

通しダイアフラムを有するコンクリート充填角形鋼管短柱のせん断破壊性状に関する実験的研究

中原浩之*1・池田啓悟*2

EXPERIMENTAL STUDY ON SHEARING BEHAVIOR OF CFT SHORT COLUMN WITH DIAPHRAGM

by

Hiroyuki NAKAHARA*¹ and Keigo IKEDA*²

A shearing behavior of Concrete filled steel tubular (CFT) member has been investigated by authors. The short columns of CFT without diaphragm were tested in the previous study. In order to observe the shearing behavior of the real CFT columns in building structures, the 12 column specimens with diaphragm have been tested under cyclic shearing force. The test results of the yield strength and the shearing capacity are discussed through investigation of the obtained load vs. deformation relations.

Key words: concrete filled steel tubular structure, shear-span ratio, shearing capacity

1. 序

CFT 柱は、通常の建物に使用されるプロポーションでは、曲げ破壊が先行する。しかしながら、これが極端に短くなった場合は、せん断破壊する可能性があり、せん断スパン長さ a と柱せい D の比 a/D (せん断スパン比) が 1.0 以下の試験体を用いた実験研究が、進められてきている^{1) 2)}。

当研究室では、2013 年度より角形断面を有する CFT 短柱を対象に、一定軸力下で強軸曲げ方向及び弱軸曲げ方向から繰返しせん断力を与える実験を実施してきた(文献 3), 4) 及び 5))。実験で得られた最大強度は、「コンクリート充填鋼管構造設計施工指針」⁶⁾により算定した終局せん断耐力(以下、指針式と呼ぶ)と比較されている。これを Table1 に示す。Table1 の試験体は、合計 13 体で、長方形断面を有する試験体が 10 体、正方形断面を有する試験体が 3 体である。長方形試験体の場合、強軸曲げ試験体である R150 試験体と R200 試験体の最大耐力は、R150 の結果については平均で 16%、R200 については 25%指針式が過大評価となった。一方で、弱軸試験体である R75 試験体については 7%、正方形試験体 S150 試験体については 8%指針式が実験値を過小評価していた。これらの結果から、長方形断面を有する CFT 柱は、強軸

曲げ方向の力を受けてせん断破壊した場合、指針式によってその耐力を安全側に評価できないのではないかと危惧がある。

これまでの実験では、CFT 柱に円柱状の加力治具を用いて直接せん断力を載荷していたが、実際の建築構造の柱の場合は、ダイアフラムを通じてせん断力が導入される。本研究では、通しダイアフラムを有する CFT 試験体を作製し、これまでと同様の加力実験を実施した。より実際に近い試験体の実験結果をもとに角形断面を有する CFT 短柱の降伏耐力と終局耐力について考察する。

Table1 試験体実験最大耐力と計算値

断面及び方向	試験体	実験最大耐力 Q_{max} (kN)	せん断耐力 Q_{su} (kN)	Q_{max}/Q_{su}	ave.	
長方形 強軸曲げ	R150-15-P	242	266	0.91	0.84	
	R150-15	224	266	0.84		
	R150-20	214	269	0.80		
	長方形 弱軸曲げ	R150-25	217	270	0.80	1.07
		R200-15	391	503	0.78	
		R200-20	382	507	0.75	
		R200-23	368	508	0.72	
正方形	R75-5	185	167	1.11		
	R75-8	179	170	1.05		
	R75-9	180	171	1.05		
正方形	S150-10	488	443	1.10	1.08	
	S150-15	483	450	1.07		
	S150-20	489	455	1.07		

平成30年12月19日受理

* システム科学部門 (Division of System Science)

* 工学研究科 (Graduate School of Engineering)

2. 実験

2.1 試験体

Fig.1 に試験体を示す。図中の斜線部がせん断破壊する領域である。試験体の両端には軸力を伝達するためのエンドプレートを溶接している。これの片方には充填コンクリート打設用の孔を、また両方に軸力を導入するためのPC鋼棒を通す21φ孔をそれぞれ4ヶ所設けている。

試験体一覧を、Table2 に示す。実験変数は、断面形状・軸力比・コンクリート強度である。鋼管は、STKR400 である。試験体名の記号と数字は、R:長方形、S:正方形、M:単調載荷、C:繰返し載荷、45,37:コンクリート強度、10,13,20,25,26,30;軸力比を示している。全試験体で共通なのは、柱せい D の150mm と全長 L の1600mm である。せん断スパン比 a/D も、0.60 で一定としている。

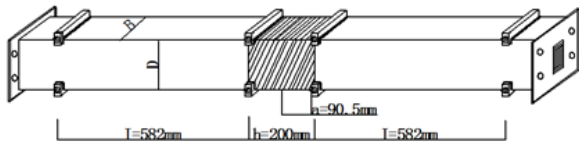


Fig.1 試験体の形状

2.2 材料

充填コンクリートは、45 試験体は、36MPa、37 試験体は、30MPa となるように調合した。充填コンクリートの諸元は、Table3 に示す。鋼管 STKR400 の力学的性質を Table4 に示す。図の値は、長方形鋼管の場合、その長辺より切り出した試験片の引張試験から求めたものである。降伏強度は、45 試験体 R、37 試験体 R、45 試験体 S、37 試験体 S それぞれ 354MPa、366MPa、366MPa、353MPa であった。

Table3 充填コンクリートの諸元

試験体	呼び強度	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	スランプ (cm)	空気量 (%)
45試験体	36	45.0	32.6	26.7	3.1
37試験体	30	37.5	28.9	22.7	2.2

Table4 鋼管の力学的性質

試験体	降伏強度 (MPa)	降伏ひずみ (%)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	降伏比
RM4520	354	0.38	424	187	0.83
RM4525					
RC4525					
RM3730	366	0.31	444	200	0.82
RC3720					
RC3730					
SM4513	366	0.40	446	186	0.82
SM4525					
SM3710					
SC3720	353	0.24	450	209	0.78
SC3726					

Table2 試験体一覧

試験体	柱せい D (mm)	柱幅 B (mm)	板厚 t (mm)	幅厚比 D/t	試験体高さ h (mm)	全長 L (mm)	支点間距離 / (mm)	せん断スパン比 a/D	軸力比 N/N_0	
									初期導入時	耐力発揮時
RM4520	150	75	3.08	24.35	200	1600	582	0.60	0.20	0.20
RM4525									0.25	0.25
RC4525									0.25	0.25
RM3730			0.29	0.30						
RC3720			0.20	0.20						
RC3730			0.29	0.30						
SM4513		150	4.18	35.89					0.13	0.13
SM4525									0.24	0.24
SC4525									0.24	0.24
SM3710			0.10	0.10						
SC3720			0.20	0.20						
SC3726			0.25	0.26						

2.3 実験方法

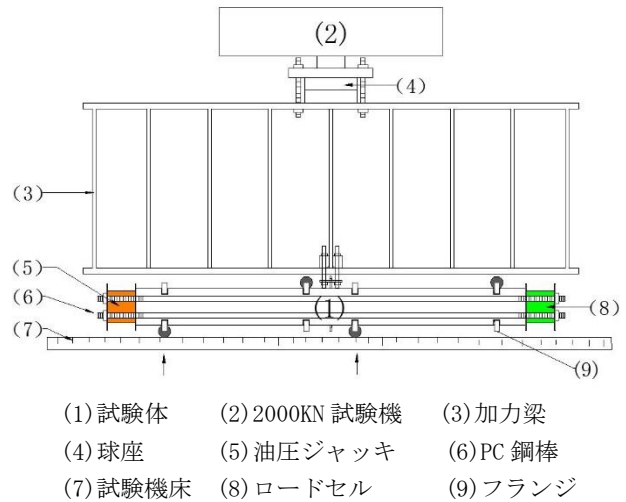
Fig.3 に示す装置を用いて逆対称を与える加力を行った。Fig.4 に加力時の断面力図を示す。

Fig.5 に加力時の変形状況を示している。点对称に配置された支点から力を加え、試験体部に逆対称変形を与えるいわゆる大野型の加力法を採用している。大野型加力装置により正負交番繰返し载荷を実施するには、通常多数の油圧ジャッキを使用することが多いが、本研究で用いる装置は、せん断力が0になる度に、試験体を中心で吊り上げ、支点位置を点对称に変更する手法により、一つの試験機だけで正負交番繰返し载荷を可能としている。

文献5) では、Photo 1 のように、試験体を吊り上げたのち、反曲点位置がずれないように斜材で連結したシリンダーを回転させて、せん断力の方向を変えていた。この方法では、斜材を回転させる際に十分なスペースをとるためのクロスヘッドの上下に時間がかかり、たくさんの実験を実施することは難しい状況にあった。

本研究は、上述のようにシリンダーの入れ替え作業だけで加力方向を反転できるので、クロスヘッドの上下の時間が短縮され、より効率的に実験が実施できるようになった。今後は、この利点を生かして更なる実験結果の蓄積を図る。

加力点部分の詳細を、Photo1 と Photo2 に示す。Photo1 は文献5) の装置を示しており、Photo2 は、本研究の装置を示している。Photo1 に示すように、シリンダー状の支点を直接試験体に載せることで、加力を実施している。一方で、Photo2 では、シリンダーをフランジ厚さ 19mm で切り欠いた部品を用意して、これを試験体フランジにはめ込むことで、フランジを介してせん断力を载荷する方法にしている。本年の方法は、実際の CFT 柱の詳細をより忠実に模擬したものとなる一方で、最も応力が大きい部分に溶接接合が必要となり、この部分での亀裂や、破断が危惧される。鉛直荷重は PC 鋼棒を介し、油圧ジャッキにより導入し、水平力は 2000kN 試験機を用いて载荷した。鉛直荷重は Fig.3 中のエンドプレートに取り付けたロードセルで、水平力は試験機で測定した。Fig.6 に試験体に貼り付けたひずみゲージの位置を示す。ひずみゲージは、すべて塑性ゲージである。試験体のフランジには 1 軸、ウェブ部分中央には 3 軸ゲージを貼り付けた。フランジの 1 軸ゲージは、この部分における曲率算出して、試験体の反曲点位置を求めることができる。3 軸ゲージの値から試験体中央部における鋼管のせん断応力の測定を目的としている。変位計により試験体の部材角と軸方向変位を測定した。



(1)試験体 (2)2000kN 試験機 (3)加力梁
(4)球座 (5)油圧ジャッキ (6)PC 鋼棒
(7)試験機床 (8)ロードセル (9)フランジ

Fig. 3 加力装置

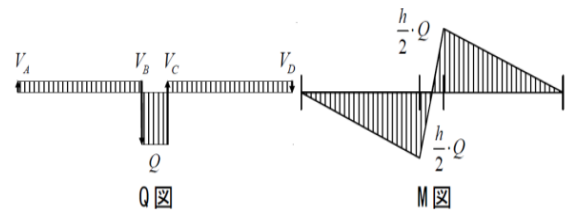


Fig. 4 断面力図(正側载荷時)

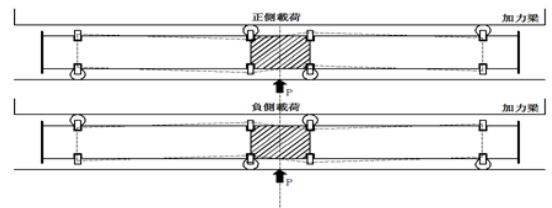


Fig. 5 加力時の変形図



Photo1 文献5) の加力支点 Photo2 本研究の加力支点

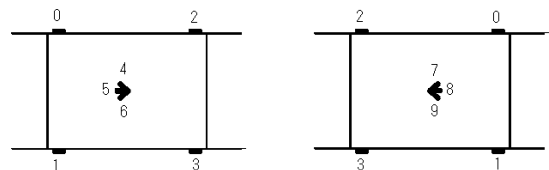


Fig. 6 ひずみゲージ貼付位置

3. 荷重－変形関係

実験のせん断力 Q －せん断ひずみ γ の関係を示す Fig.8 中の Δ 点は鋼管がせん断降伏した点を, \square 点は実験の最大せん断力を示している. 鋼管の降伏を判定には, 以下の von Misses の降伏条件式を用いた.

$${}_s\sigma_1^2 - {}_s\sigma_1{}_s\sigma_2 + {}_s\sigma_2^2 + 3{}_s\tau_{12}^2 = \sigma_e^2$$

${}_s\sigma_1$: 鋼管の加力方向応力, ${}_s\sigma_2$: 鋼管の軸方向応力

${}_s\tau_{12}$: 鋼管のせん断応力, σ_e : 相当応力

相当応力が鋼管の降伏応力に達した点を, 試験体の降伏強度と判定した.

Table5 に各試験体の, 降伏強度, 降伏ひずみ, 最大耐力, 耐力時ひずみを示している.

Photo4 のように, RM4520 試験体においてのみ溶接部に亀裂が見られた. 原因として考えられるのは, 亀裂は, 板厚 3.08mm の試験体と板厚 19mm のフランジとの隅肉溶接金属の中に発生している. 亀裂の位置が, 隅肉溶接継ぎ手の板厚 3.08mm の試験体側止端部ではなく, 隅肉溶接金属中央部に発生していることから, この亀裂は, 隅肉溶接ルート部から発生・進展した疲労亀裂であると考えられ, それと同時にのど厚不足であることも考えられる. 防止対策として, 試験体とフランジを完全溶け込み溶接にする, のど厚を大きくする等が考えられている. しかし, これによる耐力低下は見られなかった. また, すべての試験体は, 柱頭・柱脚の引張降伏より, 鋼管中央部のせん断降伏が先行していた.

加力時における試験体の反曲点位置及び a/D を Table6 に示す. これらは, 試験体中央部がせん断降伏した時の柱頭・柱脚一軸ゲージにより算出した曲率の按分から求められる. Table6 より, 今年度実施した試験体の降伏時のせん断スパン比は, 計画時を上回る結果となっている. 原因として, 試験体の中央部に载荷できていないことが考えられる. 今後, 実験器具の改良に努めたいと考える. しかしながら, 全ての試験体において, 破壊モードはせん断先行であり, この程度の a/D のばらつきは結果に大きく影響していないと考えられる.



Photo4 RM4520 溶接部の亀裂の様子

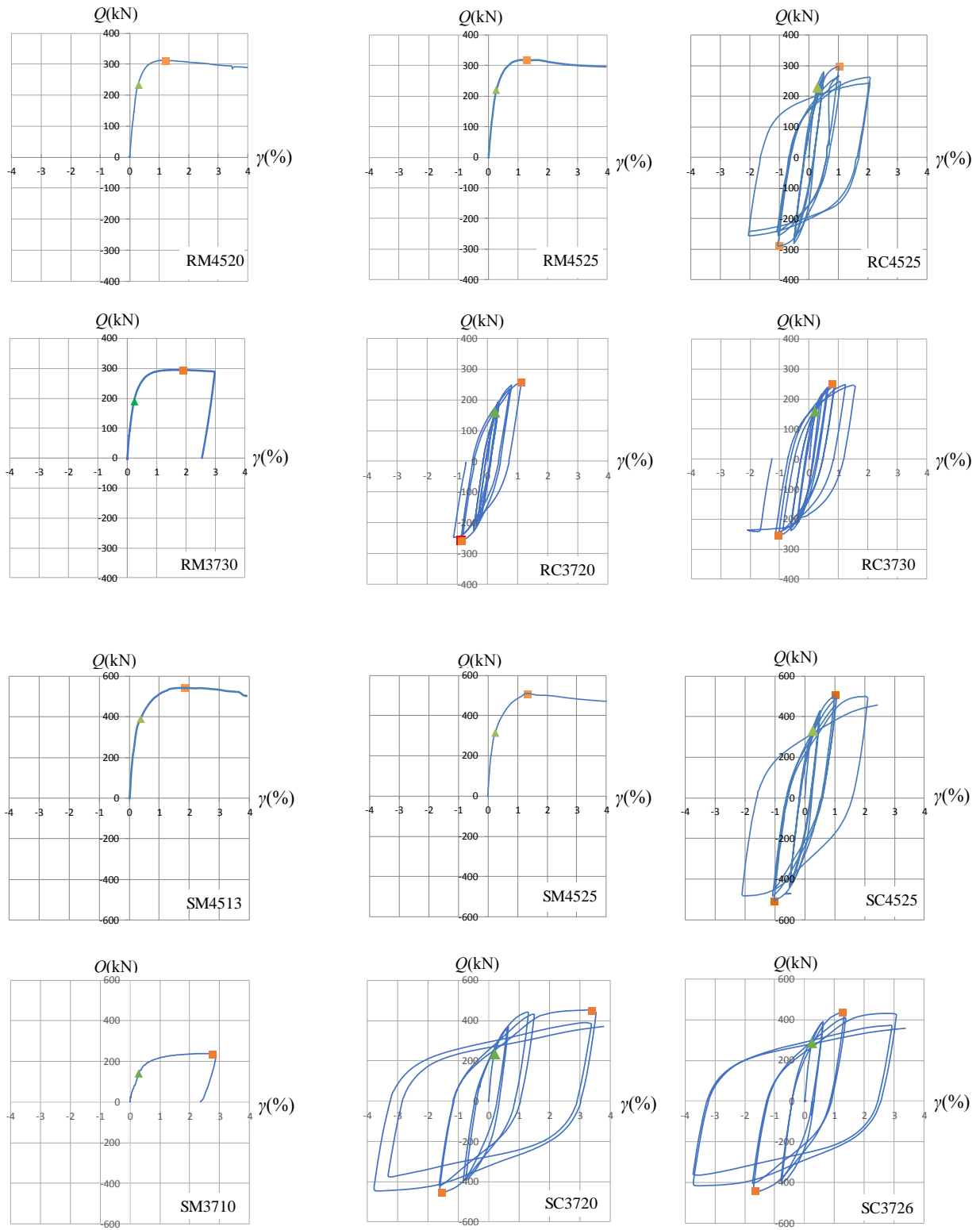
Table5 実験値一覧

試験体	降伏強度	降伏ひずみ	最大耐力	耐力時ひずみ
	(kN)	(%)	(kN)	(%)
RM4520	234	0.28	313	1.18
RM4525	220	0.27	318	1.26
RC4525	228	0.27	297	1.00
RM3730	189	0.23	294	1.90
RC3720	161	0.24	269	1.45
RC3730	158	0.21	249	0.81
SM4513	391	0.38	542	1.85
SM4525	314	0.24	510	1.35
SC4525	330	0.25	504	1.00
SM3710	282	0.23	474	3.86
SC3720	233	0.18	453	3.37
SC3726	288	0.24	438	1.29

Table6 反曲点位置

試験体	反曲点位置 a (mm)	a/D	精度
RM4520	101	0.67	1.12
RM4525	94	0.63	1.05
RC4525	97	0.65	1.08
SM4513	96	0.64	1.07
SM4525	148	0.99	1.65
SC4525	135	0.90	1.50
RM3730	92	0.61	1.02
RC3720	122	0.81	1.35
RC3730	105	0.70	1.17
SM3710	94	0.63	1.05
SC3720	125	0.83	1.38
SC3726	123	0.82	1.37
		ave.	1.23

通しダイアフラムを有するコンクリート充填角形鋼管短柱のせん断破壊性状に関する実験的研究

Fig. 8 各試験体せん断力 Q -せん断ひずみ γ 関係図

4. 剛性評価

実験の初期剛性の評価を行う。実験結果より求めた。CFT 試験体の初期剛性を K_e とする。 K_e はせん断力-せん断ひずみ ($Q-\gamma$) 関係において、せん断力 0 の点から最大せん断力の 3 分の 1 の点までの最小二乗線の傾きとした。剛性の計算値 K_{cal} は以下の式で求めた。

$$K_{cal} = {}_c K_{cal} + {}_s K_{cal}$$

$${}_c K_{cal} = \frac{{}_c K_B \cdot {}_c K_G}{{}_c K_B + {}_c K_G} \quad {}_s K_{cal} = \frac{{}_s K_B \cdot {}_s K_G}{{}_s K_B + {}_s K_G}$$

$${}_c K_B = \frac{12 \cdot {}_c E \cdot {}_c I}{h^2} \quad {}_s K_B = \frac{12 \cdot {}_s E \cdot {}_s I}{h^2}$$

$${}_c K_G = \frac{{}_c E \cdot {}_c A}{2(1 + {}_c \nu) \cdot {}_c \kappa} \quad {}_s K_G = \frac{{}_s E \cdot {}_s A}{2(1 + {}_s \nu) \cdot {}_s \kappa}$$

記号の、 E はヤング係数、 A は断面積、 ν は鋼管のポアソン比、 κ は形状係数であり、左下付き文字 C はコンクリート、S は鋼管、右下付き文字 B は曲げ、G はせん断を表す。コンクリートと鋼管の形状係数はそれぞれ 1.18 と 2.30 である。また、鋼管のヤング係数は一様に 205GPa を用いて計算を行った。実験結果と計算結果の比較を Table7 に示す。Table7 から分かるように計算値が実験値を約 21% 過大評価していることが分かった。

Table7 剛性値比較

	実験値 K_e	計算値 K_{cal}	K_e/K_{cal}	ave
RM4520	115	126	0.91	0.91
RM4525	113		0.90	
RC4525	117		0.93	
SM4513	208	247	0.84	0.82
SM4525	221		0.89	
SC4525	180		0.73	
RM3730	91	117	0.78	0.75
RC3720	83		0.71	
RC3730	91		0.78	
SM3710	146	230	0.63	0.67
SC3720	151		0.66	
SC3726	163		0.71	
		全試験体ave		0.79

5. 実験値と計算値との比較

CFT 指針を参照して算定したせん断力 Q -軸力比 N/N_0 の関係曲線上に、実験より得られた試験体の最大耐力 Q_{max} プロットしたものを Fig.10, Fig.11 に示す。Fig 中の実線は CFT 柱のせん断耐力 Q_{su} を、点線は曲げ耐力時のせん断耐力 Q_{bu} を表している。CFT 柱のせん断耐力及び終局曲げ耐力は、鋼管柱と無筋コンクリート柱の耐力を一般化累加することで求めている。Fig.10, Fig.11 よりすべての試験体の Q_{max} は終局曲げ耐力に達してないことが分

かる。これは、実験試験体がすべてせん断破壊により最大耐力が決定したことを示している。

Table8 に実験より得られた試験体の最大耐力と CFT 指針により算定した終局耐力及び実験値と計算値の比を示す。せん断余裕度 Q_{su}/Q_{bu} について考察する。45 試験体長方形で 0.74, 45 試験体正方形で 0.58, 37 試験体長方形で 0.73, 37 試験体正方形で 0.56 となっている。次に、CFT 指針式により実験のせん断耐力が評価できているのかについて考察する。

Table8 より、 Q_{max}/Q_{su} では、全試験体とも 1 を上回る結果となった。よって、試験体の水平力は、せん断耐力 Q_{su} を超えるが、曲げ耐力時のせん断力 Q_{bu} には達していないことが分かる。試験体に貼付したゲージのデータからは、ウェブのせん断降伏が早期に観測されている。これらの実験観測は、全ての試験体で同様で、以上のことから、試験体は、せん断破壊により最大耐力が決定したものと考えることができる。

Table1 から、既往の研究においては、長方形断面を有する強軸曲げ実験の結果は、これまで CFT 指針により安全側に評価することができなかった。本実験では、この問題は解決している。これの主な要因としては、フランジを試験体に取り付けた為であると考えられる。フランジは、内部コンクリートのずれ止めとして機能するほか、ウェブのせん断座屈を抑制する効果があると考えられる。

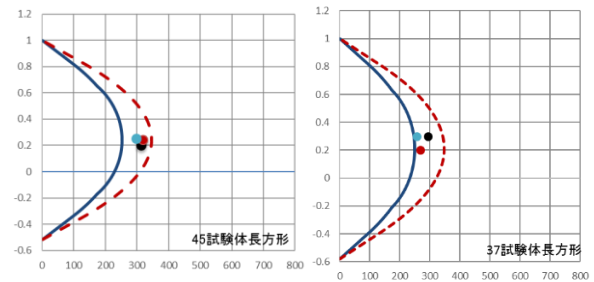


Fig. 10 せん断力 Q -軸力比 N/N_0 関係(長方形)

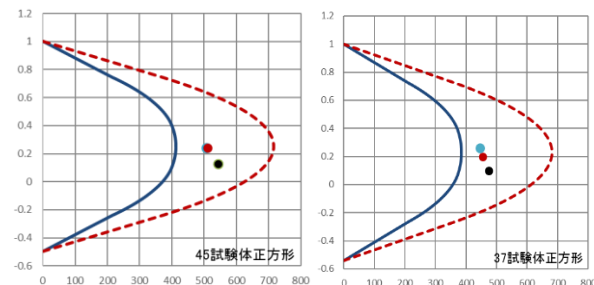


Fig. 11 せん断力 Q -軸力比 N/N_0 関係(正方形)

Table8 実験耐力と計算耐力の比較

試験体	Q_{max} (kN)	Q_{su} (kN)	Q_{bu} (kN)	Q_{su}/Q_{bu}	Q_{max}/Q_{su}	ave.
RM4520	313	256	346	0.74	1.22	1.20
RM4525	319	258	347	0.74	1.24	
RC4525	298	258	347	0.74	1.16	
SM4513	542	404	694	0.58	1.34	1.27
SM4525	510	413	716	0.58	1.23	
SC4525	508	413	716	0.58	1.23	
RM3730	294	249	343	0.73	1.18	1.08
RC3720	260	256	348	0.74	1.02	
RC3730	257	249	343	0.73	1.03	
SM3710	474	377	660	0.57	1.26	1.20
SC3720	454	384	680	0.56	1.18	
SC3726	445	384	680	0.56	1.16	
					全試験体ave.	1.19

【参考文献】

- 1) 崎野健治, 石橋久義: Experimental Studies on Concrete Filled Square Steel Tubular Short Columns Subjected to Cyclic Shearing Force and Constant Axial Force, 日本建築学会構造系論文報告書, 第 353 号, pp. 81-91, 1985. 7
- 2) 中原浩之, 津村竜次: コンクリート充填円形鋼管短柱のせん断挙動に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文, Vol. 79, No. 703, pp. 1385-1393, 2014. 9
- 3) 中原浩之, 富松輝彦: 長方形断面を有する CFT 柱のせん断性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No. 2, pp. pp. 1033-1035, 2015. 7
- 4) 陳瑞涵, 中原浩之, 富松輝彦, 窪寺弘頭, 武田亮太, 大野敦弘: 長方形と正方形断面をもつ CFT 短柱のせん断性状に関する実験的研究 (その 1 実験の方法と結果), 日本建築学会研究報告九州支部, 第 55 号, pp. 561-564, 2016. 3
- 5) 中原浩之, 陳瑞涵, 富松輝彦, 窪寺弘頭, 武田亮太, 大野敦弘: 長方形と正方形断面をもつ CFT 短柱のせん断性状に関する実験的研究 (その 2 実験結果の考察), 日本建築学会研究報告九州支部, 第 55 号, pp. 564-568, 2016. 3
- 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.

6. まとめ

本研究では, 大野式加力装置を参照した加力装置を用いてせん断スパン比 a/D 0.6 である通しダイアフラムを有する CFT 短柱に単調載荷, 繰り返し載荷する実験実施し, その破壊性状と終局耐力について考察を行った. 得られた結果を, 以下に列挙する.

- 1) すべての試験体で試験体中央部の鋼管のせん断降伏が曲げ降伏より先行していた.
- 2) RM4520 試験体においてのみ, 溶接部の亀裂が, 観測されたが, これによる耐力低下らしき現象は, 観察されなかった.
- 3) 全ての試験体で, 実験最大耐力が CFT 指針によるせん断耐力の計算値を上回り, 長方形 CFT の強軸曲げ実験試験体を含み CFT 指針式により安全側に設計できることが示された. これは, ダイアフラムをつけた効果と考えられる.

7. 今後の予定

本研究の実験試験体は, 通しダイアフラム形式を採用した. CFT はコンクリートの充填を阻害しない外ダイアフラム形式を多用されるため, ダイアフラム形式をパラメーターとした実験を追加していく予定である.