

凝結遅延型ソイルセメントの凝結過程の モニタリングと品質管理

大谷 崇・藤原 靖

Keywords: soil-cement, setting, fluidity, quality control, temperature, shear strength
ソイルセメント, 凝結硬化, 流動性, 品質管理, 温度, セン断強さ

1. はじめに

泥水セメント系材料や原位置攪拌ソイルセメント等の土セメント系混合材料による地中連続壁の造成において、特に都市部の施工現場によっては時間的、空間的に施工が制限される場合がある。このような場合、材料の凝結開始時間を遅延させることによって芯材建て込みの時間確保や地中連続壁造成の中断及び材料の打ち継ぎが可能になり、施工自由度が高まって施工工程の短縮が期待できる。凝結遅延型の泥水セメント系材料^{1), 2)}や原位置攪拌ソイルセメント等の土セメント混合材料では、凝結遅延時間の把握と凝結開始確認の手法が超遅延剤の添加量等の配合設定や施工時の品質管理で重要である。

本実験では、掘溝式連続地盤改良（TRD）工法を想定したソイルセメントの超遅延剤添加量を変えながら未硬化時の幾つかの物性を経時的に計測し、計測結果をもとに、凝結遅延型ソイルセメントの品質管理の指標として最適な、施工現場でも簡便に計測できる物性を検討した。次に、TRD工法において掘削液混合土に固化液を注入すると攪拌混合直後からソイルセメントにゲル化が見られチキソトロピックな性状を示す事例に対して、超遅延剤の添加によるゲル化抑制の検討を上記モニタリング方法の検討で用いた物性を適用して行った結果を報告する。

2. 凝結遅延型ソイルセメントの凝結過程のモニタリングと品質管理

2.1 使用材料

使用材料を表-1に示す。土は、細粒分（＜0.075 mm）含有率が30 %になるように珪砂3～7号と比重調整用粘土を混合した模擬土とした。

2.2 実験手順

表-1 使用材料
materials

材料	仕様	密度 (Mg/m ³)
模擬土 (S)	細粒分 (＜0.075 mm)	2.65
セメント (C)	普通ポルトランドセメント	3.15
ベントナイト (B)	群馬県産300メッシュ	2.65
水 (W)	水道水	1.00
超遅延剤 (R)	オキシカルボン酸塩系	1.00
増粘剤 (A)	アニオン系ポリマー	1.00

以下の混練と計測は、室温を20℃に調整した恒温室内で行った。

2.2.1 ソイルセメントの材料組成

ソイルセメントの材料組成の設定では、原位置攪拌工法の一つであるTRD工法の3パス施工を想定した。これは、対象地盤に掘削液（ベントナイト液）を注入・攪拌混合しながら掘削を行う退避掘削工程（1パス）と、起点に一旦戻り再度固化液（セメントミルク）を注入・攪拌混合しながら壁を造成する造成工程（3パス）からなる施工法である。

超遅延剤の添加量を変えながら3ケースを設定し（表-2）、予測計算法³⁾でソイルセメントの材料組成を計算した（表-3）。

2.2.2 ソイルセメントの混練

ペール缶に水、ベントナイト、増粘剤を計量して投入し、ハンドミキサーで数分間攪拌混合した後、そのまま静置した。翌日、土、セメント、超遅延剤を計量して投入し、混練状況を確認しながらハンドミキサーで10分間攪拌混合した。

2.2.3 計測

表-2 材料組成予測計算パラメータ
parameter for soil-cement composition calculation

地盤条件	乾燥密度		1.71 Mg/m ³
	飽和度		100 %
注入材条件*	掘削液（5 %ベントナイト液）		400 kg
	固化液配合	セメント量	200 kg
		水セメント比	100 %
		超遅延剤	0, 2, 3 kg
		増粘剤	1.2 kg
攪拌混合条件	排出注入比		60 %
	注入材分割数		1000

*) 地盤及び掘削液混合土1 m³に対して

表-3 ソイルセメント材料組成
material composition of soil-cement

No.	材料組成 (kg/m ³)						湿潤密度 (Mg/m ³)
	C	B	S**	W	R	A	
1	185	14	1156	499		1.1	1.855
2	185	14	1154	497	1.8	1.1	1.854
3	185	14	1154	497	2.8	1.1	1.853

**）乾燥土



写真-1 ハンドベーンせん断試験機
material composition of soil-cement



写真-2 せん断強さ計測状況
measurement of shear strength

(1) 混練直後の性状とブリーディング

混練直後のソイルセメントについて、温度と湿潤密度を計測した。500 mLのブリーディング袋で、ソイルセメントが硬化するまで（24時間後）ブリーディングを計測した。

(2) 温度

200×200×150 mmの防水処理した木製モールドにソイルセメントを打設し、乾燥しないように濡れた布で覆って静置した。ソイルセメントの中心に熱電対を設置し、データロガーで温度を経時的に計測した。

(3) せん断強さ

本実験で使用したハンドベーンせん断試験機はトルク計測部とベーンブレードからなり、ベーンブレードはD 20×H 40 mmである（写真-1）。トルク計測部は、凝結遅延時間におけるせん断強さの微小な変化を追跡できるように、数段階の計測範囲のトルク計測部を製作した。これにより、0.17～33.4 kN/m²のせん断強さが計測できる。トルク計測部を適宜交換しながら、温度計測用の試料で経時的にせん断強さを計測した（写真-2）。

(4) テーブルフロー

ソイルセメントを500 mL容器に取り分けて、経時的にテーブルフローを計測した。計測は同一試料をできるだ

け均一になるように練り返した後行った。計測以外では、乾燥しないように濡れた布で覆って静置した。

(5) 塑性粘度

ソイルセメントを500 mL容器に取り分けて、経時的に回転粘度計で塑性粘度を計測した。計測は同一試料をできるだけ均一になるように練り返して行った。計測以外では、乾燥しないように濡れた布で覆って静置した。

表-4 混練直後の性状とブリーディング
properties of soil-cement after mixing

No.	温度 (°C)	湿潤密度 (Mg/m ³)	ブリーディング率 (%)
1	24.3	1.896	1.6
2	23.9	1.901	2.7
3	24.0	1.894	5.7

2.3 実験結果

(1) 混練直後の性状とブリーディング

No.1, 2, 3のブリーディングはそれぞれ1.6, 2.7, 5.7 %だった。超遅延剤の添加量に応じて凝結遅延時間が長

くなるため、ブリーディングが大きくなったと考えられる(表-4)。

(2) 温度

温度の計測結果を図-1に示す。混練直後の温度は全ケースとも24℃程度で(表-4)、超遅延剤の添加量によらないことから攪拌混合による発熱と考えられる。超遅延剤の添加量に応じて水和反応による発熱の開始時間は遅くなった。

本実験では凝結開始時の温度上昇の勾配が小さく明確には追跡できなかったが、これはモールドを断熱処理しなかったためと考えられる。モールドを断熱処理すれば凝結開始時の温度変化をより明確に追跡できるが、本実験の簡便な方法でも水和反応による発熱のピークを得ることができたので、施工現場での計測にも適用できると考えられる。

(3) セン断強さ

せん断強さの計測結果を図-2に示す。発熱の開始時間と同様に、超遅延剤の添加量に応じてせん断強さの発現の開始時間は遅くなった。

藤原らの研究^{1), 2)}では温度のピーク時からせん断強さの発現が見られたが、本実験では発熱が見られる数時間前からせん断強さの発現が見られた。これはより小さなせん断強さを計測できるように試験機を改良したためで、温度では明確に追跡できなかった凝結開始時の性状変化をせん断強さで追跡できる。温度とせん断強さを同時に計測することで、凝結遅延時間の性状変化や凝結開始後の水和反応の進行をより明確に追跡することができると考えられる。

(4) テーブルフロー

テーブルフローの計測結果を図-3に示す。混練直後のテーブルフロー値は、超遅延剤を添加しなかったケース(No.1)では落下前が139 mm、落下後が213 mmだったが、超遅延剤を添加したケース(No.2, 3)では落下前が170 mm、落下後が230 mmで流動性が大きくなった。全ケースとも時間の経過に伴ってテーブルフロー値は小さくなった。せん断強さが発現する時にはチキソトロピックな性状を示すようになり、テーブルフロー値は落下前は100 mm、落下後は170 mm程度で計測不可能になるまで推移した。これは、本実験のテーブルフローの計測(繰り返し)間隔と水和反応(凝結)速度のバランスによるもので、計測間隔によってはテーブルフロー値は変動するものと考えられる。

テーブルフローは、温度やせん断強さに比べて凝結遅延時間や凝結開始時の性状変化に対して明確な変化が見られず鈍感である。よって、凝結遅延時間や凝結開始時

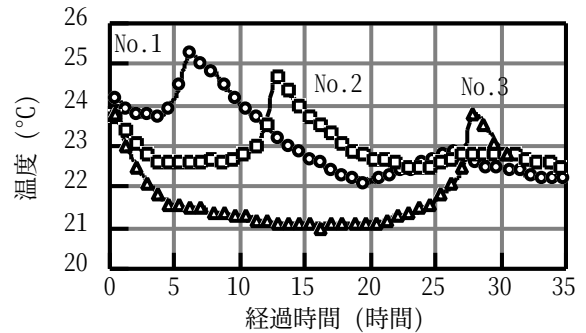


図-1 ソイルセメントの温度変化
change for temperature of soil-cement

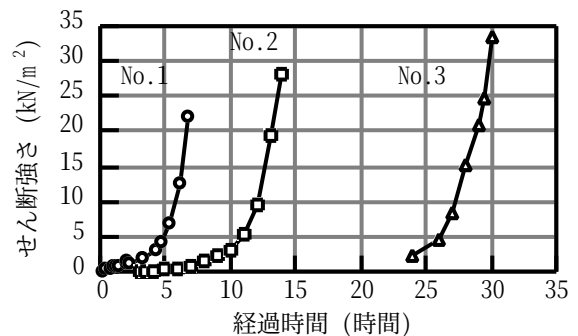


図-2 ソイルセメントのせん断強さ変化
change for shear strength of soil-cement

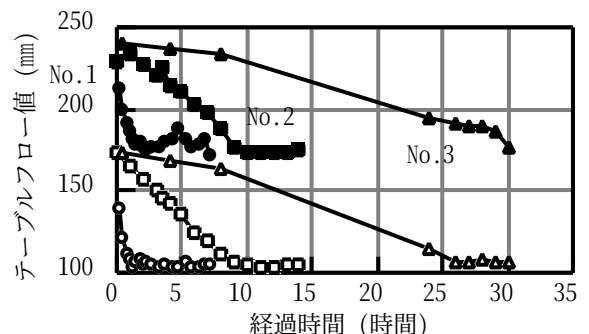


図-3 ソイルセメントのテーブルフロー変化 (テーブルフロー値は2方向測定値の平均値)
change for table flow of soil-cement

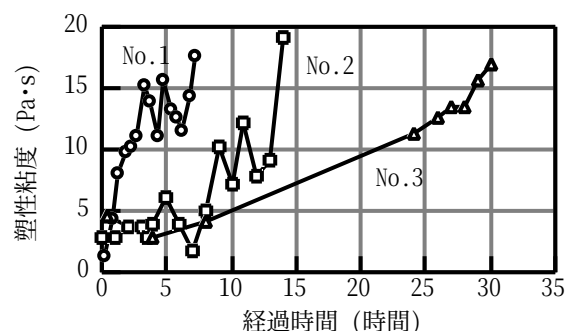


図-4 ソイルセメントの組成粘度変化
change for coefficient of viscosity of soil-cement

の詳細な性状変化の追跡にはあまり適さないと考えられる。

(5) 塑性粘度

塑性粘度の計測結果を図-4に示す。せん断強さの発現と同様に、超遅延剤の添加量に応じて塑性粘度の発現の開始時間は遅くなった。

塑性粘度は、発熱の開始やせん断強さの発現が見られる前から発現が見られた。よって、本実験における凝結遅延型ソイルセメントの凝結遅延時間や凝結開始時の性状変化に対するそれぞれの物性の敏感さの度合いは、塑性粘度 > せん断強さ > 温度 >> テーブルフローで、塑性粘度が最も大きかった。しかし、計測前の練り返しの程度による試料の不均一性が計測に大きく影響し、計測結果が変動する傾向があった。特に凝結が開始してからその影響は大きくなった。また、回転粘度計のような精密計測機器は施工現場での使用には適さず、簡便さを要求する施工現場での計測にはあまり適さないと考えられる。

以上の結果より、凝結遅延時間や凝結開始時の性状変化の明確さや施工現場での計測を考慮すると、温度とハンドベーンせん断試験機（0.17～33.4 kN/m²）によるせん断強さの計測の組合せが、ソイルセメントの凝結遅延時間と凝結開始時の性状変化を最も明確に、簡便な計測で追跡できると考えられる。

3. 超遅延剤によるソイルセメントのゲル化の抑制と未硬化時性状

3.1 使用材料

使用材料を表-5に示す。本実験で用いた掘削液混合土は対象地盤（マサ土）に掘削液配合（地盤1 m³に対して）がベントナイト5%，300 kg（291 L）で、施工時の掘削液混合土は湿潤密度が1.880 Mg/m³である。

3.2 実験手順

以下の混練と計測は、室温を20℃に調整した恒温室内で行った。

3.2.1 ソイルセメントの材料組成

超遅延剤の添加量を変えながら4ケースを設定し（表-6），外割計算でソイルセメントの材料組成を計算した（表-7）。

3.2.2 ソイルセメントの混練

表-7に従って材料を計量し、施工を想定し、ミキサーで30分間攪拌混合した。

3.2.3 計測

(1) 混練直後の性状とブリーディング

表-5 使用材料
materials

材料	仕様	密度 (Mg/m ³)
掘削液混合土 (S)	現地採取	-
セメント (C)	高炉セメントB種	3.05
水 (W)	水道水	1.00
超遅延剤 (R)	オキシカルボン酸塩系	1.00

表-6 材料組成計算パラメータ
parameters for soil-cement composition calculation

掘削液混合土条件	湿潤密度		1.880 Mg/m ³
	飽和度		100 %
注入材料条件*	固化液配合	セメント量	250 kg
		W/C比	100 %
		超遅延剤	0, 2.5, 5.0, 7.5 kg

*) 掘削液混合土1 m³に対して

表-7 ソイルセメントの材料組成
material composition of soil-cement

No.	材料組成 (kg/m ³)				湿潤密度 (Mg/m ³)
	C	S*	W	A	
1	188	866	613		1.666
2	187	864	612	1.9	1.665
3	187	862	610	3.7	1.663
4	187	861	609	5.6	1.662

**) 乾燥掘削混合土

混練直後のソイルセメントについて、温度と湿潤密度を計測した。500 mLブリーディング袋でソイルセメントが硬化するまで（24時間後）ブリーディングを測定した。

(2) せん断強さ

ソイルセメントを500 mL容器に取り分けて、ソイルセメントが乾燥しないように密封して静置した。測定が不可能になるまで、経時的にハンドベーンせん断試験機でせん断強さを測定した。

(3) テーブルフロー

ソイルセメントを500 mL容器に取り分けて、経時的にテーブルフローを計測した。計測は同一試料をできるだけ均一になるように練り返した後行った。計測以外では、乾燥しないように濡れた布で覆って静置した。

表-8 混練直後の性状とブリーディング
properties of retarded solidified soil-cement

No.	温度 (°C)	湿潤密度 (Mg/m ³)	ブリーディング率 (%)
1	17	1.706	0.6
2	17	1.681	1.8
3	18	1.713	2.7
4	18	1.689	8.2

表-9 セン断強さの変化
change for shear strength of soil-cement

No.	せん断強さ (kN/m ²)			
	1時間 経過後	3時間 経過後	5時間 経過後	24時間 経過後
1	< 0.34	0.21	0.21	-
2	< 0.34	0.60	1.67	-
3	< 0.34	< 0.34	< 0.34	3.04
4	< 0.34	< 0.34	< 0.34	2.45

-) 測定不可

表-10 テーブルフロー値の変化
change for value of table flow of soil-cement

No.	テーブルフロー値* (mm)							
	0時間 経過後		3時間 経過後		5時間 経過後		24時間 経過後	
	前	後	前	後	前	後	前	後
1	171	229	101	148	104	155	-	-
2	211	259	107	174	104	174	-	-
3	219	272	247	o.f.	227	o.f.	108	165
4	218	279	245	o.f.	259	o.f.	109	182

*) テーブルフロー値は2方向測定値の平均値

-) 測定不可

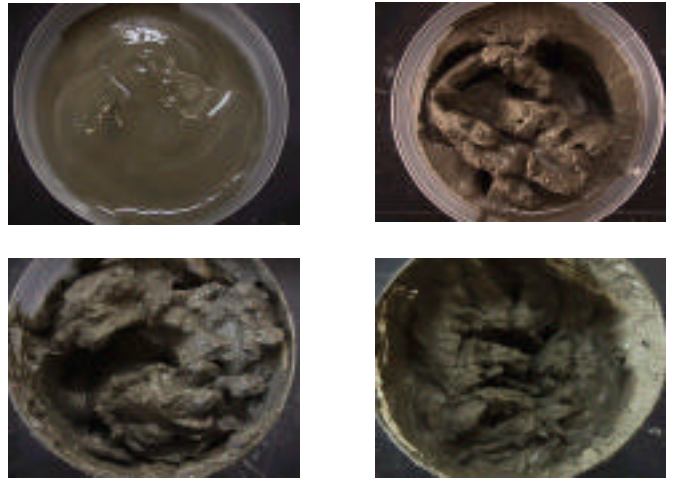
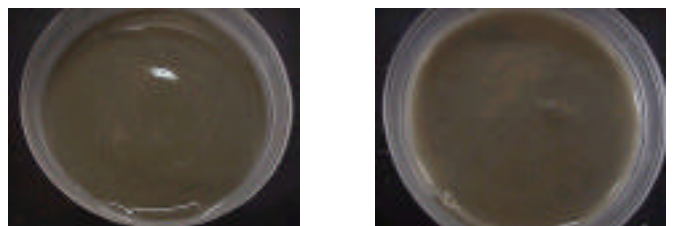
o.f.) over flow (> 300 mm)

3.2 実験手順

測定結果を表-8～10に示す。ソイルセメントの状況を写真-3～6に示す（薬さじによる攪拌後）。

超遅延剤無添加のケース（No.1）でも，超遅延剤添加のケース（No.2～4）と同様，混練直後はゲル化は見られなかった（写真-3～6）。しかし，No.1は薬さじ等による攪拌では，その他のケースに比べて若干抵抗が大きかった。

ブリーディングは，超遅延剤添加量が大きくなるに伴い大きくなる傾向があった。5.0 kg添加のケース（No.3）では2.7 %だったが，7.5 kg添加のケース

写真-3 No.1ソイルセメントの経時的性状変化（左上：混練直後 右上：3時間経過 左下：5時間経過 右下：24時間経過）
change for state of No.1 soil-cement写真-4 No.2ソイルセメントの経時的性状変化（左上：混練直後 右上：3時間経過 左下：5時間経過 右下：24時間経過）
change for state of No.2 soil-cement写真-5 No.3ソイルセメントの経時的性状変化（左上：混練直後 右上：3時間経過 左下：5時間経過 右下：24時間経過）
change for state of No.3 soil-cement

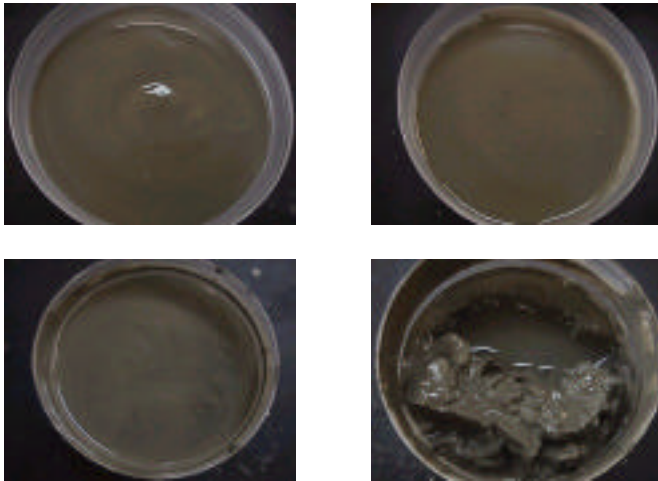


写真-6 No.4ソイルセメントの経時的性状変化（左上：混練直後 右上：3時間経過 左下：5時間経過 右下：24時間経過）
change for state of No.4 soil-cement

(No.4) では8.2%と著しく大きくなった。

せん断強さは、超遅延剤添加量が2.5 kgまでは (No.1, 2) , 混練3時間経過後にはせん断強さが発現したが、5.0 kg添加のケース (No.3) では24時間後にせん断強さが発現し、著しい凝結開始時間の遅れがあった。7.5 kg添加のケース (No.4) もほぼ同様のせん断強さの発現があった。

テーブルフローは、超遅延剤添加のケース (No.2～4) では、超遅延剤無添加のケース (No.1) より混練直後のテーブルフロー値（落下前）は50 mm程度大きくなって流動性が大きくなったが、添加量の違いによって大きな差は見られなかった。超遅延剤無添加と超遅延剤2.5 kg添加のケース (No.1, 2) では、3時間経過後はテーブルフロー値（落下前）は70～100 mm程度低下し、ゲル化が認められた。5.0, 7.5kg添加のケース (No.3, 4) では、5時間経過後もゲル化は認められず、1日経過後にテーブルフロー値がNo.1, 2の5時間経過後と同様な値になってゲル化が見られた。

以上の結果より、超遅延剤を添加することでソイルセメントの凝結開始時間を遅延させる他にも、ゲル化の抑制、流動性の改善等の効果があることがわかった。しかし、添加量の設定においては本実験の結果からも分かるように、わずかの添加量の違いによって流動性や凝結遅延時間に著しい違いが出る可能性がある。よって、配合

計画において超遅延剤の最適な添加量を検討する必要があると考えられる。

4. まとめ

凝結遅延型ソイルセメントの温度、せん断強さ、テーブルフロー及び塑性粘度を経時的に計測し、施工現場における凝結遅延型ソイルセメントの品質管理の指標に適切な物性を検討した。

その結果、凝結遅延時間や凝結開始時の性状変化の明確さや施工現場での計測を考慮すると、温度とハンドベーンせん断試験機 (0.17～33.4 kN/m²) によるせん断強さの計測の組合せが、ソイルセメントの凝結遅延時間と凝結開始時の性状変化を最も明確に、簡便な計測で追跡できると考えられる。これらの物性を、施工現場でも計測可能な凝結遅延型ソイルセメントの品質管理の指標として提案する。

次に、TRD工法において掘削液混合土に固化液を注入すると攪拌混合直後からソイルセメントにゲル化が見られチキソトロピックな性状を示す事例に対して、超遅延剤の添加によってゲル化抑制を検討した。

その結果、超遅延剤を添加することでソイルセメントの凝結開始時間を遅延させる他にも、ゲル化の抑制、流動性の改善等の効果があることがわかった。しかし、添加量の設定においては本実験の結果からも分かるように、わずかの添加量の違いによって流動性や凝結遅延時間に著しい違いが出る可能性がある。よって、配合計画において超遅延剤の最適な添加量を検討する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 藤原靖他, 凝結時間を制御した泥水固化材の性質, 第34回地盤工学研究発表会, pp.835-836, 1999.7
- 2) 藤原靖他, 凝結時間を遅延させた泥水セメント系材料の凝結硬化特性と適用, 土木学会論文集No.694/3-57, 17-27, 2001.12
- 3) 藤原靖他, ソイルセメントの材料組成の予測配合と強度特性, 土木学会第54回年次学術講演会, pp.478- 479, 1999.9