

4. 当該工事の概要

4. 1 発注形態（設計施工一括発注方式）

当該工事は、表 4.1.1 に示すような契約方法及び条件にて実施されていた。

表 4.1.1 契約方法及び契約条件

契約工事名	第二パイプライン防護設備建設工事
工事場所	岡山県倉敷市
工期	2010年8月1日～2013年6月30日
契約方法	指名競争入札（技術提案型）価格競争方式（設計・施工一括発注方式）

契約方法は、設計・施工一括発注方式である。指名競争入札（技術提案型）の価格競争落札方法である。これは技術力を有する複数の企業を発注者が指名し、最も安価な入札者を落札者とする入札方法である。表 4.1.2, 表 4.1.3 に 2000 年に設計された第一パイプラインとの比較表を示す。トンネル内径は 4500mm と同じだが、セグメントやシールドマシンの機能に違いが見られる。顕著な相違としては、以下の事項が挙げられる。

	第一パイプライン	第二パイプライン
・セグメントの分割数：	6 分割	→ 5 分割
・セグメント幅：	1200mm	→ 1400mm
・セグメント厚さ：	225mm	→ 160mm
・セグメント継手：	ボルト継手	→ 突合せ継手
・リング継手：	M22 ボルト継手	→ M16 ボルト継手
・K セグメントの外周寸法：	971.9mm	→ 1164.8mm
・K セグメントの挿入角度：	9.0°	→ 9.7°
・シールドマシン全長：	7420mm	→ 6958mm
・セグメントのかかり代：	935mm	→ 515mm
・テールシール段数：	3 段	→ 2 段

価格面から見ると、第二パイプラインは、第一パイプラインに比べて安価になっている。本シールド工法の傾向として、セグメントの幅広化、薄肉化等による工期短縮やコストダウンの傾向があった。当該工事もこれらの傾向と同様に、セグメントは幅広、薄肉、弧長大となり、シールドマシンの全長は短く、テールシールの段数も少ない仕様で設計された。これにより、シールドマシンのテール部に対するセグメントのかかり代（515mm）が短くなるとともに、K と B セグメントのテーパ部の角度（9.7°）も比較的大きくなったと考えられる。

表 4.1.2 第一パイプラインと第二パイプラインのセグメントの比較
 (国土交通省『第2回シールドトンネル施工技術安全向上協議会』資料¹⁾に加筆修正)

比較項目		第一パイプライン* ¹	第二パイプライン* ¹	
設計年* ²		2000年	2010年	
セグメントの構造	本体構造	内径	4500mm	4500mm
		外径	4950mm	4820mm
		分割数	6分割 (5+K)	5分割 (4+K)
		幅	1200mm	1400mm
		厚さ	225mm	160mm
	継手構造	セグメント間	ボルト継手構造 M22(8.8)	突合せ継手構造
		リング間	ボルト継手構造 M22(8.8)	ボルト継手構造 M16(8.8)
	Kセグメント	挿入方向	軸方向挿入	軸方向挿入
		挿入代	400mm	350mm
		中心角, 外周寸法	22.5° 971.9mm	27.69° 1164.8mm
		挿入角度	9.0°	9.7°
		継手面角度	—	—
	注入孔構造		φ62.3 × 2箇所	φ58 × 2箇所
	主鉄筋	径×本数, 引張鉄筋比	D16 × 8本, p= 0.76%	D13 × 6本, p= 0.50%
		芯かぶり	50mm	51.5mm
	シール構造	シール材		水膨張性 幅 13.5mm × 高さ 3.5mm
シール溝 寸法と位置		幅 20mm × 高さ 2.3mm 外縁から溝中心 52.5mm	幅 20mm × 高さ 2.3mm 外縁から溝中心 37.5mm	
セグメントの材質	セメントの種類		普通ポルトランドセメント	
	コンクリートの 設計基準強度	42 N/mm ²	45 N/mm ²	
	鉄筋の種別	SD295A	SD295A	
	骨材, スランプ		粗骨材の最大寸法 20mm, スランプ 6±1.5cm	
設計条件	設計手法	修正慣用計算法 (η= 0.8, ζ= 0.3) (はりばねモデル で照査)	はりばねモデル による計算法	

	荷重の 考え方	土圧	ゆるみ土圧 (最小 2D かつ 200 kN/m ² 以上)	ゆるみ土圧 (最小 2D= 86.76 kN/m ²)
		水圧	H _w = 24.44m 台形分布	H _w = 26.335m 台形分布
	常時荷重以外の 荷重の考慮		施工時シールド ジャッキ推力	・ 投錨時衝撃荷重 ・ 施工時シールド ジャッキ推力
	土質 定数値	側方土圧係数	0.45	0.4
		地盤ばね	30 MN/m ³	40 MN/m ³
	継手ばね 定数	セグメント継 手の回転ばね	—	99000~0 kN・m/rad (荷重偏心量に応じて)
		リング継手の せん断ばね	—	1.0 × 10 ⁵ kN/m
そ の 他	セグメント防食, 防水加工の有無			
	セグメント 養生日数			『出荷する製品は、設計強度 (材齢 14 日)以上に達したも のとする。』とある。

*1 第一パイプラインでは標準セグメントと曲がりボルトセグメントが使用されているが、比較においては標準セグメントを対象とした。

*2 設計年は、セグメント設計図面の作成年月日を参照した。

*空欄は不明な箇所である。

*参考データとして、発進・到達立坑の内外径は以下のとおりである。

第一パイプライン発進立坑：内径 11500mm， 外径 14700mm

第二パイプライン発進立坑：内径 11500mm， 外径 14400mm

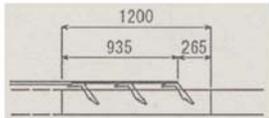
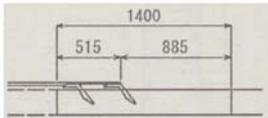
第一パイプライン到達立坑：内径 7500mm， 外径 9800mm

第二パイプライン到達立坑：内径 7500mm， 外径 9500mm

内径について、第一、第二パイプラインともに同等である。

外径について、第一パイプラインの方が大きく、第二パイプラインの立坑は薄肉になっている。

表 4.1.3 第一パイプラインと第二パイプラインのシールドマシンの比較
 (国土交通省『第2回シールドトンネル施工技術安全向上協議会』資料¹⁾に加筆修正)

比較項目		第一パイプライン	第二パイプライン	
シールドマシン基本構造	寸法	外径	5080mm	4950mm
		掘削外径		4970mm
		全長	7420mm	6958mm
		本体長さ (カッタ部除く)	6500mm	6345mm
		隔壁厚		
		スキンプレート厚	40mm	36mm
		テールプレート厚	12mm	12mm
		テールクリアランス	25mm	29mm
	装備 推力	1本当たり推力×本数 (総推力)	1500 kN × 16 本 (24000 kN)	823 kN × 26 本 (21398 kN)
	テール シール	詳細図		
段数		3 段	2 段	
材質		ワイヤブラシ (地山側 1 段はウレコンシール)	ワイヤブラシ	
緊急止水装置		無	無	
形状 保持 装置	有無	無	無	
シールドマシンの設計項目		<ul style="list-style-type: none"> ・シールド外殻の強度計算 ・テール部の強度計算 <ul style="list-style-type: none"> ・所要推力計算 ・所要カッタトルク計算 ・ビット寿命の検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・カッタトルク検討 ・推力検討 ・スキンプレート強度検討 (テール部) 	
その他	スクリュウコンベア 緊急遮断装置の有無	有 (アキュムレータ)	無 (2 段スクリュウゲートで対応)	
	テールボイド (シールド外半径と セグメント外半径の差)	65mm	65mm	

4. 2 セグメントの設計について

事業者が2011年3月に「水島第二パイプライン防護設備建設工事 平成22年度詳細設計 設計計算書(その1)」¹⁴⁾を報告書としてまとめている。同報告書からセグメントの設計について本節では述べる。ここでいう事業者は、当該工事において設計・施工を請け負った者をいう。一方、当該工事を発注した者は、発注者という。

4. 2. 1 セグメント、継手及び部材の諸元について

表4.2.1は当該工事のセグメントの諸元を示している。外径4820mm、内径4500mmであり、厚さ160mm、幅1400mmである。分割数はA1,A2,B1,B2,Kセグメントの5分割である。

図4.2.1にセグメント厚/トンネル外径比とトンネル外径の関係、図4.2.2にセグメント幅/厚比とトンネル外径の関係を示す。土木学会・日本下水道協会共編の『シールド工事用標準セグメント』¹⁵⁾によると、セグメントのセグメント厚/トンネル外径比を4%以上、セグメント幅/厚比を7以下としており、当該工事のセグメントはそれらの標準から逸脱している。

土木学会発行『セグメントの設計【改訂版】～許容応力度設計法から限界状態設計法まで～』¹⁶⁾によると、標準的なセグメントの寸法を逸脱する場合には、「耐久性や施工時荷重への対応等についても慎重に検討する必要がある」と記載されている。

表 4.2.1 セグメントの諸元 ¹⁴⁾

外径	φ 4, 820mm	
内径	φ 4, 500mm	
厚さ	160mm	
幅	1, 400mm	
分割	5分割 (4+K)	
継手構造	セグメント間	コンクリート突合せ構造
	リング間	ボルト式継手構造 (継手金物露出部はガルバナイズド防食を実施)
コンクリート	設計基準強度 $f_{ck} = 45\text{N/mm}^2$	
鉄筋	SD295A	

セグメント厚/トンネル外径比 (t/D)

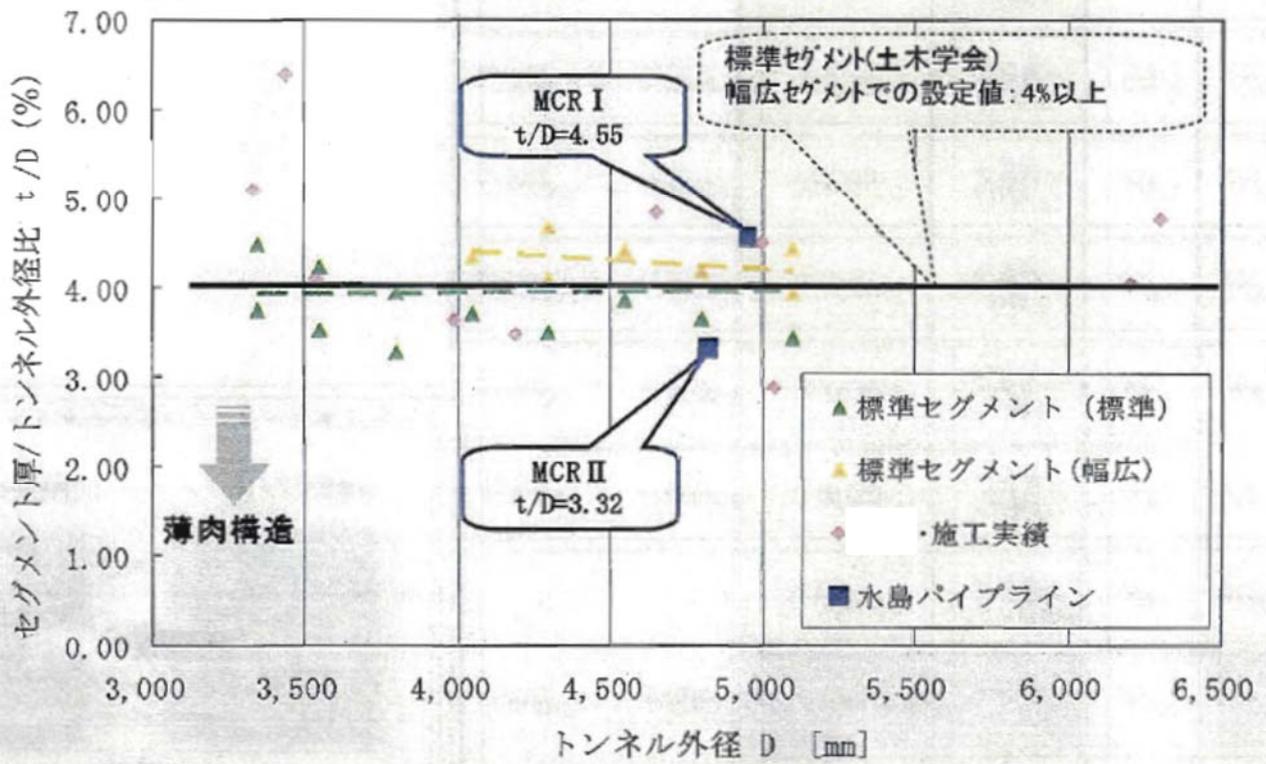


図 4.2.1 セグメント厚/トンネル外径比とトンネル外径の関係
(出典：事業者『セグメント組立て検討会』2011年12月7日¹⁷⁾)

セグメント幅/厚さ比 (W/t)

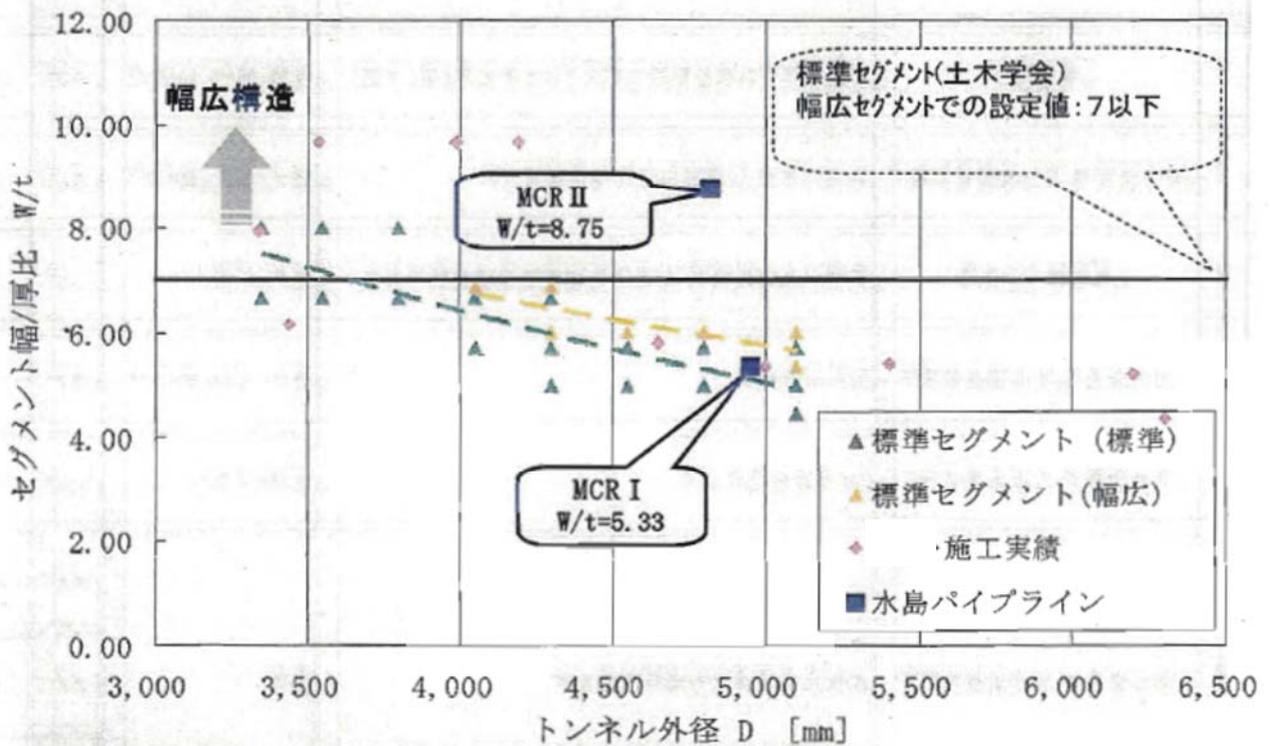


図 4.2.2 セグメント幅/厚比とトンネル外径の関係
(出典：事業者『セグメント組立て検討会』2011年12月7日¹⁷⁾)

当該工事のセグメント継手は、樹脂パイプのガイドのみのコンクリート突合せ構造である。

また、リング継手は、ボルト式継手構造であり、リング間はボルトにより締結される構造である。

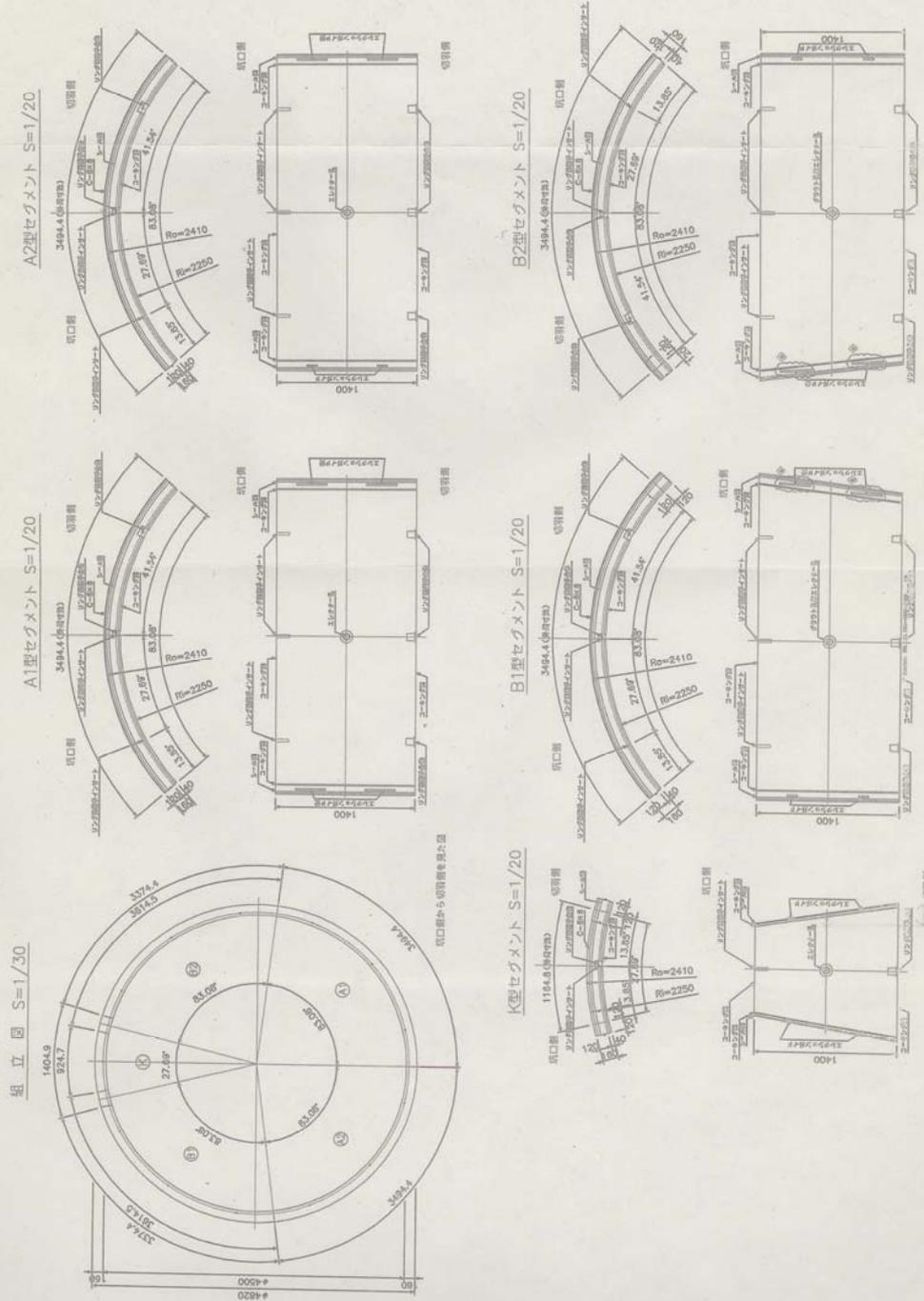
表 4.2.2 に部材の許容応力度を示しているが、ボルトには M16（外径 16mm）を用いており、引張応力度は 290N/mm^2 であり、せん断応力度は 200N/mm^2 である。

コンクリートの設計基準強度は 45N/mm^2 である。

表 4.2.2 部材の許容応力度¹⁴⁾

	コンクリート	鉄筋 SD295A	ボルト M16(8.8)
圧縮応力度 (N/mm^2)	16	180	---
引張応力度 (N/mm^2)	---	180	290
せん断応力度 (N/mm^2)	---	---	200
コンクリートの設計基準強度 : $\sigma_{ck} = 45 (\text{N/mm}^2)$			
※投錨時荷重、施工時荷重に対しては、許容応力度の短期割増 50%を考慮する。			

セグメント構造



図番	年月日	製	査	者	名	職
①						
②						
③						
④						
⑤						
⑥						
⑦						
⑧						
⑨						
⑩						
⑪						
⑫						
⑬						
⑭						
⑮						
⑯						
⑰						
⑱						
⑲						
⑳						
㉑						
㉒						
㉓						
㉔						
㉕						
㉖						
㉗						
㉘						
㉙						
㉚						
㉛						
㉜						
㉝						
㉞						
㉟						
㊱						
㊲						
㊳						
㊴						
㊵						
㊶						
㊷						
㊸						
㊹						
㊺						
㊻						
㊼						
㊽						
㊾						
㊿						

コンクリート：設計圧強 45N/mm²
 規格：SD295A

図 4.2.3 セグメント構造図

(倉敷労働基準監督署に提出された『建設工事計画届』から)

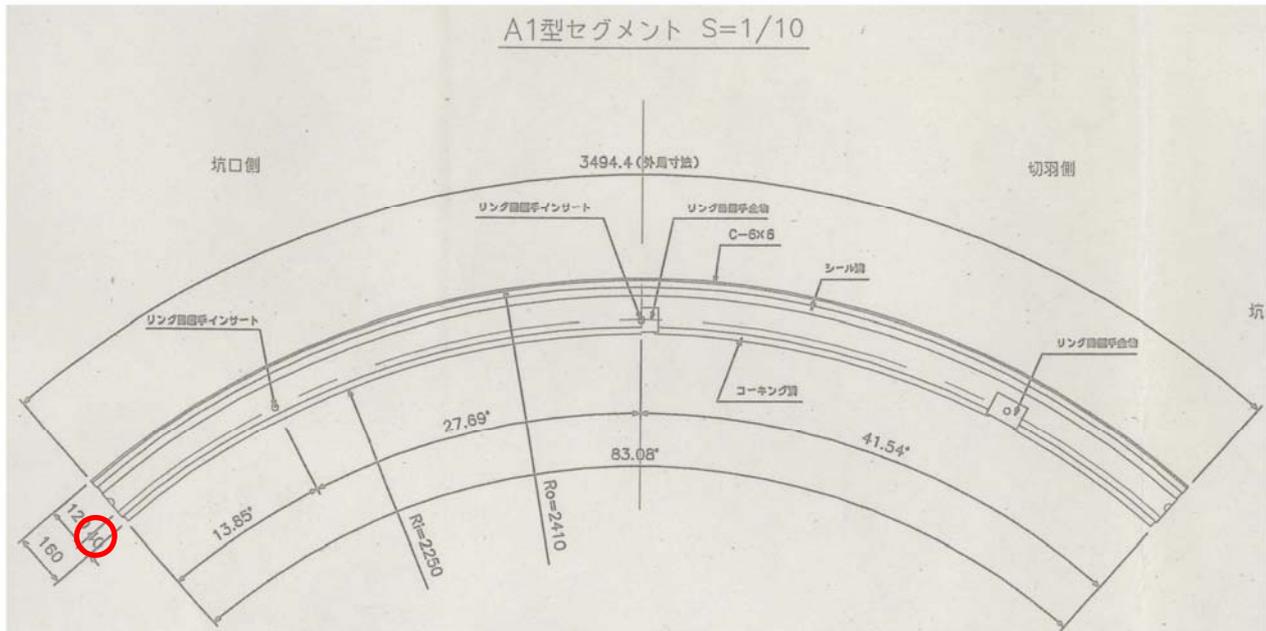


図 4.2.5 A1 セグメントの構造図¹⁴⁾

図 4.2.3 にセグメント構造図を示す。リング継手は切羽側にボルトボックス、坑口側にボルトインサートを有する構造であることがわかる。

図 4.2.4 にセグメント継手及びリング継手の詳細図を示す。セグメント継手は樹脂パイプのみであること、リング継手のボルトインサートは外径 29mm であることがわかる。図 4.2.5 の丸印で示すように、ボルトインサートの外径 29mm に対してコンクリートの被りは $40\text{ mm} - (29\text{ mm} / 2) = 25.5\text{ mm}$ となっている。

土木学会が発行するコンクリート標準示方書【設計編】¹⁸⁾によると、『かぶりは、コンクリート構造物の性能照査の前提である付着強度を確保するとともに、要求される耐火性、耐久性、構造物の重要度、施工誤差等を考慮して定めなければならない。ただし、かぶりは鉄筋の直径に施工誤差を加えた値よりも小さい値としてはならない。』とある。ボルトインサートは鉄筋ではないが、鉄筋においてはコンクリートの被りは鉄筋の直径以上なくてはならない。ボルトインサートも鉄筋と同様な考え方をすると、ボルトインサートの直径以上のコンクリートの被りをもたなければ、本来の付着強度を発揮しないと考えられる。当該セグメントにおいては、ボルトインサートの直径 29mm に対して、コンクリートの被りが 25.5mm となっており、ボルトインサートの直径よりも被りが小さい。実際に、第 8 章 8.3 節で述べるように、コンクリートの被りの小さい方向にボルトインサートを載荷すると、ボルトのせん断力 (=ボルトの許容せん断応力度 $200\text{ N/mm}^2 \times$ ボルトの有効断面積 $157\text{ mm}^2 = 31.4\text{ kN}$) よりも小さい力 (28.1kN) でボルトインサートがコンクリートから抜け出す。これは、実際に期待している耐力よりも小さな荷重でリング継手が破壊することを意味する。

4. 2. 2 セグメントの構造設計法について

(1) はりばねモデル計算法及び継手について

セグメントの構造検討は、セグメント本体を「はり」、継手を「ばね」にモデル化した「はりばねモデル計算法」（図 4.2.6 参照）で実施されている。

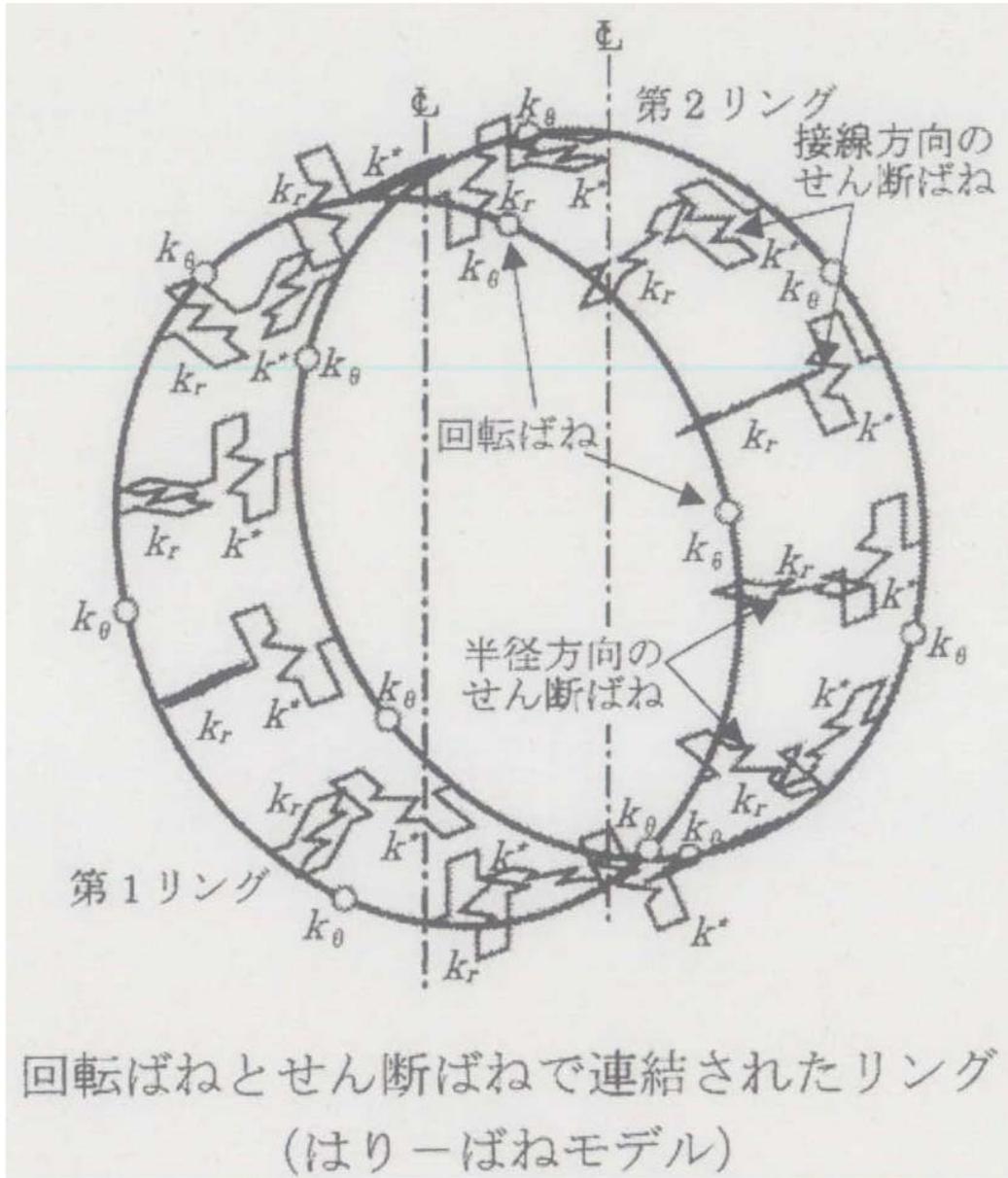


図 4.2.6 はりばねモデル計算法¹⁴⁾

セグメント継手の回転ばね定数は、下式に示すレオンハルトの突合せ継手に関する *Betongelenke* の理論式より算出される回転ばね値を用いている。

$$k_{\theta} = \frac{M}{\alpha}$$

$$= \frac{9a^2bE_0}{8} \cdot m \cdot (1-2m)^2$$

ここに、

k_{θ} : 回転ばね定数 (kNm/rad)	
M : 曲げモーメント	(kNm)
α : 回転角度	(rad)
m : 荷重偏心率 $m = e/a = M/(N \times a)$	(-)
N : 軸力	(kN)
a : セグメント桁高	0.16 (m)
b : セグメント幅	1.4 (m)
E_0 : コンクリートのヤング係数	3.3×10^7 (kN/m ²)

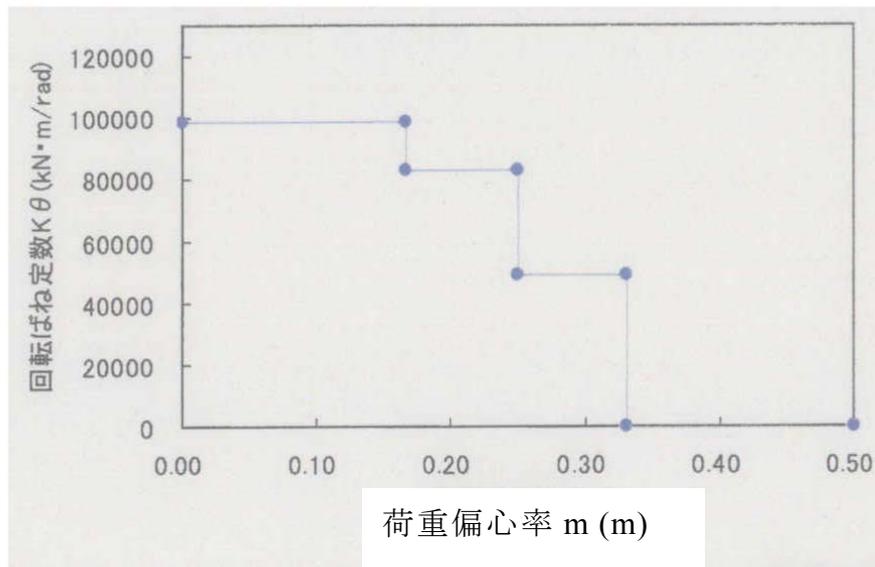


図 4.2.7 回転ばね定数と荷重偏心率の関係¹⁴⁾

回転ばね定数の値は荷重偏心率の値に応じて低減する。例えば、荷重偏心率 m が $0 \sim 0.167$ の場合、回転ばね定数 K_{θ} は 99000 kNm/rad であり、荷重偏心率が 0.333 以上となると回転ばね定数は 0 となる。

ここで、軸力が作用しない場合 ($N = 0$)、荷重偏心率 $m = M/(N \times a)$ は N に反比例するので無限大に大きくなり、回転ばね定数は 0 となる。ただし、はり—ばねモデル計算法では、回転ばね定数がたとえ 0 になったとしてもセグメント継手は離れることはなく、回転に抵抗しないヒンジ点となるだけである。

したがって、はり—ばねモデル計算法でセグメントを設計する場合には、実物においてもセグメント間を締結することが望まれる。なぜなら、セグメント間を締結し

ておけば、たとえ軸力が0になったとしても、セグメント継手が離れることはなく、はり一ばねモデル計算法により近い形となるからである。締結力のないセグメント継手では、施工過程において設計条件と異なる状況が生じた場合、軸力が小さく、曲げモーメントが大きくなる状況等では、偏心が生じセグメントが不安定になる可能性がある。

特にセグメント組立中及びセグメントがシールドマシンから地盤に露出した直後は、裏込め注入材を介して地盤とセグメントが均等に接していない等により、軸力が設計荷重ほど期待できない条件であることを十分に考慮の上設計すべきである。

一方、リング継手のせん断ばね定数 k_r 及び k^* は 1.0×10^5 kN/m という値を用いている。図 4.2.6 からわかるように、リング継手は、セグメントリングが半径方向に縮む場合や伸びる場合に抵抗し、セグメントリングが横断方向にずれる場合にも抵抗する。しかしながら、Kセグメントが抜け出すような、縦断方向への抵抗力ははり一ばねモデル計算法では考慮されておらず、そのような変形もはり一ばねモデル計算法では発生しない。ただし、後述するように当該災害では実際に Kセグメントの抜け出しが発生し、災害の原因となっているものと推定される。

(2) 設計荷重について

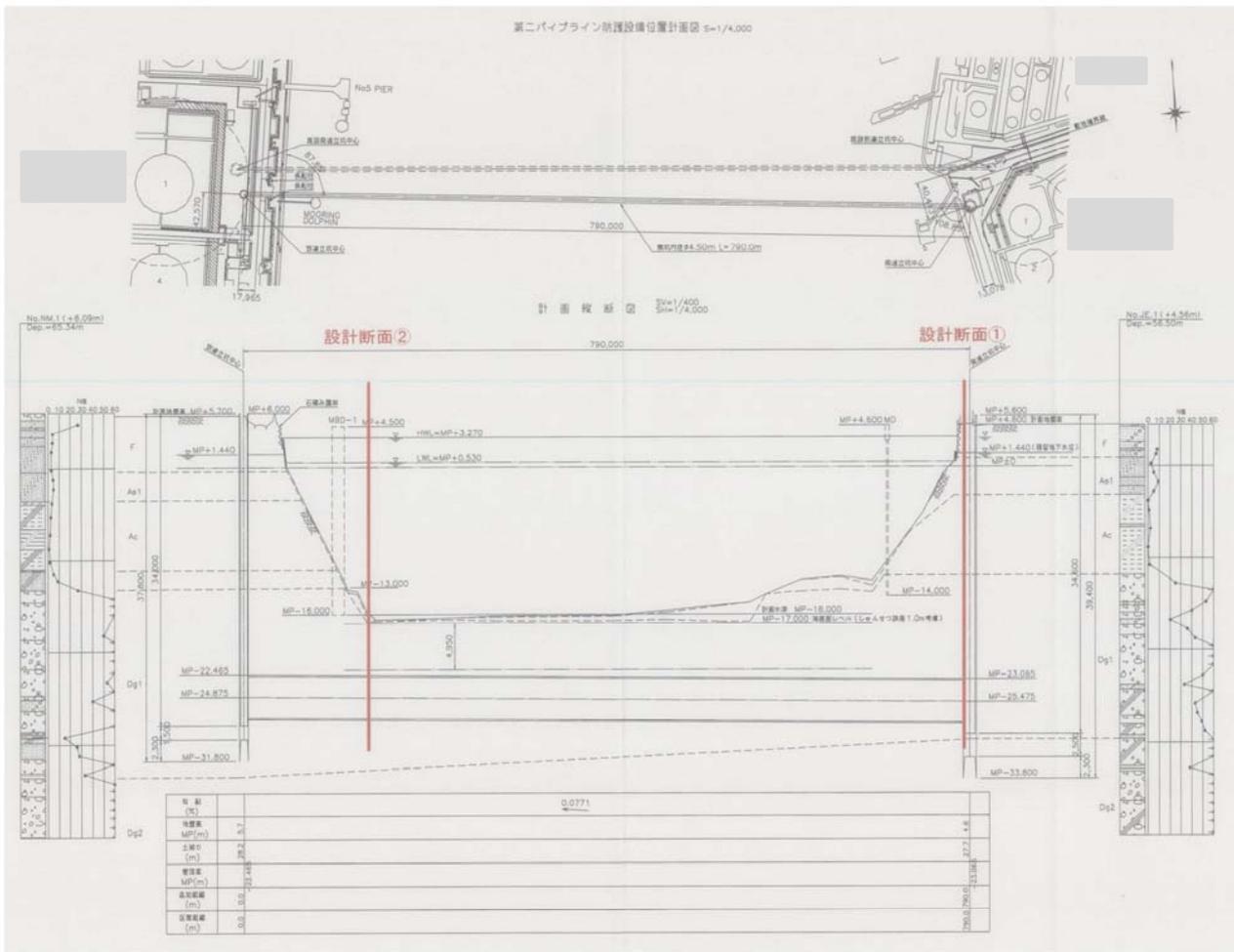


図 4.2.8 全体縦断図及び設計断面選定位置¹⁴⁾

図 4.2.8 に全体縦断図及び設計断面選定位置を示す。ここでは、設計断面①について述べる。

図 4.2.9 は設計断面①の設計土層断面を示す。同図の断面を選定した理由としては、『横坑全線において、 $2.0D_0$ （セグメント外径の 2 倍）のゆるみ土圧を設定しているため、作用土圧は等しい。したがって、作用水圧が最大となる発進立坑付近を常時荷重に対する設計断面とする。』とされている。

水深 H_w は 26.335m、土被り $2D_0$ は 9.640m である。設計時に入力された土圧、水圧を表 4.2.4 に示す。その他、自重反力及び地盤反力も設計時には入力されている。自重反力はセグメントの体積に鉄筋コンクリートの単位体積重量 26.0kN/m^3 を乗ずることで算出する。

1 リング当たりのセグメントの重量

$$= \frac{\pi \times (4.82^2 - 4.5^2)}{4} \times 1.4 \times 26.0 = 85.262\text{kN}$$

1 リングあたりに作用するセグメントの自重反力

$$pg = \frac{85.262}{[(4.82+4.5)/2]} = 18.297 \text{ kN/m}$$

地盤反力係数 K は土木学会が発行している『2006 年制定 トンネル標準示方書 シールド工法・同解説』¹⁹⁾を参考に 40 MN/m^3 という値を用いている。地盤反力係数とは、セグメントリングの半径が、セグメントの平均半径よりも大きくなる場合、その変位量に応じてセグメントリングの中心に向かって地盤から反力を与えるというものである。

当該工事のはりばねモデル計算において、セグメントリングは 209 個の節点で構成されている。例えば、セグメントリングを構成するある節点の中心からの距離（半径）が 2.43 m となったとき、 $2.43 - [(2.41+2.25)/2] = 0.1 \text{ m}$ の変位量が発生するため、その地盤反力は、 $40 \text{ MN/m}^2 \times 0.1 \text{ m} = 4.0 \text{ MN/m}$ となり、その節点をセグメントリングの中心に向かわせるような反力が発生する。

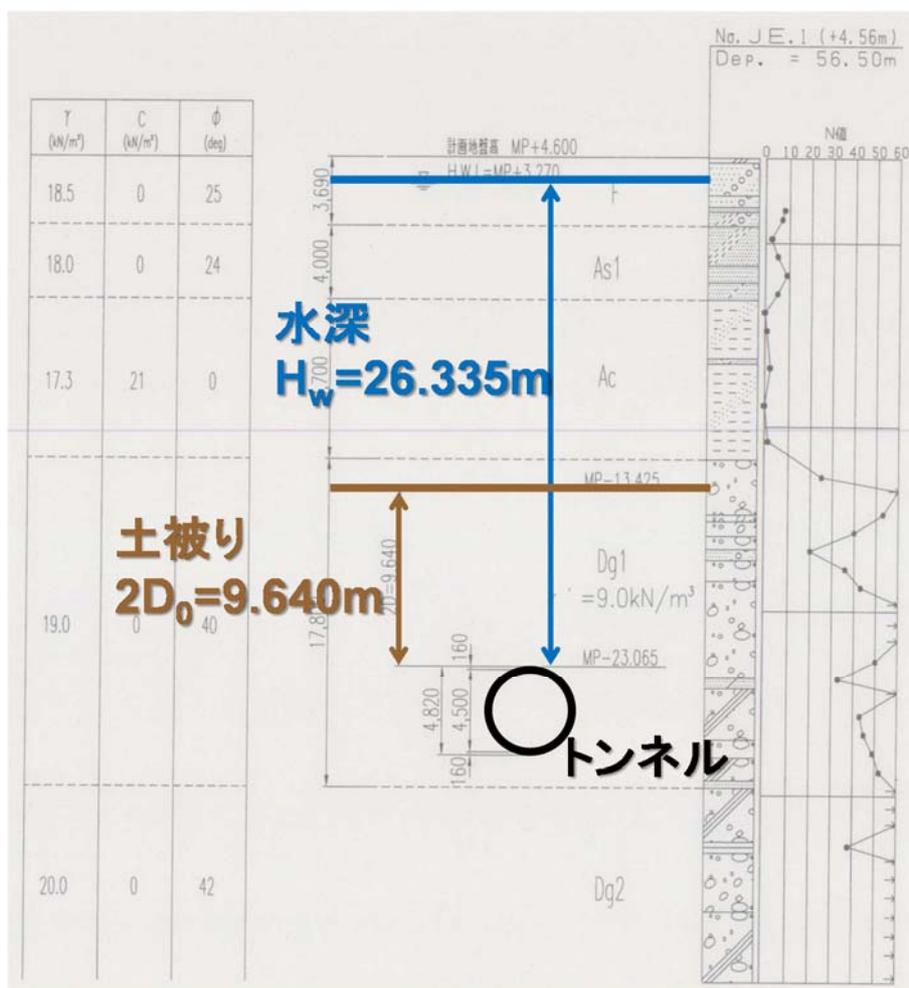
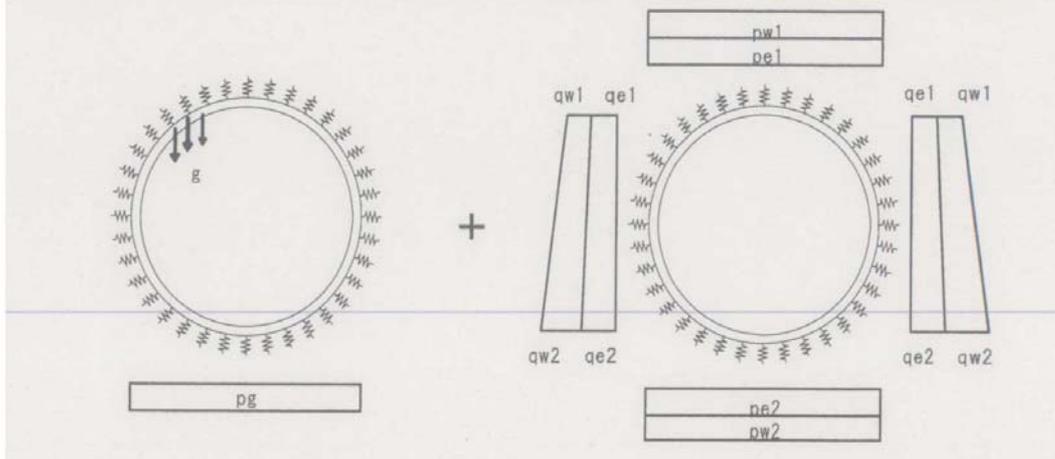


図 4.2.9 土被りと水深¹⁴⁾に加筆

表 4.2.4 設計における土圧と水圧¹⁴⁾

項目		単位	荷重値	
			m当り	リング 当り
頂部鉛直土圧	pe1	kN/m ²	86.76	121.46
底部鉛直土圧	pe2	kN/m ²	37.11	51.95
頂部側方土圧	qe1	kN/m ²	34.70	48.58
底部側方土圧	qe2	kN/m ²	52.05	72.87
頂部水圧	pw1	kN/m ²	271.25	379.75
底部水圧	pw2	kN/m ²	320.90	449.26



(3) 断面力について

はりばねモデル計算法にて算出された曲げモーメント、軸力、せん断力をそれぞれ図 4.2.10 に示す。

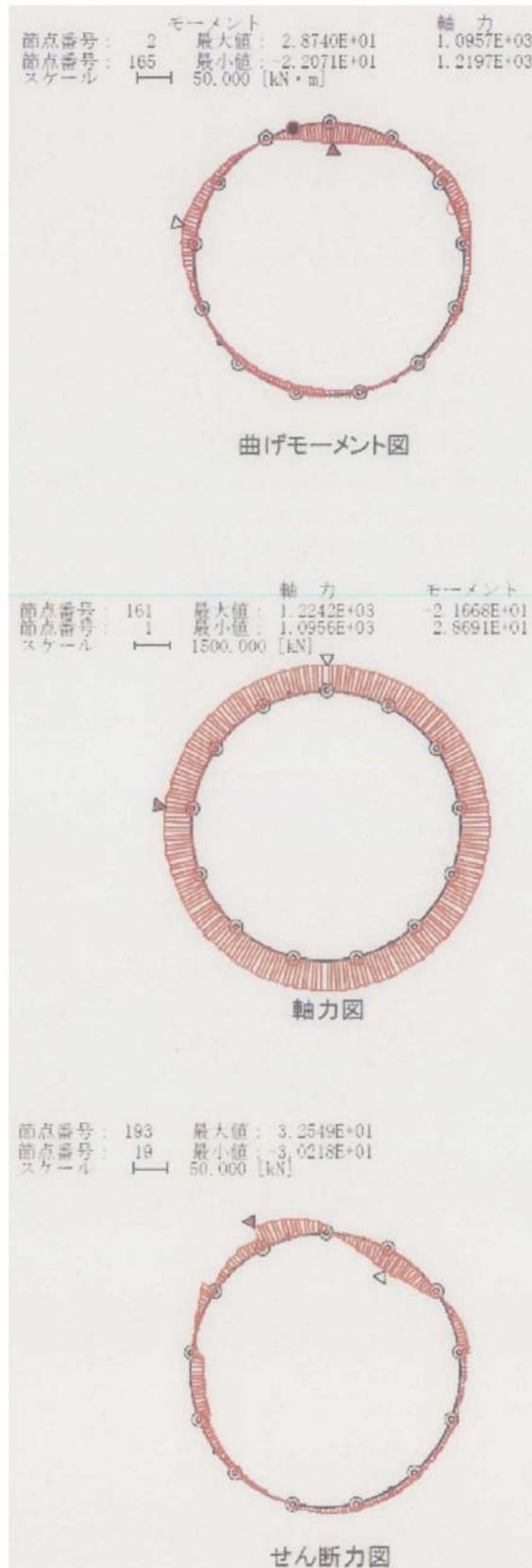


図 4.2.10 断面力

表 4.2.5 にセグメント及びセグメント継手の最大断面力一覧、表 4.2.6、表 4.2.7 にそれぞれセグメント、セグメント継手の応力度照査、図 4.2.11 にリング間せん断力を示す。

表 4.2.5 セグメント及びセグメント継手の最大断面力一覧

本体部				
項目	単位	正最大曲げ位置	負最大曲げ位置	最大せん断位置
曲げモーメント M	(kN・m/Ring)	28.7	-22.1	1.2
軸力 N	(kN/Ring)	1095.7	1219.7	1147.0
せん断力 Q	(kN/Ring)	-0.6	1.7	32.5

継手部				
項目	単位	最大曲げ位置	最大せん断位置	
曲げモーメント M	(kN・m/Ring)	16.2	16.2	
軸力 N	(kN/Ring)	1127.7	1127.7	
せん断力 Q	(kN/Ring)	27.0	27.0	

表 4.2.6 セグメントの応力度照査

検討位置			正最大曲げ モーメント位置		負最大曲げ モーメント位置		最大せん断位置	
断面寸法	B	mm	1400		1400		1400	
	h	mm	160		160		160	
断面力 (リング当り)	M	kN・m	28.7		-22.1		1.2	
	N	kN	1095.7		1219.7		1147.0	
	Q	kN	-0.6		1.7		32.5	
引張側有効高	d	mm	108.5		108.5		108.5	
引張側鉄筋量	As	cm ²	7.602		7.602		7.602	
圧縮側有効高	d'	mm	51.5		51.5		51.5	
圧縮側鉄筋量	As'	cm ²	7.602		7.602		7.602	
ヤング係数比	n	—	15		15		15	
応力度	応力状態		全圧縮		全圧縮		全圧縮	
	x	mm	157.0		182.6		238.0	
	σ_c	N/mm ²	9.1	OK	8.7	OK	6.3	OK
	σ_s	N/mm ²	全圧縮	OK	全圧縮	OK	全圧縮	OK
	τ_c	N/mm ²	0.00	OK	0.01	OK	0.22	OK
許容応力度	σ_{ca}	N/mm ²	16.0		16.0		16.0	
	σ_{sa}	N/mm ²	180.0		180.0		180.0	
	τ_a	N/mm ²	0.74		0.74		0.74	

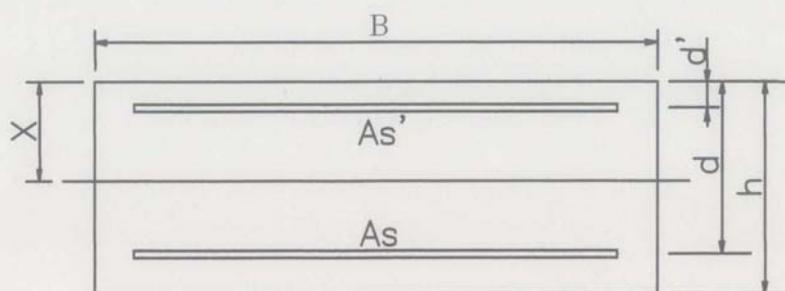


表 4.2.7 セグメント継手の照査

項目		
曲げモーメント M	k N・m	16.2
軸力 N	kN	1127.7
偏心量 e	mm	14.4
圧縮力作用範囲	mm	196.9
圧縮力作用状態	—	全断面圧縮状態
縁圧縮応力度 δ_c	N/mm ²	5.0
許容圧縮応力度 δ_{ca}	N/mm ²	16.0
判定	—	OK

はりばねモデルによって計算されたリング間せん断力(図V-2.3)を用いて、リング継手部で使用するボルト M16(8.8)の照査を行う。

節点番号: 177 最大値: 1.1295E+01
 節点番号: 91 最小値: 9.5796E-01
 スケール: 20.000 [kN]



リング間せん断力図(R2-R3)

図V-2.3 リング間せん断力(設計断面①)

最大リング間せん断力 $Q_{rs} = 11.3\text{kN}$ より

$$\begin{aligned} \tau_B &= Q_{rs} / A_{B2} \\ &= 11.3 \times 1000 / 157 \\ &= 72.0 \text{ N/mm}^2 < \tau_{Ba} = 200 \text{ N/mm}^2 \quad \text{M16(8.8) - OK} \end{aligned}$$

ここで、 Q_{rs} :	リング間せん断力	11.3 kN
τ_B :	ボルトの設計せん断応力度	N/mm ²
τ_{Ba} :	ボルトの許容せん断応力度	200 N/mm ²
A_{B2} :	ボルト有効断面積	157 mm

図 4.2.11 リング継手の照査

図 4.2.11 からリング継手に発生する最大せん断力は 11.3kN とあり、そのときのリング継手に加わるせん断応力は 72.0 N/mm² とある。一方、リング継手で使用するボルト M16 (8.8) の許容せん断応力度は 200 N/mm² であり、せん断力にすると 31.4 kN であり、リング継手はせん断しない。

しかしながら、リング継手の照査にボルトのせん断力を用いているが、第 8 章で述べるように、ボルトのせん断力 (31.4kN) を発揮する前にリング継手のボルトインサートとコンクリートの被りが薄いため、コンクリートが剥離してしまう (28.1kN)。はりばねモデル計算法から算出されるリング継手に発生する最大せん断力は 11.3kN であるから、設計荷重ではコンクリートも剥離することはないが、シールドマシンによる偏圧や裏込め注入材が未注入のセグメントについては過大なせん断力も発生すると考えられるため、注意が必要な設計 (コンクリートの剥離強度も考慮すべき) となっている。

図 4.2.12 に示すように、ジャッキ推力についても圧縮応力度の照査が実施されている。コンクリートは、ジャッキ推力による圧縮応力に対して十分な耐力を有することが示されている。

ジャッキ推力がセグメント厚さの中心より内縁へ 25.0mm 偏心したときの検討(図 V-2.7)を行う。

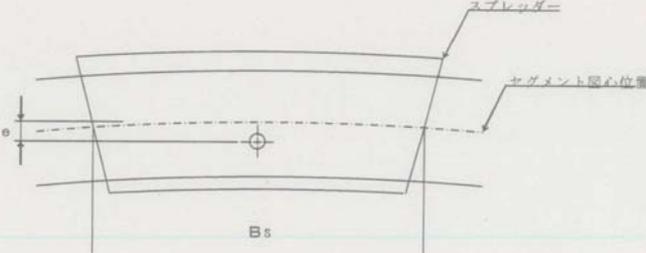
ジャッキスプレッダーの当たる面積 A_s は

$$A_s = B_s \cdot h = 0.463 \times 0.160 = 0.074 \text{ m}^2$$

このときスプレッダーの当たる中心位置の周長 B_s は

$$\begin{aligned} B_s &= 2 \cdot \pi \cdot R_c / N_j - l_s \\ &= 2 \cdot \pi \cdot 2.330 / 26 - 0.10 \\ &= 0.463 \end{aligned}$$

断面 2 次モーメント I' は

$$\begin{aligned} I' &= (B_s \cdot h^3) / 12 \\ &= (0.463 \times 0.160^3) / 12 \\ &= 0.000158 \text{ m}^4 \end{aligned}$$


ジャッキ推力 $P = 823 \text{ kN}$ より

コンクリートの最大圧縮応力度 σ_c は

$$\begin{aligned} \sigma_c &= P / A_s + (P \cdot e \cdot 0.5 \cdot h) / I' \\ &= (823 \times 10^3 / 0.074 \times 10^6) + (823 \times 10^3 \times 25 \times 0.5 \times 160) / 0.000158 \times 10^{12} \\ &= 21.5 \text{ N/mm}^2 \leq \sigma_{ca} = 16 \times 1.5 = 24.0 \text{ (OK)} \end{aligned}$$

図 V-2.7 ジャッキ推力に対する検討

ジャッキ推力に対する検討結果を表 V-2.9 に示す。

表 V-2.9 ジャッキ推力に対する検討結果

項目	単位	諸元値
セグメント内径	D_i m	4.500
セグメント外径	D_o m	4.820
桁高	h m	0.160
セグメント幅	B m	1.400
ジャッキ推力	P kN	823
半径	R_c m	2.330
ジャッキ本数	N_j 本	26
スプレッダー間距離	l_s m	0.100
中心位置周長	B_s m	0.463
断面積	A_s m ²	0.074
断面二次モーメント	I' m ⁴	0.000158
ジャッキ偏心量	e m	0.025
発生応力度	σ_c N/mm ²	21.5
許容値	σ_{ca} N/mm ²	24.0
判定		O.K.

図 4.2.12 ジャッキ推力に対する検討

4. 3 シールドマシンの設計について

倉敷労働基準監督署に提出された計画届から、シールドマシンの仕様について、表 4.3.1 に示す。

当該災害に係るシールドマシンの主な仕様は以下のとおりである。

- ・スキンプレート外径 4950 mm
- ・スキンプレート本体長さ 6345 mm
- ・テールシール ワイヤブラシ 2 段
- ・テールクリアランス 29 mm
- ・シールドジャッキ 823 kN × 1900 mm ストローク × 26 本
- ・掘削外径 4970 mm
- ・余掘り (掘削外径 4970-セグメント外径 4820)/2= 75 mm

表 4.3.1 シールドマシンの仕様

1. シールド本体関係	
(1) スキンプレート外径	φ 4950 mm
(2) スキンプレート本体長さ	6345 mm
(3) テール部板厚	36 mm
(4) テール部内径	φ 4878 mm
(5) テール部長さ	2885 mm
(6) テールクリアランス	29 mm
(7) テールシール	ワイヤブラシ 2段
(8) 中折れ装置	無し
(9) 分割	11 分割
2. 推進装置	
(1) シールドジャッキ	823kN × 1900mmストローク × 26本
(2) 切羽単位当り推力	1112 kN/m ²
(3) シールドジャッキ伸長速度	50 mm/min (全数作動時)
3. カッタ装置	
(1) カッタ装置	
(a) 支持方式	センタシャフト
(b) カッタヘッド外径	φ 4940 mm
(c) 掘削外径	φ 4970 mm
(d) カッタヘッド形式	スポークタイプ
(e) 回転方向	左右両回転
(f) 駆動方式	油圧モータ駆動
(c) 回転数 常用最大時	1.0 min ⁻¹
(d) 装備トルク 常用最大時	2217 kN・m (α=18.3)
(2) オーバカッタ装置	
(a) 形式	コピーカッタ
(b) 装備数	1 基
(c) オーバカッタ量	50 mm (スキンプレートからの出代)
(d) 作動方式	油圧式

4. エレクタ装置

(1) 型式	門型
(2) 回転数	1.0 min-1
(3) 回転角度	左・右 210°
(4) 押込力	138 kN
(5) 吊上力	94 kN
(6) 昇降ストローク	500 mm
(7) 回転取扱質量	約 2300 kg
(8) グリップスライド量	500 mm
(9) サポートジャッキ	有
(10) 操作方式	無線/有線

5. スクリュウコンベヤ

(1) 型式	リボンスクリュウコンベヤ	
(2) トラフ内径	φ 710 mm	
(3) スクリュウ径	軸径 φ 230 mm	外径 φ 700 mm
(4) スクリュウピッチ	600 mm	
(5) スクリュウ長さ	約9250 mm	
(6) 駆動方式	油圧モータ駆動	
(7) 回転数	0 ~ 7.5 min-1	
(8) 装備トルク	75.3 kN・m	
(9) 装備数	1 基	
(10) 排土量	79.0 m ³ /h (効率100%時)	
(11) 排土口ゲート	有	

6. パワーユニット

用途	電動機		油圧ポンプ		台数	備考
	出力 kw	電圧 V×Hz	吐出量 L/min	圧力 MPa		
カッタヘッド	75	440×60	183	19.1	4	
シールドジャッキ	22	440×60	31.3	34.3	1	
エレクトロカッタ	22	440×60	45	20.6	1	共用
スクリュウ	75	440×60	242	14.7	1	
ゲート	15	440×60	35	13.7	1	

7. 油圧ジャッキ

名 称	推 力 kN	本 数 本	全推力 kN	ストローク mm	使用圧力 MPa	備 考
シールドジャッキ	823	26	21398	1900	34.3	
エレクト昇降ジャッキ	69	2	138	500	13.7	
エレクト摺動ジャッキ	39	1	39	500	13.7	
エレクトサポートジャッキ	25.4	4	25.4	60	9	
コピーカッタジャッキ	156.8	1	156.8	65	13.7	
No.1ゲートジャッキ	68.6	4	137.2	370	13.7	
No.2ゲートジャッキ	107.8	2	215.6	385	13.7	

8. 油圧モータ

名 称	種 類	出力軸トルク kN・m	出力軸回転数 min-1	使用圧力 MPa	台 数	備 考
カッタヘッド	プランジャ	46.7	6	19.1	8	
エレクト	プランジャ	14.7	9.3	20.6	1	
スクリュウ	プランジャ	46.9	46.9	14.7	2	

9. 計装装置

項 目	型 式	装備数	備 考
ピッチングローリング計	電気式	1	
	下げ振り式	1	
土圧計 (チャンバー内)	電気式	2	
シールドジャッキストローク計	電気式	3	上左右
コピーカッタストローク計	流量積算式	1	
ゲートストローク計	流量積算式	1	1次ゲート
	電気式	1	2次ゲート
油圧計	電気式	4	
	ブルドン管式	5	
カッタ回転計	電気式	1	
スクリュウ回転計	電気式	1	

図 4.3.1、図 4.3.2 にシールドマシンの設計図、表 4.3.2 にシールドマシンの設計図から仕様を示す。また、図 4.3.3～図 4.3.5 にシールドマシンの組立状況、エレクター、テール部の写真をそれぞれ示す。

図 4.3.1 から組立中のセグメントの 1 つ前のセグメントはシールドマシンから地盤に露出しており、セグメントの幅 1400mm に対して 515mm がシールドマシン内に入っている。テールシールは 2 段となっており、ワイヤブラシ内に裏込め注入材が固着した場合、ワイヤブラシ内を掃除できない状況にある。テールシールが 3 段であれば、坑口側のワイヤブラシと中間のワイヤブラシで止水できるため、最も切羽側のワイヤブラシの掃除が可能となる。

図 4.3.5 からワイヤブラシの写真を見ると、内バネ板、外バネ板ともに変形容易な薄い板となっている。第 9 章で述べるが、災害発生時に土砂水が坑内に流入した場合、流入圧により容易に変形すると考えられる。

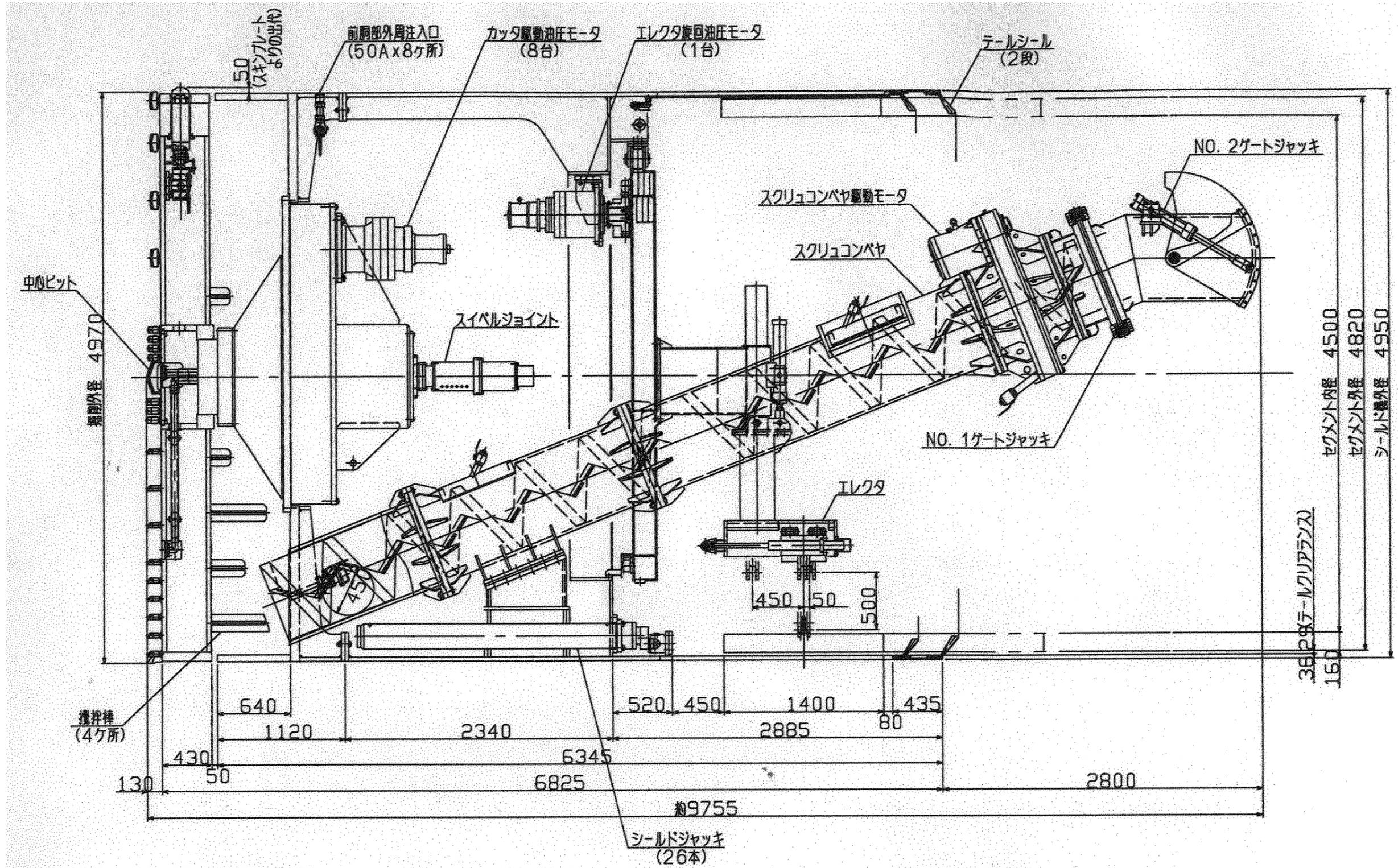


図 4.3.1 シールドマシンの設計図 (側面図)

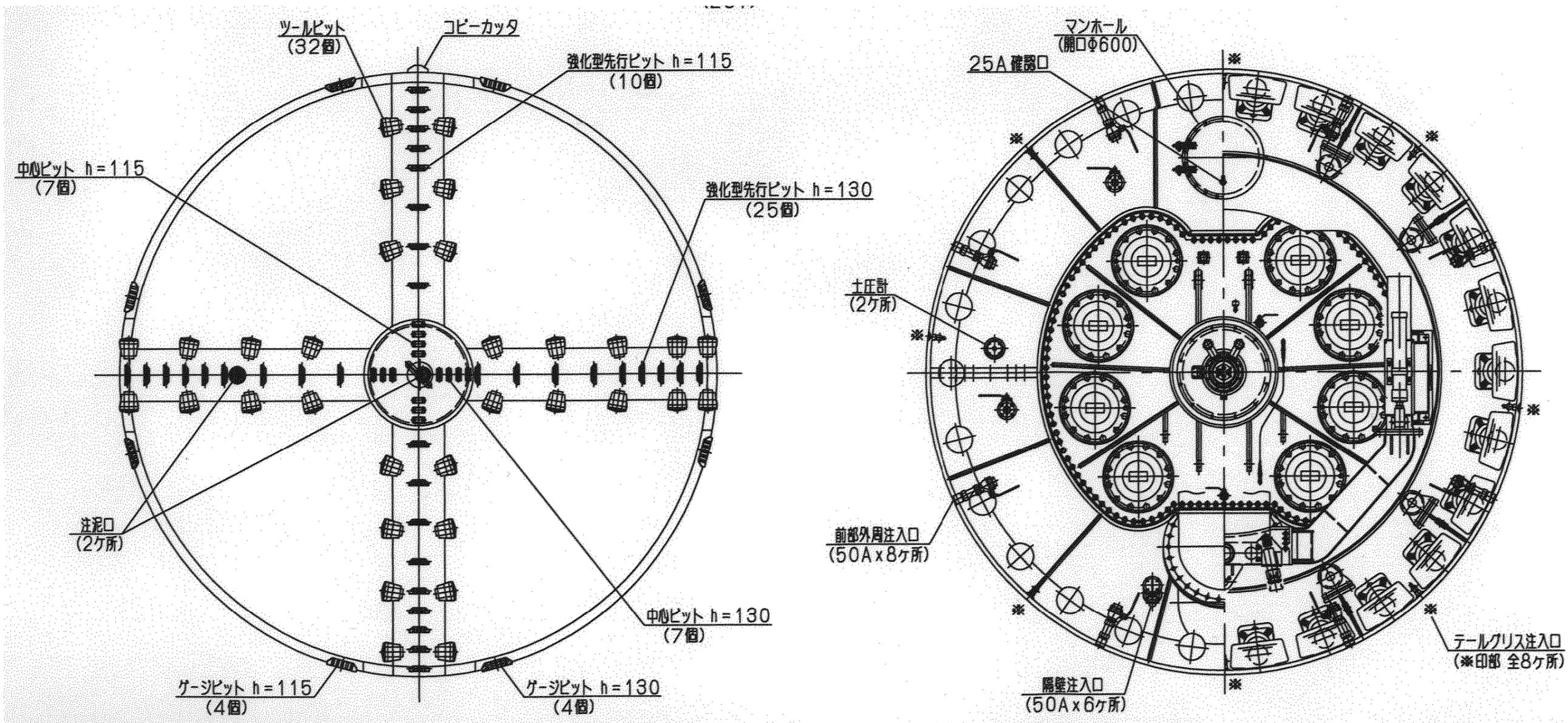


図 4.3.2 シールドマシンの設計図 (前面、後面図)



図 4.3.3 発進立坑内でのシールドマシン組立状況

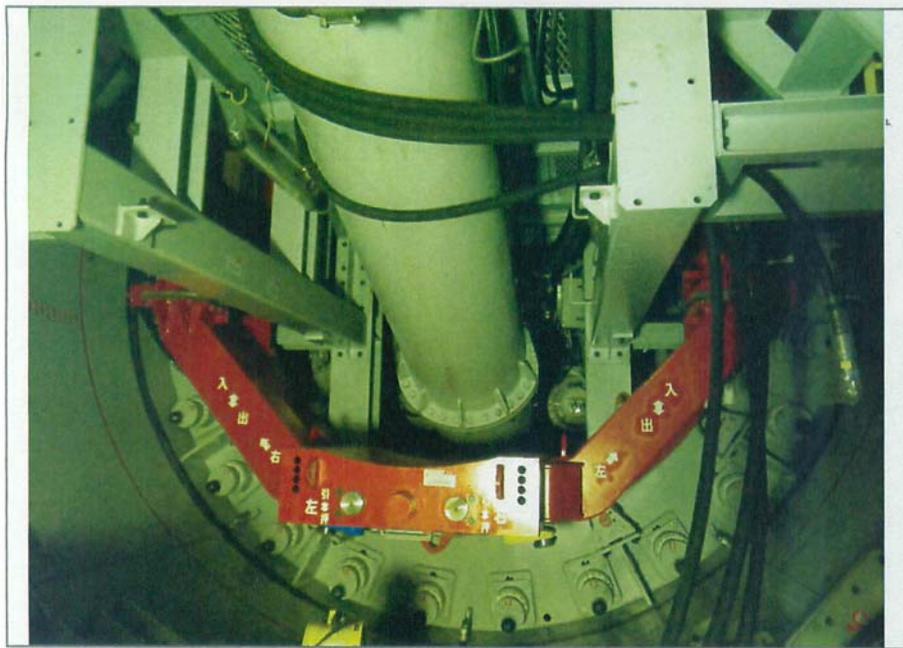


図 4.3.4 エレクター



(a) ワイヤーブラシ（新品）



(b) ワイヤーブラシの内板ばね（新品）



(c) テールシール部 (2 段)

図 4.3.5 ワイヤブラシとテールシール部 (施工前)

4. 4 本章のまとめ

- (1) シールドマシンの全長が短く、テール部が短い仕様であり、加えて、セグメントも薄肉、弧長大、幅広であった。
- (2) セグメント厚/トンネル外径比及びセグメント幅/厚比は、今までの実績値の標準的な値から余裕が小さくなる方向（危険側）に外れていた。また、リング継手は樹脂パイプのガイドであり、セグメント間を締結するものではない。さらに、リング継手のボルトインサートのコンクリートの被りが基準類の値より薄い。
- (3) セグメント寸法は今までの実績値の標準的な値から外れていたにもかかわらず、その影響を十分考慮せずにセグメントの構造設計は基準類どおりに実施しており、トンネル円周方向の軸力が十分に作用しない条件下でのセグメントリングの安定性、シールドマシンとの競りによる偏圧、K セグメントの抜け出し等の施工中の安全が十分に考慮されていなかった。
- (4) テールシールは 2 段となっており、ワイヤブラシ内に裏込め注入材が固着した場合、ワイヤブラシ内を掃除できない状況となり止水性を回復できない。

参考文献

- 1) 国土交通省：第2回シールドトンネル施工技術安全向上協議会資料
- 2)～13) 省略
- 14) 事業者：「水島第二パイプライン防護設備建設工事 平成22年度詳細設計 設計計算書（その1）」，2011年3月.
- 15) 土木学会・日本下水道協会共編：シールド工事用標準セグメントー下水道シールド工事用セグメントー，428p.，2001年7月18日発行，2001.
- 16) 土木学会：セグメントの設計【改訂版】～許容応力度設計法から限界状態設計法まで～，406p.，2010年2月19日発行，2010.
- 17) 事業者：「セグメント組立て検討会」，2011年12月7日.
- 18) 土木学会コンクリート委員会 コンクリート標準示方書改訂小委員会：2007年制定 コンクリート標準示方書[設計編]，社団法人土木学会，pp.186, pp.346-347, 2007.
- 19) 土木学会トンネル工学委員会：2006年制定 トンネル標準示方書[シールド工法]・同解説，社団法人土木学会，2006.