

鉄筋コンクリート充填鋼管構造の耐荷力の 評価手法に関する研究

王 海軍*, 長谷川 明**, 塩井 幸武***

A Study on Strength Evaluation Method of Reinforced Concrete Filled Steel Tubular Structure

Haijun WANG, Akira HASEGAWA, and Yukitake SHIOI

Abstract

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, compression test and bending test with RCFT column and beam were carried out. Parameters of experiments were strength of concrete and steel, width-thickness ratio and rib of steel tube, and bar arrangement. And then, based on experimental results, study of strength of RCFT column and beam were carried out. Evaluation formula for column and beam were proposed and tested by experimental data and existed recommendations. As a result, the proposed evaluation formula can evaluate the strength of RCFT properly.

Keywords: reinforced concrete filled steel tubular structure, strength, evaluation formula

1. はじめに

コンクリート充填鋼管柱 (CFT) は、鋼管と充填コンクリートの複合効果によって、耐荷力、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、省力化ができ、工期の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報告されている¹⁾。現実の構造ではこのような

致命的な破壊現象の発生が恐れられているため、さらに改良が必要とされる。

阪神・淡路大震災で多くの鉄筋コンクリート橋脚や柱などが大きな被害を受け、その多くがせん断力による破壊であった。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²⁾。阪神・淡路大震災以降、構造の耐震性能の向上を目指し、大地震における変形性能と震災後の復旧性能を有する構造の開発が求められている。

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。

平成 12 年 9 月 22 日受理

* 土木工学科・客員研究員

** 土木工学科・教授

*** 構造工学研究所・教授

そこで、鉄筋コンクリートを鋼管に充填させた鉄筋コンクリート充填鋼管構造(RCFT)という新しい構造を検討の対象とした。充填コンクリートに鉄筋が挿入されることによって、充填コンクリートに対する有効的な力学的挙動が期待され、終局時までせん断破壊ような脆性破壊が抑制され、震災後の復旧性能が向上されると期待される³⁾。さらに、リブを有する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し、ピーク後の耐荷力が向上され、優れた力学的特性を発揮できると考えられる。その結果、コンクリート充填鋼管柱に比較して、強度、じん性および剛性が改善され、特に最大荷重後の耐荷力、靱性が大幅に向上されと考える。

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、コンクリートの強度と鋼の強度、鋼管のリブ、径厚比、配筋の変化による耐荷力に与える影響を考慮しながら、実験を行った。さらに、実設計を考慮し、できるだけ簡便性と適切な精度を有する柱の軸圧縮力と梁の曲げ耐荷力の評価法を検討し、提案された評価式と既往の実験結果と比較し、その妥当性を検証した。

2. RCFT 柱の圧縮耐荷力評価式に関する研究

2.1 圧縮実験概要

図-1に示す短柱試験体で鋼管と充填コンクリート両者一体に軸方向に荷重制御方式によって繰返し圧縮実験を行った。実験のパラメータはコンクリートの強度、鋼材の強度、鋼管のリブ、径厚比と配筋のかぶりとした。

載荷装置の最大載荷荷重を考慮し、2種類の寸法の試験体を製作した。

A実験では、リブ有り鋼管(直径:200mm)とリブ無し鋼管(直径:217mm)を使って、中空鋼管と無筋コンクリート充填鋼管試験体それぞれ2体、合計8体を作製した。鋼管はSTK400を用い、板厚は6mmである。主鉄筋はSR295、コンクリートの28日強度 σ_c は27.4 N/mm²で

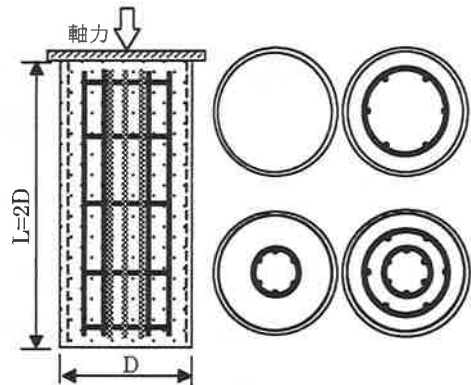


図-1 圧縮試験体

あった。

B実験では、無筋コンクリートと3種類の配筋の鉄筋コンクリートを使用し、3グループの試験体を作製した。リブ有り鋼管のみ及びリブ有り鋼管に充填させた試験体10体(SHCグループ)、リブ無し鋼管のみ及びリブ無し鋼管に充填させた試験体10体(SNCグループ)、コンクリートのみと鉄筋コンクリートの試験体12体(CNグループ)であった。鋼管はSTK400の材料を用いて、直径150mm・高さ300mm・肉厚6.4mmであった。降伏強度と最大強度はそれぞれ354 N/mm²、452 N/mm²であった。リブ断面は、ほぼ台形で鋼管取り付け側が7mm、上側が3mm、高さは4mmであり、取り付けピッチは36mmである。主鉄筋はSR295とし、 $\phi 6$ の鉄筋を6本あるいは12本配筋し、その主鉄筋比は約0.54%、1.08%であった。それぞれの主鉄筋の面積と鋼管面積比は4.2%、8.4%であった。帯鉄筋については、 $\phi 3$ の鉄筋をピッチ72mmで配置した。コンクリートの設計強度は200 N/mm²であった。粗骨材最大寸法については、試験体の寸法、鉄筋間隔、リブ間隔等を考慮し、15mmとした。

計測項目は、鉛直荷重、鉛直変位及び充填コンクリートと鋼管側面のひずみである。

2.2 実験結果

実験によって得られた RC 充填鋼管試験体の

耐力及び鋼管とコンクリートが単体として抵抗する最大荷重を単純累加強度として計算し、表-1 に示す。また、実験値と単純累加強度の比值 α

表-1 試験体の最大荷重

供 試 体 番 号			最大荷重 (kN)	平均荷重 P (kN)	累加強度法 の計算値 D_1	拘束効果 P/D_1	リブの効果
A 実験	鋼 管 (リブなし)	SN1	1277.8	1342.9			1.00
		SN2	1408.0				
		SN3	2888.8	2885.9	2309.8	1.25	1.00
		SN4	2883.0				
	鋼 管 (リブあり)	SH1	1859.5	1878.7			1.40
		SH2	1898.0				
		SH3	3147.8	3206.3	2686.1	1.19	1.20
		SH4	3264.8				
B 実験	鋼 管 (リブなし)	SNC201	1136.0	1117.8			1.00
		SNC202	1099.5				
		SNC203	1702.1	1727.4	1418.6	1.22	1.00
		SNC204	1752.8				
		SNC205	1867.2	1882.6	1490.8	1.26	1.00
		SNC206	1897.9				
		SNC207	1822.4	1846.7	1490.8	1.24	1.00
		SNC208	1871.0				
		SNC209	1914.5	1960.8	1563.0	1.25	1.00
		SNC210	2007.1				
	鋼 管 (リブあり)	SHC201	1227.1	1227.4			1.10
		SHC202	1227.6				
		SHC203	1948.9	1956.2	1591.9	1.23	1.13
		SHC204	1963.6				
		SHC205	2096.0	2109.0	1663.3	1.27	1.12
		SHC206	2121.9				
		SHC207	2073.6	2100.4	1663.3	1.26	1.14
		SHC208	2127.2				
		SHC209	2146.0	2223.7	1734.8	1.28	1.13
		SHC210	2301.4				

を複合効果として計算した。リブなし鋼管試験体での複合効果の平均値については、A 実験で 1.25, B 実験で 1.24 である。リブ有り鋼管試験体での複合効果の平均値については、A 実験で 1.22, B 実験で 1.26 である。

コンクリートを取り巻くように鋼管を使用することが高い複合効果を生起させていることが示された。この複合効果は、充填コンクリートにより鋼管の座屈が防止されていることと、充填コンクリートが鋼管により軸直角方向に拘束を受け、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、増大することによるものと考えられる。

また、リブ有り鋼管試験体の複合効果とリブなし鋼管試験体の複合効果と比較すると、同じ寸法のコンクリート充填試験体では、リブ付き鋼管がリブ無し鋼管より最大荷重は約 1.13 倍となった。これはリブによって充填コンクリートに拘束がさらに高まり、鋼管の局部座屈がさらに抑制され、鋼管と充填コンクリートの強度が高まったためと考えられる。

2.3 圧縮耐力評価式の提案

2.3.1 仮定

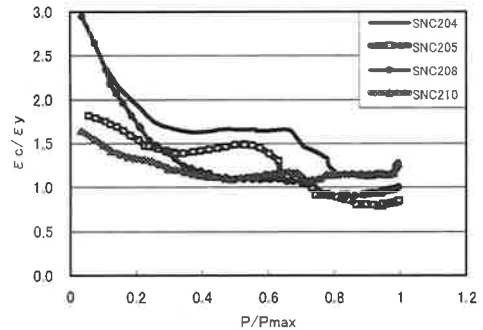
実験結果から RC 充填鋼管柱の圧縮耐力力を評価するために次のように仮定する。

(1) 図-2 に鋼管と充填コンクリートのひずみの関係を示す。普通鋼管及びリブあり鋼管試験体では、荷重の大きいときひずみ比の大きな変化が見られなかったため、鋼管と充填コンクリートの間のずれはなく、最大耐力力が発生するまで一体性が保たれていると仮定する。

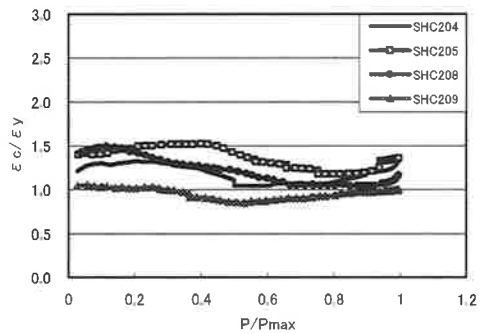
(2) 充填コンクリートは鋼管の拘束による側圧 σ_r を受け、三軸応力状態となるため、その強度 σ_{CB} は一軸圧縮強度に比べ、増大する。強度 σ_{CB} は次式により与えられる。

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

ここに、 σ_{CB} : 側圧 σ_r を受けるコンクリートの軸方向強度。



(a) 普通鋼管試験体



(b) リブ付き鋼管試験体

図-2 鋼管と充填コンクリートの一体化

k : 拘束係数, t/r の関数

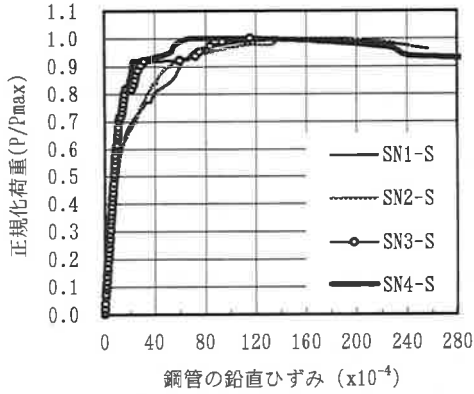
(3) 鋼管は全塑性状態にあり、ミーゼスの降伏条件に従うものとする。

(4) 鉄筋は充填コンクリートの拘束によって強度を十分に発揮できる。

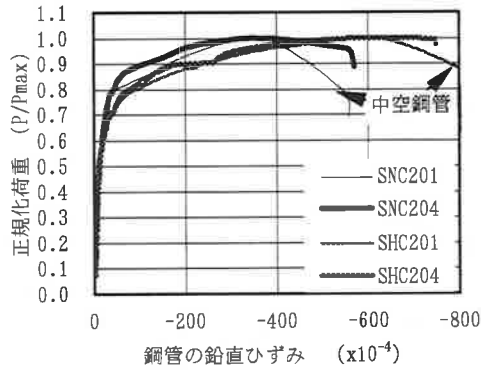
2.3.2 鋼管の二軸応力状態の検討

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-3 に示す。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、充填試験体の最大荷重時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二軸応力状態におけるミーゼスの降伏条件を用いる。



(a) A 実験



(b) B 実験

図-3 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すると、軸方向及び円周方向応力について次式が成立する。

$$\sigma_{sz} = \frac{E_s(\epsilon_z + \nu_s \epsilon_\theta)}{(1 - \nu_s^2)} \quad (3)$$

$$\sigma_{s\theta} = \frac{E_s(\epsilon_\theta + \nu_s \epsilon_z)}{(1 - \nu_s^2)} \quad (4)$$

ここで、

$\sigma_{sz}, \sigma_{s\theta}$: 鋼管の軸方向及び円周方向応力

$\epsilon_z, \epsilon_\theta$: 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

ν_s : 鋼材のポアソン比、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 $\sigma_{sy} = E_s \epsilon_z$ となることを考慮して、 $\xi = \epsilon_\theta / \epsilon_z$ とすれば、鋼材の軸方向の降伏応力度低減係数 β 及び円周方向の定減係数 α はそれぞれ (5) 式で求められる。

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

$$\alpha = \frac{\sigma_{s\theta}}{\sigma_{sy}} = \frac{E_s(\xi \epsilon_z + \nu_s \epsilon_z)}{E_s(1 - \nu_s^2) \epsilon_z} = \frac{\xi + \nu_s}{1 - \nu_s^2} \quad (5-b)$$

また、 $\alpha = \sigma_{s\theta} / \sigma_{sy}$, $\beta = \sigma_{sz} / \sigma_{sy}$ を用いて、式 (2) は次のように表される。

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

鋼管の ξ を求めるため、リブ無しとリブあ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、それぞれ図-4 に示す。縦軸は正規化した荷重とし、横軸は円周方向ひずみと軸方向ひずみの比 $\xi = \epsilon_\theta / \epsilon_z$ とする。鋼管が降伏状態に入った後に荷重の増加に

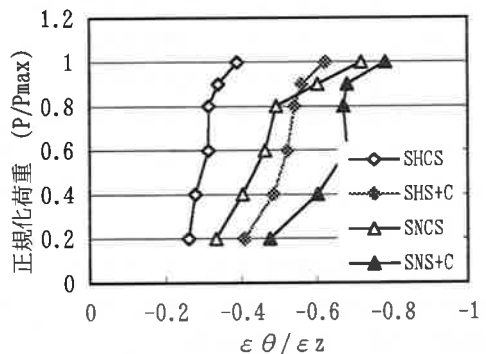


図-4 SHC 円周方向と軸方向のひずみ

表-2 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	$\alpha = \sigma_{s\theta} / \sigma_{sy}$
-0.350	0.984	-0.032	-0.055
-0.400	0.967	-0.063	-0.110
-0.450	0.951	-0.092	-0.165
-0.500	0.934	-0.121	-0.220
-0.550	0.918	-0.148	-0.275
-0.600	0.901	-0.175	-0.330
-0.610	0.898	-0.180	-0.341
-0.630	0.891	-0.190	-0.363
-0.650	0.885	-0.200	-0.385
-0.780	0.842	-0.264	-0.527

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。

普通鋼管試験体では、鋼管が降伏する時では ξ が約 0.35~0.7 であり、最大荷重時では 0.5~0.8 となる。式 (5) により求められた β と α を表-2 に示す。 β は 0.87~0.93 であり、平均値は 0.89 である。 α は -0.22~-0.44 であり、平均値は -0.36 である。しかしながら、実験によって得られた β と α はミーゼスの降伏条件 (6) を満足していない。

一方、ミーゼスの降伏条件を用いて、既に求められた β を式 (6) に代入すると α が求められる。 β は 0.87~0.93 であり、対応する α は -0.12~-0.23 となる。もし平均値を採用すれば、 $\beta=0.89$, $\alpha=-0.19$ となり、建築指針⁴⁾ と同じである。しかし、ミーゼスの降伏条件による求められた α は実験値と大きい差があり、矛盾している。このため、本研究では、この α の矛盾を避けて、後述のように $-\alpha k$ を一つの係数として求めた。

リブ付き鋼管試験体では、リブが円周方向ひずみを有効に抑制するため、降伏時鋼管の軸方向降伏応力度がリブ無し鋼管より高く、 ξ は約 0.31~0.60 であり、最大荷重時では 0.44~0.69

で、平均値は 0.55 である。対応する β は 0.92 となる。

2.3.3 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充填コンクリートは三軸圧縮応力状態となり、圧縮強度の上昇が期待できると考えられる。RC 充填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-5 に示す。

図-5 の y 軸方向の釣合いによって、円周方向と半径方向の主応力の関係式が求められる。

y 軸方向の釣合式は、

$$-\int_{-\frac{\theta}{2}}^{\frac{\theta}{2}} \sigma_r \cdot \cos \alpha \cdot r d\alpha + 2\sigma_s t \sin \frac{\theta}{2} = 0$$

$$\text{したがって、} \frac{\sigma_r}{\sigma_s} = \frac{t}{r} \quad (7)$$

となる。

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^{4~6)}。また、鋼管の円周方向の応力度は次式で表されるものとする。

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

ここに、 σ_s : 鋼管の円周方向の応力度

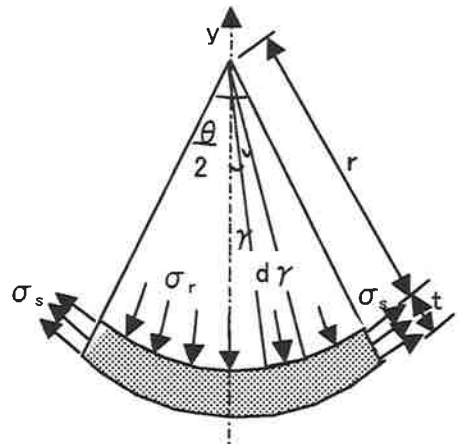


図-5 合成断面の応力状態

α : 係数

式 (7) と (8) を式 (1) に代入して次式のように整理すると、鋼管の横拘束による充填コンクリートの三軸圧縮強度が求められる。

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

$\frac{\sigma_{CB} - \sigma_c}{\sigma_c}$ 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強度

σ_{sy} : 鋼管の降伏強度

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 : 係数

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だが、実際の充填コンクリートに与える横拘束は鋼管の寸法によって異なるものと考えられるため、本研究では、 k を t/r の関数とする。

2.3.4 RC 充填鋼管柱の圧縮耐荷力評価式の提案

以上の検討にしたがって、鋼管の軸方向降伏応力度の低減とコンクリート強度の増加を考慮に入れ、中心圧縮耐力の評価式を提案する。

$$\begin{aligned} P_y &= P_{st} + P_{sr} + P_c \\ &= \beta A_{st} \sigma_{sty} + A_{sr} \sigma_{sry} + R_{cu} A_c \sigma_{CB} \end{aligned} \quad (11)$$

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は負担する荷重

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} : 鋼管の降伏強度、鉄筋の降伏強度である。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強度と低減係数

β : 鋼管の降伏強度の変化係数

この考え方に従って、試験体の最大荷重から αk の表す式を求めた。 αk と t/r の関係を図-6 に示す。この図によると、両者は $\alpha k = 8.47 * t/r + 0.18$ となる 1 次関数と近似できることがわかる。従って、圧縮側鋼管による横拘束を受けるコンクリートの強度及び増加率は (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強度の増加率は、鋼管の径厚比と二次関係であり、降伏強度に比例し、自身の一軸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 充填鋼管柱の圧縮耐荷力 P_y の評価式を次のように提案する。

$$\begin{aligned} P_y &= \beta A_{st} \sigma_{sty} + A_{sr} \sigma_{sry} \\ &\quad + R_{cu} A_c \left[\sigma_c + \left(8.47 \times \frac{t}{r} + 0.18 \right) \frac{t}{r} \sigma_{sy} \right] \end{aligned} \quad (14)$$

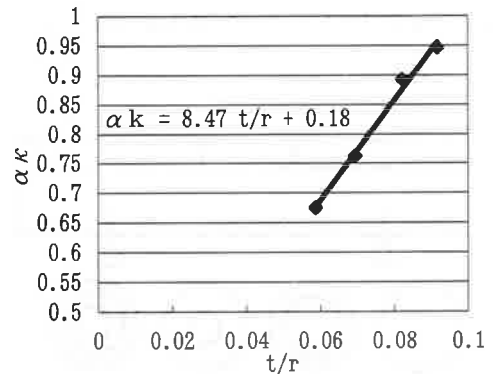


図-6 係数 αk と t/r の関係

ここに、

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

$\sigma_{sty}, \sigma_{stry}, \sigma_c$: 鋼管の降伏強度, 鉄筋の降伏強度, コンクリートの一軸圧縮強度

β : 鋼管が二軸応力状態により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, 0.85とする。

t, r : 鋼管の肉厚と内半径

3. RCFT 梁の曲げ耐力評価式に関する研究

3.1 曲げ実験概要

曲げ実験は2,940 KN 載荷装置を用いて、試験体の両端を回転支承とし、純曲げ区間に2点載荷で、荷重制御方式によって行った。実験のパラメータはコンクリートの強度、鋼材の強度、鋼管のリブ、径厚比と配筋のかぶりとした。

曲げ実験の試験体については、図-7に示す無筋コンクリートと3種類の配筋の鉄筋コンクリートを使用し、3グループの試験体を作製した。リブ有り鋼管のみ (SHB1-SHB2) 及びリブ有り鋼管に充填させた試験体10体 (SHBグループ)、リブ無し鋼管のみ (SNB1-SNB2) 及びリブ無し鋼管に充填させた試験体10体 (SNBグループ)、コンクリートのみと鉄筋コンクリートの試験体12体 (CNBグループ)、合計32体であった。鋼管の材料、リブ断面及び主鉄筋の配置は2.1で述べたB圧縮実験と同一と

した。充填用コンクリートについては、試験体の寸法、鉄筋間隔、リブ間隔等を考慮し、粗骨材最大寸法を15 mmとした。配合強度については標準的と考えた300 N/mm²として配合した。計測項目は、載荷荷重、梁のたわみ4点、および鋼管側面のひずみである。

3.2 実験結果

実験により得られた極限荷重を表-3に示す。鋼管にコンクリートを充填させ、リブ無し鋼管に代わってリブ付き鋼管を使用すると、極限荷重を高めることが分かった。充填コンクリートに鉄筋をいれても、極限荷重を高めることができない。これは主筋の面積が鋼管より非常に小さいためと思われる。また、かぶりが大きければ極限荷重はやや大きくなる傾向もあるが、その影響は僅かである。

単純累加強度法を用いて、鋼管、コンクリート充填鋼管及びRC充填鋼管試験体の終局限界状態曲げモーメントを求め、実験値との比を複合効果として計算し、表に示した。リブ無し試験体とリブ有り試験体の複合効果はほぼ同じ、平均値は1.6である。このことから、リブは梁の最大耐力力に影響を与えないと考えられる。なお、鉄筋コンクリート充填された試験体の複合効果は約1.7で最大となった。二重配筋試験体の極限荷重がコンクリートのみ充填試験体より小さい結果となったが、これは鉄筋の存在が複合効果に有効的でない結果となったのはコンクリートの充填が不良であったことと鉄筋比が小さいことが影響していると考えている。

3.3 仮定

実験結果からRC充填鋼管梁の曲げ耐力を評価するため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、曲げ耐力が発生するまで一体化し、平面保持ができる。
- (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

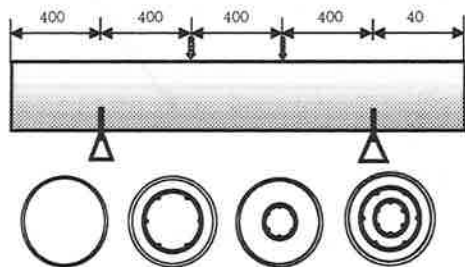


図-7 曲げ試験体

表-3 曲げ試験体の最大荷重

試験体番号		最大荷重 (kN.m)	平均荷重 SN (kN.m)	累加平均値 $D_1 = A + B_1$	複合効果 SN / D_1
リブ無し鋼管試験体 (SNB グループ)	SNB201	85.3	86.2		
	SNB202	87.2			
	SNB203	150.3	153.2	88.1	1.74
	SNB204	156.1			
	SNB205	145.7	144.6	92.9	1.56
	SNB206	143.5			
	SNB207	158.3	151.6	91.7	1.65
	SNB208	144.9			
	SNB209	140.8	139.8	93.6	1.49
	SNB210	138.8			
リブ有り鋼管試験体 (SHB グループ)	SHB201	92.4	92.7		
	SHB202	93.0			
	SHB203	149.2	148.8	88.1	1.69
	SHB204	148.4			
	SHB205	135.1	142.1	92.9	1.53
	SHB206	149.2			
	SHB207	146.3	146.2	91.7	1.59
	SHB208	146.0			
	SHB209	146.4	146.4	93.6	1.56
	SHB210	117.3			

ることから、コンクリートの引張応力は無視する。

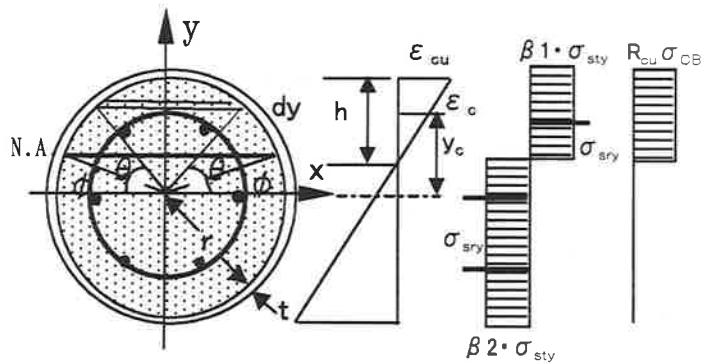
- (3) 圧縮側のコンクリートは鋼管による側圧 σ_r を受け、三軸応力状態となるため、柱の充填コンクリートと同じく、充填コンクリートの強度 σ_{CB} は一軸圧縮強度に比べ、増大するものとし、式 (12) により与えられる。
- (4) 鋼管は全塑性状態にあり、引張側の鋼管は二軸引張応力状態であり、軸方向の降伏応力度は $\beta_2 \cdot \sigma_{sy}$ となる。一方、圧縮側の鋼管は二軸引張・圧縮応力状態であり、軸方向の降伏応力度は $\beta_1 \cdot \sigma_{sy}$ とな

る。ここでは、 β_1 と β_2 を鋼材の降伏応力度変化係数とし、実験によって決められる。

- (5) 鉄筋は充填コンクリートの拘束によって強度を十分に発揮できる。
- (6) 梁断面の応力分布は図-8 のように仮定する。

3.4 鋼材の降伏応力度低減係数 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 (5) のように考える。圧縮側と引張側の ε 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。



(a) 試験体断面 (b) ひずみ分布 (c) 鋼管断面と鉄筋 (d) コンクリート断面

図-8 鋼管と充填コンクリートの応力分布

鋼管の ξ を求めるため、リブ無しとリブあ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、それぞれ図-9 に示す。縦軸は正規化した荷重とし、横軸は円周方向ひずみと軸方向ひずみの比 $\xi = \epsilon_\theta / \epsilon_z$ とする。

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。鋼管が最大荷重時では 0.5～0.7 であり、平均値は 0.63 である。従って、圧縮側の降伏応力度変化係数 β_1 は 0.93～0.87 であり、平均値は 0.89 である(表-4)。軸向圧縮力

表-4 円周方向と軸方向の降伏応力の変化係数

	$\xi = \epsilon_\theta / \epsilon_z$	$\beta = s\sigma_z / s\sigma_y$	ミーゼスの降伏条件による α
引張側	-0.140	1.053	0.116
	-0.150	1.049	0.108
	-0.160	1.046	0.100
	-0.200	1.033	0.070
中立軸	-0.300	1.000	0.000
圧縮側	-0.500	0.934	-0.121
	-0.550	0.918	-0.148
	-0.600	0.901	-0.175
	-0.620	0.895	-0.185
	-0.630	0.891	-0.190
	-0.650	0.885	-0.200
	-0.700	0.868	-0.225

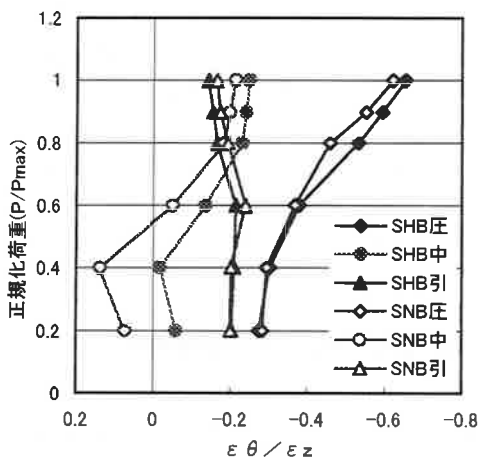


図-9 SNB, SHB 圧縮側, 中間及び引張側の ξ の比較

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、円周方向の引張応力が増大している意味である。鋼管が降伏する時 ξ が約 0.15～0.2 であり、最大荷重時では 0.14～0.16 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 1.053～1.046 であり、平均値は

1.05 である。

また、リブによって、 ξ の絶対値は圧縮側で大きく、引張側で小さい傾向が示された。言い換えると、リブによって円周方向の引張応力が増大している。

3.5 断面の中立軸

断面の中立軸は断面応力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、コンクリート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。

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

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面積

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

A_{r1} , A_{r2} : 圧縮応力, 引張応力を受ける鉄筋の面積

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。その結果、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。

3.6 RC 充填鋼管梁の曲げ耐力評価式の提案

以上の検討にしたがって、鋼管が軸方向降伏応力度の変化とコンクリート強度の増加を考慮に入れ、曲げ耐力の評価式を提案する。

$$\begin{aligned} M_y &= 2r^3 R_{cu} \sigma_{CB} \int_{\phi}^{\pi/2} \sin \theta \cos^2 \theta d\theta + \sum \sigma_{sry} A_{sr} Z_r \\ &\quad + 2r^2 t \left(\int_{\phi}^{\pi/2} \beta_1 \sigma_{sty} \sin \theta d\theta - \int_{-\pi/2}^{\phi} \beta_2 \sigma_{sty} \sin \theta d\theta \right) \\ &= \frac{2}{3} r^3 R_{cu} \left[\sigma_c + \left(8.47 \frac{t}{r} + 0.18\right) \frac{t}{r} \sigma_{sty} \right] \cos^3 \phi \\ &\quad + 2r^2 t \sigma_{sty} (\beta_1 + \beta_2) \cos \phi + \sum \sigma_{sry} A_{sr} Z_r \end{aligned} \quad (16)$$

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, 鉄筋の降伏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, 0.85 とする。

ϕ : 中立軸の位置を示す角度

4. 圧縮耐力評価式の検証

本研究で提案した評価式と、既往の提案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(建築指針と呼ぶ)の提案式による計算値と比較した。

(1) 実験値及び建築指針と提案式の比較

コンクリート充填鋼管構造設計施工指針によると、コンクリート充填鋼管柱の軸圧縮耐力は次式で評価できるとされている。

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

本実験では鉄筋があるため、式 (2-14) に鉄筋が負担する耐力を考慮すると、次式となる。

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

ここで、

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

$\sigma_{sty}, \sigma_{sry}, \sigma_c$: 鋼管の降伏強度, 鉄筋の降伏強度, コンクリートの一軸圧縮強度

α, β : 鋼管が二軸応力状態により軸方向と円周方向降応力度の低減係数, $-0.19, 0.89$ とする。

t, D : 鋼管の肉厚と内半径

k : 拘束係数, 4.1 とした。

提案式 (14) による計算した降伏荷重と, 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荷重, 及び建築指針 (18) による計算値を比較し, 表-5 に示す。ここでは, 実験結果から, $\sigma_{sty}=350 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{sry}=350 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_c=180, 230 \text{ N/mm}^2$ とした。

比較結果によると, 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, 指針の差より小さく, 実験値と良好に一致していることが分かる。これは次の理由によると考えられる。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 ka を建築指針では定数としているのに対して, 本提案では t/r の関数と考えている。このため, コンクリートの圧縮強度の増加については建築指針では t/r の 1 次関数であるのに対し, 本提案は t/r の 2 次関数として精度を高めていることとなる。また, 本提案では, リブ鋼管に適用する β を別に定めている。

(2) 実験値と提案式の比較

本論文の提案式によって, RC 充填鋼管構造の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を使用し, コンクリート強度の低減係数 R_{cu} を 1.0 とし次式により計算した。

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

ここで, 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_{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 : 鋼管が二軸応力状態により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。

式 (19) による計算された最大耐力を求め, 表-5 に示す。この表によると, 実験値と計算値の差については, コンクリートのみ充填試験体では 6.1%~9.1% であり, RC 充填試験体では 0.4%~4.7% で, 平均値は 2.5% である。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 充填鋼管構造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 2.1 で述べた式で二軸応力状態における鋼管 (1)~(4) の仮定がほぼ適切であることを示している。

5. 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 (建築指針と呼ぶ) による計算値と比較した。

(1) 実験結果, 建築指針による降伏曲げ耐力の検証

コンクリート充填鋼管構造設計施工指針の提案によると, コンクリート充填鋼管梁の曲げ耐力 M_u は次式で評価できるとされている。

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

本実験では鉄筋があるため, 式 (20) に鉄筋に負担する耐力を考慮すると, 次式となる。

$$M_u = \frac{(D-t)^2}{2} t (\beta_1 + \beta_2) \sin \phi \sigma_{sty} + \frac{2}{3} r^3 \sin^3 \phi \left(\sigma_c + \frac{2kat}{(D-2t)} \sigma_{sty} \right) + \sum A_{sr} \sigma_{sry} Z_r$$

表-5 圧縮提案式の検証

供 試 体 番 号			実験値及び指針による降伏耐力提案式の検証				実験値と提案式による最大耐力力の比較			
			降伏耐力 (kN)	平均値 P_y (kN)	指針による計算値		最大荷重 (kN)	平均荷重 P (kN)	提案式による計算値	
					計算値 (kN)	実験値との差 (%)			耐力力 (kN)	実験値との差 (%)
A 実験	鋼 管 (リップなし)	SN3	2207.3	2281.1	2733.1	19.8	2888.8	2885.9	3075.4	6.6
		SN4	2355.0							
	鋼 管 (リップあり)	SH3	2454.5	2406.5	2572.9	6.9	3147.8	3206.3	3035.6	-5.3
		SH4	2358.4							
B 実験	鋼 管 (リップなし)	SNC203	1281.8	1275.1	1434.9	12.5	1702.1	1727.4	1808.8	4.7
		SNC204	1268.3							
		SNC205	1274.1	1374.4	1491.9	8.5	1867.2	1882.6	1876.8	-0.3
		SNC206	1474.7							
		SNC207	1281.0	1330.2	1491.9	12.2	1822.4	1846.7	1876.8	1.6
		SNC208	1379.5							
		SNC209	1138.0	1429.3	1548.9	8.4	1914.5	1960.8	1944.9	-0.8
		SNC210	1429.3							
	鋼 管 (リップあり)	SHC203	1439.1	1485.1	1610.4	8.4	1948.9	1956.2	2107.3	7.7
		SHC204	1531.0							
		SHC205	1476.5	1501.0	1666.6	11.0	2096.0	2109.0	2173.4	3.1
		SHC206	1525.6							
	鋼 管 (リップあり)	SHC207	1564.7	1540.9	1666.6	8.2	2073.6	2100.4	2173.4	3.5
		SHC208	1517.0							
		SHC209	1588.8	1645.0	1722.9	4.7	2146.0	2223.7	2239.5	0.7
		SHC210	1721.2							

(21)

ここで, t, r, D : 鋼管の肉厚, 内半径及び直径
 A_r : 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
 $\sigma_{sty}, \sigma_{sry}$: 鋼管, 鉄筋の降伏強度
 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

提案式 (16) によって計算した降伏荷重と, 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荷重, 及び建築指針 (21) による降伏荷重を比較し, 表-6 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, 指針より小さく, 実験値と良好に一致していることが分かる。これは次の理由によると考えられる。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 $k\alpha$ を建築指針では定数としているのに対して, 本提案では t/r の関数と考えている。このため, コンクリートの圧縮強度の増加については建築指針では t/r の 1 次関数であるのに対し, 本提案は t/r の 2 次関数として精度を高めていることとなる。また, 本提案では, リブ鋼管に適用する β を別に定めている。

(2) 実験結果による最大曲げ耐力の検証

本論文の提案式によって, RC 充填鋼管構造の最大耐力を推定することを試みた。鋼管の降伏強度の代わりに鋼管の最大強度を使用し, 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。

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

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

$\sigma_{stu}, \sigma_{sru}, \sigma_c$: 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

ϕ : 中立軸の位置を示す角度

各試験体の最大曲げ耐力を求め, 表-6 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。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。計算値と実験値とほぼ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 (22) は RC 充填鋼管構造の耐力を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 で述べた式で二軸応力状態における鋼管の (1)~(6) の仮定がほぼ適切であることを示している。

6. 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充填させた試験体に対して繰返し軸方向圧縮耐力実験と曲げ耐力実験を行った。RC 充填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検証した。本研究において得られた結果をまとめると, 次の通りである。

(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, 特にピーク後の耐力が大幅に向上される。

(2) 柱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によって得られたと考えられる。

(3) 梁における鋼管とコンクリートの複合

表-6 曲げ提案式の検証

試験体	実験結果と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				
	降伏耐力 (kN.m)	平均値 (kN.m)	指針による計算値		提案による計算値 (kN.m)	実験値と の差 (%)	実験荷重 (kN.m)	平均荷重 EN (kN.m)	提案による計算値	
			(kN.m)	(%)					最大値 (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					150.3			
	SNB204	103.8	103.3	111.7	8.1	97.9	156.1	153.2	122.3	-20.2
	SNB205	107.9					145.7			
	SNB206	92.4	100.2	115.3	15.1	101.5	143.5	144.6	126.9	-12.2
	SNB207	101.6					158.3			
	SNB208	93.5	97.6	114.2	17.1	100.4	144.9	151.6	125.5	-17.2
	SNB209	96.6					140.8			
	SNB210	86.3	91.5	117.8	28.8	104.0	138.8	139.8	130.1	-6.9
	SHB203	91.1					149.2			
	SHB204	92.5	91.8	111.0	20.9	96.9	148.4	148.8	121.9	-18.1
リブ有り鋼管試験体 (SHBグループ)	SHB205	93.2					135.1			
	SHB206	90.5	91.9	114.6	24.8	100.5	149.2	142.1	126.5	-11.0
	SHB207	90.9					146.3			
	SHB208	90.1	90.5	113.5	25.4	99.4	146.0	146.2	125.1	-14.4
	SHB209	99.1					146.4			
	SHB210	85.7	92.4	117.1	26.8	103.0	117.3	146.4	129.7	-11.4

効果は、拘束された充填コンクリートの一軸強度が増大すること、引張側の鋼管が二軸引張応力状態になるため強度が増加することによって得られたと考えられる。

(4) 充填コンクリートの強度はコンクリートの強度、鋼管の強度及び鋼管の径厚比によって評価できる。

(5) 本研究の結果に基づいて RC 充填鋼管柱、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証した。その結果、本提案が耐力の評価をより正確に表現していることが示された。

参考文献

- 1) 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集, pp. 34-35, 1999.3

- 2) 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
- 3) 塩井幸武: RC 橋脚のせん断補強と靱性確保のための配筋に関する研究, 平成7年度-9年度科学研究費補助金研究成果報告書, 1998
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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

(2000年9月22日受付)