

環境負荷低減を考慮した複合円形シールドトンネルの採用

The adoption of the compound circular shield tunnel in consideration of environmental load reduction

藤木育雄*, 入江健二**, 大石敬司***, 橋口弘明****

Ikuo FUJIKI, Kenji IRIE, Keiji OISHI, Hiroaki HASHIGUCHI

The double-tracked shield tunnel section considered cross-sectional optimization between Ikebukuro-Shibuya No.13 line which is advancing the present construction, and it decided to adopt the tunnel section (compound circular section) of un-circular form.

A section makes width the same as the conventional circular shield tunnel, and reduces the height direction. By optimization of a section, although a cross-section area is reduced about 10% compared with the conventional circular shield tunnel, space area serves as form which can carry out of the same grade reservation mostly. And, it contributes also to environmental load reduction.

[key words]: shield tunnel, un-circular form, optimal section, environmental load reduction

1. まえがき

東京メトロでは、現在、建設を進めている地下鉄 13 号線池袋～渋谷間で環境保全活動への取り組みの一環として、環境負荷低減を考慮したシールドトンネルの検討を行った。同区間には複線用と単線用のシールドトンネルがあるが、トンネルの不要空間にインバートコンクリートを多く打設する複線シールドトンネル(3 区間)で断面最適化の検討を行い、その中の明治神宮前～渋谷間(駅名は仮称)で複合円形断面(非円形断面)を採用することにした。

複合円形断面は、非円形断面とすることでセグメントの製作費等が増加するが、掘削土量の減少によって土砂処理費が減少するため、結果として従来の円形シールドトンネルと同等の建設費で環境負荷低減を目指したものである。今回のトンネルが硬質地盤中であり、複合円を構成する円弧を工夫したことにより採用できることになった。

採用した複合円形断面は、トンネル幅が従来の円形断面と同じで、トンネル高さ方向を縮小したものである。断面最適化により、トンネルの断面積が従来の円形断面に比べ約 10%程度縮小し、不要空間に打設するインバートコンクリートが円形断面に比べ約 40%程度減少した。

これにより、シールド掘進や立坑部掘削による発生土量の抑制、立坑築造・シールド機製作・セグメント製作による建設資機材の減量化が可能となり、環境負荷低減に寄与するとともに、地下空間の有効利用につながるものである。

本文は、複合円形シールドトンネルの採用に至るまでの検討概要について報告するものである。

キーワード: シールドトンネル, 非円形断面, 最適断面化, 環境負荷低減

* フェロー会員 東京地下鉄(株) 建設部

** 正会員 東京地下鉄(株) 建設部

*** 正会員 東京地下鉄(株) 建設部 計画課

**** 東京地下鉄(株) 建設部 計画課

2. 検討区間の概要

地下鉄13号線は、東京メトロ有楽町線新線池袋駅を起点とし、都道435号(通称:グリーン大通り)、都市計画道路環五ノ1号線の下を通過後、目白通りとの交差部である千登世橋付近から明治通りに出て、そのまま明治通りを南下し、新宿三丁目、明治神宮前を経由して渋谷に至る延長約8.9kmの路線(図-1 図-2)である。完成後は、起点の新

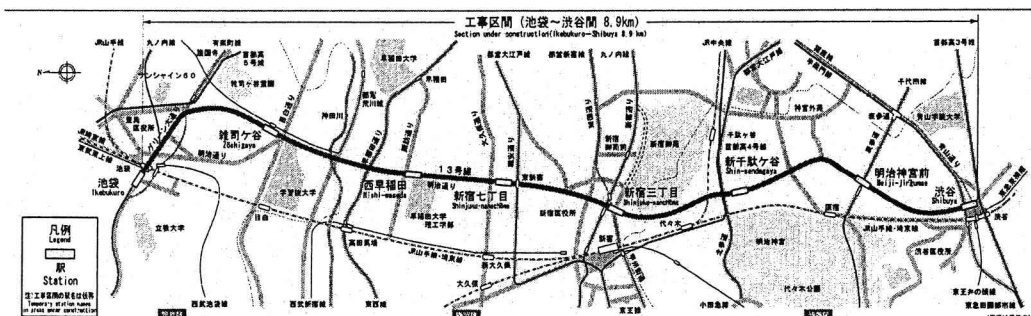


図-1 13号線平面図

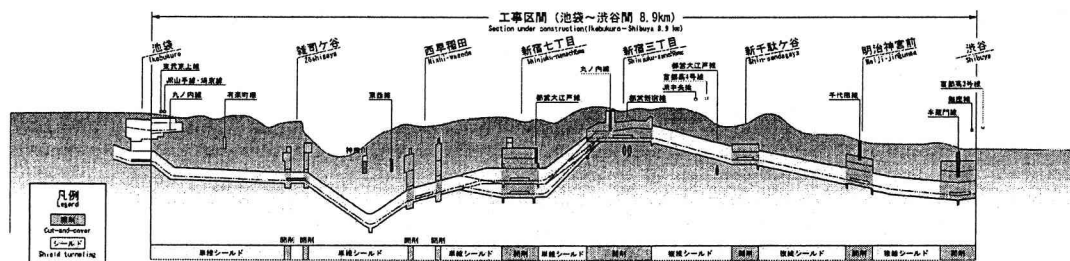
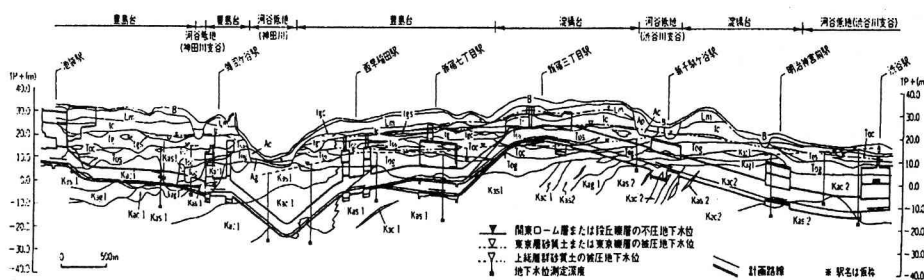


図-2 13号線縦断面図



地 層 名			土 質	凡 例	計画図録に分布する地層構成	特 徴
表	土・崖	土・埋土	粘土など	B		コンクリート片、木片などを混じる不均質なローム質粘土。N値0~3。
洪	関東ローム層	立川・武蔵野ローム層	ローム	Lm		おむね均質で多孔質なローム。一部に軽石などを含み不均質で粘性が小さい。N値は1~9。
		下末吉ローム層	火山灰質粘性土	lt		粘性の強い有機質粘土とやや粘性のある凝灰質粘土。N値は1~12。
	段丘階層 (豊島台の分布)	武蔵野階層	粘 土	tc		有機物、腐植物を混じる粘性のあるシルト・粘土。N値は4~50以上。
			砂 質 土	igs		シルトを挟むような細砂。N値は16~31。
横	東京階層	武蔵野階層	砂 質 土	tg		径2~20mm垂直面主体。細砂、中砂、粘土が混じる。N値は15~50以上。
		東京階層	粘 性 土	Toc		比較的粘性が強く、砂が混じるシルト・粘土。貝殻片を多く含む。N値は6~32以上。
			砂 質 土	Tog		細砂~粗砂主体かななり。細砂、シルト、貝殻片を含む。N値は6~50以上。
層	上総階層	東京階層	砂 質 土	Tos		径2~50mmの垂直面主体の砂礫。マトリックスは粘土・粗砂。N値は22~50以上。
		江戸川層・台人層・東久留米層	粘 性 土	Kac1		均質で更なるシルト主体(土丹状)。N値は10~50以上。
			砂 質 土	Kas1		径径が均一な細砂で密実に締まっている。固結したシルトを薄く混入。N値は23~50以上。
			砂 礫	Kag1		径2~30mmの垂直面を主体。マトリックスは粗砂・細砂。N値は28~50以上。
北多摩層		砂 質 土	Kac2		径径は均一で微細砂かななり。シルト分も混入する。N値は33~50以上。	
		粘 性 土	Kas2		所々に細砂を挟み固結シルト(土丹)。N値は50以上。	

注) 神田川や渋谷川の谷底低地には、シルト(Ac)・腐植土(Ap)・砂礫(Ag)などからなる谷底堆積物が分布する。

図-3 13号線地質縦断面図

線池袋駅において有楽町線を経て東武東上線、西武有楽町線・池袋線と、終点の渋谷駅において東急東横線と相互直通運転を行う予定であり、東京都北西部及び埼玉県南西部から神奈川県横浜方面をつなぐ、大動脈として期待されている。

13号線のシールドトンネルは、9区間15本で、池袋～新宿三丁目間を単線シールド(駅シールドを含む)で、新宿三丁目～渋谷間を複線シールドで計画している。今回の検討は、この複線シールド区間で行った。

13号線の地質構成は、図-3に示すとおりで、池袋～新宿七丁目付近は武蔵野台地の豊島台、新宿七丁目～渋谷付近は淀橋台に位置している。淀橋台では関東ローム層の下部に東京層と上総層が分布し、豊島台では関東ローム層の下部に段丘礫層をはさみ、東京層と上総層群が分布している。東京層までの各地層は概ね水平方向に堆積しており、上総層群は池袋側へ傾斜している。台地を浸食した神田川や渋谷川の河谷低地には薄く谷底堆積物が分布しているが、大部分は洪積層の安定した地盤である。地下水は、関東ローム層、段丘礫層の不圧滞水層と、東京層及び上総層群の数層に分かれた被圧滞水層に分布している。

3. 断面最適化の検討

3.1 検討の背景

検討対象とした複線シールドトンネル区間は、①上総層を主体とした硬質地盤中にトンネルが建設される、②新設するトンネルは下部に位置する既設構造物(シールドトンネル)に近接する(離隔約1m)という条件の下、断面積の縮小によって環境負荷低減を図ることを主な目的として、複線シールドトンネルの断面最適化の検討を行うことにした。

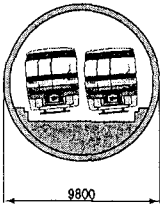
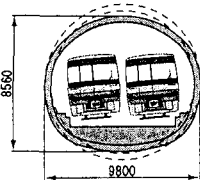
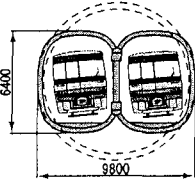
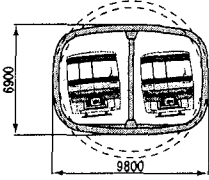
また、今回の検討は、①円形の力学特性を最大限に活かした断面形状、②鉄筋コンクリート製平板形セグメントで構築可能な断面形状、③トンネル幅とセグメント厚は円形シールドトンネルと同一(道路占用面積及び工事費を円形と同等とする。)という点に着目して断面形状を検討した。

3.2 第1次案の検討

(1)断面形状(トンネル及びセグメント)

設定した条件を考慮して検討した結果、表-1に示すような断面形状を考えた。

表-1 断面形状検討結果

	円形	案① 栗の実型	案②-1 矩形型 (二連シールド)	案②-2 矩形型
断面形状				
断面諸値	- 断面寸法 $\phi 9,800\text{mm}$ - 主鉄筋径 内面側:8D19+4D16 外面側:8D19+4D16 - 断面積 $75.40\text{ m}^2(1.00)$	- 断面寸法 $W9,800\text{mm} \times H8,600\text{mm}$ - 主鉄筋径 内面側:8D29+4D25 外面側:12D22 - 断面積 $67.80\text{ m}^2(0.91)$	- 断面寸法 $W9,800\text{mm} \times H6,400\text{mm}$ - 主鉄筋径 内面側:12D22 外面側:12D22 - 断面積 $55.81\text{ m}^2(0.74)$	- 断面寸法 $W9,800\text{mm} \times H6,900\text{mm}$ - 主鉄筋径 内面側:12D22 外面側:8D29+6D25 - 断面積 $68.50\text{ m}^2(0.90)$

案①は、トンネル上半部を円形形状のままとし、下半部だけを縮小したものである。案②-1 及び案②-2 は、円弧を残しながら矩形に近い形状とし、隅角部の発生応力を低減するため、中柱を取り付けた構造としたものである。

各々の断面形状について問題点を検証した結果、案①では、インバート部のセグメントで発生応力が大きくなり、内面側主鉄筋にD29を配筋しなければならないこと、テーパセグメントが上下左右それぞれ必要であること、曲線部($R \leq 250m$)で側道のステップ幅が確保できないことが判明した。また、案②-1 及び案②-2 では、中柱があるために曲線部($R \leq 400m$)での施工余裕(蛇行+変形 $\geq 150mm$)及び退避空間($W \geq 800mm$)を確保できないことが判明した。

図-4は、案②-2で検討した断面の一例であるが、右側の建築限界と中柱(幅 400mm)との間に200mm以上の離隔が必要であるが、それが確保できない(176mm)。同様に、案②-1でも中柱があるため同じ結果となる。これは、トンネル幅を大きくすれば解決できる問題であるが、今回の検討ではトンネル幅を円形断面と同じとする条件であるため、断面形状を再検討することとした。

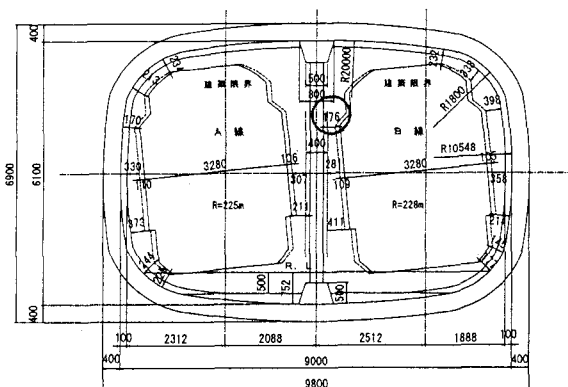


図-4 矩形型断面の建築限界との離隔

(2) シールド機

断面形状の検討と併せてシールド機の検討も行い、施工実績を考慮して表-2に示すようなシールド機を考えた。

シールド機製作費の検討にあたっては、シールド本体、カッターヘッド、その他装置、機器類、工場内組立・試運転及び輸送費、現地組立費、設計費等、詳細な項目で検討を行った。その結果として、円形のシールド機に比べ極端に割高なシールド機とはならなかった。この理由としては、トンネルの縮径(トンネル高さ)による効果が大きく、円形シールド以外での増加費を相殺する傾向となった。

前記の断面形状の検討結果を踏まえ、次案では今回の検討内容を活かしたシールド機の検討を行うこととした。

表-2 シールド機検討結果

	円形	案① 栗の実型	案②-1 矩形型 (二連シールド)	案②-2 矩形型	
		DPLEX 工法	DOT 工法	WAC 工法	DPLEX 工法
形状					
製作費	1.00	1.10	1.10	1.02	1.09

3.3 第2次案の検討

第1次案の検討結果を踏まえ、①曲線半径 $R \geq 500m$ を対象(円形シールド $\phi 9,700$ に設定)とする、②テーパリング製作時の型枠改造回数抑制のために、上下及び左右対称な形状とする、③中柱は無い構造とする条件を追加し、「掘削断面積、トンネル内空間面積、発生断面力」等の検討を行った。

(1)断面形状

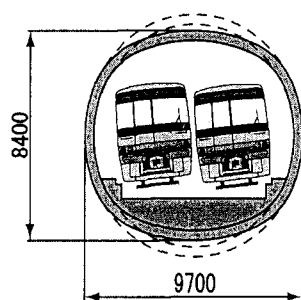
トンネル高さ、トンネル幅、円弧半径 R_1 、 R_2 、 R_3 の5つをパラメーターとして検討を行った。その検討結果の一例である図-5 は、「トンネル高さと発生断面力の関係」である。トンネル高さを 8,000mm～9,700mm まで変化させた場合、負曲げモーメント及びせん断力は、トンネル高さ 8,400mm を境に増加が落ち着く傾向にある。一方、正曲げモーメントは、増加は鈍化するが増加傾向にある結果が得られた。

また、図-6 は、「側部円弧(R_1)の半径と発生断面力の関係」であるが、円弧半径の変化による発生断面力の増加は微少であり、非円形断面形状の決定要因にならない結果が得られた。

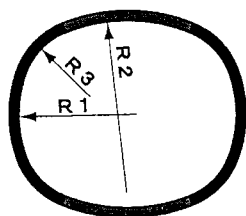
検討結果により、決定した断面は、図-7(a)に示すとおりである。

この断面の特長は、円形断面とほぼ同等のトンネル内空間面積(インバート等のコンクリート断面積を除く面積)を確保するように、複数の曲線半径を組み合わせる複合円形断面を構成する点である。表-2 に示すとおり、断面積は円形断面に比べ約10%程度の低減を図りながら、保守空間を含めたトンネル内空間面積は円形とほぼ同等な大きさを確保していることがわかる。不要空間に打設するインバートコンクリートは、円形断面に比べ約40%程度減となった。

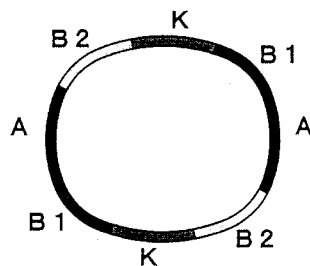
形状の考え方は、図-7(b)に示とおり、3つの曲線半径で考えた。最初に側部と頂底部の円弧(半径 R_1 、 R_2)を決定し、2つの円弧半径の交点を中心とする隅角部の円弧(半径 R_3)が決まるという順序である。



(a) 断面形状



(b) 形状の考え方



(c) セグメント分割

図-7 複合円形シールド断面図

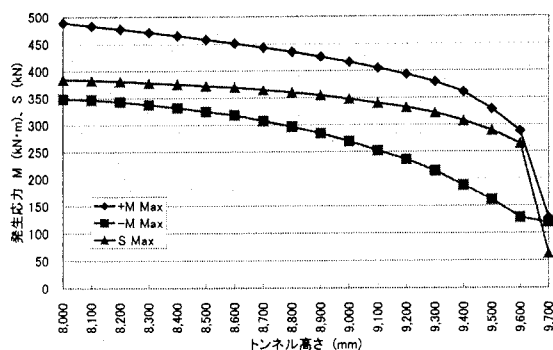


図-5 トンネル高さと発生断面力の関係

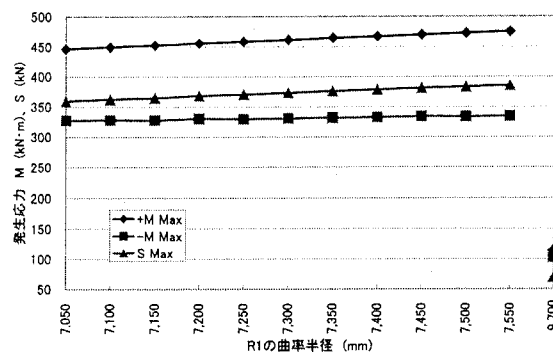


図-6 側部円弧(R_1)の半径と発生断面力の関係

表-2 面積比較

	掘削断面積	トンネル内空間面積
円形 [A] ($\phi 9.7\text{m}$)	73.90 m ²	46.95 m ²
複合円形 [B] (W9.7m×H8.4m)	67.30 m ²	46.05 m ²
B/A	0.91	0.98

(2)セグメント

セグメントの分割は、テーパリングの転用等、セグメント製作に係る費用(表-3参照)を検討した結果、図-7(c)に示すような8分割とした。また、セグメント製作費の増加を抑制するため、トンネルの上下にKセグメントを配置した。トンネルの下部にKセグメントを配置したことにより、セグメントが組み辛いという問題点はあるが、現在のシールド施工技術から十分対応可能と判断した。

主鉄筋構成(表-4参照)は、構造計算結果からA型セグメントで内面 5D19+7D16/外面 4D19+8D16、B・K型セグメントで内面 14D22/外面 14D19 となり、過大な断面力の発生はなく、構造的にも円形の力学特性を最大限に活かしているものと考えられる。

形状検討のトライアル結果からは、トンネル高さ、トンネル幅、円弧半径 R1、R2、R3 が、それぞれある一定の範囲の比率に

なるとトンネル内空間面積及び主鉄筋構成が円形とほぼ程度となることも判明した。

表-3 セグメントの分割と種類による製作費の比較

分 割	8 分 割		7分割
種 類	4種類:K、A、B1、B2	7種類:K、A×2、B1、B2、C、D、E	7種類:K、A、B1、B2、C、D、E
製作費	1.0	1.1	1.1

表-4 配筋の比較

		内面側 (坑内側)	外面側 (坑外側)
円 形 (φ9.7m)		6D19+5D16	4D19+8D16
複合円形 (W9.7m×H8.4m)	A セグメント	5D19+7D16	4D19+8D16
	B・K セグメント	14D22	14D19

(3)シールド機

シールド機については、東京メトロによる検討及び工事請負者である鹿島・大豊・東急建設工事共同企業体(以下、「JV」という)による検討の結果を踏まえ、図-8に示すような形状とした。

特長としては、トンネル全高と同じ長さのカッタースポークを配置し、掘削不可能な部分の掘削にはカッタースポークにそれぞれ装備した伸縮カッターを用い、全断面掘削を可能としている。

また、実施工に向けて東京メトロとJVで施工研究会を設置し、「上総層粘性土(泥岩)の掘進、伸縮カッター、形状(真円)保持装置、エレクトアー、ローリング防止及び修正装置、セグメント組立て、13号線で採用を予定しているテール内形状保持システム」等の技術課題に対し、現在研究しているところである。

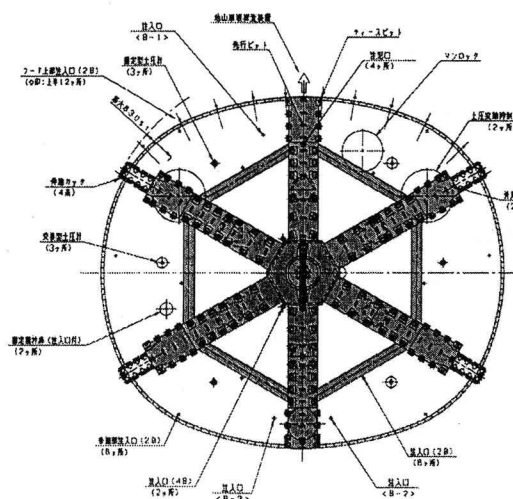


図-8 複合円形シールド機 横断面図

4. おわりに

硬質地盤に適合した複線シールド断面の最適形状として考えた「複合円形断面」を13号線シールド工事に採用することとし、設定した条件を考慮して、明治神宮前～渋谷間で施工することを決定した。これから、13号線全線のシールド工事が本格的に始まり、複合円形シールドトンネルにおいても各種の計測を計画している。今後は、実際のトンネルに発生する断面力等の計測結果及び工事における環境負荷低減効果により、「複合円形断面」の有効性を実証する予定である。