

(14) 二重鋼管・コンクリート合成柱の中心圧縮特性に及ぼす内径・外径比の影響

Effect of Inner-to-outer Diameter Ratios on Axially Loading Capacity of Concrete Filled Double Tubular Steel Columns

上中宏二郎*, 鬼頭宏明**, 園田恵一郎***, 早見 真****

Kojiro Uenaka, Hiroaki Kitoh, Keiichiro Sonoda and Makoto Hayami

*博(工) 神戸市立工業高等専門学校講師 都市工学科 (〒651-2194 神戸市西区学園東町 8-3)

**博(工) 大阪市立大学大学院助教授 工学研究科都市系 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

***工博 大阪工業大学教授 八幡工学実験場構造実験センター (〒614-8289 京都府八幡市美濃山一ノ谷 4)

****神戸市立工業高等専門学校専攻科 都市工学専攻 (〒651-2194 神戸市西区学園東町 8-3)

Centric axial loading tests of twelve specimens of concrete filled double tubular steel columns were carried out. The specimens consist of concentric double steel tubes and concrete filled between them. Experimental parameters were the ratio inner tube's diameter; outer tube's diameter; outer tube's thickness. Typical failure mode observed was a diagonal shear mode of the concrete associated with local buckling of both tubes. Their axial strengths could be estimated by a similar equation for an ordinary concrete filled steel tube with a single tube.

Key Words: composite structure, concrete filled steel tubular column, concrete filled double steel tubular column, centric loading test

1. はじめに

二重鋼管・コンクリート合成柱 (Concrete Filled Double Steel Tubular Column, 以下, DCFT とする) とは, 大きさの異なる二つの鋼管を同心円上に配置し, 両鋼管の間にコンクリートを打設した構造をいう (図-1(a)参照). この構造により, 内鋼管の部分が空洞となるため, 従来の鋼管・コンクリート充填鋼管柱¹⁾ (Concrete Filled Tubular Column, 以下, CFT とする. 図-1(b)参照) と比較して軽量となる利点を有する. したがって, 地震などによって作用する慣性力の低減, ならびにこれから増加すると思われる山岳地帯の高橋脚への適用が可能であると考えられる.

DCFT に関する既往の研究を概観すれば, 海洋構造物への使用を目的とした中心圧縮力を受ける短柱の実験的²⁾および解析的研究³⁾, 内・外に角形鋼管を用いた中心圧縮および曲げ実験⁴⁾や充填コンクリートの構成則に着目した解析的研究⁵⁾がなされている. また, 軸力一定下で曲げモーメントが作用する長柱の交番載荷試験⁶⁾では, 鉄筋コンクリート柱と同等の変形じん性能を有することが報告されている.

このような背景のもと, 本研究では DCFT の強度特性を把握するための基礎的研究として, 径厚比 (D_o/t_o) および DCFT 特有の変数である内径・外径比 (D_i/D_o) を実験変数とした中心圧縮実験を行い, 主に D_i/D_o が DCFT の中心圧縮特性に与える影響について実験的に検討した. なお, 使用した供試体は鋼管厚, 内鋼管径が異なる合計 12 体である.

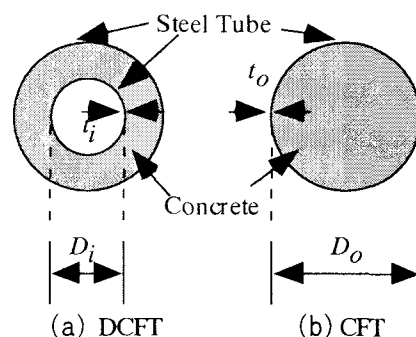


図-1 DCFT と CFT の断面

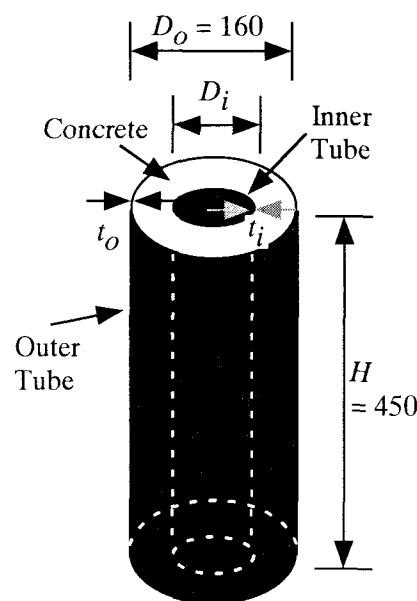


図-2 供試体

表-1 供試体一覧

No.	Tag.	Tube						Material Properties			
		[1]		[2]	[3]	Ratio		f_y	E_s	f_c	E_c
		t_o	t_i	D_o	D_i	[2]	[3]				
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	[1]	[2]	(MPa)	(GPa)	(MPa)	(GPa)
1	t10-000	0.90	0.90	158.7	0.0	175.7	0.00	221	218	18.7	23.7
2	t10-375	0.90	0.90	158.4	38.4	175.5	0.24	221	218	18.7	23.7
3	t10-750	0.90	0.90	159.0	75.9	176.1	0.48	221	218	18.7	23.7
4	t10-1125	0.90	0.90	159.1	113.7	176.2	0.71	221	218	18.7	23.7
5	t16-000	1.50	1.50	157.5	0.0	105.2	0.00	308	232	18.7	23.7
6	t16-375	1.50	1.50	157.8	39.4	105.4	0.25	308	232	18.7	23.7
7	t16-750	1.50	1.50	158.2	76.9	105.7	0.49	308	232	18.7	23.7
8	t16-1125	1.50	1.50	158.3	114.2	105.7	0.72	308	232	18.7	23.7
9	t23-000	2.14	2.14	157.7	0.0	73.6	0.00	286	222	18.7	23.7
10	t23-375	2.14	2.14	157.6	39.7	73.5	0.25	286	222	18.7	23.7
11	t23-750	2.14	2.14	157.6	77.3	73.6	0.49	286	222	18.7	23.7
12	t23-1125	2.14	2.14	157.4	114.8	73.4	0.73	286	222	18.7	23.7

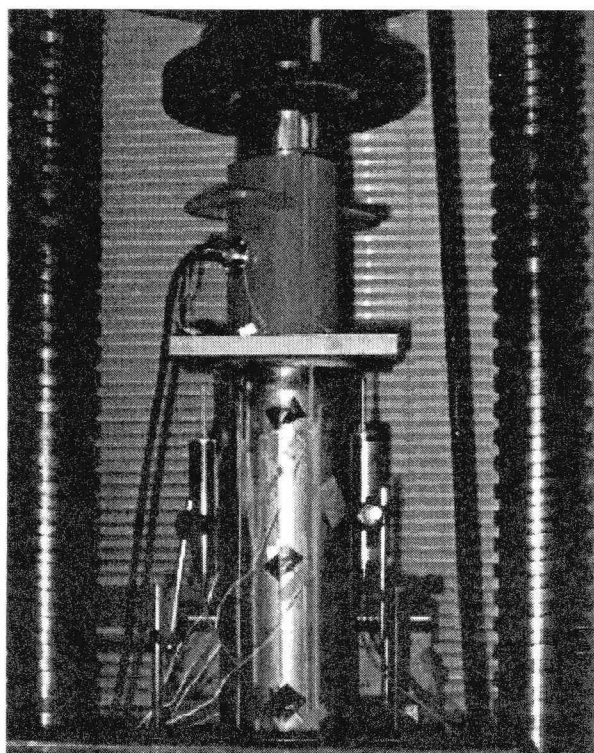


写真-1 载荷風景

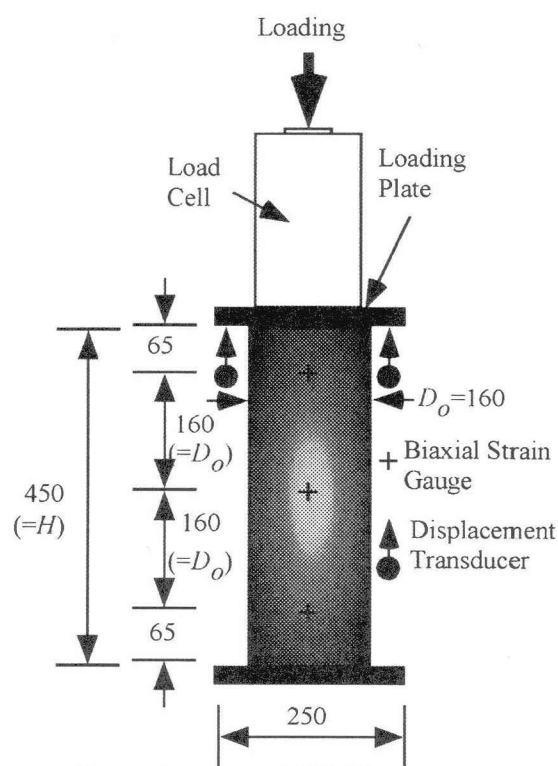


図-3 供試体の測定項目

2. 実験方法

2.1. 概要

図-2 に実験供試体を示す。供試体の形状は日本建築学会の CFT の短柱実験供試体⁷⁾を参考にし、高さ (H) = 450mm, 外鋼管の直径 (D_o) = 160mm ($H/D_o = 2.8$) と固定した。また、载荷点近傍には、溶接割れを防止するために $\phi 7$ の鋼棒を外鋼管の外側円周方向に溶接した。载荷方法は、2MN 耐圧試験器を用いて球座、ロードセル、载荷板を介し、供試体に中心圧縮力を作用させた。写真-1 に载荷風景を示す。

2.2. 実験変数

表-1 は供試体一覧を示したものである。同表にて、供試体(Tag)は設定した実験変数より定義した。すなわち、 t の添え字は鋼管厚を、ハイフンに続く数字は内鋼管径をそれぞれ示している。

内鋼管、および外鋼管の厚さ (t_o, t_i) は、公称値で 1.0, 1.6, 2.3mm とし、内鋼管と外鋼管の厚さは等しく設定した。また、内鋼管径 (D_i) は 0 (内鋼管無し), 37.5, 75.0, 112.5mm とした。



写真-2 破壊形式(t10-000)



写真-3 破壊形式(t10-750)

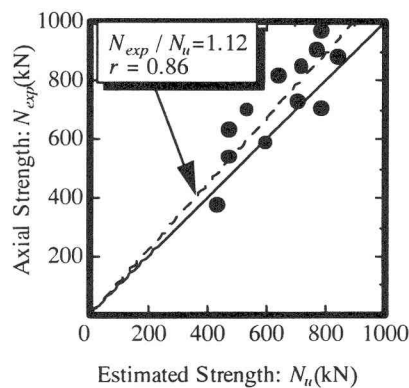


図-4 最大強度と算定強度

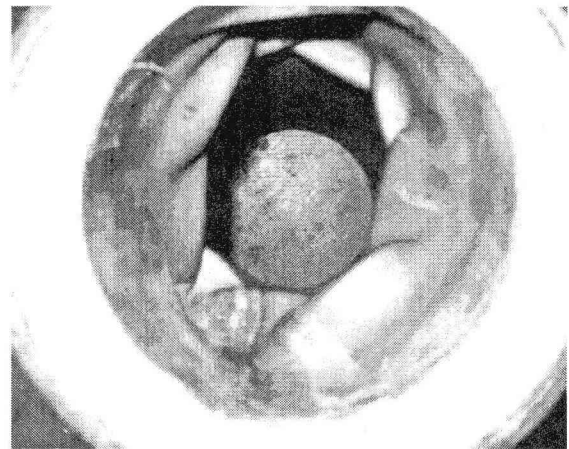


写真-4 破壊形式 (t23-1125)

2.3. 測定項目

図-3 に示すように、内鋼管、外鋼管両者に軸方向中央、および中心から 160mm 上下に離れた鋼管の表裏に二軸ひずみゲージを添付し、鋼管の軸方向、および周方向ひずみを測定した。

また、供試体頂部近傍に 3 台の変位計を配置して、供試体の軸方向変位を測定した。

3. 実験結果と考察

3.1. 破壊形式

得られた破壊形式の外観は、コンクリートのせん断破壊および、鋼管の局部座屈であった（写真-2, 3 参照）。また、内鋼管を有する供試体では、写真-4 に示すように、コンクリートのすべり面に沿って、鋼管内側へ局部座屈をしていた。

3.2. 中心圧縮強度

表-2、および図-4 に算定強度 (N_u) と実験で得られた中心圧縮強度 (N_{exp}) の関係を示す。ここで算定強度とは CFT の中心圧縮強度をあらわすもので、(1)式のように表される。

$$N_u = A_c f_c + (1 + \eta) A_s f_y \quad (1)$$

ここで、上式は日本建築学会¹⁾によるもので、 N_u : 算定中心圧縮強度、 A_c : コンクリートの断面積、 η : 充填コンクリートに対する鋼管の拘束効果による柱の耐力上昇係数¹⁾（円形鋼管の場合：0.27. 以下、拘束係数と略す。）、 A_s : 鋼管の断面積、および f_y : 鋼管の降伏強度である。

なお、DCFT では内鋼管が存在しているので、拘束係数 η を外鋼管のみに考慮し、(1)式を(1)'式の通りに修正した。すなわち、

表-2 実験結果と算定強度

No.	Tag.	[1]	[2]	[3]
		N_u (kN)	N_{exp} (kN)	$\frac{[2]}{[1]}$
1	t10-000	532	700	1.31
2	t10-375	474	635	1.34
3	t10-750	471	540	1.15
4	t10-1125	433	378	0.87
5	t16-000	641	815	1.27
6	t16-375	718	852	1.19
7	t16-750	705	728	1.03
8	t16-1125	597	589	0.99
9	t23-000	768	907	1.18
10	t23-375	784	968	1.24
11	t23-750	841	879	1.05
12	t23-1125	788	704	0.89

$$N_u = A_c f_c + (1 + \eta) A_{so} f_y + A_{si} f_y \quad (1)'$$

ここで、 A_{so} : 外鋼管断面積、ならびに A_{si} : 内鋼管断面積である。なお、本実験では、(1)'式を用いて実験値と比較した。

図-4 より、(1)'式は相対比 $N/N_u = 1.12$ 、相関係数 $r = 0.86$ と良好に実験結果を評価できていることが理解できる。すなわち、これは中空断面にも関わらず、内鋼管がコンクリート同様の拘束効果をもたらしていることを示している。

また、図-5 に中心圧縮強度(N_{exp})から求めた実験拘束係数 (η_{exp}) と D_i/D_o の関係を示す。なお、 η_{exp} は(1)'式より求めた。

$$\eta_{exp} = \frac{N_{exp} - A_c f_c - A_{si} f_y}{A_{so} f_y} - 1 \quad (1)''$$

図より、実験拘束係数 η_{exp} は、 D_i/D_o が大きくなるに従って低下する傾向が現れており、拘束効果が減少していることが理解できる。

3.3. 変形特性

図-6 に鋼管厚 2.3mm 供試体の荷重と変位の関係を示す。また、図中の横軸は得られた変位を供試体高さ($H = 450\text{mm}$)で除し、百分率で表記したものである。また、縦軸は載荷荷重を式(1)'で除したものである。

同図より、2.3mm 供試体において、0.5%変位までは D_i/D_o に関係なく、同等の軸方向剛性が得られていることが理解できる。また、 D_i/D_o が大きい t23-1125 を除いた供試体の最大強度到達後は、4%変位まで最大強度の 70%程度を保持していることが理解できる。

3.4. 応力状態

図-7 および図-8 は外鋼管および内鋼管の応力状態を

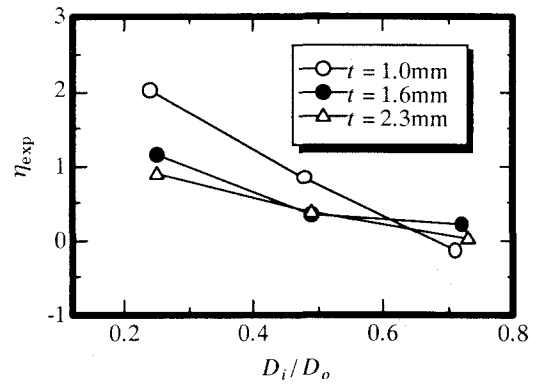


図-5 内径外径比と実験拘束係数

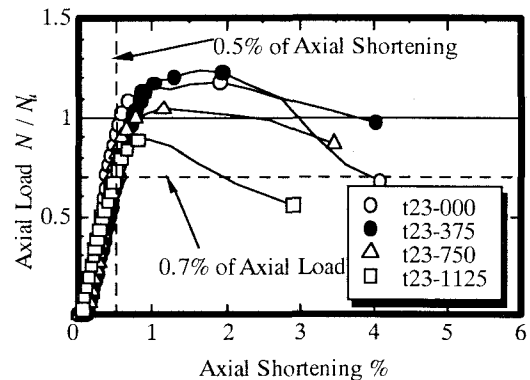


図-6 中心圧縮荷重-変位関係

それぞれ示している。また、図中の点線は Von Mises の降伏曲線であり、(2)式のとおりに表される。

$$f^2 = \sigma_z^2 - \sigma_z \sigma_\theta + \sigma_\theta^2 - f_y^2 = 0 \quad (2)$$

ここで、 σ_z : 鋼管の軸方向応力、 σ_θ : 鋼管の周方向応力、および f_y : 鋼管の降伏強度をそれぞれ示す。

次に、応力 $\{\sigma_z, \sigma_\theta\}$ は上述の降伏関数 f の関連流動則とすると、弾塑性体の応力-ひずみ関係は Prandtl-Reuss の構成則となり、(3)式の通りとなる。

$$\begin{pmatrix} \sigma_z \\ \sigma_\theta \end{pmatrix} = \frac{E_s}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & -\nu \\ -\nu & 1 \end{bmatrix} \left\{ \begin{pmatrix} \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \end{pmatrix} - \lambda \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial \sigma_z} \\ \frac{\partial f}{\partial \sigma_\theta} \end{pmatrix} \right\} \quad (3)$$

ここで、 λ : 正值のスカラー量、 ν : 鋼管のポアソン比、 $\varepsilon_z, \varepsilon_\theta$: 鋼管の軸方向および周方向の全ひずみをそれぞれ示す。実験で得られたひずみから(3)式を用いて、内および外鋼管の 2 軸応力状態を調べたものが図-7、ならびに 8 である。なお、これらの図は、圧縮を正值として取り扱っている。

図-7 より、外鋼管の周方向応力 (σ_θ) は、軸方向応力 (σ_z) が降伏応力 (f_y) に到達すると、引張側に作用した。

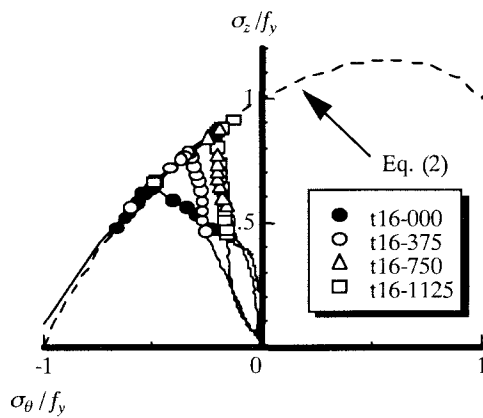


図-7 外鋼管の応力状態

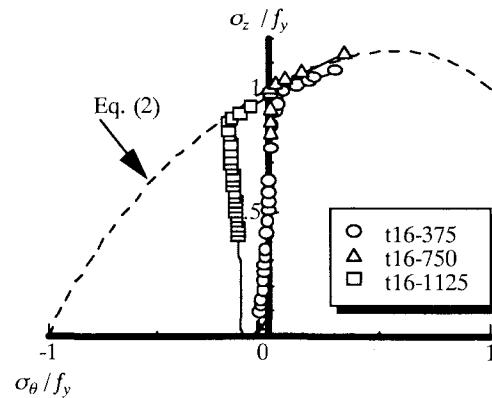


図-8 内鋼管の応力状態

一方、図-8に示す内鋼管の応力 (σ_θ) は、軸方向応力 (σ_z) が降伏応力に到達後、圧縮方向に作用した。これは図-9に示すように、充填コンクリートが終局状態に近づくときせん断破壊に伴う体積膨張を起こす現象、すなわち正のダイレイタンスによるものであると考えられる。

4. まとめ

本研究は、中空式二重鋼管コンクリート合成柱 (DCFT) の内径・外径比 (D_i/D_o) が中心圧縮特性に与える影響について、破壊形式、中心圧縮強度、変形特性、および内、外鋼管の応力状態から実験的に検討したものである。結論づけられる事項を以下に列記する。

- (1) 観察された破壊形式はコンクリートのせん断とそれによる鋼管の座屈であった。
- (2) 得られた DCFT の中心圧縮強度は、鋼管の拘束係数を考慮した CFT の中心圧縮強度算定式を用いておおむね良好に評価できた。しかしながら、 D_i/D_o が大きくなるにしたがって、拘束効果は低下する傾向が認められた。
- (3) 得られた 0.5% までの軸方向剛性は、 D_i/D_o の変化による差異は見られなかった。また、t23-1125 を除いた供試体の 4% 変位までの中心圧縮強度は、最大強度 (N_{exp}) の約 70% 程度保持していた。
- (4) 外鋼管の周方向応力 (σ_θ) は軸方向応力 (σ_z) が降伏に到達後、引張側に作用した。一方、内鋼管においては (σ_z) が降伏に到達後、(σ_θ) が圧縮方向に作用した。これは、充填コンクリートが終局状態で体積膨張を起こす、すなわちダイレイタンスによるものであると考えられる。

謝辞：載荷実験の実施に当たっては、当時神戸市立工業高等専門学校都市工学科に在籍された竹田美登里氏、横谷征平氏、および橋本健太郎氏にご尽力いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

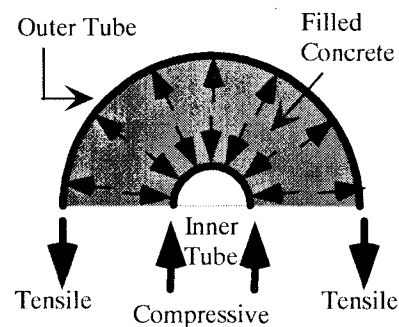


図-9 応力状態

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，2002。
- 2) Wei, S., Mau, S.T., Vipulanandan, C. and Mantrala, S.K.: Performance of New Sandwich Tube under Axial Loading: Experiment, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 121, No. 12, pp. 1806-1814, 1995.
- 3) Wei, S., Mau, S.T., Vipulanandan, C. and Mantrala, S.K.: Performance of New Sandwich Tube under Axial Loading: Analysis, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 121, No. 12, pp. 1815-1821, 1995.
- 4) Zhao, X. L. and Grzebieta, R.: Strength and Ductility of Concrete Filled Double Skin (SHS inner and SHS outer) Tubes, *Thin-Walled Structures*, Elsevier Science Ltd., Vol. 40, No. 2, pp. 199-213, 2002.
- 5) Tawaratani, Y. and Kurita, A.: Stress-Strain Relationship for Concrete in Concrete-Filled Double Steel Tubular Columns, *Proc. of 5th Korea-Japan Joint Seminar on Steel Bridges*, Pusan, Korea, pp. 151-162, 1999.
- 6) 杉本雅人，柳下文夫，谷平勉，園田恵一郎：中空式二重鋼管合成柱の変位靱性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 20, No. 3, pp.

847-852, 1998.

- 7) 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 年 10 月．
- 8) 吉田総仁：弾塑性力学の基礎，共立出版，pp. 188-190, 1997.