

# 純曲げを受ける大径厚比コンクリート充填円形鋼管部材の モーメント曲率関係に関する実験的研究

構造工学分野

小藪 隆

## 1. はじめに

コンクリート充填円形鋼管部材 (Concrete Filled circular steel Tube: 以下, 円形CFT 部材という) とは円形鋼管にコンクリートを充填した合成部材であり, 充填されたコンクリートは鋼管の拘束 (コンファインド効果) により圧縮強度が増加すること, 鋼管はコンクリートの拘束により局部座屈に対して有利であること, さらに型枠が不要で工期が短縮できることなどが知られている<sup>1)</sup> 現在, 国内外の建築構造分野において継続的かつ精力的な研究・開発・適用がなされ, 基準類の整備も進んでいる CFT 部材であるが, 同分野での断面寸法の規模は比較的小さく, 土木構造物に適用するには自ずと制限がある. 一般に, 建築分野で取り扱われる円形 CFT 部材の径厚比:  $D$  (鋼管外径) /  $t$  (鋼管厚) の上限は 70~80 程度で, その範疇での豊富な研究成果の蓄積は見られるものの, 100 を超えるようなものは数少ない.

よって本研究では, CFT 部材の土木構造物への適用を目指し, 鉄骨鉄筋コンクリート計算規準・同解説<sup>2)</sup> (以下, SRC 規準という) で定められる制限径厚比: 15 (SS400 相当) を超える円形 CFT 部材を対象に純曲げ載荷実験を行い, そのモーメント曲率関係, 特にその曲げ耐力ならびに変形性能を実験的に検討することを目的とする.

## 2. 供試体

供試体は径厚比のみを実験変数とした計 6 体を用いた. 鋼管に用いた鋼材は SS400 相当の圧延板, また充填用コンクリートには設計強度 24 (MPa) のものを用いた. また供試体とその両端に設置する加圧板とは溶接により一体化させた. これにより, 載荷時に鋼管端部において局部座屈の発生が危惧されたため, 端部の増厚補強を行った. 具体的には図-3 の中央に位置するものであり, それを拡大したものを図-1 に示す. ここで各 6 供試体の諸元と使用した材料特性を表-1 に示す.

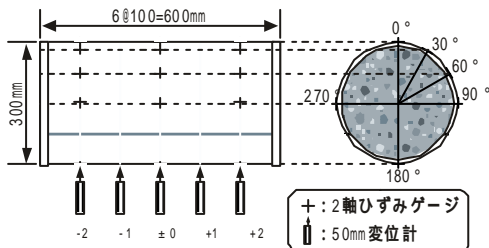


図-1 供試体および計測機器配置図

次に, SRC 規準<sup>2)</sup>に記載の耐力評価式 (1) ~ (3) による曲げ耐力  $M_U$  の算定法の概要を示す. ここで純曲げ条件として式 (1) による軸力が 0 となる中立軸位置を求めた上で, その中立軸位置における曲げ耐力を式 (2) により求めた. 式中の記号は表-1 ならびに図-2 内に一致するものである. 得られた各供試体の  $M_U$  を表-2 に示す.

$$N_U = {}_c N_U + {}_s N_U \quad (1a)$$

$${}_c N_U = (q_n - \sin q_n \cos q_n) \frac{{}_c D^2 \cdot {}_c s_{cB}}{4} \quad (1b)$$

$${}_s N_U = \{b_1 q_n + b_2 (q_n - p)\} \left(1 - \frac{{}_s t}{D}\right) D \cdot {}_s t \cdot {}_s s_y \quad (1c)$$

$$M_U = {}_c M_U + {}_s M_U \quad (2a)$$

$${}_c M_U = \sin^3 q_n \frac{{}_c D^2 \cdot {}_c s_{cB}}{12} \quad (2b)$$

$${}_s M_U = (b_1 + b_2) \sin q_n \frac{(1 - {}_s t/D)^2}{2} D^2 \cdot {}_s t \cdot {}_s s_y \quad (2c)$$

$${}_c s_{cB} = {}_c s_B + \frac{1.56 {}_s t \cdot {}_s s_y}{D - 2 {}_s t} \quad (3)$$

ここに,

$N_U$  : CFT 部材の軸力

${}_c N_U$  : 充填コンクリート部分の軸力

${}_s N_U$  : 鋼管部分の軸力

$M_U$  : CFT 部材の曲げ耐力

${}_c M_U$  : 充填コンクリート部分の曲げ耐力

${}_s M$  : 鋼管部分の曲げ耐力

${}_c s_{cB}$  : コンファインド効果を考慮した圧縮強度

$$b_1 = 0.89$$

$$b_2 = 1.08$$

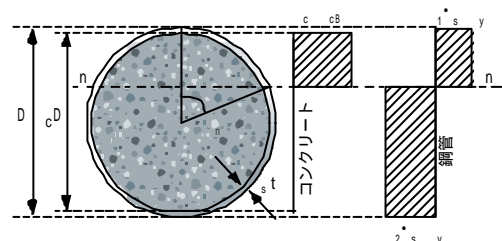


図-2 断面内の記号および終局時応力状態

### 3. 実験方法

図-3 に荷重設置概略を示す。荷重方式は左右対称の4点曲げ方式であり、左右対称に荷重治具をボルト接合した、供試体は純曲げ区間に位置する。荷重方法としては一方単純漸増荷重とし、供試体が曲げ破壊に至るまで荷重を行った。

計測は(1)荷重、(2)変位および(3)ひずみの3項目とした。具体的には(1)荷重に関しては供試体上方に位置するロードセルにて、また(2)変位に関しては、図-1に示すように供試体の変位を供試体下方に位置する5基の50mm変位計にて計測を行い、その変位値を左端から順に $d_{-2}$ 、 $d_{-1}$ 、 $d_{\pm 0}$ 、 $d_{+1}$ ならびに $d_{+2}$ とした。さらに(3)ひずみの測定は鋼管表面に貼り付けた2軸ひずみゲージによって供試体軸方向と円周方向の2方向について行った。その位置は図-1に示すように供試体中央位置と、それから左右にそれぞれ200mm離れた計3断面上にて、それぞれ円周方向に鋼管上縁から円周方向に $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$  および $270^\circ$ の計18箇所とした。また実験中には、鋼管の変状すなわち局部座屈ならびに亀裂の発生と進展を目視観察した。

なおそれぞれの変位値は供試体の両端に取り付けた治具の回転による変位も含んでいることから、以後の考察にあたり供試体中央部の純粋な供試体中央の変位 $d$ を求めるため両端の変位計を基準に、式(4)で定義した。

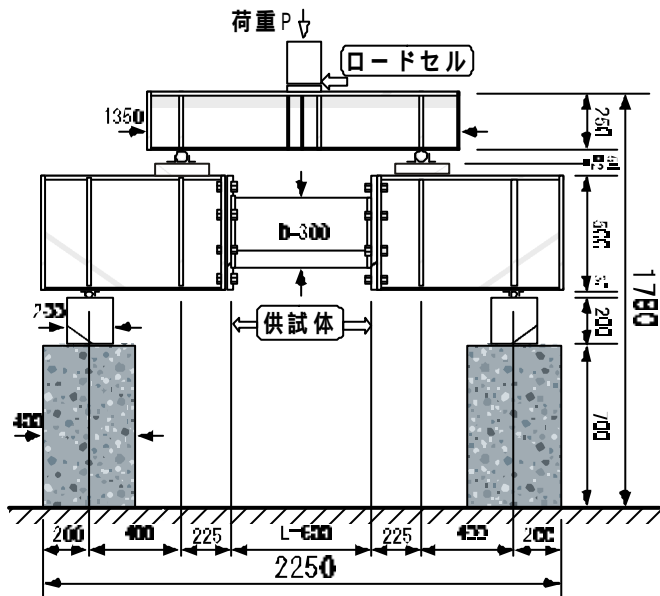


図-3 荷重設置概略図(単位:mm)

表-1 供試体寸法諸元と材料特性

供試体名	寸法諸元				鋼管の材料特性				コンクリートの材料特性	
	径厚比 $D/s t$	鋼管長 $L$ (mm)	鋼管径 $D$ (mm)	鋼管厚 $s t$ (mm)	降伏強度 $s \sigma_y$ (MPa)	引張強度 $s \sigma_U$ (MPa)	弾性係数 $s E$ (GPa)	加工硬化係数 $s H$ (GPa)	圧縮強度 $c \sigma_B$ (MPa)	弾性係数 $c E$ (GPa)
T45	69	599	300.03	4.35	206.2	336.4	189	1.88	24.0	25.8
T32	95	598	299.58	3.16	231.1	343.5	213	2.11		
T23	137	599	299.46	2.19	261.1	356.8	208	2.37		
T16	196	597	299.22	1.53	338.8	397.5	219	0.02		
T12	266	598	298.03	1.12	223.4	321.2	206	2.34		
T10	318	598	299.00	0.94	293.1	382.8	214	1.39		

$$d = d_{\pm 0} - \left( \frac{d_{-2} + d_{+2}}{2} \right) \quad (4)$$

### 4. モーメント曲率関係の数値解析手法

前述のSRC規準による算定法に加えて平面保持の仮定に基づくファイバーモデル<sup>3)</sup>を用い、数値解析的に各供試体のモーメント曲率関係および曲げ耐力 $M_F$ も求めた。算定に用いた鋼、コンクリートの応力-ひずみ関係を各々図-4,5に示す。どちらも道路橋示方書・解説<sup>3)</sup>に掲載された曲線を原型(両図中、細線参照)としCFT構造の特性を独自に考慮したものである。詳述すれば、まず鋼管は充填コンクリートによる補剛効果などを表現する係数 $\alpha_1$ と $\alpha_2$ を導入した上で、ひずみ硬化 $s H$ (表-1参照)を考慮した。一方充填コンクリートはコンファインド効果による圧縮強度の上昇<sup>2)</sup>(式(3)参照)を加味しており、本実験は鋼管の局部座屈や破断によって破壊したことから終局ひずみ $c e_U$ の設定は行わなかった。得られた各供試体の $M_F$ をSRC算定値 $M_U$ と同様に表-2に示す。

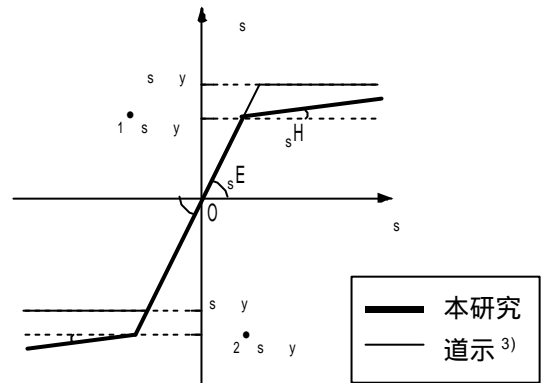


図-4 鋼管に用いた応力-ひずみ関係(引張を正)

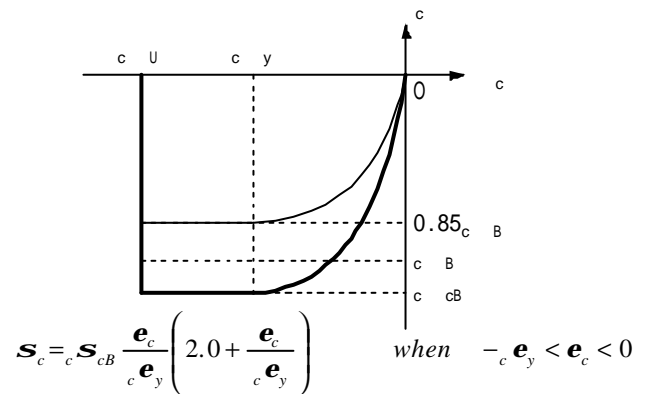


図-5 充填コンクリートに用いた応力-ひずみ関係(引張を正)

## 5. 結果と考察

### (1) 破壊形式

全供試体にて写真-1 に示すような曲げ破壊に至ったが、その中でも大きく分けて二種類の破壊形式が見られた。一者は鋼管本体軸方向に亘る溶接部を起点にそれに直行する、すなわち円周方向の亀裂の発生により鋼管が破断し耐力を失ったもので、供試体 T23, T16 と T10 がそれに相当する。もう一者は上記のような亀裂が発生しなかったもので、供試体 T45, T32 と T12 がそれにあたる。前者の一例として T23 を選び、鋼管降伏時の荷重値  $P_{yexp}$  とその時の変位値  $d_{yexp}$  で無次元化した荷重 - 変位関係である図-6 と写真-1 とを参照しながら、その破壊進行過程について述べる。図と写真中 A 点で鋼管部に貼り付けた 2 軸ひずみゲージより鋼管の降伏が確認され、さらに载荷すると図と写真中 B 点で鋼管に局部座屈の発生が見られた。その間最大耐力に至るまで C 点に至るまで B 点で発生した局部座屈が円周方向に進展した。最大耐力到達後も継続して载荷を行ったが徐々に荷重の低下がみられ、D 点で鋼管溶接部より亀裂が生じ、鋼管の破断に至った。また後者の供試体 T45, T32 ならびに T12 については、T23 と同じような局部座屈の発生と進展は認められたが、亀裂の発生は見られなかった。

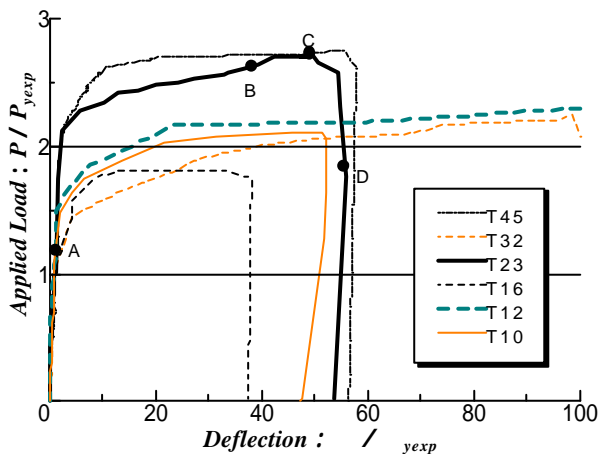


図-6 無次元化荷重 - 変位関係

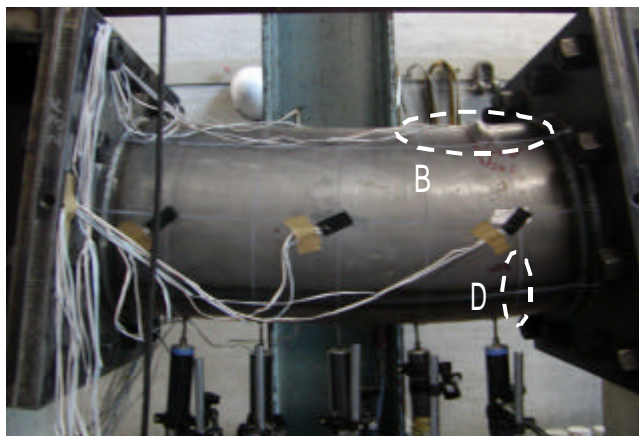


写真-1 T23, 実験後供試体

### (2) 曲げ耐力

本実験で得られた各供試体の曲げ耐力  $M_{exp}$  を表-2 に示す。  $M_{exp}$  と  $M_U$  を比較すると全供試体共に算定値を大きく実験耐力が得られていることがわかる。また解析値  $M_F$  と比較しても実験値は 2 割程度大きな値を示していることがわかる。両算定値共にコンファインド効果による強度上昇を考慮したものであるが、 $M_U$  がひずみ硬化による鋼管の強度上昇を考慮していない一方、 $M_F$  がその影響を考慮したものであることから、ひずみ硬化の影響で部材の耐力が上昇し  $M_F$  により近い値をとったものと考えられる。また充填コンクリートの引張強度を無視して計算していることも両算定値共に算定値が低い値となっている原因と考えられる。

表-2 曲げ耐力

	径厚比 $D/s t$	実験値	算定値		解析値	
		$M_{exp}$ (kN・m)	$M_U$ (kN・m)	$M_{exp}/M_U$	$M_F$ (kN・m)	$M_{exp}/M_F$
T45	69	168.8	103.7	1.63	142.6	1.18
T32	95	137.0	86.6	1.58	119.0	1.15
T23	137	107.7	69.7	1.54	95.6	1.13
T16	196	81.7	64.0	1.28	64.1	1.27
T12	266	58.5	32.4	1.80	46.5	1.26
T10	318	53.6	35.8	1.50	42.8	1.25

### (3) 変形性能

実験で得られた 5 基の変位計による変位値を用い、以下に示す差分式 (5a~d) により 4 つの曲率を求めた。

$$f_{-1} = \frac{-(d_{-2} - 2d_{-1} + d_{+0})}{100^2} \quad (5a)$$

$$f_{\pm 0} = \frac{-(d_{-1} - 2d_{\pm 0} + d_{+1})}{100^2} \quad (5b)$$

$$f_{\pm 0'} = \frac{-(d_{-2} - 2d_{\pm 0} + d_{+2})}{(2 \times 100)^2} \quad (5c)$$

$$f_{+1} = \frac{-(d_{\pm 0} - 2d_{+1} + d_{+2})}{100^2} \quad (5d)$$

以上の曲率を用い、本実験において得られたモーメント曲率関係について変形性能についての考察を行う。まず図-7 には全供試体の無次元化モーメント  $M/M_F$  と曲率の関係と比較したものを示し、また実験より得られたモーメント曲率関係とファイバーモデルを用いた数値解析により得られたモーメント曲率関係と比較したものを、制限径厚比内のものの例として T32 を、また制限径厚比外のものの例として T10 をそれぞれ図-8 と図-9 に示した。またそれらの曲率には式 (5a~d) より得られた上記  $f_{-1}$ ,  $f_{\pm 0}$ ,  $f_{\pm 0'}$  ならびに  $f_{+1}$  の 4 つのうち、他と比較して供試体内位置 -2 ~ +2 と最も広い着目範囲から得られた曲率である  $f_{\pm 0'}$  を用いた。また図中には参考のため、道路橋示方書に記載の応力 - ひずみ曲線を用いた数値解析により得られたモーメント曲率関係も記した。

表-3 降伏時および終局時の変位

	径厚比	変位		
		実験値		比
	$D/s t$	降伏時 $\ddot{a}_{y,exp}$ (mm)	終局時 $\ddot{a}_{u,exp}$ (mm)	
T45	69	0.080	5.510	68.6
T32	95	0.078	7.695	98.8
T23	137	0.110	5.435	49.4
T16	196	0.105	1.925	18.3
T12	266	0.065	6.385	98.2
T10	318	0.130	5.905	45.4

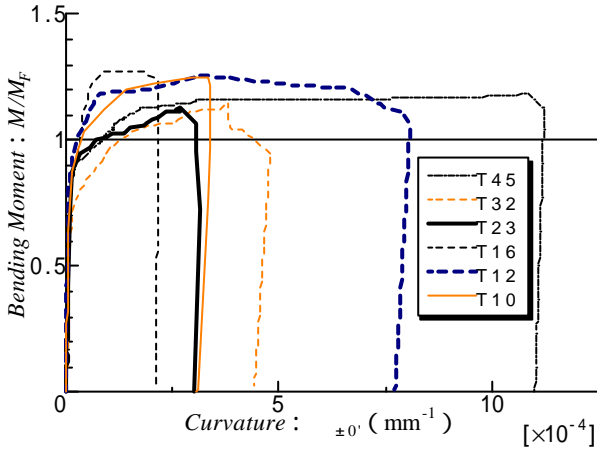


図-7  $M/M_F - f_{\pm\theta}$  関係比較

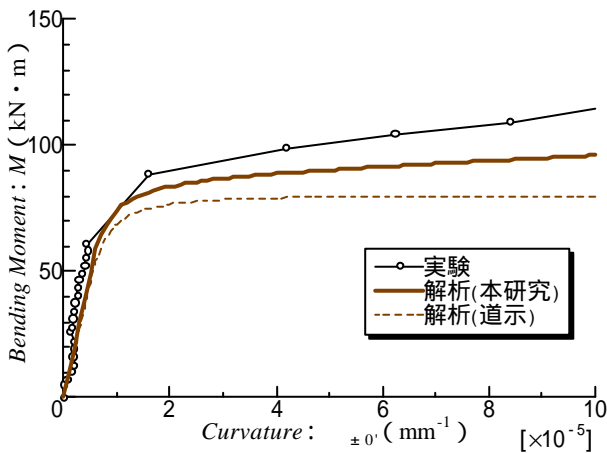


図-8 T32,  $M - f_{\pm\theta}$  関係

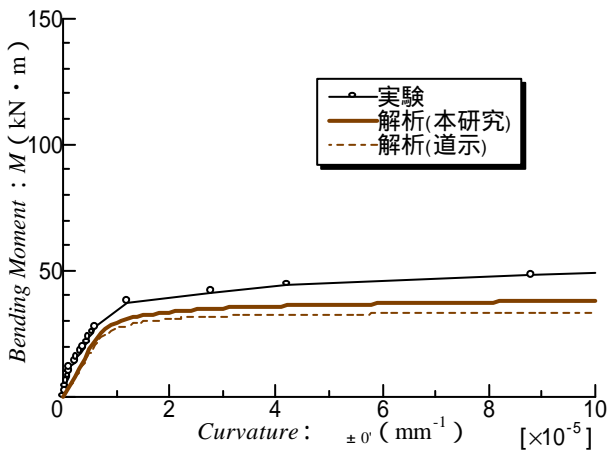


図-9 T10,  $M - f_{\pm\theta}$  関係

まず図-7を見ると、T23, T16ならびにT10に関しては鋼管に亀裂が生じ破断に至った時点で載荷を終了したため小さな値をとっているが、制限径厚比内外に関係なく全供試体がほぼ同様の挙動を示しているといえる。

また実験より得られた鋼管降伏時の変位を  $d_{y,exp}$ 、部材終局時の変位を  $d_{u,exp}$  とし、具体的な値とその比を表-3に示す。これも同様に T23, T16 ならびに T10 に関しては鋼管が破断したことから少し小さな値をとっているものと考えられ、また T12 が  $d_{u,exp}/d_{y,exp}=98.2$  と大きな値を示していることもふまえると、制限径厚比を超える供試体においても制限径厚比内のものと同様の变形性能を有すると考えられる。

また図-8と図-9を見ると、道路橋示方書に掲載の応力-ひずみ曲線を用いた解析結果よりも、本研究で行ったCFT構造の特性を加味したものをを用いた解析結果のほうが実験結果に近い挙動を示していることから、本研究で行った数値解析手法が概ね適用可能であるといえる。

## 6. まとめ

- (1) いずれの供試体も曲げ破壊に至り、全ての供試体にて局部座屈、また一部の供試体にて鋼管の破断が確認された。
- (2) 制限径厚比150を超える3体を含む全供試体において、実験で得られた曲げ耐力はSRC規準による算定設計値を大きく上回り、またひずみ硬化を考慮したファイバーモデルによる数値計算による算定設計値をも2割程度上回る結果となった。
- (3) 本実験で得られた鋼管降伏時と部材終局時の変位の比より、制限径厚比を超える供試体においても制限径厚比内のものと同様の变形性能を有することを確認した。
- (4) 平面保持の仮定の下で行った数値解析より得られたモーメント曲率関係が実験によるものを精度良く表したことから、ここで用いた鋼管ならびに充填コンクリートの応力-ひずみ関係の設定をはじめとする数値計算手法の有用性が確認できた。

## 参考文献

- 1) 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
- 2) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2001.1
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編，2002.3