

(31) 単純圧縮力を受ける角形CFT短柱の強度と変形性能に関する研究

石塚 駿¹・土井 希祐²

¹正会員 新潟大学大学院 自然科学研究科 (〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐2の町8050番地)
E-mail:fl4e025a@mail.cc.niigata-u.ac.jp

²正会員 新潟大学教授 工学部建設学科 (〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐2の町8050番地)
E-mail:mare@cc.niigata-u.ac.jp

コンクリート充填鋼管構造が優れた耐力・変形性能を有するのは鋼管と充填コンクリートによるコンファインド効果によるものである。しかしながら、角形CFT部材については、コンファインド効果が部材性能に及ぼす影響の解明は未だ不十分である。

本研究では角形CFT短柱・中空鋼管・コンクリート柱の中心圧縮実験を行い軸力-軸歪関係に関する基礎資料を得た。そして、先行研究で提案した方法によりモデル化し、最大耐力・初期剛性・変形性能についての検討を行った。

Key Words : *rectangular CFT short column, New RC equation, maximum strength, initial stiffness, deformation performance*

1. 研究背景・目的

(1) 研究背景

鋼管にコンクリートを充填した、コンクリート充填鋼管（以下、CFT と表記）構造は、優れた耐力・変形性能を有することから、近年では事務所ビルを中心とした高層建築物に広く用いられ多様な設計の実現のために発展しつつある。

CFT柱部材が優れた耐力・変形性能を有しているのは、主に鋼管と充填コンクリートによるコンファインド効果によるものである。しかしながら、角形断面を有するCFT柱部材について、大歪域においてコンファインド効果が部材性能に及ぼす影響の解明は不十分である。高軸力下におけるCFT柱部材の変形性能、およびエネルギー吸収性能を把握することは、安全で合理的な建築物の設計を行う上で非常に重要である。

(2) 研究目的

先行研究¹⁾において既往の文献から単純圧縮力を受けるCFT短柱の実験データを収集し各種パラメータについてのデータベースが作成された。コンクリートはコンファインド効果をモデル化出来るNew RC式²⁾を一部変

更して使用し、鋼材は完全弾塑性モデルを用いた。これらを累加することで円形および角形CFT短柱の軸力-軸歪関係のモデル化が行われ、最大耐力・エネルギー吸収性能・初期剛性について検討が行われた。しかしながら、角形断面を有するCFT短柱では、最大耐力以降の大歪域において、耐力の再上昇が起こることによって計算結果と実験結果が一致しないことが明らかにされた。

そこで、鋼管の歪硬化に着目し、鋼材には歪硬化を考慮したモデルを用いて角形CFT短柱の軸力-軸歪関係のモデル化が行われ最大耐力・エネルギー吸収性能・初期剛性について再検討が行われた。

本研究では文献³⁾に引き続き角形CFT短柱の中心圧縮実験を行い、軸力-軸歪関係に関する基礎資料を得ることを目的としている。あわせて、角形CFT短柱に対応した中空鋼管・コンクリート柱の中心圧縮実験を行い、先行研究において提案した、角形CFT短柱の軸力-軸歪関係モデル、ならびに最大耐力・エネルギー吸収性能・初期剛性についての評価法の妥当性について検討することを目的としている。

2. 実験計画

表-1 試験体諸元

試験体名	使用鋼材	断面幅 [mm]	板厚 [mm]	幅厚比	コンクリート強度 [MPa]	年度
S-2.3 S-3.2	STKR400	100	2.3 3.2	43.5 31.3	-	2014
CFT-2.3C-40	STKR400	100	2.3	43.5	40	
CFT-2.3C-60					60	
CFT-3.2C-40			3.2	31.3	40	
CFT-3.2C-60					60	
C-40A C-60A	-	93.6	-	-	40 60	2015
C-40B C-60B	-	93.6	-	-	40 60	

(1) 試験体

試験体諸元を表-1に、試験体の概要を図-1に各々示す。角形CFT短柱4体、中空鋼管2体、コンクリート柱4体、計10体の試験体で実験を行った。角形CFT短柱、中空鋼管の試験体にはロール成形され、溶接継ぎ目が材軸方向にあるSTKR400を使用し、鋼管部分の断面幅は100mm、板厚は2.3mmおよび3.2mmとした。材長は柱長さ一断面せい比が4以下となるように断面幅の3倍である300mmとした。コンクリート柱は板厚3.2mmの中空鋼管を型枠として製作した。充填コンクリートの調合強度は40MPa、60MPaである。実験パラメータは鋼管の幅厚比（43.5、31.3）・コンクリート強度（40、60）である。角形CFT短柱、コンクリート柱の端面は充填コンクリートの打設後にセメントペーストを用いて、キャッピングを行い端面が平滑になるよう仕上げた。

(2) 使用材料

鋼材の引張強度試験、およびコンクリートの圧縮強度試験の結果を表-2(a)、2(b)に示す。鋼材の引張強度試験はJIS 5号試験片を用いて行った。

(3) 加力方法・計測方法

加力は、新潟大学の所有する 2000kN 級のアムスラー試験機により、試験体の軸方向に平押し状態で中心圧縮力を載荷させる方法とし、静的単調載荷により行った。

軸方向変位は、マグネットスタンドにより載荷板間に設置した南北面の変位計（検長 300mm）で全体変位を計測し、試験体の東西面に溶接したナットを介して直接取り付けた変位計（検長 150mm）で中央の変位を計測した。軸方向歪は、試験体に貼付した歪ゲージにより計測を行った。

表-2 材料試験結果

(a) 鋼材				(b) コンクリート				
板厚 [mm]	σ_t [MPa]	σ_s [MPa]	E_s [GPa]	水セメント比 [%]	σ_{CB} [MPa]	E_c [GPa]	材齢 [日]	年度
2.3	387.1	437.4	195	45	37.3	27.6	28	2014
3.2	389.9	461.9	191	27	68.8	31.9		
				45	37.9	28.6		2015
				27	68.5	32.2		

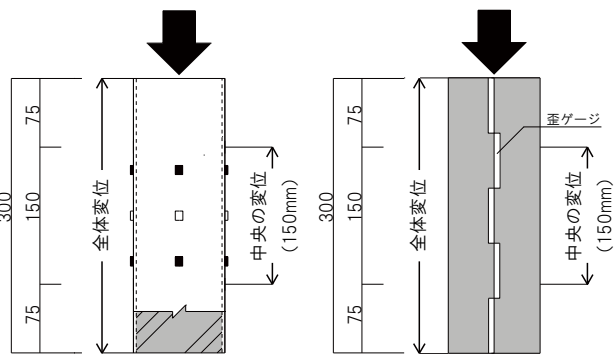


図-1 試験体の概要

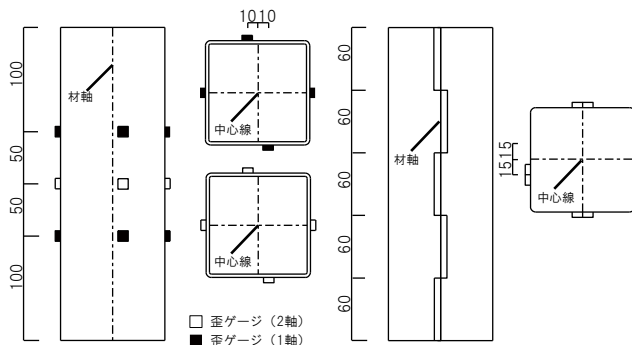


図-2 歪ゲージの貼付位置

中空鋼管・角形 CFT 短柱では歪ゲージは 4 面の上下 3 箇所に、溶接継ぎ目を避けて南北面で対称となるように貼付した歪ゲージにより計測した。また、断面中央には 2 軸ゲージを貼付し横歪も計測した（図-2 参照）。

コンクリート柱では歪ゲージは 4 面に 5 枚貼付し計測を行った。東西面の変位計取り付け治具を避けて対称となるように貼付した（図-2 参照）。

全体変位から求めた軸歪を軸歪 A、中央の変位から求めた軸歪を軸歪 B とし、歪ゲージから求めた軸歪を軸歪 C とする。

なお、C-40A、C-60A では軸歪 C の計測のみ行った。

試験体の軸方向縮みが増加し、アムスラー試験機の球座が偏心に対応しきれなくなった段階で実験を終了することとした。

3. 実験結果

(1) 軸力－軸歪関係

軸力－軸歪関係を図-3(a)～3(d)に示す。なお、図-3(a)、3(b)、3(d)については軸歪 A、図-3(c)については軸歪 C を採用している。各々の試験体において、局部座屈が目視出来た点、歪ゲージによる軸方向歪測定値が減少し始めた点を図中に示す。試験体 S-2.3、S-3.2 では最大耐力に達した後、徐々に耐力が低下した。

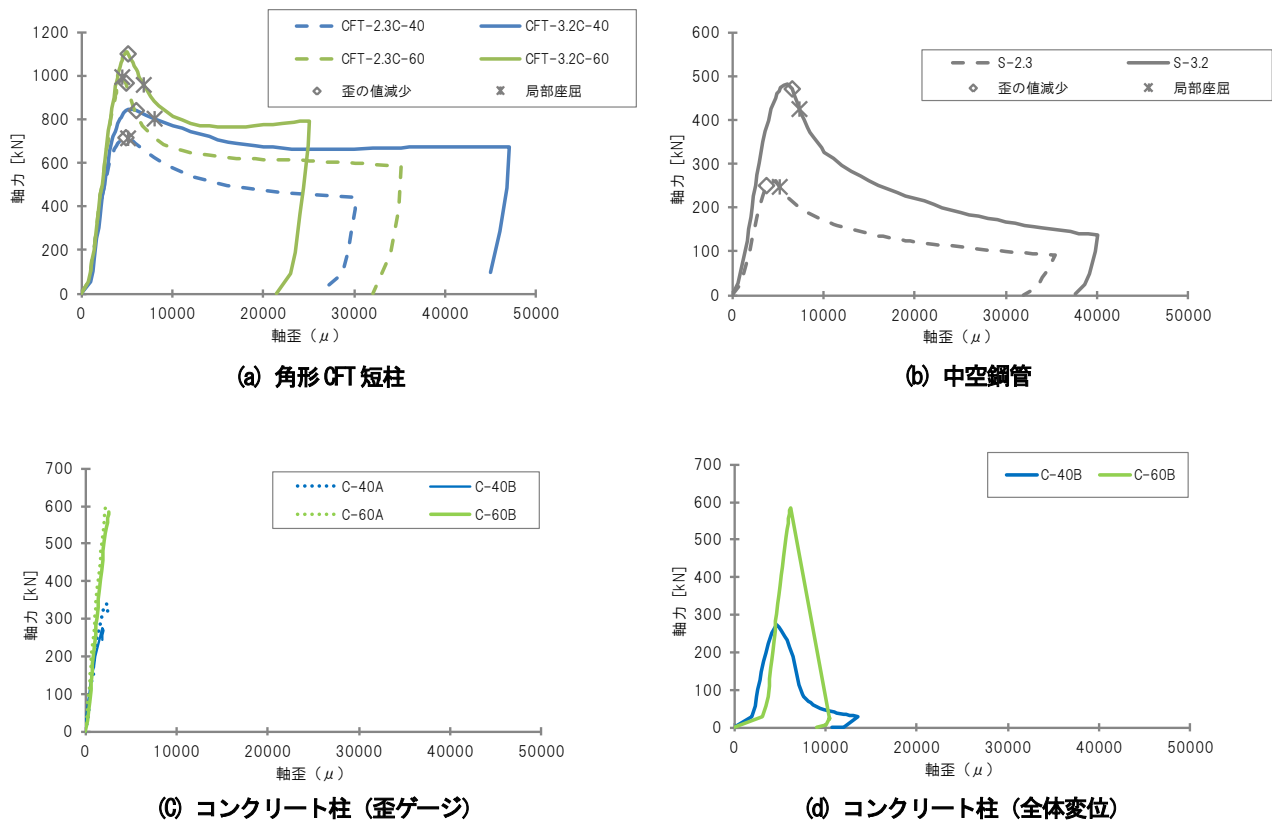


図-3 軸力-軸歪関係

試験体CFT-2.3C-40, CFT-3.2C-40では最大耐力に達した後、耐力が緩やかに低下した。試験体CFT-2.3C-60, CFT-3.2C-60では最大耐力に達した後、急激に耐力が低下しその後安定した。試験体C-40A, C-40Bでは最大耐力に達した後、急激に耐力が低下した。試験体C-60A, C-60Bでは爆裂現象を起こし急激な耐力低下が起こった。角形CFT短柱において板厚3.2mmの試験体は最大耐力以降の耐力の再上昇が認められた。一方、板厚2.3mmの試験体では最大耐力以降の耐力の再上昇は認められなかった。

(2) 最大耐力

実験結果を表-3に示す。耐力比 (Nu/No) ではS-2.3だけが0.76となり実験値が計算値を下回った。角形CFT短柱ではコンクリート強度が低い試験体の方が耐力比が大きくなった。最大耐力の計算値Noは(1)式で求めた。

$$No = A_c \times \sigma_{CB} + A_s \times \sigma_y \quad (1)$$

$$Ko = A_c \times E_c + A_s \times E_s$$

A_c : コンクリートの断面積 A_s : 鋼管の断面積

σ_{CB} : コンクリートの圧縮応力度 σ_y : 鋼材降伏応力度

表-3 実験結果

試験体名	最大耐力			初期剛性					基準化幅厚比	変形性能
	Nu [kN]	No [kN]	Nu/No	Ku $\times 10^3$ [kN]	Ku' $\times 10^3$ [kN]	Ko $\times 10^3$ [kN]	Ku/Ko	Ku'/Ko	X	ϵ_u (μ)
S-2.3	261.0	342.1	0.76	193	178	172	1.12	1.03	-	-
S-3.2	481.8	472.8	1.02	216	246	232	0.93	1.06	-	-
CFT-2.3C-40	715.9	672.5	1.06	540	385	417	1.29	0.92	1.94	6187
CFT-2.3C-60	994.0	951.4	1.04	637	492	455	1.40	1.08	1.41	5070
CFT-3.2C-40	846.1	788.9	1.07	464	486	466	1.00	1.04	-	7984
CFT-3.2C-60	1109.5	1055.7	1.05	679	530	502	1.35	1.06	-	5693
C-40A	339.8	316.0	1.08	-	199	234	-	0.85	-	-
C-60A	601.8	582.8	1.03	-	302	270	-	1.12	-	-
C-40B	273.7	321.1	0.85	295	263	242	1.22	1.09	-	-
C-60B	584.1	555.8	1.05	410	233	273	1.50	0.85	-	-

注) Nu・Ku・Ku'・ ϵ_u : 実験値, No・Ko: 計算値

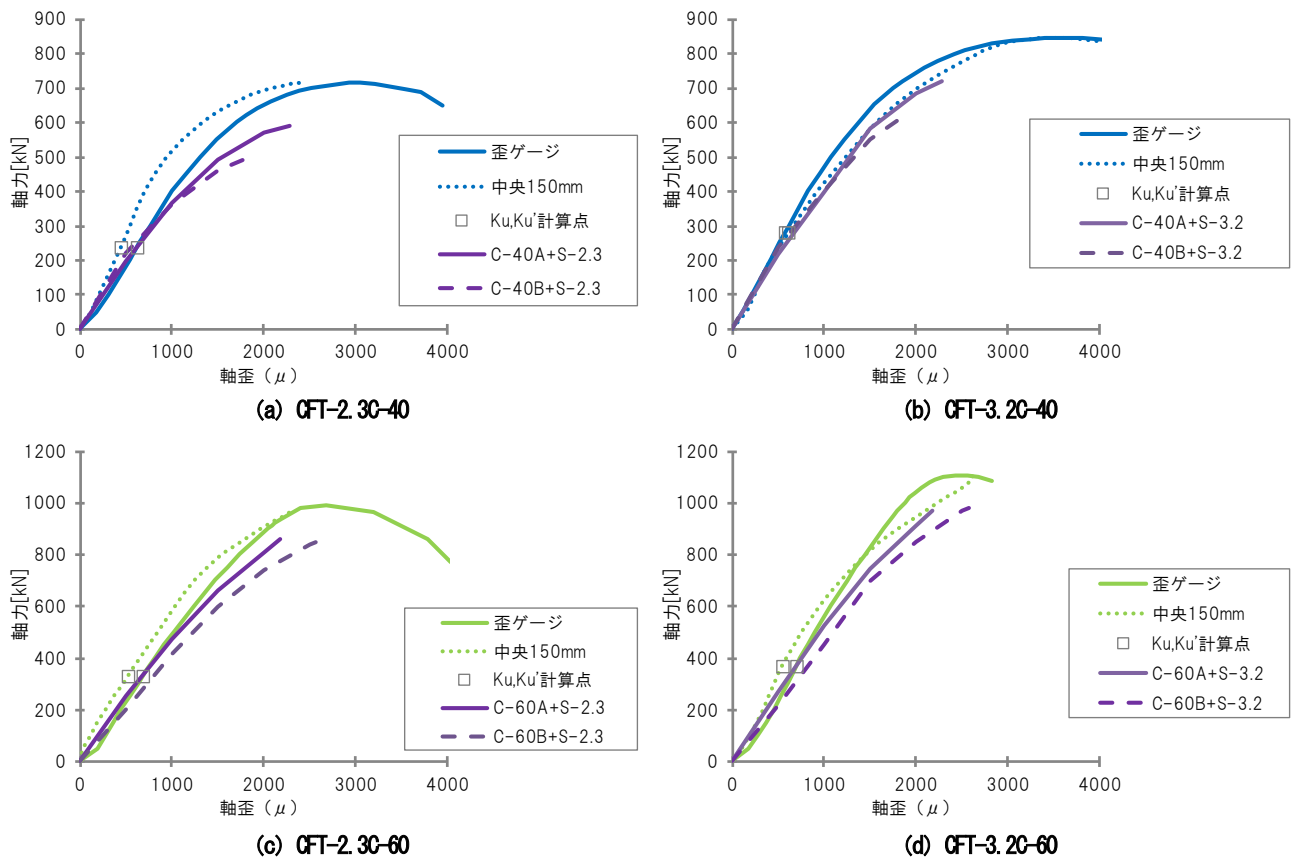


図-4 CFT と C+S の比較 (軸力-軸歪関係)

CFTとC+Sの比較を図-4(a)~4(d), および表-4に各々示す。角形CFT短柱の最大耐力は、中空鋼管とコンクリート柱の最大耐力を累加した値よりも大きくなった。これは、鋼管の局部座屈が充填コンクリートにより抑止されたことも影響していると考えられる。

表-4 C+S の比較 (最大耐力)

試験体名	CFT [kN]	コンクリート柱 (C) [kN]	中空鋼管 (S) [kN]	C+S [kN]	CFT/(C+S)
CFT-2.3C-40	715.9	355.2	261.0	616.2	1.16
CFT-2.3C-60	994.0	629.1	261.0	890.1	1.12
CFT-3.2C-40	846.1	339.8	481.8	821.6	1.03
CFT-3.2C-60	1109.5	601.8	481.8	1083.6	1.02

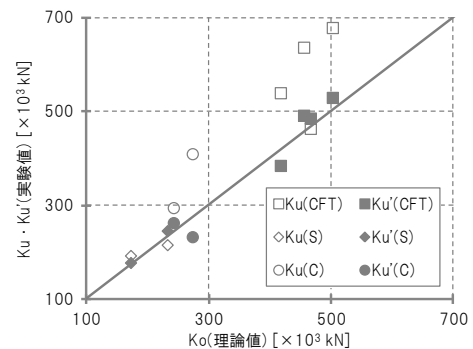


図-5 Ko による Ku と Ku' の比較

(3) 初期剛性

初期剛性の実験結果を表-3にKuとKu'の比較を図-5に各々示す。初期剛性は最大耐力の1/3の軸力を、軸歪で除した値である。Kuでは軸歪Bを用いており、Ku'では軸歪Cを用いて計算を行っている。Kuの初期剛性比ではS-3.2とC40の実験値が計算値を下回った。Ku'の初期剛性比ではCFT-2.3C-40とC40A, C60Bの実験値が計算値を下回った。図-5よりKu'の方がKuに比べてKoに近い値であることがわかる。初期剛性の計算値Koは(2)式で求めた。

$$Ko = A_c \times E_c + A_s \times E_s \quad (2)$$

ここに、

A_c : コンクリートの断面積

A_s : 鋼管の断面積

E_c : コンクリートヤング係数

E_s : 鋼材ヤング係数

(4) 変形性能

変形性能の定義を図-6に示す。変形性能は最大耐力より5%減少した軸力の時の軸歪Aの値である。幅厚比で比較すると、幅厚比の大きな試験体よりも幅厚比の小さな試験体の変形性能が良かった。コンクリート強度で比較すると、コンクリート強度が高い試験体の方の変形性能の方が良かった。

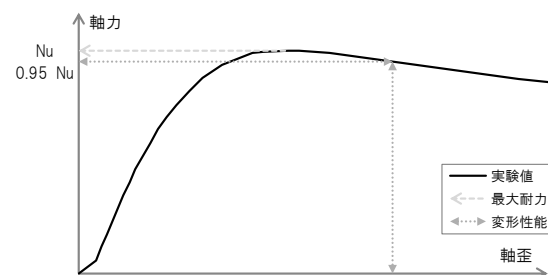


図-6 変形性能の定義

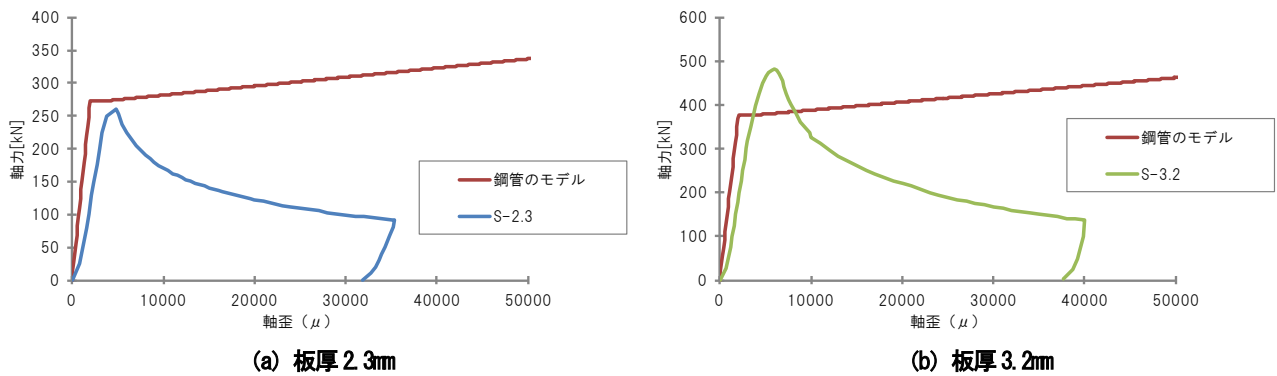


図-8 角形鋼管の軸力-軸歪関係モデルと実験結果

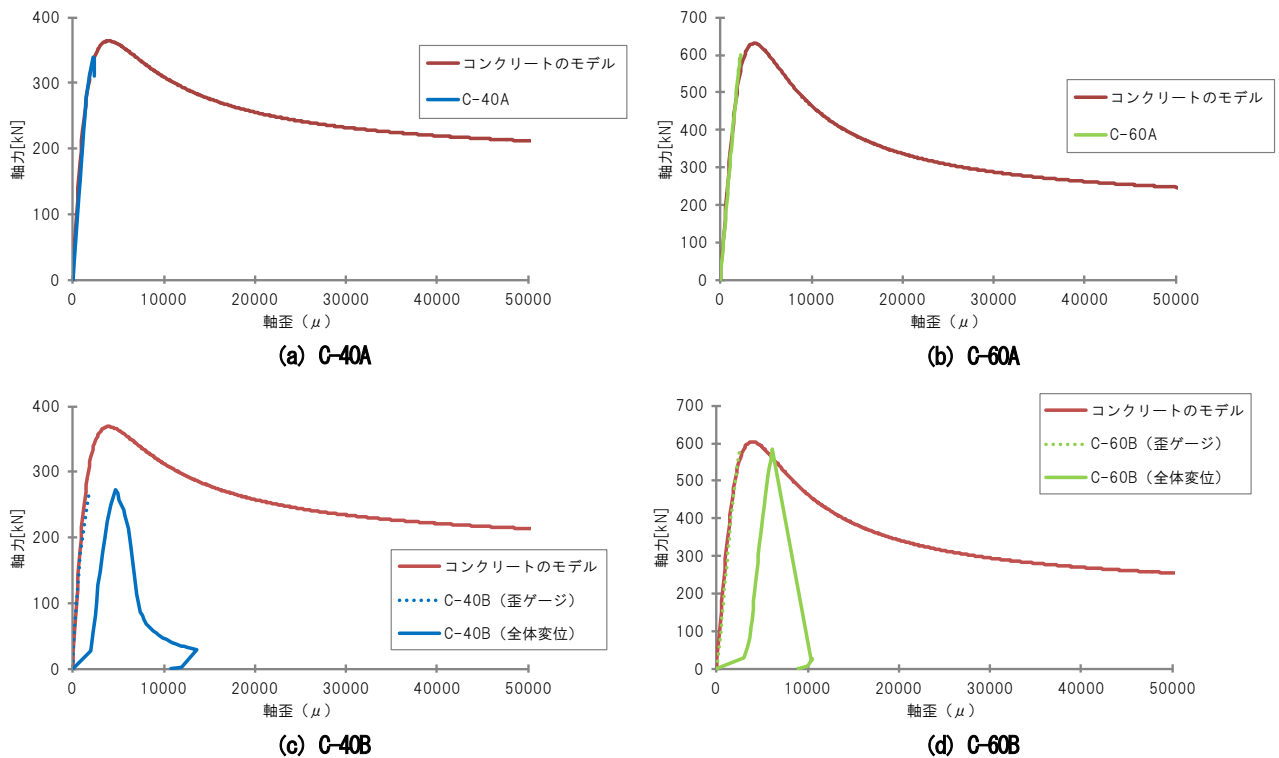


図-9 コンクリートの軸力-軸歪関係モデルと実験結果

5. 角形CFT短柱のモデル化と実験結果の比較

(1) 角形鋼管のモデル化と実験結果の比較

角形鋼管の軸力-軸歪関係モデルと実験結果を図-8(a), 8(b)に最大耐力と初期剛性の比較を表-5に各々示す。初期剛性は最大耐力の1/3の軸力を軸歪で除した値である。最大耐力は板厚2.3mmの試験体では実験値がモデルによる値を下回り、板厚3.2mmの試験体では実験値がモデルによる値を上回った。初期剛性は、どちらも実験値がモデルを上回った。

(2) コンクリートのモデル化と実験結果の比較

コンクリートの軸力-軸歪関係モデルと実験結果を図-8(a), 8(b), 8(c), 8(d)に最大耐力と初期剛性の比較を表-5に各々示す。図-8(c), 8(d)は鋼管の条件を C-40A, C-60A と合わせてモデル化したものである。初期剛性は

最大耐力の1/3の軸力を軸歪で除した値である。最大耐力はどの試験体も実験値がモデルによる値を下回った。初期剛性は C-60B の実験値 K_u だけがモデルによる値を下回った。

(3) 角形 CFT 短柱のモデル化と実験結果の比較

角形 CFT 短柱の軸力-軸歪関係モデルと実験結果の比較を図-10(a)~ 10(d)に最大耐力と初期剛性の比較を表-5に各々示す。最大耐力は全ての試験体で安全側に評価されていた。また、最大耐力以降の挙動を比較すると、コンクリート強度 40MPa の試験体は実験値がモデルの軸力を下回った後、再びモデルを上回ることが無かった。コンクリート強度 60MPa の試験体では最大耐力に達した後、実験値がモデルを下回ることのあるものの、概ね一致していた。本研究における NewRC 式によるコンファインドコンクリートモデルではコンクリート強度が 4

表-5 モデルと実験結果の比較

試験体名	最大耐力			初期剛性					変形性能		
	Nu [kN]	Nm [kN]	Nu/Nm	Ku $\times 10^3$ [kN]	Ku' $\times 10^3$ [kN]	Km $\times 10^3$ [kN]	Ku/Km	Ku'/Km	ϵu (μ)	ϵm (μ)	$\epsilon u/\epsilon m$
S-2.3	261.0	350.5	0.74	193	178	138	1.40	1.29	-	-	-
S-3.2	481.8	480.8	1.00	216	246	185	1.17	1.33	-	-	-
CFT-2.3C-40	715.9	642.1	1.11	540	385	387	1.40	0.99	6187	6900	0.90
CFT-2.3C-60	994.0	921.1	1.08	637	492	475	1.34	1.04	5070	5300	0.96
CFT-3.2C-40	846.1	741.5	1.14	464	486	420	1.10	1.16	7984	9100	0.88
CFT-3.2C-60	1109.5	1008.4	1.10	679	530	506	1.34	1.05	5693	6000	0.95
C-40A	339.8	364.2	0.93	-	199	240	-	0.83	-	-	-
C-60A	601.8	631.1	0.95	-	302	321	-	0.94	-	-	-
C-40B	273.7	369.3	0.74	295	263	242	1.22	1.09	-	-	-
C-60B	584.1	604.0	0.97	410	233	298	1.38	0.78	-	-	-

注) $Nu \cdot Ku \cdot Ku' \cdot \epsilon u$: 実験値, $Nm \cdot Km \cdot \epsilon m$: モデルによる値

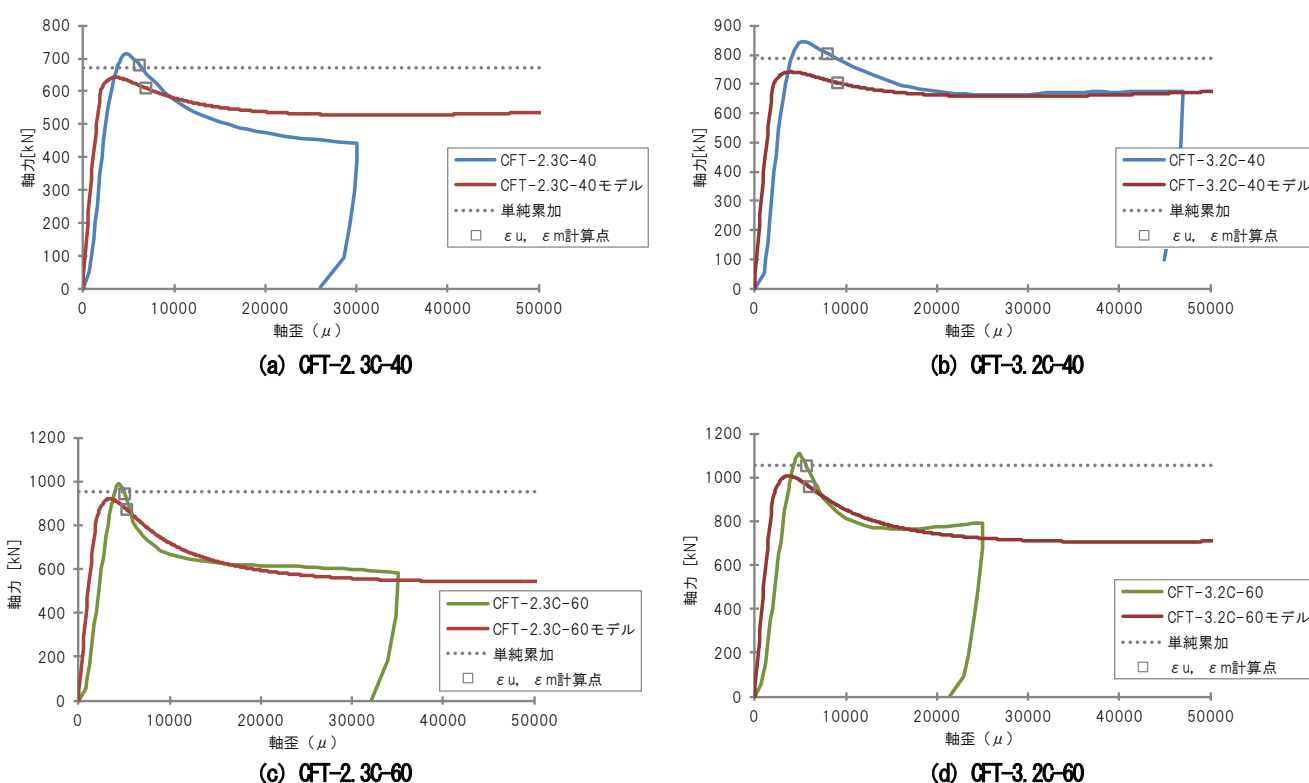


図-10 提案モデルと実験結果の比較

0MPaの場合、コンファインド効果を過大に評価していることが要因であると考えられる。さらに、10,000 μ 以降にコンクリートのモデルでの耐力が大幅に低下するためCFTのモデルでも耐力が低下し続けた。また、偏心の影響が大きかった試験体では、軸歪50,000 μ まで実験を継続出来なかったため耐力の再上昇が比較出来なかった。なお、このモデル化では局部座屈が起こったことによる耐力の低下は考慮していない。

(4) 初期剛性の比較

初期剛性の比較を図-11に軸歪4,000 μ までの範囲の軸力-軸歪関係を図-12(a), 12(b)に各々示す。

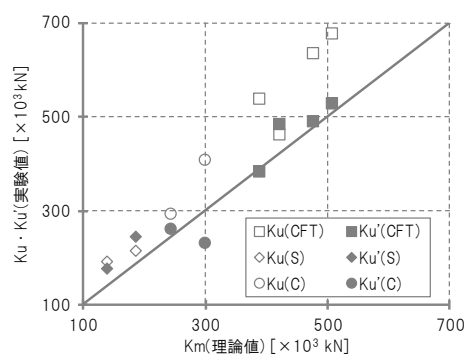


図-11 Km による Ku と Ku' の比較

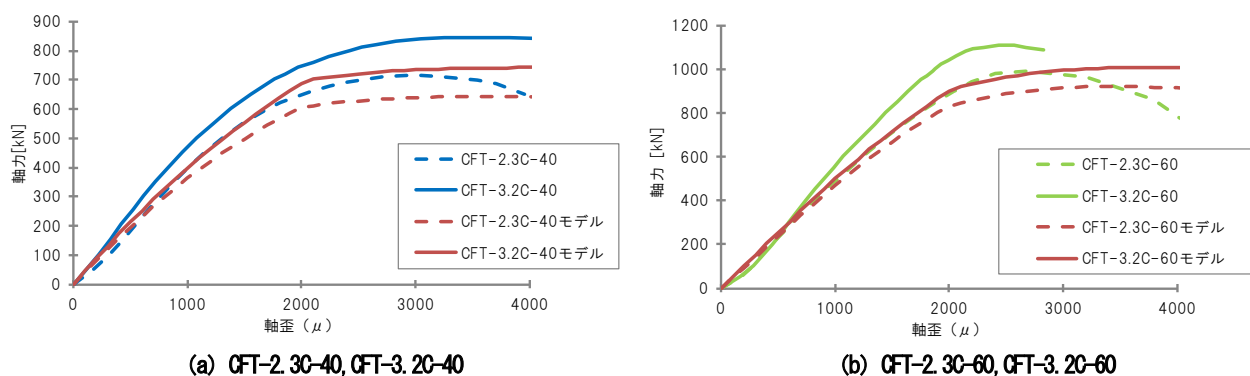


図-12 初期剛性部分の比較

なお、図-12(a), 12(b)に示す実験値の軸歪は軸歪 C である。初期剛性は K_u/K_m が全て 1.0 を超え、 K_u/K_m では CFT-2.3C-40, C-40A, C-60A と C-60B が 1.0 を超えなかった。図-11 より K_u' の方が K_u に比べて K_m に近い値であることがわかる。

(5) 変形性能の比較

変形性能はモデルにおいても実験結果と同じく、鋼管の幅厚比の小さく、コンクリート強度が低い試験体の方が変形性能が良かった(図-10 参照)。

また、変形性能はモデルが実験結果を上回っており、コンクリート強度の高い試験体の方がモデルによる値に近かった(表-5 参照)。

6. まとめ

角形 CFT 短柱、中空鋼管、コンクリート柱の中心圧縮実験を行い、先行研究¹⁾において提案した軸力-軸歪

関係モデルと比較し以下の知見を得た。

- 1) 板厚3.2mm のCFT試験体では最大耐力以降の耐力の再上昇が認められ、2.3mmでは認められなかった。
- 2) 中空鋼管とコンクリート柱の最大耐力の和よりもCFT試験体の最大耐力の方が大きな値となった。
- 3) 提案したCFT試験体の軸力-軸歪関係モデルは概ね一致した。

参考文献

- 1) 名取良純, 竹内真平, 土井希祐: 単純圧縮力を受ける CFT 短柱の強度と変形性能に関する研究, 鋼構造年次論文報告集, Vol.20, pp.93-100, 2011.11
- 2) 建設省総合研究開発プロジェクト・コンファインドコンクリート WG, 「平成 4 年度 New RC 研究開発報告書」, PP.3-2-79-3-2-80, 1993.3
- 3) 石塚駿, 土井希祐: 単純圧縮力を受ける角形 CFT 短柱の強度と変形性能に関する研究, 鋼構造年次論文報告集, Vol.22, pp.561-568, 2014.11

STUDY ON STRENGTH AND DEFORMATION PERFORMANCE OF RECTANGULAR CFT SHORT COLUMN UNDER COMPRESSIVE AXIAL FORCE

Shun ISHIZUKA and Mareyasu DOI

The concrete filled steel tube structure has a superior strength and deformation performance. It is confind effect with a steel tube and filling concrete. However, About the square cross section CFT member, the elucidation of the influence that confind effect gives to member performance is still insufficient.

In this paper, the centrally loaded of the hollow steel tube, rectangular CFT short column and concrete column got basic document about a loaded-deformation relationship. Then modelling the loaded-deformation relationship was carried out by the method that in a precedent paper. And investigation on maximum strength, initial stiffness and deformation performance.