

大径厚比を有するコンクリート充填円形鋼管部材の純曲げ特性

構造工学分野

佐原 啓介

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, 鋼管とコンクリートの相互作用により大きな耐荷能力と変形性能を有し, 耐震性能に優れた部材であることが知られている。また, このことより必要な性能に応じ部材断面を小さくすることも可能であり, 鋼管が型枠を兼務するために急速施工も可能となり, 経済的な構造といえる。近年, CFT 部材は, 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。しかし, 同分野で取り扱われる径厚比: D (鋼管外径) / t_s (鋼管厚) の上限は 70~80 程度で, これを部材断面規模の大きな土木構造物に適用すると鋼管が重厚となり, 経済性を逸することが危惧される。

そこで本研究は, CFT 部材の土木構造物への適用を最終的な目標とし, その基礎的段階として「鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」¹⁾ (以下, SRC 規準という) で定められる制限径厚比: 150 (SS400 相当) を超える径厚比を有する円形 CFT 部材を対象とした純曲げ実験を行い, その曲げモーメント - 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, 両端部増厚を施した鋼管にコンクリートを充填したものであり, 設定した実験変数は 2 種類のコンクリート強度と, 6 種類の径厚比で計 12 体の供試体を用意した。具体的には図-1 に示すものであり, その諸元と使用した材料特性を表-1 に示す。供試体名に関して“C”に続く数字がコンクリート強度を, その後の数字が径厚比を示している。

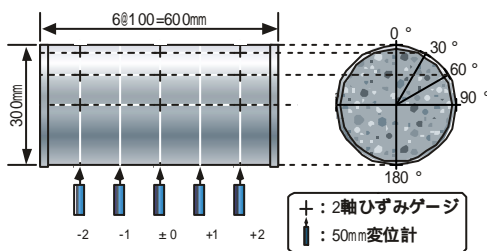


図-1 供試体および計測機器配置図

次に, SRC 規準に記載の耐力算定の概要を示す。SRC 基準に示される手法は累加強度方式であり, まず図-2 のような応力ブロックを想定し, その軸力および曲げモーメントを計算する。その上で徐々に中立軸位置を変化させることで軸力が 0 となる位置を求めその時の曲げモーメントを純曲げ耐力とする。このようにして求めた各供試体の純曲げ耐力を M_{SRC} とし, 表-3 に示す。

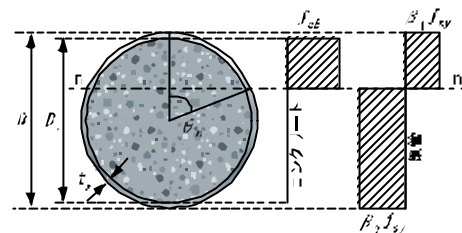


図-2 断面内の記号および終局応力状態

3. 実験方法

本実験における荷重設置概略図を図-3 に示す。荷重方式は左右対象の 4 点曲げ方式であり, 供試体が純曲げ区間に配置されるようにして実験を行った。荷重は単純一方向漸増荷重とし, 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) 鋼管表面各点でのひずみの 3 項目について行った。(1) では, 供試体上方に位置するロードセルにより, (2) では図-1 に示すように供試体下方に配置した 5 基の 50mm 変位計により計測を行い, 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) 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 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ および 180° の計 15 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 (1) で定義した。

$$d = d_{\pm 0} - \left(\frac{d_{-2} + d_{+2}}{2} \right) \quad (1)$$

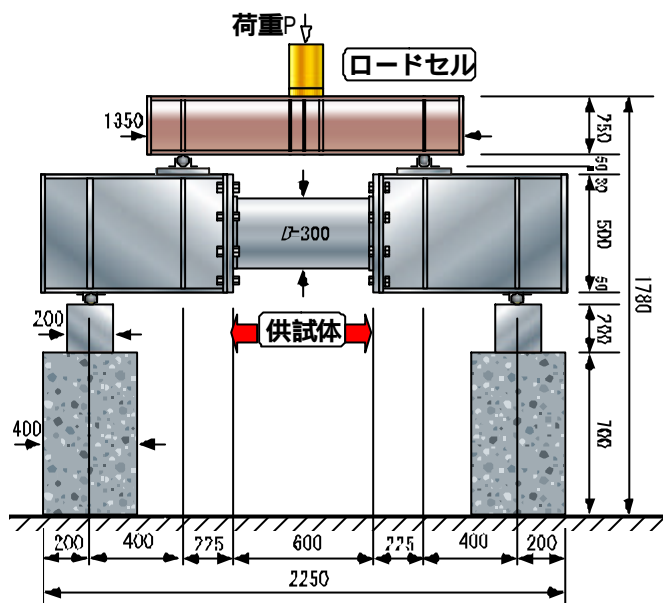


図-3 供試体設置概要

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 を求めた。算定に用いた鋼と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・同解説²⁾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 γ_1 と γ_2 ¹⁾ を導入した上で、ひずみ硬化 H_s (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断したことから終局ひずみ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_{SRC} と同様に表-3に示す。

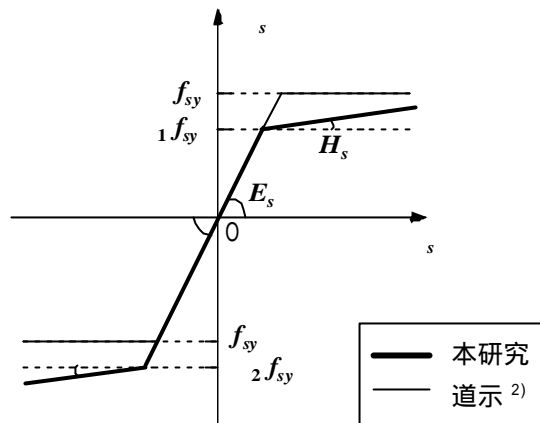
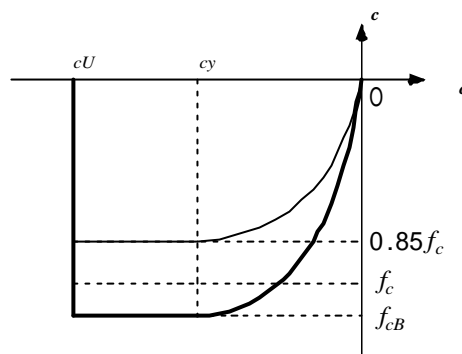


図-4 鋼管に用いた応力-ひずみ関係(引張を正)



$$f_{CB} = f_c + \frac{1.56 t_s f_{sy}}{D - 2t_s}$$

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。破壊形式には鋼管が破断しなかったものと鋼管が破断したものと大きく分けて二種類の破壊形式が見られた。鋼管が破断したものには、鋼管軸方向に亘る溶接部を起点に破断したものと引張域で鋼管が破断したものがあり、具体的には表-2に示すとおりである。

破壊の進行は耐力到達までは破断の有無に関わらず、全供試体において同様の挙動を示したため、ここでは径

表 1 供試体諸元および材料特性

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/t_s	鋼管長 L (mm)	鋼管径 D (mm)	鋼管厚 t_s (mm)	降伏強度 f_{sy} (MPa)	引張強度 f_{st} (MPa)	降伏比 f_{sy}/f_{st}	弾性係数 E_s (GPa)	加工硬化係数 H_s (GPa)	圧縮強度 f_c (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)
C24-070	69	600	300	4.35	206	336	0.61	189	1.88	24.0	25.8
C24-090	95			3.16	231	343	0.67	213	2.11		
C24-130	137			2.19	261	357	0.73	208	2.37		
C24-190	196			1.53	339	398	0.85	219	0.02		
C24-250	266			1.12	223	321	0.70	206	2.34		
C24-300	318			0.94	293	383	0.77	214	1.39		
C40-070	71	600	300	4.22	264	372	0.71	223	1.40	37.4	29.0
C40-090	95			3.15	276	432	0.64	206	2.14		
C40-130	132			2.27	234	333	0.70	209	1.85		
C40-190	197			1.52	300	373	0.80	214	0.68		
C40-250	259			1.16	207	322	0.64	193	2.08		
C40-300	306			0.98	211	332	0.64	190	2.28		

厚比が 250 の 2 供試体に関してのみ、その荷重 - 変位関係を図-6 に示す。図中、両軸の値は鋼管降伏時の荷重値 P_{yexp} とその時の変位値 d_{yexp} によりそれぞれ無次元化している。そこで、図-6 と写真-1 を参照しながら、供試体 C40-250 の破壊進行過程について述べる。図と写真中の A 点で鋼管下部（図-1 における 180°）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の B 点で鋼管に局部座屈の発生が見られた。その間最大耐力である 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 点で鋼管引張域に亀裂が生じ、鋼管の破断に至った。

表-2 破壊形式

供試体名	破壊形式	供試体名	破壊形式
C24-070	A	C40-070	-
C24-090	A	C40-090	A
C24-130	B-1	C40-130	A
C24-190	B-1	C40-190	B-2
C24-250	A	C40-250	B-2
C24-300	B-1	C40-300	B-2

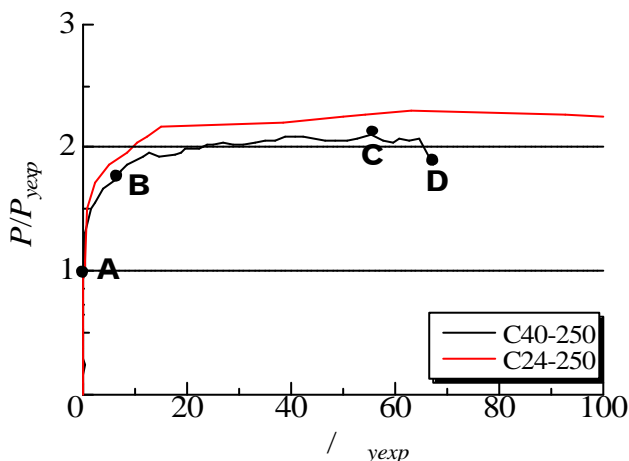


図-6 無次元化荷重 - 変位関係 ($D/t=250$)

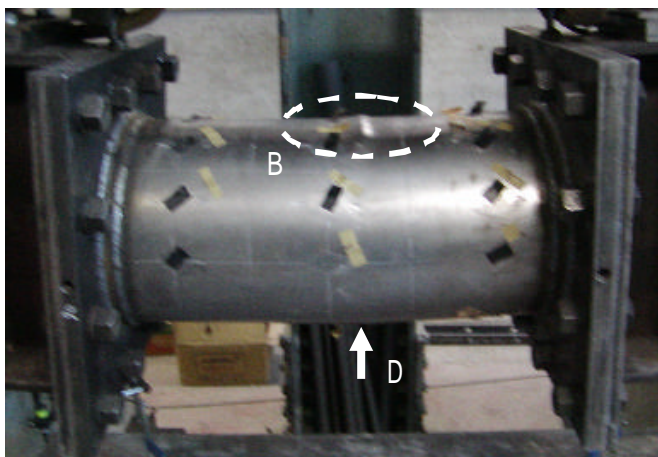


写真-1 供試体 C40-250、実験後の状況

(2) 曲げ耐力

実験で得られた各供試体の曲げ耐力 M_{exp} を表-3 に示す。

M_{exp} と M_{SRC} を比較すると全供試体において算定値を大きく上回る耐力が得られていることがわかる。これは、 M_{SRC} がひずみ硬化による鋼管の強度上昇を考慮していないためと考えられ、降伏比の大きな供試体においては M_{exp}/M_{SRC} が小さな値となっていることにより確認できる。また、解析値 M_F はひずみ硬化の影響を考慮したものであるが、この値と比しても実験耐力が 2 割程度上回っている。この原因の 1 つとして、径厚比やコンクリート強度に関わらずコンファインド効果の影響を一概に評価していることが考えられる。

表-3 曲げ耐力

	径厚比 D/t_s	実験値		算定値		解析値	
		M_{exp} ($kN \cdot m$)	M_{SRC} ($kN \cdot m$)	M_{exp}/M_{SRC}	M_F ($kN \cdot m$)	M_{exp}/M_F	
C24-070	69	169	104	1.63	143	1.18	
C24-090	95	137	87	1.58	119	1.15	
C24-130	137	108	70	1.54	96	1.13	
C24-190	196	82	64	1.28	64	1.27	
C24-250	266	59	32	1.80	47	1.26	
C24-300	318	54	36	1.50	43	1.25	
C40-070	71	-	138	-	174	-	
C40-090	95	168	109	1.55	153	1.10	
C40-130	132	127	68	1.88	91	1.39	
C40-190	197	79	59	1.34	70	1.12	
C40-250	259	58	33	1.79	48	1.23	
C40-300	306	49	28	1.75	42	1.18	

(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、差分法により検長間での平均曲率を求めた。この曲率を用い、本実験において得られたモーメント - 曲率関係および変形性能についての考察を行う。まず、図-7 および図-8 に全供試体に対してコンクリート強度毎の無次元化モーメント： M/M_F と平均曲率に鋼管径 D を乗じ無次元化した曲率： D の関係を示す。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より得られたモーメント - 曲率関係を比較したものの例として、制限径厚比内のものの例として供試体 C24-070 を、制限径厚比外のものの例として供試体 C24-300 をそれぞれ図-9 および図-10 に示す。図中、曲率には上述の平均曲率を用い、参考として、道路橋示方書に記載の応力 - ひずみ関係を用いた数値解析により得られたモーメント - 曲率関係も併せて示した。

まず、図-7 および図-8 を見ると鋼管が破断した供試体は破断に至った時点で载荷を終了したため変形が小さな値をとっているが、径厚比に関わらず全供試体においてほぼ同様の挙動を示しているといえる。

また、実験により得られた降伏時の変位 d_{yexp} と終局時の変位 d_{uexp} とその比 d_{uexp}/d_{yexp} を表-4 に示す。これを見ると溶接部を起点とする鋼管の破断等により、小さな値となっているものもあるが、制限径厚比を超える供試体においても、制限内の供試体と同様の変形性能を有していることがうかがえる。また、コンクリート強度の上昇

に伴い変形性能が低下する傾向もあり，その傾向は径厚比が小さい供試体において顕著であった．

また，**図-9**と**図-10**を見ると，道路橋示方書に記載された応力 - ひずみ関係を用いた解析よりも，本研究で行った CFT 構造の特性を加味した応力 - ひずみ関係を用いた解析結果のほうが，より実験結果に近い挙動を示していることがわかる．また**表-3**により，耐力に関しても良好に評価できていると言える．

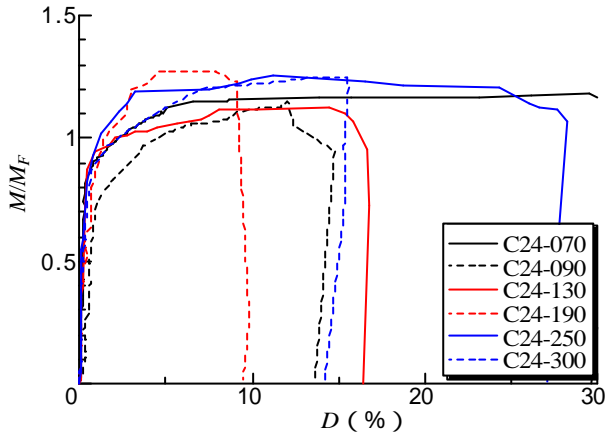


図-7 M/M_F - 関係 (C24)

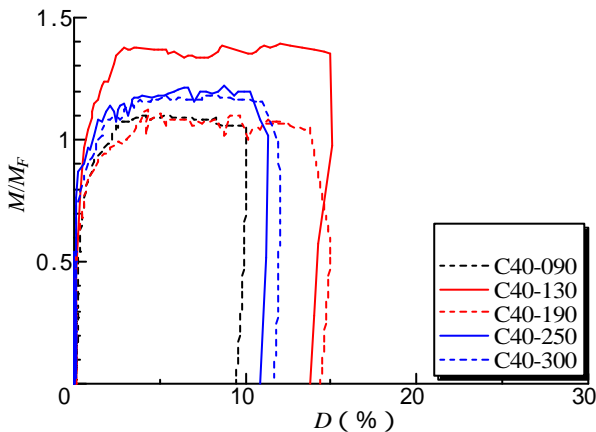


図-8 M/M_F - 関係 (C40)

表-4 降伏時および終局時の変位

供試体名	径厚比 D/t_s	変位		
		実験値		比 u_{exp}/y_{exp}
		降伏時 y_{exp} (mm)	終局時 u_{max} (mm)	
C24-070	69	0.117	4.438	37.9
C24-090	95	0.114	7.695	67.5
C24-130	137	0.115	5.435	47.3
C24-190	196	0.150	1.925	12.8
C24-250	266	0.101	6.385	63.2
C24-300	318	0.126	5.905	46.9
C40-070	71	0.127	-	-
C40-090	95	0.138	3.921	28.4
C40-130	132	0.111	2.155	19.4
C40-190	197	0.138	3.470	25.1
C40-250	259	0.098	5.420	55.3
C40-300	306	0.099	4.450	44.9

：溶接部を起点とする鋼管の破断があった供試体 (**表-2** 参照)

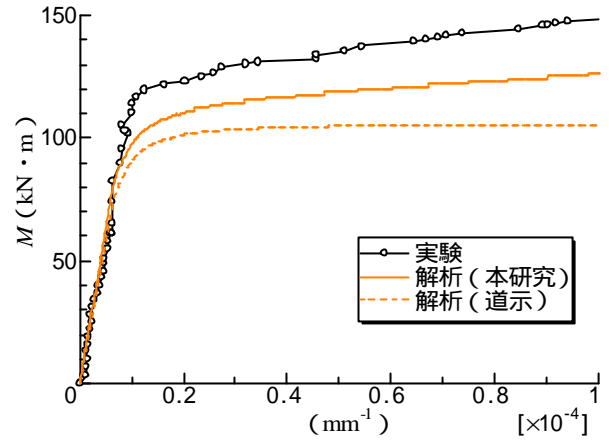


図-9 供試体 C24-070, M- 関係

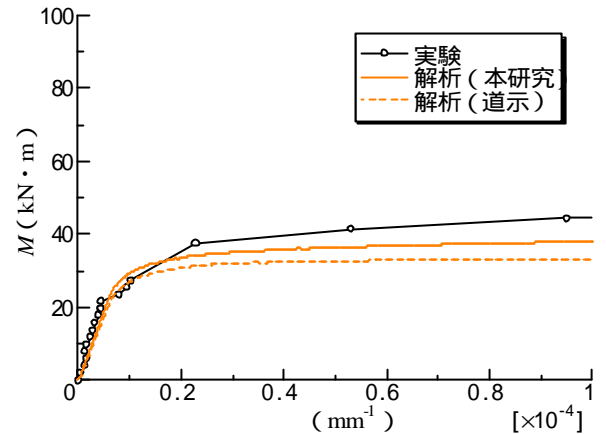


図-10 供試体 C24-300, M- 関係

6. まとめ

- (1) いずれの供試体も圧縮側に局部座屈を伴う曲げ破壊に至った．また，局部座屈の発生による耐力の低下は認められなかった．
- (2) 純曲げ耐力は，全供試体において SRC 規準による算定設計値を大きく上回り，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内のものと同等の変形性能を有することがわかった．
- (4) コンクリート強度の上昇により，変形性能が低下する傾向が見られ，その傾向は径厚比が小さいほうが顕著であった．
- (5) 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良好に表現したことから，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：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2001.1
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編，2003.3