

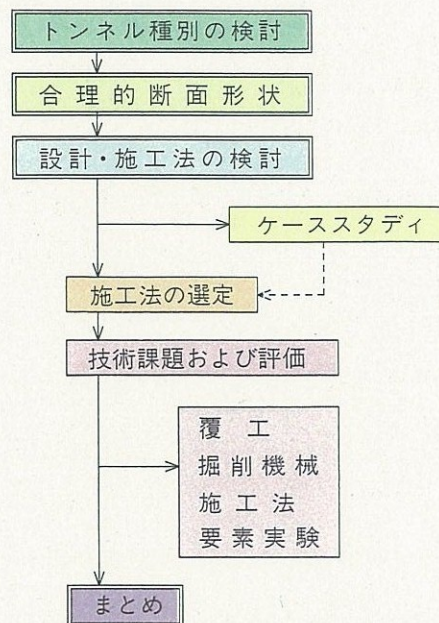
2. 研究概要

都市域のシールド工事では施工条件に制約が多く、シールドトンネルの分岐・接合部を立坑を介して地上から施工することが一段と難しくなっています。このことから、最近では地上に影響を与えない分岐・接合技術が求められてきました。

この研究は、開削工法となった場合に広い範囲に大きな影響を及ぼす地下道路トンネルのランプ部分に見られるような拡大（拡幅）区間と分岐するトンネルを持つ構造について合理的な形状と設計・施工法の研究を行ってきたものです。管径が近いトンネル同士の接合や、スムーズに分離する場合に有効な技術です。


研究は、昭和63年度から開始し、次の項目を実施しました。

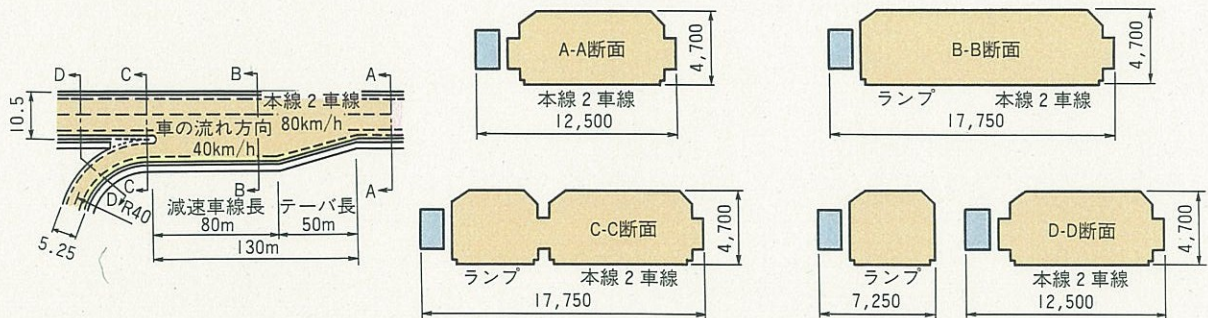
- トンネル種別の検討では、道路トンネルランプ部を念頭に置き、非開削工法で円形トンネルが遷移区間を経て2本の円形トンネルに分れる構造に絞り込みました。
- 合理的断面形状の検討では、遷移区間の形状として①大断面円形、②横二連円形、③多心円（楕円）形、④短形、を比較しました。



形状	覆工構造	覆工厚	不要空間	本線連続性	過去の実績	評価
大断面円形	RC	小	大	悪い	φ=14m迄	○
横二連円形	合成構造	大	無し	良い	無し	△
多心円形	//	中	小	良い	3×4.5m	◎
短形	//	大	小	やや悪い	× m	△

- 設計・施工法の検討では、まず遷移区間の形状が『大断面円形』と『多心円形』となる4つの施工法について開削工法と比較するケーススタディを実施しました。この結果（経済性）に加え、安全性、分離合流区間で立坑が必要か否か、等を考慮し、『分離方式』と『接合方式』を選定しました。
- 技術課題の整理および技術の評価を行うため、覆工、掘削機械、施工法を検討し、設計・施工マニュアル作成と、計画例を作成しました。また、シールド掘削方式の確認実験を実施し、マニュアルに反映させています。

計画例は、次の断面を想定しています。また、想定した施工条件を以下に示します。なお、の条件で、設計から施工計画までの一連の計画を作成しました。



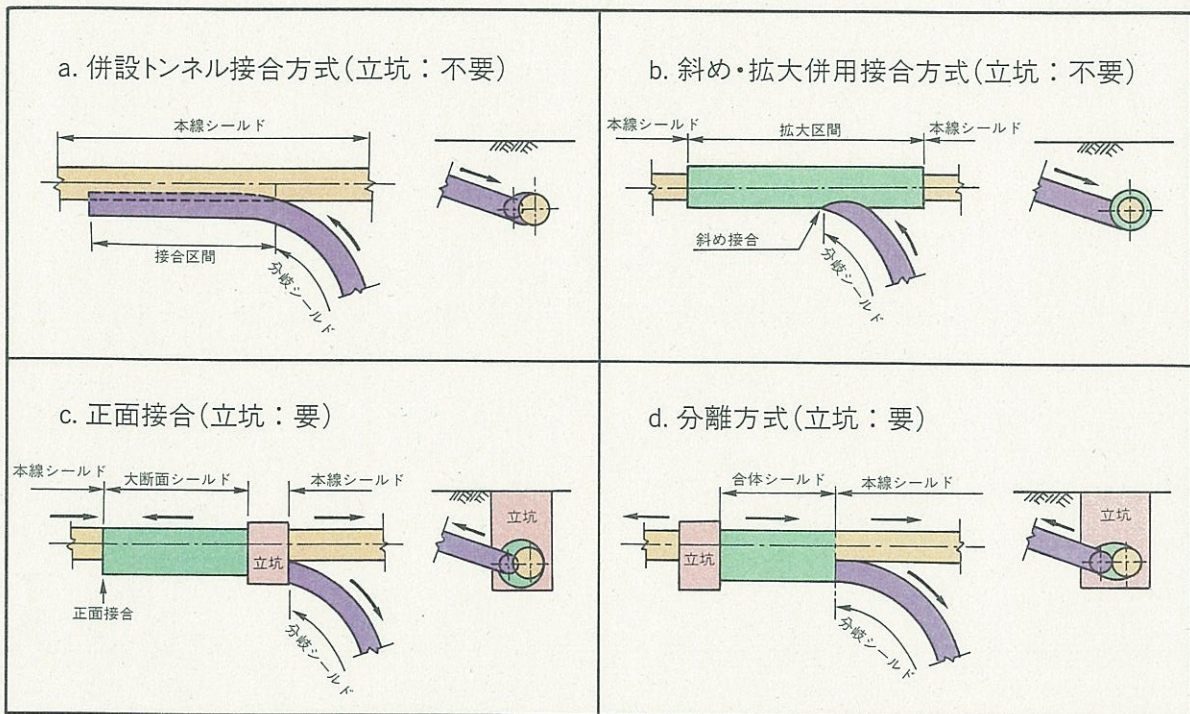
地盤条件	対象地盤	洪積砂質土				
	トンネル深度	30m				
	地下水高さ	GL-3.0m				
	側方土圧係数	$\lambda = 0.4$				
	地盤反力係数	$k = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$				
分岐合流形状	単位体積重量	$\gamma = 1.8 \text{ t/m}^3$ ($\gamma' = 0.8 \text{ t/m}^3$)				
	本線トンネル外径	5m		15m		
	分岐線トンネル外径	5m	3.3m	2.5m	15m	10m
計モデル	縦横比(高さ/横幅)	0.65, 0.7, 0.8				
	<ul style="list-style-type: none"> 土水分離 全土被り荷重考慮 剛性一様フレーム構造解析 					
使用容材力及び度	コンクリート	設計基準強度	σ_{ck} (kgf/cm ²)	420		
		許容曲げ圧縮応力度	σ_{ca} (kgf/cm ²)	140		
		ヤング係数	E_c (kgf/cm ²)	3.1×10^5		
	鉄筋	使用材料	SD35			
		許容引張応力度	σ_{sa} (kgf/cm ²)	2,000		
鋼材	材質	SM50A				
	許容引張応力度	σ_{sa} (kgf/cm ²)	1,900			
	許容せん断応力度	τ_{sa} (kgf/cm ²)	1,000			

(注) 併設トンネル接合方式について示す。
(シールド分離方式についても同様)

(注) 覆工の剛性は高強度セグメントの値を採用した。なお、併設トンネル接合方式の場所打ち鉄筋コンクリート部については、求められた断面よりRC計算を行い設定した。

3. 施工法の選定とその特徴

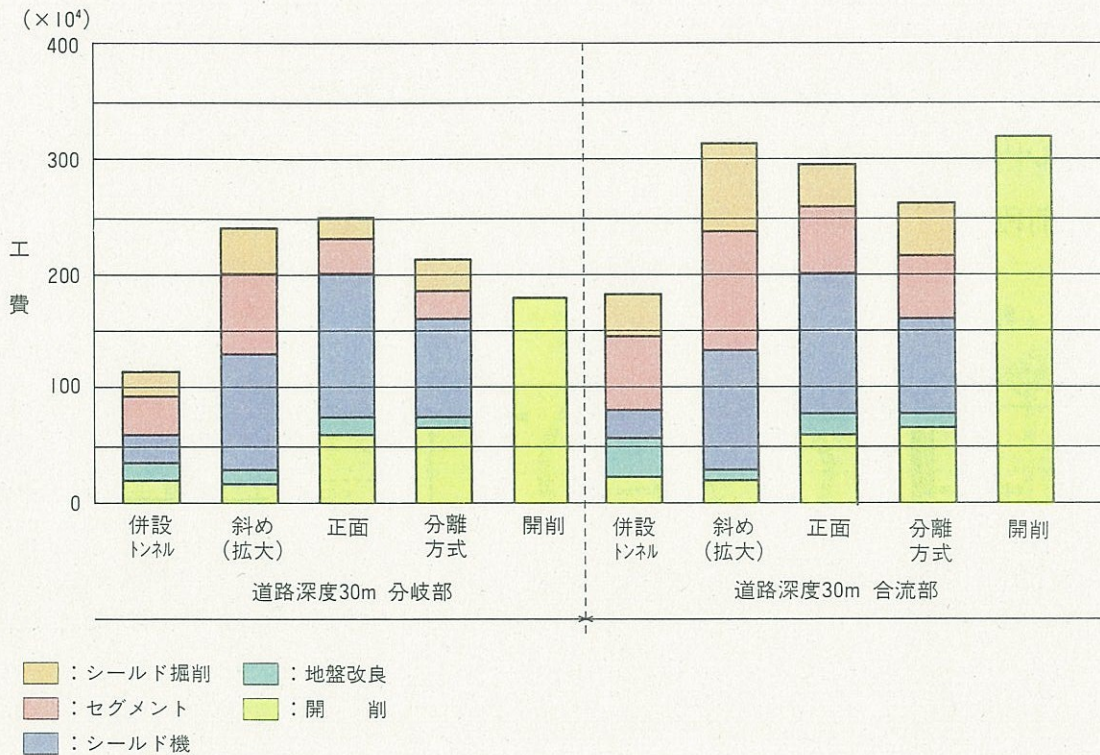
施工法の選定では、次の4ケースに開削を加えた5ケースについて比較しています。



ケーススタディ

2車線道路トンネルの分岐合流部での経済性を比較したケーススタディ結果を以下に要約します。ここでは分岐合流部と斜路部分とを含む比較を行っています。

- ①シールドを使ういずれの方式もトンネル深度が増すほど優位性が現れます。
- ②接合方式はこの中でも最も経済性で優れています。開削工法と比較した場合、道路深度が20mと浅くともほぼ同等になります。
- ③その他のシールド工法は、余り大きな差はありませんが、比較的分離方式が優れています。開削との比較では、道路深度が30mでほぼ同等となります。



施工法の選定

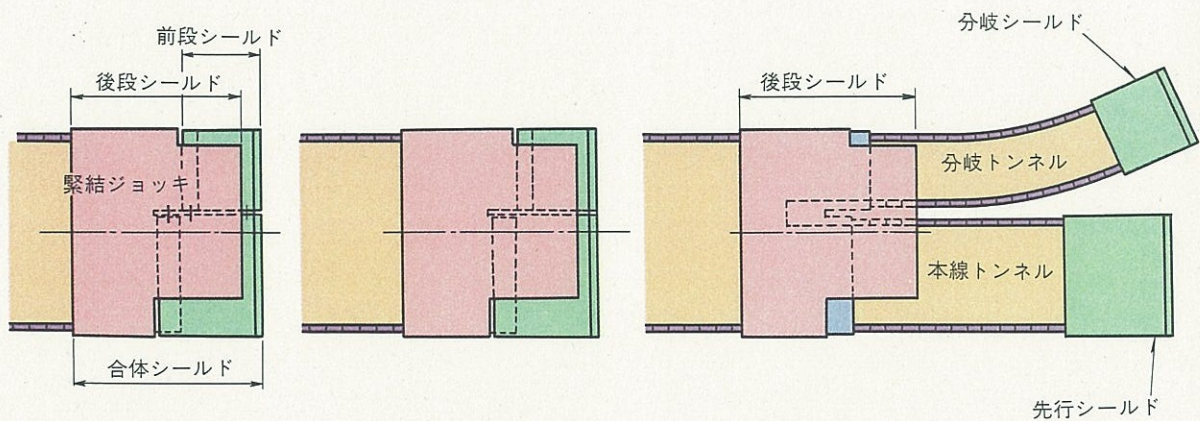
施工法は、経済性に加えて、安全性、立坑の要否、本線が併設トンネルとなる場合の適用性などが評価の対象になります。ここで、接合方式は経済性に加え、様々な条件下で採用できますが、地中を切り広げるなど安全性の面では劣ります。

一方分離方式は経済性の面で今一步ですが、施工はいずれもトンネル内からでき、安全性の面では逆に優れています。

このような特徴を踏まえ、『分離方式』と『接合方式』が選定されました。

分離方式の概要

この方式は、複数の分離する円形シールドを前段に置き、この前段シールドを包括する断面の後段シールドを一体とした合体シールドで、分岐・合流部の多心円形の断面を掘進します。分岐する地点で後段のシールドを反力として、前段のシールドを個別に発進するものです。

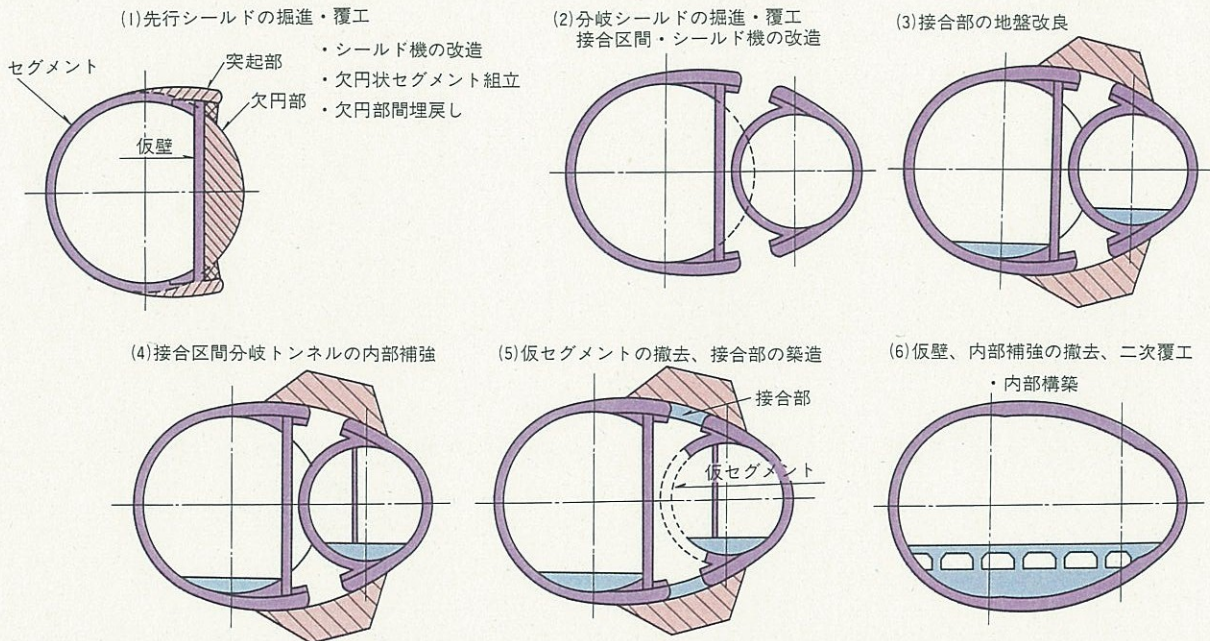


この方式は、以下の特徴があります。

- ①断面の有効利用 遷移区間（分合流部）では円形に比較し、不要空間が少なくなります。
- ②安定した本体構造 遷移区間（分合流部）は多心円形、分離後の本線、ランプトンネルは円形と内部の支保や補強は必要ありません。
- ③連続性に優れた構造 多心円形となる遷移区間（分合流部）は、高強度セグメントを使用しますので、桁高を本線部と同程度に抑さえることができ、スムーズな連続構造を実現できます。
- ④施工性に優れる工法 坑内での作業であり安全性、信頼性に優れています。また、大規模な補助工法は不要で、工期短縮が期待できます。

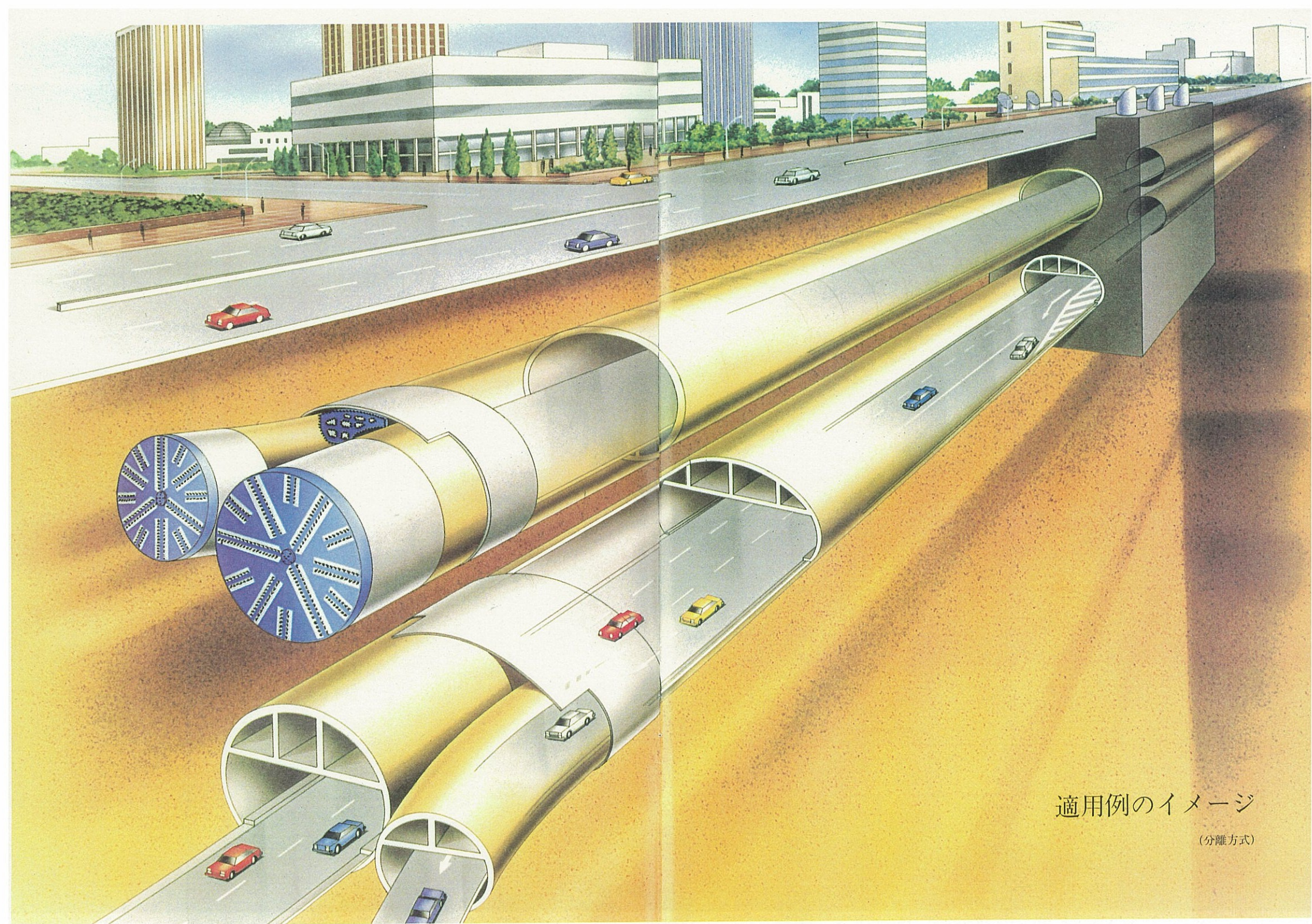
接合方式の概要

先行シールドを掘進し、分岐・接合区間では隔壁を有する欠円状の特殊セグメントで覆工を行います。この欠円部に食い込ませる形で分岐シールドを掘進し、その双方のトンネル間の部材を取り除き一体化することにより、分岐部や合流部を築造します。



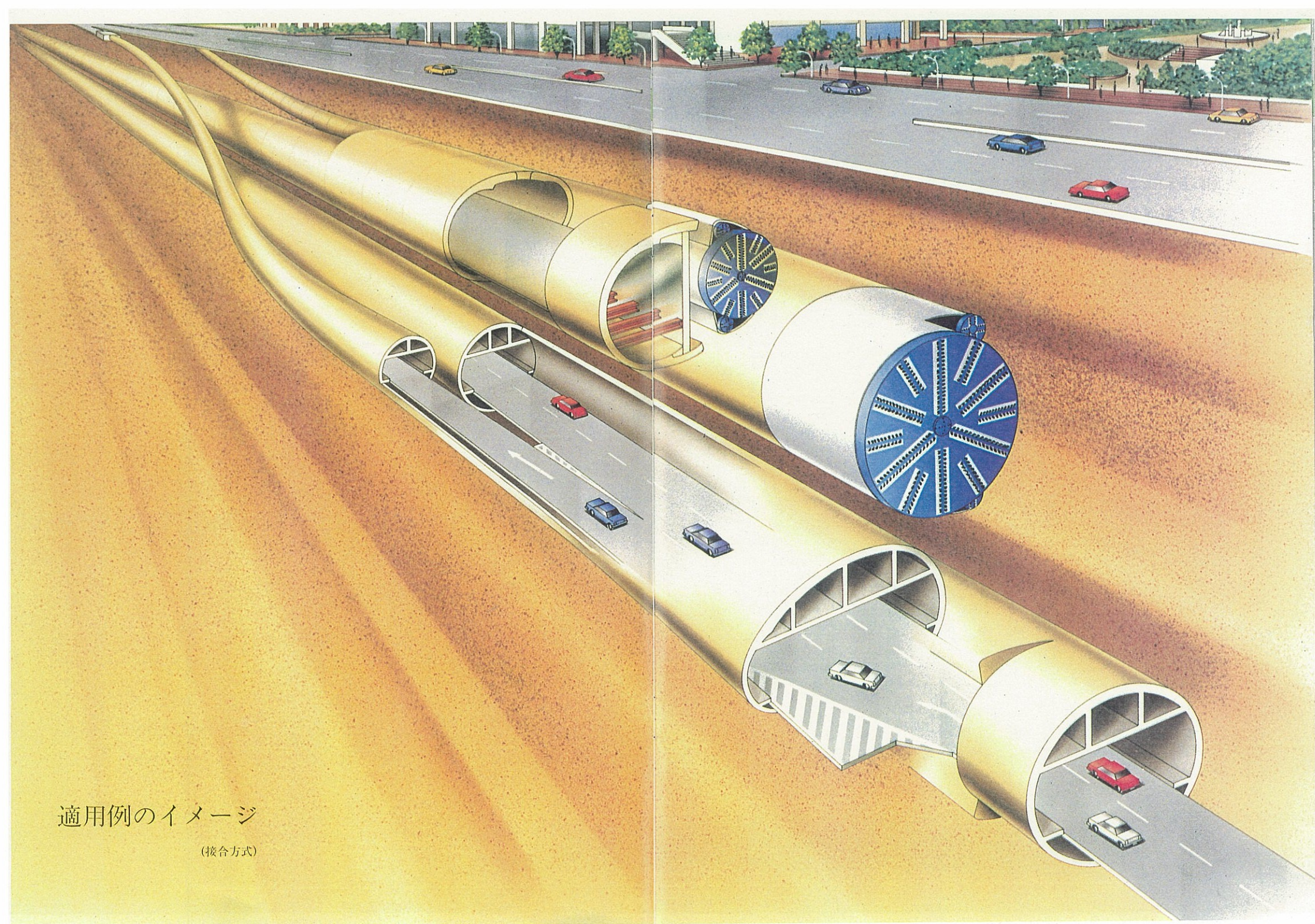
この方式は、以下の特徴があります。

- ①断面の有効利用 遷移区間（分合流部）では円形に比較し、不要空間が少なくなります。
- ②各種条件下での適用性 この構造を構築するために立坑などは特に必要無く、周辺環境に影響されずに適用できます。
- ③本体構造の有効活用 接合するシールドトンネルの覆工に高強度セグメントを使用しますので、接合後の構造としてもそのまま利用でき、経済性が増します。



適用例のイメージ

(分離方式)



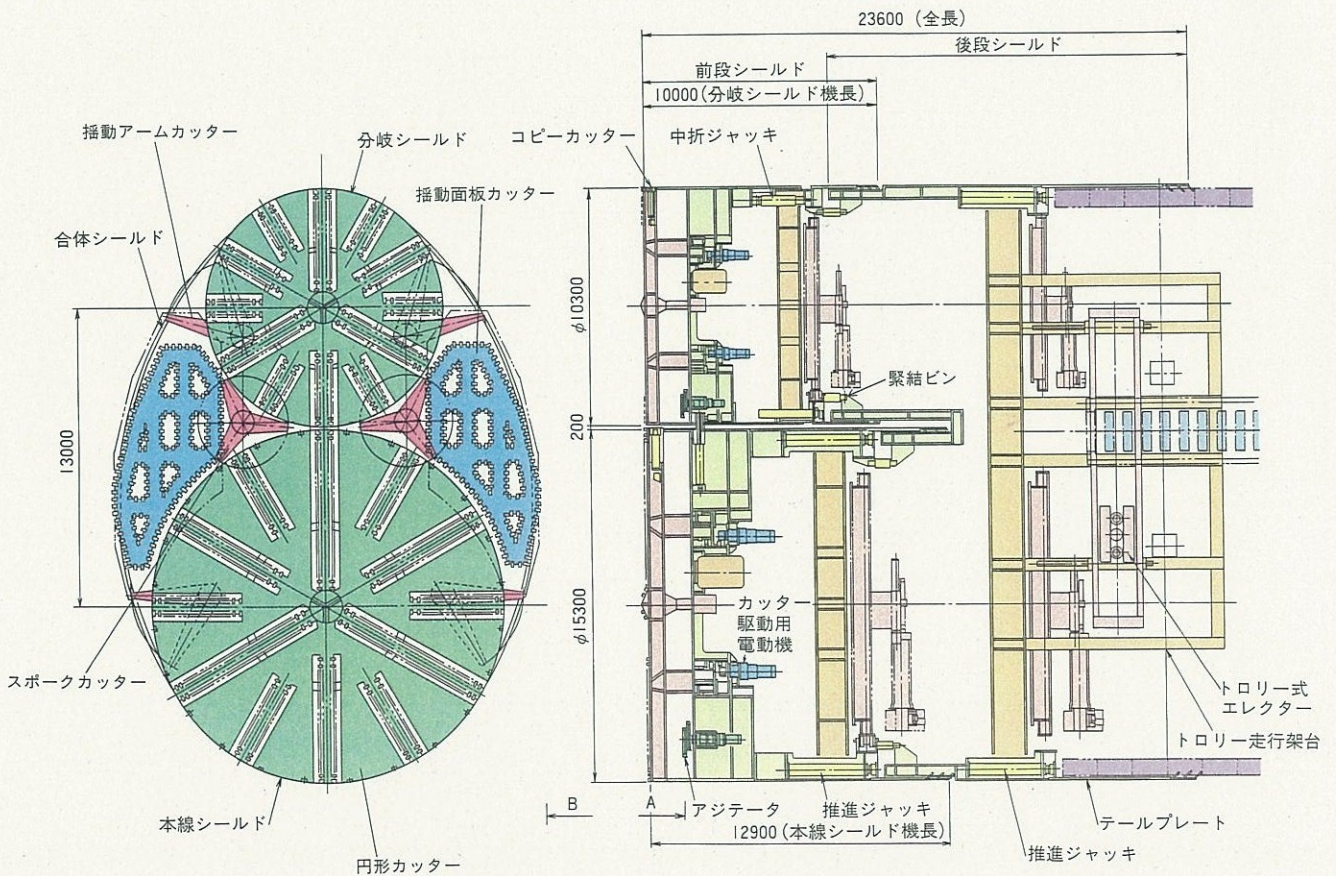
適用例のイメージ

(接合方式)

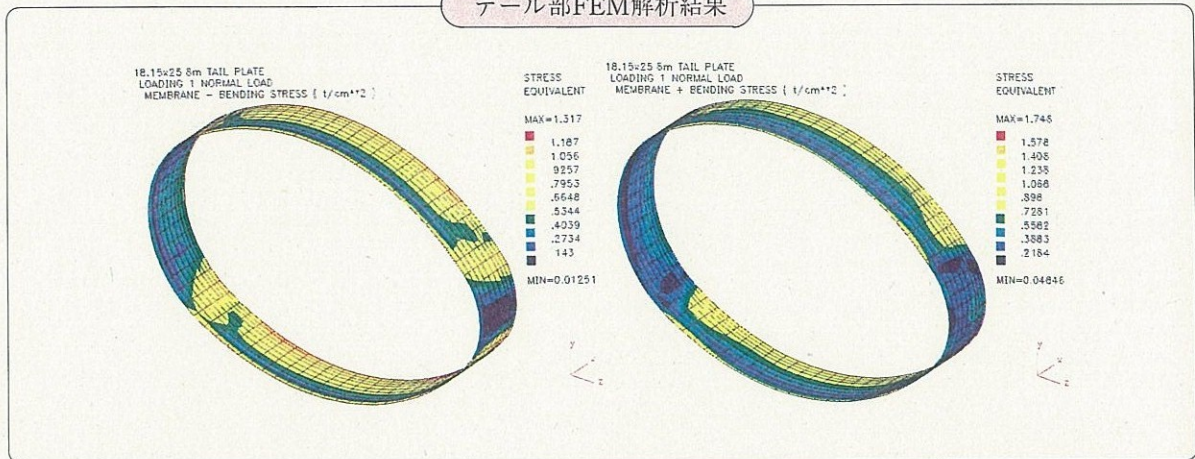
4. 分離方式の設計・施工法

シールド機

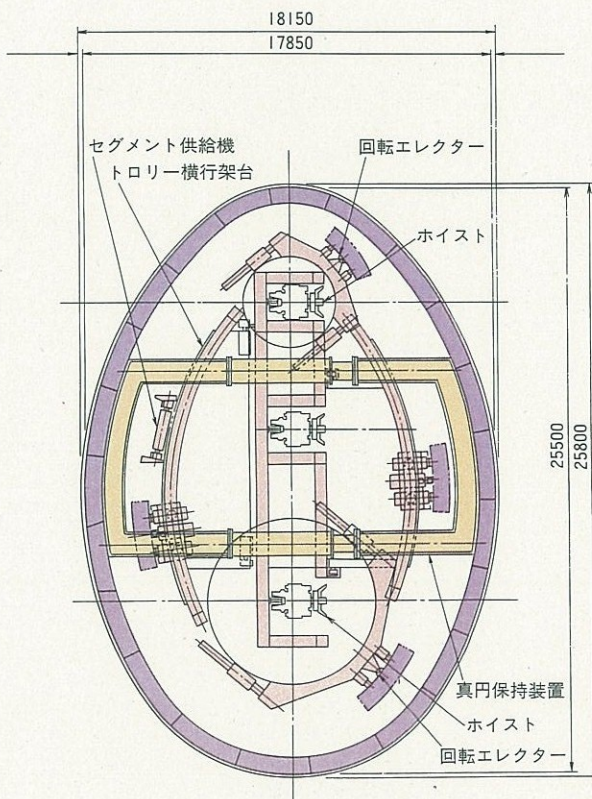
- ・回転運動により地盤を掘削する円形カッターとスポークカッター、往復運動で掘削する揺動アームカッターと揺動面板カッターを組み合わせ、多心円形の断面を掘削します。
- ・前段シールドと後段シールドの2重構造とし、緊結ピンで連結します。
- ・分離後は円形の前段シールドが個別に発進します。
- ・シールド形式は泥水式、土圧式のどちらにも適用できます。



テール部FEM解析結果



シールドの仕様



	本線シールド	分枝シールド	合体シールド
外 径	φ15300mm	φ10300mm	18150mm × 25800mm
機 長	12900mm	1000mm	23600mm
掘 削 面 積	184 m ²	83 m ²	362 m ²
総 推 力	20400T	9600 T	40800 T
単位面積当たり推力	111 T/m ²	116 T/m ²	113 T/m ²
シールドジャッキ容量	425T × 48本	300T × 32本	600T × 68本
カッタ形式と容量	円形面板カッタ 常用 3940 t-m (α=1.1) 最大 4730 t-m (α=1.32)	電動駆動方式 常用 1200 t-m (α=1.1) 最大 1440 t-m (α1.32)	本線シールド + 分枝シールド
	摺動面板カッタ		油圧シリンダ方式 常用 540t × 2台 (κ=1.2) 最大 675 × 2台 (α=1.65)
	回転スポーツカッタ		電動駆動方式 常用 70t-m × 2台 (α=1.1) 最大 105t-m × 2台 (α=1.65)
	摺動アームカッタ		油圧シリンダ方式 常用 140t-m × 4台 (κ・α=1.63) 最大 180t-m × 4台 (κ・α=2.1)

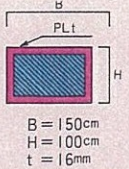
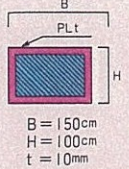
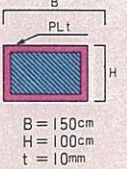
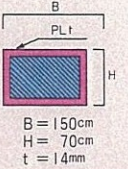
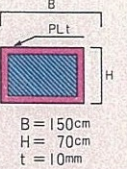
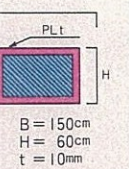
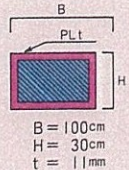
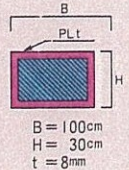
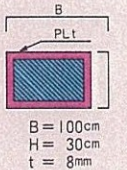
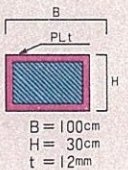
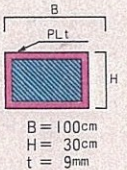
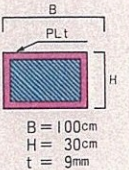
注記
α: カッタトルク係数
κ: カッタ摺動安全係数

覆工

- ・多心円形の断面となるので、強度面で有利な高強度セグメント（外周が鉄板、内部がコンクリートの合成構造）を基本に考えています。

覆工断面の検討では、本線トンネル径：分岐トンネル径を1:1, 3:2, 3:1の組み合わせとし、縦横比を0.65~0.80に変化させて発生応力度をチェックしました。

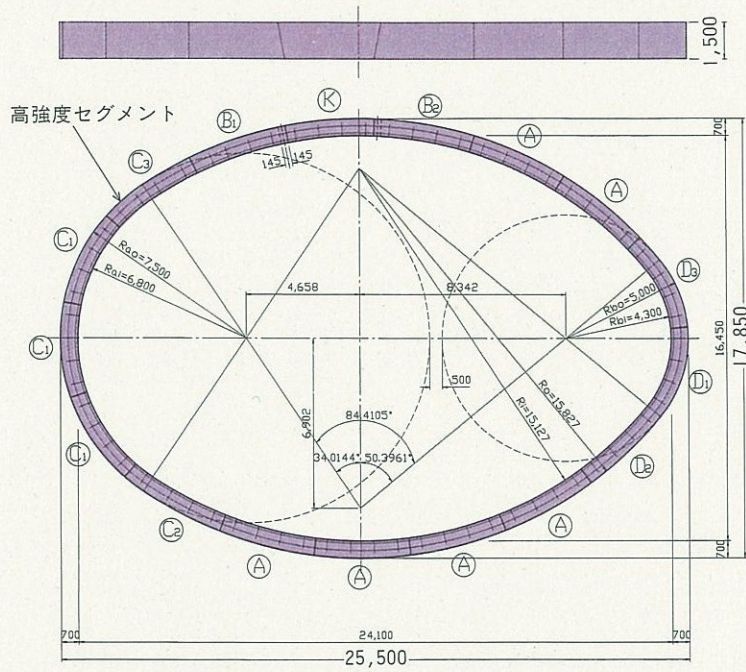
応力計算表

検討ケース		15-15-0.65	15-15-0.7	15-15-0.8	15-10-0.7	15-10-0.8	15-7.5-0.8	
断面形状		 B = 150cm H = 100cm t = 16mm	 B = 150cm H = 100cm t = 10mm	 B = 150cm H = 100cm t = 10mm	 B = 150cm H = 70cm t = 14mm	 B = 150cm H = 70cm t = 10mm	 B = 150cm H = 60cm t = 10mm	
断面力	曲げモーメント M(tm/m)	287.60	165.90	96.40	142.00	83.70	75.70	
	軸力 N(t/m)	755.40	682.10	529.30	608.80	486.10	462.10	
	剪断力 S(t/m)	66.66	40.27	42.17	40.88	44.75	43.56	
応力度	コンクリート圧縮応力度 (kgf/cm ²)	124.0	105.4	71.5	118.2	94.2	102.8	
	鋼材 鉄筋	引張応力度 (kgf/cm ²)	352.8	—	—	130.6	—	—
	圧縮応力度 (kgf/cm ²)	1860.0	1572.4	1067.3	1773.0	1403.0	1529.3	
	剪断応力度 (kgf/cm ²)	312.5	302.1	316.3	312.9	479.5	544.5	
検討ケース		5-5-0.65	5-5-0.7	5-5-0.8	5-3.33-0.7	5-3.33-0.8	5-2.5-0.8	
断面形状		 B = 100cm H = 30cm t = 11mm	 B = 100cm H = 30cm t = 8mm	 B = 100cm H = 30cm t = 8mm	 B = 100cm H = 30cm t = 12mm	 B = 100cm H = 30cm t = 9mm	 B = 100cm H = 30cm t = 9mm	
断面力	曲げモーメント M(tm/m)	-47.17 +45.11	-33.67 +31.67	-27.41 +15.96	-52.73 +40.59	-35.70 +21.17	-40.58 +24.93	
	軸力 N(t/m)	307.69 272.06	263.96 257.07	277.59 234.93	252.40 202.63	240.89 195.0	219.73 172.43	
	剪断力 S(t/m)	55.1	39.5	46.7	49.2	52.4	52.9	
応力度	コンクリート圧縮応力度 (kgf/cm ²)	126.8 117.7	123.3 112.5	107.3 —	120.4 94.0	110.0 74.1	116.0 77.6	
	鋼材 鉄筋	引張応力度 (kgf/cm ²)	439.4 487.9	202.0 254.9	45.8 —	710.6 521.4	398.9 71.0	649.2 264.3
	圧縮応力度 (kgf/cm ²)	1902 1767	1849.5 1687.5	1609.5 —	1806 1410	1651.5 1111.5	1740 1164	
	剪断応力度 (kgf/cm ²)	900.9	869.3	1027.7	742.8	1032.3	1042.2	

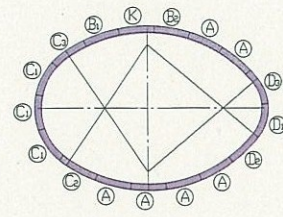
注：検討ケース15-10-0.7は、本線トンネル径15m、分岐トンネル径10mで縦横比0.7の意味

道路トンネルの分岐、合流部を想定したセグメント計画例です。

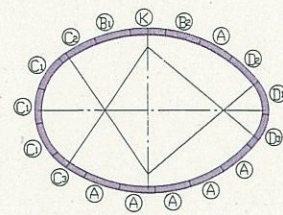
組立図 (甲組)



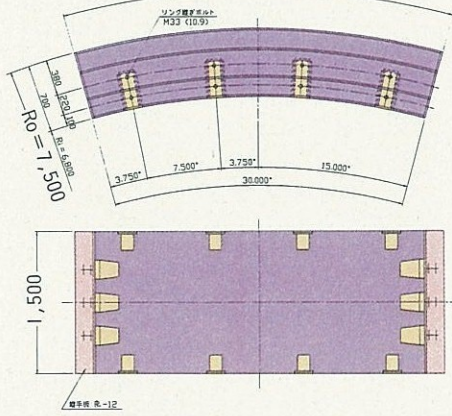
甲組



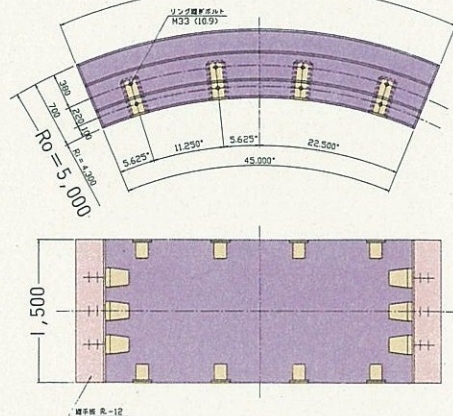
乙組



C_i 型セグメント
3927.0 (外周寸法)



D_i 型セグメント
3927.0 (外周寸法)



施工法

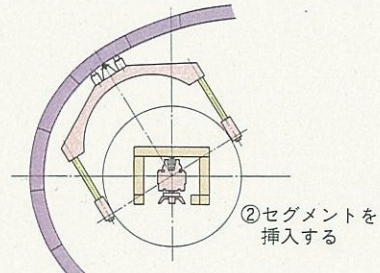
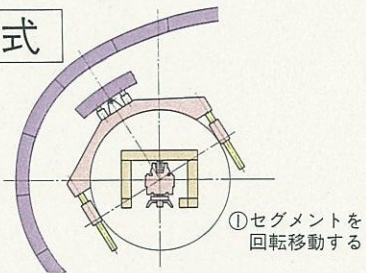
本方式の施工順序は次の通りです。

- ①合体型シールドの掘進
- ②前段エレクターへの切り替え
- ③前段ジャッキへの切り替え
- ④後段テールプレートの取り外し
- ⑤緊結ピンの取り外し
- ⑥前段シールドの掘進

分岐地点の
シールド機内作業

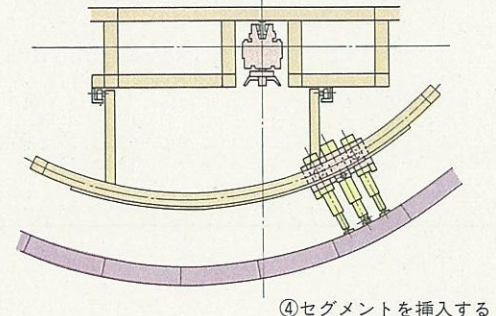
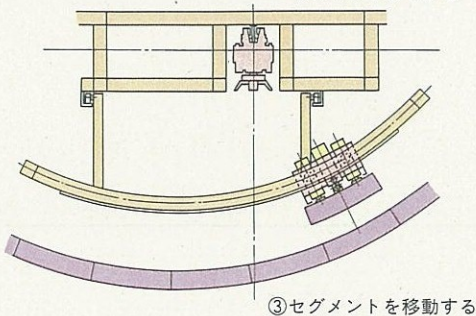
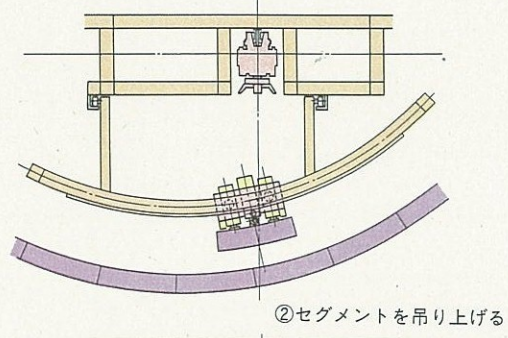
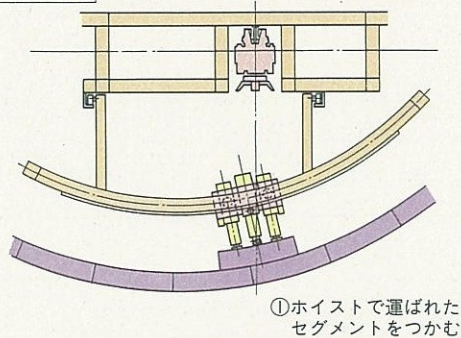
セグメントの組み立てには、回転式とトロリー式のエレクターを使います。

回転式

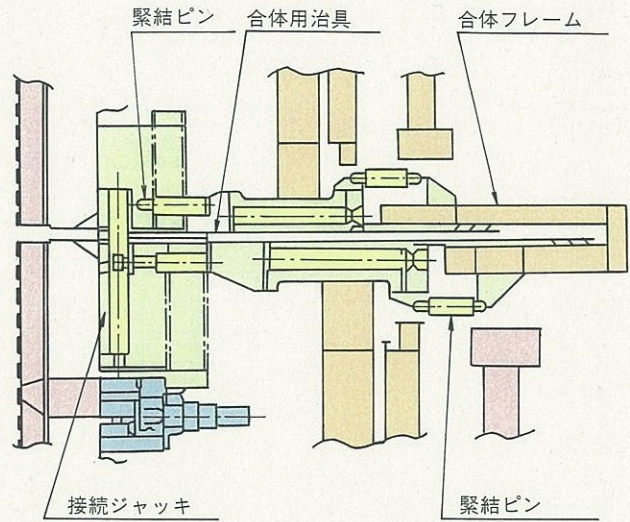


トロリー式

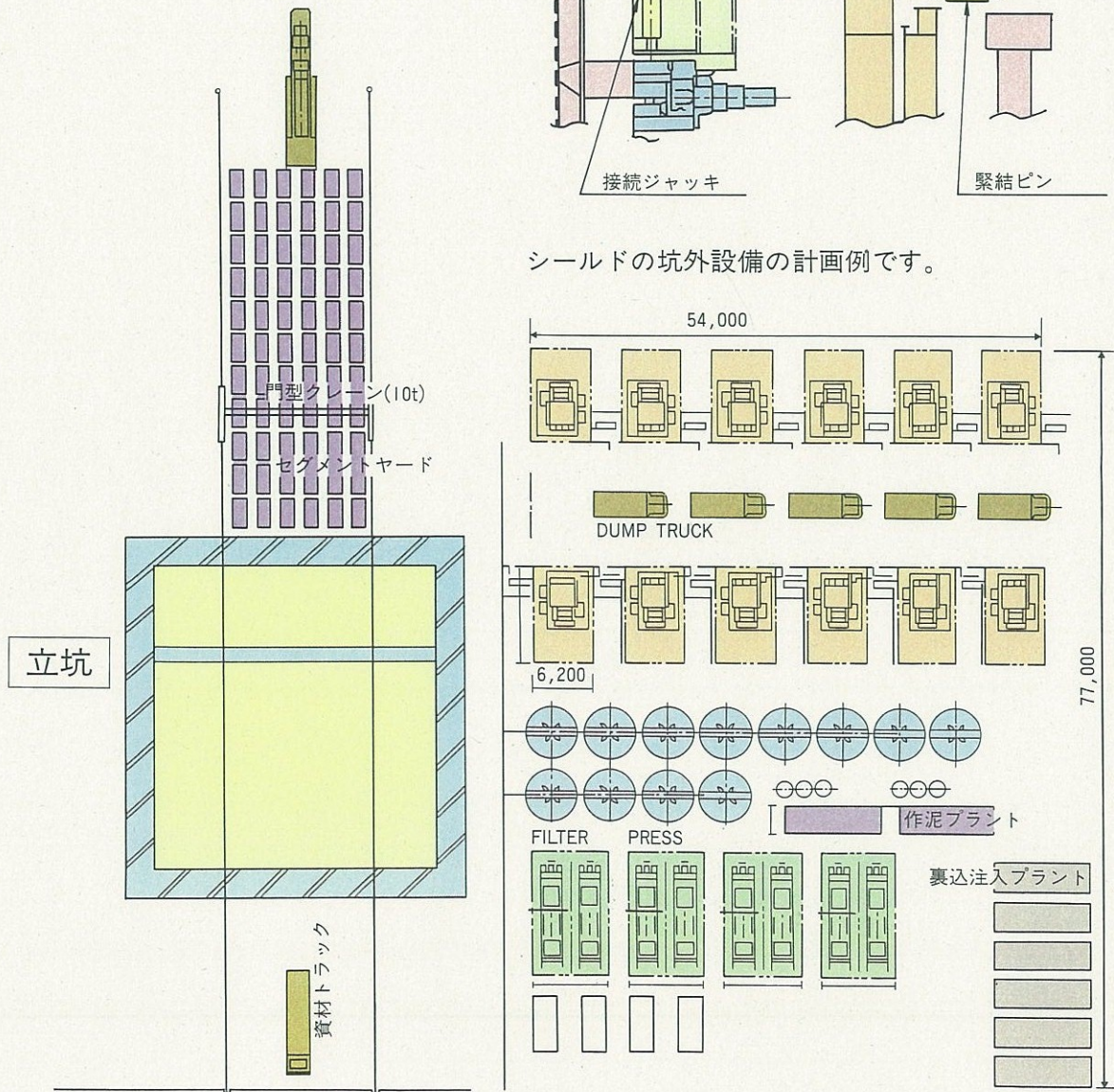
トロリー式エレクターによる組立要領



分離時には、後段シールドのテールプレートを取り外した後、ジャッキ操作で緊結ピンを抜いて前段シールド相互を分離します。



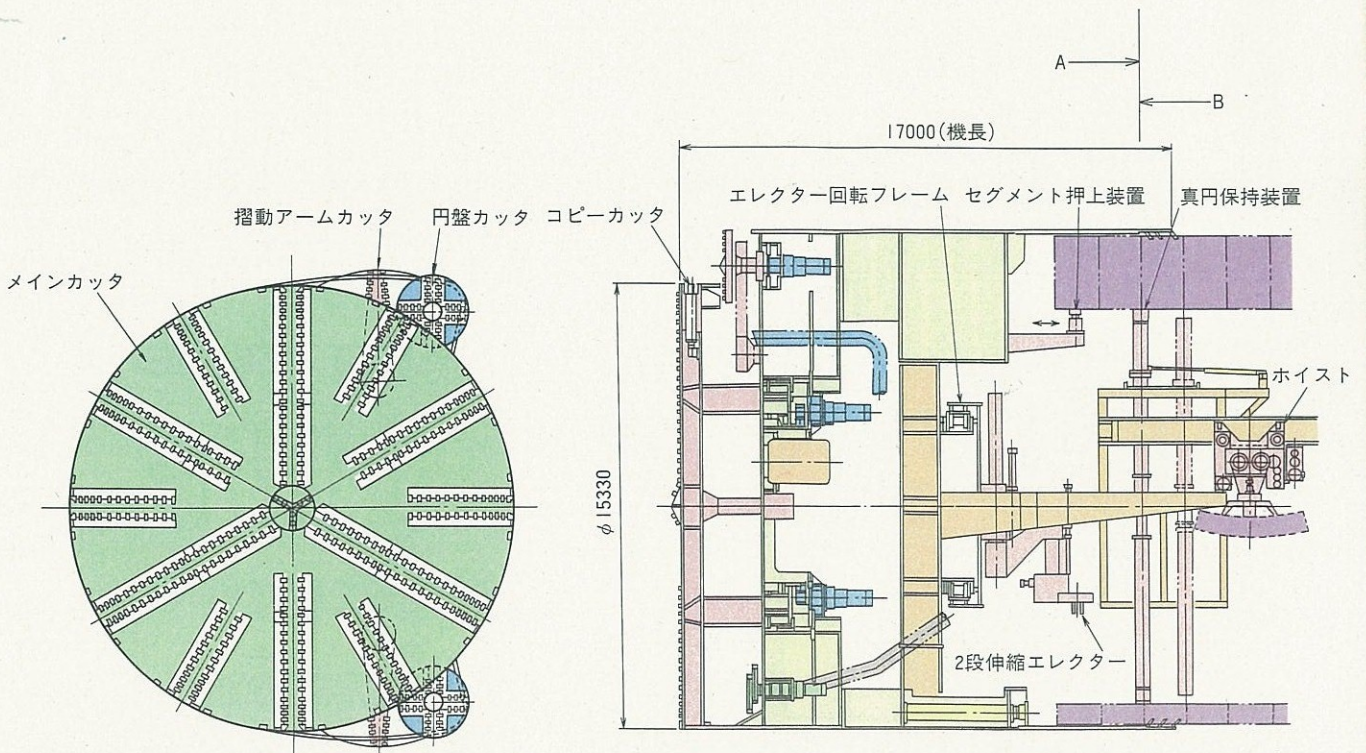
シールドの坑外設備の計画例です。



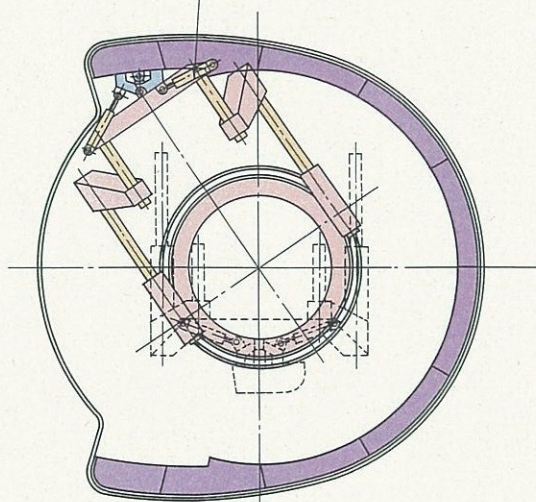
5. 接合方式の設計・施工法

シールド機

- ・本線と分岐トンネルの全線を突起付きシールドで掘進します。
(トンネル形状は、一般部が円形、接合区間が突起付き形)
- ・突起部の掘削は、円形カッターと揺動アームカッターで行います。
- ・分岐シールドは先行する本線シールド内の埋め戻し材を掘削します。
- ・シールド形式は泥水式、土圧式のどちらにも適用できます。



セグメント傾転装置



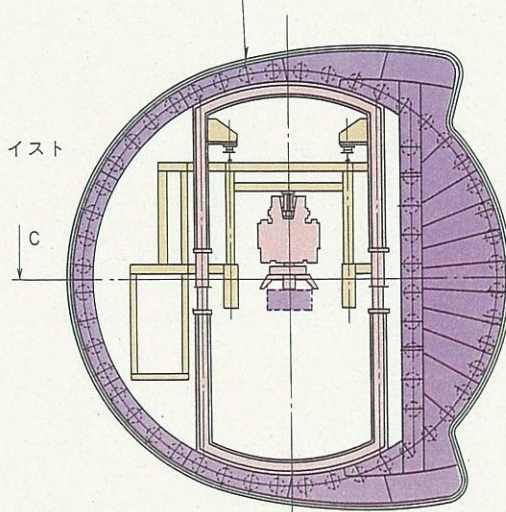
突起セグメント組立要領
(B矢視)

シールドの仕様

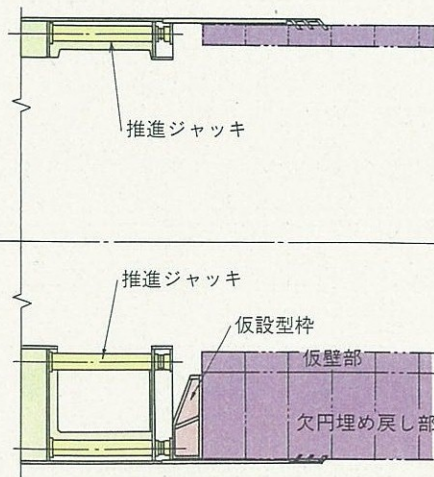
	本線シールド	分岐シールド	
外径	φ15300mm	φ10300mm	
機長	17000mm	11700mm	
掘削面積	円形部 183.8㎡	円形部 83.3㎡	
	突起部 9.5㎡	突起部 5.0㎡	
	合計 193.3㎡	合計 88.3㎡	
総推力	21600 T	11400 T	
単位面積当たり推力	112 T/㎡	129 T/㎡	
シールドジャッキ容量	425T×58本 (内10本は仮壁部用)	300T×38本 (内6本は仮壁部用)	
カッタ形式と容量	円形面板カッタ	電動駆動方式 常用 3940 t-m ($\alpha=1.1$) 最大 4730 t-m ($\alpha=1.32$)	電動駆動方式 常用 1200t-m ($\alpha=1.1$) 最大 1440t-m ($\alpha=1.32$)
	円板カッタ	電動駆動方式 常用 17.2t-m×2台 ($\alpha=1.1$) 最大 25.8t-m×2台 ($\alpha=1.65$)	電動駆動方式 常用 17.2t-m×2台 ($\alpha=1.1$) 最大 25.8t-m×2台 ($\alpha=1.65$)
	摺動アームカッタ	油圧シリンダ方式 常用 180t-m×2台 ($\alpha \cdot \kappa=1.64$) 最大 230t-m×2台 ($\kappa \cdot \alpha=2.1$)	油圧シリンダ方式 常用 50.0t-m×2台 ($\kappa \cdot \alpha=1.60$) 最大 65.5t-m×2台 ($\kappa \cdot \alpha=2.1$)

注記
 α : カッタトルク係数
 κ : カッタ揺動安全係数

推進ジャッキ



埋め戻し部組立要領
(A矢視)



欠円埋め戻し部S/J押付要領
(C矢視)

覆工

- 多心円形の断面となるので、強度面で有利な高強度セグメント（外周が鉄板、内部がコンクリートの合成構造）を基本に考えています。

覆工断面の検討では、本線トンネル径：分岐トンネル径を1:1、3:2、3:1の組み合わせとし、縦横比を0.65~0.80に変化させて発生応力度をチェックしました。

応力計算表

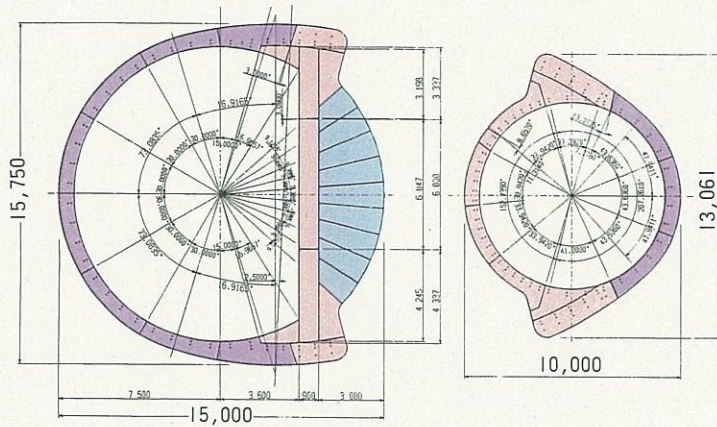
検討ケース		15-15-0.65		15-15-0.7		15-15-0.8		15-10-0.7	
断面形状		合成セグメント	場所打ちコンクリート(接合部)	合成セグメント	場所打ちコンクリート(接合部)	合成セグメント	場所打ちコンクリート(接合部)	合成セグメント	場所打ちコンクリート(接合部)
断面形状									
断面力		曲げモーメント M(t/m)	331.1	375.0	218.8	224.6	81.1	73.1	191.9
断面力		軸力 N(t/m)	678.8	603.4	628.0	562.4	517.6	480.8	560.7
応力度		コンクリート圧縮応力度 (kgf/cm ²)	123	131	107	131	58	79	123
応力度		鋼材引張応力度 (kgf/cm ²)	755	1163	385	790	—	—	629
応力度		鉄筋圧縮応力度 (kgf/cm ²)	1842	1719	1602	1690	872	1076	1848
検討ケース		15-10-0.8		15-7.5-0.8		5-5-0.65		5-5-0.7	
断面形状		合成セグメント	場所打ちコンクリート(接合部)	合成セグメント	場所打ちコンクリート(接合部)	合成セグメント	場所打ちコンクリート(接合部)	合成セグメント	場所打ちコンクリート(接合部)
断面形状									
断面力		曲げモーメント M(m/m)	75.6	63.6	83.6	61.5	60.9	87.2	32.9
断面力		軸力 N(t/m)	453.9	439.4	435.6	416.0	225.4	193.2	239.4
応力度		コンクリート圧縮応力度 (kgf/cm ²)	78	117	96	138	90	127	127
応力度		鋼材引張応力度 (kgf/cm ²)	—	—	150	146	607	1694	554
応力度		鉄筋圧縮応力度 (kgf/cm ²)	1169	1466	1440	1622	1313	—	1879
検討ケース		5-5-0.8		5-3.33-0.7		5-3.33-0.8		5-2.5-0.8	
断面形状		合成セグメント	場所打ちコンクリート(接合部)	合成セグメント	場所打ちコンクリート(接合部)	合成セグメント	場所打ちコンクリート(接合部)	合成セグメント	場所打ちコンクリート(接合部)
断面形状									
断面力		曲げモーメント M(t/m)	17.6	19.8	54.3	49.1	33.0	24.7	38.3
断面力		軸力 N(t/m)	203.8	202.0	193.2	166.7	183.5	164.9	173.3
応力度		コンクリート圧縮応力度 (kgf/cm ²)	82	124	110	138	117	140	129
応力度		鋼材引張応力度 (kgf/cm ²)	33	—	925	1725	799	460	1113
応力度		鉄筋圧縮応力度 (kgf/cm ²)	1217	—	1601	—	1730	—	1899

注：検討ケース15-10-0.7は、本線トンネル径15m、分岐トンネル径10mで縦横比0.7の意図

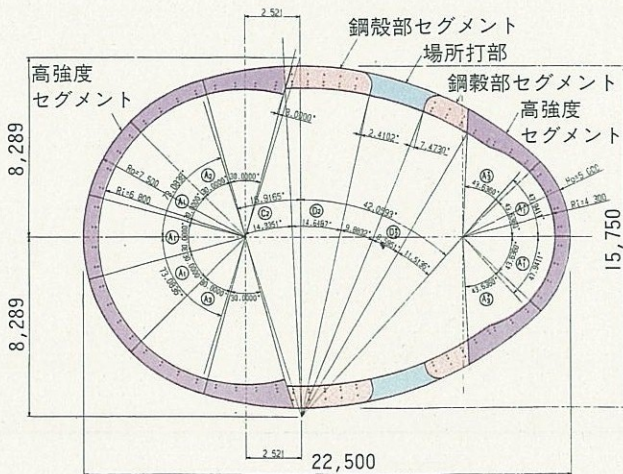
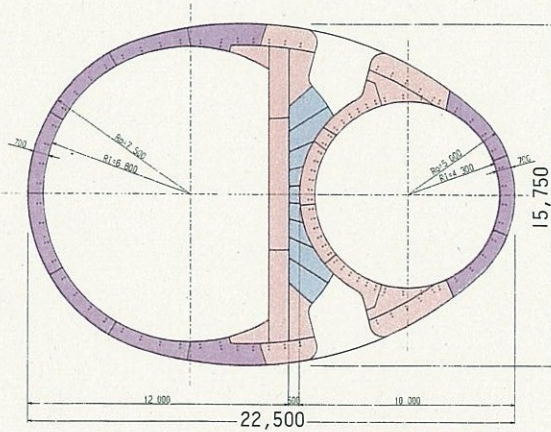
道路トンネルの分岐、合流部を想定したセグメント計画例です。

先行(本線)シールド組立図

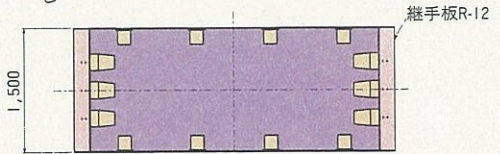
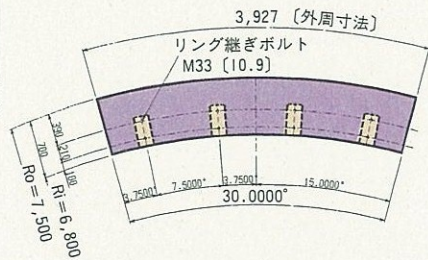
分岐シールド組立図



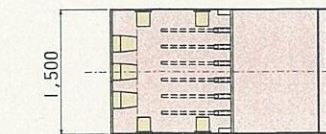
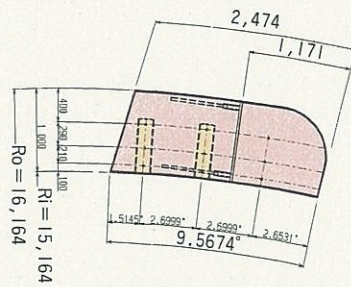
接合状態図



先行(本線)シールド高強度セグメント〔甲組〕



先行(本線)シールド鋼殻部〔甲組〕

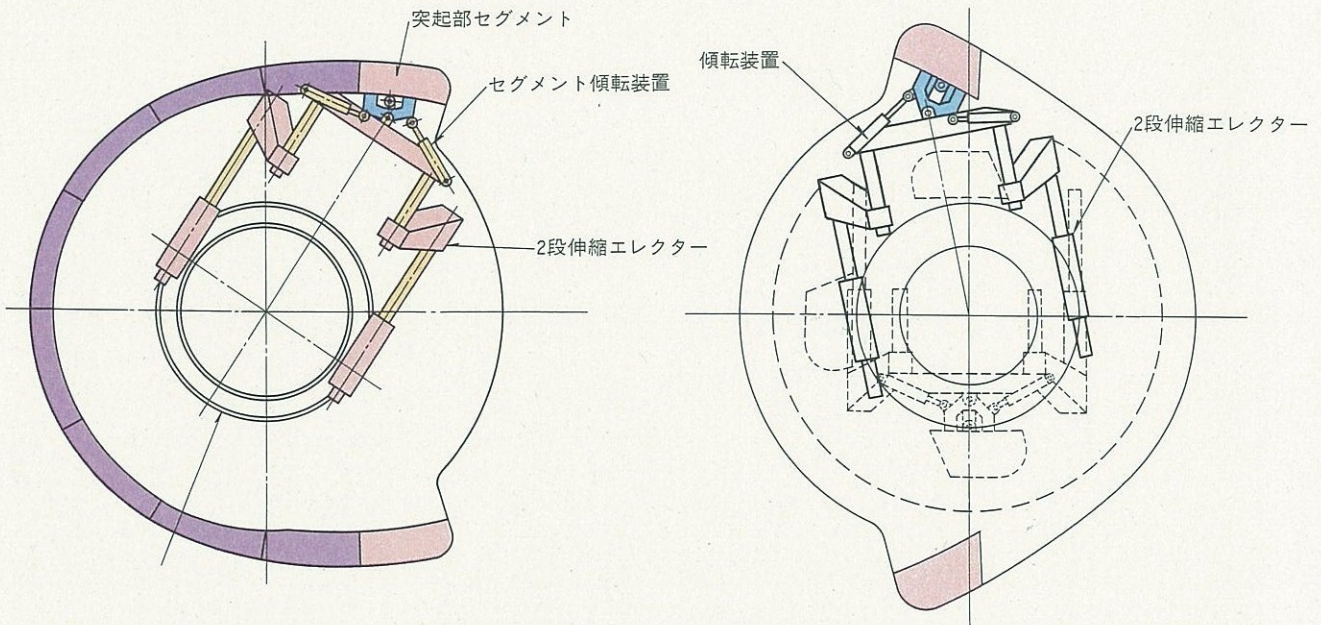


施工法

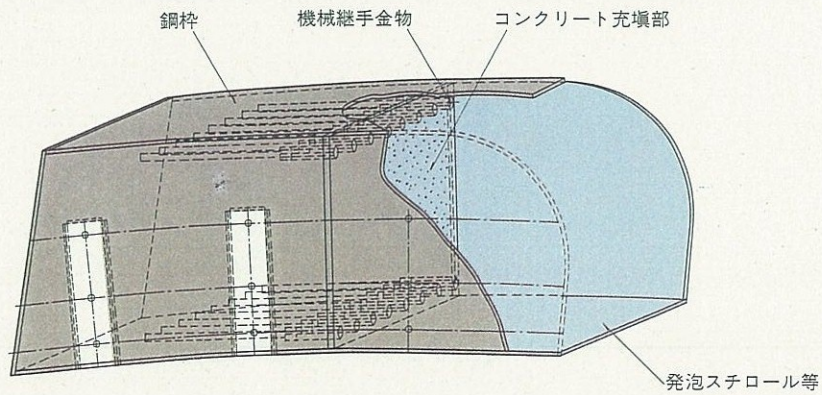
本方式の施工順序は次の通りです。

- | | |
|-------------------|-------------|
| ①先行(本線)シールドの掘削・覆工 | ⑤仮セグメントの撤去 |
| ②分岐シールドの掘進・覆工 | ⑥接合部の築造 |
| ③接合部の地盤改良 | ⑦仮壁、内部補強の撤去 |
| ④分岐トンネルの内部補強 | |

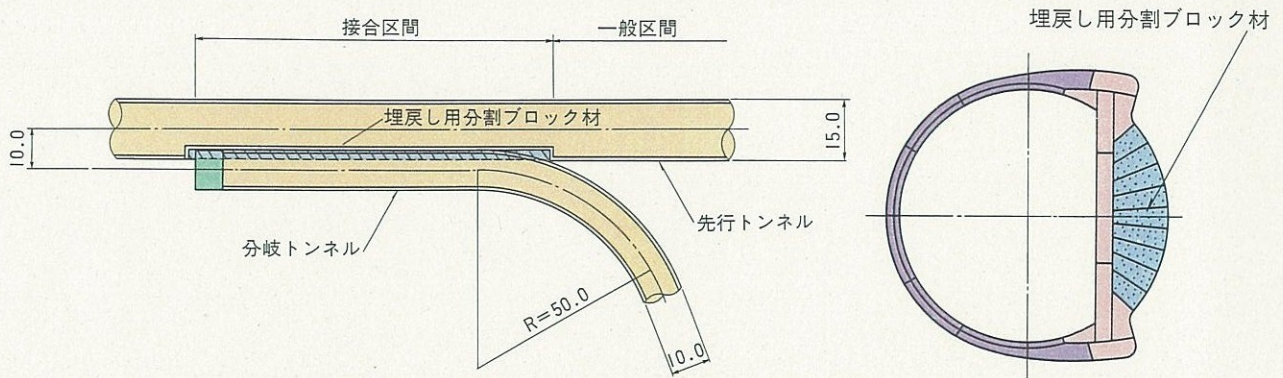
突起部があるので、セグメントの組み立てには2段縮エレクターと傾転装置を使います。



突起部分のセグメントの詳細です。

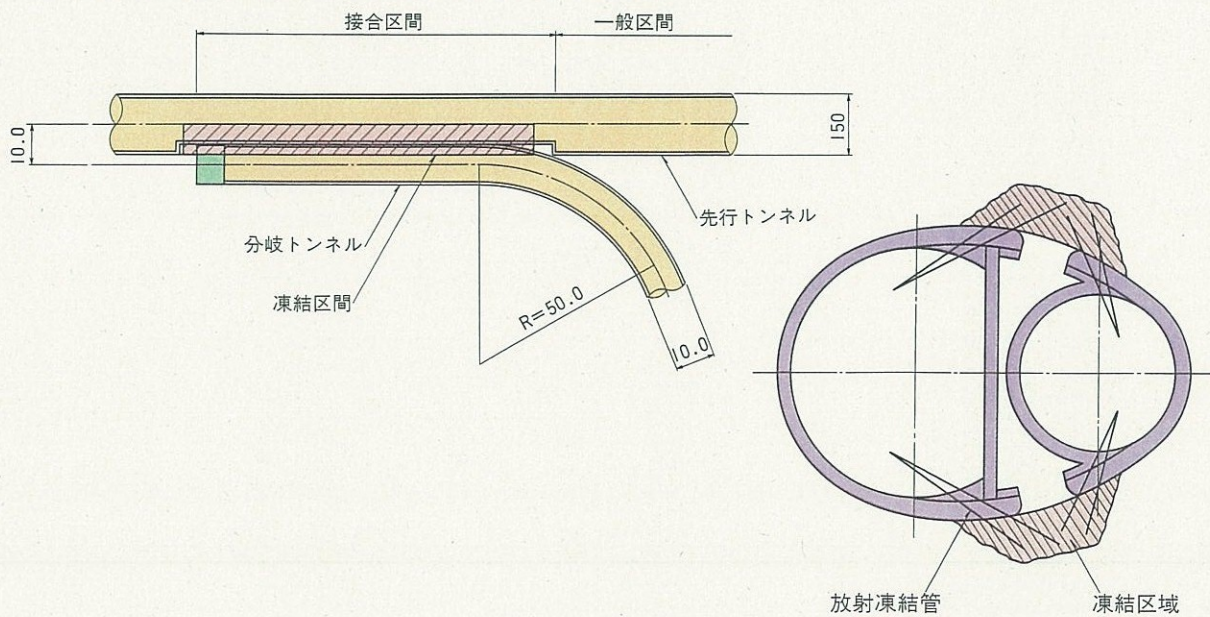


先行シールドの埋め戻し材は次の材質を考えています。



項目	発泡スチロール(EPS)	軽量コンクリート
対象地盤	沖積層	洪積層・第三紀層
圧縮強度	1~8kg/cm ²	30kg/cm ²
曲げ強度	—	圧縮強度/3
乾燥比重	20~40kg/m ³	600~1000kg/m ³
ヤング係数	340kg/cm ²	1.8×10 ⁴ kg/cm ² 以上
備考	押し出し成型ブロック	軽量粗骨材 軽量細骨材

接合時の地盤改良は次のようになります。



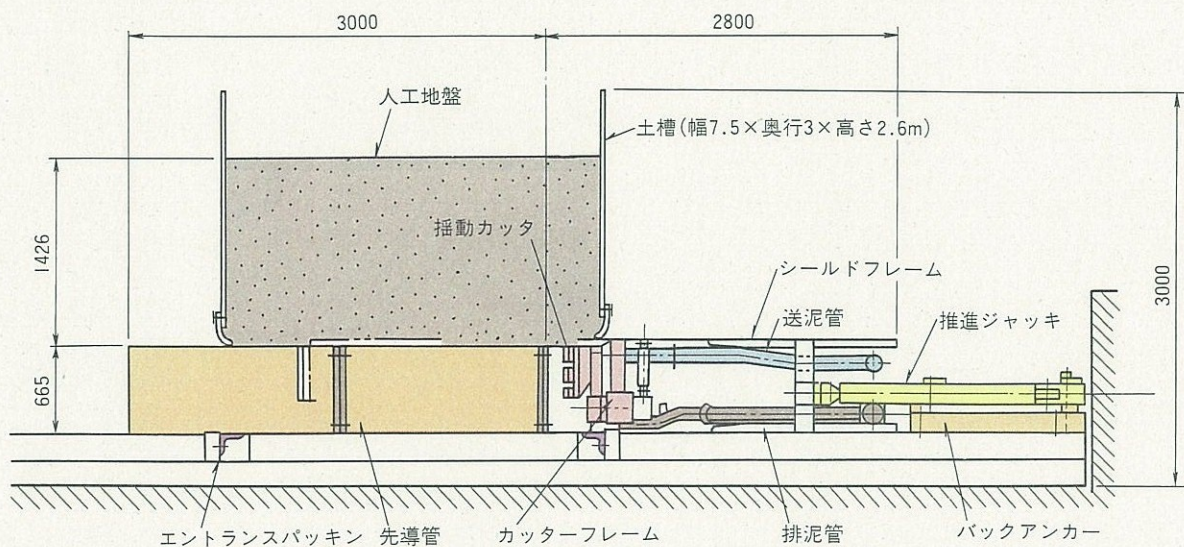
6. 要素実験

実験の目的

- ・ カッタ装備トルク算出に従来の円形カッタ設計手法が適用できるか否かを確認しました。これは、カッタが左右に反転運動するので左右端で一瞬停止状態となり、カッタに過大な負荷がかかる恐れがあるためです。
- ・ 掘削した土砂の取り込みが支障なく行えるかを確認しました。

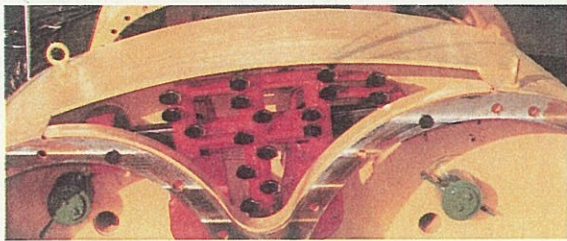
実験装置

実験装置は、シールド模型、人工地盤内に押し込む推進装置および土槽から構成しました。



シールド機の模型は、本線2車線でランプ1車線の想定断面の1/10縮尺で半割り形とし、掘削方式は泥水式としました。

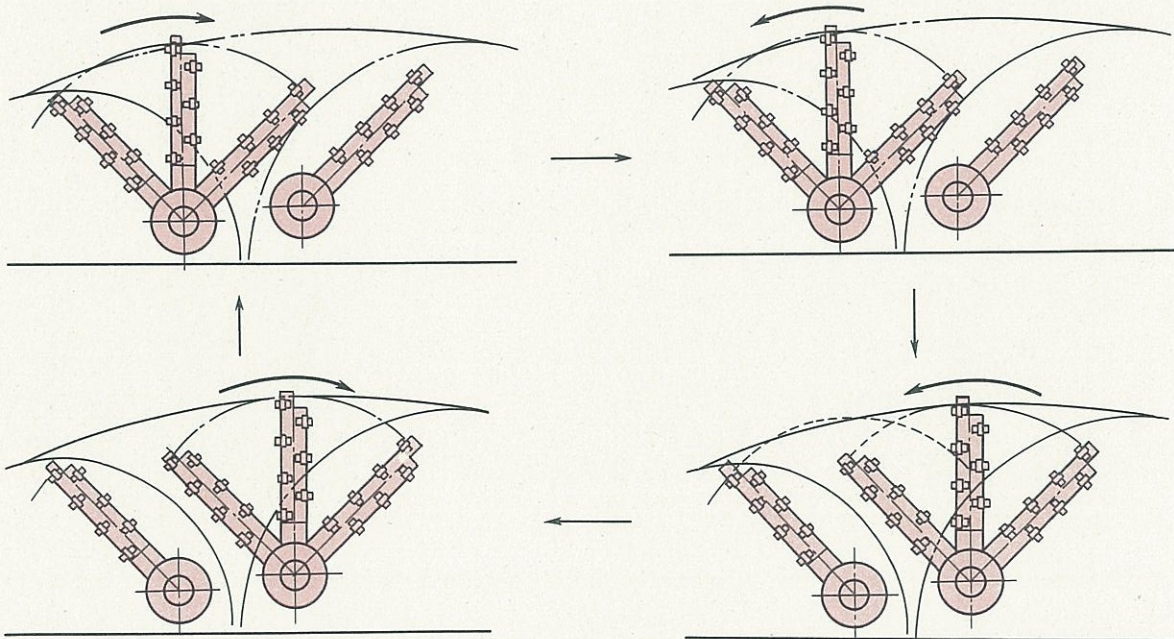
カッタの形式は、揺動面板カッタと揺動アームカッタの2方式とし、アームカッタは相互が干渉しないように、一方のアームが1往復した後に他方が掘削する方式としました。



揺動面板カッタ



揺動アームカッタ



揺動アームカッタ駆動

両カッタの駆動は、アームカッタが駆動軸を介してリンク機構付き油圧シリンダーで、面板カッタは揺動アームの回転運動を利用した直線往復運動で行いました。

実験のケース

模型シールドによる切削条件は、円形シールドの実機による掘進速度とカッタビット切削速度を同程度としました。実験ケースは、条件の組み合わせから4ケースを想定しました。

各実験ケース毎に掘進距離は2mで、掘進速度を50cm毎に変化させました。実験では、地盤条件(砂質土と粘性土)、掘進速度(1、2、3、4cm/min)をパラメータとしました。

実験条件表

項目	条件数	内 容	円形シールド実機 (φ14m)
カッタ種類	2	アームカッタ、面板カッタ	
地盤条件	2	砂質土、粘性土	
掘進速度	4	1、2、3、4 cm/min	3cm/min
揺動周期	1	アームカッタ：90°/2.5sec 面板カッタ：43°/2.5sec	回転速度 0.34rpm
切削速度	1	アームカッタ：39.2m/min (最外部ビット) 14.3m/min (最内部ビット) 面板カッタ：12.0m/min	最外周 15m/min
切り込み深さ	4	0.02、0.04、0.06、0.08cm	0.55cm
泥水圧力	2	0.1、0.05kgf/cm ²	

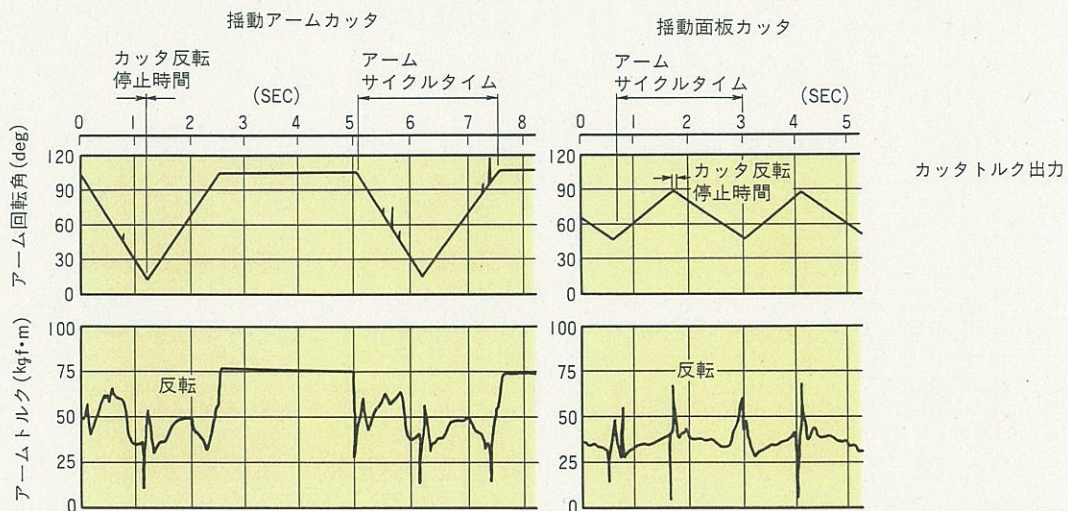
実験ケース表

ケース番号	揺動カッタ方式	地盤の種類	泥水圧力(kgf/cm ²)
1	アーム	砂質土	0.1
2		砂質土	0.05
3		粘性土	
4	面 板	砂質土	

実験の結果

結果を以下にまとめます。

- ①円形のカッタに挟まれた银杏の葉状の断面は、周辺地山に拘束されない状態のため、揺動カッタでの切削抵抗は小さい。
- ②掘削に伴う地盤の変位は砂質土、粘性土ともに小さく、掘削面の地山の崩壊もなかった。安定掘削、土砂取り込み機能も問題がないと言える。
- ③揺動アームカッタ、揺動面板カッタともトルクに異常な変化はない。本実験では、装備トルクの1/4~1/5であり、反転トルクは掘削時トルクの1.5~2倍であった。揺動カッタの装備能力算定は、従来の円形カッタの設計手法が適用できる。
- ④掘削トルクはカッタトルク全体の15~17%であり、掘進速度の違いによるトルク差はカッタ形状や土質にかかわらずほとんどない。



カッタトルク

カッタ	土質	カッタトルク (kgf·m)			掘削トルク (kgf·m)	
		無負荷時	1cm/min 掘進時	4cm/min 掘進時	1cm/min 掘進時	4cm/min 掘進時
アーム	砂質土	34	41	40	7	6
	粘性土	34	36	37	2	3
面板	砂質土	63	72	71	9	8

(注) 掘削トルク = 掘進時トルク - 無負荷トルク