

日本一超高層現場における DX チャレンジ

井上 慎介・村松 慶紀

清水建設が工事を請負う、竣工時日本一の超高層ビルとなる麻布台ヒルズ（虎ノ門・麻布台プロジェクト A 街区）において、DX（デジタルトランスフォーメーション）へ様々な取り組みを行った。本報では、清水建設のDXに関する中期デジタル戦略、およびプロジェクト概要、取り組んだDXに関して、デジタルで管理するマネジメント、自律型ロボットによる施工、BIMを核とするものづくりについてその具体的な内容とそこから見えてきた課題について紹介する。

キーワード：超高層、DX、マネジメント、ロボット、BIM

1. はじめに

建設業を取り巻く課題は加速度的に変化している。担い手の不足、未熟練工の増加、働き方の変革に伴う2024年問題、プロジェクトはより複雑になり、高難度、高品質を限られた工期の中で求められる。世界情勢を見渡すと、世界的な気候変動、現在でも続いているパンデミックや紛争、円安、インフレによる物価上昇などが続いており我々を取り巻く環境が大きく変化している。そして、今まで以上に働き方の在り方の改善が求められている。それらの解決に向けて本プロジェクトでは、DXに関する様々な取り組みを行ったのでその概要を報告する。

図-1が本プロジェクトである麻布台ヒルズ（虎ノ門・麻布台プロジェクト）の竣工外観パース、および平面図である。3本の超高層ビルが立ち並び、左手

がA街区のタワーである。発注者は森ビル(株)が中心となった虎ノ門・麻布台地区市街地再開発組合、設計は森ビル(株)と(株)日本設計、各種VE提案を取り組むため地下構造においては清水建設の設計部も参画している。物件主要用途はオフィス、商業施設、インターナショナルスクール、レジデンスであり、階数は地上64階、地下5階である。建物最高高さは約330m、最高深さは約37mで、竣工時はあべのハルカス(300m)を抜き日本で最も高いビルとなる。延べ床面積は約46万m²（東京ドーム約10個分）、鉄骨重量は約13万t（東京スカイツリー地上鉄骨4.1万tの3倍以上）になる。作業員はA街区だけでも、最盛期には建築と設備を合わせ最大5,000名となる。

本プロジェクトは竣工時日本一の高さだけでなく、規模、用途の多さ、そして施工難易度の高い工事である。この難しい工事における多くの物量、そして作業

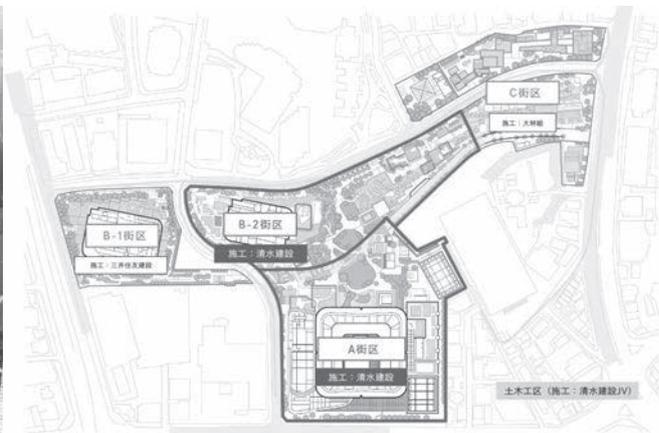


図-1 麻布台ヒルズ（虎ノ門・麻布台プロジェクト）

員の作業を如何に品質を確保し効率的に進めるかが現場の最重要ポイントである。

2. 本プロジェクトでのDXの取り組み

清水建設は中期デジタル戦略2020として「Shimz デジタルゼネコン」を策定している。「デジタルゼネコン」とは、リアルなものづくりの知恵と先端デジタル技術を活用してものづくりをデジタルで行い、リアルな空間とデジタルな空間・デジタルなサービスを提供するゼネコンである。これにものづくりだけでなく業務すべてをデジタルで支えるという考え方と合わせて「ものづくりをデジタルで」「ものづくりを支える業務をデジタルで」そして「デジタルな空間・サービスを提供する」という3つを、中期デジタル2020の戦略軸としている。本プロジェクトでは、清水建設のデジタル戦略と、最先端技術を搭載した自律型ロボットと人がコラボしながら工事を進める「シミズスマートサイト」というコンセプトを合わせ、「デジタルで管理する“Management”」をベースとして、「最先端技術を搭載した自律型ロボットと人が協働する“Robot Work”」,「BIMを核とするデータ連動でのものづくりを行う“Fabrication”」を連携させた次世代建築生産システムとして「虎麻スマートサイト」を定義し人と技術をベストミックスした施工に挑戦した。

(1) デジタルで管理する“Management”

最大5,000名が働く本プロジェクトでは、人力に頼る管理や確認作業には限界がある。そこで、現場内の状況を映像やIoT技術などデジタル技術を用いてデータ化し集積することで、現場マネジメントの効率化を図った。また、地下や高層部では通常モバイルデータ通信ができない現場内通信の課題にも挑戦した。

(a) データが集まり集約する Smart Control Center (SCC)

現場事務所内に、55 inchの有機ELディスプレイ

が36枚(3行×12列)で構成され現場のあらゆる情報が表示されるコントロールセンター(通称SCC)を設置した(図-2)。ディスプレイは正面と両側面に連なり、任意の複数画面や36画面を一画面など自由なレイアウトで表示でき、またレイアウトは事前設定をしていれば瞬時に切り替えることができ作業員の入退場や健康状況、車両の入退場、現場内カメラや山留の偏位、振動騒音、天気など状況やタワークレーンや仮設エレベータの揚重モニタリングや解析状況など作業安全や進捗管理に必要な情報の表示を行う。例えば、タワークレーンに設置した監視カメラ映像は、300m上空での建方作業を現場に行かなくてもリアルタイムに確認でき移動時間等大きく削減できる。また、作業員はいつも見られているということ認識することで安全意識の向上も図れる結果となった。そして、今までの建設業においては、施工過程におけるデータはなかなか把握できておらず、その経験、ノウハウ含めなかなか共有できず各個人の引出しにしまわれていた。しかし、今回様々なデータがすべてSCCにデジタルデータとして一元化されることでビッグデータとなり、それを更に分析して行くことが可能となった。

(b) 揚重モニタリングシステム

超高層ビルにおいては、人とモノをいかに効率的に作業場所に移動させるかが大きなポイントになり、本プロジェクトにおいても現場内のロジスティクスが現場の命運を分けると言っても過言ではない。そこで、すべてのタワークレーンと仮設エレベータ(各6台)をいつでも何をどれくらい揚重しているかの稼働運行状況をモニタリングしビジュアライゼーションに優れたゲームエンジンの技術を用いて現場での機械の動きをSCCに再現した(図-3)。クラウドサーバに蓄積された揚重データは様々統計データとしてグラフ化し日々の揚重管理の改善に活用した。また、他の案件等の計画に必要な施工ビッグデータとして全社的に活用を開始している。将来的には、各階への揚重実績と工程を重ね合わせることで進捗状況や工程が適正かの



図-2 Smart Control Center (SCC) (3行×12列:平面24枚, 曲面6枚)



図一三 揚重モニタリングシステム

判断や AI により作業員数や資材等が自動で判断していくように開発を進めている。

(c) 通信インフラと次世代分電盤 Smart Station

現場内のデジタル化において、実は通信環境が一番重要である。施工中の現場、特に 150 m 以上の高層やコンクリートに囲まれた地下部分などはモバイルデータ通信が使えない環境にある。そこで、現場内に必ず設置されている仮設分電盤の IoT 化をするとともに、通信インフラの基盤、および現場内のコミュニケーションツールとして、図一四の次世代分電盤 Smart Station を各階に設置、運用した。Smart Station は仮設分電盤としての機能に加え、各ブレーカの IoT 化、360 度カメラ、Wi-Fi アクセスポイント (PicoCELA 社製) を有しており、図一四右側のスマートステーション (10 フロアごとに 1 台) は更に、タッチモニタ、スピーカ、マイク、web カメラが搭載されたモニタユニットを有している (図一四左側はスマート分電盤であり、モニタユニット無)。

仮設分電盤の IoT 化としては、盤内のブレーカの遠隔監視や操作ができ本プロジェクトでは仮設照明を繋ぐことで自席に居ながら各階照明の状態確認や入切操作が行え、業務の合理化に繋がった。また、トリップや消費電力のモニタリングなどの機能を有している。更に、360 度カメラは、現在だけでなく、過去の状況も見ることができ、進捗確認やトラブル対策として活躍した。

コミュニケーションツールとしては、タッチモニタで当日や翌日の現場配置図や工程表などをワンクリッ



図一四 Smart Station

ク表示や Teams を使ったりリモート会議も可能である。特に本プロジェクトでは、コロナ禍で全員が一堂に一カ所の朝礼広場に集まり朝礼することは物理的にも難しく、また朝礼後の作業員の一齐移動も大変非効率であった。そこで、朝礼時は各所におかれたスマートステーションに近傍の作業員が集まり、全体にかかわる注意事項は生中継にて聞きその後エリアごとの注意事項も別途表示することで効率的で内容のある朝礼を行った。今後、現場内コミュニケーションツールとして様々なスタイルで活用していくことで新たな使用方法が期待できる。

Smart Station の大きな特徴は、各機器を無線接続でこれらの機能を使える、また Smart Station 以外の IoT 機器や個人のデバイスもフロア全域をカバーした Smart Station の Wi-Fi メッシュネットワークに接続して通信を行えることである。建屋内のどこにいても地上と同程度の通信を行えるようになるとロボットや各 IoT 機器で個別に現場内通信方法を検討する必要がなくなり、また作業員においては、通信を行うために電波が通じるフロアまで移動する必要がなくなる。本プロジェクトでは LCX (漏洩同軸ケーブル) を用いた携帯回線も併せて実施した。使い勝手としては、地上等普通の場所と同じように通話やネットができる携帯回線の方が良いが整備コストが割高であり、またキャリアごとでの対応が必要となる。更に、総務省への届出等手続きが必要で盛替等の対応も大変労力がかかる。その点、Wi-Fi は通常の電話回線は使えないが、コスト的にも許容できる範囲であり現場での対応も容易、またキャリアに関係なく誰でも使うことができる。現状においては、Wi-Fi の方がコスト含め設置の自由度や維持が簡単であり工事現場に使いやすい結果となった。現場内 DX 実現において、通信環境は絶対条件なので今後もこの点を基礎技術として見ていく必要がある。

(2) 最先端技術を搭載した自律型ロボットと人が協業する “Robot Work”

本プロジェクトではシミズスマートサイトを構成する自律型ロボットを実際の現場工事で運用した。

(a) 自動搬送ロボット “Robo-Carrier”

自動搬送ロボット (図一五) は、毎日大量に運び込まれる建築資材の現場内搬送にかかる人員削減を目的に運用を行った。これまでの自動搬送ロボットの運用では 1F のロボットと搬入階のロボット、自動化されたエレベータが連携して資材を搬送する方法であった。本プロジェクトでは、人が運ぶ速度により近づけ

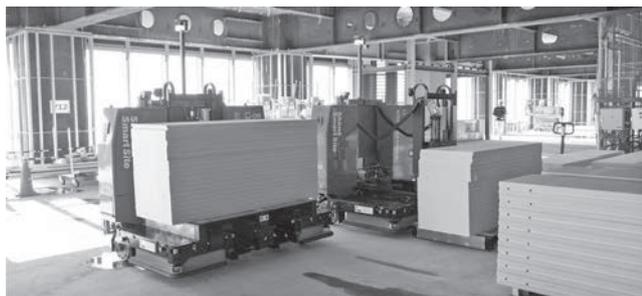


図-5 自動搬送ロボット

るためにエレベータ積込み階では人がフォークリフトで積込み、搬入階では2台のロボットでエレベータから積み下ろし仮置きをしてエレベータを下に降ろした。仮置きされた資材は空き時間にロボット2台で指定された場所まで水平搬送され、同一フロアで複数台が連携稼働できるよう最適制御システムで運用を行った。

(b) 溶接ロボット “Robo-Welder”

建築現場の中でも最も難しい作業と言える溶接作業のロボット化を試みた。図-6の溶接ロボットの特長は、溶接線毎にセンシングを行い形状を認識したうえで次の溶接線の狙い位置を計算して溶接を行う。溶接線毎に形状を認識しているので、40mmを超える板厚でも欠陥無しで溶接が可能となる。また、実際の現場の状況を反映して5mmから11mmのテーパギャップにも対応できるようなシステムになっている。現場による各種試験に合格したのち、ロボットによる本施工を板厚40～50mmの柱14本で溶接を行った。

(c) 耐火被覆吹付けロボット “Robo-Spray”

施工環境が過酷な半乾式吹付ロックウール工法の耐火被覆吹付け作業のロボット化を試みた。図-7の耐火被覆吹付けロボットはプロトタイプであるが、6軸ロボットアームとリフターを搭載した台車で構成され、タッチパネルで諸条件を入力すると自動で吹付け作業を行う。本プロジェクトでは、実際の大梁や小梁

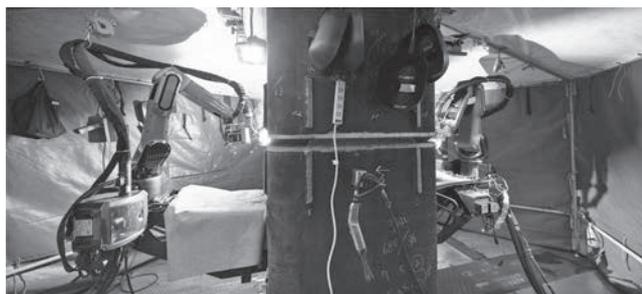


図-6 溶接ロボット

の耐火被覆の吹付け作業を吹付け厚さ45mmで3フロア合計434m²の施工を行った。大梁では、ダクト孔やリブの施工にも対応でき梁の下フランジの下側も人と同様に吹付け材の落下なしに施工できることが確認できた。

(d) OAフロア施工ロボット “Robo-Buddy OA Floor”

図-8は4輪駆動の作業台車と2本のロボットアームで構成される双腕多機能ロボットであり、本プロジェクトではOAフロアのパネルを搬送するロボットと連携をしてOAフロアの施工を行った。墨の検出から支持脚のセット、高さ調整、パネル置きの繰り返しを自動で行い合計420m²の施工を1日約40m²の施工能力で実施することができた。



図-7 耐火被覆吹付けロボット



図-8 OAフロア施工ロボット

(3) BIM を核とするデータ連動でのものづくりを行う“Fabrication”

本プロジェクトにおいては、海外デザイナーを含めた多くの関係者と多種多様な曲面を取りこんだ複雑な形状を協議しなければならない中で「『共通言語』としてのBIM」を掲げ、視覚的情報を誰に対しても齟齬なく意思伝達するためのコミュニケーションツールとして活用した。建築で作図する躯体図はRevitにて行い、設備との調整はRebroを用い地下設備のルート検証や鉄骨スリーブの精査等に使用し、建築と設備の合理的な関係性を構築した。また、鉄骨専用CADであるKAPを鉄骨重量の積算に活用し、更にそのデータを基に鉄骨一般図の作図も行い、同時に生成される3Dモデルを設備検討等にも使用した。

図-9のガラス製の大庇は、本プロジェクトの中でも屈指の取合い調整が難しい構造である。このガラス大庇は幅81m、奥行き25mと非常に大きく、そして先端部は3次的に跳ね上がる形状である。また、3本の柱から吊るり材で先端を支持し、ガラスのトッライトと同型のトラス鉄骨の構造となっている。設計から受領したデザイナー作成のフレームの3Dデータと現場発行の一般図鉄骨3Dデータに、モデラーが作成した外装および大庇の3Dモデルを重ね合わせ、関係者の認識ズレをなくし問題を先出しすることで限られた時間内で思いをひとつにまとめ上げることができた。

また、この3Dモデルを製品検査にも活用し昨今はスチールテープや差し金だけで計測していた検査を、3次元測定器で部材の座標点を実測し、あらかじめ入力していたモデル上にPCで自動的にプロットさせていくことで、数秒後に画面上でモデル化され寸法確認ができ、大変短時間に精度良く検査が行えた。

3. 取り組みを通じて得ることが出来た課題

今回、本プロジェクトにおいてDXを進めたことで見えてきた課題を示す。

1つ目が、スマートフォン、iPadの普及により、様々なアプリケーションは使いこなせるようになってきたが、ツールの標準化（モノの標準化）とともに仕事そのもののやり方（コトの標準化）の標準化が必要であるということ。

2つ目が、センシング技術の向上や通信、ソフトウェアの進化によりこれまでは困難であった膨大な施工実績データを取得することが可能となり、これらのビッグデータ活用のために高度な分析と次なるアクションが必要ということ。

3つ目が、建設ロボットの考え方は他産業と異なるということ。他産業においてはロボットが固定され製品になるものが流れてくる。また、物流倉庫などは決まった設えの空間においてロボットが動く。しかし、建築現場においては毎日目まぐるしく変わる環境において、ロボット自身が移動しながらその場所の状況や仕様に合わせ対応していかなければならず、対応するための準備時間は実際に作業する時間に比べ長く、決して生産性が良いといえる状況ではない。建設におけるロボット化は人が行っていた作業をただ置換するのではなく、既存の枠を超えて何をロボットにやらすのか、やってもらうかをもっと深掘して検討することで生産性を向上することができる。

4つ目は、活用が一番進んでおり効果が発揮されているBIMである。特に3次元曲面形状に対してスピード感を持って正確に納めるために、現代の建築施工においてなくてはならないものである。しかしながら、設計事務所、ゼネコン、サブコンごとでBIMソフト

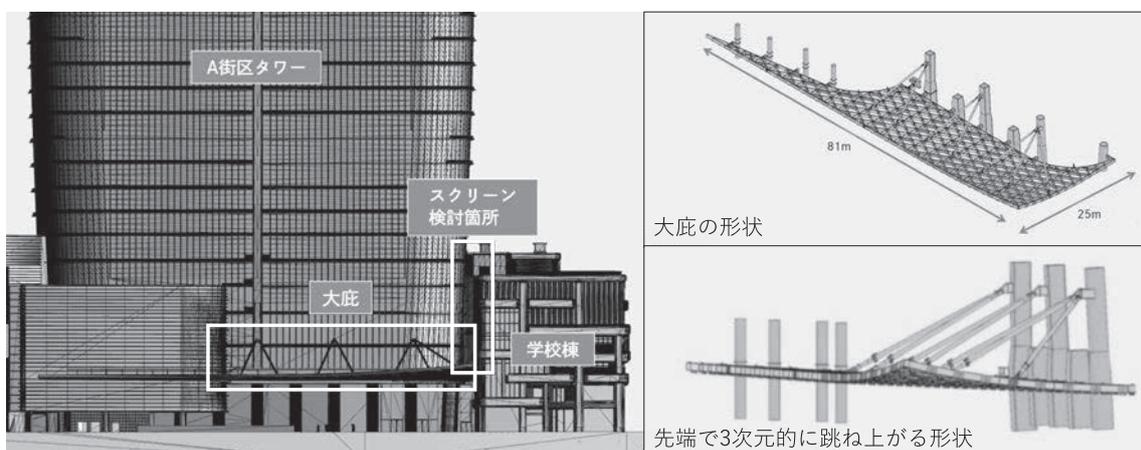


図-9 ガラス製の大庇

が異なることや設計変更対応へは通常のCADより手間がかかり、今後は更なるツールの標準化、BIMを活用した図面業務の標準化が必要である。

最後5つ目は、今後DXの取り組みにかかるコストの壁を越えていかなければ多数の現場にすぐに浸透させていくのは難しいということである。

4. おわりに（今後の挑戦）

我々建設業、そして清水建設におけるDXはスタートを切ったばかりであり、まだ様々な課題があるが新時代の建設の姿を追い求め今後も挑戦は続けなければならない。しかしながら、人がやってきたことをロボットに置き換えて急にすべてがうまく進むわけではない。正直、人の手や知恵でやるほうが簡単なことも多い。ただ、ここで歩みを止めてしまえばさらなる成長はない。デジタル化が進み、現場環境はどんどん様変わりしていく。50年後の建設現場では、ロボットと人が協働しているのが当たり前になっているかもしれ

ない。しかし一方で変えてはならないものもある。良いものをつくってお客さまにお引き渡しするという熱い気持ち、これだけは大事にしていかなければならない。人とデジタルが補完しあう未来の建設現場の礎となるために、今後も人と技術のベストミックスで工事に挑んでいく。

JCMA

【筆者紹介】

井上 慎介 (いのうえ しんすけ)
清水建設㈱
東京支店 虎ノ門麻布台再開発 A 街区建設所長



村松 慶紀 (むらまつ よしき)
清水建設㈱
建築総本部 生産技術本部 生産技術開発センター
デジタルマネジメントグループ

