

東京スカイツリーの耐震・耐風への備え

—継続時間の長い強風による疲労損傷がテーマ—

こにし あつ お
小西 厚夫

(株)日建設計 エンジニアリング部門 構造設計グループ

1 はじめに

東京都墨田区にある東京スカイツリー(写真1:以下「本タワー」という)は、2012年に高さ634mの鉄塔形式のタワーとして完成した。電波塔と観光タワーという主たる用途に加え、その高さや規模から地域防災の拠点としても期待されるなど、公共性が高く、このタワーの設計に際しては建築基準法の設定を上回る極めて高い構造性能を確保することが求められた。一方、日本は世界でも強風や地震といった構造物の設計対象となる自然外乱が極めて厳しい。本稿では、日本で初めてとなったこの600m級構造物の設計プロセスとともに、長く利用できる「鉄塔」としての設計及びメンテナンステーマについて紹介する。



写真1 東京スカイツリー

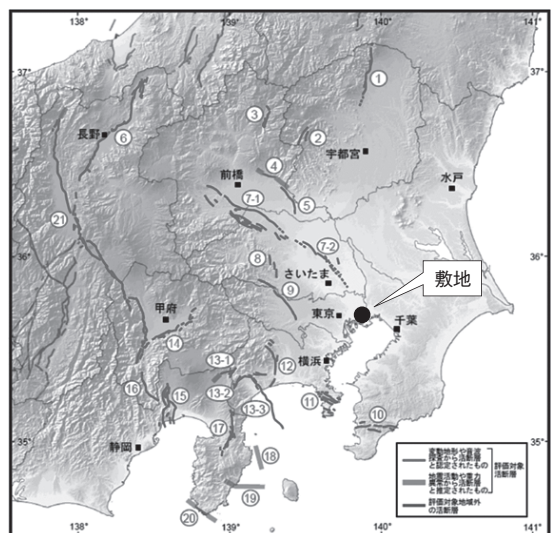
2 タワーの構造計画

1) 性能設計

その公共性に鑑み、一般的な超高層建築物が想定する外乱に対しては「ほぼ無損傷」、設計余力の確認である「建築基準法の想定しない外乱(L3:想定外外乱)」として「再現期間2000年の強風」

とM6.9の伏在直下断層の活動を想定した「伏在直下地震波」のいずれに対しても「倒壊・崩壊しない」こととした。この「伏在直下地震」とは、本タワーの設計用に国内で初めて設定した人工地震波である。一般に、地表の改変が著しい地域では活断層は発見されにくく、都心には既知の内陸型活断層が少ない(図1)。そこで、計画敷地内における古い地層の連続性からタワー直下に活断層のないことを立証した上で、タワー近傍に「未知の活断層(伏在断層)」を想定することとした。

このほかに、デジタル放送の送信周波数の精度を確保するための「日常風に対する変位速度規定」や、継続時間の長い強風に曝される鉄塔独自の特性に鑑みた「耐疲労設計法」(3節に詳述)など、国内初となるクライテリアの設定や設計手法の開発も行った。



出所: 政府地震調査研究推進本部 HP を基に筆者図示

図1 既知の内陸型活断層に示す本タワー配置図

2) 耐風設計

耐風設計に取り組むにあたり、まず高度600mまでに吹く風の「強さ」や「乱れ」といった性状を把握する必要があった。構造が強風により決定される本タワーにとって、このことは極めて重要な事項であった。

高層風の観測には、当初、ドップラーソーダー(写真2左：音波による上空風速計)とラジオゾンデ(写真2右：GPSを搭載した観測気球)による観測計画を検討した。しかし、十分な高さまで観測できるドップラーソーダーは当時まだ音の大きな機材しかなく、街中で使用できなかつたため、ラジオゾンデによる観測のみを実施した。約50台のGPSゾンデによる観測を平均化した結果、風速は地上約1,000~1,300m 辺りまで徐々に高くなるのが分かったが、ドップラーソーダーによる連続的な観測ができなかつたことから風の乱流構造は既往研究を外挿して決定した。

本タワーの耐風設計ではまず、観測結果などで得られた計画地の強風を風洞で再現した上で、風力、振動などの実験を行い、タワーの風応答性状を直接検証した(物理的シミュレーション)。次に、この結果から模擬風力波を作成し、風応答の時刻歴解析を行った(論理的シミュレーション)。時刻歴応答解析により得られる詳細な情報には、部材各部の応力だけでなく加速度・速度などタワー各部の風応答値が含まれるため、居住性能、通信性能、制振効果、耐疲労性能、メンテナンス性など、様々な検証を高い精度で行うことができた。



写真2 ドップラーソーダー(左)、GPSゾンデ(右)

3) 耐震設計

600m以上の高さで塔状比9というプロポーシオンから、本タワーの固有周期は10秒程度と、国内では経験のない長い周期になることが基本構想段階で判明した。このことは、関東平野内における入力地震動の長周期成分の卓越、いわゆる長周期地震動問題に正面から向き合うことを意味するため、以下の2点を耐震設計の主眼とした。

- ・入力地震動を正確に捉える【大深度調査】
- ・上部構造への減衰力付加【揺れにくい構造】

入力地震動を正確に捉えるためには、関東平野では約3.0kmの深層地盤の調査が必要であるが、直接掘削して調査することはほぼできない。幸い、関東一円では、大規模な反射法などによる公的な調査結果が公開されていたこと(例：図2)に加え、基本計画に着手した頃には常時微動の多点同時観測による簡易な微動アレイ探査が民間でも採用可能であったため、敷地を中心に実施した。

また、鉄塔状の構造物は、内外装がないことなどなどから揺れを小さくする減衰が一般の建築物より小さいことが知られている。そこで、規模が大きく効果の高い制振機構として新しく開発したのが、「心柱制振機構」(4節に詳述)である。

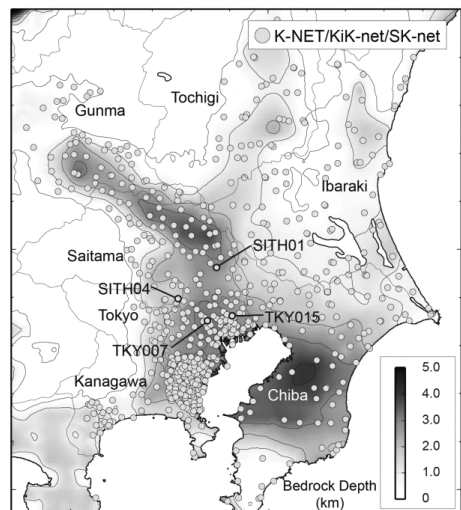


図2 関東平野の地震基盤深度¹⁾

3 長く使えるタワーを目指して

1) 高層鉄塔の耐疲労設計とメンテナンス

継続時間の長い風で断面が決定される高層の鉄塔にとって、溶接部の耐疲労設計は、防錆仕様とともにその耐久性を決める。疲労による損傷はもちろん主管部でも進行するが、形状的に応力集中が生じやすく、合格欠陥などがあるため溶接部で最も進行しやすい。このため、本タワーにおける耐疲労設計の主な対象は溶接部である。

一方、長期にわたる繰返し応力による亀裂の進展は避けがたい上、塗膜下の初期亀裂は発見しにくい。また、本タワーの塗装は、橋梁や船舶などの塗装技術として日本で培われた厚塗の重防食塗装であるが、複雑な部位は施工時の膜厚制御が難しく、防錆性能は劣化しやすい。そこで、疲労損傷と塗装の劣化がともに生じやすい外周部の分岐継手部(図3)を中心にメンテ歩廊を装備し、毎年、紫外線などによる膜厚減少の計測、目視調査とタッチアップによる維持管理を行っている。

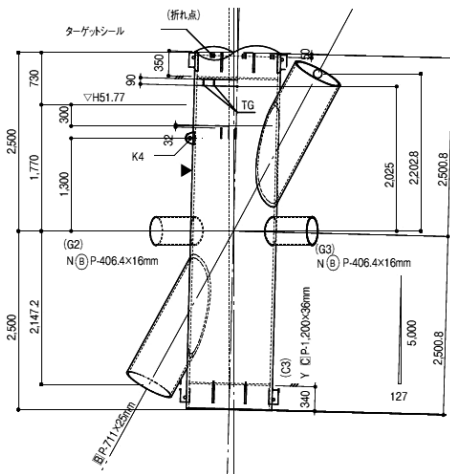


図3 代表的な分岐継手部

2) 新しい耐疲労設計法の開発

長い間に蓄積される損傷であるため、疲労による損傷を評価するためには、対象となる振動現象

の継続時間、応力振幅、回数などを定量化する必要がある。ただし、異なる振動、例えば強風と地震による損傷総量が耐用期間中にどの程度累積するかを想定することは難しく、これまでは特定の振動現象のみを対象として耐疲労設計が行われてきた。また厄介なことに、本タワーでは強風と地震による影響が拮抗していることから、耐疲労設計を行うためには両外乱の影響を同じ尺度で加算して検証する必要があった。そこで設計では、本タワーのために強風と地震を総じて考慮する新しい耐疲労検証手法を開発することとした²⁾。

3) 耐疲労設計のための風応答の定量化

耐疲労設計のための風応答としては、「100年間に遭遇する風」に加え、「数事例分の再現期間500年の強風」を考慮することとした。100年間に遭遇する風とは、計画地における風の観測結果に基づき作成した100年分の累積分布関数により定義する風であるが、その作用時間は風速レンジごとの発生確率に対応しているため強風の作用時間は高々数十分しかない。そこで、総損傷に占める割合の大きな500年再現期間の強風5時間分を、100年間に遭遇する風による損傷に加算することとした。この「5時間の強風」は、代表的な室戸台風時の風速記録(図4)などを参考に評価すると、超大型台風5事例分の損傷度に相当する。

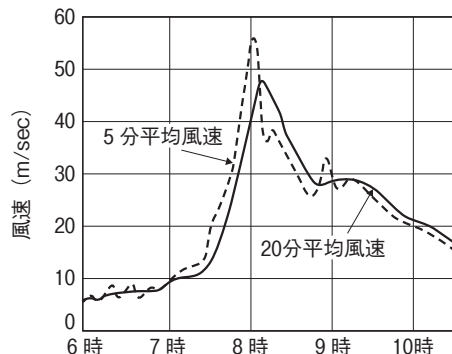


図4 室戸台風時の風速記録

4 心柱制振機構の開発(心柱型付加質量機構)

本タワーは、高層部に大きな展望台を抱えるため意外に重く、高さの割に地震と強風の応答が拮抗する特徴があった。一方、風による外力は変動のない平均成分があり、制振システムで低減できる風応答は大きくない。そこで、来客の安全と電波塔機能の確保を目標に、主に地震による応答を抑える制振システムの開発を模索した。ただし、棒状の本タワーでは既存の制振機構が機能しない。

そこで、デッドスペースである中央コアに心柱を据える制振システムのスタイルを、設計着手後3ヵ月の早い段階で発想した。ただし、実際に機能するまでには2年に及ぶ試行錯誤が必要であった。

最終的に開発した心柱は、「心柱型付加質量機構」と呼ぶもので、直径8.0m、最大厚さ60cm、高さ375mの鉄筋コンクリート造円筒形の柱が「棒状の錘」として機能する付加質量機構である(図5)。この柱を支える床は存在せず、あくまでもタワーの鉄骨塔体とは独立した制振用のデバイスであり、内部には避難階段を配している。地上125mまではタワー本体に連結した非稼働部であるが、それ以上の

部分は錘として稼働する部分で、心柱自身の応答変位をクリアランス内に留める制御を目的としたオイルダンパーで連結している。心柱の制振効果は様々な種類の地震動に対し有効で、心柱停止時を基準とすれば地震時最大50%、強

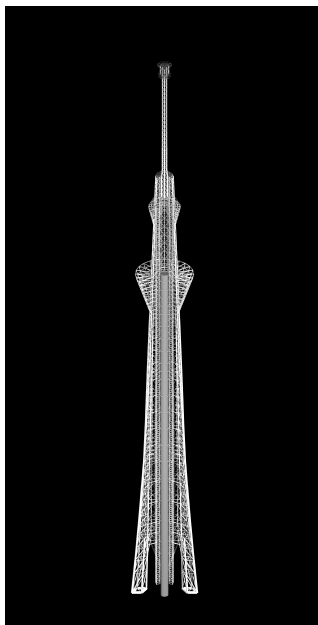


図5 心柱制振機構(カット図)

風時最大30%ある。

5 東日本大震災

本タワーの特殊性に鑑み、施工時の安全性について厚生労働省の審査が実施されることとなった。心柱制振機構による応答低減効果も完成時を対象として設計していたため、検討用外乱として50年再現期間の強風と中地震を設定した上で、10段階に分割した施工ステップごとの安全性検証が実施された。設計者としては、施工時の養生ネットによる風力増加を考慮するための風洞実験なども実施した上で、各ステップごとの架構の構造安全性を検証した。施工の立場からは、各ステップごとの仮設物に対する検証が実施され、全体として工事には十分な備えができていた。2011年3月に発生した東日本大震災における入力地震動は正にこの中地震に相当するものであり、構造体への被害はなく竣工を迎えることができた。

6 おわりに

東京スカイツリーは今年で竣工12年を迎える。筆者は、頂部 TMD(Tuned Mass Damper)や心柱基壇の積層アイソレータ、地震計などのメンテナンスに今も毎年立ち合い、その機能維持を確認している。鉄骨部材の主防錆塗装は日本で培われた信頼性の高い重防食であり、維持管理状況も良好であるが、耐用年数20年を目途として、オーバーレイによる総塗替えの準備が粛々と進められている。

(参考文献)

- 1) Kazuo Yoshimoto and Shunsuke Takemura (2014) A study on the predominant period of long-period ground motions in the Kanto Basin, Japan, *Earth, Planets and Space*, vol. 66, article number 100, pp. 236
- 2) 小西 厚夫・勝村 章・田村 幸雄(2018)「東京スカイツリーの耐疲労設計」『日本風工学会論文集』第43巻, 第1号, pp. 11-16