

論文 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

渡辺英義^{*1}・成原弘之^{*1}・小林 淳^{*1}・中村敏治^{*2}

要旨：コンクリート充填角形鋼管柱部材の構造性能を把握することを目的に、コンクリート強度、鋼管板厚、軸力比などを要因とした軸力曲げせん断実験および短柱圧縮実験を実施した。軸力曲げせん断実験では曲げ終局耐力について検討を行い、コンファインド効果を定量的に評価し、合理的な曲げ終局耐力の算定手法を提案した。短柱圧縮実験では鋼管とコンクリートの応力状態について詳細な検討を行い、弾塑性域における軸圧縮性状を把握した。

キーワード：コンクリート充填鋼管柱、コンファインド効果、一般化累加強度、曲げ終局耐力

1. はじめに

コンクリート充填鋼管構造は充填コンクリートによる鋼管の局部座屈の抑止、鋼管の拘束によるコンクリートの耐力や圧縮靱性の向上（コンファインド効果）など、優れた構造的長所を有する。しかし、現行の『鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説』（：日本建築学会、以下SRC規準と略す）による設計においてはこれらの効果は考慮されておらず、合理的な設計が行われていないのが現状である。本研究では、コンクリート充填角形鋼管柱部材の構造性能評価を行う際の基礎資料を得ることを目的に軸力曲げせん断実験および短柱圧縮実験を行い、コンファインド効果を定量的に把握することを目的とした。

2. 実験内容

2.1 試験体

表-1に軸力曲げせん断実験の試験体一覧を示す。試験体は柱脚部にスタブを取り付けた片持ち柱形式であり、試験部断面は250×250mm、せん断スパンは750mmである。パラメータはコンクリート強度 ($F_c=45,60,80\text{MPa}$)、鋼管板厚 ($t=9,12,16\text{mm}$)、軸力比 ($N/N_0=0.3,0.5,0.7$)、柱脚部補強方法（横リブ、縦リブ、スパイラル、円形鋼管）である。図-1に柱脚部補強方法を示す。スパイラル補強試験体は異形PC鋼棒を使用し、補強筋体積比 (ρ) を二水準（A補強： $\rho=1.35\%$ 、B補強： $\rho=2.69\%$ ）設定した。

短柱圧縮試験体は断面が250×250mm、高さが750mmであり、パラメータは鋼管板厚 ($t=9,12,16\text{mm}$)、コンクリート強度 ($F_c=45,60,80\text{MPa}$) とした。また、比較のためコンクリートを充填しない鋼管のみの試験体の実験も行った。

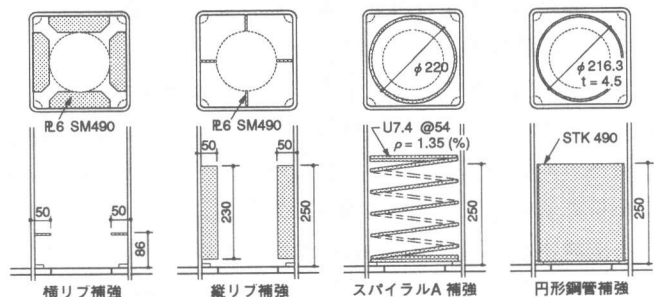


図-1 柱脚部補強方法

* 1 大成建設(株)技術研究所 構造研究グループ (正会員)

* 2 大成建設(株)技術開発部 工法システム開発室

表-1 試験体一覧および実験結果 (軸力曲げせん断実験)

No.	コンクリート強度	鋼管板厚(公称)	軸力比	柱脚部補強	材料試験結果					実験結果								
					鋼管板厚(実測)		鋼管幅厚比		鋼管		コンクリート		計算値			比較値		
					t (mm)	B/t	s _{sy} (MPa)	cσ _B (MPa)	cE (×10 ⁴ MPa)	eM _{max} (×10 ⁴ N·m)	cM _{SRC} (×10 ⁴ N·m)	cσ _B ' / cσ _B	cM _{CFT} (×10 ⁴ N·m)	eM _{max} / cM _{SRC}	eM _{max} / cM _{CFT}			
1	45	9	0.5	—	8.55	29.2	433	38.7	2.82	37.4	28.3	1.46	35.9	1.32	1.04			
2		12			11.40	21.9	442			49.1	34.7	1.90	46.2	1.42	1.06			
3		9			8.55	29.2	433			55.1	3.20	47.8	37.8	2.05	43.1	1.26	1.11	
4	60	9	0.3	—	8.55	29.2	433	56.8	3.08	40.1	30.7	1.32	38.8	1.31	1.03			
5			0.5							27.1	17.2	1.15	27.1	1.58	1.00			
6			0.7							55.5	37.9	1.95	49.1	1.47	1.13			
7		12	0.5		11.40	21.9	442	53.9	3.06	42.1	22.7	1.55	35.4	1.86	1.19			
8			0.7		16.00	15.6	460	60.1	3.53	79.7	47.7	3.16	66.3	1.67	1.20			
9			0.5							60.4	28.4	2.11	47.6	2.12	1.27			
10			0.7							42.0	31.4	1.40	39.3	1.34	1.07			
11	0.5	47.2	31.4	1.80						39.3	1.50	1.20						
12	9	0.5	横リブ	8.55	29.2	433	60.1	3.53	44.4	32.6	1.49	40.3	1.36	1.10				
13			縦リブ						48.8	32.6	1.85	40.3	1.50	1.21				
14			スパイラルA						48.6	32.6	1.83	40.3	1.49	1.21				
15	80	9	0.5	—	8.55	29.2	433	76.1	3.80	44.2	34.5	1.24	42.8	1.28	1.03			
16		12			11.40	21.9	442			54.3	40.9	1.41	52.6	1.33	1.03			
17		16			16.00	15.6	460			74.9	50.1	2.03	69.1	1.50	1.08			

注) $N_0 = sA \cdot s_{sy} + cA \cdot c\sigma_B$ sA : 鋼管断面積 cA : コンクリート断面積 s_{sy} : 鋼管降伏強度 $c\sigma_B$: コンクリート圧縮強度 eM_{max} : 最大耐力実験値
 cM_{SRC} : SRC規準による最大耐力計算値 cM_{CFT} : 提案式による最大耐力計算値 $c\sigma_B' / c\sigma_B$: コンクリート強度のかけの倍率

コンクリートには充填性を考慮して高流動コンクリートを使用し、打設は柱上部よりトレミー管を用いて行った。鋼管は冷間成形角形鋼管 (STKR490) に応力除去焼鈍 (600~650℃, 2時間, 炉冷) を行ったものを用いた。

2.2 加力・測定

図-2 に軸力曲げせん断実験

の加力方法を示す。軸力曲げせん断実験では、圧縮軸力を一定とした、変形制御による正負交番繰返し载荷を行った。測定は柱の相対変形、軸縮み、加力フレームの回転角、鋼管柱脚部のひずみなどについて行った。短柱圧縮実験では圧縮力を鋼管とコンクリートに同時に加え、平押し状態で単調载荷した。測定は軸縮み、試験体中央位置の鋼管の軸方向、周方向ひずみについて行った。

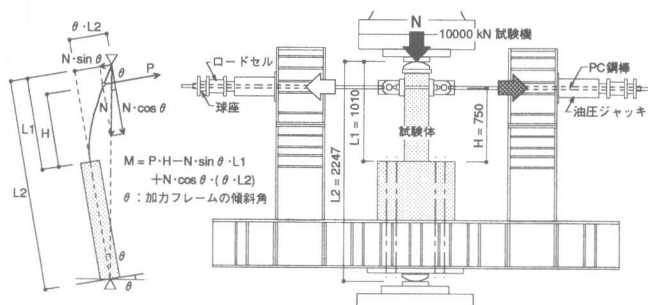


図-2 加力方法

3. 実験結果および検討 (軸力曲げせん断実験)

3.1 実験結果

表-1 に実験結果一覧を、写真-1 に最終破壊状況の一例を、図-3 に No.4, 13 試験体の柱脚部モーメント-部材角関係および軸縮み-部材角関係を示す。柱脚部モーメントには図-2 に示す方法により軸力による付加曲げ分を考慮した。

各試験体とも加力初期の段階で鋼管柱脚部が圧縮降伏し、加力の進展にともないリューダース線の発生、鋼管圧縮フランジ面の局部座屈の発生が観察され、最大耐力となった。柱脚部をスパイラル補強、円形鋼管補強した試験体の局部座屈は、1/20rad を越える大変形まで加力したにもかかわらず、無補強試験体ほど顕著で

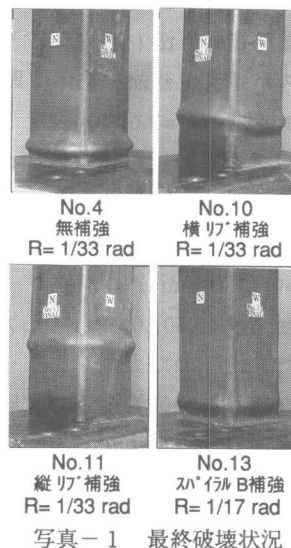


写真-1 最終破壊状況

はない。また、リブ補強試験体の局部座屈は補強リブを避けた柱上側に発生しており、リブ補強による局部座屈の抑止効果がみられた。

図-4 に柱脚部モーメント-部材角関係の包絡線を各要因ごとに比較して示す。弾性剛性はコンクリート強度が高く、鋼管板厚が大きな試験体ほど高い。最大耐力は軸力比が小さく、鋼管板厚が大きな試験体ほど高い。コンクリート強度が45MPaと60MPaの試験体で比較すると、コンクリート強度が高い試験体の方が最大耐力は高い。しかし、60MPaと80MPaの試験体の最大耐力はほぼ等しく、高強度コンクリートの使用による耐力上昇には頭打ちがみられる。柱脚部を補強した各試験体の最大耐力は、無補強試験体と比較して1~2割程度高い。最大耐力以降の耐力低下はコンクリート強度が高く、軸力比が大きい試験体ほど顕著である。

3.2 コンファインド効果

コンクリート充填鋼管柱部材の曲げ終局耐力は鋼管とコンクリートの一般化累加により算出するのが一般的である。表-1 にSRC 規準に準じて、コンクリート強度に低減係数0.85 を乗じて算出した一般化累加強度計算値を示す。各試験体の実験値は計算値の1.26~2.12倍にあり、SRC 規準による一般化累加強度は最大耐力を十分安全側に評価している。また、コンクリート強度を全く低減せずに算出した場合、実験値は計算値の1.14~1.83 倍となっていた。

コンクリート強度を低減せずに算出した一般化累加強度計算値からの実験値の耐力上昇分が鋼管により拘束されたコンクリートの耐力上昇分であると仮定し、コンクリート強度のみかけの倍率を用いてコンファインド効果の定量化を試みる。ただし、上記仮定によるコンファインド効果には、スタブによる拘束や鋼管のひずみ硬化による耐力上昇の影響も含まれている可能性がある。コンファインド効果の評価は文献 [1] と同様に式 (1) により行う。(K: 拘束係数)

$$\frac{c \sigma B'}{c \sigma B} = 1 + K \frac{s \sigma_y \cdot (t/B)^2}{c \sigma B} \dots \dots \dots (1)$$

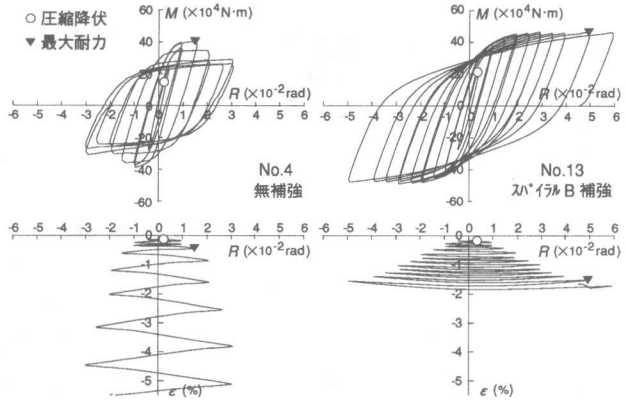


図-3 柱脚部モーメント-軸縮み-部材角 関係

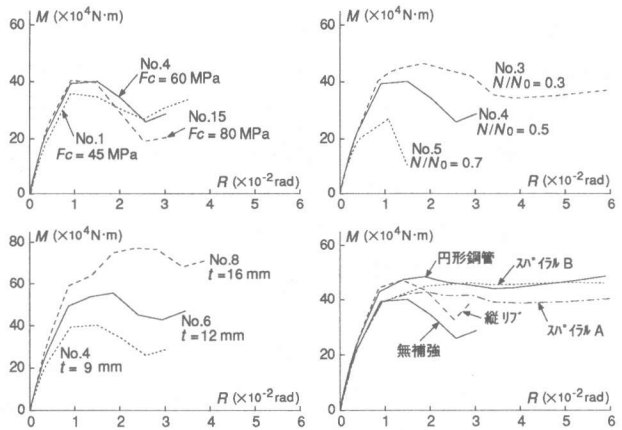


図-4 柱脚部モーメント-部材角 関係

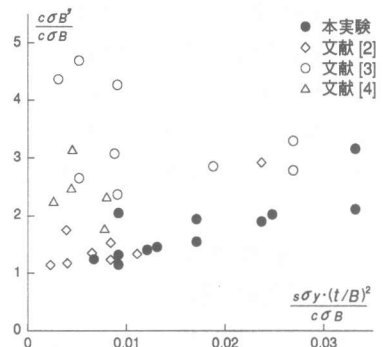


図-5 コンクリート強度のみかけの倍率

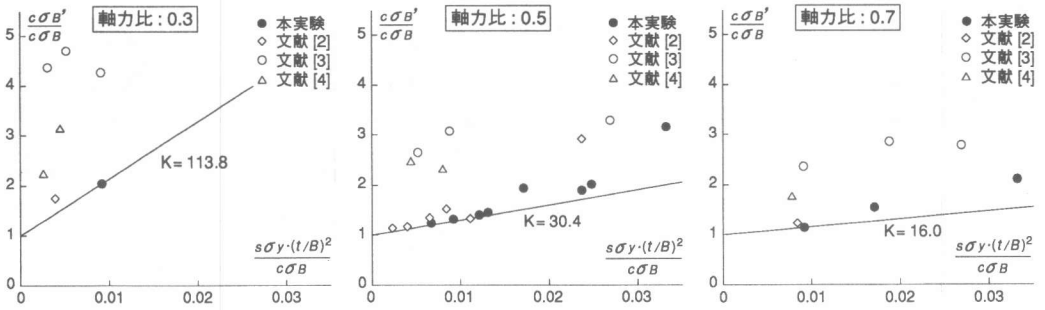


図-6 コンクリート強度のみかけの倍率

図-5 にコンクリート強度のみかけの倍率 ($c\sigma_B'/c\sigma_B$) と $s\sigma_y \cdot (t/B)^2/c\sigma_B$ の関係を示す。図-5 中には文献 [2] ~ [4] に示されている既往の実験結果も合わせて示している。実験シリーズごとにデータのばらつきは大きいですが、本実験結果の $c\sigma_B'/c\sigma_B$ と $s\sigma_y \cdot (t/B)^2/c\sigma_B$ の関係は概ね比例関係にある。図-6 に各データを軸力比ごとに整理したものを示す。軸力比が小さな試験体ほど、コンファインド効果によるコンクリートのみかけの倍率が高く、また、拘束係数も大きくなる傾向がみられる。この軸力比の影響を考慮してコンファインド効果の定量化を行う。

図-6 中には各軸力比ごとの実験値の下限となる拘束係数を示している。図-7 にこれらの拘束係数と軸力比の関係を示す。定量化に際して、安全側の評価となるようにデータの下限を満足する右下がりの直線で表現することとした。直線の X 軸切片は、後述する短

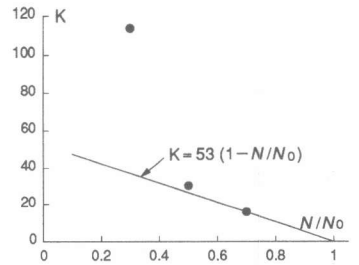


図-7 K - N/No 関係

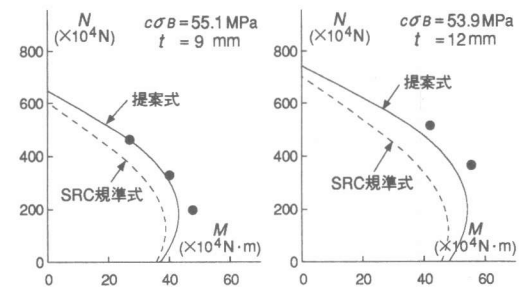


図-8 実験値と計算値の比較

柱圧縮実験において最大耐力が単純累加による計算値と概ね一致していたことより、軸力比 1.0 の時に拘束係数が 0 となるように定めた。図-7 中に軸力比の影響を考慮したコンファインド効果評価提案式を、図-8 に提案式によりコンファインド効果を考慮して算出した曲げ終局耐力の計算結果と本実験の最大耐力実験値を N-M 相関曲線上で比較したものを示す。コンファインド効果評価提案式を用いて算出した計算値に対して実験値は 1.00 ~ 1.27 倍であり、提案式を用いた耐力算出方法は実験結果を安全側かつ精度良く評価している。

4. 実験結果および検討

(短柱圧縮実験)

4.1 実験結果

表-2 に実験結果一覧を、図

表-2 実験結果一覧 (短柱圧縮実験)

No.	鋼管			コンクリート		実験値		計算値	比較値
	t (mm)	B/t	sσy (MPa)	cσB (MPa)	cE (×10 ⁴ MPa)	Ny (×10 ⁴ N)	Nmax (×10 ⁴ N)	No (×10 ⁴ N)	Nmax/No
1	8.62	29.0	440	37.2	2.82	569	583	559	1.04
2	11.47	21.8	441			662	707	659	1.07
3	15.97	15.7	462			816	943	836	1.13
4	8.62	29.0	440	58.8	3.24	648	689	676	1.02
5	11.47	21.8	441			745	798	771	1.03
6	15.97	15.7	462			888	994	939	1.06
7	8.62	29.0	440	76.1	3.80	711	757	770	0.98
8	11.47	21.8	441			846	874	859	1.02
9	15.97	15.7	462			920	1015	1020	0.99
10	8.62	29.0	440	—	—	372	380	358	1.06
11	11.47	21.8	441			491	505	468	1.08
12	15.97	15.7	462			675	816	660	1.24

－9に荷重－軸ひずみ関係の一例を示す。軸ひずみ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で除したものである。

$t=9,12\text{mm}$ の試験体は鋼管の圧縮降伏後、局部座屈が発生して荷重が急激に低下し、最大耐力となった。 $t=16\text{mm}$ の試験体は鋼管

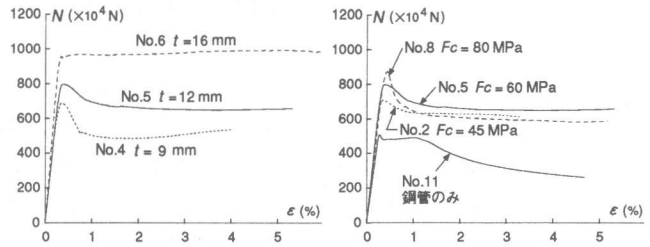
の圧縮降伏後の顕著な局部座屈は観察されず荷重を維持していた。最大耐力以降の耐力低下は鋼管板厚の小さく、コンクリート強度が高い試験体ほど顕著である。各試験体の最大耐力は単純累加による計算値に対して0.98～1.13倍であり、実験値と計算値はほぼ一致している。

4.2 鋼管の応力

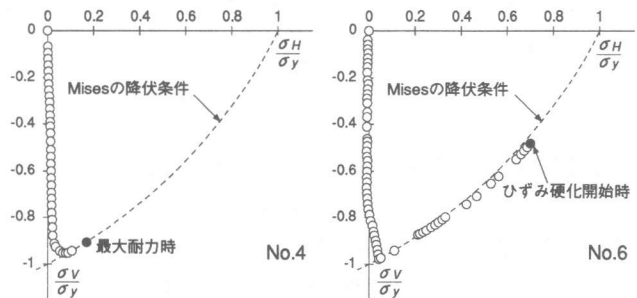
短柱圧縮試験体の軸圧縮性状を正確に把握するためには、鋼管とコンクリートの応力状態やコンファインド効果について検討する必要がある。コンファインド効果は鋼管がコンクリートの膨張を拘束することにより生じる。すなわち、最大耐力近傍の鋼管には軸方向の応力のみではなく、周方向の応力が生じていることが予想され、二軸応力状態となっていると考えられる。そこで、実験により得られた鋼管の軸方向および周方向のひずみ測定値を用い、二軸応力状態を考慮した鋼管の応力について検討した。

図－10に鋼管の軸方向応力(σ_v)と周方向応力(σ_H)の関係を、図－11に軸方向応力、周方向応力と変位計により測定した軸ひずみの関係を示す。軸方向応力、周方向応力の算出にあたって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。最大耐力以前に鋼管がひずみ硬化域に達した試験体においては、その時点までの応力を算出した。

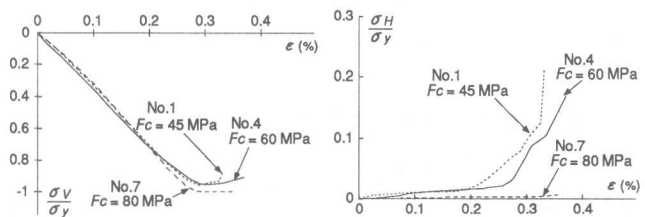
各試験体とも、周方向応力は軸ひずみが0.2～0.3%程度まではほとんど生じていない。その後、増加しはじめるものの、周方向応力が少ない状態で鋼管が降伏した。降伏後の応力状態は軸方向応力が減少し、周方向応力が増加する方向にMisesの降伏曲面上を移動する。最大耐力時の周方向応力は鋼



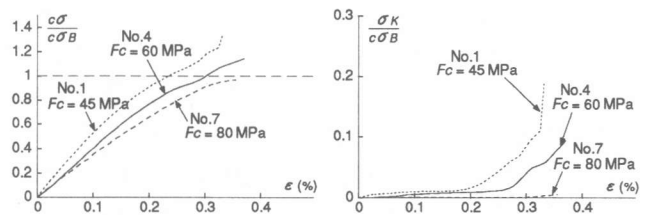
図－9 荷重－軸ひずみ関係



図－10 鋼管の軸方向応力－周方向応力関係



図－11 軸方向応力、周方向応力－軸ひずみ関係



図－12 コンクリート応力、拘束応力－軸ひずみ関係

管板厚の大きく、コンクリート強度が低い試験体ほど大きい傾向にある。

4.3 コンファインド効果

図-12に最大耐力時までのコンクリート応力 ($c\sigma$)、拘束応力 (σ_K) と軸ひずみの関係を、図-13に最大耐力時コンクリート応力と幅厚比の関係を示す。各図の応力は材料試験により得られたコンクリート圧縮強度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する軸力を差し引くことにより、拘束応力は鋼管の周方向応力が板厚方向に一樣であると仮定し、力の釣合条件により定まる式(2)により算出した。

$$\sigma_K = \frac{2t}{B-2t} \sigma_H \dots\dots\dots (2)$$

鋼管板厚が大きく、コンクリート強度が低い試験体ほど、最大耐力時のコンクリート応力、拘束応力は大きい。図-14に最大耐力時のコンクリート応力と拘束応力の関係を示す。既往の研究報告と同様に、鋼管により拘束されたコンクリートの圧縮強度と拘束応力の間には、明確な比例関係がみられる。図-14の関係を直線回帰した結果、短柱圧縮実験における拘束係数は1.64であった。

5. まとめ

軸力曲げせん断実験 コンファインド効果におよぼす軸力比の影響は大きい。軸力比の影響を考慮したコンファインド効果の評価手法を提案した。

短柱圧縮実験 弾塑性域での鋼管とコンクリートの応力状態について検討した。コンファインド効果はコンクリートの膨張を拘束する鋼管の拘束応力に比例する。拘束係数は1.6程度である。

本論では軸力曲げせん断実験と短柱圧縮実験から得られた結果の対応関係については、コンファインド効果の評価指標が異なるため、検証できていない。今後、両者の相関関係などについてさらに検討する必要があると思われる。

【謝辞】本研究の計画立案および実施に際し、九州大学松井千秋教授には貴重な御指導を頂きました。ここに深く感謝致します。

【参考文献】

- [1] 岡本達雄：高強度充てん型鋼管コンクリート (CFT) の設計，高強度材料の合成構造への活用の現状と展望，1993年度日本建築学会大会 SRC 構造部門 P.D. 資料，pp.91～96，1993.9
- [2] 今野和近ほか：充填型鋼管コンクリート柱に関する研究（その5）角形断面の軸力曲げせん断実験－L,H シリーズ－，日本建築学会大会学術講演梗概集構造Ⅱ，pp.1621～1622，1989.10
- [3] 毛井崇博ほか：充填型鋼管コンクリート柱に関する研究（その6）角形断面の軸力曲げせん断実験－M シリーズ－，日本建築学会大会学術講演梗概集構造Ⅱ，pp.1623～1624，1989.10
- [4] 長嶋俊雄ほか：充填型鋼管コンクリート柱の軸力曲げせん断実験－スパイラル補強角形断面－，日本建築学会大会学術講演梗概集構造Ⅱ，pp.1601～1602，1989.10

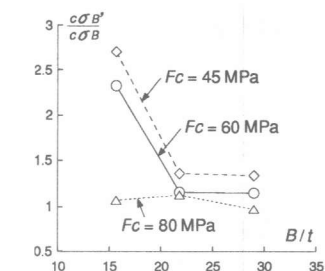


図-13 最大耐力時コンクリート応力－幅厚比 関係

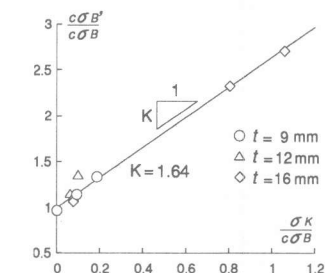


図-14 最大耐力時コンクリート応力－拘束応力 関係