論文 大きな幅厚比を有する正方形二重鋼管・コンクリート合成はりの曲 げせん断強度

上中 宏二郎^{*1}·水越 睦視^{*1}

要旨:本研究では、大きさが異なる二種類の正方形鋼管を同心に配置して、両鋼管の間のみにコンクリートを充填した二重鋼管・コンクリート合成(以下,SS-CFDST)はりの曲げせん断実験を行った。実験変数は内鋼管・外鋼管幅比(*B*/*B*₀),ならびに100以上の幅厚比(*B*/*t*₀)の合計8体である。得られた結果より、破壊形式は鋼管の局部座屈ならびにコンクリートのせん断破壊であった。さらに、曲げせん断強度は内鋼管・外鋼管幅比(*B*/*B*₀)が大きくなると低下する傾向を示した。最後に、曲げせん断力を受けるSS-CFDST はりの終局強度算定法について議論した。

キーワード:二重鋼管・コンクリート合成部材,内鋼管・外鋼管幅比,幅厚比,曲げせん断強度

1.はじめに

二重鋼管・コンクリート合成(Concrete filled double skin tubular, CFDST, 図-1参照)部材とは二種類の異なる円形,あるいは角形の鋼管を同心上に配置し,両者の間のみにコンクリートを充填したものである。CFDST部材は、コンクリート充填鋼管(Concrete filled steel tubular,以下,CFTとする)部材^{1),2)}と比較して,内鋼管内部が空洞となるため,軽量となる利点を有する。したがって,CFDSTを橋脚に適用すれば、地震などによる慣性力の低下,ならびに橋脚基礎部の負担を軽減することができると考えられる。

CFDST の研究は、内外二種類の鋼管の間にポリマー コンクリートを充填した Wei らなどの実験的³⁾ならびに 解析的研究⁴⁾に端を発する。また、径厚比(*D*/*t*₀)が比較的 小さい CFDST の力学特性の解明を目的とした Zhao らな どの研究が見られる⁵⁾。

著者らは CFDST の特有のパラメータである内径・外 径比(D_i / D_o)に着目し,径厚比が比較的大きい内外円鋼 管の CFDST(CC-CFDST,図-1a))の力学特性の把握を 目的とした系統的研究を行ってきた⁶⁹⁹。得られた一連の 研究より,内径・外径比(D_i / D_o)が大きくなると拘束効 果の低下により,終局強度が低下することを示した。さ らに,外円鋼管,内角形鋼管の CFDST(CS-CFDST)の中 心圧縮¹⁰⁹,ならびに曲げせん断特性¹¹⁾の実験的検討も 行った。これらの CS-CFDST の結果からも,円形 CFT 部 材,あるいは RC 部材の算定方法を参考にした強度算定 方法の妥当性を示している。

このような背景のもと、本研究では既報¹³に引き続き、 内外角形鋼管を有する CFDST(SS-CFDST,図-1b))の力 学特性の基礎的データを得ることを目的とした 100 以上 の幅厚比(*B*_o/*t*_o)を有し、かつ四種類の内鋼管・外鋼管幅 比(*B*_i/*B*_o)を実験変数とした SS-CFDST ディープビームの



図-2 載荷方法(単位:mm)

対称三点曲げ載荷実験を行った。得られた実験結果より SS-CFDST 部材の B_ℓ/B₀ が破壊形式,変形性能,せん断 強度ならびに曲げ強度に与える影響について考察した。 さらに,得られた結果と既報⁸の CC-CFDST のせん断実 験結果を比較した。

2. 実験方法

2.1. SS-CFDST 供試体

*1神戸市立工業高等専門学校都市工学科 教授 博(工) (正会員)

		Square steel tube						
#	Tag	$B_{_{o}}$	t_{o}, t_{i}	B _i	R/t	R/R	Yield. point	f'
				()			J_y	J_c
		(mm)	(mm)	(mm)			(N/mm^2)	(N/mm^2)
1	10-000	160.5	1.0	0.0	160.5	0.00	202.3	- 24.6
2	10-038	160.7	1.0	37.3	160.7	0.23		
3	10-075	160.4	1.0	74.9	160.4	0.47		
4	10-113	160.1	1.0	112.6	160.1	0.70		
5	16-000	160.2	1.6	0.0	100.1	0.00	201.6	
6	16-038	160.0	1.6	37.5	100.0	0.23		
7	16-075	160.3	1.6	74.9	100.2	0.47	201.0	
8	16-113	160.3	1.6	112.5	100.2	0.70		

表-1 供試体一覧



写真-1 載荷風景(10-000)

供試体の一覧を表-1に示す。外鋼管の幅(B_o)は 160mm,供試体長さ(H)はすべて450mmとしている。内 鋼管の幅(B_i)を0(CFT),38,75,および113mm,ならびに 内外鋼管厚(t_i, t_o)は1.0,および1.6mmとし,内外鋼管厚 は等しく設定(t_i/t_o =1.0)している。したがって,本研究で 用いたSS-CFDSTの幅厚比(B_o/t_o)は100および160,内 鋼管幅・外鋼管幅比(B_i/B_o)の範囲は0.00 $\leq B_i/B_o \leq 0.70$ と なる。なお、図-2の載荷方法に示すように、せん断ス パン比 $a_s/B_o=1.0$ のディープビームであり、両支点 (Support)には直径(ϕ)=40mmのローラーを用いている。

使用した充填コンクリートの粗骨材の最大寸法は,内 鋼管の最大の部材幅(*B*=113mm)の場合,外鋼管と内鋼管 の隙間が25mm程度と狭くなることを考慮して15mmと した。また,コンクリートには早強ポルトランドセメン トを用いて十分な養生期間を経た後,載荷を行った。な お,供試体両端部のコンクリートは拘束されていない。

2.2. 測定項目

図-2にひずみゲージ測定個所の詳細を示す。内外鋼 管それぞれに2軸ひずみゲージ2枚、3軸ひずみゲージ 1枚を鋼管の外側に貼付して、鋼管のひずみ状態を測定 した。さらに、載荷点下部に変位計を設置して、供試体



a) 外鋼管の破壊状況



b)充填コンクリートの破壊状況 写真-2 破壊形式(16-038)

の変形性能を測定した。

2.3. 載荷方法

本実験の載荷方法を図-2に、載荷風景を写真-1に それぞれ示す。神戸市立工業高等専門学校所有の2MN 圧 縮試験機を用いて、幅(r_p)=100mmの載荷板を介して供試 体のスパン中央に集中荷重(P)を与え、せん断力 V=P/2 を作用させて致命的な破壊が生じるまで荷重を単調増加 させた。

3. 実験結果と考察

3.1 破壊形式

写真-2に16-038の破壊形式を示す。**写真-2**a)に示 すように、曲げせん断変形が進行するとともに、拘束さ れていない端部は既報⁸⁰の CC-CFDST 同様にコンクリー トが押し出され(Pushing-out)、外鋼管は、載荷点と支点 間に局部座屈が発生していることがわかる。また、**写真** -2b)に示すように外鋼管を切断し、コンクリートの 破壊状況を確認したところ、充填コンクリートも明確な 圧縮せん断破壊が見られる。この破壊は、内鋼管幅・外 鋼管幅比(*B_i/B_o*)が 0.47 以下なら同様の傾向を示していた。 なお、既報の CC-CFDST の実験⁸⁰で発生した外鋼管の破 断は見られなかった。これは、円鋼管より角形鋼管の方 が、最大引張応力が発生する鋼材面積が大きいためであ ると考えられる。

つぎに、写真-3a)に内鋼管幅(*B_i/B_o*=0.7)が最大の供 試体の実験後の写真を示す。曲げせん断変形が見られた 写真-2とは異なり、ほとんど曲げせん断変形は見られ ず、載荷点と支点の間に局部座屈は発生しなかった。一 方、写真-3b)に示すように、支点付近ではコンクリ ートの圧縮破壊が発生し、外鋼管は外側へ広がり、台形 状に変形しているが、内鋼管ウェブは内部に座屈してい ることがわかる。

3.2 変形特性

図-3 a),b)に作用せん断力(V=P/2)とスパン中央の変 位の関係を示す。同図より,t=1.0,および1.6mmのどち らの供試体おいても、 $B/B_o \leq 0.47$ までなら変形じん性能 はCFTと同等の挙動を示しており、顕著な変形じん性 能の低下は見られなかった。これは、内鋼管内部を中空 にしても、内外鋼管がせん断補強としての役割を担って いたことが推察される。また、 $B/B_o \leq 0.47$ では、S-CFT 同様の充填コンクリートがせん断破壊したものであるた めと思われる。一方、支点近傍で圧縮破壊した $B/B_o=0.7$ は著しくじん性が低下していることがわかる。

3.3 終局せん断強度

(1) 内鋼管・外鋼管幅比とせん断強度

図-4に内鋼管・外鋼管幅比($B_{\ell}B_{o}$)と実験で得られた せん断強度(V_{exp})の関係を示す。同図より、 $B_{\ell}B_{o}$ が大きく なると V_{exp} は緩やかに低下する傾向がみられる。これは、 コンクリートの幅が小さくなったためであると考えられ る。なお、この傾向は既報のCC-CFDST ディープビーム の実験結果[®]と同じものである。

(2) 算定せん断強度

本項では、SS-CFDSTの算定手法の一つとして、RC はりのせん断強度算定手法¹³⁾を例に取り、同手法により SS-CFDSTの近似計算結果と実験結果と比較する。

まず、コンクリート部材の強度は、式(1)に示す二羽



a) 概観



b) 支点の破壊 写真-3 10-113の破壊形式



	Experimental			Estimations			Ratio		
#	Tag	P_{exp}	V_{exp}	V_{c}	V_{y}	V _{est}	V_{exp}	V_{exp}	V_{exp}
		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	V _c		V_{est}
1	10-000	299.3	149.7	43.4	64.9	108.3	3.45	2.31	1.38
2	10-038	283.3	141.7	36.2	80.1	116.2	3.92	1.77	1.22
3	10-075	242.7	121.3	29.5	95.2	124.7	4.12	1.27	0.97
4	10-113	141.3	70.7	21.5	110.3	131.8	3.29	0.64	0.54
5	16-000	392.0	196.0	50.5	103.3	153.8	3.88	1.90	1.27
6	16-038	412.7	206.4	41.8	127.4	169.2	4.94	1.62	1.22
7	16-075	358.7	179.3	34.4	151.7	186.0	5.22	1.18	0.96
8	16-113	244.0	122.0	25.2	176.0	201.2	4.84	0.69	0.61

表-2 実験結果

らが提案した RC はりのせん断耐力¹³(表-2内, V_c)の 式(1)を用いることとする。

$$V_c = 0.20 f_c^{1/3} (100 p_w)^{1/3} \left(\frac{d}{1000}\right)^{-\frac{1}{4}} \left(0.75 + 1.4 \frac{d}{a_s}\right) b_w d \qquad (1)$$

ここで, $f_{a'}$: コンクリート強度(N/mm²), b_{w} : ウェブ幅, a_{s} : せん断スパン長である。dは有効高さ(mm)であり, 図 - 5 a), b) のとおりに, 上縁までの断面一次モーメント を一定とし, 以下により求めた。

$$d = \frac{A_{si}d_i + A_{so}d_o}{A_{si} + A_{so}}$$
(2)

ここで, *d_o*, *d_i*は外鋼管, 内鋼管の有効高さであり, 以下 の通りとなる。

$$d_o = B_o - \frac{t_o}{2}$$
, $d_i = \frac{B_o + B_i}{2} - \frac{t_i}{2}$ (3a,b)

ただし、Asi,およびAsoは以下の通りとしている。

$$A_{si} = B_i t_i$$
, $A_{so} = B_o t_o$

また,鋼材比pwは以下の通りとした。

$$p_w = \frac{B_i t_i + B_o t_o}{b_w d} \tag{4}$$

なお,**図-5**を参考に部材幅*b_w=B_o-B_i*である。

つづいて,内外鋼管が負担するせん断強度 V,は内外 鋼管の幅が有効に働くと仮定し,以下の通りに求めるこ ととした。

$$V_{y} = V_{so} + V_{si} \tag{5}$$





a) 断面の決定



図-5 断面の置き換え





 $\mathbb{Z}-7$ $B_i/B_o \geq V_{exp}/V_{est}$

ここで、*V*_{so}, *V*_sは内外鋼管のせん断補強を表すもので、 式(6)のとおりである。

$$V_{so} = 2B_o t_o f_y$$
, $V_{si} = 2B_i t_i f_y$ (6a,b)

ここで、 fyは内外鋼管の降伏応力である。

以上より,本研究の条件下では,SS-CFDST の算定せ ん断強度(*V*_{est})を以下の通りとした。

$$V_{est} = V_c + V_y \tag{7}$$

表-2に本実験で得られた最大荷重(P_{exp}),最大せん断 強度($V_{exp} = P_{exp}/2$),上記の手法により求められた V_o, V_y ,ならびに V_{ext} の計算値をまとめている。

(3)実験せん断強度と算定せん断強度

図-6に算定せん断強度(V_{est})と実験せん断強度(V_{exp})の 関係を示す。支点での破壊を呈した B=113mm のものを 除き,終局状態がせん断破壊形式となったものと算定せ ん断強度を比較したところ,相対比 $V_{exp}/V_{est}=1.15$,相関 係数 r=0.83 と精度よく評価できることがわかった。した がって, $B_{i}/B_{o} \leq 0.47$ の範囲なら,式(7)を用いて SS-CFDST のせん断強度の算定が可能であることを示した。



図-9 算定曲げ強度と最大荷重

図-7に定式化した実験せん断強度(V_{exp}/V_{est})と内鋼管・外鋼管幅比(B_i/B_o)の関係を示す。同図より、破壊形式 が異なる B_i/B_o =0.7のものを除けば、大きな耐荷力の低 下は見られないことがわかる。なお、 B_i/B_o =0.7になると 著しく V_{exp}/V_{est} が低下する傾向は、CC-CFDST ディープ ビーム⁸⁾の D_i/D_o =0.7の結果と同じであった。

3.4 終局曲げ強度

本節では、曲げ強度の算定方法を試みる。図-8のとおりに中立軸が内鋼管内部にある場合には、充填コンクリートの引張を無視、および内外鋼管は全塑性状態をそれぞれ仮定すると、SS-CFDSTの軸力(Nssc(y))と曲げモーメント(Mssc(y))は以下の通りとなる。

$$N_{SSC}(y) = -4f_{y}(t_{i}+t_{o})y + \frac{kf_{c}'}{2}(B_{o}-2t_{o}-B_{i})(B_{o}-2t_{o}+B_{i}-2y)$$
(8)

$$M_{SSC}(y) = f_{y} \left\{ B_{i}t_{i}(B_{i}-t_{i}) + 2t_{i} \left(\frac{B_{i}}{2} - t_{i} \right)^{2} - 2t_{i}y^{2} \right\}$$

$$+ f_{y} \left\{ B_{o}t_{o}(B_{o}-t_{o}) + 2t_{o} \left\{ \left(\frac{B_{o}}{2} - t_{o} \right)^{2} - y^{2} \right\} \right\}$$

$$+ \frac{k f_{c}'}{8} (B_{o} - 2t_{o} - B_{i})^{2} (B_{o} - 2t_{o})$$

$$+ \frac{k f_{c}'}{8} (B_{o} - 2t_{o} - B_{i}) (B_{i}^{2} - 4y^{2})$$
(9)

ここで, k:コンクリートの低減係数(=0.85), yは断面中 心から圧縮領域の底までの距離である。まず,式(8)に Nssc(y)=0となる y=y0を求め,その y0を式(9)に代入し純 曲げ強度 Mest=Mssc(y0)を求めることができる。なお,中立 軸が内鋼管より上方にある場合の軸力と曲げモーメント に関しては限られた紙面ゆえに省略する。

図-9に最大荷重(Pexp)と式(9)より求められた Mestを載 荷荷重に置き換えた算定曲げ強度(Pmu=2Mest/as, as:せん断 スパン長)の関係を示す。同図より、本研究で用いた SS-CFDST のディープビームでは、せん断破壊または支点 部の破壊を呈しているため、最大荷重は算定曲げ強度と は異なるものであった。

4. まとめ

本研究では、100以上の大きな幅厚比(*B*_o/*t*_o)を有する SS-CFDSTディープビームの対称三点曲げ実験を行い、 主に内鋼管・外鋼管幅比(*B*_i/*B*_o)が曲げせん断強度に与え る影響について実験的に検討したものである。結論付け られる事項を列記すると以下の通りとなる。

- (1) B_i/B_o≤0.47の得られた破壊形式は、載荷点と両支点を結ぶコンクリートのせん断破壊による鋼管の座屈であった。また、内鋼管幅が一番大きい B_i/B_o=0.7のそれは両支点でコンクリートの圧縮破壊であった。なお、外鋼管の曲げ引張破壊は見られなかった。
- (2) 得られた作用せん断力(V)と変位の関係より, $B_{\ell}B_{o} \leq$ 0.47 であれば変形性能は従来の CFT とおおむね一致 した。一方, $B_{\ell}B_{o}=0.70$ となれば, それは著しく低下 した。
- (3) せん断強度は B_i/B_oが大きくなると緩やかに低下する 傾向が見られた。これは既報⁸⁾で行った CC-CFDST の 内径・外形比(D_i/D_o)が大きくなった場合の結果と同 じであった。
- (4) RC 部材のせん断強度算定方法を参考に、SS-CFDST のせん断強度を算定したところ、 $B_{i}/B_{o} \leq 0.47$ であれ ば、算定せん断強度 V_{est} を用いてせん断強度は良好に 評価できた。
- (5) 定式化したせん断強度 V_{exp}/V_{est} と B_i/B_oの関係を調べた ところ, B_i/B_o ≤ 0.47 の範囲であれば, V_{exp}/V_{est}の顕著 な低下は見られなかった。
- (6)終局状態において、コンクリートの引張を無視し内外鋼管を塑性状態に仮定し等価応力ブロックを用いた算定純曲げ強度は、破壊形式がせん断破壊、または支点部の圧縮破壊のため評価するには至らなかった。

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された池澤正太氏, ならびに同都市工学科5年生の学生諸氏にご協力頂きま した。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 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.
- 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.
- Wei, S., Mau, S. T., Vipulanandan, C. and Mantrala, S. K.: Performance of new sandwich tube under axial loading: experiment, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 121(12), 1806-1814, 1995.
- Wei, S., Mau, S. T., Vipulanandan, C. and Mantrala, S. K.: Performance of new sandwich tube under axial loading: analysis, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 121 (12), 1815-1821, 1995.
- Zhao, X. L., Tong, L. W. and Wang, X. Y.: CFDST Stub Columns subjected to Large Deformation Axial Loading, *Engineering Structures*, Elsevier, 32, 692-703, 2010.
- Uenaka, K., Kitoh, H. and Sonoda, K.: Concrete filled double skin circular stub columns under compression, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, 48(1), 19-24, 2010.
- Uenaka, K., Kitoh, H. and Sonoda, K.:Concrete filled double skin tubular members subjected to bending, *Steel & Composite Structures -An International Journal*, Techno-Press, 8(4), 297-312, 2008.
- Uenaka, K. and Kitoh, H.: Mechanical behavior of concrete filled double skin tubular circular deep beams, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, 49(2), 256-263, 2011.
- Uenaka, K.: Concrete filled double skin circular tubular beams with large diameter-to-thickness ratio under shear, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, 70, 33-38, 2013.
- Uenaka, K.: CFDST stub columns having outer circular and inner square sections under compression, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, 120, 1-7, 2016.
- 11) 上中宏二郎,酒造敏廣:外円形鋼管と内角形鋼管から成る二重鋼管合成部材のせん断実験,鋼構造年次 論文報告集,日本鋼構造協会,22,144-151,2014.
- 12) 上中宏二郎:100以上の幅厚比を有する中空式角形 二重鋼管・コンクリート合成短柱の中心圧縮特性, コンクリート工学年次論文集,日本コンクリート工 学会,38(2),1279-1284,2016.
- 13) 二羽淳一郎、山田一宇、横沢和夫、岡村甫:せん断 補強筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価、 土木学会論文集、372/V-5, 167-176, 1986.