

二段中折れシールド機械と気泡シールド工法の施工実績

Shield Tunneling using the Foam and Articulated Shield Machine

土岐 崇*
Takashi Toki

越沼 悦雄**
Etsuo Koshinuma

要 約

細粒土分10%以下、礫分40%の地盤で、気泡シールド工法と二段中折れ機構の土圧式シールド機械(φ3650mm)により、急曲線(R=20m)の施工をした実績を報告する。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 工事概要
- §3. 気泡シールド
- §4. 二段中折れシールド
- §5. 急曲線施工の防護工
- §6. セグメント
- §7. シールド材
- §8. 裏込注入
- §9. 施工実績
- §10. あとがき

企業先：中部電力株式会社

工事場所：名古屋市昭和区白金一丁目

工 期：昭和62年1月～昭和63年6月

内 容：施工延長	214m
セグメント外径	3500mm
仕上り内径	2800mm
薬液注入	発進部 182kℓ
	到達部 90kℓ
	曲線部 182kℓ
	曲線部反力壁 231kℓ
土被	発進部7m 到達部9m

§1. はじめに

都市部では建物の密集化が進み道路幅員も狭く複雑に交差する所が多い。このような都市部においては、美観とスペースの問題から地中送電洞道が選択されることが多い。しかし、路面下を利用すると、制限された工事範囲で急曲線の施工や、より一層の安全作業が要求される。

ここでは名古屋市内において、送電ケーブルを冷却する目的で計画された洞道および冷却棟の工事において採用した気泡シールド工法と、二段中折シールド機械を用いた急曲線施工について報告する。

§2. 工事概要

2-1 全体工事概要

工 事 名：北豊田南武平町線新設の内白金洞道工事

2-2 地質概要

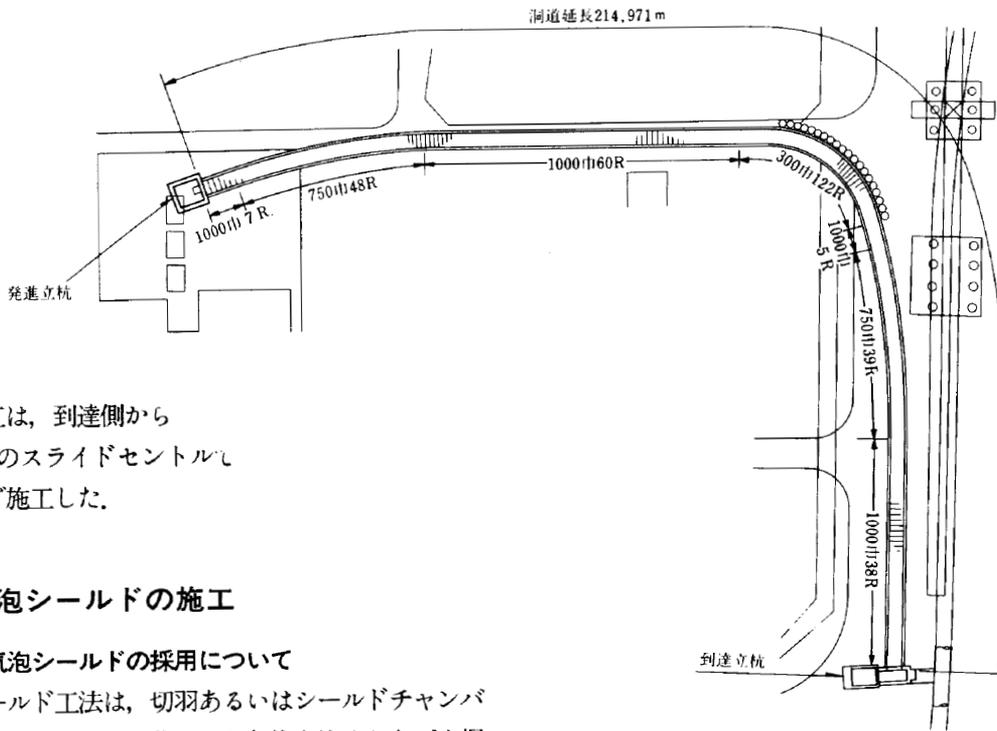
本工事区間の地質は層厚1.5m程度の不均質な埋土の下に大曾根層、その下位には熱田層と呼ばれる洪積層で形成されており、その層厚は、概ね120m程度となっている。シールド掘削断面の土質は礫混りの中粗砂で、到達点付近ではややシルト分が多く混入する。この砂質土は礫分40%、砂分50%、シルト粘土分10%前後の粒度組成で、透水係数 10^{-2} cm/sec、地下水位GL-2m、N値は10~45となっている。

2-3 施工概要

発進基地は白金町内の住宅地の一角に約600m²を確保し、発進立杭(幅5.6m×長さ9.1m×深さ12.1m)をはじめ仮設備、材料置場、事務所などに利用した。施工延長214mのほぼ中間点に急曲線区間(R=20m)があり、この曲線の上部と内側を薬液注入による地盤改良を行う一方、曲線の外側には、シールドが軌道を外れないように片押しの反力壁として、JSGによる連続壁を施工した。到達立杭は、交通量の多い交差点内に入るためできるだけ小さくし、シールド機械は埋め殺しとした。

*中部(支)白金(出)所長

**中部(支)白金(出)工事係長



二次覆工は、到達側から
 $L=7.5m$ のスライドセントラル
 セントラルで施工した。

§ 3 . 気泡シールドの施工

3-1 気泡シールドの採用について

気泡シールド工法は、切羽あるいはシールドチャンバ
 一内に特殊起泡剤により作られた気泡を注入しながら掘

Fig.1 平面図

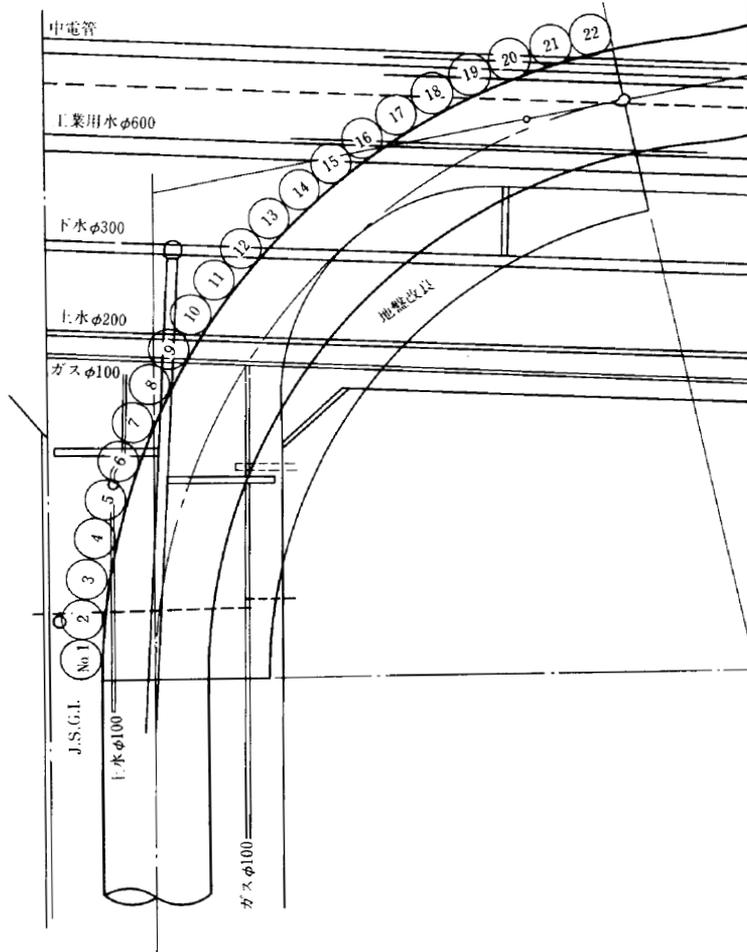


Fig.2 反力壁配置平面図

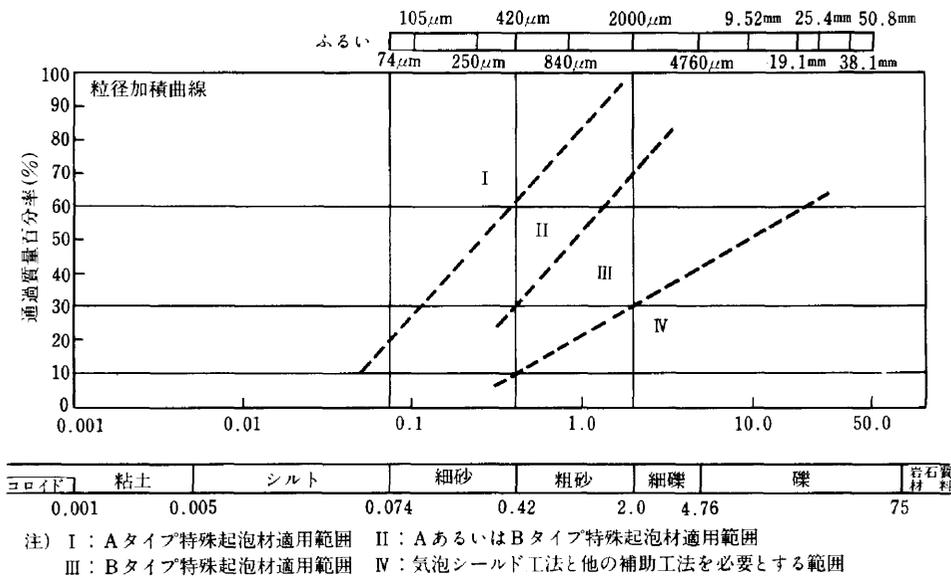


Fig.3 土質と特殊起泡材の選定基準

Table 1 特殊起泡材1㎡当り標準配合

		単位	Aタイプ	Bタイプ
配合	特殊起泡剤(OK-1)	ℓ	30	10
	起泡添加剤(OK-2)	kg	—	20
	水	ℓ	970	970
性状	pH		7.6	7.3
	比重		1.00	1.00
	粘性 (20℃)	cP	2.7	200

Bタイプの特種起泡剤(OK-1)の量は礫の大小、地下水の有無、地下水圧等によっては、特殊起泡材1㎡当り、20ℓ迄増量することがある。

進する工法である。その特長を以下に示す。

- ① 砂礫地盤の場合、気泡のベアリング効果により掘削土の流動性が高まるので、チャンバー内の閉塞が少なく順調な掘進ができる。
- ② 土粒子間隙に存在する地下水が微細な気泡と置換されることにより、掘削土の止水性が向上し地下水位の高い砂質地盤の掘削が容易となり、スクリーコンベアからの噴発が防止できる。
- ③ 気泡は圧縮性があるため、切羽圧の変動が少なく、切羽を乱さないスムーズな掘削が可能である。
- ④ 排出土が消泡剤により地山の土砂に近い性状に復元するため残土処理が容易である。
- ⑤ 粘土ベントナイトを使用していないため、抗内外を汚さず作業環境がよくなる。
- ⑥ 砂礫層から粘性土層まで適用範囲が広い。

3-2 気泡シールドの施工

(1) 気泡剤

気泡剤には土性により Aタイプ、Bタイプ二種類を使い分けるが、土質により適切な気泡剤を選定する基準は Fig.3 による。これに従い現場では Bタイプの配合で施工した。

(2) 気泡混合率

気泡混合率については、土質により次式で算定する。

$$Q = \alpha / 2 \cdot \{ (60 - 4X^{0.2}) + (80 - 3.3Y^{0.8}) + (90 - 2.7Z^{0.8}) \}$$

ここに、Q : 気泡混合率(チャンバー内の気泡量)

X : 0.074mm 粒径通過質量百分率

Y : 0.42mm 粒径通過質量百分率

Z : 2.0mm 粒径通過質量百分率

均等係数 $U_c < 4$ のとき $\alpha = 1.6$

$4 \leq U_c < 15$ のとき $\alpha = 1.2$

$15 \leq U_c$ のとき $\alpha = 1.0$

とする。

チャンバー内の発泡倍率(気泡体積/起泡剤体積)は起泡剤の配合により異なり、含水比の程度、礫の大小、

Table 2 注入添加量算定表

1㎡掘進当り(地山体積10.5㎡)

気泡注入率	20%	25%	30%	35%	40%	45%
気泡注入	起泡材 ℓ	350	438	525	613	700
	エア-量 ℓ	1,750	2,187	2,625	3,062	3,500
	計 ℓ	2,100	2,625	3,150	3,675	4,200

地下水圧などにより Table 1 の標準配合 A, B を使い分ける。A タイプの発泡倍率は 6~10 であり、B タイプは 4~8 である。

Table 2 は現場で注入添加量の算定を行った結果である。

3-3 消泡剤

気泡を含んだ掘削土は、機外に排土されると大気に触れ、時間とともに気泡は消えてしまうが、起泡添加剤を入れた B タイプの気泡は自然に消泡しにくい。しかし、Table 3 にある消泡剤を散布混合することで容易に消泡が可能となる。消泡するときの消泡剤の使用量は一般に起泡剤の 10% 程度で十分である。

Table 3 特殊消泡材 1 m³ 当り標準配合

配合	特殊消泡剤(OK-01)	ℓ	100
	消泡添加剤(OK-02)	kg	2
	水	ℓ	898
性状	pH		6.4
	比重		0.99
	粘性 (20℃)	cP	2.5

注) 消泡添加剤を使用しない場合もある。

3-4 注入の方法

当現場では気泡注入率 35% を設定し、シールド機械より土圧、ジャッキ圧力、及びカッター圧力の信号を得て、設定値に対応するよう自動注入装置を使って施工した。

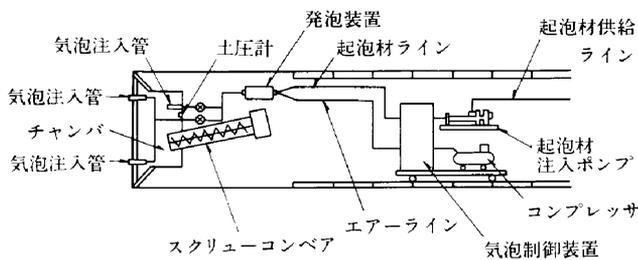


Fig.4 気泡シールド工法概要図

§ 4 . 二段中折れシールド

4-1 二段中折れ型シールド機械の採用について

都市土木のトンネル施工については年々難度の高い施工が要求されてきている。その一つに急曲線施工がある。急曲線施工は図式的にも余掘りが大きくなり地山への影

響が心配されることが多い。当現場で施工した曲線半径 20m のトンネルも従来の中折れタイプシールドでは余掘りが 30cm にもなり施工上困難が予想されたため、少しでも余掘り量を小さくするように二段中折れシールド機の使用を計画した。機械に対する検討事項を Table 4 に示す。

各条件を考慮し次のような機械仕様とした。

- ①カッター屈曲の二段中折れ方式
土圧式(加泥型)シールド機
φ3650mm
全長 ℓ = 5420mm
- ②シールドジャッキ 100t, 12本装備
- ③最大掘削量 175mm のコピーカッタ 2本装備
- ④屈曲角度 カッター側, 右左に各 2.5度
本体中折れ, 右左に各 6.0度
- ⑤掘削トルク 常用 69.2tm (α 値≒1.42)
最大 103.8tm (α 値≒2.13)

4-2 テールクリアランスと余掘り量の検討

(1) テールクリアランスの検討

テール内部でのセグメントの傾き量 (CT) は Fig.5 から次式で求められる。

$$CT = RI \{1 - \cos(\theta)\} \dots\dots\dots(1)$$

$$RI = RO - DS / 2$$

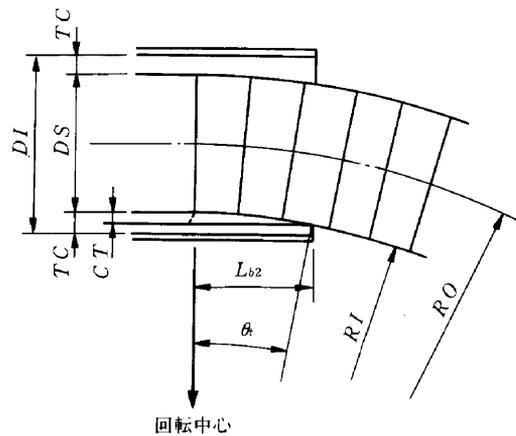


Fig.5 テールクリアランスの検討図

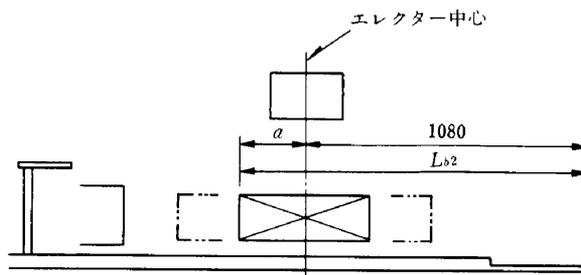


Fig.6 Lb2の検討図

Table 4 急曲線施工における問題と2段中折型シールドでの対応事項

従来型シールドにおける問題		2段中折型シールドでの対応事項		図
問題点	問題の要因	必要検討項目		
1: 急カーブが曲がりにくい (方向転換が困難)	① カーブ内側掘削の圧縮量の増加により抵抗が増える。 ② コーセクターで掘削した余隙部地盤の軟弱化が十分でない。	必要余隙量 掘削の短縮 余掘り機構 (地盤改良)	本体中折れ角度の拡大(中折れ角φの) ① カッター掘削装置の採用(掘削角φ=2.5°) ② 軌道に備えたローバクター装置を2基装備(1基予備)	① 従来式の中折れ型による状態図
	③ 軟弱地盤でのシールドの横すべりが懸念される。	掘削外側の地盤圧力 (地盤改良)	本体中折れ、カッター掘削による掘削効果の期待 ① テンションジャッキの考慮(本体にブラケット設置)	② 2段中折型による状態図
	④ テールクリアランスが十分に確保できなくなり、セグメント組立が困難になると共にシールドの回転が阻害される。	幾何学検討 (カーブセグメントの外径、幅)	① 急曲線時セグメント幅を狭小 (20m時は336mm) ② 急曲線時セグメント外径を縮小 (20mは3460mm) ③ エレクターグリッパ部の前後ストローク拡大	
2: カーブ内側、外側の掘削(テールホド)が大きい。 掘削により地盤沈下 セグメントの横移動 裏込材の切欠部への流入	④ ⑤ ⑥	必要余隙量 掘削外側の掘削半径とセグメント外側掘削半径との差が大きくなる。 ⑤ 内側は、掘削半径が小さくなる程セグメントの掘削半径が大きくなり、セグメント内側掘削半径とワッシャー内側掘削半径との差が大きくなる。	① 本体中折れとカッター掘削機構の採用(余隙量の減少) ② 裏込材遮断防止用板(手をマシン後端に設置) ③ 適当な裏込材の確保(天機)	
3: セグメントの変形及び開きが生じる。 ① セグメントの変形、移動	⑦ ⑧	曲線性能 (配速、施工管理)	① 上記1)に準じる。 ② (セグメント締結ボルトの強度、本数の増強) ③ (適当な裏込材の確保(天機)) ④ (必要によりセグメントの強度アップ) ⑤ (必要によりカーブ外側部の地盤改良)	
4: シールドジャッキセンターとテール内面との干渉が生じる。 (シールドジャッキの破損)	⑦	シールドジャッキ	① シールドジャッキ揺動支持装置の採用(左右方向へ移動) ジャッキロードと球面軸(押込中心)を大偏心としたシールドジャッキの採用	
	⑧	ジャッキ支持方法	ジャッキ前支持部を補助ジャッキにより左右へ移動させ、中間支持部はバネを介して左右へ変動できるようにし、左記の干渉を防止(揺動支持装置)	

$$\theta_t = \sin^{-1}(L_{b2}/RI)$$

RI: セグメントリング内側カーブ半径

θ_t : 右図参照

L_{b2} : テール後端よりセグメント組立位置までの距離(回転中心位置寸法)

これから必要テールクリアランス (TR) は次式となる。

$$TR = (CT + C) / 2 \dots \dots \dots (2)$$

C: セグメント組立精度誤差或はたわみ量、シールドテール部のたわみ量、セグメント組立余裕量等を考慮した余裕量 [一般の場合として $C=20\text{mm}$ とする。]

L_{b2} の数値を Fig.6 に示すようにエレクター中心から $a=150\text{mm}$ シールド前方の位置として計算すると1230mmとなる。

Table5 に示したように計算結果では $TR > TC$ となりテールクリアランス不足となるので、曲線部のセグメント外径は、標準部のセグメント外径に比べて、CT量分(約40mm) 小さくして3460mmとした。

Table 5 テールクリアランス計算結果

セグメント組立位置寸法 L_{b2} (mm)	セグメントの傾き量 CT (mm)	必要テールクリアランス TR (mm)	シールドのテールクリアランス TC (mm)
1.230	41.5	30.75	30

(2)余掘り量の検討

余掘り量の計算は、Fig.7 のシールドの回転中心 O を原点とした X-Y 座標より C 点の座標を求めて、O を中心としたシールド後胴の内接円半径 R_s と C 点の通過半径 R_c との差に、傾き角度分を修正し以下の式で算出する。

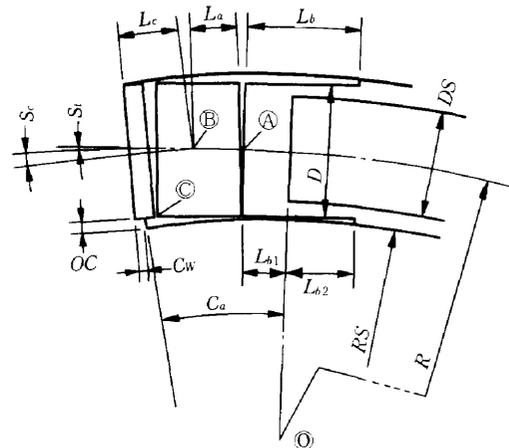


Fig.7 余掘り量の検討

A, B, C 点の座標は次式となる。

$$X_A = -(L_b - L_{b2})$$

$$Y_A = R$$

$$X_B = X_A - L_a \cos(S_t)$$

$$Y_B = Y_A - L_a \sin(S_t)$$

$$X_c = X_B - (L_c - C_w) \cos(S_t + S_c) - D/2 \sin(S_t + S_c)$$

$$Y_c = Y_B - (L_c - C_w) \sin(S_t + S_c) - D/2 \cos(S_t + S_c)$$

C点のY軸との角度 C_a は次式となる。

$$C_a = \tan^{-1} | X_c / Y_c |$$

L_b : 後胴長さ (2700mm)

L_a : 中折部よりカッター軸受までの長さ (1580mm)

L_c : カッター軸受からカッター面板までの長さ (1140mm)

S_t : 中折れ角度 (6度)

S_c : カッター屈曲角度 (2.5度)

C_w : 余掘りカッター幅 (100mm)

これらによって余掘り量 OC は下記となる。

$$OC = (\sqrt{X_c^2 + Y_c^2} - R_s) + \cos(C_a - S_t - S_c) = 101.3\text{mm}$$

余掘り量の計算結果を参考としてオーバーカッターの最大量を175mmとした。

§ 5. 急曲線施工に対する防護工

急曲線施工では、シールド機械を二段中折れ式にしても、通常施工より余掘りが大きくなり、地山の崩壊や周辺地山の変動・変形が発生しやすくなる。また、シールドジャッキの片押しによる集中荷重に対する地山の反力が必要となることなどから地盤改良と反力壁の築造をおこなった。

a) 地盤改良工 (二重管ロッド複合注入工法)

注入材料の逸失防止のため、荒詰めにショートゲルタイムのRMG-S₂を使い、浸透固結にロングゲルタイムのRMG-L₃を使った。配合比RMG-S₂:RMG-L₃=1:3として注入した。

b) 反力壁

高圧噴射大口径地盤改良杭工法であるJSG工法で、硬化材にセメント系JSG-1号を使用し、有効径1.4m、長さ6.5mの改良杭を曲線の外側に22本配列した (Fig. 2)。

§ 6 セグメント

6-1 セグメント

急曲線部のセグメントはテールクリアランス確保のため幅と外径を小さくした。当工事に使用したセグメントの種類を Table 6 に示す。

Table 6 セグメントの種類

種別	形状	使用数量	使用目的
標準	外径 $\phi 3,500$ $t=150$ $\ell=1,000$	94	直線部
片テーパ	外径 $\phi 3,500$ $t=150$ $\ell=1,000\sim 975$	16	勾配修正 蛇行修正
標準	外径 $\phi 3,500$ $t=150$ $\ell=750$	21	R=110 R=120
両テーパ	外径 $\phi 3,500$ $t=150$ $\ell=750\sim 716$	66	同上
標準	外径 $\phi 3,460$ $t=150$ $\ell=300$	12	R=20
両テーパ	外径 $\phi 3,460$ $t=150$ $\ell=336\sim 264$	80	同上
袋付セグメント	外径 $\phi 3,451$ $t=150$ $\ell=300$	30	同上 (遮へい板)
合計		319	

急曲線部は30cm幅としテーパ量は72mmとした。

R=20m部ではセグメント幅30cmのものでテーパ量を72mmとし、テールクリアランスをとるため外径を40mm小さくした。曲線の前後のそれぞれ4.5m分にも同じセグメントを使用した。

6-2 袋付きセグメント

特に急曲線部では余掘りが大きくなり、裏込注入材が切羽に回り込んで余掘り部分まで埋まってしまい余掘り

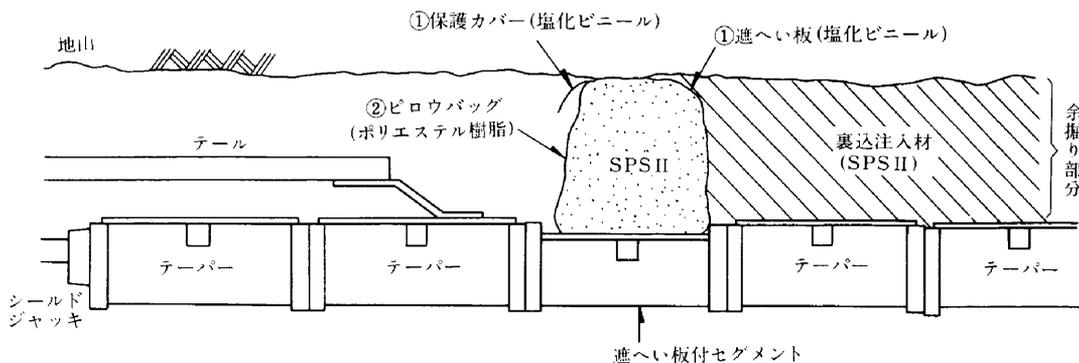


Fig.8 遮へい板付スチールセグメント

効果がなくなってしまう。そこで、セグメントの外側に裏込注入材の入る袋をつけ、セグメントの外側の限定された範囲に裏込めができるようにした。したがって、それが前後の遮閉壁となり、後方で注入した裏込材料が切羽の周りにまで入り込むことがなくなった (Fig.8)。

当現場では4リングごとに袋付セグメントを入れた。余掘りの大きい急曲線部では袋に入る材料が多くなるので、凝固時間の短い、つまり早期強度のする注入材、例えばSPS材などを用いることがよいであろう。

§ 7. シール材

シール材は、復元性と密着性に特に優れているものを選ばなければならない。片押しになると、曲線の内側にあたるセグメントは目開き方向の力が働くので、普通施工に使用した複合シール材 (スリーシーラー W) のほか低小膨潤型シール材 (ポリシーラー1000WL) を内側に貼り二段構造とした。

複合シール材は、芯材に特殊クロロプレンゴム (復元性に優れた合成ゴム) を使用し、被覆材にブチルゴムを使用したものである。

急曲線部の施工は27.5mであるが、わずかににじみ出る程度の漏水があったが、ほぼ満足できる止水ができた。

§ 8. 裏込注入

8-1 配合計画

当工事において、施工上考慮しなければならない事項として、シールド線形が全線にわたり交通量の多い路面下に位置し、到達立坑が交差点内にあるため、路面沈下は許されないという状況がある。また急曲線区間が R=20m であるため余掘りも考慮しなければならない。よって裏込注入材料は、テールポイドを短時間に完全に充填することができ、凝結後の容積変化がなく優れた止水性を持ち、経済的であるものがよいと考えられる。以上のことから、二液型早強粘土モルタル (SPS-II) を採用した。

基本配合および特性を Table 7 および Table 8 に示す。

8-2 注入および注入位置

直線および R=110m, 120m の区間では、シールド機のテールパッキンから50cm~100cm程度離れたところで掘進中に注入を設定圧まで行った。

R=20mの急曲線部では袋付きセグメントがテールパッキンを抜けると同時に袋付きセグメント部に注入

Table 7 基本配合 1 m³当たり

A 液				B 液
エスハイト	助材B	安定剤	水	SP-70
264kg	110kg	1.32kg	751ℓ	120ℓ

Table 8 モルタルおよびグラウト特性値 養生温度20℃

生比重	フロー値 (cm)	A+B液 ゲルタイム (sec)	一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)			
			σ 1hr	σ 1H	σ 7日	σ 28H
1.28	35-50	3-5	1.0	13.0	25.0	30以上

し、4リングごとに取り付けた次の袋付セグメントのところと同様に注入してから、間のセグメント部に注入した。したがって、テールポイドの注入は3~4時間のずれを生じたが薬液注入区間であるため、地盤沈下の影響はなかった。

注入管理について、当初は定圧注入と定量注入の両方を行ったが、定圧注入は注入量にムラが生じるため以後は定量注入とした。なお注入材の運搬および注入方法は次のとおりである。A液は地上の自動プラントにより自動計量、混合し、グラウトポンプにて坑内へ圧送する。また、B液も地上のプラントから坑内へ圧送する。また、B液も地上のプラントから坑内へ圧送する。その制御は、坑内の切羽付近に設置した遠隔操作盤により注入量注入圧及びグラウトポンプ回転数などを監視しながら行った。

§ 9. 施工実績

9-1 気泡シールド工法

今回の施工において泥漿式シールドと比較して有利と思われた点は次のとおりである。

- ①地上設備が比較的小さくて済んだ。
- ②泥漿材のように粘土、ベントナイトを使用していないので坑内外共汚れが少なかった。
- ③比較的地山に近い性状でズリ出しができるため、残土の積込運搬が容易であった。
- ④チャンバー内及びスクリーコンベヤ内の閉塞がなかったことは、気泡により土の流動性が高められた効果が大きいと推定された。

気泡の注入実績を Fig.9 に示す。

9-2 急曲線施工

R=20mの急曲線施工においては、Fig.10に示した曲線進入から離脱までの操作手順図を作成し、これを基

		Ring No	50	100	150	200	250	300	319
気泡注入率 (%)	40								
	30								
	20								
発電倍率	7								
	6								
	5								
推力 (t)	700								
	600								
	500								
	400								
	300								
カッター屈曲 (kg/cm)	120								
	110								
	100								
	90								
	80								
土質試験結果	採取 Ring No	9	31	91	183	246	299	306	
	礫 分	33	31	16	2	9	11	14	
	砂 分	57	61	71	83	82	80	58	
	シルト粘土分	10	8	13	15	9	9	28	
	最大粒径	25.4	19.1	19.4	9.5	9.5	9.6	19.1	
	土質分類								
	含水比	15.3	15.0	18.9	25.0	19.7	18.7	20.0	

Fig.9 気泡注入実績

準に施工した。

施工中は、特に、シールド機前面の3次元位置の把握及び後方セグメントの反力の確保に注意を払い掘進をおこなった。以下に操作手順を示す。

(1) 屈曲準備

シールド機前面が曲線手前90cmより余掘りをおこなった。余掘量は基準値20mmに対し内外共40mmとし、BC点にて内側80mm 外側50mmとした。

(2) 屈曲

シールド機前面が曲線部に入った時点から、本体中折れを行うと同時に内側余掘り量を順次増やしていき、最大140mmとした。

BCより3m曲線内に入った時点でカッター屈曲をおこなった。

施工結果はBCよりシールド機前面が7.4m曲線内に入ったところでは、R=20mの軌跡に乗っていた。その時点でのシールド機操作状況は以下のとおりであった。

- 堆力 400~500t
- ジャッキ速度 25mm/min
- 余掘量 内側 150mm
- 外側 0mm
- 本体中折角 6°
- カッター屈曲角 2.5°

R=20mを抜けるときは、ほぼ進入手順の反対の操作をおこない、直線掘進に戻した。

カーブ掘進中大きなトラブルもなく比較的スムーズに掘進ができたが、カーブ離脱時に推力の増大がみられた。

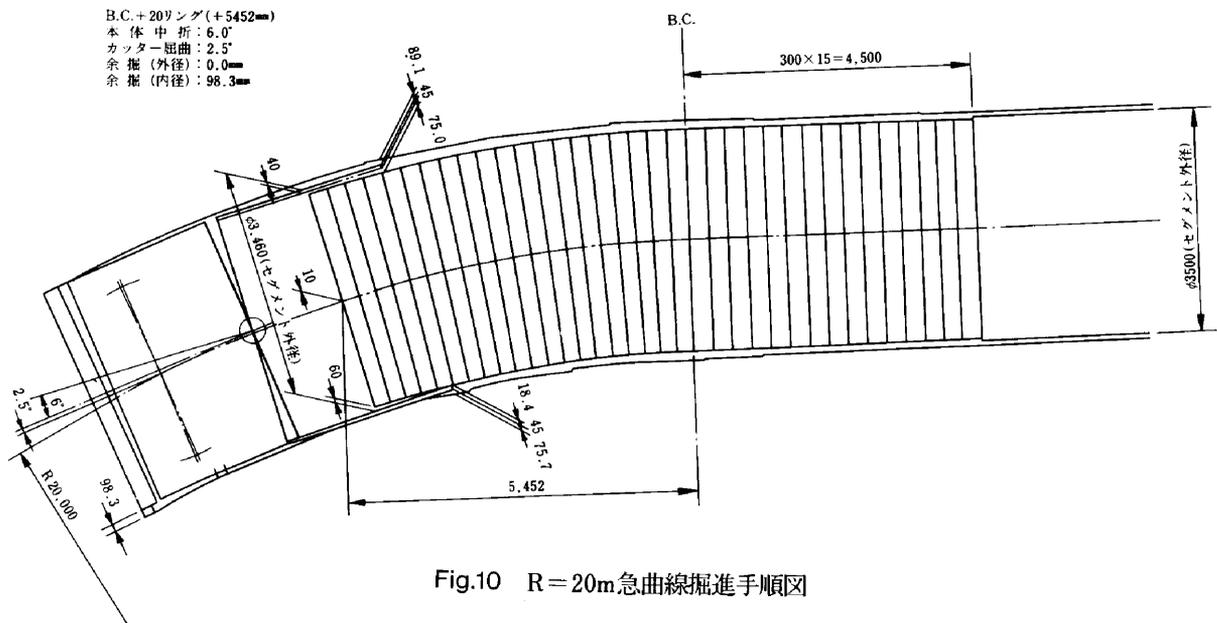


Fig.10 R=20m急曲線掘進手順図

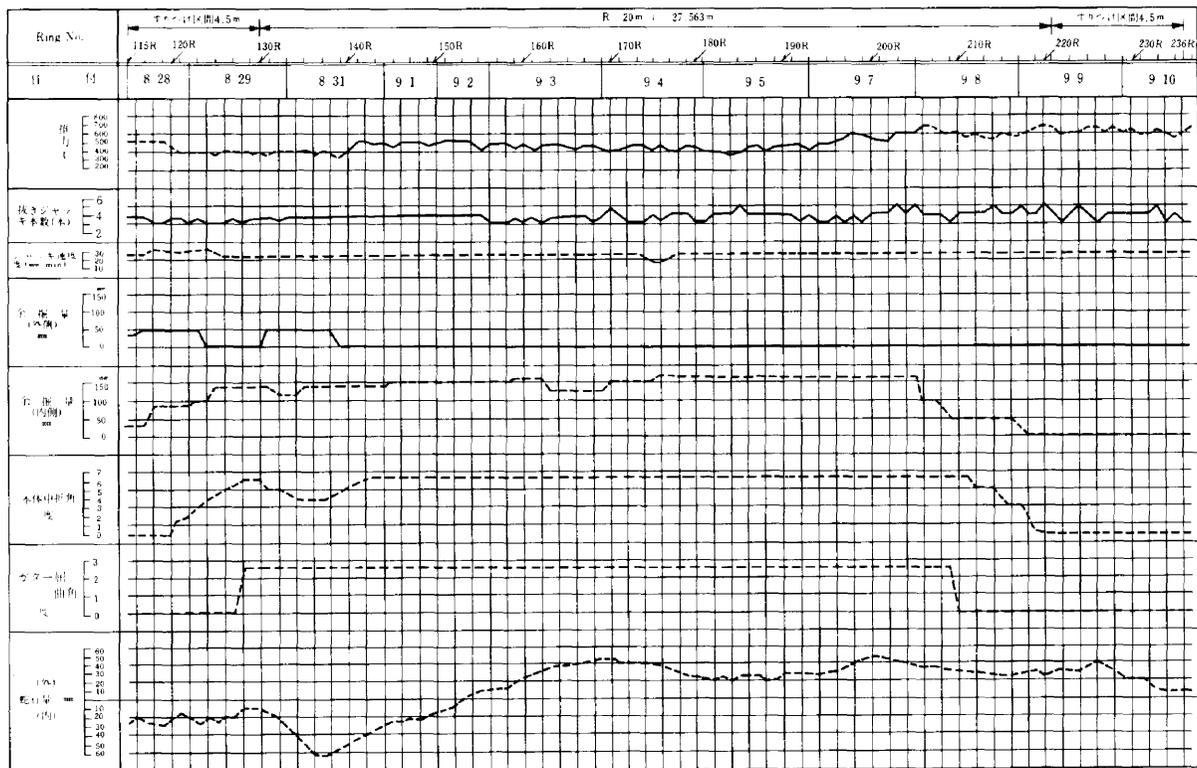


Fig.11 R=20m 施工実績

これは、薬液注入部を抜ける際、チャンバー内圧力を上げた結果によるものと考えられる。

掘進実績は Fig. 11 に示すとおりである。

稼働日当り掘進量は1.0リング/日(両番)であった。

§10. あとがき

2段中折れシールド機を用いた気泡シールドによる急曲線部を含む洞道掘進は、品質管理、工程管理面共に好成績を収めることができた。しかし本報告では概要を述べるに止まるところが多く、分析、掘り下げ方に不十分な点が多くなってしまったところは、御容赦願いたい。

おわりに、計画段階から御指導を頂いた本社、支店の関係各位に対して深くお礼を申し上げます。

参考文献

川崎重工(株)改発清秀：「急曲線施工用シールド」

気泡シールド工法協会：「気泡シールド工法」