

ソイルセメントの高流動、高強度化技術の開発 とSMW工法への適用

日高 厚¹・蔵野彰夫²・山田哲司³・伊藤隆広²

¹株式会社鴻池組 技術研究所（〒554-0002 大阪府大阪市此花区伝法四丁目3-55）

²正会員 株式会社鴻池組 技術研究所（〒554-0002 大阪府大阪市此花区伝法四丁目3-55）

³株式会社鴻池組 技術研究所（〒554-0002 大阪府大阪市此花区伝法四丁目3-55）

ソイルセメントの高流動化、高強度化技術を開発した。高流動化技術は、土粒子、セメント粒子の分散効果に優れた2種類の高性能分散剤（主剤、助剤）を一定の比率でセメントミルクに併用添加することで、ミルクの注入量を低減しても、ソイルセメントに対して強度を損なうことなく、高い流動性と凝結遅延性を与える。高強度化技術は、比表面積の大きい（6,000～10,000cm²/g）高炉スラグ微粉末を、普通ポルトランドセメントと一定の比率で混合して固化材として用いることで、ソイルセメントの高強度化を可能とする。このうち高流動化技術を、ソイルセメント柱列壁工事（SMW工法）に適用した結果、セメントミルク注入量の低減と、廃棄ソイルセメントスラリーの発生抑制が可能であることが確認できた。

キーワード：ソイルセメント, 流動化, 高強度化, 分散剤, 高炉スラグ微粉末

1. はじめに

土とセメント系固化材を混合してソイルセメントを造成する技術は、地盤改良工法、山留め工法、基礎（杭）工法、埋戻し工法などに幅広く用いられている。これらの工法の内、原地盤にセメントミルクを注入する工法では、原理的に、地盤に注入したセメントミルクの体積に等しい廃棄ソイルセメントスラリーが地上に噴出する。これは建設廃棄物の建設汚泥に該当し、産業廃棄物の適用を受ける。例えばソイルセメント山留め壁工法では、造成したソイルセメントの中に応力材としてH型鋼を建て込むことから、まだ固まらないソイルセメントに適度な流動性が必要となる。このことから、セメントミルクの注入率が大きくなり、その結果、大量に発生する廃棄ソイルセメントスラリーの処理・処分問題が生じている。

最近では建設工事の企画、設計、施工及び関連するすべての事業活動において、環境と調和を図りながら、社会の発展に貢献すべく、「建設副産物適正処理推進要領（平成10年12月1日付改正）」等で、建設廃棄物の発生抑制（減量化）およびリサイクルの推進を図り、取り組むことが必要となってきた。

筆者らは、こうした社会的背景を考慮し、ソイルセメント工法におけるこれらの問題点を解決するため、高炉スラグ微粉末の高強度性と当社開発の高性能分散剤（主剤、助剤）の土粒子およびセメント粒

子分散効果に着目し、これらをソイルセメントの固化材・流動化剤として適用することで、セメントミルクの低注入率化と注入に伴って地表面に噴出する廃棄ソイルセメントスラリーの低減、ひいては工費縮減が可能なソイルセメント配合技術および工法の開発を目指し、ソイルセメントの高強度化、高流動化技術を開発した。

本論文では、高強度化技術の開発と高流動化技術の開発について、技術の概要とその実験結果を示し、さらに、本技術のうち、高流動化技術をソイルセメント柱列壁工法（SMW工法）の現場に実際に適用した際の、その実用性と効果について述べる。

2. ソイルセメントの高強度化技術の開発

高強度化技術は、比表面積の大きい（6,000～10,000cm²/g）高炉スラグ微粉末を、普通ポルトランドセメントと一定の比率で混合して固化材として用いることにより、ソイルセメントの高強度化を図るものである。

開発にあたっては、高炉スラグ微粉末の比表面積、凝結開始材として高炉スラグ微粉末に混合する普通ポルトランドセメント（以下NPCと称す）の混合比率をパラメータとする配合試験を行い、高強度化に最適な、高炉スラグ微粉末の比表面積と、その混合比率を求めた。

表-1 高炉スラグ微粉末の品質

公称比表面積 cm ² /g		4000	6000	8000	10000	15000	18000
品 質							
密度 g/cm ³		2.92	2.91	2.91	2.91	2.89	2.89
比表面積 cm ² /g		4400	6230	8270	10050	15180	18000
活性度指数 %	材令 7 日	64	80	97	—	—	—
	材令 28 日	106	106	114	—	—	—
	材令 91 日	110	112	116	—	—	—
塩基度		1.91	1.90	1.87	1.91	1.87	1.86

(1) 実験に用いた高炉スラグ微粉末

高炉スラグ微粉末は、アルカリ刺激剤の存在下で水と反応して凝結硬化する性質（これを潜在水硬性という）をもっており、固化材として使用する場合には、消石灰やセメントなどのアルカリ物質を添加し、液相の pH を 12 以上に調整する必要がある。実験に用いた高炉スラグ微粉末は、比表面積が 4000, 6,000, 8,000, 10,000, 15,000, 18,000cm²/g のものである。このうち、4,000, 6,000, 8,000 cm²/g のものは、コンクリート用高炉スラグ微粉末として JIS 規格が制定されている。表-1 に実験に用いた 4,000~18,000 cm²/g の高炉スラグ微粉末の品質を示した。

(2) 実験方法

実験では、コスト、早強性などを考慮して NPC を凝結開始材として用いた。NPC と高炉スラグ微粉末の割合は、15% : 85%, 25% : 75%, 32.5% : 67.5%, 50% : 50% の 4 水準、一部 65% : 35%, 80% : 20% の 6 水準とした。

固化の対象とした土質は粘性土で、その主な物理特性を表-2 に示した。

固化材の配合量は、対象土 1m³ に対して 250kg とし、スラリーの W/C を 150%, 注入率は 45.6% とした。ソイルセメント練り上がり後、一軸圧縮試験用として φ5cm×10cm モールドに充填し、所定の材令まで気中養生した。一軸圧縮試験の材令は 28 日とした。

(3) 実験結果

図-1 に NPC 混合比と材令 28 日における一軸圧縮強さの関係を高炉スラグ微粉末の比表面積ごとに示した。これによると、4,000~10,000 の場合は、NPC 混合比が 15%~50% までの範囲では、混合比が多くなるほど一軸圧縮強さが大きくなり、混合比 50% で一軸圧縮強さが最大となった。また NPC 混合比 50% 以上では、混合比の増加にしたがって一軸圧縮強さが低下した。

一方、15,000, 18,000 cm²/g の場合は、NPC 混合比が 20~40% で一軸圧縮強さがピークを示し、4,000~10,000 cm²/g の結果と異なった傾向を示した。

以上の結果より、高強度化に最適な高炉スラグ微

表-2 試料土の物理特性

土粒子の密度 g/cm ³	2.69
自然含水比 %	60.1
砂 分 %	5.3
シルト分 %	37.7
粘土 分 %	57.0

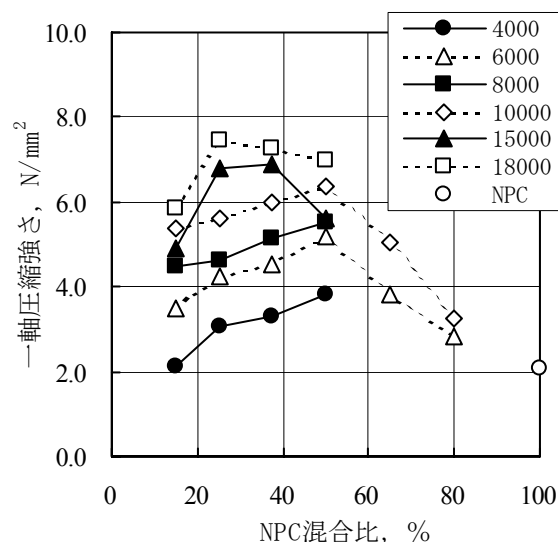


図-1 比表面積と一軸圧縮強さとの関係

粉末の比表面積は、高炉スラグ微粉末の単価、入手の簡易さも考慮して、6,000~10,000 cm²/g が好ましく、NPC 混合比は 50% 程度がよいと考えられる。

3. ソイルセメントの高流動化技術の開発

高流動化技術は、2 種類の分散剤（主剤、助剤）をセメントミルクに併用添加することにより、ソイルセメントの強度・流動性を低下させることなく、セメントミルクの低注入化を可能とするものである。

開発にあたっては、まず主剤と助剤をそれぞれ単独で添加した場合の配合試験を行い、主剤または助剤の添加量とソイルセメントの流動性、強度との関係を調べた。つぎに、主剤と助剤を併用添加した場合の配合試験を行い、高流動化に最適な主剤と助剤の添加比率を求めた。

表-3 主剤，助剤の主な特性

	主剤 (有機系分散剤)	助剤 (無機系分散剤)
外観	淡黄色透明の液体	粉末
成分	ポリカルボン酸塩	無機化合物
固形分	43wt%	100w%
比重	1.25～1.30	—
粘度	500～1000mPa・s	—
pH	7～9	—

(1) 分散剤（主剤，助剤）について

表-3 に主剤と助剤の主な物性を示す。主剤は、当社と東亜合成㈱が共同開発したポリカルボン酸系の分散剤で、淡黄色透明の液体である。助剤は、無機系の粉末の分散剤で、単価が主剤に比べて安く、高流動化のためのランニングコストを削減することを目的とする。

(2) 実験方法

配合試験に用いた土は、高強度化実験と同じ粘性土である。固化材は、高強度化実験の結果をふまえ、6,000 cm²/g の高炉スラグ微粉末と NPC を重量比 1:1 混合したものを用いた。固化材の配合量は高強度化実験と同じで、対象土 1m³ 当たり 250kg とし、W/C=150%，注入率 45.6%とした。

主剤のみの配合試験では、主剤の添加量を対象土 1m³ 当たり 20, 30, 40kg とし、助剤のみでは対象土 1m³ 当たり 10, 20, 30kg の添加量とした。また、流動化剤無添加についても実験を行い、主剤，助剤の結果と比較した。

主剤と助剤の併用添加では、両者の合計添加量を 16, 24, 32kg/m³ とし、それぞれの添加量において主剤と助剤の添加比率を 20%：80%，40%：60%，60%：40%，80%：20%の 4 ケースに変化させ最適添加比率を求めた。

ソイルセメントの品質に関する試験は、流動性、凝結遅延性をベーンせん断試験，強度を一軸圧縮試験とし，一軸圧縮試験の材令は 28 日（気中養生）とした。

(3) 実験結果

a) 主剤，助剤を単独添加した場合

図-2 に主剤，助剤の添加量ごとに経過時間とベーンせん断強さの関係を示した。

主剤は，ソイルセメントに対して高い分散性を発揮し，初期流動性，凝結遅延性ともに優れている。助剤は，無添加に比べて初期流動性は良いが，凝結遅延性がほとんどないことがわかる。

図-3 に流動化剤添加量と一軸圧縮強さの関係を示した。主剤を添加したソイルセメントの一軸圧縮強さは，添加量の増加に伴い低下傾向を示し，特に，添加量 40kg/m³ 以上ではソイルセメントがほとんど硬化しない結果となった。助剤は，無添加と比較して強度が高くなることがわかった。

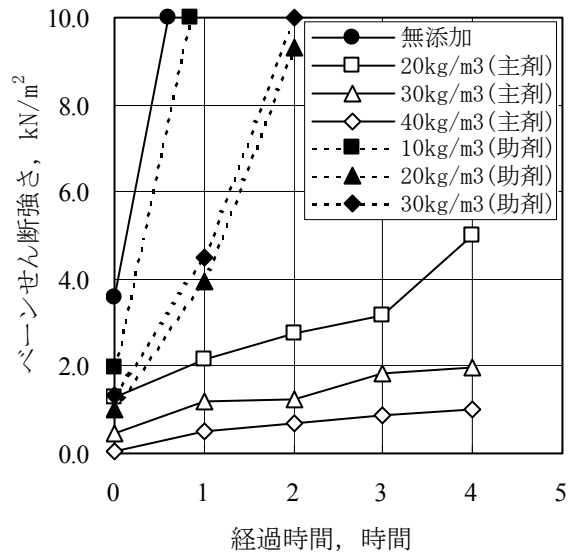


図-2 主剤，助剤の添加量における経過時間とベーンせん断強さとの関係

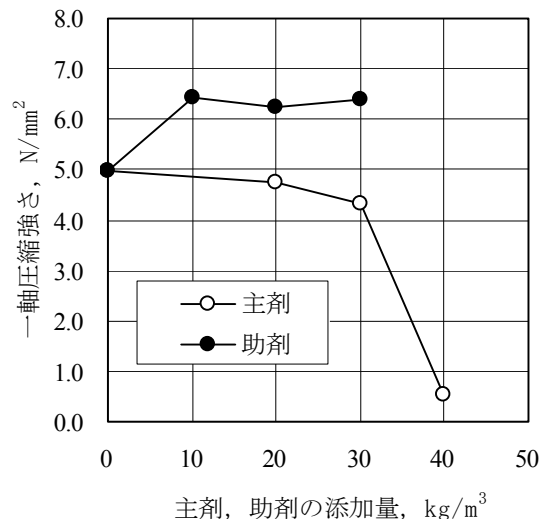


図-3 主剤，助剤の添加量と一軸圧縮強さとの関係

b) 主剤と助剤を併用した場合

本論文では，主剤と助剤の合計添加量を 24kg/m³ とした場合の結果を，以下に示す。

図-4 に，助剤の添加比率に対する経過時間とベーンせん断強さの関係を示した。助剤の添加比率が 20%，40%，60%では，ソイルセメントの初期流動性，凝結遅延性ともに良好であった。添加比率が 80%では，初期流動性は良好であるが，凝結遅延性はほとんど得られなかった。

図-5 に，助剤の添加比率と一軸圧縮強さの関係を示す。この結果によると，助剤の添加比率の増加に伴って，強度が増加することが分かった。添加比率 40%以上では流動化剤を添加しない場合よりも強度が高くなり，特に，60%，80%以上では流動化剤無添加の約 1.4～1.5 倍の強度となった。

以上の結果より，主剤と助剤を併用添加した場合，主剤，助剤を単独添加した場合に比べて，ソイルセ

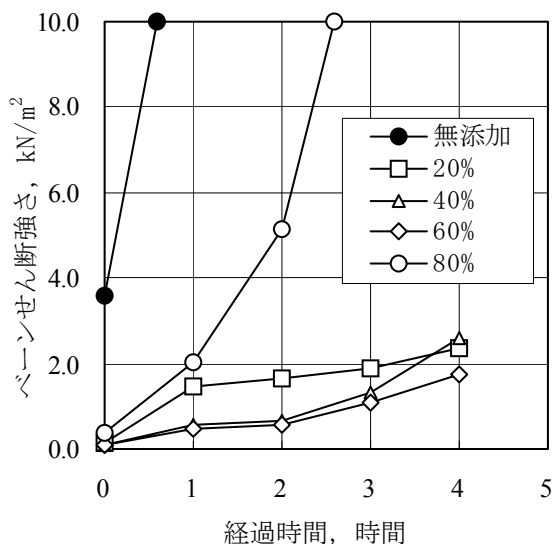


図-4 助剤の添加比率における経過時間とペーンせん断との関係

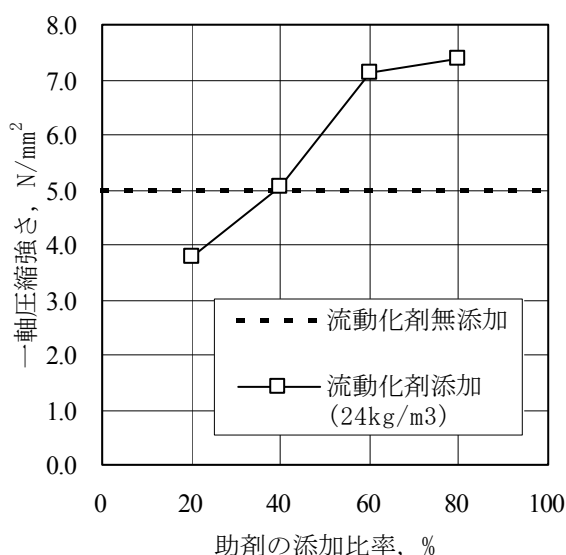


図-5 助剤の添加率と一軸圧縮強さとの関係

メントの強度を低下させることなく、高い流動性と凝結遅延性を与えられることがわかった。助剤の最適添加比率は、対象土の物性や求められる流動性と凝結遅延時間等によって異なるが、他の実験結果も踏まえ 40～60%が好ましいと考えられる。

4. ソイルセメント柱列壁工法を対象としたセメントミルク低注入率化のための配合試験

高流動、高強度化技術をソイルセメント柱列壁工法に適用した場合、どの程度注入率を低減できるかを求めた。

表-4 試料土の物理特性

土粒子の密度	g/cm ³	2.690
自然含水比	%	37.9
礫 分	%	0.0
砂 分	%	48.0
シルト分	%	44.1
粘土 分	%	7.9

表-5 配合表

配合	固化材	流動化剤 添加量 (kg/m ³)	W/C (%)	注入率 (%)
従来	高炉B種	0	200	50～75
開発	スラグ + NPC (50 : 50)	7.5		20～40

(1) 実験方法

実験に用いた対象土の物理特性を表-4に示す。また配合表を表-5に示す。従来配合は、固化材として高炉セメントB種を用いて、対象土の性状からW/Cを200%、注入率を30～100%の範囲で実験した。それに対して、高流動化技術（開発配合）では、固化材として6,000 cm²/gの高炉スラグ微粉末とNPCを重量比1:1で混合したものを用い、W/Cを従来配合と同じ200%とし、注入率を20～40%とした。

流動化剤の合計添加量は対象土量1m³に対して7.5kgとし、助剤の添加比率は60%とした。

配合試験では、ソイルセメントの初期流動性、一軸圧縮強さ（気中養生28日）について、従来配合と、開発配合を比較検討した。

(2) 実験結果

図-6にセメントミルクの注入率と材令28日における一軸圧縮強さの関係を、図-7にセメントミルクの注入率と初期ペーンせん断強さの関係を示す。

この結果によると、従来配合で標準とされる注入率50～75%における強度は、2.0～2.8 N/mm²となった。これに対し、開発配合では注入率30～40%で、従来配合と同等の強度を示した。

さらに、初期ペーンせん断強さについてみると、従来配合での注入率50～75%における初期ペーンせん断強さは0.06～0.2 kN/m²であり、これに対し、開発配合では注入率20～40%で、従来配合と同等以上の初期流動性を示した。

よって、本実験でソイルセメント柱列壁工法に必要な強度、適度な流動性を示す注入率は、従来配合が50～75%、開発配合が30～40%となり、注入率の低減率は50～60%程度可能であることが分かった。

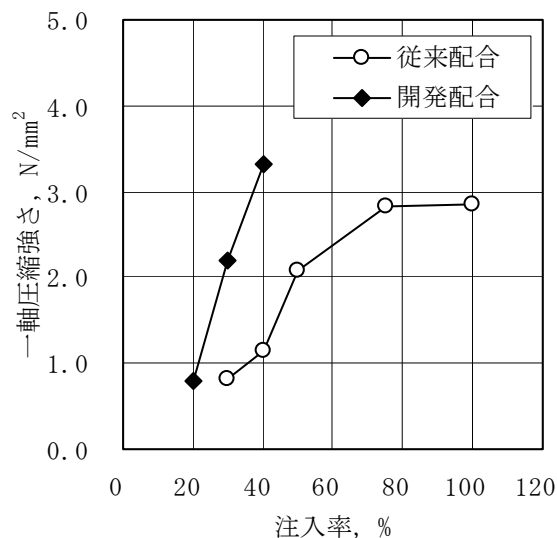


図-6 注入率と一軸圧縮強さとの関係

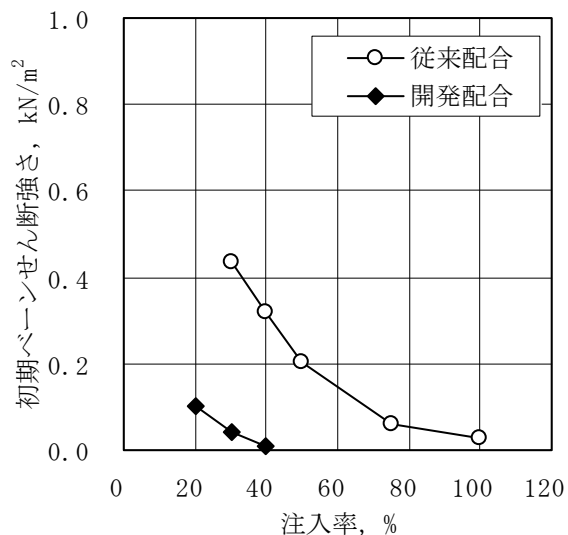


図-7 注入率と初期ペーセン断強さとの関係

表-6 各現場の工事概要

		適用概要	
		開発配合施工規模	対象土質
①	ビル新築 山留め壁工事	施工面積：2,400m ² の内の2,000m ² 削孔深さ：GL-13, 16m 削孔径：φ550	砂・シルト 主体
②	シールド発進立坑 山留め壁工事	施工面積：920m ² の内の460m ² 削孔深さ：GL-20.5m, 削孔径：φ600	砂礫主体
③	配水場建設 山留め壁工事	施工面積：9,500m ² のうち9,350m ² 削孔深さ：GL-20.5～27m, 削孔径：φ900, φ650	砂・粘土 主体

5. 高流動化技術の現場適用結果

高流動化技術について、その実用性と効果を確認するため、ソイルセメント柱列壁工法（SMW工法）の3現場に適用した。各現場とも、一部を従来配合で施工し、ソイルセメントの品質、施工性、廃棄スラリーの発生量など開発配合と比較検討した。適用した3現場の工事概要を表-6に示す。

(1) 配合計画

3現場における従来配合、開発配合をそれぞれ表-7、表-8、表-9に示す。従来配合は、地盤条件から当初計画されていた配合である。

開発配合は3現場ともセメントミルクの注入率を従来配合の60%に低減することを目標とし、配合を計画した。

使用する固化材は、ソイルセメントの必要強度が0.5N/mm²と低強度であること、事前の配合試験によって、従来配合とほぼ同等の強度が得られたことから、高炉セメントB種とした。セメントミルクのW/Cも、従来配合と同じとした。

流動化剤は、3現場とも助剤の添加比率を60%とした。また、流動化剤の合計添加量は地盤条件、施

表-7 適用現場①の配合

	固化材 (kg/m ³)	W/C (%)	流動化剤 (kg/m ³)	注入率 (%)
従来配合	280	220	—	70
開発配合	171		10	43

表-8 適用現場②の配合

	固化材 (kg/m ³)	W/C (%)	流動化剤 (kg/m ³)	注入率 (%)
従来配合	280	200	—	65
開発配合	168		10	39

表-9 適用現場③の配合

	固化材 (kg/m ³)	W/C (%)	流動化剤 (kg/m ³)	注入率 (%)
従来配合	300	230	—	79
開発配合	180		15	47

表-10 各現場の施行結果

測定項目 \ 現場	①	②	③
フロー値 (mm)	280 (従来配合：185)	300 (従来配合：262)	測定せず
一軸圧縮強さ (N/mm ²)	2.26 (従来配合：2.55)	3.40 (従来配合：3.50)	2.09 (従来配合：2.12)
ミルク注入率 (ミルク注入量/対象土量)	43% (従来配合：70%)	39% (従来配合：65%)	52% (従来配合：109%)
産廃発生率 (廃棄スラリー量/対象土量)	40% (従来配合：68%)	13% (従来配合：28%)	58% (従来配合：120%)

工条件を考慮し、適用現場①、②は 10kg/m³、③は 15kg/m³とした。

(2) 施工結果

3現場の施工結果を一括して表-10に示す。以下に施工結果についてまとめる。

a) 施工性

開発配合では、セメントミルクの注入率を従来配合の60%に減量化したにもかかわらず、ソイルセメントの流動性が得られた(詳細はb)に記述)。

その結果、芯材の位置決め、建て込みが容易であった。また開発配合では、流動化剤の凝結遅延効果により、ソイルセメントの流動性が保たれる時間が従来配合より長く、複数エレメントの連続削孔が可能となり、サイクルタイムを短くすることができ、施工性が向上した。

b) 品質

ソイルセメントの流動性は、フロー値(JHS A-313 規格準拠)の測定結果より、適用現場①では従来が185mm、開発が280mm、適用現場②では従来が262mm、開発が300mmとなり、2現場とも従来配合と比べ高い流動性を示した。

一軸圧縮強さは、3現場において従来配合が2.12N/mm²～3.50N/mm²の範囲で、開発配合は2.09N/mm²～3.40N/mm²の範囲となり、開発配合の方がやや小さい結果となった。しかし必要強度(0.5N/mm²)を満足し、山留め壁として、品質上問題のないことが確認された。

c) 産廃処分量

施工条件が異なるものの、3現場におけるセメントミルクの注入率(ミルク量/対象土量)は、従来

配合が65%～109%、開発配合が39%～52%となり、当初の目的通り従来配合の50～60%に低減できた。

廃棄ソイルセメントスラリー発生率(廃棄スラリー量/対象土量)についても、従来配合が28%～120%、開発配合が13%～58%となり、ミルクの注入率同様、従来配合と比較して50～60%に削減することができた。

6. おわりに

ソイルセメントの高強度化技術と、高流動化技術を開発した。また高流動化技術については、実際にソイルセメント柱列壁工事(SMW工法)の3現場に適用し、注入率の低減、廃棄スラリーの抑制など、その有効性を確認することができた。

今後は、ソイルセメント柱列壁工事への普及に努めるとともに、他のソイルセメント工法への適用を図っていきたいと考える。

参考文献

- 1) 山田他：高炉スラグ微粉末を用いたソイルセメントの固化特性について、第33回地盤工学研究発表会，pp. 2267-2268, 1998.
- 2) 日高他：高炉スラグ微粉末を用いたソイルセメントの流動化について、第34回地盤工学研究発表会，pp. 839-840, 1999
- 3) 伊藤他：高流動ソイルセメントのソイルセメント柱列壁工法への適用，土木学会第55回年次学術講演会，Ⅲ-B257, pp. 512-513, 2000.