

論文 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

上中 宏二郎^{*1}

要旨 : Life Cycle Cost の観点から、高防錆効果を有するステンレスの活用が鋼構造の分野で盛んとなりつつある。本研究では、ステンレス鋼材の新しい利用方法として、コンクリートをステンレス鋼管に充填したコンクリート充填ステンレス鋼管短柱部材の中心圧縮特性について、基礎的な実験的検討を合計 5 体行った。得られた結果より、従来のコンクリート充填鋼管構造の中心圧縮強度と比較した。さらに、径厚比が変形性能に与える影響について議論した。最後に、充填コンクリートとステンレス鋼管の間に作用する応力状態について言及した。

キーワード : コンクリート充填ステンレス鋼管(CFSST), 径厚比, 中心圧縮載荷, 二軸応力

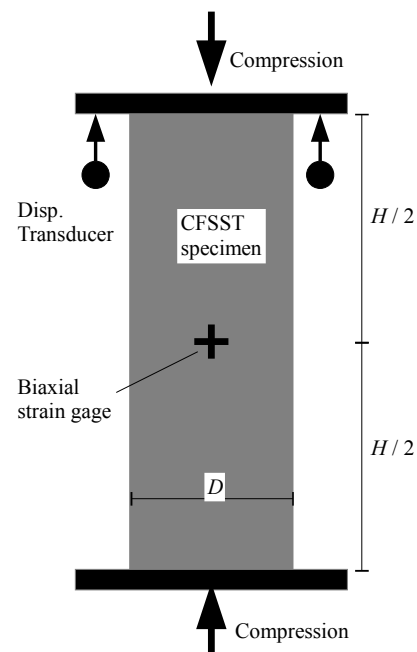
1. はじめに

Life Cycle Cost(LCC)の観点から、高防食な特性を有するステンレス鋼部材¹⁾⁴⁾の利用が主に鋼構造の分野でなされている。周知のとおり、ステンレス鋼材は、従来の炭素鋼材と比較して防錆効果があるため、施工後のメンテナンスのコストを低減できると期待できる。また、力学的観点の見地からは、普通炭素鋼材と比較して、ポアソン比は概ね同じであるが、降伏点は明確に現れないこと、また、破断に至るまでの伸びが大きいことが大きな特徴である。なお、我が国の土木分野では、外気に触れる一部分にステンレス鋼を用いたハイブリッド橋梁構造が提案されている⁵⁾。

本研究では優れた耐震性能を有する従来のコンクリート充填鋼管(Concrete filled steel tubular, 以下, CFT とする)部材⁶⁾⁷⁾の新たな活用方法として、ステンレス鋼管内部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, 以下, CFSST と称する。)部材の活用を目的とした基礎実験を計画した。CFSST 部材に着目した理由は、上述の CFT の利点を活かせる上に、前述の維持・管理のコストを抑え、かつ耐久性が増加すると考えられるためである。

ところで、CFSST の既往の国外の文献を概観すると、短柱の中心圧縮実験⁸⁾⁹⁾、ならびに長柱⁸⁾の圧縮特性の実験的検討が見られる。また、二重鋼管・コンクリート合成(Concrete filled double skin tubular)短柱部材において、外鋼管にステンレスを利用した解析的検討¹⁰⁾、ならびにステンレス鋼管に再生骨材コンクリートを充填した CFSST の実験的検討¹¹⁾も見られる。しかしながら、これら一連の研究では径厚比(D/t :鋼管の直径, t :鋼管厚)が 100 以下のものが多く、鋼材に比べて高価なステンレスの鋼材量を少なくすること、ならびに橋脚などの土木構造物へ用いる際には、さらなる大きな径厚比($D/t > 100$)の検討が不可欠であると考えられる。

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



図－1 供試体の概要とひずみゲージ貼付位置

そこで、本研究では、比較的大きな径厚比($D/t > 100$)を有する CFSST 短柱部材の中心圧縮特性を把握することを目的とした基礎実験を行った。実験変数は、ステンレス鋼管の径厚比(D/t)である。得られた実験結果の径厚比の異なる 5 体、ならびに既報⁸⁾⁹⁾の 29 体の合計 34 体の短柱の中心圧縮実験の結果から、径厚比(D/t)が中心圧縮特性に与える影響について考察し、CFSST 短柱の中心圧縮強度算定方法について議論した。最後に、CFSST の中心圧縮力作用下での平面応力下でのステンレス鋼管と充填コンクリートの間に作用する二軸弾塑性応力について言及した。

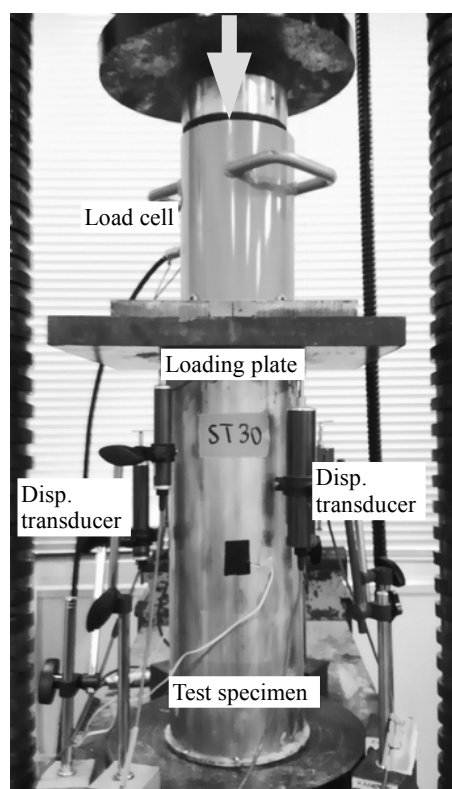
2. 実験方法

2.1. 供試体の概要

供試体の一覧を表－1 に示す。供試体の直径 $D =$

表－１ 供試体一覧

#	Tag	Stainless steel tube					Concrete		
		D (mm)	t (mm)	A_s (mm ²)	D/t	$f_{0.2}$ (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)	f'_c (N/mm ²)	A_c (mm ²)
1	ST08	158.8	0.67	333.1	238.2	220	567	15	19706
2	ST10	159.0	0.83	416.5	190.8	309	598	15	19673
3	ST15	159.1	1.50	752.3	106.1	276	558	15	19644
4	ST20	158.2	1.67	831.9	94.9	306	600	15	19413
5	ST30	157.1	2.73	1351.9	57.5	298	609	15	18796



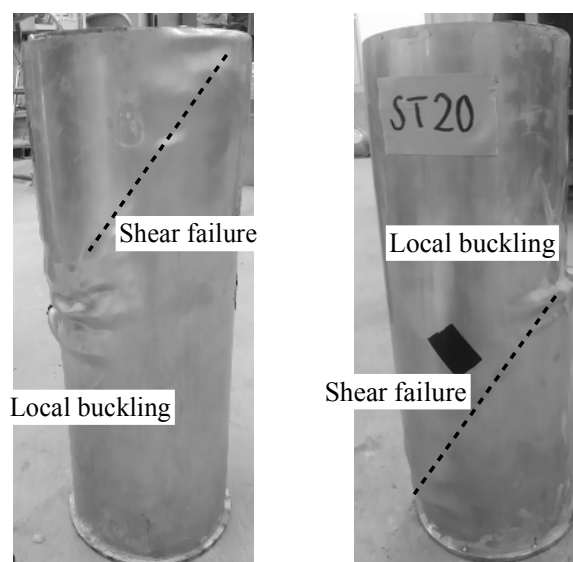
写真－１ 載荷風景

160mm, 高さ $H=450\text{mm}$ ($H/D=2.81$) と固定している。JIS 等に規定されているものでは、ステンレス鋼管の径厚比が小さくなってしまったため (例えば, $D=165.2\text{mm}$ に対して $8 < D/t < 47$), 板厚 t (公称) は 0.7(0.8), 0.8(1.0), 1.5(1.5), 1.7(2.0), および 2.7mm(3.0mm) のものを円形状に加工し, 突き合わせ溶接した。したがって, 本実験で使用した CFSST の径厚比 (D/t) の範囲は $57 < D/t < 238$ となる。

つぎに, ステンレス鋼管に使用した材料特性を表－１に示す。表中 $f_{0.2}$ とは 0.2% 耐力時の応力, f_u はステンレス鋼材の破断強度を示している。また, 本研究で用いたステンレス鋼管は広範囲に用途が可能であるオーステナイト系の SUS304L を用いている。したがって, 最大の伸び (elongation) は 50% となり, ステンレスの中でも大きな値となっている。なお, コンクリート強度 (f'_c) は, 建築分野でも用いることをも考慮し低めのものを用いた。

2.2. 測定項目と載荷方法

図－１にひずみゲージ測定箇所の詳細を示す。ステン



a) ST10

b) ST20

写真－２ 破壊形式

レス鋼管中心部に二軸ひずみゲージ二枚を南北方向に貼付し, ステンレス鋼管の応力状態を測定した。また, 載荷板 (Loading plate) 直下に四台の変位計 (Disp. transducer) を設置し, 供試体の変形性能を測定した。

つぎに, 本実験の載荷風景を写真－１に示す。球座, ロードセル, および載荷板を介し, 神戸市立工業高等専門学校所有の 2MN 圧縮試験装置にて, 供試体に中心圧縮力 (N) を作用させ, 終局状態に至るまで静的に漸増載荷させた。

3. 実験結果と考察

3.1 破壊形式

得られた ST10, ならびに ST20 の載荷終了後の状態を写真－２ a), b) に示す。これらの写真から, 最大荷重到達後, 徐々にせん断ひび割れによる変形が進行するとともに, 充填コンクリートのせん断破壊が発生し, その後ステンレス鋼管の座屈が発生した。また, ステンレス鋼管の亀裂は見られなかった。

なお, 上述の充填コンクリートのせん断破壊による鋼管の座屈現象は, 従来の炭素鋼の CFT 短柱の中心圧縮実験結果に見られるものと同じであった。

3.2 終局強度

表－２ 実験結果一覧

#	Tag	Axial strength				Strength ratios		
		N_0	N_{cu1}	N_u	N_{exp}	N_{exp}/N_0	N_{exp}/N_{cu1}	N_{exp}/N_u
		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)			
1	ST08	361	381	477	767	2.12	2.01	1.61
2	ST10	416	451	536	773	1.86	1.72	1.44
3	ST15	494	551	707	857	1.73	1.56	1.21
4	ST20	538	607	783	963	1.79	1.59	1.23
5	ST30	677	786	1098	1255	1.85	1.60	1.14

(1) 概要

日本建築学会⁷⁾にて提案されている鋼管の降伏強度とコンクリートの圧縮強度を用いた CFT の中心圧縮強度 (N_0) は以下の通りである。

$$N_0 = {}_sA \cdot {}_s\sigma_y + {}_cA \cdot \gamma_U \cdot {}_c\sigma_B \quad (1)$$

ここで, ${}_sA$: 鋼管の断面積($=A_s$), ${}_s\sigma_y$: 鋼管の降伏強度($=f_{02}$), ${}_cA$: コンクリートの断面積($=A_c$), ${}_c\sigma_B$: コンクリートの圧縮強度($=f'_c$), γ_U : コンクリートの低減係数であり, 単純累加強度の場合は, $\gamma_U = 1.0$ である。以下, N_0 は $\gamma_U = 1.0$ として算定することとする。

つぎに, 軸方向圧縮力を受ける円形 CFT 短柱の終局軸耐力 N_{cu1} は以下の通りとなる⁷⁾。

$$N_{cu1} = {}_cN_c + (1 + \xi) {}_sN_c \quad (2)$$

ここで,

$${}_cN_c = {}_cA \cdot \gamma_U \cdot {}_c\sigma_B, \quad {}_sN_c = {}_sA \cdot {}_s\sigma_y, \quad \xi = 0.27$$

である。

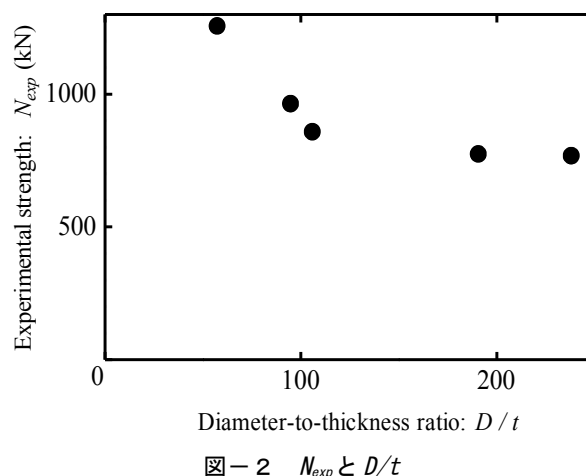
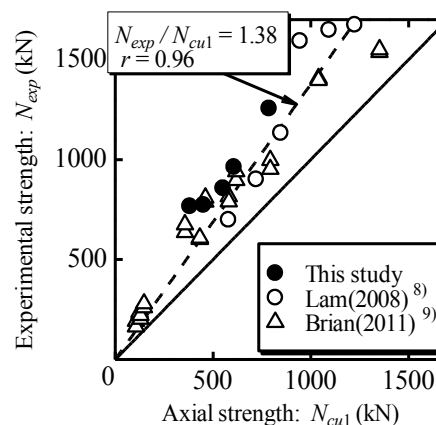
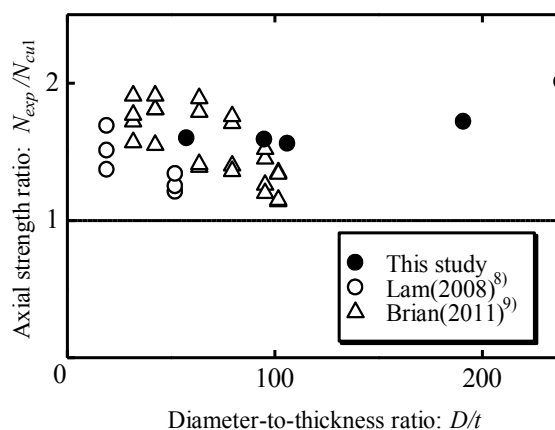
さらに, 普通鋼管より破断に至るまでの伸びが大きくコンファインド効果にさらに寄与すると思われるステンレス鋼の特徴を考慮し, 降伏強度(f_{02})の代わりに, ステンレス鋼管の破断強度(f_u)を用いた式(3)に示す中心圧縮強度 N_u を用いた比較も行った。

$$N_u = A_s \cdot f_u + A_c \cdot f'_c \quad (3)$$

なお, 表－２に本実験で得られた結果と式(1)～(3)で算出された値と実験結果との比較を行っている。

(2) 径厚比 (D/t) と実験中心圧縮強度 (N_{exp})

図－２に得られた実験中心圧縮強度(N_{exp})と径厚比(D/t)の関係を示す。同図より, 径厚比が大きくなると N_{exp} は低下する傾向がみられる。これは, ステンレス鋼材の断面積の減少によるステンレス鋼材の軸方向耐力の減少のためであると考えられる。

図－２ N_{exp} と D/t 図－３ N_{cu1} と N_{exp} 図－４ N_{exp} / N_{cu1} と D/t

表－3 既報^{8)・9)}の実験供試体の詳細

	Lam, D(2008) ⁸⁾	Brian(2011) ⁹⁾
Specimens	6	23
Diameter: D (mm)	101.3, 104	50.8-203.2
Thickness: t (mm)	2.0-6.0	1.2, 2.0
Height: H (mm)	300	150-500
D/t	19.1, 52.0	31.8-101.6
H/D	2.62, 2.88	2.46-3.14
$f_{0.2}$ (N/mm ²)	266, 412	259-320
f_u (N/mm ²)	539, 638	-
f_c (N/mm ²)	31-65	20,30

(3) 終局軸耐力 (N_{cul})

図－3に式(2)より得られた終局軸耐力(N_{cul})と実験中心圧縮強度(N_{exp})の関係を示す。ここで、同図中には既往のLamら⁸⁾ならびにBrianら⁹⁾の研究で得られたCFSSTの短柱圧縮試験の結果をそれぞれ○、ならびに△にて示している。なお、文献8), 9)の実験供試体の詳細を表－3に要約している。

同図より、従来のCFTの終局軸耐力(N_{cul})は、相関関係が見られるものの、全体的に実験中心圧縮強度(N_{exp})は終局軸耐力よりも大きな値となった。また、中心圧縮強度(N_{exp})と終局軸耐力(N_{cul})の間を最小二乗法を用いることにより、一次式にて近似したところ、相対比 $N_{exp}/N_{cul}=1.38$, 相関係数 $r=0.96$ となり、終局軸耐力(N_{cul})は実験中心圧縮強度(N_{exp})を安全側に、精度よく評価できたことがわかる。

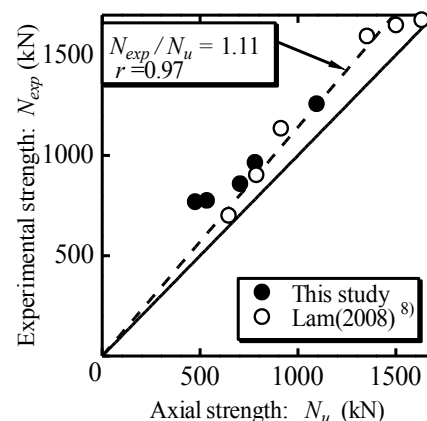
つぎに、径厚比(D/t)と終局軸耐力比(N_{exp}/N_{cul})の関係を図－4に示す。同図より、 N_{exp}/N_{cul} は D/t が100を超えて大きくなっても顕著に低下する傾向は見られないことがわかる。

(3) 中心圧縮強度 (N_u)

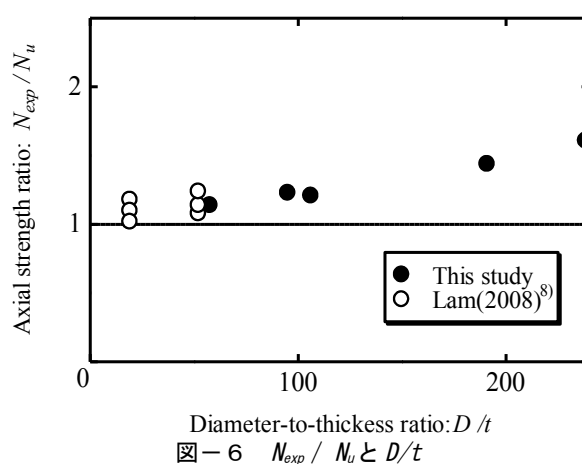
図－5に式(3)より求められた中心圧縮強度(N_u)と実験中心圧縮強度(N_{exp})の関係を示す。また、図－3同様に、ステンレスの破断強度が示されていた文献8)の6体の結果を○で示している。

同図より、ステンレスの破断強度(f_u)を用いても N_u は N_{exp} を安全側に評価するとともに、強い相関関係が窺え、式(2)で用いた値よりも一致する傾向が見られる。図－3同様に最小二乗法を用いて、一次式で線形近似を行ったところ、相対比 $N_{exp}/N_u=1.11$, 相関係数 $r=0.97$ であり、 N_u は実験中心圧縮強度を良好に評価できていることがわかる。これは、ステンレスの降伏後から破断までの伸びが大きくコンファインド効果に寄与したためと示唆される。

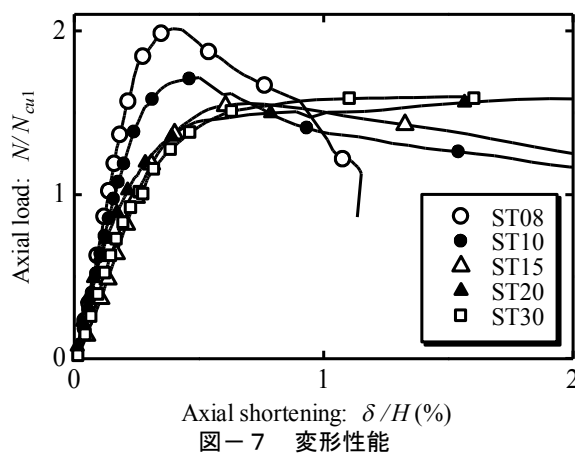
さらに、図－6には径厚比(D/t)と中心圧縮強度比 N_{exp}/N_u の関係を示す。同図からも図－4同様に径厚比(D/t)が100を超えて大きくなっても、 N_{exp}/N_u に与える影響



図－5 N_u と N_{exp}



図－6 N_{exp}/N_u と D/t

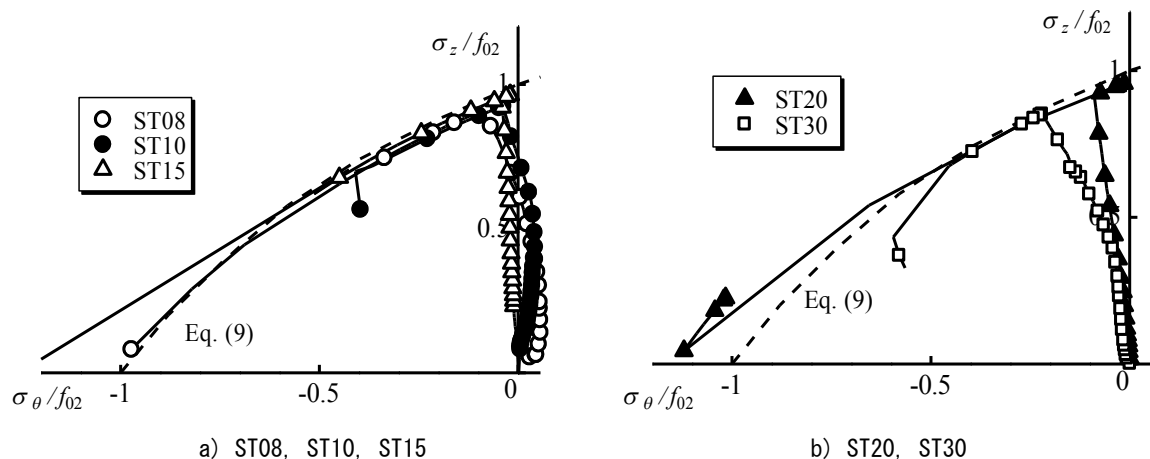


図－7 変形性能

は少ないものと考えられる。

3.3 変形特性

図－7に中心圧縮力と軸方向変位の関係を示す。ここで、縦軸は中心圧縮力(N)を終局軸耐力(N_{cul})で無次元化しており、横軸は変位(δ)を供試体高さ($H=450\text{mm}$)で除した値を百分率であらわしている。同図より、2%変位時の変形性能を見ると、ST08以外は概ねどれも同様の挙動を示していることがわかる。一方、径厚比(D/t)が200を超えるST08では、 N/N_{cul} は他のものと比較して大きな値となったものの、実験中心圧縮強度(N_{exp})到達後の挙動を



図－8 応力状態

見ると、変形性能が著しく低下していた。

3.4. 応力状態

(1) 弾塑性応力の計算¹²⁾

ステンレス鋼管中心部には二枚のステンレス用の二軸ひずみゲージを南北方向に貼付している(図－1 参照)。これらの軸方向(ϵ_z)、ならびに周方向(ϵ_θ)ひずみを用いて、各鋼管の応力状態を以下の手法により求める。

まず、弾性範囲内での平面応力状態における軸方向、周方向応力増分($d\sigma_z, d\sigma_\theta$)、およびひずみ増分($d\epsilon_z, d\epsilon_\theta$)の関係は、以下の通りに表わされる。

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_z \\ d\sigma_\theta \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{pmatrix} 1 & \nu \\ \nu & 1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} d\epsilon_z \\ d\epsilon_\theta \end{Bmatrix} \quad (4)$$

ここに、 E, ν はステンレス鋼管のヤング係数(= 193 kN/mm²)、ポアソン比(=0.3)をそれぞれ示す。

つぎに、弾塑性状態では、平面応力状態における Prandl-Reuss の構成則を用いて、部材軸と円周方向のひずみ増分をそれぞれ $d\epsilon_z, d\epsilon_\theta$ とすると、両者に対応する各応力増分 $d\sigma_z, d\sigma_\theta$ は式(5)の通りとなる。

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_z \\ d\sigma_\theta \end{Bmatrix} = \left[\frac{E}{1-\nu^2} \begin{pmatrix} 1 & \nu \\ \nu & 1 \end{pmatrix} - \frac{1}{S} \begin{pmatrix} S_1^2 & S_1 S_2 \\ S_1 S_2 & S_2^2 \end{pmatrix} \right] \begin{Bmatrix} d\epsilon_z \\ d\epsilon_\theta \end{Bmatrix} \quad (5)$$

さらに S, S_1, S_2 は

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

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

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

となる。ここで、 s_z, s_θ は軸方向ならびに円周方向の偏差応力をそれぞれ示す。

さらに、平面応力状態における von Mises の降伏曲線は以下の通りである。

$$f_s = \sigma_z^2 - \sigma_z \sigma_\theta + \sigma_\theta^2 - f_y^2 \quad (6)$$

弾性範囲内($f_s < 0$)の時は式(4)を、ステンレス鋼管が降伏点に至り、弾塑性状態($f_s = 0$)においては式(5)にそれぞれ二軸ひずみゲージより得られたひずみ増分($d\epsilon_z, d\epsilon_\theta$)を代入し、ステンレス鋼管の応力増分($d\sigma_z, d\sigma_\theta$)を計算することができる。したがって、全応力は式(7)の通りに表わされる。

$$\sigma_z = \sum_{k=1}^n d\sigma_{zk} \quad (7a)$$

$$\sigma_\theta = \sum_{k=1}^n d\sigma_{\theta k} \quad (7b)$$

なお、以下で取り扱う二軸応力は全て圧縮を正の値としており、式(6)の降伏応力 f_y は 0.2% 耐力である f_{02} を用いている。

(2) 二軸応力

図－8 a), b) にステンレス鋼管の軸方向ならびに周方向の応力(σ_z, σ_θ)の履歴を示す。ここで、 x, y 両軸は降伏応力 f_{02} で無次元化しており、図内破線は式(6)の von Mises の降伏曲線を示している。

これらの図より、軸方向応力(σ_z)が圧縮降伏応力(f_{02})に到達後、周方向応力(σ_θ)は、引張方向に流動していることにより、ステンレス鋼管は圧縮、引張状態となった。これは、充填コンクリートの体積膨張が発生したために周方向応力が引張状態となったと考えられる。なお、こ

の挙動は中心圧縮載荷を受ける従来の大きな径厚比を有する CFT の挙動^{13)・14)}と同じものであった。

4. まとめ

本研究では、耐久性を有するコンクリート充填ステンレス鋼管(CFSST)の基本特性の把握を目的とした大きな径厚比($D/t > 100$)に着目した CFSST 短柱の合計五体の中心圧縮実験を行った。また、既報^{8)・9)}の中心圧縮実験結果を用いて、主として径厚比(D/t)が中心圧縮特性に与える影響について考察したものである。実設計のための基礎データを示した。結論付けられる事項を列記すると以下の通りとなる。

- (1) 得られた CFSST の破壊形式は充填コンクリートが圧縮力を受けることによりせん断破壊し、鋼管が座屈する従来の円形 CFT のものと同じであった。
- (2) ステンレス鋼管の径厚比(D/t)が大きくなると実験中心圧縮強度(N_{exp})は低下した。これは、鋼材断面積が低下することによるものである。
- (3) 従来の CFT の算定方法を参考に、本実験および既往の研究^{8)・9)}を含めた合計 34 体の CFSST 短柱の実験中心圧縮強度(N_{exp})の算定を試みたところ、 N_{exp} と N_{cul} の間に強い相関関係は見られるものの、終局軸耐力(N_{cul})は実験中心圧縮強度(N_{exp})を安全側に評価した。
- (4) 一方、本実験ならびにステンレス鋼管の破断強度(f_u)の記載があった既報⁸⁾の合計 11 体の CFSST 短柱に関して、 f_u を用いた中心圧縮強度(N_u)と実験中心圧縮強度(N_{exp})を比較したところ、 N_u は N_{exp} を良好に評価した。
- (5) 鋼管の降伏強度に基づいた実験中心圧縮強度比(N_{exp}/N_u)、ならびに鋼管の破断強度に基づいた終局軸耐力比(N_{exp}/N_{cul})は、径厚比(D/t)が 100 以上になっても低下する傾向は見られなかった。
- (6) 得られた中心圧縮力(N)と変位(δ)の関係より、径厚比 $D/t < 200$ であれば、2%の変位までほぼ同じ挙動を示した。
- (7) 鋼管に貼付した二軸ひずみゲージにより、弾塑性応力を計算したところ、二軸応力の挙動は、軸方向応力(σ_z)が圧縮降伏応力(f_{02})に到達後、周方向応力(σ_θ)は充填コンクリートの体積膨張により、引張側に流動した。この挙動は従来の CFT 部材に見られるものと同じであった。

謝辞： 載荷実験の実施に当たっては、神戸市立工業高等専門学校専攻科・都市工学専攻に在籍中の池澤正太君にご協力いただきました。ここに記して心より感謝の意を表します。

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) 松井千秋：コンクリート充填鋼管構造，オーム社，2009.
- 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，2008.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) Yang, Y. F., Ma, G. L. and Wang, J.: Experimental Studies on Recycled Aggregate Concrete Filled Stainless Steel Tube Stub Columns, *Tubular Structures*, Balkema Press, Vol. 14, pp. 383-389, 2012.
- 12) 吉田総仁：弾塑性力学の基礎，共立出版，pp. 188-190, 1997.
- 13) 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.
- 14) Uenaka, K.: CFST Stub Column Having Outer Circular and Inner Square Sections under Compression, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol. 120, pp. 1-7, 2016.