

# 論文 CFT 短柱の軸圧縮特性に及ぼす断面形状の影響に関する研究

山本 貴正\*1・川口 淳\*2・森野 捷輔\*3・福井 伸之\*4

**要旨**：本研究は、コンクリート充填鋼管（CFT）柱の力学的特性に及ぼす断面形状の影響を明らかにすることを目的として、まずほぼ同じ材料特性かつ鋼管とコンクリートの原断面積比を有する円形および角形 CFT 短柱の中心圧縮試験を行い、基本的力学性状である応力とひずみの関係に及ぼす断面形状の影響について実験的に検討した。その結果、CFT 短柱の応力-ひずみ関係に及ぼす断面形状の影響は、角形 CFT 短柱の最大耐力発揮まではほとんど認められないことが明らかとなった。なお、最大耐力発揮以降の挙動については、鋼管の面外変形性状が著しく起因する。

**キーワード**：コンクリート充填鋼管柱、応力-ひずみ関係、圧縮耐力、短柱圧縮試験

## 1. はじめに

コンクリート充填鋼管（以下、CFT）柱構造は、鋼管とコンクリートの相乗効果により優れた耐力特性および変形性能を有していることが数多くの実験的・理論的研究<sup>1)</sup>で明らかにされている。またこれに合わせ、土木・建築物の構造形式として CFT 柱が用いられる場合が増えてきている。

CFT 柱が優れた耐力特性・変形性能を有するのは、主に、i) 鋼管による充填コンクリートの拘束効果、ii) 充填コンクリートによる鋼管の局部座屈抑制効果、によるものである。なお、CFT 柱の力学的性状に及ぼす

これらの効果については、既往の研究により円形断面はほぼ解明されているが、角形断面については明らかにされていない。この原因として、軸力作用による鋼管とコンクリートのそれぞれの応力分布が、円形断面では一様であるが、角形断面では一様でないため、角形 CFT 柱ではその基本的力学性状となる応力度-ひずみ度関係

のモデル化が難しく、厳密な構造解析結果を得ることができないことが挙げられる。従って、現状では円形 CFT 柱と角形 CFT 柱の力学的性状の定量的な相違については明らかにされていない。

そこで、本研究は、CFT 柱の力学的特性に及ぼす断面形状の影響を明らかにすることを目的として、まずほぼ同じ材料特性かつ鋼管とコンクリートの原断面積比を有する円形および角形 CFT 短柱の中心圧縮試験を行い、基本的力学性状である応力とひずみの関係に及ぼす断面形状の影響について実験的に検討した。更に、その実験結果に基づき、既往の研究で提案されている中心圧縮下における円形 CFT 短柱の応力度-ひずみ度関係式を角形 CFT 短柱に適用することを試みた。本論では、これらについて述べている。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

表-1 に本実験の CFT 短柱試験体の概要を

表-1 実験概要

断面形状	使用鋼材	公称径(幅) [ mm ]	材長 [ mm ]	公称板厚 [ mm ]	公称 径(幅)厚比	端面摩擦	$F_c$ [ N/mm <sup>2</sup> ]	载荷方法
円形	STK400	101.6	公称径x3	3.2	31.8	有, 無	27	静的単調载荷
角形	STKR400	100		3.0	33.3			

$F_c$  : コンクリート設計強度

\*1 小山工業高等専門学校 建築学科助手 博士 (工学) (正会員)

\*2 三重大学大学院 工学研究科循環システム講座助教授 博士 (工学)

\*3 三重大学 教授 工学博士

\*4 矢作建設工業 (株) 建築部 修士 (工学)

示す。実験要因として、断面形状および支圧板と試験体端面の間の拘束（以下、端面拘束）の有無を取り上げた。鋼管の断面径（幅）は、寸法効果が無視できると考えられる公称径が101.6mm、公称幅が100mmとし<sup>註</sup>、試験体材長 $h$ は実在の短柱圧縮材を想定し断面径（幅）の3倍とした。コンクリートの設計強度は $27\text{N/mm}^2$ 、最大粗骨材寸法は20mmとした。なお荷重の載荷方法は、静的単調中心圧縮とした。

## 2.2 実験方法

図-1に実験方法の概要を示す。端面拘束を除く試験体については、端面にテフロンシートを2枚重ねて挿入した。なお、中空鋼管短柱の中心圧縮実験を併せて行った。計測は、相対する2台の変位計で上下の支圧板間の軸方向変位 $\Delta$ を測定し、平均軸方向ひずみ $\Delta/h$ （軸方向変位を材長で除した値）とした。また、試験体中央の鋼管の軸方向および周方向ひずみ度を弾性二軸ひずみゲージで測定した。なお、ひずみゲージの貼付位置は、円形断面はシームの位置を避けた管周四等分点上、角形断面では鋼管のシーム直交二面の中心位置である。実験装置は三重

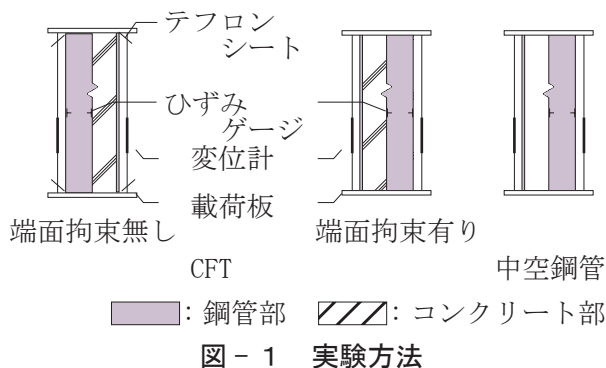


図-1 実験方法

大学の2000kN級耐圧試験機を使用した。

## 2.3 試験体概要

使用した鋼管は、市販の冷間成形鋼管であり、以下に示す2種類である。

STK400-101.6x3.2（材長6000mm）

STKR400-100x100x3.0（材長6000mm）

各種鋼管より鋼材の材料特性を把握するための引張試験片を採取した。

表-2にコンクリートの調合を示す。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は町屋川産の川砂（粒径5mm未満）、粗骨材は段戸産の碎石（粒径20mm未満）および混和剤はポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を用いている。コンクリートの混練は、三重大学工学部建築学科構造実験室で行った。

## 2.4 使用材料の特性

表-3(a)(b)に使用鋼材の引張試験結果およびコンクリートの圧縮強度試験結果をそれぞれ示す。鋼材の引張試験はJIS 1号A試験片を用いて行った。また、コンクリートの圧縮強度は、径100mm・高さ200mmの鋼製型枠を用いて封緘養生して製作したコンクリートシリンダーの圧縮強度（以下、標準強度） $\sigma_B$ である。なお、シリンダーの圧縮強度試験は、CFT短柱の中心圧縮実験を行った日に実施した。

## 3. 実験結果

表-4に実験結果一覧を示す。表中の単純累加中心圧縮耐力 $N_0$ は、コンクリート単体の圧縮強度 $\sigma_0$ を標準強度 $\sigma_B$ として算出した値である。また、角形断面の断面積は、その鋼管隅角

表-2 コンクリートの調合

スランプ [cm]	水セメント比 [%]	空気量 [%]	細骨材率 [%]	$d$ [mm]	単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]				
					水 $W$	セメント $C$	細骨材 $S$	粗骨材 $G$	混和剤 $A$
15	65	5	50	65	185	285	904	927	1.1

$d$ : 最大粗骨材寸法

表-3 材料試験結果一覧

(a) 鋼材の引張試験						(b) コンクリートの圧縮試験		
使用鋼材	$\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_s$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]	降伏比	破断伸率 [%]	使用試験体	$\sigma_B$ [N/mm <sup>2</sup> ]	材齢 [%]
STK400	362	200.2	447	0.810	29.9	円形CFT	25.1	57
STKR400	375	195.9	424	0.882	12.6	角形CFT	25.2	56

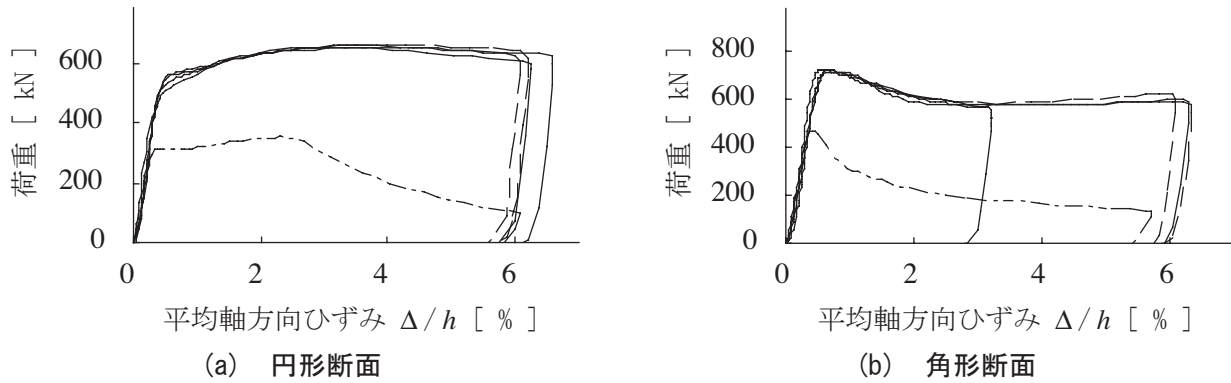
$\sigma_y$ : 降伏応力度  $E_s$ : ヤング係数  $\sigma_u$ : 引張強度

$\sigma_B$ : 標準強度

表 - 4 実験結果一覧

断面形状	端面拘束	断面径(幅)	板厚	径(幅)厚比	材長	$\frac{A_s}{A_s + A_c}$	$N_{sy} / N_0$	$N_{max}$	$N_{max} / N_0$
		$D(B)$	$t$	$D(B) / t$	$h$				
		[ mm ]	[ mm ]		[ mm ]			[ kN ]	
円形	有り	101.7	3.04	33.4	304.8	0.116	0.654	657	1.26
		101.7	3.05	33.4	304.7	0.116	0.655	649	1.24
	無し	101.7	3.04	33.5	305.8	0.116	0.654	658	1.26
		101.7	3.05	33.4	305.2	0.116	0.655	649	1.24
	(中空鋼管)	101.7	3.04	33.2	305.5	-	-	352	1.03
角形	有り	99.9	3.09	32.3	300.2	0.117	0.664	727	1.11
		99.8	3.08	32.4	300.1	0.117	0.664	718	1.09
	無し	99.8	3.06	32.6	300.2	0.116	0.662	728	1.11
		99.8	3.07	32.5	300.4	0.117	0.663	726	1.11
	(中空鋼管)	99.8	3.06	32.6	300.9	-	-	470	1.09

$N_0 = A_s \cdot \sigma_y + A_c \cdot \sigma_0$   $N_{sy} = A_s \cdot \sigma_y$   
 $A_s$ : 鋼管の原断面積  $A_c$ : コンクリートの原断面積  $\sigma_0$ : コンクリート単体の圧縮強度



実線：端面拘束有り 破線：端面拘束無し 一点鎖線：中空鋼管短柱

図 - 2 荷重 - 変形関係に及ぼす端面摩擦の影響

部内部の曲げ半径を 1.5 として計算している。

### 3. 1 最終破壊形状

写真 - 1 (a) (b) (c) に、円形および角形 CFT 短柱の最終破壊形状を示す。なお、破壊形状に及ぼす端面拘束の影響はほとんど見られなかった。

円形 CFT 短柱は写真 - (a) に示すように、円周方向に鋼管の局部座屈が若干高さがずれて発生するとともに、コンクリートの膨張による鋼管の曲げ変形が生じた。一方、角形 CFT 短柱は、4 体中 3 体が写真 - (b) に示す各面で異なる断面高さで外側に凸に膨らむ形状を示し、残りの 1 体が写真 - (c) に示す同一断面高さで外側に凸に膨らむ座屈形状を示した。なお、目視によると、各試験体ともに最大耐力発揮以前に鋼管の膨らみを確認し、その後、最大耐力発揮以降に明確な局部座屈を確認した。また、破壊形状が荷重 - 変形関係に与える影響はほとんど認められなかった。

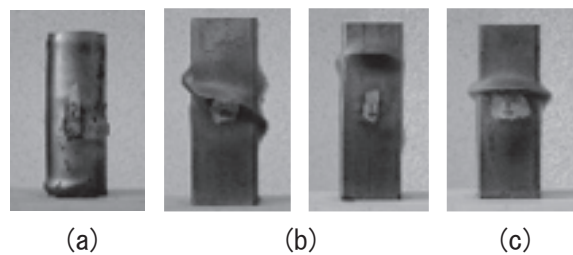
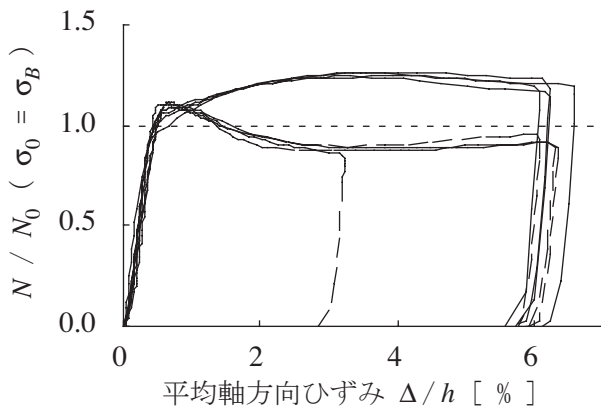


写真 - 1 CFT 短柱の最終破壊形状

### 3. 2 荷重 - 変形関係

図 - 2 (a) (b) に、円形および角形 CFT 短柱の荷重 - 変形関係をそれぞれ示す。なお、図中には中空鋼管短柱の荷重 - 変形関係が併せて示してある。図の縦軸および横軸はそれぞれ荷重  $N$  および軸方向変形  $\Delta / h$  である。図中の実線および破線はそれぞれ端面拘束有りおよび無しの試験体を表している。図より、円形および角形 CFT 短柱ともに  $N - \Delta / h$  関係に及ぼす端面摩



実線：円形 CFT 短柱 破線：角形 CFT 短柱

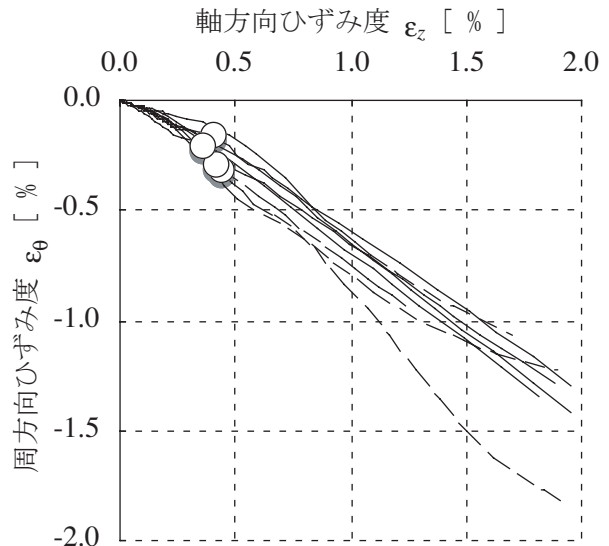
図 - 3 荷重 - 変形関係に及ぼす断面形状の影響

擦の影響がほとんどないことがわかる。また CFT 短柱の耐力劣化勾配は中空鋼管短柱のそれと比較し、円形断面は緩やかであるが、角形断面ではその異はあまり認められない。

図 - 3 に、円形 CFT 短柱と角形 CFT 短柱の荷重 - 変形関係を併せて示す。図の縦軸は荷重  $N$  を単純累加中心圧縮耐力  $N_0$  で無次元化したものを、横軸は平均軸方向ひずみ  $\Delta/h$  を表している。なお、単純累加中心圧縮耐力  $N_0$  は、コンクリート単体の圧縮強度  $\sigma_0$  を標準強度  $\sigma_B$  として算出した。図中の実線および点線は、円形および角形断面をそれぞれ表している。図より、 $N/N_0 - \Delta/h$  関係は、角形断面の最大耐力発揮まで、各断面形状ともにほぼ同じ挙動を示していることがわかる。なお、この原因として、図 - 2 で示した円形鋼管と角形鋼管の局部座屈性状の違いが挙げられる。これは、3.1 最終破壊形状で述べたように、最大耐力発揮時までは、円形および角形ともにに局部座屈は発生せず、材料の性能がほぼ同等に発揮されるため同じような挙動を示すが、最大耐力発揮時に局部座屈が発生すると、円形と角形の座屈性状が異なるため、それぞれ異なる挙動になると考えられる。

### 3.3 ひずみ度の挙動

図 - 4 に、円形 CFT 短柱および角形 CFT 短柱の周方向ひずみ度  $\epsilon_\theta$  - 軸方向ひずみ度  $\epsilon_z$  関係を併せて示す。図より、角形断面の  $\epsilon_\theta - \epsilon_z$  関係は、図中の○印で示す最大耐力発揮以降、円形試験体のそれと比較して直線関係が見られないことがわかる。これは実験時の目視により確認した鋼管の局部座屈およびコンクリートの局所的な破壊および膨張による鋼管の面外への変形が生じたことが原因であると考えられる。



実線：円形 CFT 短柱 破線：角形 CFT 短柱

○：角形 CFT 短柱の最大耐力発揮時

図 - 4 周方向ひずみ度 - 軸方向ひずみ度関係

表 - 5 検討対象とした試験体<sup>3)-5)</sup>

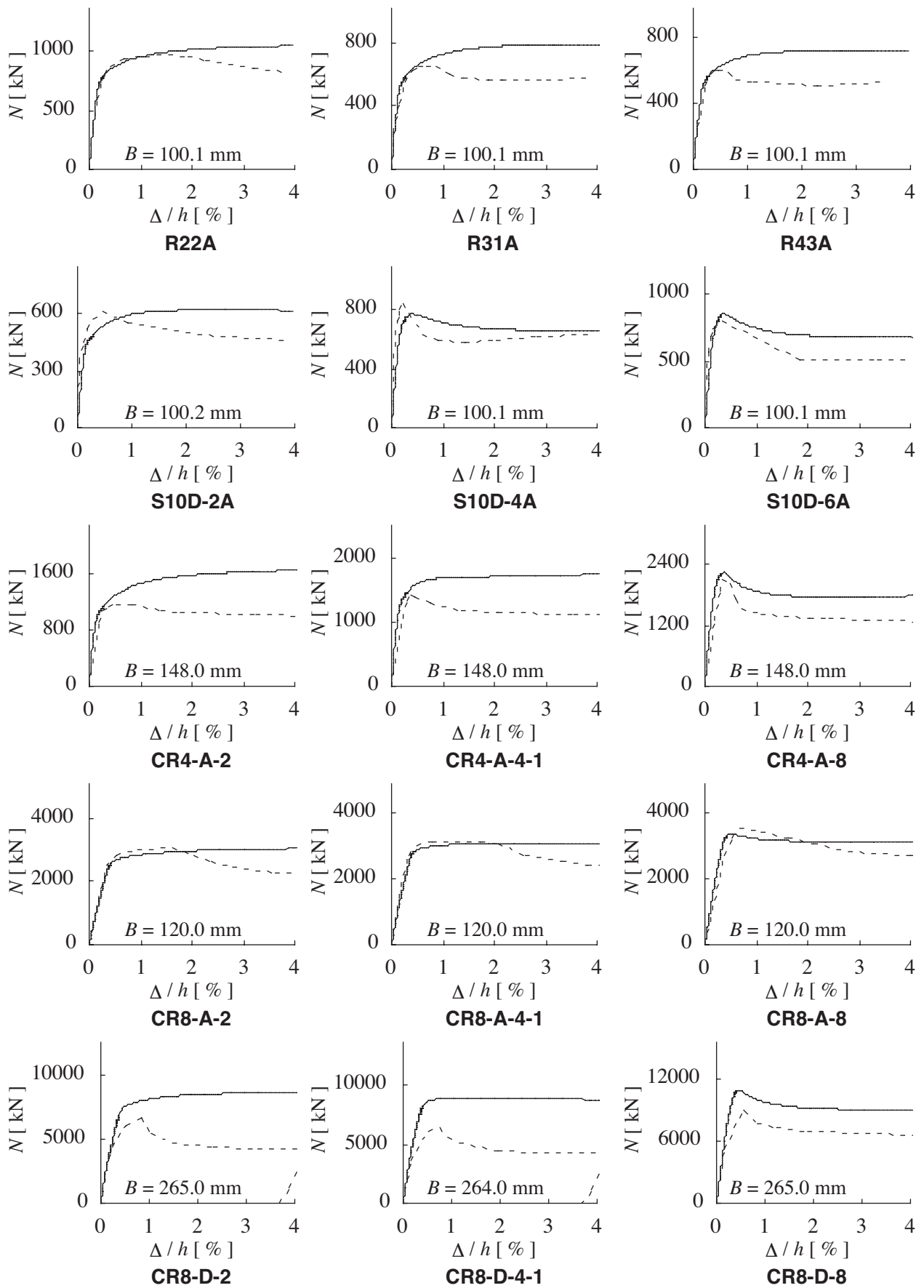
文献	試験体名称	B	B/t	h/B	$\sigma_y$	$\sigma_y/\sigma_u$	$\sigma_B$
3)	R22A	100.1	23.8		*408	0.861	21.4
	R31A	100.1	33.5	4.0	*363	0.811	21.3
	R43A	100.1	46.8		*418	0.861	25.2
4)	S10D-2A	100.2	46.4				25.7
	S10D-4A	100.1	46.1	3.0	*300	0.775	53.7
	S10D-6A	100.1	45.9				61.0
	CR4-A-2	148.0	33.8				25.4
5)	CR4-4-1	148.0	33.8	3.0	*262	0.637	40.7
	CR4-A-8	148.0	33.8				78.1
	CR8-A-2	120.0	18.5				25.4
	CR8-4-1	120.0	18.5				40.7
	CR8-A-8	120.0	18.5				78.1
	CR8-D-2	265.0	41.0	3.0	*825	0.954	25.4
	CR8-D-1	264.0	40.8				40.7
	CR8-D-8	265.0	41.0				78.1

B [ mm ]  $\sigma_y, \sigma_u$  [ N/mm<sup>2</sup> ] \*0.2%off-set

## 4. 荷重 - 変形関係の計算

### 4.1 計算方法

実験の結果、角形 CFT 短柱の荷重 - 変形関係は、最大耐力を発揮するまで、それとほぼ同じ断面積並びに材料特性を有する円形 CFT 短柱のそれとほぼ等しい関係にあることが認められた。従って、角形 CFT 短柱の断面をその鋼管とコンクリートの断面積が等しい円形断面に置換して、筆者らが提案した円形 CFT 短柱の応力 - ひずみ関係式<sup>2)</sup>を用いて角形 CFT 短柱の荷重 - 変形関係を



破線：実験値 実線：計算値

図-5 荷重-変形関係の実験値と計算値の比較

計算する。この計算方法は、既報 2) に詳しく記したので参照されたい。なお、円形 CFT 短柱の場合は、荷重 - 変形関係に及ぼす鋼管の局部座屈およびコンクリートの局所的な破壊および膨張による鋼管の面外への変形の影響がほとんどないことから、その計算式には、鋼管の変形による耐力低下が考慮されていない。

#### 4. 2 実験値と計算値の比較

図 - 5 に表 - 5 に示す試験体<sup>3)-5)</sup>の荷重  $N$  - 平均軸方向ひずみ  $\Delta / h$  関係の実験値と計算値の比較を示す。なお、計算の際に使用するコンクリート単体の圧縮強度  $\sigma_0$  は標準強度  $\sigma_B$  とした。図中の点線および実線はそれぞれ実験値および計算値を表している。

図より、寸法効果が無視できると考えられる比較的断面幅が小さい試験体 ( $B = 100-150 \text{ mm}$ ) は、計算値が、最大耐力発揮までほぼ実験値を追跡していることがわかる。一方、最大耐力発揮以降の計算値は実験値と比較して著しく高い。これは、計算式に鋼管の局部座屈およびコンクリートによる鋼管の面外への変形が考慮されていないことが原因である。なお、鋼管の局部座屈および面外への変形については鋼管の二軸応力状態とコンクリートの三軸応力状態の複雑な関係で定まり、現時点ではこれらの関係を検証できていないことから、これらの点については今後の検討課題である。また、比較的断面幅が大きい試験体 ( $B = 265 \text{ mm}$ ) については、計算値が、実験値と比較し比較的高いことがわかる。これは、コンクリートの寸法効果を考慮していないことが原因<sup>6)</sup> であると考えられる。

#### 5. まとめ

CFT 短柱の基本的力学性状である応力とひずみの関係に及ぼす断面形状の影響について実験的に検討を行い、次の知見を得た。

- 1) CFT 短柱の応力 - ひずみ関係に及ぼす断面形状の影響は、角形 CFT 短柱の最大耐力発揮までは、ほとんど認められない。
- 2) 円形および角形 CFT 短柱ともに、荷重 - 変形関係に及ぼす端面拘束の影響はほとんどない。
- 3) 角形 CFT 短柱の断面をその鋼管とコンクリートの断面積が等しい円形断面に置換して、円形 CFT 短柱と同様に荷重 - 変形関係を算

出した結果、計算値は、最大耐力発揮までほぼ実験値を追跡した。

- 4) 角形 CFT 短柱の耐力劣化勾配を評価するには、鋼管の局部座屈およびコンクリートによる面外への変形を考慮しなければならない。また比較的断面幅が大きい場合は、寸法効果を考慮しなければならない。

註) コンクリート部材の強度は断面寸法に依存する寸法効果があるために、一般に部材のコンクリート強度として使用される標準試験体 (径 100mm, 高さ 200mm) の標準強度を、その断面寸法に応じて補正する必要がある。そこで、本研究では、寸法効果が小さくなるように比較的標準試験体の断面に近い公称径が 101.6mm および公称幅が 100mm の鋼管を使用した。

#### 参考文献

- 1) 例えば、仲威雄, 加藤勉, 阿部信男: コンクリート充填鋼管の圧縮強さ, 日本建築学会論文報告集, No. 69, pp. 605-608, 1961. 10
- 2) 山本貴正, 川口淳, 森野捷輔: 寸法効果を考慮した中心圧縮を受けるコンクリート充填円形鋼管短柱の荷重 - 変形関係に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 592, pp. 193-200, 2005. 6
- 3) 吉富宏紀, 森野捷輔, 川口淳: コンクリートを充てんした角形鋼管の応力 - ひずみ関係に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), 構造 II, pp. 1573-1574, 1994. 9
- 4) Yamamoto T., Kawaguchi, J. and S. Morino: Experimental Study of Scale Effects on the Compressive Behavior of Short Concrete-Filled Steel Tube Columns, Composite Construction in Steel and Concrete IV, ASCE, pp. 879-890, 2001. 3-4.
- 5) 藤本利昭, 向井昭義, 西山功, 稲井栄一, 甲斐誠, 田中義成, 時野谷浩良, 野口隆, 馬場武志, 福本昇, 村田義行, 崎野健治, 森野捷輔: 高強度材料を用いたコンクリート充てん鋼管短柱の軸圧縮特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 498 号, pp. 161-168, 1997. 8
- 6) 崎野健治, 蛭川利彦, 松本勝憲: ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究 (CFT-17), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 構造 III, pp. 917-918, 1997. 9