

低強度モルタル充填鋼管に関する実験的研究

齋藤 二郎
入沢 賢一

Experimental Study on Steel Tubes Filled with Lightweight Low-Strength Mortar

Jiro Saito
Ken-ichi Irisawa

Abstract

The purpose of this investigation is to examine the structural behaviors and ultimate buckling loads of steel tubes filled with lightweight low-strength mortar (AFC; $\sigma_{28} \doteq 30 \text{ kg/cm}^2$) and to compare them with those cases of ordinary mortar ($\sigma_{28} \doteq 300 \text{ kg/cm}^2$) or hollow steel tubes. Three kinds of steel tubes with equal outer diameters but with different thicknesses were used and a total of 9 specimens were tested. As a result, it was found that ultimate axial load capacities of the steel tubes filled with low-strength mortar (AFC) could not be imposed. The capacities of composite members were extremely affected by balance of $\mu = A_s/A_c$. It was shown that formula © was consistent in predicting inelastic ultimate axial buckling load of the steel tubes ($30 \leq \lambda_s \leq 100$) filled with mortar.

概 要

一般の充填型鋼管コンクリートに使用されるコンクリート強度は 300 kg/cm^2 程度であるが、本実験では特に仮設機材まで利用範囲を拡張するため、軽量化、経済性を必要とし、気泡性の軽量低強度モルタル (AFC, $\sigma_{28} \doteq 30 \text{ kg/cm}^2$) 充填鋼管の性状、座屈耐力等について、普通モルタル ($\sigma_{28} \doteq 300 \text{ kg/cm}^2$) 充填鋼管及び非充填鋼管とを比較し、その適応性を検討するものである。実験は鋼管径一定で $\mu = A_s/A_c$ (鋼管断面積のモルタル断面積に対する比率) を3種類とした中心軸方向塑性座屈 (鋼管細長比; $\lambda_s = 86 \sim 88$) の実験である。この結果、低強度モルタル充填鋼管の耐力は、弾性域では鋼管とモルタルの強度の累加式は成立するが、複合材としての効果はない。座屈耐力は鋼管と充填物強度及び μ のバランスがとれていることが最も重要である。即ちモルタル充填鋼管は、軽量且つ高強度の充填物とし、薄肉鋼管とするのが理想的である。又鋼管細長比 $30 \leq \lambda_s \leq 100$ のモルタル充填鋼管の中心軸圧縮曲げ塑性座屈の計算式は提案式©が最も妥当であると思われる。

1. 序

コンクリート充填鋼管の耐力は短柱の場合、内部コンクリート強度と外部鋼管の強度に依存する。

本実験ではモルタル充填鋼管を特に仮設機械に利用範囲を拡張するために、軽量化、経済性を考え、低強度軽量モルタル ($\sigma_{28} \doteq 30 \text{ kg/cm}^2$) 充填鋼管と常用強度 ($\sigma_{28} \doteq 300 \text{ kg/cm}^2$) のモルタル充填鋼管のもの及び非充填のものと比較し、低強度モルタル充填鋼管の剛性、耐力を把握し、その適応性を検討するため中心軸方向圧縮加力によって実験した。低強度モルタルには、市販AFC (アソフォームクリート; 気泡性軽量モルタル) を使用した。

2. 実験概要

2.1. 試験体

試験体は表-1に示すように、鋼管厚と充填物の区

鋼管	A_s cm ²	A_c cm ²	$\mu = \frac{A_s}{A_c}$	r cm	$\lambda_s = \frac{l_1}{r}$	試験体 記号	充填物
$\phi 101.6 \times 3.2$	9.892	71.140	0.139	3.48	86.207	A-1	A.F.C
						B-1	普通モルタル
						C-1	非充填
$\phi 101.6 \times 4.2$	12.850	68.182	0.188	3.45	86.956	A-2	A.F.C
						B-2	普通モルタル
						C-2	非充填
$\phi 101.6 \times 5.7$	17.170	63.862	0.269	3.40	88.235	A-3	A.F.C
						B-3	普通モルタル
						C-3	非充填

表-1 試験体一覧表

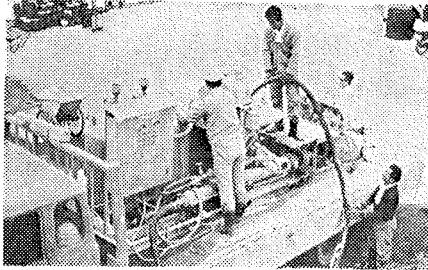
別により計9体とする。

モルタル打込方法は、鋼管を鉛直に支持し、投入充填する。そして外部より軽く叩いて振動を与え特にバイブレーターは使用しない。AFCは写-1に示す自

動総合施工機によりポンプ圧送し、上部より注入した。硬化収縮を考慮し、フランジよりモルタルは10cm余盛して、硬化後表面仕上げした。

2.2 使用材料

市販 AFC (アソーフォームクリート) はプレフォーミング方式の軽量気泡モルタルで単位体積重量は0.9~0.95t/m³である。



写一 AFC 自動総合施工機

	設計配合			現場配合		
	重量 (kg/m ³)	単位体積重量 (kg/ℓ)	容積 (ℓ)	重量 (kg/m ³)	単位体積重量 (kg/ℓ)	容積 (ℓ)
セメント	300	3.15	95	300	3.15	95
砂	300	2.6	115	300	2.6	115
水	182	1.0	182	182	1.0	182
発泡液	26,304ℓ	1.0	26,304	31,929	1.0	31.88
稀積水						
原液	1,096ℓ	1.0	1,096	1,330	1.0	1.32
計	809.4		1,000			1,130

表一 AFC 配合表

	W	C	S	備考
1 m ³	313 ^{kg}	488 ^{kg}	1464 ^{kg}	早強セメント(比重3.15) W/C=64.2% 川砂比重 C:S=1:3 2.76
1000ℓ	313 ^ℓ	155 ^{kg}	532 ^{kg}	

表一 普通モルタル配合表

強度	降伏点強度 $\sigma_{0.2}$ (kg/cm ²)	引張強さ σ_B (kg/cm ²)	弾性係数 E_s (kg/cm ²)	伸び率 (%)	ポアソン比 μ_s
鋼管種別					
$\phi 101.6 \times 3.2$	3488	4529	2.07×10^5	33.9	0.28
4.2	3381	4311	1.85×10^5	30.7	
5.7	4915	5836	2.13×10^5	24.3	

表一 鋼材の引張試験

試験体名	寸法	E_c (kg/cm ²)	σ_c (kg/cm ²)
AFC	A-1 $\phi 101.6 \times 3.2$	2.00×10^4	27.13
	A-2 4.2	2.16×10^4	27.26
	A-3 5.7	2.34×10^4	27.57
普通モルタル	B-1 3.2	1.80×10^5	296.21
	B-2 4.2	1.83×10^5	324.10
	B-3 5.7	1.83×10^5	315.10

表一 充填モルタル試験結果

鋼管の種類	鋼管			モルタル断面積 A_c (cm ²)	$\mu = \frac{A_s}{A_c}$	$\lambda_s = \frac{l}{r}$	鋼管弾性係数 E_s (kg/cm ²)	充填モルタル I_c (cm ⁴)
	A_s (cm ²)	I_s (cm ⁴)	r_s (cm)					
$\phi 101.6 \times 3.2$	9.892	120	3.48	71.140	0.139	86.207	2.07×10^5	402.5
4.2	12.850	153	3.45	68.182	0.188	86.957	1.85×10^5	369.7
5.7	17.170	198	3.48	63.862	0.269	88.235	2.13×10^5	324.3

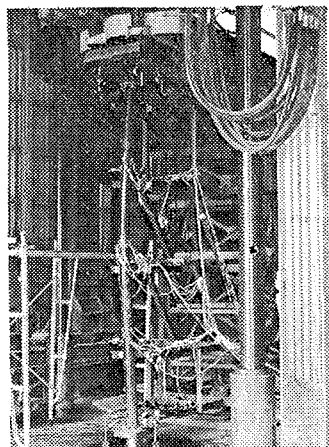
表一 試験体断面性能諸元

充填物 AFC, 普通モルタルの配合表は表一2, 表一3に示す。鋼材は一般用炭素鋼管(2種, STK41)である。又充填材の力学的試験結果は表一6, 各試験体の断面性能諸元は表一5に示す。

3. 実験方法

載荷は 300 t 油圧式試験機によっておこなった。床にはピン支承装置を取付け、両端ピンの中心軸方向圧縮試験によった。

加力は両端ピン構造でなかなか技術的に困難であるが、偏心度合を見るため、2回の繰返し(座屈計算値の²/₅, ³/₅)の後、3回目



写一 実験装置

屈させた。変形はD.G.を直角方向で5段に、歪度はW.S.G.を軸方向には円断面8等分に、円周方向には4等分に3段に貼付し、各々測定した。(写一2参照)、軸方向圧縮量は加圧板隅角部4点のD.G.の平均値とした。

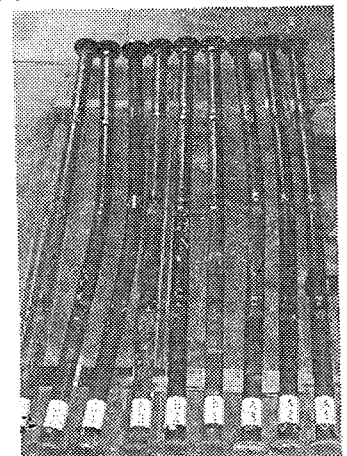
4. 実験結果と検討

4.1 座屈荷重

試験結果は表一7に示した。座屈後の変形状況は写一3に示した。

4.2 荷重と変形

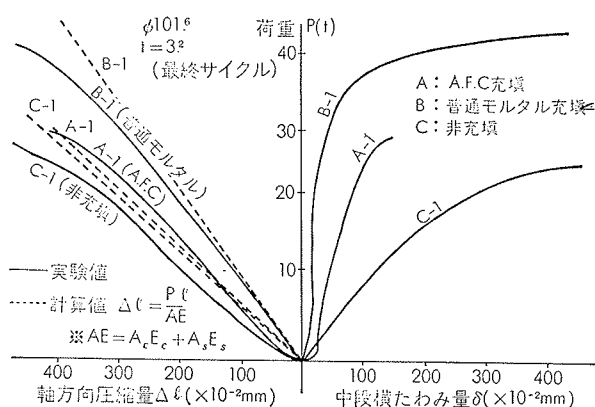
(1) 変形性状は、ピン支承のため初期時にいくらか偏心して、塑性曲げ圧縮座屈で破壊した。座屈時の横たわみ変形は、普通モルタル充填に比較して非充



写一 座屈後の変形状況

試験体	鋼管厚 (mm)	加力第1回	加力第2回	座屈荷重 (実験値)	座屈荷重の比率		座屈時の軸方向圧縮量			
					実験値	比率	実験値	比率		
A	A-1	3 ²	11.0 ⁽ⁱ⁾ 16.5 ⁽ⁱⁱ⁾	30.83 ⁽ⁱ⁾	1.097	1.097	4.565 ⁽ⁱ⁾	0.965	0.965	
F	A-2	4 ²	14.1	21.1	37.0	1.317	1.088	4.860	1.027	0.910
C	A-3	5 ⁷	18.3	27.4	69.9	2.488	1.099	6.155	1.301	1.082
普通モルタル	B-1	3 ²	—	20.4	42.1	1.498	1.498	4.920	1.040	1.040
	B-2	4 ²	16.4	24.6	47.6	1.694	1.400	4.897	1.035	0.917
	B-3	5 ⁷	20.2	30.4	70.0	2.491	1.100	5.057	1.069	0.889
非充填	C-1	3 ²	11.0	16.5	28.1	1	1	4.730	1	1
	C-2	4 ²	14.1	21.1	34.0	1.210	1	5.342	1.129	1
	C-3	5 ⁷	18.3	27.4	63.625	2.264	1	5.687	1.202	1

表一七 座屈荷重及び軸方向圧縮量とその比率



図一 荷重-変位量及び軸方向圧縮量

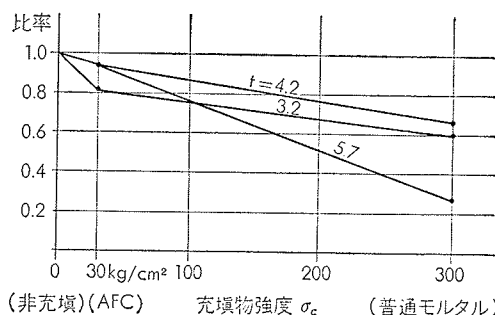
填, AFC 充填のものが大きく, 又薄肉鋼管程顕著にあらわれた。(図一1, 図一2 参照)

(2) 充填モルタルの強度と鋼管厚に関して, 薄肉鋼管 ($t=3.2, 4.2$) の場合, AFC 充填の歪みは非充填の歪みと大きな相違はないが, 同じ荷重に対し普通モルタルでは弾性域で30%の歪減少 (但し非充填の座屈荷重 $\frac{2}{3}$ の荷重点) があり充填物剛性の影響が大きい。(図一3 参照) 即ち図一2 に示したように軸方向圧縮量を非充填に対する比率で示すと, AFC 充填は $\mu = A_s/A_c$ には余り関係なく, 0.8~0.9と充填効果がないのに対し, 普通モルタル充填は0.3~0.6とその効果は大きい。厚肉鋼管 ($t=5.7$) では薄肉鋼管程はっきりと充填物による剛性効果はみられなかった。

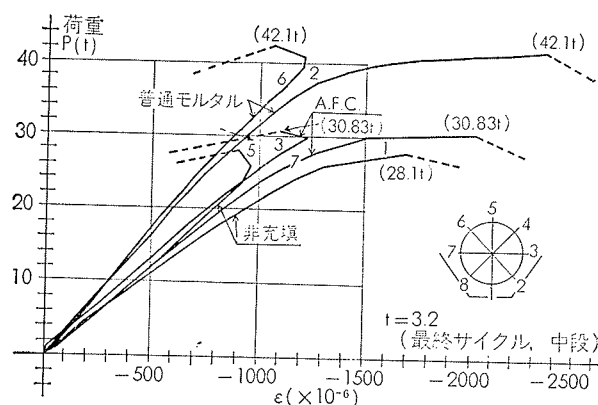
(3) 上中下段の歪みの相違はほとんどみられなかった。

4.3. 計算値

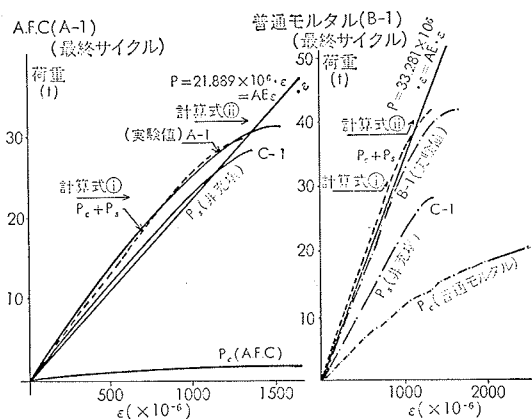
本実験のモルタル充填鋼管は短柱と長柱の間にあること (鋼管細長比 $\lambda_s = 86 \sim 88$) 及び複合材であるため, 完全弾性座屈でなく, わずかな偏心曲げ作用も加わり, 比例限度を越えた曲げ座屈であった。よって計算は弾性域の検討と座屈荷重について実験と対比して以下検討する。



図一2 軸方向圧縮量 (非充填鋼管に対する比率)



図一3 両面歪度と充填物の比較 (t=3.2)



図一4 P-ε 曲線 (AFC, 普通モルタル)

4.3.1. 弾性域の検討 鋼管コンクリート構造設計標準では, コンクリート充填鋼管の計算式が鉄骨鉄筋コンクリートにならって累加強さ式が適用出来るとされているのは, 鋼管外径の $\frac{1}{2}$ と板厚の比が80以下の場合となっている。本実験でもこの比は16~9であるが, 累加式の計算においてここで次の(i), (ii)の計算式を提案して比較した。

計算式(i) $P = P_s + P_c$

P_s : 非充填鋼管の実験結果の P-ε 曲線

P_c : 充填材の材料試験結果から得た P-ε 曲線
P- σ_c 曲線から $P_c = \sigma_c A_c$ を算出し, 各充填材の P_c -ε 曲線を作成する。

計算式(ii) $P = A_s \sigma_s + A_c \sigma_c = (A_s E_s + A_c E_c) \epsilon = A E \epsilon$

AE: 鋼管, モルタルの材料試験結果から得た弾性係数による。

計算式(i)の P_s は非充填鋼管の実験結果を使用したものであり, (ii)は鋼管, コンクリート共材料試験結果から得た弾性係数を用いており, (i), (ii)は性質の違うものであるが, 図-4に示すように弾性域では計算値(i)(ii)とも実験値とよく一致している。

4.3.2. 座屈荷重 完全弾性座屈でない複合部材の座屈計算のため, 次の4ケースについて計算し, 計算式の適応性を比較した。各計算値と実験値の比率を一覧表にしたのが表-9であり, これを図化し充填物強度との関係を示したのが図-9である。即ち座屈荷重の計算式を次の4ケースについて検討した。

(1) 提案式 ㉑ オイラーの公式を応用する

$$P_k = \frac{\pi^2 E_s I}{l^2} \quad E_s: \text{鋼管の弾性係数}$$

$$I = I_s + \frac{I_c}{n} \quad n = \frac{E_s}{E_c} (\text{弾性係数比})$$

(2) 提案式 ㉒ 鋼構造塑性設計規準による座屈荷重 $P_p = P_y \cdot F$ を応用したもので P_y, F は次式で求める。

$$P_p = P_y \cdot F$$

但し $P_y = A_{ss} \sigma_y + A_c \sigma_c$ σ_y : 鋼管の降伏点強度
 $F = 1 - 0.004(\lambda_s - 20)$ σ_c : モルタルの強度
 $20 < \lambda_s \leq 120$ λ_s : 鋼管細長比

(3) 提案式 ㉓ 鋼構造計算規準の単一材座屈荷重計算式(旧式)を応用したものである。

$$P_n = \frac{s \sigma_y \cdot A}{W} \quad A = A_s + \frac{A_c}{n} (\text{鋼管換算断面積})$$

$$W = \frac{1}{1 - 0.314 \left(\frac{\lambda_s}{100} \right)^2} \quad 30 \leq \lambda_s \leq 100$$

(4) 提案式 ㉔ 接線弾性係数論を応用して次式で $P_t = \sigma_{st} \cdot A_s + \sigma_{ct} \cdot A_c$ を求める。

接線弾性係数論による単一材の非弾性座屈荷重 $P_{cr} = \frac{\pi^2 E_t \cdot I}{l^2}$ (但し, $E_t = \frac{d\sigma}{d\epsilon}$) を直接求めることが出来ない
 ので, $\sigma_s = \frac{P_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 E_t}{\lambda_s^2}$ より $\lambda_s = \pi \sqrt{\frac{E_t}{\sigma_s}}$ の関係式を用いる。図-5に示すように材料試験結果の $\sigma-\epsilon$ 曲線から $\sigma-E_t$ 曲線を作図し, $\lambda_s = \pi \sqrt{\frac{E_t}{\sigma_s}}$ により $\sigma-\lambda$ 曲線
 を求め, 試験体の細長比に対する応力を座屈応力とする。本実験でも鋼管もモルタルにもそれぞれ材料

座屈応力	鋼管 σ_{st}	充填モルタル σ_{ct}	
		AFC	普通モルタル
$\phi 101.6 \times 3.2$	2600 kg/cm ²	21.0 kg/cm ²	185.0 kg/cm ²
4.2	2600	20.8	183.0
5.7	2700	20.6	180.0

表-8 座屈応力 σ_{st}, σ_{ct}

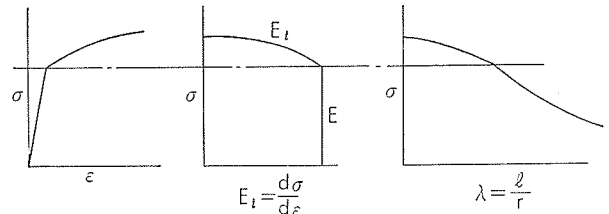


図-5

試験結果 $\sigma-\epsilon$ の曲線より, 座屈応力 σ_{st} (鋼管), σ_{ct} (モルタル) を求めると表-8のようになる。

4種類の座屈計算結果, 充填物強度, 細長比等が違っても実験値の近似値が得られるのは提案式㉑, ㉒の順である。ここで㉑, ㉒式の信頼性, 適応性を検討するため, 他のコンクリート充填鋼管の実験資料についても, 細長比 $30 \leq \lambda_s \leq 100$ の範囲でこの両提案式で計算したのが図-8である。

又両提案式の計算値と実験値を両対数目盛で表わし, 本実験及び他の実験資料について図示したのが図-6, 図-7である。このように両対数目盛で示すと, 実/計=0.8~1.2の範囲であれば㉑, ㉒式ともほとんど45°直線上にあることがわかる。以上の結果複合部材の非弾性座屈(但し $30 \leq \lambda_s \leq 100$)では提案式㉑が実験値とよく一致している。

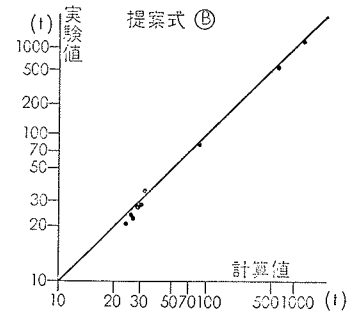


図-6

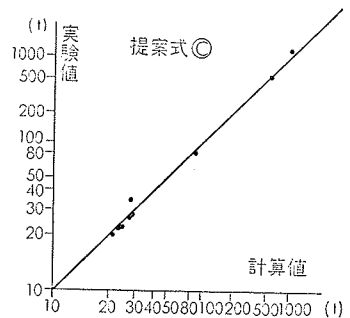


図-7

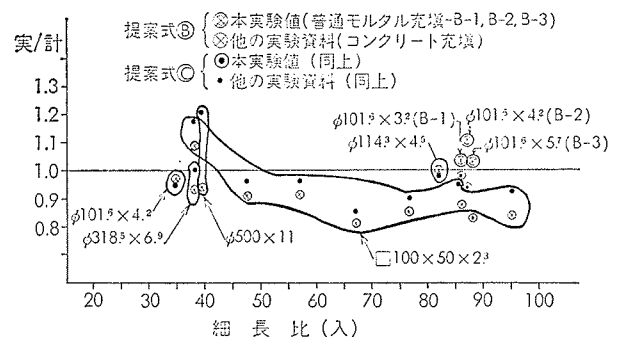


図-8 実/計-細長比の関係

供試体	$n = \frac{E_s}{E_c}$	$A = A_s + \frac{A_c}{n}$ (cm ²)	$I = I_s + \frac{I_c}{n}$ (cm ⁴)	座屈荷重 (実験値) (t)	提案式 ㉑		提案式 ㉒		提案式 ㉓		提案式 ㉔		
					計算値 P_k	実/計	計算値 P_p	実/計	計算値 P_n	実/計	計算値 P_i	実/計	
A	A-1	103.50	10.579	128.89	30.83	29.052 ^(t)	1.061	26.619 ^(t)	1.158	28.286 ^(t)	1.090	27.213 ^(t)	1.132
F	A-2	85.64	13.646	157.32	37.0	32.918	1.124	29.287	1.263	35.184	1.052	34.828	1.062
C	A-3	91.02	17.872	201.56	69.9	48.209	1.449	55.551	1.258	66.365	1.053	47.674	1.466
普通モルタル	B-1	11.50	16.078	155.00	42.1	44.155	0.953	40.361	1.043	42.990	0.979	38.880	1.082
	B-2	10.11	19.594	189.57	47.6	47.266	1.007	42.747	1.114	50.520	0.942	45.887	1.037
	B-3	11.64	22.656	225.86	70.0	61.114	1.145	67.630	1.035	84.130	0.832	57.854	1.209
非充填	C-1	—	9.892	120.00	28.1	27.166	1.034	25.366	1.108	26.449	1.062	25.719	1.092
	C-2	—	12.850	153.00	34.0	30.997	1.096	28.335	1.200	33.132	1.026	33.410	1.017
	C-3	—	17.170	198.00	63.625	46.315	1.373	54.609	1.165	63.758	0.998	46.359	1.372

表一 座屈荷重の実験値と計算値の比率一覧表

4.4. まとめ

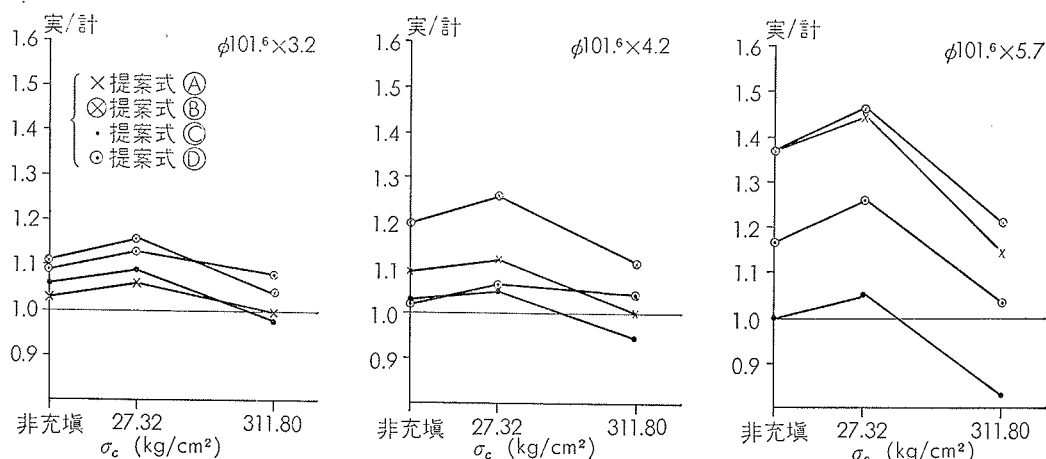
以上本実験結果と他の実験データ資料にもとづき、モルタル充填鋼管の座屈性状及び耐力について比較検討した結果、次のようなことがいえる。

(1) モルタル充填鋼管の中心軸圧縮曲げ座屈の計算

式は、鋼管の細長比 $30 \leq \lambda_s \leq 100$ の塑性座屈の場合、提案式㉓が最も妥当であるが、実/計=0.85~1.05 計算値が幾分大きくなる傾向にある。一方実/計=1.1~1.2 と計算値が逆に小さくなる提案式㉒と比較して、この2式から座屈荷重を推定すればよい。提案式㉑、㉔は鋼管断面のコンクリート断面に対する比率 $\mu = A_s/A_c$ が0.2以上になると計算値が実験値より小さくなり誤差が大きい。

(2) AFC 充填鋼管 (気泡性軽量低強度モルタル; $\sigma_{28} \approx 27 \text{ kg/cm}^2$) 及び普通モルタル充填鋼管 ($\sigma_{28} \approx 310 \text{ kg/cm}^2$) とも、弾性域では剛性累加式は成立するが、耐力については AFC 充填鋼管は剛性複合部材の効果はなく、非充填鋼管に対する耐力の比率は $\mu = A_s/A_c$ に関係なく一定であった。これに対し普通モルタル充填では μ の小さい3.2, 4.2mm厚鋼管では非充填に対し1.4~1.5倍の座屈耐力が増大したが5.7mm厚鋼管では1.1倍とほとんど変わらないことから、薄肉鋼管の方が効果的であるといえる。

(3) 軸方向圧縮量及び、部材横たわみについては、 $\mu = A_s/A_c$ よりも充填物強度の影響の方が大きいこと



図一 座屈荷重の実験値と計算値の比率と充填物強度との関係

がわかった。

(4) 以上複合部材としての望ましい性状、座屈耐力のためには、鋼管と充填物の強度及び断面のバランスがとれていることが大切である。概して $\mu = A_s/A_c$ が小さく、充填物強度が大きいのが理想的である。即ち軽量低強度モルタル充填鋼管 (AFC) は軽量ではあるが、適当な設計ではなく、仮設機材のためにも軽量高強度充填物とし薄肉鋼管とするのが理想的部材といえる。

(5) 中心軸方向座屈試験における両端完全ピン構造体は理想的モデルであり、これを再現することは困難である。この欠陥を取除くには上下端にナイフエッジを取付けたピン構造とするのがよいと思われる。

参考文献

- 1) 仲, 加藤, 阿部, 日建論報 S36, 10
- 2) 高橋, 山崎, 筒井, セメント技年報 S 47XXVI
- 3) 仲, 加藤, 青山, 佐藤, 日建関支発 S 40, 6
- 4) 「鋼管構造デザインマニュアル」土木編