

泥土圧シールドにおける急曲線施工と障害物除去

Sharp Curved Tunneling Work and Obstruction Removal by Earth Pressure Balanced Shield

鈴木 久一*
Kyūichi Suzuki

細田 道敏**
Michitoshi Hosoda

大桐 武弘***
Takehiro Ōgiri

要 約

本報文は、東京都下水道局発注による地蔵堀幹線その4工事におけるシールドの急曲線施工 ($R=25, 30, 40\text{m}$) および障害物 ($\phi 700\text{BH}$ 杭, シートパイル等不明杭) 除去の施工報告と今後予想される同種の問題について考察を加えるものである。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 概要
- §3. 急曲線施工
- §4. 障害物除去
- §5. 考察
- §6. おわりに

§1. はじめに

わが国におけるシールドは、初期には欧米の技術を学びながら普及したが、困難な施工条件で多くの経験を積み密閉型シールド機を開発し、最近では先輩の欧米に技術輸出するまでに到っている。

近年シールド工事においては、都市の過密化、交通量の増大などに伴い立坑の築造が困難となりつつあるといった問題がある。このため回転、中間立坑の築造を避けてルートを計画するために、急曲線施工が増加する傾向にある。

また、密閉型シールド機が多用されるなかでは、掘削地盤中に存在する支障物の予知及び除去といった問題がある。

当工事においても立地条件や交通条件から $R=25, 30(2\text{箇所}), 40, 50\text{m}$ と多くの急曲線施工箇所が存在し

ている。

また、当工事には東北新幹線寛永寺橋工区(当社施工)の橋梁受替工事、他企業防護工事などにより、残置されている仮設山留杭の切羽での切断除去作業も含まれている。

以下に、これらの特殊条件を含めて施工した内容を報告する。

§2. 概 要

2-1 工事概要

工事件名 第二地蔵堀幹線その4工事
工 期 自 昭和60年12月7日
至 昭和62年2月3日

主要数量 一次覆工 642.1m
セグメント外径 4.30m
地盤改良工 水ガラス系懸濁液型 441kl
水ガラス系溶液型 1024kl
噴射攪拌杭 1561kl

シールド掘進機

泥土圧シールド (中折れ式)
シールド外径 $D=4.43\text{m}$
シールド機長 $L=5.48\text{m}$
シールドジャッキ 125ton×16本

2-2 路線

路線は、寛永寺橋の高架下に築造した寛永寺橋たて坑から寛永寺橋陸橋の側部、JR新幹線の上部、NTT 洞道

*関東(支)田町(出)工事係長
**関東(支)関東上野(出)
***関東(支)東金町(出)

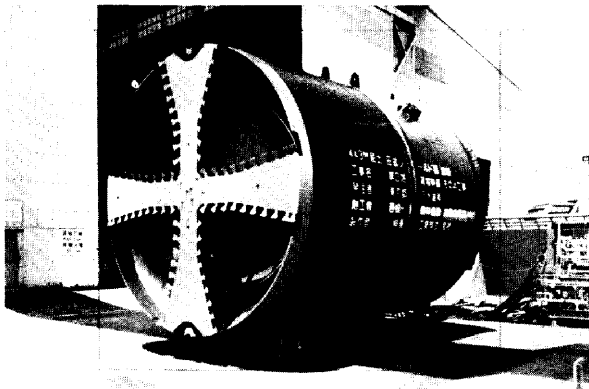


Photo 1 泥土圧シールド機(中折れ式)

の下部を通過して、荒川区東日暮野五丁目に至る施工延長642.1mである。

シールドの土被りは発進部で8.3m、到達部で7.0mで、1.87D~1.58Dの範囲にある。

路線の直・曲線比率は Table 1 に示すとおりで、全体に占める曲線部の比率は約30%である。

2-3 地質概要

本工区は、山手台地と荒川低地の岸線に位置する。そのためシールドの通過対象土層は、発進部から約270mまでは洪積世の東京粘土層と東京砂層の互層であり、残り約370mは沖積世の上部有楽町砂層である。

東京粘土層 (Dm) はシルトを主体とし N 値は20~50である。東京砂層 (Ds) は細砂を主体とし、粒子均一で所々粘土の薄層を含み N 値は15~50である。上部有楽町砂層 (As) は細砂を主体とし貝ガラ片、腐食物を混入

し、 N 値はおおむね2~3とルーズな砂層である。

以上、シールド通過対象土層は主に緩い砂層であり地下水位以下の施工となる。

Table 1 直・曲線比率

	延長(m)	比率(%)
直線	434.125	68.09
$R=25$	39.300	}
$R=30$	3.300	
$R=40$	63.900	} 31.91
$R=50$	12.150	
$R=100$	72.660	}
$R=200$	12.215	
計	637.560	100.00

§3. 急曲線施工

急曲線施工を行う場、各種の手段、方法を講じなければならないが、いずれ方法が最も確実で理想的であるかは一概にいえず、地山の条件・シールド機・セグメント・余掘り量及び補助工法などを総合的に判断して、十分かつ余裕を持った対策を講じることが必要である。

急曲線施工の検討事項のまとめを Fig. 3 に示す。

3-1 急曲線に対するシールドの設計について

急曲線施工を考慮した場合、シールド機の機動率 (L/D) をできる限り小さくすること、テールクリアランスに

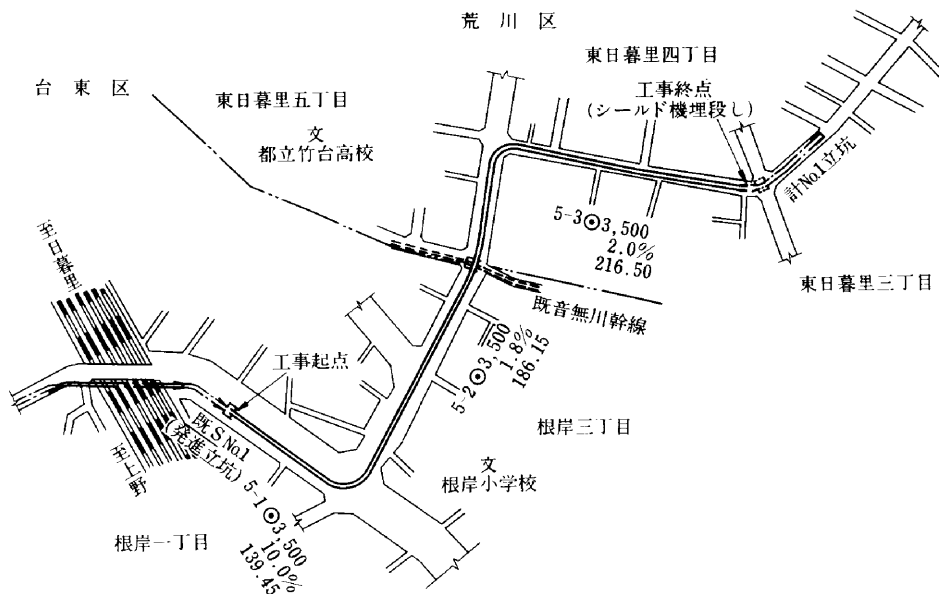


Fig.1 系統図

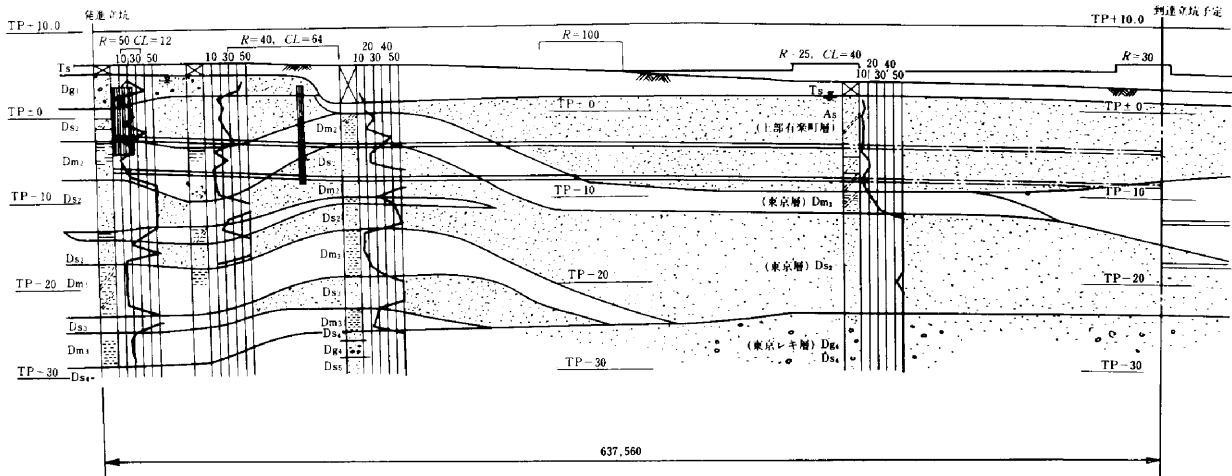


Fig.2 地質想定断面図

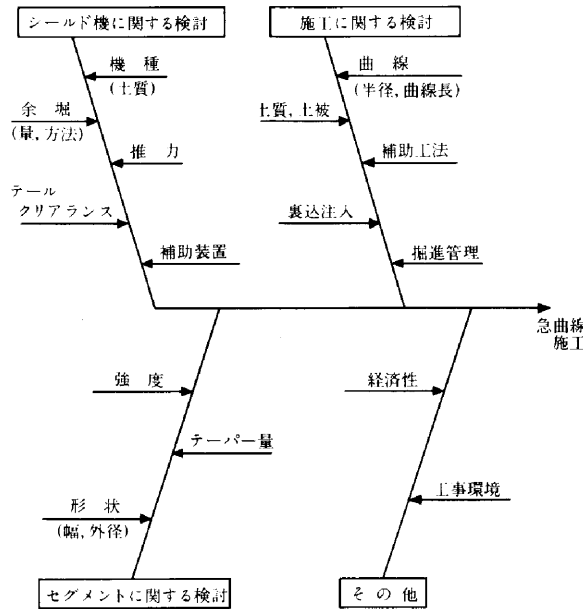


Fig.3 急曲線施工の検討事項

余裕を持たせることなどであるが、種々検討の結果、シールド機の構造は1段中折れ式とした。各曲線部に対する本体中折れ角度・必要テールクリアランス及び計算余掘量を Table 2 に示す。

3-2 急曲線施工の留意点

急曲線施工に関しては、セグメントとシールド機の位置関係、テールクリアランス、余掘量などを十分に検討し、常に状況を適切に把握していることが必要である。

急曲線 (R=25m) の施工に関し特に留意した点は次のとおりである。

- (1) シールドの軌跡が曲線を逸脱しないように推進管理を行うこと。

Table 2 各曲線における中折角度, 必要テールクリアランス計算値

曲線半径 R (m)	本体中折角度 (°)	必要テールクリアランス (mm)	シールドのテールクリアランス (mm)	計算余掘量 (mm)
25	6.3	20.3	< 25	61.5
30	5.2	17.5	< 25	53.1
40	3.9	15.4	< 25	31.5
50	3.1	13.3	< 25	25.9
100	1.4	10.6	< 25	10.6
200	0.7	7.8	< 25	5.3

曲線部の推進管理については、中折れ角度を十分管理し、曲線とシールドの軌跡が合致するように注意し、少くとも外側に逸脱しないようにした。曲線進入時の中折れ角度管理方法を Fig. 4 に、中折れ角6.3度に固定してからの推力、使用ジャッキの実績を Table 3 に示す。

ここで注目すべき点は、シールド機が曲線に乗り、順調に掘進し始めると推力が減少し、使用ジャッキも曲線外側のみの片押し状態ではなく、ほぼ直線部と同様の推進方法で曲線施工が可能となることである。これは中折れ式シールド機の前胴部が曲線にのりジャッキ自体が偏心していることと、前胴が屈曲することによりソリ効果が得られたことによると考えられる。

その結果、一般に見られるセグメント内側のジョイント部の開きもなく、蛇行も60mm程度に納めることができ、満足できる状態であった。

- (2) 余掘りにより周辺地山を乱すため、裏込注入を確実にすること。

急曲線施工には、余掘りが必要となり、計算上では

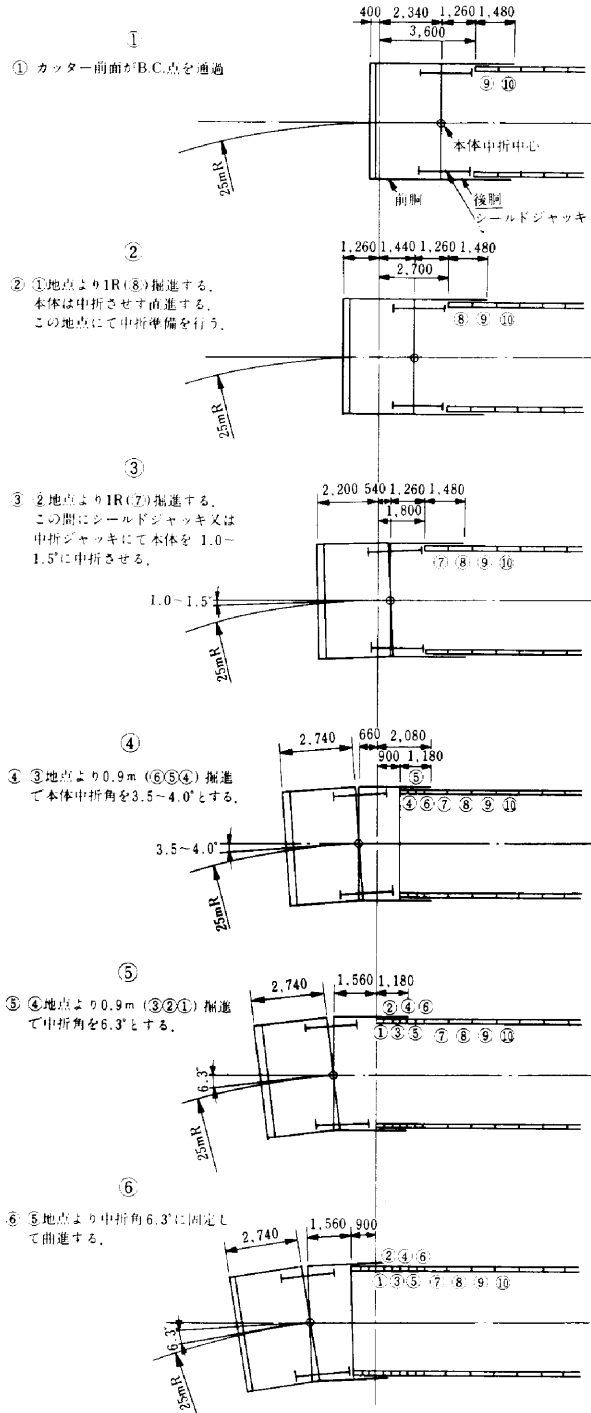


Fig.4 R=25m施工時の中折角度管理図

61.5mmとなる。これに対し実際はコピーカッターにより100mmの余掘りを行った。また、裏込注入は即時注入とした。注入実績を Table 4 に示す。

(3) セグメントの横移動に注意すること。

急曲線施工におけるシールドジャッキ推力は、すべてがセグメントにかかるのではなく、セグメント軸方向の分力のみとなり、直角方向の分力は地山に吸収される。

Table 3 R=25m施工時の使用ジャッキと推力表

リングNo.	使用ジャッキ本数		推 力 (t)
	左ジャッキ	右ジャッキ	
540	8	0	514
545	6	1	500
550	6	0	621
555	8	2	429
560	7	3	464
565	6	3	546
570	5	5	500
575	7	1	571
580	7	3	536
585	5	7	471
590	6	2	457
595	5	6	432
600	5	5	357
605	5	6	432
610	2	6	400
平均	5.8	3.3	482

Table 4 裏込注入実績

区 間	注入率(%)	備 考
直 線	158	注入材クリーンパック (ゲルタイム 5~10秒)
曲 線	186	"

そのため裏込注入が不十分であったり、地盤反力が小さい軟弱地盤の場合は、セグメントが曲線外側方向に横移動することがある。軟弱地盤のような場合には、事前に地盤改良工を施工するなど地盤反力の増強に努めるほか、急曲線施工による余掘り部の裏込注入及び二次注入などによりセグメントを固定することが必要である。また、セグメントの位置測定についても後方の不動点から測定するなどの注意を払う必要がある。

§ 4 . 障害物除去

4-1 寛永寺受替部障害物除去

当工事は、当社施工による東北新幹線上野トンネルと同じ立坑を使用し、縦断的には、410mmほどの離隔をもって約100m 併行しており、寛永寺橋陸橋交差点下にて新幹線トンネル上部を横断し、更に NTT 洞道下を通過して都道（尾竹橋通り）下を通過する。そのうち寛永寺

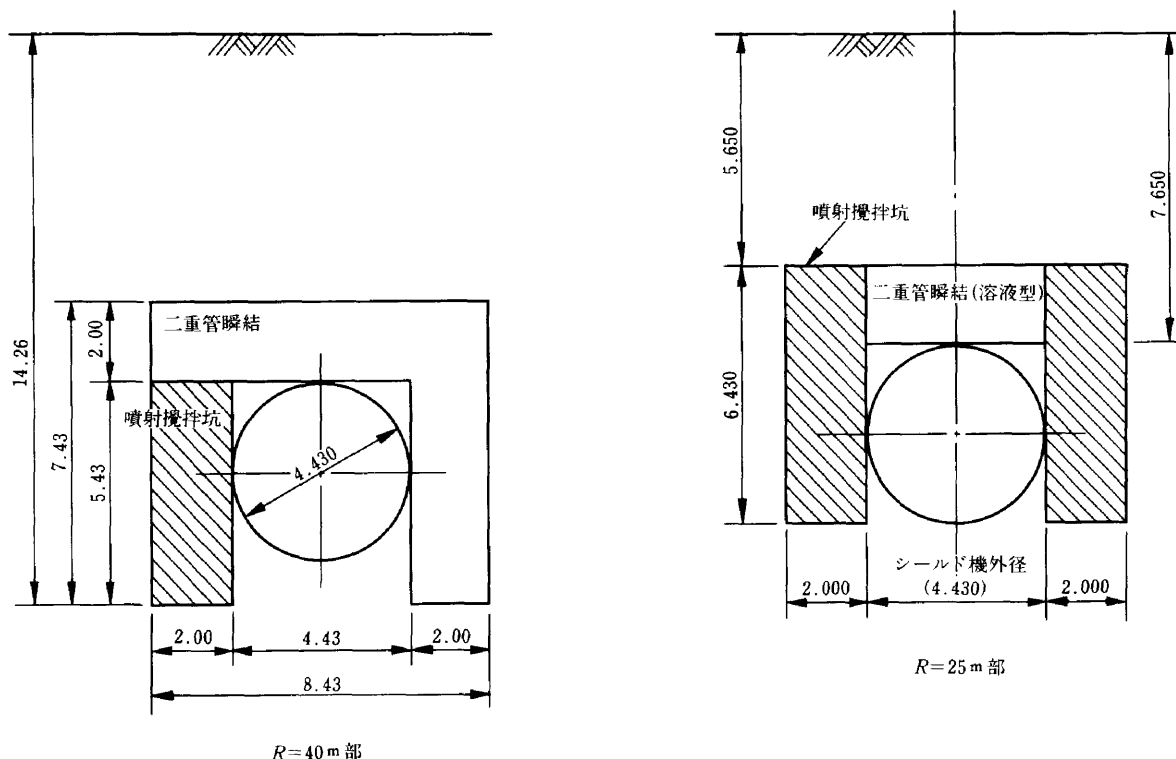


Fig.5 R=25m部, R=40m部地盤改良図

橋陸橋については、上野トンネルの施工に伴う受替工事が行われており、初期発進部にて9本、R=40m部にて6本計15本のBH杭（H-300×300×10×15）がシールドに支障となる。これらの障害物除去については種々検討を加えたが地上から防護注入を行い、シールドが支障物に近くなった時点で、坑内から支障杭を切断除去することとした。防護注入については、下水道局設計にある二重管瞬結工法による地盤改良によるほか、更に安全を期すため、当社として新たに噴射攪拌杭工法（コラムジェット）による防護を加えた。

以下に支障杭除去までの施工手順を記述する。

- ① スクリューコンベアにてチャンバー室の土砂を半分程度取り出す。
- ② 切羽土圧が下がったことを確認してマンホールを開ける。
- ③ 支障杭以外の面板部を山留する。
- ④ 支障杭のモルタルを研る。
- ⑤ 支障杭をマンホールから排出できる程度に切断する。
- ⑥ シールドSLまで撤去した後、チェーンブロックなどで下部の杭を引き上げ③、④を繰り返す。
- ⑦ 支障杭除去が完了したら山留を撤去し、速やかに掘進し、異常がないことを確認してマンホールを閉塞する。

- ⑧ スクリューコンベアは回転させずに掘進し、チャンバー室内土圧が管理値に達したのを確認した後正規の作業に戻す。

当初予想された支障杭は、上記の作業の繰り返して順調に撤去された。特に、地山はコラムジェットの効果が十分あらわれており、自立する状態で問題なく施工することができた。

4-2 R=40m部の不明杭

前期の他にR=40m部においてNTT洞道及び東電マンホール部付近において不明杭が出現して支障となり、その数は結果的に14本にのぼり、工程の大幅な遅れの原因となった。以下に不明杭の出現について記述する。

(1) 不明杭出現までの経緯

R=40m部シールド掘進中、当初予定されていた支障杭を撤去するためチャンバー内を調査したところ、当初予定していたBH杭（H-400×400、場所打ち杭）3本の他にH-300×300の不明杭が4本確認された（Fig 6参照）。

下水道局を交え道路管理者、他企業と協議し不明杭の確認を求めたが、各企業者とも付近の本体構造物の一部ではないとの説明であり、道路管理者の台帳にも記載の無いことから、不明杭も当初支障杭と同様に切断撤去することとした。また、残り区間でも不明杭の埋設が予想されるため、再調査することとした。

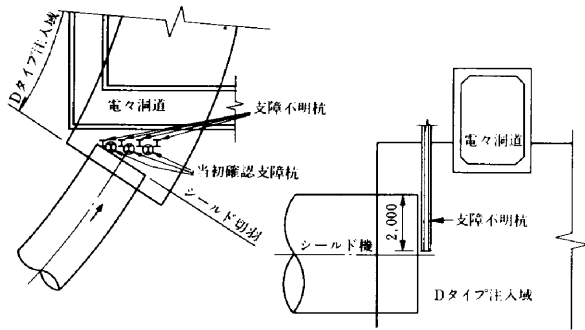


Fig.6 支障不明杭の出現

(2) 不明杭の調査

道路管理者、各埋設管理者と協議・打合せを行ったが、不明杭の有無・形状などについては資料がないため、シールド掘進路線上を古くから住んでいる地元住民の記憶や古い地図を参考にアットランダムに探査ボーリングを行なうこととした。

探査ボーリングは、舗装 (t=35cm) をメタルビットにて削孔し、以下はプラスチックビットにてジェット削孔して異物を確認する方法とした。なお、探査ボーリングは50cm ピッチとした。

(3) 調査結果

R=40m 部における調査結果を Fig. 7 に示す。

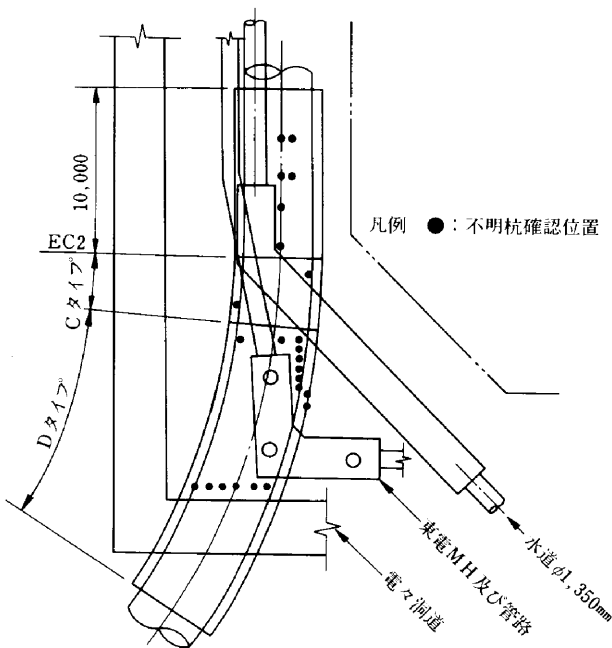


Fig.7 R=40m 部不明杭調査結果

(4) 対応

当初から支障杭が予想されている箇所、周辺地盤のゆるみ防止の地盤改良が施工されている箇所、地盤改良な

どの防護工が何もなされていない箇所などそれぞれに分類し検討を加えた。撤去の方法としては、これまでの経緯により前面を瞬結二重管注入で地盤改良し、カッター部を山留しながら切断除去することとした。

4-3 音無川幹線付近不明杭

音無川幹線付近においても前記 R=40m 部と同様に不明杭の調査を行った。その結果 Fig. 8 のとおり11ポイントにおいて何らかの障害物と思われる物に当たった。その中でも東電マンホール付近では、障害物が1.5m ピッチとなっていることから当時の山留杭らしいと想定した。φ1350の水道管路付近でも管路と平行して当るが、間隔が不揃いであることから鋼矢板のようなものではないかと想定した。

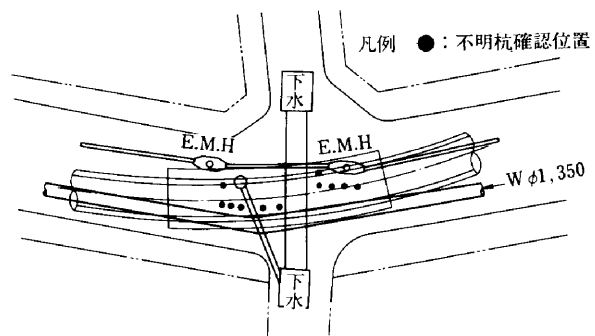


Fig.8 音無川幹線付近の不明杭調査結果

このように調査を念入りに行い、十分注意してシールド掘進したが、予知しえなかった不明杭などもあり数ヶ所でシールド機とぶつかった。ただし、シールドの各種計器にはほとんど感知せず、スクリュウコンベアから H 型鋼、シートパイルの破片やカッタービットなどが排出されたり、土砂排出が不能となったため始めて気付くような状態であった。その結果、シールド機カッタービットが折損し掘進作業の続行が不可能となり、ビット交換補修が必要となった。

ビット交換方法は検討の結果、切羽前面に作業員が出る必要があり、危険性が非常に高いことから、地盤改良工法のうち、改良強度が高く確実性のある噴射攪拌杭工法 (コラムジェット) を採用することとした。噴射攪拌杭の配置を Fig. 9 に示す。なお、シールド停止位置での噴射攪拌杭施工は、以後のシールド掘進に悪影響を及ぼすため、ビット交換予定位置を改良した後にシールド機を貫入させることとした。この状態で、切羽前面に作業空間を設け、山留を施してビット交換を終了した。



Photo 2 シールドカッターに巻きこまれたI型鋼



Photo 4 ビット交換終了

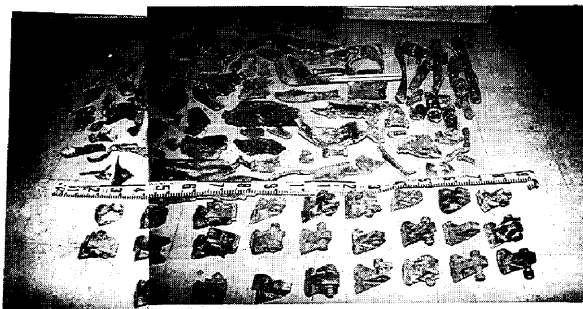


Photo 3 排出された鉄片及び掘削ビット

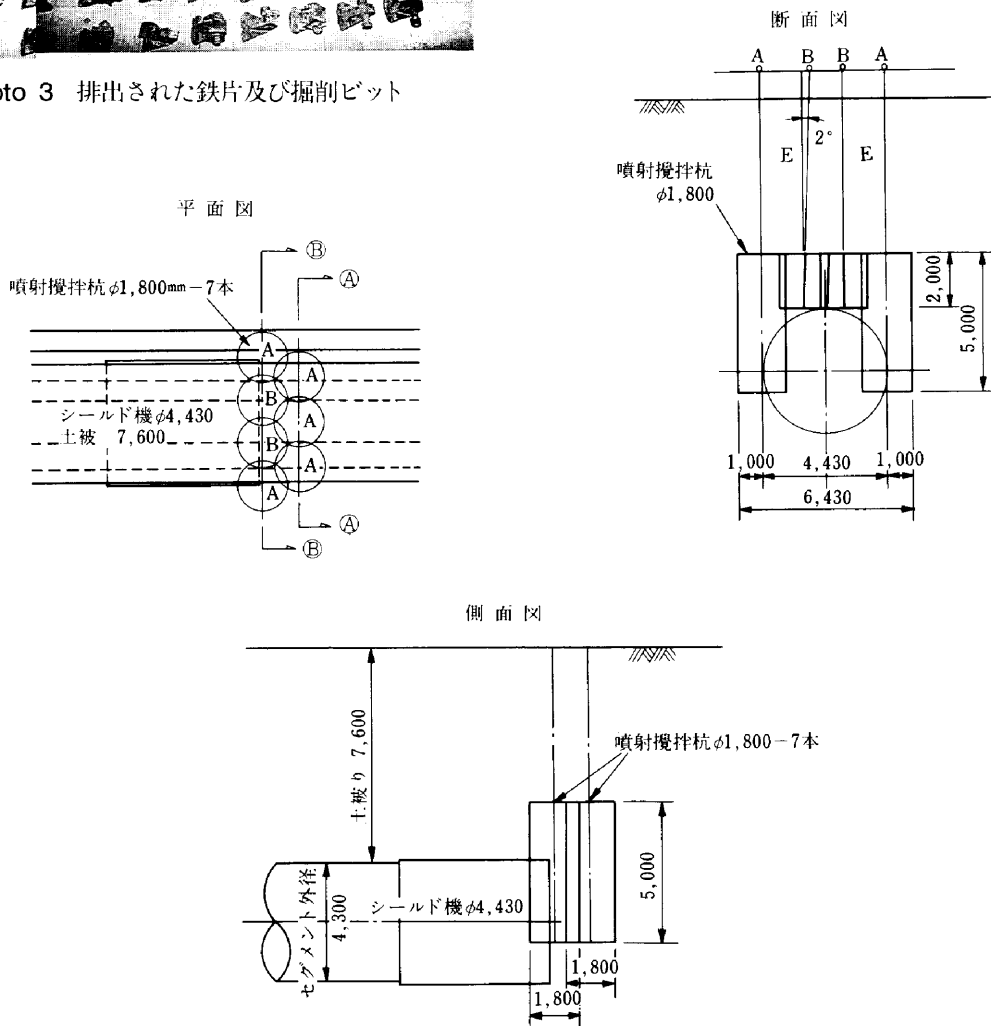


Fig.9 ビット交換のための噴射攪拌杭施工

§ 5. 考察

5-1 中折れ機構について

これまでの密閉型シールド機による施工可能な最小曲線半径は、シールド外径、規模、土質などの施工条件にもよるが、実績ではφ4500程度のシールドでは、 $R=50\sim 60\text{m}$ である。シールド機の曲線性能は、曲線半径、シールド機長・外径、ジャッキ推力及び地盤反力係数などの要素で比較できる。

- ① 機長 (L) と外径 (D) との比 (L/D =機動率) が小さい程曲線施工が容易である。
- ② 曲線半径 (R) と外径 (D) との比では、外径の20倍程度の半径が限界と言われており、経験的に30~40倍の曲線半径が望ましいと考えられる。
- ③ 最小曲線半径 (R) は急曲線検討書(日立造船)によれば幾何学的に $R=L^2/(8\cdot C)$ で表わされる。(C:クリアランス)
- ④ 前述の検討書によればシールドジャッキの回転力 (M_j) と地盤反力のつり合式より考慮すると $R=K\cdot L^4\cdot D/(24\cdot M_j)$ となる。

以上①~④に基づいて一体型と中折れ式のシールドを比較すると、シールド機長 (L) が短いと同様の効果になる中折れ式シールド機が単純に有利となる。さらに推進用ジャッキが中折れ角度分だけ偏心することによる回転力、前胴部分のソリ効果などから、より曲がり易くなることも事実である。これらは、曲線部の掘進実績がほぼ直線部と同様なことからも推察される。さらに余掘量、テールクリアランスについても中折れ式シールド機の方が有利である。

以上のように当工事においても $R=25\text{m}$ を無理なく施工した中折れ式シールド機であるが、その細部機構についてはまだまだ改良の余地がある。当工事においても Fig. 10 に示す直進用サポートリング支持ガイドピンのネジ部が数度にわたり切断したり、曲進時・直進時変更のための段取替(ガイドピンの取付取外し、サポートリング分割など)に6~7時間要するなど改良すべき点があり機構上の見直しを行った。

サポートリング部には、ジャッキ自重と共にジャッキの片押しなどによるスラスト力がかかるため、ガイドピンのネジ部締付のみの固定方法は構造上強度不足であった。また、段取り替えの操作を簡単にすることについては、機械メーカーと共に検討し、ジャッキポット部の移動量を大きくし、リングガーダーウェブでの移動量を小さくし、シールドジャッキ後方支持部を板バネ方式とすることとした。カーブ掘進中のサポートリング操作を板バネ方式としたことにより、カーブ掘進中のサポートリ

ング操作が不要となり、曲進から直進、直進から曲進の段取り替えもジャッキ操作のみで行えるようになり、時間の大幅な短縮になると考えられる。

5-2 障害物除去について

当工事のようにシールド掘進断面中に障害物(コンクリートパイル、鋼製杭、シートパイル、流木そのほか)が出現することは、今後も多に予想される。そのため我々技術者としては、障害物の予知と対策を常に念頭に置かなければならない。以下、障害物の予知と対策についてまとめてみる。

<予知について>

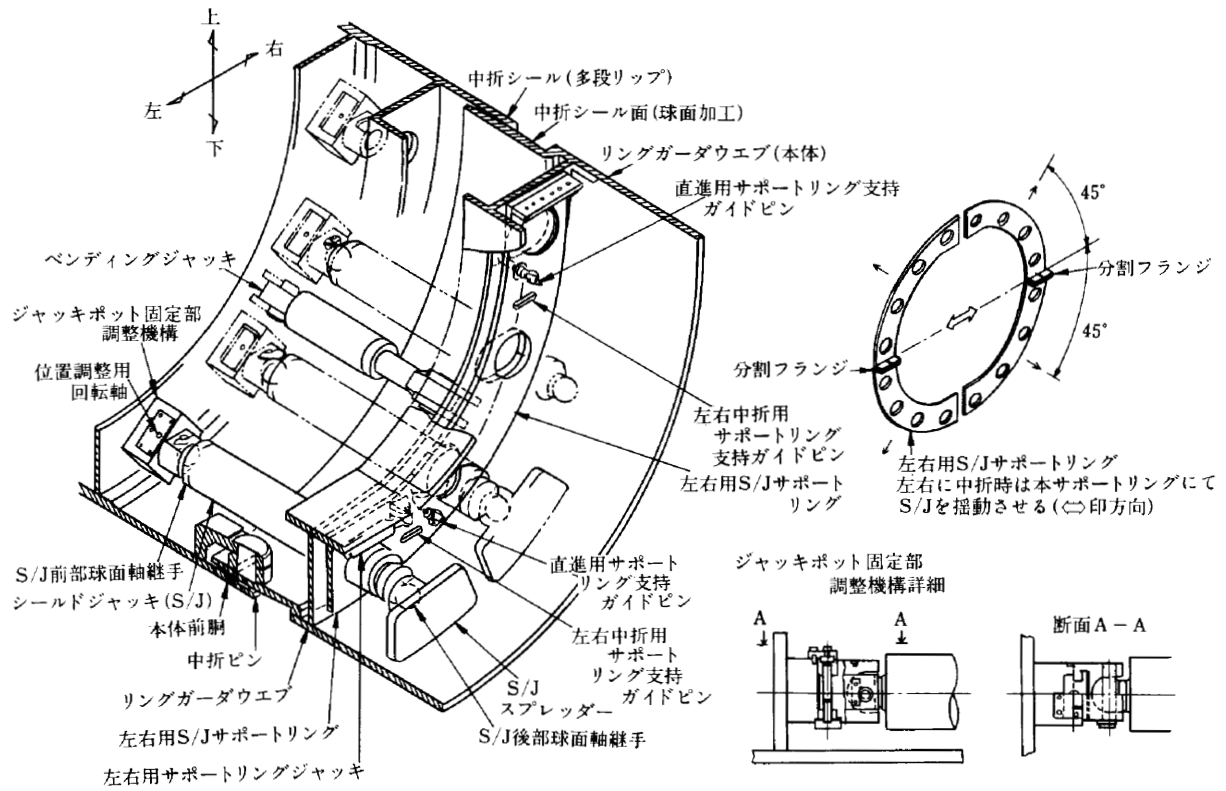
- ① シールド工事において、主要幹線道路下を掘進するような場合は、各種埋設物の布設状況・年代、道路の拡幅の範囲、井戸の有無などを道路管理者の台帳や地元の長老の話などから調査する必要がある。
- ② 付近に河川がある場合は、河川の蛇行などにより流れが変化している場合もあるため、古い地図も参考にし、土質調査などの頻度も考慮する。
- ③ 多少なりとも障害物が予想される箇所(交差点付近、他企業埋設物の人孔部など)については、企業先と打合せの上磁気探査なども検討する。
- ④ シールド機械の今後の課題も含め、スリットの自動開閉装置、チャンバー内から交換・補修可能なビットの取付方法、切羽前面部における予知センサーの取付なども検討する。

<対策について>

- ① 万一の事を考慮し、チャンバー室の隔壁に設けるマンホールはでき得る限り大きく取り、開閉が容易な構造とする。
- ② 障害物の位置・種類などが事前に判明している場合は、可能な限りこれを回避するよう、線形及び勾配の変更、地上からの除去、シールド機種の変更などを検討する。
- ③ 障害物を切羽で除去しなければならない場合は、障害物の種別・形状・数量とシールドの位置関係、特に杭などの場合は、その支持している構造物の種類、施工条件などから各種工法を比較検討して選定する。

以上述べたように、障害物の予知と対策を徹底すれば、密閉型シールド機でも除去することは可能である。ただし、安全性を考慮し、十分な地盤改良(コラムジェット、二重管瞬結注入など)を施し、切羽が自立できる状態を保ち、山留を確実にを行う必要があることは言うまでもないことである。

従来型



改良型

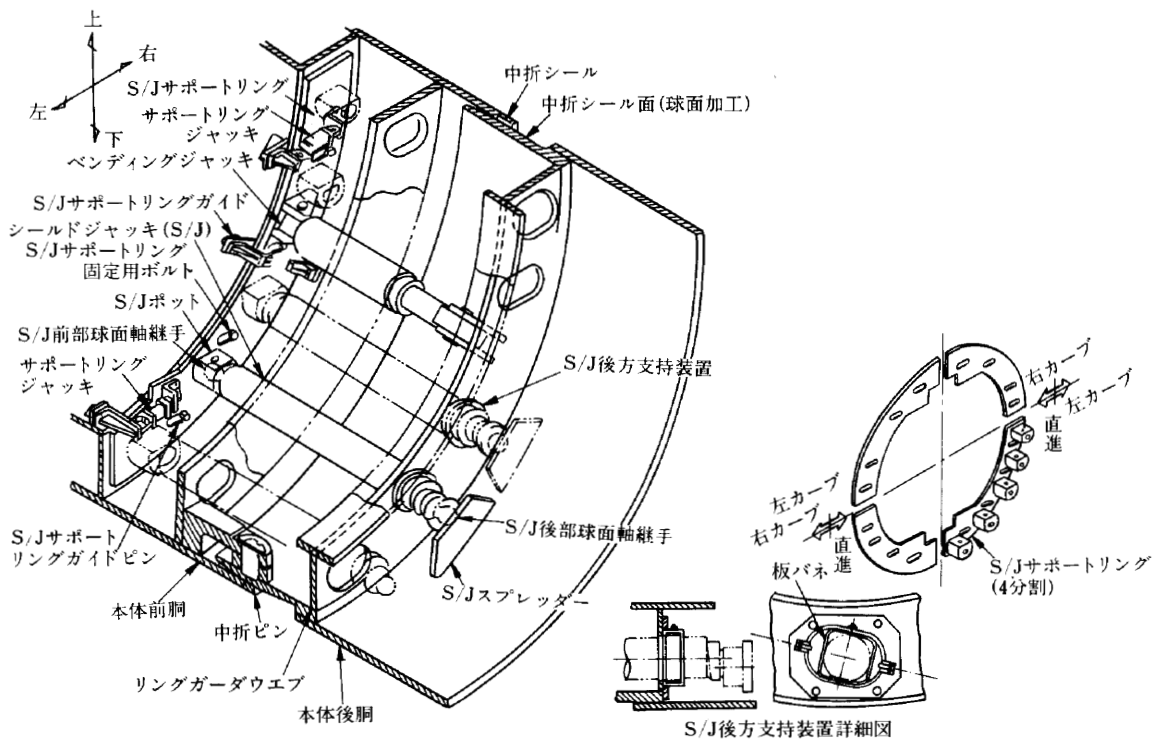


Fig.10 中折れ式シールドによるシールドジャッキ(S/J)支持方式の改善について