

東京スカイツリー®の施工技術 超高層タワーを支持する節付き壁杭

Technologies in Tokyo Sky Tree® Construction

Wall Foundation with “Nodules” to Support the World’s Tallest Tower

○佐藤真弘¹

*Masahiro Sato¹

TOKYO SKY TREE is now under construction in Sumida Ward, Tokyo. It will be the world’s tallest freestanding broadcasting tower, boasting the height of 634 m. In order to implement the unique design and structural engineering of the tower, a number of state-of-the-art technologies and expertise are employed in the construction. This report summarizes some of them, namely: “Knuckle Wall”, the wall foundation with nodule-like protrusions to support the tower’s base structure; “Lift-up Method” used for erecting the uppermost TV antenna tower; “Slipform Method”, the method used for constructing the reinforced concrete center column that will function as a mass damper for vibration control system.

1. はじめに

自立式電波塔として世界一の634mの高さとなる超高層タワー「東京スカイツリー」は、東京都墨田区において建設されている。建設地は東武鉄道業平橋駅に隣接する「押上・業平橋駅周辺地区」である。施設配置は三つの区域に分割されており、主に商業店舗に供される西街区と、敷地の中央に配置されるタワー街区、及び商業店舗とオフィスに供される東街区に分けられる^[1]（図-1）。以前は鉄道貨物ヤードとして使用されていた素敷地は、面積が約37,000m²あり東武伊勢崎線と北十間川に挟まれた約100m×400mの細長い形をしている。敷地内東側には都営地下鉄浅草線と東京メトロ半蔵門線の押上駅があり、都営浅草線は地下で敷地を斜めに横断しているなど、タワー建設としては難しい条件の場所である。

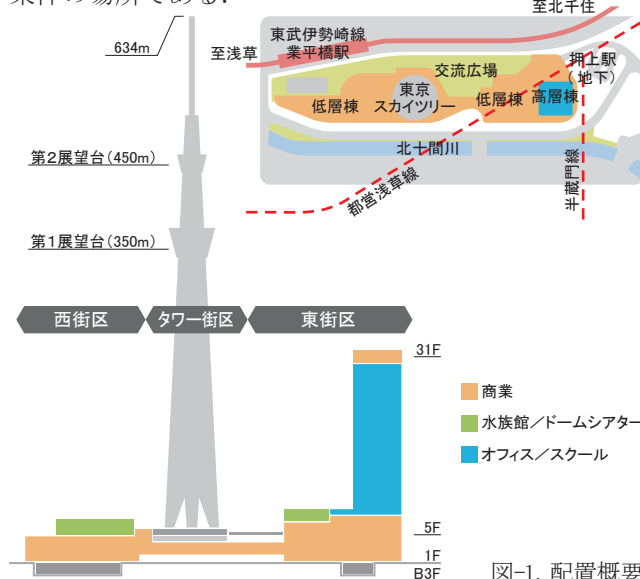


図-1. 配置概要

2. 敷地の地盤概要

タワーの建設地は東京の東側、隅田川と荒川に囲まれた沖積平野の東京低地に位置し、地盤構成は下位より順に上総層群、東京礫層・東京層・埋没段丘礫層・埋没ローム層、さらに地表近くには沖積層の有楽町層で構成されている。杭の支持層となる洪積層の東京礫層の上に有楽町層が層厚25m～30m程度堆積しており、その上部は主として厚さ5m程度の緩い砂質土層、下部は軟らかい粘性土の地盤構成である^[1]（図-2）。

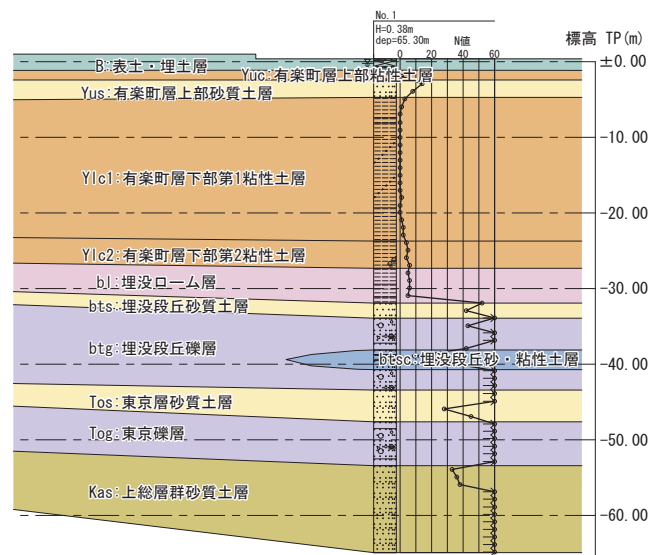


図-2. 地質推定断面図

3. 東京スカイツリーの全体計画

これまで国内で最も高い構造物であった東京タワーと比較すると、東京タワーは足元幅95mに対して高さは333m、塔状比が3.5であるのに対して、本タワーでは足元幅が東京タワーより狭い68mに対して高さが

634m、塔状比は9.3となる。塔状比が大きいということは、形状として不安定であるのに加え振動周期が長く揺れやすいことになるため、転倒防止と振動制御に工夫が不可欠である。

東京スカイツリーの構造形式は、鉄骨トラスの塔体と鉄筋コンクリート造の心柱とのハイブリッド構造である。地震力に対する揺れの特性が異なる塔体と心柱を制振ダンパーによって繋ぐことによって全体の揺れを抑える「心柱制振」を導入している。

タワーの平面形は、足元が正三角形で、上部に伸びるにつれて円へと連続的に変化するという、他に例のない形状となっている（図-3）。タワーの脚部は三本の脚で支えられ、上部に向かって平面形が徐々に丸みを帯び、高さ315mで正円となる。350mと450mの高さに展望台が計画されている。また、デジタル放送用ほかのアンテナは、トラス構造の塔体からさらに上へ突き出した「ゲイン塔」と呼ばれる部分に設置される。

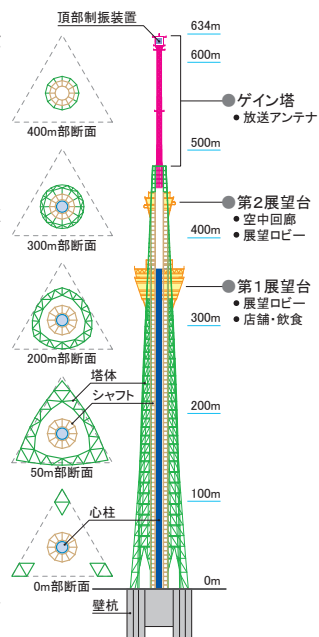


図-3. 全体計画概要

4. 東京スカイツリーの施工における最新技術

東京スカイツリーの施工においては、主に3つの最新技術が盛り込まれている。杭として大きな引抜き・押込み抵抗力を発揮する「ナックル・ウォール工法」、アンテナが設置される最上部のゲイン塔を地上で組み立ててから引上げる「リフトアップ工法」、ならびにRC造心柱の構築方法「スリップフォーム工法」である。以下に施工手順（図-4）を追いながら3つの最新技術と工法の特徴を紹介する。

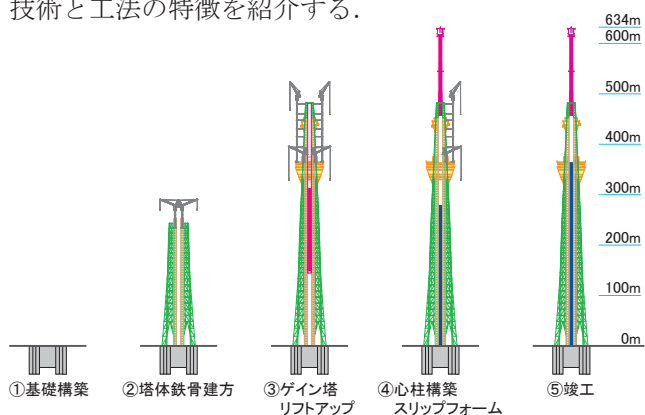


図-4. 施工手順概要

①節付き壁杭「ナックル・ウォール」による基礎構築

タワーの基礎には強風時や地震時に大きな引抜き力や押込み力が作用するため、それらに抵抗する杭技術が必要である。東京スカイツリーの杭には、鉄骨鉄筋コンクリート造地中連続壁にコブ状の節を設け、引抜き・押込みに対する抵抗力のさらなる増加を図った節付き壁杭「ナックル・ウォール」が採用されている（図-5）。

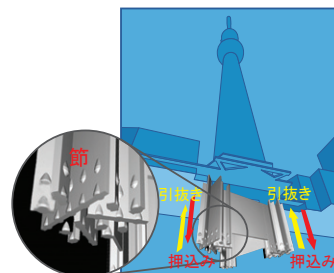


図-5. ナックル・ウォール概要

②積層工法による塔体鉄骨建方

タワーの塔体は鋼管を主としたトラス構造である。鋼管同士の接合部は継ぎ板などを使わずに直接溶接する「分岐継手」の方法をとっている。

鉄骨部材には、溶接や塗装仕上げなどの作業に必要な足場をユニット化して地上で取り付け、タワークレーンにより揚重している。495mの塔体上棟までは積層工法で鉄骨建方を行っている（写真-1、2）。



写真-1. 塔体最下部鉄骨建方



写真-2. 鉄骨（足場付）揚重

③ゲイン塔のリフトアップ

タワー最上部のゲイン塔は地上高さ500mから634mに位置する。この高さまで積層工法によって鉄骨建方を行うことは、作業の安全性のみならず、品質確保および工期の面で大きな問題がある。そこでゲイン塔は、最終的には心柱が位置することになるタワー中央部の空洞内で、地上レベルにおいて組立ててから上へ引上げるリフトアップ工法で構築する（図-6）。地上レベルでの組立は、頂上部を最初に組んで持ち上げながら順次下に鉄骨を組み上げるダルマ落としの逆の手順で行う（図-6.1）。組立が完了したゲイン塔体は、タワー中央部空洞内をワイヤーで一気に引上げる（図-6.2）。塔体の上からゲイン塔の頂部が出る位置までリフトアップした後、その位置でアンテナを取付けながら一段ずつ引上げ（図-6.3）、最終的な高さ634mに到達する。（図-6.4）

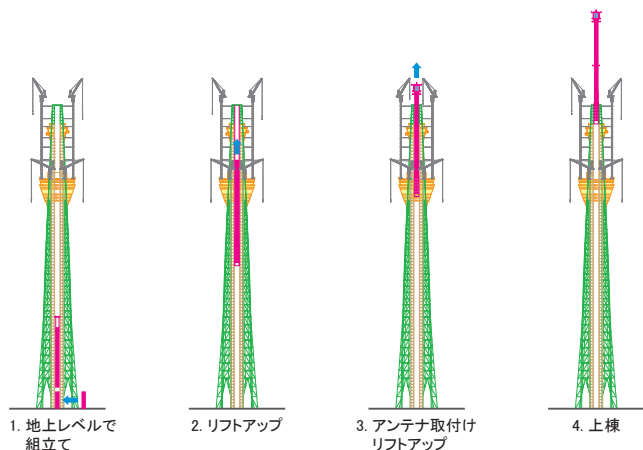


図-6. ゲインタリフトアップ手順

④スリップフォーム工法による心柱の構築

タワーシャフト中央には、円筒形で階段室となるRC造の心柱が「スリップフォーム工法」で構築される。スリップフォーム工法は、型枠を滑り上げながら連続して鉄筋を組み立てコンクリートを打設する工法で（図-7）、これまで多数の実績があるが、本工事では狭い空間内で高さ375mにもなるRC柱状体を構築するという点で他に例を見ないものとなる。スリップフォーム工法の採用により、タワーの中心部の空間でゲイン塔のリフトアップ作業を追いかけながら心柱を構築することができ、タワー全体の工期短縮が可能となっている。

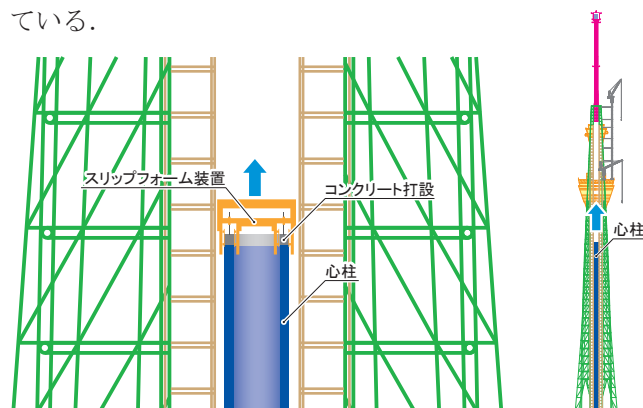


図-7. 心柱の構築（スリップフォーム工法）

5. 基礎技術として採用されたナックル・ウォール

東京スカイツリーの基礎は、正三角形をなす三本のタワー脚部の足元を繋ぐように地中壁杭を配置している。杭基礎全体で東京低地の軟らかい粘性土地盤による地震の増幅を抑えるとともに、強風時や地震時に作用する力を確実に堅固な地盤に伝えタワーを支える設計となっている。

設計初期段階では、大きな引抜き抵抗力を確保する手段として「カウンターウェイト方式」などが検討されたが、敷地の狭さや鉄道近接などの施工上問題の解

決、設計の合理性、工期・コストの面などから優位性のあるナックル・ウォールが採用されている。

この杭は、現在までに450万 m^2 の実績を有する地中連続壁工法のOWS-SOLETANCHE（オウス・ソレタンシェ）工法で施工されている。壁厚1.2m、深度GL-35m～52mで杭先端をGL-30m付近の固い頑丈な地盤（支持層）に支持および根入れさせた設計で、一辺が約70mの正三角形のそれぞれの頂点に放射状に杭が配置された平面形状になっている。三本柱の足元には、60パネル相当の杭が配置されており、それを結ぶように連続的な地中壁杭が配置され、総数77パネルで構成されている（図-8）。

三本柱の足元に配置されている「ナックル・ウォール」は、鉄筋コンクリート造（本工事では鉄骨鉄筋コンクリート造）の地中壁杭の側面にコブ状の節を付けた工法である（図-9）。この節に支持地盤での引抜き・押込み抵抗力を持たせることで効率的な設計が可能となる。

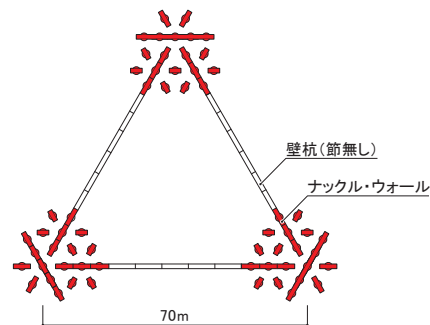


図-8. 基礎杭平面図

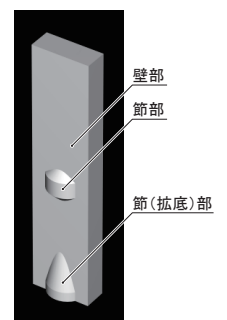


図-9. ナックル・ウォール

基礎の設計をより確かなものにするため、原位置での実物実大による40,000kNの引抜き試験を行い、引抜き抵抗力およびナックル・ウォール内に鉄骨を入れたSRC地中壁杭と上部構造の鉄骨造との連続性などを確認した^{[2][3]}（写真-3）。また、ナックル・ウォールの節部の引抜きおよび押込み抵抗力的調査も同時に試験し、良好な結果を得ている。（図-10）



写真-3. ナックル・ウォール実物実大載荷試験

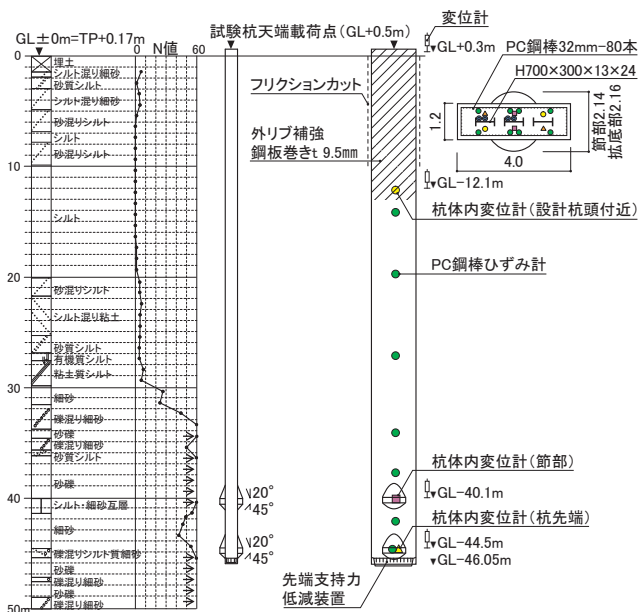


図-10. 地盤およびナックル・ウォール実物実大載荷試験杭概要

地中壁杭工事の掘削機は、当社のバケット式掘削機である「スーパーケー掘削機」、水平多軸式掘削機である「ハイドロフレーズ掘削機」および節部施工専用の「節専用掘削機」により施工している^[4]（写真-4）。

掘削は、上部の東京低地の軟らかい粘性土地盤をスーパーケー掘削機にて、その下部の固い頑丈な地盤をハイドロフレーズ掘削機にて掘削している。掘削は溝壁崩落を防止するため安定液を満たした状態で行い、その後節部専用掘削機により所定の深度の壁面を掘削してコブ状の節を設けている。

掘削作業と並行して、敷地内の鉄筋籠組立台にて全長約40mの鉄筋籠の組立を行っており、特に三本脚部の足元の鉄筋籠は鉄骨を内蔵したSRC鉄筋籠である（写真-5）。掘削完了後この鉄筋籠を掘削溝に建込むが、杭天端が作業路盤より約10m下がった位置になるため、精度確保の目的でSRC鉄筋籠上部に鉄筋籠高精度建込み装置を取り付けた難易度の高い施工を行っている。その後トレミー管によるコンクリート打設を行い、1パネルの施工が完了する。



写真-4. 杭施工状況



写真-5. SRC鉄筋籠

タワー脚部の地中壁杭は、地震時などでの水平力を伝達するため、パネル間を繋げる必要がある。地中壁杭の構造ジョイントは施工エリア・施工時間に大きく影響するため、効率的かつ簡易に地中壁杭の水平せん断力を伝達できる「CWSジョイント工法」にて結合している（写真-6）。



写真-6. CWSジョイント工法施工状況およびジョイント波形鋼板

東京スカイツリーの基礎の技術は、実物実大杭の載荷試験での設計面・施工面の良好な結果を受けて、ナックル・ウォール、SRC地中壁杭、CWSジョイントなど高機能な独自技術の組み合わせにより、他に類を見ない高さの基礎の施工を完了させている^[5]。

5. 今後の展望

東京スカイツリーの工事は、基礎工事を2008年12月に完了し、2010年7月に第一展望台に到達した。現在、ゲイン塔の地上での組立を完了しリフトアップの作業が進行中で、RC造心柱のスリップフォーム工法の施工に着手した段階である。

今後は、第二展望台の施工、ゲイン塔の最終高さへの到達と、未だ先人が経験したことのない高さでの工事を経て、2011年末の竣工に向けて工事が進んでいる。

6. 参考文献

- [1] 慶井・小西・加賀美・渡辺・小西・江坂：東京スカイツリーの構造概要，日本鋼構造協会機関誌 71，pp. 12-17，2009.
- [2] 小西：各論 場所打ちコンクリート杭底杭による基礎設計と課題，基礎工，pp. 16-18，2009.
- [3] 須藤・渡邊・横山・鈴木（剛）・鈴木（直）・関他：超高層タワーを支持する節付き壁杭の引抜き試験および押込み試験，日本建築学会大会，2009.
- [4] 須藤・清・関他：場所打ち節付き杭の鉛直交番載荷試験，日本建築学会大会，pp. 579-584，2005.
- [5] 横山・鈴木・伊東：新しい東京のシンボル・東京スカイツリーを支える連続地中壁杭，セメント・コンクリート752，pp. 9-13，2009.