

当社の超々高層建築技術を俯瞰する

—過去と現在と将来と—

生産技術本部 香田 伸次

1. はじめに

2023年6月、高さ325m・日本一の称号を冠した「麻布台ヒルズ・森JPタワー」（工事名：虎ノ門・麻布台地区第一種市街地再開発事業A街区新築工事、俗称「虎A」）が完成・竣工した。そして今、2028年5月の竣工を目指し、「虎A」を上回る高さ385mの「トーチタワー」（工事名：大手町二丁目常盤橋地区第一種市街地再開発事業 Torch Tower(B棟)新築工事、俗称「常盤橋B」）の建設を進めている。

日本初の超高層建築「霞ヶ関ビル：147m」の竣工(1968年)から遅れること3年、当社は「(旧)朝日東海ビル：120m」を通じ、超高層建築(高さ100m超)の施工を経験することになる。その後、1984年の「(旧)東芝ビルディング：166m」、2000年の「山王パークタワー：194m」を経て、2003年に初めて200mを超える「泉ガーデンタワー：201m」の完成に至る。

しかし、その後200m前後の建物については幾つか携わることができたが、「泉ガーデンタワー：201m」を超えることはなく、「虎A」の完成により一気に100m以上記録を塗り替えるまで、20年の歳月を要することになる(図-1)。



図-1 当社施工の最高高さを記録した歴代の超高層建物

この間、同分野における当社の施工実績は徐々に他社に水を開けられ、明らかに後塵を拝する状況となった。これに歯止めを掛け、一気に劣勢を挽回すべく、2016年度から「技術的競争力強化」を掲げ、全社的な活動として推進した。その第一ターゲットが「虎A」の受注であることは言うまでもないが、当初5年間は先ず“基礎体力”を鍛えるべく「400m級超々高層建物の構築に供する基幹技術力の強化」と題して、高強度材料や高耐力基礎など、地味ながらも時間がかかる、超々高層建築に不可欠な構造部材・構造システムの技術開発に取り組んだ(詳細の説明は本編に譲る)。

国内では、高さ300mを超える「スーパートール」の建設に苦勞する一方、海外では600mを超える「メガツール」級が各所に登場している(図-2)。

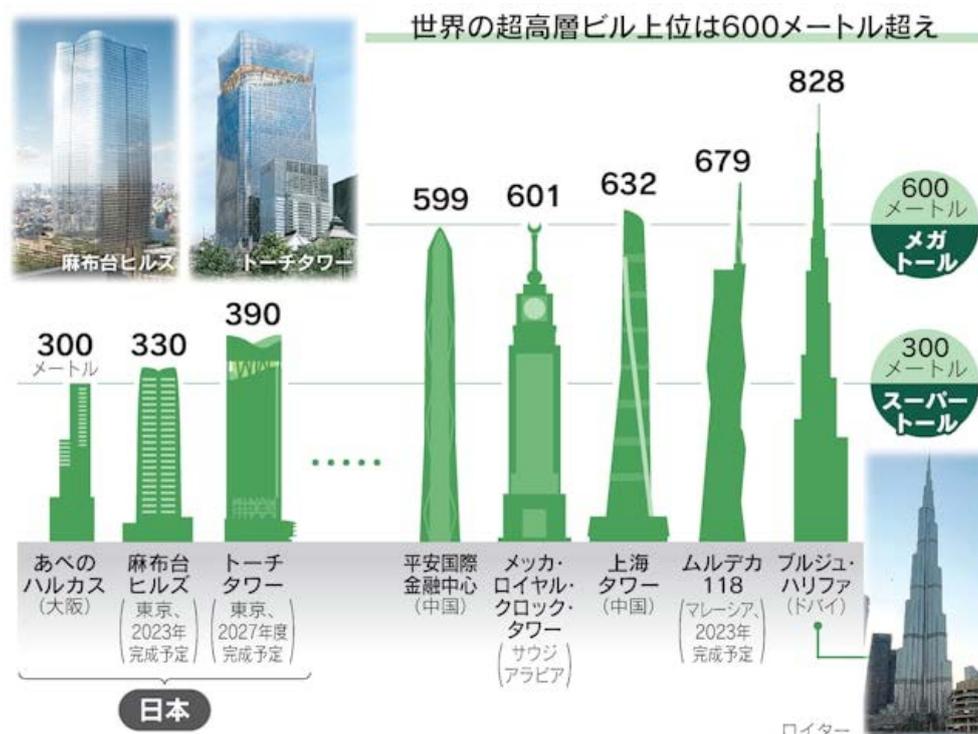


図-2 国内外の主な超高層建築(2023年2月18日 日本経済新聞・朝刊より)

地震と台風が存在が国内の超々高層建築の障壁となっていることは想像に難くないが、幾ら免震や制振技術が進歩しても、結局のところ建物のアスペクト比「高さと幅のバランス」が、居住性を含む基本的な構造性能を支配するため、経済的にも妥当な線として、アスペクト比は4倍程度といったところに落ち着く(「虎A」も概ね4倍)。

このことは、高さ方向に大きくしようとすると、幅方向にも相似的に大きくする必要があることを意味する。即ち、「泉ガーデンタワー：201m」を「虎A：325m」まで“拡大”するためには、体積的に

$$(325/201)^3 = 4.23(\text{倍})$$

の構造物を構築する必要があることになる。こうなってくると、耐震・耐風といった性能や機能上の課題よりも、「そんなにデカイものをどうやって作るのか(作れるのか)」といった“実現性”への課題の方が重くなってきて、特にこの辺りは“経験値”がものを言う世界でもあり、机上の解析やラボでの実験をいくらやっても、高精度の情報は得られない。

当社にとって、この経験値のなさがトラウマ的な弱みになっていて、「虎A」の計画段階では「当社がかろうじて持つ過去の200m級の“経験談”」をかき集め、それらを“拡大解釈”することで何とか補おうとしたが、蓋を開けてみると案の定“未知の領域”に戸惑うことになる。最後には、「虎A」自体を次に繋げるための“実証実験”と腹を括り、「どの辺りの見込みが狂い、それをどう解決したか(すべきであったか)」を“やりながら”情報収集していくことにして、着工に踏み切った。

次ページ以降、「着手前から不安視されていたこと」、「やり始めて気づいたこと」色々ある中で、「虎A」を通じて特に“経験値が上がった”3つの生産技術について、中心となって悩んだ3名に、得られた知見や気づき(必ずしも解決成果ではない)を書いてもらった。

これらを生かして「常盤橋B：385m」に取り組んでいる最中ではあるが、「虎A：325m」と比べて体積比で

$$(385/325)^3 = 1.66(\text{倍})$$

の相手であり、何とも挑み甲斐がある。

2. 超々高層建築工事の精度確保における生産革新(施工時解析とモニタリング技術)

安富 彩子

麻布台ヒルズ(330m)に先行した2プロジェクトでは、柱の軸方向の圧縮力による縮み量を柱の正規寸法に加えて製作するという対応を行っている。竣工時に各階が概ねフラットとなるよう、1件では各階一律に、もう1件では柱ごとに異なる補正値を製作長さに加え、それぞれ柱鉄骨の建方時にこれを考慮した目標レベルを設定した。これまでは多くが高さ150m以下で、柱の軸縮みは考慮せず(柱の軸剛性を1000倍として)設計されることが一般的であったが、近年200mに満たない建物において、支配面積の大きい柱が他と比較して変位が大きくなり、仕上げの納まりに支障をきたす事象が発生したことから、柱の軸縮みが無視できない超々高層建築工事においては、実際の軸剛性で施工時解析を行って、設計で想定した応力・変位の実現性を検証することが必要となってきた。

施工時解析は、一般に施工手順を考慮した解析で、施工の各段階における応力・変位を確認しながら施工計画を立案するために行われる。各階のレベルについては、竣工時(あるいは固定荷重一斉載荷時)の変位から、建方時の目標レベルを設定し、その目標に対して建方精度を管理する。施工時のモニタリングは、建方後の挙動を追うものであり、解析で予測した通りの挙動を示していることを確認しながら、事前の予測からの乖離が大きくなってきた場合は、その後の建方の目標を修正していく。

ここで、柱の軸縮みによる長さの調整が必要となる条件は、第一に「隣り合う柱の変位差が大きいこと」とすることができる。変位差が小さければ、各階の柱の変位は製作誤差・建方誤差の許容値と比較して小さく、天井内または床下のクリアランスが相当厳しい場合を除いて、施工でクリアすることができる。柱の製作長さを調整すると、図面作成、製作管理、施工管理のいずれにおいても手間が増え、人的ミスの発生可能性が高まる。その建物の特性をよく確認して、製作長さに反映することが必要かどうか、協議することが重要となる。

また、現場では計測しながら建方を行うが、ミリ以下の精度管理は困難であることから、計画においては管理可能な幅を設定することも重要なポイントとなる。表-1に超々高層建築の高さ方向の変位に影響する要因を示す。

表-1 超高層建築の高さ方向の変位に影響する要因

| | | | |
|-------------|---------|--|--------------------------|
| ①製作精度 | 即時(製作時) | 通常±1mm程度で工場測定 | 材長:±3~4mm(管理許容値) |
| ②建方精度 | 即時(建方時) | 建方治具使用により高め傾向 | 継手階高さ:±5mm(管理許容値) |
| ③溶接縮み | 即時(溶接時) | 各節1~2mm | 初層で発現、板厚に依存しない |
| ④地盤沈下 | 進行変位 | 概ね30~50mm(建物外周と中央で差) | 設計段階で想定し実測値で補正 |
| ⑤柱の軸縮み | 進行変位 | 各層1~2mm, $\Sigma = 80 \sim 90\text{mm}$ (虎麻) | 設計軸力から予測可, CFTの剛性評価は課題 |
| ⑥仮設荷重による変位 | 施工時変位 | | TCなど完成時にはなし, 施工中は影響あり |
| ⑦日射・気温による変位 | 常時変位 | | 季節変化は予測可, 直射日光の影響は評価困難 |
| 地震・風による変位 | 短期変位 | | |
| ※計測誤差 | 誤差 | | 機器精度・計測誤差・計測環境(陽炎, 水蒸気)等 |

表-1に示す通り、最も影響が大きく、また予測の幅が大きいのが④地盤沈下である。地盤沈下は制御できないが、上部架構の変位に加算されるものであり、これに対処することが、超高層の建方における課題となる。さらに、モニタリングにおいては、計測対象が常に動いていること、機器精度、計測誤差、計測環境等により計測誤差が少なからず生じること、これがもう一つの大きな課題となる。

施工時解析や計測の精度を上げることが重視されがちだが、設計施工の場合には柱の軸力に応じた断面として各階の変位をそろえる工夫や、仕上げのクリアランスを適切な確保など、施工性を考えた設計とすることが全体最適につながると考える。

最後に、施工時のモニタリングとしては、柱の軸力を計測した事例も蓄積しつつあるが、変位における計測精度以上に、取得したデータの取扱は困難である。柱がコンクリート充填鋼管(CFT)の場合、鋼管のひずみを測ってCFT断面の軸力に換算するが、現場においてひずみゲージを軸力ゼロの状態に貼付するのが難しいこと、充填コンクリートの打設後のいつからCFT断面で軸力を負担するのか、コンクリートのクリープのような挙動をどう評価するのかなど、取得データの取扱について解析と比較する前に検討・解決すべきだと考える。

3. 超々高層建築外装における生産革新

安田 辰雄

現在、超々高層建築の外装は、ガラスとアルミフレームで構成されたユニタイズドカーテンウォール (CW) が主流である。ユニタイズドCWとは、工場でアルミフレームにガラス・耐火ボードをセットしパネル体にしたもので、工場で作製するため、安定した製品の品質確保と、現場作業の簡略化による省人化、無足場施工を実現できる工法である。現場搬入後は、アルミ型材特有の勘合方式で、パネル体同士を積層していく乾式工法で、インターロック方式と呼ばれる。

図-3は、麻布台ヒルズ、歌舞伎町タワー、芝浦一丁目に用いたユニタイズドCWの断面形状を示している。いずれもメーカー既製品ではなく、製作メーカーも異なるフルオーダー品であるが、非常によく似た断面形状をしている。インターロック方式のユニタイズドCWが、日本に普及し始めておよそ20年ぐらいであるが、当初の断面形状から多少の進化はあるものの、ここ数年は大きな変化は見られず、ある意味成熟期にあるといつてよい。

そのため、超々高層建築にユニタイズドCWを適応する際に重要となる生産革新は、ユニタイズドCWの機能向上を目指して工夫を凝らすことではなく、建物の個性に合わせて最適化できるかどうかである。例えば、軽量化に関して、超々高層建築になると、5000を超えるユニタイズドCWが使われるが、アルミフレーム重量を1個あたり1Kg軽減するだけで、5tものアルミ重量を削減することができる。これに伴い、アルミニウム合金を生成する際に発生するCO₂も削減することができる。これは、アルミフレームだけでなく、ガラスも同様である。この軽量化を実現するためには、緻密かつ合理的なフレーム支持位置の算出、当該建物の風洞実験値との整合が重要で、単純梁ではなく一点はね出しモデルの連続梁が合理的である。この場合、フレームの撓みよりも、曲げ応力がクリティカルになることが多く、断面のポテンシャルを引き出すためには、断面形状の重心位置も重要となる。また、製作時の加工量の削減や、組立の容易さによる時間の短縮も、安定した製品の品質確保や、製作納期の短縮につながる。つまり、ユニタイズドCWの建物への最適解を見つけること、研ぎ澄ますことが生産革新へ繋がる。

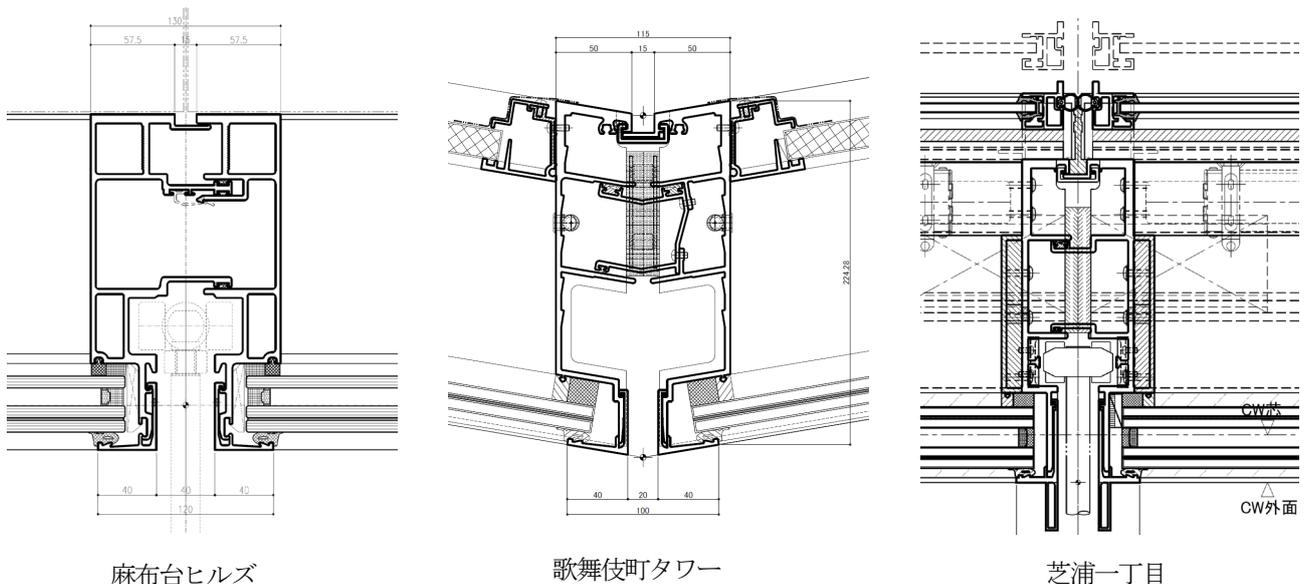


図-3 ユニタイズドカーテンウォールの断面形状

ユニタイズドCWは成熟期ではあるが、まだまだチャンスもある。例えばサイズは、輸送限界や効率によって決定する傾向にあるが、製作限界はさらに大型化が可能で、大型化によりアルミ重量や加工量・部品点数などを大きく削減できる。現状では、製作工場の能力を活かし切れておらず、外装意匠の自由度も制限されている。今後は、より簡略化した外装システムを構築できれば、現場での組立により、大型のユニタイズドCWの施工も可能になる。また、最も荷重を負担する堅枠断面に合わせて、上下枠などの横材も大きく設定されているが、これらを必要強度から検証することで、更なるアルミ重量削減も見込める。さらに、超々高層建物のユニタイズドCWは、メンテナンス時の安全性確保のため、堅枠にゴンドラレールを内蔵している。しかし、アルミフレームが大きくなり冷気を室内側に伝えやすく、結露しやすくなるという弱点がある。これに対し、ベアリングなどを用いて、新しいゴンドラガイドを開発すれば、従来の課題を解決しながらアルミ重量を軽減することができる。今や超々高層建築の外装は、成熟期から変革期に向かっている。

4. 超々高層建築施工における場内物流の生産革新

高橋 康浩

超々高層建築の施工は、多くのフロアに跨り同時に進むため、資材の揚重や作業員の移動も多く、仮設エレベータの使用頻度は非常に高い。しかし、その高さゆえ、エレベータ昇降には時間を要する。そのため、仮設エレベータの効率的な運用や、仮設エレベータ自体の性能が、超々高層建築の施工効率に大きな影響を与える。

今回、麻布台ヒルズの施工に、揚重実績の取得システムと、情報共有化技術を導入した。この施工で得られた揚重データをもとに、新たに超々高層建築に対応した大型エレベータを開発したので、このエレベータの能力と機能も併せて紹介する。

・揚重モニタリングシステム

「揚重モニタリングシステム」は、エレベータやクレーンによる資機材と作業員の揚重実績データを、AI や IoT 等の最先端技術を活用して見える化し、作業の効率化を図るシステムである。現場の揚重状況を可視化するだけでなく、収集した揚重作業の実績データを管理・分析することで、現場の運用改善や工程管理、品質確保に役立てることができる。本システムを、麻布台ヒルズの施工に初めて導入し、エレベータの設置時期や必要台数に関するデータが得られた。今後は、蓄積したデータを、現場改善のための計画立案や技術開発、工程シミュレーション等に活用し、技術展開していく。



図-4 揚重モニタリングシステム

・スマートコントロールセンター

施工実績データは、蓄積するだけでなく、データを見える化し関係者で共有できるかが重要なポイントとなる。

「スマートコントロールセンター」は、現場内のあらゆる情報を集約、可視化する現場管理ルームとしての役割を担っている。ルーム内には、縦2m、横13mを超える533インチ相当のモニターが設置されており、現場内カメラの映像や、揚重モニタリングシステムの映像、山留偏位計測数値など5種類以上の映像・データが表示され、関係者が同時に情報を共有することができる。様々な情報をリアルタイムに可視化・共有することで、建方サイクルの改善による工程短縮や、揚重機の効率的な活用など、的確な現場管理をサポートし生産性向上に寄与する。



図-5 スマートコントロールセンター

・次世代型工事用エレベータ

超々高層建築の施工においては、高層階へ資機材と作業員をいかに早く効率よく運ぶことができるかが、生産性向上の大きな鍵となる。麻布台ヒルズの施工では、資材揚重が10,000回/月以上、1日2000名もの作業員の移動が、揚重モニタリングのデータから明らかとなった。そこで、今後の超々高層建築施工のさらなる効率化を図るため、工事用エレベータとして国内最大クラスである「SEC-5000RS」(図-6)を開発した。このエレベータは、110m/minの昇降速度と、最大5tの積載能力を有しており、現場内ロジスティクスの効率化と、作業員の移動時間短縮が期待される。また、これまで手動で行っていた、高所作業車の稼働管理を、エレベータに備わったセンシング機能を使うことで自動化し、現場の機器管理の手間を大幅に削減できる。その他の機能として、フレームの制振防音構造、揚程・積載状況に合わせた可変速度制御、遠隔監視機能等を有している。この次世代型工事用エレベータは、麻布台ヒルズのような超々高層建築を始めとする、今後の高層建物施工の主力機として展開する予定である。



図-6 次世代型工事用エレベータ「SEC-5000RS」