

(32) 軸力作用下で交番曲げ荷重を受ける
コンクリート充填角形鋼管の耐荷力実験

Experimental Study on the Alternating Bending Strength of Thin-Walled
Concrete-Filled Box Beams under Constant Axial force

忠 和男* 桜井孝昌** 加藤賢治*** 宇野洋平****

Kazuo CHU, Takamasa SAKURAI, Kenji KATO, Youhei UNO

In the case that thin-walled box beams are utilized as beam-column members, the strength of the beam depends on local buckling values of the beam. In order to hold on the strength of beam materials, various methods need to be considered. In our experimental studies, the box beams are filled with concrete for preventing the beam from local buckling. The tested beams are steel square tube made by cold-working. Loading tests were performed by alternating bending under constant axial force. The object of the studies is to find the decreasing ratio of the strength of beam for the number of cycles of loading. The experimental results reveal the fact that the decreasing ratio of non-concrete filled beam is in the range of 11~14% per one cycle. On the contrary, the ratio of concrete-filled beam is in 1~2%.

The results show that the filled concrete are effective to increase the load carrying capacity of thin walled box beams under cyclic loading.

1、まえがき

地震時にその影響を強く受けると考えられる都市高速道路等の鋼製橋脚や海洋波力を受ける鋼製海洋ジャケット等の構成部材として鋼管が現在多く利用されている。この種の鋼管部材の耐荷力は、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、さらに弾塑性領域に達する応力を発生させる繰り返し荷重のもとでは、繰り返し荷重による耐荷力の低下が著しいことが指摘されている。¹⁾

福本、草間は、交番曲げ荷重を受ける溶接薄肉箱桁に関する基礎的研究²⁾の中で繰り返し回数と耐荷力の低下特性について報告している。渡辺³⁾らは、軸力を受ける溶接鋼箱桁に繰り返し曲げ荷重を作用させた場合の耐荷力特性について次のように指摘している。(1) 鋼箱桁柱の繰り返し曲げに対する耐荷力は、圧縮、引張を受けるフランジの一般化幅厚比、及び箱桁を補剛する補剛材の剛度に強く影響される、(2) 全断面降伏荷重の10%を一定軸力として作用させ、繰り返し曲げ荷重を与える場合の耐荷力は、軸力の存在しない場合の耐荷力よりその値が低下する。

著者らは、既に、軸力を作用させない場合の冷間成形角形鋼管梁を対象として、繰り返し曲げ荷重の繰り返し回数に対する耐荷力の低下傾向を検討するために、コンクリートを充填しない冷間成形角形鋼管及びコ

*	工修	豊田工業高等専門学校講師	土木工学科
**	工博	豊田工業高等専門学校教授	土木工学科
***		豊田工業高等専門学校助教授	建築学科
****		豊田工業高等専門学校教授	建築学科

ンクリート充填角形鋼管の耐荷力実験を行ってきた。⁴⁾しかし、道路橋の橋脚等の実際の構造物においては、これらの鋼管が軸力と曲げを受ける部材として使用されている場合が多い。これらの実構造物に対応して、本研究では、一定軸力作用下で交番曲げ荷重を受けるコンクリート充填角形鋼管の耐荷力実験を行い、繰り返し回数と耐荷力の低下率の関係を調べた。同種の実験として既に報告されている渡辺らと本実験との相違点として、(1) 著者らの供試体が市販の冷間成形角形鋼管であるのに対し、渡辺らの供試体は、4枚の鋼板を溶接で成形した溶接鋼管であること、(2) 著者らは、鋼管の補剛効果を上げるためにコンクリートを充填したのに対して、渡辺らは、箱桁内部の軸方向に鋼板を溶接して補剛していること、(3) 著者らの繰り返し曲げ載荷方法が変位制御振幅が一定であるのに対し、渡辺らは、この変位制御振幅を一定の比率で増加させる方式であること。これらの相違は、本実験が実構造上の使用部材として比較的小さな部材を対象としていることおよび繰り返し曲げ荷重の繰り返し回数と部材の耐荷力の低下傾向を調べることを主目的としていることによるものである。

2、実験概要

(1) 供試体

供試体は、市販の冷間成形角形鋼管で、材質はSTKR41、寸法は□-200*200*4.5mm、長さ3000mmである。供試体は、合計5体作製した。供試体の両端に軸力を加えるため開口部には正方形鋼板を溶接した。図-1、及び表-1にその形状及び寸法を示す。記号D、t、d、r、Lは、図-1に示す部分の値を表し、I及びWは梁断面の断面2次モーメント及び断面係数を示す。表-1のCM-1は、単調載荷用の供試体を示しCC-2～5は繰り返し載荷用の供試体を示す。供試体の形状は、表-1に示すように幅厚比が $D/t=44.6$ 、等価幅厚比R

が $1.02 (R = (D/t) \cdot 12 (1 - \nu^2) \sigma_v / 4 \pi^2 E)$ のもので、局部座屈の生じ易い断面を選んだ。載荷に伴う供試体の局部座屈を防止するために載荷点、両端及びそれらの中間位置を補剛板で補強した。補剛板は、200*100*9mmものを4面に溶接した。ただし、端部の一方には、200*150*9mmの鋼板を溶接し、他方の端部には、コンクリート打設を考慮して脱着可能なキャップ状の治具を取付た。表-2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_v 、 ϵ_{v0} 、 σ_u 、 E_{st} 及び ν は、それぞれ断面積、ヤング係数、降伏応力、 $\epsilon_{v0} = \sigma_v / E$ で定義される歪み、引張り強さ、歪み硬化係数及びポアソン比を示す。表-3は、鋼管内部に充填したコンクリートの圧縮強度及びヤング係数等を示す。なお、ここで使用したセメントは、早強ポルトランドセメントである。

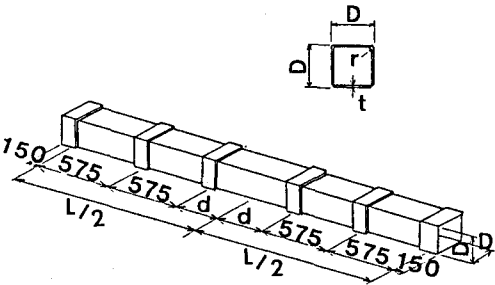


図-1 供試体の寸法

表-1 供試体の寸法及び断面の諸係数

	D (mm)	t (mm)	A (mm ²)	D/t	d (mm)	r (mm)	L (mm)	I (cm ⁴)	W (cm ³)
CM-1	200.3	4.15	3256.1	48.3	348.0	9.3	3000	2088.9	208.6
CC-2	200.2	4.14	3246.8	48.4	349.5	9.3	3000	2081.0	207.9
CC-3	200.5	4.14	3251.7	48.4	349.5	9.3	3000	2090.6	208.5
CC-4	200.4	4.15	3257.8	48.3	349.8	9.3	3000	2092.1	208.8
CC-5	200.5	4.16	3267.1	48.2	349.0	9.3	3000	2100.0	209.5
AVE.	200.3	4.15	3255.9	48.3	349.2	9.3	3000	2090.5	208.7

載荷実験に先
立って、供試体
の初期形状の測
定を行った。表
一4にコンクリ
ート充填後のコ
ンクリート充填
角形鋼管 のそ

ぞれの板要素の
最大たわみ量を
示す。この表に
示すように、最
大たわみ量は、
板厚（4.5m
m）の21～
61%の範囲に
あった。これら
の最大たわみ量
は、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標準許容値（
0.5%）に対して、0.5%
～1.3%となっており、許容
値を越えたものがおおかった。初
期たわみの形状は4面とも外側
に膨らんでいたものがほとんど
であった。

（2）実験方法

実験は、単調載荷実験
と繰り返し載荷実験との2通り
、単調載荷実験は、繰り返し載
荷実験における変位制御時の制
御量を決定するための基礎資料
を得るために行った。実験装置
の概略図を図一2に示す。この
実験装置において、供試体の軸
方向にセットしたジャッキは手
動式の油圧ジャッキを用い鉛直
方向荷重は油圧サーボ疲労試験
機を用いて載荷した。載荷は、
2点載荷で行い、供試体の両支

表一2 鋼材の引張試験結果

	Cross Section Area A (mm ²)	Young's Modulus E X10 ⁴ (kg/mm ²)	Yield Stress σ_y (kg/mm ²)	Yield Strain ϵ_y X10 ⁻³	$\epsilon_{y0} =$ σ_y/E ϵ_{y0} X10 ⁻³	Tensile Strength σ_u (kg/mm ²)	Strain Hardening Modulus EstX10 ² (kg/mm ²)	Poisson's Ratio ν
NO.1	A	272.2	—	—	—	—	—	—
	B	256.1	2.10	38.15	3.64	1.76	45.05	0.323
	C	262.0	2.21	39.10	4.00	1.90	47.01	0.296
NO.2	A	264.1	2.00	34.60	3.46	1.52	45.16	0.289
	B	268.1	2.30	38.50	4.20	1.92	50.31	0.300
	C	254.3	2.75	39.15	3.86	1.62	49.97	0.318
NO.3	A	256.0	1.73	37.40	3.60	1.84	42.53	0.211
	B	260.3	1.81	36.35	4.16	2.10	45.82	0.288
	C	256.03	—	—	—	—	—	—
AVE.	261.0	2.13	37.61	3.85	1.81	46.55	2.31	0.289

表一3 コンクリートのヤング係数及び圧縮強度試験結果

	Cross Section Area A (mm ²)	Young's Modulus E _c X10 ⁴ (kg/mm ²)	Compression Strength σ_c (kg/mm ²)	Poisson's Ratio ν
AVE.	78.69	0.33	3.35	0.12

表一4 供試体中央部分の初期最大たわみ量

供試体番号	$(\Delta t/t) * 100 (\%)$			
	板要素 0	板要素 1	板要素 2	板要素 3
CM-1	29	40	30	39
CC-2	57	35	36	56
CC-3	53	57	41	42
CC-4	48	21	61	37
CC-5	43	42	39	36

圖一-2 實驗裝置概略圖

単調載荷実験は、一様軸力として全断面降伏荷重の10%である25.4 t onを加えながら、変位制御により、鉛直下方向に変位を徐々に増加した。供試体の鉛直方向の変位量の増減に対しても軸力が一定となるように手動油圧ジャッキで軸力を調整した。

繰り返し載荷実験も単調載荷実験同様に変位制御で行った。鉛直方向載荷シリンダーの最大振幅 δ_0 を一定にして5サイクルまで静的繰り返し載荷を行った。その後は、振動数を0.01 Hzの正弦波で動的に繰り返し載荷した。 δ_0 の値は、単調載荷実験の結果から得られた荷重-変位曲線を基に座屈直後の大きさのものと、座屈後やや変位が進んだ状態の値を選択した。

材料の降伏応力 σ_v 、降伏荷重 P_v 及び P_v を載荷したときの梁の微小変位理論による梁中央点の鉛直方向たわみ δ_v を次式のように定義する。

$$P_v = 2W\sigma_v / (L/2 - d) \quad (1)$$

$$\sigma_v = P_v (L - 2d) (L^2 + 2Ld - 2d^2) / EI \quad (2)$$

ここに、 W 及び E はそれぞれ表-1及び表-2に示す鋼管の断面係数及びヤング係数を表し、 L 及び 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_v と δ_v の値は、表-1に示す鋼管の値を式(1)及び(2)に代入して得られた $P_v = 15.46 \text{ tonf}$ 及び $\delta_v = 17.03 \text{ mm}$ とした。変位制御量として選んだ値は(2)式で得た σ_v で除して、無次元化した値で表すと座屈直後の値 $\delta_o / \delta_v = 1.76$ および座屈後やや変位の進んだ状態の値 2.35 である。

3 実験結果と考察

(1) 单调载荷实验

図-4は、横軸に梁中央点の鉛直下方向の変位を無次元化した値 δ_o/δ_v をとり、縦軸に荷重を無次元化した値 P/P_v をとって、軸力を作用させない場合と、其れを作用させた場合の単調載荷実験における荷重-変位曲線を示したものである。軸力を作用させない場合の結果は、文献(5)で発表したものと同一のものである。軸力を作用させないコンクリート充填角形鋼管では、 $\delta/\delta_v=1.0$ 附近から荷重の増加率は低くなるものの $\delta/\delta_v=5.0$ を越えても荷重は増加する。これに対して、軸力を作用させた場合の

コンクリート充填角形鋼管では、 $P/P_y = 1.11$ 、 $\delta/\delta_y = 1.9$ 附近で荷重は増加せず横ばい状態となった。単調載荷の場合、初期状態で全断面降伏荷重の10%の軸力を与えたことにより、曲げ荷重Pの最大値が、軸力のない場合のそれに比べて20%程度小さくなった。

(2) 繰り返し載荷実験

図-5において横軸に鉛直方向の変位比 δ/δ_y をとり、縦軸に荷重比 P/P_y をとって、荷重-変位曲線を示す。(a)及び(b)は、軸力を作用させないコンクリート充填角形鋼管の場合で、載荷点の制御変位振幅比 $\delta_o/\delta_y = 1.76$ 及び 2.35 で、繰り返し載荷実験を行った結果である。また、この(a)、(b)は、文献(4)より引用した。(c)及び(d)は、軸力を作用させたコンクリート充填角形鋼管の場合で制御振幅比は、(a)、(b)の場合に対応している。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て、変位の測定位置は、図-4の δ_3 である。図-5の(a)から(d)のいずれの場合も、繰り返し載荷に伴う最大荷重の急激な低下は見られずコンクリート充填による補剛のため局部座屈の防止効果表れている。(b)及び(d)についても同様であるが、(d)の場合の紡錘形の形状が(b)に比べて、偏平度が増している。図-6(a)は、横軸に供試体中央上面の歪み ε_T (図-4)と ε_{v0} との比をとり、図-6、(b)では梁側面の歪み比 $\varepsilon_s/\varepsilon_{v0}$ をとり、いずれも縦軸に、荷重比 P/P_y をとって、荷重-歪履歴曲線を示した。横

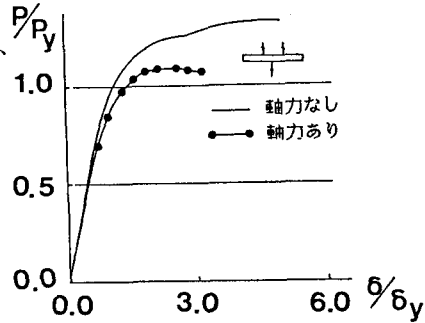
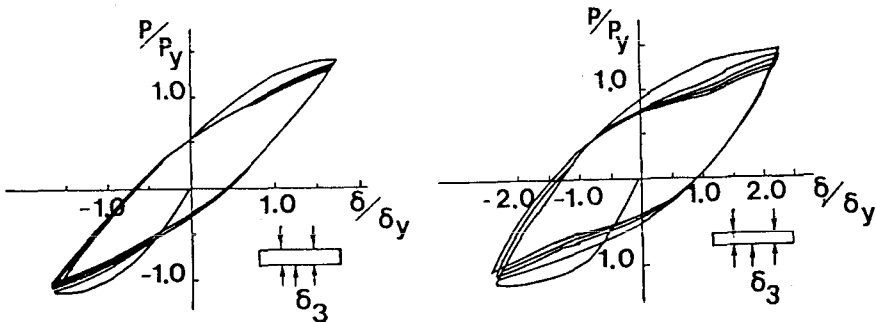
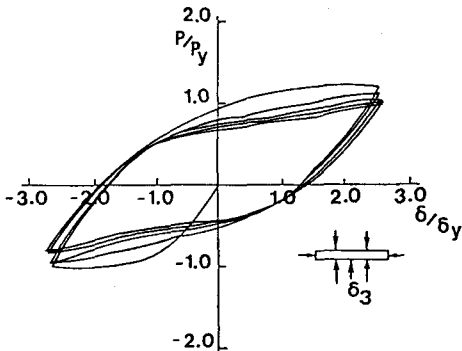
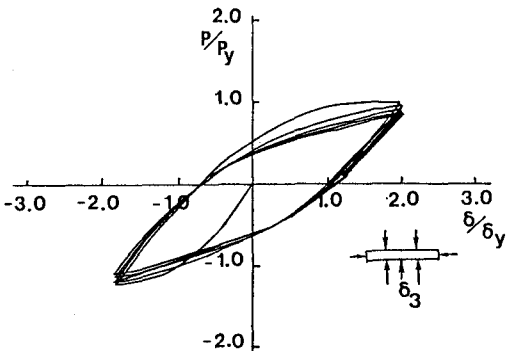


図-4 荷重-変位曲線 (CM-1)



(a) 無軸力作用鋼管 (CM-1)
($\delta_o/\delta_y = 1.76$)

(b) 無軸力作用鋼管 (CM-2)
($\delta_o/\delta_y = 2.35$)



(c) 軸力作用鋼管 (CC-4) ($\delta_o/\delta_y = 1.76$)

(d) 軸力作用鋼管 (CC-2) ($\delta_o/\delta_y = 2.35$)

図-5 コンクリート充填角形鋼管の荷重-変位履歴曲線

軸の正の値が引張歪みを表す。

図-6の(a)

では、まず、圧縮歪みが生じ続いて引張り歪みと繰り返し荷重を受け、5サイクル目では、局部座屈が生じ外側に膨らんだ形状となっていた。図-6(

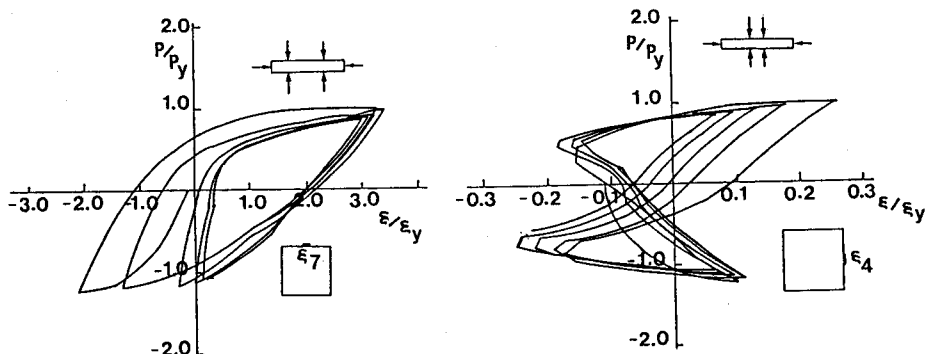
b)でも同様である。なお、実験中、5サイクル静的荷重後の動的荷重10サイクル程度で、供試体中央部に局部座屈が大きく進行しクラックが発生した。発生位置は、荷重点位置よりであった。

図-7は、軸力を作用させた場合のコンクリート充填角形鋼管(CC2-5)と中空角形鋼管(C-1~NC-5)(文献(5)から引用)の最大荷重と繰り返し回数との関係を示したものである。図中NC-1~5は、軸力を作用させない結果を示し、CC-2~5は、軸力を作用させた場合

の結果を示す。図中の縦軸は、鉛直下方向の最大荷重比 $P_{\downarrow}/P_y$ と鉛直上方向の最大荷重比 $P_{\uparrow}/P_y$ を($P_{\downarrow}/P_y + P_{\uparrow}/P_y$)/2 = P_{max}/P_y と定義した。横軸には、繰り返し回数をとった。この図で、中空角形鋼管では、変位制御振幅比の小さい $\delta_o/\delta_v = 1.02$ (NC-2)では、最大荷重の低下は僅かである。これに対して、 δ_o/δ_v 比が、1.14(NC-3)になると5サイクルまでの繰り返し荷重で急激な低下がみられる。特に、制御振幅比 $\delta_o/\delta_v = 1.14 \sim 1.23$ 迄の変化に対する低下傾向に比べ、 $\delta_o/\delta_v = 1.02 \sim 1.14$ の間には相違が見られ前者の間では、制御変位振幅量に対して荷重の低下が敏感に反応する。これに対して、コンクリート充填角形鋼管の場合は、変位制御振幅比 $\delta_o/\delta_v = 1.76$ (CC-3)および2.35(CC-5)とも最大荷重の低下傾向は、その低下率が小さく動的20サイクル目まででも同じ傾向を示している。表-5は、最大荷重の低下率と繰り返し回数との関係を示したものである。繰り返し1サイクルあたりの最大荷重の平均低下率をKとして、nサイクル目の最大荷重 P_{crn} とn-1サイクル目の P_{crn-1} からKを

$$K = (P_{crn} - P_{crn-1}) / (n - n-1) P_y \quad (3)$$

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。軸力を作用させたコンクリート充填角形鋼管の単調荷重実験による最大荷重の $P_{cr}/P_y = 1.11$ であるの対



(a) コンクリート充填角形鋼管 (CC-4)

(b) コンクリート充填角形鋼管 (CC-4)

図-6 荷重-歪み履歴曲線

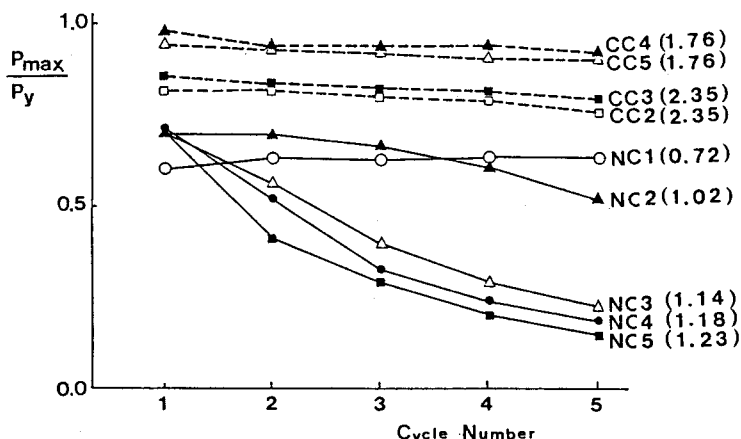


図-7 最大荷重の低下と繰り返し回数との関係

表一五 最大荷重の低下率と繰返し回数との関係

	Direction of Load	P_v (t)	δ_v (mm)	P_{CR} P_y	δ_{CR} δ_y	δ_o δ_y	K		
							$n = 1$ $n = 5$	$n = 5$ $n = 10$	$n = 10$ $n = 20$
CM-1	down	15.46	17.03	1.11	2.88				
CC-2	down	15.46	17.03	0.77		2.35	1.62%	1.16%	3.17%
	up			0.88			1.46%	1.42%	2.59%
CC-3	down	15.46	17.03	0.77		2.35	1.46%	1.03%	1.10%
	up			0.94			1.29%	1.29%	1.49%
CC-4	down	15.46	17.03	1.11		1.76	1.13%	0.91%	0.58%
	up			0.84			1.29%	0.78%	0.65%
CC-5	down	15.46	17.03	1.22		1.76	0.97%	1.68%	0.26%
	up			0.65			0.97%	0.52%	0.45%

して、参考文献の中空角形鋼管では、 $P_{cr}/P_v = 0.72$ となり、最大荷重において、約40%の増加があった。また、コンクリートを充填しないNC-3 ($\delta_o/\delta_v = 1.14$) ~ NC-5 ($\delta_o/\delta_v = 1.23$) では、5サイクル迄の最大荷重の低下率が10.8%~13.8% (文献(5) 参照) で平均13%の低下率であるのに対して、制御変位振幅比に相違はあるもののCC-2 ($\delta/\delta_v = 1.76$) ~ CC-5 ($\delta_o/\delta_v = 2.35$) のそれは、0.97%~1.62% でその平均は1.27%となり耐荷力の大幅な強度増加が見られた。また、動的载荷に入っても20サイクルまででは、急激な低下傾向も見られなかった。

ところで、5サイクル迄の低下率は、軸力を作用させないコンクリート充填角形鋼管の場合⁽⁴⁾ その平均低下率が、それぞれおよそ3% ($\delta_o/\delta_v = 1.76$)、4% ($\delta_o/\delta_v = 2.35$) であるのに対して、軸力の作用する場合のそれぞれに対応する低下率は、1.1%及び1.5%となり、約2%の低下率の減少がみられた。しかし、10~20サイクルにおけるその低下率は、前者が0.79% ($\delta/\delta_v = 1.76$)、1.21% ($\delta/\delta_v = 2.35$) に対して後者では、0.49% ($\delta/\delta_v = 1.76$)、2.1% ($\delta/\delta_v = 2.35$) となり、軸力作用による影響は、低サイクル時では、僅かながら低下率が下がり、高サイクル時には、その低下率が1%程度上がりこの程度に耐荷力に対する軸力の影響があったといえる。以上のことから、充填されたコンクリートが鋼管の局部座屈を防止し、しかも局部座屈が生じた後も曲げ荷重に抵抗する能力をもつことが認められた。

4. まとめ

軸力作用下で交番曲げ荷重を受けるコンクリート充填角形鋼管について耐荷力実験を行い、耐荷力に

対する軸力作用による影響、及びコンクリート充填による角形鋼管の補剛効果について以下のようにまとめる。

(1) 初期たわみ量は、板厚の20～60%程度になり、文献(4)の結果よりも大きくなった。然し、初期たわみ形状は、文献(4)同様に面外に膨らむ形状を示している。

(2) 単調載荷実験の荷重-変位曲線で軸力を作用させないコンクリート充填角形鋼管⁽⁴⁾では、局部座屈発生後も強度増加がみられるのに対して、軸力作用下でのコンクリート充填角形鋼管では局部座屈発生後は軸力の影響により強度増加はみられなかった。従って、軸力作用下でのコンクリート充填角形鋼管では、軸力の作用を受けない場合と異なり局部座屈の発生が梁全体の耐荷力低下に影響を及ぼすことが分かった。

(3) 繰り返し載荷における最大荷重の低下率と繰り返し回数との関係から軸力作用下でコンクリートを充填しない鋼管の5サイクルまでの最大荷重の低下率⁽⁵⁾が10.8% ($\delta/\delta_v=1.14$)～13.8% ($\delta/\delta_v=1.23$)で平均13%に対して、コンクリートを充填した鋼管では、0.97% ($\delta/\delta_v=1.76$)～1.62% ($\delta/\delta_v=2.35$)で平均1.27%となり、コンクリート充填による補剛効果が現れ、大幅な強度増加がみられた。

また、5サイクル迄の最大荷重の低下率において、軸力を作用させないコンクリート充填角形鋼管の結果⁽⁴⁾では、約3% ($\delta/\delta_v=1.76$)及び4% ($\delta/\delta_v=2.35$)であるのに対し、本実験結果のそれぞれに対応する低下率は、約1.1% ($\delta/\delta_v=1.76$)及び1.5% ($\delta/\delta_v=2.35$)となり、約2%の低下率の減少がみられた。しかし、10～20サイクルにおけるその低下率は、前者が0.79% ($\delta/\delta_v=1.76$)及び1.21% ($\delta/\delta_v=2.35$)に対して、後者では、0.49% ($\delta/\delta_v=1.76$)及び2.1% ($\delta/\delta_v=2.35$)となり、 $\delta/\delta_v=2.35$ において1%の強度低下がみられたものの顕著な影響は現れなかった。

謝 辞

本実験に用いた供試体は東海鋼材工業(株)の御協力を戴いて作製された。御協力戴いた佐藤章次氏、増田勝彦氏及び工場の職員諸氏に厚くお礼申しあげます。

実験の実施に当たっては本校土木工学科及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。

参考文献

- 1) Popov, E. P., and Black, R. G.; Steel Structures under Severe Cyclic Loading, Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 107, No. ST9, Proc. Paper 16497, Sep, 1981.
- 2) Yuhshi FUKUMOTO and Haruyuki KUSAMA; Cyclic Bending Test of Thin-Walled Box Members, Proc. of JSCE, Structural/Eng/Earthquake, Vol. 2, NO. 1, April, 1985
- 3) Eiichi WATANABE, Susumu EMI; AN EXPERIMENTAL STUDY ON STRENGTH OF THIN-WALLED STEEL BOX BEAM-COLUMNS UNDER REPETITIVE BENDING, Proc. of JSCE, Structural/Eng/Earthquake Eng Vol. 5 No. 1, April 1988
- 4) 坂井、佐野、宇野、忠、高橋; 変形歪みを受けるコンクリート充填角形鋼管梁の耐力に関する実験的研究、構造工学論文集、VOL. 34A, 1988, 3
- 5) 忠、坂井、高橋、宇野; 一定耐力のもとで変形歪みを受ける角形鋼管梁の耐力実験、土木学会中部支部学術発表会講演要旨、1988, 3
- 6) 中井孝、吉川純、木本利之; コンクリートを充填した角形鋼管梁の梁、柱端角部の耐力性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
- 7) 三井物産株式会社; ボックスコラムの震害調査-ボックスコラム震害調査委員会報告、1987年8月
- 8) 羽村、坂井孝昌、高橋孝幸; くり返し歪みを受ける箱形梁の耐力実験、土木学会第41回年次学術講演会講演要旨、1-88, 1986年11月
- 9) 羽村、坂井孝昌、高橋孝幸; くり返し歪みを受けるコンクリート充填角形鋼管梁の耐力特性、土木学会年次学術講演会講演要旨、1-74, 1987年9月