

シールドトンネル施工技術安全向上協議会  
報告書

平成 26 年 3 月

シールドトンネル施工技術安全向上協議会

## はじめに

シールドトンネル施工技術安全向上協議会が実施する検討は、平成 24 年 2 月 7 日に発生した岡山県倉敷市のシールドトンネル工事現場での事故を受けて、事故の再発防止を図るため、シールドトンネルの設計・施工について技術的な検討を行うことを目的とするものであり、事故の責任の所在を追求することを目的に行うものではない。

今回の事故は、海底トンネルをシールド工法により構築する工事で、シールドの掘進中にトンネル内へ海水が流れ込み 5 名の死亡者が生じたものであり、再発防止策等の検討が必要であると考えられる。そのため、協議会では、倉敷市の事故に関する検討と広くシールド工事を受注する建設会社からシールド工事に関するアンケート調査を実施し、シールド工事の安全向上に関する提言を取りまとめたので、以下のとおり報告する。

## 目 次

1. 事故概要とシールドトンネル施工技術安全向上協議会の設置	1
1.1 事故の概要	1
1.2 シールドトンネル施工技術安全向上協議会の設置	1
2. 日本のシールドトンネル工事の現状	3
2.1 日本におけるシールド工事の実施状況	3
2.2 シールド工事における技術基準、技術開発経緯	8
3. 倉敷市の事故に関する検討	12
3.1 工事概要	12
3.2 事故発生時の状況	19
3.3 現地調査結果	23
3.3.1 回収されたセグメントの調査結果	24
3.3.2 引揚げられたシールドの調査結果	36
3.3.3 セグメント型枠の調査結果	45
3.4 施工データの調査結果	47
3.5 事故発生時のシミュレーション解析	62
3.5.1 三次元有限要素法によるセグメント挙動の検討	62
3.5.2 三次元浸透流解析による切羽圧変化の検討	67
3.6 K-B間のセグメント継手面の摩擦係数試験	71
3.7 調査・検討等により明らかになった主な事項	74
3.8 考えられる事故の発生メカニズム	76
3.9 事故発生の変因の整理	84
4. シールド工事に関するアンケート調査	86
4.1 要旨	86
4.2 シールド工事を行う建設会社からのアンケート調査による結果とりまとめ	86
5. シールド工事の安全向上に関する提言 ～ シールドトンネルの設計・施工における留意事項 ～	89
6. おわりに	102
参考資料	参- 1
I 協議会経過と公表資料	参- 1
I.1 協議会規約・委員名簿	参- 1
I.2 協議会の開催経過	参- 4
I.3 公表資料	参-11
II 現地調査結果	参-12
II. 1 セグメントの調査結果	参-12

Ⅱ. 2 シールドの調査結果 .....	参-33
Ⅱ. 3 セグメント型枠の調査結果 .....	参-40
Ⅲ 施工関係者のヒアリング結果 .....	参-46
Ⅳ 三次元有限要素法によるセグメントの挙動解析 .....	参-68
Ⅴ 三次元浸透流解析による切羽圧力変化の解析 .....	参-79
Ⅵ 建設会社からのアンケート結果 .....	参-85

## 1. 事故概要とシールドトンネル施工技術安全向上協議会の設置

### 1.1 事故の概要

平成24年2月7日午後0時35分ごろ、岡山県倉敷市の水島コンビナート内のJX日鉱日石エネルギー水島製油所工場の海底トンネルの工事中に、トンネル内へ海水が流込み作業員5人が行方不明（同年3月3日までに5人の死亡が確認）となる事故が発生した。

事故は、旧新日本石油のA工場と、水島港を挟んで対岸にある旧ジャパンエナジーのB工場とを結ぶ約800mのパイプライン用の海底トンネルをシールド工法により構築する工事で発生し、B工場側から約160m掘進したところでトンネル内へ海水が流れ込みトンネルが水没した。事故は、シールドによる1リング分の掘削が終了し、セグメントの組立中に起こった。

工事に用いられていたシールドの外径は4.95mで、シールド形式は泥土圧シールド、また、使用していたセグメントは外径4820mm、厚さ160mm、幅1400mmの鉄筋コンクリートセグメントである。掘削対象地盤は平均N値43のれき層で、土被りは4.95～24.5mである。

### 1.2 シールドトンネル施工技術安全向上協議会の設置

#### (1) 目的

倉敷市の事故を受けて、シールドトンネルの設計・施工技術について、安全面等からの向上を図るため、技術的な検討を行うことを目的とする。

#### (2) 構成

協議会は以下の委員により構成された。

委員長	今田 徹	東京都立大学 名誉教授
副委員長	小山 幸則	立命館大学総合科学技術研究機構 客員教授
委員	三村 衛	京都大学大学院 工学研究科 教授
委員	鈴木 明彦	(一社)日本トンネル技術協会 技術部長
委員	安井 成豊	(一社)日本建設機械施工協会施工技術総合研究所 研究第一部 部長
委員	三木 慶造	(一社)日本建設業連合会 土木工事技術委員会 専門委員
委員	真下 英人	(独)土木研究所 道路技術研究グループ長
委員	菅野 高弘	(独)港湾空港技術研究所 特別研究官

(所属、役職はH26.1現在)

行政委員	国土交通省	大臣官房	技術調査課長
行政委員	国土交通省	大臣官房	公共事業調査室長
行政委員	国土交通省	総合政策局	公共事業企画調整課長
行政委員	国土交通省	土地・建設産業局	建設業課長
行政委員	国土交通省	水管理・国土保全局	治水課長
行政委員	国土交通省	水管理・国土保全局	下水道事業課長
行政委員	国土交通省	道路局	国道・防災課長
行政委員	国土交通省	港湾局	技術企画課長

(3) 開催経緯

協議会の開催経緯は以下のとおりである。

第1回協議会	平成24年4月27日
現地視察	平成24年5月22日
第2回協議会	平成24年6月29日
第3回協議会	平成24年7月23日
第4回協議会	平成24年9月28日
第5回協議会	平成25年1月31日
第6回協議会	平成25年8月23日
現地視察	平成25年8月29日
第7回協議会	平成25年11月22日
第8回協議会	平成25年12月20日
第9回協議会	平成26年1月31日

## 2. 日本のシールドトンネル工事の現状

### 2.1 日本におけるシールド工事の実施状況

#### (1) シールド工事件数

シールド工事件数および施工延長の推移を図 2.1.1 に示す。

年度別のシールド工事件数、施工延長は、1990 年度で 340 件、総延長 330km 程度であったが、90 年度以降の工事件数の減少とともに施工延長も減少傾向にある。近年(07 年度～10 年度)では、60～70 件、総延長 100km 程度で推移している。

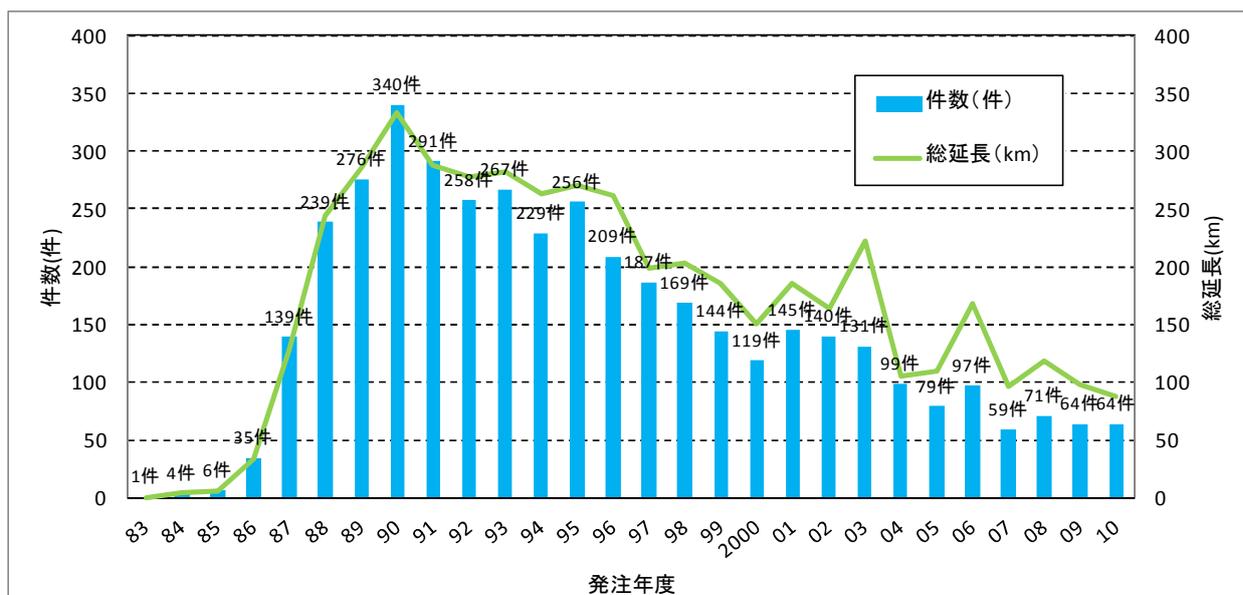


図 2.1.1 年度別シールド工事件数、施工延長の推移状況

(出典：シールド工法技術協会のホームページ)

出展：本資料に示したシールドの工事件数、割合等のデータは、シールド工法技術協会のホームページに掲載のシールド工事実績グラフ (PDF) の図を引用している。(以降、図 2.1.9 まで)

(2) 過去 10 年間における工事実施状況

① トンネルの用途

過去 10 年間(01 年度～10 年度)におけるトンネル用途別工事件数の推移、割合を図 2.1.2、図 2.1.3 に示す。

トンネル用途別では、各年度ともに下水道が最も多くの工事件数となっている。過去 10 年間の工事件数の割合が高い順から、下水道が約 53%、地下河川・貯蓄管が約 10%、上水道が約 9%、ガスが約 7%となっている。

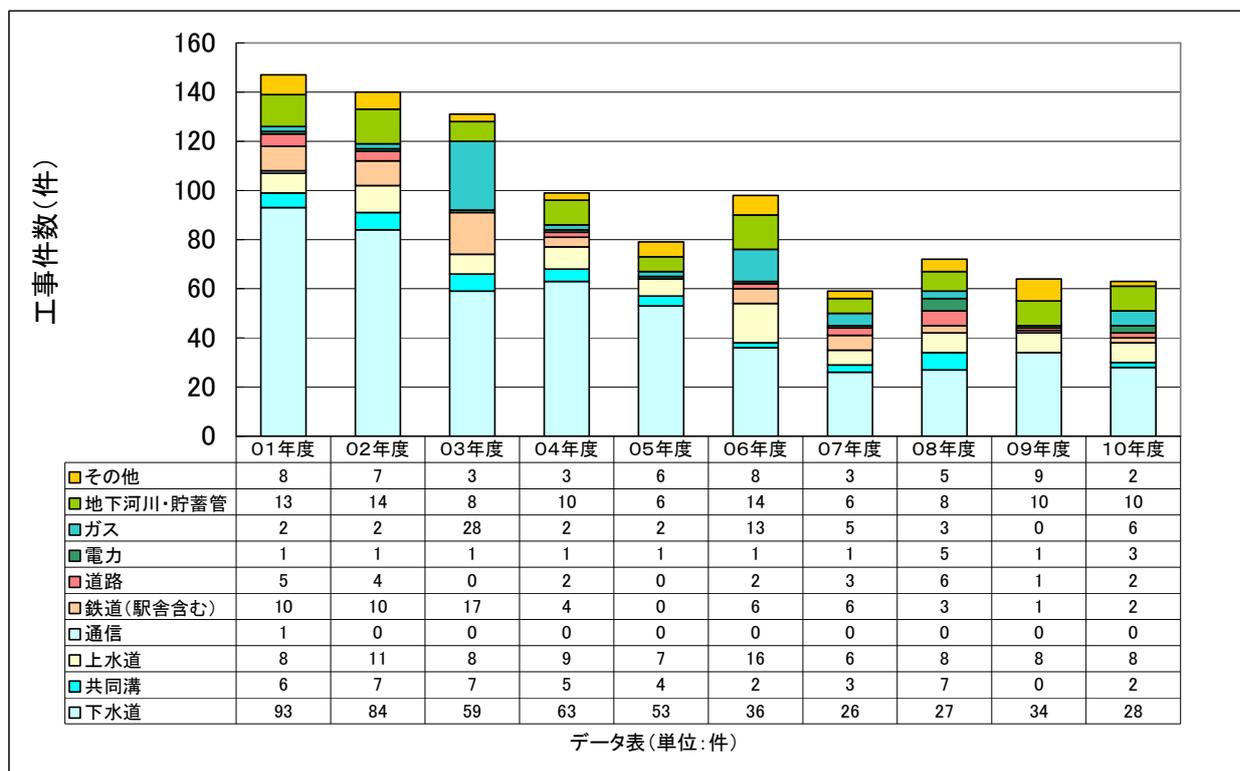


図 2.1.2 トンネル用途別工事件数の推移 (年度別 01～10 年度)

(出典：シールド工法技術協会のホームページ)

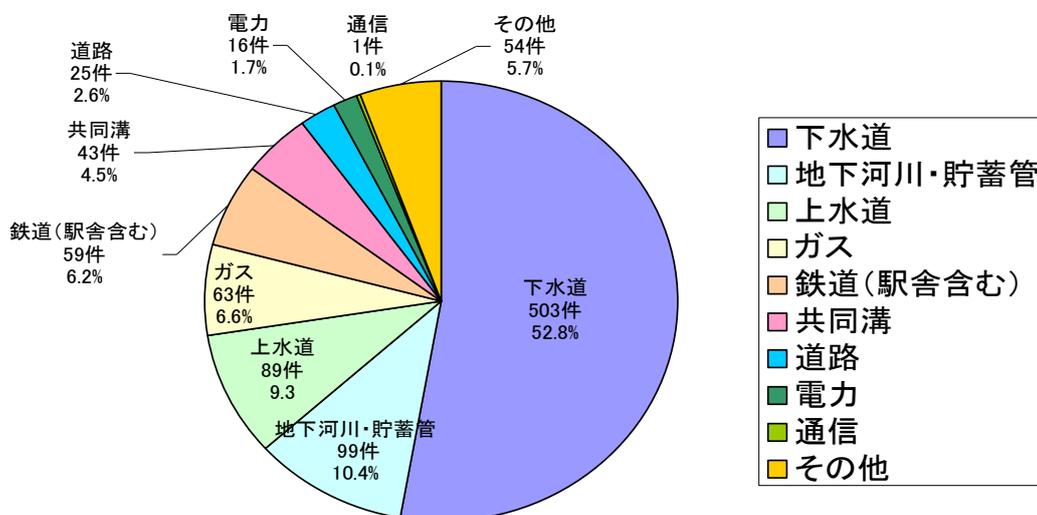


図 2.1.3 トンネル用途別工事件数の割合 (年度別 01～10 年度)

(出典：シールド工法技術協会のホームページ)

②シールドの機種

過去 10 年間(01 年度～10 年度)におけるシールド機種別工事件数の推移、割合を図 2.1.4、  
 図 2.1.5 に示す。

シールド機種別では、各年度ともに泥土圧、泥水式の工事件数が多く、ほとんどの工事は、  
 泥土圧か泥水式で施工されている。特に、泥土圧の工事件数が多く、各年度ともに概ね 7 割以  
 上を占めている。

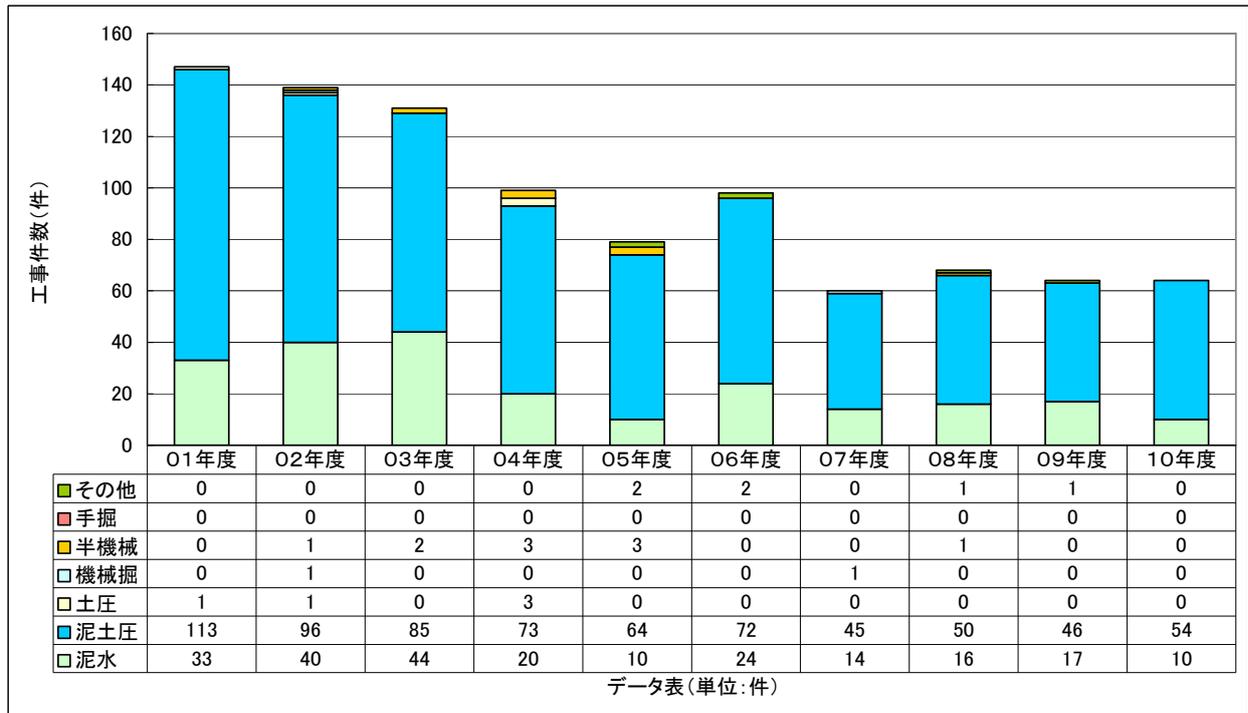


図 2.1.4 シールド機種別工事件数の推移 (年度別 01～10 年度)

(出典：シールド工法技術協会のホームページ)

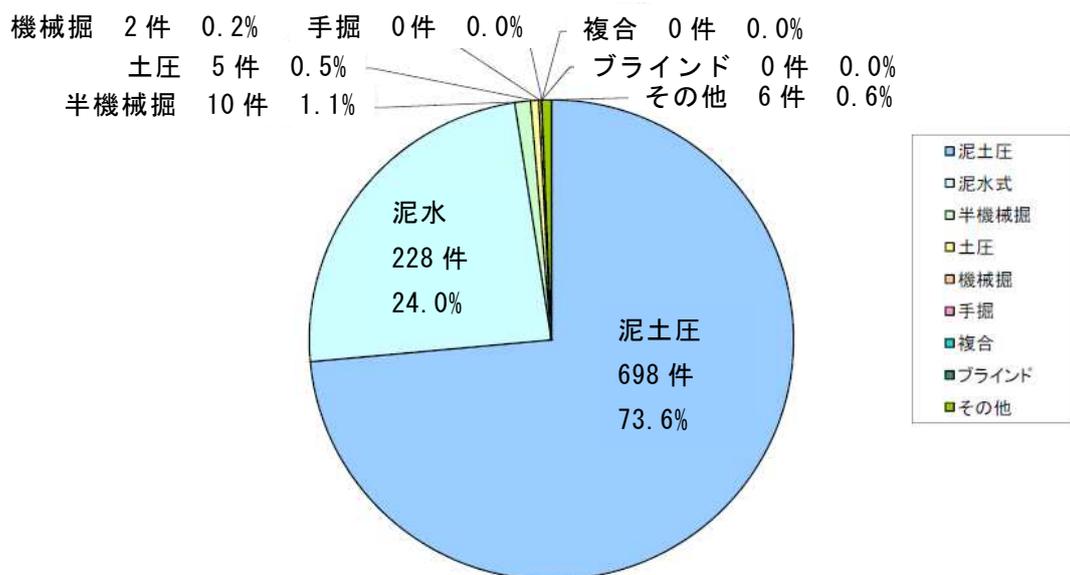


図 2.1.5 シールド機種別工事件数の割合 (年度別 01～10 年度)

(出典：シールド工法技術協会のホームページ)

### ③シールドの口径

過去10年間（01年度～10年度）におけるシールド径別工事件数の割合を図2.1.6に、トンネル用途別のシールド径の比率を図2.1.7に示す。

シールドの口径は、小さい口径で多くの件数があり、口径が大きくなるにしたがって工事件数が少なくなっている。口径3000mm未満が最も多くの工事件数があり全体の約49%を占めている。ついで、3000mm以上6000mm未満が全体の約41%であり、6000mm未満の口径の工事件数が全体の約90%を占めている。

トンネル用途別のシールド径の比率は、通信、ガス、上水道の約8割以上が口径3000mm未満の工事件数となっている。また、下水道、電力の約4～5割が口径3000mm未満の工事件数となっている。道路、鉄道、地下河川・貯留管等で口径9000mm以上の工事がある。

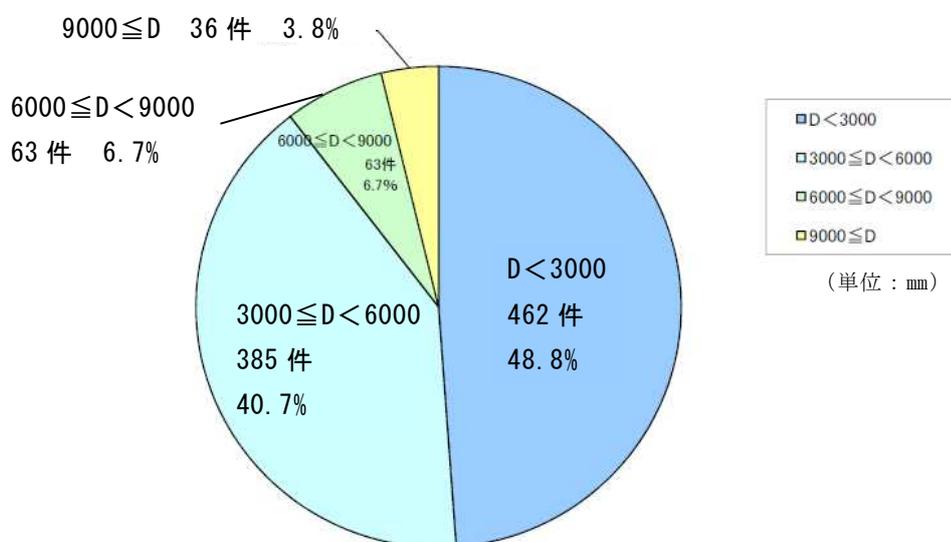


図2.1.6 シールドの口径別工事件数の割合（年度別01～10年度）  
（出典：シールド工法技術協会のホームページ）

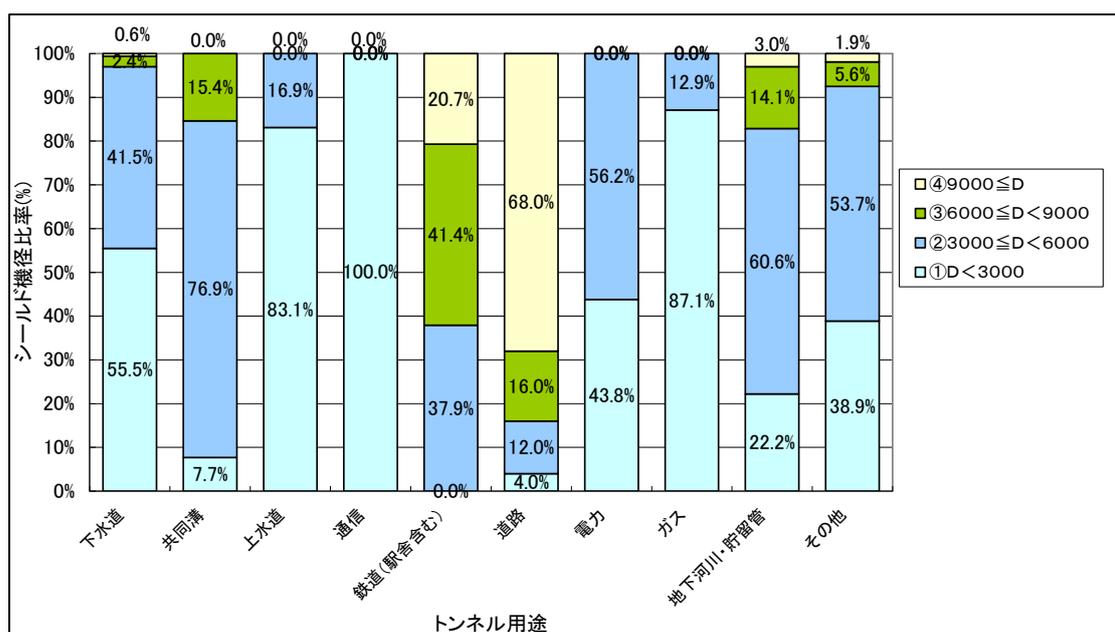


図2.1.7 トンネル用途別シールド径比率（年度別01～10年度）  
（出典：シールド工法技術協会のホームページ）

#### ④セグメントの種類

過去10年間（01年度～10年度）におけるセグメント種別工事件数の割合を図2.1.8に、トンネル用途別のセグメント種別を図2.1.9に示す。

セグメントの割合は、鋼製が最も多く全体の工事件数の約55%を占めている。次いで、RCが約40%であり、鋼製とRCで工事件数の約95%を占めている。

トンネル用途別のセグメント種別は、口径の小さい通信、ガス、上水道、下水道のトンネルで鋼製を使用している割合が多い。また、比較的、口径の大きい鉄道、道路、地下河川・貯留管等でRCを使用している割合が多い。

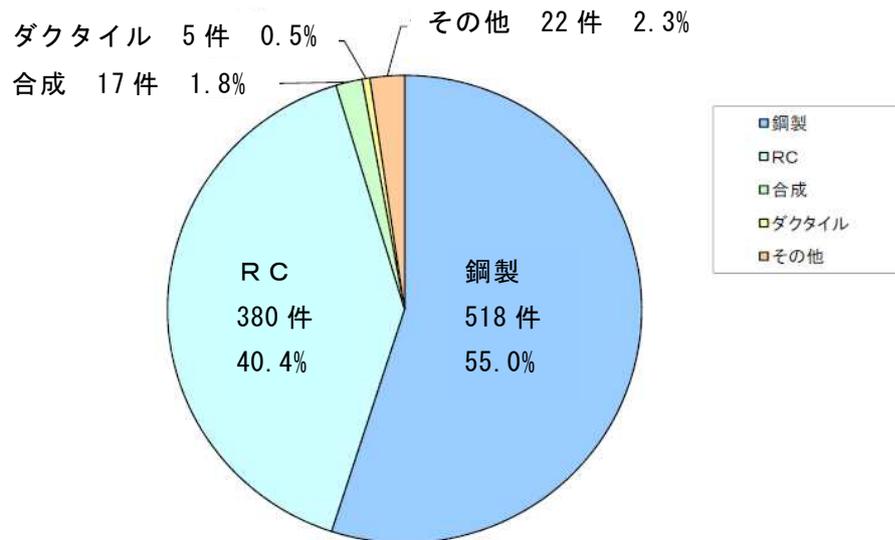


図2.1.8 セグメント種別工事件数の割合（年度別01～10年度）  
（出典：シールド工法技術協会のホームページ）

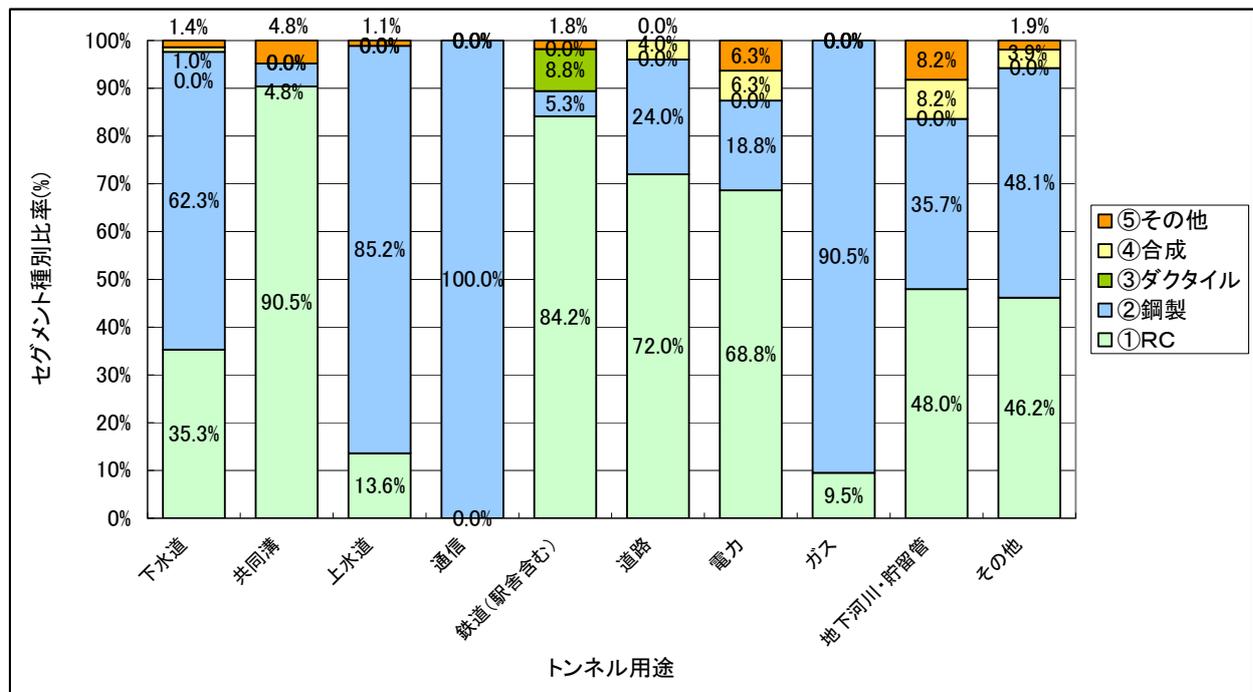


図2.1.9 トンネル用途別セグメント種別比率（年度別01～10年度）  
（出典：シールド工法技術協会のホームページ）

## 2.2 シールド工事における技術基準、技術開発経緯

### (1) シールド工事における技術基準

現在、シールド工事において主に用いられている技術基準としては「2006年制定 トンネル標準示方書 シールド工法・同解説」((社)土木学会、平成18年7月)がある。この基準は、シールド工法の調査、計画、設計、施工および施工管理についての一般的な標準を示したものであるとして広く活用されている。また、シールド工事用のセグメントの規格については、「シールド工事用標準セグメント」((社)土木学会、平成13年7月)があり、実績件数が最も多い下水道トンネルのセグメントの標準として活用されてきた。

シールド工事における主な技術基準類・指針類を表2.2.1に示す。このほか、各事業者毎にシールド関連の基準類や指針類を作成している。

表 2.2.1 シールド工事における主な技術基準類・指針類

名称	発行機関	発刊時期 (上段：初版年) 下段：最新版	主な適用範囲
2006年制定 トンネル標準示方書 シールド工法・同解説	(社)土木学会	(昭和44年) 平成18年7月	シールド工法の調査、計画、設計、施工および施工管理についての一般的な標準を提示
シールド工事用標準セグメント -下水道シールド工事用セグメント - (JSWASA-3, 4-2001)	(社)土木学会・ (社)日本下水道協会 共編	(昭和48年) 平成13年7月	・シールド工事に使用する鋼製およびコンクリート系のセグメントについて規定 ・下水道のシールド工事に使用する鋼製およびコンクリート系のセグメントについて規定
シールドトンネル設計・施工指針	(社)日本道路協会	(平成21年) 平成21年2月	シールド工法により建設する道路トンネルおよび共同溝に適用
鉄道構造物等設計標準・同解説-シールドトンネル	(財)鉄道総合技術研究所	(平成9年) 平成9年7月	都市域の土砂地山あるいは固結度の低い地山中に、鉄道トンネルを建設する場合の調査、計画および設計に適用
下水道シールド工事用二次覆工一体型セグメント設計・施工指針	東京都下水道局	(平成14年) 平成21年2月	シールド工法の工期短縮と建設コストの削減を目指して、東京都下水道局では試行工事と各種の実験を通して技術の開発や検証を行い、これらで得られた技術や手法を分析・整理したもの
トンネル構造物設計要領 (シールド工法編)	首都高速道路(株)	(平成15年) 平成20年7月	首都高速道路(株)がシールド工法によって築造するトンネルの本体構造物の設計に適用

### (2) 技術開発経緯

国内におけるシールド工法の技術開発経緯として、主なシールド技術の実績を表2.2.2に示す。

シールド工法が、わが国の都市トンネルの施工法として最初に導入されたのは昭和30年代である。それ以来、さまざまな技術開発が行われ、現在ではわが国の都市トンネルの主要な工法として位置づけられている。

シールド技術の主な変遷は、昭和40年代までは圧気併用の手掘り式シールドが多く占めていたが、その後、省力化や安全確保等の面から切羽の安定性の向上が期待できる泥水式シールド、土圧式シールド等の密閉型シールドの技術が開発された。その結果、昭和50年代には手掘り式シールドが減少し、泥水式シールド、土圧式シールド等の密閉型シールドが主流を占めるようになり、現在に至っている。

その後、昭和 60 年頃から、輻輳する都市部において地下空間の有効利用の観点等から、トンネル用途に応じた効率的な断面形状に対応するため、一部区間の断面を拡大する拡大シールドや、複円形シールド、楕円形等の円形以外の断面形状のシールド技術が開発された。また、大口径化も進み、東京湾横断道路トンネル等のシールド外径 14m を超える大断面のシールド工事が実施された。さらに、地中接合技術、セグメント組立技術およびそれにとりまなう各種のセグメント継手構造、長距離掘進技術等の種々の技術が開発された。

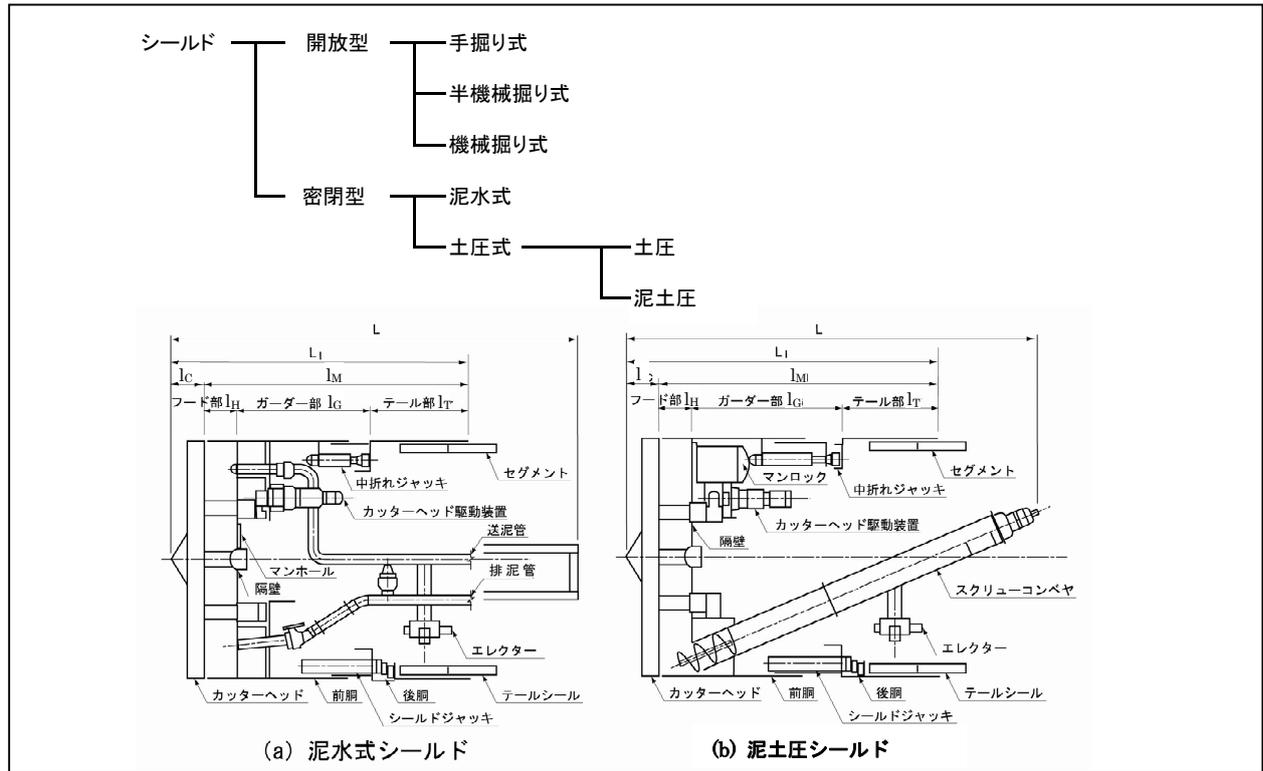
近年では、コスト縮減、工期短縮のための高速施工やさらなる長距離掘進に対応するため、二次覆工省略、セグメントの薄肉化、セグメントの幅広化が進むとともに、これまで別々に実施していたシールド掘進とセグメント組立を同時に行う同時施工技術などが開発されている。また、このほか、道路トンネルを対象とした大規模な分岐・合流技術、立坑を必要としない地上発進技術も開発されている。

表 2.2.2 国内における主なシールド技術の実績

年 西暦 元号		主な事項	トンネル名等
1920	大正9年	国内最初のシールド工法の適用	国鉄羽越線折渡トンネル
1957	昭和32年	ルーフシールド（日本の都市土木でシールドを採用した最初の事例）	帝都高速度交通営団地下鉄4号線永田町、延長231m
1960	昭和35年	円形シールド	名古屋市地下鉄覚王山トンネル
1962	昭和37年	圧気シールド	東京、下水道石神井川下幹線、沖積
1963	昭和38年	機械掘りシールド	大阪、上水道大淀送水管
1965	昭和40年	ブラインドシールド	東京、下水道浮間幹線
1966	昭和41年	半機械掘りシールド	名古屋、下水道
1967	昭和42年	泥水式シールド	埼玉（浦和）、流域下水道
1974	昭和49年	土圧式シールド	東京、下水道水元幹線
1976	昭和51年	中折れシールド	東京、下水道井の頭上幹線
1977	昭和52年	限定圧気シールド	東京、水道神谷町新田幹線
1981	昭和56年	場所打ちライニング工法	東京、下水道、本田幹線
1984	昭和59年	拡大シールド	東京、電力、清洲橋通り管路
1988	昭和63年	複円形（MF）シールド（二連）	東京、JR京葉線
1991	平成3年	複円形（DOT）シールド（二連）	広島、新交通システム
1992	平成4年	地中接合技術 シールド発進・到達時の仮壁切削技術	東京、上水道、東南幹線工事、直径3.4m 電力 2.9m
1993	平成5年	密閉型楕円形シールド 球体シールド（縦横連続掘進） 密閉型矩形シールド	東京、下水道大森幹線 川崎、下水道観音川雨水滞水池 千葉（習志野）、下水道菊田川幹線
1994	平成6年	世界最大断面（円形、シールド外径14.14m）、各種の自動化技術（地中接合、セグメントの自動組立、高水圧、軟弱地盤での長距離掘進）	東京湾横断道路トンネル 東京、下水道足立区花畑枝線工事
1995	平成7年	複円形（MF）シールド（三連） 直角シールド 異形断面シールド	大阪、地下鉄駅シールド 横浜、下水道能見台雨水幹線 名古屋、小田井山田共同溝
1996	平成8年	トンネル径変化（二段式）シールド	東京、電力、環7東海松原橋管路、トンネル 外径7.1mと4.95m
1999	平成11年	ビット交換技術	川崎、雨水幹線
2002	平成14年	マルチ・マイクロ・シールド・トンネル（MMST）	東京、首都高速道路換気同道工事
2004	平成16年	分岐・合流技術（大規模地中切り上げ）	中央環状新宿線
2005	平成17年	耐火セグメント 分岐・合流技術（非開削）	秋田中央道路 中央環状新宿線
2007	平成19年	長距離掘進（8030m）、高速施工（目標平均400m/月）	中央環状品川線シールドトンネル
2008	平成20年	シールドの地上発進技術（URUP）	中央環状品川線大井地区トンネル工事

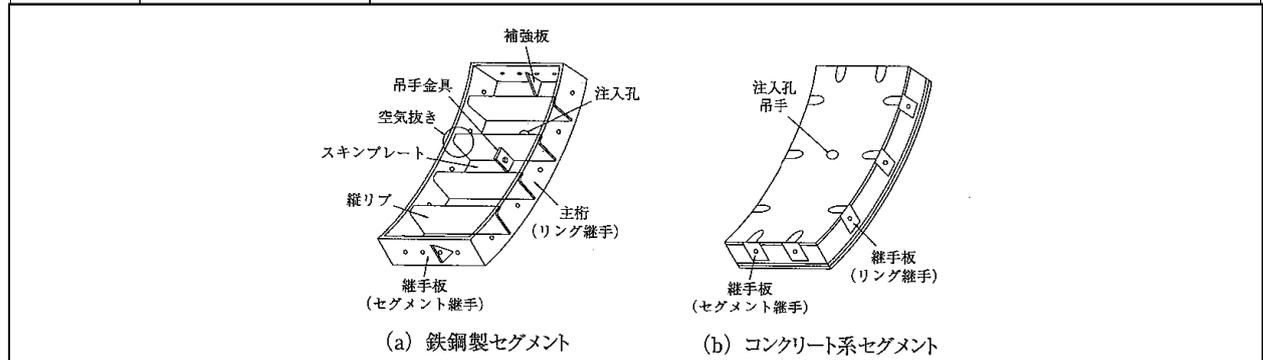
〈参考〉

主なシールド工法の種類

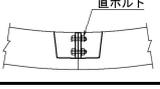
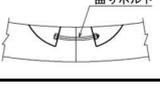
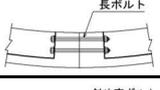
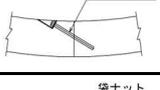
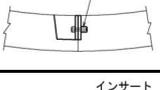
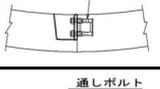
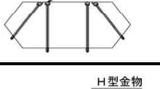
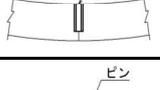
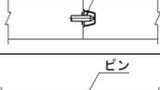
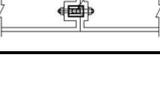
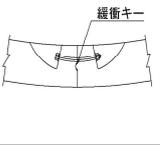
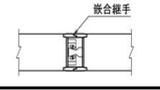
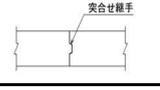
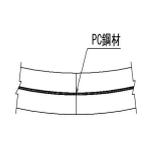


主なセグメントの種類

大分類	中分類	主な特徴
コンクリート系セグメント	鉄筋コンクリートセグメント	<ul style="list-style-type: none"> <li>耐久性に富み、耐圧縮性に優れている。</li> <li>剛性が大きく、施工に留意すれば水密性に優れている。</li> <li>重量が大きく、引張強度が小さい。</li> <li>二次覆工を省略する場合には、鉄筋やトンネル内面に露出する鋼製構造部材の耐久性を確保する必要がある。</li> <li>一般的に、鉄筋のかぶりを大きくすることや、鋼製構造部材の防食処理などの対策を採用している。</li> <li>一般的に中・大口径のシールドトンネルにおいては鋼製セグメントやダクタイルセグメントに比べて安価である。</li> <li>急曲線部や開口部などの特殊部を除いた一般部を中心として広く採用される。</li> </ul>
	合成セグメント	<ul style="list-style-type: none"> <li>鋼材と鉄筋コンクリートまたは鋼材と無筋コンクリートとを組合せたものが一般的に用いられている。</li> <li>鉄筋の代わりにラチストラスや平鋼、形鋼等を用いた鉄骨コンクリート系セグメントも開発されている。</li> <li>合成セグメントは、同じ断面であれば高い耐力と剛性を得ることが可能であるが、鉄筋コンクリートセグメントに比べ高価である。</li> <li>曲線部等でセグメント厚さを小さくして内空断面を確保する場合やトンネル延長の一部に大きな荷重が作用する区間がある場合等に用いられることが多い。</li> </ul>
鉄鋼製セグメント	鋼製セグメント	<ul style="list-style-type: none"> <li>材質が均一で強度も保証され、優れた溶接性を有し、比較的軽量である。</li> <li>鉄筋コンクリートセグメントに比較して変形しやすい。</li> <li>ジャッキ推力や裏込め注入圧等が過大となるときは、座屈に対する配慮が必要である。</li> <li>二次覆工を省略する場合、適切な防食工を施す必要がある。</li> <li>一般的に、小口径のシールドトンネルにおいて鉄筋コンクリートセグメントに比べて安価である。</li> <li>中・大口径のセグメントにおいては急曲線部やトンネルの一部を開口する必要がある場合などの特殊部に適用される場合が多い。</li> </ul>
	ダクタイルセグメント	<ul style="list-style-type: none"> <li>一般的に、他のセグメントに比較して高価である。</li> <li>延性に富み、強度も高く、製品精度が良好であり、防水性に優れている。</li> <li>曲線部等でセグメント厚さを小さくして内空断面を確保する場合やトンネル延長の一部に大きな荷重が作用する区間がある場合、トンネルの一部を開口する必要がある場合などの特殊部に用いられることが多い。</li> </ul>



代表的なセグメントの継手構造の分類と特徴

分類		主な特徴	概念図
大分類	中分類		
ボルト・ナット・ワッシャー締結タイプ	直ボルトタイプ	・実績はもっとも多い (標準RCセグメントの継手形式)	
	曲りボルトタイプ	・継手面に金物がなく止水性，耐久性良好	
	長ボルトタイプ	・継手面に金物がなく止水性，耐久性，耐震性良好	
インサートボルトタイプ	斜め直ボルト	・継手面に金物がなく耐食性良好	
	袋ナット式直ボルトタイプ	・直ボルト式に比べ，ボルトボックスが半減	
	インサート埋込式直ボルトタイプ	・直ボルト式に比べ，ボルトボックスが半減	
	通しボルトタイプ	・トンネル内面に継手金物がなく耐久性良好	
楔式締結金具タイプ	軸方向挿入式楔締結タイプ	・トンネル内面に継手金物がなく耐久性，施工性良好	
	半径方向挿入式楔締結タイプ	・トンネル内面に継手部欠損が小さく施工性良好	
ピン式締結	コンクリート系セグメントタイプ	・トンネル内面に継手金物がなく耐久性，施工性良好	
	鉄鋼製セグメントタイプ	・トンネル内面に継手金物がなく耐久性良好，施工性良好	
キーロック継手タイプ	半径方向キータイプ	・キーによるせん断力伝達効果が期待できる	
	円周方向キータイプ	・キーによるリング添接効果期待できる	
メカニカル嵌合締結タイプ		・機械式嵌合による目違い抑止とせん断力伝達効果大	
突合せ継手タイプ		・継手金物がなく耐久性良好	
PC締結タイプ	リング・軸方向個別締結タイプ	・プレストレス導入による鉄筋量低減とクラック防止効果大	
	リング軸方向同時締結タイプ	・プレストレス導入による鉄筋量低減とクラック防止効果大	

出典：「シールドトンネル設計・施工指針」（社）日本道路協会、平成21年2月

### 3. 倉敷市の事故に関する検討

#### 3.1 工事概要

##### (1) 工事の概要

図 3.1.1 に工事現場の位置図を示す。事故が発生した工事は、JX 日鉱日石エネルギー(株)水島製油所 A 工場 (旧 新日本石油(株)) と B 工場 (旧 (株) ジャパンエナジー) 間の水島港を横断する配管敷設用トンネルを構築するものであり、B 工場を起点に水島港海底を横断し、A 工場を終点とする延長 790m を泥土圧シールド工法で施工するものである。なお、本工事には、シールドトンネル工のほかに、発進・到達立坑 (ともにニューマチックケーソン工法) と配管敷設用の架台設置といった付帯設備工も含まれている。

##### [工事概要]

工 事 名 : 第二パイプライン防護設備建設工事

発 注 者 : JX 日鉱日石エネルギー(株)

工 期 : 2010 年 8 月 1 日 ~ 2013 年 6 月 30 日

入札方式 : 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)

請 負 者 : 鹿島建設(株)

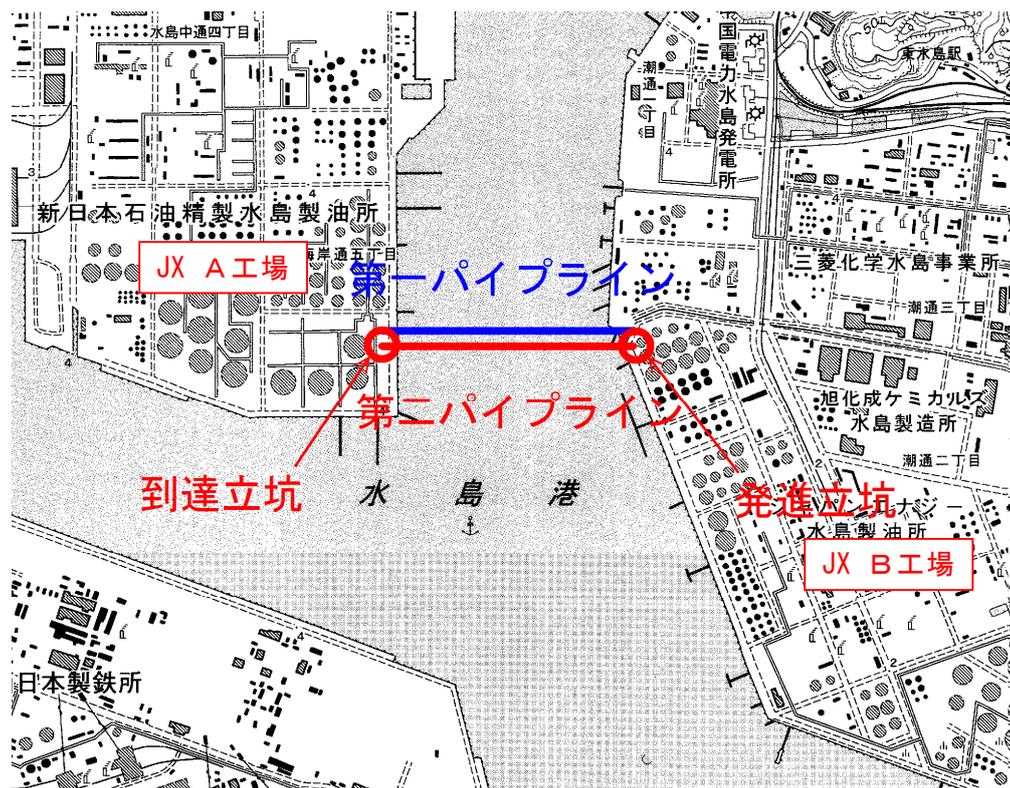


図 3.1.1 工事現場の位置図

##### (2) トンネルの概要

図 3.1.2 にトンネルの断面図と平面図を、図 3.1.3 にトンネルの縦断図を、表 3.1.1 に設計に用いられた地盤物性値をそれぞれ示す。シールドトンネルは、仕上がり内径が 4500mm、延長が 790m で、トンネルの縦断勾配は 0.0771% の上り勾配、平面線形は直線である。トンネルは、平均 N 値が 43 の洪積第 1 砂礫層 (Dg1) に位置し、土被りは、発進・到達立坑部で約 28m、海底

横断部で最小となり 4.95m である。

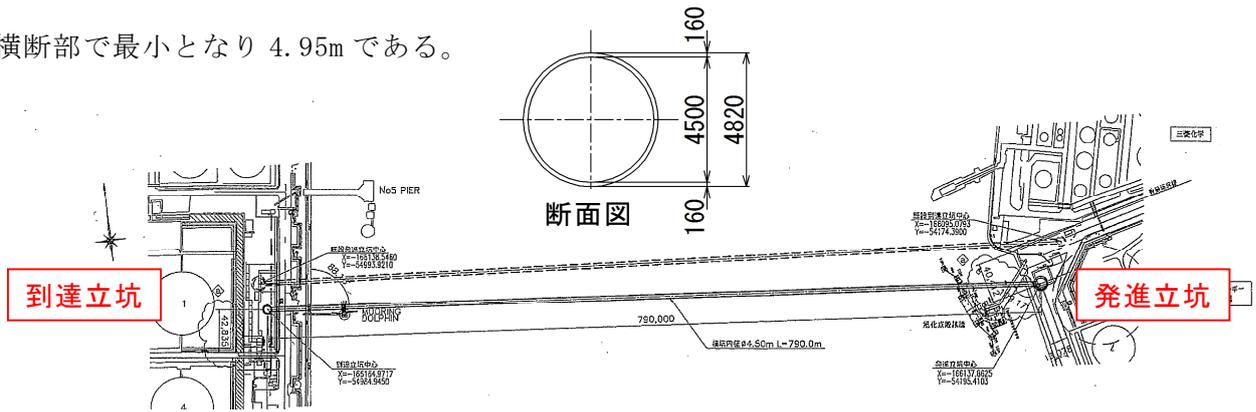


図 3.1.2 断面図、平面図（鹿島建設(株)資料より）

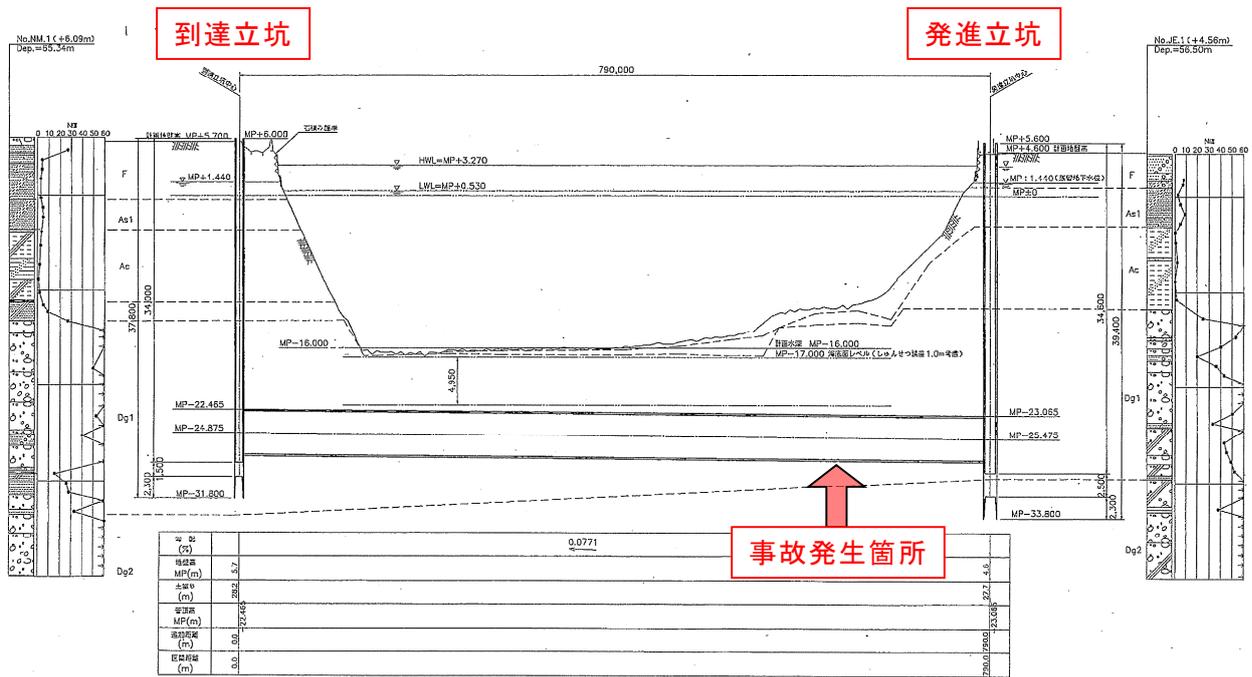


図 3.1.3 縦断図（鹿島建設(株)資料より）

表 3.1.1 設計用地盤物性値（鹿島建設(株)資料より）

土質	記号	平均 N 値	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	粘着力 C (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 <sup>*2)</sup> $\phi$ (deg)	変形係数 E <sub>0</sub> (kN/m <sup>2</sup> )
埋土層	F	3	18.0 <sup>*1)</sup>	0	22	8,800 <sup>*4)</sup>
沖積第1砂質土層	As1	5	18.0 <sup>*1)</sup>	0	24	12,000 <sup>*3)</sup>
沖積粘性土層	Ac	2	17.4	67	0	11,600 <sup>*3)</sup>
洪積第1砂礫層	Dg1	43	19.0 <sup>*1)</sup>	0	40	118,000 <sup>*4)</sup>
洪積第2砂礫層	Dg2	50	20.0 <sup>*1)</sup>	0	42	137,200 <sup>*4)</sup>

\*1) JH 設計要領第一集に示される値より推定。

\*2)  $\phi = \sqrt{(15N) + 15}$  より推定。

\*3) 坑内水平載荷  $E_0 = E_s$   $\alpha = 4$

\*4) N 値より換算  $E_0 = 2.74N$   $\alpha = 1$  を乗じている。

### (3) セグメント構造の概要

本工事で用いられたセグメント構造の概要を表3.1.2に、セグメントの構造図を図3.1.4に、A1型セグメントの配筋図を図3.1.5に示す。

図、表から、本工事で用いられたセグメントは、以下の特徴が挙げられる。

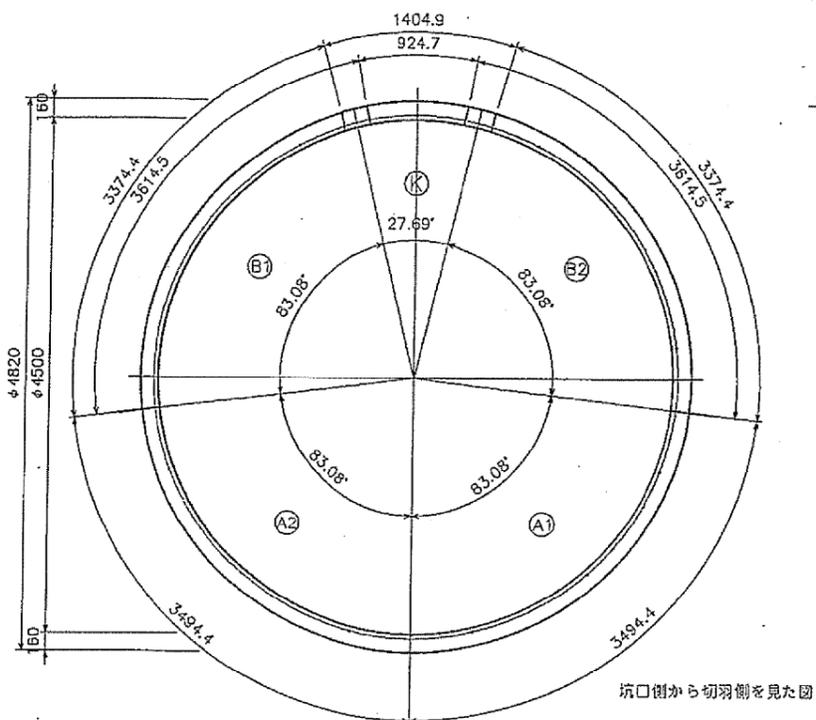
- ・セグメント厚さと外径の比率が3.3%であり、「シールド工用標準セグメント 平成13年7月1日改正 日本下水道協会」で目安としている4%以上を下回っており、外径に対して厚さが薄いセグメントである。
- ・セグメント幅と厚さの比が8.8であり、「シールド工用標準セグメント」で目安としている7以下を上回っており、厚さに対して幅が広いセグメントである。
- ・セグメントの分割が5分割であり、「シールド工用標準セグメント」では本セグメントの外径クラスにおいては6分割であることから、セグメントの分割数が少ない。
- ・セグメント継手が突合せ継手構造であり、セグメント継手間の締結力を有していない。
- ・リング継手はボルト継手構造で1リングあたり13本の継手を配置しているが、分割数を少なくしていることにより、ボルトの本数が「シールド工用標準セグメント」の16本に比べて少ない。また、配筋図からわかるように、リング継手の埋込みインサートの部分で、セグメント内側の鉄筋が配置されていない。
- ・軸方向挿入型Kセグメントの挿入代が350mmと少なく、それとともなって挿入角度が9.7degと大きくなっている。

表 3.1.2 セグメント構造の概要（鹿島建設(株)資料より）

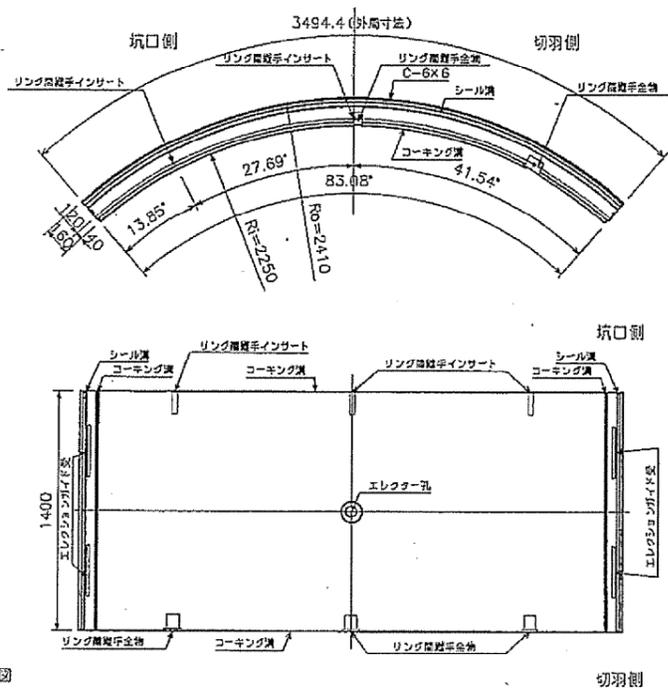
本体構造	内径	4500mm
	外径	4820mm
	厚さ	160mm
	幅	1400mm
	分割数	5分割(4+K)
継手構造	セグメント間	突合せ継手構造
	リング間	ボルト継手構造 M16(8.8)×13本
Kセグメント	挿入方向	軸方向挿入
	挿入代	350mm
	中心角、外周寸法	27.69deg、1164.8mm
	挿入角度	9.7deg

# セグメント構造図

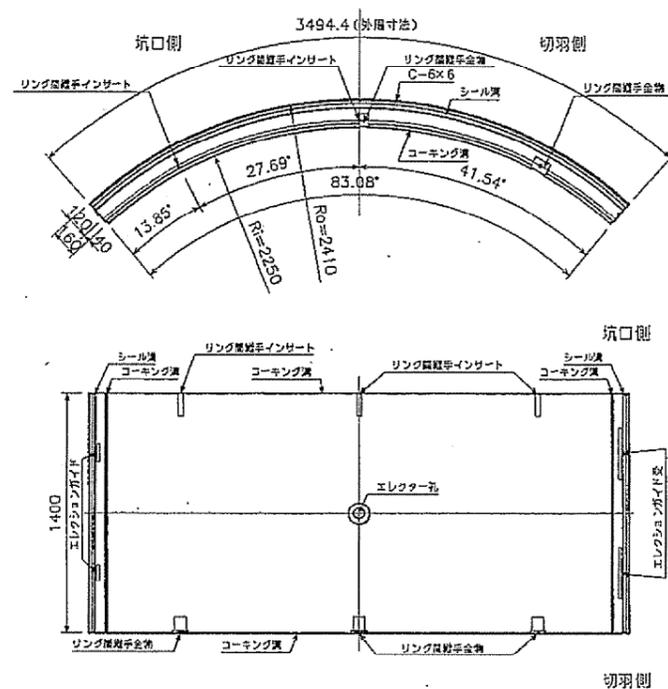
組立図 S=1/30



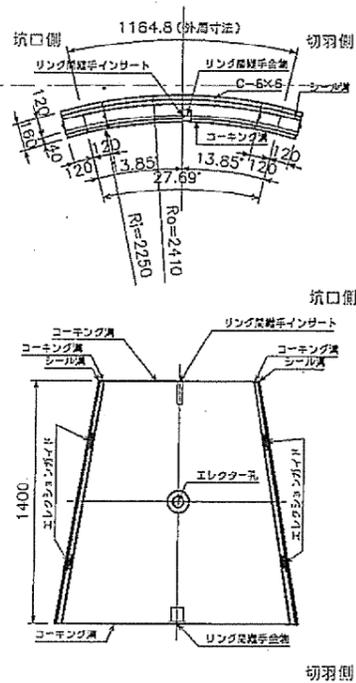
A1型セグメント S=1/20



A2型セグメント S=1/20

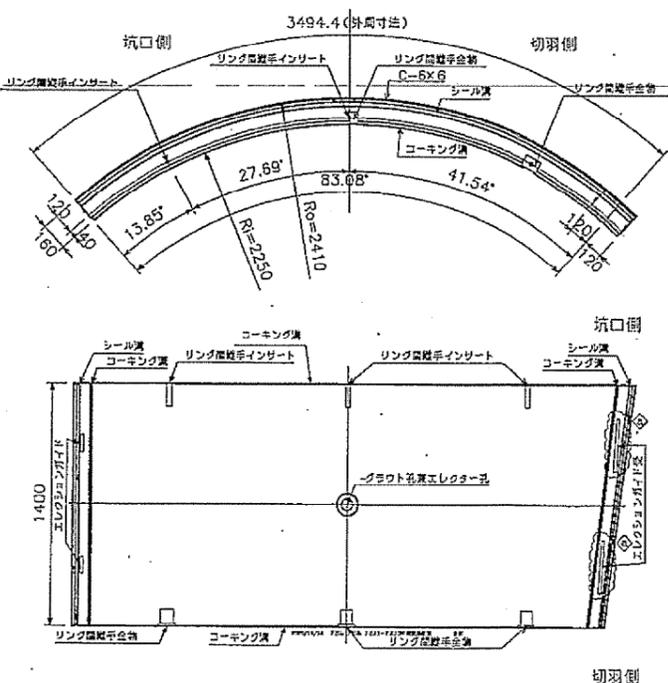


K型セグメント S=1/20



※K型のセットバックは350mmとする

B1型セグメント S=1/20



B2型セグメント S=1/20

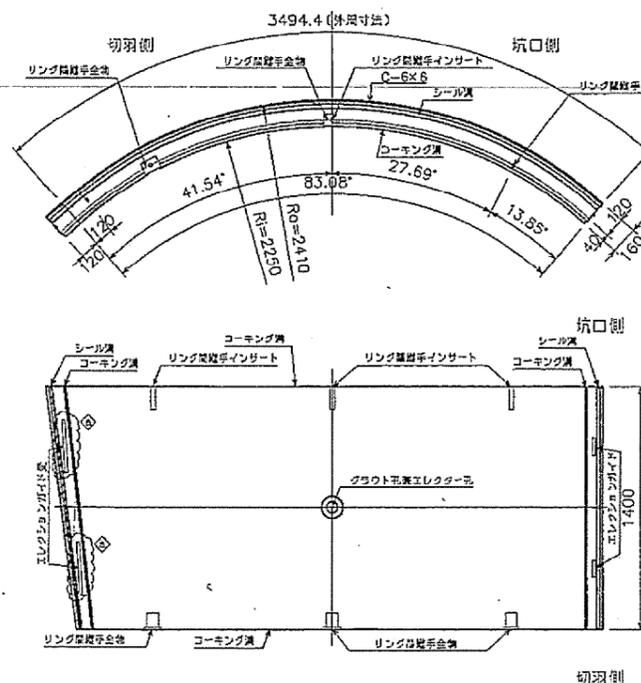


図 3.1.4 セグメント構造図 (鹿島建設(株)資料より)

コンクリート: 設計基準強度 45N/mm<sup>2</sup>  
鉄筋: SD295A

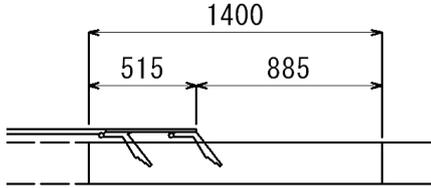


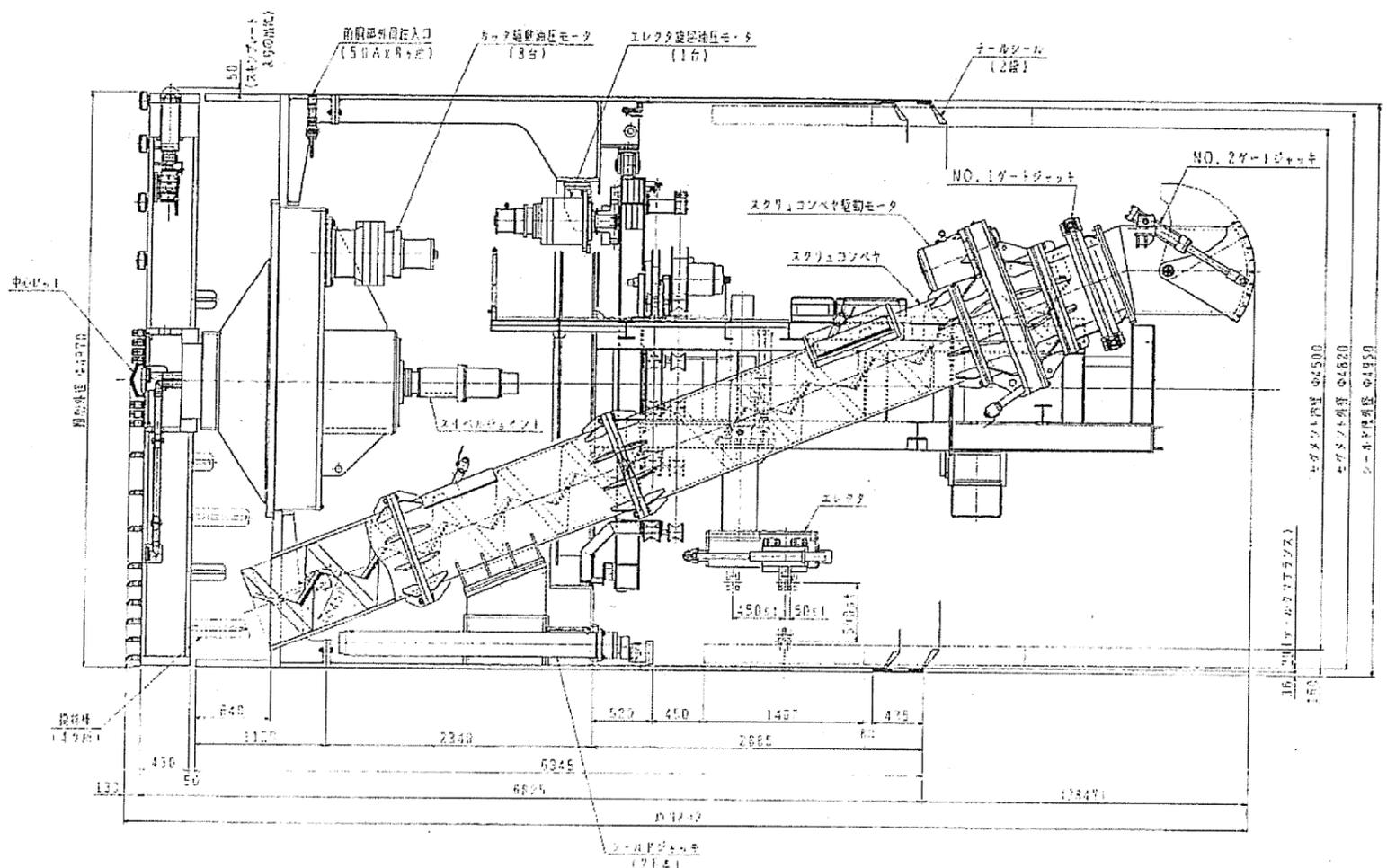
#### (4) シールドの概要

本工事で用いられたシールドの概要を表 3.1.3 に、シールドの一般図を図 3.1.6 に示す。図、表から、本工事で用いられたシールドは、以下の特徴が挙げられる。

- ・シールドジャッキの推力と本数が 823kN×26 本（総推力 21,398kN）であり、「下水道用設計積算要領 2010 年版 日本下水道協会」では本セグメントの外径クラスにおいては 1200kN×18 本（総推力 21,600kN）であることから、推力の小さいジャッキを多く装備している。
- ・海底で高水圧が作用する条件下で、テールシールの段数が 2 段である。
- ・掘進完了時におけるセグメントのシールドテール内でのかかり代が 515mm と小さい。これにより、組立てたセグメントは次のリングの掘進完了時には 3 分の 2 程度が地山内となる。
- ・形状保持装置が装備されていない。

表 3.1.3 シールドの概要（鹿島建設(株)資料より）

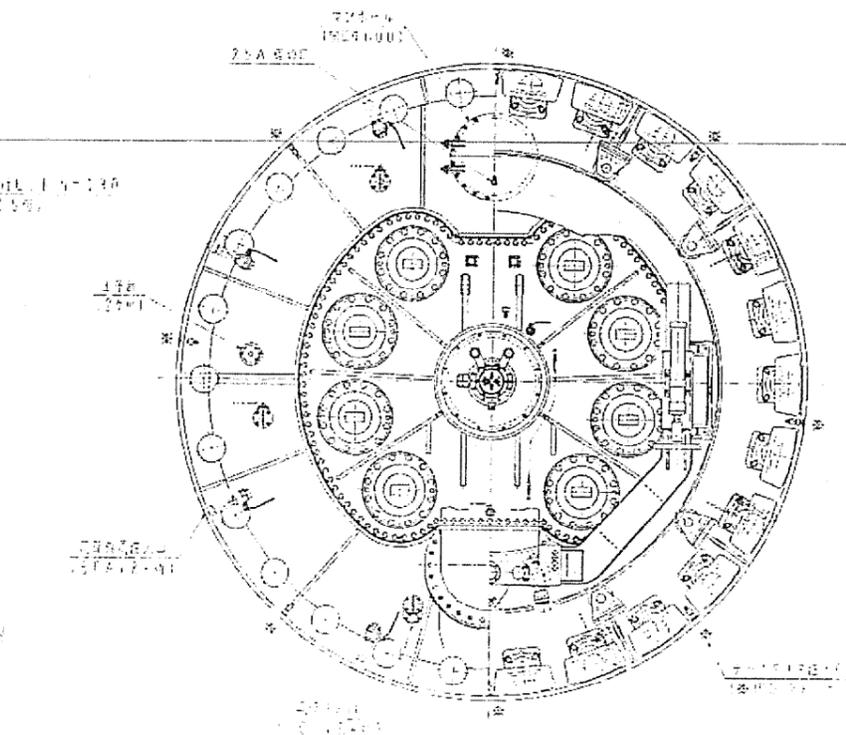
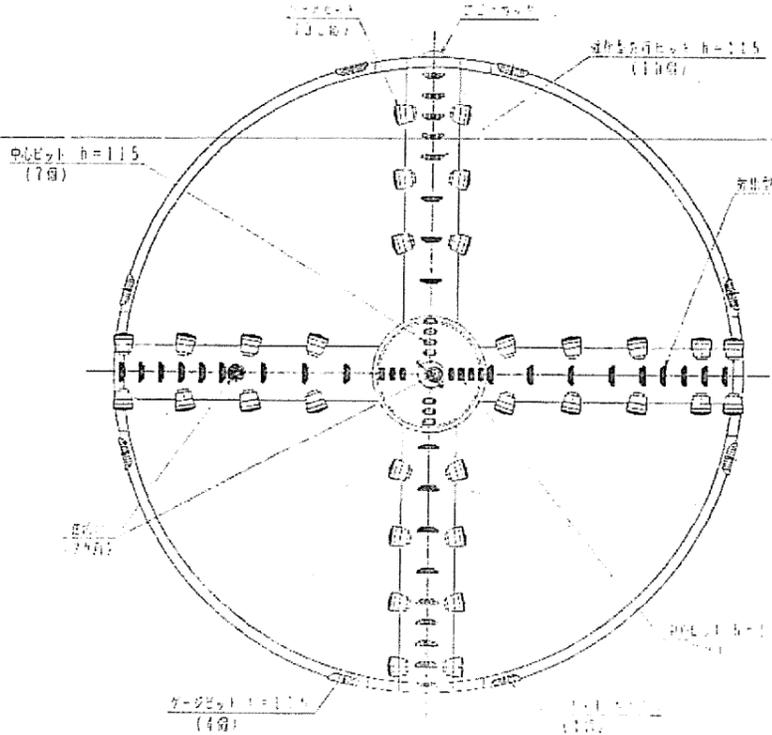
諸元	外径	4950mm
	掘削外径	4970mm
	全長	6958mm
	スキンプレート厚	36mm
	テールクリアランス	29mm
	テールプレート厚	12mm
装備推力	1 本あたりの推力×本数 (総推力)	823kN×26 本 (21398kN)
テールシール	かかり代の概念図	
	段数	2 段
	材質	ワイヤブラシ
形状保持装置	有無	なし



シールド本体	
外径	φ4950 mm
全長	約9802 mm
シールド本体長さ	6345 mm
シールドジャッキ	823kN x 1900mm <sup>2</sup> x 34.3MPa x 26本
総推力 x 推進速度	21398kN x 50mm/min
切羽単位面積当り推力	1112kN/m <sup>2</sup>
パワー	電動機 22kw x 4P x 440V x 60Hz x 1台
ユニット	油圧ポンプ 31.3 l/min x 34.3MPa x 1台

カッター	
回転数	1.0 min <sup>-1</sup>
トルク (常用最大)	2217kN·m (α=18.3)
油圧モータ	46.7kN·m x 19.1MPa x 8台
パワー	電動機 75kw x 4P x 440V x 60Hz x 4台
ユニット	油圧ポンプ 183 l/min x 19.1MPa x 4台
ゲートジャッキ	156.8kN x 65mm <sup>2</sup> x 13.7MPa x 1本
パワー	電動機
ユニット	油圧ポンプ

エレクタ	
型式	円型
回転数	1.0 min <sup>-1</sup>
吊り荷重	約2360kg
油圧モータ	14.7kN·m x 20.6MPa x 1台
パワー	電動機 22kw x 4P x 440V x 60Hz x 1台
ユニット	油圧ポンプ 45 l/min x 20.6MPa x 1台
昇降ジャッキ	69.0kN x 500mm <sup>2</sup> x 13.7MPa x 2本
掘削ジャッキ	39.0kN x 500mm <sup>2</sup> x 13.7MPa x 1本
サポートジャッキ	25.4kN x 60mm <sup>2</sup> x 9MPa x 4本



スクリュコンベヤ	
回転数	0~7.5 min <sup>-1</sup>
羽根径 x ピッチ	φ700mm x P600mm
回転トルク	75.3kN·m
排土量	79 m <sup>3</sup> /h (100%効率が時)
パワー	電動機 75kw x 4P x 440V x 60Hz x 1台
ユニット	油圧ポンプ 242 l/min x 14.7MPa x 1台
ゲートジャッキ	NO.1 58.6kN x 370mm <sup>2</sup> x 13.7MPa x 4本
掘削ジャッキ	NO.2 107.8kN x 365mm <sup>2</sup> x 13.7MPa x 2本
パワー	電動機 15kw x 4P x 440V x 60Hz x 1台
ユニット	油圧ポンプ 35 l/min x 13.7MPa x 1台

図 3.1.6 シールド一般図 (鹿島建設(株)資料より)

### 3.2 事故発生時の状況

図 3.2.1 に請負者である鹿島建設(株)が整理した事故発生時の詳細経緯の資料を示す。この資料によると、事故当日(2012年2月7日)に発生した主な事象とそこから推定される事柄は表 3.2.1 に示すとおりである。事故は、112 リングの掘進を完了し、A2 セグメント、A1 セグメント、B1 セグメントの順に 3 ピースを組立てたのち、B2 セグメントを組立てるためにシールドジャッキの引抜きを開始したと同時に(12:06:09)にトラブル(浸水)が発生し、その時点から 17 分~23 分後の間に大規模な出水となりトンネルと立坑が浸水したものと推定される。

表 3.2.1 事故当日(2012年2月7日)に発生した事象と推定される事柄  
(鹿島建設(株)資料より)

時刻	発生した事象	推定される事柄
朝~11:45	<ul style="list-style-type: none"> <li>112 リングの掘進が完了。</li> <li>切羽圧に大きな異変は見当たらない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>112 リングの掘進までは問題なく進捗していた。</li> </ul>
11:45~12:06	<ul style="list-style-type: none"> <li>シールドジャッキの引抜きと押当てを 3 ピース分行った。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>A2、A1、B1 の順に 3 ピースのセグメントを組立てた。</li> </ul>
12:06:09~12:07:13	<ul style="list-style-type: none"> <li>新たに 6 本のシールドジャッキを引抜く動作が開始された。</li> <li>上記と同時に、切羽圧の急激な低下が記録された(図 3.2.2)。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>B2 セグメントの組立を開始した。</li> <li>12:06:09 から何らかの浸水が始まったと思われる。</li> </ul>
12:17 頃	<ul style="list-style-type: none"> <li>作業員から鹿島建設(株)の社員に「何らかのトラブル」を伝える連絡があった。</li> </ul>	
12:23~12:29	<ul style="list-style-type: none"> <li>立坑上部まで浸水し、立坑の天端から水があふれた。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>大規模な出水は、12:23~12:29 の 6 分間のうちで生じたものと思われる。</li> </ul>

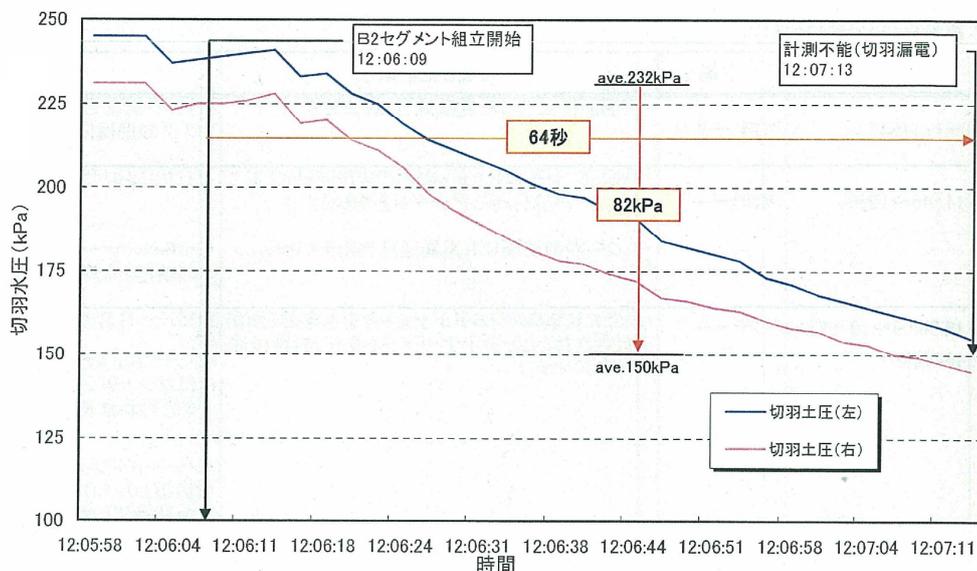


図 3.2.2 事故時の切羽圧の低下 (鹿島建設(株)資料より)

水島海底シールドで発生した事象について  
 — PCデータの分析から整理した事柄 —

2012.02.28

事故当日(2012年2月7日)

時刻	根拠	発生した事象	推定される事柄	説明	作業員配置
朝～11:45	PCデータ	・切羽圧に大きな異変は見当たりません。	・111リングまでの掘進・セグメントの組立～112リングの掘進は問題なく進捗しました。		地上: A (11:45頃はJV事務所で昼の打合せ) B (セグメント他資材積込)
11:45～12:06	PCデータ	・順次、シールドジャッキの引き抜きと押し当てを、3ピース分行ったデータがあります。 ・この間の切羽圧にも異変は見当たりません。	・112リングのセグメントを組立てていました。 ・26本のシールドジャッキのうち3本が引き抜き済の状態となりました。		立坑下: C (積込) D (バッテリーロコ) 切羽: E (マシンオペ) F (セグメント組立) G (セグメント組立)
12:06:09～12:07:13 (64秒間)	PCデータ	・新たに6本のシールドジャッキを引き抜く動作が開始されたことを示すデータがあり、64秒後に途切れています。	・4ピース目のセグメントの組立を行おうとした。 ・シールドジャッキの引き抜き途中で、12:07:13にはシールドジャッキの操作ができなくなったものと思われます。 ・シールドジャッキ26本のうち9本が引き抜かれた状態となり、111リングのセグメントに対する支持が長時間にわたって不安定になったと思われます。	・シールドジャッキは(油圧ポンプが作動している)制御系の電源が停止すると、安全のため稼働しなくなるしくみとなっています。 ・この引き抜き操作で、111リングのB1は6→1本、B2は6→4本、Kは2→0本での支持となります。	/
12:06:09～12:07:13 (64秒間)	PCデータ	・シールドジャッキの引き抜き開始と同時に、切羽圧の急激な低下が記録され、64秒後に途切れています。	・12:06:09から何らかの浸水が始まったと思われます。		
12:17頃	携帯電話の通話記録	・Aさんから鹿島の社員に「何らかのトラブル(漏電?)」を伝える連絡がありました。			○Eさんが切羽から坑口へ移動し、EVで地上へ。そこでAさんと会話。Aさんは鹿島のH(TEL(12:17))。
12:23	PCデータ	・PCの通信接続が切れました(これ以後、データは取得されていません)。	・この時点までは、シールドトンネル内の水位はシールドトンネル床面から1.25m以下であったと思われます。	・シールドトンネルの床面から1.25mのところにシールド用トランスがあり、冠水すれば停電します。 ・この後もPCは無停電装置で動きます。	○Gさんが坑口へ移動しEVで地上へ。 ○その後、EさんとAさんがEVで降りてきて横坑内へ。
12:23～12:29	観測	①立坑上部まで浸水しました。②海底に直径20m深さ3.5mの陥没が生じていました。③立坑の天端から水があふれました。	・大規模な出水は12:23～12:29の6分間のうちで生じたものと思われます。		○AさんとEさんは横行の途中(坑口から見える範囲)を中へ向かって歩行中。
12:29	PCデータ	・PCの電源が消失しました。	・PCが置かれている計測室の床面が浸水したと思われます。		○横坑内の途中で、Aさんが「逃げろ」と叫んだのを聞いて、Cさんは螺旋階段を駆け上がる。 ○GさんはEVで降下中。

出水時作業員配置状況予想図

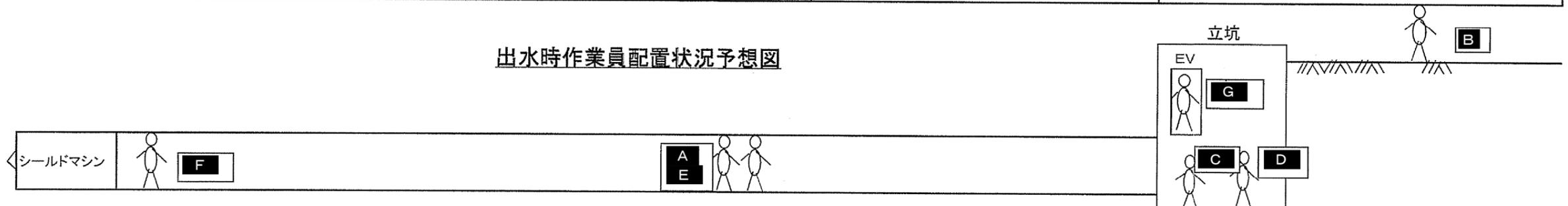
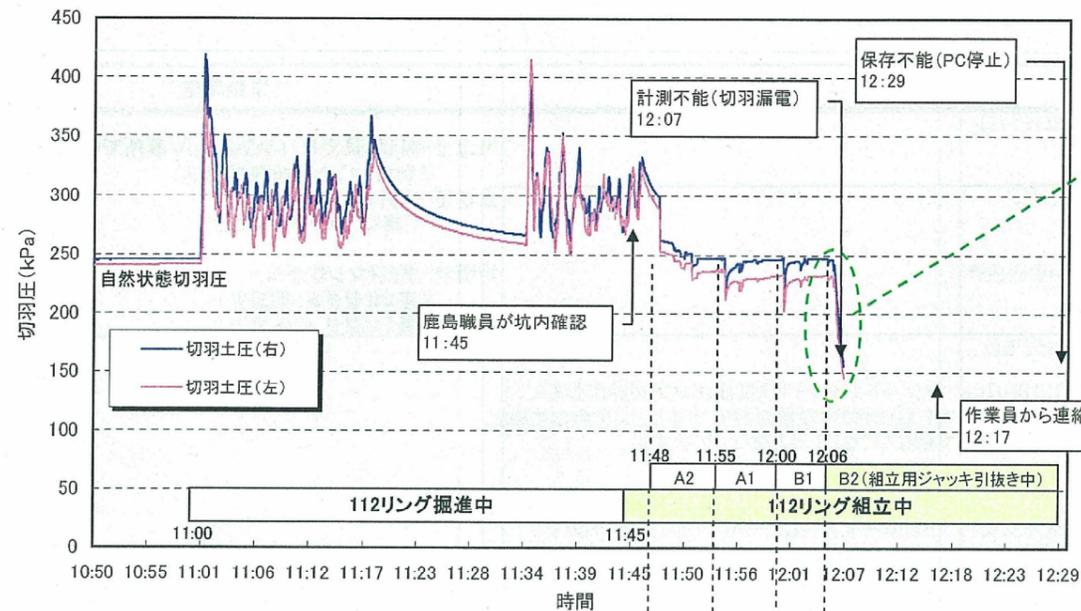
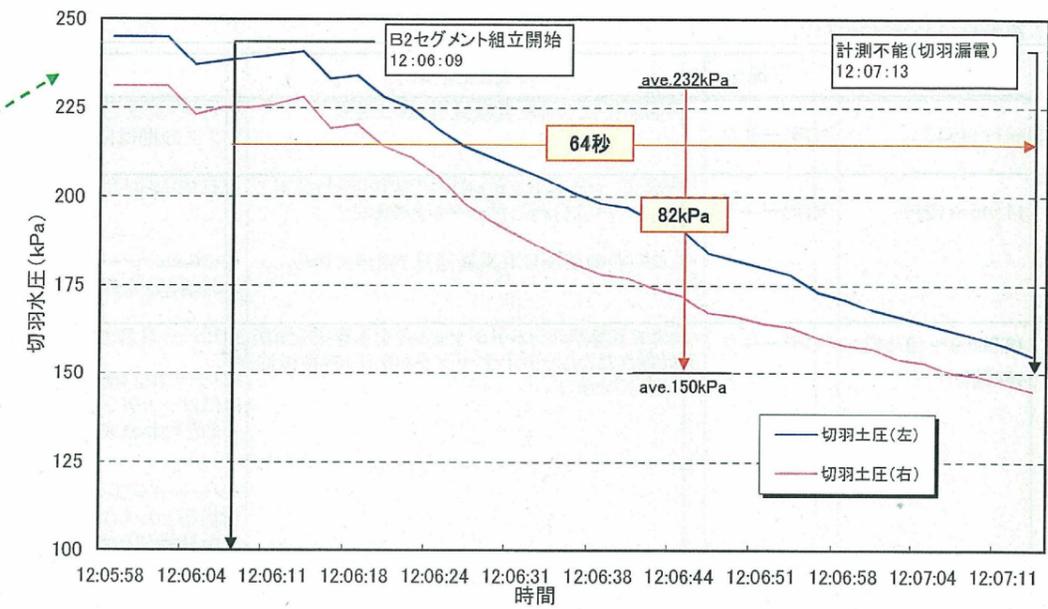


図 3.2.1(1) 事故発生時の詳細経緯 (鹿島建設(株)資料より)

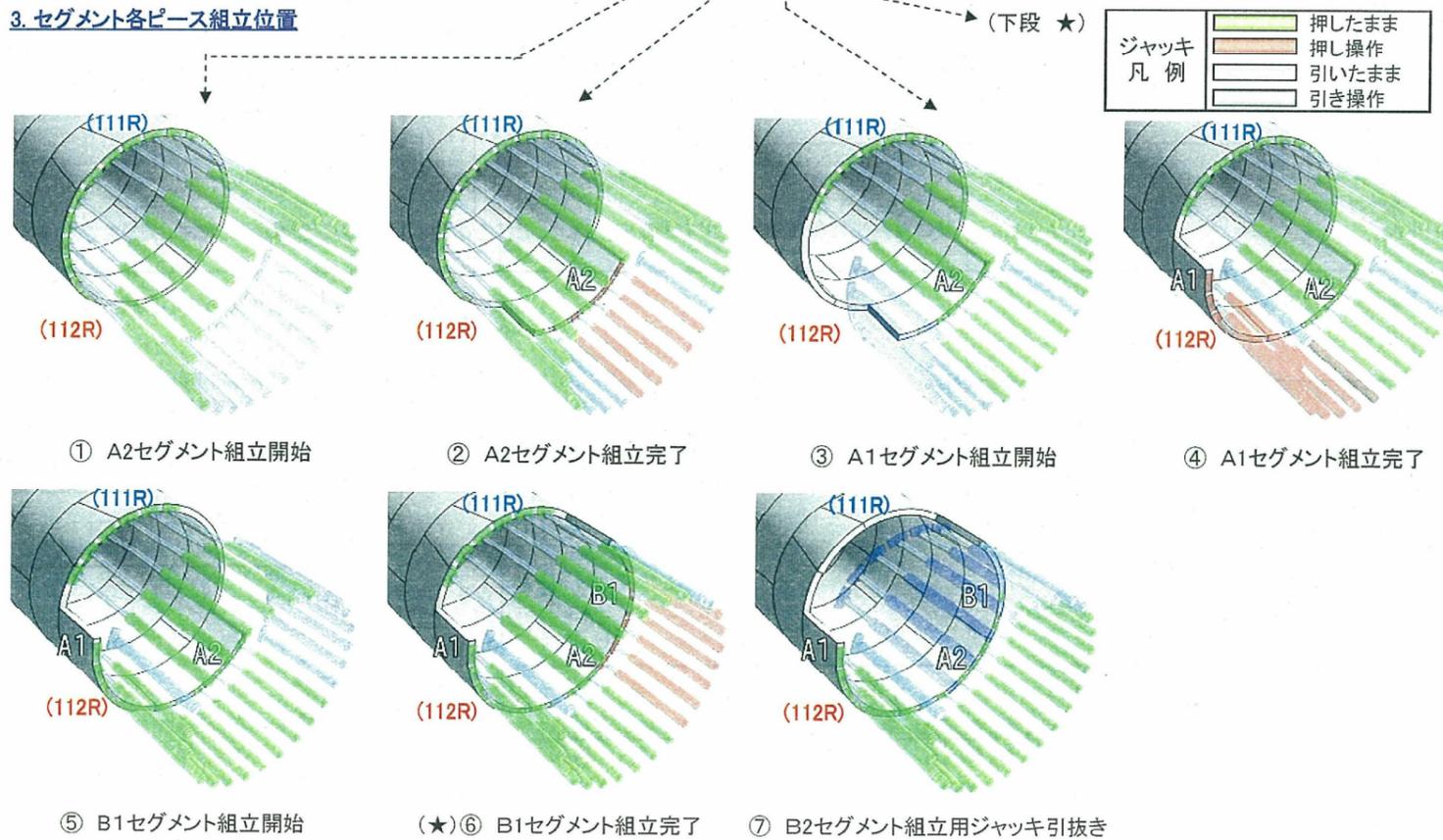
1. 切羽土圧掘進データ(112リング掘進～112リング組立～データ消失まで)



2. 切羽土圧掘進データ(112リング組立～計測不能)



3. セグメント各ピース組立位置



4. マシン・セグメント最終状態(推定)

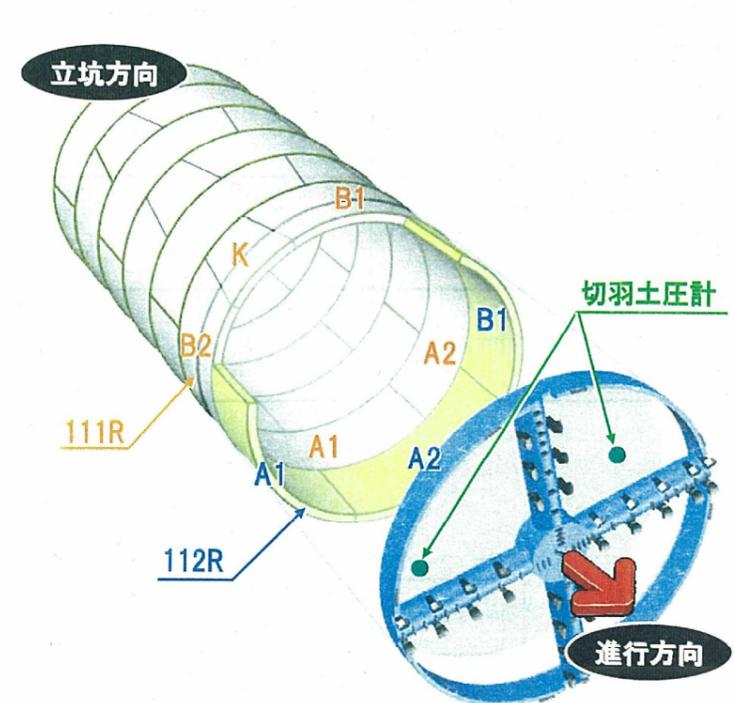
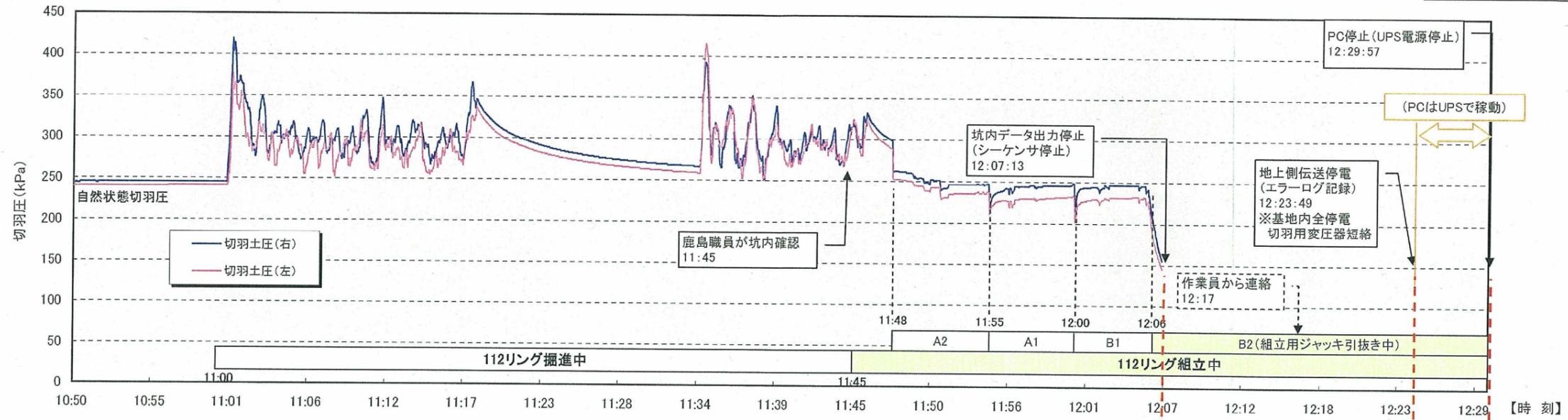


図 3.2.1(2) 事故発生時の詳細経緯 (鹿島建設(株)資料より)

5. 電源消失について(112リング掘進～112リング組立～データ消失まで)

※UPS：無停電電源装置



シールド機	正常動作	12:07:13	動作停止(制御回路 停止)	12:23:49
掘進管理システム	坑内	正常動作	通信切断(坑内伝送器 電源停止)	
	地上	正常動作	UPS稼動	UPS電源停止
電源	坑内	通電	シールド機 又は 切羽 停電	
	地上	通電		全停電

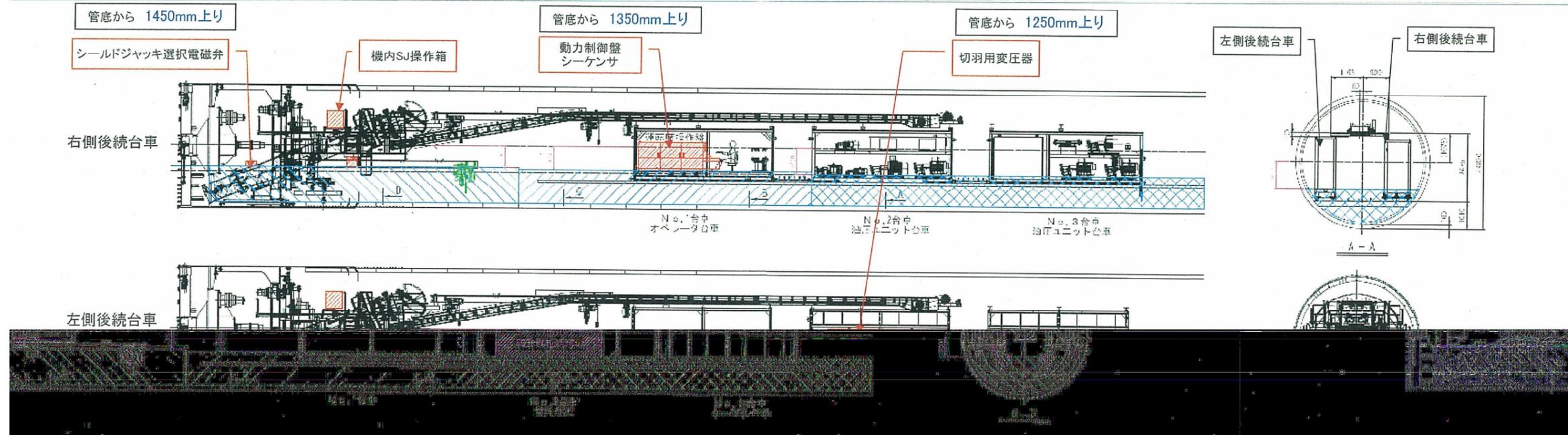


図 3.2.1(3) 事故発生時の詳細経緯 (鹿島建設(株)資料より)

### 3.3 現地調査結果

本協議会では、事故のメカニズムを把握するために表 3.3.1 に示す調査を行った。

表 3.3.1 調査項目の一覧

調査項目	調査内容
回収されたセグメントの調査	<ul style="list-style-type: none"><li>・セグメントの損傷状況 本体（内面、外面）の損傷状況 リング継手の損傷状況 セグメント継手の損傷状況</li><li>・セグメント内面の曲率半径</li></ul>
引揚げられたシールドの調査	<ul style="list-style-type: none"><li>・テールシールドの状況</li><li>・シールドジャッキのストローク長と直線性</li><li>・スクリーコンベアのシールド内での通り</li><li>・テールグリス注入口付近の状況確認</li><li>・シールドと機内に残置されている 112R の位置関係</li></ul>
セグメント型枠の調査	<ul style="list-style-type: none"><li>・型枠寸法調査</li><li>・製品単体の寸法調査</li><li>・仮組寸法調査</li></ul>

### 3.3.1 回収されたセグメントの調査結果

#### (1) セグメント調査の概要

事故時に土砂の流入とともに坑口側へ流されたセグメントについては、事故直後に立坑から引揚げ、事故時に流されずに海底に残ったセグメントについては、シールド引揚げの際に事故時に組立中であった112リングから後方の4リング分が海底から引揚げられている。

109R～112Rのセグメントのうち109RのKセグメント以外はすべて回収され、**図 3.3.1**に示すシールド引揚げの際に実施された海中での残置状況の確認や回収されたセグメントの形状、損傷状況から、各ピースのリングNo.を推定した。リングNo.を推定した結果、**表 3.3.2**に示すように、110RのA1、A2、B1、B2セグメントと112Rの組立前であったB2、Kセグメントは事故直後において立坑から回収され、その他のセグメントは海底から回収されたこととなる。なお、各セグメントピースのリングNo.の推定は、以下のとおりである。

109R・・・海中調査（**図 3.3.1**）から判明。

110R・・・海中調査（**図 3.3.1**）から立坑側に流されたと考えられ、回収時に確認された刻印、セグメント継手面の形状（エレクトリオンガイド溝、受け溝）、リング継手の損傷状況から推定。Kセグメントについては、海底より2ピースが回収されており、110R、111Rのいずれかであることから、ボルト締結の痕跡の有無（締結済み）から推定。

111R・・・海中調査（**図 3.3.1**）から判明。Kセグメントについては、海底より2ピースが回収されており、110R、111Rのいずれかであることから、ボルト締結の痕跡の有無（締結前）から推定。

112R・・・組立前のB2、Kセグメントについては、事故直後に立坑から吊手金具が設置された状態で回収されたことから判明。組立済みのA1、A2、B1セグメントについては、海中調査（**図 3.3.1**）から判明。

表 3.3.2 セグメントの回収状況

リング No.	立坑より回収 (事故直後)	海底より回収 (シールド引揚げ時)	未回収
109R		A1、A2、B1、B2	K
110R	A1、A2、B1、B2	K	
111R		A1、A2、B1、B2、K	
112R	B2、K（組立て前）	A1、A2、B1	

回収されたセグメントについて、セグメントの損傷状況として、各ピースのセグメント本体（内面側、外面側）、リング継手部、セグメント継手部の損傷状況の確認とともに、セグメント内面の曲率半径の計測を行った。また、全景写真として、セグメントの内面、外面に関して、回収されたセグメントを展開図的に配置し、高所作業車から全体が把握できる写真を撮影した。各調査結果は参考資料に示す。

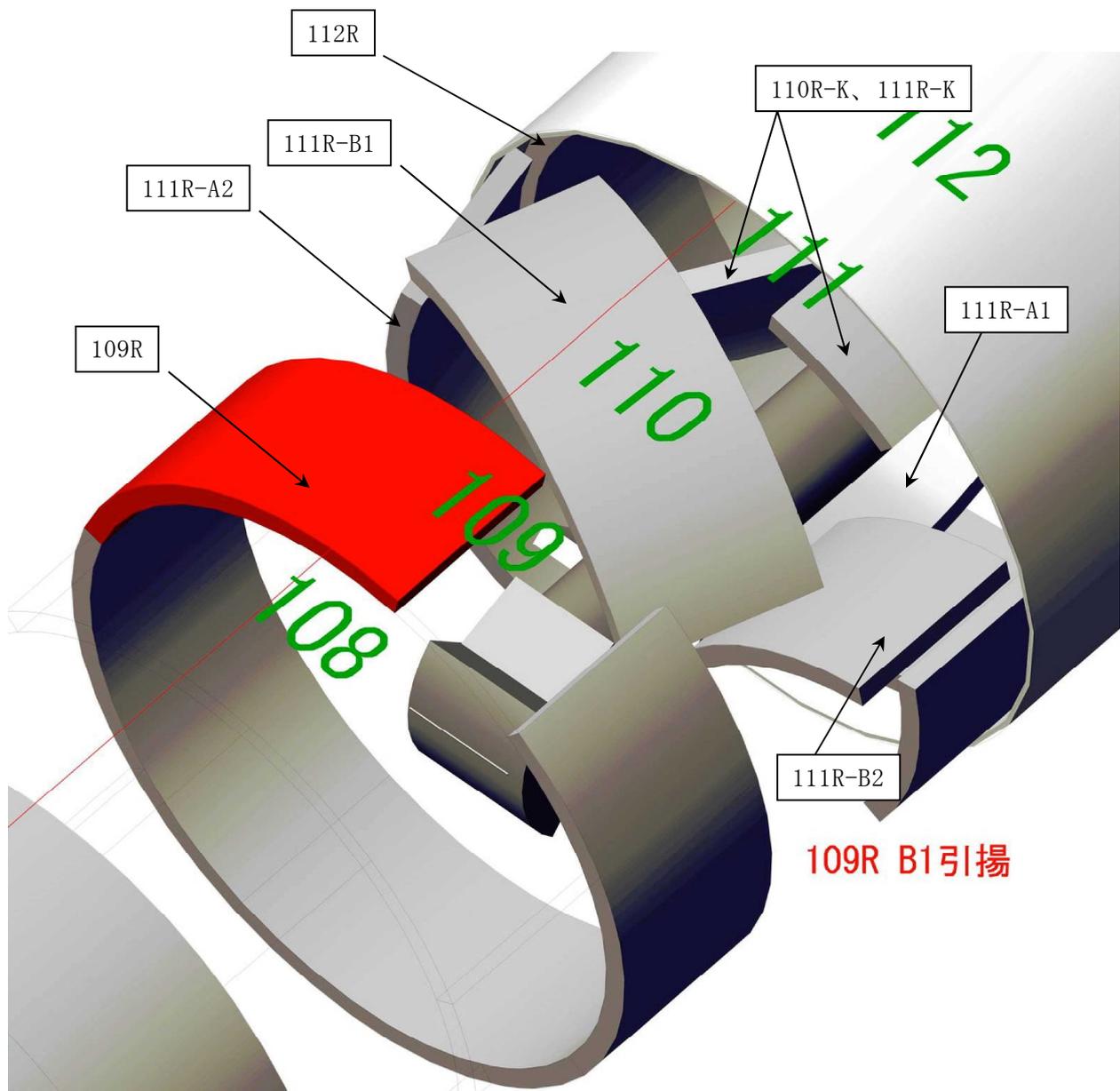


図 3.3.1 セグメント海中残置状況の概念図（鹿島建設(株)資料より）

(2) セグメント調査の結果

1) セグメントの損傷状況

図 3.3.2、図 3.3.3 に調査により確認されたセグメントの損傷状況を展開図、立体図にそれぞれ示す。

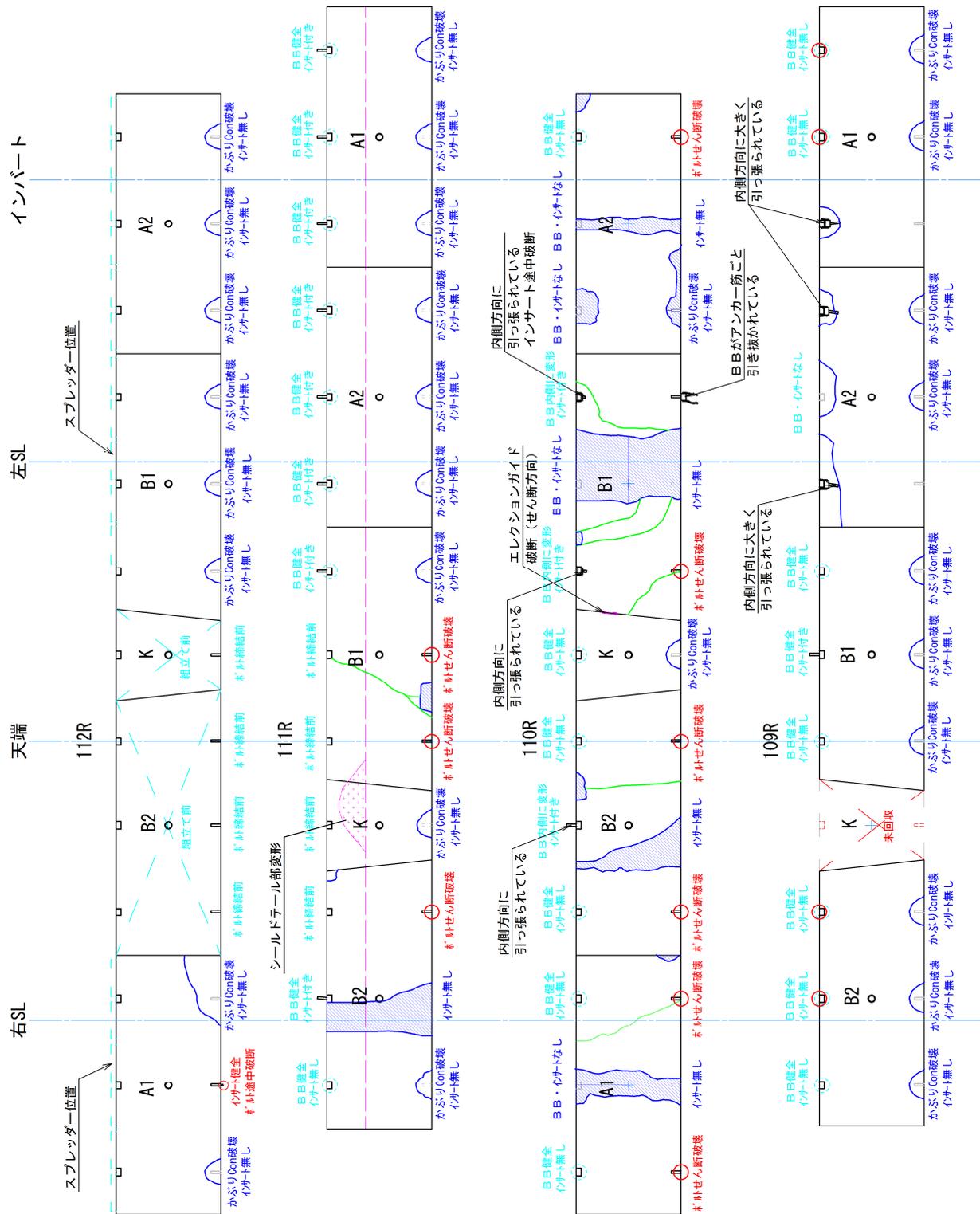


図 3.3.2 セグメント内面側の損傷状況（展開図）

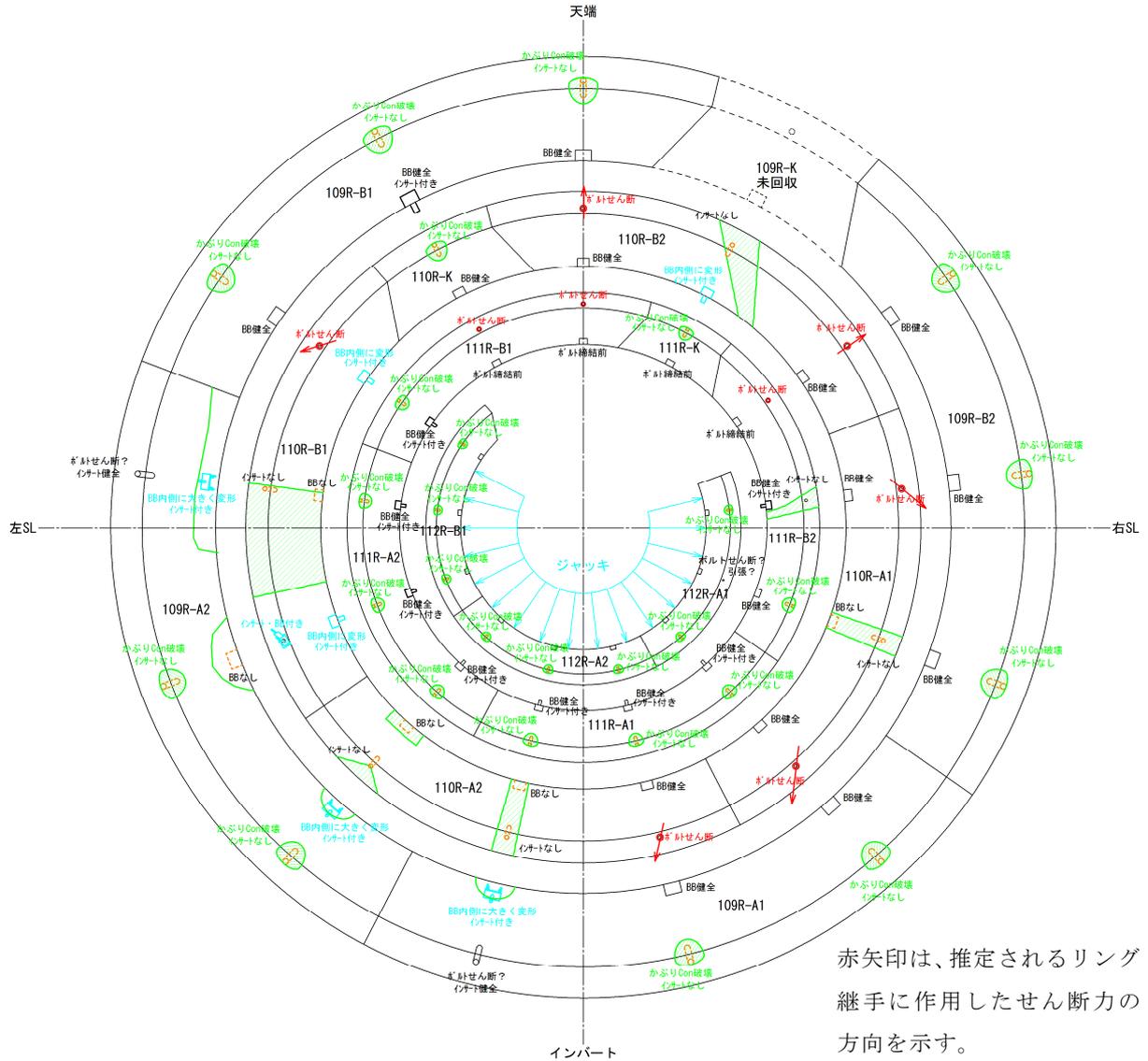


図 3.3.3 セグメント内面側の損傷状況（立体図）

セグメントの調査結果から、以下の特徴的な損傷が確認された。

[トンネル天端付近のひび割れ]

- ・ 110R、111R の天端付近に軸方向に伸びるひび割れ

[111R の K セグメントの抜出しの痕跡]

- ・ エレクションガイドによる B2 セグメントの損傷（111R の K-B2 間セグメント継手）
- ・ リング継手が斜めに引張られたと推定される破壊形態

[リング継手の破壊形態]

- ① インサート側かぶりコンクリート破壊
- ② ボルトせん断破壊
- ③ ボルトボックス側のめくれ
- ④ ボルトボックス側アンカー筋引抜き

## 2) トンネル天端付近のひび割れ

写真3.3.1、写真3.3.2に、111RのB1セグメントと、110RのB2セグメントの内面の損傷状況を示す。写真からセグメント内面にトンネル軸方向に伸びる曲げひび割れとみられるひび割れが確認できる。

111RのB1セグメントと、110RのB2セグメントはトンネル天端付近に位置することから、トンネル上部から大きな力が作用したことが考えられる。

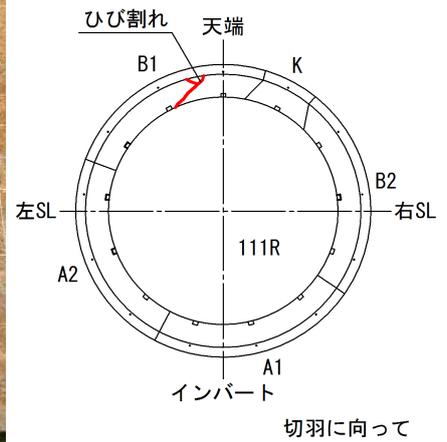


写真 3.3.1 111R の B1 セグメント内面の損傷状況

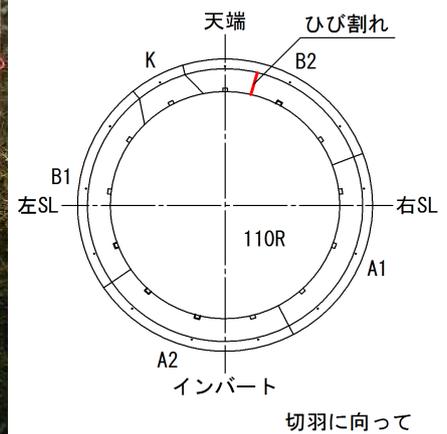


写真 3.3.2 110R の B2 セグメント内面の損傷状況

### 3) 111R の K セグメントの抜出しの痕跡

写真 3.3.3 に、111R の B2 セグメントの K 側のセグメント継手の損傷状況を、図 3.3.4 に、その損傷状況をスケッチしたものを示す。写真と図から、111R の B2 セグメントの K 側のセグメント継手に損傷が確認され、切羽側のエレクションガイド受け溝では、切羽側端部を起点に隅角部が欠けた状態、坑口側のエレクションガイド受け溝では、同じく切羽側端部を起点にひび割れが入った状態にある。

これらの損傷は、図 3.3.5 に示すように K セグメントが切羽側に抜出し、K セグメントのエレクションガイドに設置した樹脂パイプが、下側に位置する B2 セグメントのエレクションガイド受け溝の切羽側端部で引っかかり、さらに切羽側への抜出し力が作用したために欠け、ひび割れが生じたものと考えられる。K セグメントの抜出し量は、図 3.3.6 に示すエレクションガイドとエレクションガイド受け溝との関係から 150mm 程度と推測される。

また、写真 3.3.4 に示すリング継手の破壊状況から、リング継手は斜めに引張られたと推定される。



写真 3.3.3 111R の B2 セグメントの K 側セグメント継手の損傷状況



写真 3.3.4 111R の K セグメントが接続する 110R のリング継手の破壊状況

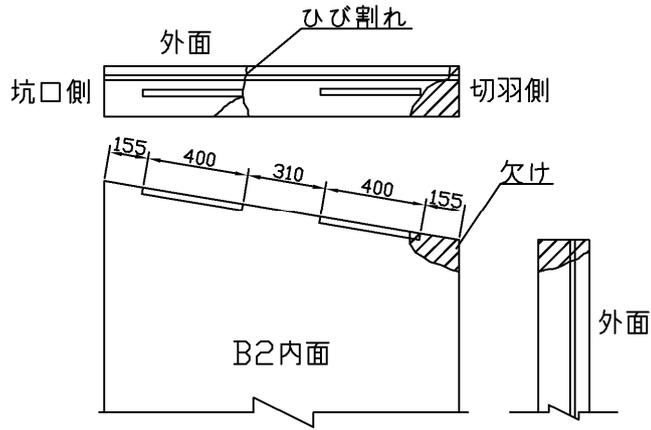


図 3.3.4 111R の B2 セグメントの K 側セグメント継手の損傷スケッチ

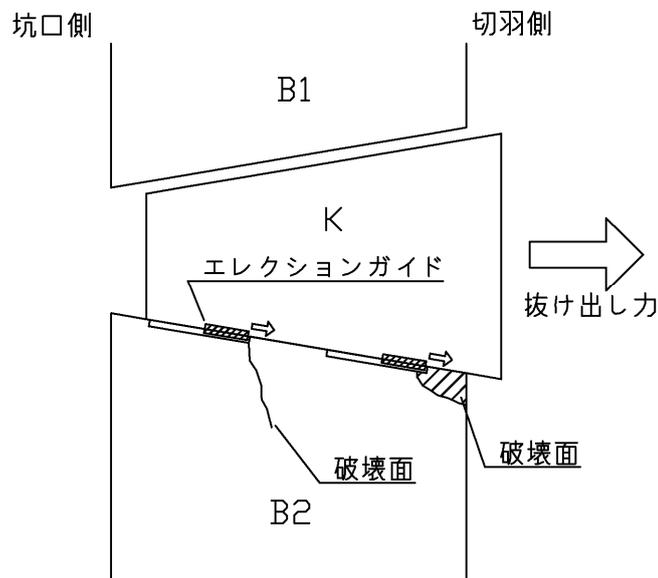
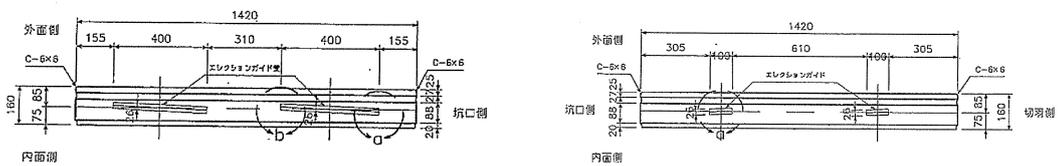


図 3.3.5 K セグメントの抜出しによる損傷のイメージ図



a) B2 側

b) K 側

図 3.3.6 K-B2 間セグメント継手

#### 4) リング継手の破壊形態

リング継手の破壊状況は、インサート側かぶりコンクリート破壊、ボルトせん断破壊、ボルトボックス側のめくれ、ボルトボックス側アンカー筋引抜きの4種類に大きく分類することができる。

##### ①インサート側かぶりコンクリート破壊

インサート側のかぶりコンクリートの破壊は、最も多く見られた現象で、109R-110R間では110RのKセグメント部の1箇所のみであるが、109R~112Rのすべてのリング間で生じている。ボルトボックス側では、ボルトボックスにインサートが付いた状態となっているものが多く見られる。**写真3.3.5**に、インサート側のかぶりコンクリートの破壊の例を示す。

この破壊現象は、**図3.3.7**に示すようにインサート側にトンネル内側へせん断力が作用したことによりかぶりコンクリートが破壊し、ボルトボックスにインサートが残った状態になったと考えられる。また、現場のセグメントを用いたインサート側の試験のうち、**写真3.3.6**に示すトンネル内側へせん断力を作用させたケースの破壊状況と損傷の傾向が最も一致している。



a) 111R側



b) 112R側

写真3.3.5 インサート側かぶりコンクリート破壊の例（111R-112R間インバート部）



写真3.3.6 現場のセグメントを用いたリング継手の試験  
（インサート側をトンネル内側に引抜いた場合）

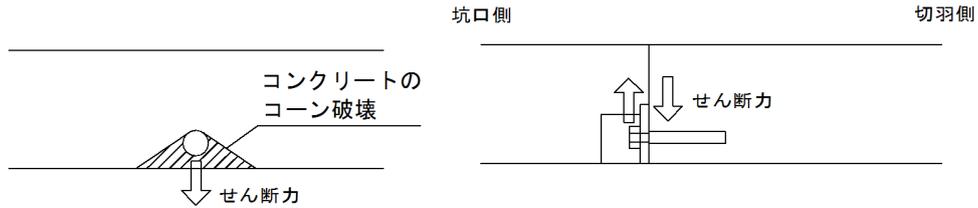


図 3.3.7 インサート側かぶりコンクリート破壊のイメージ図

②ボルトせん断破壊

ボルトのせん断破壊は、109R-110R 間、110R-111R 間で見られ、トンネル上半および切羽に向って右側で生じている。写真 3.3.7 に、ボルトのせん断破壊の例を示す。

この破壊現象は、①で示したインサート側のかぶりコンクリートの破壊とは作用したせん断力の方向が異なり、図 3.3.8 に示すようにインサート側にトンネル外側やトンネル周方向へせん断力が作用したことによりボルトのせん断破壊が生じたと考えられる。



a) 109R 側



b) 110R 側

写真 3.3.7 ボルトせん断破壊の例 (109R-110R 間天端部)

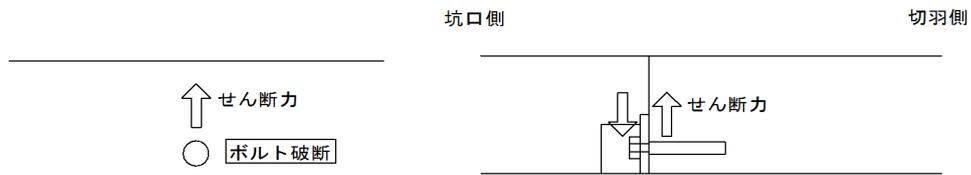


図 3.3.8 ボルトせん断破壊のイメージ図

### ③ボルトボックス側のめくれ

ボルトボックス側のめくれは、109R-110R 間で見られ、インバートから左スプリングライン付近で3箇所生じている。ボルトボックス側のかぶりコンクリートが破壊し、アンカー筋がトンネル内側へ大きく変形した状態となっている。また、3箇所ともにボルトボックスにインサートが付いている。インサート側では、セグメント本体が割れた状態やインサート周辺のコンクリートが大きく破壊した状態であった。写真3.3.8に、ボルトボックス側のめくれの例を示す。

この破壊現象は、図3.3.9に示すように切羽側の110Rのセグメントピースがトンネル坑口側に向ってめくられることにより、ボルトボックス側のかぶりコンクリートが破壊するとともにアンカー筋がトンネル内側へ変形したと考えられる。インサート側は、ボルトボックスにインサートが残った状態となっていることから、インサート部のかぶりコンクリートの破壊、インサートの引抜き、セグメント本体の割れなどが考えられるが、破壊形態を特定することは困難である。



a) 109R 側

b) 110R 側

写真 3.3.8 ボルトボックス側のめくれの例 (109R-110R 間インバート部)

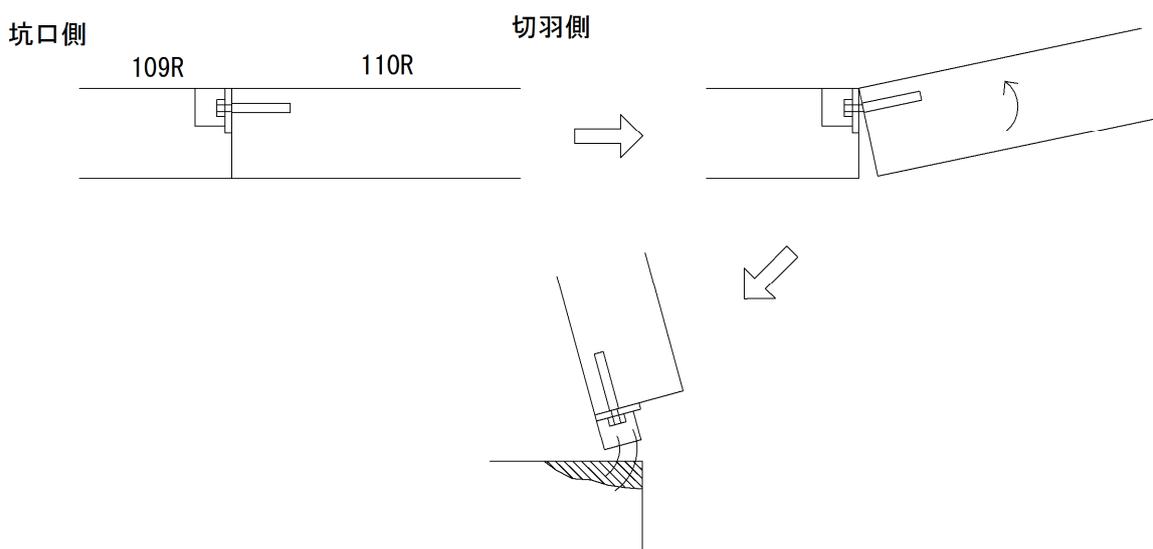


図 3.3.9 ボルトボックス側のめくれのイメージ図

#### ④ボルトボックス側アンカー筋引抜き

ボルトボックス側のアンカー筋引抜きは、109R-110R間の左スプリングライン付近で1箇所発生している。ボルトボックス側のかぶりコンクリートが破壊し、インサート側にアンカー筋の付いたボルトボックスが残っている状態である。写真3.3.9に、ボルトボックス側のアンカー筋引抜きの例を示す。

この破壊現象は、③で示したボルトボックス側のめくれと同様に、切羽側の110Rのセグメントピースがトンネル坑口側に向かってめくられたが、③とは異なり、インサート側の破壊よりボルトボックスのアンカー筋が先に抜けたと考えられる。



a) 109R側



b) 110R側

写真3.3.9 ボルトボックス側アンカー筋引抜きの例(109R-110R間左スプリングライン付近)

5) セグメント内面の曲率半径

図 3.3.10 に回収された 109R~111R の各セグメントで計測したセグメント内面の曲率半径と設計値 (2250mm) との差の分布を示す。損傷の大きい 110R で設計値に対する曲率半径の差が大きく、最大値 777mm、最小値-972mm となっている。隣接する 109R の切羽側と 110R の坑口側、110R の切羽側と 111R の坑口側で計測結果に関連性が見られないことから、事故時の流出による影響や、引揚げ後の保管状況の影響を受けていると思われる。

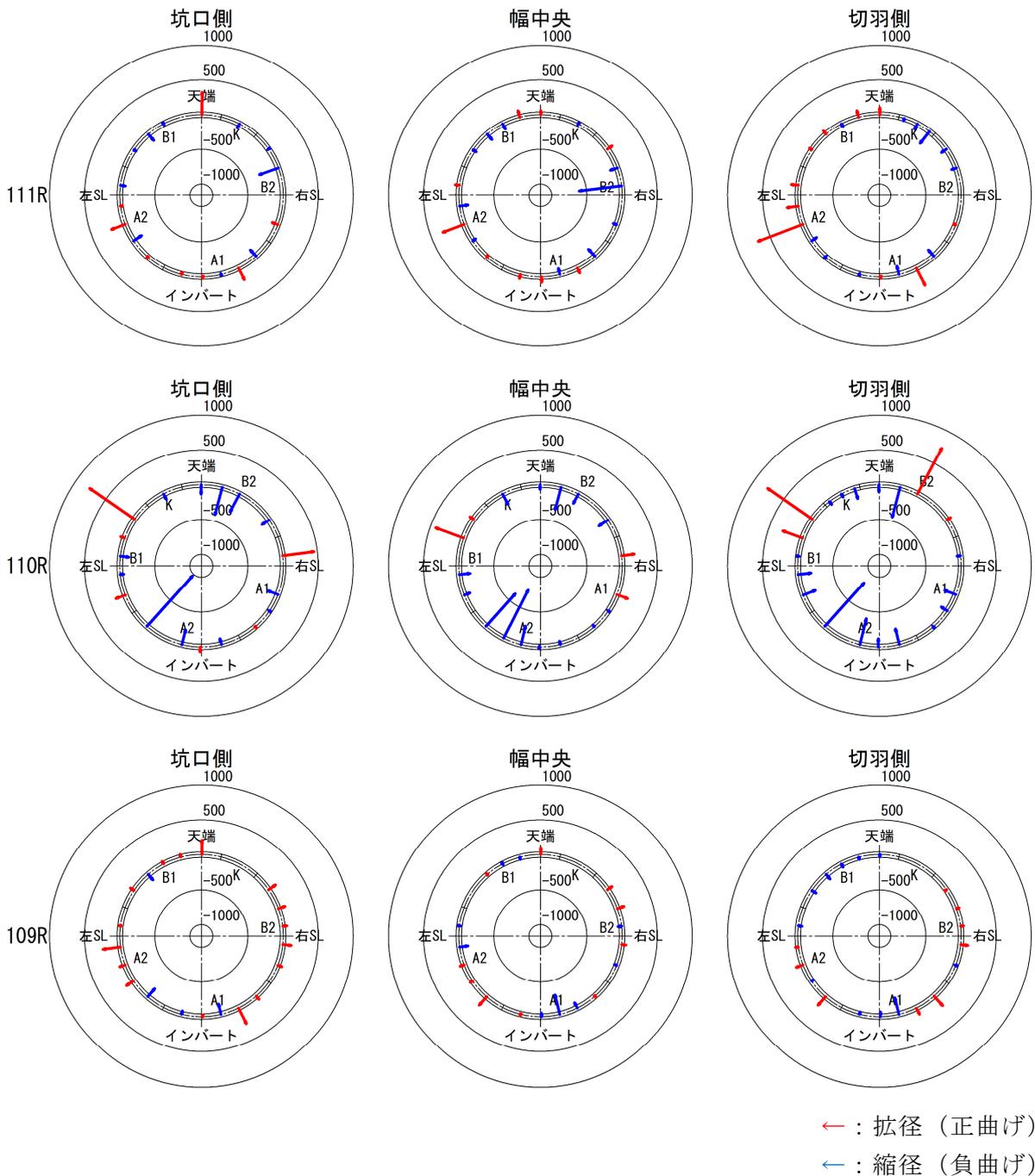


図 3.3.10 計測した内面曲率半径と設計値 (2250mm) との差

### 3.3.2 引揚げられたシールドの調査結果

#### (1) シールド調査の概要

引揚げられたシールドについて、表 3.3.3 に示す調査を行った。

表 3.3.3 調査項目

No.	調査項目
1	テールシールの状況
2	シールドジャッキのストローク長と直線性
3	スクリーコンベヤのシールド内での通り
4	テールグリス注入口付近の状況確認
5	シールドと機内に残置されている 112R の位置関係

#### (2) テールシールの状況

テールシールの状況を観察するとともに、テールブラシの形状・寸法を外周長 30cm～60cm ピッチを基本に全周にわたって計測し、各位置におけるブラシのバネ板の角度を算出した。

写真 3.3.10 にテールブラシの状況の代表例を、表 3.3.4 に計測したテールブラシの寸法から算出したブラシのバネ板の角度を、図 3.3.11 にテールシールの設計図を、図 3.3.12 に設計テールクリアランス時の内バネ板の角度をそれぞれ示す。テールシールの状況は、上半と下半とで状況が異なる。写真 3.3.10 に示すように、上半のブラシは付着物がなく広がった状態、下半のブラシは付着物があり押しつぶされたような状態にある。ただし、表 3.3.4 のブラシのバネ板の角度を算出した結果から、設計テールクリアランス時における内バネ板の角度が、設計値の約 80deg に対して計測結果が -35～53deg となっていること、内バネ～外バネの角度が、設計値の 10deg に対して計測結果が 22～109deg となっていることから、ブラシの形状は施工時からシールドの引揚げ等によって大きく変化していると判断される。

また、写真 3.3.10 の a) に示すように、切羽に向って天端より約 50cm 右側の位置（111R の K セグメント側で、図 3.3.13 に示す位置）を中心に外周長約 60cm にわたってテール部スキンプレートの内側側面への変形が見られ、最大で 23mm の変形量である。この変形は、シールド外側から局所的な力が作用したことによるものと考えられ、この位置が土砂の流入箇所である可能性がある。

なお、テールブラシに付着していた物質の成分分析の結果によれば、1 段目（切羽側）のテールブラシの切羽に向って 4 時と 10 時の方向から裏込め注入材が検出された（図 3.3.13）。したがって、施工途中において裏込め注入材がテールシールドへ回り込んでいたことが確認された。

表 3.3.4 テールブラシの形状

	1 段目		2 段目	
	内バネ板	内バネ～外バネ	内バネ板	内バネ～外バネ
計測結果	-35～29deg	40～104deg	-32～53deg	22～109deg
設計値	78deg <sup>*1)</sup>	10deg	80deg <sup>*1)</sup>	10deg

\*1) 設計テールクリアランスの場合



a) 天端部

b) インバート部

写真 3.3.10 テールブラシの状況

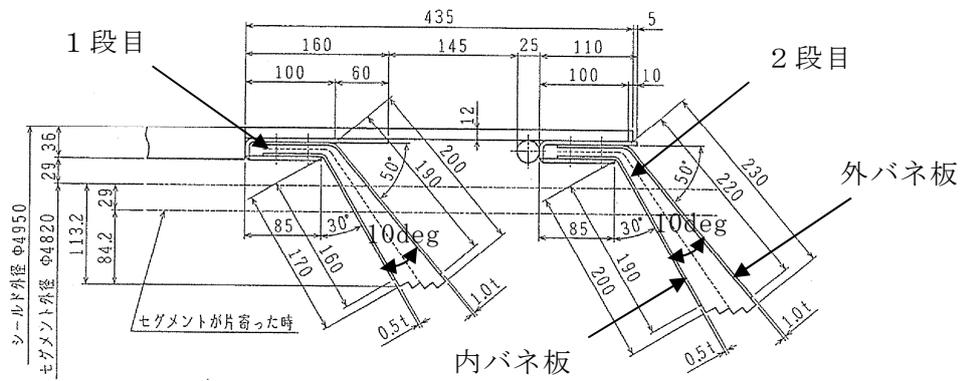


図 3.3.11 テールシール設計図

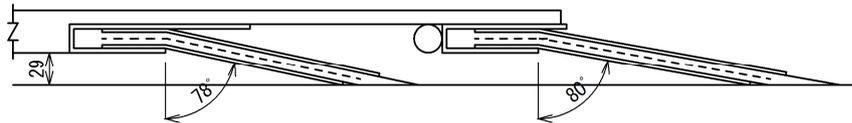


図 3.3.12 設計テールクリアランス時の内バネ板角度

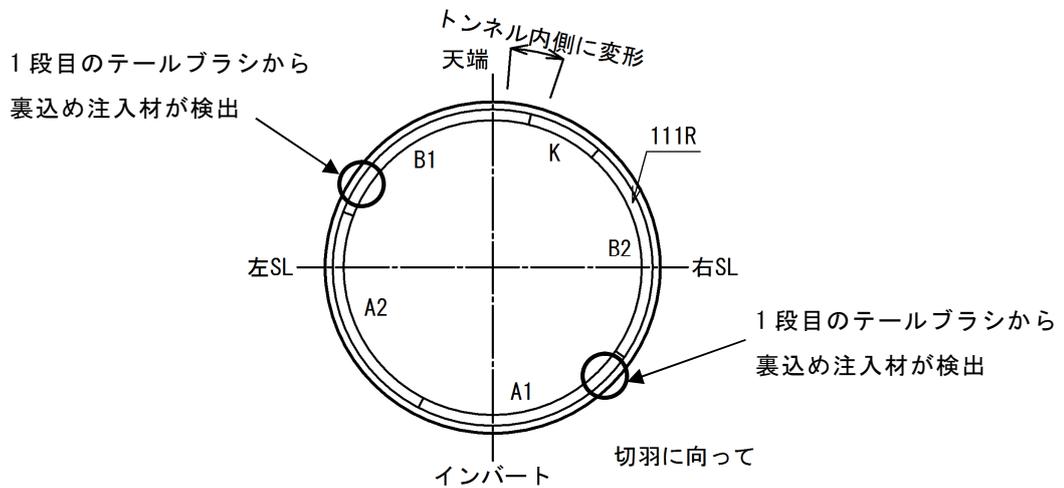


図 3.3.13 テール部スキンプレート変形箇所、裏込め注入材検出箇所

(3) シールドジャッキのストローク長と直線性

各ジャッキのストローク長の計測と、スキンプレートからジャッキまでの離れを切羽側と坑口側の2箇所計測し、ジャッキの傾き（内側か外側か）を算出した。

1) ストローク長

図 3.3.14 に示すように No. 23, 24 は 112R の B1 セグメントを組立てるときに引いた状態のまま、No. 1~5、25、26 は 112R の B2 セグメントを組立てるために引いている最中、No. 6~22 は組立てた 112R の A1、A2、B1 セグメントを押している状態であった。引いているジャッキのうち、No. 26 のみが突出しているのは、油圧ポンプが 1 系統であることから、各ジャッキにおける抵抗の差により引く速度に違いが生じていた可能性がある。

また、112R を押しているジャッキのストローク長より、112R のセグメントの向きを整理すると図 3.3.15 のようになる。各セグメントの両端のストローク長より目開き量を推定すると約 15~20mm となり、セグメントが組めるような状態ではないこと、表 3.3.5 に示すように自動計測システムで記録されていたストローク長に対して計測結果が 20~25mm 程度長くなっていることから、事故時にジャッキが動いたことが考えられる。

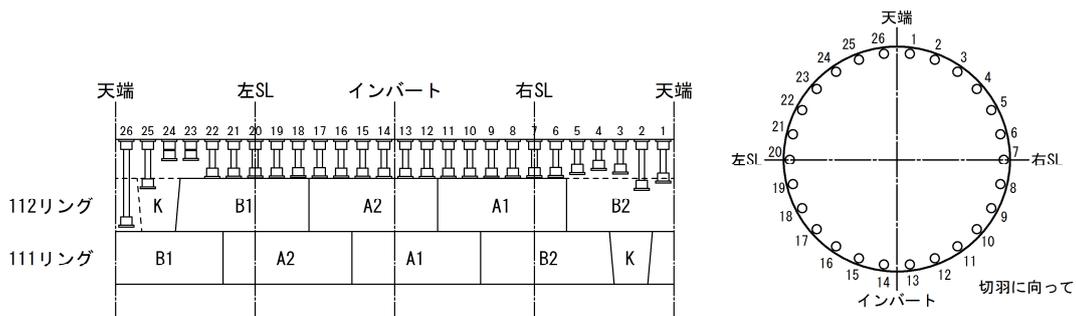


図 3.3.14 ジャッキストロークのイメージ図

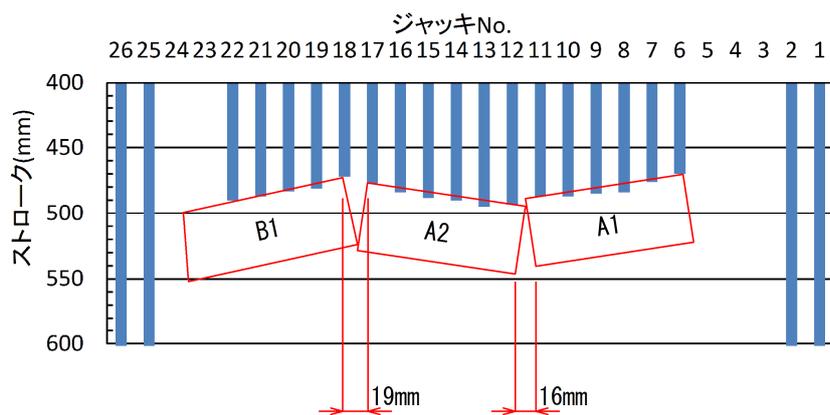


図 3.3.15 ジャッキストロークによる 112R のセグメントの向き

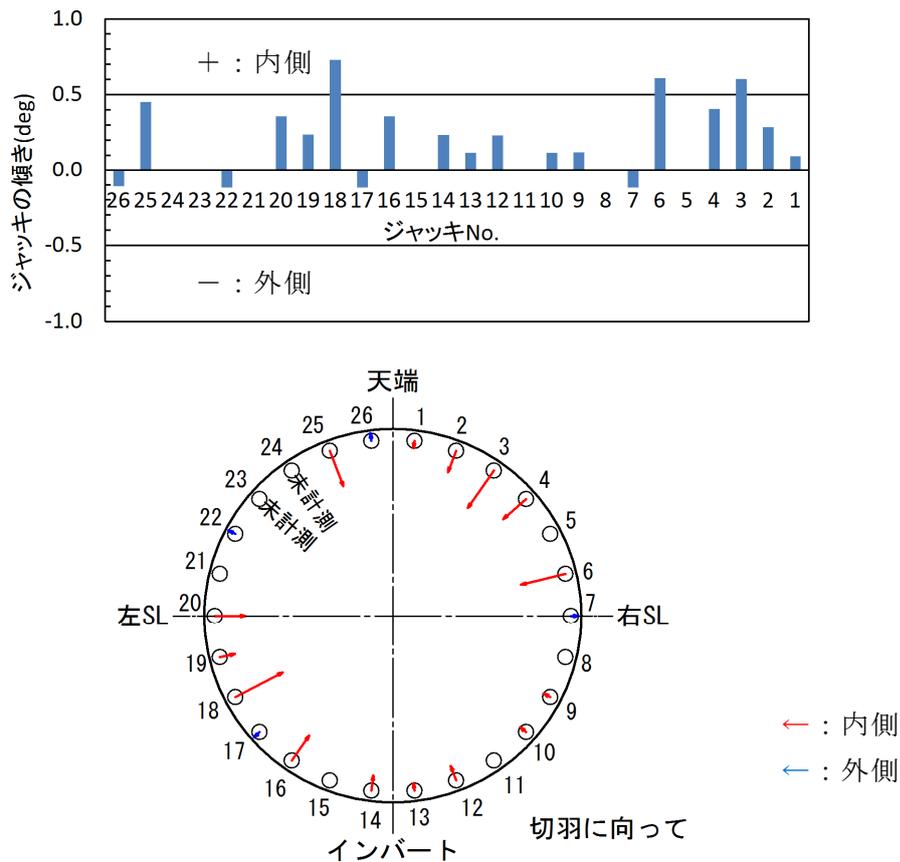
表 3.3.5 自動計測データと現地調査のジャッキストロークの比較

	ストローク左 (ジャッキ No. 20)	ストローク右 (ジャッキ No. 7)
①自動計測データ*1)	465mm	451mm
②現地調査	483mm	476mm
差 (②-①)	18mm	25mm

\*1) 自動計測データは、事故時にデータが出力されていた最後(12:07:13)の値(切羽圧の低下が計測されデータが途切れる直前)

2) ジャッキの直線性

図 3.3.16 に各ジャッキのトンネル半径方向の傾き(角度)と、断面で見たときの傾いている方向とその程度のイメージ図を示す。図より、ジャッキの向きは、No. 7、17、22、26 で外向きとなっているが、その角度は 0.1deg と小さいこと、No. 5、8、11、15、21 では完全に直線であること、その他のジャッキでは内向きとなっており、最大で 0.7deg であることが分かる。ジャッキはやや内側に向いている傾向であるが、その角度は小さいことから、ジャッキはほぼ直線性が保たれていたことを確認した。



※ジャッキNo. 23、24は、ストローク長が約30mmと短いことから傾きの計測を実施していない。

図 3.3.16 ジャッキの傾き

#### (4) スクリューコンベヤのシールド内での通り

シールドに対するスクリューコンベヤの水平方向の位置を計測した結果、テールエンドから約 1.8m 後方の位置で切羽に向かって約 6cm 右側に変位していることを確認した。また、**写真 3.3.11** に示すようにスクリューコンベヤ下部の鋼材が大きく変形しており、トンネル崩壊時に荷重を受けたと思われるが、元の位置に対する変位量が分からないことから、荷重が作用した方向の推定は困難である。

「(2) テールシールの状況」のテール部変形から想定される土砂流入箇所を考えると、スクリューコンベヤは左側に変位することになるため、計測した結果と整合は取れていない。トンネルの最終的な崩壊時に荷重を受け変形が生じたことや、シールド引揚げ時などにスクリューコンベヤが動いたことが可能性として考えられる。

また、**写真 3.3.12** に示すようにスクリューコンベヤの排土ゲートは完全に閉じていた状態であったため、事故時においてスクリューコンベヤからの土砂噴発はなかったと考えられる。



写真 3.3.11 スクリューコンベヤ下部の鋼材の変形



写真 3.3.12 スクリューコンベヤの排土ゲート



表 3.3.6 テールグリス注入口の触診結果

グリス注入口の触診結果

	付着物の有無	触診結果
注入口1	○	注入口内に硬い物質が詰まっていた状態
注入口2	×	注入口付近に付着物がなく注入口を確認
注入口3	○	付着物は下写真に示す繊維が混入した固結物
注入口4	○	付着物は繊維が混入したゲル状の物質
注入口5	○	付着物は下写真に示す繊維が混入した固結物
注入口6	○	付着物は下写真に示す繊維が混入した固結物
注入口7	○	付着物は下写真に示す繊維が混入した固結物
注入口8	○	付着物はゼリー状の油分



写真 注入口7付近の付着物

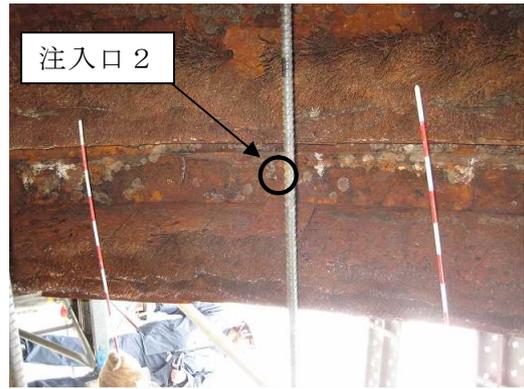
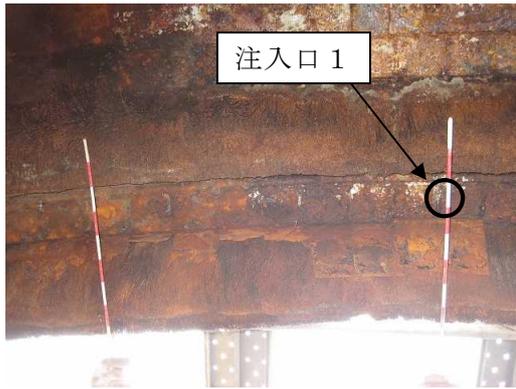


写真 3.3.13 テールグリス注入口付近の状況

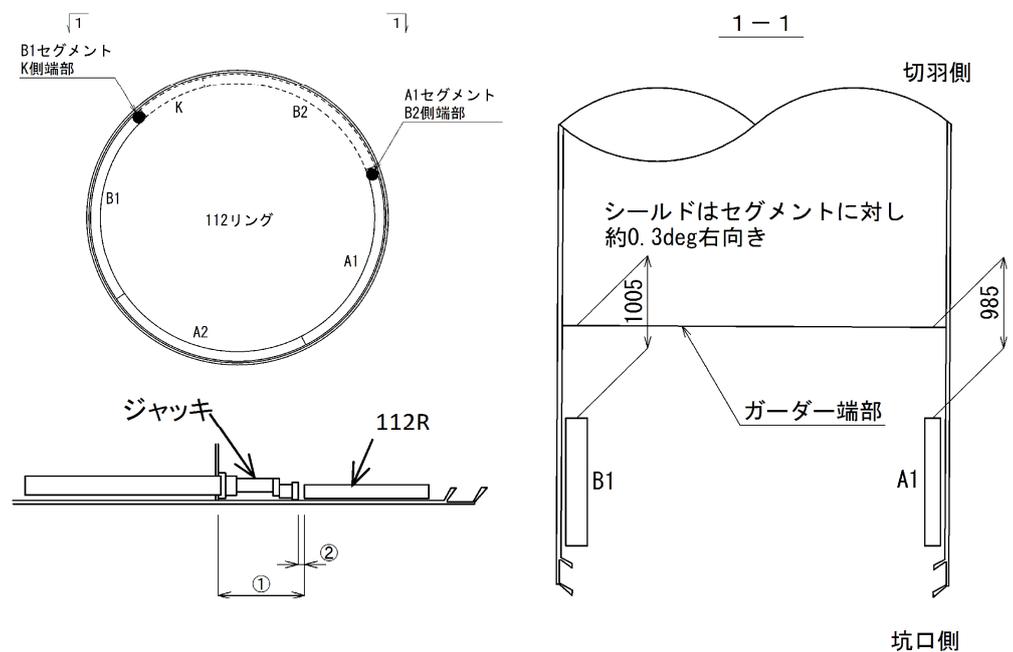
(6) シールドと機内に残置されている 112R の位置関係

図 3.3.18 に、シールドと機内に残置されている 112R のセグメントとの位置関係（ガーダー端部～セグメント切羽側）の計測結果を示す。計測結果から、セグメントに対しシールドが約 0.3deg 右を向いている結果となった。ただし、セグメントとジャッキスプレッダに 15～20mm 程度の隙間が生じていたことから、土砂流入時やシールド引揚げ時にセグメントが動いたことが考えられる。

シールドと機内に残置されている112リングの位置関係の計測結果

計測位置	計測箇所	B1セグメント K側端部 mm	A1セグメント B2側端部 mm
①	ガーダー端部～セグメント	1005	985
②	ジャッキスプレッダ～セグメント	14	22

計測位置



[参考:シールド機図面より抜粋]

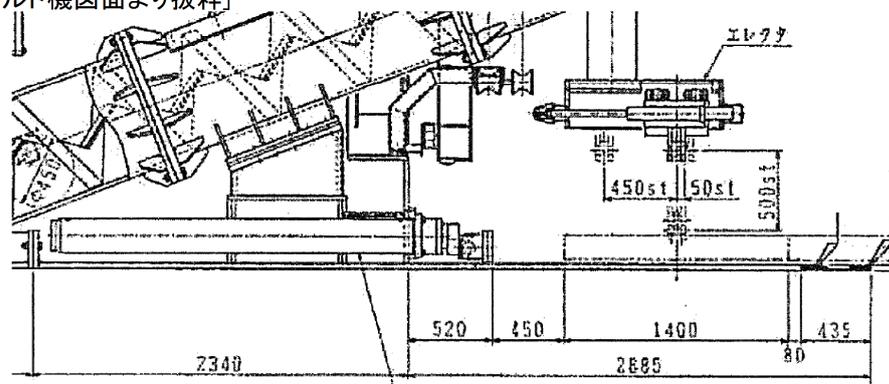


図 3.3.18 シールドと機内に残置されている 112R のセグメントとの位置関係の計測結果

### 3.3.3 セグメント型枠の調査結果

#### (1) 型枠寸法調査結果

各セグメントピースの型枠について、幅および厚さを複数の箇所にて計測した。表 3.3.7 に示す計測結果は、全て許容差の範囲内であるため、型枠自体に問題があった可能性は低いと考えられる。

表 3.3.7 型枠寸法調査結果

	寸法	
	幅 <sup>※1</sup> mm	厚さ mm
A1 型	1388	162～163
A2 型	1388	162～163
B1 型	1388～1389	162～163
B2 型	1388～1389	162～163
K 型	1389	161～163
設計寸法、許容差	1388±1.0	160+5.0、-1.0 <sup>※2</sup>

※1：セグメント幅 1400mm からコーキング溝 6mm×2 箇所を控除している。

※2：厚さの許容差-1.0mm は、局所的な肉厚減少の限界を示す。

#### (2) 製品単体の寸法調査結果

各セグメントピースの製品（セグメント製作工場にて保管されていたもの）について、幅および厚さを複数の箇所にて計測するとともに、セグメントのねじれ等を確認するために対角弦長を計測した。表 3.3.8 に示す幅、厚さの計測結果は、全て許容差の範囲内であるため、セグメントの製作精度に問題があった可能性は低いと考えられる。また、表 3.3.9 に示す対角弦長の計測結果では、実際の対角弧長に対し 1～4mm 程度の違いがあること、B2 型は 2 つの対角弦長の差の符号が逆転していることから若干ねじれている傾向にあることが分かるが、問題と考えられるほど大きいものではない。

表 3.3.8 製品単体の寸法調査結果（幅、厚さ）

	寸法	
	幅 mm	厚さ mm
A1 型	1400	163～164
A2 型	1400～1401	162～164
B1 型	1400～1401	163～164
B2 型	1400	163～164
K 型	1401	161～163
設計寸法、許容差	1400±1.0	160+5.0、-1.0 <sup>※3</sup>

※3：厚さの許容差-1.0mm は、局所的な肉厚減少の限界を示す。



### 3.4 施工データの調査結果

鹿島建設(株)から提供のあった自動計測データと坑内測量結果から、以下の整理を行った。

- ① ジャッキストロークの経時変化 (自動計測データ)
- ② セグメント組立時のジャッキストロークの経時変化 (自動計測データ)
- ③ セグメント組立時のシールドの姿勢の経時変化 (自動計測データ)
- ④ シールドの切羽土圧の経時変化 (自動計測データ)
- ⑤ セグメントとシールドの水平、鉛直偏差とテールクリアランスの推移 (自動計測データ、坑内測量結果)
- ⑥ シールドとセグメントの縦断方向の変化 (坑内測量結果)

#### (1) ジャッキストロークの経時変化

図 3.4.1 に、108 リング、111 リング、112 リングの掘進時ならびにセグメント組立時のジャッキストロークの経時変化を示す。これらの図から、以下の点が確認できる。

- ① 掘進完了時から組立完了時までにはジャッキストロークが 1410～1430mm 縮小している。これは、セグメントを組立てたことによるものであるが、セグメント幅が 1400mm であるにもかかわらず 1430mm 縮小していることからシールドがセグメント組立中に後退していることが考えられる。
- ② ずり鋼車の入替えに伴う待機時間を除いた掘進時間は概ね 25～30 分程度であり、各リングで概ね一定の値を示している。
- ③ 施工のサイクルは各リングで概ね一定であり、112 リングについて特異な作業が行われたことは確認できない。

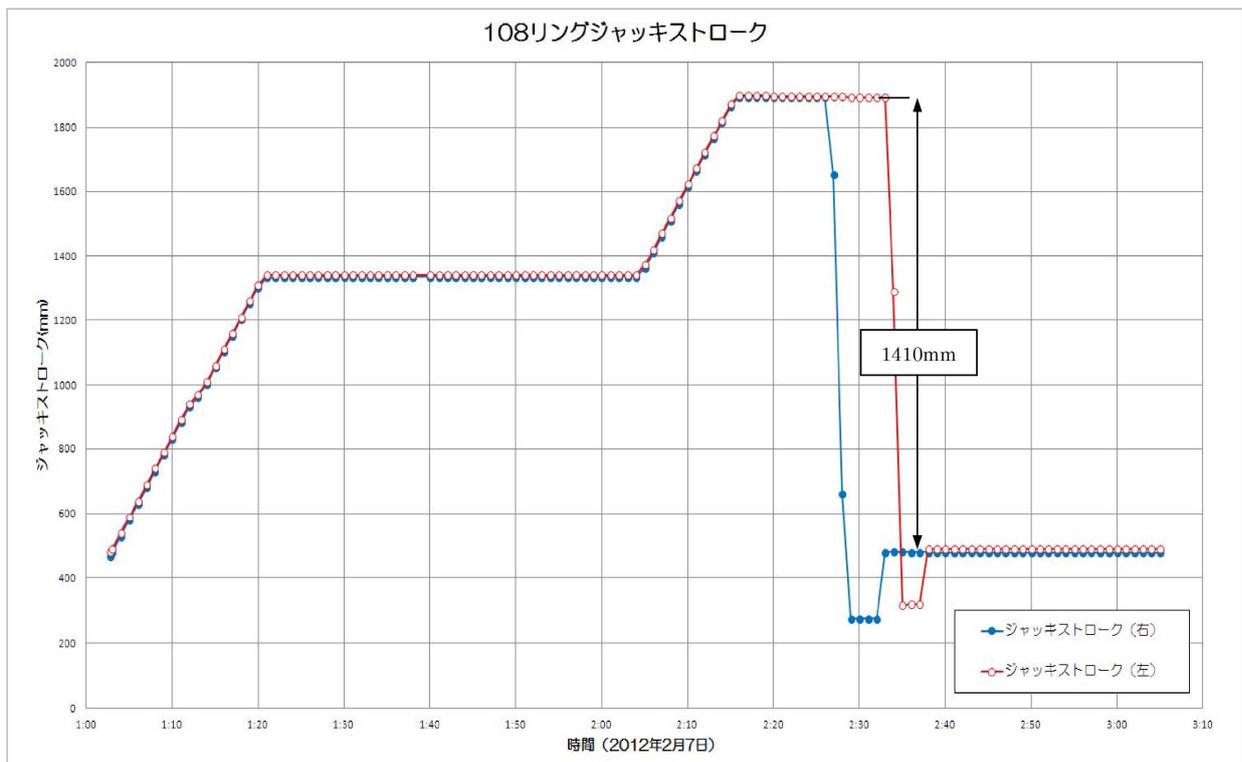


図 3.4.1(1) ジャッキストロークの経時変化 (108 リング)

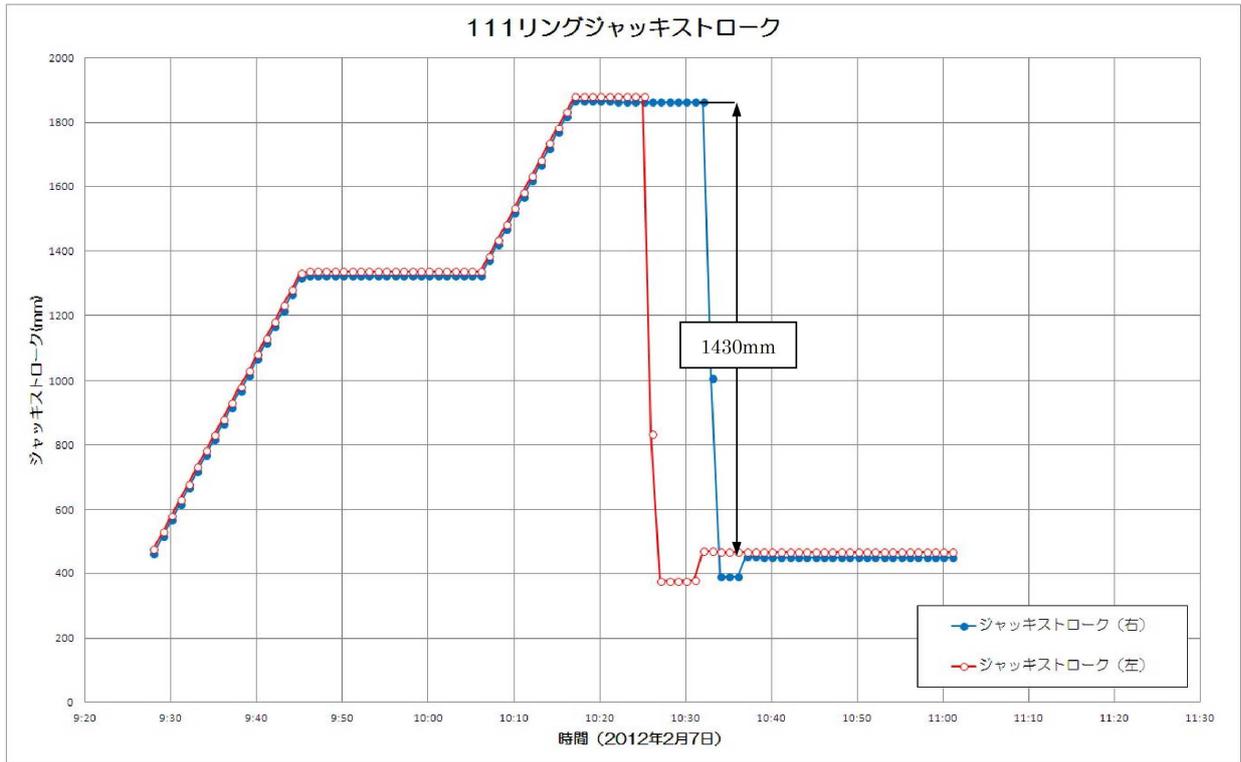


図 3.4.1(2) ジャッキストロークの経時変化(111 リング)

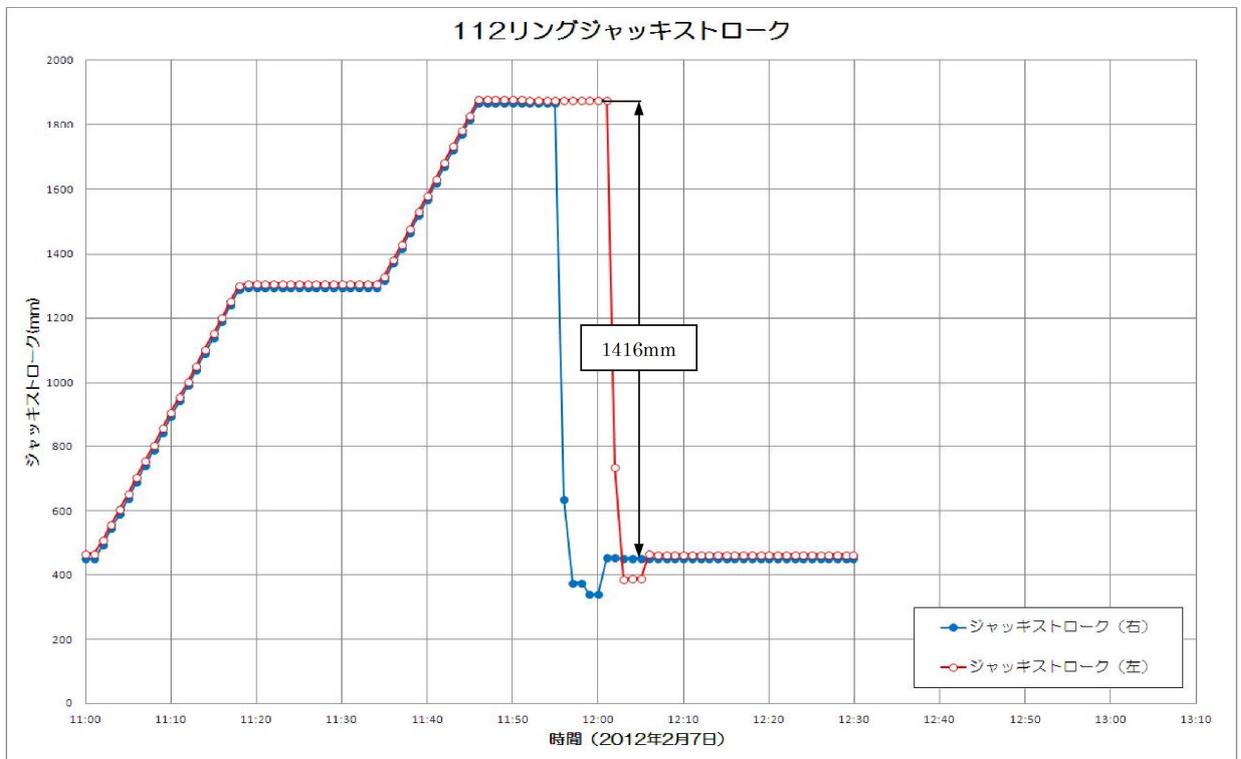


図 3.4.1(3) ジャッキストロークの経時変化(112 リング)

(2) セグメント組立時のジャッキストロークの経時変化

図 3.4.2 に、108 リング、111 リング、112 リングのセグメント組立時のジャッキストロークの経時変化を示す。これらの図から、以下の点が確認できる。

- ①左右のジャッキ位置のセグメントを組立終わった後は 1~2mm のジャッキストロークの縮小が認められる。全体のジャッキストロークの縮小と比較すると小さい値である。
- ②ジャッキを縮小した後にセグメントの組立を行っているが、108 リングと 111 リングでは一旦縮小した後にジャッキを再操作した跡は見られないが、112 リングでは右のジャッキを縮小した後に再度 30mm 程度の縮小操作を行っている。

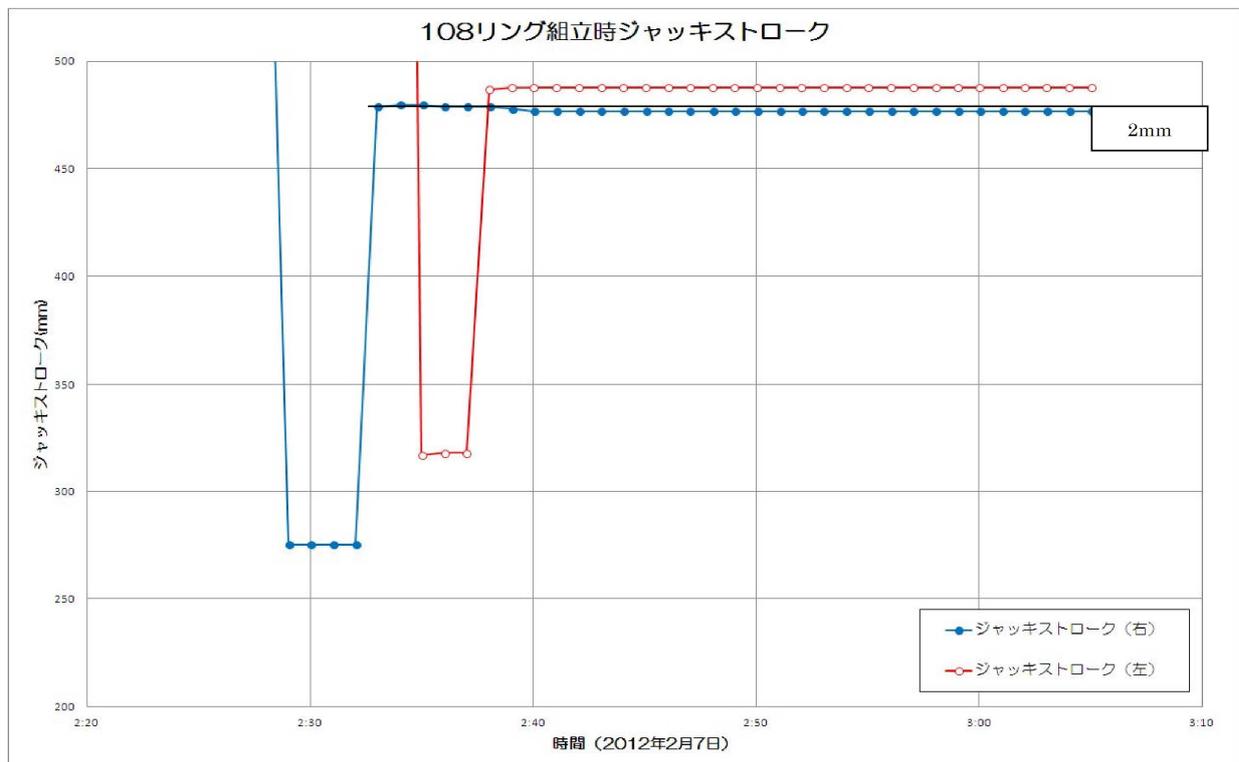


図 3.4.2(1) セグメント組立時のジャッキストロークの経時変化(108 リング)

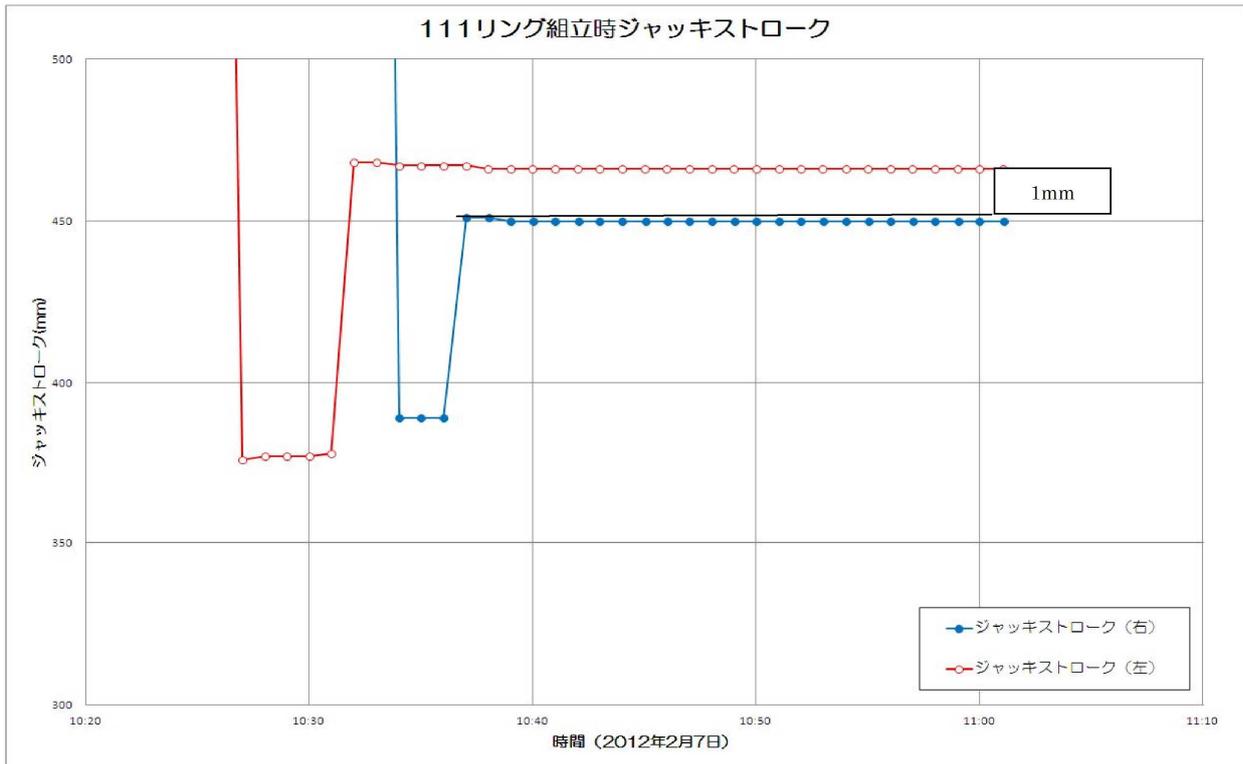


図 3.4.2(2) セグメント組立時のジャッキストロークの経時変化(111 リング)

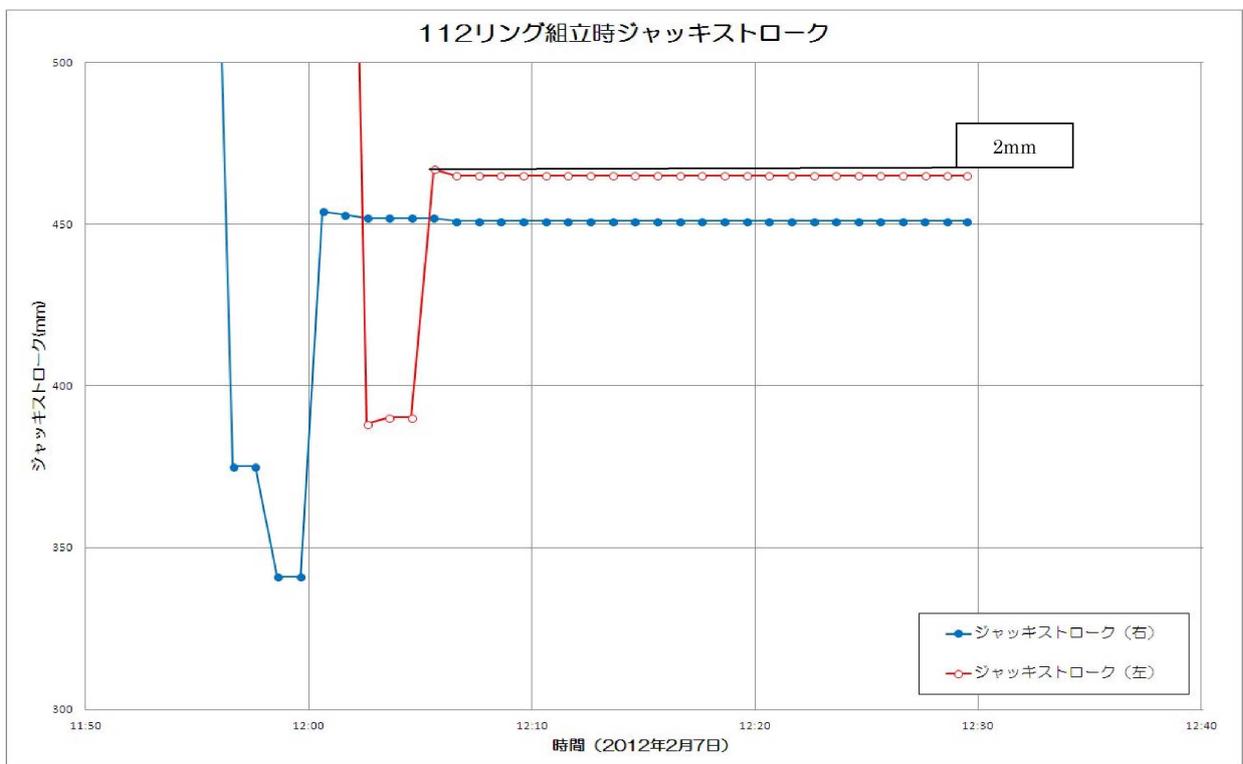


図 3.4.2(3) セグメント組立時のジャッキストロークの経時変化(112 リング)

(3) セグメント組立時のシールドの姿勢の経時変化

図 3.4.3 に、108 リング、111 リング、112 リングのセグメント組立時のシールドの姿勢を水平偏角と鉛直偏角で表し、その経時変化を示す。これらの図から、以下の点が確認できる。

- ① 水平偏角は組立中に 0.1 度から 0.2 度程度変化している。シールドが停止中の水平偏角の変化であるので、組立に伴うジャッキの操作によってシールドが水平方向に動いていると考えることができる。
- ② 鉛直偏角は組立中に 0.05 度程度変化している。水平偏角と同様に、組立に伴うジャッキの操作によってシールドが鉛直方向に動いていると考えることができる。
- ③ シールド機長が約 7m であることから、水平方向に 12~24mm<sup>\*1)</sup>程度、鉛直方向に 6mm 程度動いている可能性がある。

これらのことから、スプリングラインのシールドジャッキで 8~16mm<sup>\*2)</sup>程度伸縮している可能性がある。

\*1)  $7000\text{mm} \times \tan 0.1^\circ = 12.2\text{mm}$  (図 3.4.4 参照)

\*2)  $4500\text{mm}$  (ジャッキ位置の径)  $\times \tan 0.1^\circ = 7.9\text{mm}$  (図 3.4.4 参照)

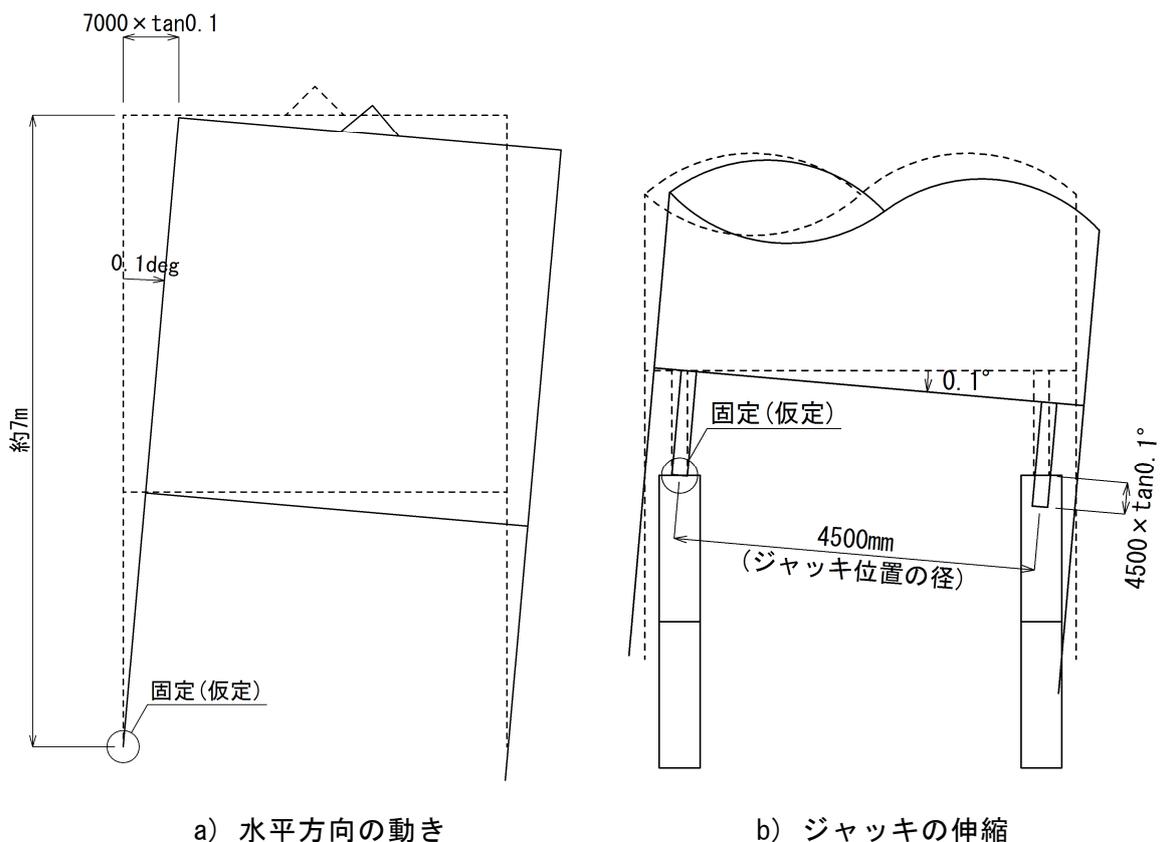


図 3.4.4 シールドの姿勢変化のイメージ

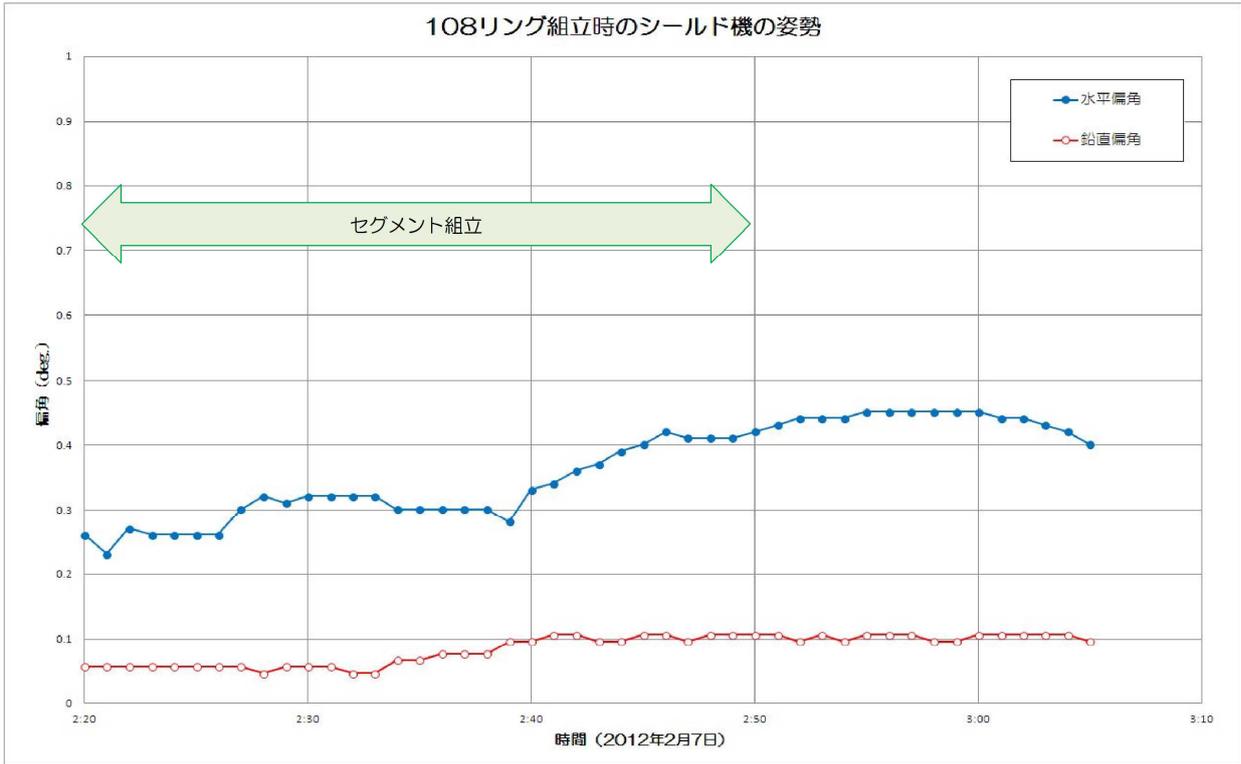


図 3.4.3(1) セグメント組立時のシールドの姿勢 (108 リング)

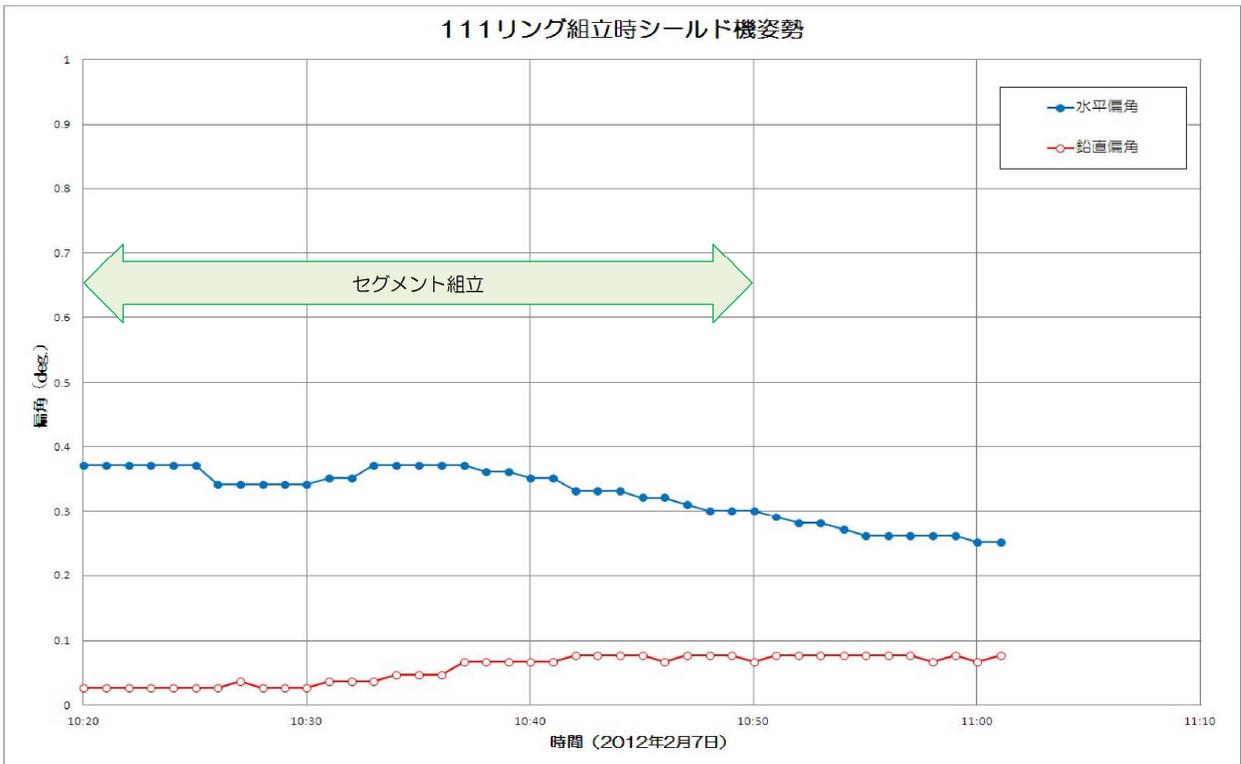


図 3.4.3(2) セグメント組立時のシールドの姿勢 (111 リング)

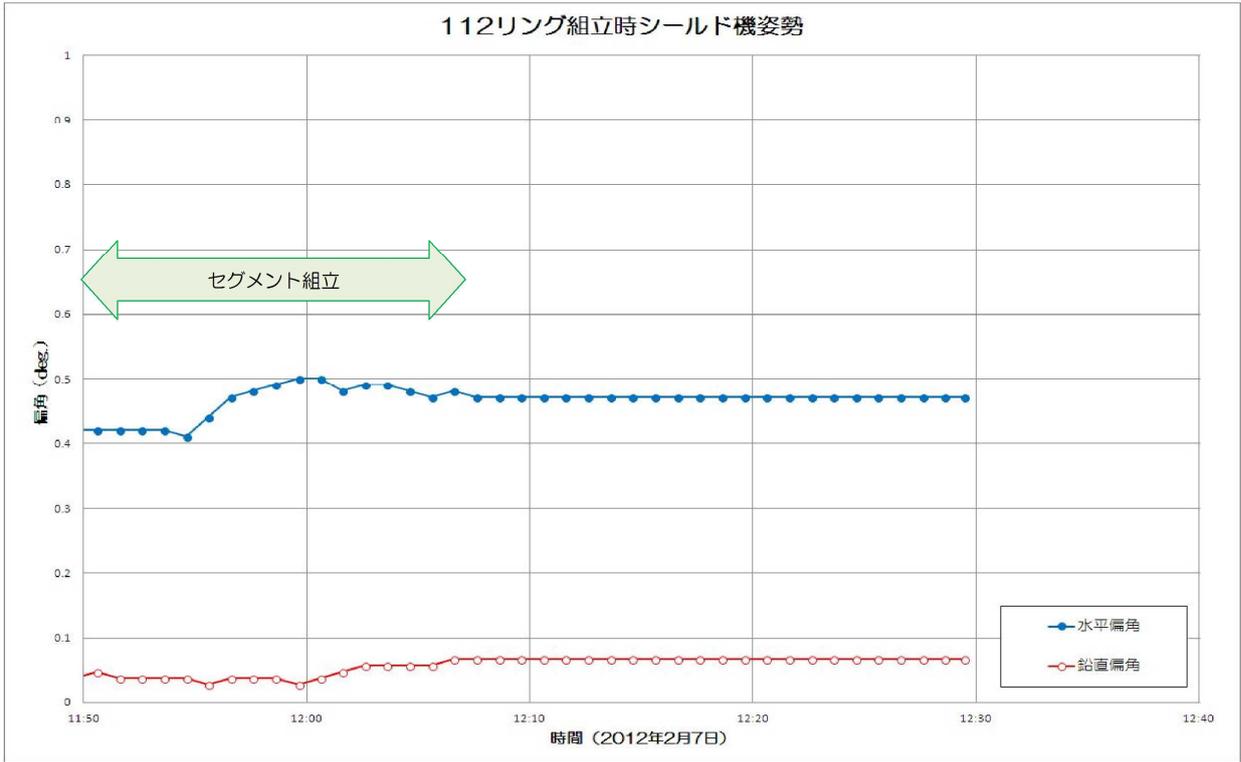


図 3.4.3(3) セグメント組立時のシールドの姿勢 (112 リング)

#### (4) シールドの切羽土圧の経時変化

図 3.4.5 に、108 リング、111 リング、112 リングのシールドの切羽土圧の経時変化を示す。これらの図から、以下の点が確認できる。

- ①掘進中に上昇した切羽土圧は掘進終了後に徐々に低下して概ね一定値に安定する。(108 リング：約 220kPa, 111 リング：約 240kPa, 112 リング：約 240kPa)
- ②掘進中の切羽土圧は変動しているが、108 リングでは 325kPa 程度、111 リングでは 340kPa 程度、112 リングでは 370kPa 程度を最大値としていることから、掘進時と掘進停止時との切羽土圧の差は最大で 130kPa 程度となる。
- ③セグメント組立時には切羽土圧が約 10kPa、複数回低下している。
- ④112 リングでは組立中に約 100kPa の切羽圧の低下が見られる。このとき、No. 16~22 のジャッキを伸長してセグメントに当てた後に No. 1, 2, 25, 26 の 4 本のジャッキを縮小し始め、1 分後に No. 3, 4 の 2 本のジャッキの縮小を追加している。
- ⑤112 リングの切羽土圧は 12:08 以降のデータは全て同一値を示している（他のデータも全て変化が見られない）ことから、測定システムが正常に作動していない可能性があるが、12:07 以前のデータは信頼できるものと考えられる。よって、切羽土圧が急激に低下したことは確認できる。

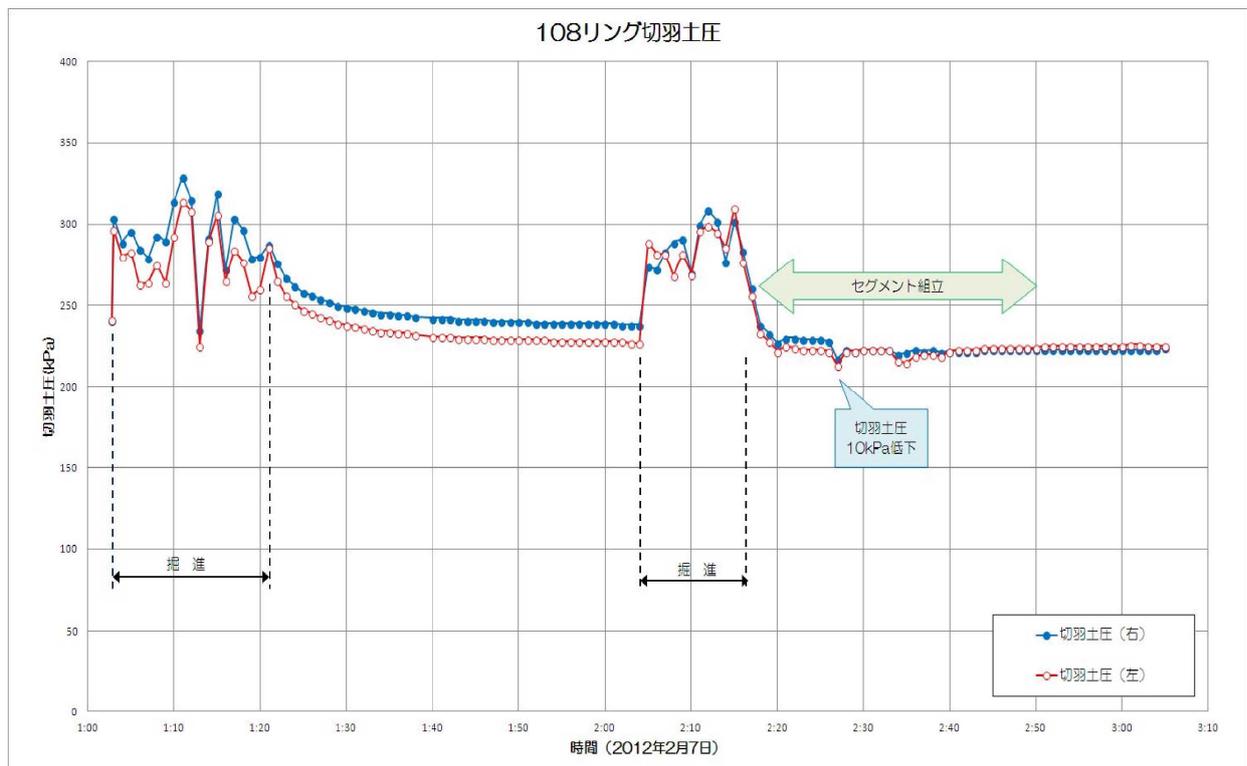


図 3.4.5(1) 切羽圧の経時変化(108 リング)

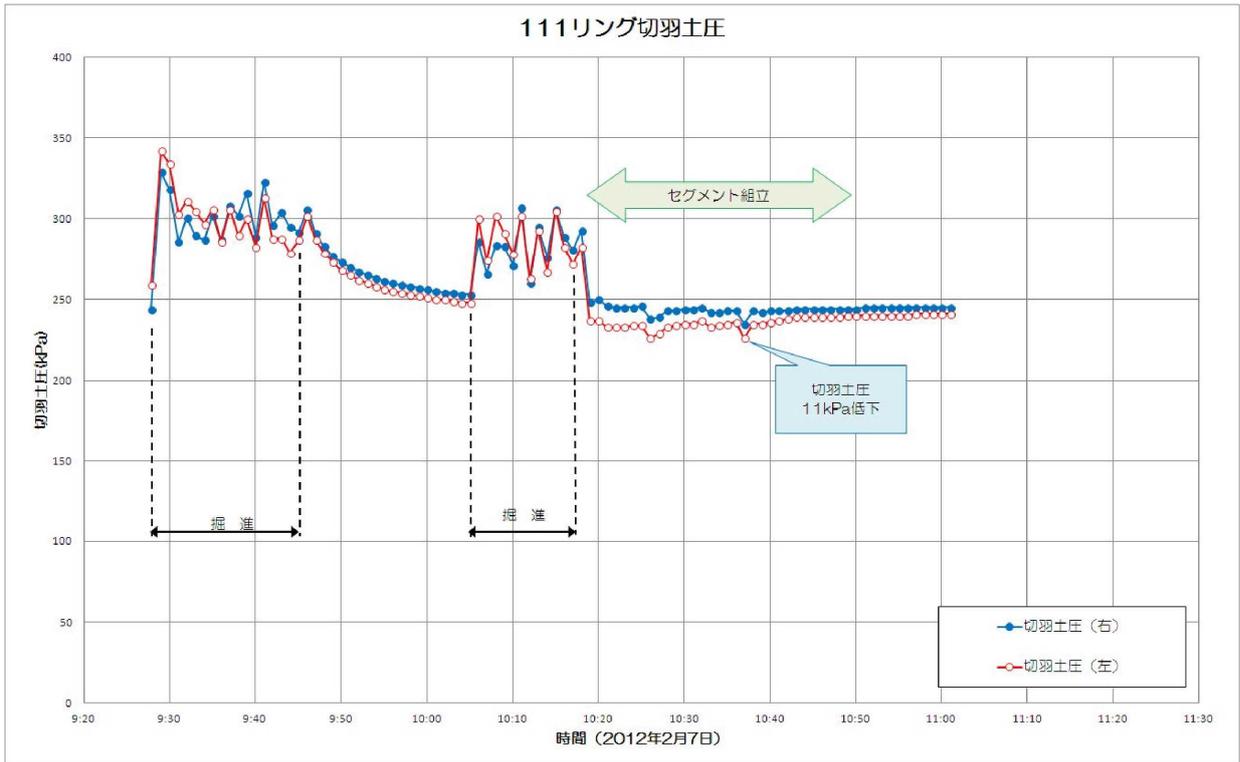


図 3.4.5(2) 切羽圧の経時変化(111 リング)

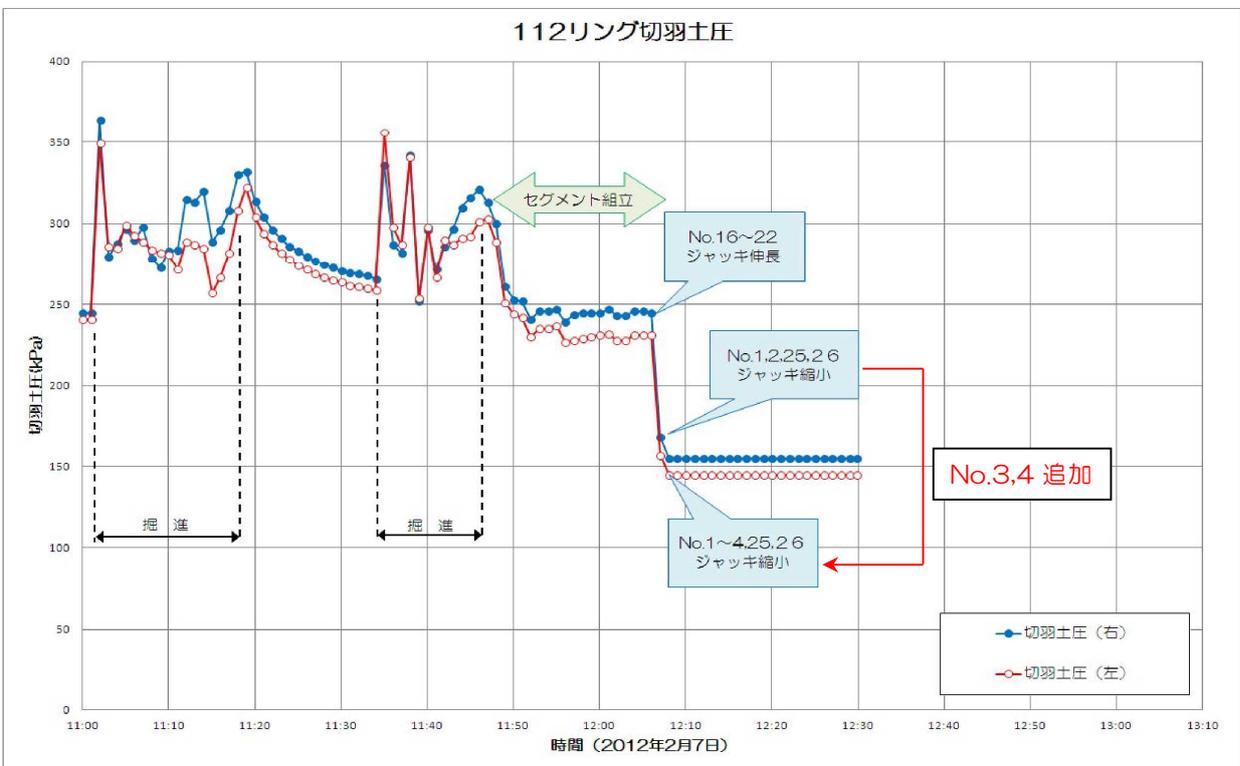


図 3.4.5(3) 切羽圧の経時変化(112 リング)

(5) セグメントとシールドの水平、鉛直偏差とテールクリアランスの推移

図 3.4.6 にセグメントとシールドの水平偏差の推移を、図 3.4.7 に左右のテールクリアランスの推移を示す。なお、水平偏差については、施工関係者へのヒアリングにおいて、シールドマシン設置前に実施した基線測量と初期掘進完了後に実施した基線測量に差が生じていたことが確認されており、坑内測量によるセグメントとシールドの偏差は、25R 付近で基線の方位角を変更していることが確認できる。これに対して自動計測によるシールドの偏差(補正前)は、基線の変更が行われていないと思われるため、基線の差を方位角 0.11deg、初期座標 -60mm と仮定してシールド偏差の補正を行った(補正後)。

これらの図から、以下のことが確認できる。

- ① 基線を変更した 25R 付近から 95R 付近までは、セグメントとシールド(坑内測量、自動計測ともに)の偏差の推移の傾向は一致しているが、95R 付近以降で、自動計測によるシールドの偏差が坑内測量によるセグメント、シールドの偏差とずれが生じている。
- ② 坑内測量によるセグメントとシールドの偏差から、シールドは、基線を変更した 25R 付近から 80R 付近までは右にカーブしているが、80R 付近で左にカーブし、その後は、ほぼ直線で推移していることが分かる。
- ③ 左右のテールクリアランスの推移は、テールから裏込め注入材の漏出が確認された 85R までは、右側のテールクリアランスが大きい傾向で推移しているが、裏込め注入材が漏出した 85R 以降では、左右でほぼ同じテールクリアランスとなっている。

これらのことから、以下のことが考えられる。

- ① 95R 付近以降で、坑内測量によるシールド偏差とセグメント偏差の推移の傾向は一致しているため、自動計測によるシールド偏差に誤差が生じていることが考えられる。
- ② 基線に差が生じていたため、変更した基線にシールドを戻そうと右に曲げていたが、80R 付近以降ではシールドは基線から離れる挙動となっていることから、シールドの制御が適切に行われていなかったことが考えられる。
- ③ 85R 以前で右側のテールクリアランスが大きい傾向となっているのは、シールドを右に曲げていたためと考えられる。85R 以降で左右でほぼ同じテールクリアランスとなっているのは、裏込め注入材のテールシールへの回り込み、固着によりシールドの挙動が制約されたことが考えられる。

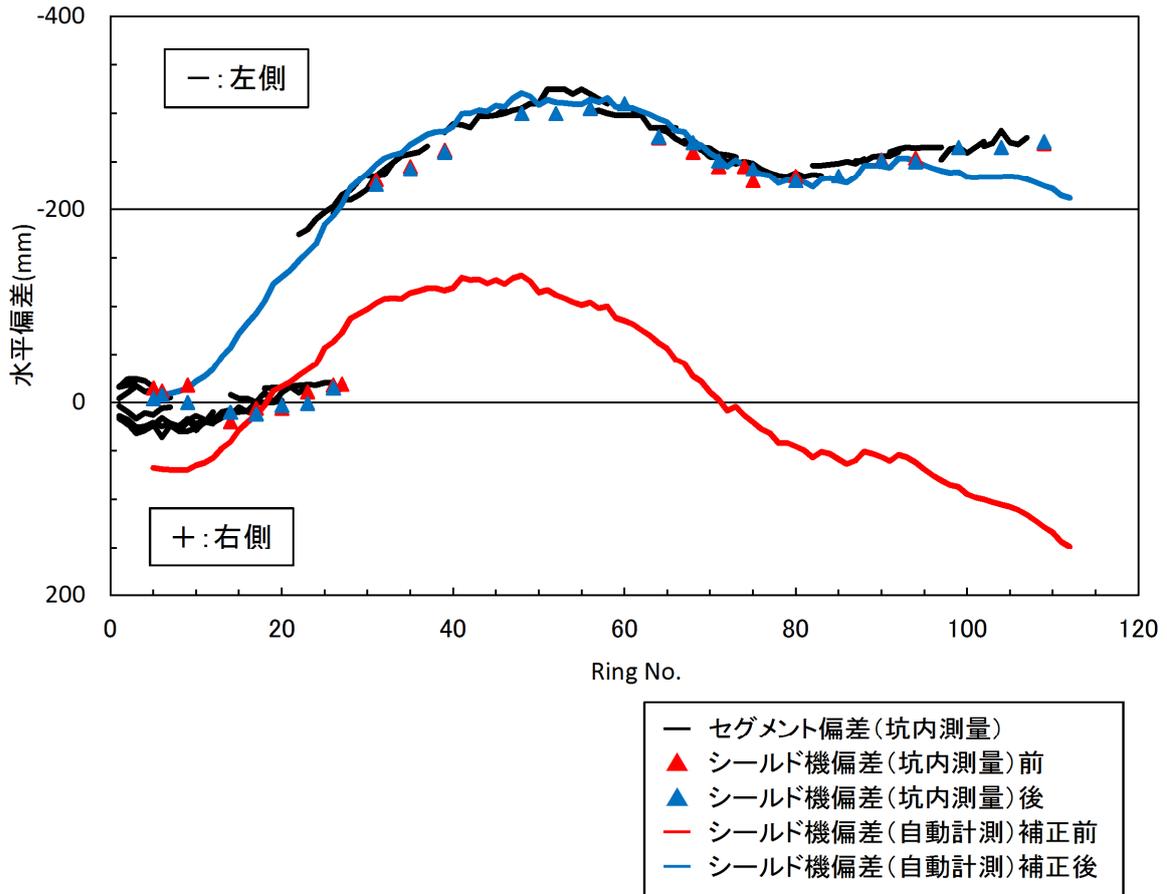


図 3.4.6 セグメントとシールドの水平偏差の推移

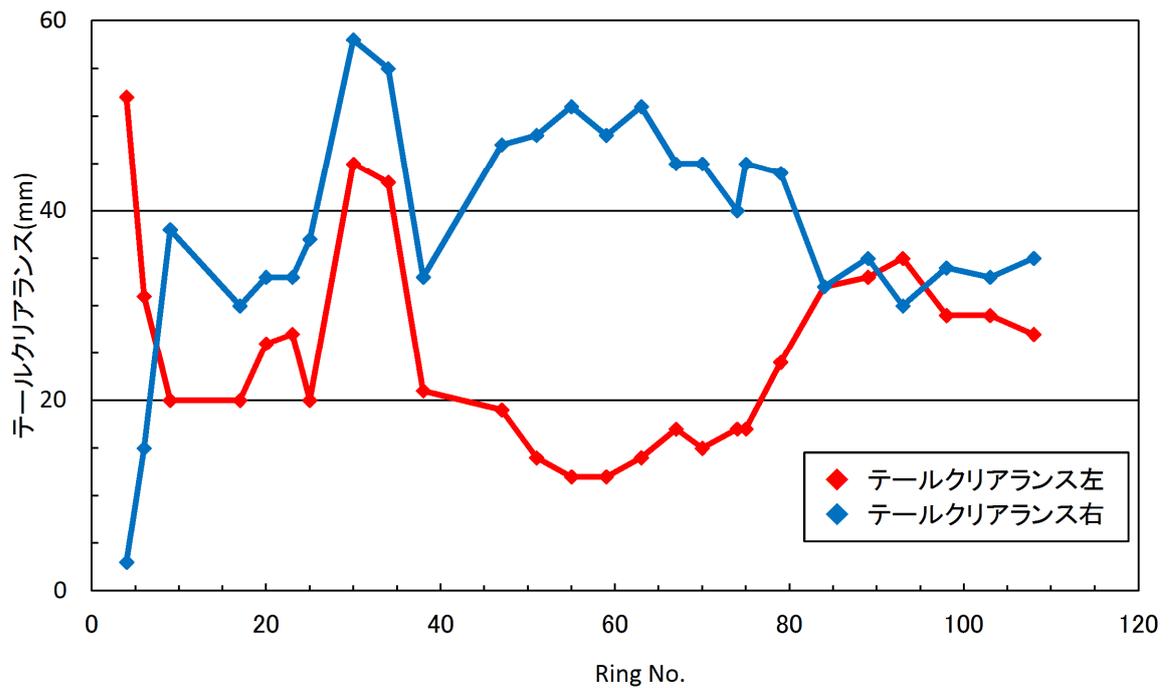


図 3.4.7 左右のテールクリアランスの推移

図 3.4.8 にセグメントとシールドの鉛直偏差の推移を、図 3.4.9 に上下のテールクリアランスの推移を示す。

これらの図から、以下のことが確認できる。

- ①30R 付近までは、セグメントとシールド（坑内測量、自動計測ともに）の偏差の推移の傾向は一致しているが、30R 付近以降で、自動計測によるシールドの偏差が坑内測量によるセグメント、シールドの偏差とずれが生じている。
- ②坑内測量によるセグメントとシールド偏差から、シールドは、上下に変動を繰り返す、80R 付近以降から事故の直前までは、基線から+20mm でほぼ直線で推移しており、事故直前では、シールドはセグメントに対して下がっている傾向である。
- ③上下のテールクリアランスの推移では、上側のテールクリアランスが大きい時と、下側のテールクリアランスが大きい時が交互に現れている。

これらのことから、以下のことが考えられる。

- ①30R 付近以降で、坑内測量によるシールド偏差とセグメント偏差の推移の傾向は一致しているため、自動計測によるシールド偏差に誤差が生じていることが考えられる。
- ②事故直前では、シールドがセグメントに対して下がっている傾向であるため、トンネル上部をシールドのテール部で抑える力が働いていた可能性が考えられる。
- ③上側のテールクリアランスが大きい時と、下側のテールクリアランスが大きい時が交互に現れているのは、シールドが上下に変動していたためと考えられる。

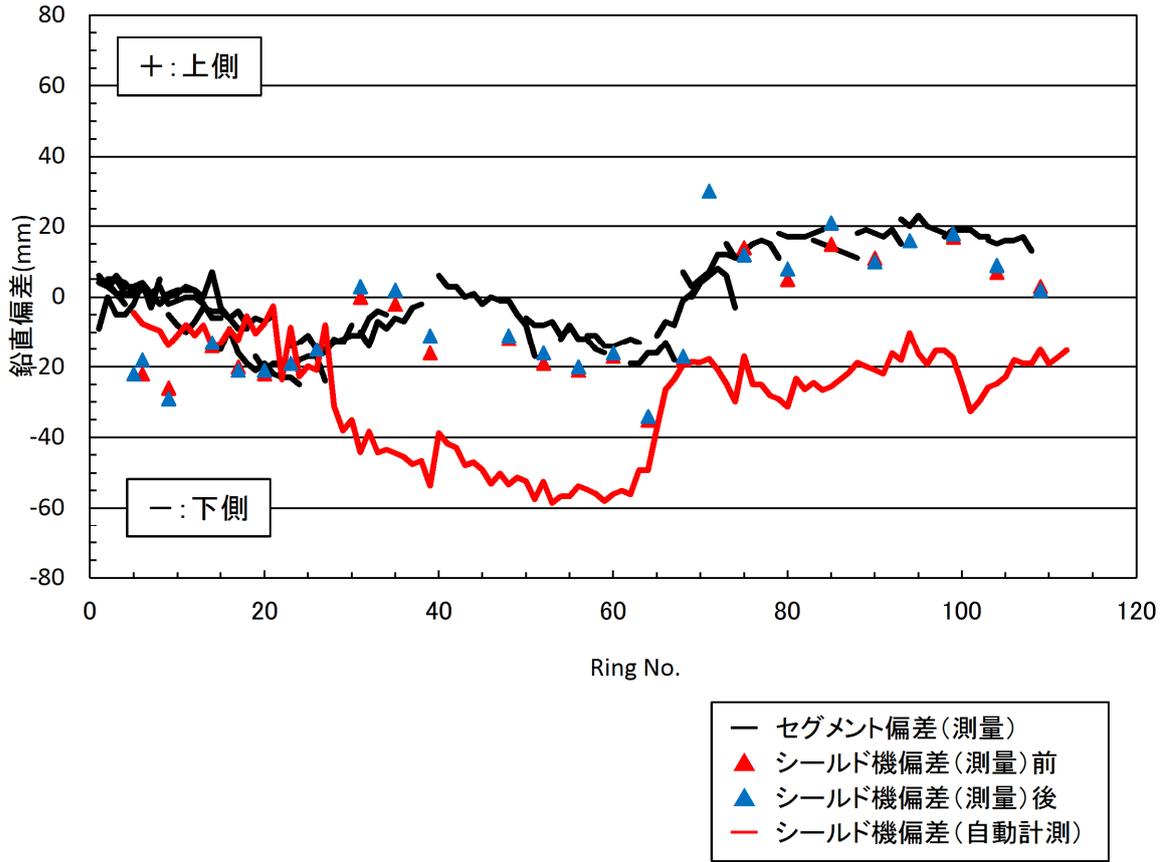


図 3.4.8 セグメントとシールドの鉛直偏差の推移

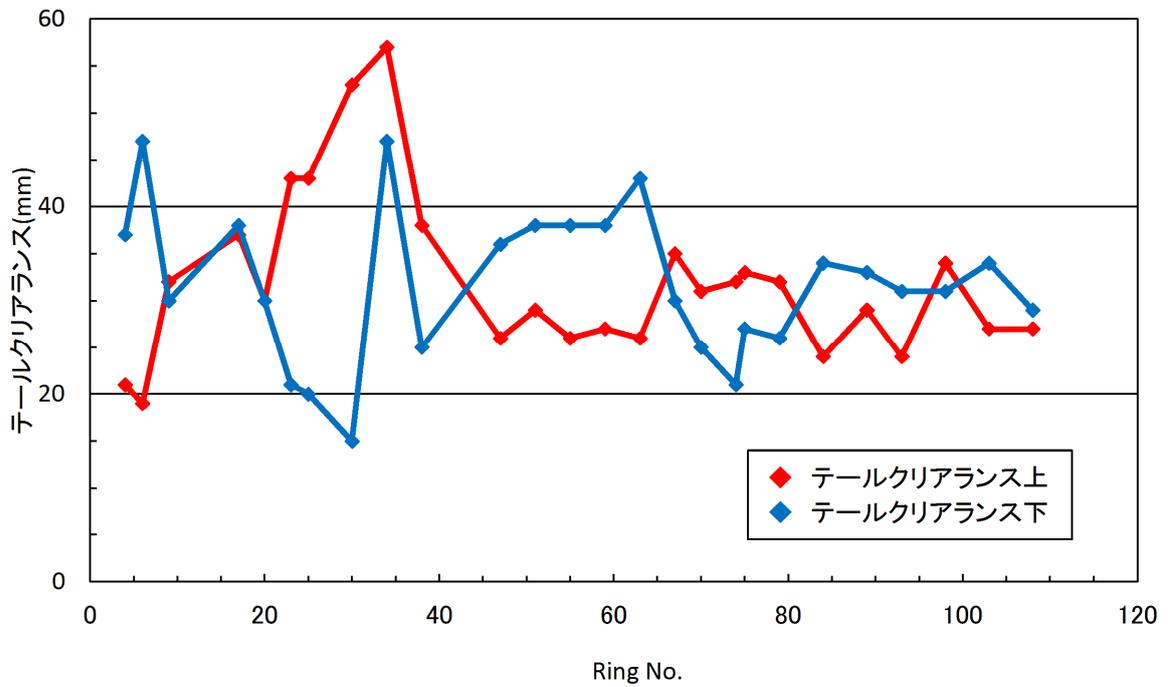


図 3.4.9 上下のテールクリアランスの推移

(6) シールドとセグメントの縦断方向の変化

図 3.4.10 に、掘進指示書に記載されているシールドとセグメントの標高偏差、上下のテールクリアランス、セグメントの真円度の測量結果より、シールドとセグメントの縦断方向の変化を整理したものを示す。なお、標高の偏差は変化を分かりやすく示すために 30 倍で表現している。これらの図から、以下のことが確認できる。

- ①2月3日夜(99R掘進完了時)では、シールドとセグメントの鉛直偏差はほぼ同じである。セグメントの真円度は、上下に2mm拡大する変形状態である。
- ②2月6日昼(104R掘進完了時)では、シールドは、2/3夜に比べ9~10mm下がり、セグメント高さより8mm低くなっている。セグメントの真円度は、2/3夜とは異なり左右に1mm拡大する変形状態である。
- ③2月6日夜(109R掘進完了)では、シールドは、2/6昼に比べさらに4~7mm下がり、セグメント高さより11mm低くなっている。セグメントの真円度は、2/6昼の左右に拡大する変形状態が1mmから6mmに大きくなっている。

これらのことから、2月7日の施工では、トンネル上部をシールドのテール部で抑える力が働いていた可能性がある。

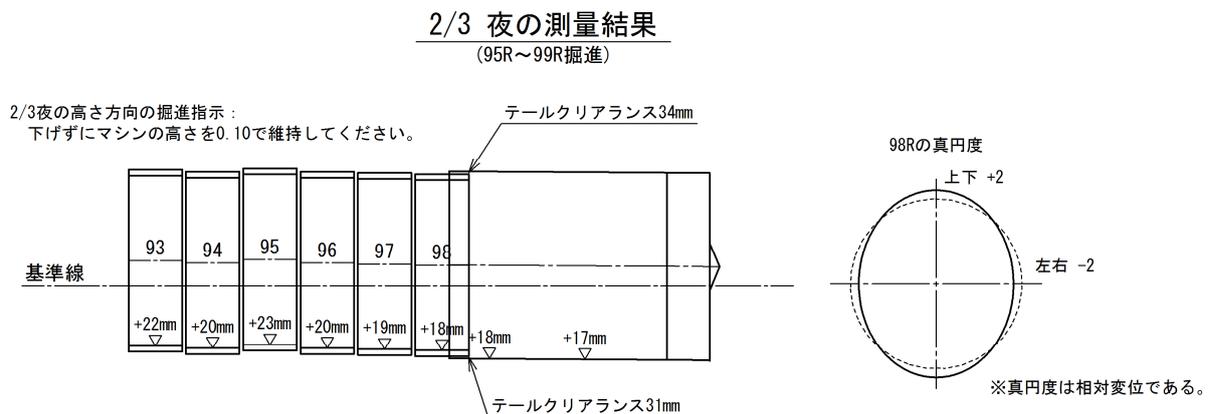


図 3.4.10(1) シールドとセグメントの縦断方向の変化(2月3日夜)

2/6 昼の測量結果  
(100R~104R掘進)

2/6昼の高さ方向の掘進指示：  
マシンの高さを0.10前後で維持してください。

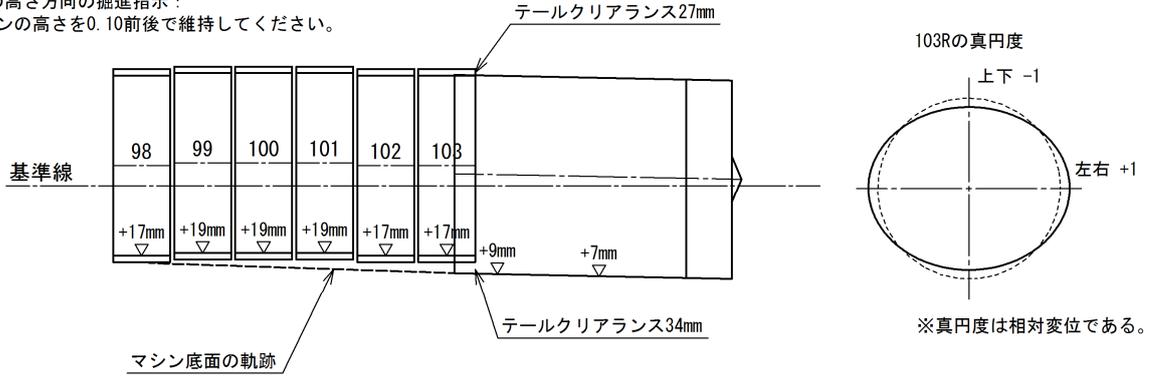


図 3.4.10(2) シールドとセグメントの縦断方向の変化(2月6日昼)

2/6 夜の測量結果  
(105R~109R掘進)

2/6夜の高さ方向の掘進指示：  
ピッチングを0.10前後で維持してください。

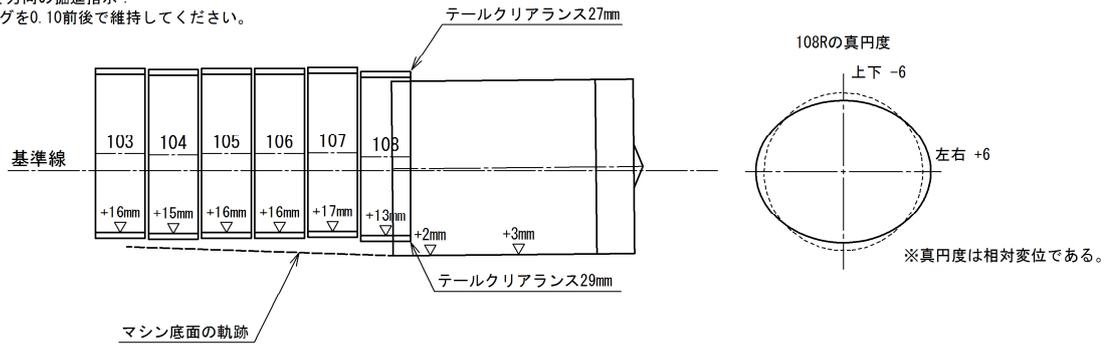


図 3.4.10(3) シールドとセグメントの縦断方向の変化(2月6日夜)

### 3.5 事故発生時のシミュレーション解析

#### 3.5.1 三次元有限要素法によるセグメント挙動の検討

##### (1) 検討の目的

現地調査の結果から、事故の発生のきっかけとしてKセグメントの抜出しの可能性が高いと考えられる。施工関係者へのヒアリングでは、Kセグメント挿入時にセグメント継手面に滑剤を塗布していたこと、裏込め注入の実施が掘進リングから3リング後方であったことが確認されている。また、施工データの調査結果では、シールドとセグメントが競っていた可能性があると考えられることから、これらの要因がKセグメントの抜出しに与える影響を把握するために三次元解析を実施した。

##### (2) 解析モデルの概要

図3.5.1に、解析モデルの概要図を示す。解析範囲は、事故発生時に組立てていた112リングから後方30リング(42m)とし、裏込め注入材が充填された地盤中にある部分を地盤ばねで支え、テールシール内にある部分をテールシールばねで支えた。また、セグメントピースはシェル要素でモデル化するとともに、ばね要素でモデル化したセグメント継手、リング継手により隣接ピースと結合する。

トンネル、地盤、シールドの境界条件は、以下のように設定した。

- ・トンネル坑口側節点 : 鉛直ローラー
- ・トンネル切羽側節点 : 自由
- ・地盤ばねの地盤側節点 : 固定
- ・テールシールばねのシールド側節点 : 固定

セグメントに作用する外力は、以下を考慮した。

- ・裏込め注入材が充填された地盤中にある部分 : 土水圧  
(土圧は設計土圧(2Dの緩み土圧)とした)
- ・裏込め注入材が充填されていない地盤中にある部分 : 水圧
- ・テールシール部 : テールシール圧  
(水圧と同等とした)
- ・112リングの切羽側端面 : ジャッキ力

裏込め注入材は、施工関係者へのヒアリングにおいて掘進リングから3リング後方で注入していたことが確認されており、112R掘進時には109Rまで裏込め注入が行われたこととなるが、この時の裏込め注入材は注入直後であるため未固結な状態と考え、基本的なモデルにおける裏込め注入材の充填範囲は108Rから坑口側とした。

セグメント、セグメント継手ばね、リング継手ばね、地盤ばね、テールシールばねの物性値は、参考資料に示している。

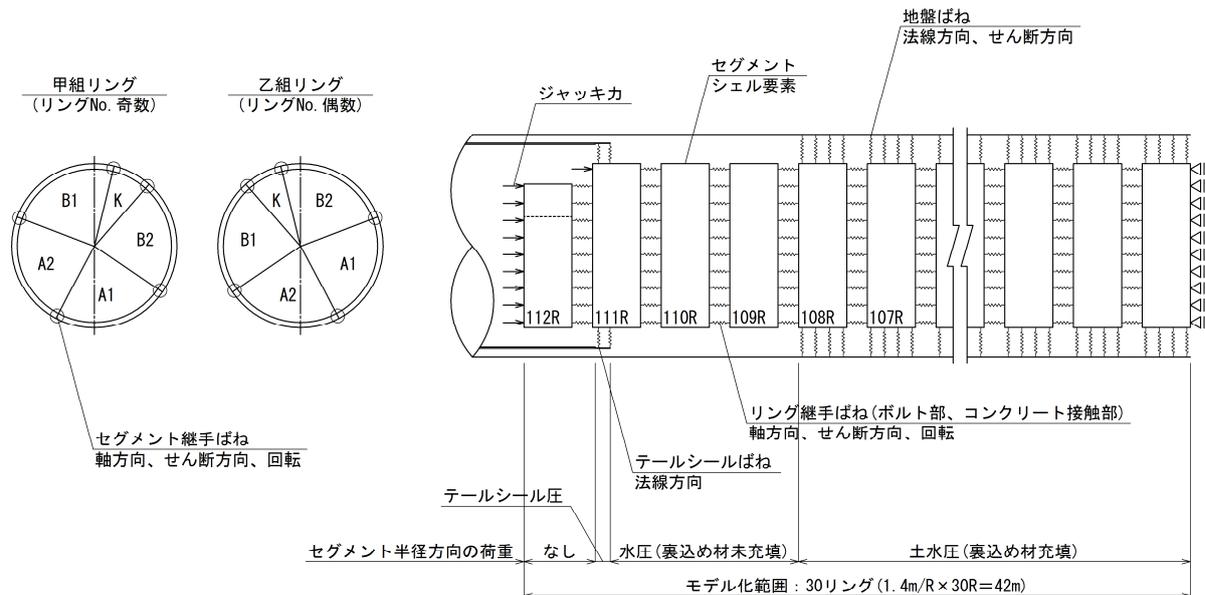


図 3.5.1 解析モデルの概要図

### (3) 解析ケース

解析は、111R の Kセグメントの抜出しに着目し、111R の K-B 間セグメント継手の摩擦係数、シールドとセグメントの競りによるテール部の偏圧、出水によるセグメントに作用する水圧低下、109R～111R の裏込めの有無に関して、表 3.5.1 に示す 10 ケースを実施した。

シールドとセグメントの競りによるテール部の偏圧は、右スプリングラインと天端で、テールクリアランスがゼロとなった状態を想定し、既往の文献<sup>1)</sup>から図 3.5.2 に示すように設定した。

また、出水によるセグメントへの作用水圧の低下は、浸透流解析の結果から 111R、110R 周りの水圧を抽出し、図 3.5.3 に示すように設定した。

109R～111R の裏込めを考慮したケースでは、裏込め注入材の硬化過程を考慮し、既往の文献<sup>2)</sup>を参考に、112R 掘進時に注入された 1R 分については、表 3.5.2 に示す低減させた地盤ばねを設定した。

表 3.5.1 解析ケース一覧

ケース	B-K間の $\mu$	テール部偏圧		出水による 水圧低下	109R-111R 裏込めの有無
		側部	上部		
Case1-1	0.5	—	—	—	無し
Case1-2	0.1	—	—	—	無し
Case2-1	0.5	○	—	—	無し
Case2-2	0.1	○	—	—	無し
Case2-3	0.1	○	—	—	有り
Case3-1	0.5	—	○	—	無し
Case3-2	0.1	—	○	—	無し
Case3-3	0.1	—	○	—	有り
Case4-1	0.5	—	—	○	無し
Case4-2	0.1	—	—	○	無し

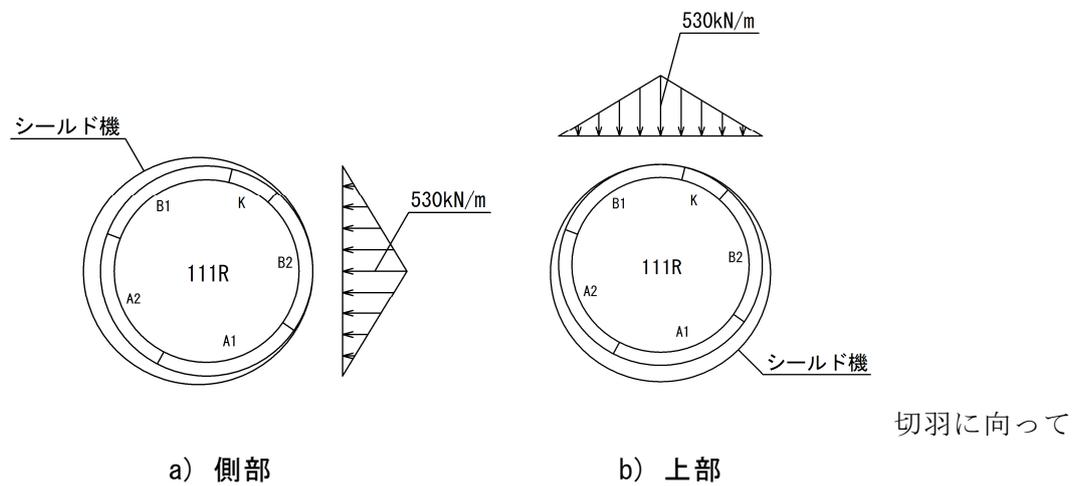


図 3.5.2 テール部偏圧

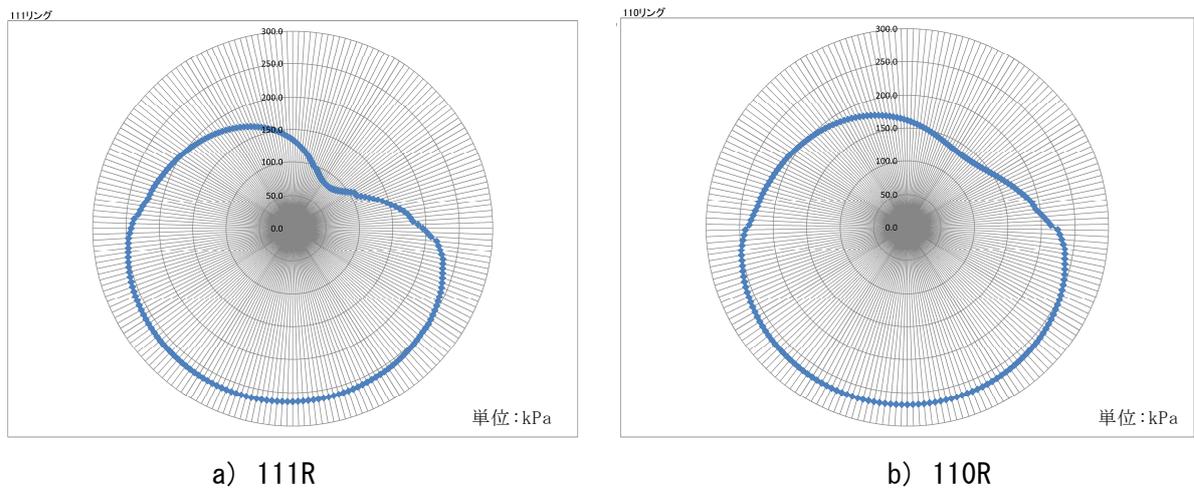


図 3.5.3 出水による水圧低下

表 3.5.2 裏込め注入材の硬化過程を考慮したばね値の設定

	時間 hh:mm:ss	経過時間 hh:mm:ss	経過時間 hour	裏込めばね kN/m <sup>3</sup>	ばね値 kN/m <sup>3</sup>
110R掘進完了	8:42:19	3:23:43	3.395	1344000	地盤ばねと同等
111R掘進完了	10:16:57	1:49:05	1.818	600000	地盤ばねと同等
112R掘進完了	11:45:59	0:20:03	0.334	18000	12000
No.2、3ジャッキ引抜き	12:06:02				

※地盤ばねと裏込め材ばねとの足し合わせは、直列ばねとして値を算出した。

※110R、111R掘進時に注入した裏込め材は、地盤ばね(40MN/m<sup>3</sup>)以上の強度となっているため、地盤ばねと同じばね値で設定した。

(4) 解析結果

111RのKセグメントと110RのBセグメントとの間のリング継手の断面力とリング継手の伸び量の算定結果を表3.5.3に示す。

表 3.5.3 リング継手の発生断面力と伸び量の算定結果

解析ケース	軸力 (kN)	せん断力 (kN)			曲げモーメント (kN・m)	伸び量 (mm)
		半径方向	接線方向	合力		
CASE1-1	22.3	-1.3	-1.2	1.7	-0.1	0.02
CASE1-2	83.7	-2.4	-3.5	4.3	0.2	0.08
CASE2-1	2.0	3.4	-70.2	70.3	-1.0	0.00
CASE2-2	103.0 <sup>※1</sup>	-10.9	-19.7	22.5	-4.3	2.09
CASE2-3	103.0 <sup>※1</sup>	-12.7	-20.1	23.8	-3.4	2.15
CASE3-1	103.0 <sup>※1</sup>	-2.2	54.2	54.2	-1.3	0.18
CASE3-2	103.0 <sup>※1</sup>	-10.7	-1.1	10.8	-2.9	1.22
CASE3-3	103.0 <sup>※1</sup>	-10.6	-17.4	20.3	-5.8	2.03
CASE4-1	29.3	1.3	0.0	1.3	-1.1	0.03
CASE4-2	41.7	1.0	-1.4	1.7	-0.9	0.04

※1：リング継手に作用する引張力がボルトの降伏点を超えている。

この結果から、リング継手のボルトが降伏する可能性がある荷重状態はCASE2-2（設計荷重+側部テールシール偏圧/ $\mu=0.1$ ）、CASE2-3（設計荷重+側部テールシール偏圧/ $\mu=0.1/109R\sim 111R$ 裏込めあり）、CASE3-1（設計荷重+頂部テールシール偏圧/ $\mu=0.5$ ）、CASE3-2（設計荷重+頂部テールシール偏圧/ $\mu=0.1$ ）およびCASE3-3（設計荷重+頂部テールシール偏圧/ $\mu=0.1/109R\sim 111R$ 裏込めあり）である。また、CASE1-2（設計荷重/ $\mu=0.1$ ）については短期許容応力度相当の軸力89.5kNに近い軸力が発生している。セグメント継手の摩擦係数を低減し、偏圧を作用させたケースではリング継手ボルトの引張力が降伏点を超える傾向が得られた。このとき、Kセグメント部からの湧水を考慮した水圧を作用させたCASE4は荷重強度が小さいためにリング継手ボルトは降伏点に至っていないが、 $\mu=0.5$ のケースに比べて $\mu=0.1$ のケースの軸引張力が大きくなっていることから、セグメント継手の摩擦係数が小さい場合にはリング継手に過大な引張力が作用すると考えられる。

一方、リング継手に作用するせん断力を見ると、設計荷重(CASE1)や水圧を軽減させた荷重

条件 (CASE4) では顕著な傾向が見られないが、テールシールの偏圧が作用した CASE2 と CASE3 では摩擦係数を  $\mu = 0.5$  としたケースのせん断力が卓越する傾向を示している。

リング継手に作用する曲げモーメントはいずれのケースでも小さい値を示しているが、引張力やせん断力との組合せを考慮した場合にはその影響が顕在化する可能性がある。とくに、テールシールの偏圧を考慮し、摩擦係数  $\mu = 0.1$  としたケースでは曲げモーメントが比較的大きくなっており、引張力やせん断力が大きなケースと一致している。

リング継手の伸び量 (リング継手の目開き量) は、テールシールの偏圧を考慮し、摩擦係数  $\mu = 0.1$  としたケースでは大きな値を示している。その絶対値は数 mm の水準であるが、継手に作用する断面力の水準からリング継手が破断している可能性が高く、この条件では K セグメントが拔出す可能性が高いと判断される。109R~111R の裏込めの有無による違いを見ると、側部にテールシールの偏圧を作用させた CASE2 では、裏込めを考慮することで、伸び量が低下する結果となっているが、頂部にテールシールの偏圧を作用させた CASE3 では、裏込めを考慮することで、伸び量が増加する結果となっている。

#### (5) まとめ

三次元有限要素法によるセグメント挙動の検討を行った結果、セグメント継手面の摩擦係数が低下し、セグメントに偏荷重が作用することで、リング継手にボルトの降伏点を越えるような引張力が作用することが確認された。

#### 参考文献

- 1) 荻野竹敏ら：テールシールの拘束力に関する要素実験について、土木学会第 64 回年次学術講演会 VI-010、pp. 19-20、2009.
- 2) 小山幸則：シールド工法におけるセグメント設計法の合理化に関する研究、p. 43、1999.

### 3.5.2 三次元浸透流解析による切羽圧変化の検討

#### (1) 検討の目的

事故発生時において切羽圧の急激な低下が計測されており、この時から出水が始まったと推定しているが、出水と切羽圧低下の関連については明らかになっていない。そのため、111RのKセグメント付近で出水が発生することで、切羽の圧力が低下するかを確認するために三次元浸透流解析を実施した。なお、解析の手法は、時間の経過に伴う圧力の変化を表現するため、非定常解析とした。

#### (2) 解析モデルの概要

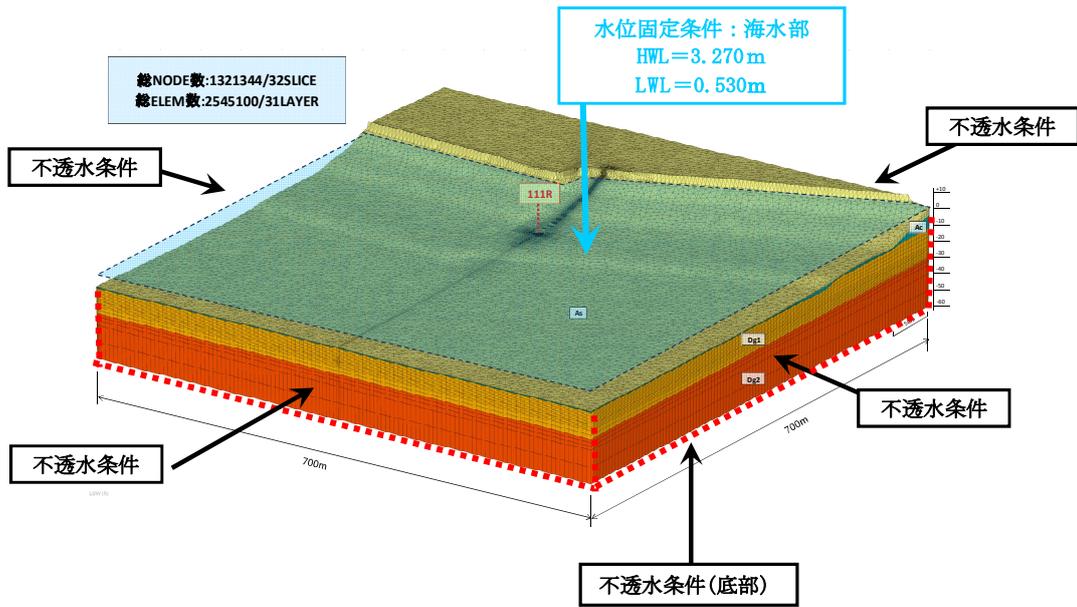
三次元地盤モデルは、縦断方向700m、横断方向700mの矩形、鉛直方向はGH-60m~GH+10mの範囲である。また、要素分割はシールド軸方向、および横断方向について最小距離0.2mとして詳細分割し、セグメントの変状が比較的小さい区域と地盤データの少ない地域は、地形凹凸が再現でき、地表水の流下が再現できる程度までの分割とし、要素分割数は表3.5.4に示すとおりである。図3.5.3に三次元モデルの概要図を示す。本地盤モデルにおける帯水層区分は、既往地質概要を基に4区分とし、各地層に表3.5.5に示す透水係数、体積含水率、比貯留係数を設定した。境界条件は、図3.5.3に示すとおり、海水部は潮位として水位固定条件、モデル側面と底面は、地下水流出入量が無い不透水境界として扱う。Kセグメントの抜き出し量（出水面積）は、現地調査の結果によると初期の抜き出し量がエレクションガイドの寸法より150mm程度以内と考えられることから、100mm（出水面積は約0.1m<sup>2</sup>）として検討を行った。

表 3.5.4 三次元地盤モデルの要素分割

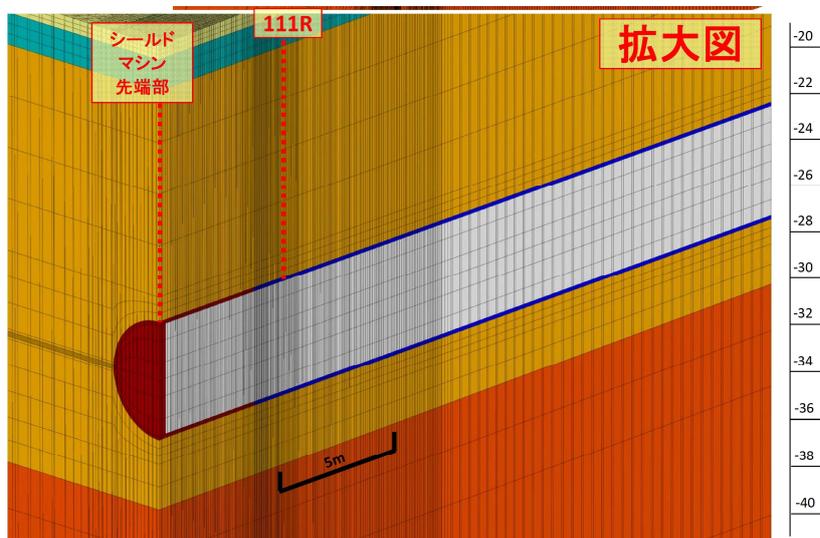
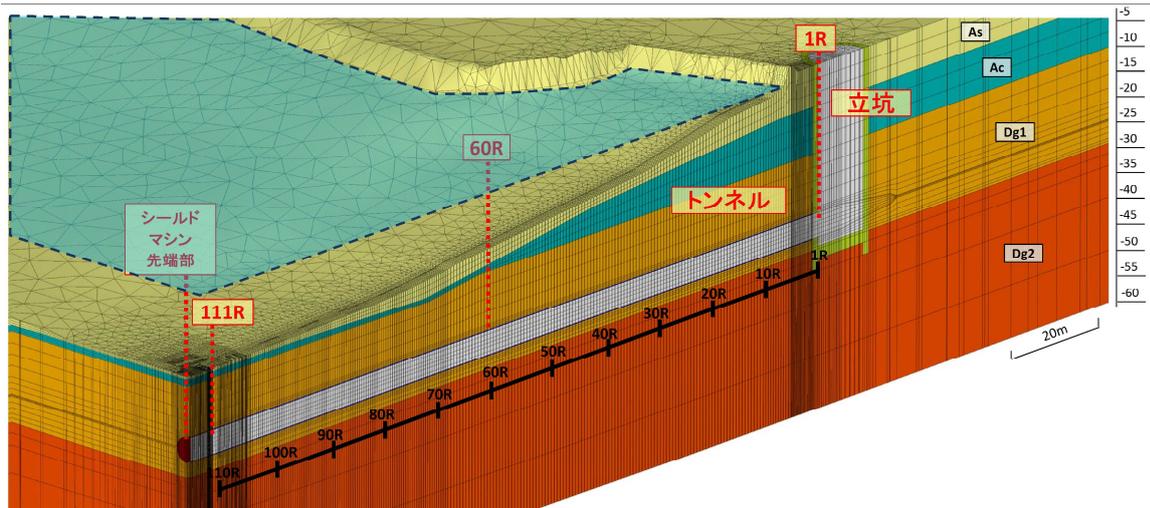
要素数	2,545,100	要素分割最小長 シールド縦断方向 0.20m 横断方向 0.20m 鉛直方向 0.05m
節点数	1,321,344	
水理区分数	6	

表 3.5.5 帯水層区分と水理定数

	地質	透水係数の試験値 (cm/sec)	透水係数 (cm/sec)	飽和体積含水率 (%)	比貯留係数 (-)
1	表層(As1)	-	1.00E-03	3.00E+01	1.00E-03
2	Ac		1.00E-05	3.00E+01	3.00E-03
3	Dg1	1.00E-2~7.00E-3	1.00E-02	3.00E+01	5.00E-05
4	Dg2	1.00E-1~2.00E-2	1.00E-01	3.00E+01	1.00E-04
5	セグメント		1.00E-10	1.00E-03	1.00E-10
7	Kセグメント破損部		1.00E-01	3.00E+01	1.00E-04
8	シールド外周緩み範囲		1.00E-01	3.00E+01	1.00E-04
9	立坑コンクリート		1.00E-10	1.00E-03	1.00E-10

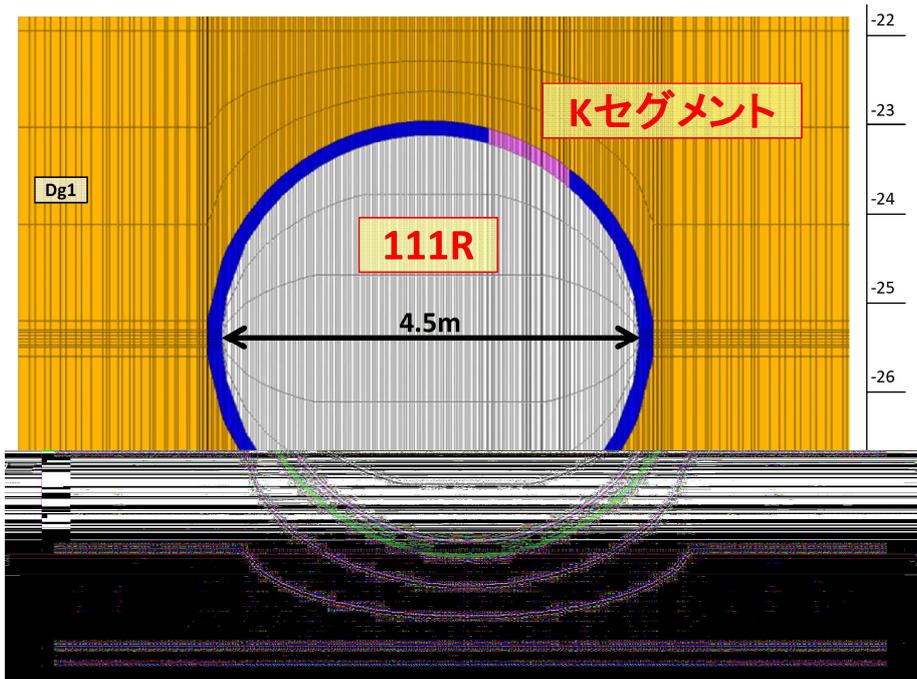


a) モデル全体図と境界条件

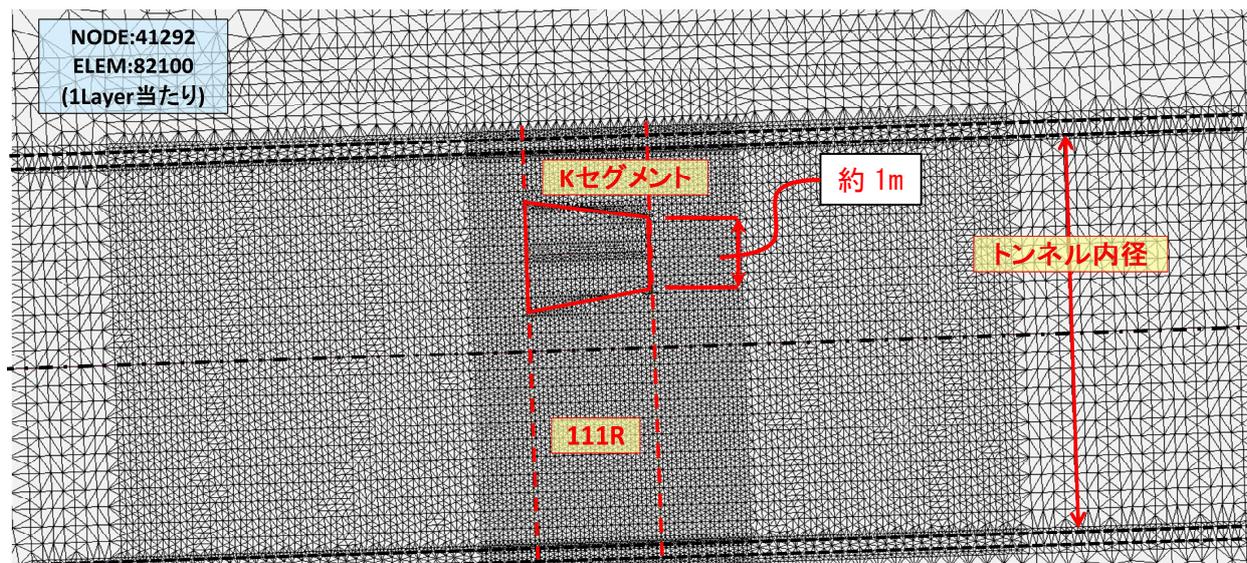


b) モデル縦断面図

図 3.5.3 三次元モデルの概要図と境界条件



c) 111R 断面図 (坑口より見て)



d) 111R 付近の平面図

図 3.5.3 三次元モデルの概要図と境界条件

### (3) 解析結果

図 3.5.4 に、事故時に計測された切羽圧と三次元浸透流解析により得られた土圧計の位置における間隙水圧の経時変化の比較を、図 3.5.5 に三次元浸透流解析により得られた湧水量をそれぞれ示す。この図から、解析結果は計測された切羽圧の低下を良く再現できていることから、出水が発生することで切羽圧が低下することが確認された。また、湧水量は定常状態で約  $0.9\text{m}^3/\text{min}$  であり、 $1\text{cm}^2$  あたりに換算すると  $15\text{cc}/\text{sec}$  の湧水量である。

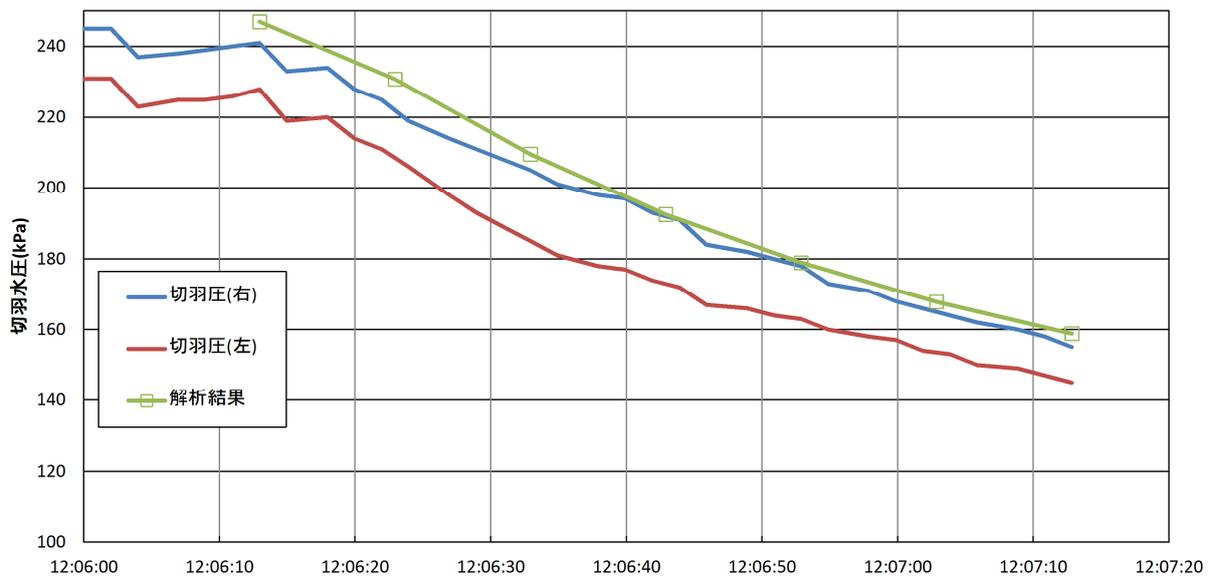


図 3.5.4 間隙水圧の経時変化

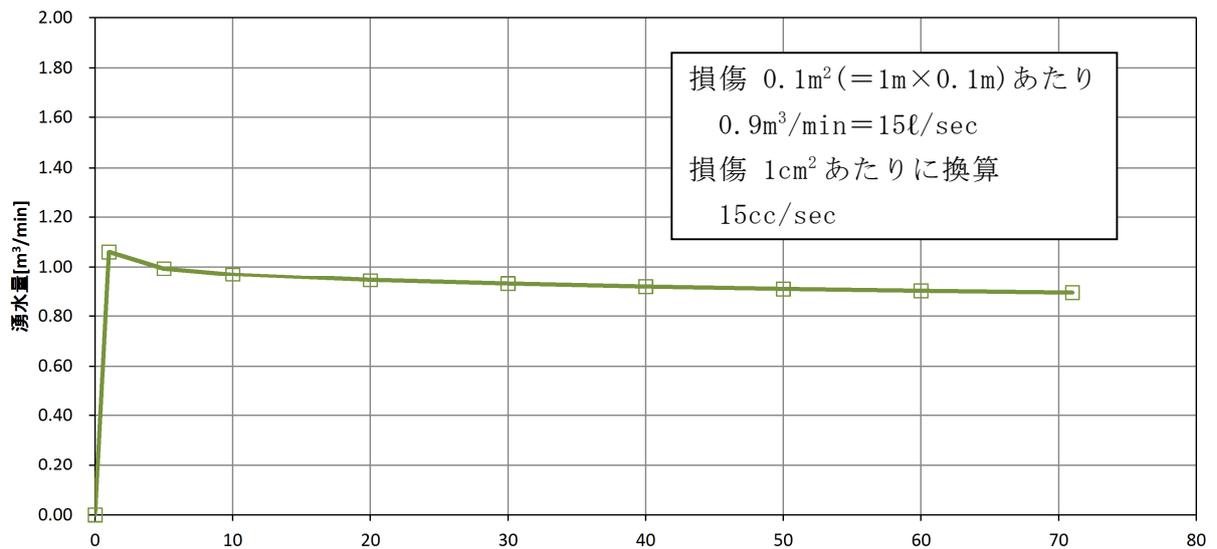


図 3.5.5 湧水量

### (4) まとめ

三次元浸透流解析による切羽圧の変化の検討を行った結果、111R の K セグメント付近で出水が発生することで、切羽の圧力が低下する可能性が十分にあることが確認された。

### 3.6 K-B間のセグメント継手面の摩擦係数試験

#### (1) 目的

セグメントの挙動解析により、K-B間のセグメント継手面の摩擦係数の値がKセグメントの拔出し量に大きく影響することが明らかとなった。本試験は、倉敷市のシールド現場におけるK-B間のセグメント継手面の摩擦係数について把握することを目的とする。

#### (2) 試験方法

##### 1) 試験概要

試験は二次载荷試験装置を使用し、K-B間のセグメント継手面の一部を切り出した部分供試体を用いた摩擦係数要素試験を行った。

##### 2) 実施要領

##### ①部分供試体の作成

倉敷のシールド現場用として製作された未使用のKセグメント、Bセグメントを使用し、各セグメントの継手面周辺の一部をカットして摩擦試験が実施可能な大きさの供試体を作成した。作成する供試体は4組とし、部分供試体寸法は、150mm（接触面の長さ）×200mmとした。

##### ②試験

部分供試体を二次载荷試験装置に設置し、油圧ジャッキを用いて予め定めた軸力状態になるまで载荷し、その状態を保持したまま軸力と直行する方向から载荷を行い、部分供試体はずれはじめる最大荷重を確認した。油圧ジャッキにより载荷する部分供試体は、試験装置底面との摩擦が生じないように底面から数mm浮かせた状態で実施した。なお、载荷は変位制御で実施した。写真3.6.1に二次元载荷試験装置を、図3.6.1に試験の概要図を示す。



写真 3.6.1 二次元载荷試験装置

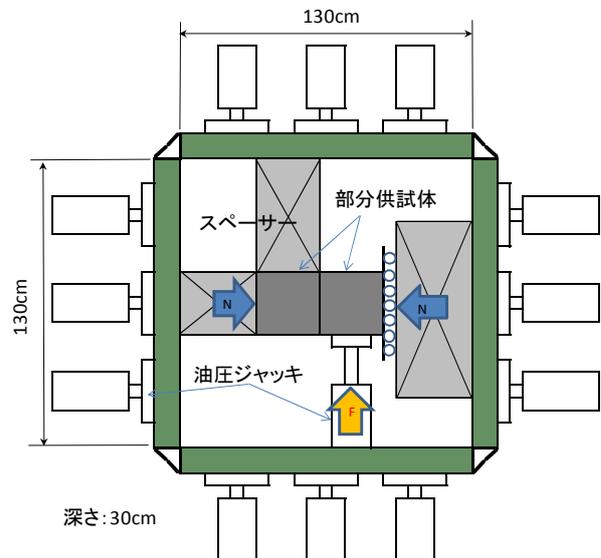


図 3.6.1 試験の概要図

#### (3) 試験ケース

K-B間のセグメント継手面の状態について下記4状態を想定し、各状態に対して表3.6.1に示す4軸力について実施した。

表 3.6.1 試験ケース一覧

試験 NO.	条件	目標軸力 (kN)	供試体
①	シール材がある場合(浸水無し)	30, 60, 90, 120	NO. 1
②	シール材がある場合(浸水あり)		NO. 2
③	②+シール材のみに滑剤を塗布した場合(浸水あり)		NO. 3
④	②+接触面全面に滑剤を塗布した場合(浸水あり)		NO. 4

※軸力は、設計計算書を参考に正負の曲げモーメントと軸力を受ける場合の最大軸力値を参考に、現場条件下に近い軸力状態を最大値として4段階を設定。

※(浸水あり)は、事故時の現場状況からKセグメントがシールドテールから地山側へ出てから約1時間後に事故が発生したことを考慮し、試験前に約1時間浸水させた。

※シール材は、セグメントに貼付されているものをそのまま使用した。

※滑剤は、倉敷のシールド現場で使用した材料を使用した。

(4) 試験結果

試験で得られた載荷力、変位のデータを整理するとともに、軸力、載荷力との関係から摩擦係数を求めた。試験結果を表 3.6.2、図 3.6.2、図 3.6.3 に示す。これより、滑剤を塗布しない条件でも①シール材がある場合(浸水なし) 0.17~0.19、②シール材がある場合(浸水あり) 0.16~0.18 と比較的低い値であった。滑剤を塗布することで、③②+シール材に滑剤塗布(浸水あり) 0.05~0.09、④②+接触面全面に滑剤塗布(浸水あり) 0.04~0.05 と、さらに摩擦係数が低下することが確認された。なお、供試体を浸水することによる顕著な差は見られなかった。また、滑剤を塗布しない①②については、約5mm~10mm までの変位までの再試験を行ったところ、摩擦係数は若干増加する傾向にあったが、最大でも摩擦係数は0.25程度であった。

表 3.6.2 試験結果一覧表

		軸力 kN	最大摩擦力 kN	相対変位 mm	摩擦係数	備考
①シール材がある場合(浸水無し)	CASE4-1	131.77	22.94	1.28	0.174	
	CASE4-2	84.39	15.62	1.09	0.185	
	CASE4-3	56.78	10.91	1.07	0.192	
	CASE4-4	28.78	5.33	1.09	0.185	
①再試験	CASE4-5	127.66	26.78	5.02	0.210	(CASE4-1再試験)
	CASE4-6	78.32	15.75	5.34	0.201	(CASE4-2再試験)
	CASE4-7	46.80	8.31	4.62	0.178	(CASE4-3再試験)
	CASE4-8	20.56	2.85	4.20	0.139	(CASE4-4再試験)
②シール材がある場合(浸水あり)	CASE1-1	107.30	18.85	0.82	0.176	
	CASE1-2	84.98	14.26	0.63	0.168	
	CASE1-3	56.00	9.30	0.59	0.166	
②再試験(浸水なし)	CASE1-4	28.39	4.96	0.58	0.175	
	CASE1-5	108.08	25.92	10.01	0.240	(CASE1-1再試験)
	CASE1-6	78.12	20.34	8.63	0.260	(CASE1-2再試験)
③②+シール材のみに滑剤を塗布した場合(浸水あり)	CASE2-1	114.93	10.42	0.56	0.091	
	CASE2-2	87.52	7.07	0.57	0.081	
	CASE2-3	57.57	4.34	0.59	0.075	
	CASE2-4	28.20	1.49	0.58	0.053	
④②+接触面全面に滑剤を塗布した場合(浸水あり)	CASE3-1	115.52	4.96	0.59	0.043	
	CASE3-2	86.94	3.22	0.57	0.037	
	CASE3-3	56.39	2.48	0.58	0.044	
	CASE3-4	26.82	1.36	0.58	0.051	

※ 各 CASE の試験は、同一の供試体を用いて実施した。

※※ ①再試験、②再試験(浸水なし)は、それぞれの試験で使用した同一の供試体を用いて約5~10mm の大変位まで載荷した。

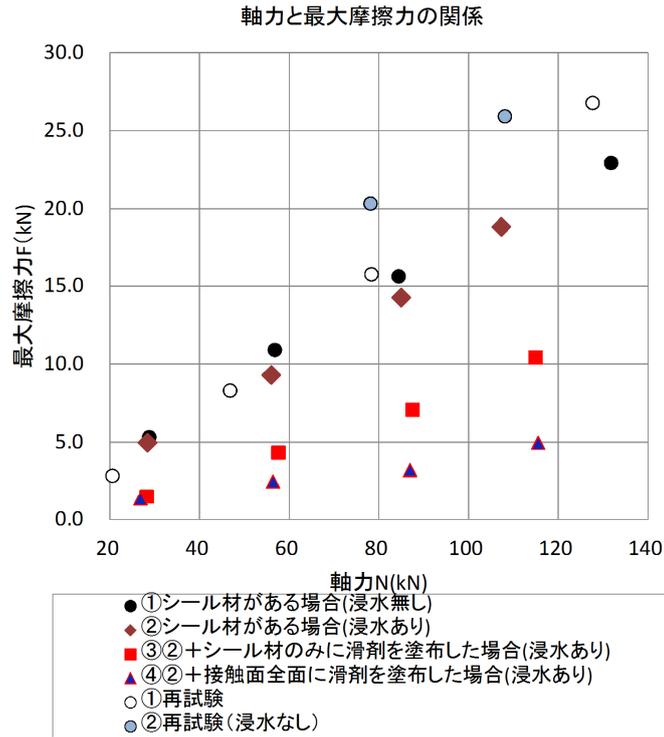


図 3.6.2 軸力と最大摩擦力の関係

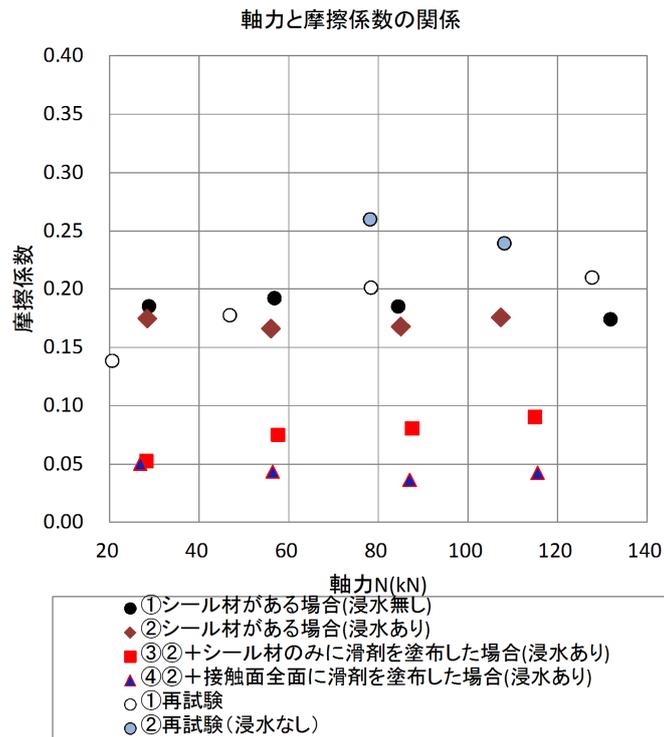


図 3.6.3 軸力と摩擦係数の関係

(5) まとめ

K-B 間のセグメント継手面の摩擦係数の試験を行った結果、倉敷市の現場の条件（施工関係者へのヒアリングでKセグメントに滑剤を塗布）では、摩擦係数が 0.1 以下に低減していた可能性があることが確認された。

### 3.7 調査・検討等により明らかになった主な事項

倉敷市の事故に関する現地調査、施工データの調査、事故発生時のシミュレーション解析について検討した結果とともに、施工関係者のヒアリング結果による施工状況等から明らかになった主な事項を整理した一覧を表 3.7.1、表 3.7.2 に示す。

表 3.7.1 設計図書の調査（確認）により明らかになった主な事項

調査項目	明らかになった主な事項	想定される現象
セグメントの設計図書等の調査（確認）	厚さが160mmと薄い	セグメントの耐力に余裕代が少なかった可能性
	幅が1400mmと広い（長い）	セグメント組立時にBセグメントが垂下がりがやすかった可能性
	セグメント継手が突合せ構造で締結力がない	セグメントのリング方向の軸圧縮力によりKセグメントが切羽側へ動きやすかった可能性
	Kセグメントの挿入代が小さめで、挿入角度が大きい	
	リング継手の埋込インサートの箇所内で内側の鉄筋を配置していない	リング継手の破壊形態がインサートのかぶりコンクリートのせん断破壊という脆性的なものとなった可能性
	セグメントの分割数が少ない	セグメント組立時のジャッキ引抜きの影響（シールドの姿勢変化）が相対的に大きかった可能性 セグメント組立時にBセグメントが垂下がりがやすかった可能性
シールドの設計図書等の調査（確認）	海底で高水圧が作用する条件下でテールシールドが2段	テールシールドの機能が十分でなかった可能性
	テール部の長さが短い（セグメントのテール内でのかかり代が小さい）	テール部からセグメントへ作用する荷重の作用点が切羽側となり、競り荷重等による影響が通常より大きかった可能性
	形状保持装置が装備されていない	セグメント組立時にBセグメントが垂下がりがやすかった可能性

表 3.7.2 調査・検討等により明らかになった主な事項

調査項目	明らかになった主な事項	想定される現象
回収されたセグメントの調査	110R、111Rの天端付近のセグメント内面に軸方向に伸びる曲げひび割れ	トンネルの上部から下方へセグメントが押し付けられた可能性
	111RのKセグメントの抜出しの痕跡	111RのKセグメントが抜出した可能性
引揚げられたシールドの調査	111RのKセグメント付近におけるシールドテールがトンネル内空側に変形	111RのKセグメントが抜出した後にシールド上部の土砂等が突発的に流入した可能性
	シールド側のテールグリスの配管内部の閉塞	シールド側のテールブラシヘテールグリスが注入されていなかった可能性
	切羽に向かって4時と10時の方向のテールブラシから裏込め注入材が検出	固着した裏込め注入材の存在によりセグメントに対して部分的にテールシールドからの拘束圧が高くなっていた可能性
施工状況・施工データの調査	シールド発進直後からトンネル計画線に対して水平方向に概ね200mm程度の偏差	トンネルの計画線に戻すためのシールド掘進が行われた可能性
	裏込め注入を掘進リングから3リング後方のリングで実施	シールドテールを抜けて、地山側に出たセグメントリングが浮力により浮上る可能性
	28Rからテールグリスマaterialを一般的な材料から特殊な材料に変更（テールシーラークレーショックシーラー）	十分な止水性が確保できていなかった可能性
	85R付近を施工時に裏込め注入材がシールドの下側から漏出	テールシールド内に裏込め注入材が流入し、テールシールド内で裏込め注入材が固着しシールドの挙動が制約された可能性 固着した裏込め注入材の存在によりセグメントに対して部分的にテールシールドからの拘束圧が高くなっていた可能性
	85R以降の左右のテールクリアランスがほぼ同様な値	
	2月6日夜（109R掘進完了）では、シールドは2月6日昼に比べて4～7mm下がり、セグメント高さより11mm低く、セグメントの真円度は、左右に拡大する変形状態がさらに進行	シールドとセグメントとの位置関係を把握できていなかった可能性 2月7日の施工時にはトンネル上部をシールドのテール部で押さえる力が作用した可能性
	事故直前にB2セグメントを組立てるために111RのKセグメントを含む範囲の9本のシールドジャッキを引抜いた	111RのKセグメントの抜出しに対する抵抗力が不足してKセグメントが抜出した可能性 27本中9本のシールドジャッキを引抜いたことにより、シールドの姿勢が上下方向に挙動する可能性
三次元有限要素法によるセグメント挙動の検討	テール部に側部もしくは上部から偏圧が作用し、KセグメントとBセグメント間の摩擦係数が0.1と小さい場合は、111RのKセグメントのリング継手に作用する軸方向の引張力がボルトの降伏点を超える	112RのB2セグメント組立時に111RのKセグメントを含む範囲のシールドジャッキを引いたことにより111RのKセグメントの抜出しに対する抵抗力が不足してKセグメントが抜出した可能性
三次元浸透流解析による切羽圧変化の検討	111RのKセグメントが約10cm程度抜出した場合、事故時に記録された短時間における切羽圧の急激な低下の傾向と一致	111RのKセグメントが抜出した可能性
K-B間のセグメント継手面の摩擦係数試験	現場で使用されていたセグメントの部分供試体を用いた摩擦係数試験により、実際の施工で行われていたシールド材に滑剤を塗布した状態での摩擦係数は、0.1以下と非常に低い	111RのKセグメントを含む範囲のシールドジャッキを引いたため、111RのKセグメントが抜出した可能性

### 3.8 考えられる事故の発生メカニズム

#### (1) 考えられる事故の原因

これまでに述べた倉敷市の事故に関する検討の結果から、事故に至る直接的な原因は以下の理由から 111R の K セグメントが拔出し、111R ならびに 110R の安定性が損なわれたことによるものと推定される。

- 1) 111R の K セグメントのリング継手 (110R 側) が斜めにトンネル内部へ引張られたと推定される破壊形態を示している。
- 2) 111R の K セグメントのセグメント継手ならびに B2 セグメントのセグメント継手の損傷状態に、K セグメントが切羽側に移動したことによって生じたと推定されるひび割れや破損が見られる。
- 3) 三次元 FEM によるシミュレーションの結果、降伏点を超える引張力がリング継手 (M16) に作用した可能性があることを確認した。

このような K セグメントの拔出しの要因には複数の事象が挙げられるが、以下の理由から 111R の K セグメントの拔出しが発生した要因として K セグメントがセグメントリングに作用する軸力などによって拔出し易い形状・寸法であったことや、セグメントとシールドテールの上部との競り (または、テールクリアランスの縮小による偏圧) が挙げられる。

- 1) K セグメントの挿入角度が  $\theta_K = 1/3 \theta_A$  ( $\theta_K$ : K セグメントの中心角,  $\theta_A$ : A セグメントの中心角) の実績である  $7^\circ$  前後に対して約  $10^\circ$  と大きく、K セグメントの押し出し力が大きくなる (トンネル標準示方書では「 $7\sim 22^\circ$  としている例が多い」としているが、 $22^\circ$  の実績は等分割の K セグメントであり、RC セグメントの  $\theta_K = 1/3$  または  $1/4 \theta_A$  の分割角度の K セグメント場合には  $7^\circ$  前後の実績が主流である。また、突合せ継手の一種であるほぞ付きセグメントの挿入角度は  $6^\circ$  未満としている例が多い)。
- 2) K セグメントの拔出しに抵抗する K セグメントと B セグメントの間の摩擦力はセグメント継手面の摩擦係数を  $\mu = 0.5$  と仮定して算出することが多いが、実験結果から条件によっては  $\mu = 0.1$  を下回る可能性があることが確認され、見込んでいた摩擦力が確保されなかった可能性がある。さらに、K セグメントが滑動したときに、突合せ構造であるセグメント継手は継手面の摩擦抵抗のほかには拔出しに抵抗できないこと、リング継手による拔出しに対する抵抗力として回収されたセグメントの調査結果からリング継手の破壊形態がインサートのかぶりコンクリートのせん断破壊という脆性的なものであったことから、拔出しに対する抵抗力が不足していた可能性がある。
- 3) セグメントとシールドとの位置関係の推移から、2 月 7 日の施工ではトンネル上部をシールドのテールスキンプレートで抑える力が働いていた可能性がある。
- 4) 掘進指示書にシールドの姿勢を  $0.1$  度上向きで維持するとされているにもかかわらず、測量結果は下向き (2 月 6 日昼) であるなど、シールドの姿勢制御が順調に行われていない可能性が認められ、測量データのない 2 月 7 日昼にはさらにシールドのテールの上部がセグメントに接近していた可能性がある。
- 5) 110R、111R の頂部付近のセグメントにはセグメント幅方向に伸びる曲げひび割れと見られるひび割れが確認されており、トンネル上部から大きな力が作用した可能性を示唆している。

- 6) これらの事実確認の結果を踏まえて三次元のFEM解析によるシミュレーションを行った結果、トンネル上部にシールドテールの競りが生じていたと仮定した場合に、111RのKセグメントが抜出す可能性が十分にあることが確認された。

(2) 考えられるトンネルの崩壊過程

回収されたセグメントの調査結果等から、トンネルの崩壊は二段階で生じたと推定され、崩壊に至った過程としては、以下が考えられる。

【第一段階】

①111R の K セグメントの拔出し

【第二段階】

②111R の K セグメントの脱落

③111R の B2 セグメントの折れ、B1 セグメントの脱落

④110R の K セグメントの拔出し、脱落

⑤110R の崩壊

①111R の K セグメントの拔出し

(1) で示したように、トンネル崩壊のきっかけは、111R の K セグメントが切羽側に拔出したことによるものと推定される。K セグメントのリング継手が斜めに引張られたと推定される破壊形態を示していることから、K セグメントは図 3.8.1 に示すように切羽側がトンネル内側へ落ち込むようにして拔出したと考えられる。拔出した K セグメントは、エレクションガイドによって一時的に抑えられたが、拔出しによって生じた隙間から地下水の流入が始まったことが可能性として考えられる。事故発生時の状況で、不具合発生からトンネル崩壊に至るまでの間に、切羽の作業員が不具合を徒歩で連絡し、その後、トンネル内に戻るなど復旧活動が行われていたことから、この状態が 20 分程度継続していたものと思われる。

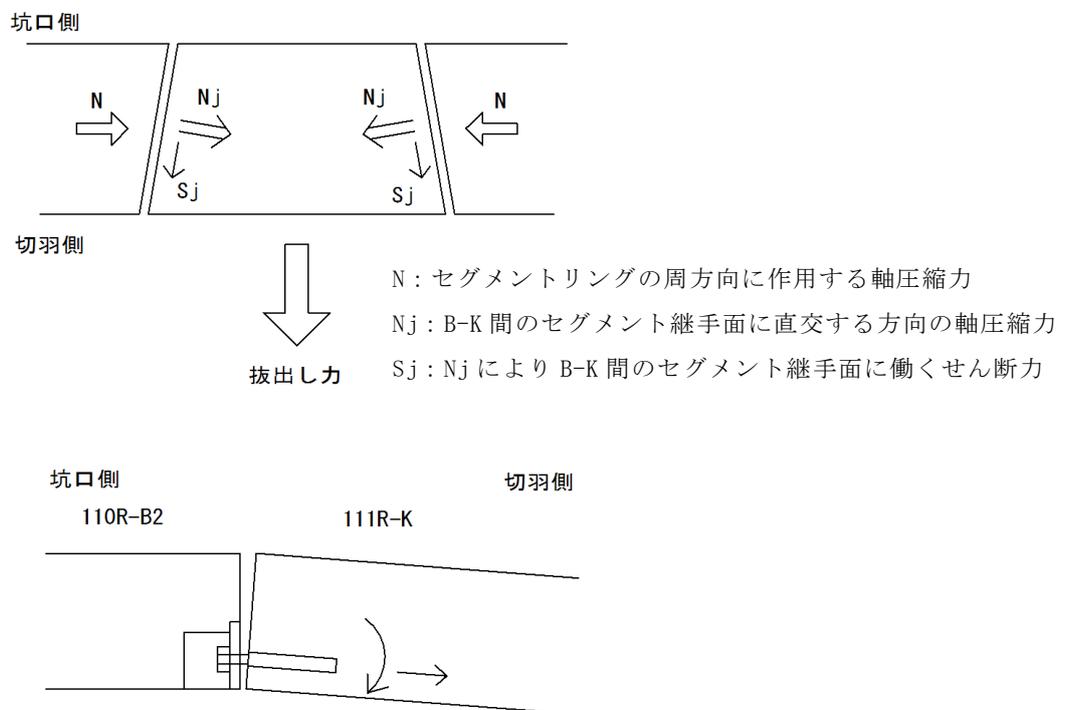


図 3.8.1 K セグメントに発生する引張力と曲げ

## ②111RのKセグメントの脱落

Kセグメントが拔出したのち、地下水の流入が継続することによって周辺地盤が緩められ、セグメントに作用する荷重が増加することで、Kセグメントの拔出しにより安定性が低下した111R、110Rが壊滅的に破壊し、短時間に大量の土水の流入が生じたことが可能性として考えられる。

この時のトンネルの崩壊過程としては、まず、エレクトリオンガイドによって一時的に拔出しが抑えられていた111RのKセグメントへ作用する荷重が増加し、拔出し力に抵抗することができなくなり脱落した可能性が考えられる。図3.8.2に、111RのKセグメントの拔出し、脱落時のイメージを示す。

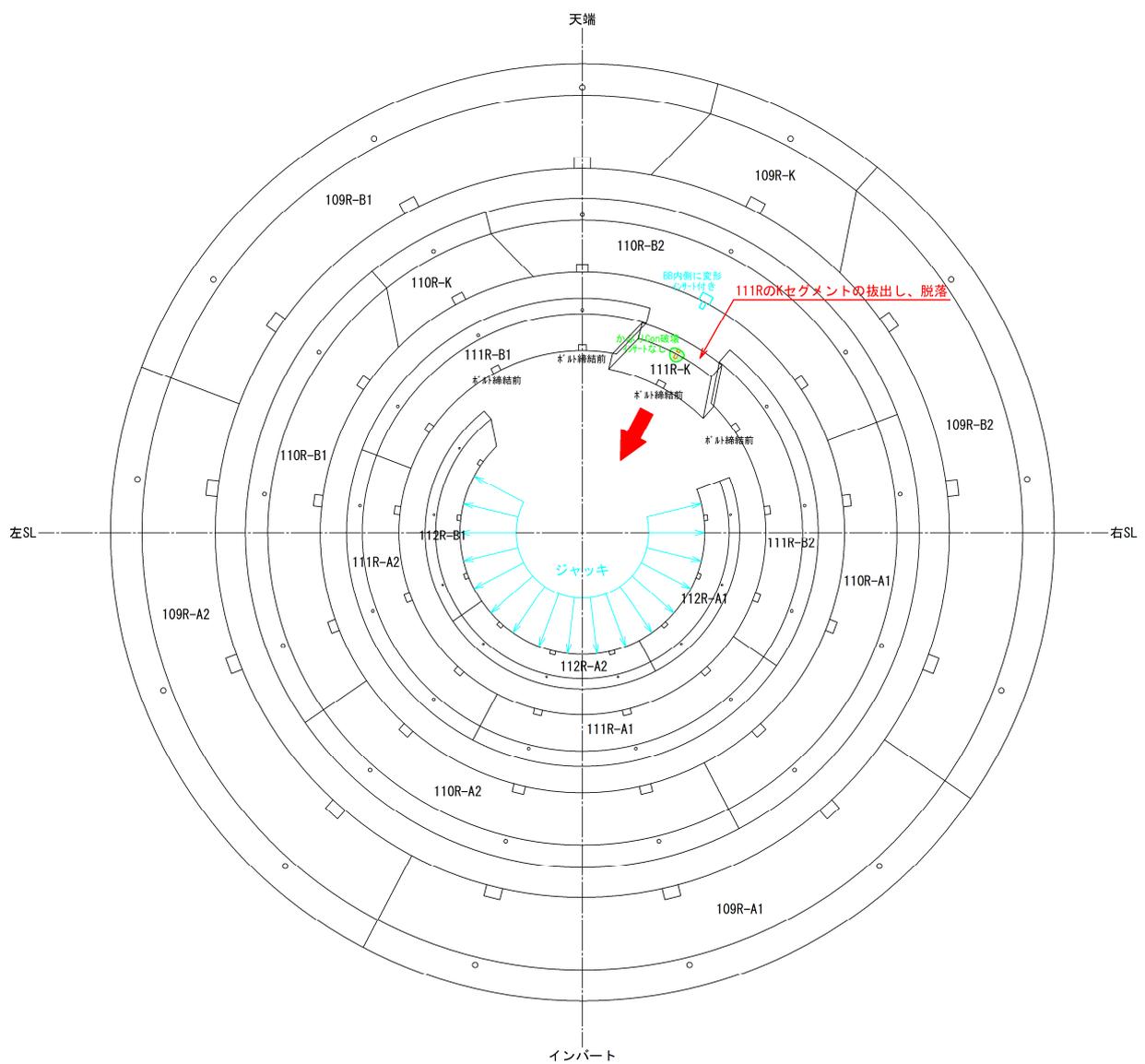


図 3.8.2 111RのKセグメントの拔出し、脱落

### ③111R の B2 セグメントの折れ、B1 セグメントの脱落

111R の K セグメントが脱落することで、111R が不安定となるが、スプリングラインより下方は、112R のセグメントを介して、ジャッキによりトンネル軸方向に支持された状態にあるため、瞬時であるが、どうにか形状を維持できたと考えられる。

一方で、111R の B2 セグメントのスプリングラインより上方と、B1 セグメントは、ジャッキによる拘束を受けていないため、外部からの荷重によりトンネル内側へ落ち込んだ状態になると考えられる。リング継手に発生するせん断力が、ボルトの耐力を越えることでリング継手が破断し、B2 セグメントはジャッキ拘束の有無の境で折れ、B1 セグメントはトンネル内側へ脱落したと考えられる。

この時、図 3.3.1 に示したセグメントの海中残置状況から、折れ曲がった B2 セグメントの上に、B1 セグメントが位置しているため、破壊の過程としては B2 セグメントが折れ、次に B1 セグメントが脱落したことになる。図 3.8.3 に、111R の B2 セグメントの折れ、B1 セグメントの脱落時のイメージを示す。

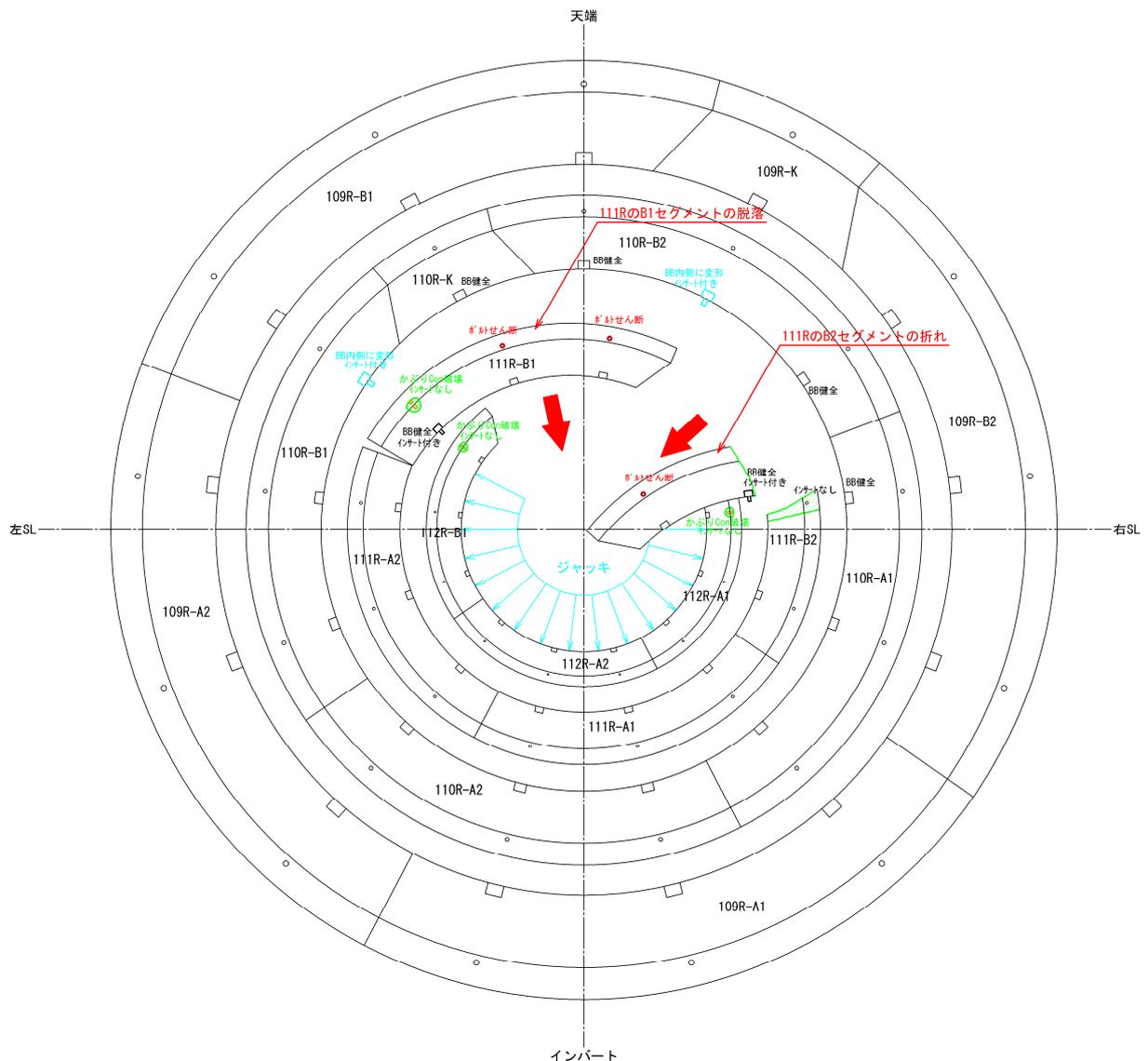


図 3.8.3 111R の B2 セグメントの折れ、B1 セグメントの脱落

④110R の K セグメントの拔出し、脱落

111R の B1 セグメントが脱落により、リング継手で接合されている 110R の K セグメントが引張られ、脱落したことが考えられる。写真 3.8.1 に示すように 110R の K セグメントと 111R の K セグメントのインサート側の損傷状況が似ていること、図 3.3.1 に示したセグメントの海中残置状況から 110R の K セグメントはシールド内に残っていたことから、110R の K セグメントも切羽側へ拔出すように脱落したと考えられる。図 3.8.4 に、110R の K セグメントの拔出し、脱落時のイメージを示す。



a) 110R



b) 111R

写真 3.8.1 K セグメントの損傷状況

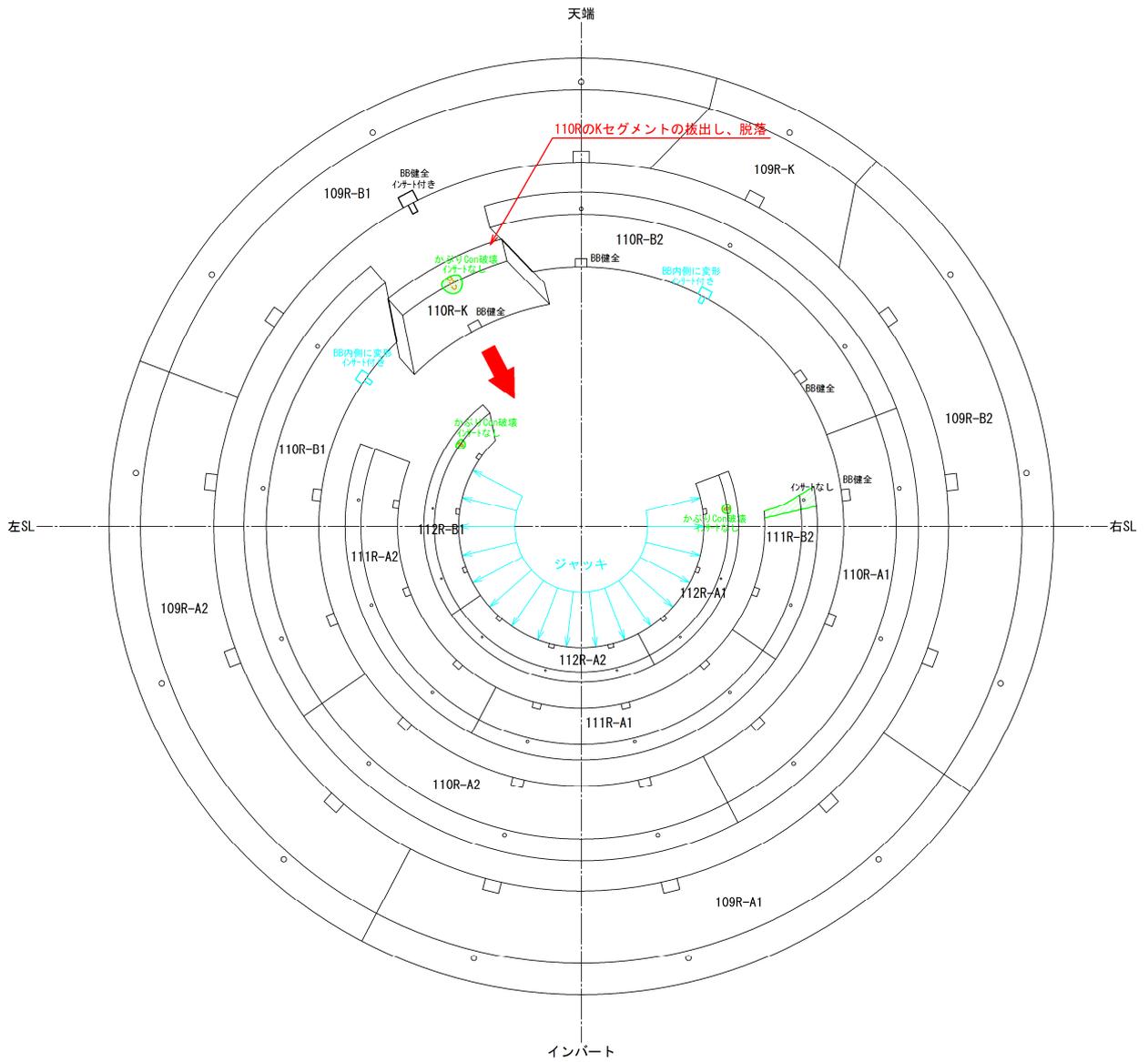


図 3.8.4 110R の K セグメントの拔出し、脱落

### ⑤110R の崩壊

110R の K セグメントが脱落することで、110R も不安定となり、110R が崩壊に至ったと想定される。110R-111R 間のリング継手で 111R のインサート側にかぶりコンクリートの破壊が多いこと、109R-110R 間のリング継手で 109R のボルトボックス側にかぶりコンクリートが破壊し、アンカー筋がトンネル内側に大きく変形した状態であることから、110R がトンネル坑口側へ向かってめくられるように崩壊し、大量の土水の流入とともに坑口へ流されたことが考えられる。また、110R より切羽側にある 111R、112R、および、先に切羽側へ脱落したと考えられる 110R の K セグメントはシールド側へ流されたと考えられる。さらに、110R の崩壊とともに 109 の K セグメントも 110R の K セグメントと同様に抜出し脱落したが、流入した土砂に埋もれたため、回収できなかったことが考えられる。図 3.8.5 に、110R の崩壊時のイメージを示す。

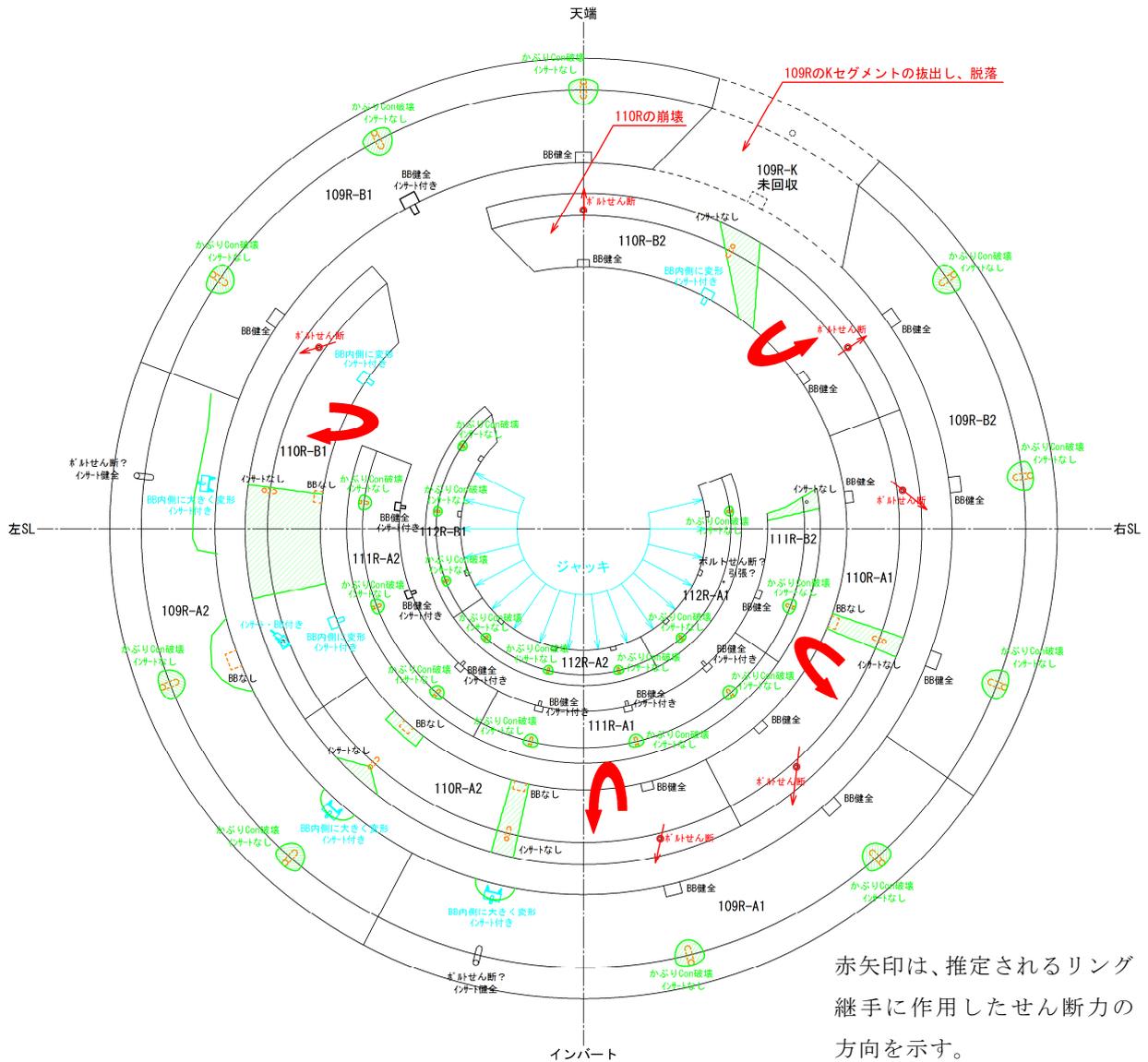


図 3.8.5 110R の崩壊

### 3.9 事故発生の要因整理

考えられる事故の発生メカニズムを受けて、掘削条件、シールド、セグメント、および、施工における各要因と事故の発生メカニズムとの関連を図 3.9.1 に整理した。今回の倉敷市の事故では、事故につながる要因とその要因から考えられる問題点として以下が考えられる。

#### 1) テールシールの止水性に不安

海底で高水圧が作用する条件でシールドのテールシールが 2 段であったこと、施工関係者へのヒアリングにおいて、施工途中（本掘進を開始する段階）でテールグリスの材料を変更していたことが確認されていることから、テールの止水性に不安があったことが考えられる。

#### 2) Bセグメントにタレが発生しやすい

セグメントが幅広であることや分割数が少ないことから 1 ピースの重量が大きいこと、セグメント継手が突合せ構造で締結力がないこと、シールドに形状保持装置が装備されていないこと等から、セグメント組立時に Bセグメントが垂れやすかったことが考えられる。

#### 3) リング方向の軸圧縮力により Kセグメントが切羽側へ拔出しやすい

セグメント継手が突合せ構造で締結力がないこと、施工関係者へのヒアリングにおいて、Kセグメントを組立てる際にセグメント継手に滑剤を塗布していたことが確認されていること等から、セグメントに作用するリング方向の軸圧縮力により Kセグメントが切羽側に拔出しやすかったことが考えられる。

#### 4) リング継手のせん断、引抜き強度に不安

セグメントの厚さが薄いため、リング継手の埋込みインサートの箇所で内側の鉄筋を配置していないことから、リング継手のせん断強度、引抜き強度に不安があったことが考えられる。

#### 5) 掘進完了時にテールシールにかかるセグメントへの作用荷重が大きい

セグメントの幅が広く、シールドのテールの長さが短いことから、組立てたセグメントは次のリングの掘進完了時には 3 分の 2 程度が地山側に出ており、セグメントに作用する水圧等の外力が通常より大きかったことが考えられる。また、テール部においてテールブラシやテールグリス圧の作用点や、テールとセグメントが競った場合のテールからの競り荷重の作用点がセグメントの切羽側となることから、テールブラシやテールグリス圧の影響や競り荷重による影響が通常より大きくなったことが考えられる。

#### 6) テールシールに裏込め注入材が固着

85R 付近の施工時に裏込め注入材がテール内へ漏出していたこと、テールブラシの付着物の分析結果から、切羽に向かって 4 時と 10 時の方向で裏込め注入材が検出されていることから、テールシールに裏込め注入材が侵入していたことが確認された。このため、裏込め注入材が固着したことで部分的にテールシールの拘束圧が高くなっていた可能性がある。

#### 7) シールドの制御が難しい

施工関係者へのヒアリングにおいて、裏込め注入は、掘進リングから 3 リング後方で実施していたことが確認されていることから、シールドのすぐ後方では裏込め注入材の充填が十分に なされていない状況にあったことが考えられる。このため、シールドの制御が難しい状態であったことが考えられる。

#### 8) シールドの組立時の姿勢変化

セグメントの分割数が少ないため、セグメント組立時に一度に開放するジャッキの範囲が大きくなることから、セグメント組立時のシールドの姿勢変化が大きかったことが考えられる。

### 事故の要因からメカニズムの推測

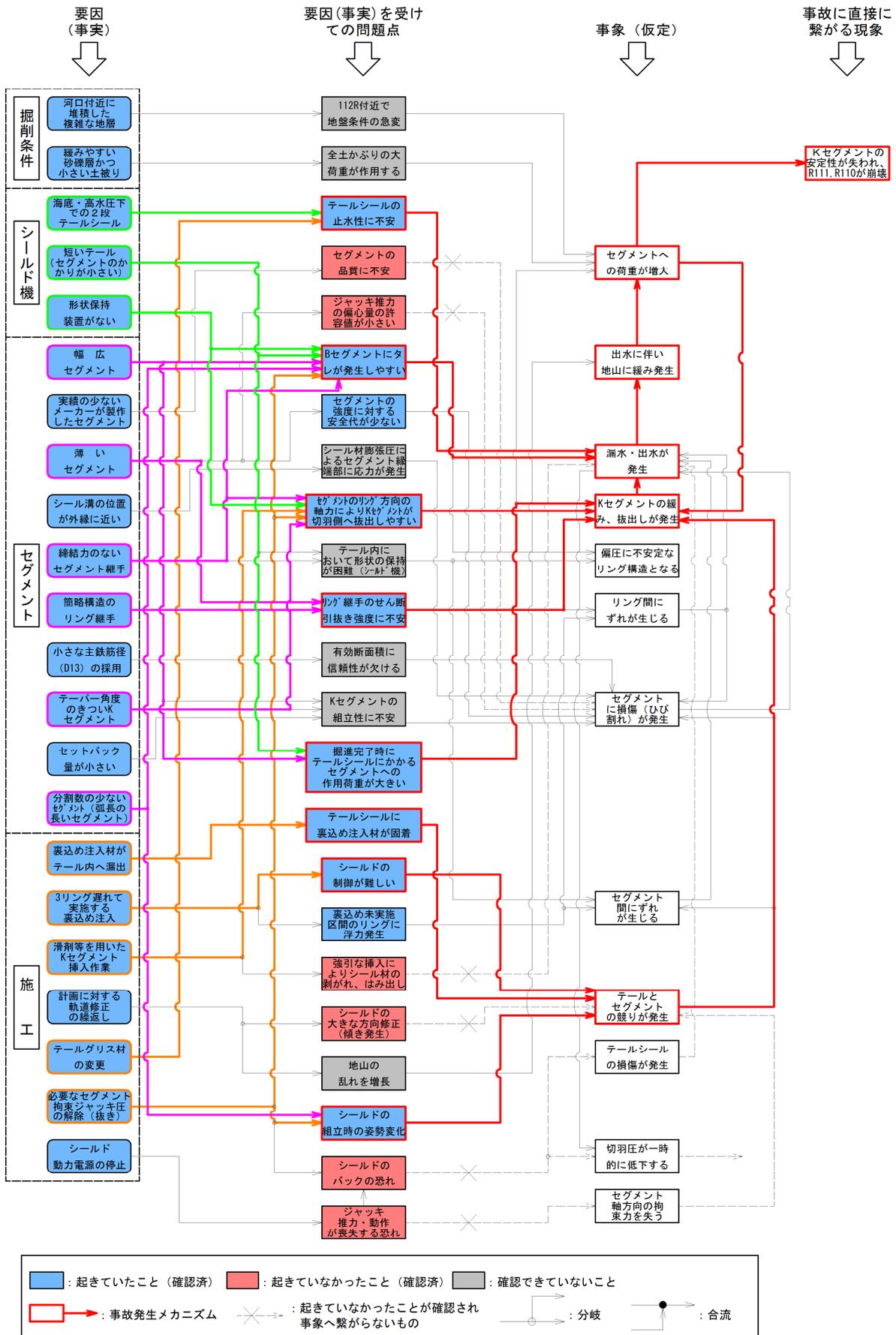


図 3.9.1 事故の要因からメカニズムの推測

## 4. シールド工事に関するアンケート調査

### 4.1 要旨

本協議会では、倉敷市の事故に関する検討のほかに、全国のシールド工事現場でのトラブルやヒヤリハットの事例を収集し、シールドトンネルの設計・施工上の課題を抽出するために、シールドトンネルを施工する建設会社へアンケート調査を実施した。アンケート調査の結果から、複数の建設会社からいくつかの類似したトラブルやヒヤリハットの事例が確認されたため、再発防止に向けた検討を実施するにあたりアンケート結果の整理を行った。

### 4.2 シールド工事を行う建設会社からのアンケート調査による結果とりまとめ

#### (1) 調査の目的

全国のシールド工事現場でのトラブル等の発生事例やその対応例などをもとに、シールドトンネルの設計・施工のトラブル要因を整理し、シールドトンネルの設計・施工上の課題を抽出し、今後の改善点の検討に資するものである。

#### (2) 調査方法

シールド工事に関して、(一社)日本建設業連合会を通じてシールドトンネルを施工する建設会社に対して、これまでの事故やトラブル、事故につながるようなヒヤリハット、事故につながる危険性のある事柄について、幅広く自由記述によるアンケートを実施した。自由記述のなかで、問題意識が多くあった項目について詳細なアンケートを実施し、計 8 社から回答を得た。

#### (3) 調査結果

アンケート調査の結果から、複数の同様な内容の回答が得られたものと、少数意見ではあるが重要と思われるものを抽出して整理した。

#### ① 軸方向挿入型 K セグメントの抜出しについて

##### 1) 抜出し現象が発生している事例

- ・K セグメントのシールド切羽側（トンネル軸方向）への抜出し現象は、シールド掘進中に発生している事例もあるが、主にセグメント組立時に K セグメントを押さえていたシールドジャッキを緩めた時に発生している。
- ・K セグメントの抜出し現象は、引張剛性または締結力が小さいリング継手や、突合せ継手等の締結力が小さいセグメント継手を採用したセグメント等で発生した例が多い。そのほか、大深度・高水圧等の条件下で高い裏込め注入圧が必要な場合、大口径・幅広セグメント等で裏込め注入圧の受圧面積が大きい場合、セグメントリングの分割数が少なく K セグメントの挿入角度が大きい場合等の条件で K セグメントの抜出し現象が発生した例が見られる。

##### 2) 実施した抜出し防止対策の事例

##### ア. 施工段階における対策事例

- ・K セグメントを組立済みのリングに PC 鋼棒、レバブロック、ターンバックル等の治具とセグメントの把持金物を利用して固定する。
- ・セグメント継手面（K セグメントと B セグメント間）の摩擦力を増加させる。

- ・シールド掘進時には K セグメントをシールドジャッキで常に押せるジャッキ配置とする。
- ・独自に K セグメントの抜出しを防止するためのマニュアルを設けて対応する。

#### イ. 設計段階における対策事例

- ・セグメントのリング継手とセグメント継手の剛性、引抜き耐力および締結力を向上させる。
- ・K セグメントの挿入角度を低減する。

### ② コストを優先したセグメントの設計について

#### 1) 施工現場でリスク増大を感じさせる場面・事象事例

- ・類似実績工事と比較してセグメント厚さを薄くし、幅を広げたとき。
- ・厚さが薄いセグメントを使用し、施工時荷重によってセグメントに損傷が生じたとき。
- ・幅が広いセグメントを使用し、シールドテール部との競り等の施工時荷重の作用によってセグメントに損傷が生じたときや、トンネル坑内でセグメントの取回し時に隅角部の欠けが生じたとき。
- ・高水圧や過大な裏込め注入圧によって鋼製セグメントに変形が生じたとき。

#### 2) リスクを増大させる設計事例

- ・大深度、高水圧の設計条件で厚さが薄いセグメントを採用した。
- ・過剰な幅広セグメント（工事コスト縮減や施工速度増大等の理由から）を採用した。
- ・実績値を逸脱したセグメント（鉄筋量、幅、厚さ）を採用した。
- ・継手の評価や土質評価等の誤った判断、不適切な線形採用等の設計ミスが発生した。
- ・施工時に起こり得る条件や事象を設計で反映していない。

### ③ シールドトンネルの浮上りについて

#### 1) セグメントの「浮上り」が発生する現場条件

- ・東京湾横断道路（大断面、海底横断）と同様な大断面で小土被りのトンネル。
- ・大断面で比較的薄いセグメントを採用しているトンネル。
- ・海底横断、河川横過の中大口径のトンネル。
- ・泥水式シールドによって施工されるトンネル。

#### 2) セグメントの「浮上り」確認方策

- ・テールクリアランスの計測、掘進管理測量、坑内測量によって確認する。
- ・坑内のセグメント高さの計測・測量等によって確認する。
- ・同一セグメントにおいてセグメント組立後とテール通過後の高さの経時変化の計測によって確認する。

#### 3) 「浮上り」対策事例

- ・トンネル内に施工中インゴット（ウェイトとなる重量鋼材）を設置する。
- ・裏込め注入材の施工時期が遅れると、テールボイドに存在する泥水や地下水で浮力を受けることとなり、トンネル断面の重量が浮力より軽い場合はシールドトンネルがテールボイド内で浮上るため、これを防止するため同時裏込め注入を行う。

④ その他（アンケート回答にあった現場で発生したヒヤリハット）

- ・急曲線施工時において、テールとセグメントとの競りによってリング継手にせん断力が発生すること、ならびに、セグメント本体やセグメント継手に過大な曲げモーメントが発生して損傷したとき。裏込め注入材がテールブラシに固着した場合にはその影響は増大する。

## 5. シールド工事の安全向上に関する提言

### ～ シールドトンネルの設計・施工における留意事項 ～

本協議会において検討した「3. 倉敷市の事故に関する検討」ならびに「4. シールド工事に関する聞き取り調査」に基づいて、シールド工事の安全性を向上させるために必要と判断される事項について「シールドトンネルの設計・施工における留意事項」をとりまとめた。すなわち、ここに示す留意事項は事故によって得られた知見のみにとどまらず、広く国内のシールド工事の実態を踏まえてとりまとめたものである。

留意事項の中には、従来のシールド工事において経験豊富な技術者が現場で判断していた事項や、その施工条件に応じて適宜対応していた事項も含まれると思われるが、将来のシールド工事を担う技術者への技術の継承という観点も考慮して広範に記述している。

以下の留意事項は、今後のシールド工事の安全性向上に向けて、各学協会、事業者等が定めるシールドトンネルの設計・施工に関わる基準類において、その改訂等に合わせて反映されるよう強く望むものである。

## (1) シールドトンネルの調査・計画

### (1)-1 リスクの想定と対応

現場の条件から、万一事故が発生した場合の被害の状況を想定して、リスクを考慮した総合的なシールドトンネルの設計・施工を行うこと。

#### 【解説】

シールドトンネルのセグメントは、施工の影響を受ける構造物であり、地山内で安定するまでの間に受ける様々な影響を考慮して設計する必要がある。しかし、シールドトンネルの施工中には予測できない事態が発生することも排除できない。万一事故が発生した場合の被害の影響は、シールドトンネルを施工する現場の条件によって、大きく異なるものと考えられる。とくに、海底下、河川下、湖沼下あるいは市街地で施工するシールドトンネルで事故が発生した場合には、大量出水、陥没等大きな被害が発生することが想定される。

このため、現場条件に応じたリスクを的確に評価し、適切な安全性を有する設計を実施するとともに、リスクに適切な対応が可能となるように設計の考え方を反映させた施工計画ならびに施工管理を実施する必要がある。

### (1)-2 地質調査

シールドトンネルの地質調査は、既往の調査結果等がある場合を除き、掘進対象地盤の地質状況およびその変化を把握するため、適切な計画のもとにボーリング調査を十分に実施すること。また、地下水の状況およびその変化、可燃性ガスの状況等の必要な調査を実施すること。

#### 【解説】

シールドトンネルの地質調査は、シールド工法の設計全般ならびに施工計画に大きく影響を及ぼすため、その調査を入念に行う必要がある。とくに、周囲の地形変化が激しい地域等では、対象路線の左右で土質等が変化することもあるため、調査・計画時に配慮する必要がある。

このため、既存の調査資料や初回の地質調査において十分に地質の変化を読み取ることができない場合は、地形変化も考慮のうえボーリング調査を追加することなどによつて的確に地質の状態を把握しなければならない。また、シールドの設計・施工で重要となる設計水圧は正確に把握する必要があるため、被圧水の有無を含め、年間の水位変化等、時間的な変化も調査することが重要である。

また、地盤の特性はN値を用いておおよその推定を行うことが一般的であるが、礫分の多い地盤等では実質的な地盤の剛性や強度以上にN値が高く測定されることがあるため、粒度分布等各種情報を踏まえた適切な判断が必要である。

### (1)-3 水底の探査

海／河川／湖沼を小さい土被りで横断して掘進するシールドトンネルを計画する場合は、海底／河床／湖沼底の探査等を十分に実施すること。

#### 【解説】

海底、河床、湖沼底等は、経年変化が生じやすく、かつ、調査が困難であることもあり、その情報を正確に把握し難い場合がある。しかし、シールドトンネルの線形計画、覆工計画および施工計画等において、重要となる土被り設定には海底、河床、湖沼底等の情報は欠くことができない。このため、海、河川、湖沼等を横断して掘進するシールドトンネルの調査・計画・設計にあたっては、当該地域の堆積環境を念頭に置いて、海底、河床、湖沼底等の探査を十分

に実施し、地形、土質、将来の経年変化を十分把握しなければならない。また、将来の浚渫の可能性(計画河床高さ)についても調査する必要がある。ただし、既往の調査結果、過去の施工例等を調査し、十分な土被りが確保できると判断される場合は探査を省略してもよい。

## (2) セグメントの設計

### (2)-1 セグメントの本体と継手

セグメントの本体と継手は、完成時の安全性の確認はもとより、施工状況を考慮した設計を行い、万一の場合にも重大な事故につながらないように安全性の確保に配慮すること。

#### 【解説】

シールドトンネルのセグメントは、水圧、土圧等トンネル完成時に作用する荷重に抵抗する主体構造物であると同時に、施工時にはシールド掘進時のジャッキ推力、シールドテール内から地山側へ出る際のテールシールやテールグリス圧による拘束圧、裏込め注入圧のほか、既に組立てたセグメントリングの組立精度や変形状況によって生じる外力等の施工時荷重にも抵抗する構造物である。

セグメントの設計にあたっては、対象トンネルの施工条件を十分考慮したうえで、地盤条件のほかに、トンネルがおかれている諸条件を考慮し、完成時はもちろん施工中における安全性と機能が確保されるように配慮する必要がある。

このため、セグメントの設計は、施工時荷重のほか、裏込めの注入時期や注入位置等を含めて、施工時の状況を十分に考慮して行う必要がある。

とくに、締結力が入らない突合せ継手等のセグメント継手を採用した場合は、継手の構造形式によっては、裏込め注入の状況、リング継手の強度等によって、構造耐力が著しく低下し、急激な崩壊を招く可能性がある。したがって、セグメント継手の選定にあたっては、現場の状況、施工条件等を的確に反映させてリスクを評価し、適切な継手構造を採用する必要がある。

リング継手は、セグメント継手と同様に、種々の施工時荷重に配慮したうえで、継手の構造形式や強度を決定することが重要である。とくに、リング継手の引抜き耐力はシールドの曲線施工や蛇行修正時を想定し、トンネル軸方向の引張力と断面方向のせん断力とが複合して作用することに配慮した設計を行う必要がある。また、リング継手の破壊形態は、コンクリートの破壊による脆性的な破壊形態にならないようにしなければならない。

### (2)-2 セグメントの形状・寸法

セグメントの形状・寸法の決定にあたっては、構造計算のほか、類似工事等の実績も参考に検討すること。

#### 【解説】

セグメントの形状・寸法は、一般に構造設計等で計画するが、施工時荷重の大きさと作用状態、発生応力、施工誤差等に設計では予測できない不明確な点もあることから、類似工事のセグメントの厚さと外径の比率、セグメント幅と厚さの比等の実績も勘案して検討する必要がある。ただし、実績の下限値付近では、事故や損傷を生じた事例があり、そのリスクを評価したセグメント構造の決定や施工上の対策等を行う必要がある。また、継手の種類によっては、継手に求められる引張強度やせん断強度を確保するために、一定以上のセグメントの厚さが必要になることから、セグメント厚さの検討にあたっては継手の構造や配置を考慮して決定することが重要である。

### (2)-3 セグメントの分割

セグメントの分割は、リングとしての構造的な安定性、製作性、施工性のほかに、K セグメントの安定性に配慮して決定すること。

#### 【解説】

セグメントの分割数が少ない場合は、1ピースの弧長と重量が大きくなるため、運搬性やトンネル坑内等での取扱いやすさが低下することがある反面、型枠や継手のコストが軽減できることや組立回数の低減によって組立速度が向上することが期待できるため、運搬性や取扱いに支障がなければ分割数を少なくする傾向にある。また、K セグメントは分割形式を等分割にしてその中心角を大きくすることなどによって、拔出しに対する安定性が高まると考えられるが、Kセグメントの重量が増えるとともに、等分割のKセグメントは挿入時にオペレータが両側のB-K間のセグメント継手の離隔を同時に見られずB・Kセグメントの隅角部の欠け等の不具合が出ることもあるため施工性にも配慮して分割形式を決定する必要がある。

セグメントの分割形式の選定にあたっては、経済性や組立時間の短縮だけでなくセグメント組立のためにジャッキを引抜いたときの影響やKセグメントの安定性、組立時のセグメントの損傷防止についても十分配慮することが重要である。

### (2)-4 Kセグメント

K セグメントの型式、形状・寸法は、漏水等の原因となるリング継手の目開きを生じさせないように配慮するとともに、K セグメントの拔出しの可能性を照査すること。また、必要に応じてKセグメントの滑動を防止する対策を講じること。

#### 【解説】

K セグメントは、最終的にリングを閉合して完成させるセグメントである。すなわち、セグメントの組立誤差が累積された部分に挿入するものであり、最も組立に注意が必要な部分である。このため、Kセグメントの型式、形状（挿入角度、継手角度）・寸法は、完成時はもちろんのこと、施工性についても十分配慮して決定する必要がある。

軸方向挿入型Kセグメントでは、挿入角度を大きくすると施工上は有利なことが多いが、継手面がトンネル軸と斜交するため、継手面の力の伝達がより複雑となるので適切な角度とする必要がある。軸方向挿入型のKセグメントが拔出そうとする力は、セグメントのリング方向の軸圧縮力によって生じ、挿入角度が大きくなると大きくなる。セグメントを組立てるため、Kセグメントを押さえているジャッキを抜いた場合、この力は、KセグメントとBセグメントとの間の摩擦、リング継手、セグメント継手の抵抗によって保持される。ボルト形式のセグメント継手が用いられている場合は、ボルトのせん断力によって拔出し力が保持力を超えることは少ないと考えられる。しかしながら、近年、多く用いられるようになってきているワンパス式の継手では、セグメント継手のせん断抵抗が期待できる場合を除いて、KセグメントとBセグメントとの摩擦、リング継手の強度で拔出し力を保持する必要がある。KセグメントとBセグメントとの摩擦力は摩擦係数に依存するが、要素実験の結果、条件によって摩擦係数が0.1を下回ることが明らかとなった。Kセグメントの拔出しは、漏水の原因になるとともに、状況によっては、重大災害につながる可能性があるため、Kセグメントの拔出しについて十分な照査を行う必要がある。拔出しの検討にあたっては、Kセグメント挿入時におけるシール材への滑剤の塗布等の影響についても考慮する必要がある。

照査の結果、抜出し力が保持する力を上回る場合は、施工時に仮の保持力を付加するなど適切な対策を講じる必要がある。保持力を付加する方法としては把持金具を用いて、隣接する既設のセグメントにKセグメントを固定する方法等が用いられている。

また、半径方向挿入型Kセグメントでは、半径方向への抜出し力に対して、セグメント継手やリング継手のせん断強度を十分に確保するなどの摩擦に頼らない構造上の防止対策を講じなければならない。

#### (2)-5 Kセグメントの挿入代

軸方向挿入型Kセグメントを使用する場合のKセグメント挿入代（セットバック量）は、施工性が確保できる長さとなるよう配慮すること。

##### 【解説】

軸方向挿入型Kセグメントは、トンネル軸方向にテーパをつけてトンネル縦断方向の切羽側から挿入する構造であるため、テール内でのスペース確保が必要である。

シールドテールでのKセグメントの挿入代を短くするとセグメント組立時におけるセグメントの損傷、組立精度の低下等、覆工の品質に支障をあたえる可能性がある。さらに、継手の挿入角度を大きくすることや継手角度を設ける必要が生じ、Kセグメントの安定性を低下させる要因となる。このため、適切な施工性とKセグメントの安定性が確保できる挿入代となるよう十分配慮する必要がある。

#### (2)-6 RCセグメントの鉄筋量

RCセグメントの鉄筋量は、構造計算による許容応力度の照査のほか、セグメントの破壊形態や類似工事等のセグメントの設計実績も参考にして検討すること。

##### 【解説】

RCセグメントの鉄筋量は、一般にトンネル完成時における作用荷重に対する構造設計等で求めるが、施工時の影響も考慮する必要がある。しかし、施工時の影響は施工時荷重の大きさと作用状態、施工誤差等に影響され、設計では予測できない不明確な点もあるため、RCセグメントの鉄筋量および構造細目の決定にあたっては設計荷重に対する許容応力度の照査のみによらず、単純曲げの破壊形態が鉄筋の降伏よりもコンクリートの圧縮破壊が先行して発生する鉄筋量とならないことや、曲げひび割れ発生時に中立軸が極端に上がり背面コンクリートが急激に圧縮破壊する鉄筋量にならないことを確認するとともに、類似工事等のセグメントの最小鉄筋量、最大鉄筋量、主鉄筋最小径、鉄筋間隔等の実績も勘案して決定することが重要である。

#### (2)-7 RCセグメントのシール溝

RCセグメントのシール溝は、適切な位置、寸法・形状とすること。

##### 【解説】

RCセグメントのシール溝は、シール材の界面応力により、セグメント端部に欠けやひび割れが生じる可能性がある。とくに、水膨張性シール材を採用する場合には、セグメント組立後の膨張圧の影響等によりセグメント端部に損傷を与える可能性がある。

このため、シール溝の位置や寸法・形状およびシール材の形状・種類を検討し、セグメントが損傷せず、十分な止水効果が得られる仕様にしなければならない。

## (2)-8 シールドジャッキ偏心量の影響

セグメントの設計にあたっては、テールクリアランスの影響を考慮してシールドジャッキ偏心量の影響に対する安全性の検討を行うこと。

### 【解説】

セグメントの設計にあたっては、シールドテール内でのセグメントリングの偏りを考慮し、シールドジャッキの偏心量にテールクリアランス分の誤差を加味して、RCセグメントでのひび割れの発生、鋼製セグメントにおけるトンネル軸方向の座屈に対する安定を検討する必要がある。とくに、セグメントの厚さが薄い場合には重要である。また、セグメント幅が広い場合には、セグメント厚さが薄いことの影響が顕在化することが考えられるため十分注意して設計する必要がある。

## (2)-9 シールドの施工計画を考慮したセグメントの設計

セグメントの設計にあたっては、シールドの施工計画を考慮して設計条件や照査項目を定めること。

### 【解説】

セグメントは施工中にジャッキ推力や裏込め注入圧等の荷重を受けるとともに、完成後の土圧、水圧等の永久荷重に抵抗するトンネルの主体となる構造物である。このため、施工時にセグメントに損傷を与えると長期的に主体構造物に求められる機能や性能の低下を招く要因となる可能性がある。また、シールドの施工においては変化する地質条件に適宜対応しながら、大きな土水圧、切削抵抗に対抗するためのジャッキ推力を取扱う必要がある。ジャッキ推力のセグメントに与える影響は大きく、シールドの推進にあたっては、シールドとセグメントの位置を適正な範囲に保つ必要がある。しかし、地盤状況の変化、シールド推進の制御方法等の影響を受けて適正範囲を超えることが少なからず生ずる。また、裏込め注入の実施時期を状況によって遅延せざるを得ない場合が生ずることもある。このため、シールドの施工時の地盤条件や施工の計画、施工時の状況を反映させたセグメントの構造設計とすることが施工時における不具合を避け、セグメントの損傷を防止するうえで、また、重大な事故を防ぐために重要である。

一方、工事实施にあたって施工計画を立てる場合は、設計条件に適合した計画にすることが必要である。このためには、下記に配慮することが重要である。

- ① 施工計画を立案する際、設計結果を反映した施工計画が行えるよう、想定した施工条件を明示すること。
- ② 施工時には、セグメント設計時に想定した施工条件を反映した施工計画を立案するとともに、施工上の留意点を周知すること。
- ③ セグメントの構造設計条件が、施工計画において設計時に想定した施工条件と異なる場合には、施工計画に合わせて適切に構造設計を見直すこと。
- ④ 施工中に不具合や施工計画と異なる状況が生じた場合は、原因の究明と設計に及ぼす影響を検討すること。

## (2) - 10 急曲線施工に対する対策

急曲線施工ではセグメントに局所的な施工時荷重が作用することがある。このため、セグメント本体や継手の損傷を防止するため、十分な対策を講ずること。

### 【解説】

急曲線施工におけるセグメントには、シールドジャッキの片押しや場合によってシールドテールでの競り等により、セグメントリングに大きな偏圧が作用するなど、局所的な施工時荷重が一時的に作用することがある。とくに、シールドテールとの競りやテールブラシへの裏込め注入材の侵入、固着によって、局所的な荷重や過度なセグメントの拘束力が発生する場合は、セグメント本体や継手部に損傷が生じている施工事例が多い。

このため、急曲線部では以下に留意することが必要である。

- ① セグメントは急曲線区間だけでなくその前後の区間においても大きな施工時荷重を受けることがあるため、急曲線区間を含む前後の一定区間においても適切なセグメントの構造・形式、幅・厚さ等の形状、および継手構造とする。
- ② 急曲線施工にあたって、シールドは高い操作性ならびに適切なテールクリアランスを確保し、シールド掘進時のシールドジャッキによるセグメントへの偏圧を防止するため、中折れ装置の採用とともにシールドジャッキのシリンダーの小型化や配置についても検討する。
- ③ 急曲線区間はシールドとセグメントリングとのずれやセグメントリングの変形により、テールブラシ内に裏込め注入材が侵入して固結しないように対策を検討する。
- ④ 急曲線区間で外径を縮小した鋼製セグメントを用いる場合は、テールシール内へ裏込め注入材が侵入しやすくなり、急曲線区間通過後のRCセグメントに対して局所的な施工時荷重が作用することによって損傷が生じることが考えられるため、その対策を十分に検討する。

## (3) シールドの設計

### (3) - 1 テールシール

テールシールは、トンネル通過地盤の土質条件や地下水位、間隙水圧等を総合的に検討し、十分な止水性が確保できるよう配慮すること。また、テール部のセグメントかかり代の設定にあたっては、地盤条件、セグメント幅、テールシールの取付け長さ、施工性および実績等を総合的に勘案して検討すること。

### 【解説】

テールシールは、シールドトンネルの施工期間にわたって地下水等のトンネル内への流入を防止するための性能を有し続けなければならない。

このため、テールシールは、トンネルの規模、延長、土被り、土質条件、地下水位、間隙水圧、トンネル線形等を考慮して設計し、とくに河川、海底横断の場合は十分な止水性が確保できる構造、機構、段数としなければならない。また、テールシールそのものの耐久性を考慮するとともに、テールシールの性能低下を防ぐために、適切なテールグリス材の選定とテールグリス圧の確保方法（給脂方法、管理方法等）についても検討する必要がある。

セグメントはテールを抜ける過程において、テール内部に位置するセグメントにはテールシールとテールグリスを介して荷重が作用し、テールから抜出たセグメントには裏込め注入圧、水圧等が複雑に作用する。これらの荷重が作用する状況によっては、トンネル全体の構造安定性に影響を与えることがある。このため、テール内のセグメントのかかり代の設定はセグメント設計における施工時荷重の考え方と整合を図り、セグメントに対して過大な荷重が作用する

ことのないよう、セグメントの幅とテールスキンプレート長、テールシールの取付け長さ（シール段数）等のバランスに配慮するとともに、施工性や実績を総合的に勘案して設計しなければならない。

また、セグメントの注入孔から注入を行う場合は、テールシールとセグメント裏込め注入孔との位置関係を考慮し、テール部セグメントのかかり代をテール部まで確実に裏込め注入が行えるように設計する必要がある。

### **（３）-２ スクリューコンベヤからの噴発防止**

**スクリューコンベヤからの噴発防止対策について十分検討すること。**

#### **【解説】**

土圧式シールドの排土機構であるスクリューコンベヤは、地下水がシールド内へ噴発しないようにチャンバー内の土圧を保持するための重要な設備である。

このため、地下水圧、掘削地盤の透水性、土質性状等に基づき二次スクリューコンベヤの必要性等も考慮し適切なスクリューコンベヤを選定する。また、止水性等の圧力保持能力の確保に課題が残る地盤条件や、トンネルがおかれている諸条件によっては、排土口への緊急遮断装置等の緊急時対策や掘進中の停電時に備えた噴発防止対策を検討する必要がある。

### **（３）-３ 形状保持装置**

**形状保持装置の検討にあたっては、覆工の規模だけでなく、セグメント継手の締結力の有無等に配慮すること。**

#### **【解説】**

セグメントは正確に組立てなければ、次のセグメントの組立が困難になるばかりか、テールを抜出した後に地盤によってはリングの変形を助長する恐れもある。この傾向はとくにセグメント継手に締結力を有さない場合に顕著となる。

新規に組立てるセグメントリングは、既設のセグメントリングに倣って組まれるため、既設のセグメントリングの組立精度の影響を受ける。一方、既設のセグメントは、新規のセグメントの組立のためにシールドジャッキを解放することによって変形することがある。このため、裏込め注入によりセグメントの形状が固定されるまで、形状保持装置を設け組立精度を確保することがある。

形状保持装置の検討にあたっては、セグメント継手に締結力を持たない自立性の低いセグメントを使用する場合には、トンネルの規模、地盤条件、施工方法等に配慮して、その設置の要否の判定を慎重に行う必要がある。

### **（３）-４ 電気設備、油圧設備**

**シールドトンネル内の電気設備、油圧設備は、緊急時にも問題が生じないように計画すること。**

#### **【解説】**

出水やセグメントの大規模な損傷等の緊急事態が生じた場合にも、電気設備、油圧設備は正常に機能することが求められる。しかし、緊急事態においてはその影響を受けることが避けられない場合もある。したがって、通信機能、制御機能の途絶やジャッキ圧力の低下等緊急事態の対応に大きな影響を与える設備については、バックアップ機能や油圧回路の独立性を高めるなど影響を最低限に留めるようにする必要がある。

### (3)-5 シールドジャッキ

シールドジャッキとスプレッダーの偏心量によるジャッキロッドの変形に対する安全性を確認すること。

#### 【解説】

一般的に、セグメントへの偏心作用荷重を小さくするため、スプレッダー中心とジャッキの中心を偏心させ、セグメント中心にスプレッダーをあわせる場合が多い。この時、ジャッキロッドには、その偏心分の曲げ荷重が作用して変形しやすくなるため、シールドジャッキとスプレッダーの偏心量によるジャッキロッドの変形に対する安全性を確認する必要がある。

とくに、セグメント幅が広い場合にはジャッキロッドもそれに伴って長くなり、また、セグメント厚さが薄い場合にはジャッキのロッドを細くすることがあることから、ジャッキロッドの変形に対して十分に注意しなければならない。

### (4) シールド工事の施工計画

#### (4)-1 突合せ継手の使用

セグメントに締結力のない継手を採用する場合は、形状の保持に努め、とくに漏水等の原因となるリング継手の目開きや目違いが生じないように配慮すること。

#### 【解説】

セグメントの組立に際しては目開きや目違いを原因とした漏水が発生しないように努めることが重要である。

とくに、セグメントに締結力のない継手を採用する場合は、形状の保持に努めて漏水等の原因となる有害な目開きや目違いが生じないように配慮することが重要である。また、Kセグメントの挿入時に滑剤を使用する場合は、セグメント継手面の摩擦力が低下し、セグメントの拔出しに対する抵抗力が低下することに注意する必要がある。セグメント継手面の摩擦係数については、シールド材の貼付、滑剤の塗布等、実際の施工に応じた状態での既往の試験結果に基づいて設定するか、実際の施工に応じた状態での摩擦試験を行い、設計結果の確認をすることが重要である。

#### (4)-2 セグメントの組立とシールドジャッキ操作

セグメントの組立は、“たれ”ができるだけ生じないようにすること。Kセグメントを押さえていたジャッキの引抜き操作は特に慎重に行うこと。また、セグメント組立時のシールドジャッキの解放パターンは組立中のセグメントリングの安定性を十分検討したうえで選定すること。

#### 【解説】

セグメントに“たれ”等施工誤差による変形を要因とした損傷が生じないように、組立には高精度で慎重な作業が要求される。とくに、Kセグメントに隣接するBセグメントは寸法も大きく、リング上部にあるため、“たれ”を生じやすいので注意が必要である。Kセグメントの挿入時にBセグメントを拘束しているジャッキを解放する場合は、ジャッキの解放の影響を検討し、慎重な作業に努める必要がある。

セグメントの組立効率を向上させる目的で、セグメントを軸方向に固定しているシールドジャッキの解放範囲を必要以上に大きくすると、シールドの後退やリング継手の目開き、セグメントの“たれ”が生じる可能性があるほかシールドの姿勢が大きく変化する可能性があり、注

意が必要である。

#### (4)-3 裏込め注入工

裏込め注入はセグメントが早期に安定するように、テールボイドへの確実な充填をすみやかに実施すること。また、裏込め注入工の施工管理は、注入圧と注入量で行うこと。

##### 【解説】

裏込め注入工は、セグメントを固定し、地山の緩みと沈下を防ぐとともに、セグメントからの漏水防止、セグメントリングの早期安定やトンネルの蛇行防止等を図るために、すみやかに行わなければならない。

裏込め注入はシールドの掘進と合わせて実施する同時注入、または、掘進後すみやかに実施する即時注入を採用することが一般的である。セグメントの設計においては、裏込め注入材がテールボイドに速やかに充填され、セグメントを早期に安定させることを前提としている。このため、実施工においては設計の前提条件を踏まえテールボイドへの確実な充填を早期に実施することが求められる。

一般に裏込め注入工の施工管理方法は、注入圧管理によるものと注入量管理によるものがあるが、どちらか一方だけでは正確な充填状況を確認するのが難しい。このため、両方法を併用することで総合的に管理することが望ましく、実施工においては初期段階に注入量、注入圧の設定値を試行し、注入効果および地上、近接構造物等への影響を確認のうえ、裏込め注入工の施工管理値を決定する必要がある。また、地盤条件の変化、余掘りの状況等を考慮して、一定の区間ごとに確実に充填されていることを施工管理データ等で確認し、その結果を施工に反映させることが望ましく、注入量、注入圧が施工前の想定と大きく異なる場合は、直ちに原因を究明し、必要な対策を検討・実施することが重要である。

#### (4)-4 シールドトンネルの浮上り

施工時には、テールボイド内におけるセグメントリングの浮上りに対して、セグメントの継手や裏込め注入方法を適切に選定し、施工時の安全性を確保するとともに、トンネルの浮上りについての確認を常に怠らないこと。

##### 【解説】

施工時に裏込めの注入時期が遅れると、テール脱出後のセグメントリングがテールボイド内で浮上り、セグメント本体および継手部に過大な力が作用する可能性がある。このため、シールドの掘進と同時あるいは直後の裏込め注入の実施に努めるとともに、テールクリアランスの計測や坑内測量の結果等からトンネルの浮上りが生じていないかを確認し、浮上りによるリング間のずれ等のトンネルの安全性に関わる問題が生じないように留意することが重要である。

施工設備等の関係で早期の裏込め注入ができない場合には前述した現象を十分に考慮したうえで、セグメント本体および継手構造の設計を行う必要がある。

#### (4)-5 切羽圧力の管理

切羽圧力が急激な変動があった場合は、直ちにその原因を究明し、適切に対応すること。

##### 【解説】

シールド工法は、土砂の取込み過多やシールド前面の圧力変化によって切羽のバランスを失うと、地盤変位（地表面沈下・隆起等）を引き起こす可能性があるため、切羽圧力の管理は適

切に行わなければならない。

切羽における掘削土の状態を直接見ることのできない密閉型シールドでは、切羽圧力、排土量、シールド負荷（シールドジャッキ推力、カッタートルク等）を計測することで、施工中の切羽の状態を間接的に確認している。とくに、切羽圧力に大きな変化が確認された場合は、シールド施工になんらかの異常があった可能性を示すものと考えることができる。

このため、切羽圧力の常時計測管理を行い、急激な変動があった場合は、重大な事故につながらないように、ただちに原因を究明し、適切な対応を迅速に行う必要がある。

また、土圧式シールドにおいては、切羽圧力はシールド機停止状態の圧力を最低値として、掘進による変動を考慮して安定した状態を保っていることが切羽圧力の管理において重要であり、排土量が多すぎると掘進中に停止時の切羽圧力を下回ることがあるため、切羽の安定を確保するうえでも切羽圧力の変動に十分に留意する必要がある。

#### （４）-６ 線形管理

線形管理は、要求される線形の誤差の範囲に収まるよう的確に実施する必要があるとともに、線形管理に問題が生じた場合は、急激なシールドの姿勢の変化や過大な余掘りを避け、計画的かつ緩やかに行うこと。

##### 【解説】

シールドの線形管理は、トンネルの使用目的や用地条件等によって求められる精度が異なるのが一般的である。一方、シールドは極めて大きな質量を持つ機械であり、地盤条件の変化やシールドの‘くせ’等によって、計画通りのトンネル線形からずれることがあり、適宜、蛇行修正を行うこととなる。

このとき、急激な蛇行修正を行うと、過大な余掘りやシールドジャッキの片押しを行うことによって、セグメントに損傷を与える原因となる。さらに、シールドのテールとセグメントとのクリアランス（テールクリアランス）が不足し、セグメントリングに偏荷重が作用することも考えられる。

また、急曲線施工においては、シールドが計画線形に沿って円滑に掘進することができるようにコピーカッター等を用いて適切な余掘りを行うことが重要である。余掘りが過大な場合には周辺地盤に変状を生じさせる原因となり、過小な場合にはシールドの姿勢制御が困難になることやジャッキ推力が増大すること等によってセグメントに損傷を与える原因となる。

近年、硬質地盤での工事が増加しているが、硬質地盤ではあらかじめシールドが通過する形状に合わせて、コピーカッター等を用いて地盤を掘削しておく必要があり、線形形状と掘削軌跡を３次元で把握し、精度の高いシールドの推進を行う必要がある。このためには、可視化やシールド推進の自動化等より高度な手法が必要である。また、シールドの高速化が進んでいるが、高速化されたシールドでは、より速やかな対応が必要であり、各種の機械データを含めて迅速に総合的な判断、運用ができるシステムを構築することが望ましい。

#### （４）-７ テールグリスの管理

テールからの漏水や裏込め注入材の侵入を防止するため、テールグリスは、適切な材料を使用して、掘進前にテールブラシに確実に充填するとともに、掘進中はその量と圧力を適切に管理すること。

##### 【解説】

テールシールの止水性を確保するためには、適切なテールグリス材を使用し、掘進前に十分な量を確実にテールブラシに練り込むように充填するとともに、掘進中はテールグリスをテールシール内に封入し、その圧力を適切に管理することによって地下水や裏込め注入材の侵入を防止することが重要である。このとき、テールグリスの圧力は地下水圧や裏込め注入圧より高く保たれることが必要である。

小断面シールドで一般的に行われている、セグメント注入孔から断続的にテールグリスを補充する方法では、テールグリス圧力を常時モニターし管理することが難しい。したがって、自動給脂装置等の確実に圧力が保持できる装置を設けることが望ましい。

また、テールグリスの材質によっては裏込め注入材と反応して硬化する性質をもつものもあることから、テールグリスの材料選定にあたっては、裏込め注入材と混合した場合の反応を確認する必要がある。

#### (4)-8 排土量管理

掘削土砂の過取り込みは、周辺地盤を緩めてシールドの掘進制御を困難にすることにつながる。一方、取込み不足はジャッキ推力が上昇してセグメントに作用する施工時荷重が増大する。このため、掘進時の土砂の取込み量の管理を適切に行い、過取り込みや取込み不足を防止すること。

##### 【解説】

排土量管理はシールドの形式や掘削土の運搬方法によって適用可能な手法が異なるため、それぞれの施工設備に応じて適切に実施する必要がある。

掘削土の過取り込みが発生した場合、地表面沈下等の周辺への影響が大きくなるばかりでなく、シールドの切羽周辺の地盤を緩め、シールドの姿勢制御を困難にすることが想定される。一方、取込み不足が発生した場合には、ジャッキ推力が上昇しセグメントに作用する施工時荷重が増大することが想定され、セグメントの損傷要因となる。

このため、海底シールド等において周辺地盤の沈下が問題とされない場合においても適切な排土量管理を行うように努めなければならない。

とくに土圧式シールドでは、スクリーコンベヤの回転数によって排土量を管理する方法がとられることが多い。チャンバー内の掘削土の塑性流動化が適切に管理されて、安定した掘削が行われている場合には一定の精度を確保した排土量管理が可能である。しかし、地山条件は常に変化し、流動化の状態は変わるので、地山条件等に応じた補正が必要である。

このため、排土量の管理は、スクリーコンベヤの回転数のみに頼らず、他の方法と併用して、精度の維持に努めることが必要である。

#### (4)-9 シールドの姿勢制御

セグメントの線形とシールドの姿勢を常に監視し、セグメントとシールドのテールとの間に適切なクリアランスが確保できるように管理すること。

##### 【解説】

シールドの向きがセグメントの線形とずれることにより、テールクリアランスが均等でなくなりテールクリアランスに大小が発生する。テールクリアランスが極端に小さくなった側では、テール部でセグメントとの競りが生じ、セグメントリングに偏荷重が作用することとなる。この偏荷重は、一般的にセグメントの設計においては考慮されていない荷重であるため、セグメ

ントリングに過大な影響を与えないように施工管理しなければならない。

テール部に偏荷重が発生したことを想定した三次元の構造解析では、K セグメント周辺に大きな断面力が発生し、セグメントリングが不安定になる可能性が確認されている。このことから、セグメントリングに過大な偏荷重が作用しないようにシールドの姿勢を制御し、適切なテールクリアランスを確保できるよう管理する必要がある。

一方、掘削土の過取込み等によって周辺地盤を大きく乱した場合には、シールド周辺の地盤が不安定となり、シールドの姿勢制御に大きな影響を与えることが予想される。このような姿勢の変化に対して、シールドジャッキの操作（下方のジャッキを偏って使用することによってノーズアップを図る）によって姿勢を修正しようとした場合、トンネル下部のセグメントに、シールドジャッキの片押し推力が作用するとともに、トンネル上部のテールクリアランスが急激に減少して偏荷重が発生する可能性がある。したがって、急激な姿勢の修正を行わずに、掘進線形に合わせてセグメントリングを組立てながら徐々にシールドの姿勢と線形を修正することが重要である。

シールドの姿勢の管理に用いるピッチング計やローリング計等の計測機器の値は、誤差を含むことがあるため、データのキャリブレーションを行いその精度を維持する必要がある。そのため、測量と計測機器のデータの差に留意することが必要である。

#### (4) -10 施工管理全般

シールド工事の施工においては、常にシールドとセグメントの挙動や出来形に留意し、異常な現象が確認された場合には、その原因究明に努め、必要な対策を講じること。

##### 【解説】

シールド工事において、設計時に設定したシールドとセグメントの性能を適切に発揮させることが施工の安全性を保つために必要である。

シールドには多くの計測機器が設置され、逐次データが得られるのが一般的である。これらのデータを迅速に評価し、シールドのパフォーマンスを常時確認しながら施工することが重要である。セグメントについては真円度の測定結果のほかに継手の目開きや目違いの程度、コンクリートのひび割れや鋼材の過大な変形、漏水等が生じていないかを目視で確認することが重要である。

シールドやセグメントに異常が確認された場合には、ただちに施工を中断するなどの安全上の措置をとったうえで、その原因を究明することに努め、必要な対策を講じて施工を行う必要がある。

#### (4) -11 避難

漏水、出水等の工事上の不具合や異常事態が発生した場合における避難基準を定め、遅滞なく適切な避難が行えるようにすること。

##### 【解説】

地盤を対象とするシールドトンネル工事では、調査や条件の把握に限界があり、不測の事態が生ずることを避けられない場合がある。不具合や異常事態が生じた場合、修復、復旧に努める必要があるが、場合によっては、避難の機会を失うことになる可能性がある。したがって、あらかじめ避難すべき状況を定め、迅速な避難ができるように計画しておく必要がある。

## 6. おわりに

本協議会では、今回の事故を契機として、シールドトンネルの設計・施工技術について、安全面等からの向上を図るため、技術的な検討を行うこととして、議論を深めてきた。一方、議論においては、必ずしも技術面にとどまらない意見も数多くあったことから、今後のシールドトンネル工事における安全性の向上を図る上で参考とすべく、主な意見について、下記に示す。

- 1) シールドトンネルを計画し、円滑に完成させるためには、多様な技術基準に加え、技術基準に規定されていない事項について、受発注者双方が適時適切に仕様を決定していくことが基本となる。

このため、専門技術者がいない組織にあっては一定の技術力を有する組織への委託を行うことも視野に検討する必要がある。

- 2) 施工現場で生じているトラブルやヒヤリハットなどを公開することは、請負者にとって不利益になる恐れがあることから、トラブル等の事例は、表面化しにくいため、共有化ができず、設計や基準類に反映されにくい場合がある。しかしながら、これらの情報は非常に重要な情報となるため、現場で起きたトラブルやヒヤリハットを確実に共有できるしくみを構築するなど、重大事故の発生を未然に防止するための対応を行うとともに、その後の設計や施工に反映させられるように情報共有を図ることが重要である。

- 3) これまでのシールド工法の設計・施工に関する技術開発は、より高度な技術力を必要とする施工や特殊な条件下における施工を可能とする技術や施工の効率化等に寄与する技術等を中心に行われてきた。しかしながら、施工の安全性を向上させるための技術開発や施工管理手法に関する技術開発などは、課題として残されており、今後は、例えば、シールド施工時のデータの適切な活用やデータの可視化などに注力されることが求められる。

- 4) 今後、今にもまして世界的に都市化が進み、地下利用が進んでいくものと想定される。シールド工法は日本の誇る基本技術であり、現在も日々進歩している技術分野でもある。今後も、わが国がリードしてきた技術として継続的に研究開発が推進され、安全かつ信頼性を確保した上で、更なる発展を遂げていくべき技術である。