

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：27101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289193

研究課題名(和文) 長周期地震動が考慮できる新しい細長いCFT柱の設計式

研究課題名(英文) Evaluation formula for slender CFT columns considering long duration earthquake

研究代表者

津田 恵吾 (Tsuda, Keigo)

北九州市立大学・国際環境工学部・教授

研究者番号：50112305

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：CFT柱材の許容耐力に関して、実験による降伏耐力はおおむね短期許容耐力に近いことを示した。また、CFT長柱を対象とし、両端が単純支持され片方の端部のみ曲げモーメントを受ける柱材について全塑性モーメントの95%、90%を発揮できる指標 $\alpha$ を示し、 $\alpha$ が耐力評価に対して適切な耐力指標となっていることを示した。

CFT長柱の疲労特性を調べるために、座屈長さ・断面せい比、変位振幅、軸力比、載荷プログラムを実験変数とした曲げせん断実験を行い、軸力比が大きいほど、振幅が大きいほど荷重の低下が大きいことを示し、最大荷重の95%、90%、85%、80%に荷重が低下した時のサイクル数を示した。

研究成果の概要(英文)：As for the allowable strength of CFT columns, yield strengths observed in the experimental study are similar to the short-term allowable strength of CFT columns. The value of index  $\alpha$  is shown with which the slender CFT column subjected to the end moment at the only one side exerts the 95% or 90% of full plastic moment. And it is shown that the  $\alpha$  is appropriate index to evaluate the strength of CFT columns.

The experimental study of the slender CFT columns in order to clarify the cyclic rotation capacity against the long period ground motion is carried out. The test parameters are the effective length - depth ratio, deflection amplitude, axial force ratio and loading program. The degradation of the load is large when the deflection amplitude and axial force ratio are large. The number of cycles when the load decreased by 95%, 90%, 85% and 80% is shown.

研究分野：建築構造

キーワード：鋼・コンクリート合成構造 長周期地震動 設計式

## 1. 研究開始当初の背景

コンクリート充填鋼管(以後 CFT)構造は、現在では大多数の超高層建物に利用されている。すでに多くの実績があり、完成されつつある構造であると考えられているが、新しく発生した重要な問題がある。

現在、CFT 柱の設計式は、「日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針(以後 CFT 指針)」、「新都市ハウジング協会：コンクリート充填鋼管(CFT)造技術基準・同解説」に示されている。本研究では主として柱部材を対象とする。まず、日本建築学会の CFT 指針に示されている柱部材の現行の設計式について述べる。

軸方向力と曲げモーメントを受ける部材については、許容耐力と終局耐力が示されており、それぞれ座屈長さ $l_k$ と断面せいの比  $l_k/D$  の範囲によって、短柱( $l_k/D \leq 4$ )、中柱( $4 < l_k/D \leq 12$ )、長柱( $l_k/D > 12$ )と定義され、それぞれに対して設計式が示されている。短柱は長さの影響を考慮しておらず、中柱、長柱は長さの影響が考慮された設計式となっている。また、許容耐力は単純累加強度、終局耐力は一般化累加強度による耐力式となっている。終局耐力については、これまでに曲げモーメント勾配がない場合については、実験や解析によってその耐力の妥当性は確認されている。しかしながら、許容耐力については、単純累加強度による許容耐力と実部材のひずみや応力の状態が必ずしも対応しているとはいえず(劉青崧、城戸將江、津田恵吾：コンクリート充填角形鋼管断面の累加強度と降伏強度について、鋼構造年次論文報告集、第 17 巻、pp.587-594、2009 年 11 月) 今後も検討の必要がある。

許容耐力は、弾性限とみなせる耐力であるが、現在降伏強度が  $700\text{N/mm}^2$  を超えるような高強度鋼が開発され、実際の建築構造物に数は少ないものの適用されている。この鋼材は震度 7 クラス弾性となるような構造物のために開発されたものである。高強度材料を用いれば柱は細長くなる。今後このような高強度材料を用いた CFT 柱が設計される可能性があることを考慮すると、弾性限とみなされる許容耐力について実挙動との対応を明確にし、特に長柱の設計式について見なおす必要があると考えられる。

また、細長い柱の設計については 2 次曲げの影響を考慮する必要がある。現在、長柱について曲げモーメント勾配のある場合について、実験値と解析値との比較は行われてはいるが(城戸將江、津田恵吾：モーメント勾配のあるコンクリート充填鋼管長柱の耐力について、鋼構造年次論文報告集、第 12 巻、pp.317-322、2004 年 11 月)、モーメント勾配を考慮するための係数については、CFT 柱の特性を考慮したものとはなっていない。より合理的な設計を行うためには、許容耐力、終局耐力も含めてモーメント勾配係数を含む、中柱、長柱の設計式の再検討を行う必要

がある。

さらに、CFT 柱の設計式のうち終局耐力については実験、解析によってその妥当性が確認されていることを述べたが、長周期地震動のように、同一振幅で長時間繰返しの荷重を受ける場合の CFT 柱の研究は数が少なく設計式には反映されておらず、今後長周期地震動に対する設計法を提案する必要がある。

また、すでに CFT 柱を用いた構造物は建設されている。CFT 柱の鋼管幅厚比、径厚比の制限値は鋼構造設計規準に示されている値の 1.5 倍まで緩和されているため、長時間にわたる繰返し荷重の影響で耐力劣化が生じ建物全体への影響が生ずることが考えられる。局部座屈は、CFT 柱の損傷限界として注意すべき現象であり、その発生限界や部材耐力への影響を示す必要がある。現在、局部座屈発生限界が「松井千秋、津田恵吾、河野昭彦、山地雄二郎、藤永隆：コンクリート充填円形鋼管柱の構造性能と軸力制限値、日本建築学会構造系論文集 第 512 号、pp.181-188、1998 年 10 月」に示されているが、長周期地震動を念頭に置いたものではない。

## 2. 研究の目的

先述した背景から、本研究では、現行の CFT 指針では考慮されていない長周期地震動、これまでに耐力の妥当性について十分に検討されてこなかった許容耐力ならびに曲げモーメント勾配の影響について明らかにすることで、新しい CFT 中柱・長柱の設計式を提案することを目的とする。

CFT 中柱ならびに長柱の単純累加強度による許容耐力、解析による降伏耐力(鋼管が降伏したときの耐力あるいはコンクリートのひずみが弾性とみなせなくなる時の耐力)を比較する。また、これらの許容耐力、降伏耐力とこれまでに行った実験結果と、今回計画する実験結果と比較することにより、CFT 柱の許容耐力として定義できる適切な状況(ひずみや応力の状況)を示す。現在開発されている高強度材料も適用範囲とし得る合理的な評価式とすることを旨とする。

CFT 長柱のモーメント勾配の考慮については、主として解析的に研究を進める。現在の CFT 指針では曲げモーメント勾配の考慮方法として、曲げモーメント勾配係数  $C_M$  で除すことによって評価するが、このモーメント勾配係数について CFT 柱にふさわしい式を提案する。

長周期地震動への設計式の提案方法としては、同一振幅で繰返し荷重を受ける実験を計画し、鋼管の局部座屈、疲労、塑性変形能力(複数回の履歴)による構造性能への影響を明らかにすることとする。繰返し荷重の影響を考慮できる耐力評価式あるいは適用範囲を表す工学量を示すこととする。また、応答解析により必要とされる必要変形能力(繰返し回数)を示す。

### 3. 研究の方法

#### (1) 解析的研究

##### ①CFT 柱材の許容耐力に関する研究

ここでは、CDC 法と呼ばれる解析手法を用い、一定軸力のもと水平荷重を受ける片持ち柱の、水平荷重—水平変形関係を求めた。また、その関係において、コンクリートあるいは鋼管が降伏した時の曲げモーメントと、現行のCFT 指針の短期許容耐力の比較を行った。解析においては、鋼材の応力—ひずみ関係を基本的な 1) 完全弾塑性型、2) メネゴット—ピント型、3) 森野らにより提案されたモデル、の3つとし、柱材を構成する応力—ひずみ関係が変わった場合のそれぞれの耐力の比較を行う。また、後述する実験結果において、短期許容耐力に達した時に鋼管が降伏しているかどうかを、試験体に貼り付けたひずみゲージより判断し、座屈長さ・断面せい比、軸力比との関係を示す。

図1に、完全弾塑性型モデルおよびメネゴット—ピントモデルを用いた場合の、短期許容耐力と降伏耐力の比較を、曲げモーメント—軸力相関関係上に示す。図によれば、軸力比  $n$  が0以外の場合はすべて短期許容耐力よりも降伏耐力のほうが小さい値となっていた。

図2に、実験により得られた降伏耐力と、CFT 指針の終局耐力および短期許容耐力の比較を示す。図によれば、ばらつきはあるものの、実験による降伏耐力はおおむね短期許容耐力に近い位置に分布している。また、 $l_k/D=10$  の場合、軸力比が大きいほど実験による降伏耐力は短期許容耐力に近く、軸力比が小さくなるにつれ実験値と短期許容耐力の差が大きくなっていった。

##### ②CFT 長柱のモーメント勾配の考慮について

CFT 長柱を対象とし、上記と同様の解析手法を用い、両端が単純支持され片方の端部のみ曲げモーメント（端モーメントと呼ぶ）を受ける柱材の端モーメント—回転角関係を求めた。軸力比と鋼管の細長比を解析変数とし、全塑性モーメントを期待できる組み合わせについて検討する。

図3に座屈長さ  $l_k (= \lambda_c)$  と断面せい  $D$  の比—軸力比  $n_y$  関係を示す。 $l_k/D=30$  の直線はCFT 指針における適用範囲での座屈長させい比の上限を示す。また、短柱、中柱、長柱を分ける  $l_k/D=4, 12$  の境界線も示す。端モーメントの最大値  $M_{1max}$  が全塑性モーメント  $M_{pc}$  の95%の耐力を発揮している点を白丸印 (○)、90%の耐力を発揮している点を黒丸印 (●) で示す。図より  $l_k/D=30$  の上限でほぼ細長比  $\lambda_c$  の値が1となっている。また、本研究で定義した軸力比  $n_y$  と細長比  $\lambda_c$  の組み合わせで表される「0.05 領域」、 「0.1 領域」の場合には  $l_k/D=30$  の上限を超えても95%の耐力を発揮している。図より、 $\alpha (= n_y \cdot \lambda_c^2)$  の値は耐力評価に対して適切な耐力指標となっている。

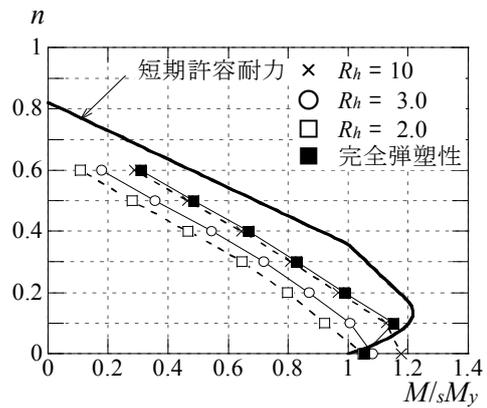


図1 短期許容耐力と降伏耐力の比較（解析）

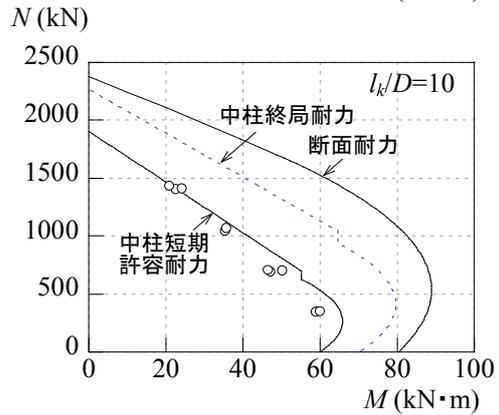
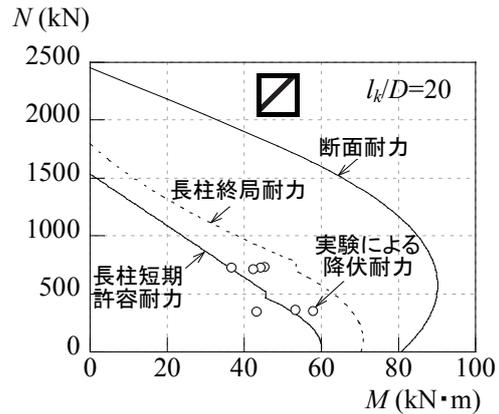


図2 CFT 指針の耐力と実験による降伏耐力

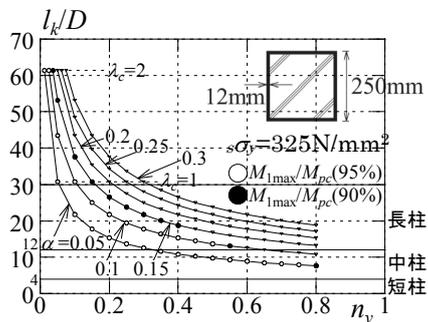


図3  $l_k/D-n_y$  関係

#### (2) 実験的研究

##### ①実験概要

一定軸力  $N$  のもと一定変位振幅繰返し水平力  $Q$  を受けるコンクリート充填角鋼管長柱の疲労特性を調べるために、上記の荷重条件を代表するモデルとして、図4に示す材長



ル目の水平力に対する  $i$  サイクル目の水平力の比である。図によれば、軸力比  $n=0.15$  の場合は、水平力の低下の仕方は緩やかであるが、軸力比  $n=0.3$  の場合は、5 サイクル目くらいまでは  $n=0.15$  と同じような傾向を示しているものの、その後は急激に水平力が低下していることがわかる。

すべての試験体において同じ図を書き、軸力比、振幅の影響について検討した結果、 $l_k/D=20$  の場合、振幅  $R=1\%$  の場合は耐力はほとんど低下しなかった。 $R=2\%$ 、 $R=3\%$  の場合は今回の試験体はいずれも局部座屈変形が進展し、耐力が低下した。 $l_k/D=20$ 、10 いずれの場合も、軸力比が大きいほど、振幅が大きいほど荷重の低下が大きい。

表3および4に、最大荷重の95%、90%、85%、80%に荷重が低下した時のサイクル数を示す。また、この表に基づき正側における部材角と荷重低下時サイクル数の関係を書いたものを図9に示す。

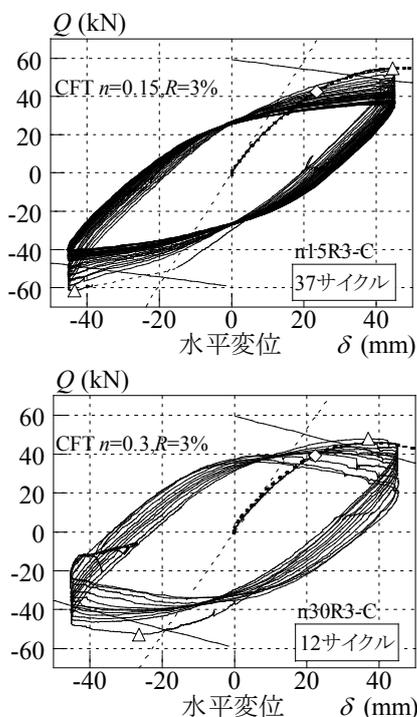


図7 水平力-水平変位関係

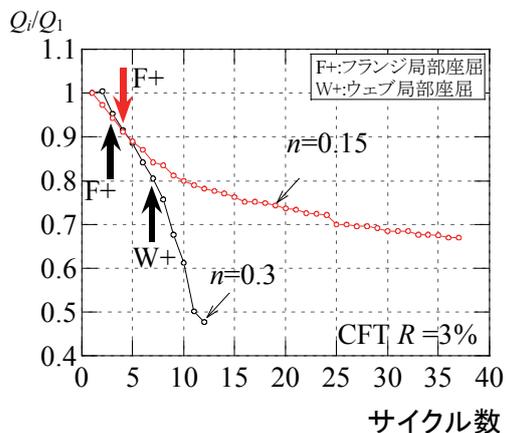


図8 耐力劣化状況

表3 荷重低下時のサイクル数 ( $l_k/D=20$ )

試験体名		$N_{95\%}$	$N_{90\%}$	$N_{85\%}$	$N_{80\%}$
LD20-n15R1-C	正	500+	—	—	—
	負	480	—	—	—
LD20-n15R2-C	正	8	16	39	100+
	負	3	9	38	50
LD20-n15R3-C	正	2	4	6	9
	負	2	4	6	9
LD20-n30R1-C	正	400+	—	—	—
	負	400+	—	—	—
LD20-n30R2-C	正	10	13	26	50
	負	7	13	21	46
LD20-n30R3-C	正	3	4	5	7
	負	1	2	4	5

\*記号「+」はそのサイクル数においても荷重が低下していないことを表す。

表4 荷重低下時のサイクル数 ( $l_k/D=10$ )

試験体名		$N_{95\%}$	$N_{90\%}$	$N_{85\%}$	$N_{80\%}$
LD10-n15R1-C	正	14	43	124	200+
	負	11	32	82	200+
LD10-n15R15-C	正	3	6	12	24
	負	2	6	12	27
LD10-n30R1-C	正	11	27	51	120
	負	9	19	58	134
LD10-n30R15-C	正	4	6	11	18
	負	2	5	8	15
LD10-n45R1-C	正	8	18	32	36
	負	9	19	31	36
LD10-n60R05-C	正	100+	-	-	-
	負	100+	-	-	-
LD10-n60R075-C	正	7	10	11	12
	負	8	9	10	11
LD10-n60R1-C	正	2	3		
	負	1	2	3	

200+ : n15R1-C 試験体は荷重が 80%に低下する前に 200 サイクルで実験を終了した。

100+ : n60R05-C 試験体は荷重が 95%に低下する前に 100 サイクルで実験を終了した。

#### 4. 研究成果

(1) 鋼材の応力-ひずみ関係を解析変数として、CFT 柱材の降伏耐力と許容耐力の比較を行った結果、軸力比  $n$  が 0 以外の場合はすべて短期許容耐力よりも降伏耐力のほうが小さい値となっていた。また、実験による降伏耐力と短期許容耐力を比較した結果、実験による降伏耐力はおおむね短期許容耐力に近い位置に分布してい

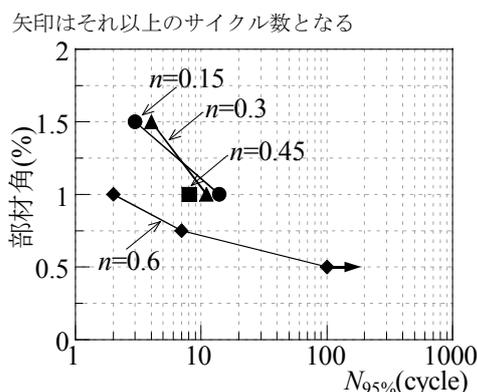


図9 側の部材角と荷重低下時サイクル数の関係

た。

- (2) CFT 長柱を対象とし、両端が単純支持され片方の端部のみ曲げモーメントを受ける柱材の端モーメント一回転角関係を軸力比  $n_y$  と細長比  $\lambda_c$  を解析変数として求め、全塑性モーメントの 95%, 90% を發揮できる  $\alpha$  ( $=n_y \cdot \lambda_c^2$ ) を示し、 $\alpha$  が耐力評価に対して適切な耐力指標となっていることを示した。
- (3) 一定軸力  $N$  のもと一定変位振幅繰返し水平力  $Q$  を受けるコンクリート充填角形鋼管長柱の疲労特性を調べるために、1) 座屈長さ・断面せい比  $l_k/D$ , 2) 変位振幅, 3) 軸力比  $n$ , 4) 載荷プログラムを実験変数とした曲げせん断実験を行った。軸力比が大きいほど、振幅が大きいほど荷重の低下が大きいことを示し、最大荷重の 95%, 90%, 85%, 80% に荷重が低下した時のサイクル数を示した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① 城戸將江, 津田恵吾, 原口将行, 曲げ座屈するコンクリート充填鋼管圧縮材の耐力評価, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第 82 巻, 第 735 号, pp.753-763, 2017.5
- ② 原口将行, 城戸將江, 津田恵吾: コンクリート充填角形鋼管柱の終局耐力評価について, 鋼構造年次論文報告集, 査読有, Vo. 24, pp80-86, 2016.11
- ③ 半田遼, 劉懋, 城戸將江, 津田恵吾: 角形 CFT 柱の初期剛性に及ぼす鋼材の応力一ひずみ関係の影響, 鋼構造年次論文報告集, 査読有, Vo. 24, pp87-94, 2016.11
- ④ 津田恵吾, 城戸將江, 完全弾塑性型の応力一ひずみ関係よりなる角形鋼管柱の終局耐力評価について, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第 80 巻, 第 718 号, pp.1981-1990, 2015.12

[学会発表] (計 7 件)

- ① 半田遼, 宇津宮遥奈, カクオツキン, 城戸將江, 津田恵吾: 一定変位振幅繰返し載

荷を受ける角形 CFT 長柱の耐力劣化性状に関する研究その 4, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2017.9.1, 広島工業大学 (広島県・広島市)

- ② 宇津宮遥奈, カクオツキン, 城戸將江, 津田恵吾, 半田遼: 一定変位振幅繰返し載荷を受ける角形 CFT 長柱の耐力劣化性状に関する研究その 5, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2017.9.1, 広島工業大学 (広島県・広島市)
- ③ 崔剛, 宇津宮遥奈, 城戸將江, 津田恵吾, 大西宏明: 一定変位振幅繰返し載荷を受ける角形 CFT 長柱の耐力劣化性状に関する研究その 6, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2017.9.1, 広島工業大学 (広島県・広島市)
- ④ 大西宏明, 宇津宮遥奈, 城戸將江, 津田恵吾, 崔剛: 一定変位振幅繰返し載荷を受ける角形 CFT 長柱の耐力劣化性状に関する研究その 7, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2017.9.1, 広島工業大学 (広島県・広島市)
- ⑤ 城戸將江, 津田恵吾, 吉田キカ, カクオツキン: 一定変位振幅繰返し載荷を受ける角形 CFT 長柱の耐力劣化性状に関する研究その 1 実験計画, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 III, pp.1345-1346, 2016. 8.24, 福岡大学 (福岡県・福岡市)
- ⑥ カクオツキン, 城戸將江, 津田恵吾, 吉田キカ: 一定変位振幅繰返し載荷を受ける角形 CFT 長柱の耐力劣化性状に関する研究その 2 実験方法ならびに水平力一水平変位関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 III, pp.1347-1348, 2016. 8.24, 福岡大学 (福岡県・福岡市)
- ⑦ 吉田キカ, 城戸將江, 津田恵吾, カクオツキン: 一定変位振幅繰返し載荷を受ける角形 CFT 長柱の耐力劣化性状に関する研究その 3 多数回繰返し特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 III, pp.1349-1350, 2016. 8.24, 福岡大学 (福岡県・福岡市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

津田 恵吾 (TSUDA, Keigo)  
北九州市立大学・国際環境工学部・教授  
研究者番号: 5 0 1 1 2 3 0 5

### (2) 研究分担者

城戸 將江 (KIDO, Masae)  
北九州市立大学・国際環境工学部・准教授  
研究者番号: 1 0 4 5 3 2 2 6  
保木 和明 (HOKI, Kazuaki)  
研究者番号: 7 0 5 9 9 0 2 6  
北九州市立大学・国際環境工学部・講師