	64	488	164	102	10.8					
													194	761	441	134	-17.8	7.3			
	R3E1 -CTX	0.328	228.6		0.73	30		5.7	2.5	26	未到達	47	447	168	30	6.0		18.1			
												88	565	290	108	1.1	1.0	55.3			

1) 最大伸びに達した時点 2) 荷重を支持できなくなった時点 3) 鋼管付近 4) コンクリート中央

表—5 被覆材料の組成 単位: 重量%

材料名称	ロックウール	セメント	バーミキュライト	アルミナシリカ	水酸化アルミニウム・炭酸カルシウム	その他
セラミック被覆	—	20	10	35	30	5
湿式ロックウール	30	20	10	10	—	30
セラミックファイバー	—	—	—	100	—	—

2.2 試験方法

試験装置を図—3に示す。載荷装置は、アムスラー式圧縮試験機(容量300tonf・定荷重装置付)、ロードセルおよび反力フレームにより構成されており、表—4に記載した荷重を加熱前に試験体に加えた。上下の載荷板には球座(半径190mm)を設置しており、座屈長さは試験体長さと同じである。

座屈長さ(3500mm)は一般のビル建築の柱と比べて長いが、試験装置の構造上、端部を固定にできないこと、試験体の長さを短くすると加熱炉内で試験体が分割されることとなり、試験体の設置・取り出しが困難であること(加熱炉の開口は上部のみ)など、試験装置の制

図—3 載荷加熱試験装置

約からこの長さとした。

载荷の終了は、試験体が荷重支持能力を失った（以下、崩壊）時点とし、その判定は軸方向変形速度（収縮速度）が急増した時点（以下、試験終了時）とした。载荷終了と同時に加熱も終了した。なお、加熱は JIS A 1304 に準拠した標準加熱とした。

試験中の試験体の伸びと鋼管の局部座屈による急激な収縮を把握するため、試験体全体の伸び量を柱脚部ベースプレートに 4 隅に変位計（感度：100 μ /mm）を設置して測定した。なお、偏芯载荷の試験体では、柱中央部の水平変形量をセラミック棒（長さ 1 m、直径 10 mm）を使用して炉外に取り出し、変位計（感度：100 μ /mm）で測定した。各測定点を図-2 に示す。

加熱温度は、JIS C 1602 に規定する K 熱電対を保護管に入れ、試験体より 3 cm 離れた位置で材長方向に 3 ヶ所各 4 点の計 12 点で測定した。また、鋼管温度は材長方向に 3 ヶ所の計 8 点、コンクリート温度は、材長方向中央部の 4 点とした。各測定点を図-2 に示す。

2.3 試験結果

試験結果を表-4 に示す。本表には、鋼管温度が 350°C および 600°C に到達した加熱時間（以下、時間）、柱の伸びが停止した時点（以下、伸び停止時）および試験終了時の時間と各部温度、軸方向伸び量、同収縮速度、水平変形量を記載した。

2.3.1 温度性状

図-4 に鋼管の平均温度を、図-5、6 にコンクリート温度（鋼管付近と中央部）を、加熱温度と合わせて示した。図中の丸印は、試験終了時を示している。

試験体 R3E0-CT では、鋼管用の熱電対が時間 115 分ですべて破断した。また、試験体 R3E0-NI では鋼管近辺のコンクリート用の熱電対が破断し、いずれも、試験終了時まで温度を測定できなかった。試験体 R3E0-NI における熱電対の破断は、コンクリートの破壊が進行したことによるものと考えられる。試験体 R3E0-CT では、中心部のコンクリート温度が時間 70～95 分の間で低下しているが、これは内部の水蒸気の移動の影響と考えられる。

無被覆の試験体 R3E0-NI では、鋼管温度は加熱温度にほぼ等しく急激に上昇している。被覆した試験体では、鋼管温度は 300～400°C まで急激に上昇し、その後上昇速度は鈍化している。これは、耐火塗料が鋼材温度 300°C 近辺で発泡した後断熱性を発揮することも要因のひとつであるが、CFST 柱の熱容量が時間とともに発揮され、鋼管温度の上昇が抑制されたものと考えられる。なお、鋼管温度の上昇速度は各試験体ともほぼ同じで、セラミック被覆（被覆厚 5 mm）と耐火塗料（塗膜厚 1 mm）はほぼ同等の断熱性能を有している。

伸び停止時の鋼管温度は、FR 鋼の試験体で軸力比

図-4 加熱時間と鋼材温度（平均値）との関係

図-5 加熱時間とコンクリート温度（鋼管付近）との関係

図-6 加熱時間とコンクリート温度（中央部）との関係

0.2 では 600°C を上回り、軸力比 0.3 では試験体 R3E1-FP を除いて 600°C を下回っている。一方、一般鋼の試験体ではいずれも 500°C を下回っている。

試験終了時の鋼管温度は、FR 鋼の試験体でいずれも

600°Cを上回っており、一般鋼では、偏芯載荷のR3E1-CTXで600°Cを下回っている。

コンクリート温度はいずれも低く、試験終了時で、鋼管近辺で最高441°C、中心部で最高136°Cであった。

2.3.2 変形状

時間と軸方向伸び量の関係を、中心載荷の試験体については図-7（伸び量は4点の平均値）に、偏芯載荷の試験体は図-8（伸び量は各点ごと）に示した。また、偏芯載荷の試験体の、時間と柱中央部の水平変形量との関係を図-9に示した。

図-7から、中心載荷の試験体における変形状は、以下の4ステージに分類できる（模式図：図-10）。

- ① 柱が熱膨張する第1ステージ（伸び停止時まで）
- ② 鋼管に局部座屈（写真-1, 2）が生じ、柱が急激に収縮する第2ステージ
- ③ 鋼管の局部座屈により、鋼管からコンクリートに軸力が移行し、収縮速度が遅くなる第3ステージ
- ④ コンクリートの強度低下で再び急激に収縮し、崩壊に至る第4ステージ

第2ステージでは、鋼管とコンクリートの温度差から鋼管の熱膨張にコンクリートが追従できず、コンクリートが負担していた軸力が鋼管に移ること、また、鋼管そのものが高温で強度低下を起こすことから、局部座屈が生じる。局部座屈が発生する時点は、伸び停止後、収縮速度が急増する時点と考えられ、特に、FR鋼の試験体において顕著に表れている。局部座屈の発生した時間および鋼管温度は、R3E0-NI：18分（624°C）、R2E0-CT：140分（653°C）、R3E0-CT：113分（613°C）、R3E0-FP：137分（622°C）などであり、鋼管温度はいずれも600°Cを超えている。FR鋼の600°Cにおける降伏点（表-1）は2220 kgf/cm²であることから、例えば、軸力比0.3の試験体では、この時点で鋼管がすべての軸力を負担する状態（鋼管の応力度は、 $N/A_s = 1960 \text{ kgf/cm}^2$ ）に近くなっていると考えられる。なお、一般鋼のR3E0-CTXでは、伸び停止時の時間が短く、また、収縮速度も比較的緩やかであることから、局部座屈の発生点が明確ではない。

第3ステージで収縮速度が遅くなる時間は、R3E0-NI：20分、R2E0-CT：145分、R3E0-CT：118分、R3E0-FP：142分、R3E0-CTX：95分などであった。

第4ステージにおける試験終了時の時間とコンクリート強度との関連については、本研究では明らかにできなかった。なお、試験体R2E0-CTは時間が180分に到達しても荷重を支持したことから、180分で試験を中止した。これは、軸力比が小さく（0.2）、コンクリート強度が高温時低下しても荷重を支持したものと考えられる。

偏芯載荷の試験体では、鋼管に局部座屈が生じると曲

図-7 軸方向伸び量（中心載荷）

図-8 軸方向伸び量（偏芯載荷）

図-9 水平方向変形量（偏芯載荷）

げモーメントに抵抗できないことから第3ステージが存在せず（模式図：図-10）、鋼管の局部座屈が直接崩壊につながっている（図-8における試験体R2E1-CT、R3E1-FP）。なお、試験体R3E1-CTとR3E1-CTX

図—10 変形状の模式図

では、ベースプレートの4隅で測定した軸方向伸び量が試験途中で2本ずつに分離しており、第3ステージが明確に表れていない。これは、R3E1-CTで75分前後、R3E1-CTXで22分前後に荷重装置下部の球座が回転し、4隅に設置した変位計が伸びと収縮を測定したことによる（いずれも伸び停止前）。このことは、図—8で伸び量が分離した時点と、図—9で水平変形量の増加した時点とが、試験体R3E1-CTとR3E1-CTXにおいて一致していることから明らかである。球座の回転が、伸び停止時、試験終了時の時間に及ぼした影響は明らかではないが、4点の伸び量の平均値が最大に達した時点（伸び停止時）は、

R3E1-CT : 82分（試験終了時：98分）

R3E1-CTX : 47分（試験終了時：88分）

などであり（表—4）、伸び停止時と試験終了時の時間差

が短い試験体R3E1-CTは、試験体R2E1-CT、R3E1-FPと同様の変形状と考えられる。なお、一般鋼のR3E1-CTXでは、伸び停止時の時間が短く、第3ステージの存在が明確ではない。

一般鋼の試験体は、中心荷重、偏心荷重とも鋼材温度350°C近辺から伸びが鈍化し、最大伸び量もFR鋼と比較して、例えば、中心荷重の試験体（R3E0-CTとR3E0-CTX）では2/3程度と小さくなっており、伸び停止時の時間も短くなっている。伸びが鈍化した理由は、一般鋼の強度が鋼材温度の上昇とともに低下し、圧縮ひずみの増大により伸びが相殺されたものと考えられる。

2.3.3 崩壊状況

崩壊状況を、写真—1, 2（中心荷重：R3E0-NI）および写真—3（偏心荷重：R2E1-CT）に示した。

中心荷重の試験体では、全体座屈は生じておらず、鋼管の局部座屈部分におけるコンクリートの破壊で柱が荷重支持能力を失ったものと考えられる。なお、無被覆の試験体では鋼管の損傷が著しい。

偏心荷重の試験体では、柱の全体変形（軸方向収縮および横たわみ）が著しい。なお、座屈の起点は鋼管の局部座屈部分である。

2.3.4 考察

軸力比と時間の関係を、伸び停止時および試験終了時について図—11, 12にそれぞれ示す。以上の結果から、各パラメーターの影響を以下に考察する。

① 被覆の有無

無被覆の試験体では鋼管温度が急激に上昇するが、被覆した試験体では、伸び停止時および試験終了時の時間が大幅に伸びている。

② 偏心の影響

偏心荷重の試験体は、中心荷重と比較すると伸び停止

写真—1 崩壊後の試験体（R3E0-NI）

写真—2 局部座屈の試験体（R3E0-NI）

写真—3 崩壊後の試験体（R2E1-CT）

図—11 軸力比と耐火時間の関係(伸び停止時)

図—12 軸力比と耐火時間の関係(試験終了時)

時の時間に大きな差はないが、試験終了時の時間が大幅に短い。試験終了時と伸び停止時の時間の比率は、

中心荷重：FR 鋼 1.51～1.73，一般鋼 3.03

偏芯荷重：FR 鋼 1.13～1.22，一般鋼 1.87

であった（無被覆の試験体 R3E0-NI を除く）。このことは、補強鉄筋のない CFST 柱が偏芯荷重を受けると、伸び停止後（あるいは局部座屈発生後）短時間で崩壊に至り、偏芯荷重に敏感であることを示している。なお、FR 鋼の試験体は一般鋼と比較して試験終了時と伸び停止時の時間の比率が短い、これは、一般鋼の伸び停止時が短く、相対的に試験終了時との比率が大きくなったことによると考えられる。

③ 軸力の影響

軸力が増加すると、伸び停止時および試験終了時の時間が短くなる。その比率は、

中心荷重：R2E0-CT/R3E0-CT

伸び停止時 1.24，試験終了時 1.08

偏芯荷重：R2E1-CT/R3E1-CT

伸び停止時 1.48，試験終了時 1.51

などであり、偏芯荷重においてその影響が大きい。

④ 鋼種の影響

FR 鋼は一般鋼と比較して、伸び停止時の時間が 1.5～1.7 倍（約 30 分）と長い、これは、伸び停止時が

鋼管が荷重支持能力を保持している時点であることから、高温強度に優れた FR 鋼が一般鋼と比較して時間が延びているものである。試験終了時の時間に大きな差は認められない。なお、鋼管温度が 600℃ に到達する時間は、350℃ に到達する時間のいずれも 3 倍以上となっている（表—4）。これは、CFST 柱の熱容量が時間とともに発揮され、鋼管温度の上昇速度が遅くなることによると考えられる。

⑤ 座屈長さの影響

座屈長さは一定としており、その影響は明らかではないが、偏芯荷重の試験終了時の時間を除いて大きな差はないと考えられる。

伸び停止時には、偏芯荷重の試験体も含めて全体座屈は生じておらず座屈長さの影響はない。これは、偏芯荷重における水平変形量の測定結果などからも明らかである。

一方、試験終了時については、中心荷重では、試験体の崩壊状況から全体座屈は生じていないと判断される（写真—1, 2）。また、偏芯荷重においても、全体座屈が発生する前に破壊の起点（局部座屈）が形成されていること（写真—3）、鋼管が角形であり局部座屈後にコンクリートを拘束する力が小さいことなどから、中心荷重と同様、鋼管の局部座屈部分におけるコンクリートの破壊で柱の荷重支持能力が決まったものと考えられるが、本研究の結果からは明らかではない。

3. 熱容量試験

3.1 試験体および試験条件

試験体は、角形鋼管（□-300×300×9，長さ 450 mm）に普通コンクリートを充填したものである。試験体の形状および寸法を図—13 に示す。

試験条件を表—6 に示す。試験体数は、被覆の有無、種別および厚さをパラメーターとした 12 体である。被覆材料は、荷重加熱試験で使用したセラミック被覆と耐火塗料に加えて、石膏ボード（JIS A 6913，比重：750 kg/m³）、セラミックファイバー（JIS R 3311，比重：

図—13 熱容量試験の試験体の形状・寸法

表—6 熱容量試験 (試験条件・試験結果)

試験体 番号	被 覆 材 料	被覆厚 (mm)	指定被覆厚 (mm)		鋼材温度到達時間(分)	
			1 時間	2 時間	350°C	600°C
A-12 A-15	無機繊維強化石膏ボード	12 15	21	42 (2 層)	65 120	160 未到達
B-10 B-13	屋内用発泡性耐火塗料	1.0 1.3	—	—	30 35	115 160
C-03 C-06	セラミックファイバー	3 6	—	15 (+ロックウール45)	55 80	120 160
D-05 D-15	湿式ロックウール	5 15	30	40	70 145	未到達 未到達
E-05 E-10 E-15	セラミック被覆	5 10 15	20	30	30 58 93	105 170 未到達
X-00	(無被覆)	—	—	—	10	25

写真—4 熱容量試験体：試験後
(耐火塗料, B-18)

130 kg/m³), ロックウールの5種類とした。セラミック被覆, セラミックファイバー, ロックウールの組成を表—5に示す。

耐火塗料は, 錆止層 (150 g/m²×1 層)・発泡層 (B-10 : 590 g/m²×3 層, B-13 : 765 g/m²×3 層)・保護層 (200 g/m²×1 層) から構成されている。全体の塗膜厚は表—6 に示した。

なお, 試験体を□-300 に限定した理由は, 被覆材料の仕様による差に重点を置いたことと, このサイズでも熱容量は十分に大きく, 有用な性能 (例えば, 3 時間耐火相当の耐火性能) が得られると判断したからである。

3.2 試験方法

試験は, JIS A 1304 の標準加熱に準拠した3 時間加熱とした。温度測定は, JIS C 1602 に規定するK 熱電対を用い, 炉内加熱温度, 鋼管表面温度およびコンクリート温度を測定した。測定位置を図—13 に示す。なお, 試験体には上下面にセラミックボード (400×400, 厚さ50 mm) を取り付け, 上下面からの入熱を防止した。

3.3 試験結果

図—14 に, 耐火塗料 (B-18) を例に, 鋼管およびコンクリート各部の温度の測定結果を示す。また, 写真—4 に試験後の試験体の外観を示す。鋼管温度は, 耐火塗料の発泡が完了する300°C 近辺から上昇勾配が低くなっている。また, コンクリート温度は, 140°C 前後で暫時停滞するが, これはコンクリートに含まれる自由水の影響によるものと考えられる。

図—15~19 に, 各被覆材料ごとの鋼管温度の測定結果 (平均値) を示した。図中の点線は, FR 鋼柱 (鉄骨柱, H-300×300×10×15) の載荷加熱試験¹²⁾で測定した鋼材温度 (平均値) で, 被覆は, 耐火塗料 (PI 48, 塗膜厚 : 2.58 m), ロックウール (W 10 A, W 15 A, 被覆厚 : 10, 15 mm), セラミック被覆 (CT 10, CT 15,

(試験体記号 B-18)

図—14 熱容量試験結果

図—15 鋼材温度測定値 (石膏ボード)

CT 20, 同 : 10, 15, 20 mm) である。なお, 載荷加熱試験では, 試験終了時で加熱を停止していることから, 鋼材温度もその時点から低下している。また, 図中の一点鎖線は, 前述の CFST 柱の載荷加熱試験で測定した

図—16 鋼材温度測定値 (耐火塗料)

図—17 鋼材温度測定値 (セラミックファイバー)

図—18 鋼材温度測定値 (湿式ロックウール)

図—19 鋼材温度測定値 (セラミック被覆)

鋼管温度 (平均値) で、被覆は、耐火塗料 (R3E0-FP)、セラミック被覆 (R3E0-CT) である。なお、無被覆の試験体 (X-00) の鋼管温度も合わせて示した。

表—6 に、鋼管温度が 350°C および 600°C に到達した時間を記載した。表中の未到達は、 600°C に到達せず 3 時間加熱で試験を終了したものである。また、耐火構造の指定材料については、耐火時間 1, 2 時間の被覆厚を参考に記載した。指定材料の被覆厚は、鉄骨柱 (H-300 $\times$ 300 $\times$ 10 $\times$ 15, 上述の載荷加熱試験と同じ) で鋼材温度 350°C に到達する厚さであることから、CFST 柱との比較上、参考とした。

以下に、試験結果について考察する。

同一被覆厚のロックウール (図—18, D-15 と W15A, 被覆厚 15 mm) およびセラミック被覆 (図—19, E-10 と CT10, 被覆厚 10 mm) では、CFST 柱の鋼管温度の上昇速度が鉄骨柱のほぼ 1/2 程度である。また、耐火塗料 (図—16) でも、塗膜厚の薄い CFST 柱が (B-10, 1.0 mm) が厚い鉄骨柱 (PI48, 2.58 mm) より温度上

昇が少ない。

なお、前章で述べた載荷加熱試験における鋼管温度の測定結果と本加熱試験の結果を比較すると、同一被覆厚では、耐火塗料 (図—16, R3E0-FP と B-10, 塗膜厚 1.0 mm)、セラミック被覆 (図—19, R3E0-CT と E-05, 被覆厚 5 mm) の温度上昇はほぼ等しい。

その他の試験結果についても、鋼管温度が 350°C に到達した時間と表—6 に示した各被覆の指定厚の比較から、CFST 柱の熱容量の効果は明らかである。なお、指定厚は、加熱試験において加熱終了後の温度上昇も含めて鋼材温度が 350°C 以下となる厚さであり、本試験は 3 時間まで加熱を継続していることから、厳密な比較とはなっていない。

以上の結果から、CFST 柱では、その熱容量から鋼管温度の上昇が少なく、各被覆材料とも鉄骨柱と比較してほぼ 1/2 の被覆厚で同等の断熱性能が得られる。

また、鋼材温度が 600°C に到達する時間は 350°C に到達する時間のいずれも 2 倍以上となっている (表—6)。

これは、CFST 柱の熱容量が時間とともに発揮され、鋼材温度が高温となった時点で温度上昇が緩やかになることによるもので、FR 鋼を使用することの効果が明らかとなっている。

4. 結 語

以上、CFST 柱の荷重加熱試験および加熱試験（熱容量試験）の結果から、以下の点が明らかとなった。

- ① 補強鉄筋のない CFST 柱は偏芯荷重に敏感である。すなわち、伸び停止時（あるいは鋼管の局部座屈発生時）から試験終了時（崩壊時）までの時間が、中心荷重と比較して大幅に短い。また、軸力が増加すると伸び停止時・試験終了時とも時間が短くなるが、偏芯荷重においてその影響が顕著である。なお、以上は、本研究で対象とした座屈長さの試験体における結果であり、座屈長さが短い試験体では異なった結果が得られることも考えられる。
- ② 無被覆の CFST 柱では鋼管温度が急激に上昇することから、特に、伸び停止時（あるいは局部座屈発生時）の時間が極めて短くなる。一方、鋼管に軽微な被覆を行えば、CFST 柱の熱容量が有効に発揮され、伸び停止時・試験終了時とも時間が大幅に延びる。
- ③ CFST 柱の熱容量の効果は時間とともに発揮されることから、高温において鋼材温度の上昇が緩やかとなる。このことは、高温強度に優れた FR 鋼を使用することで、その効果を有効に利用できることを示している。

以上、補強鉄筋のない CFST 柱は偏芯荷重に敏感であることから、安定した耐火性能を得るには、鋼管が、荷重を支持できる温度（伸び停止時あるいは局部座屈発生時まで）で使用することが望ましい。この場合、鋼管に軽微な被覆を行うことで、CFST 柱の熱容量を有効に発揮させ、長時間の耐火性能が得られる。さらに、鋼管に高温強度に優れた FR 鋼を使用することで、その耐火性能を大幅に向上させることができる。

謝 辞

本研究の遂行にご協力頂いた新日鐵化学の片島 昭氏、原 基氏、エスケー化研の元木英男氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) K. Kordina and W. Klingsch : Fire Safety of Composite Columns of Concrete Filled Hollow Sections, CIDECT

Report, No.15, C1/C2, 1983

- 2) J. P. Grimault : Calcul a l'incendie des profils creux remplies de béton, manual pratique. Chambre Syndicale des fabricants du tubes d'acier. (和訳：JSSC レポート, No.10, 1988)
- 3) Calculation of the Fire Resistance of Centrally Loaded Composite Steel-Concrete Columns Exposed to the Standard Fire. ECCS, Technical Committee 3, 1988.9. (和訳：JSSC レポート, No.18, 1991)
- 4) 斎藤 光, 上杉英樹：鋼管コンクリート柱の耐火性（充填コンクリートの有効性）, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.2107~2108, 昭和52年10月
- 5) 鈴木敏郎, 木村 衛, 古平章夫, 伏見光雅：コンクリート充てん角形鋼管柱の耐火性能に関する実験（定軸力下における加熱時挙動について）, 日本建築学会論文報告集, 第350号, pp.77~85, 1985.4
- 6) 木村 衛, 太田秀彦, 金子洋文, 古平章夫：複合荷重を受ける充填型鋼管コンクリート柱の耐火性能に関する実験的研究, 日本建築学会論文報告集, 第417号, pp.63~70, 1990.11
- 7) 作本好文, 大橋 守, 計良光一郎, 斎藤 光：建築構造用耐火鋼材の高温強度特性, 日本建築学会論文報告集, 第427号, pp.107~115, 1991.9
- 8) 岡田忠義, 吉田正友, 田坂茂樹, 計良光一郎, 作本好文, 山口種美：建築構造用耐火鋼材を使用したコンクリート充填鋼管実大柱の荷重加熱試験（その2, セラミック系耐火被覆材を使用した場合）, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1171~1172, 1991.9.
- 9) 岡田忠義, 吉田正友, 田坂茂樹, 岡部 猛, 作本好文, 山口種美：建築構造用耐火鋼材を使用したコンクリート充填鋼管柱の耐火性能, GBRC, 第65号, pp.18~23, 1992.1
- 10) T. Okada, T. Yamaguchi, Y. Sakumoto and K. Keira, : Loaded Heat Tests of Full-Scale Columns of Concrete-Filled Tubular Steel Structure using Fire-Resistant Steel for Buildings, Proceedings of the Third International Cooperation and Research in Steel-Concrete Composite Structures, pp.101~106, 1991.9
- 11) 雑喉良介, 吉田正友, 田坂茂樹, 作本好文, 山口種美, 岡田忠義：建築構造用耐火鋼材を使用するコンクリート充填鋼管柱の熱容量特性に関する実験研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1403~1404, 1992.8
- 12) 作本好文, 山口種美, 岡田忠義, 吉田正友, 田坂茂樹, 斎藤 光：建築構造用耐火鋼材の耐火性能に関する実験的研究, 日本建築学会論文報告集, 第434号, pp.149~158, 1992.4

(1992年9月9日原稿受理, 1993年2月8日採用決定)