

4 心円シールド工法による地下鉄駅の建設 CONSTRUCTION OF SUBWAY STATION WITH 4-CENTERED SHIELD METHOD

粥川幸司*・中村益美**・小浦場博***・大西 亮***

Koji KAYUKAWA, Masumi NAKAMURA, Hiroshi KOURABA and Ryo ONISHI

Roppongi station in Metropolitan Subway Route No.12, which has been planned and constructed as upper and lower twin-tunnels, was the first case in the world 4-centered shield method has been employed in construction. The station is located in a very busy district of Tokyo. Beside that, in the underground there exist complicated systems of electric transmission lines and electric manholes. Under such difficult site conditions, in order to preserve the surrounding environment, and moreover, to reduce the construction period, this method has been developed and applied. As a result of applying this method, a high quality tunnel station was managed to complete and put into operation in time.

Key words: 4-centered shield method, subway station, deep underground

1. はじめに

地下鉄道の建設においては、一般に駅部では開削工法、駅間ではシールド工法が採用されているが、近年の都市の過密化、あるいは地下空間の有効利用という観点から、駅部においてもシールド工法が採用されはじめている。従来のシールド工法による駅部トンネルは、併設の円形シールドトンネルを施工した後、縫地、パイプルーフ、かんざし桁、およびルーフシールド等によるトンネル間の切り上げ工法を併用して建設されている。しかしながら、これらの工法の場合、工種が多岐にわたり施工管理が煩雑になると同時に、工期も延びる傾向にある。さらに、その利用が叫ばれている大深度地下空間では、一般に高水圧下での施工となり安全性、経済性の面でも困難になると予想される。一方、最近では複円形や矩形といった非円形の断面を有するシールド工法が実用化され、その施工実績も年々増えつつある。これらの工法は、円形に比べて不要な空間が少なく、これにともなって掘削土砂量を低減できるということが特徴である。

このような背景において、地下鉄 12 号線六本木駅の建設（図-1, 2）では、日本有数の繁華街である、道路幅員が狭い、大型の地下埋設物が存在するため地下鉄駅が大深度となる、といった施工に際しての種々の制約条件があった。そこで、これらの制約条件を克服しながら周辺環境への影響を最小限に抑制し、なおかつ工期を短く工法として、世界で初めての 4 心円シールド工法による上下二段の地下鉄駅の建設が行われた。本工法は、必要とされる地下鉄駅空間を最小の断面で効率よく、しかも短い期間で建設できることを目指して開発されたものである。実際の施工においては、六本木の地下約 30~40m の深度で上下二段の駅ト

キーワード：4 心円シールド工法、地下鉄駅、大深度

* 正会員 ハザマ 技術・環境本部 技術研究所

** 正会員 東京都地下鉄建設(株) 工事本部

ンネル部分を約 10 ヶ月という短期間で施工を終えることができた¹⁾。本報では、4 心円シールド工法の開発にいたる経緯と工法の適用効果について述べる。



図-1 都営地下鉄 12 号線路線全体図

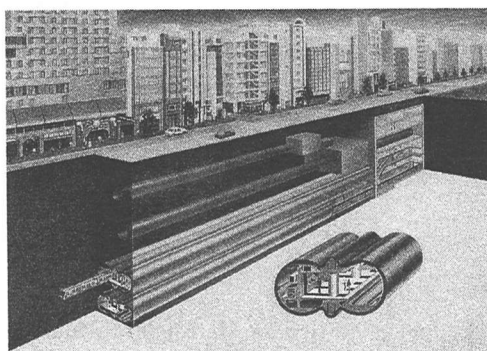


図-2 六本木駅概要

2. 地下鉄 12 号線六本木駅工区の概要^{1) 2)}

2.1 工事の概要

図-3～5 に六本木駅工区の平面図、縦断図、断面図をまとめて示す。駅構造物諸元は以下の通りである。
駅両端部

延長：97m (50m+47m)， 深さ：45m， 工法：開削工法

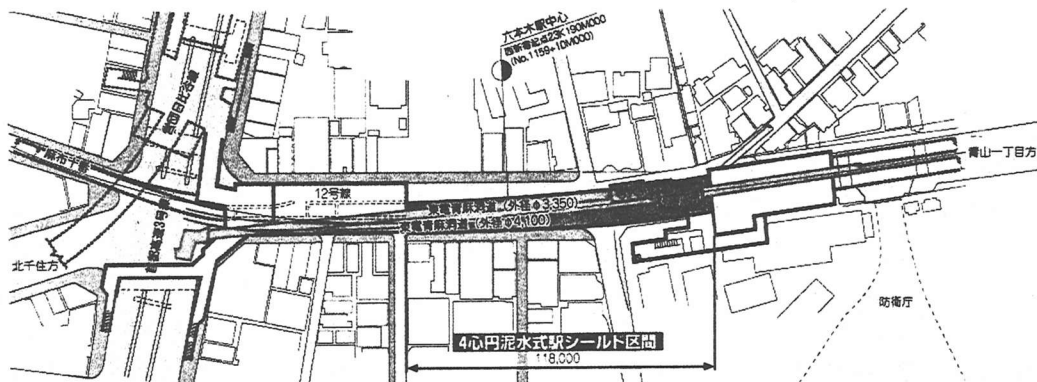


図-3 六本木駅工区平面図

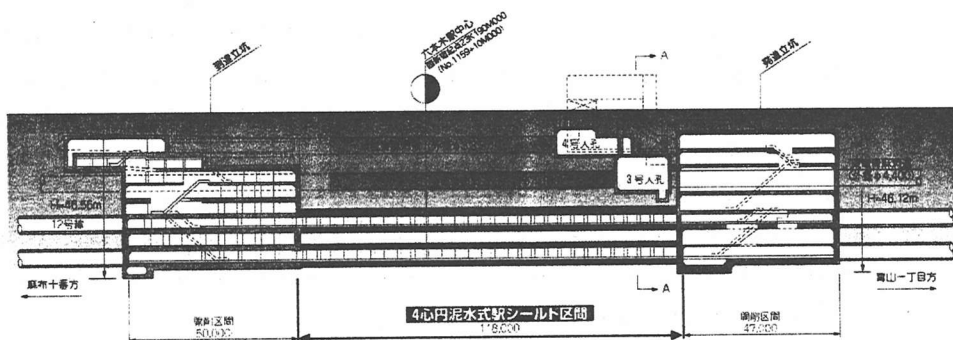


図-4 六本木駅工区縦断図

駅中央部

延長：118m×上下二段， 土被り：27～37m

最小曲線半徑： $R=502\text{m}$ ， 勾配：2‰

工法：4心円シールド工法

2・2 工事の制約条件

駅は六本木の中心部に位置し、営団日比谷線六本木駅と接続して乗り換えができる駅となる。このような繁華街において地下鉄駅を建設する際に、次に示す種々の制約条件があった。

(a) 駅の立地に関する条件

六本木駅と隣接する麻布十番駅を結ぶ路線において、図-5 トンネル断面図，地質状況図
道路幅が非常に狭いため、六本木駅に取り付く路線が
単線上下の並列のトンネルとなる。このため、六本木駅のホーム部が外回り線と内回り線の高さが異なる上
下二段となる。また、六本木の地上は日本有数の繁華街であり、昼夜を問わず歩行者や通行車両で溢れてい
る。このため、施工に際しての道路占有範囲をできるだけ小さく、しかも短期間にする必要があった。

一方、地下鉄駅の施工周辺の地盤は砂層、砂礫層が主体の洪積地盤で比較的硬質である（N値 50 以上）が、透水係数が大きく（ 1.31×10^{-3} ）、また均等係数が 1.9 と非常に小さいため、崩壊しやすい地盤である。さらに、建設予定地には電力洞道 2 本（ $\phi 4.1\text{m}$ 、 $\phi 3.35\text{m}$ 、シールドトンネル）が併走しており、大型の電力人孔（3 号、4 号）も存在している。このため、駅はそれ以深に位置することとなり、駅構造物に対して土圧、水圧などの作用荷重も大きくなる。

(b)社会的ニーズに関する条件

近年の建設工事に対する社会的ニーズとして、経済性の確保や環境の保全が求められている。すなわち、駅建設地の周辺住民や商店街などに対して、騒音、振動や道路占有にともなう交通渋滞をできるだけ少なくすると同時に、短期間で駅を建設する必要がある。また、地盤の掘削においては、掘削土砂量を極力少なくするため、駅機能を満足する必要最小限の駅空間を建設するトンネル工法が求められた。

3. 4 心円シールド工法²⁾

3・1 工法の概要

4 心円シールド工法は、上述した課題を一気に解決する工法として開発されたものであり、同一面内に配

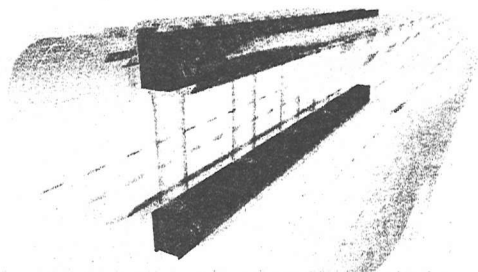


図-6 4心円シールド覆工構造

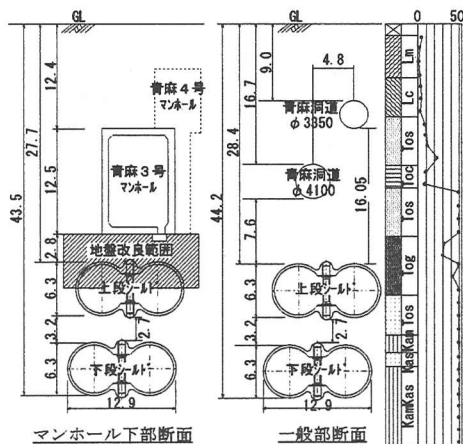


図-5 トンネル断面図，地質状況図

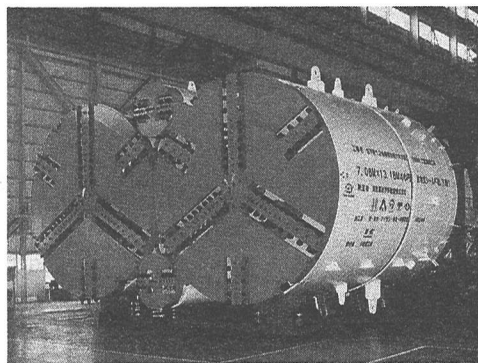


写真-1 4心円シールド機

置された4枚のカッターフェースを有するシールド機にて、必要とされるトンネルの供用空間を一括で掘削すると同時に、駅の覆工構造を完成させる複円形シールド工法である。4心円シールド覆工構造と4心円シールド機を図-6、写真-1に示す。

3・2 4心円シールド覆工構造

図-6に示したように、覆工構造は断面中央の上下に特殊な形状をした一体型セグメントを配置し、その間を4m毎の柱で支持する3次元的な構造となるものである。

一体型セグメント(写真-2)は、箱桁を内蔵しており、この箱桁部材を1リング(1m)毎に高力ボルトで摩擦接合してトンネル軸方向の桁部材を形成する。このため、一体型セグメントはトンネル横断面の通常のセグメント機能と、トンネル縦断方向の桁としての機能を兼ね備えることになる。シールド掘進完了後には後述する組立用柱を撤去し、4mごとに設置した本設の柱のみで支持する。なお、1ピースあたりの重量は約60kNである。

次に、本設の柱(写真-3)は、一体型セグメントとの接合部が鋳鉄、その他は鋼管の重量約70kNの鋼製柱である。なお、掘進時において本設の柱が設置されるリング以外には組立用柱(H形状の鋼製、重量約20kN)を用いる。

一方、側円部には鋼枠とコンクリートの合成構造セグメント(写真-4)を用いている。本セグメントの各継手にはボルトを一切使わない嵌合方式を用いており、さらに組立精度を向上させ、かつ位置決めを容易にするために、セグメント間は連結ピン継手、リング間はカム式ワンタッチ継手を採用している。なお、この継手方式は一体型セグメントにも採用している。

トンネルの品質向上の一つである止水性確保に関し、水膨張シール材をセグメント嵌合部に使用している。また、最終的に嵌合部にモルタルを填充することにより、さらなる止水性の向上を図る。

3・3 4心円シールド機

シールド機(写真-1)は、同一平面内に配置された左右の回転カッター($\phi 6.56\text{m}$)、上下の回転カッター($\phi 1.72\text{m}$)、合計4つのカッターを有する、高さ7.06m、幅13.18mの4心円泥水式シールド機である。また、同一チャンパー方式とすることにより、切羽の安定や流体の制御を管理しやすい構造と

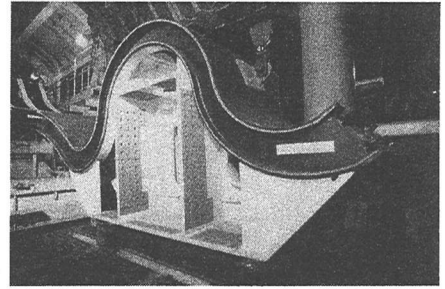


写真-2 一体型セグメント



写真-3 柱

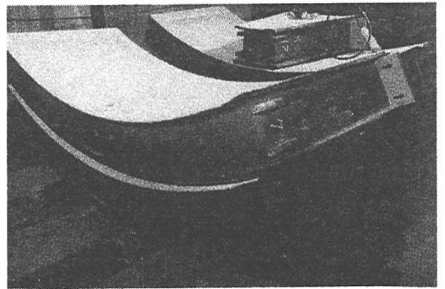


写真-4 側円部セグメント

表-1 4心円シールド機仕様

シールド機本体要目		
最大幅×最大高×機長		13180×7060×8100mm
カッター外径		左右6560mm, 上下1720mm
シールドジャッキ		2500kN×1500ST×35MPa×28本
		1500kN×1500ST×35MPa×6本
装備総推力		79000kN
単位面積当たり推力		1.04MPa
カッター・ディスク要目		
左右側円部	形式	全断面掘削正逆回転方式
	トルク	常用3210kN・m
	回転数	0.8r.p.m.
	電動機	30kW×4P×9台×2
中央上下	形式	全断面掘削正逆回転方式
	トルク	常用83kN・m, 最高103kN・m
	回転数	0~3r.p.m.
	油圧モーター	SX504×2台×2
ローリング制御機構要目		
H&Vシールド(クロスアークエリート)機構		
中折れジャッキ		1250kN×150ST×30MPa×16本
中折れ角度		上下±1度

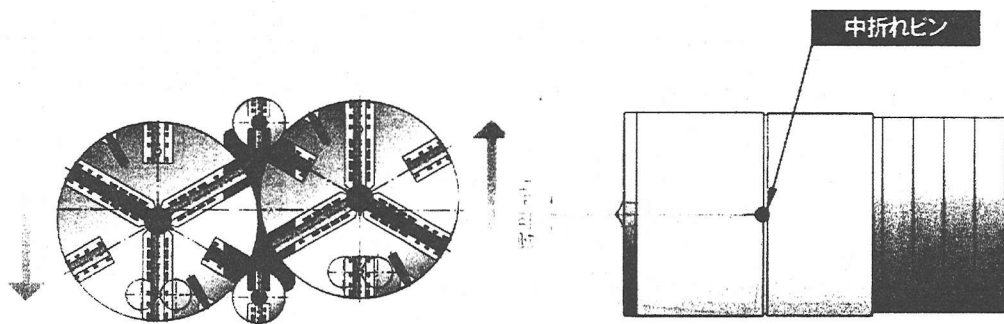


図-7 左右前胴部の中折れ機構

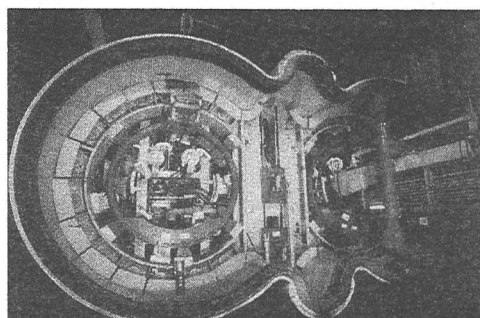


写真-5 セグメント組立装置

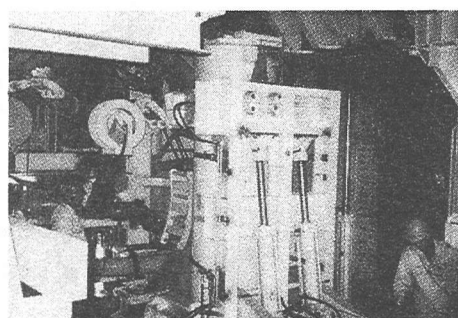


写真-6 セグメント供給装置

している。表-1にシールド機仕様を示す。

4心円シールド工法で重要なことは、覆工構造において一体型セグメント内の箱桁部材をリング毎に確実に連結して箱桁の構造特性を確保すること、および本設の柱に関し、偏心軸力や曲げモーメントが発生しないよう一体型セグメントとの接続を確実にを行い柱の鉛直精度を確保すること、である。

そのため、覆工構造に関するこれらの要求事項を満足するため、4心円シールド機では、まず、シールド機の姿勢を正しく保つ方策として、左右両側円部のシールド胴体に上下の中折れ機構（中折れ角度最大 $\pm 1^\circ$ ）を装備した（図-7）。この中折れ装置とコピーカッターの余掘りを併用し、シールド機のローリングとピッチングの修正を容易に行えることが本シールド機の特徴である。一方、狭いトンネル坑内で複雑で重量のある覆工構造を精度よく効率的に組み立てるために、次に示すようなセグメント組立手順を考案した。すなわち、まず、下部、上部の一体型セグメントを搬入し、それぞれに対応する中央エレクターで把持した後、本設の柱（または組立用柱）を搬入する。そして、これらの3部材をシールド機内で一体化させた後、先行リングに連結するという手順である。このような手順を踏むことによって、一体型セグメントと柱の接合が確実に行われ、柱に想定以上の断面力が発生することを防止することができる。なお、側円部セグメントに関しては、従来の円形シールドの場合と同様な組立方式をとる。これらの装置を写真-5、6に示す。

4. 4心円シールド工法の適用の効果

4.1 従来工法との比較

これまでに述べた4心円シールド工法を六本木駅工区で適用するに際して、従来の工法との比較検討を行った。ここで比較の対象とした工法は、実現の可能な工法として、これまでにシールド工法を用いた地下鉄駅の建設方法として実績のある円形大断面シールド工法、2本の単線クラスのシールドトンネルを併設して

施工しその間を切り抜ける地中切り抜け工法、である。また、地下鉄駅の施工法としての実績はないものの、近年施工実績が増えている2連型シールド工法を本工区で適用することを想定した場合も比較の対象とした。

比較結果の一例として表-2に掘削土量の概略数値を、図-8に掘削深さに関する断面図を示す。

ここで立坑の掘削深さは、各工法で使用するシールド機の断面形状と高さ、公私境界および地中に既存する大型の電力人孔との離隔、上下トンネル間の離隔により決定される。ここでは電力人孔、および上下のシールドトンネル同士の離隔を約2.8m(約0.5D)と想定している。また、円形大断面シールド工法では、列車とホーム部を包含する大きさとして外径10.3mを想定し、上下斜めの併設としている。切り抜け工法では、単線クラスのシールドトンネル(外径約5.4m)を4本としている。2連型シールド工法では、今回の4心円シールドの場合と同様に断面中央上下にトンネル軸方向の桁構造のための空間を断面内に包含した形状としている。

表-2より、掘削土量の概算では4心円シールド工法が最も少なく、他工法よりも有利な条件となった。また、掘削土量の他に、立坑が少しでも浅くなることによって、土留め壁の厚さを薄くできることや、底盤での揚水圧を少なくできる、といった効果も得られる。

一方、シールド機本体については、地中切り抜け工法の場合が単円で最も小さくなるが、4本のトンネルが必要であり、さらに切り抜け施工の分も併せて工期が大きくなる可能性がある。また、円形大断面シールド工法はもとより、2連型シールド工法の場合も掘削断面積が大きいいため、シールド機重量も増え経済的に不利になるとともに、シールド機の組立、解体に要する工期もふえることとなる。

表-2 各工法の掘削土量の比較

項目	単位	4心円 シールド工法	円形大断面 シールド工法	地中切り 抜け工法	2連型 シールド工法
立坑の掘削深さ	m	45	52	46	46
土留め壁厚さ	m	1.6	2.0	1.8	1.8
立坑の掘削土量*1	$\times 10^3 \text{ m}^3$	154	184	161	161
トンネル断面積	m^2/m	75	88	120	87
トンネル掘削土量*2	$\times 10^3 \text{ m}^3$	16	19	26	19
総掘削土量	$\times 10^3 \text{ m}^3$	171	203	187	180
掘削土量の比率	%	100	119	110	106

*1：立坑深さ×(発進到達立坑の長さ97m+壁厚)×(立坑幅約30m+壁厚)で算出。

*2：トンネル断面積×トンネル延長216m、で算出。

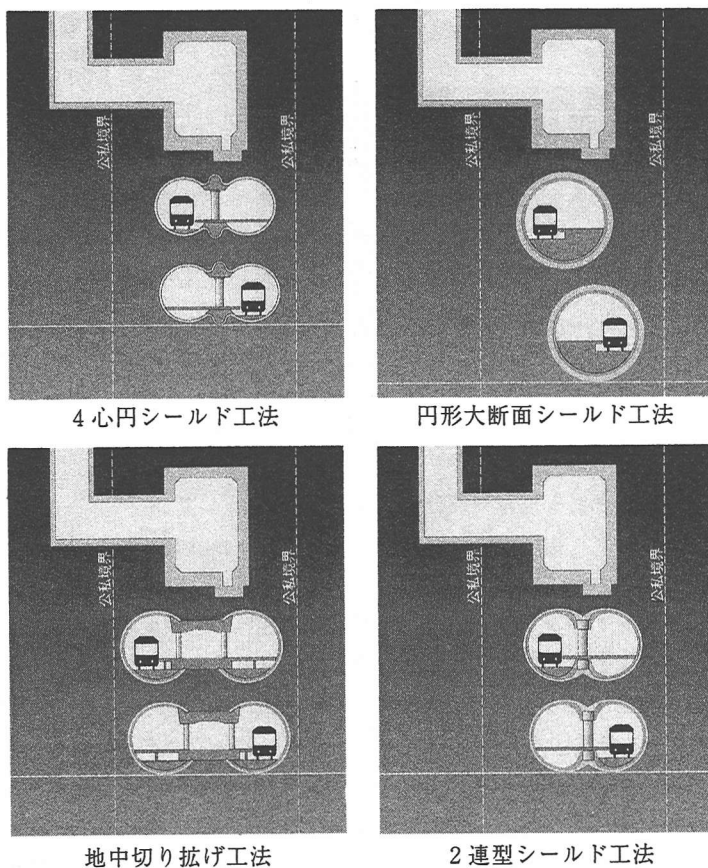


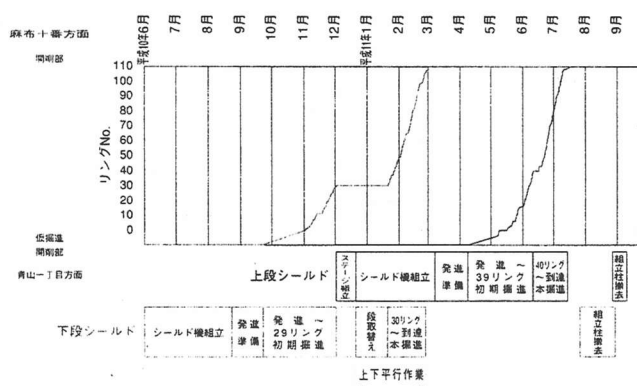
図-8 各シールド工法の断面比較

4.2 掘進工程の短縮

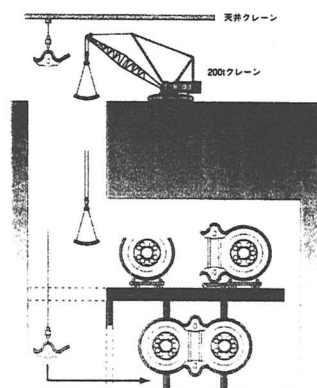
4心円シールドトンネルに関わる掘進工程（実績）を図－9に示す。下段シールドは、平成10年9月21日に掘進を開始し、平成11年2月26日に到達した（暦日数：159日）。また、上段シールドは平成11年4月8日に掘進を開始し、平成11年7月16日に到達した（暦日数：100日）。

本シールドの発進部の土留め壁にはNOMSTを採用しているが、実施工においてはその切削に約1ヶ月を要した。初期掘進時には、慣らし運転やセグメントの組立の慣れ、大型の電力人孔直下の掘進のため、慎重な施工を行っており、平均1リング/日（最高2リング/日）のペースであった。セグメントの組立においては、狭い坑内での重量物の取扱いや、供給装置、エレクターの運転に慣れないこと、および一体型セグメント箱桁部の摩擦接合に要するボルト本数が1リング当たり下段シールドで約590本、上段シールドで約460本もあることから、発進当初はボルトの締め付けを含めて約10時間を要した。しかしながら、掘進が進むにしたがい4～5時間程度で組立を行えるようになった。この結果、本掘進においては平均2リング/日（最大4リング/日）のペースを確保することができた。

ところで、掘進の当初計画は、下段シールドを掘進の後、上段シールドの組立、掘進を行うものであった。しかしながら、ここではさらなる工期短縮を目指し、下段シールドを39リング掘進した後の段取り替えの期間を利用して、上段シールドの発進ステージの組立を行い、その後、下段シールドの再掘進と平行して上段シールド機の組立を行うこととした（図－10）。これにより、掘進工程を約1ヶ月短縮することができた。



図－9 掘進工程実績



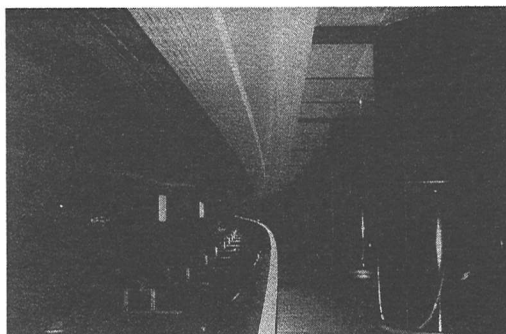
図－10 上下平行作業

5. おわりに

本報では、都営地下鉄12号線六本木駅建設工事で採用された4心円シールド工法について述べた。写真－7に完成後のトンネル坑内の状況を示す。

本工法の開発は、上述した施工に関しての種々の制約条件のもとで、その時々最新の要素技術を取り入れながら行ったものであり、覆工構造に関する設計方法の検討や実際のセグメントを用いた載荷実験、各種の解析を実施することによって

トンネル構造の具体化を図ってきた。また、シールド機に関しても、既存のシールド技術を応用し、セグメントの組立における様々な工夫を取り入れながら、実用化を図ってきたものである。



写真－7 完成後のトンネル坑内

一方、実際の工事では、無数の複雑に配置された埋設物の切り回し、狭い道路空間や作業時間帯に制約を受けながらの土留め壁の施工、さらには既存する大型の電力洞道を受け防護しながらの掘削、など、発進部、到達部の立坑の掘削に約 7 年を費やした。また、地下約 40m での上下二段のシールド掘進では、このような複雑な断面形状をしたシールドが、東京の電力需要の約 1/3 を担う大型の電力施設の下を約 2.8m の離隔で掘進するという、これまでに例のない工事であった。

このように、今後の地下空間の建設においては、都市のさらなる過密化によって建設にともなう制約条件はますます厳しくなるものと予想される。環境保全をふまえた上でのコスト縮減、工期短縮といった社会的ニーズに対応するため、今回の 4 心円シールド工法が同種の工事において少しでも参考となれば幸いである。

なお、本工事では 12 号線環状部特別委員会（委員長 山本稔東京都立大学名誉教授）の御指導をいただいた。ここに感謝の意を表す次第である。

6. 参考文献

- 1) 金安進，新治均，五十畑徹：大型埋設物直下での 4 心円シールドの上下二段施工，トンネルと地下，30-11，pp.25～35，1999.11.
- 2) 小浦場博，大西亮，粥川幸司：4 心円泥水式駅シールドの開発と施工，土木学会，最新の施工技術 13，pp.81～92，2000.2.