

建築構造用高強度厚肉円形鋼管

High Strength and Heavy Wall Thickness Steel Pipes for Building Structures

末石 伸行 SUEISHI Nobuyuki JFE スチール 建材センター 建材技術部 主任部員(課長)
荒川 武和 ARAKAWA Takekazu JFE スチール 鋼管セクター部 主任部員(部長)
大森 章夫 OHMORI Akio JFE スチール スチール研究所 厚板・形鋼研究部 主任研究員(課長)・博士(工学)
松井 篤美 MATUI Tokumi JFE スチール 西日本製鉄所 鋼材商品技術部 溶接管室 主任部員(副課長)

要旨

近年、建築構造用に使用される円形鋼管の高強度化・大断面化要求が高まっている。JFE スチールでは、高性能厚鋼板を適用した引張強度 $550 \text{ N/mm}^2 \sim 780 \text{ N/mm}^2$ 級（降伏強度 $385 \text{ N/mm}^2 \sim 630 \text{ N/mm}^2$ 級）の鋼管を開発した。建築鉄骨として使用されるという視点から、特に鋼管の降伏強度（YS）と降伏比（YR）に着目し、鋼板の目標特性および鋼管製造工程の検討を行った結果、多様な設計要求に対応した低 YR および高 YR（高 YS）鋼管の提供が可能となった。

Abstract:

In recent years higher tensile strength and heavier section of steel pipes have been required for building structures. JFE Steel has developed a series of steel pipes from 550 to 780 N/mm^2 tensile strength class (from 385 to 630 N/mm^2 yield strength class) by applying high performance steel plates. Mechanical properties of the pipes, particularly yield strength (YS) and yield ratio (YR), are focused in order to achieve high performance for the building frames. Both low YR and high YR (high YS) types of pipes, which are required according to various design requests, can be produced through controlling the mechanical properties of applied plates and the manufacturing processes of the pipes.

1. はじめに

建築用円形鋼管の主たる用途は柱材であり、特に近年では、コンクリート充填鋼管柱（CFT）として使用されることが多い。コンクリート充填した際の拘束効果や方向性のない断面形状など、角形鋼管に比べて、その構造的優位性が広く認められている。建物規模としては、中高層～超高層と比較的大規模なものに適用されることが多いのも円形鋼管の特徴といえる（写真 1）。断面サイズで最も多く採用されているのは、2000 年～2006 年に JFE スチールに引合いのあった円形鋼管採用物件で集計すると（図 1）、外径が $\phi 600 \sim 800 \text{ mm}$ 、管厚は $20 \sim 40 \text{ mm}$ のものであり、造管製法としては、UOE 製法のものが多い。しかし、至近では外径 $\phi 2000 \text{ mm}$ 前後、管厚は 40 mm 超から 100 mm のものなど、これまでにない大断面の円形鋼管が、年に数件程度設計採用されてきている。JFE スチールでは、これら特



写真 1 円形鋼管柱を採用した物件例

Photo 1 Example of building using circular columns

殊案件にも対応できる引張強度 (TS) : $490 \text{ N/mm}^2 \sim 780 \text{ N/mm}^2$ (降伏強度 (YS) : $385 \text{ N/mm}^2 \sim 630 \text{ N/mm}^2$)

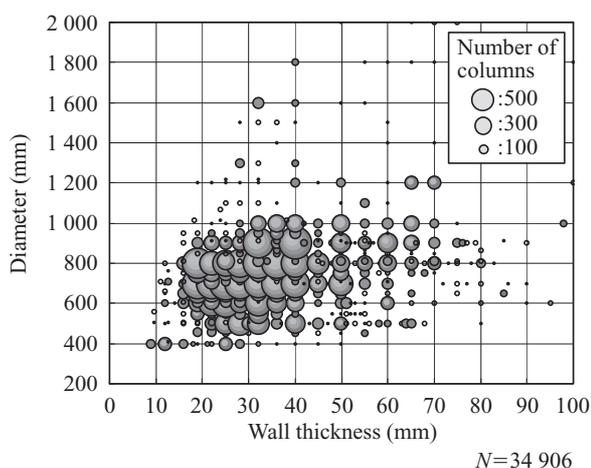


図1 円形鋼管柱 採用断面の分布 (2000-2006年)
Fig.1 Distribution of column size

の高強度厚肉円形鋼管を開発し、建築用途における要求性能を満足することを確認した。本論文では、母材性能を確認するための鋼管の製造結果について紹介する。

2. 建築構造用円形鋼管に求められる性能

2.1 機械的性質

現行の日本の建築物の設計思想には、弾塑性の考え方が取り入れられており、設計上想定する大地震時に構造部材が塑性化し、エネルギー吸収することで建物の倒壊を逃れるように考えられている。弾塑性設計の考え方は、塑性変形能力に富んだ鋼材の性能を生かすものであり、弾性設計に比べて必要断面を小さくすることができ、経済性に優れた設計といえる。そこで、円形鋼管に限らず建築構造用の主部材には、YSに上限値が定められ、YSとTSの比（降伏比 $YR=YS/TS$ ）を規定することで、塑性化させることを意識した規格値が定められている。柱材用途で使用される円形鋼管の一般的な規格であるJIS（日本工業規格）のSTKN規格にも同じ考え方が盛り込まれており、YSレンジおよびTSレンジはいずれも 150 N/mm^2 が規定され、YRは85%以下（溶接鋼管）が規定されている。建築基準法で指定されていない高強度の材料では大臣認定が必要となるが、この際の規定値も、円形鋼管ではこのSTKN規格に倣うケースが多い。

一方、近年では建築物の設計はこれまでの仕様規定設計から性能規定設計へと移る動きがあり、法規上も設計者は、一定の制限を設けながら建物ごとの要求仕様に合わせた比較的自由度の高い設計が可能となってきている。そのような中で、従来の弾塑性設計のみではなく、弾性設計を採用する動きも出始めている。弾性設計を採用するメリットは、複雑な降伏後の塑性性状まで考慮しなければならない弾塑

性設計に対して、構造的に明快であることと、何よりも地震などの被災後も弾性設計されている建物の全体もしくは部分が無損傷で継続使用できることがあげられる。このような建物に使用する主部材では、十分な降伏強度が確保できていればよく、高YR材の使用が可能となる。

以上のように、建築構造用の鋼材では、弾塑性設計用には低YR材が、弾性設計用には高YR材（高YS材）が求められている。JFEスチールでは、これらそれぞれの要求に対応すべく高強度厚肉円形鋼管の商品開発を進めてきたが、特に高YR材については、経済性に配慮して、引張強度を既存鋼種レベルに押さえ、YSを高く設定した。

靱性については、近年の震災被害などから建築分野で関心の高まっている性能である。円形鋼管はその製造過程で塑性加工を受けるため、加工前鋼板に比べて靱性値が低下する傾向にあるが、造管後も一般鋼板程度の靱性値を確保することが望まれている。

2.2 溶接施工性

高強度鋼材の溶接では、一般的に高い予熱温度と厳格なパス間温度管理など難易度の高い施工が要求される。そこで、低い予熱温度で健全な溶接施工ができる鋼材が望まれており、本開発の中では P_{CM} （溶接割れ感受性組成）の値を低く抑えた鋼板を採用することでその要望にこたえた。

2.3 寸法精度

寸法精度について、建築鉄骨では一般にJASS6（建築工事標準仕様書 鉄骨工事）¹⁾が基準とされている。建築構造用円形鋼管の規格としては、一般的にJISのSTKN規格が採用されているが、この規格では外径精度が周長換算で規定されており、管継ぎ溶接部などで発生する目違いを考慮して規定されているJASS6の真円度とは測定方法もその許容差も異なる。この違いは特に大径断面で大きくなり、たとえば、 $\phi 2000\text{ mm}$ の許容差は、JISでは周長換算外径で $\pm 10\text{ mm}$ となるのに対して、JASS6では真円度で $\pm 3\text{ mm}$ となる。建築鉄骨の施工においては、相対的に厳しい精度管理が必要となるJASS6を考慮することが求められる。

2.4 開発目標

本開発の対象は、超高層建築物または工作物の柱材用途の円形鋼管である。目標強度レベルは、 $TS490\sim 550\text{ N/mm}^2$ （ $YS385, 400\text{ N/mm}^2$ ）級、 $TS570\sim 590\text{ N/mm}^2$ （ $YS440, 500\text{ N/mm}^2$ ）級、 $TS780\text{ N/mm}^2$ （ $YS630\text{ N/mm}^2$ ）級の3区分とし、各強度レベルで低YRと高YRの仕様を設定した。ただし、 $TS780\text{ N/mm}^2$ 級では高YR鋼管を開発対象とした。また、靱性値や P_{CM} （溶接割れ感受性組成）の値は、建築鉄骨で採用されている同強度クラスの鋼板仕様を確保するものとした。それぞれの開発目標仕様を表1に示す。

表 1 機械的性質および化学成分の目標値

Table 1 Targets for mechanical properties and chemical compositions of steel pipes

Steel pipe		Mechanical properties				Chemical composition
		YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	YR=YS/TS	vE* ¹ 0°C (J)	P _{cm} * ² (%)
TS490-550	P-385B	385-535	550-700	≦85% (Low YR)	≧70	≦0.27
	P-400T	400-600	490-640	≦95% (High YR)	≧70	≦0.27
TS570-590	P-440B	440-590	590-740	≦85% (Low YR)	≧47	≦0.30
	P-500T	500-700	570-740	≦95% (High YR)	≧70	≦0.30
TS780	P-630T	630-880	780-930	≦95% (High YR)	≧47	≦0.30

*¹ 1/4t from surface

*² P_{cm}: C+Si/30+Mn/20+Cu/20+Ni/60+Cr/20+Mo/15+V/10+5B

3. 開発課題と考え方

3.1 厚板の材質制御

3.1.1 降伏比 (YR)

図 2 に示すように、一般に厚鋼板の YR は鋼材の高強度化にともなって上昇する。従来の TS570~610 N/mm² 級鋼板の平均的な YR は 80% を超え、780 N/mm² 級鋼板では 85% を超える。表 1 に示した高 YR 仕様の鋼管には、従来の高 YR 鋼板をそのまま適用できる場合もあるが、低 YR 仕様の鋼管素材としては、化学成分や製造プロセスを通じて YR を制御した低 YR 鋼板を適用する必要がある。図 3 には、Super-OLAC を活用した低 YR 化のための製造プロセスの模式図を示す。550 N/mm² 級鋼 (HBL385²⁾) 以下の強度レベルでは、図 3(a) に示すような TMCP (thermo-mechanical control process) 条件の最適化により 80% 以下の低 YR 化が達成できる。さらなる高強度材では、図 3(b) のような 2 相域焼入 (Q') を含む複雑な多段熱処理を適用することによって、590 N/mm² 級鋼 (SA440) では 80% 以下、780 N/mm² 級鋼 (低 YR-HT780; JFE-HITEN780T) では 85% 以下の低 YR 化が達成できる。JFE スチールは、引

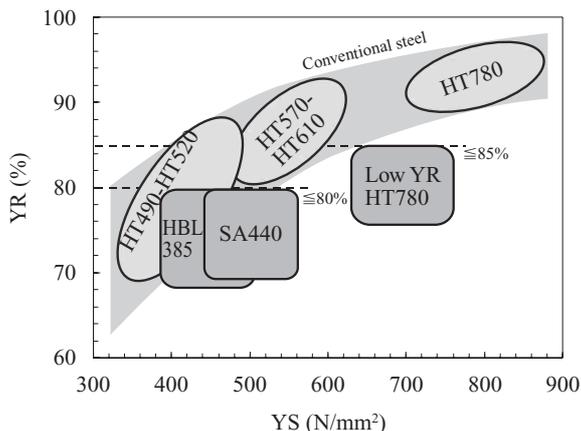


図 2 厚鋼板の降伏強度と降伏比の関係

Fig. 2 Relationship between yield strength (YS) and yield ratio (YR) of steel plates

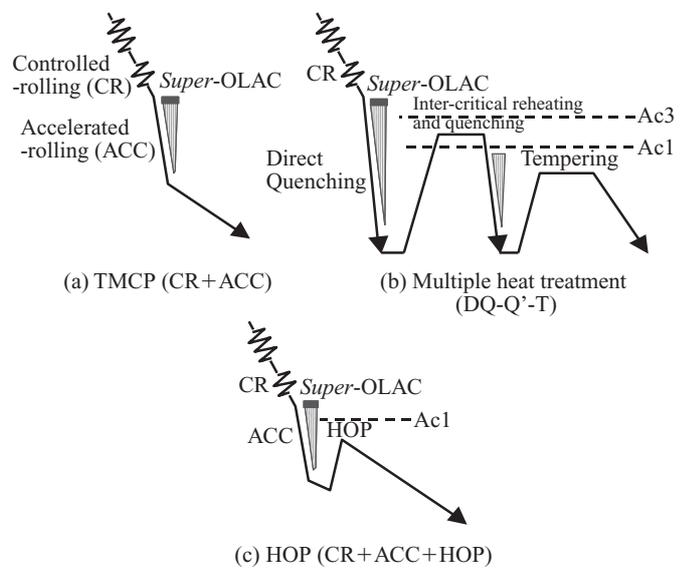


図 3 低降伏比 (YR) 鋼板の製造条件

Fig. 3 Manufacturing processes for low yield ratio (YR) steel plates

張強度 490 ~ 780 N/mm² 級の低 YR 鋼ラインアップ* の大臣認定を取得している。

近年、世界で初めて導入したオンライン誘導加熱装置 HOP[®] (Heat-treatment On-line Process)³⁾ を活用することによって、オフラインの Q' 熱処理でしか従来達成できなかった硬質マルテンサイト相の微細分散組織制御をオンライン熱処理で実現する技術が確立された。これにより、図 3(c) に示すような HOP 適用非調質プロセスによる低 YR-HT780 鋼板が開発されている⁴⁾。

3.1.2 曲げ加工による材質変化

造管曲げ加工によって、鋼管表裏面には最大で板厚 t と管径 D の比 (t/D) 程度の引張あるいは圧縮塑性ひずみが導入されるため、加工硬化や靱性の低下などの材質変化が生じる。鋼管素材に適用する鋼板の目標特性は、造管前後の材質変化を考慮して設定する必要がある。

* 建築構造用 TMCP鋼材 (HBL325, HBL355, HBL385; 数値は降伏点または耐力), 高性能 590 N/mm²鋼材 (SA440; YS440N/mm²級), 低 YR-HT780鋼 (JFE-HITEN780T; YS630 N/mm²級)

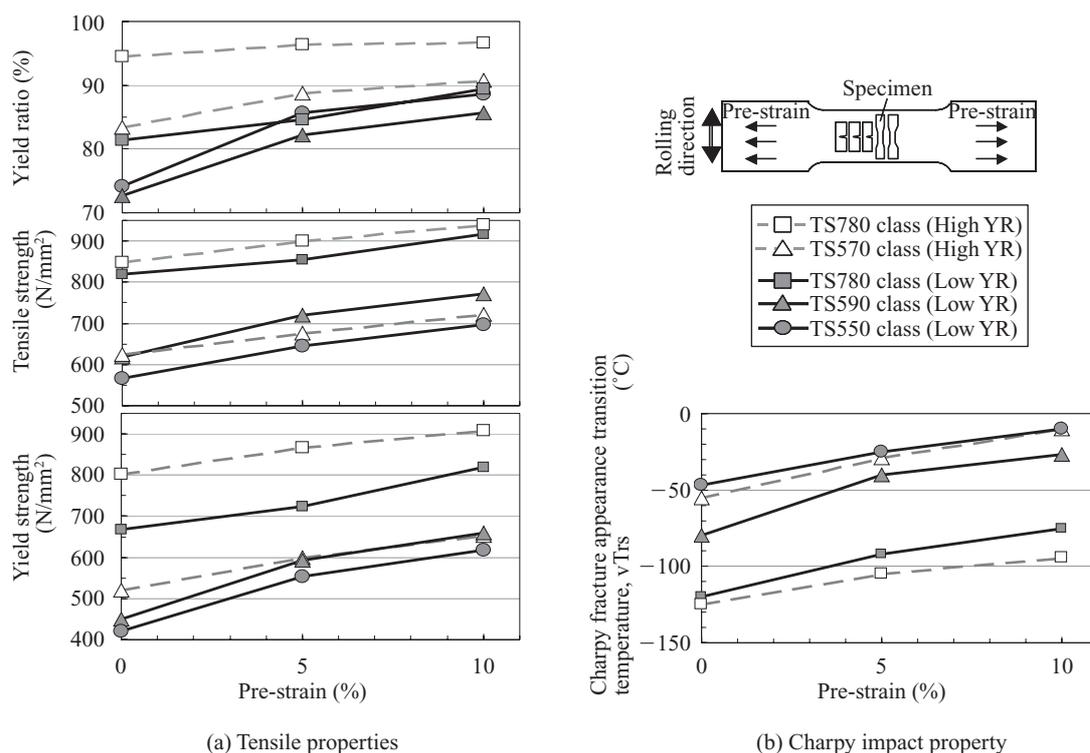


図4 鋼板の引張およびシャルピー衝撃特性に及ぼすひずみ時効の影響

Fig.4 Effects of strain aging on tensile and Charpy impact properties of steel plates

図4は、TS550～780 N/mm²級の各種鋼板（板厚40～60 mm）から板幅方向（C方向）に採取した予ひずみ導入試験体（平行部：18t×80w×180L）に、冷間で5%または10%の引張予ひずみを付与し、さらに250℃×1hの時効熱処理を施した後に材質を評価した結果である。鋼管軸方向の引張試験を模擬するため、予ひずみ付与方向とは垂直の圧延方向（L方向）に丸棒引張試験片およびシャルピー衝撃試験片を採取した。曲げ加工によって導入される塑性ひずみ量は鋼板板厚位置によって異なるので、このような単純引張予ひずみ試験は、実際の造管加工を忠実に再現するものではないが、塑性加工による材質変化について系統的な基礎データを得ることができる。

図4(a)に示した引張試験結果によれば、予ひずみ量の増加にともなって、YS、TSおよびYRは増加するが、YRの増加量は、低YR鋼板の方が高YR鋼板よりも大きい。鋼管の低YR仕様を満足するためには、素材鋼板の目標YRをさらに低くするか、3.2節で述べるような温間曲げ加工や造管後の熱処理など、加工硬化を軽減するプロセスを適用する。

また、図4(b)には、シャルピー破面遷移温度(vTrs)に及ぼす予ひずみ量の影響を示す。ひずみ時効により各鋼板の靱性は低下し、vTrsが30～50℃上昇した。鋼管素材として適用する厚鋼板では、このような曲げ加工による靱性の低下を考慮した成分設計と製造条件の最適化が必要となる。

表2 y形溶接割れ試験結果

Table 2 Results of y-groove weld cracking tests

Steel plate			Welding conditions	Preheating temperature (°C)	Crack ratio
Grade	P _{CM}	Thickness (mm)			
780 N/mm ² class	0.27	60	GMAW (CO ₂) Welding consumable: MG-80, φ1.2 Heat input: 1.1 kJ/mm	75°C	0%
				50°C	0%
	0.24	40		50°C	0%
				25°C	0%
590 N/mm ² class (SA440-U)	0.21	80	GMAW (CO ₂) Welding consumable: MG-60(YGW-21), φ1.2 Heat input: 1.1 kJ/mm	25°C	0%
550 N/mm ² class (HBL385)	0.17	100		0°C	0%
				50°C	0%
				25°C	0%

Atmosphere: 20°C, 60%

3.1.3 溶接施工性 (低 P_{CM} 化)

JFE スチールでは、最先端の加速冷却装置 *Super-OLAC* を活用した高精度の TMCP 技術を駆使することによって、炭素当量 C_{eq} と溶接割れ感受性組成 P_{CM} を低減して優れた溶接性を確保した高強度高性能鋼板を開発してきた。例として、表 2 に、主な建築用低 YR 鋼板 (550 N/mm² 級 TMCP 鋼 (HBL385), 高施工型 590 N/mm² 鋼 (SA440-U)⁵⁾, 低 YR-780 N/mm² 級鋼) の y 形溶接割れ試験結果を示す。少なくとも 590 N/mm² 級以下の鋼では、炭酸ガスシールドアーク溶接における割れ防止予熱温度は常温以下であり、おおむね予熱を必要としないレベルの溶接施工性を有する。

3.2 造管

3.2.1 曲げ加工

JFE スチールにおける建築構造用円形鋼管で、本開発の対象としているような高強度厚肉のものは、プレスバンド製法での造管となる (写真 2)。プレスバンド製法は、プレス機により鋼板を一定間隔で 3 点曲げし、その後矯正機で所定曲率を得る。この際に制約となるのが、プレス能力である。厚肉の鋼板を全厚で塑性曲げ加工するには、相当のプレスパワーが必要であり、プレス機の能力を超える場合には、変形抵抗を下げるために、加工前に加熱して温間加工を行う必要がある。この際、加熱温度が高いほど、変形抵抗を下げるができるが、加工硬化も変化するので、材質の変化を考慮してプレスバンド条件を決める必要がある。

また、造管後の寸法精度を確保するためには、原板精度の管理、矯正能力の把握、シーム溶接による変形量の把握などが課題となる。特に厚肉の鋼管では溶接量も多く、シームビードの幅も広くなるため、寸法精度を確保する上でも溶接時の開先寸法や溶接入熱などの溶接条件を管理している。

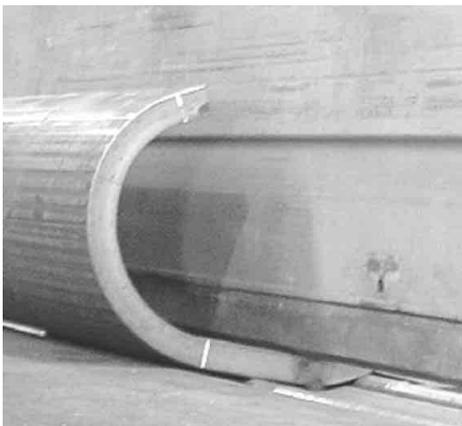


写真 2 プレスバンド製法
Photo 2 Press bending process

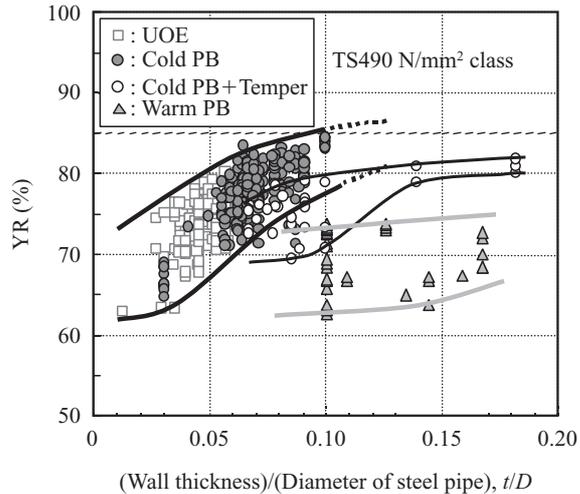


図 5 490 N/mm² 級鋼管の降伏比 (YR) に及ぼす温間曲げ加工と加工後熱処理の影響

Fig. 5 Effects of warm bending and tempering on yield ratio (YR) of 490 N/mm² class pipes

3.2.2 曲げ加工時あるいは加工後の熱処理

t/D の値が大きくなると断面の鋼管では、冷間曲げ加工時の塑性ひずみの影響で、加工硬化が大きい場合もある。その場合には、あらかじめ温間曲げ加工を行うか、造管後に熱処理を施すことで、YS, TS, YR の過度の上昇や靱性値の低下を軽減し、機械的特性を所定の目標範囲内に制御している。図 5 は、温間曲げまたは熱処理によって YR が低下することを 490 N/mm² 級鋼管のデータを例に示したものである。温間曲げまたは造管後の熱処理による材質変化は、素材鋼板の化学組成やマイクロ組織、あるいは t/D によって異なるため、成分、強度レベル、鋼板の製造方法、サイズごとに加工温度や熱処理条件を決定している。

4. 鋼管の製造結果

4.1 製造した鋼管と機械試験結果

外径 800~2100 mm, 管厚 40~100 mm, t/D 値 4.2~7.8 % と幅広い範囲のサイズで、TS490 N/mm²~780 N/mm² の強度レンジの鋼管を製造した。その化学成分例を表 3 に示し、鋼管サイズとその造管条件、機械的性質を表 4 に示す。機械的性質では、鋼板データと鋼管データの双方を示している。引張試験片には全厚試験片を採用し、鋼管では管軸方向から、鋼板では造管前の同方向から採取している。衝撃試験はシャルピー衝撃試験とし、試験片の採取位置は、鋼管では管外面から板厚の 1/4 位置の管軸方向、鋼板では造管前の同位置、同方向としている。

4.2 考察

表 3 より、採用した鋼板の P_{CM} の値が、目標仕様を満足できていることが確認できる。特に TS490~550 N/mm², TS570~590 N/mm² の鋼管においては、目標仕様よりも十

表3 鋼板の化学成分例
Table 3 Chemical compositions of steel plates

Steel pipe		Plate thickness (mm)	Chemical composition (mass%)							
			C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	N (%)	C _{eq} (%)	P _{cm} (%)
TS490-550	P-385B	50	0.13	0.35	1.34	0.006	0.002	0.003	0.38	0.21
	P-400T	95	0.06	0.20	1.48	0.008	0.002	0.005	0.42	0.17
TS570-590	P-440B	80	0.09	0.26	1.50	0.008	0.002	0.003	0.46	0.20
	P-500T	100	0.08	0.24	1.45	0.016	0.003	0.004	0.41	0.19
TS780	P-630T	40	0.06	0.19	2.00	0.012	0.001	0.004	0.55	0.25
	P-630T	60	0.12	0.27	0.97	0.003	0.001	0.005	0.55	0.28

C_{eq}: C+Si/24+Mn/6+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14 P_{cm}: C+Si/30+Mn/20+Cu/20+Ni/60+Cr/20+Mo/15+V/14+5B

表4 鋼管の機械的特性
Table 4 Mechanical properties of pipes

Steel pipe		Steel pipe				Tensile properties (Plate)				Tensile properties (Pipe)				
		D (mm)	t (mm)	t/D	Condition for bending	Heat treatment	YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	YR=Y/TS	vE 0°C (J)	YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	YR=Y/TS	vE 0°C (J)
TS490-550	P-385B (Low YR)	800	50	6.3	Cold		434	596	73%	280	499	607	82%	252
		1 000	50	5.0			434	596	73%	280	509	609	84%	243
	P-400T (High YR)	1 300	95	7.3	Warm	Temper	405	579	70%	343	564	627	90%	328
		2 100	95	4.5	Cold		407	586	69%	346	490	609	86%	316
TS570-590	P-440B (Low YR)	900	40	4.4	Cold	Temper	502	637	79%	263	535	652	82%	268
		800	45	5.6			479	631	76%	284	572	691	83%	279
		800	50	6.3			467	609	77%	305	550	665	83%	295
		800	60	7.5			490	645	76%	312	536	667	80%	275
		900	70	7.8			475	620	77%	298	513	652	79%	271
	1 900	80	4.2	484	658	74%	320	542	672	81%	273			
	P-500T (High YR)	1 300	90	6.9	Warm		561	706	79%	210	666	734	91%	150
		2 100	100	4.8	Cold		546	698	78%	231	629	726	87%	223
TS780	P-630T (High YR)	800	40	5.0	Warm		645	841	77%	202	759	833	91%	181
		800	40	5.0			669	823	81%	232	741	862	86%	222
		1 000	50	5.0			662	859	77%	228	775	846	92%	126
		1 000	60	6.0			737	825	89%	254	719	823	87%	250

t/D: Wall thickness/Diameter of steel pipe Tensile test: JIS 2201 No. 12
Charpy impact test: JIS Z 2242 V-notch 1/4t from surface

分低い値となっており、TMCP技術を駆使することで、予熱なしでも溶接施工可能な低P_{CM}成分を達成している。

表4の引張試験結果では、鋼板を曲げ加工することでYS、TS、YRともに数値は上昇するが、製品となる鋼管で、すべて目標仕様を満たしていることが確認できる。衝撃試験の結果からは、造管後の靱性値が、鋼板に比べて多少低下する傾向はあるが、すべての鋼管で100J以上を確保しており、強度、板厚、曲率に関係なく目標仕様を達成できることが分かる。

図6にはt/D別の鋼管の降伏比(YR)分布を示している。強度・板厚・曲率が異なっても、鋼板の性能を

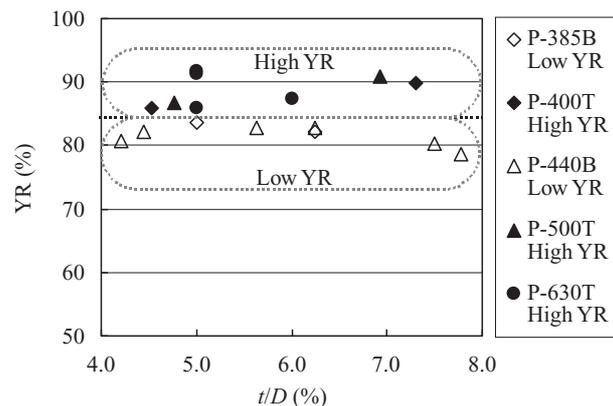


図6 鋼管の降伏比(YR)

Fig.6 Relationship of t/D and Yield ratio (YR) for pipe data

Super-OLAC や HOP などを利用して適切に制御し、造管時の鋼板加熱や、造管後の熱処理を適切に選択することで、 t/D に関わらず、YR の値を所定の幅に制御できていることが分かる。

5. おわりに

引張強度 (TS) $490 \text{ N/mm}^2 \sim 780 \text{ N/mm}^2$ (YS385 $\text{N/mm}^2 \sim 630 \text{ N/mm}^2$)、板厚 40~100 mm という高強度厚肉領域において、建築構造用円形鋼管に要求される性能を確保するための開発を行い、目標設定した仕様の鋼管が製造できることを確認した。特に、同強度レベルにおいて低 YR 仕様材と高 YR 仕様材を造り分けることが可能となり、これまで以上に多様な設計要求に対応した鋼管を提供することができると考えている。

参考文献

- 1) 日本建築学会編. 建築工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事.
- 2) 林謙次, 藤沢清二, 中川一郎. JFE 技報. 2004, no.5, p.45.
- 3) 藤林晃夫, 小俣一夫. JFE 技報. 2004, no.5, p.8.

- 4) 植田圭治, 遠藤茂, 伊藤高幸. JFE 技報. 2007, no.18, p.23.
- 5) 小俣一夫, 吉村洋, 山本定弘. NKK 技報. 2002, no.179, p.57.



末石 伸行



荒川 武和



大森 章夫



松井 篤美