

# 論文 超高強度コンクリートを用いた角形 CFT 柱の圧縮特性

熊谷 仁志\*1・西田 浩和\*2・菊地 俊文\*3

**要旨：**本論文では、設計基準強度 90~150N/mm<sup>2</sup> の超高強度コンクリートを用いた角形 CFT 柱試験体を作製し、充填コンクリートの自己収縮ひずみの計測を行った後、中心圧縮試験を行って、その圧縮特性を検討した。1/2 縮小試験体の CFT 内部では最大 400 $\mu$  程度の自己収縮ひずみが計測され、その状態で長期軸力レベルまで载荷して、自己収縮が圧縮剛性などに与える影響について明らかにした。また 1/8 縮小試験体の中心圧縮試験結果から、超高強度コンクリートを用いた角形 CFT 柱の圧縮耐力および荷重・変形関係モデルの評価方法について提案している。

**キーワード：**CFT, 超高強度コンクリート, 自己収縮, 中心圧縮試験

## 1. はじめに

最近、200m~300m 級の超高層建物にコンクリート充填角形鋼管柱（以下、角形 CFT 柱とする）が採用されるようになり、設計基準強度 100 N/mm<sup>2</sup> を上回る超高強度コンクリートが使用されている。充填コンクリートには強度増進や圧入時の施工性および流動性を改善する目的で、シリカフェームセメントや別添のシリカフェームが

用いられることが多く、この種のコンクリートは自己収縮ひずみが大きくなる懸念されているが<sup>1)</sup>、自己収縮が構造性能に与える影響について設計では考慮されていない<sup>2)</sup>。そこで今回、超高強度コンクリートを用いた角形 CFT 柱試験体を作製して、自己収縮ひずみを計測するとともに、その試験体に圧縮軸力を加えて、その圧縮特性について検討を行った。

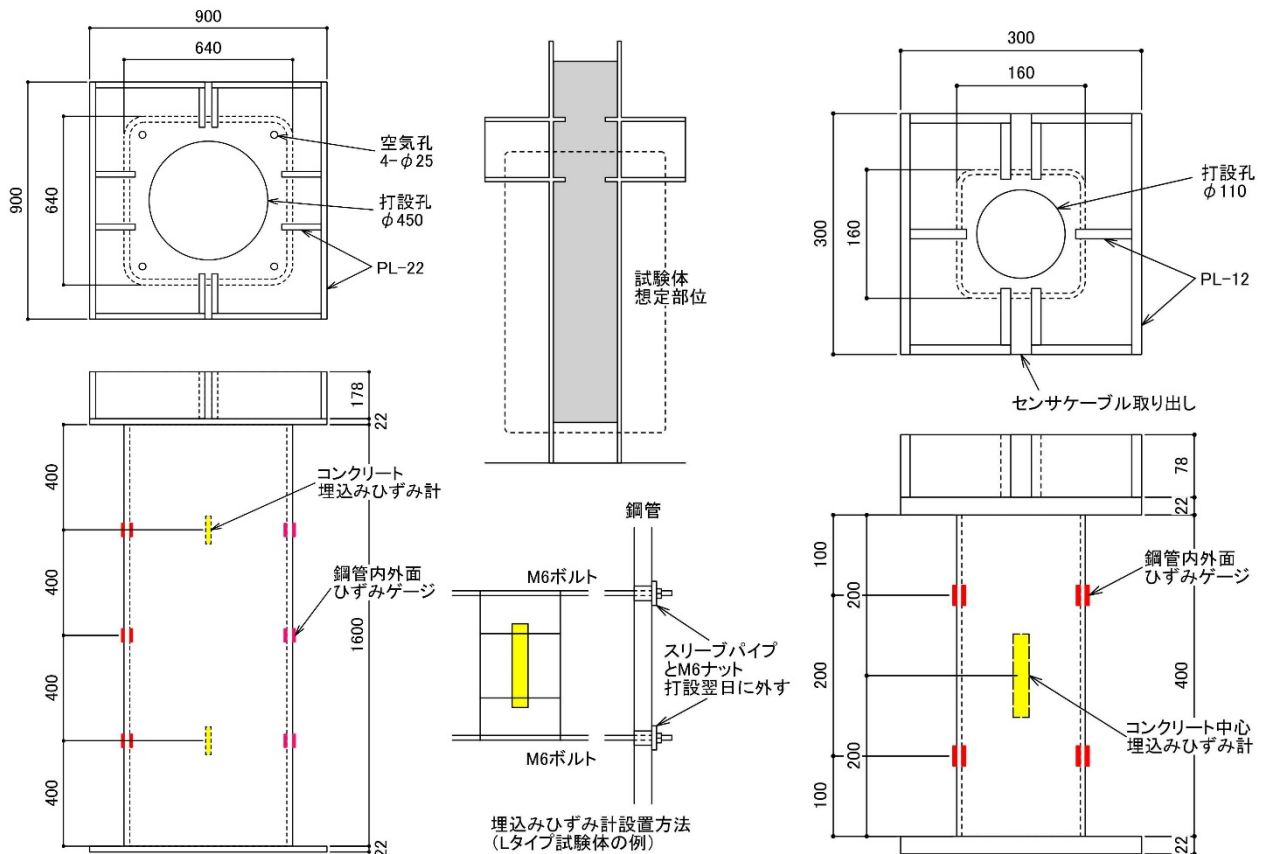


図-1 試験体の形状・寸法（左：Lタイプ、右：Sタイプ）

\*1 清水建設（株）技術研究所 主席研究員 博士（工学）（フェロー会員）

\*2 清水建設（株）生産技術本部 グループ長 工修（正会員）

\*3 清水建設（株）技術研究所 工修（正会員）

## 2. 試験体

試験体は図-1に示すLタイプ、Sタイプの2種類である。試験体の一覧と使用したコンクリートの力学的特性を表-1に、コンクリートの計画調合を表-2に、鋼材の板厚と力学的特性を表-3に示す。コンクリートは設計基準強度(Fc)が90, 120, 150の3水準であり、記号SRは収縮低減型の高性能減水剤を使用したことを表している。

Lタイプ試験体は柱幅(B)が640mm、試験体区間の高さ(H)が1,600mmである(H/B=2.5)。実際の超高層建物柱の約1/2縮小モデルである。角形鋼管は鋼板をU字型に折曲げ加工(外半径2.5t, tは板厚)したものを溶接している。下部は鋼板と突合せ溶接し、上部は打設用の孔を設けた鋼板と突合せ溶接している。上部には載荷用のスタブを設け、載荷前に上面を石膏でキャッピングしている。試験体内部には埋込みひずみ計を図-1に示す方法で設置し、鋼管の内外面には溶接タイプのひずみゲージを設置している。埋込みひずみ計は温度を計測できるものを使用し、鋼管外面のひずみゲージ位置には熱電対を設置して温度を計測している。実際の施工ではコンクリートは圧入工法とすることが多いが、本試験ではセンサを損傷しないように、落とし込み充填工法で打設している。コンクリート4種類と鋼管板厚(B/t=53, 29)をパラメータとした8体を作製した。

Sタイプ試験体は柱幅(B)が160mm、試験体区間の高さ(H)が400mmである(H/B=2.5)。実際の超高層建物柱の約1/8縮小モデルである。角形鋼管は鋼板をU字型に折曲げ加工(外半径2t)したものを溶接している。下部は鋼板とパーシャル開先で隅肉溶接し、上部は打設用の孔を設けた鋼板とパーシャル開先で隅肉溶接している。打設方法やセンサの設置方法などはLタイプと同様である。コンクリート4種類、鋼管板厚(B/t=27, 36, 50)と強度(SS400, 590N/mm<sup>2</sup>級)をパラメータとした12体を作製した。

図-1に示したように、試験体柱の上端はダイアフラム、下端は打継ぎ部を想定している。既往の文献<sup>3)</sup>では上下にダイアフラムが存在すると自己収縮が拘束され、ダイアフラム近傍にひび割れが発生することが指摘されているが、今回はひび割れの影響が少ない下端が打継ぎ部である条件での実験を計画した。Sタイプ試験体のダイアフラムやリブを想定した鋼板は溶接作業性を考慮して、実際の縮小寸法よりも板厚を増している。

## 3. 自己収縮ひずみの計測

### 3.1 標準試験体

CFT試験体と並行して、それぞれのコンクリートについて100mm×100mm×400mmの標準試験体を作製し、

表-1 試験体一覧およびコンクリートの力学的特性

試験体	B (mm)	コンクリート	t (mm)	鋼材	B/t	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )		
Lタイプ	640	90	12	SS400	53	119	44700		
			22		29				
		120	12		53			163	48800
			22		29				
	120SR	12	53		156	48300			
		22	29						
	150SR	12	53		163	47800			
		22	29						
Sタイプ	160	90	3.2	SS400	50	123	44800		
			4.5		36				
			6		27				
			3.2		50				
		120	4.5		36	161	48900		
			6		27				
		120SR	3.2		50	160	47900		
			4.5		36				
		150SR	6		27	170	46900		
			6		590級				

※コンクリート圧縮強度・ヤング係数は現場封緘供試体の中心圧縮試験時試験結果

表-2 コンクリートの計画調合

記号	水結合材比 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
		W	C	SF	S1	S2	G	Ad1		Ad2
90	22.7	160	705	---	731	---	824	8.11	---	117
120	15.2	160	1053	---	435	---	824	13.69	---	147
120SR	15.2	160	1053	---	435	---	824	---	13.69	147
150SR	14.0	160	1029	114	---	317	824	---	13.14	176 ※

(共通) 目標スランプフロー 65cm 目標空気量 2%  
 C: シリカフェウムセメント(SFC) SF: 粉体シリカフェウム  
 S1: 富津市鶴岡産山砂 S2: 桜川市富谷産硬質砂岩砕砂  
 G: 桜川市富谷産硬質砂岩砕石2005  
 Ad1: ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤  
 Ad2: 収縮低減型ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤  
 ※圧縮強度は標準養生供試体の材齢28日試験結果(150SRのみ材齢56日)

表-3 鋼材の形状および力学的特性

鋼材	降伏点 $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 $E_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\frac{\sigma_y}{E_s}$	板厚 実測	幅厚比 実測	一般化幅厚比
t3.2 (SS400)	315	478	205000	0.0015	3.06	52.3	2.05
t4.5 (SS400)	301	459	204000	0.0015	4.31	37.1	1.43
t6 (SS400)	307	459	206000	0.0015	5.85	27.4	1.06
t6 (590級)	558	655	205000	0.0027	5.98	26.7	1.40
t12 (SS400)	282	440	207000	0.0014	12.1	53.0	1.96
t22 (SS400)	293	439	208000	0.0014	21.9	29.2	1.10

埋込みひずみ計を用いて自己収縮ひずみを計測した。凝結始発時刻を起点としたひずみ計測結果を図-2に示す。標準試験体の養生方法は20℃一定養生と簡易断熱養生の2種類である。簡易断熱養生試験体は同図に示すように、厚さ200mmの発泡スチロールで作製した養生箱内に設置している。簡易断熱養生試験体の温度上昇の履歴を図-3に示す。

材齢28日での自己収縮ひずみは標準タイプの高性能減水剤を使用したFc120が最も大きく、20℃一定養生で約350 $\mu$ 、簡易断熱養生で約450 $\mu$ であった。水和熱の影響によって試験体温度が高くなる簡易断熱養生は、20℃一定養生よりも、自己収縮ひずみが大きくなる傾向があ

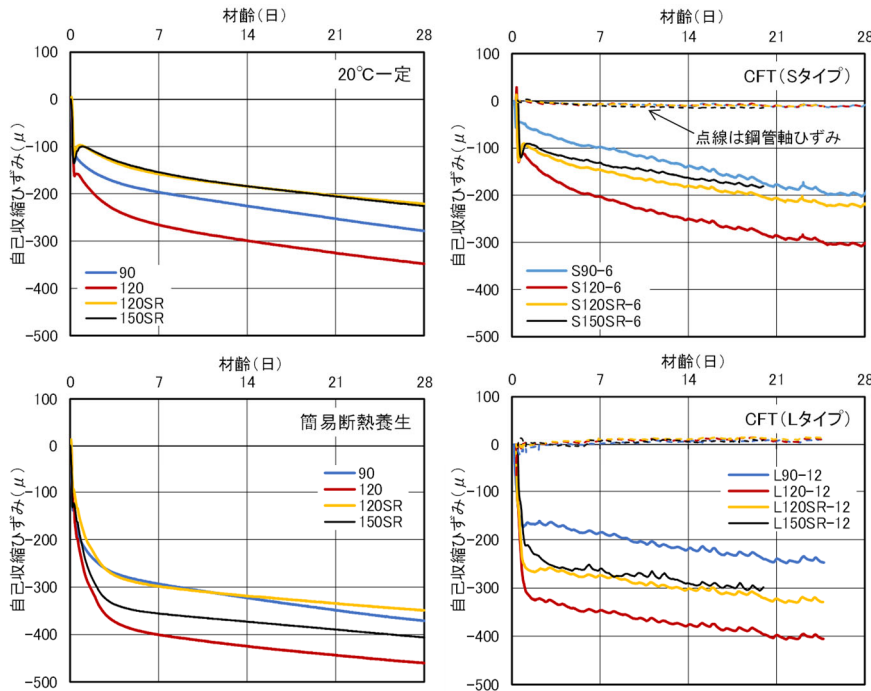


図-2 自己収縮ひずみ計測結果

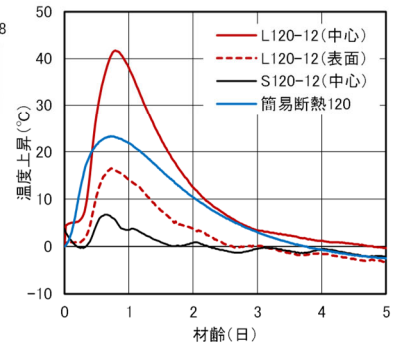
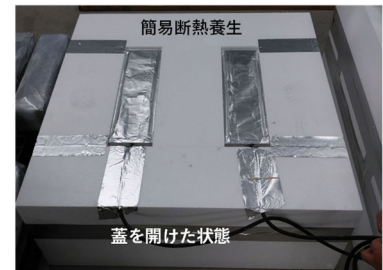


図-3 試験体の温度履歴

るが、シリカフェーム使用量の多いFc150SRは他の割合よりも増加率が大きくなっている。またFc120とFc120SRを比較すると、収縮低減型減水剤を使用した効果は100μ程度であった。

### 3.2 CFT 試験体

図-2には、LタイプおよびSタイプ試験体内部の自己収縮ひずみ計測結果も示している。荷重のため移動した試験体は28日の手前で計測を中断しているが、材齢28日での自己収縮ひずみはFc120が最も大きく、Sタイプで約300μ、Lタイプで約400μと考えられる。標準試験体の結果と同様、試験体温度の高くなるLタイプは、Sタイプよりも自己収縮ひずみが大きくなる傾向がある。収縮低減型減水剤を使用した効果は100μ程度であった。

CFT試験体の鋼管軸ひずみはほとんど変化しておらず、鋼管の拘束が自己収縮に及ぼす影響はほとんど見られない。また図-3に示すように簡易断熱養生の試験体温度上昇は、Lタイプ試験体の中心部と表面の平均的な値となっている。したがって簡易断熱養生試験体とLタイプ試験体の自己収縮ひずみは概ね同等となっている。実大CFT柱では充填コンクリートの温度が今回よりも高くなる可能性があり、最高温度や積算温度の予測による補正は必要であるが、標準試験体を用いたCFT柱の自己収縮ひずみの推定は概ね可能であると考えられる。

## 4. 中心圧縮試験

### 4.1 Lタイプ試験体

自己収縮ひずみの計測を行った後、材齢28日程度で

中心圧縮試験を行った。Lタイプ試験体は水和熱の影響などをできるだけ実際と合わせるために、試験体寸法を大きくしているため、加力装置限界のため破壊までは荷重せず、単純累加軸耐力 ( $N_u = A_c \times \sigma_B + A_s \times \sigma_y$ ,  $A_c$ : 充填コンクリートの断面積,  $\sigma_B$ : コンクリートの圧縮強度,  $A_s$ : 鋼管の断面積,  $\sigma_y$ : 鋼管の降伏点) の1/3レベルの荷重まで荷重して、試験を終了している。

前述のひずみ計測に加えて、荷重と平均ひずみの計測を行った。平均ひずみは、試験区間上下の鋼板間の長さ変化を変位計で計測し、その値を試験体高さ(H)で除したものである。

図-4に荷重・ひずみ関係の一例を示す。なお3章の自己収縮ひずみの計測では圧縮ひずみを負としていたが、以降の図では慣例に従い圧縮を正としている。同図

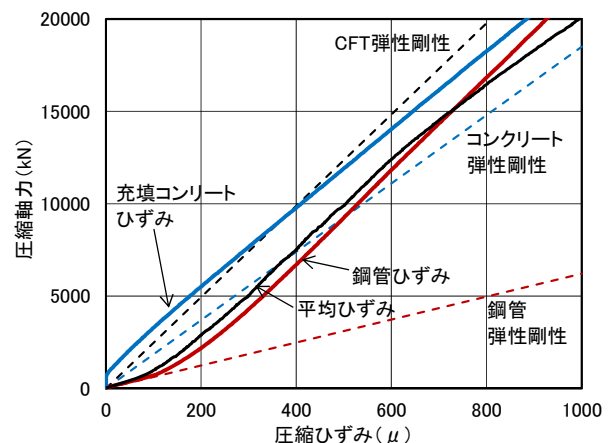


図-4 荷重・ひずみ関係 (L120-12の例)

には、平均ひずみに加えて、充填コンクリートの軸ひずみ、鋼管の軸ひずみ、弾性剛性計算値を併せて示している。CFT 弾性剛性は  $E_c \times A_c + E_s \times A_s$  ( $E_c$ : コンクリートのヤング係数,  $E_s$ : 鋼管のヤング係数), コンクリートの弾性剛性は  $E_c \times A_c$ , 鋼管の弾性剛性は  $E_s \times A_s$  として求めている。

载荷のごく初期には鋼管のひずみのみが増加し、充填コンクリートのひずみは変化しなかったが、鋼管ひずみが  $100 \mu$  程度に達すると充填コンクリートのひずみが増加しはじめた。この現象はコンクリートの自己収縮の影響と判断できるが、3章で示した载荷前の自己収縮ひずみが  $400 \mu$  程度であったことと比較すると、その影響は大きくない。この図だけではその違いの原因は断定できないが、自己収縮によって肌分かれしていた鋼管とコンクリートが载荷によって部分的に接触するようになり、充填コンクリートにも徐々に応力が伝達されていくのではないかと考えられる。

平均ひずみの挙動は、鋼管ひずみと類似していた。载荷のごく初期には鋼管のみの弾性剛性で推移し、充填コンクリートのひずみが増加しはじめると、CFT の弾性剛性で推移している。

図-5 は全試験体 (試験体 L90-22 は変位計に不具合があったため除外) について、割線剛性試験結果と CFT 弾性剛性計算値の比較を行ったものである。縦軸は試験結果を計算値で除した比率、横軸は载荷軸力を単純累加軸耐力で除した軸力比である。剛性の試験結果は弾性剛性計算値の約 80% であり、軸力レベルや試験体による差はほとんど認められない。

図-6 は全試験体について、充填コンクリートのひず

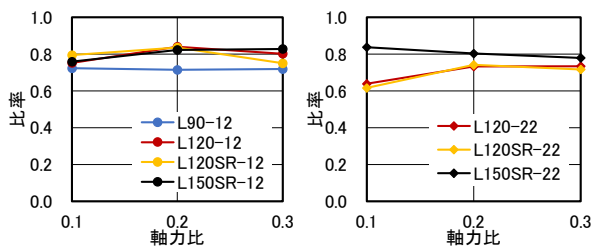


図-5 剛性の試験結果と計算値との比較

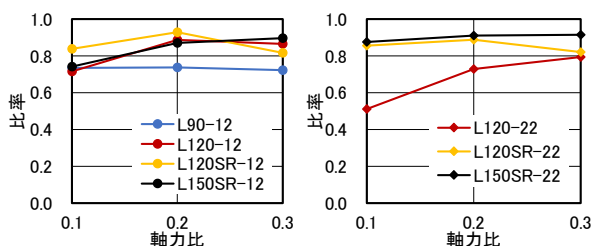


図-6 コンクリートひずみと平均ひずみの比較

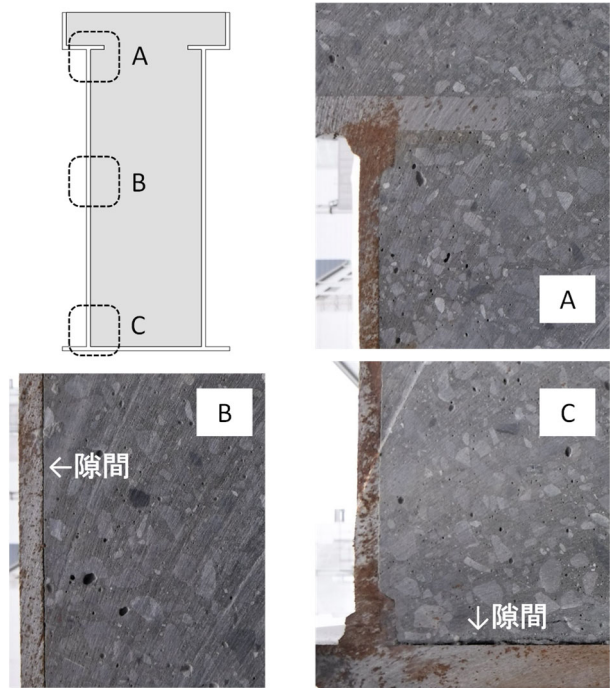


写真-1 試験体切断面の状況 (L120-12 の例)

みと平均ひずみを比較したものである。縦軸はコンクリートひずみ試験結果を平均ひずみ試験結果で除した比率、横軸は载荷軸力を単純累加軸耐力で除した軸力比である。前述のように自己収縮の影響により、縦軸の比率は 1 を下回っており、载荷によってコンクリートのひずみは増加するものの、平均ひずみと一致するまでには至っていないことがわかる。このことは図-5 に示したように剛性が計算値の 80% 程度で推移していることと符合している。

写真-1 は载荷試験後に試験体を縦半分切断した状況である。試験体上部鋼板 (ダイヤフラム想定) とコンクリートは隙間なく一体化している。一方で下部鋼板とコンクリート、ならびに鋼管鉛直面とコンクリートの間には隙間が観察された。このような状況は全試験体で共通であった。载荷試験の影響も含まれてはいるが、主に自己収縮の影響と考えられる。L タイプの試験は軸力比 1/3 の範囲であり、コンクリートのひび割れなどは見られなかった。また鋼管の局部座屈も見られなかった。

鋼管鉛直面とコンクリート間の隙間は、試験体高さ方向で一様ではなく、中央部で顕著であった。先に述べたとおり自己収縮によって鋼管とコンクリートの付着は切れるものの、軸力の载荷によって部分的に接触するため、図-4 に見られるように初期荷重レベルからコンクリートに応力が伝達していくのではないかと推測される。全体を通して、自己収縮の影響として圧縮剛性の若干の低下は認められるが、長期軸力レベルまで有害な損傷は見られなかった。

#### 4.2 Sタイプ試験体

自己収縮ひずみの計測を行った後、材齢35日程度で破壊に至るまで中心圧縮試験を行った。コンクリートや鋼管のひずみ計測に加えて、荷重と平均ひずみの計測を行った。平均ひずみは、試験区間上下の鋼板間の長さ変化を変位計で計測し、その値を試験体高さ(H)で除したものである。

表-4に最大耐力の一覧を示す。表中には単純累加軸耐力( $N_{u1}$  計算方法は前述と同様)も示している。図-7に荷重・平均ひずみ関係を示す。左側のグラフはコンクリート強度をパラメータとし、右側のグラフは鋼板厚さをパラメータとしたものである。コンクリート強度や鋼板厚さの増加で最大耐力は上昇するが、荷重・ひずみ関係の傾向は同様である。充填コンクリートが圧縮破壊すると脆性的に荷重が低下し、ひずみ約10,000 $\mu$ 、荷重が最大耐力の1/2程度になったところで荷重が安定する。

図-8は荷重と鋼管軸ひずみの関係を、幅厚比が50の試験体(S120-3.2)と幅厚比が27の試験体(S120-6)について示したものである。幅厚比が50の場合、鋼管が降伏ひずみ(約1500 $\mu$ )に達すると内面と外面でひずみの傾向が異なるようになり、局部座屈による鋼板の曲げひずみが認められる。幅厚比が27の場合、鋼管の内面と外面は同様に推移しており、最大耐力に至るまで局部座屈の影響は顕著には認められない。

写真-2は試験体の最終破壊状況である。図-8に示すように最大耐力に至るまでの鋼管のひずみ履歴には差があったが、最終破壊状況はほぼ同じである。鋼管がはらみ出している位置は、充填コンクリートの圧縮破壊によるすべり面の位置と対応している。

図-9の左側のグラフは、縦軸に最大耐力を単純累加軸耐力 $N_{u1}$ で除した比率、横軸に一般化幅厚比( $(B/t) \times (\sigma_y/E_s)^{0.5}$ )を用いて示したものである。一般化幅厚比の

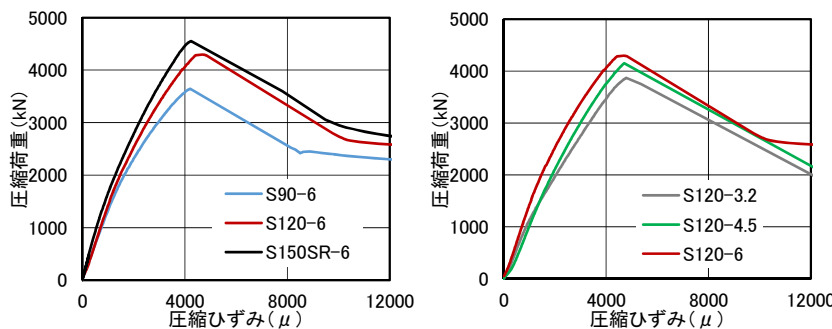


図-7 荷重・平均ひずみ関係の例

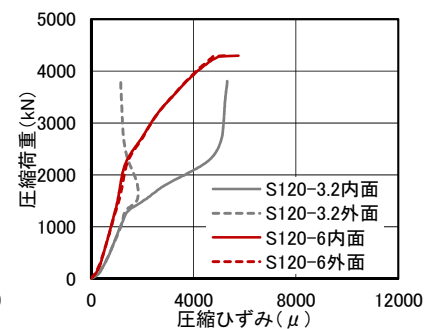


図-8 荷重・鋼管軸ひずみ関係の例

表-4 最大耐力一覧 (Sタイプ)

試験体	最大荷重 $N_{max}$ (kN)	単純累加 $N_{u1}$ (kN)	$N_{max}$ $N_{u1}$	計算値 $N_{u2}$ (kN)	$N_{max}$ $N_{u2}$
S90-3.2	3105	3506	0.89	3181	0.98
S90-4.5	3307	3607	0.92	3318	1.00
S90-6	3643	3779	0.96	3530	1.03
S120-3.2	3869	4401	0.88	3957	0.98
S120-4.5	4150	4472	0.93	4074	1.02
S120-6	4296	4609	0.93	4261	1.01
S120SR-3.2	3872	4384	0.88	3937	0.98
S120SR-4.5	3934	4456	0.88	4054	0.97
S120SR-6	4208	4594	0.92	4242	0.99
S120SR-6H	5149	5505	0.94	5145	1.00
S150SR-6	4551	4819	0.94	4432	1.03
S150SR-6H	5416	5729	0.95	5333	1.02

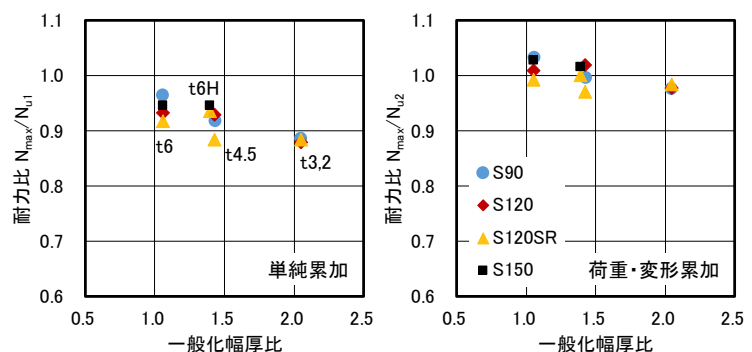


図-9 最大耐力と幅厚比の関係



写真-2 最終破壊状況の例 (左: S120-3.2, 右: S120-6)

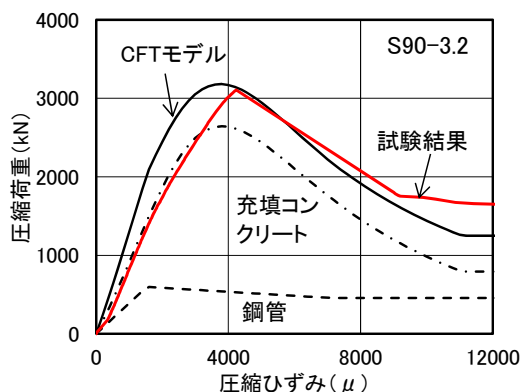


図-10 荷重・変形関係モデルの例

増加に従って、耐力比が低下していることがわかる。幅厚比が大きくなると最大荷重に達する前に鋼管に局部座屈が生じて耐力が低下し、単純累加軸耐力に到達しないことが既往の研究など<sup>4)</sup>でも示されている。また、超高強度コンクリートの場合には、圧縮破壊時のひずみが大きく、鋼管による拘束効果が少なく脆性的に破壊することを適切に考慮することが重要である。そこで、図-10に示すように充填コンクリートと鋼管のそれぞれについて荷重・変形関係モデルを作成し、その累加によって最大耐力を評価する。

鋼管のモデルについては、文献4)に示されている中原らの提案モデルを用いる。充填コンクリートのモデルについては、文献5)に示されている崎野らのモデルを用いるが、以下の点を修正している。

- ・鋼管の拘束効果による圧縮強度の上昇は無いものとするが(プレーンコンクリートの圧縮強度を用いる)、最大荷重以降の強度低下域では拘束効果を考慮する
- ・圧縮強度の寸法・形状の補正係数は、筆者らが超高強度コンクリート用に提案しているもの<sup>9)</sup>を用いる
- ・前述の自己収縮の影響を考慮し、最大荷重時までの剛性は0.8倍する

図-10に試験結果と提案モデルを比較しているが、概ね軸圧縮挙動を模擬できているものと考えられる。

全試験体について、この手法を用いて最大耐力を計算し、表-4の $N_{u2}$ に示している。また図-9の右側のグラフは縦軸に最大耐力を $N_{u2}$ で除した比率、横軸に一般化幅厚比を用いて示したものである。計算値は試験結果の±3%の範囲にあり、超高強度コンクリートを用いたCFT柱の軸圧縮耐力を単純累加よりも精度よく評価することができた。

## 5. まとめ

設計基準強度 $90\sim 150\text{N/mm}^2$ の超高強度コンクリートを用いた角形CFT柱試験体を作製し、充填コンクリートの自己収縮ひずみの計測を行った後、中心圧縮試験を行

って、その圧縮特性を検討した。その結果を以下に要約する。

- (1) CFT 角柱試験体に使用したコンクリートについて標準試験体を用いた自己収縮試験を行った結果、柱試験体の充填コンクリートで計測された自己収縮ひずみは、簡易断熱養生による自己収縮ひずみとほぼ同等であり、本試験の範囲では最大約 $400\mu$ であった。
- (2) 自己収縮を計測した柱試験体を用いて中心圧縮試験を行った結果、上記 $400\mu$ の自己収縮ひずみの影響は顕著には表れなかった。圧縮試験時の剛性は、弾性剛性計算値の約80%程度であった。
- (3) 上記の剛性への影響以外は、自己収縮がCFT角柱の長期性能に与える影響は認められなかった。
- (4) 設計基準強度 $F_c$ が $90\sim 150\text{N/mm}^2$ の超高強度コンクリートを用い、幅厚比 $B/t$ が $27\sim 50$ の範囲にあるCFT角柱の軸圧縮耐力は、単純累加耐力には至らなかった。
- (5) 崎野らの提案手法を超高強度コンクリートにも適合するように一部修正することで、軸圧縮耐力を精度よく評価することができた。

## 謝辞

CFT柱の中心圧縮試験を実施するにあたり、日本大学理工学部大型構造物試験センターの30MN大型構造物試験機を使用させていただきました。柳崎尚輝氏をはじめ関係各位に深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 松田拓，嶋毅，河上浩司，西本好克：初期高温履歴を受けた超高強度コンクリートの自己収縮特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1247-1252，2006
- 2) 日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針，2008
- 3) 山田一徳ほか：CFT柱内部のコンクリートのひずみ分布，日本建築学会東海支部研究報告書，第47号，pp.45-48，2009.2
- 4) 中原浩之，崎野健治，稲井栄一：コンクリート充填コンクリート鋼管柱の中心圧縮性状のモデル化，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.3，pp.817-822，1998
- 5) 崎野健治，孫玉平：直線型横補強材により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係，日本建築学会構造系論文集，第461号，pp.95-104，1994.7
- 6) 熊谷仁志，戸澤正美，黒瀬行信：超高強度鉄筋コンクリート立体耐震壁の曲げ圧縮破壊に関する研究，コンクリート工学論文集，第16巻，第3号，pp.59-68，2005.9