

施することで、影響を最小限に抑制できた。

(6) 地上到達時の課題と対策

シールド地上到達時に想定される課題やリスクを地上発進の実績を踏まえて事前に抽出し、設計および施工における各種対策を以下のように講じた。

1) 浮上がり対策

地上発進と同様に、トンネル上部に盛土の施工が可能であったため、他工種で発生する残土を利用して盛土を実施した。なお、到達位置が既設構造物の立体交差道路直下で盛土高さに制限があったため、換気所工事で掘削した砂礫土を利用して単位体積重量の大きな土砂により浮上がりに抵抗する上載荷重を確保した。

2) 切羽土圧、裏込め注入圧管理

地上発進と同様に、切羽の管理土圧は「土圧（静止土圧）+水圧（静水圧）」以上に設定し、チャンパー内に複数設置した土圧計のうち掘削断面の最上段の土圧計を管理ポイントとして調整、管理した。盛土材が砂質土であるため、切羽からの加泥材や裏込め注入材が容易に流出することが予想されたため、予備圧を通常の30kPaから小土被り区間では20kPaに設定した。また、掘進中の土圧変動幅についても、シールド運転手と連絡を取り合いながら、最小となるよう管理した。さらに、常時監視員を盛土上に配置して、流出が確認された場合は即座に圧力調整を実施した。



写真-5 シールド地上到達状況

その結果、既設構造物である立体交差道路や周辺地盤の変状を引き起こすことなく、安全に地上到達することができた（写真-5）。

4. おわりに

URUP工法は、もともとアンダーパスの急速施工を目的として開発された工法であるが、地上発進、小土被り掘進、地上到達という一連のシールド施工が可能であるという技術的メリットから、アンダーパス工事以外の様々なプロジェクトへの展開が可能である。

今回紹介した事例以外にも、開放型シールドによる複合アーチ大断面の道路トンネル工事や（写真-6）、海底を横断するガス導管トンネル工事（写真-7）などでもすでに実績をあげている。

このように、URUP工法は様々な施工条件下におけるシールドトンネルの急速施工のニーズに答えることができる技術である。

今回紹介した事例を含め、今後も施工ノウハウの蓄積に努め、さらなる技術向上を図ることで、当工法の一層の普及、展開に取り組む所存である。



写真-6 道路トンネル（開放型、複合アーチ大断面）での施工事例

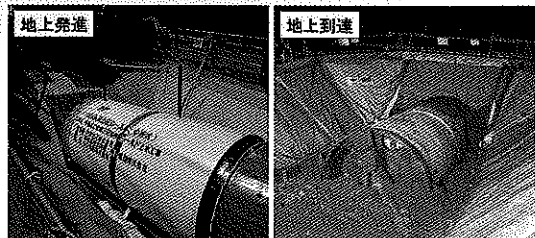


写真-7 ガス導管トンネル（海底横断）での施工事例

特集 ● 掘る（都市編）

先端技術研究2

気泡を利用した掘削工法

あかき ひろかず
赤木 寛一*



1. はじめに

土に気泡さらに水を添加し混練した気泡混合土は、流動性と止水性が増加し、密度が減少する。気泡シールド工法や軽量盛土工法は、これらの特性を生かしている。

土粒子、水及び気泡を適切に配合した気泡混合土は、各々の密度は2.7、1.0、0.04g/cm³と大きな差があるにもかかわらず、それらは分離することなく懸濁状態を保つ。この懸濁物の安定液としての性質を調べた結果、地中に掘削された溝壁を保持する機能があることを確認し、ソイルセメント地中連続壁等の施工時の安定液として利用し、これらを気泡安定液と呼んでいる。なお、従来のソイルセメント地中連続壁の施工では、掘削・攪拌中の流動性を確保するために大量の水を使用する必要があり、排泥が多く発生するという課題があった。これに対し、気泡を使用すると、

少ない水分で流動性が確保でき、しかも最終的には消泡剤を用いて気泡を消すため、図-1のように排泥量を大幅に低減することが可能となる。

また、深層混合処理工法において改良対象土が火山灰質粘性土のように粘性が高い場合にはセメント系懸濁液の混練は容易ではない。このような場合、前もって火山灰質粘性土と気泡を混練した気泡混合土にセメント系懸濁液を混合すると、水セメント比が小さくても土とセメントの混練性が向上し、少ないセメント量でも均質な強度発現が得られやすいので、深層混合処理工法でも気泡が使用可能である。

以上のように、ソイルセメント地中連続壁や深層混合処理工法において、掘削土に気泡を添加した気泡混合土の特性を利用した施工工法を気泡掘削工法と称している。

2. 気泡について

気泡掘削工法に用いられる気泡は、生分解性のアルキルサルフェート系界面活性剤の起泡剤を使用して作成される。20倍希釈した起泡剤を、体積比で起泡剤1と空気24の割合で発泡機に送り込み発泡させた密度0.04g/cm³、気泡径200μmの気泡を標準状態としている。気泡安定液に使用する気泡は、土中の水や掘削攪拌時の圧力の変動によっても破泡しないことが必要である。

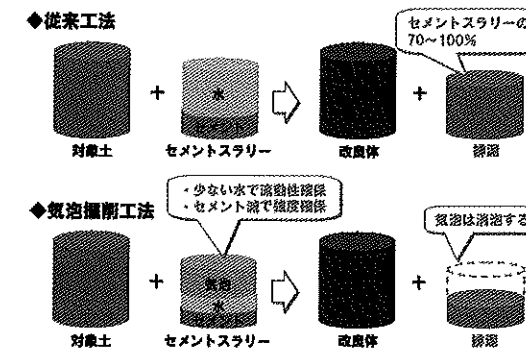


図-1 気泡掘削による排泥低減のメカニズム

*早稲田大学 理工学術院 教授

また、破泡剤を気泡安定液や気泡混合土に混合すると、気泡は容易に破泡し、それらの体積は減少する。環境への負荷を減らすために、起泡剤のみならず破泡剤も生分解性を有する種類を選ぶことが望ましい。

3. 気泡安定液について

気泡安定液の物性は、下記のとおり混合土の物性（細粒分含有率 P 、細粒分の液性限界 w_L 、粗粒分の比表面積 S ）と気泡添加率 Q （混合土の乾燥質量に対する起泡剤の質量百分率）と含水比 w の関数で表せ、 Q と加水量 W によりその物性を管理することができる。具体的な現場配合設計例や管理方法などについては、参考文献¹⁾に示されているので参照されたい。

3.1 最小含水比

乾燥状態の土に、気泡を添加・混練すると気泡は水分を土に奪われて破泡する。破泡の生じない気泡混合土の最小の含水比を最小含水比 w_{min} (%)と称し、 P の関数として式(1)で求めている。

$$w_{min} = 6.97 + 0.0403P \dots(1)$$

3.2 分離含水比

懸濁状態の気泡安定液に徐々に水を加え含水比を高くすると土、水、気泡の分離が生じる。この含水比を分離含水比 w_{sep} (%)と称し、 Q 、 P 、 w_L 、 S により式(2)で求めている。

$$w_{sep} = (0.0253S + 1.17Q + 1.07) \frac{100 - P}{P} + w_L \frac{P}{100} \dots(2)$$

3.3 単位体積重量

地中に掘削された溝壁の安定を保つためには、ベントナイトを利用した安定液と同様に気泡安定液の単位体積重量を 10.3kN/m^3 以上に保つ必要があるが、その単位体積重量は気

泡の添加量 Q で容易に調節することができる。たとえば、 Q を2.3%とすると気泡安定液の単位体積重量は 10.3kN/m^3 となる。

3.4 流動性

ソイルセメント地中連続壁の施工においては、安定液の流動性は芯材の挿入性を左右する。気泡安定液の流動性は Q と w により容易に調整が可能であり、その定量的評価はテーブルフロー値 TF により行うこととし、次式(3)のような気泡安定液の含水比 w の一次式で表し、係数 α 、 β は土の物性値(P 、 w_L 、 S)と Q を用いて決定することができる¹⁾。

$$TF = \alpha w + \beta \dots(3)$$

3.5 溝壁の安定

溝壁の安定を保って掘削をするには、溝壁面に安定液の液圧を垂直全応力として有効に作用させるために、溝壁面に難透水層を形成するとともに、地盤の崩壊圧以上の液圧を溝壁面に加える必要がある。安定液の溝壁面における難透水層の形成状況を調査するために、豊浦砂や硅砂を対象として、気泡安定液とベントナイト安定液により形成された難透水層の透水係数 k を室内浸透実験で測定したところ、表-1に示すような結果となった。

ベントナイト安定液では、粒径の大きな砂では浸透して難透水層に相当する泥膜が形成されないが、気泡安定液では幅広い粒径範囲の砂で地盤材料よりも3ケタ程度小さい透水係数の難透水層が形成されていることがわかる。

この気泡安定液による難透水層の形成メカニズムは、図-2に示すように気泡安定液の液圧により気泡が土粒子間の空隙に侵入し、土粒子と水、気泡よりなる不飽和帯が形成されることによるためと考えられている。

3.6 気泡安定液の管理

気泡安定液の施工時における品質は、図-

表-1 気泡安定液、ベントナイト安定液による難透水層形成後の透水係数 (m/s)

地盤材料	豊浦砂	硅砂7号	硅砂6号	硅砂5号	硅砂4号	硅砂3号
平均粒径 D_{50} (mm)	0.188	0.196	0.334	0.571	0.941	1.49
地盤材料の透水係数	1.80×10^{-4}	1.70×10^{-4}	4.21×10^{-4}	6.62×10^{-4}	9.73×10^{-4}	9.10×10^{-4}
気泡安定液による透水係数	1.80×10^{-7}	4.78×10^{-7}	7.40×10^{-7}	2.57×10^{-7}	1.45×10^{-7}	1.30×10^{-7}
ベントナイト安定液による透水係数	2.50×10^{-8}	2.90×10^{-8}	3.30×10^{-8}	浸透により難透水層不形成		

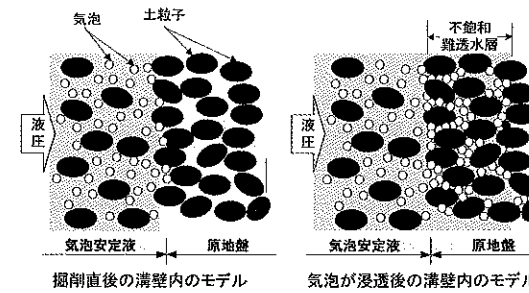


図-2 難透水層形成概念図

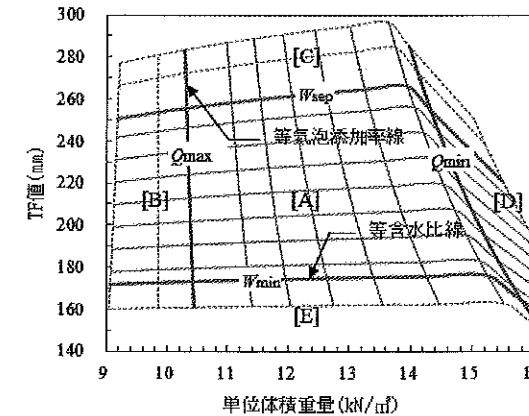


図-3 気泡安定液管理図

3に示すように、前述の安定液の TF 値に関係する最小含水比 w_{min} 、分離含水比 w_{sep} 、単位体積重量に関する最小気泡添加率 Q_{min} 、最大気泡添加率 Q_{max} で囲まれた領域([A])内部に位置するように気泡量と加水量の組合せにより管理する。

4. 気泡掘削工法

気泡掘削工法に分類される具体的な工法として、3種類が挙げられる。気泡安定液を使用する工法としては、①AWARD-Trend(アワード・トレンド)工法、②AWARD-Ccw(アワード・シーシーダブリュー)工法があり、気泡混合土を利用する工法として、③AWARD-Demi(アワード・デミ)工法がある。

ここでは、気泡掘削技術をTRD工法に対して適用したAWARD-Trend工法とSMW工法に適用したAWARD-Ccw(アワード・シーシーダブリュー)工法に関する三つの事例を紹介する。

4.1 AWARD-Trend工法による強風化凝灰岩の掘削

1) 工事概要

- ・施工場所：青森県(2工区)
- ・施工法：TRD工法によるソイルセメント地中連続壁
- ・施工規模：施工延長=500m、掘削深度(最大)=26m、掘削幅=0.55m
- ・表層からの土質構成：盛土；0~1m、火山灰質シルト；1~3m、強風化凝灰岩(全体にローム状で礫混じり)3~16m、風化凝灰岩(カッターで容易に傷がつく)；16~28m

- ・物性値(各層の混合土)：粗粒分と細粒分の土粒子単位体積重量=27.1kN/m³、粗粒分の50%粒径=0.00045m、細粒分含有率=57%、液性限界=90%

2) 施工状況

施工管理のために、掘削予定地点の採取土の物性試験及び気泡安定液の配合試験を行った。配合試験では排泥土量を少なくするために気泡添加率は1.0%とし、加水量を変化させて、気泡安定液を作製した。その結果、単位体積重量=10.3kN/m³、 TF 値=180mmの気泡安定液を得るための初期配合量を、掘削土1m³当たりの気泡量0.305m³(気泡添加率=1.0%に相当)、加水量0.290m³とした(第2工区では0.350m³)。

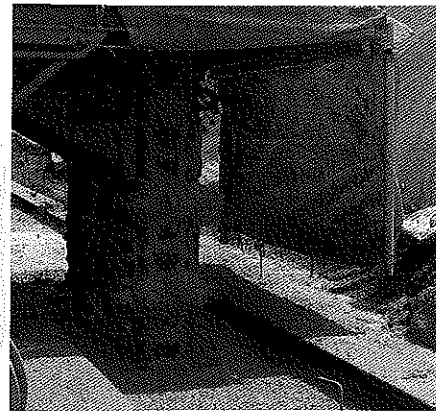


写真-1 気泡掘削工法の施工状況

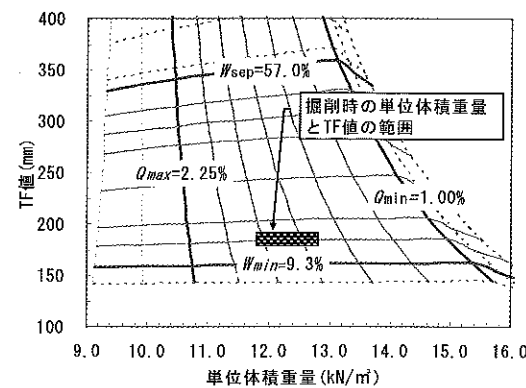


図-4 気泡安定液管理図 (強風化凝灰岩)

写真-1は施工状況の一例であり、図-4に施工に使用した安定液管理図ならびに施工中の気泡安定液の単位体積重量とTF値の計測値の範囲をプロットした。初期配合で決めた気泡量、加水量をほぼ変えることなく安定した掘削が可能であり、気泡安定液の単位体積重量は11.8~12.8kN/m³、TF値は185~200mmで安定していた。

3) 排泥土量

掘削時の掘削土量、気泡添加量、加水量ならびに掘削時の排泥土量を表-2に示す。排泥土量が気泡と水の添加量の和より少ないのは、ソイルセメント壁造成時に気泡を消泡させたこと及び気泡安定液が溝壁から透水したことによると推定される。

掘削に伴う排泥土量率を式(4)で求めると、2つの工区の排泥土量率の平均値は28.6%であり、同様な土質でベントナイト系安定液を

表-2 掘削土量と1m³当たりの排泥土量収支

工区	掘削土量 (m ³)	添加量 (m ³)		掘削時排泥土量 (m ³)
		気泡量	水量	
第1工区	2.829	0.305	0.290	0.250
第2工区	2.056	0.305	0.350	0.321
平均	2.444	0.305	0.320	0.286

使用した場合の実績値55~70%と比較すると1/2以下であった。

$$\text{排泥土量率} = \frac{\text{排泥土量}}{\text{掘削土量}} \times 100 \dots(4)$$

4.2 AWARD-Trend 工法による天満礫層の掘削

1) 工事概要

- ・施工場所：大阪府
- ・施工法：TRD工法によるソイルセメント地中連続壁
- ・施工規模：施工延長=80m、掘削深度=26m、掘削幅=0.55m
- ・表層からの土質構成：盛土；0~2m、砂混じりシルト、シルト混じり砂層の互層；2~12m、砂礫層（天満層）；12~28m
- ・物性値（各層の混合土）：粗粒分、細粒分の土粒子単位体積重量=26.5kN/m³、粗粒分の50%粒径=0.0007m、細粒分含有率=34%、液性限界=70%

2) 施工状況と排泥土量

掘削土の物性試験及び気泡安定液の配合試験をもとに、単位体積重量=10.3kN/m³、TF値=180mmの気泡安定液を得るための初期配合量を、掘削土1m³当たりの気泡添加量を0.391m³（気泡添加率1.25%に相当）、加水量を0.162m³とした。

現場で使用した気泡安定液の管理図及び施工中の気泡安定液の単位体積重量とTF値の計測値の範囲を図-5に示す。この現場の掘削土砂は掘削対象層の約1/2が天満礫層であることより、前節4.1の青森の現場に比較して粗粒分が多いので含水比の許容管理幅が狭かったが、気泡安定液の単位体積重量11.8~

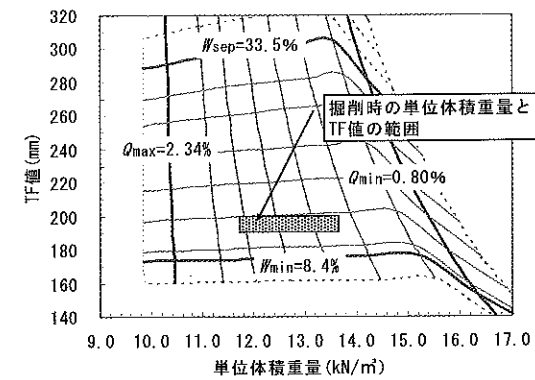


図-5 気泡安定液管理図 (天満礫層)

13.7kN/m³、TF値は190~200mmの範囲で安定した施工ができた。また、掘削に伴う排泥土量は約170m³であり、全掘削土量1140m³の14.7%であった。これは同様な土層構成の地盤をベントナイト系安定液で掘削した場合の実績値の1/3程度であった。

4.3 AWARD-Ccw工法による砂質土層の掘削

1) 工事概要

都内の建築工事現場において、気泡掘削工法を試験的に図-6に示すような箇所でも適用した。改良長は、施工盤から15.5mであり、改良対象土質は、GL-6.0mまでが埋土層、GL-6.0~-15.5mまでが細砂層である。埋土層は基本的に粘性土である。写真-2は、当試験工事における施工状況を示している。

2) 主要な施工状況と排泥土量

掘削中に、トレンチ内に溜まっている余剰

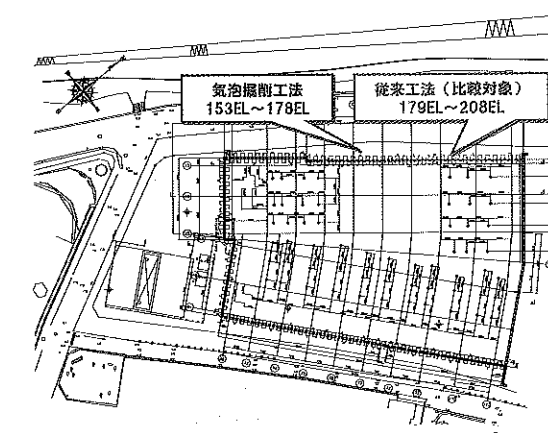


図-6 試験施工箇所

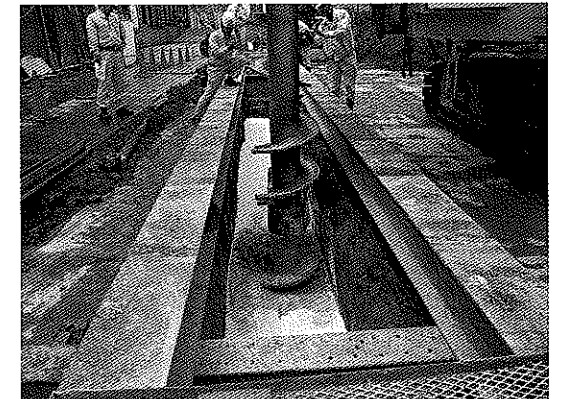


写真-2 施工状況

土を採取して流動性を確認した。従来工法および気泡掘削工法適用ケースのTF値は、図-7に示すように、ともに150mm以上を満足している。従来工法と比較すると、全体的に気泡掘削工法のTF値は小さい傾向にあるが、施工において、特に問題がない範囲であると言える。

改良強度については、現場の工程上の制約によりチェックボーリングによるコア採取が難しかったため、山留掘削進捗に応じて、低強度用のシュミットハンマーにより確認した。設計基準強度は $\sigma_{28}=500\text{kN/m}^2$ であり、シュミットハンマーの反撥硬度が15以上であればこれを満足する。図-8に示すように、埋土層において、設計基準強度を満足している。また、セメント添加量を約25%程度低減しているが、従来工法と同等の強度を確保している。これは、従来工法ではW/C=270%

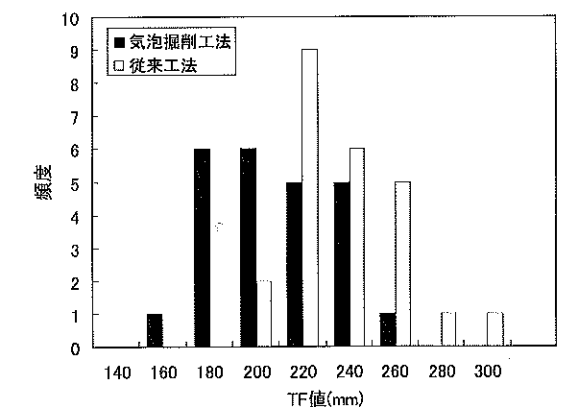


図-7 流動性の確認結果

分岐立坑における
上向きシールド実績報告



井上 信一*1 小森 敏生*2 山田 善啓*3

1. はじめに

御堂筋共同溝事業は、国土交通省近畿地方整備局が進めている幹線共同溝の内、一般国道25号(御堂筋)の浪速区難波中一丁目から北区曾根崎二丁目の路線延長4,019mの区間に計画している大阪市水道局の水道管(φ1,500mm)および関西電力のケーブルを布設するための共同溝を構築するものである(図-1)。

共同溝は本体トンネル部と分岐立坑で構成されており、本体トンネル部は平成23年度に完成し、現在は国道25号御堂筋共同溝立工事で分岐立坑を施工中である。分岐立坑は、電力ケーブル用分岐立坑(EB1~6)、水道管用分岐立坑(WB1)および水道管及び電力ケーブル用分岐立坑(EB7WB2)の計8か所ある。

その内、7か所の分岐立坑(EB1~6, WB1)については、地上付近に構築するボックスカルバート構造の分岐室(高さ約5m, 延長約15m)と本体トンネル部をつなぐ約30mの立坑のシャフト部を上向きシールド工法にて施工する(図-2)。

分岐立坑は、交通量の多い国道25号内分離帯の中に位置しているため、道路規制の必要な工事は夜間に制限される。また、大阪市営地下鉄御堂筋線が近接しており、分岐立坑構

築時には地下鉄躯体を含む周辺地盤への影響を最小限に抑える必要があった。そのため、本工事では大深度立坑のシャフト部の構築に上向きシールド工法を採用した。

本稿では、2013年9月時点で完了している5箇所の分岐立坑(EB3, EB4, EB5, EB6, WB1)の内、EB3・EB6分岐立坑における上向きシールド工法によるシャフト部の施工について報告する。

2. 上向きシールド工法概要

上向きシールド工法は、既設の本体トンネル内部から地上に向けて発進するため、材料の運搬・供給や掘削土の搬出を地下のトンネ

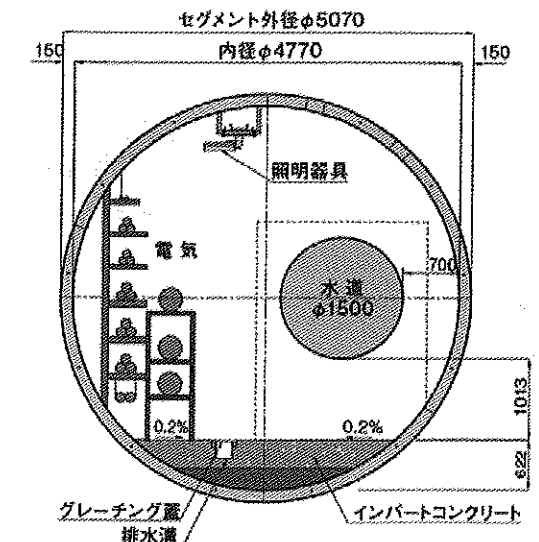


図-1 共同溝断面図

*1 国土交通省 近畿地方整備局 大阪国道事務所 建設監督官
*2 大成・五洋特定建設工事共同企業体 御堂筋上向きシールド作業所 監理技術者
*3 大成・五洋特定建設工事共同企業体 御堂筋上向きシールド作業所

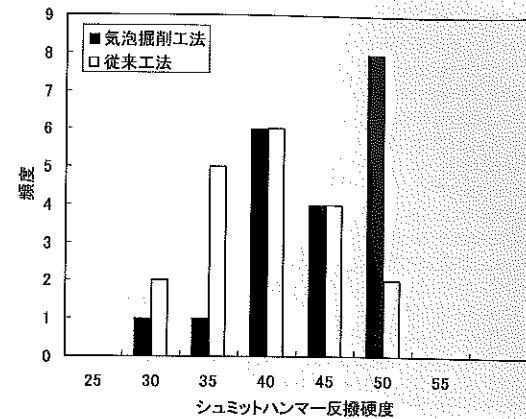


図-8 改良強度確認結果(埋土層)

表-3 排泥発生量の比較

工法	施工エレメント数(エレメント)	全排泥量(m ³)	改良体積(m ³)	改良体積あたり排泥量(m ³ /m ³)
従来工法	31	135	232.5	0.58
気泡掘削工法	26	46	197.2	0.23

程度であるが、気泡を添加することでW/C=100%にまで低減し、水分量を減らせたことが理由と言える。

排泥量は、ダンプトラックの運搬台数により計量した。気泡掘削と従来工法の施工エレメント数が異なるため、改良体積1.0m³あたりに発生した排泥量を比較した。表-3に示すように、従来工法に対して約60%程度排泥を低減することができた。

5. まとめ

本稿は、掘削土砂に適量の気泡及び水を加えた混合体である気泡安定液の物性、基本性能を実験的に検討するとともに、現場での施工管理方法を考案し、施工実績をもとにその妥当性を検証したものである。以下に、得られた結論を記す。

- 1) 気泡安定液は掘削土砂に気泡と水を加えた混合体であるので、掘削土砂の物性(土粒子の単位体積重量, 比表面積, 細粒分含有率, 液性限界)の影響を受けるが、気泡添加率と加水量により安定液として要求される基本性能(単位体積重量, 流動性等)を容易にコントロールすることができる。
- 2) 気泡安定液によって、掘削時の溝壁安定

に不可欠な難透水層が形成され、その対象土質はベントナイト系安定液よりも広い。

- 3) 気泡安定液は、安定液の懸濁安定に関係する最小含水比と分離含水比、溝壁安定と掘削性能に関する単位体積重量とTF値の4種類の項目によってその基本性能が決まる。これらの4種の項目は、それぞれ掘削土砂の物性値、気泡添加率、含水比を変数とする関数で表示できる。

- 4) 現場における掘削管理は、気泡安定液管理図を用いて行うことができる。管理図は気泡安定液の単位体積重量とTF値の関係図中に、最小含水比と分離含水比及び最小気泡添加率と最大気泡添加率の4本の管理線に囲まれた領域として表示される。この領域内では、気泡安定液としての機能を発揮する。掘削時に気泡安定液の単位体積重量とTF値で表される状態がこの領域外に移行する場合には、気泡添加量あるいは加水量の増減により対応可能である。

- 5) 強風化凝灰岩(掘削土量, 約2500m³×2工区)及び天満礫層(掘削土量1140m³)を気泡安定液を利用してTRD工法で掘削した場合と砂質土層でSMW工法に気泡安定液を適用した場合の良好な実績に基づいて、本研究で考案した気泡安定液管理手法の妥当性とその有用性を実証した。また、気泡安定液中の気泡は容易に消泡できるので掘削に伴う排泥土量はベントナイト安定液の場合の約1/2~1/3になることを確認した。

参考文献

- 1) 近藤義正・仲山貴司・赤木寛一: 掘削土に気泡と水を添加した地盤掘削用安定液の開発と適用, 土木学会論文集C, Vol.64, No.3, pp.505~518, 2008年7月
- 2) 安井利彰・川島要一・赤木寛一・近藤義正・土屋敦雄: 気泡掘削工法を適用した柱列式ソイルセメント壁の発生汚泥量低減効果, 第10回地盤改良シンポジウム論文集, 日本材料学会, pp.509-514, 2012年10月