

(論文)

HAZ靱性に優れた建築構造用低YR型780MPa級円形鋼管の特性と組織制御技術

Mechanical Properties and Microstructural Control of TS 780MPa Steel Pipe with Low Yield Ratio and Excellent HAZ Toughness for Building Structures



山口徹雄*1
Tetsuo YAMAGUCHI



今村弘樹*1
Hiroki IMAMURA



塩飽豊明*2
Toyoaki SHIWAKU



川辺壮一*3
Soichi KAWABE

Recently, since thicker steel pipes with higher tensile strength are being used for large building construction and large spans, TS 780MPa steel pipes with high earthquake-resistant performance are in demand. To meet this demand, we have developed TS 780MPa steel pipes (KSAT®630) with low YR and excellent HAZ toughness. The application of the DQ-N-T process and a chemical composition low in carbon, plus the inclusion of Mn, Ni, and Cr in steel plates for steel pipes enables multi-phase microstructural control including M-A and refining of the effective grain size in HAZ. As a result, advanced steel pipes formed from developed steel plates satisfied target properties.

まえがき＝近年、建築分野においては、建造物の大形化や大スパン化傾向が強まるにつれて、使用鋼材のさらなる厚肉化、高強度化の要望が高まっている。さらに、設計自由度や意匠性向上の観点から、入力荷重に対する等方性、梁取付けの自由度の高さなど、構造的に優位な高強度厚肉円形鋼管が、主に柱材として中高層～超高層建造物に適用されてきている。

一方、阪神・淡路大震災以降、巨大地震時の倒壊防止を目的として、塑性変形能力の観点での低降伏比（Yield Ratio, 以下 YR という）化や、破壊の起点となりやすい溶接熱影響部（Heat Affected Zone, 以下 HAZ という）での良好な靱性（じんせい）といった建築構造物の耐震安全性向上に関わる特性が建築用鋼材に求められるようになってきている。

当社では、上述の状況を踏まえ、耐震安全性向上に寄与する鋼材の提供を目的として、国内最大級のプレス能力を有する佐々木製罐工業株式会社と共同で HAZ 靱性に優れた低YR型の引張強さ 780MPa 級円形鋼管 (KSAT®630) を開発した。

本稿では、低YR化および高 HAZ 靱性化に向けた鋼管

素材鋼板の組織制御技術および開発鋼管の特性について報告する。

1. 開発鋼管の目標特性

本開発鋼管においては、高強度化と耐震安全性向上を目的として以下の特性を具備させることを目標とした（表 1）。

- 1) 鋼管加工後での 780MPa 級以上の引張強度 (TS) の確保
- 2) 適用最大厚 80mm, 最小径厚比 (D/t) で 10 という厳しい曲げ加工条件時でも低 YR 特性の具備 (YR ≤ 90%)
- 3) 円形鋼管シーム溶接継手部(サブマージアーク溶接, 入熱 10kJ/mm) での靱性確保 ($E_0 \geq 70J$)

2. 円形鋼管での低YR化と高HAZ靱性化

2.1 円形鋼管用素材鋼板の目標特性の設定

今回対象としている厚肉、高強度の円形鋼管は素材鋼板をプレスバンド法によって曲げ加工して製造される。曲げ加工により導入されるひずみ量が増すにつれ、塑性

表 1 円形鋼管の機械的性質の目標値

Table 1 Target mechanical and welded joint properties of steel pipes

Thickness(mm)	D/t	Mechanical properties				Welded joint properties	
		Tensile properties			Charpy impact properties	Tensile properties	Charpy impact properties
		YS (MPa)	TS (MPa)	YR (%)			
≤80	10≤	630≤	780~930	≤90	70≤	780≤	70≤

Tensile test specimen : JIS Z 2201 No.4 1/4t

Charpy impact test : JIS Z 2242 V-notch 1/4t

*1 鉄鋼事業部門 技術開発センター 厚板開発部 *2 神鋼リサーチ株式会社 *3 佐々木製罐工業株式会社

変形による加工硬化は大きくなり、鋼管加工後にはYSの上昇に伴い、YRが上昇する。したがって、鋼管加工後の低YR化のためには素材鋼板のYRを低減することが不可欠である。

そこで、表2に示す従来の調質型780MPa級鋼の成分に二相域焼入れ(Q')を施し、低YR化させた供試鋼を用いて鋼管加工時の曲げひずみ量とYRの変化を調査した。結果を図1に示す。D/tが10という最小径厚比で想定される1/4t位置での曲げひずみ量は5.6%相当であり、その曲げ加工条件においてYR≤90%を確保するには、素材鋼板のYRを80%以下とする必要があることがわかる。本開発においては鋼管加工によるばらつきも考慮し、素材鋼板のYRの目標を75%以下に設定した。

また、溶接継手部靱性については、成分の影響が支配的であり、鋼管加工により変化しないため、素材鋼板の成分設計にてHAZ靱性を確保することとした。以上より、耐震安全性と高強度を両立させる鋼管を実現するために設定した素材鋼板の目標を表3に示す。

2.2 素材鋼板の極低YR化のための製造方法検討

590MPa以上の高強度建築構造用鋼板で低YR化を実現するための製造プロセスとしてはこれまで、図2に示すような二相域での焼入れを含む多段熱処理(DQ-Q'-T)が適用されてきた^{1), 2)}。これは、DQ時に生成してQ'時に逆変態せず、高温焼戻しを受ける焼戻しベイナイト

表2 試作鋼の化学成分と熱処理方法

Table 2 Chemical compositions and heat treatment of steel

Chemical compositions (mass%)						Heat treatment
C	Si	Mn	P	S	others	
0.13	0.25	0.85	0.009	0.003	Cu, Ni, Cr, Mo, V, B	DQ-Q'-T

DQ: Direct Quenching

Q': Inter-critical reheating and Quenching

T: Tempering

表3 鋼管用素材鋼板の機械的性質目標値

Table 3 Target mechanical and welded joint properties of steel plates for steel pipes

Mechanical properties		Welded joint properties	
Tensile properties		Tensile strength	Charpy impact properties
TS (MPa)	YR (%)	TS (MPa)	E_0 (J)
780~850	≤75	780≤	70≤

Tensile test specimen: JIS Z 2201 No.4 1/4t

Charpy impact test: JIS Z 2242 V-notch 1/4t

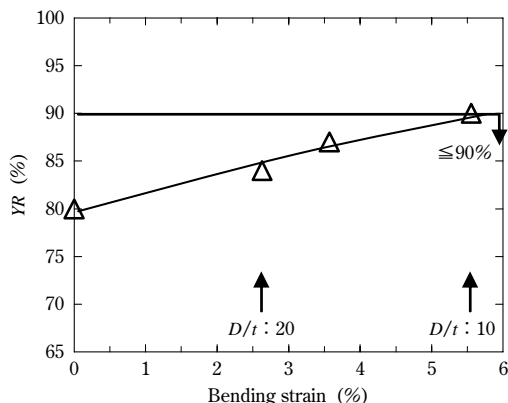


図1 曲げひずみがYRにおよぼす影響

Fig. 1 Effect of bending strain on yield ratio (YR)

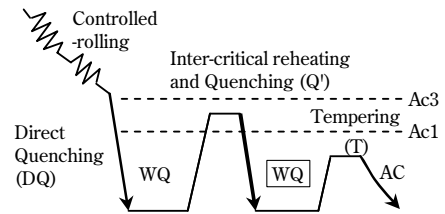


図2 多段熱処理(DQ-Q'-T)の模式図

Fig. 2 Schematic illustration of multiple heat treatment (DQ-Q'-T)

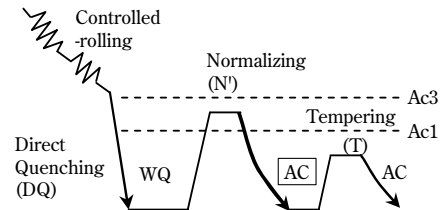


図3 多段熱処理(DQ-N'-T)の模式図

Fig. 3 Schematic illustration of multiple heat treatment (DQ-N'-T)

(軟質相)と、Q'時に逆変態して生成したベイナイト(硬質相)の複相組織とすることによってYRの低減を図ったものであり、780MPa級素材鋼板のYRは図1のとおり80%程度である。低YR化には軟質相と硬質相の硬さ比の増大が有効である³⁾ことから、さらなる鋼板の極低YR化のためには、硬質相の硬さをさらに増加させることが効果的であると考えられる。そこで、ベイナイトや焼戻しマルテンサイトより硬さの高い島状マルテンサイト(Martensite-Austenite constituent, 以下M-Aという)を硬質相として積極的に活用することとした。

M-Aは、オーステナイトからの拡散変態の進行に伴い、未変態オーステナイトへのカーボンの局所的な濃縮によって生成する。そのため、M-Aを生成させるには、二相域加熱後をQ'のような水冷ではなく、冷却速度の遅い空冷とする二相域焼準(DQ-N'-T, 図3)を適用し、図4に示すように二相域加熱後の空冷中に逆変態オーステナイトへのカーボンの局所的な濃縮を促進させることが有効と考えた。図5に表2と同じ成分の供試鋼を用いて各熱処理法でのTS-YRバランスを調査した結果を示す。N'を適用することにより、素材鋼板に対するYRの目標である70%程度という極低YR特性を実現できることがわかる。しかしながらこの成分では、二相域加熱後の空冷時に軟質なポリゴナルフェライトも析出し、そのTSは720MPa程度にとどまっている。したがって、N'を適用して極低YR特性を具備しつつ、780MPa級鋼としての強度を確保するには焼入れ性をさらに高める必要がある。

2.3 素材鋼板の成分系の検討

図6に今回適用を検討しているDQ-N'-Tプロセスに近いQ-N'-T(Q:オフライン再加熱焼入れ-N'-T)における780MPa級鋼板の引張特性におよぼす焼入れ性倍数(合金元素を添加したときの理想臨界直径と、添加しないときの理想臨界直径との比)DIの影響を示す⁴⁾。ここで、DIは鋼の焼入れ性を示す指標で丸棒試験片が中心部までマルテンサイト変態する最大直径[inch]のことであり、添加元素の種類や量の影響を受ける。DIが増加

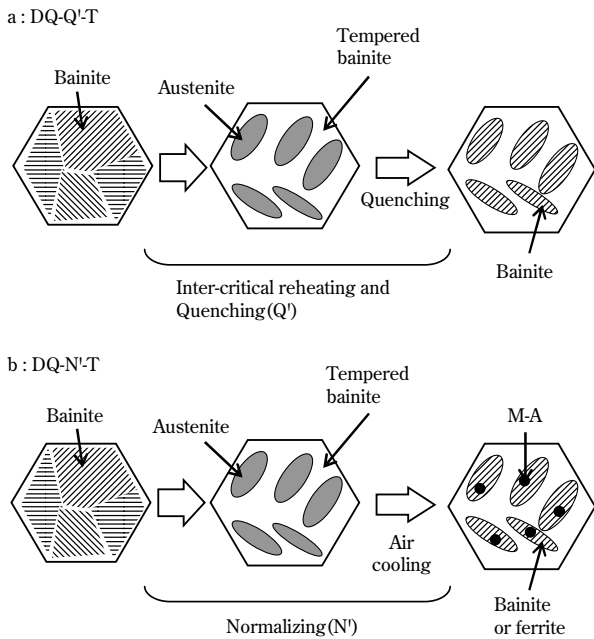


図4 多段熱処理 (a: DQ-Q'-T, b: DQ-N'-T) による組織制御の模式図

Fig. 4 Schematic illustration of microstructural control by multiple heat treatment (a: DQ-Q'-T, b: DQ-N'-T)

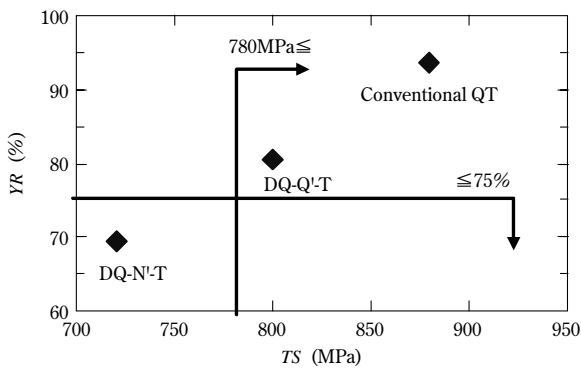
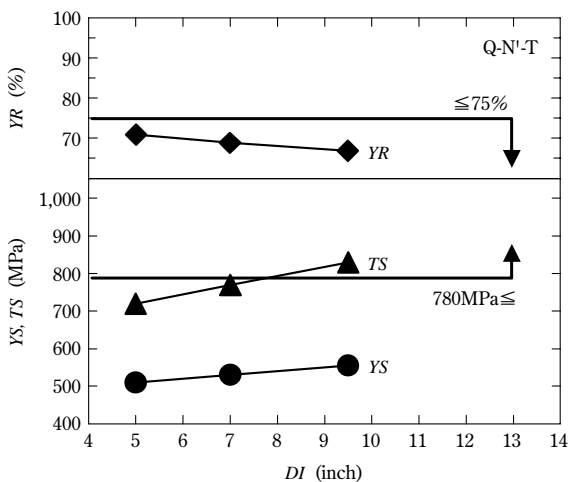


図5 種々の熱処理方法での TS と YR の関係

Fig. 5 Typical relationship between TS and YR of each multiple heat treatment



$$* DI = 1.16 \times (C/10)^{1/2} \times (0.7 \times Si + 1) \times (5.1 \times (Mn - 1.2) + 5) \times (0.35 \times Cu + 1) \times (0.36 \times Ni + 1) \times (2.16 \times Cr + 1) \times (3 \times Mo + 1) \times (1.75 \times V + 1) \times (200 \times B + 1)$$

M : M(mass%)

図6 780MPa 級鋼板の引張特性における DI の影響⁴⁾

Fig. 6 Effects of DI on tensile properties of HT780 (thickness : 50mm, t/4)

するのに伴って強度は増加し、YR は低下する傾向が確認された。また、780MPa 級としての強度を安定して確保するには DI は 9 inch 以上が必要になることがわかる。しかしながら、表 2 に示したような従来の調質型 780MPa 級鋼板の成分ではカーボン量が 0.1% を超えている。このため、耐溶接割れ性や HAZ 韌性の劣化を招くことが懸念されることから、焼入れ性向上のためにさらに合金元素を添加することは困難である。

一方、当社では、590MPa 級以上の高強度鋼における HAZ 韌性改善技術として、「低カーボン多方位ベイナイト技術」⁵⁾ を確立している。この技術は、従来の 780MPa 級鋼に対し、カーボン量を 1/2 以下とするとともに弱炭化物生成元素である Mn, Ni, Cr を積極的に添加し、HAZ の組織単位をランダム化することによって破壊の抵抗を上げる技術である。これにより、従来の調質型 780MPa 級鋼板に対して耐溶接割れ性と HAZ 韌性を大幅に改善することが可能である。そこで、強度確保と HAZ 韌性両立の観点からこの技術に基づいた成分系とすることとした。

3. 素材鋼板と円形鋼管の特性

2章で述べた検討結果を踏まえ、耐震安全性に優れた低YR型780MPa級円形鋼管用素材を製造した。まず、成分は良好なHAZ韌性が得られる「低カーボン多方位ベイナイト技術」を適用し、極低YR特性と高強度を両立させる目的から DI を 10 inch とした (表 4)。そして、この成分を有する鋼片に制御圧延および加速冷却を施し、厚さ 80mm の厚鋼板とし、二相域焼準を実施することによって円形鋼管用素材鋼板とした。

表 5 に素材鋼板の機械的性質を示す。780MPa 級の強度と 71% という極低 YR 化との両立が図られている。図 7 に開発鋼板の組織写真を示す。比較として二相域焼入れを実施した従来鋼の組織も示す。ナイトール腐食の結果、いずれの鋼板も地の組織は微細な焼戻しベイナイト組織となっていることがわかる。一方、レペラ腐食の結果、二相域焼準を適用した開発鋼には微細に分散した M-A が認められ (図中の矢印部)、図 4 に示した狙いどおりの組織となっていることを確認した。以上のような組織の実現により、極低 YR 特性と 780MPa 級の強度を両立できたものと考えられる。

表 4 開発鋼の化学成分
Table 4 Chemical compositions of developed steel

Chemical compositions (mass%)						DI (inch)
C	Si	Mn	P	S	others	
0.05	0.26	2.01	0.007	0.002	Cu, Ni, Cr, Mo, Ti, B	10.03

表 5 開発鋼板の機械的性質
Table 5 Mechanical properties of developed steel plate

Thickness (mm)	Mechanical properties				
	Tensile properties			Charpy impact properties	
	YS (MPa)	TS (MPa)	YR (%)	E_{ch} (J)	T_{ch} (°C)
80	582	814	71	240	-125

Tensile test specimen : JIS Z 2201 No.4 1/4t
Charpy impact test : JIS Z 2242 V-notch 1/4t

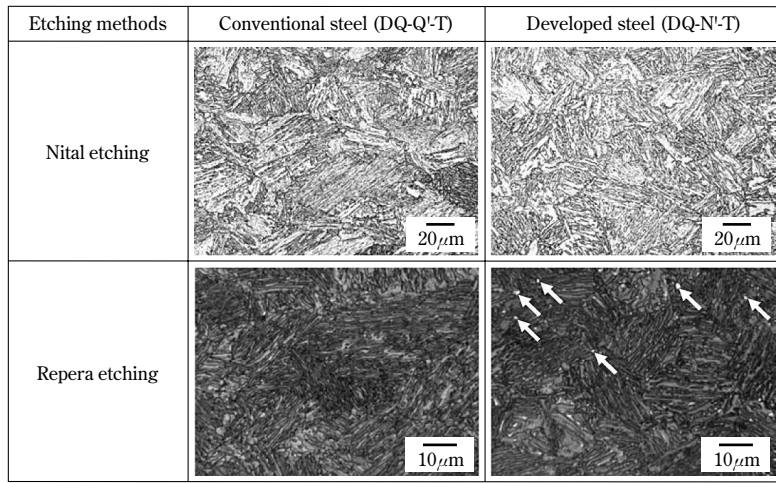


図7 開発鋼の組織

Fig. 7 Microstructure of developed steel

表6 開発鋼管の機械的性質

Table 6 Mechanical properties of developed steel pipe

Wall thickness (mm)	D/t	Mechanical properties				
		Tensile properties			Charpy impact properties	
		YS (MPa)	TS (MPa)	YR (%)	E_0 (J)	T_{rs} (°C)
80	10	777	899	86	195	-94
80	15	751	890	84	205	-100
80	20	720	875	82	202	-106

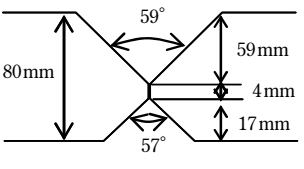
D/t : Diameter of steel pipe/Wall thickness

Tensile test specimen: JIS Z 2201 No.4 1/4t from surface

Charpy impact test: JIS Z 2242 V-notch 1/4t from surface

表7 開発鋼管のシーム溶接条件と継手性能

Table 7 Welding conditions and mechanical properties of seam welded joints (SAW)

Wall thickness (mm)	D/t	Shapes and dimensions of groove	Welding conditions	Tensile properties		Charpy impact properties	
				TS (MPa)	Fracture position	V-notch position	E_0 (J)
80	10		Welding consumable: PF-H80AK/US-80LT Heat input: ~9.3kJ/mm Preheat: 75°C Inter pass temp: 100~200°C	854	HAZ	WM	122
				850		FL	215
						HAZ1mm	191
						HAZ3mm	238

WM: Weld metal FL: Fusion line HAZ: Heat affected zone

Tensile test: JIS Z 3121 No.1

Charpy impact test: JIS Z 2242 V-notch

つぎに、開発鋼板を素材として佐々木製罐工業が有する15,000トンプレス機にてプレスバンド法により製缶加工を行った。得られた円形鋼管の機械的性質を表6に示す。 D/t で10という本開発で想定した曲げ加工度の最も厳しい条件においても86%と十分に低いYR特性を達成できている。また、 D/t で15, 20程度の曲げ加工であれば、JISの建築構造用炭素鋼鋼管(STKN)に匹敵する低YR特性($YR \leq 85\%$)が得られている。

表7にシーム溶接におけるサブマージアーク溶接(SAW)条件、溶接継手引張特性、およびシャルピー衝撃試験特性を示す。継手強度は780MPa以上を十分に満足している。一方、HAZ韌性は、従来の調質型780MPa級鋼板ではHAZ部韌性確保の観点から最大入熱が5kJ/mm以下に制限されているのに対し、約2倍となる入熱9.3kJ/mmの溶接を適用しても、本開発鋼管では0°Cでのシャルピー吸収エネルギーはHAZ部のいずれの位置でもほぼ200Jの良好な値を示しており、目標の70J

以上を十分に達成できていることを確認した。

むすび=最大厚80mmにおいて、径厚比が小さく曲げ加工度が大きい場合でも安定して低YR特性を有し、HAZ部の韌性も良好な耐震安全性に優れた780MPa級円形鋼管KSAT630を開発した。開発鋼管は東京スカイツリー®(東武タワースカイツリー株式会社などの商標)のゲイン塔に適用されている。今後も設計自由度や意匠性、耐震安全性に優れた建築構造物への適用拡大が期待される。

参考文献

- 1) 鹿内伸夫ほか: 鉄と鋼, Vol.76 (1990), p.89.
- 2) 徳納一成ほか: 新日鉄技報, No.365 (1997), p.37.
- 3) 小林克杜ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.58, No.1 (2008), p.52.
- 4) 岡野重雄ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.42, No.3 (1992), p.6.
- 5) 畑野 等ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.54, No.2 (2004), p.105.