

東広島市西条 1 号雨水幹線建設工事での親子シールド工法施工事例

A Case Study of Parent-child Shield Method Used for Construction of Higashi Hiroshima Saijo Stormwater Detention Sewer Trunk Line No. 1

佐藤 邦 男^{*1}
Kunio Satou

関塚 真 也^{*2}
Shinya Sekizuka

佐藤 琢 磨^{*3}
Takuma Satou

【要旨】

本工事は、東広島市の主要幹線である交通量の多い、旧 375 号線と市道町田吉行線の路下に、セグメント外径 $\phi 4,550\text{mm}$ から $\phi 2,550\text{mm}$ に変化するシールドトンネルを施工するものである。

1 本のシールドを、内部から縮小径に断面変化をさせるシールド工法を親子シールド工法という。親子シールド工法を適用する工事は、採用された経緯よりコスト縮減や地下構造物との近接施工などの制約を受ける場合が多く、当工事においても同様であった。親区間での極端な土質変化や不利な現場条件の追加により、様々な対応を余儀なくされた掘進であったが、工事関係者全員が常にこの特殊シールド工法を意識して施工した結果、完了することができた。

当工事のように外径比が大きい親子シールド工法は、我が国においても事例の少ない特殊な工法である。

本稿では、親子シールド工法の特殊性と施工事例について報告する。

【キーワード】 親子シールド，断面変化，外径比

1. はじめに

一般のシールド工事の施工は、1 つのトンネル径に対してシールド機は 1 機である。近年都市部における地下埋設物の状況や交通に対する影響等から立坑用地の場所がなく、またコスト縮減の要求から異なる径をもつ 2 トンネルを 1 機のシールド機で掘進する工事が、日本下水道事業団より発注された。

当工事は、東広島市西条大坪付近の雨水浸水対策として、分流式雨水幹線を築造するものである。

市の主要幹線である交通量の多い、旧 375 号線と市道町田吉行線の路下に、セグメント外径 $\phi 4,550\text{mm}$ から $\phi 2,550\text{mm}$ に変化するシールドトンネルを泥土圧式親子シールド工法により施工する。

セグメント外径 $\phi 4,550\text{mm}$ の親区間は $L=630\text{m}$ である。セグメント外径 $\phi 2,550\text{mm}$ の子区間は $L=280\text{m}$ である。

地下埋設物の状況等から、親区間、子区間ともに土被り $2.7\text{m}\sim 4.65\text{m}$ での小土被り掘進であり、親区間においては、 $R=25\text{m}$ の急曲線施工を含む。

工期が短く、また周辺環境への配慮要求から、十分な土質調査が出来ないまま、受注後すぐにシールド機の仕様決定、製作を行わざるを得なかった。黒瀬川沿いにコ



図-1 位置図



写真-1 親子シールド機

1. 九州支店 下関シールド作業所 2. 東北支店 J S東松島ポンプ場作業所 3. 土木事業本部 土木統括部 機電G

コンパクトな発進基地を設備した後、速やかに掘進を開始した。

親区間での掘進は、土質調査不足が響き想定外に硬い岩盤層の出現により掘進が滞った。路上からの掘削作業や摩耗したカッタビットの交換など計画外の作業が追加となり難航したが、工事関係者全員の尽力により、シーールド機を損壊させることなく所定の位置まで到達させることができた。

本稿では、親子シーールドの特殊性を検証しつつ、苦労した施工結果について報告する。



写真-2 岩盤層確認

2. 工事概要

工事名：東広島市西条1号雨水幹線建設工事

発注者：日本下水道事業団

施工者：飛島・共立特定建設共同企業体

施工場所：東広島市西条大坪町地内

工期：平成21年2月～平成26年3月

トンネル施工延長：910m

(親区間L=630m+子区間L=280m)

シーールド機：φ4,690mm/φ2,680mm 泥土圧式

掘削土搬出方法：ベルトコンベア+ズリ鋼車

親機 総推力：19,200kN (600kN×32本)

子機 総推力：6,500kN (500kN×13本)

親機カッタトルク：1,627/2,272kN-m (α：15.8/22.0)

子機カッタトルク：307/455kN-m (α：15.9/23.6)

親 セグメント：

一般部 φ4,550mm×1,200mm (RCおよび鋼製)

急曲線部 φ4540mm×300mm (鋼製)

子 セグメント：

φ2,550mm×1000mm (二次覆工省略型RC)

3. 親子シーールド工法概要

東広島市では西条大坪付近の雨水浸水対策として、大坪町内の路下4.0m～7.0mに、全長910mの雨水幹線管渠の敷設を計画した。計画水量より下流側にあたる黒瀬川

沿いから大坪町交差点付近までの630m区間に仕上り内径φ3,750mmの管渠と、上流側の280m区間に仕上り内径φ2,200mmの管渠が必要であり、断面の変化が必要であった。

また、上流側の管渠計画線上は交通量が多く地下埋設物が輻輳している商業地であるため、立坑用地が確保できない問題と、地下埋設物を避けながら管渠を築造しなければならぬ問題があった。

これらを解決するために東広島市は、1台のシーールド機で断面の異なる管渠を築造できる親子シーールド工法を採用した。

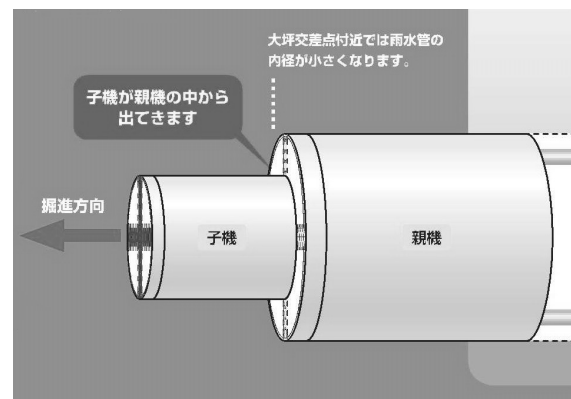


図-2 親子シーールド工法イメージ

親子シーールド工法は、親シーールド機（親機）に予め、子シーールド機（子機）の一部を装備したまま掘進し、所定の位置まで親機を到達させた後、坑内で親機の一部を解体、子機を組立て（親子換装）、反力枠設置などの子機発進準備工を坑内で行った後、親機と子機を一体化させている部材を引き外して分離させ、縮径した子機を発進させる工法である。（親子分離・発進）

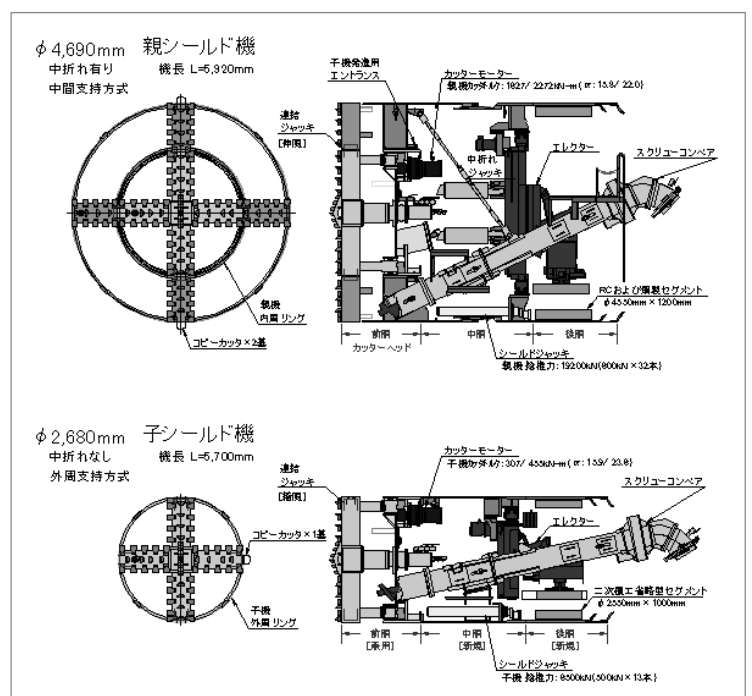


図-3 シールド機の構成

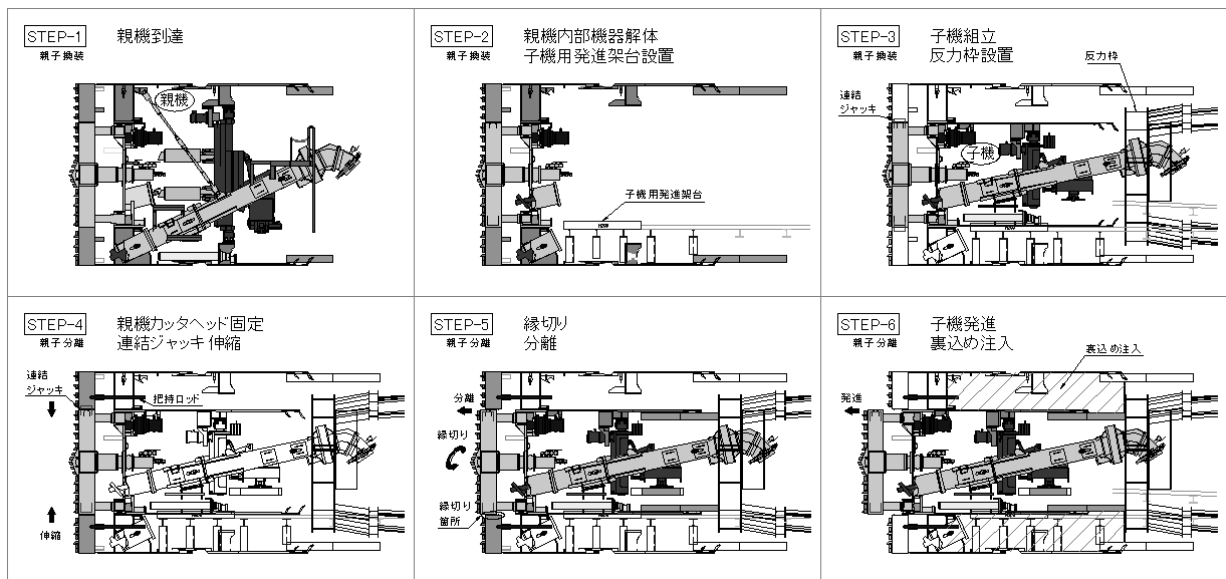


図-4 親子シールド工法の施工ステップ図

シールド機の構成を図-3に、親子シールド工法の施工ステップ図を図-4に示す。

親機φ4,690mmと子機φ2,680mmの外径差が大きいため、基本設計として、前胴部にあたるカッターヘッド中央部のみを親機と子機で兼用し、それ以外の部分については転用もしくは別仕様とした。

カッターヘッド中央部は親子兼用であるため、カッター支持方式は親機では中間支持方式となり、子機では外周支持方式となる。シールド掘削断面の土質条件は、親区間、子区間とも全般に砂礫と砂質土主体の土質であるため、強化先行ビットを多数配置した摩耗に強いカッター仕様とした。また親区間の一部で強風化花崗岩の出現が想定されたため、カッター駆動部に可能な限りカッターモーターを装備して、カッタートルクを確保した。

なお、親機カッターヘッドと子機カッターヘッドは、4本のスポーク内に装備している連結ジャッキで一体化しており、親子分離時には子機の油圧回路を用いて、これらの連結ジャッキを縮めて分離させる構造とした。

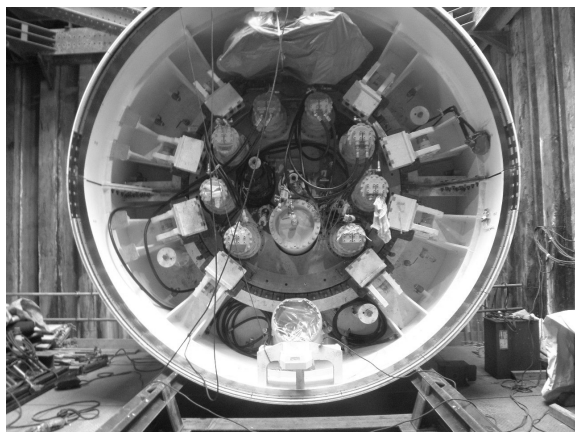


写真-3 親シールド機前胴部

親機と子機との径の差が大きいため、エレクターと後続台車は親機用と子機用を別で使用せざるを得なかったが、コスト削減の要求に応えるべくスクリューコンベアとシールドジャッキは転用できる仕様とした。また、親区間にR=25mの急曲線区間があることから、親機は中折れ式を採用した。子区間にもR=150mの曲線区間があったが、シールドジャッキの油圧制御を行うことで曲線対応可能と判断し、子機には中折れ式を採用しなかった。

4. 親子換装

当工事における親子シールド換装工事の課題と対応結果について以下に記す。

親機と子機との胴体接合部の止水部材は、掘進中の土水圧に対抗でき、子機発進時には支障とならない部材を選定しなければならない。接合部止水部材をシール構造とした場合、子機発進時にシールが無効となり止水性を確保できないことから、エントランス構造とした。当エントランスには、グリスおよび止水剤の注入配管を設備し、万一漏水するなどの緊急時にも迅速に対応できる構造とした。親区間掘進中、子機発進時ともに、エントランスの効果は高く、親機と子機接合部の止水性は良好であった。

子機掘進時にスポークへ掘削荷が集中しないように子機外周にも補強リングが必要となるが、親機掘進時にそれにより土砂流れを阻害しないかという懸念があった。土質条件が厳しいため機械強度を優先し、掘進中の適切な加泥注入により対応することとしたが、ビット交換時にカッターヘッド部を確認すると、子機外周リング内が土砂閉塞気味であった。面板閉塞等の顕著な悪影響はなかったが、子機外周リングが土砂流れを阻害していたと思われる。今後は、子機外周リングに土砂抜き穴を設けて

おく、子機外周リング内に洗浄設備を設けておくなど、親子シールド機的设计、製造段階での工夫が必要であると思われる。

スクリーコンベアは、取付位置を変更し、親機から子機に転用する計画である。スクリーコンベア脱着時の止水方法は、当初、機械式の止水ゲートを検討したが設置空間の狭隘さと親子シールド機の構造上、設備が複雑になり現実性が乏しかった。

また、子機の前胴部に重心が偏るため、子機発進直後にノーズダウンした場合、子機の後胴が親機のカッターヘッドに干渉し、それ以上進めなくなる可能性があった。

そこで、親機到達前に止水性と地耐力の向上を目的として親子換装部の地盤改良を行い、地山を保持した。

子機中胴部はシールドジャッキ等の内部機器を全て組込むと16.9tとなり、既設の10t門型クレーンでは吊ることができない。また吊り降しに移動式クレーンを用いた場合、防音ハウスの天井パネルを開放しなければならなかったため、作業工程および経済性で不利となる。

そのため、子機中胴部は内部機器を抜き取った状態(10t未満)で搬入し、既設の10t門型クレーンで立坑へ投入、立坑下の専用運搬台車の上で内部機器の組立を行った。

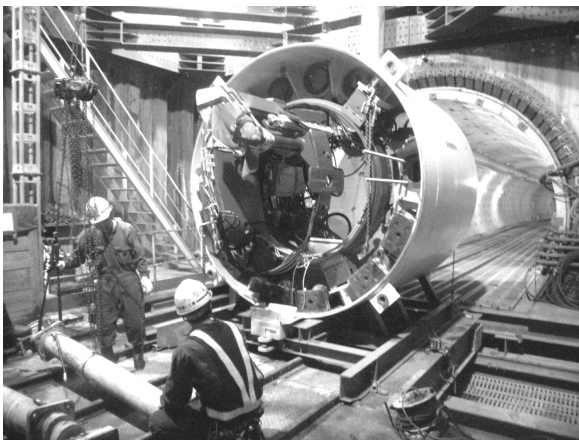


写真-4 子機中胴内部機器組立

親側トンネルと子側トンネルの中心は同じ中心点であるが、親と子で後続設備の大きさと配置が異なるため、軌条の高さと中心も異なる。子機胴体持込も同様である。バッテリーロコの牽引計算よりトンネルの断面変化点から親側トンネル18mを軌条すりつけ区間とし、親区間用、子機胴体持込用、子区間すりつけ用の3種類の枕木を用意した。親子換装工事中に2回の軌条盛替えを行ったが、運搬路や安全通路の盛替え作業のため、各業者間の作業工程調整に苦労した。特殊条件下で段取替え作業を行う場合は、作業工程に若干の余裕をもたせたほうが良いと思われる。

坑内に持込む資機材のなかで子機中胴部が最大の重量

と寸法になる。既設の台車では対応が出来ないため、子機胴体持込用に専用運搬台車を製作した。軌条への荷重を分散させるため、通常4輪の車輪を8輪に増やした。また坑内が軌条間610mmの単線路であり、運搬時の横転が懸念されたため、専用運搬台車端部をソリ構造とし、横転防止対策を行った。



写真-5 子機中胴坑内運搬

子機胴体の組立精度がほぼ子シールド機の製品精度であるため、外径 $\phi 4,690\text{mm}$ の親機機内で $\phi 2,680\text{mm}$ の子機胴体を如何にして高精度に組立てるのかについて検討を行った。その結果、以下を考慮した。

- ①発進架台の高さおよびセンターに軌条を盛替え、専用運搬台車に搭載した子機胴体の中心と組立中心とをほぼ同じとした。
- ②胴体接合部をフランジ加工とした。
- ③子機胴体を専用運搬台車で組立位置直近まで運搬後、親機機内に複数個設置したチェンブロックにて子機胴体を吊り上げ、芯出し調整する。
- ④発進レールで子機胴体を仮固定後、フランジ面を芯棒で合わせ微調整する。

これにより狭隘な親機機内でも子機胴体を高精度で組立てることができた。



写真-6 子機胴体組立

親機と子機の外径の比を外径比という（ $\phi 4,690\text{mm}/\phi 2,680\text{mm}=1.75$ ）。当工事のように外径比が大きい親子シールド工法は全国でも数例しか施工事例がなく、当社としても初の施工であった。

外径比が大きい場合、物理的に親機カッタ駆動部に装備できるカッターモーター数が限定される、親機と子機の連結部構造が複雑化する、土砂取込み口を親機と子機で別にしなければならない（スクリーコンベアの仮解体作業が発生する）、などの不利な点もあるが、子機胴体の坑内運搬や親機機内での子機組立など、有利な点もあった。外径比により留意する点異なるため、親子シールド工法という一般的な視点のみで計画しないことが肝要である。

親機到達から親子換装工事完了まで、工程に遅延をきたすことなく計画通り行うことができた。

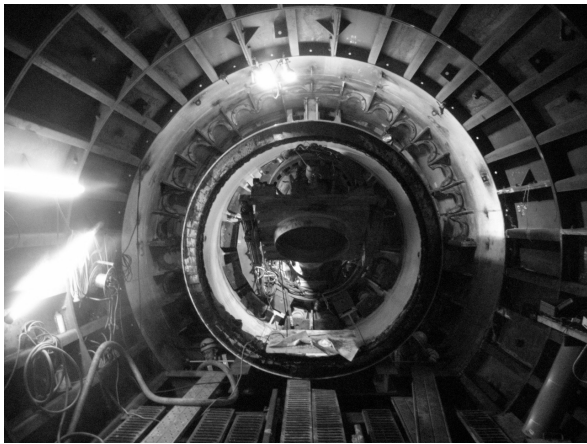


写真-7 親子換装工事完了

5. 親子分離

5.1 連結ジャッキ縮限

親機カッタヘッドと子機カッタヘッドの一体化は、4本のスポーク内に装備している連結ジャッキで行っている。連結ジャッキを縮めた段階で、親機カッタヘッドが落下するため、親機カッタヘッドを固定する設備が必要

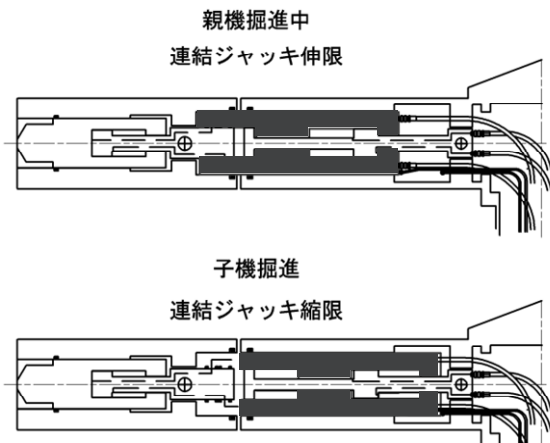


図-5 連結ジャッキ

である。固定は親機掘進後の地中内作業であるため、シンプルで確実な設備が良い。子機分離の前に、親機機内から親機スポークに向け、把持ロッド（先端がノミ、後端がネジ構造のロッド）を回して伸ばし、親機側のスポークに接合させ、親機カッタヘッドを固定した。

親機と子機を切り離すべく、連結ジャッキを縮める作業をスポーク毎に1台ずつ単独で行なった。（図-5参照）

連結ジャッキが限界まで縮んだかの確認は、縮める作業中にジャッキから排出される戻り油量による油圧的判定とジャッキ内部に設置されている近接スイッチの反応による電氣的判定の二重の判定方法により確認する。

結果を表-1に示す。

表-1 連結ジャッキ分離判定結果

スポーク	押側 戻り油量 [cc]		判定	近接スイッチ			判定
	実測値	理論値		伸限	縮限	判定	
A	400	2,262	×	ON	ON	○	○
B	2,670	2,655	○	ON	ON	○	○
C	2,360	2,262	○	ON	ON	○	○
D	2,700	2,655	○	ON	ON	○	○

A スポークの縮限作業で戻り油量が理論値の1/5程度であり油量の判定では不合格としたが、近接スイッチによる判定では合格であったため、総合的に合格の判定とした。

5.2 子機分離・発進

親区間での掘進において、連結箇所であるスポークを変形させていた場合、親子分離ができなくなる。

親区間では、想定外に硬い岩盤層の出現などにより、カッタトルク値が上昇したため低速掘進となった。坑内設備の増設でカッタトルク上限値を上げることは可能であったが、掘進速度よりも親子シールド機連結部の保護を優先し、当初計画のカッタトルク上限値を順守した。

また、ビット交換などスポーク部付近での火気作業が追加となったが、放熱剤を使用し、スポークを熱変形させない熱管理を伴った作業を行った。

受注時の計画段階から掘進、換装に至るまで、常に親子シールド工法を意識しての施工であった。

連結ジャッキ縮限確認後に、路上および機内、子機坑口部、坑内反力部に監視員を配置し、子機カッターを回転させたところ、低トルクでカッターが回転し、親子縁切りに成功した。引き続きスポーク部が完全に分離するまで子機を発進させたが、全ての監視箇所でもトラブルもなく、親子分離工事を完了した。

管渠の断面変化点を子機反力部に計画したため、子区

間は本セグメントから始まる。発進直後のノーズダウンを懸念していたが、親機到達前に施工した地盤改良の効果が高く、ノーズダウンは無かった。また、子機テール部がエントランスを通過後に子セグメントと親機との間に裏込め注入し、親子換装部の止水覆工を行った。

親子換装部の止水覆工をもって、親子シールド工法を完了した。

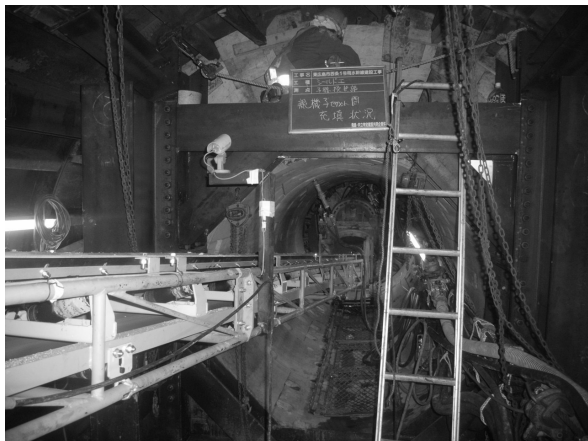


写真-8 親子換装部止水覆工

6. おわりに

平成25年9月に子機が到達し、無事にシールド掘進を終えることができた。

親子シールド工法は、外径比により留意する点異なる。外径比が大きい当工事の施工事例は、我が国においても希少事例であるため、親子シールドの特殊性を再度検証しつつ、施工結果について報告させて頂いた。

今後、本工事での施工事例が、特殊条件下でシールド施工を行う場合の参考となれば幸いである。

謝辞：

当該区間のシールド施工に際しては、日本下水道事業団広島事務所、東広島市下水道部をはじめ多くの方々からのご助言とご指導を頂きました。本紙面をお借りしてお礼を申し上げます。

【参考文献】

- 1) 社団法人土木学会：トンネル標準示方書，シールド工法・同解説 2006年度版，2006.
- 2) (有)日本プロジェクト・リサーチ：第54回シールド・トンネル工法施工技術講習会テキスト，pp.1-15，2010.

Summary This project involves driving a tunnel with a shield-type tunnel boring machine having two segmental lining outside diameters. While driving a tunnel under former National Highway Route 375 and municipal road Machida-Yoshiyuki Line, both of which are heavy-traffic arterial roads in the city of Higashi Hiroshima, the TBM switched its segmental lining outside diameter from 4,550 mm to 2,550 mm.

The shield tunneling method in which a smaller-diameter shield is launched from a larger-diameter shield is referred to as the parent-child shield method. This method is often used for projects that impose restrictions such as the necessity of reducing cost and driving a tunnel in close proximity to existing underground structures because they are the very reasons why the method was developed in the first place. The Higashi Hiroshima Saijo stormwater detention sewer construction project, too, was such a project. The tunnel section driven with the parent shield posed various challenges such as extreme changes in geological conditions and adverse site conditions requiring various creative approaches, but the tunneling work was completed thanks to the construction team members' careful attention to the peculiarity of the special shield tunneling method.

The parent-child shield method used in this project was a rare case even in Japan because the ratio between the outside diameters of the parent and child shields was large.

This paper reports on the special nature of the parent-child shield method and the project completed by using that method.

Key Words : Parent-child shield method, Lining diameter changeover, Outside diameter ratio