

粘性地盤における地中連続壁の安定液管理 ～粒度分析装置を用いた安定液比重の管理～ Slurry Quality Control of Diaphragm Wall under Cohesive Ground (Control of Slurry-Density with Particle-Size Distribution Analyzer)

平井 裕二*
Yuji Hirai

栗丸 功**
Isao Kurimaru

池田 繁紀***
Shigenori Ikeda

松嶋 久男**
Hisao Matsushima

要 約

本現場は、中部電力川越火力発電所から西名古屋変電所への送電用洞道を新設するにあたり、同発電所内に設置する発進立坑を地中連続壁工法にて施工するものである。掘削深度は75.5mであるが、このうち約5割がN値5以下のシルトで占められている。このため、掘削時にはシルトの過剰混入による安定液比重の上昇をきたし、種々のトラブルを誘発することが懸念された。そこで、このトラブルを事前に予測・対処することを目的とし、短時間で掘削土や安定液の粒度が測定可能な粒度分析装置を現場に配備し、施工時における安定液管理へ適用した。また、この装置を用いて安定液へ混入する掘削土の粒径を定量的に把握し、安定液の初期配合や細粒分除去装置の検討にも役立てた。この結果、比重は管理基準値内を推移し、比重上昇に伴うトラブルもなく無事施工を終了することができた。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 概要
- § 3. 粒度分析装置
- § 4. 事前検討項目
- § 5. 掘削時の安定液管理
- § 6. おわりに

§ 1. はじめに

連続地中壁工法における安定液管理は、現在に至っても管理者の経験によって性状の判断および対処を行う場合が多い。そのため、安定液が劣化した場合、その原因

について誤った判断および対処を行うことにより、施工の進捗や安定液管理費用へ重大な影響を及ぼす場合がある。とくに、崩壊性砂質土のようにあらかじめ安定液比重を高く維持する場合を除き、掘削時における安定液比重の上昇は、その対処方法により安定液の転用回数やコンクリートの品質が左右されるほど重要な問題となる。掘削時に比重が上昇する主な原因は、掘削速度の超過に伴う粗粒分および細粒分除去装置の能力不足もしくは細粒分除去装置では除去が難しい粘土分やシルト分の混入である。通常、この原因を判定するためには、安定液の粒度分析を地盤工学会基準に基づいた沈降分析法¹⁾にて測定しなければならない。しかし、この方法では、試験開始から分析終了まで約1日を要するため、結果が出た時点では施工が進み、手遅れになる場合もある。

本現場の土質は、掘削対象土の約5割が軟弱なシルト層で構成されていることから、シルト分の混入による安定液比重および粘性の上昇が懸念された。そこで、比重

*技術研究所先端技術研究課

**中部(支)中電桑名(出)

***中部(支)戸田幹線(出)

および粘性が上昇する原因を早期に判定・対処し、施工への影響を少なくすることを目的とし、短時間で掘削土や安定液の粒度が測定可能な粒度分析装置を現場に配備した。まず施工前に、掘削対象土の粒度分析を行い、シルト分の混入による安定液への影響や初期配合におけるベントナイト添加量の検討に役立てた。また、微細粒子の混入による安定液性状への影響も把握するため、市販されている粘土を用いて、比重と粘性の関係についても調査した。次に施工段階では、日々の安定液試験に粒度分析を追加することにより、安定液の粒度分布変化や細粒分除去装置の処理能力を把握した。また比重の上昇が生じた場合は、その原因の判定にも役立てた。

本報文では、粒度分析装置を用いたこれら安定液比重の管理方法について報告する。

§ 2. 概要

2-1 工事概要

図-1は、地中連続壁平面図および断面図を示したものである。掘削は昼夜2交代で行い、掘削機は(株)利根製EMX-240を使用した。

写真-1は本現場の全景、写真-2は掘削機本体である。

工事名称 : 桑名地区洞道新設工事 (第1工区)

発注者 : 中部電力株式会社
 施工場所 : 三重県三重郡川越町大字亀崎新田字朝明 87-1 中部電力(株)川越火力発電所内
 工期 : 自 平成9年7月1日 至 平成12年5月20日
 工事数量 : 地中連続壁工 一式
 内径 : 17.0m (28角形)
 壁厚 : 1,200mm
 壁深度 : 75.5m (鉄筋部60m, 無筋部15.5m)

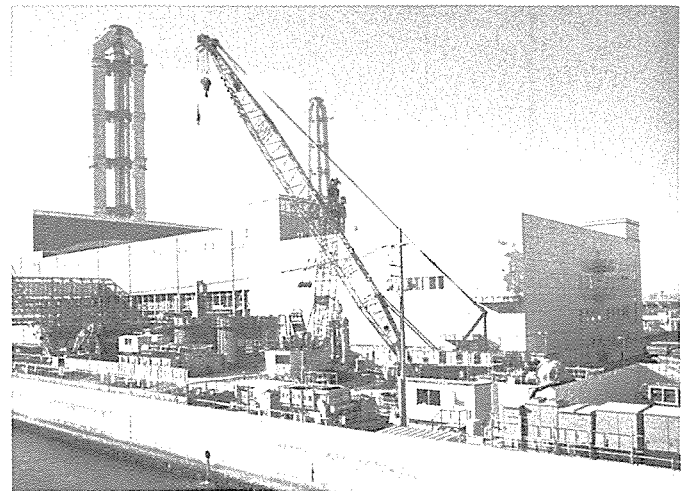


写真-1 現場全景

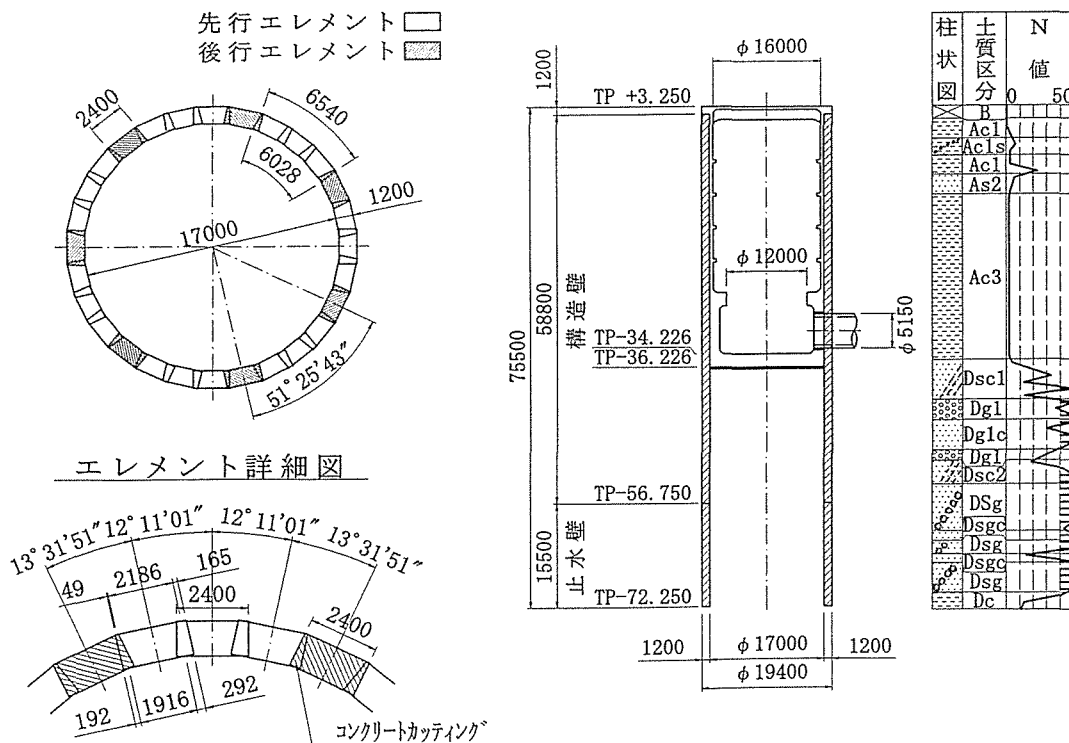


図-1 地中連続壁平面図および断面図

先行(A)エレメント 7エレメント
 (1エレメント3ガット)
 後行(B)エレメント 7エレメント
 エレメント長：先行6,540mm (外寸法)
 6,028mm (内寸法)
 後行2,400mm
 継手方式：フリー継手(コンクリートカッティング)

(GL-0m)~-39mまでは富田浜層、四日市港層と呼ばれる沖積のシルトおよび粘土層(Ac1, Ac3)より構成される。強度は、N値5以下の軟弱地盤である。また、GL-39m~-75mは洪積の砂質土・砂礫層(Dsg)が主体で、基底は粘性土層(Dc)で構成される。

地下水位はGL-1.5mに位置するが、季節によりある程度の変動があると考えられる。

2-2 土質概要

発進立坑は、伊勢湾北部臨海地帯に属し、地表面

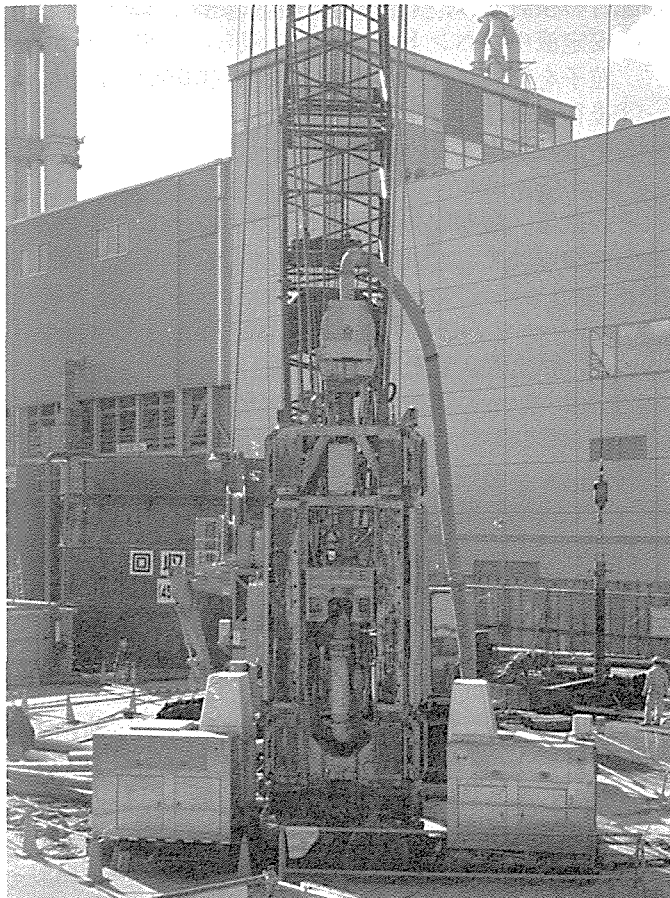


写真-2 掘削機本体 (EMX-240)

§ 3. 粒度分析装置

粒度分析方法には数々の方法があるが、本現場では、(株)堀場製作所製レーザ回折/散乱式粒度分析装置「LA-910」を用いて測定した。写真-3は、その分析装置である。この装置は、粒度を測定する「測定部」、水などの溶媒を保管するタンク「希釈ユニット」、データ処理を行う「データ処理部」の3つから構成されている。試料は水系および粉末系のどちらも測定できるが、粉末の場合は、あらかじめ水等の溶媒に希釈しておく必要がある。サンプル量は、試料が水溶液の場合、薄く濁った程度のもを50ml程度、粉末の場合は3g程度で測定が可能と

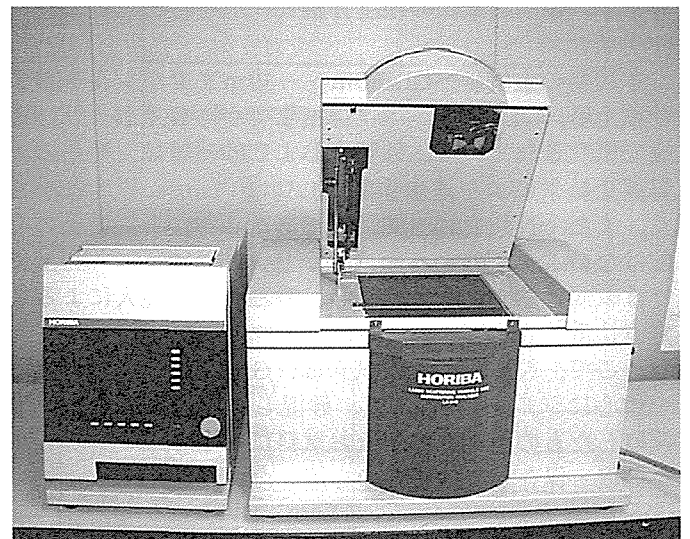


写真-3 粒度分析装置

表-2 各深度における土質とその粒度分析結果

試料番号	採取深度 (GL-)	土質区分	含有率			平均粒子径 ; D ₅₀
			粘土分	シルト分	砂分	
1	3m	シルト	33.2%	59.7%	7.1%	9 μm
2	5m	砂混じりシルト	11.6%	61.2%	27.2%	40 μm
3	9m	シルト	27.2%	62.3%	10.5%	12 μm
4	13m	砂混じりシルト	14.3%	67.1%	18.6%	27 μm
5	16m	シルト	26.8%	65.0%	8.2%	11 μm
6	25m	シルト	37.7%	58.3%	4.0%	8 μm
7	36m	シルト	55.0%	45.0%	0%	5 μm

なる。また粒子径は、 $0.01\mu\text{m}\sim 1,000\mu\text{m}$ までが測定可能である。

次に、測定方法について説明する。まず、試料を測定部に入れ、攪拌・超音波にて分散状態にする。データ処理部に映し出される濃度を参考に、試料が測定可能な濃度か確認を行う。もし、濃度が高い場合は、希釈ユニットより溶媒を加える。濃度が測定可能な範囲に収まれば、測定開始ボタンを押し測定を行う。

また、装置の測定原理は、レーザをあてると試料内の粒子から強弱に変化した散乱（回折）光が生じる。この散乱光強度は、粒子の大きさによって異なる。本装置はこの違いを利用し、装置内の集光レンズに集められた散乱光強度の角度分布から、粒度分布を計算している。

以上の様な方法・原理の下で、測定は約1分で終了し、分析データがプリントされる。このデータシートには、粒子径とその頻度（混入率）および粒径加積曲線の関係が表される。

§ 4. 事前検討項目

4-1 掘削対象土の粒度分析

(1)分析試料

本現場の土質は、GL-0m～-39mまでがシルトおよび粘土層、GL-39m～-75.5mまでが砂質土および砂礫層で構成されている。砂質土および砂礫層は、事前の土質調査結果により透水係数が $1.3\times 10^{-3}\text{cm/sec}$ 程度と小さく、また、N値も30～50以上であることから、崩壊の心配はないことが分かった。しかし、GL-0m～-39mまでは軟弱地盤であることから、微細粒子の混入による安定液比重への影響が懸念された。

そこで、粒度分析用の試料は、GL-0m～-39mまでを中心にシルト層から5点、砂混じりシルト層から2点採取したものをを用いた。なお試料は、ボーリング調査時に採取・保存していたものをを用いた。

(2)分析結果

表-2は、各深度における土質と含有率についてまとめたものである。

表より、GL-5m,13mの砂混じりシルトは砂の含有率が多いものの、平均粒子径が $27\sim 40\mu\text{m}$ と小さい。しかし、GL-3m, 9m, 16m, 25m, 36mでは、砂およびシルトの含有率が減った反面、粘土の含有率が多くなり、平均粒子径が約 $10\mu\text{m}$ とさらに細かくなっている。とくに、GL-36mの平均粒子径は $5\mu\text{m}$ とほぼ粘土であった。これより、GL-3m～36mの土質は、事前の土質試験結果ではシルトであったが、今回の粒度分析により、そのほとんどが粘土に近い粒子径であることが分かった。

以上の結果から、これらの微細粒子が安定液に混入し

た場合、土砂分離が非常に困難となる。さらに、細粒分除去装置の能力以上に掘削を行うと、GL-3m～36mのシルトは安定液中に残存し、安定液の性状を著しく悪化させる可能性があることが分かった。

4-2 安定液の初期配合

粒度分析結果から、掘削土の約5割を占めるシルト層（GL-0～-39m）のほとんどが粘土粒子に近い粒子径であることが分かった。これより、細粒分除去装置の能力不足による安定液比重の上昇が懸念された。そこで、初期配合の検討では、下記の事項を重要視した。

- ①安定液中のベントナイト量を減らし、混入する粘土粒子を有効に使用する。
- ②後行掘削時はカッティング工法のため、コンクリートから溶出するカルシウムイオンに耐えうる安定液とする。

その結果、初期配合は表-3に示すようにベントナイト量を少なくし、CMCを多く添加したポリマー系安定液とした。

4-3 粘土混入量と粘性の関係

GL-0～39mに存在するシルト層の混入により、安定液比重および粘性の上昇が懸念された。そこで、シルトの混入による粘性への影響を把握するため、このシルト層と同じように粘性の出にくい非膨潤性の木節粘土（真比重を2.6と仮定）を清水に添加し、比重（粘土添加量）とB型粘度との関係について調査した。その結果を表-4および図-2に示す。

表および図から、比重1.11（粘土添加量20%）程度まではB型粘度が低く推移しているが、比重1.11を越えるとB型粘度は急激に上昇している。つまり、木節粘土のように粘性の出にくい非膨潤性の粘土であっても、比重1.11を越えると、微細粒子によって溶液の粘性が急激に上昇することが分かった。

そこで、本現場における比重の管理基準値は1.15であるが、細粒分除去装置では除去できない微細粒子による急激な粘性上昇に対応するため、安定液比重は1.11以下を目安に維持・管理をすることとした。

表-3 先行掘削時における初期配合

材 料	仕 様	配 合
ベントナイト	群馬産 #300	2.0%(20kg)
C M C	セロース系中粘度粉末	0.2%(2kg)
分散剤	ポリカルボン酸系液体	0.1%(1kg)
練り水	工業用水	1 m ³

4-4 土砂分離装置

土砂分離設備の選定は、安定液管理だけでなく全体の施工においても重要であり、選定の結果によっては構造物の品質にも大きく影響する。

本現場の掘削対象土は、軟弱なシルト層が主体であるため、75 μ m未満の土粒子を効率よく分離する細粒分除去装置の選定が重要であると考えた。そこで、粗粒分の除去はサンドトロンメルで行い、細粒分の除去はマッドセパマシンで行った。導入したマッドセパマシンは、時間当たりの除去能力が30m³程度のもので、表-5に示す仕様のを2台並列に配置した。

§ 5. 掘削時の安定液管理

先行掘削時では、SMW区間(GL-0~-20m)での安定液の凝集防止および掘削土(GL-0~-39m)から混入する微細粒子の除去に管理の重点を置いた。

後行掘削時では、先行掘削時の問題に加え、コンクリートカッティングに伴う激しい凝集に対しても管理の重点を置いた。このうち、微細粒子の除去に関しては、細粒分除去装置の除去能力を把握することが重要であると考えられたため、粒度分析装置による分離能力の把握も行った。さらに、掘削時の進捗に伴う微細粒子の混入度を把握するため、各エレメントにおいて掘削供給用安定液（先行掘削時は、前エレメントの掘削液を細粒分除去装置で処理した後に、次エレメントの掘削供給用安定液として使用した）の粒度分析を行い、比重1.11以下を維持するように管理した。下記に、これら掘削時の管理方法について記す。

5-1 細粒分除去装置の除去能力

粒度分析による安定液の管理の前提として、細粒分除去装置（マッドセパマシン）の処理能力を把握するため、処理前・後の安定液を採取し粒度分析を行った。これは、細粒分除去装置で完全に除去可能な最小粒子径を明らかにし、微細粒子の混入状況を把握するためである。

図-3は、その粒度分析結果である。処理前の安定液は、0.3~344 μ mの土粒子で構成されている。一方、処理後の安定液は、20 μ m以上の土粒子が完全に除去されており、ヒストグラムの形が左へ大きくシフトしていることが分かる。

以上の結果より、マッドセパマシンによって、20 μ m以上の土粒子を完全に除去できることが分かった。しかし、GL-0~39mに存在するシルトの平均粒子径は5~12 μ mであることから、この区間のシルトが安定液中へ混入した場合、その半分以上はマッドセパマシンでは除去できないことが分かった。このため、微細粒子による

比重や粘性の上昇があらためて懸念された。

表-4 比重とB型粘度との関係

木節粘土 添加量	比 重	B型粘度(cp)
0%(清水のみ)	0	2.8
5%	1.03	3.0
10%	1.06	3.2
15%	1.09	4.0
20%	1.11	9.5
30%	1.17	42.8
40%	1.20	95.0

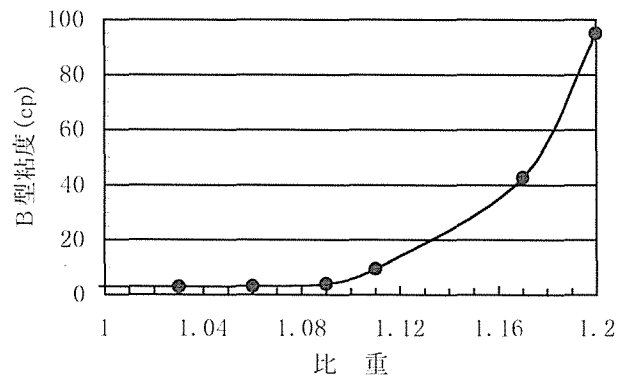


図-2 比重とB型粘度との関係

表-5 マッドセパマシンの仕様

形 式		EL-60S
寸 法	全 長(mm)	5,500
	全 幅(mm)	2,300
	全 高(mm)	2,600
総 重 量(kg)		9,700
電 動 モ ー タ		同軸防滴保護型
遠 心 分 離 機	形 式	DB-60
	材 質	SUS304
	駆 動 方 式	油圧駆動
	油 圧 モ ー タ	A2F160
容 量		1.031
所 要 電 力 (kw)	主 モ ー タ	55.0
	操 作 動 力	2.0
	ブ ロ ア モ ー タ	3.7
	合 計	60.7

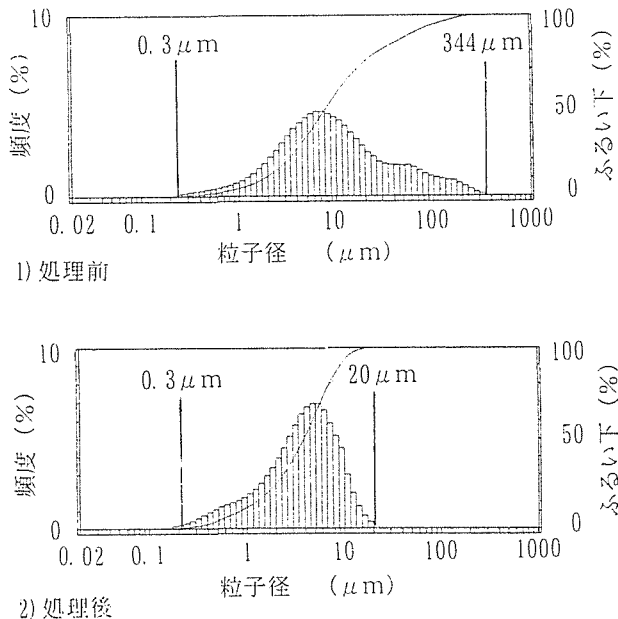


図-3 粒度分析結果 (マッドセパマシン処理前・後)

5-2 先行掘削時の管理

(1) 掘削供給用安定液の粒度分析結果

表-6は、先行掘削時における掘削供給用安定液の粒度分布および比重についてまとめたものである。表より、比重は掘削開始時のA-1からA-3までの上昇が顕著であるが、それ以降は緩やかに上昇し、A-6(終了時)では1.08となった。平均粒子径は掘削に伴い5.7~7.0 μm の範囲で大きく変動したが、開始時と終了時は5.7 μm とほぼ同じであった。これらの原因は、掘削土よりベントナイトと同じ粒子径もしくは、それ以下の微細粒子が多く混入したことが原因と考えられる。また、A-3付近で平均粒子径が大きく変動した原因は、掘削速度が速いため細粒分除去装置の処理が追いつかなかったことによるものと考えられる。

(2) 対策とその効果

粒度分析の結果より、掘削土からはベントナイトと同じ粒子径、もしくはそれ以下の微細粒子が混入していることが分かった。このため、微細粒子の混入による比重の上昇が懸念された。そこで、微細粒子による比重上昇を抑制するために、新たに補充する安定液には、ベントナイトを添加せず、CMCや分散剤を清水に添加し、比重が1.11以下を推移するように対処した。さらに、細粒分除去装置で除去可能な掘削土に関しては、各ガットの掘削終了時まで除去できるように、掘削機の掘進速度を調整しながら対処した。

SMW掘削時における安定液の凝集については、B型粘度が管理基準の150cpに近づいた時点で、重炭酸ナトリ

ウムまたは炭酸ナトリウムを安定液へ添加して粘性の低下を図った。

以上の対策を講じた結果が図-4である。図は、施工期間中における安定液の比重およびB型粘度の変化を示したものである。微細粒子の除去対策として、細粒分除去装置へ負担がかからないように掘削機の掘進速度を調整したため、微細粒子の過剰混入による急激な比重上昇を抑制でき、目標の1.11を下回ることができた。また、各ガットとも、GL-0~20m(例えば、A-5では11/15, 11/17, 11/18付近)まではSMW区間を掘削したため、B型粘度が一時的に150cp前後まで大きくなっている。しかし、それ以降は重炭酸ナトリウムや炭酸ナトリウムの添加によりB型粘度も基準値内で推移することができた。

以上の結果より、先行掘削時は微細粒子による比重や粘性の上昇、また、SMWによる安定液の凝集を最小限に抑えることができた。

5-3 後行掘削時の管理

(1) 掘削供給用安定液の粒度分析結果

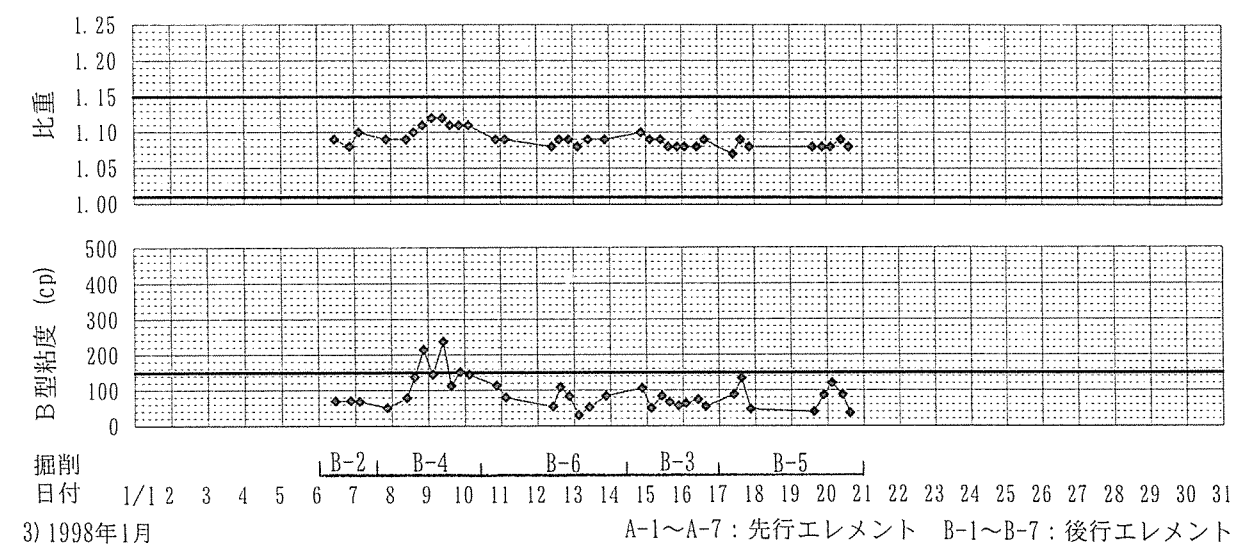
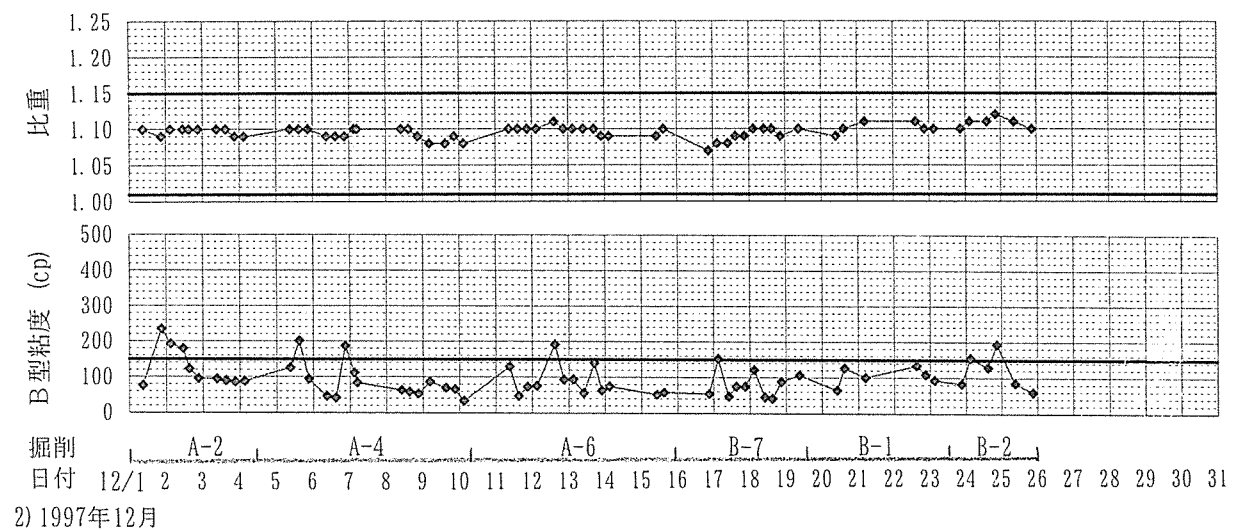
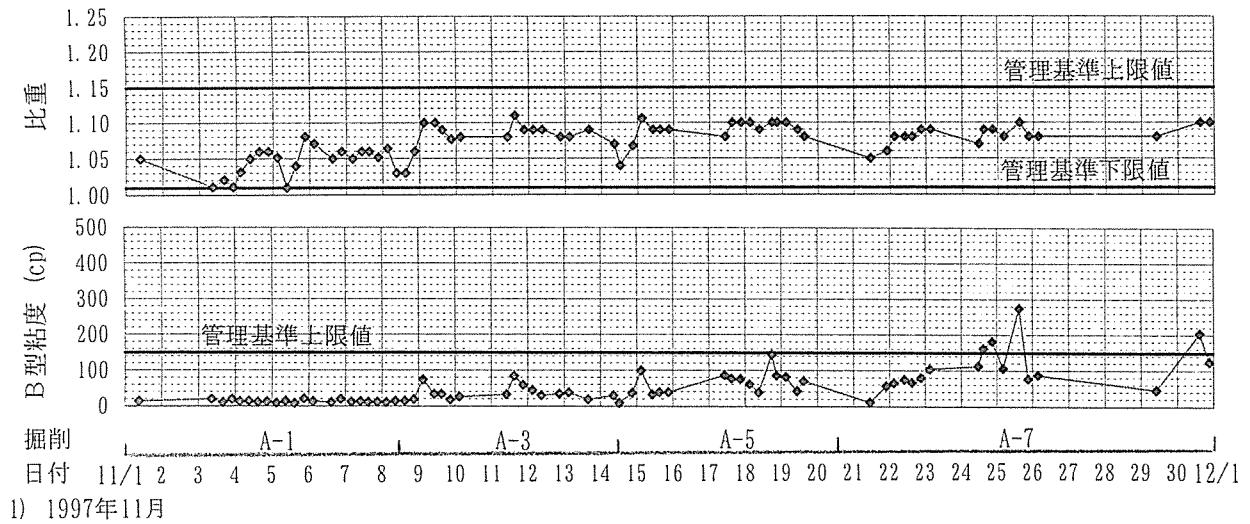
表-7は、後行掘削時における掘削供給用安定液の粒度分布および比重をまとめたものである。表から、掘削の進行に伴い、平均粒子径はさらに小さくなっているが、比重は1.09と変化していないことが分かる。つまり、この現象は掘削土から微細粒子が安定液へ混入している

表-6 粒度分析結果 (先行掘削時)

施工順序	エレメント番号	安定液比重	平均粒子径 D ₅₀ (μm)
1	A-1	1.01	5.7
2	A-3	1.06	7.0
3	A-5	1.07	6.0
4	A-7	1.07	5.3
5	A-2	1.08	5.5
6	A-4	1.08	5.5
7	A-6	1.08	5.9

表-7 粒度分析結果 (後行掘削時)

施工順序	エレメント番号	安定液比重	平均粒子径 D ₅₀ (μm)
8	B-7	1.09	5.8
9	B-1	1.09	5.5
10	B-2	1.09	5.3
11	B-4	1.09	4.5
12	B-6	1.09	4.3
13	B-3	1.09	4.2
14	B-5	1.09	4.0



A-1~A-7: 先行エレメント B-1~B-7: 後行エレメント

図-4 安定液の性状変化

が、コンクリートカッティングによる掘削速度の低下により細粒分除去装置の処理能力が、微細粒子の混入量を上回ったためと考えられる。

(2)対策とその効果

粒度分析結果より、比重は1.09と変化していないが、安定液中の微細粒子はさらに細かくなっていることが分かった。そのため、このように微粒子化した安定液にコンクリートカッティングに伴うカルシウムイオンが混入した場合、激しい凝集が生じることが懸念された。そこで、混入するカルシウムイオンに対しては、カルシウムイオンを不活性化する重炭酸ナトリウムや炭酸ナトリウムを安定液へ添加し、安定液の凝集防止を図った。混入する微細粒子に関しては、先行掘削時と同様に、粗粒分および細粒分除去装置の処理能力に見合った速度で掘削を行った。これにより、混入する微細粒子をできるだけ除去し、比重が1.11以上にならないように管理した。さらに、後行掘削時は先行掘削時に比べ安定液量が少なく済むため、総安定液量を確認しながら適宜廃棄した。なお、廃棄時期は、微細粒子による影響が一番大きいGL-39mまでの掘削液を中心に行った。廃液後は良液を補充し対処したが、比重および粘性が高い場合は、清水に重炭酸ナトリウムを添加したものを溝内安定液へ少量添加し、粘性の低下に努めた。

以上の対策を講じた結果が図-4である。これより、

後行掘削時は一時的なB型粘度の上昇はあるものの、比重およびB型粘度はほぼ管理基準値内を推移した。また、比重は1.09と目安の1.11を下回り、当初懸念された微細粒子の混入によるドラブルもなく、無事に施工を終了することができた。

§ 6. おわりに

粘性地盤における安定液の管理は、微細粒子の混入が大きな問題となり、大変困難とされてきた。そこで、本現場では、粒度分析装置を配備し、微細粒子の混入による安定液への影響を定量的に把握し、対処することを試みた。その結果、安定液へ混入する微細粒子の収支、細粒分除去装置による分離能力などを定量的に把握することができ、微細粒子による比重上昇に対して具体的な対策を講じることができた。これにより、無事施工を終了することができ、安定液作液量および廃液量とも、計画数量より大幅に削減することができた。

最後に、本工事に関してご指導・ご助言を戴いた関係者各位に深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 地盤工学会編：土質試験の方法と解説(第3回改訂版), p.56,1990