

超高層建造物を実現する、 耐震安全性に優れた高張力円形鋼管の開発

山口 徹 雄

近年、建築構造物の大型化、大スパン化に伴って、建築構造用の円形鋼管は高強度化、厚肉化が進んでおり、耐震安全性に優れた引張強度 780 MPa 級の円形鋼管が求められている。これらの要望に対応するため、低降伏比特性と優れた溶接熱影響部 (HAZ) 靱性を具備した 780 MPa 級円形鋼管を開発した。本開発鋼管は東京スカイツリー®のゲイン塔に適用されており、本報では、その特性および素材鋼板の材料組織制御技術について報告する。

キーワード：建築、円形鋼管、耐震安全性、低 YR、高靱性

1. はじめに

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 (YieldRatio, 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。

このような状況を踏まえ、耐震安全性向上に寄与する鋼材の提供を目的として、HAZ 靱性に優れた低 YR 型の引張強さ 780 MPa 級円形鋼管を開発した。

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。

2. 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 780 MPa 級以上の引張強度 (TS) の確保
- 2) 適用最大厚 80 mm, 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 10 kJ/mm) での靱性確保 ($vE_0 \geq 70$ J)

3. 円形鋼管での低 YR 化と高 HAZ 靱性化

(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

表 1 円形鋼管の機械的性質の目標値

Thickness (mm)	D/t	Mechanical properties				Welded joint properties	
		Tensile properties			Charpy impact properties vE_0 (J)	Tensile properties TS (MPa)	Charpy impact properties vE_0 (J)
		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

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。

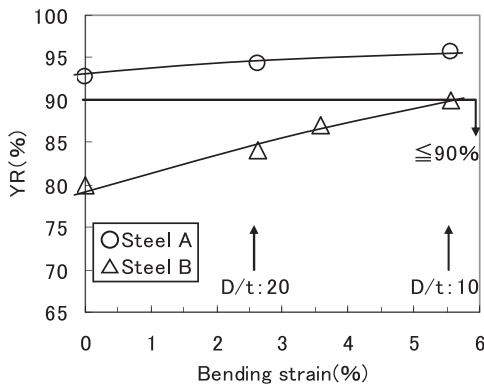
そこで、表—2に示す従来の調質型780MPa級鋼の成分に二相域焼入れ(Q)を施し、低YR化させた供試鋼を用いて鋼管加工時の曲げひずみ量とYRの変化を調査した。結果を図—1に示す。D/tが10という最小径厚比で想定される1/4t位置での曲げひずみ量は5.6%相当であり、その曲げ加工条件においてYR ≤ 90%を確保するには、素材鋼板のYRを80%以下とする必要があることがわかる。本開発においては鋼管加工によるばらつきも考慮し、素材鋼板のYRの目標を75%以下に設定した。

表—2 試作鋼の化学成分と熱処理方法

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

Q-T : Reheat Quenching (Q)- Tempering (T)

DQ-Q'-T : Direct Quenching (DQ)- Inter-critical reheating and Quenching (Q')- Tempering (T)



図—1 曲げひずみがYRにおよぼす影響

また、溶接継手部の中で、FL (Fusion Line)、HAZ部の靱性については、鋼板の成分の影響が支配的であり、鋼管加工による変化は小さいため、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

表—3 鋼管用素材鋼板の機械的性質目標値

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 ≤

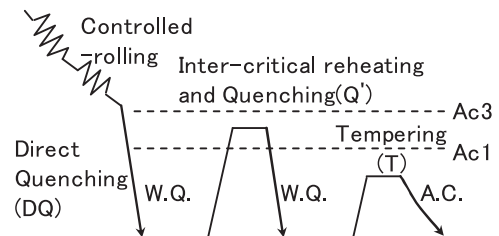
Tensile test specimen : JIS Z 2201 No.4 1/4t

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

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。

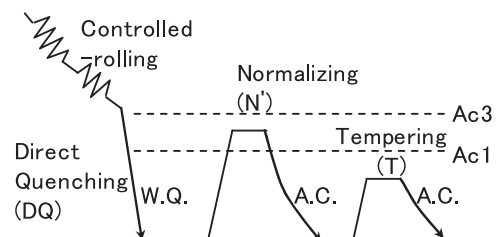
(2) 素材鋼板の極低YR化のための製造方法検討

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に示すように直接焼入れ(DQ : Direct Quench)の後に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(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%程度であり、今回の素材鋼板のYR目標である75%以下を満足できていない。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⁾。軟質相の硬さを低下させることによる硬さ比の増大は、780MPaという高強度の維持が困難であることから、高強度を維持した上でさらに鋼板の極低YR化を図るには、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。

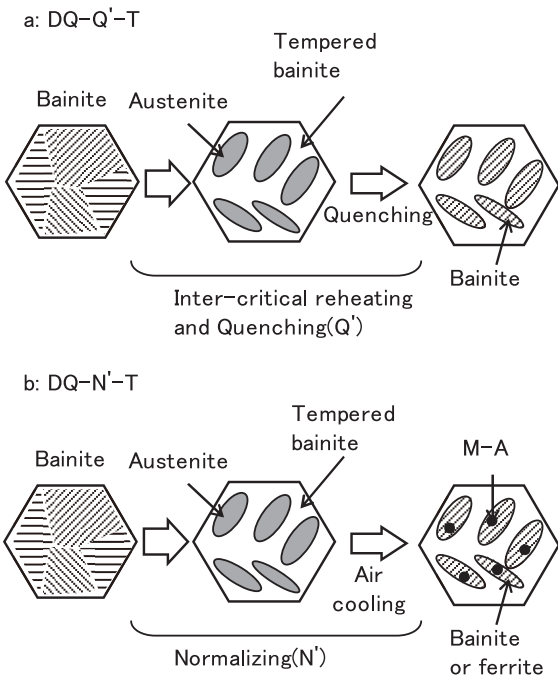


図—2 多段熱処理(DQ-Q'-T)の模式図

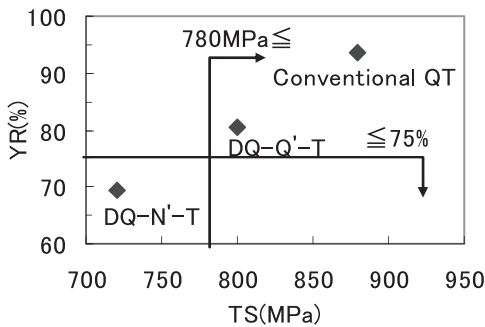
M—Aは、オーステナイトからの拡散変態の進行に伴い、未変態オーステナイトへのカーボンの局所的な濃縮によって生成する。そのため、M—Aを生成させるには、二相域加熱後をQ'のような水冷ではなく、冷却速度の遅い空冷とする二相域焼準(DQ—N'-T、



図—3 多段熱処理(DQ-N'-T)の模式図



図一四 多段熱処理 (a: DQ-Q'-T, b: DQ-N'-T) による組織制御の模式図

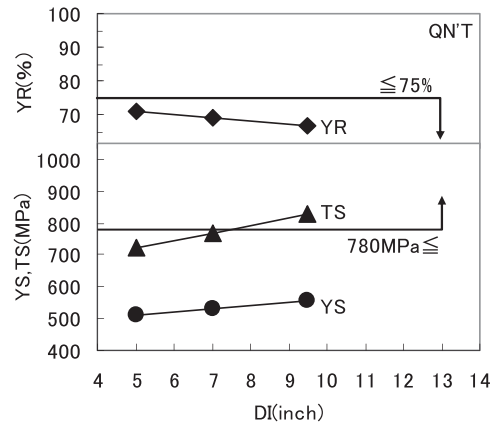


図一五 種々の熱処理方法での TS と YR の関係

図一三)を適用し、図一四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炭素の局所的な濃縮を促進させることが有効と考えた。図一五に表一2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 720 MPa 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、780 MPa 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。

(3) 素材鋼板の成分系の検討

図一六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—N'—T) における 780 MPa 級鋼板の引張特性におよぼ



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

M: M (mass%)

図一六 780 MPa 級鋼板の引張特性における DI の影響⁴⁾

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、780 MPa 級としての強度を安定して確保するには DI は 9 inch 以上が必要ながわかる。しかしながら、表一2に示したような従来の調質型 780 MPa 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、これまでに 590 MPa 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⁾が確立されている。この技術は、従来の 780 MPa 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 780 MPa 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。

4. 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 780 MPa 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 (表一4)。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 80 mm 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。

表一5に素材鋼板の機械的性質を示す。780 MPa 級の強度と 71% という極低 YR 化との両立が図られている。図一7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)、図一4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 780 MPa 級の強度を両立できたものと考えられる。

つぎに、開発鋼板を素材としてプレスバンド法により製管加工を行った。得られた円形鋼管の機械的性質を表一6に示す。D/t で 10 という本開発で想定した

表一4 開発鋼の化学成分

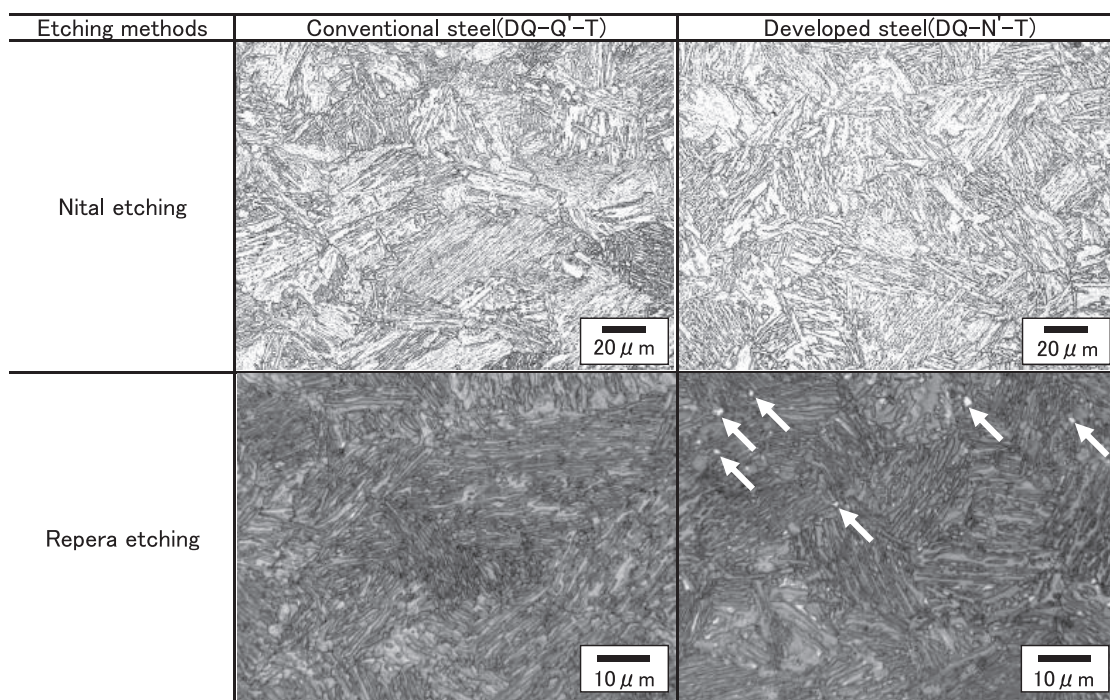
Chemical compositions (mass%)						DI (inch)
C	Si	Mn	P	S	Others	
0.05	0.26	2.01	0.007	0.002	Cu, Ni, Cr, Mo, Ti, B	10.03

表一5 開発鋼板の機械的性質

Thickness (mm)	Mechanical properties				
	Tensile properties			Charpy impact properties	
	YS (MPa)	TS (MPa)	YR (%)	vE_0 (J)	vT_{rs} (°C)
80	582	814	71	240	-125

Tensile test specimen : JIS Z2201 No.4 1/4t

Charpy impact test : JIS Z2242 V-notch 1/4t



図一7 開発鋼と従来鋼の組織

表一6 開発鋼管の機械的性質

Wall thickness (mm)	D/t	Mechanical properties				
		Tensile properties			Charpy impact properties	
		YS (MPa)	TS (MPa)	YR (%)	vE_0 (J)	vT_{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

表一 7 開発鋼管のシーム溶接条件と継手性能

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 : ~9.3 kJ/mm Preheat : 75°C Inter pass temp : 100 ~ 200°C	854	HAZ	WM	122	
				850		HAZ	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

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。

表一 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 780 MPa 以上を十分に満足している。一方、HAZ 韌性は、従来の調質型 780 MPa 級鋼板では HAZ 部韌性確保の観点から最大入熱が 5 kJ/mm 以下に制限されているのに対し、約 2 倍となる入熱 9.3 kJ/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 200 J の良好な値を示しており、目標の 70 J 以上を十分に達成できていることを確認した。

5. おわりに

最大厚 80 mm において、径厚比が小さく曲げ加工度が高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 780 MPa 級円形鋼管を開発した。開発鋼管は東京スカイツリー® 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。

JCMIA

《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) 小林克社ほか：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.

【筆者紹介】

山口 徹雄 (やまぐち てつお)
 (株)神戸製鋼所
 鉄鋼事業部門 技術開発センター 厚板開発部

