

流動化剤を用いたソイルセメント壁の 注入量低減工法

佐藤 英二・木之下 光男

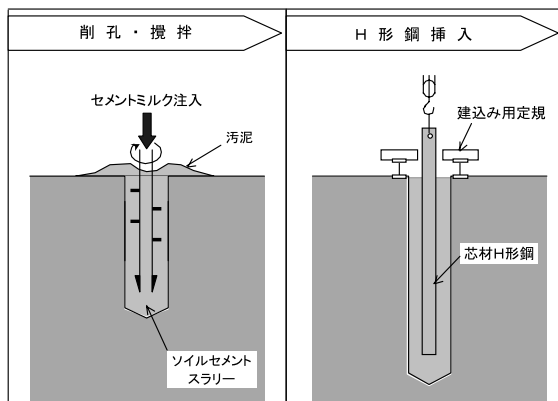
従来のソイルセメント壁の施工では、土 1 m³ の固化過程で約 0.7 m³ の建設汚泥が発生し、環境負荷低減や工費低減等の観点から建設汚泥の削減技術が求められていた。筆者らは、ソイルセメント用の流動化剤を開発してセメントミルクの注入量を低減し、施工性や強度を確保しながら建設汚泥を 4 割程度削減できる工法を開発した。

本報告では、ソイルセメントに必要な流動性の指標、開発したソイルセメント用の流動化剤の概要、室内調合試験での性能確認結果、現場施工試験での効果確認結果等の一連の研究開発成果を示す。

キーワード：山留め壁、ソイルセメント壁、注入量低減、建設汚泥削減、流動化剤、施工試験

1. はじめに

原位置地盤にセメントミルクを注入し、混合攪拌することでソイルセメントの山留め壁を構築するソイルセメント壁工法が普及している（図—1）。土とセメントミルクの混合物であるソイルセメントスラリーは、地中で硬化すれば山留め壁として活用されるが、溢れた不要なものは建設汚泥（以下、汚泥と呼ぶ）となる。工事では注入したセメントミルクとほぼ同体積の汚泥が発生するため環境負荷低減および工費削減の観点から汚泥削減技術が求められている。



図—1 従来のソイルセメント壁工法

汚泥の削減技術には、主に 2 種類がある。一方は、汚泥を液状分と土砂分に分離し、液状分に含まれるセメントと水を再利用することで、汚泥を削減する再利用工法である¹⁾。他方は、セメントミルク中の水量を

減らし、セメントミルクに流動化剤を添加することで芯材挿入などの施工性を確保しながら、溢れ出る汚泥を削減する工法である^{2)~4)}。

再利用工法は、汚泥を液状分と土砂分に分離する大型設備機械が必要であり、汚泥の液状分に含有するセメント分の有効性を判断して再調合するのが難しい。一方、セメントミルクを減量する工法はソイルセメントスラリーの流動性を確保する高性能な流動化剤が必要となる。筆者らは、大型設備機械を必要とする汚泥の再利用工法は市街地での工事には適さないと判断し、流動化剤で施工性や強度を確保しながらセメントミルクの注入量を低減し、汚泥を削減する工法を開発した。

まず、ソイルセメントスラリーに必要な流動性の指標を検討し、指標を満足するまで流動性を向上させる流動化剤を開発した。また、室内調合試験で流動化剤の性能を確認した後、実工事で施工試験を行い、本工法の有効性を定量的に確認した。

2. 注入量低減上の条件

従来のソイルセメント壁工法では、土 1 m³ を硬化させる過程で約 0.7 m³ の汚泥（土とセメントミルクの混合物）が発生している（図—2）。これは、ソイルセメントの流動性を確保し、芯材 H 形鋼のソイルセメントへの挿入を円滑にすることなどのために、水量の多いセメントミルクを多量に地盤に注入するためである。

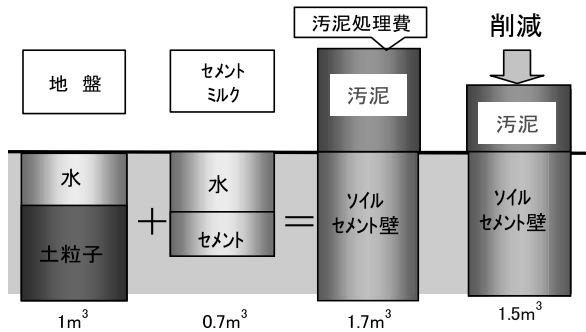


図-2 ソイルセメント壁工法における汚泥発生の概念

H形鋼の挿入性は、砂質土地盤と粘性土地盤では異なり、地盤によって注入量を変えている。しかし、注入量は経験的に決めているものであり、H形鋼が挿入可能かの事前の判断材料が無いのが実情である。ソイルセメント壁の注入量低減工法を検討する場合、定量的にH形鋼の挿入性を評価する方法が必要である。

H形鋼が挿入可能かの判断基準と、攪拌性(攪拌回数)がソイルセメントの流動性に与える影響を室内実験で検証した。本実験では流動化剤は使用していない。

(1) H形鋼が挿入できるソイルセメントの流動性⁵⁾

H形鋼挿入時における力の釣合いの概念図を図-3に示す。H形鋼を自重で挿入できるのは、以下の条件が成り立つ時である。

$$W > F + B \quad (1)$$

ここで、W：H形鋼の重量 (kN)

F：ソイルセメントの挿入抵抗合力 (kN)

B：H形鋼が受ける浮力 (kN)

H形鋼先端部の抵抗を無視すると、下式となる。

$$f < (W - B) / A \quad (2)$$

ここで、f：ソイルセメントの挿入抵抗 (kN/m²)

A：模型H形鋼の表面積 (m²)

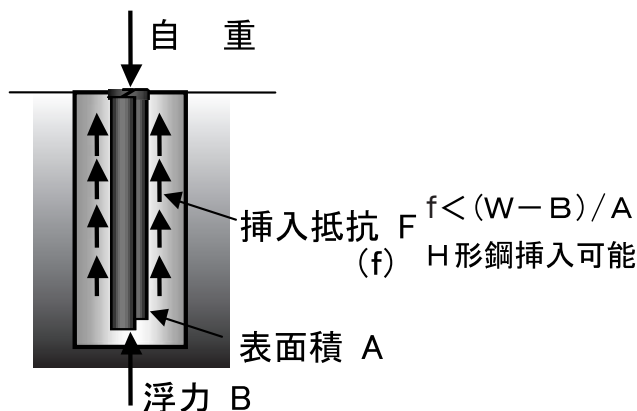


図-3 H形鋼挿入時の力の釣合い

模型H形鋼 (H - 55 × 25 × 3 × 3) を作成し、粘性土と砂質土の2種類について挿入実験を行った。土、セメント等は一定量とし、水量を変えて流動性の異なるソイルセメントを作成して挿入実験を行った。また、モルタルフロー試験 (JIS R 5201 に準拠) によるモルタルフロー (15打時) を流動性の指標とした。

模型H形鋼の挿入実験結果を図-4 (a) に示す。粘性土、砂質土ともに、モルタルフロー (流動性) が低下するにつれて挿入抵抗は増大する傾向を示す。また、実工事のH形鋼がH - 400 × 200 × 8 × 13の場合、挿入可能なモルタルフローを算定すると16cm以上となる。実工事におけるH形鋼挿入結果を図-4 (b) に示す。「○」は挿入できたことを、「×」は挿入できなかったことを示す。16cm以上という指標は実工事のH形鋼挿入結果とも対応している。実験や実工事の挿入結果から、自重で挿入可能なソイルセメントの流動性はモルタルフローで16cm程度以上と判断される。

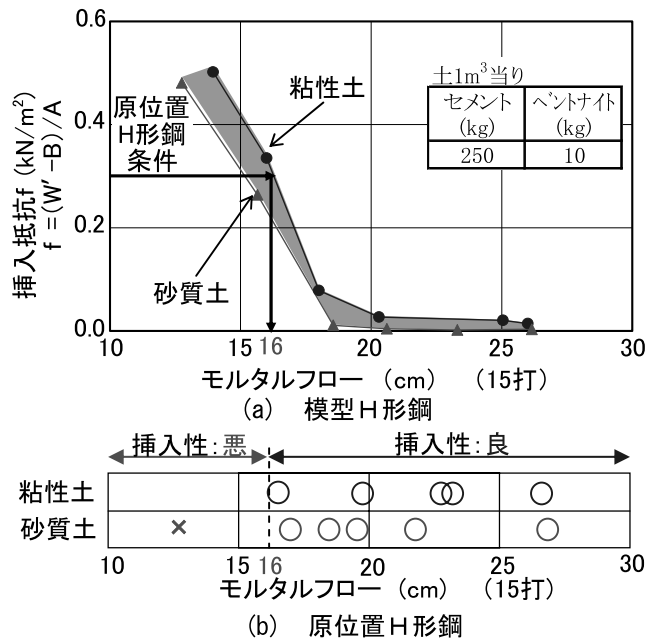


図-4 H形鋼挿入結果

(2) 攪拌性(攪拌回数)と流動性の関係⁵⁾

攪拌性を向上させることで流動性を向上させることができるかを明確にするため室内調査実験を行った。

粘性土と砂質土を用いて、攪拌回数の異なるソイルセメントの流動性や強度を比較した。練混ぜは137回転/分のホバートミキサーを用いて実施し、攪拌回数はケースA：137回、ケースB：685回、ケースC：2055回 (A：B：C = 1：5：15) の3ケースを実施した。セメントミルクの調合を表-1に示す。

表-1 セメントミルクの割合

土 1 m ³ 当り	水 (kg)	セメント (kg)	ベントナイト (kg)	注入率 (%)
粘性土	700	350	10	82
砂質土	600	250	10	69

攪拌性（攪拌回数）と流動性の関係を図-5に示す。砂質土は攪拌回数にかかわらず、流動性の高い位置で安定している。粘性土は攪拌回数を増加させると流動性が向上するが、ある攪拌回数を超えると流動性はそれ以上向上しない傾向を示した。粘性土は攪拌性を向上させるだけでは流動性の向上に限界がある。

実験結果より、注入量低減工法での流動性向上にはほかの手段が必要であり、ソイルセメント用の流動化剤の開発が必要と判断した。

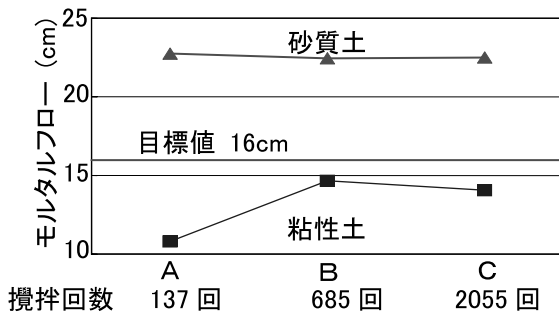


図-5 攪拌性と流動性の関係

3. ソイルセメント用の流動化剤の概要⁴⁾

開発した流動化剤の成分は、ポリカルボン酸共重合体と、セメントの硬化遅延を目的とした流動保持剤（界面活性剤）を3：1の割合で混合したものである。流動化剤の外観を写真-1に示す。流動化剤は黄褐色の液体である。揮発性がなく、急性毒性も非常に低いので、環境への悪影響はない。

ソイルセメントの流動化には、流動化剤の吸着により粒子表面がマイナスの荷電をして粒子同士が反発する静電反発力が寄与している。さらに、ポリカルボン酸系流動化剤は、高分子吸着保護層の形成による立体



写真-1 流動化剤の外観

反発力の効果が大きいと考えられる。立体反発力による粒子の流動化の概念を図-6に示す。流動化剤の分子が粒子表面に吸着し、立体的な分子構成で厚みのある保護層を形成することで粒子が反発し、流動化を促進させる。

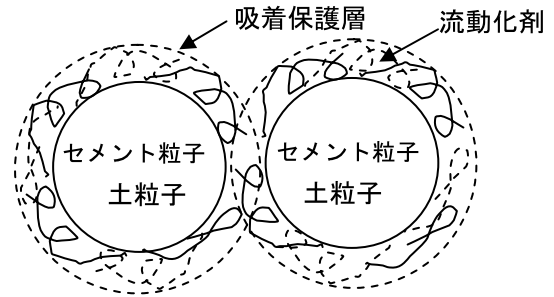


図-6 流動化剤による流動化促進の概念図

4. 室内試験による流動化剤の性能の確認⁶⁾

開発した流動化剤の性能を定量的に評価するために、土の種類を変えた室内調査試験を行った。

用いた材料を表-2に示す。Y工事で採取した砂とI工事の粘土を用い、「砂質土」は砂分が約7割、「粘性土」は細粒分が約7割となるよう砂と粘土を混合した。

表-2 室内調査試験に用いた材料

セメント	高炉セメントB種
水	水道水（千葉県印西市）
ベントナイト	米国ワイオミング州産（H社製）
流動化剤	F剤：開発品（ポリカルボン酸共重合体＋流動保持剤）
試料土	砂質土（Y工事の砂：I工事の粘土＝8：2） 粘性土（Y工事の砂：I工事の粘土＝3：7）

調査を表-3に示す。従来工法の調査は通常の工事で使用される調査であり、注入量低減工法は、従来工法から注入率を約50%低減したものとした。

注入量低減工法の試験結果を、砂質土について図-7に、粘性土について図-8に示す。モルタルフロー

表-3 セメントミルク割合の概要

	調査 No.	水 (kg/±1m ³)	セメント (kg/±1m ³)	ベントナイト (kg/±1m ³)	W/C (%)	注入率 (%)	注入率 低減率 (%)
従来工法	1	600	250	10	240	68.6	0
注入量 低減工法	2	300	150	10	200	35.4	48.5

の経時変化を、無添加 (○) と流動化剤を 3, 6, 9 kg/土 1 m³ 添加したもの (▲, ◆, ■) を比較している。無添加に対し、特に、流動化剤を 6, 9 kg/土 1 m³ 添加したものは、どの時間においてもモルタルフローが大きくなっている。

流動化剤添加量とモルタルフローの関係を図-9, 図-10 に示す。施工では削孔開始後, 1 時間程度で

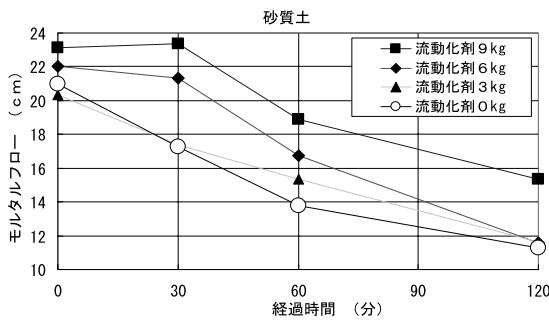


図-7 経時変化 (砂質土)

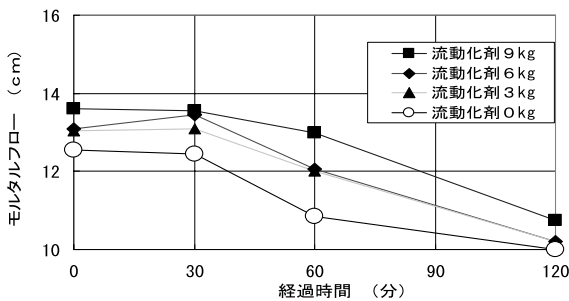


図-8 経時変化 (粘性土)

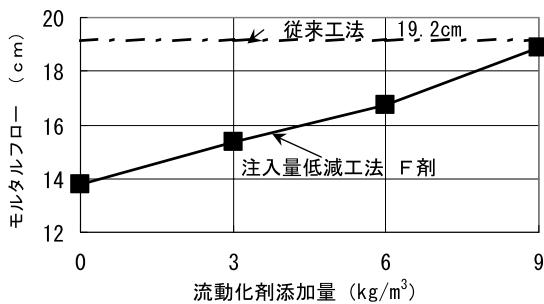


図-9 流動性 (砂質土・60分後)

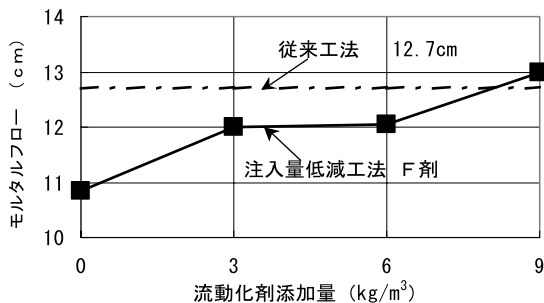


図-10 流動性 (粘性土・60分後)

H 形鋼を挿入することから、経過時間 60 分後の流動性を比較している。流動化剤量が増えると、モルタルフローが大きくなり流動性が良くなる。注入量を約 50% 低減しても、流動化剤を 9 kg/土 1 m³ 程度添加することで従来工法と同等の流動性が得られた。

5. 施工試験による流動化剤の効果の確認⁵⁾

流動化剤の効果確認と注入量低減工法の可能性確認を目的として実工事で施工試験を実施した。

施工試験を実施した山留め壁工事と地盤の概要を図-11 に示す。ソイルセメント壁は約 9 m の根切りを行うための山留め壁であり、削孔径がφ 630 mm, 削孔長が 14.5 m, H 形鋼は H - 400 × 200, ピッチ 450 mm である。

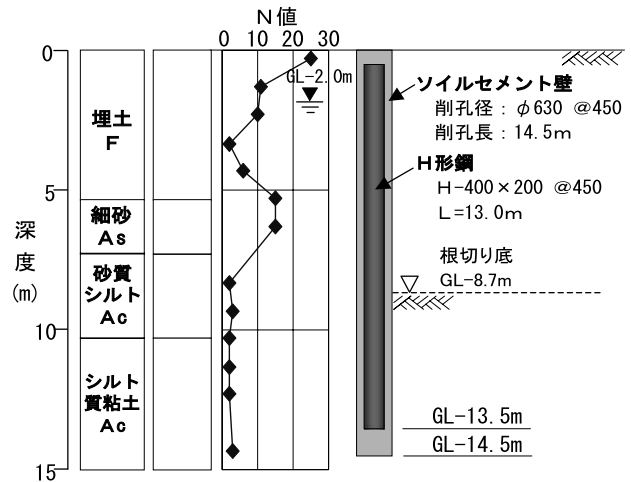


図-11 施工試験を実施した工事

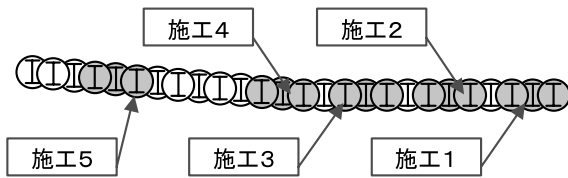
地盤は、表層から埋土層, 沖積砂層, および沖積シルト層という層序となっている。自由水位および被圧水位は共に約 GL-2 m である。

施工試験のセメントミルクの調合を表-4 に、試

表-4 セメントミルク調合の概要

土 1m ³ 当り		施工 1	施工 2	施工 3	施工 4	施工 5
		従来工法	注入量低減工法			
調合	水 : W (kg/土 1 m ³)	650	480	419	360	296
	セメント : C (kg/土 1 m ³)	202	226	199	207	190
	ベントナイト (kg/土 1 m ³)	14	17	16	16	17
	W/C (%)	322	212	211	174	156
	W'/C (%)	568	432	460	414	417
注入率 (%)		72.2	56.1	49.1	43.5	36.6
流動化剤 (F 剤) (kg/土 1 m ³)		0	8.0	8.0	8.0	8.0
芯材の挿入性		○	○	○	○	○

W'/C : 地盤中の水を考慮した水セメント比、単位体積重量および含水比より水量を 497kg/土 1 m³ と仮定

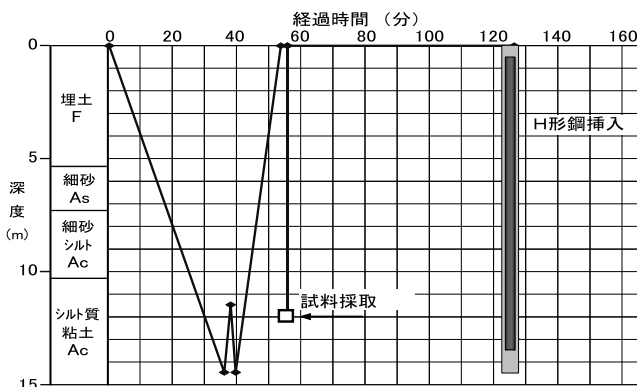


図一 12 試験施工位置

験施工位置を図一 12 に示す。施工 1 は、従来工法による実施工の調合であり、注入量低減工法の施工試験と比較するために示す。従来工法の注入率は約 72 % で流動化剤は添加していない。ここで、注入率とは土に対する注入するセメントミルクの体積の割合である。

施工 2～5 では、流動化剤で流動性を確保しながら注入率を従来工法より低減させた。室内調合試験結果から表一 4 のように施工 2 から施工 5 まで段階的にセメントミルク中の水量とセメント量を減らした。施工 5 の注入率は 36.6 % であり従来工法の半分である。施工 2～5 とともに流動化剤は 8.0 kg/土 1 m³ を添加した。

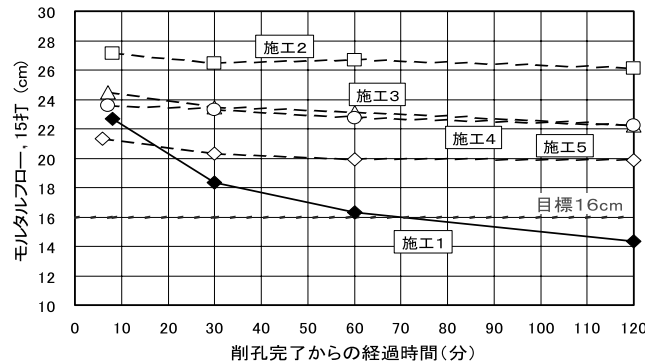
削孔サイクルの例を施工 1 (従来工法, 注入率 72 %) について図一 13 に示す。削孔時間は約 50 分で、削孔直後にサンプラーを用い深度 12 m からソイルセメントを採取した。H 形鋼挿入は、削孔完了から約 70 分経過後である。H 形鋼挿入は、施工 1 と施工 2～5 の全てにおいてスムーズに挿入ができた (表一 4 下端参照)。



図一 13 削孔サイクルの例 (施工 1 : 従来工法)

削孔完了からの経過時間とモルタルフローの関係を図一 14 に示す。流動化剤を用いない施工 1 では、約 1 時間を経過すると H 形鋼挿入に必要なモルタルフロー 16 cm 程度まで低下した。一方、施工 2～5 では 2 時間経過後でも 16 cm を十分確保している。

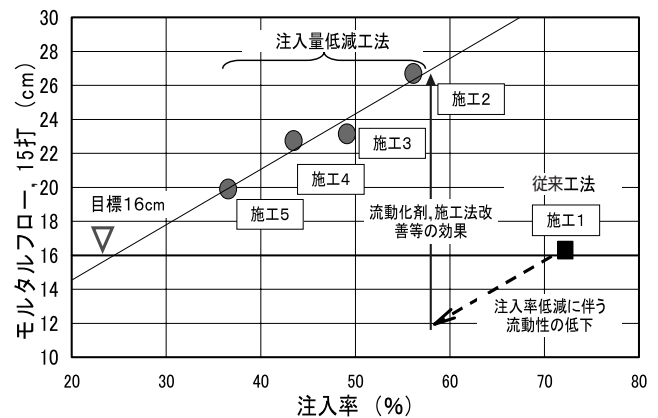
施工 1 (従来工法), 施工 2～5 の注入率とモルタ



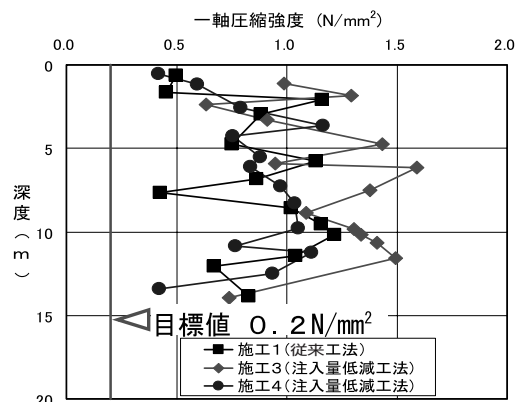
図一 14 時間経過に伴う流動性の変化

ルフロー (削孔完了 60 分後) の関係を図一 15 に示す。従来工法の注入率 72 % から、流動化剤を用いずに注入率を低減させると流動性は低下してしまうが、流動化剤を使用した注入量低減工法では、全ケースで目標値の 16 cm を超えている。特に、施工 5 は注入率を従来工法の半分に低減させたにもかかわらず、モルタルフローは同等以上であり、施工性は低下せず H 形鋼が挿入できた。流動化剤の効果が高かったものと判断される。

コアボーリング試料 (材齢約 10 週) による 3 ケー



図一 15 採取したソイルセメントの流動性試験結果



図一 16 コア試料の圧縮強度試験結果

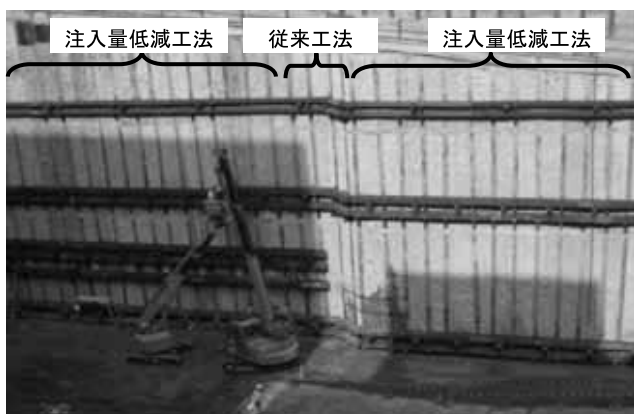
スのコア強度を重ねて図—16に示す。全ての強度は目標強度を満足している。また、施工3、4（注入量低減工法）の強度は、施工1（従来工法）と同等か高い傾向を示している。また、根切り時のソイルセメント壁を確認した結果、従来工法部分と注入量低減工法部分の止水性は問題がなかった。流動化剤によって施工性および品質を損なうことなく、注入率を従来工法の半分程度まで低減できた。

6. 実工事への適用

本工法は、5章に示した工事を始めとして5件の工事で施工試験を行って効果を確認し、現在まで5件の実工事に適用している。

東京都区内の砂質地盤でのソイルセメント壁工事に本工法を適用した事例では、汚泥550 m³（汚泥搬出用ダンプで110台分）を削減できた。また、ソイルセメント壁の施工中は、汚泥を一時的に溜めて置く汚泥ピットが縮小でき、作業スペースが増大し作業性が向上した。

根切り後のソイルセメント壁の状況を写真—2に示す。従来工法部分も流動化剤を用いた注入量低減工法部分も漏水は見られず、止水性も問題がなかった。



写真—2 適用工事における根切り後の状況

7. おわりに

ソイルセメントスラリーの流動性を向上させる流動化剤を開発し、室内調合試験で流動化剤の性能を確認した後、実工事で施工試験を行い、本工法の有効性を確認した。一連の研究開発で以下を明らかにした。

①H形鋼が自重で挿入可能なソイルセメントの流動

性はモルタルフローで16 cm程度以上と判断される。

②粘性土は攪拌性向上だけでは流動性向上に限界があり、注入量低減工法には流動化剤が必要である。

③開発したソイルセメント用流動化剤は、室内調合試験でソイルセメントに対し優れた流動性を示した。

④実工事での施工試験では、注入量を従来工法の半分まで低減しても流動化剤の効果で流動性低下は見られずH形鋼はすべて挿入できた。また、原位置強度の低下は見られず、止水性も問題がなかった。

以上より、ソイルセメント壁工事において、流動化剤の添加により施工性および品質を損なうことなく、注入量を従来工法の4割程度低減でき、建設汚泥も4割程度削減できると判断される。

謝辞 御助言や御協力頂いた(株)竹中工務店の青木雅路氏、石井健太郎氏、瀬之口浩二氏、後藤良太氏、笠義秀氏、浦瀬 誠氏、鳥居勇一氏、玉井勝士氏、竹本油脂(株)の玉木伸二氏、疋田次峰氏に謝意を表します。

JICMA

《参考文献》

- 1) 茂 雅夫・川原真一郎、他：発生泥土リサイクルによる残土低減工法の事例：GSS工法、基礎工、33 [5], p.69-72 (2005.5)
- 2) 堀井宏謙・山崎 勉・松居 克、他：分散剤を添加したソイルセメント柱列壁の諸物性—第1報 注入量低減施工—、第35回地盤工学研究発表会発表講演集、pp.2013-2014 (2000.6)
- 3) 日高 厚・伊藤隆広：ソイルセメントの高流動化技術の開発、第5回地盤改良シンポジウム論文集、p.67-72 (2002.11)
- 4) 佐藤英二・木之下光男、他：流動化剤を用いたソイルセメント壁の注入量低減工法の研究（その1～3）、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-1, pp.545-550 (2005.9)
- 5) 佐藤英二・木之下光男、他：流動化剤を用いたソイルセメント壁の注入量低減工法の研究（その4～6）、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-1, pp.589-594 (2006.9)
- 6) 笠 義秀・玉木伸二、他：流動化剤を用いたソイルセメント壁の注入量低減工法の研究（その7～8）、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-1, pp.515-518 (2007.8)

【筆者紹介】

佐藤 英二（さとう えいじ）
 (株)竹中工務店 技術研究所
 建設技術研究部 地盤・基礎部門
 主席研究員
 博士（工学）技術士（建設部門）



木之下 光男（きのした みつお）
 竹本油脂(株) 第三事業部
 研究開発部
 部長
 工学博士

