中心圧縮を受ける充填鋼管コンクリート柱の内部温度と耐火時間に関する研究

FIRE RESISTANCE OF CONCRETE-FILLED STEEL TUBE COLUMNS UNDER CONSTANT AXIAL LOADS

齋藤 秀人*, 森田 武**, 上杉 英樹***

Hidetō SAITO, Takeshi MORITA and Hideki UESUGI

This paper presents both experimentally and analytically the fire-resistance of concrete-filled steel tube (CFT) columns without fire-protection. Six of CFT column specimens, with rectangular or circular sections of 300mm to 500mm in size, were heated for three hours in accordance with ISO-834. A transition of the temperatures measured inside of concrete was simulated successfully by the numerical thermal analysis, in which the thermal conductivity of concrete was taken as 0.8 times of the value prescribed in Eurocode 4 (EC4), and the specific heat of concrete taken as 1.2 times. Based on the numerical thermal analysis for the CFT columns, a non-linear stress analysis was carried out taking into account the under-high-temperature behaviors of concrete as prescribed in EC4. It turned out that, for the heating tests of the axially loaded CFT columns, the stress analysis could possibly explain the deviation in the previous experimental data by allowing a tolerance to the standard heating curves prescribed in ISO-834.

Keywords : fire resistance, concrete-filled steel tube columns, non-fire-protection, constant axial load
耐火性能, 充填鋼管コンクリート柱, 無耐火被覆, 一定軸力

1. はじめに

無耐火被覆の鉄骨柱が火災時に直接火災にさらされると荷重支持能力を早期に失う。充填鋼管コンクリート柱（以下 CFT 柱）においても、外周部は高温となって早期に強度低下する。しかしコンクリートの内部温度はなかなか上昇せず、柱の荷重支持能力は一定時間維持される。耐火構造としての無耐火被覆 CFT 柱は欧州では以前から認められており¹⁾、多くの実験結果に基づいて無耐火被覆 CFT 柱の実施例が我が国でも近年多く見られるようになってきている。

1977年に齋藤・上杉は、実験的・解析的に温度性状を検討した結果を報告し^{2, 3)}、無耐火被覆 CFT 柱実現の可能性を示した。1982年以降、他に先駆けて古平らは載荷加熱試験結果を報告し^{4~7)}、引き続き佐久間ら⁸⁾・今野ら^{9~10)}・池田ら¹¹⁾・作本ら^{12, 13)}・道越ら^{14~16)}・吉野ら¹⁷⁾・久保田ら¹⁸⁾・新都市型住宅システム開発プロジェクト（以下 新都市）¹⁹⁾ などにより様々な実験報告がなされてきた。一方筆者らは、梁の伸び出しを考慮した無耐火被覆 CFT 柱の耐火性能に関する研究^{20~26)}および無耐火被覆 CFT 柱の内部温度と耐火性能²⁷⁾について1992年以降報告してきた。

無耐火被覆 CFT 柱の耐火時間は、鋼管を無視した軸力比（コンクリート断面積と圧縮強度の積で軸力を除した値）で一般に評価され、設計手法も構築されてきた¹⁹⁾。しかし耐火試験装置固有の性能に試験結果が影響を受けるためか、実験で得られた耐火時間には大きなバラツキが認められる。そこで試験条件の誤差を考慮して耐火時間

を評価する必要があると考えた。

本論は、無耐火被覆 CFT 柱の内部温度を実用的に予測すること、および中心圧縮を受ける無耐火被覆 CFT 柱の耐火時間のバラツキの原因を探ることの2つを目的として、加熱試験と温度解析および既往の試験結果^{4~13, 15~19)}の集積と温度・熱応力解析を試みたものである。

なお本研究でとった手法は、純粋な理学的方法ではなく、若干の誤差をとをもって結果的に第一近似が得られるならばそれで良しとする工学的方法である。コンクリートのように砂・砂利・セメント・水の結合体である物質の高温性状を精密な分析の方法で追求することはきわめて困難であり、むしろ不可能であるからである。

2. 無耐火被覆 CFT 柱の耐火試験時の内部温度

2.1 既往の研究

無耐火被覆 CFT 柱の温度性状に関しては、齋藤・上杉による研究^{2, 3)}以降、今野ら¹⁰⁾や道越ら¹⁴⁾により実験的あるいは解析的研究が行われ、柴田²⁸⁾による解析的研究はコンクリート充填鋼管構造設計施工指針²⁹⁾にまとめられている。

高温強度・熱伝導率・比熱などの材料の高温特性についての研究は以前から行われ^{30~32)}、近年まとめられたものとしては Eurocode 4（以下 EC4）³³⁾と建築物の総合防火設計法（以下 防火総プロ）³⁴⁾がよく知られている。

(注) 本研究の一部は文献²⁷⁾に発表している。

* 清水建設㈱技術研究所 主任研究員

** 清水建設㈱技術研究所 主任研究員・工博

*** 千葉大学大学院自然科学研究科 教授・工博

Senior Research Engineer, Institute of Technology, Shimizu Corporation
Senior Research Engineer, Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng.
Prof., Graduate School of Science and Technology, Chiba University, Dr. Eng.

2.2 加熱試験

中心圧縮の荷重加熱試験は、様々な断面の試験体を対象として行われている。しかし内部温度は詳細に報告されていない。そこで基礎的な温度データを得ることを目的として加熱試験を行った。

試験体は、概略外形寸法が300・400・500mmである角形断面と円形断面で、長さ1,150mmの6体である。長さ方向中央付近の1断面で温度測定を行い、図-1に示すように断面の中心で1点、その他では対称条件を満たす各4点を測点とし、角形断面のコーナー部には熱電対を多く配した。コンクリートは呼び強度42N/mm²、鋼管はF値325N/mm²である。試験時のコンクリートの材令は114～118日、圧縮強度54.3N/mm²、含水率4.9%であった。コンクリートの調査・まだ固まらないコンクリートの試験結果・圧縮試験結果を表-1～3に示す。

試験は、清水建設(株)の耐火試験炉において、概略外形寸法が同じ角形と円形を2体ずつ図-2に示すように垂直にセットして実施した。なお断熱を目的として、試験体の上下端部約10cmおよび上面には毛布状の耐火被覆を施した。加熱はISO 834³⁵⁾に定める標準加熱3時間である。温度測定にはK熱電対を用い、加熱終了後も3時間程度の計測を行った。その結果、炉内温度は標準加熱温度曲線にほぼ一致し、対称条件を満たす各4測点での内部温度には大きなバラツキは認められなかった(図-7・8参照)。

2.3 温度解析

内部温度解析は、加熱温度・熱伝達率・材料の熱定数・コンクリートの含有水分の取扱いを定め、有限要素法あるいは差分法により一般に行われる。本論では、角形断面に対しては1/4断面を対象にした

二次元差分法、円形断面に対しては一次元差分法を用いた。第*i*-1層(温度 T_{i-1} 、熱伝達率 λ_{i-1} 、層厚 d_{i-1})から第*i*層(温度 T_i 、熱伝達率 λ_i 、層厚 d_i)に面積(A_i)を通して微小時間(Δt)に流入する熱量(q_i)の一次元差分式を1式に、第*i*層(比熱 C_i 、密度 ρ_i 、体積 V_i)の微小時間(Δt)の温度上昇(ΔT_i)を2式に示す³⁴⁾。

$$q_i = \frac{2 \cdot (\lambda_{i-1} \cdot d_{i-1} + \lambda_i \cdot d_i)}{(d_{i-1} + d_i)^2} \cdot (T_{i-1} - T_i) \cdot A_i \cdot \Delta t \quad (1式)$$

$$\Delta T_i = \frac{q_i - q_{i+1}}{C_i \cdot \rho_i \cdot V_i} \quad (2式)$$

図-3に示すように、鋼管を厚さ方向に3分割($d/4 \cdot d/2 \cdot d/4$, d : 厚さ)し、コンクリートは中心から5mm・10mm・10mm・・・と分割して、鋼管と接する部分で端数を調整することとした。設定した諸条件は次の通りである。

加熱温度は、昇温過程ではISO 834の標準加熱曲線、冷却過程では3回の加熱試験で得られた炉内温度実測値の近似曲線とする。

対流熱伝達率(α_f)は23W/m²Kで一定とする^{34, 36)}。また火炎の等価放射率0.9・鋼の放射率0.8・合成放射率(ϵ_r)0.73とし³⁶⁾、ステファン・ボルツマン定数(σ)を用いて放射熱伝達率は温度に依存させる。火炎(温度 T_f)から第1層(温度 T_1 、面積 A_1)に微小時間(Δt)に流入する熱量(q_1)を3式に示す³⁴⁾。

$$q_1 = \left\{ \alpha_f \cdot (T_f - T_1) + \epsilon_r \cdot \sigma \cdot (T_f^4 - T_1^4) \right\} \cdot A_1 \cdot \Delta t \quad (3式)$$

鋼材とコンクリートの比熱・熱伝達率は、図-4に示すように防火総プロとEC4には一見して大きな差はない。しかし防火総プロの適用範囲はEC4に比較して極めて狭い。すなわちEC4の適用範囲が常

図-1 試験体の断面と温度測定位置

図-2 耐火試験炉と試験体

表-1 コンクリートの調査

Sl. (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
				W	C	S	G	Ad.*
21	4.5	38.9	46.2	175	450	773	927	6.075

*: マイティ3000S, 高性能AE減水剤標準形

表-2 まだ固まらないコンクリートの試験結果

Sl. cm	Air %	温度 °C	ρ kg/m ³	気温 °C
22.5	7.4	11.0	2300	6.5

表-3 コンクリートの試験結果

	圧縮強度 N/mm ²			弾性係数 kN/mm ²	ポアソン 比	含水率 %
x1	48.9	54.1	54.9	33.4	0.228	4.8
x2	50.0	53.7	55.3	34.6	0.230	4.8
x3	44.4	52.8	52.6	31.3	0.203	5.1
平均	47.8	53.5	54.3	33.1	0.220	4.9
養生 材令	封かん	標準	封かん			
	28日		114日			

温から1200℃までであるのに対し、防火総プロの適用範囲は鋼材が600℃以下、コンクリートが800℃以下に限られ外挿が必要になる。そこで本論で用いる熱定数はEC4に準拠することとした。

コンクリートの含有水分は移動せず、100℃で蒸発し、水分がある間は温度上昇しないと仮定する。含水率は4.9%とした。水の蒸発潜熱(H_b)による第*i*層の水分蒸発量(ΔW)を4式に示す³⁴⁾。

$$\Delta W = \frac{q_i - q_{i+1}}{H_b} \quad (4式)$$

比重は、鋼材7850kg/m³・コンクリート2300kg/m³で一定とする。昇温過程でのコンクリート温度の解析値と実測値の比較を図-5に示す。断面形状に関係なく、解析結果は測定結果を大きく上回る傾向が認められる。これは安全側の設計(高い内部温度)を意図し、EC4が高い熱伝導率と低い比熱をコンクリートに設定しているためであると考えられる。

そこで内部温度の解析値を実用的な水準まで実測値に近づけるこ

図-3 温度解析時の分割方法

図-4 鋼材とコンクリートの熱常数

図-5 測定値と計算値の比較

とを目的として、EC4のコンクリートの熱伝導率に0.8と0.6、比熱に1.2と1.4を乗じ、同様の温度解析を行った。解析値を実測値で除した値を横軸とし、縦軸を度数として図-6に示す。図中、 $\bar{x}$ は平均値、 σ は標準偏差である。コンクリートの熱定数としては、EC4の熱伝導率に0.8・比熱に1.2を乗じた解析結果が最適である。

コンクリートの熱伝導率をEC4の0.8倍、比熱をEC4の1.2倍、鋼材の熱定数をEC4とした温度解析結果を、時刻歴の温度測定結果(炉内・鋼管表面・内部)に上書きして図-7・8に示す。解析結果と測定結果は非常に良く一致している。

2.4 他事例への温度解析の適用

コンクリートの調合と強度が前記と異なるCFT柱への温度解析の適用性を確認するために、既報のCFT柱の載荷加熱試験²²⁾の試験体について同様の温度予測を行い測定温度と比較する。

試験体は、□-300×9 (STKR 400) および○-318.5×7.9 (STK 400) 各6体の鋼管に鉄筋を配しコンクリートを充填した12体であ

図-6 コンクリートの熱常数を変化させた温度解析結果

図-7 温度測定値と計算値の時刻歴（角形断面）

図-8 温度測定値と計算値の時刻歴（円形断面）

る。試験は2期にまたがるが、コンクリートの呼び強度は共に30N/mm²であり、表-4に示す2種の調査はほぼ同じである。試験体には図-9に示すように長さ1.2mの筒体部が2つあり、その片方を無

耐火被覆の加熱試験部とし、加熱試験部以外には十分な耐火被覆を施した。温度測定は加熱試験部の中央断面において行った。温度解析に対応する測定位置を図-10に示す。

試験では、熱膨張による梁の伸び出しを考慮した変形を軸力とともにCFT柱に作用させて、軸力を保持できなくなるまでJIS A 1304³⁷⁾の標準加熱を行った。試験時のコンクリートの材令は59～88日、圧縮強度31.0～37.0N/mm²、含水率6.0～6.5%であった。

温度解析は前述と同様に、角形断面に対しては1/4断面を対象にした二次元差分法、円形断面に対しては一次元差分法を用いた。鋼管を厚さ方向に3分割($d/4 \cdot d/2 \cdot d/4$, d :厚さ)し、コンクリートは中心から5mm・10mm・10mm・・・と分割して、鋼管と接する部分で端数を調整している。設定した諸条件は次の通りである。

加熱温度はJIS A 1304の標準加熱曲線とする。

対流熱伝達率は23W/m²Kで一定とする。また火炎の等価放射率0.9・鋼の放射率0.8・合成放射率0.73とし、ステファン・ボルツマン定数を用いて放射熱伝達率は温度に依存させる。

コンクリートの熱伝導率はEC4の0.8倍、比熱はEC4の1.2倍とし、鋼材の熱定数はEC4とする。

コンクリートの含有水分は移動せず、100°Cで蒸発し、水分がある間は温度上昇しないと仮定する。含水率は6.0%とした。

比重は、鋼材7850kg/m³・コンクリート2300kg/m³で一定とする。温度解析結果を時刻歴の温度測定結果(炉内・鋼管表面・内部)に上書きして図-11に示す。また図-6と同様に、解析値を実測値で除した値を横軸とし、縦軸を度数として図-12に示す。図中、 $\bar{x}$ は平均値、 σ は標準偏差である。

載荷加熱試験では、コンクリートのひびわれによる熱電対の損傷やひびわれでの水蒸気の移動があるためか、温度測定結果にバラツ

キが認められる。また標準偏差も図-6に比較して大きい。しかし度
数分布を見ると解析結果と測定結果は概ね良く一致しており、2.2節
とは異なる調査と強度のコンクリートを用いたCFT柱においても、
コンクリートの熱伝導率をEC4の0.8倍とし、比熱をEC4の1.2倍と
した温度解析は十分実用的であることを確認できた。

3. 中心圧縮を受ける無耐火被覆CFT柱の耐火時間

3.1 既往の研究

火災は構造物の長期荷重状態が発生する。CFT柱には常時、曲げ
モーメントとせん断力も作用しているが、軸力が支配的である³⁸⁾。
したがって中心圧縮の荷重加熱試験は、無耐火被覆CFT柱の耐火時
間を確認する上で最も基本となる手段である。

無耐火被覆CFT柱の中心荷重加熱試験は、古平ら^{4~7)}が開始し、
新都市¹⁹⁾をはじめ多くの実験報告^{8~13, 15~18)}が大断面や高強度
材料を用いるなどしてなされてきた。

鉄筋などが配されていない既往の試験結果の一覧を表-5に示す。
全59体中、円形断面の試験体が17体とやや少ない。試験体の断面の
形状・寸法、コンクリート強度などは多様である。

中心圧縮を受けるCFT柱の耐火性能は鋼管を無視した軸力比で評
価されることが多い。そこで表-5の軸力比と耐火時間の関係を断面
形状別に図-13に示した。図中の実線と点線は、コンクリート強度
42N/mm²以下を対象とした新都市の回帰式と設計式である。試験体
の断面寸法をプロットサイズで示し、白抜きのプロットは42N/mm²
を超える高強度コンクリートの結果である。全体の傾向を回帰式は

表-4 コンクリートの調査

区分	Sl. cm	Air %	W/C %	S/a %	単位量 kg/m ³					Ad.
					W	C	S	G	Ad.	
C1	15.0	4.5	51.6	45	165	320	815	1017		0.8
C2	15.0	4.5	52.0	45	165	318	818	1017		0.8

Ad.: ポソリスNO.70, AE減水剤標準型

図-9 試験体の形状寸法

図-10 試験体の温度測定位置 (○印)

よく表している。しかし評価尺度である軸力比が同じであっても、
著しく異なる耐火時間が散見されている。42N/mm²以下の角形断面
を見ると、軸力比が0.6で47~138分、軸力比が0.45で79~168分
の耐火時間となっている。断面寸法や強度が異なる試験体の耐火時
間を、コンクリートの断面積と圧縮強度の積で軸力を除した軸力比
は評価できていない。

3.2 解析的検討

表-5の耐火時間の比較検討を目的として、同一の解析条件の下で
各試験体の耐火時間の算定を試みる。

前述と同様に内部温度は、加熱をISO 834の標準加熱曲線、コンク
リートの熱伝導率をEC4の0.8倍、比熱をEC4の1.2倍とし、鋼材の
熱定数をEC4として、一・二次元差分法で解析した。分割も前述と
同様で、鋼管は厚さ方向に3分割 (d/4・d/2・d/4, d: 厚さ) し、コ
ンクリートの分割は中心から5mm・10mm・10mm・・・として、鋼
管と接する部分で端数を調整した。

耐火時間の解析値は、温度解析と同様に断面分割した単位長さの
部材を対象に、弾塑性熱応力解析^{23~26, 39, 40)}で求めた。温度は
前記解析値である。鋼管の存在は完全に無視し、コンクリートの熱
膨張率・高温強度低下率・応力ひずみ関係は図-14に示すEC4にし
たがった。クリープと過渡ひずみは考慮していない。

耐火時間の解析値を表-5の右欄に、耐火時間の実験値と解析値の
比較を図-15に示す。試験体の断面寸法をプロットサイズで示し、
白抜きのプロットは高強度コンクリートである。解析値を著しく下
回る角形大断面・高強度の実験値¹⁹⁾が認められる。その他は、実験

図-11 他事例²²⁾への温度解析の適用

図-12 他事例²²⁾での温度解析結果の度数分布

値と解析値が倍・半分程度に分布している。

実験には誤差が付き物である。無耐火被覆CFT柱の中心軸荷加熱実験においても、支持条件・載荷荷重・加熱温度・コンクリート強度などに誤差が考えられる。しかし、支持条件・載荷荷重・コンクリート強度などには許容誤差に関する規定が無い。一方でISO 834は加熱温度の許容誤差を次のように明記している。

「標準加熱温度に対する平均炉内温度の許容誤差は、加熱5～10分で15%・10～30分で15～5%・30～60分で5～2.5%・60分以上で2.5%であること。さらに平均炉内温度が許容範囲内にある場合、測定加熱温度と標準加熱温度の誤差を100℃未満とすること。」

表-5 既往の試験結果

No.	鋼 管	鋼種	σB N/mm ²	加熱 長さ m	径長 さ比	軸力比 P AcσB	耐火 時間 min	解析 値 min	文献 No.
1	□-300×9	SS41	27.5			0.452	106	154	4, 19
2	□-200×6	SS41	28.3			0.44	88	85	4, 19
3	□-300×6	STKR41	23.5	1.0		0.50	172	130	8
4	□-300×6	STKR41	23.5	1.0		0.80	42	40	8
5	○-150×4.5	STK41	23.9			0.56	58	43	9
6	□-300×9	SS41	23.4	1.68		0.94	30	17	5, 19
7	□-300×9	SS41	23.4	1.68		0.47	203	142	5, 19
8	□-300×9	SS41	49.1	1.68		0.45	157	151	5, 19
9	□-300×9	SS41	49.1	1.68		0.34	248	203	5, 19
10	○-508×6.4	SS41	402*	2.2		0.78	48	83	11
11	○-508×6.4	SS41	402*	2.2		0.79	30	79	11
12	○-508×6.4	SS41	39.4	2.2		0.79	22	79	11, 19
13	○-508×6.4	SS41	402*	2.2		0.79	25	79	11
14	○-508×6.4	SS41	402*	2.2		0.51	144	282	11
15	□-300×9	FR	346*	1.6		0.30	177	223	12
16	□-300×9	FR	346*	1.6		0.43	83	159	12
17	□-300×9	FR	346*	1.6		0.60	47	93	12
18	□-300×9	SS41	41.8	1.4		0.60	47	93	6
19	□-300×9	SS41	41.8	1.4		0.45	79	151	6
20	□-300×9	SS41	41.8	1.4		0.34	175	202	6
21	□-300×9	FR	37.5	3.0		0.68	33	70	13
22	□-300×9	STKR400	41.1		3	0.48	72	141	10, 19
23	□-300×9	STKR400	33.6	2.1		0.33	207	205	17
24	□-300×9	STKR400	33.6	2.1		0.39	139	178	17
25	□-300×9	STKR400	33.6	2.1		0.50	82	131	17
26	□-300×9	STKR400	33.6	2.1		0.66	27	72	17
27	□-300×9	STKR400	60.2	2.1		0.38	101	183	17
28	□-300×6	SM490	91.3	2.3		0.31	115	219	15
29	□-250×6	STKR400	632*	0.95		0.45	42	120	7
30	○-267×6	STK400	632*	0.95		0.45	34	126	7
31	○-318.5×9	STK400	25.5			0.66	47	77	18
32	□-500×25	STKR400	70.2		7	0.24	348	560	16
33	□-500×25	STKR400	70.2		7	0.35	102	413	16
34	□-500×25	STKR400	70.2		7	0.55	36	207	16
35	□-500×12	STKR400	70.2		7	0.35	206	468	16
36	□-750×38	STKR400	77.1		4.8	0.24	323	1175	16
37	□-750×38	STKR400	72.9		4.8	0.27	157	1073	16
38	□-750×38	STKR400	75.7		4.8	0.35	105	842	16
39	□-750×38	STKR400	72.9		4.8	0.55	41	424	16
40	○-318.5×9	SM50	23.9	1.6	8.17	0.79	58	47	19
41	○-318.5×9	SM50	40.2	1.6	8.17	0.53	90	125	19
42	○-318.5×9	SM50	40.2	1.6	8.18	0.79	31	47	19
43	○-216.3×6	SM50	40.2	1.0	8.25	0.38	186	103	19
44	○-216.3×6	SM50	40.2	1.0	8.25	0.51	117	76	19
45	○-406.4×12	SM50	40.2	2.0	7.63	0.58	83	149	19
46	○-406.4×12	SM50	40.2	2.0	7.63	0.87	32	38	19
47	□-300×9	SM50A	23.9	1.6	8.17	0.90	42	24	19
48	□-300×9	SM50A	23.9	1.6	8.17	0.60	138	93	19
49	□-300×9	SM50A	40.2	1.6	8.17	0.45	168	151	19
50	□-300×9	SM50A	40.2	1.6	8.17	0.60	58	93	19
51	□-300×9	SM50A	40.2	1.6	8.17	0.90	25	25	19
52	□-200×6	SM50A	40.2	1.0	8.25	0.45	132	81	19
53	□-200×6	SM50A	40.2	1.0	8.25	0.60	79	53	19
54	□-400×12	SM50A	40.2	2.0	7.63	0.60	79	146	19
55	□-400×12	SM50A	40.2	2.0	7.63	0.90	39	33	19
56	○-318.5×9	SM50	64.5	1.6	8.17	0.53	50	125	19
57	○-318.5×9	SM50	64.5	1.6	8.17	0.79	38	46	19
58	□-300×9	SM50A	64.5	1.6	8.17	0.60	32	93	19
59	□-300×9	SM50A	64.5	1.6	8.17	0.90	21	24	19

*: 原著に従いkgf/cm²

また表-5の4文献^{4, 8, 11, 17})には加熱温度測定値が記載され、その変動幅は50～200℃程度であった。したがってCFT柱の軸荷加熱試験結果の考察に際しては、加熱温度の誤差を認識するべきであると考えた。なお、表-5の9文献^{5~7, 9, 10, 12, 13, 15, 19})には測定加熱温度の記載がなく、2文献^{16, 18})では誤差が不明であった。

そこで表-5の中で最も多い断面寸法である□-300×9と○-318.5×9について、ISO 834が許容する範囲内で加熱条件を次のように変化させて解析的な比較検討を試みた。

- ①加熱温度が一樣に低い場合（下限加熱温度，3時間で1082℃）。
- ②標準加熱（3時間で1110℃）。
- ③加熱温度が一樣に高い場合（上限加熱温度，3時間で1137℃）。
- ④断面外周方向の加熱温度に勾配があり、その勾配が標準加熱温度±4.5%（3時間で1110±49℃）の場合。（図-16参照）
- ⑤断面外周方向の加熱温度に勾配があり、その勾配が上限加熱温度±4.5%（3時間で1137±50℃）の場合。

加熱温度が一樣な場合の温度解析は、角形：1/4断面・二次元、円形

図-13 既往の試験結果

図-14 高温コンクリートの応力ひずみ関係³³⁾

図-15 耐火時間の実験値と解析値の比較

形：一次元，加熱温度に勾配がある場合の温度解析は，角形：1/2断面・二次元，円形：1/2断面・円柱座標系二次元として，いずれも差分法で行うこととした。また加熱温度に勾配がある場合は，バイメタル効果による曲げ変形が部材に生じるので，図-16に示すように部材長1,000mm・長さ方向5分割・一端固定・他端自由・径長さ比6.6の部材を仮定している。

耐火時間の解析値と軸力比の関係を実験値とともに図-17に示す。耐火時間の解析値は，平均加熱温度が下限のときに最も長く，上限のときは標準よりも短くなり，標準加熱温度±4.5%および上限加熱温度±4.5%ではさらに短くなる。

加熱温度の誤差は一様ではなく，部材の長さ方向にもあり得ることなどから，解析値の帯からはずれている実験値は少なくない。しかし解析値の帯は実験値の分布状況を定性的に説明しており，加熱温度の誤差が耐火時間のバラツキの重要な一要因であることを明らかにすることができた。

4. 結論

概略外形寸法が300・400・500mmの角形と円形の無耐火被覆CFT柱を対象に，3時間の加熱試験を行った。その内部温度のシミュレーション解析を行った結果，コンクリートの熱伝導率をEC4の値の0.8倍，比熱をEC4の値の1.2倍，鋼材の熱定数をEC4の値とすることにより，解析値が実験値と非常に良く一致することが判明した。

上記温度解析に基づき，コンクリートの熱膨張率・高温強度低下率・応力ひずみ関係はEC4にしたがって，弾塑性熱応力解析を行った。鋼管の存在は無視し，コンクリートのクリープおよび過渡ひずみは考慮していない。その結果，既往の無耐火被覆CFT柱の中心載荷加熱試験結果のバラツキの重要な一要因が，加熱温度の誤差にあることが明らかとなった。

参考文献

- 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)
- 齋藤 光，上杉英樹：角形鋼管コンクリート柱の耐火試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.2107～2108，1977.10
- 上杉英樹：鋼管コンクリート柱の耐火性（充てん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.2153～2154，1978.9
- 鈴木敏郎，木村 衡，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的研究一定軸力下における加熱時挙動について，日本建築学会構造系論文報告集，第350号，pp.77～84，1985.4
- 古平章夫，飯塚幸治，藤中英生，大橋宏和，木村 衡：充填型鋼管コンクリート柱の耐火性能について—中心載荷加熱実験，日本建築学会大会学術講演梗概集B，pp.1051～1052，1989.10
- 古平章夫，藤中英生：充填型鋼管コンクリート柱の偏心載荷加熱実験，日本建築学会大会学術講演梗概集B，pp.1043～1044，1990.10
- 古平章夫，藤中英生：充填コンクリートを補強した鋼管コンクリート柱の耐火性能，日本建築学会大会学術講演梗概集A-2，pp.99～100，1995.8
- 佐久間仁，村松弘道，吉田正友：無耐火被覆鋼管コンクリート柱の耐火性能実験，GBRC，1987.10
- 今野和近，村松弘道，伊藤茂樹，佐久間仁：無耐火被覆鋼管コンクリート柱の火災時耐力の評価，日本建築学会大会学術講演梗概集B，pp.1381～1382，1988.10
- 下川弘海，今野和近，中村信行，吉田正友，伊藤茂樹：充填鋼管コンクリ

図-16 勾配のある加熱温度と解析時の軸方向分割

図-17 軸力比と耐火時間（解析値と実験値）

ト柱の耐火性能に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集A，pp.14017～1422，1994.9

- 池田憲一，熊谷敏男，中村賢一，最上滋二，斎藤 光：アンボンド型充填鋼管コンクリート構造に関する研究-耐火性能実験-，日本建築学会大会学術講演梗概集B，pp.557～558，1989.10
- 計良光一郎，作本好文，山口種美，岡田忠義：建築構造用耐火鋼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，日本建築学会大会学術講演梗概集B，pp.1041～1042，1990.10
- 作本好文，山口種美，岡田忠義，吉田正友，田坂茂樹：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，日本建築学会構造系論文報告集，第447号，pp.159～168，1993.5
- 道越真太郎，西垣太郎，水野敬三，黒岩秀介，後藤和正，前沢澄夫，塚田康夫，斎藤光，上杉英樹，中村賢一：大断面コンクリート充填鋼管柱の耐火性能に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集A，pp.1407～1410，1994.9
- 道越真太郎，西垣太郎，黒羽健嗣，水野敬三，黒岩秀介，斎藤光，上杉英樹，中村賢一：コンクリート充填型鋼管柱の耐火性能に関する研究-火災時の軸方向支持力，日本建築学会大会学術講演梗概集A-2，pp.89～90，1995.8
- 杉田和直，道越真太郎，西垣太郎：高強度コンクリート充填鋼管柱の耐火性能実験，日本建築学会大会学術講演梗概集A-2，pp.19～24，1998.9
- 吉野茂，畑戸龍夫，多賀章，今村輝武：無耐火被覆鋼管コンクリート柱の耐火性能-中心載荷加熱実験，日本建築学会大会学術講演梗概集B，pp.1425～1426，1994.9
- 久保田一男，高田啓一，平山博巳：鉄筋コンクリート充填型鋼管柱の耐火性能の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集A-2，pp.101～102，1995.8
- 新都市ハウジング協会：CFT構造技術指針・同解説，2000年度版，2001.2

- 20) 齋藤秀人, 齋藤 光: 充填鋼管コンクリート柱の耐火性能に関する実験的研究—梁の伸び出しによる強制変形を受ける場合について—, 日本建築学会構造系論文報告集 No.458, pp.163 ~ 169, 1994.4
- 21) 齋藤秀人, 齋藤 光: 充填鋼管コンクリート柱の耐火性能に関する実験的研究—梁の伸び出しによる横力を受ける場合について—, 構造工学論文集 Vol.46B, pp.221 ~ 227, 2000.3
- 22) 齋藤秀人, 池田憲一: 鉄筋を配した充填鋼管コンクリート柱の耐火性能に関する実験的研究—梁の伸び出しによる横力を受ける場合について—, 日本建築学会構造系論文報告集 No.549, pp.151 ~ 157, 2001.11
- 23) 谷田貝健, 齋藤秀人, 上杉英樹, 齋藤 光: コンクリート充填型鋼管柱の耐火性—数値解析による応力変形性状—, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp.1399 ~ 1400, 1992.8
- 24) 谷田貝健, 齋藤秀人, 上杉英樹, 齋藤 光: 円形断面を持つコンクリート充填型鋼管柱の耐火性—数値解析による応力変形性状—, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.209 ~ 212, 1993.3
- 25) 丹羽博則, 谷田貝健, 齋藤秀人, 上杉英樹, 齋藤 光: コンクリート充填型鋼管柱の耐火性—軸方向変形量の補正方法の検討—, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp.1367 ~ 1368, 1993.9
- 26) 丹羽博則, 齋藤秀人, 上杉英樹, 齋藤 光: コンクリート充填型鋼管柱の耐火性—鋼管の局部座屈を考慮した解析—, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp.1413 ~ 1414, 1994.9
- 27) 齋藤秀人, 森田武: 無耐火被覆充填鋼管コンクリート柱の耐火性能について (その4・5), 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp.1 ~ 2, 2002.8, pp.261 ~ 262, 2003.9
- 28) 柴田道生: コンクリート充填鋼管の火災時の温度分布, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp.1431 ~ 1432, 1994.9
- 29) 日本建築学会: コンクリート充填鋼管構造設計施工指針, 1997.10
- 30) 原田有: 建築耐火構法, 工業調査会, 1973
- 31) H. Bizri: Structural Capacity of Reinforced Concrete Columns Subjected to Fire Induced Thermal Gradients, Report No. UC SESM 73-1, University of California Berkeley, January 1973
- 32) Juri Kajaste-Rudnitski: Numerical model of thermoelastic-plastic concrete material, VTT publications 154, Technical Research Centre of Finland, September 1993
- 33) Eurocode 4, Design of Composite Steel and Concrete Structures, Draft for Part 1.2: Structural Fire Design, 1994
- 34) 日本建築センター: 建築物の総合防火設計法 第4巻 耐火設計法, 1988.4
- 35) ISO 834-1: Fire-resistance tests - Elements of building construction -, Part: General requirements, 1999
- 36) 日本建築学会: 鋼構造耐火設計指針, 1999.1
- 37) 日本工業規格: JIS A 1304 建築構造部分の耐火試験方法, 1994
- 38) 大内富夫, 湯谷孝夫, 西垣太郎, 丹羽博則, 宮本圭一, 齋藤秀人, 谷田貝健, 高橋清: 建築構造物の長期設計荷重時応力, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp.165 ~ 170, 1997.9
- 39) 上杉英樹, 小池 浩: 高層鉄骨架構の熱応力解析 (その1) 区画火災を受ける高層鉄骨架構の熱応力解析手法, 日本建築学会構造系論文報告集 No.384, pp.1 ~ 12, 1988.2
- 40) 上杉英樹, 関美和, 丹羽博則, 齋藤 光: 火災時に於けるコンクリート充填鋼管柱の荷重支持能力に関する解析的研究, 構造工学論文集 Vol.42B, pp.379 ~ 386, 1996.3

(2003年12月9日原稿受理, 2004年4月22日採用決定)