

論文 角形断面を有するコンクリート充填鋼管柱のせん断耐力式の提案

中原 浩之*1・森下 詢太*2・瀧 賢太郎*2・藤嶋 太一*3

要旨: 角形断面を有する 32 体のコンクリート充填鋼管柱のせん断破壊実験を実施した。実験の主たるパラメータは軸力比である。実験試験体はすべて、せん断スパン比が 0.6 の短柱で、これらに繰返しせん断力を載荷して、そのせん断力-変位関係を得た。本論では、せん断破壊が先行した実験の最大耐力のデータベースを作成し、実験値を計算値で除した値の平均が 1.0 となる実験式を構築した。実験と計算の比の標準偏差は 0.041 となった。

キーワード: せん断スパン比, 軸力比, せん断降伏, 曲げ降伏, 圧縮ストラット

1. はじめに

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、具体的には、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 以下の試験体では、せん断破壊することが報告されている^{1) 2)}。

著者らは、2013 年度より角形断面を有する CFT 短柱を対象に、一定軸力下で繰返しせん断力を与える実験を実施してきた^{3) 4) 5)}。これまでの実験結果では、一部の例外を除いて、CFT 短柱はせん断破壊による最大耐力が観測されている。本研究では、これらをデータベースとして、せん断耐力式を構築する。

これまでの研究では、実験で得られた最大せん断力を CFT 指針⁶⁾に記載されているせん断耐力設計式 (以下、CFT 指針式と称す) で評価してきた。CFT 指針式はコンファインド効果や付着応力を考慮しておらず、実験結果をやや過小評価する傾向があることが分かっている。また、CFT 指針式は、一般化累加耐力式であり、計算式が複雑なことが、実用上の便を欠くとの指摘がある。そこで、容易に計算ができて、これまでの実験の最大せん断力を精度よく評価できる新たな CFT 柱のせん断耐力実験式を提案する。

2. 実験データベースと設計式の概要

2.1 実験試験体

これまでに行ったせん断破壊実験試験体を図-1 に示す。試験体の全長は、1600mm である。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作用させるためのエンドプレートと溶接している。この片方にはコンクリート充填用の孔を設けている。またエンドプレートの両方には、軸力を導入するための PC 鋼棒を通す 28Φ 孔をそれぞれ 4ヶ所設けている。この試験体に逆対称の変形を与える加力を行い、得られた最大耐力を収集した。試験体一覧を表-1 に示す。主たる実験変数は、式(1)の軸力比 n である。

$$n = N / N_0 \tag{1}$$

ここに、

$$N_0 = N_s + N_c$$

$$N_s = A_s \cdot F_y$$

$$N_c = A_c \cdot F_c$$

N : 作用軸力

N_s : 鋼管の圧縮耐力

N_c : コンクリートの圧縮耐力

A_s : 鋼管の断面積

F_y : 鋼管の降伏強度

A_c : コンクリートの断面積

F_c : コンクリートの圧縮強度

表-1 において軸力比 n は、0.09 から 0.40 とした。他の変数は、ダイアフラム形式・断面形状・コンクリートの圧縮強度である。ダイアフラム形式は通しダイアフラム形式と外ダイアフラム形式の 2 通りである。断面形状は幅 75mm, せい 150mm の長方形断面と幅 150mm, せい 150mm の正方形断面の 2 通りである。鋼管のせいと厚さの比の範囲は、33.8 から 53.2 である。コンクリートの圧縮強度は 37MPa から 61MPa の範囲で実験をしている。全試験体で共通のものは、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。鋼管はすべて STKR400 が使用されている。

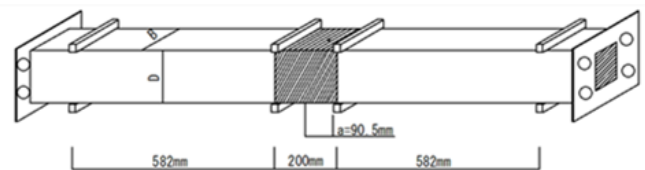


図-1 試験体の形状

*1 長崎大学大学院工学研究科 教授・博士 (工学) (正会員)

*3 長崎大学工学部工学科 学部生

*2 長崎大学大学院工学研究科 大学院生

表-1 試験体一覧

試験体	ダイヤフラム形式	断面形状	コンクリート強度 [MPa]	軸力比	鋼管の降伏強度 [MPa]	せん断降伏強度 [kN]	最大強度 [kN]
1	通し ダイヤフラム	長方形	37	0.20	366	161	269
2				0.30		158	249
3				0.30		189	294
4			45	0.20	354	234	313
5				0.25		220	319
6				0.25		228	298
7			61	0.30	354	251	306
8				0.40		248	278
9				0.10		281	474
10		正方形	37	0.20	353	233	453
11				0.26		438	445
12				0.13		391	542
13			45	0.25	366	314	510
14				0.25		330	508
15				0.15		419	546
16			0.25	348	465	550	
17	外 ダイヤフラム		39	0.09	371	208	291
18				0.19		208	295
19				0.28		215	286
20			41	0.20	373	213	307
21				0.30		209	287
22		0.50		140		255	
23		61	0.10	354	237	336	
24			0.20		258	342	
25			0.19		347	478	
26		39	0.27	368	373	489	
27			0.33		365	474	
28			0.15		356	495	
29	41	0.28	373	337	482		
30		0.34		371	460		
31		0.25		477	560		
32	0.30	348	487	539			

2.2 日本で用いられている設計式

日本で用いられている CFT 柱のせん断耐力式としては、例えば、鋼管コンクリート構造計算規準・同解説がある⁷⁾。この計算規準では、鋼管内コンクリートは、曲げ破壊を生じると仮定されている。一方で、CFT 指針式では、鋼管内コンクリートは、アーチ機構を形成し、せん断抵抗するとされている。本論では、実験で得られた CFT 短柱の最大せん断力について、CFT 指針で評価した。この設計式は、一般化累加強度式で、载荷軸力により、鋼管の負担せん断力が場合分けされており、計算手順は複雑となる。以降では、CFT 指針より算出したせん断耐力を Q_{AJI} とする。

2.3 米国で用いられている設計式

米国での CFT 部材の設計においては、AISC 2010⁸⁾ で提案された設計式が用いられている。AISC 2010 では、CFT のせん断強度に関する設計式として、2 種類が示されている。本論では、上記に加えて、文献 9) の WSDOT による提案式と、これを修正した Roeder らの提案式の計 4 種類のせん断耐力推定精度を調べている。以降に、AISC より算出したせん断耐力をそれぞれ Q_{AISC1} 、 Q_{AISC2} とする。WSDOT に記載されている方法で算出したせん断耐力を Q_{WSDOT} 、Roeder らの提案式より算出したせん断耐力を Q_{Roeder} とする。これらの計算式を以下に示す。なお、WSDOT 式と Roeder 式の精度の検討に用いられた実験データベースにおいて、鋼管の降伏強度、鋼管の幅厚比、コンクリート強度の最大値は、それぞれ、542MPa、56.0、67.5MPa となっている。

・ AISC Method 1 式

※鋼管の強度のみを考慮

$$Q_{AISC1} = 0.6F_y \cdot A_{sw} \quad (2)$$

・ AISC Method 2 式

※コンクリートの強度のみを考慮

$$Q_{AISC2} = 2\sqrt{F_c} \cdot A_c \quad (3)$$

・ WSDOT 式

$$Q_{WSDOT} = 0.6F_y \cdot A_{sw} + 0.5 \cdot 0.0829 \cdot 2 \cdot \sqrt{F_c} \cdot A_c \quad (4)$$

・ Roeder 式

$$Q_{Roeder} = 2 \cdot 0.6F_y \cdot A_{sw} + 3 \cdot 0.0829 \cdot \sqrt{F_c} \cdot A_c \quad (5)$$

ここで、 A_{sw} は鋼管ウェブ部分の断面積である。

2.4 実験値と設計式との比較

日本と米国で使用されている式を比較するために、図-2 に軸力比 n とせん断耐力の関係図を示す。ここでこの図には、CFT 指針によるせん断耐力の計算値と WSDOT 式の計算値を線で示している。また、a) 図には試験体名 17, 18, 19 の実験データをプロットしており、b) 図には試験体名 15, 16, 32 の実験データをプロットしている。CFT 指針式は、一般化累加耐力式で、この図上では曲線としてあらわされる。一方、WSDOT 式は、鋼管とコンクリートのせん断耐力の和で表現されており、この図上では直線としてあらわされる。これが両者の相違点である。

実験データが存在している軸力比 0~0.3 の間では、CFT 指針式は、WSDOT 式よりも大きな値を与えている。また、実験値は、CFT 指針式よりもさらに大きいことが分かる。これについて、詳しく見てみる。表-2 に、実験より得られたせん断耐力 Q_{exp} を前述の耐力式から得られたせん断力で除したものを纏めている。ここで、試験体名 1, 2, 22 は、実験の不備があったため、統計データから除外している。表-2 から、コンクリート強度のみで構成される AISC Method 2 式が一番安全側の評価となった。一方で、鋼管・コンクリートの両方の強度を考慮している WSDOT 式は、実験値を安全側に評価する算定式の中では、CFT 指針式に近い値を示している。

表-2 の最下段には Q_{exp} をそれぞれの計算値で除したものの平均と標準偏差を示している。平均を比較すると、CFT 指針式は、20%安全側の評価となっている。AISC 1, AISC 2, WSDOT 式は、それぞれ 60%を超える大幅な安全側の評価となっている。一方で、Roeder 式は 18%危険側の評価となっている。また、標準偏差は、CFT 指針式が 0.07 となり、耐力評価のばらつきが一番小さいことが分かる。続いて、Roeder 式、WSDOT 式のばらつきが小さい。以降では、CFT 指針式と WSDOT 式を比較しながら、新しいせん断耐力式の構築を試みる。

CFT 指針式と WSDOT 式の大きな相違点は、作用軸力の影響の考慮の有無である。軸力比 n を横軸にとり、縦軸に実験値を計算値で除した値の変化を図-3 に示す。

図-3 の a) には、CFT 指針式による予測精度の変化を、b) には、WSDOT 式による予測精度の変化を載せている。図には、プロットの回帰直線も示している。

CFT 指針式は、WSDOT 式に比して、せん断耐力の予測のばらつきが小さい。これは、CFT 指針式は、軸力の影響を考慮しているためと考えられる。

n の増大は、CFT 内部のコンクリートのせん断抵抗成分を増加させる働きがある。つまり、コンクリートの強度抵抗の寄与も見ることがある。そのため、図-4 に、コンクリート強度を横軸に取った同様の図を載せている。CFT 指針式について、コンクリート強度は増加しても実験値/計算値は同程度となっている。この結果はコンクリートのせん断抵抗の寄与を妥当に評価していると言える。

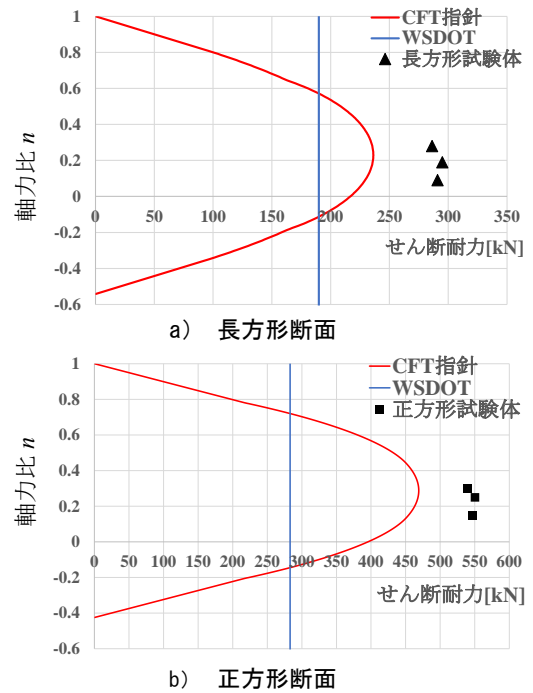


図-2 CFT 指針式と WSDOT と実験値の比較

表-2 日本・米国設計式における計算値・実験値の比較

試験体	実験値 Q_{exp} [kN]	日本の設計式		米国の設計式							
		Q_{AJ} [kN]	Q_{exp}/Q_{AJ}	Q_{AISC1} [kN]	Q_{exp}/Q_{AISC1}	Q_{AISC2} [kN]	Q_{exp}/Q_{AISC2}	Q_{WSDOT} [kN]	Q_{exp}/Q_{WSDOT}	Q_{Roeder} [kN]	Q_{exp}/Q_{Roeder}
3	249	247	1.01	204	1.22	121	2.06	209	1.19	422	0.59
4	313	256	1.22	191	1.64	133	2.35	197	1.59	399	0.78
5	319	258	1.24	191	1.67	133	2.40	197	1.62	399	0.80
6	298	258	1.16	191	1.56	133	2.24	197	1.51	399	0.75
7	306	283	1.08	196	1.56	154	1.99	202	1.51	411	0.74
8	278	276	1.01	196	1.42	154	1.81	202	1.38	411	0.68
9	474	377	1.26	266	1.78	245	1.93	276	1.72	562	0.84
10	453	384	1.18	266	1.70	245	1.85	276	1.64	562	0.81
11	445	384	1.16	266	1.67	245	1.82	276	1.61	562	0.79
12	542	405	1.34	268	2.02	269	2.01	279	1.94	569	0.95
13	510	413	1.23	268	1.90	269	1.90	279	1.83	569	0.90
14	508	413	1.23	268	1.90	269	1.89	279	1.82	569	0.89
15	546	454	1.20	270	2.02	312	1.75	283	1.93	578	0.94
16	550	468	1.18	270	2.04	312	1.76	283	1.94	578	0.95
17	291	230	1.27	184	1.58	125	2.33	190	1.53	384	0.76
18	295	236	1.25	184	1.60	125	2.36	190	1.55	384	0.77
19	286	235	1.22	184	1.55	125	2.29	190	1.51	384	0.74
20	307	248	1.24	194	1.58	127	2.42	199	1.54	403	0.76
21	287	246	1.17	194	1.48	127	2.26	199	1.44	403	0.71
23	336	268	1.25	196	1.71	154	2.18	202	1.66	411	0.82
24	342	281	1.22	196	1.74	154	2.22	202	1.69	411	0.83
25	495	395	1.25	271	1.83	257	1.93	282	1.76	574	0.86
26	482	402	1.20	271	1.78	257	1.88	282	1.71	574	0.84
27	460	397	1.16	271	1.70	257	1.79	282	1.63	574	0.80
28	478	385	1.24	260	1.84	252	1.90	271	1.76	552	0.87
29	489	385	1.27	260	1.88	252	1.94	271	1.80	552	0.89
30	474	382	1.24	260	1.82	252	1.88	271	1.75	552	0.86
31	560	458	1.22	270	2.07	312	1.79	283	1.98	578	0.97
32	539	469	1.15	270	2.00	312	1.73	283	1.90	578	0.93
平均			1.20		1.73		2.02		1.67		0.82
標準偏差			0.07		0.20		0.23		0.19		0.09

一方で、ばらつきはあるものの WSDOT 式はコンクリート強度が増加するにつれて実験値／計算値は右上がりとなる回帰線が得られており、コンクリートのせん断強度に対する寄与を過少に評価していることが分かる。従って、WSDOT 式のコンクリートの寄与を増加することで精度の高い実験式を構築できると考えられる。次に、実験データに基づき新たなせん断耐力推定式の構築を行っていく。

2.5 せん断実験式の提案

本節では、実験データベースに基づいたせん断耐力実験式 Q_{cal} の提案を行う。新たな実験式は、WSDOT 式に倣い式(6)のように鋼管のせん断耐力 Q_s とコンクリートのせん断耐力 Q_c の単純和とする。それぞれのせん断耐力は、鋼管の圧縮耐力、コンクリート圧縮耐力に対する割合として表す。

$$Q_{cal} = Q_s + Q_c \quad (6)$$

ここに、

$$\begin{aligned} Q_s &= \alpha_s N_s \\ Q_c &= \alpha_c N_c \end{aligned} \quad (7)$$

Q_s : 鋼管のせん断耐力, Q_c : コンクリートのせん断耐力
 α_s : 鋼管の低減係数, α_c : コンクリートの低減係数

まず、 α_s は、以下のように設定する。つまり、 $\alpha_s N_s$ は、鋼管のウェブ部の断面積にせん断降伏強度を乗じたものであり、WSDOT 式と同じである。

$$\alpha_s = \frac{A_{sw}}{A_s} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

次に、コンクリートの低減係数 α_c を定める。CFT 指針式では、鋼管内のコンクリートは、圧縮ストラットを形成し、アーチ機構によりせん断抵抗すると考えられており、提案式ではこれに倣い、コンクリートの圧縮強度に比例する式とする。 α_c の値は実験結果に基づいて定める。実験の値 Q_{exp} から Q_s を差し引いて、これをコンクリートの圧縮耐力 N_c で除すことで各試験体の α_c の値が求められる。これらを表-3 に示す。その平均を α_{c1} とすると、式(9)のように値が定まる。

$$\alpha_{c1} = 0.26 \quad (9)$$

式(7)に式(8)と式(9)の低減係数を用いたものを CFT のせん断耐力式① Q_{cal1} とする。図-5 に、縦軸を Q_{exp}/Q_{cal1} とし、横軸を n とした関係図を示す。一般化累加強度式の理論によると軸力比とせん断耐力の関係は曲線となるため、プロットの近似曲線を 2 次関数で示している。

図-5 から、近似曲線は上に凸のグラフとなっており、図-2 における CFT 指針式の軸力比-せん断耐力関係図と同様の傾向を示していると見ることができる。

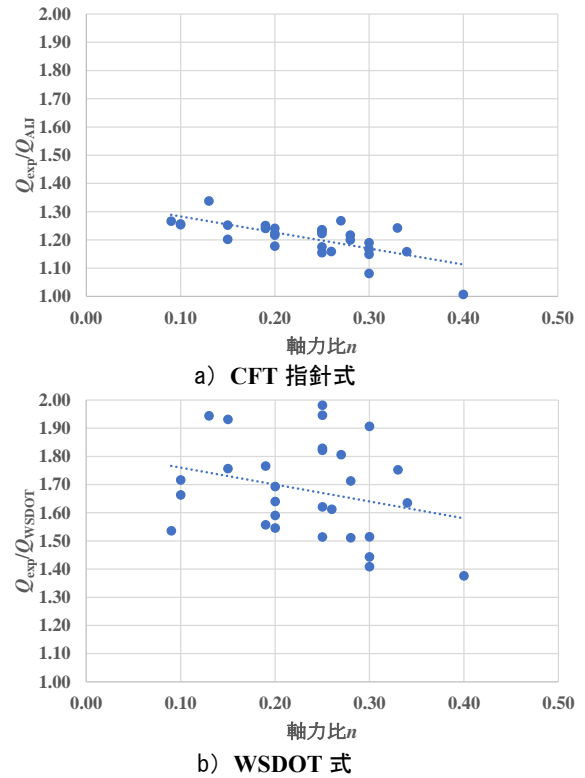


図-3 CFT 指針式と WSDOT 式における実験値／計算値と軸力比の関係図

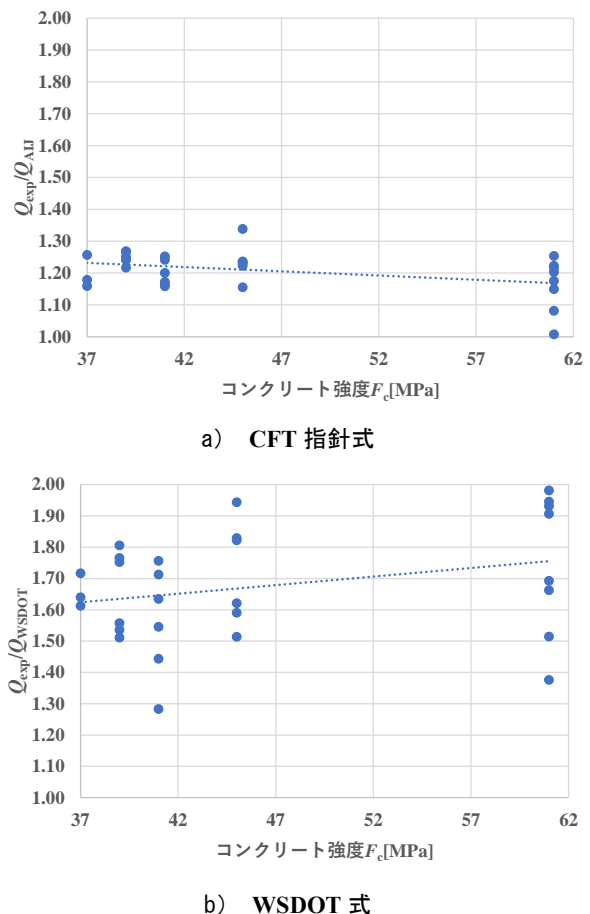


図-4 CFT 指針式と WSDOT 式における実験値／計算値とコンクリート強度の関係図

図-5 からわかるように、 Q_{cal1} は n の変化に相関がありそう見える。そこで低減係数 α_c を図-5 の近似曲線で評価すると、次が得られる。これを α_{c2} とし式(10)に示す。

$$\alpha_{c2} = 0.26(-1.40n^2 - 0.14n + 1.12) \quad (10)$$

式(7)に式(8)と式(10)を用いたものを CFT のせん断耐力式② Q_{cal2} とする。図-6 に縦軸を Q_{exp}/Q_{cal2} とし、横軸を n とした関係図を示す。せん断耐力式② Q_{cal2} は、計算が容易で、軸力比 n の変化を考慮できる実験式となっている。表-4 に新せん断耐力実験式①と②の平均値と標準偏差を示す。実験式なので、新せん断耐力実験式①と②の両方の平均は 1.00 となる。標準偏差は、新せん断耐力実験式①で 0.050、新せん断耐力実験式②で 0.041 となり、両実験式は CFT 指針式や WSDOT 式よりも精度の高い実験式となった。

式(5)および(6)は、次の項目において、上限値としての適用範囲を設ける。

- 1) 軸力比 : 0.40
- 2) コンクリート強度 : 61MPa
- 3) 鋼管の幅厚比 : 53.2

鋼管の強度については、AISC Method 1 式をそのまま使用しているので、強度の制限は設けていない。実験では、通しダイアフラム形式と外ダイアフラム形式の 2 通りがあるが、今回は、これらの違いを考慮しなかった。しかしながら、ダイアフラム形式の違いによる圧縮ストラットの傾きに影響が出ることが考えられる。ダイアフラム形式ごとに係数を設けることで、さらなる精度の向上が予想される。今後は、様々なパラメータの試験体を追加して、提案した実験式の適用範囲を広げてゆく予定である。

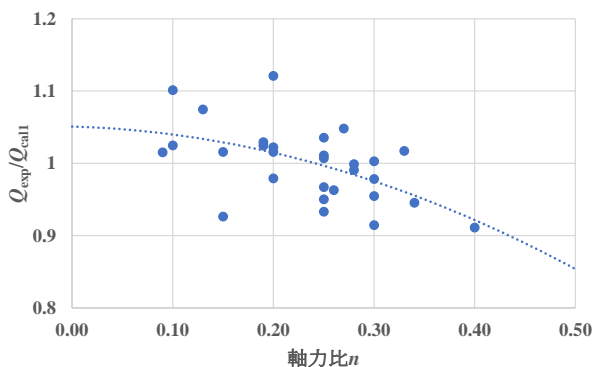


図-5 Q_{exp}/Q_{cal1} と軸力比 n の関係図

表-3 低減係数 α_c の導出

試験体	Q_{exp} [kN]	sQ [kN]	N [kN]	α_c
3	294	204	369	0.24
4	313	191	445	0.27
5	319	191	445	0.29
6	298	191	445	0.24
7	306	147	604	0.26
8	278	147	604	0.22
9	474	266	749	0.28
10	453	266	749	0.25
11	445	266	749	0.24
12	542	268	902	0.30
13	510	268	902	0.27
14	508	268	902	0.27
15	546	270	1218	0.23
16	550	270	1218	0.23
17	291	184	390	0.27
18	295	184	390	0.28
19	286	184	390	0.26
20	307	194	408	0.28
21	287	194	408	0.23
23	336	147	604	0.31
24	342	147	604	0.32
25	495	260	786	0.30
26	482	260	786	0.28
27	460	260	786	0.25
28	478	271	823	0.25
29	489	271	823	0.26
30	474	271	823	0.25
31	560	270	1218	0.24
32	539	270	1218	0.22
平均				0.26

表-4 実験値/計算値の平均と標準偏差

	Q_{exp}/Q_{cal1}	Q_{exp}/Q_{cal2}
平均	1.00	1.00
標準偏差	0.050	0.041

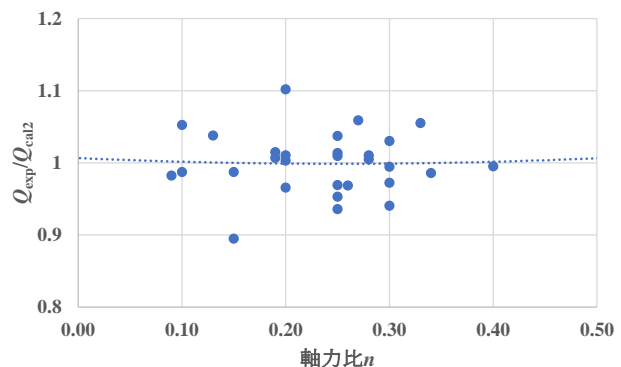
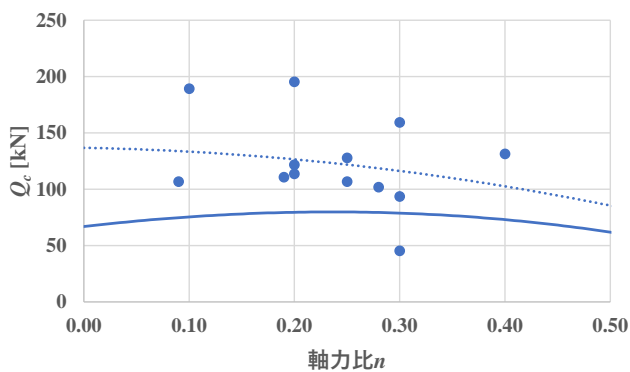


図-6 Q_{exp}/Q_{cal2} と軸力比 n の関係図

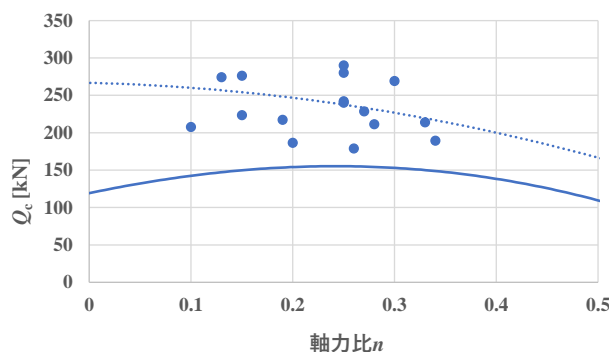
2.6 理論値との比較

前項までで構築した新たなせん断耐力実験式は、実験結果の回帰式に基づくもので、理論的な考察が不足している。本節では、CFTのコンクリート部分がアーチ機構を形成すると仮定して、これの計算結果と前述の実験式とを比較する。曲げ・せん断を受ける材は、軸力に応じて中立軸位置が定まる。ここでは、全塑性状態を仮定して、コンクリートの圧縮ストラットの有効断面積とその角度を求め、計算でコンクリートのせん断耐力寄与分 Q_c を計算する。

図-7にコンクリートのせん断耐力 Q_c と n の関係を示す。図中のプロットは、実験値 Q_{exp} から鋼管のせん断耐力 Q_s を引いたもので、その回帰線を点線で示している。これは、本論で構築した実験式②のコンクリートのせん断耐力項 $\alpha_c N_c$ である。実線で示しているのはアーチ理論により計算した Q_c である。長方形と正方形のどちらも点線と実線を比較すると、理論値は実験結果を過小評価しているが、どちらも上に凸の同様の傾向であることがわかる。今後は、両者の乖離を埋める考察を深め、提案式の妥当性を確認してゆく。



a) 長方形



b) 正方形

図-7 理論との比較

3. まとめ

本研究では、せん断スパン比が 0.6 の長方形と正方形の断面を持つ CFT 柱の 29 体の試験体にせん断力を載荷する実験の結果をまとめて、その最大耐力についてデータベースを作成した。これを用いて、実験値を計算値で除した値の平均が 1.0 となる 2 通りの実験式を提案した。これらは、鋼管とコンクリートのせん断耐力の和として表した。2 つ目の式は、軸力比 n を考慮できる。2 つの実験式の実験値と計算値の比の標準偏差は、それぞれ、0.050 と 0.041 となった。アーチ機構による理論値と比較すると、理論値は実験値を過小評価しているが、同様の傾向であった。今後は、試験体を追加してさらに適用範囲の広い実験式の構築を目指す。

謝辞

本研究は、平成 30 年度科学研究費助成事業、基盤 C 「せん断破壊するコンクリート充填鋼管柱の繰返し水平加力下における構造性能」(研究代表者：中原浩之)に基づき実施した。関係各位と実験に協力いただいた皆様に謝意を表す。

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
- 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集, Vol.79, No.703, pp.1385-1393, 2014
- 3) 陳瑞涵, 中原浩之: 角形断面を有するコンクリート充填鋼管短柱の正負交番せん断力載荷実験, 長崎大学紀要 47(88), pp.47-53, 2017
- 4) 池田啓悟, 中原浩之: 通しダイアフラムを有するコンクリート充填角型鋼管短柱のせん断破壊性状に関する実験的研究, 長崎大学紀要 49(92), pp.43-49, 2019
- 5) 松竹光太郎, 中原浩之: 異なるダイアフラムを有するコンクリート充填鋼管短柱のせん断破壊性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集 43(2) pp.685-690, 2021
- 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
- 7) 日本建築学会: 鋼管コンクリート構造計算基準・同解説, 1980
- 8) American Institute of Steel Construction: Specification for Structural Steel Buildings. AISC, Chicago, IL, 2010
- 9) Roeder, C., Lehman, D., Heid, A., and Maki, T.: Shear Design Expressions for Concrete Filled Steel Tube and Reinforced Concrete Filled Tube Components, WSDOT Research Report, Seattle, Washington, 2016