

論文 二重鋼管合成柱の中心圧縮特性に及ぼす内・外鋼管厚比の影響

上中宏二郎*1・濱本誠司*2・鬼頭宏明*3

要旨：径が異なる2つの鋼管を同心円上に配置し、両鋼管の間だけにコンクリートを充填した二重鋼管合成柱は、内鋼管内部が空洞となるため従来の鋼管コンクリート合成柱と比較して軽量となる利点を有する。そこで本研究では、鋼管コンクリート合成柱の重量と比較して、60%程度の二重鋼管合成短柱の中心圧縮実験を合計9体行い、二重鋼管合成柱の特有のパラメーターである内・外鋼管厚比が、同特性に与える影響について実験的に検討することを目的としている。

キーワード：合成柱, 二重鋼管, 中心圧縮特性, 内・外鋼管厚比, 軽量化

1. まえがき

二重鋼管合成柱 (Concrete Filled Double Tubular Steel Structures, 以下, CFDT とする)^{1), 2)}とは、異なる D_i , D_o の径を有する二種類の鋼管を同心円上に配置し、両鋼管の間だけにコンクリートを充填した鋼・コンクリート合成柱のことをいう(図-1 参照)。このような構造形式のため、内鋼管の内部にコンクリートを充填することが無く、空洞となるため、建築分野で使用されているコンクリート充填鋼管構造^{3), 4)}(Concrete Filled Steel Tubular Structures, 以下, CFT とする)と比較して軽量となることが大きな利点である。したがって、CFDT は地震等によって作用する慣性力の低下、ならびに、これから増えると思われる山岳地帯の道路橋などの高橋脚への適用が可能であると考えられる。

このような背景のもと、著者らは CFDT の基本特性の把握を目的に、CFDT の径厚比 (D_o/t_o) ならびに特有のパラメーターの一つである内径・外径比 (D_i/D_o) を実験変数とした合計12体の短柱の中心圧縮実験を行ってきた⁵⁾。得られた結果より、CFDT の中心圧縮強度は CFT に類似した計算方法で評価が概ね可能であるが、 D_i/D_o が大きい、すなわち、内鋼管を配置するためにできる中空断面積が大きくなると、充填コン

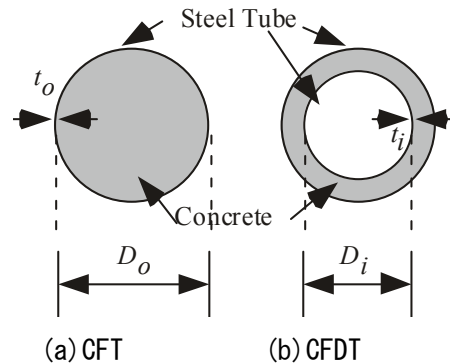


図-1 CFT と CFDT の断面

クリートの拘束効果が低下する傾向にあることを指摘した⁵⁾。

そこで、本研究では CFT の重量を 60%程度に低減した内径・外径比 (D_i/D_o) ≈ 0.7 の供試体に対し、内鋼管・外鋼管厚比 (t_i/t_o) を変化させた9体の供試体の中心圧縮実験を行い、 t_i/t_o による拘束効果の変化、ひいては中心圧縮特性に与える影響について、実験的に検討することを目的としている。

2. 実験方法

2.1. 供試体

表-1 に本研究で用いた供試体一覧を示す。鋼管は 1.0, 1.6, 2.3mm の鋼板を円形に加工後、溶接して作成している。供試体の高さ (H) = 450mm,

*1 神戸市立工業高等専門学校 都市工学科助教授 博(工) (正会員)

*2 神戸市立工業高等専門学校専攻科 都市工学専攻

*3 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系助教授 博(工) (正会員)

表-1 供試体一覧

No.	Tag.	Steel Tube						Conc. Area (mm ²)	Material Properties (MPa)			
		thick.(mm)		ratio	Dia.(mm)		Area(mm ²)		f_c	f_{yo}	f_{yi}	
		t_o	t_i	t_i/t_o	D_o	D_i	A_{so}	A_{si}				A_c
1 ²⁾	t10-10	0.90	0.90	1.0	160	114	633	375	9227	18.7	221	221
2	t10-16	0.88	1.52	1.7	159	116	521	547	8848	25.1	301	326
3	t10-23	1.00	2.18	2.2	160	117	533	740	8927	25.1	301	232
4	t16-10	1.55	0.90	0.6	159	114	678	341	8991	25.1	326	301
5 ²⁾	t16-16	1.50	1.50	1.0	160	114	667	559	8811	18.7	308	308
6	t16-23	1.47	2.13	1.5	160	117	748	713	8559	25.1	326	232
7	t23-10	2.17	0.90	0.5	160	114	1105	376	8688	25.1	232	301
8	t23-16	2.17	1.52	0.7	160	116	991	534	8568	25.1	232	326
9 ²⁾	t23-23	2.30	2.30	1.0	160	115	1174	733	8154	18.7	286	286

Note; t_o : Outer tube's thickness, t_i : Inner tube's thickness, D_o : Outer tube's diameter, D_i : Inner tube's diameter, f_c : Concrete cylindrical strength, f_{yo}, f_{yi} : Yielding point of outer and inner tubes.

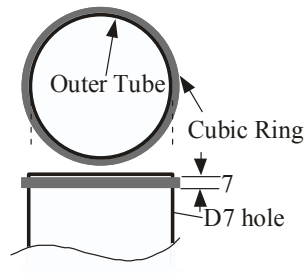


図-2 外鋼管の溶接割れ防止

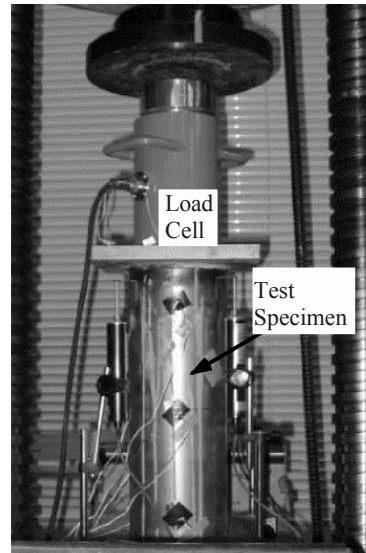


図-4 載荷風景

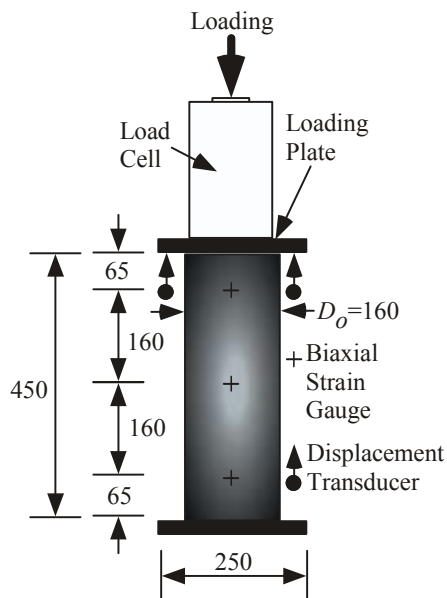


図-3 載荷方法(単位: mm)

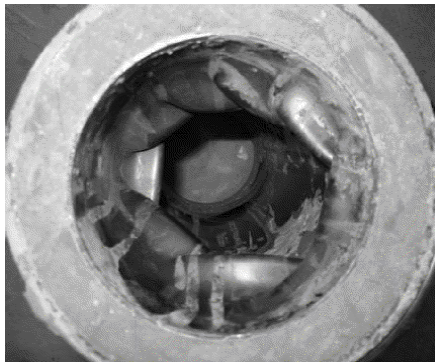
外鋼管径 (D_o) =160mm, および内鋼管径 (D_i) =112.5mm は固定している。

また, 使用したコンクリートのスランプは150mm, 粗骨材の最大寸法は内外鋼管の間が25mm 程度のため15mm とした。

次に, 供試体名の t の添え字は外鋼管厚さ ($t_o=1.0, 1.6, 2.3\text{mm}$) を, ハイフンに続く数字は内鋼管厚 ($t_i=1.0, 1.6, 2.3\text{mm}$) をそれぞれ示している。したがって, 実験変数である内鋼管厚・外鋼管厚比 (t_i/t_o) は0.5~2.2 の範囲となる。なお, 外鋼管上端には7×7mm の鋼棒を溶接し, 外鋼管の溶接割れを防止した(図-2 参照)。載荷方法(図-3, 図-4 参照)は2MN アムスラー載荷試験



(a) t16-10



(b) t16-23

図-5 破壊形式

機を用いてロードセル，球座を介して，20mm 程度の変形，あるいは破壊に至るまで中心圧縮载荷した。また，载荷中は供試体の膨らみ，ならびに鋼管の座屈を目視観察した。

2.2. 測定項目

二軸ひずみゲージを供試体前後，中心から上下 160mm 離れた鋼管表面（内，外鋼管の前面 3 箇所，背面 3 箇所の合計 6 箇所）に貼付し，鋼管の軸方向ひずみ (ε_z)，ならびに周方向ひずみ (ε_θ) を測定した（図-3，+印）。また，変位計を前方 2 箇所，後方 1 箇所の合計 3 箇所設置し，供試体の部材軸方向変形を測定した。なお，载荷風景は図-4 に示すとおりである。

3. 実験結果と考察

3.1. 破壊形式

まず，図-5 (a) に CFDT の典型的な破壊の外観を示す。得られた破壊形式は，コンクリート

表-2 算定強度と実験強度

No.	Tag.	Axial Strength Ratio		
		N_u (kN)	N_{exp} (kN)	$\frac{N_{exp}}{N_u}$
1 ⁵⁾	t10-10	433	378	0.87
2	t10-16	599	458	0.76
3	t10-23	599	597	1.00
4	t16-10	609	630	1.04
5 ⁵⁾	t16-16	598	589	0.99
6	t16-23	690	761	1.10
7	t23-10	657	772	1.18
8	t23-16	681	759	1.11
9 ⁵⁾	t23-23	788	704	0.89

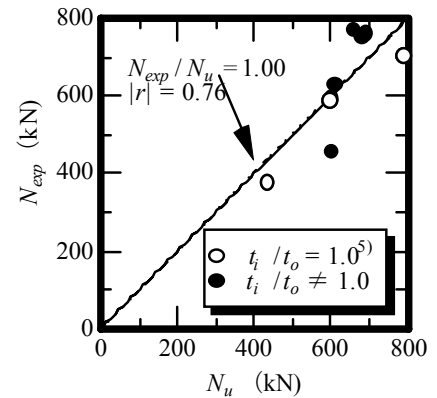


図-6 最大強度と算定強度

がせん断破壊し，外鋼管中央付近に局部座屈をもたらすものであった。なお，外鋼管の溶接割れは見られなかった。

つぎに，図-5 (b) に内鋼管の破壊状況を示す。同写真より，内鋼管も同様にコンクリートのせん断破壊面に沿って，らせん階段状に局部座屈を呈していることが分かる。なお，内・外鋼管厚比の変化による破壊形式の差異は見られなかった。

3.2. 中心圧縮強度

(1) 算定強度

表-2 に本実験で得られた中心圧縮強度 (N_{exp}) と算定強度 (N_u) を示す。ここで， N_u とは日本建築学会で提案されている CFT の中心圧縮強度算定式³⁾であり，(1)式のとおりとなる。

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

ここで、 N_u : 算定中心圧縮強度、 A_c, A_s : コンクリートおよび鋼管の断面積、 f_c : コンクリート強度、 f_j : 鋼管の降伏強度、 η : 鋼管の拘束効果による柱の耐力上昇係数³⁾(円形鋼管: 0.27)をそれぞれ示す。

つぎに、CFDT は CFT 同等の拘束効果を得ると考えて、外鋼管のみに拘束効果を考慮した(2)式に修正した。

$$N_u = A_c f_c + (1 + \eta) A_{so} f_y + A_{si} f_y \quad (2)$$

ここで、 A_{so}, A_{si} : 外および内鋼管断面積である。以下、(2)式を算定強度 (N_u) としている。

図-6 に中心圧縮強度 (N_{exp}) と(2)式を用いた算定強度 (N_u) との関係を示す。なお、図中○は文献5)の $t_i/t_o = 1.0$ 、●は $t_i/t_o \neq 1.0$ をそれぞれ示している。同図より、これら全供試体の相対比 (N_{exp}/N_u) = 1.00, 相関係数 $|r| = 0.76$ となり、ばらつきは大きいものの、CFDT は(2)式を用いて概ね評価できることを示している。すなわち、CFDT の中心圧縮強度は CFT と同様な手法によりに評価できることが分かる。

(2) 内・外鋼管厚比

まず、図-7 は t_i/t_o と中心圧縮強度の関係を示したものである。同図より、 $t_i/t_o = 1$ の供試体よりも t_i/t_o を変化させた方が算定強度 (N_u) と同等、あるいは上回る傾向が窺える。したがって、内鋼管径を大きくし、中空の断面積が増加しているにも関わらず、 t_i/t_o を変化させることにより、CFT に近い拘束効果が得られたことが理解できる。

(3) 重量比

図-8 には中心圧縮強度の比と重量の比の関係を示している。ここで、 W_{CFT}, N_{CFT} とは、内鋼管の存在を無視して外鋼管のすべてにコンクリートを充填した場合の CFT の重量、および(1)式より求められる中心圧縮強度をそれぞれ示したものであり、 W_{CFDT} とは、本実験で用いた供試体の重量である。また、鋼およびコンクリートの単位体積重量 (γ_s, γ_c) はそれぞれ 77 kN/m^3 ,

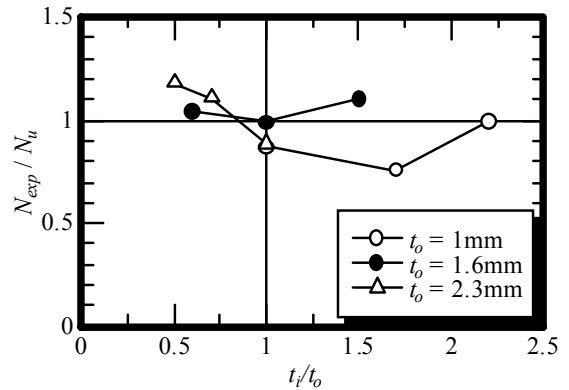


図-7 t_i / t_o と最大強度

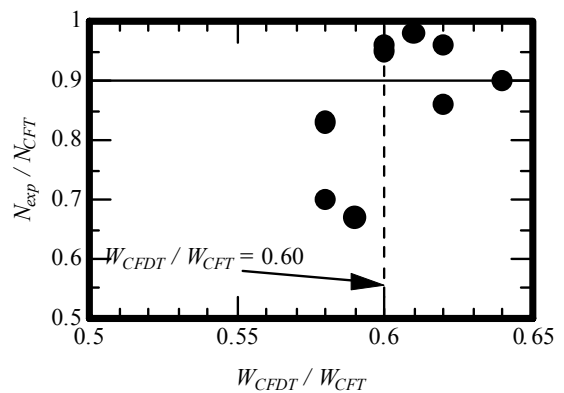


図-8 強度比と重量比

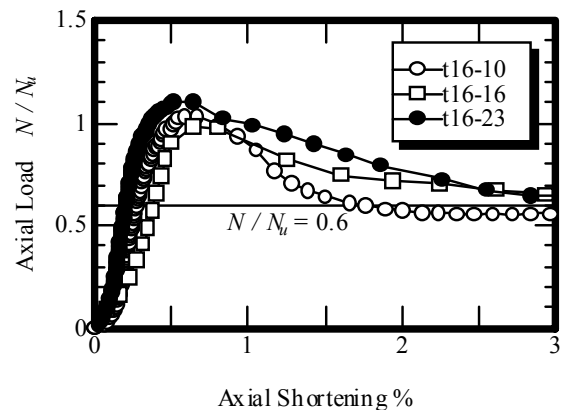


図-9 変形特性

23 kN/m^3 としている。図より、CFDT は CFT の重量の 60%程度まで低下させても CFT の 90%程度の中心圧縮強度が期待できることが分かる。

3.3. 変形特性

図-9 に外鋼管が 1.6mm の供試体の中心圧縮荷重 (N/N_u) と変位の関係を示す。なお、図中横軸は得られた部材軸方向変位を供試体高さ (H

=450mm) で除したものであり、高さの比率で表記している。

同図より、それぞれ供試体の軸方向剛性の違いにより、初期剛性は異なるものの、最大強度到達後、前述の図-5で示したコンクリートのせん断破壊を起こした後、鋼管の局部座屈が進行しながら強度が低下し、3%変位では t_i/t_o の変化に関係なく概ね $N/N_u = 0.6$ 程度に収束していった。また、 $t_i/t_o > 1.0$ の供試体(●)の最大耐力到達後の挙動は、耐力低下が緩やかであることも分かる。なお、この傾向はすべての供試体において観察された傾向であることを付記しておく。

3.4. 2軸応力状態

図-10, 11に外、内鋼管の応力履歴を示す。ここで、図中の点線は平面応力状態における Von Mises の降伏曲線であり、(2)式のとおりを表される。

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

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⁶⁾となり、(3)式の通りとなる。

$$\begin{pmatrix} \sigma_z \\ \sigma_\theta \end{pmatrix} = \left\{ \frac{E_s}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & -\nu \\ -\nu & 1 \end{bmatrix} - \frac{1}{S} \begin{bmatrix} S_1^2 & S_1 S_2 \\ S_1 S_2 & S_2^2 \end{bmatrix} \right\} \begin{pmatrix} \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \end{pmatrix} \quad (3)$$

ただし、

$$S_1 = \frac{E_s}{1-\nu^2} (s_z + \nu s_\theta) \quad (4)$$

$$S_2 = \frac{E_s}{1-\nu^2} (s_\theta + \nu s_z) \quad (5)$$

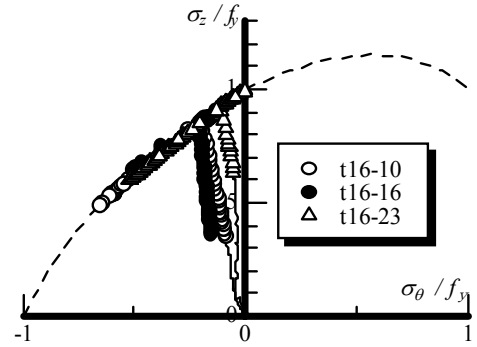


図-10 外鋼管の応力状態

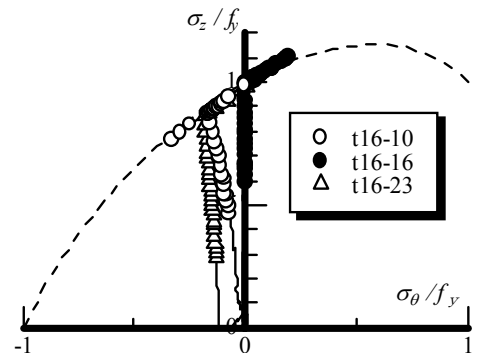


図-11 内鋼管の応力状態

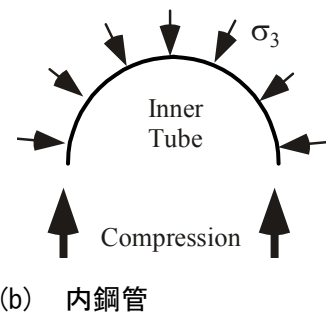
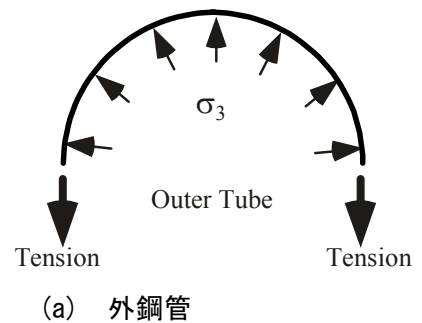


図-12 応力作用図

$$S = \frac{4}{9} f^2 H' + (S_1 s_z + S_2 s_\theta) \quad (6)$$

である。ここで、 s_{θ} , s_z : 周方向ならびに軸方向の偏差応力, ν : 鋼管のポアソン比, ε_z , ε_{θ} : 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-10, ならびに 11 である。なお、これらの図は、圧縮を正の値として取り扱っている。

図-10 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、引張側に流動していった。

一方、図-11 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-12 に示すように充填コンクリートが終局状態に近づくと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り応力 (σ_3) が発生し、外鋼管には引張応力 (図-12(a)) を、内鋼管には圧縮応力 (図-12(b)) を作用させているものと考えられる。このような拘束応力が発生することにより、CFDT は CFT と同様な強度、および 3.3 節の変形特性が得られたと思われる。また、内鋼管の周方向応力の測定プロット数が外鋼管より少ない理由は、内鋼管のひずみゲージは充填コンクリートに接しており、載荷荷重が大きくなるに従って、充填コンクリートがひずみゲージに大きな力を与え、コードが断線し、測定不可能にしているためである。なお、内・外鋼管厚比の変化による応力状態の差異は認められなかった。

4. まとめ

本研究では、内径・外径比を一定とし、内・外鋼管厚比の異なる 9 体の CFDT 供試体の中心圧縮実験を行い、主として軽量化が中心圧縮強度に与える影響について、実験的に検討したものである。結論づけられる事項を列記すると以下の通りである。

- (1) 観察された破壊形式はコンクリートがせん断破壊し、その破壊面に沿って鋼管が座屈するものであった。

- (2) CFDT の中心圧縮強度は CFT のそれとほぼ同等に評価できた。
- (3) 内鋼管径が大きく、中空の断面積が増加しているにも関わらず、 t_i / t_o を変化させることにより、中心圧縮強度の上昇、すなわち CFT と同等の拘束効果が得られた。
- (4) CFDT の中心圧縮強度は CFT の 60%程度の重量で CFT の算定強度の 90%程度を保持した。
- (5) CFDT の荷重-変位関係は、 t_i / t_o に関係なく 3%変位では算定強度の 60%程度を保持していた。
- (6) 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、引張側に流動した。一方、内鋼管においては (σ_z) が降伏に到達後、(σ_{θ}) が圧縮方向に流動した。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。

謝辞

載荷実験を行うに当たっては、当時神戸市立工業高等専門学校に在籍された早見真氏 (現ダイタン)、後藤誠志氏 (現山崎建設)、西田康人氏 (現豊橋技術科学大学)、橋本和朗氏 (現広島大学) にご協力頂きました。心より感謝いたします。

参考文献

- 1) Wei, S. et.al: 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.
- 2) Wei, S. et.al: 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 上中他: 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, 第 5 回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp. 105-110, 2003.
- 6) 吉田: 弾塑性力学の基礎, 共立出版, pp. 188-190, 1997.