東京スカイツリー®「高さ世界一への挑戦」
－株式会社大林組による特別講演より－

職業能力開発総合大学校　小平キャンパス　西澤　秀喜

1. はじめに

平成24年３月３日，第16回ポリテクビジョンin東京（職業大東京校）において，株式会社大林組・建築本部プロポーザル部の高木浩志課長にお願いして，表題の特別講演をしていただいた（写真１）。

本稿は，世界一を実現するための技術開発や，これまでに経験したことのない高所での工事管理技術などを中心に，講演要旨を取りまとめたものである。

2. 工事概要（タワー）

名　　称：東京スカイツリー
所　在　地：東京都墨田区押上一丁目
敷 地 面 積：約36,900㎡（但し，タワー＋東西街区）
高　　さ：634m
施 設 内 容：展望施設，放送施設等
構　　造：鉄骨造，鉄骨鉄筋コンクリート造，鉄筋コンクリート造
基 礎 工 法：場所打杭，地中連続壁杭
着　　工：2008年７月
竣　　工：2012年２月
事 業 主 体：東武鉄道株式会社・東武タワースカイツリー株式会社
設計・監理：株式会社日建設計
施　工　者：株式会社大林組

写真１　工事中の全景

3. 計画の概要

東京スカイツリーの敷地は，北側に東武伊勢崎線の高架の鉄道，南は北十間川という細い川に挟まれ，非常に細長い形をしている。南北方向が100mほどしかなく，東西は400mほどある，面積3.7ヘクタールの敷地である。以前は東武鉄道の貨物ヤードとして使われていた（図１）。

地下には都営浅草線と，東京メトロ半蔵門線の２本の地下鉄が敷地を横断しており，押上駅（地下）が敷地の東側に位置している。

細長い敷地のために工事が難しいことに加え，伊勢崎線と２本の地下鉄も通っており，安全性の確保が絶対条件となった。

施設全体の名称は「東京スカイツリータウン®」で，中心のタワーの足元には商業・オフィス・文化施設・プラネタリウム・水族館等が入る。

工事は，タワー・東街区・西街区と大きく３つに分割して行われた。大林組は中心のタワーを単独で，東街区の地上31階／地下３階建をJVで施工した。ちなみに西街区の地上７階／地下２階建は，大成建設を主体としたJVで行われた。

東京スカイツリーを世界のタワーと比較すると，エッフェル塔や東京タワーは鉄骨造であるが，これより高いタワーはベルリン・上海・モスクワ・トロントなどにある。これらは300～500m級で，鉄筋コンクリート造が主流となった。コスト的には有利だが，長期間にわたって雨風や落雷にさらされると，表面が劣化してひび割れるとの指摘がある。

こうした事情を踏まえて，東京スカイツリーは中心部が鉄筋コンクリート造，外側の骨格を鉄骨トラス構造とした，ハイブリット構造である（図２）。

中国の広州タワーは2009年末に竣工したが，高さ600mである。東京スカイツリーと同時期に工事が行われたが，若干遅れてスタートした東京スカイツリーは，世界一の高さを誇りたいとの想いから，後に「武蔵の国」にちなんで634mと発表した。

ほかのタワーが建っている場所は大きな地震がほとんどないが，日本は地震大国であり台風も毎年襲来する。東京は高いタワーを造るには，大変条件の厳しい場所である。これらを克服するためには，さ

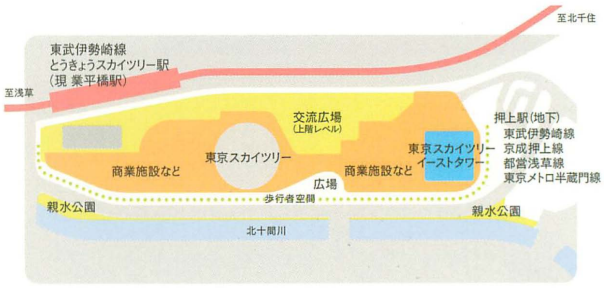

図１　敷地と建物配置

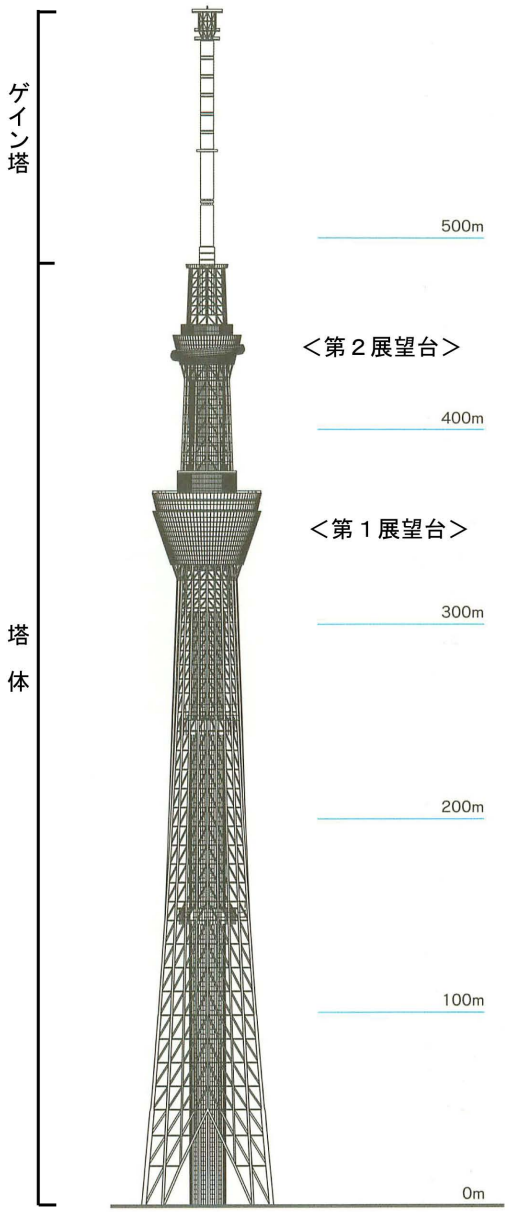

図２　立面

まざまな技術的難題を解決する必要があった。したがって，「東京スカイツリー」は高さが世界一というだけでなく，特別なプロジェクトであった。

4. 設計について

設計・監理は株式会社日建設計である。大林組の担当ではないが，スカイツリーを語るうえでデザインや構造も避けられないので，知り得る範囲で概略を説明する。

設計のスタートに当たって，事業主から『時空を超えたランドスケープ』と，『600mを超えたい』という２つが要望されたと聞いている。

こうした要望に応えつつ，「日本古来の技と最新技術に支えられた新しい街のシンボル」を，「強く，しなやかに，美しく」をキーワードとして設計が進められた。

東京スカイツリーの断面形状は足元が正三角形で，上に伸びるにつれて滑らかに円形に変化していく，世界に類を見ない形態となっている（図３）。

立体的に見ると，足元の三角形の頂点から伸びる稜線がわずかに反った形であり，この曲線は日本刀のしなやかさや鋭さ，あるいは城の石垣の力強さを感じさせる。これとは反対に，中間部のふっくらとしたところは“むくり”と言い，寺院や神社の柱を連想させる。このように全体のフォルムは，日本古来の美意識によって構成されている。

また，スカイツリーは見る方向によって姿が異なる。“反り”と“むくり”によって左右非対称に見え，天空に伸びるしなやかでシャープなシルエットとなっている。これは日本の伝統的な美しさと，未来へ向かう立ち姿がデザインに込められている。

スカイツリーには展望台が２つある。高さ350mの第１展望台は「東京スカイツリー天望デッキ」といい，展望ゾーンは３階建てで，レストランもある。地上からは分速約600mのエレベーターにより約50秒で到着する。

さらに上の第２展望台（高さ450m）は「東京スカイツリー天望回廊」といい，高さ445mでエレベーターを降り，ガラス張りでスパイラル状の緩やかなスロープを周って到着する仕組みになっている。

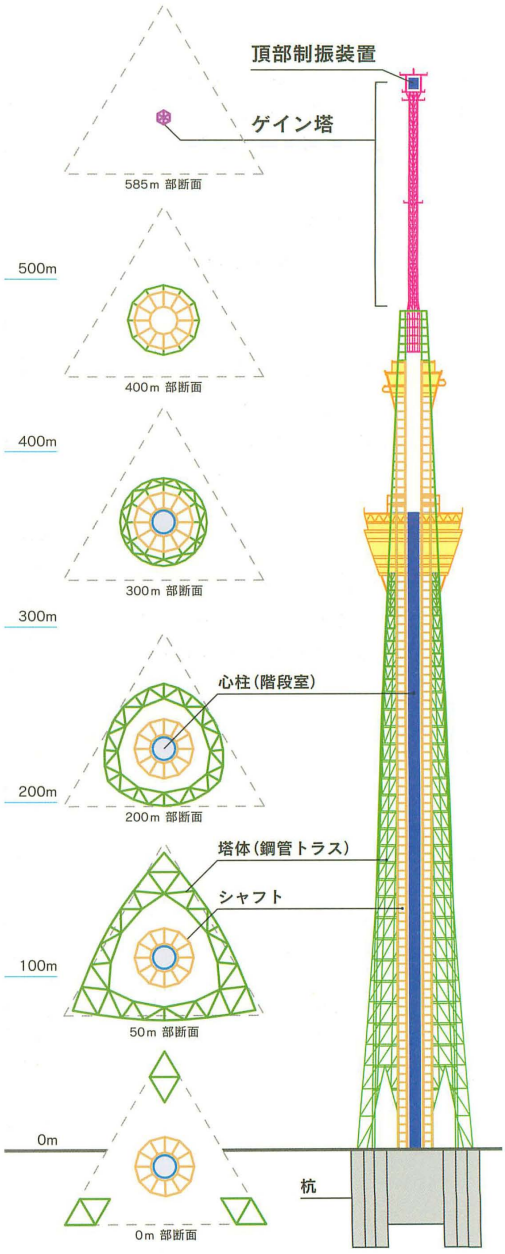

図３　断面の変化

夜はLEDによってライトアップされるが，２種類のライトアップが計画され，一日おきに変わる。１つ目は『粋』というテーマで，隅田川の水をモチーフにした淡いブルーにライトアップさる。２つ目は『雅』というテーマで，江戸の情緒を表現するように，江戸紫と金箔のきらめきを表現したデザインとなっている。照明デザインはシリウスライティングオフィスの戸恒浩人氏によるものである。

5. 構造上の特徴について

美しい立ち姿を実現するためには，構造上の難題を克服する必要があった。構造的に見ると，スカイツリーの特徴は「細長く高い」ことである。

東京タワーは足元の幅が95mで，高さが333mである。この幅と高さの比率をアスペクト比といい，東京タワーのアスペクト比は１対3.5となっている。

一方，東京スカイツリーは足元の幅が68mしかなく，高さは634mであるから，アスペクト比は１対9.3となる。東京タワーに比べてかなり細長いため，揺れやすく倒れやすいことになり，しっかりと自立するための工夫が必要となる。

地震や強風によって大きな横向きの力が加わると，全体が巨大なテコのようになり，一方の脚部に引抜き力が，もう一方の脚部には押込みの強い力が加わる。これらに対抗するためには，基礎を相当に強化する必要がある。

そこで，大林組が開発したナックルウォール（節付きの壁杭）を採用した。これは，鉄筋コンクリートの壁を地中に構築し，壁状の杭として使うもの。さらに節のような突起を設けて，引抜き力や押込み力に抵抗する。３ヵ所の節付き壁杭は，さらに地中の壁によって繋がれ，全体が三角形となっている。これにより，地震時の水平力にも抵抗できる。ナックルウォールの深さは，一番深いところで地下53mに達する。敷地の地盤は，地下40m以深が強固な岩盤であり，そこに10m以上埋め込んでスカイツリーを堅固に支えている。

東京スカイツリーの上部構造は鉄骨造が中心であるが，この壁杭の中にも鉄骨が埋め込まれており，それが上部の鉄骨と直結されている。したがって，鉄骨の長さは634m＋50mとなる。

次に，「揺れやすさ」に対する対策については，日本古来の知恵を生かしている。日本のタワーの祖先は五重塔だが，古いものは千年以上にわたり地震に耐えてきた。火事で消失したものはあっても，地震で倒壊した記録はないとのこと。この五重塔の耐震性の秘密は，科学的に完全には解明されていないようだが，塔全体を縦に貫く１本の柱（心柱）があり，これが他の部材と接触しておらず，独立した心柱が塔全体の揺れを抑えているといわれている。

スカイツリーはこの仕組みを現代的に解釈して，中心に鉄筋コンクリート造の心柱を構築し，外側に鉄骨トラス構造の骨格を組み合わせてハイブリット構造としている。この２つの構造は地震に対して特性が異なり，これらをオイルダンパーで繋ぐことにより，タワー全体の揺れを低減する仕組みとなっている。これを「心柱制振」と呼び，世界でも初のシステムである（図４）。なお，心柱内部には避難階段が設置されている。

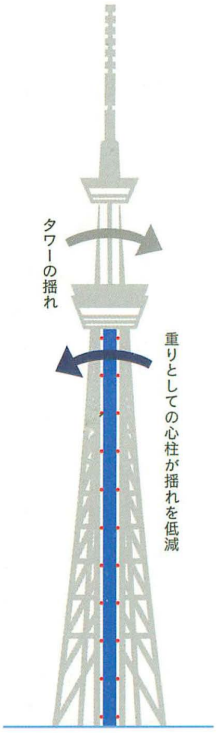

図４　心柱制振

最上部の一番細い塔体は，地上デジタル放送用のアンテナを取り付ける部分で「ゲイン塔」と呼ぶ。最も揺れやすく，そのままでは電波の送信に支障が起こるため，頂部にも別の制振装置を設置している。

6. 建設工事について

高さ634mは前人未到であり，施工計画に当たってはさまざまな問題を事前に明らかにして，解決していく必要があった。

タワークレーンについては，既存のものでは最大でも300mまでしか揚重できない。そこで特別仕様の最新機種を開発し，揚重範囲を420mまで増強した。また，狭いスペースでも３機設置して作業をスピーディに進められるようにするため，コンパクト化を図った。さらに，お互いがぶつからないように統合管理システムも搭載した。風や地震についても検討し対策を施した。

次に，高さ420m以上をどうやって造るのか，最

新のタワークレーンでも地上から420mが揚重の限界になる。そこで，400mまでは３機のクレーンで組立てていき，その後は第１展望台の屋上（375m）にクレーンを移動し，さらに１機を追加して計４機にする。４機のうちの２機は上へと伸ばしていき，他の２機で地上から資材を第１展望台屋上まで揚重してそこで中継することとした。このように，２機ずつペアを組んで揚重作業を行い，420m以上を建てることとした。500m以上の揚重能力を持つクレーンを開発する案もあったが，効率・安全・経済性などからリレー方式が最善であると判断した。

高所への揚重作業における最大の問題は，風の影響である。揚重には長い時間がかかり，風の影響を受けやすい形状の荷物もある。また，地表と上空では風の状況が異なり，タワーに当たった風が回り込むなど，風向や風速が急に変化することもある。

一番危険な状況は，揚重の途中で荷物が回転しはじめる現象である。そこで，タワーの周りの風をコンピュータ・シミュレーションにより解析し，荷物に対する風の影響も解析した。その結果をもとに，荷物の回転制御装置を開発した。人工衛星の姿勢を制御するのにも使用されるジャイロ効果を応用した装置である。装置内に重い円盤型のフライホイールを内蔵し，これを高速回転させると自転軸の方向を保とうとする働きが生じる。これによって荷物を安定させる。さらに，フライホイールの回転軸を傾けることで縦軸方向に回転する力を発生させ，急な風に対しても制御できる。

この装置は風への対策だけでなく，吊り上げた荷物の向きを制御して取り付け作業をしやすくすることにも使用した。微妙な角度の調整も可能で，狭い処でも部材をぴたりと据え付けることができた。

高さが大きいことは，垂直方向の精度管理がたいへん重要となる。一般的なビルの鉄骨工事では，１ヵ所に基準点を設置してレーザー計測などで高さや位置を確認・調整し，溶接を行って固定する。１段目が完了したら基準点を盛り替えて２段目を建て，これを繰り返していく。

スカイツリーでは，500mまで部材を積み上げて建てるので，何十回もの盛り替えを行うことになる。したがって，わずかな誤差でも累積して大きな誤差になり兼ねない。そこで，GPSを利用した計測システムを開発し，累積誤差を確認しながら全体の精度を確保した。具体的には，タワーと離れた場所に固定した基準点を設け，タワー上の盛り替え点との２ヵ所でGPS信号を受信することで，誤差を数ミリ以下に抑えることができた。

精度管理上の難しい問題はほかにもある。鉄骨は太陽の光で暖められると伸びるので一方に傾く。また，風の影響で揺れたり，重量物の揚重によって傾くなど，タワーは常に動いている。垂直精度の管理には，これらの影響を差し引く必要がある。

タワーの日射による影響については，日中は南側が伸びて北に傾く。高さ300m地点では7cmも傾いてしまう。そして，夕方になると元に戻る。このサイクルを毎日繰り返している。こうした状態を把握し，日射の影響を差し引いた垂直精度管理を行った。

また，風については，風速・風向とGPSを連動させて計測を行った。風の強さと揺れ幅の関係を把握し，風の影響を差し引いて垂直精度を管理した。

タワーの骨格は，高強度鋼管を使用したトラス構造となっている。鋼管が複雑に交差するため，設計・製作・施工に関して，さまざまな問題があった。トラスの交点では，主管に複数の支管が集中し，そのままでは仕口が溶接できない。そこで，メインの主管にテーパーをつけて直径を大きくし，支管は直径を小さく絞って溶接できるようにした。

鋼管同士の溶接では，鋼管を直接溶接する“分岐継手”を用いた。建築ではあまり使用しない手法だが，シンプルな形状となり，埃や水がたまりにくく，錆や汚れを防ぐ効果も発揮している。

ところで，タワーの平面形状は１層ごとに変化し，すべての鋼管柱が斜めになっている。この複雑な形を正確に製作するには，従来の図面による設計・製作の手法では不十分であった。そこでコンピュータ上で精密な３次元モデルを構築し，形状・材質・強度・重量・組立方法など，さまざまな検討を行う「BIM（Building Information Modeling）」を全面的に活用した。なお，部材の形状については，重量の検討のほかにトレーラーへの積み込み状

況まで立体的な検証を行った。

現場施工についても，事前に立体的な施工シミュレーションを行った。また，この３次元データと現場での計測データを照合し，建方精度の確認を行った。「BIM」がなければ，東京スカイツリーの設計・製作・施工は不可能であったともいえる。

7. 施工手順について

まず初めに，基礎杭の構築を行った。新開発技術であるナックルウォール（節付き壁杭）である。地中に特殊な機械で深い溝を掘る。掘削中に壁面が崩れないように安定液を満たしておく。そして節の部分は，掘削機の羽を油圧で開きながら回転させて壁面の土を削り取った。次に地上でカゴのように組立てた鉄骨と鉄筋を挿入し，コンクリートを流し込んで完成となる。

外側の鉄骨トラスは，下からタワークレーンによって積み上げる「積層工法」で組立てる。一番下の最大の部材は，直径2.3m，厚さ10cmで非常に重量があるため，長さ4mずつの輪切りに分割して，運搬・揚重が可能な最大重量30t以内に収めた。

この鉄骨を溶接するのも大変な作業で，熟練の溶接工が４人一組で３日がかりで行った。ちなみに，160回の溶接線が積み重なっている。このようにして500mまでのトラス構造部分で25,000ピース，重量にして合計32,000tの鉄骨を積み上げた。

現場の地上部分は非常に狭いので，搬入した鉄骨はトレーラーから低層棟の屋上に上げ，そこで荷捌きを行った。ここでは鉄骨に作業用の特殊ユニット足場をセットして，タワークレーンで一気に吊り上げた。こうして上空で足場を取り付ける危険な作業を省いた。据え付けた鉄骨は，三次元レーザー計測の値を確認し，正確な位置になるように微調整を行って締め付け，最後に溶接して固定する。溶接部分は現場で塗装を行って作業が完了する。役割を終えた足場は取り外して地上に戻すが，また次の鉄骨に取り付けて繰り返し使用する。こうして効率と安全性を向上させた。外側の鉄骨トラスの積み上げには，668日間を要した。

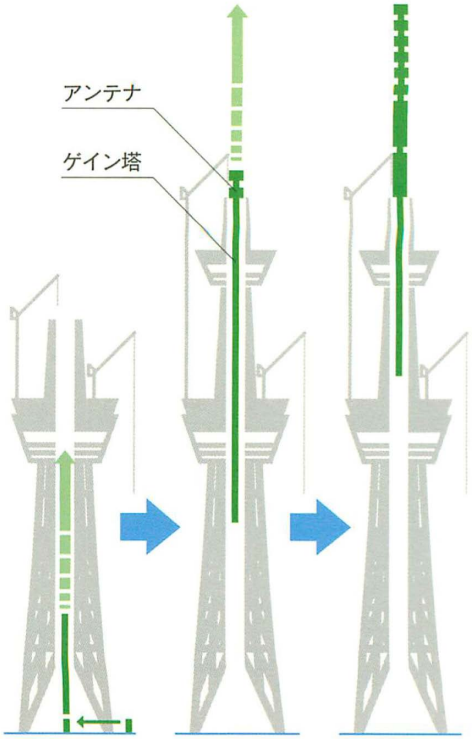

図５　リフトアップ工法

最上部のゲイン塔は，これまでのように鉄骨を積み上げようとすると，安全性・精度確保・揚重時間など多くの問題が想定された。そこでゲイン塔については，地上で全体を組立ててから吊り上げる「リフトアップ工法」を採用した（図５）。

タワーのトラス部分の中心には，心柱を設置する空洞がある。これを利用してゲイン塔を空洞内部で組立てる。手順は最上部から下に向かって組立て，一節ごとにワイヤーとジャッキで引き上げて，その下に次の一節を継ぎ足していった。これを繰り返して全体が組み終わると，最頂部まで一気に吊り上げた。塔体の頂部から突き出た部分にアンテナを取り付けながらさらにリフトアップを進め，634mに到達したところでゲイン塔の足元を塔体に溶接して固定した。これにより，施工の安全性や品質（精度），また工期の問題を解決した。

油圧ジャッキは，１台当たり500tの引上げ能力のものを全体で12台設置した。総計では6,000tの吊り上げが可能であり，3,000tのゲイン塔に対してかなりの余裕がある。吊り上げは１分間に5cmのペースでゆっくり行った。ゲイン塔を吊るワイヤーの張力

を，一本一本個別にコントロールできるシステムを使い，工事現場内の司令室で制御を行った。また，ゲイン塔が塔体から突き出た状態では，水平の油圧ジャッキを複数段に設置し，ゲイン塔を横から抑えて安定させるとともに，１/10mm単位で押し引きして精度確保にも利用した。リフトアップには，約９ヵ月を要した。

ゲイン塔のリフトアップを追いかけるように，トラス中心部の空洞に鉄筋コンクリートの心柱を構築した。この施工には，高い煙突などに使われる「スリップフォーム工法」を採用した（図６）。

これは，型枠を滑らせながら上昇させ，連続してコンクリートを流し込んでいく工法である。今回の心柱は，狭い空間の中で高さ375mまで立ち上げるという例のない施工となった。高強度でありながら，短時間で固まる性能のコンクリートが採用され，１日当たり約３mのスピードで連続して打設し，375mまで構築した。

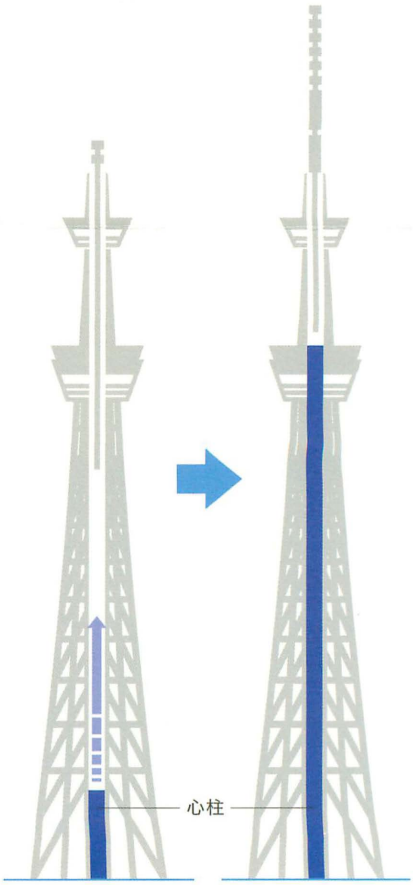

図６　スリップフォーム工法

8. “3.11”の地震について

2011年３月11日午後２時46分，東北地方太平洋沖地震が発生した。墨田区では，震度５弱を観測した。現場は，最終回の１つ手前のリフトアップ作業中（619m～625m）であった。ゲイン塔頂部の振れ幅は４～6mに及んだものと推測される。ワイヤーに吊られた状態のゲイン塔は，ワイヤーの伸縮により10cm程度の上下動があった。塔体最上部（高さ497m）の振れ幅は，左右に1.4m程であった。これらは，心柱の制振装置およびゲイン塔頂部の制振装置が作動していない状態での揺れの大きさである。

着工前からさまざまな対策を検討してきたが，すべて想定の範囲内の挙動であった。その結果，作業員や職員に怪我はなく，構造体にも被害はなかった。一部の仕上げ材に損傷があったが，交換して対処した。仮設材ではリフトアップ中の転倒防止用水平ジャッキに取り付けた滑り材（樹脂製）が一部損傷したが，交換して対応した。タワークレーンも事前検討による対策の結果，損傷はなかった。

スカイツリーの現場には，地震のほかに風や雷を察知する警報システムを設置していた。このシステムによる緊急地震速報が作動し，揺れ始めの１分前に警報を発した。それにより，作業員は現場の安全確保と緊急退避を行った。揺れの収束後には，避難行動マニュアルに沿って安全な場所へ避難した。800人程度の作業員が現場内に居たが，間もなく全員の無事が確認できた。

タワーの構造体は，３年半にわたる工期の中で，徐々に形態が変化していく。それぞれの工事進行段階において構造解析を行っており，耐震安全性の確認がなされていた。東京スカイツリーはもともと耐震性が高い設計であり，心柱のない状態でも通常の建物以上の耐震性を有している。今回の地震動は，事前検討の範囲内のものであり，被害が全くないという想定通りの結果となった。

リフトアップについては，合計で3,000tのゲイン塔を吊り上げている状況であった。これを支えるワ

イヤーは，法的基準を上回る設計としてあり，震度７の直下型地震の縦揺れに対しても，破断しない強度になっていた。そのおかげで，吊り上げワイヤーには全く損傷が見られなかった。ワイヤー以外のリフトアップ関連の仮設部材は，さらに高い強度となっており，全く問題がなかった。

タワークレーンは，一般の標準仕様として震度５強に耐える仕様である。しかし今回は，これをかつてない高さに設置することになるため，標準仕様では強度が不足することも想定され，建設中のタワー上に載せた解析モデルに震度５強の地震波を加えた動的解析を行って，３つの追加対策を実施した。

１つ目は，タワークレーン自体が倒壊しないように，クレーンマスト（支柱）の強度を25％増強した。２つ目は，クレーンマストとスカイツリー本体を結ぶ繋ぎ材の最上部に，オイルダンパーの制振装置を設置し，揺れを半減させた。これは，タワークレーンでは世界初と思われる。３つ目は，ジブ（タワークレーンの腕の部分）のアオリ防止装置である。ジブは正面から突風を受けると，後方に倒れて損傷する恐れがある。その対策として，ジブを前からもワイヤーで押さえた。当初，強風対策として検討したこのアオリ防止装置が有効に作用し，地震の揺れにもジブが暴れ回ることなく，損傷を抑えられた。

以上のように，さまざまな事前検討と対策の結果，3.11の地震に対しても，工事進行の障害となるような損害はなく，地震の１週間後の３月18日に最終リフトアップを行って，高さ634mに到達した。

9. まとめ

3.11の地震では，スカイツリーは未完成の状態ながら激しい揺れに耐え，計らずも耐震設計や構造強度の確かさとともに，施工における技術力と安全管理の成果を実証することとなった。こうして2012年２月末に無事完成した（写真２）。

東京スカイツリーの建設では，「巨大である」ことと「精密である」という，相反する２つの要素を両立する必要があった。計画通りに完成できたのは，実現に向けて知恵と力を結集した数々の関係者と，一緒に汗を流した現場作業員１人ひとりのお陰である。

写真２　完成した施設全景

また，３年半にわたる工事を見守ってくださった地域の皆さま，さらに国民の皆さまにたいへんお世話になりました。この場を借りてお礼を申し上げます。（講演終了）

10. あとがき

東京に自立式電波塔としては世界一の高さとなる「東京スカイツリー」を建設するために，設計･製作･施工の各プロセスにおいて「現代の匠たち」が多数活躍したことが，特別講演を聴いてよくわかった。その姿は千年以上前に，現在まで残る五重塔を造った「いにしえの匠たち」を髣髴させ，感動した。

最後に今回の特別講演を快く引き受けてくださった株式会社大林組，そしてたいへん解かりやすく説明してくださった高木講師に心からお礼を申し上げます。

［資料提供］株式会社大林組