地熱貯留層掘削技術に関する委託研究

「地熱井掘削における逸泥対策技術の開発」

地熱井における水中不分離セメントの適用について

令和 4 年 5 月

（委託）独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構
（受託）帝石削井工業株式会社（現：株式会社 INPEX ドリリング）

本書は、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物機構(以下、JOGMEC)が帝石削井工業株式会社(以下、TDC、現：株式会社 INPEX ドリリング)に平成 30 年度から令和 2 年度までの 3 年間に委託し実施した地熱貯留層掘削技術に関する委託研究「地熱井掘削における逸泥対策技術の開発」の成果報告書を JOGMEC にて再編集したものである。

なお、以降の委託先の名称は、委託事業実施時の名称を使用することをご了承ください。

総説

地熱井掘削において、掘削コスト増大の要因として逸泥対策に要する日数が上げられる。逸泥対策に要する時間を削減できれば掘削コストの縮減に大きく寄与すると考えられる。この事業では、逸泥対策の一つのツールとして、土木分野で用いられている水中不分離性混和剤に着目し、地熱井での逸泥対策への適用を目的として平成 30 年度から令和 2 年度の 3 年度にわたり検証を実施した。

本事業では、数種の水中不分離性混和剤から室内試験を経て、最も現地実証試験に適した水中不分離性混和剤を選択し、現地実証坑井へ適用した。

これらの検証作業より以下のことが言える。

- 水中不分離セメントは逸泥対策において一定の効果が見込めることを確認した。
- 水中不分離セメントを使用したセメンチングの作業方法を確立した。
- 地上での施工性を考えると界面活性系水中不分離性混和剤が有効であることを確認した。
- 水中不分離セメントは作業手順を工夫することで、低温度域から高温度域のフィールドまで地熱井掘削で通常使用されている設備で施工が可能であることを確認した。

なお、本書の内容を確認した上で、さらに詳細なデータの開示を要望する場合は、下記の URL より問い合わせをいただければと思います。
https://geothermal.jogmec.go.jp/contact/index.php

改めて、機構もしくは委託先であった TDC から連絡いたします。

目次

図　目　次

表　目　次

使用する略語

GWC　：　地熱井セメント
OPC　：　普通ポルトランドセメント
LCM　：　逸泥防止剤
TT　：　シックニングタイム
DP　：　掘管、ドリルパイプ
API RP　：　American Petroleum Institute Recommend Practice を示し、米国石油協会が作成した「推奨ガイドライン」を示す。

水中不分離セメント：水中不分離性混和剤を混ぜ込んだセメントスラリー
C 系混和剤(もしくは"C 系")：セルロース系水中不分離性混和剤
S 系混和剤(もしくは"S 系")：界面活性系水中不分離性混和剤

※　本事業では、S 系混和剤及び C 系混和剤の比較検討のため、各種試験を実施しているが、最終的に S 系混和剤を現地実証試験に採用することとしたため、本書では S 系混和剤の試験結果を中心に記述している事にご留意ください。

1. 概要

地熱井掘削においては、ケーシングセメンチングをフルホールセメンチングに近い施工をすることを目的として、LCM スポットおよびセメントスポットによる逸泥対策手法が主に用いられている。ただ、大規模逸泥が発生した地域においては、逸泥対策に日数を費やしているのが現状である。そこで既存のセメンチング方法以外のセメントスラリーの調査を行い、土木分野で広く用いられている水中不分離性混和剤に着目し、地熱井での逸泥対策への適用を目的として平成 30 年度から令和 2 年度の 3 年度にわたり検証を実施したので以下に紹介する。

なお、3 年度にわたる事業の実施体制を以下に示す。

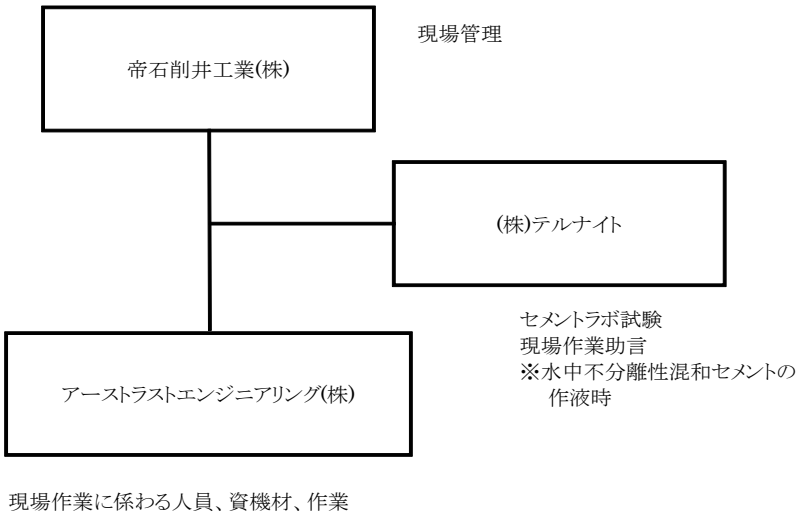


図 1：事業実施体制図

2. 水中不分離性混和剤について

水中不分離性混和剤とは、橋梁を支える基礎構造物工事や防波堤の設置などの主として河川や海岸などの水辺で行われる土木工事で水中へセメントを打設する際、セメントスラリーの水中への拡散防止を目的として、セメントスラリー自体の拡散抵抗性を高めるために使用される材料の総称である。水中不分離性混和剤の主な利点は、水中でセメントが拡散しないことから目的箇所に対して計画通りのセメントを適切に充填できることにあり、加えて施工水域の汚濁防止にも絶大なる効果を発揮する。

一般的にはセメントスラリー、モルタルおよびコンクリートの流動性、拡散抵抗性および粘弾性などを改善するため、水溶性セルロース系高分子化合物の水中不分離剤を添加するが、アルキルアリルスルフォン酸塩、アルキルアンモニウム塩を主成分とした特殊な水中不分離性混和剤も存在する。また、水中不分離剤を含むコンクリート混和剤、セメント、骨材があらかじめブレンドされている水中不分離性無収縮モルタルもある。図 2 にて、水中不分離性混和剤の効果を写真にて示す。水中不分離剤を添加していないセメントスラリー（写真左）は、水中へセメント粒子が拡散しているが、水中不分離性混和剤を添加したセメントスラリー（写真右）は、セメント粒子が水中に拡散していないことが目視で確認できる。

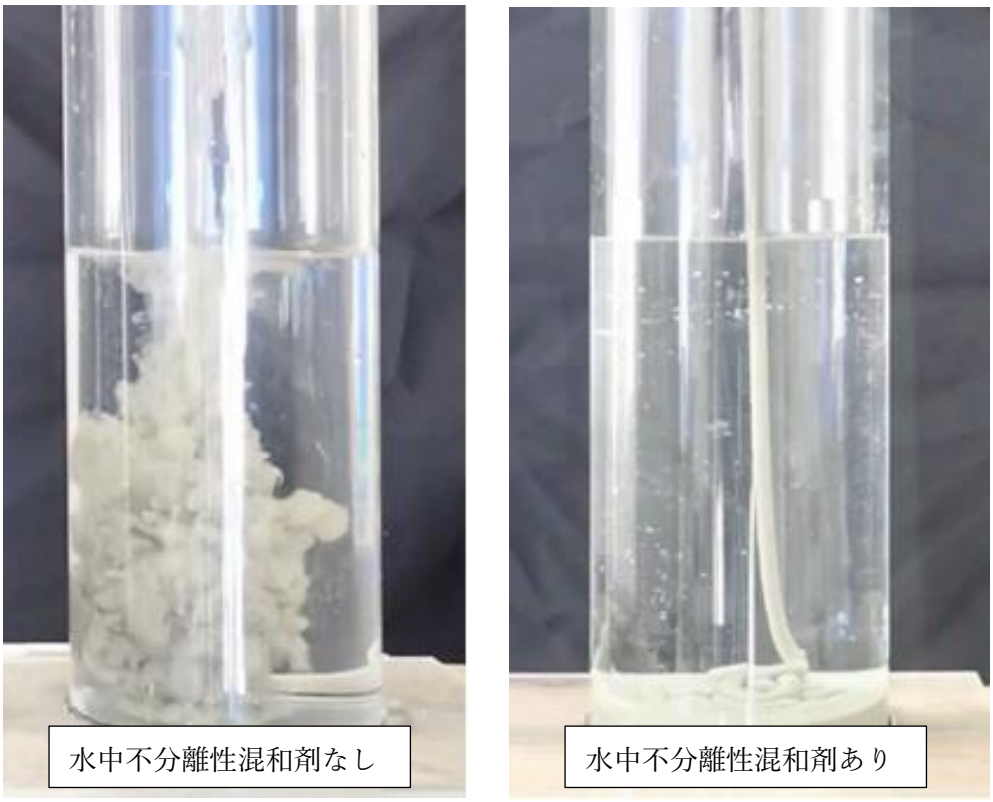


図 2：水中不分離性混和剤の効果

水中不分離セメントの土木事業での利点は以下のように謳われている。

- セメントスラリーの水中での拡散抵抗性と充填性を向上させる。
- 砂質土へ打設したセメントスラリーの逸水を防止する。
- 保形成が高く、軟弱地盤での崩落防止効果に優れる。
- セメントスラリー自体の硬化時間に影響しない。
- 水中における安定したセメント強度の発現を補助する。
- 添加量により弾性体から粘性体まであらゆるセメントスラリー性状へ調整できる。
- 保水性とレベリング性に優れ、セメントやモルタルのひび割れを防止する。
- 製品には有害な重金属が含まれておらず、環境安全性が高い。
- 施工水域の汚濁を防止する。
- 液体製品なので粉体製品よりも作業性が高い。
- ポンプ圧送性に優れている。
- 溶解水は清水、海水を問わず使用できる。

本事業では、地熱井掘削に水中不分離性混和剤を適用できるか室内実験にて確認し、実坑井

において現地実証試験(平成 31 年度および令和 2 年度)にて水中不分離セメントを使用したので、結果を紹介する。

3. 水中不分離セメントの坑井への適用にあたり

セメントスラリーの坑井への適用に当たっては、坑井と同様の条件下において、作業が実施でき、期待される効果が得られるかを事前に室内実験にて確認する必要がある。つまり、セメントと各種添加剤および坑井作業にて使用する清水を混錬し、スラリー性状が妥当であるか室内実験を行う。

このことは、水中不分離セメントの適用を考える際も、水中不分離性混和剤はセメント添加剤の一種と考え、同様に必要な事項となる。

また、室内試験での確認事項としては、スラリーの ①比重、② 粘性(流動特性)、③ 遊離水、④ 脱水量、⑤ シックニングタイム、⑥ 固化後のセメントの硬さ(圧縮強度)などがあげられる。

以上のことが、非常に重要であり、この後に試験結果を示すが、これは傾向を示すもので絶対的な試験結果ではなく、使用する水、セメントまた水中不分離性混和剤が変わると、性状も変わることがあるため、水中不分離セメントを坑井に対して使用する際には、事前に室内試験を実施し、適用できるスラリー性状であること確認する必要がある。

3-1. 坑井条件の決定

前述したように坑井に対し採用するセメントスラリーの配合を決定する必要がある。

なお、採用する坑井状況の要件は表 1 のような条件を坑井毎に設定し、候補坑井で使用する作業用水にてラボ試験を実施することが必要となる。

表 1：組成検討試験における設定条件および目標値の設定表(例)

項目		設定条件および目標値
坑底静置温度（BHST）	GWC	100℃
	OPC	80℃
	口元	30℃
坑底循環温度（BHCT）	GWC	50℃
	OPC	40℃
	口元	27℃
スラリー比重		1.80
シックニングタイム	30Bc	4 時間 30 分±30 分
	100Bc	6 時間±30 分
一軸圧縮強度		5MPa 以上/8hr 養生
脱水量（低脱水配合の場合）		300m ℓ 以下
遊離水		1.4%以下
水中分離度試験 （水中不分離性混和剤を用いた場合）		水中不分離性を維持すること

なお、この目標は、平成 31 年度に実施した比較的温度が低い坑井に対しての現地実証試験に向けて、設定したものを例として示している。実際に使用する際には、設定条件および目標値を坑井条件に合わせて設定する必要がある。

また、溶解水として使用する水の分析例を表 2 に示す。セメントを溶かす用水についても塩分濃度やカルシウム濃度などの性状を把握しておくことが重要である。

表 2：現地の作液水の分析結果(例)

分析項目		測定値
pH	-	7.1
Cl^-	mg/ ℓ	36
Ca^{2+}	mg/ ℓ	9.0
Mg^{2+}	mg/ ℓ	3.9

3-2. 水中不分離セメントの性状試験項目について

「3. 水中不分離セメントの坑井への適用にあたり」で記述したように室内試験での確認事項としては、スラリーの ①比重、② 粘性(流動特性)、③ 遊離水、④ 脱水量、⑤ シックニングタイム、⑥ 固化後のセメントの硬さ(圧縮強度)などがあげられる。

水中不分離セメントの地熱井への適用に際し、併せて、フロー試験、水中分離度試験、透視度試験を組み込み、水中不分離性に関しても試験を実施した。

表 3：水中不分離セメントの評価に用いた試験項目

試験項目	規格名	規格番号
フロー試験	エアモルタルおよびエアミルクの試験方法	JHS 313-1192 シリンダー法
水中分離度試験	コンクリート用水中不分離性混和剤品質規格	JSCE-D 104-2013
透視度試験	日本工業規格　工場排水試験方法	JIS K 0102
粘性測定	Determination of Rheological Properties and Gel Strength using Rotational Viscometer	API RP 10B-2
シックニングタイム	Well-simulation Thickening Time Tests	API RP 10B-2
一軸圧縮強度	Well-simulation Compressive-strength Tests	API RP 10B-2
遊離水	Free-fluid Test with Static Period at Ambient Temperature	API RP 10B-2
脱水量	Static Fluid-loss Tests	API RP 10B-2

3-2-1. 試験装置および機器

上記、水中不分離セメントの評価のための試験に使用した試験装置、機器および試験方法について以下に記載する。

3-2-1-1. フロー試験

フロー試験は、施工現場においてスラリーの流動性を簡便かつ短時間に測定するための手段として、広く用いられている試験である。試験機器として、シリンダーフロー測定器（内径 80mm、高さ 80mm の円筒容器）と塩ビ板（400mm×400mm）を用いる。

図 3 に、シリンダーフローの外観を示す。

図 3：シリンダーフローの外観

以下に、試験手順を示す。

1. 塩ビ板の中心にシリンダーフロー測定器を置き、作液したスラリーを充填し、液面を水平にする。
2. 測定器を持ち上げ、その際に形成されるスラリーの広がり幅（フロー値）を測定する。

図 4 に、フロー試験の試験前と試験後の状況写真を示す。

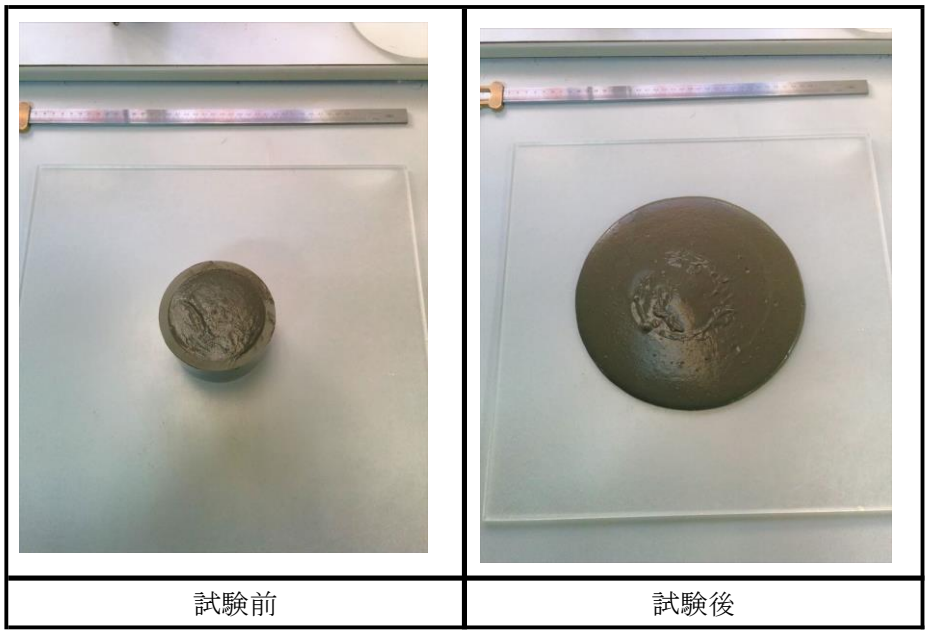


図 4：フロー試験の試験前と試験後の状況写真

3-2-1-2. 水中分離度試験

水中分離度試験は、水中不分離性コンクリートを水中に自由落下させたときの浮遊物質量と pH を測定し、その水中分離度を評価する試験である。

試験機器としては、試料を水中に投入するための投入容器とヘラを用いる。また、水を入れるための高さ約 150mm のガラス製のビーカー（容量 1,000m ℓ ）も用いる。

図 5 に、水中分離度試験の状況写真を示す。

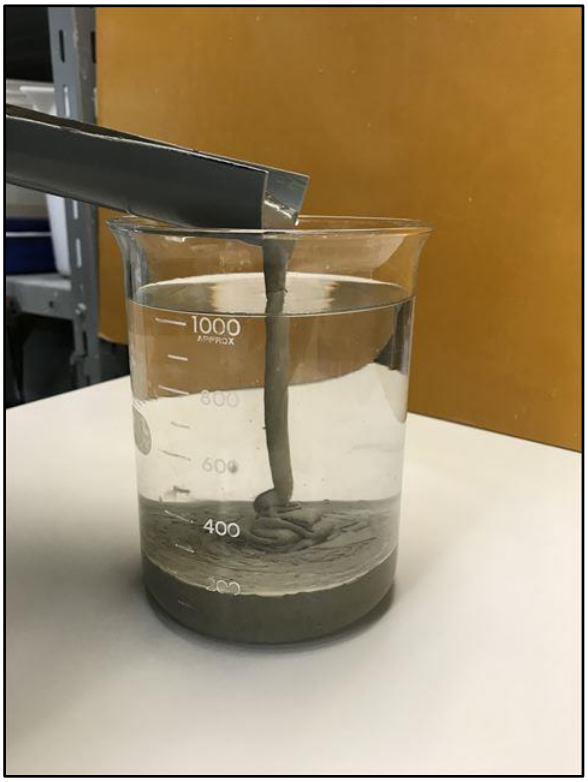


図 5：水中分離度試験の状況写真

・被検水の作製

1. 1,000mℓのビーカーに、20±2℃の蒸留水を 800mℓ入れる。
2. 試料 500g を、投入容器に計り取る。
3. 投入容器に採取した試料を、ヘラを用い、20～30 秒の間に水面から静かに自由落下させる。
4. 水中落下終了後 3 分間静置した後、吸引装置を用い、沈下した試料を乱さないように、静かにビーカー内の水を約 600mℓ分取する。この操作は、1 分以内に行う。
5. 分取した水の約 200mℓを pH 試験用の被検水として使用する。残りを浮遊物質量の被検水とする。

・浮遊物質量の測定

1. ろ過材を時計皿の上に置き、105～110℃の乾燥機中で乾燥し、放冷した後、その質量を量る。
2. 被検水を均一に混合し、約 300mℓをメスシリンダーに分取し、その容積を読み取る。
3. ろ過材をろ過器に取り付け、分取した被検水を吸引ろ過する。付着物質の量が無視できる程度になるまで器壁に付着した物質を蒸留水でろ過材上に数回洗い落とす。
4. ピンセットなどを用い、ろ過材をろ過器から注意して取り出し、時計皿に移し、105～110℃の乾燥機中で 2 時間乾燥し、放冷した後、その質量を量る。

・pH の測定

1. pH 計を、規定に従って校正する。
2. pH 計の検出部を、蒸留水で繰り返し 3 回以上洗い、きれいな紙などでぬぐう。
3. 被検水に pH 計の検出部を浸し、指示値が安定したときの pH 値を読み取る。

水中分離度試験では、目視で被検水の濁り具合を確認した。そのときの判断基準は、表 4 を目安として評価を行った。

表 4：水中分離度試験における被検水の判断基準

状態	判断基準
良好	ほぼ透明
濁りあり（小）	透明ではないが、若干濁っている
濁りあり（中）	濁りあり（小）と濁りあり（大）の中間
濁りあり（大）	かなり濁りが強いが、ビーカー奥の背景が確認できる
不良	かなり濁りが強く、ビーカー奥の背景が確認できない

3-2-1-3. 透視度試験

透視度試験は、透視度計を用い、濁水の透明の度合を測定する試験である。濁水をシリンダー内に注いだのち、底部に置かれた標識を明確に認めることができる時の水柱の高さを計り、1cm を 1 度として度数を求める。

図 6 に、透視度計の外観を示す。

以下に、試験手順を示す。

1. 透視度計に濁水を注ぐ。
2. 透視度計を上からのぞきながら、下側のコックを開き、少量ずつ濁水を排出する。
3. 透視度計の内底に置かれた“二重十字マーク”が明確に見えた時点で、排水を止める。
4. この時の濁水の高さより透視度を求める。(水が濁っているほど透視度は小さくなる)

図 6：透視度計の外観

なお、本試験においては、透視度計の値を測定し、換算表を用いて浮遊物質量に換算する手法を採用した。

透視度は、透視度計を用いる事で、現場でも手軽に測定できるという利点がある。

しかし、透視度計を用いない場合、吸引器や乾燥器などの装置が必要となり、測定に長い時間を要する。

よって、透視度計を用いることで浮遊物質量の値に若干の誤差が生じる可能性があるものの、その分試験に要する時間を大幅に短縮するに至った。

表 5 に、透視度計と浮遊物質量の換算表を示す。

表 5：透視度計と浮遊物質量の換算表

推定値

透視度 (cm)	推定BOD (mg/L)	推定COD (mg/L)	推定SS (mg/L)
30	19	23	38
29	21	25	41
28	23	28	45
27	26	30	48
26	28	33	52
25	31	37	57
24	35	41	62
23	39	45	67
22	43	49	72
21	48	54	79
20	53	60	85
19	59	66	92
18	65	73	100
17	72	80	109
16	80	88	118
15	89	98	128
14	99	107	139
13	110	118	151
12	122	131	163
11	135	144	177
10	150	159	192
9	167	175	208
8	185	193	226
7	205	212	245
6	228	234	266
5	253	258	288
4	281	284	313
3	311	313	339
2	346	345	368
1	384	380	399

推定式(一般用)

透視度(cm)をxとしたとき、

$BOD = 425.79e^{-0.1042x}$

$COD = 419.07e^{-0.0972x}$

$SS = 432.55e^{-0.0812x}$

3-2-1-4. 粘性測定

セメントスラリーの流動特性を把握するため、粘性測定を行った。水中不分離性混和剤を含んだセメントスラリーは、粘性が高い傾向を示す。そのため、一般的な粘性測定装置では目盛りが振り切れ、測定が困難である。そこで、装置内部のスプリングの強度を高めた、特殊な Fann Model 35A(VG メータ)を用い、粘性測定を行った。

図 7 に、Fann Model 35A(VG メータ)の外観を示す。

図 7 : Fann Model 35A(VG メータ)の外観

以下に、試験手順を示す。

1. 専用のカップにスラリーを注いだ後、3rpm でロータを回しながら、ロータの刻線までカップを引き上げる。
2. 10 秒間回転させたのち、3rpm のダイヤルを読み取る。
3. 徐々に高い回転数に切り替え、各々の回転数でのダイヤルを読み取る。各回転数において、10 秒間経過した後、測定を行う。
4. ゲルを崩すため、300rpm で 1 分間混合を行う。
5. 10 秒停止後、3rpm で回し、最大のダイヤルの読みを記録する（10 秒ゲル)。
6. 10 分経過後、再び 3rpm で回し、最大のダイヤルの読みを記録する（10 分ゲル)。

3-2-1-5. シックニングタイム

シックニングタイムは、与えられたセメントスラリーが、その坑井の坑底温度と圧力条件下において、ポンプ可能な粘性を維持する時間を把握するために測定する。

試験装置は、高温高圧シックニングタイムテスターを用い、セメントスラリーの粘性が

100Bc（Bearden units of slurry consistency）に達するまでの時間を測定する。

図 8 に、高温高圧シックニングタイムテスターの外観を示す。

図 8：高温高圧シックニングタイムテスターの外観

以下に、試験手順を示す。

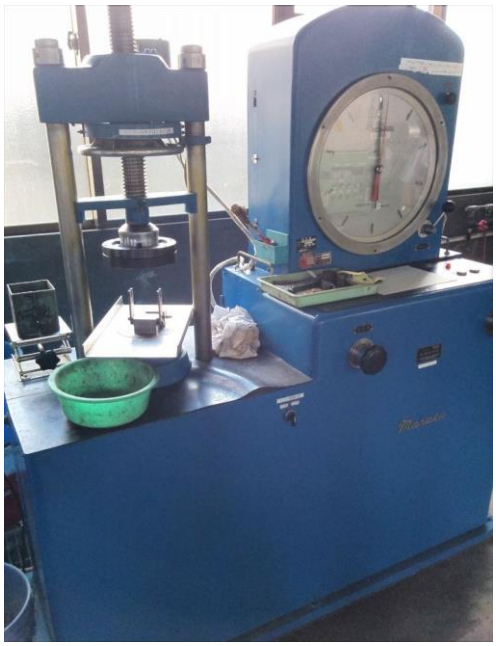
1. スラリーコンテナの上側より、準備したスラリーを満たす。
2. コンテナ内にセンタープラグをきつく閉めつける。
3. 表面のセメントを洗い流し、ふき取る。パドルが滑らかに回転することを確認する。
4. 圧力容器中にスラリーコンテナを設置し、ポテンショメータやその他装置を取り付ける。オイルの充填を開始する。
5. 圧力容器のヘッドアッセンブリを取り付け、熱電対を取り付け、軽くネジ締めする。圧力容器が完全にオイルに充填された後、きつくネジ締めする。
6. 初期圧力、温度条件をセットし、シックニングタイムテストを開始する。
7. シックニングタイムテスト中は、坑井シミュレーションのテストスケジュールに従い、温度、圧力条件を管理する。
8. 100 Bc に達するまでの時間を記録する。
9. テスト終了後、冷却を行い、圧力を開放する。その後、ポテンショメータとスラリーコンテナを取り出し、清掃する。

3-2-1-6. 一軸圧縮強度

地熱井におけるセメントスラリーは、最終的な長期強度が十分に発現することに加え、設定されたセメント硬化待機時間（目安として 6～24 時間）にて硬化が進み、次の掘削作業を続けるのに十分な強度が得られるよう、配合組成を検討しなければならない。そこで、実際の坑井で想定されている温度と圧力条件下で養生された硬化体を用い、強度測定が行われる。

図 9 に、セメント養生装置および一軸圧縮強度測定装置の外観を示す。

セメント養生装置



一軸圧縮強度測定装置

図 9：セメント養生装置および一軸圧縮強度測定装置の外観

以下に、試験手順を示す。

1. 型枠を組み立てる。
2. セメント養生装置に試験スケジュールを設定する。
3. 試験用セメントスラリーを混練する。
4. スラリーを型枠の 1/2 の深さまで注ぎ、突棒で 25 回均一にスラリーを突く。更にスラリーを型枠一杯になるまで注ぎ、同様の操作を行い、空気を追い出す。
5. 型枠をセメント養生装置にセットし、温度計を取り付ける。その後、セメント養生装置の密閉作業を速やかに行う。
6. 養生温度、養生時間毎に定められたスケジュールに従い、養生を開始する。
7. 各養生時間の 1 時間 45 分前にヒーターを切り、圧力を維持しながら 30 分放冷する。その後、冷却バルブを開放し、養生終了 45 分前まで冷却を続ける。
8. 養生終了 45 分前に、試料をセメント養生器から取り出し、27℃±3℃を維持した水槽に浸す。
9. 養生終了時間に試料を取り出し、一軸圧縮強度を測定する。

3-2-1-7. 遊離水

遊離水は、2 時間静置後のセメントスラリーの表面に遊離した水の量を測定する試験である。遊離水が多いと、セメント硬化中にセメント粒子の沈降やウォーターブロックが生じやすくなり、坑井トラブルの原因となる。そのため、遊離水の発生を極力抑えるように調整する必要がある。

API 規格では、クラス G と H セメントの遊離水を 1.4%以下に規定しているが、坑井元で使用するセメントスラリーにおいても、遊離水を 2%以下に調整することが望ましい。

図 10 に、遊離水測定時の写真を示す。

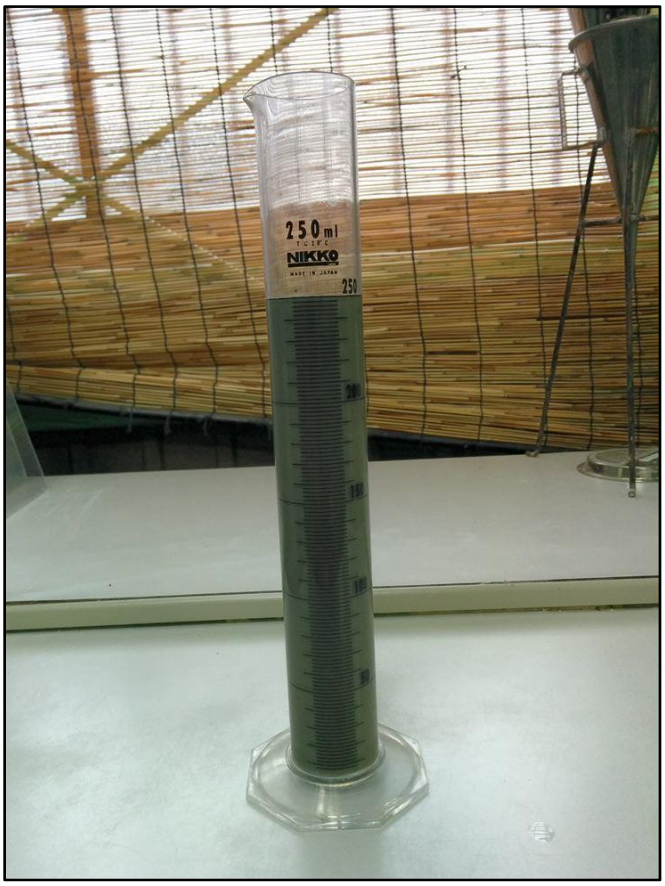


図 10：遊離水測定時の写真

以下に、試験手順を示す。

1. 試験用セメントスラリーを混練する。
2. 250mℓ のメスシリンダーに、250mℓ までスラリーを注ぎ、2 時間放置する。
3. 2 時間±1 分後、遊離水の量を、0.2mℓ 刻みで計測する。
4. 遊離水の量をパーセントで表記する。

3-2-1-8. 脱水量測定

一般的に、セメントスラリーの脱水量は非常に多く、70kgf/cm2×30 分で試験した場合、1,500～2,000mℓ 程度の脱水量を示すことが多い。その場合、脱水調整剤を添加することで、

脱水量を減らすことが可能となる。セメントスラリーの脱水量の測定においては、ろ紙ではなく、325 メッシュ（44 ミクロン）の金網を使用する。

図 11 に、高温高圧脱水試験器の外観を示す。

図 11：高温高圧脱水試験器の外観

以下に、試験手順を示す。

1. 加圧用の窒素ガスを準備する。
2. 加熱用ジャケットにセルを入れ、試験温度まで事前に加熱を行う。
3. 試験用セメントスラリーを混練する。
4. 大気圧式または加圧式コンシストメータを用い、試験温度までスラリーを加熱する。
5. ボトムバルブを閉め、セルにスラリーを注ぐ。
6. スクリーン、O リング、エンドキャップを確実に取り付ける。
7. セルの上部に、熱電対を取り付ける。
8. 圧力供給ラインにて、7MPa±0.3MPa まで加圧し、トップバルブを開ける。
9. ボトムバルブを開放し、直後にタイマーにて時間を計測する。テスト中は、任意の温度と 7MPa±0.3MPa の圧力を保つ。
10. 30 秒, 1, 5, 10, 15, 20, 30 分後の脱水量を記録する。
11. 30 分後またはセル内部からの液体の流出が終了した時点で試験を終了する。
12. 十分にセルを冷却し、圧力を開放する。
13. ケーキの厚さを計測し、状態を確認する。

3-3. 水中不分離セメントの基本的な性状

本委託事業で行われた実験に基づき、スラリー性状の傾向を示す。なお、本事業では、セルロース系水中不分離性混和剤を 1 種、界面活性系水中不分離性混和剤を 1 種選定し、各種性状試験を実施しているが、現場実証試験では、界面活性系水中不分離性混和剤を使用したため、界面活性系水中不分離性混和剤を中心に紹介する。また、これ以降、セルロース系水中不分離性混和剤を「C 系混和剤」(表などでは「C 系」)、界面活性系水中不分離性混和剤を「S 系混和剤」(表などでは「S 系」)と記す。

3-3-1. 水中不分離性の測定

まず、水中不分離性混和剤の混入割合を変化させ、水中不分離性の確認を行うとともに、水中不分離性混和剤の適正添加量を検討したので、結果を示す。

表 6：水中不分離性の確認

使用セメント	OPC	OPC	OPC	OPC	OPC	OPC	OPC	GWC	GWC
S 系混和剤	2%	2.5%	3%	1.5%	2%	3%	0%	3%	0%
比重	1.60	1.60	1.60	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80
水中不分離性（目視）	濁りあり（小）	濁りあり（中）	良好	濁りあり（小）	良好	良好	不良	良好	不良
浮遊物質量	85	180	38 以下	121	38 以下	38 以下	204	38 以下	230
pH	10.48	10.98	9.60	10.99	9.81	9.67	12.39	9.15	12.16

普通ポルトランドセメントから作液した S 系混和剤を使用した水中不分離セメントにおいては、スラリー比重 1.80 の場合、清水に対して 2%以上添加することで、水中不分離性が良好となることを確認した。ただし、十分な水中不分離性を確保するには、3%が適切であると評価した。

スラリー比重 1.60 の場合、清水に対して 2%および 2.5%添加では、十分な水中不分離性が得られないことを確認した。そのため、十分な水中不分離性を確保するには、3%が適切であると評価した。

また、地熱井セメントにおいても、同様のことが言えると考えられる。

なお、地熱井セメントをベースとした水中不分離セメントと普通ポルトランドセメントをベースとした水中不分離セメントにおいては、水中不分離性、浮遊物質量、pH、遊離水の試験結果に大きな違いは見られないと判断した。

3-3-2. 水中不分離セメントの一軸圧縮強度

セメント養生器および一軸圧縮強度測定装置を用い、一軸圧縮強度を測定した。

既存の逸泥対策用セメントスラリーと比較を行うため、水中不分離剤を含まない一般的な逸泥対策用セメントスラリーを作液し、同様に試験を行った。

スラリー比重は、全て 1.80 で試験を行った。また坑底静置温度を、30℃、80℃、150℃に設定し、養生時間は 24 時間とした。坑底静置温度 30℃および 80℃においては普通ポルトランドセメントを、坑底静置温度 150℃においては地熱井セメントを使用した。

表 7：一軸圧縮試験結果

使用セメント	OPC	OPC	GWC	GWC
比重(sg)	1.80	1.80	1.80	1.80
水中不分離剤	3%	0%	3%	0%
一軸圧縮強度 (MPa@24hr)	13.3 @30℃	12.1 @30℃	----------	----------
	24.4 @80℃	20.1 @80℃	----------	----------
	----------	----------	32.2 @150℃	35.1 @150℃

セメントの種類に違いがあるものの、坑底静置温度（養生温度）が高くなるにつれ、一軸圧縮強度が高くなる傾向を確認した。

また、いずれの試験結果においても、一般的な逸泥対策用セメントスラリーとして用いられている「不分離剤無し」と、「不分離剤」を添加したときの一軸圧縮強度が同等の強度を示すことを確認した。

3-3-3. 粘性(流動特性)試験およびシリンダーフロー試験の傾向

粘性(流動特性)およびフロー値に関し、試験を行ったので、その結果を示す。

表 8：粘性およびシリンダーフロー測定結果

使用セメント	OPC	OPC	GWC	GWC
水中不分離性混和剤	なし	S 系混和剤 3%	なし	S 系混和剤 3%
比重	1.80	1.80	1.80	1.80
シリンダーフロー値	410 x 415	298 x 301	395 x 395	334 x 334
VG メータ				
θ 600	69	665	73	395
θ 300	44	830	51	525
θ 200	38	735	43	555
θ 100	27	515	35	455
θ 6	13	60	18	85
θ 3	9	40	12	55

表 8 にて示すように、水中不分離性混和剤を混入した場合は、総じて粘性が高くなる。このことより、ポンピング性およびハイドロリクスに注意する必要があるといえる。

なお、OPC ベースの水中不分離セメントと GWC ベースの水中不分離セメントを比較すると、シリンダーフローは、地熱井セメントを用いたスラリーにて、大きくなる傾向、また、VG メータの測定結果は、地熱井セメントを用いたスラリーにて、粘性が低くなる傾向となった。

3-3-4. 遊離水・脱水量について

遊離水測定器具及び脱水試験器を用い、不分離剤を用いたセメントスラリーと含まないスラリーの遊離水および脱水量を測定した。

これらの試験は、API RP 10B-2 にて規格されており、通常セメントスラリーに対して実施される試験項目である。

表 9：遊離水および脱水量の測定結果

使用セメント	OPC	OPC	GWC	GWC
比重	1.80	1.80	1.80	1.80
水中不分離性混和剤	なし	S 系混和剤 3%	なし	S 系混和剤 3%
遊離水(%)	1.0	0	0.8	0.5
脱水量(mℓ/30min)	1732	762	1234	1043

水中不分離剤を加えたスラリーは、遊離水が生じなかった。

脱水量については、水中不分離性混和剤を使用した場合、762mℓ/30 分であり、不分離剤を加えていないセメントスラリーよりは、脱水量が低くなった。

なお、OPC ベースの水中不分離セメントのほうが、GWC ベースの水中不分離セメントよりも脱水量が少なくなった。

3-3-5. セメント硬化時間(シックニングタイム)について

シックニングタイムテスターを用い、シックニングタイムを計測した。シックニングタイムを計測することで、与えられたセメントスラリーが、その坑井の坑底温度と圧力条件下において、ポンプ可能な粘性を維持する時間を把握することができる。

表 10：シックニングタイム(坑底循環温度 27℃)測定結果

No.	水中不分離剤	スラリー比重	シックニングタイム
1	S 系混和剤	1.80	30Bc/174 分
2	なし	1.80	100Bc/166 分

シックニングタイム試験は、コンシステンシーが 30Bc に達するまでの時間を計測し、ポンプ圧送可否の目安を得る試験である。しかし、水中不分離剤セメント（表 10 の No.1 試験）を用いてシックニングタイムを測定した場合、測定開始直後よりポンプ圧送可否の目安とされる 30Bc を上回る値を示した。

一方、水中不分離剤なしの配合組成においては、測定開始直後から 10Bc 以下を維持した後、徐々にコンシステンシーが上昇するため、正確なシックニングタイムを確認できた。

シックニングタイムの検証を行うため、以下に検証に用いたスラリー組成およびシックニングタイム検証結果を示す。

表 11：検証試験における配合組成および試験結果

配合名			GWC 通常測定	GWC 2hr 静置後	OPC 通常測定	OPC 2hr 静置後
配合組成	GWC	kg	100		-	
	OPC	kg	-		100	
	比重	sg	1.8		1.8	
	溶解水	kg	45.6		49.4	
	脱水調整剤	kg	3		3	
	GWC 用遅硬剤	kg	0.3		0.6	
	S 系混和剤	kg	1.6		1.6	
	消泡剤	kg	0.3		0.3	
	出来上がり	ℓ	83.8		86.1	
試験結果	静置時間	分	-	120	-	120
	TT 計測温度	℃	50	50	40	40
	TT, 30Bc	時間：分	4:00	5:45	4:45	測定不能
	TT, 100Bc	時間：分	5:23	7:10	5:53	7:15
	100Bc 到達時間の差	時間：分	-	+1:47	-	+1:22

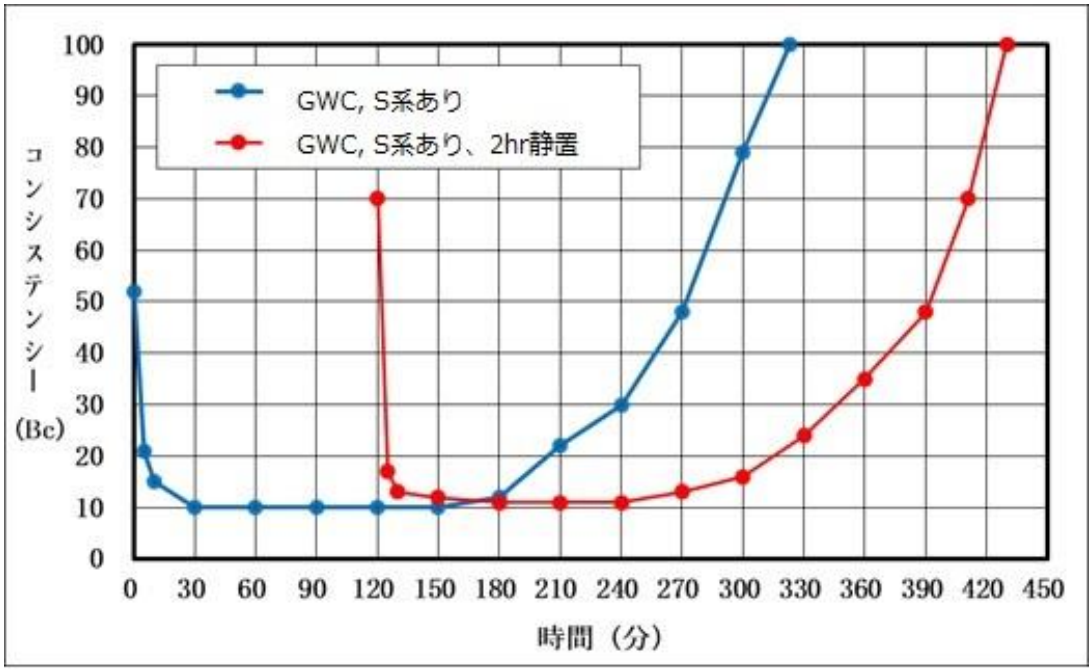


図 12：GWC を用いた配合組成におけるシックニングタイム検証結果

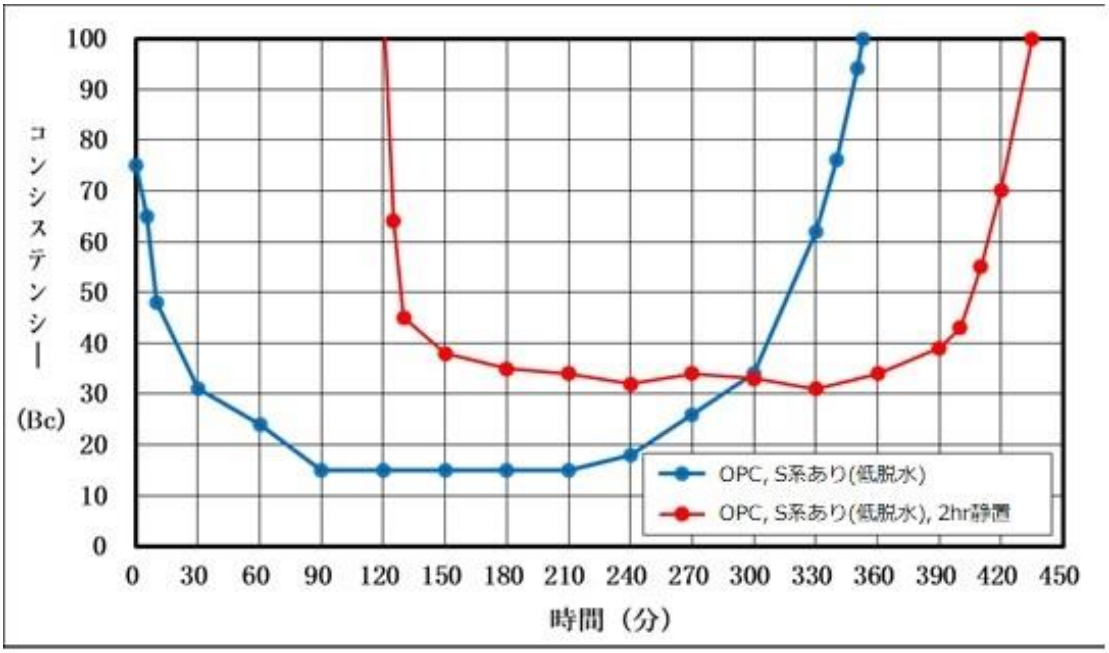


図 13：OPC を用いた配合組成におけるシックニングタイム検証結果

図 12 および図 13 から、

- 水中不分離セメントは、ベースのセメントが GWC であろうと OPC であろうと、ミキシング当初は高いコンシステンシーを示す。ある程度の撹拌が進むと、普通のセメントスラリーと同様のコンシステンシー上昇がみられる。
- GWC がベースセメントの場合と OPC がベースセメントの場合、撹拌開始時のコンシステンシーの降下具合は、若干違い、OPC をベースセメントとした場合のほうが、コンシステンシーの降下は、若干緩やかだった。
- OPC と水中不分離性混和剤を用いた配合組成において、スラリーを 2 時間静置した場合、コンシステンシーが 30Bc を下回らなくなることが確認された。
- 現場作業で使用するセメントミキシングタンクにも、混合能力の高い撹拌装置を備え、水中不分離性混和剤を含むセメントスラリーの水中不分離性が極端に失われない程度の撹拌を継続することが望ましいと評価した。

なお、シックニングタイムの性状が水中不分離セメントでは通常のセメントスラリーとはかなり異なることが判明しており、平成 31 年に実施した現地実証試験ではセメントスラリーの送入に時間が掛かり、セメントスラリーの全量を坑内に送入出来なかったトラブルが発生しているため、更なる検証を行っている。この検証については、「6.【別添資料】樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間の検討」にて示す。

3-3-6. 水中不分離セメントの耐熱温度について

水中不分離セメントがどの程度の温度環境まで水中不分離性を保持できるかを確認した。試験方法としては、室温にてセメントスラリーを混錬した直後に、50℃または 80℃の温水をビーカーに準備し、水中分離度試験を実施した。

表 12：温水を用いた水中分離度試験の配合組成および試験結果

配合名			GWC＋S 系 3%	OPC＋ S 系 3%	GWC＋ S 系 4%	GWC＋C 系 1.2%
配合組成	GWC	kg	100	-	100	100
	OPC	kg	-	100	-	-
	比重	sg	1.80	1.80	1.80	1.80
	溶解水	kg	45.6	49.4	48	49.8
	脱水調整剤	kg	3	3	-	-
	GWC 用遅硬剤	kg	0.3	0.6	-	-
	S 系混和剤	kg	1.6	1.6	1.9	-
	C 系混和剤	kg	-	-	-	0.6
	消泡剤	kg	0.3	0.3	0.3	0.1
	出来上がり	ℓ	83.8	86.1	83.5	83.6
水中分離度試験結果	温度	℃	50	50	50	50
	目視確認	-	良好	濁りあり (中)	濁りあり (小)	濁りあり (小)
	透視度	度	30↑	6.4	24.7	18.3
	浮遊物質量	mg/ℓ	38 以下	258	58	98
	pH	-	9.74	11.63	9.99	10.05
水中分離度試験結果	温度	℃	80	80	80	80
	目視確認	-	濁りあり (中)	濁りあり (大)	濁りあり (中)	濁りあり (中)
	透視度	度	6.4	3.2	8.4	6.7
	浮遊物質量	mg/ℓ	258	334	219	251
	pH	-	11.14	11.54	10.79	11.04

温水の温度を 80℃にした場合、特に水中不分離性が悪化するとの結果が得られた。

ただし、試験時の状況写真（図 14 および図 15）が示すように、大部分のセメントスラリーはビーカーの下部に堆積しており、温水中にかなりの量のセメントスラリーの固形分が分散したような状態ではない印象を受ける。これは、水中不分離性が完全に失われず、むしろある程度の水中不分離性が維持されていると考えられる。

GWC＋S系（現地実証試験配合）

OPC＋ S系（現地実証試験配合）

GWC＋ S系 4%

GWC＋C系 1.2%

図 14：水中分離度試験の状況写真（温水条件：50℃）

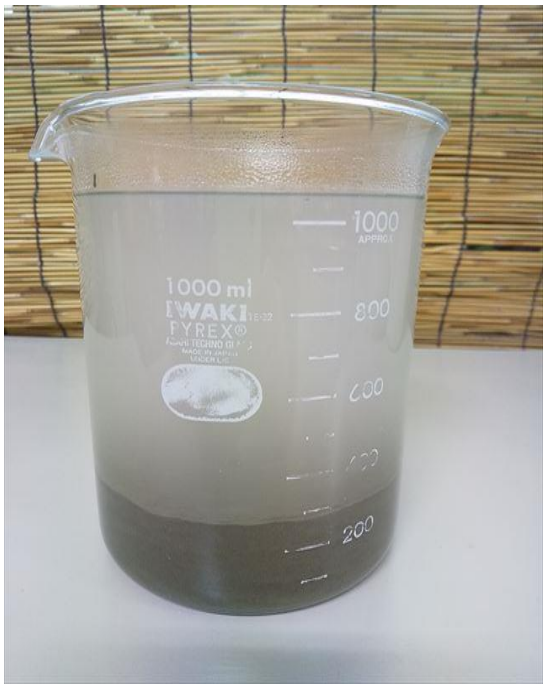
	
GWC＋S系（現地実証試験配合）	OPC＋ S系（現地実証試験配合）
	
GWC＋ S系 4%	GWC＋C系 1.2%

図 15：水中分離度試験の状況写真（温水条件：80℃）

3-3-7. 粗骨材を併用した場合の水中不分離セメントの性状について

粗骨材は、逸泥層に入り込み、逸水を止めるや逸水量を軽減するなどの効果が期待できるため、水中不分離セメントに混錬した場合のスラリー性状を検証した。

ここで使用した粗骨材は以下になる。

- **骨材 M**：今回使用した骨材は、絶乾密度は 1.45g/cm3 とかなりセメントスラリーに近い。軽量コンクリートの骨材として国内での使用実績が多数ある。なお、カタログにおける骨材 M の粒度分布は以下のようになる。

表 13：骨材 M の粒度分布(ふるい通過率)

粒度(ふるい通過率)			
20mm	15mm	10mm	5mm
100%	95～100%	40～65%	0～15%

- **骨材 P：**この骨材は非常に軽く、0.1kg/l 程度の重さしか無い。比重に換算すると 0.2～0.4 である。国内では軽量コンクリートの骨材として幅広く使われており、海外では軽量セメントによるセメンチングにも利用実績があることから選定した。なお、カタログにおける骨材 P の粒度は 15.0～3.0mm となる。

表 14：骨材併用試験結果（水中不分離剤：S 系混和剤 、基本スラリー比重 1.80）

組成※				M 5% S 系 3%	M 10% S 系 3%	M 20% S 系 3%	P 2.5% S 系 3%	P 5% S 系 3%	P 10% S 系 3%
配合組成	普通ポルトランドセメント		g	100	100	100	100	100	100
	清水		mℓ	53.8	53.8	53.8	53.8	53.8	53.8
	S 系混和剤		mℓ	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
	消泡剤		mℓ	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	速硬剤（塩化カルシウム）		g	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	骨材 M		g	4.28	8.55	17.1	-	-	-
	骨材 P		g	-	-	-	2.14	4.28	8.55
	出来上がり量		mℓ	85.4	85.4	85.4	85.4	85.4	85.4
試験結果	シリンダーフロー		mm	336 346	278 283	281 281	328 332	260 268	231 246
	水中分離度	目視観察	-	良好	良好	良好	濁りあり（中）	濁りあり（中）	濁りあり（中）
		透視度計	cm	30↑	30↑	30↑	9.8	14.3	16
		浮遊物質量	mg/ℓ	38 以下	38 以下	38 以下	195	135	118
		pH 測定	-	11.26	10.19	10.26	12.5	11.4	11.41
	スラリー比重		sg	1.79	1.76	1.77	1.67	1.61	1.52

上記試験結果より、以下の傾向を確認した。

- S 系混和剤に骨材 M を添加した試験結果より、S 系混和剤 の添加量 3%（対水）にて、十分な水中不分離効果が得られることを確認した。
- 同様に、S 系混和剤 に骨材 P を添加した試験結果においても、S 系混和剤 の添加量 3%（対水）で試験を行ったが、良好な水中不分離効果を得ることができなかった。これは、セメントスラリー自体の水中不分離性が失われたというよりは、投入したセメントスラリーの表面から、骨材 P が上側（水面）に浮遊する現象により、結果として被検水が濁るという状況であった。この現象は、結果は表示していないが C 系混和剤では生じなかったため、S 系混和剤 の増粘機構に由来する現象であると推測された。

- S 系混和剤 を用いたときも、骨材 P を添加することで、スラリー比重が低下する傾向が見られた。骨材 P を 10%（対出来上がり量）添加した場合、スラリー比重が 1.52 まで低下した。
- シリンダーフローの値は、骨材 M を用いた場合 280～340mm 程度を、骨材 P を用いた場合 230～330mm 程度を示した。この事より、骨材 P を使用した場合、骨材 M 使用時よりもシリンダーフローが小さくなる傾向を確認した。また、結果はここでは表示していないが C 系混和剤 添加時よりも全体的にフロー値が大きくなる傾向が見られた。

また、地熱井セメントでも骨材 M を使用して、性状試験を行っているので、その結果を示す。

表 15：骨材の有無の場合の試験結果の比較

番号				①	②	③	④
セメントの種類				地熱井セメント			
配合組成	GWC		kg	100			
	溶解水		kg	45.6			
	脱水調整剤		kg	3			
	GWC 用遅硬剤		kg	0.3			
	S 系混和剤		kg	1.6			
	消泡剤 30C		kg	0.3			
	出来上がり		ℓ	83.8			
	骨材 M （外割り濃度）		kg	0 0%	4.2 (5%)	8.4 (10%)	16.8 (20%)
試験結果	フロー値		㎜	284 x 290	282 x 284	276 x 278	278 x 278
	水中分離度試験	目視確認	-	良好	良好	良好	良好
		透視度	度	30↑	30↑	30↑	30↑
		浮遊物質量	mg/ℓ	38 以下	38 以下	38 以下	38 以下
		pH	-	9.96	9.62	9.7	9.87

上表の試験結果より、フロー値は、骨材の添加量の増加に伴い、若干小さくなる傾向を確認した。これは、骨材を加えることで単位体積当たりの水比が小さくなることが影響したためと考えられた。

また骨材無添加（上表の番号①）の配合組成における pH は 9.96 であった。よって、水中分離度試験においては、骨材を用いた時の pH が低下し、良好な水中不分離性が得られることを確認した。これは、骨材を加えることで、スラリー中の粘着力が高まるため、水中不分離性が良好になると解釈された。しかし、骨材の添加量が 5%、10%、20%と増加するに

伴い、pH の値は次第に高くなる傾向が見られた。よって、骨材の添加量が 5%程度の場合、水中不分離性が最も良好となると評価した。

3-3-8. 粗骨材を含んだ水中不分離セメントの一軸圧縮試験について

「4. スラリーの挙動について」にて、水中不分離セメントの挙動試験について、記述するが、ここでは挙動試験実施後の模擬逸泥層に対し、硬化体の成形作業を行ったのち、深度毎における一軸圧縮強度試験を実施したので、結果を記述する。

ここで、一軸圧縮試験を行った試験片は以下の配合であった。

表 16：一軸圧縮試験の試験片

#	基材	水中不分離剤	粗骨材	不分離剤濃度
1	普通ポルトランドセメント	なし	無し	
2			M(20wt/vol%)	
3			P(10wt/vol%)	
4		S 系	無し	2%
5			M(20wt/vol%)	3%
6			P(10wt/vol%)	3%

挙動試験を終えたサンプルのうち、上表の 6 配合において整形作業を行い、一軸圧縮強度試験を実施した。次の表 17 に、一軸圧縮強度試験結果を示す。

硬化体サンプルの一軸圧縮強度試験を行った結果、以下の傾向が確認された。

- 全体的に、上部区間の硬化体の比重は低くなり、一軸圧縮強度も小さくなる傾向にある。これは、下部区間に比べ、上部区間の方が容器内部に充填された水と接触しやすいためと考えられた。
- 水中不分離剤を添加した場合、水中不分離剤を含まない配合組成よりも一軸圧縮強度が全体的に高くなる傾向を示した。
- 水中不分離剤を添加した組成では、骨材 P よりも骨材 M を併用したときの一軸圧縮強度が若干高くなる傾向にある。
- 骨材 P を混合した配合組成では、比重が低くなる傾向が見られた。
- 水中不分離剤と骨材を併用した配合組成では、上部から下部において全体的に骨材が分散している状況が確認できた。この事からも、水中不分離剤がセメントスラリーを均質化する機能を有することを確認した。

また、地熱井セメントでも骨材 M を使用して、一軸圧縮試験も行っているので、その結果を表 18 に示す。

表 17：挙動試験後のセメントスラリーの一軸圧縮強度試験結果

No.	骨材	区間	サンプル深度 cm		比重	一軸圧縮強度
			From	To	-	MPa
1	なし	1	0	5.115	1.38	1.3
		2	5.115	9.095	1.39	2.1
		3	9.095	14.45	1.42	3.6
		4	22.76	28.05	1.51	9.7
		5	28.05	33.06	1.54	13.3
		6	33.06	38.5	1.59	19.5
2	骨材M 20%	1	0	5.02	1.458	2
		2	5.02	10.075	1.518	4.7
		3	10.075	15.235	1.59	6.2
		4	23.51	28.47	1.704	14.9
		5	28.47	33.57	1.802	15.1
		6	33.57	38.9	1.679	3.3
3	骨材P 10%	1	0	5.05	1.347	1.1
		2	5.05	10.055	1.44	2.7
		3	10.055	15.245	1.532	5.7
		4	19.61	24.765	1.738	14.4
		5	24.765	29.79	1.828	16.9
		6	29.79	34.8	1.868	30.2
4	なし	1	0	4.965	1.35	1.1
		2	4.965	10.265	1.69	9
		3	10.265	15.115	1.76	18.8
		4	17.885	22.905	1.79	21.5
		5	22.905	27.985	1.79	29.1
		6	27.985	33.1	1.81	30.1
5	骨材M 20%	1	0	5.12	1.596	5.6
		2	5.12	10.21	1.675	10.8
		3	10.21	15.375	1.707	16.6
		4	21.725	26.95	1.695	16.8
		5	26.95	31.9	1.733	18.6
		6	31.9	37	1.737	23.7
6	骨材P 10%	1	0	5.23	1.364	2.1
		2	5.23	10.24	1.376	6.7
		3	10.24	15.22	1.47	10.6
		4	22.66	27.82	1.643	16.3
		5	27.82	32.89	1.689	19.2
		6	32.89	38	1.728	20.8

表 18：骨材の有無の場合の一軸圧縮試験結果の比較

番号			①	②	③	④
セメントの種類			地熱井セメント			
配合組成	GWC	kg	100			
	溶解水	kg	45.6			
	脱水調整剤	kg	3			
	GWC 用遅硬剤	kg	0.3			
	S 系混和剤	kg	1.6			
	消泡剤 30C	kg	0.3			
	出来上がり	ℓ	83.8			
	骨材 M （外割り濃度）	kg	0 0%	4.2 （5%）	8.4 （10%）	16.8 （20%）
一軸圧縮強度		℃/hr	100/16	100/24	100/24	100/24
		MPa	10.6	11.5	10.9	11.1

上表の試験結果より、骨材を最大で 20%まで添加した結果、一軸圧縮強度に大きな変化が見られないことを確認した。

試験当初、骨材を加えることで単位体積当たりの水比が小さくなるため、骨材の添加量を増やすに伴い、一軸圧縮強度が徐々に上昇することを想定していた。今回の試験で用いた骨材の濃度は最大で 20%（外割り）に設定したが、この濃度は一般的なコンクリートで用いられる骨材よりもはるかに低い濃度である。そのため、一軸圧縮強度に関しては、骨材が水中不分離性混和剤を有したセメントスラリーに与える影響は軽微であったと評価した。

4. スラリーの挙動について

4-1. 平成 30 年度の挙動確認試験

平成 30 年度は、基本的な水中不分離セメントの挙動を試験するために模擬坑井を使用して挙動の確認を行ったので、ここで紹介する。

4-1-1. 試験方法

本試験ではアクリルパイプにて 3 種類の模擬坑井を製作した。各模擬坑井によって試験方法を使い分けたが、例外については試験結果にて個別に述べる。

模擬坑井 A：外径 100mm、内径 90mm と50mm、内径 40mm のアクリルパイプを使用して 12-1/4”坑と 5”DP を模した模擬坑井を約 30%のサイズで製作した。12-1/4”坑を模したアウターパイプに 5”DP を模したインナーパイプを挿入した。アウターパイプの上部にはオーバーフロー分回収用の 1”ホースジョイントを設けた。この模擬坑井に清水を満たし、インナーパイプから手持ちの容器と漏斗を使用してセメントスラ リーを投入した。この際に、ホースジョイントからのオーバーフロー分を超えてアウ ターパイプの口元から水が溢れないよう注意しながらセメントスラリーを投入した。セメントスラリーの投入が終了し、模擬坑井内が落ち着いたらインナーパイプをスラリーと水の境界面より上に引き上げて経過を観察した。セメントスラリーの使用量は 2ℓ である。図 16 に模擬坑井 A の模式図を示す。

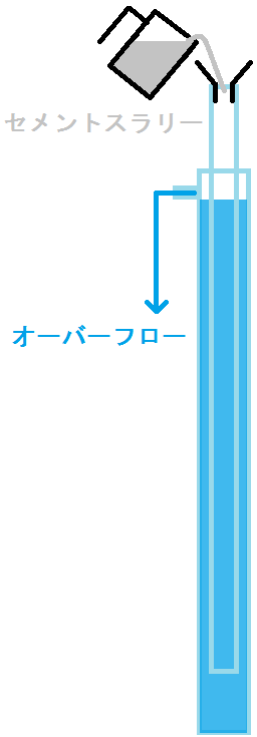


図 16：模擬坑井 A 模式図

模擬坑井 B：模擬坑井 A のアウターパイプ最下部に横向きで内径 40mm のパイプを設け、その先にフランジで内径 40mm、長さ 315mm のパイプを模擬逸泥層として接続した。この模擬逸泥層内にガラスビーズを詰め、ビーズのサイズによって逸水量を変化させることが出来るようにした。この模擬逸泥層のアウターパイプ側は 10mm×40mm のスリット状になっており、模擬逸泥層からカラスビースが出ないように前後は 5 メッシュの金網を挟んだ。ビーズサイズ 10mm の場合のみスリット側の金網を省略した。そしてモルタルポンプとインナーパイプをフレキシブルホースで接続してセメント スラリー送入ラインとした。この模擬坑井に準備として清水をポンプし、ポンプ内とフレキシブルホース内を清水で満たした。この際ホッパー内の清水が見えなくなるまでポンプした。その後模擬坑井に清水を満たしてからバルブを開けて逸泥状況を再現し、ホースジョイントから少しオーバーフローするように口元からの給水量を調整した。そして空のホッパーにスラリーを投入し、ホッパー内のスラリーが見えなくなるまでポンプした。その後清掃用のスポンジを後押し用のプラグとして投入してから後押し用の清水をホッパーに投入し、スポンジがインナーパイプに達するまで清水で後押しを行う。後押しが終了して模擬坑井内が落ち着いたらフレキシブルホースを取り外してインナーパイプを水とスラリーの境界面より上に引き上げて経過を観察した。セメントスラリーの使用量は 4 ℓ である。図 18 に模擬坑井 B の模式図を示す。

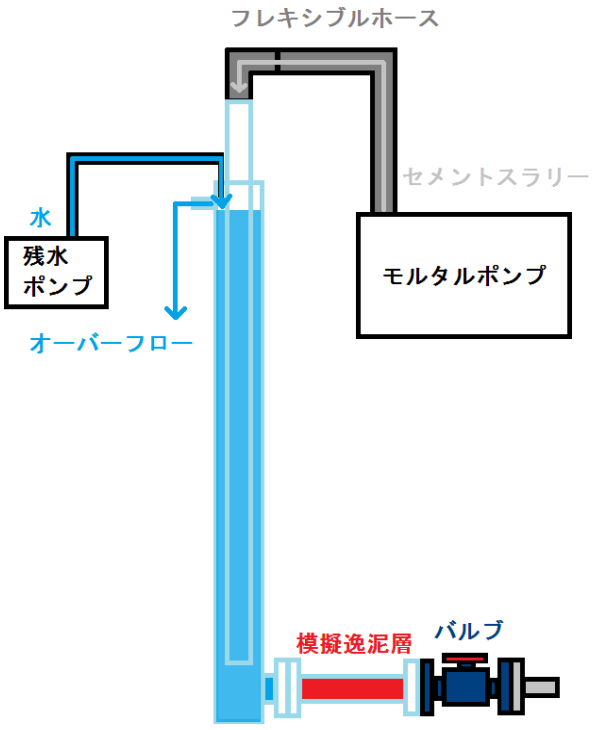


図 18：模擬坑井 B 模式図

図 17：模擬逸泥層 B 外観

模擬坑井 C：模擬坑井 B とほぼ同様だが、模擬逸泥層の形状が異なるタイプである。逸水層が上に伸びている場合を想定して模擬逸泥層を 90 度曲げて上に伸ばした。それ以外は模擬坑井 B と同様である。また、試験手順も模擬坑井 B の場合と同様である。図 20 に模擬坑井 C の模式図を示す。

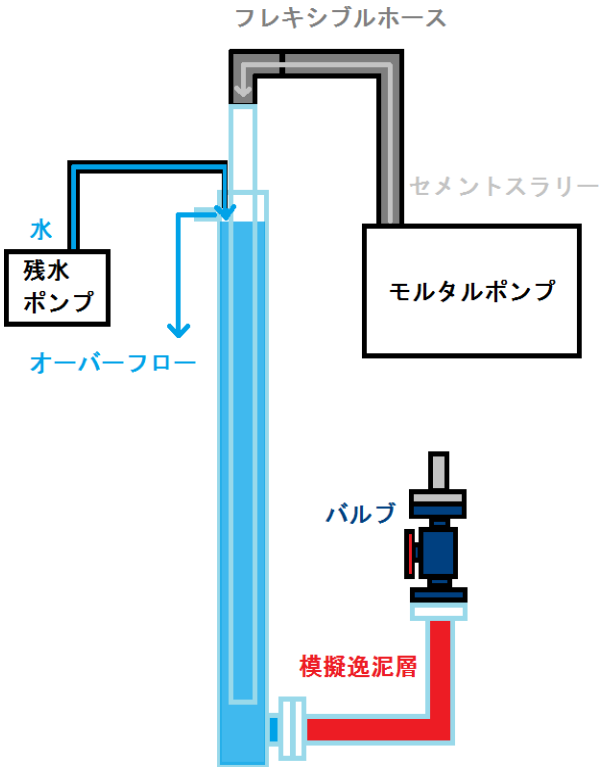


図 20：模擬坑井 C 模式図

図 19：模擬逸泥層 C 外観

模擬坑井 B&C における模擬逸泥層について

模擬逸泥層に充填するガラスビーズのサイズは 5mm,7mm,10mm を使用した。模擬坑井 B と模擬坑井 C の各ビーズサイズにおける各種データを表 19 に示した。2mm のビーズはテストしたところ透水性が低く、水中不分離剤を添加したセメントスラリーが浸透しなかったので実際の試験では使用しなかった。また、試験の最後により大きな逸水量になるよう模擬逸泥層に砂利を詰めた試験をいくつか実施した。砂利の外観を図 22 に示す。ビーズ粒径と逸水量はほぼ比例関係にあるので、砂利の逸水量からビーズ粒径に換算すると約 13mm であった。

表 19：各ビーズサイズにおける各種データ

ビーズ粒径 (mm)	模擬坑井	逸水量 (cm3/s)	ビーズ全重量 (g)	ビーズ容積 (cm3)	孔隙率 (%)	透水係数 (cm/s)	流速 (cm/s)	浸透率 (darcy)
2	B	77	633	253	36.0	1.03	6.1	1364
5	B	148	616	246	37.8	1.99	11.8	2634
7	B	246	598	239	39.6	3.30	19.6	4373
10	B	325	552	221	44.3	4.36	25.9	5779
砂利	B	430	515	211	46.7	5.77	34.2	7652
5	C	128.4	1192	477	37.8	5.21	10.2	6913
7	C	140.9	1157	463	39.6	5.72	11.2	7586

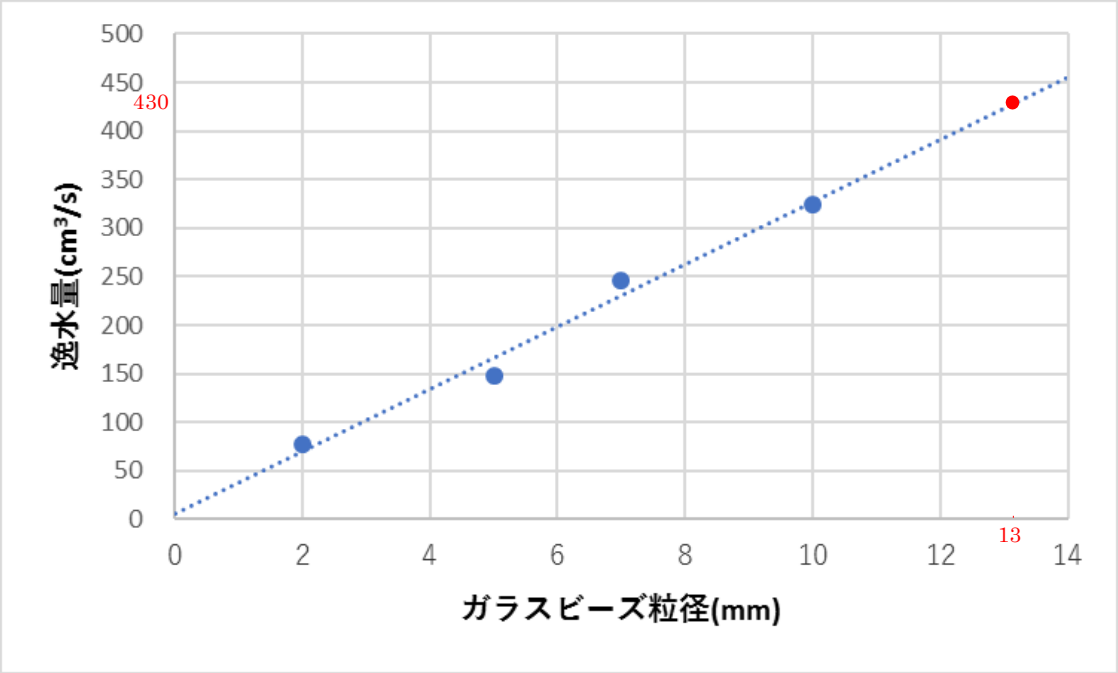


図 21：ビーズサイズと逸水量の相関関係

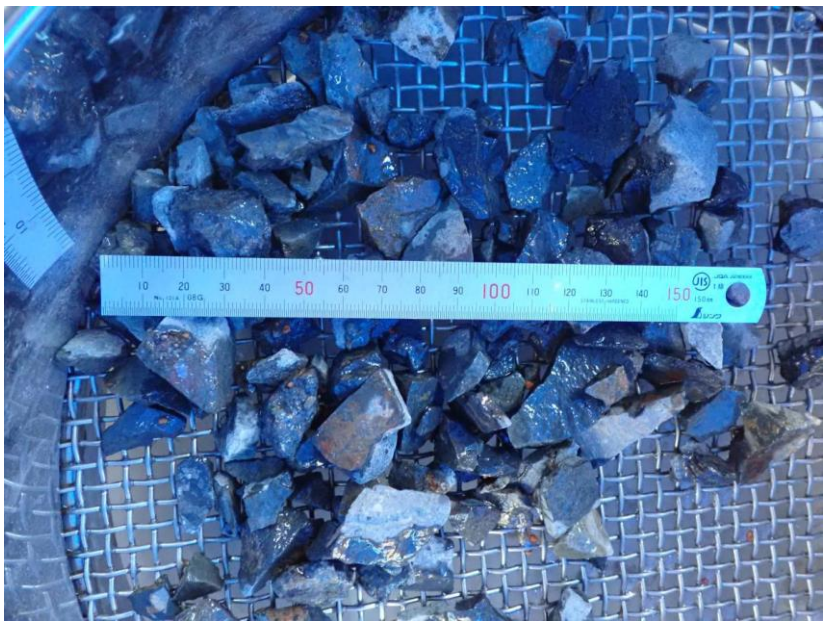


図 22：砂利外観

4-1-2. 試験結果

「まとめと考察」をここに記す。

- 水中不分離剤及び粗骨材を添加したセメントスラリーについて、模擬坑井を使用して水中での挙動を可視化した。
- 水中不分離剤を添加したセメントスラリーは水中不分離性を発揮している場合においてはほぼ全ての場合で模擬逸泥層を閉塞することが出来た。この結果より水中不分離剤は逸泥対策セメンチングに使用するのに一定の有効性があると考えられる。
- 骨材を添加する場合、水中不分離剤を添加していない普通のセメントスラリーでは水中で骨材が分離してしまうが、水中不分離剤を添加したセメントスラリーであればある程度骨材の分離を抑えられることを確認した。
- 水中不分離剤と骨材にも相性があり、S 系混和剤の場合は骨材 P や STOPLOSS、テルストップ等の骨材を添加すると水中不分離性が失われる傾向にある。これは骨材の吸水性が S 系混和剤の水中不分離性発現機構に影響を及ぼしているのではないかと考察される。骨材 M や砂利、テルプラグやテルマイカなどの吸水性の低い骨材では性状に変化を生じないことを確認した。また、試験結果は記載していないが C 系混和剤の場合は骨材 M を添加すると水中不分離性が若干低下するが、吸水性の高い骨材を添加しても性状に大きな変化がなく、非常に軽量な骨材 P を添加しても骨材の分離が生じなかった。
- ワーカビリティーについては今回の実験を通して S 系混和剤のほうが C 系混和剤より優れていると感じた。S 系混和剤の場合は練上がったセメントスラリー に S 系混和剤の溶液を添加して撹拌すれば均一なスラリーが出来上がるのに対し、C 系混和剤の場合はセメント溶解水に溶かしてからセメントを加えるためセメントがダマになりやすく、均一なセメントスラリーを作るのに習熟が必要だった。また、使用した機材の洗

浄などに関しても S 系混和剤の場合は付着性が低いため簡単に洗浄が可能だが、C 系混和剤は付着性が強いためホッパーやデリバリーラインの洗浄に気を使う必要があった。特に 2%添加の C 系混和剤を実験した際は付着性が非常に強く、デリバリーラインの洗浄に多くの時間を必要とした。

- 今回の試験ではポンプスピードが遅かったこともあり、水中不分離剤を添加したセメントスラリーは清水で後押しを行ってもセメントスラリーの大部分がデリバリーライン内に残ってしまった。この問題の解決策として、デリバリーライン洗浄用のスポンジを物理的な後押しとしてポンプすることでセメントスラリーを送った。実際の坑井に適用する場合にも何らかの対策が必要になる可能性がある。
- 粗骨材を添加した試験の多くの場合において 5mm や 7mm のビーズの場合よりも 10mm のビーズを使用した場合のほうが模擬逸泥層への浸透が少なくなる傾向にあった。この原因としてはビーズ粒径と骨材のサイズ比によるものだと考えられる。一般に 3 つの大きさが等しい半径 R の球に接する最小の球の半径は以下の式で求めることが出来る。

$$R\left(\frac{1}{cos30°}-1\right)=R\left(\frac{2}{\sqrt{3}}-1\right)\approx 0.15R$$

上式は模擬逸泥層のビーズ粒径の 15%の大きさの粒子がちょうどビーズ間の隙間のサイズであり、15%より若干大きな骨材が隙間を塞ぐのに最適なサイズだということを示唆している。この式を使用して計算した各ビーズサイズにおける接する最小の球の粒径の計算結果を以下の表 20 に示す。

表 20：各ビーズサイズにおける計算結果

ビーズ粒径 (mm)	接する最小の球の粒径 (mm)
5	0.75
7	1.05
10	1.50
13	1.98

この結果より、今回使用した骨材は 10mm ビーズや砂利の場合には最適な大きさだったが、5mm ビーズと 7mm ビーズの場合ではサイズが大きすぎたのではないかと考察される。

- いくつかの場合において、模擬坑井 B と模擬坑井 C で同一ビーズサイズだが模擬坑井 B より模擬坑井 C のほうが模擬逸泥層への浸透が多かった場合があった。これに関して、透水係数を計算すると模擬坑井 C は 5 前後となり、模擬坑井 B の 10mm ビーズの場合より大きいことが分かった。これは土柱長が長くなって高低差が減ったことで動水勾配が小さくなっても流量があまり変わらなかったことが原因である。しかし、なぜ流量があまり変化しなかったのかは検討の余地がある。

4-2. 水中不分離セメントの挙動試験

本試験では、現地実証試験で行ったパーフォレーション区間への水中不分離セメント圧入について、パーフォレーション孔からセメントが流出するのを確認することを目的とした。

また、平成 30 年度の試験では確認しきれなかった水中不分離セメントの挙動を明らかにすることを目的として、以下の項目について試験を実施した。

- 水中不分離セメントがパーフォレーション孔から流出することの確認
- 水中不分離セメントによるトップジョブセメンチングの作業性確認
- 界面活性系水中不分離性混和剤とセルロース系水中不分離性混和剤の作業性確認

ここでは、試験方法と結果のみを記述する。

4-2-1. パーフォレーション孔から流出確認

本試験では、現地実証試験で行ったパーフォレーション区間への水中不分離セメント圧入について、パーフォレーション孔からセメントが流出するのを確認することを目的とした。

4-2-1-1. 試験方法

アウターパイプ内に、底を閉じて側面に穴を開けたインナーパイプを挿入し、上部のホースジョイントからオーバーフローするまで清水を満たした。漏斗を使用してインナーパイプ内にスラリーを投入し、漏斗からスラリーが落ちきったらインナーパイプの口元まで水を満たし、スラリーが流出するようであれば口元に水を継ぎ足して流出する様子を観察した。流出しないようであれば手押し式のテストポンプを接続し、インナーパイプ内に圧力を掛けて穴からスラリーが流出する様子を観察した。圧力に関してはテストポンプの圧力計部分にセンサーを取り付け、圧力変化を記録した。以下図 23 に流出確認試験模式図を示す。

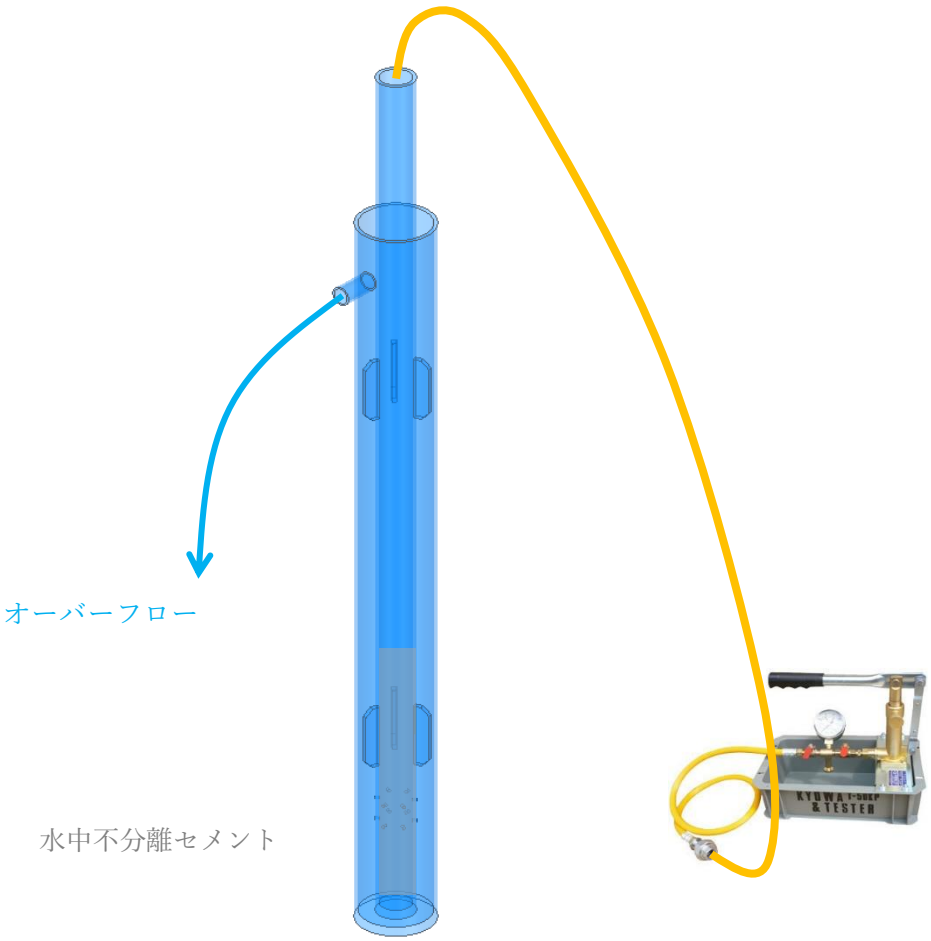


図 23：流出確認試験模式図

アクリルパイプを使用して 3 種類の試験機材を製作した。図 24 に各試験機材を示す。

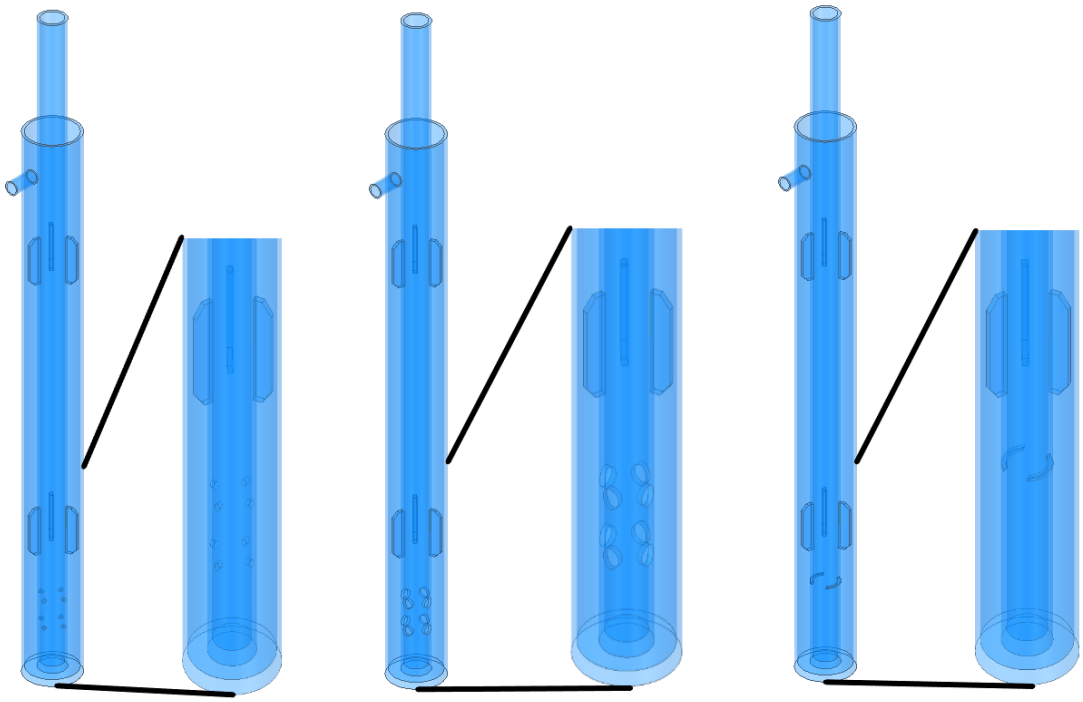


図 24：各試験機材

アウターパイプは外径 100mm、内径 90mm、全長は 1,500mm であり、インナーパイプは外径 50mm、内径 40m、全長 1,700mm である。アウターパイプの上端より 200mm の位置にオーバーフロー分を排出するホースジョイントを設けた。試験機材 A と試験機材 B は、インナーパイプの下端から 100mm と 250mm の位置にそれぞれ 7mm と 16mm の穴を 4 ヶ所ずつ設けた。試験機材 C は下端から 100mm の位置に 2mm のスリットを 2 か所設けた。

今回の実証試験に使用した坑井のパーフォレーション孔のサイズが 7mm と 16mm だったため、試験機材 A と試験機材 B にはそれぞれパーフォレーション孔と同じ 7mm と 16mm の穴を設けることとした。試験機材 C に関しては地層の細かい亀裂を想定してスリットとした。

4-2-1-2. 試験項目

本試験にて実施した試験の試験項目一覧を次に示す。

表 21：流出確認試験項目一覧

番号	使用機材	水中不分離性混和剤	不分離剤濃度
1	試験機材 A （7mm ホール）	S 系混和剤	3%
2			4%
3			5%
4		C 系混和剤	1.5%
5			1.75%
6			2.0%
7	試験機材 B （16mm ホール）	S 系混和剤	3%
8			4%
9			5%
10		C 系混和剤	1.5%
11			1.75%
12			2.0%
13	試験機材 C （2mm スリット）	S 系混和剤	3%
14			4%
15			5%
16		C 系混和剤	1.5%
17			1.75%
18			2.0%

4-2-1-3. 配合組成

各種配合組成は平成 30 年度の試験の際に用いた配合を基本とし、水中不分離性混和剤の添加量を調整した。以下表 22 に配合組成を示す。

なお、この配合組成はこれ以降の地上試験においても共通である。

表 22：配合組成

番号		①	②	③	④	⑤	⑥	
水中不分離性混和剤		S系（3%）+OPC	S系（4%）+OPC	S系（5%）+OPC	C系（1.5%）+OPC	C系（1.75%）+OPC	C系（2.0%）+OPC	単位
比重		1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	s.g.
配合組成	OPC	100	100	100	100	100	100	g
	GWC	0	0	0	0	0	0	g
	清水	52.1	51.6	51.2	53.6	53.6	53.5	mℓ
	C系	0.0	0.0	0.0	0.804	0.938	1.072	g
	S系	1.6	2.1	2.7	0	0	0	mℓ
	消泡剤	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	mℓ
	Vol	85.6	85.6	85.6	85.8	85.9	85.9	mℓ

4-2-1-4. 試験結果まとめ

今回の試験結果より、水中不分離セメントはパーフォレーション孔から十分に流出することが確認され、スリットを用いた試験により逸泥層にも圧入が可能であることが示唆された。

今回の試験の過程で水中不分離セメントは低温の場合でも温度によって挙動が変化することが示唆された。

4-2-2. トップジョブセメンチングの作業性確認試験

平成 30 年度の試験において、水中での挙動試験はドロッピング方式についてのみ挙動確認を行ったが、平成 31 年度ではトップジョブセメンチングの際の水置換性の確認やセントラライザーの影響について確認するための試験を実施した。

4-2-2-1. 試験方法

アウターパイプ内に底を閉じて側面にセントラライザーを模した板取り付けたインナーパイプを挿入し、インナーパイプとアウターパイプの間に水を満たしてスラリーを投入して挙動を確認した。スラリーの投入にはスクイズポンプを使用した。以下図 25 にトップジョブセメンチング試験模式図を示す。

図 25：トップジョブセメンチング試験模式図

試験機材はアクリルパイプを使用して製作した。アウターパイプは外径 100mm、内径 90mm、全長は 1,500mm であり、インナーパイプは外径 50mm、内径 40m、全長 1,700mm である。インナーパイプには 5mm 厚のアクリル板で製作した全長 50mm のセントラライザーが 250mm 毎に 3 枚ずつ 4 ヶ所取り付けた。にアウターパイプの上端より 200mm の位置にオーバーフロー分を排出するホースジョイントを設けた。

4-2-2-2. 試験項目

本試験にて実施した試験の試験項目一覧を以下に示す。

表 23：トップジョブ試験項目一覧

番号	水中不分離性混和剤	不分離剤濃度
1	S 系混和剤	3%
2		4%
3		5%
4	C 系混和剤	1.5%
5		1.75%
6		2.0%
7	なし	なし

なお、水中不分離性混和剤なしの組成に関しては、S 系混和剤 3%の配合から S 系混和剤を除いたものである。

4-2-2-3. 試験結果まとめ

S 系混和剤、C 系混和剤共に良好な置換性と充填性を示した。今回の試験結果よりどちらの水中不分離性混和剤もトップジョブセメンチングに使用する事は可能であると考えられる。

しかし、S 系混和剤に関しては若干セントラライザーに引っかかるような挙動があった。また、C 系混和剤に関しては沈殿していく過程で細かい破片に千切れてしまうので、表面積増加による水中不分離性の低下が懸念される。実際に使用する際にはこれらの点に留意する必要があると思われる。

4-2-3. S 系混和剤と C 系混和剤の作業性確認試験

界面活性系水中不分離性混和剤である S 系混和剤と、セルロース系水中不分離性混和剤である C 系混和剤の作業性を確認するために、2 種類の試験を実施した。

① 模擬地上配管を使用した作業性確認

② 漏斗を使用した作業性確認

両試験ともに、どの程度の水中不分離セメントが流路(配管および漏斗)に張り付いてしまうか確認を行っている。

それぞれの試験から得られた知見は以下のようであった。

① 配管への張り付きについて

S 系混和剤の方が C 系混和剤に比べて地上配管への張り付きが少なく、洗浄も簡単であるということが示された。

S 系混和剤の場合は添加濃度が高くなっても配管への張り付きが顕著に悪化するということは無かったが、C 系混和剤の場合は添加濃度が高くなると如実に配管への張り付きが増え、洗浄に必要なポンプの回数が増えることも示された。

② 漏斗への張り付きについて

試験結果を基に水中不分離性混和剤添加濃度と付着量の関係を図 26 に示す。

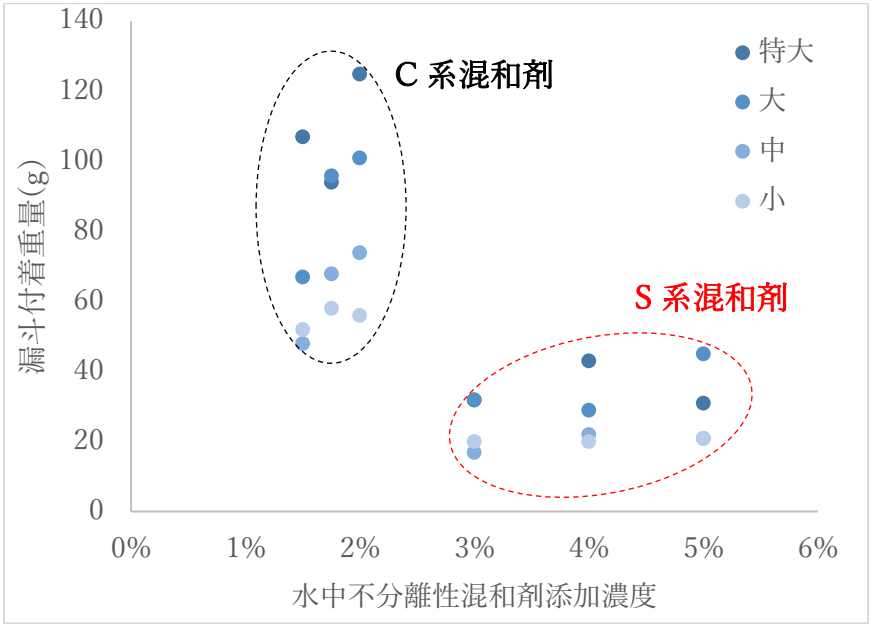


図 26：水中不分離性混和剤添加濃度と付着量

上記のグラフより、C 系混和剤は S 系混和剤より明らかに付着量が多く、付着性が強いことが確認された。また、どちらの水中不分離性混和剤も添加濃度が増えると付着性も強くなる傾向にあることが確認された。

次に、単位面積当たりの洗浄による剥離量を以下図 27 に示す。

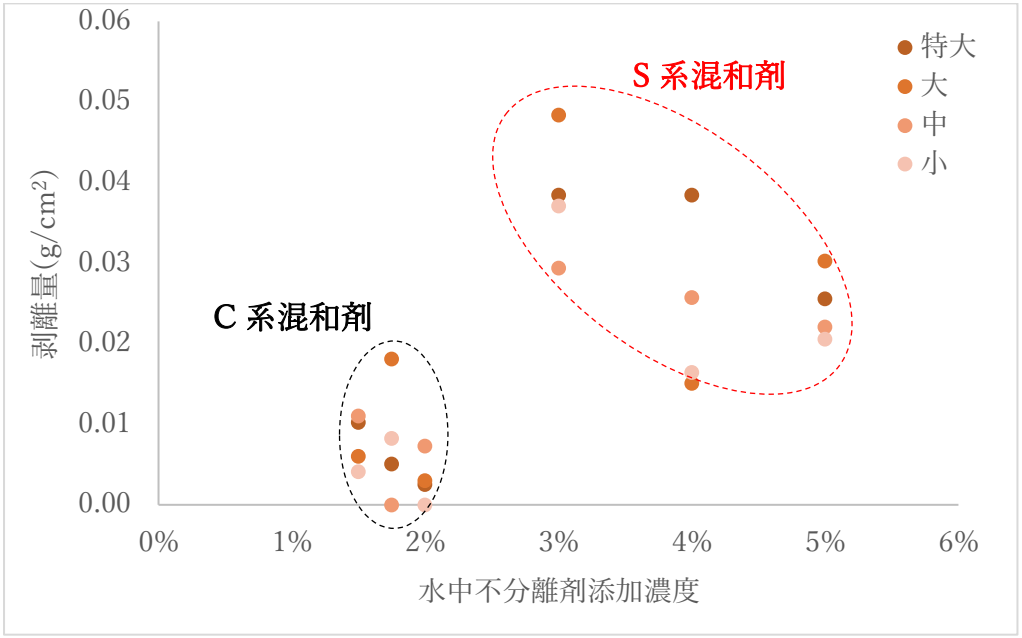


図 27：単位面積当たりの洗浄による剥離量

上図より、C 系混和剤は流水で洗浄してもスラリーがあまり剥離しないが、S 系混和剤は流水で洗浄すると多くのスラリー剥離する傾向にあることが分かる。よって、C 系混和剤より S 系混和剤の方が付着したスラリーが剥離しやすいということが確認された。また、ど

ちらも添加濃度が上がると剥離量が減少する傾向にあることが確認された。

滴下時間を確認すると、S 系混和剤は濃度が低いと滴下時間が概ね短くなる傾向にあるが、C 系混和剤の場合は濃度が低くても滴下時間が長くなる傾向にあった。これは、S 系混和剤の濃度が低い場合は流動性が高いためにスラリーが滴下しやすくなっているが、スラリー量が減ってきて流速が落ちるとチキソトロピーによって流動に歯止めがかかりスラリーの滴下が停止するためであると考えられる。また、C 系混和剤はポリマーの粘性によって水中不分離性を発現しているため、濃度が低くても粘度が上がった分滴下に時間がかり、長時間流動性を保っていると考えられる。

5. セメンチング作業について

本事業では、実坑井に対して水中不分離セメントを使用してのセメントプラグの設置方法など、有効性を確認する目的で現地実証試験を実施している。その際に用いた作業手順や現地実証試験を行った上での教訓などを記述する。

5-1. 現地実証試験で使用した機器

1) ミキシングタンク

セメントスラリーに水中不分離性混和剤を混入し、よく撹拌するため。

2) セメンチングポンプ

- ピストンポンプ

骨材などブリッジング剤を使用しない場合には、地熱掘削で使用するポンプを使用できる。

※ プランジャーポンプに関しては、本事業での確認テストは実施していない。

- コンクリートポンプ

ピストンポンプやプランジャーポンプで送入できないような骨材などをブリッジング剤として水中不分離性混和剤を添加したセメントスラリーを送入する場合に使用。

なお、現地実証試験から以下の注意点が考察された。

※ 水中不分離セメントを自由落下でポンプに供給する際には最低でも 4”程度の配管が必要と実証試験の結果から考えられる。

※ コンクリートポンプを使用して水中不分離セメントをポンプする際にはポンプシリンダーのシール等を確認する必要がある

3) その他

一般的に埋坑作業で使用する機材

なお、現地実証試験を実施して、以下の点に考慮する必要があることが考察された。

※ 骨材の粒径選定は、配管や鉄管が詰まりにくいサイズを選定する必要がある。

※ 水中不分離性混和剤が混入されたセメントスラリーは配管の曲がりなどに張り付いてしまう傾向があるため、洗浄用にスポンジを準備して、セメンチング後に配管内や鉄管内に送入することで、張り付きをかなり落とすことができる。

実証試験での機器配置図を次にて示す。

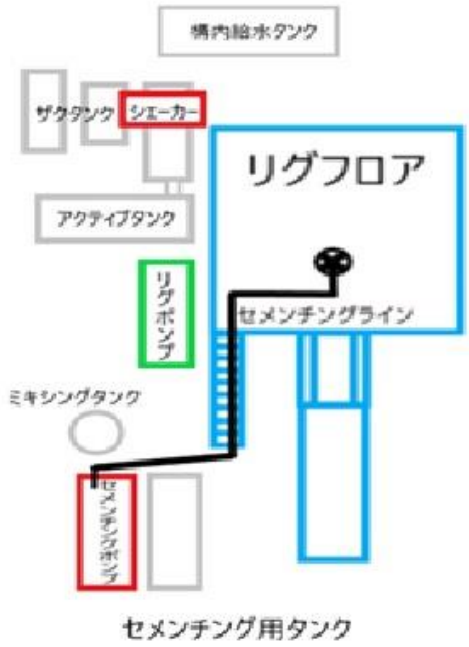


図 28：機器配置図(例)

5-2. 基本的な作業手順

ここでは、本手順は現地実証試験にて採用した基本的な手順を示す。

1) 目的の深度にノズルを設置したのち、循環して坑内を冷却する。また、逸泥・逸水がある場合には、逸泥量の確認および逸泥量の減少がみられる場合には安定するまで測定する。
2) 事前にセメントミキシングタンクに所定量の水を溜めて、セメント添加剤を投入し、セメント溶解水を作液する。
   ※ 水が適温でない場合、適温になるよう調整する。(20℃前後)
3) セメントミキシングタンクにセメントを投入し、セメントスラリーを作液する。
4) 作液したセメントスラリーに水中不分離性混和剤(S 系混和剤)を投入し、よく撹拌して水中不分離セメントを作液する。
5) 作液した水中不分離セメントの性状を確認する。
6) 必要に応じ、先行水やスペーサーなどを送入する。
7) 作液した水中不分離セメントを坑内にポンプする。
8) セメントスラリーのポンプを終えたらラインを切り替えて地上ライン分の清水をポンプする。
9) 後押し用のプラグ兼セメンチングライン内及び DP 内洗浄としてライン内にスポンジを投入する。
10) 所定量の後押しを行う。
11) 後押し終了後、予定 TOC 上までオープンエンドが上がるよう数スタンド分の DP を揚管したら中抜き循環を行い、DP 内に残ったスラリーを洗浄する。

12) 使用した地上ラインは 2 回ほど内部にスポンジを通して洗浄する。その他使用した機材を洗浄し、セメンチングを終了する。

なお、現地実証試験から以下の注意点が考察された。

※ 模擬試験結果から水中不分離セメントは沈降する可能性があると考えられたが、逸泥の無い井戸では水中不分離セメントは沈降せず、大部分が浅部に向かって立ち上がるという挙動を示す。

※ 水中不分離セメントのシックニングタイムは、ラボ試験の結果と実フィールドで異なる可能性があることが示唆された。これは、ラボ試験の場合にはシックニングタイム測定時に常に高い剪断応力を加えるが、実フィールドでの使用時には混錬時以外には大きな剪断応力が掛からないという違いに起因するのではないかと考えられる。

5-3. 実証試験からの教訓

ここでは、各年度に実施された現地(実際の坑井を使用しての)実証試験で得られた教訓を示す。なお、平成 31 年度と令和 2 年度にて現地実証試験が行われた坑井は同じ敷地に掘削された坑井であり、平成 31 年度の現地実証試験が行われた坑井が、掘削深度が浅く、地層温度も低い坑井となっている。

5-3-1, 平成 31 年度 現地実証試験

現地実証試験が行われた坑井の状況は以下表 24 に示す。また、図 29 にて現地実証試験前後の坑内図を示す。なお、この坑井を「H31 坑井」と以下記載する。

表 24 : H31 坑井の概要

坑井深度	1298m
仕上げ CSG および最終坑径区間	9-5/8”CSG 820.05m (Full Hole Cementing), 7”Liner 1,298m (孔明管 400m)
KOP および最高傾斜	KOP: 49m, 最高傾斜：18.37m@995.67m
坑井内最高地層温度	100.3℃ @1258.5m, ST:06:25
備考	946.4m よりプラグバックセメンチング

なお、H31 坑井での現地実証試験においては、1,300m から試験を実施する予定だったが、ゲージ通しの際に 914m で負荷があり、それ以深は閉塞していた。そのため、試験区間を確保するために 953.6m まで 8-1/2”Bit にて浚渫を実施したところ、細かいザクのリターンがあった。その後 953.6m 以深の状況確認のため 6”Bit にて 955.5m まで浚渫を実施したが、それ以深の浚渫は断念して砂利を投下し、946.4m よりプラグバックセメンチングを開始した。

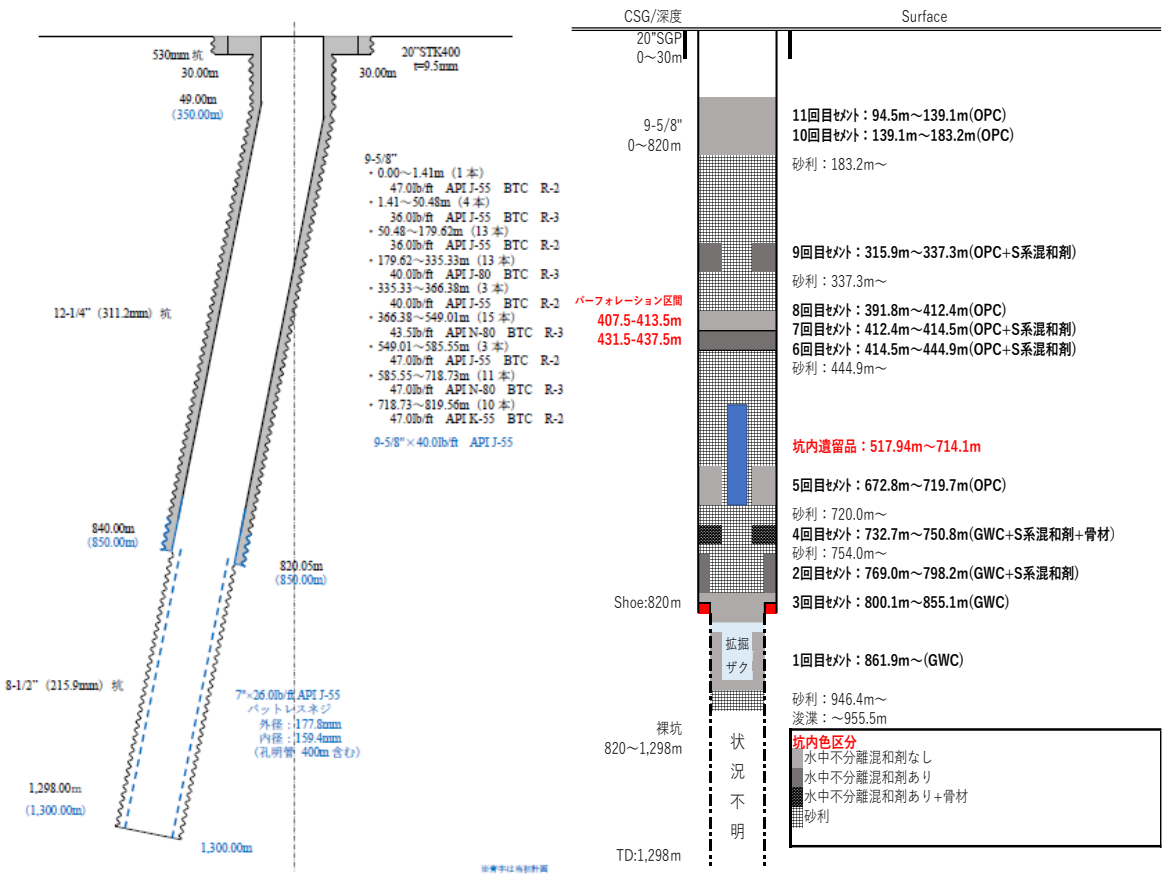


図 29：H31 坑井 実証試験前坑内図および試験後坑内図

以下、本現地実証試験のまとめと考察を記載する。

- 水中不分離セメントを自由落下でポンプに供給する際には最低でも 4”程度の配管が必要
- コンクリートポンプを使用して水中不分離セメントをポンプする際にはポンプシリンダーのシール等を確認する必要がある
- 骨材を使用した水中不分離セメントはコンクリートポンプを使用する事で問題なくポンプ出来るが、DP のサイズと骨材のサイズについて検討が必要である
- 逸泥の無い井戸では水中不分離セメントは沈降せず、大部分が浅部に向かって立ち上がるという挙動を示す
- 採取したコアサンプルの強度を確認したところ、水との接触部分に関しては強度が低下し、水との接触が少ない部分に関しては良好な強度を発現していることを確認した。また、浅部での普通セメントと水中不分離セメントの水境界面での強度を確認したところ、水中不分離セメントの方がコンタミの減少により高い強度を得ることが出来ていた
- 骨材を使用した水中不分離セメントは全体的に良好な強度を発現し、骨材を添加しな

かった場合と比較してコンタミが減少する可能性がある。

- パーフォレーションを行った逸泥区間に水中不分離セメントを打設して加圧し、セメントスラリーを圧入することで逸泥層に水中不分離セメントが圧入可能
- 水中不分離セメントのシックニングタイムは、ラボ試験の結果と実フィールドで異なる可能性があることが示唆された。これは、ラボ試験の場合にはシックニングタイム測定時に常に高い剪断応力を加えるが、実フィールドでの使用時には混錬時以外には大きな剪断応力が掛からないという違いに起因するのではないかと考えられる。

5-3-2. 令和 2 年度 現地実証試験

現地試験が行われた坑井の状況は以下表 25 に示す。また、図 30 にて現地実証試験前後の坑内図を示す。なお、この坑井を「R2 坑井」と以下記載する。

表 25 : R2 坑井の概要

坑井深度	2667m
仕上げ CSG および最終坑径区間	13-3/8”CSG 416.4m (Full Hole Cementing) 9-5/8” Liner 1209.46m 7” Liner 2646.4m (孔明管：1034.49m 含む)
KOP および最高傾斜	KOP: 452m, 最高傾斜: 44.41° @2069m
坑井内最高地層温度	252.3℃ @2640.3m, ST:114:28
備考	

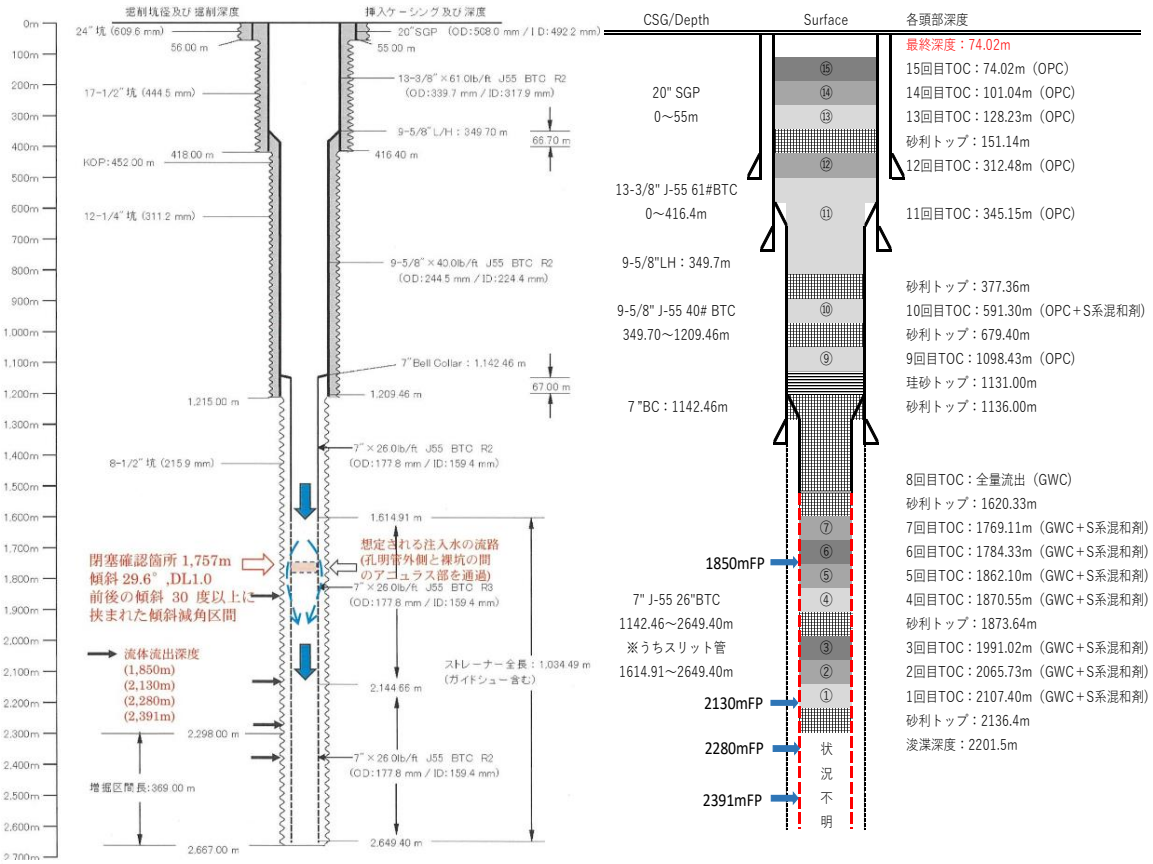


図 30：R2 坑井 実証試験前坑内図および試験後坑内図

以下、本現地実証試験のまとめと考察を記載する。

- 事前試験を行い、一般的に使用されているピストンポンプで水中不分離セメントをポンプすることが可能であることを確認した。
- 地熱井掘削現場で一般的に使用されているピストンポンプを使用して実際に水中不分離セメントを坑内に打設した。
- 寒冷地での作業において水中不分離セメントを使用する場合には事前に溶解水を20℃以上まで加温しておく必要があるという知見を得た。
- 逸泥状態にある井戸であれば打設方法によっては水中不分離セメントを使用した投下式セメンチングが可能であることが示唆された。
- 逸泥の無い井戸では水中不分離セメントは沈降せず、大部分が浅部に向かって立ち上がるという挙動を示すことを改めて確認した。

6. 【別添資料】樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間の検討

「3-3-5. セメント硬化時間(シックニングタイム)について」で記述したように、シックニングタイムの性状が水中不分離セメントでは通常のセメントスラリーとはかなり異なることが判明しており、平成 31 年に実施した現地実証試験ではセメントスラリーの送入に時間が掛かり、セメントスラリーの全量を坑内に送入出来なかったトラブルが発生しているため、検証すべく試験を行っている。ここでは、樹脂硬化時間測定装置を用い、水中不分離性混和剤を配合したセメントスラリーの硬化時間を測定した検証試験についてとりまとめた。

6-1 ．試験の背景

平成 31 年度実施した試験にて、水中不分離性混和剤を配合したセメントスラリーのシックニングタイムの測定結果の妥当性に関する課題が挙げられた。

通常、シックニングタイムは、シックニングタイムテスターを用い、コンシステンシーが 30Bc から 100Bc に達するまでの時間を計測する試験である。しかし、水中不分離性混和剤を用いたセメントスラリーは、測定開始直後のコンシステンシーが 70Bc を超え、その後 10～30Bc までコンシステンシーが低下した後、一定時間経過後に徐々にコンシステンシーが上昇し、最終的にコンシステンシーが 100Bc に到達する傾向を示す。これは、シックニングタイム計測中、スラリーカップ内に配置される撹拌翼が 150rpm で回転しているため、スラリーに強いシェアが掛かり、徐々に粘性が低下するが、その後、時間の経過とともにセメントの水和反応が進行するため、コンシステンシーが上昇するものと考えられた。

この様に、シックニングタイムの測定においては、初期段階で高いコンシステンシーを示したのち、急激に数値が低下する傾向を確認したため、水中不分離性混和剤を用いたセメントスラリーのシックニングタイムの妥当性を検証する必要があると考えられた。

これは、平成 31 年に実施した現地実証試験にて実施した第 8 回セメンチング（普通ポルトランドセメント、S 系混和剤あり、低脱水配合）実施中、セメントスラリーの送入に時間が掛かり、セメントスラリーの全量を坑内に送入出来なかった事象に関連している。すなわち、事前に配合試験にて確認していたシックニングタイムよりも短い時間でコンシステンシーが上昇した可能性が考えられた。

よって、シックニングタイムテスターと、樹脂硬化時間測定装置の 2 種類の装置を用い、お互いの硬化時間測定結果を比較することで、セメントスラリーの硬化時間の特性を評価することとした。

樹脂硬化時間測定装置は、最大温度 50℃の条件で連続的にトルクを計測する装置である。そのため、坑内におけるセメントスラリーの挙動を把握するには最大温度が不足しているが、少なくとも地上でのセメント混練タンク内でのセメントの硬化状況の予測に役立つと捉えている。

また、樹脂硬化時間測定装置は、シックニングタイムテスターのようにパドルが高速で回転しない構造のため、水中不分離性混和剤を含んだセメントスラリーの粘性を保持したまま計測できる点が特長とされる。

図 31 に、樹脂硬化時間測定装置の外観を示す。

図 31：樹脂硬化時間測定装置の外観

6-2. 試験手順

以下に、樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間の試験手順を示す。

1. 所定の材料を添加し、セメントスラリーを作液する。
2. 専用のカップにセメントスラリーを充填し、恒温槽上部のカップホルダにカップを設置する。
3. 撹拌ユニットに撹拌棒をセットし、カップ上部に設置する。
4. 制御ボックスの電源投入ボタンを押し、電源表示灯の点灯を確認する。
5. 計測ソフトを立ち上げ、パソコンとシーケンサを通信状態にする。
6. 測定開始ボタンをクリックし、計測を開始する。
7. 計測終了後、セメントスラリーの重量を測定し、水分の減少量を算出する。

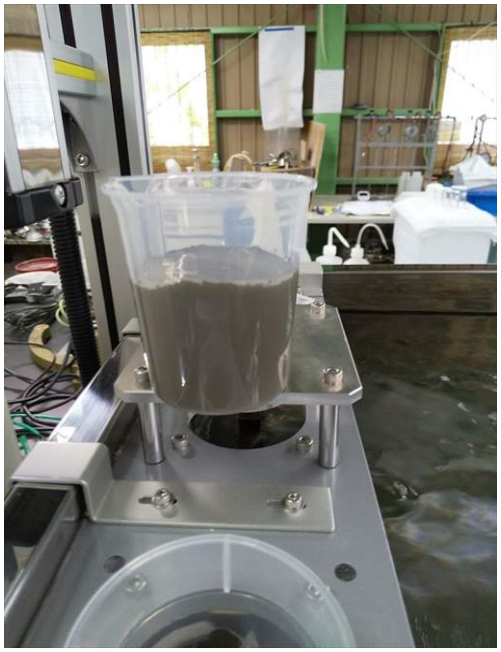
なお、セメントスラリーのトルクを検知するために用いる撹拌棒は、試行錯誤を繰り返した結果、材質がポリ塩化ビニルで、直径が 16 ㎜のものを主に使用した。

図 32 から図 34 に、樹脂硬化時間測定装置を用いた試験状況を示す。

1. セメントスラリー作液（1）

2. セメントスラリー作液（2）

3. セメントスラリー充填



4. カップホルダに設置（1）

図 32：樹脂硬化時間測定装置を用いた試験状況（1）

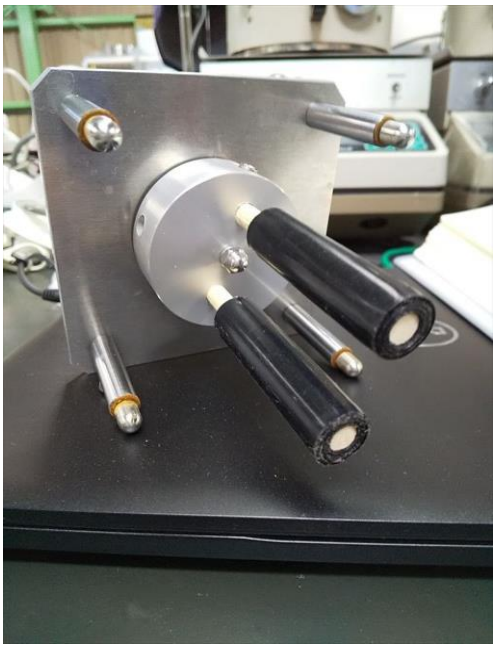
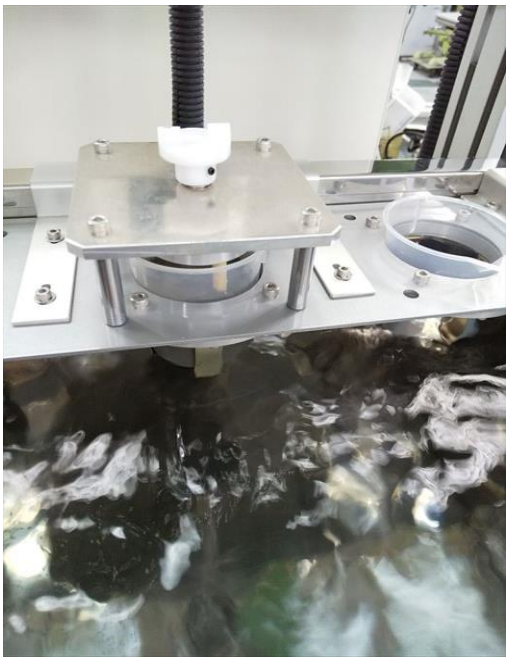
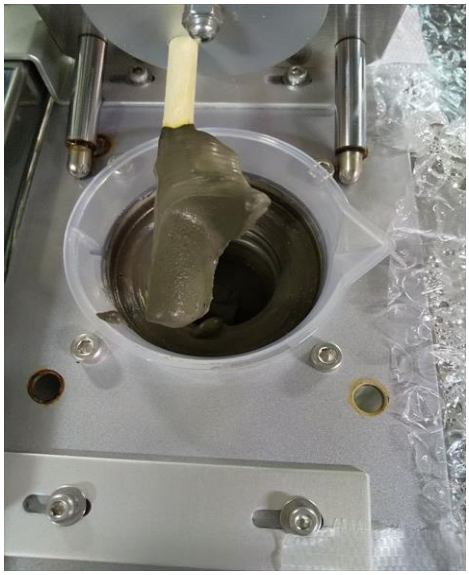
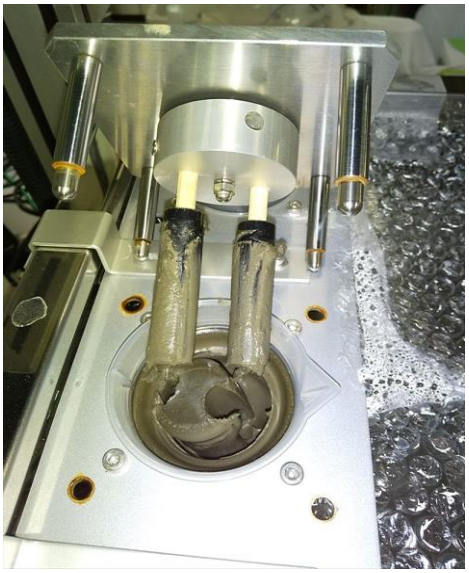
<table>
<tr><td>  </td><td> 
</td></tr>
<tr><td>5. カップホルダに設置（２）</td><td>6. 恒温槽の温度調整</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>7. 撹拌ユニットの組立</td><td>8.撹拌ユニットの設置</td></tr>
</table>

図 33：樹脂硬化時間測定装置を用いた試験状況（２）

9. 測定状況

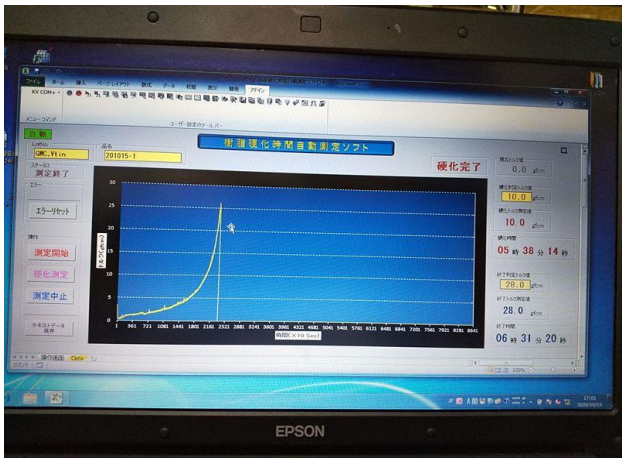


10. 測定後の状況（1）



11. 測定後の状況（2）

12. 測定後の状況（3）



13.測定後の計測ソフトの画面

図 34：樹脂硬化時間測定装置を用いた試験状況（3）

6-3. 樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間とシックニングタイムの関係

樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間と、シックニングタイムとの関係を把握するため、事前に確認試験を行った。

平成 31 年実証試験用の配合組成において、最も温度が低い条件は坑底循環温度 60℃であった。しかし、樹脂硬化時間測定装置の恒温槽の最大の設定温度は 50℃であった。そのため、配合組成は、樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間と、シックニングタイムとの関係を把握する組成としては適切ではないと判断した。

表 26 に、地熱井セメント、S 系混和剤ありの組成を示す。

この地熱井セメント、S 系混和剤ありの組成は、坑底循環温度 50℃の条件で構築した。そのため、樹脂硬化時間測定装置とシックニングタイムテスターの測定温度をどちらも 50℃で統一できるため、比較用の組成として適切と考えた。

よって、ここでは表 26 にある配合組成（地熱井セメント、S 系混和剤あり、坑底循環温度 50℃）を用いることとした。表 26 にある配合組成を以下、組成 A と一部記載する。

また、図 35 に同配合におけるシックニングタイムの測定結果を、図 36 に同配合における樹脂硬化時間測定装置の測定結果を示した。

表 26：地熱井セメント、S 系混和剤ありの組成(組成 A)
（坑底循環温度 50℃）

設定条件	撹拌棒の直径	㎜	16
配合組成	スラリー比重	-	1.80
	地熱井セメント	kg	100
	溶解水	kg	45.6
	TF-80	kg	3.0
	TR-18	kg	0.3
	S 系混和剤	kg	1.6
	消泡剤 30C	kg	0.3
	出来上がり	ℓ	83.8
試験結果	シックニングタイム	坑底循環温度,℃	50
		30Bc	4:00
		100Bc	5:23
	一軸圧縮強度	坑底静置温度,℃	100
		8hr, MPa	8.3

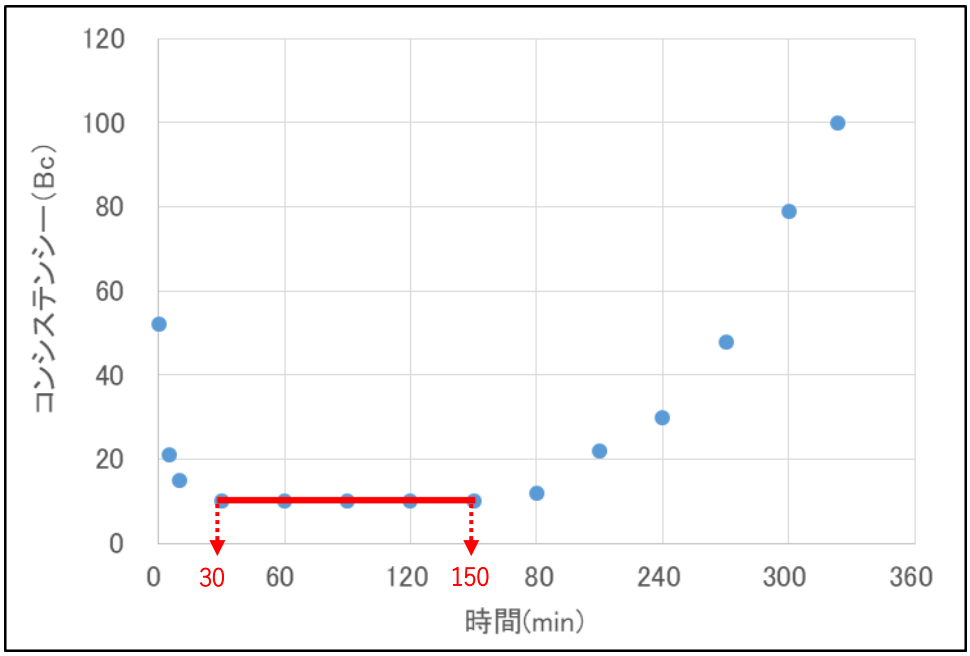


図 35：組成 A のシックニングタイム測定結果（坑底循環温度 50℃）

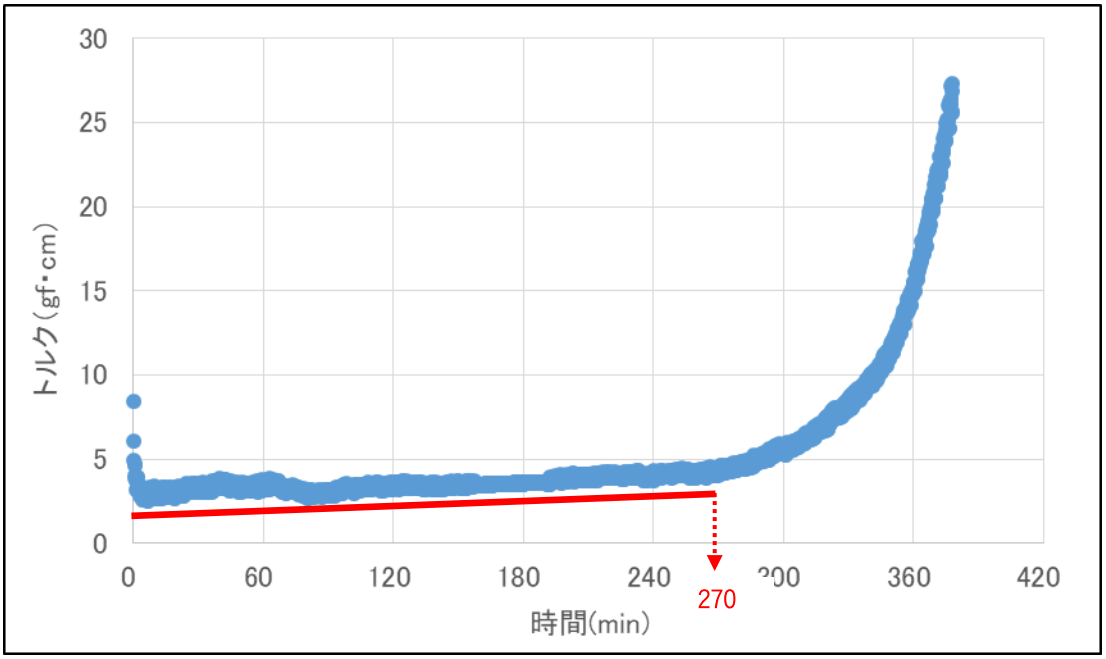


図 36：組成 A の樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間測定結果（坑底循環温度 50℃）

図 35 のシックニングタイムの測定結果は、測定開始直後に 30Bc よりも高いコンシステンシーを示すが、その後徐々にコンシステンシーが低下し、2 時間 30 分ほど 10Bc を維持する。その後セメントの水和反応が進むにつれ、コンシステンシーが上昇し、5 時間 23 分後に 100Bc に到達した。

一方、図 36 に示す樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間の測定では、測定直後から 3 分間は若干高いトルクを示したが、その後は 4 時間 30 分ほど比較的安定したトルクを示し、その後徐々にトルクが上昇し、6 時間 18 分後に 27gf・cmに到達した。

そこで、この 2 つのデータの安定した区間（シックニングタイムの場合：30 分から 150 分、樹脂硬化時間測定装置の場合：3 分から 270 分）の平均値を用い、樹脂硬化時間測定装置で得られたトルクをコンシステンシー（Bc）に換算する作業を行った。

表 27 に、換算に用いた数値を示す。

表 27：換算に用いた数値

装置名	測定時間	平均値	換算係数
シックニングタイムテスター	30～150 分	10Bc	
樹脂硬化時間測定装置	3～270 分	3.566gf・cm	2.804

表 27 の結果より、樹脂硬化時間測定装置で得られた測定値（単位：gf・cm）に、上表で得られた係数を用い、コンシステンシー（単位：Bc）に換算することとした。

樹脂硬化時間測定装置で得られた数値をコンシステンシーに換算した結果を、図 37 に示す。

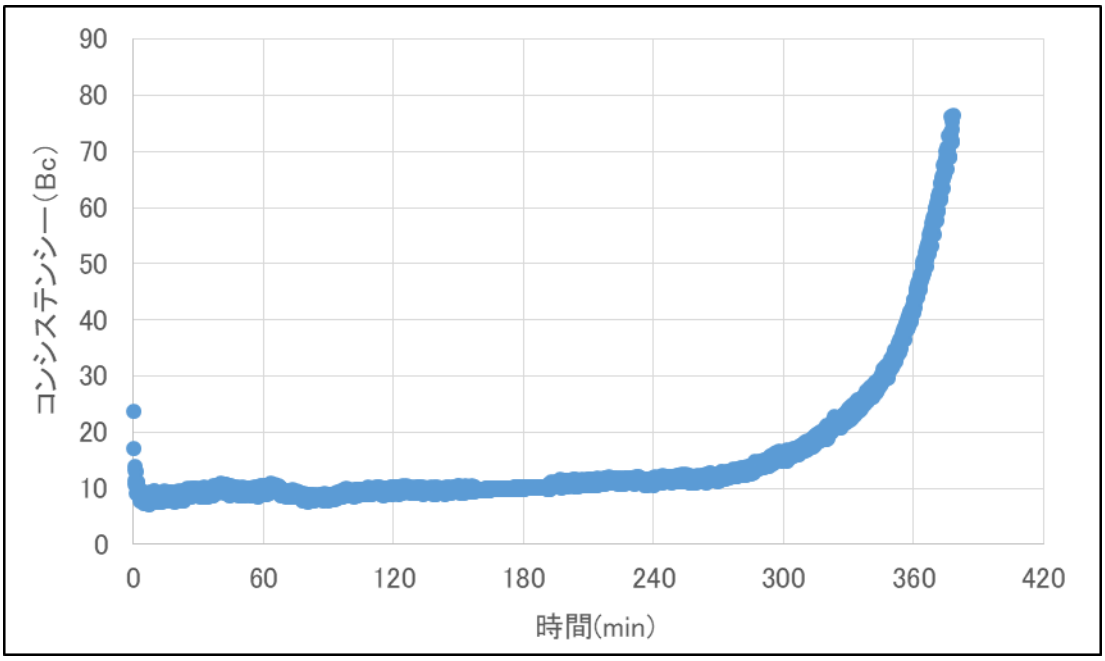


図 37：組成 A の樹脂硬化時間測定装置の結果をコンシステンシーに換算した結果（坑底循環温度 50℃）

図 37 の結果より、表 26 に示す組成 A(地熱井セメント、S 系混和剤あり)を用いた、樹脂硬化時間測定装置で得られた硬化時間は、開始直後より 240 分ほど 10Bc 程度を維持した後、徐々に値が上昇し、最終的には 6 時間 18 分後に 76.5Bc に達したと評価した。

シックニングタイムテスターは、チャンバー部が密閉状態であり、かつ坑内圧力に相当する圧力が掛かっている。一方、樹脂硬化時間測定装置のカップ内は、大気圧かつ解放状態であるため、セメントスラリーからの水分の蒸発が生じる。よって、両装置の構造上の違いはあるものの、表 26 に示す地熱井セメント、S 系混和剤ありの組成にて、測定開始から 4 時間程度低いコンシステンシーを示したため、少なくとも 4 時間程度は地上タンク内で硬化

が進行することは無いと評価した。

この様に、樹脂硬化時間測定装置で得られた結果は、測定温度が最大で 50℃であるため、坑内の高温度環境下におけるセメントスラリーの挙動を完全に把握することはできないが、セメントミキサーによるスラリー混練中のセメント硬化時間を予測するのに利用できると解釈された。

6-4. GWC、S 系混和剤を用いた組成（坑底循環温度 50℃）の硬化時間測定結果

先に示した組成 A は、坑底循環温度を 50℃に設定した組成であるため、樹脂硬化時間測定装置でも同じ温度で測定でき、かつ S 系混和剤を用いた組成であるため、シックニングタイムと樹脂硬化時間測定装置の結果を比較するのに最も適した組成と考えた。

そのため、本組成の試験結果より係数を求め、樹脂硬化時間測定装置の測定結果をシックニングタイムテスターの単位に換算する作業を行っており、その結果は既に「7.3. 樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間とシックニングタイムの関係」に示したとおりである。

結果より、シックニングタイムにおける硬化時間は約 290 分で 70Bc に達しているのに対し、樹脂硬化時間測定装置における硬化時間は約 375 分で 70Bc に達した。

よって、どちらの試験でも早期の段階でコンシステンシーが低下し、最終的にコンシステンシーが上昇する、同様の傾向が見られたが、樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間の方が、シックニングタイムよりも長くなる傾向が見られた。

このような差が生じた原因は、お互いの装置の仕組みと、測定時の容器内の圧力が異なるためと考えた。測定時の水分蒸発量および温度・圧力条件については、表 27 に示したとおりである。

この試験結果を踏まえ、お互いの試験結果において 30Bc に達するまでに十分な時間を要しており、セメントスラリー混練時に想定外に硬化が進行する可能性は極めて低いと評価した。

表 28：組成 A における測定時の水分蒸発量および温度・圧力条件（坑底循環温度 50℃）

装置名	項目	測定値
樹脂硬化時間測定装置	測定時間	378 分
	蒸発水量（対溶解水）	11.6%
	蒸発水量（対セメントスラリー）	6.3%
シックニングタイムテスター	測定時の温度	50℃
	測定時の圧力	15.5MPa

6-5. 普通ポルトランドセメント、S 系混和剤を用いた組成（坑底循環温度 40℃、低脱水配合）の硬化時間測定結果

ここでは、表 29 に示す普通ポルトランドセメントと S 系混和剤を用いた組成（低脱水配合）に対し、樹脂硬化時間測定装置を用いて硬化時間を測定した。なお、表 29 の組成を以下、組成 B と一部記載する。

この組成 B は、平成 31 年度に構築した配合組成であり、令和 2 年度の実証試験においては使用されていない配合である。しかし、普通ポルトランドセメントと S 系混和剤を用いた代表的なセメントスラリーと判断したため、本装置を用いて試験を行った。

この配合は、坑底循環温度を 40℃に設定した組成であるため、樹脂硬化時間測定装置の恒温槽の水温も 40℃に設定して試験を行った。

本組成は、他のセメントスラリーに比べて粘性が高かったため、直径 16 ㎜の撹拌棒を用いた場合､試験開始直後に計測可能な最大トルクを振り切れる現象が確認された｡そのため、本試験では直径 10 ㎜の撹拌棒を用いて測定を行った。

表 29 に、試験に使用した普通ポルトランドセメントと S 系混和剤を用いた組成（低脱水配合）と試験結果を示す。

表 29：組成 B および試験結果（坑底循環温度 40℃、低脱水配合）

設定条件	撹拌棒の直径	㎜	10
配合組成	スラリー比重	-	1.80
	普通ポルトランドセメント	kg	100
	溶解水	kg	49.4
	TF-80	kg	3.0
	TR-18	kg	0.6
	S 系混和剤	kg	1.6
	消泡剤 30C	kg	0.3
	出来上がり	ℓ	86.1
試験結果	シックニングタイム	坑底循環温度,℃	40
		30Bc	4:45
		100Bc	5:53
	一軸圧縮強度	坑底静置温度,℃	80
		8hr, MPa	12.0

図 38 に、組成 B のシックニングタイムの測定結果を示す。

また図 39 および図 40 に、組成 B の樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間の測定結果（実測結果およびトルク/コンシステンシー換算結果）を示す。

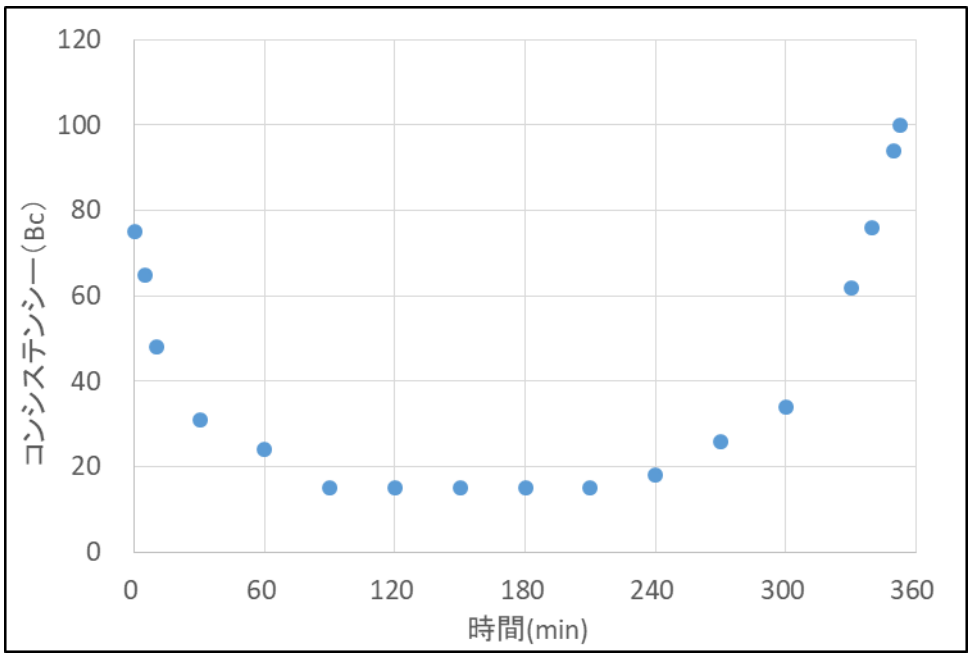


図 38：組成 B のシックニングタイムにおける測定結果
（坑底循環温度 40℃、低脱水配合）

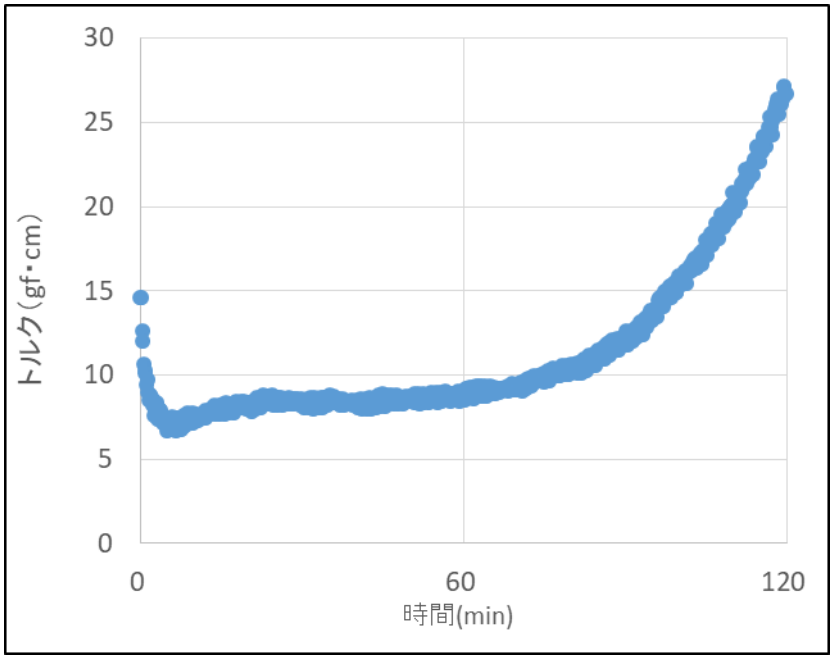


図 39：組成 B の樹脂硬化時間測定装置を用いた測定結果
（坑底循環温度 40℃、低脱水配合）

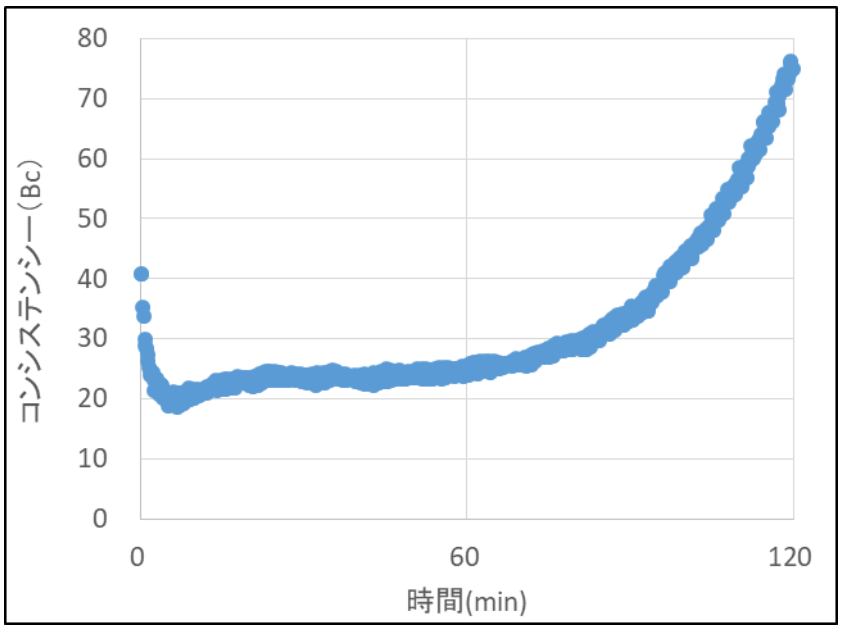


図 40：組成 B の樹脂硬化時間測定装置を用いた測定結果（トルク/コンシステンシー換算）（坑底循環温度 40℃、低脱水配合）

シックニングタイムと樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間の結果を比較すると、シックニングタイムが 340 分で 70Bc に達しているのに対し、樹脂硬化時間測定装置では約 116 分で 70Bc に達した。

よって、どちらの試験でも早期の段階でコンシステンシーが低下し、最終的にコンシステンシーが上昇する、同様の傾向が見られたが、樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間の方が、シックニングタイムよりもかなり短くなることを確認した。

この原因として、普通ポルトランドセメントと S 系混和剤を組合せた場合、GWC と S 系混和剤を組み合わせた場合よりもセメントスラリーの増粘性が高まるため、結果として GWC を使用した時よりも硬化時間が早まると考えられた。

また、シックニングタイムテスターによる測定では、スラリーカップ内部に設置する撹拌翼が 150rpm で回転するため、スラリーに強いシェアが掛かり、結果としてスラリーの粘性低下を引き起こし、シックニングタイムの硬化時間が長く計測されると考えられた。

30Bc に達するまでの硬化時間は、シックニングタイムテスターによる測定では 285 分に対し、樹脂硬化時間測定装置では 82 分との結果となった。この事より、シックニングタイムテスターによる試験結果にて十分なシックニングタイムを確保したと思われた本組成においては、本試験の結果より、十分なシックニングタイムを確保できていない可能性があると評価した。

このように、樹脂硬化時間測定装置で測定した結果とシックニングタイムテスターの結果を比較することで、水中不分離性混和剤を含んだセメントスラリーの硬化時間をより正確に把握できることを確認した。

測定時の水分蒸発量および温度・圧力条件を表 30 に示す。

表 30：組成 B における測定時の水分蒸発量および温度・圧力条件
（坑底循環温度 40℃、低脱水配合）

装置名	項目	測定値
樹脂硬化時間測定装置	測定時間	120 分
	蒸発水量（対溶解水）	5.1%
	蒸発水量（対セメントスラリー）	2.9%
シックニングタイムテスター	測定時の温度	40℃
	測定時の圧力	8.0MPa

6-6. 普通ポルトランドセメント、S 系混和剤を用いない組成（坑底循環温度 40℃、高脱水配合）の硬化時間測定結果

表 31 にて示す普通ポルトランドセメントを用い、S 系混和剤を用いない組成（高脱水配合）に対し、樹脂硬化時間測定装置を用いて硬化時間を測定した。なお、表 31 の組成を以下、組成 C と一部記載する。

この組成は、S 系混和剤を含まないため、一般的なセメントスラリーに分類される。そのため、シックニングタイムで得られた結果が重視されるため、樹脂硬化時間測定装置を用いた試験を行う必要は無いと考えられた。

しかし、令和 2 年度の実証試験において、9-5/8”ライナーハンガーケーシング上部の 335m 付近でのセメンチングに本組成が使用される計画であったため、本試験を行うこととした。

この配合は、坑底循環温度を 40℃に設定した組成であるため、樹脂硬化時間測定装置の恒温槽の水温も 40℃に設定して試験を行った。

表 31 に、普通ポルトランドセメントを用い、S 系混和剤を用いない組成（高脱水配合）と試験結果を示す。

表 31：組成 C と試験結果（坑底循環温度 40℃、高脱水配合）

設定条件	撹拌棒の直径	㎜	16
配合組成	スラリー比重	-	1.80
	普通ポルトランドセメント	kg	10
	溶解水	kg	53.3
	TD-55	kg	0.8
	TR-11	kg	0.15
	消泡剤 30C	kg	0.1
	出来上がり	ℓ	85.7
試験結果	シックニングタイム	坑底循環温度,℃	40
		30Bc	5:10
		100Bc	6:10
	一軸圧縮強度	坑底静置温度,℃	80
		8hr, MPa	9.5

図 41 に、組成 C のシックニングタイムの測定結果を示す。

また図 42 および図 43 に、組成 C の樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間の測定結果（実測結果およびトルク/コンシステンシー換算結果）を示す。

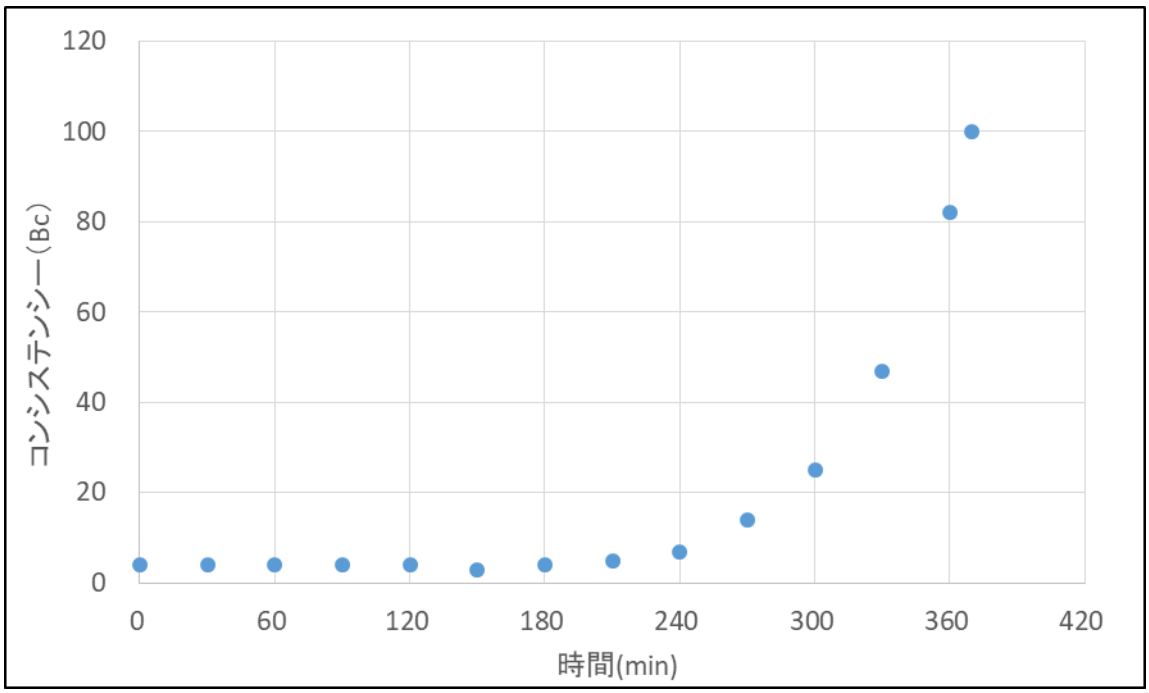


図 41：組成 C のシックニングタイムの測定結果（坑底循環温度 40℃、高脱水配合）

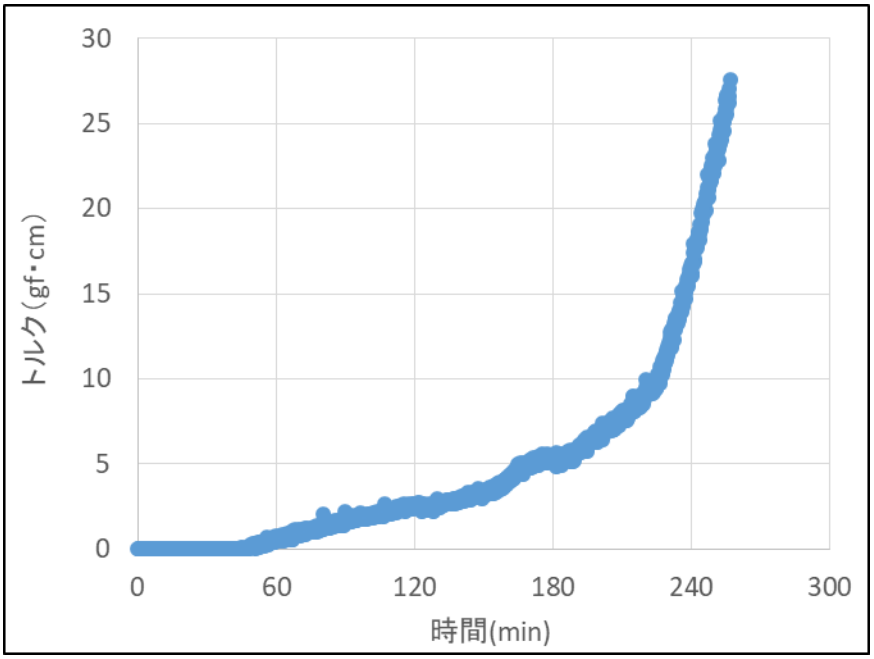


図 42：組成 C の樹脂硬化時間測定装置を用いた測定結果
（坑底循環温度 40℃、高脱水配合）

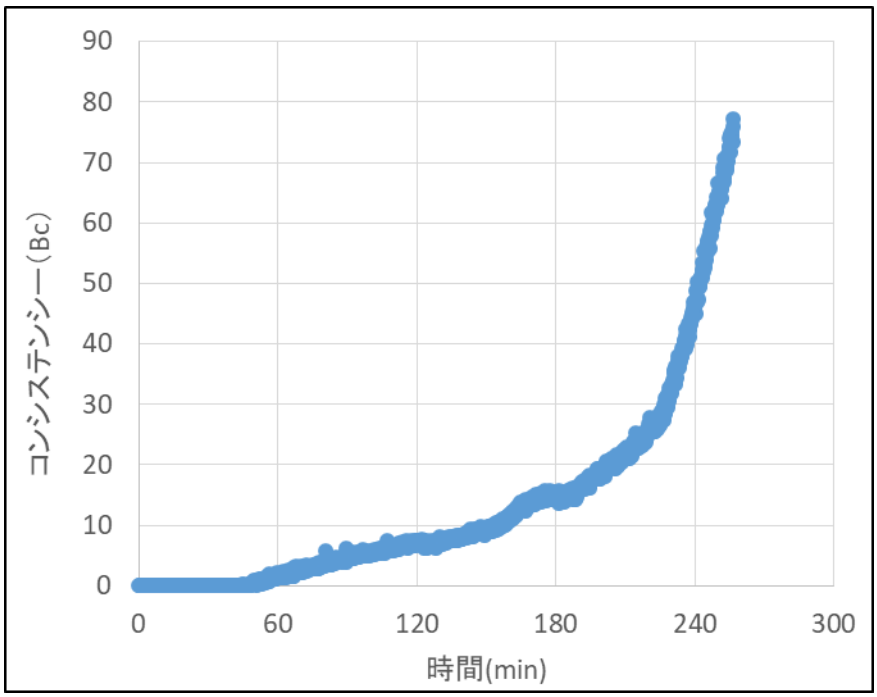


図 43：組成 C の樹脂硬化時間測定装置を用いた測定結果（トルク/コンシステンシー換算）（坑底循環温度 40℃、高脱水配合）

シックニングタイムと樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間の結果を比較すると、シックニングタイムが 350 分で 70Bc に達しているのに対し、樹脂硬化時間測定装置では約 252 分で 70Bc に達した。

よって、どちらの試験でも早期の段階でコンシステンシーが低下し、最終的にコンシステンシーが上昇する、同様の傾向が見られたが、樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間の方が、シックニングタイムよりも短くなることを確認した。

この原因として、シックニングタイムテスターと樹脂硬化時間測定装置における測定条件の違いが関連していると考えた。本試験において、シックニングタイムテスターの容器内部の圧力は 8.0MPa に保持されており、スラリーからの水分の蒸発も生じない。しかし、樹脂硬化時間測定装置では容器が解放状態であるため、圧力は大気圧環境下で、かつスラリーからの水分の蒸発が徐々に進行する。その差が試験結果に影響を及ぼしたと考えた。

30Bc に達するまでの硬化時間は、シックニングタイムテスターによる測定では 310 分に対し、樹脂硬化時間測定装置では 226 分との結果となった。この事より、昨年度の試験結果にて十分なシックニングタイムを確保したと思われた本組成は、樹脂硬化時間測定装置において硬化時間が短く計測されたが、S 系混和剤を含まない組成であるため、シックニングタイムの数値を重視すべきであると評価した。

測定時の水分蒸発量および温度・圧力条件を表 32 に示す。

表 32：組成 C 測定時の水分蒸発量および温度・圧力条件
（坑底循環温度 40℃、高脱水配合）

装置名	項目	測定値
樹脂硬化時間測定装置	測定時間	256 分
	蒸発水量（対溶解水）	4.3%
	蒸発水量（対セメントスラリー）	2.7%
シックニングタイムテスター	測定時の温度	40℃
	測定時の圧力	8.0MPa

6-7. 普通ポルトランドセメント、S 系混和剤を用いない組成（坑底循環温度 27℃）の硬化時間測定結果

普通ポルトランドセメントを用い、S 系混和剤を用いない組成に対し、樹脂硬化時間測定装置を用いて硬化時間を測定した。なお、表 33 の組成を以下、組成 D と一部記載する。

本組成も、既述した「7.6 普通ポルトランドセメント、S 系混和剤を用いない組成（坑底循環温度 40℃、高脱水配合）の硬化時間測定結果」同様、S 系混和剤を含まないため、一般的なセメントスラリーに分類される。そのため、シックニングタイムで得られた結果が重視されるため、樹脂硬化時間測定装置を用いた試験を行う必要は無いと考えられた。

しかし、令和 2 年度の実証試験において、150m 付近の 13-3/8”ケーシング管内のプラグバックセメンチングに、本組成が使用される計画であるため、硬化時間の測定を行った。

この配合は、坑底循環温度 27℃に設定した組成であるため、樹脂硬化時間測定装置の恒温槽の水温も 27℃に設定して試験を行った。

表 33 に、普通ポルトランドセメントを用い、S 系混和剤を用いない組成(組成 D)と試験結果を示す。

表 33：組成 D と試験結果（坑底循環温度 27℃）

設定条件	撹拌棒の直径	㎜	16
配合組成	スラリー比重	-	1.80
	普通ポルトランドセメント	kg	100
	溶解水	kg	53.4
	塩化カルシウム	kg	1.0
	TD-55	kg	0.6
	消泡剤 30C	kg	0.1
	出来上がり	ℓ	86.2
試験結果	シックニングタイム	坑底循環温度,℃	30
		30Bc	3:15
		100Bc	5:18
	一軸圧縮強度	坑底静置温度,℃	27
		8hr, MPa	2.8

図 44 に、組成 D のシックニングタイムの測定結果を示す。

また図 45 および図 46 に、組成 D の樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間の測定結果（実測結果およびトルク/コンシステンシー換算結果）を示す。

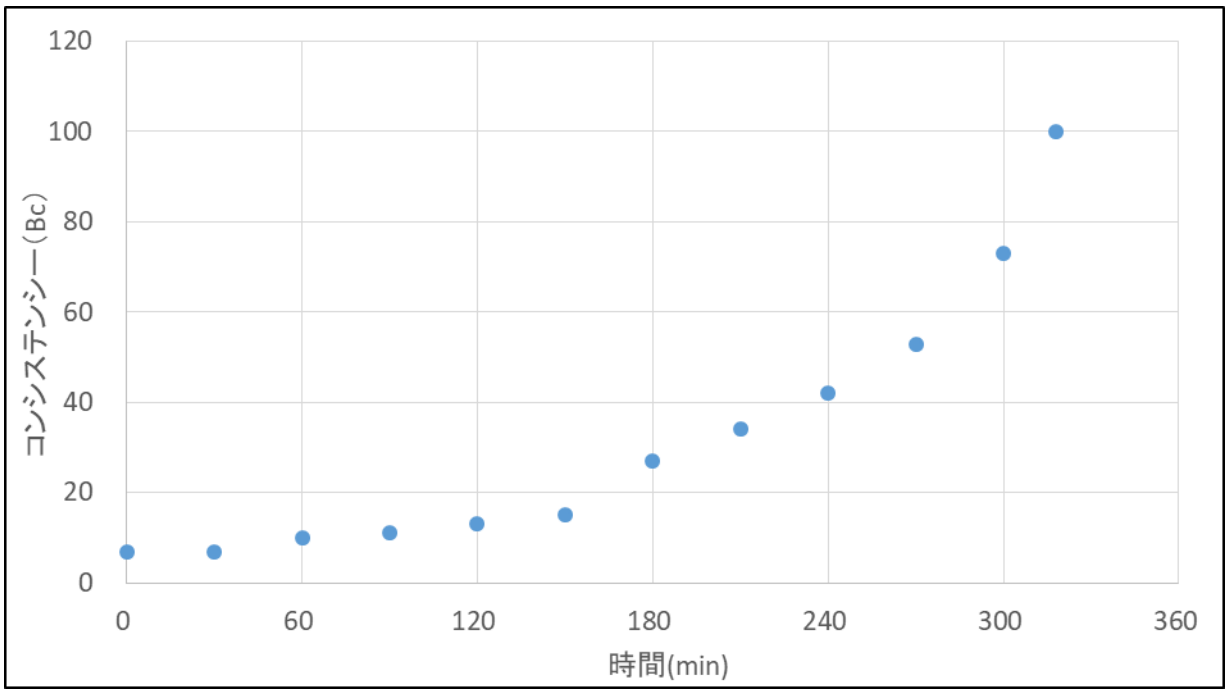


図 44：組成 D のシックニングタイムの測定結果（坑底循環温度 27℃）

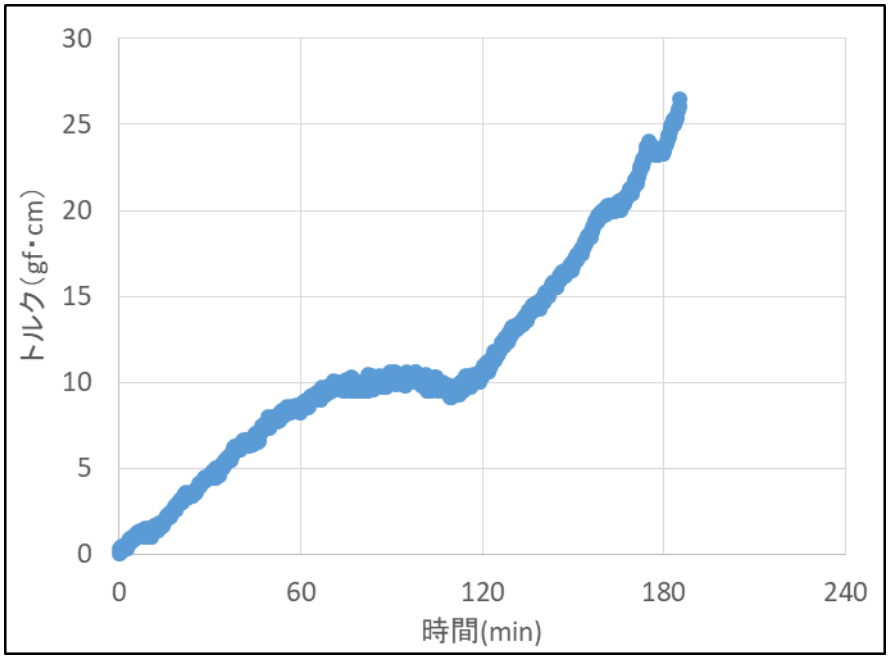


図 45：組成 D の樹脂硬化時間測定装置を用いた測定結果（坑底循環温度 27℃）

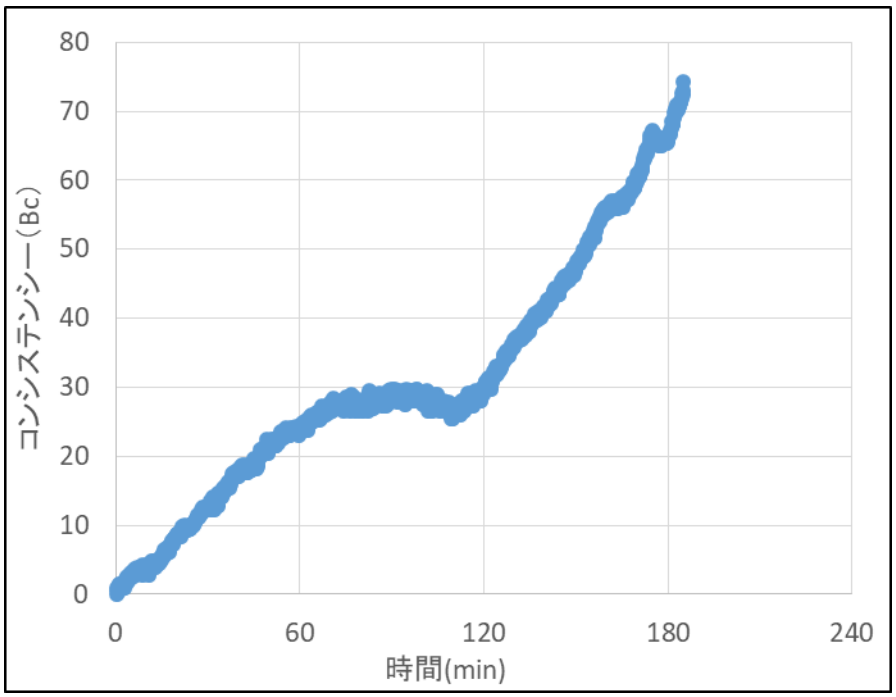


図 46：組成 D の樹脂硬化時間測定装置を用いた測定結果（トルク/コンシステンシー換算）（坑底循環温度 27℃）

シックニングタイムと樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間の結果を比較すると、シックニングタイムが 300 分で 70Bc に達しているのに対し、樹脂硬化時間測定装置では約 182 分で 70Bc に達した。

よって、樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間は、測定開始時よりコンシステンシーの上昇が見られ、結果としてシックニングタイムよりも短くなることを確認した。

この原因として、シックニングタイムテスターと樹脂硬化時間測定装置の構造の違いが関連していると考えた。本試験において、シックニングタイムテスターの容器内部の圧力は 4.0MPa に保持され、スラリーからの水分の蒸発も生じない。しかし、樹脂硬化時間測定装置では容器が解放状態であるため、圧力は大気圧環境下で、かつスラリーからの水分の蒸発が徐々に進行する。その差が試験結果に影響を及ぼしたと考えた。

30Bc に達するまでの硬化時間は、シックニングタイムテスターによる測定では 195 分に対し、樹脂硬化時間測定装置では 119 分との結果となった。この事より、平成 31 年度の試験結果にて十分なシックニングタイムを確保したと思われた本組成は、樹脂硬化時間測定装置において硬化時間が短く計測されたが、S 系混和剤を含まない組成であるため、シックニングタイムの数値を重視すべきであると評価した。

測定時の水分蒸発量および温度・圧力条件を表 34 に示す。

表 34：組成 D の測定時の水分蒸発量および温度・圧力条件（坑底循環温度 27℃）

装置名	項目	測定値
樹脂硬化時間測定装置	測定時間	185 分
	蒸発水量（対セメントスラリー）	1.0%
	蒸発水量（対溶解水）	0.6%
シックニングタイムテスター	測定時の温度	27℃
	測定時の圧力	4.0MPa

6-8. GWC、S 系混和剤を用いた組成（坑底循環温度 110℃）の硬化時間測定結果

GWC および S 系混和剤を用いた R2 坑井における 2,130m 用のセメントスラリー組成（坑底循環温度 110℃）にて、樹脂硬化時間測定装置における硬化時間を測定した。なお、表 35 の組成を以下、組成 E と一部記載する。

本組成は、本年度構築した組成の中で最も温度の高い、坑底循環温度 110℃に適応した配合である。しかし、樹脂硬化時間測定装置の恒温槽の最大水温は 50℃となるため、50℃にて試験を行った。

よって、樹脂硬化時間測定装置で測定した硬化時間が、シックニングタイムよりもかなり長くなると想定された。

表 35 に、令和 2 年度の実証試験において 2,130m セメンチング用の組成(組成 E)と試験結果を示す。

表 35：組成 E と試験結果（坑底循環温度 110℃）

設定条件	撹拌棒の直径	㎜	16
配合組成	スラリー比重	-	1.80
	GWC	kg	100
	溶解水	kg	42.9
	TF-80	kg	6.0
	TR-18	kg	1.0
	S 系混和剤	kg	1.6
	消泡剤 30C	kg	0.3
	出来上がり	ℓ	84.3
試験結果	シックニングタイム	坑底循環温度,℃	110
		30Bc	5:40
		100Bc	6:00
	一軸圧縮強度	坑底静置温度,℃	220
		8hr, MPa	24.2

図 47 に、組成 E のシックニングタイムの測定結果を示す。

また図 48 および図 49 に、組成 E の樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間の測定結果（実測結果およびトルク/コンシステンシー換算結果）を示す。

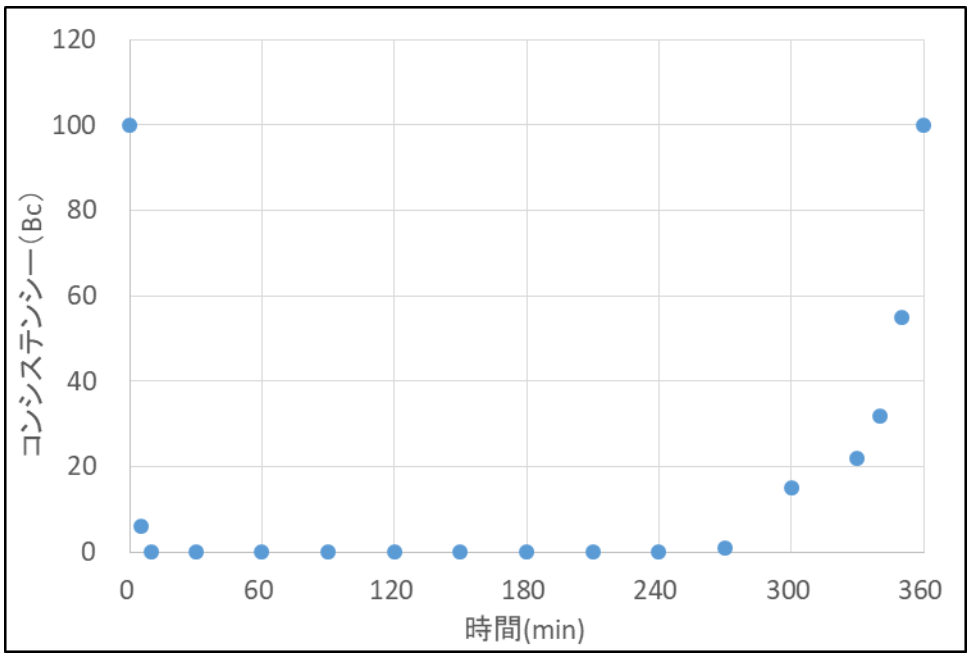


図 47：組成 E のシックニングタイムの測定結果（坑底循環温度 110℃）

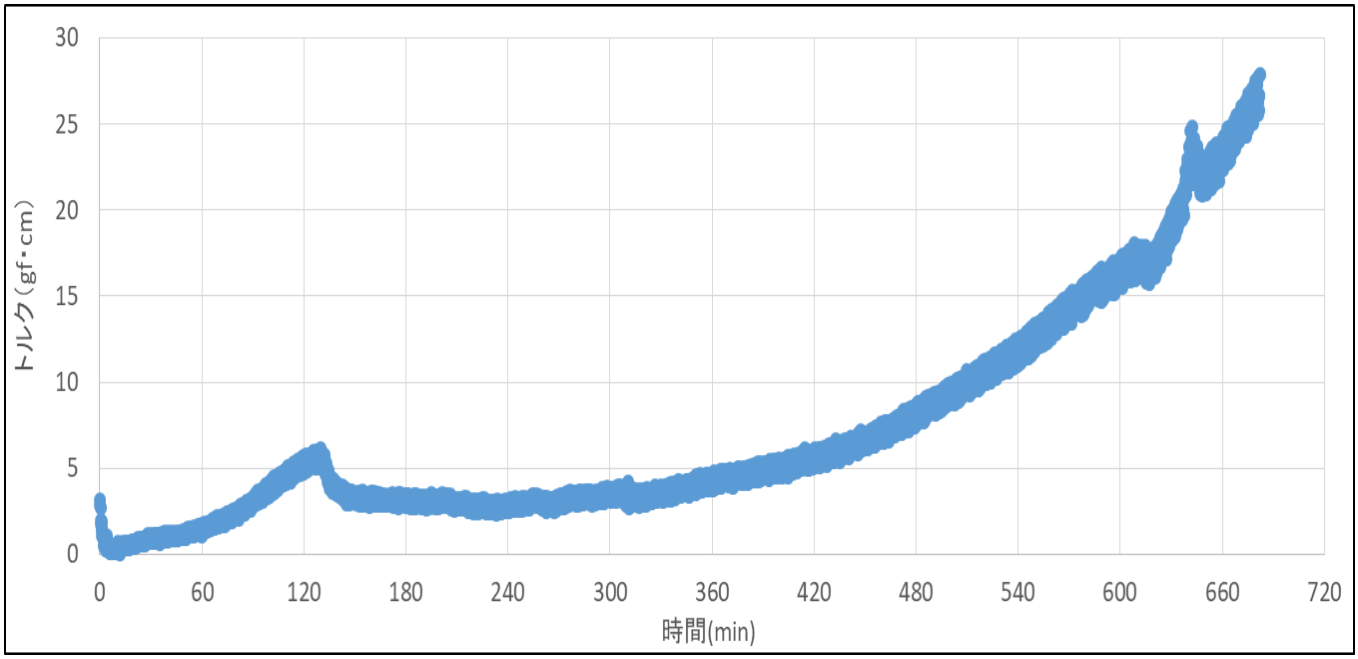


図 48：組成 E の樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間の測定結果（坑底循環温度 110℃）

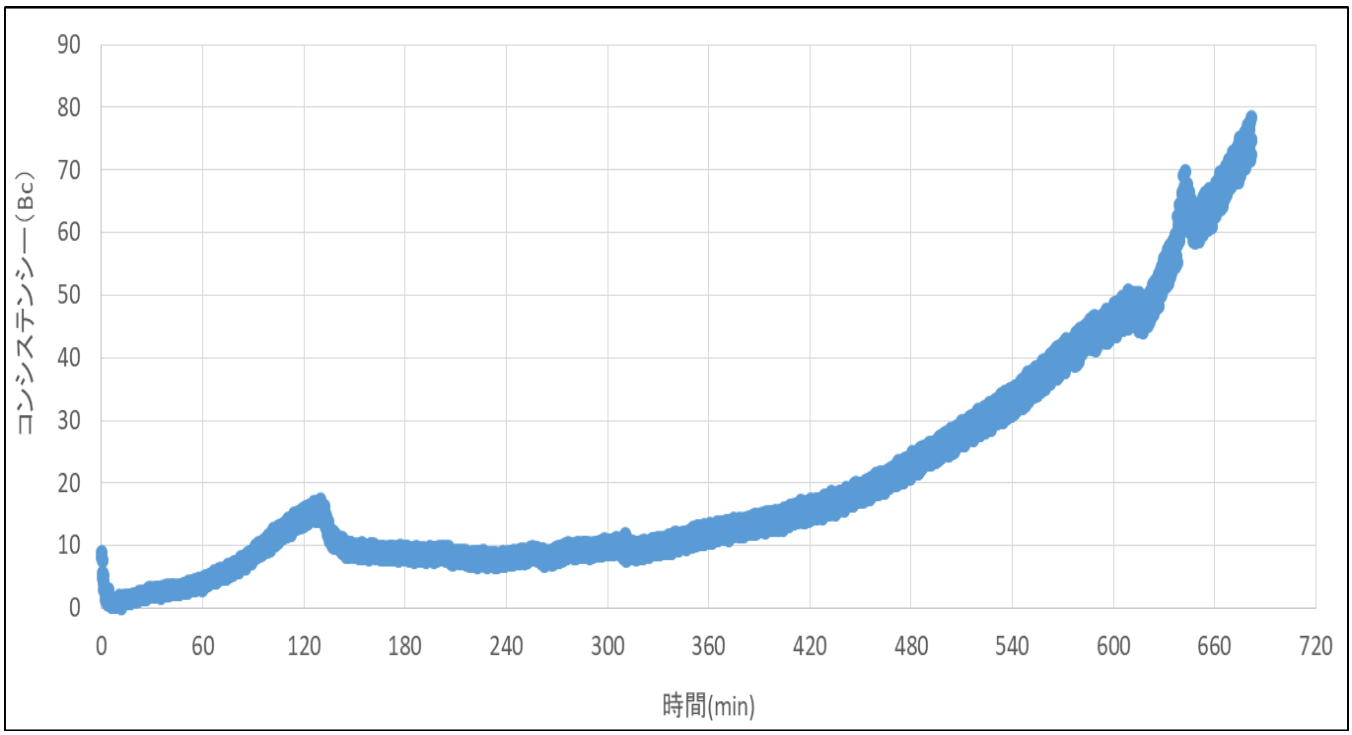


図 49：組成 E の樹脂硬化時間測定装置を用いた測定結果（トルク/コンシステンシー換算）（坑底循環温度 110℃）

シックニングタイムと樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間の結果を比較すると、シックニングタイムが 350 分で 70Bc に達しているのに対し、樹脂硬化時間測定装置では約 666 分で 70Bc に達した。

よって、どちらの試験でも早期の段階でコンシステンシーが低下し、最終的にコンシステンシーが上昇する、同様の傾向が見られたが、樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間の方が、シックニングタイムよりもかなり長くなることを確認した。

これは、既述したとおり、シックニングタイムでは 110℃で試験を行ったが、樹脂硬化時間測定装置では 50℃で試験を行ったことが大きく影響したと考えられた。

この試験結果より、測定温度が 50℃を上回る組成においては、測定温度の違いが大きく硬化時間に影響を及ぼすため、単純な比較はできないと解釈された。

30Bc に達するまでの硬化時間は、シックニングタイムテスターによる測定では 340 分に対し、樹脂硬化時間測定装置では 513 分との結果となった。この事より、本組成は、シックニングタイムおよび樹脂硬化時間測定装置のどちらの結果においても十分な硬化時間を示したため、セメントスラリー混練時に想定外に硬化が進行する可能性は極めて低いと評価した。

測定時の水分蒸発量および温度・圧力条件を表 36 に示す。

表 36：組成 E の測定時の水分蒸発量および温度・圧力条件（坑底循環温度 110℃）

装置名	項目	測定値
樹脂硬化時間測定装置	測定時間	682 分
	蒸発水量（対溶解水）	31.0%
	蒸発水量（対セメントスラリー）	15.8%
シックニングタイムテスター	測定時の温度	110℃
	測定時の圧力	37.7MPa

6-9. GWC、S 系混和剤を用いた組成（坑底循環温度 80℃）の硬化時間測定結果

GWC および S 系混和剤を用いた R2 坑井における 1,850m 用のセメントスラリー組成（坑底循環温度 80℃）にて、樹脂硬化時間測定装置における硬化時間を測定した。

本組成は、本年度構築した組成の中でも温度の高い、坑底循環温度 80℃に適応した配合である。しかし、樹脂硬化時間測定装置の恒温槽の最大水温は 50℃となるため、50℃にて試験を行った。

よって、前述した「7.8 GWC、S 系混和剤を用いた組成（坑底循環温度 110℃）の硬化時間測定結果」と同様、樹脂硬化時間測定装置で測定した硬化時間が、シックニングタイムよりも長くなることが想定された。

表 37 に、本年度構築した 1,850m セメンチング用の組成と試験結果を示す。なお、表 37 の組成を以下、組成 F と一部記載する。

表 37：組成 F と試験結果（坑底循環温度 80℃）

設定条件	撹拌棒の直径	㎜	16
配合組成	スラリー比重	-	1.80
	GWC	kg	100
	溶解水	kg	42.9
	TF-80	kg	6.0
	TR-18	kg	0.35
	S 系混和剤	kg	1.6
	消泡剤 30C	kg	0.3
	出来上がり	ℓ	83.9
試験結果	シックニングタイム	坑底循環温度,℃	80
		30Bc	4:25
		100Bc	4:50
	一軸圧縮強度	坑底静置温度,℃	180
		8hr, MPa	19.6

図 50 に、組成 F のシックニングタイムの測定結果を示す。

また図 51 および図 52 に、組成 F の樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間の測定結果（実測結果およびトルク/コンシステンシー換算結果）を示す。

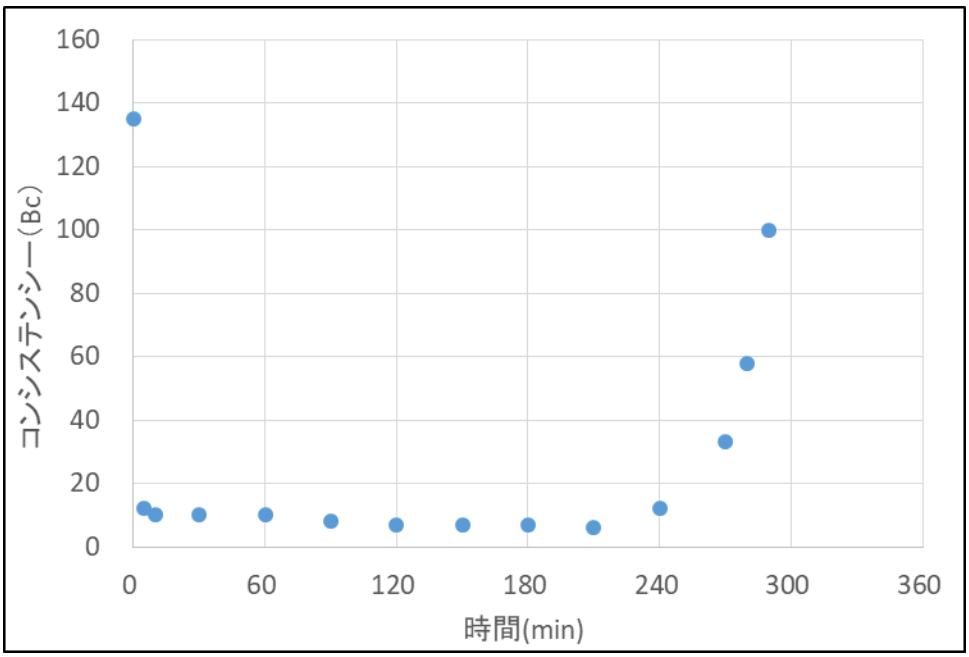


図 50：組成 F のシックニングタイムの測定結果（坑底循環温度 80℃）

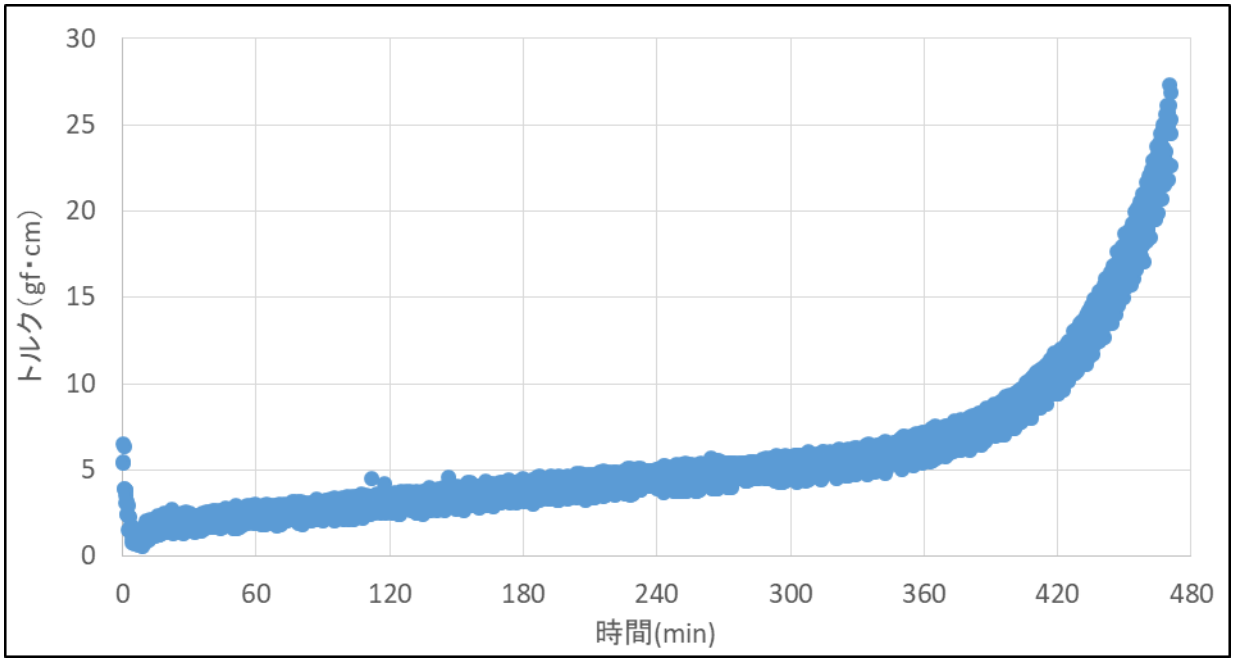


図 51：組成 F の樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間の測定結果（坑底循環温度 80℃）

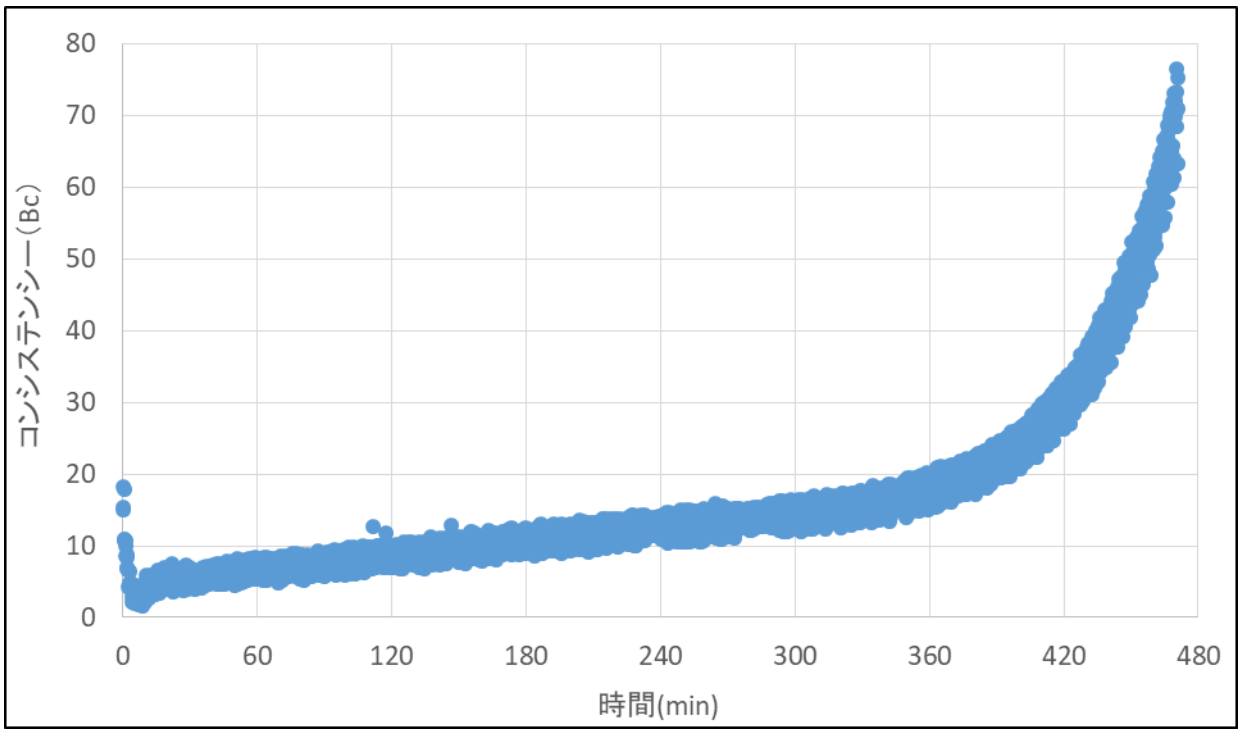


図 52：組成 F の樹脂硬化時間測定装置を用いた測定結果（トルク/コンシステンシー換算）（坑底循環温度 80℃）

シックニングタイムと樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間の結果を比較すると、シックニングタイムが 285 分で 70Bc に達しているのに対し、樹脂硬化時間測定装置では約 467 分で 70Bc に達した。

よって、どちらの試験でも早期の段階でコンシステンシーが低下し、最終的にコンシステンシーが上昇する、同様の傾向が見られたが、樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間の方が、シックニングタイムよりもかなり長くなることを確認した。

これは、既述したとおり、シックニングタイムでの測定温度は 80℃であったが、樹脂硬化時間測定装置では 50℃で試験を行ったことが大きく影響していると考えられた。

この試験結果を踏まえ、測定温度が 50℃を上回る組成においては、測定温度の違いが大きく硬化時間に影響を及ぼすため、単純な比較はできないと解釈された。

30Bc に達するまでの硬化時間は、シックニングタイムテスターによる測定では 265 分に対し、樹脂硬化時間測定装置では 412 分との結果となった。この事より、本組成は、シックニングタイムおよび樹脂硬化時間測定装置のどちらの結果においても十分な硬化時間を示したため、セメントスラリー混練時に想定外に硬化が進行する可能性は極めて低いと評価した。

測定時の水分蒸発量および温度・圧力条件を表 38 に示す。

表 38：組成 F の測定時の水分蒸発量および温度・圧力条件（坑底循環温度 80℃）

装置名	項目	測定値
樹脂硬化時間測定装置	測定時間	471 分
	蒸発水量（対溶解水）	24.2%
	蒸発水量（対セメントスラリー）	12.3%
シックニングタイムテスター	測定時の温度	80℃
	測定時の圧力	32.1MPa

6-10. GWC、S 系混和剤を用いない組成（坑底循環温度 60℃および 70℃）の硬化時間測定結果

GWC を用い、S 系混和剤を用いない R2 坑井における 1,155m および 1,614m 用のセメントスラリー組成（坑底循環温度 60℃および 70℃）にて、樹脂硬化時間測定装置における硬化時間を測定した。

この組成は、S 系混和剤を含まないため、一般的なセメントスラリーに分類される。そのため、シックニングタイムで得られた結果が重視されるため、樹脂硬化時間測定装置を用いた試験を行う必要は無いと考えられた。

しかし、R2 坑井の実証試験において、1,155m および 1,614m 区間でのセメンチングに本組成が使用される計画であるため、本装置を用いて測定を行った。

本配合は、坑底循環温度 60℃および 70℃に適応した組成である。しかし、樹脂硬化時間測定装置の恒温槽の最大水温は 50℃のため、50℃にて試験を行った。

表 39 に、本年度構築した 1,155m および 1,614m セメンチング用の組成を示す。なお、表 39 の組成を以下、組成 G と一部記載する。

なお、本配合組成を構築するにあたり、坑底循環温度 60℃および 70℃における試験をそれぞれ実施したが、設定温度差が 10℃と小さいため、結果としてどちらも同じ配合組成を採用するに至った。

表 39：組成 G と試験結果（坑底循環温度 60℃および 70℃）

設定条件	撹拌棒の直径	㎜	16
配合組成	スラリー比重	-	1.80
	GWC	kg	100
	溶解水	kg	50.1
	クニゲル GT	kg	1.0
	TD-55	kg	0.4
	消泡剤 30C	kg	0.1
	出来上がり	ℓ	84.2
試験結果	シックニングタイム	坑底循環温度,℃	70
		30Bc	4:40
		100Bc	5:04
		坑底循環温度,℃	60
		30Bc	4:45
		100Bc	5:26
	一軸圧縮強度	坑底静置温度,℃	170
		8hr, MPa	32.0
		坑底静置温度,℃	160
		8hr, MPa	30.8

図 53 に、1,155m セメンチング用配合の、図 54 に 1,614m セメンチング用配合のシックニングタイム測定結果を示す。

また図 55 および図 56 に、樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間の測定結果（実測結果およびトルク/コンシステンシー換算結果）を示す。

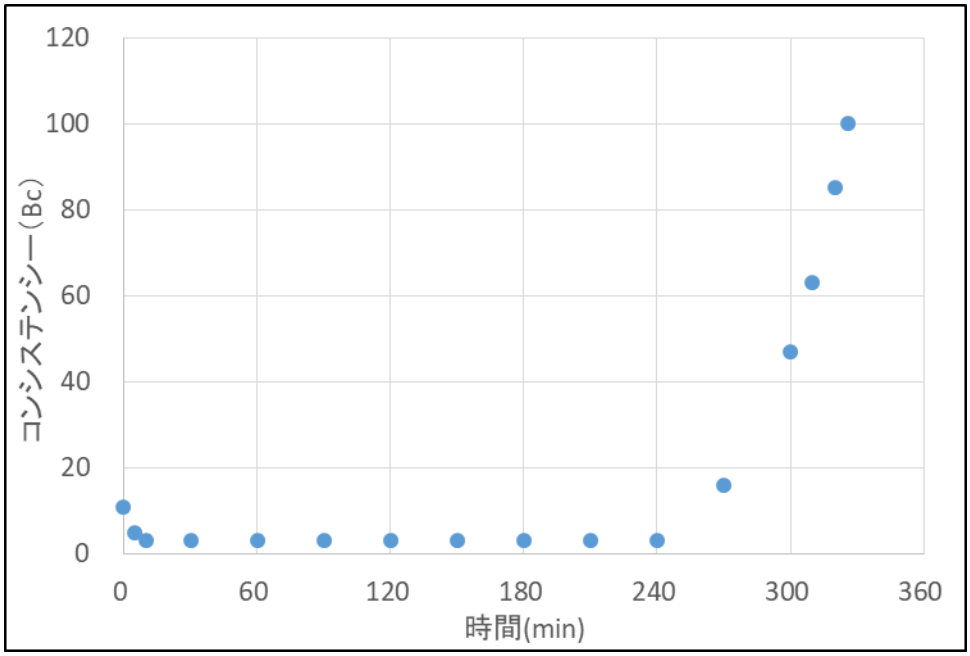


図 53：組成 G のシックニングタイム測定結果（坑底循環温度 60℃）

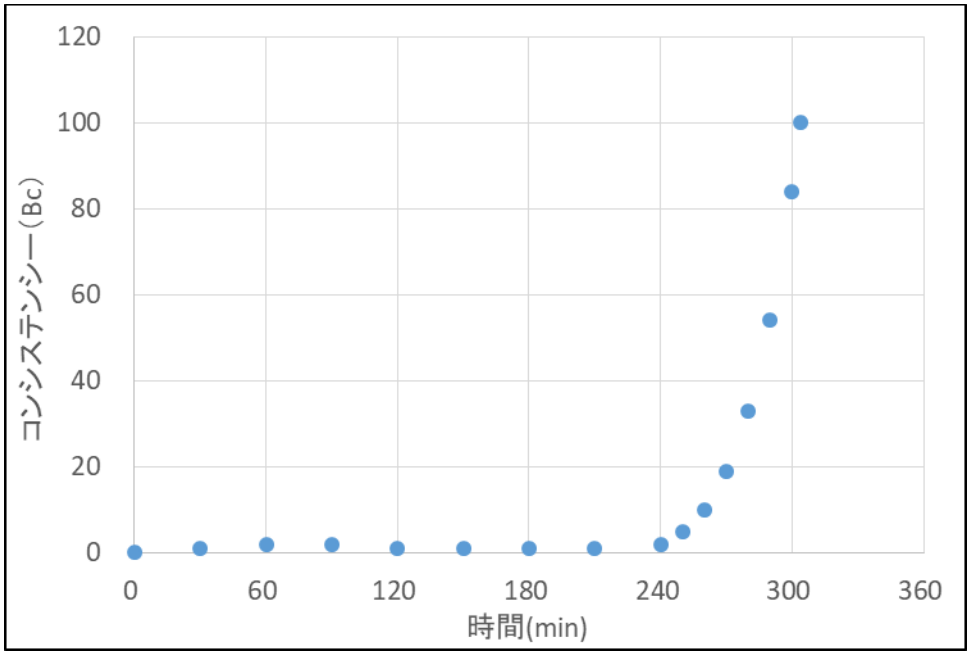


図 54：組成 G のシックニングタイム測定結果（坑底循環温度 70℃）

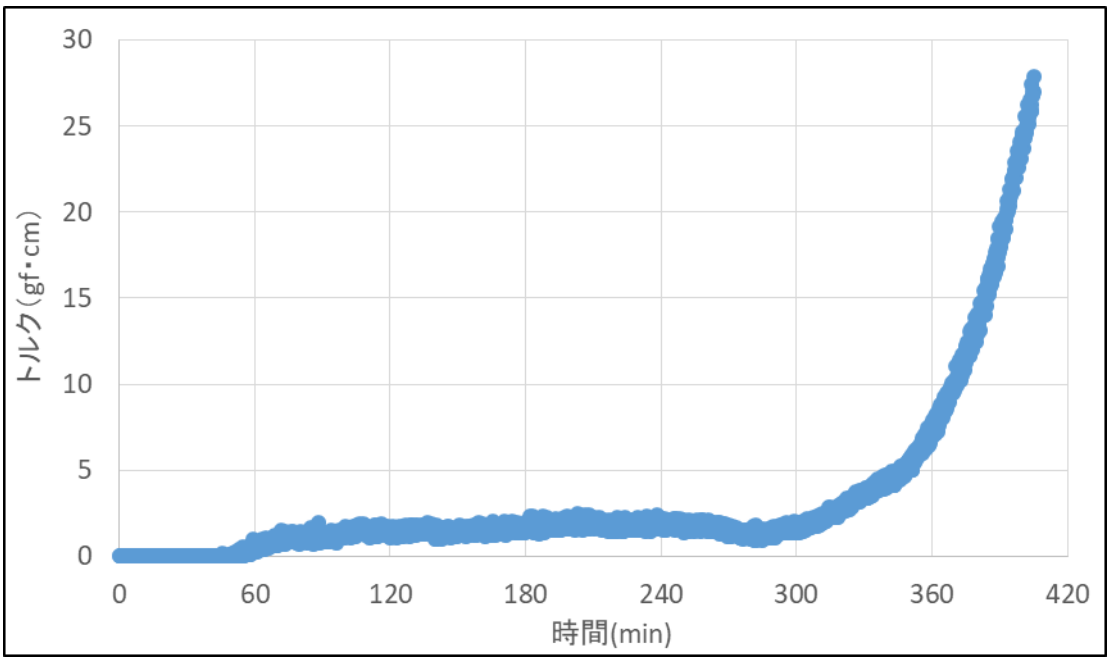


図 55：組成 G の樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間の測定結果（坑底循環温度 60℃および 70℃）

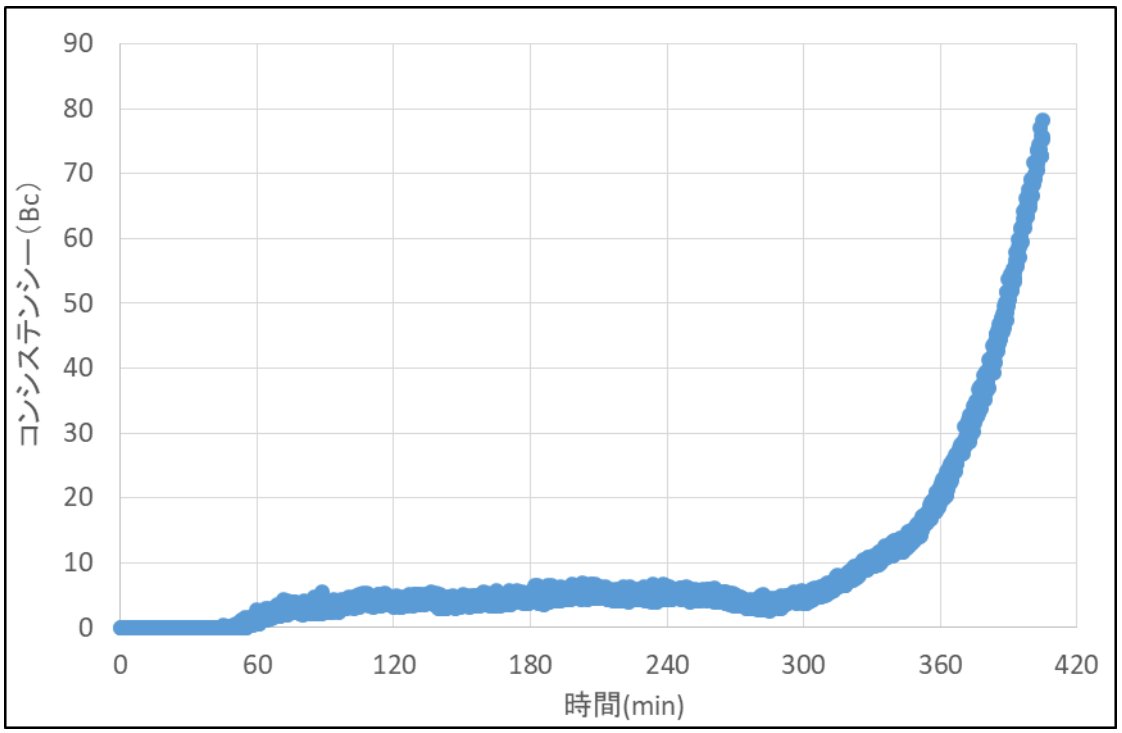


図 56：組成 G の樹脂硬化時間測定装置を用いた測定結果（トルク/コンシステンシー換算）（坑底循環温度 60℃および 70℃）

シックニングタイムと樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間の測定結果を比較すると、1,155m セメンチング用配合のシックニングタイムが 315 分で 70Bc に、1,614m セメンチング用配合のシックニングタイムが 295 分で 70Bc に達しているのに対し、樹脂硬化時間測定装置では約 401 分で 70Bc に達した。

よって、どちらの試験でも早期の段階でのコンシステンシーが低く、最終的にコンシステンシーが上昇する、同様の傾向が見られたが、樹脂硬化時間測定装置を用いた硬化時間の方が、シックニングタイムよりも長くなることを確認した。

これは、樹脂硬化時間測定装置での測定温度が 50℃であり、シックニングタイムの測定温度である 60℃または 70℃よりも低いことが影響したと考えられた。また、シックニングタイム測定時は、28.9MPa の圧力が掛かっているが、樹脂硬化時間測定装置での計測時は、大気圧となることも硬化時間に影響を与えたと解釈した。

この試験結果を踏まえ、測定温度および圧力の違いが硬化時間に影響を及ぼすため、硬化時間に関する単純な比較はできないと解釈した。

30Bc に達するまでの硬化時間は、シックニングタイムテスターによる測定では 280 分程度であり、樹脂硬化時間測定装置では 370 分となった。この事より、本組成は、シックニングタイムおよび樹脂硬化時間測定装置のどちらの結果においても十分な硬化時間を示したが、S 系混和剤を含まない組成であるため、シックニングタイムの硬化時間を重視すべきであると評価した。

測定時の水分蒸発量および温度・圧力条件を表 40 に示す。

表 40：組成 G の測定時の水分蒸発量および温度・圧力条件
（坑底循環温度 60℃および 70℃）

装置名	項目	測定値
樹脂硬化時間測定装置	測定時間	405 分
	蒸発水量（対溶解水）	12.0%
	蒸発水量（対セメントスラリー）	7.1%
シックニングタイムテスター（1,155m セメンチング用）	測定時の温度	60℃
	測定時の圧力	20.5MPa
シックニングタイムテスター（1,614m セメンチング用）	測定時の温度	70℃
	測定時の圧力	28.9MPa

6-11. まとめ

樹脂硬化時間測定装置を用い、各組成に対し、セメントスラリーの硬化時間を測定し、シックニングタイムの値と比較した。

その結果、普通ポルトランドセメントを用いた組成では、樹脂硬化時間測定装置で得られた硬化時間が、シックニングタイムよりも短くなる傾向を確認した。これは、GWC に比べ、普通ポルトランドセメントの水和反応が短時間で進行し、コンシステンシーが上昇しやすいためと考えられた。また、樹脂硬化時間測定装置においては、測定中に水分の蒸発が生じるため、より硬化が促進されやすいと解釈した。

普通ポルトランドセメントを用い、S 系混和剤を用いた組成（低脱水配合）においては、シックニングタイムで得られた数値が 340 分で 70Bc に達したのに対し、樹脂硬化時間測定装置では約 116 分で 70Bc に達しており、より短時間で硬化が進行することを確認した。よって、普通ポルトランドセメントと S 系混和剤を併用した組成においては、シックニングタイムの硬化時間が実際のセメントスラリーの硬化時間よりも長く計測される可能性があることを確認した。

平成 31 年度の実証試験において、第 8 回セメンチング（普通ポルトランドセメント、S 系混和剤あり、低脱水配合）実施中、コンクリートポンプの流量が低下し、ポンプに時間を要した際、タンク内のセメントスラリーの流動性が低下したため、タンク内に残存したセメントスラリーの送入を断念した事象が発生した。

この時の配合組成は、上述した普通ポルトランドセメントを用い、S 系混和剤を用いた組成（低脱水配合）と同一である。この事より、この組成においては、シックニングタイムで得られた硬化時間よりもむしろ、樹脂硬化時間測定装置の硬化時間を重視すべきと評価した。

この事より、今後 S 系混和剤を用いた配合組成の硬化時間を測定する場合、シックニングタイムテスターによる測定のみならず、樹脂硬化時間測定装置のような機構を有した装置にて硬化時間を確認することが重要と解釈された。