

延長の短い大口径シールドの機械費低減の工夫

LARGE SIZED SHIELD MACHINE COST REDUCTION SCHEMES EMPLOYED IN SHORT TUNNEL CONSTRUCTION

徳竹輝夫* 千葉 茂* 阿部 優**滝脇平人**
Teruo TOKUTAKE, Shigeru CHIBA, Masaru ABE and Hirato TAKIWAKI

There is an increasing demand for safe tunnel construction using the shield tunneling method in urban areas because of construction conditions and other constraints. However, the shield machine cost is so high that the shield tunneling method is not usually used for building short tunnels.

In this report, we describe some shield machine cost reduction schemes. In these schemes, main parts of machine for the construction of short-distance double-track subway tunnel can be used for the construction of neighboring single-track tunnels after the double-track tunnel has been constructed.

key words: reuse of main parts (e.g. bearings, cutter motors), withdrawal, cost reduction and short distance tunnel.

1. まえがき

都営地下鉄12号建設工事放射部の引上線は、西新宿駅(仮称)～十二社駅(仮称)間の単線シールドの間に設置するもので、引上線となる複線シールド(掘削外径9.04m,延長127m)を泥水式、単線シールドを泥土圧式工法で築造する。対象土質は洪積層の砂、シルト、砂礫であり、土被りは約20m、地下水はGL-9mである。

一般にシールド工法では、マシンの費用が高いため短距離のトンネルでは不経済な工法となることが多い。本工事では、複線シールド、単線シールドのマシン費用低減を計るため種々の工夫改善を行い施工にあたったが、以下にその概要を報告する。

2. 地質概要

当工区の地層は、武蔵野台地の東域にあたり、成田層群に属する東京層とそれを覆う渋谷粘土層および関東ローム層から構成される。地層は上から埋土層(F)、ローム層(L)、洪積粘土層にあたる渋谷粘土層(Sc)、東京層の砂層(Tos)、粘土層(Toc)、礫層(Tog)が存在し、シールド通過部は上部20%が東京砂層、30%が東

* 正会員 東京都交通局 新宿建設事務所

** 正会員 清水建設(株) 土木東京支店 西新宿第二工区作業所

京粘土層、下半50%が東京礫層である。東京砂層はN値30以上のよく締まった均一な砂層で、東京粘土層はN値 6～24、粘着力 $C=11\text{tf/m}^2$ と安定した地層である。東京礫層はN値50以上あり、礫分の含有率が70%で、細粒分は6%と少ない。礫径は $\phi 50\text{mm}$ 程度までのものが主体で所々に径 $80\text{mm}\sim 120\text{mm}$ の玉石が点在する。当工区における東京礫層の最大礫径は西新宿地区での超高層ビルの大規模掘削工事、当工区開削部の施工実績より、短径 250mm 長径 400mm と想定された。透水係数は東京砂層で 10^{-3}cm/sec 、東京礫層で 10^{-2}cm/sec である。また、間隙水圧は東京砂層で 1.0kgf/cm^2 、東京礫層で 1.1kgf/cm^2 程度である。

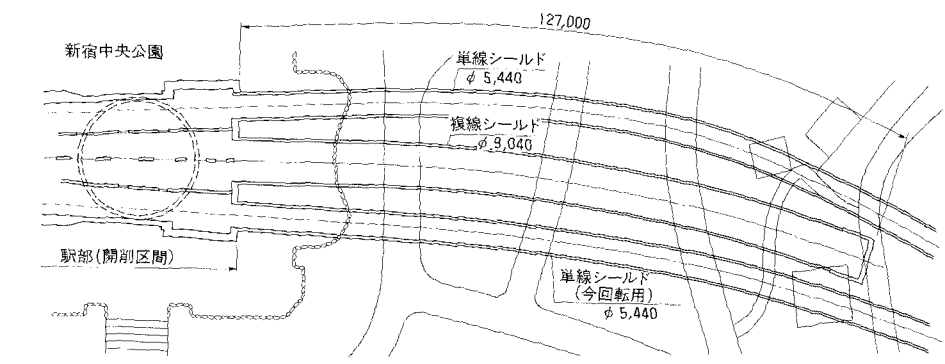


図-1 平面図

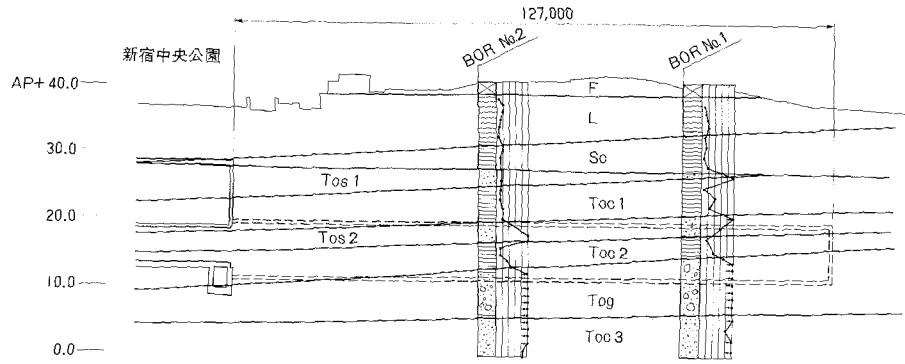


図-2 地質縦断面図

3. 施工条件

今回マシン費用の低減を計る方策を検討する上で重要な施工条件としては、次のことがあげられる。

- ①複線シールドの施工延長が 127m と非常に短い。
- ②シールドの線形は、最小曲線半径が $R=314\text{m}$ 、縦断的には全線にわたり水平である。
- ③シールド土被りは、発進部で 16.7m 、到達部で 17.7m 、最大土被りは 21.8m となり、シールド掘削径($\phi 9.04\text{m}$)の $1.8\sim 2.4$ 倍である。
- ④引上線シールドと単線シールド2本が隣接しているため、機材輸送上の問題がない。
- ⑤発進基地・発進立坑が新宿中央公園内であり、引揚げ・組立時の作業スペースが充分確保できる。

4. マシン費用低減のための方策

この引上線シールドは施工延長が短く、また計画上複線シールド施工後に単線シールドを施工することか

ら、部品（軸受け部、カッター駆動装置、シールドジャッキ、油圧ポンプ後続台車等）は単線シールドに転用可能な形式を選定し、使用する計画とした。特に施工条件の項で示すように、当現場では、発進立坑直上が公園で作業ヤードが十分確保できること、シールド双方の立坑が共通であり輸送の必要がないことから、マシンの心臓部である大型かつ非常に重量のある軸受け部（直径5.44m 総重量74t）をトンネル地中到達部より取出し再利用するという我国初の計画を立案、実行することとした。

さらに、当工区が127mと超短距離であること、土質の信頼性も高いことを考慮して、複線シールドの各種装備能力は過去の類似径、類似土質での実績値を踏まえた上で、軸受けの寿命を含めた装備仕様の余裕率を標準仕様に対し低減する計画とした。

5. 転用及び仕様低減の具体的方法

5.1 シールドジャッキ

大口径泥水式シールドの掘削断面積当りの推力(f)は、切羽水圧 $p \geq 2\text{kgf/cm}^2$ の条件下での実績が $f = 40 \sim 51\text{tf/m}^2$ の範囲である（表－1）。

しかし実際の計画にあたっては、シールドジャッキの片押しによって方向制御を行うなどの施工性を考慮して、安全率を含め実績値の2倍以上の推力 $f = 100 \sim 130\text{tf/m}^2$ を装備することを標準としている。当工区では線形が緩やかでジャッキの片押しも少ないことから総合的な経済効果を高める組み合わせとするために、単線シールド2基分への転用を考慮し、 $150\text{tf/本} \times 40\text{本} = 6,000\text{tf}$ （ $f = 93.4\text{tf/m}^2$ ）を採用した。なお、単線シールドについては、各々 $150\text{tf/本} \times 20\text{本} = 3,000\text{tf}$ のジャッキ推力とした。

5.2 カッタートルク

一般に、シールドマシンのカッター装備トルク(T)は下式で示される。

$$T = \alpha \cdot D^3 \quad (\text{tf} \cdot \text{m})$$

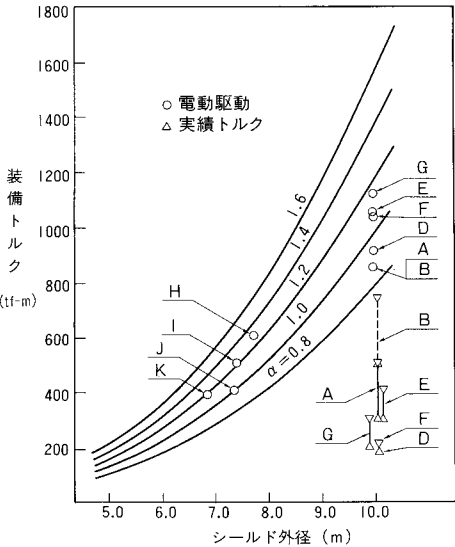
D ：シールド径 (m)
 α ：トルク係数

この内、計画時のトルク係数は、泥水式シールドで $\alpha = 0.9 \sim 1.5$ の範囲とすることが多い。しかしながら、過去の実績では砂礫層で $\alpha = 0.3 \sim 0.5$ 程度である（図－3）。

当工区においては、軸受け部・減速機等を単線シールドへ転用するという前提条件に、これらの実績を考慮しながら装備トルクの検討を行った。この結果、設計条件に基づく複線シールドの装備トルクよりも単線シールド2基分の装備トルクが大きくなったため、トルク係数 α は0.84とした。また、掘進の際には速度を10～20mm/min程度にしてカッターへの負荷を低減する計画とした。

表－1 大口径泥水シールド推力の実績

工事名	外 径 (mm)	切 羽 泥水圧 (kgf/cm ²)	土 質	推 力 (tf)		単位面積当り推力 (tf/m ²)	
				装 備 (tf×本)	実 績 (最大)	装 備 (最大)	実 績 (最大)
A	10,000	2.6	砂、砂礫 粘土	8,250 250×33本	4,000	105.0	51.0
B	10,000	3.8	砂、砂礫 粘土	9,900 300×33本	6,500	126.1	82.8
C	9,700	4.0	シルト 粘土、砂	8,250 250×33本	3,800	111.6	51.4
D	10,000	2.6	砂、シルト	6,600 200×33本	3,000	84.0	38.2
E	10,000	3.2	砂礫、砂 粘性土	8,250 250×33本	4,000	105.0	51.0
F	10,000	2.4	砂礫 粘性土	8,700 300×29本	6,300	110.8	80.3
G	10,000	2.4	洪積粘性土 砂、砂礫	8,700 300×29本	3,500	110.8	44.6



図－3 カッタートルクの実績

5.3 カッター軸受部及びカッタ駆動装置

(a) 軸受部

複線部では大口径泥水式シールドにて実績のある中間ビーム支持方式を選定し、単線シールドでは外周ビーム支持方式として転用可能とする計画とし、軸受け径を若干小型化した。(一般に同径シールドでの軸受け部外径が $\phi 4,400\text{mm}$ であるのに対し $\phi 4,200\text{mm}$ とした。)

(b) カッター駆動装置

カッター駆動装置は、騒音や坑内温度が低い等の作業環境に優れ、安全性が高くかつ機械効率的に有利となるカッター電動駆動方式を採用した。電動モーターの容量は、一般に掘削外径9mクラスでは $37\sim 45\text{kW}/\text{台} \times 15\text{台} = 555\sim 675\text{kW}$ であるが、単線シールドへの転用互換性を考慮し、 $30\text{kW}/\text{台} \times 15\text{台} = 450\text{kW}$ とした。単線シールドの駆動装置はマシン1基当り $30\text{kW} \times 8\text{台} = 240\text{kW}$ (2基で16台必要)として、不足する1台分のみを追加発注した。

5.4 カッタービット

ビット型式については、砂礫層主体のため耐衝撃性に主眼を置き従来通り超硬チップインサート型ティースビット型式を選定し、取付け方法は溶接型とした。ビット配置条数については、一般に最外周8条、外周4条、内周2条とするところを、短距離施工であることを考慮し最外周4条、外周2条、内周は1条として、約40%程度ビット数を低減した。

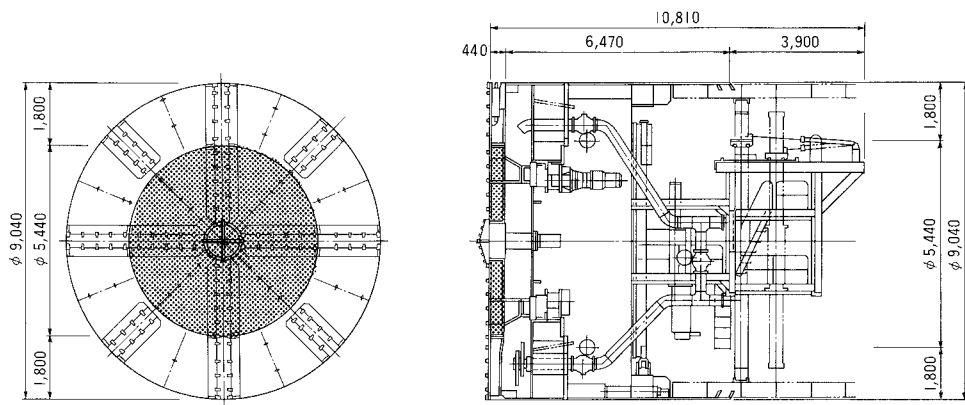


図-4 複線シールド計画図

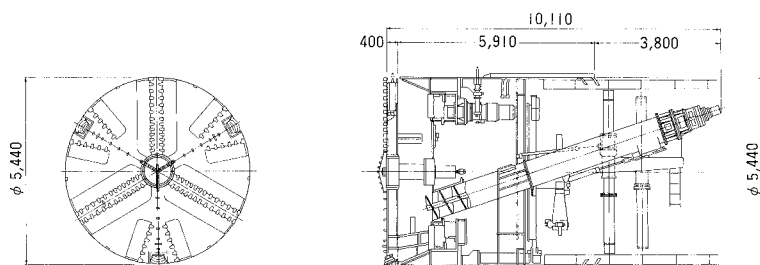


図-5 単線シールド計画図

5.5 テールシール

型式としては、現在の技術で最も安定し、信頼性の高いワイヤーブラシ型テールシールを選定した。一般に装備段数は、テールシールが損傷した場合における交換時の作業等の安全性を考慮し、3段装備とすこ

とが多い。当工区では、短距離であることのほかに、水圧も $2\text{kgf}/\text{cm}^2$ 以下であること、線形が緩やかであることを考慮して2段装備とした。なお、ワイヤーブラシは一般のワイヤーブラシよりブラシの長さを長くし、施工にあたってはテールシーラ等充填材の注入管理を十分に実施することによって安全性を確保した。

5.6 スキンプレート板厚

掘削外径9mクラスのシールド実績では、テールプレート板厚は $t=60\text{mm}$ （材質SM490A）が一般的である。当工区においても長期荷重による計算では板厚が $t=60\text{mm}$ となったが、設計荷重を短期扱いとし、許容応力度の割増しをすることで、テールシーラの取付限界の40mmまで薄くする計画とした。（ $t=40\text{mm}$ 採用時の最大発生応力度は $\sigma_s=2,051\text{kgf}/\text{cm}^2 < \sigma_a=2,850\text{kgf}/\text{cm}^2$ ）この結果、シールド外径が40mm小さくなり、掘削土量、テールボイド量を低減することができた。（掘削土量0.9%、テールボイド量で22.4%の低減となった。）

6. 施工

6.1 チャンバー内充填

施工順序としては、まずシールド機が到達したのち、チャンバー内の掘削土砂を排除するため、カッターは回転させない状態で泥水の循環を十分に行った。チャンバー内の清掃完了後、チャンバー最下部に設けた注入管よりTGS工法により瞬結性モルタルを注入した。その後、上部の注入管からも泥水を抜きながら同様にモルタルの充填をおこなった。最大注入圧は、軸受け部土砂シーラの耐圧性を考慮して $5\text{kgf}/\text{cm}^2$ に設定、充填中は切羽水圧を慎重に監視した。しかしながら、充填度の確認のため注入管よりチェックボーリングしたところ、最下部の止水が一部不十分であることが判明した。これはチャンバー内泥水中の砂礫分が底部に堆積していたこと、注入管がチャンバー最下部に設けられなかったことから下方についてはモルタル置換が十分にできなかったものと考えられる。このため、予備排泥管と排泥管を利用して薬液注入を施工し、チャンバー内再注入によって解体時の止水性を万全なものとした。

1. チャンバー内固化剤注入

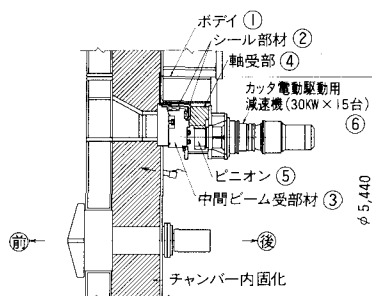


図-6 解体手順図(ステップ1)

2. ⑥カッター減速機を取外す

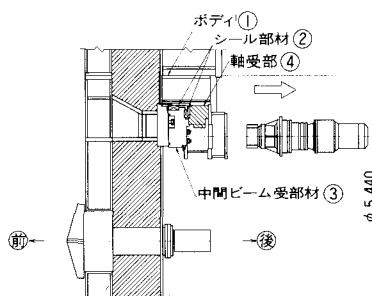


図-7 解体手順図(ステップ2)

3. 反力材を切断した上で、中間ビーム受部材の取付ボルトを取外す

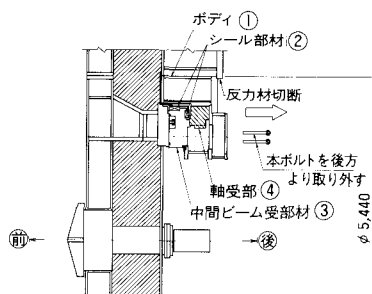


図-8 解体手順図(ステップ3)

4. ①②③④全体を後方に取外す

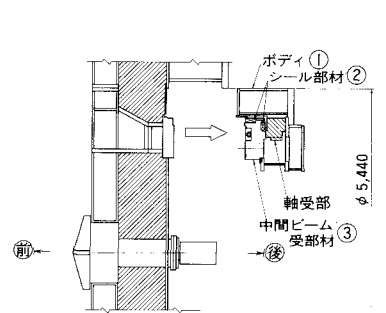


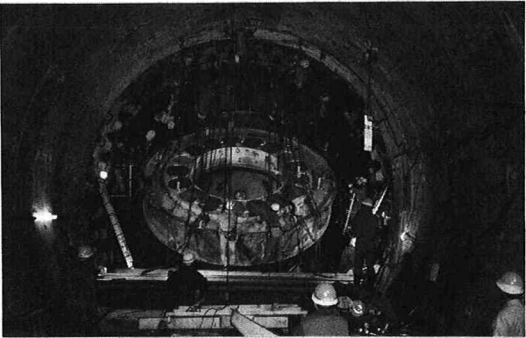
図-9 解体手順図(ステップ4)

6.2 軸受け部取出し

チャンバー内を充填、固化し止水状況を確認後、シールド機の解体を行った（図－6～9）。また、平行して一次インバートコンクリートの打設を行い、軸受け部を坑内運搬するための専用軌条を布設した。これは、取出す軸受け部の総重量が 74t もあり、通常の H 型鋼の枕木では耐えられず、インバート上に 30kg レールを直に敷設する構造としたためである。

軸受け部の取出しは、シールド坑内での作業であり揚重機械等を使用できないため、大型の 30t、20t 吊りチェンブロックおよび油圧ジャッキ等を使用して引出し反転を行った（写真－1）。

また、軸受け部を搬出する台車を特別に製作し、軸受け部をこの台車に乗せた後、インバート上の軌条を使ってウインチで引出した。なお、発進立坑から地上への引揚げおよび単線シールドへの組み込みには、200t 吊りクレーンを使用した。



写真－1

7. 結果

一連の作業は十分に計画を練った上で実行したものの、狭い坑内での重量物の取扱いであったため、非常に難作業となった。今後、土質条件の正確な把握、地上スペースの確保、および輸送上の問題がないことなどの施工条件と、軸受け寿命などの機械的条件が制限できる場合には、過去の実績値を参考にして、シールド機仕様を標準より低減し、さらに軸受け部等の部品を再利用することで、他のトンネル工法と比較して十分実施可能となることが本現場で実証された。現在、転用組立てを終えて単線シールドを掘進中である。

月 日 項 目	延 日 数																																																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
準備工																																																	
油圧ホース機器取外し																																																	
真円保持装置撤去																																																	
エレクター解体																																																	
送排泥管撤去																																																	
後方作業デッキ解体																																																	
リングガーター切断																																																	
シールドジャッキ取外し																																																	
カッターモーター取外し																																																	
駆動部サポート切断																																																	
駆動部取付ボルト取外し																																																	
駆動部搬出及吊段取																																																	
駆動部取外し・搬出																																																	
チャンバー充填																																																	
薬液注入																																																	

図－10 工程表

8. おわりに

今後都市内トンネル工事では、種々の施工条件、制約条件により短区間のシールド工事の必要性が益々増大すると思われる。限定された諸条件のもとで可能となった本工事であるが、今後の都市域でのシールド工法の適用領域を拡大することに寄与したと考えられる。