

交番曲げを受けるコンクリート充填角形鋼管梁の
耐荷力に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON STRENGTH OF CONCRETE-FILLED
STEEL SQUARE BEAMS UNDER ALTERNATING BENDING

桜井 孝昌*・加藤 賢治**・宇野 洋平***・忠 和男****・草間 晴幸*****

By Takamasa SAKURAI, Kenji KATO, Youhei UNO, Kazuo CHU, and Haruyuki KUSAMA

Experimental results on ultimate strength of steel square tubular beams under alternating bending are presented. Two kinds of tubular beams were tested. The one is non-composite tubular beams and the other is concrete filled tubular beams. The tested beam cross section is selected so thin that local buckling arises on the non-composite beams.

Particular interest is given to the reduction in the ultimate strength of concrete filled beams as well as that of the non-composite beams under alternating bending.

1. まえがき

鋼管部材は製作が容易で、かつ梁や柱部材として優れた断面性状を有しているため、広く利用されている。構造部材として、幅厚比の大きい鋼管を使用する場合は、局部座屈が鋼管全体の耐荷力を決定し、鋼管の材料強度が有効に生かされないため、種々の補剛法が考えられている。さらに、薄肉部材が地震力や海洋波力などの繰り返し荷重を受ける構造物の部材として用いられる場合は、初期たわみや残留応力などの初期不整の影響を強く受け、非弾性領域の応力を発生させる繰り返し荷重のもとで、著しい強度劣化が生じる^{1),2),3)}。福本、草間⁴⁾は、交番曲げ荷重を受ける溶接薄肉箱桁の耐荷力実験を行ない載荷回数の増加に伴う桁の耐荷力の低減特性について報告している。渡辺等⁵⁾は、一定の軸力のもとで角形鋼管に曲げ荷重が繰り返し作用する場合の耐荷力特性について実験を行ない、曲げ強度に与える軸力の影響が大きいことを指摘した。

これらの鋼管部材の特性を考慮し、その欠点を補う目的で、鋼管にコンクリートを充填するコンクリート充填鋼管が構造用部材として注目され、土木工学の分野でも多くの研究成果が報告されている⁶⁾。

一方、建築構造物を対象とした鋼管コンクリート構造の設計⁷⁾においては、コンクリート充填鋼管の幅厚比制限値が充填しない中空鋼管のその1.5~1.7倍まで緩和できることが示されている。コンクリート充填鋼管は、耐荷力や変形性能ともに中空鋼管に比較して優れていることが橋脚⁸⁾やラーメン隅角部⁹⁾の静的実験でも明らかにされ、合成構造の特性を生かした設計法についても報告されている¹⁰⁾。

*	工博	豊田工業高等専門学校助教	土木工学科 (471	豊田市栄生町 2 の 1)
**		豊田工業高等専門学校講師	建築学科 (	同上)
***		豊田工業高等専門学校教授	建築学科 (	同上)
****	工修	豊田工業高等専門学校助手	土木工学科 (	同上)
*****	工博	豊田工業高等専門学校助教	土木工学科 (	同上

コンクリート充填鋼管の大きい特徴の一つとして、崩壊に到るまでの粘り強さが中空鋼管より極めて大きいことが指摘されている⁸⁾。この変形能力に関する特性は、部材が繰返し荷重を受ける場合に特に大きく発揮される。繰返し荷重を受けるコンクリート充填鋼管に関しては、建築構造物を対象として、鋼管の幅厚比制限を緩和する目的で多くの研究が行なわれている¹¹⁾。

コンクリート充填鋼管は、地震力を受ける高速道路の橋脚、波力を受ける海洋構造物の部材、あるいは路線下横断構造物の梁部材等、繰返し荷重を受ける構造部材として極めて有効である。

著者等は、冷間成形角形鋼管梁を対象として、コンクリート充填角形鋼管の交番曲げに対する耐荷力特性を検討する目的で、コンクリートを充填しない角形鋼管^{12),13)}およびコンクリート充填角形鋼管の耐荷力実験¹⁴⁾を行ってきた。本報告では、これらの結果に基づいてコンクリート充填による補剛効果に特に注目し、交番曲げの繰返し載荷回数と耐荷力の減少傾向を実験的に検証した。

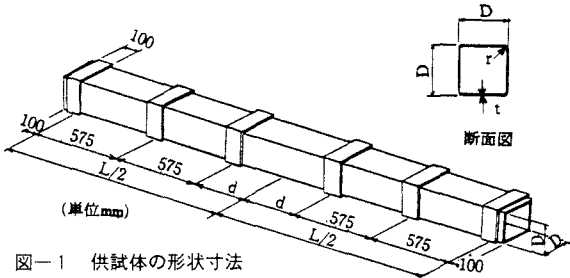
中空角形鋼管の耐荷力に比較して、コンクリート充填鋼管の耐荷力は、コンクリートの圧縮抵抗力和断面変形拘束により、向上することが予想される。一方、実設計においては、コンクリート充填による自重の増加等の問題も生じる。

実験に用いた供試体は局部座屈が生じ易い角形鋼管梁で、等価幅厚比 $R=1.02$ とした。

2. 実験概要

(1) 供試体

供試体として使用した冷間成形角形鋼管は材質がSTKR41で、寸法が□-200×200×4.5mm、長さ3000mmの市販の品である。供試体は10体作成し、その内5体は、中空角形鋼管とし、残りの5体は、コンクリート充填角形鋼管とした。



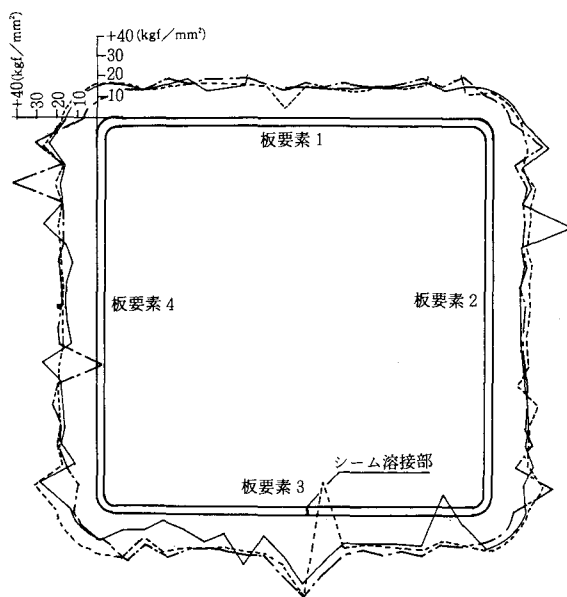
図－1 供試体の形状寸法

表－1 供試体の寸法および諸係数

供試体	D (mm)	t (mm)	A (mm ²)	D/t	d (mm)	r (mm)	L (mm)	I (cm ⁴)	W (cm ³)
M-1	200.7	4.45	3493.3	45.1	352.2	9.3	3000	2243.8	223.6
C-1	200.8	4.68	3671.4	42.9	351.4	9.3	3000	2354.4	234.5
C-2	200.7	4.52	3546.9	44.4	351.2	9.3	3000	2275.9	226.8
C-3	200.8	4.55	3571.8	44.1	351.3	9.3	3000	2293.1	228.4
C-4	200.8	4.50	3533.4	44.6	351.3	9.3	3000	2270.0	226.1
AVE.	200.8	4.50	3532.8	44.6	351.3	9.3	3000	2268.8	226.0

中空角形鋼管は、図－1 および表－1 にその形状および寸法を示す。表－1 のM-1 は単調載荷用の供試体を示し、C-1～4 は、繰返し載荷用の供試体を示す。D、t、d、r、L は、それぞれ図－1 に示す値であり、I およびW は梁断面の断面 2 次モーメントおよび断面係数を表す。供試体の形状は、表－1 に示すように幅厚比が平均で $D/t=44.6$ 、等価幅厚比 R が 1.02 ($R=(D/t)\sqrt{12(1-\nu^2)\sigma_y/4\pi^2E}$)のもので、局部座屈の生じ易い断面である。載荷に伴う供試体の局部座屈を防止するために載荷点、両端およびそれらの中間位置を補剛板で補強した。補剛板の板厚は9.0mmで幅100.0mmのものを4面(上下、両側面)

にすみ肉溶接した。コンクリート充填角形鋼管の供試体は図－１および表－１に示す角形鋼管にコンクリートを充填したものを用いた。鋼管内部にはスタッドはなく、桁の端部断面は、コンクリート充填状態のまま、拘束していない。表－１にみられるように、それぞれの供試体の形状はほとんど差がないので、コンクリート充填角形鋼管については、その形状寸法を示すことを省略した。



図－２ 異なる３体の供試体の残留応力分布

表－２ 鋼材の引張試験結果

供試体	断面積 A (mm²)	ヤング係数 E ($\times 10^4$) (Kgf/mm²)	降伏応力 σ_y (Kgf/mm²)	$\epsilon_{y0} = \frac{\sigma_y}{E}$ ($\times 10^{-3}$)	引張強さ σ_u (Kgf/mm²)	ひずみ硬化係数 Est ($\times 10^3$) (Kgf/mm²)	ポアソン比 ν
M-1	252.8	2.05	40.2	1.96	50.0	4.31	0.312
C-1	282.9	1.96	36.2	1.85	44.4	3.20	
C-2	252.8	2.16	40.5	1.88	49.6	3.30	
C-3,4	252.8	2.14	40.3	1.88	49.6	3.62	
AVE.	260.3	2.08	3.89	1.89	48.4	3.61	0.312

表－２には、供試体から切り出した試験片の引張試験結果を示す。A, E, σ_y , ϵ_{y0} , σ_u , E_{mt} および ν は、それぞれ断面積、ヤング係数、降伏応力、 $\epsilon_{y0} = \sigma_y / E$ で定義されるひずみ、引張強さ、ひずみ硬化係数およびポアソン比を示す。

載荷実験に先立って、供試体の初期不整の測定を行なった。図－２に、この角形鋼管の残留応力分布を示す。残留応力の測定は、コンタクト型マイクロストレングージ（ゲージ長 100mm）を用い、切断法によって行なった。この分布図は、供試体の外側の軸方向残留応力分布について３体の供試体の結果を同一の図に示したものである。図－２に示す冷間成形角形鋼管の残留応力分布は、溶接箱桁の場合とはおおいに異なる。溶接箱桁においては、隅角部の溶接部分で降伏応力程度の引張応力が生じ、板の中央部分では、降伏応力の 0.1～0.2 倍の圧縮応力が生じている。これに対して、冷間成形角形鋼管の残留応力分布は、どの板要素においても鋼管の外側で様な大きさの引張応力が生じている¹⁵⁾。応力の釣合を考えると、鋼管の内側は、圧縮応力が

分布していることになる。残留応力の大きさは、平均値が降伏応力の0.46倍、溶接部では、1.0倍である。

表－3は、中空角形鋼管およびコンクリート充填角形鋼管のそれぞれ板要素の初期最大たわみ量を表している。この表に示すように中空角形鋼管およびコンクリート充填角形鋼管の最大たわみ量は、それぞれ板厚（ $t=4.5\text{mm}$ ）の16.4％および19.6％であった。これらは、鋼管の板要素（ $D=200\text{mm}$ ）のそれぞれ0.37％および0.44％であり、コンクリート充填角形鋼管の方が初期たわみがわずかに大きい。しかし、いずれの鋼管も日本鋼構造協会規格の冷間成形角形鋼管の規定に示されている初期たわみの標準許容値¹⁹⁾（0.5％）以内である。4面とも外側に膨らんでいる。

なお、コンクリートは、普通ポルトランドセメントを使用した。コンクリートの配合およびJISA1108によって得られたコンクリートの圧縮強度試験結果を、表－4に示す。

表－3 中央部分の初期最大たわみ量

種 類	供 試 体	厚 み t (mm)	板 要 素 1 $\Delta t/t \times 100^{-2}$	板 要 素 2 $\Delta t/t \times 100^{-2}$	板 要 素 3 $\Delta t/t \times 100^{-2}$	板 要 素 4 $\Delta t/t \times 100^{-2}$
中空角形鋼管	M-1	4.45	9.9	7.9	6.7	7.2
	C-1	4.68	13.5	3.6	10.9	3.4
	C-2	4.52	15.7	5.8	12.1	5.4
	C-3	4.50	16.4	5.3	7.6	5.8
	C-4	4.55	12.5	7.3	8.6	5.9
コンクリート充填角形鋼管	MM-1	4.50	18.3	12.4	11.3	10.3
	CM-1	"	14.8	13.8	8.2	12.4
	CM-2	"	19.4	7.0	13.4	10.2
	CM-3	"	19.6	7.2	14.0	7.8
	CM-4	"	13.7	13.4	11.0	10.6

表－4 コンクリートの配合および圧縮試験結果

セメント の 種 類	粗骨材 の最大 寸法 (mm)	スラン プ (cm)	空気量 (%)	水セメ ント比 (%)	細骨材 率 (%)	単位量 (kgf/nl)				圧縮強度 Kgf/mm ²	ヤ ン グ 係 数 Kgf/mm ² $\times 10^4$	ポアソン 比
						水	セ メ ン ト	粗 骨 材	混 和 剤			
普通ポルト ランド セメント	25	12	4	58	45	161	278	813	0.28	4.03	0.39 $\times 10^4$	0.13

(2) 実験方法

実験は、単調載荷実験と繰り返し載荷実験に分け、単調載荷実験は繰り返し載荷実験のための基礎資料を得るために行なった。実験装置の概略図を図－3に示す。いずれの載荷実験も2点載荷で行ない、供試体の両支点は上下両方向とも単純支持とした。ひずみおよび変位の測定位置は、図－4に示すように梁中央部にひずみゲージを各面に3箇所ずつ計12箇所、梁下面に変位計を9箇所とした。

単調載荷実験は、変位制御により、鉛直下方向に変位を漸増して行なった。

繰り返し載荷実験も、変位制御で行なった。載荷シリンダーの最大振幅 δ を一定にして5～6サイクルまで静的繰り返し載荷を行ない、その後は、振動数を0.01Hzの正弦波で動的に繰り返し載荷した。 δ の値は、中空角形鋼管およびコンクリート充填角形鋼管について、単調載荷実験の結果から得られた荷重－変位曲線を基にそれぞれ2種類の大きさを選定した。

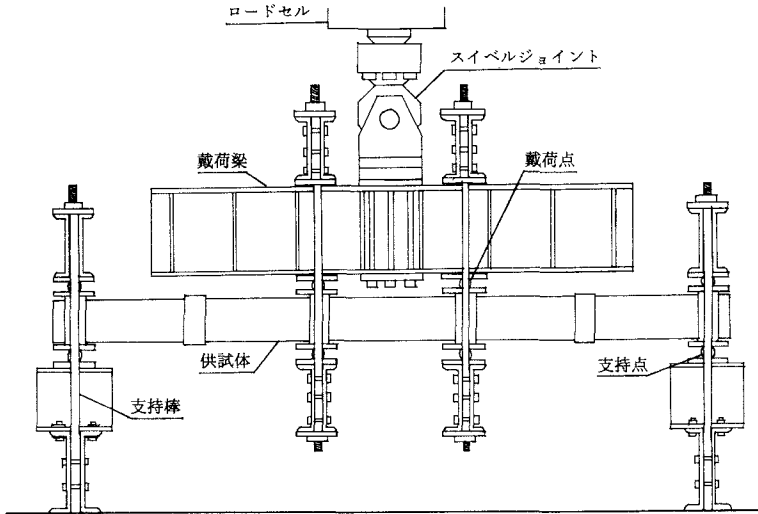


図-3 実験装置

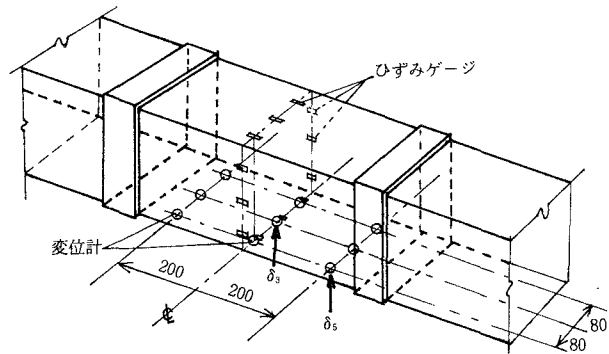


図-4 ゲージおよび変位計の位置 (単位: mm)

材料の降伏応力 σ_y 、降伏荷重 P_y および P_y を載荷したときの微小変位理論による梁中央のたわみ δ_y を次式のように定義する。

$$P_y = 2W \sigma_y / (L/2 - d) \quad (1)$$

$$\delta_y = P_y (L - 2d) (L^2 + 2Ld - 2d^2) / 48EI \quad (2)$$

ここに、 W および E はそれぞれ表-1 および 2 に示す中空角形鋼管の断面係数およびヤング係数を表し、 L および d は図-1 に示す諸元を表す。実験結果を無次元化するために用いる P_y と δ_y の値は、表-1 に示す中空角形鋼管の平均値を式(1)および(2)に代入することにより得られる $P_y = 15.46 \text{ tf}$ および $\delta_y = 17.03 \text{ mm}$ とする。変位制御として選んだ 2 種類の値は、微小変位理論で求めたフランジが降伏応力に達したときの梁の変位で除して、無次元化した値で表すと $\delta_o / \delta_y = 1.23, 1.29$ および $1.53, 1.60$ である。 $\delta_o / \delta_y = 1.23$ および 1.29 は、座屈直後の値に選んだ場合であり、 $\delta_o / \delta_y = 1.53$ および 1.60 は、座屈後かなり変形が進んだ場合の値に選んだ。

コンクリート充填角形鋼管については、変位がかなり大きく増加しても最大荷重は低下しないため、中空角形鋼管の大きい方の制御変位に近い $\delta_o / \delta_y = 1.76$ およびそれよりさらに大きい $\delta_o / \delta_y = 2.35$ を選んだ。

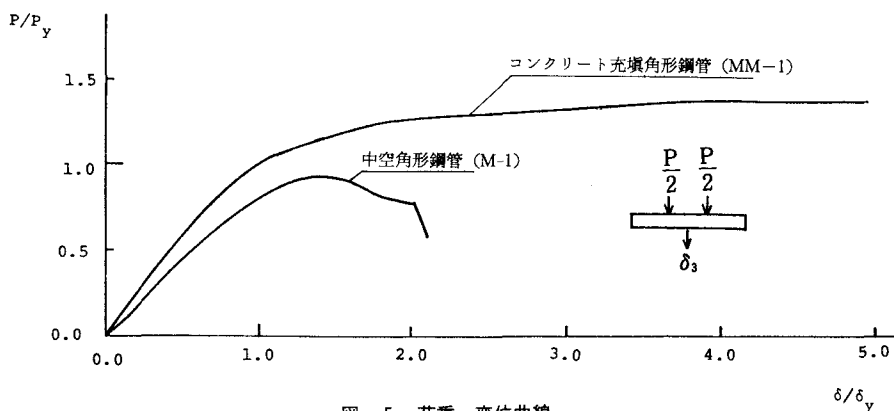


図-5 荷重一変位曲線

3. 実験結果と考察

(1) 単調荷重実験

図-5は、横軸に梁中央点の鉛直下方向の変位 δ_3 と δ_y との比をとり、縦軸は荷重 P と P_y との比をとって中空角形鋼管とコンクリート充填角形鋼管の単調荷重実験における荷重一変位曲線を示したものである。中空角形鋼管の場合は、はり中央点の軸方向ひずみの急激な増加がみられ、同時に $P/P_y=0.9$ 、 $\delta_0/\delta_y=1.16$ の付近で局部座屈の発生が認められた。座屈荷重は降伏荷重の90%程度で生じていることがわかる。また $\delta_0/\delta_y=1.4$ を越えると荷重が急激に低下する。これに対して、コンクリート充填角形鋼管の場合は、 $\delta_0/\delta_y=1.40$ を越えてもなお荷重の増加があり、 $\delta_0/\delta_y=5.0$ に達しても荷重の低下は見られない。これは、コンクリート充填角形鋼管が局部座屈してから崩壊に到るまでの変形が、中空角形鋼管のそれと比較していちじるしく大きいことを示している。

(2) 繰り返し荷重実験

図-6は、横軸に鉛直方向の変位の比 δ_0/δ_y をとり、縦軸に荷重の比 P/P_y をとった荷重一変位履歴曲線である。(a)は中空角形鋼管の場合で、載荷点の制御変位振幅比 $\delta_0/\delta_y=1.60$ で繰り返し荷重実験を行った結果である。(b)および(c)は、コンクリート充填角形鋼管について載荷点の制御変位振幅比 $\delta_0/\delta_y=1.76$ および2.35の場合の結果を表している。変位制御の位置はシリンダーヘッド部で行ったのに対し、変位の測定位置は、いずれも図-4の δ_5 である。図-6の(a)に示す、中空角形鋼管の場合ははり中央断面の変形が上下方向で非対称となり、履歴曲線の形状が繰り返し回数の増加に伴って大きく変化し、最大荷重もかなり低下している。これに対し(b)に示すコンクリート充填角形鋼管の場合は、安定した紡錘形を示しており、履歴曲線の形状および最大荷重とも繰り返し荷重の増加に対して大きな変化は見られず、コンクリート充填による局部座屈防止効果が顕著に表れている。(c)は、制御変位振幅が大きくなると履歴曲線に逆S字形の形状が表れていることを示す。しかし、繰り返し荷重による最大荷重の低下傾向は、(b)の場合と同様にわずかである。図-7は、繰り返し荷重実験における供試体中央の上面のひずみ ε_2 (図-4)と ε_y の比を横軸とし、 P/P_y を縦軸にとった履歴曲線を示す。横軸の正の値が圧縮ひずみを表す。(a)は中空角形鋼管の結果を(b)はコンクリート充填角形鋼管の結果を表す。中空角形鋼管の場合は、ひずみが圧縮側に大きく生じているが、これは写真-1に示すように梁上面の中央がくぼみ、側面が膨らむ典型的な局部座屈変形結果である。これに対してコンクリート充填角形鋼管の場合は写真-2に示すように鋼管にコンクリートを充填しているために断面の内側の変形が拘束され、上面の中央は外側に膨らみ、さらにその両側も外部に膨らむ変形によって生じた結果である。

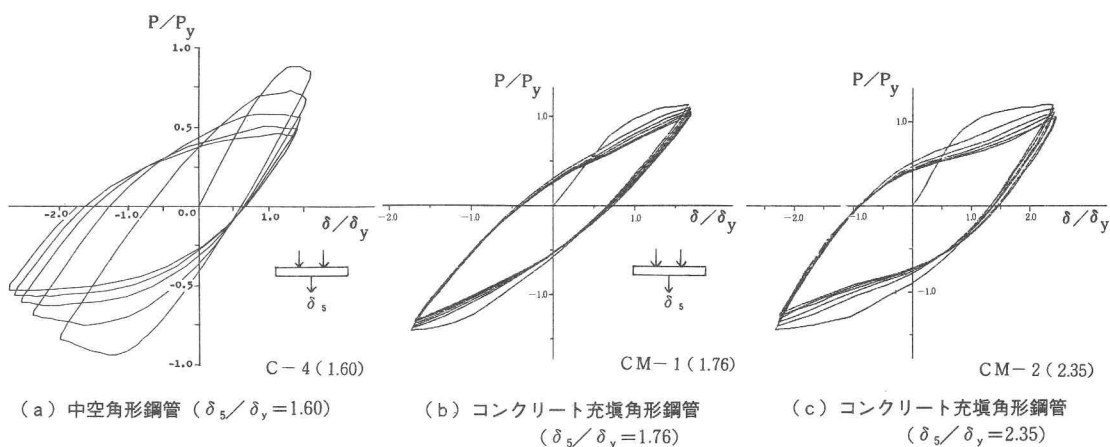


図-6 荷重-変位履歴曲線

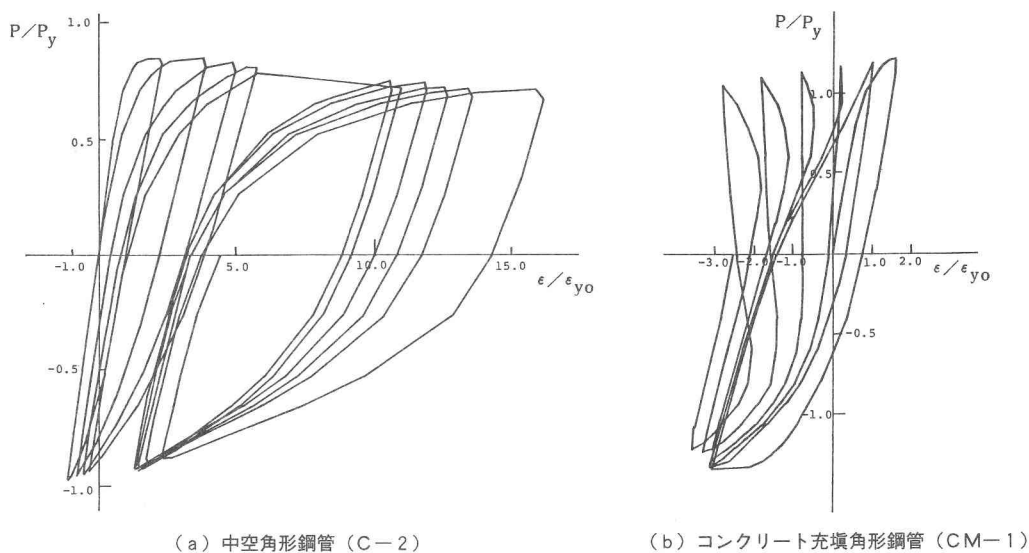


図-7 荷重-ひずみ曲線

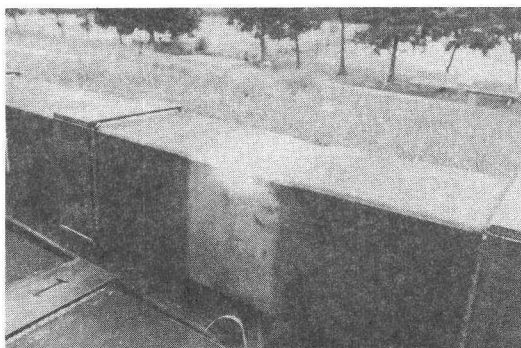


写真-1 中空角形鋼管の座屈形状

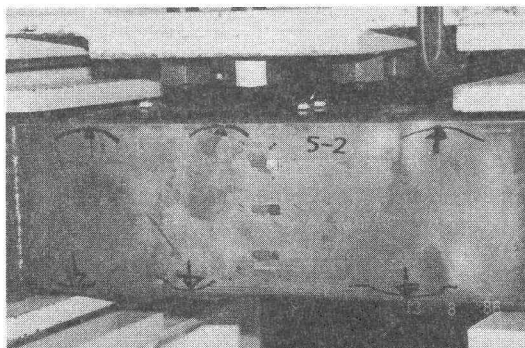


写真-2 コンクリート充填角形鋼管の座屈形状

図-8は、中空角形鋼管 (C-1~4) とコンクリート充填角形鋼管 (CM-1~4) の最大荷重と繰返し回数
 の関係を示したものである。図中の縦軸は、鉛直下方向を正として、 P/P_y をとり、横軸は、繰返し回数
 をとった。図から理解されるように、中空角形鋼管で、変位制御振幅の小さい $\delta_o/\delta_y=1.23$ (C-2) の場合
 は、繰返し回数に伴う最大荷重は、直線的に低下するが、低下率は小さい。これに対して、変位制御振幅
 の大きい $\delta_o/\delta_y=1.53$ (C-3) および 1.60 (C-4) の場合は、5 サイクル程度までに最大荷重は急激に低下す
 る。

コンクリート充填角形鋼管の場合は、変位制御振幅比 $\delta_o/\delta_y=1.76$ (CM-1, 2) および 2.35 (CM-3, 4) と同
 じ傾向を示し、6 サイクルまでの最大荷重の低下率は、中空角形鋼管のその $1/2$ 程度であり、その後
 は繰返し回数が増加しても最大荷重はほとんど低下しない。以上の結果から、中空角形鋼管は、局部座屈
 が生じることにより最大荷重の低下がいちじるしいのに対して、コンクリート充填角形鋼管は、局部座屈が
 生じても梁全体の耐力にはわずかしこ影響しないことがわかった。これは、コンクリート充填の効果によ
 るものと考えられる。

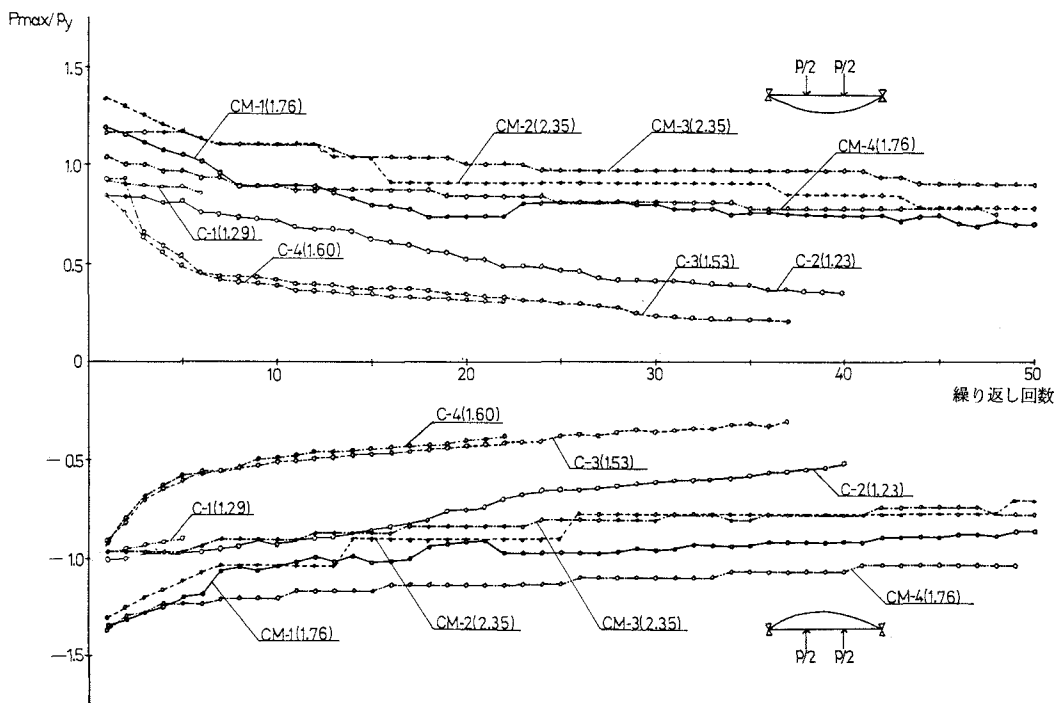


図-8 最大荷重と繰返し回数

表-5は、繰返し回数と最大荷重の低下率との関係を示したものである。繰返し1サイクル当りの最
 大荷重の平均低下率を κ として、 n サイクル目の最大荷重 P_{crn} と n' サイクル目の $P_{crn'}$ から κ を

$$\kappa = (P_{crn} - P_{crn'}) / (n' - n) P_y \quad (3)$$

と定義して計算したものである。表中の P_{crn} と δ_{crn} は最大荷重とそれに対応する最大変位を表す。

中空角形鋼管の場合は、変位制御振幅の小さい $\delta_o/\delta_y=1.23$ では、繰返し回数にかかわらず $\kappa = 1 \sim 2\%$ 程度低下しているのに対して、 $\delta_o/\delta_y=1.53$ および 1.60 では、1~6回までで7~9%の急激な低下
 が見られ、その後は1%程度の低下率になっている。

コンクリート充填角形鋼管の場合は、最大荷重が中空角形鋼管 ($P_{cr}/P_y=0.9$) よりも約50%増加している。これは充填したコンクリートの圧縮抵抗および補剛効果による梁の強度増加である。変位制御振幅比 $\delta_o/\delta_y=1.76$ および 2.35 の場合とも、1～6 サイクルまでの最大荷重の低下率は 3～4 % と中空角形鋼管に比べてかなり小さく、繰り返し回数が 20 回を越える場合には、その低下率は中空角形鋼管のその 1/2 以下となる。

表一 5 最大荷重の低下率

種 類	供 試 体	荷重の方向	P_u/P_y	δ_o/δ_y	δ_o/δ_y	κ			
						$n=1, n'=6$	$n=6, n'=11$	$n=11, n'=21$	$n=21, n' \geq 35$
中 空 角 形 鋼 管	M-1	down	0.90	1.34					
	C-1	down	0.89		1.29	0.94%			
		up	1.00			0.95%			
	C-2	down	0.81		1.23	1.75%	1.00%	1.60%	0.79%
		up	1.03			0.08%	0.88%	1.90%	0.73%
	C-3	down	0.94		1.53	8.90%	0.97%	1.25%	0.95%
		up	1.04			7.20%	1.10%	0.97%	0.52%
	C-4	down	0.88		1.60	9.30%	1.25%	0.75%	
		up	0.93			8.40%	1.26%	0.82%	
	MM-1	down	1.36	2.87					
コンクリート充填角形鋼管	CM-1	down	1.19		1.76	3.30%	2.59%	1.49%	0.11%
		up	1.35			3.31%	3.10%	1.03%	0.18%
	CM-2	down	1.03		1.76	1.94%	1.29%	0.32%	0.36%
		up	1.36			2.59%	1.29%	0.32%	0.35%
	CM-3	down	1.16		2.35	0.65%	0.65%	0.97%	0.33%
		up	0.97			0.65%	0.65%	0.65%	0.22%
	CM-4	down	1.33		2.35	4.01%	0.65%	1.94%	0.45%
		up	1.31			4.53%	0.91%	1.29%	0.67%

4. まとめ

交番曲げを受ける冷間成形角形鋼管梁について、中空角形鋼管の場合とコンクリート充填角形鋼管の場合の耐荷力実験を行ないコンクリート充填の耐荷力に及ぼす補剛効果を検討し以下の結論を得た。

- (1) 残留応力分布は、溶接箱桁の場合では溶接部分に降伏応力程度の高い残留応力が生じるのに対して、本実験で用いた冷間成形角形鋼管では、残留応力分布は断面全体にわたってほぼ一定で、鋼管外側の残留応力は降伏応力の約0.46倍の引張応力である。シーム溶接部では降伏応力程度であるが、この領域は狭い範囲に限られている。
- (2) 初期たわみの形状はすべての断面が凸形に膨らんでいる。初期たわみの大きさは、中空鋼管とコンクリート充填鋼管ともに大差はなく、最大でも板厚の20%程度である。
- (3) 単調載荷による荷重－変位曲線で示されているように、中空角形鋼管の梁中央部に局部座屈が生じ、その後の変位の増加に従って荷重が急激に減少する。これに対して、コンクリート充填角形鋼管の場合は、局部座屈が生じた後でも変位の増加に対して荷重が僅かずつ増加し、局部座屈は梁全体の耐荷力の低下に大きな影響を及ぼさない。
- (4) 繰り返し載荷における制御変位が $\delta_o/\delta_y=1.6$ 程度の比較的大きい場合で中空鋼管のみの場合は繰り返し1サイクル当り最大荷重が繰り返し初期状態で9%，繰り返し回数が多くなる場合で約1%低下するのに対し、コンクリート充填角形鋼管の場合は、繰り返し初期で2～4%，繰り返し回数が多くなる場合で0.2～0.7%と最大荷重の低下率がかなり小さくなる。これは、充填コンクリートが局部座屈に

よる断面変形を拘束すると共に、コンクリートが圧縮破壊後も鋼管の拘束効果により直ちに圧縮抵抗力を失わない為と考えられ、コンクリート充填の効果が顕著に表れている。

謝 辞

本実験に用いた供試体は本校実習工場の御協力を得て作製された。御協力頂いた工場長小森勝夫教授および工場の職員諸氏に厚くお礼申し上げます。

供試体の残留応力測定に関して大阪大学工学部土木工学科の福本嘸士教授に御協力頂いた。実験の実施に当っては本校土木工学科および建築学科の卒業研究生による多大の協力を得た。ここに記して心より感謝の意を表します。

本研究は、昭和59年度文部省特定研究の一環として行なわれたものである。

参考文献

- 1) Popov. E. P., and Black, R. G.: Steel Struts under Severe Cyclic Loading, Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 107, No. ST9, Proc. Paper 16497, Sep., 1981.
- 2) Popov. E. P., Zayas, V. A., and Mahin, S. A.: Cyclic Inelastic Buckling of Thin Tubular Columns, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 105, No. ST11, Proc. Paper 14982, Nov., 1979.
- 3) Proceeding of the Fifth International Off Shore Mechanics and Arctic Engineering Symposium, April, 1986. Tokyo.
- 4) Yuhshi Fukumoto and Haruyuki Kusama: Cyclic Bending Test of Thin-Walled Box Members, Proc. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol. 2, No. 1, April, 1985.
- 5) 渡辺英一, 北沢正彦, 杉原直樹, 奥野雅弘: 軸力を受ける鋼箱桁の反復曲げ強度に関する基礎的考察, 土木学会第41回年次学術講演会, 1986年11月。
- 6) 土木学会編: 合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, 1986年9月。
- 7) 日本建築学会編: 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算基準 同解説, 1987年改訂版。
- 8) 中井博, 吉川紀: コンクリートを充填した鋼製橋脚の耐荷性にに関する実験的研究, 土木学会論文集第344号/Ⅰ-1, p p 195~204, 1984年4月。
- 9) 中井博, 吉川紀, 村本和之: コンクリートを充填した長方形鋼製橋脚の梁, 柱隅角部の耐荷性にに関する実験的研究, 構造工学論文集 Vol. 33A. pp 327~340, 1987年3月。
- 10) 中井博, 北田俊行, 吉川紀: コンクリートを充填した角形柱鋼板要素の一設計法, 土木学会論文集第356/Ⅰ-3, p p . 405~413, 1985年4月。
- 11) 松井千秋, 河野昭彦: 繰返し軸方向力を受けるコンクリート充填鋼管部材の弾塑性性状に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1987年10月。
- 12) 加藤賢治, 宇野洋平, 桜井孝昌, 草間晴幸, 忠和男: くり返し荷重を受ける冷間成形角形鋼管梁に関する実験的研究 そのⅠおよびそのⅡ, 豊田工業高等専門学校研究紀要第19号, pp. 71~83, 1986年11月。
- 13) 忠和男, 桜井孝昌, 草間晴幸: くり返し荷重を受ける箱けたの耐荷力実験, 土木学会第41回年次学術講演会講演梗概集Ⅰ-88, 1986年11月。
- 14) 忠和男, 桜井孝昌, 草間晴幸: くり返し荷重を受けるコンクリート充填角形鋼管梁の耐荷力特性, 土木学会第41回年次学術講演会講演梗概集Ⅰ-74, 1987年9月。
- 15) Fukumoto, Y. and Kusama, H.: Local Instability Tests of Plate Elements under Cyclic Uniaxial Loading, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 111, No. 5, May, pp. 1051~1067.
- 16) 日本鋼構造協会: ボックスコラムの標準化—ボックスコラム標準化小委員会報告, 1987年8月。

(1987年10月16日)