災害調査報告書

岡山県倉敷市内の海底シールドトンネル 建設工事中に発生した崩壊水没災害

平成 26 年 6 月



1. 災害概要	1-1
2.災害調査委員会の概要	2-1
 2.1 委員会の概要 	2-1
2. 2 委員名簿	2-1
3. 調査実施状況	3-1
4.当該工事の概要	4-1
4. 1 発注形態(設計施工一括発注方式)	4-1
4. 2 セグメントの設計について	4-5
4.3 シールドマシンについて	4-23
4. 4 本章のまとめ	4-34
参考文献	4-35
5. 災害発生までの経緯	5-1
5. 1 災害発生までの経緯	5-1
5.2 本章のまとめ	5-8
с	6-1
0. 火吉光王坑场の地員 6. 1 半該用提の地質の亦連	0-1 6-1
0. 「 当 政 玩 场 の 地 員 の 友 虚 6 2 海 庐 抽 般 調 杏	6-5
6.2 ※実務生用提付近から採取した試料の分析	6-41
	6-63
8.1 4 7 4 0 6 C 00 参考文献	6-64
7. 掘進管理システムのデータ分析	7-1
7.1 掘進管理システムについて	7-1
7. 2 シールドマシンの軌跡	7-14
7.3 災害発生時のシールドマシンの動き	7-20

7.4 本章のまとめ

7-34

8. 回収されたセグメントの破損状況調査及びセグメント及び 8-1 継手の強度試験 8.1 立坑及び海底地盤から回収されたセグメント 8-1 8.2 単体曲げ試験 8-57 8.3 リング継手に関する試験 8-70 8.4 コンクリート部分の物理試験 8-112 8.5 セグメント継手に関する摩擦係数確認試験 8-121 8. 6 K セグメントの抜け出しに関する検討 8-131 8.7 本章のまとめ 8-135 参考文献 8-137

9. 海底:	から回収されたシールドマシンの調査	9-1
9.1	シールドマシンの外観調査	9-1
9.2	テールブラシと固着物の調査	9-3
9.3	土砂採取場から採取した試料の分析	9-27
9.4	シールドジャッキの調査	9-31
9.5	本章のまとめ	9-34
参考文	献	9-35

10.災害発生原因推定のための数値解析シミュレーション10-110.1切羽圧低下に関する有限要素法解析10-110.2セグメントリング構造の崩壊に関する個別要素法解析10-1410.3本章のまとめ10-42参考文献10-43

11.災害発生に至るまでの崩壊メカニ	エズム 11-1
11.1 崩壊メカニズム	11-1
11.2 本章のまとめ	11-6
12. 推定される災害発生原因と再発防。	止対策 12-1

<u> </u>		10000日九王小西亡丹九的正月末	12 1
12.	1	推定される災害発生原因	12-1
12.	2	同種災害の再発防止対策	12-5

参考資料

1. 災害概要

(1)災害の種類

海底シールドトンネルの崩壊水没災害

(2) 災害発生日時

2012年2月7日正午12時30分頃

(3) 災害発生場所

岡山県倉敷市(図 1.1.1 参照)B工場~A工場を結ぶ水島海底シールドトンネル建設工事現場内

(4)所轄労働基準監督署

倉敷労働基準監督署

(5) 工事概要

工事名:第二パイプライン防護設備建設工事
 工事内容:全長約 790m、内径 4.5mの水島海底シールドトンネル建設工事
 工期:2010年8月1日~2013年6月30日
 契約方法:指名競争入札(技術提案型)価格競争方式
 (設計・施工一括発注方式)

(6) 被災状況

5名 (死亡)

(7)作業内容

B 工場敷地内の発進立坑から A 工場の到達立坑に向けてシールドマシンに より掘進し、セグメントの組立てを行う作業を 2011 年 12 月 8 日 (木) から開 始していた。災害当時、112 リング目(発進立坑から 160m 付近)を組み立てて いた。

(8) 災害発生状況

2012年2月7日の午前11時43分頃、発進立坑から160m付近までシールド マシンの掘進が終了し、同日の正午12時頃、112リング目(ここで「112R」と いう。)のセグメントを組み上げている時、出水が始まった。同日の正午12時 20分過ぎには、111R及び110Rのセグメントが崩壊、海水等が流入し、トンネ ルと立坑が海水面レベルまで冠水した。5名が行方不明となり、後日死亡が確 認された。1名は、水に浸かりながら自力で脱出した。



図 1.1.1 災害発生現場の位置

(海底地盤の窪みの位置(+):緯度 34°30′03.21″、 経度 133°44′29.21″)
 (出典:国土地理院地図(電子国土 Web):http://cyberjapan.jp/index3.html)

2. 災害調査委員会

2.1 災害調査委員会の設立趣旨

シールドトンネルに詳しい学識経験者等から構成する「岡山県の海底シールドト ンネル建設工事中に発生した水没災害に関する災害調査委員会」(以下,「委員会」 という。)を設置し,災害発生のメカニズム,災害原因等の検討を行うこととした。

2.2 委員名簿

- 今田 徹 東京都立大学 名誉教授 (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 (委嘱当時 京都大学大学院工学研究科 教授)
- 小西 真治 東京地下鉄株式会社鉄道本部工務部 土木担当部長 (委嘱当時 公益財団法人鉃道総合技術研究所構造物技術研究部 主管研究員)

事務局

独立行政法人労働安全衛生総合研究所 建設安全研究グループ

3. 調査実施状況

表 3.1.1 に現場等における調査及びセグメントの試験等の概要について示す。

年	月	調査概要
	2	立坑、中央管理室、現場事務所等の調査 立坑から引き揚げられたセグメントのボルト痕等の調査
	3	海底地盤調査
	4	立坑から引き揚げられたセグメント、機器等についての 実況見分及び水中カメラによる横坑内の調査への立ち会 い
9019	6	セグメント単体曲げ試験
2012	7	ボルト穴の内径計測、破断ボルトのレプリカ採取
	8	リング継手(ボルトインサート)の引抜き試験
	11	セグメント型枠、作製方法、仮組み、立坑から引き揚げ られたセグメントの寸法調査
	12	リング継手(ボルトインサート、ボルトボックス)の載 荷試験
	7	海底地盤から引き揚げられたセグメントの調査
2013	8	海底地盤から引き揚げられたシールドマシン及びセグメ ントの調査(テールブラシ、スキンプレート等の調査)
	10	海底地盤から引き揚げられたシールドマシン及びセグメ ントの調査(シールドジャッキ、ボルト穴の内径計測等 の調査)
	11	海底地盤から引き揚げられたシールドマシン及びセグメ ントの調査(ボルト痕、ボルト破断箇所等の調査)
	12	セグメントの設計方法に関する実況見分への立ち会い セグメント継手面の摩擦係数確認試験 (独立行政法人土木研究所との合同実施)

表 3.1.1 現場等における調査及びセグメントの試験等の概要

4. 当該工事の概要

4.1 発注形態(設計施工一括発注方式)

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

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

表 4.1.1 契約方法と契約条件

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

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

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

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

比較項目		逐項目	第一パイプライン ^{*1}	第二パイプライン*1
設計年 ^{*2}		十年*2	2000 年	2010 年
		内径	4500mm	4500mm
		外径	4950mm	4820mm
	半 半 基 半	分割数	6 分割 (5+K)	5 分割(4+K)
	件坦	幅	1200mm	1400mm
		厚さ	225mm	160mm
		セガメント問	ボルト継手構造	空合计继手構造
	継手		M22(8.8)	大日で極于何辺
	構造	リング間	ボルト継手構造	ボルト継手構造
) V / [F]	M22(8.8)	M16(8.8)
セ		挿入方向	軸方向挿入	軸方向挿入
グメ		挿入代	400mm	350mm
ン	Kセグ	中心角,	22.5° 971.9mm	27.69° 1164.8mm
トの	メント	外周寸法	22.5 971.91111	27.09 1104.0000
構		挿入角度	9.0°	9.7°
這		継手面角度	—	
	注	入孔構造	<i>ø</i> 62.3 × 2 箇所	<i>ø</i> 58 × 2 箇所
		径×本数,	D16 × 8 本,	D13×6本,
	主鉄筋	引張鉄筋比	p= 0.76%	p= 0.50%
		芯かぶり	50mm	51.5mm
		シール材		水膨張性
	シール	· · · · · ·		幅 13.5mm× 高さ 3.5mm
	構造	シール溝	幅 20mm × 高さ 2.3mm	幅 20mm× 高さ 2.3mm
		寸法と位置	外縁から溝中心	外縁から溝中心 37.5mm
			52.5mm	
セ	セメ	ントの種類		普通ポルトランドセメント
クメ	コン	クリートの	42 N/mm ²	45 N/mm ²
ン	設言	+基準強度		
アの		筋の種別	SD295A	SD295A
材		骨材,		粗骨材の最大寸法 20mm,
	7	< ランプ		スランプ 6±1.5cm
設			修正慣用計算法	
計	- - - -	设計手法	$(\eta = 0.8, \zeta = 0.3)$	はり-ばねモデル
一 件			(はりーばねモデル	による計算法
			で照査)	

	# #	土圧	ゆるみ土圧 (最小 2D かつ 200	ゆるみ土圧
	何里の		kN/m ² 以上)	(
	ちん刀	水正	$H_{w}=24.44m$	$H_w = 26.335 m$
		台形分布	台形分布	台形分布
	尚 時	荷重買及の	施工時シールド	 投錨時衝擊荷重
	市町,	両重以下の	旭上町 シート	・施工時シールド
	1町 -	里りろ思		ジャッキ推力
	土質	側方土圧係数	0.45	0.4
	定数值	地盤ばね	30 MN/m ³	40 MN/m ³
		セグメント継		99000~0 kN·m/rad
	継手ばね	手の回転ばね		(荷重偏心量に応じて)
	定数	リング継手の		$1.0 \times 10^{5} \text{ trN/m}$
		せん断ばね		1.0×10 km/m
セグメント防食,		シト防食,		
そ	防水	加工の有無		
\mathcal{O}	+	ガマント		『出荷する製品は、設計強度
他		シアマト		(材齢 14 日)以上に達したも
	①	21日刻		のとする。』とある。

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

*2 設計年は、セグメント設計図面の作成年月日を参照した。

*空欄は不明な箇所である。

*参考データとして、発進・到達立坑の内外径は以下のとおりである。

第一パイプライン発進立坑:内径 11500mm,外径 14700mm

第二パイプライン発進立坑:内径 11500mm,外径 14400mm

第一パイプライン到達立坑:内径 7500mm, 外径 9800mm

第二パイプライン到達立坑:内径 7500mm, 外径 9500mm

内径について、第一、第二パイプラインともに同等である。

外径について、第一パイプラインの方が大きく、第二パイプラインの立坑は薄肉になって いる。 表 4.1.3 第一パイプラインと第二パイプラインのシールドマシンの比較 (国土交通省『第2回シールドトンネル施工技術安全向上協議会』資料¹⁾に加筆修正)

比較項目		七較項目	第一パイプライン	第二パイプライン
		外径	5080mm	4950mm
		掘削外径		4970mm
		全長	7420mm	6958mm
		本体長さ	6500mm	6245.000
	寸法	(カッタ部除く)	050011111	034311111
		隔壁厚		
		スキンプレート厚	40mm	36mm
シ		テールプレート厚	12mm	12mm
 		テールクリアランス	25mm	29mm
ド	装備	1本当たり推力×本数	1500 kN × 16 本	823 kN × 26 本
マシ	推力	(総推力)	(24000 kN)	(21398 kN)
ン基本構造		詳細図	1200 935 265	1400
适	テール	段数	3 段	2 段
	シール		ワイヤブラシ	
		材質	(地山側1段はウレコ	ワイヤブラシ
			ンシール)	
		緊急止水装置	無	無
	形状			
	保持	有無	無	無
	装置			
			・シールド外殻の強度	
			計算	・カッタトルク検討
			・テール部の強度計算	• 推力検討
	シールドー	マシンの設計項目	• 所要推力計算	・スキンプレート強度
			・所要カッタトルク計	検討 (テール部)
			単いしまへのやき	
		7 川 - ウィンベマ	 ・ ・	毎(2mヵカリンン
	ー ヘン 取 /	/ ッユソコン ^ / / う ゴン - シン -	有 (アキュムレータ)	- トで対応)
その		テールボイド		
他	(3	ノールド外半径と	65mm	65mm
	セグァ	ペント外半径の差)		o min

4.2 セグメントの設計について

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

4.2.1 セグメント、継手及び部材の諸元について

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

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

土木学会発行『セグメントの設計【改訂版】~許容応力度設計法から限界状態設計 法まで~』¹⁰によると、標準的なセグメントの寸法を逸脱する場合には、「耐久性や 施工時荷重への対応等についても慎重に検討する必要がある」と記載されている。

衣 4.2.1	モクメン	イトの諸元 17

1 + 1 + 1 = 14

4	下径	φ 4, 820mm
Þ	可径	φ 4, 500mm
鳫	「さ	160mm
1	幅	1, 400mm
5.	了害」	5 分割 (4+K)
	セグメント間	コンクリート突合せ構造
継手構造	リング間	ボルト式継手構造 (継手金物露出部はガルバナイズド防食を実施)
コンク	リート	設計基準強度f ck=45N/mm ²
鉄筋		SD295A

セグメント厚/トンネル外径比(t/D)



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



セグメント幅/厚さ比 (W/t)

図 4.2.2 セグメント幅/厚比とトンネル外径の関係 (出典:事業者『セグメント組立て検討会』2011年12月7日¹⁷⁾) 当該工事のセグメント継手は、樹脂パイプのガイドのみのコンクリート突合せ構 造である。

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

表 4.2.2 に部材の許容応力度を示しているが、ボルトには M16(外径 16mm)を用いており、引張応力度は 290N/mm²であり、せん断応力度は 200N/mm²である。

コンクリートの設計基準強度は45N/mm²である。

	コンクリート	鉄筋 SD295A	ボルト M16(8.8)
圧縮応力度 (N/mm ²)	16	180	
引張応力度 (N/mm ²)		180	290
せん断応力度(N/mm ²)			200
コンクリートの記	设計基準強度 :	$\sigma \mathrm{ck} = 45$ (N/	$/mm^2$)

表 4.2.2 部材の許容応力度 14)

※投錨時荷重、施工時荷重に対しては、許容応力度の短期割増50%を考慮する。



図 4.2.3 セグメント構造図 (倉敷労働基準監督署に提出された『建設工事計画届』から)



図 4.2.4 セグメント継手及びリング継手の詳細図 (倉敷労働基準監督署に提出された『建設工事計画届』から)



図 4.2.5 A1 セグメントの構造図¹⁴⁾

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

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

土木学会が発行するコンクリート標準示方書【設計編】¹⁸⁾によると、『かぶりは、 コンクリート構造物の性能照査の前提である付着強度を確保するとともに、要求さ れる耐火性、耐久性、構造物の重要度、施工誤差等を考慮して定めなければならな い。ただし、かぶりは鉄筋の直径に施工誤差を加えた値よりも小さい値としてはな らない。』とある。ボルトインサートは鉄筋ではないが、鉄筋においてはコンクリー トの被りは鉄筋の直径以上なくてはならない。ボルトインサートも鉄筋と同様な考 え方をすると、ボルトインサートの直径以上のコンクリートの被りをもたなければ、 本来の付着強度を発揮しないと考えられる。当該セグメントにおいては、ボルトイ ンサートの直径 29mm に対して、コンクリートの被りが 25.5mm となっており、ボル トインサートの直径よりも被りが小さい。実際に、第8章8.3節で述べるように、コ ンクリートの被りの小さい方向にボルトインサートを載荷すると、ボルトのせん断 力(=ボルトの許容せん断応力度200 N/mm²× ボルトの有効断面積157mm²=31.4 kN) よりも小さい力(28.1kN)でボルトインサートがコンクリートから抜け出す。これは、 実際に期待している耐力よりも小さな荷重でリング継手が破壊することを意味する。 4.2.2 セグメントの構造設計法について

(1)はり一ばねモデル計算法及び継手について



図 4.2.6 はりーばねモデル計算法 14)

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

$k_{ heta} = rac{M}{lpha}$	
$=\frac{9a^2bE_0}{8}\cdot m\cdot (1-2m)^2$	
ここに、	
k _θ :回転ばね定数(kNm/rad)	
<i>M</i> :曲げモーメント	(kNm)
α: 回転角度	(rad)
m: 荷重偏心率 m= e/a= M/(N×a)	(-)
N: 軸力	(kN)
a: セグメント桁高	0.16 (m)
b: セグメント幅	1.4 (m)
For コンクリートのヤング係数	3.3×10^7 (kN/m ²)



図 4.2.7 回転ばね定数と荷重偏心率の関係¹⁴⁾

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

ここで、軸力が作用しない場合(N=0)、荷重偏心率 m= M/(N×a)は N に反比例す るので無限大に大きくなり、回転ばね定数は 0 となる。ただし、はり一ばねモデル 計算法では、回転ばね定数がたとえ 0 になったとしてもセグメント継手は離れるこ とはなく、回転に抵抗しないヒンジ点となるだけである。

したがって、はり一ばねモデル計算法でセグメントを設計する場合には、実物にお いてもセグメント間を締結することが望まれる。なぜなら、セグメント間を締結し ておけば、たとえ軸力が0になったとしても、セグメント継手が離れることはなく、 はり一ばねモデル計算法により近い形となるからである。締結力のないセグメント 継手では,施工過程において設計条件と異なる状況が生じた場合,軸力が小さく,曲 げモーメントが大きくなる状況等では,偏心が生じセグメントが不安定になる可能 性がある。

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

一方、リング継手のせん断ばね定数 kr及び k*は 1.0×10⁵ kN/m という値を用いている。図 4.2.6 からわかるように、リング継手は、セグメントリングが半径方向に縮む場合や伸びる場合に抵抗し、セグメントリングが横断方向にずれる場合にも抵抗する。しかしながら、K セグメントが抜け出すような、縦断方向への抵抗力ははり一ばねモデル計算法では考慮されておらず、そのような変形もはり一ばねモデル計算法では発生しない。ただし、後述するように当該災害では実際に K セグメントの抜け出しが発生し、災害の原因となっているものと推定される。

(2) 設計荷重について



図 4.2.8 全体縦断図及び設計断面選定位置¹⁴⁾

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

図 4.2.9 は設計断面①の設計土層断面を示す。同図の断面を選定した理由としては、『横坑全線において、2.0D₀(セグメント外径の2倍)のゆるみ土圧を設定しているため,作用土圧は等しい。したがって、作用水圧が最大となる発進立坑付近を常時荷重に対する設計断面とする。』とされている。

水深 Hwは 26.335m、土被り 2Doは 9.640m である。設計時に入力された土圧、水圧 を表 4.2.4 に示す。その他、自重反力及び地盤反力も設計時には入力されている。 自重反力はセグメントの体積に鉄筋コンクリートの単位体積重量 26.0kN/m³ を乗ず ることで算出する。

1 リング当たりのセグメントの重量 = $\frac{\pi \times (4.82^2 - 4.5^2)}{4} \times 1.4 \times 26.0 = 85.262 kN$ 1リング当たりに作用するセグメントの自重反力

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

地盤反力係数 K は土木学会が発行している『2006 年制定 トンネル標準示方書 シールド工法・同解説』¹⁹⁾を参考に 40MN/m³という値を用いている。地盤反力係数 とは、セグメントリングの半径が、セグメントの平均半径よりも大きくなる場合、そ の変位量に応じてセグメントリングの中心に向かって地盤から反力を与えるという ものである。

当該工事のはり一ばねモデル計算法において、セグメントリングは 209 個の節点 で構成されている。例えば、セグメントリングを構成するある節点の中心からの距 離(半径)が 2.43m となったとき、2.43-[(2.41+2.25)/2]=0.1 m の変位量が発生するた め、その地盤反力は、40 MN/m² × 0.1 m= 4.0 MN/m となり、その節点をセグメント リングの中心に向かわせるような反力が発生する。



図 4.2.9 土被りと水深 14)に加筆

			荷重値		
項目		単位	m当り	リング 当り	
頂部鉛直土圧	pe1	kN/m ²	86.76	121.46	
底部鉛直土圧	pe2	kN/m ²	37.11	51.95	
項部側方土圧	qe1	kN/m ²	34.70	48.58	
底部側方土圧	qe2	kN/m ²	52.05	72.87	
頂部水圧	pw1	kN/m ²	271.25	379.75	
底部水圧	pw2	kN/m ²	320.90	449.26	
底部水庄	pw2	kN/m ²	320.90	449. 20	

pe2 pw2

pg

表 4.2.4 設計における土圧と水圧 14)

(3) 断面力について

はり一ばねモデル計算法にて算出された曲げモーメント、軸力、せん断力をそれぞれ図 4.2.10 に示す。



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

表 4.2.5 セグメント及びセグメント継手の最大断面力一覧

6	- 1	1.1 -	24	
	2.4	100	3.64	10
100	× 1	1.14	D 1	3

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

継手部

項目	単位	最大曲げ位置	最大せん断位置
曲げモーメント M	(kN·m/Ring)	16.2	16. 2
軸力 N	(kN/Ring)	1127.7	1127.7
せん断力 Q	(kN/Ring)	27.0	27.0

検討	位置		正最大的モーメン	曲げ ト位置	負最大 モーメン	曲げ ト位置	最大せん	新位置	
No	В	mm	1400		1400		1400		
断面寸法	h	mm	160		160		160		
	M	kN • m	28.7		-22.	1	1.2		
断面力	N	kN	1095.	1095.7		1219.7		1147.0	
(リング当り)	Q	kN	-0,6		1.7		32.4	5	
引張側有効高	d	mm	108.	5	108.5		108.5		
引張側鉄筋量	As	cm ²	7.60:	2	7.602		7.602		
圧縮側有効高	d'	mm	51.5	5 51.5		5	51.5		
圧縮側鉄筋量	As'	cm ²	7.60	2	7.60	7.602		7.602	
ヤング係数比	n	-	15		15		15		
	応力	1状態	全圧線	宿	全压制	宿	全圧縮 238.0		
	x	mm	157. ()	182.	6			
応力度	σс	N/mm ²	9.1	OK	8,7	OK	6.3	OK	
	σs	N/mm ²	全圧縮	OK	全圧縮	OK	全圧縮	ОК	
	το	N/mm ²	0.00	OK	0.01	OK	0.22	OK	
	σca	N/mm ²	16.0		16.0)	16.0)	
許容応力度	σ sa	N/mm ²	180.0)	180,	0	180.	0	
	τa	N/mm ²	0.74		0.74	1	0,74		

表 4.2.6 セグメントの応力度照査



As

×

C

P 4



表 4.2.7 セグメント継手の照査

項目		
曲げモーメント M	kN•m	16.2
軸力 N	kN	1127.7
偏心量 e	mm	14.4
圧縮力作用範囲	mm	196.9
圧縮力作用状態	-	全断面圧縮状態
縁圧縮応力度δc	N/mm ²	5.0
許容圧縮応力度δca	N/mm ²	16.0
判定	-	OK





図 4.2.11 リング継手の照査

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

しかしながら、リング継手の照査にボルトのせん断力を用いているが、第8章で 述べるように、ボルトのせん断力(31.4kN)を発揮する前にリング継手のボルトイン サートとコンクリートの被りが薄いため、コンクリートが剥離してしまう(28.1kN)。 はり一ばねモデル計算法から算出されるリング継手に発生する最大せん断力は 11.3kN であるから、設計荷重ではコンクリートも剥離することはないが、シールド マシンによる偏圧や裏込め注入材が未注入のセグメントについては過大なせん断力 も発生すると考えられるため、注意が必要な設計(コンクリートの剥離強度も考慮 すべき)となっている。 図 4.2.12 に示すように、ジャッキ推力についても圧縮応力度の照査が実施されて いる。コンクリートは、ジャッキ推力による圧縮応力に対して十分な耐力を有する ことが示されている。

ジャッキ推力がセグメント厚さの中心より内緑へ25.0mm 偏心したときの検討(図V-2.7)を行う。 ジャッキスプレッダーの当たる面積 Ao は $A s = B s \cdot h = 0.463 \times 0.160 = 0.074 m^2$ このときスプレッダーの当たる中心位置の周長Bsは $Bs = 2 \cdot \pi \cdot Rc / Nj - 1s$ $= 2 \cdot \pi \cdot 2.330 / 26 - 0.10$ オレッオー = 0.463断面2次モーメントI'は $I' = (B s \cdot h^3) / 12$ = (0.463 × 0.160³) / 12 $= 0.000158 \text{ m}^4$ Bs ジャッキ推力P = 823kN より 図V-2.7 ジャッキ推力に対する検討 コンクリートの最大圧縮応力度ocは $\sigma c = P / A s + (P \cdot e \cdot 0.5 \cdot h) / I'$ $= (823 \times 10^{3} / 0.074 \times 10^{6}) + (823 \times 10^{3} \times 25 \times 0.5 \times 160) / 0.000158 \times 10^{12}$ $= 21.5 \text{ N/mm}^2 \leq \sigma \text{ ca} = 16 \times 1.5 = 24.0$ (OK)

ジャッキ推力に対する検討結果を表V-2.9に示す。

項目		単位	諸元値
セグメント内経	Di	m	4.500
セグメント外径	Do	m	4.820
桁高	h	m	0.160
セク・メント幅	В	m	1.400
ジャッキ推力	Р	kN	823
半径	Rc	m	2.330
ジャッキ本数	Nj	本	26
スプレッダー間距離	Is	m	0.100
中心位置周長	Bs	m	0.463
断面積	As	m2	0.074
断面二次モーメント	I'	m4	0.000158
ジャッキ偏心量	е	m	0.025
発生応力度	σс	N/mm^2	21.5
許容値	σca	N/mm^2	24.0
判定			0. K.

表 V-2.9 ジャッキ推力に対する検討結果

図 4.2.12 ジャッキ推力に対する検討

4.3 シールドマシンの設計について

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

当該災害に関係するシールドマシンの主な仕様は以下のとおりである。

- ・スキンプレート外径 4950 mm
- ・スキンプレート本体長さ 6345 mm
- ・テールシール ワイヤブラシ 2段
- ・テールクリアランス 29 mm
- ・シールドジャッキ 823 kN × 1900 mm ストローク × 26 本

4970 mm

- 掘削外径
- ・余堀り

(掘削外径 4970-セグメント外径 4820)/2=75 mm

表 4.3.1 シールドマシンの仕様

1.	シール	ド本	(体関係		
	(1)	ス	、キンプレート外径		φ 4950 mm
	(2)	ス	キンプレート本体長さ		6345 mm .
	(3)	テ	ール部板厚		36 mm
	(4)	テ	ール部内径		φ 4878 mm
	(5)	テ	ール部長さ		2885 mm
	(6)	テ	ールクリアランス		29 mm
	(7)	テ	ールシール		ワイヤブラシ 2段
	(8)	中	折れ装置		無し
	(9)	分	割		11 分割
2.	推進装	置			1
	(1)	N	ールドジャッキ	823kN	× 1900mストローク × 26本
	(2)	切	羽単位当り推力		1112 kN/m
	(3)	3	ールドジャッキ伸長速度		50 mm/min (全数作動時)
3.	カッタ	装置			
	(1)	力	ッタ装置		
		(a)	支持方式		センタシャフト
		(b)	カッタヘッド外径		φ 4940 mm
		(c)	掘削外径		ϕ 4970 mm
		(d)	カッタヘッド形式	*	スポークタイプ
		(e)	回転方向		左右両回転
	2	(f)	駆動方式		油圧モータ駆動
		(c)	回 転 数 常用最大時	ŕ ·	1. 0 min-1
		(d)	装備トルク 常用最大時	ŕ	2 2 1 7 kN·m ($\alpha = 18.3$)
	(2)	才	ーバカット装置		
		(a)	形 式		コピーカッタ
		(b)	装備数		1 基
		(c)	オーバカット量		50 mm (スキンプレートからの出代)
		(d)	作動方式		油圧式

4. I	こレクタ	7装置	
	(1)	型式	門型
	(2)	回転数	1. 0 min-1
	(3)	回転角度	左·右 210°
	(4)	押込力	138 kN
	(5)	吊上力	94 kN
	(6)	昇降ストローク	500 mm
	(7)	回転取扱質量	約 2300 kg
	(8)	グリップスライド量	500 mm
	(9)	サポートジャッキ	有
	(10)	操作方式	無線/有線
5.ス	クリコ	ウコンベヤ	
	(1)	型式	リボンスクリュウコンベヤ
	(2)	トラフ内径	ϕ 710 mm
	(3)	スクリュウ径 軸径 φ	230 mm 外径 φ 700 mm
	(4)	スクリュウピッチ	600 mm
	(5)	スクリュウ長さ	約9250 mm
	(6)	駆動方式	油圧モータ駆動
	(7)	回転数	$0 \sim 7.5$ min-1
	(8)	装備トルク	75.3 kN·m
	(9)	装備数	1 基
	(10)	排土量	79.0 m³/h (効率100%時)
	(11)	排土ロゲート	有

6. パワーユニット

		電動機		油圧ポンプ			
用	途	出力	電圧	吐出量 L/min	圧 力 MPa	台 数	備考
カッタイ	ヽッド	75	440×60	183	19. 1	4	
シールドミ	ジャッキ	22	440×60	31. 3	34. 3	1	
エレクタ、コと	。一力ッタ	22	440×60	45	20.6	1	共用
スクリ	ュウ	75	440×60	242	14.7	1	
ゲー	۲.	15	440×60	35	13.7	1	

7. 油圧ジャッキ

名 称	推力 kN	本数	全推力 kN	ストローク	使用圧力 MPa	備 考
2 mill b 21 mut	000	26	91200	1000	2/ 3	
2-111 2 794	040	20	41090	1900	04.0	-
エレクタ昇降ジャッキ	69	2	138	500	13.7	
エレクタ摺動ジャッキ	39	1	39	500	13.7	
エレクタサホ ートジ ャッキ	25.4	4	25.4	60	9	
コヒ゜ーカッタシ゜ャッキ	156.8	1	156.8	65	13.7	
No.1ケ ートシ ャッキ	68.6	4	137.2	370	13.7	
No.2ケ ートシ ャッキ	107.8	2	215.6	385	13.7	

8. 油圧モータ

名 称	種類	出力軸トルク kN・m	出力軸回転数 min-1	使用圧力 MPa	台 数	備考
カッタヘッド	フ゜ランジ ャ	46.7	6	19.1	8	
エレクタ	ア ランジャ	14.7	9. 3	20.6	1	
スクリュウ	フ° ランジ ャ	46.9	46.9	14. 7	2	

9. 計装装置

項目	走 壁	装備数	備考	
ビッエンガローロンガキ	電気式	1		
ビップシッローリンク前	下げ振り式	1		
土圧計 (チャンパー内) 電気式		2		
シールドジャッキストローク計	電気式	3	上左右	
コピーカッタストローク計	流量積算式	1		
レシュート たまし	流量積算式	1	1次ゲート	
9-FXFU-91	電気式	1	2次ゲート	
油圧計	電気式	4		
	ブルドン管式	5	i.	
カッタ回転計	電気式	1		
スクリュウ回転計	電気式	1		

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

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

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



図 4.3.1 シールドマシンの設計図(側面図)



図 4.3.2 シールドマシンの設計図(前面、後面図)
表 4.3.2 シールドマシンの仕様(設計図から引用)

Maria (M	Ð	<u>- // ト 4 14</u>
<u>9</u>	径	4950 mm
全	長	約 9755 mm
シール	ド本体長さ	6345 mm
シールドジャッキ		823 kNx 1900mms tx 34. 3MPax 264
離推力	x推進速度	21398 k Nx 50 ^{m m} /m 1 n
切羽単位	立 百艘当推力	1112kN/#
117-	电动模	22kwx4Px440vx60Hzx1台
ユニット	油圧ポンプ	31.3 l/m1nx34.3MPax1台

		<u> </u>
٥	転数	1.0 min ⁻¹
۲	N 9	(常用最大)2217kN·m (α=18.3)
汨	近モータ	46.7kN·m x 19. 1MPa x 8台
パワー	電動	表 75kwx4Px440vx60Hzx4台
ユニット油圧ポンプ		ブ 183 l/m1 nx 19. 1MPa x 4台
리》	Þ y ±	156.8kNx65mm ^{s t} x13.7MPax14
カバワ)- 電動機 ^{、ット} 油圧ポン	エレクタ用パワーユニットと共用

		I V 2 9			
₽	式	門 型			
٥	転数	1. 0 m i n ⁻¹			
吊り荷重		約 2300k g f			
油圧モータ		14.7kN·m x20.6MPa x1台			
パワー	电勤機	22kwx4Px440vx60Hzx18			
ユニット	油圧ポンプ	45 l/minx20.6MPax1台			
昇降	ジャッキ	69. 0kNx500mm ^{s t} x13. 7MPax2本			
摺動ジャッキ		39. OKNx500mm ^{s t} x13. 7MPax1本			
サポー	トジャッキ	25. 4 kN x 60 mm ^{s t} x 9MPa x 4本			

		1		スクリュコンペヤ			
回転数			數	0~7.5 min ⁻¹			
羽根径Xビッチ		ピッチ	\$700mmxP600mm				
回転トルク		12	75.3kN·m				
	排土量		1	79 m ³ /h (100%效率時)			
15	ס-		動機	75kwx4Px440vx60Hzx1台			
ב	ニット	油	臣ポンプ	242 l/m l nx 14. 7MPa x 1台			
بر	234	"+ NO. 1		68. 6kNx370mm ^{s t} x13. 7MPax4本			
2	נאפוני		NO. 2	107. 8kNx385mm ^{s t} x13. 7MPax2本			
	-01/-	- [電動機	15kwx4Px440vx600Hzx1台			
F	עבבא		証ボンブ	35 1/m1nx13.7MPax1台			



図 4.3.3 発進立坑内でのシールドマシン組立状況



図 4.3.4 エレクター



(a) ワイヤーブラシ (新品)



(b) ワイヤーブラシの内板ばね(新品)



(c) テールシール部(2 段)

図 4.3.5 ワイヤーブラシとテールシール部(施工前)

4. 4 本章のまとめ

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

参考文献

1) 国土交通省:第2回シールドトンネル施工技術安全向上協議会資料

2)~13) 省略

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

5. 災害発生までの経緯

5.1 証言等から得られた災害発生に至る時間経緯

証言等から得られた災害発生に至る時間経緯を表 5.1.1 に示す。

時刻	①立坑からの脱出者か	②地上クレーンオペレ	③土砂運搬者からの調	④事業者の機電担当者	⑤事業者による PC デ
	らの調査結果	ータからの調査結果	查結果	からの調査結果	ータの分析結果
11:30			事業者の工事事務所で	事業者の工事事務所で	
~11:40頃			打ち合わせ	打ち合わせ	
11:40 頃			打ち合わせ終了	職長が工事事務所に来 たので、事業者の所長, 副所長,他2人ととも に打合せ	
					11:45 まで 112 リング
11:45頃			現場に戻り、休憩所で		掘進
			昼休憩		11:48 A2セグメント
					組立て開始
11:55 頃				打合せ終了。事務所で	11:55 A2セグメント
			職長も休憩所にいた。	昼食。職長現場に戻る。	完了。A1 セグメント組 立て開始
	トンネル (構坊) の中か				12:00 A1セグメント 完了。B1セグメント組 立て開始。
止牛ころ	ら「ドーン」という大き				12:06 B1セグメント
	な音。(正午前あたりの				完了。 19:00:00 Do セガインノ
	時間帯だと思う)				12:06:09 B2 セクメン ト組立てのため シー
					ルドジャッキ引き抜き
					開始。

表 5.1.1 災害発生までの経緯

時刻	①立坑からの脱出者か	②地上クレーンオペレ	③土砂運搬者からの調	④事業者の機電担当者	⑤事業者による PC デ
	らの調査結果	ータからの調査結果	查結果	からの調査結果	ータの分析結果
	音の直後、立坑下の警 報設備から「ピピピ」という電子音。 背中を土砂で汚したシ ールドオペレータが立 坑まで走ってきて立坑 下の電話をかけ始め た。内容聞き取れず。 シールドオペレータ, エレベーターで地上へ 行った。	立坑下の警報ブザーが 「ビービー」と鳴る。地 上立坑脇は鳴らず。(正 午過ぎだと思う) シールドオペレータが 立坑下の電話をかけた が地上立坑脇の電話は 鳴らなかった。 シールドオペレータ, エレベーターで地上に 上がってきた。 シールドオペレータ、 職長が休憩所の近くで 話をしていた。 2人は立坑へ。	シールドオペレータ、 休憩所に来て職長と何 か話をし、2人一緒に休 憩所を出て行った。		切羽土圧急激に低下。 何らかの浸水が始まっ たと思われる。 12:07:13 切羽土圧計 測不能。(切羽漏電)

時刻	①立坑からの脱出者か	②地上クレーンオペレ	③土砂運搬者からの調	④事業者の機電担当者	⑤事業者による PC デ
	らの調査結果	ータからの調査結果	查結果	からの調査結果	ータの分析結果
	シールドオペレータ、				
	職長, エレベーターで				
	立坑下へ降りてきた。2				
	人はトンネル (横坑)の				
	中へ。				
	, ,				
	途中で職長からセグメ				
	ントを上げるよう指示				
	される。				
	その指示を地上の地上				
	クレーンオペレータに				
	伝えようと電話したが				
	つながらず。			職長から、携帯に電話	
<u>12:17(</u> 着信履歴)	エレベーターに乗ろう			が入った。10 秒くらい	
	としていた作業員 A に			通話。聞き取りにくく、	
	伝言。そのとき作業員A			正確には聞き取れず。	
	はエレクターが埋まっ			「ブレーカー」、「漏電」	
	ていることを述べた。			と言っているように思	
	切迫した様子ではなか			えた。	
	った。			-	

時刻	①立坑からの脱出者か	②地上クレーンオペレ	③土砂運搬者からの調	④事業者の機電担当者	⑤事業者による PC デ
	らの調査結果	ータからの調査結果	查結果	からの調査結果	ータの分析結果
	トンネルの中から職長 が「逃げろ」と切迫した 声で叫んだ。 作業員 B は、逃げろと いう声を聞いた後、な ぜかトンネルの中に走 って行った。 らせん階段で地上に駆 け上がった。すぐに足 元から水が押し上げられるよ うに立坑入口へ。	「ドーン」という大きな 音。今度は「ド、ドド、 ドーン」というものす ごい音。 立坑まで走っていっ た。立坑の半分まで水。 みるみるうちに水が上 がってきた。南方向へ 逃げた。	「ドーン、ドーン」とい う大きな音が 2 回連続 して鳴った。地面の揺 れを感じた。音は地中 からと思った。(午後 12 時 20 分頃ではないかと 思う)	着信から2、3分後に職 長へ確認の電話を入れ た。電波状態は悪くな く、普通に話ができた。 現場にいけばいいのか とたずねると、そうだ との職長から返答あ り。自転車で立坑に向 かう。	12:23:49 PC の通信 接続が切れた。以後デ ータ取得されず。この 時点までトンネル内の 水位は 1.25 メートル以 下と推定。

時刻	①立坑からの脱出者か	②地上クレーンオペレ	③土砂運搬者からの調	④事業者の機電担当者	⑤事業者による PC デ
	らの調査結果	ータからの調査結果	查結果	からの調査結果	ータの分析結果
		土砂ピットで水に追い つかれた。休憩室まで 逃げた。			
<u>12:25(電話発信記録)</u>		休憩室で土砂運搬者に 事業者の人に電話する ように頼んだ。(午前12 時30分ぐらいだと思 う)	地上クレーンオペレー タがかなりあわてた様 子で「山が落ちた。元請 けに電話してくれ」 <u>所長あて電話した</u> 。 休憩所の外に出ると中 央管理室の小屋の方か ら「ピーピー」という電 子音。		
		立坑までもどると水が ひいていた。			

時刻	①立坑からの脱出者か	②地上クレーンオペレ	③土砂運搬者からの調	④事業者の機電担当者	⑤事業者による PC デ
	らの調査結果	ータからの調査結果	查結果	からの調査結果	ータの分析結果
		水面近くのらせん階段	事業者の機電担当者が	立坑に到着したとき、	
		に立坑からの脱出者が	自転車で、続くように	立坑の周囲は水浸し。	
		座っているのを発見。	所長が自動車で立坑に	立坑は2~3m下まで	
		立坑からの脱出者を休	到着。	水でいっぱい。	
		憩室へ。			
		また立坑へもどり、だ			
		れか出てこないか見て			
		いた。			
12:29:57					12:29:57 PC の電源 喪失。管理室の床が浸 水したと思われる。
					12:23~12:29の間に 大規模な出水が生じた と思われる。

5.2 本章のまとめ

(1)本災害発生日当日2012年2月7日の正午頃、トンネル内から「ドーン」という大きな音があり、それ以降、作業員の動きが慌ただしくなっていた。

(2) 同日午後 12:23 分頃,「ドーン、ドーン」という大きな音が 2 回連続して鳴 り、トンネル内に水が流入した。

(3)同日午後12:29分頃、トンネル内に流入した水は、一度立坑から溢れた後、立 坑をほぼ満水にした。

6. 災害発生現場の地質

6.1 当該現場の地質の変遷

倉敷市地域は近世以降さかんに干拓が行われた地域である。江戸時代から明治時代にかけて倉敷,玉島地域の干拓事業が進められ,陸域が急速に拡大していった。水島地域はその干拓地を流れていた東高梁川の河口部にあたる。この東高梁川が廃川となった旧河床が,昭和18年に飛行機工場建設のために埋め立てられたが,これがその後の広大な水島工業地帯に発展した埋立地の造成の始まりとなった(倉敷市コンビナート防災審議会・倉敷市消防局,1995)。

図 6.1.1 は水島地域の地形区分図である。同図中に示した赤線及び赤丸が当該工事である トンネル(横坑)と発進到達立坑の位置である。発進到達立坑は,埋立地にあたる。

同図中には、埋立地の他、山地、沖積低地、干拓地の領域を記載している。山地は干拓 が行われる前まで島であったことが分かっている。平野は沖積低地、干拓地、埋立地に区 分できるが、沖積低地は干拓以前から陸地であった地形で、小規模な谷底平野と、海浜か らなる。海浜の部分も小規模であるが、後浜の微高地が残っている。

干拓地はかつて干潟であった場所を,堤防によって海水を遮断して陸地化したものであ る。標高は0~1mと低い。干拓後から大正の河川改修までの間,東高梁川が連島から水島 港へ流れていた。その流路付近には自然堤防による微高地が形成された。埋立地は工場建 設を目的に太平洋戦争中から造成が始まった。浅海であった土地が盛土によって埋め立て られ,標高 4m ほどの陸地が形成されている。限られた地域ではあるが玉島では江戸時代 の埋め立てによって造成された土地がある。

鈴木¹⁾は、水島地域の地層を3層に区分している。砂層及び泥層(C及びD層),砂及 び泥層(B層),礫層(洪積層)である。沖積層基底面は、砂及び泥層(B層)と礫層(洪 積層)の境界である。図 6.1.2(a)に沖積層基底の等深線図を示す。当該工事のトンネルは水 深約 23m の箇所を掘進することから、礫層(洪積層)に位置していたことがわかる。また、 同図(b)に表層地質図を示しているが、表層は砂層であることがわかる。

さらに、同図(a)の地質断面図(CD間)を見ると、図 6.1.3 のようになり、点線で示した 箇所が当該工事付近である。表層からの層順は、沖積層基底面までで①盛土、②砂層及び 泥層、③砂及び泥層、④礫層となる。また、当該工事付近の海底地盤の層順は、①砂層及 び泥層、②砂及び泥層、③礫層となる。

6-1



図 6.1.1 水島地域の地形区分図(鈴木茂之:倉敷市水島地域の沖積地盤地質,岡山大学地 球科学報告書 2006 年第 13 巻第 1 号, 2006.¹⁾に一部加筆)(赤線は当該工事のトンネルの 位置を示している。)



(a) 沖積層基底の等深線図

(b) 表層地質図

図 6.1.2 水島地域の沖積層基底の等深線図と表層地質図

(鈴木茂之: 倉敷市水島地域の沖積地盤地質, 岡山大学地球科学報告書 2006 年第13 巻第 1号, 2006.¹⁾に一部加筆) (赤線は当該工事のトンネルの位置を示している。)



図 6.1.3 水島地域の沖積層の地質断面図

(鈴木茂之: 倉敷市水島地域の沖積地盤地質, 岡山大学地球科学報告書 2006 年第13 巻第 1号, 2006.¹に一部加筆) (青線は当該工事付近である。)

6. 2 海底地盤調査

海底トンネル事故周辺における海底地盤の地形及び地質(地層)の状態を把握するため に船位測量、水深測量及び音波探査を実施した。また、海底地盤内の構造物(シールドマ シン又はセグメント)と事故時に発生した海底地盤の陥没部の位置も確認した。

調査海域は、岡山県倉敷市水島港東部海域であり、a)から d)までの 4 点で囲まれる海域である。

a) 緯度 34°29′59.2″ 経度 133°44′36.5″

b) 緯度 34°29′59.0″ 経度 133°44′26.7″

c) 緯度 34°30′08.1″ 経度 133°44′26.2″

d) 緯度 34°30′08.3″ 経度 133°44′33.6″ 調査内容を以下に示す。

(1) 船位測量(音波探査と同時に実施)

(2) 水深測量(音波探査と同時に実施)

(3) 音波探查

a) 音源:ブーマー

b) 受信器:マルチチャンネル(4ch:チャンネル間隔2.5m) 調査期間は、2012年3月17日~2012年3月18日である。

6.2.1 調査方法及び調査機器

本調査では、ブーマーを音源としたマルチチャンネル曳航式音波探査を実施した。調査 状況の写真を図 6.2.1 に示すとともに、以下に、調査範囲、船位測量、水深測量及び音波探 査について述べる。



図 6.2.1 調査状況

6.2.1.1 調查範囲

調査範囲を図 6.2.2 に示す。調査は、測線(ここでは「調査測線」という。)に沿って実施した。調査測線は、計 13 測線である。南北に NS-5 から NS+5 まで計 11 測線、東西に EW-1 と EW-0-2 の計 2 測線である。このうち、NS-0 は海底地盤の陥没部上を通ることを 意図した南北の測線であり、EW-0-2 は海底シールドトンネルの頂部上を通ることを意図し た東西の測線である。



図 6.2.2 調査範囲

6.2.1.2 船位測量

船位測量とは、船の現在の位置を平面直角座標第5系(世界測地系)により計測するこ とをいう。船位測量は衛星測位法の一種である GPS (Global Positioning System)により行 い、測定精度を上げるために海上保安庁のビーコン補正情報を使用したディファレンシャ ル方式 GPS (Differential GPS; DGPS)を適用した。

以下、測定方法及び DGPS 装置について述べる。

(1) 測定方法

GPS は、多数の人工衛星から発信される時刻信号から、各衛星と受信機との距離を求め て受信機の位置を測定する方法である。この方式は、通常の受信機の使用方法では±10m 程 度の測位誤差を伴うのが一般的である。このため、正確な位置座標が求められている陸上 基地局に GPS を設置し、陸上基地局の位置座標と GPS 測位による位置座標との比較を行 い、この情報を常時移動局(調査船)に提供し補正することにより、移動局の測位精度向 上を図る。

本調査では、海上保安庁が放送している DGPS 用の補正情報(ビーコン)を陸上基地局 からの情報として利用した。

(2) **DGPS** 装置

調査に使用した DGPS 受信装置は、DGPS 受信機(ビーコン一体型)、アンテナ及び誘 導用パソコンで構成されている。装置の配置は、アンテナを調査船の上空が開けた場所に 取り付け、その他の装置を操舵室に設置する。

調査船の船位データは時刻、X、Y座標(平面直角座標系第5系[世界測地系])、移動速度(船速)などからなり、船上の誘導用パソコンで処理され、調査船の誘導及びマルチチャンネル音波探査の発振制御に使用される。また、船位データは、船上の誘導用パソコンのハードディスクに1秒ごとに保存される。

DGPS の規格・性能を表 6.2.1 に、測定概念図を図 6.2.3 に、その構成図を図 6.2.4 にそれ ぞれ示す。

6-9

名称	規格・性能
DGPS 受信機 ・アンテナ (一体型)	Trimble EVEREST マルチパス低減技術 DGPS: 12ch L1 帯アンテナ ビーコン用 2ch 及び SBAS 精度:約1m (ディファレンシャルモード)
誘導用パソコン	CPU:1.50 GHz メモリ:1GB HDD:80GB
DGPS ビーコン局	位置:北緯 34°05′24″ 東経 132°59′29″ 送信周波数:321 kHz データ送信レート:200bps
イベント コントローラ (発振制御器)	出力 : リレー接点 チャンネル数 : 4ch

表 6.2.1 DGPS の規格・性能

GPS衛星(最低4個の衛星のデータを受信)



海上床英月100110周





図 6.2.4 DGPS の構成図

6.2.1.3 水深測量

水深測量とは、水深を計測することである。本水深測量は、音響測深法により音響測深 機(千本電気社製: PDR-1300)を使用して実施した。以下、水深測量の方法及び音響測深 機について述べる。

(1) 水深測量の方法

水深測量は、音響測深機の本体を調査船の観測室に、超音波の送受波器を調査船の舷側 に設置して行う。音響測深機は送受波器から超音波を発信し、海底面で反射して戻ってく る超音波を送受波器で受信する。受信された超音波は電気信号に変換され、発信してから 戻ってくるまでの往復時間に対応した海底面の起伏を記録紙上に連続的に描く。

音波の水中伝播速度は海水の温度、塩分濃度などに応じて変化するので、実際の水深は、 バーチェックによる実測水深と音響測深機が示す水深目盛との差によって補正される。本 調査で行った補正は、-1.0%である。

(2) 音響測深機

本調査で使用した音響測深機は、記録部とケーブルで接続された送受波器とで構成され、 このうち記録部は記録器と制御回路の機能を備えている。音響測深機の動作原理は次のと おりである。制御回路から送受信部の送信側に音波発生同期信号が送られると、所定の周 波数の持続時間を持つパルス波が発生する。このパルス波が送受波器の送信側で電気エネ ルギーから超音波に変換され、水中へ発信される。水中を伝播し海底面で反射して戻って きた超音波は、送受波器の受信側で受波され、再び電気エネルギー(信号)に変換される。 この信号は送受信部を通り、連続した海底面として記録器の記録紙上に表示される。

なお、本調査では深レンジを使用し、吃水は調査全体を通して 0.8m、紙送りは 40mm/分 とした。本調査で使用した音響測深機の規格・性能及び構成図は、それぞれ表 6.2.2 及び図 6.2.5 のとおりである。

6-11

名称	規格・性能				
記録器	最大可測深度:浅=125m、深=250m				
	精度:±(0.03+水深×1/1000)m				
	シフト:浅=15m、深=30m×8段				
	記録縮尺:浅=1/100、深=1/200				
	発信回数:浅=5回/秒、深=2.5回/秒				
	紙送り:40,60,80,120mm/分				
	*デジタル出力有り				
送受波器	周波数:200 kHz				
	指向角:半減全角 6°				

表 6.2.2 音響測深機の規格・性能



6.2.1.4 音波探查

音波探査とは、音波を利用して海底面、海底面下の地層、構造物の有無等を探査することをいう。本音波探査は、ブーマーを音源とするマルチチャンネル音波探査により実施した。

マルチチャンネル音波探査は、図 6.2.6 のように1つの音源から発振され海底下から反射 してくる音波を多チャンネルの受波器(ストリーマーケーブル)を利用して受信し、チャ ンネルごとにデジタル化(量子化)して収録パソコンに保存する。収録されたデータはコ ンピュータにより、S/N比(Signal to Noise ratio)の向上をはじめとする、様々なデータ処 理を行うことにより、高精度、高分解能のアナログ記録断面に変換される。

以下、探査方法及び装置の概要について述べる。



(1) 探查方法

調査は、音波探査装置の本体を調査船に設置し、それに連結する送波器及び受波器は船 尾から所定の距離及び深度で曳航して行う。調査船は速度を約3~4ノット(1.5~2.1 m/sec) に保ち、所定の間隔で音波を発振し、音波が海底面、地層境界などで反射して戻ってくる ところを受波器で捕捉しながら調査測線上を航行する。多成分の受波器で捕捉された音波 は、デジタル変換器(LX-110)によりチャンネルごとにアナログ信号がデジタル信号に変 換され、パソコンのハードディスクに所定のフォーマット(TAFFmat)で収録される。

調査時の品質管理は、最も音源に近いニア・チャンネル(1ch)をアナログ記録断面図と してモニターに表示するとともに、全トレースの信号波形を収録パソコンのモニター画面 上に表示させて行った。

なお、デジタル・マルチチャンネル方式は、共通反射点(CMP)重合を基本とするため に、船位及び発振間隔の精度が重要な要素となり、調査船の直線誘導及び等間隔での発振 は、誘導用のパソコン画面に表示される船位・船速を基にして、インターバルタイマーに よって制御した。表 6.2.3 に船速、発振間隔、探査深度の対応表を示す。水面からの探査深度の算出に当たっては、音速を 1500m/sec と仮定しており、発振点からの音波は地層境界等に反射して受信点にて受波されるまで往復の距離を伝播するため、探査深度はその半分となる。

本調査の観測条件は 2012 年 3 月 17 日に実施したテスト走航の結果により決定し、その 一覧表及び概略図は、表 6.2.4 及び図 6.2.7 にそれぞれ示すとおりである。発振間隔は、水 深が十数 m であること、モニター記録での反射記録の見え方等を考慮し 0.625m とした。 取得データ長は、次の発振までであるので調査時の船速によって可変であるが、データを SEG-Y (ファイル形式)変換する際、0.2sec (探査深度約 150m)で固定した。測点間隔は、 125m (約 200 ショット)とした。

船速		0.625m 毎発振	音速 1500m/sec		
		発振間隔	探查深度		
ノット	m/sec	sec	m		
3.0	1.54	0.40	304		
3.1	1.59	0.39	294		
3.2	1.65	0.38	285		
3.3	1.70	0.37	276		
3.4	1.75	0.36	268		
3.5	1.80	0.35	260		
3.6	1.85	0.34	253		
3.7	1.90	0.33	246		
3.8	1.95	0.32	240		
3.9	2.01	0.31	234		
4.0	2.06	0.30	228		

表 6.2.3 船速、発振間隔、探査深度の対応表

調査方式		ブーマー方式		
送	送波器	ブーマー		
波	(音源)	電磁誘導振動素子1個		
이더		送信電圧:3.55 kV		
	発振エネルギー	150 J		
	送波器の深度	0.3 m		
	発振間隔	約 0.625 m		
受	受波器の型及び素子数	压電型振動素子 5素子/ch		
波器	チャンネル数	4 ch		
ηц	チャンネル間隔	2.5 m		
	受波器の深度	0.5 m		
デ	収録時間	次の発振まで。		
ジタ		SEG-Y(ファイル形式)変換時に		
シル記録		0.2 sec でカット。		
	A/D 変換(量子化)	24 bit		
	サンプリング周波数	10,000 Hz		
モ	受信周波数	1,000 ~ 2,000 Hz		
ニター記録	記録掃引時間	0.1 sec		
	記録深度範囲	約 75m		
	記録方式	感熱紙		
	記録密度	100 Line/inch		
	有効記録幅	254 mm (10 inch)		
測点間隔		125 m (約 200 ショット毎)		
船速		$3 \sim 4 \nearrow $ (= 1.54 ~ 2.06 m/sec)		

表 6.2.4 観測条件一覧表



図 6.2.7 ブーマー方式マルチチャンネル音波探査の概略図

(2) 装置の概要

探査装置は、主に発振部、受信部及び記録部で構成されている。本調査で採用した探査 装置の規格・性能を表 6.2.5 に示す。また、装置の構成を図 6.2.8 に示す。装置の作動機構 の概要を以下に述べる。

(a) 発振部

本調査で使用した送波器(音源)は、ブーマーである。

ブーマーは電磁誘導振動式の送波器で、平面上のコイルに電流を一瞬流し、これに近 接して配置されている非磁性銅製円盤の反発作用により音波を発生させる装置である。 (b) 受信部

送波器(音源)から発振された音波は、海底面、地層境界面などで反射し、再び海面 付近に戻ってきたところを受波器(ストリーマーケーブル)で捕捉される。

ストリーマーケーブルの構成は、調査船側からストリーマーケーブルを水中に沈める 比重の大きいトーイングリーダー、音波を受波するアクティブセクション、ケーブル末 端コネクタの防水を兼ねるケーブルエンドセクション及び安全航行のためのロープと テールブイである。

ストリーマーケーブルで捕捉された反射波は、船上にある増幅器を経て、アナログ信 号とデジタル信号に分けて記録部で収録される。

(c) 記録部

記録部はデジタル変換器、収録パソコン、アナログ用受信器、モニター記録機等で構成されている。

デジタル信号は変換器を通して、入力した反射信号に増幅、エリアスフィルタ、A/D 変換などを施し、収録パソコンへ保存される。保存されたデータはデジタル変換器の所 定のフォーマット(TAFFmat)で収録されるため、調査終了後、SEG-Yフォーマット(米 国物理探査学会[SEG]のフォーマットの1つ)に変換し、再度ハードディスク、DVD-R 等に保存される。

アナログ信号はアナログ用受信機を通して、入力した反射信号に増幅、フィルター等 を施し、モニター記録機に出力される。

	名称	規格・性能			
発 送信機		方式:電磁誘導方式			
振		送振出力:50~350J(50J毎に調整可能)			
니디		高圧直流電圧:2.5~3.9 kV			
		コンデンサー容量:48 µF			
		高圧開閉回路:SCR			
		使用電源:AC 200-240 V, 45-65 Hz			
		消費電源:平均 2.0 kVA			
	送波器	方式:圧電磁誘導モノパルス方式			
		送信出力:最大 300 ジュール			
受	ストリーマ	チャンネル数:4ch			
信	ケーブル	チャンネル間隔:2.5 m			
니니		素子数:5素子(GeoSpace MP-18-200)			
		感度:42 volt/bar			
	増幅器				
	(プリアンプ)				
デ	デジタル	量子化:16 or 24 bit			
シタ	変換器	入力チャンネル:32ch			
ル		サンプリング周波数:1.5 kHz~96 kHz			
記録	収録パソコン	CPU: 3 GHz			
部		メモリ:4GB			
		HDD : 500 GB			
		書き込みメディア:DVD-RAM			
モ 受信機 利得:100dB		利得:100dB			
ニタ		フィルター:20~15000 Hz(バンドパス)			
Ì		TVG:可			
記録		AGC:可			
部	記録機	記録レンジ:1/32~8 sec			
		記録幅:12.7 cm or 25.4 cm			
		記録方式:感熱方式			
		記録密度: 75, 100, 150, 200 本/inch			

表 6.2.5 音波探査装置の規格・性能



図 6.2.8 ブーマー方式マルチチャンネル音波探査の構成

(3) 計測されたデータの解析

(a) 計測されたデータの概要

本調査で取得されたデータは、船位測量データ(デジタル)、測深データ(デジタル・ アナログ)及び音波探査データ(デジタル・アナログ)である。これらのうち、船位測量 データ及び測深データのデジタルデータは、調査測線の開始から終了まで1秒毎に収録さ れている。

船位測量データは、平面直角座標系第5系(世界測地系)のXY座標であり、測深デー タは、基本水準面(CDL)から海底面までの水深である。基本水準面(CDL)とは、潮位の 基準面の1つで、その地点の平均水面から主要四分潮の半潮差の和だけ差引いた高さの仮 定の面であり、水深を表す基準として港湾ごとに運輸省令によって定められている。

音波探査データにおいて、発振点(ブーマー)と受信点(ブーマーに最も近いストリー マーケーブル内の 1ch)の船位測量が重要になる。図 6.2.9 に調査機器設置図を示す。同図 の GPS の位置から 26.2m 後方に発振点と受信点の中間点(CDP ポイント)がある。各測線 において 125m 毎の中間点(CDP ポイント)の XY 座標を表 6.2.6 に示す。また、図 6.2.2 に示した調査測線図の各測線は表 6.2.6 の XY 座標を基に描かれたものである。図 6.2.2 に も測点 1、2、3(測線 EW-1 については測点 4 まで、測線 NS+5-2 については測点 5 まで) をプロットしている。また、図 6.2.9 に示す PDR-1300 が音響測深機の位置である。



図 6.2.9 調査機器設置図

表 6.2.6 各測線における 125m 毎の発振点(ブーマー)と受信点(1ch)の中間点の XY 座標(世界測地系、平面直角座標第5系)

測点	1		2		3		4		5	
測線	x	Y	Х	Y	х	Y	х	Y	х	Y
EW-0-	-	-	-	-	-	-				
2	166145.44	54422.21	166144.31	54370.19	166144.17	54337.18	-	-	-	-
EW-1	-	-	-	-	-	-	-	-		
	166119.16	54428.15	166113.76	54373.01	166110.51	54317.79	166110.40	54313.32	-	-
NS 5	-	-	-	-	-	-				
113-3	166259.10	54399.68	166134.07	54405.50	166008.92	54410.16	_	-	-	-
NS-4	-	-	-	-	-	-	_	_	_	_
113-4	166258.20	54389.51	166133.18	54393.43	166008.09	54398.76	-	-	-	-
NS-3	-	-	-	-	-	-	_	_	_	_
	166259.43	54379.68	166134.39	54384.14	166009.18	54387.58	_		_	
NG 2.2	-	-	-	-	-	-	_	_	_	_
110 2 2	166259.79	54370.03	166134.87	54375.22	166009.73	54373.84				
NS 1	-	-	-	-	-	-	-	_	_	-
1.0 1	166259.11	54362.27	166133.84	54365.74	166008.89	54369.57				
NS-0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	166258.08	54348.49	166133.08	54354.34	166007.96	54360.78				
NS+1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	166258.02	54341.19	166132.94	54343.00	166007.79	54346.63				
NS+2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11012	166257.33	54333.37	166132.12	54333.56	166007.05	54338.06				
NS+3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	166256.68	54320.63	166131.62	54322.99	166006.49	54327.18				
NS+4-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	166255.83	54311.13	166130.61	54314.78	166005.41	54317.30				
NS+5-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
110102	166255.52	54300.28	166130.52	54306.50	166095.47	54308.77	166040.59	54313.16	166005.33	54313.49

(b) 音波探査記録の波形データ処理及び解析断面図の作成

観測で得られたブーマー音波探査記録は、記録紙を媒体としたアナログ記録(モニター 記録)及び電子媒体(パソコンのハードディスク等に収録)のデジタル記録である。デジ タル記録は電子媒体のままでは解析できないため、データ処理を行いアナログ記録に変換 する必要がある。データ処理の方法については、朝倉(1982)²⁾が詳しい。地質構造解析に使 用する記録(解析断面図)は、データ処理により変換されたアナログ記録断面図(処理記 録断面図)である。

適用したデータ処理のフローチャート及びパラメータを図 6.2.10 に示す。

デジタル		処理項目	パラメータ		
記録	[1]	書式変換			
[1]書式変換	[2] ジオメトリの設定				
[3]トレース編集	[3]	トレース編集			
[4]振幅回復	[4]	振幅回復			
	[5]	フィルタ	Low-cut: 300 Hz		
[0] ワースウェーフレット デコンボリューション	[6]	ソースウェーブレット	Gap length : 0.6 ms		
[7]共通反射点ギャザー		デコンボリューション	Operator length : 25.6 ms		
[9]NMO補正	[7]	共通反射点ギャザー			
↓ [10]CMP重合	[8]	速度解析			
[11]水深補正	[9]	NMO 補正			
デコンボリューション →	[10]	CMP 重合			
[12]マルチチャンネル デコンボリューション	[11]	水深補正			
[13]帯域通過フィルタ	[12]	マルチチャンネル	Gap length : 0.4 ms		
[14]重合処理 断面図		デコンボリューション	Operator length : 6.4 ms		
	[12]	マルチチャンネル	Gap length: 1.6 ms		
		デコンボリューション	Operator length : 25.5 ms		
	[13]	帯域通過フィルタ	500 ~ 2000 Hz		
	[14]	記録断面図の表示	水平縮尺:16 Trace/cm		
			鉛直縮尺: 300 cm/sec (1:250)		

図 6.2.10 データ処理のフローチャートとパラメータ
6.2.2 調査結果

調査結果は6.2.2.1海底地盤の地形、6.2.2.2海底地盤の地質(地層)、 6.2.2.3トンネルの設計計画座標と音波探査結果の比較に分類し、それぞれについ て以下に示す。

6.2.2.1 海底地盤の地形(船位測量及び水深測量の結果)

水深測量によって得られた海底地形図を図 6.2.11 に示す。海底地形は、0.5m ごとの等深 線で表示している。また、色が濃くなるほど、水深が深いことを示している。なお、基本 水準面(CDL)からの水深に統一している。このために 10 分ごとの潮高を岡山県の管理す る水島港の検潮所から入手し使用している。さらに、各測線と測点もプロットしている。

調査海域は、N 桟橋の北側ドルフィン前面から西側に 100m、南北方向に 200m の範囲で、 水深は概ね 10.5m から 13.0m と全般に平坦な海域である。

同図において、測線 EW-0-2 と測線 NS-0 が交差するあたりに当該事故によって出来たと 思われるほぼ円形の陥没部(直径約 16m、海底面からの深さ約 3.8m)が認められる。陥没 部は、周囲から崩れ落ちた土砂、浮泥等が堆積し、事故発生直後より浅くなっている可能 性もある。

また、調査海域北側の海底地形は、第6号桟橋(8号、9号バース)に出入港する船舶 によると思われる地形の凹凸(比高約2.0m)が見られる。すなわち、出入港する船舶のス クリューによって、航路上は海底面が侵食され、航路の間は巻き上げられた土砂が堆積し ている。この傾向は桟橋近くで顕著であり、沖に向かって凹凸は小さくなる。



図 6.2.11 調査海域の海底地形図

6.2.2.2 海底地盤の地質(地層)(船位測量及び音波探査の結果)

処理記録断面図を解析し、音響層序区分を実施した結果、各測線の解析断面図が得られる。各測線の解析断面図を図 6.2.12~図 6.2.24 に示し、それらの図の凡例を図 6.2.25 に示す。縦軸は、発振点(ブーマー)から発振された音波が受信部に受波されるまでの経過時間を示しており、1 目盛が 0.01sec であることから、0.01sec × 1500m/sec ÷ 2=7.5m と基本水準面からの深さに換算することもできる。横軸は、発振点と受信点の中間点(CDP ポイント)の番号(約 0.625m 毎)を示しており、測点 1、2、3 の XY 座標(表 2.5.1)から横軸を平面直角座標第5系に変換することも可能である。

本海域に分布する地層は I 層から III 層までの 3 層に区分される。以下、各層の概要を述べる。

I層

全体的に反射面に乏しい白抜けの地層である。反射強度が弱いことから、層相は未固 結のシルト、泥または浮泥と想定される。層厚は約1~2mで、NS-5~NS-3測線の南部 及びEW-0-2、EW-1測線の西部では層厚が厚くなるが、これは水島航路の浚渫後、I層 が厚く堆積したためと思われる。

(2) II 層

上面の反射が非常に強く、内部に若干の水平層理を伴う地層である。上面の反射が非 常に強いこと及び事故直後に潜行したダイバーが陥没部の壁面にこぶし大の礫を確認 していることから、本層は礫層を主体としていると考えられる。層厚は変化に乏しく 5 ~10m である。本層内には、一部音波散乱層が含まれており、それより下位の情報を判 読できない。

(3) III 層

本調査の最下層で上面のみ確認でき、本層上面の直下に海底面及び II 層上面の強い 二重反射(疑似情報)が見られることから内部構造は不明である。上面は東西測線であ る EW-1 測線では所々強い反射を伴い比較的明瞭に見えるが、南北測線では若干不明瞭 であり、連続した反射面を判別することは難しい。内部構造が判読できないことから、 層相は不明である。また、本層の下限が判読できないことから、層厚も不明である。



図 6.2.12 測線 EW-0-2 における解析断面図



図 6.2.13 測線 EW-1 における解析断面図



図 6.2.14 測線 NS-5 における解析断面図













図 6.2.18 測線 NS-1 における解析断面図







図 6.2.20 測線 NS+1 における解析断面図







図 6.2.22 測線 NS+3 における解析断面図







図 6.2.24 測線 NS+5-2 における解析断面図



6.2.2.3 トンネルの位置

(1) 音波探査結果からわかるトンネルの位置

埋設トンネルは、音波探査記録上では円形の断面形状ではなく、回折波(双曲線状の擬 似反射面)として現れる(図 6.2.12~図 6.2.24 参照)。回折波は第1パイプライン付近、当 該事故が発生したトンネル付近の複数の測線で連続的に確認されたほか、さらに1箇所で 連続的に確認された。全体的に、回折波の明瞭な所(反射強度:強)と不明瞭な所(反射 強度:弱)がランダムに存在し、また、第1パイプラインとトンネルの回折波の幅に顕著 な差があった。

第1パイプラインにおいて、測線 NS-5~NS+5 の南北方向の全測線で回折波が確認できる。当該事故のトンネルにおいて、測線 NS-1~NS+5 (測線 NS+4 を除く)の6測線で回折 波が確認できる。このうち、顕著な反射が見られるのは測線 NS+1 である。海底下の深度 は6.2~10.6mで、第1パイプラインに比べて同じか少し深い傾向を示す。陥没部の中心で ある測線 NS-0 よりも西側 10m の位置にある測線 NS-1 でも回折波が確認できる。少なくと も海底面の陥没を引き起こした現象は切羽面の直上ではなく、より後方で発生したものと 推測される。

そのほかに連続する回折波が測線 NS-3~NS-1 の 3 測線で海底下約 7.6m に確認された。 この箇所に埋設されている構造物等の情報は無いので、回折波が連続して確認された原因 は不明である。

(2) 音波探査結果とトンネルの設計計画座標との比較

解析断面図から、NS-2-2 から NS+5-2 までの断面図を平面直角座標第5系に変換し、XY 座標でトンネルの回折波、第1パイプラインの回折波、トンネルの設計計画座標と比較し た結果を図 6.2.26、図 6.2.27 に示す。図 6.2.26 において、トンネル及び第1パイプライン の回折波は、それぞれの設計計画座標とほぼ一致しており、トンネルの位置の特定ができ ていることがわかる。また、図 6.2.27 から、地盤の陥没部の中心座標(X= -54353.02, Y= 166143.33)は切羽面より後方(発進立坑側)にあることがわかる。

また、解析断面図から、縦軸を基本水準面からの深さ、横軸を平面直角座標第5系に変換し、トンネルの設計計画座標と比較した結果を図6.2.28~図6.2.30に示す。

図 6.2.28 は測線 NS+3 (ほぼ 88 リングの横断面)を実測座標に変換したものである。同 図を見ると、トンネルの回折波頂部の座標は、Xssr=-166141.82、Yssr=-54322.79、 MPssr-19.8m であり、トンネル頂部の設計計画座標(Xssrd=-166142.2493、Yssrd= -54323.1220、MPssrd-22.9679m)との差はΔX= Xssrd - Xssr=-0.33m, ΔY= Yssrd - Yssr= -0.43m, ΔMP= MPssrd - MPssr=3.17m である。平面直角座標第5系の XY 座標の計測精度は ±1.5m 以内であるが、基本水準面からの深さの精度はそれ以下となっている。これは、基 本水準面からの深さの算出に当たって、音波が深さ方向に一定の速度 1500m/sec で伝播す ると仮定しているが、実際には音波がそれよりも早い速度で砂礫層を通過する。そのよう な仮定が深さの精度に影響を与えており、実際にはトンネルの回折波頂部の座標 MPssr-19.8m より深い箇所にトンネルが存在するものと考えられる。

図 6.2.29 は測線 NS-0(ほぼ 110 リングの横断面)を実測座標に変換したものである。同 図を見ると、トンネルの回折波頂部の座標 X_{110R}= -166144.51 は、陥没部の中心座標 X_f= -166143.33 よりも 1.2m ほど切羽から立坑を見て右側に存在する。

図 6.2.30 は測線 EW-0-2 (ほぼトンネルの縦断面)を実測座標に変換したものである。同 図を見ると、トンネルの回折波頂部の座標 Y_t= -54356.62 は、陥没部の中心座標 Y_f= -54353.02 よりも 3.6m ほど到達立坑側に存在する。トンネルの設計計画座標と比較すると、 陥没部の中心は、110 リングの直上に当たることがわかる。ただし、精度は±1.5m であるこ とと、1 リングの長さが 1.4m であることを考慮すると、110 リングの直上だと断定するこ とはできない。



世界測地系,平面直角座標(第5系) Y

図 6.2.26 世界測地系 [平面直角座標(第5系)] XY 座標における音波探査結果と当該事故のトンネルの設計計画座標との比較



世界測地系,平面直角座標(第5系) Y

図 6.2.27 世界測地系 [平面直角座標(第5系)] XY 座標における音波探査結果と当該事故のトンネルの設計計画座標との比較(拡大図)



図 6.2.28 測線 NS+3 における音波探査結果とトンネルの設計計画座標の比較



図 6.2.29 測線 NS-0 における音波探査結果とトンネルの設計計画座標の比較



図 6.2.30 測線 EW-0-2 における音波探査結果とトンネルの設計計画座標の比較

6.3 災害発生現場付近から採取した試料の分析

6.3.1 地盤材料の粒度試験

地盤材料は礫,砂など粗粒土からシルト,粘土などの細粒土まで様々な大きさのものが 入り交じって構成されている。このような地盤材料を構成する土粒子の粒径の分布状態を 「粒度」という。粒度は、土の物理的性質や力学的性質と密接な関係があることが知られ ており、各国にて基準化されている。図 6.3.1 に日本の土粒子の粒径区分とその呼び名を 示す。

日本では, 粒径 75mm 未満を対象とした試験方法として「土の粒度試験方法(JIS A 1204)」 があり³⁾, 粒径 75mm を超える石分を対象とした地盤材料の粒度を求める方法として「石 分を含む地盤材料の粒度試験方法(JGS 0132)」がある⁴⁾。細粒分から石分まで幅広く含む 当該採取試料では, 両者の試験を行い, 結果を組み合わせて粒度を示した。

				粒	拉径 (mm)						
0.0	0.0	975 O.:	25 0.	85 2	2 4.	.75	19	75	30	00	
* 는 그는	SZILA	細砂	中砂	粗砂	細礫	中礫	粗礫	粗石	(コブル)	巨石(ボルダー)	
			砂			礫			7	石	
細粒分		粗粒分							石分		

図 6.3.1 土粒子の粒径区分と呼び名

6.3.1.1 粒度試験方法の概略

(1) 石分を含む地盤材料の粒度試験方法(JGS 0132)⁴⁾

粒子径が 75mm 以上の石分を含む地盤材料の粒度を求める試験方法であり、粒径 75mm 未満の土質材料の粒度を求めるには後述する土の粒度試験方法(JIS A 1204)を適用する。

試験方法を図 6.3.2(上側)に示す。なお、本試験方法では、採取する試料の量を最大粒 径に応じて表 6.3.1のようにすることが規定されているが、海底下からの採取であり採取 した量が限定されていることから各ケース約 50kg の試料にて試験を実施している。

(2) 土の粒度試験方法(JIS A 1204)³⁾

高有機質土以外で、粒径が 75mm 未満の土を対象とした試験方法である。試験手順を図 6.3.2(下側)に示す。まず、試料を粒径により 2mm 以上と 2mm 未満の 2 つに分ける。粒 径 2mm 以上の土粒子は水洗いを行った後、ふるい分析を行う。粒径 2mm 未満の土粒子は 沈降分析を行った後、粒径 0.075mm 以上の土粒子を水洗いし、ふるい分析を行う。



図 6.3.2 粒度試験方法の手順(上側:石分を含む地盤材料の粒度試験方法,下側:土の 粒度試験方法)

試料の最大粒径 mm	試料質量 kg
300	750~1500
125	$100 \sim 200$

表 6.3.1 採取する試料の最小質量の目安(参考)

6.3.1.2 粒度試験結果

粒度試験結果を表 6.3.2~6.3.3 に,各ケースの粒径加積曲線を図 6.3.3 にそれぞれ示 す。ここで、均等係数と曲率係数は、土の粒度の広がりや形状を数値化したものであり、 均等係数は粒径加積曲線の傾きを表すもので、大きくなるほど粒径の幅が広いことを示し ている。細粒分 5%未満の粗粒土に対し、Uc≥10の土は「粒径幅の広い」といい、Uc<10の 土を「分級された」という。一方、曲率係数は、粒径加積曲線のなだらかさを表すもので、 U'cが 1~3 の場合に「粒径幅の広い」といえる。

粒度試験にて得られたこれらの結果は、後述する工学的分類や透水性の推定に用いる。

= -1 \/\/ ⊾т	材料種類	石分			 礫分				砂分		シルト分	粘土分		
訊科 NO.		%	巨石	粗石	%	粗礫	中礫	細礫	%	粗砂	中砂	細砂	%	%
1	土質材料	-	-	-	0				6.1	0.1	1.3	4.7	39.1	54.8
2	土質材料	-	-	-	22.5	11.6	8.6	2.3	12.0	3.2	5.0	3.8	22.4	43.1
	土質材料	-	-	-	80.1	44.9	27.7	7.5	17.2	5.4	10.4	1.4	2.	7
3	地盤材料	5.8	0.0	5.8	75.5	42.3	26.1	7.1	16.2	5.0	9.8	1.4	2.	5
	土質材料	-	-	-	68.6	41.6	21.8	5.2	20.4	6.4	10.2	3.8	5.2	5.8
4	土質材料	-	-	-	80.6	54.4	20.9	5.3	18.6	3.6	12.2	2.8	0.	8
4	地盤材料	4	0.0	4.0	77.4	52.2	20.1	5.1	17.8	3.4	11.7	2.7	0.8	
5	土質材料	-	-	_	79.1	46.2	26.5	6.4	20.2	8.1	11.2	0.9	0.	7
6	土質材料	-	-	-	78.0	42.0	28.3	7.7	20.5	7.2	11.6	1.7	1.	5
	地盤材料	2.7	0.0	2.7	75.9	40.9	27.5	7.5	19.9	7.0	11.3	1.6	1.5	
	土質材料	-	-	-	76.4	54.2	17.2	5.0	22.5	8.7	12.9	0.9	1.	1
/	地盤材料	1.9	0.0	1.9	74.9	53.2	16.8	4.9	22.1	8.6	12.6	0.9	1.	1
8	土質材料	-	-	-	81.1	43.8	29.5	7.8	18.2	6.8	9.7	1.7	0.	7
9	土質材料	-	-	-	78.1	47.0	24.3	6.8	21.0	8.5	10.6	1.9	0.	9
10	土質材料	-	-	-	88.9	53.9	29.2	5.8	10.9	5.1	5.5	0.3	0.	2
10	地盤材料	8.2	0.0	8.2	81.6	49.5	26.8	5.3	10.0	4.7	5.0	0.3	0.	2
11	土質材料	-	-	-	90.7	55.6	29.8	5.3	9.0	3.3	5.1	0.6	0.	3
11	地盤材料	7	0.0	7.0	84.4	51.7	27.7	5.0	8.3	3.0	4.8	0.5	0.	3
10	土質材料	-	-	-	89.1	62.1	23.7	3.3	10.5	3.2	6.5	0.8	0.	4
12	地盤材料	2.9	0.0	2.9	86.5	60.3	23.0	3.2	10.2	3.1	6.3	0.8	0.	4
12	土質材料	-	-	-	93.5	57.8	32.2	3.5	5.8	1.8	3.4	0.6	0.	7
13	地盤材料	1.8	0.0	1.8	91.8	56.8	31.6	3.4	5.7	1.8	3.3	0.6	0.	7

表 6.3.2 粒度試験結果一覧(その1 粒径区分毎の質量百分率)

(採取位置は図 6.3.8 のとおりである。)

表 6.3.3 粒度試験結果一覧(その 2 最大粒径,通過質量百分率,均等係数,曲率係数)

	++*1 4毛 米石	最大粒径	60%粒径	50%粒径	30%粒径	20%粒径	10%粒径	均等係数	曲率係数	土粒子の密度	使用した分散剤
武科 NO.	1/1 不补埋我	(mm)	D ₆₀ (mm)	D50 (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₂₀ (mm)	D ₁₀ (mm)	Uc	U'c	ρ_{s} (g/cm ³)	
1	土質材料	2	0.0063	0.0039	0.0013	-	-	-	-	2.645	ヘキサメタりん酸ナトリウム, 10ml
2	土質材料	53	0.025	0.0083	0.0020	-	-	-	-	2.653	ヘキサメタりん酸ナトリウム, 10ml
	土質材料	75	22	16	5.8	2.0	0.55	40	2.8	-	-
3	地盤材料	125	25	18	6.5	2.5	0.59	42	2.9	-	-
	土質材料	75	20	13	1.6	0.48	0.040	500	3.2	2.655	ヘキサメタりん酸ナトリウム, 10ml
4	土質材料	75	28	22	8.0	2.3	0.42	67	5.4	-	-
4	地盤材料	125	30	24	8.8	2.7	0.44	68	5.9	-	-
5	土質材料	75	232	17	6.1	1.8	0.70	33	2.3	-	-
6	土質材料	75	20	14	4.9	1.5	0.57	35	2.1	-	-
	地盤材料	125	21	15	5.2	1.7	0.59	36	2.2	-	-
_	土質材料	75	30	23	5.9	1.3	0.64	47	1.8	-	-
/	地盤材料	125	31	23	6.3	1.3	0.65	48	2.0	-	-
8	土質材料	75	21	16	6.3	2.3	0.73	29	2.6	-	-
9	土質材料	75	23	17	5.5	1.6	0.67	34	2.0	-	-
10	土質材料	75	27	21	11	6.1	1.6	17	2.8	-	-
10	地盤材料	125	31	24	12	7.0	1.9	16	2.4	-	-
11	土質材料	75	27	22	12	7.5	2.6	10	2.1	-	-
11	地盤材料	300	30	24	13	8.4	2.6	12	2.2	-	-
12	土質材料	75	32	26	15	9.0	1.6	20	4.4	-	-
	地盤材料	125	33	27	15	9.4	1.7	19	4.0	-	-
12	土質材料	75	25	22	15	10	4.8	5.2	1.9	-	-
13	地盤材料	125	25	22	15	10	5.0	5.0	1.8	_	-



(1) 試料 No.1



(2) 試料 No.2



(3) 試料 No.3



(4) 試料 No.4



(5) 試料 No.5





(7) 試料 No.7



(8) 試料 No.8



(9) 試料 No.9



(10) 試料 No.10



(11) 試料 No.11



(12) 試料 No.12



(13) 試料 No.13図 6.3.3 各採取箇所における試料の粒径加積曲線

6.3.2 地盤材料の工学的分類

地盤材料の観察による評価や、粒度、液性限界・塑性限界などの比較的簡単な試験の結 果に基づいて、地盤材料を工学的特徴の類似したグループに分類することを「地盤材料の 工学的分類」という。礫や砂などの粗粒分の多い材料の工学的性質は、粒度に強く依存し ている。一方、シルトや粘土などの細粒分の多い材料の工学的性質は、コンシステンシー に強く依存している。地盤材料の多くは、粗粒分と細粒分の両方を含んでいるので、粒度 とコンシステンシー限界に基づいて分類される⁵。

ここでは,採取した試料について実施した「石分を含む地盤材料の粒度試験」,「土の 粒度試験」,「土粒子の密度試験」(細粒分が多い採取試料)から地盤材料の工学的分類 を行った結果を示す。

6.3.2.1 工学的分類方法の概略

地盤材料は粒径によって図 6.3.4 に示すように岩石質材料,石分まじり土質材料,土質 材料に区分される。土質材料は,観察,粒度,液性限界・塑性限界等に基づいて分類する。



図 6.3.4 地盤材料の工学的分類

6.3.2.2 地盤材料の分類

(1) 地盤材料の分類体系

粒径 75mm 以上の石分を含む地盤材料は, 粒径によって図 6.3.1 のように粒径区分され, それぞれ呼び名が定められている。また地盤材料の工学的分類体系は, 図 6.3.5 のように定められている。



図 6.3.5 地盤材料の工学的分類体系

(2) 土質材料の大分類

粒径 75mm 未満の土質材料は、主に観察によって、粗粒分または細粒分の含有率、礫分 または砂分および有機物の多少、人工材料であるかどうかによって図 6.3.6 にしたがって 大分類される



図 6.3.6 土質材料の工学的分類体系(大分類)

(3) 土質材料の中小分類(粗粒土)

土質材料のうち粗粒土の工学的分類体系を図 6.3.7 に示す。礫質土は礫分が砂分よりも 多い土質材料であり、その分類は図 6.3.7 のように礫分、砂分および細粒分の含有率によ って礫 {G}、砂礫 {GS}、細粒分まじり礫 {GF} に中分類し、さらに細粒分、砂分の含 有率によって小分類する。砂質土は砂分が礫分よりも多い土質材料であり、その分類は図 6.3.7 のように礫分、砂分および細粒分の含有率によって砂 {S}、礫質砂 {SG}、細粒分 まじり砂 {SF} に中分類し、さらに細粒分、砂分の含有率によって小分類する。

6.3.2.3 地盤材料の工学的分類結果とボーリング調査結果との比較

採取地点毎の地盤材料について「6.3.1 地盤材料の粒度試験」にて得られた粒度 組成等から地盤材料を工学的に分類したところ,図6.3.8 のような結果となった。なお, 図6.3.8 左側には,鑑定嘱託書 I-2013-05 添付資料2 水島ルネッサンス計画ボーリング 調査工事報告書(抄)写し のボーリング柱状図(ボーリング名:JE.1,調査位置:岡山県 倉敷市潮通2-1)の土砂採取深度付近の土質区分,記事を併せて記載してある。このボーリ ング柱状図に記載されている土質区分は主に目視観察(一般的に体積混合比を反映してい るものと見られる)で判別しており,地盤材料の工学的分類と一義的に対応していない。 公益社団法人地盤工学会では,判別・分類指標の異なる両者の対応表として表6.3.4%のよ うなものを示しており,立坑でのボーリング柱状図とシールド機前面から採取した土砂の 傾向は概ね一致する。



図 6.3.7 粗粒土の工学的分類体系

深	鑑定嘱託	書別添資	資料2 ボーリング柱状図			
度 m -11.50	土質	区分	記事	試料No.	地盤材料の工学的分類名	
	砂 シハ	質 ノト	比較的均質。粘性中位。 所々シルトをブロック状に混入。 所々貝殻片を極く少量混入。 下部,砂分の含有多い。	1	砂まじり細粒土 (F-S)	
	砂	礫		2	砂まじり礫質細粒土 (FG-S)	
-14.79						
-15.14	玉石 し 砂	記じり <u>礫</u> /	φ2~70mmの亜円礫~亜角繰からなり,φ30 ~50mmの礫を主体とする。所々100~120mm 玉石混入。	3	粒径幅の広い砂質礫-R(GWS-R)/ 細粒分まじり砂質礫(GS-F)	
-15.94	玉石涯	見じり	φ2~70mmの亜円礫~亜角礫からなり、φ30 ~50mmの礫を主体とする。可φ100~120mm			
-16.64	<u> 砂</u> 砂	傑_/ 礫	玉石混入。 φ2~30mmの亜円礫~亜角礫主体	Λ	粒径幅の広い砂質礫-R	
-17.24	一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一	しり	♦2~50mmの礫混入。粒径均一。	т	(GWS-R)	
	<u></u>	/	- 4.9~50mm/21亜田遜~亜角礫主体			
-18.39		傑	マトリックスは細砂〜中砂。	5	粒径幅の広い砂質礫 (CWS)	
	矿少	礫	φ2~50mmの亜円礫~亜角礫主体。 マトリックスは細砂で若干細粒分を含有。	6 7	粒径幅の広い砂質礫-R (GWS-R) 粒径幅の広い砂質礫-R (GWS-R)	
				8	粒全幅の広い砂質礫 (GWS)	
-23.69	viela I de	110 10		9	粒径幅の広い砂質礫 (GWS)	
-24.24		もしり 一応	粒径均一。		粒径幅の広い砂まじれ離P	
		<u> </u>		10	他主袖の広くもなしり保て (GW-SR)	
	粘土 砂	粘土質 砂 一礫	↓2~30mmの亜円礫~亜角礫主体。 マトリックスは粘土質細砂~砂質粘土。	11	粒径幅の広い砂まじり礫−R (GW-SR)	
				12	粒径幅の広い砂まじり礫-R (GW-SR)	
-27.99	砂	礫	◆2~50mmの亜円礫~亜角礫主体。 所々細砂をブロック状に混入。	13	一 分級された砂まじり礫-R (GP-SR)	

図 6.3.8 採取地点毎における立坑のボーリング柱状図の土質記載箇所(左)と地盤材料 の工学的分類名(右)

	現場土質名	地盤材料の分類名					
大区分	小区分	大分類 中分類		中分類	小分類		
	玉石まじり礫 礫(粗礫・中礫・細礫)	粗粒土			礫 砂まじり礫		
	砂まじり礫			礫	粗粒分まじり礫		
	腐植物(貝殻・火山灰)まじり				粗粒分砂まじり礫		
磁所上	礫		磁啠十				
怵貝上	玉石まじり砂礫		陈貝上	石小龙舷	砂質礫		
	砂礫			1911	細粒分まじり砂質礫		
	粘土まじり砂礫			砂粒分まじり離	細粒分礫		
	有機質砂礫				砂まじり細粒分質礫		
	火山灰質砂礫・凝灰質砂礫			よしり傑	細粒分質砂質礫		
	砂(粗砂・中砂・細砂)				砂		
	礫まじり砂			石小	礫まじり砂		
	腐植物(貝殻・火山灰)まじり			119	細粒分まじり砂		
	砂				細粒分礫まじり砂		
砂質土	砂礫		砂質土	磁压动	礫質砂		
				땪貝切	細粒分まじり礫質砂		
	粘土まじり砂・粘土質砂			如此与人人	細粒分砂質		
	有機質砂			和私力	礫まじり細粒分砂		
	火山灰質砂・凝灰質砂			よしり119	細粒分質礫質砂		

表 6.3.4 地盤材料の分類名と現場土質名との対応 のを加筆修正
6.3.3 各採取地点毎の透水係数の推定

6.3.3.1 透水性の目安「透水係数」

土の透水性を表す目安として透水係数がある。透水係数は速度の次元を持ち,主に間隙の半径で代表される土の構造と間隙流体の粘性係数に支配される。図 6.3.9 に透水係数と地盤材料の大まかな区分を示す。礫の k=10⁰(m/s)程度から粘土の k=10⁻¹²(m/s)程度まで 10 の 12 乗ほどの広範囲にわたる⁷⁾。

1	0 ⁻¹¹ 10 ⁻¹⁰ 1	0 ⁻⁹ 10 ⁻⁸ 1	0 ⁻⁷ 10 ⁻⁶	10	-5 10-4	10 ⁻³ 1	0 ⁻² 10 ⁻¹	10 ⁰
透水性	実質上不透水	非常に低い	低い		中位		高い	
対応する 土の種類	粘性土	微細砂, 砂ーシルト	シルト, 一粘土混合土		砂およて	斥藥	清浄な礫	

透水係数 k (m/s)

図 6.3.9 透水係数と地盤材料区分

土中の間隙流体の流れが管中の流れで近似できると考えると,間隙比(間隙率)や粒子 の代表径と関連づけて透水係数の値を考えることができる。このような概念で多くの研究 者が透水係数の概略値の推定を行っている。ここでは,採取地点毎の採取試料の透水係数 について「6.3.1 地盤材料の粒度試験」によって得られた粒径加積曲線の通過質量 百分率の所定値に相当する粒径から透水係数の概略値を推定した。

6.3.3.2 透水係数の推定方法

透水係数を推定する方法として様々なものが提案されているが、ここでは以下の推定方 法について記載した。

(1) Creager (クレーガー) の提案表⁸⁾

(2) 工藤らの粗粒材を対象とした透水係数算定式⁹⁾

(3) 森田らの幅広い種類の土の既往試験結果に基づく透水係数算定式¹⁰⁾

以下、これらの推定方法について説明する。

(1) Creager (クレーガー)の提案表⁸⁾

クレーガーは代表径として、20%粒径 D₂₀ を用いて透水係数の概略値を求める表 6.3.5 を提案した。クレーガーの提案表は、D₂₀だけから透水係数を推定できることや、この表か ら指数関数の近似式で表記できるため、我が国の現場では多用されて現在に至っている。 このクレーガーの提案表は、特殊土の一つである均等係数の小さい「レス土」を含むアメ リカ合衆国中部にある 4 つのダムサイトにて実施された数百例の浸透試験結果から得られ た平均的な値であって、原文には「現場における極めて大まかな概算値を表す。密度、温 度あるいは間隙率の違いが透水係数には大きな違いになる」との断りがある。また、D₂₀が 2.0mmの細礫までが対象となっている点に注意が必要である。 今回各層から採取した試料の D₂₀ を見ると, 2.0mm 以上の試料も散見されるが, 指数関数式に代入し外挿することで透水係数を算出している。今回使用した式を下記に示す。

 $k = 0.0034 D_{20}^{2.2954}$

ここで, *k*:透水係数(m/sec)

D20:20%粒径

	TC of of				
D20(mm)	k (cm/sec)	土質分類	D20(mm)	k (cm/sec)	土質分類
0.005	3.00×10^{-6}	粗粒粘土	0.18	6.85×10^{-3}	微粒砂
0.01	1.05×10^{-5}	細粒シルト	0.20	8.90×10^{-3}	
0.02	4.00×10^{-5}	粗砂シルト	0.25	1.40×10^{-2}	
0.03	8.50×10^{-5}		0.3	2.20×10^{-2}	中粒砂
0.04	1.75×10^{-4}		0.35	3.20×10^{-2}	
0.05	$2.80 imes 10^{-4}$		0.4	4.50×10^{-2}	
0.06	4.60×10^{-4}	極微粒砂	0.45	5.80×10^{-2}	
0.07	$6.50 imes 10^{-4}$		0.5	7.50×10^{-2}	
0.08	$9.00 imes 10^{-4}$		0.6	1.10×10^{-1}	粗粒砂
0.09	1.40×10^{-3}		0.7	1.60×10^{-1}	
0.10	1.75×10^{-3}		0.8	2.15×10^{-1}	
0.12	2.6×10 ⁻³	微粒砂	0.9	$2.80 imes 10^{-1}$	
0.14	3.8×10^{-3}		1.0	3.60×10^{-1}	
0.16	5.1×10^{-3}		2.0	1.80×10^{-0}	細礫

表 6.3.5 クレーガーによる D₂₀ と透水係数

(2) 工藤らの粗粒材を対象とした透水係数算定式⁹⁾

工藤らは粗粒材を対象として粗粒材の透水係数に影響すると考えられる、粒度および密度に着目し、これらを変動要因とした透水試験を行い、粒径と間隙比から粗粒材の透水係数の算定法を検討した。実験式の同定には間隙比が考慮できる Poiseulle 式を採用して以下の式を提案した。

$$k = 0.406 \frac{\gamma_w}{\mu} \frac{e^3}{1+e} D_{30}$$

ここに, k: 透水係数

yw:水の密度(0.99910g/cm³) μ:水の粘性係数(0.0114dyn・s/cm²) e:間隙比(e=n/(1-n)) D₃₀:30%粒径 U_c:均等係数 (3) 森田らの幅広い種類の土の既往試験結果に基づく透水係数算定式¹⁰⁾

森田らは国内の約 200 個の室内透水試験結果とその土の粒度試験結果を用いて粒度特性 値と間隙率を加味した透水係数推定式を提案している。彼らが提案した式を下記に示す。

 $k = 0.052 (D_{30})^{1.5} U_c^{-0.8} n^{4.4}$

ここに, k: 透水係数

*D*₃₀:30%粒径

Uc: 均等係数

n:間隙率(%値の1/100)

上記に示したいずれの推定方法もかなりの推定誤差を伴うものとして認識されているこ とや,適用範囲が限定されていることに注意が必要である。また,(2)や(3)の透水係 数推定式では,試料の間隙率 n や間隙比 e が重要な要素となっている。しかし地層中の試 料の締め固まり程度は不明なことが多い。そのため一般的には透水係数のオーダーを決め る場合に利用されることが多い。当該鑑定では,立坑のボーリング調査の結果から相対密 度が「密な~非常に密な」結果であったことや,水理公式集より未固結地盤の有効間隙率 は表 6.3.6 のように示されていること等から,今回の透水係数の推定には,表 6.3.6 のう ち洪積砂礫層の有効間隙率 15~20 を参考として,n=10, 15,45 として検討を行った。

地層	間隙率	有効間隙率	地層	間隙率	有効間隙率
沖積礫層	35	15	洪積砂礫層	30	15~20
細砂	35	15	砂層	30~40	30
砂丘砂層	30~35	20	ローム層	50~70	20
泥粘土質層	45~50	15~20	泥層粘土層	50~70	5~10

表 6.3.6 有効間隙率の参考値(未固結地盤)¹¹⁾

6.3.3.3 各種推定方法から得られた透水係数

表 6.3.7 に各採取地点において推定された透水係数を一覧で示す。上記のように透水係数の推定には誤差を伴うものとして認識されているが、いずれの推定方法によっても、砂礫層の透水係数は $10^{-2} \sim 10^{3}$ (m/s)に位置し、粘土層の透水係数は $10^{-8} \sim 10^{-5}$ (m/s)に位置している。なお、(2)、(3)の算定式は間隙率に支配されるが、当該地盤は比較的密な地盤であることから間隙率 n は小さいことが想定されており、n=15 程度が妥当な値である。

試料	地盤材料の分類名	分類記	粒度物性值			推定透水係数 k (m/s)									
No.		号	20%粒径	30%粒径	均等係数	Creager	工藤ら	の透水係数算	算定式	森田ら	の透水係数算	氧定式			
			D_{20}	D_{30}	U_{c}	提案表		間隙率 n			間隙率 n				
			(mm)	(mm)	(mm)		10	15	45	10	15	45			
1	砂まじり細粒土	F-S	_	0.0013	-	_	$7.4 imes 10^{-8}$	2.8×10 ⁻⁷	1.8×10^{-5}	—	_	_			
2	砂まじり礫質細粒土	FG-S	—	0.002	-	_	1.8×10^{-7}	6.6×10 ⁻⁷	4.3×10^{-5}	—	_	_			
3	粒径幅の広い砂質礫・R	GWS-R	2.5	6.5	40	3.1×10^{0}	1.9×10^{0}	7.0×10 ⁰	4.5×10^{2}	1.8×10^{-2}	1.1×10 ⁻¹	$1.3 \times 10^{+1}$			
	細粒分まじり砂質礫	GS-F	0.48	1.6	500	6.3×10 ⁻²	1.1×10^{-1}	4.3×10 ⁻¹	$2.7 imes 10^{1}$	$2.9 imes 10^{-4}$	1.7×10 ⁻³	2.2×10^{-1}			
4	粒径幅の広い砂質礫・R	GWS-R	2.7	8.8	67	3.8×10^{0}	3.4×10^{0}	1.3×10^{1}	8.3×10^{2}	1.9×10^{-2}	1.1×10 ⁻¹	1.4×10^{1}			
5	粒径幅の広い砂質礫	GWS	1.8	6.1	33	1.4×10^{0}	1.6×10^{0}	6.2×10 ⁰	4.0×10^{2}	1.9×10^{-2}	1.1×10 ⁻¹	1.4×10^{1}			
6	粒径幅の広い砂質礫・R	GWS-R	1.7	5.2	35	1.3×10^{0}	1.2×10^{0}	4.5×10 ⁰	2.9×10^{2}	1.4×10^{-2}	8.5×10 ⁻²	1.1×10^{1}			
7	粒径幅の広い砂質礫・R	GWS-R	1.3	6.3	47	6.7×10 ⁻¹	1.7×10^{0}	6.6×10 ⁰	4.3×10^{2}	$1.5 imes 10^{-2}$	9.0×10 ⁻²	1.1×10^{1}			
8	粒径幅の広い砂質礫	GWS	2.3	6.3	29	$2.6 imes 10^{0}$	1.7×10^{0}	6.6×10 ⁰	4.3×10^{2}	2.2×10^{-2}	1.3×10 ⁻¹	1.7×10^{1}			
9	粒径幅の広い砂質礫	GWS	1.6	5.5	34	1.1×10^{0}	1.3×10^{0}	5.0×10 ⁰	3.2×10^{2}	1.6×10^{-2}	9.5×10 ⁻²	1.2×10^{1}			
10	粒径幅の広い砂まじり礫・	GW-SR	7.0	12	17	3.6×10^{1}	6.2×10^{0}	2 4 × 101	1.5×10^{3}	8.0×10^{-2}	5 3 ¥ 10-1	6.7×10^{1}			
	R				17	3.0 \ 10	0.3 \ 10	2.4 ^ 10	1.3 ~ 10	8.9 \ 10	5.5 ~ 10	0.7 \ 10			
11	粒径幅の広い砂まじり礫-	GW-SR	8.4	13	10	5.6×10^{1}	7.4×10^{0}	28×101	1.8×10^{3}	1.5×10^{-1}	0.2×10^{-1}	1.2×10^{2}			
	R				10	5.0 ~ 10	7.4 ^ 10	2.0 ~ 10	1.8 ~ 10	1.3 \(10)	9.2 ~ 10	1.2 \ 10			
12	粒径幅の広い砂まじり礫・	GW-SR	9.4	15	20	7.2×10^{1}	0.0×10^{0}	37×101	2.4×10^{3}	1.1×10^{-1}	6 5 ¥ 10·1	8.2×10^{1}			
	R				20	1.3 ^ 10	9.9 ~ 10	5.7 ~ 10-	$2.4 \wedge 10^{\circ}$	1.1 ^ 10	0.3 ^ 10 -	0.2 ^ 10			
13	分級された砂まじり礫·R	GP-SR	10	15	5.2	$8.4 imes 10^1$	9.9×10^{0}	3.7×10 ¹	2.4×10^{3}	3.2×10^{-1}	1.9×10 ⁰	2.4×10^{2}			

表 6.3.7 様々な推定方法から得られた各採取地点から採取された試料の透水係数

- 6. 4 本章のまとめ
- (1)水島地域の地質に関する既往の研究から、当該工事付近の海底地盤の層順は、沖積 層基底面までで①砂層及び泥層、②砂及び泥層、③礫層である。
- (2)海底地盤調査から、本災害発生箇所付近の海底地盤は、トンネル位置である約23m 以深までで概ね3層に区分できる。
- (3)海底地盤調査から、本災害後に海底地盤に生じた窪みの中心座標は、トンネルの設計計画座標と比較すると、110 リングの直上に当たる。
- (4)シールドマシン前面から採取した土砂試料を分析した結果,立坑でのボーリング柱 状図と傾向は概ね一致する。
- (5) 既往の研究からいくつか提案されている透水係数の推定方法を用いて本試料の透水 係数を算出したところ,砂礫層の透水係数は 10⁻²~10³(m/s)に位置し,粘土層の透水 係数は 10⁻⁸~10⁻⁵(m/s)に位置していた。

参考文献

- 鈴木茂之: 倉敷市水島地域の沖積地盤地質, 岡山大学地球科学報告書 2006 年第 13 巻 第1号, 2006.
- 2) 朝倉夏雄: 初心者のための反射法データ処理, 物理探鉱, 第 35 巻, 第 6 号, pp.47-70, 1982.
- 3) 地盤工学会編:第3編 物理試験 第4章粒度試験 4.2 土の粒度試験,地盤材料試験の方法と解説, pp.115-125, 2009.
- 4) 地盤工学会編:第3編 物理試験 第4章粒度試験 4.4 石分を含む地盤材料の粒度 試験,地盤材料試験の方法と解説, pp.125-127, 2009.
- 5) 地盤工学会編:第2編地盤材料の工学的分類,地盤材料試験の方法と解説, pp.51-92, 2009.
- 6) 地盤工学会編:第4 編地盤材料の工学的分類, 土質試験の方法と解説, pp.212-245, 2000.
- 7) 例えば、日下部治:土木系大学講義シリーズ⑦ 土質力学、コロナ社、266p、2004.
- 8) Creager, W. P., Justin, J. D. and Hinds, J. : Engineering for dams, Vol. III : Earth, Rock-fill, Steel and Timber Dams, John Wiley and Sons, p. 649, 1944.
- 9) 工藤アキヒコ,西方卯佐男,玉野浩之,浅田昌蔵:粗粒材の透水係数算定式に関する 一検討,第34回地盤工学研究発表会(東京),pp.135-136,1999.
- 10) 森田悠紀雄, 坪田邦治, 西垣誠, 小松満: 粒度分布と間隙率を考慮した土の透水係数 の推定方法, 土と基礎, Vol. 53, No.7 pp. 5-7, 2005.
- 11) 土木学会編:水理公式集昭和46年改訂版, p365, 1974.

7. 掘進管理システムのデータ分析

7.1 掘進管理システムについて

密閉型シールド工事では,掘進時の地盤性状を切羽圧やジャッキ推力等から把握 するとともに,裏込注入圧・量やシールドマシンの姿勢計測等の掘進管理データを 逐次入手することで安全性の高い施工を実現している。本節では,当該工事に使用 されていた掘進管理データのソースとなる(1)掘進管理システム,(2)掘進指示 書,(3)掘進日報について,その概略を記載する。

(1) 掘進管理システム

図 7.1.1 に掘進管理システムの構成図を示す。掘進管理システムは、ジャイロセン サー、レベル計、ジャッキストローク量等によって、シールドマシンの姿勢を計測 し、掘進を管理する。その他、使用ジャッキ番号、総推力、ジャッキ圧力等も計測し、 中央管理室にて計測モニターを通じて常に確認できるようになっている。

図 7.1.2、図 7.1.3 にジャイロセンサー及びレベル計の設置位置、設置状況写真をそれぞれ示す。

図 7.1.4 に具体的にシールドマシンの姿勢(左右偏差及び鉛直偏差)の計測方法を 示す。

・左右偏差の計測手順

- 掘進開始時(掘削モード+カッタ回転+ジャッキ伸)の代表ストローク(左右で 大きい値)を最大ストロークとしてセット。
- ② 同様に左右偏差値を初期の左右偏差値としてセット。
- 約3秒毎に以下の計算を行う。
- ④ 左右偏差=前回左右偏差+tan(ジャイロ方位角-計画方位角)×(代表ストローク -最大ストローク)÷1000
- ⑤ ここで、前回左右偏差=左右偏差、最大ストローク=代表ストローク、である。
- ・鉛直偏差の計測手順
- 初期掘進前に坑内の基準ユニット(h2)とシールド機内の計測ユニット(h1)との差 (h2-h1)を MP-25.475m(計画標高)としてセット。
- ② 鉛直偏差=MP-25.475 ((h1-h3)/1000)
- ③ ここで、h3 は計画標高と現在の計測ユニットとの標高差である。

上述のとおり,左右偏差(法線偏差)は,ジャイロ方位角とストローク値を用いて 算出された 2 次データである。ジャイロ方位角は変動するデータではあるが,シー ルドマシンの位置を測量するまでは,左右偏差(法線偏差)と鉛直偏差の値によりシ ールドマシンの姿勢を把握することが可能である。特に,災害発生直前のシールド マシンの姿勢は,左右偏差(法線偏差)と鉛直偏差の値に頼らざるを得ない。



図 7.1.1 掘進管理システムの概略図







図 7.1.2 ジャイロセンサー及びレベル計の設置位置



(a) ジャイロセンサーの設置状況



(b) レベル計の設置状況

図 7.1.3 ジャイロセンサー及びレベル計の設置状況写真

【左右偏差】



 ・掘進開始時(掘削モード+カッタ回転+ジャッキ伸)の代表ストローク(左右で大きい値) を最大ストロークとしてセット 同様に左右偏差値を初期の左右偏差値としてセット

左右偏差

=前回左右偏差+tan(ジャイロ方位角 θ 3-計画方位角 θ 1)×(代表ストローク|2-最大ストローク(|2+伸長)÷1000

約3秒毎に以下の計算を行う。

左右偏差 =前回左右偏差+tan(ジャイロ方位角-計画方位角)×(代表ストローク - 最大ストローク)÷1000 前回左右偏差=左右偏差 最大ストローク=代表ストローク





【鉛直偏差】



初期掘進前に h2 - h1 = MP-25.475m としてセットする。



図 7.1.4 左右偏差(法線偏差)と鉛直偏差の計測方法

(2) 掘進指示書

当該工事では、掘進管理システムの他にも坑内からトランシット、コンベックス 等を用いて、セグメント及びシールドマシンの法線偏差(左右偏差)、標高偏差(鉛 直偏差)、テールクリアランス、真円度等を計測していた。それらの結果と掘進管理 システムのジャッキストローク、ピッチング、ジャイロ方位角等をまとめ、それに基 づき、昼勤、夜勤ごとに次の勤務に向けた掘進指示書を施工者が作成していた。表 7.1.1 は災害発生前、2012年2月7日昼勤に向けた指示書である。作成されたのは、 同年2月6日夜勤後である。

同表の掘進指示書から、標高偏差に着目すると、108 リングのセグメントとシール ドマシンの後ろは 11mm の差があることがわかる。シールドマシンのターゲットの 位置を図 7.1.5 に示す。ターゲットの位置は、

マシン前:エレクター付近(定点)

マシン後:エレクターから坑口側(テールブラシまでの間の定点)

であり、休憩時間や昼勤・夜勤の交代時などの合間をみて、トランシットやレベル計 により計測していた。

ターゲット間の距離は、図 7.1.5 から 1.021m= 1021mm である。表 7.1.1 からマシン前の標高偏差 3mm、マシン後の標高偏差 2mm であるから、その傾きを算出すると、atan[(3mm-2mm)/1021mm]×180°/ π =0.056°となり、マシンピッチングの値 0.12°と若干の差はあるが傾向は一致している。しかしながら、法線偏差を見ると、マシン前の法線偏差-271mm、マシン後の法線偏差-269mm となり、切羽に向かって左向きであるのに対し、ジャイロ方位角は切羽に向かって右向きを示しており、傾向が異なっている。この原因は定かではない。

同表の掘進指示書の下欄には、『測量では、セグメントがマシンを抜けてから左と 上方向に動いている結果となっています。』とある。このことから、シールドマシン のテール部からセグメントが荷重を受けていることがわかる。

テールクリアランスについては、図 7.1.6 に示すように、シールドマシンの内径と セグメントの外径の差をコンベックスにより計測している。上下のテールクリアラ ンスは、シールドマシンの中心を通る上下の位置で計測しており、左右のテールク リアランスは、シールドジャッキ No.7 と No.20 の上あたりで計測している。上下の 合計値と左右の合計値の差でセグメントリングの真円度を計測している。

真円度は上下真円度の方が左右真円度よりも小さくなっており、セグメントリン グが縦につぶれる(横に広がる)ような変形を呈していることがわかる。シールドマ シンのテール部からセグメントが下方に押され、このような変形を呈したものと推 察される。

表 7.1.1 掘進指示書(2012年2月7日昼に宛てたもの、2月6日夜勤務後作成)





登録		マシンター	・ゲット表		
測点ID	測点名	前後距離 (m)	左右距離 (m)	上下距離 (m)	前胴/後胴
1	マシン前	-4.578	0.000	-2.439	前胴
2	マシン後	-5.599	0.000	-2.439	前胴

図 7.1.5 シールドマシン内のターゲットの位置



(a) テールクリアランスの計測位置(側面図)



(b) テールクリアランスの計測位置 (テール部と詳細図)

図 7.1.6 テールクリアランスの計測位置

(3) 掘進日報

掘進指示書に合わせて、現場では1リングごとに掘進日報も作業員が記載することとなっていた。表 7.1.2 は 81~85 リング、105~109 リングの掘進日報である。

同表から 82 リングの K セグメントが割れていること、85 リングでは裏込め注入 材がテール部から坑内に出てきたことがわかる。また、104 リングでは再度 K セグ メントが割れている。

その他、掘進日報では、加泥材、裏込め注入材の量も記載するようになっている。

表 7.1.2 掘進日報

(a) 81~85 リング

運転責	-		掘進日報	平成	<u>22年月日()墨·夜</u>
	St 1	Xa	83	84	
1/5/97Nin		101時 、 の4-14 、 パター1日 、 のダー1日 、 取行修正	福浩 · 128-3A - Cター8 · ひやートロ - 経行修正	回帰 - インサーFA - ヘンサートロ ・ インサート C ・ 銀行信正	個線 ・ インタートム ・ インタートロ ・ インタートロ ・ 蛇行植正
グメントタイプ	(14 - 104-HA - 104-HE - 104-HO - 101118-11	10 10 44. 9	12 m 49 #	14. 11 40 3	16 m 45 9
国家网络和国		19 9 ·	13 115 8	15 11 5.6 1	17 11 52 9
朝時下時間	280 22.0 Mos	Мря	Mya	Mpa	280~348 Mpm
L IE	1 Ming a TANO O Mine	Mpa	Mpe .	Mizer	- 15000 20.00 mpm
7179-12-11	In a AD rem/min	entry/miles	mes/min	รุษธ/กมัก	
VIVISE	×0 × 0 0 0	コピー是用範囲 方向	コピー使用範囲 方貞	コピー推用値到 方向	コピー使用報題
使用シャッキ		מא ליבולב	3ピーストローク mm	32	32-21-0-2 mm
)		9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8	6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6	88888888888888888888888888888888888888
ジャッキョ酸力 KN	高中から使用 ム 西中美で優用 ×	- 一日本の小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小	<u>新中から夜間内。 (新中本で愛想 *</u>) 新進数 9-77 ==	<u> 自 たから使用 ム </u>	Nul San 448 mm
itys, zho-3	Hend allate /703 mm Hend allate /703 mm Hend 45 mm Hand 277 man	Pho2 回線版 mm No.0 回波版 rem	- No.3 - 190	田田田 10 1 1 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0	BASE 1216 mm BASE 1216 mm
ジャイロ方位	10.011000 268 /88 x 10.01107 26830 x	128111812 24 13.5 H 12811187 265, 124 2	нини <u>267.18</u> и	18111817 268 by 18 18111814 25 mm	шини 268 12 ш шинина 254,06 мт
682	анина 25416 mm минат 25407 mm	1881187 25406 mm	NIN(19) T 254 06 m	1811/07 754-08 == 1911/1910 0.33 B	1881687 25404 mm 1881684 -030 It
n-1247	13/11/16/72 0,26 m manifest 0,55 m	1日日日間か (150 素) (150 \xi) (150 \xi	101019 0100 x	MRAMET -0.31 世 開発(的な) 1.07 世	10000000000000000000000000000000000000
24927	「昭和15438 - 月 · 〇 章 158月1987 0 · 〇 4 章	1041000 0.03 m 104146.7 0.03 m		10月後7 1.03 R	1000H1507 007 度 1000 · 皮好 · 秋海 · 蜜發
植土仪派	図応・進行・軟高・環境	田心 • 與終• 號間• 現與	END - M RT - BANG - HERE) 24 - 20周 - 約主 - その他() 夢 - 修彊 - 船士 - その恒(
± 3	1 段・砂線・粘土・その他() 影・影響・粘土・その他(194922- 890 (L)	935 ILI
10 .Z	1 24022 - 95/ ILI 1 1040000 917 ILI	100020- 4/6 [L]	200 AT 7 70 (11)	111 111 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 1	21-12-1177 94 113 1 AB 14 1 AM 9/
建込め	A庫 2/60 L B線 /20 会社	L A篇 2157 L B版 [23] L 由計	U A版 //0 / 0 4 8線 /// 4 ・ 合計	L AN	L 前期/6/5
-			82R K 29"	0	- まこた

(b) 105~109 リング

							~		加工		军区		~			च्य लो	no #		=/	1	
進戰者						£m.	,		-	1	-	-	_	6.0	0	TAK.	22 4			1.000 1	
リングNa		195				10	D		-	1.0	1		108				109				
クメントタイプ	「御幕一 心	9-14 - (3#-18	(34-) 0 -	蛇行修正	個年 ・ 白	9-1-4 · 129-	10 - 1/1-10	• 经行储工	福井 ・ 心	9-4A · 154-1	8 . 124-10	· 结行修正	HEAN ()	m-the instruction	6 - (51-)	ロ・蛇行像正	1844 1 43	19-1A - 10	1-10 - 134-	トロ: 蛇行停口	
國州開洽納加		7B #	19 8	1		2 1	32 #			73. "	020		1		02:	9		3	105	杂	
目和新了诗观	1	70 m	46 8			72 1	27 9		-	0 10	09 5			2 11	16 :	9		3	11.30	9	
£ Æ		2800	2000	.64pm		270a	1330	Move		2809	330	.Mpe		270	~34	O Mos		270	2340	Mps	
カッターほり	1500 a	2 MAGET	R.Y.	Mpa		1500 -	-2/00	Mps	1	1500 n	12100	Mpa		NECE a	12/2	C Mps		14500	V210	C Mpa	
「おりまっ直座	num	4rn 15	6	mm/min		40.	40	mm/min	-	417	150	rivel/solin		LAC 0	150	mo/min		44	0000	inters/units	
in million de	32-	-体用绘图		方向	31-	他和新闻	10-	方向	aĽ-	使用軟問	1	方向	dg.	一進用範囲	T	方向	32.	一位用範囲	1	方向	
gins isi	37-	-31-0-7		min	=E-	210-015		min	32-	ストローク		ant and	3Ľ-	-2-0-2	-	mm	32-	-21-0-0	_	me	
	BBBBB	B B B B B B B B B B B B B B B B B B B	BBB BBB BBB BBB BBB BBB BBB BBB BBBB BBBB	00000 C	BBBBBB	B B B B	B B B	^e eeee	ABBBB	888 8	B B B	000000	. BBBB	Bee e	0.00	8 8 8 9 9 8 9 8 8	BBBBBB	BB	000 000	a soo so	
240中總權力	10 Hand	naina Milin	465	<u>8. 815</u>	资中力 No.3	Contraction of the second		STR. N.	2010 A	·····································	1. 476	SEA ×	t dt (E	いら後備用」 間違い	0 mm	大学使用 ×	114D	N-SATER A	9.00 \$7	<u>四季で通用 3</u> 7 min	
*****	Nad	102211 102211 102211	883 411 112	inini mini inini	Haik	12.05.02 (12.05.02) (12.05.02) (12.05.02)	1825	mm mm Mm	Hest	間違臣 / 相違的 創進法 /	483	pan. prov	(Na ₂ 8	四点也 但近期 1月进程	480	100 100	No.8	和成第 和成第	188		
ジャイロオ位	以向助始 如何处了	20	68.03	12 12	面相開始 國用級了	1	268222	R R	ULWINT ULWINT		268.35	<u>R</u>	地形间的。 组织修行了	22	68.2	R R	(熱)((洗)(注)) ((1))((1))((1))((1))((1))((1))((1)	-	268.4	324	
<i>µ</i> ≈ <i>µ</i>	位用原始 和和母子	25	385	entra terra	WINTERS WEALINT	17A	377	1777 1247	規制用約 通用詞 7	-2	53.74	ranti	電用開始 個用(最了	4	373	am am	個別(第)合 個別(第7		20.51	2 ===	
ローリング	Watter T	-(2.06	R	限用用制 使用每丁	-	P.Z.	R R	指标用标 图和例子	8	1.4	10 02	相相關語	-	7.33	度	加州限的加州和	-	0.18	tit At	
2.000	(ERIESA)	1 0	net	11	10.010066	1	4.191	JR.	00.0036036	1	5.18	R	相同的		OUR	虘	THE WAR DO AN		0.10	L A	
ビッテング	ta initi T	K.	172	15	BRIM'T	1	017	H	UERIM T	0	- FI	tt.	個純態了		n.F.T	th.	10/4407		(2. X	I E	
14 + 14 m	Dautite, 1	mill off	0.7	18.	Partition 1	mp . 6 /2	T+FU			1000 100	. 1012			開約、長期	- H-EL - HI	N		110-1	147.101 - 1	(n	
+ -	25 - 2548 -	What a Jacobia	and . 1910		10 - 16.58 -	おナ - モの油			1 26 - 10 TH -	はナ - 王の仲に		1	100 · 2010	第十一子の曲/			10 · 10 ·	- 総土 + モの	HAC		
to ut	タックスルー	11 - TUNET	19 12	1	547210-	9	26 1	(C)	タックスルー	92	5 0	11	タックスルー	92	4	(L)	チックスルー		588	(L)	
	うしんしまうう		7.2 11	L1	うしっていまいう	2	6	[[]]	クレイショック	94	f	(L)	うしいショック	7 7	2	[1]	クレイショウ	a	61	TICK	
WEEL DI	Alt	1/721 L	Bitt 9	13 1	Alt	2500 由計	1. 8覆	150	L A液	1/68 11	1 8/8 7	16 1	AJR	1 2/14 #1	L图道	128	L ANK	1222	6 L BM	1420	
N 4	N.	Rep + 100	700	cK)						-						9					

7.2 シールドマシンの軌跡

図 7.2.1 に掘進指示書から読み取ったテールクリアランスとリング No.の関係を示 す。また、掘進日報に記載されていたコメントも合わせて示している。掘進日報に は、85R において『テールから裏込めがでました』との記述がある。同図から 85 リ ングでテール部から裏込め注入材が坑内に漏れてきた後、テールクリアランスの値 が一定値となり、設計テールクリアランスとほぼ同等になっている。これらのこと から、テールブラシ内に裏込め注入材が入り固着したものと考えられる。なお,後述 する第9章 9.2.2 や本報告書の巻末参考資料『テールブラシの固着物の分析,裏込め 注入材とテールシール材との混合物の一軸圧縮試験結果, p.1~p.74』によると,テー ルブラシ内の固着物から,裏込め注入材やテールシール材の成分が検出されている。 また,裏込め注入材と当該現場でテールシール材として使用された止水材が混ざり 合った場合,裏込め注入材単体よりも強度を発揮することを確認した。

図 7.2.2 に法線偏差(左右偏差)とリング No.の関係を示す。同図には掘進指示書 に記載されていた測量に基づく「セグメント(測量結果)」と「マシン前後(測量結 果)」の法線偏差だけでなく、掘進管理システムのデータから計測されたシールドマ シンの左右偏差(法線偏差)も示している。同図から 26 リング以降、法線偏差の値 が-197.9mm(約-200mm)と急激に大きくなっている。

発進立坑を掘削した時に立坑がわずかに回転していたため、立坑の発進口が設計 計画線から許容範囲内ではあるがわずかにずれていた。発進口のコンクリートはシ ールドマシンが掘削しやすいように予め作製されていた。発進口からシールドマシ ンを発進させるため、立坑のずれ量及び回転量が多いほど、実際のトンネルの線形 に誤差を含むこととなる。一般的に、そのずれ量及び回転量は初期掘進後の線形管 理により補正する。後続台車の長さはシールドマシンテール部から約 33m であるか ら、約 33m 以上は発進口からほぼ直線的に横坑を構築しなければならず、施工上の 計画線に沿ってほぼ直進していたものと推察される。法線偏差が急激に大きくなっ た 26 リング付近は切羽延長距離にして約 36m であり、26 リング付近から線形の補 正ができるようになると推察される。そのため、26 リング付近で再度精密な測量を 実施し、設計計画線からの法線偏差及び鉛直偏差を正確に計測したと考えられる。 したがって、26 リング以降、設計計画線からの法線偏差を精密に測量した結果、法 線偏差の値が-197.9mm となったものと推察される。

また、同図から 85 リング以降、掘進管理システムデータであるシールドマシンの 法線偏差と測量データであるセグメントの法線偏差の値が異なる傾向を示してい る。セグメントはわずかに左方向に向かっているのに対し、シールドマシンは右へ 右へとセグメントを設計計画線に戻そうとしていることがわかる。掘進管理システ ムデータのシールドマシンの法線偏差(左右偏差)は、図 7.1.4 で示したように、ジ ャイロ方位角とジャッキストローク量(ジャッキ No.7 と No.20)から算出している。 このため、シールドマシンが右を向きながら真っ直ぐに進んでいたとしても、シー ルドマシンの法線偏差の値は増加(より右向き)することとなる。裏込め注入材がテ ールブラシ内で固結した場合、シールドマシンを右に向けると、セグメントはシー ルドマシンから押され、より余裕のある左へ遷移する。したがって、85 リング以降、

7-14

トンネルの線形を修正しようとシールドマシンを右に向けることによって、逆にセ グメントは左へ向かうという現象が発生していたと推察される。

図 7.2.3 に同じく法線偏差(左右偏差)と切羽延長距離の関係を示す。同図から「セ グメント(測量結果)」は設計計画線(方位角 268.02 度)に対して 0.035 度左に向 いていることがわかる。



(注:□内は掘進日報の備考欄から記載) 図 7.2.1 テールクリアランスとリング No.の関係



12 / 110.

図 7.2.2 法線偏差(左右偏差)とリング No.の関係



実測距離, 切羽延長距離(m)

図 7.2.3 法線偏差(左右偏差)と切羽延長距離の関係



図 7.2.4 鉛直偏差とリング No.の関係



実測距離, 切羽延長距離(m)

図 7.2.5 鉛直偏差と切羽延長距離の関係

図 7.2.4、図 7.2.5 に鉛直偏差(標高偏差)とリング No.の関係、鉛直偏差と切羽延 長距離の関係をそれぞれ示す。先ほどと同様、掘進指示書から読み取った「セグメン ト(測量結果)」と「マシン前後(測量結果)」の標高偏差の値、掘進管理システム からシールドマシンの鉛直偏差及びテールクリアランス(上下)をプロットしてい る。図 7.2.4 から、100 リング以降、「マシン前後(測量結果)」と「セグメント(測 量結果)」の鉛直偏差の差が大きくなっていることがわかる。つまり、セグメントが シールドマシンを抜けてから上方向に動いていたことがわかる。また、図 7.2.5 から、 99 リング以降のセグメント(測量結果)の標高偏差と切羽延長距離の関係からセグ メントの傾きを算出すると、0.044 度下向きであった。これに対し、掘進管理システ ムデータによると、シールドマシンの姿勢は上向きであり、シールドマシンのテー ル部が結果的にセグメントを下方に押し付ける形になっているものと推察される。

セグメントの蛇行修正には、テーパーセグメントの挿入、コピーカッタによる一 方向への余掘りの拡大等が挙げられる。

当該工事で使用する全セグメントリングの総数は 557 リングである。その内、テ ーパーリングは 20 リング含まれている。つまり、標準のセグメントリングが 537 リ ング、テーパーリングが 20 リングである。当該工事では 5、 6、 24、 32、 39、 53、 54、 62 リングにテーパーリングを使用しており、20 リング中 8 リング(40%)を使 用していた。総数 557 リング中、災害発生時には 111 リングまで組み上がっており、 20%程度の進捗状況であった。進捗状況に対して、テーパーリングの使用割合が多く なっており、62 リング以降テーパーリングの使用を控えていた可能性も示唆される。

コピーカッタの使用に関して、掘進管理システムのデータから「コピーカッタス トローク」及び「コピーカッタ位置」とリング No.の関係を示す。掘進管理システム のデータは 2、3 秒毎に各項目のデータを出力するが、初期掘進から 112 リングまで のデータ量を 1 つの図面で示すと容量が大きくなり過ぎることから、1 分間隔のデー タに間引いて示している。したがって、1 分以内の間に動きがあった場合には図示さ れていない可能性もある。コピーカッタストロークは、-15mm から 0mm まで変化 しており、負値の場合は、コピーカッタがシールドマシン外径から出現していない 状態を示していると考えられる。一方、正値の場合は、シールドマシン外径からコピ ーカッタが出現している状態を示し、「コピーカッタ位置」の地盤を「コピーカッタ ストローク」量ほど掘削すると考えられる。

同図からコピーカッタストロークは 27 リングと 108 リングで反応している。27 リ ングは 2011 年 12 月と 2012 年 1 月の年末年始に当たり、シールドマシンは停止して いる状態であると考えられる。108 リングについて、2、3 秒毎に出力された掘進管 理システムのデータを詳細に見ると、2012 年 2 月 7 日 3:04:57 から 3:05:04 まで 8 秒 ほど、コピーカッタストロークが-10 → 50 → 50 → -14mm と変化しているが、 証言等から誤操作であると考えられる。それ以外の掘進ではコピーカッタを使用し ておらず、初期掘進から災害発生までコピーカッタを使用していないようである。 なお、コピーカッタ位置は 0 度から 360 度まで変化しており、シールドマシン切羽 面のカッタの動きに合わせてコピーカッタも回転するためだと考えられる。



図 7.2.6 コピーカッタストローク及びコピーカッタ位置とリング No.の関係

7.3 災害発生時のシールドマシンの動き

ここでは、主に掘進管理システムのデータから、災害発生直前のジャッキ操作、切 羽圧の変化、ジャイロとピッチングの変化、セグメントとシールドマシンの位置関 係について述べる。

7.3.1 ジャッキ操作

掘進管理システムのデータから使用したシールドジャッキ No.、総推力等がわかる ため、どのジャッキを押したり抜いたりしているかがわかる。

図 7.3.1 は災害発生日である 2012 年 2 月 7 日 (火)の掘進が終了した時点からの ジャッキ操作の図を示したものである。赤丸で示した箇所が使用しているジャッキ である。枠内左下に総推力の上昇が記載されている場合(例えば p.7-23 右上図)、 ジャッキがセグメントを押している。したがって、それ以外はジャッキを抜いてい ることになる。切羽から坑口を見るように図を示している。

同図から、掘進時には計 21本のジャッキを使用していることがわかる(11:46: 21時点)。まず、11:47:51~11:52:09まで112リングのA2セグメントにかか るジャッキを抜いていることから、同A2セグメントを挿入しようとしていることが わかる。挿入後、11:52:12からジャッキ総推力が上昇しており、同A2セグメント が挿入されたことを示している。

同様にして、11:58:21に112リングのA1セグメントが挿入されている。

また、12:03:30に112リングのB1セグメントも挿入されている。

その後、12:06:00~12:06:02 に 112 リングの B2 セグメントを入れるため、ジ ャッキ 25、26、1、2、3、4 を抜いていることがわかる。それ以降のデータは 12:07 :13 で途切れている。

全体を通してみると、ジャッキ1、2、3、4、5、23、24、25、26の計9本のジャッ キが抜かれていることがわかる。













図 7.3.1 ジャッキ操作

7.3.2 切羽圧の変化

掘進管理システムのデータから切羽土圧及び総推力の変化を図 7.3.2 に示す。土圧 計はシールドマシン前面のチャンバー内にあり(図 7.1.2 参照)、切羽土圧は土圧計 により計測される。切羽土圧を見ると、ジャッキを抜いた 12:06:02 以降、急激に 切羽土圧が低下し、232 kPa から 150 kPa と 82 kPa も低下していることがわかる。

第 10 章で述べるが、シールドマシンの掘削外径(4970mm)とシールドマシンの 外径(4950mm)には片側10mmの余堀りがあり、掘削外径とセグメント外径(4820mm) では75mmの余堀りがあるため、111リングのKセグメントが抜け出そうとすると、 そこから土砂水が流入し、すぐに水の流れ、水圧の低下等により切羽のチャンバー 内にまで到達し、切羽圧が低下すると考えられる。

同図において、総推力を見ると112 リング A1 セグメントを挿入する際、比較的大きな総推力(1000kN 以上)をかけていることがわかる。また、112 リングの B1 セグメントを挿入するため総推力をかけた後、上側のジャッキを抜いた直後に災害が発生していることがわかる。



図 7.3.2 切羽圧及び総推力と時刻の関係

7.3.3 ジャイロ及びピッチングの変化

図 7.3.3 は掘進管理システムのデータからジャイロ方位角(左右方向)及び総推力 と時刻の関係を示している。計画方位角(左右方向)が 268.019 度であるから、掘進 終了後ですでに 268.4 度付近とシールドマシンが切羽に向かって右方向に向いてい ることがわかる。その後、112 リング A2 セグメント、A1 セグメントを入れるに従 い、ジャイロ方位角(左右方向)は徐々に増加し(さらに右に)12:06:02 には 268.49 度を示している。計画方位角(左右方向)との差は+0.471 度である。

図 7.3.4 は掘進管理システムのデータからジャイロピッチング(上下方向)及び総 推力と時刻の関係を示している。計画方位角(上下方向)が 0.044 度であるから、掘 進終了後に 0.08 度付近であり、わずかにシールドマシンが上向きになっている。そ の後、112 リングの A1 セグメントを挿入する際、ジャイロピッチング(上下方向) の値がわずかに増加していることから、さらに上向きになり、シールドマシンのテ ール部がセグメントを押し下げようとするものと推察される。12:06:02 にはジャ イロ方位角(上下方向)が 0.13 度となっており、計画方位角(上下方向)との差は +0.086 度である。

図 7.3.5 は掘進管理システムのデータから鉛直偏差及び総推力と時刻の関係を示したものである。12:06:02 以降、鉛直偏差が 8mm ほど下がっており、シールドマシンが下方に 8mm 下がったことを示している。テールブラシが固着している場合は、111 リングの B1 セグメント及び K セグメントに対して、より下方に押し下げる力を与えることとなる。



図 7.3.3 ジャイロ方位角(左右方向)及び総推力と時刻の関係



図 7.3.4 ジャイロピッチング(上下方向)及び総推力と時刻の関係



図 7.3.5 鉛直偏差及び総推力と時刻の関係
7.3.4 シールドマシンとセグメントの位置関係

図 7.2.3 からセグメントと計画方位角となす角度が-0.035 度(切羽に向かって左 向き)であること、図 7.3.3 からはシールドマシンと計画方位角となす角度が+0.471 度(切羽に向かって右向き)であることがわかる。つまり、セグメントに対してシー ルドマシンは、+0.471-(-0.035)=0.506 度ほど切羽に向かって右に傾いていること になる。これを CAD で図示すると、図 7.3.6 のとおりである。テールブラシがセグ メントにより接近し、テールクリアランスは 5.4mm 程度となる。テールブラシが固 着していれば、セグメントに対して切羽に向かって右から左方向の荷重が作用する。

同様に鉛直方向についても考察する。図 7.2.5 からセグメントと計画方位角のなす 角度が-0.044 度(鉛直下向き)であること、図 7.3.4 からはシールドマシンと計画 方位角となす角度が+0.086 度(鉛直上向き)であることから、セグメントに対して シールドマシンは、+0.086-(-0.044)= 0.13 度ほど鉛直上向きとなる。これを CAD で図示すると、図 7.3.7 のとおりである。テールクリアランスは 23mm 程度となり、 左右方向に比ベクリアランスに余裕があるが、左右方向と同様、テールブラシが固 着していれば、セグメントに対して鉛直下向きの荷重が作用する。



図 7.3.6 シールドマシンとセグメントの位置関係(上方から見た場合)





図 7.3.7 シールドマシンとセグメントの位置関係(側方から見た場合)

(1) 掘進日報によると、85 リングにおいて、シールドマシンのテール部から裏込め注入材が漏出していた。

(2) テールクリアランスの値は、85 リング以降、設計テールクリアランス 29mm に近い値にほぼ収束しており、裏込め注入材がテール部で固着していた可能性があ る。

(3)線形管理上の重要なデータである測量データ(セグメント位置)とシールド マシンの位置偏差(掘進管理システムデータ)の値が異なる傾向を示していた。つ まり、シールドマシンは右に向かっていたが、セグメントが左に向かっていたた め、設計計画線に戻そうとよりシールドマシンを切羽に向かって右に向けていた。 また、セグメントはシールドマシンを抜けてから上方向に動いていたが、シールド マシンを上に向けようとしたため、結果としてシールドマシンテール部がセグメン ト上部と競った。

(4) 当該工事では5、6、24、32、39、53、54、62 リングにテーパーリン グを使用しており、20 リング中8 リング(40%)を使用していた。総数557 リング 中、災害発生時には111 リングまで組み上がっており、20%程度の進捗状況であっ た。進捗状況(20%程度)に対して、テーパーリングの使用割合(40%)が多くな っており、62 リング以降テーパーリングの使用を控えていた可能性が示唆される。

(5) 112 リングの B2 セグメントを挿入するため、上部のジャッキ9本(26本中)を引き抜いた時に、シールドマシンがテール部を下げるように変位した。このため、シールドマシンのテール部と組み上げられた上部のセグメントとの競りが発生した可能性がある。

8 回収されたセグメントの破損状況調査及びセグメント及び継手の強度試験

災害発生直後である 2012 年 2 月 15 日から立坑内から破損したセグメントが引き 揚げられた。その後 2012 年 3 月 2 日まで断続的にセグメントが引き揚げられた。そ の後, 2013 年 7 月 10 日からシールドマシンの引き揚げに伴い,残存していたセグメ ントも引き揚げ,回収された。本章では,8.1 節にて回収されたセグメントにおける 破損状況調査結果について述べ,その後 8.2 節~8.5 節では当現場で使用予定だった 未使用のセグメントを用いたセグメント及び継手の各種強度試験結果について述べ る。

8. 1 立坑及び海底地盤から回収されたセグメント

109R~112Rの各セグメント(A1, A2, B1, B2, K)の破損状況を図 8.1.1~図 8.1.16 に示す。また,地山側から見たセグメントの全景を図 8.1.17、坑内側から見たセグメ ントの全景を図 8.1.18 に示す。

これらの図から, 111R よりも 110R の損傷が激しいことがわかる。110R では、K セグメントを除く A1, A2, B1, B2 セグメントがすべてほぼ中央部で破壊していた。

なお、A1, A2, B1 セグメントについては、コンクリート部とともに鉄筋も全て中央 部で破断していたが、B2 セグメントについては、コンクリート部は破断していたが 鉄筋は破断せずに繋がったままであった。これは B2 セグメントの変形が先に進み、 その後、一気に A1, A2, B1 セグメントが破壊した可能性があることを示唆している。

全体としては、111R(110Rと111R間)ではボルトインサート部においてコーン 破壊が多く見られているが、110R(109Rと110R間)ではボルトインサート内でボ ルトが破断している箇所が多く見られた。





(b) 地山側



(c) 坑内側



(d) 37番のボルトボックス





(f) 39番のボルトボックス

図 8.1.1 109R の A1 セグメントの破損状況





(b) 地山側



(c) 坑内側





35 番のボルトボックス (e)

(f) 36番のボルトボックス

図 8.1.2 109R の A2 セグメントの破損状況





(b) 地山側



(c) 坑内側



(d) 31番のボルトボックス



(e) 32番のボルトボックス



(f) 33番のボルトボックス

図 8.1.3 109R の B1 セグメントの破損状況





(b) 地山側



(c) 坑内側



(d) 27番のボルトボックス



(e) 28番のボルトボックス



(f) 29番のボルトボックス

図 8.1.4 109R の B2 セグメントの破損状況





(b) 地山側



(c) 坑内側



(d) 14番のボルトボックス



(g) 39番のボルトインサート



(e) 15番のボルトボックス



(h) 27番のボルトインサート



(f) 16番のボルトボックス



(i) 28番のボルトインサート

図 8.1.5 110R の A1 セグメントの破損状況





(b) 地山側



(c) 坑内側



(d) 24番のボルトボックス



(g) 36番のボルトインサート



(e) 25番のボルトボックス



(h) 37番のボルトインサート



- (f) 26番のボルトボックス
- (i) 38番のボルトインサート

図 8.1.6 110R の A2 セグメントの破損状況





(b) 地山側



(c) 坑内側



(d) 21番のボルトボックス



(g) 33番のボルトインサート



(e) 22番のボルトボックス



(h) 34番のボルトインサート



(f) 23番のボルトボックス



(i) 35番のボルトインサート

図 8.1.7 110R の B1 セグメントの破損状況





(b) 地山側



(c) 坑内側



(d) 17番のボルトボックス



(g) 29番のボルトインサート



(e) 18番のボルトボックス



(h) 30番のボルトインサート



(f) 19番のボルトボックス



(i) 31番のボルトインサート

図 8.1.8 110R の B2 セグメントの破損状況





(b) 地山側



(c) 坑内側



(d) 20番のボルトボックス



(e) 32番のボルトボックス

図 8.1.9 110R の K セグメントの破損状況





(b) 地山側



(c) 坑内側



(d) 11番のボルトボックス



(g) 25番のボルトインサート



(e) 12番のボルトボックス



(h) 26番のボルトインサート



(f) 13番のボルトボックス



(i) 14番のボルトインサート

図 8.1.10 111R の A1 セグメントの破損状況





(b) 地山側



(c) 坑内側



(d) 8番のボルトボックス



(g) 22番のボルトインサート



(e) 9番のボルトボックス



(h) 23番のボルトインサート



(f) 10番のボルトボックス



(i) 24 番のボルトインサート

図 8.1.11 111R の A2 セグメントの破損状況





(b) 地山側



(c) 坑内側



(d) 5番のボルトボックス



(g) 19番のボルトインサート



(e) 6番のボルトボックス



(h) 20番のボルトインサート



(f) 7番のボルトボックス



(i) 21番のボルトインサート

図 8.1.12 111R の B1 セグメントの破損状況





(b) 地山側



(c) 坑内側



(d) 1番のボルトボックス



(g) 15番のボルトインサート



(e) 2番のボルトボックス



(h) 16番のボルトインサート



(f) 3番のボルトボックス



(i) 17番のボルトインサート

図 8.1.13 111R の B2 セグメントの破損状況





(b) 地山側



(c) 坑内側



(d) 4番のボルトボックス



(e) 18番のボルトインサート

図 8.1.14 111RのKセグメントの破損状況



(a) 設計図面



(b) 地山側



(c) 坑内側図 8.1.15 112R の B2 セグメントの破損状況





(b) 地山側



(c) 坑内側図 8.1.16 112RのKセグメントの破損状況



図 8.1.17 112R~109R のセグメントの破損状況(地山側)


図 8.1.18 112R~109R のセグメントの破損状況(坑内側)

回収された各セグメントのリング継手の破壊状況を見ると、ボルトが破断してい る箇所、ボルトインサートが引抜けている箇所、ボルトボックスがコンクリートか ら剥離している箇所等が見られる。1つのセグメントにおいても、各リング継手の破 壊状況が異なっている場合もある。そこで、災害発生時又は直後に各セグメントが どのように挙動したのかを把握するため、ボルトボックスのボルト穴の内径をキャ リパー形内側マイクロメータにより計測した。

ボルト(M16)が破断又は変形する際,ボルトボックスのボルト穴(¢23mm)に変 形を及ぼすと考えられる。また,その方向にボルトのネジ山の痕跡がついている箇 所も見受けられた。そこで,ボルト穴の内径を数箇所計測し,ボルトのネジ山の痕跡 の箇所も合わせて計測すると,ボルトが動いた方向(セグメントが動いた方向)を推 定できる。

図 8.1.19 は、ボルト穴の内径及びネジ山の痕跡を計測する方法を示している。セ グメントを坑内側が天を向くように接地し、セグメント円周の接線と平行な面を 0° とし、45°、90°、135°の箇所の内径を各ボルトボックスについて計測した。また 併せて、ネジ山の痕跡のある箇所もセグメント円周の接線と平行な面からの角度を 計測した。

さらに、ボルトが破断する際、ボルトインサートにボルトが残存する場合もある ことから、ボルトインサートの内径と破断したボルトの隙間に着目し、ボルトが動 いた方向(セグメントが動いた方向)を推定した。

表 8.1.1 にボルト穴の内径を計測した結果,表 8.1.2 にネジ山の痕跡のある箇所及 びボルトインサートの内径と破断したボルトの隙間の方向を計測した結果を示す。



(a) セグメントのボルトボックスの概略図



図 8.1.19 ボルトボックスの内径を計測した箇所と方向の定義 (坑内側を天,地山側を地とする。)

在 由	111R								
円皮	A2			B1			B2		K
	No.10	No.9	No.8	No.7	No.6	No.5	No.2	No.1	No.4
0	23.261	23.057	22.928	22.667	22.808	22.818	22.806	22.811	22.990
45	23.055	22.951	23.211	22.902	22.928	22.946	22.686	22.890	22.994
90	23.125	22.899	22.923	22.900	22.825	22.884	22.561	22.927	22.992
135	23.235	23.047	22.953	22.987	22.933	22.930	22.953	22.836	22.992

表 8.1.1 ボルトボックスのボルト穴の内径計測結果

岳 由	110R							
円 反 。	A1		A2	B2		K		
	No.16	No.14	No.26	No.19	No.17	No.20		
0	22.930	22.457	22.463	22.902	22.862	23.019		
45	22.943	22.581	22.865	23.140	22.949	23.543		
90	22.842	23.111	23.204	23.008	22.944	23.098		
135	23.288	22.718	23.004	22.981	23.310	23.020		

	109R							
月皮	A1		B1		B2			
	No.39	No.38	No.33	No.31	No.29	No.28	No.27	
0	22.771	22.811	22.877	22.694	23.047	23.025	22.845	
45	22.955	22.933	22.931	22.752	23.062	22.834	22.892	
90	21.993	23.081	22.954	22.745	22.908	22.736	22.862	
135	22.415	22.877	22.775	23.075	23.248	22.924	23.665	

表 8.1.2 ボルトボックスのボルト穴にあるボルト痕の方向とボルトインサート内の ボルト破断の隙間の方向

リング	セグメント	ボルトボックス or ボルトインサート	ボルト痕 or ボルト破断の すき間	ボルト痕 or ボルト破断の 逃げ部
No	No	No	θ_1	θ_2
			deg	deg
		10	225	_
	A2	9	225	_
		8	錆のため不明	_
		19	120	-
		20	145	—
	B1	7	225	-
111		6	90?	_
		5	錆のため不明	_
		17	45	315
	DJ	3	無し	-
	BZ	2	270	-
		1	245	135?
	K	4	無し	_
		39	45	300
	A1	27	55	320
		28	125	-
		14	110	290
	A 0	38	60	315
110	AZ	26	295	-
	B1	33	160	-
		29	_	350
	D 2	31	_	320
	DZ	19	45	215
		17	135	?
	K	20	45	_
	Λ1	39	錆のため不明	
		38	錆のため不明	_
	D1	33	90?	
109		31	充填材と錆のため不明	_
		29	135	_
	B2	28	90~135?	_
		27	45?	-

同表をまとめ,図 8.1.19 のように,災害発生直前のセグメントの動きを矢印で示した。

同図から、111RのB1及びB2セグメントに着目する(図8.1.20参照)と、111RのKセグメントに向かうように矢印が伸びている。110RのB2及びKセグメントに着目すると、111RのB1及びB2セグメントが坑内側に変位することにより、相対的に上方に移動するような矢印が得られ、両者の関係がよく一致していることがわかる。つまり、111RのKセグメントが抜け出そうとし、111RのB1及びB2セグメントがKセグメントの方に垂れ下がってきたものと推察される。

110R と 111R の間のリング継手部のボルトボックス(110R) とボルトインサート 部(111R)の破壊状況は、K セグメントを除いて大別すると①ボルトの破断、ボル トボックス残存、②ボルトボックスの変形、ボルトはボルトボックスに残存、コー ン破壊、③ボルトボックスは健全、ボルトは消失、コーン破壊、の3パターンがあ った。以下に、それぞれについて図等を用いて述べる。



図 8.1.19 ボルトボックスのボルト穴とボルトインサートに残存したボルトの変形 の方向(矢印の方向は,矢印が位置しているセグメントの動きとして記載。)



図 8.1.20 111R の B1 及び B2 のボルトインサートに残存したボルトの変形と 110R の A1, B2 及び K のボルトボックスのボルト痕の跡

①ボルトの破断、ボルトボックス残存箇所等について

111RのB1及びB2セグメントの継ぎ手部に着目すると、図8.1.20内に示す赤丸印の継ぎ手部において111RのKセグメントに向かう方向にボルトのねじ山痕が明瞭に確認できた。また、それぞれに対応する破断したボルトインサート部は、ねじ山痕がある方向と反対側に若干のすき間が見られた。つまり、111RのKセグメントが抜け始めるにともない、111RのB1及びB2セグメントが坑内側に変位していると認められる。この時点で、上記赤丸箇所のボルトが破断したと考えられる。

111RのKセグメントが抜け出そうとし,111RのB1及びB2セグメントがKセ グメントの方に垂れ下がってきたものと推察される。



ボルトボックスに引張りとはく離の方向に力がかかっている。

図 8.1.21 111R の K のボルトインサート部の剥離状況と 110R の B2 のボルトボックスの変形状況

111RのKセグメントと110RのB2セグメント(No.18)を図8.1.21に示す。

111RのKセグメントのボルトインサート部は、コーン破壊の様相を呈している。 また、ボルトインサートは、110RのB2セグメントのボルトボックスにボルトとと もに引抜けた状態で発見されている。

110RのB2セグメントのボルトボックスは、坑内側のコンクリート面から剥離し, 浮き上がっている。ボルトボックスに引張りとはく離の方向に力がかかっていると 認められる。

以上から,111RのKセグメントには、引張りと坑内側に力がかかり、111RのK セグメントの抜け出ししとともに坑内に垂れ下がるように変位したと推察される。



図 8.1.22 110R の B2 セグメントの中央のボルトボックス(ボルト及びボルトイン サートが引抜けているが,ボルトインサートは 111R の K セグメントのものである。)

また,当該 111R の K セグメントのボルトインサートは曲がるように変形していたため,ボルトのネジを緩めボルトインサートを取り外すことが困難であった。

110R の B2 セグメントのボルトボックスに残存した 111R の K セグメントのボル トインサートを観察すると(図 8.1.22 参照),刻印が有る側面と刻印が無い側面で 節目の位置が異なることが分かった。そこで、図 8.1.23 に示すように、111R の K セ グメントのコーン破壊の面とボルトインサートのレプリカを採取し、刻印と節目の 位置を一致させれば、破壊前のボルトインサートの位置が分かり、合わせてボルト がどの方向に曲げられたかを推定できる。

図 8.1.24 にその結果を示しているが、111R の K セグメントのボルトインサート は、刻印が無い側面が地山側を向いていたことが明らかとなった。ボルトインサー トをその方向に向けると、ボルトは地山側に曲げられていることが推察される。ボ ルトが曲げられた方向が地山側だとすると、111R の K セグメントが抜け出す方向と は逆であり、K セグメントが一気に坑内側に崩落したのではなく 2 段階に渡って崩 壊したと推測される。つまり、111R の K セグメントは完全には抜け出さず、ある程 度の時間、111 リングは坑内側に縮む方向に変形しているもののリングの状態を保っ ていたものと考えられる。



図 8.1.23 レプリカの採取箇所(111RのKセグメントのボルトインサート部) (110RのB2のボルトボックスに,111RのKセグメントのボルトインサートが引 抜けた形で残存していた)



図 8.1.24 111RのKセグメントのボルトインサート部のレプリカと110RのB2の ボルトボックスに引抜けた形で残存していた111RのKセグメントのボルトインサ ートのレプリカ



図 8.1.25 110R の B2 のボルトボックスに引抜けた形で残存していた 111R の K セ グメントのボルトインサートの推定される災害発生直後の向き(ボルトは地山側に 変形している。)



ボルトボックスにはく離の方向に力がかかっている。変形が大きいのは徐々に変形が進んだためと考えられる。

図 8.1.26 111R の B1 のボルトインサート部と 110R の B1 のボルトボックスの状況

②ボルトボックスの変形、ボルトはボルトボックスに残存、コーン破壊箇所につい て

次に,111RのB1と110RのB1のリング継手に着目すると,図8.1.26に示すよう にボルトインサートは引抜けコーン破壊の様相を呈し,ボルトボックスは坑内側の コンクリート面から大きく浮き上がっていることがわかる。

これについても先ほどと同様, コーン破壊面とボルトインサートのレプリカを採取し, 破壊前のボルトインサートの位置を推定した。図 8.1.28, 図 8.1.29 にその結果を示しているが,刻印が無い側面と有る側面の境界も見受けられる。したがって, 図 8.1.30 に示すように,破壊前のボルトインサートの位置が推定され,ボルトは坑内側に変形していると推察される。同箇所は,ボルトボックスも坑内側に大きく変形し, ボルトも同方向に変形していることから,変位速度が遅い状態で荷重を受けていたものと推察される。つまり,111RのKセグメントが抜け出そうとし,111RのB1とB2が坑内側に垂れ下がるが,この箇所において,110Rと111Rが崩壊するまでの間、荷重を受け持っていたものと考えられる。



図 8.1.27 レプリカの採取箇所(111RのB1セグメントのボルトインサート部) (110RのB1のボルトボックスに,111RのB1セグメントのボルトインサートが引 抜けた形で残存していた)



図 8.1.28 111R の B1 セグメントのボルトインサート部のレプリカと 110R の B1 の ボルトボックスに引抜けた形で残存していた 111R の B1 セグメントのボルトインサ ートのレプリカ



図 8.1.29 111R の B1 セグメントのボルトインサート部の拡大写真 (刻印有側と刻印無側の境界が見える)



図 8.1.30 110R の B1 のボルトボックスに引抜けた形で残存していた 111R の B1 セ グメントのボルトインサートの推定される災害発生直後の向き(ボルトは坑内側に 変形している。)



図 8.1.31 111R の B1 のボルトインサート部と 110R の A2 のボルトボックスの状況

111RのB1セグメントと110RのA2セグメントのリング継手を図8.1.31に示す。 ボルトインサートが引抜けコーン破壊を呈し、ボルトボックスは坑内側のコンク リート面から剥離し浮き上がっている。ボルトインサートは溶断されているため(回 収時に溶断),ボルトの曲げの方向は定かでない。

上述の箇所と同様,111RのKセグメントが抜け出そうとし,111RのB1とB2が 坑内側に垂れ下がるが、これらの箇所において、110Rと111Rが崩壊するまでの 間、荷重を受け持っていたものと考えられる。



ボルトインサート部のコーン破壊とボルトの破断の両方が発生する方向に力がか かったと考えられる。

図 8.1.32 111R の A1 のボルトインサート部と 110R の A1 のボルトボックスの状況

③ボルトボックスは健全、ボルトは消失、コーン破壊箇所について

図 8.1.32 は、111R の A1 と 110R の A1 のリング継手を示している。特徴的である 点として、ボルトインサート部はコーン破壊の様相を呈し、ボルトが消失している にもかかわらず、ボルトボックスはほぼ健全である点である。

また、ボルト穴を見ると、ボルトのネジ山の痕跡が 2 箇所見受けられ、ボルトインサートが引き抜かれる方向とボルトが破断する方向と 2 段階の変形を呈したものと推察される。

ボルトが消失していることから、ボルトが破断したものと考えられるが、ボルトボ ックスが健全であることから、破断時点の変形速度が大きかったものと考えられる。



ボルトインサート部のコーン破壊とボルトの破断の両方が発生する方向に力がかかったと考えられる。

図 8.1.33 111R の A1 のボルトインサート部と 110R の A2 のボルトボックスの状況

図 8.1.33 は, 111R の A1 と 110R の A2 のリング継手を示している。先ほどと同様, 破断時点の変形速度が大きかったものと考えられる。

次に 110R と 109R のリング継手に着目する。

110R と 109R のリング継手部は、ボルト破断している箇所が多いことがわかる(図 8.1.34 参照)。ボルトの破断面を電子顕微鏡により観察すると、破断した方向(セグ メントの移動した方向)が推定できる。

図 8.1.35 に示すように、ボルトの破断面に等軸ディンプルが観察されれば、その 面には引張りが作用していたことがわかり、ディンプルがある方向を有していれば せん断によりボルトが破断したことがわかる。ディンプルとは、延性破壊した破断 面上に観察される円形状の模様である。介在物等を中心として微小空洞が形成され、 それの合体により破面が形成される。ディンプルの形状と上下破面のマッチングに より、荷重の負荷方向が推定できる。

当該災害では、セグメントのボルトインサートからボルトを抜きだすことが困難 であるため、図 8.1.36 に示すように、レプリカ採取用の道具を用いて破断面の型を シリコンゴムで採取した。

破断面を観察した結果,等軸ディンプルが観察され,110R と 109R のリング継手 に引張りが作用していたことが推定される(図 8.1.37 参照)。つまり,図 8.1.38 に 示すように,110R が 109R に対して,曲がるように坑内側に変位しボルト破断に至 ったと推察される。曲げは局所的にみれば引張りで破壊することになるためである。

また、ボルトボックスにボルトボックスがはく離する方向に力が働いているにも かかわらず、破断した箇所のすべてのボルトボックスが健全なのは破壊が一瞬(変 位速度が大きい)にして起こったためと考えられる。

一方,後述するように、リング継手の載荷試験では、セグメントの円周と接する 方向にボルトに力を加えると、ボルトが破断した。その時のボルトの破断面を観察 した結果が図 8.1.39 である。同図からディンプルは横方向に伸長していることがわ かり、ボルトにせん断力が作用したことがわかる。

なお、シールドマシンと同時期に海底から引き揚げられたセグメントのボルトの 破断部についてもレプリカによる破断面の採取を行ったが錆が進んでいたため、判 別が出来なかった。



図 8.1.34 ボルトのせん断面を観察した箇所



(b) A部 (繊維状破面部), 等軸ディンプル, (ステレオ写真)



(c) B部(シヤーリップ部),伸長ディンプル,(ステレオ写真)

図 4.3 静引張破面のカップアンドコーンとディンプル (低合金鋼, SMn 443 相当材)



図 4.4 ディンプルパターンと応力状態¹¹⁾

図 8.1.35 ディンプルと応力状態(出典:フラクトグラフィ,丸善)



(a) レプリカ採取用の道具



(b) レプリカ採取中 図 8.1.36 ボルト破断面のレプリカ採取用の道具



(a) 110RのB2のボルト破断面(No.31)(b) 110RのA1のボルト破断面(No.28)
図 8.1.37 電子顕微鏡による当該セグメントのボルト破断面(レプリカ)の観察結果

(方向をもたない等軸ディンプルであることが見て取れる。)



図 8.1.38 109R に対する 110R の崩壊メカニズム



図 8.1.39 後述するリング継手の載荷試験(接線方向)により破断されたボルトの 破断面(レプリカ)の観察結果(一方向に伸長したディンプルであることが見て取 れる。)

以上、回収されたセグメントの破壊状況、ボルト等の破断の状況、シールドマシンと一緒に回収されたセグメントの位置関係(図 10.2.24)等からセグメントの破壊の機序を推定すると次のようである。

1) 111 リングの K セグがある程度抜け、この K セグを中心として 111 リングの B2 と B1 セグが垂れ下がる。(この時点で K セグのすき間、垂れた 111 リングとシ ールドマシンのすき間から土砂水が吹き出したものと考えられる。)

2) セグメント天井付近の111 リングと110 リング間のボルト(4本)が破断する。

(さらに垂れた 111 リングとシールドマシンのすき間から土砂水が吹き出したと考 えられる。)

3) 111 リングの B1・A2 と 110 リングとに除々に相対的にずれが生じ、この2 リング間の縁が切れる。

4) 111 リングの K セグが抜け、B2 が折れて上半分が倒れ込むとともに B1 が落下。

5) 同時に 110 リング(B1、B2、A1、A2 セグ)が破壊し、坑口側に流れる。K セ グも同時に落下(切羽側に流れる)。

8.2 単体曲げ試験

セグメント単体の基本的な強度性能を確認するため、セグメント単体曲げ試験を 実施した。試験体のセグメントはA1セグメントであり、計3体のA1セグメントに ついて、それぞれ単体曲げ試験を実施した。試験体の名称は、A1-1、A1-2、A1-3と した。

試験方法は、図 8.2.1 に示すように、試験体を冶具の上に設置し、200kNの静的ジャッキを用いて載荷(P)した。試験状況の写真を写真 8.2.1 に示す。

変位計の取り付け位置を図 8.2.2 に示す。①はジャッキストローク変位量であり、 ②~④は載荷ジャッキ直下のセグメント坑内側の変位量、⑤~⑧はセグメント両端 部の変位量である。



図 8.2.1 セグメント単体曲げ試験の試験方法



(a) 試験状況全影



(b) 載荷盤直下のセグメントの変位計測





(c) セグメント端部の支持方法(d) セグメント端部の変位計測写真 8.2.1セグメント単体曲げ試験の試験状況



①はジャッキストローク変位量

図 8.2.2 変位計取り付け位置

ジャッキの荷重と各変位量との関係を図 8.2.3 に示す。載荷ジャッキ直下のセグメ ント坑内側の変位量(②~④)については、初期の立ち上がりも弾性的であり、荷 重変位関係は線形である。ジャッキストローク(①)については、初期の立ち上が りが緩やかになっており、これは試験装置自体のいわゆる「なじみ」によるもので あるが、その後は変位量(②~④)と同様な傾向を示しており、良好な計測結果が 得られている。セグメント両端部の変位量(⑤~⑧)は、セグメントがある程度変 位するまではほとんどなく、ひび割れ発生荷重に到達して以降、大きな変位量が計 測される。ひび割れの確認は目視により行い、ひび割れを油性ペンでなぞるととも に、その時の荷重をセグメントに直接記載した。

各 A1 セグメントのひび割れ発生荷重は、40.0kN(A1-1)、39.5kN(A1-2)、40.0kN (A1-3)と各試験でほぼ同等の値であった。



図 8.2.3 A1 セグメントの単体曲げ試験時の荷重と変位の関係

図 8.2.4 に A1-1, A1-2, A1-3 の荷重と変位の関係を示す。A1-1 と A1-2 について は、荷重が約 80.0kN に到達した段階で載荷を終了したが、A1-3 については、変位計 の計測限界まで載荷し、試験終了荷重は 90.0kN であった。ひび割れ発生荷重の平均 値は 39.8kN であった。したがって、試験終了荷重と試験終了荷重時の中央直下の変 位量は試験上の制約による値である。試験結果を表 8.2.1 に示す。



図 8.2.4 A1-1, A1-2, A1-3の荷重と変位の関係を同じ図面内にて比較(変位計③)

		ひび割れ発生		試験終了
	ひび割れ	時の中央直下	封驗效了世重	荷重時の
試験体 No.	発生荷重	の変位量	武 映 於 」 何 里 (Ⅰ-NI)	中央直下の
	(kN)	(mm)	(KIN)	変位量
				(mm)
A1-1	40.0	3.86	81.0	51.8
A1-2	39.5	3.76	80.0	31.2
A1-3	40.0	3.18	90.0	94.4
平均	39.8	3.60	_	_

表 8.2.1 セグメント単体曲げ試験結果

写真 8.2.2 に A1 セグメント (A1-3)の単体曲げ試験後のひび割れ発生状況を示す。 同写真はセグメントの切羽側つまりボルトボックスが設けてある箇所を左から右に かけて撮影したものである。また、セグメントに記載された線は、ひび割れをなぞ ったものであり、数値はそのひび割れが発生したときの荷重を示している。セグメ ント中央のボルトボックスの左右端 ((j)~(m))からひび割れが発生しており、その 後、左右のボルトボックスと中央のボルトボックスの間に位置する載荷丸棒直下((h) 及び(o))からひび割れが発生している。

(a)	(b)	(c)	(d)
	173.5 173.5 173.0 173.5 173.0 173.5 175.5 175.5 175.5 175.5 175.5 175.5 175.5 175.5 175.5 175.5 175.5	12 415 5825 55,0 47,5 8825	145 158.5 148.5 147.5 14.0 148.5 14.0 148.5 14.0 148.5
(e)		(g)	(n)
			51/0 0 0 55 0 0 0 0
(1)	(j)	(K)	(1)
7	1530 14 12.5 151.0 151.5 151.5 142.0 155	1025 1025 1025 1025 1025 1025 1025 1025	125 125 1.9 755 /420 /935
(m)	(n)	(0)	(p)
/ (20 h35			(t)
(4)	(1)	(8)	(1)

写真 8.2.2 A1 セグメント(A1-3)の単体曲げ試験後のひび割れ発生状況(切羽側, 左 →右) 写真 8.2.3 から写真 8.2.5 に A1-1 から A1-3 までの単体曲げ試験後のセグメントの ひび割れ発生状況の写真を示す。坑口側つまりボルトインサートが設けてある箇所 も同様に,まずセグメント中央のボルトインサートの左右端からひび割れが発生し, 続いて載荷丸棒直下からひび割れが発生する傾向にあった。



写真 8.2.3 A1 セグメント(A1-1)の単体曲げ試験後のひび割れ発生状況



写真 8.2.4 A1 セグメント(A1-2)の単体曲げ試験後のひび割れ発生状況



写真 8.2.5 A1 セグメント(A1-3)の単体曲げ試験後のひび割れ発生状況

写真 8.2.6 は, A1-3 の単体曲げ試験後のひび割れ発生状況(セグメント中央の坑内 側)を示している。同写真から,切羽側のボルトボックス,エレクター孔,坑口側 のボルトインサートを結ぶような亀裂も生じていることがわかる。



写真 8.2.6 A1-3 の単体曲げ試験後のひび割れ発生状況(セグメント中央坑内側)

図 8.2.5 にセグメント単体曲げ試験時の曲げモーメントの算出方法を示す。曲げモ ーメントの算出にあたっては、社団法人日本下水道協会発行の『シールド工事用標 準セグメントー下水道シールド工事用セグメントー(JSWAS A-3,4-2001)』²⁾を参考 にした。

作用する最大の曲げモーメントは、以下の式により表される。

$$M = \frac{P}{2} \cdot \frac{(L2 - L1)}{2} + \frac{W_D \cdot L2}{8}$$
(8.2.1)

ここで, *P*: 試験時の荷重, *W_D*: セグメントの自重, *L₁*=900mm, *L₂*=2984 である。 また, セグメントの自重は, 以下の式により求まる。

$$W_D = (b \cdot h \cdot S) \cdot \gamma_c \tag{8.2.2}$$

ここで, b: セグメントの幅(= 1.4m), h: セグメントの厚さ(= 0.16m), S: セグメントの弧長(=(3494.5+3262.5)/2=3378.5), γ_c : セグメントの単位体積重量(= 26.0kN/m³)で



図 8.2.5 セグメント単体曲げ試験時の曲げモーメントの算出方法

	試懸	検値	試験値		
	(事業	专者)	((独)労働安全衛生総合研究		
			所)		
	曲げモーメント 荷重		曲げモーメント	荷重	
	$(kN \cdot m)$	(kN)	$(kN \cdot m)$	(kN)	
ひび割れ発生	27.2	38.0	28.1	39.8	
試験終了	37.7	58.3	54.2	90.0	

表 8.2.2 セグメント単体曲げ試験時の曲げモーメントと荷重
式(8.2.1)及び式(8.2.2)から、ひび割れ発生荷重から、ひび割れ発生モーメントを求め、同様に、試験終了荷重から試験終了曲げモーメントを求めた。

表 8.2.2 にセグメント単体曲げ試験時の曲げモーメントと荷重を示す。本試験結果 は 39.8kN となっているため、事業者のひび割れ発生荷重である 38.0kN よりも大き くなっている。また、事業者の行った試験における試験終了の定義が不明なため厳 密な比較はできないが、試験終了荷重についても、本試験結果は 90.0kN 以上となっ ているため、こちらについても事業者の試験終了荷重を超えている。

8.3 リング継手に関する試験

8.3.1 ボルトインサートの引抜き試験

セグメントのボルトインサート部分の引抜きに対する強度を確認するため本試験 を実施した。

図 8.3.1 に示すように、試験体のセグメントは A2 セグメント1 体であり、計3箇 所のボルトインサート部にボルトを挿入し、各ボルトを1 つずつ 200kN の静的載荷 ジャッキにより図中の上方向に引っ張ることにより試験を実施した。試験体の名称 は、A2-No.1、A2-No.2、A2-No.3 とした。図中には、ボルトインサートの根入れ底か ら 45°の線を描いている。この線をコーン破壊の破壊線と仮定した。反力盤の間隔は 450mm とした。インサートの長さ(=埋込深さ)は 130mm、外径は 29mm である。ASTM E488 / E488M - 10 Standard Test Methods for Strength of Anchors in Concrete Elements³⁾, (社)日本建築あと施工アンカー協会発行の「あと施工アンカー標準試験法・同解

説」⁴⁾によると、反力盤の間隔は埋込深さの 3.5 倍程度あれば反力盤の影響が引抜き 強度に影響を及ぼさないとされている。本実験の場合は、埋込深さの約 3.46 倍が反 力盤の間隔である。同資料には反力盤の間隔と引抜き強度の関係も記述されている。 それによると大きく見積もっても本実験の結果は高い方に 5%程度の範囲に入って いる。



図 8.3.1 A2 セグメントに対するボルトインサートの引抜き試験

写真 8.3.1 にボルトインサートの引抜き試験の実施状況を示す。引抜き試験時の変 位量は、ジャッキストロークにて計測している。また、A2-No.2、A2-No.3 について は、同写真(b)、(c)に示すように、ボルトに変位量測定用の冶具を取り付け、変位量 を計測している。



(a) 遠影



(b) 近影(c) 変位計の設置状況写真 8.3.1A2 セグメントに対するボルトインサートの引抜き試験

図 8.3.2 にボルトインサートの引抜き試験時の荷重と変位の関係を示す。同図(a)の A2-No.1 に対して、ジャッキストロークのみでしか変位量を計測していないため、曲 線は1本である。最大荷重は116.2kNであった。次に、同図(b)、(c)の A2-No.2、A2-No.3 を見ると、ジャッキストロークによる変位量計測に比べ、ボルトに取り付けた変位 計による変位量の計測結果の方がより小さい変位量で破壊している。ジャッキスト ロークでの変位の値は、治具等の「なじみ」分も含まれているため、ボルトインサ ートに近い位置での変位量の計測の方がインサート部からのボルトの抜け量等がよ り直接的に測定できている。また、最大荷重はそれぞれ 94.3kN、105.4kN であり、 最大荷重を示すときのボルトインサート直近の変位量はそれぞれ 2.37mm、0.99mm であった。

全ての結果を図 8.3.3,表 8.3.1 にまとめる。図 8.3.3 からジャッキストロークで計 測された変位量から描かれた荷重変位曲線は、どの試験結果もほぼ同等であること がわかる。表 8.3.1 から、最大荷重についても平均値として 105.3kN となり、ばらつ きもそれほど大きくない。

写真 8.3.2 から写真 8.3.4 に A2-No.1 から A2-No.3 の試験後の写真を示す。A2-No.1 のみボルトインサート部が完全にセグメントから剥離していた(写真 8.3.2(b),(f)参 照)が,A2-No.2,A2-No.3 についてはボルトインサート部とセグメントのコンクリ ート部分が完全に剥離していなかった(写真 8.3.3(f),写真 8.3.4(f)参照)。破壊面は, ボルトインサート部の底部から約 45°に走っている(写真 8.3.2(e),写真 8.3.3(e), 写真 8.3.4(e)参照)が,鉄筋とコンクリートの境界面まで破壊面が到達すると約 30 °まで破壊面が緩やかになり(写真 8.3.2(f)参照),鉄筋とコンクリートの境界に沿 って破壊面が拡がる(写真 8.3.3(d),(f),写真 8.3.4(d)参照)。このため,厳密に 45 °で破壊面が表面に出現せず,表面に見える破壊面の角度は水平面から 30°(ボル トインサートの長軸から 60°)又はそれよりも小さい角度で破壊しているように見 える(写真 8.3.2(a),(c),(d),写真 8.3.3(a),(b),(c),写真 8.3.4(a),(b),(c)参照)。



図 8.3.2 ボルトインサートの引抜き試験時の荷重と変位の関係



図 8.3.3 ボルトインサートの引抜き試験時の荷重と変位の関係(各試験結果の比較)

試験体	最大荷重	最大荷重時の	ひび割れ
No.	(kN)	変位量	発生状況
		(mm)	
A2-No.1	116.2	未計測	最大荷重時に瞬時に発生
A2-No.2	94.3	2.37	最大荷重から徐々に進展
A2-No.3	105.4	0.99	最大荷重時に瞬時に発生
平均	105.3	1.68	—

表 8.3.1 ボルトインサートの引抜き試験結果



写真 8.3.2 ボルトインサートの引抜き試験後の写真 (A2-No.1)



写真 8.3.3 ボルトインサートの引抜き試験後の写真(A2-No.2)



8.3.2 リング継手のせん断試験

リング継手は、ボルトインサート、ボルトボックス、ボルトで構成される。ボル トインサート又はボルトボックスと載荷板をボルトで連結した状態において、載荷 板を坑内側へ載荷、地山側へ載荷、セグメントの円周(接線)方向へ載荷、坑口側 と地山側の間の45度又は切羽側と坑内側の間の45度の方向に載荷、と種々の方向 の強度を調査するためリング継手に関して以下の載荷試験を実施した。載荷方向は 図8.3.4、図8.3.5、図8.3.6 に示すとおりである。

- ・ボルトインサートの載荷試験
 - a) 坑内側へ載荷
 - b) 地山側へ載荷
 - c) 円周(接線) 方向へ載荷
 - d) 坑口側と地山側の間の 45 度の方向に載荷
- ・ボルトボックスの載荷試験
 - a) 坑内側へ載荷
 - b) 地山側へ載荷
 - c) 円周(接線) 方向へ載荷
 - d) 切羽側と坑内側の間の 45 度の方向に載荷



図 8.3.4 ボルトインサート及びボルトボックスに関する載荷試験の方向



図 8.3.5 ボルトボックスに関する載荷試験の方向



図 8.3.6 ボルトインサートに関する載荷試験の方向

8.3.2.1 載荷試験方法

試験は、テストベッド上に試験体を固定し、載荷フレームの柱に取り付けた油圧 ジャッキで載荷した。載荷中、載荷荷重と冶具の変位量等を計測した。 使用した機器の一覧を表 8.3.2 に示す。

名称	容量
テストベッド	500kN·m
油圧ジャッキ	荷重 500kN
	ストローク 300mm
ロードセル	±200kN
変位計	ストローク 50mm
	感度 1/200mm
データロガー	1000ch

表 8.3.2 使用した試験機器の一覧

(1) 坑内側へ載荷又は地山側へ載荷

図 8.3.7, 図 8.3.8 に試験方法の概略図及び詳細図を示す。また,写真 8.3.5 に試験 前の載荷ジャッキ,セグメント,変位計等の設置状況を示す。使用したセグメント は,A2 セグメントである。

セグメント中央を除く2箇所のボルトインサート又はボルトボックス付近をH型 鋼で固定し、セグメント中央のボルトインサート又はボルトボックスを500kNジャ ッキにより水平方向に荷重を載荷した。

セグメントの固定に用いた H 型鋼の間隔 d は,反力が載荷荷重に影響を与えない 間隔及びセグメントが曲げによってひび割れない間隔である必要があり, d= 1012mm とした。

セグメント中央のボルトインサート又はボルトボックスの載荷部分は、ジャッキ 先端の載荷板とボルトインサート又はボルトボックスを M16 ボルトとナットにより 締結させることにより構成されている。載荷板の板厚は、ボルトボックスの厚さに 合わせ 12mm とした。載荷時の摩擦の影響を低減させるため、ボルトインサート又 はボルトボックス、載荷板の間に厚さ 2mm、幅 100mm、長さ 200mm のテフロンシ ートを設置し、M16 ボルトにより締結した。なお、ボルトの締付けは、レンチを用 いて手締めとした。



図 8.3.7 ボルトインサート及びボルトボックスの坑内側及び地山側への載荷方法の 概略図





断面 A-A

図 8.3.8 ボルトインサート及びボルトボックスの坑内側及び地山側への載荷方法 の詳細図



写真 8.3.5 ボルトインサート及びボルトボックスの坑内側及び地山側への載荷試 験状況

(2)円周(接線)方向へ載荷

図 8.3.9 に試験方法の概略図を示す。また、写真 8.3.6 に試験前の載荷ジャッキ、 セグメント等の設置状況を示す。使用したセグメントは、A1 セグメントである。

セグメント中央のボルトインサート又はボルトボックスの載荷部分は、ジャッキ 先端の載荷板とボルトインサート又はボルトボックスを M16 ボルトとナットによ り締結させることにより構成されている。載荷板の板厚は、ボルトボックスの厚さ に合わせ 12mm とした。載荷時の摩擦の影響を低減させるため、ボルトインサート 又はボルトボックス、載荷板の間に厚さ 2mm、幅 100mm、長さ 200mm のテフロン シートを設置し、M16 ボルトにより締結した。なお、ボルトの締付けは、レンチを 用いて手締めとした。



図 8.3.9 円周(接線)方向への載荷方法の概略図



写真 8.3.6 ボルトインサート及びボルトボックスの坑内側及び地山側への載荷試験 状況

(3) 坑口側と地山側の間の 45 度の方向又は切羽側と坑内側の間の 45 度の方向に 載荷

図 8.3.10, 図 8.3.11 にそれぞれボルトインサート及びボルトボックスに対しての試験方法の概略図を示す。また,写真 8.3.7,写真 8.3.8 に試験前の載荷ジャッキ,セグメント等の設置状況を示す。使用したセグメントは,A2 セグメントである。

セグメント中央のボルトインサート又はボルトボックスの載荷部分は、ジャッキ 先端の載荷板とボルトインサート又はボルトボックスを M16 ボルトとナットによ り締結させることにより構成されている。載荷板の板厚は、ボルトボックスの厚さ に合わせ 12mm とした。載荷時の摩擦の影響を低減させるため、ボルトインサート 又はボルトボックス、載荷板の間に厚さ 2mm、幅 100mm、長さ 200mm のテフロン シートを設置し、M16 ボルトにより締結した。なお、ボルトの締付けは、レンチを 用いて手締めとした。



図 8.3.10 坑口側と地山側の間の 45 度の方向に載荷(ボルトインサート)



図 8.3.11 切羽側と坑内側の間の 45 度の方向に載荷(ボルトボックス)



写真 8.3.7 坑口側と地山側の間の 45 度の方向に載荷(ボルトインサート)



写真 8.3.8 切羽側と坑内側の間の 45 度の方向に載荷(ボルトボックス)

8.3.2.2 載荷試験結果

ボルトインサート及びボルトボックスと載荷板を M16 ボルトで締結した状態に おいて、様々な方向から載荷試験を実施した。結果は以下に示すとおりである。

(1) 坑内側へ載荷又は地山側へ載荷

試験結果の一覧表を表 8.3.3 に示す。

図 8.3.12, 図 8.3.13, 写真 8.3.9, 写真 8.3.10 にボルトインサートの載荷試験結果, 図 8.3.14, 図 8.3.15, 写真 8.3.11, 写真 8.3.12 にボルトボックスの載荷試験結果を示 す。ボルトの締付けは、レンチを用いて手締めを基本としているが、図 8.3.16 のみ トルク 135N·m にてボルトを締付けており、トルクの影響を調査しているが、結果と して、トルクの影響は 2.7kN 程度である。

図 8.3.17 にボルトインサート及びボルトボックスの坑内側及び地山側への載荷試 験における荷重変位関係をまとめて示している。

ボルトインサートの坑内側への載荷試験における最大荷重が最も小さく,28.1kN しかない。これは、第4章で述べたように、設計ではボルトのせん断力を用いてい るが、ボルトのせん断力を発揮する前に、ボルトインサートに坑内側への荷重が加 わると、ボルトのせん断力以下の荷重でリング継手が破壊してしまうことを示して いる。

	> <	9 <u>0</u>	
載荷方向	ひび割れ発生荷重 (トN)	最大荷重 (比N)	破壊状況
		(KIN)	
ボルトインサート	6.0	28-1	坑内側コンクリート
坑内側へ載荷	0.0	20.1	破壊
ボルトインサート	79.0	91 C	地山側コンクリート
地山側へ載荷	/8.0	81.0	破壊
ボルトボックス	50.0	50.0	坑内側コンクリート
坑内側へ載荷	50.0	39.9	破壊
ボルトボックス		82.0	M16 ボルト
地山側へ載荷	_	82.0	破断
ボルトボックス			
地山側へ載荷		0 <i>1</i> 7	M16 ボルト
M16 ボルトの	_	04.7	破断
締付軸力:135N·m			

表 8.3.3 ボルトインサート及びボルトボックスの坑内側及び地山側への載荷試験結 里一覧



図 8.3.12 ボルトインサートの坑内側への載荷試験結果



写真 8.3.9 ボルトインサートの坑内側への載荷試験後の破壊状況



図 8.3.13 ボルトインサートの地山側への載荷試験結果



写真 8.3.10 ボルトインサートの地山側への載荷試験後の破壊状況



図 8.3.14 ボルトボックスの坑内側への載荷試験結果



写真 8.3.11 ボルトボックスの坑内側への載荷試験後の破壊状況



図 8.3.15 ボルトボックスの地山側への載荷試験結果



写真 8.3.12 ボルトボックスの地山側への載荷試験後の破壊状況



図 8.3.16 ボルトボックスの地山側への載荷試験結果(M16 ボルトの締付軸力 135N·m)



図 8.3.17 ボルトインサート及びボルトボックスの坑内側及び地山側への載荷試験 結果

(2)円周(接線)方向へ載荷

試験結果の一覧表を表 8.3.4 に示す。図 8.3.18, 写真 8.3.13 にボルトインサートの 載荷試験結果,図 8.3.19,写真 8.3.14 にボルトボックスの載荷試験結果,図 8.3.20 に両者の比較を示す。

表 8.3.4 ボルトインサート及びボルトボックスの円周(接線)方向への載荷試験結

試験条件	最大荷重 (kN)	最終破壊状況
ボルトインサート 円周 (接線) 方向	84.3	ボルト破断
ボルトボックス 円周(接線)方向	87.5	ボルト破断

果



図 8.3.18 ボルトインサートの円周(接線)方向への載荷試験結果



写真 8.3.13 ボルトインサートの円周(接線)方向への載荷試験後の破壊状況



図 8.3.19 ボルトボックスの円周(接線)方向への載荷試験結果



写真 8.3.14 ボルトボックスの円周(接線)方向への載荷試験後の破壊状況



図 8.3.20 ボルトインサート及びボルトボックスの円周(接線)方向への載荷試験結 果

(3) 坑口側と地山側の間の 45 度の方向又は切羽側と坑内側の間の 45 度の方向に 載荷

試験結果の一覧表を表 8.3.5 に示す。図 8.3.21,写真 8.3.15 にボルトインサートの 載荷試験結果,図 8.3.22,写真 8.3.16 にボルトボックスの載荷試験結果,図 8.3.23 に両者の比較を示す。

表 8.3.5 ボルトインサートを坑口側と地山側の間の 45 度の方向へ載荷した試験及 びボルトボックスを切羽側と坑内側の間の 45 度の方向へ載荷した試験結果

試験条件	荷重 (kN)	破壊状況
ボルトインサート		コンクリート破壊
坑口側と地山側の間の	55.1	ボルトインサート抜け出
45 度の方向		L
ボルトボックス	41.1	ボルトボックスの剥離
切羽側と坑内側の間の	51.7, 51.1	コンクリートの剥離
45 度の方向	60.9	ボルト破断



図 8.3.21 ボルトインサートを坑口側と地山側の間の 45 度の方向へ載荷した試験結 果



写真 8.3.15 ボルトインサートを坑口側と地山側の間の 45 度の方向へ載荷した試験 後の破壊状況



図 8.3.22 ボルトボックスを切羽側と坑内側の間の 45 度の方向へ載荷した試験結果



写真 8.3.16 ボルトボックスを切羽側と坑内側の間の 45 度の方向へ載荷した試験後の破壊状況



図 8.3.23 ボルトインサートを坑口側と地山側の間の 45 度の方向へ載荷した試験及 びボルトボックスを切羽側と坑内側の間の 45 度の方向へ載荷した試験結果

8.3.2.3 載荷試験結果まとめ

試験結果の一覧表を表 8.3.6 に示す。また、図 8.3.24 にボルトインサートに対する 載荷方向とボルトが破断する領域との関係、図 8.3.25 にボルトボックスに対する載 荷方向とボルトが破断する領域との関係、図 8.3.26、図 8.3.27 にボルトインサート及 びボルトボックスに対する載荷方向と破壊荷重の関係、図 8.3.28 にボルトボックス のボルト穴の内径計測結果、表 8.3.7 にボルトボックスのボルト穴の内径計測結果一 覧表をそれぞれ示す。

設計ではボルトのせん断力を用いているが、ボルトのせん断力を発揮する前に、 ボルトインサートに坑内側への荷重が加わると、ボルトのせん断力以下の荷重でリ ング継手が破壊してしまうことを示している。設計計算での最大リング間せん断力 は 11.3kN であるため、設計荷重では破壊にはいたらず、ひび割れが発生するのみで あるが、設計では想定されていない破壊形態となり、当該設計は望ましいものでは ないと言える。

	載荷方向	荷重	破壞状況
		(kN)	
	古古佃	6.0	ひび割れ
	りLPT頂	28.1	坑内側コンクリート破壊
ボルト	地山側	78.0	ひび割れ
		81.6	地山側コンクリート破壊
インサー	円周(接線)	84.3	ボルト破断
F	坑口側と	55.1	コンクリート破壊及び
	地山側の間		ボルトインサート抜け出し
	の		
	45 度の方向		
	古古加	50.0	ひび割れ
	りLPTI則	59.9	坑内側コンクリート破壊
	地山側	82.0	ボルト破断
ボルト	円周(接線)	87.5	ボルト破断
ボックス	切羽側と	41.1	ボルトボックスの剥離
	坑内側の間	51.7, 51.1	コンクリートの剥離
	Ø	60.9	ボルト破断
	45 度の方向		

表 8.3.6 試験結果一覧表




コンクリート破壊する領域





(c) 拡大図

図 8.3.24 ボルトインサートに対する載荷方向とボルトが破断する領域との関係





(b) ボルトが破断する領域とコンクリート破壊する領域









(c) 拡大図

図 8.3.25 ボルトボックスに対する載荷方向とボルトが破断する領域との関係



(a) ボルトインサート側





ボルトボックス側

図 8.3.26 ボルトインサート及びボルトボックスに対する載荷方向と破壊荷重の関係



(a) ボルトインサート側



図 8.3.27 ボルトインサート及びボルトボックスに対する載荷方向と破壊荷重の関係



図 8.3.28 ボルトボックスのボルト穴の内径計測結果(変位を 10 倍にして記載)

表 8.3.7 ボルトボックスのボルト穴の内径計測結果一覧表

	試験名又はリング名										
	B2-カ(新品)		BB(坑内側)		BB(地山側)		BB(接線方向)		BB(45度の方向)		
角度	平均	新品の 平均直径 からの差	平均	新品の 平均直径 からの差	平均	新品の 平均直径 からの差	平均	新品の 平均直径 からの差	平均	新品の 平均直径 からの差	
0	22.940	0.003	22.894	-0.043	22.931	-0.006	23.484	0.547	23.143	0.206	
45	22.942	0.005	22.937	0.000	22.937	0.000	22.971	0.034	23.287	0.350	
90	22.946	0.009	23.067	0.130	23.687	0.750	22.852	-0.085	23.106	0.169	
135	22.920	-0.017	22.808	-0.129	22.893	-0.044	22.968	0.031	23.115	0.178	
新品の 平均直径	22.937										

8.4 コンクリート部分の物理試験

セグメント単体曲げ試験に供した A1 セグメントのコンクリート部分から円柱供 試体を採取し,超音波速度試験及び一軸圧縮試験を実施した。超音波速度試験及び 一軸圧縮試験は,セグメントのコンクリート強度の把握に加えて,数値解析パラメ ータを得るために実施した。

JIS A 1107:2002「コンクリートからのコア及びはりの切取り方法並びに強度試験方法」⁵⁾によると、『コア供試体の直径は、一般に粗骨材の最大寸法の3倍以下としてはならない』と明記されている。当該災害のセグメント作製に使用されたコンクリートの粗骨材の最大寸法は20mmであるため、円柱供試体の直径は60mm以下としてはならない。しかしながら、セグメント内の配筋にかかってしまうため、直径30mm、高さ60mmの円柱供試体が採取できる最大の寸法であった。そのため、直径30mm、高さ60mmの円柱供試体を用いて試験を実施した。

コンクリート採取状況の写真を写真 8.4.1 に,採取箇所の概略図を図 8.4.1 に示す。 A1 セグメント 3 体から合計 12 個の供試体を採取できた。各 A1 セグメントにつき, 各 4 個の供試体を採取したことになる。採取した合計 12 個の供試体のうち,各 A1 セグメントにつき,各 2 個の供試体,合計 6 個の供試体を超音波速度試験及び一軸 圧縮試験に供した。



写真 8.4.1 A1 セグメントのコンクリート部分から円柱供試体を採取



図 8.4.1 A1 セグメントのコンクリート部分から円柱供試体を採取。

8.4.1 一軸圧縮試験

ー軸圧縮試験は、材料の最も基本的な力学特性を求める試験であるとともに、比 較的簡便な試験で実施頻度が高く、その試験結果は多方面に利用されている。

一軸圧縮試験は、JIS A 1108:2006「コンクリートの圧縮強度試験方法」⁶に従い実施した。JIS A 1132:2006「コンクリート強度試験用供試体の作り方」⁷⁾によると、『供試体は、直径の2倍の高さをもつ円柱形とする。その直径は、粗骨材の最大寸法の3倍以上、かつ、100mm以上とする』とある。今回採取した円柱供試体は、直径30mm、高さ60mmのため、供試体の高さは直径の2倍であるが、直径の寸法は同規格を満たしていない。これは前述したように、セグメントの配筋のためである。

写真 8.4.2 に一軸圧縮試験の様子を示す。

また,JISA1149:2010「コンクリートの静弾性係数試験方法」⁸⁾に従い,一軸圧縮 試験中の静弾性係数を計測した。静弾性係数は,供試体にはり付けたひずみゲージ により10×10⁻⁶以下の精度で供試体のひずみを計測し,以下の式により求められる。

$$E_{c} = \frac{S_{1} - S_{2}}{\varepsilon_{1} - \varepsilon_{2}} \times 10^{-3}$$
(8.4.1)

ここで, *E*_c: 各供試体の静弾性係数(kN/mm²) *S*₁: 最大荷重の 1/3 に相当する応力(N/mm²)

S₂:供試体の縦ひずみ 50×10⁻⁶のときの応力(N/mm²)

εi: 応力によって生じる供試体の縦ひずみ

 $\varepsilon_2: 50 \times 10^{-6}$



写真 8.4.2 一軸圧縮試験の様子

図 8.4.2 に各供試体の軸方向応力と軸ひずみの関係を示す。

軸方向の応力は、軸方向に加えた力を供試体の断面積で除した値である。

軸方向の変位は,供試体の外部から変位計により軸方向の変位を計測した場合(外 部変位計),供試体の左右側面からそれぞれひずみゲージにより供試体の軸方向の 変位を計測した場合(ひずみゲージ)がある。外部変位計の場合,供試体の端面が 完全な平坦でない影響,試験機の載荷盤自体の変形の影響等を含み,実際の供試体 の変位よりも大きな変位を計測してしまう。このため,全ての供試体において,外 部変位計から計測される応力ひずみ関係は図の右側へシフトした曲線を呈してい る。

一方,ひずみゲージから計測される応力ひずみ関係は,初期の立ち上がりも直線 的であり,良好な応力ひずみ関係が得られている。ただし,ひずみゲージから計測 される軸ひずみは,ひずみゲージの検長に対するひずみゲージの変位量から求めら れるものであるため,局部的なひずみ値になっていることに留意する必要がある。



一軸圧縮強さ qu および静弾性係数 Ec の概要について,図 8.4.3 に示す。一軸圧縮 強さ qu は最大圧縮応力であり、静弾性係数 Ec は同図及び式(8.4.1)に示すように、 最大圧縮応力の 1/3 の点と軸ひずみ 0.005%の点を結んだ直線の傾きである。また、 破壊ひずみ Gは、一軸圧縮強さが計測された時の軸ひずみの値である。

ー軸圧縮試験は、比較的簡便な試験で実施頻度が高いため、蓄積されたデータも 多く、一軸圧縮強度から材料の相対的な強さを知ることができる。静弾性係数は、 ある応力に対して、その材料がどの程度変形するかを示すものであり、その値が小 さいと材料は変形しやすいと言える。

ー軸圧縮試験結果を表 8.4.1 に示す。一軸圧縮強さ及び破壊形状写真を見ると,強度の低い A1-1a 及び A1-2a については,供試体が縦割れに破壊しており,局部的な引張力が作用したため割裂破壊の様相を呈していると推察される。また,供試体の大きさが標準的な大きさ(直径 100mm,高さ 200mm)よりも小さく,相対的に供試体に占める粗骨材の大きさが大きくなるため,粗骨材とコンクリートモルタルの境界面で破壊しているということも考えられる(例えば,「表 8.4.1 A1-2a 破壊形状写真」参照)。したがって,縦割れによる破壊,粗骨材とコンクリートモルタルの境界面での破壊等を呈している A1-1a 及び A1-2a については,その結果を無視し,平均値からは除外した。

ー軸圧縮強さの平均値は、59.9 N/mm²となり、当該災害のセグメントのコンクリートの設計基準強度は45 N/mm²であるため、設計基準強度を満たす。

静弾性係数 E_c の平均値は 42.5 kN/mm²となり,超音波速度試験から算出された動弾性係数 E_d = 37.7 kN/mm²と近い値を示している。



図 8.4.3 静弾性係数 Ec および一軸圧縮強さ qu の求め方

8-117

試料 A1-1 A1-2 A1-3 平 番号 均 b b b a a a 物性 値 і і 値 一軸 42.5 50.7 42.1 75.8 52.0 61.1 59. 9 圧縮 強さ q_u N/mm^2 破壞 0.11 0.17 0.08 0.30 0.20 0.19 0.2 ひずみ 2 $\mathcal{E}_{f}(\%)$ 静 47.8 34.3 42.2 36.5 63.9 35.2 42. 弾性 5 係数 E_c kN/mm 2 破壞 形状 写真

表 8.4.1 一軸圧縮試験結果

※ A1-1a 及び A1-2a については、一軸圧縮強さ及び破壊形状写真を見ると、供試体 が縦割れに破壊しており、割裂破壊の様相を呈していると推察され、円柱供試体 (直径 30mm, 高さ 60mm)を採取する際に、クラックが発生した可能性がある ため、平均値を算出する際には除外した。

8.4.2 超音波速度試験

超音波速度は、材料の硬さを示す指標として利用される⁹。例えば、山岳トンネルでは地山等級を決定するために、P波速度、S波速度といった弾性波速度を用いている¹⁰。また、超音波速度、超音波速度から得られる動弾性係数等は数値解析に有用である。

JIS A 1127:2010「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数,動せん断弾性係数及 び動ポアソン比試験方法」¹¹⁾によると、共鳴振動によっても動弾性係数等を算出す ることができるが、超音波速度を数値解析に使用するという目的上、地盤工学会基 準である JGS1220-2009「パルス透過法による岩石の超音波速度測定法」⁹に従い、試 験を実施した。

図 8.4.4 に超音波速度測定装置の構成例を,写真 8.4.3 に実験状況をそれぞれ示す。 超音波測定装置は,基本的にパルス発生装置,発受振子,測定装置から構成されて おり,本実験でもこれに準じた。ここから得られる超音波速度 VP 及び Vs から,動ポ アソン比 va,動せん断弾性係数 Ga 及び動弾性係数 Ea を以下の式にて求めることが出 来る。

$$v_{d} = \frac{(V_{P} / V_{S})^{2} - 2}{2\{(V_{P} / V_{S})^{2} - 1\}}$$
(8.4.2)

$$G_d = \rho_t \cdot V_s^2$$

(8.4.3)

$$E_d = 2(1+v_d) \cdot G_d \tag{8.4.4}$$

ここで、 *ρ*_t: 測定状態における供試体の密度

表 8.4.2 に超音波速度試験結果の一覧を示す。合計 6 個の供試体の平均値をとると, P 波速度で 4.76km/sec, S 波速度で 2.47km/sec となる。また,動ポアソン比,動せん 断弾性係数,動弾性係数の平均値はそれぞれ 0.315, 14.3 kN/mm², 37.7 kN/mm²とな る。





写真 8.4.3 超音波速度測定状況例

封制来百	A1-1		A1-2		A1-3			
物性値	a ※	b	a ₩	b	а	b	平均值	
P波速度 Vp (km/sec)	4.55	4.68	4.89	4.72	4.75	4.88	4.76	
S 波速度 Vs (km/sec)	2.47	2.42	2.65	2.42	2.58	2.46	2.47	
動ポアソン比 <i>Va</i>	0.291	0.318	0.292	0.322	0.291	0.330	0.315	
動せん断弾性係 数 Gd (kN/mm ²)	14.4	13.9	16.5	13.7	15.6	14.1	14.3	
動弾性係数 <i>Ed</i> (kN/mm ²)	37.3	36.7	42.5	36.3	40.3	37.6	37.7	

表 8.4.2 超音波速度試験結果一覧

※ A1-1a 及び A1-2a については,一軸圧縮強さ及び破壊形状写真(表-3.1.1)を見 ると,供試体が縦割れに破壊しており,割裂破壊の様相を呈していると推察され, 円柱供試体(直径 30mm,高さ 60mm)を採取する際に,クラックが発生した可 能性があるため,平均値を算出する際には除外した。 8.5 セグメント継手に関する摩擦係数確認試験

8.5.1 摩擦係数確認試験の概要

セグメント継手面の摩擦係数が K セグメントの抜け出し力に影響すると考えられ るため、セグメント継手に関する摩擦係数確認試験を実施した。同試験は(独)土 木研究所と(独)労働安全衛生総合研究所との合同で実施した。また,同試験は(独) 土木研究所の構造力学実験施設内にある二次載荷試験装置(図 8.5.1,図 8.5.2 参照) を使用し、K セグメントと B1 セグメント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確認試験である。



図 8.5.1 二次載荷試験装置((独)土木研究所 構造力学実験施設内)

T	而	2
1	IH	



図 8.5.2 セグメント継手に関する摩擦係数確認試験概略図



図 8.5.3 K セグメントと B1 セグメントのセグメント継手面の一部を切り出した部 分供試体(接触面の長さ 150mm×200mm)

当該工事に用いられる予定であった新品のセグメント(K セグメントと B1 セグ メント)を使用し、各セグメントのセグメント継手面周辺の一部分をカットして摩 擦試験が実施可能な大きさの供試体を作成した(図 8.5.3 参照)。供試体は4 組作成 した。部分供試体寸法は、150mm(接触面の長さ)×200mm とした。

部分供試体を二次載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 状態になるまで載荷し、その状態を保持したまま軸力と直行する方向から載荷を行 った。試験中,軸力,軸力と直行する方向の荷重(ここでは「摩擦力」という。), 変位を計測した。載荷は変位制御で実施した。

KセグメントとBセグメントのセグメント継手面の状態について表 8.5.1 に示す4 つの状態を想定し、各状態に対して4つの軸力について摩擦係数確認試験を実施し た。試験 No.①ではシール材が有る場合でセグメントの浸水無しという条件である。 試験 No.②ではシール材が有る場合でセグメントの浸水有りという条件である(図 8.5.4 参照)。試験 No.③では②の条件に加えて、シール材のみに滑材を塗布してい る(図 8.5.5 参照)。試験 No.4 では②の条件に加えて、接触面全面に滑材を塗布し ている。

試験	<i>友 (</i> 开	軸力	/
No.	未任	(kN)	供訊件
1	シール材がある場合(浸水無し)	30	No.1
2	シール材がある場合(浸水有り)	60	No.2
3	②+シール材のみに滑材を塗布した場合(浸水有り)	90	No.3
4	②+接触面前面に滑材を塗布した場合(浸水有り)	120	No.4

表 8.5.1 試験ケース一覧

※軸力は、第4章の表4.2.4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。

※(浸水有り)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。

※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。

※滑材は、当該工事において使用された材料を使用。



図 8.5.4 部分供試体を水浸させている状態(試験 No.2), ③, ④)



図 8.5.5 シール材のみに滑材を塗布している様子(試験 No.③)

8.5.2 試験結果

試験で得られた摩擦力を軸力で除すことにより摩擦係数を算出した。また,固定 側と移動側の部分供試体の変位差(摩擦力と平行な方向)を相対変位とし,摩擦係 数と相対変位との関係を図 8.5.6~図 8.5.9 に示した。さらに,試験結果の一覧を表 8.5.2,図 8.5.10,図 8.5.11 に示す。

これより、滑材を塗布しない条件でも試験 No.①シール材がある場合(浸水無し) 0.17~0.19, ②シール材がある場合(浸水有り) 0.17~0.18 と比較的低い値であった。

滑材を塗布することで、試験 No.③②+シール材に滑材塗布(浸水有り)0.05~0.09 (平均値 0.075)、④②+接触面前面に滑材塗布(浸水有り)0.04~0.05(平均値 0.044) 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,滑材を塗布しない試験 No.①と②で用いた部分供試体に対して,浸水無しの 条件で約 5mm~10mm の相対変位まで再試験を実施したところ,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 0.26 であった。

当該工事では、セグメントを水で濡らし、シール材に滑材を塗布した状態で K セ グメントを挿入したとの証言が得られていることから、試験 No.③と同様の条件とな る。したがって、当該工事におけるセグメント継手面の平均摩擦係数は 0.075 となる。



図 8.5.6 摩擦係数と相対変位の関係(試験 No.①)



図 8.5.7 摩擦係数と相対変位の関係(試験 No.2)



図 8.5.8 摩擦係数と相対変位の関係(試験 No.③)



図 8.5.9 摩擦係数と相対変位の関係(試験 No.④)

		ᇔᆂ	早十麻肉も	扣封亦估	麻阙反粉	麻椒灰粉	供去
			取入库综力	相对委证	库尔休奴	库尔休奴	调石
		KN	KIN	mm		平均恒	
	CASE4-1	131.77	22.94	1.28	0.174		
①シール材がある場合(浸水無	CASE4-2	84.39	15.62	1.09	0.185	0.102	
L)	CASE4-3	56.78	10.91	1.07	0.192		
	CASE4-4	28.78	5.33	1.09	0.185		
	CASE4-5	127.66	26.78	5.02	0.210	0.165	(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)
	CASE1-1	107.30	18.85	0.82	0.176		
②シール材がある場合(浸水あ	CASE1-2	84.98	14.26	0.63	0.168	0.197	
り)	CASE1-3	56.00	9.30	0.59	0.166		
	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)
②舟武殿(受小なし)	CASE1-6	78.12	20.34	8.63	0.260		(CASE1-2再試験)
	CASE2-1	114.93	10.42	0.56	0.091		
③②+シール材のみに滑材を	CASE2-2	87.52	7.07	0.57	0.081	0.075	
塗布した場合(浸水あり)	CASE2-3	57.57	4.34	0.59	0.075		
	CASE2-4	28.20	1.49	0.58	0.053		
	CASE3-1	115.52	4.96	0.59	0.043	0.044	
④2+接触面全面に滑材を塗	CASE3-2	86.94	3.22	0.57	0.037		
布した場合(浸水あり)	CASE3-3	56.39	2.48	0.58	0.044		
	CASE3-4	26.82	1.36	0.58	0.051		

表 8.5.2 試験結果一覧表



軸力と最大摩擦力の関係

図 8.5.10 最大摩擦力と軸力の関係



軸カと摩擦係数の関係

図 8.5.11 摩擦係数と軸力の関係

8.6 K セグメントの抜け出しに関する検討

前節から K セグメントと B セグメントの摩擦係数を計測したところ, 摩擦係数が 比較的小さな値であったため, K セグメントの抜け出しが懸念される。そこで本節 では, K セグメントの抜け出しに関する検討を行う。

図 8.6.1 は K セグメントに加わる軸力を示している。主な軸力として,作用水圧 による軸力とテールブラシ圧による軸力が挙げられる。K セグメントには,水圧と テールブラシにより軸力 N が加わる。

図 8.6.2 に, K セグメントに着目し, K セグメントに加わる力とモーメントを示す。 なお, K セグメントはシールドジャッキにより支持されていない場合を考える。し たがって, K セグメントの切羽側の面に作用する力とモーメントはゼロ(0)となる。

同図から、軸力NによりKセグメントとBセグメントの間には、すべりを発生 させる力 ($N\sin\beta$) とすべりに抵抗しようとする力 ($\mu N\cos\beta$) が働く。ここで、 β は K セグメントの挿入角度 (= tan⁻¹(240/1400)=9.73°) 、 μ はK セグメントとBセグメ ントの摩擦係数である。

K セグメントの左右に働くすべりを発生させる力 ($N\sin\beta$) の合力 ($2N\sin\beta\cos\beta$) は、同図の鉛直方向にKセグメントを抜け出させる力になる。また、リング間の目 開きがゼロ (0) の場合、シール材の反発力 (P_s) もKセグメントを抜け出させる力 となる。

ー方、Kセグメントの左右に働くすべりに抵抗しようとする力 ($\mu N\cos\beta$) の合力 ($2\mu N\cos\beta\cos\beta$)は、同図の鉛直方向のKセグメントの抜け出しに抵抗しようとする 力となる。また、8.3節で計測したボルトインサートの引抜き抵抗 R_b (= 105.3 kN) も K セグメントの抜け出しに抵抗しようとする力となる。

これらの鉛直方向の力の釣合いを考えると次式が導かれる。

$$2\mu N\cos\beta\cos\beta + R_b - 2N\sin\beta\cos\beta - P_s = 0 \tag{8.6.1}$$

同式を摩擦係数についてまとめると、次式のようになる。

$$\mu = \frac{\sin\beta}{\cos\beta} - \frac{R_b - P_s}{2N\cos\beta\cos\beta}$$
(8.6.2)

なお,同図の水平方向の力は,同図からもわかるように左右対称であるから,釣 合いが保たれている。また,ボルトインサートの引抜き抵抗の作用点周りのモーメ ントを考えると,こちらも左右対称であることから,モーメントの釣合いも保たれ ている。

式(8.6.2)からKセグメントが滑り出そうとする時の摩擦係数を求める。軸力Nには、作用水圧とテールブラシ圧に起因するものがある。

まず,作用水圧について,Kセグメントの中央に加わる作用水圧を求める。第4 章の表 4.2.3 からトンネル頂部水圧(271.25 kN/m²)に,トンネル頂部からKセグメ ント中央までの鉛直距離(0.276 m)に海水の単位体積重量(10.3 kN/m³)を乗じた ものを加えると、274.09 kN/m²と求まる。したがって、作用水圧に起因する軸力は 以下のようになる。

$$N_{w} = P_{w} \cdot \frac{R_{out}}{\left(R_{out} - R_{in}\right)} \cdot \Delta \cdot \left(R_{out} - R_{in}\right) = 584.60kN$$

$$(8.6.3)$$

ここで, P_w: 作用水圧 (= 274.09 kN/m²), R_{out}: セグメント外半径 (= 2.41 m), R_{in}: セグメント内半径 (= 2.25 m), Δ: セグメントのテールエンドからの出代 (= 0.885 m)

一方,テールブラシ圧 Pt 及びテールブラシ圧に起因する軸力 Nt は,事業者が倉敷労働基準監督署に提出した資料『【補足資料】水島第二パイプライン防護設備 K セグメントの抜け出し検討 2012.10.31』¹²⁾によると,以下のようである。ここでテールブラシ圧に起因する軸力 Nt は,シールドマシンとセグメントの競りのない状態を考える。競った場合には Nt はより大きくなる可能性がある。

$$P_{t} = \frac{\left(40.80kg + 50.95kg\right)}{2} \cdot 9.81m / s^{2} \cdot 2 \not\boxtimes / 1400 = 0.643kN / m$$
(8.6.4)

$$N_{t} = P_{t} \cdot \frac{R_{out}}{(R_{out} - R_{in})} \cdot (R_{out} - R_{in}) = 1.549kN$$
(8.6.5)

軸力 N は以下のようになる。

$$N = N_w + N_t = 586.15kN \tag{8.6.6}$$

シール材の反発力は、『【補足資料】水島第二パイプライン防護設備 K セグメントの抜け出し検討 2012.10.31』¹²⁾によると、目開き 0mm の場合、以下のようになる。

$$P_s = 27.3N / mm^2 \cdot 924.8mm / 1000 = 25.25kN$$
(8.6.7)

したがって,式 (8.6.2) に式 (8.6.6),式 (8.6.7), β = 9.73°, R_b = 105.3 kN を代入すると、摩擦係数 μ は以下のとおりである。

$$\mu = 0.101 \tag{8.6.8}$$

摩擦係数が 0.101 以上であれば, K セグメントは抜け出さないが, 摩擦係数が 0.101 より小さくなると K セグメントは抜け出す。したがって, 8.5 節から, セグメント を水で濡らし, シール材に滑材を塗布した状態において, K セグメントと B セグメ ントの摩擦係数は 0.101 を下回るため, 計算上 K セグメントは抜け出すこととなる。



図 8.6.1 K セグメントに加わる軸力(作用水圧 Pw, テールブラシ圧 Pt, 合力(軸 力)N)



図 8.6.2 K セグメントに加わる力とモーメント

8.6 本章のまとめ

- (1)回収されたセグメントの破壊状況、ボルト等の破断の状況、シールドマシン と一緒に回収されたセグメントの位置関係等からセグメントの破壊の機序を推 定すると次のようである。
 - ① 111 リングの K セグメントがある程度抜け、この K セグメントを中心として 111 リングの B2 と B1 セグメントとが垂れ下がる。(この時点で K セグメントのすき間,垂れた 111 リングとシールドマシンのすき間から土砂水が吹き出したものと考えられる。)
 - ② セグメント天井付近の 111 リングと 110 リング間のボルト(4本)が破断 する。(さらに垂れた 111 リングとシールドマシンのすき間から土砂水が吹 き出したと考えられる。)
 - ③ 111 リングの B1・A2 と 110 リングとに徐々に相対的なずれが生じ、この 2 リング間の縁が切れる。
 - ④ 111 リングの K セグメントが抜け, B2 が折れて上半分が倒れ込むとともに B1 が落下。
 - ⑤ 同時に110 リング(B1, B2, A1, A2 セグメント)が破壊し、坑口側に流れる。K セグメントも同時に落下(切羽側に流れる)。
- (2) セグメント単体曲げ試験を実施した結果,セグメントの鉄筋コンクリート部 分について,設計値以上の曲げ耐力を有していた。
- (3)リング継手について、ボルトインサートに被りの薄い方向から力が加わると、
 28.1kN でボルトインサートと周囲のコンクリートが剥離した。第4章で示したように、セグメント構造計算では、最大リング間せん断力は11.3kN であることから、十分な耐力を有している。しかしながら、同構造計算では、ボルトのせん断力(34.1kN)と比較しており、ボルトインサートに被りの薄い方向に力が加わると、ボルトのせん断力(34.1kN)よりも小さな荷重でボルトインサートと周囲のコンクリートが剥離する(28.1kN)。これは想定していた箇所(ボルト)と異なる箇所(コンクリート)が期待していた耐力以下で破壊することを意味する。
- (4) セグメントから抜き出したコンクリート供試体に対して,一軸圧縮試験を実施したところ,コンクリートの設計基準強度以上の一軸圧縮強度を有していた。 また,同供試体に対して超音波速度試験を実施したところ,P波及びS波速度 の平均値はそれぞれ 4.76km/sec, 2.47km/sec と計測された。一軸圧縮強度,P 波及びS波速度の値は,第10章で示す個別要素法解析において,セグメント を表現するパラメータに用いる。

(5) K セグメントの抜け出しについて検討したところ、セグメント継手面の摩擦 係数が 0.101 より小さい場合、設計時の水圧と通常のテールシール圧により計 算上では K セグメントが抜け出すことを確認した。

当該工事では、セグメントを水で濡らし、シール材に滑材を塗布した状態で K セグメントを挿入したとの証言が得られていることから、セグメント継手面 の平均摩擦係数は 0.101 を下回る結果となった。したがって、設計時の水圧と 通常のテールシール圧でも計算上 K セグメントは抜け出すという結果となる。 参考文献

- 日本材料学会フラクトグラフィ部門委員会編:フラクトグラフィ 破面と破壊 情報解析,丸善出版,2000.
- 2) 社団法人土木学会,社団法人日本下水道協会共著:シールド工事用標準セグメントー下水道シールド工事用セグメントー JSWAS A-3,4-2001,社団法人日本下水道協会, p.299, 2001.
- 3) ASTM E488 / E488M 10 Standard Test Methods for Strength of Anchors in Concrete Elements.
- 社団法人日本建築あと施工アンカー協会:「あと施工アンカー標準試験法・同解 説」.
- 5) 日本規格協会: JIS ハンドブック⑨建築 II (試験), JIS A 1107:2002「コンクリ ートからのコア及びはりの切取り方法並びに強度試験方法」, pp. 232-236, 2011.
- 6) 日本規格協会: JIS ハンドブック⑨建築 II (試験), JIS A 1108:2006「コンクリートの圧縮強度試験方法」, pp. 237-245, 2011.
- 7) 日本規格協会: JIS ハンドブック⑨建築 II (試験), JIS A 1132:2006「コンクリート強度試験用供試体の作り方」, pp. 339-351, 2011.
- 8) 日本規格協会: JIS ハンドブック⑨建築 II (試験), JIS A 1149:2010「コンクリートの静弾性係数試験方法」, pp. 389-392, 2011.
- 9) 社団法人地盤工学会 地盤調査法改訂編集委員会:パルス透過法による岩石の 超音波速度測定方法,地盤材料試験の方法と解説―二分冊の1―,社団法人地 盤工学会,pp.259-270,2009.
- 10) 土木学会 トンネル工学委員会: 2006 年制定トンネル標準示方書 [山岳工法] ・同解説,社団法人土木学会, pp.38-44, 2006.
- 11) 日本規格協会: JIS ハンドブック⑨建築 II(試験), JIS A 1127:2010「共鳴振動 によるコンクリートの動弾性係数,動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方 法」, pp. 306-310, 2011.
- 12) 事業者:【補足資料】水島第二パイプライン防護設備 K セグメントの抜け出し検討 2012.10.31, 2012.

9. 海底から回収されたシールドマシンの調査

海底地盤から回収されたシールドマシンの調査を倉敷労働基準監督署と岡山県警 の立ち会いのもと実施し、一部データについては、倉敷労働基準監督署より提供さ れた。倉敷労働基準監督署と当研究所の調査結果について以下にまとめる。

9.1 シールドマシンの外観調査

図 9.1.1 に示すように、シールドマシン内には 112R の A1、A2、B1 が損傷、変形 しているもののほぼ定位置のまま残っている状況であった。また、テール部スキン プレートに凹みが見られた。図 9.1.2 はテール部スキンプレートの拡大図である。同 図に示すように、坑内側へ凹んでいることがわかる。



図 9.1.1 シールドマシンのテール部



図 9.1.2 テール部スキンプレートの凹み



図 9.1.3 テール部スキンプレートの凹み

図 9.1.3 はテール部スキンプレートの凹みの位置及び深さを計測し、CAD により 設計における 111R の位置と比較したものである。同図から、B1 セグメントと K セ グメントにまたがって凹みが存在していることがわかる。この凹みは、シールドマ シンの外径から中心に向かって 31mm ほど変形していることが認められた。シール ドマシンとセグメントの半径差は(4950 – 4820) / 2 = 60 mm であるから、この凹みに よって、シールドマシンテール部スキンプレートとセグメントの外径が接すること はないが、このような凹みが災害発生前にあったとすると、セグメントを組むこと が困難であると考えられる。したがって、この凹みは、災害発生時に生じた可能性 があると考えられる。第10章で後述するように、災害発生時に111RのKセグメ ントが抜け出そうとすることから、111RのB1、B2も坑内側へ変位し、そのすき間 から土砂水が坑内へと流入するものと推定される。したがって、流入時にスキンプ レートが凹んだ可能性があると推察される。

9.2 テールブラシと固着物の調査

9.2.1 テールブラシの損傷

図 9.2.1 に設計時のテールブラシの寸法を示す。スキンプレートから外バネ板までの角度 x_{design} とすると、 $x_{design} = 50^{\circ}$ であることがわかる。また、内バネ板とスキンプレートとの垂直面のなす角度を y_{design} とすると、 $y_{design} = 30^{\circ}$ であることがわかる。さらに、テールブラシの開きの角度を z_{design} とすると、 $z_{design} = 90^{\circ} - x_{design} - y_{design} = 20^{\circ}$ であることがわかる。



図 9.2.1 設計時のテールブラシの寸法



図 9.2.2 テールブラシの測定値について
これに対し、海底地盤から引き揚げられたシールドマシンのテールブラシの損傷 の程度について、倉敷労働基準監督署が実施した計測結果について以下に示す。

図 9.2.2 に示すように、テールブラシの外バネ板とスキンプレートの距離 a、内バネ板とスキンプレートの距離 b、テールブラシの幅 c 等を計測することにより、スキンプレートから外バネ板までの角度 x、内バネ板とスキンプレートとの垂直面のなす角度 y、テールブラシの開きの角度 z を計測している。

表 9.2.1 に切羽側テールブラシ(前段、1 段目)の計測結果を、表 9.2.2 に坑口側テ ールブラシ(後段、2 段目)の計測結果を示す。

表 9.2.1 から、内バネ板とスキンプレートとの垂直面のなす角度 y に着目すると、 スキンプレートの 12 時の方向から 52 度~90 度(右側面)にかけて、角度 y がマイ ナスの値を示している。これは、テールブラシの内バネ板が切羽側にめくれるよう な形で変形していることを示している。セグメントがテールブラシに接する際の一 般的な変形の範囲内では y は約 78°となる。

内バネ板の変形に引っ張られるような形でテールブラシの開きの角度 z もスキン プレートの 12 時の方向から 52 度~90 度(右側面)にかけて値が大きくなっており、 テールブラシも損傷が激しいことがわかる。

第 10 章で後述するように、111 リングの K セグメントが抜け、B2 セグメントが 倒れこむように破壊されたとすると、その辺りから土砂水が流入するため、このよ うなテールブラシの損傷を発生させたものと推察される。

一方、スキンプレートから外バネ板までの角度 x に着目すると、6°~52°の範囲内 にあり、平均値も 18°と設計時よりも小さいものとなっているが、セグメントがテー ルブラシに接する際の一般的な変形の範囲内(約 12°)であると考えられる。特筆す べきは、テールブラシの内バネ板が切羽側にめくれるような形で変形しているのに 対し、外バネ板がそれほど変形していない点である。第7章で述べたように、85 リ ング掘進中、テールブラシから裏込め注入材が漏れてきたこともあり、切羽側のテ ールブラシの外バネ板には裏込め注入材が付着していたと考えられる。したがって、 外バネ板は固着していたため、土砂水が流入しても変形せず、テールブラシ及び内 バネ板が土砂水の浸透圧により変形したと推察される。調査ではテールブラシの硬 さを計測していないものの、外バネ板付近のテールブラシは全周にわたって固着物 により非常に固くなっていたことを確認している。

表 9.2.2 から、内バネ板とスキンプレートとの垂直面のなす角度 y に着目すると、 スキンプレートの 12 時の方向から 78 度~87 度(右側面)にかけて値が大きくなっ ており、テールブラシの開きの角度 z もその範囲で大きな値を示している。

	***								前段(1段目)	単位:mm					
番号	基本点からの 長さ(cm)	補正值	角度※2 (dog)	外バネ板の幅	а	b	c	sinx	X	(dag)	d 200-eeev	d-c	tany	y (red)	y (dag)	z 90-x-y
1	*1 0	3.09	(deg) 356.91	150	80	182	110	a / 200 0.400	(rad) 0.412	(deg) 23.578	183.303	73.303	(d-c)/b 0.403	(rad) 0.383	(deg) 21.938	(deg)
2				130 150												
4	30	3.09	3.86	150	72	196	130	0.360	0.368	21.100	186.590	56.590	0.289	0.281	16,105	52 ,795
6		2.00	10.00	150	75	100	150	0.075	0.004	00.004	105 405	05.405	0.100	0.104	10.550	57 400
8	60	3.09	10.80	150	/5	190	150	0.375	0.384	22.024	185.405	35.405	0.186	0.184	10.556	57.420
9	90	3.09	17.75	150 150	78	194	150	0.390	0.401	22.954	184.163	34.163	0.176	0.174	9.987	57. 058
11				150 150												
13 14	120	3.09	24.69	150 150	80	200	130	0.400	0.412	23.578	183.303	53.303	0.267	0.260	14.923	51 499
15 16	150	3.09	31.64	150 150	62	197	169	0.310	0.315	18.059	190.147	21.147	0.107	0.107	6.127	65.814
17				150 150												
19	180	3.09	38.58	150	76	188	140	0.380	0.390	22.334	184.997	44.997	0.239	0.235	13.460	54,206
20	200	3.09	43.21	150	60	163	120	0.300	0.305	17.458	190.788	70.788	0.434	0.410	23.474	49.068
22	210	3.09	45.53	150	90	193	180	0.325	0.331	26.744	178.606	-1.394	-0.064	-0.064	-0.414	63.670
24	230	3.09	52.47	150	88	212	235	0.300	0.305	26.104	179.600	-55.400	-0.261	-0.256	-14.645	78.541
26 27	250 260	3.09 3.09	54.79 57.10	150 150	84 82	212 211	210 220	0.420	0.433	24.835 24.205	181.505 182.417	-28.495 -37.583	-0.134 -0.178	-0.134 -0.176	+7.655 -10.099	72.821
28 29	270 280	3.09 3.09	59.42 61.73	150 150	82 84	216 216	240 250	0.410	0.422	24.205 24.835	182.417 181.505	-57.583 -68.495	-0.267 -0.317	-0.261 -0.307	+14.927 +17.594	80.722 82.760
30 31	290 300	3.09 3.09	64.05 66.36	150 150	80 80	219 180	240 220	0.400	0.412	23.578 23.578	183.303 183.303	-56.697 -36.697	-0.259 -0.204	-0.253 -0.201	- 1 4.515 - 1 1.523	80.936 77.945
32 33	310 320	3.09 3.09	68.68 70.99	150 150	78 82	198 204	240 210	0.390	0.401	22.954 24.205	184.163 182.417	-55.837	-0.282	-0.275	+15.749	82.794 73.495
34	330	3.09	73.31	150	80	213	250	0.400	0.412	23.578	183.303	-66.697	-0.313	-0.303	7.387	83.809
36	360	3.09	80.25	150	60 52	190	280	0.300	0.305	17.458	190.788	-89.212	-0.470	-0.439	25.152	97.694
38	380	3.09	84.88	150	45	185	270	0.205	0.203	13.003	194.872	-75.128	-0.406	-0.386	22.102	99.099
40	400	3.09	89.51	150	47 50	190	260	0.235	0.237	13.392	194.399	-66.351	-0.358	-0.344	9.721	94.772
41 42	410 420	3.09	91.83 94.14	130	40 26	180 150	150 170	0.200	0.201	7.470	195.959	45.959	0.255	0.250	10.685	<u>64.1</u> 40 71.845
43 44	430 440	3.09 3.09	96.46 98.77	計測不能 計測不能	20 26	90 140	78 220	0.100	0.100	5.739 7.470	198.997 198.303	120.997 -21.697	1.344 -0.155	0.931 -0.154	53.357 8.810	30.903 91.340
45 46	445 450	3.09 3.09	99.93 101.09	130 150	24 28	140 140	57 37	0.120	0.120	6.892 8.048	198.555 198.030	141.555 161.030	1.011 1.150	0.791	45.316 48.996	37.792 32.956
47 48	470 475	3.09 3.09	105.72 106.87	150 150	52 56	89 116	44 200	0.260	0.263	15.070 16.260	193.122 192.000	149.122 -8.000	1.676 -0.069	1.033	59.170 	15.760 77.685
49 50	480 485	3.09 3.09	108.03 109.19	150 150	40 50	210 180	200 210	0.200	0.201	11.537	195.959 193.649	-4.041 -16.351	-0.019 -0.091	-0.019 -0.091	-1.102 -5.190	79.565 80.713
51 52	493 510	3.09 3.09	111.04 114.98	150 150	57 57	209 202	200 200	0.285	0.289	16.559 16.559	191.706 191.706	-8.294 -8.294	-0.040	-0.040	-2.273	75.714 75.793
53 54	515 528	3.09 3.09	116.13 119.14	150 150	57 49	186 171	170 130	0.285	0.289	16.559 14.182	191.706 193.905	21.706 63.905	0.117 0.374	0.116	6.656 20.491	66.785 55.327
55 56	540 546	3.09 3.09	121.92 123.31	150 150	54 50	177 184	180 170	0.270	0.273	15.664	192.572 193.649	12.572 23.649	0.071	0.071	4.063	70.273 68.199
57 58	555 570	3.09 3.09	125.39 128.87	150 150	45 50	118 180	180 210	0.225	0.227	13.003	194.872 193.649	14.872	0.126	0.125	7.183	69.814 80.713
59 60	600	3.09	135.81	150 計測不能	60	140	230	0.300	0.305	17.458	190,788	-39.212	-0.280	-0.273	-15.647	88,189
61		0.00	100.01	130		140	200	0.000	0.000	17.400	100.700	00.212	0.200	0.270	0.047	00.100
63	630	3.09	142.76	130	80	146	170	0.400	0.412	23.578	183.303	13.303	0.091	0.091	5.206	61.216
65	660	3.09	149.70	150	80	173	145	0.400	0.412	23.578	183.303	38.303	0.221	0.218	12,484	<u>53</u> 938
67	600	2.00	150.05	150	75	166	140	0.075	0.204	00.004	105 405	45.405	0.074	0.067	15 000	50,670
69	090	5.05	150.05	150	75	100	140	0.375	0.304	22.024	165.405	43.403	0.274	0.207	1012.90	J21076
70	720	3.09	163.59	150	85	168	155	0.425	0.439	25.151	181.039	26.039	0.155	0.154	8.810	56.039
73	750	2.00	170.54	150	47	172	105	0.225	0.027	12 502	104 200	0.200	0.054	0.054	8110	72 200
75	750	0.00	170.54	150	47	173	105	0.200	0.237	10.002	194.555	3.333	0.034	0.034	p.110	13.295
70	780	3.09	177.48	150	47	176	210	0.235	0.237	13.592	194.399	-15.601	-0.089	-0.088	5.066	81.47 <mark>4</mark>
79	010	2.00	101.10	150	75	015	105	0.075	0.004	00.004	105 405	0.505	0.045	0.045	0.555	70.501
81	010	3.09	101.27	150	75	213	190	0.375	0.101	10.270	106 700	-9.595	-0.045	-0.045	72.555	70.301 E0.017
83	040	3.09	191.37	150	158	34	150	0.180	0.181	52.186	122.621	-27.379	-0.805	-0.678	-38.843	76.657
85	870	3.09	198.32	150	35	84 207	180	0.175	0.176	10.079	196.914	16.914	0.082	0.082	4.671	75.250
87	000		005.00	150	07	107	100	0.105	0.105	7 750	100 100	70 100	0.400	0.000		FORCE
89	900	3.09	200.20	150	21	10/	128	U.135	0.135	1./59	190.109	/0.169	0.420	0.398	4 2. /91	<u>39,</u> 450
90	930	3.09	212.21	150	34	123	150	0.170	0.171	9.788	197.089	47.089	0.383	0.366	20.949	59.264
92				150												
94 143	980	3.09	223.78	150	45	155	150	0.225	0.227	13.003	194.872	44.872	0.289	0.282	16.145	60.852
144	1010	3.09	230.73	150	75	175	165	0.375	0.384	22.024	185.405	20.405	0.117	0.116	6.651	61.325
146				150												
148	1040	3.09	237.67	150	50	195	160	0.250	0.253	14.478	193.649	33.649	0.173	0.171	9.791	<u>65.7</u> 32
150	1070	3.09	244.62	150	38	165	190	0.190	0.191	10.953	196.357	6.357	0.039	0.039	2.206	76.841
152				150												
154	1100	3.09	251.56	150	40	175	220	0.200	0.201	11.537	195.959	-24.041	-0.137	-0.137	7.822	86.285
156	1130	3.09	258.51	150		105	0.00		0.0		105.0		0.0	0.0	b	70.0-1-
158				150	40	165	200	0.200	0.201	11.537	190.959	-4.041	-0.024	-0.024	-11.403	79.866
160	1160	3.09	265.45	150	55	184	213	0.275	0.279	15.962	192.289	-20.711	-0.113	-0.112	6.422	<u>80.46</u> 0
162				130												
165	1190	3.09	272.40	150	55	196	145	0.275	0.279	15.962	192.289	47.289	0.241	0.237	13.564	60.473
165	1000			150												
601	1 1 1 1 1 1 1 1	10 10 10	070 04	100	50	100	100	0.005	0.000	15 007	100.050	10.050	0.000	0.000	0.000	70 70 4
169	1220	3.09	279.34	130 130	53	190	180	0.265	0.268	15.367	192.850	12.850	0.068	0.068	3.869	70.764

表 9.2.1 切羽側テールブラシ(前段、1 段目)の計測結果(倉敷労働基準監督署提供)

172				100												
173				150												
174				150												
175				150												
176				150												
177	1310	3.09	300.18	150	70	180	135	0.350	0.358	20.487	187.350	52.350	0.291	0.283	16.216	53 297
178				150												
179				150												
180	1340	3.09	307.12	150	93	194	135	0.465	0.484	27.710	177.062	42.062	0.217	0.214	12.233	50.057
181				150												
182	1370	3.09	314.06	150	89	198	130	0.445	0.461	26.423	179.106	49.106	0.248	0.243	13,929	49.648
183				150												
184				150												
185				130												
186	1400	3.09	321.01	130	87	131	140	0.435	0.450	25.785	180.086	40.086	0.306	0.297	17.014	47.201
187				150												
188				150												
189	1430	3.09	327.95	150	90	184	121	0.450	0.467	26.744	178.606	57.606	0.313	0.303	17.384	45.872
190				150												
191				150												
192	1470	3.09	337.21	150	92	180	140	0.460	0.478	27.387	177.584	37.584	0.209	0.206	11.794	50.819
193				150												
194				150												
195	1530	3.09	351.10	150	68	142	155	0.340	0.347	19.877	188.085	33.085	0.233	0.229	13,116	57.008
196				150												
197				150												
198	1560	3.09	358.05	150	77	168	210	0.385	0.395	22.644	184.583	-25.417	-0.151	-0.150	8.603	75.959
199				150		_				-		-		-	-	
200				150						-						

※1 基準点はシールドマシンの仮置場での天頂部(12時位置)。
※2 角度は、シールドマシン外径々4950mmから算出。シールドマシンの設計上の天頂部(12時位置)を0度とした値。

										後段(2	2段目)	単位:mm							
番号	基準点からの 長さ(cm)	補正値	角度※2	外バネ板の幅	а	b	с	d	t	b'	c'	tanx	x	×	a-d	tany	У	У	z
	※ 1		(deg)						板厚等の長さ	b-t	c-t	b'∕a	(rad)	(deg)		(a−d)∕c'	(rad)	(deg)	90-x-y (deg)
1	0	3.09	356.91	150	195	110	230	165	15	95	215	0.49	0.45	25.97	30	0.14	0.14	7.94	56.08
3				150															
4	20	2.00	2.06	150	100	117	220	154	20	00	100	0.46	0.42	24.95	26	0.19	0.19	10.25	54.90
6		3.03	3.00	150	190		220	154	23	00	199	0.40	0.43	24.0J	30	0.10	0.18	10.23	JH.03
7	60	3.09	10.80	150	197	116	222	148	34	82	188	0.42	0.39	22 60	49	0.26	0.25	1461	5279
9		0.00	10.00	150	107			110	Ű.	Ű.	100	0.12	0.00		10	0.20	0.20	1.01	QL.70
10	90	3.09	17.75	150 150	190	114	217	149	16	98	201	0.52	0.48	27.28	41	0.20	0.20	11.53	51.19
12				150															
13	120	3.09	24.69	150	175	143	231	136	18	125	213	0.71	0.62	35.54	39	0.18	0.18	10.38	44.09
15				150															
10	150	3.09	31.64	150	180	139	212	112	18	121	194	0.67	0.59	33.91	68	0.35	0.34	19.32	36.77
18				150															
20	180	3.09	38.58	150	174	145	230	122	18	127	212	0.73	0.63	36.13	52	0.25	0.24	13.78	40.09
21	210	3.09	45.53	148	165	152	237	170	17	135	220	0.82	0.69	30.20	-5	-0.02	-0.02	-1.30	52.01
23	217.5	3.09	47.26	150	182	124	230	163	18	106	212	0.58	0.53	30.22	19	0.02	0.02	5.12	54.66
24	240	3.09	52.47	150 150	177	143	232	152	18	125	214	0.71	0.61	35.23	25	0.12	0.12	6.66	48.11
26			53.40	欠損		450			17	100				10.50					10.44
27	260	3.09	57.10	<u>火損</u> 欠損	145	150	239 234	141	17	133	222	0.92	0.74	39.92	-3	-0.01	-0.01	-0.79	<u>46.44</u> 50.87
29				150															
30	300	3.09	66.36	150	173	148	231	156	19	129	212	0.75	0.64	36.71	17	0.08	0.08	4.58	48.70
32	322	3.00	71 45	148 148	183	134	231	167	17	117	214	0.64	0.57	32 50	16	0.07	0.07	4.28	5313
34	332	3.09	73.77	148	199	100	217	162	17	83	200	0.42	0.40	22.64	37	0.19	0.18	10.48	56.88
35 36	342 352	3.09 3.09	76.08	150 147	189 193	122 112	222 235	151 249	17 17	105 95	205 218	0.56	0.51	29.05	38 -56	0.19	0.18	10.50	50.44 78.20
37	360	3.09	80.25	149	188	123	235	237	17	106	218	0.56	0.51	29.42	-49	-0.22	-0.22	-12.67	73.25
38	372 383	3.09	83.03	150 148	194 206	113	230	292 311	17	96	213	0.49	0.46	26.33 16.75	-98 -105	-0.46	-0.43	-24.71	88.38 99.07
40	390	3.09	87.20	150	209	66	213	270	17	49	196	0.23	0.23	13.19	-61	-0.31	-0.30	-17.29	94.09
41	403 412	3.09	90.21 92.29	150 150	211 216	42 28	225 160	212 88	<u>17</u> <u>1</u> 7	<u>25</u> <u>1</u> 1	208 143	0.12	0.12	<u>6.76</u>	<u>-1</u> <u>12</u> 8	0.00	0.00	-0.28 41.83	83.52 45.25
43	420	3.09	94.14	150	214	38	165	93	17	21	148	0.10	0.10	5.60	121	0.82	0.69	39.27	45.13
44 45	442	3.09	99.23	130	199	107	196	100	17	90	179	0.45	0.42	24.34	99	0.55	0.51	28.95	36.72
46	450	3.09	101.09	150	203	91	201	102	17	74	184	0.36	0.35	20.03	101	0.55	0.50	28.76	41.21
48				150															
49 50	480	3.09	108.03	150 150	205	82	191	115	17	65	174	0.32	0.31	17.59	90	0.52	0.48	27.35	45.06
51	510			150			100		10							0.54		07.00	
52	510	3.09	114.98	150	210	164	193	121	19	145	1/4	0.69	0.60	34.62	89	0.51	0.47	27.09	28.29
54	540	2.00	101.00	150	010	60	171	00	10	44	150	0.01	0.01	11.02	110	0.77	0.66	27.64	40.52
55	540	3.09	121.92	150	210	02	1/1	92	10	44	153	0.21	0.21	1.03	110	0.77	0.00	37.04	40.53
57	562.5 570	3.09	127.13	150	214	42	220	52 142	17	25	203	0.12	0.12	6.66	162	0.80	0.67	38.59	44.75
59	0/0	0.00	120.07	150	210	04	100	172	20	04	170	0.10	0.10	0.07	/1	0.40	0.00	21.70	00.10
60 61	600	3.09	135.81	150 150	211	68	145	50	21	47	124	0.22	0.22	12.56	161	1.30	0.91	52.40	25.05
62		0.00	100.01	150								0.22	0.22		101		0.01	02.10	20.00
63 64	630	3.09	142.76	150	208	72	182	114	20	52	162	0.25	0.24	14.04	94	0.58	0.53	30.12	45.84
65				150															
67	660	3.09	149.70	150	209	70	180	109	22	48	158	0.23	0.23	12.93	100	0.63	0.56	32.33	44.74
68				150															
70	690	3.09	156.65	150	212	49	181	204	18	31	163	0.15	0.15	8.32	8	0.05	0.05	2.81	78.87
71	720	3.09	163.59	150 150	216	62	197	134	25	37	172	0.17	0.17	9.72	82	0.48	0.44	25.49	54.79
73				150															
74	750	3.09	170.54	150	211	44	200	173	25	19	175	0.09	0.09	5.15	38	0.22	0.21	12.25	72.60
76				150															
78	780	3.09	177.48	150	217	25	217	238	20	5	197	0.02	0.02	1.32	-21	-0.11	-0.11	-6.08	94.76
79 80				150									<u> </u>						
81	810	3.09	184.43	150	216	50	152	89	20	30	132	0.14	0.14	7.91	127	0.96	0.77	43.89	38.20
<u>82</u> 83				150 150															
84	840	3.09	191.37	150	210	52	214	141	23	29	191	0.14	0.14	7.86	69	0.36	0.35	19.86	62.27
86				150															
87 88	870	3.09	198.32	150 150	212	42	205	130	18	24	187	0.11	0.11	6.46	82	0.44	0.41	23.68	59.86
89			ar-	150			a · -									-		.	
90 91	900	3.09	205.26	150 150	211	62	212	153	21	41	191	0.19	0.19	11.00	58	0.30	0.29	16.89	62.11
92	0.02		010.04	150	04.4	10		<u></u>	00		101	0.00		1.07	102		0.77	44.74	10.01
93 94	930	3.09	z (2.21	150 150	214	16	141	94	20	-4	121	-0.02	-0.02	€ −1.07	120	0.99	0.78	44.76	46.31
95	080	3 00	210 1F	150	010	91	155	115	20	1	125	0.00	0.00	0.07	07	0.70	0.60	25.70	54.02
90	900	3.09	213.13	150	212	41	100	611	20		130	0.00	0.00	1 0.27	J/	0.72	0.02	33.70	JH.U3
98 99	990	3 09	226 10	150	214	39	131	89	19	20	112	0.00	0.00	5.34	125	1 1 9	0.84	48 14	36.52
100		0.00		150	2.7							0.00	5.00	. 0.04			0.04		
101	1020	3.09	233.04	150	213	51	146	80	21	30	125	0.14	0.14	8.02	133	1.06	0.82	46.78	35.21
103				150															
104	1050	3.09	239.99	150	211	59	170	93	20	39	150	0.18	0.18	10.47	118	0.79	0.67	38.19	41.34
106	1080	2.00	246 02	150	207	70	170	104	22	56	156	0.27	0.56	15 14	102	99.0	0.59	22 4 4	41 / 2
108	1000	3.09	240.03	150	201	10	173	104	20	50	100	U.2 /	0.20	p=1,0.14	103	0.00	0.08	00.94	
109	1110	3.09	253.88	150 150	211	49	189	124	19	30	170	0.14	0.14	8.09	87	0.51	0.47	27 10	5 <mark>4.81</mark>
111		0.00		150								0.14	5.1-f			5.01	5.47		
112	1140	3.09	260.82	150 150	212	51	178	123	21	30	157	0.14	0.14	8.05	89	0.57	0.52	29.55	52.40
114		-		150											·				
115				150															
117	1170	3.09	267.77	150	212	50	166	109	20	30	146	0.14	0.14	8.05	103	0.71	0.61	35.20	46.74
119	1200	3.09	274.71	150	212	60	183	103	24	36	159	0.17	0.17	9.64	109	0.69	0.60	34.43	45.93
120	1210 1228	3.09	277.03	150	214	-10	196 257	121 128	23	-33	173 236	-0.15	-0.15	-17 40	93 89	0.54	0.49	28.26	70.51
122	1230	3.09	281.66	130	201	96	192	126	22	74	170	0.37	0.35	20.21	75	0.44	0.42	23.81	45.98
123				150 150															
105	-		r			r	r	r		r	r	r			_	r	r		

表 9.2.2 坑口側テールブラシ(後段、2 段目)の計測結果(倉敷労働基準監督署提供)

125	1260	3.09	288.60	150	206	/9	195	140	25	54	170	0.26	0.26	14.69	60	0.39	0.37	21.22	24.09
126				150															
127				150															
128	1290	3.09	295.55	150	183	132	221	229	24	108	197	0.59	0.53	30.55	-46	-0.23	-0.23	-13.14	72.60
129				150															
130				150															
131	1320	3.09	302.49	150	165	156	226	129	25	131	201	0.79	0.67	38.45	36	0.18	0.18	10.15	41.40
132				150															
133	1340	3.09	307.12	150	182	134	222	182	19	115	203	0.63	0.56	32.29	0	0.00	0.00	0.00	57.71
134	1350	3.09	309.43	150	197	105	216	182	20	85	196	0.43	0.41	23.34	15	0.08	0.08	4.38	62.28
135	1360	3.09	311.75	150	210	51	215	164	18	33	197	0.16	0.16	8.93	46	0.23	0.23	13.14	67.93
136	1370	3.09	314.06	欠損	250	124	215	136	18	106	197	0.42	0.40	22,98	114	0.58	0.52	30.06	36.97
137	1380	3.09	316.38	150	195	104	205	150	17	87	188	0.45	0.42	24.04	45	0.24	0.23	13.46	52.49
138				150															
139				150															
140	1410	3.09	323.32	150	197	104	223	157	17	87	206	0.44	0.42	23.83	40	0.19	0.19	10.99	55.18
141				150															
142				150															
143	1440	3.09	330.27	150	200	100	196	110	19	81	177	0.41	0.38	22.05	90	0.51	0.47	26.95	41.00
144				150															
145				150															
146	1470	3.09	337.21	150	207	75	162	115	17	58	145	0.28	0.27	15.65	92	0.63	0.57	32.39	41.95
147				150															
148				150															
149	1500	3.09	344.16	150	192	117	204	113	17	100	187	0.52	0.48	27.51	79	0.42	0.40	22.90	39.59
150				150															
151				150															
152	1530	3.09	351.10	150	189	127	245	160	18	109	227	0.58	0.52	29.97	29	0.13	0.13	7.28	5 2.75
153				150		1													

図 9.2.3 に坑口から切羽を見るようにテール部スキンプレートを見た場合の x/x_designの分布、図 9.2.4 に y'_design/y'の分布、図 9.2.5 に z/z_designの分布を極座標表 示により示す。これらは全て切羽側のテールブラシについてまとめた図である。

内バネ板の角度 y については、スキンプレートから内バネ板までの角度に補正している ($y'=90^\circ + y$)。したがって、設計時の内バネ板の角度は、 $y'_{design} = 90^\circ + 30^\circ = 120^\circ$ となる。また、内バネ板が切羽側に捲れる場合を大きい値とするため、 y'_{design} を分子にとっている。

図 9.2.3 を見ると、切羽に向かってスキンプレートの 12 時の方向からおよそ 2 時、5 時、10 時の方向付近で大きい値となっているが、設計時の外バネ板の角度よ りも極めて小さい。セグメントがテールブラシに接する際の一般的な変形の範囲内 (約 12°)であるとき、12°/50°= 0.24 となるが、0.24 よりも小さい値を示している 箇所も 3 時、7 時、9 時の方向付近にある。前述したように、土砂水が流入しても 外バネ板が設計時の外バネ板の角度まで戻らなかったのは、全周にわたって外バネ 板とテールブラシの間が裏込め注入材により固着したためである。

一方、図 9.2.4 を見ると、ほとんどの箇所で設計時の内バネ板の角度を超過している。特に切羽に向かってスキンプレートの 12 時の方向からおよそ 2 時~3 時の方向の変形が大きい。前述したように、この方向から土砂水が多く流入し、内バネ板は裏込め注入材で固着していないため、変形したものと推察される。

図 9.2.5 を見ると、テールブラシの開きの角度も内バネ板の変形に追随して、2 時 ~3 時の方向の変形が大きいことがわかる。



図 9.2.3 設計時の外バネ板の角度で正規化された災害後の外バネ板の角度



図 9.2.4 設計時の内バネ板の角度で正規化された災害後の内バネ板の角度



図 9.2.5 設計時のテールブラシの開きの角度で正規化された災害後の開きの角度

9.2.2 テールブラシに固着した試料の成分分析

本項では、テールブラシに固着した試料の成分を分析した。前述した第7章7.2 によると、テールブラシ内には、裏込め注入材が固着した可能性が示唆された。な お、テールブラシ内には、テールシール材、裏込め注入材、充填材が混入する可能 性があるため、各材料とテールブラシ内から採取した固着物を比較分析した(巻末 参考資料『テールブラシの固着物の分析、裏込め注入材とテールシール材との混合 物の一軸圧縮試験結果、p.1~p.74』参照)。

(1) テールシール材

テールシールは、テールブラシ内に注入し、土砂水がシールドマシン内(坑内) に流入しないようにするための材料である。当該工事では、テールシールとして、 以下の3種類のものが用いられた。

・テールグリス A

疎水性を有した油脂性の材料である。

- ・止水材 A(特殊繊維材無し) 粘性土溶液と特殊水ガラスを混合させた高粘性な可塑状の材料である。 裏込め注入材と同様に配合に水を使用している。
- ・止水材 B(特殊繊維材有り)
 粘性土溶液と特殊水ガラスを混合させた高粘性な可塑状の材料である。
 裏込め注入材と同様に配合に水を使用している。
 特殊繊維材の混入以外は、止水材 A と同配合である。

証言等から、初期掘進時には止水のためテールブラシにテールグリス A のみを入 れていたが、3R 掘進中にテールより漏水があり、3R 以降も裏込め注入材やテールグ リス A が漏れ出てきたこともあり、2012 年 1 月 17 日以降(20R あたり)、止水材 A に変更した。当初は、止水材 A に特殊繊維材を混入していなかったが、特殊繊維材 を混入しようやく止水できる状態となった(止水材 B の使用)。

なお、巻末参考資料『テールブラシの固着物の分析、裏込め注入材とテールシール 材との混合物の一軸圧縮試験結果、p.64~p.74 参照』によると、テールグリスAと裏 込め注入材の混合物に比べ、止水材 B と裏込め注入材の混合物の方がより強度が高 い結果となっている。つまり、止水材 B と裏込め注入材がテールブラシ内で混ざり 合った場合には、テールブラシはより硬くなる可能性が示唆される。一方、テールグ リスA と裏込め注入材の混合物は、一軸圧縮試験用供試体型枠から脱型する段階で も変形してしまうような柔らかい混合物であった。そのため、テールブラシ内でも 固着し難いと考えると、テールシール材にはテールグリスA のような疎水性を有し た油脂性の材料が望ましい。

テールグリス A を図 9.2.6 に示す。

止水材 A の配合表を表 9.2.3 に、止水材 B を表 9.2.4 に示す。

また、テールグリスA及び止水材Bの粘性とベーンせん断強度を表9.2.5に示す。



図 9.2.6 テールグリス A

表 9.2.3 止水材 A

	А	塑強調整剤	
材料名	a 液	水	b 液
(真比重)	(2.6)	(1.0)	(1.37)
数量	520g	800mL	50mL

- 1. a 液 520g を水 800mL にて予めダマがなくなるまで混練する。(家庭用ハンドミ キサーなどで約2分間十分に攪拌する。)→1時間静置する。(a 液を水との膨潤 を十分に行う。)
- 2. 1.の中に b 液 50mL を同じく均一になるようハンドミキサーで攪拌しながら少しずつ添加して完成させる。
- 3. 2. で完成した試料は1日の経過で粘性が増大する。よってその性状確認は水分が 蒸発しないよう密閉容器に1日保管後,確認する。

表 9.2.4 止水材 B

	A 液(1m³) (65kg/100L	РР	塑強調整剤
材料名	a 液	水	PP	b 液
(真比重)	(2.6)	(1.0)	(1.30)	(1.37)
数量	520 kg	800 L	50 kg	50 L

特殊配合① (A:B=20:1)

特殊配合② (A:B=20:1)

	A 液(1m³) 1	00kg/100L	PP	塑強調整剤
材料名	a 液	水	PP	b 液
(真比重)	(2.6)	(1.0)	(1.30)	(1.37)
数量	722 kg	$722~{ m L}$	50 kg	50 L

表 9.2.5 テールグリス A 及び止水材 B の粘性とベーンせん断強度

テールグリスA 確認

粘性	60,000 ср
ベーンせん断	3.0 kN/m ²

止水材 B

試験ケース①(A 液 10L+PP 500g+ b液 500mL)

配合	A 液 520kg/m ³	A 液 722kg/m³				
12 h htt-	F0 000 m	150,000~				
柏1生	50,000 cp	200,000 ср				
ベーンせん断	2.2 kN/m ²	6.8 kN/m ²				
評価	^{テールグリスA} より粘 性が弱く使用は適さ ない。	粘性、ベーンせん断 強度の値から見ても 使用には適している 感じがある				

本報告書では、表 9.2.3 に示すように事業者から提供された配合表をもとに止水 材 A の比較試料を作製している。同配合表は、表 9.2.4 の特殊配合①の特殊繊維材 が無い場合に該当する。当該現場では、特殊繊維材混入後は、表 9.2.4 の特殊配合 ①に従い、止水材 B を配合していた。

表 9.2.3 にしたがって作製した止水材 A を図 9.2.6 に示す。また表 9.2.4 の特殊配合①にしたがって作製した止水材 B を図 9.2.7 に示す。



図 9.2.6 止水材 A (材齢 7 日)



(a) 止水材 B

(b) 特殊繊維材

図 9.2.7 止水材 B

(2) 裏込め注入材

裏込め注入材は、シールドマシンによって切り取られた地盤とセグメント外径と の隙間を充填する材料である。セグメントがシールドマシンを抜けた後、すぐに裏 込め注入材を充填しなければ、セグメントには水圧のみが作用する。すなわち、浮 力が作用し、セグメントが上方に浮き上がる現象を生じることになる。しばらくす ると、地盤がゆるみセグメント外径に接するようになるが、地盤をゆるませてしま い、セグメントの土被りが薄いと海底地盤まで変形が到達してしまうこともある。 したがって、セグメントがシールドマシンから抜けると同時に裏込め注入材を注入 することが望まれるが、当該工事では、3 リング又は 4 リング後ろから注入されて いた。例えば、112 リング掘進中であれば、109 リング又は 108 リングから注入し ていたことになる。この時、110 リング又は 110 及び 109 リングは、水圧のみが作 用し不安定な状態にある。

表 9.2.6 に裏込め注入材の配合表を示す。同表にしたがって作製した裏込め注入 材を図 9.2.8 に示す。

	A(945mL)											
① 液	② 液	③ 液	④ 液	水	空気量	⑤ 液						
230g	30g	0.3g	2.3g	764mL	95mL	$55 \mathrm{mL}$						

表 9.2.6 裏込め注入材の配合表

1. 水 400mL と②液 30g を混ぜて約 1 時間放置。つぶが出来ていてもしばらくして 攪拌すると混ざる。

- 1.の中に③液(量が少ないので水を入れて多くする),④液(量が少ないので水 を入れて多くする)を入れる。上記に用いた水と合計で364mL入れる。①液 230gを加えて攪拌する。泡が立つので攪拌を1分間程して細かい泡にする。A 液完了。
- 3. A 液の中に⑤液 55mL を加えて攪拌する。10 秒位で柔らかい粘土状となる。数 時間放置すると硬化する。



図 9.2.8 裏込め注入材(材齢 8 日)

(3) 充填材

充填材は、シールドマシン及びセグメントを海底地盤から引き揚げるために、 2013年から横坑に充填された固結材料である。計画では、107リング付近まで充填 材で固める予定であったが、固結するまではわずかながら流動性もある材料のた め、より切羽側にまで充填材が浸透することは致し方のないことだと考えられる。 したがって、テールブラシ内にも充填材が混入している可能性もあるため、充填材 も比較試料として表 9.2.7 の配合表にしたがって作製した。

材料	ж	セメント	7717992	特殊增粘剤	高性能減水剤	消泡剤 (5 倍希釈)
名称	水道水	高炉B種	7ライアッシュ JIS23 種			
¥—カ—						
(比重)	1.00	3.04	2.20	1.052	1.056	1.00
混合量 (kg)	606	300	600	18.9	4.50	0.47

表 9.2.7 充填材の配合表



図 9.2.9 横坑の充填材(材齢 2 日)

(4) テールブラシの固着物の採取

倉敷労働基準監督署が表 9.2.8 に示す場所から固着物を採取した。図 9.2.10、図 9.2.11 にそれぞれ坑口側、切羽側のテールブラシの固着物採取場所を示す。また、 各採取試料の写真を図 9.2.12 に示す。

試料	採	採 取 年 日 日	赵 取堪所				採取	採取場所
番号	取	床城千万百	床收笏川				場所	基準点から
1	Α	平成25年9月12日	坑口側テールブラシ(後段)	1	番部分	外板外ブラシ間	0	0
2	В	平成25年9月12日	坑口側テールブラシ(後段)	19	番部分	外板外ブラシ間	39	170
3	С	平成25年9月12日	坑口側テールブラシ(後段)	38	番部分	内ブラシメッシュ間	86	372
4	D	平成25年9月12日	坑口側テールブラシ(後段)	50	番部分	外板外ブラシ間	113	490
5	Е	平成25年9月12日	坑口側テールブラシ(後段)	58	番部分	外板外ブラシ間	132	570
6	F	平成25年9月12日	坑口側テールブラシ(後段)	77	番部分	外板外ブラシ間	178	770
7	G	平成25年9月12日	坑口側テールブラシ(後段)	88	番部分	外板外ブラシ間	204	880
8	Н	平成25年9月12日	坑口側テールブラシ(後段)	96	番部分	外板外ブラシ間	222	960
9	Ι	平成25年9月12日	坑口側テールブラシ(後段)	115	番部分	メッシュ外ブラシ間	267	1155
10	J	平成25年9月12日	坑口側テールブラシ(後段)	134	番部分	外メッシュと外ブラシ間	313	1350
11	Κ	平成25年9月12日	坑口側テールブラシ(後段)	144	番部分	外ブラシと外メッシュ間	336	1450
12	L	平成25年9月19日	切羽側テールブラシ(前段)	1	番部分	スキンプレート外板間	0	0
13	М	平成25年9月19日	切羽側テールブラシ(前段)	4	番部分	外板外ブラシ間	7	30
14	Ν	平成25年9月19日	切羽側テールブラシ(前段)	19	番部分	外板外ブラシ間	42	180
15	0	平成25年9月19日	切羽側テールブラシ(前段)	38	番部分	スキンプレート外板間	88	380
16	Р	平成25年9月19日	切羽側テールブラシ(前段)	58	番部分	メッシュ内ブラシ間	132	570
17	Q	平成25年9月19日	切羽側テールブラシ(前段)	58	番部分	スキンプレート外板間	132	570
18	Х	平成25年9月27日	切羽側テールブラシ(前段)	62	番部分	スキンプレート外板間	144	620
19	Y	平成25年9月27日	切羽側テールブラシ(前段)	78	番部分	スキンプレート外板間	183	790
20	R	平成25年9月19日	切羽側テールブラシ(前段)	148	番部分	外ブラシ外板間	236	1020
21	S	平成25年9月19日	切羽側テールブラシ(前段)	168	番部分	メッシュ外ブラシ間	282	1220
22	Т	平成25年9月19日	切羽側テールブラシ(前段)	168	番部分	スキンプレート外板間	282	1220
23	U	平成25年9月19日	切羽側テールブラシ(前段)	178	番部分	スキンプレート外板間	306	1320
24	V	平成25年9月19日	切羽側テールブラシ(前段)	184	番部分	スキンプレート外板間	321	1385
25	W	平成25年9月19日	切羽側テールブラシ(前段)	191	番部分	スキンプレート部	337	1457
26	AA	平成25年9月12日	シールドマシンフードチャンバー内					
27	Ζ	平成25年8月8日	111R B2セグメント 地山側					

表 9.2.8 テールブラシの固着物の採取(倉敷労働基準監督署資料に一部加筆修正)



図 9.2.10 テールブラシ固着試料採取場所見取図(坑口側テールブラシ)坑口から切 羽を見た図



図 9.2.11 テールブラシ固着試料採取場所見取図(切羽側テールブラシ)坑口から切 羽を見た図











図 9.2.12 採取試料の写真

(5) 採取試料の分析

採取試料 A~Z、AA について、比較試料(テールグリス A、止水材 A、裏込め注 入材、充填材)のどれに当たるか赤外吸収スペクトル、形態観察、組成分析を実施し 分析した。

分析結果について表 9.2.9 に示す。同表から切羽に向かって 4 時と 10 時の方向の テールブラシ(前段,切羽側)から裏込め注入材が確認された(図 9.2.11 参照)。な お,裏込め注入材の混入割合が約 50%以下になると,成分分析では裏込め注入材を 検出できないことがわかった。

図 9.2.13 にテールシール注入管の詳細図を示す。切羽に向かって 4 時の方向の テールシール注入管がテールグリス A でいっぱいであったことを確認している。計 8 箇所からテールシールを油圧ジャッキにより手動で注入していく構造であり、1本 の管から 8 箇所のテールシール注入管に分岐しているため、どこか 1 箇所入りにく い管があると、他の箇所へとテールシールが流入するものと推察される。したがっ て、切羽に向かって 4 時の方向の注入管がテールグリス A でいっぱいであったこと から、止水材 B が流入していかなかったものと推察される。

切羽側のテールブラシにまで裏込め注入材が到達していること、85 リング掘進中 に裏込め注入材が坑内にまで漏れて来ていたことから、切羽側のテールブラシは全 周にわたって裏込め注入材により固結していた可能性が考えられる。

試料 番号	採取 番号	採取年月日	採取場所採取 場所 基準点か 角度 (度)採取場所						テール グリス A	止水材 A	充填材	その他
1	A	2013年9月12日	坑口側テールブラシ(後段)	1番部分	外板外ブラシ間	0	0		\bigcirc			
2	В	2013年9月12日	坑口側テールブラシ(後段)	19 番部分	外板外ブラシ間	39	170		0			
3	С	2013年9月12日	坑口側テールブラシ(後段)	38 番部分	内ブラシメッシュ間	86	372		0			
4	D	2013年9月12日	坑口側テールブラシ(後段)	50 番部分	外板外ブラシ間	113	490		0	\bigcirc		
5	E	2013年9月12日	坑口側テールブラシ(後段)	58 番部分	外板外ブラシ間	132	570		\bigcirc			
6	F	2013年9月12日	坑口側テールブラシ(後段)	77 番部分	外板外ブラシ間	178	770			\bigcirc	\bigcirc	
7	G	2013年9月12日	坑口側テールブラシ(後段)	88 番部分	外板外ブラシ間	204	880		\bigcirc			
8	Н	2013年9月12日	坑口側テールブラシ(後段)	96 番部分	外板外ブラシ間	222	960		0	\bigcirc		
9	Ι	2013年9月12日	坑口側テールブラシ(後段)	115 番部分	メッシュ外ブラシ間	267	1155		\bigcirc	\bigcirc		
10	J	2013年9月12日	坑口側テールブラシ(後段)	134 番部分	外メッシュと外ブラシ間	313	1350		\bigcirc			
11	K	2013年9月12日	坑口側テールブラシ(後段)	144 番部分	外ブラシと外メッシュ間	336	1450		\bigcirc			
12	L	2013年9月19日	切羽側テールブラシ(前段)	1 番部分	スキンプレート外板間	0	0		\bigcirc	\bigcirc		
13	М	2013年9月19日	切羽側テールブラシ(前段)	4 番部分	外板外ブラシ間	7	30		\bigcirc	\bigcirc		
14	N	2013年9月19日	切羽側テールブラシ(前段)	19 番部分	外板外ブラシ間	42	180		\bigcirc			
15	0	2013年9月19日	切羽側テールブラシ(前段)	38 番部分	スキンプレート外板間	88	380		\bigcirc	\bigcirc		
16	Р	2013年9月19日	切羽側テールブラシ(前段)	58 番部分	メッシュ内ブラシ間	132	570		\bigcirc	\bigcirc		
17	Q	2013年9月19日	切羽側テールブラシ(前段)	58 番部分	スキンプレート外板間	132	570	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc		
18	Х	2013年9月27日	切羽側テールブラシ(前段)	62 番部分	スキンプレート外板間	144	620		\bigcirc	\bigcirc		
19	Y	2013年9月27日	切羽側テールブラシ(前段)	78 番部分	スキンプレート外板間	183	790			0		
20	R	2013年9月19日	切羽側テールブラシ(前段)	148 番部分	外ブラシ外板間	236	1020		\bigcirc	\bigcirc		
21	S	2013年9月19日	切羽側テールブラシ(前段)	168 番部分	メッシュ外ブラシ間	282	1220		\bigcirc	\bigcirc		
22	Т	2013年9月19日	切羽側テールブラシ(前段)	168 番部分	スキンプレート外板間	282	1220		\bigcirc	\bigcirc		
23	U	2013年9月19日	切羽側テールブラシ(前段)	178 番部分	スキンプレート外板間	306	1320	\bigcirc			\bigcirc	
24	V	2013年9月19日	切羽側テールブラシ(前段)	184 番部分	スキンプレート外板間	321	1385		0			
25	W	2013年9月19日	切羽側テールブラシ(前段)	191 番部分	スキンプレート部	337	1457		\bigcirc			
26	AA	2013年9月12日	シールドマシンフードチャンバー内	· · · ·		-		\bigcirc		\bigcirc		
27	Z	2013年8月8日	111R B2セグメント 地山側							\bigcirc		
※ 裏込め注入材と(テールグリスA+止水材)の区別が難しく、裏込め注入材の混合比が約50%以下の場合,裏込め注入材を検出できない。												

表 9.2.9 採取試料の分析結果





図 9.2.13 テールシール注入管

9.3 土砂採取場から採取した試料の分析

スクリューコンベアを通った掘削土砂は流動化をよくするための薬剤等が混入さ れているため,掘削土砂は掘削前の自然地盤の物性とは厳密には異なる。特に, 粒度 については細粒分が混入し、液性塑性限界の値にも影響があると推察される。そこ で、ここでは、災害発生日と災害発生日から2、3日前の掘削土砂を比較することに より、災害発生日の地盤の変化について調査分析した。

土質試験は、土粒子密度試験(JIS A 1202: 1999)¹⁾、粒度試験(JIS A 1204: 2000)²⁾、液 性塑性限界試験(JIS A 1205)³⁾を実施し、それぞれの特性について調査を行った。 表 9.3.1 に土質試験結果を示す. 掘削土砂の特性は以下のようである.



(1-a)災害発生日より 2,3 日前の掘削土 (2-a)災害発生日午前 11 時 50 分頃の掘削 砂



土砂



(1-b) 災害発生日より 2,3 日前の掘削 土砂 (近影)



(2-b) 災害発生日午前 11 時 50 分頃の掘 削土砂 (近影)



			災害発生日より 2,3 日前	災害発生日午前11時50分頃			
			\mathcal{O}	\mathcal{O}			
			掘削土砂	掘削土砂			
	土粒子密度 ps g/cm ³		2.686	2.675			
般	自然含水比 wn %		9.3	10.2			
		粗粒分(0.075mm 以 上)%	87.6	88.2			
	(内訳)	礫分(2~75mm) %	57.8	61.6			
		砂分(0.075~2mm) %	29.8	26.6			
	細粒分(0.075mm 未 満)%		12.4	11.8			
	(内訳)	シルト分(0.005~0.075mm) %	6.1	6.9			
粒		粘土分(0.005mm 未満) %	6.3	4.9			
度	最大粒径 mm		53	53			
	60%粒径 D ₆₀ mm		9.76	11.85			
	50%平均粒径 D ₅₀ mm		4.88	6.50			
		30%粒径 D ₃₀ mm	0.610	0.738			
		10%粒径 D10 mm	0.029	0.044			
		均等係数 Uc	334	272			
	曲率係数 U _c '		1.31	1.05			
コンシ	液性限界 WL%		NP	34.5			
ステンシー		塑性限界 wp%	NP	18.6			
- 特 性	塑性指数 I _P		NP	15.9			
	地盤材料の分類名 分類記号 凡例記号		細粒分まじり砂質礫	細粒分まじり砂質礫			
分 類			GS-F	GS-F			
			♦	•			

表 9.3.1 掘削土砂の土質試験結果

(1) 土粒子の密度試験結果

どちらの掘削土砂もほぼ 2.68g/cm³を示しており,石英(二酸化ケイ素 SiO₂ 100%,比重 2.65)を多く含んだ土であると推測される.

(2) 粒度試験

図 9.3.2 に粒径加積曲線を示す.この図から,礫から粘土まで幅広い粒径を有していることがわかる.また,両掘削土砂の粒度分布に大きな差はなく,災害発生日の地盤はその 2,3 日前の地盤と大きく変化していないと結論付けられる。

図 9.3.3 の日本統一分類法によると,大分類は粗粒土(粗粒分が 50%以上)となり, 小分類は細粒分まじり砂質礫(GS-F)となる.図 9.3.4 の三角座標を用いても簡便に この分類は行える.



図 9.3.2 粒径加積曲線



図 9.3.3 日本統一分類法による土の分類



図 9.3.4 三角座標

9.4 シールドジャッキの調査

倉敷労働基準監督署がシールドジャッキのロッドの長さ等、詳細な調査を実施している(表 9.4.1 参照)。その結果、ジャッキ No.1~5、No.23~26 の計 9 本のジャッキが抜かれている(セグメントから離れている)状態を確認している。

ここでは、セグメントに接触していたジャッキ No.6~22 までの計 17 本のジャッキ について、その位置とロッドの長さについてまとめる。

図 9.4.1 はシールドマシンの側面からジャッキを見た場合のロッドの長さ、図 9.4.2 はシールドマシンの上方からジャッキを見た場合のロッドの長さを示している。同 図には、各ジャッキの位置とロッドの長さの関係から最小自乗法によりその傾きを 算出し、図中に黒色破線として示している。図 9.4.1 では、黒色破線の左側がシール ドマシン(切羽側)、右側がセグメント(発進立坑側)となる。図 9.4.2 では、黒色 破線の下側がシールドマシン(切羽側)、上側がセグメント(発進立坑側)となる。 つまり、黒色破線はシールドマシンとセグメントの接触面を示しており、黒色破線 の傾きからシールドマシンの傾きがわかる。例えば、図 9.4.1 で説明すると、セグメ ントが水平に掘進されていたとすると、黒色破線を時計回りに回転し垂直とする。 その時、シールドジャッキもともに回転させると、シールドマシンは上を向いてい ることになる。したがって、これらの図からシールドマシンの傾きを算出した結果、 シールドマシンはセグメントに対して上向き 0.8 度、切羽を向いて右方向に 0.005 度 傾いていることが確認された。第7章で述べたように、ジャイロピッチング、ジャ イロ方位角から災害発生直前、シールドマシンはセグメントに対して 0.13 度上向き、 0.506 度切羽に向かって右向きであった。絶対値は異なるものの、シールドマシンの 傾きについての傾向は一致している。シールドマシンの上向きの角度の方が災害発 生直前よりも大きく変化していることから、シールドマシンがより上向きになるこ とにより、テール部は下方に下がるため、下向きの力がセグメントに過大に作用し た可能性も示唆される。

表 9.4.1 シールドジャッキの測定結果(倉敷労働基準監督署提供)

周方向から見た図

シールドジャッキ測定値(単位:mm)







\setminus	Α	В	С	D	E	F	F'	F"	G	Н
ジャン キNo.	ロッド長さ	スキンプレート ~ロッド (根元)	スキンプ ^{ルート} ~ロッド (先)	スキンフ [°] レート ~スフ [°] レッダ [・] 一 (時計回り 左)	スキンプレート ~スプレッダー (時計回り 右)	赤テーフ [°] 後端 ~スフ [°] レッダー (スフ [°] レッダー中 心) 赤テーフ [°] より伸 ーとする	赤テーフ [°] 後端 ~スフ [°] レッダー (時計回り <u>左)</u> むでる方向を+、	赤テーフ [°] 後端 ~スフ [°] レッダー (時計回り 右) 縮む方向を	シールト [*] マシン 内部の残存 セグメント〜ス フ [°] レッダー(時 計回り左)	シールト・マシン 内部の残存 セグメント〜ス プレッダー(時 計回り右)
1	615	107	108	35	30	140			※ 1	※ 1
2	805	108	115	20	60	335			※ 1	※ 1
3	382	106	115	7	76	-80			※ 1	※ 1
4	285	107	114	5	67	-185			₩1	※ 1
5	388	108	112	7	66	-80			※ 1	※ 1
6	470	107	110	12	61	-2			Ж1	※ 1
7	475	108	107	10	51	1			Ж1	※ 1
8	484	107	107	10	47	5			Ж1	※ 1
9	488	108	108	10	40	4			※ 1	※ 1
10	488	107	107	6	40		20	3	※ 1	※ 1
11	490	104	105	18	36		18	7	※ 1	※ 1
12	494	106	110	測定不能 ※2	測定不能 ※2	測定不能 ※2	測定不能 ※2	測定不能 ※2	50	50
13	495	107	108	測定不能 ※2	測定不能 ※2	測定不能 ※2	測定不能 ※2	測定不能 ※2	42	46
14	490	108	108	測定不能 ※2	測定不能 ※2	測定不能 ※2	測定不能 ※2	測定不能 ※2	35	40
15	488	109	107	測定不能 ※2	測定不能 ※2	測定不能 ※2	測定不能 ※2	測定不能 ※2	27	36
16	485	106	107	測定不能 ※2	測定不能 ※2	測定不能 ※2	測定不能 ※2	測定不能 ※2	25	31
17	477	107	108	測定不能 ※2	測定不能 ※2	測定不能 ※2	測定不能 ※2	測定不能 ※2	20	30
18	474	108	113	47	9		-11	6	₩1	※ 1
19	482	107	109	51	15		-1	15	₩1	※ 1
20	484	109	107	44	10		2	6	₩1	※ 1
21	487	107	105	40	8		6	11	※ 1	※ 1
22	490	106	108	56	6		11	25	※ 1	※ 1
23	31	111	測定不能 ※3	76	4		-460	-427	※ 1	※ 1
24	33	112	測定不能 ※3	68	6		-463	-424	※ 1	※ 1
25	766	108	111	測定不能 ※3	測定不能 ※3	測定不能 ※3	測定不能 ※3	測定不能 ※3	※ 1	※ 1
26	1781	110	108 ※4	測定不能 ※3	測定不能 ※3	測定不能 ※3	測定不能 ※3	測定不能 ※3	※ 1	※ 1

※1 残存セグメント無し。

※2 セグメント残存のため測定不能。

※3 スキンプレートー部切断のため測定不能。 ※4 スキンプレートー部切断のため、シャフト先端部ではなく、赤テープ付近で測定。







図 9.4.2 シールドマシンの上方からジャッキを見た場合のロッドの長さ

9.5 本章のまとめ

- (1)シールドマシンのテール部スキンプレートに凹みがあり、その凹みの位置は 111 リングの B1 と K セグメントの上部にあたる。
- (2)切羽側テールブラシの外ばね板と内ばね板の角度を計測したところ、外ばね板の角度は,設計・施工時の角度とほぼ同等であった。一方,内ばね板の角度は,設計・施工時の角度よりも大きく、より切羽側に大きく広がっていた。内ばね板は,災害発生時に土砂水が坑内に流入したために,その流入圧により変形したものと推察される。外ばね板は,裏込め注入材の固着により相対的に硬くなり,流入圧でも容易に変形しなかったと推察される。
- (3) 坑口側及び切羽側のテールブラシの固着物を分析した結果,切羽側のテール ブラシにおいて,切羽に向かって4時と10時の方向から裏込め注入材が検出さ れた。したがって,裏込め注入材が,切羽側のテールブラシの全周にわたって固 着していたと推察される。なお,裏込め注入材と止水材の赤外吸収スペクトルが 類似しているため,裏込め注入材が止水材に対して50%以上含まれていないと, 裏込め注入材が検出されない結果となっている。
- (4)シールドマシンのスクリューコンベアを通った掘削土砂(災害発生日から 2, 3日前と災害発生日)の分析を実施した結果,災害発生日 2,3日前と災害発生 日では掘削土砂の粒度分布に変化が見られなかった。このことから,災害発生日 の2,3日前から海底地盤の土質に急激な変化はないと考えられる。
- (5)シールドマシンのシールドジャッキのロッドの長さを計測した結果、シールドマシンはセグメントに対して上向き 0.8 度、切羽を向いて右方向に 0.005 度傾いていることが確認された。第7章で述べたように、絶対値は異なるものの、掘進管理システムデータから得られたシールドマシンのセグメントに対する傾きと傾向は一致していた。

参考文献

- 1) 社団法人地盤工学会 地盤調査法改訂編集委員会(2009):土粒子の密度試験方法,地盤材料試験の方法と解説―二分冊の1―,(社)地盤工学会, pp. 97-102.
- 2) 社団法人地盤工学会 地盤調査法改訂編集委員会(2009):土の粒度試験方法, 地盤材料試験の方法と解説―二分冊の1―,(社)地盤工学会,pp.115-136.
- 3) 社団法人地盤工学会 地盤調査法改訂編集委員会(2009):土の液性限界・塑性 限界試験方法,地盤材料試験の方法と解説―二分冊の1―,(社)地盤工学会,pp. 137-152.

10. 災害発生原因推定のための数値解析シミュレーション

10.1 切羽圧低下に関する3次元有限要素解析

10.1.1 はじめに

当該災害発生直前に掘進管理システムに計測されたシールドマシン前面に設置さ れた土圧計の急激な圧力の低下挙動を図 10.1.1 に示す。12:06:02 秒から土圧計の 値は 245kPa から急激に低下し、約1分後の 12:07:10 には 155kPa まで低下した。 その時刻以降は掘進管理システムの数字が同じ値を記録していることから、それ以 降は何らかの理由により計測不可となったものと思われる。12:06:02 は B セグメン トを挿入するためにジャッキを引き抜いた時間であることや証言等を総合的に判断 すると K セグメント抜け出しによって水や土砂がシールドマシン内に流入した可能 性があり、それがシールドマシン前面の土圧に影響を与えたと考えられる。

ここでは、K セグメント抜け出しによる隙間発生によってシールドマシン前面の 土圧計が図 10.1.1 のような低下挙動をするかについて、3 次元有限要素法による非 定常浸透流解析を実施し、計測データとの比較を行った。



図 10.1.1 112 リング組立中の切羽圧力低下挙動

10.1.2 有限要素法(FEM)による非定常浸透流解析の概要

(1) 有限要素法とは

有限要素法は、航空機の翼の詳細な強度計算を行うために開発されたものであり、 連続的な物体を有限個の「要素」に分割して各要素の特性を単純な数学的モデルで 近似し、連立方程式の形にして全体の挙動を解析するものである。有限要素法は、土 木分野では橋梁、トンネル、高速道路、ダムの強度計算や津波、河川の流れ計算に、 建築関係では高層ビル、大型ドームの設計計算などに利用されている。また、複雑な 形状の解析が容易であり、汎用プログラムが作りやすく、強力な機能を有する汎用 プログラムが市販されている。

(2) 使用した解析プログラム (ソフトウェア)

有限要素法による切羽圧低下に関する再現シミュレーションには地盤専用有限要素法ソフトウェア PLAXIS 3D 2013(オランダ PLAXIS B. V.社製)を使用した。 オランダ PLAXIS B V 社製の PLAXIS シリーズは、全世界で 7000 ライセンス以上の 販売実績があり、主に欧州では設計基準(Eurocode7&8)にて PLAXIS による 2 次元 を中心とした FEM 解析が行われているため、標準的な解析ソフトとして利用されて いる。 10.1.3 解析モデルと各種条件設定

(1)解析領域のモデル化

本解析では、図 10.1.2 に示す「第二パイプライン防護設備位置計画図」(事業者作成)から点線部を抽出してモデル化した。ここで、モデル化したモデル図を図 2 に示す。第6章に示すように海底地形の形状および層序としては南北方向にも高低差があるが、本解析の主目的を鑑みると影響が少ないものと判断して成層を水平と仮定し、横断方向 50m、縦断方向 130m、鉛直方向は-14~-42.94m の範囲を FEM にてモデル化した。これらをオートメッシュ機能により要素分割したところ、土要素数 63、187 要素、節点数 93、299 節点に分割された。ここで、当該災害発生現場の地盤条件(砂礫地盤)ではシールドマシン周辺箇所のオーバーカットによって透水性が良くなるものと考えられる。そのため、それを考慮してシールドマシン周辺に 0.25m の幅で透水性が良い地盤領域を組み込んだ。なお、ここで設定した幅 0.25m はメッシュサイズと数値解析上安定の為に設定したものであり、本来であればオーバーカット領域 10mm として設定する必要がある。



図 10.1.2 モデル化箇所



図 10.1.3 解析領域のモデル化



メント破損領域(1400mm 破損) 部を厚さ 0.25m のオーバーカットに よる透水性が良い領域で覆う

図 10.1.4 シールドマシン周辺箇所のモデル化(抽出図)
(2) 地盤パラメータと透水係数の設定

事業者作成「水島第二パイプライン防護設備建設工事 平成 22 年度詳細設計 設計計算書(その1)」¹⁾から、下記の地盤パラメータを使用した。

土質	記号	平均 N 値	単位体積重 量 γ (kN/m ³)	粘着力 c (kN/m²)	内部摩擦 角 \$ ^{*2} (deg)	変形係数 E ₀ (kN/m ²)	ポアソ ン比 vd ^{*5}
埋土層	F	3	18.0^{*1}	0	22	$8,800^{*4}$	0.40
沖積第1砂質土層	As1	5	18.0^{*1}	0	24	$12,000^{*3}$	0.40
沖積粘性土層	Ac	2	17.4	67	0	$11,600^{*3}$	0.45
洪積第1砂礫層	Dg1	43	19.0^{*1}	0	40	$118,000^{*4}$	0.30
洪積第2砂礫層	Dg2	50	20.0^{*1}	0	42	$137,200^{*4}$	0.30

表 10.1.1 地盤パラメータ

*1 JH 設計要領第一集に示される値より推定

*3 孔内水平載荷 E₀=E_s α=4

*4 N値より換算 Eo=2.74N α=1を乗じている

*5 ポアソン比はトンネル標準示方書(開削工法編)に示される一般的な値を使用

透水係数は、事業者によりシールド掘進対象地盤の洪積第1砂礫層(Dg1)と沖積 第1砂質土層(As1)について実施されている。ここで、本解析では表10.2.1に示す ようなパラメータを使用した。

土質	記号	透水係数 k(cm/sec)	解析に使用した透水係数 k (cm/sec)	
			【1】	【2】
沖積第1砂質土層	As1	$0.8\!\sim\!2\! imes\!10^{-2}$	$1.16 imes 10^{-2}$	$1.0 imes 10^{-3}$
沖積粘性土層	Ac		$1.74 imes 10^{-6}$	$1.0 imes 10^{-5}$
洪積第1砂礫層	Dg1	$1\!\sim\!4\!\times\!10^{-2}$	$2.89 imes 10^{-2}$	$1.0 imes 10^{-2}$

表 10.1.2 解析に使用した透水係数

(3) セグメントの破損による水漏れの再現

セグメントの破損による水漏れを再現するために、K セグメントが抜け出したと 仮定して K セグメントの要素の一部を取り去り、それを再現した。破損規模は図 10.1.5 に示す 7 種類であり、K セグメントの抜け出し長としては、50mm、100mm、 150mm、200mm、250mm、500mm、1400mm である。



図 10.1.5 セグメントの破損規模

10.1.4 解析ケース

解析ケースを表 10.1.3 に示す。検討項目は下記の3点である。すなわち、

- ① セグメント破損規模
- ② オーバーカットによる透水性
- ③ 透水係数を変化させた場合

これらについて、①は図 10.1.5 に示す 7 種類、②は透水係数を 3 種類、③は透水 係数を 2 種類に変化させた解析を行った。

解析ステップの状況を図 10.1.6 に示す。まず、自然地盤を再現するために K0 圧密 による自重解析を行い、第 2 段階で弾塑性解析を実施した。その後、トンネル掘削 を再現するように地盤掘削とシールドマシン、セグメントの構築を行った後に弾塑 性解析を実施した。弾塑性解析にて解が安定した後、非定常浸透流解析を時間スケ ールとして 5 日間(=7200分)行った後、オーバーカット部(②)を発現させてセグ メント破損規模(①)を変化させた各ステップの非定常浸透流解析を時間スケール で 5 分間実施した。なお、③については透水係数の違いによる影響を把握するため に実施したものであり、初期条件の透水係数パラメータも変化させて解析を行って いる。

	①セグメント破増相構	のオー	- バーナ	③透水係数 素 10.1.9		
ケース	(mm)		$(\mathbf{k} \times)$			
					1 10.1.2	
	50/100/150/200/250/500/1400	100	50	10	[1]	$\left(2\right)$
1	0	\bigcirc	—		\bigcirc	
2	0		0		\bigcirc	
3	0			\bigcirc	\bigcirc	
4	0	\bigcirc	—			\bigcirc
5	0		0			0
6	0			\bigcirc		\bigcirc

表 10.1.3 解析ケース一覧



図 10.1.6 解析フロー

10.1.5 解析結果

(1) 掘進管理システムによる計測データとの比較

まず、掘進管理システムによる左右の切羽圧の変化と各解析ケースの結果を比較す る。図 10.1.7 にセグメント破損後の切羽の間隙水圧低下状況をケース毎に示す。す べてのケースにおいてセグメント破損部から漏水を再現すると切羽圧の低減が見ら れた。今回の解析条件では切羽圧の低下に与える影響因子としてはオーバーカット 部の透水係数の変化が最も大きかった。オーバーカット部は堅固な砂礫層の場合に は、空隙として存在する可能性もあり、その場合には透水係数は大きくなる。そのよ うな状態を解析では忠実に再現することは難しいが、シールドマシン周辺のオーバ ーカット部によってセグメント破損による坑内への土砂・水流入による水圧低下に よって切羽に設置された圧力センサーが圧力低下したということは、解析から示す ことができる。

なお、掘進管理システムによる左右の切羽圧変化と各解析ケースの結果を見ると、 初期(15秒)では、透水係数が Dg1 層の透水係数の 10 倍のケースと一致している が、その後徐々に切羽圧が低下していき、掘進管理システムによる左右の切羽圧が 計測された最終状態では透水係数が Dg1 層の 50 倍や 100 倍の解析ケースの結果に 漸近しつつある。つまり、坑内への土砂・水の流入により周辺地山の様相が変化して 短時間で透水性が良くなっていったものと推察される。



(2) ケース 2



(3) ケース3







(5) ケース 5



(5) ケース 6

図 10.1.7 セグメント破損による各ケースにおける切羽圧の低下挙動

(2) セグメント破損部周辺の間隙水圧分布状況について

セグメント破損部周辺の間隙水圧の等高分布について隙間 50mm の結果を図 10.1.8 に示す。全てのケースにおいてセグメント破損部から間隙水圧が低下している 状況が分かる。さらに、オーバーカット部の透水性が良いほど地表面まで間隙水圧 低下範囲が広がっていることが分かる。





10.1.6 まとめ

本節では、K セグメント抜け出しによる隙間発生によってシールドマシン前面の 圧力計が低下挙動をするかについて、3 次元有限要素法による非定常浸透流解析を実 施し、計測データとの比較を行った。その結果、オーバーカット部の透水性を良くす ることで、切羽部の圧力低下を再現することができた。当該災害発生現場の地盤は 砂礫層でありオーバーカットによって切羽前面とシールドマシン後方には隙間が存 在することが考えられる。そのような状態となれば掘進管理システムによる切羽圧 力が低下した挙動を説明することができる。すなわち、掘進管理システムの切羽圧 力の低下挙動は、K セグメントの抜け出しにより、切羽前面から K セグメントに至 るまで、水の流れが発生したことによって説明することができる。

10.2 セグメントリング構造の崩壊に関する個別要素法解析

10.2.1 個別要素法 (DEM)²⁾について

個別要素法とは、あるステップでの球要素同士の重なり合い U をバネ定数 k で乗 ずること(F=kU)により、球要素間に働く力 F を算出し、その力から次のステップ での球要素間の位置 x を運動方程式(F=ma、m:質量、a:加速度($=\frac{d^2x}{dt^2}$))によ り求め、新たな球要素の位置 x を算出し、再度、新たな球要素同士の重なり合い U を算出するというステップを繰り返すことにより、砂礫等の挙動をシミュレートす るものである.図 10.2.1 は、個別要素法の計算手順を示す.



図 10.2.1 個別要素法の計算手順

個別要素法(DEM)の球要素同士の接触点での力学モデルを図 10.2.2 に示す.このように、球要素同士の接触点での重なり合いを法線方向 Uⁿと接線方向ΔU^sで求めれば、簡単に法線方向の力 Fⁿと接線方向の力 F^sが求まる.また、すべり条件も考慮されており、生じている接線方向の力 F^sが F^smax より大きいとすべりが生じる.

 $F_{\max}^s = \mu |F^n|$

$$|F^{s}| > F_{\max}^{s} \rightarrow$$
すべり発生

ここで、µは摩擦係数である。

本報告書では、摩擦係数を変化させることで、セグメント継手(セグメント同士の 接触面)の摩擦を変化させたシミュレーションを実施している。

また球要素はコンクリート内の細骨材及び粗骨材をモデル化している。

このような力学モデルは粒状体の挙動を表現する上では有用であるが、リング継 手の挙動を表現するには、接触点におけるボンド(ここでは「コンタクトボンド」と いう。)を付加する必要がある.個別要素法では、コンタクトボンドも提案されてお り、図 10.2.3 のようである.このように、コンタクトボンドを与えることで、球要素 同士が結び付き、せん断力だけでなく引張力に対しても抵抗できるようになる.本 報告書では、コンタクトボンドをリング継手に対して用いた。リング継手に作用す るせん断力又は引張力どちか一方がコンタクトボンドの強度を超えるとコンタクト ボンドは消失し、球要素の接触点の力学モデルのみとなる。





(a) 接触点でのモデル(法線方向)

(b) 接触点でのモデル(接線方向)



すべり条件 $F_{\max}^{s} \leq \mu F^{n}$

(c) 接触点におけるモデルとすべり条件 図 10.2.2 個別要素法(DEM)の球要素同士の接触点でのモデル



(a) コンタクトボンド



図 10.2.3 コンタクトボンドのモデル

さらに、球要素だけでは、セグメント(コンクリート)の挙動を表現できないた め、セグメントを構成する球要素同士をパラレルボンドで固結させている。パラレ ルボンドは球要素同士を固結し、せん断応力、引張り応力だけでなく曲げモーメン トにも抵抗する。こちらも同様にパラレルボンドに作用するせん断応力又は引張り 応力がパラレルボンドの強度を超えるとパラレルボンドは消失する。コンタクトボ ンドとパラレルボンドの違いは、コンタクトボンドが曲げモーメントに対し抵抗し ないのに対し、パラレルボンドは曲げモーメントにも抵抗する点である。





図10.2.4 球要素同士を固結させるパラレルボンド

10.2.2 解析パラメータの決定方法について

(1) セグメントを表現するための解析パラメータについて

解析パラメータは図 10.2.5 に示すフローチャート ³⁾に従って決定した。同図の丸 印で示した ρ_s 、 V_p 、 V_s 、 V_{p_bm} 、 V_{s_bm} 、 q_u が実験から決定される。実験から決定 されるパラメータは以下のようである。

ρ_s:細骨材、粗骨材の粒子密度(kg/m³)

*V*_p:細骨材、粗骨材の P 波速度(m/sec)

 $V_{\rm s}$:細骨材、粗骨材のS波速度(m/sec)

 $V_{p_{bm}}$: コンクリートの P 波速度 (m/sec)

*V*s_bm:コンクリートのS波速度 (m/sec)

 $q_{\rm u}:$ コンクリートの一軸圧縮強度 (N/mm^2)

細骨材、粗骨材の粒子密度は、日本の標準砂である豊浦標準砂の値を用い、 2650kg/m³とした。V_p、V_sは豊浦標準砂(*D*_r=80%)のP波、S波速度から決定した¹⁾。 さらに、第8章で述べたように実際に使用される予定だった新品のセグメントから コンクリート部分を切り出し、コンクリートのP波、S波速度、一軸圧縮強度を計測 し、V_{p bm}、V_{s bm}、*q*_uを決定した。

球要素の平均半径は、セグメントの厚さ 160mm を球要素 2 個分で表現できるよう、平均半径を 40.8mm としている。球要素の平均半径を 40mm ではなく 40.8mm とした理由は、球要素の平均半径が 40.8mm であれば球要素同士が丁度接するようにしてセグメントの外径(4820mm)を形成できるからである。球要素は単一な径で解析するよりも粒径にわずかな幅を持たせた方が解析として安定するため、最小半径 $R_{min}= 27.2mm$ 、最大半径 $R_{max}= 54.4mm$ とし、 $R_{max}/R_{min}= 2$ としている。

これらの値からフローチャートの式(1)を用いて球要素の剛性が、式(2)を用 いてパラレルボンドの剛性が、式(5)、(6)を用いてパラレルボンドの強度が求 まる。

摩擦係数µはシミュレーションの中で変化させている。

減衰定数βは、1以下では自由振動、1以上では過減衰振動、1では臨界減衰振動と 呼ばれる。ここでは、臨界減衰振動に近い 0.8 という値を採用した。

このようにして決定されたセグメントを表現する解析パラメータを表 10.2.1 にま とめた。

また、安定な解析を行うため、計算に用いる時間刻み Δt を決定する必要がある。 ここでは安定限界の時間刻み Δt_{cr} の値を反映させ、計算ごとに Δt を変化させている が、 Δt の値は $1.0 \times 10^{-7} < \Delta t < 1.0 \times 10^{-5}$ の範囲内にあった。

図 10.2.5 のフローチャートを用いて決定したパラメータを使用し、セグメント単体曲げ試験をシミュレートした。球要素の半径はこのシミュレーションの場合 80.4mmとしている。シミュレーション結果が単体曲げ試験時の荷重と変位を平均的に表現できている。



図 10.2.5 解析パラメータを決定するフローチャート

パラ	メータ(材料定数)	記号	セグメント	単位
	密度	$ ho_{s}$	2650	kg/m ³
	平均半径	R	0.0408	m
球要	法線方向の剛性	k ⁿ	18.0	kN/mm
素	接線方向の剛性	k^{s}	7.3	kN/mm
	摩擦係数	μ	0.10	-
	減衰定数	β_n, β_s	0.8	-
パラレルボンドと 球要素の半径比		$\overline{\lambda}$	1.0	-
パー	法線方向の剛性	\overline{k}^{n}	480	N/mm ³
ノレルボン	接線方向の剛性	\overline{k}^{s}	130	N/mm ³
	法線方向の強度	$\overline{\sigma}_{c}$	160	N/mm ²
۲	接線方向の強度	$-\overline{\tau}_{c}$	160	N/mm ²

表 10.2.1 セグメントのパラメータ



図 10.2.6 個別要素法 (DEM) によりシミュレートされた単体曲げ試験時の荷重と変位

(2) リング継手を表現するためのパラメータについて

図 10.2.7 に示すように、リング継手のボルトの中心は、セグメントの坑内側から 40mmの箇所にある。したがって、リング継手を表現する球要素の半径は 40mm と した。

リング継手を表現する球要素同士をコンタクトボンドで締結し、ボルトを表現す る。コンタクトボンドの剛性と強度は、第8章で述べたように、ボルトインサート の引張り試験結果、ボルトインサート及びボルトボックスの載荷試験結果から決定 した。

法線方向の剛性 kⁿ= 36 kN/mm

接線方向の剛性 k^s= 14 kN/mm

法線方向の強度 oc= 105.3 kN

接線方向の強度 *c*= 62.9 kN

密度、摩擦係数、減衰定数については、セグメントを表現する球要素と同様とした。

表 10.2.2 にリング継手を表現する解析パラメータをまとめた。これらのパラメー タを第8章で示したボルトインサートの引張り試験結果とボルトインサート及びボ ルトボックスの載荷試験結果に表示すると図 10.2.8、図 10.2.9 のようになり、パラ メータが試験結果をよく表現していることがわかる。



図 10.2.7 リング継手のボルトの中心の位置 ¹⁾

パラ	メータ(材料定数)	記号	リング継手	単位
	密度	$ ho_s$	2650	kg/m ³
	平均半径	R	0.04	m
球 要 素	法線方向の剛性	k ⁿ	36	kN/mm
	接線方向の剛性	k^{s}	14	kN/mm
	摩擦係数	μ	0.10	-
	減衰定数	β_n, β_s	0.8	-
	法線方向の強度	$\sigma_{\!c}$	105.3	kN
ンタクトボンド	接線方向の強度	$ au_c$	62.9	kN

表 10.2.2 リング継手を表現する解析パラメータ



図 10.2.8 ボルトインサートの引張り試験結果と個別要素法パラメータの表示



図 10.2.9 ボルトインサート及びボルトボックスの載荷試験結果と個別要素法パラ メータの表示

10.2.3 作用させる外力(設計荷重)について

シミュレーションで用いた外力について説明する。ここでは、第4章で述べた設計 荷重をシミュレーションに対しても用いている。災害発生前には 109 リングから裏 込め注入材を注入していたという証言も得られていることから、109 リングまでは裏 込め注入材を介してセグメントが地盤と接触していたと考えられる。したがって、 109 リングまでは設計時と同様に土圧、水圧、自重反力、地盤反力を加える。

加えた土圧、水圧を図 10.2.10、図 10.2.11、表 10.2.3 に示す。また、自重反力 (18.297kN/m) についても、設計時と同様にセグメントリングの 3 時から 9 時の方 向に、下方から上向きの力を載荷する。

地盤反力係数も設計時と同様に法線方向(セグメントリングの中心に向かう力) に *k*= 40 MN/m³という値を入力している。セグメントの外径よりも球要素がはみ出 すとそのはみ出した量に地盤反力係数を乗じて、地盤反力をセグメントリングの中 心に向かって球要素に作用させる。



図 10.2.10 土被りと水深 1)に加筆修正



図 10.2.11 土圧と水圧の分布 1)

	単位	荷重值		
項目		m当り	リング 当り	
頂部鉛直土圧	pe1	kN/m ²	86.76	121.46
底部鉛直土圧	pe2	kN/m ²	37.11	51,95
頂部側方土圧	qe1	kN/m ²	34.70	48.58
底部側方土圧	qe2	kN/m ²	52.05	72.87
頂部水圧	pw1	kN/m ²	271.25	379.75
底部水圧	pw2	kN/m ²	320.90	449.26

表 10.2.3 設計における土圧と水圧 1)

一方、111 リング、110 リングについては、裏込め注入材の痕跡が見られず、セ グメントの損傷が激しかったことから、セグメントが地盤と接することなく、水圧 のみが作用する状態だったと考えられる。そのため、111 リング、110 リングにつ いては、水圧のみを作用させる。作用させる水圧は設計時の水圧と同様である。地 盤には接していないため、土圧、自重反力、地盤反力は作用しない。

また、テールブラシが一部固着していたため、固着している場合、固着していない場合のシミュレーションを実施している。固着している場合には、すべてのテールブラシが固着しているものとしてシミュレーションを実施している。テールシールが固着していない場合、テールシールの剛性は4.6MN/mとし、裏込め材により固着した場合は、5.9MN/mとしている。これらの値は、既往の研究からテールブラシ載荷試験結果を参考に決定した(図10.2.12、図10.2.13 参照)。



(a) 載荷方法①



(b) 載荷方法(2)

図 10.2.12 テールブラシ載荷装置⁴⁾

(高橋正朗ら、シールドのテールシールがセグメントに与える影響に関する研究、 土木学会論文集 F1(トンネル工学)特集号 Vol.66、No.1、pp.109-120.)



図 10.2.13 テールブラシの載荷試験における載荷荷重と変位量⁴⁾(Case1:テール ブラシのみ、Case2:テールグリスのみの場合、Case3:テールブラシにテールグリス を注入した場合、Case4:裏込め材がすべてのテールブラシ内部に混入して固化し た場合、Case5:Case4の状態でグリス圧を作用させた場合、Case6:Case5の状態に 加えて、裏込め材がテールブラシ間に入り込んでブロック状に固化した場合)(高 橋正朗ら、シールドのテールシールがセグメントに与える影響に関する研究、土木 学会論文集 F1(トンネル工学)特集号 Vol.66、No.1、pp.109-120.)

10.2.4 シミュレーションの手順

シミュレーション手順を以下に説明する。

- セグメント内外径の円筒状の壁要素を設ける。また 112 リング切羽側、108 リン グ坑内側にも壁要素を設ける。
- 2 壁要素間に球要素(最小半径 R_{min}= 0.0272m、 最大半径 R_{max}= 0.0544m、 平均半
 径 R= 0.0408m)を密度 1.572g/cm³となるよう発生させる。
- ③ セグメント間、リング間に壁要素を設置する(図 10.2.14 左図参照)。
- ④ リング継手の設計図面と同様の位置の球要素を削除し、新たにリング継手用の球 要素(半径 R=0.04m)を設け、コンタクトボンドを付加する。これによりリング 継手が再現される(図 10.2.14 右図参照)。
- ⑤ 全球要素間にパラレルボンドを付加する。
- ⑥ セグメント間、リング間のパラレルボンドを削除する。これにより、セグメントは完全に独立し、リング間はリング継手のみで締結されている状態となる(図 10.2.15 右図参照)。
- ⑦ 108 リングの球要素の変位及び回転を固定する(図 10.2.16 右図参照)。
- ⑧ セグメント間、リング間の壁要素を削除する。
- ⑨ シールドマシンの設計図面と同様の位置に円筒状の壁要素を設置する(図 10.2.16 右図参照)。
- ⑩ ジャッキの設計図面と同様の位置に壁要素を設置する(図 10.2.16 右図参照)。ジャッキは 112 リング B1 セグメントのセグメント組み立て時のジャッキ総推力(756kN:掘進管理システムの2月7日12時5分56秒時点のデータ)を表現できるよう、球要素と僅かな重なり合いを持たせる。12時5分56秒時点で実際に使用されたジャッキは、ジャッキNo.17~22の6本であり、1本当たり126kNのジャッキ推力が働いている。シミュレーションでは、掘進中もシミュレーションしているため、合計26本のジャッキに均等に126kNのジャッキ推力が働いているものとしている。この時の総推力は3276kNとなる。実際の掘進中のジャッキ総推力(13701kN:掘進管理システムの2月7日11時34分51秒時点のデータ、使用ジャッキ本数21本)と比べると非常に小さい値である。
- ① テール部を模擬する円筒状の壁要素(セグメントの外径と同等の直径を有し幅 435mm)を設置する。
- ⑩ 重力を作用させる。
- ③ 110 リングの掘進。109 リングの幅 1400mm のうち 885mm が地盤に露出。土水圧、 自重反力、地盤反力を載荷(図 10.2.17 参照)。
- ④ 111 リングの掘進。109 リングの残り 515mm に土水圧、自重反力、地盤反力を載荷。
 荷。合わせて、110 リングの幅 1400mm のうち 885mm に水圧のみを載荷。
- 112 リングの掘進。110 リングの残り 515mm に水圧のみを載荷。合わせて、111 リングの幅 1400mm のうち 885mm に水圧のみを載荷。
- ⑩ 裏込め注入材によりテール部が固着する場合を表現するケースでは、テール部の
 剛性を 4.6MN/m から 5.9MN/m にあげる(図 10.2.19 参照)。
- ⑪ 第7章で述べたように掘進管理システムのデータと掘進指示書のデータからシー

ルドマシン及びテール部を水平方向に 0.506 度、鉛直方向に 0.13 度傾ける(図 10.2.20、図 10.2.21 参照)。鉛直方向にのみ 0.13 度傾ける場合もシミュレーション を実施している。

- ⑧ ジャッキ23、24、25、26、1、2、3、4、5(計9本)を抜く(図 10.2.22 参照)。
- ① 上記した条件でもセグメントリングが崩壊しなかった場合、第7章で述べたように掘進管理システムのデータからシールドマシン及びテール部を鉛直下方に 8mm ほど変位させる。



図 10.2.14 セグメント及びリング継手の作成



図 10.2.15 パラレルボンドの分布



図 10.2.16 108 リングの変位回転固定、シールドマシン、ジャッキの設置



図 10.2.17 110 リングの掘進。109 リングが裏込め注入材を介して地盤と接するため、土圧、水圧、自重反力、地盤反力を載荷。



図 10.2.18 111 リングの掘進。112 リングの掘進。110 リング、111 リングに水圧の みを載荷。



図 10.2.19 シールドマシンのテール部



図 10.2.20 シールドマシン、テール部を水平方向に 0.506 度、鉛直方向に 0.13 度傾 ける前



図 10.2.21 シールドマシン、テール部を水平方向に 0.506 度、鉛直方向に 0.13 度傾 けた後



図 10.2.22 ジャッキ 23、24、25、26、1、2、3、4、5(計9本)を抜いた後 Y 方向(掘進方向)の変位を色分けして表示 -:切羽側(赤色)、+:発進立坑側(青色)

10.2.5 シミュレーション結果

実施したシミュレーションのケースについて表 10.2.4 に示す。

図 10.2.3~図 10.2.8 に各ケースの解析結果を示す。図中の色分けは、Y 方向(掘 進方向)の変位を表示しており、Y 方向の変位がマイナスであれば切羽側に変位し ていることを示し(赤色)、プラスであれば発進立坑側に変位していることを示す (青色)。

全てのケースの比較から以下のことが明らかとなった。

・セグメントの摩擦係数が 0.1 の場合,シールドマシンを鉛直及び水平に傾けた場合,鉛直のみに傾けた場合ともに,セグメントリングが崩壊した。

・テール部の固着の有無による影響はあまり見受けられなかった。これは図 10.2.13 に示したように、テール部の剛性が固着の有無によりそれほど大きく変化しないためである。

・セグメントの摩擦係数が0.2の場合,Kセグメントは抜け出そうとするが,セグ メントリングの崩壊には至らなかった。

	トゲノンノ	テール部の	シールドマシン	シールドマシン	シールドマシン		
	セクメント		の鉛直方向の	の水平方向の	の鉛直方向の		
	の摩擦係数	固有の有悪	傾き	傾き	変位		
Case1	0.1	有	0.13	0.506	無		
Case2	0.1	無	0.13	0.506	無		
Case3	0.2	無	0.13	0.506	8mm		
Case4	0.1	無	0.13	無	無		
Case5	0.2	無	0.13	無	8mm		

表 10.2.4 実施したシミュレーションの条件

(1) Case1:セグメントの摩擦係数 0.1、テール部の固着有、シールドマシンを鉛 直方向、水平方向に傾ける。



(a)



(b)



(c)



(d)

図 10.2.23 セグメントの崩壊機序、Y 方向(掘進方向)の変位を色分けして表示 -:切羽側(赤色)、+:発進立坑側(青色)



(b) 個別要素法による崩壊状況

図 10.2.24 海底地盤のセグメントの状況と個別要素法による崩壊状況との比較

(2) Case2: セグメントの摩擦係数 0.1、テール部の固着無、シールドマシンを鉛直 方向、水平方向に傾ける。



図 10.2.25 Case2 の個別要素法による崩壊状況
 Y 方向(掘進方向)の変位を色分けして表示
 -:切羽側(赤色)、+:発進立坑側(青色)

(3) Case3: セグメントの摩擦係数 0.2、テール部の固着無、シールドマシンを鉛直 方向、水平方向に傾けた後、鉛直のみに 8mm 変位。



図 10.2.26 Case3 の 個別 要素 法 による 崩壊 扒 Y 方向(掘進方向)の変位を色分けして表示 -: 切羽側(赤色)、+:発進立坑側(青色) (4) Case4: セグメントの摩擦係数 0.1、テール部の固着無、シールドマシンを鉛直 方向のみに傾ける。



図 10.2.27 Case4 の個別要素法による崩壊状況
 Y 方向(掘進方向)の変位を色分けして表示
 -:切羽側(赤色)、+:発進立坑側(青色)
(5) Case5: セグメントの摩擦係数 0.2、テール部の固着無、シールドマシンを鉛直 方向のみに傾けた後、鉛直のみに 8mm 変位。



図 10.2.28 Case5 の 個別 要素 法 による 崩壊 扒 が Y 方向(掘進方向)の変位を色分けして表示 -:切羽側(赤色)、+:発進立坑側(青色)

10.3 本章のまとめ

- (1) 第7章で示した災害発生時にシールドマシン前面の切羽圧が低下したことについて、3次元有限要素法による非定常浸透流解析から、111 リングのKセグメントに隙間が生じ、その隙間からシールドマシン内に水が流入したことで説明できることが明らかとなった。
- (2)第7章で得られたシールドマシンのセグメントに対する傾き、上部のジャッキを9本引き抜くこと等、災害発生直前の状態を3次元個別要素法により再現したところ、111リングのKセグメントが抜け出そうとし、111リング、110リングがほぼ同時に破壊することが明らかとなった。3次元個別要素法による解析でも第8章で示した破壊の機序と同様にセグメントが破壊した。

参考文献

- 事業者:「水島第二パイプライン防護設備建設工事 平成22年度詳細設計 設計計算書(その1)」,2011年3月.
- Itasca Consulting Group Inc.: Particle Flow Code in 3 Dimensions Theory and Background, pp.2-4~2-5, pp. 2-6~2-10, pp. 1-24~1-25, pp. 1-15~1-22, Minneapolis Minnesota 554ji01 USA, 2008.
- 吉川直孝、 堀智仁、 伊藤和也、 三田地利之: 固結粒状材料における個別要素 法パラメータの決定方法の検討、 地盤工学ジャーナル、 Vol. 8、 No. 2、 pp. 221-237、 2013.
- 4) 高橋正朗ら、シールドのテールシールがセグメントに与える影響に関する研究、
 土木学会論文集 F1(トンネル工学)特集号 Vol.66、No.1、pp.109-120.

11. 災害発生に至るまでの崩壊メカニズム

11.1 崩壊メカニズム

これまでの調査結果から、災害発生に至るまでの現場状況と想定される現象、崩壊 メカニズムを表 11.1、表 11.2 に示す。同表のような順序でセグメントが崩壊し、海 水が横坑、立坑に流入し、災害に至ったと考えられる。

表 11.1 災害発生に至るまでの現場状況と想定される現象

掘進管理システム、電話発信記録、証言等から確認されている現 想定される現象				
場状況				
$\sim 12:06$	・112 リングの B2 セグメントを組み立てるため、	・ジャッキを引		
	シールドジャッキを引き抜く(計9本を引き抜いた	き抜いた時、		
	状態となる。)。(第7章7.3.1節参照)	111 リングの K		
		セグメントが切		
		羽側に抜け出そ		
		うとし, リング		
		継手が損傷す		
	・立坑下にいた立坑からの脱出者が、トンネル(横	る。		
	坑)の中から「ドーン」という大きな音を聞く(正	・111 リングの		
	午前あたりの時間帯だと思う。)。	B1、B2 セグメ		
		ントのリング継		
		手(110 リング		
		側)の一部がせ		
		ん断する。		
	・切羽圧の急激な低下が開始。(第7章7.3.2節参	・111 リンクの H D1 D2 以け		
		K、B1、B2 が坑		
	・ 音の 直後、 立 坑 下 の 警報 設 備 か ら 「 ビ ビ ビ 」 と い	内にわすかに垂		
	り電士音。	れ下かり、出水		
		が充生。		
$12 \cdot 06 \sim$				
12.00				
12:07.13		・ 出水が継続す		
切羽十庄計		ることにより、		
測不能。(切		 地盤の緩みを引		
羽漏電)	・背中を土砂で汚したシールドオペレータが立坑	き起こし、111		
,	まで走ってきて立坑下の電話をかけ始める。地上立	リング及び 110		
	坑脇の電話は鳴らず。	リングの上部に		
	・シールドオペレータ、エレベーターで地上へ行	作用する荷重が		
		增大。		

	・シールドオペレータ、休憩所に来て職長と何か話	
	をし、2人一緒に休憩所を出て行く。	
	・シールドオペレータ、職長、エレベーターで立坑	
	下へ降りる。2人はトンネル(横坑)の中へ。	
	・途中で職長がセグメントを上げるよう、立坑にい	
	た立坑からの脱出者に指示する。	
	・立坑からの脱出者は、その指示を地上の地上クレ	
	ーンオペレータに伝えようと電話するがつながら	
	Ŧ	
	 ・立坑からの脱出者は、エレベーターに乗ろうとし。 	
	ていた作業員Aにその指示を伝言。そのとき作業員	
	A h エレクターが埋まっていることを述べる 切泊	
	ーた様子でけない	
$19 \cdot 17$	・融長から、立坊から離れた堤斫にある現場事務所	
12.11	にいた事業者の機需相当者の携帯に電話が入る 10	
	してた事業者の機能医当者の場所に <u>他的χ</u> 。10	
	やくらい 虚 品。 聞き 取りにくく、 工催には聞き 取れ	
	ない。 概氏が リンレース 」、「納竜」 こ日 うてい	
19.10		
$\frac{12\cdot19}{77+19\cdot90}$	・東業老の機電相当者は 美信からの の八級に隣	
<u>X12.20</u>	・ 争未有の機电担当有は、 <u>有信から2、5万後</u> に戦 長。確認の電話な入れる。電波出能は悪くなく 並	
	通に的かできる。現場にいりはいいのかとたりなる	
	と、てうにとの臧長から返合。日転単で立功に向か	
10,000	・地上クレーンオペレータが、「ドーン」というナ	. 111 Il \/ ガ
12.20	キャント ショント クル、「トーン」という八	- 111 リンク、 110 II ングの亦
	こな日、「反は「「、」「、」「、」」というものう	110 リンノの変
		ルが進行し、両
		♪ ♪ ♪ ♪ ハ* 朋 袋 。
12 · 23 · 10		• 大出水
12.20.45 PC の通信	・トンネルの中から職長が「逃げる」と切迫した声	ХЦЛ
10 ジ 巡 信 接続が 切わ	で叫ぶ	
た 川谷デ	・作業昌 B け 逃げるという声を思いた谷 わぜか	
た。以後ア	「「未貢」」は、起けっていう声を聞いた後、などが	
ア収付で	・ 立 伝 か ら の 脱 出 老 け こ よ た 匹 晩 四 で 柳 ト に 駆 け ト	
4090	- エッル・ワンル山田は、ワビル咱衣(地上に座り上 がる、オグに見テから水が畑)実み、水に畑」しげ	
	//・シ。 パ 、 に 定 元 //・ ウ 小 // * コT し 可 ヒ、 小 に 1T し 上 り らわ ス ト う に 立 信 入 口 へ	
	・地工にいた地工グレーンオハレーグは、立切まで	

	走っていく。立坑の半分まで水。みるみるうちに水	
	が上がってくる。南方向へ逃げる。土砂ピットで水	
	に追いつかれる。休憩室まで逃げる。	
	・地上クレーンオペレータは、休憩室で土砂運搬者	
	に事業者の人に電話するように頼む。	
12:25	 ・土砂運搬者が、<u>所長あて電話</u>。 	
(電話発信		
記録)		
12:29:57	・土砂運搬者が、休憩所の外に出ると中央管理室の	
PC の電源	小屋の方から「ピーピー」という電子音を聞く。	
喪失。中央		
管理室の床		
が浸水した		
と思われ		
る。		
	・事業者の機電担当者が自転車で、続くように所長	
	が自動車で立坑に到着。	





11.2 本章のまとめ

災害発生に至るまでの崩壊メカニズムは以下のようである。

- ① 2012年2月7日12時6分 ジャッキを引き抜いた時、111 リングのKセグメントが切羽側に抜け出そうとし、リング継手が損傷する。111 リングのB1、B2セグメントのリング継手(110 リング側)の一部がせん断する。111 リングのK、B1、B2 が坑内にわずかに垂れ下がり、出水が発生。
- ② 同日 12 時 6 分~12 時 23 分 出水が継続することにより、地盤の緩みを引き起こし、111 リング及び 110 リングの上部に作用する荷重が増大。その間、作業員の動きが慌ただしくなる。
- ③ 同日 12 時 23 分~12 時 30 分 111 リング、110 リングの変形が進行し、両リング が崩壊、トンネル坑内、発進立坑まで水没する。

12. 推定される災害発生原因と再発防止対策

12.1 推定される災害発生原因

本災害は、設計・計画上及び施工上の不具合が複合的に重なり、111 リングの K セ グメントが抜け出すことを契機として、最終的に 111、110 リングが崩壊したことで 発生したと推定される。

災害発生に至った要因、原因及びその背景は、設計・計画から施工までにわたった 次の事項が挙げられる。

- 12.1.1 設計·計画時
- (1) シールドマシン
 - 土被りの浅い海底下のトンネル工事において、テールシールが2段であったこと。

施工途中にテール部から漏水があったことが報告されており、テールシール が2段であったことが、テール部の止水性を低下させる要因の一つとなったと 考えられる。

- ② シールドマシンの全長が短く、テール部が短い仕様であったこと。 このため、セグメントが幅広であったことも加わってシールドマシンのテー ル部に対するセグメントのかかり代が短くなるとともに、K セグメントと B セ グメントのテーパー部分の角度も比較的大きくなり、本災害を誘発する要因の 一つとなったと考えられる。
- (2) セグメント
 - セグメントの厚さが薄く、リング継手のコンクリートの被りが薄かったこと。

このため、被りが薄い方向へ力が加わった際にリング継手のボルトインサー ト周囲のコンクリートがはく離することにより容易に継手部が破壊した。ま た、ボルトインサートが主筋と主筋の間に設置されていなかったこともボルト インサートの変形、ボルトインサート周囲のコンクリート破壊等を助長したも のと考えられる。

- ② セグメントが弧長大、幅広であったこと。 このため、セグメント組立て時にジャッキを引き抜かなければならない本数 が増え、セグメントの抜け出しや垂れ下がりが発生し、割れ、欠けの要因とも なったこと。
- ③ セグメント継手をボルト等による堅固な構造とせず、樹脂パイプによりガイドさせた突合せ構造としたこと。
- ④ セグメントの寸法が薄肉、弧長大、幅広であり、加えて、セグメント継手も

樹脂パイプによりガイドさせた突合せ構造であるにもかかわらず、K セグメン トの抜け出しの可能性について十分に検討していなかったこと。なお、K セグ メントの抜け出しについては、土木学会発行の『2006 年制定 トンネル標準示 方書 シールド工法・同解説』等の基準類(以下、「基準類」という。)に明 確な規定はないが、標準的なセグメントの寸法を逸脱する場合には、『耐久性 や施工時荷重への対応等についても慎重に検討する必要がある』と言及してい る。

- 12.1.2 施工時
- (1) シールド掘進
 - 線形管理上の重要なデータである i)テールクリアランス、 ii)測量デー タ(セグメント位置)、iii)シールドマシンの位置偏差(掘進管理システムデ ータ)の値が異なる傾向を示していたにもかかわらず十分な照査を行っていな かったこと。

テールブラシにおいて裏込め注入材等が固着したためテールクリアランス のデータはほとんど変化がなく、掘進管理システムのデータは右に向かってい たが、測量データが左に向かっていたため、設計計画線に戻そうとよりシール ドマシンを切羽に向かって右に向けていた。また、シールドマシンよりもセグ メントは相対的に上方にずれていたが、シールドマシンを上に向けようとした ため、結果としてシールドマシンテールブラシがセグメント上部と競ったこ と。これにより、K セグメントが抜け出すことを誘発したこと。

- ② テールグリスを油圧ポンプにより手動で注入していたが、注入量及び注入圧 を管理していなかったこと。
- ③ テールグリスに、裏込め注入材と配合が類似した止水材 B を用いたことで、 裏込め注入材がテールシール内に入り込んできた際、止水材 B と裏込め注入材 が固結してテールブラシ内で固化した可能性があること。
- (2) セグメントの組立て
 - 計測データに基づいた線形管理を適切に行っていなかった可能性があり、それに加えて、裏込め注入材がテールブラシに固着したことにより、シールドマシンのテール部とセグメントとのクリアランスが減少し、セグメントの組立精度に影響を与えたこと。

このため、85 リング以降、セグメントが設計計画線よりも左方向にさらにず れており真円に組めていなかった可能性がある。セグメントの割れ、欠け、垂 れ下がり等の1つの要因となった可能性も考えられる。

③ 85 リング以降、セグメントとシールドマシンの位置偏差の値が異なる傾向を 示していたにもかかわらず、テーパーセグメントを挿入しなかったこと。

このため、組み上げられたセグメントが切羽に向かって左方向に向かったま

まとなり、右に向けたシールドマシンのテール部との競りが発生したこと。 なお、予め用意していたテーパーセグメントは 20 リングで、製造したリン グ全数の 557 に占める割合は 3.6%となっており、基準類において示されてい る「直線区間に使用するリング数の 3%程度」を上回っていた。しかし、約 87m 掘進時点(62 リング)ですでに 8 リングテーパーリングを使用していたことか ら、テーパーセグメントをできるだけ使用しないようにしていた可能性がある (テーパーセグメントを挿入したリングは、5、6、24、32、39、53、54、62 リ ングである。そのうち、5、6 リングの K セグメントはテーパーセグメントでは なく標準セグメントを挿入していた。)。

 ④ 112 リングの B2 セグメントを挿入するため、上部のジャッキ9本(26本中) を引き抜いたことで、シールドマシンがテール部を下げるように変位したこと。

このため、シールドマシンのテール部と組み上げられた上部のセグメントとの競りが発生したこと。これにより、K セグメントが抜け出すことを誘発したこと。

⑤ K セグメントの挿入を容易にするため、セグメントに水をかけ、また潤滑剤 をシール材に塗布していたこと。

これによりセグメント同士の摩擦力が減少し、セグメント間が樹脂パイプの ガイドだけだったため、K セグメントが抜け出したこと。これが本災害の契機 となったものである。

- ⑥ セグメントの組立時又は組立後に頻繁にセグメントの割れ、欠け等が発生していたが、逐次の補修に留まり、その原因を検討・究明した上で、対応していなかったこと。
- (3) 裏込め注入

3 リング後方(109 リング)又は4 リング後方(108 リング)から裏込め注入材 を充填していた。そのため、1~2 リング又は1~3 リング後方(111~110 又は111 ~109 リング)のリングは、水圧のみが作用する状態となり、地盤反力が得られ ず周囲から拘束されていない不安定な状態となっていたこと。

また、浮力により、シールドマシンのテール部と組み上げられた上部のセグメ ントとの競りも発生していたこと。

- (4) 避難訓練及び退避
 - ① 避難訓練を適切な時期に実施していなかったこと。
 - ② 12:06 以降、出水が始まった時点で、作業員を直ちに退避させなかったこと。

- 12.1.3 その他
- (1)線形管理が適切に行われていない場合等にかかる外力(基準類では検討されていない外力)に耐える余裕代がなかったこと。
- (2) 設計・施工の安全性について、発注者が請負者以外の第3者のシールドトン ネルの専門機関に客観的な確認を求めていなかったこと。

12.2 同種災害の再発防止対策

同種災害の再発防止対策として、以下の事項が挙げられる。

12.2.1 設計·計画時

設計者は,設計・計画に当たっては現場の諸条件を的確に判断するとともに施工 体制等を十分考慮して設計を行う必要があること。

- (1) シールドマシン
 - 土被りの浅い河川下、海底下等を掘削する場合、裏込め注入材や地下水のシ ールドマシン内への流入を防止するため、テールシールを3段以上設ける等+ 分な止水性を確保するとともに、それを維持できる構造すること。
 - ② 土被りの浅い河川下、海底下等を掘削する場合、テールグリスの注入を自動 注入方式にする等、テールグリスが十分に充填されるよう注入圧力、注入量を 管理できる方法とすること。
 - ③ 土被りの浅い河川下、海底下等を掘削するトンネル工事において、シールド マシンの直径が十分大きく、セグメント間を締結しない場合、セグメントの組 立時にリング構造を保持できるような設備対策(形状保持装置等)も検討する こと。
- (2) セグメント
 - 完成した後の安全だけでなく、施工中の安全を考慮の上、セグメントを設計 すること。
 - ② セグメントの形状・寸法の決定にあたっては、適切な構造計算のほか、類似 工事等の実績も参考にして検討すること。類似工事等の実績を逸脱する場合に は、その影響を十分に検討すること。
 - ③ リング継手、セグメント継手を含むセグメント覆工は施工時を含め安定性を 確保できる構造とすること。
 - ④ K セグメントの抜け出しの可能性を十分に検討すること。

12.2.2 施工時

施工者は、設計の条件を十分理解して施工に携わる必要のあること。

- (1) シールド掘進
 - シールドマシン及びセグメントの位置座標を的確に把握するため、適宜測量 を実施すること。
 - ② 掘進管理のための各種データを常時計測することにより、セグメント及び継 手に対して過度の荷重がかからないよう適切に線形管理を行うこと。また、適切なテールクリアランスの維持に留意すること。

具体的には、シールドマシン及びセグメントの設計計画線からの鉛直偏差、 左右偏差を常時モニタリングし、鉛直・左右偏差に上下限値を設け、上下限値 内にシールドマシン及びセグメントの鉛直・左右偏差が維持されるようにする こと。

- ③ 計測データに異常があった場合には直ちに施工を中止して原因を究明し、対応策を講じること。
- ④ テールグリスの材料を適切に選定し、注入量及び注入圧力を適切に管理する こと。
- (2) セグメントの組立て
 - 上記(1)②のセグメントの線形管理において上下限値を超過する前に、テ ーパーセグメントを適宜挿入すること。
 - ② セグメントの組立誤差を最小にし、真円になるよう組み立て、引き抜くジャッキの本数を最小限にとどめること。
 - ③ セグメント継手の締結力がない場合、潤滑剤等を用いたセグメントの挿入を 行うと、セグメント継手面の摩擦低減により、セグメントリングの形状保持が 困難になる可能性があることを認識の上、潤滑剤等の使用を最小限にとどめる こと。
 - ④ K セグメントの抜け出しが懸念される場合には、必要に応じて物理的な抜け 出し防止措置を講じること。
 - ⑤ セグメントの組立時に割れ、欠け等が頻発する場合は、その原因を究明し、 対応策を講じること。
- (3) 裏込め注入

裏込め注入は、同時注入又は即時注入により実施し、遅れて注入することのないようにすること。また、裏込め注入は、注入圧力と注入量の双方を管理しつつ、 実施すること。

- (4) 避難訓練及び退避
 - ① 避難訓練を適切な時期に実施すること。
 - ② 出水等による労働災害発生の急迫した危険があるときは、直ちに作業を中止

し、人命確保を最優先として速やかに労働者を安全な場所まで退避させること。

- 12.2.3 その他
- (1)線形管理が不十分な場合等にかかる可能性のある施工時荷重に対して、トン ネルが脆性的に破壊することがないように、冗長性(リダンダンシー)を考慮し た設計・計画とすること。
- (2)発注者にシールドトンネルの専門家がいない等、十分な知見がない場合には、 発注者は、第3者のシールドトンネルの専門機関から設計・施工方法の安全性 について、あらかじめ確認を受けることが望ましいこと。

参考資料

・テールブラシの固着物の分析、裏込め注入材とテールシール材との混合物の一軸圧縮試験結果

1. 採取試料の分析

採取試料 A~Z、AA について、比較試料(ア:裏込め注入材、イ:テールグリスA、ウ: 止水材、カ:充填材)のどの材料に該当するか赤外吸収スペクトル、形態観察、組成分析 を実施し分析した。

- 1.1 比較試料の赤外吸収スペクトル
- (1)比較試料イ(テールグリスA)



図 1.1 比較試料イ(テールグリス A)の赤外吸収スペクトル

No.	吸収又は吸収帯 (cm ⁻¹)	ピークトップ の波数(cm ⁻¹)	備考
1	$ \begin{array}{c c} 1 \\ 2 \\ $	2,952	-CH3に由来する吸収。
2		2,924	-CH2-に由来する吸収。
3		2,854	-CH3に由来する吸収。
4		2,871	-CH2-に由来する吸収。
5	2,511	2,511	HCO ₃ -に由来する吸収。
6	1,795	1,795	HCO ₃ -に由来する吸収。
7	1,560~1,240	1,454 付近	-CH3や-CH2-に由来する吸収と CO3 ^{2-や} HCO3 ⁻ に由 来する吸収が重なった吸収。
8	1,365	1,365	三級ブチル C-H 対称変角による吸収。
9	1,230	1,230	三級ブチル骨格に由来する吸収。
10	876	876	CO3 ²⁻ に由来する吸収。
11	714	714	CO ₃ ²⁻ , HCO ₃ -に由来する吸収。

表 1.1 比較試料イの赤外吸収スペクトル上の特徴的な吸収帯

IR スペクトルのパターンから,比較試料イはブチルゴム・エラストマーと炭酸カルシウムの混合物と推定される。なお,図中に示した青色の点線で囲った吸収帯と青色の矢印で示した吸収は比較試料イ(テールグリス A)に特徴的な吸収帯又は吸収を示したものである。

(2) 比較試料ア(裏込め注入材)



図 1.2 比較試料ア(裏込め注入材)の赤外吸収スペクトル

No.	吸収帯又は吸収 (cm ⁻¹)	ピークトップ の波数(cm ⁻¹)	備考
1	3,666	3,666	Si-OH や鉱物に含まれる非会合 OH 基に由来する 吸収。鉱物の存在が示唆される。
2	3,616	3,616	Si-OH や鉱物に含まれる非会合 OH 基に由来する 吸収。鉱物の存在が示唆される。
3	3,700~2,800	3,404	-OH 基に由来する吸収。水分による吸収と考えられる。
4	2,989	2,989	-CH3に由来する吸収。
5	2,900	2,900	-CH₃に由来する吸収。
6	1,700~1,550	1,643	-OHに由来する吸収。水分による吸収と考えられる。
7	1,500~1,300	1,414	CO ₃ ²⁻ , HCO ³ に由来する吸収及び不飽和脂肪族の =CH 基による吸収。炭酸塩及び樹脂の存在が示 唆される。
9	1,200~900	1,000 付近	SiO ₃ ²⁺ , Si-O-Si 伸縮に由来する吸収。けい酸塩鉱物の存在が示唆される。
10		949	CH ₂ =CHR(トランス-CH=CH-)に由来する吸収か。
11	872	872	CO ₃ ²⁻ に由来する吸収。炭酸塩の存在が示唆される。
12	850~800	818	-CH2=CHによる吸収か。1,420~1,410cm ⁻¹ の=CH と対。
13	665	665	CO ^{3²} , HCO ³ に由来する吸収。炭酸塩の存在が示 唆される。

表 1.2 比較試料アの赤外吸収スペクトル上の特徴的な吸収帯

IR スペクトルのパターンから、比較試料アには水分が含まれ、タルクやベントナイ

ト,クレー,けい藻土などの鉱物や炭酸カルシウム,樹脂などが混合されたものと考えら れた。なお,図中に示した桃色の点線で囲った吸収帯と桃色の矢印で示した吸収は比較試 料ア(裏込め注入材)に特徴的な吸収帯又は吸収を示したものである。

(3)比較試料ウ(止水材)



図 1.3 比較試料ウ(止水材)の赤外吸収スペクトル

No.	吸収帯又は吸収 (cm ⁻¹)	ピークトップ の波数(cm ⁻¹)	備考
1	3,695	3,695	Si-OH(シラノール基)や鉱物に含まれる OH 基に 由来する吸収。鉱物の存在が示唆される。
2	3,620	3,620	Si-OH(シラノール基)や鉱物に含まれる OH 基に 由来する吸収。鉱物の存在が示唆される。
3	3,700~3,050	3,408	-OH 基に由来する吸収。水分による吸収と考えられる。
4	1,700~1,600	1,633	-OHに由来する吸収。水分による吸収と考えられる。
5	1,115	1,115	Si-O-Si に由来する吸収。けい酸塩鉱物の存在が 示唆される。
6	1,100~930	1,028	Si-O-Si に由来する吸収。けい酸塩鉱物の存在が 示唆される。
7	914	914	不明。
8	800~710	795	不明。
9	694	694	CO ₃ ²⁻ , HCO ₃ -に由来する吸収。炭酸塩の存在が示唆される。

表 1.3 比較試料ウの赤外吸収スペクトル上の特徴的な吸収帯

IR スペクトルのパターンから,比較試料ウには水分が含まれ,タルクやベントナイト,クレー,けい藻土などの鉱物などが混合されたものと考えられた。なお,図中に示した緑色の点線で囲った吸収帯と緑色の矢印で示した吸収は比較試料ウ(止水材)に特徴的な吸収帯又は吸収を示したものである。

(4) 比較試料力(充填材)



図 1.4 比較試料カ(充填材)の赤外吸収スペクトル

No.	吸収帯又は吸収 (cm ⁻¹)	ピークトップ の波数(cm ⁻¹)	備考
1	3,654	3,654	Si-OH(シラノール基)や鉱物に含まれる OH 基に 由来する吸収。鉱物の存在が示唆される。
2	3,700~3,050	3,340	-OH 基に由来する吸収。水分による吸収と考えられる。
3	2,987	2,987	-CH3に由来する吸収。
4	2,900	2,900	-CH2-に由来する吸収。
5	5 6 1,600~1,300	1,475	CO ₃ ²⁻ , HCO ₃ ⁻ に由来する吸収。
6		1,412	CO ₃ ²⁻ , HCO ₃ ⁻ に由来する吸収。
7	1,300~900	1,057	Si-O-Si に由来する吸収。
8	874	874	CO ₃ ²⁻ に由来する吸収。
9	796	796	不明。
10	613	613	不明。

表 1.4 比較試料カの赤外吸収スペクトル上の特徴的な吸収帯

IR スペクトルのパターンから,比較試料カは,タルクやベントナイト,クレー,けい 藻土などの鉱物や炭酸カルシウムなどが混合されたものと考えられた。なお,図中に示し た橙色の点線で囲った吸収帯と橙色の矢印で示した吸収は比較試料カ(充填材)に特徴的な 吸収帯又は吸収を示したものである。

- 1.2 調査試料の赤外吸収スペクトル
- (1) 調査試料 A



図 1.5 調査試料 A の赤外吸収スペクトル

(2) 調査試料 B



図 1.6 調査試料 B の赤外吸収スペクトル

(3) 調査試料 C



図 1.7 調査試料 C の赤外吸収スペクトル

(4) 調査試料 D



図 1.8 調査試料 D の赤外吸収スペクトル

(5) 調査試料 E



図 1.9 調査試料 E の赤外吸収スペクトル

(6) 調査試料 F



図 1.10 調査試料 F の赤外吸収スペクトル

(7) 調査試料 G



図 1.11 調査試料 G の赤外吸収スペクトル

(8) 調査試料 H



図 1.12 調査試料 H の赤外吸収スペクトル

(9) 調査試料 I



図 1.13 調査試料 I の赤外吸収スペクトル

(10) 調査試料 J



図 1.14 調査試料 J の赤外吸収スペクトル

(11) 調査試料 K



図 1.15 調査試料 K の赤外吸収スペクトル

(12) 調査試料L



図 1.16 調査試料 L の赤外吸収スペクトル

(13)調査試料 M



図 1.17 調査試料 M の赤外吸収スペクトル

(14) 調査試料 N



図 1.18 調査試料 N の赤外吸収スペクトル





図 1.19 調査試料 O の赤外吸収スペクトル

(16) 調査試料 P



図 1.20 調査試料 P の赤外吸収スペクトル

(17)調査試料Q



図 1.21 調査試料 Q の赤外吸収スペクトル

(18) 調査試料 R



図 1.22 調査試料 R の赤外吸収スペクトル

(19) 調査試料 S



図 1.23 調査試料 S の赤外吸収スペクトル

(20) 調査試料 T



図 1.24 調査試料 T の赤外吸収スペクトル

(21) 調査試料 U









図 1.26 調査試料 V の赤外吸収スペクトル

(23) 調査試料 W



図 1.27 調査試料 W の赤外吸収スペクトル

(24) 調査試料 X



図 1.28 調査試料 X の赤外吸収スペクトル

(25) 調査試料 Y



図 1.29 調査試料 Y の赤外吸収スペクトル

(26) 調査試料 Z



図 1.30 調査試料 Z の赤外吸収スペクトル
(27) 調査試料 AA



図 1.31 調査試料 Z の赤外吸収スペクトル

採取番号	採取場所	判定結果*1	共存候補※2
А	シールドマシンテールブラシ後段1番部分外板外ブラシ間	イ単独	_
В	シールドマシンテールブラシ後段 19 番部分外板外ブラシ間	イ単独	_
С	シールドマシンテールブラシ後段 38 番部分内ブラシメッシュ間	イ単独	—
D	シールドマシンテールブラシ後段 50 番部分外板外ブラシ間	イ+	ウ
Е	シールドマシンテールブラシ後段 58 番部分外板外ブラシ間	イ単独	—
F	シールドマシンテールブラシ後段 77 番部分外板外ブラシ間	イを含まず	不明
G	シールドマシンテールブラシ後段 88 番部分外板外ブラシ間	イ単独	_
Н	シールドマシンテールブラシ後段 96 番部分外板外ブラシ間	+1	ウ
Ι	シールドマシンテールブラシ後段 115 番部分メッシュ外ブラシ間	イ+	ウ
J	シールドマシンテールブラシ後段 134 番部分外メッシュ外ブラシ間	イ単独	—
K	シールドマシンテールブラシ後段 144 番部分外ブラシと外メッシュ間	イ単独	—
L	シールドマシンテールブラシ前段1番部分スキンプレート外板間	+1	ウ
М	シールドマシンテールブラシ前段4番部分外板外ブラシ間	イ+	ウ
N	シールドマシンテールブラシ前段 19 番部分外板外ブラシ間	イ単独	—
0	シールドマシンテールブラシ前段 38 番部分スキンプレート外板間	イ+	ウ
Р	シールドマシンテールブラシ前段 58 番部分メッシュ内ブラシ間	イ+	ウ
Q	シールドマシンテールブラシ前段 58 番部分スキンプレート外板間	+1	ア
R	シールドマシンテールブラシ前段 148 番部分外ブラシ外板間	+1	ウ
S	シールドマシンテールブラシ前段 168 番部分メッシュ外ブラシ間	イ+	ウ
Т	シールドマシンテールブラシ前段 168 番部分スキンプレート外板間	+1	ウ
U	シールドマシンテールブラシ前段 178 番部分スキンプレート外板間	イを含まず	—
V	シールドマシンテールブラシ前段 184 番部分スキンプレート外板間	イ単独	—
W	シールドマシンテールブラシ前段 191 番部分スキンプレート部	イ単独	—
X	シールドマシンテールブラシ前段 62 番部分スキンプレート外板間	イ+	ウ
Y	シールドマシンテールブラシ前段 78 番部分スキンプレート外板間	イを含まず	ウ
Z	111R,B2 地山側	+イ	ウ
AA	シールドマシンフードチャンバー内	イを含まず	ア,ウ

表 1.5 赤外吸収スペクトルからの判定結果

※1 判定結果欄の例

イ単独:比較試料イの材料のみと考えられるもの。 イ+:比較試料イに他の材料が含まれていると考えられるもの。 イを含まず:比較試料イの材料が含まれていないと考えられるもの。

+イ:他の材料が主でイが含まれていると考えられるもの。

※2 共存候補欄の例

-: 判定結果欄に示した材料のみと考えられるもの。

不明:共存物の存在の有無を含め判断できなかったもの。

ウ:比較試料ウが共存していると考えられるもの。 ア:比較試料アが共存していると考えられるもの。 ア,ウ:比較試料アと比較試料ウが共存していると考えられるもの。

- 1. 4 比較試料の形態観察及び元素組成分析結果
- (1) 比較試料ア
- ·形態観察結果



図 1.32-1 比較試料アの走査電子顕微鏡像(×100 倍)



図 1.32-2 比較試料アの走査電子顕微鏡像(×2,000 倍)



図 1.33 比較試料アの組成分析結果

元素名(原子記号)	半定量值 (w/w%)
炭素(C)	1.8
酸素(0)	47.7
ナトリウム(Na)	2.7
マグネシウム(Mg)	0.5
アルミニウム(Al)	2.6
けい素(Si)	11.1
いおう(S)	0.9
カリウム(K)	0.3
カルシウム(Ca)	31.0
鉄(Fe)	1.4
合計	100.0

表 1.6	比較試料ア	の組成分析結果
1.0		

注)測定結果は、検出された元素の計数値に係数をかけて算出 し、合計が100%となるように計算された値であり、検量線を用い た化学分析のような正確な濃度を示したものではない。なお、測 定を行ったX線分析装置の測定対象は、原子量が8(ほう素)以上 の元素であり、それ以下の元素は含まれていても検出されない。 以下、組成分析結果下については同様。



図 1.34-1 比較試料ウの走査電子顕微鏡像(×100 倍)



図 1.34-2 比較試料ウの走査電子顕微鏡像(×2,000 倍)



図 1.35 比較試料ウの組成分析結果

元素名(原子記号)	半定量值 (w/w%)
炭素(C)	0.8
酸素(0)	50.2
ナトリウム(Na)	2.1
マグネシウム(Mg)	0.7
アルミニウム(Al)	9.2
けい素(Si)	28.6
カリウム(K)	1.6
カルシウム(Ca)	1.0
チタン(Ti)	0.5
鉄(Fe)	5.3
合計	100.0

表 1.7 比較試料 ウの組成分析結果



図 1.36-1 比較試料カの走査電子顕微鏡像(×100 倍)



図 1.36-2 比較試料カの走査電子顕微鏡像(×2,000 倍)



図 1.37 比較試料カの組成分析結果

元素名(原子記号)	半定量值 (w/w%)
炭素(C)	4.9
酸素(0)	47.3
ナトリウム(Na)	0.2
マグネシウム(Mg)	0.5
アルミニウム(Al)	8.1
けい素(Si)	20.6
いおう(S)	0.9
カリウム(K)	1.1
カルシウム(Ca)	14.1
チタン(Ti)	0.7
鉄(Fe)	1.6
合計	100.0

表 1.8 比較試料カの組成分析結果

- 1.5 調査試料の形態観察及び元素組成分析結果
- (1) 調査試料 C
- ·形態観察結果



図 1.38-1 調査試料 C の走査電子顕微鏡像(×100 倍)



図 1.38-2 調査試料 C の走査電子顕微鏡像(×2,000 倍)



図 1.39 調査試料 C の組成分析結果

元素名(原子記号)	半定量值 (w/w%)
炭素(C)	22.8
酸素(0)	49.8
マグネシウム(Mg)	0.3
けい素(Si)	0.4
いおう(S)	0.4
カルシウム(Ca)	25.1
鉄(Fe)	1.2
合計	100.0

表 1.9 調查試料 C の組成分析結果

注)測定結果は、検出された元素の計数値に係数をかけて算出し、合計が100%となるように計算された値であり、検量線を用いた化学分析のような正確な濃度を示したものではない。なお、測定を行ったX線分析装置の測定対象は、原子量が8(ほう素)以上の元素であり、それ以下の元素は含まれていても検出されない。以下、組成分析結果については同様。



図 1.40-1 調査試料 D の走査電子顕微鏡像(×100 倍)



図 1.40-2 調査試料 D の走査電子顕微鏡像(×2,000 倍)



図 1.41 調査試料 D の組成分析結果

元素名(原子記号)	半定量值 (w/w%)
炭素(C)	12.4
酸素(0)	44.7
マグネシウム(Mg)	0.5
アルミニウム(Al)	0.6
けい素(Si)	1.2
カルシウム(Ca)	39.9
鉄(Fe)	0.7
合計	100.0

表 1.10 調査試料 D の組成分析結果



図 1.41-1 調査試料 E の走査電子顕微鏡像(×100 倍)



図 1.41-2 調査試料 E の走査電子顕微鏡像(×2,000 倍)



図 1.42 調査試料 E の組成分析結果

元素名(原子記号)	半定量值 (w/w%)
炭素(C)	22.6
酸素(0)	42.6
マグネシウム(Mg)	0.3
けい素(Si)	0.2
いおう(S)	0.4
カルシウム(Ca)	33.0
鉄(Fe)	0.9
合計	100.0

表 1.11 調査試料 E の組成分析結果



図 1.43-1 調査試料 F の走査電子顕微鏡像(×100 倍)



図 1.43-2 調査試料 F の走査電子顕微鏡像(×2,000 倍)





元素名(原子記号)	半定量值 (w/w%)
炭素(C)	1.8
酸素(0)	47.1
ナトリウム(Na)	2.0
マグネシウム(Mg)	10.2
アルミニウム(Al)	6.8
けい素(Si)	16.3
いおう(S)	1.9
塩素(Cl)	2.5
カリウム(K)	0.4
カルシウム(Ca)	1.3
チタン(Ti)	0.6
マンガン	0.6
鉄(Fe)	8.5
合計	100.0

表 1.12 調査試料 F の組成分析結果



図 1.45-1 調査試料 H の走査電子顕微鏡像(×100 倍)



図 1.45-2 調査試料 H の走査電子顕微鏡像(×2,000 倍)



図 1.46 比較試料 H の組成分析結果

元素名(原子記号)	半定量值 (w/w%)
炭素(C)	4.1
酸素(0)	49.6
ナトリウム(Na)	1.6
マグネシウム(Mg)	3.2
アルミニウム(Al)	6.5
けい素(Si)	17.4
塩素(Cl)	0.4
カリウム(K)	1.5
カルシウム(Ca)	6.8
鉄(Fe)	8.9
合計	100.0

表 1.13 比較試料 H の組成分析結果

(6) 調査試料 M



図 1.47-1 調査試料 M の走査電子顕微鏡像(×100 倍)



図 1.47-2 調査試料 M の走査電子顕微鏡像(×2,000 倍)



図 1.48 比較試料 M の組成分析結果

元素名(原子記号)	半定量值 (w/w%)
炭素(C)	13.4
酸素(0)	46.1
マグネシウム(Mg)	1.1
アルミニウム(Al)	0.4
けい素(Si)	0.9
塩素(Cl)	0.6
カルシウム(Ca)	37.5
合計	100.0

表 1.14 比較試料 M の組成分析結果



図 1.49-1 調査試料 O の走査電子顕微鏡像(×100 倍)



図 1.49-2 調査試料 O の走査電子顕微鏡像(×2,000 倍)



図 1.50 調査試料 O の組成分析結果

半定量值 (w/w%)
18.6
47.1
0.8
2.8
1.2
3.0
0.3
1.2
0.2
24.0
0.8
100.0

表 1.15	調査試料O	の組成分析結果
--------	-------	---------



図 1.51-1 調査試料 Q の走査電子顕微鏡像(×100 倍)



図 1.51-2 調査試料 Q の走査電子顕微鏡像(×2,000 倍)



図 1.52 調査試料 Q の組成分析結果

元素名(原子記号)	半定量值 (w/w%)
炭素(C)	13.8
酸素(0)	42.6
ナトリウム(Na)	0.6
マグネシウム(Mg)	1.2
アルミニウム(Al)	1.6
けい素(Si)	4.0
いおう(S)	0.8
塩素(Cl)	0.8
カリウム(K)	0.3
カルシウム(Ca)	32.7
鉄(Fe)	1.6
合計	100.0

表 1.16 調査試料 Q の組成分析結果



図 1.53-1 調査試料 R の走査電子顕微鏡像(×100 倍)



図 1.53-2 調査試料 R の走査電子顕微鏡像(×2,000 倍)



図 1.54 調査試料 R の組成分析結果

元素名(原子記号)	半定量值 (w/w%)
炭素(C)	9.4
酸素(0)	45.9
ナトリウム(Na)	1.0
マグネシウム(Mg)	2.7
アルミニウム(Al)	1.8
けい素(Si)	4.6
塩素(Cl)	2.8
カリウム(K)	0.3
カルシウム(Ca)	25.4
鉄(Fe)	6.1
合計	100.0

表 1.17 調査試料 R の組成分析結果

(10)調査試料U



図 1.55-1 調査試料 U の走査電子顕微鏡像(×100 倍)



図 1.55-2 調査試料 U の走査電子顕微鏡像(×2,000 倍)



図 1.56 調査試料 U の組成分析結果

半定量值 (w/w%)
3.0
46.7
0.9
1.1
5.6
16.0
0.6
2.6
0.5
20.9
0.4
1.7
100.0

表 1.18 調査試料 U の組成分析結果



図 1.57-1 調査試料 X の走査電子顕微鏡像(×100 倍)



図 1.57-2 調査試料 X の走査電子顕微鏡像(×2,000 倍)



図 1.58 調査試料 X の組成分析結果

元素名(原子記号)	半定量值 (w/w%)
炭素(C)	17.6
酸素(0)	45.7
ナトリウム(Na)	0.2
マグネシウム(Mg)	0.5
アルミニウム(Al)	0.5
けい素(Si)	1.6
いおう(S)	0.3
塩素(CL)	0.6
カルシウム(Ca)	33.0
合計	100.0

表 1.19 調査試料 X の組成分析結果



図 1.59-1 調査試料 Y の走査電子顕微鏡像(×100 倍)



図 1.59-2 調査試料 Y の走査電子顕微鏡像(×2,000 倍)





元素名(原子記号)	半定量值 (w/w%)
炭素(C)	4.7
酸素(0)	50.9
ナトリウム(Na)	2.0
マグネシウム(Mg)	1.3
アルミニウム(Al)	7.9
けい素(Si)	21.4
りん(P)	0.4
いおう(S)	1.4
塩素(Cl)	1.6
カリウム(K)	1.4
カルシウム(Ca)	2.1
チタン(Ti)	0.2
鉄(Fe)	4.7
合計	100.0

表 1.20 調查試料 Y の組成分析結果

(13) 調査試料 AA



図 1.61-1 調査試料 AA の走査電子顕微鏡像(×100 倍)



図 1.61-2 調査試料 AA の走査電子顕微鏡像(×2,000 倍)



図 1.62 調査試料 AA の組成分析結果

半定量值 (w/w%)			
2.3			
50.4			
1.8			
0.4			
6.2			
18.6			
0.4			
1.1			
1.4			
13.8			
0.2			
3.4			
100.0			

表 1.21 調査試料 AA の組成分析結

採取番号	採取場所	判定結果*1	含有候補*2
С	シールドマシンテールブラシ後段 38 番部分内ブラシメッシュ間	イ単独	_
D	シールドマシンテールブラシ後段 50 番部分外板外ブラシ間	ウを含む	イ
E	シールドマシンテールブラシ後段 58 番部分外板外ブラシ間	イ単独	_
F	シールドマシンテールブラシ後段 77 番部分外板外ブラシ間	カとウを含む	不明
Н	シールドマシンテールブラシ後段 96 番部分外板外ブラシ間	ウを含む	イ
М	シールドマシンテールブラシ前段4番部分外板外ブラシ間	ウを含む	イ
0	シールドマシンテールブラシ前段 38 番部分スキンプレート外板間	ウを含む	イ
Q	シールドマシンテールブラシ前段 58 番部分スキンプレート外板間	ア又はウを含む	イ
R	シールドマシンテールブラシ前段 148 番部分外ブラシ外板間	ウを含む	イ
U	シールドマシンテールブラシ前段 178 番部分スキンプレート外板 間	カとアを含む	
Х	シールドマシンテールブラシ前段 62 番部分スキンプレート外板間	ウを含む	イ
Y	シールドマシンテールブラシ前段 78 番部分スキンプレート外板間	ウを含む	不明
AA	シールドマシンフードチャンバー内	アとウを含む	不明

表 1.22 形態観察及び元素組成分析結果からの判定結果

※1 判定結果欄の例

イ単独:比較試料イの材料のみと考えられるもの。

ウを含む:比較試料ウが含まれていると考えられるもの。

カとウを含む:比較試料カと比較試料ウが含まれていると考えられるもの。

カとアを含む:比較試料カと比較試料アが含まれていると考えられるもの。

ア又はウを含む:比較試料ア又は比較試料ウが含まれていると考えられるもの。

アとウを含む:比較試料アと比較試料ウが含まれていると考えられるもの。

※2 共存候補欄の例

-:判定結果欄に示した材料のみと考えられるもの。

イ:比較試料イが共存していると考えられるもの。

不明:共存物の存在の有無を含め判断できなかったもの。

1.7 裏込め注入材と止水材の混合物の分析

本節では,裏込め注入材と止水材の混合物を分析した。裏込め注入材が混合物の質量比 でどの程度まで含まれると,赤外吸収スペクトル,形態観察及び成分分析により,裏込め 注入材を検出できるか検討した。

1. 7.1 赤外吸収スペクトルによる分析

(1) 比較試料オ(裏込め注入材+止水材)(裏込め注入材 50%を含む)



図 1.63 比較試料才の赤外吸収スペクトル

表 1.23 比較試料オの赤外吸収スペクトルのうち,裏込め注入材の存在を表すと考えられ

る吸収

No.	吸収帯又は吸収 (cm ⁻¹)	ピークトップ の波数(cm ⁻¹)	備考
1	1,408	1,408	CO ₃ ²⁻ , HCO ₃ ⁻ に由来する吸収及び不飽和脂肪族の =CH 基による吸収。炭酸塩及び樹脂の存在が示 唆される。
2	968	968	不明。


図 1.64 混合試料-1 の赤外吸収スペクトル



図 1.65 混合試料-2 の赤外吸収スペクトル



図 1.66 混合試料-3 の赤外吸収スペクトル



図 1.67 混合試料-4 の赤外吸収スペクトル

- 1. 7.2 比較試料の形態観察及び元素組成分析結果
- (1) 比較試料オ(裏込め注入材+止水材)
- ·形態観察結果



図 1.68 比較試料オの走査電子顕微鏡像(×100 倍)



図 1.69 比較試料オの走査電子顕微鏡像(×2,000 倍)

·元素組成分析結果





元素名(原子記号)	半定量值 (w/w%)
炭素(C)	1.4
酸素(0)	49.0
ナトリウム(Na)	1.9
マグネシウム(Mg)	0.6
アルミニウム(Al)	5.5
けい素(Si)	18.8
いおう(S)	0.4
カリウム(K)	1.0
カルシウム(Ca)	18.4
鉄(Fe)	3.0
合計	100.0

	表	1.24	比較試料オの組成分析結果
--	---	------	--------------

注)測定結果は、検出された元素の計数値に係数をかけて算出し、合計が100%となるように計算された値であり、検量線を用いた化学分析のような正確な濃度を示したものではない。なお、測定を行ったX線分析装置の測定対象は、原子量が8(ほう素)以上の元素であり、それ以下の元素は含まれていても検出されない。以下、組成分析結果下については同様。

1. 7. 3 混合試料の外観



図 1.71 混合試料の外観

1. 7. 4 裏込め注入材と止水材の混合物の分析のまとめ

止水材に裏込め注入材を指定の割合で混合した場合の赤外吸収スペクトル(以下,「IR スペクトル」という。)の収集等を行った結果,以下の所見を得た。

- 1)比較試料オのIRスペクトルは、止水材のIRスペクトルによく似ていたが、1,410cm⁻¹付近や970cm⁻¹付近に裏込め注入材に由来すると考えられる吸収がわずかにみられた。
- 2) 混合試料のIRスペクトルでは、50%混合の試料(混合試料-4)で970cm⁻¹付近に裏込め注 入材に由来すると考えられる吸収がわずかにみられたが、他の試料では裏込め注入材 の存在を裏づけるような吸収は認められなかった。
- 3)比較試料オの形態観察の結果,裏込め注入材で特徴的だった繊維状の結晶の存在がみ られた。
- 4)比較試料オの組成分析の結果,主成分は酸素,けい素,カルシウムであった。止水材 の主成分は酸素,けい素で,カルシウムの含有率は非常に低かったことから,比較試 料才に含まれるカルシウムの大部分は裏込め注入材に由来するものと考えられた。
- 5) 止水材に裏込め注入材を混合した場合,裏込め注入材を20%以上混合したものについては止水材の流動性が明らかに低下するようであったが,10%以下の混合では大きな差異は感じられなかった。

1. 8 総合判定結果

総合判定結果については、本文中第9章 p.9-25 表 9.2.9 に示す。同表から切羽に向かって 4 時と 10 時の方向のテールブラシ(前段,切羽側)から裏込め注入材が確認された(本文 中第9章 p.9-17 図 9.2.10 及び p.9-18 図 9.2.11 参照)。なお,裏込め注入材の混入割合が 50% より少なくなると,裏込め注入材を検出できないことが確認された。

本文中第9章 p.9-26 図 9.2.13 にテールシール注入管の詳細図を示す。切羽に向かって4 時の方向のテールシール注入管がテールグリスAでいっぱいであったことを確認している。 計8箇所からテールグリスを油圧ジャッキにより手動で注入していく構造であり、1本の 管から8箇所のテールシール注入管に分岐しているため、どこか1箇所入りにくい管があ ると、他の箇所へとテールグリスが流入するものと推察される。したがって、切羽に向か って4時の方向の注入管がテールグリスAでいっぱいであったことから、止水材が流入し ていかなかったものと推察される。そのため、十分な止水効果が得られず、裏込め注入材 が切羽側のテールブラシにまで到達したと推察される。

切羽側のテールブラシにまで裏込め注入材が到達していること、85 リング掘進中に裏込め注入材が坑内にまで漏れて来ていたことから、切羽側のテールブラシは全周にわたって 裏込め注入材により固結していた可能性が考えられる。 2. 材料単体及び混合物(裏込め注入材、止水材 B、テールグリス A)の一軸圧縮試験

ー軸圧縮試験は、材料の最も基本的な力学特性を求める試験であるとともに、比較的簡 便な試験で実施頻度が高く、その試験結果は多方面に利用されている。

2.1 材料の配合について

裏込め注入材については、本文中第2章表2.1のとおり配合しており、すでに配合方法 について前述したため、ここでは止水材B(特殊繊維材PP有り)の配合方法について示す。

表 2.1 に止水材 B の配合表及び配合方法を示す。同配合を参考に必要量の止水材 B を配合した。配合後の止水材 B を図 2.1 に示す。

	A 液(1m ³) 6	5kg/水 100L	特殊繊維材	塑強調整剤	
材料名	a液 水		PP	b 液	
(真比重)	(2.6)	(1.0)	(1.30)	(1.37)	
数量	520kg 800L		50kg	50L	
計 1.137m ³	1m ³		38.5L	50L	
(配合例)	1300g	2000mL	125g	125mL	
2.721mL	2.5L		96mL	125mL	

表 2.1 止水材 B の配合表及び配合方法

 a 液 1300g を水 2000mL にて予めダマがなくなるまで混練する。(家庭用ハンドミキ サーなどで約2分間十分に攪拌する。)→1時間静置する。(a 液を水との膨潤を十分 に行う。)

2. PP125g を 1.の a 溶液にハンドミキサーで攪拌しながら少しずつ添加する。(均一になるよう混練する。)

- 3. 2.の溶液に b 液 50mL を同じく均一になるようハンドミキサーで攪拌しながら少しず つ添加して完成させる。
- 4. 3. で完成した試料は1日の経過で粘性が増大する。よってその性状確認は水分が蒸発 しないよう密閉容器に1日保管後,確認する。



図 2.1 止水材 B

2.2 一軸圧縮試験の供試体作製方法

ー軸圧縮試験に供する供試体は、直径 50mm、高さ 100mm とし、表 2.2 に示す条件の下、作製した。

	空気中	海水中	海水中
	5日養生	5日養生	28 日養生
裏込め注入材単体	\bigcirc	\bigcirc	0
裏込め注入材(50%)			
+	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
止水材 B(50%)			
裏込め注入材(20%)			
+	\bigcirc	\bigcirc	—
止水材 B(80%)			
裏込め注入材(50%)			
+	—	\bigcirc	—
テールグリス A(50%)			

表 2.2 一軸圧縮試験供試体の作製条件

裏込め注入材単体については、本文中第2章表2.1のとおり配合後、直径50mm、高さ100mmのプラスチック製モールドに流し込み、供試体を作製した(図2.2参照)。

裏込め注入材と止水材 B を混合させた場合(図 2.3 参照)及び裏込め注入材とテールグ リス A の混合物の場合(図 2.4 参照)、混合物をスプーンですくい、モールド内に混合物 を詰め、供試体を作製した。実際の状況を想定して、混合物は比較的緩い状態となるよう 作製した。密にした場合には、一軸圧縮強度が上昇することも想定されるためでもある。

供試体作製後、空気中又は海水中に所定の日数ほど、供試体を養生させた。空気中に養生する場合、試料が乾燥しないよう、ラップで密閉した。海水中に養生する場合、水道水に所定量の海水の素を加え、人工海水を作製し、同海水を満たした水槽内にモールドごと供試体を水浸した(図 2.5 参照)。

5日養生を選択した理由として、2012年2月2日の85リング掘進中又は組み立て中にテ ール部から裏込め注入材が漏れ出したとの記載が掘進日報にあることから、災害発生日で ある2012年2月7日までに5日の日数が経過しているためである。28日養生を選択した 理由は、一般的にコンクリート等の設計基準強度が28日強度として規準化されているため である。



図 2.2 裏込め注入材



(a) 裏込め注入材 50%と止水材 B50%の混合物



(b) 裏込め注入材 20% と止水材 B 80%の混合物図 2.3 裏込め注入材と止水材 B の混合物



図 2.4 裏込め注入材 50% とテールグリス A50%の混合物



図 2.5 供試体を海水中に養生している様子



図 2.6 プラスチック製のモールドから供試体を脱型



図 2.7 ストレートエッジを用いた供試体端面の成形

所定の日数養生した後、プラスチック製のモールドから供試体を取り出し(図 2.6 参照)、供試体端面をストレートエッジにより平坦にした(図 2.7 参照)。供試体の直径、高さ、質量を計測し、湿潤単位体積重量を計算した。

6.3 一軸圧縮試験

ー軸圧縮試験は,JISA1216:2009「土の一軸圧縮試験方法」¹⁾に従い実施した。 図 2.8 に一軸圧縮試験の様子を示す。



図 2.8 一軸圧縮試験の様子

図 2.9 に各供試体の軸方向応力と軸ひずみの関係を示す。

軸方向の応力は、軸方向に加えた力を供試体の断面積で除した値である。

軸方向のひずみは,変位計により計測した軸方向の変位を初期の供試体の高さで除し、 百分率で示した値である。



(a) 5 日養生



(b) 28 日養生図 2.9 一軸圧縮試験時の応力ひずみ関係

		供試体No.1		供試体No.2		供試体No.3		平均	
		湿潤 単位体積 重量	一軸圧縮強度	湿潤 単位体積 重量	一軸圧縮強度	湿潤 単位体積 重量	一軸圧縮強度	湿潤 単位体積 重量	一軸圧縮強度
		kN/m ^{**}	kN/m	kN/m [*]	kN/m	kN/m ⁻	kN/m	kN/m [*]	kN/m ⁻
	空気甲 5日養生	11.6	172	11.7	174	11.7	174	11.7	173
裏込め注入材単体	海水中 5日養生	11.7	172					11.7	172
	海水中 28日養生	11.2	408	11.1	389	11.3	393	11.2	396
裏込め注入材(50%) + 止水材B(50%)	空気中 5日養生	11.6	277	11.7	285	11.6	264	11.6	275
	海水中 5日養生	12.0	333	12.1	340			12.0	337
	海水中 28日養生	12.0	688	11.9	692			11.9	690
裏込め注入材(20%) + 止水材B(80%)	空気中 5日養生	12.0	130	11.7	115			11.9	122
	海水中 5日養生	12.2	124	12.2	120			12.2	122
裏込め注入材(50%) + テールグリスA(50%)	海水中 5日養生	12.5	29					12.5	29

表 2.3 一軸圧縮試験結果

一軸圧縮試験結果を表 2.3 に示す。図 2.9 と合わせて考察する。

図 2.9(a)から、裏込め注入材単体の一軸圧縮強度について、空気中養生と海水中養生で 差は見られない。裏込め注入材 20%と止水材 B80%の混合物の一軸圧縮強度についても同 様に海水による影響は見受けられない。

一方、裏込め注入材 50% と止水材 B50% の混合物の一軸圧縮強度は、海水中養生の方が 空気中養生よりも強度が大きい。海水を含み湿潤単位体積重量が大きいこと、海水による サクションも影響していると推察されるが、少なくとも海水により強度が低下することは ないことが確認できる。

裏込め材単体の場合よりも、止水材 B を 50%混合した場合、著しく強度が大きい。人工 海水に 5 日間養生した場合、裏込め注入材単体の一軸圧縮強度(172kN/m²)に比べ、止水 材 B を 50%混合した場合の一軸圧縮強度(337kN/m²)は、約2倍である。これは、セメン ト改良土のように、裏込め注入材がセメント、止水材 B が粘土の役割を果たし、セメント 単体よりも強度が大きくなる関係と類似していると推察される。裏込め注入材の質量が少 ない場合(20%)、セメントの量が少ないことと類似しており、強度が発現されないものと 推察される。

一方、裏込め注入材 50%とテールグリス A50%を混合した場合では、著しく強度が小さ く、テールグリス A は主に油脂であるため、セメント改良土のような働きをしないと推察 される。人工海水中に 5 日間養生した場合、裏込め注入材単体の一軸圧縮強度(172kN/m²) に比べ、テールグリス A を 50%混合した場合の一軸圧縮強度(29kN/m²) は、0.17 倍程度 である。

図 2.9(b)から、28 日間養生させた後も裏込め材単体の場合よりも、止水材 B を 50%混合した場合、著しく強度が大きく、1.7 倍の一軸圧縮強度を有する。

参考文献

1) 地盤工学会 地盤調査法改訂編集委員会 編:地盤材料試験の方法と解説―二分冊の 2-, 土の一軸圧縮試験, pp. 541~551, 社団法人地盤工学会, 2009 年.