

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。

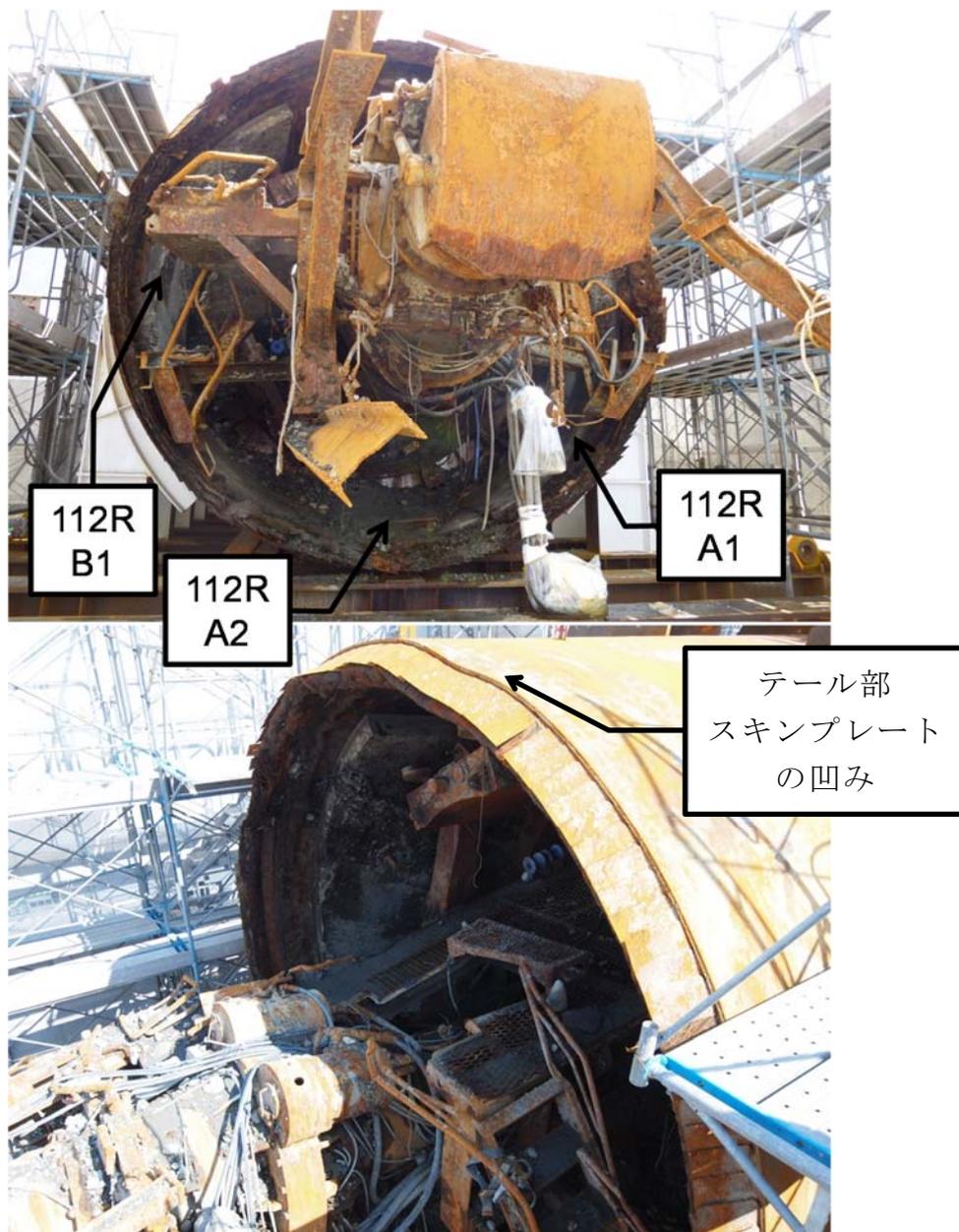


図 9.1.1 シールドマシンのテール部



図 9.1.2 テール部スキンプレートの凹み

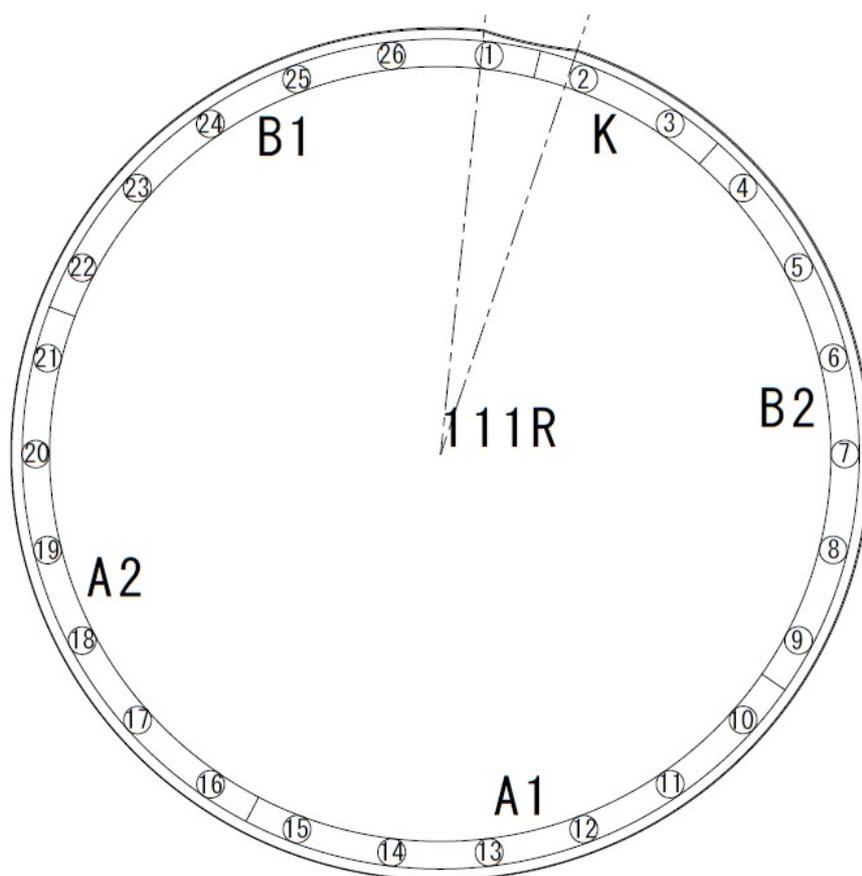


図 9.1.3 テール部スキンプレートの凹み

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 $(4950 - 4820) / 2 = 60 \text{ mm}$ 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かと推察される。

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。

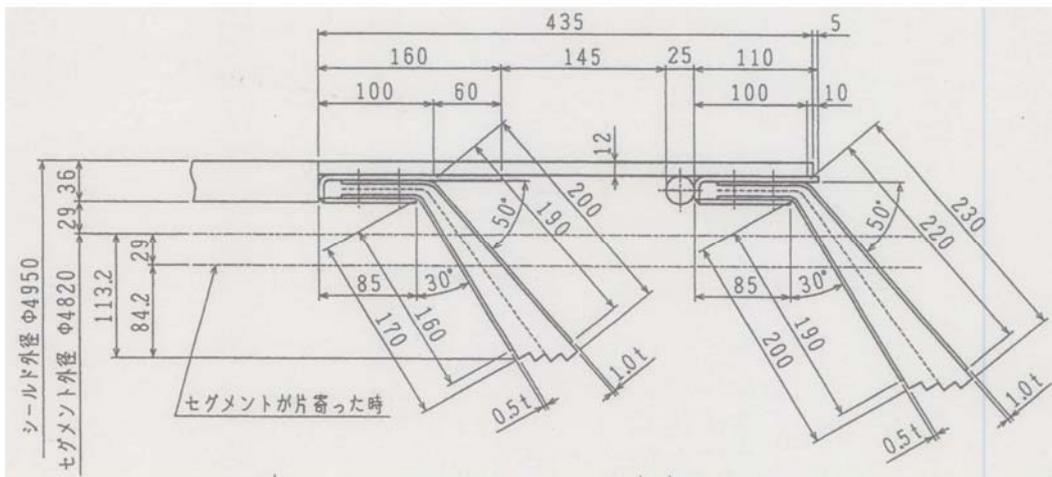


図 9.2.1 設計時のテールブラシの寸法

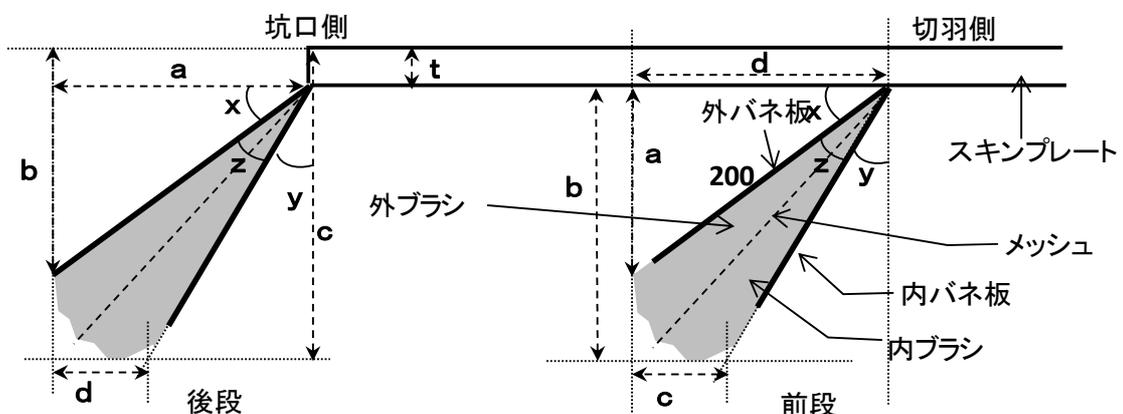


図 9.2.2 テールブラシの測定値について

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。

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）

後段(2段目) 単位:mm																					
番号	基準点からの長さ(mm)	補正値	角度※2 (deg)	外ハネ板の幅	a	b	c	d	t	b'-t	c-t	b'/a	tanx	x (rad)	x (deg)	a-d	tany (a-d)/c	y (rad)	y (deg)	90-x-y (deg)	z
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		
2				150																	
3				150																	
4				150																	
5	30	3.09	3.86	150	190	117	228	154	29	88	199	0.46	0.43	24.85	36	0.18	0.18	10.25	54.89		
6				150																	
7				150																	
8	60	3.09	10.80	150	197	116	222	148	34	82	188	0.42	0.39	22.60	49	0.26	0.25	14.61	52.79		
9				150																	
10				150																	
11	90	3.09	17.75	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				150																	
14	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																	
16				150																	
17	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																	
19				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				148																	
22	210	3.09	45.53	150	165	152	237	170	17	135	220	0.82	0.69	39.29	-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	0.09	0.09	5.12	54.66		
24				150																	
25	240	3.09	52.47	150	177	143	232	152	18	125	214	0.71	0.61	35.23	25	0.12	0.12	6.66	48.11		
26				欠損																	
27	260	3.09	57.10	欠損	145	150	239	141	17	133	222	0.92	0.74	42.53	4	0.02	0.02	1.03	46.44		
28	270	3.09	59.42	欠損	147	140	234	150	17	123	217	0.84	0.70	39.92	-3	-0.01	-0.01	-0.79	50.87		
29				150																	
30				150																	
31	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				148																	
33	322	3.09	71.45	148	183	134	231	167	17	117	214	0.64	0.57	32.59	16	0.07	0.07	4.28	53.13		
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	342	3.09	76.08	150	189	122	222	151	17	105	205	0.56	0.51	29.05	38	0.19	0.18	10.50	50.44		
36	352	3.09	78.40	147	193	112	235	249	17	95	218	0.49	0.46	26.21	-56	-0.26	-0.25	-14.41	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	3.09	83.03	150	194	113	230	292	17	96	213	0.49	0.46	26.33	-98	-0.48	-0.43	-24.71	88.38		
39	383	3.09	85.58	148	206	79	234	311	17	62	217	0.30	0.29	16.75	-105	-0.48	-0.45	-25.82	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	3.09	90.21	150	211	42	225	212	17	25	208	0.12	0.12	6.76	-1	0.00	0.00	-0.28	83.52		
42	412	3.09	92.29	150	216	28	160	88	17	11	143	0.05	0.05	2.92	128	0.90	0.73	41.83	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				150																	
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		
47				150																	
48				150																	
49	480	3.09	108.03	150	205	82	191	115	17	65	174	0.32	0.31	17.59	90	0.52	0.48	27.35	45.06		
50				150																	
51				150																	
52	510	3.09	114.98	150	210	164	193	121	19	145	174	0.69	0.60	34.62	89	0.51	0.47	27.09	28.29		
53				150																	
54				150																	
55	540	3.09	121.92	150	210	62	171	92	18	44	153	0.21	0.21	11.83	118	0.77	0.66	37.64	40.53		
56				150																	
57	562.5	3.09	127.13	150	214	42	220	52	17	25	203	0.12	0.12	6.66	162	0.80	0.67	38.59	44.75		
58	570	3.09	128.87	150	213	54	198	142	20	34	178	0.16	0.16	9.07	71	0.40	0.38	21.75	59.18		
59				150																	
60				150																	
61	600	3.09	135.81	150	211	68	145	50	21	47	124	0.22	0.22	12.56	161	1.30	0.91	52.40	25.05		
62				150																	
63				150																	
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																	
66				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																	
69				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				150																	
72	720	3.09	163.59	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				150																	
75	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																	
77				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				150																	
80				150																	
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		
82				150																	
83				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		
85				150																	
86				150																	
87	870	3.09	198.32	150	212	42	205	130	18	24	187	0.11	0.11	6.46	82	0.44	0.41	23.68	59.86		
88																					

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、 $12^\circ/50^\circ = 0.24$ 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。

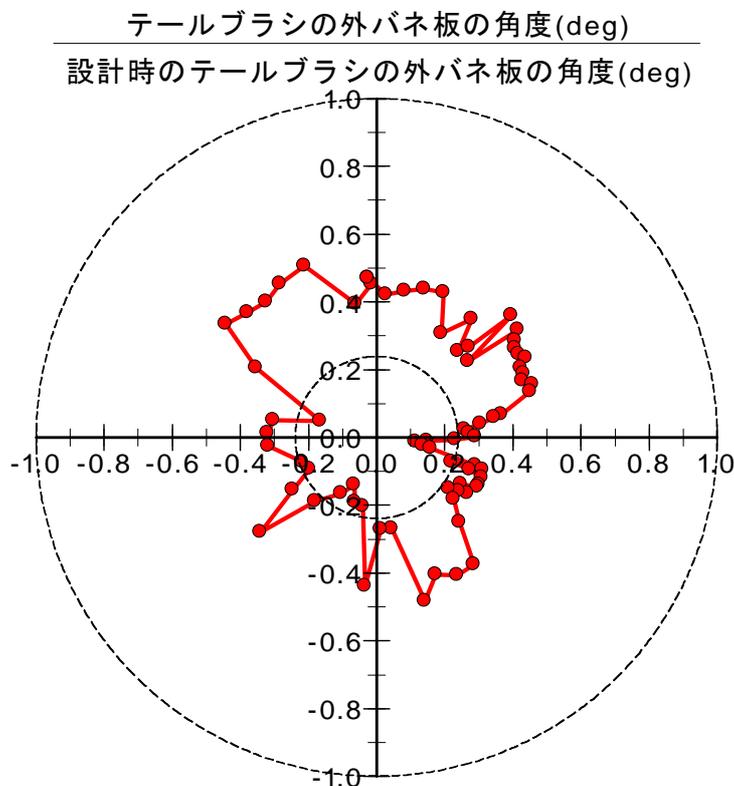


図 9.2.3 設計時の外バネ板の角度で正規化された災害後の外バネ板の角度

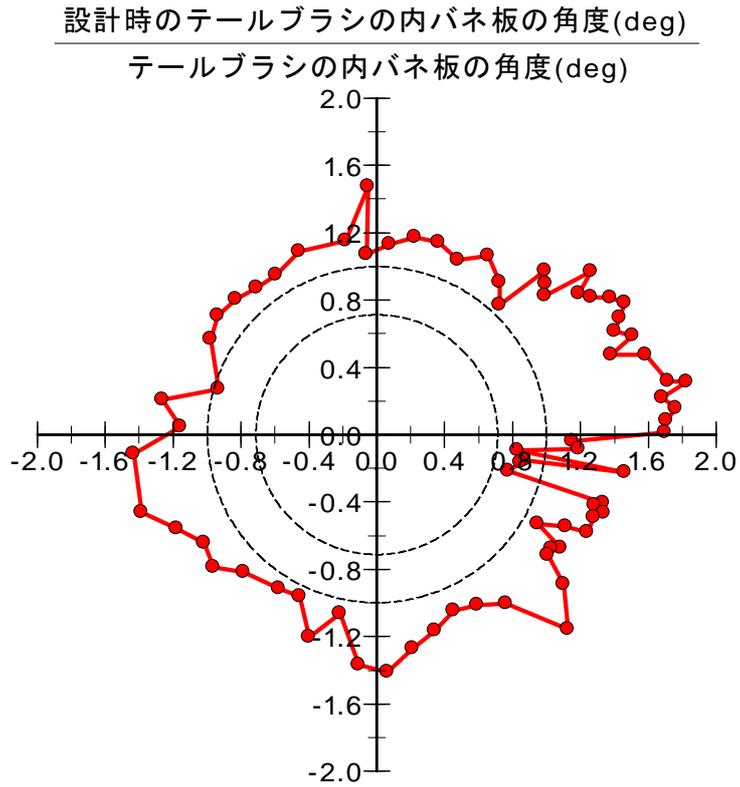


図 9.2.4 設計時の内バネ板の角度で正規化された災害後の内バネ板の角度

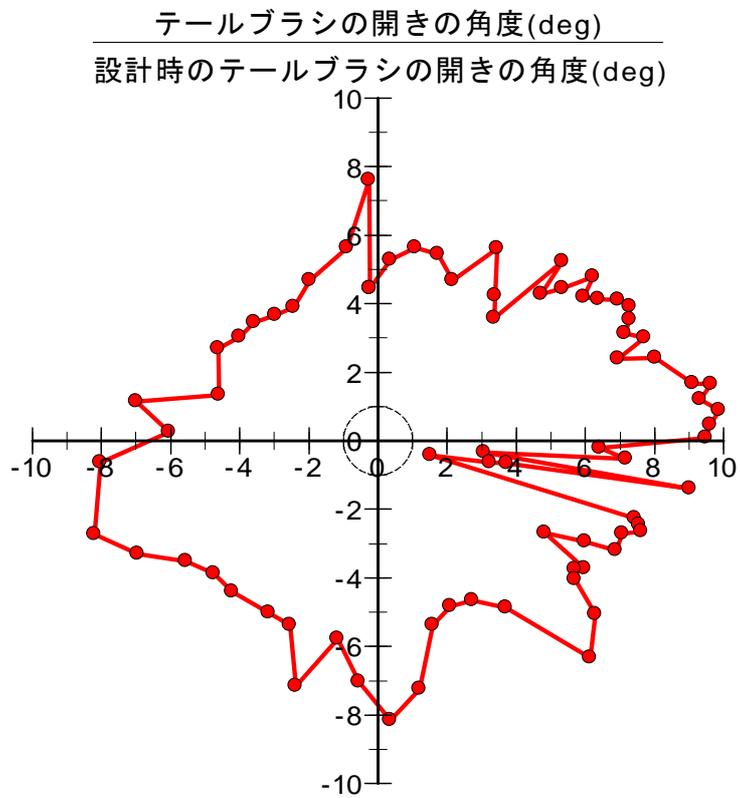


図 9.2.5 設計時のテールブラシの開きの角度で正規化された災害後の開きの角度

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性の材料である。

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性の材料である。

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、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。

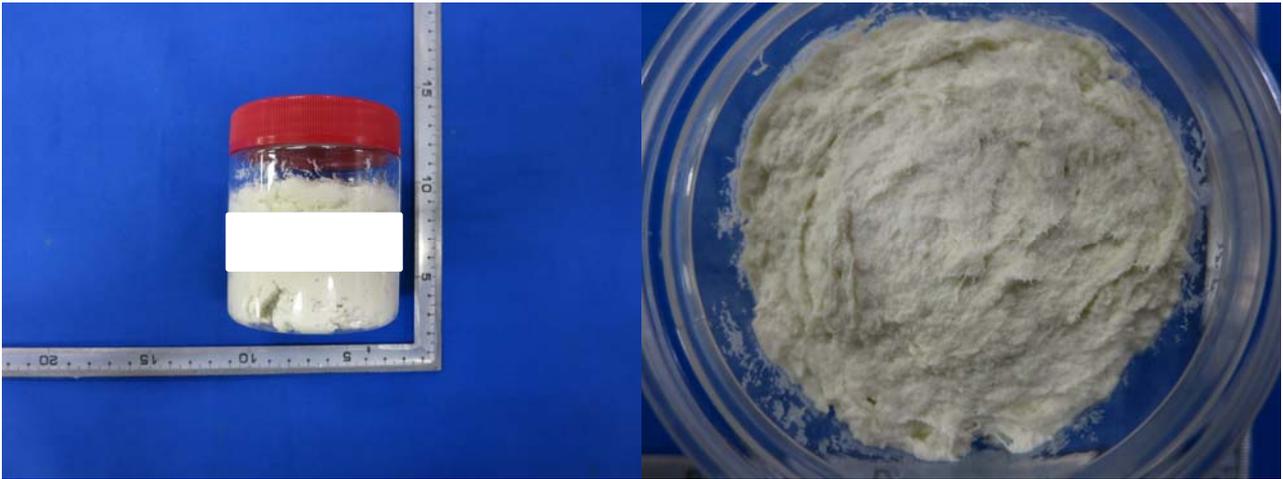


図 9.2.6 テールグリス A

表 9.2.3 止水材 A

材料名 (真比重)	A 液		塑強調整剤
	a 液 (2.6)	水 (1.0)	b 液 (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

特殊配合① (A : B=20 : 1)

	A 液(1m ³) 65kg/100L		PP	塑強調整剤
材料名 (真比重)	a 液 (2.6)	水 (1.0)	PP (1.30)	b 液 (1.37)
数量	520 kg	800 L	50 kg	50 L

特殊配合② (A : B=20 : 1)

	A 液(1m ³) 100kg/100L		PP	塑強調整剤
材料名 (真比重)	a 液 (2.6)	水 (1.0)	PP (1.30)	b 液 (1.37)
数量	722 kg	722 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 cp
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/m ³
粘性	50,000 cp	150,000~ 200,000 cp
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。

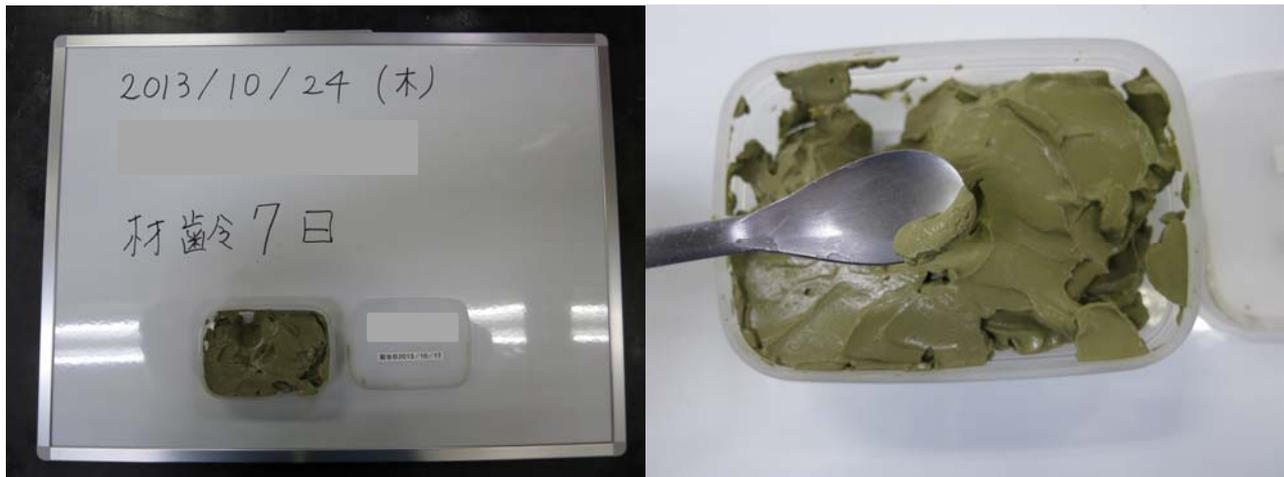


図 9.2.6 止水材 A (材齢 7 日)



(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。

表 9.2.6 裏込め注入材の配合表

A(945mL)						B (55mL)
① 液	② 液	③ 液	④ 液	水	空気量	⑤ 液
230g	30g	0.3g	2.3g	764mL	95mL	55mL

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。
2. 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。

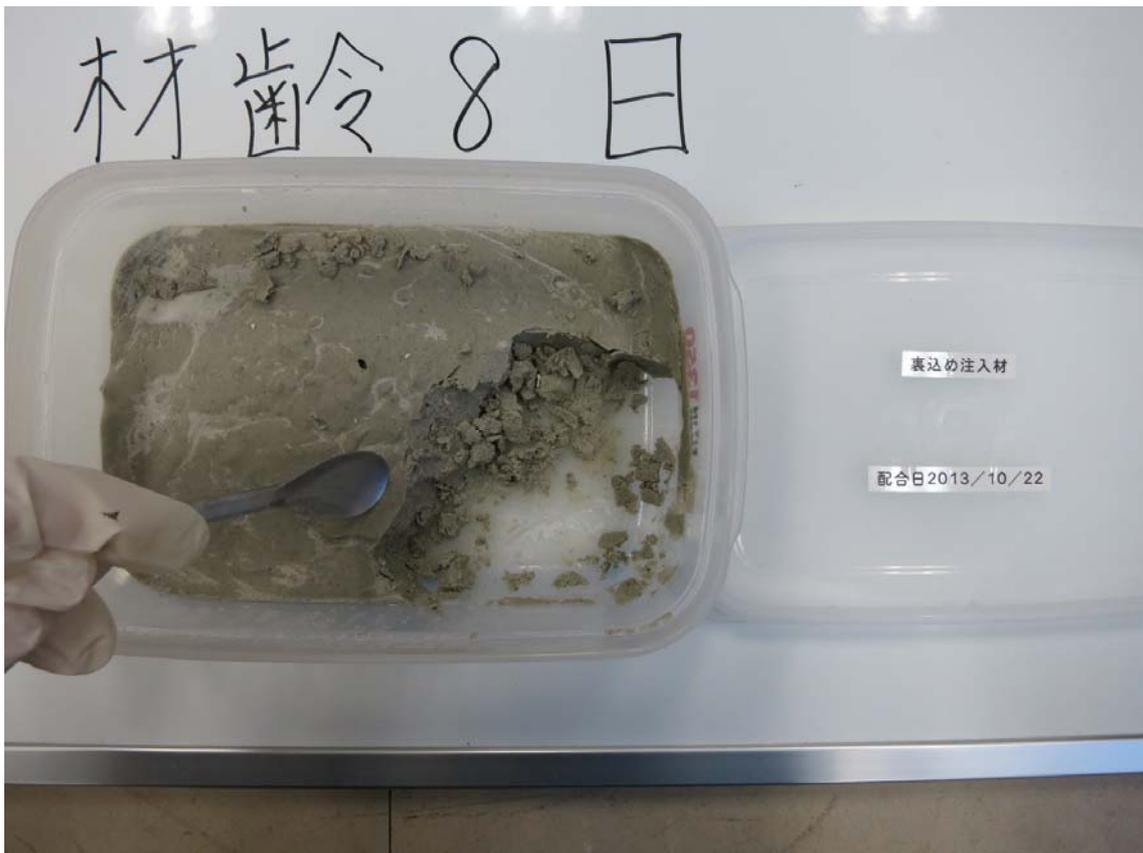
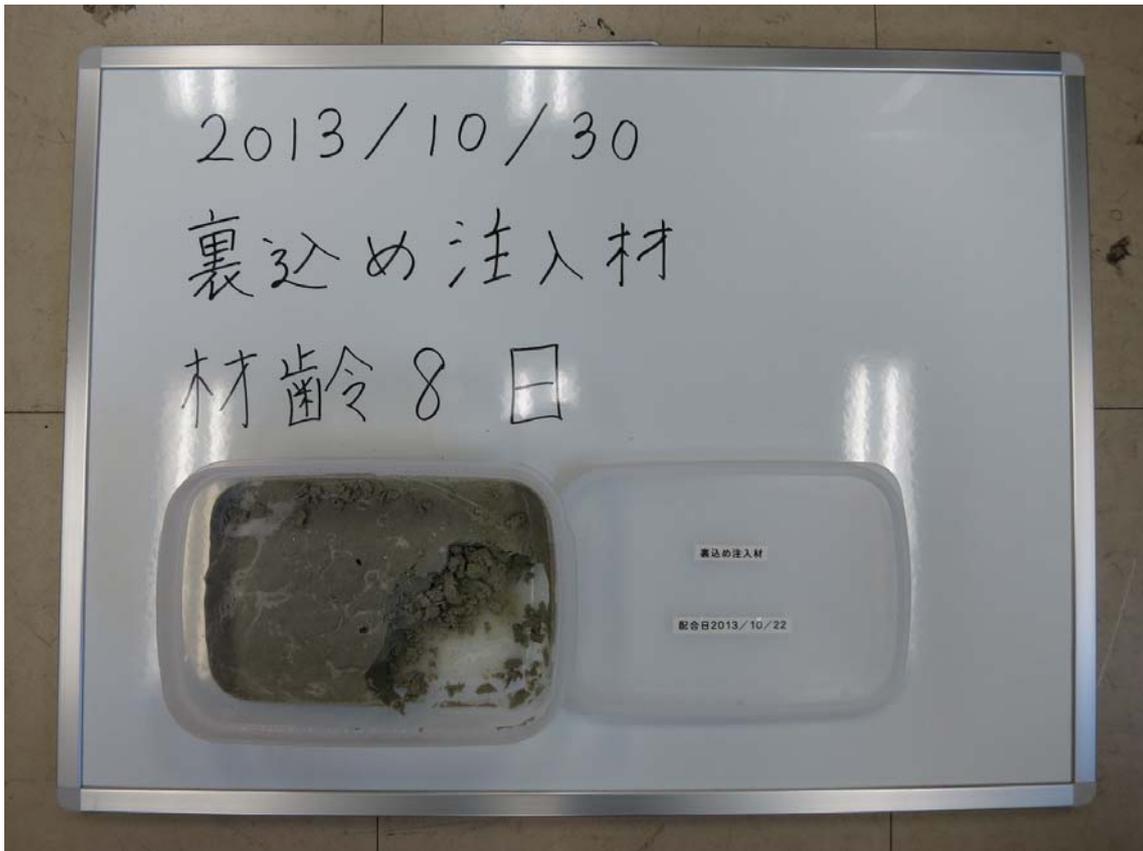


図 9.2.8 裏込め注入材 (材齢 8 日)

(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上げるために、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。

表 9.2.7 充填材の配合表

材料	水	セメント	フライアッシュ	特殊増粘剤	高性能減水剤	消泡剤 (5倍希釈)
名称	水道水	高炉B種	フライアッシュ JIS23種			
メーカー	-					
(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



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。

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）

試料番号	採取	採取年月日	採取場所		採取場所	採取場所基準点から
1	A	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
2	B	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
3	C	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
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
5	E	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
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
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
8	H	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
9	I	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
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
11	K	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
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
13	M	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
14	N	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
15	O	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
16	P	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
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
18	X	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
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
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
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
22	T	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
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
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
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
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	Z	平成25年8月8日	111R B2セグメント 地山側			

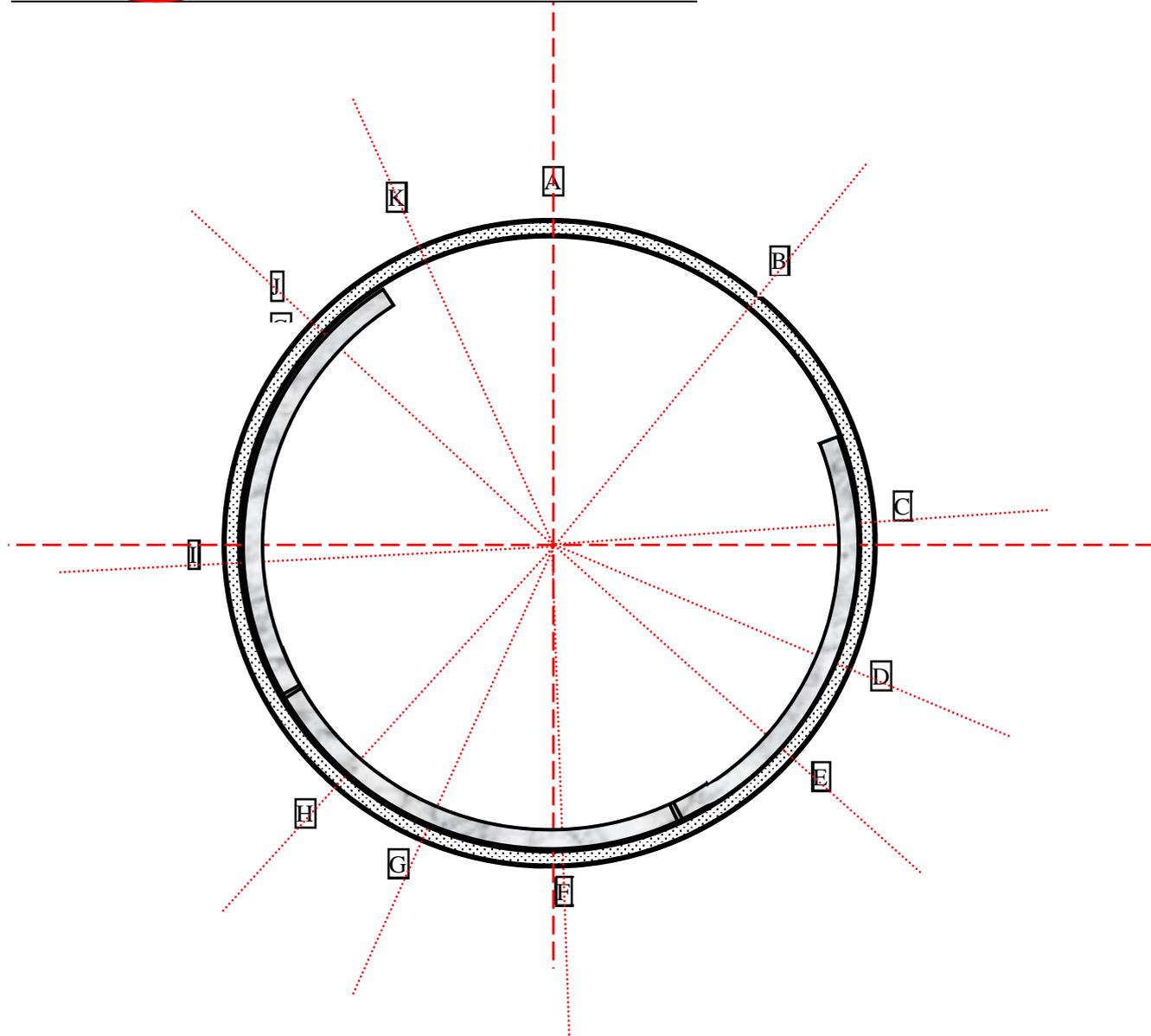
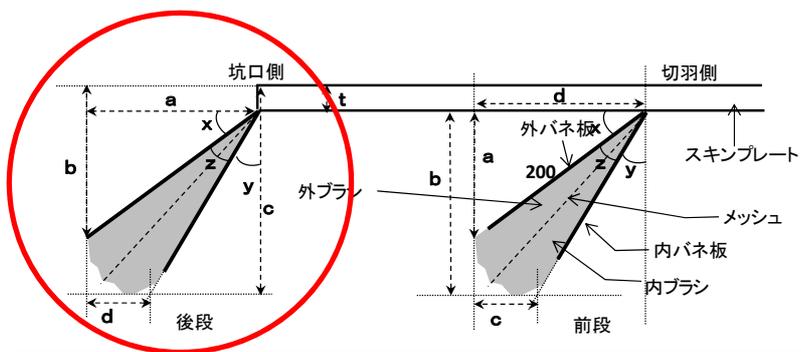


図 9.2.10 テールブラシ固着試料採取場の見取図 (坑口側テールブラシ) 坑口から切羽を見た図

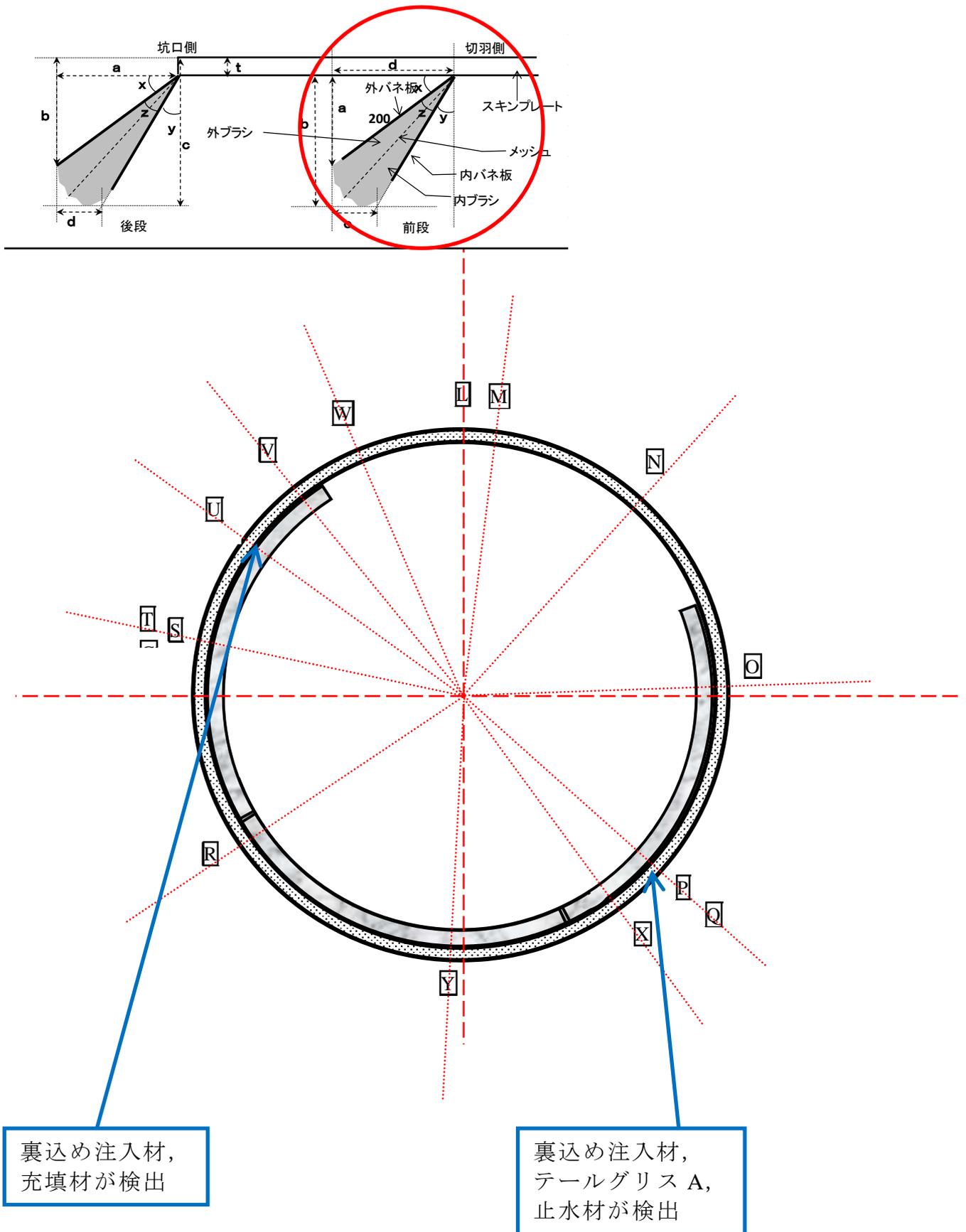


図 9.2.11 テールブラシ固着試料採取場見取図 (切羽側テールブラシ) 坑口から切羽を見た図



(A)



(B)



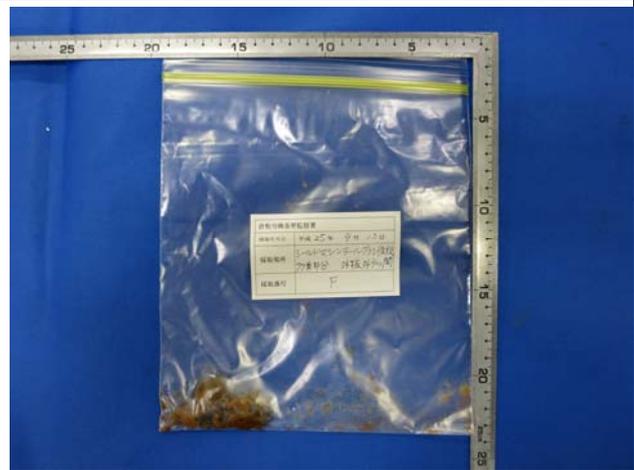
(C)



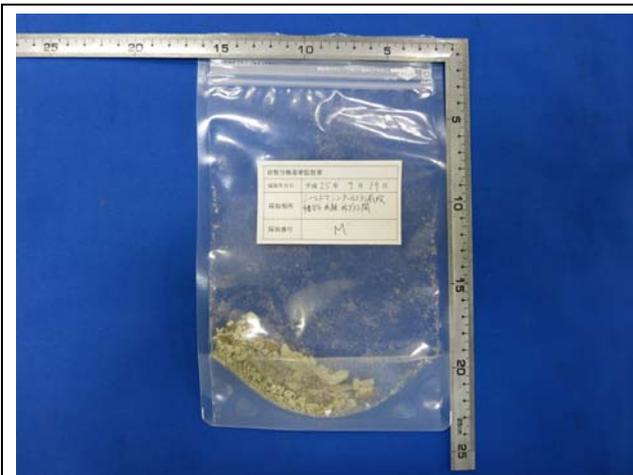
(D)



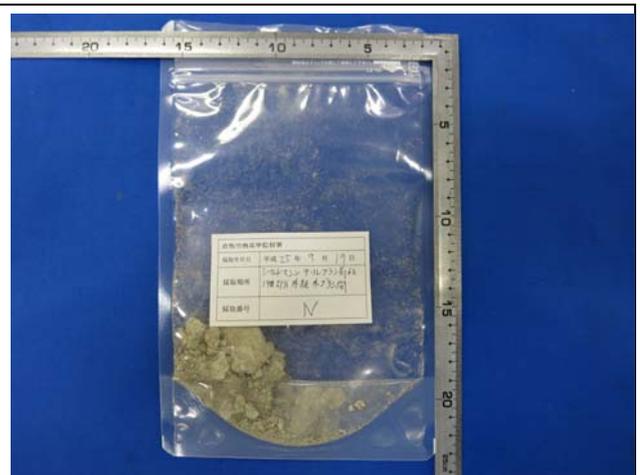
(E)



(F)



(M)



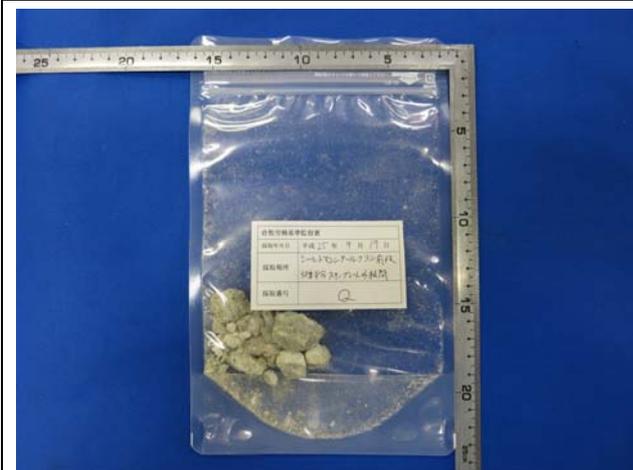
(N)



(O)



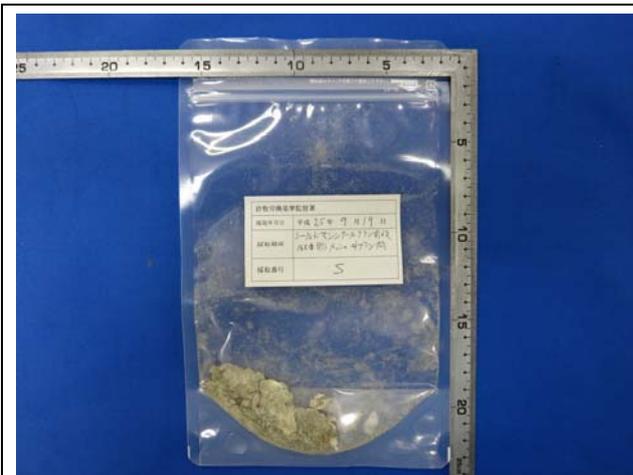
(P)



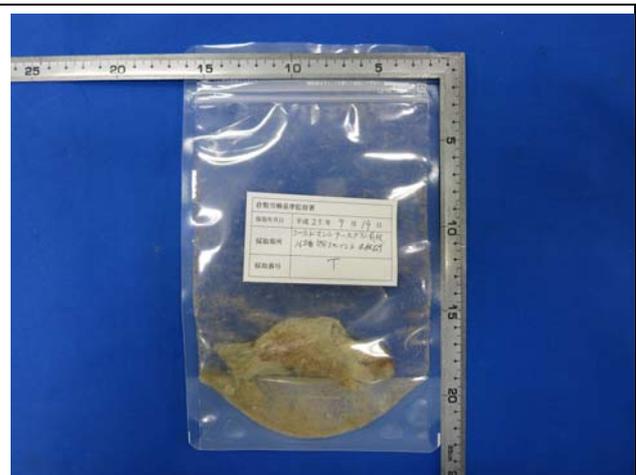
(Q)



(R)



(S)



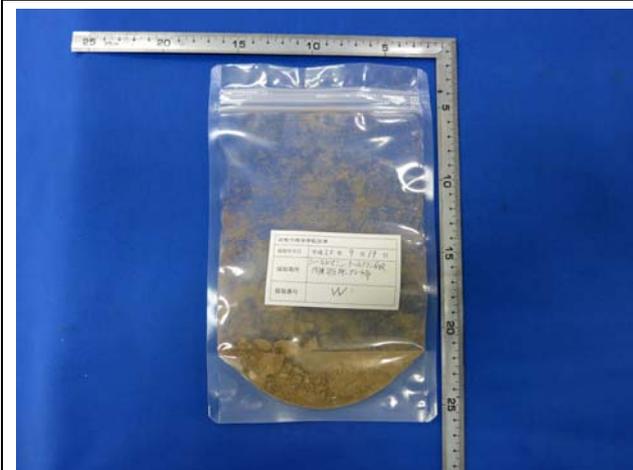
(T)



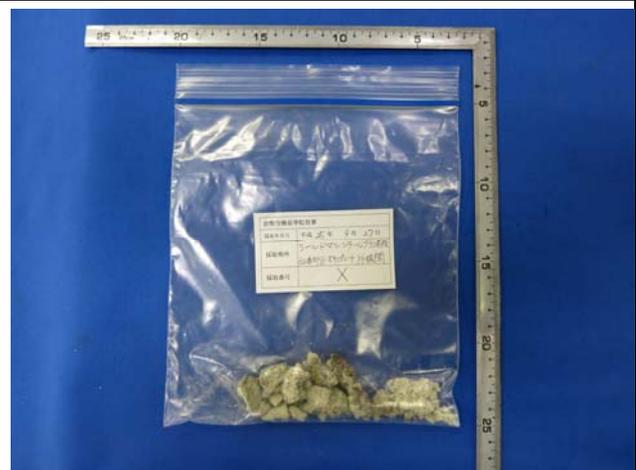
(U)



(V)



(W)



(X)



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。

表 9.2.9 採取試料の分析結果

試料番号	採取番号	採取年月日	採取場所		採取場所角度(度)	採取場所基準点からの距離(cm)	裏込め注入材	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	○				
2	B	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	○				
3	C	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	○				
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	○	○			
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	○				
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		○	○		
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	○				
8	H	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	○	○			
9	I	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	○	○			
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	○				
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	○				
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	○	○			
13	M	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	○	○			
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	○				
15	O	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	○	○			
16	P	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	○	○			
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	○	○	○		
18	X	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	○	○			
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		○			
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	○	○			
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	○	○			
22	T	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	○	○			
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	○		○		
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	○				
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	○				
26	AA	2013年9月12日	シールドマシンフードチャンパー内						○	○		
27	Z	2013年8月8日	111R B2セグメント 地山側						○	○		

※ 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。

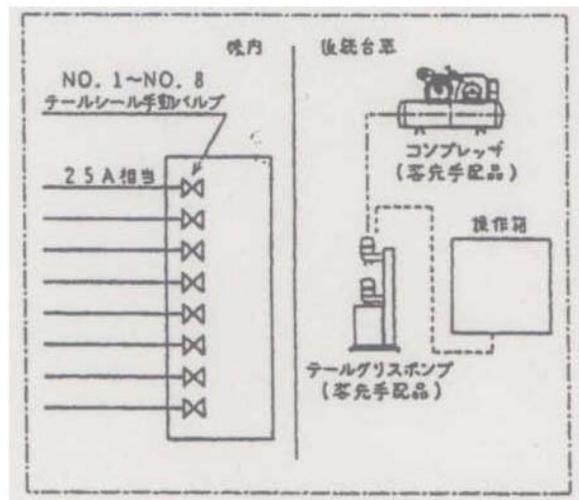
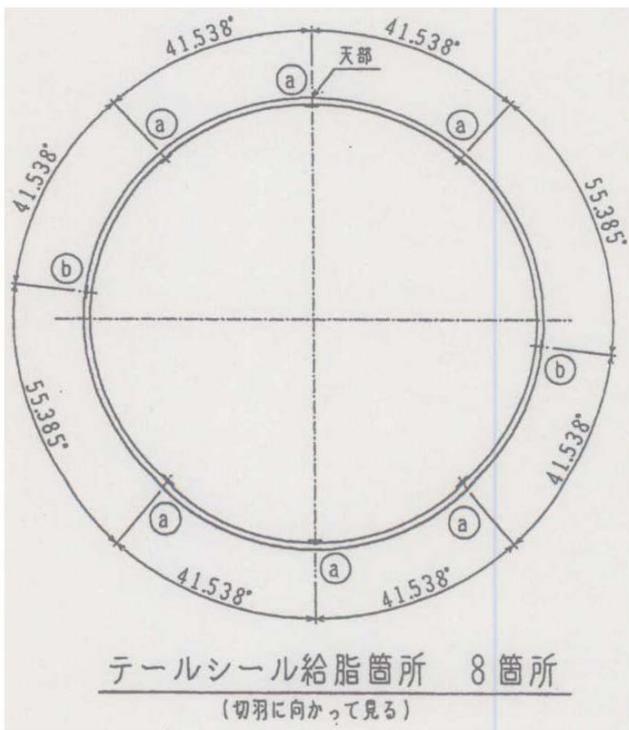
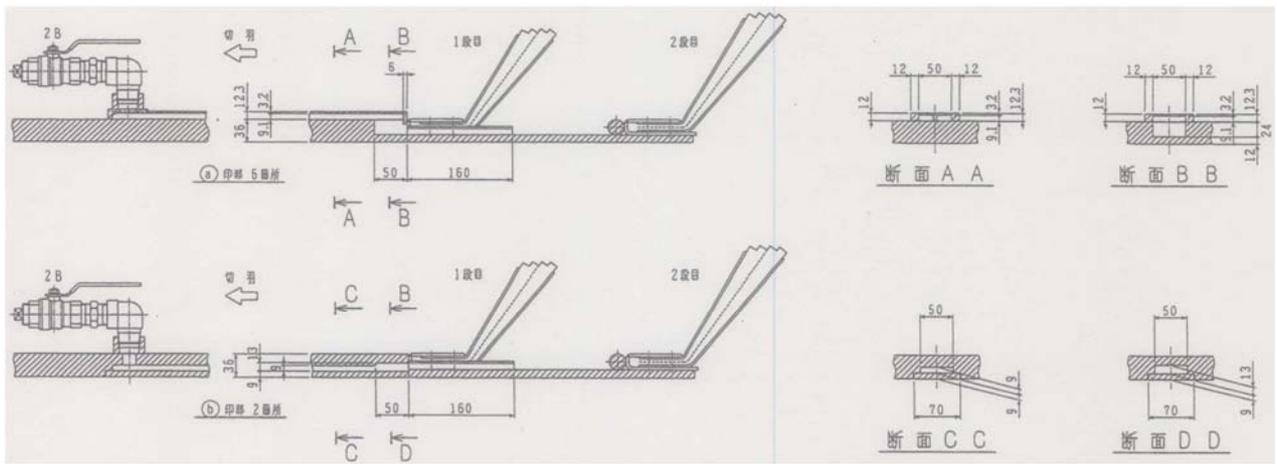


図 9.2.13 テールシール注入管

9.3 土砂採取場から採取した試料の分析

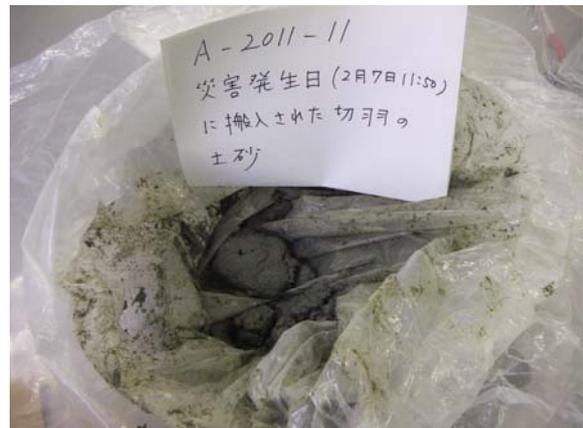
スクリーコンベアを通った掘削土砂は流動化をよくするための薬剤等が混入されているため、掘削土砂は掘削前の自然地盤の物性とは厳密には異なる。特に、粒度については細粒分が混入し、液性塑性限界の値にも影響があると推察される。そこで、ここでは、災害発生日と災害発生日から2,3日前の掘削土砂を比較することにより、災害発生日の地盤の変化について調査分析した。

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なものである。



(1-a)災害発生日より 2,3 日前の掘削土砂
(遠影)



(2-a)災害発生日午前 11 時 50 分頃の掘削土砂
(遠影)



(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)

図 9.3.1 掘削土砂の写真

表 9.3.1 掘削土砂の土質試験結果

		災害発生日より 2,3 日前 の 掘削土砂	災害発生日午前 11 時 50 分頃 の 掘削土砂	
一般	土粒子密度 ρ_s g/cm ³	2.686	2.675	
	自然含水比 w_n %	9.3	10.2	
粒度	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
		粘土分(0.005mm 未満) %	6.3	4.9
	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 D_{10} mm	0.029	0.044	
均等係数 U_c	334	272		
曲率係数 U_c'	1.31	1.05		
コンシステンシー特性	液性限界 w_L %	NP	34.5	
	塑性限界 w_P %	NP	18.6	
	塑性指数 I_P	NP	15.9	
分類	地盤材料の分類名	細粒分まじり砂質礫	細粒分まじり砂質礫	
	分類記号	GS-F	GS-F	
	凡例記号	◆	●	

(1) 土粒子の密度試験結果

どちらの掘削土砂もほぼ 2.68g/cm^3 を示しており，石英（二酸化ケイ素 SiO_2 100%，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。

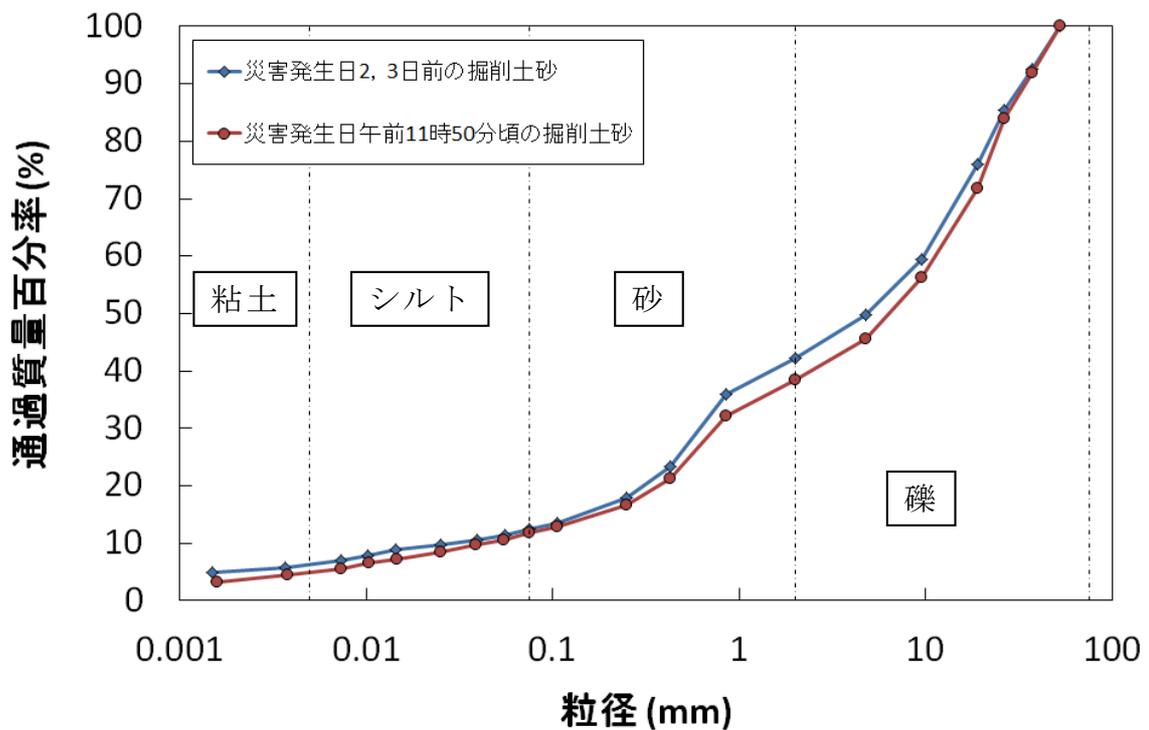


図 9.3.2 粒径加積曲線

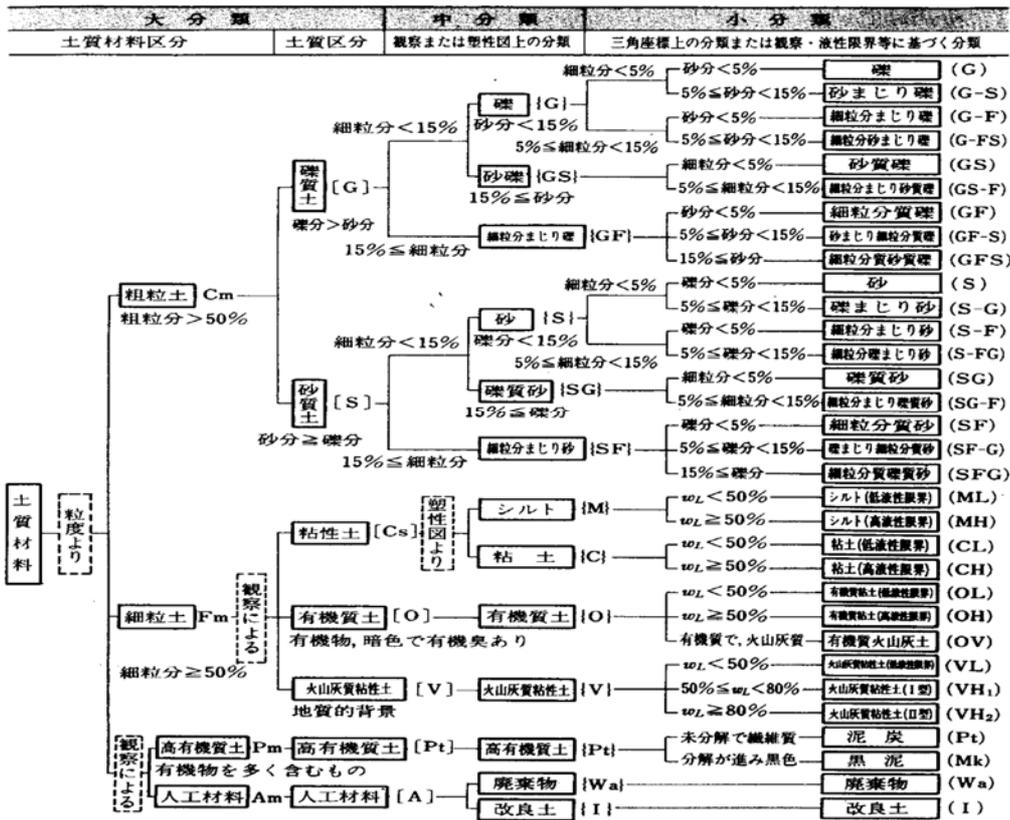


図 9.3.3 日本統一分類法による土の分類

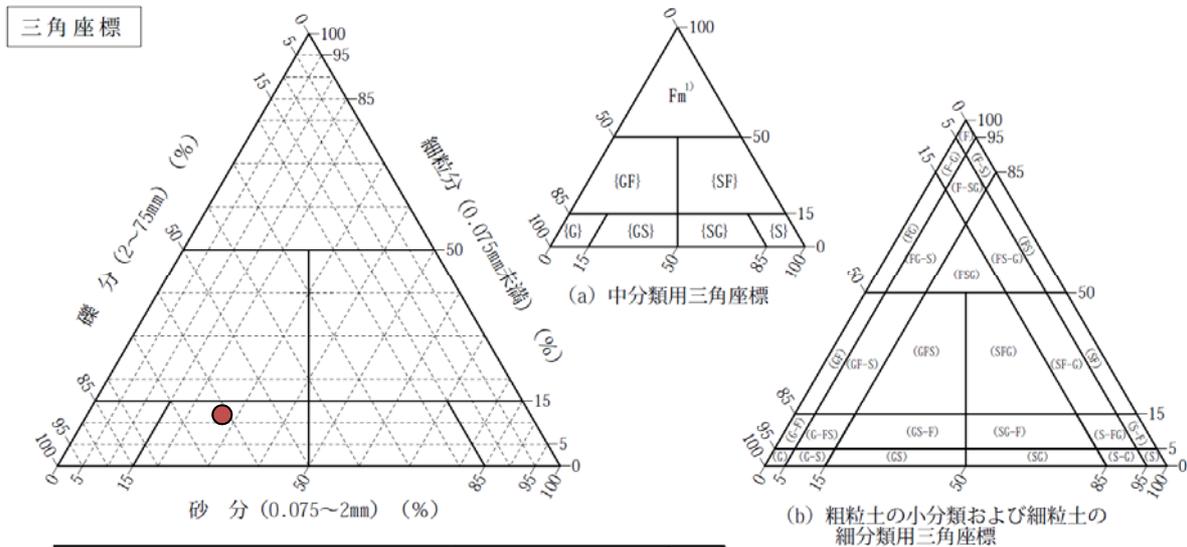


図 9.3.4 三角座標

9. 4 シールドジャッキの調査

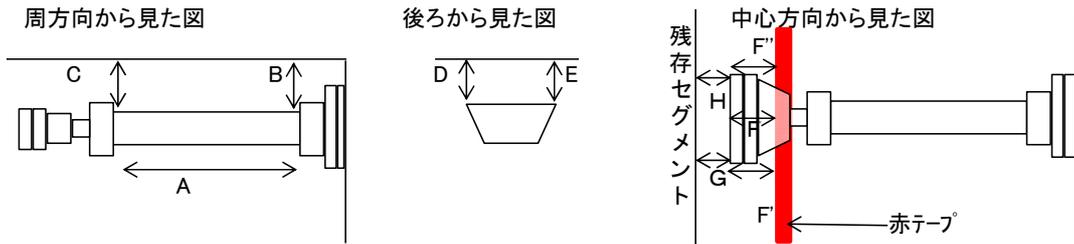
倉敷労働基準監督署がシールドジャッキのロッドの長さ等、詳細な調査を実施している（表 9.4.1 参照）。その結果、ジャッキ No.1~5、No.23~26 の計 9 本のジャッキが抜かれている（セグメントから離れている）状態を確認している。

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)

シールドジャッキ測定値(単位:mm)



ジャッキNo.	A	B	C	D	E	F	F'	F''	G	H
	ロッド長さ	スキンプレート ～ロッド (根元)	スキンプレート ～ロッド (先)	スキンプレート ～スフレッター (時計回り 左)	スキンプレート ～スフレッター (時計回り 右)	赤テープ後端 ～スフレッター (スフレッター中 心) 赤テープより伸びる方向を+, 縮む方向を -とする	赤テープ後端 ～スフレッター (時計回り 左)	赤テープ後端 ～スフレッター (時計回り 右)	シールドマシン 内部の残存 セグメント～ス フレッター(時 計回り左)	シールドマシン 内部の残存 セグメント～ス フレッター(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			※1	※1
7	475	108	107	10	51	1			※1	※1
8	484	107	107	10	47	5			※1	※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 スキンプレート一部切断のため測定不能。

※4 スキンプレート一部切断のため、シャフト先端部ではなく、赤テープ付近で測定。

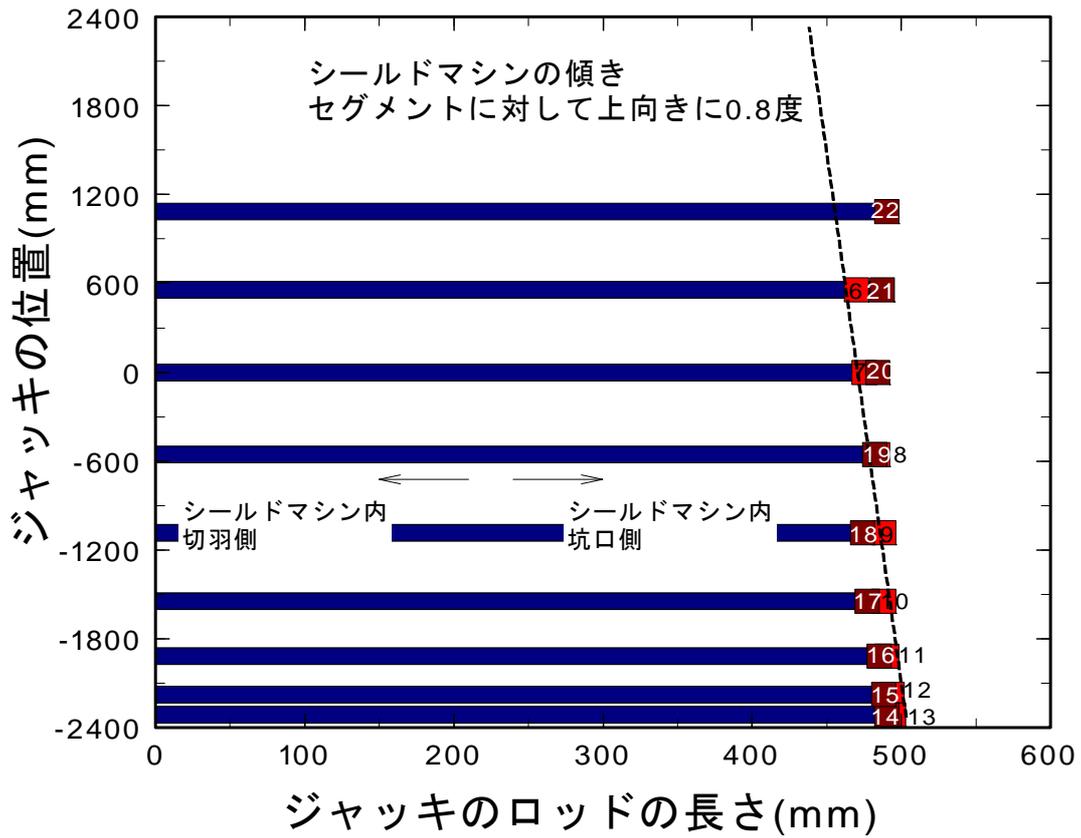


図 9.4.1 シールドマシンの側面からジャッキを見た場合のロッドの長さ

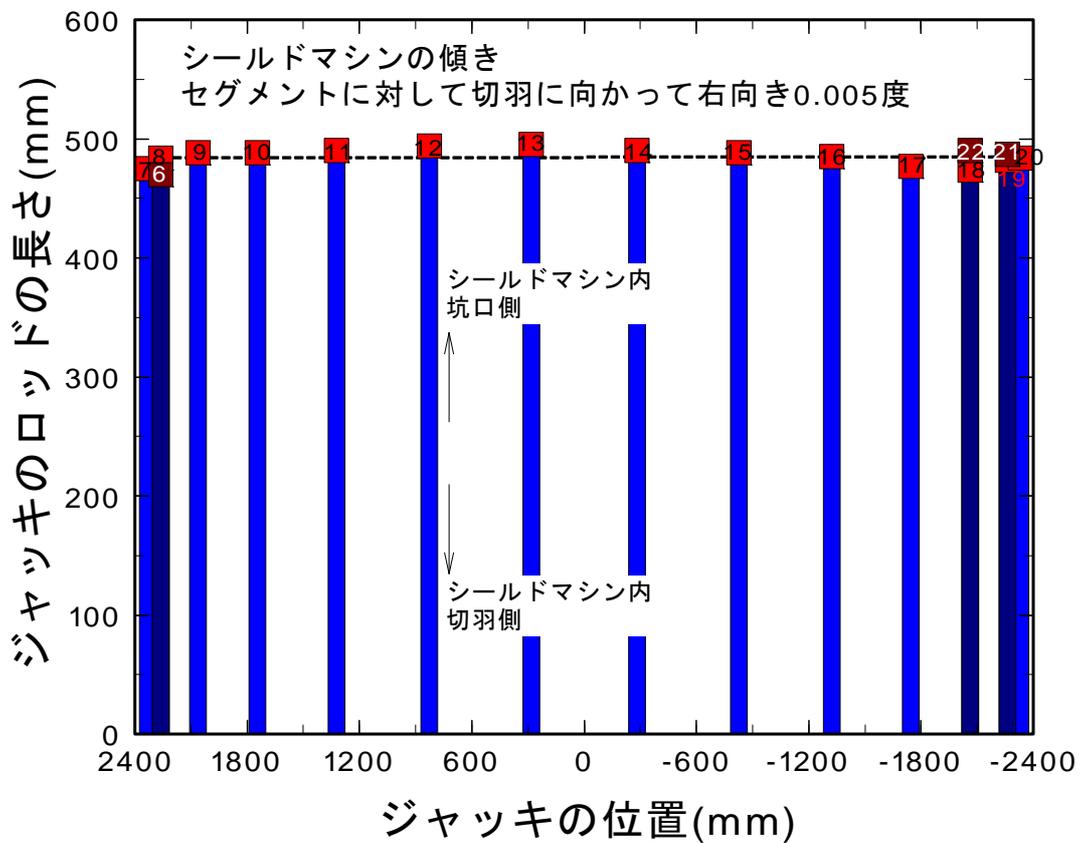


図 9.4.2 シールドマシンの上方からジャッキを見た場合のロッドの長さ

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ウ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.