

碓子を含んだ軽量コンクリート充填ステンレス鋼管の曲げせん断特性

神戸市立工業高等専門学校 都市工学科 教授 ○上中宏二郎

神戸市立工業高等専門学校 都市工学科 教授 水越 睦視

近畿大学理工学部 社会環境工学科 教授 東山 浩士

1. はじめに

軽量骨材コンクリート¹⁾は従来のコンクリート(NC)と比較して 20%程度軽量化が可能である。また、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)、細骨材、粗骨材両者に軽量骨材を用いたものを軽量コンクリート 2 種(LC2)としている。しかしながら、LC を用いたはりのせん断強度は NC よりも低下することが言われており、せん断耐力は NC の 70%程度としている²⁾。さらに、LC を鋼管に充填した軽量コンクリート充填鋼管(L-CFT)部材は、従来のコンクリート充填鋼管部材(N-CFT)部材³⁾よりも軽量化が可能となるとともに、LC のせん断補強が可能であると考えられる。

つぎに、ステンレス鋼⁴⁾は錆びない鋼材であり建設材料にステンレス鋼を用いれば維持管理の低減が期待できる。またステンレス鋼は炭素鋼管と同じあるいはそれ以上の降伏強度を有するとともに、破断までのひずみが大きいことが特徴である。

ところで、CFT 部材の大きな特徴は、鋼管内部のコンクリートが拘束効果により三軸応力状態となるため優れた耐震性能を有することが知られている。さらなる耐震性能の向上のためには、軽量化をする方が望ましいが、文献 3)では、充填コンクリートとして軽量コンクリートを用いることは適用範囲外とされている。

このような背景のもと、著者らは L-CFT 部材の曲げ特性に関する実験的検討を行い、曲げ強度算定方法について提案している⁵⁾。また、LC の細骨材をすべて使用済み碓子(Ceramic Waste, CW)に置き換えた LC(CWLC)を鋼管に充填したものについても実験的な検討を行っており、碓子が曲げ特性に与える影響は見られなかったことを報告している。ここで、CW とは電力会社から廃棄されるセラミック製の絶縁体のことであり、年間約 1 万トンが廃棄されているものである。なお、普通鋼管よりも破断までのひずみが大きい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(CFSST)部材も優れた耐震性能を有すると期待できる⁶⁾。

本研究では、優れた変形性能を有する CFT に軽量化、ならびに防食の特徴を加えた軽量 2 種コンク

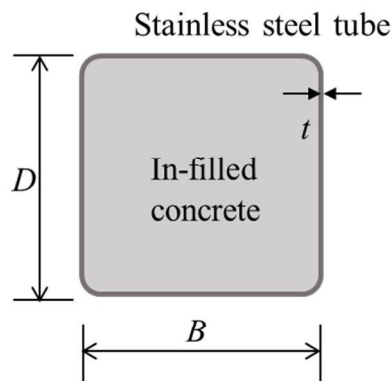


図-1 L-CFSST 部材の断面

表-1 供試体一覧

No.	Tag.	Stainless steel tube				Concrete			
		Width	Thick.	B/t	Shear span ratio	f_y	f_u	f_c'	E_c
		B (mm)	t (mm)			(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(kN/mm ²)
1	LC-2	125	3.0	41.7	2	259	630	33.9	16.4
2	LC-4				4				
3	CWLC-2				2				
4	CWLC-4				4				

表-2 コンクリート配合表

(a)LC

Unit weight(kg/m ³)				
$W/C(\%)$	W	C	S	G
55	175	318	621	564

(b)CWLC

Unit weight(kg/m ³)					
$W/C(\%)$	W	C	FA	S	G
55	165	300	20	852	564

リート充填ステンレス鋼管(L-CFSST)部材(図-1 参照)の曲げせん断特性の把握を目的とした実験的検討を行った。実験変数は、せん断スパン比、ならびに碇子の有無である。得られた破壊形式、最大荷重の結果より、LC2 を充填したステンレス鋼管の曲げせん断強度算定方法を提案することを目的とする。

2. 実験方法

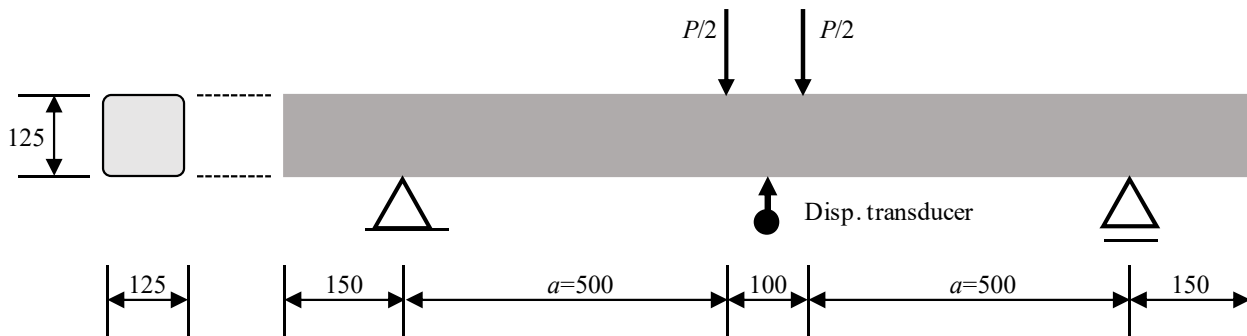
2.1 供試体の概要

表-1 に供試体一覧を示す。供試体名は 2 種類の充填材料(LC2, CWLC)ならびにせん断スパン比(2,4)の合計 4 体である。ステンレス鋼はオーステナイト系の SUS304 を用いている。ステンレス鋼管の幅(B)125 mm, 厚さ(t)3mm であり, 本研究でのステンレス鋼管の幅厚比(B/t)は 41.7 となる。なお, ステンレス鋼管の 0.2%強度 f_y , 最大強度 f_u はそれぞれ 259, 630N/mm² であり, f_u は f_y の 2 倍以上の値となっている。

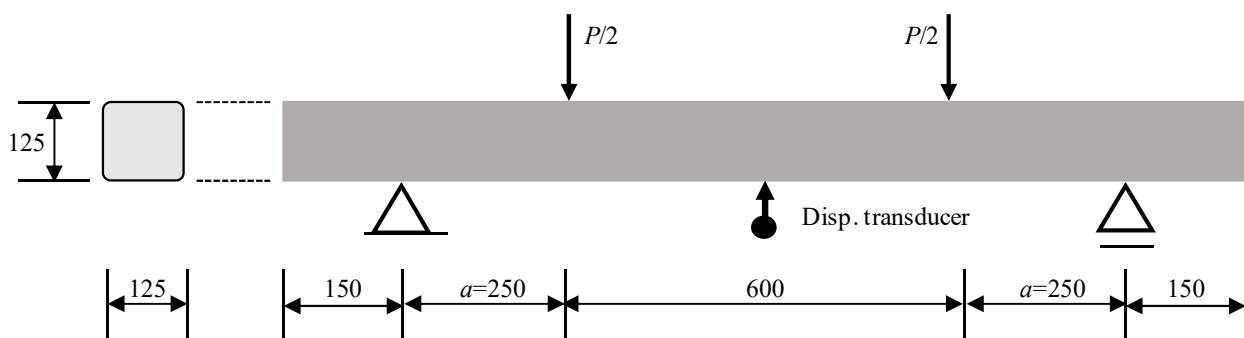
つぎに, 充填コンクリートである LC と碇子を混入した CWLC の配合表を表-2 に示す。また, 軽量粗骨材, 軽量細骨材, および碇子の表乾比重はそれぞれ, 1.68, 1.86, および 2.41 であった。なお, CWLC には材料分離を抑制するためフライアッシュ(FA)を用いた。

2.2 載荷方法

図-2 に載荷方法を示す。500kN 載荷試験装置を用いて, 載荷はりに集中荷重(P)を与え, 対称 4 点曲げ載荷試験方法により供試体に曲げモーメント, ならびにせん断力を作用させた。また, 変位計によ



a)せん断スパン比 4



b)せん断スパン比 2

図-2 載荷方法

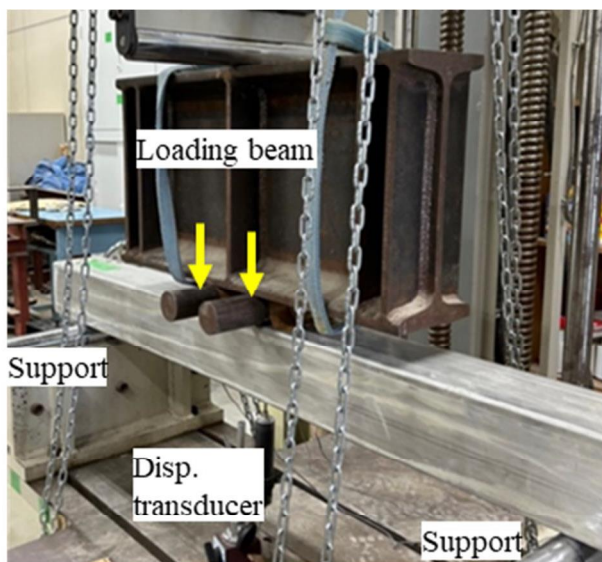
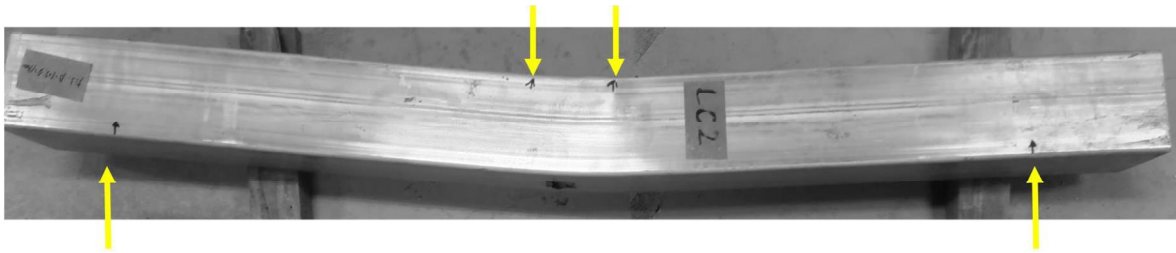


写真-1 載荷風景

りスパン中央のたわみ(δ)を測定した。さらに、スパン中央の断面上縁、中央、ならびに下縁にそれぞれ 1 枚の一軸ひずみゲージを貼付し、ステンレス鋼管のひずみ状態を測定した。最後に、載荷状態を写真-1 に示す。

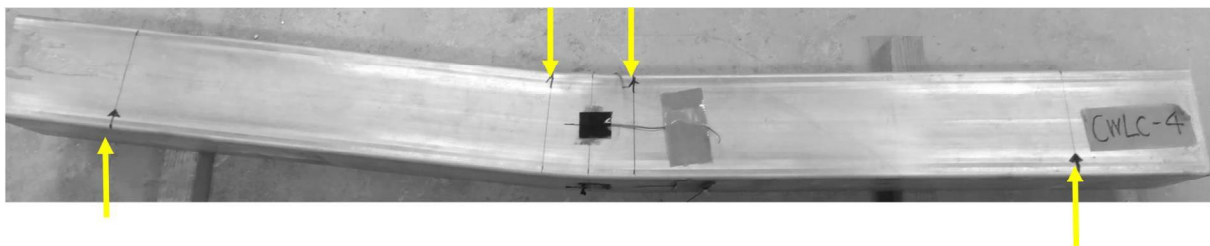


a)LC-4

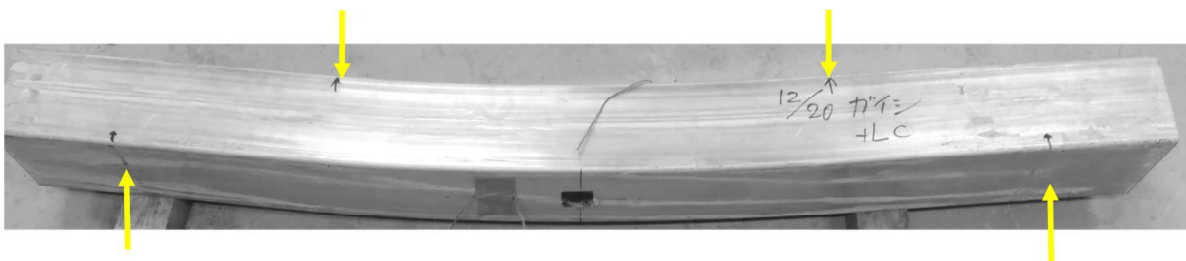


b)LC-2

写真-2 破壊形式 (LC)



a)CWLC-4



b)CWLC-2

写真-3 破壊形式 (CWLC)

3. 実験結果と考察

3.1 破壊形式

写真-2, 3 に全供試体の破壊状態を示す。全ての破壊形態は曲げ破壊形式は、ステンレス鋼管が局部座屈を呈して、終局状態に至った。また、引張側では、ステンレス鋼管の降伏が確認されたものの、ステンレス鋼管の破断は見られなかった。さらに、せん断スパン比が2~4の間であれば、せん断スパン比の変化による破壊形式の差異は見られなかった。なお、充填材料が破壊形式に及ぼす影響は見られなかった。

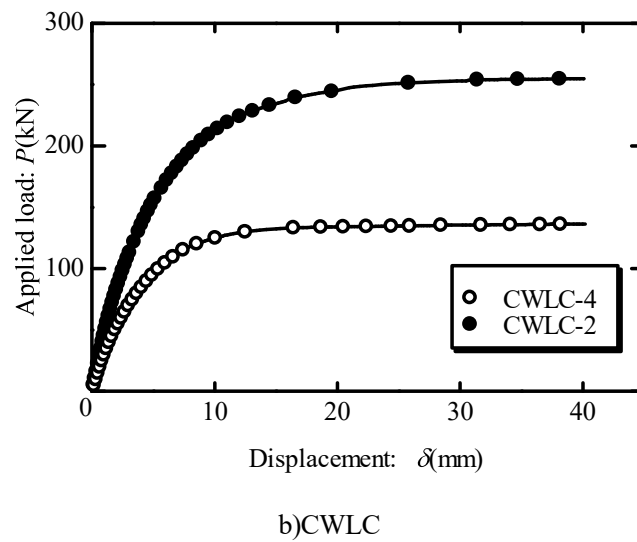
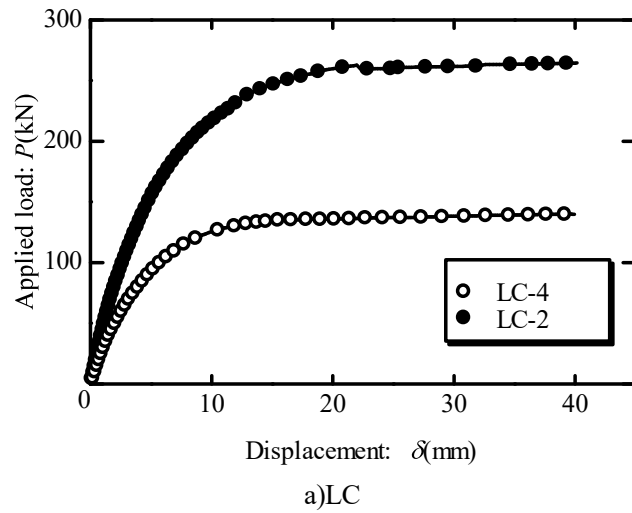


図-3 変形性能

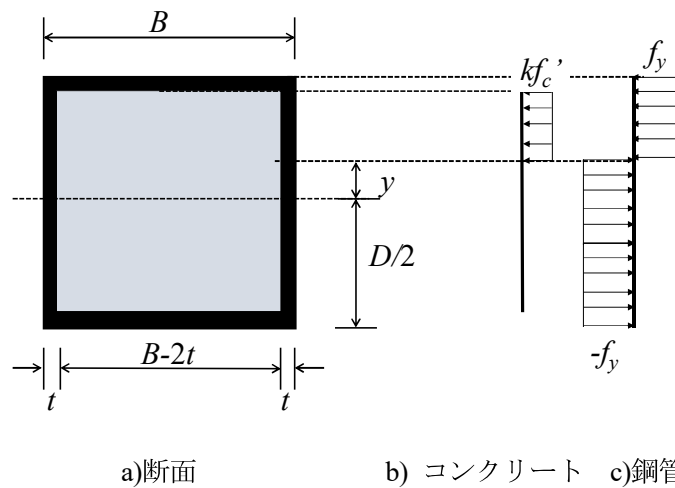


図-4 応力状態

3.2 変形性能

図-3a), b)に載荷荷重(P)とスパン中央の変位(δ)の関係を示す。全ての供試体において、20mm までの変形までに最大荷重に到達し、その後も断面の高さの 1/3 程度である 40mm 近くにおいても、おお

表-3 実験結果一覧

No.	Tag.	[1]	[2]	[3]	[4]	[1]/[2]	[1]/[3]	[1]/[4]
		M_{max} (kN m)	M_{est-fy} (kN m)	M_{est-fu} (kN m)	$M_{est-fuy}$ (kN m)			
1	LC-2	33.1	20.3	46.4	33.5	1.63	0.71	0.99
2	LC-4	35.3	20.2	46.5	33.5	1.75	0.76	1.05
3	CWLC-2	31.9	20.4	46.6	33.6	1.56	0.68	0.95
4	CWLC-4	34.1	20.4	46.5	33.8	1.68	0.73	1.01

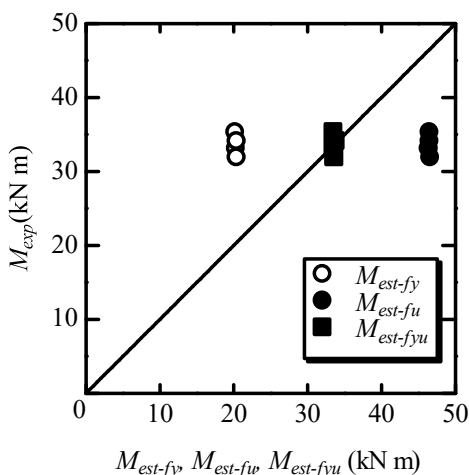


図-5 算定強度と実験強度

むね最大強度を維持しており、変形性能が確認できている。これは、鋼管内のコンクリートが三軸応力状態によるものと考えられ、従来の普通鋼管充填コンクリート部材と同じ挙動であることを示している。さらに、同じせん断スパン比でLC、CWLCを比較しても大きな差異は見られなかった。以上より、LC、およびCWLCを充填材に用いたステンレス鋼管部材は十分な変形性能を有していることがわかる。

3.3 曲げ強度の算定

著者らが、既報⁵⁾にて行った炭素鋼管に軽量コンクリートを充填したL-CFTの算定強度を参考に、本実験のL-CFSSTの結果との比較を行う。

まず、L-CFSSTの終局状態のコンクリートの応力の引張を無視し、ステンレス鋼管が降伏上小田井になっている図-4のとおり仮定するとステンレス鋼管、ならびに充填コンクリートの軸力と曲げモーメント(N_{us} , N_{uc} , M_{uc} , M_{us})は式(1)-(4)のとおりとなる。

$$N_{us} = -4f_y t y \tag{1}$$

$$N_{uc} = k f'_c (B - 2t) \left(\frac{D}{2} - t - y \right) \tag{2}$$

$$M_{us} = f_y t B (D - t) + 2 f_y t \left\{ \left(\frac{D}{2} - t \right)^2 + y^2 \right\} \quad (3)$$

$$M_{uc} = \frac{1}{2} k f'_c (B - 2t) \left(\frac{D}{2} - t - y \right)^2 \quad (4)$$

ここで、ここで、 B : 断面幅, D : 鋼管の高さ, t : 鋼管厚, k : コンクリートの低減係数(=0.85), y : 断面中央から圧縮領域までの距離をそれぞれ示す。上式より求めた軸力, 曲げモーメントにより, L-CFSST, CWL-CFSST の軸力, および曲げモーメントはそれぞれの和となる。

$$N_{est} = N_{us} + N_{uc} \quad (5)$$

$$M_{est} = M_{us} + M_{uc} \quad (6)$$

軸力の総和を表す式(5)より, $N_u=0$ となる y の距離は, 以下の通りとなる。

$$y = \frac{k f'_c (B - 2t) (D - 2t)}{8 t f_y + 2 k f'_c (B - 2t)} \quad (7)$$

式(5)から得られた y を式(3), (4)に代入し, 純曲げ強度 M_{est} を求めて, 実験曲げ強度(M_{exp})と比較する。

図-5 に実験曲げ強度と算定曲げ強度の関係を示す。ここで, M_{est-f_y} は式(6)にステンレス鋼管の 0.2% 強度(f_y)を用いて算定したもの, M_{est-f_u} は式(6)にステンレス鋼管の最大強度(f_u)を用いて算定したもの, $M_{est-f_{yu}}$ は式(6)にステンレス鋼管の最大強度と 0.2%強度の平均値を用いたものをそれぞれ示す。なお, これらの値を表-3 にまとめている。

図-5 より, 実験曲げ強度は降伏強度に基づいた M_{est-f_y} と比較すると安全側になる。これは, 鋼管が降伏点以降も耐力を維持していたことと考えられる。一方, 引張強度に基づいた M_{est-f_u} と比較すると鋼管は破断に至っていないため危険側の評価となった。このことから, ステンレス鋼材の最大強度と降伏強度の平均の応力($f_{yu}=(f_y+f_u)/2$)を用いて計算した $M_{est-f_{yu}}$ と M_{exp} を比較したところ, 算定強度は概ね実験強度を予測できることが確認することができた。なお, 本節においても, 充填材料の影響が終局強度に及ぼす影響は見られなかったことを付記する。

4. まとめ

本研究は, 幅厚比が一定のステンレス角形鋼管に軽量コンクリート 2 種(LC2), 軽量碍子コンクリート(CWLC)を充填し, せん断スパン比を実験変数とした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)破壊形式は, ステンレス鋼管圧縮部分の座屈であった。また, ステンレス鋼管の降伏は確認できたものの破断は見られなかった。さらに充填材料の違いによる破壊形式の差異は見られなかった。
- (2)変形性能は, 20mm までの変位でせん断スパン比に関係なくすべての供試体が最大荷重に到達した。その後, 最大強度を保持したまま変形が進行し, 高いじん性が得られていることが確認された。なお, 充填材料が変形性能に及ぼす影響については見られなかった。

(3)既報⁵⁾に基づいた N-CFT 部材の最大曲げ強度算定方法で比較したところ、降伏強度に基づいた曲げ強度では安全側の評価となった。また、最大強度に基づいた算定強度では危険側となった。そこで、降伏強度と最大強度の平均強度を用いて再計算したところ、実験結果をほぼ予測できることがわかった。

謝辞：実験を行うにあたり、神戸市立工業高等専門学校都市工学科に在籍された 5 年生の学生諸君にご協力をいただきました。また、(一社)近畿建設協会より、研究助成金をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 笠井芳夫編：軽量コンクリート，技術書院，pp. 71-87，2002.
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕，丸善，p. 191，2017.
- 3) 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.
- 4) ステンレス協会市場開発委員会：ステンレスの初歩，2007.
- 5) 上中宏二郎，水越睦視，東山浩士：軽量骨材および使用済み碍子細骨材を用いたコンクリート充填角形鋼管部材の曲げ特性に関する基礎的研究，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. 44, No. 2, pp. 667-672, 2022.
- 6) 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.