

(論文)

# 建築構造用高性能鋼管KSAT440およびKSAT630

## High Tensile Strength Steel Pipe KSAT440 and KSAT630 for Building Structures



小林克壮\*

Yoshitake KOBAYASHI



塩飽豊明\*

Toyoaki SHIWAKU



柴田光明\*\*

Mitsuaki SHIBATA

High tensile strength steel pipe has advanced performance in safety, designing, and construction cost for building structures. Therefore, Kobe Steel developed low YR(Yield Ratio) type 590MPa and 780MPa tensile strength class steel pipes for building structures. Steel pipes are shaped by press bending process, causing increases in the YR in their tensile properties. We developed extra-low YR and high strength steel plate for achieving low YR pipe, creating a new dual phase microstructure, softer ferrite and harder bainite, by a new manufacturing process of heat treatment.

まえがき = 近年の建築・鉄骨分野においては、鋼構造物の大型化と空間の大スパン化が進むとともに、安全性の向上や意匠性追求、建設コスト縮減が指向されている。また円形鋼管は、これまで多くの適用例がある四面ボックス柱と比較して、地震などの入力荷重に対する等方性や梁の取付けの自由度の高さといったメリットから、その採用は拡大する傾向にある<sup>1)</sup>。

これまで当社は、国内最大級の15,000トン級のプレス能力を有する佐々木製罐工業㈱との共同ブランドとして、引張強さ490～590MPa級建築構造用高性能円形鋼管(KSAT325, KSAT355, KSAT440)を2001年に開発した<sup>2)</sup>。

建築用鋼材の特長として、巨大地震に対する建築構造物の倒壊を防止する観点から、降伏比(YR)の上限値が規定されている<sup>3)</sup>。

一般に、円形鋼管では、成形工程における冷間塑性変形によって、降伏応力(YP)と引張強さ(TS)の上昇に伴いYRも上昇する。それを考慮し、円形鋼管のYR規格値の上限は、厚鋼板よりも5%緩和されたものの、円形鋼管の径厚比 $D/t$ (円形鋼管の直径 $D$ /板厚 $t$ )が小さく

なる、すなわち塑性変形率が高くなるとともに、YRの上昇は大きくなり、規格値を満足しない場合がある。そのため、鋼管成形工程後に熱処理により強度の調整とYR低減を図っている。

そこで、径厚比 $D/t$ が小さい強曲げ加工を施した円形鋼管のYRを低減させるため、その素材となる鋼板の特性の改善を行った。

本報告では、引張強さ590MPa級円形鋼管KSAT440の低YR化技術と特性、また、その技術を横展開して開発した引張強さ780MPa級円形鋼管KSAT630の特性を紹介する。

### 1. 円形鋼管の特性

KSAT440、およびKSAT630の化学成分と機械的性質の規格値をそれぞれ表1、表2に示す。

適用板厚は、KSAT440が最大板厚100mm、KSAT630は最大板厚60mmとして、最小の径厚比( $D/t$ )は10である。KSAT440の化学成分は $C_{eq}$ と $P_{CM}$ 、またKSAT630は $P_{CM}$ のみを規定している。

引張特性についてはKSAT440の引張強さを590MPa

表1 開発鋼の化学成分規格  
Table 1 Specification for chemical composition of steel pipe

Steel pipe	Wall thickness (mm)	Main chemical composition (mass%)						C <sub>eq</sub> (%) <sup>*1</sup>	P <sub>CM</sub> (%) <sup>*2</sup>
		C	Si	Mn	P	S	N		
KSAT440	19～100	0.18	0.55	1.60	0.030	0.008	0.006	0.44 0.47 <sup>*3</sup>	0.28 0.30 <sup>*4</sup>
KSAT630	12～60	0.13	0.55	2.50	0.025	0.008	0.006	-	0.30

\*1 C<sub>eq</sub> : C + Si/24 + Mn/6 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14 (mass%)

\*2 P<sub>CM</sub> : C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B (mass%)

\*3 Wall thickness t 40mm / 0.44% t > 40mm / 0.47%

\*4 Wall thickness t 40mm / 0.28% t > 40mm / 0.30%

\* 鉄鋼部門 加古川製鉄所 技術研究センター \*\* 鉄鋼部門 加古川製鉄所 技術研究センター (現: ㈱コベルコ科研)

表2 機械的性質の規格値  
Table 2 Specification for mechanical properties

Steel pipe	$D/t$ *5	Tensile properties				Impact properties ,E <sub>0</sub> (J)	Welded joint properties Tensile strength (MPa)
		YP (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	YR (%)		
KSAT440	10	440	590 ~ 740	20	85	47	590
KSAT630	10	630	780 ~ 930	16	90	47	780

Test specimen for steel pipe

- Tensile test / JIS Z2201 No.4 or No.12
- Charpy impact test / JIS Z2242 V-notch

\*5 :  $D/t$  : Diameter of steel pipe / Wall thickness (mm)

以上, YRを85%以下, KSAT630は引張強さを780MPa以上, YRを90%以下に設定して, 高強度と低YR特性の両立を図る。また, 円形鋼管はシーム部に多電極サブマージアーク溶接が適用される。鋼管製造効率の向上のためには, 想定される最大入熱を10kJ/mmと設定して, 溶接継手の引張強さを母材の引張強さ以上, 溶接熱影響部(HAZ) 靱性を47J以上とした。

## 2. 開発課題と解決の考え方

### 2.1 高強度円形鋼管の問題点

円形鋼管は鋼板素材をプレス曲げなどの冷間加工を施して製作される。その際, 冷間加工による塑性変形により, 鋼板素材が加工硬化し, YRは上昇する。

この現象は不可避であり, そのため円形鋼管の低YR化を達成するには, その鋼板素材の特性改善が必要である。

### 2.2 冷間曲げ加工による材質変化の定量化

以下, KSAT440用鋼板素材について記す。円形鋼管のYRを85%以下に抑制できる鋼板素材の目標特性を定量化するために, 鋼板素材からの成形時の曲げひずみ量と材質変化を定量化することが必要である。

図1に $D/t$ と板厚方向 $1/4t$ における曲げひずみの関係を示す。鋼板素材に付与される曲げひずみは,  $D/t$ によって決定し,  $D/t$ が15から10になると急激に増加して約5%にも達する。

そこで, 引張強さ400, 490, 590MPa級の建築用鋼板を用いて, 曲げひずみが引張特性におよぼす影響を調査した。図2に示すとおり, 鋼板から円形鋼管に成形したときには, 鋼板素材の強度クラスによらず, すなわち金属組織に関わらず, 曲げひずみによる引張特性の変化量はほぼ一定であることが明確になった。このことから, 曲げひずみの大きさによって円形鋼管の引張特性を予測できることがわかった。

また, 図2の結果から, 曲げひずみが約5%の強曲げ加工の領域において, TSを満足するのは590MPa級鋼のみであり, またYRを満足できるのは, 400MPa級鋼のみであることがわかる。すなわち従来の590MPa級鋼では, 円形鋼管のYRを85%以下とすることは困難であるといえる。

### 2.3 鋼板素材の目標特性と金属組織

以上の検討結果より, 円形鋼管のYRを85%以下とするためには, 鋼板素材の引張強度は590MPa級, YRは

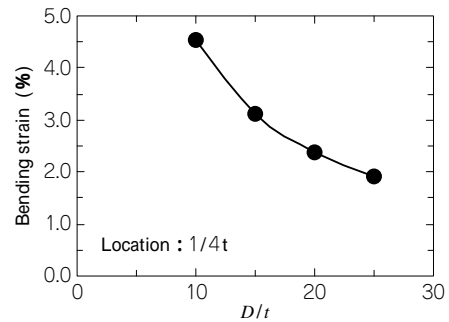


図1  $D/t$ と曲げひずみの関係

Fig. 1 Relationship between  $D/t$  and bending strain

Mark	Tensile stress class (MPa)	Typical Phase	Microstructure
	590	Bainite	
	490	Ferrite + Bainite	
	400	Ferrite + Pearlite	

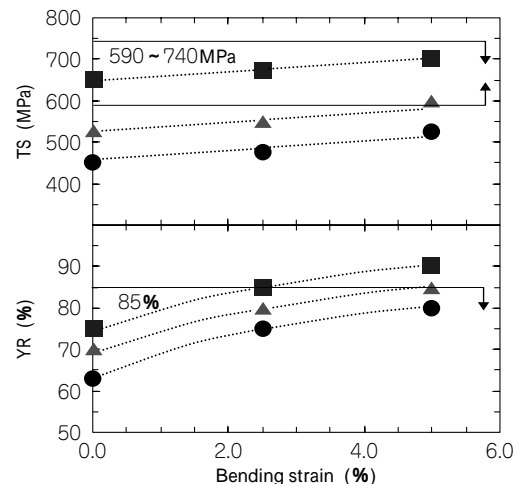


図2 曲げひずみが材質変化におよぼす影響

Fig. 2 Effect of bending strain on TS and YR

400MPa 級鋼なみとすることが必要となる (図3)。つまり、YR を制御するためには YP と TS をそれぞれ個別に制御する必要がある。

YP は先に変形する軟質相に主に影響され、また TS は最終的に変形、破断する硬質相に主に影響されると考えられる。したがって、鋼板素材に必要な低 YR と高 TS の性能を具備させるには、軟質相をより軟質なフェライト、硬質相をより硬質なベイナイトとする複相組織が有効であると考えた。

各種強度の、軟質相と硬質相の硬さ比と YR の関係について調査した。図4に示すとおり、軟質相と硬質相の硬さ比の増大が低 YR 化に有効であり、400MPa 級の YR70% 程度を達成するには、硬さ比を約 1.75 とする必要があることがわかる。

複相組織化の達成手段は、二相域熱処理を活用することが一般的である。従来の 590MPa 級鋼は、Q (焼入れ) - Q' (二相域焼入れ) - T (焼戻し) の熱処理方法によって二相域焼入れ時に生成するベイナイト (硬質相) と最初の焼入れ時に生成するベイナイト (軟質相) の複相組織であった<sup>4)5)</sup>。本開発においては、軟質相のより軟質化のため、N (焼ならし) - Q' - T という新熱処理法により、ポリゴナルフェライトを初相とし、焼入れベイナイトとの複相組織化を図った。

この考えをもとに試作した開発鋼のミクロ組織を図5に示す。従来鋼はベイナイトが主組織であるのに対して、開発鋼は狙いどおりの軟質のポリゴナルフェライトが生成し、フェライト間に硬質のベイナイトが認めら

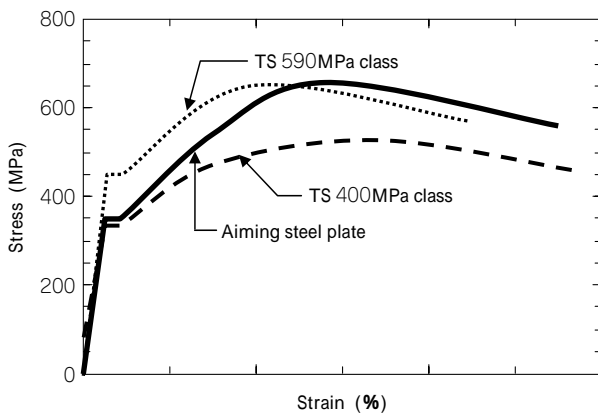


図3 開発の狙いの公称応力 - 公称ひずみ曲線

Fig. 3 Aiming strain-stress curve of developed steel

Steel	Conventional (Q - Q' - T)	Developed (N - Q' - T)
Microstructure		
Typical phase and mechanical properties	Soft bainite - Hard bainite YR = 77%	Ferrite - Bainite YR = 67%

図5 開発鋼と従来鋼の金属組織と機械的性質の比較

Fig. 5 Comparison between microstructure and mechanical properties

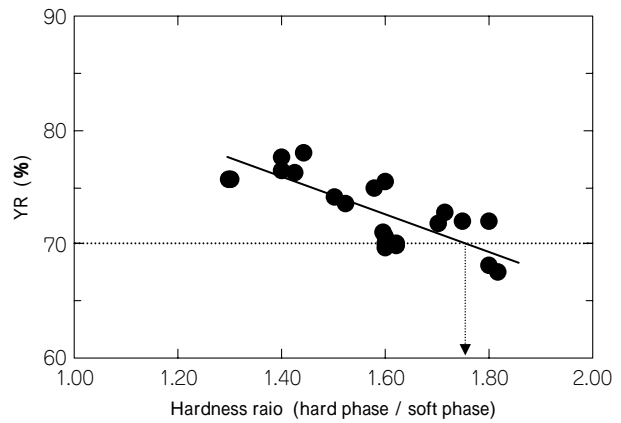


図4 硬さ比が YR におよぼす影響  
Fig. 4 Effect of hardness ratio on YR

れ、従来到達しえなかった低 YR が達成できている。

この考え方は、引張強さ 780MPa 級の高強度円形鋼管にもそのまま適用が可能であり、高強度と低 YR 特性の確保を可能とした。

### 3. 円形鋼管の特性

#### 3.1 KSAT440 の特性

KSAT440 の化学成分と機械的性質をそれぞれ表3、表4に示す。鋼板素材の YR を 70% 程度とすることにより、円形鋼管の YR は、 $D/t$  が 10 においても、YR 規格値を満足していることが確認できた。 $D/t$  が 20 については、厚鋼板の YR レベルであり、製管後の熱処理の省略の可能性を示唆する結果となっている。

#### 3.2 KSAT630 の特性

表5、表6に KSAT630 の化学成分と機械的性質を示す。本開発鋼においても、円形鋼管の目標特性を十分に満足する良好な機械的性質が得られている。表7に y 形溶接割れ試験結果を示す。溶接性についても予熱温度 25 の室温において割れは発生せず、良好な溶接性を有している。シーム溶接条件を表8、および図6に示す。シーム溶接継手性能は、表9に示すとおり、多電極サブマージアーク溶接による入熱約 8kJ/mm の溶接継手においても、目標特性を十分に満足する良好な溶接継手特性が得られている。断面マクロ組織を図7に示す。溶接金属の溶込みと形状は良好であり、また有害な欠陥は認められなかった。

表3 化学成分 (KSAT440)

Table 3 Chemical composition of steel pipe (KSAT440)

Steel pipe		Chemical composition (mass%)								
		C	Si	Mn	P	S	N	others	Ceq	P <sub>CM</sub>
KSAT440	Conventional	0.12	0.23	1.47	0.010	0.004	0.0049	Cu, Ni, Cr, Mo, V, B	0.43	0.24
	Developed	0.14	0.38	1.41	0.012	0.002	0.0049	Cu, Ni, Cr, Nb, V	0.43	0.25

表4 円形鋼管の機械的性質 (KSAT440)

Table 4 Mechanical properties of steel pipe (KSAT440)

Steel pipe		Wall thickness (mm)	D/t	Heat Treatment	Tensile properties				Impact properties
					YP (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	YR (%)	√E <sub>0</sub> (J)
KSAT440	Conventional	70mm	Steel plate		491	654	30	75	266
			20	-	599	705	27	85	245
				SR	551	663	28	83	249
			10	-	672	752	22	89	181
				SR	587	688	27	85	234
			Steel plate		450	639	31	70	225
	Developed		20	-	549	679	28	81	207
				SR	505	631	29	80	214
			10	-	610	711	24	86	183
				SR	560	669	27	83	211

表5 化学成分

Table 5 Chemical composition of steel plate

Steel pipe	Chemical composition (mass%)						
	C	Si	Mn	P	S	others	P <sub>CM</sub>
Conventional	0.11	0.25	0.85	0.009	0.003	Cu, Ni, Cr, Mo, V, B	0.26
Developed	0.05	0.24	1.99	0.007	0.002	Cu, Ni, Cr, Mo, Ti, B	0.27

表6 円形鋼管の機械的性質 (KSAT630)

Table 6 Mechanical properties of steel pipe (KSAT630)

Steel pipe		Wall thickness (mm)	D/t	Tensile properties				Impact properties
				YP (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	YR (%)	√E <sub>0</sub> (J)
Conventional		50	Steel plate	772	832	25	93	213
				653	814	26	80	231
KSAT630	Developed	60	20	697	846	21	84	245
			15	768	881	22	87	218
			10	796	901	20	88	216

表7 y形溶接割れ試験結果 (KSAT630)

Table 7 Results of y-groove weld cracking test (KSAT630)

Steel pipe	Wall thickness (mm)	Weld method	Welding consumable	Welding condition				Test results	
				Current (A)	Voltage (V)	Travel speed (mm/min)	Heat input (kJ/mm)	Pre heat temp. ( )	Crack ratio (%)
KSAT630	60	GMAW Shielded gas CO <sub>2</sub>	MG-80 Wire Dia. φ 1.2 mm	350	30	350	1.8	25	0, 0, 0
								50	0, 0, 0
								75	0, 0, 0
								100	0, 0, 0

Test method : JIS Z3158

Welding atmosphere : Temp.25 / moisture content 60%

表 8 シーム溶接条件  
Table 8 Welding condition of seam welded joint

Steel pipe	Wall thickness (mm)	D/t	Weld procedure	Welding condition			
				Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Heat input (kJ/mm)
KSAT630	60	15	SAW Both side multi-pass in each side	700 ~ 1,000	28 ~ 40	520 ~ 660	4.4 ~ 7.9

表 9 サブマージアークシーム溶接継手性能  
Table 9 Mechanical properties of seam welded joint (SAW)

Tensile test		Charpy impact test	
Tensile strength	Fracture position	V-notch position (1/4t from surface final side)	Charpy absorbed energy $\sqrt{E_0}$ (J)
814 815	Weld metal Weld metal	Weld metal	Ave.109
		Fusion line	Ave.223
		F.L. + 1mm	Ave.249

Size of specimen : Tensile test / JIS Z3121 No.1  
Charpy impact / JIS Z2242 V-notch

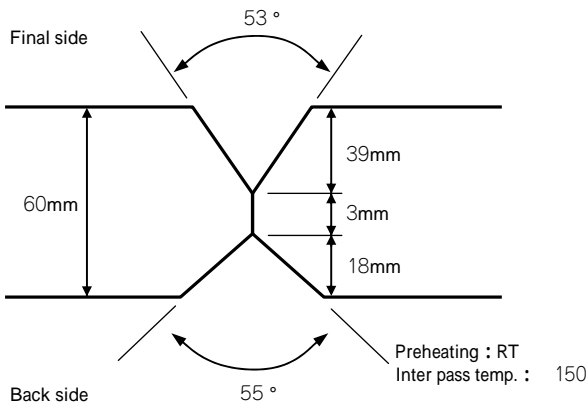


図 6 開先形状  
Fig. 6 Groove profile

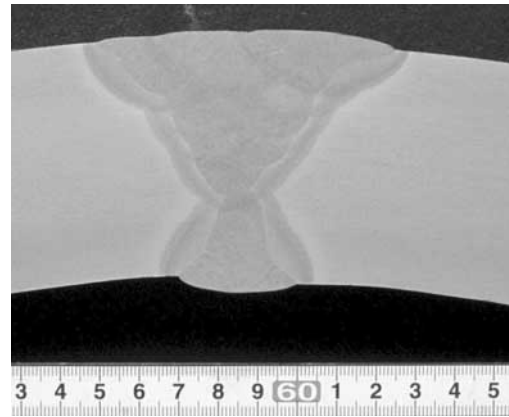


図 7 シーム溶接部の断面マクロ組織  
Fig. 7 Macrostructure of seam welded joints

むすび = 冷間曲げ加工度が大きい場合にも、安定して低 YR が実現できる KSAT440, 630 用の鋼板素材を開発した。また、建築用途としては、最高強度の円形鋼管である KSAT630 は、優れた溶接性および溶接継手性能を有していることが確認できた。当社はいずれの円形鋼管においても国土交通大臣認定を取得しており、今後これら円形鋼管は、設計自由度、意匠性、安全性に優れた建築構造物への適用拡大が見込まれる。

参 考 文 献

- 1) 春日正巳ほか：JFE 技報, No.2 (2003) p.63.
- 2) 池田英次ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.52, No.1(2002) p.95.
- 3) 加藤 勉：鉄と鋼, Vol.74 (1988) No.6, p.951.
- 4) 鹿内伸夫ほか：鉄と鋼, Vol.76 (1990) p.89.
- 5) 岡野重雄ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.42, No.3 (1992) p.6.