大型構造用鋼管の力学的特性, 残留応力, 及び寸法精度

MECHANICAL PROPERTIES, RESIDUAL STRESSES AND DIMENSIONAL ACCURACIES OF LARGE-SIZE CIRCULAR STRUCTURAL STEEL TUBES

桑 村 仁*

Hitoshi KUWAMURA

Mechanical properties, residual stresses and dimensional accuracies of large-size structural steel tubes of circular hollow section designated as STK400 and STKN490B were investigated. The sample number was 18 as delivered, and half cuts of them were normalized. As-delivered tubes exhibited higher yield strength, tensile strength and yield ratio, but less uniform elongation than their correspondent normalized ones. Charpy absorbed energy of as-delivered was smaller in circumferential direction than in longitudinal direction, the tendency of which was not altered in the normalized. Residual stresses in ERW tubes in their longitudinal direction were extremely large in comparison with UO-forming tubes and Bending-roll tubes. Dimensional deviations from nominal sizes were small enough to satisfy the JIS tolerances, but not always met European Standards.

Keywords : Structural steel tube, Circular hollow section, Mechanical properties, Residual stresses, Dimensional accuracies

構造用鋼管, 円形中空断面, 力学的特性, 残留応力, 寸法精度

1. 序

本論文は比較的厚肉で大径の構造用鋼管を建築鉄骨に使用の際に必要な設計施工上の様々な特性値の実態を調査したものである。調査対象は一般構造用炭素鋼鋼管 STK(JIS G 3444)と建築構造用炭素鋼鋼管 STKN(JIS G 3475)であり, 形状は円形中空断面(CHS)である。昨今の建築鉄骨では鋼管よりも角形鋼管が多く用いられているので, 混同を避ける必要があるときは鋼管を円形鋼管と呼ぶこととし, そうでない場合は JIS にらって単に鋼管と呼ぶことにする。

建築における円形鋼管は国内外ともトラス構造に用いられることが多く, 鋼管構造というとき通常, 鋼管トラスが想起される。円形鋼管がラーメン構造の柱材として用いられることは比較的少なく, 特に, 我が国では角形鋼管が鉄骨ラーメン柱の大勢を占めている。しかしながら, 円形鋼管は同断面積・同厚の正方形角形鋼管と比べると, Table 1 に示すように, 断面性能が総じて優れている。断面 2 次モーメント, 断面 2 次半径, 塑性断面係数が相対的に大きいことは, 剛性, 座屈耐力, 保有水平耐力の面で円形鋼管のほうが構造設計上, 有利であることを意味している。円形断面が完全な軸対称断面でその性能が方向に依らないことや曲面がもつ意匠性も魅力とされている。

にもかかわらず, 円形鋼管が敬遠される最大の理由は価格の問題である。Fig.1 に過去 7 年ほどの円形鋼管と角形鋼管の月次販売価

Table 1 同断面積・同厚の円形鋼管と角形鋼管の断面性能比

断面特性	円形／角形
任意の図心軸に関する断面2次モーメント (I_x, I_y, I_{45})	1.07~1.20 (1.22)
任意の図心軸に関する断面2次半径 (i_x, i_y, i_{45})	1.03~1.09 (1.10)
x軸またはy軸に関する弾性断面係数 (Z_{ex}, Z_{ey})	0.94~0.95 (0.95)
対角軸に関する弾性断面係数 (Z_{e45})	1.13~1.32 (1.35)
x軸またはy軸に関する塑性断面係数 (Z_{px}, Z_{py})	1.02~1.07 (1.08)
対角軸に関する塑性断面係数 (Z_{p45})	1.05~1.14 (1.15)
サン・ブナンねじり定数 (J_T)	1.15~1.56 (1.62)
外周長 (ϕ)	1.00 ($1-0.215t/B$)

(注)

角形鋼管の角部アールによって数値に幅が生じる。本表では角部外側半径を板厚の2倍(STKR), 2.5倍(BCR), 3.5倍(BCP)を設定。角部アールが大きいほど, 円形に近づくので比は1.0に向かう。括弧内は角部アールがゼロのとき(最下段の t, B は厚さと幅)。x軸, y軸は角形鋼管の辺に平行な図心軸。

格¹⁾の推移を示す。引張強さ 400MPa のやや大型サイズ(外寸 400mm×厚さ 16mm)では角形鋼管 STKR400 に対して円形鋼管 STK400 の価格は 1.15~1.72 倍(調査期間平均で 1.46 倍)である。

* 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 教授・Ph. D.

Prof., Dept. of Architecture, School of Engineering, The University of Tokyo, Ph. D.

販売価格（千円/トン）

Fig.1 円形鋼管と角形鋼管の販売価格の推移

引張強さ 490MPa の大型サイズ（外寸 600mm×厚さ 40mm）で見ると、角形鋼管 BCP325（大臣認定品）に対して円形鋼管 STK490 の価格は 1.03～1.79 倍（平均で 1.47 倍）である。この価格比率は上で述べた断面性能の比を上回っており、円形鋼管が角形鋼管に比べて競争力の点で劣っていることを物語っている。

価格の問題は構造工学では如何ともし難いが、円形鋼管のもつ構造的利点は捨てがたいものがある。今後、円形鋼管が角形鋼管と同様、鉄骨ラーメン柱のもう一つの選択肢として普及する場合に備え、柱材として想定される比較的厚肉で大径の円形鋼管の各種特性を調査した。調査項目は、力学的特性（応力－ひずみ特性とシャルピー衝撃特性）、残留応力、寸法精度である。今まで、この種の系統的調査研究は行われておらず、鋼管構造の実験的研究に付随して鋼管の応力－ひずみ特性が断片的に調べられてきたにすぎない。シャルピー衝撃特性と寸法精度に関する公開データは皆無といってよい。残留応力については薄肉小径の電縫鋼管を対象としたもの^{2), 3), 4)}が有

るのみである。

2. 試験に用いた鋼管

試験に用いた鋼管は市中から購入した 18 本で、そのミルシート値を Table 2 に示す。厚さの小さいほうから順に並べ、同厚のものは外径の小さいほうから並べて、No.1～18 の試験体番号を付けてある。外径 D と厚さ t の組合せを実測値でプロットしたのが Fig.2 で、径厚比 D/t は 10～35 の範囲にある。18 本の鋼管は STKN490B-E-G, STK400-E-G, STK400-A(UO), STK400-A(Bend)+SR の 4 グループに分けられ、それぞれ 3 本、7 本、4 本、4 本である。記号の意味は Table 2 の下注に記したが、以下でも補足説明する。厚さ、外径、製造方法の種類を確保することに配慮したため、結果的に 4 社の製品が混在することとなった。18 本それぞれについて分光分析によって化学成分を調査し、ミルシートが実物と対応していることを確認した。

購入品は各鋼管とも長さ 1m で、寸法精度に関する測定を行った

Fig.2 試験に用いた鋼管の外径と厚さの組合せ

Table 2 試験に用いた鋼管のミルシート値

試験体 番号 No.	規格 ^{*1}	製造方法 ^{*2}	メーカー ^{*3}	公称寸法 $D_n \times t_n$ (mm)	機械的性質						化学成分 (%)						
					引張試験片 ^{*4}	降伏点ま たは耐力 ^{*5} (N/mm ²)	引張強さ ^{*5} (N/mm ²)	降伏比 (%)	伸び ^{*5} (%)	0℃シャル ピー吸収エ ネルギー (J)	C	Si	Mn	P	S	N	Ceq
1	STKN490B	E-G	A社	457.2×16.0	L方向, 12C号	459	548	84	43	190	0.15	0.16	0.81	0.013	0.004	0.0024	0.29
2	STKN490B	E-G	A社	558.8×16.0	L方向, 12C号	447	546	82	43	251	0.16	0.17	0.75	0.015	0.004	0.0020	0.29
3	STK400	E-G	B社	406.4×19.0	T方向, 5号	336	465	-	40	-	0.16	0.02	0.83	0.013	0.002	-	-
4	STKN490B	E-G	A社	406.4×19.0	L方向, 12B号	421	543	78	41	170	0.16	0.16	0.72	0.017	0.005	0.0026	0.29
5	STK400	E-G	B社	457.2×19.0	T方向, 5号	332	451	-	40	-	0.16	0.01	0.86	0.014	0.003	-	-
6	STK400	E-G	B社	558.8×19.0	T方向, 5号	358	475	-	43	-	0.10	0.01	0.66	0.012	0.003	-	-
7	STK400	E-G	A社	609.6×19.0	T方向, 5号	326	462	-	47	-	0.16	0.01	0.95	0.019	0.006	-	-
8	STK400	A(UO)	B社	508.0×20.6	T方向, 5号	433	538	-	45	-	0.08	0.22	1.52	0.015	0.002	-	-
9	STK400	E-G	A社	508.0×22.0	T方向, 5号	353	467	-	47	-	0.16	0.03	0.93	0.017	0.004	-	-
10	STK400	E-G	A社	558.8×22.0	T方向, 5号	319	452	-	52	-	0.16	0.02	0.92	0.014	0.004	-	-
11	STK400	E-G	A社	609.6×22.0	T方向, 5号	343	455	-	47	-	0.16	0.02	0.93	0.018	0.005	-	-
12	STK400	A(UO)	B社	609.6×25.0	T方向, 5号	357	472	-	50	-	0.09	0.12	1.37	0.019	0.002	-	-
13	STK400	A(UO)	B社	508.0×26.2	T方向, 5号	429	519	-	50	-	0.08	0.23	1.56	0.008	0.001	-	-
14	STK400(SS400)	A(Bend)+SR	C社(D社)	457.2×30.0	(C方向, 1号)	(302)	(454)	-	(33)	-	0.15	0.23	1.12	0.015	0.005	-	-
15	STK400	A(UO)	B社	609.6×30.0	T方向, 5号	379	459	-	56	-	0.08	0.12	1.37	0.013	0.002	-	-
16	STK400(SS400)	A(Bend)+SR	C社(B社)	457.2×35.0	(C方向, 1号)	(299)	(463)	-	(34)	-	0.16	0.18	0.94	0.017	0.003	-	-
17	STK400(SS400)	A(Bend)+SR	C社(D社)	457.2×40.0	(C方向, 1号)	(322)	(461)	-	(34)	-	0.15	0.22	1.11	0.013	0.005	-	-
18	STK400(SS400)	A(Bend)+SR	C社(D社)	457.2×45.0	(C方向, 1号)	(307)	(457)	-	(36)	-	0.15	0.20	1.11	0.017	0.005	-	-

^{*1} STK400(SS400)は鋼管STK400の原板がSS400で、鋼管と原板の製造メーカーが異なることを指す。

^{*2} E-Gは電気抵抗溶接まま、A(UO)とA(Bend)はそれぞれUO成形、板巻成形の後に継目をサブマージアーク溶接した自動アーク溶接鋼管、SRは製管後にSR処理（応力除去焼なまし処理）したもの。

^{*3} C社(D社)は鋼管の製造メーカーがC社、原板の製造メーカーがD社。

^{*4} L方向は管軸方向、T方向は管周方向、括弧内のC方向は原板（熱間圧延鋼板）の圧延直交方向、12C号等はJIS引張試験片の型式番号。伸び計測の標点距離は、12B, 12C, 5号試験片が50mm、1号試験片が200mm。

^{*5} (302)等の括弧内の数値は鋼管ではなくその原板（熱間圧延鋼板）から採取した引張試験片をSR処理（応力除去焼なまし処理）して引張試験を行ったデータ。

後、0.5m ずつ二つに切断し、片方はそのまま調査し、もう片方は焼ならし熱処理を施してから調査した。本論文では、前者を製品まま(as-delivered)、あるいは冷間成形まま(cold-formed)の鋼管、後者を焼ならし(normalized)、あるいは熱処理(heat-treated)の鋼管と呼ぶことにし、18 体×2 種の鋼管を調査する。この熱処理は鉄-炭素平衡状態における A₃ 変態点あたりの温度(今回はすべて 820℃に統一)まで加熱し空冷する焼ならしで、鋼管の材質を初期化して成形前の原板(熱間圧延鋼材)の材質を知るのが目的である。

JIS では STK 及び STKN の製造方法が製管方法と仕上げ方法の組合せで規定されている。製管方法は電気抵抗溶接(ERW, 記号 E)、自動アーク溶接(記号 A)、継目無し(記号 S)、鍛接(記号 B)の 4 種類である。このうち、継目無鋼管は寸法精度が劣ること、鍛接鋼管は継目シームの強度が低いという理由で建築鉄骨ではほとんど用いられず、もっぱら電気抵抗溶接鋼管(略称、電縫鋼管)と自動アーク溶接鋼管が用いられる。両者をあわせて溶接鋼管と呼んでいる。後者の自動アーク溶接鋼管は平板から円形への成形方法により、UO 鋼管(または UOE 鋼管)と板巻鋼管(ベンディング鋼管)の 2 種類があり、いずれも継目は直線(ストレートシーム)で、その溶接はサブマージアーク溶接(SAW)が主流である。今回入手した UO 鋼管、板巻鋼管も SAW である。

次に、仕上げ方法は JIS で熱間仕上げ(記号 H)、冷間仕上げ(記号

C)、電気抵抗溶接まま(記号 G)の 3 種類がある。仕上げとは、所定の寸法に製管材を仕上げることを言い、材質を改善することが目的ではない。したがって、現在、建築に供されている鋼管は冷間成形鋼管であり、角形鋼管の角部ほどではないにしても、冷間加工によって元の熱間圧延鋼材が硬化及び脆化していることを認識しておく必要がある。硬化は降伏点と降伏比の上昇、伸び能力の低下を招き、塑性設計には不都合となる。脆化は破壊靱性の低下を招き、微小なき裂が脆性破壊の引き金になりやすくなるので、構造安全上注意すべき点である。なお、今回入手した板巻鋼管 STK400-A(Bend)+SR は 4 体とも、仕上げとは別に、製管後に 620℃で応力除去焼なまし処理(SR 処理)が施されたものであった。

試験項目は、製品ままと焼ならし熱処理したものそれぞれについて、材料引張試験、シャルピー衝撃試験、残留応力測定、及び製品ままでの寸法測定の 4 項目である。以下、その順に試験方法と試験結果を説明する。

3. 材料引張試験とその結果

3.1 引張試験片

製品ままの鋼管と焼ならし熱処理した鋼管からそれぞれ管軸方向に引張試験片(JIS 14B 号、全厚の比例試験片)をシーム溶接から離れた位置から切り出した。試験片のつかみ部は、試験機のチャック

Fig.3 代表的な応力—ひずみ曲線(管軸方向の引張試験)

Table 3 引張試験から得られた鋼管の主要な特性値

鋼管製品 ^{*1}				製品ままの力学的特性値（管軸方向） ^{*2}								焼ならし熱処理後の力学的特性値（管軸方向） ^{*2}							
試験体 番号 No.	規格	製造方法	公称寸法 $D_n \times t_n$ (mm)	試片 記号	E (N/mm ²)	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	YR (%)	ϵ_{st} (%)	ϵ_u (%)	EL ^{*3} (%)	試片 記号	E (N/mm ²)	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	YR (%)	ϵ_{st} (%)	ϵ_u ^{*4} (%)	EL ^{*3} (%)
1	STKN490B	E-G	457.2×16.0	1C	195,000	429	520	82.5	-	13.2	32	1H	215,000	316	432	73.1	2.9	>22.2	39
2	STKN490B	E-G	558.8×16.0	2C	199,000	394	514	76.7	-	10.7	31	2H	208,000	336	438	76.7	2.9	>23.5	37
3	STK400	E-G	406.4×19.0	3C	213,000	428	494	86.6	-	6.1	31	3H	209,000	296	421	70.3	2.4	>24.0	38
4	STKN490B	E-G	406.4×19.0	4C	204,000	463	526	88.0	-	9.6	31	4H	215,000	305	435	70.1	2.5	>22.2	40
5	STK400	E-G	457.2×19.0	5C	208,000	358	448	79.9	-	12.2	36	5H	215,000	255	408	62.5	1.8	>24.5	40
6	STK400	E-G	558.8×19.0	6C	206,000	409	480	85.2	-	14.0	36	6H	210,000	297	387	76.7	2.9	>23.5	42
7	STK400	E-G	609.6×19.0	7C	210,000	355	437	81.2	-	12.8	36	7H	213,000	266	418	63.6	1.9	>27.0	40
8	STK400	A(UO)	508.0×20.6	8C	206,000	417	503	82.9	-	13.7	28	8H	215,000	373	486	76.7	2.4	>22.1	32
9	STK400	E-G	508.0×22.0	9C	204,000	373	445	83.8	-	15.2	31	9H	200,000	268	434	61.8	1.3	>15.7	29
10	STK400	E-G	558.8×22.0	10C	205,000	365	430	84.9	-	15.3	35	10H	207,000	274	431	63.6	2.0	>19.7	34
11	STK400	E-G	609.6×22.0	11C	200,000	360	435	82.8	-	16.1	34	11H	214,000	275	423	65.0	1.9	>20.0	38
12	STK400	A(UO)	609.6×25.0	12C	207,000	375	451	83.1	-	14.8	34	12H	208,000	323	427	75.6	3.1	>22.3	39
13	STK400	A(UO)	508.0×26.2	13C	206,000	408	488	83.6	-	14.7	34	13H	217,000	373	470	79.4	2.1	18.5	37
14	STK400(SS400)	A(Bend)+SR	457.2×30.0	14C	218,000	325	451	72.1	1.4	15.8	31	14H	215,000	278	442	62.9	1.5	>21.3	33
15	STK400	A(UO)	609.6×30.0	15C	210,000	372	446	83.4	-	15.6	35	15H	213,000	320	420	76.2	3.0	>20.9	35
16	STK400(SS400)	A(Bend)+SR	457.2×35.0	16C	218,000	313	442	70.8	1.3	14.7	31	16H	218,000	263	431	61.0	1.9	>19.4	35
17	STK400(SS400)	A(Bend)+SR	457.2×40.0	17C	218,000	283	414	68.4	1.6	18.8	36	17H	215,000	258	412	62.6	1.9	>20.2	36
18	STK400(SS400)	A(Bend)+SR	457.2×45.0	18C	214,000	283	404	70.0	1.7	18.7	36	18H	216,000	260	415	62.7	1.8	>17.9	38

^{*1} 規格と製造方法の記号はTable 2参照。

^{*2} 力学的特性値の記号: E = ヤング係数, σ_y = 降伏強さ(降伏棚のあるものは降伏点, 降伏棚のないものは0.2%オフセット耐力), σ_u = 引張強さ, YR = 降伏比, ϵ_{st} = ひずみ硬化開始ひずみ(降伏棚のあるもののみ), ϵ_u = 一様伸び(引張強さにおけるひずみ), EL = 破断伸び

^{*3} EL 計測の標点距離は, 1C~7C及び1H~7Hが100mm, 8C~13C及び8H~13Hが150mm, 14C~18C及び14H~18Hが200mm。

^{*4} ϵ_u の値が >22.2 等となっているものは, 引張強さの手前でひずみがひずみゲージの計測可能範囲を超えたため, 実際の一様伸びが22.2%より大きいことを表す。

が滑らないように平坦に切削加工した。製品ままの鋼管から切り出した試験片は、残留応力の解放によって曲がった状態となるが、矯正は行わず、そのまま試験機のチャックに固定して試験を行った。そのため、载荷の初期段階で試験片平行部に曲げが入ることになるが、表と裏に貼付したひずみゲージの値の平均を用いるので、曲げ成分は除去される。

3.2 材料引張試験の結果と考察

引張試験から得られた応力—ひずみ曲線を4グループの代表1体について Fig.3 に掲載する。同一グループ内では応力—ひずみ曲線が同じ形態をとるので他は省略する。一つのグラフには製品ままと熱処理の両方が描かれており、それぞれ 1C, 1H のように記号を付けてある。製品ままのものは降伏棚のない丸屋根型の曲線となるが、製管後に SR 処理が施されていた板巻鋼管は製品ままでも降伏棚が現れている。熱処理したものはすべて明瞭な降伏点及び降伏棚が現れ、製品ままのものよりカーブが下方にシフトする。主要な力学的特性値を Table 3 にまとめておいた。表中のひずみ硬化開始ひずみ ϵ_{st} に数値が入っているものは、降伏棚があることを意味し、その降伏強さは下降伏点である。降伏棚のないものの降伏強さは 0.2% オフセット耐力である。冷間成形によって、降伏強さ、引張強さ、降伏比が増大すること、及び一様伸びが低下することが知られているが、今回の試験でも原板の材質に初期化した熱処理材と製品ままを比較すればその通りになっていることが分かる。

今回実施した焼ならし熱処理によって冷間成形鋼管が成形前の原板(熱間圧延鋼材)の性質に初期化される。そこで、冷間成形の影響が顕著に現れる降伏強さについて製品ままと熱処理鋼管の比を径厚比に対してプロットしたのが Fig.4 である。電縫鋼管(E-G)では STK400, STKN490B ともに径厚比が小さいほど降伏強さの上昇率が大きくなる傾向が見られ、これは径厚比が小さいほど塑性加工の度合いが大きくなることを示唆している。UO 鋼管と SR 処理された板巻鋼管では径厚比の影響が見られず、電縫鋼管より降伏強さの上昇率が抑えられている。

焼ならし熱処理を施すと強度が鋼管の規格を満たさなくなることがある。例えば、試験体 No.1 の引張試験片 1H の降伏強さと引張強さはそれぞれ 325, 490N/mm² に満たない。2H, 4H, 6H も同様でこれらはすべて電縫鋼管である。このこと自体は製品上の瑕疵ではなく、冷間成形後の強度を保証しつつ成形性を確保するために原板(電縫鋼管では熱延コイル)の強度を低めに設定してあるからである。鋼管の材質を改善するために安易に熱処理すると強度不足に陥る可能性があることを設計者は認識しておく必要がある。

ラボテストの結果(Table 3 の製品ままの力学的特性)をミルシート値(Table 2)と単純に比較することはできない。両者には载荷速度、ひずみの計測方法、試験片の標点距離、試験片の採取方向の違いがあるからである。载荷速度は JIS でその範囲が定められているが、ミル試験では生産効率を上げるためその上限近くに設定し、ラボ試験ではデータのサンプリング間隔を密にするため下限近くに設定するので、载荷速度の遅いラボ試験のほうが降伏強さ、引張強さが低くなる。また、ラボ試験ではひずみゲージによってひずみを計測するが、ミル試験では伸び計でひずみを計測する。冷間成形鋼管から採取した試験片のように曲がっている試験片に装着した伸び計では

Fig.4 製品ままと熱処理後の降伏強さの比

弾性係数が精確に測定できないため 0.2% オフセット耐力の評価にかなり大きな誤差が生じることがある。また、ラボ試験では平行部の長い JIS 試験片を採用して一様な応力場を得ようとするので、これに伴って標点距離も長くなり、その結果、破断伸び EL が小さくなる。これらの違いを考慮すれば今回のミル試験値とラボ試験値に不整合はないと考えてよい。一つ注意すべき点として、電縫鋼管の管周方向の降伏強さ(ミル試験値)は管軸方向の降伏強さ(ラボ試験値)より小さい傾向が見られることである。製品の歩留まり上、管軸方向よりも管周方向から引張試験片を採るほうが有利ではあるが、構造設計では管軸方向の力学的特性のほうが重要となる。STKN では管軸方向の引張試験を要求しているが、STK では方向を指定していないので注意を要する。

4. シャルピー衝撃試験とその結果

4.1 シャルピー衝撃試験片

シャルピー吸収エネルギーは脆性破壊に対する抵抗能力の指標として有用であることが知られており、試験方法の簡便さもあって、建築構造用圧延鋼材(SN)にならって建築構造用炭素鋼鋼管(STKN)の B グレードでも 0℃ シャルピー吸収エネルギーが 27J 以上と規定されている。ただし、一般構造用炭素鋼鋼管(STK)にはシャルピー規定がない。

過去に行われた円形鋼管柱と H 形梁フランジの接合部の実験によると、脆性破壊(厚さの小さいものでは延性破壊)が少なからず報告されており、その様相は Fig.5 のモード C とモード L に大別される。モード C は管周方向にき裂が進展する形式で、ダイアフラムと鋼管の溶接止端を起点とする場合⁵⁾だけでなく、ダイアフラムが無い場合でも梁フランジと鋼管の溶接止端を起点とするものが報告されている⁶⁾。このモード C のき裂は、柱に作用する曲げモーメントによる管軸方向の引張応力が主因であり、梁フランジから加わる直交方向の引張応力も多軸応力として関与すると考えられる。これに対して、モード L は管軸方向にき裂が進展する形式で、ダイアフラムが無い場合に梁フランジの側縁と鋼管の溶接止端を起点とするものがかなり報告されているが^{7), 8), 9)}、ダイアフラムが有る場合にもダイアフラムと梁フランジ側縁の溶接止端から発したき裂がダイアフラムを通して柱に至ることもある¹⁰⁾。このモード L のき裂は、梁フランジ側縁に集中する管周方向の引張応力が主因である。

(1) ダイアフラム付き円形鋼管柱のモードC及びモードL破壊

(2) ダイアフラムの無い円形鋼管柱のモードC及びモードL破壊

Fig. 5 円形鋼管柱 - H形梁フランジ接合部の破壊形式

そこで、シャルピー衝撃試験片を Fig.6 のように、管軸方向(L)及び管周方向(C)のそれぞれ外面側(O)と内面側(I)から 3 個ずつ採取した。試験片の V ノッチに作用する引張応力の方向から考えて、管軸方向の試験片は上記のモード C、管周方向の試験片はモード L の破壊に対応することになる。また、V ノッチは鋼管の外面に向け、き裂が厚さ方向に外面から内面に向かって進行する実態に合わせた。

4.2 シャルピー衝撃試験の結果と考察

シャルピー衝撃試験から得られた 0℃シャルピー吸収エネルギーを、管軸方向の外面(LO)と内面(LI)、管周方向の外面(CO)と内面(CI)の 4 つに分けて、Fig.7 に全データをプロットした。横軸は試験体番号 1~18 で、製品ままを白抜き、熱処理を塗りつぶしマークでプロットしてある。冷間加工によってシャルピー衝撃特性が低下することが知られているが、今回調査した鋼管は全般的に衝撃特性が優れており、27J を下回るものは全試料 432 個のうち 5 個のみで、3 個の平均値が 27J を下回ったのは製品まま試験体 No.17 の管周方向

Fig. 7 0℃シャルピー吸収エネルギー

Fig. 6 シャルピー衝撃試験片の採取方向と厚さ内の位置

外面と製品まま試験体 No.18 の管周方向内面のみであった。ただし、27J が脆性破壊を防止するために十分とは言えないので、吸収エネルギーが低レベルのものが存在する実態を念頭に置いておく必要がある。

Fig. 7 を相互に見比べると、管周方向のシャルピー吸収エネルギーが外面側と内面側ともに管軸方向より小さい傾向が見て取れる。そこで、管軸方向に対する管周方向の比 (3 個の平均値の比) をプロットしてみると Fig.8 のようであり、やはり、ほとんどの鋼管において管周方向のほうが管軸方向より破壊靱性が低い。STKN の JIS 規格ではシャルピー衝撃試験片を管軸方向から採取することが規定されているが、管周方向はその値より小さい傾向があることに注意する必要がある。このことは前出 Fig.5 のモード L の破壊が侮れないことを示唆している。

熱処理によってシャルピー吸収エネルギーがどの程度向上するか、逆に言えば、冷間成形によって原板の靱性がどの程度失われたかを見るために、製品ままのシャルピー吸収エネルギーに対する熱処理材の比をとったものを Fig.9 に示す。1.0 を超えるもの、すなわち熱処理によって靱性が回復するものが多いが、No.18 のように一部逆になっているものも見られる。これは熱処理過程での結晶粒成長に関わる微量元素の有無に依るものと考えられる。UO 鋼管 (試験体 No.8, 12, 13, 15) は管軸方向、管周方向とも同程度に高いシャルピー衝撃特性を示しており、熱処理に依ってもほとんど変化していな

Fig. 8 管軸方向に対する管周方向のシャルピー吸収エネルギーの比

Fig. 9 熱処理によるシャルピー吸収エネルギーの増加率

い。その化学成分を Table 2 で見ると、炭素含有量が少なく、靱性を高める働きをするマンガンが多く含まれている。

5. 残留応力測定とその結果

5.1 残留応力の測定方法

一般に、残留応力の測定は切断法による。よく行われるのは、ひずみゲージを貼付した後、その周辺を切断して解放されたひずみを測定し、それを残留ひずみとするものである。残留応力は直接測定することはできないが、残留ひずみに弾性係数を乗じて計算する。ただし、実際の残留応力は多軸状態にあるので解放ひずみから残留応力を正確に求めるのは難しく、厚さの内部の解放ひずみをひずみゲージで測ることができない点に限界がある。このひずみゲージ法はゲージを貼付した箇所の局所的な解放ひずみが得られるわけであって、非一様に分布している残留応力の大域的な様相を知るには多数のひずみゲージを密に貼付する必要がある。薄肉小径の電縫鋼管の残留応力をひずみゲージで調べた既往研究^{2), 3), 4)}によると、残留応力は Fig.10 のような分布をしており、管周方向と管軸方向とも外面が引張、内面が圧縮の残留応力状態となっている。すなわち、切断による解放ひずみは外面が圧縮、内面が引張となる。

もう一つの方法は、切断後に生じる変形を測定する方法で、大域的あるいは平均的な残留ひずみを知ることができる。本研究では大型の鋼管を対象としているので、ひずみゲージを貼付したままその

周辺を切断するのは困難と考え、この変形測定方法を用いることにした。残留応力を変形測定によって調べる方法はあまり知られていないので、その手順と計算根拠について以下に説明する。残留ひずみと残留応力は可逆的な弾性力学量であるので、これらは弾性力学によって定量化できる。

5.2 管周方向残留応力の測定方法

管周方向については、Fig.11 のように、鋼管を輪切りにしてリングを取り出す。リングの幅を小さくとれば（今回 20mm）、管軸方向の残留応力は解放されるので、切断後は管周方向の一軸応力状態を考えればよい。ただし、ポアソン比により管周方向の残留ひずみも部分的に解放されるので管周方向残留応力が低めに評価されることに注意する必要がある。次に、リングの 1 か所を切断すると（今回はシーム溶接部で切断）、管周方向の残留ひずみが解放されて輪が広がる。ただし、残留応力の分布が Fig.10 と逆になっていると輪が縮まるが、いずれの場合も数理的には正負の符号が逆になるだけで同じように扱うことができる。

切断前のリングの厚さの中心を通る円の半径を r_0 とする。切断後の隙間を含んだ外周長を巻尺で測定しそれを l_1 とすれば、厚さ t の中心を通る円の半径 $r_1 = l_1/2\pi - t/2$ が定まる。曲率の変化 $\Delta\phi = 1/r_0 - 1/r_1$ がリング断面の曲げ剛性 EI を介して解放曲げモーメント $M_{rc} = EI\Delta\phi$ と対応付けられ、この解放曲げモーメントに対応して最外縁の管周方向残留応力 $\sigma_{rc} = M_{rc}t/2I$ が次式で求められる。

$$\sigma_{rc} = \frac{Et}{2} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_1} \right) \quad (1)$$

式中の E はヤング係数で、 $E = 205,000 \text{ N/mm}^2$ とする。厳密には、この問題に曲がり梁の理論を適用する必要があるが、本研究で対象とした径厚比が 10 以上の鋼管では、曲げの中立軸を厚さの中心とする上記の簡便法を使っても誤差は 8% 以下である。

1 か所で切断したリングをさらに反対側で切断すると、半円弧が 2 個できる。図のように両端の厚さ中心点間距離 l_2 と厚さ中心線の

Fig.10 電縫鋼管の残留応力分布

Fig.11 管周方向の残留応力を調べるための切断法

Fig.12 管軸方向の残留応力を調べるための切断法

むくり c_2 を大型ノギスで測定すれば、厚さの中心を通る円弧の半径 r_2 は、幾何学的な関係から次式で表される。

$$r_2 = \frac{\frac{l_2^2}{4} + c_2^2}{2c_2} \quad (2)$$

この r_2 を(1)式の r_1 と置き換えれば、半リングの残留応力が求められる。初めの1か所切断で残留応力が完全に解放され、かつ管周に沿って残留応力が一様であれば、 $r_1 = r_2$ となるが、実際にはそうなっていないので多少の違いが生じる。

上式の σ_{rc} が正のときは切断することによって円弧が広がる場合であり、管周方向の残留応力は外面が引張、内面が圧縮であったことを意味する。平板を単純に冷間曲げのみによって円筒に成形すると必ずそのようになるが、後で見るように、それ以外の成形力が作用すると残留応力のパターンが異なってくる。また、熱処理した鋼管では σ_{rc} が負になることがある。その理由は、加熱によって残留応力が除去されるとともに、鋼管の外面が先に冷却硬化し、遅れて冷却収縮する内面が外面側の拘束を受けて引っ張られ、その反作用として外面が圧縮されるためである。

5.3 管軸方向残留応力の測定方法

次に、管軸方向については、Fig.12のように、管軸に平行な帯状の短冊（今回は幅 30mm×長さ 465mm）を鋼管から切り出す。すると、管軸方向の残留ひずみが解放されて短冊は内面側が凸となるように曲がる（電縫鋼管の場合）。熱処理鋼管では逆方向に曲がることがあるが、その理由は上で述べたのと同様である。

短冊の両端を水平定盤上で支持し、水平基準点間の長さ l_3 とむくり c_3 を測定する。むくりは、ダイヤルゲージを短冊の外面の幅中心線に沿って水平にスライドさせながら測定し、その最大値をとる。残留ひずみの解放によって生じる円弧の半径、すなわち曲率半径 ρ は(2)式と同様の考えで、

$$\rho = \frac{\frac{l_3^2}{4} + c_3^2}{2c_3} \quad (3)$$

となる。よって、管軸方向の解放曲げモーメント $M_{rL} = EI/\rho$ から、最外縁の曲げ応力度は次式で与えられる。

$$\sigma_{rL} = \frac{M_{rL}}{2I/t} = \frac{Et}{2\rho} \quad (4)$$

図のように、短冊を長さ方向にさらに2分割して同様の測定を行い、長さ l_4 とむくり c_4 から片側それぞれの残留応力を求めることが

Fig.14 管軸方向外面の残留応力

Fig.15 管周方向外面の残留応力

Fig.16 残留せん断応力

Fig.13 残留せん断応力を調べるための切断法

できる。

鋼管から切り離された管軸方向の短冊が内面側を凸とするように曲がる時、管軸方向の残留応力は外面側が引張、内面側が圧縮であったことを意味する。鋼板を円形に冷間で曲げ成形したとき、管周方向だけでなく管軸方向にも残留曲げモーメントが入る理由は、平面ひずみ状態で管周方向に曲げひずみを与えると同じ符号の曲げ応力度が直交方向すなわち管軸方向に生じるからである。

5.4 残留せん断応力の測定方法

鋼管から切り出したリングの1か所を切断すると、前述のように輪が広がる（あるいは縮まる）が、それと同時に、Fig.13のように、輪がねじれて切り口に段差ができることがある。これは内部に封じ込められていたねじりモーメントが解放されることによって生じるものである。この残留ねじりは鋼管の製造過程で、合せ目がずれた状態（成形ロールの駆動力の不均衡によりねじりモーメントが入った状態）でシーム溶接されることによる。これに伴い、断面内部にはせん断応力が残留応力として封印され、リングの1か所を切断すると、そのせん断ひずみが解放されて段差が生じる。円形鋼管の場合は管軸直交方向に切断しても軸対称断面であるので、スリットを入れない限りねじり変形が顕在化しないが、この円形鋼管をさらに成形した角形鋼管を切断すると残留ねじりが解放されて断面にゆがみが生じることがある。

断面内の残留せん断応力は、シーム溶接する直前の開断面の状態を導入されるので、鋼管断面の厚さ中心でゼロ、外面と内面向きが逆で大きさは最大となる。この内外面の残留せん断応力 τ_r は、リング切断面の切り口に生じる段差を δ_s とすると、ねじりの膜類似理論を援用して反り関数を導くことにより¹¹⁾、次式で与えられる。ここで、せん断弾性係数を $G = 79,000 \text{ N/mm}^2$ とする。

$$\tau_r = \frac{Gt}{2\pi r_0^2} \delta_s \quad (5)$$

5.5 残留応力の測定結果と考察

製品ままの鋼管の外面の管軸方向残留応力 σ_{rL} と管周方向残留応力 σ_{rc} （いずれも引張応力を正）、及び残留せん断応力 τ_r を径厚比に

対してプロットしたものを Fig.14, Fig15, Fig16 に示す。前 2 者は各鋼管につき切断片 3 個のデータをプロットしてある。この 3 つのグラフを総覧して気づく大きな特徴は、電縫鋼管、UO 鋼管、板巻鋼管の残留応力が全く異なった様相を呈していること、及び電縫鋼管の管軸方向残留応力が際立って大きいことの 2 点である。管軸方向の残留応力のほうが管周方向より大きいことは、薄肉小径の電縫鋼管の残留応力をひずみゲージ法で調べた既往研究^{3), 4)}の知見と一致している。以下、少し詳しく観察してみる。

管軸方向の残留応力 (Fig.14) は、電縫鋼管では 300N/mm²前後に達しており、これは Table 3 に掲載した焼ならし熱処理によって初期化した鋼管すなわち成形前の原板の降伏強さのレベルに達しており、引張強さ近くまで達しているものもある。これは塑性加工による必然の結果であるが、鋼管の外面で管軸方向に大きな引張残留応力が入っていることに対しては構造安全上の注意が必要であろう。つまり、弾性限耐力にはほとんど余裕が無いことになるので、延性と靱性によって安全性を確保するというスタンスが不可欠である。電縫鋼管とは違って、UO 鋼管では残留応力の正負が逆転しており、外面が圧縮で、残留応力の大きさは 150N/mm²前後である。これは U 型曲げ成形、O 型プレス成形に続く拡張成形(Expand)の影響を受けているものと考えられる。板巻鋼管は SR 処理が施されていたため、残留応力は比較的小さく、外面がほとんどにおいて圧縮である。SR 処理によって外面が圧縮になるのは、加熱後の徐冷過程で外面側の冷却が先行するためと考えられる。

管周方向の残留応力 (Fig.15) は、管軸方向に比べて小さい。電縫鋼管でさえ、50N/mm²前後に収まっており、UO 鋼管ではそれより小さく、SR 処理された板巻鋼管ではほとんどゼロか、外面側が圧縮である。ただし、前述のようにリング切出し時に管周方向残留ひずみが部分的に解放されるので、実際の管周方向残留応力はこれより高めになっていると考えられる。

残留せん断応力 (Fig.16) は、電縫鋼管にのみ観察され (最大で 70N/mm² 程度)、UO 鋼管と板巻鋼管ではほとんどゼロである。電縫鋼管では径厚比の大きいほど残留せん断応力が高くなる傾向が見られる。これは圧延ロールの駆動力によって厚さの小さいものほど

ねじりが入りやすいためであろうと推測される。シーム溶接される直前の円状開断面のねじり定数は $2\pi r_o t^3/3$ で、厚さの 3 乗に比例するからである。上記の 70N/mm² は原板の降伏せん断応力度の約 40% で、管軸方向残留応力と比べればさほど大きな値ではない。残留せん断応力を計算する際に用いるリング切断面の段差は電縫鋼管で最大 23mm (試験体 No.6) であったが、この段差はシーム溶接直前の合せ目の材軸方向のずれ、すなわちねじり理論における反りである。つまり、23mm の反りを生じさせるねじりモーメントが加えられた状態でシーム溶接されたと推定される。電縫鋼管とは成形方法の異なる UO 鋼管と板巻鋼管ではこのようなねじりがほとんど入らないと考えられる。

焼ならし熱処理した鋼管の残留応力は製品ままのものよりはるかに小さかったので詳細は割愛するが、管軸方向残留応力は、外面の冷却が先行するために、外面が圧縮となる傾向が見られ、その大きさは 50N/mm² 程度以下であった。管周方向の残留応力と残留せん断応力はいずれもゼロとみなしうる結果であった。

6. 鋼管の寸法測定とその結果

6.1 鋼管の寸法許容差

鋼管の寸法は外径、厚さ、長さで表され、公称値 (指定値、規定値ともいう) と実測値がある。ここでは公称値(nominal)に対して添え字 n を付け、公称外径、公称厚さ、公称長さをそれぞれ D_n , t_n , L_n で表す。実測値には一個で代表する測定値のほかに複数の測定値から得られる最大値、最小値、平均値がある。ここでは一個の代表測定値は添え字なしとし、後の三者はそれぞれに添え字 max , min , ave を付ける。

実際の製品寸法には誤差があり、誤差が大きいと鉄骨などの二次製品の製作に支障をきたすので、許容誤差 (公差) が鋼材規格で定められている。本論では薄肉小径の鋼管は除外し、柱材として想定される $D \geq 100\text{mm}$, $t \geq 12\text{mm}$, $D/t \leq 100$ の鋼管の許容誤差について JIS¹²⁾, 欧州 EN^{13), 14)}, 米国 ASTM¹⁵⁾ の最新規定 (2014 年時点) を比較したものを Table 4 に示す (ただし、継目無鋼管を除く)。鋼管の寸法精度に関する JIS 規格は国際的にみて甘く、EN 規格がも

Table 4 鋼管の寸法許容差の国際比較

(継目無鋼管を除く、外径 $D \geq 100\text{mm}$, 厚さ $t \geq 12\text{mm}$, 径厚比 $D/t \leq 100$)

規格名	外径 D	厚さ t	真円度	真直度	質量	長さ	溶接ビード高さ
JIS G 3444 ²⁰¹⁰ 一般構造用炭素鋼鋼管 (STK)	1号 ^{*1} : $\pm 1\%$ 2号 ^{*2} : $\pm 0.5\%$ ただし、外径 350mm 超の溶接鋼管の管端部は $\pm 0.5\%$	1号 ^{*1} : $-1.5\text{mm} \sim +15\%$ 2号 ^{*2} : $-1.2\text{mm} \sim +10\%$	規定なし	実用的に真つぐ (数値規定なし)	規定なし	指定なき限り指定長さ以上、 または受渡当事者間協定	規定なし
JIS G 3475 ²⁰⁰⁸ 建築構造用炭素鋼鋼管 (STKN)	$\pm 1\%$ ただし、外径 350mm 超の溶接鋼管の管端部は $\pm 0.5\%$	$-0.5\text{mm} \sim +15\%$	規定なし	実用的に真つぐ (数値規定なし)	規定なし	指定なき限り指定長さ以上、 または受渡当事者間協定	規定なし
BS EN 10210-2:2006 Hot finished structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels - Part 2	$\pm 1\%$, かつ $\pm 10\text{mm}$	-10% +公差は質量公差による	2 %	全長に対して 0.2% どの 1m に対しても 3mm	個々の製品長さにつき $\pm 6\%$	長さ指定の時 (Exact), $2 \leq L \leq 6\text{m}$: $0 \sim +10\text{mm}$ $L > 6\text{m}$: $0 \sim +15\text{mm}$	サブマージアーク溶接 (内外面とも) 最大値 $t \leq 14.2\text{mm}$: 3.5mm $t > 14.2\text{mm}$: 4.8mm
BS EN 10219-2:2006 Cold formed welded structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels - Part 2	$\pm 1\%$, かつ $\pm 10\text{mm}$	$D \leq 406.4\text{mm}$: $\pm 0.5\text{mm}$ $D > 406.4\text{mm}$: $\pm 10\%$, かつ $\pm 2\text{mm}$	2 %	全長に対して 0.2% どの 1m に対しても 3mm	個々の製品長さにつき $\pm 6\%$	長さ指定の時 (Exact), $L < 6\text{m}$: $0 \sim +5\text{mm}$ $6 \leq L \leq 10\text{m}$: $0 \sim +15\text{mm}$ $L > 10\text{m}$: $0 \sim +(5\text{mm} + 1\text{mm/m})$	サブマージアーク溶接 (内外面とも) 最大値 $t \leq 14.2\text{mm}$: 3.5mm $t > 14.2\text{mm}$: 4.8mm
ASTM A500/A500M-13 Cold-formed welded and seamless carbon steel structural tubing in rounds and shapes	$\pm 0.75\%$	$\pm 10\%$	規定なし	全長に対して 0.2%	規定なし	長さ指定の時 (Specifc), $L \leq 6.5\text{m}$: $-6 \sim +13\text{mm}$ $L > 6.5\text{m}$: $-6 \sim +19\text{mm}$	規定なし
ASTM A501-07 Hot-formed welded and seamless carbon steel structural tubing	$\pm 1\%$	規定なし	規定なし	全長に対して 0.2%	個々の製品長さにつき -3.5%	長さ指定の時 (Specifc), $L \leq 6.7\text{m}$: $-6.4 \sim +12.7\text{mm}$ $6.7 < L \leq 13.4\text{m}$: $-6.4 \sim +19\text{mm}$	規定なし

(注) ^{*1} 1号は特に指定が無い場合。^{*2} 2号は特に指定が有る場合。

とも厳しく設定されている。JIS に規定のない真円度(Out of roundness)と真直度(Straightness)は EN^{13), 14)} で定義されている次式を用いることにする(記号は Fig.17 参照)。真円度と真直度は値が 0 のとき、それぞれ完全な円、直線を表し、値が大きくなると真円、直線から外れていく。

$$O_r = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_n} \times 100 \quad (\%) \quad (6)$$

$$S_t = \frac{e}{L} \times 100 \quad (\%) \quad (7)$$

真円度は、鋼管柱どうしの現場突合せ継手で目違いが大きくならないように規定しておく必要があるが、現行 JIS では真円度の規定がない。告示 1464 号では厚さが 15mm を超える場合の食い違いは厚さの 1/10 以下かつ 3mm 以下となっており、それを超える場合は適切な補強を要する。真円度は、外径の許容差とは独立のものであることに注意する必要がある(鋼管の外径は周長から計算で求めることが許されているので、真円度とは無関係である)。

真直度は柱の建て方精度だけでなく圧縮耐力にも関係するので、学会 JASS 6¹⁶⁾では 0.1%以下に制限してあるが、現行 JIS の鋼管には曲がりの規定がない。このことは角形鋼管についても同様の状況

Fig.17 鋼管の寸法の定義

にあり、一般構造用角形鋼管(JIS G 3466)の真直度は 0.3%以下という甘い制限になっている。ただし、建築構造用冷間成形角形鋼管 BCR, BCP では製品長さ 9m 未満と以上につき、曲がり e を全長の 1/1500 以下, 1/1250 以下という比較的厳しい制限を与えており¹⁷⁾, JASS 6 と整合している。かつて鉄骨柱に多用された H 形鋼の真直度は JIS G 3192 において 0.1%以下(せいが 300mm 以下では 0.15%以下)と規定されている。

6.2 寸法の測定方法

今回入手した鋼管は JIS にある「管端部」が特定できなかったもので、両端を区別せずに扱うこととし、周長、外径、厚さの測定は納品された 1m 長さの両端で行った。平均外径 D_{ave} は JIS に準拠して巻尺による外周長の測定値を $\pi = 3.1416$ で除して計算し、両端の値を平均した。最大外径 D_{max} と最小外径 D_{min} については、端部断面のシーム溶接部を起点(0 時)として時計の文字盤と同様に 12 等分し、対角位置(例えば 1 時と 7 時)を順次ずらしながら、6 か所の直径を大型ノギスで測定し、その中から D_{max} と D_{min} を見つけて上記の真円度を計算し、両端の真円度の大きいほうの値を採用した。最大厚さ t_{max} と最小厚さ t_{min} もほぼ同様の手順によってマイクロメータで測定し、平均厚さ t_{ave} は両端の全測定値の単純平均とした。曲がり e は、測定区間が僅か 1m しかない関係で非常に小さかったので、鋼管の外面の長手方向に直線定規を当て最も隙間が大きいとみられる箇所をすきまゲージで測定した。溶接ビード高さは端部断面で外面と内面それぞれについてノギスで測定して両端の値の大きいほうを採用した。なお、ビード切削仕上げを行っている電縫鋼管はビード高さ 0 である。

6.3 寸法の測定結果と考察

寸法の測定結果に基づく誤差を一覧表にしたものを Table 5 に示す。表の下段には、18 試験体の最小値と最大値、及び寸法精度の規定が厳格な BS EN 10219 の許容差を記入してある。全体的に寸法

Table 5 寸法の測定結果及び寸法許容差との比較

試験体 番号 No.	公称寸法		外径の誤差		厚さの誤差		真円度	曲がり	真直度	長さの誤差	溶接ビード高	
	$D_n \times t_n$ (mm)	L_n (mm)	$D_{ave} - D_n$ (mm)	$(D_{ave} - D_n)/D_n$ $\times 100$ (%)	$t_{ave} - t_n$ (mm)	$(t_{ave} - t_n)/t_n$ $\times 100$ (%)	O_r (%)	e (mm)	S_r (%)	$L - L_n$ (mm)	外面 (mm)	内面 (mm)
1	457.2×16.0	1,000	1.1	0.24	0.24	1.5	0.17	0.2	0.02	2.5	0.0	0.0
2	558.8×16.0	1,000	1.0	0.18	0.25	1.6	0.20	0.2	0.02	1.5	0.0	0.0
3	406.4×19.0	1,000	0.8	0.19	-0.72	-3.8	0.25	0.1	0.01	1.0	0.0	0.0
4	406.4×19.0	1,000	1.8	0.43	0.26	1.4	0.10	0.1	0.01	1.0	0.0	0.0
5	457.2×19.0	1,000	1.0	0.22	-0.82	-4.3	0.39	0.2	0.02	1.0	0.0	0.0
6	558.8×19.0	1,000	1.0	0.17	-0.67	-3.5	0.43	0.3	0.03	2.5	0.0	0.0
7	609.6×19.0	1,000	1.0	0.16	-0.62	-3.3	0.20	0.2	0.02	0.0	0.0	0.0
8	508.0×20.6	1,000	0.6	0.13	0.24	1.2	0.63	0.5	0.05	0.0	0.0	1.5
9	508.0×22.0	1,000	0.8	0.15	-0.69	-3.1	0.28	0.1	0.01	3.6	0.0	0.0
10	558.8×22.0	1,000	0.8	0.14	-0.45	-2.0	0.20	0.2	0.02	1.8	0.0	0.0
11	609.6×22.0	1,000	0.3	0.05	-0.55	-2.5	0.21	0.3	0.03	2.2	0.0	0.0
12	609.6×25.0	1,000	0.7	0.11	0.02	0.1	0.31	0.5	0.05	1.0	2.5	1.8
13	508.0×26.2	1,000	0.6	0.12	0.04	0.1	0.47	0.5	0.05	1.5	2.0	1.5
14	457.2×30.0	1,000	0.9	0.19	-0.06	-0.2	0.59	0.3	0.03	0.2	0.0	0.8
15	609.6×30.0	1,000	1.3	0.21	0.27	0.9	0.16	0.2	0.02	0.5	2.5	2.0
16	457.2×35.0	1,000	2.4	0.52	-0.56	-1.6	0.28	0.3	0.03	0.0	0.0	1.0
17	457.2×40.0	1,000	0.9	0.20	0.20	0.5	0.94	0.5	0.05	1.0	0.0	2.0
18	457.2×45.0	1,000	1.2	0.27	0.16	0.4	0.85	0.3	0.03	0.0	0.0	3.0
最小			0.3	0.05	-0.82	-4.3	0.10	0.1	0.01	0.0	0.0	0.0
最大			2.4	0.52	0.27	1.6	0.94	0.5	0.05	3.6	2.5	3.0
BS EN 10219			±10	±1	±0.5 ^{*1}	±10 ^{*2}	2.0	3.0	0.2	0~+5	4.8	4.8

^{*1} $D_n \leq 406.4\text{mm}$ に対して $\pm 0.5\text{mm}$, $D_n > 406.4\text{mm}$ に対して $\pm 2\text{mm}$, ^{*2} $D_n > 406.4\text{mm}$ に対して $\pm 10\%$

精度は良く管理されており、EN 規格を満たさないのは試験体 No.3 のみで、厚さの誤差 -0.72mm がマイナス許容差 -0.5mm を超えている。もちろん、この鋼管(STK400)は JIS の許容差は満たしている。

構造用鋼管を建築鉄骨柱に普及させるには、欧州規格と同様、真円度と真直度の数値規定が必要になってくる。真直度については従来からの設計及び施工標準との関係で、 0.1% 以下にする必要があり、これはユーロ規格より厳しい許容差となる。真円度については、鋼管柱どうしの継目、特にダイアフラムが無い場合に、目違いを小さくする上で不可欠な要件となる。

7. まとめ

鉄骨ラーメン柱への適用を想定して大型構造用鋼管の材質、残留応力、寸法精度を調査した。鋼材規格は一般構造用炭素鋼鋼管 STK400 と建築構造用炭素鋼鋼管 STKN490B で、外径は $406.4\sim 609.6\text{mm}$ 、厚さは $16\sim 45\text{mm}$ 、径厚比は $10\sim 35$ の範囲である。製造方法で分類すると、電縫鋼管、UO 鋼管、および板巻鋼管の 3 種類である。この調査のために入手した鋼管は 18 本であるが、製品ままの状態に加え、それらに焼ならし熱処理(820°C)を施して成形前の原板の状態に初期化した熱処理鋼管の合計 36 本について調べた。主な知見は以下のとおりである。

(1) 製品ままの鋼管は冷間成形の影響により応力一ひずみ曲線が丸屋根型となるが、熱処理鋼管では明瞭な降伏点と降伏棚が現れた。ただし、製品ままでも応力除去焼なまし(SR 処理、 620°C)がされていた板巻鋼管では降伏棚が観察された。製品ままの鋼管は熱処理鋼管に比べて、降伏強さ、引張強さ、及び降伏比が高く、逆に一樣伸びが小さかった。特に、電縫鋼管では降伏強さが原板より相当高くなっており、径厚比が小さいほどその傾向が顕著であった。

(2) 製品ままの鋼管の 0°C シャルピー吸収エネルギーは管周方向のほうが管軸方向より明らかに小さい傾向が観察された。熱処理を施しても、その傾向は変わらなかったが、製品ままの鋼管よりも吸収エネルギーが全般的に上昇する傾向が見られた。鋼管の外側と内面側のシャルピー衝撃特性にさほど差は見られなかった。

(3) 残留応力は電縫鋼管、UO 鋼管、板巻鋼管で全く異なる様相を呈した。電縫鋼管の管軸方向残留応力は際立って大きく、原板の降伏応力レベルかそれ以上の大きな値(外面が引張、内面が圧縮)を示した。管周方向の残留応力は相対的に小さく、残留せん断応力は電縫鋼管のみに観察された。熱処理鋼管では残留応力がほとんど除去されていた。

(4) 鋼管の寸法誤差はすべて JIS 規格を満たすものであったが、国際的に厳しい公差を規定している欧州 EN 規格を満たさないものがあった。欧米で規定されている構造用鋼管の真円度と真直度は現在の JIS では規定されていないが、これについては、鉄骨製品とし

ての寸法精度を確保するために今後検討の余地がある。

謝辞

本研究は、2013 年 11 月に急逝された加藤勉東京大学名誉教授の遺志を継いで行われたものである。加藤先生から受けた薫陶に感謝しつつ本稿を捧げたい。

参考文献

- 1) 建設物価調査会：Web 建設物価、2014.6.
- 2) 若林 実、野中泰二郎、西川一正：電縫鋼管の座屈に関する実験的研究、京都大学防災研究所年報、No.12A、pp.439-462、1969.3.
- 3) 加藤 勉、青木博文：電気抵抗溶接鋼管のひずみ履歴と残留応力一短柱の圧縮試験における見掛けの応力-ひずみ関係への影響について、日本建築学会論文報告集、第 230 号、pp.43-110、1975.4.
- 4) 辻 文三、康 海偉：電縫鋼管の材料特性、日本建築学会構造系論文報告集、第 440 号、pp.85-93、1992.10.
- 5) 仲 威雄、加藤 勉、湯浅 丹、田中淳夫、佐々木哲也：水平荷重を受ける鋼構造柱・はりおよびその接合部の挙動について<報告・その 2>、日本建築学会論文報告集、第 102 号、pp.37-43、1964.9.
- 6) 高田武之、田中 剛、田淵基嗣、塩飽豊明、大隈亮佑、西村有司：ノンダイアフラム形式円形鋼管柱梁接合部の弾塑性挙動一その 2 実験結果一、日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1、pp.759-760、2010.9.
- 7) 大隈亮佑、田中 剛、田淵基嗣、高田武之、西村有司：ノンダイアフラム形式円形鋼管柱梁接合部の弾塑性挙動一その 4 パネル梁耐力比を因子とした十字形架構実験一、日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1、pp.1093-1094、2011.8.
- 8) 上場輝康、金谷 弘、藤原勝義、田淵基嗣：鋼管柱・H 形はり接合部の単純模型実験一鋼管柱溶接接合部の研究 I 一、日本建築学会論文報告集、第 322 号、pp.44-51、1982.12.
- 9) 付 功義、森田耕次：コンクリート充填円形鋼管柱-鉄骨梁フランジ接合部の局所引張耐力に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 504 号、pp.119-125、1998.2.
- 10) 伊藤豪城、付 功義、永田匡宏、中村秀司、森田耕次：コンクリート充填円形鋼管柱-鉄骨梁接合部の力学的挙動に関する研究、その 1 研究計画と実験結果、日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1、pp.831-832、1995.8.
- 11) 桑村 仁：建築の力学-弾性論とその応用-(第 9 章ねじり)、技報堂出版、2001.4.
- 12) 日本規格協会：JIS ハンドブック 2-鉄鋼 II、2014.1.
- 13) British Standards Institution: Hot Finished Structural Hollow Sections of Non-Alloy and Fine Grain Steels - Part 2: Tolerances, dimensions and sectional properties (BS EN 10210-2)、2006.
- 14) British Standards Institution: Cold Formed Welded Structural Hollow Sections of Non-Alloy and Fine Grain Steels - Part 2: Tolerances, dimensions and sectional properties (BS EN 10219-2)、2006.
- 15) ASTM International: Annual Book of ASTM Standards, Section 1/Iron and Steel Products, Volume 01.01/Steel-Piping, Tubing, Fittings、2014.
- 16) 日本建築学会：建築工事標準仕様書 JASS 6 鉄骨工事(第 9 版)、2012.5.
- 17) 日本建築センター：2008 年版冷間成形角形鋼管設計・施工マニュアル、全国官報販売協同組合、2008.12.

MECHANICAL PROPERTIES, RESIDUAL STRESSES AND DIMENSIONAL ACCURACIES OF LARGE-SIZE CIRCULAR STRUCTURAL STEEL TUBES

Hitoshi KUWAMURA*

* Prof., Dept. of Architecture, School of Engineering, The University of Tokyo, Ph. D.

Mechanical properties, residual stresses and dimensional accuracies of heavy-section steel tubes of circular hollow section (CHS), that are presumed to be utilized in building columns, were investigated. They are designated as STK400 and STKN490B in Japanese Industrial Standards (JIS). The dimensions of the examined tubes are ranging 406.4 to 609.6 mm in diameter, 16 to 45 mm in thickness, and 10 to 35 in diameter-to-thickness ratio, as scheduled in Table 2 and plotted in Fig. 2. They are manufactured by one of three different cold-forming processes named as roll-forming with electric resistance welding (ERW), UO-forming with submerged arc welding (SAW), and Bending-roll forming with SAW. The sample number was 18 as delivered, and half cuts of them were normalized at 820°C in furnace in order to identify the properties of original steels before their cold-forming processes.

The stress-strain curves in longitudinal direction of as-delivered tubes except stress-relieved Bending-roll tubes show the round-roof type due to the cold-forming effect, while those of normalized tubes show an apparent yield point followed by a yield plateau as exemplified in Fig. 3. As-delivered tubes exhibited higher yield strength, tensile strength and yield ratio, but less uniform elongation than their correspondent normalized ones, which are summarized in Table 3. Especially, the elevation of yield strength of ERW tubes to the original hot-rolled steels is significant in the way that the elevation is escalated with the decrease of diameter-to-thickness ratio as shown in Fig. 4.

Charpy impact test was performed at 0°C for V-notch specimens extracted from the tubes as illustrated in Fig. 6. Charpy absorbed energy of as-delivered tubes is smaller in circumferential direction than in longitudinal direction as observed in Figs. 7 and 8, the tendency of which is not altered in the normalized tubes. This suggests that the mode-L fracture in Fig. 5 cannot be neglected. The absorbed energy of normalized tubes is generally greater than that of as-delivered as shown in Fig. 9. The differences of absorbed energy between outer and inner surfaces of the tubes are not noticeable.

Residual stresses were evaluated by means of measuring deformations of pieces cut from the tubes so that the deformations come from the release of residual strains contained in the material as illustrated in Figs.11, 12, and 13. Residual stresses in ERW tubes in their longitudinal direction are extremely large in comparison with UO and Bending-roll tubes as shown in Fig. 14 such that the outer surface is in tension and the inner surface is in compression. Residual stresses in the circumferential direction are relatively smaller as shown in Fig. 15. Residual shearing stresses associated with residual torque confined during the process of cold-forming are observed only in ERW tubes as shown in Fig. 16. All types of residual stresses in the normalized tubes are negligible.

Dimensional deviations from nominal or specified sizes are measured in the scope of JIS, European Standards (EN) and American Standards (ASTM), whose tolerances are compared in Table 4. The dimensional errors of the examined tubes, as summarized in Table 5, are small enough to satisfy the tolerances specified in JIS, but not always meet EN. The straightness and out-of-roundness specified in EN and partly in ASTM should be specified in JIS in order to qualify the fabrication of tubular columns in buildings.

(2014年9月1日原稿受理, 2014年11月6日採用決定)