

地中接合対応型挿入式拡張シールドにおける 伸縮スポークの精度確保に関する考察

CONSIDERATION OF MECHANICAL CONNECTION BY EXTENSION SPOKES FOR PARENT-CHILD SHIELDS

市野道明¹⁾・倉木修二¹⁾・岡村直利²⁾・小俣文良³⁾・清水幸範¹⁾

Michiaki ICHINO, Shuji KURAKI, Naotoshi OKAMURA, Fumiyoshi OMATA, Yukinori SHIMIZU

An insertion system, cylindrically enlarged slurry shield machine (capable of underground mechanical docking of different diameters) was developed in order to satisfy the requirements of the surrounding environmental restrictions, cost reduction, and shorter construction period. The system is designed to carry out works for a series of subsections by one shield machine, which performs works ranging from excavating two tunnels of different sectional diameters to docking with another shield under the ground without using a shaft. This paper summarizes the problems on the mechanical connection of the parent and child shield cutter-heads by the extension spokes used on the machine and how to solve the problems.

Key Words: shield tunneling, parent-child shields, enlargement, extension spokes

1. はじめに

りんかい線工事のうち、第2広町立坑から大井町駅までの区間の第1広町トンネル(延長 $L=696\text{m}$)は、単線断面トンネルとプラットホームを包含した駅断面トンネルからなっている。また大井町駅の品川シーサイド駅方においては、隣接する東大井トンネル(延長 $L=1,320\text{m}$)に接続する構造となっている(図-1)。これらの区間のトンネルは、重要構造物の直下、および交通量が多く道路幅員が狭い都道下に位置しており、地上からの施工が困難なことからシールド工法により建設するものである。従来、断面の異なる2つのトンネルをシールド工法により建設する場合、径の異なるシールド機を個々に製作していたが、都市部の地下鉄建設においてはその掘進距離が短いことから大変不経済なものとなっていた。

これらの状況から地上周辺部への影響が小さく、工費の大幅な縮減を可能とする挿入式拡張泥水シールド機を開発した(図-2)。本機は単線断面トンネルを子機($\phi 7.26\text{m}$)で、駅断面トンネルを親機($\phi 10.30\text{m}$)で掘進し、対向するシールド機($\phi 7.26\text{m}$)と機械式地中接合をする断面変化対応型の親子シールド機である。本機は通常のシールド機と比較して構造が複雑であること、子機、拡張、親機、地中接合からなる4つの施工段階において要求される機能が異なることなどの理由から、「トンネルを掘る機械としての品質」をいかに保つかが重要なテーマであった。これに加えて先に述べた周辺環境、工費縮減、さらにりんかい線の早期開業に向けた工期短縮という3つの施工条件を考慮する必要があったため検討すべき課題は広範に及んだ。

本文では、このうち本機の最大の特徴である伸縮スポークによる機械式親子接合について述べるもので、次節以降に伸縮スポーク接合に関する課題を整理し、その具体的な対策について検討している。

佐藤工業(株) 東京支店土木部門

佐藤工業(株) 首都圏業務部土木部門

佐藤工業(株) 大阪支店機電部門

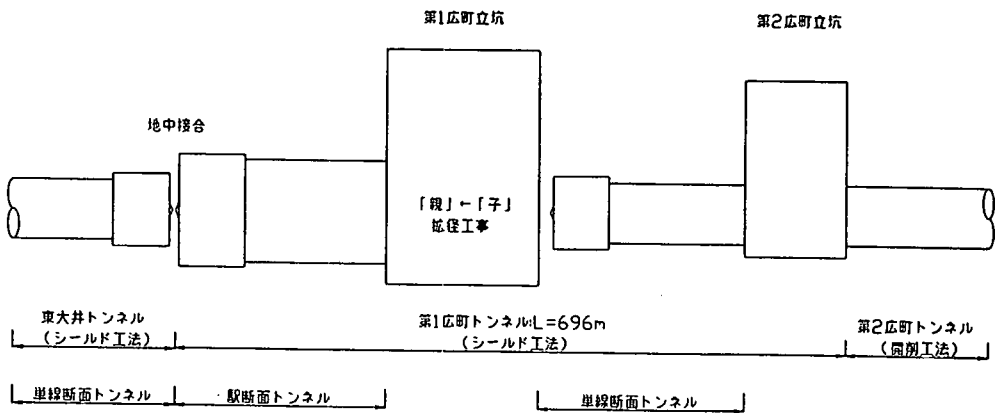


図-1 第1広町トンネルの概要

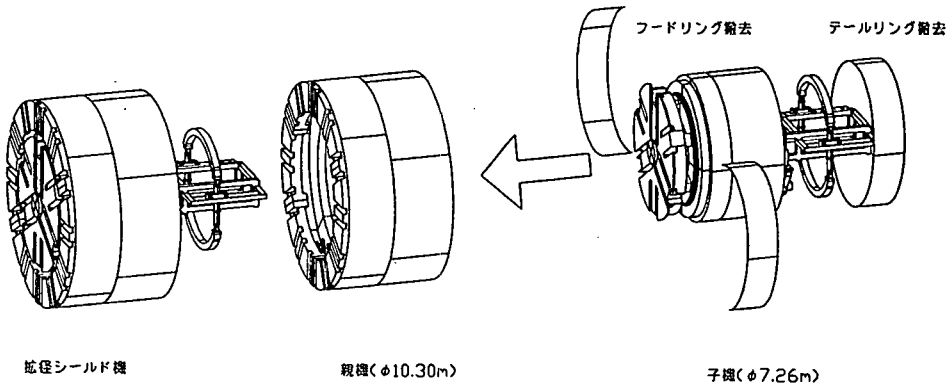


図-2 挿入式拡張泥水シールドのイメージ

2. 伸縮スポークに要求される機能と課題

シールド機の駆動部や推進装置、および後方設備などを共有するいわゆる親子シールド機は過去にも数例の実績がある¹⁾。しかしこれらはすべて親機から子機への縮径のみであり、本機のように子機から親機への拡張さらに地中接合に至る一連の工程を1台のシールド機で行うのは初めての試みである。本機の最大の特徴は、地中接合時に親機と子機のカッターヘッドを確実に分離し対向シールド機から押し出される貫入リングを受け入れる空間を確保することから、両機のカッターヘッドの接合に機械的に接合および分離ができる伸縮スポーク構造を用いることである。伸縮スポーク(図-3)は、子機のカッターヘッドスポーク部に計6本装備され油圧により制御する。スポークの先端は、円錐状のテーパーをもつ凸構造(これをテーパーピンと呼ぶ)になっており、これを親機カッターヘッドの凹部(これをボス穴と呼ぶ)に挿入し、親機のカッターヘッドに作用する切羽前面圧、および掘削トルクの伝達を行う。

この伸縮スポークに要求される機能は、掘進中に偏荷重により伸縮スポークが変形しないこと、拡張工事において確実かつスムーズに両機の接合ができること、地中接合時に伸縮スポークが確実に縮み、貫入リングを受け入れる空間を確保することなどがあげられる。

まず掘進中の伸縮スポークの変形に関する問題は、伸縮スポークに生ずる応力を把握する方法と、変形の要因である局所的な片あたりによる偏荷重を低減する方法との2つに分けられる。前者については親機掘進時はもちろんのこと、子機の掘進においても、NOMST 壁や炭素繊維補強モルタルによる中間杭の切削があることを考慮すると、十分な管理体制の下での掘進が必要と考えられた。また後者については、カッターヘッド全体の製作精度を高いレベルで確保するとともに、工場での製作精度をいかに現地で再現するかが重要と考えた。次に親機と子機の確実かつスムーズな接合に関する問題は、現地組立における工場制作精度の再現性を確保するとともに、先行して組み立てられたドーナツ状の親機に子機を挿入する方法と、両機の軸芯と

相互位置を決定する方法を確立することが重要なポイントと考えられた。挿入式の拡張方法は、組立方式と比較して換装工期が短縮できるという利点を有する。この利点を最大限に活用できる拡張技術が必要となる。地中接合時の伸縮スポークの確実な作動に関する問題は、伸縮スポークの変形に関する問題で述べたように、適正な掘進管理により地中接合対応型のシールド機としての品質を確保してゆくことが重要と思われる。

以上のことから、伸縮スポークに要求される機能を満たすために必要な課題は、①伸縮スポークの機能を確保できる管理値の設定とその条件下で掘進する技術、②高いレベルの製作精度を確保する技術、③工場製作時の品質を現地で再現する技術、の3点に整理できる。

3. 伸縮スポークの機能の確保

(1) 伸縮スポークの管理値の設定と計測結果

掘進中の伸縮スポークの健全性はひずみ計測により確認するものとし、健全性を保証する管理値はカッターヘッド全体を対象とする FEM 解析の結果から判断することにした。この管理値には1次管理値と2次管理値の2段階の指標を設け、伸縮スポークの機能の維持に努めることとした。計測値が1次管理値より小さい範囲にあるときは、これを安全状態とみなし通常の手法による掘進を継続する。計測値が1次管理値と2次管理値の範囲にあるときは、これを要注意状態とみなし中央制御室で警報を鳴らすとともに、シールド機のオペレーターに周知する。オペレーターは掘進速度を減少させるか、またはカッターの旋回を逆回転にするなどの手段を講じて、シールド推力やカッタートルクを減少させ伸縮スポークの負担を軽減する。また万が一1次管理値内での掘進が困難な状態となった場合は、2次管理値を最終リミットとした十分な監視体制のもとに掘進を行う。計測値が2次管理値を超えた場合は、これを厳注意状態とみなし掘進を一時停止して要因の分析、掘進管理方法の再検討を行うものとした。

FEM 解析は、カッターヘッドを平面応力要素でモデル化し、これにカッターヘッドの前面に垂直に作用する荷重 P_f 、カッターヘッドの外周部に垂直に作用する荷重 P_c 、およびカッターヘッドの前面に水平に作用する荷重 W を作用させるものである(図-4)。 P_f と P_c はセグメントの設計と同様に考えて、シールド機の外径と土被りの関係、土質、地下水位を考慮して算定した。また、カッターヘッドの前面に水平に作用する荷重 W は、以下に述べる方法により算定した。

カッターヘッド前面に作用する抵抗トルク T_f は次式により算定する。

$$T_f = \left(1 - \frac{A}{100}\right) \times \frac{2}{3} \times \pi \times \left(\frac{D_c}{2}\right)^3 \times P_f \times \mu \quad (1)$$

ここに、 D_c : カッターヘッドの外径

A : カッターヘッドの開口率

P_f : カッターヘッドの前面に作用する荷重

μ : カッターヘッドと土との摩擦係数

である。

また、カッターヘッドの外周側面の抵抗トルク T_c は次式により算定する。

$$T_c = \frac{1}{2} \pi \times D_c^2 \times L_c \times P_c \times \mu \quad (2)$$

ここに、 P_c : カッターヘッドの外周部に作用する荷重

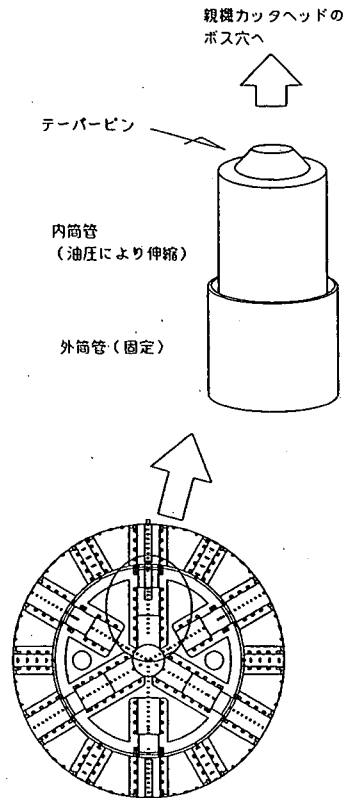


図-3 カッターヘッドと伸縮スポーク

L_c : カッタヘッドの長さ

である。

ここで有効トルクを、常用トルクから式(1)と式(2)より算定される抵抗トルクを引いたものとし、これがカッタスポークに均等に作用すると仮定すれば、カッタヘッド前面に水平に作用する荷重 W は次式で表される。

$$T = N1 \int_{r1}^{r4} W \cdot r dr + N2 \int_{r2}^{r4} W \cdot r dr + N3 \int_{r3}^{r4} W \cdot r dr \quad (3)$$

$$W = \frac{2T}{N1(r4^2 - r1^2) + N2(r4^2 - r2^2) + N3(r4^2 - r3^2)} \quad (4)$$

ここに、 T : カッタの有効トルク

Ni : カッタスポークの本数

$r1$: No.1 スポークの中心側の半径

$r2$: No.2 スポークの中心側の半径

$r3$: No.3 スポークの中心側の半径

$r4$: スポークの外周半径

W : カッタヘッドの前面に水平に作用する荷重

である。

このように行った FEM 解析より、本機は装備トルクの 100% が作用した場合には、伸縮スポークのひずみ計測位置で 130N/mm^2 程度の応力度を生じるとの結果を得た。そこで偏荷重に対する安全性を考慮して、装備トルクの 70% が作用した場合に生ずる応力度 66.1N/mm^2 に相当するひずみ 315μ を 1 次管理値として定め掘進を行うことにした。また、FEM 解析よりひずみ計測位置に生ずる応力度は、カッタヘッドに生じる最大応力度の 71% 程度の大きさであるとの結果を得た。これから、2 次管理値は許容応力度の 7 割に相当する 996μ に設定した。

図-5 にひずみの計測結果の一例を示す。この図からひずみが 1 次管理値まで達することなく順調に施工されていることがわかる。100 リング以降、シールド推力とカッタ電力が増加の傾向を示している。これは掘削対象地山が、洪積粘性土層から葉液注入を行った礫層、および泥岩層へ変化したためと考えられる。しかし、掘進速度の低減、セグメント組立時の適度な切羽バイパス運転などを行うことによって、伸縮スポークへの負荷を増加させることなく掘進することができた。

(2) 製作精度の確保

偏荷重を極力低減するためには 6 本の伸縮スポークに均等に荷重を分散させる必要がある。伸縮スポークの一部または数本に集中して荷重が作用するような状態は避けるべきである。このためには、接合部となる伸縮スポーク先端と親機カッタヘッドのボス穴の単体としての製作を精度の高いレベルで行い、片あたりなどを防ぐ必要がある。

両機の接合面は直径 $\phi 7,360\text{mm}$ の大口径であり、伸縮スポークと親機カッタヘッドを独立に製作すると、現状の機械加工技術では表-1 に示すような誤差を生じる可能性があり、この誤差のもとでは他の要因による誤差の発生を合わせて考えると 6 本の伸縮スポークを完全に接合することは困難と予測された。

これらの状況から、現状の機械加工技術による誤差は許容せざるを得ないため、まず接合精度の確保を優先することにした。すなわち、子機の伸縮スポークを先行して製作し、それに合わせて親機のカッタヘッドを製作する写し加工を行い、接合精度を確保するものである。これにより厳密に言えば伸縮スポーク個々の

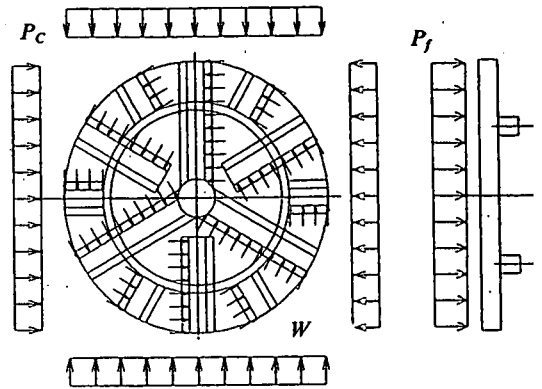


図-4 カッタヘッドに作用する荷重

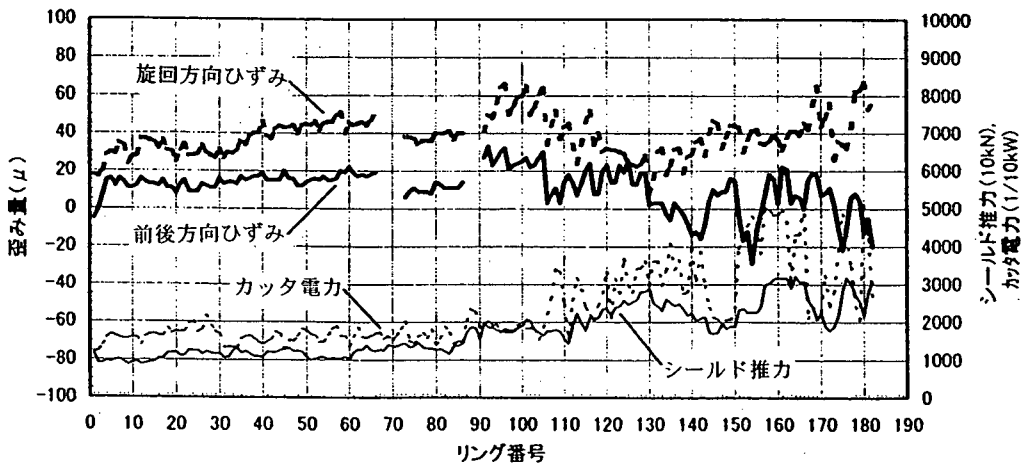


図-5 ひずみの計測結果

位置は異なるものの、密接な接合性は十分に保証することができる。

(3) 現地組立における再現性

工場における仮組み時点では(2)で述べた方法により要求される品質を満たすことが確認された。次に、この製品をいかに現地で再現するのが問題となる。本機の場合、両機が接する伸縮スポークの先端のテーパーパービン部とバルクヘッド部に設定するクリアランス量と、両機的位置を決める方法とが特に重要と考えられた。以下でこれについて述べる。

カッタヘッドの接合に関しては過去に例のない6点を同時に位置合わせする必要がある。現地における立坑の限られた空間内で重量 10,000kN にも達するシールド機を3次元的に取り扱うのは困難と考えられた。シールド機的位置の微調整や再加工を繰り返しては、挿入式の拡張を行う本機のメリットがなくなる。また、現地での再現は、子機を組立てる時点と、子機の到達前に先行して親機を組み立てる時点、子機が到達した後に拡張を行う時点の3つの時期についても検討する必要がある。以下ではこれに関する対策を述べる。

a) 子機と親機の組立時点における対応

現地組立における子機カッタヘッドの伸縮スポークの位置、および親機カッタヘッドのボス穴の位置は、三次元測定による座標管理により決定することとした。この三次元測定は工場での仮組み検査時を初期座標値としこれを基準に現地での組立てを行い、再現性を確保するものである。

現地組立における伸縮スポークの位置は、伸縮スポーク軸受けの隙間 0.975mm、スポーク本体の製作精度 0.08~0.24mm、溶接ひずみ $\pm 2.0\text{mm}$ 、測定機器の精度 $\pm 0.8\text{mm}$ から最大で 4.015mm の誤差を生じる可能性がある。これから $\pm 4\text{mm}$ を現地組立ての許容値とし、この誤差が生じた場合にも容易に接合できるようにテーパーパービンのテーパ量を決めた。またカッタヘッドの溶接においては、溶接によるひずみが極力生じないように配慮した。

b) 拡張時点における対応

拡張時点では、ドーナツ状に組み立てられた親機に対する子機の軸芯の一致および軸方向の位置の決定が必要となる。本機において最も接合精度が要求される部分は、両機の荷重の伝達部分と止水性の観点からのバルクヘッド部分である。軸心の一致と軸方向の位置の決定は、このバルクヘッド部分を基準として行うことにした(図-6)。

まず軸芯の一致については、あらかじめ親機内周に設けたガイドレールと呼ぶ治具の上に、子機を滑らせて挿入することで実現した。ガイドレールは工場の仮組み時点に親機のバルクヘッドを基準に位置の微調整を行い設置したものである。これにより親機の現地組立時点でガイドレールを精度よく設置すれば容易に両

機の軸芯の一致が図れる。ガイドレール設置の許容値は、一般板金公差をもとに $\pm 1\text{mm}$ を設定した。

次に両機の軸方向の位置については、スライドキーと呼ぶ治具を用いて行った。スライドキーは工場での仮組み時に親機バルクヘッドを基準として取り付けした平板で、これにより現地で容易に位置を再現することができる。スライドキーの寸法精度にはガイドレールと同様に $\pm 1\text{mm}$ の許容を与えた。

カットヘッドを精度よく接合するためには両機の相対位置の再現が不可欠である。本機においてはこの2つの治具により所定の精度内で迅速に換装工事を完了した。はじめに述べたように、当工区には工期短縮が求められていた。最終到達時期から試算された工期内で施工を完了するためには、掘進距離が短いことを勘案するといかに換装工期を短縮するかがキーポイントであった。

4. おわりに

本機におけるこのような実績から子機から親機への拡張技術はほぼ確立したものと考える。この技術と親機から子機への縮径技術とを合わせて用いれば、子から親へ、また親から子へなどの断面変化のニーズに対応可能と考えている。

現在、都市部の道路下中浅程度までの部分は既設の構造物が幅輻しておりすでに満杯の状態にある。残された大深度の地下空間を有効に利用するためにも、より経済的で合理的な地下構造物の建設が望まれる。断面変化と地中接合に対応できるシールド技術の確立は、大深度地下空間の構造物の建設に大いに貢献できると考えている。

参考文献

1)例えば、西林，矢萩，永島，市野，桐谷：超大断面子機内蔵多分割シールドの組立精度確保に関する考察，トンネル工学研究論文・報告集，第7巻，1997.11

表-1 現状の機械加工技術による誤差

	計画位置	機械加工精度
半径方向	3,680mm	$\pm 5\text{mm}$
角度方向	中心角 60°	$\pm 10'$

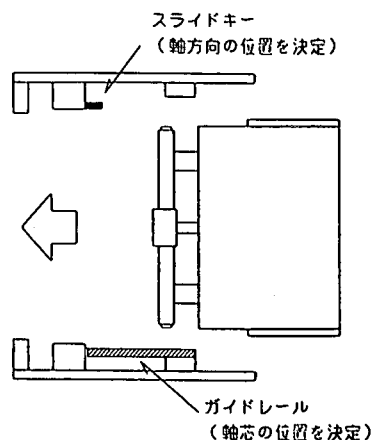


図-6 軸心と軸方向位置の決定