特集

東京スカイツリー®を支える鋼材・溶接技術

1. 全体概要

東京スカイツリーの構造計画*

小西 厚夫**, 慶伊 道夫***, 加賀美安男****, 中西 規夫**

小西 厚夫

慶伊 道夫

加賀美安男

中西 規夫

Structural Design of the Tokyo Skytree*

by KONISHI Atsuo**, KEI Michio***, KAGAMI Yasuo**** and NAKANISHI Norio**

キーワード

構造計画, 東京スカイツリー, 風荷重, 地震荷重, 架構計画, 基礎計画, 心柱制振

1. 構造計画

1.1 構造種別の選択

本敷地は、東西方向は約 400 m、南北方向は約 100 m の細長い敷地であり、高さ 600 m を超えるタワー（東京スカイツリー・634 m）を建設する上で特に南北方向の敷地幅

はかなり大きな制約となることが予想された。

また、図 5 に示す土質柱状図からもわかるように地表は約 30 m にわたり沖積層が堆積する地盤であり、杭を用いて構造物を支持することが予想された。構造計画上の大きな選択肢として鉄骨造か鉄筋コンクリート造かといった構造種別の判断があるが、この本タワーでは基本的には鉄骨造を選択している。その理由を以下に示す。

・意匠上、鉄骨造の方が開放的な外観を造り安い。

全体配置図

*原稿受付 平成25年3月26日

** 株式会社 日建設計 NIKKEN SEKKEI LTD
*** 元・株式会社・日建設計（現・エードス株式会社） Advanced Design Operation System Co. Ltd. (Former Employee of NIKKEN SEKKEI LTD)

****正 員 株式会社 日建設計 Member, NIKKEN SEKKEI LTD

- ・杭基礎が前提となることから、構造物を鉄筋コンクリートに比較して軽量化できる鉄骨造の方が有利である。
- ・高さ/幅比（スペクトル比）が大きなタワーとならざるを得ないことから、より軽量化が可能な鉄骨造の方が地震時の転倒モーメントを小さくできる。
- ・風荷重による転倒モーメントに対して、鉄骨造の方が受風面積を小さくできることから有利である。
- ・鉄筋コンクリートの場合、ひび割れに関連する問題が生じる。

本計画では構造物中央には心柱と呼ばれる直径8mの鉄筋コンクリート造円筒を配置し、中に非常階段を内蔵するとともにこの構造物を錘として利用した制振システムを採用設計した。その意味では本タワーはハイブリッド構造物であり、S、RCの特徴を生かした構造物といえる。なお心柱は、プレストレスト構造としひび割れにも対応している。

1.2 架構形式の選択

本タワーは、鋼管トラス構造を採用している。その理由としては、「そり」と「むくり」をデザインコンセプトとしたことにより、本タワーの各部材が複雑な3次元パターンで連結されることが上げられる。そのため形状的な方向性がなく接合が容易な円形鋼管を使用するとともに、その接合部は分岐継手を採用している。今回採用した鋼管は、強度、サイズともに大きく、高力ボルトによる接合がむずかしく溶接にたよらざるを得ないことや、外観上ガセットプレート等が必要ないために外観をすっきりみせることが可能で、且つ防錆上の弱点が少ないことがその採用理由である。

1.3 基礎形式の選択

今回の敷地の地層構成から杭基礎が前提となった。その中で、特に地震時及び風荷重時に作用する押し込み力及び引き抜き力に対処するため、脚部の三角形平面の頂点の部分には連続地中壁杭を配置した。その先端位置は、引き抜き対策から構造物全体の支持層であるGL-35m程度の段丘礫層より更に深いGL-50m程度とし、連壁杭のなかにはH形鋼を内蔵させている。さらに、連続地中壁杭先端部には、引き抜き抵抗用として節がもうけられた工法を採用した（図6）。

2. 設計用荷重と設計目標

2.1 風荷重

(1) 自然風の高さ方向の特性に対する設定

建物南方約8kmに東京湾が存在することや、本タワーが634mと高いことから、周辺街区の地表面粗度を反映した地表面境界層が十分発達し得ないことを考慮し、粗度区分Ⅱを採用した。境界層高さは、計画構造物より上に存在すると設定し、平均風速のプロファイルは「建築物荷重指針・同解説」（日本建築学会2004年版）の採用すべき乗則分布が300m以上の高さに対しても外挿できるとして平均風速を計算した。風のスケール、風の乱れの高さ方向分布は、平均風速のプロファイルと同様、300m以上の高さに対しても同指針が外挿できるものとした。ただし、風の乱れは最低10%として下限を設けた（写真1）。

図1 平面概要図

写真1 ラジオゾンデによる高層風の観測

表1 想定暴風の平均風速

暴風の呼称	再現期間	基本風速相当の平均風速
レベル1暴風	100年	36.0m/s
レベル2暴風	1300年	42.5m/s
レベル3暴風	2000年	44.7m/s

(2) 設計上想定する暴風と設計用風荷重の設定

各レベルの暴風により計画建物に作用する風力は、レベル2暴風に関して耐風設計フローの手順(図2)により等価静的風荷重を求め、レベル1及びレベル3に関しては基本風速の2乗に比例するとして求めた(表1)。

2.2 地震荷重

(1) 地震時構造安全性の検討方針

本タワーが634mと高いため高次モードや部材の軸伸縮の影響が大きく、通常の超高層建築物の設計で行われているような「応答層せん断力の包絡荷重」により静的な設計用地震荷重を定義することが困難である。このため本タワーの地震時における構造安全性は、表2に示す採用地震波に対する部材レベルでの時刻歴応答解析を実施し、全部材について安全性を検証した。

(2) 採用地震動

計用地震動の選定に関しては、通常超高層建築物の設計で用いられる告示波、観測波以外に長周期地震や内陸型直下地震が直近でおきた場合を想定したサイト波を作成して検討を行った。図3に採用地震波の一部についてレスポンススペクトルを示す。

2.3 設計目標

本タワーの設計に関しては、表3に示すようにレベル2

図2 耐風設計フロー図 (等価静的風荷重の作成)

表2 採用地震波

入力レベル	採用地震波
レベル1地震 (稀に発生する地震動)	告示波 観測波
レベル2地震 (極めて稀に発生する地震動)	告示波 観測波 南関東地震 (M7.9…サイト波) 東海地震 (M8.0…サイト波実体波) 東海地震 (M8.0…サイト波LOVE波) 東南海地震 (M8.2…サイト波LOVE波) 南海地震 (M8.6…サイト波LOVE波)
レベル3地震	直近に震源を有する内陸直下型地震 (M6.9…サイト波)

の地震及び風荷重に対しては接合部等を除いて部材応力は弾性域内に留まるように設計した。なお、構造安全性に関する表3の設計目標以外に電波塔という用途から必要とされる構造性能があるがここでは省略する。

3. 上部構造の設計

(1) 架構計画について

中央に鉄筋コンクリート構造の円筒形の階段室(心柱)を配置し、それを取り囲む形でエレベーター等を内包する鉄骨造のコア(中塔・内塔)が配置されている。その外側は鋼管によるトラス構造で形成されており、その平面形は足元の正三角形(1辺約68m)から高さ約300mで円(正確には正24角形)に変化する(図1)。

足元の正三角形の隅の部分には、4本の主材からなる鼎トラスとよばれるトラスを配置するとともに、水平構面(リングトラス)でこのトラスを連結する構造となっている。水平構面は12.5mから5mごとに各層に配置されるとともに、中塔とは2層ごとに連結されて構造物としての一体性を確保している(図4)。水平構面を形成する部材は主に冷間成形角形鋼管で接合部には耐候性高力ボルトを使用している。

地震力及び風荷重に対しては主に鼎トラス及び外周架構(外塔)で抵抗する。また、固有値解析により全体屈曲の可能性を検討し安全であることを確認している。さらに各部材の渦励振による影響も考慮して部材を決定して

図3 レスポンススペクトル

表3 設計目標

入力レベル	損傷レベル
レベル1地震(稀に発生する地震動) レベル1暴風(再現期間100年)	無損傷
レベル2地震(極めて稀に発生する地震動) レベル2暴風(再現期間1300年)	ほぼ無損傷(部材は弾性)
レベル3地震 レベル3暴風(再現期間2000年)	倒壊しない

いる。

(2) 使用鋼材および分岐継手の設計

使用鋼材及び分岐継手設計方法については、「3. 集まれエンジニア!「東京スカイツリーにおける最新の技術と材料」」で述べる。

4. 基礎の設計

4.1 敷地の地盤概要

本タワーの計画地は、隅田川と荒川に囲まれた東京低地に位置しており、表層地形は砂州～後背湿地に分類されるが、現在、計画地周辺の表層部は広く人工的な埋土地形と

図4 架構の概要

図5 地質推定断面図

なっている。計画地付近の地質は江戸川層や舎人層を含む上総層群を基盤とし、洪積層の東京礫層・東京層・埋没段丘礫層・埋没ローム層、さらに地表近くは沖積層の有楽町層で構成される。有楽町層の層厚は25～30m程度であり、上部は主として厚さ5m程度の緩い砂質土層を主体とし、下部は粘性土を主体とする。

(1) 地盤調査概要

今回実施した地盤調査を以下に示す。

- ・ボーリング調査
- ・現場透水試験
- ・孔内水平載荷試験
- ・室内土質試験
- ・PS検層
- ・常時微動測定
- ・微動アレイ探査

図5にボーリング調査から得られた土質柱状図の一部を示す。

①地盤の卓越周期

1秒以上の長周期で7.0～9.0秒、3.0～4.0秒、1.0秒未満で0.4～0.5秒、0.6～0.7秒に地盤の卓越周期が観測されている。

②微動アレイ探査結果

地震基盤は($v_s \geq 3000$ m/sec)の深度は約2.5kmと推定された。

(2) 杭の設計

本タワーの杭は、GL-35m以深の堅固な洪積砂礫層を支持層とし、高い耐力と剛性を有するRC連続地中壁杭と場所打ち杭からなる。特に足元部分は図6に示すような通常

図6 連続地中壁杭 (RC+SRC)

図7 基礎部の構造

のRC連続地中壁杭と鼎トラス直下に配置したSRC連続地中壁杭から形成される。SRC連続地中壁は、節付連続地中壁杭として大きな引き抜き耐力をもたせ、先端位置をGL-50mとしている。さらに、壁杭内部にはH形鋼を配置して壁体自体の引張耐力を大きくしている。節付連続地中壁については、本敷地における実大実験を実施して引き抜き耐力を確認した。

(3) 基礎の設計

基礎部（地下部）は、上部鉄骨造から大きな曲げとせん断力が作用することから、その平面形状に合わせて鋼板壁を内臓した鉄骨鉄筋コンクリート壁を配置している（図7）。鋼板壁の板厚は55mm～22mmとし鉄筋コンクリートの壁厚は2700mm及び1900mmとした。

5. 心柱制振の概要

本タワーでは、中央部に配置した心柱とその外側の鉄骨造部分を構造的に切り離し、別々の挙動をさせることで、それぞれの部分に作用する地震力を互いに打ち消すねらいのあるシステムを採用し、地震時の応答低減を行っている。原理的には心柱重量（質量）を利用した質量付加機構による制振システムともいえるが、非常階段を内臓する心柱は単なる錘ではないことから、従来の質量付加機構とは異なっている。この制振システムを心柱制振と名付けている。心柱という名称は日本の伝統建築である五重塔からとっており、その柱が周囲の屋根を支持する柱梁架構からきり離されていることに由来している。

心柱と外周架構の間のクリアランスは約1m程度で、図8に示すように高さ125m以下は鋼材により心柱とその外側の部分を一体化し、高さ125m以上ではオイルダンパーを設けることにより心柱の変位を制御するとともにタワー全体に減衰性能を付加している。この心柱制振により、大地震時に最大で40%程度の応答せん断力を低減した。

なお、再現期間500年のような強風に対しては、外周鉄

図8 心柱制振の概要

転載：溶接学会シンポジウム資料「東京スカイツリーの構造計画」
2011.2. より

骨造部の変位により心柱とのクリアランスが不足する場合が生じることから通常時は高さ約260mの部分にストッパーを設けて対応している。従って風に対しては、高さ260m以上の心柱（高さ約100m）のゆれによる制振効果を期待しており、2000年の再現期間を有する強風に対してもこのストッパーがはずれることはないが、大地震の時にはこのストッパーがはずれ上記の制振効果を発揮するように制御している。ストッパーの最大保持力は1350kNで、6基がオイルダンパーと同じ平面配置で設置されている。