

2. 建設計画

2.1 小竹向原～池袋間

都市交通審議会答申第15号(1972年)により、有楽町線(8号線)と副都心線(13号線)が並行区間となった小竹向原～池袋間の輸送需要増加に対応するため、地下鉄初の上下型複々線構造(図2-1)とすることとし、1975年に同区間の工事方法一部変更認可申請を行った。

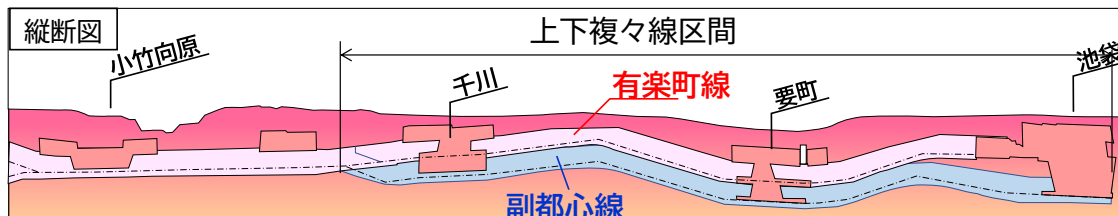


図 2-1 小竹向原～池袋間複々線部の縦断面図

2.2 小竹向原駅

小竹向原駅では西武線との接続を考慮する必要があり、池袋側に折り返し運転用の引上げ線を設けた2面4線構造とした。

2.3 池袋～渋谷間

池袋～雑司が谷間はグリーン大通り下から計画道路(環状5号線の1)下を通り、雑司が谷～渋谷間は明治通り下を通るルートで計画した。最終的な新駅設置の計画は、雑司が谷、西早稲田、東新宿、新宿三丁目、北参道、明治神宮前、渋谷の計7駅で、西早稲田駅と北参道駅を除く5駅は既存の鉄道路線との乗り換えが可能となっている(図2-2)。

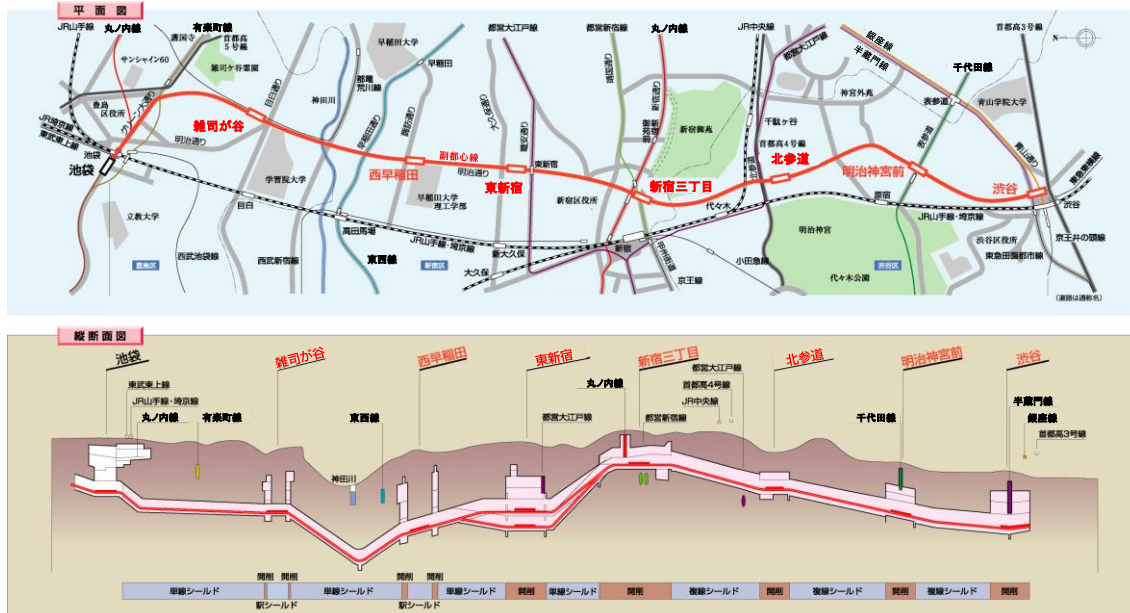


図 2-2 池袋～渋谷間 平面・縦断面図

2.4 池袋～雑司が谷間のルート

免許申請時は計画道路(環状5号線の1)下を通るルートで計画されていたが、計画道路の用地取得が難航していた。そこで、シールド技術の進歩による急曲線施工が可能となったことなども考慮し、現道である明治通り下を通るルート(図2-3)も検討したが、計画道路の事業計画の具体化が2000年度を目途に進められたため、当初計画のとおりと決定した。

2.5 雑司が谷駅

雑司が谷駅は、既設大型埋設物及び計画道路(トンネル構造)構築範囲を避ける必要があること、また、都電荒川線の下受け範囲を最小限とするため、駅の前後に立坑を設置する、めがね型の駅シールド構造(図 2-4)とした。

2.6 西早稲田駅

当初、東西線との乗り換えも考慮した駅位置を計画した(現在よりも早稲田通り寄り)が、既設大型埋設物を新設する駅構築に取り込むことが必要であった。取り込み方法等を慎重に検討した結果、極めて困難であると判断し、現在の駅位置へ変更するとともに既設大型埋設物等に支障しないよう、雑司が谷駅と同様の駅シールド構造とした。

2.7 東新宿駅

池袋～渋谷間の速達性のためには「急行運転」の実施が必須であったため、中間付近となる東新宿駅に追越し施設を計画した。明治通りの道路幅員を考慮し、上下型のホーム構造により追越し施設を確保する計画とした(図 2-5)。

2.8 新宿三丁目駅

新宿三丁目駅は、縦断的に丸ノ内線と都営新宿線に挟まれた空間に開削工法で設置する計画としなければならず(図 2-6)、都営新宿線構築(単線シールドトンネル)との鉛直方向最小離隔はわずか11cmであった。また、東急線との相互直通運転を行うことになったことから、東急線方面からの列車を折り返しする引上げ線も併せて設置する計画とし、延長 787m の開削区間となった。

2.9 北参道駅及び明治神宮前駅

北参道駅は、乗り換え路線がない開削駅であり、標準的な1面2線構造とした。また、明治神宮前駅は、千代田線との連絡を考慮し明治通りと表参道通りの交差点部に設置した。

2.10 渋谷駅

渋谷駅は、半蔵門線やその他既設路線との連絡を考慮し宮益坂下交差点付近に設置した。東急線との相互直通運転を行うことになったため、東急電鉄との共同使用駅となり、緩行線と急行線との接続や運行調整、列車の折り返しができるよう1面2線構造から2面4線構造(図 2-7)に変更した。



図 2-3 池袋～雑司が谷間のルート

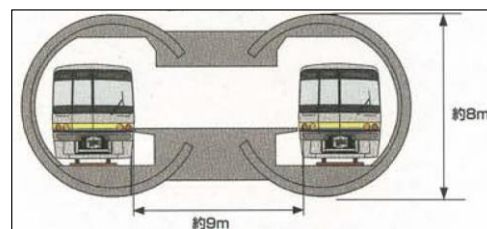


図 2-4 めがね型駅シールド

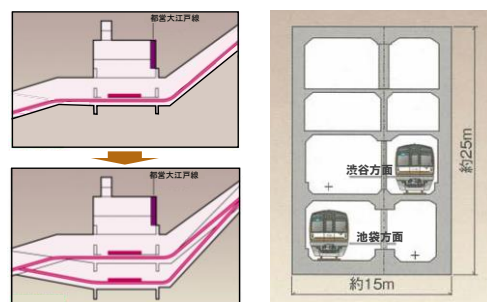


図 2-5 東新宿駅(上下型ホーム構造)

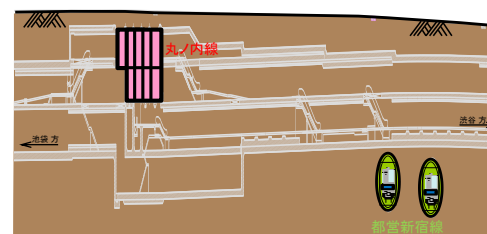


図 2-6 新宿三丁目駅縦断面図

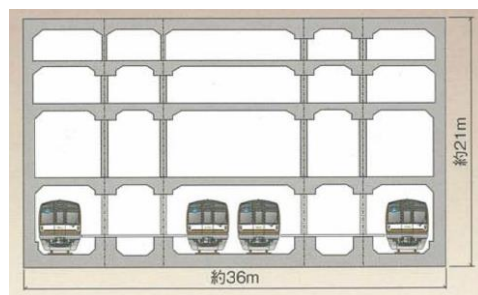


図 2-7 渋谷駅(2面4線構造)

3. 営団地下鉄が培った建設技術と副都心線

3.1 開削工法の変遷と副都心線

営団地下鉄は1951年に丸ノ内線の建設に着手して以降、地下鉄ネットワークの整備拡充を進め、現在9路線195kmを営業している。年月を経るにつれ、新たな路線の建設には各種地下構造物との競合などの制約が多くなり、駅部も駅間トンネルも深くなる傾向となっている(図3-1)。掘削深さが深くなることに伴い、開削工法に用いる土留めには高い止水性と剛性が必要となり、1960年代前半頃までは親杭横矢板が主流であったが、柱列式地下連続壁やRC地下連続壁へと主流が変わっていった(写真3-1)。環境とその保全に対する社会の意識も時代とともに高まり、騒音や振動はもとより、地下水位や建設発生土に対しても十分配慮した施工が求められるようになった。開削工法の基本的な流れ(土留め・路面覆工・掘削・構築)は昔も今も変わらないが、土留め形式をはじめ、使用材料(木製→鋼製)、各種建設重機

の充実による機械化、さらに路上作業時間(昼間→夜間)、沿道対応など時代変化もある中、諸先輩が培ってきた貴重な経験や技術を受け継ぎ、安全で経済的な工事を実施してきた。

副都心線池袋～渋谷間では、地形や地盤、都内有数の繁華街での施工環境などを考慮し、多軸式の柱列式地下連続壁、大型鋼製支保工や3m覆工板等を採用して施工した。

3.2 シールド技術の変遷と副都心線

営団地下鉄初のシールドトンネルは、1957年の丸ノ内線国会議事堂前～赤坂見附間で施工したルーフシールドである(写真3-2)。円形シールドトンネルは、1964年の東西線(5号線)門前仲町～東陽町間の単線シールドトンネル(φ6,750)で、どちらも開放型シールドである。それまで全て開削工法により施工していたが、1961年に名古屋の地下鉄工事でRCセグメントによる円形シールドトンネルが施工されたのが契機となり各分野でシールド工法

が徐々に採用されるようになった。営団地下鉄では、1963年に東西線におけるシールド工法採用の技術調査を目的とし、外部学識経験者を含む『5号線シールドトンネル調査委員会』(1965年には全建設路線対象の委員会となる)を設置してシールド工事に取り組み、これ以降も最先端のシールド技術を開発・採用、シールドトンネル調査委員会における審議結果を現場で実施して無事に工事完成させるとともに、セグメント設計法などを含め工事で得られた知見を関係示方書や基準類に盛り込む等、日本のシールド技術をリードしてきた。

路線名	地下駅数	駅部平均深さ	5m	10m	15m	20m	25m	駅間部最大深さ
銀座線	18	9.0m						16m
丸ノ内線	25	9.0m						22m
日比谷線	19	11.9m						23m
東西線	14	13.6m						26m
千代田線	17	16.3m						35m
有楽町線	22	17.4m						34m
半蔵門線	14	22.2m						39m
南北線	19	21.6m						43m
副都心線	11	24.8m						39m
合計	159	15.4m						

駅部平均深さは駅中心部のレール面～地表面の距離、駅間部最大深さは当該部構築下端～地表面の距離

図3-1 各路線の建設深さ

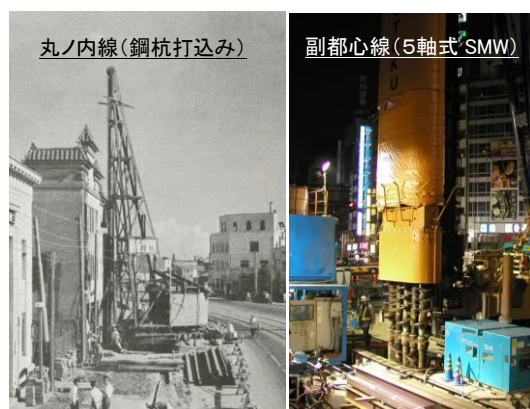


写真3-1 杭打ち工事の状況

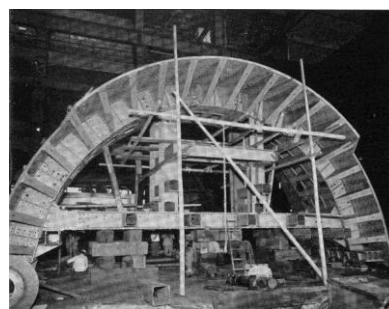


写真3-2 ルーフシールド

営団地下鉄初の複線円形シールドトンネルは、1969 年の千代田線国会議事堂前～赤坂間(φ9,800)で、以後、シールド工法の特長である路面交通や周辺建物への影響が少ないといった利点を活かして半蔵門線などでも積極的に採用していくことになった。

この当時のシールド工法は、全面開放型・圧気・半機械掘り式が主流(写真 3-3)であったが、切羽が崩壊しやすい地盤では費用と時間がかかる例が多くなってきていた。

これに対応する技術進歩のひとつが密閉型シールドの研究・開発であった。小断面での施工例は見受けられたものの、複線断面級の例は全くない状況の中、営団地下鉄は 1978 年、有楽町線小竹向原～氷川台間の複線トンネルへ世界に先駆けて大断面泥水式シールド(写真 3-4)を採用し、無事に複線トンネルを完成させた。これにより、密閉型シールドによる切羽安定と施工安全性が認められ、開削工法よりも有利なトンネル建設工法となり、以降は密閉型シールドが主流となるとともに、駅部は開削工法、駅間はシールド工法という考え方が定着した。

また、シールド技術の進歩により、泥土圧シールドの信頼性が向上したことを踏まえ、半蔵門線水天宮前～押上間では、ほぼ一様な粘性土層を掘進する区間に営団地下鉄初となる泥土圧シールドを採用するとともに、錦糸町～押上間では、当時、世界最大径の偏心多軸式泥土圧シールドによる複線トンネルを築造(2000 年)した。

さらに、大断面化や断面形状多様化などの技術進歩もあり、南北線では駅間と駅部を同一シールドで築造する「着脱式泥水三連型駅シールド」(1994 年)や、3 線部用シールド機に複線シールド機を内蔵した「抱き込み式親子泥水シールド」(1995 年)を施工した。

副都心線池袋～渋谷間でも、シールドの新技术の開発・採用という『営団魂』を踏襲し、施工条件等を考慮した泥水式または泥土圧シールドの選定、セグメント幅広化や合理的な継手開発、さらに明治神宮前～渋谷間には、構造的に円形の特性を活かしつつトンネル断面積を縮小した複合円形断面(図 3-2)を考案・採用する等、最後の新線建設の証に相応しい技術の集大成として取り組んだ。

3.3 副都心線における環境負荷低減への取り組み

既述のとおり、騒音・振動の低減、地盤・地下水位や路面交通への影響低減など、環境やその保全に適切に対応するべく取り組んできているが、副都心線池袋～渋谷間では、都市部における環境負荷に着目し、以下に挙げる建設副産物の発生抑制とリサイクル、温室効果ガス発生抑制などにも積極的に取り組み環境負荷低減に貢献した(写真 3-2)。

- ・工事車両に CNG 車や酸化触媒装備車の導入
- ・電動掘削機械や電動クレーンの開発と採用(建設機械メーカーも参画した検討会設立)

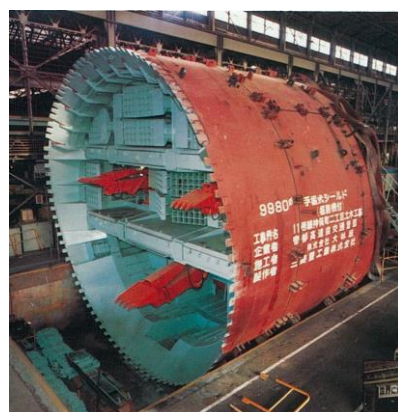


写真 3-3 開放型複線シールド



写真 3-4 泥水式複線シールド

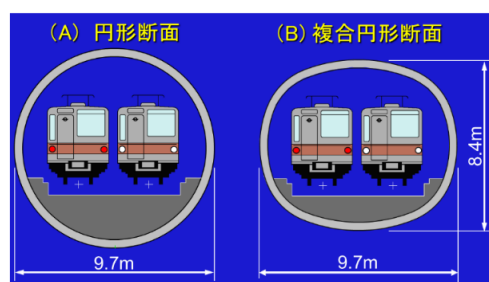


図 3-2 円形断面と複合円形断面

- ・建設発生土等を開削工事埋戻し用流動化処理土やインバートの材料として再利用
- ・複合円形断面の採用によるシールド発生土量低減(円形断面に比べ断面積が約 10%減)



写真 3-2 副都心線における環境負荷低減の取り組み例

3.4 副都心線のアンダーピニング工事

副都心線池袋～渋谷間では、多くの既設路線との交差部があること、また、雑司が谷駅においては都電荒川線直下での施工などがあったことから、様々な方式によるアンダーピニング工事を多く施工したことも特徴的である。中でも創意工夫を講じたアンダーピニング工事としては、新宿三丁目駅における丸ノ内線のアンダーピニングが挙げられる(図 3-3、写真 3-3)。下受け桁を副都心線本体構造に利用する SRC 構造を採用し、下受け桁撤去工程の省略、本体構造鉄筋量の低減などによる工程短縮とコスト縮減を図った。

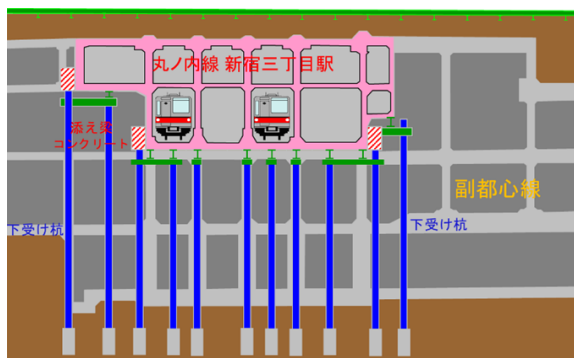


図 3-3 丸ノ内線アンダーピニング断面図



写真 3-3 アンダーピニング施工状況

4. 開業後の課題とその克服

4.1 小竹向原駅における平面交差と列車遅延

2008 年 6 月 14 日、池袋～渋谷間の開業により待望の副都心線全線開通を迎え、人々の社会生活を支える新たな地下鉄路線が誕生した。大変明るい出来事になるはずであったのだが、深刻な問題が発生した。慢性的な列車運行遅延の発生により、利用する旅客から笑顔を奪ってしまったのである。

1975 年時点の需要に基づく基本計画では、混雑時の最小運転間隔を 2 分 30 秒とし、東武・和光市方面から 24 本、西武方面から 24 本の列車が小竹向原駅に進入、そのうち東武・和光市方面から有楽町線、西武方面から副都心線に各 6 本ずつ、計 12 本の列車が平面交差渡りを通して運行する計画としているものの、平面交差による支障はなく運行が可能とされていた(図 4-1)。



図 4-1 基本計画策定時の運行計画

しかし、池袋～渋谷間の開業までに輸送需要が増大し、副都心線開業時点では東武・和光市方面からは基本計画策定時を上回る 25 本、西武方面から 16 本の列車が小竹向原駅に進入、そのうち東武・和光市方面から有楽町線に 14 本、西武方面から副都心線に 6 本の計 20 本の列車が平面交差渡りを通過することになった(図 4-2)。需要動向を鑑み、有楽町線 24 本、副都心線 17 本で運行したが、さらに東急線が新たに加わる 5 社相互直通運転開始時(2013 年 3 月)には副都心線内で最大 7 本の運行本数増加が必要となる。

ここで課題となったが「平面交差」である。小竹向原駅の配線上、全ての列車が「東武・和光市方面→副都心線」、「西武方面→有楽町線」という運行計画であれば、平面交差を必要としないため安定的な運行が期待できる(図 4-3)が、平面交差渡りを通過する場合、2 本の列車が小竹向原駅をほぼ同時に発車すると、一方が平面交差渡りを通過するまでもう一方は必ず駅間停車が必要となり、遅延等の影響を双方が受けやすくなる。既に運行している東武・和光市方面から有楽町線へ向かう交差列車 14 本を減少することは、旅客利便性の低下に直結するため、交差列車本数を維持して東急線とのダイヤを策定しなければならなかった。

しかし、副都心線開業直後から、この平面交差部が隘路となって大幅な遅延が顕在化しており、平面交差を解消しなければ遅延発生による運行の混乱が長時間・広範囲に波及する。そこで、「東急線との相互直通運転開始までに、せめて都心に向かう方向だけでも平面交差を解消する!」という時間に制約がある中で、非常に難しい課題克服に挑むことになった。

4.2 平面交差解消対策としての連絡線設置工事

既存の小竹向原～千川間のトンネルは、要町通り(幅員約 40m)の下に敷設されている。連絡線設置計画にあたっては、工事中も鉄道施設機能を確保すること、有楽町線と副都心線が小竹向原～千川間で平面交差しないような連絡線設置とすること、千川駅のホーム改造は最小限とし、極力、列車停止位置の変更を少なくすること等に留意した。こうした条件を踏まえ、連絡線接続部の断面、列車通過速度を踏まえた分岐器の選定や設置位置などの検討を行い、平面交差解消対策工事の範囲を延長約 410m と定めた(図 4-4)。

当初計画では、工事全体を開削工法で施工する案も検討したが、沿道への環境配慮、既設構造物の改造範囲や地上部施工範囲を極力減らすことを考慮し、連絡線はシールド工法(単線シールドトンネル)によることにした(図 4-5)。

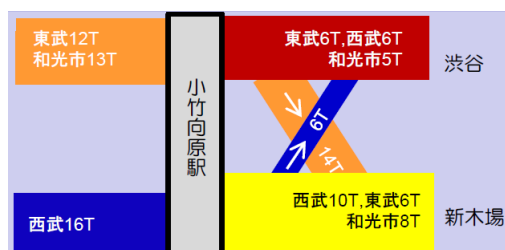


図 4-2 副都心線開業時の運行計画

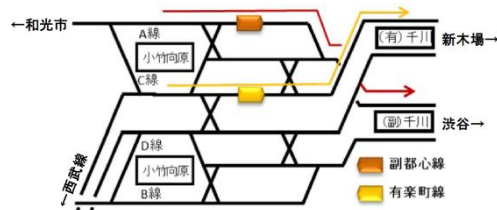


図 4-3 平面交差がない運行計画

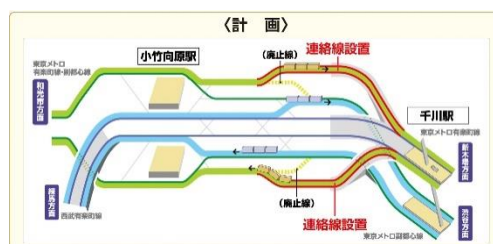


図 4-4 平面交差解消対策計画

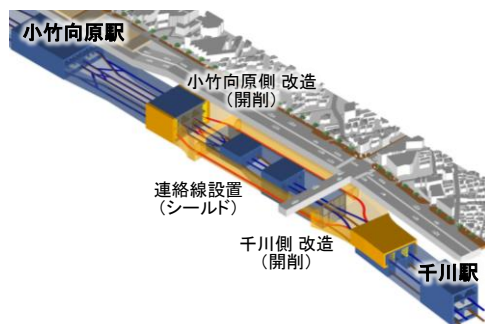


図 4-5 連絡線設置3D イメージ

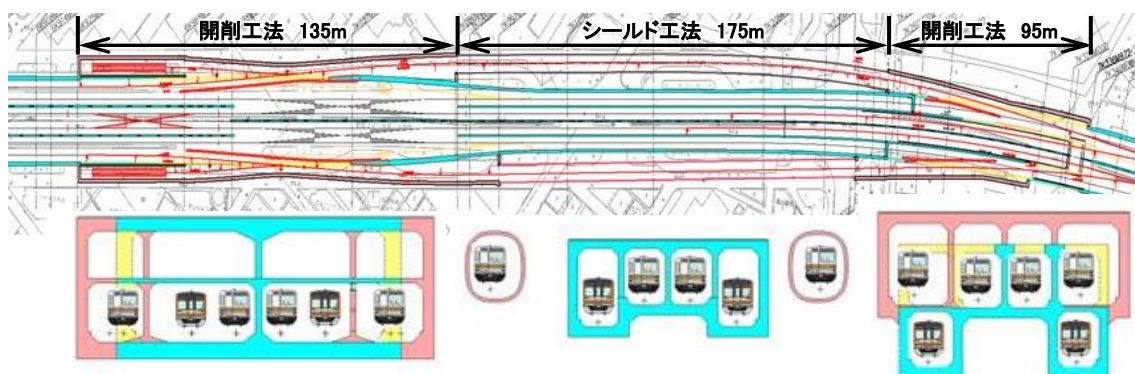


図 4-6 小竹向原～千川間連絡線設置工事 平面・断面図

小竹向原方の開削トンネルは、既設構造物の両側に連絡線構造物を接合する構造(図 4-6 左下)とした。千川方の開削トンネルは、有楽町線として運行している地下1階部構築を拡張して連絡線構造物を築造するとともに、縦断勾配を変更する必要もあるため既設上床版の一部を撤去しなければならず、撤去作業を可能な限り軌道階から行わない施工方法を検討し、新設上床版と既設上床版との離隔を2m程度確保することとした(図 4-6 右下)。連絡線(シールドトンネル)は、既設構造物の外面と官民境界との離れが限られる中、民地部との十分な離隔確保と既設構造物への影響抑制、また、トンネル断面縮小による環境負荷低減などを考慮し、副都心線明治神宮前～渋谷間で考案・採用した複合円形断面の考え方を応用し、幅方向を縮小した断面形状(W5, 500×H6, 000)とした(写真 4-1)。



写真 4-1 単線複合円形断面トンネル

営業線における工事のため、作業時間やスペースの制約に加え、新旧構造物の接合や既設部材の撤去、軌道敷設替えなど技術的難度も非常に高い工事となったが、様々な技術開発と創意工夫を凝らすとともに、軌道・電気部門はもとより運転・営業部門も含め全社一丸となって取り組んだ結果、目標としていた「2013年3月の池袋方面連絡線供用開始」を成し遂げ、平面交差解消という課題を克服した。また、2016年2月には連絡線が全面開通し、さらなる安定運行が可能となった。

4.3 連絡線設置後の列車運行

池袋方面の連絡線設置前の有楽町線遅延は、輸送障害等のダイヤ乱れ時に小竹向原駅付近での列車輻輳による遅延が急上昇し、さらに新木場駅に向かって遅延が増大する傾向であったが、連絡線設置により有楽町線小竹向原～千川間の運転時間が約52秒改善されたほか、小竹向原駅での遅延増加が抑制され路線全体としても大幅に減少した。また、連絡線による駅間距離の短縮により、同駅間の平常時運転時間も約8秒短縮された。

また、2016年の連絡線全面開通により、東武・和光市方面及び西武方面への連絡線も供用開始した。供用前の遅延傾向は、和光市駅近傍での列車集中による遅延が増加するほか、小竹向原駅近傍では有楽町線・副都心線の遅延を相互に波及させていたが、連絡線設置により平常運転時には、有楽町線(千川→小竹向原)では運転時間が平均約21秒、最大約67秒、副都心線(千川→小竹向原)では平均約8秒、最大約35秒改善されたほか、輸送障害発生時においても、有楽町線で平均約21秒改善するなど、安定輸送に大いに貢献した。以上

<※本文掲載の図・写真は全て東京地下鉄株式会社提供>