

遅硬性ソイルセメントの基礎的な評価試験および開発

諸 富 鉄之助 三 浦 俊 彦

Basic Evaluation Testing and Development of Soil Cement with Delayed Solidification

Tetsunosuke Morotomi Toshihiko Miura

Abstract

Soil cement is used for piles and underground walls. However, it may be necessary to delay hardening and ensure fluidity to secure the construction time of the core material and rationalize workability. In some cases, it is difficult to achieve the target quality, depending on the conditions. To summarize the current issues, we first evaluated the effects of W/C adjustment and the addition of retardants on the quality of soil cement. Next, a slow-acting solidifier developed by Obayashi Corporation was used to evaluate the impact of the solidifier on the quality of the soil cement. In this study, we report the results of these studies and a field case of slow-acting soil cement.

概 要

ソイルセメントは施工時の仮設支持構造物や地中壁に使用されるが、芯材建込み時間の確保等の施工の合理化から、硬化を遅らせ流動性の確保が求められる場合がある。空頭制限等の施工条件が厳しい現場や土質が粘性土である場合などでは、強度や流動性の目標品質を達成することが困難なケースもある。本検討では、まず砂質土を用いた遅硬性ソイルセメントの品質について、遅延剤を適切に添加することで目標を達成した。次に粘性土を用いたソイルセメントについて、水固化材比の調整や遅延剤等の添加が品質へ及ぼす影響を評価した。流動性の確保と強度の両立が難しいが、固化材によっては目標を達成できた。最後に、大林組が新たに開発した遅硬性に優れた固化材を使用し、室内試験および現場配合試験を実施した。その結果、開発固化材を使用した遅硬性ソイルセメントは、従来のソイルセメントと比べて、より流動性や強度の目標品質を達成できることを確認した。

1. はじめに

施工時の仮設支持構造物や、止水や土留めを目的とした地中連続壁において、土とセメントを混合したソイルセメントが広く利用されている。ソイルセメントの性能は、一軸圧縮強度等の強度で評価されるが、施工方法に応じて流動性や硬化時間等の調整が求められることが多い。これらソイルセメントの性能は、セメントと混合する土の性状（土質）によって大きく影響を受けるため、セメントと土の化学反応を事前に理解して施工することが必要である。

近年では、芯材の建込み時間の確保のために、ソイルセメントの強度は確保した状態で、硬化を遅らせて流動性を一定時間確保することが求められるケースがある。この場合、コンクリート分野で用いられている流動化剤や硬化遅延剤が利用され、施工される場合が多い。しかし、砂質土では一定の効果があるものの、粘性土では流動性や遅延時間の確保、強度発現が目標品質を達成できない場合が多く、課題となっている¹⁾。

そこで本論文では、2章でまず流動性を確保しやすい砂質土を用いた遅硬性ソイルセメントの品質について報告する。砂質分を多く含む互層地盤でのCRM工法による鋼製連壁造成現場を想定して、配合試験を実施した。次に3章で、流動性を確保しづらい粘性土を用いた遅硬性ソイルセメントの品質に関する基礎的な検討について報告す

る。粘性土地盤でのSMW工法やe-コラム工法²⁾を想定して、配合試験を実施した。流動性や硬化遅延性、強度発現に影響を及ぼすと考えられる水固化材比（以下、W/C）、流動化剤、遅延剤および固化材の影響を評価し、それらの課題を整理した。最後に4章で、開発した遅硬性ソイルセメントについて報告する。具体的には、ソイルセメントで一般に使用される高炉セメントB種（以下、BB）とセメント系固化材と併せて、初期の流動性と硬化遅延性に優れるように成分を調整した固化材（以下、開発固化材）を用いて、粘性土における硬化遅延性の評価を実施した。また、開発固化材を使用した現場配合試験についても記載する。

2. 砂質土を用いた遅硬性ソイルセメント

2.1 試験方法

CRM工法²⁾によって鋼製連壁を造成する工事を想定した。本工法では、掘削した土を原料にし、地上プラントにてセメントミルクと混合してソイルセメントを作製する。それを掘削した孔に打設し、その後芯材(NS-BOX)を建て込む。ソイルセメントが自立する程度に硬化した後に、隣のエレメントの掘削が可能になる。そのため、工期短縮を目的とし、早期のソイルセメントの硬化が望まれることが多い。そこでソイルセメントの目標品質は、18時間後の流動性がシリンダーフロー³⁾で160 mm以

上、3日後の一軸圧縮強度が自立可能な強度である100 kN/m²、28日後が1200 kN/m²とした。

Fig. 1に示す地盤から採取した土を、CRM工法で想定される粒度に調整して試料土を作製した。細粒分が少ない土（以下、S土）と、それに比べてやや細粒分が多い土（以下、C土）の2ケースである。試料土の物性値をTable 1に示す。固化材にはBBを、遅延剤にはオキシカルボン酸系を使用した。遅延剤の効果が小さくなる夏場の施工を想定し、混練り水は30°Cに調整した。

試験条件をTable 2に示す。土1 m³に対してベントナイト30 kg、固化材350 kgを添加する設定として、スラリー作製の水にベントナイト、遅延剤、固化材の順に添加・攪拌し、固化材スラリーを作製した。遅延剤添加量は固化材（重量）に対して1~2 wt-C%とした。スラリー中の水量は、ポンプ圧送性等の施工性を考慮し、作製直後のソイルセメントの流動性がシリンダーフローで250~300 mmとなるように調整した。その後、土と固化材スラリーを混合・攪拌しソイルセメントを作製した。作製直後、18時間後にシリンダーフロー試験を実施した。また別途作製したソイルセメントを用いて、3、28日養生後に一軸圧縮強度を測定した。

2.2 結果

遅延剤添加量と18時間後のシリンダーフローの関係を図Fig. 2に、遅延剤添加量と3、28日養生後の一軸圧縮強度の関係を図Fig. 3に示す。遅延剤添加量が増加すると、いずれのケースでも18時間後のシリンダーフローが増加し、一軸圧縮強度が減少した。遅延剤添加量を1.1 wt-C%と

すると、C土のケースでは遅延剤過少となり、18時間後の流動性を160 mm以上確保できなかった。また遅延剤添加量を1.7 wt-C%とすると、S土のケースでは遅延剤過剰となり、3日後強度が100 kN/m²以下となった。これらから、本条件での適切な遅延剤添加量は1.4 wt-C%であった。本章の検討により、砂質土の場合は、汎用的なBBを使用し、かつ遅延剤添加量を適切に設定することによって、十分に目標品質を達成できることがわかった。

3. 粘性土を用いた遅硬性ソイルセメント

3.1 W/Cの影響

3.1.1 試験方法 本節の検討では、機械攪拌工法によるSMW造成工事を想定した。本工法では、固化材スラリーを注入しながら地盤を掘削し、原位置で土を混合攪拌・改良する。その後、現場によってはH鋼等の芯材を建て込むこともある。目標品質は、芯材を建て込むことのできる流動性として、1時間後のテーブルフローで160 mm¹⁾、28日後の一軸圧縮強度を1200 kN/m²とした。

試料土には細粒分質砂と砂質シルトを使用した。Fig. 4に粒径加積曲線をそれぞれ示す。細粒分含有率は、細粒分質砂で約45%、砂質シルトで約80%であった。また土質試験の結果、細粒分質砂では塑性限界、液性限界がそれぞれ26.6%、38.8%で、砂質シルトでは塑性限界、液性限界がそれぞれ29.7%、50.2%であった。固化材はBBを使用した。

試験条件をTable 3に示す。土1 m³に対して固化材180 kgを添加する設定とし、W/Cを変化させて固化材ス

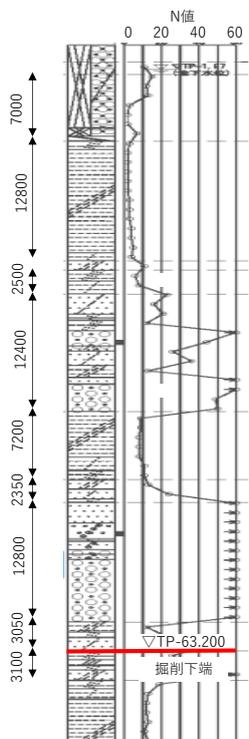


Fig. 1 土質柱状図
Soil Profile

Table 1 試料土の物性値

| Results of Soil Characteristic Tests | | | | |
|--------------------------------------|-------------------|-------|-------|------|
| 項目 | 単位 | S土 | C土 | |
| 含水比 | % | 25.7 | 29.7 | |
| 土粒子密度 | g/cm ³ | 2.680 | 2.675 | |
| 粒度 | 礫分 | % | 20.2 | 13.8 |
| | 砂分 | % | 46.1 | 40.2 |
| | シルト分 | % | 21.6 | 30.4 |
| | 粘土分 | % | 12.1 | 15.6 |

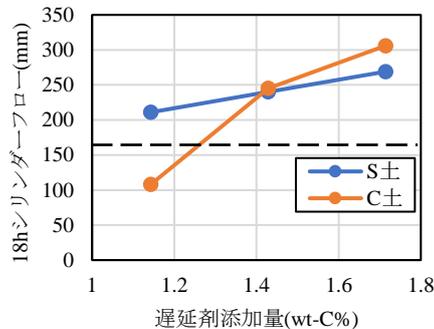


Fig. 2 遅延剤-シリンダーフロー関係
Amount of Retardant - Cylinder Flow (18h) Relationships

Table 2 試験条件
Conditions of Test

| 対象土質 | 固化材 | | | 遅延剤添加量 (wt-C%) |
|------|-----|--------------------------|---------|----------------|
| | 種類 | 添加量 (kg/m ³) | W/C (%) | |
| S土 | BB | 350 | 190 | 1.1 |
| | | | | 1.4 |
| | | | | 1.7 |
| C土 | BB | 350 | 200 | 1.1 |
| | | | | 1.4 |
| | | | | 1.7 |

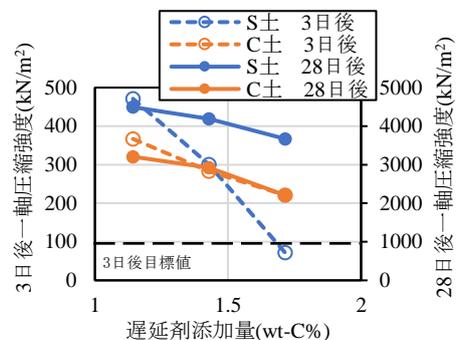


Fig. 3 遅延剤-一軸圧縮強度関係
Amount of Retardant - UCS (3d, 28d) Relationships

ラリーを作製した。その後、土と固化材スラリーを、ソイルミキサーを用いて2分間混合攪拌してソイルセメントを作製した。作製直後と1時間後にテーブルフロー試験(JIS R 5201)を実施した。また、7日と28日間室温で密閉養生した後に一軸圧縮強度を測定した。

3.1.2 結果 それぞれの試料土におけるW/Cとテーブルフロー(直後と1時間後)の関係をFig. 5, 6に、W/Cと一軸圧縮強度の関係をFig. 7, 8に示す。W/Cが大きくなるにつれて、テーブルフロー値は大きくなり流動性が増加した。一方で一軸圧縮強度は、W/Cの増加とともに減少し、流動性と一軸圧縮強度の関係は相反した。

細粒分質砂ではW/C=400%の条件で、流動性と一軸圧縮強度それぞれの目標を達成した。一方で細粒分の多い砂質シルトでは、いずれのW/Cでも流動性と一軸圧縮強度の目標を同時に達成することはできなかった。一軸圧縮強度の目標値を28日養生後で2000 kN/m²以上とした場合は、細粒分質砂でも目標を達成できるW/Cは存在せず、加水量の調整だけでは、流動性と強度を同時に達成させることは難しい場合が多いと考えられた。本試験では、流動性の指標としてテーブルフロー試験をソイルセメント作製の直後と1時間後で実施しているが、実際の施工では、ソイルセメント作製から半日以上の流動性確保が望まれる場合が多い⁴⁾。本検討では、1時間後にテーブルフロー値が減少し、流動性が低減しているケースが多く、実際の施工での建込み時の流動性がさらに小さくなるのが予想されるため、流動性確保と強度を両立させることは難しいと考えられた。

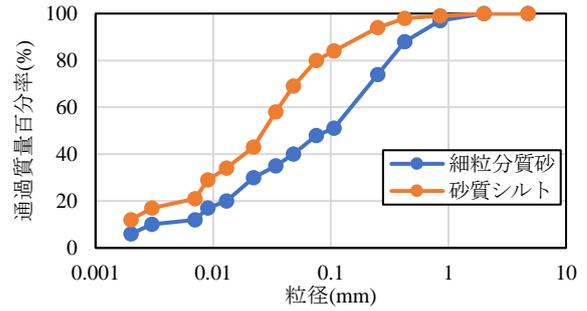


Fig. 4 試料土の粒度分布
Particle Size Distribution of Soil

Table 3 試験条件
Conditions of Test

| 対象土質 | 固化材 | | |
|-------|-----|--------------------------|---------|
| | 種類 | 添加量 (kg/m ³) | W/C (%) |
| 細粒分質砂 | BB | 180 | 100 |
| | | | 200 |
| | | | 300 |
| | | | 400 |
| | | | 500 |
| 砂質シルト | BB | 180 | 500 |
| | | | 550 |
| | | | 600 |
| | | | 850 |

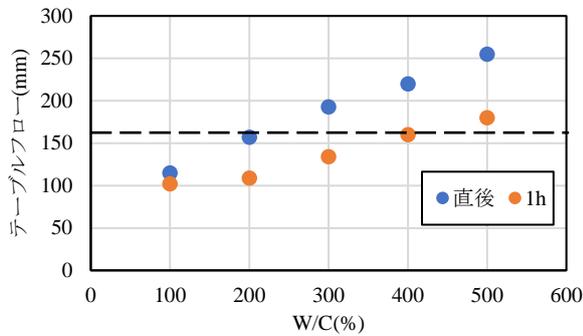


Fig. 5 W/C-テーブルフロー関係(細粒分質砂)
W/C - Table Flow Relationships (Sand)

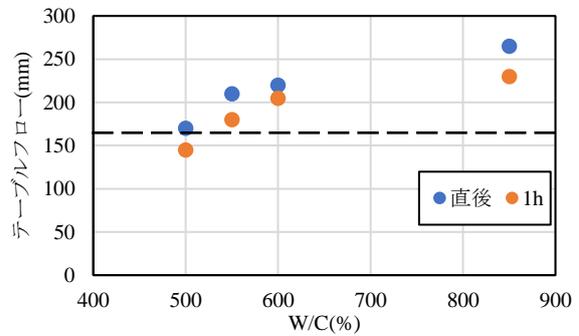


Fig. 6 W/C-テーブルフロー関係(砂質シルト)
W/C - Table Flow Relationships (Silt)

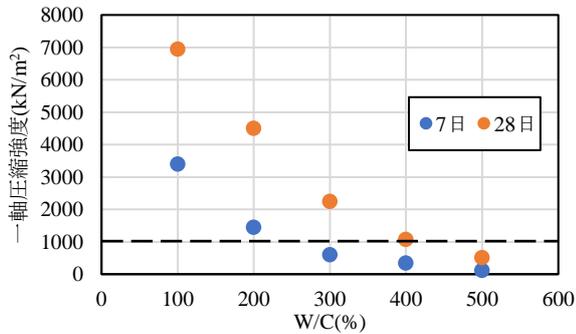


Fig. 7 W/C-一軸圧縮強度関係(細粒分質砂)
W/C - UCS Relationships (Sand)

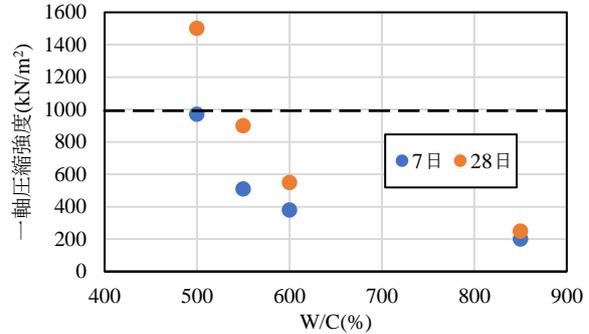


Fig. 8 W/C-一軸圧縮強度関係(砂質シルト)
W/C - UCS Relationships (Silt)

3.2 流動化剤・遅延剤の影響

3.2.1 試験方法 本節の検討では、3.1節と同様のSMW工法を想定して試験を実施し、目標品質も同様に設定した。試料土は、3.1節で特に流動性と強度の確保が難しいと考えられた砂質シルトを使用した。固化材はBBを使用した。流動化剤はメーカーが異なる3種類の材料(A, B, C)を用いた。いずれも主成分をポリカルボン酸とする流動化剤である。遅延剤は、流動化剤と同じメーカー製の3種類のオキシカルボン酸系(A', B', C')を用意し、同じメーカーの流動化剤と合わせて使用した。

試験条件をTable 4に示す。試験手順は3.1節と同じであるが、遅延剤を添加しないケースでは流動化剤も添加せず(無添加)、遅延剤を添加するケースでは流動化剤添加量は、固化材添加量(重量)に対して4 wt-C%とした。土1 m³に対して固化材添加量を180 kgとした。その条件で、固化材スラリーに遅延剤を、固化材添加量(重量)に対して0, 4, 8 wt-C%添加した。その後、土と固化材スラリーを混合した。ソイルセメント作製直後、1, 3, 6, 12時間後のテーブルフロー値を測定した。さらに遅延剤による長期養生後の強度への影響を評価するため、7, 28, 91日養生後の一軸圧縮強度を測定した。

3.2.2 結果 経過時間とテーブルフロー値の関係をFig. 9に、養生時間と一軸圧縮強度の結果をFig. 10に示す。無添加のケースは、テーブルフロー値が時間経過とともに減少し、6時間以降で160 mm以下となった。流動化剤と遅延剤を添加したケースでは、いずれの材料も無添加に比べて20 mm程度のテーブルフローの増加がみられたが、流動性の確保が数時間長くなる程度であった。一軸圧縮強度は、流動化剤と遅延剤を添加したケースでは、無添加に比べて小さくなる傾向にあり、すべてのケースで91日養生後でも1000 kN/m²以下であった。養生時間が28日から91日までの強度増加がなく、無添加に比べて小さい値となっており、流動化剤と遅延剤を組み合わせた配合は長期強度に影響する結果であった。よって今回の条件では、流動化剤と遅延剤を組み合わせることは困難と考えられた。

3.3 固化材の影響

3.3.1 試験方法 機械攪拌式地盤改良工法であるe-コラム工法[®]によるソイルセメント鋼管杭の造成工事を想定した。本工法では、一次削孔として泥水で削孔した後、2次削孔として固化材スラリーを注入しながら攪拌し、ソイルセメントを構築する。想定したソイルセメント鋼管杭の概要と土質柱状図をFig. 11に示す。支持層への根入れの根固め部とそれ以外の一般部によって、目標品質および配合が異なる。本論文では一般部について報告する。目標品質は72時間後の流動性がテーブルフロー値で200 mm以上、28日後の一軸圧縮強度が2000 kN/m²以上とした。

Fig. 11に示す現場でe-コラム工法を実施した際に想定

される泥水を模擬的に作製し、試料土として使用した。模擬した泥水の比重は1.500 g/cm³で、細粒分を多く含む。固化材はBBとセメント系固化材であるGS200(太平洋セメント株式会社製)を、遅延剤はオキシカルボン酸系を使用した。

試験ケースをTable 5に示す。遅延剤を固化材重量に対して0~5 wt-C%となるように添加して、W/Cが70%の条件で固化材スラリーを作製した。その後、固化材を300~500 kg/m³添加して、泥水と固化材スラリーを混合・攪拌し、ソイルセメントを作製した。流動性は、作製直後、24, 48, 72時間後のテーブルフローを測定して経

Table 4 試験条件
Conditions of Test

| 対象土質 | 固化材 | | | 流動化剤 | | 遅延剤 | |
|-------|-----|-------------------------|--------|------|------------|-----|------------|
| | 種類 | 添加量(kg/m ³) | W/C(%) | 種類 | 添加量(wt-C%) | 種類 | 添加量(wt-C%) |
| 砂質シルト | BB | 180 | 550 | — | 0 | — | 0 |
| | | | | A剤 | 4 | A'剤 | 4 |
| | | | | B剤 | | B'剤 | 4 |
| | | | | B剤 | | B'剤 | 8 |
| | | | | C剤 | | C'剤 | 4 |
| | | | | C剤 | C'剤 | 8 | |

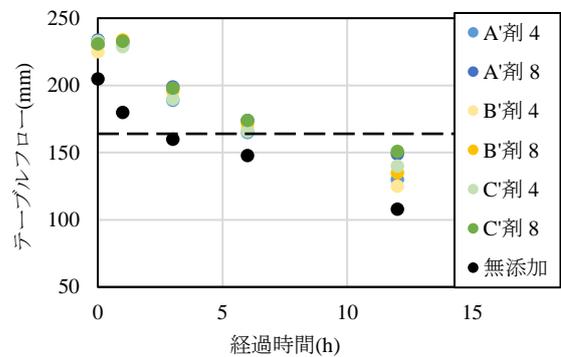


Fig. 9 経過時間-テーブルフロー関係
Elapsed Time - Table Flow Relationships

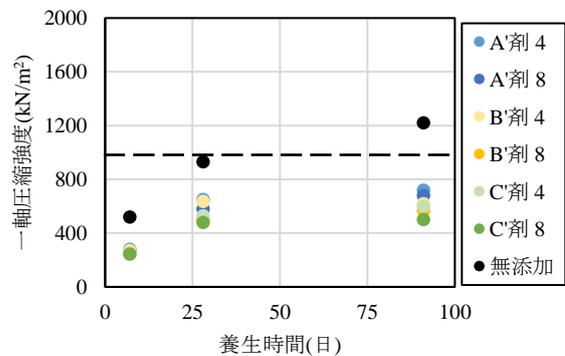


Fig. 10 養生時間-一軸圧縮強度関係
Curing Time - UCS Relationships

時変化を調べた。強度については、ソイルセメントを密閉室温養生し、7、28日後に一軸圧縮強度を測定した。

3.3.2 結果 遅延剤添加量と72時間後テーブルフロー値の関係を図. 12に、遅延剤添加量と28日後一軸圧縮強度の関係を図. 13に示す。まず流動性について、いずれの固化材のケースでも、遅延剤添加量が小さいと流動性が小さく、テーブルフローの最小値である100 mmであった。固化材添加量および遅延剤添加量が増加すると流動性が向上した。次に強度について、固化材によらず、固化材添加量が大きいほど、また遅延剤添加量が小さいほど、一軸圧縮強度は大きかった。また流動性と強度発現には相反する挙動がみられた。その中で、固化材にGS 200を使用し、固化材添加量が500 kg/m³、遅延剤添加量が4 wt-C%のケースが目標品質を達成した。ここから、粘性土の場合は、遅延剤の添加と組み合わせると、遅硬性に優れた固化材を選定することにより、同じ固化材添加量で比べた時に目標品質を達成可能なことがわかった。

4. 粘性土用の遅硬性固化材の開発

4.1 開発固化材について

3章の結果から、砂質シルト等の粘性土では、W/Cや流動化剤、遅延剤を調節するだけでは、流動性の確保と強度発現の両立が困難なケースがあることがわかった。これは、流動化剤や遅延剤が粘性土に含まれる細粒分に吸着し、本来これら薬剤がセメント由来のカルシウムと反応して効果を発現する機能を阻害しているためである⁵⁾。一方で、遅硬性に優れた固化材を選定することにより、目標品質を達成できるケースもあることがわかった。そこで筆者らは、流動化剤や遅延剤の一部が細粒分に吸着しても、流動性の確保と強度発現のバランスを調整しやすい新たな遅硬性固化材を開発した⁶⁾。

4.2 開発固化材の室内配合試験

4.2.1 試験方法 配合試験をするにあたっては3.3節と同様のe-コラム工法による施工を想定した。目標品質は、ソイルセメント作製から72時間後までテーブル

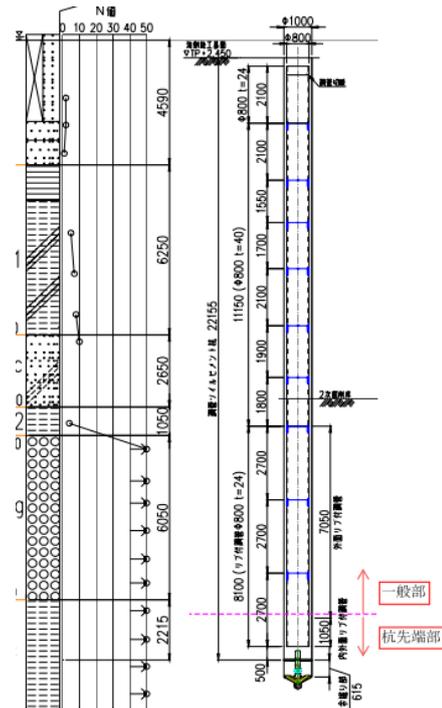


Fig. 11 土質柱状図
Soil Profile

Table 5 試験条件
Conditions of Test

| 対象土質 | 比重 | 固化材 | | 遅延剤添加量 (wt-C%) | | |
|--------|-------|-------|--------------------------|----------------|--|---|
| | | 種類 | 添加量 (kg/m ³) | | | |
| 一次削孔泥水 | 1.500 | BB | 400 | 4 | | |
| | | | 500 | 0 | | |
| | | GS200 | 300 | 2 | | |
| | | | | 4 | | |
| | | | 400 | 5 | | |
| | | | | 0 | | |
| | | | 500 | 3 | | |
| | | | | 4 | | |
| | | | | | | 0 |
| | | | | | | 2 |
| | | | 3 | | | |
| | | | 4 | | | |

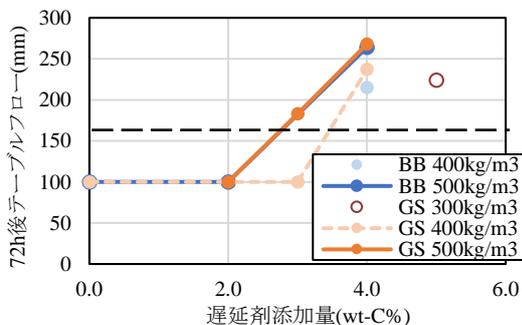


Fig. 12 遅延剤添加量-72hテーブルフロー関係
Amount of Retardant - Table Flow (72h)

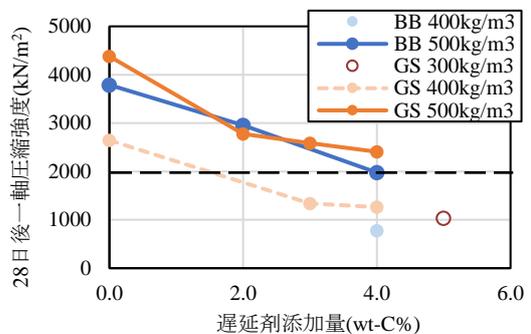


Fig. 13 遅延剤添加量-一軸圧縮強度関係
Amount of Retardant - UCS (28d)

ローが160 mm以上、28日養生後の一軸圧縮強度が15000 kN/m²以上とした。

試料土は沖積粘土を使用した。掘削後の孔内泥水の状態を模擬するために、湿式分級で75 μm以下の細粒分を試料土から取り出して、比重をe-コラム工法で想定される1.570に調整した。固化材は、BB、セメント系固化材であるGS200、開発固化材（図表中はそれぞれBB、GS、NSと表記する）の3種類を使用し、遅延剤との組合せ効果を調べた。遅延剤はオキシカルボン酸系を使用した。試験ケースをTable 6に示す。試験方法および測定項目は3.3節と同様である。固化材スラリーW/Cは60%、固化材添加量は標準配合⁷⁾である1000 kg/m³、遅延剤添加量は0~2wt-C%とした。

4.2.2 結果 Table 6に測定結果を示す。遅延剤添加量と72時間後のテーブルフローの関係を図14に、遅延剤添加量と28日後の一軸圧縮強度の関係を図15に示す。流動性は、いずれの固化材でも、遅延剤添加量が0.5 wt-C%以上で目標とする72時間後のテーブルフローを達成した。28日後の一軸圧縮強度は、高炉セメントは目標を達成できず、セメント系固化材および開発固化材で目標強度を達成できた。セメント系固化材および開発固化材を使用すると、遅延剤添加量がおおよそ0.5~0.75 wt-C%の範囲で、流動性と強度の目標品質を両立できた。特に開発固化材を使用したケースでは流動性が大きかった。したがって、従来では流動性と強度の両立が難しい粘性土においても、セメント系固化材や開発固化材を、遅延剤と組合せて用いることで、両立が可能となることがわかった。上記の範囲で、目標とする流動性が高いほど開発固化材が有効であることもわかった。

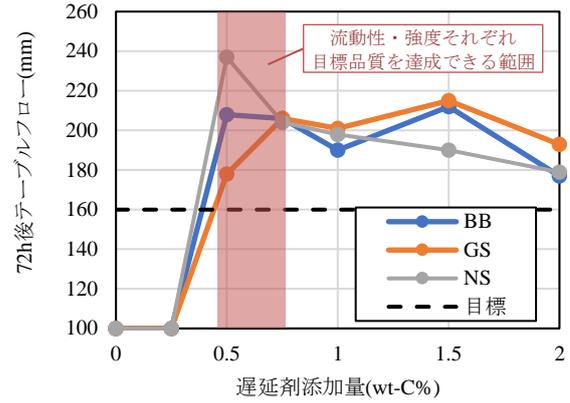


Fig. 14 遅延剤添加量－72hテーブルフロー
Amount of Retardant – Table Flow (72h)

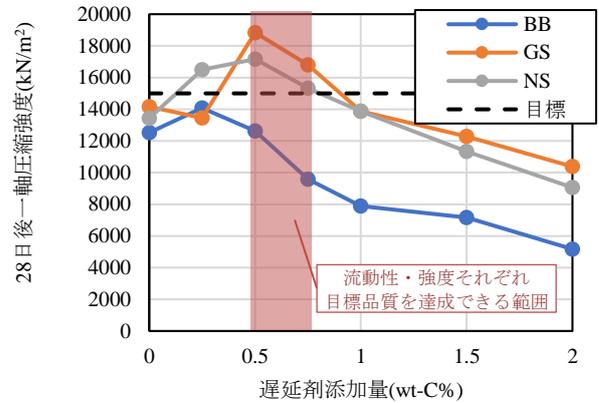


Fig. 15 遅延剤添加量－28日後一軸圧縮強度
Amount of Retardant – UCS (28d)

Table 6 固化材影響評価の試験ケースおよび結果
Conditions and Results of Evaluation Test for the Effect of Cements

| 対象土質 | 泥水比重 | 固化材 | | | 遅延剤添加量 (wt-C%) | テーブルフロー (mm) | | 一軸圧縮強度 28d (kN/m ²) |
|------|-------|-----|--------------------------|---------|----------------|--------------|-----|---------------------------------|
| | | 種類 | 添加量 (kg/m ³) | W/C (%) | | 直後 | 72h | |
| 沖積粘土 | 1.570 | BB | 1000 | 60 | 0 | 172 | 100 | 12530 |
| | | | | | 0.25 | 190 | 100 | 14075 |
| | | | | | 0.5 | 185 | 208 | 12618 |
| | | | | | 0.75 | 182 | 206 | 9593 |
| | | | | | 1 | 190 | 190 | 7888 |
| | | | | | 1.5 | 197 | 212 | 7160 |
| | | | | | 2 | 198 | 177 | 5171 |
| | | GS | | | 0 | 173 | 100 | 14150 |
| | | | | | 0.25 | 196 | 100 | 13459 |
| | | | | | 0.5 | 182 | 178 | 18841 |
| | | | | | 0.75 | 173 | 206 | 16788 |
| | | | | | 1 | 178 | 201 | 13873 |
| | | | | | 1.5 | 183 | 215 | 12280 |
| | | | | | 2 | 187 | 193 | 10379 |
| | | NS | | | 0 | 187 | 100 | 13433 |
| | | | | | 0.25 | 197 | 100 | 16500 |
| | | | | | 0.5 | 194 | 237 | 17167 |
| | | | | | 0.75 | 203 | 204 | 15333 |
| | | | | | 1 | 204 | 198 | 13867 |
| | | | | | 1.5 | 211 | 190 | 11333 |
| | | | | | 2 | 208 | 179 | 9057 |

4.3 開発固化材の現場配合試験

4.3.1 概要 土留め目的でソイルセメント壁を造成する現場である。土質柱状図をFig. 16に示す。施工方法はe-コラム工法であり、4.2節に記載した方法と同様である。本現場の目標品質は、48時間後の流動性がテーブルフロー値で200 mm以上、28日後の一軸圧縮強度が4000 kN/m²以上であった。

4.3.2 試験方法 試験方法や測定項目は基本的に4.2節と同様である。試料土は現場から採取した土を使用した。土質試験の結果をTable 7に示す。現場では土質ごとに削孔に使用する泥水の配合が異なるため、試験でも現場で想定される比重の泥水になるよう、試料土ごとに土を調整した。固化材は普通ポルトランドセメント、BB、開発固化材(図表中ではそれぞれOP、BB、NSと表記する)の3種類を使用した。遅延剤はオキシカルボン酸系を使用した。固化材スラリーのW/Cは100%、遅延剤添加量は0~2 wt-C%とした。

固化材添加量の条件設定については、事前試験により、普通ポルトランドセメントを使用し、遅延剤を添加しない条件で、目標強度となる28日養生後の一軸圧縮強度4000 kN/m²を達成する添加量を、試料土A~Cそれぞれで求めた。事前試験の結果をFig. 17に示す。なお、固化材添加量の標準配合は1000 kg/m³である。試料土Aは1300 kg/m³、粘性土である試料土BおよびCは1800 kg/m³

で目標強度4000 kN/m²を達成することがわかる。よって、各種固化材添加量は上記で決定した添加量とした。試験ケースをTable 8に示す。

4.3.3 結果 テーブルフローの結果をTable 8に示す。試料土ごとに各種固化材による28日後の一軸圧縮強度を比較したグラフをFig. 18, 19に示す。まず流動性については、ほとんどのケースでテーブルフローの測定上限値である300 mmであった。また適切な遅延剤量を添加することで、いずれのケースにおいても48時間後のテーブルフロー200 mm以上を達成できた。ただし細粒分を多く含む試料土Cでは、遅延剤の量が多く必要であった。次に一軸圧縮強度であるが、これまでの検討と同様に、遅延剤を添加すると、7、28日養生後それぞれで一軸圧縮強度が低下した。固化材による比較としては、遅延剤を添加するケースでもしないケースでも、普通ポルトランドセメントやBBと比べて開発固化材の方が、一軸圧縮強度が大きい傾向にあった。

今回の配合試験事例では、いずれの試料土においても、固化材添加量と遅延材添加量を調整することで目標の流動性と強度を達成できた。さらに、開発固化材を使用すると、固化材および遅延剤の添加量を減らすことができる可能性が示唆された。

Table 7 試料土の土質試験の結果

| Results of Soil Characteristic Tests | | | | |
|--------------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|
| 項目 | 単位 | A | B | C |
| 土粒子密度 | g/cm ³ | 2.655 | 2.656 | 2.614 |
| 粒度 | 礫分 | 0 | 0 | 0 |
| | 砂分 | 68.2 | 48.9 | 15.4 |
| | シルト | 13.9 | 21.9 | 29.0 |
| | 粘土分 | 17.9 | 29.2 | 55.6 |
| 液性限界 | % | 47.6 | 77.3 | 100.6 |
| 塑性限界 | % | 23.6 | 29.3 | 38.8 |
| 分類 | | 細粒分質砂 | 砂質粘土 | 砂質粘土 |

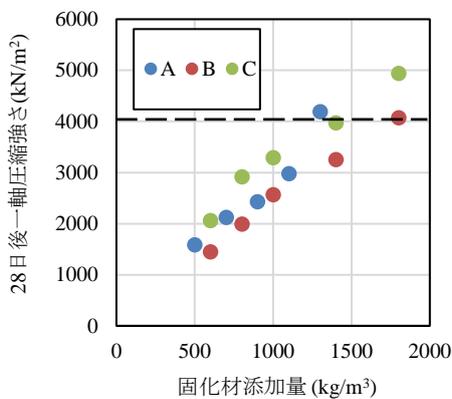


Fig. 17 固化材添加量—一軸圧縮強度関係
Amount of Cement – UCS (28d) Relationships

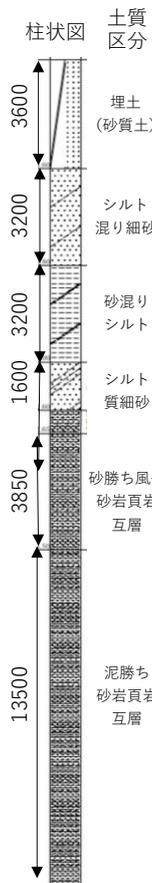


Fig. 16 土質柱状図
Soil Profile

Table 8 土留め壁の配合試験ケースおよび結果
Conditions and Results of Tests
of Soil Retention Pile

| 対象土質 | 泥水比重 | 固化材 | | 遅延剤添加量 (wt-C%) | テーブルフロー (mm) | | |
|------|------|-----|--------------------------|----------------|--------------|-----|-----|
| | | 種類 | 添加量 (kg/m ³) | | W/C (%) | 直後 | 48h |
| | | | | | | | |
| A | 1.43 | OP | 1300 | 100 | 0 | 300 | |
| | | | | | 1 | 300 | |
| | | | | | 0 | 300 | |
| B | 1.30 | BB | 1300 | 100 | 0 | 300 | |
| | | | | | 1 | 300 | |
| | | | | | 0 | 300 | |
| C | 1.31 | NS | 1300 | 100 | 0 | 300 | |
| | | | | | 1 | 300 | |
| | | | | | 0 | 300 | |
| A | 1.43 | OP | 1800 | 100 | 0 | 300 | |
| | | | | | 1 | 300 | |
| | | | | | 0 | 300 | |
| B | 1.30 | BB | 1800 | 100 | 0 | 300 | |
| | | | | | 1 | 300 | |
| | | | | | 0 | 300 | |
| C | 1.31 | NS | 1800 | 100 | 0 | 300 | |
| | | | | | 1.7 | 300 | |
| | | | | | 0 | 300 | |
| A | 1.43 | OP | 1800 | 100 | 0 | 300 | |
| | | | | | 1.7 | 300 | |
| | | | | | 0 | 300 | |
| B | 1.30 | BB | 1800 | 100 | 0 | 300 | |
| | | | | | 1.7 | 300 | |
| | | | | | 0 | 300 | |
| C | 1.31 | NS | 1800 | 100 | 0 | 300 | |
| | | | | | 1.7 | 300 | |
| | | | | | 0 | 300 | |

5. まとめ

砂質土および粘性土を用いた遅硬性ソイルセメントの品質について整理した上で、開発固化材の効果を評価した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 砂質土では、汎用材のBBを使用し、W/Cの調整や遅延剤を使用することで、目標品質を達成できるが、粘性土では達成が難しい場合がある。
- 2) 粘性土のソイルセメントの流動性の確保および強度発現に優れる固化材は、BBより、セメント系固化材や、特に開発固化材である。
- 3) 遅硬性ソイルセメントの目標品質や施工条件は現場によって異なるため、現場条件に応じて固化材の選定や配合条件を設定することが重要である。

また今後は、さらに施工条件が複雑化し、ソイルセメントに求められる目標品質も高まることが予想される。今後はより広範囲な条件にも対応できる遅硬性ソイルセメントの開発に取り組みたい。

謝辞

本研究の実施にあたり、明治大学の加藤雅彦准教授および太平洋セメント株式会社の野崎隆人氏より貴重なご意見を賜りました。ここにお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 社団法人地盤工学会：地盤工学・実務シリーズ 20 地中連続壁工法，2004
- 2) CRM工法研究会：掘削土再利用連壁工法設計・施工マニュアル，2002
- 3) 日本道路公団：日本道路公団規格(JHS A 313)「エアモルおよびエアミルクの試験
- 4) 三浦俊彦，他：粘性土を対象としたソイルセメントの流動化・硬化遅延剤に関する調査事例，第54回地盤工学研究発表会論文集，2019
- 5) 下野瑞季，他：ソイルセメントにおける固化遅延剤

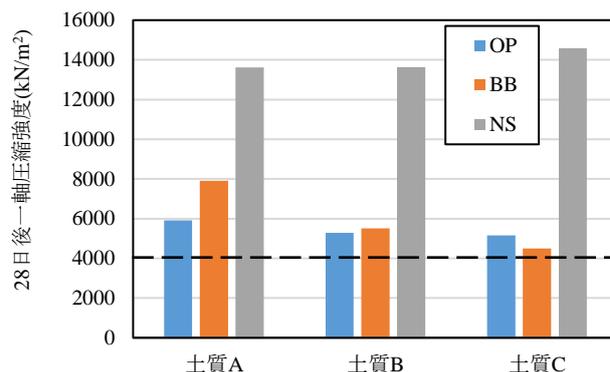


Fig. 18 固化材による一軸圧縮強度の比較(遅延剤なし)
Comparison of UCS (28d) with Cement (without Retardant)

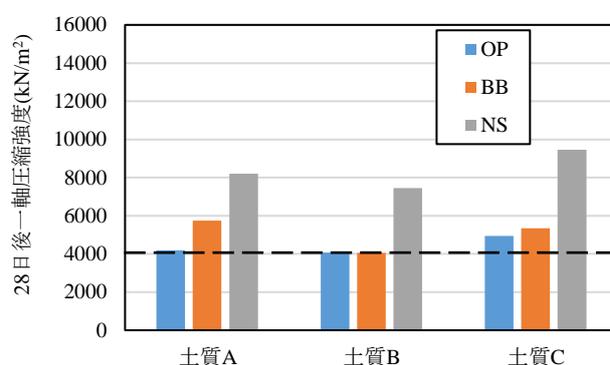


Fig. 19 固化材による一軸圧縮強度の比較(遅延剤あり)
Comparison of UCS (28d) with Cement (with Retardant)

の遅延メカニズム 粘性土の影響，第55回地盤工学研究発表会論文集，2020

- 6) 野崎隆人，他：粘性土を対象としたソイルセメントの高性能化に関する材料検討，第55回地盤工学研究発表会論文集，2020
- 7) ソイルセメント合成鋼管杭工法協会“ハイエスシー杭工法”，HYSC 土木 製品情報 JFEスチール，<https://www.jfe-steel.co.jp/products/katakou/catalog/dlj-510.pdf>，（参照 2023-06-01）