

大深度トンネル技術検討委員会

第 2 回 委員会資料

施工技術に関する検討 参考資料

目 次

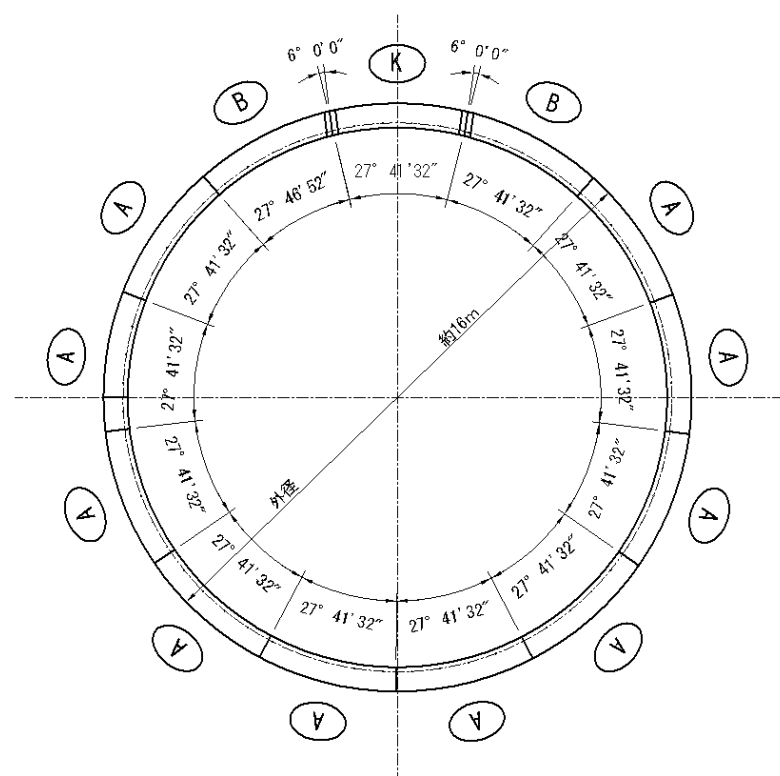
- 参考 1 セグメント概略構造図 1
- 参考 2 シールド機製作機械 2
- 参考 3 シールド機概略構造図 3
- 参考 4 立坑概要図 4
- 参考 5 シールド発進基地（例） 5
- 参考 6 切羽の安定検討 6
- 参考 7 本線シールド施工時の地盤への影響検討 7
- 参考 8 地中拡幅部における合理的な断面形状の検討 9
- 参考 9 補助工法の選定 10
- 参考 10 地中拡幅部施工法の概要イメージ 11
- 参考 11 地中拡幅部施工時の地盤への影響検討 12
- 参考 12 地中拡幅部における新工法の分類 16
- 参考 13 大深度法適用時の地盤への影響検討 18

平成 17 年 12 月 5 日

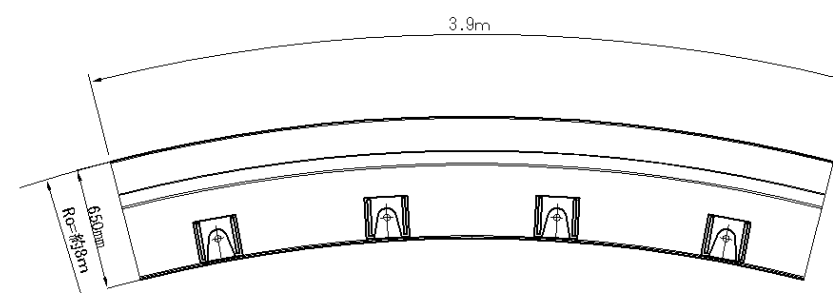
国土交通省 関東地方整備局 道路部

RCセグメント構造図 一本線シールド

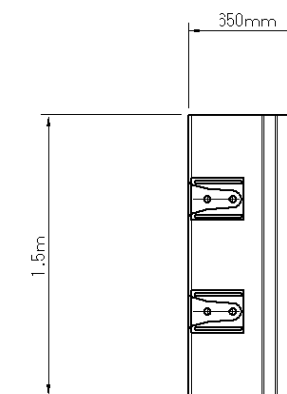
組立図 S=1/100



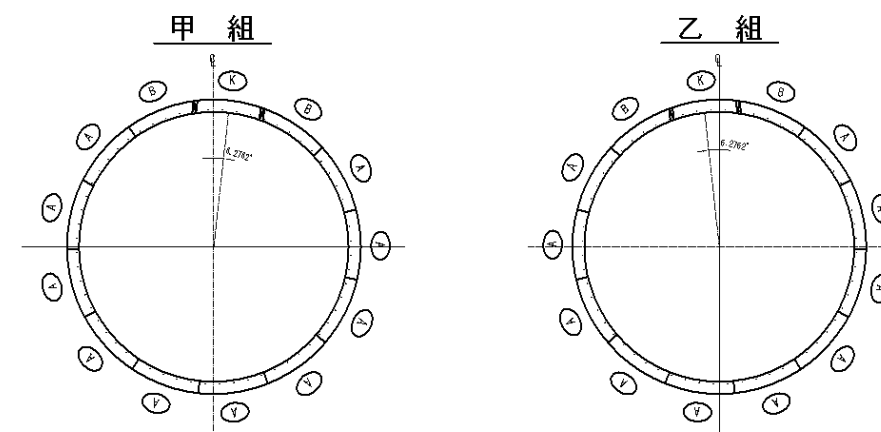
A型セグメント S=1/20



セグメント間継手 S=1/20



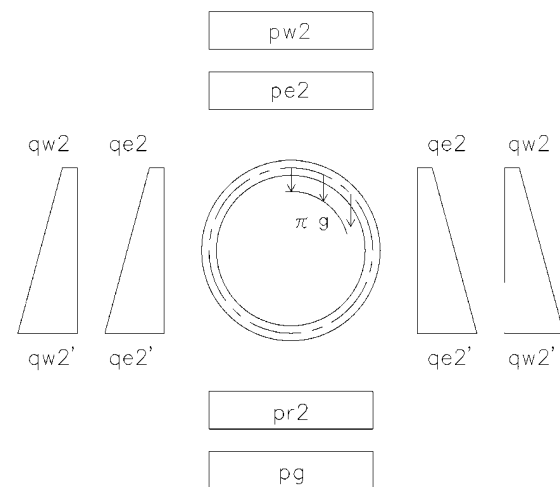
セグメント組合せ図 S=1/200



※各縮尺で作成した図面を縮小したものである。

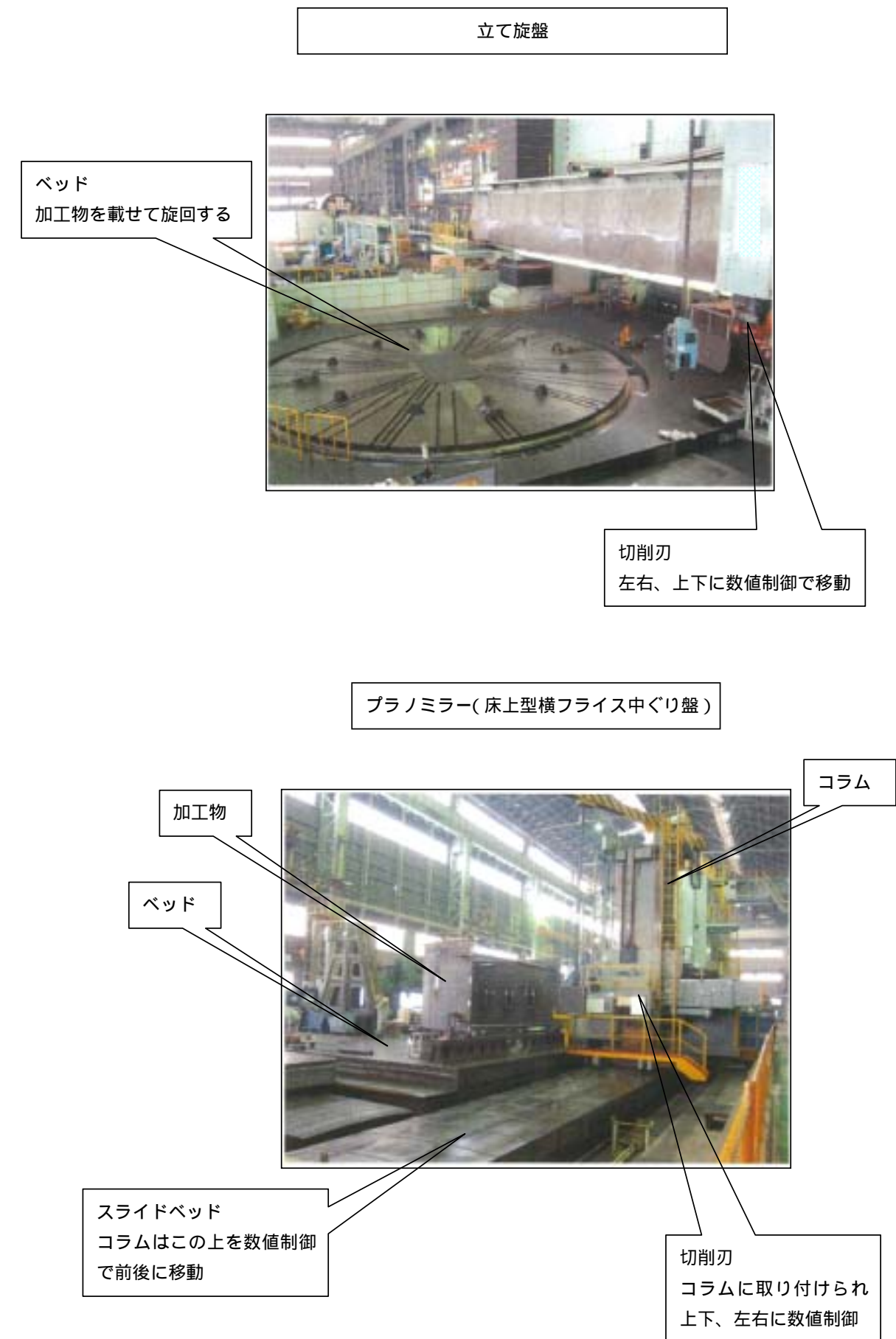
セグメントの構造は下記条件により、修正慣用計算法を用いて断面力を算出し、材料をコンクリート設計基準強度 59N/mm^2 鉄筋 S D 345 としたときの応力を照査して、セグメント厚 650mm とした。

本線シールド(16m , t = 650mm) 計算条件		
基本条件	土被り (GL-m)	41
	地下水位 (GL-m)	9
	作用土圧 p_{s2} (kN/m ²)	最低土被り(シールド天端まで:16.0m分) = 144.000
	地上部荷重	大深度地下使用制度における建築物荷重(直接基礎)
	上載荷重 p_a (kN/m ²)	建築物荷重(700kN/m ²) - 揚圧力 = 540
	分散後上載荷重 p_{a2} (kN/m ²)	371
	主な側方対象地盤	上総層
	想定N値	50
	土圧の取り扱い方	土水分離
	トンネル標準示方書による N 値の分布	非常によく締まった砂質土 : 30 N
	設計で用いる側方土圧係数	0.35
	設計で用いる地盤反力係数 k [MN/m ³]	50
	リング幅[m]	1.5
設計荷重 (奥行き 1m あたり) kN/m ²	鉛直土圧 $p_{e2} = p_{s2} + p_a$	515
	鉛直水圧 p_{w2}	320
	頂部水平土圧 q_{e2}	219.4
	頂部水平水圧 p_{w2}	326.5
	底部水平土圧 q_{e2}'	267.8
	底部水平水圧 p_{w2}'	476.8
	鉛直荷重の反力 $p_{r2} = q_{e2} + p_{w2}$	545.9
	自重反力 $p_g = \cdot g$	42.9

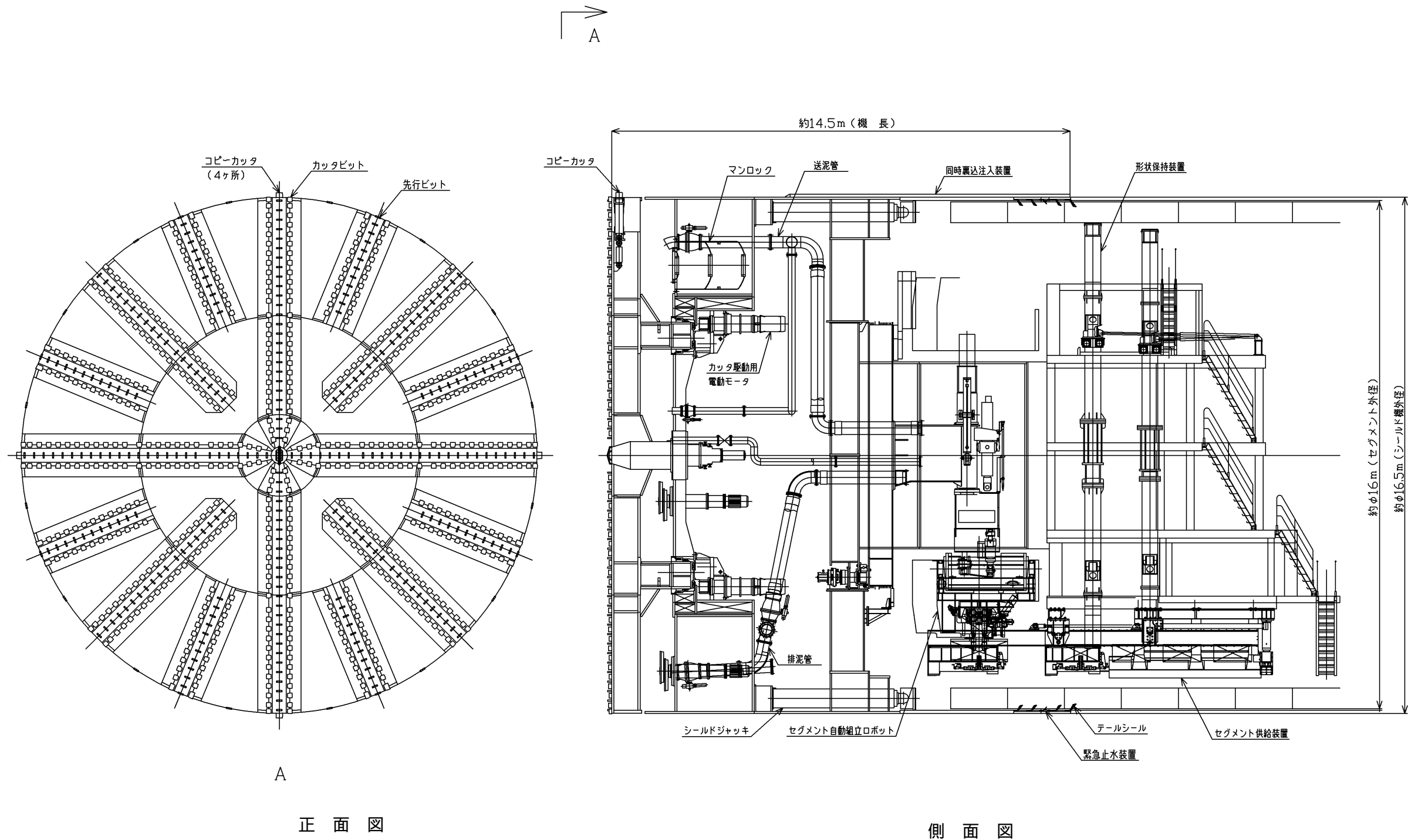


<参考 2> シールド機製作機械

立て旋盤およびプラノミラーの一例を示す。

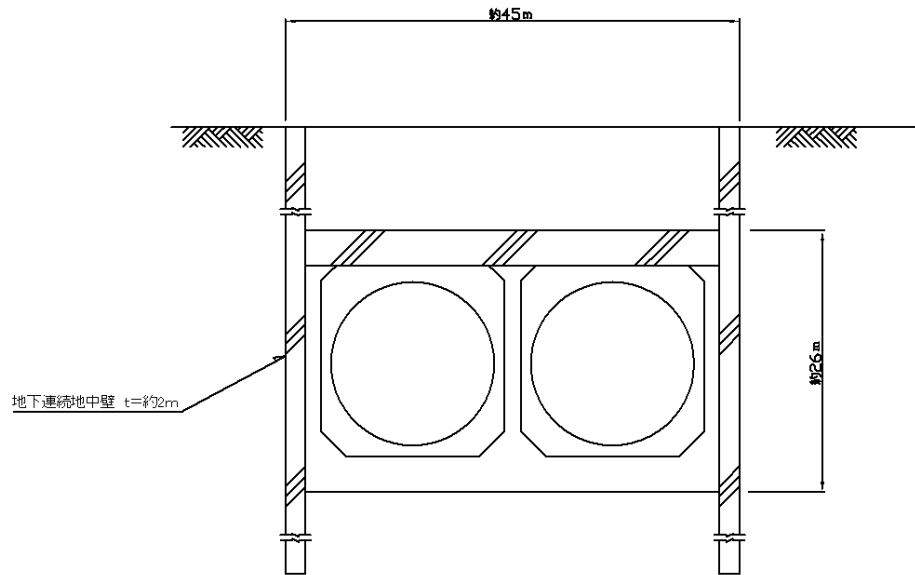


<参考3> シールド機概略構造図

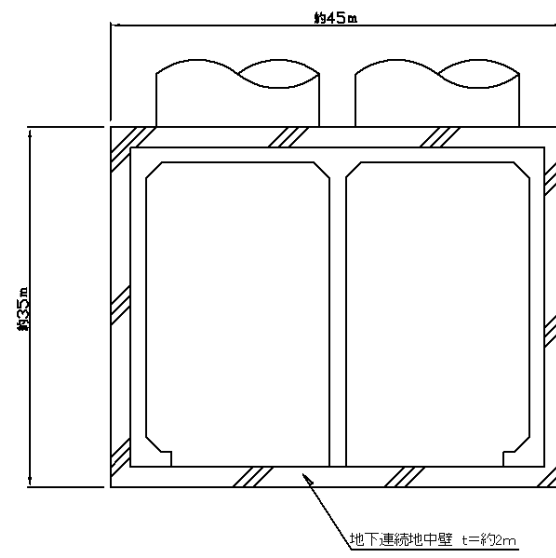


< 参考 4 > 立坑概要図

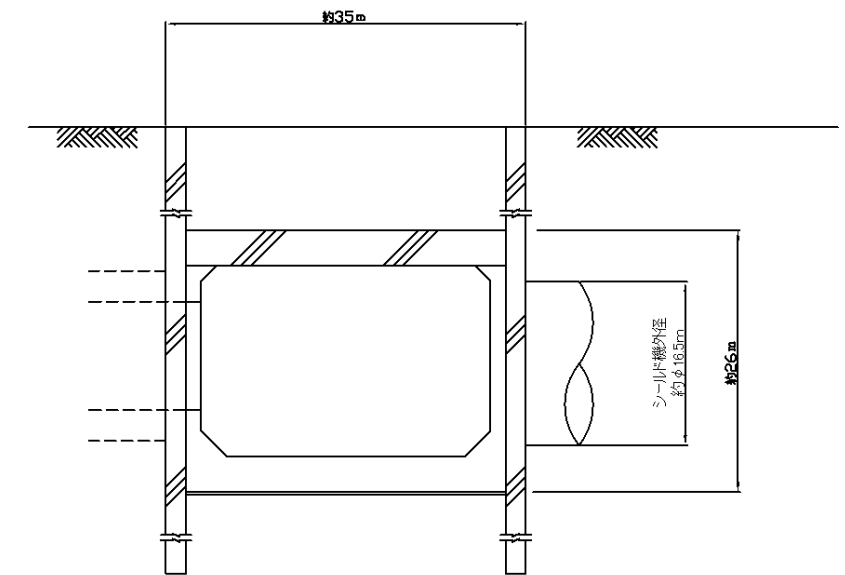
断面図



平面図

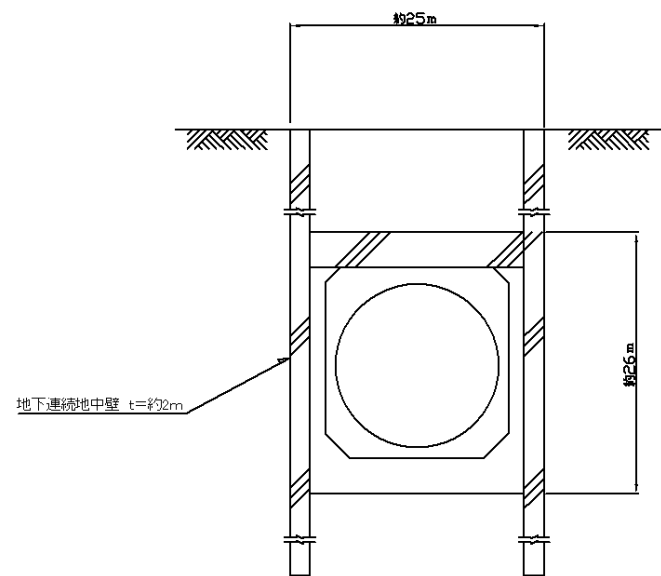


縦断面図

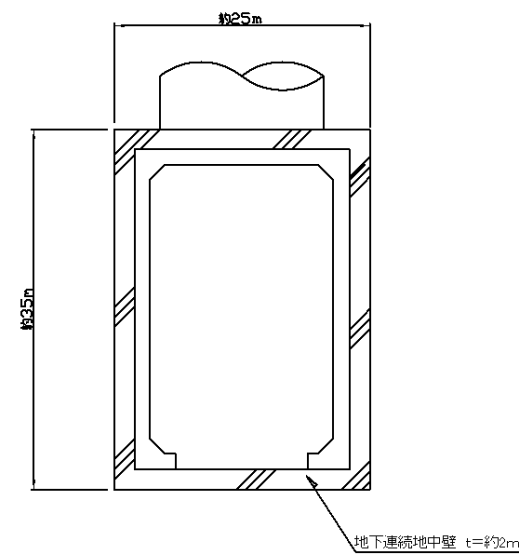


シールド機2台発進用立坑

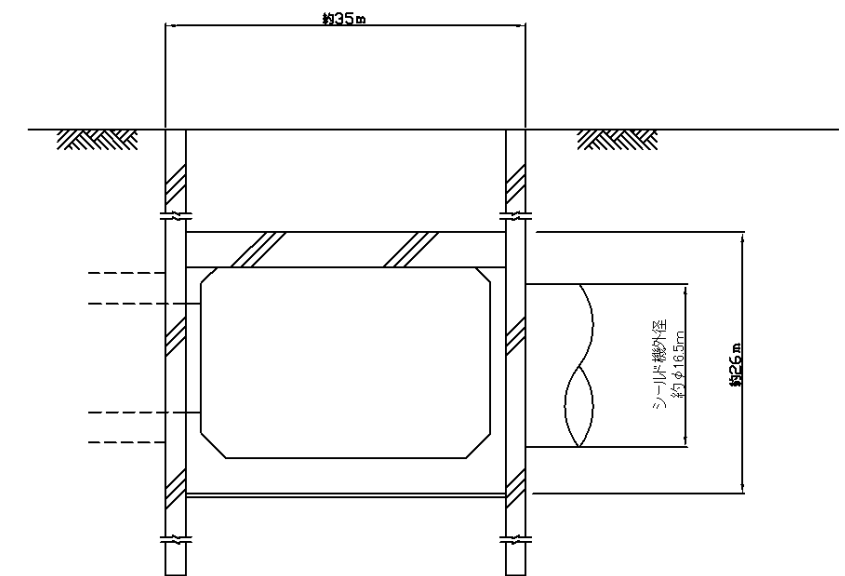
断面図



平面図



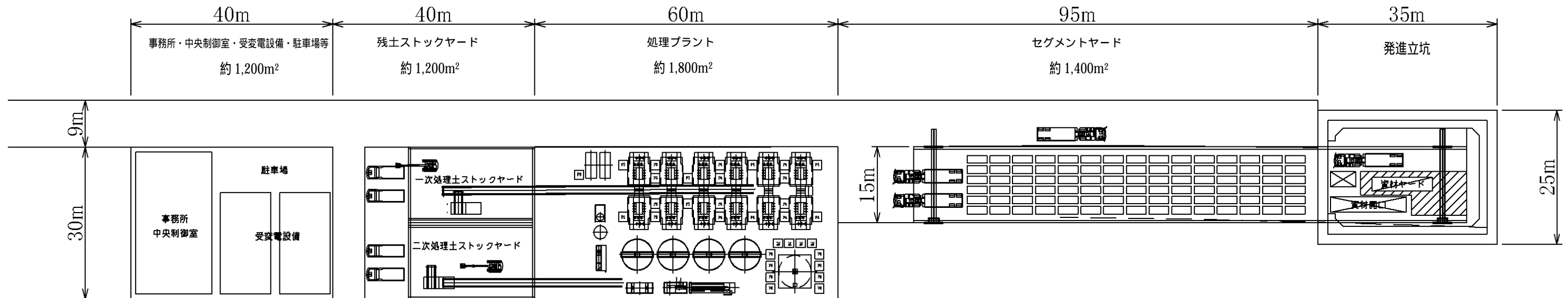
縦断面図



シールド機1台発進用立坑

< 参考 5 > シールド発進基地 (例)

設 備	必要面積 (シールド機 1 台分)
セグメントヤード	約 1,400m ²
処理プラント	約 1,800m ²
残土ストックヤード	約 1,200m ²
事務所、中央制御室、受変電設備、駐車場等	約 1,200m ²
合 計	約 5,600m ²



<参考 6> 切羽の安定検討

1) 検討方法

泥水式シールドにおける切羽の安定は、泥水圧が次の ~ を満足する必要があり、必要泥水圧の範囲は管理可能な 10 kN/m² 以上である必要がある。

地盤の主働限界圧以上であること

泥水の限界圧 (Pfa) は、プロムスや森らによる次式とする。

$$Pfa = pv + \cdot Cu$$

ここで、pv : 土被り圧

Cu : 地盤のせん断強度

: 6 (プロムス) 4~5 (森ら) 検討計算ではこれらの平均値 5 とする。

地下水圧以上であること

地下水の流出を防ぐために、泥水圧を地下水圧以上とする必要がある。

地盤の割裂力以下であること

割裂発生圧は、森らの研究による次式とする。

$$\text{割裂発生圧} = Ph + 0.5 qu$$

ここで、qu : 地盤の一軸圧縮強さ

Ph : 地盤水平方向圧

地盤の受働限界圧以下であること

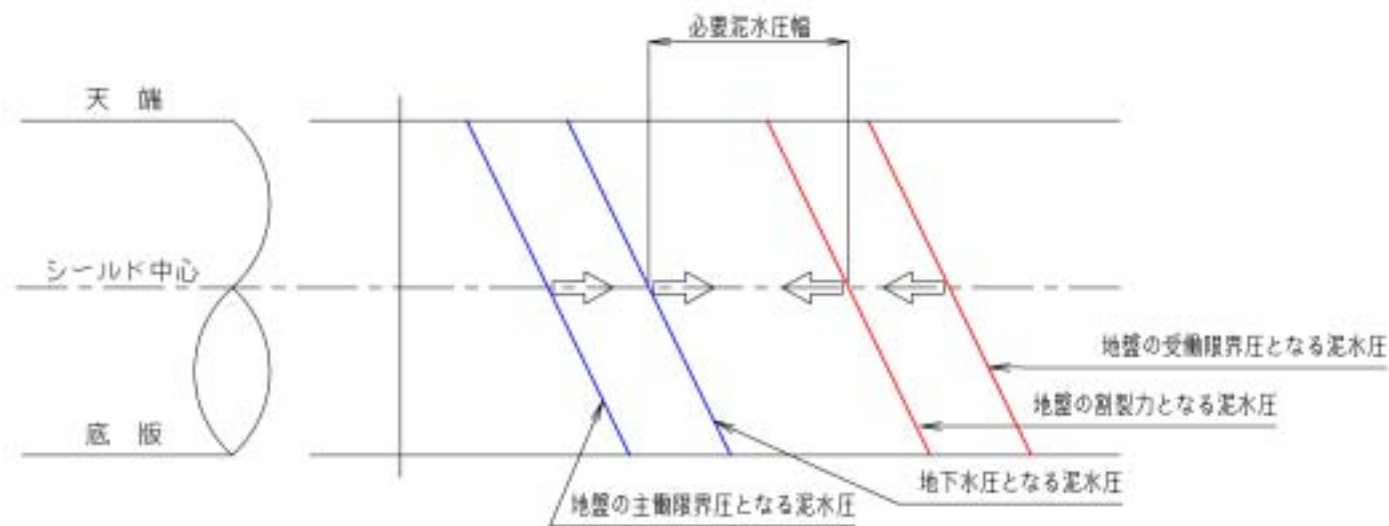
泥水の限界圧 (Pfp) は、森らによる次式とする。

$$Pfp = pv + \cdot Cu$$

ここで、pv : 土被り圧

Cu : 地盤のせん断強度

: 4~5 (森ら) 検討計算では平均値 4.5 とする。



必要泥水圧幅のイメージ

2) 検討結果

ケーススタディにおける必要泥水圧は管理可能な範囲内にあり、施工可能である。

(単位 : kN/m²)

シールド掘削地層		東名 JCT 付近	中央 JCT 付近	関越 JCT 付近
		立川礫層 上総層 (北多摩層、 東久留米層)	上総層 (東久留米層)	武蔵野礫層 江戸川層
最低泥水圧 (大きいほう)	地盤の主働限界圧	173	512	232
	地下水圧	102	416	123
最大泥水圧 (小さいほう)	地盤の割裂力	221	758	258
	地盤の受働限界圧	398	1462	469
必要泥水圧幅		48	246	26

透水係数の大きい礫層や層境などにおいては、逸泥・逸水の可能性もあり、施工時には現地に即した地盤性状をもととした検討が必要となるとともに、特に礫層に対する地盤調査を行い、切羽の安定検討が必要である。

<参考7> 本線シールド施工時の地盤への影響検討
 FEM解析により、本線シールド施工時の地盤への影響を検討する。

1) 解析条件

解析モデル図 (土被り 41m、離隔 7m)		入力物性値																																
解析モデル図		地盤の物性値																																
		<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">地層</th> <th rowspan="2">単位体積重量 kN/m³</th> <th rowspan="2">代表N値</th> <th colspan="2">変形特性</th> <th colspan="2">強度特性</th> </tr> <tr> <th>変形係数 E kN/m²</th> <th>ポアソン比</th> <th>粘着力 C kN/m²</th> <th>内部摩擦角 deg</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Lm</td> <td>14</td> <td>5</td> <td>21,000</td> <td>0.45</td> <td>100</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Mg</td> <td>18</td> <td>49</td> <td>39,000</td> <td>0.30</td> <td>25</td> <td>35</td> </tr> <tr> <td>Ks</td> <td>19</td> <td>50</td> <td>140,000</td> <td>0.30</td> <td>100</td> <td>42</td> </tr> </tbody> </table> <p>定数は東京都総合地盤図等の文献より設定。 全線にわたる代表断面であるため、Ksの変形係数は解析上厳しい値となるN×2800と想定。 Ks：上総層群</p>		地層	単位体積重量 kN/m ³	代表N値	変形特性		強度特性		変形係数 E kN/m ²	ポアソン比	粘着力 C kN/m ²	内部摩擦角 deg	Lm	14	5	21,000	0.45	100	15	Mg	18	49	39,000	0.30	25	35	Ks	19	50	140,000	0.30	100
地層	単位体積重量 kN/m ³	代表N値	変形特性				強度特性																											
			変形係数 E kN/m ²	ポアソン比	粘着力 C kN/m ²	内部摩擦角 deg																												
Lm	14	5	21,000	0.45	100	15																												
Mg	18	49	39,000	0.30	25	35																												
Ks	19	50	140,000	0.30	100	42																												
地層区分		セグメント物性値																																
		<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>仕様</th> <th>解析モデル</th> <th>変形係数 (kN/mm²)</th> <th>断面積 (cm²)</th> <th>断面二次 (cm⁴)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RC : t=650</td> <td>ビーム</td> <td>39</td> <td>6,500</td> <td>1.83E+06</td> </tr> </tbody> </table> <p>セグメントの曲げ剛性の補正係数 =0.8を考慮する。</p>		仕様	解析モデル	変形係数 (kN/mm ²)	断面積 (cm ²)	断面二次 (cm ⁴)	RC : t=650	ビーム	39	6,500	1.83E+06																					
仕様	解析モデル	変形係数 (kN/mm ²)	断面積 (cm ²)	断面二次 (cm ⁴)																														
RC : t=650	ビーム	39	6,500	1.83E+06																														
		計算方法																																
		<ul style="list-style-type: none"> ・ 土水分離計算とする。 ・ 掘削開放率 外環と同様な地層における大規模併設シールドの施工事例を参考に15% (土水分離計算) とした。 																																

2) 検討結果

	地表面傾斜角	GL-25m 地盤傾斜角	地山の塑性領域図
変位グラフ			
最大値	0.3/1000 rad < 1/1000 rad 1	0.5/1000 rad < 1/1000 rad 1	
	地表面沈下	地表面と支持地盤面との水平変位差	
変位グラフ			
最大値	10mm	4mm < 15mm 1	トンネル周辺に塑性領域は発生しない。

1 「平成 16 年度 大深度地下における山岳工法の近接影響に関する調査報告書 平成 17 年 3 月 国土交通省都市・地域整備局大都市圏整備課 大深度地下利用室」(検討経過 2.2.2 既存の基準類の整理と許容値) より

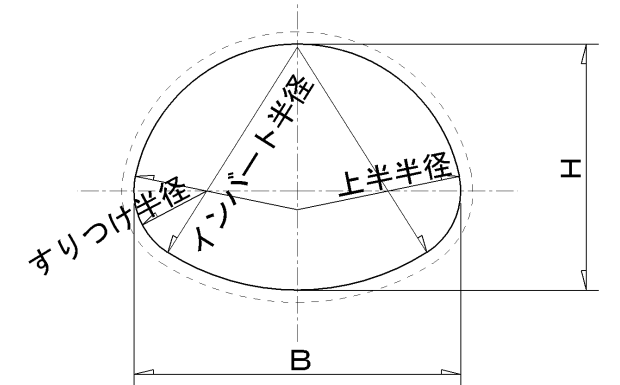
< 参考 8 > 地中拡幅部における合理的な断面形状の検討

上半半径 13.4m、インバート半径 20m、すりつけ半径 6m、偏平率 0.75 (H/B) とする。

インバートとすりつけ半径の組合せの検討

地中拡幅部における土質地下水条件による骨組み解析より、インバート半径、すりつけ半径の組合せによる覆工厚を算出し、経済的な組合せを選定する。

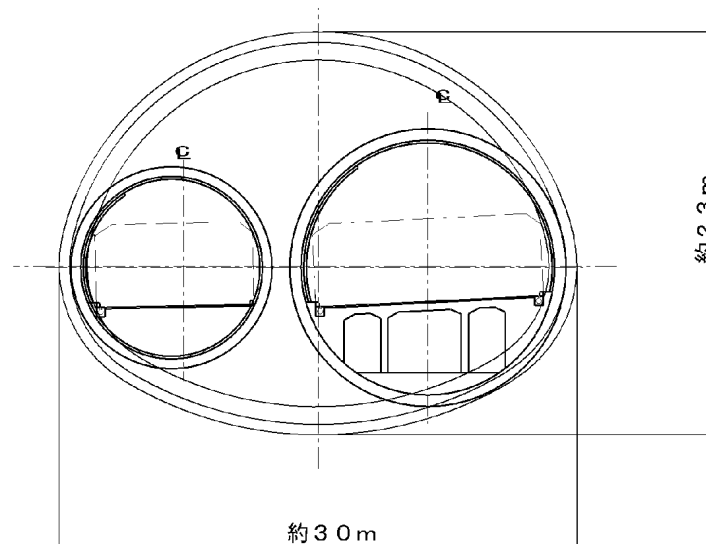
			インバート半径		
			20.0m (上半R x 1.5)	26.9m (上半R x 2.0)	30.7m (上半R x 2.25)
すりつけ半径	3.5m	二次覆工厚	180 cm	250 cm	280 cm
		断面積	599 m ²	654 m ²	679 m ²
		経済性	1.54	2.03	2.24
	5.0m	二次覆工厚	140 cm	180 cm	200 cm
		断面積	564 m ²	589 m ²	603 m ²
		経済性	1.27	1.52	1.66
	6.0m	二次覆工厚	100 cm	150 cm	190 cm
		断面積	529 m ²	561 m ²	592 m ²
		経済性	1.00	1.32	1.59



偏平率の検討

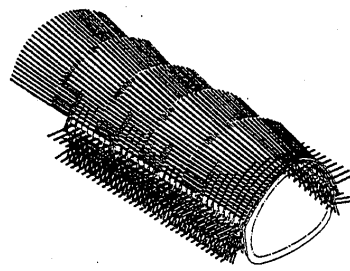
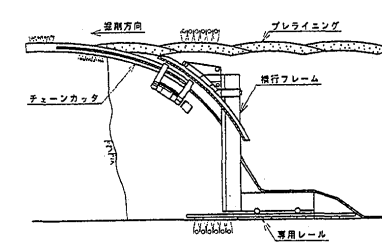
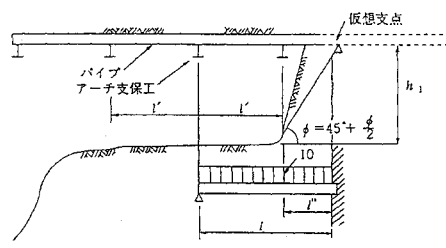
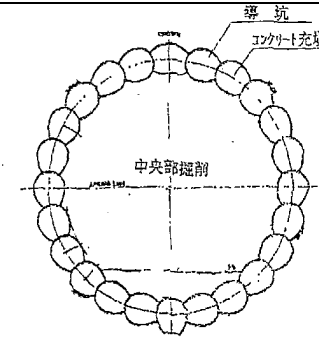
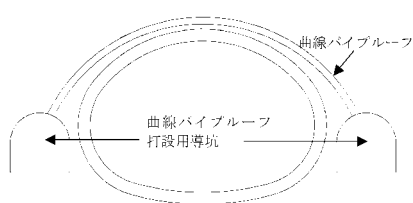
で選定した断面に対し、経済的な偏平率を検討する。

偏平率 (H/B)	0.79	0.75	0.70
二次覆工厚	100 cm	100 cm	300 cm
断面積	529 m ²	501 m ²	643 m ²
経済性	1.00	0.96	2.26

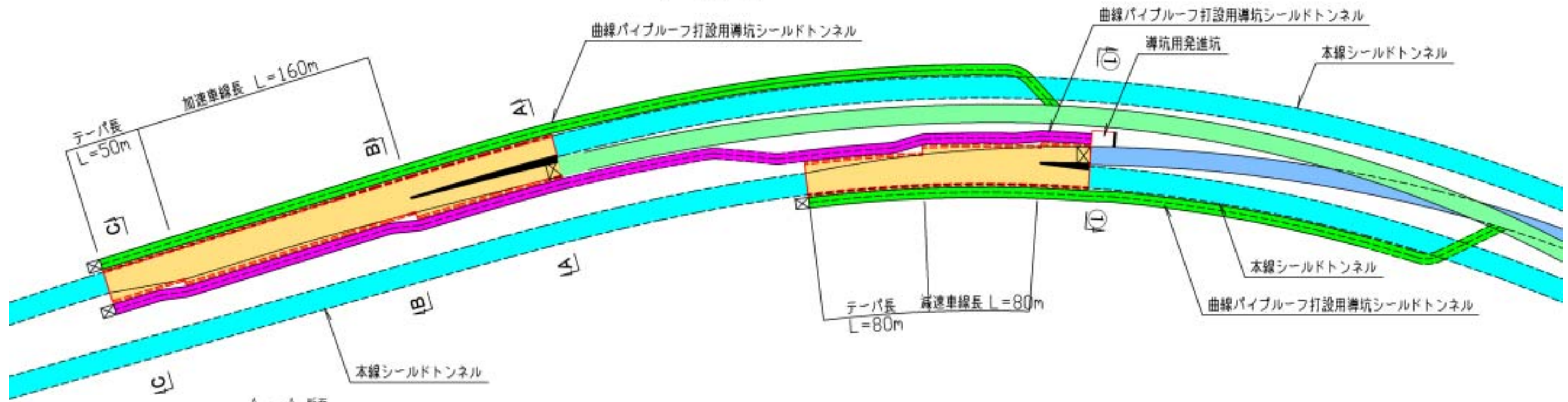


<参考 9> 補助工法の選定

大断面の地中拡幅で用いられる工法には、長尺鋼管フォアパイリングがよく用いられるが、外環分岐合流部の地中拡幅部は、国内における未固結地山で施工されたトンネルに対し、非常に大きな規模となる。このため、長尺鋼管フォアパイリング以上に地表面変位を抑制する補助工法として、剛性が高い先受け工であること、先行変位が大きい切羽前 1 D 程度の区間を先受けできること、施工実績があること、などの理由から曲線パイプルーフ工法を選定し検討する。

工法一般名称	長尺鋼管フォアパイリング (AGF)	プレライニング工法	パイプルーフ工法	小トンネルによる覆工構築工法	曲線パイプルーフ工法
概要図					
概要	<ul style="list-style-type: none"> 切羽から前方に向けてトンネル外周部にあらかじめ長さ 10m ~ 15m 程度、100mm 前後の鋼管をアーチ状に配置して打設し、鋼管周辺の地山に注入材を圧入して掘削時の切羽の安定を図るもの。注入材にはセメントミルクやウレタン等がある。 	<ul style="list-style-type: none"> トンネル掘削に先行して切羽外周部を切削し、切削部にコンクリートを充填して厚さ 15 ~ 50cm のコンクリートライニングを構築する工法。 	<ul style="list-style-type: none"> トンネル掘削に先行して掘削断面外周に沿って、トンネル軸方向に一定間隔にパイプを挿入設置し、鋼管打設後に鋼管内および鋼管と地山の間にセメントミルクを注入する。 	<ul style="list-style-type: none"> 覆工の形状に小断面の導坑を積み上げ、その集合体で覆工を形成する。その後、内部を掘削することでトンネルを建設する。 	<ul style="list-style-type: none"> トンネル掘削に先行して横断方向に曲線パイプルーフを打設し、剛性の高い先受け工を施工する。
1 施工延長	<ul style="list-style-type: none"> 12 ~ 15m 程度 	<ul style="list-style-type: none"> 1 ~ 5m 	<ul style="list-style-type: none"> 1 シフトの施工延長は主に施工精度上の制約から決定され、20 ~ 50m の例が多いが、90m 以上施工した例もある。 	<ul style="list-style-type: none"> 基本的に延長の制限はない。 	<ul style="list-style-type: none"> 導坑やシールドの拡幅施工が必要となるが、先受け長さに制限がない。
効果の程度	<ul style="list-style-type: none"> 鋼管と注入材により切羽周辺地山を確実に改良できる。 先受け長が長く、鋼管がある程度の剛性を持ったため、地山の緩み防止ならびに先行変位抑制効果が高い。 	<ul style="list-style-type: none"> 掘削に先立ち、トンネル外周にスリットコンクリートシェルを構築し、一次覆工が施工された状態となるため、先受け効果が高い。 	<ul style="list-style-type: none"> 鋼管と支保工により地山荷重を確実に受け止めるので、トンネル掘削に伴う変位を制御できる。 鋼管を大口径のものにすることにより剛性を大きくすることが可能。 低土被りでの沈下抑制効果が高い。 	<ul style="list-style-type: none"> 小トンネルの導坑の積み重ねによる影響は考えられるが、各々の小トンネルの施工は影響が少ないため、地表面変位の抑制に効果が期待できる。 先受け工がそのまま躯体となるため、合理的な先受け効果が期待できる。 	<ul style="list-style-type: none"> トンネル掘削前に高い剛性の先受け工が完成しているため、切羽到達前に生じる先行変位の抑制や、沈下の抑制に高い効果が期待できる。
施工性	<ul style="list-style-type: none"> 汎用機械または専用機械による施工が可能であり、大規模な段取り替えは必要ない。 鋼管打設時に切羽を 1 ~ 2 日間止めるため、鏡吹きつけなどの鏡安定対策が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> 切羽高さに対して先受け長が短いため、大きな先受け効果が期待できない。 	<ul style="list-style-type: none"> 通常、坑口部に反力架台を設置し、専用施工設備により鋼管を打設する。 坑内からの打設は困難。 	<ul style="list-style-type: none"> 小トンネルをシールドで施工する場合には発進立坑が必要となる。 複数の小トンネル施工が必要なため、工期工費の増大の可能性がある。 立坑が必要となる。 	<ul style="list-style-type: none"> 曲線パイプルーフは専用機械による施工となる。 曲線パイプルーフを施工するための施工空間として導坑が必要となる。 曲線パイプルーフや導坑の施工のため工期工費の増大の可能性がある。
適用地山	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤から N 値が 10 未満の軟弱な土まで幅広い地山に適しているが、特にトンネル坑口部や土被りの小さい沢部および局所的な不良地山部で用いられる。 	<ul style="list-style-type: none"> 一軸圧縮強度が 5,000kN/m² 以下の超軟岩地山、砂質地山および粘性土地山は施工可能であるが硬質の礫を含む礫質土は切削や穿孔が出来ない場合があるので施工は困難である。 	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤から N 値が 10 未満の軟弱な土まで幅広い地山に適しているため、特に都市部などでトンネル掘削に伴う地表面沈下に制約を受けられる場合に採用される。 	<ul style="list-style-type: none"> 小トンネルが掘削できる地山であれば適用可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 涌波トンネルの例ではリバース工法によるため細砂層以外では施工不可。 粘性土や礫層では、掘削工法の改良が必要。
主な工法名 (主な実績)	AGF 工法(小東山 Tn) トレヴィチューブ工法(舞子 Tn) ロジンチューブ工法(水戸 Tn) グラウトフォアパイリング工法 長尺中空ロックボルト	モノベック PASS 工法(勝田台 Tn) NewPLS 工法(保土ヶ谷 Tn、吉井 Tn)	坑口パイプルーフ工法(小東山 Tn) ミニパイプルーフィング工法 TA フォアパイリング工法(北総栗山 Tn)	MMST (首都高大師換気所換気洞道、小トンネルはシールドで施工) (マウントベーカー Tn : 米国、小トンネルは TBM 導坑)	中央導坑から打設 (涌波 Tn) 併設するシールドから打設 (首都高新宿線富ヶ谷入出路)
評価	<p>通常の NATM トンネルにおいて用いられる補助工法としては、先受け長が長い場合、比較的大きな効果が期待できる。 外環分岐合流部の地中拡幅部ではより剛性の高い補助工法が必要。</p>	<p>横断方向にも連続した先受け工が可能であるが、切羽高さに対して先受け長が短いため、大きな先受け効果が期待できない。</p>	<p>坑内から施工を行う場合には掘削断面+施工余裕分の切掘げを行う必要がある。</p>	<p>先行施工する躯体を先受けとするため、剛性の高い補助工法となり、地表面変位低減効果が期待できるが、複数の小トンネルをシールドから発進させる場合には MMST のように立坑が必要である。</p>	<p>掘削工法や鋼管径対応などの改良により適用は可能と考えられる。 高剛性の先受けによる地表面沈下抑制効果は高いと考えられる。</p>

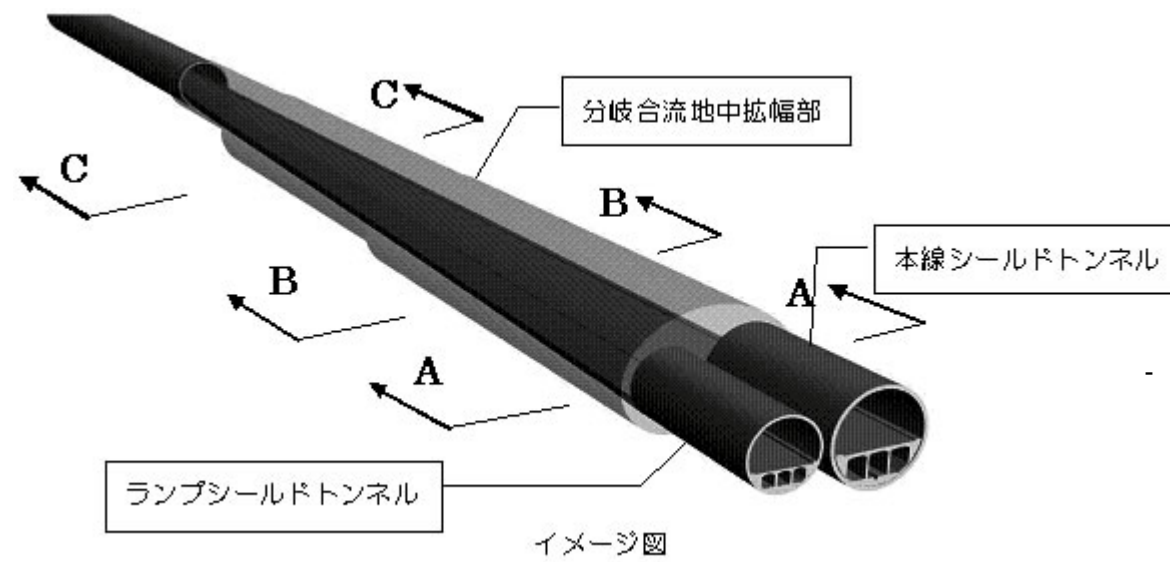
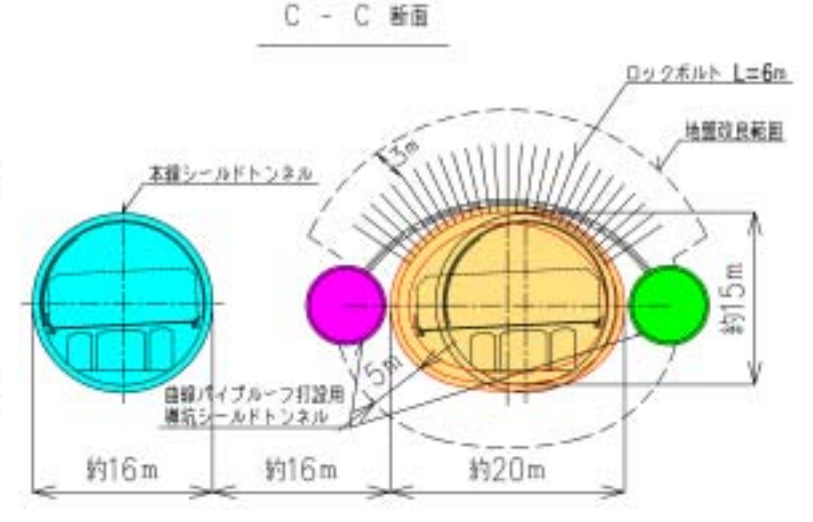
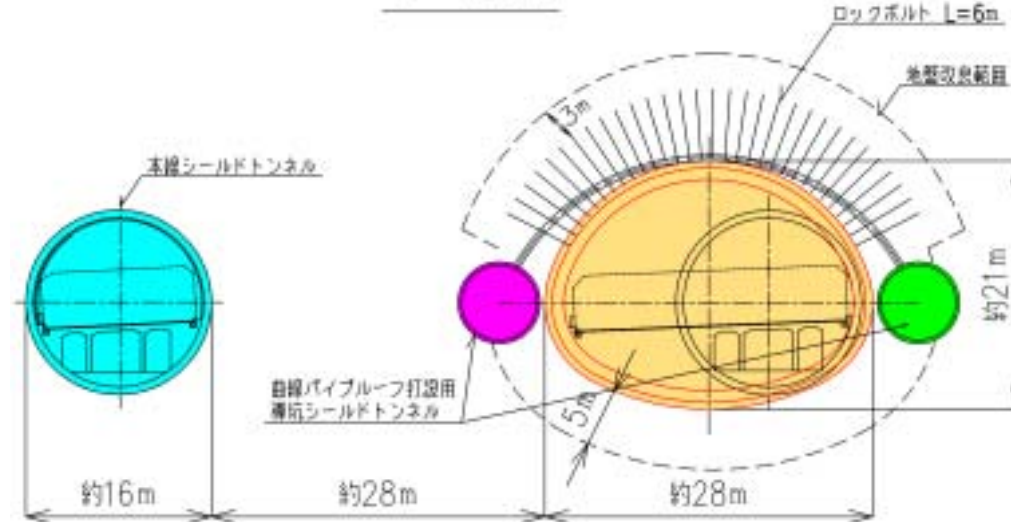
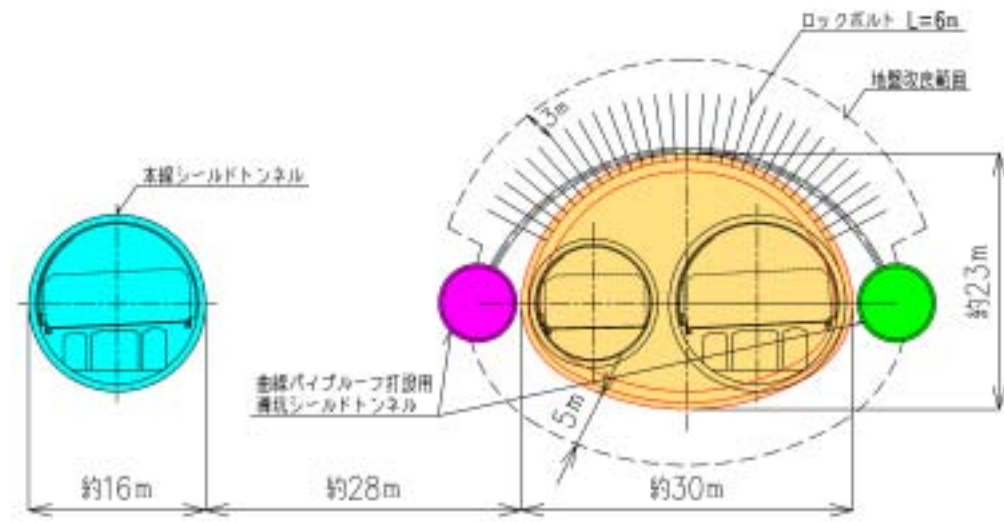
平面図



A - A 断面

B - B 断面

C - C 断面



・ 断面は<参考 11>における計算断面位置

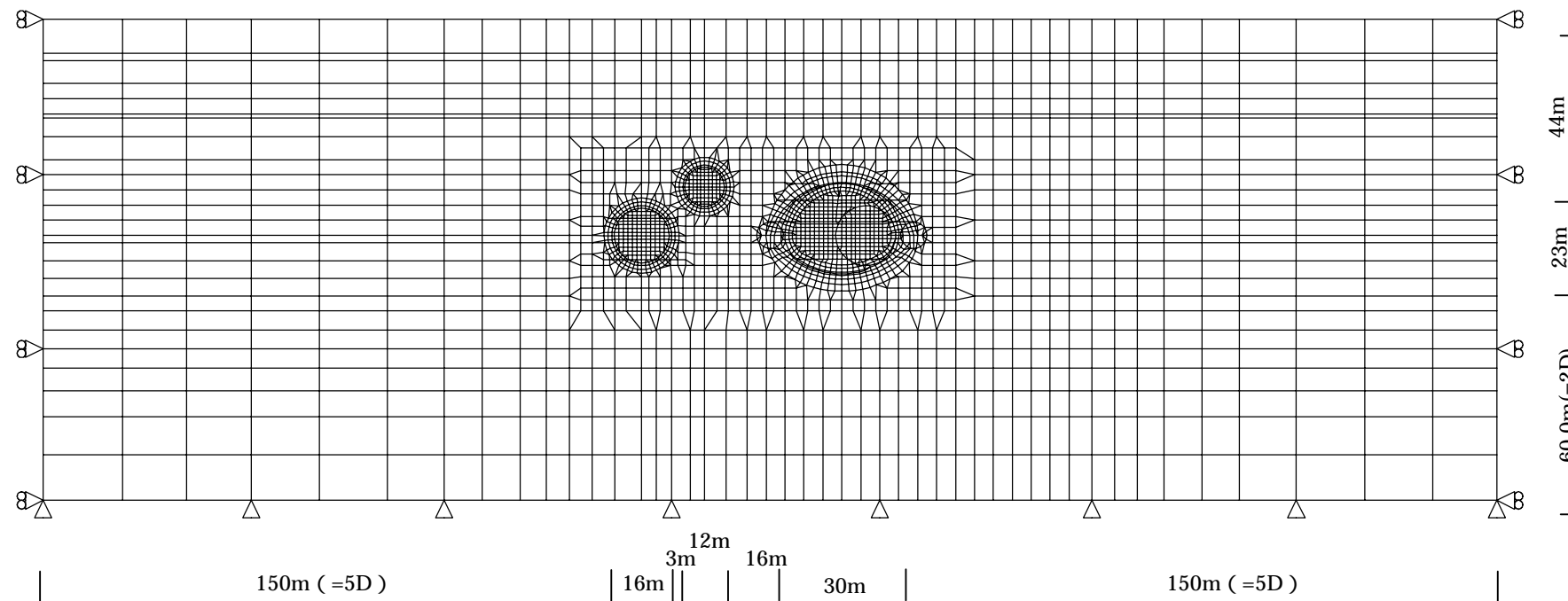
<参考 11> 地中拡幅部施工時の地盤への影響検討

1. 中央 JCT 地中拡幅部

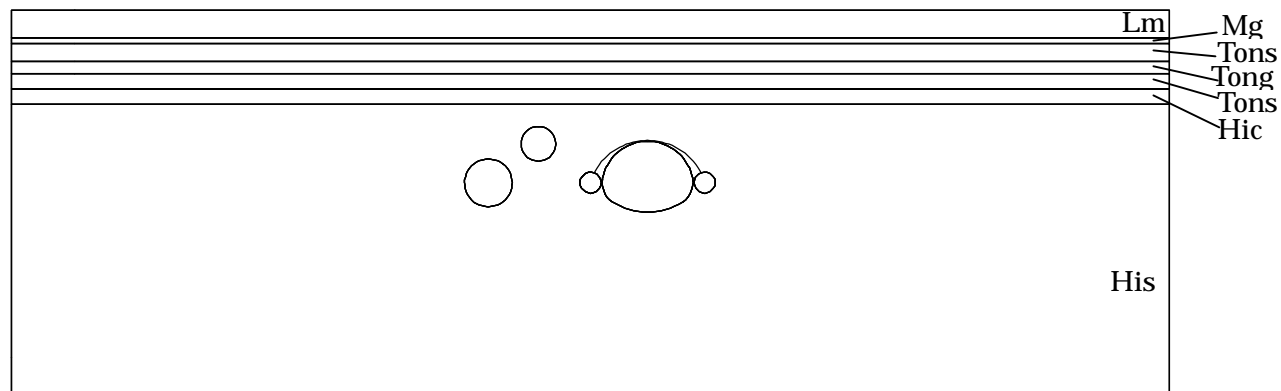
FEM 解析により、地中拡幅部施工時の地盤への影響を検討する。解析断面は、地中拡幅部が最大断面となり、ランプトンネルも併設する<参考 10>における - 断面とする。

1) 解析条件

解析モデル図



地層区分図



入力物性値一覧

地盤の物性値

地層	単位体積重量 kN/m ³	代表N値	変形特性		強度特性	
			変形係数 E kN/m ²	ポアソン比	粘着力 C kN/m ²	内部摩擦角 deg
Lm	14	5	21,000	0.45	100	15
Mg	18	49	39,000	0.30	25	42
Tong	19	50	283,000	0.30	25	42
Tons	19	50	420,000	0.30	100	42
Hic	19	50	100,000	0.30	400	10
His	19	50	210,000	0.30	100	42

構造物物性値一覧表 (梁要素)

構造物の種類別		仕様	解析モデル	変形係数 kN/mm ²	断面積 cm ²	断面二次 cm ⁴
シールド	本線セグメント	RC : t=650	ビーム	39	6,500	1.83E+06
	導坑セグメント	RC : t=250	ビーム	39	2,500	1.04E+05
	ランプセグメント	RC : t=550	ビーム	39	5,500	1.11E+06
NATM	吹付けコンクリート	ck=30N/mm ² t=600	ビーム	5.2	6,000	1.80E+10
	鋼アーチ支保工	SS400 H428×407	ビーム	210	3.61E+02	1.19E-02
補助工法	曲線パイプルーフ	508 t=12.7@1m	ビーム	210	1.98E+02	6.06E-04

計算方法

・ 土水一体計算とする。

・ 掘削解放率

シールド：外環と同様な地層における大規模併設シールドの施工事例を参考に 15% (土水分離計算) とした。本検討では土水一体計算に相当する値として 7.5% とした。

NATM：掘削解放率を 30~40% としている事例が多いが、本検討では比較的堅固な地盤を掘削することから 30% とする。

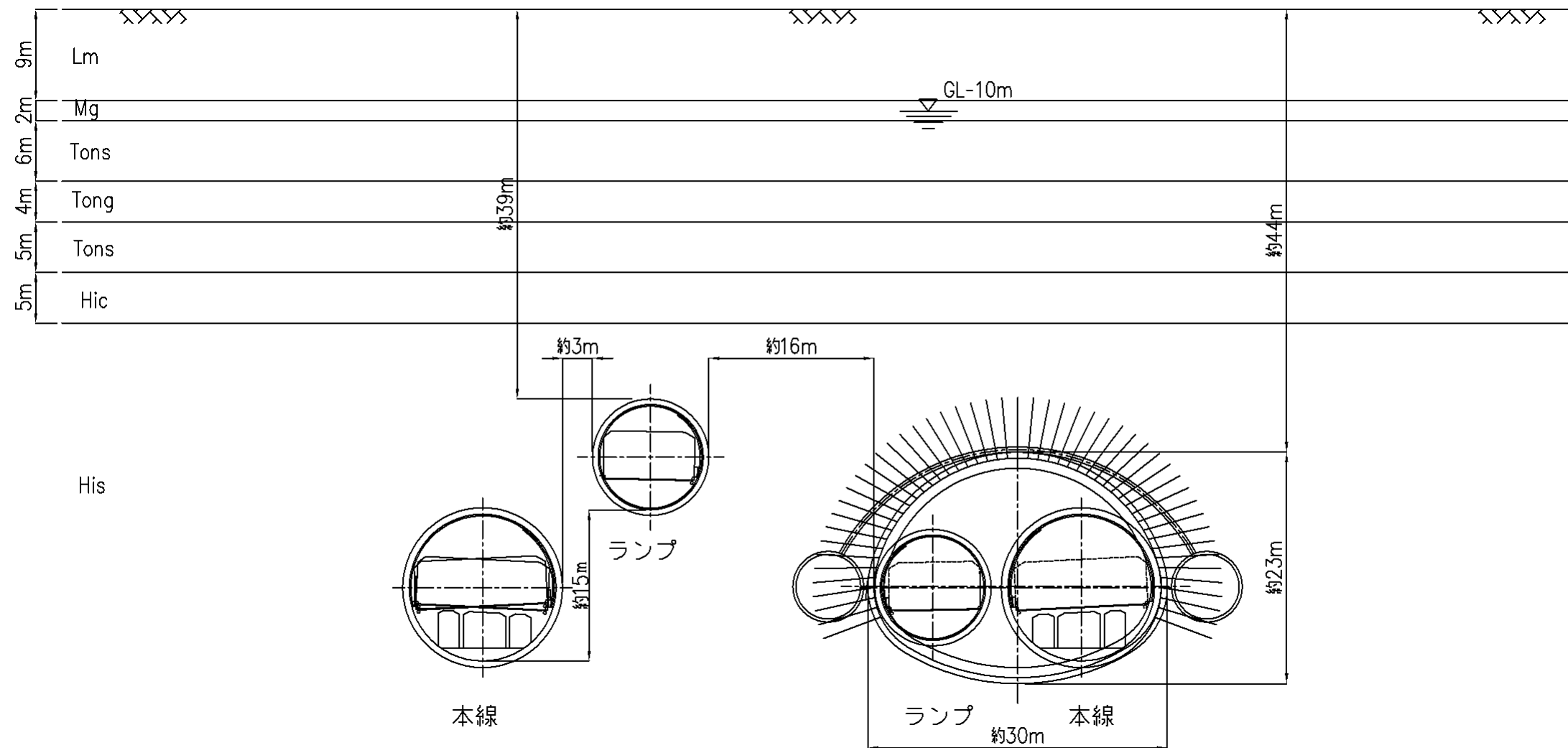
セグメントは曲げ剛性の有効率 =0.8 を考慮

本坑の吹付けコンクリートは弱材令時の剛性を考慮した。一般的に弱材令の剛性として ck=18N/mm² の場合に、E=4kN/mm² としている。またコンクリートの剛性は、強度の 1/2 乗に比例しており、ck=30N/mm² 相当に換算し、求めた。

2) 検討結果

補助工法		地表面傾斜角	地表面沈下量
曲線パイプルーフ	変位グラフ		
	最大値	0.8/1000rad < 1/1000rad 1	43mm

1 「平成 16 年度 大深度地下における山岳工法の近接影響に関する調査報告書 平成 17 年 3 月 国土交通省都市・地域整備局大都市圏整備課 大深度地下利用室」(検討経過 2.2.2 既存の基準類の整理と許容値) より



2. 東名 JCT 地中拡幅部

FEM 解析により、地中拡幅部施工時の地盤への影響を検討する。解析断面は、地中拡幅部が最大断面となり、ランプトンネルも併設する断面とする。

1) 解析条件

