

論文 スパイラル筋で補強したコンクリート充填角形鋼管柱の短柱圧縮性状

渡辺英義*1・金子文彦*2・竹村寛恭*3

要旨：円形スパイラル筋で補強した角形CFT柱の短柱圧縮実験を実施した。スパイラル筋補強による耐力上昇は少ないが、圧縮靱性の改善効果は大きい。実験結果を分析することにより、鋼管とコンクリートの応力状態におよぼすスパイラル筋の影響を把握した。鋼管とスパイラル筋に拘束されたコンクリートには両者の拘束効果が期待ができる。スパイラル筋の補強効果を考慮した鋼管とコンクリートの応力-ひずみ関係モデルを作成した。

キーワード：角形CFT, 短柱圧縮性状, スパイラル筋補強, 応力-ひずみ関係

1. はじめに

筆者らは過去に角形CFT柱の端部を簡易な方法で補強した場合の曲げせん断実験を実施している。柱端部1D (D:柱せい) の範囲を円形スパイラル筋で補強した場合、特に優れた性能を示すことが明らかとなったが、定量的評価には至らなかった。本研究では、柱端部をスパイラル筋で補強した角形CFT柱の実用化の第一段階として短柱圧縮実験を実施し、曲げせん断応力下での挙動を推定するために必要となる、鋼管とコンクリートの応力-ひずみ関係を作成することを目的とした。

2. 実験内容

表-1に試験体一覧を、図-1に試験体形状を、表-2, 3に鋼材とコンクリートの材料特性を示す。試験体の断面は250×250mm (鋼管なし試験体は230×230mm) で、高さは750mmとした。パラメータはコンクリート強度 ($F_c=30,60\text{MPa}$), 鋼管板厚 ($t=6,9\text{mm}$), スパイラル筋の降伏強度 ($\sigma_y=1275,685,295\text{MPa}$) と補強量, スパイラル筋および鋼管の有無である。スパイラル筋補強量は、径 (6,9mm) およびピッチ (25,50mm) の要因を組み合わせることにより変化させた。表-1中のスパイラル筋断面積

表-1 試験体一覧

No.	断面 B, D (mm)	コンクリート強度 F_c (MPa)	鋼管板厚 t (mm)	幅厚比 B/t	スパイラル筋	降伏強度 σ_y (MPa)	断面積比 ρ_w (%)	体積比 ρ (%)	備考		
1	250	60	9	27.8	—	—	—	—	基本 シリーズ		
2					U6.4 - @50	1275	0.52	1.09			
3					UHD6 - @50	685	0.56	1.16			
4					D6 - @50	295	0.56	1.16			
5					—	—	—	—			
6		30	—	—	—	—	—	—	コンクリート 強度		
7		U6.4 - @50	1275	0.52	1.09						
8		D6 - @50	295	0.56	1.16	—	—	鋼管板厚			
9		—	—	—	—	—	—				
10		230	60	6	41.7	U6.4 - @50	1275	0.52	1.09	鋼管なし	
11	D6 - @50					295	0.56	1.16			
12	—					—	—	—	—		—
13	U6.4 - @50					1275	0.52	1.09			
14	UHD6 - @50					685	0.56	1.16			
15	250		9	27.8	—	U6.4 - @25	1275	1.04	2.18	基本シリーズ 補強量	
16						U9.0 - @50	1.11	2.33			
17						U6.4 - @25	1.04	2.18			
18						U9.0 - @50	1.11	2.33			
19						—	—	—	—		—
20	250	—	9	27.8	—	—	—	鋼管のみ			
			6	41.7	—	—	—				

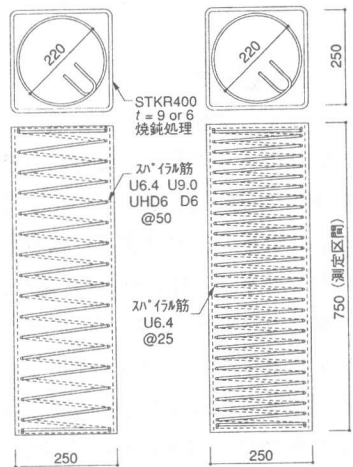


図-1 試験体形状

*1 大成建設(株)技術研究所 建築研究部 構造耐火研究室 主任 工修 (正会員)
 *2 大成建設(株)設計本部 構造設計第二部 設計室 主任 工修
 *3 大成建設(株)設計本部 構造設計第二部 設計室 室長

表-2 鋼材の材料特性

種別	降伏強度 σ_y (MPa)	ヤング係数 E (GPa)	破断強度 σ_u (MPa)	伸び ϵ_B (%)
鋼管 ($t=5.57$)	356	201	467	30.2
鋼管 ($t=8.42$)	328	204	453	37.6
U6.4	1386	206	1490	11.0
U9.0	1390	206	1473	10.0
UHD6	784	192	1002	9.5
D6	386	176	514	16.3

注) U6.4, U9.0, UHD6の σ_y は0.2%耐力

表-3 コンクリートの材料特性

目標圧縮強度 F_c (MPa)	圧縮強度 σ_B (MPa)	ヤング係数 E (GPa)	ポアソン比 ν	割裂引張強度 σ_t (MPa)
30	34.6	26.6	0.20	2.74
60	66.9	32.3	0.21	4.44

比 p_w は $B \times D = 230 \times 230\text{mm}$ として、体積比 ρ はスパイラル筋により拘束されるコンクリート部のみを考慮して算出した。本試験体のスパイラル筋により拘束される部分のコンクリート断面積は、全コンクリート断面積の約70%である。鋼管には市販の冷間成形角形鋼管 (STKR400) を使用し、焼鈍 (550℃で4時間保持、その後炉冷) を行った。スパイラル筋は試験体全長に配置し、端部は二重巻きとし所定のフックを設けた。

加力は圧縮力を鋼管とコンクリートに同時に加え、平押し状態で単調載荷した。測定は柱軸縮み、鋼管およびコンクリートの軸方向、周方向のひずみ、スパイラル筋のひずみについて行った。

3. 実験結果

表-4に実験結果一覧を示す。軸ひずみ ϵ は変位計により測定した軸方向の縮み量を測定区間長さ (=750mm 図-1参照) で除したものである。鋼管の圧縮降伏は、軸方向および周方向応力を考慮し、Misesの降伏条件により定めた。圧縮耐力計算値 N_0 は、コンクリート強度に材料試験結果を用い、スパイラル筋の効果を検討せずに算出した単純累加強度である。CFT試験体の最大耐力実験値は計算値の0.96~1.20倍となっており、実験値が計算値を下回った試験体は1体のみであった。

図-2に各試験体の圧縮力と軸ひずみの関係を各要因ごとに重ね書きして示す。鋼管降伏後

表-4 実験結果一覧

No.	鋼管圧縮降伏時		スパイラル筋降伏時		最大耐力時		計算値	
	圧縮力 (MN)	軸ひずみ (%)	圧縮力 (MN)	軸ひずみ (%)	圧縮力 (MN)	軸ひずみ (%)	N_0 (MN)	N_{max}/N_0
1	4.93	0.139	—	—	6.62	0.277	6.24	1.06
2	5.62	0.170	6.39	0.740	6.76	0.399		1.08
3	5.92	0.195	6.59	0.529	6.71	0.368		1.08
4	5.63	0.166	6.51	0.391	6.72	0.325		1.08
5	4.49	0.162	—	—	5.11	0.231	4.49	1.14
6	4.39	0.150	5.11	1.018	5.19	1.548		1.16
7	4.28	0.145	4.96	0.365	4.97	0.394		1.11
8	5.13	0.195	—	—	5.47	0.254	5.72	0.96
9	5.10	0.182	4.88	0.567	5.75	0.274		1.00
10	5.39	0.218	5.64	0.355	5.76	0.291		1.01
11	—	—	—	—	3.46	0.266	3.53	0.98
12	—	—	2.39	0.536	3.37	0.275		0.96
13	—	—	2.67	0.446	3.42	0.261		0.97
14	—	—	—	—	3.45	0.272	6.24	0.98
15	5.42	0.159	7.46	1.099	7.46	1.178		1.20
16	5.93	0.183	7.41	1.241	7.42	1.306		1.19
17	—	—	4.04	1.237	4.05	1.146	3.53	1.15
18	—	—	3.53	1.199	3.55	1.022		1.01
19	2.70	0.159	—	—	2.92	0.196		2.61
20	1.98	0.192	—	—	1.98	0.192	1.91	1.04

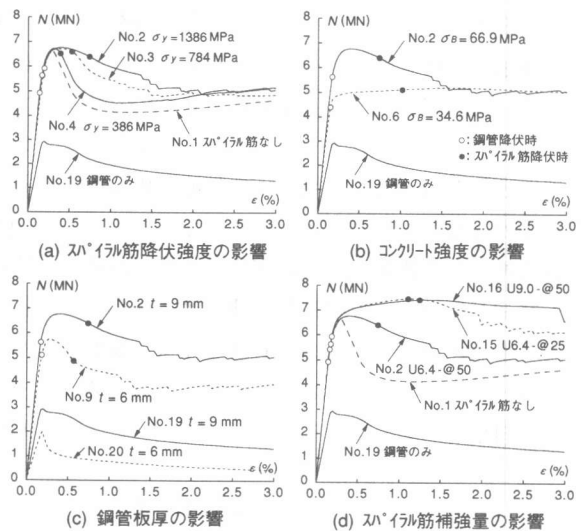


図-2 圧縮力-軸ひずみ関係

の圧縮力-軸ひずみ関係において、スパイラル筋なしの試験体の最大耐力付近までは、スパイラル筋補強の影響は少ない。スパイラル筋補強量が少ないNo.2~4試験体の場合、最大耐力の上昇はわずかであり、降伏強度による有為差も殆どみられない。しかし、No.2に対して補強量を2倍としたNo.15,16試験体の最大耐力は、スパイラル筋なしの試験体の1.12~1.17倍まで上昇している。また、補強量が少ないNo.2~4試験体は最大耐力以降にスパイラル筋が降伏しているのに対し、補強量が2倍のNo.15,16試験体は、スパイラル筋の降伏により最大耐力となっ

ており、補強効果が大きいと言える。最大耐力以降の耐力低下は、スパイラル筋の降伏強度が高く、補強量が多い試験体ほど緩やかである。

4. 結果の検討

4.1 鋼管の応力

図-3 に $F_c=60\text{MPa}$, $t=9\text{mm}$ の試験体の鋼管の軸方向応力 σ_v , 周方向応力 σ_H , 軸ひずみ関係を示す。図中の応力は材料試験による降伏応力 σ_y で無次元化している。軸方向, 周方向応力は鋼管のひずみ測定値を用い, 二軸応力状態を考慮して算出した。塑性域では鋼管を完全弾塑性と仮定し, Mises の降伏条件とひずみ増分理論における Prandtl-Reuss の式を用いた。ポアソン比 ν は, 弾性域では鋼管のみの試験体の実験結果から算出した値 ($t=9\text{mm} \rightarrow \nu=0.272$) を, 塑性域では 0.5 を用いた。鋼管応力の算出は局部座屈が顕著となる以前のひずみ測定値が信頼できる時点まで行った。この時点ではすべての試験体において, 鋼管はひずみ硬化域には達していない。

各試験体とも周方向応力がほとんど生じていない状態で鋼管が降伏した。鋼管降伏後も周方向応力は漸増するが, 軸ひずみが 0.2~0.3% 程度から急に大きくなり始める。コンクリートの膨張が軸ひずみ 0.2~0.3% 程度から始まり, 鋼

管がコンクリートの膨張を拘束している状態であると考えられる。

図-4 に鋼管の軸方向, 周方向応力と軸ひずみの関係をスパイラル筋の降伏強度と補強量を要因として示す。図中の●は最大耐力時である。補強なしの試験体と比較して, スパイラル筋補強の試験体では破壊の進行に伴う軸方向応力の減少と周方向応力の増加の割合が緩やかとなっている。図-4 (b) より補強量が多い試験体ほどスパイラル筋による拘束の効果が大きいことがわかる。また, 図-4 (a) より鋼管の応力を算出することが可能な軸ひずみ 0.6% 程度までの範囲では, 降伏強度による顕著な差異は認められない。スパイラル筋の降伏強度が鋼管の応力状態におよぼす影響は少ないと考えられる。

4.2 鋼管の応力-ひずみ関係モデル

前節の検討結果をもとに, コンクリートの膨張を拘束する効果を考慮した鋼管の応力-ひずみ関係モデルの作成を行った。図-5 に応力-ひずみ関係モデルを示す。モデル化は, コンクリート強度が $F_c=60\text{MPa}$, 鋼管板厚が $t=9\text{mm}$ の試験体に対して, 周方向応力と軸ひずみの関係を図-5 に示す①から③の鋼管の応力状態に対応する三本の直線で近似することにより行った。軸方向応力と軸ひずみの関係は, モデル化した周方向応力と軸ひずみの関係と Mises の降

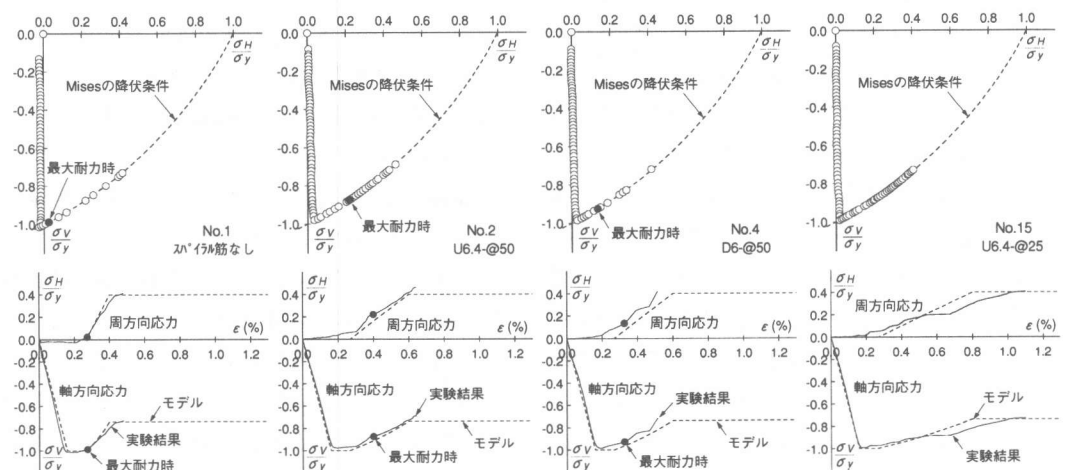


図-3 鋼管の軸方向応力, 周方向応力, 軸ひずみ関係

伏条件から算出される。

①から②の状態へ移行する時の軸ひずみ、すなわち、コンクリートが膨張し始める時の軸ひずみ ϵ_0 はプレーンコンクリートの強度時の軸ひずみとした (ϵ_0 は次々節の表-5中の式(9)から算出)。

③の状態は前節の検討では明確に確認されていない。破壊が進展した段階では、ひずみ硬化や局部座屈の影響により、鋼管の応力状態を正確に把握することは困難である。本研究では各試験体で算出された周方向応力の最大値が概ね $\sigma_H/\sigma_y=0.4$ であることに着目し、③の状態は軸ひずみによらず $\sigma_H/\sigma_y=0.4$ で一定であると仮定した。

②の状態は鋼管とスパイラル筋の両方がコンクリートを拘束している状態である。前節の検討より、スパイラル筋の降伏強度が鋼管の応力状態におよぼす影響は少なく、補強量による影響が支配的であることが明らかとなった。これらの結果を勘案し、②の状態はスパイラル筋降伏強度に依存せず、スパイラル筋補強量が多いほど周方向応力の増加の割合が緩やかとなるようにモデル化した。前述の ϵ_0 時と②から③の状態へ移行する時点とを結ぶ直線が実験結果と適合するように、③の状態へ移行する時点スパイラル筋補強量ごとに定めた。③の状態へ移行する時の軸ひずみは、図-5に示すようにスパイラル筋なしの試験体では0.4%、スパイラル筋体積比が $\rho=1.09\sim 1.16\%$ の試験体では0.6%、 $\rho=2.18\sim 2.33\%$ の試験体では0.8%とした。図-3中に作成した応力-ひずみ関係モデルを示す。実験結果を基に作成しているので当然であるが、提案したモデルと実験結果の対応は良い。

4.3 コンクリートの応力

図-6にコンクリートの応力 $c\sigma$ と軸ひずみの関係を示す。図中のコンクリート応力はプレー

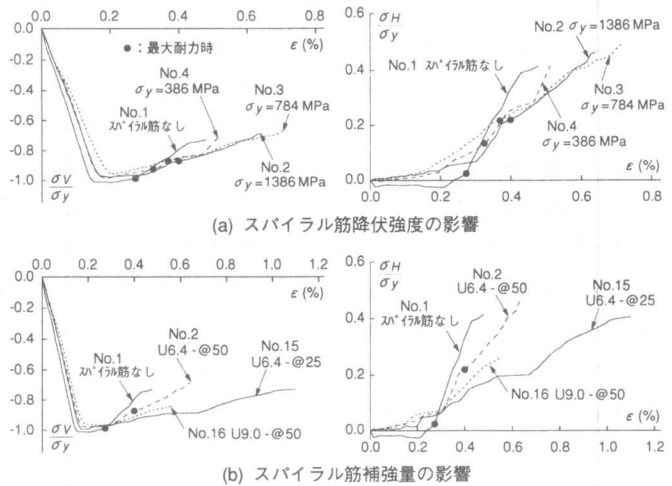
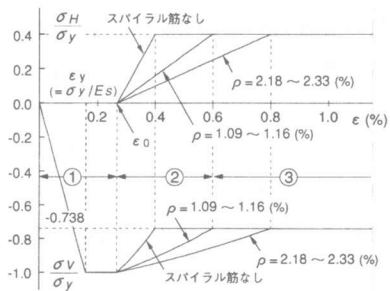


図-4 鋼管の軸方向、周方向応力-軸ひずみ関係



- ①: 鋼管とコンクリートの相互の影響がなく、鋼管に周方向応力が生じていない状態
- ②: コンクリートが膨張し始め、鋼管がコンクリートを拘束している状態
- ③: 鋼管による拘束が上限となり、周方向応力が増加しない状態

図-5 鋼管の応力-ひずみ関係モデル

ンコンクリート試験体 (No.11) の最大応力 $c\sigma p$ で無次元化している。コンクリート応力は実験結果から鋼管の負担軸力を差し引くことにより算出した。

補強なしの試験体においても、鋼管の拘束により、最大応力はプレーンコンクリートの1.16倍まで上昇している。スパイラル筋補強の試験体では、最大耐力以降もコンクリート応力は上昇し続けており、降伏強度が高く、補強量が多いほど上昇率も大きい。ただし、スパイラル筋の降伏強度による有為差が明確になるのは最大耐力以降の軸ひずみが約0.4%以上になった時点である。CFTとしては、スパイラル筋降伏強度

による最大耐力への影響は少なく、圧縮靱性の改善に効果が大きいという前章で述べた実験結果を裏付けている。

4.4 コンクリートの応力-ひずみ関係モデル

本研究ではNew RC式²⁾を参考とし、表-5に示す鋼管およびスパイラル筋による拘束を考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係モデルを作成した。表-5中の式(2)、(3)以外はNew RC式であり、式(4)、(5)、(13)は本研究の評価に適合するように表現を改めている。

本研究で対象とするコンクリートは、鋼管のみに拘束される部分とスパイラル筋および鋼管の両方に拘束される部分とに分けて考えることができる。始めに鋼管のみに拘束されるコンクリートについての検討を行う。New RC式では鋼管による拘束も考慮されているが、その根拠となる実験³⁾はコンクリートのみに圧縮力を載荷する方法で行われており、鋼管とコンクリートの両方に圧縮力を作用させた場合にはそのまま適用できない。前々節で述べた鋼管モデルでは、鋼管による拘束が上限となり、周方向応力が増加せず $\sigma_H/\sigma_y=0.4$ で一定となる状態を想定した。鋼管のみに拘束されるコンクリートのモデルは表-5中の式(2)に示すように、鋼管の応力状態の差異と鋼管モデルとの整合性を考慮し、New RC式中の σ_{hy} を鋼管モデルの最大周方向応力 $\sigma_H=0.4 \times \sigma_y$ に置き換えて作成した。

図-7(a)に前節で検討したスパイラル筋なしのNo.1試験体のコンクリート応力とモデルによる計算結果の比較を示す。同図では両者の応力にコンクリートの断面積を乗じて、圧縮力-軸ひずみ関係で比較している。計算結果の

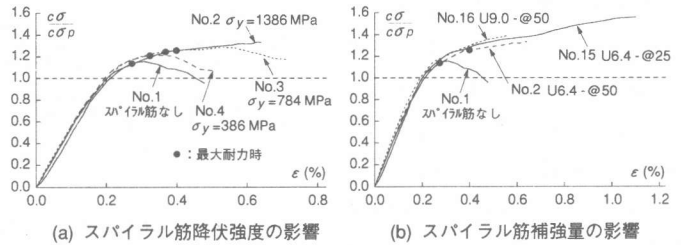


図-6 コンクリート応力-軸ひずみ関係

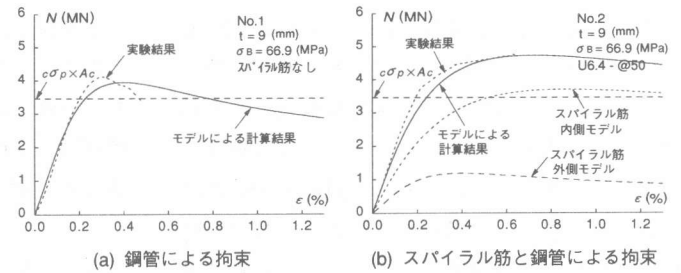


図-7 コンクリート応力の実験結果と計算結果の比較

表-5 コンクリートの応力-ひずみ関係モデル

$\frac{c\sigma}{c\sigma_{CB}} = \frac{AX + (D-1)X^2}{1 + (A-2)X + DX^2}$	(1)
$(s)c\sigma_{CB} = c\sigma_p + s\kappa s\rho \times 0.4 s\sigma_y$	(2)
$(s+sp)c\sigma_{CB} = c\sigma_p + s\kappa s\rho \times 0.4 s\sigma_y + sp\kappa s\rho s\sigma_y$	(3)
スパイラル筋の場合 $s\kappa = 2.09 \left(1 - \frac{s}{2Dc}\right)^2$	(4)
鋼管の場合 $s\kappa = 11.5 \left(\frac{d''}{C}\right)$	(5)
$X = \frac{\epsilon c}{\epsilon c_0}$ $A = \frac{E_c \epsilon c_0}{c\sigma_{CB}}$ $K = \frac{c\sigma_{CB}}{c\sigma_p}$	(6)
$K \leq 1.5$ の時 $\epsilon c_0 = \epsilon_0 (1 + 4.7(K-1))$	(7)
$K > 1.5$ の時 $\epsilon c_0 = \epsilon_0 (3.35 + 20(K-1.5))$	(8)
$\epsilon_0 = 0.93 (c\sigma_p)^{1/4} \times 10^{-3}$	(9)
$E_c = 4.1 k (c\sigma_p/100)^{1/3} \times 10^4 \times (\gamma_c/24)^2$	(10)
$D = \alpha + \beta c\sigma_p + \gamma \sqrt{(K-1)c\sigma_p/23}$	(11)
$\alpha = 1.50$ $\beta = -1.71 \times 10^{-2}$	(12)
鋼管の場合 $\gamma = 2.4$ スパイラル筋の場合 $\gamma = 1.6$	(13)

ここに $c\sigma$: 軸方向応力 ϵc : 軸ひずみ
 $c\sigma_p$: プレコンクリートの強度 $s\rho$: スパイラル筋の体積比
 $(s)c\sigma_{CB}$: 鋼管による拘束コンクリートの強度 $s\rho$: 鋼管の体積比
 $(s+sp)c\sigma_{CB}$: 鋼管とスパイラル筋による拘束コンクリートの強度
 $s\sigma_y$: 鋼管の降伏強度 $sp\sigma_y$: スパイラル筋の降伏強度
 s : スパイラル筋の間隔 Dc : スパイラル筋の中心間距離
 γ_c : コンクリートの単位容積重量 E_c : コンクリートのヤング係数
 ϵ_0 : プレコンクリートの強度時の軸ひずみ C : 鋼管の内幅
 ϵc_0 : 拘束コンクリートの強度時の軸ひずみ d'' : 鋼管板厚
 k : 粗骨材の種類による係数 (一般の場合は1.0)

圧縮力-軸ひずみ関係の上昇域の剛性が実験結果より低くなっているが、計算結果は実験結果を概ね模擬できている。

次にスパイラル筋および鋼管の両方に拘束さ

れる部分についての検討を行う。
この部分のモデル化は表-5中
の式(3)に示すように、鋼管と
スパイラル筋の各々の効果を累
加することにより行った。図-
7(b)に前節で検討したNo.2試
験体のコンクリート応力とモデ
ルによる計算結果の比較を示す。

モデルによる計算結果は、表-5中の式(2)と式(3)を用いて、鋼管のみに拘束される部分とスパイラル筋および鋼管の両方に拘束される部分の計算結果を個別に作成し、ひずみの適合を考慮して累加したものである。図-7(a)の場合と同様に圧縮力-軸ひずみ関係の上昇域の剛性が実験結果より低くなっているが、計算結果と実験結果の対応は良いと言える。

4.5 CFTの圧縮力-軸ひずみ関係モデル

前節までの検討により相互の影響を考慮した鋼管とコンクリートの応力-ひずみ関係モデルが得られた。本節では実験結果と両者のモデルによるCFT試験体の計算結果との比較を行う。

図-8にCFT試験体の実験結果とモデルによる計算結果の比較を示す。計算結果は前節と同様に各々のモデルを個別に作成して断面積を乗じ、ひずみの適合を考慮し累加したものである。

鋼管の降伏以降、計算結果の圧縮力-軸ひずみ関係は実験結果を下回る傾向にあり、スパイラル筋補強量が多いNo.15試験体でより顕著である。また、スパイラル筋補強量が少ないNo.2試験体では、鋼管モデルの軸方向応力の減少が終了し、軸方向応力が一定となる時点から、計算結果と実験結果の適合性が悪くなる。この原因として、実験時に発生時点を明確に特定することが困難であり断言できないが、鋼管の局部座屈の影響が考えられる。局部座屈の影響を考慮した鋼管モデルが必要となるが、実験データが十分でなく、現時点で提案することは困難である。

上記が解決すべき問題点として挙げられ、継続して検討を行う必要があるが、本研究で作成

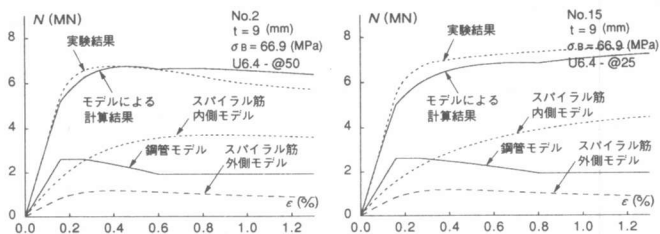


図-8 実験結果と計算結果の比較

した鋼管とコンクリートの応力-ひずみ関係モデルによりCFT試験体の実験結果を概ね模擬できていると言える。今後、鋼管幅厚比や材料強度が異なる場合についても検討を行い、より一般的なモデルを作成する予定である。

5. まとめ

円形スパイラル筋で補強した角形CFT柱の短柱圧縮実験を行い、以下の知見を得た。

- ・スパイラル筋補強による耐力上昇は少ないが、圧縮靱性の改善効果は大きい。その効果はスパイラル筋の降伏強度や補強量に依存する。
- ・鋼管とスパイラル筋に拘束されたコンクリートには両者の拘束効果が期待できる。
- ・スパイラル筋の補強効果を考慮した鋼管とコンクリートの応力-ひずみ関係モデルを作成した。各々のモデルを用いてCFT柱の挙動をある程度表現することができる。

参考文献

- 1) 渡辺英義・成原弘之・小林淳・中村敏治：コンクリート充填角形鋼管柱部材の構造性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.2，pp.1149-1154，1995.6
- 2) 平成4年度 New RC 研究開発概要報告書，C-7) コンファイト®コンクリートの力学特性に関する資料の取りまとめ，1993.3
- 3) 崎野健治・孫玉平：直線型横補強材により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係，日本建築学会構造系論文集，第461号，pp.95-104，1994.7