

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

Considerations for assembly accuracy of super large diameter multiply divided nesting child shield machine

西林聖武¹⁾・矢萩秀一²⁾・永島 茂³⁾・市野道明⁴⁾・桐谷祥治⁵⁾

Masatake NISHIBAYASHI, Shuuichi YAHAGI, Shigeru NAGASHIMA, Michiaki ICHINO, Yoshiharu KIRITANI

Railroad tunnels with different cross sections composed of 3 lines of track ($\phi 14.18\text{m}$), including side track line, and dual track lines ($\phi 9.7\text{m}$), are excavated with only one shield machine. This paper deals with the required accuracy for on-site assembling of super large diameter multiply divided nesting child shield machine, detailed actions to be taken to ensure required accuracy, and the actual results of on-site assembly.

Key words: super large shield, multiply divided machine, assembling accuracy, on-site assembly

1. はじめに

地下鉄の建設に当たっては、密集市街地の施工となるため、周辺地域への交通・沿道環境保全に配慮する一方、建設費の縮減に対する検討が重要な課題であり、建設方法は一般的に駅部および中間換気室等の特殊部は開削工法、駅間はシールド工法が採用されている。

現在、帝都高速度交通営団（以下営団と呼ぶ）が建設中の南北線のうち麻布駅（仮称）から清正公前駅（仮称）の区間は、中間換気室を挟んで留置線を含む3線部と通常の複線部からなっている。当該区間の施工法について種々検討した結果、周辺への影響を最小限に抑制できるシールド工法を採用することとし、さらに建設費を縮減する目的で、掘削断面の異なる3線部および複線部を1台のシールド機で対応する「抱き込み式親子シールド」工法を開発した。本工法の実用化に当たっては、解決すべき多くの課題があった。とくに、子機を内蔵することから従来の単体シールド機と比較して、より厳しい組立精度を確保する必要がある。しかもシールド機は陸上運搬となることから、本体部分で91の小ブロックに分割された部材を現場で組み立てるという厳しい条件が加わることとなる。

本論文は、このような条件下における超大断面子機内蔵多分割シールドの現地組立に関し、必要精度の設定、要求精度を確保するための具体的対応策および現地組立実績について述べるものである。

2. 抱き込み式親子泥水式シールドの基本検討

2-1 工事概要

抱き込み式親子泥水式シールド工法を適用する工事概要および土質条件を図-1、2に、

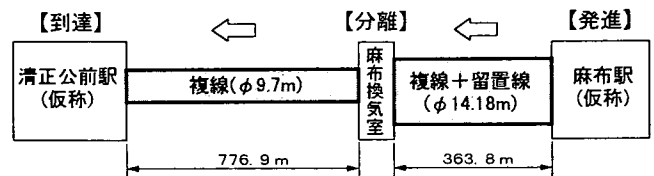


図-1 施工概要図

- 1) フェロー 帝都高速度交通営団建設本部副本部長
- 2) フェロー 帝都高速度交通営団白金工事事務所長
- 3) 正会員 帝都高速度交通営団建設本部設計部設計第一課長
- 4) 正会員 佐藤工業㈱土木本部技術部長
- 5) 正会員 佐藤工業㈱土木本部技術部次長

シールドの概要を図-3に示す。シールドは、麻布駅より発進し麻布換気室で子機を親機より切り離し、清正公前駅に到達させるものである。

地盤は、上部より埋土、沖積粘性土・礫質土、東京礫層と続き、その下部に比較的安定した上総層群泥岩が分布している。シールドは上総層群泥岩中を主に掘進する計画であるが、全体的に上総層群の被りが小さく、一部区間では上部の東京礫層がシールド掘削断面内に出現することが想定される。

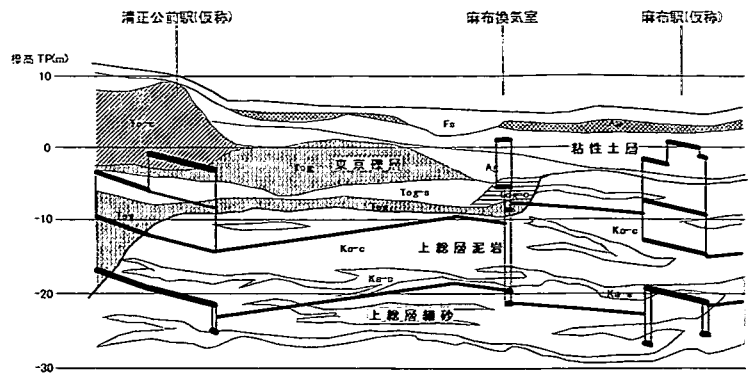


図-2 地質縦断面図

2-2 親子シールドの基本条件

シールド外径 $\phi 14.18\text{m}$ の親機に外径 $\phi 9.7\text{m}$ の子機を内蔵する親子シールドの実用化に対する基本条件は以下のように整理できる。

- ①親機・子機としての機能がそれぞれに確保できること
- ②親機と子機の機器をできる限り共有できること
- ③超大断面の親機から、地下鉄複線断面の子機（大重量）をスムーズに分離できること
- ④大断面・多分割シールドの組立精度が確保できること
- ⑤現地組立工程を短縮できること

これらの基本条件に対して、以下の現場施工条件を考慮する必要がある。

- ①親機から子機への分離は、麻布換気室を利用する
- ②親機の掘進速度は、発進基地となる麻布駅に設置可能な泥水処理設備能力の制約から、通常の半分に相当する 20mm/min 以下とする（子機は 40mm/min ）
- ③親機と子機の掘進中心軸がずれており、子機切り離し時に水平方向に $1,250\text{mm}$ （右）、鉛直方向に 68mm （上）移動させる

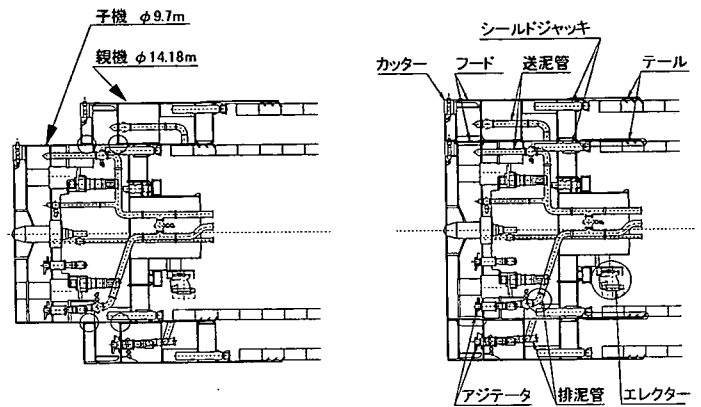


図-3 抱き込み式親子泥水式シールド概要図

2-3 基本構造の検討

以上の基本条件および施工条件から親子シールドの基本構造について以下のように検討を行った。

(1) カッターヘッド構造

カッター支持構造としては、大断面シールドに一般的に用いられている中間支持方式を採用している。中間支持軸受けのベアリング径は、親機単独に対してはカッター面板の構造的バランスからなるべく大きくすることが望ましいが、分離後の子機に対するバランスを考慮して、同程度の外径の東京湾横断道路シールドよりも小さな軸受径とした（図-4）。このため、片持梁として支持されるカッター面板外周部の強度をアップすることで対応することとした。

(2) 子機内蔵・支持方式

子機ではあるが、外径 $\phi 9.7\text{m}$ の地下鉄複線断面であり、テールプレート等の一部部材が装備されていない状態で内蔵されるものの、約10,000kN近い重量物となる。子機内蔵・支持方式は、親機に内蔵された状態における子機の安定性および子機分離時の施工性・安定性を確保できるように選定する必要がある。

子機の全重量は、親機のガーダー部下部に2本の50kgNレールを設置して子機を載せる構造として支持させることとした。子機内蔵時の安定性については、前部はカッター面板とバルクヘッドを溶接により、後部は振れ止め部材（コッタ）により、各々固定する構造で確保することとした（図-5）。

これにより、子機分離時の親機と子機間のクリアランスを確保するとともに、子機分離時のガイドレールとしての機能も持たせることができる。

(3) 接合方法

親機と子機は、カッター面板および隔壁部分で接合する必要がある。接合方法としては、機械的接合と溶接接合の2つの方法が考えられる。

一般に、機械的接合は組立時の溶接ひずみによる影響を受けないこと、および分離時の施工性に優れる等の利点を有している反面、大断面シールドで大きな荷重を伝達する場合は、接合部が複雑となり、機械構造的な信頼性確保が困難となる。一方、溶接接合は、組立時の溶接ひずみの影響および分離時の切断方法・切断後の精度確保等、検討課題も残されているが、構造が単純で信頼性にも優れている。

本親子シールドにおいては、カッター面板の接合位置は荷重条件が最も厳しくなる片持梁の支点近くであることに加えて、親機・子機の軸受け径とのバランスからの荷重増への対応を考慮する必要があること、および隔壁部は、接合部分のシール機能の確保および軸方向の伝達荷重への対応を考慮する必要があること等から、カッター面板および隔壁の接合は、溶接接合を採用することとした。

3. 組立精度の確保

3-1 検討課題

本親子シールドの本体重量は約26,000kNとなる。また、施工場所が都心部であるため、シールドの輸送は陸上輸送となり、運搬可能な最大ブロック重量250kNの制約を受けて、主要部分だけでも91のブロックに分割する必要がある。

シールドの寸法精度については、「トンネル標準示方書(シールド工法編)・同解説(平8)土木学会」の第

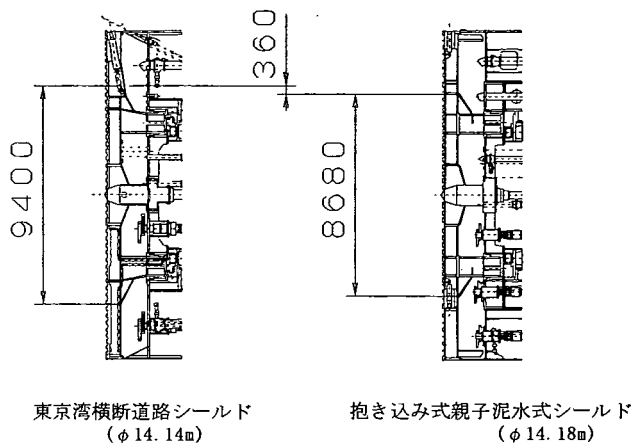


図-4 カッターヘッド支持部の大きさ比較

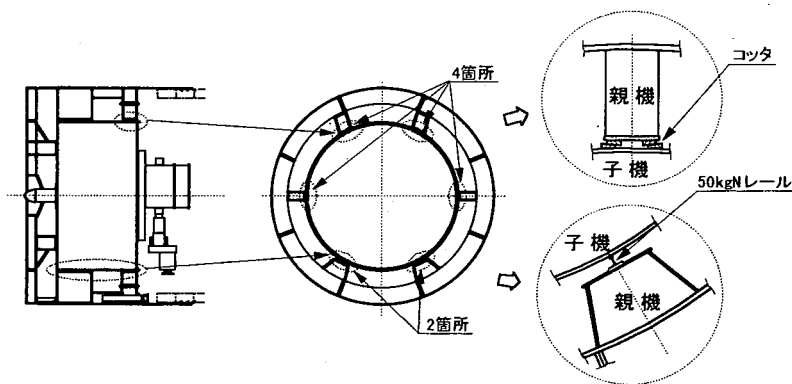


図-5 子機内蔵・支持方式

129条解説で解説表3.4および解説表3.5に、真円度の許容誤差および本体軸方向の曲がり許容誤差として示されている（表－１）。親子シールドでは、子機切り離し時を考慮すると、子機に対して後述するようにより厳しい寸法精度が要求される。

表－１ シールド製作精度

a) 真円度の許容誤差			b) 本体軸方向の曲がり許容誤差		
シールドの直径 (m)	(8)～10	(14)～16	シールド本体長さ (m)	(5)～6	(8)～10
内径の許容誤差 (mm)	0～20	0～32	曲がり許容誤差 (mm)	±9.0	±18.0

【トンネル標準示方書(シールド工法編)・同解説】 第129条 解説 表3.4より

【トンネル標準示方書(シールド工法編)・同解説】 第129条 解説 表3.5より

また、現地組立は、立坑内空寸法（幅17.4m、長さ17.6m）、および地上からの開口部寸法（幅8m、長さ10m）の限られた作業空間と、資材搬入・組立設備に制約を受ける。これらの条件の下で、組立精度をいかにして確保するかが、本計画で最も重要かつ困難な検討課題となった。

3-2 組立精度の設定

親子シールドでは、子機を切り離す際に、親機と子機の間に所要のクリアランスが必要となる。このクリアランスは、親機と子機の接続部の構造に影響するため、とくに子機の組立精度の設定が重要となる。

前述のトンネル標準示方書の規定によれば、子機切り離し時において考慮すべきシールド外径の最大誤差 δ_{max} は、真円度の誤差と軸方向の曲がり誤差を加えた量で、以下のように表される。

$$\delta_{max} = \delta c + \delta b = 20 \pm 9 = 11 \sim 29 \text{ mm} \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに δc ; 真円度許容誤差の最大値

子機の外径9.7mに対する真円度の許容誤差は、最小 -0mm、最大 +20mm

δb ; 本体軸方向の曲がり許容誤差

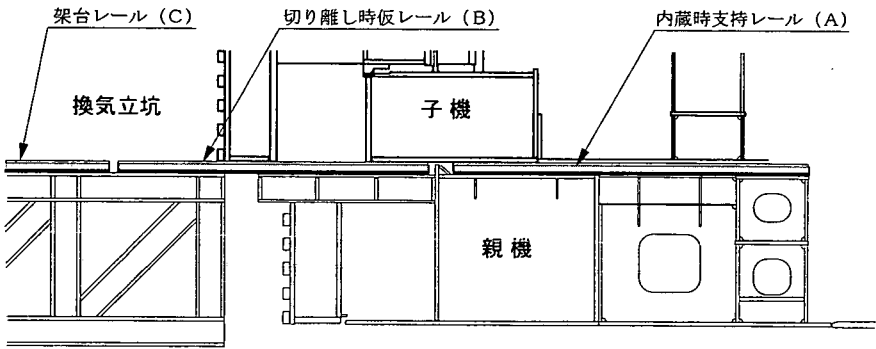
内蔵時子機の本体長さ5.9mに対する本体軸方向の曲がり許容誤差は、±9mm

さらに、子機切り離し時の施工余裕 α を考慮すると、親機と子機の接合部における必要最小クリアランス C_{min} は次のように設定することができる。

$$C_{min} = \delta_{max} + \alpha = 29 + 20 = 49 \text{ mm} \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで、施工余裕 α (=20mm) は、子機切り離しを以下のような施工手順で実施することを想定して設定した（図－６）。

- ①子機は、親機内蔵時の支持レール(A)上を滑らせて前方へ押し出し、換気立坑内の架台レール(C)上へ移動させる。



図－６ 子機切り離し施工概要図

②親機内の支持レール最先端と換気立坑内の架台レール間（約4.5m）は、切り離し時の仮レール(B)を設置して移動させる。

すなわち、子機は別々に設置されるレール(A)・(B)・(C)上を移動して換気立坑内まで移動させることとなる。従って、施工余裕 α は、各レールの設置誤差および引き出し時の施工性を考慮して20mmに設定した。

なお、親機到達時の換気立坑に対する姿勢誤差については、レール(B)、(C)を親機の姿勢に合わせて設置し、換気立坑内に移動後に調整することとして、今回の検討では考慮していない。

一方、本機ではシールドの規模から、軸方向荷重を単純な構造で効果的に伝達させるため、親機と子機をバルクヘッド部でラップさせる方式を採用している（図－7）。ラップ構造とした場合のラップ部分の板厚は、クリアランスの大きさに影響するため、間隙はできる限り小さく押さえる必要がある。子機分離時の切断施工性を考慮すると、使用可能な部材寸法として最大板厚 80mm 程度となる。

この板厚で許容されるクリアランス量を有限要素法を用いて解析した（図－8）。解析に用いた作用荷重Pは、以下のように設定した。

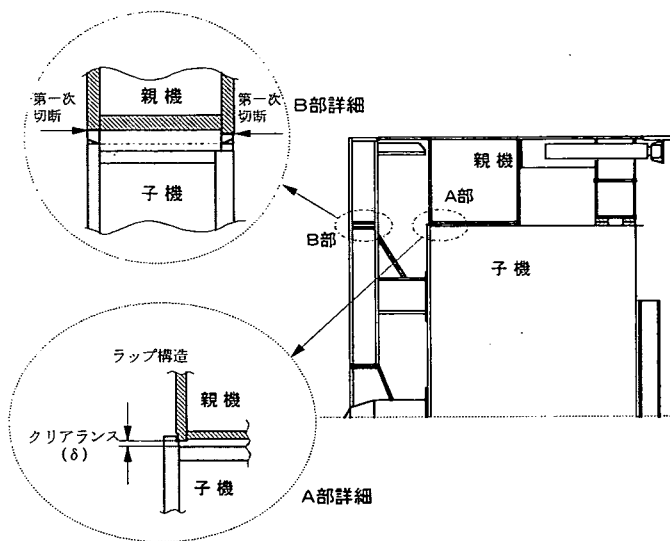
$$P = P_1 + P_2 = 250 + 600 = 850 \text{ kN/m}^2$$

ここに P_1 ; カッター面板に作用する前面土荷重(250kN/m²)

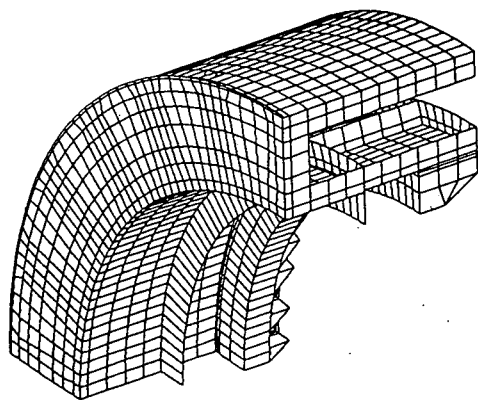
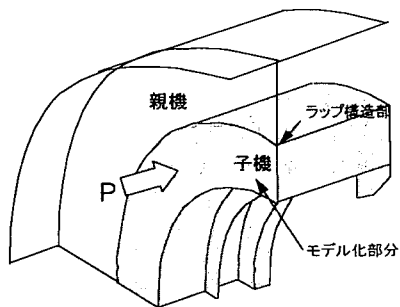
P_2 ; チャンバー内泥水圧(600kN/m² : 管理最大泥水圧の1.5倍)

解析結果を図－9、10に示す。図－10より板厚80mmに対する最大クリアランスは36mmとなる。前述のようにトンネル標準示方書の許容誤差から算出された49mmに対して、クリアランスを13mm縮小する必要があることとなる。すなわち、施工余裕(20mm)を確保すると、子機の組立許容誤差は16mmとなり、トンネル標準示方書の許容誤差29mmに対して、非常に厳しい精度が要求されることとなる。

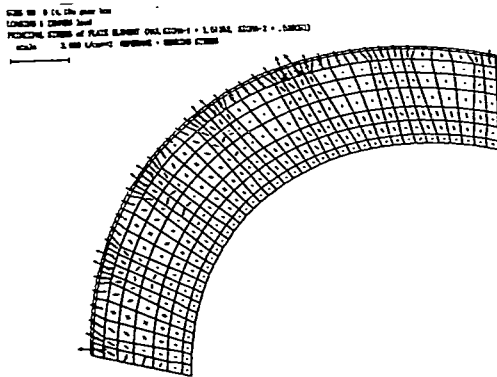
そこで、子機の前胴部と中胴部の各々について組立精度を設定することにより、施工余裕の縮小を図ることとした。すなわち、子機切り離し時は、親機のカッター面板および隔壁（前胴部）接合部の切り離し部分の内側を子機が通過することとなるから、前胴部より中胴部の外径を小さめに設定することにより、見かけの施工余裕を縮小することができる。本機では、中胴部の外径を前胴部より約10mm小さめに設定すること



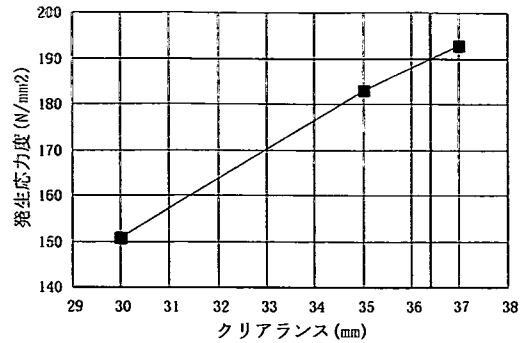
図－7 接合部構造



図－8 解析構造モデル図



図－９ 応力算定結果



図－１０ クリアランスと発生応力度

により、後胴部引き抜き時の見かけのクリアランスを拡大し、前述の施工余裕20mmを10mmまで縮小できるものと判断した。

以上の検討から、本親子シールドにおける子機の組立目標精度は表－２のように設定した。このうち真円度については、非常に厳しいもののトンネル標準示方書に示されている許容誤差の1/2程度を確保すればよいこととなる。

表－２ 機械加工箇所と組立精度

機械加工部 (▽印)		子機前胴部	子機中胴部
目標値	真円度	10～20 mm	0～10 mm
	真円度+真直度	± 26 mm 以内	
施工実績	真円度	7～16 mm	5～10 mm
	真円度+真直度	± 25 mm	

なお前述のように、中胴部の外径を前胴部より約10mm小さめに設定することは、軸方向の曲がり誤差として10mm程度発生することとなり、内蔵時の前胴+中胴の本体長さ5.9mに対する許容誤差±9mmを越えることとなる。しかしながら、内蔵時は子機の製作途中と見なすことができ、テールプレート取り付け時の調整により、子機シールド完成時は本体長さ9.9mに対する許容誤差±18mm以内に納めることが可能である。

3-3 組立誤差の発生要因と精度確保対策

一般に、複数のブロックを接合して構造物を組み立てる場合、組立誤差の発生要因として以下のものが考えられる。

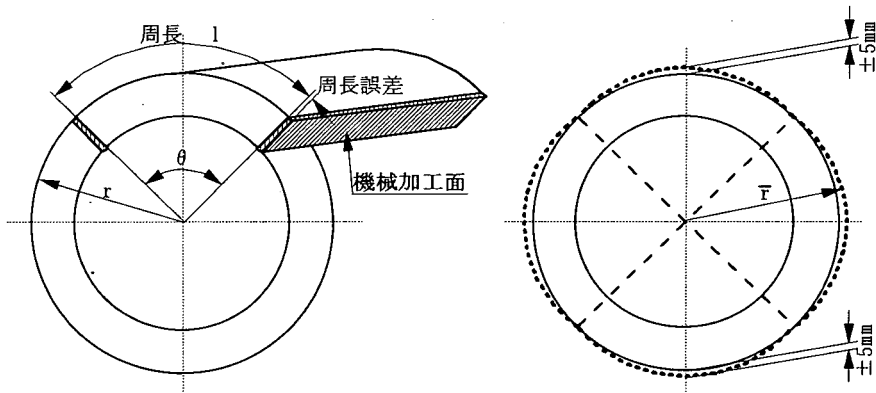
- ①ブロック製作精度
- ②ブロック分割数

③ブロック接合時の溶接による歪み・捻れ

このうち、②ブロック分割数については、シールド外径でほぼ決定される、③ブロック接合時の溶接による歪み・捻れについても、ブロック間の仮止め等で制御できる、等のため組立精度を向上させるためには、ブロック製作精度を向上させる必要がある。

ブロック製作精度はブロック毎に規定されていないため、ブロック製作精度に関する具体的なデータが得られていない。そこで通常の品質・製造管理のもとで製作されるブロックの寸法精度を次のように推定した。通常、製缶加工されたブロックで高精度が要求される場合、機械加工により仕上げることとなるが、このとき製缶加工により発生する誤差を見込んで機械加工代として設けている。一般に、ブロック接合面の歪み・捻れに対する機械加工代は10mmとしている。機械加工代は通常発生すると予測される誤差より若干大きめに設定されているから、製缶誤差は機械加工代の80%の8mm程度と想定できる。

各ブロックは、接合面をボルト結合により拘束し、全体として円形に組み立てられるため、前述の製缶誤差8mmが接合面一ヶ所当たりの周長方向の誤差となる。一般に10mクラスのシールド機の周方向は4分割であり、最大で $8\text{mm} \times 4\text{ヶ所} = 32\text{mm}$ の周長誤差、すなわち $32/\pi \approx 10\text{mm}$ の真円誤差が発生する可能性がある。



図－１１ 真円度と機械加工箇所

また、各ブロックの円弧面の製缶誤差は、スキンプレーットの曲げ加工誤差とスキンプレーットの溶接に伴う歪み・捻れの変形により発生する。通常、曲げ加工精度は $\pm 3\text{mm}$ 、溶接による変形は $\pm 2\text{mm}$ 程度であり、合わせて $\pm 5\text{mm}$ 程度が円弧面の製缶誤差として考えられる。4ブロックで円形に組み立てる場合の真円誤差としては、図－１１に示すように最大で $\pm 10\text{mm}$ となる。

従って、接合面誤差と円弧面誤差から、最大で20mmの真円度誤差が発生するものと想定できる。これは、トンネル標準示方書の8～10mクラスのシールドに対する $-0 \sim +20\text{mm}$ という許容誤差規定に相当するものとなっている。

なお、上記数値は、管理が良好な場合の製缶誤差である。本親子シールドにおける子機の目標製作誤差は、表－２に示すようにトンネル標準示方書の許容誤差の1/2という非常に厳しいものであるため、組立精度を確保する方法について検討を行った。

組立後の真円誤差の発生要因は前述のとおりであり、組立後の真円精度を確保するためには、以下の2つの対策が考えられる。

①外周面の円弧形状の精度を上げる

②ブロック分割部の接合面の平面度と角度の精度を上げる

単純には、各々について機械加工すれば対応可能であるが、製作費が大幅に増大するため、以下の方法に

より対応することとした。

i)ブロック接合面を機械加工する

ブロック接合面に機械加工を入れることにより、接合面の仕上げ誤差は $\pm 1\text{mm}$ 以内の精度を確保する。これにより、接合面誤差による真円度の誤差は $(1\text{mm} \times 4)/\pi \approx 1\text{mm}$ とすることができる。

ii)外周部材は単一部材の曲げ加工により円弧面を作る

単一部材の曲げ加工のためブロック形成のための溶接接合を最小限に抑えられる。また、型板による計測管理で形状精度の向上を図る。これらにより、機械加工に頼ることなく前述の円弧面の曲げ加工精度および溶接による変形量をそれぞれ80%程度に抑え、円弧面の製作誤差 $\pm 4\text{mm}$ を確保する。真円度の誤差としては8mm以内を確保できる。

以上の対策により、真円度の誤差としては $1+8=9\text{mm}$ を確保できることとなる。本体軸方向の曲がりに対しては、表-2に示すように軸方向継ぎ手面に機械加工を入れることにより確保することとした。

3-4 組立実績

表-2に組立精度設定値と製作実績値を示す。子機・親機とも所要の精度を満足することができた。このことは、超多分割シールドの製作に対しては周長管理と端面機械加工の組み合わせで所期の製作精度に対応できることを示した。

ブロック接合精度の向上は立体組立を容易にする（接合が容易）ことから、現地組立工程の短縮という効果をもたらした。91分割の本機に於いては、当初7ヶ月程度を見込んでいたのに対して5.5ヶ月で完了させることができた。東京湾横断道路は18分割で5ヶ月程度を要しており、約5倍の分割数でありながら、ほぼ同期間で組み立てることができた。

4. まとめ

以上の組立精度向上対策および現地組立実績結果から得られた知見は以下のとおりである。

(1)製作費を最小にシールド組立精度を向上できる

機械加工によるブロック接合面精度を確保するとともに、単一部材の曲げ加工および型板を用いた入念な寸法精度管理によりブロックの円弧面誤差が抑制され、多分割シールドの高精度組立が可能となった。とくに、機械加工を最小限に抑えており、製作費も抑制することができた。

(2)組立精度向上により現地組立期間の短縮が図れる

各ブロックの製作精度が向上したため、現地組立を効率的に行うことができ、現地組立工程を約20%強短縮することができた。

今後、都市部（内陸部）では多くの地下河川、道路トンネル等の大断面シールドトンネルの計画が立案されており、本検討で得られた成果は、これら大断面シールドの製作費・製作精度・現地組立工程等に対して大いに寄与するものと考ええる。

なお、シールドは来年(1998年)早々に到達し、子機切り離しが実施される予定である。親機シールドの掘進実績と合わせて、子機切り離し実績についても、今後報告していきたいと考えている。

最後に、本研究に当たり、営団「シールドトンネル調査委員会」（村上博智委員長）の各委員、およびメトロ開発㈱を始め多くの関係者から貴重なご指導・ご助言を頂いた。ここに謝意を表する次第である。

参考文献

1)松田、小林、河野、鈴木：世界最大の抱き込み式親子泥水シールド工法の設計

—営団7号線南麻布工区一、トンネルと地下、Vol.27, No.6, 1996.6.