特集

東京スカイツリー®を支える鋼材・溶接技術

3. 施工

3.2 部材加工

東京スカイツリーの鉄骨製作*

稲田 哲夫**

Introduction of Steel Fabrication Technology in the Tokyo Sky Tree Project*

by INADA Tetsuo**

キーワード

東京スカイツリー，大型鋼管トラス構造，3次元CAD，相貫継手，レーザー芯出器，パイプコースター，ゲイン塔仮組立

1. はじめに

自立式電波塔としては世界一の高さ「634m」となる東京スカイツリー。当社としてもこのような大型鋼管トラス構造物を手掛けるのは初めてであった。本稿では，この特殊建築物の製作における当社の取り組みについて紹介する。

2. 鉄骨製作の課題確認

当社はこれまでも様々な構造物に携わらせて頂いたが，本工事のような構造物製作の経験は少なく，製作対象の難易度と当社既存の生産技術・設備・技術者などにどれほどのギャップ（問題点）が有るか？の視点で取り組みの全体像を描くところから入った。製作対象物の検討項目は以下である。

- (1) 大型鋼管トラス構造の工作図・現寸・製作（組立・溶接）・塗装・輸送方法の確立（生産計画）
- (2) 非常に高い寸法精度の要求に対応
- (3) 生産の平準化（工事専任作業員で賄う）
- (4) 生産設備の整備と新規導入

3. 3次元CADを活用した生産計画の立案

まず，3次元CADによる構造モデルを作成し，そのデータを以下の検討に活用した（図1）。

- (1) 工作図反映項目への活用

図1 3D-CADによる事前検討

柱鋼管切断位置精度，分岐継手角度・先端精度，各種展開図，付帯・仮設部材取り付け位置決め，建て方精度管理用ターゲットシールの位置決め等を監理者等，施工者と協議・確認を行い解決を図った。

- (2) 部材同士の干渉有無に対する検証

トラス節点部分，仮設・付帯鉄骨の干渉有無を確認し，干渉するものは全て監理者等・施工者と協議して解決を図った。

- (3) 輸送計画

大径鋼管に鋼管ブレースブラケット等が取り付けくので，重量・寸法に関しては，輸送法令上の問題が懸念された。これらは，工作図の作図開始前に解決しなければならなかったが，3次元モデルを活用することで，輸送車両の選定，荷姿の決定等をスムーズに行うことができた。

*原稿受付 平成25年3月8日

** 株式会社ハルテック Komaihaltec Inc.

4. 製品精度要求への対応

(1) 製品精度確保への課題

現場建方精度を確保するには、大径鋼管における現場継手部角度精度及びねじれ精度への確認が必要であった。更にトラス構造形式では主管に対し、多様な方向から複数の部材が一点で取り合う複雑な空間トラス構造であり、現場継手に食い違い等の障害を生じる恐れがあるため、非常に厳密な製品精度管理が求められた。社内の寸法精度管理値及び溶接部の品質管理要求事項の一例を表1に示す。

これらの品質要求事項に対し、各製作工程において、対処方法を提案、実践した。

(2) けがき

①基準点・基準線のけがき

製品の精度管理の根幹として、正確な基準線のけがきは最重要工程であるが、プレスバンド鋼管の断面は正円ではなく、仮想芯も基準線も正確に求めることは容易ではない。様々な芯出し方法を検討した結果、市販のレーザー芯出し器を用いて安価、正確、迅速かつ容易に基準線のけがきが行える芯出し要領を作り上げることができた。

②鋼管切断線のけがき

表1 社内寸法精度管理値及び品質管理要求事項

項目	課題
1 大径鋼管、基準線の野書き精度	社内管理値 $e \leq 1\text{mm}$
2 大径鋼管の斜め切断	勾配 $a \approx 10 \sim 200\text{mm}$ に対応 (図-2参照)
3 大径鋼管の切断精度	社内管理値 $e \leq D/1000$
4 大径鋼管現場溶接部の開先精度	管理値 $-0^\circ \leq \angle \alpha \leq +5^\circ$
5 分岐管の組立精度	社内管理値 $e \leq 2\text{mm}$ (図-3参照)
6 交差角 $22 \sim 30^\circ$ 、分岐管の溶接	トゥ(toe)部: PP溶接、のど厚 1t ヒール(heel)部: すみ肉溶接、脚長 2t
7 分岐管の製品精度	管理値 $e \leq 3\text{mm}$ (図-3参照)

図2 鋼管斜め切断の勾配

図3 分岐管組立精度 (L: 設計寸法)

高精度の野書きをレーザー芯出し器により実現

図4 1次野書き 基準点・基準線の決定

鋼管両端で下げ振り・アルミ仮材を直行させる
定規で鉛直線・水平線の1/2を点を含わせる。
鋼管の基準点を成す「ひし形」を決定する。
⇒鋼管の内外にマーキングし、基準点とする。
鋼管両端の基準点を結び、基準線とする。

レーザー芯出し器は、基準線に直交方向にもレーザーを照射できるため、鋼管切断線のけがきも容易に行うことができる。同時に野書き道具を用いて鋼管内部の野書き線を鋼管外部に転記し、このけがき線を基準に鋼管を切断することで、切断時の直角度を確保できた。図5にその概要を示す。

けがきの完了した時点で、けがき線の間隔と対角寸法を確認して記録した。この後に、鋼管の外側に切断線を写す。

(3) 鋼管の切断・開先加工

①主管

本タワーの外形(フォルム)は、「そり」「むくり」を組み合わせた湾曲形状であるが、鋼管を曲げるのではなく、

写真1 基準点の決定

レーザー芯出し器により円周状に鋼管切断線を表示

図5 1次野書き 鋼管切断線の野書き

写真2 1次野書き 鋼管切断線の野書き状況

まっすぐな鋼管を現場継手部で折って繋げることで曲面を形成している。そのため、鋼管の切断線は管軸に対して勾配が必要(斜め切断)となり、大径鋼管の切断・開先加工には大きな課題があった。コスト面も含めた検討の結果、オートパイクル(ポータブル自動ガス切断機)を適用することに決定した。既存品での大径鋼管の切断実績はなかったが、本工事用の切断条件をメーカーと共同で作り上げ、ガイドレールは自作する事で解決した。図6にその概要を示す。

オートパイクルの採用により、

課題2：大径鋼管の斜め切断

課題3：大径鋼管の切断精度 $e \leq D/1000$

課題4：鋼管現場溶接部開先精度 $0^\circ \leq \angle \alpha \leq +5^\circ$

の問題を解決した。

②分岐管

分岐管は斜め切断となること、また部分溶け込み溶接、すみ肉溶接及びその移行部で開先形状が異なる等、複雑な開先加工となるのでCNC制御のパイプコースターの導入により対処した(図7参照)。また、交差角が非常に小さい(最小交差角 23° 、切断時最小トーチ角 15°)問題に関しては、本プロジェクトとして、特別な切断ソフトの開発をメーカーに依頼し対処した。

パイプコースターを使用することにより、分岐管の斜め切断部、部分溶け込み溶接部、すみ肉溶接部、開先角度移行部の開先加工に3次元CADデータを活用し、切断、開先精度の向上を図ることができた。

・主管の直角・斜め切断、高精度開先加工をオートパイクル(ポータブル自動切断機)により実現

・ガイドレールを用いた微い機構
→切断始端のズレ対策
→斜め切断への対処
⇒大径鋼管の精密切断

オートパイクル ガイドレール

図6 オートパイクルによる鋼管切断・開先加工概要

：分岐管の3次元曲面切断(オートパイクル適用対象外)をパイプコースター(パイプ自動切断機)により実現

【鉄骨詳細図・3次元現寸】

3次元CADデータにより分岐管データ抽出

【分岐管データのコントロールパネル入力】

主管・分岐管外径、板厚、交差角、開先角度など
※開先角度は一つの切断面で一律ではない

【パイプコースター作動】

鋼管芯線の自動書き
鋼管の3次元切断

図7 パイプコースターによる鋼管切断・開先加工概要

5. 組立・溶接方法

(1) 分岐管の組立

分岐管の取付け精度は高精度な現場建方を実現するための最重点項目と捉え、レーザー芯出し器を活用し正確な位置を決定する方法を考案した。図8に組み立て方法を紹介する。

レーザー芯出し器の活用により、

課題5：分岐管の組立精度社内管理値 $e \leq 2\text{mm}$

を満足することができた。

(2) 分岐管の溶接

分岐管の溶接は回転治具の活用により、作業性の良い溶接姿勢を確保するよう工夫した。分岐管の溶接は、横向姿勢を基本として実施した(写真4 写真5)。

図8 分岐管の組み立て方法

レーザー芯出し器利用での分岐管の設置

写真3 分岐管の組み立て状況

写真4 自作回転治具による製品横持ち削減

写真5 分岐管の溶接状況

写真6 分岐管すみ肉溶接部脚長検査用野書き

分岐管のヒール部は、すみ肉溶接部で脚長管理 ($2t$ 以上)、トゥ部とサドル部は部分溶け込み溶接で、のど厚 ($1t$ 以上) 管理、(t : 分岐管板厚) としている (図10参照)。ヒール部すみ肉溶接部の“脚長管理”については、脚長予定線と検査用差越線を製品にけがき、管理の基準とした (写真6)。

トゥ部、部分溶け込み溶接部の“のど厚”管理については、分岐管の直径や分岐管の取り付け交差角、更に主管に

図9 分岐管溶接部の開先形状

図10 分岐管溶接部の脚長管理、のど厚管理

図11 型取りゲージによる“のど厚”管理

接触する位置によって“のど厚”の限界線は微妙に変化する。仮に“のど厚”の検査に限界ゲージを作るとすると、一つの継ぎ手で数種のゲージが必要になる。そこで図11に示す市販の型取りゲージを採用することにより、一つのゲージで代用する事が出来た。

使用法は、図11に示すゲージを分岐管の表面と溶接面に押し当て、ゲージを離した後確認した溶接表面の位置が分岐管の管軸直交断面に沿った直線を包絡すれば合格と判定する。

検査装置の活用、検査野書線により、

課題6：分岐管溶接部の管理

を実施し、各課題の積み重ねの成果として、

課題7：分岐管の製品精度 $e \leq 3\text{mm}$

を満足する完成品とすることが出来た。

6. 検査 (ゲイン塔仮組立検査)

ゲイン塔は対角芯々間寸法 5.4m の六角柱形状の立体トラスであり、外周6方向、放射1方向から7部材が1点

図12 仮組立検査測定ポイント

表2 仮組立検査測定ポイント

検査位置 記号	管理 許容差	限界 許容差	記事
1 柱頭の高さ (H1~H6)	±3.0	±5.0	
2 A 柱脚側の柱間隔 (A1~A6)	±2.0	±2.5	(参考値)
2 B 柱頭側の柱間隔 (A1~A6)	±2.0	±2.5	
3 A 柱脚側の柱間対角 (B1~B3)	±3.0	±5.0	(参考値)
3 B 柱頭側の柱間対角 (B1~B3)	±3.0	±5.0	
4 水平材と軸ブレースの目通り (e1~e4)	±3.0	±5.0	
5 水平材と軸ブレースの目違い (δ)	D(管径) ≤1500 t ≤15 ekm ≤1.5 t >15 ekm ≤t/10 かつ 3mm		
6 水平材と軸ブレースのルートギャップ (g)	Δg ≥ -2	Δg ≥ -3	
7 柱の倒れ (h1~h2)	±3.0	±5.0	6方向

写真7 仮組立検査状況

で取合い、かつ、各部材長が3m以下という、極度に誤差許容が少ない構造物であった。そのため単一の部材精度はもとより、柱・梁・斜材の集結精度にも非常に厳しい要求があり、製造各社には初回製造ロットにおいて仮組立検査を行うことが要求された。

本検査(写真7)において、測定ポイントと検査項目および基準値を図12と表2に示す。

7. 工場塗装

本工事においては、各塗装工程における塗装環境の確保・塗装間隔の遵守・必要塗装膜厚の確認、また不必要な

工程1 素地調整
ブラスト処理を行い、錆を十分に除去し、清掃な金属面にする 基準：ISO-Sa2 1/2 (ISO 8501)

↓ (塗装間隔：4hr 以内)

工程2 下塗り
規格 道路橋塗装用塗料標準
塗料名 有機ジンクリッチペイント
色相 グレー
塗装方法 エアレス
標準仕様量 600 (g/m ²)
標準膜厚 75 (μm)

↓ (塗装間隔：1日～10日)

工程3 中塗り
規格 道路橋塗装用塗料標準
塗料名 エポキシ樹脂塗料下塗り
色相 グレー
塗装方法 エアレス
標準仕様量 540 (g/m ²)
標準膜厚 120 (μm)

↓ (塗装期間：1日～10日)

工程4 上塗り
規格 大日本塗料規格
塗料名 厚膜形フッ素樹脂塗料上塗り
色相 5ツヤ (C75-80B と C75-85B の中間色)
塗装方法 エアレス
標準仕様量 260 (g/m ²)
標準膜厚 55 (μm)

図13 塗装工程一般部

写真8 塗装状況写真

反転・横持ち移動の削減等、竣工以降までを考慮した品質確保を前提とした管理が要求された。十分な塗装期間を設けることを前提に製品製作工程を組み、全製品に対しての緻密な検査を行うことにより、品質要求を達成することができた。図13に本工事塗装工程(一般部)並びに塗装状況写真(写真8)を示す。

8. おわりに

東京スカイツリーの建設に、当社が携わる事が出来たこと、また無事に全製品を現場に届けられた事に感謝をしたい。計画段階から実施段階における幾つもの難問をクリア出来たのも日建設計・大林組ならびに各鉄骨製作会社のご指導とご協力のお陰であると考えている。工事関係者が一致団結して、お互いにアイデアを出し合ったことで、非常に素晴らしい生産管理手法を確立することが出来た。今回の工事で培われた生産管理手法を、今後他物件についても生かして行きたいと思う。