

論文 高軸力を受ける高強度 C F T 長柱の耐震性能の検討

飯田 正憲*1・石川 裕次*2・曾我 裕*3

要旨：近年，超高層オフィスビルのエントランスを開放的な吹き抜け空間とし，比較的細い柱で構成するデザインニーズが増加している。この様な柱は，近年の高強度・高性能な材料開発を背景に，高強度冷間成形角形鋼管および高強度コンクリートを用いた C F T 柱として設計されることが多い。本論では，高軸力を負担する高強度材料を用いた冷間成形角形鋼管 C F T 長柱の力学性状を検討するために 6 体の試験体を用いて高軸力を導入した曲げせん断実験を実施した。実験変数はコンクリート強度および軸力比とした。ここでは曲げ耐力および靱性性能について実験データを検討した結果を示す。

キーワード：冷間成形角形鋼管，C F T，長柱，軸力比，高強度コンクリート

1. はじめに

近年，超高層オフィスビルのエントランスを開放的な吹き抜け空間とし，比較的スレンダーな柱で構成するデザインニーズが増加している。この様な柱は，長柱（座屈長さ径比： $L_k/B \geq 12$ ）となる場合が多く，かつ高軸力を負担している。また，高強度・高性能な材料が開発され， $F_c100\text{N/mm}^2$ 超の高強度コンクリートおよび高強度材料を用いた冷間成形角形鋼管が，C F T 柱に採用されるようになってきた。しかしながら，現行指針¹⁾では，材料強度が指針の適用範囲を超え，さらに長柱に対して定められている軸力比制限を満足できないケースもある。このような長柱を，設計に採用するためには耐震性能確認実験を行う必要がある。このような背景から，高軸力を負担する高強度材料を用いた冷間成形角形鋼管 C F T 長柱の実験を行った。本論では，このデータに基づき，曲げ耐力および変形性能を検証した結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 実験変数，試験体

実験変数は，コンクリート強度および最大軸力比とした。表 - 1 に試験体一覧，図 - 1 に試験体図を示す。試験体は柱断面を $250 \times 250 \times 14$ とした冷間成形角形鋼管に Fc60～Fc105 の高強度コンクリートを充填した C F T 柱である。断面形状および座屈長さ径比は全試験体とも同一である。L100～L102 は， 550N/mm^2 級鋼を用いた試験体で，コンクリートの設計基準強度は Fc105（実強度 134.5），実験変数として最大軸力比をそれぞれ 0.55，0.40，0.65 に変動させている。また，L200～L202 は， 490N/mm^2 級鋼を用いた試験体で，軸力比を 0.55，実験変数としてコンクリート強度をそれぞれ，Fc105，Fc60，Fc150 に変動させている。ここで，図 - 1 に示す様に，

表 - 1 試験体一覧

試験体名	キーワード	鋼管断面 B×D×t (mm)	幅厚比 B/t	座屈長さ径比 L_k/B	鋼管鋼種	設計基準強度 F_c (N/mm^2)	最大軸力比 N/ N_0
L100	0.55 N_0	250	18	12.8*	550 N/mm ² 級	105	0.55
L101	0.40 N_0	×					0.40
L102	0.65 N_0	×					0.65
L200	Fc105	×			490 N/mm ² 級	105	
L201	Fc60	×				60	
L202	Fc150	×				150	

N_0 ：軸圧縮力を受ける部材の単純累加耐力
 L_k ：座屈長さ，B・D：鋼管の幅・成，t：鋼管の厚み
 * L201 については座屈長さを補正後，座屈長さ径比 10.0 を採用している。

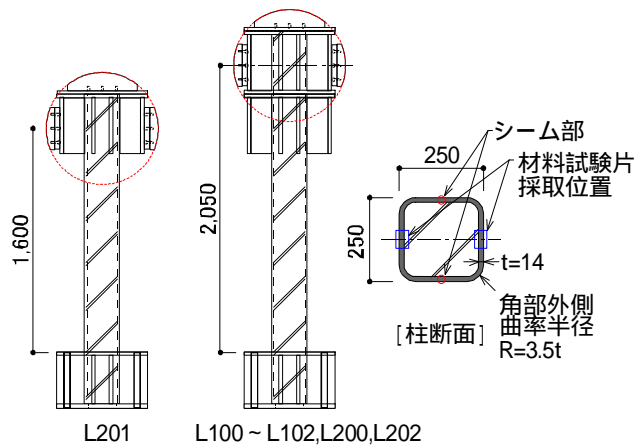


図 - 1 試験体図

表 - 2 鋼材の材料試験結果

鋼管鋼種 (N/mm^2 級)	降伏強度 s_y (N/mm^2)	引張強度 s_u (N/mm^2)	降伏比 s_y/s_u (%)	破断伸び e_l (%)
550	412	553	74.5	43.1
490	441	555	79.6	41.9

表 - 3 コンクリートの材料試験結果

設計基準強度 F_c (N/mm^2)	圧縮強度 f_c (N/mm^2)	弾性係数 c_E (N/mm^2)	ポアソン比
60	75.9	3.39×10^4	0.213
105	134.5	4.07×10^4	0.210
150	166.7	4.25×10^4	0.226

*1 (株) 竹中工務店 技術研究所構造部門 研究員 工修 (正会員)
 *2 (株) 竹中工務店 技術研究所構造部門 主任研究員 工博 (正会員)
 *3 (株) 竹中工務店 名古屋支店設計部構造 G 副部長 工修

L201 と、その他の試験体では、柱頭部の加力スタブの長さを変更している。これは、L201 の実験結果の分析をしたところ、ピン支承用治具に生ずる摩擦の影響を無視できないことが判明したためである。柱頭部加力スタブを延長し、試験体長さを長くすることで座屈長さ径比を 16.4 としているが、柱頭に生ずる曲げモーメントの影響を考慮して、反曲点高さからは 12.8 程度になるよう設定している。鋼材およびコンクリートの材料試験結果をそれぞれ表 - 2, 3 に示す。鋼材の材料試験結果より、引張強度は両者でほとんど変わらないが、降伏強度が 550N/mm^2 級鋼の方が小さいため、降伏比が 550N/mm^2 級鋼の方が小さい。なお、鋼材の材料試験結果は試験体の平坦部から採取した試験片（図 - 1 参照）の結果を示している。

2.2 加力方法

加力装置図を図 - 2 に示す。建研式加力装置の加力梁にピン支承用治具を設置し、柱脚固定、柱頭ピンの加力方法を採用した。本加力装置は軸力 1,200t、水平加力 200t まで荷重が可能な加力装置である。水平加力は変位漸増荷重とし、 $R = \pm 1, \pm 2.5, 5, (\pm 2.5), \pm 10, (\pm 5), \pm 20, (\pm 5), \pm 30, \pm 40, \pm 50 \times 10^{-3} [\text{rad.}]$ を各 2 回繰り返し、最後に $+60 \times 10^{-3} [\text{rad.}]$ まで押し切りとした。() のサイクルは、各変形後の小サイクルを想定した。図 - 3 に軸力の荷重履歴を示す。軸力は、想定する高層建物の

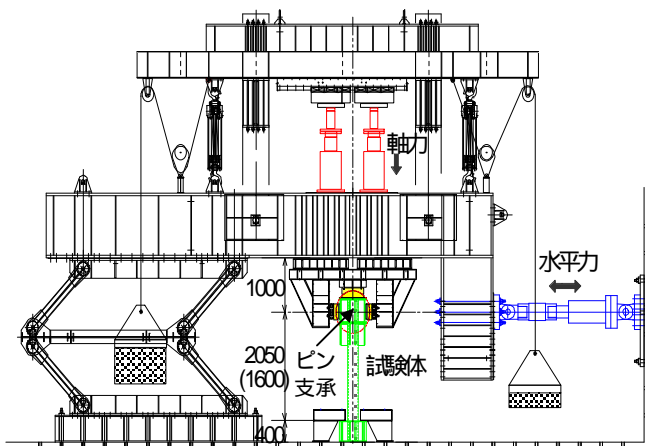


図 - 2 加力装置図

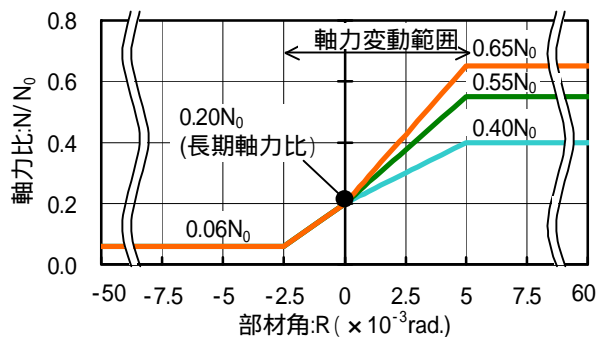


図 - 3 軸力の荷重履歴（軸力比 - 部材角関係）

変形角に応じて変動させた。初期軸力を軸力比 0.2（長期荷重相当）とし、正加力側は変形角 $5.0 \times 10^{-3} [\text{rad.}]$ にて最大軸力比（0.4～0.65）、負加力側は変形角 $-2.5 \times 10^{-3} [\text{rad.}]$ にて最少軸力比（0.06）としている。なお、各試験体の部材角および軸ひずみは、下スタブと加力点との変形から求めた。

3. 実験結果

3.1 破壊状況

(1) L100 シリーズ（実験変数：軸力比）

代表的な試験体である L100 試験体の各部材角における損傷状況を図 - 4 に示す。いずれの試験体も部材角 $5 \times 10^{-3} [\text{rad.}]$ 付近で、鋼管表面の変形が大きくなり始めたことを示す表面の黒皮の剥離現象が見られる。 $5 \times 10^{-3} [\text{rad.}]$ を超えた時点で鋼管ひずみが降伏ひずみに達する。 $20 \times 10^{-3} [\text{rad.}]$ 付近では、内部コンクリートの割裂音が発生し、除々に圧縮縁コンクリートの損傷が進行したと考えられる。この現象の後に鋼管局部座屈が柱脚から $1.0D$ （ D ：柱成に相当）の範囲に見られ、それと共に軸ひずみが増加した。最大耐力時の部材角はそれぞれ、L100 で $60 \times 10^{-3} [\text{rad.}]$ 、L101 で $40 \times 10^{-3} [\text{rad.}]$ 、L102 で 30×10^{-3}

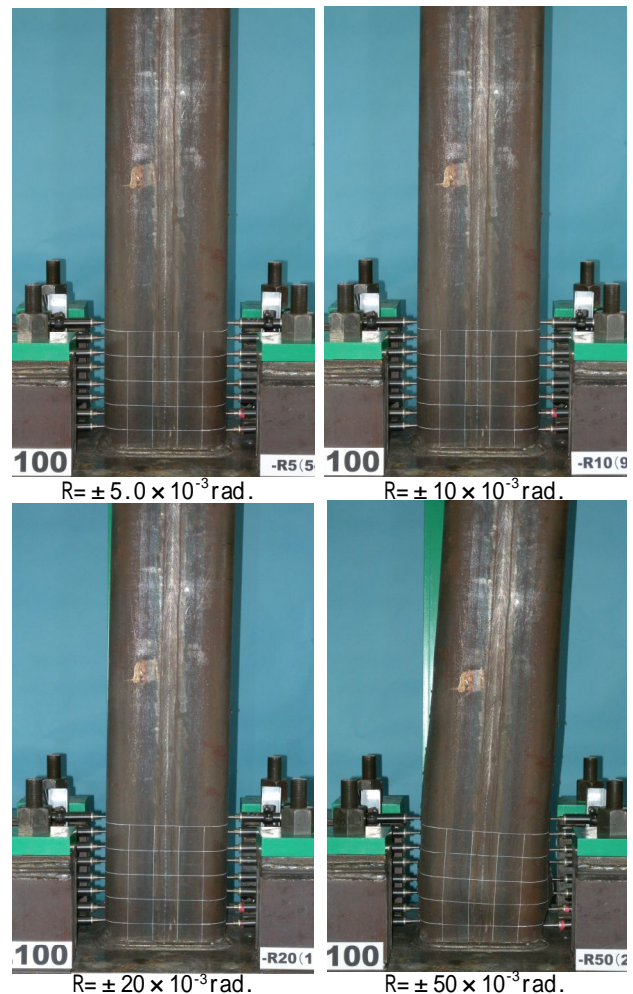


図 - 4 各部材角における柱脚部の損傷状況（L100）

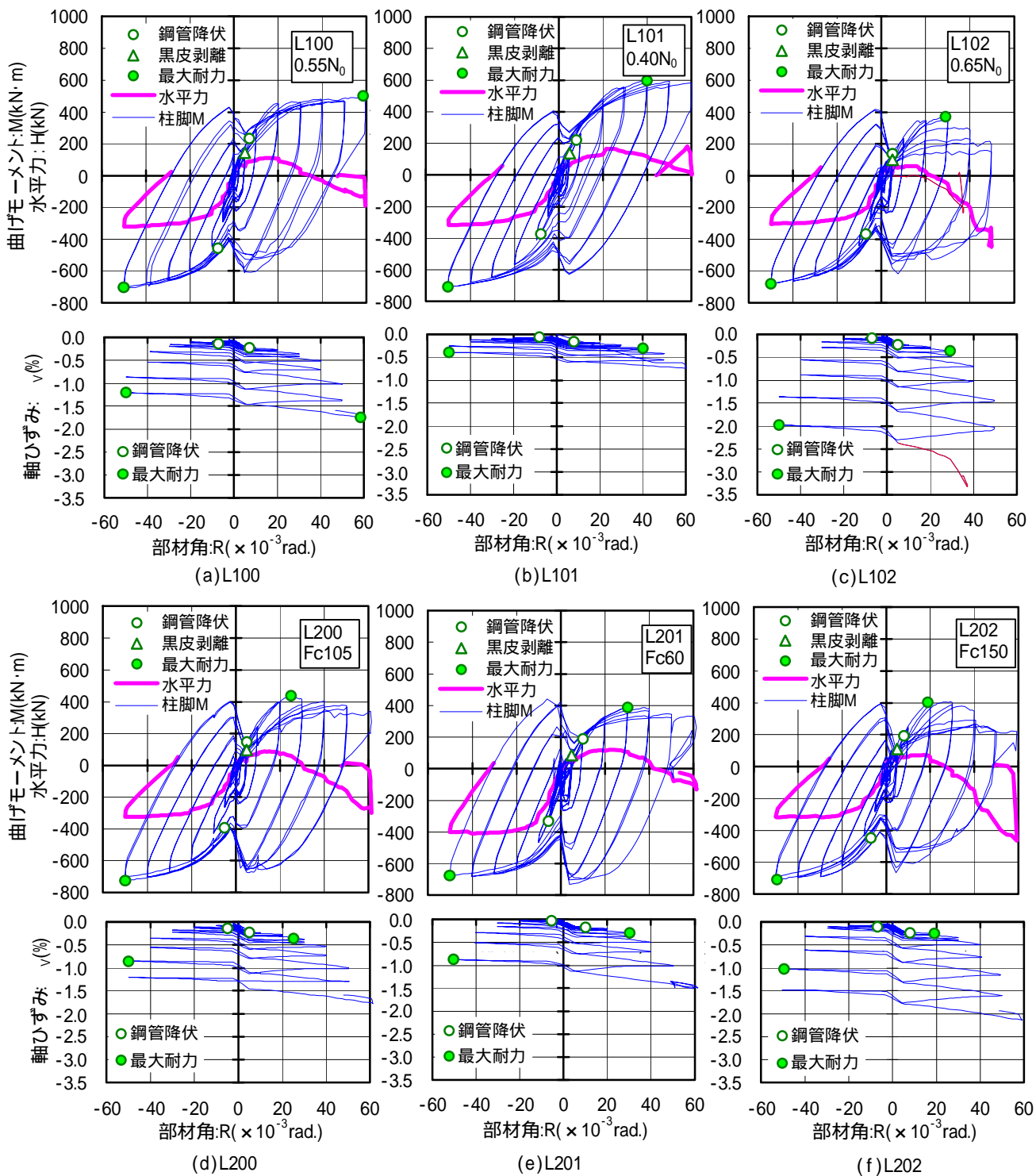


図 - 5 実験結果 (曲げモーメントおよび水平力 - 部材角関係, 軸ひずみ - 部材角関係)

[rad.]であった。その後, L100, L101 ではほとんど耐力低下を示さず 60×10^{-3} [rad.]まで荷重を行った。一方, L102 では, 最大耐力後に鋼管の面外変形と共に軸ひずみが急激に増大し, 60×10^{-3} [rad.]に向かう 40×10^{-3} [rad.]で, 軸力が維持できなくなったため実験を終了した。(図 - 5 (c), 赤線部参照)

(2) L200 シリーズ (実験変数: コンクリート強度)

最大耐力までの破壊の状況は L100 シリーズと同様のため省略する。最大耐力発生時の部材角はそれぞれ, L

200 で 25×10^{-3} [rad.], L201 で 30×10^{-3} [rad.], L202 で 20×10^{-3} [rad.]であった。その後, L200, L201 では, 若干の耐力低下を示したものの, 60×10^{-3} [rad.]まで安定して加力することができた。高強度コンクリート Fc150 を使用した L202 でも, 60×10^{-3} [rad.]まで加力を行ったが, サイクル中の耐力低下が著しく, 最大変形時の耐力は, 最大耐力の 1/2 程度となった。

3.2 荷重 - 変形関係

実験結果を図 - 5 に示す。上段に曲げモーメントおよび

び水平力 - 部材角関係図を、下段に軸ひずみ - 部材角関係図を示した。なお、水平力は、軸力と水平変形により生じるせん断力の低下の影響を含めた形で評価し、初期載荷時のピークを包絡して示した。また、曲げモーメントは、水平力により生じる曲げモーメントに、軸力と水平変形により生じる曲げモーメントを足し合わせた柱脚の曲げモーメントである。この時、建研式加力装置において生ずる水平力に対する摩擦の影響および柱頭の回転支承に生じる摩擦の影響を考慮し、柱脚曲げモーメントを2割程度低減した。また、各図中には鋼管表面の黒皮の剥離現象が見られた点を、鋼管の内外に貼付したひずみゲージの平均が鋼材の降伏ひずみに達した点を、最大耐力点を示した。

(1) L100 シリーズ (実験変数: 軸力比)

正加力側では、最大軸力比が小さい試験体ほど最大耐力が大きくなった。また、最大耐力時変形は、最大軸力比の最も高い L102 で最も小さくなった。また、最大耐力後の耐力低下は、最大軸力比の最も高い L102 で急激に耐力低下しており、他の2体が 60×10^{-3} [rad.]まで最大耐力をほぼ維持したのに対し、L102 では、最大耐力の1/2程度であった。負加力側では、軸力比に差がないため、最大耐力は試験体間の差がない。また、軸ひずみに着目すると、同一部材角における軸方向ひずみは、軸力比が高くなるにつれて大きくなった。また、最大耐力時の軸ひずみはそれぞれ、L100 で 1.74%、L101 で 0.30%、L102 で 0.36% となった。

(2) L200 シリーズ (実験変数: コンクリート強度)

正加力側では、コンクリート強度の違いによる最大耐力に大きな差はないが、コンクリート強度が大きくなると、最大耐力発生時の部材角が小さくなった。また、最大耐力後の耐力低下については、コンクリート強度が大きい試験体ほど耐力低下が著しく、コンクリート強度の最も高い L202 の 60×10^{-3} [rad.]時の耐力は、最大耐力の1/2程度となった。これらの原因は、軸力比が同一で、コンクリート強度が大きい程、軸力が大きくなるためである。負加力側については、軸力に大きな差がないため、耐力にも差は見られなかった。同一部材角における軸方向ひずみは、軸力比が同一のため、コンクリート強度が大きい程、軸力が大きくなり、軸ひずみも大きくなった。また、最大耐力時の軸ひずみは、L200 で 0.36%、L201 で 0.29%、L202 で 0.25% となった。

3.3 曲げ耐力

表 - 4 に実験結果の一覧を示す。また、図 - 6 に各試験体の M-N 関係を示す。図表には、それぞれ部材角 ± 5 、 ± 10 、 $\pm 20 \times 10^{-3}$ [rad.]時 (初期載荷時) および鋼管降伏時、最大耐力時における柱脚モーメント値を示した。また、短期許容耐力および終局耐力の計算値として学会長

柱式²⁾による計算値を示した。なお、学会長柱式²⁾の適用範囲は、コンクリートの圧縮強度が Fc90 までであるが、ここでは外挿して使用した。

(1) 終局曲げ耐力

全試験体の最大曲げ耐力は、 $c_{r0}=1.0$ とした学会長柱式の終局曲げ耐力を上回っており、その余裕度は、1.26 ~ 1.62 となっている。各部材角における曲げ耐力に注目すると、 M_{10} (10×10^{-3} [rad.]時の曲げ耐力)では、終局曲げ耐力よりも若干小さい耐力を示しているが、 M_{20} (20×10^{-3} [rad.]時の曲げ耐力)では、終局曲げ耐力をほぼ上回っており、若干下回ったコンクリート強度の低い L201 でも、余裕度は 0.98 である。

(2) 短期許容曲げ耐力

鋼管降伏時の曲げ耐力は学会長柱式の短期許容曲げ耐力を概ね上回っている。コンクリート強度の低い L201 の負加力側では若干下回り、その余裕度は 0.95 である。

3.4 限界部材角

限界部材角の実験値と計算値を表 - 5 に示す。なお、限界部材角には、水平力 (軸力と水平変形により生じるせん断力の低下の影響を含めて評価) および柱脚の曲げモーメント (水平力により生じる曲げモーメントに、軸力と水平変形により生じる曲げモーメントを足し合わせて評価) の値が最大値の 95% に低下した時点の部材角をそれぞれ示した。また、計算値は新都市式 (短柱式)¹⁾ および学会長柱式²⁾を示した。いずれの式もコンクリート強度の適用範囲は、Fc90 までであるが、本論では外挿して計算した。なお、実験値と計算値の比較においては、水平力による限界部材角と学会長柱式を、柱脚曲げモーメントによる限界部材角を新都市式と比較する。

L100 シリーズ (実験変数: 軸力比) では、軸力比が高くなると限界部材角も小さくなる傾向が見られた。また、L200 シリーズ (実験変数: コンクリート強度) では、コンクリート強度が高くなると限界部材角も小さくなる傾向が見られた。また、実験値と計算値の比較では、全試験体で実験値の方が上回っている。比較的的水平力による限界部材角と学会長柱式の対応が良く、その割合は、1.12 ~ 1.60 となっている。長柱では、限界部材角が、 20×10^{-3} [rad.]以上 (FA ランク) である必要があるが、軸力比の最も高い L102 およびコンクリート強度の最も高い L202 以外の試験体でこれを満足している。L102 および L202 についても柱脚曲げモーメントに対する限界部材角では 20×10^{-3} [rad.]以上の変形性能を有している。

3.5 変動軸力の影響について

図 - 5 に示す曲げモーメント - 部材角関係において部材角 -2.5×10^{-3} [rad.] ~ $+5.0 \times 10^{-3}$ [rad.]において復元力特性が凹状になっているのは、この範囲で軸力を変動させているためである。図 - 7 に L100 試験体における、

表 - 4 実験結果一覧

試験体名	加力方向	実験結果					学会長柱式		実験結果 / 学会長柱式	
		M_5 (kN·m)	$M_{降伏}$ (kN·m)	M_{10} (kN·m)	M_{20} (kN·m)	M_{max} (kN·m)	短期耐力	終局耐力	$M_{降伏} / M_{calS}$	M_{max} / M_{calU}
							$calM_S$ (kN·m)	$calM_U$ (kN·m)		
L100	正加力	144	233	287	453	504	108	315	2.16	1.60
	負加力	273	454	440	587	703	325	455	1.40	1.55
L101	正加力	135	221	258	424	596	214	399	1.03	1.49
	負加力	237	374	407	566	708	326	452	1.15	1.57
L102	正加力	137	137	234	349	373	51	231	2.69	1.62
	負加力	279	367	483	588	679	326	455	1.12	1.49
L200	正加力	95	148	244	388	438	107	325	1.38	1.35
	負加力	262	391	421	594	724	339	484	1.15	1.49
L201	正加力	80	188	182	305	379	135	312	1.39	1.22
	負加力	235	332	446	605	657	350	484	0.95	1.36
L202	正加力	111	194	248	348	405	111	321	1.75	1.26
	負加力	271	446	433	620	710	338	486	1.32	1.46

「学会長柱式」は文献2)に基づくCFT長柱の曲げ耐力式を示す。なお、学会長柱式のコンクリート強度の適用範囲は F_c90 までであるが、本論では外挿して用いた。

M_5 , M_{10} , M_{20} は、それぞれ $5 \times 10^{-3} \text{rad.}$, $10 \times 10^{-3} \text{rad.}$, $20 \times 10^{-3} \text{rad.}$ 時の曲げ耐力を示す。

$M_{降伏}$, M_{max} は、それぞれ鋼管降伏時、最大耐力時の曲げ耐力を示す。

短期許容耐力算定に使用したコンクリート及び鋼管の短期許容応力度は、許容応力度時のひずみを考慮して求めた。²⁾

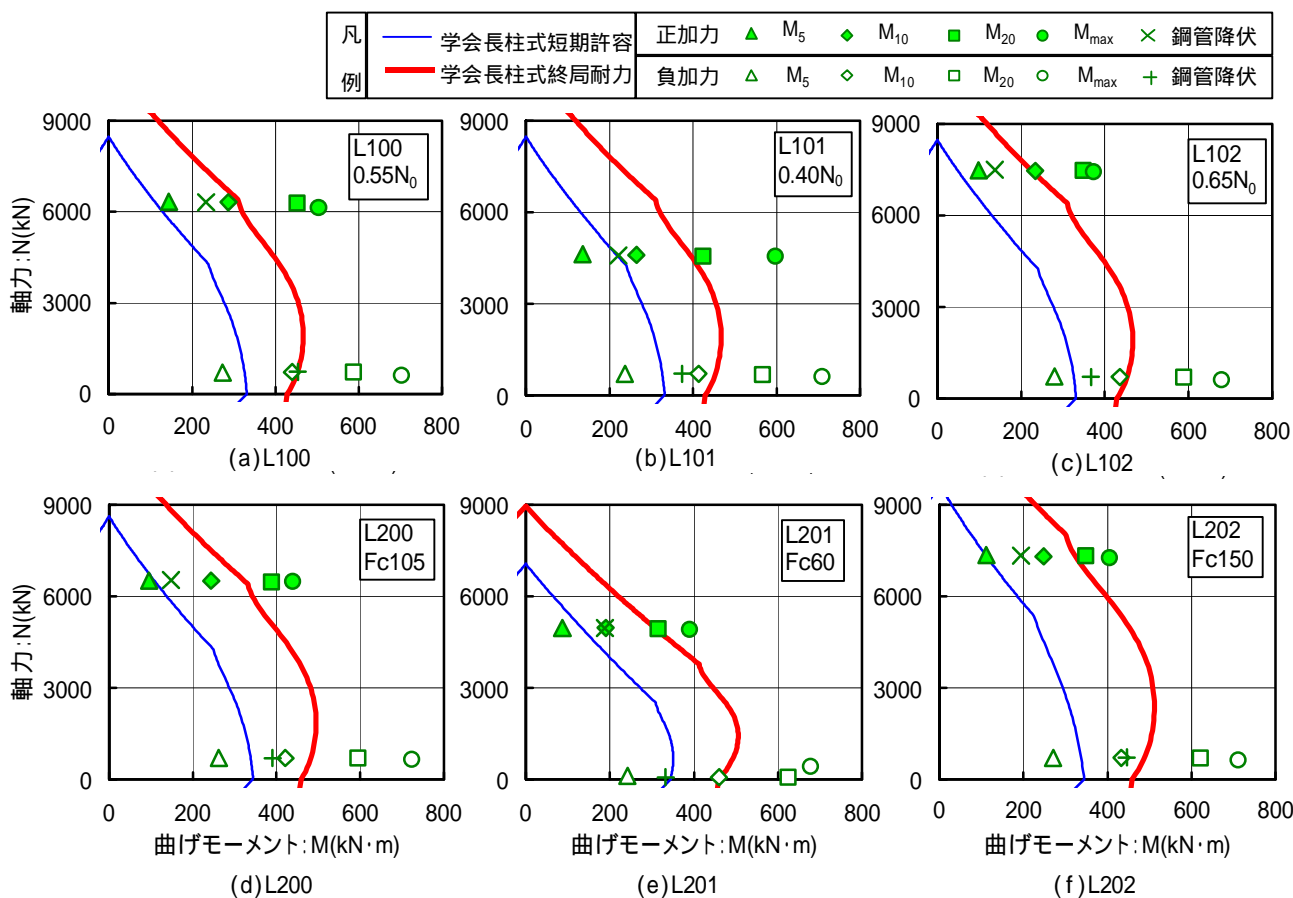


図 - 6 各試験体の M - N 関係

$\pm 5.0 \times 10^{-3} \text{ [rad.]}$, $\pm 10 \times 10^{-3} \text{ [rad.]}$, $\pm 20 \times 10^{-3} \text{ [rad.]}$, $\pm 30 \times 10^{-3} \text{ [rad.]}$, $\pm 40 \times 10^{-3} \text{ [rad.]}$, $\pm 50 \times 10^{-3} \text{ [rad.]}$ の各履歴サイクルを、M-N 相関図に示した。また、学会長柱式²⁾による終局耐力も示した。正加力時に着目すると、 $\pm 20 \times 10^{-3} \text{ [rad.]}$ までは、部材角の増加と共に曲げモーメ

ントも増加しているが、 $\pm 30 \times 10^{-3} \text{ [rad.]}$ からは、部材角の増加に反して曲げモーメントが低下し、軸力が最大軸力比となる $5.0 \times 10^{-3} \text{ [rad.]}$ で増加に転じている。一方、負加力側においては、 $\pm 20 \times 10^{-3} \text{ [rad.]}$ までは、部材角の負側への増加と共に曲げモーメントも負側へ増加し、-

且 ± 0 [rad.]で減少するがその後再び増加に転じている。
 $\pm 30 \times 10^{-3}$ [rad.]からは、部材角の増加に反して曲げモーメントが低下し、軸力が最低軸力比となる -2.5×10^{-3} [rad.]で増加に転じている。正、負いずれも $\pm 30 \times 10^{-3}$ [rad.]から傾向が変化しているが、これは、柱脚における鋼管の局部座屈が観察され始めた時点と一致している。

3.6 設計に使用される範囲の曲げ耐力について
 図 - 8 に、L100 試験体における $\pm 20 \times 10^{-3}$ [rad.]までのサイクルにおける部材角 - 曲げモーメント関係を示す。図には、包絡線（初期載荷時の値）と、鋼管降伏時の耐力および学会長柱式による短期許容耐力と終局耐力も併せて示した。これによると、鋼管降伏時の耐力は、短期許容耐力を上回り、終局耐力についても正負それぞれほぼ 10×10^{-3} [rad.]で計算値と同等の耐力を示している。

3.7 実験後の内部コンクリートの状況
 実験後に脚部の鋼管を一部取り除き、内部コンクリートの状況を確認した。図 - 9 は試験体裏面（正サイクル時に圧縮側となる）領域である。圧縮縁となる外周部のコンクリートは損傷が著しいが、内部コンクリートは健全な状態であった。

4. まとめ

本実験では、高軸力を負担する高強度材料を用いた冷間成形角形鋼管 C F T 長柱の実験を実施し、以下の知見が得られた。

- (1) 軸力比の異なる試験体群では、軸力比が大きい試験体ほど最大耐力が小さくなり、最大耐力時変形も小さくなる傾向が見られた。
- (2) コンクリート強度の異なる試験体群では、コンクリート強度が大きい試験体ほど最大耐力時変形が小さくなる傾向が見られた。
- (3) 全試験体の最大曲げ耐力は、学会長柱式による終局曲げ耐力を上回った。また、鋼管降伏時の曲げ耐力と、学会長柱式による短期許容耐力との比較では、概ね鋼管降伏時の曲げ耐力が短期許容耐力を上回っているが、コンクリート強度の低い L201 の負加力側で若干下回った。
- (4) C F T 長柱の限界部材角は、新都市市式および学会長柱式で計算される値よりも大きな値を示し、十分な変形性能を有していることが確認された。

参考文献

- 1) コンクリート充填鋼管（C F T）造技術基準・同解説の運用及び計算例等，新都市ハウジング協会，1999.9
- 2) コンクリート充填鋼管構造設計施工指針，日本建築学会，2008.10

表 - 5 限界部材角の実験値と計算値

試験体名	実験値		計算値		実験値 / 計算値	
	$H R_u$ (水平力)	$M R_u$ (柱脚曲げモーメント)	学会長柱式 $cal R_{u1}$	新都市市式 $cal R_{u2}$	学会長柱式 $H R_u / cal R_{u1}$	新都市市式 $M R_u / cal R_{u2}$
L100	20.9	60以上	16.8	9.1	1.24	6.59
L101	32.3	60以上	22.4	16.6	1.44	3.61
L102	16.1	32.1	14.4	4.1	1.12	7.84
L200	20.1	32.0	16.8	9.0	1.19	3.57
L201	28.2	43.1	17.7	19.2	1.60	2.25
L202	19.3	33.2	15.7	3.0	1.23	10.94

新都市市式：文献1)参照（柱長さ径比 h_0/B 6 を対象）
 学会長柱式：文献2)参照（座屈長さ径比 $L_k/D > 10$ を対象）
 なお、両式のコンクリート強度の適用範囲は $F_c 90$ までであるが、本論では外挿して用いた。
 実験値，計算値それぞれの単位は $\times 10^{-3}$ rad. とする。

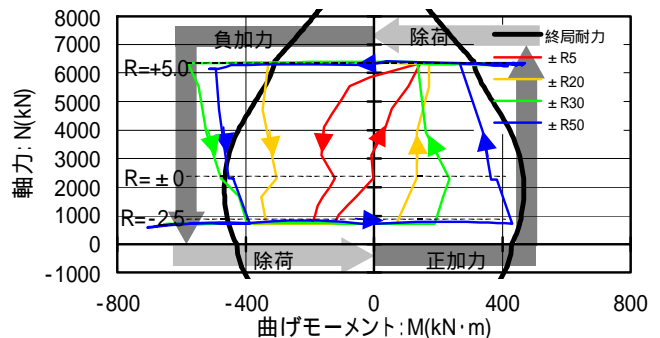


図 - 7 各部材角のサイクルにおける M-N 関係 (L100 試験体による)

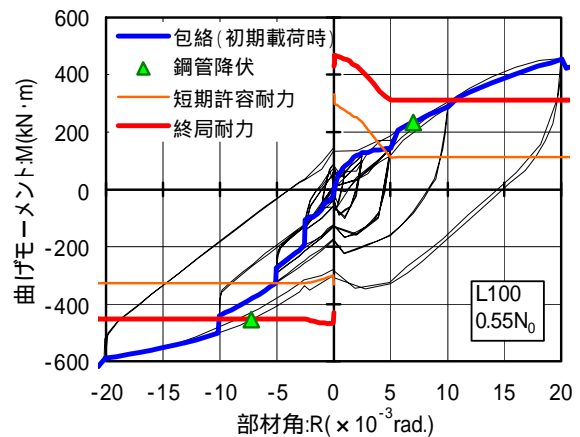


図 - 8 $\pm 20 \times 10^{-3}$ rad.までのサイクルにおける部材角と曲げモーメントの関係 (L100)



図 - 9 実験終了後の内部コンクリートの様子 (L100)