特集

東京スカイツリー®を支える鋼材・溶接技術

2. 鋼材・溶接材料

2.3 溶接材料

東京スカイツリー建設工事に使われた溶接材料*

村田 義明^{**}，豊田 剛正^{***}

Welding Consumables used for Construction of Tokyo Sky Tree^{*}

by MURATA Yoshiaki^{**} and TOYODA Takamasa^{***}

キーワード 東京スカイツリー，溶接材料，塔体，外周架構，ゲイン塔，分岐継手，高降伏点鋼，鋼管

1. はじめに

2012年5月に開業した東京スカイツリー（以下、本タワー）は、全高634mの地上波デジタル放送を担う自立式電波塔として、多くの新しい技術が投入され、2008年7月の着工から2012年2月末の竣工まで、約3年半を費やして建設された。また、本タワーの確認申請区分は工作物内建築物で、建築物としての高さは459m（軒高=459.42m）であり、横浜ランドマークタワーの296mを上回り、建築物としても日本一の高さを誇っている。

本タワーの建設工事においては、

- ①各種の高強度・厚肉鋼管を採用
- ②鋼管トラス構造とするため、各鋼管の連結部には分岐継手を採用
- ③現場工事では未曾有の高所作業となる

などの特色があった。

本タワー建設工事で使用された溶接材料には、鋼管を製造するためのサブマージアーク溶接材料、分岐継手や工事現場継手などの組立てに用いるガスシールドアーク溶接用のソリッドワイヤとフラックス入りワイヤがある。

本稿では、上記①の各種高強度鋼管を対象とした溶接材料の一例、および特長などについて紹介する¹⁻³⁾。

2. 東京スカイツリーの構造と製作フロー

構造的には、頂部に位置しアンテナが設置されるゲイン塔と、これと展望台を支える塔体に大別される。

塔体の構造として、中心にある避難階段を兼ねた鉄筋コンクリート製コア（以下、心柱）とエレベータ昇降通路となるシャフト部を取り囲むように、鋼管トラス構造の外周架構が設置され、心柱と外周架構とが協働して大地震や強風時の揺れが抑制される制振構造となっている。このような大きな外力が作用しても、弾性を保証する構造のため、高い応力まで塑性変形しない高降伏点鋼の適用が図られた。また、634mという高さから外周架構に作用する荷重は大きく、そのため設計強度（降伏耐力）が500N/mm²と400N/mm²の円形鋼管（以下、YP500とYP400鋼管）が必要とされた。最も荷重が大きくなる足元の三角形の頂点に位置する柱部材には、外形2,300mm、肉厚100mmのYP500鋼管が採用された。

さらに、ゲイン塔においては、設計強度（降伏耐力）が630N/mm²のいわゆるHT780鋼の高強度鋼管が指定された。ゲイン塔の脚部と本体塔との接続部には、外径1,200mm、肉厚80mmのHT780鋼管が採用された。

これら高強度、かつ、厚肉の円形鋼管が分岐継手などで溶接されることで、それぞれ外周架構とゲイン塔の鋼管トラス構造が製作された。製作全体の流れを図1に示す。

- ①厚板から鋼管の製造
- ②分岐継手の工場組立て
- ③現場工事（建方）

なお、鋼管の製造（以下、造管）では、肉厚と径に応じて異なる製造法があるが、同図は厚肉タイプの造管に適用されるプレスバンド鋼管（以下、PB鋼管）の例である。これは、厚板をプレス（一部、ロール曲げ）により円筒形に成形した後、継目を溶接してできる鋼管で、その継目の溶接には、一般にはサブマージアーク法による多層溶接が適用されている。

工場および現場の組立てにおいては、主に炭酸ガスシールドアーク溶接による半自動溶接法が用いられた。そのなかで、ソリッドワイヤは下向と横向溶接用に適用され、工場組立てにおいては1.4mmのワイヤ径が、建方では

*原稿受付 平成25年3月8日

**正 員 日鐵住金溶接工業(株) Member, Nippon Steel & Sumikin Welding Co., Ltd.

***正 員 株式会社神戸製鋼所 Member, Kobe Steel, Ltd.

1.2mm が主流に使われた。また、フラックス入りワイヤは全姿勢溶接用として使用された。

3. 外周架構（塔体）の建設工事

3.1 高降伏点鋼管について

塔体の外周架構には、本タワーへの適用を想定して開発・大臣認定取得作業が進められてきた新しい建築構造

図1 鋼管トラスの製作フロー

用の YP400, YP500 の円形鋼管が、柱、斜材、水平材として大量に使用された（表1参照）。

一般的に合金を添加して高強度化を行うと、加工性や溶接性が損なわれる。そこで、上記鋼管の製作段階から高降伏点鋼板を素材として使用し、部材の薄手化による溶接時間短縮や予熱軽減などが図られた。本鋼材は、圧延工程での熱加工制御プロセス（TMCP）を活用することで、合金添加量を抑えるとともに圧延後の熱処理工程を省略又は軽減して、結晶粒を微細化して建築構造用鋼材に求められる溶接性・靱性を確保したまま、構造設計上の強度である降伏点を向上させている。従来の同じ強度クラスの鋼材と比較して、YP400 鋼管では降伏強さの下限保証値を 23%、YP500 鋼管では 14% 向上させている。

3.2 高降伏点鋼管用の溶接材料

表2に示す YP400 および YP500 鋼管用溶接材料は、本タワー工事で採用された一例である。また、これら製品に対しては、前述した高降伏点鋼管のメリットを最大限活用する観点から、特別仕様が設けられた。以下に、その特長について解説する。

(1) サブマージアーク溶接材料

同表に示すサブマージアーク溶接材料は、PB 鋼管の造管の際、多層溶接に適用される。フラックスとしては、ミクロ組織微細化技術を活用した Ti-B 複合添加タイプを採用し、溶接金属の高靱性化を図っている。概して、①狭開先溶接用のスラグ剥離性が良好な溶融フラックス（JIS Z 3352 SFAR1 該当）、②鉄粉入りボンドフラックス（JIS Z 3352 SFAZ 該当）の2種類がそれぞれ採用され、溶接施工の能率向上が図られた。組合せワイヤとしては、0.1C-2Mn-0~0.5Mo 系の中から、強度レベルに合致したワイヤが選

表1 外周架構（塔体）に使用された高降伏点鋼管の規格一例

区分	種類	最大肉厚 (mm)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏比 (%)	衝撃値 (J)	P _{CM} ¹⁾ (%)	造管 方法
高降 伏点	YP400	60	400~600	490~640	≤95	≥70(0°C)	≤0.26	UOE, PB
	YP500	100	500~700	590~740	≤95	≥70(0°C)	≤0.30	UOE
従来	STKN490B	36	325~475	490~640	≤80	≥27(0°C)	≤0.29	—
	(参) SA440C ²⁾	—	440~540	590~740	≤80	≥47(0°C)	≤0.30	—

注記¹⁾ 溶接割れ感受性組成=C+Si/30+Mn/20+Cr/20+Mo/15+Cu/20+V/10+5B

注記²⁾ 建築構造用高性能 590 N 鋼材 (40 mm < 板厚 ≤ 100 mm)

表2 スカイツリー建設工事で使用された高降伏点鋼管用溶接材料の一例

区分	対象の鋼管	溶接法 ¹⁾	規格 ²⁾	溶着金属の化学成分(%)						0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	衝撃値 (J)
				C	Si	Mn	Mo	他	P _{CM}			
分岐 継手 の組 立て	YP400×YP400 又は YP400×YP500	GMAW	JIS Z 3312 YGW18	0.07	0.5	1.1	0.2	Ti, B	0.19	590	630	150 (0°C)
		FCAW	JIS Z 3313 T550T1-1CA-X-X	0.05	0.4	1.2	0.3	—	0.16	560	630	94 (0°C)
	YP500×YP500 又は YP500×YP700	GMAW	大臣認定 MWLD-0015	0.07	0.4	1.4	0.3	—	0.19	590	660	110 (-5°C)
		FCAW	Z3313 T59J1T1-1CA-X-X	0.05	0.5	1.6	—	Ni0.5	0.19	600	640	96 (-5°C)
造 管	YP400×YP400	SAW	Z3183 S532-H 該当	0.08	0.3	1.4	—	Ti, B	0.17	490	570	130 (0°C)
			Z3183 S582-H 該当	0.07	0.2	1.5	0.2	Ti, B	0.18	550	600	140 (0°C)
	YP500×YP500		Z3183 S624-H4 該当	0.10	0.2	1.4	0.5	Ti, B	0.20	640	670	110 (-5°C)

注記¹⁾ GMAW=ガスシールドアーク溶接(ソリッドワイヤ)、FCAW=ガスシールドアーク溶接(フラックス入りワイヤ)、SAW=サブマージアーク溶接

注記²⁾ JIS は、最新版の規格を記載

記号	区 分	板 厚
○	0.2% 耐力 $\geq 500\text{N/mm}^2$ 引張強さ 590 ~ 740N/mm 2	25mm
△	0.2% 耐力: 500N/mm 2 未満 引張強さ 590 ~ 740N/mm 2	
×	0.2% 耐力: 500N/mm 2 未満 引張強さ 590 ~ 740N/mm 2 未満	
●	0.2% 耐力 $\geq 500\text{N/mm}^2$ 引張強さ 590 ~ 740N/mm 2	20mm
▲	0.2% 耐力: 500N/mm 2 未満 引張強さ 590 ~ 740N/mm 2	
×	0.2% 耐力: 500N/mm 2 未満 引張強さ 590 ~ 740N/mm 2 未満	

図2 YP500 用ソリッドワイヤの入熱・パス間温度の管理

図3 本タワー工事向けソリッドワイヤ製品の拡散性水素量検査結果の一例

図4 本タワー工事向けフラックス入りワイヤの拡散性水素量の一例

択された。

(2) ソリッドワイヤの規格問題への対応

本タワー工事用の高降伏点鋼管用溶接材料については、該当 JIS 規格の降伏強さが、相対する鋼管の規格値と同等以上であることが基本要件であった。しかしながら、YP500 鋼管に対応するソリッドワイヤとして、当時の JIS Z 3312 YGW21 の規格値では、その要件を満たすことができなかった。YP500 鋼管の降伏点下限値に対して、10 N/mm 2 と僅かではあるがアンダーマッチであった。このような課題に対しては、国土交通省大臣認定を取得した 590 N 級ワイヤを採用することで解消された。その際、降伏強さ 500 N/mm 2 以上を担保するため、ワイヤ径毎に適正条件が探索された。その結果を図 2 に示す。YP500 鋼を対象にした入熱・パス間温度の管理値上限は、従来の降伏強さ 440 N 級建築構造用鋼の場合と比べ、特にワイヤ径が 1.4 mm の場合には適正条件範囲が狭くなっている。その後、当該 1.4 φ 製品においては、1.2 φ と同じ管理条件にて

使用が可能となるよう改善されている。

(3) 550 N 級フラックス入りワイヤの開発

通常、建築鉄骨の半自動溶接施工としては、ソリッドワイヤが主流である。本タワー建設工事では、分岐継手や斜材の周溶接が多いことから、全姿勢溶接に対応できる 550 N 級フラックス入りワイヤ (JIS Z 3313 T550T1-1CA-X) が開発された。立向溶接を想定した大入熱溶接 (4.0 kJ/mm 程度) に対しても、所定の機械的特性を確保できる特長を有する。

(4) 低水素化への取り組み

本タワーの建設工事においては、高強度・厚肉部材の溶接施工となることから、溶接割れを防止するために、予熱の検討が行われた。ただ、建方の作業環境に配慮すれば、予熱作業の軽減が望まれる。溶接材料面からは、ソリッドワイヤおよびフラックス入りワイヤの全品種を対象に、拡散性水素量の特別仕様が設けられた。ワイヤ表面の油分量はワイヤ送給性を担保する反面、水素源となることから、低

表3 YP630 円径鋼管の性能一例

径厚比 D/t	鋼管の機械的性質					溶接継手の機械的性質	
	引張特性		シャルピー衝撃特性		溶接割れ感受性組成	引張特性	
	降伏点又は耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏比 (%)	伸び (%)	vE 0°C (J)	P _{CM} [※] (%)	引張強さ (N/mm ²)
≥10	≥630	780~930	≤90	≥16	≥47	≤0.30	≥780

※ P_{CM} = C+Si/30+Mn/20+Cu/20+Ni/60+Cr/20+Mo/15+V/10+5B

表4 YP630 円形鋼管用溶接材料の性能一例

溶接法	JIS規格	溶接金属の化学成分の一例 (%)							溶接金属の機械的性質の一例			
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	吸収 エネルギー (J)
SAW	Z3183 S80J4-H4該当	0.09	0.35	1.68	0.012	0.005	2.53	0.75	840	910	18	-60°C 100 -80°C 95
GMAW	Z3312 G 78 A 2 U C N4M4T	0.08	0.38	1.25	0.009	0.011	2.22	0.63	710	830	22	0°C 95

水素化の実現のために油量が厳重管理された。例えば、ソリッドワイヤについては、図3に示すように拡散性水素量が3 ml/100 g 以下に管理された製品が出荷された。

一方、フラックス入りワイヤでは、開封初期段階での低水素化に取り組んだ。製造工程などの見直しにより、図4に示すように拡散性水素量として4 ml/100 g 以下を実現した。

[15≤h_w<30mm]

$$\theta_{ph}^* = 120 + 120 \log (H_{JIS}/3.5) + 5(h_w - 20) + 8(\sigma_B - 83)$$

[30≤h_w≤40mm]

$$\theta_{ph}^* = 120 + 120 \log (H_{JIS}/3.5) + 5(h_w - 20) - 0.05(h_w - 30)^2 + 8(\sigma_B - 83)$$

θ_{ph}^* : Critical preheating and interpass temperature to prevent cold cracks in multi-run weld metal ; °C
 H_{JIS} : Diffusible hydrogen content of weld metal ; ml/100gr
 h_w : Weld thickness ; mm
 σ_B : Tensile strength of weld metal ; kgf/mm²

(1)

4. ゲイン塔の建設工事

4.1 降伏点 630 N/mm² 級鋼管について

ゲイン塔には、降伏点 400, 500 N/mm² 級鋼だけでなく、より高強度な引張強さ 780 N/mm² 級鋼（以下、HT780 鋼）による、降伏点 630 N/mm² 級（以下、YP630）円径鋼管が使用された。最大板厚 80 mm までの YP630 厚肉円形鋼管が建築構造物に採用されるのは、国内初となる。

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）での良好な靱性といった、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た。また、良好な溶接性を確保するため、鋼板成分の低 P_{CM} 化が望まれている。この状況を踏まえ、表3の例に示す、従来鋼板と比較して HAZ 靱性に優れ、降伏比を低く抑えた YP630 円径鋼管が開発され、ゲイン塔の一部に適用されている⁹⁾。

4.2 降伏点 630 N/mm² 級鋼管用の溶接材料

表4の例で示す YP630 鋼管用溶接材料は、①耐割れ性の向上、②高靱性化、を大きなキーワードとして開発されており、以下にその特長について述べる。

(1) 耐割れ性の向上

YP630 鋼の溶接時に問題となる割れは、HAZ の硬化あるいは溶接材料の拡散性水素に起因する低温割れであり、溶接材料面からは、強度レベル、積層厚さ、拡散性水素量の影響に関する検討が進められた。式(1)は、溶接金属の強度、積層厚さ、拡散性水素量から、多層溶接金属の割れ停

図5 多層溶接金属の低温割れに及ぼす拡散性水素量と強度の影響 (SAW)

止最低予熱温度を計算する推定式を示したもので、引張強さレベル 590~900 N/mm²、拡散性水素量レベル 0.1~40 mL/100 g (グリセリン法) に適用可能である⁹⁾。図5は、厚板での拘束多層溶接割れ試験結果を示す。この試験では、溶接金属の強度と拡散性水素レベルを変化させているが、式(1)同様に拡散性水素量が低いほど、また強度が低いほど、割れを防止するための予熱温度を低くできることがわかる⁹⁾。

SAW 材料における一層の低水素化は、図6に示すボンドフラックスへの炭酸塩の添加によって、アーク雰囲気中の水素分圧を抑えることで、溶接金属の極低水素化を実現した⁷⁾。

図6 ボンドフラックス中の CO_2 量と溶着金属の拡散性水素量の関係

図8 溶着金属の靱性に及ぼす Ni 添加量の影響 (GMAW)

図7 強度別の靱性向上手段

(2) 高靱性化

図7に示すように、YP550 鋼程度までの溶接材料では、Ti-B 複合添加によって高靱性化が図られているが、YP600 鋼以上の溶接金属マイクロ組織はベイナイト～マルテンサイトであり、フェライト微細化技術である Ti-B 系の採用はできない。基本的には、変態点の低下によるマイクロ組織微細化とマトリックスを強靱化する目的で、Ni が活用されている。その効果の一例を図8に示すが、遷移曲線は Ni 量の増加に伴って低温側へと移行している。

HT780 鋼用高靱性溶接材料の溶接金属化学成分は、C-Si-Mn-2.0~3.5Ni-(Cr)-Mo 系が採用されており、GMAW 材料については、低 C、高 Ni 系とすることによって溶接金属の強靱化が、SAW 材料については、高 Ni 系ワイヤと低酸素溶接金属が得られる、高塩基性のボンドフラックスとの組合せによって、強靱化が図られている。

ただし、図9に示す SAW 材料における例⁹⁾のように、この強度クラスの溶接材料の溶接金属強度は、溶接時の冷却速度と密接に関係しており、所定の強度を得るためには、施工条件の管理が必要である。

(3) 溶接施工管理

YP630 鋼管は、優れた耐割れ性および良好な機械的性質を両立した溶接金属を得るため、表5に示す例のように厳密な管理のもとで、施工が行われた。

SAW 材料は、低温割れ防止のため、溶着金属の拡散性水素量が極めて低く設計されているが、HT780 鋼としては異

図9 溶接金属の強度に及ぼす冷却速度の影響 (SAW)

例の極厚板であるため、予熱・パス間温度の管理値下限は裕度を持って 125°C とした。また、溶接直後熱処理として $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ を $1\sim 2$ 時間行うことにより、溶接金属中の拡散性水素を逃すことで、耐低温割れ性を更に向上させる施工を実施した。強度確保には、溶接金属の冷却速度が遅くなることを防ぐため、予熱・パス間温度の管理値上限を 200°C とし、入熱の上限は 10.0 kJ/mm 以下とした。溶接条件の一例を表6に、断面マクロ組織の一例を写真1に示す。

GMAW 材料は、強度確保のため、溶接施工指針⁹⁾において、低入熱 (3.0 kJ/mm 以下)、低パス間温度 (150°C 以下)での管理が必要とされており、現場溶接施工に則した検証において、より詳細に適正電流・電圧が確認されている¹⁰⁾。また、ゲイン塔は設置高さが 500 m を超えており、設置位置での組み立て溶接は、厳しい気象条件下で行われることとなるため、予熱・パス間温度管理や防風対策など、安定した溶接部の品質が得られる施工管理は、困難が予測された。この問題を解決するため採用されたのが、リフトアップ工法であり、シャフト空洞部の地上付近でゲイン塔の組み立てを行うことができたため、安定した溶接部の品質を

表5 YP630 鋼用溶接材料の施工管理一例

溶接法	JIS規格	板厚	予熱・パス間温度	溶接入熱	備考
SAW	Z3183 S80J4-H4該当	30～50mm	100～200℃	≦10.0kJ/mm	フラックス乾燥:250～350℃×1hr. 電源極性:AC
		50～80mm	125～200℃		
GMAW	Z3312 G 78 A 2 U C N4M4T	30～50mm	75～150℃	≦3.0kJ/mm	電流:250～280A 電圧:32V以下
		50～80mm	100～150℃		

表6 YP630 鋼の溶接条件一例

	開先形状 (mm)	パス	電流 (A)	電圧 (V)	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cpm)	入熱 (kJ/mm)
内面		1	500	28	-	-	25	3.4
		2	550	30	550	32	45	4.5
		3	750	32	700	36	35	8.4
外面		1	500	28	-	-	25	3.4
		2～10	600 ～700	30 ～34	-	-	25 ～30	3.5～5.0
		11 ～last	700 ～750	30 ～32	650 ～700	34 ～36	40 ～60	5.0～7.0

写真1 YP630 鋼の溶接金属断面マクロ組織 (板厚 50 mm)

確保できた。

5. おわりに

東京スカイツリーは、高降伏点鋼や低降伏比鋼など新しい高張力鋼の極厚鋼板が採用されており、溶接部が複雑な形状となる鋼管トラス構造であるため、健全で必要性能を満足する溶接継手を作製することが難しく、現地組み立てにおいては、高所での厳しい環境下での溶接が必要となる建築構造物だった。これらの課題に対して、溶接材料面では、適正な成分添加による性能の確保、フラックス入りワイヤの適用による作業性の向上などが図られ、施工管理面では、溶接条件や予熱・パス間温度の管理、防風対策などが取り入れられた。これらは、長年積み重ねてきた溶接技術の粋を集めて、初めて可能となった溶接施工の集大成と言える。本タワーの建設を通して新しく開発された技術や施工管理上の知見は、今後更に磨き上げられて、一般構造物の溶接へも活用されることが期待される。

加えて、本タワーのような歴史に残る巨大建造物の建設において、溶接が担う役割が様々なメディアに取り上げられた。溶接材料が、建造物に占める重量割合は2～3%と少ないが、極めて重要な技術分野であることを、日常は溶接に関わらない人たちにも、興味を持って知って頂ける、非

常に素晴らしい機会だったと思う。

今回、歴史的な建造物の建設に関われたことに感謝し、今後の溶接技術の更なる発展に貢献したい。

参考文献

- 鈴木孝彦ほか：新日鉄技報第387号（2007）64 2007年。
- 鈴木孝彦・村田義明：配管技術54巻（2012）2号，17，2012年2月。
- 村田義明：第12回鉄鋼材料と鋼構造に関するシンポジウム，2012年。
- 山口徹雄ほか：HAZ 靱性に優れた建築構造用低 YR 型 780 MPa 級円径鋼管の特性と組織制御技術，神戸製鋼技報，61-2（2011）16-19。
- 矢竹丘ほか：鋼材の溶接遅れ割れの研究（第3報），溶接学会誌，50-3（1981）291-296。
- N. Okuda et al.: HYDROGEN INDUCED CRACKING SUSCEPTIBILITY OF WELD METAL, IIW-No.II-1072-86（1986）。
- 長谷薫ほか：造船の建造方法を変えた片面サブマージーク溶接法の開発と発展，神戸製鋼技報，50-3（2000）70-73。
- 原則行：溶接材料面から見た溶接施工管理について，溶接技術，9（1999）89-93。
- 建築構造用鋼性能鋼管 KSAT630，溶接施工指針，神戸製鋼所（2007）。
- 中平和人ほか：第二吉本ビルディング 第2回 建築構造用鋼性能 780 N/mm² 鋼材（HT780）の溶接施工，鉄鋼技術，17-193（2004）56-65。