

泥水工法用高性能分散剤「Super Slurry」の開発

佐藤 祐司 炭田 光輝
川地 武

Development of High Efficiency Dispersing Agent for Slurry Excavation System

Yuji Sato Mitsuteru Sumida
Takeshi Kawachi

Abstract

In high-speed diaphragm wall construction of large, very fine soil grains (VFSG) that can not be removed by the soil separation system are accumulated in the slurry with the excavated material. This paper, first, clarifies the negative effect of the VFSG, on the slurry. It causes the slurry to become highly viscous at low density, it degrades remarkably when it mixes with the cement, and the dispersion agent becomes ineffective in the degraded slurry. Secondly, demonstrates the efficiency of the highly effective newly developed dispersing agent 「Super Slurry」. The performance of Super Slurry is optimal with VFSG accumulated slurry and has high dispersion efficiency. Super Slurry can recover slurry that is degraded remarkably by cement, so that it can be used repeatedly. Moreover, the treatment is easy because it is liquid.

概 要

大規模、高速施工の地中連続壁工事では、掘削泥水中に土砂分離システムで除去できない微細な土粒子（超微粒子と呼ぶ）が、掘削に伴って蓄積する。超微粒子が蓄積すると泥水性状に悪影響を及ぼすことが懸念される。本論文では、まず、超微粒子が泥水に蓄積すると泥水が低比重で高粘性となる、セメントで劣化しやすい、さらに分散剤が効きにくいなどの基本的特性を明らかにした。次に、超微粒子が蓄積した泥水に対して分散効果が著しく高い高性能な分散剤「Super Slurry」を開発し、この特徴を明らかにした。Super Slurryは、1)液状であるので混練が不要で取り扱いが容易である、2)超微粒子（土粒子）に対して分散能が高い、3)セメントで劣化した泥水の再生が繰返し可能であり、塩類凝集しにくいなどの特徴を有する。

1. はじめに

泥水を用いて地盤を掘削する泥水工法には地中連続壁工法、泥水シールド工法、リバースサーキュレーション工法などがあり各種建設工事に広く採用されている。とりわけ、OWS-SOLENTANCHE工法は地中連続壁工法として昭和41年に開発され、この種の工法としてわが国最大の施工実績を誇っており、止水壁、山留壁、本体地下構造壁あるいは支持杭としても利用されている¹⁾²⁾。掘削には開発当初にパーカッション式のCIS掘削機、昭和46年からバケット式のケリー掘削機が使用され、昭和53年には深度100mクラスの掘削を可能とする回転ビット型のハイドロフレイズ掘削機が開発されて、現在も更に開発改善が行われている。

泥水を使用する地中連続壁工法では、工事の安全性、施工性、経済性は泥水技術の優劣に負うところが多い。泥水は掘削壁面の安定に不可欠であるだけでなく、掘削土をスラリー輸送するので、土砂の運搬・分離にも重要な機能を果たす。掘削壁面の安定は、その機構が十分には解明されていないが泥水位と地下水位の差による泥水

圧によって掘削壁面に不透水性の泥膜が形成される、いわゆる造壁性が重視される³⁾⁴⁾。さらに、泥水中に混入した土砂の運搬・分離には泥水の流動特性（粘性）が重要である。これらの機能を発揮するための泥水材料は石油ポーリングに準用したペントナイト泥水⁵⁾が当初用いられていた。当社では、昭和48年に水溶性高分子を主成分とするポリマー泥水⁶⁾を開発し、その後各種の改良を行い、現在はほとんどの連壁工事でポリマー泥水を使用している。

また、泥水中に混入した土砂の分離は、スクリーン、サイクロン、沈砂槽などで粗粒分を除去していたが、スクリュージェカント⁷⁾を開発したことで細粒分の分級が可能となり、泥水の再利用率が向上した。

最近の大規模、高速施工の地中連続壁工事では、泥水中にスクリュージェカントで除去できない土粒子が蓄積し、ほとんどが1 μ m以下の粒子（以下、超微粒子と記す）になっている。超微粒子が蓄積した泥水（以下、超微粒子泥水と記す）は、低比重で粘性が著しく増加するなど施工への影響も懸念される。この超微粒子泥水の対策としては、蓄積した超微粒子の除去⁸⁾や超微粒子が泥水性状

Table 1 連壁工事の泥水に関連する施工状況の一例
Example of Slurry Relation Change in Case of Diaphragm Wall Construction by the Hydrofraise

項目	初期のハイドロ掘削	最近のハイドロ掘削	最近の問題点など
掘削速度	5~10 m ³ /hr	10~20 m ³ /hr	・大規模、高速施工化により、時間当りの掘削量が著しく増加し、多量の土砂が泥水中に混入する
土砂分離	スクリーン、サイクロン、沈砂槽	同左	
細粒分の除去	フィルタープレス（廃泥水として処分）	スクリュエデカンタ（概ね10μm以上の粒子を除去し、泥水は再利用）	・泥水を廃棄せずに、スクリュエデカンタで細粒分を分級し、再利用するのでスクリュエデカンタで除去できない超微粒子が蓄積する
泥水材料	ポリマー泥水	同左	・十数年ほとんど変化なし
掘削泥水量	掘削機、土砂分離システムの改善に応じてかえてはいない。		・工事は大深度、大規模化しているが敷地の制約により泥水量は抑制されている
泥水性状	---	高比重、高粘性化	・低比重でも粘性が高い、分散剤が効きにくい

に与える影響を抑制（無害化）する方法などが考えられる。無害化の方法には、分散剤により泥水の粘性を低減させる方法がある。しかし、超微粒子泥水には従来の分散剤は効きにくい。そのため、超微粒子に適した高性能な分散剤の開発が望まれている。そこで、超微粒子泥水に対して、分散効果の高い分散剤「Super Slurry」を開発した。

本論文では、最近の連壁工事の特徴を概説し、超微粒子の蓄積が泥水性状に及ぼす影響を明らかにした。そして、開発した高性能分散剤Super Slurryの性能について室内試験により得られた結果を報告する。

2. 最近の連壁工事の特徴

Table 1に開発初期のハイドロ掘削機による連壁工事（ハイドロ施工と略す）と最近のハイドロ施工における泥水関連の施工状況の一例を示す。最近のハイドロ施工は掘削機や土砂分離機の改善により高速施工が可能になっている。そのため大深度、大規模の連壁工事では、初期のハイドロ施工に比べ、時間当りの掘削量は約2倍に向上しており、多量の掘削土が泥水中に混入する。泥水中に混入した粗粒分はスクリーン、サイクロンなどで除去している。初期のハイドロ掘削では、スクリーン、サイクロンで除去できない細粒分が泥水に蓄積し泥水比重が高くなると、フィルタープレスなどを用いて廃泥水として処分することで細粒分を除去していた。一方、最近のハイドロ掘削では、粗粒分の除去方法は変わっていないが、細粒分はスクリュエデカンタなどで泥水中の概ね10μm以上の土粒子を分級し、泥水は再利用している。また、掘削泥水量は敷地の制約などにより抑制されており、ほとんど変化していない。これらのことから、最近の大深度、大規模の連壁工事では掘削開始後短時間に泥水中の土粒子のほとんどが1μm以下になっている。一例として、Fig. 1に掘削日数に伴う泥水中に蓄積した超微粒子量の変化を示す。泥水中の1μm以下の土粒子量は掘削日数とともに多くなり、掘削開始10~15日程度で泥水中の土粒子の80~90%となっている。

今後益々、工事の急速施工、効率化が望まれているの

Table 2 供試土の土質性状
Property of Examined Soil

項目	分析値
土粒子密度 (g/cm ³)	2.687
含水比 (%)	29.0
液性限界 (%)	48.9
塑性限界 (%)	20.6
塑性指数	28.3
コンシステン指数	0.26

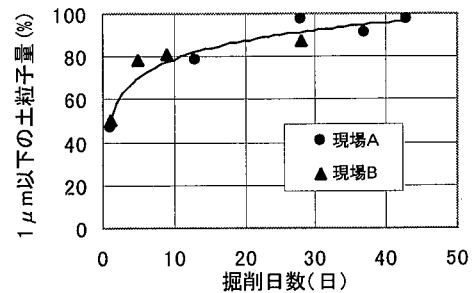


Fig. 1 掘削泥水中の超微粒子量の変化
Change of very fine soil grain quantity in Slurry

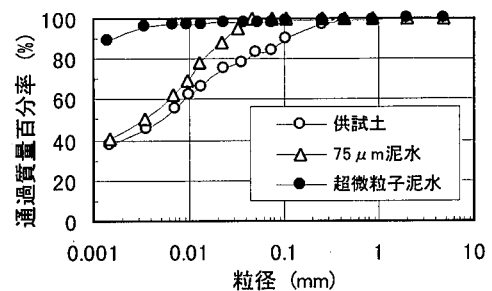


Fig. 2 供試泥水の粒度分布
Particlesize Accumulation Curve of Examined Slurry

で、今以上に超微粒子泥水が高比重、高粘性になり施工への悪影響が懸念される。そのため、超微粒子泥水の性状改善は重要な課題である。

Table 3 化学組成と含有鉱物

Chemistry Composition and Containing Mineral

項目	供試土	75 μ m 泥水	超微粒子 泥水	
主な 化学 組成 (%)	SiO ₂	60.0	61.3	53.1
	Al ₂ O ₃	19.3	20.3	23.2
	Fe ₂ O ₃	4.2	4.7	6.7
	MgO	3.8	3.7	5.1
	K ₂ O	3.5	3.5	4.3
主な結晶鉱物	石英, 長石, 角閃石, 雲母粘土鉱物, 緑泥石			

3. 超微粒子泥水の特徴

上述したように最近の連壁工事では、泥水に超微粒子が蓄積する。そこで、泥水中の土粒子の粒径によって化学組成、含有鉱物に違いがあるか、また泥水性状に与える影響を室内試験によって検討した。ここでは、この結果について報告する。

3.1 実験概要

Table 2に供試土の性状を示す。この土を水道水で解膠し、200メッシュ篩いで篩別して75 μ m以上を分級した泥水（以下、75 μ m泥水と記す）と遠心分離機で分級した泥水（以下、超微粒子泥水と記す）の2種類を作製し、実験に供試した。Fig. 2に示すように遠心分離機で分級した超微粒子泥水の粒径は、約90%が1 μ m以下である。供試土、75 μ m泥水、超微粒子泥水の土粒子の化学組成、含有鉱物は、それぞれ蛍光X線分析、X線回折分析により測定した。また、泥水の基本性状はポリマーを0~0.4%添加して、ファンネル粘度（以下、FVと記す）と大林式造壁性（50mmHg、5分の吸引脱水量を測定する）を測定した。劣化再生試験では、ポリマー無添加の泥水にセメントを添加して劣化させたのち、分散剤を添加し再生させた。このときの流動特性をB型粘度計で測定し、降伏値で評価した。

3.2 結果と考察

3.2.1 化学組成と含有鉱物 Table 3に供試土、75 μ m泥水、超微粒子泥水中の土粒子の化学組成と結晶鉱物を示す。供試土と75 μ m泥水の土粒子の化学組成は、さほど差が認められなかったが、超微粒子ではSiO₂が減少しAl₂O₃、Fe₂O₃、MgOなどが増加していた。また、X線回折分析の結果、検出された結晶鉱物の種類に違いはないが、粘土鉱物の含有量は超微粒子泥水が最も多いことが認められた。

3.2.2 泥水の基本性状 Fig. 3に75 μ m泥水、超微粒子泥水の流動性、造壁性を示す。75 μ m泥水の粘性はポリマーを添加しない場合、比重1.02でFVは18.6sec、比重1.135で20.0secとなり比重が高くなってもさほど増加しない。ポリマーを0.4%添加した場合、比重1.10付近からFVは増加するが、比重1.135でも29.5secであり、通

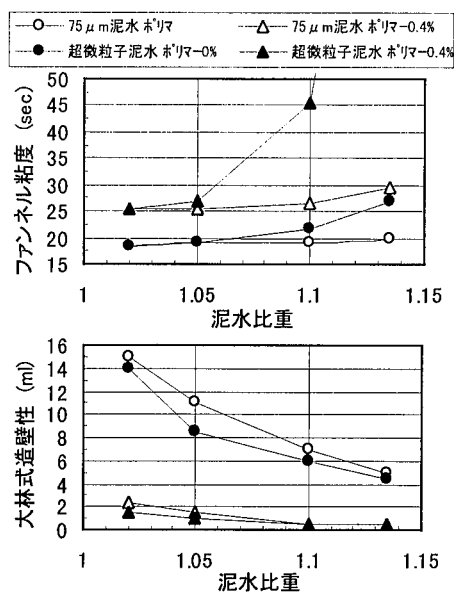


Fig. 3 超微粒子泥水の流動性と造壁性
The Flow-Ability and Wall-Building Characteristic of Very Fine Soil Grain Accumulated Slurry

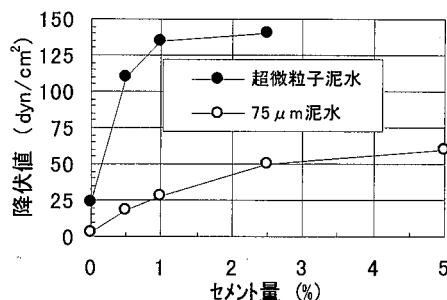


Fig. 4 超微粒子泥水のセメント添加時の流動性
The Flow-Ability Characteristic in Cement Addition of Very Fine Soil Grain Accumulated Slurry

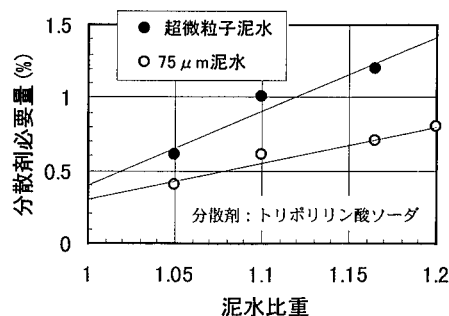


Fig. 5 劣化泥水の再生に必要な分散剤量
Necessary Quantity of Dispersion Agent to Replay Degraded Slurry

常の管理基準値²⁾の20~36sec以内である。一方、超微粒子泥水では、ポリマー無添加の場合でも比重1.05程度からFVが増加し、比重1.135では27.0secとなる。さらにポリマーを0.4%添加した場合、比重1.10でFVは45secと

Table 4 泥水工法の主な分散剤⁵⁾⁹⁾
Main Dispersion Agent of Slurry Excavation

種類	主な利用目的	留意点など
無機系	炭酸塩	泥水中のCa ²⁺ のマスクング
	複合リン酸塩	〃, 泥水(粘土)の分散
高分子系	フミン酸系	泥水(粘土)の分散
	リグニンスルホン酸系	泥水(粘土), セメントの分散
	ポリカルボン酸系	泥水(粘土), 機顔料, セメントの分散
	ナフタレンスルホン酸系	セメント, 機顔料の分散
	ポリスチレンスルホン酸系	セメントの分散

なり基準値を逸脱する。

造壁性はポリマー無添加の場合、例えば、比重1.05の脱水量は75 μ m泥水で約11mlであるが、超微粒子泥水では8.5mlと超微粒子が蓄積することにより造壁性がよくなる。しかし、ポリマーを添加すると脱水量の差はほとんどなくなる。この事象は、ポリマー泥水の場合、約1%以上の土粒子が混入していると土粒子の種類に関係なく造壁性が得られることと一致している⁶⁾。

3.2.3セメント劣化と再生 Fig. 4に比重1.10, ポリマー無添加の泥水にセメントを添加したときの降伏値の変化を示す。泥水は降伏値が高いものほどドロドロとした状態である。図示するように超微粒子泥水は75 μ m泥水に比べ降伏値が著しく高くなり、セメントに対して劣化しやすい。また、図示しないが超微粒子泥水にセメントが混入すると粘性は著しく増加するため、掘削時の揚泥ポンプの負荷が高くなって掘削能率が低下したり、コンクリート打設前のスライム処理など施工に悪影響を及ぼすと考えられる。

セメントで劣化した泥水に分散剤を添加して再生すると75 μ m泥水、超微粒子泥水とも降伏値が低下し、セメント添加前の降伏値まで改善される。しかし、ある添加量を超えて過剰に分散剤を添加すると塩類凝集を起し降伏値が増加する。Fig. 5に、セメントで劣化した泥水を分散剤で再生したとき降伏値が最小となる分散剤添加量を分散剤必要量と称することにし、泥水比重と分散剤必要量の関係を示す。75 μ m泥水の分散剤必要量は、比重1.05で0.4%、比重1.165では0.7%であり、超微粒子泥水の同比重での分散剤必要量はそれぞれ0.6%、1.2%である。このように超微粒子泥水は75 μ m泥水に比べて、同比重で比較すると分散剤の必要量が多くなり、高比重になるほど分散剤が効きにくくなる。

4. 各種分散剤の性能と問題点

泥水の粘性低減には従来から各種の分散剤が使用されている。一般に、分散剤はTable 4に示すものが主に使用されており、無機系と高分子系に大別できる。無機系分散剤には炭酸塩、複合リン酸塩などがあり、泥水ではカルシウムイオンのマスクング作用などにより分散効果を維持する。高分子系では通常、ポリカルボン酸系分散剤が泥水の分散に使用され、無機分散剤と比較して分

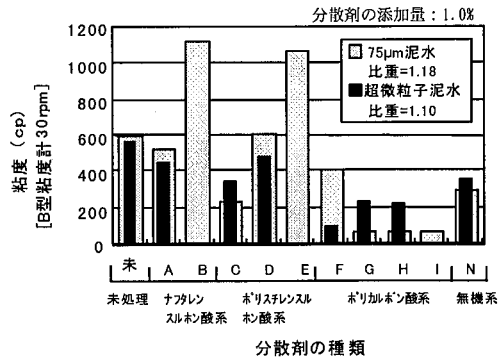


Fig. 6 各種分散剤の分散能
Dispersion Ability of the Various Dispersing Agent

散能は高いが高価である。泥水に対する分散剤の添加量は通常0.1~0.5%程度である。無機系分散剤は過剰添加した場合や繰返し添加すると塩類が蓄積し塩類凝集を起こして、泥水の粘性が増加する場合がある。また、従来の分散剤は、超微粒子泥水に対して粘性低下効果が低く、セメントで著しく劣化した場合に再生しにくい。Fig. 6に各種の高分子系分散剤について分散能を比較した一例を示す。分散剤の種類、また同一種でも分子量などの違いによって粘度の低減効果に違いがある。ナフタレンスルホン酸系およびポリスチレンスルホン酸系分散剤は粘度が多少低下するものもあるが、ほとんどが未添加と同程度、あるいは増加する傾向にある。ポリカルボン酸系では、1種類だけ粘度の増加みられるが、他の高分子系分散剤と比較すると泥水の粘度は著しく低下している。よって、各種分散剤の中では従来から使用しているポリカルボン酸系分散剤が超微粒子に対して最も効果があると考えられる。しかし、従来のポリカルボン酸系分散剤では、比重1.1の超微粒子泥水の粘性は約120cpまでしか低下せず、ポリマー泥水の良液と同等の10~20cp程度まで粘性を改善することは困難である。

5. 高性能分散剤 Super Slurry

高分子系薬剤はその主鎖、側鎖の構造や分子量などにより分散、凝集、接着という機能が発現する。一般的に分散剤としての分子量は数十万以下⁹⁾であるといわれている。開発したSuper Slurryは、従来の分散剤のうち超

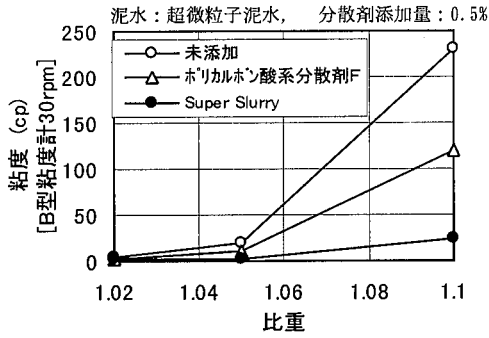


Fig. 7 Super Slurryの超微粒子に対する分散能
Dispersion Ability of Super Slurry to Very Fine Soil Grain

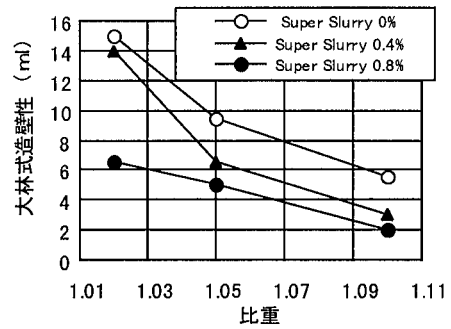


Fig. 8 Super Slurryの造壁性改善効果
Improvement Effect of Super Slurry to Wall-Building Characteristic

微粒子に効果のあるポリカルボン酸系分散剤の分子量や側鎖構造など変えて、超微粒子およびセメントで劣化した泥水に対して最適な分散能を発現するように合成したものである。

ここでは開発した高性能分散剤Super Slurryの性状などについて室内試験により得られた結果を述べる。

5.1 Super Slurryの性状

5.1.1 超微粒子泥水に対する分散能 Fig. 7に従来のポリカルボン酸系分散剤とSuper Slurryの超微粒子泥水に対する分散能の一例を示す。分散能の試験方法は、ポリマー無添加の泥水に分散剤を0.5%添加して十分間攪拌してから、B型粘度計を用いて泥水の粘度を測定し評価した。図示するように、泥水比重が高くなると、従来使用しているポリカルボン酸系分散剤とSuper Slurryの分散能に著しい差異が認められる。泥水比重が1.1で粘性が約230cpの高比重高粘性の場合、従来のポリカルボン酸系分散剤では泥水の粘性が120cp程度までしか低下していない。一方、Super Slurryは通常のポリマー泥水の良液と同等な粘性である10~20cp程度まで粘性の改善が可能であり、超微粒子が蓄積し高比重高粘性となった泥水に対して高い分散能を示す。

なお、Fig. 8にSuper Slurryの添加による造壁性の変化の一例を示す。Super Slurryの添加により、泥水の脱水量は低減し造壁性が良くなっている。これは、土粒子が分散したことにより、泥膜が緻密になるためであると考えられる。

5.1.2 セメントで劣化した泥水の繰返し再生効果 連壁工事では、セメント改良地盤の掘削やコンクリートカッティングの掘削において、泥水の劣化防止や劣化した泥水を再生するため分散剤を使用する。そのとき、分散剤は単に劣化した泥水を再生させるだけでなく、繰返し再生させることが必要となる。そこで、従来現場で使用している分散剤である炭酸ソーダ、トリポリリン酸ソーダと今回開発したSuper Slurryの劣化再生の繰返し分散効果を室内試験で検討した。今回の試験では、泥水にセメント添加してFVが30sec以上になったときに、分散剤を

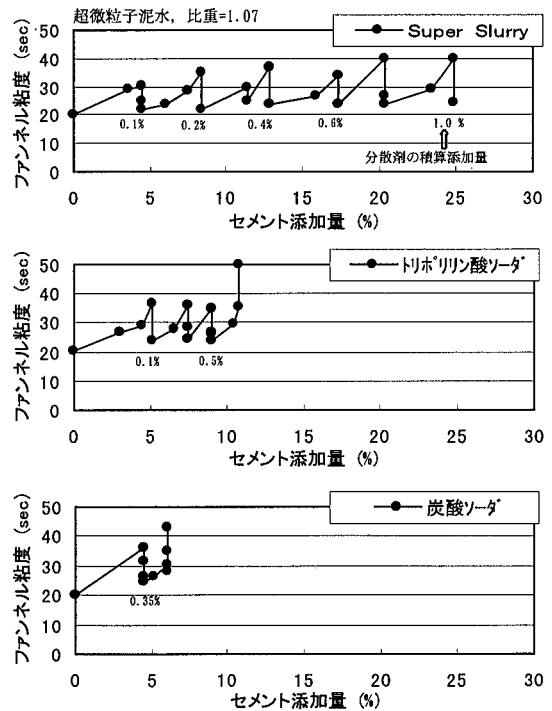


Fig. 9 劣化再生の繰返し時のSuper Slurryの分散能
Dispersion Ability of Super Slurry in Degradation Replay's Repeating

添加しFVを25sec以下まで下げるサイクルを繰返し行い、分散剤の再生効果を評価した。

Fig. 9に各分散剤の劣化再生の繰返し試験結果を示す。炭酸ソーダ、トリポリリン酸ソーダでは劣化再生を繰返して所定のセメント・分散剤量を超えると、もはや分散剤を添加しても泥水の粘性は低下せず、逆に増粘し再生が不可能となる。この状態は塩類凝集を起こしたためであり、現場では廃泥水として処分される。一方、Super Slurryは劣化再生を繰返し行なっても塩類凝集せず何回でも再生が可能であり、泥水を廃棄せず繰返し使用できる。繰返し再生能力を再生が可能であったセメント添加総量と比較すると、これは土の種類や泥水比重あるいは

Table 5 Super Slurryの特徴
Characteristic of Super Slurry

性状	外観	黄褐色液体
	比重	1.3程度
	粘度	400cp程度
	pH	8.0程度
特徴	・液状で取り扱いが容易 ・超微粒子の分散能が高い ・セメントによる劣化泥水の繰返し再生が可能	
効果	・廃泥水量の削減 → 環境負荷の低減 ・泥水材量の削減 → コスト削減 ・土砂分離性能の向上など → 掘削効率の向上	

セメントの添加方法などによって変化するので絶対的な数値ではないが、この試験結果ではSuper Slurryは25%、トリポリリン酸ソーダは9%、炭酸ソーダは4.5%である。すなわち、Super Slurryのセメント劣化における限界セメント量¹⁾はトリポリリン酸ソーダの2.7倍、炭酸ソーダの5.5倍である。また、再生に必要な分散剤量を比較すると、Super Slurryは炭酸ソーダ、トリポリリン酸ソーダに比べ混入したセメントに対して少ない添加量で再生が可能である。

5.2 Super Slurryの特徴

Table 5にSuper Slurryの特徴を示す。Super Slurryは上述したように通常の掘削泥水だけでなく、超微粒子が蓄積して高粘性になった泥水の粘性低減やセメントによって著しく劣化した泥水の再生が可能となるように合成したポリカルボン酸系の分散剤である。液状タイプであるため混練が不要であり、掘削溝内などに直接添加できる。また、従来の分散剤に比較し少量の添加量で泥水の再生が可能で、超微粒子の蓄積や塩類凝集によって従来廃棄していた泥水を再生利用することができる。このことから、廃泥水の削減、それに伴う新液の作泥量を低減することが可能であると考えられる。なお、泥水が劣化する前に添加しておくことで泥水粘性の増加やセメント劣化の抑制に高い効果を示す。

6. おわりに

大規模、大深度、高速施工の連壁工事では、土砂分離システムで除去できない超微粒子による泥水への悪影響が著しく、泥水を廃棄処分せざるをえないケースが多くなっている。そこで、このような劣化した泥水を繰返し再生利用できる高性能な分散剤Super Slurryを開発した。以下に本論文の結果をまとめて示す。

- 1) 最近のハイドロ掘削による大規模、高速施工の連壁工事では泥水中の1 μ m以下の超微粒子量は、掘削とともに多くなり、掘削開始10～15日程度で泥水中の80～90%になる。
- 2) 超微粒子泥水は75 μ m泥水に比べ、粘土鉱物の含有量は多い。

- 3) 超微粒子泥水は比重1.05程度から粘性が増加し、ポリマーを0.4%添加すると、比重1.1でファンネル粘度が45secとなり管理基準値を逸脱する。また、セメントによる劣化（粘性増加）が大きく、従来の分散剤では効きにくい。
- 4) 開発したSuper Slurryは、従来のポリカルボン酸系分散剤では、120cp程度までしか泥水粘性を改善できなかった高比重高粘性の超微粒子泥水に対して、ポリマー泥水の良液と同等の10～20cpまで粘性を低減できる。
- 5) Super Slurryは塩類凝集しにくく、セメントで劣化した泥水を繰返し再生することが可能である。再生可能な限界セメント量を比較すると、Super Slurryはトリポリリン酸ソーダの2.7倍、炭酸ソーダの5.5倍である。また、再生に必要な分散剤量もトリポリリン酸ソーダ、炭酸ソーダに比べ少量である。

現在、Super Slurryを現場施工に適用しており上述した効果を検証している。今後はSuper Slurryを広く普及するとともに、さらに高速化、高効率化する連壁工事に対応可能な泥水材料の開発を進めている。また、機会があればSuper Slurryの現場適用結果なども報告する予定である。

参考文献

- 1) 株大林組：OWS-SOLETANCHE工法，パンフレット
- 2) 連続地中壁工法，土質工学会，pp.1～106，(1988)
- 3) 喜田，川地：泥水の基本的性質，基礎工，No.5，pp.6～14，(1982)
- 4) 金谷，秋野：泥水掘削における溝壁安定性の実大実験，土質工学会論文報告集24-4，pp.171～182，(1984)
- 5) 沖野文吉：ボーリング泥水，技報堂出版，pp.151～157，(1986)
- 6) 喜田，川地：高分子・粘土複合体の泥水工法への適用，土と基礎，28-2，(1980)
- 7) 喜田，炭田，辻：土工事における濁水処理に関する研究(第21報)，大林組技術研究所報，No.32，pp.87～91，(1986)
- 8) 炭田，佐藤，川地，吉崎：電気泳動法による超微粒子の分級装置の開発，地盤工学会年次講演会論文集，pp.1689～1690，(1998)
- 9) 藤本武彦：高分子薬剤入門，三洋化成工業，pp.296～309，(1992)
- 10) 喜田，炭田，千野：セメント固化地盤の掘削に関する研究(その3) -清水練・海水練泥水の劣化・再生に及ぼすポリマー濃度の影響-，第24回土質工学会発表講演集，pp.1539～1540，(1990)