

重要構造物横断・急曲線・岩盤地山での 超小口径シールドトンネルの施工

平石 富茂 *

本工事では、岡崎市下水道幹線（東部幹線）の内、岡崎市本宿町ほか1箇町地内の旧東海道などの直下に延長1,001.6 m、内径φ1,000 mmの下水道管渠をシールド工法で築造した。特徴は、シールド外径φ1,330 mmの超小口径、岩盤掘削、重要構造物（国道1号、名古屋鉄道・東名高速の高架、鉢地川）の横断、及び急曲線（R=15 m, R=30 m）施工などである。ここでは、当該工事のシールドトンネル施工実績を報告する。

キーワード：重要構造物横断，急曲線，岩盤掘削，超小口径，ラムサス SD シールド

1. はじめに

岡崎市下水東部幹線は、市の東端にある鉢地川（矢作川の支川）沿いの丘陵地に位置する。当初は、地上から開削工事で計画されたが、交通障害や地下埋設物の処理など近隣への影響を考慮してシールド工法へ変更になった。また、超小口径シールドでは標準的なミニシールド工法で設計されていたが、新たな工法発展のため当社で実績のある排土バルブ式泥土圧シールド（以下ラムサス SD シールド）へ変更を提案して採用された。

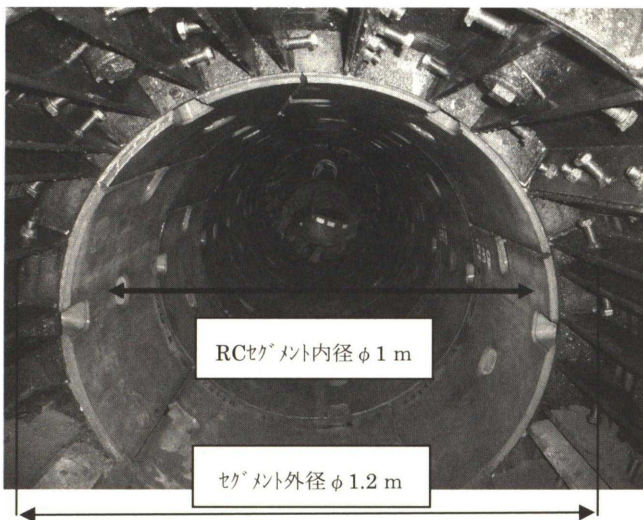


Photo.1セグメント断面図

2. 概要

2. 1 工事概要

シールド掘進は、まず発進立坑 M2 から上流側に向かって掘進し、中間立坑 M3 を通過して到達立坑 M4 に到達した。その後、シールド機を引き上げて工場で整備して

再度 M2 に投入した。そして、下流に向かって掘進し、中間立坑 M1 を通過して既設人孔 MA に到達した。

工事名：下水道管渠築造工事

施工箇所：愛知県岡崎市本宿町字丸山腰地内

～岡崎市山綱町2丁目地内

発注者：岡崎市

施工者：熊谷・松尾特定建設工事共同企業体

工期：平成20年11月7日～平成22年6月30日

工事内容

- ・ シールド形式：ラムサス SD シールド
- ・ シールド外径：φ1,330mm
- ・ セグメント種類
 - RC：外径φ1,200mm，幅600mm，桁高100mm
 - 鋼製：外径φ1,200mm，幅600mm（R=60m以上）
 - 幅300mm（R=15m, 30m），桁高83mm
- ・ トンネル平面線形
 - R=15, 30, 60, 200(4箇所), 250, 500m
 - 全長991m（上流側226m，下流側765m）
- ・ 縦断線形：0.16%
- ・ 発進立坑(M2)：φ9.2m×深11.4m
- 上流到達立坑(M4)：φ3.8m×深9.4m
- 中間立坑：φ2.0m×深10.3m(M3)
- 深10.5m(M1)
- 下流側到達立坑(MA)
 - ：既設3号人孔φ1.5m，深9.0m
- ・ 補助工法：M2, M3 及び M4 は薬液注入
- M1 はウエルポイント
- MA はCJG（φ1.8m×4）と薬注

*名古屋支店 岡崎本宿作業所

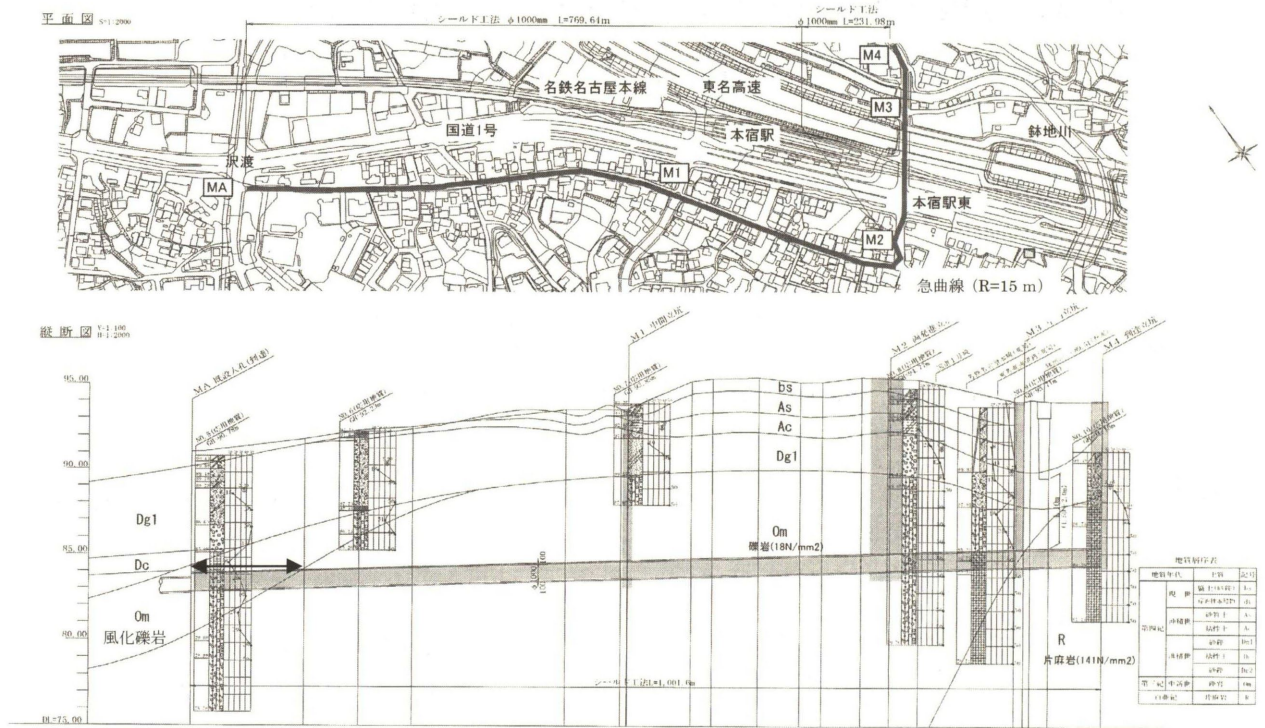


Fig.1 平縦断面図

2.2 地質概要

土被りは平均 9 m 程度で GL-5 m 程度までは砂礫質土、それ以深は岩盤である。掘削対象地山の 90% が岩盤（礫岩 18N/mm²～片麻岩 140N/mm²）である。下流到達部付近は、礫岩が風化した砂礫質地盤である。地下水位は、GL-1 m から GL-4 m である。

3. 重要構造物の横断

上流側のシールド掘進では、国道 1 号、名鉄本線・東名高速道路の高架及び鉢地川横断がある。シールド掘進に伴う地盤変位を極力小さくし、これらの構造物への影響を最小限に抑える必要がある。そのためには、地盤に適したシールド形式の選定、入念な掘進管理、適切な一次覆工・裏込め注入を行わなければならない。

3.1 シールド形式の選定

シールド形式の選定にあたって、地盤変位を極力小さくするため、切羽の安定が図れる密閉型を採用した。また、上流側全線の掘削対象地山が礫岩と片麻岩、下流側も到達部付近の風化区間以外は礫岩であることから、カッターヘッドは、ドーム型ローラビット面板にした。

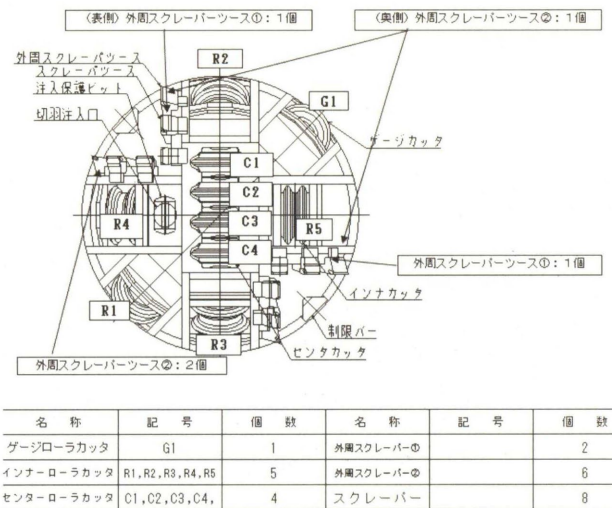


Fig.2 シールド機面板形状図

3.2 掘進管理

ラムサス SD シールド工法は、カッターヘッドにより掘削した土砂を切羽と隔壁間に充満させ、添加材を注入して、その土圧により切羽の安定を図りながら隔壁を貫通して設置した管のバルブを開閉して間欠的に排土する工法である。

3.2.1 カッターチャンパー内の圧力（泥土圧）

切羽の安定を確保するため、カッターチャンパー内の圧力（泥土圧）は、上限値を（掘進停止時のチャンパー

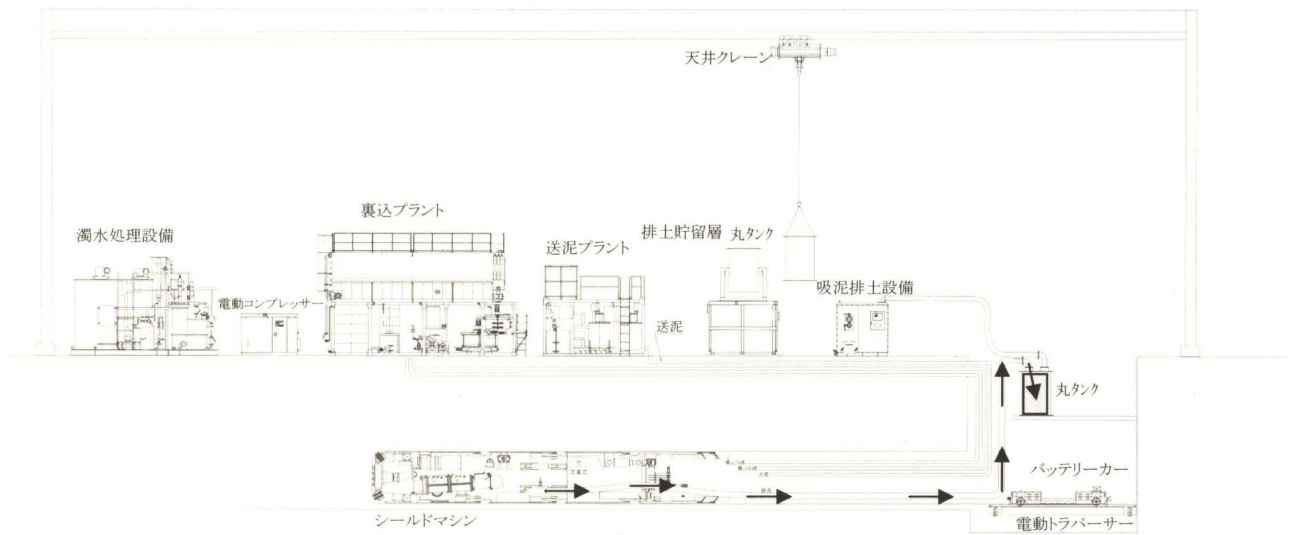


Fig.3 工法概要図

内土水圧+60kpa), 下限値を(掘進停止時のチャンバー内土水圧-20kpa)で管理した。(Fig.4 泥土圧グラフ)

岩盤層では、掘削土砂の流動性が乏しく、亀裂があると透水性が高いため、止水性の確保が必要になる。そのため添加材は、鉱物系と水溶性高分子系(ポリマー系)の配合(粘土 30kg, ホリダス V10 12.5kg, 水 982L)を用いて、塑性流動性と不透水性を高めた。礫岩の計画注入率は、120%である。

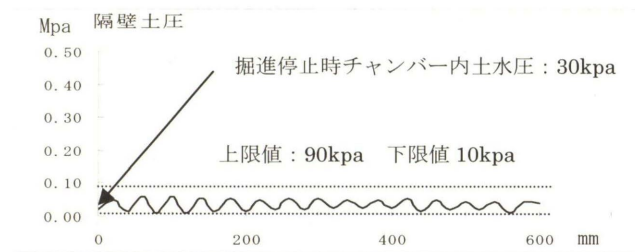


Fig.4 泥土圧グラフ

3. 2. 2 排土量管理

チャンバー内から排出した土砂は、立坑上に設置した吸泥排土設備(132kw, 最大 15t/h)を使用して、立坑下の移送用丸タンク(1.2m³)に吸込み溜める。それを天井クレーンで地上の土砂ピットへ運び仮置きした。

排土量管理は、容積管理とし、土砂ピットへ投入する前に移送用丸タンクの上端から排土面までの深さをスケールで測り土量を算出・管理した。

排泥距離が長くなると週 1 回程度の頻度で管内に残留する土砂により算出土量にばらつきがあったが、それは前後 2~3 リングの平均で判定した。

3. 2. 3 裏込め注入

地山の緩みと沈下を防ぐために、テールボイドを地山に適合した注入材・注入方法で充填した。

注入材は、早期強度の確保できる二液性のセメント系可塑状型を用いた。配合は、A 液: 固化材 270kg, 助剤 28kg, 安定剤 1kg, 水 816L, B 液: 急硬材 74L を用いた。ゲルタイムは、15 秒以内、初期強度(1 h)は 0.1N/mm² である。注入方法は、セグメントからの即時注入とし、切羽への回り込みを防止するため、テールから 2 m 離れた注入孔から注入した。注入圧は、チャンバー内圧力 +200kpa で管理し、最低でもテールボイド量は注入した。

3. 3 計測管理

計測は、オートレベルを用いた人為測量で施工前 3 回、影響範囲(切羽前方 20m)掘進中及び通過後 1 ヶ月 2 回/日の頻度で実施した。測定箇所は、国道 1 号上の 10m 毎でトンネル中心と 5m 離れた左右、名鉄名古屋本線の橋脚 4 点、東名高速道路の橋脚 4 点、鉢地川の橋台 4 点とした。

3. 4 掘進・計測結果

掘進結果は、下表のとおりである。

Table1 掘進結果

平均値	上流側	下流側
添加材注入率(%)	88.0	76.7
裏込注入率(%)	111.7	109.7
*排土率(%)	130.9	135.2
掘進速度(mm/分)	14.8	21.2

※排土率=(排土量-添加材量) / 掘削地山体積) × 100

上流側は、下流に比べて硬質地盤であり切削後粒状になり易かったため、添加材量の使用量が多く、掘進速度が遅くなっている。また、裏込め注入率が高く、排土率が低いのは十分な裏込め注入量の確保と土砂の取り込み過ぎがなかった結果と考える。これらの対策により、全測点で地盤変位は発生しなかった。

4. 急曲線施工

4.1 シールド機の特性

急曲線(半径 15m)を掘削するために、シールド機は4胴3折れタイプにした。施工時には切羽側から8.8°, 7.5°, 8.1°の中折れ角度が必要になるので、設備としてはTable2のような曲線半径 10 mが施工可能なシールド機を使用した。余掘量は、掘削外径φ1380mm(シールド外径φ1330mm)よりさらに38mm必要になるので、最外周のローラーカッターを急曲線用に変更して外径φ1460mmで掘削した。

Table2 シールド機仕様

シールド外径	φ 1,330mm	
掘削外径	φ 1,460mm (曲線半径 15m)	
総推力	500kN×4本=2,000kN	
カッタートルク	常時 79.2kN・m (最大 119kN・m)	
最大掘進速度	66mm/min	
中折れ 角度	左右	前から 13.7°, 12.3°, 10°
	上下	前から 13.7°, 12.3°, 1°
回転数	5.3rpm	

急曲線(半径 15m)施工時のシールド機の屈曲状況をFig.4に示す。

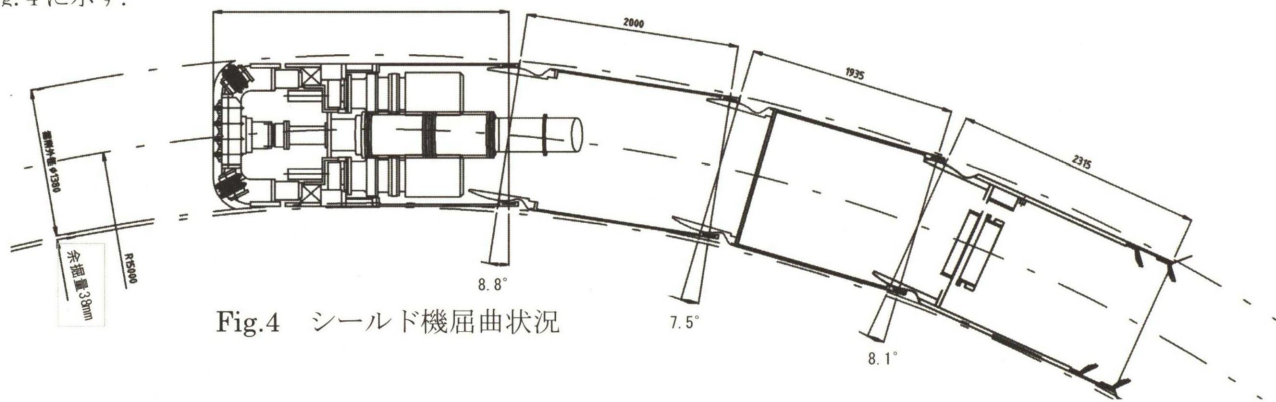


Fig.4 シールド機屈曲状況

4.2 セグメント

本工事では、一般部はRCセグメント(外径φ1200mm, 内径φ1000mm)、曲線半径 60m以下の曲線とその干渉部及び中間立坑通過部には鋼製セグメント(外径φ1200mm, 内径φ1034mm)を用いた。分割数は、ともに1リング5分割とした。また、急曲線(曲線半径 15m, 30m)には、セグメント幅 300mmを採用し、その他は幅 600mmとした。

急曲線(半径 15m)用の鋼製セグメントは、テーパリング(両面テーパ、テーパ量 32mm, テーパー角 1.53度)と標準リングの割合を6:1で施工した。

4.3 測量

急曲線施工中は、最低昼夜各2回(一般部は昼夜各1回)の頻度でシールド機の位置・姿勢を測量し、シールド機の方向制御を行った。

4.4 結果

上流側掘進後に、シールド機を吊り上げて工場で抜径用φ1460mmのビットに交換整備して下流側掘進開始後12mから急曲線(R=15m)の施工を始めた。掘進は、順調に進み、急曲線部で300mm幅のセグメントを使用したにもかかわらず、上流側の一般部に匹敵するような進捗を確保し、延長31mを9日で施工した。蛇行量は、発注者の規格値の60%である水平50mm, 上下30mm以内とすることができた。掘進実績を下表Table3に示す。

Table3 掘進実績

		上流側	下流側
一般部の平均日進	m	4.4	6.2
	R	7.7	10.3
急曲線部の平均日進	m	-	3.8
	R	-	12.5

5. 岩盤掘削

5.1 ビット磨耗

ローラービットの磨耗量は、転送距離に比例するので下記の式で算出した。

① 掘削速度 (V)

$$V = \alpha \times T \times N$$

α : 掘進係数 (Table4 参照)

T : 切込深さ (cm) (Fig.5 参照)

N : カッター回転数 (rpm)

② ローラービット転送距離 (La)

$$La = 2\pi \times R \times L \times N \times \xi / V$$

R : 取付半径

L : 区間延長

ξ : 掘削係数 (Table4 参照)

ビット許容転送距離は 400km (メーカー値) とした。

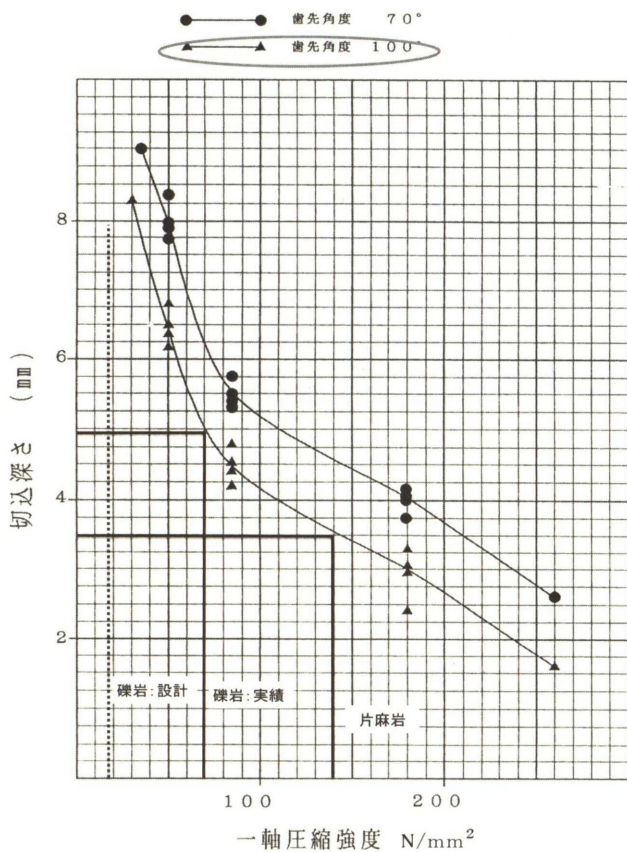


Fig.5 一軸圧縮強度と切込深さの関係

計画時には、礫岩の強度を $qu=18N/mm^2$ に想定して、上下流とも交換する予定は無かった。しかし、実際は礫岩に含まれる花崗岩が現場シュミットハンマー測定で $qu=100N/mm^2$ 程度 (コアサンプリングで $qu=70N/mm^2$) と高か

ったので、ビットの磨耗量が激しく上下流の中間立坑で追加のビット交換を実施した。

Table4 掘削係数と掘進係数

地質 番号	岩質	地質状況		掘削係数 (ξ)	掘進係数 (α)
		亀裂・破砕・固結程度	一軸圧縮強度 (qu , N/mm^2)		
1	A	マッシュで硬い	> 100	1.0	0.6~0.8
	B				
	C				
2	A	硬く、亀裂間隔50~10cm	50~140	1.0	0.6~0.8
	C	硬く、亀裂少ない			
	D				
	E				
3	A	破砕質、所々少断層をはさむ	20~80	1.0	0.6~0.8
	B	亀裂多い			
	C	亀裂間隔30~70cmときに所々少断層をはさむ			
	D	中岩~軟岩で、亀裂少ない			
	E	一般にマッシュで軟岩			
4	A	破砕帯、あるいは亀裂非常に多く風化帯	5~50	0.8	0.7~0.9
	B				
	C	非常に亀裂多いが破砕帯、あるいは少断層多い、又は軟岩			
	D	破砕帯が軟岩、あるいは風化し亀裂多い			
	E	軟岩が固結程度悪い			
5	A	破砕帯、又はあるいは風化はなほだしい	< 20	0.6	0.8~1.0
	B				
	C	破砕帯あるいは少断層多いあるいは風化は少断層			
	D	破砕帯あるいは軟岩			
	E	軟岩が固結程度悪い			
	F	軟岩が固結程度悪い			
6	A	破砕帯が風化はなほだしい	< 5	0.5	1.0
	B				
	C				
	D	破砕帯あるいは軟岩あるいは風化			
	E	固結程度悪いあるいは風化			
	F	固結程度悪いあるいは風化			

礫岩強度が高くなると掘進係数 α 、切込深さ T が小さくなるので掘進速度が遅くなる。また、掘削係数 ξ が大きくなるので転送距離が長くなる。それにより、中間立坑 M3, M1 の転送距離を計算するとそれぞれ 435km 程度になり、ビット交換が必要であることを確認できる。

特に、上流側の中間立坑 M1 でビット交換後に、80 m 余りを掘進して到達立坑 M4 に到達したときには、最外周のゲージビットの山が消失するほどの超硬チップの折損および母材磨耗が見られた。(Photo. 2) これは、到達付近の片麻岩の高強度 ($140N/mm^2$ 以上) によると考える。



Photo.2 ゲージカッタ磨耗

5.2 地下水位下の岩盤掘削

下流側中間立坑を通過後の切羽に水圧が作用する約150mの区間で、推力によりセグメントが損傷し易くなる装備の60%に達して、掘進速度を上げられないトラブルが度々発生した。

掘削面に地下水圧が作用するのは、掘削岩盤に亀裂などの不良箇所があると考えた。地下水圧(最大80kpa)が切羽に作用すると排土バルブを開けて、チャンバー内から排泥する時、地下水が流入して土砂が洗われやすい状態になる。推力が上がる原因は、岩盤がカッターヘッドで礫状(10mm以下)に破碎されたものの細粒分が流出して流動性を失いシールド機スキンプレートの外側に詰まり、礫がかみ合い摩擦力が作用するためと考えた。(Photo.3参照)

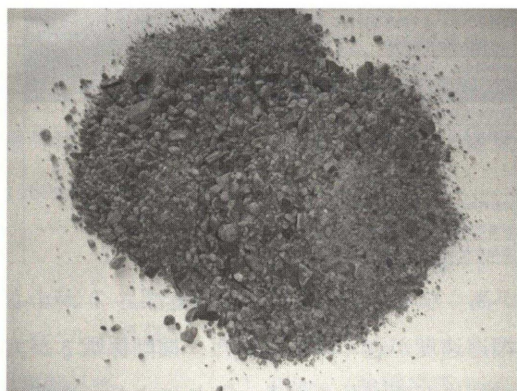


Photo.3 切削された岩盤

前述のような地下水圧下の岩盤掘削で生じるシールド機の推力上昇を抑制するため、以下の三つの対策を実施した。

① 排土時のチャンバー内土圧を保持する。

岩盤掘削の場合は、掘進速度が遅いので、排土バルブ方式で残土排出を行うとバルブを開けた瞬間、どうしても切羽の土水圧を保持することが難しい。チャンバー内土圧の低下を少なくするため、こまめにバルブの開閉を行い、チャンバー内の圧力保持に努めた。実際には、開放時もシールド機停止時のチャンバー内圧-20kpaを確保するように施工した。

② 地山に適した添加材にする。

湧水を抑えるため、紙製の目詰め材を配合した。また、粘土の量を増やして比重を重くして湧水に洗われ難くした。ポリマー系添加材の量も増やし、粘性も増加させた。

③ 裏込め注入の管理圧を上げて充填性を確保した。

セグメント後方からの流水を遮断するため、裏込め注入圧が泥土圧+300kpaになるまで注入して充填性の向上を図った。

前述の対策等により、推力上昇のトラブル回数も減り、無事この区間を通過した。また、地下水圧のある区間では、礫岩に含まれるこぶし大の玉石も多数出現したが、スクリーコンベヤ方式でなく、排土バルブ方式であったので閉塞等のトラブルはなく掘進することができた。

5.3 中間立坑通過

中間立坑は、以下の理由でシールドトンネル掘削施工前に実施した。

① 事前に掘削対象地山の性状を把握する。

立坑を掘削することにより、シールド掘削対象地山が想定よりも硬いことが認識され、ビット交換の準備をすることができた。(Photo.4立坑硬岩の油圧破碎状況)

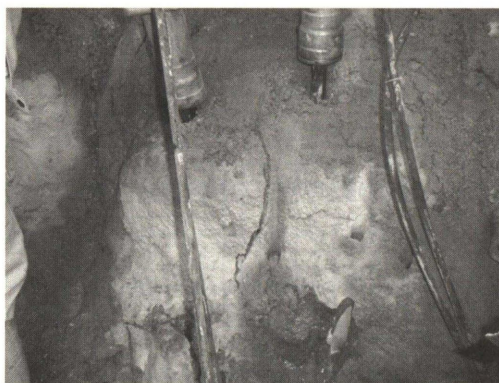


Photo.4 立坑硬岩の油圧破碎状況

② ビットの磨耗状況を目視確認する。

許容磨耗量(10mm)を超えているものがあつたので、上下流の中間立坑で1回ずつビット交換を実施した。

③ 坑内の測量点を確認する。

坑内と地上の測点をつないで、坑内基点を確認した。

④ 全体工程が厳しいので、立坑施工がクリティカルパスにならないようする。

下流側中間立坑M1の補助工法は、薬液注入工で計画していたがNTTとの協議でNTTケーブル周りの薬液注入工が認められず、ウエルポイント工に変更した。変更協議に時間を要したが、協議を早めに進めていたのでトンネル工程に影響なく施工できた。

シールド機の中間立坑通過には手間がかかるが、上記

のように立坑先行施工は効果的であったと考える。

5.4 上流側到達立坑の先行削孔施工

発進立坑の掘削時に礫岩の中に高強度の花崗岩玉石が存在して、立坑掘削に計画以上の工程を要した。それを踏まえて、より高強度が想定される到達立坑 M4 ($\phi 3.8$ m) の施工では、地上から先行削孔を実施した。

油圧式クローラドリルを用いて、 $\phi 150$ mm の削孔を掘削底面まで実施した。円形立坑の中央部分に自由面をつくり、人力掘削を補助することを目的に、配孔パターンは十文字に 40cm ピッチとした。

先行削孔付近の掘削は予定どおりであったが、周辺部等の先行削孔から遠い部分は、予定以上に時間がかかった。硬岩の場合は、全体的に等ピッチに配孔した方が良く考える。

6. 超小口径トンネル

6.1 シールド機の特徴

シールド機は、セグメント内径 $\phi 1$ m の超小口径トンネルを施工するため、通常の後続台車に設備するものが全てシールド機内に配置されている。それにより機内空間は非常に狭くセグメントを組み立てるテール部から機内に入るときは、体を横にしなないと入れない。また、シールド機外径 $\phi 1330$ mm に対して機長は 9 m と長くなっている。

機内に入って掘進と排泥パルプの操作作業を行うので、その場所は座って作業できるスペースが確保されている。

6.2 下流側到達方法

下流側の到達は、既設人孔のライナープレートにシールド機の面板を当てて外殻のみを残置して、坑内で解体する計画であった。しかし、超小口径の坑内で火気を使用して解体作業を行う苦渋作業の解放と工期短縮のため、既設人孔にシールド機を貫通させ、搬出可能な最大長さ (60cm) で輪切りにしてクレーンで吊上げ・搬出した。

(Fig. 6 参照)

その後、シールド機を推進して、セグメントを組立、切断・搬出を繰り返しながら一次覆工を既設人孔に接続した。シールド機解体時には、既設人孔の斜壁から上を

取り外し、シールド機貫通部躯体は取り壊し、一次覆工接続後に復旧した。

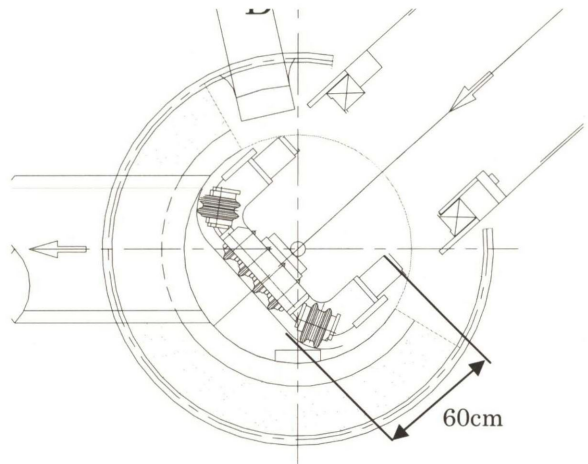


Fig.6 既設人孔内でシールド機解体

シールド機を既設人孔に到達させる場合、以下の 2 点に留意した。

①シールド機周りから人孔への土砂流入を防止する。

到達防護工は、高圧噴射攪拌工法 (CJG) と薬液注入工を実施した。シールド機到達前に、既設人孔から CJG のコアサンプリングを行い、一軸圧縮強度及び漏水状況を確認した。その結果、一軸圧縮強度 $qu=5.3\text{N/mm}^2$ 、漏水なしの状況を確認して、シールド機到達後に貫通部の既設人孔壁のハツリを実施した。

また、シールド機の解体に合わせて、推進する時は機内から同時裏込め注入を実施した。実施工では、土砂の流入も無く一次覆工と既設人孔の接続を行うことができた。

②既設人孔内径 ($\phi 1500$) と掘削外径 ($\phi 1380$) の口径差が少ないので、より精度の高い貫通が求められる。

下流側でジャイロを用いた坑内基本測量を 3 回実施して測量精度の向上を図った。その結果、貫通精度は 30 mm 以内とすることができた。

7. おわりに

ラムサス SD シールド工法を更に発展させるため、今回工事に採用した。掘削対象地山の礫岩が想定以上に高強度であったため、2 回の追加ビット交換が必要になったが、重要構造物に影響を与えることも無く、急曲線も無事に

施工できた。

超小口径トンネルにラムサス SD シールド工法の採用機会を増やすことにより、標準工法（ミニシールド）以外の選択肢となることができる。超小口径分野でシールド工法がさらに発展するためには、複数の選択肢があり互いに競争し合う必要があると考える。そのためには、更なるコストの縮減が必要である。

その方法として、以下の三つを考えている。

① 安価なセグメントを製作する。

継手は、セグメント費にしめる割合が大きいため、簡易な継手にする。

② セグメントを内面平滑にする。

鋼製セグメントも事前にコンクリートを打設して内面平滑タイプにすることで内面仕上げを減らすことができる。

③ 掘削汚泥を減量化する。

バキュームで坑外まで排泥する必要から、掘削汚泥はズリトロ運搬方式に比べて含水比が高い。これを脱水することにより減量化する。また、脱水後の泥土性状によっては普通残土として処理できる可能性もある。

岡崎市下水道幹線（東部幹線）は、平成 21 年 1 月から施工を開始して、平成 22 年 6 月に無事故無災害で竣工することができました。

当初懸念された重要構造物、近隣への影響も無く終了することができたのは、全ての工事に協力していただいた皆様のおかげと考えています。現場施工に当たり、ご指導を頂いた岡崎市下水道工事課工事 1 班の皆様、工事期間中協力を頂いた近隣の皆様、松尾建設及び協力会社の皆様、名古屋支店・本社関係部署の皆様にご協力いただき本紙面をお借りして感謝の意を表します。

参考文献

1) 土木学会：トンネル標準示方書[シールド工法]・同解説 2006 版

謝辞

Construction of Small Diameter Shield Tunnel with Sharp Curve into Hard Rock under Important Structure

Tomishige HIRAIISHI

Abstract

The drainage work at east Okazaki district was constructed under the old Tokaido road at Motojuku area, by shield tunnel method. The drainage length is 1,001.6m and the finished diameter is 1,000mm. The characteristic point of construction is extremely small diameter, hard rock excavation, crossing over the important structure and sharp curve (minimum radius 15m).

Keyword: Crossing important structure, Sharp curve, Hard rock excavation, Extremely small diameter, Replace multi-form semi-shield
