超高強度コンクリート充填鋼管柱の終局曲げ耐力に関する研究

ULTIMATE BENDING STRENGTH OF
HIGH-STRENGTH CONCRETE FILLED STEEL TUBE COLUMN

最相元雄*, 安部貴之**, 中矢浩二**

Motoo SAISHO, Takayuki ABE and Kouji NAKAYA

On the basis of stub-column test of concrete filled steel tube(CFT) and calculation of steel tube stress, the equation of confined concrete strength of CFT column is derived. This equation is a simple function expressed only by the strength ratio of steel tube to filled concrete. By the use of the equation of confined concrete strength the method to predict the ultimate bending strength of CFT column is proposed. The proposed method is the generalized superposed strength method in which the concrete strength is defined by the confined concrete strength and the steel tube strength is decided according to the calculated stress distribution. This method can predict well the maximum bending strength of CFT column test even if CFT column is the super-high strength concrete filled steel tube.

Keywords: concrete-filled steel tube, beam-column, high-strength concrete, ultimate strength, confined concrete

コンクリート充填鋼管、柱、高強度コンクリート、終局耐力、コンクリート拘束効果

1. 序

コンクリート充填鋼管(CFT)はコンクリートと鋼管の長所と短所を巧みに組み合わせた部材で、そのせん断曲げ柱は優れた耐力と塑性変形能力を発揮することが知られている。また、その終局曲げ耐力は累加強度式で比較的簡単に、しかも、安全側の値が計算できることでひろく使われている。一方、コンクリート混和材及び混和剤の研究開発により現在では 1000kgf/cm^2 を越える圧縮強度の超高強度コンクリートが比較的容易に打設可能となり、その実用化が期待される^{1)-3), 26)-29)}。

著者らは超高強度コンクリートの実用化に適切な構造部材としてCFT部材を考え、超高強度コンクリート充填鋼管せん断曲げ柱の動載荷実験を実施し、耐震構造部材としての終局状態を明らかにするとともに、終局曲げ耐力、累積塑性変形能力等の基本的性能を求めた²⁶⁾⁻²⁹⁾。その結果によると、超高強度コンクリート充填鋼管せん断曲げ柱の復元力特性の形状は普通強度コンクリート充填鋼管の場合とよく似た良好な形状となり、しかも、優れた耐力と塑性変形能力が期待できることが示された。しかし、その終局曲げ耐力の値に注目すると、鋼管と充填コンクリートの条件によってコンクリート拘束効果が異なるため、これによって実験値と一般化累加強度との

対応に顕著な差が見られ、超高強度コンクリート充填鋼管柱の終局曲げ耐力は普通強度コンクリート充填鋼管柱の場合と同一の一般化累加強度式では扱えないことが示された。

コンクリート拘束効果を考慮したCFT柱の終局曲げ耐力式は既にいくつも提案されている⁴⁾⁻¹⁰⁾。さらに最近ではその適用範囲を広げるための研究も進められており、終局曲げ耐力を支配するコンクリート圧縮強度、鋼管強度、鋼管径厚比等に関し、幅広く適用できる終局曲げ耐力式も示されている。しかしながら、超高強度コンクリート充填鋼管柱に関しては、実験資料が少なくその終局曲げ耐力式はほとんど検討されていない。また、耐震構造部材としてのCFT柱では、その終局曲げ耐力は載荷速度の影響を受けるがこれについても考慮されていない。

本論では普通強度コンクリート充填鋼管柱から超高強度コンクリート充填鋼管柱まで幅広く適用できる終局曲げ耐力式を求めるとともに、耐震構造部材としてのCFT柱が受ける載荷速度効果と終局曲げ耐力式との関連について述べる。なお、ここで鋼管は冷間成形円形鋼管を表す。

* 熊本大学 教授・工博
** 熊本大学 大学院生

Prof., Kumamoto Univ., Dr. Eng.
Graduate Student, Kumamoto Univ.

2. CFT 短柱圧縮試験

2.1 試験体

鋼管と充填コンクリートの条件によって異なるコンクリート拘束効果を明らかにすることを目的とし、普通強度コンクリートから超高強度コンクリートまでコンクリート圧縮強度の異なる CFT 短柱圧縮試験を実施した³⁰⁾。

試験体は鋼管の材料と径厚比および充填コンクリート圧縮強度を実験変数とする合計 29 体で、これを表 1 に示す。試験体長さは全て鋼管外径の 3 倍である。試験体の充填コンクリートは超高強度コンクリート、高強度コンクリート及び普通強度コンクリートの 3 種類で、そのコンクリート圧縮強度 (σ_c) は超高強度コンクリートで $\sigma_c=1250\text{kgf/cm}^2$ 、高強度コンクリートで $\sigma_c=500\text{kgf/cm}^2$ 、普通強度コンクリートで $\sigma_c=250\text{kgf/cm}^2$ を目標として各々調査したもので、その調査と各試験体のコンクリート圧縮試験結果を表 2 と表 1 に示す。コンクリート材料試験には封緘養生した材料試験体を用いた。鋼管は冷間成形の円形鋼管で、材料は STK400, STK490 の 2 種類である。鋼管断面は $\phi-101.6\times 3.2$ (STK400), $\phi-139.8\times 2.8$ (STK400), $\phi-139.8\times 2.4$ (STK490) の 3 種類で、これらを各々径厚比 (D/t) 30, 50, 60 の鋼管と呼ぶことにする。これらの鋼管の引張試験および短柱圧縮試験結果によって求めた材料の機械的性質を表 3 に示す。引張試験には鋼管から切り出した JIS12 号試験片を用い、圧縮試験には柱長さが鋼管外径の 3 倍の鋼管短柱を用いた。表 3 中の降伏応力度 (σ_y, σ_{cy}) は 0.2% offset 値である。

2.2 試験方法

圧縮試験の荷重方法と測定方法を図 1 に示す。単純圧縮荷重となるように、試験体下端には球座を設けて予測される最大荷重の約 1/10 まで荷重した後、この球座の回転を固定することで試験体不整から生じる曲げ荷重を取り除くこととした。また、試験体端面の不整を取り除くため、端面を研磨した後荷重した。荷重は油圧試験機で与えたが、荷重速度の影響をできるだけ小さくするため、軸方向平均歪速度が $50\mu-200\mu/\text{分}$ の範囲で定速荷重となるように制御しながら荷重した。測定は、荷重 (P) を油圧試験機の荷重計で、また、試験体中央断面の鋼管表面軸方向歪と周方向歪を 2 方向歪ゲージ (WSG) で測定した。WSG の位置はシームの位置を除く管周四等分点上である。他に荷重速度制御のため試験体の軸方向縮みを変位計で測定した。

2.3 実験結果

荷重 (P) の最大値 (P_m) を表 1 にまとめて示す。普通強度コンクリート及び高強度コンクリート充填鋼管短柱では、 P_m は単純累加の

図 1 CFT 短柱圧縮試験概要

降伏圧縮強度 $P_y (= \sigma_c A_c + \sigma_y A_s, A_c: \text{充填コンクリート断面積}, A_s: \text{鋼管断面積})$ を越えているのに対して、超高強度コンクリート充填鋼管短柱では 2 体を除いていずれも P_y に達していない。これは CFT 短柱耐力に鋼管とコンクリートの相互作用が関わることを示すもので、以下ではこの挙動における鋼管応力状態に注目して、これが支配するコンクリート拘束効果を求める。

表 1 CFT 短柱圧縮試験体と実験結果

Specimen	D/t	σ_c	ϵ_c	ρ	P_y	P_m	σ_{ce}/σ_c
S-30.1	33.9	1194	0.36	1.99	120	114	1.05
S-30.2	33.9	1194	0.36	1.99	120	122	1.15
S-30.3	34.0	1384	0.35	2.32	134	121	0.98
S-50.1	50.2	1194	0.36	3.12	211	211	1.06
S-50.2	50.2	1194	0.36	3.12	211	200	1.00
S-50.3	50.2	1384	0.35	3.62	238	213	0.92
S-50.4	50.2	1384	0.35	3.62	238	209	0.90
S-50.5	50.2	1384	0.35	3.62	238	212	0.92
S-60.1	59.1	1384	0.35	3.47	247	222	0.95
S-60.2	59.1	1384	0.35	3.47	247	218	0.93
S-60.3	59.1	1384	0.35	3.47	247	221	0.95
H-30.1	34.0	637	0.24	1.07	81	94	1.55
H-30.2	34.0	637	0.24	1.07	81	94	1.55
H-30.3	34.3	637	0.24	1.08	82	92	1.46
H-50.1	50.2	585	0.23	1.53	125	135	1.25
H-50.2	50.2	585	0.23	1.53	125	142	1.33
H-50.3	50.2	585	0.23	1.53	125	134	1.24
H-60.1	59.1	637	0.24	1.60	140	159	1.38
H-60.2	59.1	722	0.34	1.81	152	161	1.23
H-60.3	59.1	722	0.34	1.81	152	161	1.23
H-60.4	59.1	722	0.34	1.81	152	166	1.28
L-30.1	34.3	259	0.42	0.44	54	69	2.38
L-30.2	34.0	283	0.37	0.47	55	73	2.40
L-30.3	34.0	300	0.39	0.50	57	73	2.27
L-50.1	50.2	259	0.42	0.67	78	95	1.73
L-50.2	50.2	283	0.37	0.67	78	97	1.79
L-60.1	59.1	283	0.37	0.71	89	112	1.94
L-60.2	59.1	283	0.37	0.71	89	113	1.96
L-60.3	59.1	283	0.37	0.71	89	110	1.90

試験体名の表示

S-30.1
1-2.3

1: コンクリート圧縮強度

S: 超高強度コンクリート

H: 高強度コンクリート

L: 普通強度コンクリート

2: 鋼管径厚比 ($D/t=30, 50, 60$)

3: 試験体番号

D/t : 鋼管径厚比

σ_c : コンクリート圧縮強度 (kgf/cm^2)

ϵ_c : コンクリート圧縮強度歪 (%)

ρ : コンクリート鋼管強度比

($=\sigma_c A_c / \sigma_u A_s$)

P_y : 降伏圧縮強度 ($=\sigma_c A_c + \sigma_y A_s$) (tf)

P_m : 最大圧縮荷重 (tf)

σ_{ce}/σ_c : 拘束コンクリート圧縮強度比

表 2 充填コンクリートの調合 (絶対比重)

コンクリート	$\frac{W}{C+SF}$	重量割合 (kg/m^3)					
		W	C	SF	FA	CA	AD
超高強度コンクリート	20	150	625	125	568	1010	22
高強度コンクリート	35	194	555	-	591	1087	5
普通強度コンクリート	60	216	360	-	762	1063	-

W: 水, C: セメント, SF: シリカフューム, FA: 細骨材, CA: 粗骨材, AD: 混和剤

表 3 鋼管の機械的性質

円形鋼管	引張試験			短柱圧縮試験		
	σ_y	σ_u	ϵ_u	$c\sigma_y$	$c\sigma_u$	$c\epsilon_u$
$\phi-101.6\times 3.2$	3.85	4.64	23.8	3.77	4.27	2.05
$\phi-139.8\times 2.8$	3.48	4.52	28.8	3.34	3.60	0.86
$\phi-139.8\times 2.4$	4.72	5.60	22.6	4.38	4.74	0.79

σ_y : 引張降伏応力度 (tf/cm^2)

σ_u : 引張強さ (tf/cm^2)

ϵ_u : 一様伸び (%)

$c\sigma_y$: 圧縮降伏応力度 (tf/cm^2)

$c\sigma_u$: 最大圧縮応力度 (tf/cm^2)

$c\epsilon_u$: 最大圧縮応力時の圧縮歪 (%)

3 CFT 短柱の圧縮挙動

3.1 鋼管歪と鋼管応力度

各試験体の鋼管表面歪を充填コンクリートと鋼管の違いに関係なく同じ座標上に表したものを図2に示す。各値は鋼管表面に貼った4枚の歪ゲージの平均値である。横軸は軸方向歪(ϵ_A)で、縦軸に周方向歪(ϵ_T)を表した場合を●印で、また、周方向と軸方向の歪増分比($\Delta\epsilon_T/\Delta\epsilon_A$)の値を表した場合を○印で示す。

鋼管歪は $\epsilon_A = -\epsilon_y$ (ϵ_y : 引張降伏歪)に至るまでは弾性的に挙動し、 ϵ_A が降伏点に達した後は、 $\epsilon_A - \epsilon_T$ 関係は勾配を変えていずれも直線的となっている。鋼管降伏後に歪増分比 $\Delta\epsilon_T/\Delta\epsilon_A$ 値がほぼ一定値となる挙動は、これまでの実験結果に共通して認められる挙動で既に報告された¹¹⁾⁻¹²⁾とおりであるが、さらに詳細に $\epsilon_A - \epsilon_T$ 関係を見ると次のとおりである。即ち、いずれの試験体も鋼管が降伏すると $|\Delta\epsilon_T/\Delta\epsilon_A|$ 値が急増し、その後も $|\Delta\epsilon_T/\Delta\epsilon_A|$ 値は徐々に増加を続け、 $\Delta\epsilon_T = -\Delta\epsilon_A$ の状態にまで達するか、あるいは、 $\Delta\epsilon_T = -\Delta\epsilon_A$ の状態に達しない場合も軸方向圧縮歪の増加とともにこの状態に漸近している。

次に Mises の降伏条件によって鋼管応力度を求める。鋼管の歪硬化後の降伏条件を Mises の降伏条件式で(1)式のように表すことにする。

$$\sigma_A^2 - \sigma_A \sigma_T + \sigma_T^2 = \sigma_u^2 \quad (1)$$

ここで σ_A , σ_T は鋼管の軸方向応力度と周方向応力度で、 σ_u は鋼管の引張強さである。冷間成形鋼管の応力度歪関係はラウンドハウ

図2 鋼管軸方向歪と周方向歪及び歪増分比の関係

図3 鋼管軸方向歪と軸方向及び周方向応力度の関係

ス型で降伏直後からの歪硬化が顕著であり、応力度歪関係は塑性域の応力度を σ_u とする完全弾塑性モデルでほぼ近似できる³⁰⁾。この理由によって、ここでは降伏条件式を鋼管引張強さ(σ_u)で定義する。この場合の鋼管軸方向応力度増分($\Delta\sigma_A$)と周方向応力度増分($\Delta\sigma_T$)に関する構成方程式は、(1)式の降伏条件を塑性ポテンシャルとして次式のように表される。

$$\{\Delta\sigma\} = [D^p]\{\Delta\epsilon\} \quad (2)$$

但し、 $\{\Delta\sigma\} = [\Delta\sigma_A \ \Delta\sigma_T]^T$, $\{\Delta\epsilon\} = [\Delta\epsilon_A \ \Delta\epsilon_T]^T$, $[D^p]$: 弾塑性剛性行列である。また、歪硬化後の状態を考えているため、(2)式に歪硬化成分は含まれていない。

(2)式によると、 $\sigma_A = -\sigma_u/\sqrt{3}$, $\sigma_T = \sigma_u/\sqrt{3}$ の状態に $\Delta\epsilon_T = -\Delta\epsilon_A$ の条件を与えると(3)式となる。

$$\{\Delta\sigma\} = \{0\} \quad (3)$$

いま、歪増分比 $\Delta\epsilon_T/\Delta\epsilon_A$ 値が図2の破線で表される場合、即ち、 $-1 < \epsilon_A/\epsilon_y < 0$ の範囲で $\Delta\epsilon_T/\Delta\epsilon_A = -v$ ($v = -0.3$, v : ポアソン比)、 $\epsilon_A/\epsilon_y < -1$ の範囲で $\Delta\epsilon_T/\Delta\epsilon_A = 1.0$ となる場合の鋼管応力度(σ_A , σ_T)を(2)式によって求めると、(4)式の値に達した後(3)式の条件によってこの点に停留する。

$$\sigma_A = -\sigma_u/\sqrt{3}, \quad \sigma_T = \sigma_u/\sqrt{3} \quad (4)$$

この状態を表したのが図3の実線である。図3は鋼管軸方向歪(ϵ_A)に対する鋼管応力度(σ_A , σ_T)の変化を表したもので、この図には実験値の鋼管歪(ϵ_A , ϵ_T) (図2)に対する鋼管応力度(σ_A , σ_T)を(2)式によって計算した値も●印と○印で示している。その結果は、いずれの試験体においても鋼管圧縮歪が増加すると実線と同じく σ_A , σ_T は(4)式の値に達するか、あるいはこの値に漸近する結果となっている。即ち、鋼管の軸方向塑性歪が充分大きくなると鋼管応力度は(4)式の値で近似できることを示している。

3.2 拘束コンクリート圧縮強度(σ_{cc})

鋼管応力度を(4)式で近似して、鋼管から拘束を受けるコンクリート圧縮強度(以後、拘束コンクリート圧縮強度と呼ぶ)を求め。拘束コンクリート圧縮強度はCFT短柱が最大荷重に達した時のコンクリート応力度とし、この値をCFT短柱の最大荷重(P_m)から鋼管応力を差し引くことにより(5)式で求める。

$$\sigma_{cc} = \{P_m - (\sigma_u/\sqrt{3}) A_s\} / A_c \quad (5)$$

但し、充填コンクリートと鋼管の関係によっては、鋼管応力度が(4)式の値に達する以前にCFT短柱の圧縮荷重が最大荷重となる場合がある³⁰⁾。この場合 σ_{cc} は実際の拘束コンクリート圧縮強度を表さずこれに相当する値となるが、ここではこれを拘束コンクリート圧縮強度と呼ぶこととする。各短柱圧縮試験体について、拘束コンクリート圧縮強度(σ_{cc})と材料試験のコンクリート圧縮強度(σ_c)との比を求めて図4に示す。図の横軸は鋼管と充填コンクリートの強度比 $1/\rho = (\sigma_u A_s / \sigma_c A_c)$ である。実験値はほぼ直線分布し、図中に破線で示す(6)式で良好に近似できる。

$$\sigma_{cc}/\sigma_c = 0.76/\rho + 0.76 \quad (6)$$

但し $\rho = \sigma_c A_c / \sigma_u A_s$ で $\rho \neq 0$ とする。図5も同じ σ_{cc}/σ_c を表したもので、図4の値(●印)の他に既報のCFT短柱圧縮試験の試験結果¹³⁾⁻²³⁾を○印で示す。引用したのは本論と同じ載荷条件で実施された冷間成形円形鋼管のCFT短柱圧縮試験で、鋼管の引張強さ(σ_u)

が明示されている合計 85 体の試験結果である。各試験体のコンクリート圧縮強度 (σ_c) は $176\text{kgf/cm}^2 < \sigma_c < 1842\text{kgf/cm}^2$ 、鋼管降伏応力度 (σ_y) は $2.84\text{tf/cm}^2 < \sigma_y < 8.51\text{tf/cm}^2$ 、鋼管外径 (D) は $101.6\text{mm} < D < 450.0\text{mm}$ 、鋼管径厚比 (D/t) は $16.7 < D/t < 152.0$ で、その試験範囲は極めて幅広い。これに対して図 5 に示す結果はほぼ直線分布しており、(6) 式の妥当性とともこの直線関係が幅広い CFT 短柱においても成立することが示されている。

なお、CFT 短柱の拘束効果によるコンクリートの強度上昇は、拘束係数 (K) と充填コンクリート表面に作用する拘束応力度 (σ_r) との積 ($K\sigma_r$) で表される場合が多く^{1), 5), 11), 24)-25)}、その拘束応力度と鋼管応力度は Mises の降伏条件に従って求められている。この手法は一般に CFT 短柱の最大圧縮荷重 (P_m) が $P_y (= \sigma_c A_c + \sigma_y A_s)$ を上回る場合を対象とするもので、 $P_m < P_y$ の場合、即ち、鋼管径厚比が大きい場合¹⁸⁾ や超高強度コンクリートを充填した場合³⁰⁾ の CFT 短柱では条件によって最大圧縮荷重が P_y 以下になるが、これらに対してこの手法は適用できない。これと異なり (6) 式は $P_m < P_y$ の場合も適用可能な近似式である。

4 CFT 柱の終局曲げ耐力実験

CFT 柱の終局曲げ耐力式を導き、且つ、その終局曲げ耐力式の妥当性を検討するために、既に報告した CFT セン断曲げ柱の実験結果²⁶⁾⁻²⁹⁾ を用いる。その実験概要は以下のとおりである。CFT セン断曲げ柱実験は多層剛節骨組の柱部材を想定し、一定軸力と繰り返し

図 4 拘束コンクリート圧縮強度の実験値と近似式

図 5 既報¹³⁾⁻²³⁾の実験値と拘束コンクリート圧縮強度近似式との比較

図 6 CFT 柱試験体

せん断曲げ荷重を受ける部材が実験対象である。柱の終局曲げ耐力は柱端の条件、即ち、柱はり接合部の条件によって影響をうけるため、試験体は図 6 のような円形鋼管の CFT 柱と H 形鋼はりで構成される十字型試験体である。試験対象は CFT 柱部分であるため、H 形鋼はりおよび接合部のリングスチフナーには十分な強度を与えて、試験終了まで弾性範囲におさまるように設計した。鋼管柱の両端にはエンドプレートと溶接し、鋼管と充填コンクリートの間のずれに対してはこのエンドプレートで拘束する。CFT 柱部材の終局曲げ耐力と終局状態に関わる変数として、鋼管の材料と径厚比、充填コンクリート圧縮強度、柱軸力比、柱長さ、載荷速度、載荷履歴を想定し、これらを実験変数とする合計 70 体の試験体について実験した。各試験体の試験条件を表 4 に示す。充填コンクリートは 2 節の短柱試験体と同じ調合で、その圧縮強度は表 4 に示すとおりである。また、鋼管も前述の短柱圧縮試験と同じ鋼管を用いた。試験体の荷重条件と支持条件は図 7 に示すように、柱端がピン支持、はり両端がローラー支持という支持条件で、柱他端に一定軸力 (N) と横力 (F) を作用させるものである。載荷速度が終局曲げ耐力に及ぼす影響を知る目的で、横力を動載荷する実験と静載荷する実験を実施した。実験結果の例を図 8 と図 9 に示す。図は柱脚に作用する曲げ荷重 $M_c (= N\delta_c + FL_c)$ と柱変形角 (δ_c/L_c) で表した荷重変形関係で、図中、矢印は鋼管局部座屈発生点 (LB)、最大曲げ荷重点 (M_m) 及び終局状態の鋼管亀裂発生点 (Crack) を表す。これらの図に見られるように、本実験では鋼管局部座屈は柱変形角の振幅が $\delta_c/L_c = 1/30 \sim 1/20$ の範囲で発生しているが、これによる顕著な耐力劣化は認められず、鋼管局部座屈が最大曲げ荷重を直接支配していない。図 8 は普通強度コンクリートから超高強度コンクリートまで充填コンクリート圧縮強度が互いに異なる場合の実験結果で、図 9 は動載荷実験値と静載荷実験値の比較であるが、最大曲げ荷重点 (M_m) までに注目する限り、いずれもその復元力特性は互によく似た形状となることがわかる。そこで、荷重の向き及び変位履歴上の位置に関係なく荷重の最大値 (M_m) を求め、この値をまとめて表 4 に示す。なお、一定軸力と繰り返し横力を受ける CFT 柱では、一定軸力保持不能と

図 7 試験条件
(荷重条件と支持条件)

図8 荷重変形関係 (コンクリート強度が異なる場合)

図9 動載荷実験と静載荷実験の荷重変形関係

なり終局状態になる場合と鋼管に亀裂が発生し終局状態となる場合がある²⁹⁾。前者は試験終了まで曲げ耐力が上昇を続けて最大曲げ荷重が得られないため、ここでは後者の試験結果のみを表4に示す。但し、コンクリートを充填しない試験体については最大曲げ荷重が読み取れるためこれらを含める。

5 繰り返し荷重を受ける CFT 柱の鋼管歪と鋼管応力度

CFT 柱が繰り返し荷重を受ける場合、その曲げ圧縮断面の挙動と CFT 短柱圧縮挙動がいかに対応するかは明確でないため、ここでは CFT 柱の実験で得られた鋼管の歪を使って両者の関係を検討し、終局曲げ耐力時の鋼管の応力状態とコンクリート拘束効果を求める。

CFT 柱の鋼管表面軸方向歪 (ϵ_A) と周方向歪 (ϵ_T) の関係を図10に示す。この歪は柱脚から 30mm (但し鋼管径厚比 $D/t=50$ の場合) の鋼管表面に貼った2方向歪ゲージ (WSG1, WSG2) から求めた値で、

図中の太線と細線は荷重面内の鋼管両側の歪を表す。この歪ゲージ位置には鋼管局部座屈が発生するが、図の歪は局部座屈発生前までの値である。図中の破線は CFT 短柱圧縮試験の歪増分関係 (図2) に破線で示した場合の値であるが、せん断曲げ荷重を受ける CFT 柱においても同様な挙動が見られる。即ち、せん断曲げ荷重が繰り返し作用する場合も、繰り返し数と塑性歪振幅に関係なく、軸方向圧縮歪が増加すると ($\Delta\epsilon_A < 0$)、 $|\Delta\epsilon_T/\Delta\epsilon_A|$ 値は徐々に増加を続け、やがて、 $\Delta\epsilon_T = -\Delta\epsilon_A$ の関係が現われ、ほぼその状態が継続している。あるいは、この状態に達していない場合も、この状態に $\epsilon_A - \epsilon_T$ 関係は漸近している。この性状はコンクリート鋼管強度比 (p) が異なるいずれの試験体にも共通して現われている。

図10の $\epsilon_A - \epsilon_T$ 関係に対して、鋼管軸方向応力度 (σ_A) と周方向応力度 (σ_T) を (2) 式によって計算した結果が図11で、図中の○印と●印は各々図10の細線 (WSG1) と太線 (WSG2) の歪に対する鋼管応

図10 鋼管の軸方向歪と周方向歪の関係

図11 鋼管の軸方向応力度と周方向応力度の履歴

力度を表す。実線は(1)式の Mises の降伏条件である。図には概略以下の性状が認められる。即ち、交番繰り返し塑性変形を受ける各試験体では、鋼管軸方向応力度(σ_A)が正負交互に降伏し、各サイクル毎に $T(2\tau, \tau) \rightarrow P_1(1, 0) \rightarrow P_2(-1, 0) \rightarrow C(-\tau, \tau)$ の履歴を描きながら C 点近傍と T 点近傍を往復する(但し $\tau=1/\sqrt{3}$)。とくに、軸方向圧縮歪が進み充分塑性化した状態では、鋼管応力度(σ_A, σ_T)は $C(-\sigma_u/\sqrt{3}, \sigma_u/\sqrt{3})$ 点の近傍に停留している。これは、塑性変形が充分進んだ状態において、繰り返し荷重を受ける CFT 柱の鋼管圧縮応力度が、CFT 短柱圧縮試験の鋼管とほぼ同じ応力状態となることを意味する。これらの結果に基づくと、CFT 柱の終局曲げ耐力時の応力状態を次の応力状態で近似できる。

- i) 鋼管の軸方向圧縮応力度は $\sigma_u/\sqrt{3}$ で、軸方向引張応力度は $2\sigma_u/\sqrt{3}$ である。
- ii) 充填コンクリートは短柱の最大圧縮荷重時と同じ拘束を受けて、拘束コンクリート圧縮強度は(6)式の σ_{ce} 値となる。

6 CFT 柱の終局曲げ耐力

繰り返し荷重を受ける CFT 柱が終局曲げ耐力に達した時の応力状態を前節の i) と ii) の条件に基づいて表し、且つ、その応力度分布を鋼管も充填コンクリートともに矩形分布とすると、図 12 の断面応力状態となる。これに一般化累加強度式を適用して(7)式の終局曲げ耐力(M_{ue})を得る。

$$\begin{aligned} M_{ue} &= M_{uec} + M_{ues} \\ N &= N_c + N_s \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 M_{uec}, M_{ues} は図 12 の全塑性応力状態における各々コンクリートと鋼管の終局曲げ耐力であり、 N_c, N_s は同じ応力状態でのコンクリートと鋼管の軸力を各々表す。

この M_{ue} 値と実験結果(M_m)を比較して表 4 に示す。また、同じ結果を図 13 と図 14 に●印で示す。図の横軸はコンクリート拘束効果を表す変数として(6)式で導入した充填コンクリートと鋼管の強度比(ρ)である。

図 13 と図 14 にはコンクリート圧縮強度(σ_c)と鋼管降伏応力度(σ_y)でコンクリートと鋼管の耐力を表し、一般化累加強度式で計算した終局曲げ耐力(M_u)を○印で示す。 M_u 値には鋼管の歪硬化及びコンクリート拘束効果が含まれていないため、当然のことながら、これらが原因となって実験値との対応は良くない。その値はコンクリート鋼管強度比(ρ)によって異なり、 $1.12 \leq M_m/M_u \leq 1.94$ と幅広い。とくに、高強度コンクリート充填鋼管柱あるいは超高強度コンクリート充填鋼管柱、即ち、コンクリート鋼管強度比(ρ)が大きい範囲において実験値は計算値を上まわるものの割合が小さく、単純に一般化累加強度(M_u)を普通強度コンクリート充填鋼管柱から超高強度コンクリート充填鋼管柱まで一律に適用できないことが示されている。

これに対して M_{ue} 値は $0.95 \leq M_m/M_{ue} \leq 1.44$ で M_m/M_u 値に比較して良い結果となっている。とくに、 M_m/M_{ue} 値は普通強度コンクリートから超高強度コンクリートまで充填するコンクリート圧縮強度にほとんど影響を受けない結果となっており、この点で M_m/M_u 値と異なる。

図 9 に示したように CFT 柱の最大曲げ荷重は載荷速度の影響を

図 12 終局曲げ耐力時の CFT 断面応力状態

受ける。この載荷速度効果による最大曲げ荷重の違いを区別して示したのが図 13 と図 14 で、前者は静載荷実験結果で後者は動載荷実験結果である。両者を比較すると載荷速度効果によって M_m/M_u 値と M_m/M_{ue} 値が増加する挙動が明らかに認められる。

また、CFT 柱の実験はせん断曲げ荷重を与える実験で、その最大曲げ荷重を求めるに際しては、柱脚に作用する曲げ荷重(M_c)の最大値を最大曲げ荷重とした。既に指摘されているように⁶⁾、柱脚では溶接による断面増加とリングスチフナーからの拘束があって柱断面の曲げ耐力は高くなり、柱脚からある程度離れた部材断面が限界に達することで CFT 柱の最大曲げ荷重(M_m)が決まっている。このモーメント勾配の影響を求めるため、実験ではシアースパン比が約

図 13 終局曲げ耐力計算値と静載荷実験値の比較

図 14 終局曲げ耐力計算値と動載荷実験値の比較

2.5の試験体とシアースパン比が約5.0の試験体を用意したが、図13と図14の結果には両者の差が明確に現われている。

結局、 M_{uc} 式ではこの載荷速度効果とモーメント勾配の影響を無視しているため、これらが M_m 値と M_{uc} 値の差の原因となっている。現実に剛節骨組の柱を対象とする限り載荷速度効果とモーメント勾配の影響を受けることは不可避であり、これは今後の課題である。しかし、その影響の範囲は図13と図14に示す程度であり、 M_{uc} 式は充分有効な終局曲げ耐力式である。

なお、コンクリートを充填しない鋼管柱($\rho=0$)の M_{uc} 計算では鋼管断面応力度分布を引張強さ σ_u の矩形分布としたが、CFT柱と同様に良い結果となった。

7 結論

i) CFT短柱圧縮試験の鋼管軸方向歪と周方向歪の特性に注目し、拘束コンクリート圧縮強度式を求めた。この式は鋼管コンクリート強度比に関する直線式で、普通強度コンクリート充填鋼管短柱から超高強度コンクリート充填鋼管短柱まで幅広いCFT短柱に対してコンクリート拘束効果を表わすことができる。

ii) 拘束コンクリート圧縮強度式を一般化累加強度式に適用し、CFT柱の終局曲げ耐力式を導いた。この式は普通強度コンクリート充填鋼管柱から超高強度コンクリート充填鋼管柱まで幅広いCFT柱を対象とし、繰り返し荷重を受けるCFT柱の終局曲げ耐力を求めるのに有効である。但し、CFT柱の終局曲げ耐力が受ける載荷速度効果とモーメント勾配の影響はこの式には含まれてない。

表 4.A 試験体と実験結果 ($\phi 139.8 \times 2.4$ の試験体)

Specimen	Loading	N/ N_u	L_c	D/t	σ_c	ρ	M_m	M_m/M_u	M_m/M_{uc}
SCTDI-S-60.20	D I	0.199	36.3	58.1	1379	3.40	571	1.27	1.18
SCTDI-S-60.10	" "	0.103	36.3	58.1	1379	3.40	481	1.25	1.10
SCTDI-H-60.20	" "	0.161	36.3	57.7	725	1.77	415	1.21	1.06
SCTDI-L-60.45	" "	0.437	36.2	57.9	402	0.99	451	1.64	1.37
SCTDI-L-60.25	" "	0.226	36.2	57.9	402	0.99	402	1.34	1.15
SCTDI-L-60.20	" "	0.174	36.2	57.9	402	0.99	383	1.30	1.10
SCTDC-S-60.20	D C	0.198	36.3	57.4	1379	3.35	585	1.30	1.21
SCTDC-S-60.10	" "	0.102	36.3	57.4	1379	3.35	501	1.29	1.14
SCTDC-H-60.20	" "	0.161	36.3	57.7	725	1.77	421	1.23	1.08
SCTDC-L-60.45	" "	0.450	36.2	57.9	402	0.99	467	1.72	1.44
SCTDC-L-60.20	" "	0.200	36.3	57.9	402	0.99	414	1.39	1.39
STDC-O-60.45	" "	0.445	36.3	57.9	-	0.00	204	1.39	1.03
SCTSC-S-60.20	S C	0.198	36.3	57.4	1379	3.35	544	1.20	1.12
SCTSC-S-60.10	" "	0.100	36.3	57.4	1201	2.92	452	1.23	1.07
SCTSC-H-60.20	" "	0.161	36.2	57.7	725	1.77	409	1.19	1.05
SCTSC-L-60.45	" "	0.450	36.2	57.9	402	0.99	410	1.51	1.26
SCTSC-L-60.20	" "	0.200	36.2	57.9	402	0.99	377	1.27	1.08
SCTDR-S-60.20	D R	0.199	36.3	58.1	1379	3.40	565	1.26	1.17
SCTDR-H-60.20	" "	0.200	36.3	58.1	725	1.79	444	1.26	1.13
SCTDR-L-60.20	" "	0.200	36.2	57.9	402	0.99	408	1.37	1.17
LCTDI-S-60.20	D I	0.203	72.6	58.6	1155	2.87	472	1.13	1.05
LCTDI-S-60.10	" "	0.101	72.5	58.7	1155	2.87	429	1.19	1.04
LCTDI-L-60.35	" "	0.350	72.6	58.6	450	1.12	436	1.44	1.25
LCTDI-L-60.25	" "	0.250	72.6	58.6	450	1.12	360	1.17	1.02
LCTDC-S-60.20	D C	0.203	72.5	58.7	1155	2.87	490	1.17	1.08
LCTDC-S-60.10	" "	0.101	72.5	58.6	1155	2.87	443	1.23	1.07
LCTDC-L-60.35	" "	0.350	72.5	58.6	450	1.12	426	1.41	1.23
LCTDC-L-60.25	" "	0.250	72.7	58.6	450	1.12	384	1.25	1.09
LCTSC-S-60.10	S C	0.101	72.6	58.6	1155	2.87	402	1.12	0.97

表 4.B 試験体と実験結果 ($\phi 139.8 \times 2.8$ の試験体)

Specimen	Loading	N/ N_u	L_c	D/t	σ_c	ρ	M_m	M_m/M_u	M_m/M_{uc}
SCTDI-S-50.25	D I	0.227	36.2	50.4	1194	3.14	524	1.32	1.19
SCTDI-S-50.10	" "	0.117	36.3	50.4	1194	3.14	471	1.39	1.17
SCTDI-H-50.35	" "	0.370	36.3	50.4	585	1.54	479	1.61	1.38
SCTDI-H-50.20	" "	0.191	36.2	50.4	585	1.54	442	1.51	1.26
SCTDI-L-50.45	" "	0.449	36.3	50.4	302	0.79	415	1.94	1.43
SCTDI-L-50.25	" "	0.250	36.2	50.5	359	0.94	389	1.52	1.22
STDI-O-50.50	" "	0.485	36.2	50.5	-	0.00	189	1.87	1.10
SCTSI-S-50.25	S I	0.227	36.2	50.4	1194	3.14	485	1.22	1.10
SCTSI-S-50.10	" "	0.117	36.2	50.4	1194	3.14	426	1.26	1.06
SCTSI-H-50.20	" "	0.191	36.2	50.4	585	1.54	398	1.36	1.13
SCTSI-L-50.25	" "	0.250	36.2	50.5	359	0.94	359	1.40	1.12
SCTSI-L-50.20	" "	0.193	36.2	50.4	359	0.94	353	1.39	1.11
STSI-O-50.50	" "	0.485	36.2	50.5	-	0.00	162	1.61	0.95
SCTDC-S-50.25	D C	0.250	36.2	50.5	1201	3.19	575	1.41	1.29
SCTDC-S-50.10	" "	0.100	36.3	50.5	1201	3.16	480	1.46	1.21
SCTDC-H-50.25	" "	0.250	36.3	50.4	724	1.90	485	1.49	1.29
SCTDC-L-50.45	" "	0.449	36.2	50.4	302	0.79	409	1.91	1.41
SCTDC-L-50.25	" "	0.249	36.3	50.4	302	0.79	381	1.56	1.23
SCTSC-S-50.25	S C	0.250	36.3	50.5	1201	3.16	514	1.26	1.15
LCTDI-S-50.20	D I	0.200	72.4	50.5	1155	3.04	443	1.17	1.03
LCTDI-S-50.10	" "	0.100	72.5	50.4	1155	3.03	388	1.20	0.99
LCTDI-L-50.25	" "	0.205	72.6	50.5	429	1.13	337	1.26	1.02
LCTDC-S-50.20	D C	0.200	72.8	50.5	1146	3.01	445	1.18	1.04
LCTDC-S-50.10	" "	0.100	72.6	50.5	1146	3.01	419	1.30	1.07
LCTDC-L-50.25	" "	0.250	72.5	50.5	429	1.13	350	1.29	1.06

表 4.C 試験体と実験結果 ($\phi 101.6 \times 3.2$ の試験体)

Specimen	Loading	N/N _u	L _c	D/t	σ_c	ρ	M _m	M _m /M _u	M _m /M _{ue}
SCTDI-S-30.25	D I	0.247	25.0	34.2	1383	2.33	301	1.46	1.34
SCTDI-S-30.10	" "	0.108	24.9	34.2	1308	2.20	251	1.43	1.23
SCTDI-H-30.20	" "	0.196	25.0	34.0	446	0.75	221	1.52	1.26
SCTDI-L-30.25	" "	0.264	24.9	34.0	180	0.30	221	1.84	1.39
SCTSI-S-30.25	S I	0.248	25.0	34.2	1383	2.33	249	1.21	1.11
SCTSI-S-30.10	" "	0.108	24.9	34.2	1308	2.20	234	1.33	1.14
SCTSI-H-30.20	" "	0.197	25.0	34.0	446	0.75	221	1.53	1.27
STDI-O-30.35	D I	0.346	24.9	34.2	-	0.00	139	1.58	1.21
STDR-O-30.35	D R	0.345	24.9	34.3	-	0.00	133	1.49	1.15
STSI-O-30.35	S I	0.345	24.9	34.2	-	0.00	119	1.34	1.03
STSR-O-30.35	S R	0.346	24.9	34.2	-	0.00	123	1.38	1.07
LCTDI-S-30.25	D I	0.254	50.2	34.2	1336	2.25	276	1.36	1.25
LTDI-O-30.35	D I	0.346	50.1	34.2	-	0.00	123	1.39	1.07
LTDI-O-30.35	D R	0.346	50.0	34.2	-	0.00	130	1.47	1.13
LTSI-O-30.35	S I	0.345	50.0	34.3	-	0.00	111	1.25	0.97
LTSR-O-30.35	S R	0.345	50.1	34.3	-	0.00	124	1.39	1.07

試験体名の表示

S CT D I-S-60.20
1 2 3 4-5-6 .7

- 1: 柱長さ ($S: L_c/D=2.5, L: L_c/D=5.0$)
 2: 鋼管 (T), コンクリート充填鋼管 (CT)
 3: 静荷重 (S), 動荷重 (D)
 4: 時刻歴変位波形
 I: 漸増振幅交番繰り返し変位,
 C: 定振幅交番繰り返し変位,
 R: 不規則変位
 5: コンクリート圧縮強度 (S, H, L)
 6: 鋼管径厚比 ($D/t=30, 50, 60$)
 7: 軸力比 ($N/N_u, N_u=\sigma_c A_c + \sigma_u A_s$)

- L_c : 柱長 (cm)
 D/t : 鋼管径厚比
 σ_c : コンクリート圧縮強度 (kgf/cm^2)
 ρ : コンクリート鋼管強度比 ($=\sigma_c A_c / \sigma_u A_s$)
 M_m : 最大曲げ荷重 ($tf \cdot cm$)
 M_u : 一般化累加強度式の終局曲げ耐力
 M_{ue} : (7) 式の終局曲げ耐力

謝辞 本研究は平成 8-10 年度文部省科学研究費 (基盤研究 (B) 研究代表者 最相元雄) による研究の一部である。又、試験体の製作に際しては住友金属工業株式会社の協力を得た。記して感謝致します。

参考文献

- 岡本達雄, 前野敏元, 益尾潔, 西澤英和, 金多 潔: 高強度遠心成形鋼管コンクリート柱の圧縮耐力に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 469 号, 1995.3.
- 宮木聡, 松井千秋, 畑戸龍夫, 今村輝武, 吉野茂, 中克己: 遠心成形コンクリート充填鋼管柱の耐力・変形性能, 日本建築学会構造系論文集, 第 500 号, 1997.10.
- 藤本利昭, 向井昭義, 西山功, 稲井栄一, 甲斐誠, 時野谷浩良, 馬場武志, 福元敏之, 森浩二, 崎野健治, 森野捷輔: 高強度材料を用いたコンクリート充てん鋼管柱の曲げせん断性状, 日本建築学会構造系論文集, 第 509 号, 1998.7.
- 越智敏夫, 辻文三, 中島正愛, 楊柳, 遠藤創: 水平力を受ける円形コンクリート充填鋼管柱の復元力特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1992.8.
- 吉野茂, 畑戸龍夫, 多賀章, 今村輝武, 渡辺朋之, 宮木聡: 鋼管コンクリート構造の開発 その 6, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1993.9.
- 佐藤孝典, 金本清臣: 充填鋼管コンクリート構造における鋼とコンクリートの分担力抽出のための変形経路再現実験, 日本建築学会構造系論文集, 第 468 号, 1995.2.
- 加藤勉: 曲げと圧縮をうけるコンクリート充填鋼管柱の耐力, 変形能力 (コンクリート充填鋼管柱の耐力, 変形能力の研究, II), 日本建築学会構造系論文集, 第 477 号, 1995.11.
- 佐藤孝典: 充填鋼管コンクリート柱の部材耐力の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1997.9.
- 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.
- 崎野健治, 蛭川利彦: ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究 (CFT-35) 円形 CFT 柱の終局曲げ耐力算定式の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998.9.
- 富井政英, 吉村浩二, 森下陽一, 吹原正見: 中心圧縮を受けるコンクリート充填鋼管短柱に関する研究 (その 1-2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1977.10.
- 越智敏夫, 辻文三, 中島正愛, 楊柳, 森田晋治: コンクリート充填鋼管柱の曲げ座屈耐力 (その 1-2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1991.9.
- 北田俊行, 吉田康樹, 中井博: コンクリートを充填した鋼管短柱の弾塑性挙動に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.34A, 1988.3.
- 山口育雄, 菅野俊介, 長嶋俊雄, 平出亨, 沢田博: 充てん型鋼管コンクリート短柱の中心圧縮性状 その 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1988.10.
- 上遠野明夫, 山口種美: 充填型鋼管コンクリート柱に関する研究 その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1989.10.
- 田中清他: 合成短柱の力学性状に関する研究 その 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1989.10.
- 渡辺朋之, 多賀章, 岩岡信一: 鋼管コンクリート構造の開発 その 4, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1993.9.
- 時野谷浩良, 田中義成, 福本昇, 村田義行, 藤本利明, 向井昭義: ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究 (CFT-3) コンクリート充てん鋼管柱の軸圧縮 その 3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1995.8.
- 馬場武志, 藤本利昭, 向井昭義, 西山功, ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究 (CFT-10), コンクリート充てん鋼管柱の曲げせん断性状 その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1996.9.
- 前野敏元他, 160N/mm² 級のコンクリートを用いたコンクリート充填鋼管柱の中心圧縮実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1996.9.
- 植坂武史, 吉川祐三, 齊藤啓一, 古海賢二, 小浜洋輔, 清水孝悦: 冷間成形円形鋼管と高強度コンクリートを用いた充填型鋼管コンクリート構造の実験的研究 その 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1996.9.
- 小松慎二, 蛭川利彦, 崎野健治, 石出一郎: コンクリート充填円形鋼管柱の弾塑性性状に関する研究 その 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1996.9.
- 大塚貴弘, 鈴木敏郎, 元結正次郎, 太田秀彦: 軸圧縮を受けるコンクリート充填円形鋼管短柱の力学的特性に関する研究 その 1-3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1997.9.
- 佐藤孝典: 円形断面の充填鋼管コンクリート構造におけるコンファインド効果のメカニズムとそのモデル化, 日本建築学会構造系論文集, 第 452 号, 1993.10.
- 蛭川利彦, 小松慎二, 崎野健治: 中心圧縮力を受けるコンクリート充填円形鋼管短柱における拘束効果, 日本建築学会構造系論文集, 第 506 号, 1998.4.
- M.Saisho and K.Mitsunari: Dynamic Restoring Force Characteristics of Steel Tube Filled with Super-High Strength Concrete, 10WCEE, Vol.VI, 1992.8.
- M. Saisho and K. Mitsunari: Experimental Study on Dynamic Behavior of Steel Tube Filled with Super-High Strength Concrete, 4-ASCCS, Steel Concrete Composite Structures, 1994.6.
- K.Mitsunari and M.Saisho: Ultimate Strength and Plastic Deformation Capacity of CFT Beam-Column Subjected to Dynamic Load, 11WCEE, 1996.6.
- 最相元雄, 光成和昭: 超高強度コンクリート充填鋼管せん断曲げ柱の終局挙動に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 520 号, 1999.6.
- 最相元雄, 岡部猛, 光成和昭: 超高強度コンクリート充填鋼管短柱の拘束効果と終局耐力に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.42B, 1996.3.

(1998年10月8日原稿受理, 1999年3月26日採用決定)