

論文

[2165] 高強度材料を用いたコンクリート充てん角形鋼管柱の軸圧縮性状

林 信之^{*1}・田内敏昭^{*1}・福元敏之^{*1}・佐伯俊夫^{*2}

1. はじめに

コンクリート充てん形鋼管柱は、コンクリートによる鋼管局部座屈抑制と、鋼管によるコンクリート拘束効果の相互作用によって高耐力、高靱性が期待できる合理的、経済的な部材であることが知られている。これに高強度材料を用いた場合、部材断面積の縮小化が図られる。あるいは大スパン化への対応や超高層建物への適用も可能な柱部材になるものと考えられる。

従来強度の材料を用いたコンクリート充てん形鋼管柱については、『鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説』（以下SRC規準と略す）において累加強度方式による設計が認められている。しかし、高強度材料の場合には、鋼管の降伏ひずみとコンクリートの圧縮強度時のひずみ（以下それぞれ ϵ_y , ϵ_u と略す）レベルは従来強度のものに比べ著しく大きくなる。したがって、材料強度の組合せによっては、高張力鋼と普通強度のコンクリートを用いたSRC部材の実験で報告されたように、鋼管が降伏する以前にコンクリートが破壊し軸圧縮耐力が累加耐力に満たなくなる[1]。あるいは逆に ϵ_u が ϵ_y より著しく大きくなり鋼管の降伏比も高いため、コンクリートが圧縮強度に達する前に鋼管が座屈し、累加耐力に達しないということが懸念される。しかし、高強度材料を用いたコンクリート充てん形鋼管柱の軸圧縮実験に関しては、山口等の研究[2]などがあるがまだデータは少なく十分とは言えない。そこで、本論文は今後使用が見込まれる高強度材料（鋼管：50キロ鋼，60キロ鋼，80キロ鋼、充てんコンクリート圧縮強度：600，900，1200kgf/cm²）を組合せたコンクリート充てん角形鋼管柱（以下充てん形と略す）の、基礎的な力学的性状を調べることを目的として行った短柱軸圧縮実験結果をまとめ、耐力及び変形性状について検討を行ったものである。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は外径が□-200×200 L= 600mmの正方形溶接箱形断面の鋼管を用いた38体で、その概要を表-1および図-1に示す。実験要因は鋼管材質，コンクリート強度，鋼管幅厚比，鋼管の補強形式および充てんコンクリートの有無である。また高強度コンクリートにおいては、使用する骨材の種類によって剛性が変化し、 ϵ_u が大きく違うことが報告されている[3]。そこで、本実験では圧縮強度900kgf/cm²において、高弾性（EH）タイプおよび低弾性（ES）タイプのコンクリートを用い ϵ_u も変動させた。また、鋼管の幅厚比B/tは適用の対象を高層建物としているため、比較的小さいB/t=33~13の中で6水準とした。なお、試験体の製作にあたっては鋼管とコンクリートに同時に載荷するため、充てんコンクリート打設後上下端部を目荒らしし、無収縮性の高強度モルタルにてキャッピングして、鋼管端面と同一面となるよう平滑に仕上げた。

鋼管に使用した鋼材の機械的性質およびコンクリートの圧縮強度試験結果を表-2，表-3を示す。

*1 鹿島技術研究所 第三研究部第3研究室（正会員）

*2 鹿島技術研究所 第三研究部次長

表一 試験体一覧および主な実験結果

試験体名		諸 元				実験値				実験 経過 分類	計算値		実験値／計算値		
		鋼 管				コンクリ ート圧縮 強度 cσB kgf/cm ²	降 伏		最 大		SRC規準 aNu(sNy) tf	単純累加 NO tf	eNu aNu(sNy)	eNu NO	
		外径 B mm	板厚 t mm	B/t	幅厚比 一般化 α		荷重 eNy tf	ひずみ ε _y %	実験値 eNu tf						ひずみ ε _u %
充	C06SSL	200.6	5.86	34.2	1.53	524	320	0.190	400	0.365	A-1	350	378	1.14	1.06
	C09SSL	200.9	8.77	22.9	0.95	524	340	0.176	449	0.476	A-2	392	419	1.14	1.07
	C07H6L	200.7	6.99	28.7	1.35	524	360	0.195	438	0.410	A-1'	408	436	1.07	1.01
	C12H6L	200.9	12.13	16.6	0.86	524	625	0.243	710	0.488	A-4	661	686	1.07	1.04
	C06SSM	200.8	5.87	34.2	1.53	891	400	0.206	492	0.379	A-1	462	510	1.06	0.97
	C06SSMEH	200.6	5.87	34.2	1.52	801	440	0.216	490	0.297	A-2	434	477	1.13	1.03
	C06SSMES	200.6	5.88	34.1	1.52	898	420	0.296	510	0.457	A-1	464	512	1.10	1.00
	C09SSM	201.0	8.77	22.9	0.95	891	475	0.227	537	0.515	A-2	498	543	1.08	0.99
	C06SSMT1	200.7	5.89	34.1	1.52	891	400	0.261	495	0.537	A-2	462	510	1.07	0.97
て	C06SSMT2	200.7	5.87	34.2	1.53	891	475	0.244	560	0.404	A-3	539	557	1.04	1.01
	C06SSMT3	200.8	5.88	34.2	1.52	891	474	0.257	540	0.390	A-3	503	535	1.07	1.01
	C07H6M	200.6	6.99	28.7	1.35	892	475	0.267	539	0.404	A-1'	517	563	1.04	0.96
	C07H6MES	200.6	6.99	28.7	1.35	898	475	0.294	550	0.405	A-1'	519	565	1.06	0.97
	C12H6M	200.8	12.13	16.6	0.86	892	675	0.241	782	0.489	A-4	758	800	1.03	0.98
	C08H8M	201.2	8.13	24.8	1.54	892	725	0.351	769	0.446	B-1'	769	814	1.00	0.94
	C16H8M	200.4	16.08	12.5	0.77	892	1125	0.354	1250	0.651	A-4	1175	1213	1.06	1.03
	C06SSH	200.4	5.87	34.1	1.52	1153	540	0.379	600	0.471	A-2	540	601	1.11	1.00
	C09SSH	200.4	8.77	22.9	0.95	1153	500	0.251	632	0.454	A-1	570	628	1.11	1.01
ん	C16SSH	200.4	15.54	12.9	0.54	1153	625	0.250	790	0.474	A-2	711	760	1.11	1.04
	C06SHT1	200.6	5.87	34.2	1.52	1153	580	0.395	610	0.453	A-2	541	602	1.13	1.01
	C06SHT2	200.7	6.91	29.0	1.30	1153	600	0.300	660	0.450	A-3	638	668	1.03	0.99
	C06SHT3	200.7	5.90	34.0	1.52	1153	580	0.342	640	0.436	A-3	580	626	1.10	1.02
	C07H6H	200.5	6.98	28.7	1.35	1150	620	0.392	649	0.463	A-2'	592	652	1.10	0.99
	C09H6H	200.9	9.06	22.2	1.15	1150	675	0.309	750	0.406	A-2	720	778	1.04	0.96
	C12H6H	200.9	12.18	16.5	0.86	1150	750	0.288	875	0.436	A-3	829	883	1.06	0.99
	C16H6H	200.4	15.87	12.6	0.61	1150	775	0.289	920	0.506	A-4	846	895	1.09	1.03
	C08H8H	201.6	8.15	24.7	1.54	1226	875	0.388	898	0.443	B-1'	869	932	1.03	0.96
形	C12H8H	200.7	12.02	16.7	1.04	1226	1050	0.351	1104	0.503	A-3	1067	1125	1.03	0.98
	C16H8H	199.4	16.07	12.4	0.77	1226	1200	0.377	1293	0.577	A-4	1246	1298	1.04	1.00
	V06S5	200.5	5.89	34.0	1.52		150	0.182	170	0.274		192		0.89	
	V09S5	200.8	8.77	22.9	0.95		200	0.174	250	0.334		243		1.03	
	V16S5	200.4	15.23	13.2	0.56		330	0.146	(540)	(2.926)		422		(1.28)	
	V09H6	200.9	9.03	22.3	1.16		340	0.251	397	1.024		392		1.01	
	V12H6	201.0	12.23	16.4	0.86		450	0.234	592	2.906		526		1.12	
	V16H6	200.5	15.91	12.6	0.61		475	0.208	(707)	(3.242)		570		(1.24)	
	V08H8	201.0	8.17	24.6	1.53		475	0.383	492	0.545		511		0.96	
V12H8	200.5	12.10	16.6	1.03	675		0.363	762	1.746	746		1.02			
V16H8	200.5	16.10	12.5	0.77	900		0.388	(1073)	(3.200)	962		(1.12)			

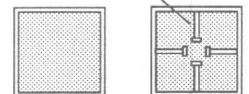
$\alpha = (B/t) \times \sqrt{s\sigma_y / sE}$ $s\sigma_y$: 鋼管の降伏点 $sE = 2100 \text{ tf/cm}^2$
 eNy, ϵ_y : 接線剛性が初期剛性の $1/3$ となった荷重およびひずみ
 aNu : SRC規準の終局耐力 $aNu = sA \times s\sigma_y + 0.85 \times cA \times c\sigma_B$
 sA : 鋼管断面積 $s\sigma_y$: 鋼管降伏点
 cA : コンクリート断面積
 $c\sigma_B$: コンクリート圧縮強度
 ただし中空形は降伏耐力 $sNy (= sA \times s\sigma_y)$ を用いた。

NO : 単純累加耐力 $NO = sA \times s\sigma_y + cA \times c\sigma_B$
 実験経過分類の記号は本文 3. 1 (1) による。
 ただし末尾は溶接部が破断したことを示す。

試験体名 C06SSMT1

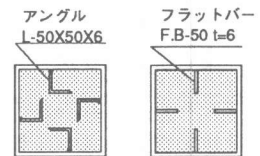
コンクリート充てんの有無 C: 充てん V: 中空
 板厚(mm)
 鋼管材質 S5: SM490 H6: SM570 H8: HT780
 コンクリート強度 L: 600 M: 900 H: 1200 (kgf/cm²)
 鋼管補強タイプ T1: TYPE-1 T2: TYPE-2 T3: TYPE-3
 (図一参照)
 コンクリート弾性種別 EH: 高弾性 ES: 低弾性

スタッドボルト
9φ l=60 @100



(a) 無補強タイプ

(b) Type-1



(c) Type-2

(d) Type-3

図一 試験体の断面形状

表二 鋼材の機械的性質

材質	板厚 t mm	降伏点 $s\sigma_y$ tf/cm ²	引張強度 $s\sigma_t$ tf/cm ²	伸び %	降伏比 $s\sigma_y/s\sigma_t$ %	降伏ひずみ ϵ_y %
SM490	5.86	4.18	5.80	22	72	0.199
	8.77	3.60	5.36	27	67	0.171
	15.54	3.74	5.51	27	68	0.178
SM570	6.99	4.67	6.54	18	71	0.222
	9.06	5.66	6.93	19	82	0.270
	12.18	5.70	6.89	19	83	0.271
	15.87	4.85	6.30	21	77	0.231
	8.15	8.11	8.62	12	94	0.386
HT780	12.02	8.18	8.60	12	95	0.390
	16.07	8.10	8.68	14	93	0.386

表三 コンクリートの圧縮強度試験結果

強度種別	圧縮強度 $c\sigma_B$ kgf/cm ²	弾性係数 cE tf/cm ²	弾性 ポアソン比 ν	圧縮強度時の ひずみ $c\epsilon_u$ %	備考
600	524	324	—	0.266	
900-1	891	376	0.21	0.306	バッチの違い
900-2	892	371	0.19	0.317	による
900ES	898	339	0.21	0.361	低弾性タイプ
900EH	901	525	0.19	0.210	高弾性タイプ
1200-1	1153	389	0.22	0.338	バッチの違い
1200-2	1150	371	0.21	0.396	による
1200-3	1226	389	0.20	0.359	

2. 2 加力方法および測定方法

加力方法および測定方法の概要を図-2に示す。加力は2000t油圧式試験機を用い、軸力を試験体上下に設置した載荷板を介してコンクリートと鋼管に同時に加え、平押し状態で単調加力を行った。

測定は荷重、軸変形および鋼管のひずみの主要点について行った。軸変形の測定には試験体周りの4箇所に電気式変位計を配置し、これらの測定値の平均を軸方向変形とし、これを加力前の試験体長さ L で除した値を軸方向ひずみ ϵ とした。

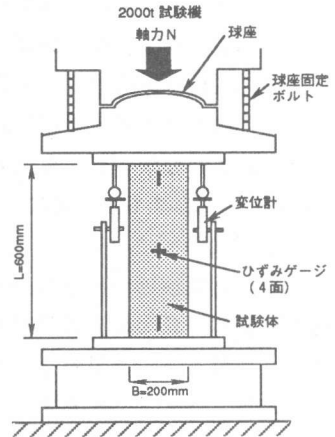


図-2 加力、測定方法の概要

3. 実験結果

3. 1 実験経過および破壊性状

(1) 中空試験体

中空試験体の荷重-軸ひずみ関係を、 B/t を降伏応力度で無次元化した一般化幅厚比($\alpha = (B/t) \times \sqrt{(s\sigma_y/sE)}$)毎に比較して図-3に示す。図の縦軸は降伏荷重計算値(sN_y)で無次元化している。このように中空試験体ではいずれの材質でも、 $\alpha \geq 1.52$ の試験体では降伏ひずみに達する直前に座屈が生じて荷重が低下し、また $1.16 \geq \alpha \geq 0.86$ の試験体は降伏後に荷重の上昇が見られた後、座屈が生じ荷重が低下した。一方 $\alpha \leq 0.77$ の試験体では軸方向ひずみが3%に至っても座屈は生じず荷重は上昇傾向にあった。板厚、材料強度の関係で各材質間で α が完全に一致していないので性状に差が見られるが、 α がほぼ同じ試験体ではHT780, SM570もSM490と同様な性状を示している。これは木村等による高張力中空鋼管実験(文献[4])結果と一致しており、高張力鋼を用いた角形鋼管柱の変形性状は α で評価できることが本データからも推測される。

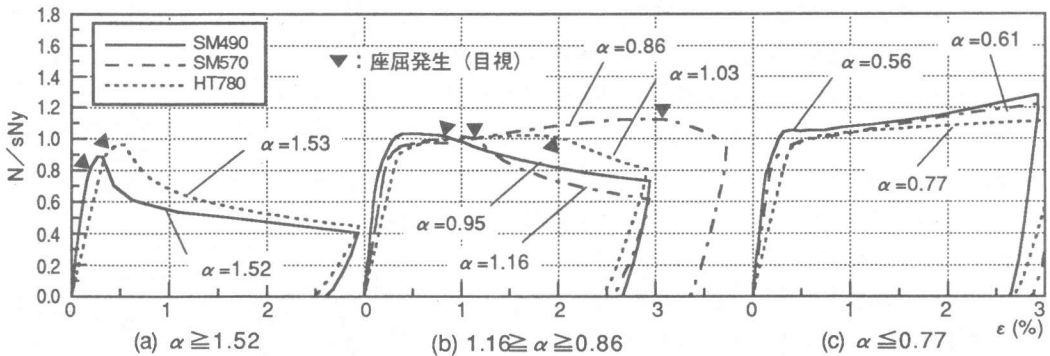


図-3 中空形試験体の荷重-軸ひずみ関係

(2) 充てん形試験体

充てん形の試験体の実験経過は、最大耐力前後で以下のタイプに分類される。

(a) 最大耐力前

A. 鋼管降伏先行型：鋼管降伏までは線形挙動を示し、鋼管降伏後剛性を徐々に低下させ最大耐力に至る。

B. 鋼管局部座屈発生先行型：線形挙動を示すが鋼管が降伏する前に鋼管が座屈し、剛性が急激に低下し、直後に最大耐力に至る。

(b) 最大耐力後

1. 最大耐力近傍で鋼管が座屈し、荷重が急激に低下してその後も徐々に下降する。
2. 最大耐力近傍で鋼管が座屈、荷重が急激に低下しするが、その後荷重が安定する。
3. 鋼管は座屈しないが最大耐力直後に急激な荷重低下が見られ、その後荷重が安定する
4. 鋼管は座屈せずほぼ最大耐力レベルの荷重で安定する。

上記により分類される各試験体の実験経過を表-1に示す。全試験体の中で局部座屈発生が先行(Bタイプ)したものはHT780 $t=8\text{mm}$ の鋼管($\sigma_y=0.386\%$)と、 $900, 1200\text{kgf/cm}^2$ ($\sigma_y=0.317, 0.356\%$)のコンクリートを組合せたC08H8M, C08H8Hのみであり、同種の組合せでも鋼管幅厚比の小さい試験体では鋼管の降伏が先行する結果となった。鋼管の座屈は $\alpha \geq 0.95$ の全ての無補強試験体で最大耐力近傍で目視観察されたが、 $\alpha \leq 0.86$ の試験体では生じなかった。また補強した鋼管を用いた試験体については、スタッドボルト補強はボルト間で座屈したが、アングルおよびフラットバーで補強したものは座屈は生じなかった。なお、鋼管がSM570, HT780で板厚がそれぞれ $t=7\text{mm}, 8\text{mm}$ の試験体は、座屈により凸型に膨らんだ境界部のかど溶接が、軸ひずみ3%に達する前に破断したため、そこで加力を中止した。

3. 2 充てん形試験体の荷重-軸ひずみ ($N-\epsilon$) 関係に及ぼす各実験要因の影響

荷重 N あるいは荷重を累加耐力計算値で無次元化した N/N_0 と軸ひずみ ϵ 関係を実験要因別に比較した代表例を図-4～図-8に示す。これらの図から判断される各実験要因の N (または N/N_0) - ϵ 関係に及ぼす影響は最大耐力以降の変形状に顕著に現われる。そこで最大耐力以降の荷重-ひずみ関係に着目して各実験要因の影響について以下に示す。

(1) コンクリート強度の影響 (図-4 参照)

最大耐力直後の荷重低下はコンクリート強度が高いほど大きく、その後に安定する荷重レベルはコンクリート強度に係わりなくほぼ同一である。

(2) 鋼管材質の影響 (図-5 参照)

鋼管にHT780, SM570といった高張力鋼を使用した試験体の $N/N_0-\epsilon$ 関係は同じ B/t の SM490 の試験体とはほぼ同じ性状を示した。したがって鋼管材質の違う充てん形試験体の $N/N_0-\epsilon$ 関係は B/t で評価できることになり、3. 1 (1) で示した中空形試験体の α で評価されるのと異なる傾向を示している。

(3) 鋼管幅厚比の影響 (図-6 参照)

幅厚比が小さいくなるほど最大耐力以後の荷重低下が小さく、靱性が改善される。

(4) 鋼管補強の影響 (図-7 参照)

補強した鋼管を使用した試験体ではいずれも最大耐力まではほぼ同一の性状を示すが、補強することにより荷重低下が小さくなり、その効果はスタッドボルト、フラットバー、アングル補強の順に大きい。

(5) コンクリート圧縮強度時のひずみレベルの違い (図-8 参照)

圧縮強度 900kgf/cm^2 のコンクリートで、剛性を変えた高弾性 (EH)、標準弾性、低弾性 (ES) の σ_y は、圧縮強度試験の結果それぞれ0.21, 0.31, 3.61%でありEHとESで

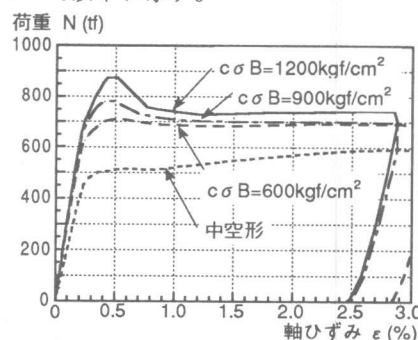


図-4 コンクリート強度の影響
(SM570, $B/t=17$)

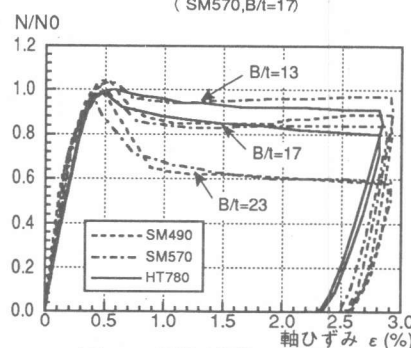


図-5 鋼管材質の影響
($c\sigma B=1200\text{kgf/cm}^2$)

1.5%もの変動幅を与えることができた(表-3 参照)。

図-8にこれらのコンクリートとSM490($s \epsilon_y = 0.199\%$)の鋼管を組合せた試験体の $N/N_0 - \epsilon$ 関係を比較して示す。試験体の最大耐力時のひずみ ϵ_u はコンクリートの $c \epsilon_u$ に応じた差が見られ、その後の $N/N_0 - \epsilon$ 関係は ϵ_u が大きいほど荷重が徐々に低下する傾向を示している。

3. 3 充てん形試験体の耐力

(1) 最大耐力実験値と計算値の比較

表-1に最大耐力実験値と単純累加による計算値を比較して示した。実験値と計算値はほぼ一致し、またSRC規準の終局強度計算値は安全側の評価となった。このように本実験結果の範囲では、コンファインド効果によるコンクリートの耐力上昇や、鋼管の $s \epsilon_y$ とコンクリートの $c \epsilon_u$ レベルの違いによるコンクリートの早期破壊、および鋼管の早期座屈による極端な耐力の減少もなかった。コンファインド効果によるコンクリートの耐力上昇がないのは、文献[5]に示されているように、角形鋼管ではコンクリートへの拘束圧は鋼管の面外抵抗によるため拘束効果が小さい。さらに鋼管のポアソン比(弾性域: $\nu=0.3$, 塑性域 $\nu=0.5$ 程度)が、コンクリートのポアソン比(圧縮強度試験結果によると、本実験で用いた 1200 kgf/cm^2 の場合でもコンクリートの圧縮強度直前までのポアソン比は $\nu=0.2 \sim 0.3$ であった)より大きく、コンクリートが圧縮強度に達するまでは、鋼管の横方向の伸びが充てんコンクリートの膨張を上回るため、拘束力が発生しないことに起因しているものと思われる。ただし、試験体の最大耐力時のひずみ ϵ_u は $0.37 \sim 0.65\%$ となっており、いずれも

使用したコンクリートの圧縮強度試験結果から得られた $c \epsilon_u$ を大きく上回っている(表-1および表-2 参照)。このことから、鋼管によりコンクリートの脆性的な破壊は緩和され靱性が向上していること、また鋼管は充てんコンクリートによって局部座屈が拘束され、高張力鋼を用いた場合にも、軸力に対しては十分な塑性変形能力が確保されることが分かる。ただし、鋼管の局部座屈発生が先行したC08H8M,C08H8Hでは実験値がやや低めの値となっているので、これらの組合せについては幅厚比を小さくする必要があると思われる。

(2) 荷重低下率 β に関する考察

実験では最大耐力直後に荷重が急激に低下し、その後荷重が一定値に安定する性状を示したものが多く見られた。この最大耐力後の荷重低下を定量的に把握することは靱性を評価す

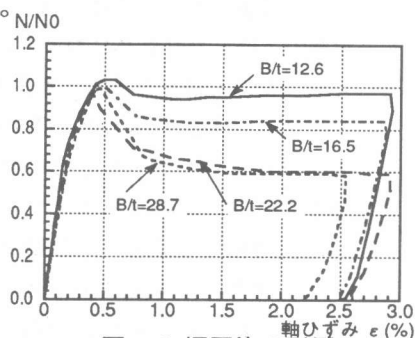


図-6 幅厚比の影響
(SM570, $c \sigma B=1200 \text{ kgf/cm}^2$)

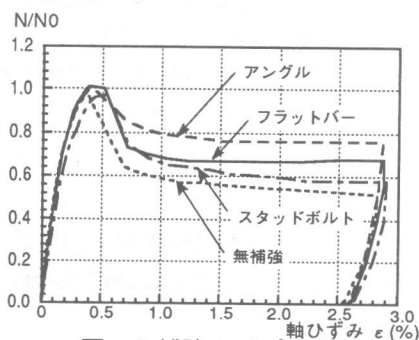


図-7 補強タイプの比較
(SM490, $c \sigma B=900 \text{ kgf/cm}^2$)

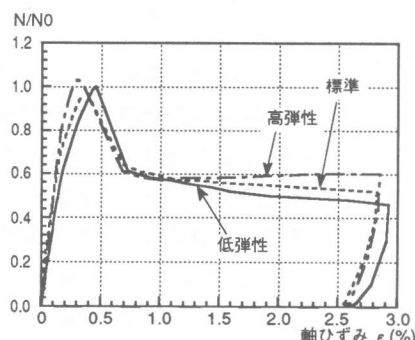


図-8 コンクリート剛性の影響
(SM490, $B/t=34$, $c \sigma B=900 \text{ kgf/cm}^2$)

る上で重要である。そこで低下後に最小となった荷重 N_{min} （ただし、荷重低下後も徐々に荷重が下降した試験体については、軸方向ひずみが1.5%時の荷重を N_{min} とした）を最大耐力 cN で除した値を荷重低下率 β と定義し、無補強試験体の β について定量的評価を試みた。

3. 2 (1) で示したように最大耐力以降の荷重低下はコンクリート強度と幅厚比に影響を受け、1.2鋼管の材質には影響されない。したがってコンクリート強度と幅厚比の2要因を評価するため充てんコンクリートの最大耐力 cN （ $=c\sigma B\times cA$ c ：充てんコンクリートの断面積）を累加耐力 N_0 で除した値 cN/N_0 を用いた [6]。

このようにして得られた無補強試験体の β — cN/N_0 関係を図-9に示す。

β と cN/N_0 間には線形関係が成り立っていることが分かる。そこで回帰分析によりコンクリート充てん形鋼管柱の荷重低下率 β について実験式(1)を得た。

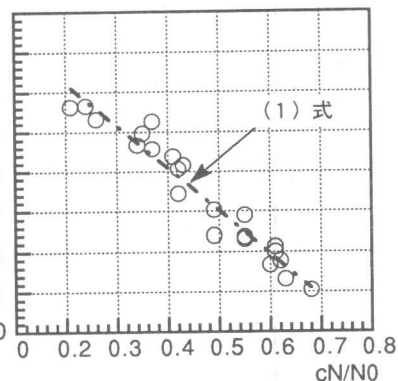


図-9 β — cN/N_0 関係

$$\beta = 1.23 - 1.065 \times (cN/N_0) \quad (\text{相関係数} = 0.97) \quad (1)$$

$$(0.21 \leq cN/N_0 \leq 0.68)$$

4. まとめ

高強度材料を用いたコンクリート充てん角形鋼管柱の軸圧縮実験を行った結果、得られた主な成果を以下に示す。

- (1) 高強度材料を用いたコンクリート充てん角形鋼管柱の軸圧縮耐力は、本実験で採用した材料の組合せの範囲では単純累加による計算値とほぼ一致した。
- (2) 高張力鋼を使用したコンクリート充てん角形鋼管柱の荷重—軸ひずみ性状は幅厚比が同じSM490材のものとほぼ同等であった。
- (3) 最大耐力以降の荷重低下はコンクリート強度および鋼管幅厚比に影響され、荷重低下率 β は cN/N_0 と線形関係にあり実験式(1)が得られた。

最後に計画段階から実験実施に至るまで数々のご助言を頂きました東京大学の秋山教授、山田助手、また本実験に使用した鋼管材料を支給して頂いた新日本製鐵(株)会社の関係各位に対し深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 若林實：「高張力鋼を用いたSRC構造」コンクリート工学 vol28, No11, pp.6-13, 1990.11
- [2] 山口育雄ほか：「充てん型鋼管コンクリート短柱の中心圧縮性状」日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.1353-1356, 1988.10
- [3] 友澤史紀・野口貴文・小野山貫造：「高強度コンクリートの応力ひずみ曲線に及ぼす粗骨材の影響」セメント・コンクリート論文集, NO45, pp.210-215, 1991
- [4] 木村衛・太田彦彦・樫村俊也：「充てん型鋼管コンクリート短柱圧縮性状」日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.1351-1352, 1988.10
- [5] 富井政英・崎野健治：「充てんコンクリート鋼管構造に関する研究の現状 その1. 部材の弾塑性性状」コンクリート工学 vol13, No2, pp.26-52, 1975.2
- [6] 遠藤創・辻文三・中島正愛他：「コンクリート充填鋼管短柱の軸圧縮挙動」日本建築学会近畿支部研究報告集 pp.125-128, 1992