



我が国の社会インフラを支える
鉄鋼材料

日本各地で、将来を見据えたインフラ整備事業が進行している。背景には、建築・構造物の老朽化や、自然災害への対応、少子高齢化による人口減少に伴い、都市や地域の整備へのニーズが高まっている事などが挙げられる。なかでも東京は、2020年東京五輪をめざした整備が進み、大規模開発ラッシュとなっている。

大規模開発プロジェクトにみる鉄鋼材料の役割

渋谷駅東口基盤整備工事・地下貯留槽
渋谷川の付け替え工事を行いながら、地下に雨水貯留槽を建設。
最大貯留量は約4,000 tで、25 m×5コースプール8個分に相当する。

(写真提供：東急建設(株))

大規模開発ラッシュが続く東京

2016年以降に着工が予定されている全国の大規模物件(延床面積1万 m²以上)は、3,170万 m²確認されているが、このうち首都圏は1,918万 m²と、開発が集中している。首都圏の大規模物件を鋼材に換算すると、269万 tに及ぶと推計されている(図1)。

特に東京では2020年東京五輪をめざした開発が進行しており、五輪関連の施設に加えて、増加が見込まれる観光客への対応として、商業施設や宿泊施設などの建設も進む予定である。これから2017年にかけて、工事の着工はピークに達する勢いだ。

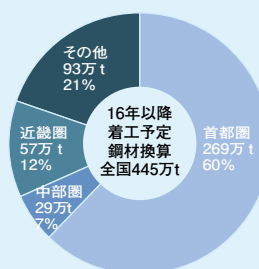
インフラ整備事業においては、きわめて多くの鋼材が投入される。現在、年間約2,300万 tの鋼材が建設分野で消費されており、その量は国内鋼材消費量の44%を占める。品種としては、最も多いのが鉄筋等棒鋼で、次いでH形鋼等形鋼、そして薄板・亜鉛めっき鋼板、厚板・中板、鋼管と続く。

日本は建設分野を取り巻く環境やニーズの変化に応じて、多種多様な鋼材を開発してきた。例えば強度については、1400 N/mm²高力ボルトなどの超高強度鋼から、100~225 N/mm²級の極低降伏点鋼まで、きわめて広い範囲の鋼材が開発されている。性能については、優れた溶接性や靱性、耐食性、変形能力など、さまざまな性能を持つ鋼材が開発されている。形状については、大断面材や極厚材、非対称断面材など、形状の自由度が高くサイズバリエーションに富んだ材料が製造可能となっている。

建設分野では、鉄鋼材料の高強度化に伴う伸びや靱性の低下がもたらす耐震性への懸念等から高強度鋼材の採用は慎重に進められてきたが、新しい耐震設計法の施行等により1990年以降、高強度鋼材の適用が進展するようになった。さらに2000年以降にダンパー等によって地震による建築物の振動エネルギーを吸収して、柱や梁の損傷を軽減する制振構造が普及したことによって、超高強度鋼材も適用されるようになっている。

大型開発ラッシュとなっている東京において、特に渋谷は100年に一度といわれる規模で再開発が進められており、また、超高層ビルの中を道路が貫く虎ノ門ヒルズの難工事も話題となった。新しい構造物の建設が鉄鋼材料の技術革新を生み、また鉄鋼材料の性能向上が鋼構造のさらなる発展を促す。以降、話題の二つのプロジェクトを紹介し、鋼構造と鉄鋼材料が果たす役割を述べる。

2016年以降に着工予定のおもな大型物件(図1)
(延床面積1万 m²以上、2016年3月末現在)



16年3月末までの各種新聞情報に基づき、16年以降に着工予定の全国の大規模建築案件(延床面積1万 m²以上)を集計。

全国集計結果: 3,170万 m²
うち首都圏: 1,918万 m²
中部圏: 209万 m²
関西圏: 382万 m²
その他地域: 660万 m²

鋼材換算は、国土交通省発表の建築原単位(延床面積1 m²当りの鋼材使用量)を用いて推計。

(出典:「No.259鉄鋼需要四半期報」(一社)日本鉄鋼連盟)



我が国の社会インフラを支える鉄鋼材料

Project 1

変貌を遂げる渋谷 100年に1度のビッグプロジェクト

100年に1度と言われる渋谷駅周辺開発プロジェクトの工事が進んでいる。渋谷は今、どのように変貌を遂げようとしているのか。そこに息づく鋼構造の施工技術を紹介する。



東口駅前広場整備 2019年度完成予定。交通結節機能の強化と安全で快適な広場空間を形成するため、渋谷川を移設し、地下広場と雨水貯留槽の整備を行っている。
(写真提供：東急建設(株))

世界一訪れたい街を目指して

渋谷は京王、JR、東急、東京メトロの5駅8線の鉄道路線が集まるとともに、東口、西口併せて都内最大級のバスターミナルを持つ全国有数の公共交通拠点である。また若者のファッションや文化の情報発信地として、昼夜を問わず人があふれ、活気に満ちた日本を代表する街の1つだ。その渋谷らしさを残しながら、再開発をとおして街全体の活性化を促し、日本はもとより世界への流行発信地となることを目指して、渋谷駅周辺開発プロジェクトが行われている。渋谷駅街区、渋谷駅南街区、渋谷宮下町計画、道玄坂一丁目駅前地区、渋谷駅桜丘口地区、南平台プロジェクトの6エリアで、渋谷駅の機能更新と再編、駅ビルの再開発と一体的な都市基盤整備が段階的に行われ、2027年度に全体が完成する予定となっている。

地下から地上まで複雑に同時進行する工事

宮益坂の中腹から地下鉄が地上に出て、明治通りを高架橋で横切り、旧百貨店3階のホームへと入っていく駅東口の光景は、まさに渋谷のシンボルの1つと言える。しかし増改築を繰り返してきた駅建物内部は、宮益坂を降りて谷を歩き道玄坂を登るという不便さや、乗り換えを困難にする複雑な動線を生み出してきた。また、すり鉢状の地形によって、2014年6月末のゲリラ豪雨時には溢れた水がマンホールから噴出するなど、水害への備えが求められた。こうした課題を解決するため、駅東口ではわずか1 haほどの極めて狭い区域で、地下を流れる渋谷川を移設しながら雨水貯留槽や地下広場を建設する土木工事が、2019年度完成を目指して同時並行で行われている。

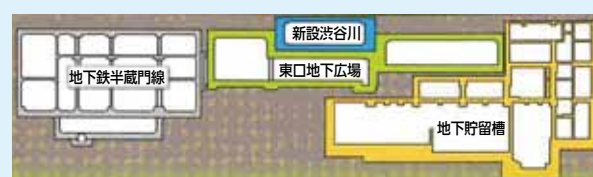
地下広場は、高い階層にあるJR線と東京メトロ銀座線、地下にある東急東横線、田園都市線、東京メトロ半蔵門線、副都心線をつなぐスペースとして整備され、完成すれば乗り換えが大幅にスムーズになる。この広場スペースを捻出するため、渋谷川を長さ約160 mにわたって東側へ約30 m移設した。渋谷川は宮益坂下から天現寺橋

の2.6 kmを流れる河川で、渋谷駅東口を横断する区間は、旧百貨店の地下を流れる暗渠となっていた。新しい渋谷川の構造は高さ4 m、幅10 mのRC(鉄筋コンクリート)造ボックスカルバートで、現場で鉄筋や型枠を組み立ててコンクリートを流し込む現場打ち工法が採用され、工事完成後2015年8月に新しい川として切り替わった。

東口の地下空間は、渋谷川が地下広場の上を流れ、地下広場の下に雨水貯留槽を設置するという重層構造になっている(図2)。掘削工事では、地上から約30 mの深さに壁面防護のための土留杭を打設し、その後約25 mまで一気に掘り、下の床版から上の床版に向けて躯体を構築していく順巻工法が採用された。運用中のバスロータリーの直下での杭打ち工事となることから、掘削口を厚い覆工板で覆ったまま作業が行えるようになるまで、深夜に機材を持ち込み、覆工板を外してコンクリート杭を打設し、作業後に覆工板を被せ、機材を持って帰るといった日々が続いた。また渋谷駅周辺は地表より約13.5 mまでが水分の多い砂礫層で、その下は非常に硬い土丹層となっており、掘削作業に時間がかかる厄介な地層でもあった。

こうした制約のあるなか、地下空間で土木工事が行われる一方、地上では高さ約230 mの超高層ビル東棟が2014年8月に本格着工した。地下7階、地上46階建ての東棟は、延床面積約17万5,000 m²のS(鉄骨)造、SRC(鉄骨鉄筋コンクリート)造で、鋼材使用量は約3万3,000 tにのぼる。近年の超高層ビル建設にはHRC(高強度鉄筋コンクリート)造やPC(プレストレストコンクリート)造が多いが、渋谷駅

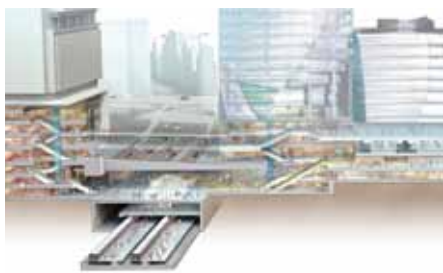
渋谷駅東口の地下の構造(図2)



2019年度完成予定。地下広場を整備するため、渋谷川を東側に移設するとともに、ゲリラ豪雨への浸水対策として、約4,000 tの雨水を一時的に溜める貯留槽を整備する。

渋谷の 将来イメージ(図5)

左から渋谷ヒカリエ前出入り口、渋谷駅街区(東棟、中央棟、西棟)、渋谷駅西口交通広場



(写真提供：東京急行電鉄(株))



(写真提供：渋谷駅前エリアマネジメント協議会)

周辺開発プロジェクトは複合業務・商業ビルが中心のため、建設される高層ビルはS造やSRC造が多く、今後、渋谷の街では大量の鉄骨が使用される見込みとなっている。

BIMとCIMを統合した施工支援技術の活用

現在の渋谷のように、地下から地上まで複雑に入り組むさまざまな土木構造物や建築物が同時進行で建設される状況では、これら大規模プロジェクト群相互の調整も必要となるが、その複雑さ故、従来の2次元図面でそれをするのは難しい。一方建設業界では、3次元の建築情報データベースであるBIM (Building Information Modeling) や、その土木版であるCIM (Construction Information Modeling) の導入が進んでおり単体プロジェクトでは課題検討や情報共有に効果を発揮している状況がある。東急建設ではこのBIMとCIMを同時に運用するUiM (Urban Information Modeling) という独自のワークフローを実用化し、渋谷駅周辺の再開発プロジェクトの一部に導入し、それぞれの現場、あるいは現場間の調整に活用している。

例えば建築工事の高層ビル間を地下でつなぐ通路は土木工事のトンネルとして施工される(図3)。建築の地下工事の空間を土木のトンネルの発進坑として利用する大変ユニークな試みだが、複数

現場間での高度な調整が求められる。トンネル上部を土圧を受けるパイプルーフで覆い、その下を掘り進む工法を採用したが、このパイプルーフを打ち込む際に必要な反力架台は、山留めの鉄骨切梁と同じ位置の地下空間への設置が必要となる。応力の性質が全く異なるこの二つの構造体を一体化することはできない。言わば、触れ合うことのないジャングルジムを2つ重ね合わせたかのような複雑な様相となり、その調整は困難を極めた。建築の山留めの鉄骨が複雑に組み上げられた中で、土木の推進工法の反力架台を構築できるか、大きな掘削用マシンを地上からクレーンで吊り下ろす開口寸法を確保できるか等、2次元図面では土木と建築の関係者の議論がかみ合わない場面もあったが、3次元デジタルモデルでシミュレーションや検証を行うことによって、事前に施工手順の検討や問題点の抽出と改善を図れるようになった。土木と建築という、文化や風土の大きな違いを持つ現場間での調整が一気に進むことになった。

細部から街全体までデジタル化

渋谷の街を構成する建物やインフラを部位ごとに細かく3次元デジタルモデル化し、それらの機能や属性を付加情報として加えることによって、UiMは建造物の枠を超えた街全体のデータを統合利用できる。対象エリアは渋谷駅周辺開発プロジェクト群が展開されている駅周辺を大きく超えた東西約2 km、南北約1.7 kmで、人々が渋谷の街と認識する範囲をカバーしている。さらに時間軸情報を付与することによって、事業期間が異なる複数の再開発事業それぞれの建造物が複雑な順序で立ち上がっていく様子を見ることができる。あらゆる事業段階で、他事業との関連性を考慮した設計・施工を実現し得る、拡張可能なシステムと言える。

もちろん、ある高層ビルの基準階では(図4)、鉄骨と設備、外壁のカーテンウォール相互の干渉チェックというBIMとしては一般的な検討が着実に行われている。その上でUiMならではの特性を生かし、3次元デジタルモデルで高層棟基準階の窓から街の景色を見渡すことも可能だ。新しい渋谷の街にふさわしい連続性のあるフロア空間やサービスを創造するツールとして活用も期待される。

建物やインフラの一つ一つやそれらのつながりにまで、利用者の目線さえ持ち込むことを可能とするUiM。日本一訪れたい魅力ある流行発信地として、渋谷の街が着々と生まれ変わろうとしている今、UiMのさらなる活用も期待されている。

●取材協力 東急建設(株)

土木と建築の隣接現場間のUiM事例(図3)



街全体に展開するUiMは、隣接現場間での言わば「スポットUiM」の集合体でもある。建築の地下工事仮設を土木トンネル発進坑に使う、ユニークだが難しい取組みを3次元デジタルモデルによりサポートした。

高層棟基準階のBIMによる干渉チェック(図4)



鉄骨躯体と設備配管等の干渉チェックという、一般的になりつつあるBIM利用も、街全体の拡がりがあるUiMデータの中に置かれている。

(資料提供：東急建設(株))

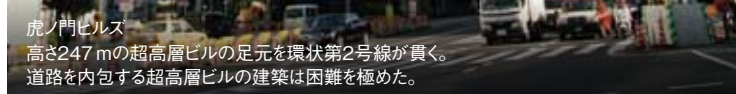


我が国の社会インフラを支える鉄鋼材料

Project 2

超高層ビルを道路が貫く 虎ノ門ヒルズ

2020年開催の東京五輪に向けて、東京では道路等の整備が進んでいる。なかでも環状第2号線(神田佐久間町～有明)は選手村とスタジアムを結ぶ重要な役割を担う道路である。2014年には虎ノ門～新橋間が計画から実に68年をかけて、開通し話題を呼んだ。



立体道路制度により長年の構想が実現

そもそも環状第2号線の歴史は古く、1946(昭和21)年に神田佐久間町～新橋間、9.2 kmの道路建設が決定された(図6)。このうち神田佐久間町～虎ノ門間はすでに開通し「外堀通り」として使用されてきたが、残りの虎ノ門～新橋間、約1.4 kmは、用地の取得が難航したために長年にわたり事業化にはいたらなかった(図7)。GHQが虎ノ門の米国大使館から東京湾の竹芝桟橋までの軍用道路を要求したという俗説から、いつしかこの区間は「マッカーサー道路」と呼ばれるようになった。

1989年に「立体道路制度」が創設されたことにより、計画は
いっきに動き出した。それまでは道路法により道路の上下空間
においては私権の行使ができないとされてきたが、道路法、都

環状第2号線全体図(図6)



(東京都第一建設事務所資料より)

着工前の開発予定地(図7)



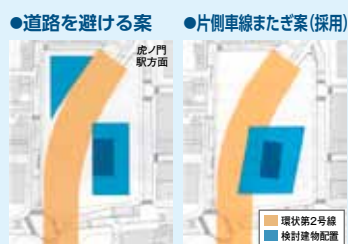
まるでモーゼが海をわたったように、高層ビルの谷間に低層ビルが連なっていた。
(写真提供：東京都第二市街地整備事務所)

市計画法、都市再開発法、建築基準法が改正され、道路と建築物などの立体利用を可能とする制度が誕生した。同制度を利用することにより、道路の大部分を地下トンネルとし、地上に超高層ビルを建設し、地域住民が優先的に入居することで、課題であった用地の取得が進んだ。

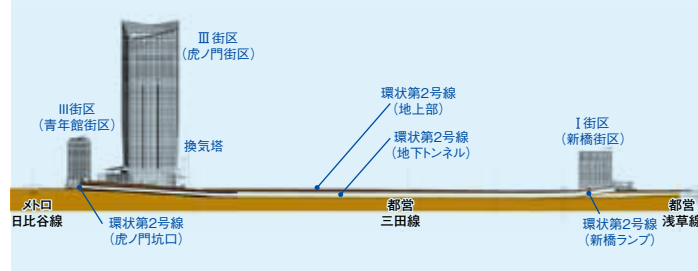
立体道路制度を利用し、道路と超高層ビルを立体的に構築するため、さまざまな設計案が比較、検証された。当初は道路を避けてビルを分割して配置する案もあったが、十分な平面規模が得られないことがわかり、ビルの中を道路が貫通するというアイデアが出てきた。最終的には、道路は虎ノ門の北西部より地下に潜りこみ、道路の片側車線が超高層ビル(虎ノ門ビルズ)の地下1階部分をカーブしながら貫通する設計案が採用された(図8.9)。

提案された設計案(図8)

最終的には、道路と建物の関係は複雑になるが、広場を虎ノ門駅前側に設けることができるため、片側車線またぎ案が採用された。



虎ノ門開発街区計画図(図9)



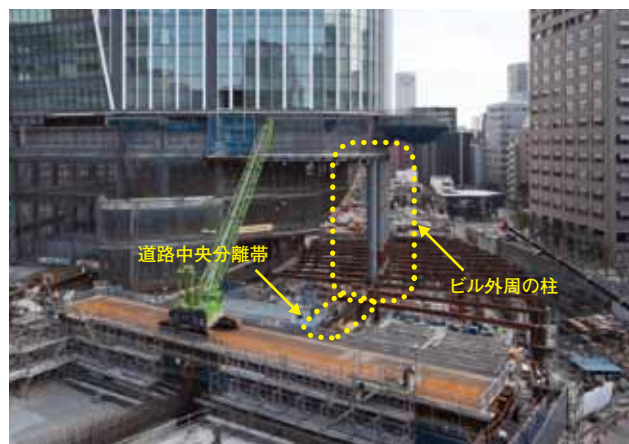
(資料提供：東京都第二市街地整備事務所)

打ち込まれた237本のCFT柱(図10)



地下の落とし込みCFT充填38 m、地上の圧入CFT207 mと、最大級の施工となった。地上の圧入では粘り強い高強度コンクリートを1階から47階まで圧送するため、圧送高さを水平換算した642 mの模擬圧送管を現場に設置して試験が行われた。(写真提供：森ビル)

道路の形状にあわせて配置されたビル外周の柱(図11)



(写真提供：森ビル(株))

道路にあわせて設計された超高層ビルの構造

虎ノ門ヒルズは地上52階、地下5階、高さ247 m、地上はS造を主体とした制振装置付ラーメン構造で、地下はS造、SRC造、RC造の混合構造となっている。使用する鋼材の最大強度は590 N/mm²級、最大板厚は90 mmである。柱は鋼管の中に超高強度コンクリートを充填するCFT(Concrete Filled Steel Tube)柱が使用され、鋼管がコンクリートを拘束し、剛性、耐力、変形、耐火等で優れた性能を発揮する(図10)。

虎ノ門ヒルズは建物が道路の荷重を支持する道路一体建物である。そのためビルの構造は道路躯体を中心に考えられた。例えばビルの南側外周の柱は、道路の中央分離帯部分に合わせて、道路のカーブに沿うように配置されている(図11)。この柱の配置が、虎ノ門ヒルズの特徴である、ゆるやかな曲面を描くフォルムにつながっている。

道路形状にあわせた柱の配置によって、通常、上部に住宅やホテルが入る超高層ビルは、建物外形が上にいくほど細くなる場合が多いが、今回は高層階の外形を変えずに約85×61 mの平面形となっている。そしてその中央各所に粘性系ダンパーとして

オイルダンパー516基、鋼材系ダンパーとしてブレーキダンパー620基と座屈拘束ブレース82基を配置した制振構造となっている。

また北西、南東、南西角部の柱は、道路躯体部分を貫通しないように、それぞれが8～13階付近で2本の柱がY字状に結合し1本に集約され配置されている。結合部分は、上部2本の柱の応力を下部の柱に確実に伝達するため「仕口部」が設けられた。仕口部に接続される柱鋼材は590 N/mm²級鋼か550 N/mm²級鋼などで、高強度部材が接合するため、仕口部は鋳鋼(SCW620材)で製作された。仕口部は約20 tの重量があり、建築用鋳鋼としては国内最大級となる。SCW620材は建築工事での使用実績が少ないことから、実物大試験体を製作し事前に検証が行われた(図13)。

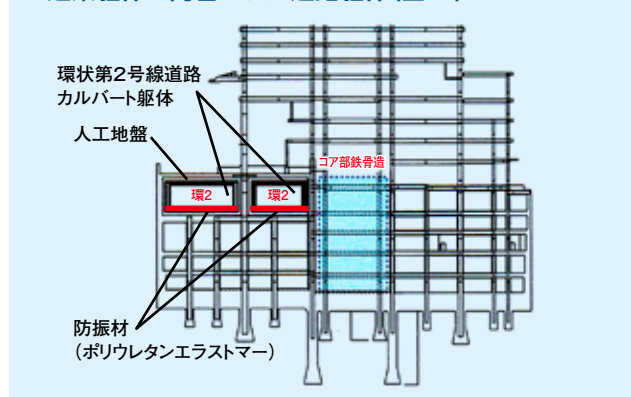
250 mを超える2本の柱が1本に結合されるため、Y字状の柱を受け止める杭は通常の2倍となる60,000 kN～70,000 kNの軸力がかかり、在来工法の場合打ち杭では支えることができなかった。そこで東京スカイツリーでの実績もある節付き壁杭が採用された。これは壁状の杭に節をつけることで杭が地盤に固定され、荷重を支える力が大幅に増える。また地震時の水平力にも高い剛性を発揮する(図14)。

一方、地下1階に配置された道路躯体は、建築躯体の中に土木構造物であるトンネル状道路カルバート躯体が構築された。建築躯体は片側車線で約20 mのロングスパンをもつ大空間となり、この中に道路躯体が置かれる構造となった。そのため構造的に建築躯体と道路躯体が繋がる部分はない(図12)。

建築躯体内を道路が通過することから、交通振動による居住性への影響が懸念された。既存道路トンネルでの振動測定結果を用いて建物各所での加速度応答解析を行った結果、大きな影響は生じないことを確認したが、不測の事態に備え道路躯体の下に防振材(ポリウレタンエラストマー)を敷き、振動を抑え込んでいる。

道路躯体の上部は人工地盤がつくられ、緑化が図られた。

建築躯体に内包された道路躯体(図12)



(資料提供：森ビル(株))



我が国の社会インフラを支える鉄鋼材料

仕口部の製作(図13)



実物大試験を行い、そりが生じる接続部の厚さを増加させたり、母材で引張強度が低くなる傾向があったため、焼き戻し温度を調整した。



(写真提供：森ビル(株))

節付き壁杭を形成する鉄筋カゴ(図14)



節付き壁杭



(資料提供：森ビル(株))

人工地盤はプレストレスを導入した1,000 mm厚の鉄筋コンクリート床板と1,000 mm厚の鉄筋コンクリート壁で構成されている。プレストレスは長さ約40 mのPC鋼より線約570本を上下2段に配置した大規模なものとなっている。

虎ノ門ヒルズでの使用鉄骨量は地上部が約5.3万 t、地下部が約0.7万 t、トータルで約6万 tにおよぶ超大型工事となった。大量の鉄骨は17もの工場で作られたが、その品質管理は、通常行われている施工者経由ではなく、建築者経由で第三者検査が実施された。より信頼性の高い管理によって、安定した品質の鉄骨が製作・供給された。

土木と建築が一体となった難工事

超高層ビルの中に道路が貫通するという虎ノ門ヒルズの施工は、一大難工事となった。

特に課題となったのが3年という、このクラスの超高層ビルとしては非常に短い工期である。しかも地上と地下の構造物に加えて道路躯体も同時に構築しなければならない。対策として、逆打ち工法が採用された。これは「逆打ち支柱」と呼ばれる地下階の柱と杭と一緒に打ち込み、まず一階の床を構築する。その後、地上躯体を構築していくと同時に地下を掘り進めながら地下躯体を下方向に構築していく工法である。地上と地下の躯体構築を平行して進めることができるため、工期を大幅に短縮することができた。



新虎通りにはオープンカフェが設置されるなど、新しい試みが実施されている。

柱を打つ際は、道路躯体がカーブしながら配置されているため、237本におよぶ柱は、そのカーブに沿って正確に打ち込まなければならず、その位置はミリ単位の高い精度が要求された。そこで、東京スカイツリー建設時にも利用された、3次元光波測量器が導入され、不具合を1本も出さずに柱の打ち込みが行われた。

さらに、都市部における限られた敷地での工事も課題となった。道路部分に建築資材を置くことができず、敷地の1/3程度しか作業や資材置き場として使用できなかった。そこで機械や生コン車などの走行と資材の仮置きに使う構台を2階建てにし、1階では掘削や地下の建設工事を行い、2階にクレーンを載せ、鉄骨を取り扱う場所とした。

さまざまな課題に対して、道路を構築する土木部門と、超高層ビルを構築する建築部門が綿密な協議と調整を繰り返して課題を解決していった。またこのプロジェクトは、東京都が初めて「事業協力者方式」、さらには「特定建築者制度」を活用し、道路という公共施設が民間企業とのパートナーシップのもとに建設された新しい試みといえる。

さらに官民の連携は、地上部においても進展している。開通区間のうち、地上部は整備され、「新虎通り」と名づけられた。通常、道路の占有はやむを得ない場合しか許可されないが、新虎通りでは地域住民などで構成された「新虎通りエリアマネジメント協議会」の承認を得て、道路管理者の許可が下りると、歩道にオープンカフェ等を設置できる。パリのシャンゼリゼ通りに匹敵するような活気あるプロムナードにする計画で、既存の枠組みをこえた取り組みは、今後の街づくりにも影響を与えるかもしれない。

現在、環状第2号線は2020年開催の東京五輪に向けて、臨海部での延伸工事が進められており、臨海部と都心部をつなぐ大動脈として、その動向が注目されている。

●取材協力 東京都第一建設事務所、東京都第二市街地整備事務所、森ビル(株)
●文 藤井 美穂