

# 戦後復興期～高度成長期における 地下鉄建設技術の発達について

小野田 滋

フェロー会員 鉄道総合技術研究所 情報管理部（〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38）  
E-mail:shigeru.onoda.71@rtri.or.jp

戦前は東京と大阪のみに限られていた日本の地下鉄は、戦後になると名古屋（1957）、札幌（1971）、横浜（1972）、神戸（1977）、京都（1981）、福岡（1981）、仙台（1987）と拡大し、政令指定都市クラスの大都市には不可欠な交通インフラとして普及した。

本論文では、戦後の地下鉄建設にもたらされた要素技術としてシールド工法、地下連続壁工法、アンダーピンニング工法、凍結工法を取り上げ、建設時の記録等に基づいてそれぞれの技術がもたらされた経緯や意義を明らかにした。また、地下鉄に建設された橋梁についても、いくつかの特徴的な橋梁が建設されたことを指摘した。

**Key Words:** history of subway, shield tunneling method, freezing method, diaphragm wall, post-WW2

## 1. はじめに

戦前期は東京と大阪のみに限られた地下鉄道は、路面電車で代わる都市内交通機関として、戦後になると急速に発展し、大都市には不可欠な交通インフラとして整備が進められた。本論文では、戦後復興期～高度成長期（1945（昭和 20）年～1970（昭和 45）年頃）に開業した地下鉄を対象として、この時代における地下鉄建設に用いられた技術について概観する。なお、この時代で区切ったのは、この時代までの地下鉄は東京、名古屋、大阪の三大都市圏に限られていたこと、その後の地下鉄工事に継承される要素技術がこの時期に確立されたと考えられることなどによるもので、具体的には帝都高速度交通営団（現在の東京地下鉄）の丸ノ内線、日比谷線、東西線、千代田線、東京都交通局の浅草線、三田線、名古屋市交通局の東山線、名城・名港線、大阪市交通局（現在の大阪市高速電気軌道）の御堂筋線、谷町線、四つ橋線、中央線、千日前線、堺筋線の 14 路線である。

## 2. 戦後の地下鉄道の発達

### 2.1 東京都の地下鉄

東京の地下鉄は、戦前期に現在の東京メトロ・銀座線にあたる浅草～渋谷間が全通したが、戦後は丸ノ内線の建設から開始され、日比谷線、東西線、千代田線が 1970（昭和 45）年までに開業した。一方、戦前期から計画されていた東京都による地下鉄事業も開始され、1960（昭和 35）年に浅草線が開業し、続いて 1968（昭和 43）年に三田線が開業した。

浅草線では、日本で最初の試みとして、他社線との相互直通運転を開始し、浅草線を介して京成線（京急線は 1968（昭和 43）年から）が乗り入れた。相互直通運転にあたっては、軌間や信号方式、車両の規格の統一などが行われ、電車線は架空線式を採用した。同様の相互直通運転は、営団地下鉄の日比谷線（東武伊勢崎線と東急東横線）、東西線（国鉄総武本線と中央本線）、千代田線（小田急小田原線と国鉄常磐線）でも行われ、日本の地下鉄固有の運転方式として、名古屋市、京都市、大阪市、福岡市でも採用された（海外でもソウル地下鉄などで用いられるが一般的ではなく、地下鉄と都市近郊鉄道の相互直通運転はほとんど普及していない）。

### 2.2 名古屋市の地下鉄

名古屋市の地下鉄は戦前から計画が進められていたが実現せず、戦後に具体化された。戦後の 1947（昭和 22）年に立案された 6 路線、延長 55km の整備計画では、名鉄線や近鉄線との相互直通運転や、国鉄名古屋駅への乗入れも検討されていたが、計画の縮小によって第三軌条式の小断面地下鉄として建設され、1957（昭和 32）年に東山線の名古屋～栄町（のち栄）間が開業した。1965（昭和 40）年に開業した名城・名港線も第三軌条式で、他社線との相互直通運転は行れず、1979（昭和 54）年に鶴舞線と名鉄豊田線との相互直通運転の開始で実現した。

表-1 戦前期～戦後復興期～高度成長期（1927～1970 年）における日本の地下鉄道

[illegible]

### 2.3 大阪市の地下鉄

大阪市の地下鉄は、戦前期に御堂筋線の梅田～天王寺間と四つ橋線の大国町～花園町間が開業していたが、戦後は工事を中断したままであった御堂筋線の延伸区間（天王寺～昭和町）が戦後の地下鉄としては最も早く1951（昭和26）年に開業した。その後、谷町線、中央線、千日前線が第三軌条式を用いて開業した。

最初の相互直通運転は、1969（昭和 44）年に開業した堺筋線で初めて採用され、架空線式により阪急千里線・京都線との相互直通運転を開始した。しかし、架空線式による相互直通運転は堺筋線のみで、翌年に実施された御堂筋線と北大阪急行電鉄、1986（昭和 61）年に実施された中央線と近鉄東大阪線（けいはんな線）との相互直通運転では、いずれも乗り入れ側が第三軌条方式で新線を建設して実現した。

なお、他の大都市の公営交通事業（路面電車の時代を含む）は、私鉄の事業を自治体を買収して公営化したのが、大阪市は当初から市営交通事業として事業を行ったのが特徴で、日本で初めて公営事業として地下鉄を開業させた自治体であった。また、御堂筋の開削工事と地下鉄建設を併施した際に、軌道法の適用を受けたため、その後も軌道法によって地下鉄事業を継続している。

### 3. 主な地下鉄建設技術

### 3.1 シールド工法の導入

戦後の地下鉄建設を代表した技術のひとつが、シールド工法であった。戦前期におけるシールド工法は、鉄道省によって 1921（大正 10）年に羽越本線・折渡トンネルの膨張性地質の突破に用いられたのが最初で、シールド掘削機の設計は鉄道省大臣官房研究所の田中豊によって行われ、横河橋梁製作所で製造された。その後、丹那トンネルの水抜坑、関門トンネルの本坑の掘削にも用いられたが、この 3 例のみにとどまり、地下鉄工事には用

いられなかった。戦後は、営団地下鉄・丸ノ内線の工事  
でルーフシールドが初めて用いられ、これを端緒として  
地下鉄工事を中心に普及した。戦前期を含む初期の地下  
鉄工事は、比較的浅い地盤にトンネルを設けたため、開  
削工法（カットアンドカバー）を主体として一部で潜函  
工法などを用いたが、都市部の地下空間利用が進むとと  
もに、より深い地盤や地盤条件の悪い軟弱地盤を掘削す  
る必要が生じ、こうした条件に適したシールド工法が用  
いられることとなった。以下、初期の地下鉄工事で用い  
られたルーフシールド、円形シールド、機械式シールド  
（メカニカルシールド）、かんざし桁を用いた地下駅の  
構築についてその事例を紹介する。

### (1) ルーフシールド

営団地下鉄・丸ノ内線のルーフシールド工法は、千代田区永田町の首相官邸前（国会議事堂前～赤坂見附間）の工事で適用されたが、この区間は土被りが深いこと（最大 15m）、クイックサンド現象を起こしやすい洪積細砂層を主体とする地盤であること、鋼矢板の打込みが地質の関係で困難であること、周辺は首相官邸や国会議事堂などが立地して道路面の使用に極度の制限を受けること、などの理由からルーフシールド工法を採用するこ

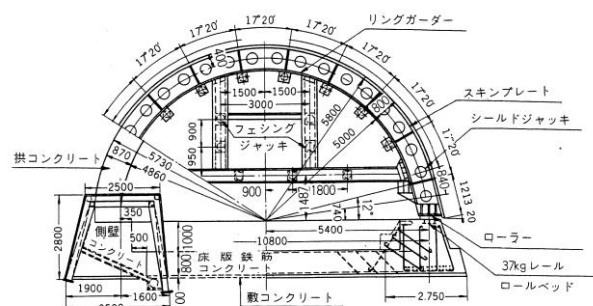


図-1 首相官邸前で用いられたルーフシールド\*6

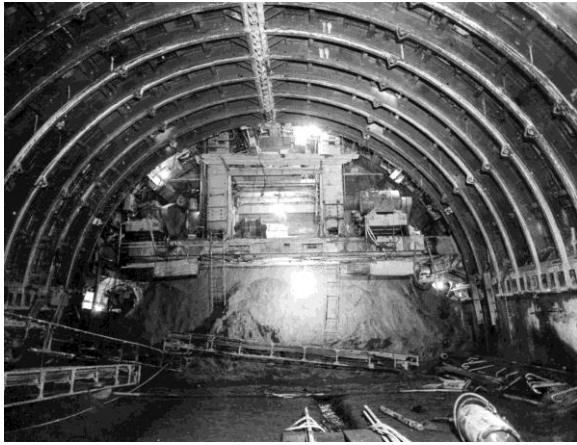


写真-1 首相官邸前のルーフシールド工事

となった。ルーフシールド工法は、半円シールドとも呼ばれ、アーチ部分のみを鋼殻で覆った構造のシールドで、同時期に行われた関門国道トンネルの工事でも用いられたが、姿勢制御が難しく、より施工性に優れた円形シールドが普及したため、その後は駅部（有楽町線永田町駅など）での部分的な使用にとどまった。

掘削作業は人力により行われ、覆工は鉄筋コンクリートセグメントを用いる予定であったが、試験の結果が思わしくなかったため、場所打ちコンクリートが用いられた。ルーフシールド区間の施工は 1957（昭和 32）年 5 月に準備工事に着手し、翌年 2 月～8 月にかけて延長 231m 区間を掘削して同年 11 月に完成し、1959（昭和 34）年 3 月に開業した。

## （2）円形シールド

円形シールドは、強大な地圧にも耐え、施工も容易で、セグメントの形状も単純化できるなど様々なメリットが

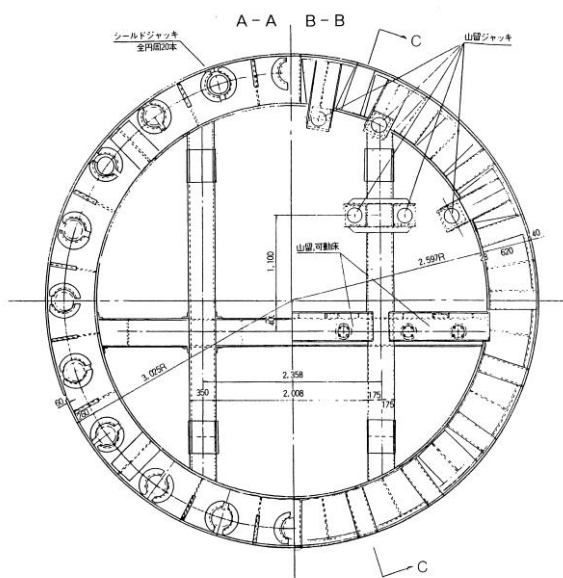


図-2 堀割町工区で用いられたシールド掘削機\*10

あるため、シールド掘削機の標準形式として広く普及した。戦前のシールドもこの形式であったが、戦後の鉄道トンネルで初めてこの形式を使用したのは、名古屋市営地下鉄・東山線の堀割町工区（池下～覚王山間）で、外径 6.05m、内径 5.19m（完成後のトンネル内径は 5.10m）の単線用シールド掘削機が用いられた。掘削面は切羽が前面に露出する開放式（オープン式とも）で圧気を併用し、掘削は手掘りにより行われた。また、セグメントは中子型の鉄筋コンクリート製で、最後に二次覆工コンクリートで内巻を行った。

単線並列式で 2 機の掘削機を使用し、1 番線は延長 388m、2 番線は延長 357m を掘削した。工事は、1961（昭和 36）年 4 月から準備工事を開始し、1 番線は 1961（昭和 36）年 11 月～1962（昭和 37）年 4 月、2 番線は 1962（昭和 37）年 2 月～同年 6 月に掘削作業を行って同年 9 月に完成し、1963（昭和 38）年 4 月に開業した。堀割町工区（一般には「覚王山シールド」とも呼ばれる）で使用された円形シールドは、鉄筋コンクリートセグメントとともにシールド工法のスタンダードとなり、戦後のシールド工事の原点となった。

## （3）機械式シールド

当初のシールドトンネルは、開放式で手掘りによる人力掘削を基本としていたが、切羽の掘削をカッターによって機械的に行う機械式シールド（「メカニカルシールド」とも）が開発され、大阪市営地下鉄・谷町線の第二工区（天満橋～谷町四丁目間：「谷三（谷町三丁目）工区」とも）の下り線（南行線側）で初めて使用された。

この工区では、上り線（北行線側）に手掘式シールドを用い、到達点で解体後に下り線側に転用する計画であったが、工程上の都合によって下り線に機械式シールドを導入することとなった。掘削機は外径 6.97m で回転用ジャッキで面板を回転させ、ベルトコンベアーと運搬車によって掘削土砂を後方に排出した。

初めての試みであったこともあり、掘削機の姿勢制御

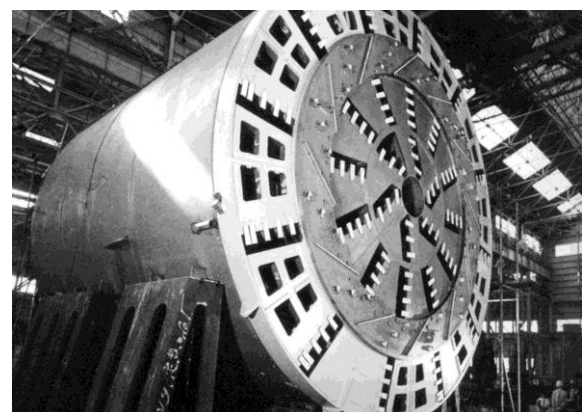


写真-2 「谷三シールド」の掘削機\*11

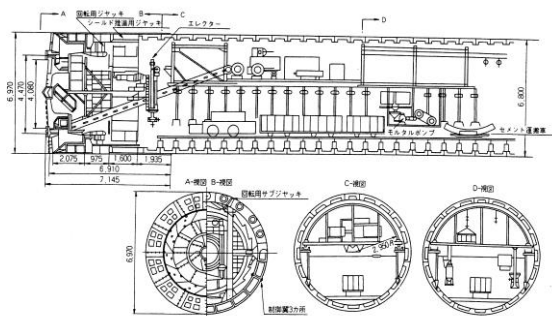


図-3 「谷三シールド」の施工\*9

が難しく、地質の変化によって掘削力が低下するなどの困難に遭遇したが、1965（昭和 40）年 10 月に掘削を開始して、翌年 6 月までに延長 447m を掘削し、同年 10 月に完成して 1967（昭和 42）年 3 月に開業した。掘削作業が安定してからは、上り線の手掘り掘削に比べて約 1.5 倍の掘進速度を記録し、機械掘りの優位性が示された。

なお、第二工区の上り線工事では掘削途中から圧気を併用したが、下り線は薬液注入のみで圧気を使用しなかった。また、セグメントは鉄筋コンクリート中子式で、二次覆工コンクリートで内巻してトンネル内径を 5.7m とした。機械式シールドはその後、泥水加圧式、土圧式などが開発され、手堀式に代わるシールド掘削機の標準スタイルを確立した。

#### （4）かんざし桁によるシールド駅

地下鉄駅の施工法は、開削工法が使用されていたが、駅が地下深部に設けられるようになるとシールド工法が用いられるようになり、乗降場（プラットフォーム）を設けるために様々な工夫が行われるようになった。

1967（昭和 42）年に完成した営団地下鉄・東西線の木場駅では、単線並列のシールドトンネル内にそれぞれプラットフォームを設けたが（サイドホーム式）、1968（昭和 43）年に完成した都営地下鉄・浅草線の高輪台駅では単線並列のトンネルを縫地工法で接続して島式ホームを構成した。営団地下鉄・千代田線の新御茶ノ水駅では、シールド工法によって単線並列トンネルを完成したのち、H型鋼でかんざし桁を圧入し、左右のトンネルを架け渡し、鋼管柱とH型鋼による変形防止工で上床桁を支え、セグメントを外しながら中間部を掘削してしま式ホームを完成させた。工事は、1966（昭和 41）年 11 月に開始し、1969（昭和 44）年 11 月に完成し、同年 12 月に開業した。

単線並列トンネルを接続して島式ホームを構成する施工法は、その後も中間部の掘削にルーフシールド工法を用いる施工法などが開発され、営団地下鉄有楽町線の

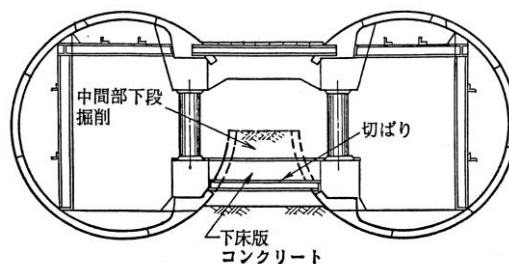


図-4 かんざし桁を用いた新御茶ノ水駅の横断面図\*7

永田町駅（1974）、同・半蔵門線の永田町駅（1979）、同・三越前駅（1989）で用いられた。シールド工法を用いた地下鉄駅の建設は、さらに多円形シールド工法の適用へと発展し、三円形シールド工法を用いた大阪市営地下鉄長堀鶴見緑地線の大阪ビジネスパーク駅（1996）、営団地下鉄・南北線の白金台駅（2000）などで用いられた。

### 3.2 新工法の導入

地下鉄の建設工事は、トンネル技術を主体としたが、このほかにも地下工事を行うための様々な特殊工法（凍結工法、薬液注入工法、デブウェル工法など）が用いられた。その多くは、すでに他の分野で実用化された技術ではあったが、これらを地下鉄工事の現場条件に合わせて適用しながら工事が進められた。また、開削トンネルの工事では、従来の親杭式横矢板工法に代わって、地下連続壁工法が普及した。ここでは、こうした新工法のうち、イコス工法とアンダーピンニング、凍結工法についてその適用例を概説する。

#### （1）イコス工法

イコス工法は、ウィーン大学教授の Christian Veder が開発した地下連続壁の施工法の一つで、イタリアの Impresa di Costruzione Opere Specializzare (ICOS) 社が実用化にあたったためその略称で呼ばれるが、発明者の名から Veder 工法とも呼ばれる。日本では、1959（昭和 34）年に中部電力畑薙ダムの止水壁に用いられたのが最初で、営団地下鉄ではこうした内外の動向を踏まえて将来の地下鉄建設に適した最新技術を導入する目的で、丸ノ内線方南町支線の中野坂上～中野新橋間の 24m 区間を試験工区に定めた。構築は、複線ボックスラーメン構造で、側壁部分をクラムシェルによって掘削してベントナイト液を充填したのち、鉄筋籠を吊り込み、ベントナイト液をコンクリートに置換えて側壁部完成させた。その後、掘削と上床版、下床版中壁の施工を行って、構築を完成させた。工事は 1961（昭和 36）年 3 月に開始され、同年 10 月に完了したが、初めての試みであったこともあって、ベントナイト溶液の漏洩などトラブルがあった。イコス工法はその後日比谷線や東西線などの工

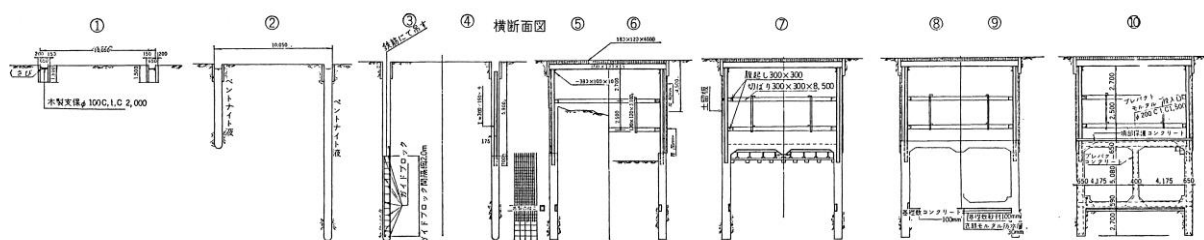


図-5 イコス工法の施工順序図\*4

事でも用いられ、その他の連続壁工法とともに地下鉄工事で普及した。

## (2) アンダーピンニング

丸ノ内線は、東京から国鉄線の下をくぐり抜けて有楽町を経由し、ふたたび国鉄線の下をくぐって霞が関方面へ至るルートが選択されたため、国鉄新永間市街線の高架橋を2カ所でくぐることとなり、工事はすべて日本国有鉄道に委託された。

このうち、東京～有楽町間の第4有楽町橋高架橋については、橋台となるアーチを内巻補強し、新設される橋脚と工事桁として使用する仮設の槽状桁（トラフガーダ）を用いて線路をいったん受け替え、3径間分のアーチ高架橋を撤去した。撤去した高架橋部分は、工事桁を撤去しながら本設となる複線 PC 桁を2径間で並列して架設し、さらにその直下を開削方式で掘削して、矩形断面の複線トンネル（中柱付）を構築し、ふたたび埋め戻

した。工事は、日本国有鉄道東京工事に委託され、1956（昭和 31）年8月に着手し、1958（昭和 33）年3月に竣工（丸ノ内線東京～西銀座間の開業は 1957（昭和 32）年12月15日）した。

また、有楽町～新橋間の第1有楽町橋高架橋は、煉瓦アーチを撤去して、支間 7.0mの PC 桁×2連が架設され、中間に橋脚を設けた。丸ノ内線のトンネルは、高架橋の全荷重を鉄筋コンクリート門形ラーメンの地下桁でアンダーピンニングし（地下桁の基礎は、ニューマチックケーソン工法で施工）、幅 9.4m×高さ 5.48mの矩形断面の鉄筋コンクリート構造の複線トンネル（中柱付）を開削工法で構築した。PC 桁は、桁長 7.585m×桁高 0.5mの I 形断面の桁を線路横断面方向に 11 本並べて単線分の桁とし、横締めをして一体化させ、さらにこれを線路方向に4枚並べて複々線の線路を構成した。第4有楽町橋高架橋と同様に工事は日本国有鉄道東京工事に委託され、1957（昭和 32）年4月に着手、翌年8月に竣工し、同年10月15日に丸ノ内線西銀座～霞ヶ関間が開業した。

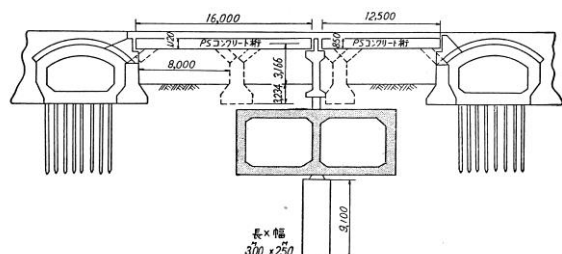


図-6 第4有楽町橋高架橋のアンダーピンニング\*1



写真-3 第1有楽町橋高架橋のアーチ改築部分の現状

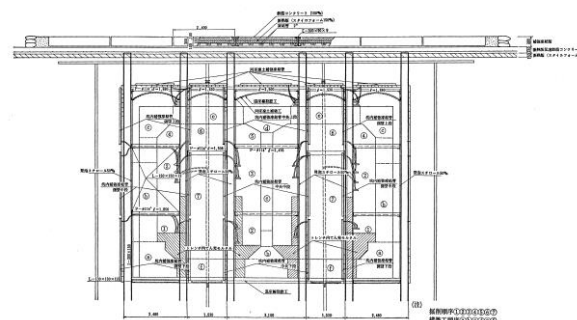


図-7 日本橋川における凍結工法区間の横断面図\*7

本橋川河底横断工事では、1924（大正 13）年に架設された道路橋の神田川橋が架かり、千代田線のトンネルはその直下に開削工法で建設された。現場は、神田川橋のほかにも首都高の橋脚が隣接し、河川舟運の確保などを考慮して、現状の河川容積のまま施工が可能で、他の構造物にも影響が少間隔、凍結速度、凍結膨張の影響などについて各種の試験を実施して決定し、冷凍機を用いて塩化カルシウム溶液を $-20\sim-30$  度に冷却した。凍土の掘削はトレンチ工法によって行われ、1967（昭和 42）年に着工して 1969（昭和 44）年 7 月に竣工した。

### 3.3 橋梁技術

地下鉄はその大部分が地下区間で、河川の下をくぐることが多いが、郊外の延伸部や地形条件によっては地上に高架橋を建設し、河川を橋梁で横断している。高架橋や橋梁の数も限られるため、一般の鉄道のような橋梁の標準設計も必要なく、ほとんどはそれぞれの現場条件にあわせて個々に設計されている。このため、数は少ないが、特徴的な橋梁が設計され、地下鉄の特徴となっている。ここでは、復興期～高度成長期の地下鉄の橋梁の中から、御茶ノ水橋梁（丸ノ内線）、馬込第 1 架道橋（浅草線）、新淀川橋（御堂筋線）を紹介してみたい。

#### （1）御茶ノ水橋梁



写真-4 御茶ノ水橋梁の現状



写真-5 御茶ノ水橋梁のリベット接合

御茶ノ水橋梁は、1956（昭和 31）年に営団地下鉄・丸ノ内線が、御茶ノ水～淡路町間で延長開業した際に架設した橋梁で、神田川を斜めに急角度で横断するため斜桁（左約 33 度）として設計された。しかも半径 180m の曲線区間で、神田川の舟運に必要な空頭を確保しつつ、神田川の水面近くを横断しなければならないという制約条件があり、他の神田川の橋梁と同様に橋脚を河川に設けることなくひと跨ぎで神田川を渡っていることを設計条件とした。また、風致地区に架設されることを重視し、地下鉄技術研究会の議論や地下鉄神田川橋梁懇談会の検討を経て、その詳細設計を進めることとなった。

その結果、支間 36m の複線下路ボックスガーダが選択された。主桁の中心間隔は 11m、主桁高さは中央部で 2.2m としたが、これは車窓の下端より桁高を低く抑え、車窓からの眺望を確保するために決められたと考えられる。また、急曲線区間に架設された橋梁であったため、床組の縦桁を曲線に合わせてシフトして配置したのが特徴で、曲線桁ではなく直線桁として設計された。

主桁の形状について、委員の田中豊が矩形の主桁を提案したが、東京都建設局長だった石川栄耀がカマボコ形とするよう主張したため、端部の桁高をやや低くしてカマボコ形に変更したとされる。また、この時代は、鉄道橋梁にも溶接接合が導入されるようになっていたが、まだリベット接合が主流で、御茶ノ水橋梁もリベット接合により製作された。田中は、リベットに皿鉚を用いて仕上げることを主張し、これを用いて主桁の外側面および上面を溶接橋梁のように平滑に仕上げた。工事は 1955（昭和 30）年 6 月に着工し、同年 10 月に竣工した。

#### （2）馬込第 1 架道橋

都営地下鉄・浅草線西馬込駅の終端の地上部に車両基地として馬込車庫が設けられたが、丘陵地を切り開いたため地形の関係で引き上げ線の一部を高架橋とせざるを得ず、出入庫線高架部として道路を跨ぐ架道橋がいくつか架設された。その最南端に架設された馬込第 1 架道橋は、支間 53.95m、2 主桁の複線下路ボックスガーダと



写真-6 馬込第 1 架道橋の現状

して設計された。この形式は、営団地下鉄丸ノ内線の御茶ノ水橋梁と同じであったが、支間長は約 1.5 倍となり、主桁の最大高さも中央部で 2.8m と約 1.3 倍になった。工事は 1967（昭和 42）年 6 月に着工し、翌年 1 月に竣功した。

### （3）新淀川橋梁（新淀川大橋）

大阪市営地下鉄・御堂筋線は、戦前期に梅田～天王寺間が開業したが、梅田以北についても延伸する計画で、淀川には吊橋の架設を想定していた。しかし、戦争の影響で 1939（昭和 14）年に工事は中止され、新淀川橋梁の橋脚を施工したのみで終戦を迎えた。

戦後、千里ニュータウンの開発、東海道新幹線新大阪駅の開業などで淀川右岸と都心とのアクセスを向上させることとなり（のちに万国博覧会輸送にも用いられる）、新淀川橋梁が建設されることとなった。調査の結果、戦前に建設された下部構造を補強するのみで再利用できることが判明したが、道路併用橋とすることは工期や保守

管理上無理があるため、地下鉄専用の単独橋として設計され、のちに両側に道路橋を単独で増設した。

中央部の橋梁形式は、3 径間連続箱桁、4 径間単純桁（橋脚新設）、3 径間単純桁などが比較検討されたが、3 径間のゲルバー式とし、中央径間は安定性と美観を考慮してランガー式とした。ランガーの架設はケーブルエレクトクションで行われ、1964（昭和 39）年に完成した。

## 4. まとめ

本論文では、建設時の記録等に基づいてそれぞれの技術がもたらされた経緯や意義を明らかにするとともに、地下鉄に建設されたいくつかの橋梁についてもその沿革や特徴について言及した。本論文で指摘した要素技術は、土木遺産としての戦後の地下鉄を評価する上での技術的評価指標としても重要なポイントである。

**謝辞：**本研究は、公益社団法人土木学会土木史研究委員会が文化庁より受託した近現代建造物緊急重点調査（土木）（平成 27～30 年度）の成果である。

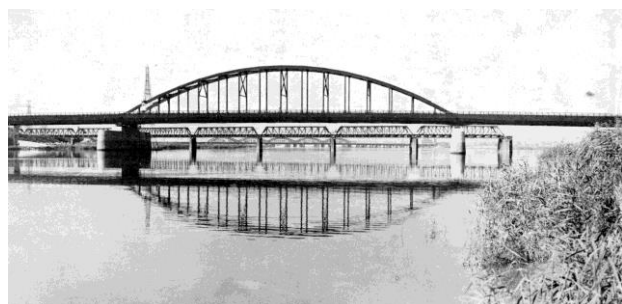


写真-7 完成時の新淀川橋梁\*3



写真-8 新淀川橋梁（新淀川大橋）の現状

## 参考文献

- 1) 『東京地下鉄丸ノ内線建設史（下巻）』帝都高速交通営団（1960）
- 2) 清水雄吉、中島誠也『地下鉄施工法』山海堂（1961）
- 3) 鉄骨橋梁協会＋日本橋梁建設協会共編『鉄骨橋梁年鑑 1965』城南書院（1965）
- 4) 『東京地下鉄荻窪線建設史』帝都高速交通営団（1967）
- 5) 『都営地下鉄建設史－1号線－』東京都交通局（1971）
- 6) 『シーロッド工法による鉄道トンネル実施例集』日本鉄道施設協会（1974）
- 7) 『東京地下鉄千代田線建設史』帝都高速交通営団（1983）
- 8) 『大阪市地下鉄建設五十年史』大阪市交通局（1983）
- 9) 『シーロッド工法による鉄道トンネル実施例集（その2）』地下鉄技術協議会（1985）
- 10) 『資料集・名古屋の地下鉄建設』名古屋市交通局（1986）
- 11) 『大阪市地下鉄建設 70 年のあゆみ』大阪市交通局（2003）
- 12) 『シーロッド技術変遷史』日本トンネル技術協会（2016）

（2019.4.8 受付）

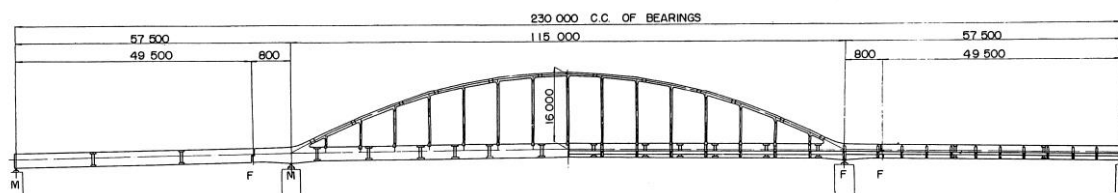


図-8 新淀川橋梁立面図\*3