

超急曲線 ($R = 12\text{ m}$) シールド工事の施工 SHIELD DRIVING METHOD AT SHARP CURVE OF 12 METERS RADIUS

荒川 修*・南條克正**・村井仁丸***

Osamu ARAKAWA, Katsumasa NANJO, Murai HITOMARU

This report is made on the counterplan and result to technical problem for the construction of sharp curved shield tunnel. It is, generally speaking, very difficult to carry out continuous driving, by closed type mechanical machine, of shield tunnel with sharp curve of less than 15 meters radius. The continuous mechanical driving for this shield tunnel with sharp curve of 12 meters radius was planned, by earth pressure balance shield tunneling method with bubble injection, and actually done with good results. It is noted that this shield machine was equipped with bending jack of 13.5 degrees bending angle, which is seldom in the world.

Keyword: Shield Tunneling, Earth Pressure Balance Shield, Bubble Injection, Segment
Ground Treatment by Chemical Grouting

1. はじめに

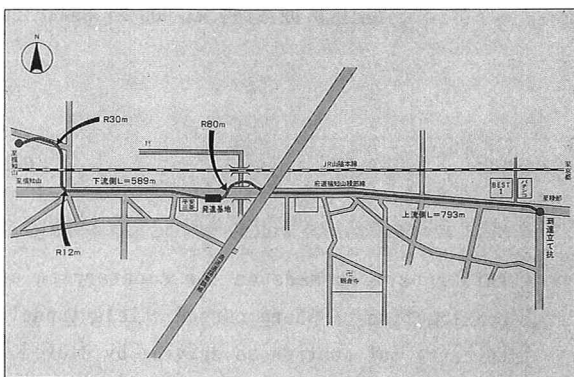
近年におけるシールド工法での施工条件は厳しくなっており、特殊条件下におけるシールド施工が増加している。現時点においても大深度、大口径、長距離、急曲線施工とそのニーズは多様化している。その中でも急曲線については土地の高騰による発進立坑の用地難あるいは、交通渋滞などの工事による市民生活への影響および工期短縮、工事費の低減により今までの施工法であったシールド機回転立坑の構築を省略して急曲線の施工を行うケースが多くなっている。 $R = 30\text{ m}$ 、 20 m と施工可能な曲率半径も小さくなっているが $R = 15\text{ m}$ 以下のいわゆる超急曲線においては、機械施工が難しく、面盤を取り外し手掘りに改造し掘った空間の中を機械が進むという方法、または回転立坑での方向転換による方法が一般的である。そこで超急曲線における密閉型シールド機での連続した機械施工の技術、施工法の確立が強く望まれている。ところが超急曲線での現状での問題点は多く、また曲線施工の難易度の目安になる機長(L)と外径(D)の比 L/D は、大口径では1をきっているのに比べ、小口径では2を越すケースもあり、今回は $L/D = 2.63$ というわが国でも初めてのケースで、極めて厳しい条件での超急曲線 $R = 12\text{ m}$ への挑戦でありました。本工事において泥土圧式シールド機での連続機械掘進を計画・施工し、ほぼ良好な施工実績を得たので、今回経験した超急曲線施工における問題点と対策及びその実績について今後の課題も含めて報告する。

* 福知山市下水道部
** 正会員 飛島建設(株)大阪支店
*** (株)松村組 大阪本店

2. 工事概要

2.1 路線状況

本工事は、福知山市の東部、観音寺・興地区の水
洗化による生活環境の向上整備と公共用水域の水質
汚濁防止を目的として泥土圧シールド掘進機（外径
 $\phi 2130\text{ mm}$ ）を使用し、仕上り内径 $\phi 1350\text{ mm}$ の下水道用シールドトンネルを土被り $7.69\sim 3.99\text{ m}$ の路面下に総延長として 1389.5 m 築造したものである。このうちの下流側 410 m 付近での超急曲線線形 $R=12\text{ m}$ 、 $IA=87^\circ$ 度、 $CL=18.3\text{ m}$ の線形での事例である。路線平面図および $R=12\text{ m}$ 部詳細を図-1に示す。



2.2 地質状況

シールド通過区間の土質は図-2の土質縦断面図に示すとおり
沖積、洪積礫質土層を通過する。Bor. 4付近の山稜の迫出
し部では、比較的浅い所から基盤岩が分布しており、一部強風
化岩区間が予想された。この沖積、洪積礫質土層は礫率が高く、
特に沖積基底部では $\phi 300\text{ mm}$ 程度の巨礫が点在しており、
細粒分が $6\sim 10\%$ である。透水係数は 10^{-2} cm/s オーダー
と高く地下水位も、 $GL-1.4\text{ m}$ にあり1つの大きな滞水層
をなしている。

R=12 m部詳細図

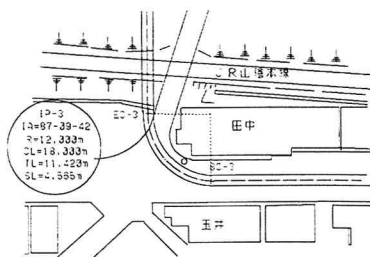
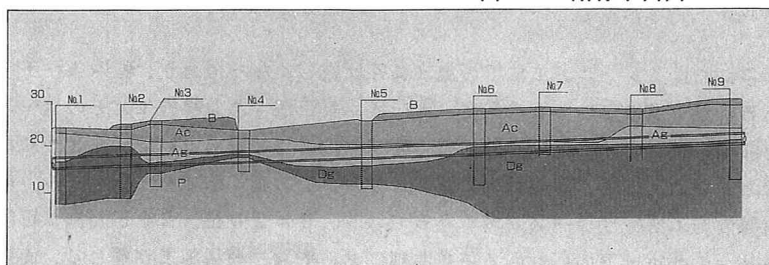


図-1 路線平面図

B	埋	土
Ac	粘性土	沖 積 世
Ag	礫質土	
Dg	礫質土	洪 積 世
P	基盤岩	中～古生代



3. 超急曲線シールド掘進計画

図-2 土質縦断面図

3.1 予想される技術的課題

曲率半径 $R=12\text{ m}$ の超急曲線施工への技術的課題は、未経験な分野でもあり予期しない事態も考えられる
が密閉型シールドの急曲線での経験から、主として以下の7点に絞られる。

- ①余掘りの方法。即ち計算余掘り量 111 mm をどの様にしていかに確実にを行うか。
- ②余掘りの確保。即ち余掘り空間の崩壊を抑えていかに確保するか。
- ③セグメントの固定、推進反力確保を目的とする裏込注入でテールボイドをいかに早く確実に充填するか。
- ④リング当たりストローク差 68 mm 、偏角 1.3° 度のシールド掘進方向制御をいかに行うか。
- ⑤ジャッキの片押し、テールクリアランスの不足によるセグメントの変形を抑え、真円度をいかに保つか。
- ⑥曲線の線形精度を保つための姿勢制御、狭小な坑内での測量、線形管理をいかに行うか。
- ⑦極端な余掘りに伴う地盤の沈下等の変状をいかに抑えるか。

3.2 課題に対する対応策

(1) シールド機での対策

①曲線半径 $R = 12\text{ m}$ を考慮し余掘り量を最小限とするため、フラット式より中折れ角度が大きくとれる球面中折れタイプを採用、最大中折れ角 13.5° とした。(写真-1)

②前胴押しでは中折れ時のシールドジャッキの偏心量が大きくセグメントに悪影響を及ぼすため後胴押しタイプのシールドジャッキを使用した。

③曲線半径と中折れ角から最大余掘り量を図-3により計算し、任意の掘削範囲を設定できる最大ストローク 200 mm のコピーカッターを1基装備した。また、コピーで切削した土砂を機内に取り込みやすいように側面に大きく開口部を設けた。

④土圧系シールドは、シールド機のカッターで切削した土砂をチャンバー内に充填し発生する泥土圧により切羽を安定させ添加材により塑性流動化と止水性を向上させ掘進する工法の為曲線施工での余掘りでの空間の圧力保持にはクリアランスを泥水で満たすことによって保持できる泥水式シールドがよいとされている。そこで今回は土圧系の気泡シールド工法のため、気泡の圧縮性と泥漿の非圧縮性の相乗効果を期待し曲線部での切羽切削には気泡、コピーカッターでの余掘り空間充填用に泥漿とそれぞれ系統を独立した配管と注入孔を設置し気泡・泥漿併用工法を計画、施工した。設備概要を図-4に示す。

(2) セグメントでの対策

①曲線部のセグメントは、トンネル標準示方書では異形と標準の組み合わせは、 $2:1$ 以下の使用割合にするのが望ましいとされている。しかし、 $R = 12\text{ m}$ での超急曲線においては、中折れ角度が大きいことから、直線からカーブへのスムーズな進入が図れないため数リング緩和曲線の区間を設置し計算によりテーパ量 $\Delta = 68\text{ mm}$ 、 $T:S = 3:1$ (有効長 266 mm) とした。

②シールド機後胴でのセグメントとテール内面の隙間(図-3参照) $C_{in} = -5, 3\text{ mm}$ と干渉する事から組み立て時のテールクリアランスを確保する為、セグメント外径を 1950 mm の縮小セグメントとする。

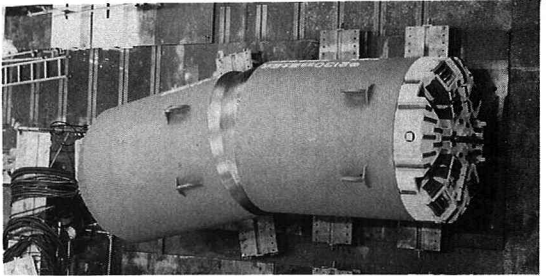


写真-1 シールド機中折れ状況

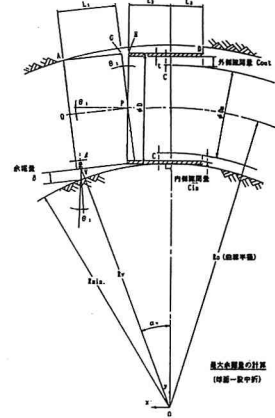


図-3 余掘り量検討図

幾何学的な余掘り量の計算は次式から算定される。

$$R_{min} = R_0 - D/2 \quad R_0: \text{曲線半径}$$

$$\text{点 } P, Q, V \text{ の座標} \quad D: \text{シールド外径}$$

$$P(X_P = L_2, Y_P = R_0)$$

$$Q(X_Q = X_P + L_1 \cos \theta_1, Y_Q = Y_P + L_1 \sin \theta_1)$$

$$V(X_V = X_P + (L_1 - 1) \cos \theta_1 - D/2 \sin \theta_1, Y_V = Y_P + (L_1 - 1) \sin \theta_1 - D/2 \cos \theta_1)$$

$$\text{点 } V \text{ と } Y \text{ 軸との角度 } \alpha_v$$

$$\alpha_v = \tan^{-1}(X_V / Y_V)$$

余掘り量 δ

$$\delta = (R_V - R_{min}) / \cos(\alpha_v - \theta_1)$$

$$= (\sqrt{X_V^2 + Y_V^2} - R_{min}) / \cos(\alpha_v - \theta_1)$$

計算結果

$$\text{切羽余掘り量 (mm)} \delta = 111.3$$

$$\text{曲線内側隙間量 (mm)} C_{in} = -5.3 \text{ (マイナス許容)}$$

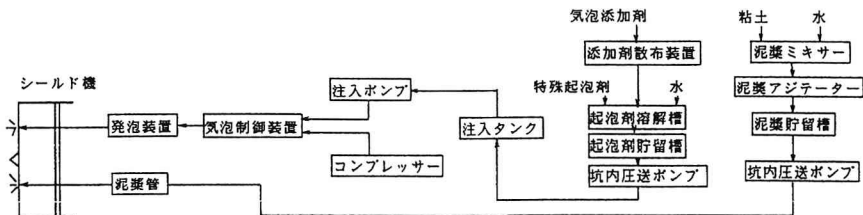


図-4 気泡・泥漿設備概要

④テールクリアランスの減少、セグメントとテール内面との競りに起因して、セグメントボルトの剪断破壊の恐れがあることからリング間継手ボルトの強度を上げる。

表一 1 曲線部裏込注入配合

急曲線施工においてはセグメントがテールから出たら直ちに周辺地山に固定しなければシールドジャッキの片押しや推力の偏荷重の作用によりセグメントが移動したり変形したりして所定の線形を確保できない。また余掘り量が大きいため、シールド機周辺の余掘り部や切羽への裏込め材の回り込みによるトラブルが予想されるためゲルタイム5秒、1時間圧縮強度 3 kg/cm^2 となる表-1の曲線部特殊配合を計画した。

A 液				B 液
セメント	助 材	安定材	水	SP材
350Kg	70Kg	1,75Kg	711ℓ	150ℓ

試驗結果

比 重	フロ一值	ゲルタイム	一軸圧縮強度 (Kg/cm ²)			
	(cm)	(秒)	δ 1 h	δ 1 日	δ 7 日	δ 27 日
1.33	35≤	4~5秒	3	13	18	40

(4) 補助工法での対策

R=12m部は、交通量の多い府道をほぼ直角に曲がる。そのためシールド掘進に伴う周辺地盤への影響を防止するため、上部は緩み範囲の沈下防止を目的として、またカーブ内側は余掘りに対する壁面保持のために薬液注入工（2重管ロッド注入）を計画し、カーブ外側はシールド掘進の反力に耐えるだけの強度を必要とするため反力壁とシールド本体のガイドウォールとして噴射攪拌杭（CJG工）を図-5のように施工した。

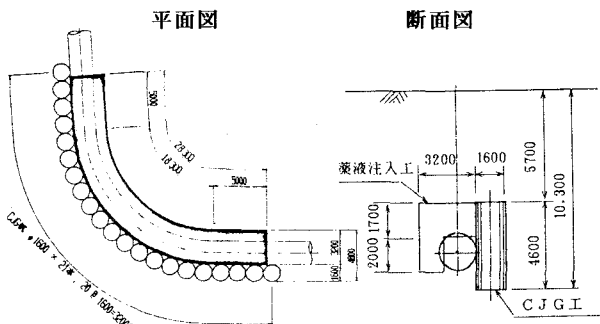


图-5 12 m R部地盤改良工

(5) 線形管理システムでの対策

一般にシールド工事の線形管理は、トランシットやレベル等の光学測量機器を使ってセグメントの出来形やシールド機の位置を測量し、その結果によりシールドジャッキを操作し蛇行修正を行なう、いわゆる『後追い測量』が主流であったが、昨今、測量作業の省略化と推進精度の向上を図るため、ジャイロコンパスやレーザー光波、傾斜計等の計測機器による自動測量装置も開発されている。しかしながら、急曲線や小口径シールドにおいてはその採用にはまだまだ改良する余地が残っている。そこで今回は小口径、超急曲線でのシールド自動計測システム（ジャイロマスター）と全自動方向制御システム（FLEX）によりシールドの自動測量と姿勢制御による線形管理システムを採用した。

4. 施工状況および計測結果

4. 1 シールド線形管理

超急曲線における掘進は未知の分野であり、あらゆる事態を想定、余掘りや中折れの角度、タイミングを検討し最良と思われるシールド軌跡をシミュレーションしたものが図-6である。計画と実績を分析してみると中折れ角度においては、計画どおり折る事ができた。余掘り量は計算量に余

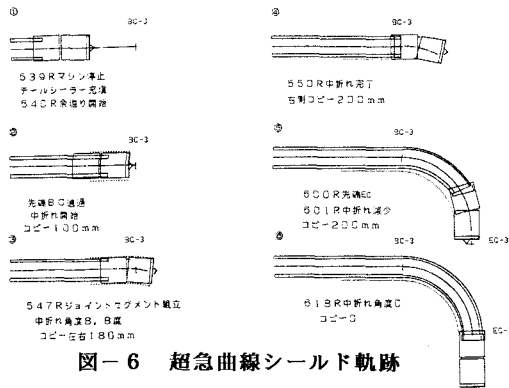


図-6 超急曲線シールド軌跡

裕を取りプラス側となっている。これはシールド掘進に伴う震動やシールド側面が地山と接触し、余掘り部分が崩壊しても尚且つ、シールド機が土砂の圧密による抵抗を受ける事なく、曲線をシフトしながら掘進できる余裕として計画した結果である。R=12mの超急曲線では、1リングのタイミングのずれが線形をコントロール出来ない事態を引き起こす。今回は1段中折れのため計画線上に中折れ点を合わせ、テールにおいてはセグメント組み立て位置を合わせる事を原則として1リング毎にその軌跡を管理した。551リングでの中折れ完了した状態でのシールド機とセグメントの関係は図-7に示すとおりであり、テールクリアランス、シールド機と地山との隙間、余掘りと中折れの関係もほぼ理想的な状態となっている。その後のシールド掘進は13、5度の中折れ角度を維持し、200mmの余掘りを行うことで、シールドジャッキは均等押し（曲線内側と外側のジャッキを同数使用）掘進が可能となりシールド機の姿勢制御や線形管理が非常に容易であり、シールド一次覆工の品質である水平、鉛直方向の蛇行量は線形管理基準内の±50mm以内に納める事が出来た。

この事から超急曲線施工において最も重要な事は、余掘りによるクリアランスの確保と均等押し掘進である。従来の片押し掘進では、図-8のように片押しによる推進での急激な移動により曲線内側に大きな抵抗土圧が発生し、余掘り空間の崩壊等による推進力の不足から、推力を上げざるを得なくなり、ジャッキ圧増加によるセグメントの変形や移動、裏込注入材の破壊、またシールド機本体の横滑り現象、急激なローリングによるピッチングの進行等、線形逸脱や不具合の発生が考えられた。今回の均等押し掘進では、超急曲線内外に同様な小さい地盤反力を発生させることによりスムーズな超急曲線掘進が可能となったと考えられる。

4.2 シールド推力

シールド推力は予想の約半分のシールド推力で済んだ。これは内側の余掘りした地山の壁が崩壊することなく自立安定していた事と、中折れ角度13.5度のシールド機のソリ効果がシールドジャッキの均等押しにより最も効果的に発揮され少ない推力で充分な回転モーメントが得られたからである。シールド推力の比較を図-9に示す。総推力は、BC手前でやや高くなっているのは薬液注入工での地盤改良効果と、切削土砂の塑性流動化が減少したためと思われる。以降は約150tf前後の安定した推力を示している。

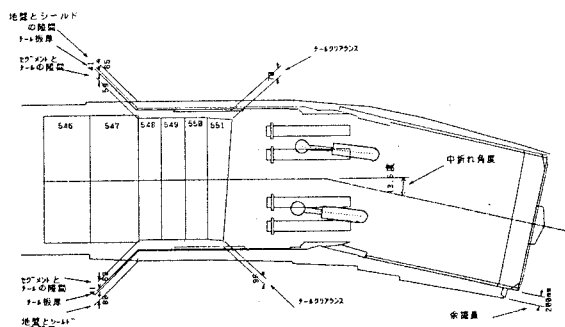
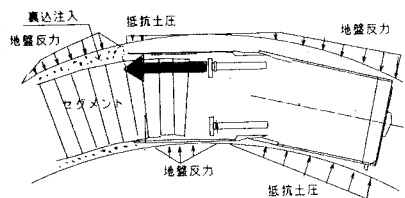


図-7 中折れ完了したシールド機
従来の片押し



今回の均等押し

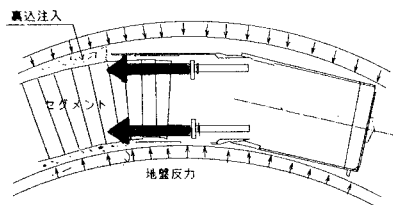


図-8 超急曲線での地盤反力

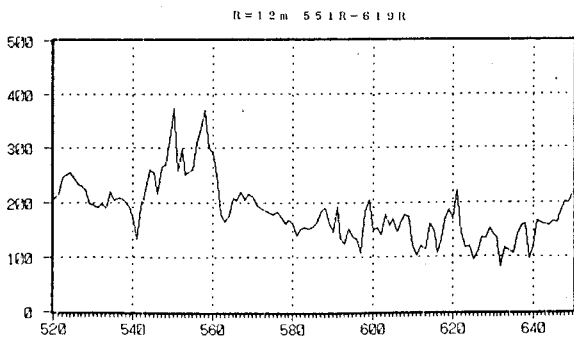


図-9 シールド総推力経距変化図

4. 3 シールド掘進管理データ

超急曲線部においても一般部と同様に泥土圧式の切羽安定理論である管理土圧を設定し、土圧をコントロールすることにより切羽の安定を図った。しかし余掘り量が200mmと大きいことから、シールド機周辺の空洞や周辺、地盤の緩み領域に起因して土圧を一定に保つ土圧制御が難しいのではないかと懸念していたが圧力低下も0.1kgf/cm²程度であり、カッタートルクは直線と同様安定した値を示している。ジャッキスピードが540～560Rで低下しているのは、超急曲線進入時の線形管理を慎重に行うため意図的にジャッキスピードを抑えた為であり全体的には極めて安定した掘進であり、平均日進量8.9Rと極めて安定した掘進が得られた。

5. 今後の課題

急曲線の中でもR=15m以下の坑内状況は、様々な点で通常の掘進と異なる作業状況となる。超急曲線をより安全で効率的に行うために本工事を通じて感じた問題点を設備面と施工面に亘り列記する。

- ①後続台車の牽引と超急曲線可能なベルトコンベアーの開発
- ②小口径の多段中折れの開発と中折れ時のローリング修正
- ③超急曲線における線形での緩和曲線の設置
- ④超急曲線での総合管理システムの技術開発

6. おわりに

本工事は、平成5年4月超急曲線部を含め、JR山陰本線の軌道や周辺地盤、交通量の多い府道にも全く影響を与えることなく一次覆工を完了した。シールド外径φ2130mmと大断面ほど派手さはないがシールドでの急曲線施工は口径に比べ機長の長い小断面ほど施工難易度が高く、今回のようなL/Dの比が2.6を越えるケースでの例は殆ど無く、まして狭少であるがゆえに機内設備の関係で多段中折れの配備が不可能な為、世界でも類を見ない中折角度13.5度でのR=12mへの挑戦であった。当初はわが国でも殆ど例がない超急曲線ということで不測の事態や難工事が予想されたが、先の対策により曲率半径R=12m超急曲線に挑戦し、無事克服できたことを喜ぶとともに今回の実績が今後のシールド工法での超急曲線の設計・施工の参考になれば幸いである。

最後に、本工事の検討や施工にあたり貴重な助言をいただいた関係各位の皆様にご感謝の意を表します。

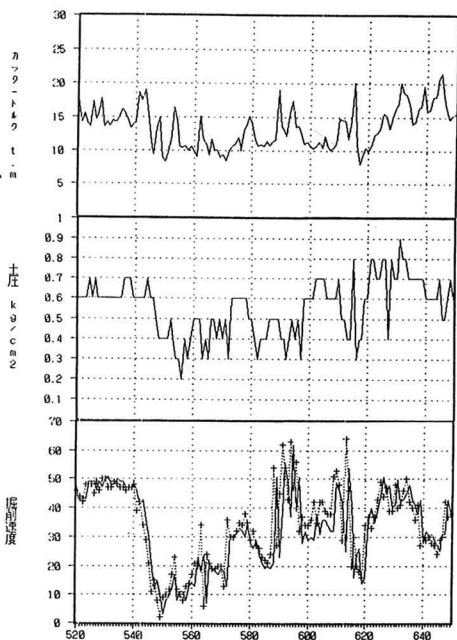


図-10 掘進管理データ

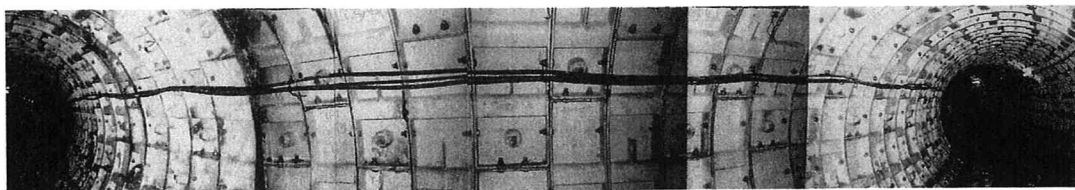


写真-2 R=12m坑内状況