複曲率形式の複合加力を受ける無耐火被覆 CFT 柱の耐火性能
に関する実験的研究EXPERIMENTAL STUDY ON FIRE RESISTANCE OF UNPROTECTED
CONCRETE-FILLED TUBULAR COLUMNS SUBJECTED
TO DOUBLE CURVATURE BENDING

西村 俊彦*, 河野 守**, 長岡 勉***

Toshihiko NISHIMURA, Mamoru KOHNO and Tsutomu NAGAOKA

A series of full scale fire resistance tests was conducted to investigate the behavior of concrete-filled tubular (CFT) columns without fire protection under fires. Each column was subjected to both axial and lateral loadings so that a double curvature bending was realized. The test results showed that fire resistance of unprotected CFT columns was significantly affected by factors such as axial force ratio, applied lateral displacement, cross sectional shape and depth-thickness ratio of steel tube, and the method to cast concrete. A local buckling of steel tube at the top or bottom region of column reduced the confinement effect on concrete and caused crush of concrete nearby, which eventually lead to the failure of CFT column.

Keywords : fire resistance, concrete-filled tubular column, without fire protection,
fire resistance test under load, double curvature, full scale model

耐火性能, CFT 柱, 無耐火被覆, 載荷加熱実験, 複曲率, 実大サイズ

1. はじめに

コンクリート充填鋼管造柱（以下、CFT 柱）は、鋼管の内部にコンクリートを充填した合成構造であり、鉄骨造に比べ優れた耐火性能を示すことが知られている。軸力の大きさ、コンクリート強度、部材角等の上限を制限することで、耐火被覆を施さなくても耐火建築物（建築基準法第 2 条第九号の二）の柱に求められる耐火性能を確保することも可能である¹⁾。

耐火被覆を施さない CFT 柱（以下、無耐火被覆 CFT 柱）の耐火性能を実験で確認した結果は数多く報告されている（例えば文献 2～14）。これらの研究では、熱膨張により材軸方向へ伸び出す梁の影響を考慮して、CFT 柱の柱頭を水平変形させながら、建物の長期荷重に相当する軸力を同時に与えた状態で加熱する「複合加力載荷加熱実験」を行っている^{2～14)}。これらの実験では、主に軸力の大きさとコンクリート強度をパラメーターとしており、これ以外の条件、例えば、部材角、幅厚比、圧入管の有無、骨材の影響等について検討した事例は極めて少なく、これらの条件が無耐火被覆 CFT 柱の耐火性能に与える影響に関する知見は乏しい。また、過去に行われた実験の大部分は、断面の幅（若しくは外径）が 200～300mm 程度の小断面試験体を用いたものであり、実際の建物で一般的に用いられるような実大サイズの試験体（600mm 程度）を用いた複合加力載荷加熱実験の結果が報告された事例はない。断面サイズ（寸法効果）は

無耐火被覆 CFT 柱の耐火性能に影響する可能性が高いと考えられる。そこで本研究では、種々の条件をパラメーターとして実大サイズの試験体による複合加力載荷加熱実験を行い、無耐火被覆 CFT 柱の火災時の挙動と破壊に至る基本的なメカニズムについて考察した。

なお、複合加力載荷加熱実験については、使用する耐火炉や加力装置などの条件によって様々な方法が提案されている。特に文献 2 では、建物の架構に生じる応力・変形状態を適切に評価できるモデルとして図 1 に示す複曲率形式の複合加力実験モデルを提案している。本研究では、文献 2 が提案する方法で実験を行い、無耐火被覆 CFT 柱の耐火性能を検討した。

図 1 複曲率形式の複合加力載荷加熱実験

* 竹中工務店技術研究所 主任研究員・博士(工学)

** 東京理科大学 教授・工博

*** 竹中工務店技術研究所 主任研究員・工修

Chief Researcher, Research and Development Institute, Takenaka Corporation, Dr. Eng.
Prof., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

Chief Researcher, Research and Development Institute, Takenaka Corporation, M. Eng.

2. 実験概要

2. 1 試験体概要

試験体一覧を表1に示す。無耐火被覆 CFT 柱の耐火性能に影響を及ぼすと考えられる軸力比、部材角、断面寸法、幅厚比、断面形状、骨材の種類、打設方法を実験変数として計10体の試験体を計画した。断面を□600×600×19、粗骨材を石灰岩碎石、最大部材角を1/100rad.、コンクリートの常温時の軸耐力に対する荷重軸力の比（以下、軸力比）を0.32とした試験体4を標準試験体とし、これと実験条件の異なる項目をハッチで示す。試験体1～3は軸力比をパラメーターとしている。試験体2と5は最大部材角、試験体6は骨材の種類、試験体7は幅厚比、試験体8は断面形状、試験体9は打設方法、試験体10は断面寸法を試験体4と変えている。試験体の形状・寸法を図2（断面図）と図3（正面図）に示す。試験体9を除く試験体は、下部柱と上部柱を別々に製作した。鋼管上部からの落とし込みによってコンクリートを打設した後、下部柱、接合部、上部柱をPC鋼棒で緊結して一体化した。試験体9は、下部柱、接合部、上部柱を一体で施工し、鋼管内に圧入管を設置して、圧入によりコンクリートを打設した。本論文では、加熱を受ける下部柱を試験体と定義し、下部柱を評価の対象とする。

コンクリートは実験時の強度が50N/mm²になるよう配合した。配合を表2に示す。骨材（粗骨材）は、試験体5（硬質砂岩碎石）を除き、石灰岩碎石とした。コンクリートの材料特性を表3に示す。試験体と幅及び外径の等しい鋼管にコンクリートを充填した模擬柱を製作し、模擬柱からコア抜きしたシリンダー供試体を用いて圧縮試験を行った。模擬柱のコンクリートは、試験体と同時に打設を行い、配合と打設日が同じでも打設数量等の関係から生コン車が異なる。

表1 試験体一覧

試験体	鋼管			最大部材角 (rad.) ※1	骨材	径長比 (L/B, L/D)	幅厚比 (B/t, D/t)	コンクリート 目標強度	施工方法 ※2	軸力比 ※3
	形状	断面	鋼種							
1	角形	600×600×19	BCP325	1/50	石灰岩	6.7	31.6	50	方法1	0.36
2	角形	600×600×19	BCP325	1/50	石灰岩	6.7	31.6	50	方法1	0.32
3	角形	600×600×19	BCP325	1/50	石灰岩	6.7	31.6	50	方法1	0.27
4	角形	600×600×19	BCP325	1/100	石灰岩	6.7	31.6	50	方法1	0.32
5	角形	600×600×19	BCP325	1/200	石灰岩	6.7	31.6	50	方法1	0.32
6	角形	600×600×19	BCP325	1/100	硬質砂岩	6.7	31.6	50	方法1	0.32
7	角形	600×600×25	BCP325	1/100	石灰岩	6.7	24.0	50	方法1	0.32
8	円形	609.6×19	STKN490B	1/100	石灰岩	6.7	32.1	50	方法1	0.32
9	角形	600×600×19	BCP325	1/100	石灰岩	6.7	31.6	50	方法2	0.32
10	角形	300×300×9	BCR295	1/50	石灰岩	7.0	33.3	50	方法1	0.32

※1 部材角=試験体の柱頭水平変位（接合部の水平変位）／試験体の筒体部長さ

※2 方法1: 上下柱を分離し落とし込みでコンクリートを打設後PC鋼棒で結合、方法2: 上下柱一体で圧入によりコンクリートを打設

※3 常温時のコンクリートに対する軸力比 $N/(cA \cdot \sigma_B)$

図2 試験体（断面図）（単位：mm）

表2 コンクリートの配合

配合 No.	試験体	呼び強度 N/mm ²	水セメント比 %	単位量 kg/m ³					混和剤
				水	セメント	細骨材1	細骨材2	粗骨材	
1	1,2,3	42	41.4	175	423	554	239	915	5.076
2	4,5,7,8	42	41.4	175	423	549	237	932	4.524
3	6	42	41.4	175	423	559	242	898	5.076
4	9,10	42	41.4	175	423	549	237	932	5.076

【使用材料】セメント: 普通ポルトランドセメント, 細骨材1: 神栖市産陸砂, 細骨材2: 鹿沼市産砕砂, 粗骨材: 栃木市産砕石 (No.3のみ鹿沼市産砕石), 混和剤: 高性能AE減水剤

表3 コンクリートの材料特性

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	最大荷重時 ひずみ (μ)	比重	含水率 (%)	材齢 (日)
1,2	50.1	28,360	2,504	2.27	5.9	90,108
3	53.3	27,273	2,818	2.25	4.5	134
4	42.2	27,933	2,272	2.30	5.5	71
5	48.1	24,229	2,723	2.18	4.7	153
6	48.6	26,377	2,775	2.24	4.1	82
7	47.0	27,312	2,488	2.21	5.0	91
8	46.1	26,840	2,427	2.21	5.1	103
9	53.4	30,875	2,444	2.28	5.5	98
10	61.9	30,249	2,889	2.30	5.5	117

図3 試験体（正面図）（単位：mm）

る場合は、打設する試験体毎に模擬柱を用意した。

鋼管にはBCP325(断面サイズ600mmの角形鋼管:以下,□600),STKN490B(断面サイズ609.6mmの円形鋼管:以下,○600)とBCR295(断面サイズ300mmの角形鋼管:以下,□300)を使用した。鋼材の機械的性質(常温時)を表4に示す。SN490やBCR295は既往の文献^{例えば15~17}に鋼材の高温特性が示されているが,BCP325については公開されたデータがほとんどなく,高温特性が不明なため,高温引張試験を行った。試験片は試験体5及び9に用いた鋼管の平板部とコーナー部からそれぞれ採取した。試験片数は各温度についてN=2とした。BCP325の高温引張試験の結果一覧(平均値)を表5,応力-ひずみ関係の一例を図4~5,ひずみ1%時応力を図6に示す。400℃以下の範囲では,コーナー部の強度が平板部に比べ高い値を示しているが,400℃を過ぎたあたりからコーナー部の強度は大きく低下し,600℃以降は平板部と概ね同じ強度を示した。

表4 鋼材の機械的性質

試験体	鋼材種	板厚 (mm)	降伏強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
1, 2, 3	BCP325	19	330	2.091×10^5	521	29.1
4, 6	BCP325	19	413	2.012×10^5	546	27.2
5, 9	BCP325	19	357	1.970×10^5	527	28.7
7	BCP325	25	415	1.868×10^5	547	29.8
8	STKN490B	19	464	1.960×10^5	561	37.1
10	BCR295	9	431	2.012×10^5	516	20.2

表5 鋼材の高温引張試験結果

温度 (℃)	平板部		コーナー部	
	ひずみ1%時応力 (N/mm ²)	強度 残存率	ひずみ1%時応力 (N/mm ²)	強度 残存率
RT(常温)	327.4	1.00	461.8	1.00
100	295.5	0.90	449.2	0.97
200	302.5	0.92	482.7	1.05
300	289.6	0.88	464.6	1.01
400	271.0	0.83	426.0	0.92
500	230.3	0.70	302.3	0.65
600	129.3	0.39	155.2	0.34
700	59.1	0.18	66.1	0.14
800	40.9	0.13	40.5	0.09

図4 BCP325の応力-ひずみ関係(平板部)

図5 BCP325の応力-ひずみ関係(コーナー部)

図6 BCP325のひずみ1%時応力

2. 2 実験方法

竹中工務店技術研究所の載荷加熱用耐火試験炉を用いて実験を実施した。実験装置を図7に示す。下部柱の脚部は境界条件が固定となるよう,PC鋼棒によって試験装置(架台)と緊結した。試験体10(□300)は,下部柱の高さを調整するため,試験装置の架台と試験体の間にスタブを設けた。上部柱の頭部は球座を介して鉛直加力用の油圧ジャッキと接続した。接合部には,梁の伸び出しを模擬した水平変位を与えるため,水平加力梁を介して,水平加力用の油圧ジャッキ(他端部は反力トラスに固定)と接続した。上部柱頭部の水平方向への変位を止めるため,上部柱の頭部(球座の位置)は頭部固定梁と接続した。以上の実験装置及び加力方法は基本的に文献2に従っている。加熱範囲は,下部柱(上下端部から100mmの範囲)はセラミックブランケットで被覆)のみとし,炉内に含まれる接合部と水平加力梁はセラミックブランケットで被覆した。

表1に示す軸力比に相当する鉛直軸力を試験体に与えた状態で,ISO834に規定された標準加熱温度曲線に従い,試験体が破壊するまで加熱した。水平方向には,柱の部材角が1時間で表1に示す最大部材角に到達するように,柱頭の水平変位を一定の速度で漸増し(接合部中央高さ位置の測定点で制御),最大部材角到達後は,水平変位を固定した。

試験体の破壊は,試験体の鉛直方向変位及び変位速度がISO834で規定する許容変位(=h/100ここに,h:試験体高さ)か許容変位速度(=3h/1000)に到達した時間,若しくは,鉛直軸力がISO834

図7 試験装置(試験体1~9)(単位:mm)

の荷重規定値（荷重が 5%低下）に達した時間で評価することとし、
 この中で最も短い時間を「耐火時間」と定義した。なお、許容値を決
 める際の試験体高さには加熱長さを採用し、試験体 1～9 は
 $h=3820\text{mm}$ 、試験体 10 は $h=1900\text{mm}$ とした。

実験時は、鉛直・水平荷重、炉内雰囲気・鋼管・コンクリート温度、
 鉛直・水平変位を測定した。各温度は k 型熱電対を用いて試験体の中
 央高さ位置で測定した。鋼管とコンクリート温度は図 2 に示す位置、
 炉内雰囲気温度は鋼管表面から 100mm 離れた位置で測定した。

3. 実験結果

3. 1 結果概要

【耐火時間】耐火時間の一覧を表 6 に示す。

【温度】温度測定結果の一例として、試験体 6 (□600)、試験体 8
 (○600)、試験体 10 (□300) の炉内雰囲気温度、鋼管温度、コン
 クリート温度を図 8～10 に示す。炉内雰囲気温度と鋼管温度は全測
 定点の平均値を示す。角形鋼管のコンクリート温度は図 2 に示す平
 板部とコーナー部の平均値を示す。

【鉛直方向変位】全試験体の鉛直方向変位の経時変化を図 11 に、鉛
 直方向変位速度の経時変化を図 12 に示す。無耐火被覆 CFT 柱の火

表 6 耐火時間

試験体名	許容値到達時間(分)			耐火時間(分) MIN(①～③)
	①鉛直変位	②変位速度	③鉛直荷重	
1	51.0	51.0	51.5	51.0
2	58.0	58.0	58.5	58.0
3	65.5	71.0	72.0	65.5
4	66.5	66.5	65.0	65.0
5	72.5	72.5	73.0	72.5
6	62.5	62.5	62.5	62.5
7	65.5	69.0	69.0	65.5
8	76.5	80.0	79.5	76.5
9	43.5	43.0	43.5	43.0
10	39.5	39.0	39.0	39.0

災時の鉛直方向変位の一般的な挙動 (図 13) が既往の文献 (例えば、
 文献 1 等) に示されている。鋼管温度が急上昇することで加熱初期
 に伸び変形を示すが (区間①：以下、鋼管伸張域)、その後、鋼管の
 塑性変形や局部屈曲により急激な収縮を示す (区間②：以下、鋼管
 収縮域)。鋼管の負担していた軸力が充填コンクリートに移行すると、
 急激な収縮はおさまり、それ以降は安定した変形性状を示す (区間
 ③：以下、安定域)。更に加熱を継続すると充填コンクリートの内部
 温度は徐々に上昇し、ある時点で充填コンクリートの破壊等により
 急激な収縮変形を示し (区間④：以下、破壊域)、作用軸力の保持が
 不可能となる。今回実験を実施した試験体 (図 11) はいずれも図 13
 と概ね同様の挙動を示している。試験体によっては、区間③にあた

図 8 温度測定結果(□600：試験体 6)

図 9 温度測定結果(○600：試験体 8)

図 10 温度測定結果(□300：試験体 10)

図 11 鉛直方向変位

図 12 鉛直方向変位速度

図 13 鉛直方向変位の一般的な挙動

写真 1 破壊状況 (向かって右側に水平加力)

る挙動が明確に現れていない試験体もある。例えば試験体 1～3 及び 10 がこれに該当する。

【回転角】試験体頭部の回転角として、試験体 3(最大部材角 1/50 rad.)、試験体 4(最大部材角 1/100 rad.)、試験体 5(最大部材角 1/200 rad.) の測定結果を図 14 に示す。柱頭には最大部材角を上回る大きな回転角が生じている。図 7 に示す加力方法は試験体にとって厳しい条件になっていることがわかる。

図 14 柱頭回転角

【局部座屈】実験後の試験体を写真 1 に示す。最大部材角 1/50 rad. を与えた試験体 1～3 は、柱頭と柱脚の圧縮側に大きな局部座屈を生じている。特に柱頭の局部座屈が大きく進展している。最大部材角 1/100 rad. を与えた試験体 4, 6 及び最大部材角 1/200 rad. を与えた試験体 5 は、柱脚の圧縮側に大きな局部座屈を生じたが、柱頭には大きな局部座屈が見られなかった。一方、幅厚比の小さい試験体 7 は柱頭の圧縮側及び柱脚の圧縮側と引張側に大きな局部座屈を生じた。最大部材角が 1/100 rad. の他の試験体 4, 6 とは異なる傾向を示している。後述するように (4.1 参照)、試験体 7 は鉛直方向に大きな伸張変形を示しており、これが影響した可能性が考えられる。円形鋼管を用いた試験体 8 は、柱頭柱脚に局部座屈が観察されたが、膨らみは小さく、角形鋼管のような顕著な膨らみは見られなかった。圧入口を設けた試験体 9 は、筒体部の中央部に大きな局部座屈を生じ

加熱 25 分時

加熱 30 分時

写真 2 炉内状況 (試験体 5 : □600)

加熱 20 分時

加熱 30 分時

写真 3 炉内状況 (試験体 10 : □300)

た。試験体 9 を除く他の試験体はいずれも局部座屈が柱頭若しくは柱脚に集中しており、筒体部の中央部に局部座屈を生じたのは試験体 9 のみである。中央部の局部座屈は、圧入口の付近に位置しており、圧入管の影響によって局部座屈を生じた可能性が考えられる。小断面の試験体 10 (□300, 1/50 rad.) は、柱頭の圧縮側に大きな局部座屈を生じたが、柱脚には局部座屈が見られなかった。

【加熱中の観察】いずれの試験体も、加熱初期の伸張変形が止まり、収縮変形に移行する際に大きな音が確認された。鋼管収縮域 (図 13 区間②) に移行した直後 (概ね 10 分程度の間) は、大きな音が断続的に確認された。加熱柱の柱頭柱脚に生じた局部座屈は、伸張変形から収縮変形に反転した直後に生じたことが観察されている。炉内に設置したカメラで撮影した試験体の一例を写真 2 (試験体 5 の柱脚) と写真 3 (試験体 10 の柱頭) に示す。試験体 5 は、26 分で伸び変形が止まり、26～30 分にかけて急速な収縮変位を示している。25 分の時点では局部座屈は見られないが、30 分の時点では大きな局部座屈が柱脚に形成されていることがわかる。試験体 10 は、18 分で伸び変形が止まり、その後 18～29 分にかけて比較的緩やかな収縮変位を示している。20 分には柱頭に小さな局部座屈が生じており、30 分には局部座屈が大きく成長している様子がわかる。

3. 2 軸力比の影響

軸力比を変数にした試験体 1～3 の鉛直方向変位及び変位速度の比較を図 15 に、耐火時間と軸力比の関係を図 16 に示す。耐火時間と軸力比はほぼ直線的な負の比例関係にあり、軸力比が小さくなるほど耐火時間が長くなる傾向が見られた。

3. 3 部材角の影響

最大部材角を変数にした試験体 2(1/50 rad.)、試験体 4(1/100 rad.)、試験体 5(1/200 rad.) の鉛直方向変位及び変位速度の比較を図 17 に、耐火時間と最大部材角の関係を図 18 に示す。最大部材角が小さくなるほど耐火時間が長くなる結果となった。最大部材角は無耐火被覆 CFT 柱の耐火性能に影響することを確認した。

図 15 鉛直方向変位・変位速度の比較 (試験体 1, 2, 3)

図 16 軸力比と耐火時間

図 18 最大部材角と耐火時間

図 17 鉛直方向変位・変位速度の比較（試験体 2, 4, 5）

試験体 4 (1/100rad.) と試験体 5 (1/200 rad.) は安定域 (図 13 の区間③) が明確に形成されており、軸力がコンクリートに移行できたものと推察される。これに対し、試験体 2 (1/50 rad.) は、安定域が見られない。鋼管の負担していた軸力がコンクリートに移行する時点で既にコンクリートが圧壊していた可能性が考えられる。また、試験体 2 (1/50 rad.) と試験体 4 (1/100 rad.) は、最大部材角に到達する前に変位速度が急増しているのに対し、試験体 5 (1/200 rad.) は、最大部材角に達するまで変位速度の急増が起きていない。最大部材角を 1/50 rad. と 1/100 rad. に設定した試験体は、水平変位 (部材角) の増大によって最大部材角に達する前にコンクリートが圧壊したと考えられる。

3. 4 粗骨材の影響

粗骨材の種類は、コンクリートの耐火性能に影響することが報告されている¹⁵⁾。建物で一般的に用いられている石灰岩碎石と硬質砂岩碎石を用いて粗骨材の違いが耐火性能に及ぼす影響を比較した。試験体 4 (石灰岩) と試験体 6 (硬質砂岩) の鉛直方向変位及び変位速度の比較を図 19 に示す。いずれの試験体も同様の变形挙動を示した。耐火時間は試験体 4 (石灰岩) が 65 分、試験体 6 (硬質砂岩) が 62.5 分でほぼ同じ結果となった。粗骨材の種類は無耐火被覆 CFT 柱の耐火性能にほとんど影響しないことを確認した。

図 19 鉛直方向変位・変位速度の比較（試験体 4, 6）

3. 5 幅厚比の影響

鋼管の幅厚比は鋼管の局部座屈に影響することが知られている。鋼管の幅厚比の影響を検討するため、試験体 4 (鋼管厚 19mm, B/t=31.6) に対し、鋼管厚を 25mm (B/t=24) に増やした試験体 7 を計画した。試験体 4 (B/t=31.6) と試験体 7 (B/t=24) の鉛直方向変位及び変位速度の比較を図 20 に示す。試験体 7 (B/t=24) は、伸張変形のピーク時及び軸力が鋼管からコンクリートに移行する時間が試験体 4 (B/t=31.6) に比べ若干長くなっているが、変位速度が増大し始める時間は概ね同じであり、耐火時間はほぼ同じ結果となった (試験体 4 が 65 分に対し試験体 7 は 65.5 分)。試験体 7 は、柱頭と柱脚に大きな局部座屈を生じており (写真 1)、幅厚比を小さく

図 20 鉛直方向変位・変位速度の比較（試験体 4, 7）

しても局部座屈を抑制する効果はないことを確認した。幅厚比 24～31.6 の範囲においては、幅厚比の違いで変形性状に若干の違いが出るが、耐火時間に関してはほとんど変わらない結果となった。

3. 6 鋼管形状の影響

円形鋼管を用いた無耐火被覆 CFT 柱は、角形鋼管に比べ優れた耐火性能を発揮することが報告されている^{1,2)}。また、円形鋼管は角形鋼管に比べ幾何学的に局部座屈をし難いことが一般に知られている。角形鋼管に対する耐火性能の向上の程度及び局部座屈に対する影響を検討するため、円形鋼管を用いた試験体 8 を計画した。試験体 4 (角形鋼管) と試験体 8 (円形鋼管) の鉛直方向変位及び変位速度の比較を図 21 に示す。耐火時間は試験体 4 (角形) が 65 分であるのに対し、試験体 8 (円形鋼管) は 76.5 分まで伸びており、円形鋼管試験体は角形鋼管試験体に対し優れた耐火性能を示している。両試験体の実験後の局部座屈の状況を写真 4 に示す。試験体 4 (角形) は柱脚に大きな局部座屈を生じているのに対し、試験体 8 (円形) は、局部座屈による鋼管の膨らみが小さい。試験体 8 (円形) は局部座屈後も鋼管の拘束効果が得られたことで急激な変形の進展が抑えられ、試験体 4 (角形) に比べ優れた耐火性能を発揮したと考えられる。

図 21 鉛直方向変位・変位速度の比較（試験体 4, 8）

写真 4 局部座屈状況（角形鋼管と円形鋼管）

3. 7 圧入管及び打設方法の影響

試験体 1～8 及び 10 は、下部柱と上部柱を分離して施工し、それぞれ上部からの落とし込みによりコンクリートを打設した後に PC

鋼棒で上下柱を結合している。一方、建物で用いられる CFT 柱は、接合部にコンクリート充填孔を設け、圧入により上下柱のコンクリートを一体で打設するケースが多い。上下柱を分離施工した試験体は、試験体頭部のコンクリートと接合部プレートとの間に隙間を生じやすいため、収縮時の局部座屈の影響を過大に評価している可能性が考えられる。また、圧入で打設する場合は、鋼管の内部に圧入管を設ける必要があるが、圧入管が無耐火被覆 CFT 柱の耐火性能に与える影響を実験的に検討した事例はない。そこで、上下柱を一体で施工すると共に下部柱に圧入管を挿入した実建物仕様の試験体 9 を計画した。試験体 4 と試験体 9 の鉛直方向変位及び変位速度の比較を図 22 に示す。試験体 9 は 35 分で変位が急増し、43 分で破壊に至っている。同一断面、同一軸力比の試験体 4 に比べ耐火時間が短い。試験体 9 の早期破壊の要因は、試験体 4 と試験体 9 の相違点である、「上下柱一体施工」若しくは「圧入管」のいずれかが影響したと考えられる。しかし、今回の実験結果のみで、どちらに原因があったのかを判断することは難しい。試験体 9 は、圧入管の近傍に大きな局部座屈が形成されている（写真 5）。これは圧入管の無い他の試験体には見られない特有の現象であり、圧入管を設けたことで、その近傍に局部座屈が形成され、これによって早期破壊を生じた可能性が高い。上下一体施工及び圧入管の影響については、今後さらに検討を進める必要がある。

図 22 鉛直方向変位・変位速度の比較（試験体 4, 9）

写真 5 試験体 9 の局部座屈状況

3. 8 断面寸法の影響

断面の寸法効果が耐火性能に与える影響を検討するため、断面寸法が 300mm の試験体 10 を計画した。軸力比（0.32）と部材角（1/50rad.）が同じで、断面寸法が異なる試験体 2（□600）と試験体 10（□300）の鉛直方向変位及び変位速度の比較を図 23 に示す。

試験体 10 は、伸張域から収縮域に反転し、鉛直方向変位が 0 に戻った直後（35 分）に鉛直方向変位が急増し、その 4 分後（39 分）に

図 23 鉛直方向変位・変位速度の比較（試験体 2, 10）

荷重支持能力を喪失した。試験体 2（□600）に比べ、破壊に至る挙動が脆性的である。耐火時間を比較すると、試験体 2（□600）の 58 分に比べ試験体 10（□300）は 39 分と短い。断面寸法が大きくなることで耐火性能は向上す

表 7 文献 2 との比較

	試験体10	文献2
断面	□300×300×9	
鋼材	BCR295	
最大部材角	1/50rad.	
$\sigma_c(N/mm^2)$	61.9	43.5
径長さ比	7.0	12.8
軸力比	0.32	0.31
耐火時間	39分	41分

ることを確認した。なお、試験体 10 と似た条件で複曲率形式の複合加力実験を実施した結果が文献 2 に示されている。両者の比較を表 7 に示す。径長さ比、コンクリート強度等で条件が異なるが、軸力比、部材角、耐火時間の関係は概ね一致している。

3. 9 実験後の内部コンクリート

試験体 3,4,8,9,10 については、実験終了後に柱頭柱脚部の鋼管を剥ぎ取り、コンクリートの破壊状況を観察した。柱頭柱脚のうち、より局部座屈の大きい側のコンクリートの状況を写真 6 に示す。

いずれの試験体も鋼管が局部座屈を生じた位置に破壊が集中し、主に圧縮側のコンクリートが圧壊している状況が観察された。圧入管を設けた試験体 9 を除き、試験体中央部には、損傷があまり見られなかった。圧入管を設けた試験体 9 は、圧入管の周辺に局部座屈が発生し、この部分でコンクリートが激しく圧壊している状況が見

写真 6 コンクリートの破壊状況

られた。試験体 4 は、圧縮側のコンクリートが圧壊しており、鋼管を剥ぎ取る際に、粉砕されたコンクリート片が大量に落下したが、引張側のコンクリートには損傷がほとんど見られなかった。

4. 考察

4. 1 鋼管の伸び出しについて

各試験体の鉛直方向変位（図 11）が伸張変形から収縮変形に移行する時間にばらつきが見られるが、これは鋼管の常温耐力（ $sA \times s\sigma_y$ ）に対する載荷軸力の比（以下、鋼管軸力比）の違いによるものである。鉛直方向への伸張変位が最大となるとき鋼管温度（以下、最大伸張時鋼管温度）とそのときのひずみ（以下、最大伸張ひずみ）を表 8 に示す。最大伸張ひずみは、最大伸張変位を柱の加熱長さで除して求めた。同表には、鋼管軸力比を併せて示す。最大伸張時鋼管温度と鋼管軸力比の関係を図 24(a)に、最大伸張ひずみと鋼管軸力比の関係を図 24(b)に示す。

最大伸張時鋼管温度と最大伸張ひずみは、鋼管軸力比と概ね負の相関関係があり、鋼管軸力比が大きくなるほど、最大伸張時鋼管温度と最大伸張ひずみは小さくなる。鋼管の熱膨張能力は、鋼管の剛性の変化に依存している。400℃を過ぎると鋼管の応力-ひずみ関係上の接線勾配は大きく低下しており（図 4, 5）、400℃以降は熱膨張能力が低下していることが推察される。範囲は限定的であるが、図中の回帰直線式を用いることで、鋼管軸力比から最大伸張鋼管温度と最大伸張変位を概ね推定することができる。

表 8 伸張変位最大時の鋼管温度・ひずみ・鋼管軸力比

試験体	時間 (分)	鋼管温度 (℃)	伸張ひずみ ($\times 10^{-6}$)	鋼管軸力比 $N/(sA \cdot s\sigma_y)$
1	21.0	476	5,274	0.406
2	23.0	475	5,392	0.361
3	24.0	502	5,945	0.324
4	26.5	539	6,455	0.243
5	25.5	511	6,050	0.320
6	25.0	526	6,258	0.279
7	30.0	547	6,918	0.200
8	25.5	538	6,176	0.232
9	24.0	498	5,629	0.355
10	17.5	457	4,263	0.419

(a) 最大伸張時鋼管温度 (b) 最大伸張ひずみ
図 24 鋼管軸力比と最大伸張時鋼管温度・最大伸張ひずみ

4. 2 水平力について

水平力の一例として、試験体 4 の測定結果を図 25 に示す。同図中には鉛直方向変位速度の推移を併せて示す。2.2 に示したように、本実験では水平変位を速度一定で制御し、60 分で最大値に到達した後は変位を固定している。常温であれば、水平力は直線的に増加するが、無耐火被覆 CFT 柱を加熱した状態で水平加力した試験体では、水平力がふたこぶ状の経時変化を示している。水平力の 1 度目の上

図 25 水平力と鉛直方向変位速度の経時変化（試験体 4）

表 9 水平力の測定結果

試験体	水平力最大時		水平力反転時 (分)
	水平力(kN)	時間(分)	
1	1,058	18.5	43.0
2	1,139	19.5	47.0
3	1,127	21.0	52.5
4	799	23.0	62.0
5	419	22.5	69.0
6	783	21.5	56.5
7	950	27.5	59.5
8	433	22.0	53.0
9	743	19.0	43.5
10	292	14.0	36.0

昇は主に鋼管の水平剛性によるものである。鋼管温度が上昇し鋼管の剛性が低下したことで、水平力が減少したと考えられる。水平力が 1 度目のピークを迎えた直後に試験体は鉛直方向に急速な収縮を示している。鋼管の負担していた軸力がコンクリートに移行し、鉛直方向変位速度の急増が止まると、水平力の急激な減少も止まり、その後、水平力は回復している。水平力の急激な減少が止まる時間と鉛直方向変位の急増が止まる時間は一致している。

水平力の 2 度目の上昇は、主にコンクリートの水平剛性によるものである。水平力が 2 度目のピークに達した時点（41.5 分）で鋼管温度は 701℃に達しており、鋼管の水平剛性は大きく低下している。水平力の 2 度目のピークは、水平変位の増大で圧縮側コンクリートの一部が圧壊し、水平剛性が低下したことが理由として考えられる。62 分以降は水平力が負側の値を示している。これは水平方向に倒れ込もうとする試験体を水平ジャッキが引き戻している状態、言い換えれば、P-δ 効果によって生じる水平力を試験体が負担できない状態になっていることを意味する。

全試験体の測定結果の一覧（最大時と正負反転時）を表 9 に、水平力の経時変化の一例を図 26 に示す。図 26(a)は、最大部材角を変えた試験体 2,4,5 の比較を示す。最大部材角が大きい試験体ほど 1 度目のピーク時の水平力が大きい。試験体 4（最大部材角 1/100rad.）と試験体 5（最大部材角 1/200 rad.）は、2 度目の水平力の上昇が見られるが、最大部材角を 1/50 rad.に設定した試験体 2 は、2 度目の水平力の上昇がほとんど見られない。3.3 で述べたように、最大部材角が 1/50rad.の試験体 2 は、鋼管からコンクリートに軸力が移行する時点で圧縮側コンクリートの一部が既に破壊状態に至っていたため、水平力を回復できなかったものと判断できる。2 度目の水平力低下点は、水平加力によるコンクリートの圧壊（耐力低下）を判断する有効な指標になると考える。

図 26(b)は、断面形状と鋼管厚を変化させた試験体 4,7,8 の比較を示す。1 度目のピーク時の水平力の大きさに違いが見られるが、これ

図 26 水平力の経時変化の比較

は鋼管断面による水平剛性の違いによるものである。図 26(c)は、軸力比を変化させた試験体 1,2,3 の比較を示す。試験体 2 と 3 は、水平力の再上昇が明確に見られない。これは鋼管軸力比(表 8 参照)の大きさが影響している。鋼管軸力比の小さい試験体 2・3 は、鋼管からコンクリートに軸力が移行する時間が遅くなるため、水平変位が進展し、軸力がコンクリートに移行する際にはコンクリートが既に圧壊していたことが推察される。逆に鋼管軸力比の大きい試験体 1 は、鋼管からコンクリートに軸力が移行する時間が早まったため、軸力がコンクリートに移行する時点で、コンクリートはまだ圧壊しておらず、水平力が再上昇したものと推察される。

4. 3 破壊メカニズムについて

3. に示した実験結果から、複曲率形式の複合加力を受けた無耐火被覆 CFT 柱試験体の破壊は、柱頭若しくは柱脚に形成された鋼管の局部座屈が大きく影響していると判断できる。この局部座屈は、加熱初期に軸方向に伸びた鋼管が収縮する際に形成されたことが確認されている。複曲率の複合加力を受けると、曲率の大きくなる柱頭若しくは柱脚の圧縮側で鋼管が局部座屈を生じ、この部分に破壊(コンクリートの圧壊)が集中することが今回の実験で明らかになった。鋼管に局部座屈が形成された時点(図 28 c 点)で、コンクリートには荷重支持能力に影響するような大規模な圧壊は生じていなかったと考えられる。局部座屈した鋼管の裏側には、鋼管に拘束されない無筋コンクリート断面が形成されていたことが推察される(図 27)。鋼管に拘束されない無筋コンクリート断面が生じたことで、無耐火被覆 CFT 柱試験体は図 28 に示すメカニズムにより破壊したものと考えられる。局部座屈した鋼管の内側は鉄筋等により補強されてい

ない無筋のコンクリート断面であるため、水平加力に対する抵抗能力(曲げ耐力と変形性能)はあまり高くない。水平変位が進展し、鋼管に拘束されない無筋コンクリート断面に生じる曲げモーメントが増大することで、圧縮側コンクリートの縁に圧壊が生じる。圧壊したコンクリート片が、鋼管とコンクリートの隙間に脱落することで、コンクリートの断面欠損範囲が拡大し、鉛直変位は急速に増大する(図 28 d 点)。角形鋼管 CFT 柱(試験体 1~7, 9~10)は、鉛直変位が進展すると、局部座屈部の鋼管の膨らみがますます拡大するため、鋼管とコンクリートの隙間がコンクリート片で埋まることはなく、コンクリートの断面欠損範囲はさらに拡大し、鉛直方向変位は加速度的に増大する。コンクリートの圧壊範囲が拡大し、圧壊を生じていない健全なコンクリート部分で荷重を支持できなくなると、無耐火被覆 CFT 柱は崩壊する(図 28 e 点)。鋼管に局部座屈が生じ

図 27 鋼管に拘束されない無筋コンクリート柱の形成

図 28 無耐火被覆 CFT 柱の破壊メカニズムの推定

ていなければ、コンクリート断面の縁が圧壊したとしてもコンクリート片の脱落は鋼管に抑制されるため、圧壊範囲はゆるやかに拡大し、急速な鉛直方向変位の進展は生じない。角形鋼管 CFT 柱は、局部座屈による鋼管の膨らみが大きいため、圧壊したコンクリート片の脱落が鋼管によって拘束されず、圧壊範囲が急激に拡大したものと考えられる。これに対し、円形鋼管 CFT 柱（試験体 8）は、角形鋼管に比べ局部座屈による鋼管の膨らみが小さいため、コンクリートの縁が圧壊しても、鋼管とコンクリートの隙間にコンクリート片が埋まることで鋼管の拘束が得られ、コンクリートの圧壊範囲の拡大が抑制される。このため、円形鋼管は、角形鋼管に比べ優れた耐火性能（変形性能と耐火時間）を示したものと考えられる。

鋼管に拘束されない無筋コンクリート断面は、曲げモーメントに対する抵抗能力が低いため、最大部材角を $1/50 \text{ rad.}$ と $1/100 \text{ rad.}$ に設定した角形鋼管 CFT 柱試験体は、いずれも最大部材角に到達する前にコンクリートが圧壊し、鉛直方向変位が急増しているが、最大部材角を $1/200 \text{ rad.}$ に設定した試験体 5 は、試験体に生じる曲げモーメントが小さいため、無筋コンクリート断面で水平力に抵抗することができ、最大部材角に達するまで変位が急増することなく、荷重を保持できたものと考えられる。

5. 結論

実大サイズの無耐火被覆 CFT 柱試験体を用いて複曲率形式の複合加力荷重加熱実験を行い、以下の知見を得た。

- ① 既往の研究で報告されてきた以下の項目を再確認した。
 - ・軸力比が小さくなるほど耐火時間は長くなる。
 - ・円形鋼管は角形鋼管に比べて耐火時間が長くなる。
 - ・軸力比と径長さ比が同じ場合、断面寸法が大きくなると耐火時間は長くなる。
- ② 今回実施した実験で以下の点が明らかになった。
 - ・柱頭若しくは柱脚の圧縮側で鋼管が局部座屈を生じ、この部分にコンクリートの破壊（圧壊）が集中する。
 - ・部材角は耐火性能に影響する。部材角が小さいほど耐火時間は長くなる。
 - ・幅厚比と骨材の種類は耐火時間にあまり影響しない。
 - ・圧入管を設けると圧入管の付近に局部座屈が生じる。圧入管の無い試験体に比べ耐火時間は短くなる。
- ③ 複曲率形式の複合加力を受ける無耐火被覆 CFT 柱の破壊メカニズムを考察した。柱頭若しくは柱脚で鋼管が局部座屈を生じた部分は、鋼管に拘束されない無筋コンクリート断面状態となり、この部分に軸力と曲げモーメントが作用したことで、コンクリートが広範囲にわたり圧壊し、柱としての荷重支持能力を喪失したと推察される。

今後、実験データのさらなる蓄積、数値解析による検討等を行い、コンクリートの破壊条件を明らかにして、無耐火被覆 CFT 柱の耐火性

能を定量的に評価できるようにする必要がある。なお、今回実施した複曲率形式による複合加力荷重加熱実験の拘束条件（下部柱の下端を固定）は、建物の柱の条件よりも厳しいと考えられる。今回の実験方法を用いて建物の無耐火被覆 CFT 柱の耐火性能を評価する際は、この点を適切に考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 新都市ハウジング協会:CFT 造耐火設計指針, 2004.4
- 2) 新都市ハウジング協会調査研究委員会躯体構造部会 CFT 耐火 WG:無耐火被覆 CFT 長柱の耐火性能, 日本建築学会技術報告集 第 16 号, pp. 145-150, 2002.12
- 3) 湯谷孝夫・古平章夫・丹羽博則・窪田伸・小林秀雄:高強度コンクリートを用いた無耐火被覆 CFT 柱の耐火性能 (その 1:実験概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp. 51-52, 1999.9
- 4) 吉野茂・西垣太郎・宮本圭一・平山博巳・藤原敏夫:高強度コンクリートを用いた無耐火被覆 CFT 柱の耐火性能 (その 2:温度分布および力学的性状), 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp. 53-54, 1999.9
- 5) 酒井雅康・池田憲一・村上行夫・菊田繁美:高強度コンクリートを用いた無耐火被覆 CFT 柱の耐火性能 (その 3:耐火性能および観察結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp. 55-56, 1999.9
- 6) 堀昭夫・清水一秋・若松高志・塩崎洋一:高強度コンクリートを用いた無耐火被覆 CFT 柱の耐火性能 (その 4:既往文献データを含めた火災時耐力式の提案), 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp. 57-58, 1999.9
- 7) 古平章夫・藤中英生・岡本達雄・坪内幸一:複合荷重を受ける充填型鋼管コンクリートの耐火性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp. 1405-1406, 1992.8
- 8) 齋藤秀人・森田 武・橋本正美・齋藤 豊・上杉英樹・齋藤 光:耐火被覆の無い充填鋼管コンクリート柱の荷重加熱実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp. 1365-1366, 1993.9
- 9) 下川弘海・伊藤茂樹・今野和近・中村信行・岡本晴仁:充填型鋼管コンクリート柱の耐火性能に関する研究(その 4 軸力曲げせん断実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp. 97-98, 1995.8
- 10) 湯谷孝夫・松中輝雄・小野徹郎・中島将好・上田弘樹・中里卓三・戸康生:耐火被覆の無い充填型鋼管コンクリート柱の耐火性能に関する研究 その 1)耐火設計の考え方と実験計画, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp. 37-38, 1996.9
- 11) 村上秀夫・藤原光弥・上田弘樹・小野徹郎・渡辺伸生・平山博巳・戸康生:耐火被覆の無い充填型鋼管コンクリート柱の耐火性能に関する研究 その 2)荷重加熱実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp.39-40, 1996.9
- 12) 東間敬造・吉野 茂・今村輝武・畑戸龍夫:無耐火被覆鋼管コンクリート柱の耐火性能-複合荷重加熱実験-, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, 1997.9, pp. 189-190
- 13) 宮本圭一・大内富夫・福元敏之・桜本文敏・関田徹志:高強度材料を用いたコンクリート充填鋼管柱の荷重加熱実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp. 17-18, 1998.9
- 14) 宮本圭一・大内富夫・福元敏之・桜本文敏・関田徹志:高強度材料を用いたコンクリート充填円形鋼管柱の荷重加熱実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp. 63-64, 1999.9
- 15) 日本建築学会:構造材料の耐火性ガイドブック, pp43, 2009 年
- 16) 雑喉良介,井英浩,寺沢太沖,川野晴弥:建築構造用鋼材の高温特性 その 1 鋼材の 0.2%off-set 耐力と 1%耐力, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp. 207-208, 2009.8
- 17) 寺沢太沖,井英浩,雑喉良介,川野晴弥:建築構造用鋼材の高温特性 その 2 鋼材の基準強度(F 値)と鋼材の Ys 及び高温 1%耐力, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp. 209-210, 2009.8

(2012年 8 月10日原稿受理, 2013年 1 月10日採用決定)