

鉄筋コンクリート充填円形鋼管の耐力評価式に関する研究

Study on Strength of Reinforced Concrete Filled Circular Steel Tubular Structure

魏 華*, 岩崎 正二**, 長谷川 明***, 塩井 幸武****, 宮本 裕*****

Wei Hua, Iwasaki Shoji, Hasegawa Akira, Shioi Yukitake, Miyamoto Yutaka

*	工修	岩手大学大学院	中国瀋陽工業大学	(〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5)
**	工博	岩手大学助教授	工学部建設環境工学科	(〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5)
***	工博	八戸工業大学教授	土木工学科	(〒031-8501 八戸市妙字大開 88-1)
****	工博	八戸工業大学教授	構造工学研究所	(〒031-8501 八戸市妙字大開 88-1)
*****	工博	岩手大学教授	工学部建設環境工学科	(〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5)

Concrete filled steel tubular structures (CFT) adopted in civil engineering works are increasing, especially in large scale of works because of high strength, deformation, toughness and so on. On the other hand, as a kind of strengthen measure for seriously damaged reinforced concrete piers of viaduct in Hanshin-Awaji earthquake of Japan in 1995, reinforced concrete piers were wrapped with steel plate. Then, a new kind of structure appeared, that is, reinforced concrete filled steel tubular structures (RCFT). In this paper, based on experimental study, study of strength of reinforced concrete filled steel tubular column and beam are carried out. Evaluation formula for column and beam are proposed and tested by experimental data and existed recommendations. As a result, the proposed evaluation formula can evaluate the strength of RCFT properly. Parameters of experiments are strength of concrete and steel, width-thickness ratio and steel tube with or without rib, and bar arrangement.

Key Words : reinforced concrete filled steel tubular structure, strength, evaluation formula

キーワード：鉄筋コンクリート充填円形鋼管，耐力，評価公式

1. はじめに

近年、土木・建築の分野で、コンクリート充填鋼管(CFT)柱が合成構造として広範に用いられるようになってきている。CFT 柱に関する既往の研究は、今まで多数の論文が発表されている^{1)~7)}。それらの研究によると、コンクリート充填鋼管柱は、鋼管と充填コンクリートの複合効果によって、耐力、靱性および剛性が大幅に改善できることが明らかにされている。また、コンクリート充填鋼管柱の施工では、コンクリート型枠が不必要であることから、狭い現場での建て込みが容易にでき、省力化、工期短縮など優れた施工性も有している。しかし、柱の軸圧縮実験では終局時に充填コンクリートのせん断破壊現象が見られた⁸⁾。

阪神・淡路大震災で多くの鉄筋コンクリート橋脚や柱、鋼製橋脚などが大きな被害を受け、その多くがコンクリートのせん断破壊と鋼管の局部座屈によるものであった⁹⁾。このため、震災後、鉄筋コンクリート橋脚・柱の側面を鋼板で巻き、注入材で固めた一種の鉄筋コンクリート充填鋼板構造とする耐震補強が実施された¹⁰⁾。また、既設の鋼製橋脚に対して RC を充填する耐震補強も行われた。これらの補強構造物は、見方を変えたと一種の鉄筋コンクリート充填鋼管(RCFT)構造と見なすことが可能である。

前川等¹¹⁾は、落石防止柵の支柱にコンクリート充填鋼管を用

いるために、PC 鋼棒で補強したコンクリート充填鋼管を考え、静的曲げ試験を行い曲げ耐力について検討している。

一方、今後の大型構造物や長大構造物の建設と過密化した都市空間の有効利用を考えると、さらに断面の小さな部材の設計を可能とする構造が必要とされる。

そこで、本論文では、鉄筋コンクリートを円形鋼管に充填させた鉄筋コンクリート充填円形鋼管柱を検討の対象とした。これまで行われた著者等の鉄筋コンクリート充填円形鋼管柱の圧縮試験^{12),13)}や梁の純曲げ試験¹⁴⁾によると、充填コンクリートに鉄筋を挿入することによって、充填コンクリートのせん断耐力等が増し、終局時まで充填コンクリートにせん断破壊が発生しないことが分かっている。さらに、リブを有する円形鋼管を使用すると鋼とコンクリートの一体化が促進され、終局時まで両者が一体となって挙動する。それらの結果、鉄筋コンクリート充填円形鋼管はコンクリート充填円形鋼管に比較して、強度、剛性および靱性が改善され、特に荷重-変位曲線(圧縮試験)、モーメント-曲率曲線(曲げ試験)のそれぞれのピーク後の耐力、靱性が大幅に向上すると考えられる。

本論文では、鉄筋コンクリート充填鋼管柱、梁(RCFT)を対象として行った圧縮試験と純曲げ試験の概要と試験結果を述べる

とともに、これらの試験結果に基づき柱の軸圧縮耐力と梁の曲げ耐力を算出できる計算式を提案し、既往の計算式や実験結果と比較し、その妥当性を検討した。

2. 圧縮試験概要

2.1 試験体と材料特性

圧縮試験に用いる柱試験体寸法と試験体の一覧をそれぞれ図-1と表-1に示す。

表中のA試験では、リブ有り鋼管(直径:200mm、高さ:400mm)とリブ無し鋼管(直径:217mm、高さ:400mm)を使って、中空鋼管と無筋コンクリート充填鋼管試験体をそれぞれ2体、合計8体作製した。また、後述の単純累加強度を求めるためにCFT柱の充填部分と同様な材料、寸法のコンクリート試験体3体についても同様な試験を行った。

CFT柱試験体に用いられたコンクリートの材料特性を表-2に示す。コンクリートの28日圧縮強度は27.4N/mm²であった。鋼管はSTK400を用い、板厚は6mmで、降伏強度と最大強度はそれぞれ354.3N/mm²、451.8N/mm²であった。リブ断面はほぼ台形で、写真-1リブの形状鋼管取り付け側(下底)が7mm、上側(上底)が3mm、高さが4mmであり、取り付けピッチは40mmである。リブの形状を写真-1に示す。

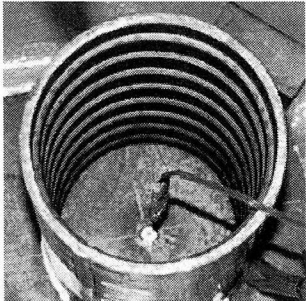


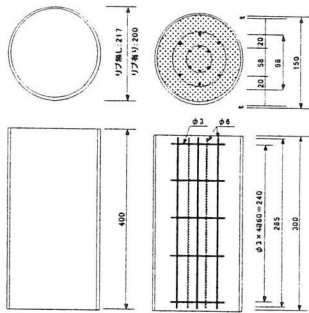
写真-1 リブの形状

B試験では、柱試験体は充填状況により中空、普通コンクリート、かぶりの大きいRC(鉄筋コンクリート)、かぶりの小さいRC、二重配筋RCの5種類10体を、それぞれリブ無し鋼管使用タイプとリブ有り鋼管使用タイプの2種類作成し、計20体について試験を行った。また、後述の単純累加強度を求めるためにRCFT柱、CFT柱の充填部分と同様な寸法、配筋にしたRC試験体12体についても同様の試験を行った。柱試験体に用いられた鋼管はA試験と同様のものである。コンクリートの材料特性は圧縮強度が異なるほかは、A試験とほぼ同様である。コンクリートの圧縮強度は21.6N/mm²であった。B試験体の寸法は外径150mm、高さ300mm、板厚6mmである。リブ断面は、ほぼ台形で、鋼管取り付け側(下底)が7mm、上側(上底)が3mm、高さは4mmであり、取り付けピッチは36mmである。鉄筋はSR295のφ6、φ3を、それぞれ軸方向鉄筋とフープ筋として使用した。

2.2 試験状況と測定項目

圧縮試験は図-2に示すような1軸圧縮試験を行った。荷重方法は荷重制御方式で、荷重速度を5.88kN/sec(0.6tf/sec)、荷重ステップは図-3のように荷重増分を196kN(20tf)とし、1176kN(120tf)より3回の繰返し荷重を行った。図-4は、図-3の荷重ステップに従って得られたRCFTの荷重-変位曲線の一

例である。測定項目は柱試験体上端部の変位4点、鋼管表面のひずみ12点、充填コンクリートのひずみ1点である。ひずみゲージ位置の詳細は図-5に示すとおりである。最大荷重到達後、試験体の耐力が80%を下回るか、変位が40mmを示したときに試験を終了した。



A試験体 B試験体
図-1 柱試験体寸法

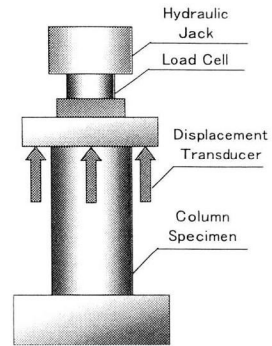


図-2 試験装置

表-1 柱試験体一覧表

		中空鋼管	CFT	かぶり小のRCFT	かぶり大のRCFT	二重配筋のRCFT
試験体種類						
A試験	リブ無し	SN1(SN2)	SN3(SN4)			
	リブ有り	SH1(SH2)	SH3(SH4)			
B試験	リブ無し	SNC201	SNC203	SNC205	SNC207	SNC209
		SNC202	SNC204	SNC206	SNC208	SNC210
	リブ有り	SHC201	SHC203	SHC205	SHC207	SHC209
		SHC202	SHC204	SHC206	SHC208	SHC210

表-2 コンクリートの材料特性

粗骨材最大寸法(mm)	スランプ(cm)	空気量(%)	水セメント比(%)	細骨材率(%)
15	11.2	7.1	61	47.0

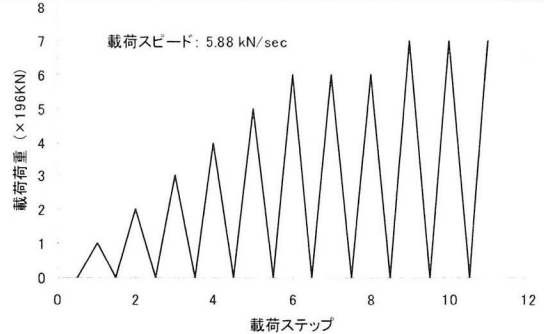


図-3 荷重履歴

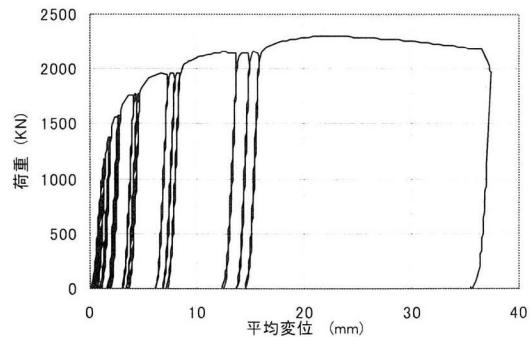


図-4 SHC210 荷重-変位関係

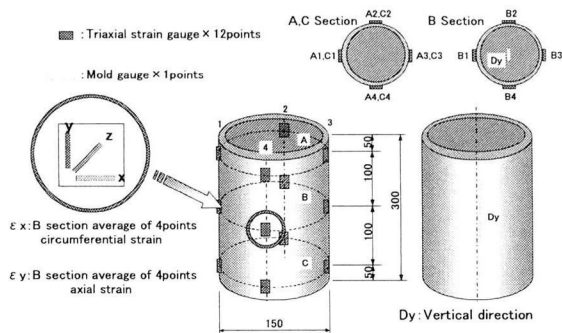


図-5 柱試験体のゲージ位置の詳細

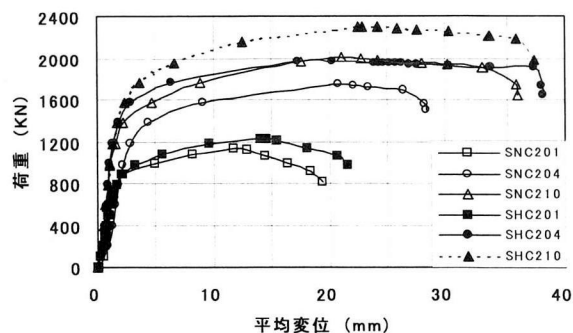


図-6 荷重-変位包絡線

2.3 圧縮試験結果

表-3 に各試験体の最大圧縮耐力、合成効果及び靱性率等を示す。表中の単純累加強度とは、中空鋼管の最大圧縮耐力とコンクリート試験体(それぞれの配筋を有する RC 試験体)の最大圧縮耐力を単純に加えたものであり、試験体種類により異なる値となる。合成効果とは、各試験体の最大圧縮耐力 N_u を単純累加強度 N_0 で割った値である。また、靱性率は、最大圧縮耐力時の変位 δ_p を降伏時の変位 δ_y で除したものである。 δ_y は、荷重-変位曲線の最初の折れ曲がり点の変位とした。表-3 から RCFT 柱は従来の CFT 柱と比べて、最大圧縮耐力、合成効果ともに上回ることが分かった。特に二重配筋の RCFT 柱がリブ無し、リブ有り両タイプで最も良い性能を示した。即ち、最大圧縮耐力の平均値はそれぞれ 1961kN、2224kN、合成効果はそれぞれ 1.26、1.34 になった。これらは充填材としてコンクリートを用いるより、RC を使用する方が部材の一体化が促進されることを示している。また、かぶりの小さい RCFT 柱が、かぶりの大きい RCFT 柱より最大圧縮耐力が大きいのは、鉄筋に囲まれているコアコンクリートの領域が大きいためと考えられる。

変形性能に関しては、表-3 より二重配筋の RCFT 柱がリブ無し、リブ有り両タイプの鋼管で最も大きい靱性率を示した。リブ有り鋼管タイプはリブ無し鋼管タイプより靱性率が大きくなった。その平均値はそれぞれ 8.6 と 6.9 であった。

代表的な試験体の荷重-変位包絡線を図-6 に示す。図-6 より

り RCFT 試験体の圧縮耐力、変形性能が中空鋼管、CFT 試験体より優れていることが分かった。また、普通鋼管にリブをつけると、圧縮耐力が大きくなることが分かった。

図-7 のグラフは縦軸に RCFT 柱及び CFT 柱の充填コンクリートと鋼管の軸方向ひずみ比 ($\varepsilon_c / \varepsilon_y$) を、横軸に最大荷重で無次元化した荷重 (P/P_{max}) を表したものである。 ε_c 、 ε_y はそれぞれコンクリートと鋼管の軸方向ひずみを表す(図-5 参照)。リブ無し鋼管を用いた RCFT 及び CFT について見てみると(図-7(a))、荷重初期段階では両者のひずみの間にずれが生じており、ひずみ比は 1.5~3.0 を示している。その後荷重が大きくなるにつれ、ひずみ比は減少し、最大荷重付近では 1.0 に近い値を示した。一方、リブ有り鋼管を使用した試験体について見てみると(図-7(b))、荷重初期段階から終局状態まで 1.0 付近を推移していることから、鋼管とコンクリートが一体化して挙動していることが分かった。

RCFT 柱及び CFT 柱は試験体の種類に関わらず鋼管の局部座屈を伴って破壊した。リブ有り鋼管の特徴として、終局時に鋼管表面のコーティングがリブ模様に剥離する現象が見られた。試験後、鋼管をカットして充填コンクリートの破壊状況を観測した。写真-2 は柱試験体の充填コンクリートの破壊状況を示している。リブ無し鋼管を用いた試験体では、鋼管の局部座屈が発生した位置でコンクリートが座屈の形状に沿って膨らんでいたが(写真-2(a))、リブ有り鋼管を用いた試験体では、同様の位置で圧壊していた(写真-2(b))。

表-3 柱試験体の単純累加強度、最大圧縮耐力、合成効果及び靱性率

試験体種類		供試体 番号	リブ無し							リブ有り							
			単純累加 強度 N ₀ (KN)	最大圧縮 耐力 N _u (KN)	平均値 N _a (KN)	合成効果 α (N _u / N ₀)	降伏時の 変位 δ _y (mm)	最大耐力 時の変位 δ _p (mm)	靱性率 μ δ _p / δ _y	供試体 番号	単純累加 強度 N ₀ (KN)	最大圧縮 耐力 N _u (KN)	平均値 N _a (KN)	合成効果 α (N _u / N ₀)	降伏時の 変位 δ _y (mm)	最大耐力 時の変位 δ _p (mm)	靱性率 μ δ _p / δ _y
A 試験	中空鋼管	SN1		1278	1342		2.2	11.7	5.2	SH1		1860	1879		2.2	14.1	6.3
		SN2		1408			3.2	12.3	3.9	SH2		1898			2.2	12.4	5.6
	CFT	SN3	2279	2889	2886	1.27	2.3	15.6	6.7	SH3	2816	3147	3206	1.14			
		SN4	2883	2.4	18.1	7.5	SH4	3265									
B 試験	中空鋼管	SNC201		1136	1118		2.2	11.7	5.3	SHC201		1227	1228		2.2	14.1	6.4
		SNC202		1100			2.1	12.3	5.9	SHC202		1228			2.2	12.4	5.6
	CFT	SNC203	1581	1702	1728	1.09	2.2	15.6	7.1	SHC203	1690	1949	1957	1.16	2.6	23	8.8
		SNC204		1753			2.4	18.1	7.5	SHC204		1964			2.5	20.4	8.2
	かぶりの小 さいRCFT	SNC205	1533	1867	1883	1.23	2.4	17.2	7.2	SHC205	1643	2096	2109	1.28	2.8	23.5	8.4
		SNC206		1898			2.3	12.9	5.6	SHC206		2122			2.3	20.6	9.0
	かぶりの大 きいRCFT	SNC207	1593	1822	1847	1.16	2.8	17.5	6.3	SHC207	1702	2074	2101	1.23	2.6	17.3	6.7
		SNC208		1871			2.3	15.7	6.8	SHC208		2127			2.6	23.6	9.1
	二重配筋 のRCFT	SNC209	1555	1915	1961	1.26	2.9	19	6.6	SHC209	1664	2146	2224	1.34	2.2	17.5	8.0
		SNC210		2007			2.5	21.1	8.4	SHC210		2301			2.0	22.3	11.2
	Bの平均値					1.19			6.9					1.25			8.6

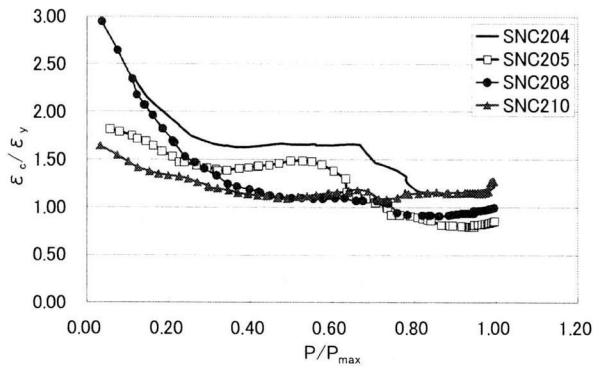


図-7(a) リブ無し鋼管を使用した柱試験体

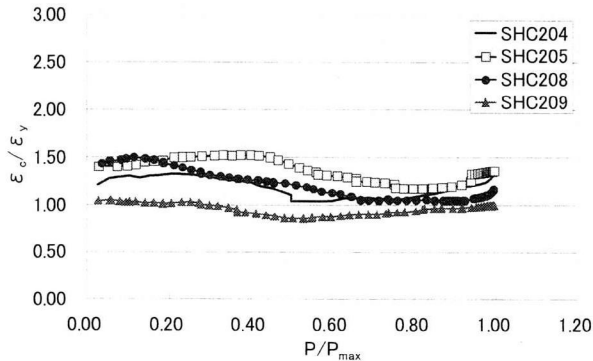
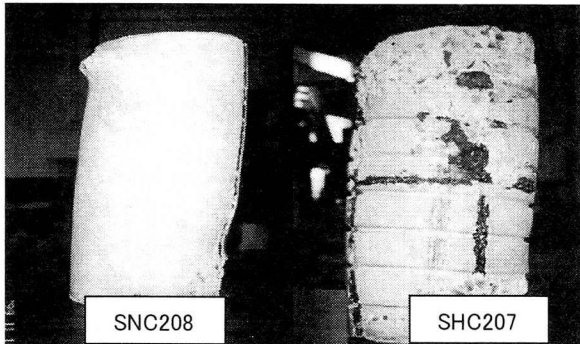


図-7(b) リブ有り鋼管を使用した柱試験体

図-7 CFT、RCFT柱の充填コンクリートと鋼管の軸方向ひずみの関係



(a) リブ無し (b) リブ有り

写真-2 圧縮試験による柱試験体の破壊形状

3. RC 充填円形鋼管柱の圧縮耐力評価式の提案

3.1 解析モデルの仮定

実験結果から RC 充填円形鋼管柱の圧縮耐力評価式を誘導するために次のような仮定を設けた。

- (1) 鋼管と充填コンクリートの間のずれはなく、最大圧縮耐力が発生するまで一体化している。
- (2) 充填コンクリートは鋼管の拘束による側圧 σ_r を受け、三軸応力状態となるため、その強度 σ_{CB} は一軸圧縮強度に比べ増大する。強度 σ_{CB} は次式により与えられる。

$$\sigma_{CB} = \sigma_c + k\sigma_r \quad (1)$$

ここに、 σ_{CB} : 側圧 σ_r を受けるコンクリートの一軸圧縮強度。

k : 拘束係数、 t/r の関数

σ_c : コンクリートの一軸圧縮強度

- (3) 鋼管は全塑性状態にあり、ミーゼスの降伏条件に従うものとする。
- (4) 鉄筋の強度は充填コンクリートの拘束によって充分に発揮される。

3.2 圧縮耐力評価式の提案

(1) 鋼管の二軸応力状態の検討

中空鋼管試験体とコンクリート充填鋼管試験体の鋼管外面中央部のひずみ状況を図-8 に示す。図よりコンクリート充填鋼管試験体の最大荷重時の鋼管ひずみは、中空鋼管試験体とほぼ一致している。従って、コンクリート充填鋼管試験体の最大荷重時の鋼管のひずみは、中空鋼管と同一と仮定する。鋼管は充填コンクリートの横作用によって二軸応力状態になる。このため、鋼管の降伏条件としては以下のような二軸応力状態におけるミーゼスの降伏条件を用いる。

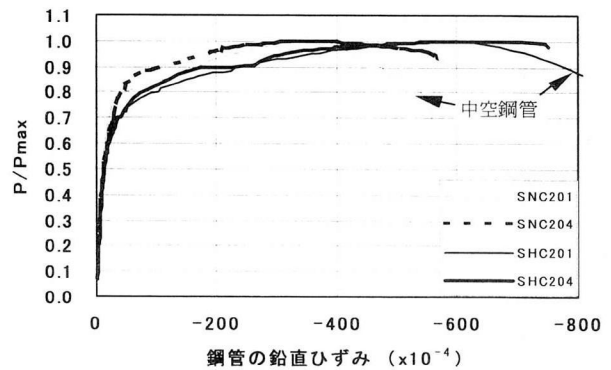


図-8 中空鋼管と充填鋼管のひずみ状況

$$\sigma_{sz}^2 - \sigma_{sz} \cdot \sigma_{s\theta} + \sigma_{s\theta}^2 = \sigma_{sy}^2 \quad (2)$$

ここに、

σ_{sz} : 鋼管の軸方向応力

$\sigma_{s\theta}$: 鋼管の円周方向応力

σ_{sy} : 鋼管の一軸降伏強度

また、鋼管の円周方向応力による、軸方向降伏応力度の低下を考える。鋼管の径厚比が大きいため、鋼管を近似的に平面応力状態と仮定できるので、軸方向及び円周方向応力について次式が成立する。

$$\sigma_{sz} = \frac{E_s(\varepsilon_z + \gamma_s \varepsilon_\theta)}{(1 - \gamma_s^2)} \quad (3)$$

$$\sigma_{s\theta} = \frac{E_s(\varepsilon_\theta + \gamma_s \varepsilon_z)}{(1 - \gamma_s^2)} \quad (4)$$

ここで、

ε_z 、 ε_θ : 鋼管の軸方向及び円周方向のひずみ

E_s : 鋼管のヤング率

γ_s : 鋼管のポアソン比、ここでは、0.3 とした。

鋼管の一軸応力状態時の軸方向応力が $\sigma_{sy} = E_s \varepsilon_z$ となることを考慮して、 $\xi = \varepsilon_\theta / \varepsilon_z$ とすれば、鋼管の降伏応力低減係数 β は式(5)で求められる。

$$\beta = \frac{\sigma_{sz}}{\sigma_{sy}} = \frac{E_s(\varepsilon_z + \gamma_s \xi \varepsilon_z)}{E_s(1 - \gamma_s^2) \varepsilon_z} = \frac{1 + \gamma_s \xi}{1 - \gamma_s^2} \quad (5)$$

鋼管の ξ を求めるため、リブ無しとリブ有り試験体において鋼管の円周方向ひずみ ε_θ と軸方向ひずみ ε_z の関係を調べ、図-9に示す。縦軸は最大荷重で無次元化した荷重とし、横軸は円周方向ひずみと軸方向ひずみ比 $\xi = \varepsilon_\theta / \varepsilon_z$ とする。図中のSNCSとSHCSの記号は、リブ無しとリブ有中空鋼管試験体のそれぞれの平均値を表しており、SNS+CとSHS+Cはリブなしとリブ有り充填鋼管(CFT、RCFT)のそれぞれの平均値を表わしている。図-8に示す鋼管の $P/P_{max} - \varepsilon_z$ 曲線から分かるように、鋼管が降伏状態に入るのはどの試験体においても、 P/P_{max} がほぼ0.8の前後である。従って、図-9に示す各試験体の平均値で表した $P/P_{max} - \varepsilon_\theta / \varepsilon_z$ 曲線においても、 P/P_{max} が0.8前後で降伏が生じると考えた。図-9より鋼管が降伏状態(P/P_{max} が0.8前後)に入った後は、荷重の増加に伴って ξ の絶対値が増大し、鋼管が負担する荷重が低減することがわかる。また、リブが円周方向ひずみを有効に抑制するため、降伏時のリブ有り鋼管の軸方向降伏応力はリブ無し鋼管より高い。

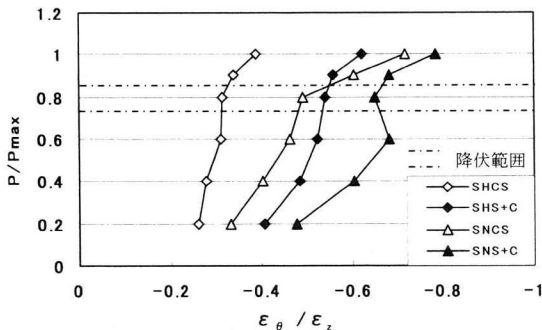


図-9 鋼管の円周方向と軸方向のひずみ比と P/P_{max} の関係

文献(16)と比較するために、 $\alpha = \sigma_{st} / \sigma_{sy}$ と表わすと、式(2)は次のようになる。

$$\beta^2 - \beta\alpha + \alpha^2 = 1 \quad (6)$$

この式から、既に求められた β を代入すると α が求められる。 ξ と α 、 β の関係を表-4に示す。図-9よりリブ有りコンクリート充填試験体の鋼管が降伏す

表-4 円周方向と軸方向の低減率

$\xi = \varepsilon_\theta / \varepsilon_z$	$\beta = \sigma_{sz} / \sigma_{sy}$	ミーゼスの降伏条件による α
-0.350	0.984	-0.032
-0.400	0.967	-0.063
-0.450	0.951	-0.092
-0.500	0.934	-0.121
-0.540	0.921	-0.143
-0.550	0.918	-0.148
-0.600	0.901	-0.175
-0.610	0.898	-0.180
-0.630	0.891	-0.190
-0.647	0.886	-0.199
-0.680	0.875	-0.215

る時は各試験体の ξ の平均値が-0.54となり、対応する β は0.92である。その時 α は-0.14となる。一方、リブ無しコンクリート充填鋼管試験体の鋼管が降伏する時は各試験体の ξ の平均値が-0.65となり、対応する β は0.89である。その時 α は-0.20となる。コンクリート充填鋼管構造設計施工指針¹⁶⁾(以下に建築指針と呼ぶ)では $\alpha = -0.19$ 、 $\beta = 0.89$ を採用している。

(2) 充填コンクリートの三軸応力状態の検討

鋼管の横拘束による側圧を受ける充填コンクリートは三軸圧縮応力状態となる。RC充填円形鋼管構造に軸方向圧縮力が作用した場合の合成断面の応力状態を図-10に示す。

図-10のy軸方向の釣合によって、円周方向と半径方向の主応力の関係式が求められる。

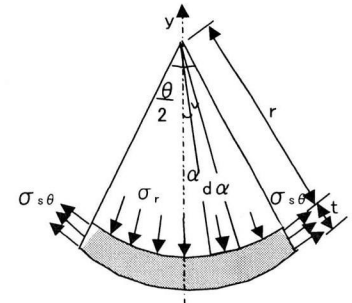


図-10 合成断面の応力状態

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_{s\theta}} = \frac{t}{r} \quad (7)$$

円周方向と半径方向の二つの主応力が等しい三軸応力状態にあるコンクリートの降伏条件を式(1)によって与えることとする^{6), 15), 16)}。また、鋼管の円周方向の応力度は次式で表せる。

$$\sigma_{s\theta} = \alpha \sigma_{sy} \quad (8)$$

ここに、 $\sigma_{s\theta}$ ：鋼管の円周方向の応力度

α ：係数

式(7)と式(8)を式(1)に代入すると、次式のようになる。

$$\sigma_{CB} = \sigma_C + \alpha k \frac{t}{r} \sigma_{sy} \quad (9)$$

$\frac{\sigma_{CB} - \sigma_C}{\sigma_C}$ を充填コンクリート圧縮強度の増加率と定義す

ると、式(9)は次式となる。

$$\frac{\sigma_{CB} - \sigma_C}{\sigma_C} = \alpha k \frac{t}{r} \frac{\sigma_{sy}}{\sigma_C} \quad (10)$$

ここに、

σ_{CB} ：鋼管による横拘束を受けるコンクリートの圧縮強度

σ_{sy} ：鋼管の一軸降伏強度

σ_C ：コンクリートの一軸圧縮強度

$\frac{r}{t}$ ：鋼管の径厚比

αk ：充填コンクリートの圧縮強度の増加パラメータ

k は静水圧で側圧を載荷する方法によるコンクリートの3軸圧縮試験を行った Richart の実験値による係数であり、およそ $k=3 \sim 4$ となり、建築指針では4.1としている。この値は側圧を

一定にして求められたものである。

(3) RC 充填円形鋼管柱の圧縮耐力評価式の提案

したがって、鋼管の軸方向降伏応力度の低減とコンクリート圧縮強度の増加を考慮に入れた、RC 充填円形鋼管柱の中心圧縮耐力式は、次式ようになる。

$$P_y = P_{st} + P_{sr} + P_c$$

$$= \beta A_{st} \sigma_{sty} + \Sigma A_{sr} \sigma_{sry} + R_{cu} A_c \sigma_{cb} \quad (11)$$

ここに、

P_{st} 、 P_c 、 P_{sr} : 鋼管部、充填コンクリート及び軸方向鉄筋の負担する荷重

A_{st} 、 A_c 、 A_{sr} : 鋼管部の断面積、コンクリートの断面積、軸方向鉄筋の断面積

σ_{sty} 、 σ_{sry} : 鋼管の一軸降伏強度、鉄筋の一軸降伏強度。本研究では、ひずみ硬化による耐力上昇の影響を除くため鋼管の一軸降伏強度のかわりに最大強度を用いた。

σ_{cb} 、 R_{cu} : 側圧 σ_r を受けるコンクリートの軸方向圧縮強度と低減係数。建築指針¹⁶⁾によって、 R_{cu} は 0.85 とする。

β : 鋼管の軸方向降伏応力度の低減係数。図-9 と表-4 よりリブ無し鋼管は 0.89 とし、リブ有り鋼管は 0.92 とする。

鋼管厚さと半径が若干異なる 4 本の RC 充填円形鋼管柱の圧縮試験より得られた圧縮耐力 P_y の値を、式(11)に代入し、 σ_{cb} を逆算した。 σ_{cb} を式(10)に代入して、 αk の表す近似式を求めた。 αk と t/r の関係を図-11 に示す。

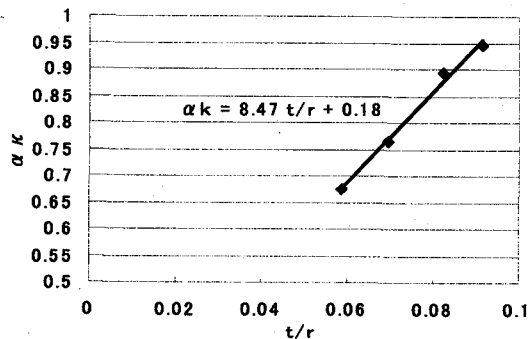


図-11 係数 αk と t/r の関係

この図によると、両者は $\alpha k = 8.47 \times t/r + 0.18$ となる 1 次関数で近似できることがわかる。従って、横拘束を受けるコンクリートの圧縮強度及び増加率は、 αk の式を式(9)、(10)に代入して、次式となる。

$$\sigma_{CB} = \sigma_c + \left(8.47 \times \frac{t}{r} + 0.18 \right) \frac{t}{r} \sigma_{sy} \quad (12)$$

$$\frac{\sigma_{CB} - \sigma_c}{\sigma_c} = \left(8.47 \times \frac{t}{r} + 0.18 \right) \frac{t}{r} \frac{\sigma_{sy}}{\sigma_c} \quad (13)$$

上式によると、充填コンクリートの圧縮強度の増加率は、鋼管の径厚比と二次関係にあり、鋼管の一軸降伏強度に比例し、充填コンクリート自身の一軸圧縮強度と反比例関係であることが分かる。

従って、軸圧縮力を受ける RC 充填円形鋼管柱の圧縮耐力 P_y の評価式は、次のようになる。

$$P_y = \beta A_{st} \sigma_{sty} + \Sigma A_{sr} \sigma_{sry}$$

$$+ R_{cu} A_c \left(\sigma_c + \left(8.47 \times \frac{t}{r} + 0.18 \right) \frac{t}{r} \sigma_{sy} \right) \quad (14)$$

なお、リブ有り鋼管の場合に、式(12)等の横拘束力の評価において、リブによる横拘束への寄与は考慮されていない。この点については今後の検討課題である。

4. 曲げ試験概要

4.1 試験体と材料特性

梁試験体は柱試験体と寸法が異なるほかは、断面の形状、種類などは同様である。曲げ実験に用いる梁試験体寸法と試験体の一覧をそれぞれ図-12 と表-5 に示す。梁試験体の寸法は外径 200mm、長さ 2000mm、鋼管の厚さは 6mm である。また、後述の単純累加強度を求めるために RCFT 柱、CFT 柱の充填部分と同様な寸法、配筋にした RC 試験体 12 体についても同様の試験を行った。鋼管は STK400 を使用し、降伏強度は 354.3N/mm²、CFT 梁試験体に用いられた充填コンクリート材料特性を表-6 に示す。コンクリートの 28 日圧縮強度は 33.4N/mm² であった。主鉄筋には SR295 $\phi 6$ 、帯鉄筋に SR295 $\phi 3$ を使用した。またリブの断面形状、取り付けピッチは圧縮試験体と同様である。

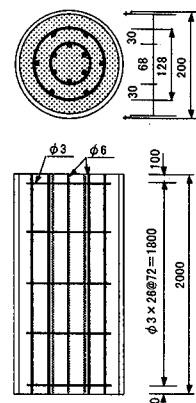


図-12 梁試験体寸法

表-5 梁試験体一覧表

試験体種類	中空鋼管	CFT	かぶり小の RCFT	かぶり大の RCFT	二重配筋の RCFT
試験体名	リブ無し	SNB201	SNB203	SNB205	SNB207
		SNB202	SNB204	SNB206	SNB208
	リブ有り	SHB201	SHB203	SHB205	SHB207
		SHB202	SHB204	SHB206	SHB208

表-6 コンクリートの材料特性

粗骨材最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)
15	10.0	4.5	55	47.6

4.2 試験状況と測定項目

曲げ試験は図-13 に示すような両端を回転支承とする 2 点載荷により行なった。載荷方法は荷重制御方式で、載荷速度を

2.49kN/sec(0.3tf/sec)、荷重ステップは図-14 のように荷重増分を 49kN(5tf)とした。図-15 は図-14 の荷重ステップに従って得られた RCFT の M- ϕ 曲線の一例を表したものである。測定項目は荷重荷重と図-13 に示すたわみ 4 点、鋼管表面のひずみ 8 点である。曲げ耐力が最大曲げ耐力の 80% を下回った場合、梁中央の変位が 90mm に到達した場合に試験を終了した。

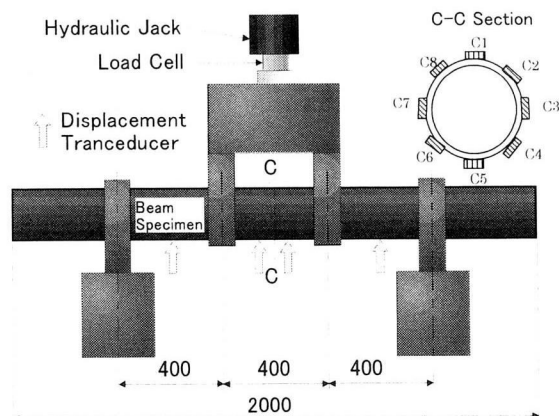


図-13 試験装置と計測状況

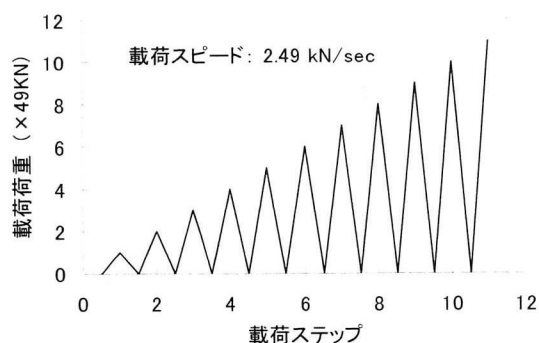


図-14 荷重履歴

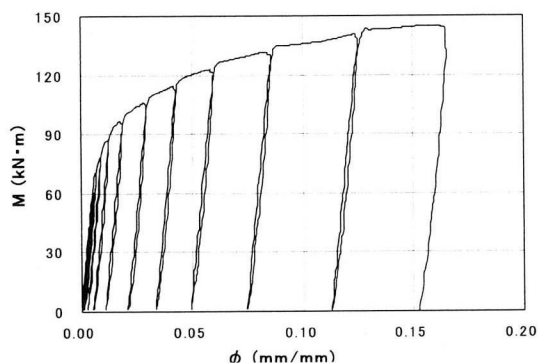


図-15 SNB208 M- ϕ 関係

4.3 試験結果

各試験体の最大曲げ耐力、合成効果及び靱性率等を表-7 に示す。表中の単純累加強度とは、中空鋼管の最大曲げ耐力と RC 試験体の最大曲げ耐力を単純に加えたものであり、合成効果は、各試験体の最大曲げ耐力 M_0 を単純累加強度 M_0 で割った値である。靱性率は、圧縮試験の場合と同様である。

表-7 により、リブ無し鋼管使用タイプ、リブ有り鋼管使用タ

イプの両タイプを比較して最大曲げ耐力、合成効果に顕著な差が見られないことから、リブは RCFT 梁、CFT 梁の曲げ耐力増大にあまり影響しないものと考えられる。RCFT 梁の最大曲げ耐力が CFT 梁の最大曲げ耐力よりやや低くなってしまった原因としては、流動性のあるコンクリートを使用しなかったためにコンクリートの充填が不十分だったことが考えられる。その後実施された純曲げ実験¹⁷⁾では、CFT 梁の最大曲げ耐力より RCFT 梁の最大曲げ耐力の方が若干大きく出ているようである。

試験体の靱性率については、今回の試験では終局時の耐力がピークの 80% 以下になるまで変位を測定できなかったために最大曲げ耐力時の変位 δ_p を降伏時の変位 δ_y で除したものを靱性率として変形性能を評価した。RC 充填タイプの試験体における靱性率は、ややばらつきが多く試験体の種類ごとに明確な差が表れていない。しかし、コンクリート充填タイプのリブ無しとリブ有りの試験体を比較するとリブ有りの試験体の靱性率が平均で 2.48 高くなっている。

図-16 に曲げモーメント-曲率曲線を示す。このグラフから鋼管のみの試験体に比べて充填タイプの試験体の耐力・剛性・変形性能がともに向上していることが分かる。

図-17 はリブ有り鋼管を用いたかぶり小 RCFT 梁の中央断面における鋼管表面水平方向のひずみ分布を示したものである。図より RCFT 梁は引張側のコンクリートにひび割れが発生することから約 100 kN・m 時に中立軸の圧縮側へのシフトが見られた。

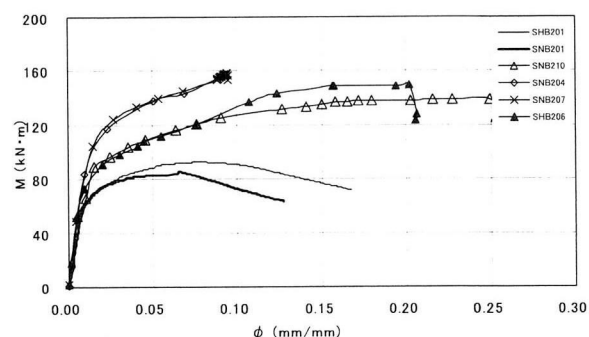


図-16 M- ϕ 包絡線

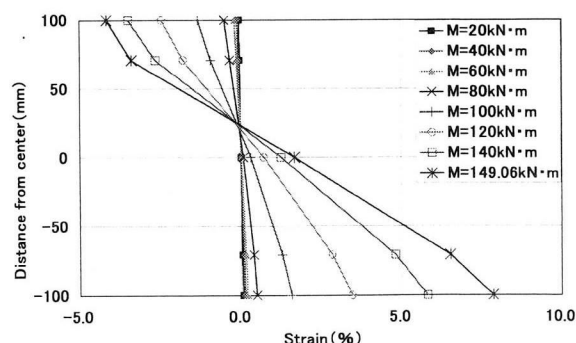


図-17 RCFT 梁 (SHB206) 中央断面のひずみ分布

5. RC 充填円形鋼管梁の曲げ耐力評価式の提案

5.1 解析モデルの仮定

実験結果から RC 充填円形鋼管梁の曲げ耐力を評価するため

表-7 梁試験体の単純累加強度、最大曲げ耐力、合成効果及び靱性率

リブ無し									リブ有り								
試験体 種類	単純累加 強度 M_0 (kN-m)	供試体番号	最大曲げ 耐力 M_u (kN-m)	平均値 M_u (kN-m)	合成効果 $\alpha(M_u/M_0)$	降伏時の 変位 δ_y (mm)	最大耐力 時の変位 δ_u (mm)	靱性率 μ δ_u/δ_y	試験体 種類	単純累加 強度 M_0 (kN-m)	供試体番号	最大曲げ 耐力 M_u (kN-m)	平均値 M_u (kN-m)	合成効果 $\alpha(M_u/M_0)$	降伏時の 変位 δ_y (mm)	最大耐力 時の変位 δ_u (mm)	靱性率 μ δ_u/δ_y
中空鋼管		SNB201	85.3	86.3		4.49	35.30	7.86	中空鋼管		SHB201	92.4	92.7		6.42	40.82	6.36
		SNB202	87.2			6.85	37.44	5.47			SHB202	93.0			5.66	40.48	7.15
CFT	88.1	SNB203	150.3	153.2	1.74	6.58	55.80	8.48	CFT	94.6	SHB203	149.2	148.8	1.57	7.96	79.54	9.99
		SNB204	156.1			8.09	49.46	6.11			SHB204	148.4			7.15	68.36	9.56
かみりの小 さいRCFT	92.9	SNB205	145.7	144.6	1.56	7.21	68.67	9.52	かみりの小 さいRCFT	99.4	SHB205	135.1	142.2	1.43	8.47	72.79	8.59
		SNB206	143.5			7.21	78.32	10.86			SHB206	149.2			10.75	107.59	10.01
かみりの大 きいRCFT	91.7	SNB207	158.3	151.6	1.65	7.25	50.49	6.96	かみりの大 きいRCFT	98.2	SHB207	146.3	146.2	1.49	6.84	41.01	6.00
		SNB208	144.9			7.89	85.51	10.84			SHB208	146.0			9.52	66.59	6.99
二重筋筋の RCFT	93.6	SNB209	140.8	139.8	1.49	4.15	22.45	5.41	二重筋筋の RCFT	100.1	SHB209	146.4	146.4	1.46	9.17	76.78	8.37
		SNB210	138.8			6.92	97.49	14.09			SHB210	※117.3			8.85	58.18	6.57

に次のように仮定する。

- (1) 鋼管と充填コンクリートの間のずれはなく、曲げ耐力の発生するまで一体化し、平面保持が成立している。
- (2) 曲げ耐力が発生する時には引張側のコンクリートにひび割れが発生していることから、コンクリートの引張応力は無視する。
- (3) 圧縮側のコンクリートは、鋼管の拘束による側圧 σ_r を受け三軸応力状態となる。そのため、充填コンクリートの圧縮強度 σ_{cb} は、一軸圧縮強度に比べ増大し、式(12)により与えられる。
- (4) 鋼管は全塑性状態にあり、ミーゼスの降伏条件に従うものとする。引張側の鋼管は二軸引張応力状態であり、軸方向の降伏応力度は $\beta_2 \cdot \sigma_{sy}$ となる。一方、圧縮側の鋼管は二軸引張・圧縮応力状態であり、軸方向の降伏応力度は $\beta_1 \cdot \sigma_{sy}$ となる。ここで、 β_1 と β_2 は鋼管の降伏応力度変化係数であり、実験により決められる。
- (5) 鉄筋の強度は充填コンクリートの拘束によって充分に発揮される。
- (6) 梁断面の応力分布は図-18のように仮定する。

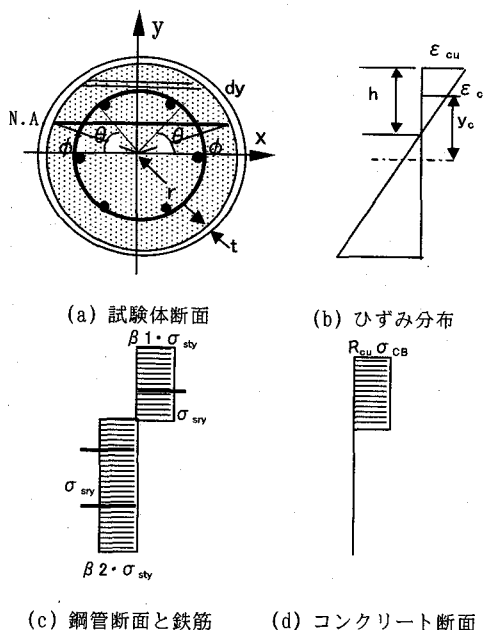


図-18 鋼管とコンクリートの応力分布

5.2 鋼管の降伏応力度変化係数 β_1 、 β_2

鋼管の円周方向応力による、軸方向降伏応力度の変化は式(5)のように考える。圧縮側と引張側の ξ を実験値から求めることによって、それぞれ β_1 、 β_2 が算出できる。

鋼管の ξ を求めるため、リブ無しとリブ有り試験体において鋼管の円周方向ひずみと軸方向ひずみの関係を調べ、図-19に示す。縦軸は最大荷重で無次元化した荷重とし、横軸は円周方向ひずみと軸方向ひずみ比 $\xi = \epsilon_\theta / \epsilon_z$ とする。図中のSNB圧、SNB中とSNB引は、それぞれリブ無し充填鋼管(CFT、RCFT)試験体の圧縮側、中間側と引張側の平均値を表しており、SHB圧、SHB中とSHB引は、それぞれリブ有り充填鋼管(CFT、RCFT)試験体の圧縮側、中間側と引張側の平均値を表している。

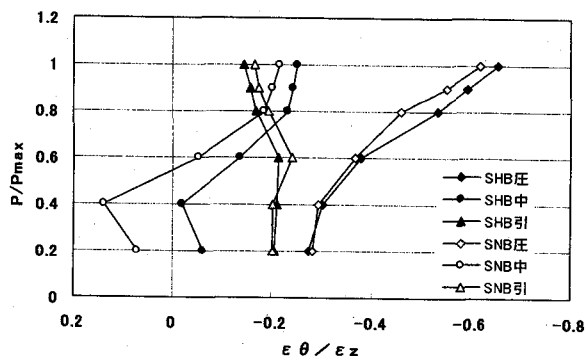


図-19 鋼管の円周方向と軸方向のひずみ比と P/P_{max} の関係

圧縮側では、 ξ の絶対値は荷重の増加に伴って増大している。鋼管の最大荷重点は-0.621~-0.655の範囲にあり、平均値は-0.638である。従って、圧縮側の降伏応力度変化係数 β_1 は0.894~0.883であり、平均値は0.89である。軸方向圧縮力を受ける柱と同じである。

引張側では、 ξ の絶対値は荷重の増加に伴って低減している。これは円周方向の引張応力が増大していることを意味する。鋼管が最大荷重時で ξ は-0.144~-0.165であり、平均値は-0.15である。従って、引張側の降伏応力度変化係数 β_2 は1.051~1.045であり、平均値は1.05である。

鋼管の降伏条件としては二軸応力状態におけるミーゼスの降

伏条件を用いて、既に求められた β_1 、 β_2 を式(6)に代入すると、対応する α は-0.186~-0.203、0.096~0.112となる(表-8)。ここでは、それぞれの平均値を $\alpha_1=-0.19$ 、 $\alpha_2=0.11$ と考える。

表-8 梁の円周方向と軸方向の降伏応力度変化係数

$\xi = \varepsilon_{\theta} / \varepsilon_z$		$\beta = \sigma_{sz} / \sigma_{sy}$	ミーゼスの降伏 条件による α
引張側	-0.144	1.051	0.112
	-0.150	1.049	0.108
	-0.160	1.046	0.100
	-0.165	1.045	0.096
中立軸	-0.300	1.000	0.000
圧縮側	-0.621	0.894	-0.186
	-0.638	0.889	-0.194
	-0.650	0.885	-0.200
	-0.655	0.883	-0.203

5.3 合成断面の中立軸

合成断面の中立軸は断面応力の軸方向の釣合いによって求められる。断面の圧縮力は、圧縮側鋼管の圧縮力、コンクリートの圧縮力と鉄筋の圧縮力によるものとする。引張力は引張側鋼管の引張力と鉄筋の引張力によるものとする。よって、次式が成立する。

$$\beta_1 \sigma_{sty} A_{s1} + \sigma_{CB} A_c + \sum \sigma_{sry} A_{r1} = \beta_2 \sigma_{sty} A_{s2} + \sum \sigma_{sry} A_{r2} \quad (15)$$

ここで、 $\beta_1=0.89$ 、 $\beta_2=1.05$

σ_{sty} 、 σ_{sry} ：鋼管と鉄筋の一軸降伏強度

$\sigma_{CB} = \sigma_c + \left(8.47 \times \frac{t}{r} + 0.18\right) \frac{t}{r} \sigma_{sty}$ ：圧縮側鋼管に

よる横拘束を受けるコンクリートの圧縮強度

$A_c = 0.5r^2(\pi - 2\theta - \sin 2\theta)$ ：圧縮応力を受けるコンクリートの断面積

$A_{s1} = \text{tr}(\pi - 2\theta)$ 、 $A_{s2} = \text{tr}(\pi + 2\theta)$ ：圧縮応力、引張応力を受ける鋼管の断面積

A_{r1} 、 A_{r2} ：圧縮応力、引張応力を受ける鉄筋の断面積

式(15)に従って、各試験体の中立軸を求め、実験値と比較した結果、両者に良好な一致を見た。なお、本計算では、鉄筋の面積は鋼管の面積と比べると微小であるため、中立軸の計算では無視する。

5.4 RC 充填円形鋼管梁の曲げ耐力評価式の提案

以上の検討に従って、鋼管の軸方向降伏応力度の変化と充填コンクリートの圧縮強度の増加を考慮に入れた、RC 充填円形鋼管梁の曲げ耐力の評価式を提案する。

$$M_y = 2r^3 R_{cu} \sigma_{CB} \int_{\phi}^{\pi/2} \sin \theta \cos^2 \theta d\theta + \sum \sigma_{sry} A_{sr} Z_r + 2r^2 t \left(\int_{\phi}^{\pi/2} \beta_1 \sigma_{sty} \sin \theta d\theta - \int_{-\pi/2}^{\phi} \beta_2 \sigma_{sty} \sin \theta d\theta \right)$$

$$= \frac{2}{3} r^3 R_{cu} \left[\sigma_c + \left(8.47 \frac{t}{r} + 0.18\right) \frac{t}{r} \sigma_{sty} \right] \cos^3 \phi + 2r^2 t \sigma_{sty} (\beta_1 + \beta_2) \cos \phi + \sum \sigma_{sry} A_{sr} Z_r \quad (16)$$

ここで、 M_y ：断面の降伏曲げモーメント

t 、 r ：鋼管の肉厚と内半径

A_{sr} ：軸方向鉄筋の断面積

Z_r ：鉄筋の図心から中立軸までの距離

σ_{sty} 、 σ_{sry} 、 σ_c ：鋼管、鉄筋の一軸降伏強度及びコンクリートの一軸圧縮強度

R_{cu} ：充填コンクリート圧縮強度の低減係数、建築指針¹⁶⁾によって、0.85とする。

ϕ ：中立軸の位置を示す角度

$\beta_1=0.89$ 、 $\beta_2=1.05$

6. 降伏及び最大圧縮耐力評価式の検証

本研究で提案した評価式と、既往の評価式の違いを比較するために、本研究の試験体に対して、実験結果、本提案式による計算値と建築指針の提案式による計算値と比較した。

6.1 実験値、建築指針式と提案式による降伏圧縮耐力の比較検討

建築指針によると、コンクリート充填円形鋼管柱の軸圧縮降伏圧縮耐力は次式で評価できるとされている。

$$N_u = \left(\beta - \frac{(D - 2t)}{2(D - t)} \kappa \alpha \right) A_{st} \sigma_{sty} + A_c \sigma_c \quad (17)$$

本実験では鉄筋があるため、式(17)に鉄筋が負担する降伏圧縮耐力を考慮すると、次式となる。

$$N_u = \left(\beta - \frac{(D - 2t)}{2(D - t)} \kappa \alpha \right) A_{st} \sigma_{sry} + A_c \sigma_c + \sum A_{sr} \sigma_{sry} \quad (18)$$

ここで、

A_{st} 、 A_c 、 A_{sr} ：鋼管の断面積、コンクリートの断面積、軸方向鉄筋の断面積

σ_{sty} 、 σ_{sry} 、 σ_c ：鋼管の一軸降伏強度、鉄筋の一軸降伏強度、コンクリートの一軸圧縮強度

α 、 β ：鋼管の二軸応力状態による軸方向と円周方向降伏応力度の低減係数を表し、それぞれ-0.19、0.89とする。

t 、 D ：鋼管の肉厚と直径

κ ：拘束係数を表し、4.1とした。

提案式(14)により計算した降伏圧縮耐力と、実験データから得られた荷重-変位曲線の変曲点から求めた降伏圧縮耐力、及び建築指針(18)による計算値を比較し、表-9に示す。ここでは、実験結果から、 $\sigma_{sty}=350\text{N/mm}^2$ 、 $\sigma_{sry}=350\text{N/mm}^2$ 、 $\sigma_c=180\text{N/mm}^2$ (A試験)、 230N/mm^2 (B試験)とした。

表-9 圧縮耐力評価式の検証

供試体番号			実験値及び指針による降伏圧縮耐力提案式の検証						実験値と提案式による最大圧縮耐力の比較			
			降伏圧縮耐力 (kN)	平均値 Py (kN)	指針による計算値		提案式による計算値		最大圧縮耐力 (kN)	平均値 P (kN)	提案式による計算値	
					計算値 (kN)	実験値との差 (%)	計算値 (kN)	実験値との差 (%)			最大圧縮耐力 (kN)	実験値との差 (%)
A実験	鋼管 (リブなし)	SN3	2207.3	2281.1	2733.1	19.8	2447.1	7.3	2888.8	2885.9	3075.4	6.6
		SN4	2355.0						2883.0			
	鋼管 (リブあり)	SH3	2454.5	2406.5	2572.9	6.9	2369.6	-1.5	3147.8	3206.3	3035.6	-5.3
		SH4	2358.4						3264.8			
B実験	鋼管 (リブなし)	SNC203	1281.8	1275.1	1434.9	12.5	1378.4	8.1	1702.1	1727.4	1808.8	4.7
		SNC204	1268.3						1752.8			
		SNC205	1274.1	1374.4	1491.9	8.5	1432.2	4.2	1867.2	1882.6	1876.8	-0.3
		SNC206	1474.7						1897.9			
		SNC207	1281.0	1330.2	1491.9	12.2	1432.2	7.7	1822.4	1846.7	1876.8	1.6
		SNC208	1379.5						1871.0			
		SNC209	1138.0	1429.3	1548.9	8.4	1485.9	4.0	1914.5	1960.8	1944.9	-0.8
		SNC210	1429.3						2007.1			
	鋼管 (リブあり)	SHC203	1439.1	1485.1	1610.4	8.4	1604.9	8.1	1948.9	1956.2	2107.3	7.7
		SHC204	1531.0						1963.6			
		SHC205	1476.5	1501.0	1666.6	11.0	1657.2	10.4	2096.0	2109.0	2173.4	3.1
		SHC206	1525.6						2121.9			
		SHC207	1564.7	1540.9	1666.6	8.2	1657.2	7.6	2073.6	2100.4	2173.4	3.5
		SHC208	1517.0						2127.2			
		SHC209	1568.8	1645.0	1722.9	4.7	1709.6	3.9	2146.0	2223.7	2239.5	0.7
		SHC210	1721.2						2301.4			

表-9 により、建築指針による計算値は実験値より 4.7%~19.8%大きい。これに対して、本論文の提案式(14)による計算値と実験値との差は 1.5%~10.4%であり、建築指針による計算値と実験値の差より小さく、実験値と良好に一致していることが分かる。この理由の一つとして、本提案では、リブ無し鋼管とリブ有り鋼管に適用する β を別々に定めているためである。

6.2 実験値と提案式による最大耐力の比較検討

本論文の提案式によって、RC 充填円形鋼管構造の最大耐力を推定することを試みた。この場合、鋼管の降伏強度の代わりに鋼管の最大強度(最大荷重発生時の応力)を使用し、充填コンクリート強度の低減係数 R_{cu} を 1.0 として次式により計算した。

$$P_u = \beta A_{st} \sigma_{stu} + \Sigma A_{sr} \sigma_{sru} + A_c R_{cu} \left(\sigma_c + (8.47 \times \frac{t}{r} + 0.18) \frac{t}{r} \sigma_{sty} \right) \quad (19)$$

ここで、 A_{st} 、 A_c 、 A_{sr} ：鋼管の断面積、充填コンクリートの断面積、軸方向鉄筋の断面積

σ_{stu} 、 σ_{sru} 、 σ_c ：鋼管の最大強度、鉄筋の最大強度、コンクリートの一軸圧縮強度

β ：鋼管の二軸応力状態による軸方向降伏応力度の低減係数。リブ無し鋼管は 0.89 とし、リブ有り鋼管は 0.92 とする。

R_{cu} ：コンクリート強度の低減係数。 R_{cu} は 1.0 とする。

式(19)により最 RC 大耐力を求め、表-9 の右側に示す。この表によると、実験値と計算値の差については、コンクリート充填試験体では 4.7%~7.7%であり、RC 充填試験体では 0.3%~3.5%で、計算値と実験値とは良好な一致が見られた。このことから、本論文で提案した評価式(19)は RC 充填円形鋼管柱の最大耐力をより正確に推定できると考えられる。これは最大耐力

の計算の仮定として 3.1 で述べた(1)~(4)の仮定がほぼ適切であることを示している。

また、本提案式では、かぶり小とかぶり大の RCFT 試験体の鉄筋比(0.97%)が同じため最大耐力は、同じ値となるが、実験値ではかぶり小の試験体の方がかぶり大の試験体より若干多きめの値となり鉄筋の配置の違いが出ているようである。二重配筋の RCFT 試験体の場合は、一重配筋試験体に比べ鉄筋比(1.96%)が増えるため、一番大きな耐力となった。

7. 降伏及び最大曲げ耐力評価式の検証

本研究で提案した評価式と、既往の提案式の違いを比較するために、本研究の試験体に対して、実験結果、本提案による計算値とコンクリート充填鋼管構造設計施工指針(以下建築指針と呼ぶ)による計算値と比較した。

7.1 実験値、建築指針式と提案式による降伏曲げ耐力の比較検討

建築指針の提案によると、コンクリート充填円形鋼管梁の降伏曲げ耐力 M_u は次式で評価できるとされている。

$$M_u = \frac{(D-t)^2}{2} t (\beta_1 + \beta_2) \sin \phi \sigma_{sy} + \frac{2}{3} r^3 \sin^3 \phi \left(\sigma_c + \frac{2\kappa t}{(D-2t)} \sigma_{sy} \right) \quad (20)$$

本実験では鉄筋があるため、式(20)に鉄筋が負担する曲げ耐力を考慮すると、次式となる。

$$M_u = \frac{(D-t)^2}{2} t (\beta_1 + \beta_2) \sin \phi \sigma_{sy} + \frac{2}{3} r^3 \sin^3 \phi \left(\sigma_c + \frac{2\kappa t}{(D-2t)} \sigma_{sy} \right) + \Sigma A_{sr} \sigma_{sry} Z_r \quad (21)$$

ここで、 t 、 r 、 D ：鋼管の肉厚、内半径及び直径

A_{sr} ：軸方向鉄筋の断面積

Z_r ：鉄筋の図心から中立軸までの距離

σ_{sty} 、 σ_{sry} ：鋼管及び鉄筋の一軸降伏強度

σ_c ：コンクリートの一軸圧縮強度

ϕ ：中立軸の位置を示す角度

$\beta_1=0.89$ 、 $\beta_2=1.05$

提案式(16)によって計算した降伏曲げ耐力と、実験データから得られた曲げモーメント-曲率曲線の変曲点から求めた降伏曲げ耐力、及び建築指針式(21)による降伏曲げ耐力を、表-10に示す。

実験結果と比べると、建築指針による計算値は実験値より8.1%~28.8%大きい。本論文の提案式(16)による計算値と実験値との差は1.3%~13.7%であり、建築指針による計算値と実験値の差より小さく、実験値と良好に一致していることが分かる。

7.2 実験値と提案式による最大曲げ耐力の比較検討

本論文の提案式によって、RC 充填円形鋼管構造の最大耐力を推定することを試みた。鋼管の降伏曲げ耐力の代わりに鋼管の最大曲げ耐力を使用し、コンクリート強度の低減係数 R_{cu} を1.0として次式によりRC 充填円形鋼管構造の最大曲げ耐力を推定した。

$$M_u = \frac{2}{3} r^3 R_{cu} \left[\sigma_c + \left(8.47 \frac{t}{r} + 0.18 \right) \frac{t}{r} \sigma_{stu} \right] \cos^3 \phi + 2r^2 t \sigma_{stu} (\beta_1 + \beta_2) \cos \phi + \sum \sigma_{sru} A_{sr} Z_r \quad (22)$$

ここで、

M_u ：断面の最大曲げ耐力

t 、 r ：鋼管の肉厚と内半径

A_{sr} ：軸方向鉄筋の断面積

Z_r ：鉄筋の図心から中立軸までの距離

σ_{stu} 、 σ_{sru} 、 σ_c ：鋼管、鉄筋の最大強度及びコンク

リートの一軸圧縮強度

R_{cu} ：コンクリート強度の低減係数、ここでは、1.0とする。

ϕ ：中立軸の位置を示す角度

$\beta_1=0.89$ 、 $\beta_2=1.05$

各試験体の最大曲げ耐力を求め、表-10の右側に示す。この表によると、提案式による計算値はすべて安全側にある。提案式では、CFT 試験体より RCFT 試験体の最大曲げ耐力は、若干大きく算出された。二重配筋の RCFT 試験体で、CFT 試験体より6%程度大きくなった。実験値と計算値の差については、コンクリートのみ充填試験体では18.1%~20.2%であり、RC 充填試験体では6.9%~17.2%で、平均値は12%である。計算値と実験値との差が、10%を越えているため、今後提案式の更なる改善が必要と思われるが、本論文で提案した最大曲げ耐力評価式(22)は RC 充填円形鋼管梁の最大曲げ耐力を大方推定できると考えられる。これは最大曲げ耐力の計算の仮定として5.1で述べた(1)~(6)の仮定が安全側で、ほぼ推定できることを示している。

8. まとめ

本研究では、リブ無し鋼管とリブ有り鋼管を使用して、コンクリートと鉄筋コンクリートをそれぞれ充填させた試験体に対して繰り返し軸方向圧縮試験と繰返し純曲げ試験を行った。RC 充填円形鋼管構造の耐力評価手法に関する提案を行い、実験結果及び建築指針による結果と比較することで検証を行った。本研究において得られた結果をまとめると、次の(1)~(4)の通りである。特に(1)~(3)の結果は、既往のコンクリート充填円形鋼管(CFT)の研究で言及されてきた一般的傾向であるが、本研究により鉄筋コンクリート充填円形鋼管(RCFT)でも同様な傾向があることが確認できた。

(1) 鋼管にコンクリートあるいは鉄筋コンクリートを充填すると、複合効果により高い耐力が得られる。リブ有り鋼管を

表-10 曲げ耐力評価式の検証

試験体		実験結果と建築指針による降伏曲げ耐力評価式の検証						実験結果による最大曲げ耐力評価式の検証			
		降伏曲げ耐力(kN.m)	平均値(kN.m)	指針式による計算値		提案式による計算値		最大曲げ耐力(kN.m)	平均値(kN.m)	提案式による計算値	
				計算値(kN.m)	実験値との差(%)	計算値(kN.m)	実験値との差(%)			計算値(kN.m)	実験値との差(%)
リブ無し鋼管試験体(SNBグループ)	SNB203	102.9	103.3	111.7	8.1	97.9	-5.3	150.3	153.2	122.3	-20.2
	SNB204	103.8						156.1			
	SNB205	107.9	100.2	115.3	15.1	101.5	1.3	145.7	144.6	126.9	-12.2
	SNB206	92.4						143.5			
	SNB207	101.6	97.6	114.2	17.1	100.4	2.9	158.3	151.6	125.5	-17.2
	SNB208	93.5						144.9			
	SNB209	96.6	91.5	117.8	28.8	104.0	13.7	140.8	139.8	130.1	-6.9
	SNB210	86.3						138.8			
リブ有り鋼管試験体(SHBグループ)	SHB203	91.1	91.8	111.0	20.9	96.9	5.6	149.2	148.8	121.9	-18.1
	SHB204	92.5						148.4			
	SHB205	93.2	91.9	114.6	24.8	100.5	9.4	135.1	142.1	126.5	-11.0
	SHB206	90.5						149.2			
	SHB207	90.9	90.5	113.5	25.4	99.4	9.8	146.3	146.2	125.1	-14.4
	SHB208	90.1						146.0			
	SHB209	99.1	92.4	117.1	26.8	103.0	11.5	146.4	146.4	129.7	-11.4
	SHB210	85.7						117.3			

使った充填鋼管柱は、リブ無し鋼管を使った充填鋼管柱よりさらに高い圧縮耐力を得ることができ、特に荷重-変位曲線のピーク後の耐力が大幅に向上する。

(2) コンクリート充填及びRC充填円形鋼管柱における鋼管とコンクリートの複合効果は、鋼管により横拘束された充填コンクリートの一軸圧縮強度の増大によって生じたと考えられる。

(3) 梁における鋼管とコンクリートの複合効果は、拘束された充填コンクリートの一軸圧縮強度が増大することと、鋼管の引張応力を受ける側が二軸引張応力状態になることによって強度が増加することにより生じたと考えられる。

(4) 本研究の結果に基づいてRC充填円形鋼管柱、梁の降伏耐力と最大耐力の評価式を提案し、実験結果及び既往の提案と比較検討した。その結果、本提案式が軸圧縮及び曲げの耐力の評価をより正確に表現していることが示された。

本論文の評価式の特徴の一つとしては、充填コンクリートの三軸応力状態での圧縮強度の増加パラメータ $k\alpha$ を、定数ではなく径厚比 t/r の関数としていることである。この関数を、軸圧縮試験結果に一致するように、最適化手法を用いて近似関数として求めている。しかし、実験結果に合致するように、充填コンクリートの圧縮強度の増加割合 k を操作するのは、物理的な意味から適切でない場合も考えられるので、今後実験データを増やしていくことで検討して行きたい。

また、 ξ の評価に関して、圧縮試験では鋼管が降伏する時の値を基本としているのに対して、曲げ試験では最大荷重時の値を採用している。しかしながら、式(5)にて ξ から β が評価できるのはあくまで鋼管が弾性である場合である。曲げ試験の最大荷重時には鋼管は既にかかなり塑性化しているものと考えられ、最大荷重時の ξ の値を持って、式(5)から β を評価するのは厳密には問題があると思われるので、今後の検討課題とした。

本論文は、軸圧縮力と曲げモーメントが独立に作用した場合の研究である。橋脚等の実構造物では、軸力と曲げモーメントが同時に作用するため、軸力と水平力がRCFT柱に同時に作用する場合等の実験的研究が今後の検討課題となろう。

参考文献

- 1) 鈴木敏郎、元結 正次郎、太田秀彦:純圧縮を受けるコンクリート充填円形鋼管短柱の力学的特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.499, pp.123-129, 1997.9
- 2) 最相元雄、岡部猛、光成和昭:高強度コンクリート充填鋼管短柱の拘束効果と終局耐力に関する実験的研究, 構造工学論文集, vol.42B, pp.351-359, 1996.3
- 3) 松井千秋:コンクリート充填鋼管構造の構造性能と設計, 鋼構造論文集, 第1巻第2号, 1994.6

- 4) 宇佐美 勉、鈴木森晶、葛 漢彬:鋼・コンクリート合成橋脚の地震時保有水平耐力照査法の提案, 第3回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp119-124, 1995.11
- 5) 村田 清満、安原 真人、渡辺 忠朋、木下 雅敬:コンクリート充填円形鋼管柱の耐荷力と変形性能の評価, 構造工学論文集, Vol.44A, 土木学会, pp.1555-1564, 1998.3
- 6) 中井 博、北田 俊行、吉川 紀、村上 脩二、桜本 洋一:曲げとねじりを受けるコンクリート充填円形断面鋼管の実験的研究, 土木学会論文集, No.612/I-46, pp.85-97, 1999.1
- 7) 唐 嘉琳、日野伸一、黒田一郎、太田俊昭:コンクリート充填円形鋼管柱を対象とした鋼管とコンクリートの応力-ひずみ関係のモデル化, 鋼構造論文集, 第3巻第11号, 1996.9
- 8) 王 海軍、長谷川明、塩井幸武:鉄筋コンクリート充填鋼製橋脚の圧縮耐荷力に関する実験的研究, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要, pp.34-35, 1999.3
- 9) 土木学会:阪神・淡路大震災における鋼構造物の震災の実態と分析, 1999
- 10) 日本鋼構造協会:土木分野におけるコンクリート充填鋼管構造の現状と今後の課題, 1998.9
- 11) 前川幸次、梶川康男、吉田 博:PC鋼棒で補強されたコンクリート充填鋼管はりの曲げ耐荷力に関する研究, 構造工学論文集, Vol.39A, 土木学会, pp.153-164, 1993.3
- 12) 王 海軍、長谷川明、塩井幸武:鉄筋コンクリート充填鋼製橋脚の圧縮耐荷力に関する実験的研究, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要, p34-35, 1998.3
- 13) 石橋博則、長谷川明、塩井幸武:RC充填鋼管柱に関する実験的研究, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要, pp78-79, 1999.3
- 14) 遠藤考則、王 海軍、長谷川明、塩井幸武:RC充填充填梁に関する実験的研究, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要, pp80-81, 1999.3
- 15) 土木学会:鋼・コンクリート複合構造の理論と設計、基礎編、理論編, 1999.4
- 16) 日本建築学会:コンクリート充填鋼管構造設計施工指針, 1997
- 17) 石橋博則、長谷川明、鍋島憲昭:鉄筋コンクリート充填鋼管構造に関する実験的研究 その2 梁の場合, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要, pp26-27, 2000.3

(2002年9月13日受付)