

# 気泡を利用した地盤防災技術の 産学連携による開発

早稲田大学理工学術教授

赤木寛一 教授

text by Hirokazu Akagi

1954年岡山県生まれ。78年早稲田大学理工学部土木工学科卒業。84年同大学院修了後、同大専任講師、86年同大助教授を経て、94年同大教授に就任。現在の研究テーマは、気泡、薬液注入などの化学技術を利用した地盤に関する環境保全、防災に関する研究。趣味はゴルフ、今年にはピアノに挑戦予定。

## 1 はじめに

早稲田大学理工学術院社会環境工学科・建設工学専攻、赤木寛一研究室では、マグマ（神奈川県鎌倉市岩瀬 1306 近藤義正社長）と太洋基礎工業（愛知県名古屋市中川区柳森町 107 伊藤孝芳社長）と共同で、地盤防災に貢献するとともに環境負荷を低減し、環境に優しい地盤基礎構造物を作る「気泡掘削技術」を開発しました。この気泡掘削技術をもとにして、大林組、竹中土木、戸田建設、間組、前田建設工業、三井住友建設などの建設業各社と共同で数種類の工法が実用化され、10例以上の実施例を持つに至っています。

## 2 技術開発の背景

地中深く土を掘る場合、例えば地下駅舎などの建設では駅舎の周囲に幅 1m、深さ数十メートルの深さまで溝を掘ることがありますが、溝壁は周りの土の力（土圧）と地下水圧に押されて、溝壁は崩壊する恐れがあります。この溝壁を地中に造る地中連続壁工法は 1950 年頃ヨーロッパで土留め壁や遮水壁を構築する工法として採用され、日本では 1959 年に畑薙ダムの遮水壁として鉄筋コンクリート地中連続壁が初めて導入されました。その後、市街地周辺の建設工事による騒音、振動、周辺地盤の沈

下や地下水位への影響などが社会・環境問題となり、このような社会・環境問題に対応する有効な工法として地中連続壁工法は発達してきました。近年では大深度化、大型化が進むのみならず、要求される品質と経済性の面より地中連続壁工法の壁体や施工法の多様化が進んでいます。

地中連続壁工法は、安定液と壁体材料により鉄筋コンクリート地中連続壁、安定液固化地中連続壁およびソイルセメント地中連続壁に分類されます。鉄筋コンクリート地中連続壁はベントナイト粘土を含むベントナイト系安定液により壁面の安定を保ちながら掘削した溝壁内に鉄筋カゴとコンクリートにより連続した壁体を構築する工法であり、施工品質の向上により本体構造の地下外壁としても使用されるようになっていきます。安定液固化地中連続壁は鉄筋コンクリート地中連続壁と同様にベントナイト系安定液を用いて掘削を行い、安定液に固化材を混練、固化させ壁体を造成し、土留め壁や遮水壁として使用するものです。ソイルセメント地中連続壁は安定液としてセメントスラリー系安定液を使用し、掘削土にセメントスラリーを添加しながら掘削と混練を行い、セメントスラリー中に掘削土が混合した状態で固化させる地中連続壁です。

いずれの地中連続壁工法においても安定液は溝壁の安定を保ち、かつ掘削土の排泥を容易にする重要な役割を果たしています

が、安定液の主原料であるベントナイト粘土やセメントが排泥土に混入し、これらの混入した排泥土の再利用は困難なために、産業廃棄物として管理型処分場に埋め立て処分をせざるを得ません。しかしながら、これらの安定液は掘削土量に比較し排泥土量が多いこと、さらには近年の廃棄物処分場の新設の困難さと埋め立て容量の減少と相まって、排泥土量の削減と排泥土の有効利用が社会的な要求となっています。

また、ベントナイト系安定液では、ベントナイト粘土により溝壁面に難透水層を形成し、安定液圧を作用させることで溝壁の安定を保ちますが、砂礫土層では難透水層の形成が困難なために溝壁の保持が不安定であり、超軟弱層では安定液の単位体積重量が不足すると溝壁の保持が困難な場合があります。また、セメントスラリー系安定液では難透水層の形成性が悪く、かつ掘削土の懸濁保持性も悪いために溝壁面の安定性に欠けるとともに掘削土の分離沈降が生じやすく、安定液としての特性に問題があります。

一方、土に気泡を加えると単位体積重量が減少し、流動性が良くなり、さらに止水性が向上するなどの性状変化が生ずることは従来から知られており、気泡シールド工法や軽量盛土工法ではこれらの性状変化を単独あるいは組み合わせで利用されてきました。しかし、土と気泡の混合体の機能や土の物性に応じたその工学的特性の変化に

図1 気泡安定液管理図

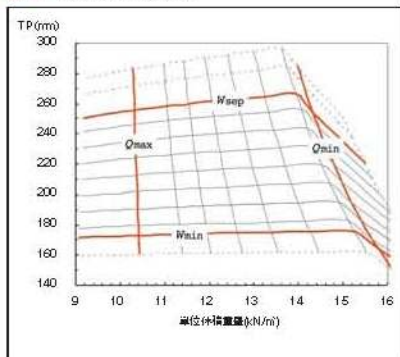


図2 気泡のベアリング効果

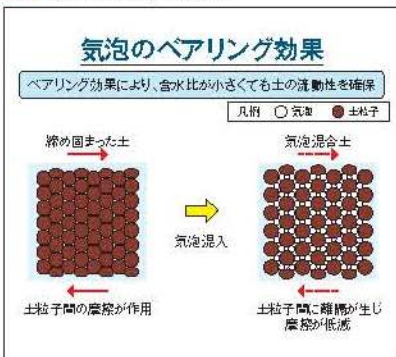
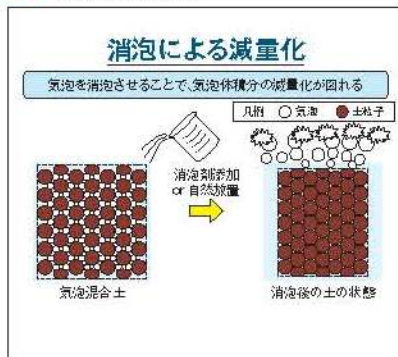


図3 消泡による減量化



については未解明でした。

### 3 気泡で土を掘る

前にも述べたように建設工事では、気泡はコンクリートの流動性を高めたり、凍害を防ぐために4～7%の気泡を混入したり、気泡シールド工法や軽重盛土工法で使用されてきましたが、この産学連携共同研究で気泡を利用して土を掘る技術を新たに開発しました。

気泡の物性は気泡、地盤掘削土に水を加えた安定液（以下、気泡安定液）の特性に大きな影響を与えるので、アルキルサルフェート系界面活性剤、部分加水分解蛋白質およびアルキルエーテル系界面活性剤の3種類の起泡剤について気泡安定性試験を実施しました。その結果に基づいて、アルキルサルフェート系界面活性剤を起泡剤に採用するとともに、試験室と施工現場における気泡および気泡安定液の作製方法を規定しました。

また、気泡安定液を地中連続壁の掘削用安定液として使用するために必要な基本特性として、気泡安定液中の気泡の消泡条件、気泡安定液の分離条件、溝壁の安定性、流動性および適用深度に着目して、詳細な実験結果に基づいて気泡安定液の特性とそれらに影響を及ぼす要因を多変量解析により分析しました。

具体的には、掘削土の物性値、気泡添加率および含水比を変数とし、気泡安定液の消泡、分離、溝壁の安定性および流動性に

係る状態変化を支配する実験式を求めました。さらに、これらの実験式に掘削土の物性値を代入すると、気泡安定液の消泡、分離、溝壁の安定性や流動性は、定数あるいは気泡添加率と含水比の一次あるいは二次式となるので、気泡と水の添加量を増減することにより気泡安定液の特性を制御できることを明らかにしました。

気泡は圧縮性が大きく地中連続壁の掘削深度が深くなると体積が減少して気泡安定液の機能に変化が生じる可能性があるので、掘削深度で約50mに相当する最大500 kN/m<sup>2</sup>の圧力範囲での気泡安定液の圧縮性に関する検討を行い、掘削安定液としての性能に問題がないことを確かめました。

これらの成果を踏まえて、気泡安定液を実際に現場で使用するための管理手法を前述の実験式を基に考案しました。すなわち、気泡安定液の単位体積重量と流動性を表すテーブルフロー値（TF値）の直交座標平面上に、気泡安定液の消泡、分離、溝壁安定および流動性に関する管理限界線をプロットし、安定した掘削状態とは、この4本の管理限界線に囲まれた範囲内であることを明らかにし、この管理限界線を記入した図1を気泡安定液管理図と定義しました。

施工時には掘削現場から採取した気泡安定液の単位体積重量とTF値を気泡安定液管理図にプロットすることにより、掘削時の気泡安定液が良好な状態にあるか、危険な状態に移行しようとしているかなどが一目で把握でき、危険な状態では気泡あるい

は水の添加量の増減の必要性を判断できることを実証しました。

現場においては、写真1に示すようなシェーピングフォーム状の気泡を掘削機の先端から吐出し、掘削土と混合しつつ掘削を行うと、掘削土と気泡の混合体は写真2に示すような懸濁状態となり、溝壁の安定性、流動性が得られ、容易に掘削を行うことができます。混合した気泡に消泡剤を加えると、土砂は元の状態に戻ります。

気泡のもとになる界面活性剤は生分解性で、泡の成分が地中に残っても数か月程度で地中の微生物に分解されるので、使用材料の環境への適合条件も確認済みです。このため、写真3に示すような気泡を利用した地盤掘削技術は排土量が約1/2～1/3に減少するだけでなく、建設現場での埋め戻しなどに排土を再利用することが可能となり、産業廃棄物埋立地容量に対する負荷を軽くし、CO<sub>2</sub>排出の削減にも貢献する環境配慮型の工法であるといえます。

### 4 気泡を利用した地盤防災新技術の開発

この気泡掘削技術を利用して、各種の地下掘削工法による構造物、例えばソイルセメント山留め壁への適用は実用化され、気泡を用いた等壁厚式ソイルセメント壁工法：AWARD-Trend（アワード・トレンド）工法や気泡を用いた柱列式ソイルセメント壁工法：AWARD-Ccw（アワード・シーシーダブリュー）工法として実際の工事で使用されています。また、超高層

写真1 シュービングフォーム状の気泡 写真2 気泡安定液



写真3 気泡安定液による地盤掘削状況



ビルなどで使用される現場打ち基礎杭の施工法 (AWARD-Inpile)、さらに埋め立て地などで地盤を強化し、地震時の液状化を防止し、沈下を防ぐための地盤改良工法 (AWARD-Demi) を開発済みであり、記者発表を行うとともにこの工法は地盤防災の最新技術としてテレビ番組に取り上げられました。

このAWARD-Demi (アワード・デミ) 工法は、気泡を吐出しながら地山の貫入掘削を行い、**図2**に示すような気泡のベアリング効果により攪拌混合性を向上させた地山 (気泡混合土) に、引抜き時に**図3**に示すように改良材 (消泡材を添加したセメントスラリー) を添加・攪拌し、気泡を消泡しながら地山とセメントスラリーとの混ぜ練りを行い、改良体を造成する地盤改良工法です。

気泡の添加により加水量を低減できるため、余剰汚泥量の発生を抑制できる他、添加したセメントスラリーが余剰汚泥の一部として流出しないので、単位セメント量を削減することができる環境配慮型のコストパフォーマンスに優れた地盤改良工法です。

AWARD-Demi 工法は、各種基礎地盤へ適用することにより、地盤の安定性確保、沈下量低減および側方流動防止などの効果があります。また、掘削時の安定確保を目的として、土留めの変位量の低減、ヒービングなどの防止、掘削法面の滑り防止および土留めの止水などを図ることができます。さらに、地震時の液状化防止や近接施工の防護対策など、多方面への用途があり

ます。

## 5 今後の新技術開発の動向

この産学連携による新技術開発研究では、上記のような各種現場に利用される工法の開発のみならず、気泡の特徴を生かした有用な構造物を造るための開発も行っています。

例えば、重金属で汚染された工場の跡地や、放射能汚染土壌を受け入れた産業廃棄物処分場などでは、有害な物質が地下水流によりその周辺の土壌に流れ出さないようにするために遮水壁を構築し、水の流れを遮断することが求められます。そのために周辺の土にセメントを混合しソイルセメント遮水壁を造ることがありますが、大きな地震の力がソイルセメント遮水壁に加わると、壁に小さな亀裂が入り有害物質を含む水が漏れる可能性があります。そこで、ソイルセメント遮水壁中に気泡を残すことにより、地震時に柔軟性のある壁体を造るとこの亀裂を防ぐことができます。また、ベントナイトの自己修復性を利用して、亀裂を修復することも可能となります。

一方、下水処理場や地下鉄駅舎などの地下構造物を構築するために構造物底面より深い位置まで山留め壁を構築することがあります。この場合、山留め壁はもともと存在した地下水の流れを遮断する恐れがあるので、下流域では地盤の沈下や植生に悪影響を及ぼすことがあります。これを防ぐためには工事が完成したら、早急に山留め壁

の透水性を低下させて、地下水を通すことが求められます。この場合にも、気泡などを適切に使用することにより、このような対策工法が可能となるので、現在、このための技術開発に向けた実証研究を進めています。

## 6 産学連携の重要性

気泡掘削技術の基礎理論は赤木研究室が中心となって、約8年の歳月をかけ実験、考察を繰り返して構築したもので、既に4件の特許があり、そのうちの1件は海外にも申請中でもあります。

これらを特許のままで眠らさないで、基礎特許を基に、前述の6社の建設業者と、個別にあるいは複数の業者と5種類の共同研究を進め、2種類の工法開発は完了し、実用に供されています。建設業各社はこの技術を実用に供する上での技術的、経済的な検討と現場施工試験を担当し、赤木研究室は基礎実験を担い、お互いの強みを生かした組織で共同研究を円滑に進めています。

今後は工法のみならず、気泡の特徴を生かした各種の地盤防災に貢献できる新機能を有する地盤基礎構造物の開発を目指す元気な産業界との共同研究の機会を求めています。

以上