

報告 大口径 CFT 柱の構造性能確認実験

勝倉 靖*1・中村 敏治*2・田口 典生*2・小林 淳*1

要旨：大断面で径厚比の大きいコンクリート充填鋼管柱の耐力を算定する場合、寸法効果によって充填コンクリートのみかけの圧縮強度が低下することを考慮する必要がある。本論文では、まず、無筋コンクリートの圧縮実験結果から、寸法効果によるコンクリートの見かけの圧縮強度の低下量が米国開拓局の強度低下曲線によって安全側に算定できることを示した。次に、この強度低下曲線を充填コンクリートの強度推定に用いることで、大型のコンクリート充填鋼管柱の曲げ耐力をほぼ適正に算定できることを示した。

キーワード：コンクリート充填鋼管柱、寸法効果、曲げ耐力、耐力算定

1. はじめに

日米共同耐震実験研究の一環として、コンクリート充填円形鋼管（CFT）柱の実験^{1,2)}が行われた。同実験では、断面寸法の大きな試験体の耐力実験値が耐力計算値を下回る傾向があることが指摘されている。文献³⁾では、この原因としてコンクリートの寸法効果⁴⁾を指摘し、これを考慮することで実験結果に近い耐力算定結果が得られることが示されている。同実験では、試験体断面の直径は最も大きいもので450mmである。今回の試験体は最大で直径900mmであり、寸法効果の影響をより強く受けるものと考えられる。

2. 圧縮強度試験結果

寸法効果によるコンクリート圧縮強度の見かけの低下量を把握するため、円筒形試験体の圧縮実験を実施した⁵⁾。試験体の高さと同径の比は2:1である。試験体の直径は300, 600, 800mmであり、コンクリートの目標強度は33, 60MPaである。なお、材料試験は直径100mm, 高さ200mmのシリンダー（100D）によって行った。試験期間中のシリンダー強度は、33MPaシリーズではほとんど増加せず、60MPaシリーズで2.0MPaの強度増加が見られた。

発熱量による養生条件の差を検討するために、33MPaシリーズの直径600mmの試験体をコア抜きして、直径100mmの供試体を採取した。

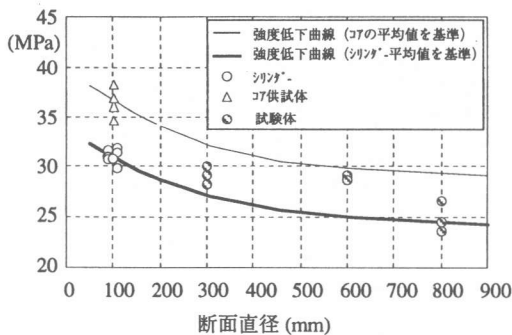


図-1 圧縮強度低下曲線（33MPa）

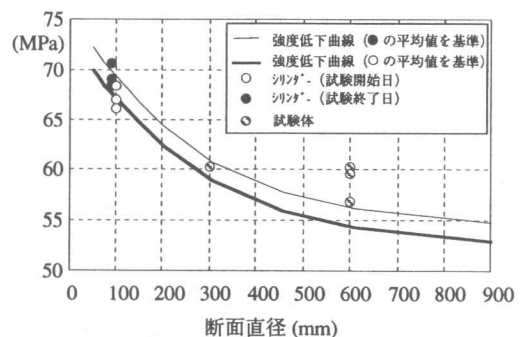


図-2 圧縮強度低下曲線（60MPa）

*1 大成建設(株)技術研究所 建築構造研究室（正会員）

*2 大成建設(株)技術本部 技術開発第一部構法システム開発室

直径100mmの試験結果の平均値を基準値として、これに米国開拓局の圧縮強度低下率⁴⁾を乗じた曲線と、直径300, 600, 800mmの実験結果を比較したものを図-1, 図-2に示す。シリンドラ強度を基準とした曲線は、実験値の下限値をほぼ押さえている。33MPaシリーズの600Dの実験結果は、シリンドラ強度を基準とした曲線よりも高く、むしろコア供試体の強度を用いた曲線の方が近くなっている。300D, 800Dの供試体とはやや傾向が異なるので断定はできないが、径の大きな試験体では内部発熱の影響を受けた可能性も考えられる。

次に、ヤング係数と試験体寸法との関係を図-3に示す。この結果からは試験体寸法がヤング係数に与える影響は見られない。

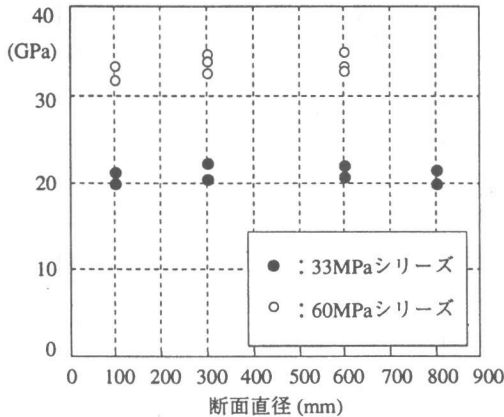


図-3 ヤング係数と試験体寸法

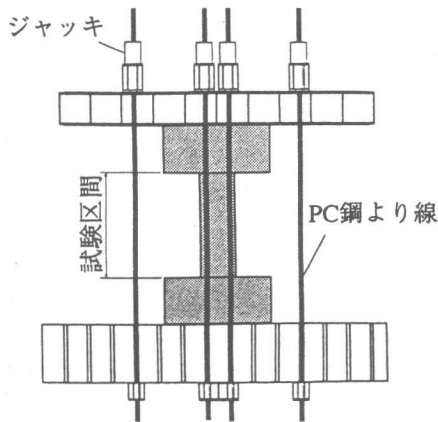


図-4 加力方法

3. コンクリート充填鋼管柱の等曲げ実験

3.1 試験体

試験体は円形断面を有するコンクリート充填鋼管柱であり、試験区間の長さと同断面直径の比は3対1である。試験のパラメータは、断面寸法Dと鋼管の径厚比である。断面の直径Dは300, 600, 900mmとし、径厚比は約75, 100, 150とした。なお、試験体名称は、D(鋼管外径) - (板厚)とした。

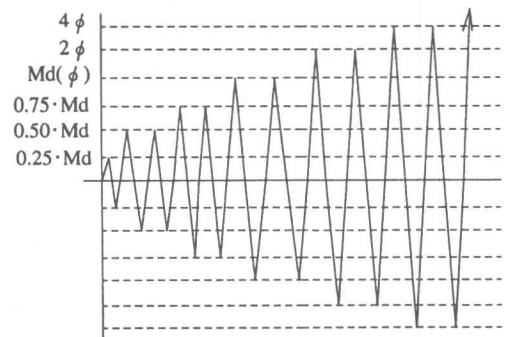
試験体概要を表-1に示す。同表には、コンクリート強度 σ_B 、鋼管の降伏強度 $s\sigma_y$ 、柱軸力Nを示した。

3.2 加力・測定方法

中央部のジャッキで柱軸力を、両端部のジャッキにより、軸力と偶力モーメントを与えた。加力方法を図-4に、加力サイクルを図-5に示す。

表-1 試験体概要

試験体名称	σ_B (MPa)	$s\sigma_y$ (MPa)	N (kN)
D300-2.3	63.8	234	1448
D300-3.2	64.2	313	1544
D300-4.5	64.6	346	1623
D600-6	61.3	408	6513
D900-6	60.3	382	13800
D900-9	63.6	347	14440
D900-12	67.1	379	15711



Mdは、コンクリート強度63MPa、 c_{rU} を0.85として、拘束効果を考慮しない一般化累加式で求めた値。

8サイクル以降は、Md時の曲率 ϕ の2倍、4倍とした。

図-5 加力サイクル

4. 一般化累加式による耐力算定

最大耐力（実験値）と一般化累加式による計算値の比較を表-2に示す。同表には後述するファイバーモデルによる算定結果も示している。累加耐力1，累加耐力2は，鋼管の拘束効果を考慮しない一般化累加式によって得られた値であり， $c_r u$ としてそれぞれ0.85⁶⁾，1.0としている。累加耐力3は強度低下率を考慮し， $c_r u$ を1.0として算出した計算値である。累加耐力4は，充填コンクリートの強度に強度低下率を考慮した上で，鋼管の拘束効果を考慮した一般化累加式⁷⁾で計算したものであり， $c_r u$ は1.0としている。

径厚比が100の試験体について，累加耐力2の方法で求めた耐力曲線と最大耐力との比較を図-6に示す。また，すべての試験体の実験値と計算値の比率を図-7に示す。

これらによると，同じ径厚比の試験体であっても，試験体の寸法が大きくなると，計算値が実験値より大きくなり，鋼管外径が900mmの試験体では，耐力算定値が実験値を上回っている。

上記の原因として，試験体寸法が大きくなると，コンクリートの見かけの圧縮強度が寸法効果によって低下することが考えられる。

充填コンクリートの強度として強度低下率を考慮した場合の算定値と実験値の比率を図-8に示す。これによると，大型の試験体で実験値と計算値の比がほぼ1になる。

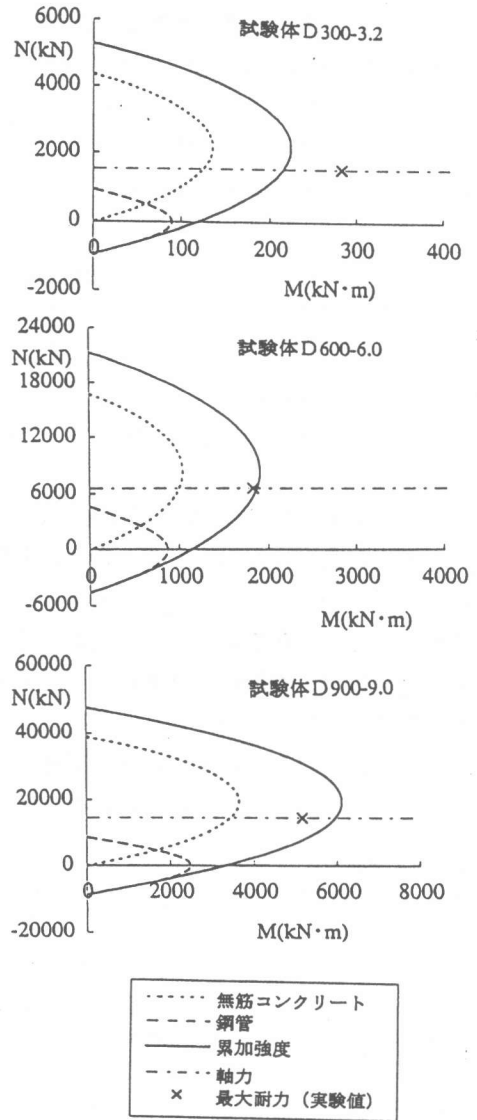


図-6 累加耐力曲線

表-2 耐力一覧

試験体名称	最大耐力 (実験値)	累加耐力1		累加耐力2		累加耐力3		累加耐力4		ファイバー1		ファイバー2		ファイバー3		ファイバー4	
		計算値	実/計	計算値	実/計	計算値	実/計	計算値	実/計	計算値	実/計	計算値	実/計	計算値	実/計	計算値	実/計
D300-2.3	202	159	1.27	172	1.18	162	1.25	166	1.22	163	1.24	153	1.32	160	1.26	160	1.26
D300-3.2	283	201	1.41	215	1.32	204	1.39	211	1.34	202	1.40	191	1.48	204	1.38	204	1.38
D300-4.5	343	248	1.38	263	1.30	251	1.37	262	1.31	246	1.39	233	1.47	255	1.34	255	1.34
D600-6	1827	1745	1.05	1871	0.98	1706	1.07	1787	1.02	1731	1.06	1567	1.17	1723	1.06	1720	1.06
D900-6	4524	4793	0.94	5177	0.87	4609	0.98	4778	0.95	4818	0.94	4250	1.06	4577	0.99	4566	0.99
D900-9	5153	5541	0.93	5949	0.87	5348	0.96	5576	0.92	5540	0.93	4954	1.04	5373	0.96	5363	0.96
D900-12	6173	6760	0.91	7199	0.86	6554	0.94	6884	0.90	6675	0.92	6037	1.02	6671	0.93	6661	0.93

注) 最大耐力 (実験値)，計算値の単位は，すべてkN・mとする。実/計は，実験値を計算値で除した比を示す。

次に、鋼管の拘束効果を考慮して計算を行う。鋼管の拘束効果は、文献³⁾にならい図-9に示すモデルを仮定した。すなわち、鋼管を軸力のみを負担する部分と横拘束のみに働く部分に分ける。拘束圧 σ_r を受けた場合、コンファインドコンクリートの強度 $c\sigma_{cB}$ は、無拘束の場合のコンクリート強度 σ_p と、拘束圧 σ_r による上昇分の和として次のように得られる。

$$\begin{aligned} c\sigma_{cB} &= \sigma_p + 4.1\sigma_r \\ &= \sigma_p + 8.2\alpha\sigma_y \cdot t / (D-2t) \quad (1) \end{aligned}$$

ここで、 D は鋼管外径、 t は鋼管厚、 σ_y は鋼管の降伏強度、 α は鋼管の横拘束に対する有効係数(0.159)である。 σ_p はシリンダー強度に強度低下率を乗じて求め、式(1)から得られる $c\sigma_{cB}$ を用いて累加耐力を求めた。耐力算定値と実験値の比率を図-10に示す。これによると、鋼管の拘束効果により、充填コンクリートの強度が高く算定されるため、耐力

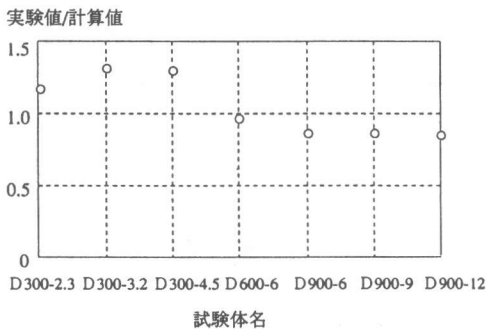


図-7 耐力の比較 (累加耐力 2)

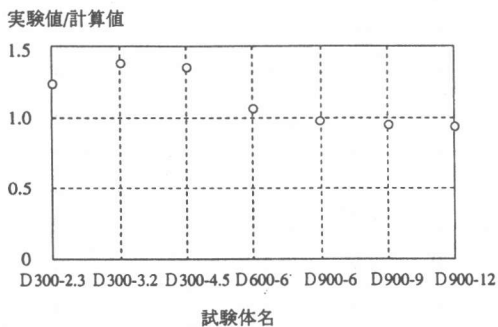


図-8 耐力の比較 (累加耐力 3)

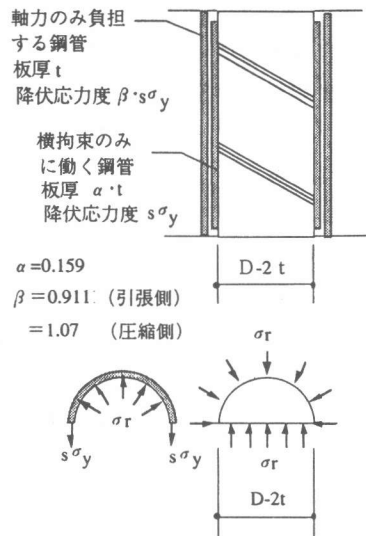


図-9 鋼管の拘束効果

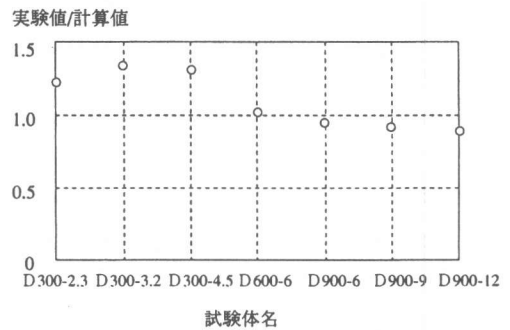


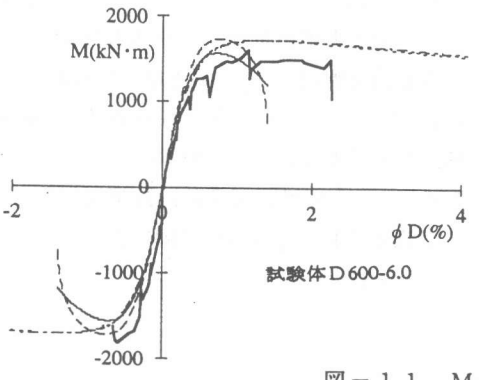
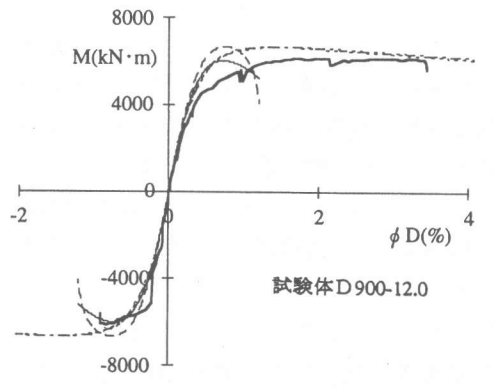
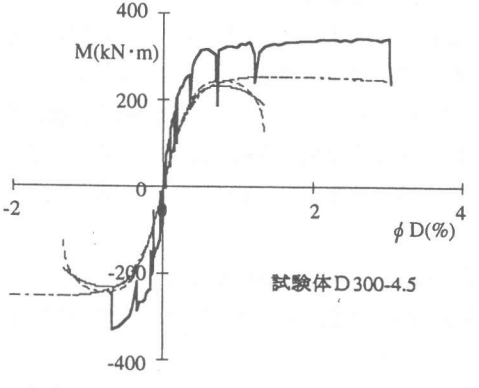
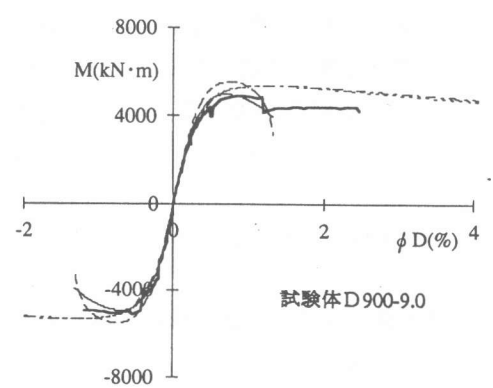
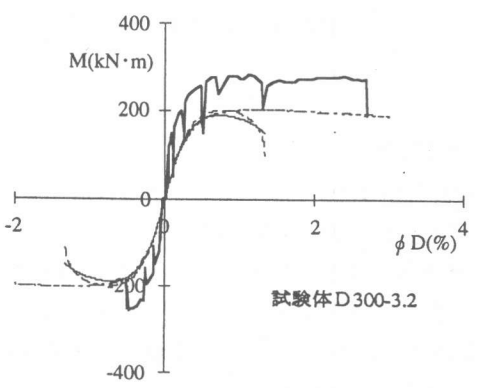
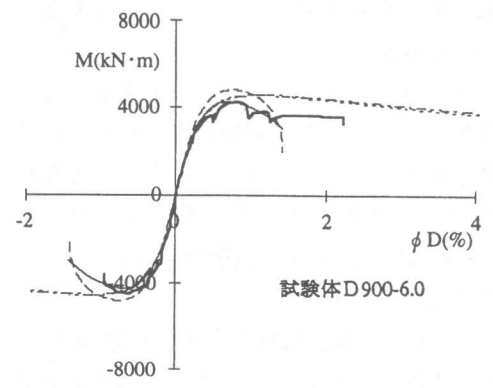
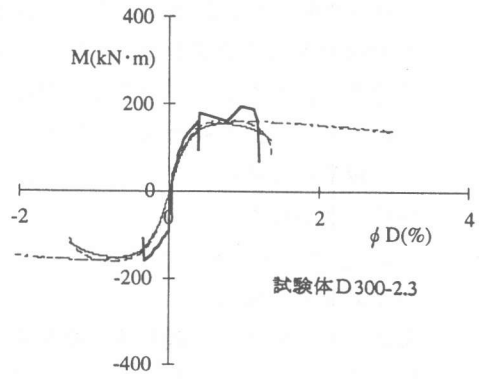
図-10 耐力の比較 (累加耐力 4)

算定値も高く得られることになる。しかしながら、寸法効果による強度低減に比べて、その効果は著しいものではなく、大型試験体における耐力算定値と実験値の比は概ね1に近い。

5. モーメント-曲率関係

ファイバーモデルによってモーメント-曲率関係の解析を行った。結果を図-11に示す。充填コンクリートの応力-ひずみ関係、鋼管の拘束効果に関するモデルは文献³⁾に与えられているものを用いている。

計算値のうち、ファイバー1、ファイバー2は、鋼管のコンファインド効果を無視した場合であり、鋼管の応力-ひずみ関係は完全弾塑性として計算したものである。ファイバー1は強



- 凡例
- 実験値
 - - - ファイバー1
 - ファイバー2
 - ⋯ ファイバー3
 - - - ファイバー4

図-11 M- ϕ D関係の比較

度低下率を考慮せず、ファイバー 2 は考慮したものである。

ファイバー 3 は、コンクリート強度に寸法効果を考慮した上で、鋼管のコンファインド効果を考慮し、コンクリートのヤング係数に寸法効果を考慮しないで解析したものである。鋼管の降伏強度を、引張側で $0.911s\sigma_y$ 、圧縮側で $1.07s\sigma_y$ とした。

ファイバー 4 は、文献³⁾と同じ方法で算定したものであり、充填コンクリートのヤング係数 E_c を、シリンダー強度に強度低下率を乗じた σ_p から式(2)を用いて求めており、ヤング係数に関して寸法効果が考慮されることになる。

$$E_c = (0.69 + 0.332\sqrt{\sigma_p}) \times 10^4 \quad (2)$$

ヤング係数における寸法効果の考慮の有無がファイバー 3、ファイバー 4 の違いである。

ファイバー 1、ファイバー 2 による方法では、鋼管の拘束効果によるコンクリートの靱性向上を解析に取り込んでいないため、実験値に比べ、早期に耐力低下を生じる。

ファイバー 3 では、最大耐力以降の耐力保持の状態など、実験結果の傾向をよく捉えていると言える。

ファイバー 3 とファイバー 4 の結果には、ほとんど差異が見られず、寸法効果によるヤング係数の低下については、解析結果に大きな影響を与えないことが示された。

6. まとめ

結論は以下の通りである。

- (1) 充填コンクリートの強度に寸法効果を考慮しない場合、断面寸法が大きい試験体の耐力を、実験値に比べ高く算定する。
- (2) 強度低下率によって、コンクリートの寸法効果を考慮すると、大断面の

試験体の耐力をほぼ適正に算定できる。

- (3) 大断面で薄肉の鋼管を用いた場合、寸法効果によるコンクリートの圧縮強度の低下量のほうが相対的に影響が大きく、鋼管の拘束効果が耐力に与える影響は小さかった。
- (4) 文献³⁾などでも報告されているように、拘束効果を考慮したモーメント-曲率関係の解析結果は実験結果の傾向を良好に捉えており、比較的大断面の試験体の実験結果にも適用しうることを確認した。

参考文献

- 1) 崎野健治ほか:ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究 (CFT-7) コンクリート充填円形鋼管柱の純曲げ実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.747-748, 1995.8
- 2) 松本勝憲ほか:ハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究 (CFT-8) コンクリート充填円形鋼管柱の曲げ耐力, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.749-750, 1995.8
- 3) 崎野健治ほか:コンクリート充填円形鋼管柱の曲げ性状に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, vol.18, No.2, pp.1289-1294, 1996
- 4) Blanks, R. F. and Mcnamara, C. C. : Mass Concrete Tests in Large Cylinders, ACI Journal, pp.280-303, Jan./Feb. 1935
- 5) 中村敏治ほか:プレーンコンクリートの寸法効果に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.883-884, 1997.9
- 6) 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, pp.157-163, 1987.6
- 7) コンクリート充填鋼管構造設計施工指針, 日本建築学会, pp.46-93, 1997.10