

気泡シールド工法の水環境負荷を従来の1/25に低減

清水建設株式会社
安井 克豊

1. はじめに

土圧式シールド工法の一つである気泡シールド工法は、加泥材として気泡を用いる工法であり、施工性・経済性に優れることから、数多くのシールドトンネル工事で採用されている。気泡は特殊起泡剤（界面活性剤の一種）の水溶液を発泡させたものであり、特殊起泡剤は土水中に生息する微生物により短期間で生分解され無害となる。しかし、特殊起泡剤を含む掘削土が十分に生分解されないうちに海面埋め立てなどに使用されると、水生環境（水中に生息する水生生物およびそれらが一部を構成している水域生態系）に影響を及ぼす懸念がある。

そこで、筆者らは水生環境への影響（以下、水生環境負荷と称す）を従来のものの25分の1未満に低減できる特殊起泡剤「エコムース」（写真-1）を開発し、2つのシールドトンネル工事現場に適用してその有効性を確認した¹⁾。本稿では、本技術の概要と現場への適用事例を紹介する。



写真-1 エコムースで作成した気泡

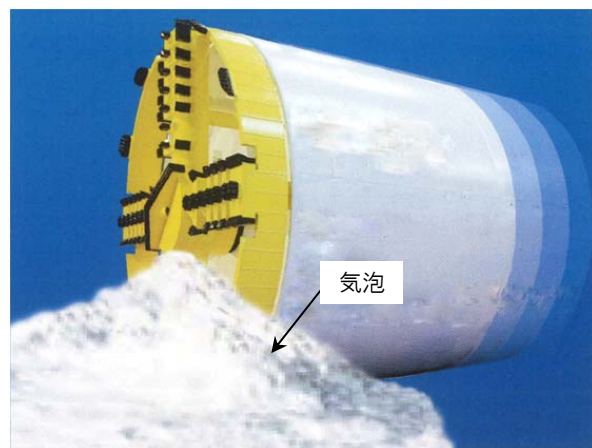


写真-2 気泡シールド工法のイメージ

2. 開発の背景

(1) 気泡シールド工法の採用件数の増加

気泡シールド工法は、シェービングクリーム状の気泡を切羽やチャンバー内に注入しながら掘進する工法である（写真-2）。気泡の注入効果により、掘削土の流動性と止水性が向上するとともに、チャンバー内における掘削土の付着を防止できるため、切羽を安定させながらスムーズな掘進が実現できる。また、掘削土がスクリーコンベアから排出されると、大気圧下に開放されて気泡が消泡し、地山の土砂の性状に近い状態に復元するため、掘削土の運搬や処理が容易になる。

このように優れた特徴を持つ気泡シールド工法は、近年にその基本特許の有効期限が切れたこともあり、数多くのシールドトンネル工事で採用されている。特にシールド外径が10mを超える大断面シールドトンネル工事では、図-1に示すとおり平成22年度までの3年間の採用割合が60%を超えており、気泡シールド工法は現在のシールド工法の主流になりつつある。

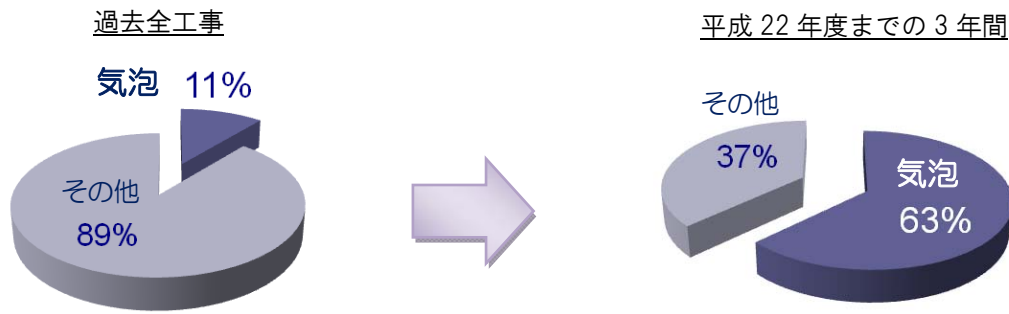


図-1 気泡シールド工法の採用割合（シールド機外径 10m 超）

(2) 化学物質に対する規制の強化

近年、国民の地球環境に対する関心が高まるなか、化学物質に対する監視が厳しくなっている。一方、都市部のシールドトンネル工事では、掘削土を海面の埋め立てに利用するケースが増え、気泡シールド工法で施工した際の掘削土に含まれる特殊起泡剤による水生生物への影響が懸念される場合がでてきた。建設発生土の受入事業者によっては「掘削土に含まれる特殊起泡剤の濃度」を受入基準としており、従来の特殊起泡剤を使用すると掘削土を3日間仮置きして、土中の微生物に特殊起泡剤を生分解させて基準を満足するのを待ってから搬出する必要があるため、非常に広大な仮置き用地を必要とするとともに、工費や工期に大きな影響を及ぼしている²⁾。

このような背景のもと、水生環境にやさしい特殊起泡剤の開発が急務となり、筆者らは「エコムース」を開発した。

3. エコムースの特徴

エコムースの特徴をまとめると、以下に示すとおりである。

- ①特殊起泡剤自体の水生環境負荷が従来のものの1/5（図-2）
- ②使用量が従来のものの1/5（図-2）
- ③気泡シールド工法の水生環境負荷が従来のものの1/25（図-2）
- ④生分解性に優れ環境中に蓄積されない
- ⑤汎用性に優れ従来の気泡シールド工法の設備で使用可能

以下、それぞれについて詳述する。



図-2 エコムースによる水生環境負荷低減の概要

(1) 特殊起泡剤自体の水生環境負荷が従来のものの5分の1

気泡の原料である特殊起泡剤の化学成分を見直し、水生環境負荷が小さく、施工性・経済性に優れたものを選別して配合した。水生環境負荷の評価には、化学品の危険有害性の国際的な分類基準と表示方法を定める GHS の基準を採用した。この基準では、化学品による水生生物への影響を「急性水生毒性」と称し、水系食物連鎖における高次消費者である魚類（メダカ）を対象として、化学物質に 96 時間暴露した際に魚類の半数が死亡する際の化学物質の濃度“96 時間 LC₅₀ (mg/L)”で評価する。96 時間 LC₅₀ の値が大きいほど水生環境負荷が小さいことを意味する。

公的機関である（財）日本食品分析センターによる評価結果では、従来の特殊起泡剤（製品名 OK-1）の 96 時間 LC₅₀ が 43mg/L であるのに対し、エコムースでは 240mg/L であり、水生環境負荷が従来のものの 1/5 未満 (240/43≒5.6) になることを確認した。GHS では急性水生毒性の評価区分を表-1 のように設定しており、従来の特殊起泡剤が区分 3 (水生生物に有害) に属するのに対し、エコムースはこの区分を大幅に下回る区分外の評価であり、このことからエコムースが水生環境にやさしいことがわかる。

表-1 GHS による急性水生毒性の評価区分

区分	表示	注意喚起語	96 時間 LC ₅₀
区分 1		水生生物に非常に強い毒性	≤1mg/L
区分 2	—	水生生物に毒性	≤10mg/L
区分 3	—	水生生物に有害	≤100mg/L

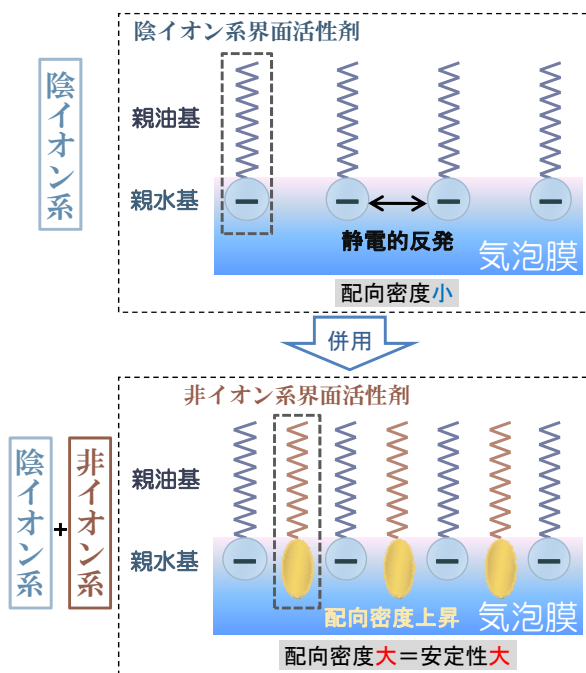


図-3 気泡の安定性向上の概要

(2) 使用量が従来のものの5分の1

① 気泡の安定性向上のための方策

陰イオン系界面活性剤に適量の非イオン系界面活性剤を添加することで気泡の安定性が大幅に向上する効果（併用効果）を利用し、少ない使用量で従来のものと同等の気泡の安定性を確保できるようにした。併用効果による気泡の安定性向上の概要を図-3 に示す。

気泡の安定性を評価するために、破膜試験を実施した。破膜試験は、写真-3 に示す器具を用いて、フレームに形成された気泡膜が破れるまでの時間（破膜時間）を計測するもので、破膜時間が長いほど気泡の安定性が高い

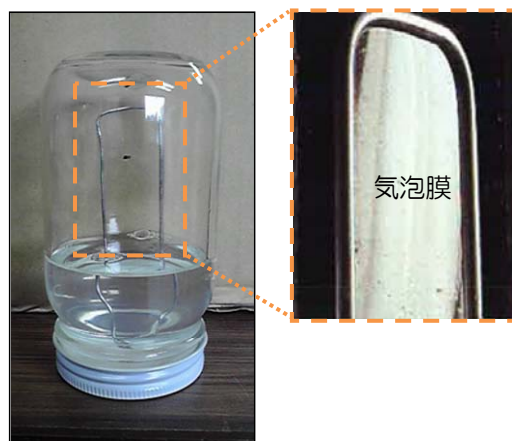


写真-3 破膜試験器具

ことを意味する。

陰イオン系界面活性剤を主剤とし、非イオン系界面活性剤の添加率を変化させて破膜試験を実施したところ、**図-4**に示す結果となった。非イオン系界面活性剤の添加率が3%のときに併用効果が最も大きく（破膜時間 138 分）なり、これをエコムースの配合とした。また、従来の特殊起泡剤の破膜時間が27分であることから、エコムースが従来のものの5倍以上（ $138/27 \approx 5.1$ ）の優れた気泡の安定性を有することを確認した。

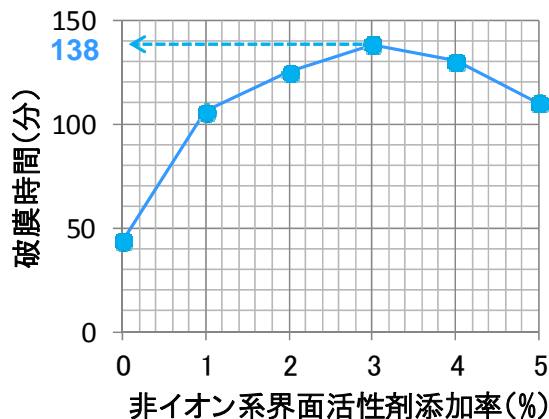


図-4 破膜試験結果

② 室内試験による気泡シールド工法への適用性の検証

エコムースの気泡シールド工法への適用性を検証するために、掘削土の性状管理方法として一般に用いられる気泡混合土のスランプ試験およびコーン貫入試験を実施した。試験結果を**表-2**に示す。エコムースは従来のものと比較して5分の1の濃度（使用量）で同等の性状すなわち施工性が得られることを確認した。

表-2 エコムースの施工性確認試験結果

	試料	注入率	発泡倍率	濃度	スランプ	コーン指数
		(%)	(倍)	(%)	(cm)	(kN/m ²)
エコムース	5号硅砂 (含水比 15.0%)	10	8	0.6	13.0	19.5
従来のもの				3.0	13.0	13.2

(3) 気泡シールド工法の水環境負荷が従来のものの25分の1

以上より、エコムースを使用すると、「①特殊起泡剤自体の水環境負荷が従来のものの1/5」であり、「②使用量が従来のものの1/5」であることから、トータルで「③気泡シールド工法の水環境負荷が従来のものの1/25」となることを確認した。

(4) 生分解性

生分解性とは、自然界の微生物の働きにより有機物が水、酸素、炭酸ガス等に分解され自然に戻る性質を指す。すなわち、生分解性の悪い物質は環境中に蓄積されやすくなることから、生分解性は環境への影響を評価するための重要な指標の1つである。

公的機関である(財)日本食品分析センターにおいてDOC法による生分解度試験を実施した結果、エコムースの14日後の生分解度は85%であることがわかった。一般に、生分解度が60%以上であれば生分解性が良好な物質と言えることから、エコムースが優れた生分解性を有し、環境中に蓄積されにくいことを確認した。

(5) 汎用性

エコムースは、従来の特殊起泡剤の施工設備をそのまま利用できることや、従来の特殊起泡剤と同様に掘削対象土の粒度分布に応じて使用配合や気泡混合率を設定できることから現場への導入が容易である³⁾。ここで、特殊起泡材には、特殊起泡剤の水溶液であるAタイプ（粘土、シルト、細砂用）と特殊起泡剤に起泡添加剤を加えた水溶液であるBタイプ（細砂、粗砂、砂礫用）、Bタイプの気泡にゲル化剤を添加することにより、気泡を安定強化させるCタイプ（礫用）がある。

また、使用量を従来のものよりも大幅に低減できることから工費の削減効果も期待できる。このように、エコムースは優れた汎用性を有する。

4. 現場への適用事例

(1) 洪積粘性土層への適用

掘削土がチャンバー内に付着しやすい洪積粘性土層に適用した事例を紹介する。工事概要を表-3に、施工状況を写真-4～6に示す。写真-4に示すように、チャンバー内における掘削土の付着を防止してスムーズな排土を実現した。また、写真-6に示すように、消泡後の掘削土は地山の土砂の性状に近い状態に復元しており、エコムースの気泡シールド工法への優れた適用性を確認できた。

表-3 工事概要

発注者	大阪広域水道企業団
工事名	配水管布設工事(バイパス・堺市)3工区その2
場所	大阪府堺市西区石津西町～堺市堺区大浜西町
概要	工業用水バイパス配水管(ダクタイル鉄管φ1,350mm) 気泡シールド工法:掘削外径φ2,422mm、掘進延長2,367m
実績	対象土質:洪積粘性土 施工延長:2,367m 使用タイプ:Aタイプ 施工時期:平成22年11月～平成23年9月



写真-4 排土状況(切羽)



写真-5 排土状況(土砂ピット)



写真-6 消泡後の掘削土

(2) 沖積砂質・礫質土層への適用

地下水位が高い沖積砂質・礫質土層に適用した事例を紹介する。工事概要を表-4に示す。沖積砂質土・礫質土を小土被り(4.7～7.5m)で掘進するため、地盤変状の抑制が求められた。掘削に先立

ち、立坑の掘削土砂を用いて気泡混合土の性状確認試験を実施し、B タイプの配合を採用することとした。ここで、B タイプの配合とは、特殊起泡剤に気泡の安定強化を目的とした起泡添加剤（パルプを主原料として得られるセルロース系の水溶性高分子剤）を加えたものである。

写真-7、8 に施工状況を示す。掘進中におけるカッタートルクは小さい値で安定し、気泡のベアリング効果による掘削土の流動性を確認できた。また、写真-8 に示すように、スクリーコンベアからの噴発は見られず、気泡による止水効果も確認できた。このように、小土被りの沖積砂質・礫質土層においても切羽を安定させながらスムーズな掘進を実現し、地盤変状を最小限に抑制することができた。

表-4 工事概要

発注者	平塚市
工事名	松風町・久領堤貯留管築造工事その1
場所	神奈川県平塚市松風町、久領堤、夕陽ヶ丘地内
概要	下水貯留管 気泡シールド工法:掘削外径φ3,290mm、掘進延長1,754m
実績	対象土質:沖積砂質土、沖積礫質土 施工延長:1,754m 使用タイプ:Bタイプ 施工時期:平成23年11月～平成24年7月

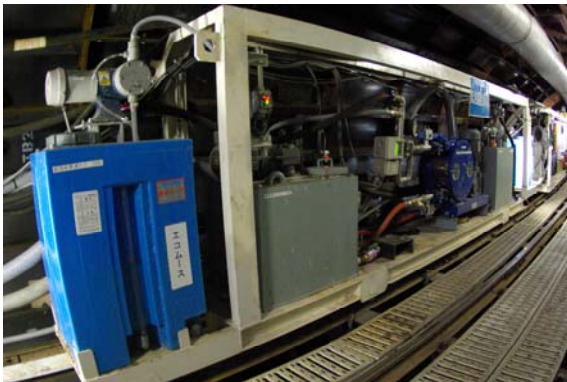


写真-7 坑内気泡設備



写真-8 排土状況

5. おわりに

本技術は、従来の気泡シールド工法の設備をそのまま利用できる高い汎用性を確保しつつ、環境負荷の低減ならびに工費や工期の削減を実現させた点が高く評価され、平成23年度土木学会環境賞を受賞した。今後はさらなる現場への展開を図っていく所存である。

参考文献：

- 1) 安井克豊、迫野 涼、渡邊洋輔：水生環境負荷を1/25に低減した特殊起泡剤「エコムース」の開発、土木学会第66回年次学術講演会講演概要集（平成23年度）、VI-020
- 2) 特別リポート「世界屈指のシールド」、日経コンストラクション、2011.6.13号、p.61
- 3) シールド工法技術協会：気泡シールド工法技術資料、平成23年8月