

分岐シールド工法「地下茎工法」の開発（その2）

The Development of Ramified Shield Method

「Subterranean Stem Shield System」－Part 2－

桑原 資孝*	渡辺 徹**
Yoshitaka Kuwabara	Toru Watanabe
内田 克巳***	大西 徳治****
Katsumi Uchida	Noriharu Onishi
磯 陽夫**	
Akio Iso	

要 約

分岐シールド工法「地下茎工法」は、施工中のシールドトンネル内から分岐シールドを斜め、あるいは直角に発進する工法で、分岐シールド用の発進立坑が不要であり、全体工期の短縮と経済性の図れる工法である。

本報告では、西松建設技報 Vol.17（抄録）分岐シールド工法「地下茎工法」の開発（その1）に引き続き、本線シールド外径7mクラスでの二重スキンプレート方式によるシールド構造や分岐部の施工方法等に対する検討について報告するものである。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 二重スキンプレート方式の概要
- § 3. シールドの検討
- § 4. 分岐部の施工方法の検討
- § 5. おわりに

§ 1. はじめに

分岐構造を有するトンネルは、電力、通信、上・下水道等さまざまな分野において数多く見受けられる。これら施設の分岐部の築造法には、本線トンネルへ分岐シールドを接合させる方法、本線トンネル内から分岐シールドを発進させる方法、あるいは分岐部に立坑を築造する方法等がある。

これらの工法のうち立坑を必要とする工法は、立坑用地の取得難、立坑施工中における周辺環境への影響および立坑築造に伴う工事費の増大等のデメリットを生じる。分岐シールド工法「地下茎工法」は、トンネル内から分岐シールドを発進させることにより、これらの課題を解決した工法である。

「地下茎工法」には、本線と分岐トンネルの設計・施工条件により4つの方式¹⁾があるが、本報文は二重スキンプレート方式の検討内容を示したものである。

* 機材部

** 技術研究所土木技術課

*** 機材部機械課

**** 土木設計部設計課

§ 2. 二重スキンプレート方式の概要

シールドは図-1、および図-4に示すとおり前胴、中胴、後胴の三つに分かれている。前胴部は掘削機構、中胴部は二重スキンプレート構造の分岐シールド内蔵機構、後胴部は推進とセグメント組立て機構となっている。なお、前胴については分岐後の掘進のためにシールドジャッキ、エレクター等を初めから備えた構造となっている。

また、シールド機種は、本線と分岐シールドの同時施工時における分岐部の掘削土および資機材輸送を考慮し、先ず泥水式シールドを対象に検討を行うことにした。

2-1 施工手順

分岐の施工手順を図-1～3で説明する。

- ①本線シールドの掘進（分岐シールドは、本線シールド中胴部の二重スキンプレート内に内蔵済）。
- ②分岐位置で本線シールドの掘進停止（図-1）。
- ③前胴部および中胴部の外側スキンプレートのみを掘進し、分岐シールドの発進口を露出した時点で本線シールドの停止（図-2）。
- ④分岐シールドを発進。
- ⑤分岐シールドの初期掘進終了後、本線シールドと分岐シールドを同時施工（図-3）。

2-2 特徴

本方式の主な特徴を以下に示す。

- ①本線シールド内から分岐シールドを発進するので発進立坑は不要。
- ②分岐シールドと本線シールドは同時施工ができる。
- ③本線シールドは、分岐シールドの発進後も同径。
- ④分岐部の発進部は、本線シールドのセグメントの撤去が不要で、また、分岐シールドを密閉型とすることで地盤改良が不要。

§ 3. シールドの検討

「地下莖工法」二重スキンプレート方式は、中胴部に特徴があるため、中胴部の構造、強度等の検討内容を中心に述べる。

3-1 検討条件

(1) 土質条件

- ・土質 : 洪積砂層
- ・土被り : 40.0 m (曲線部は45.0 m)
- ・地下水位 : GL-25.0 m
- ・土の単位体積重量 : 2.0 tf/m^3
(水中 1.0 tf/m^3)
- ・土の内部摩擦角 : 35度

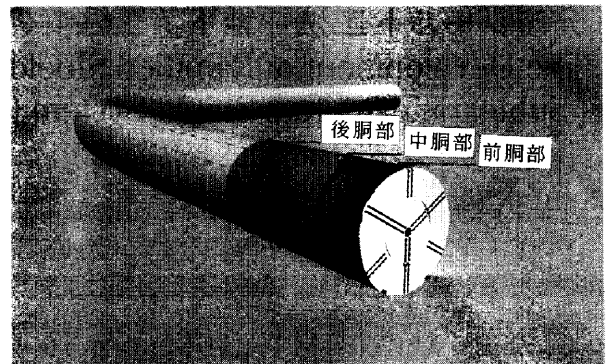


図-1 分岐位置到達

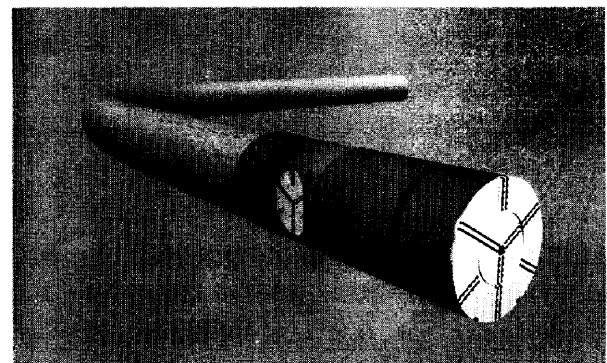


図-2 内側スキンプレート（発進口）露出

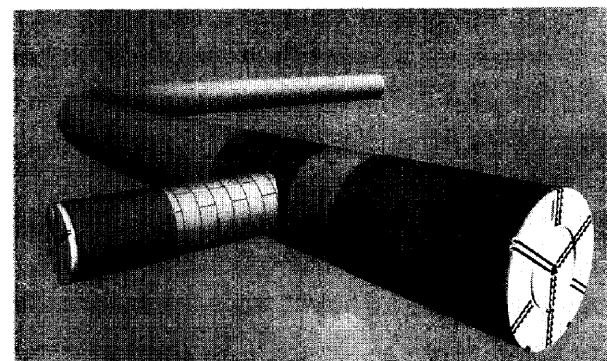


図-3 本線・分岐シールド同時掘進

- ・N値 : 50以上
- ・土圧係数 : 0.4
- ・上載荷重 : 1.0 tf/m^2
- ・切羽水圧（シールド中心） : 2.6 kgf/cm^2

(2) 本線トンネル

- ・縦断勾配 : 分岐前 $-5\% \sim +3.65\%$
- ・水平最小曲率半径 : 分岐前 $R=60 \text{ m}$
 , 分岐後 $R=30 \text{ m}$
- ・セグメント外径 : 7,100 mm
- ・セグメント幅 : 一般部 1,200 mm
 , 60mR部 800 mm
 , 30mR部 600 mm

・テールクリアランス：30mm×2=60mm

(3) 分岐トンネル

・セグメント外径：4,050mm

・セグメント幅一般部：1,000mm

・テールクリアランス：25×2=50mm

3-2 シールドの設計

シールド全体構造図を図-4に示すが、主な仕様は以下のとおりである。

- ①急曲線の対応として中折れジャッキを装備する。
- ②シールドジャッキの推力は、シールドジャッキ支持のリングガーターから中胴と後胴間の中折れジャッキへ、中胴部内スキンプレートへ、そして前胴と中胴間の中折れジャッキを介して前胴部へ伝達する。
- ③中胴部は外スキンプレートと内スキンプレートの二重構造である。内スキンプレートには分岐シールドの発進用開口部があり、その中には推力が均等に伝達できるように連結管を設置する。
- ④中胴部の外スキンプレートは分岐後の本線シールドのテール部を短くする目的で約半分に分割する（詳細は後述）。

(1) シールドの装備推力・カットトルク

シールドの装備推力とカットトルクを表-1、表-2に示す。

分岐前の本線シールドは、従来シールドに比べ機長が長く、重量も大きい。算定結果は従来シールドの装備と同等である。

(2) スキンプレートの検討

中胴部の外スキンプレートは分岐後に分割されるが、後

表-1 装備推力

	本線シールド	分岐シールド
所要推力：F	2085 t	530 t
装備推力：F ₀	200t×24本=4800t	100t×16本=1600t
単位面積当りf	116(tf/m ²)	116(tf/m ²)
余裕率 F ₀ /F	2.30	3.00

表-2 カットトルク

	本線シールド	分岐シールド
所要トルク：T	274 tfm	37.0 tfm
装備トルク 常用	406(609)tfm	86(141)tfm
安全率（常用）	1.48	2.27
トルク係数：α	1.06	1.15

胴スキンプレートに比べ短い。したがって、設計条件の厳しい後胴部スキンプレートについてFEM解析を行った。その結果を表-3に示す。

表-3 後胴部スキンプレートの解析結果

最大引張応力	231 kgf/cm ²	<1400kgf/cm ²
最大圧縮応力	514 kgf/cm ²	<1400kgf/cm ²
プレート厚	19 mm	
材質	SS400	
最大撓み量	プレート端 下部	1.16 mm

(3) 中胴部の内スキンプレートの検討

中胴部の内スキンプレート構造を図-5に示す。

中胴部の内スキンプレートは、分岐シールドの発進口としての開口部があること、本線シールドジャッキ推力を伝達すること、分岐シールドジャッキの推進反力を受けること等を考慮し、三次元FEM解析を行った。

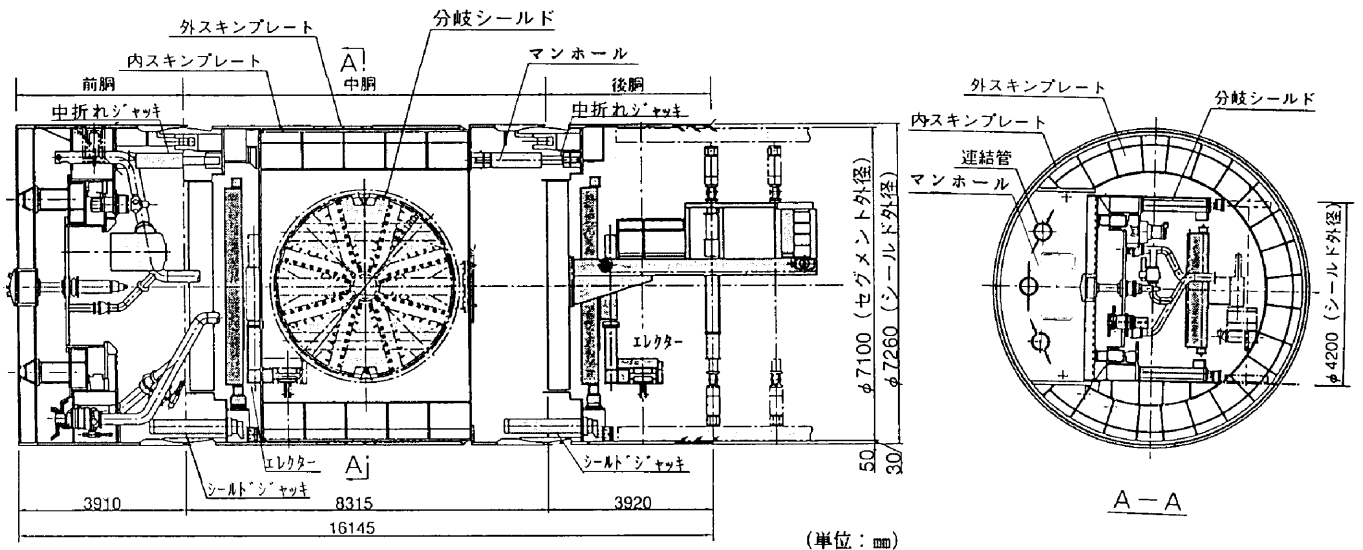


図-4 全体構造図

算定結果を表-4、図-6および図-7に示す。

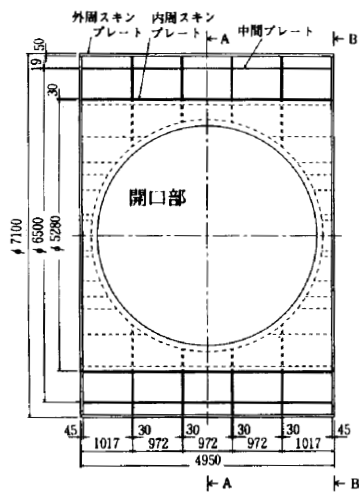
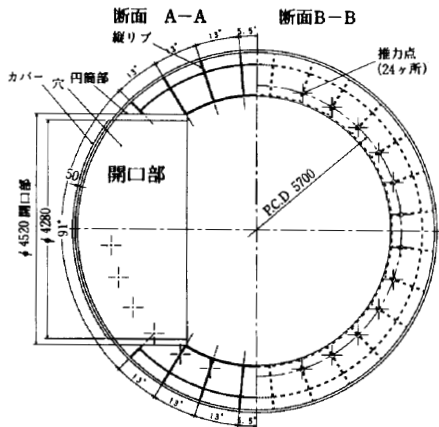


図-5 中胴・内スキンプレート構造図

表-4 内スキンプレートの解析結果

最大圧縮応力	1040kgf/cm ² < 1400kgf/cm ²
材質	S S 400
最大撓み量	半径方向(発進口横外側) 0.98mm
	軸方向(発進口横内側) 1.70mm

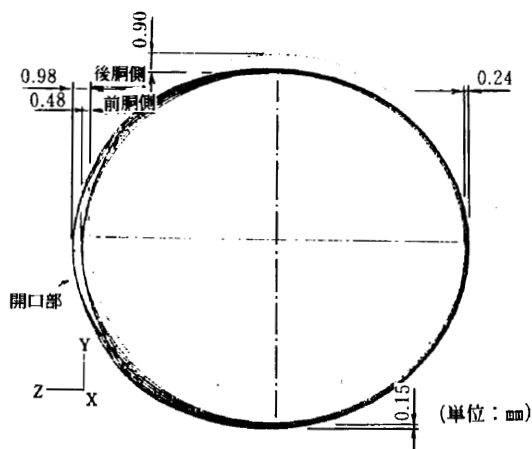


図-6 内スキンプレート変形図（半径方向）

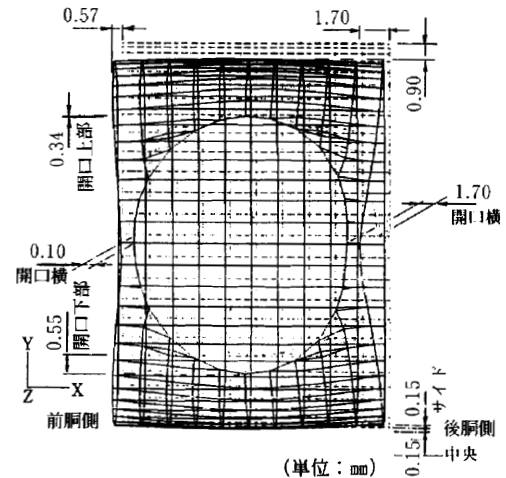
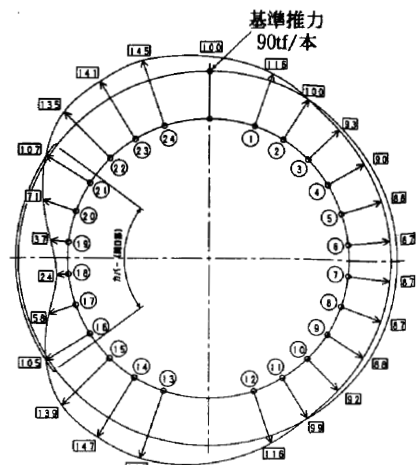


図-7 内スキンプレート変形図（軸方向）

(4) 推力伝達の検討

中胴部の内スキンプレートは上記に示すとおり強度上の問題はない。しかしながら、シールド掘進時においての後胴側から前胴側への中折れジャッキ支点位置における推力は、中胴部の内スキンプレートの変形が場所によって異なるために均等に伝達しない。後胴側の中折れジャッキ中心位置に、ジャッキ推力を負荷（90tf/本）し、その位置に対応する前胴側の中折れジャッキ支点位置での反力割合のFEM算定結果を図-8に示す。開口部位置で最小で24%、上下付近で最大149%となり、推力の伝達に大きな差がでた。このことはシールドの運転制御に問題となる。そこで開口部に連結管を設け、均一な推力の伝達が行われるようにした。連結管の設置を図-9に示す。



□は基準反力に対する割合を示す
○印は中折れジャッキNo.を示す。

図-8 反力状態（中折れジャッキ支点位置）

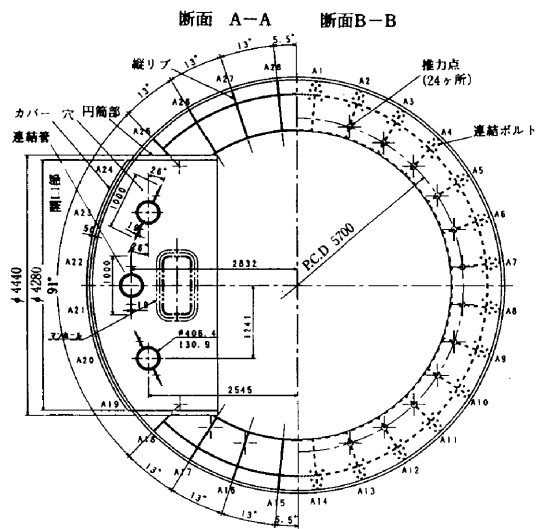


図-9 連結管設置図

また連結管の撤去については、図-4 全体構造図A-A断面に示すよう、本線シールドが分岐部へ到達後、坑口側仕切板側部に設けたマンホールから出入して行く。その後面板空間に泥水を充填し、発進口の開口にそなえる。

(5) 中胴外スキンプレート分離方法および止水方法

分岐後、前胴と中胴外スキンプレートが一体となり本線シールドとなるのが、そのままでは中胴外スキンプレ

ートが長く運転制御が困難となる。そこで、分岐後中胴外スキンプレートを中間付近で分離できる構造とした。

その分離方法と、各段階における止水方法を図-10に示す。

止水箇所は図中A～Dに示すとおりである。

- ①：分割部からの水に対する止水。
- ②：分岐前、中胴後部からの水に対する止水。
- ③：分岐シールド発進口が露出しはじめたときに対する止水。
- ④：分割後の本線テールシール。

(6) 分岐シールド発進部のエントランスシール

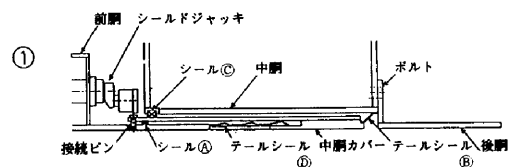
分岐部の土被りが浅い場合は、通常のエントランスシールを設置すれば良いが、高水圧が作用し、かつ地盤改良を行わない発進部では、エントランスシールの信頼性が重要である。そこで図-11に示すシール膜内部に加圧水を注入、膨張させ、止水シールを分岐シールドに押しつける止水構造を採用した。

シールの特徴を以下に示す。

- ①耐圧性が高い（常用10kgf/cm²）。
- ②シールを2列配置し、かつシールの作動機能により段差部での止水が可能である。
- ③特に地下茎工法においては、シール部、分岐シールドとも工場を組みこむため事前に性能の確認を行うことができる。

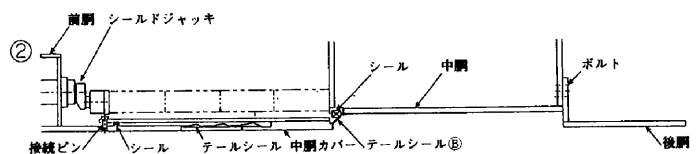
STEP-1

通常掘進



STEP-2

分岐シールド発進時、前胴シールドジャッキにて推進し、中胴部を露出状態とする。



STEP-3

接続ピン撤去後推進することで中胴カバーと中胴スキンプレートを分割。

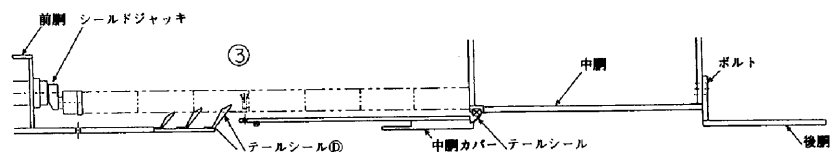


図-10 中胴外スキンプレート分離手順図

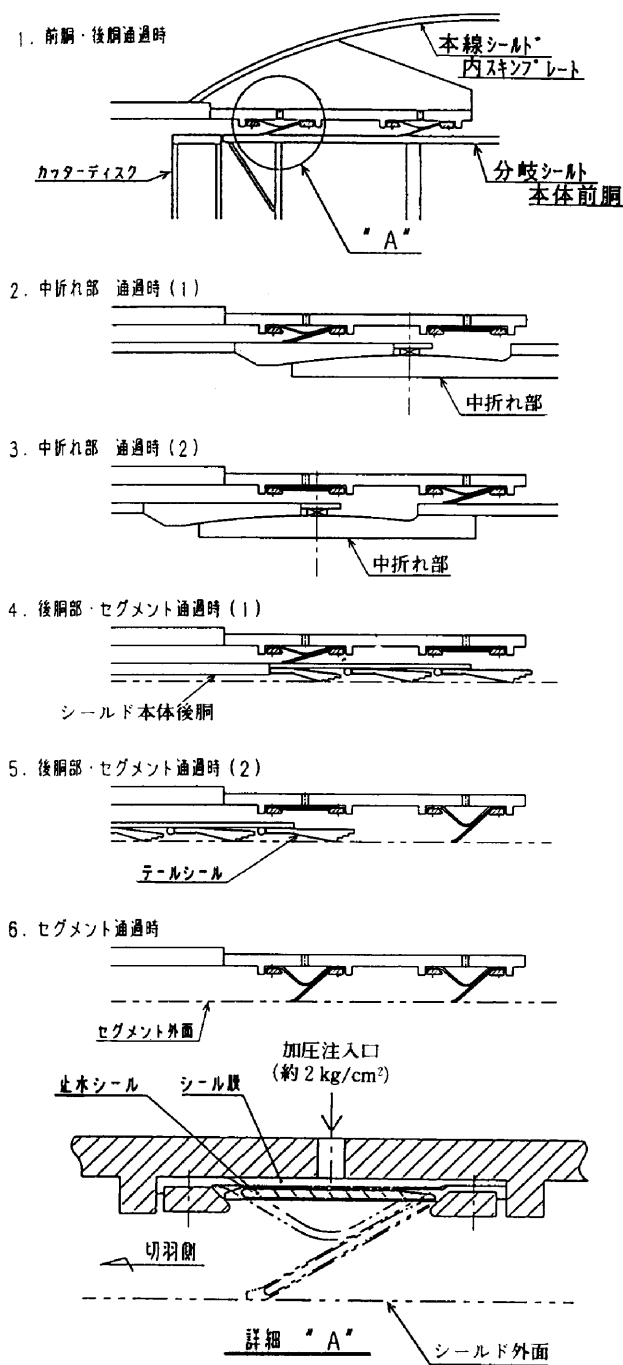


図-11 エントランスシールド図

3-3 中折れ角・余掘り量

急曲線に対するシールドの中折れ角および余掘り量を表-5に示す。

表-5 中折れ角及び余掘り量

カーブ半径	中折れ角		余掘り量
分岐前 60m	前胴/中胴 5.5°	中胴/後胴 6°	155.2 mm
分岐後 30m	前胴/中胴 7°		140.4 mm

3-4 二重スキンプレート方式の適用可能範囲

二重スキンプレート方式の適用可能範囲については、分岐セグメントの最小外径を2mとして、本線セグメント外径に対し適用できる分岐セグメント外径について検討した。その結果を図-12に示す。

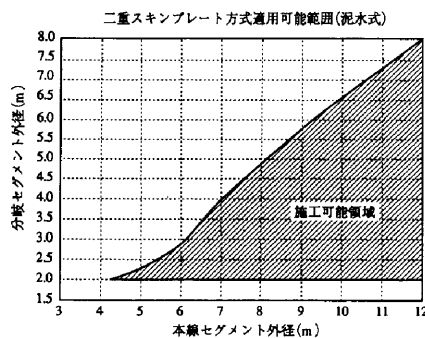


図-12 摘要範囲

§ 4. 分岐部の施工方法の検討

分岐部の作業手順を表-6に示す。地下莖工法は従来工法に比べ分岐作業が簡易であり、安全でシステム化されている。そのため、本線シールド外径7mクラスでの分岐作業は従来工法の約60%の109日（約3.5ヶ月）程度の作業で分岐が可能である。

§ 5. おわりに

本報告では、「地下莖工法」のうち二重スキンプレート方式について述べたが、他の方式についても検討を進め、より広範囲の分岐条件に対してより合理的な分岐シールド工法への開発を行っていく考えである。

また、「地下莖工法」は現状技術の効果的な組み合わせにより発展させたものであり、即、実工事への対応が可能であると判断している。従って今後は実工事での実証により、より効果的な工法への改善、工法全体についての経済性の追求を図っていく考えである。

参考文献

- 1) 桑原 他：技報Vol.17分岐シールド工法「地下莖工法」の開発（その1）
- 2) 大西 他：分岐シールド工法「地下莖工法」の開発，土木学会第49回年次学術講演会，第Ⅵ部，pp.432-433，1994
- 3) 内田 他：分岐シールド工法「地下莖工法」の開発，日本建設機械化協会，平成6年度建設機械と施工シンポジウム，No19 pp.96～99，1994

表-6 分岐作業手順

作業手順	概略図
<p>1. 分岐位置到達</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 中胴部と後方セグメントを固定するため、ライナー組込み溶接 ② 後方のシールドジャッキを撤去 ③ 中胴・後胴間の中折れ部固定 ④ 分岐シールドを仮推進させるため、中胴部の連結管を撤去 ⑤ 真円保持、架台撤去 ⑥ 分岐シールド後方台車設置及び配管 	
<p>2. 分岐シールド仮推進</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 分岐シールド後方に反力受けを設置して仮推進 ② 分岐シールド切羽部前面の泥水充填 ③ 本線シールドのセグメントを運搬するため、ホイストレールを延伸 <p>3. 本線シールド仮掘進</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 本線シールドの前胴部掘進(1R) ② 本線シールドの後方エレクターを撤去して前胴部へ移動設置 ③ 本線シールドの前胴部を掘進(4R) 	
<p>4. 分岐シールド発進仮設備</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 分岐シールドの反力受け、仮支保工設備の設置 ② 分岐シールドの送排泥管の残りを接続 ③ 計装設備配線 ④ 分岐シールドエレクター設置 ⑤ 分岐シールド配管内に泥水充填 ⑥ 分岐シールド前胴部推進(2R) <p>5. 分岐シールド初期掘進</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 分岐シールドの後胴スキンプレートを取付けるための設備を設置 ② 分岐シールドの後胴スキンプレートを取付け ③ 分岐シールド初期掘進 	
<p>6. 本線シールド本掘進</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 分岐シールド初期掘進完了(反力不用な位置及び後方設備が設置可能な距離まで掘進) ② 本シールド再掘進準備(分岐シールド用の仮セグメントを撤去) ③ 分岐用の発進台、反力受けを撤去 ④ 発進坑口処理及びコンクリート打設 ⑤ 本線シールドの軌道設備を設置 ⑥ 本線シールドの後方設備の設置及び配管配線 ⑦ 本線シールド真円保持装置の移動設置 ⑧ 内外スキンプレートに連結している結合ピン連結金具を撤去 ⑨ 本線シールドの本掘進 <p>7. 分岐シールド本掘進</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 本線シールドの掘進、発進坑口を本線シールド後方台車が過ぎた地点で分岐シールドの本段取り替え ② 分岐シールドの床及び軌道の整備 ③ セグメント引込み用のホイスト設備設置 ④ 後方設備を分岐トンネル内へ設置し、配線 ⑤ 泥水配管の接続及び本線・分岐シールドの同時掘進用制御設備設置テスト ⑥ 分岐シールドの本掘進 	