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

2.2 プレスベンド管の製造 東京スカイツリーの プレスベンド管の製造*

川 辺 壮 一**

Production of the Press Bend Tube for Tokyo Skytree*

by KAWABE Soichi**

キーワード 東京スカイツリー, プレスベンド管, 高強度円形鋼管

1. 東京スカイツリーの塔体に使用された鉄骨材料

東京スカイツリーの塔体に使用された材料は鋼材約34,000トンで、円形鋼管と角形鋼管の2種類の断面の鋼管が使用されたが大部分は円形鋼管であった。

この円形鋼管の大部分は降伏強度400 N/mm²以上の高強度鋼管であった。

東京スカイツリーの塔体に使用された鉄骨材料とその使用部材を表1に示す。

塔体最下部（鼎トラス）には、降伏強度が500 N/mm²の

新開発極厚鋼管（最大サイズの外径2,300 mm、板厚100 mm）が使用された。またゲイン塔には、国内の建築構造物としては初めての降伏強度630 N/mm²の超高強度鋼管（最大サイズの外径1,200 mm、板厚80 mm）が使用された。これら降伏強度400 N/mm²以上の高強度鋼管は、東京スカイツリー用に新たに開発した国土交通大臣の認定取得材である。

2. 東京スカイツリー用鋼管の製造方法

本タワーに使われた鋼管の製造方法は、円形鋼管がプレスベンド、ロールベンド、UOE、電気抵抗溶接（電縫鋼管）、

表1 東京スカイツリーに使用された鉄骨材料

部位	ゾーン	外径×板厚 (mm)	製造法					鋼材の降伏点	形状
			UOE	プレスベンド ロールベンド	電縫 鋼管	シーム レス	遠心力 鋳鋼管		
柱材	鼎トラス	711.2φ×28~2,300φ×100	○	○				325,400,500N/mm ² 級	円形 鋼管
	外塔	1,100φ×25~1,016φ×60		○				325,400,500N/mm ² 級	
	ゲイン塔	900φ×45~1,200φ×80	○	○				325,400,500N/mm ² 級 630 N/mm ² 級	
斜材	外塔	406.4φ×12.7~1,000φ×60		○				235,325N/mm ² 級	
	ゲイン塔	318.5φ×9~500φ×22		○				325,400,500N/mm ² 級	
水平 材	外塔、鼎トラス	267.4×12~318.5φ×32			○	○	○	325 N/mm ² 級 (一部 SCN590B-CF)	
	水平連結トラス	165.2φ×5~558.8φ×19				○		325 N/mm ² 級	
	リングトラス	250×250×6×6 ~500×500×12×12		□	□			325 N/mm ² 級 (STKR490,BCP325)	角形 鋼管

○：円形鋼管 □：角形鋼管

*原稿受付 平成25年3月8日

** 佐々木製罐工業株式会社 SASAKI PIPE & TUBE CO. LTD

表2 YP630～YP400（製造者の大臣認定品）の化学成分、機械的性質の仕様の一例
（板厚は 50 mm 超え、比較の STKN は 40 mm）

強度 クラス N/mm ²	鋼管母材部							溶接 継手部
	化学成分		降伏点 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	降伏比 %	伸び %	衝撃値 0℃ J	引張強さ N/mm ²
	Ceq %	PCM %						
YP630	—	≤0.30	≥630	780～930	≤90	≥16	≥47	≥780
YP500	—	≤0.30	500～700	590～740	≤95	≥20	≥70	≥590
YP400	≤0.42	≤0.27	400～600	490～640	≤95	≥23	≥70	≥490
STKN490B	≤0.44	≤0.29	325～475	490～640	≤85	≥23	≥27	≥490

表3 施工者と製造者の間で交わした本物件の鋼管径の仕様

強度クラス N/mm ²	外径 mm	板厚 mm						目標 許容差 mm	保証 許容差 mm
YP630	φ 1200	80						±4.5	±6.0
	φ 1200	60						±3.5	±5.0
YP500	φ 2300	100						±6	±10
	φ 1800	80						±5	±8
	φ 1400	60	50					±4	±7
	φ 1200	60	50					±3.5	±5.5
	φ 1000	60	55	50	45	40		±3	±4
YP400	φ 1900	50						±5	±8
	φ 1500	50						±4	±7
	φ 1300	55	40	32				±3.5	±5.5
	φ 1000	60	50	40	36	32		±3	±4
YP630～YP400（製造者の大臣認定品）の鋼管径の許容差									±1.0%

シームレス、遠心力鋳鋼管方式、角形鋼管がプレスベンド、電縫鋼管方式であった。厚板を曲げ加工する、プレスベンド、ロールベンド、UOE 方式では、高強度円形鋼管が製造されたが、そのうち特にプレスベンド、ロールベンド方式は、UOE 方式では困難な厚肉、大径の円形鋼管を製造した。

3. 東京スカイツリー用円形鋼管への厳しい性能要求

本タワーの円形鋼管に要求された性能は、上述の高強度化、極厚・大径化のほか高靱性化さらに現場溶接も考慮した予熱温度低減のための高溶接性化に加え、厳しい食い違い許容差をクリアするため、真円度確保が非常に厳しい大口径鋼管に対しても極めて厳格な鋼管断面の寸法精度が要求された。

表2、3には本タワーに使用された高強度円形鋼管の施工者と製造者（鋼材メーカー／鋼管メーカー）との間で交わした製造者の大臣認定品 YP630、YP500、YP400 の仕様の一例を示す。

化学成分では、良好な溶接性確保のため P_{CM} を最大 0.30% 以下に抑え、機械的性質では、衝撃値は通常の円形鋼管（STKN490B）に比べて高く、YP630 の降伏比は 90% 以下と YP500、YP400 に対し低目の仕様となっている。

4. 高強度円形鋼管への厳しい性能要求に対する対応

これらの高強度円形鋼管は、厚板製造メーカー及びプレスベンド管メーカーとも、未経験分野が多々あったものの、著名物件の東京スカイツリー建設のために何としてもやり遂げようとの強い意志のもと、厚板の開発・製造／プレス／溶接の3部門がお互いに連携、協力し開発を進め、大臣認定を取得した。

大臣認定取得後も厳しい要求に対応するために厚板製造メーカー、溶接材料メーカーと協力し材質（鋼材及び溶接部）安定化への取り組みを行うと同時に、寸法精度向上及びその他課題克服に向けての取り組みを行った。

4.1 取り上げた鋼管と主な取り組みの紹介

製造上最も難物であった YP500 の最大外径 2,300 mm、最大厚 100 mm と最高強度 YP630 の外径 1,200 mm、厚さ 80 mm の2つの鋼管の製造を取り上げ、下記の主要な3つの取り組みとその成果について紹介する。

- ・寸法精度向上への取り組み
- ・材質安定化に向けての取り組み
- ・YP630 のガス切断性、溶接上の課題の克服と溶接部の健全性確保の取り組み

a: プレス

b: プレス

c: 内面溶接

d: 外面溶接

写真1 製造工程写真

図1 プレスベンド鋼管（2シーム法）の製造工程

図2 プレス曲げ方向

4.2 プレスベンド方式による製造工程の概要

具体的な対応を述べる前に上記鋼管は、鋼管メーカーにより製造したものでありその製造工程の代表写真を写真1にイラストを図1に示す。

プレス曲げ方向は、図2に示すように厚板の長手方向である圧延方向（L方向）に対し直角方向に曲げたC方向曲げである。通常、外径が1000φ以下では1シーム法の製造

であるが、本例のように外径が1000φを超える鋼管は、原材料となる厚板の輸送規制から、厚板を2枚使用し、まず半割を2個作りそれらの合体により1本の鋼管とするいわゆる2シーム法の製造であった。

4.3 寸法精度向上に向けての取り組み

曲げ加工により円径鋼管を製造する上において寸法精度の向上を目指す基本的な考えは、規定の外径での丸みの

確保と規定外径からの狙いの円周長を確保することを主な前提としている。

本タワー向けの円形鋼管は、従来の鋼管に比べ極めて強度が高い。このためプレス時に丸みが出ていないと、後工程の矯正で多大の時間がかかる。納期的にも逼迫しており、出来上がりの製品をいかに矯正工程なし或いは矯正の工程でも短時間に真円に近づけるかが大きな課題であった。

また、製品の外径の良否を左右する円周長が狙い通りに確保できているか否かを、組立溶接工程（図1 製造工程のg）で確認するが、組立溶接時に円周長が狙いより大きすぎるとその調整のため極厚材の開先面のガスあるいはグライNDER研削のための多大な時間が必要となり次工程に進めなくなる、またルートギャップが過大となるとその後の溶接に悪影響が出ることからいかに円周長を狙い通りにするかも大きな課題であった。

①規定の外径での丸みの確保策

プレスバンドによる曲げ加工は多点曲げにより行うが、鋼管メーカーでは、円形鋼管への曲げ加工時の作業として鋼管の内径（内R）に合わせて

- ・鋼板への押し位置の罫書き（図1のa）
- ・プレス機のレーザー光線の罫書き線への位置合わせによる芯合わせ
- ・プレス作業中にこまめに内Rゲージを見ながら曲り具合のチェック（写真1のa）
- ・上記情報をもとにプレスの長手方向の細かなストローク量の管理

を行い丸み出しに努めた。

また、曲げ加工時において、外力を加え変形を与えても、その外力を除くとわずかであるが元に戻るいわゆるスプリングバック現象が認められる。このスプリングバック量は高強度になればなるほど増大し、丸みへの悪影響が心配されたが内Rゲージを見ながら細かなストローク量調整機能を駆使しての曲げ加工を行う事により、特に不具合を生じることはなかった。

最終製品で矯正が必要な場合には、外径1,600mm以下の場合には主に端曲げ、本曲げ用に使用したプレス（図1のb, d）で、内径1,600mm超えの大径管は油圧張り出し機（図1のn）での矯正を行った。

②原板板厚設定および規定の外径からの狙いの円周長の確保

材料を曲げ加工することにより外面側に引張歪、内面側に圧縮歪が生じ、その歪の大きさは、板の表面部が最も大きく順次板厚の内側に向かって小さくなり板の中央付近は、引張歪も圧縮歪もない中立軸が存在する。

図3に示すように外径が小さく板厚が厚い曲げ部では板厚が減り薄くなっている。

更に、プレス上型による内径側への凹みも減肉の原因となり、製品板厚（原板板厚－減肉分） $\geq$ 設計板厚となるような原板板厚設定が必要となる。

曲げ加工により薄くなったということは材料が伸びていることであり、結果的に中立軸は内側に寄ってくる。特に外径が小さく板厚が厚い材料ほど、伸びは大きな値を示し、この値を予測せずして展開寸法（端曲げ後の切断を含む）を出してしまうと最終製品での寸法は過大、逆に伸び代を大きく予測しすぎる展開寸法とすると最終製品での寸法は過小となる。

通常流れている材料は、鋼種、板厚と径厚比（D/t）毎の減肉代、伸び代、更に溶接による縮み代とを考慮した蓄積データから原板の板厚設定及び展開寸法を計算している。

本件では、原板の板厚設定については、蓄積データをもとに実施した。一方、円周長設定すなわち半割鋼管の幅切断については、蓄積データが少なかったことから、通常は図1のcで終わらせる寸法切断工程で幅切断に余長を持たせ、1工程分増やした図1のeの段階で製品実測して切断位置を確定することで、仕上がり寸法精度の確保に努めた。

4.4 曲げ加工による材質の安定化と形状変化の最小化への取り組み

①全数熱処理（SR処理）化

厚板をプレスベンディング方式（ロールベンディングも同等）により円形鋼管に曲げ加工することにより板厚と鋼管径によって曲げ加工度は大きく変化し、素材鋼板からの材質も大きく変化する。

図3 曲げ加工による減厚と中立軸の移動

表4 YP630, YP500 の化学成分、機械的性質の実績（平均値）

強度クラス N/mm ²	鋼管 寸法	化学成分		機械的性質				
		データ数	PCM %	データ数	降伏点 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	降伏比 %	衝撃値 0℃ J
YP630	1,200φ ×80	6	0.273	12	737.9	859.4	85.9	168.8
	規格値		≤0.30		≥630	780～930	≤90	≥47
YP500	2,300φ ×100	4	0.230	8	549.4	641.5	85.6	270.2
	規格値		≤0.30		500～700	590～740	≤95	≥70

図4 鋼管径実績

更に曲げ加工後の熱処理 (SR) によっても鋼管の材質は大きく変化することを素材の厚板供給メーカーとの実験段階で経験した。

当初は、SR は降伏比改善の1手段として考えていたが、本物件は過去に経験のない高強度で大径かつ極厚材であり、材質の安定化 (強度, 降伏比, 衝撃値), さらに素管製作後の熱履歴に対し形状変化の最小化, すなわち屋外, 高所での現場組立て溶接 (建方) に支障が出にくくなることを考慮して YP400 以上の高強度材については全数 SR 処理を実施することとした。

SR 処理のタイミングは、YP630 のような 780 N/mm² 級鋼では SR 処理により溶接部とその近傍の衝撃特性が劣化する事が懸念されたため、YP630 のみはプレス後の組立溶接前 (図1の f), その他の材料は SAW 溶接後 (図1の l) に実施した。

② SR 条件管理の徹底

強度が高くなればなるほど曲げ加工度や SR 処理の条件が材質変化量に及ぼす影響が大きいため、素材鋼板の材質毎と曲げ加工度毎に SR 条件を決定した。

特に最高強度の YP630 は、材質変化が温度条件に極めて敏感であるため、熱処理炉内の雰囲気温度のみならず同一厚のダミー材を用い板厚中心部の温度測定での管理を行った。

4.5 YP630 のガス切断性, 溶接上の課題の克服と溶接部の健全性の確認

YP630 には多量の特殊合金元素が添加されているため、ガス切断性に問題があることがあらかじめ予想された。そのため切断試験を行ったところ、垂直切断では切断精度は

やや荒れ、開先切断では実用に堪えないことが分かった。

そこでアクアガス (水の電気分解で生じた水素と酸素に LPG 等を添加したガス切断用燃料ガス) 発生装置を導入し、切断速度, 酸素圧の変更等の試行錯誤の結果問題をクリアーした。

更に別な問題では、SAW 溶接において、溶接部の作業性の問題や溶接部に低温割れが発生する等の問題が発生した。

溶接材料メーカーと共に、実験を繰り返し、予熱, パス間温度, 後熱の徹底した温度管理で割れの原因となる拡散性水素量を低減し、必要な強度を確保しつつ割れを出さない溶接を実現した。

溶接部の健全性の確認は、外面側からの全ての溶接が終了した後での UT のみならず、外面側からの約 1/2 の溶接が終了した時点で溶接ストップ。24時間後に UT (いわゆる中間 UT) を実施し健全性を確認した後、更に予熱からスタートさせ残りを溶接するという作業方法を採用した。

4.6 成果

表4に YP630 の 1,200φ×80, YP500 の 2,300φ×100 の化学成分, 機械的性質の実績及び図4に鋼管径の実績を示す。

化学成分, 機械的性質ともいずれの値も規格値を十分満足した。また鋼管径はいずれも目標値を全数クリアーし良好な値であった。

これらは、著名物件の東京スカイツリー物件の製造に対しトラブル無く、良い物をなんとしても造り上げようと厚板製造メーカー, 溶接材料メーカー及び社内とが一丸となって取り組みを行った成果だと考える。