

論文 二重ステンレス鋼管・コンクリート合成短柱の圧縮強度

上中宏二郎^{*1}・角掛久雄^{*2}

要旨: ステンレス鋼はさびないという利点があり、今後の土木、建築構造物への活用が期待されている。二重ステンレス鋼管・コンクリート充填鋼管(CFDSST)部材とは、異なる2種類のステンレス鋼管の間のみにコンクリートを充填した新しい構造物であり、従来のコンクリート充填鋼管部材より軽量となる利点を有する。本研究では、CFDSST 短柱の中心圧縮実験を行った。実験変数は、鋼管の径厚比、ならびに内鋼管と外鋼管の直径の比である。得られた破壊形式、変形性能、応力状態から CFDSST 部材の中心圧縮強度推定式を提案した。最後に、中心圧縮力を受ける CFDSST 短柱の鋼管の応力状態について言及した。

キーワード: コンクリート充填鋼管部材, CFDSST, 径厚比, 内径・外径比, 中心圧縮強度

1. はじめに

ステンレス鋼¹⁾³⁾は、防錆効果を有していることは周知の事実である。また、ステンレス鋼の土木構造物への適用が、鋼構造の分野でされてきている⁴⁾⁵⁾。ステンレス鋼を土木、ならびに構造物へ活用すれば、防錆効果が期待できるため、炭素鋼と比較してメンテナンスの負担を軽減できると考えられる。特に、ステンレス鋼の SUS304 はさびや腐食に強いとされている。さらに、ステンレス鋼は破断までのひずみが炭素鋼よりも大きいため、高いじん性効果も期待できる。

コンクリート充填鋼管(Concrete filled steel tubular, CFT)部材⁶⁾とは、炭素鋼管内にコンクリートを充填した合成構造部材であり、型枠が不要であることや鋼管内部の充填コンクリートが三軸応力状態となるため、優れた耐震性能を有することは周知の事実である。特に、円形鋼管の CFT においては、この拘束効果が顕著に表れるとされている。

ところで、ステンレス鋼管にコンクリートを充填したコンクリート充填ステンレス鋼管(Concrete filled stainless steel tubular, CFST, 断面は図-1 a)参照)部材の力学特性に関する検討が国外でみられる⁷⁾⁸⁾。また、同心円上に2種類の鋼管を配置した2重ステンレス鋼管合成(Concrete filled double stainless steel tubular, CFDSST, 断面は図-1b)参照)部材の検討⁹⁾もなされている。しかしながら、上述で行われたもののステンレス鋼管の直径と鋼管厚の比、すなわち径厚比(D/t)は100以下のものである。

このような背景のもと、著者らは、橋脚を対象とした大きな100以上の径厚比を有するCFST短柱の基礎的実験¹⁰⁾を行った。実験変数はステンレス鋼管の径厚比であり、径厚比が中心圧縮特性に与える影響を検討した。得られた結果より、CFST短柱は、従来のCFT短柱と同じ

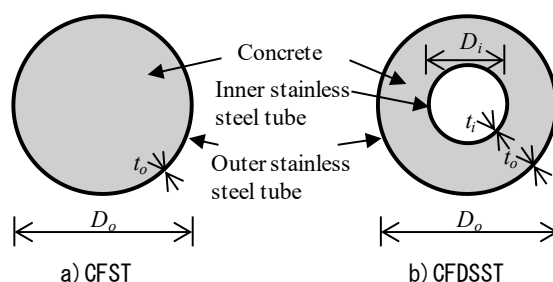


図-1 CFDSST と CFST の断面

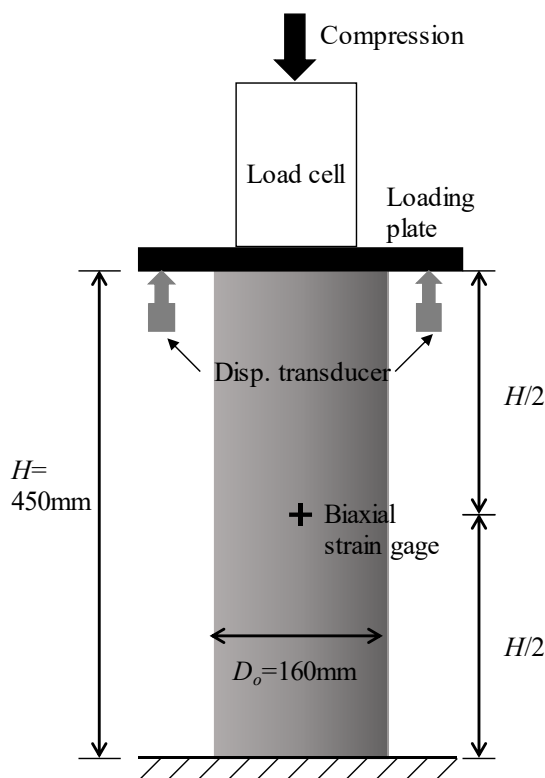


図-2 荷重方法

^{*1} 神戸市立工業高等専門学校教授 都市工学科 博士(工学) (正会員)

^{*2} 大阪公立大学大学院教授 工学研究科都市系専攻 博士(工学) (正会員)

表－１ 供試体一覧

No.	Tag	Stainless steel tube					Concrete		
		Outer diam.	Inner diam.	Thick.	Ratio		f_{02}	f_u	f'_c
		D_o (mm)	D_i (mm)	t_i, t_o (mm)	D_i/D_o	D_o/t_o	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)
1	10-000	160	0	1.00	0.00	160	261	586	56.0
2	10-076		76		0.48		309	598	45.5
3	10-113		113		0.71				
4	15-000		0	1.50	0.00	107			44.0
5	15-076		76		0.48		276	558	45.5
6	15-113		113		0.71				
7	20-000		0	2.00	0.00	80			44.0
8	20-076		76		0.48		306	600	45.5
9	20-113		113		0.71				

破壊形式を示したこと、算定強度はステンレス鋼とコンクリートの累加強度でおおむね表現できることを確認した。なお、優れた変形性能、ならびに防錆効果を有するCFSST部材であるが、CFSST部材を軽量化させ、柱部材などに適用すれば、橋脚などの柱部材の耐震性能をさらに向上させることが可能であると考えられる。

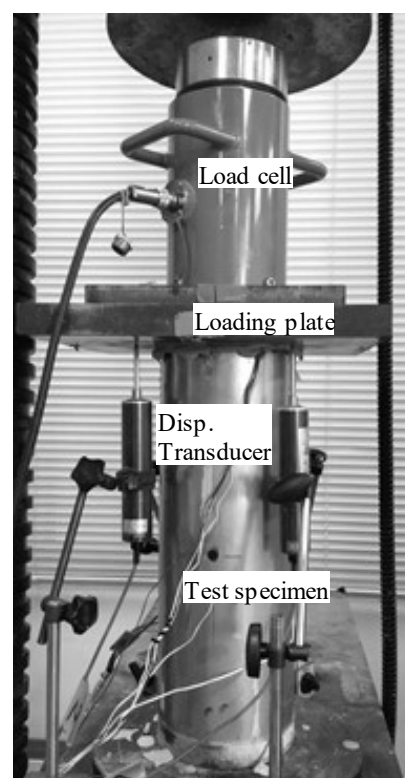
そこで本研究では、直径が異なる２種類のステンレス鋼管を同心円上に配置し、両鋼管の間のみにコンクリートを充填したCFDSST短柱の中心圧縮特性に関する実験的検討を行った。実験変数は、外鋼管の比較的大きな径厚比(D_o/t_o)、ならびに内鋼管と外鋼管の直径の比、すなわち内径・外径比(D_i/D_o)である。得られた破壊形式、変形性能、および中心圧縮強度よりCFDSST短柱の中心圧縮特性について考察した。さらに、内外のステンレス鋼管に貼付したひずみゲージよりステンレス鋼管の応力状態を調べた。最後に、内径・外径比の影響を考慮したCFDSST短柱の中心圧縮強度の定量的な把握を行った。

2. 実験方法

2.1 供試体の概要

表－１に供試体一覧を示す。使用したステンレス鋼管は、SUS304であり、鋼板板厚1.0, 1.5, ならびに2.0mmのステンレス鋼板を円形状に成型し溶接して製作した。外側のステンレス鋼管の直径(D_o)、ならびに短柱の高さ(H)は160mm ならびに450mm とそれぞれ一定の長さにしてしている。また、内側のステンレス鋼管の直径(D_i)は0mm(CFSST), 76mm, および113mm である。さらに、内外鋼管厚(t_i, t_o)は1.0, 1.5, および2.0mm の合計３種類であり、内外の両鋼管厚(t_i, t_o)は等しい値に設定している。したがって、内鋼管・外鋼管径比(D_i/D_o)は0.0 から0.7, 外鋼管の径厚比(D_o/t_o)は80 から160 の範囲となる。

つぎに、表－１の第８列から９列には、ステンレス鋼



写真－１ 載荷風景

管の基準強度の0.2%耐力 f_{02} 、ならびに最大引張強度 f_u 、をそれぞれ示している。同表最終列にはコンクリートの圧縮強度 f'_c をそれぞれ示している。なお、コンクリートには早強セメントを用いており、３週間以上の養生期間を設けた。

2.2 測定項目

図－２に載荷方法と測定項目を示す。供試体上部と載荷板の間にはジェットセメントにより、水平な状態に整えてから、球座、ロードセル、載荷板を介して2MN圧縮載荷試験装置を用いて単調載荷方法により中心圧縮力を

表－２ 実験結果

No.	Tag	D_i/D_o	Axial strength					Ratio		
			N_c (kN)	N_{si} (kN)	N_{so} (kN)	N_{02} (kN)	N_{02-85} (kN)	N_{exp} (kN)	N_{exp}/N_{02}	N_{exp}/N_{02-85}
1	10-000	0.00	1098.0	0.0	130.4	1228.3	1063.7	1229.9	1.00	1.16
2	10-076	0.48	685.7	72.8	154.3	912.9	810.0	812.7	0.89	1.00
3	10-113	0.71	435.8	108.7	154.3	698.9	633.5	496.0	0.71	0.78
4	15-000	0.00	851.8	0.0	206.1	1058.0	930.2	1207.0	1.14	1.30
5	15-076	0.48	674.4	96.9	206.1	977.5	876.3	877.8	0.90	1.00
6	15-113	0.71	424.5	145.0	206.1	775.7	712.0	582.3	0.75	0.82
7	20-000	0.00	841.0	0.0	303.8	1144.8	1018.6	1349.0	1.18	1.32
8	20-076	0.48	663.3	142.3	303.8	1109.3	1009.8	875.8	0.79	0.87
9	20-113	0.71	413.4	213.4	303.8	930.5	868.5	601.0	0.65	0.69

CFDSST 短柱に作用させた。

また、内外鋼管外側高さ方向中心($H/2$)の位置に 2 軸ひずみゲージをそれぞれ 1 枚、合計 2 枚貼付し、内外ステンレス鋼管の 2 軸ひずみ($\varepsilon_z, \varepsilon_\theta$)を測定した。さらに、載荷上部には変位計を 3 台設置し、CFDSST 短柱の軸方向変位(δ)を測定した。最後に、本研究の載荷風景を写真－1 に示す。

3. 実験結果と考察

3.1 破壊形式

写真－2 に載荷終了後の破壊形態を示す。写真－2 a), b) に示すように、CFST, ならびに CFDSST の外鋼管の破壊形式は、充填コンクリートのせん断破壊に伴うステンレス鋼管の座屈が生じ、終局状態に至った。この傾向は従来の炭素鋼管を用いた CFT 短柱の結果とおおむね一致している。また、これは大きな径厚比を有する既報の CFSST 短柱の結果と一致している¹⁰⁾。さらに、CFDSST 短柱においては、鋼管上部にも局部座屈が見られる。これは、部材厚が薄くなるため、載荷板近傍に座屈が発生しやすくなると考えられる。

つぎに、写真－2 c) に内鋼管内部の実験終了後の状態を示す。コンクリートのせん断破壊面に沿って内側に鋼管がらせん階段のように内側へ局部座屈を起こしていることが確認できた。

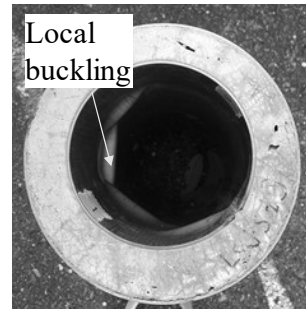
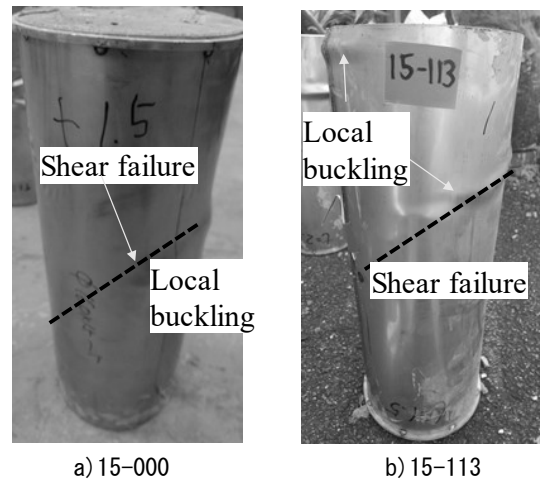
3.2 中心圧縮強度

(1) 概要

まず、CFDSST 短柱の中心圧縮強度を求めるにあたり、以下の鋼管とコンクリートの累加式を用いて算定中心圧縮強度(N_{02})とする。

$$N_{02} = N_{so} + N_{si} + N_c \quad (1)$$

N_{so}, N_{si} , および N_c は外鋼管, 内鋼管, および充填コンクリートの強度であり、以下の通りとなる。

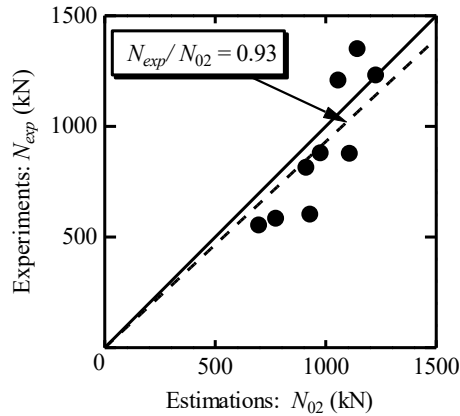


c) 20-113

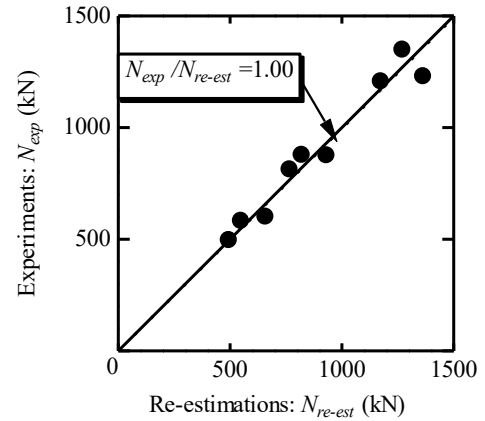
写真－2 破壊形式

$$N_{so} = A_{so} \cdot f_{02}, \quad N_{si} = A_{si} \cdot f_{02}, \quad N_c = A_c \cdot f'_c \quad (2a, b, c)$$

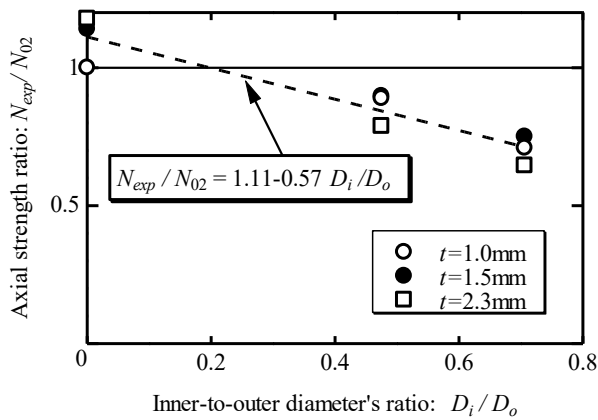
ここで、 A_{so}, A_{si}, A_c は外鋼管, 内鋼管, ならびに充填コンクリートの断面積, f_{02} はステンレス鋼管の 0.2% 強度, f'_c は充填コンクリートの圧縮強度をそれぞれ示す。これから N_{so}, N_{si}, N_c , ならびに N_{02} を表－2 内の第 4～7 列にまとめている。なお、同表内第 8 列の N_{02-85} とは上記 N_c に 0.85 を乗じたものである。



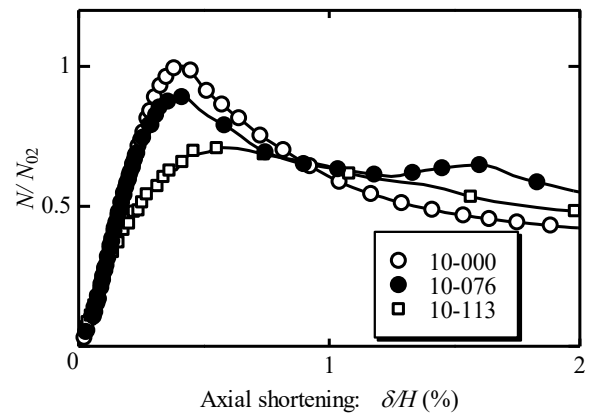
図－３ 算定中心圧縮強度と実験中心圧縮強度



図－５ N_{re-est} と N_{exp}



図－４ 中心圧縮強度比と内径・外径比



図－６ 作用中心圧縮力と軸方向変形

(2) 実験中心圧縮強度

図－３に算定中心圧縮強度(N_{02})と実験中心圧縮強度(N_{exp})の関係を示す。同図より、相対比 $N_{exp}/N_{02}=0.93$ となり、実験中心圧縮強度は算定中心圧縮強度よりも 7%程度低下しているものの、おおむね予測できていることがわかる。また、表－２内第 10 列に示すように、 N_{exp}/N_{02} は内鋼管を有する CFDSST は CFSST と比較して低下する傾向にある。これは、内鋼管による充填コンクリートへの拘束効果の低下が起因すると考えられる。なお、 N_{02-85} と実験強度を比較すると相対比 N_{exp}/N_{02-85} は 1.03 となり、実験中心圧縮強度は N_{02-85} を用いておおむね評価できることもわかった。

(3) 中心圧縮強度比と内径・外径比

図－４に実験中心圧縮強度と算定中心圧縮強度の比(N_{exp}/N_{02} 、以下、中心圧縮強度比と称する)と内径・外径比(D_i/D_o)の関係を示す。外鋼管の径厚比に関係なく D_i/D_o が大きくなるという結果から中心圧縮強度比は低下する強い傾向がわかる。この結果を最小二乗法にて近似させると以下の関係が得られた。

$$\frac{N_{exp}}{N_{02}} = 1.11 - 0.57 \frac{D_i}{D_o} \quad (3)$$

上式の相関係数は 0.94 となり、圧縮強度比と内径・外径比は強い相関がみられた。以上より、CFDSST 短柱の中心圧縮強度は内径・外径比に大きく影響を受けることがわかった。この傾向は炭素鋼管を用いた CFDST 短柱のもの¹¹⁾とおおむね一致した。

以上より、内径・外径比(D_i/D_o)を考慮した CFDSST 短柱の中心圧縮強度推定式(N_{re-est})は以下の通りとなる。

$$N_{re-est} = \left(1.11 - 0.57 \frac{D_i}{D_o}\right) (A_{so}f_{02} + A_{si}f_{02} + A_{cf}f_c') \quad (4)$$

図－５に N_{exp} と N_{re-est} の関係を示す。内径・外径比(D_i/D_o)を考慮した式(4)は、実験値を精度良く評価していることがわかった。

3.3 変形性能

図－６に作用中心圧縮力(N)を算定中心圧縮強度(N_{02})で除した N/N_{02} と軸方向変位(δ)を供試体高さ(H)で除した δ/H の関係を示す。なお、軸方向変位(δ/H)は百分率で

表している。

同図より、最大値は0.5%の変位近傍でそれぞれ最大値を迎えるものの、 D_i/D_o が大きくなると最大値が低下していることがわかる。その後、徐々に変形は進行するが、急激に耐力低下を起こすことなく、2%の変位近傍ではおおむね $N/N_{02}=0.5$ に収束していることがわかる。

3.4 ステンレス鋼管の応力

(1) 二軸応力の計算¹²⁾

内外ステンレス鋼管の外側には2軸ひずみゲージを供試体高さ中央の南北方向にそれぞれ貼付している。これらを用いて炭素鋼管と同様の方法で充填コンクリートからのステンレス鋼管の2軸応力を以下に示す Prandtl-Reuss の式を用いて計算する。

まず、平面応力状態における von Mises の降伏条件は以下の通りとなる。

$$f_s = \sigma_z^2 - \sigma_z \cdot \sigma_\theta + \sigma_\theta^2 - f_{02}^2 \quad (5)$$

ここで、 σ_z, σ_θ は軸方向ならびに周方向の応力、 f_{02} はステンレス鋼材の0.2%耐力をそれぞれ示す。弾性範囲内においては、二軸方向のひずみ増分 $d\epsilon_z, d\epsilon_\theta$ を用いて2軸応力の増分 $d\sigma_z, d\sigma_\theta$ は以下の通りに表される。

$$\begin{bmatrix} d\sigma_z \\ d\sigma_\theta \end{bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu \\ \nu & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\epsilon_z \\ d\epsilon_\theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

また、 E はステンレス鋼管のヤング係数(=200kN/mm²)、 ν はポアソン比(=0.3)である。

つぎに、鋼管が弾塑性状態 $f_s=0$ となったとき、応力増分 $d\sigma_z, d\sigma_\theta$ は以下の通りとなる。

$$\begin{bmatrix} d\sigma_z \\ d\sigma_\theta \end{bmatrix} = \left\{ \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu \\ \nu & 1 \end{bmatrix} - \frac{1}{S} \begin{bmatrix} S_1^2 & S_1 S_2 \\ S_1 S_2 & S_2^2 \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} d\epsilon_z \\ d\epsilon_\theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

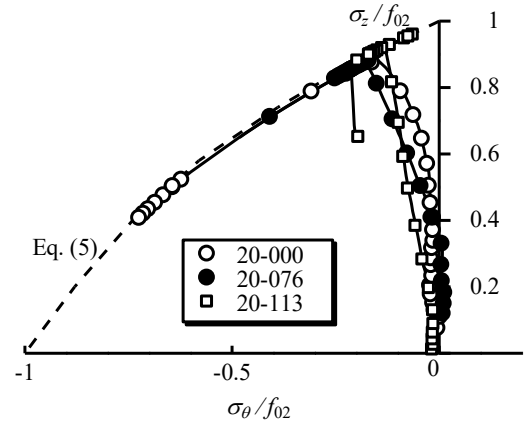
ここで、 S_1, S_2, S は以下の通りとなる。

$$S = s_z S_1 + s_\theta S_2$$

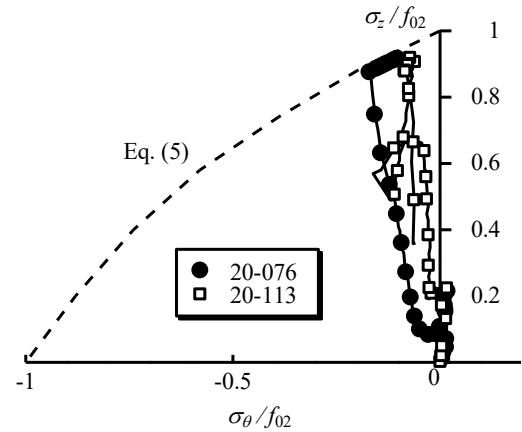
$$S_1 = \frac{E}{1-\nu^2} (s_z + \nu s_\theta) \quad (8a, b, c)$$

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

以上より、ステンレス鋼管に作用する二軸応力は以下の通りに求めることができる。



図－7 外鋼管の応力状態



図－8 内鋼管の応力状態

$$\sigma_z = \Sigma d\sigma_z, \quad \sigma_\theta = \Sigma d\sigma_\theta \quad (9)$$

ステンレス鋼管が弾性範囲内($f_s < 0$)なら式(6)から、塑性状態においては式(7)により応力増分を求め、式(9)によりステンレス鋼管に作用する軸方向(σ_z)、ならびに周方向応力(σ_θ)を計算する。なお、ここで取り扱う2軸応力は圧縮を正の値として取り扱っている。

(2) 外鋼管

図－7に外鋼管の2軸応力状態を示す。ここで、 x, y 軸ともにひずみより得られた応力(σ_z, σ_θ)をステンレスの0.2%耐力(f_{02})で無次元化している。また、式(5)を図中破線で表している。

同図より、軸方向応力(σ_z)が降伏曲線に到達後、周方向応力(σ_θ)は引張方向に流動した。これは、炭素鋼管のCFDSTと同様に充填コンクリートの正のダイレイタンスーによるものと考えられる。

(3) 内鋼管

図－8に内鋼管の2軸応力状態を示す。なお、同図も x, y 軸を f_{02} で無次元化している。同図より、軸方向応力(σ_z)が降伏曲面に到達する挙動は外鋼管と類似するもの

の、到達後の挙動は異なるものであった。これは、外鋼管ほどコンクリートのダイレイタンスの影響を受けないものと考えられる。したがって、内鋼管の拘束効果が十分に得られないため、内径・外径比が大きくなると中心圧縮強度比が低下したと考えられる。

4. まとめ

本研究は、同心円上に異なる直径のステンレス鋼管を配置した大きな径厚比を有するCFDSST短柱の中心圧縮特性を9体の供試体から主に内径・外径比に着目し、実験的に検討したものである。結論付けられる事項を列記すると以下のとおりである。

- (1) 得られた破壊形式はコンクリートのせん断破壊に伴う内外鋼管の局部座屈であった。また、外鋼管は外側に、内鋼管は内側に座屈形状が現れた。外鋼管の破壊形状に関しては既報¹⁰⁾のCFSST短柱の結果と同じであった。
- (2) CFDSST短柱の中心圧縮強度は、内外鋼管、コンクリートの累加強度でおおむね予測することが可能であった。
- (3) 一方、内径・外径比(D_i/D_o)が大きくなると中心圧縮強度比(N_{exp}/N_{02})は低下する傾向が見られた。これは、鋼管とコンクリート間の拘束効果が低下したためと考えられる。
- (4) 上記(3)より、内径・外径比の影響を含んだ推定中心圧縮強度(N_{re-est})を算定すると、推定圧縮強度は実験結果を良好に評価した。
- (5) 中心圧縮力を算定中心圧縮強度 N_{02} で除したもの (N/N_{02})と軸圧縮変位の関係を調べたところ、内径・外径比の影響を受けることなく、0.5%の変位で最大強度となった。また、 N/N_{02} は内径・外径比が大きくなると低下していることがわかった。さらに、2%の変位では、内径・外径比に関係なく N/N_{02} は0.5の値となった。
- (6) Prandtl-Reussの式を用いてステンレス鋼管の弾塑性応力を計算したところ、外鋼管の軸方向応力は f_{02} に到達後、周方向応力は引張方向へ流動した。これは、従来の炭素鋼管と同様にみられる正のダイレイタンスの影響であると考えられる。
- (7) 内鋼管の応力挙動は、(5)で上述の外鋼管と同様に軸圧縮応力が増加し、圧縮降伏応力には到達するものの、周方向へ流動する前に終局状態に至った。

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

専門学校の都市工学科5年生、ならびに都市工学専攻科に在籍された学生諸君にご協力いただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) ステンレス協会市場開発委員会：ステンレスの初歩，2007.
- 2) 板倉孝明：ステンレス構造材の基礎知識，ステンレス鋼とは(その1)，ステンレス建築，No. 32, pp. 26-29, 2007.
- 3) 板倉孝明：ステンレス鋼材の基礎知識，ステンレス鋼とは(その2)，ステンレス建築，No. 33, pp. 26-29, 2007.
- 4) Gedge, G: Structural Uses of Stainless Steel – Buildings and Civil Engineering, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol. 64, pp. 1194-1198, 2008.
- 5) 松下裕明，矢吹哲哉，有住康則，下里哲弘：ステンレス鋼－構造用鋼ハイブリッド圧縮補剛版の耐力評価，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol. 69, No. 1, pp. 121-132, 2013.
- 6) 日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針，2008.
- 7) Lam, D. and Gardner, L.: Structural Design of Stainless Steel Concrete Filled Columns, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol. 64, pp. 1275-1282, 2008.
- 8) Brian Uy, Zhong Tao and Han, L. H.: Behaviour of Short and Slender Concrete-filled Stainless Steel Tubular Columns, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol. 67, pp. 360-378, 2011.
- 9) Hassanein, M. F., Kharoob, O. F. and Liang, Q. Q.: Circular Concrete-Filled Double Skin Tubular Short Columns with External Stainless Steel Tubes under Axial Compression, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol. 73, pp. 252-263, 2013.
- 10) 上中宏二郎：コンクリート充填ステンレス鋼管短柱の中心圧縮特性に関する基礎実験，コンクリート工学年次論文集，日本コンクリート工学会，Vol. 39, No. 2, pp. 985-990, 2017.
- 11) Uenaka, K., Kitoh, H. and Sonoda, K.: Concrete Filled Double Skin Circular Stub Columns under Compression, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol. 48, Issue 1, pp. 19-24, 2010.
- 12) 吉田総仁：弾塑性力学の基礎，共立出版，pp. 188-190, 1997.