

論文 軽量骨材コンクリートを充填した中空式二重鋼管合成部材のせん断特性

上中宏二郎^{*1}・水越睦視^{*1}

要旨：軽量骨材コンクリートとは、骨材に人工軽量骨材を用いたものであり、従来の普通コンクリートと比較して約 20%の軽量化が可能である。また、中空式二重鋼管・コンクリート合成部材(CFDST)とは、同心円上に直径が異なる2種類の鋼管を配置してその間のみにコンクリートを充填した構造形式を指す。本研究では、軽量コンクリート2種を CFDST に充填したせん断スパン比 0.5 の L-CFDST の曲げせん断実験を行った。得られた結果より、中実断面の L-CFT 部材との比較を行った。最後に、RC 部材のせん断強度算定手法に類似した L-CFDST 部材のせん断強度算定方法を提案した。

キーワード：軽量コンクリート、中空式二重鋼管合成部材、径厚比、内径・外径比、せん断

1. はじめに

軽量骨材コンクリート(LC)^{1),2)}とは、細骨材、ならびに粗骨材に軽量骨材を用いたものであり、粗骨材のみに軽量骨材を用いたものを軽量コンクリート1種(LC1)、粗骨材、細骨材に軽量のものを用いたものを軽量コンクリート2種(LC2)と呼ぶ。膨張頁岩系の構造用軽量骨材を用いた場合は、従来のコンクリート(NC)と比較して 20%程度の軽量化が可能である。しかしながら、LC を用いた RC 部材のせん断強度は 70%に低減されている³⁾。

中空式二重鋼管合成(Concrete filled double skin tubular, CFDST, 図-1a)参照)部材とは、同心円上に直径の異なる2種類の円形の鋼管を配置し、それら両者の間のみにコンクリートを充填した中空断面の合成構造部材である(図-1a)参照)。CFDST 部材は、内鋼管の内部が空洞となるため、従来のコンクリート充填鋼管(Concrete filled steel tubular, CFT, 図-1b)参照)部材^{4),5)}と比較して軽量となる利点を有する。

ところで、コンクリート充填鋼管設計施工指針⁴⁾では、これまで精力的になされた CFT の力学挙動をまとめたものであるが、LC を充填材料に用いたものは適用の範囲外とされている。一方、LC を鋼管に充填した軽量コンクリート充填鋼管部材(L-CFT)の以下のような研究がなされつつある。まず、Hunaiti⁶⁾らは、径厚比が 30 程度の L-CFT 部材の圧縮実験、ならびに曲げ実験を行っており、前者においては充填コンクリートの圧縮強度を 67%に低減して中心圧縮強度を求めている。つづいて、Mouli⁷⁾らは、長方形鋼管に LC を充填した短柱の圧縮実験を行っている。

このような背景のもと、著者ら⁸⁾は 100 程度の大きな径厚比を有する LC2 を充填した L-CFT 部材の曲げせん断特性の実験的検討を行い、曲げ、またはせん断破壊を

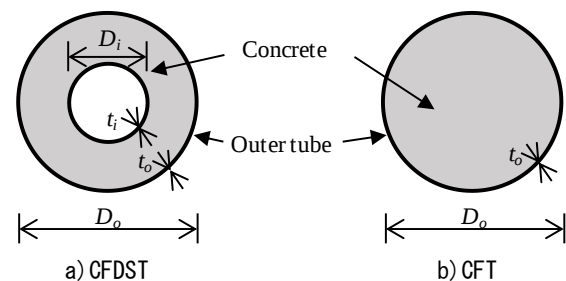


図-1 CFDST と CFT の断面

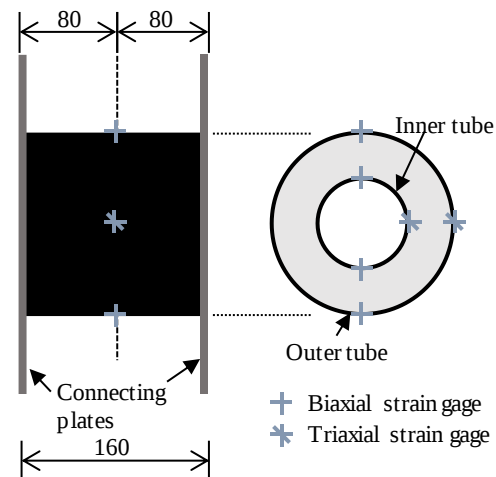


図-2 供試体の詳細とゲージ貼付位置

呈する場合のそれぞれの終局強度算定方法について提案している。また、L-CFT 部材よりさらに軽量化が期待できる二重鋼管に軽量コンクリートを充填した二重鋼管・軽量コンクリート合成(L-CFDST)短柱に関する実験的検討⁹⁾を行い、L-CFDST 短柱の中心圧縮強度は、コンクリートの圧縮強度と鋼管の降伏強度の累加強度で推定でき

^{*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)

表－１ 供試体一覧

No.	Tag	Steel tube						Concrete			Note
		D_i (mm)	t_i (mm)	D_o (mm)	t_o (mm)	D_o/t_o	D_i/D_o	f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)	f_c' (N/mm ²)	
1 ⁸⁾	L10-160	-	-	160	1.0	160	-	253	367	31.0	Ref. 8)
2	L10750	75	1.0	160	1.0	160	0.47	299	397	39.6	This study
3	L10113	113	1.0	160	1.0	160	0.71	299	397	39.6	
4 ⁸⁾	L16-160	-	-	160	1.6	100	-	216	351	31.0	Ref. 8)
5	L16750	75	1.7	160	1.7	97	0.47	409	451	39.6	This study
6	L16113	113	1.7	160	1.7	97	0.71				
7 ⁸⁾	L23-160	-	-	160	2.3	70	-	182	319	31.0	Ref. 8)
8	L23750	75	2.3	160	2.3	71	0.47	258	373	39.6	This study
9	L23113	113	2.3	160	2.3	71	0.71				

ることを示している。

そこで、本研究では、既報⁹⁾の L-CFDST 部材の中心圧縮特性の検討に引き続き、逆対称二点載荷方法を用いた L-CFDST のせん断特性の把握を目的とした実験的検討を合計 6 体行った。実験変数は外鋼管の径厚比(D_o/t_o)、ならびに内径・外径比(D_i/D_o)であり、上記変数がせん断特性に与える影響について実験的に検討した。さらに、既報の同形状の L-CFT のせん断強度⁸⁾と比較し、RC のせん断強度に類似した L-CFDST ディープビームのせん断強度算定方法について検討した。

2. 実験方法

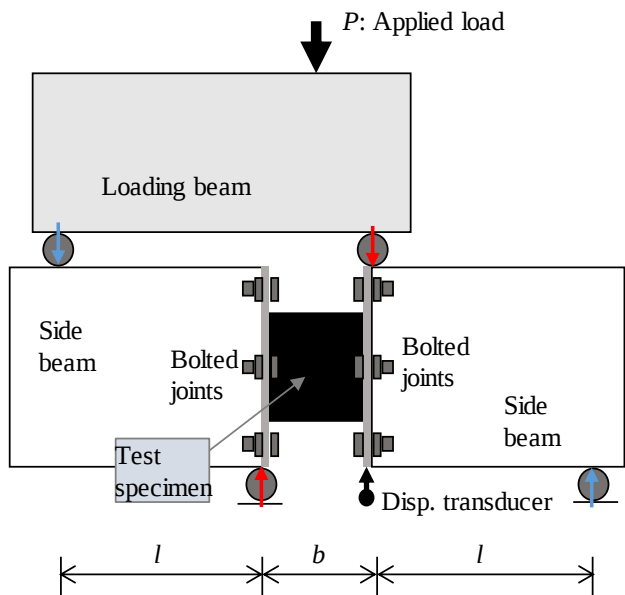
2.1 供試体の概要

表－１に供試体一覧を示す。外鋼管の直径(D_o)は 160mm、供試体長さ(b)は 160mm と固定している。また、内鋼管径(D_i)は、0(CFT)、75mm、ならびに 113mm である。さらに、鋼管厚(t_i , t_o)は 1.0, 1.6, および 2.3mm であり、内外鋼管の鋼管厚は等しくしている。したがって、内外鋼管の直径の比(内径・外径比, D_i/D_o)の範囲は 0.0～0.7, および外鋼管の径厚比(D_o/t_o)それは 70～160 となる。

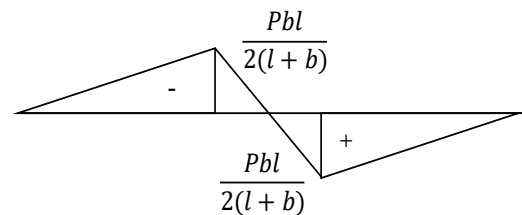
内外鋼管は、鋼板を円形状に加工後突合せ溶接にて製作した。また、外鋼管は溶接後、図－２に示すように両端には載荷治具と高力ボルトで固定する厚さ 12mm の接続板(Connecting plate)を溶接した。

つぎに、本研究で用いた軽量骨材コンクリート 2 種(LC2)に用いた骨材は、膨張頁岩系の構造用細骨材であり、細骨材、粗骨材の表乾比重はそれぞれ 1.92, ならびに 1.65 である。LC2 を充填後、十分な養生期間を経たのち、載荷実験を実施した。圧縮強度(f_c')、およびヤング係数(E_c)はそれぞれ 39.6N/mm²、ならびに 15.4kN/mm²であった。

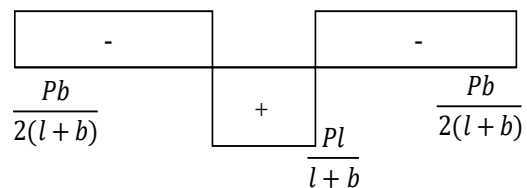
さらに、載荷方法は、図－３a)に示すように載荷はりを通して載荷荷重(P)を分配した逆対称二点載荷方法とした。この手法により、供試体両端部で曲げモーメントの符号は反転するものの、供試体に一定のせん断力



a) 載荷方法

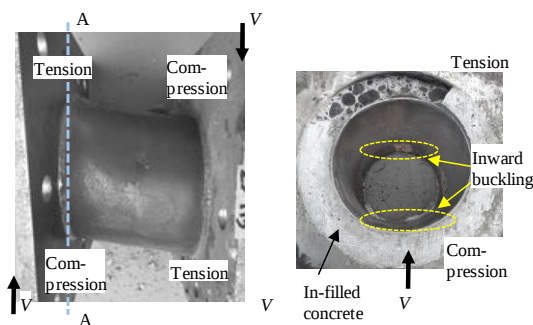


b) 曲げモーメント図 (B. M. D.)

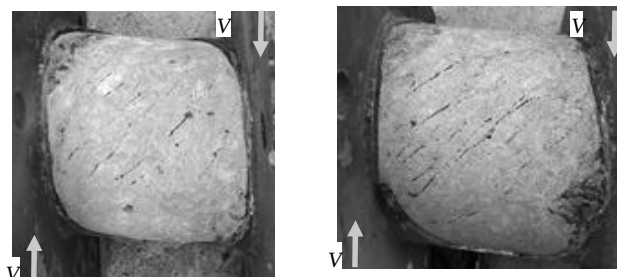


c) せん断力図 (S. F. D.)

図－３ 逆対称二点載荷方法



a) 外鋼管 b) A-A 断面の破壊
写真－１ 破壊状態 (L23113)



a) L23-113 b) L23750
写真－２ 充填コンクリートのひび割れ

($V=Pl/(1+b)$)を作用させることができる。また、図－３b), c)の断面力図より、せん断スパン比($b/2/D_o$)は約 0.5 となる。なお、表－１内の供試体 No. 1, 4, ならびに 7 は既報⁸⁾の内鋼管が無い L-CFT である。

2.2 測定項目

図－２にひずみゲージの貼付位置を示す。内鋼管、ならびに外鋼管外側の上下面に 2 枚の 2 軸ひずみゲージを断面中心に 1 枚の 3 軸ひずみゲージをそれぞれ貼付し、鋼管の応力状態を測定した。また、図－３に示すように、載荷点下部には変位計 (Disp. transducer) を設置し、L-CFDST 部材の変形性能を測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 破壊形式

写真－１に載荷終了後の破壊形態を示す。写真－１a), より、せん断力(V)が作用することにより、終局状態に至った。また、写真－１b)は A-A 断面の内部の破壊状況を示したものである。供試体両端部には圧縮および引張の両者の曲げモーメントが作用している。内部コンクリートの引張側では、コンクリートのひび割れによりコンクリートが剥離、圧縮側では、せん断変形により内鋼管に圧縮力が作用していることにより、座屈が発生していることがわかる。さらに、写真－２は充填コンクリートの状態を示したものである。せん断力が作用する支点の間の圧縮ストラットにひび割れが発生していることがわかる。なお、貼付した 3 軸ひずみゲージによる主応力状態から、鋼管の降伏を von Mises の降伏条件¹²⁾より確認した。

3.2 せん断強度

(1) 概要

3.1 破壊形式で述べたように、すべての供試体において L-CFDST 供試体はせん断力が作用することによるせん断変形により終局状態に至った。したがって、本項では、RC はりのコンクリートとせん断補強筋の和によるせん断強度の算定方法に類似した以下の手法で曲げせん

断力作用下での L-CFDST ディープビームのせん断強度推定のみを試みる。

まず、RC ディープビームのせん断強度¹⁰⁾は、以下の通りに表される。

$$V_u = \frac{0.24 f_c'^{\frac{2}{3}} (1 + \sqrt{100 p_w}) (1 + 3.33 \frac{r}{d_o})}{1 + \left(\frac{a}{d_o}\right)^{\frac{1}{2}}} b_w d_o \quad (1)$$

ここで、 f_c' :コンクリートの圧縮強度、 a : せん断スパン長(=80mm)、および r : 載荷板の厚さ(ここでは、接続板の厚さ $t=12\text{mm}$)である。また、有効高さ d_o は図－４に示すように外鋼管の円形の鋼材断面積 A_{so} に等価な正方形断面に置き換え以下の通りとした。

$$d_o = B_o - \frac{t_o}{2} \quad (2)$$

また、置き換えた正方形鋼管の断面高さ B_o は、置き換え前後の断面積(A_{so})、板厚(t_o)を等しくすることにより、以下の通りに求めることができる。

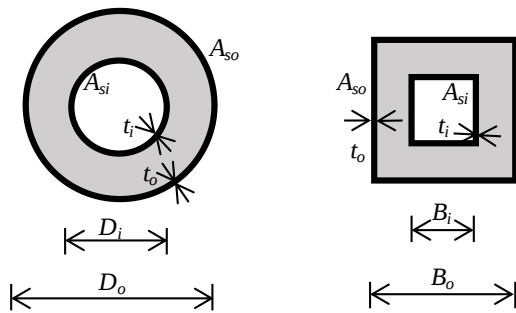
$$B_o = \frac{1}{4} \{ \pi D_o + (4 - \pi) t_o \} \quad (3)$$

さらに、 D_o 、ならびに t_o は外鋼管の直径と鋼管厚さをそれぞれ示す。外鋼管の手法と同様に、図－４に示す内鋼管の断面高さ B_i ならびに有効高さ d_i は、円形から正方形の置き換え前後の断面積(A_{si})、ならびに鋼管厚(t_i)を等しく置いて、以下の通りとなる。

$$B_i = \frac{1}{4} \{ \pi D_i + (4 - \pi) t_i \} \quad (4)$$

表－２ 実験結果一覧

No.	Tag	V_u (kN)	V_{so} (kN)	V_{si} (kN)	V_{est} (kN)	V_{est-m} (kN)	P_{exp} (kN)	V_{exp} (kN)	V_{exp}/V_{est}	V_{exp}/V_{est-m}
1 ⁸⁾	L10-160	67	56	0	123	129	231	162	1.32	1.25
2	L10750	49	66	31	146	166	197	138	0.94	0.83
3	L10113	32	66	46	144	164	176	123	0.85	0.75
4 ⁸⁾	L16-160	76	78	0	154	190	333	233	1.51	1.23
5	L16750	57	148	69	274	227	303	212	0.77	0.93
6	L16113	38	148	104	290	241	279	195	0.67	0.81
7 ⁸⁾	L23-160	83	90	0	172	252	376	263	1.53	1.04
8	L23750	63	127	59	249	328	471	330	1.32	1.01
9	L23113	42	127	90	259	341	465	325	1.26	0.95



図－４ 鋼管断面積の置き換え

$$d_i = B_i - \frac{t_i}{2} \quad (5)$$

ここで、 D_i 、ならびに t_i は内鋼管の直径、壁厚をそれぞれ示す。

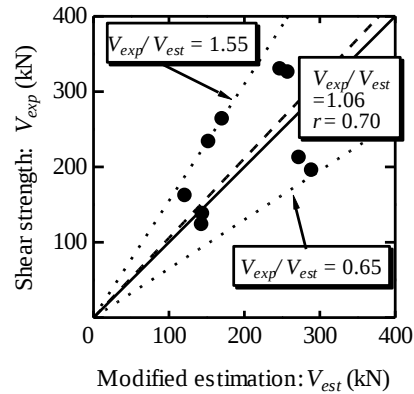
以上より、幅 B_o 、 B_i を求めることにより、鉄筋比 p_w は A_{so} の正方形断面の底面である $1/4$ が引張に寄与していると仮定し、以下の通りに求められる。

$$p_w = \frac{A_s}{4d_o \cdot (B_o - B_i)} \quad (6)$$

そして、内外鋼管のせん断強度 (V_{si} , V_{so}) は正方形鋼管のウェブがせん断抵抗に寄与すると仮定し、以下の通りとした。

$$V_{si} = 2jfy t_i d_i, \quad V_{so} = 2jfy t_o d_o \quad (7a, b)$$

なお、 $j=7/8$ を用いており、L-CFT の場合は、内鋼管が存在しない L-CFDST と考え、 t_i 、ならびに d_i は 0 としている。以上より、L-CFDST はりの算定せん断強度 (V_{est}) は、以下の通りとした。



図－５ 算定強度と実験せん断強度

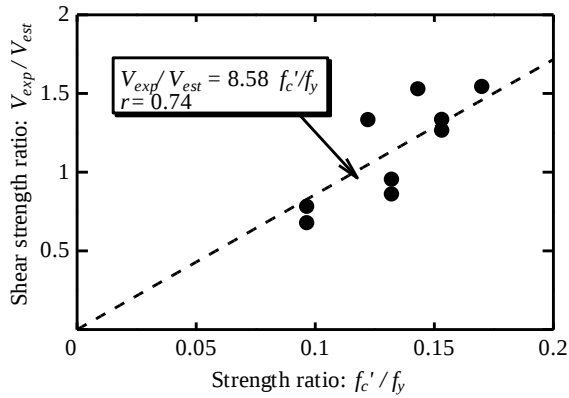
$$V_{est} = V_{si} + V_{so} + V_u \quad (8)$$

上記手法により求めた算定せん断強度 (V_{est}) を表－２にまとめている。

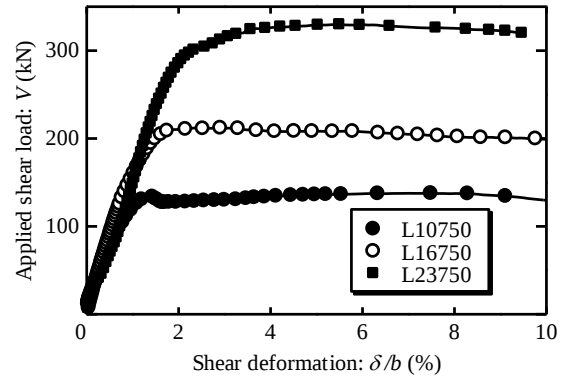
(2)せん断強度の算定

図－５に実験せん断強度 (V_{exp}) と式(8)より求めた算定せん断強度 (V_{est}) の関係を示す。また、表－２の第 10 列目には、実験せん断強度と算定せん断強度の比 (V_{exp}/V_{est}) を示している。同図、ならびに同表より、式(8)から求めた算定せん断強度 (V_{est}) と実験せん断強度 (V_{exp}) は、最小二乗法を用いることにより、相対比 (V_{exp}/V_{est}) = 1.06、相関係数 r は 0.70 で評価できるものの、 V_{exp}/V_{est} は、点線で示すように $0.65 < V_{exp}/V_{est} < 1.55$ の範囲となった。すなわち、式(8)から求めた算定せん断強度は、実験せん断強度を評価することは言い難いものとなった。特に、供試体 No. 5, 6 の算定せん断強度は、実験せん断強度を大きく上回っていることがわかる。これらより、鋼管の降伏強度の差異が上記の結果となった理由と考えられる。

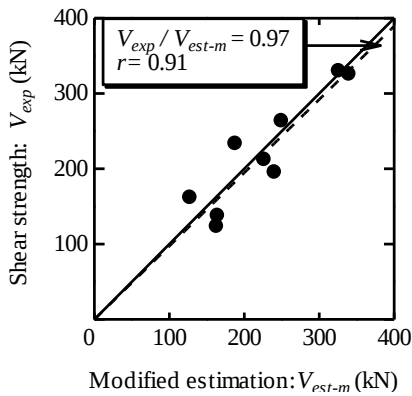
つぎに、図－６には実験せん断強度比 (V_{exp}/V_{est}) とコンクリートの圧縮強度と鋼管の降伏強度の比 (f_c'/f_y) の関係を示す。同図より、 f_c'/f_y が大きくなると V_{exp}/V_{est} が大きくなることが確認できる。したがって、最小二乗法により、両者の関係を求めると以下の通りとなる。



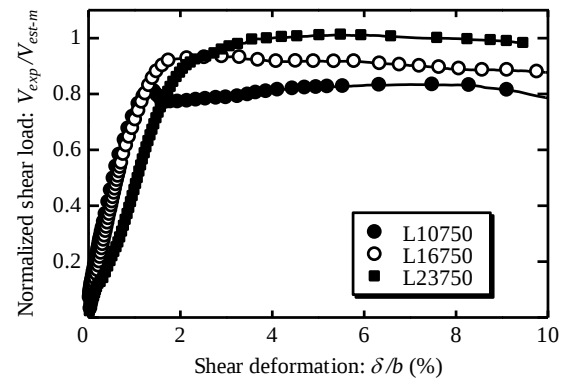
図－6 V_{exp}/V_{est} と f'_c/f_y の関係



a) 作用せん断力と変位

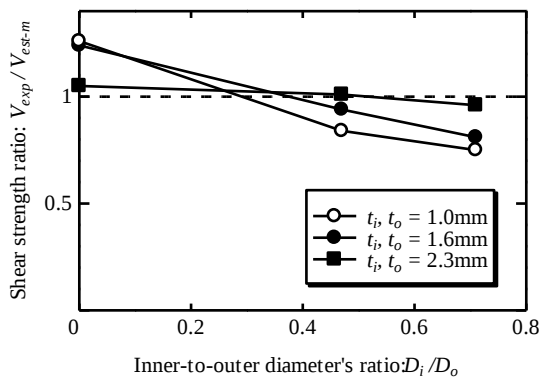


図－7 修正算定強度と実験せん断強度



b) 定式化した作用せん断力と変位

図－9 作用せん断力と変位



図－8 修正算定強度比と内径・外径比

$$\frac{V_{exp}}{V_{est}} = 8.58 \cdot \frac{f'_c}{f_y} \quad (9)$$

上式の関係を用いて式(8)を修正し、修正せん断強度 V_{est-m} を以下の通りとした。

$$V_{est-m} = 8.58 \cdot \frac{f'_c}{f_y} \cdot V_{est} \quad (10)$$

表－2 の第7列に修正せん断強度(V_{est-m})を示している。

また、図－7 に実験せん断強度(V_{exp})と V_{est-m} の関係を示す。同図より、両者の関係を最小二乗法により求めると相対比(V_{exp}/V_{est-m})=0.97、相関係数(r)=0.91 となり、コンクリートの圧縮強度と鋼管の降伏強度を考慮した修正算定せん断強度は実験せん断強度を精度よく評価できることがわかった。

(3)実験せん断強度比と内径・外径比

図－8 に実験せん断強度と修正算定せん断強度の比 (V_{exp}/V_{est-m})と内径・外径比(D_i/D_o)の関係を示す。前項において、 V_{est-m} を用いて V_{exp} をおおむね評価できるものの、同図より、 D_i/D_o が大きくなると中空部分が大きくなるにしたがって V_{exp}/V_{est-m} が低下する傾向がみられる。これは、既報の普通コンクリートを用いた N-CFDST の実験結果¹¹⁾と同じものであった。

3.3 変形性能

図－9 a)に内鋼管径(D_i)が 75mm の供試体の作用せん断力(V)と載荷点下部の変位(δ)の関係を示す。ここで、横軸は得られた変位(δ)を供試体高さ($b=160$ mm)で除して百分率で表記している。

同図より、すべての供試体において $\delta/b=2\%$ のせん断変形付近で、最大せん断力近傍に到達することがわかる。さらに、内鋼管の直径が同じであっても、外鋼管の径厚

比(D_o/t_o)が小さくなれば、最大せん断力が大きくなるということがわかる。これは、全断面積における鋼材断面積の比が大きくなるためである。また、 $\delta/b=10\%$ の変形が進行するまで、外鋼管の径厚比の影響を受けることなく、おおむね最大せん断強度を保持していることもわかる。

つぎに、図-9b)に材料特性を考慮した作用せん断力を V_{est-m} で除した無次元化作用せん断力(V/V_{est-m})とせん断変形(δ/b)の関係を示す。これらの関係より、内径・外径比(D_i/D_o)が等しければ、外鋼管の径厚比(D_o/t_o)に影響は若干あるものの、おおむね等しい変形じん性能を保持していた。なお、L10750 は、初期の傾きが他のものと比較して小さくなっている。これは、曲げ剛性が他のものよりも小さくなったためと示唆される。

4. まとめ

本研究は、外鋼管の径厚比(D_o/t_o)ならびに内径・外径比(D_i/D_o)を実験変数とした従来の N-CFDST よりも軽量となる L-CFDST ディープビームの逆対称二点荷重方法による曲げせん断実験を行った。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) L-CFDST では、せん断変形が進行し、内外鋼管の座屈ならびに充填鋼管の圧縮ストラットに沿ったひび割れにより終局状態に至って破壊した。また、曲げ引張側では、コンクリートの剥離が確認できた。
- (2) 内外鋼管を等しい面積の正方形に置き換え、RC のディープビームに類似した算定せん断強度(V_{est})により実験せん断強度(V_{exp})を評価したところ、 V_{est} と V_{exp} の間にはばらつきが見られた。
- (3) 実験せん断強度と算定強度の比(V_{exp}/V_{est})は、コンクリート圧縮強度と鋼管の降伏強度の比(f_c'/f_y)が大きくなると大きくなる傾向が見られた。
- (4) 鋼管の降伏強度とコンクリートの圧縮強度の比(f_c'/f_y)を考慮し、再計算した修正算定せん断強度(V_{est-m})と実験せん断強度(V_{exp})を比較したところ、 V_{est-m} は V_{exp} を良好に評価した。
- (5) 内径・外径比(D_i/D_o)と実験せん断強度と修正せん断強度と算定強度の比(V_{exp}/V_{est-m})は、 D_i/D_o が大きくなると V_{exp}/V_{est-m} が低下した。
- (6) 作用せん断力(V)とせん断変位(δ/b)の関係より、すべての供試体において 2%の変形付近で最大せん断力に到達した。最大せん断力に到達後、作用せん断力は低下することなく 10%の変形が進行するまでせん断強度を保持していた。
- (7) 作用せん断力を修正せん断強度で除した作用せん断力(V/V_{est-m})とせん断変形 (δ/b)の関係より、内径・外径比(D_i/D_o)が等しければ、外鋼管の径厚比(D_o/t_o)の影響はあるものの変形じん性能はおおむね一致

することがわかった。

謝辞

荷重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。なお、本研究の一部は JSPS 科研費(課題番号:18K04338)の助成を受けたものです。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 人工軽量骨材協会：力学的特性—人工軽量骨材コンクリートの力学的特性について—、人工軽量骨材コンクリート技術資料, No.4, 1987.
- 2) 笠井芳夫編：軽量コンクリート, 技術書院, pp. 71-87, 2002.
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編], 丸善, p. 191, 2017.
- 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, 丸善, 2008.
- 5) 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, 丸善, 2002.
- 6) Hunaiti, Y. M.: Strength of composite sections with foamed and lightweight aggregate concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 9, No. 2, pp. 58-61, 1997.
- 7) Mouli, M. and Khelafi, H.: Strength of short composite rectangular, hollow section columns filled with lightweight aggregate concrete, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol. 29, pp. 1791-1797, 2007.
- 8) Uenaka, K. and Mizukoshi, M.: Lightweight concrete filled steel tubular beam under bending-shear, *Structures - Research Journal of The Institution of Structural Engineers*, Elsevier, Vol. 30, pp. 659-666, 2021.
- 9) 上中宏二郎, 水越睦視：二重鋼管・軽量コンクリート合成短柱の圧縮特性, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学会, Vol. 42, No. 2, pp. 931-936, 2020.
- 10) 二羽淳一郎：FEM 解析に基づくディープビームのせん断耐力算定式, 第 2 回 RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集, 日本コンクリート工学会, pp. 119-128, 1983.
- 11) Uenaka, K.: Concrete filled double skin circular tubular beams with large diameter-to-thickness ratio under shear, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol. 70, pp. 33-38, 2013.
- 12) 土木学会：材料特性の数値モデル入門, pp. 43-44, 1989.