小 特 集

超大型鋼構造物特集 (その 2)
建築物横浜ランドマークタワーに用いた極厚、
高張力大径鋼管の製造と溶接技術*

萩原 賢次**, 大橋 守**, 上遠野明夫**

坂上 精希**, 工藤 弘***

Manufacturing and Welding Techniques Utilized
on Extra-Heavy-Walled High-Strength Large-
diameter Welded Pipes for Main Structural
Members of the 296m High Yokohama Land-
mark Tower*by Kenji Hagiwara**, Mamoru Ohashi**, Akio Kadono**, Seiki Sakaue**
and Hiroshi Kudo***キーワード：鋼管，仕口，建築構造，溶接，多層溶接，高張力鋼，プレ
スベンディング

1. はじめに

近年のビル建設にあたっては、インテリジェント化、大空間確保のニーズから、超高層化、大型化の傾向が顕著である。これらのビルを支える主柱材用部材には必然的に高強度が要求され、かつ鋼材の場合には断面性能的観点からも極厚材が必要となる。

本報は、この主柱材用部材に溶接鋼管を使用した例として、横浜みなとみらい 21 地区に建設中の、地上 70 階、地下 3 階、GL よりの高さ 296m、横浜ランドマークタワーに用いた極厚大径鋼管の製造、その溶接および鋼管柱・仕口部材の溶接について、技術資料としてまとめたものである。

2. 使用された大径鋼管と溶接方法の概要

鋼管製造法には大別して継目無（シームレス）鋼管方式と厚板、帯鋼を管状に成形した後、継目を溶接する溶接鋼管方式がある。横浜ランドマーク

タワーの主柱材に用いられた鋼管は、後者の範疇に分類され、かつその外径が $\phi 800\text{mm} \sim \phi 900\text{mm}$ 最大厚さが 90mm という、極厚大径鋼管である。

この大径鋼管は、厚板をプレスにより連続的に管状成形（プレスベンディング）した後、縦継目（シー

図 1 適用された鋼管製造法

*原稿受付 平成 4 年 1 月 10 日

** 新日本製鐵株式会社, Nippon Steel Corporation

*** 西村工機株式会社, Nishimura Koki Co., Ltd.

表1 適用された溶接方法

鋼管の縦継目および円周突合せ溶接	サブマージアーク溶接 多電極、多層盛
鋼管柱加工・仕口取付け溶接	CO ₂ シール半自動 アーク溶接

図2 製造プロセス

ム)をサブマージアーク法により溶接したものである。また建築用部材とするために、規定の長さに仕上げるための鋼管同士の円周突合わせ溶接と、鋼管柱加工・仕口取付け溶接が工場で実施されている。

鋼管製造法を図-1に、横浜ランドマークタワーの主柱材に用いられたプレスベンディング鋼管とその円周突き合わせ、鋼管柱加工・仕口取付けに適用された溶接方法を表-1に示す。

3. 大径鋼管の仕様、製造プロセスおよび製造結果

3.1 大径鋼管の仕様

当該主柱材に使用された大径鋼管の仕様を、表-2に示す。

材料規格としては、表-2の様に4種類のものが使用されているが、本報では5,000トン(全量の約80%)の出荷実績をもち、かつ使用鋼材中最も強度の高い、JIS G3106 SM570Q材について、その製造

表2 主柱材用大径鋼管の仕様

材料規格(機械的特性は鋼管に仕上げた後保証する)	JIS G3106 SM490A	YR≤80%
	SM490B	YR≤80%
	SM520B	YR≤80%
	SM570Q	YR≤80%
鋼管規格	JIS G3444	
鋼管寸法	外径φ800, 850, 900mm 厚さ 28~90mm	

¹YR(Yield Ratio: 降伏比) 鋼管母材の耐力と抗張力の比。耐震性向上のため特に付加された仕様。

法、溶接法、品質特性を紹介する。

3.2 大径鋼管の製造プロセス

当該主柱材に使用された極厚大径鋼管の製造プロセスを、図-2に示す。

製鋼では、溶銑中の不純物の減少、必要とする合金添加のための精錬が行なわれた後、連続鋳造法によりスラブに製造される。

このスラブを圧延し、鋼管の材料となる厚板が製造される。特に今回初めて要求された仕様 YR≤

80%を満足させるために、圧延、冷却、熱処理を通して、低 YR 化のための新技術が適用されている。

厚板はプレスベンディングおよび縦継目のサブマージアーク溶接加工を受け、鋼管に仕上げられる。また、必要に応じ鋼管同士の突合せ円周溶接が行なわれ、長尺加工される。

造管(成形・溶接)後、鋼管母材の YR を仕様範囲に完全に制御するために、熱処理(応力除去焼鈍)が行なわれる。

最終段階の機械試験によって、母材の YR を含め、鋼管の機械的特性が保証される。

3.3 製造結果

3.3.1 製鋼・厚板

(1) 製造プロセス

当該大径鋼管用厚板は、転炉および連続鋳造法により製造されたスラブを用い、厚板ミルで圧延・熱処理され製造された。

とくに、低 YR 特性を得るために、圧延後 γ - α 二相域から水冷する熱処理により、フェライト・ベイナイトの二相混合組織を生成させ、かつこの比率を制御する新技術を適用した。

(2) 化学成分

化学成分は、SM570Q の規定に加え、以下の点を特に考慮して設計されている。

① 鋼管、仕口溶接加工時の溶接性向上のために低 Pcm 値とする。

② 耐ラメラテア特性向上のために、S(硫黄)含有量を低く抑える。

化学成分例を表-3に示す。

(3) 厚板の機械的特性

表-4, 5に厚板の機械的特性を示す。

強度は JIS G3106 SM570Q の規格を満足し、YR(降伏比)も低い値を示している。

衝撃値についても十分高い値が得られている。

(4) 厚板の溶接性

低 Pcm 値で製造された厚板の溶接性が良好なことを確認するため、板厚 90mm について、実施工で適用される CO₂シール半自動アーク溶接法にて JIS Z3158「斜め Y 形溶接割れ試験」が実施された。

試験結果を図-3に示す。結果は良好である。

3.3.2 鋼管

(1) 成形

成形は、能力 12,000 Ton プレスにより連続的に行

表 3 化学成分例 (単位: mass%)

板 厚	C	Si	Mn	P	S	Ceq.
90mm	0.11	0.25	1.45	.015	.001	0.44
80mm	0.14	0.25	1.41	.012	.001	0.43

表 4 引張特性 試験片: JIS 5 号 (全厚)

板厚	方 向	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	降伏比 YR(%)
90mm	L	463	633	48	73
80mm	L	474	641	45	74

表 5 シャルピー衝撃特性

板厚	方 向	試験 温度	吸収エネルギー (J)
90mm	L	0℃	288
80mm	L	0℃	223

試験片: JIS 4号 (板厚 $\frac{1}{4}t$ の位置)

なわれる。その方法を模式的に図-4 に示す。

(2) 縦継目の溶接

縦継目の溶接は、2 又は 3 電極多層サブマージアーク法により鋼管の内面及び外面から行なわれる。この溶接に当たっては、極厚、高張力鋼管の縦継目溶接を行ない、必要な継目品質を確保すること、工程上のネック解消のため能率向上を図ることの、二つの観点から施工条件が決められている。図-5 に開先形状と溶接パス数を、表-6 に溶接材料、溶接条件を、写真-1 に溶接部のマクロ形状を示す。又機械試験結果を円周突合せ溶接と共に、図-7 に示す。

(3) 鋼管の熱処理

高 t/D (Max. 10%) のプレス成形によって上昇した鋼管の耐力 (YS) を下げ、降伏比 (YR) を規格値内に制御するため、造管後熱処理が行なわれる。熱処理条件は、保定時間を一定とし、熱処理前の材質特性によってその温度を選ぶと言う考え方で決定されている。熱処理条件例を表-7 に、その結果を図-6 に示す。

(4) 円周突合せ溶接

縦継目同様、極厚高張力鋼管の円周突合せ溶接の品質確保と、能率向上を図るために、施工条件が決められている。表-8 に溶接条件を図-7 に機械試験結

図 3
斜め Y 形
溶接割れ試
験結果 (板
厚 90mm)

図 4 連続プレス成形法

図 5 開先形状と溶接パス数の例

表 6 溶接材料、溶接条件

ワイヤ	² Y-DM
フラックス	² YF-15
溶接入熱量	60KJ/cm
層間温度	250℃以下

²日鐵溶接工業(株)製

果を示す。

(5) 溶接部の非破壊試験

縦継目、円周突合せ溶接部共全線、UST（超音波探傷試験）による非破壊試験が実施される。

UST 結果を表-9 に示す。

(6) 仕上がり寸法精度、形状

鋼管の仕上がり外径精度（公称値 $\phi 850\text{mm}$ 、 $\phi 900\text{mm}$ よりの精度）、形状をそれぞれ図-8 写真-2

表 8 円周突合せ継目の溶接材料、溶接条件

ワイヤ	$^3\text{Y-DM}$
フラックス	$^3\text{NB55L}$
溶接入力熱量	50KJ/cm

3 日鐵溶接工業(株)製

写真 1 縦継目の溶接マクロ形状

表 7 熱処理条件例

保定温度	$(500^{\circ}\text{C} \sim 650^{\circ}\text{C}) \pm 10^{\circ}\text{C}$
保定時間	1 時間以上／厚さ 25mm

図 6 熱処理後の機械試験結果

図 7 縦継目及び円周突合せ溶接の機械試験結果（いずれも抗張力）

表 9 UST 結果

総試験長さ (m)	3,510
総欠陥長さ (m)	11
欠陥発生率 (%)	0.3 ($^40.02$)

4 総溶接長さに対する欠陥発生率

試験・判定：JASS-6（日本建築学会 建築工事標準仕様書）

図 8 製品の外径精度

写真2 製品の形状

に示す。

4. 鋼管柱・仕口の仕様、溶接方法およびその結果

4.1 鋼管柱・仕口の仕様

柱は3階分を1節とし、鋼管柱部材一本当たりの長さは約12mである。SM570Q 鋼管柱は8階～52階に用いられており、その仕口は、10階梁の上フランジ位置だけが貫通ダイアフラム形式で、他は全て外ダイアフラム形式である。貫通ダイアフラムは材質 SM570Q、板厚 100mm であり、外ダイアフラムは、材質 SM490、SM520、板厚 40mm 以下である。梁仕口のついた鋼管柱部材の重量は最大で約 30 トンである。

4.2 鋼管柱・仕口溶接施工試験

実際の施工に先立ち、溶接施工法の妥当性を確認するため、仕口（貫通ダイアフラム・外ダイアフラム）と柱継手を含む全長 3.7m の実大試験体および部分仕口試験体が、川崎重工業（株）野田工場で製作された。

これらの試験体から切り出した試験片による、単純引張試験、引張圧縮繰返し試験、シャルピー衝撃試験など一連の試験が実施され、溶接部が設計上の要求性能を満足しており、溶接施工法が妥当であることも確認された²⁾。

4.3 鋼管柱・仕口の溶接加工

SM570Q 鋼管柱・仕口の加工は約 5,000 トンについて、新日本製鐵（株）若松鉄構海洋センターで実施された。

この極厚、SM570Q 鋼管柱の溶接加工に当たっては、以下に示す項目が重点管理され、品質が保証されている。

表 10 下向き溶接の溶接条件例

ワイヤ	J I S Z 3 3 1 3 Y F W 2 5
ワイヤ径	φ 1. 4 ～ 1. 6 mm
溶接電流	3 5 0 ～ 4 3 0 A
溶接電圧	3 8 ～ 4 2 V
溶接速度	2 5 ～ 3 5 cm / 分
最大入熱量	5 0 K J / cm

表 11 立向き上進溶接条件例

ワイヤ	J I S Z 3 3 1 3 Y F W 2 4
ワイヤ径	φ 1. 2 ～ 1. 4 mm
溶接電流	2 0 0 ～ 3 0 0 A
溶接電圧	2 5 ～ 3 0 V
溶接速度	8 ～ 1 5 cm / 分
最大入熱量	7 0 K J / cm

表 12 許容最高層間温度

SM570Q材相互の溶接	250℃
SM570Q材と SM520材 SM490材	350℃

表 13 UST 結果 (6 節～16 節)

総試験長さ (m)	3, 7 8 1
総欠陥長さ (m)	2 4
欠陥発生率 (%)	0. 6

(1) 溶接工の認定・溶接施工法の妥当性確認

加工開始に先立ち技量認定試験が実施され、その合格者約 50 名が溶接工として認定された。同時に溶接継ぎ手性能試験も実施され、溶接施工法の妥当性も確認された。

(2) 貫通ダイアフラム部の溶接

貫通ダイアフラム部は、レ形開先・裏当付きの T 継手である。仮組立て後鋼管柱部材は回転装置上に設置され、下向きまたは立て向きの溶接姿勢がとれるよう回転後、固定した状態で溶接された。

溶接法としては、フラックス入りシームレスワイヤを用いた CO₂シール半自動アーク溶接法がとられている。溶接条件例(下向き溶接)を表-10 に示す。

(3) 外ダイアフラム部の溶接

外ダイアフラム部の溶接は K 開先両面溶接で、その片面はガウジング（裏はつり）される。初層から十分な溶込みを得るため、溶接は鋼管柱円周位置を一作業当たり 90°～120°の範囲で分割し、部材を回転装置上で回転・固定後、立向き上進溶接されている。

写真3 加工の状況

加工の状況を写真-3に、溶接条件例を表-11に示す。

(4) 予熱および層間温度管理

SM570Q 極厚材の溶接を行なうに当たり、組立用の仮付け溶接も含め、予熱が必ず実施されている。

予熱方法には、深層部まで昇温させるため、高周波加熱法が適用されている。

予熱温度は予備検討段階では100℃以上としたが、10%引張歪みを与えた鋼材の斜めY形溶接割れ試験で、25℃でも割れ発生がなかったこと、ならびに溶接法がCO₂シール半自動アーク法に特定され、拡散性水素量レベルも低いことより、本生産では50℃以上とした。

層間温度は表-12の温度を管理値とした。

4.4 鋼管柱・仕口溶接部の非破壊試験

溶接後24時間以上経過したのち、SM570Q 材に関する溶接部にはMT（磁粉探傷試験）が、全溶込み（Full Penetration）溶接部にはUST（超音波探傷試験）が全線について実施されている。

6節から16節のUST結果を表-13に示す。

5. まとめ

超高層ビルの主柱材向けに初めて採用された極厚高張力、低降伏比大径鋼管にかかわる製法、溶接法、品質特性を紹介した。

SM570Q 鋼管の製造は平成2年10月より開始され、平成4年1月に、その仕口加工まで完了した。この間、製鋼・厚板・造管・熱処理・検査・機械試験・仕口加工と言う極めて長い工程にもかかわらず、ビル建設側からの即納（Just-In-Time）要請に応えるため、厳格な品質管理に加え、能率、生産性向上を図る必要があった。このことには、厚板での新技術開発、溶接施工能率の向上、鋼管の熱処理ロット拡大等に対応し、超高層ビル主柱材として大径鋼管を供給可能とする、総合生産体制を確立する事ができた。

謝 辞

末尾ながら、本プロジェクトの遂行にあたり多くご指導、ご協力頂きました関係の方々に、心からお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 吉田，森田，山崎，沢田，上遠野，望月，藤原：日本建築学会大会学術講演（東北）1991・9 “SM570Q 極厚鋼材の性能に関する実験的研究”（その1 厚板及び鋼管素材に関する実験）
- 2) 沢田，森田，山崎，大池，鈴木，後藤，藤原：日本建築学会大会学術講演（東北）1991・9 “SM570Q 極厚鋼材の性能に関する実験的研究”（その3 鋼管柱に関する実験）