

論文 小型試験体を用いた高温時の CFT Stub Column の力学特性評価

金 圭庸*1・金 榮善*2・李 泰圭*2・金 武漢*3

要旨: 本研究は小型試験体を用い 40, 60, 80MPa の高強度コンクリートを充填した CFT Stub Column に対して高温時の力学特性を評価したものである。試験体の寸法は 75×75×200mm の鋼管で高強度コンクリートを充填した小型試験体であり、載荷加熱試験では常温である 20°C から、100, 200, …, 700°C の範囲で温度を上昇させた後、加熱温度を 1 時間維持した状態で圧縮強度試験を行った。CFT Stub Column 試験体の力学特性として圧縮強度、ヤング係数及び最大応力時のひずみなどを高強度コンクリートの高温特性と比較したもので、小型試験体を用いて CFT Column の高温特性評価方法の有効性を検討したものである。

キーワード: CFT Stub Column, 高強度コンクリート, 小型試験体, 高温特性, 力学的特性

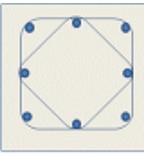
1. はじめに

複合構造である鉄筋コンクリート、鉄骨鉄筋コンクリート、充填鋼管コンクリート (以下, RC, SRC, CFT と示す) 構造は表-1 に示すように鋼材とコンクリートによって作られた構造部材として用いられ、その利点の一つとしていずれも膨張率がほぼ同じであることが挙げられる。また、各材料とも十分な付着性能が確保されていることから構造設計上では等価断面部材として成り立ち、化学的観点からはコンクリートのアルカリ成分による鋼材の腐食抑制効果があるなど優れた複合構造と言える。これら複合構造は土木構造用とは異なり、建築構造部材としては部材寸法が小さいが、地震荷重、風荷重などの設計外力と共に火災に対する安全性も要求されるため設計時に十分に考慮しなければならない¹⁾。

複合構造としての充填鋼管コンクリート (Concrete filled steel tube) 部材は耐力・変形性能が優れるため、超高層建築物などの構造部材に多く用いられてきている。一方、CFT 柱部材の充填コンクリートは熱容量が大きいため、火災時の高温による鋼材の耐力が低下してもコンクリートが荷重支持能力を失わない範囲では耐火性能が期待できる。しかし鋼材が表面に露出していることから、火災初期に耐力の低下を引き起こし、また鋼材とコンクリートの挙動の差による部材全体の耐力低下が生じるため CFT 柱部材の耐火性能については十分な検討が必要である²⁾。

火災時の軸方向荷重を受ける CFT 柱の挙動については、加熱の初期段階で部材表面の鋼管が軸方向に膨張し、その膨張によって柱に加わる荷重は鋼管が負担する。その後加熱温度が高くなるほど鋼管からコンクリートに荷重負担が移行し、コンクリートの耐力が低下し始め最終的には崩壊に至る^{3),4)}。

表-1 鋼材とコンクリート複合柱の耐火性能の概要

断面			
	(a) RC	(b) SRC	(c) CFT
軸力 ⁹⁾	$eP_{n(max)} = 0.85\alpha [0.85f_{ck}(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}]$		$P_n = A_g F_{cr}$
火災	被覆コンクリートによる鋼材の保護		充填コンクリートが支持
部材耐力性能	現象: コンクリートの加熱後、熱伝達により鋼材の耐力低下 対策: 爆裂制御及び鋼材の熱遮断		現象: 鋼材の急激な耐力低下後コンクリートが耐力負担し、熱を吸収
	耐力低下速度 ¹⁰⁾ $d\delta_s/dt = 3h/1000(\text{mm}/\text{min.})$ 収縮変位量 ¹⁰⁾ $\delta_s = 3h/1000(\text{mm})$		
耐火性能	コンクリート爆裂及び高温特性 鋼材の熱的特性		コンクリートの高温特性

これより火災時の CFT 柱の荷重支持能力は最終的に内部のコンクリートによって決定されるため、充填コンクリートの耐力の基準として CFT 柱の耐火時間が評価されている。また、CFT 部材はこの形状を縮小しても同じメカニズムを適用することができると考えられ⁵⁾、本研究では試験体寸法を小さくした小型試験体を用い材料の熱的特性を評価する試験方法の有効性を検討したものである。

本研究はコンクリートを充填した CFT 柱の縮小試験体として CFT Stub Column 試験体を作製し、載荷・加熱試験装置を使用して常温の 20°C から 100, 200, …, 700°C の高温まで各加熱温度環境下で力学的特性を実験実証的に評価しその結果を検討分析したものである。

*1 大韓民国 忠南大学校 建築学部 助教授 工博 (正会員)

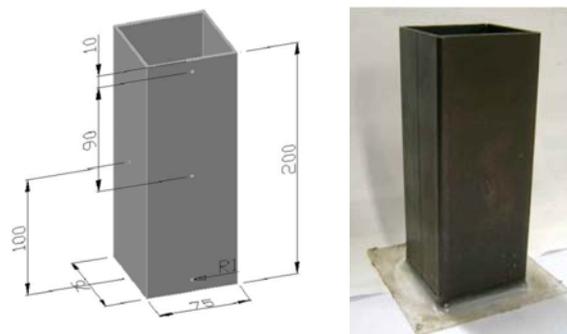
*2 大韓民国 忠南大学校 大学院 建築工学科 博士課程 (正会員)

*3 大韓民国 忠南大学校 建築学部 教授 工博 (正会員)

表-2 実験計画

試験体 No.	W/C (%)	目標温度 (°C)	繊維混入率	試験項目	
f _c 40N ^{a)}	45	20, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700	-	圧縮強度 ヤング係数 熱膨張ひずみ	
f _c 60N	35				
f _c 80N	25				
f _c 80N_PP ^{b)}					PP0.3Vol.%
f _c 80N_PP+SF ^{c)}					PP0.3Vol.%, SF0.5Vol.%

- a) f_c40N：充填コンクリートの設計基準強度 40MPa
 b) PP：ポリプロピレン繊維混入
 c) SF：スチール繊維混入



(a) 試験体の寸法及び形状 (b) Stub Column

図-1 CFT Stub Column 試験体

表-3 使用材料の物理的性質

材料	物理的性質
セメント	普通ポルトランドセメント(密度:3.15g/cm ³)
細骨材	海砂(密度: 2.61g/cm ³ , 吸水率: 0.97%)
粗骨材	花崗岩碎石(最大寸法:20mm, 密度:2.67g/cm ³ , 吸水率: 0.9%)
混和剤	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系)
Polypropylene fiber	直径 20μm, 長さ 19mm
Steel fiber	直径 0.5mm, 長さ 35mm

2. 実験計画及び方法

2.1 実験計画

本研究における実験計画を表-2に示す。鋼管は参考文献4)の無耐火被覆CFT造柱の仕様で提示された基準に準じて75×75×200mmの寸法をもつSPSR490鋼管(t=2.3mm)の試験体を作製した。充填コンクリートの強度は40, 60, 80MPaとし、その各々の強度に対して水セメント比は45%, 35%, 25%とした。また、80MPaの充填コンクリートの場合には火災時の爆裂を考慮してPP繊維及びスチール繊維を混入した⁴⁾。

2.2 使用材料

本研究に使用した材料を表-3に示す。セメントは粉末度3,630cm²/g、比重3.15の普通ポルトランドセメントを用い、混和剤はポリカルボン酸系高性能AE減水剤を使用した。また、粗骨材は最大寸法20mmの花崗岩類碎石を使用し、細骨材は海砂を使用した。80MPaの充填コ

ンクリートについては、有機繊維として直径20μm、長さ19mmのポリプロピレン繊維(polypropylene fiber, 以下PPと示す)と直径0.5mm、長さ35mmのスチール繊維(steel fiber, 以下SFと示す)を使用した。

2.3 コンクリートの調合

本実験に使用したコンクリートの調合は表-4に示すように40, 60, 80MPaの強度を目標としW/B 45, 35, 25%に設定し、f_c80N_PP, f_c80N_PP+SF調合の場合には高強度コンクリートの爆裂抑制を考慮してPP繊維を全体容積の0.3%混入し、スチール繊維は全体容積の0.5%を混入した。

2.4 試験体の作製方法

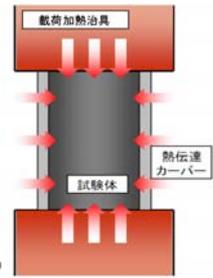
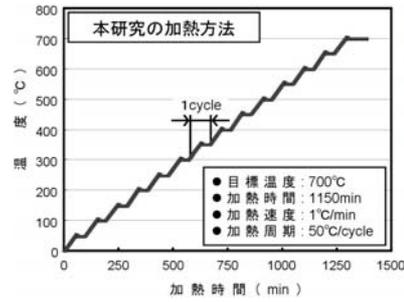
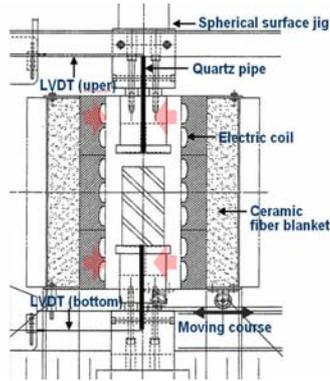
加熱実験のためのCFT Stub Column試験体は図-1に示すように寸法75×75×200mm、鋼管厚さ2.3mmのSPSR490の角型鋼管を使用した。加熱試験時の加熱炉の温度調節のために、熱伝対をCFT Stub Columnの上部及び下部から10mmの位置に埋め込んだ。試験体はKS F 2403「コンクリートの強度試験用試験体の作製方法」に準じて作製した。CFT Stub Columnの充填コンクリートの強度確認のための試験体と耐火実験のためのCFT Stub Column試験体を温度20±3°C, R.H. 50%の恒温恒湿室内に120~150日間の気乾養生を行った。また、圧縮強度用試験体の上下面処理はコンクリート用研磨機を使用した。

2.5 载荷・加熱装置の概要

写真-1に本研究で使用した载荷・加熱試験装置全景

表-4 コンクリートの調合設計

Specimen	W/C (%)	Slump-flow (cm)	Air cont. (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	Unit weight (kg/m ³)					AD (B×wt%)
						C	S	G	PP	SF	
f _c 40N	45	50±5	4±2	45	165	367	775	989	-	-	0.6
f _c 60N	35	60±5	4±2	45	165	471	760	969	-	-	0.9
f _c 80N	25	50±5	4±2	45	165	660	691	881	-	-	1.2
f _c 80N_PP	25	50±5	4±2	60	160	640	909	632	2.7	-	1.2
f _c 80N_PP+SF	25	50±5	4±2	60	160	640	909	632	2.7	39.25	1.2



(a) 加熱サイクル (b) 熱伝達概念図

図-2 加熱方法の概要

写真-1 載荷及び加熱炉試験装置

及び加熱炉の詳細図を示す。加熱炉は W450×L450×H450mm の寸法とし、 $\varnothing 100 \times 200$ mm の大きさまで加熱試験ができるものとした。また試験装置は加熱と載荷実験が同時に可能である。加熱方式は電気ヒーターを利用した電機加熱方式とし、加熱方法は加熱炉の上部と下部に設置したコンクリート試験体の加力治具を加熱することで熱を伝達する間接加熱方法を使用した。上部と下部に設置された電気ヒーターは各々独立に温度が調節できるように設計した。

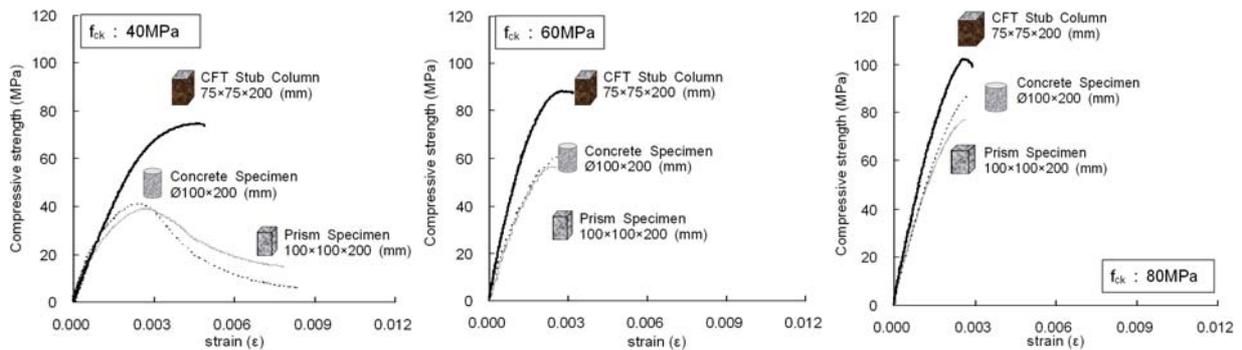
図-2 に示すように電気ヒーターの寸法は $\varnothing 200 \times H130$ mm とし、コンクリート試験体の加力治具の寸法に合わせて作製し熱が効率的に伝達するようにした。また、加熱炉の外部へ熱が放出されることを防ぐため内部に

セラミックファイバー(ceramic fiber)を用いたブランケットを設置した。

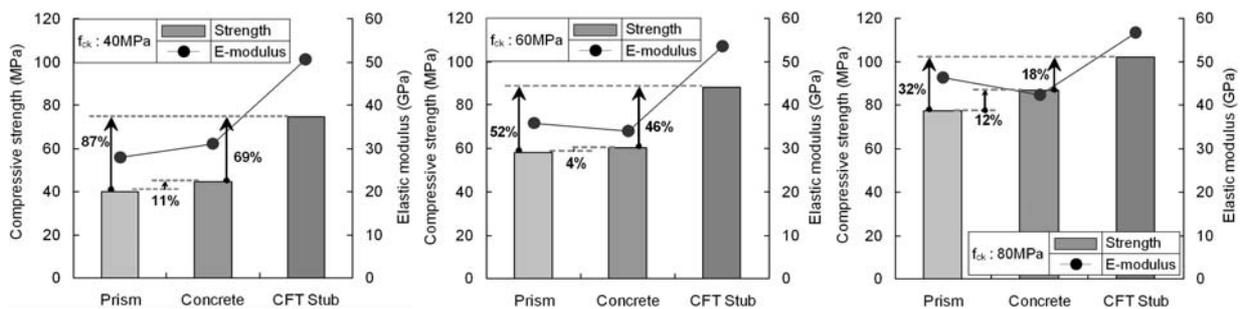
試験体の載荷には荷重容量 2,000kN の載荷試験機を使用した。試験体の上部には加熱・載荷治具と水冷式冷却器を設置し、載荷試験機と加熱炉装置の連結部には試験体の偏心を防止するため球座を設けた⁶⁾。

2.6 加熱方法及び力学的性質の評価

高温時の圧縮強度の評価を行うため写真-1 に示すように CFT Stub Column 試験体を載荷装置に設置した後加熱した。その後各々の目標温度まで加熱し、その設定温度の状態で圧縮強度と変位を測定した。試験体の変位は上下部の冷却器の中心に熱膨張係数の小さい石英管を通して、その石英管の先端に LVDT 変位計を設置することで測定した⁶⁾。



(a) 応力-歪曲線



(b) 圧縮強度及びヤング係数の変化

図-3 コンクリート試験体と CFT Stub Column 試験体の力学特性の比較

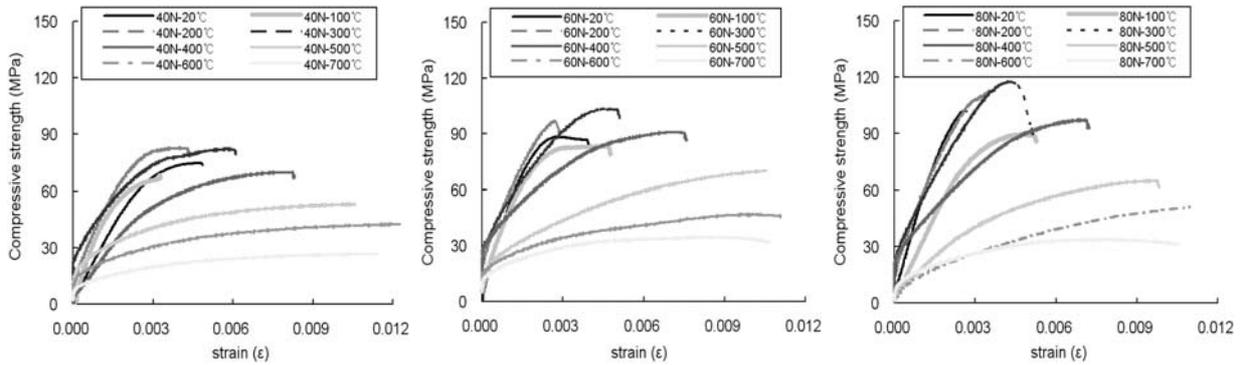


図-4 高温時における CFT Stub Column 試験体の応力-歪曲線

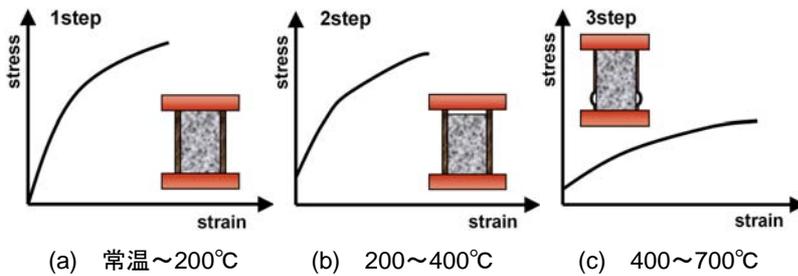


図-5 高温時に軸力を受けた際の CFT の挙動変化

加熱速度は図-2 に示すようにコンクリートの熱伝達が均等になるように 1°C/min の速度で加熱し、試験体の内外部の温度差が 5°C 以内となるように制御した。試験体の温度は試験体の上中下部表面に熱伝対を 3 箇所設置して測定し、熱伝対の温度はデータロガーを使用して 1 秒毎に記録した。

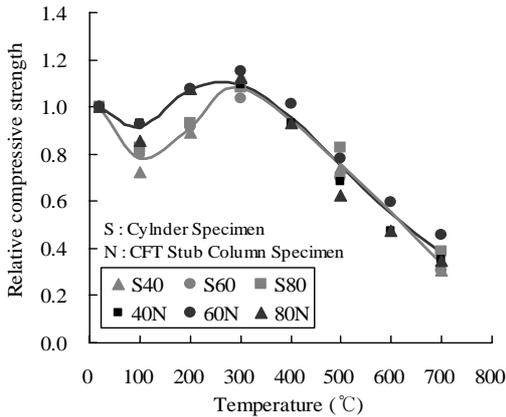


図-6 円柱型試験体及び CFT Stub Column 試験体の圧縮強度比

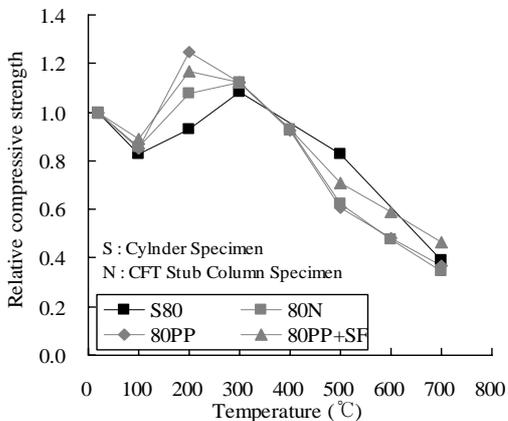


図-7 f_c80N コンクリート及び繊維混入 CFT Stub Column の圧縮強度比

CFT Stub Column の圧縮強度試験は各試験で設定した目標温度に到達した後 1 時間保持し、その後 KS F 2405 「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じて行った。また、高温下でのヤング係数試験は目標温度まで加熱を行った後 KS F 2438 「コンクリート円柱型試験体ヤング係数及びポアソン比の試験方法」に準じてヤング係数実験を行った⁶⁾。

3. 実験結果及び考察

3.1 常温での力学的性質

図-3 はコンクリート設計強度 $f_c40, 60, 80\text{MPa}$ に対して円柱型試験体($\phi 100 \times 200\text{mm}$)、角型試験体($100 \times 100 \times 200\text{mm}$)及び CFT Stub Column 試験体($75 \times 75 \times 200\text{mm}$, $t=2.3\text{mm}$)の圧縮強度及びヤング係数を評価した結果である。コンクリート試験体形状比(d 直径 : h 高さ)が 1:2 で、かつ断面が円柱型及び角型の場合、コンクリートの圧縮強度は各々の設計強度 $f_c40, 60, 80\text{MPa}$ に対して円柱型断面の試験体が若干大きくなり、断面形状によるヤング係数の差は確認されなかった。従って、本研究では便宜上、円柱型試験体を基準試験体とした。

CFT Stub Column 試験体の圧縮強度は円柱型試験体に比べて f_c40N は約 69%, f_c60N は約 46%, f_c80N は約 18% 圧縮強度が上昇し、ヤング係数は f_c40N , f_c60N , f_c80N についてそれぞれ約 63%, 58%, 34% 向上した。これは、鋼管の拘束効果による影響であると考えられる。また、コンクリートの圧縮強度が大きくなるほど鋼管の拘束効果による力学特性の向上効果は相対的に低くなる傾向が現れた。

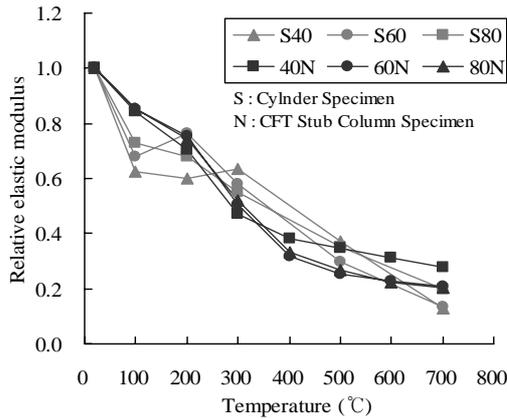


図-8 円柱型試験体及び CFT Stub Column 試験体のヤング係数比

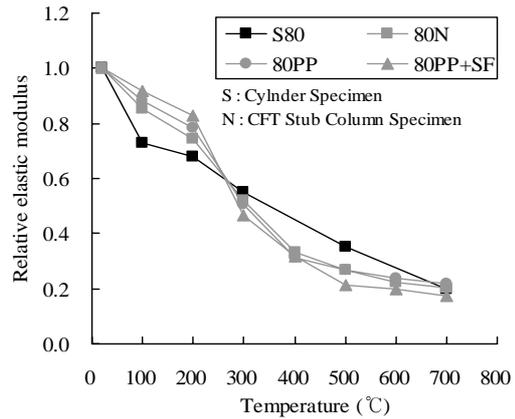


図-9 f_c80N コンクリート及び繊維混入 CFT Stub Column のヤング係数比

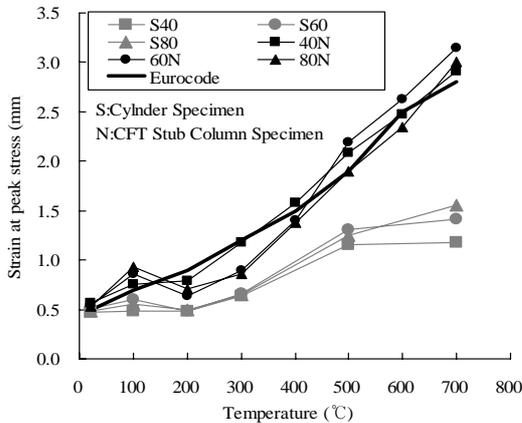


図-10 円柱型試験体及び CFT Stub Column 試験体の最大応力でのひずみ

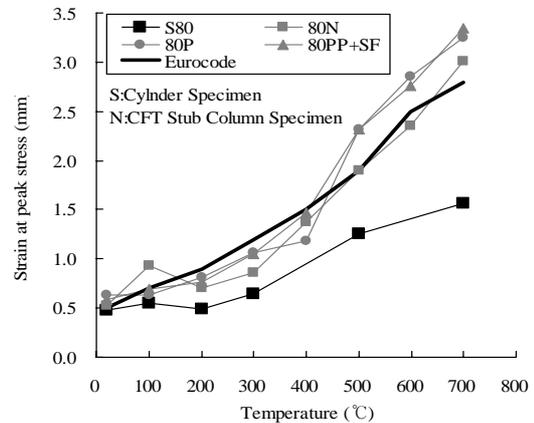


図-11 f_c80N コンクリート及び繊維混入 CFT Stub Column の最大応力でのひずみ

3.2 高温時の CFT Stub Column の圧縮強度

高温時の CFT Stub Column 試験体の応力-ひずみ曲線を図-4 に示す。加熱温度 20°C, 100, 200, …700°C の高温環境下では加熱温度が高いほど鋼材の降伏とともにコンクリートの耐力も低下した。鋼材の複合効果によって 300°C までは常温での横拘束効果による耐力の向上が維持されるが 300°C 以上の温度では鋼材の急激な耐力低下により CFT Stub Column 試験体の耐力が低下した。また、充填コンクリートの強度が大きくなるほど耐力は急速に低下する傾向が現れた。図-5 は本研究の圧縮強度の結果を中心に高温時の軸力を受けた CFT Stub Column 試験体の応力-ひずみ曲線と鋼材の変形状の概要を示したものである。

図-6 は CFT Stub Column 試験体及び円柱型試験体の高温圧縮強度と常温圧縮強度の比を示したものである。両試験体の高温時の圧縮強度比はほぼ同じ傾向を示したが、CFT Stub Column 試験体の圧縮強度比は円柱型試

験体に比べ、300°C までは上回り、鋼材とコンクリートの複合効果により高温での圧縮強度が向上した。しかし、300°C 以後の温度では CFT Stub Column 試験体と円柱型試験体の圧縮強度比がほぼ同じ変化の傾向を示した。

図-7 は充填コンクリートに繊維を混入した f_c80N_{PP} 及び f_c80N_{PP+SF} の CFT Stub Column 試験体に対して、高温圧縮強度と常温圧縮強度の比を示したものである。 f_c80N において、角型鋼管で補強された CFT Stub Column 試験体は円柱型試験体に比べて 100~300°C の温度範囲で圧縮強度が相対的に大きくなったが、加熱温度 400°C では常温圧縮強度値以下まで低下し、500°C 以上では耐力がさらに低下し 700°C では円柱型コンクリート試験体とほぼ同じ値である約 40% の水準まで耐力が低下した。

3.3 高温時のヤング係数及び最大応力でのひずみ

加熱温度別円柱型試験体及び CFT Stub Column 試験体の高温ヤング係数と常温ヤング係数の比は図-8 に示す。100~200°C の温度範囲で、円柱型試験体のヤング係数比

の急激な低下に比べ、CFT Stub Column 試験体のヤング係数比は相対的に緩慢に低下した。また、CFT Stub Column のヤング係数は初期加熱温度の段階で圧縮強度のような再上昇する傾向がなく、加熱温度が高くなるほど低下し、充填コンクリートの強度が大きくなるほどヤング係数は急激に低下する傾向が現れた。

充填コンクリートに繊維を混入した f_c80N_PP 及び f_c80N_PP+SF の CFT Stub Column 試験体における高温ヤング係数と常温ヤング係数の比を図-9 に示す。100~200°Cの温度範囲で繊維を混入した CFT Stub Column 試験体は f_c80N 試験体の充填コンクリートと同じ圧縮強度の円柱型試験体に比べてヤング係数が相対的に大きくなったが、高温になるほど著しく低下し、700°Cでは円柱型コンクリート試験体とほぼ同じ値である約20%の水準まで低下した。一方、CFT Stub Column 試験体の繊維混入による効果は見られなかった。

CFT Stub Column の最大応力でのひずみを図-10 に示す。全ての試験体において、100°Cから200°Cまでの最大応力でのひずみは大きな差が見られない。300°C以後高温になるほど圧縮強度時ひずみが増加している。円柱型コンクリート試験体は700°Cで0.6~0.8%ひずみ率の既往の研究結果^{7),8)}と類似な傾向が見えるが、CFT Stub Column 試験体の最大応力でのひずみは1.4%を超過する結果を示した。これは高温を受ける場合にあってもCFT Stub Column 試験体の鋼管が横拘束の効果で延性的な破壊による現状と考える。

図-11には繊維を混入したCFT Stub Column 試験体の最大応力時のひずみを示す。繊維を混入しない f_c80N 試験体と繊維を混入した f_c80N_PP 及び f_c80N_PP+SF 試験体は高温時の挙動がほぼ同じであり、300°Cまでは緩慢に収縮し、その温度以降は収縮量が急激に増加した。なお、繊維を混入したCFT Stub Column 試験体の最大応力時のひずみは円柱型試験体に比べて高温になるほど大きく収縮した。これは繊維を混入していないCFT Stub Column 試験体の最大応力での変位結果とほぼ同じ傾向を示している。

4. まとめ

CFT 柱の耐火性能を改善するために、CFT Stub Column の高温特性評価に関する研究を行った結果をまとめると以下の点が挙げられる。

- (1) 小型試験体を用いて、高温時のCFT Stub Column の力学的特性の評価をすることができ、かつ材料学的な観点から評価方法として適用可能性が見られた。
- (2) 高温時のCFT Stub Column の圧縮強度比の変化は円柱型試験体とほぼ同じ傾向を示したが、300°CまではCFT Stub Column 試験体の圧縮強度比が円柱型試験

体より上回り、300°C以上では急激に低下してコンクリート試験体とほぼ同じ挙動を示した。

- (3) 高温時の圧縮強度変化と異なり、CFT Stub Column 試験体のヤング係数は200~300°Cの間で再上昇せず高温になるほど減少した。また充填コンクリートの強度と繊維混入による変化は見られなかった。
- (4) CFT Stub Column の最大応力でのひずみは100~300°Cの温度範囲で常温と同様の値を示したが、300°C以上では急激に増加し700°Cでは円柱型試験体に比べて約1.5mm以上大きく収縮した。

謝辞

本研究は三星物産(株)建設部門とBK(Brain Korea)21-2段階事業の支援を受けて得られた研究成果の一部であり、光亜科学工業(株)と共同作製した加熱炉によって実施された研究としてここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Park, K.C., Choi, S.M., Kim, D.G.: Evaluation on fire test for the concrete filled steel tube column, Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol.12, No. 6, pp.759-768, 2000.12
- 2) 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試験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第417号, pp.63-70, 1990
- 3) 作本好文, 山口種美, 岡田忠義, 吉田正友, 斎藤 光, 建築構造用耐火鋼材を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) 新都市ハウジング協会: CFT 造耐火設計指針, 2004
- 5) 劉永燦: コンクリート充填角型鋼管構造の挙動に関する研究, 博士学位論文, 漢陽大学校, 1997
- 6) 金圭庸, 金武漢, 金榮善, 朴贊圭: 熱伝達加熱方式によるコンクリートの高温特性の評価方法, コンクリート工学年次論文報告集, pp.759-764, 2007.7
- 7) 安部武雄, 古村 福次郎, 戸祭邦之, 黒羽健嗣, 小久保 勲: 高温度における高強度コンクリートの力学的特性に関する基礎的研究”, 日本建築学会構造系論文集, No.515, 1999. 1, pp.163~168
- 8) 平島岳夫, 常世田昌壽, 豊田康二, 山下平祐, 篠原幸一, 上杉英樹: 高温加熱を受けるコンクリートの力学的特性に関する実験結果の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.135-137, 2003.9
- 9) American Concrete Institute: ACI manual of concrete practice - Part 3, 1985
- 10) JIS A 1304: 建築構造部分の耐火試験方法, 1994