

# 泥土圧シールド工法における高水圧下に対応した気泡性状実験

粥川 幸司<sup>1</sup>・名倉 浩<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 株式会社安藤・間 建設本部 (〒107-8658 東京都港区赤坂六丁目 1-20)

E-mail: kayukawa.koji@ad-hzm.co.jp

<sup>2</sup>正会員 株式会社安藤・間 建設本部 (〒107-8658 東京都港区赤坂六丁目 1-20)

E-mail: nagura.hiroshi@ad-hzm.co.jp

近年、シールドトンネルの大断面と大深度、高水圧化に対して、泥土圧シールド工法の採用が増えており、掘削土のチャンバーでの塑性流動化を促進する添加材として気泡が主流になりつつある。そこで、高水圧下での気泡の適用に関する知見を得ることを目的として、実施工での要求事項を対象とした要素実験、模擬実験を行った。実験では、高水圧に対応した最新の気泡材を選定し、基本性能、土砂と攪拌した際の塑性流動化の可否とその持続性、噴発防止剤を添加した際の改質状況に着目した。その結果、高水圧下においても高水圧に対応した気泡材は、要求事項を満足する性能やその持続性があるとともに、噴発に対しても適切な噴発防止剤によって改質できることがわかった。

**Key Words:** shield tunneling method, muddy soil pressure, high water pressure, rheological foams

## 1. はじめに

近年のシールドプロジェクト（たとえば、東京外かく環状道路（関越～東名）やリニア中央新幹線）では、都市地下空間の過密化に伴って、大深度地下の公共的使用に関する特別措置法に基づいた大深度（40m以深）、高水圧下での施工が求められる。また、立坑が深くなることに伴い、その数をできるだけ少なくするため、シールドトンネルそのものの長距離化、それに伴う高速施工のニーズが高まっている。

一方、大断面のシールド工法において、従来、切羽安定（切羽圧の制御）や長距離施工に伴うビット摩耗等の耐久性、掘削土の搬送に有利な泥水シールド工法が多かったが、掘削土の処理が比較的容易なことや、発進基地を小さくすることができる泥土圧シールド工法が採用される事例が増えてきた。

このような背景のもと、今後のシールド工事では、大断面、大深度、高水圧、長距離、高速施工が重要なポイントとなり、これを実現するための個別の要素技術の開発やその積み上げが必要である。一方で、高水圧下での泥土圧シールドの実績が少なく、知見にも乏しい。そこで、高水圧下での泥土圧シールド工法の成否を左右する要素技術の一つとして、チャンバーでの塑性流動化を促

進する添加材の中から、大断面シールドにおいて主流となりつつある気泡材を取り上げ、高水圧下での適用に関する知見を得ることを目的として、気泡の性質や実施工での要求事項を対象とした要素実験、模擬実験を行うこととした。

## 2. 大深度、高水圧下における気泡の役割

### (1) 泥土圧シールド工法の課題

泥土圧シールドの施工では、切羽の安定を図りながら、掘進速度に応じた円滑な掘削、排土を行うことが必要である。大断面、大深度、高水圧下においては、特に次の2点が重要である。

#### ・切羽安定

大断面シールドでは、その断面内で地盤が多層構造である場合が多く、また、トンネル上端と下端の高低差でチャンバー内の上下方向の圧力差（たとえば、 $\phi 10\text{m}$ 以上では $0.15\text{MPa}$ 程度以上）も大きくなる。

一方、切羽圧の制御を確実にを行うためには、多様な土質の掘削土をチャンバー内で確実に塑性流動化させるとともに、高いチャンバー内圧力や上

下方向の大きな圧力差、さらには、掘進停止中や休日明け等の時間経過に対しても材料分離が生じず、切羽圧の保持、泥土の塑性流動性を持続することができる添加材が必要となる。

・スクリーコンベヤーでの確実な減圧

高水圧下では、必然的に切羽圧、チャンバー内圧力が高圧になる。また、切羽圧の変動を抑制するためにスクリーコンベヤー出口（排土ロケット）での泥土の噴発を防止することが必要となる。このため、圧送ポンプの直結や泥水輸送方式の採用のほか、チャンバーで塑性流動化した泥土に添加材（噴発防止剤）をスクリーコンベヤーで注入、改質し、そのせん断抵抗や管壁、羽根との摩擦抵抗を確保する方策、スクリーコンベヤーの長尺化、多段化で減圧区間を確保する方策等、確実に減圧する工夫が必要である。

(2) 添加材（切羽）の選定

従来の泥土圧シールド工法における切羽での添加材には、主に粘土鉱物系、界面活性剤系、高分子系が用いられている。

切羽での添加材と掘削土の搬送方式には密接な関係がある。たとえば、連続コンベヤー方式を採用する場合には、スクリーコンベヤーから排出される土砂がある程度改質され、流動性を失った状態にする必要がある。気泡材による泥土では、流動性の消失を比較的容易に実現できるので、大断面、大深度、高水圧下で泥土圧シールドの高速施工を目指すとするれば、必然的に添加材に気泡を用いることが有利となる。その際には、(1)で示した高水圧下でのチャンバー内掘削土の塑性流動性状の持続と、確実な減圧が課題となる。

(3) 高水圧に対応した気泡材

切羽での添加材に気泡材を用いた場合の塑性流動性を確保するメカニズムは、起泡材と圧縮空気で作成した気泡を切羽で添加し、これが土粒子間に入り込むことによって、

- ・気泡のベアリング効果で流動性が向上すること。
- ・間隙水が排除され泥土の止水性が向上すること。

である。そのほかの利点として、

- ・気泡が土砂とカッターや隔壁等の中に入り込み、土砂の付着防止になる。
- ・気泡がクッションの役割を果たすので、切羽に対するスクリーコンベヤー回転や排土ロケット操作による圧力変動の抑制にもなる。

ことも挙げられる。

ところで、このような役割を果たすべき気泡がチャンバー内で破泡すると、起泡材と空気に分離しチャンバー

内に高圧の空気溜まりを形成する。これが、地盤の微細な間隙や水みちを通じて河川や地上へ噴出する恐れが生じる。一方、それまで塑性流動性を保持していた泥土が流動性を失うとカッタートルクが上昇するほか、その泥土が地下水で飽和された状態となり、塑性流動化土の役割の一つである止水性を損なうこととなる。さらに、泥土が土砂と地下水に分離することで、スクリーコンベヤー排土口から地下水が噴発するとともに、圧力低下により切羽崩壊を生じさせることにもなる。したがって、気泡にはチャンバー内に安定して存在することが求められる。

ここで言う「気泡の安定」とは、次のことを言う。

- ・泡の大きさが小さい状態（石けんの泡よりもシェービングクリームのようなきめ細やかな泡）で存在すること。
- ・泡膜の強度が大きく、破泡しにくいこと。

さらに、気泡そのものにおいて、下記の性能とその持続性が必要となる。

- ・高水圧下においても円滑に発泡すること。
- ・泡の膨張と収縮を伴うチャンバー内での繰返しの圧力変動（とくにφ10m以上の大断面では0.15MPa以上）に対しても破泡しにくいこと。
- ・昼夜交代時や休日明け等に伴う時間経過に対しても破泡しにくいこと。

(4) 噴発防止剤

スクリーコンベヤー排土ロケットでの噴発を防止する方法として、スクリーコンベヤーを長尺化、多段化する方法とともに、噴発防止剤をスクリーコンベヤーで注入し、泥土のせん断抵抗や摩擦抵抗を向上させる方法が考えられる。噴発防止剤の多くはアクリル系水溶性ポリマーであり、改質のメカニズムは、泥土に含まれる

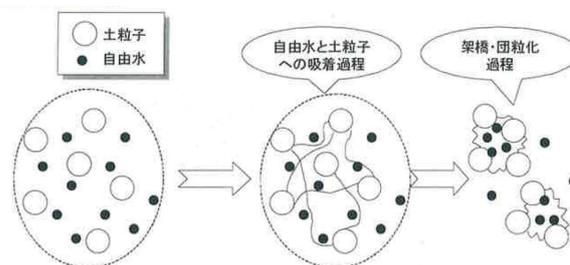


図-1 噴発防止剤による凝集、団粒化の模式図<sup>1)</sup>

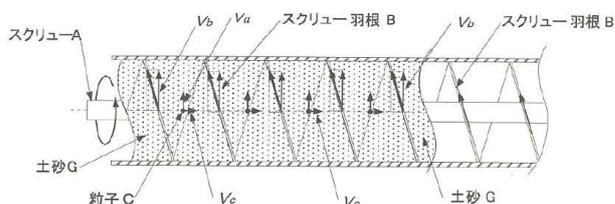


図-2 スクリューコンベヤーの排土機構<sup>2)</sup>

水分を吸水し、また、粘土、シルト等の微細粒子を凝集し、さらに、土粒子を団粒化する（図-1）<sup>1)</sup>もので、泥土の流動性が消失するとともに、せん断抵抗が向上するものである。

一方、スクリーコンベヤーは、スクリーの回転によって泥土を移動させるもの（図-2）<sup>2)</sup>で、積極的な攪拌機能を持たない。また、噴発防止剤は泥土に添加後の吸水作用、凝集作用、団粒化にある程度の時間を要する。したがって、噴発防止剤の性能には、土質、気泡の種類との組み合わせやその使用量とともに、吸水、凝集、団粒化に要する時間が短いことが求められる。

### 3. 実験の目的と概要

#### (1) 実験の目的

泥土圧シールドに用いる気泡材について、近年、メーカー各社から特色のある気泡が提示されている（表-1）。これらのうち、高水圧対応とされている気泡はいずれも発泡倍率が10倍以上である。高発泡倍率の特徴は、より少ない起泡材で同量の気泡を生成できるので、気泡中の水分量を少なくでき、泥土の止水性に有利となる。

ところで、気泡材の大気圧下での発泡や土砂との攪拌、塑性流動性を評価する実験は各社で行われているものの、圧力下については明確になっていない。

そこで、高水圧に対応した気泡を用いて、次を目的とした実験を行うこととした。

- ・高気圧下での気泡の生成と、その持続性を確認する。
- ・高気圧下にて、気泡材を土砂に注入、攪拌し、土砂が塑性流動化すること、ならびに、それがチャンバー内の圧力変動、さらには時間経過でも塑性流動性を持続できることを確認する。

#### (2) 実験の概要

##### a) 実験の種類

###### ① 高気圧下での気泡発泡実験

気泡単体について、大気圧下ならびに高気圧下での性状とその時間経過による変化を確認する。ここでは、大気圧下での発泡、観察とともに、後述するアクリル製タンクを用い、高気圧（0.5MPa）を維持したタンク内に気泡を発泡し、観察することとした。以下、気泡発泡実験と称する。

###### ② 高気圧下での気泡添加による土砂攪拌実験

後述する塑性流動実験装置<sup>3)</sup>を用い、高気圧下にて攪拌中の土砂へ気泡を注入し、性状の変化を確認する実験を行うこととした。また、シールド掘進のリング毎や昼夜交代時、または休日明けの掘進停止を想定した土砂性状の時間経過による変化を確認することとした。以下、土砂攪拌実験と称する。

###### ③ 高気圧下での噴発防止剤添加による改質確認実験

土砂攪拌実験と同様に、塑性流動実験装置を用いて高気圧下で気泡を添加した攪拌中の泥土に噴発防止剤を注入し、塑性流動化した土砂が改質されることを確認するものである。本来であれば、スクリーコンベヤーで噴発防止剤を注入する必要があるが、実験では気泡と同様に注入することとした。以下、改質確認実験と称する。

表-2 実験に用いた噴発防止剤

噴発防止剤	性質・特徴	添加量	適用気泡材
		kg/m <sup>3</sup>	
a	凝集性, 団粒化	1~10	A, D
b	凝集性, 団粒化	1~3	B
c1	吸水性, 団粒化	2~5	C
c2	吸水性, 地下水ゲル化	2~5	
e1	吸水性	1.5~2.5	E
e2	凝集性	0.2~2	

表-1 気泡材の例

気泡材	A	B	C	D	E
主成分	AOS*	AES*	AES*	AES*	AES*
濃度	1~3%	0.5~1%	0.4~5%	0.5~5%	2~4%
発泡倍率	8倍	10倍	10~20倍	10~20倍	8~20倍
特徴	実績多 魚毒性が強い	注入率小 発泡性良	高発泡技術 不透水技術 疎水膜剤 砂礫~粘土まで	安定性向上 (泡膜) 低魚毒性 生分解性	発泡性良 安定性良(泡膜) 魚毒性
大断面高水圧対応	—	△(大断面对応)	○	○	○
実験での採用	○	○	○	○	○

\*: いずれもアニオン界面活性剤で、AOSはスルホン酸塩、AESは硫酸エステル塩に分類される。

## b) 実験材料の選定

### ① 気泡材と噴発防止剤

実験に用いる気泡材には、表-1に示した5種類を用いることとした。噴発防止剤については、気泡材に応じた各メーカー推奨品を用いた(表-2)。

### ② 土質材料

土砂攪拌実験、改質確認実験で用いる土質材料には、砂質土、粘性土を対象とするため、文献<sup>4)</sup>で用いた鬼怒川砂と、入手性のよい笠岡粘土を用いた。実験では、気泡添加前でスランプ5cmの状態にするため、鬼怒川砂、笠岡粘土を適宜空練り、加水調整し作成土とした(写真-1)。作成土の配合を表-3に示す。



写真-1 攪拌前の作成土（砂質土）

表-3 作成土（砂質土、粘性土）の配合

作成土	鬼怒川砂	笠岡粘土	水
	重量%		
砂質土	63.0	29.0	8.0
粘性土	19.8	55.6	24.6



写真-2 アクリル製タンク(2台)

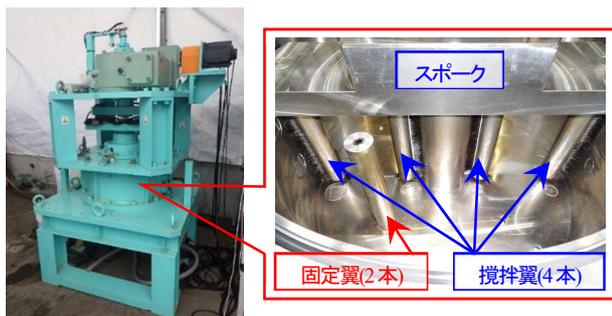


写真-3 塑性流動実験装置<sup>3)</sup>

## c) 実験装置

### ① アクリル製タンク

気泡発泡実験に用いるアクリル製タンク(写真-2)は、内径約18cm、内空高さ約1m、容積約25Lで、耐圧は0.5MPaである。

### ② 塑性流動実験装置<sup>3)</sup>

土砂攪拌実験、改質確認実験で用いる塑性流動実験装置(写真-3)は、シールドのチャンバーを水平にした形で、その底面が隔壁、側面がフード部に相当するもので、寸法は内径φ600mm×高さH300mmである。スポーク、攪拌翼、固定翼を装備しており、実質容積は約75Lである(以下、模擬チャンバーと称する)。気泡材、噴発防止剤を隔壁(底面)から注入可能である。

攪拌時では、スポークの回転に要する力をロードセルで荷重として測定しトルクに換算する。土砂の硬軟はスポーク回転トルクの大小で判断することができる。また、スポーク回転速度は0.5~2.0rpmで任意に設定可能であるが、今回の実験では1rpmとした。なお、文献<sup>3)</sup>で装備したせん断力計について、今回の実験では用いていない。

## d) 実験手順

### ① 気泡発泡実験の手順

大気圧下での気泡発泡実験では、500mLメスシリンダーに発泡し、その経時変化を観察した。

高気圧下での気泡発泡実験について、その手順を図-3に示す。タンク内を0.5MPaに加圧の後、起泡材、空気を発泡筒で混合発泡し、タンク底面から注入する。タンク内圧力については、レギュレータで一定圧に保持する。気泡注入60分経過後に0.5MPa→0.4MPa→0.5MPaの減圧、再加圧を行う。また、注入量は気泡の高さで管理し、時間経過に伴う気泡の破泡、消泡状況を目視観察することとした。なお、起泡材の濃度については、表-1に示したメーカー推奨値のうちの最も濃い状態で行うこととした。

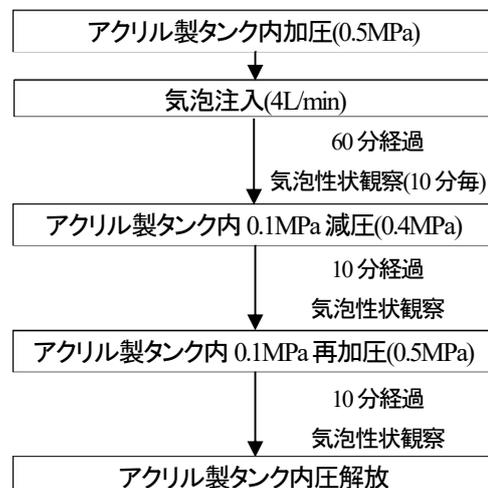


図-3 高気圧下での気泡発泡実験の手順

② 土砂攪拌実験, 改質確認実験の手順

高気圧下での土砂攪拌実験, 改質確認実験の手順を図4, 5に示す。

土砂攪拌実験では, スランブを5cmに調整した約40Lの作成土を模擬チャンバーに投入, 密閉し, チャンバー内圧を空気で0.5MPaに加圧の後, 攪拌を開始する。攪拌中に所定量の気泡材を隔壁(底面)から注入, さらに所定の時間で0.1MPaの減圧, 再加圧を繰り返した。その後, スプークの回転を停止し, 昼夜交代後や休日明けの再掘進を想定した2時間, または2日間静置の後, 再攪拌した。その後, 模擬チャンバーの圧力を解放して, 目視観察するとともに, 事後スランブ試験を実施した。なお, 気泡注入率は砂質土で30%, 粘性土で50%とした。また, 攪拌中はスプーク回転トルクを測定, 算出している。

改質確認実験では, 気泡注入, 模擬チャンバー内圧力の減圧, 再加圧を土砂攪拌実験と同様の手順で実施した後, 噴発防止剤を注入, 攪拌し, 改質によるスプーク回転トルクの変化を確認した。その後, 土砂攪拌実験と同様に目視観察, 事後スランブ試験を実施した。なお, 噴発防止剤の添加量は80g (2kg/m<sup>3</sup>相当)の同量とした。

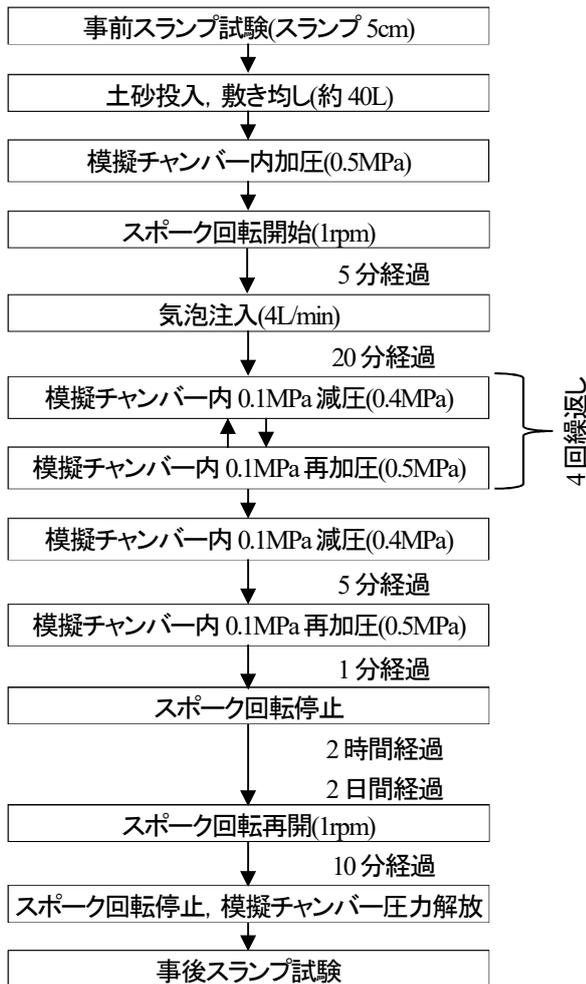


図4 土砂攪拌実験の手順

e) 実験ケース

実験ケースを表4に示す。土砂攪拌実験, 改質確認実験では, 砂質土に対して選定した全ての気泡材で行い, 2日間静置, 粘性土では気泡材を選別して行った。以降に実験結果を示す。

4. 実験の結果

(1) 大気圧下, 高気圧下の気泡発泡実験結果

a) 大気圧下での気泡発泡実験結果

気泡の大気圧下での性状と触診を表5に, メスシリンダーに発泡した気泡の経時変化を表6に, 気泡が破泡し起泡材に戻った量(以下, 液化量と称する。)の経時変化を図6に示した。

気泡Aと比較して高水圧に対応した気泡C, D, Eは, 泡がきめ細やかでクリーミーであり, とくにC, Eは粘り気を感じるのもであった。BについてはAに近い性状であった。

気泡の経時変化について, A, Bが時間経過で気泡が薄くなったが, C, Eは, 泡持ちが良く, 液化量も半分以下であり, 持続力が高いと言えた。なお, DはA, Bよりは持続力が高いが, C, Dよりは若干下回るように観察された。

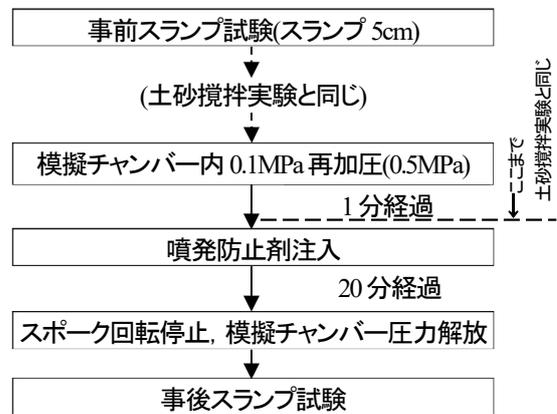


図5 改質確認実験の手順

表4 実験ケース一覧 (○:実施)

気泡材		A	B	C	D	E		
気泡発泡実験	大気圧下	○	○	○	○	○		
	高気圧下	○	○	○	○	○		
土砂攪拌実験	砂質土	2時間静置	○	○	○	○		
		2日間静置	—	—	—	○	○	
	粘性土	2時間静置	—	—	○	○	○	
		2日間静置	—	—	—	—	—	
改質確認実験	噴発防止剤	a	b	c1	c2	a	e1	e2
	砂質土	○	○	○	○	○	○	○
	粘性土	—	—	—	—	—	—	—

表-5 大気圧下での気泡性状

気泡材	A	B	C	D	E
希釈率 %	3.0	1.0	5.0	5.0	4.0
発泡倍率 倍	8	10	20	20	20
気泡性状					
外観	<ul style="list-style-type: none"> <li>全体的に水っぽく、容器全体に広がりやすい。</li> <li>気泡の大きさは比較的均一である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>全体的に水っぽく、容器全体に広がりやすい。</li> <li>部分的に肥大している気泡がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>きめが細かくクリーミーで粘り気がある。</li> <li>気泡の大きさは均一である。</li> <li>泡が広がらずにしっかり積み上がる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>気泡の大きさ、水っぽさ、クリーミーさは中間程度。</li> <li>部分的に肥大している気泡がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>クリーミーで粘り気がある。</li> <li>部分的に肥大している気泡がある。</li> <li>泡が広がらずにしっかり積み上がる。</li> </ul>
触診	<ul style="list-style-type: none"> <li>水気が強い。</li> <li>容器下部の気泡は破泡、液化している。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水気が強く泡が消えやすい。</li> <li>容器下部の気泡は破泡、液化している。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>しっとりして、手に絡みつく。</li> <li>容器内部の気泡はほとんど液化していない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>比較的さらつとしている。</li> <li>容器内部の気泡はほとんど液化していない。</li> <li>CやEのような泡の粘り気やしっとり感は乏しい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>しっとりして、手に絡みつく。</li> <li>容器内部の気泡はほとんど液化していない。</li> </ul>
その他	希釈液の時間経過に伴う分離、沈降等は少ない。	希釈液の時間経過に伴う分離、沈降等は少ない。	希釈液の時間経過に伴う分離、沈降等が多少見られる。	希釈液の時間経過に伴う分離、沈降等はほとんどない。	希釈液の時間経過に伴う分離、沈降等が顕著である。

表-6 大気圧下での気泡性状の経時変化

気泡材	A	B	C	D	E
希釈率 %	3.0	1.0	5.0	5.0	4.0
発泡倍率 倍	8	10	20	20	20
全景					
上面状況	発泡直後				
	60分後				
下部状況 (液化状況)	発泡直後				
	60分後				
気泡性状 (破泡による液化)	<ul style="list-style-type: none"> <li>気泡性状の持続性が低く、時間経過で気泡が薄くなる。</li> <li>発泡直後の破泡による液化が多いが、時間経過での液化の増加は少ない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aと同様に、気泡性状の持続性が低く、時間経過で気泡が薄くなる。</li> <li>発泡直後の破泡による液化が多いが、時間経過での液化の増加は少ない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>気泡性状の持続性が高い。</li> <li>発泡直後の破泡による液化は皆無である。</li> <li>時間経過で液化はするが、Aの半分以下である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>気泡性状の持続性は中位以上。</li> <li>発泡直後の破泡による液化は少ない。</li> <li>時間経過で液化はするが、Aの半分以下である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cと同様に、気泡性状の持続性が高い。</li> <li>発泡直後の破泡による液化は皆無である。</li> <li>時間経過で液化はするが、Aの半分以下である。</li> </ul>

b) 高気圧下での気泡発泡実験結果

高気圧下 (0.5MPa) で発泡させた気泡の性状と経時変化の状況を表-7に、液化量の経時変化を図-7に、液化せずに残留している気泡の発泡時体積に対する比率 (ここでは残気泡率と称する) の経時変化を図-8に示す。なお、実験では気泡注入 60 分経過後に 0.5MPa→0.4MPa→0.5MPaの減圧、加圧を行っている。

泡は、減圧、加圧によりその大きさが大小するが、減圧時に泡が大きくなると、膜の厚さが薄くなるとともに、

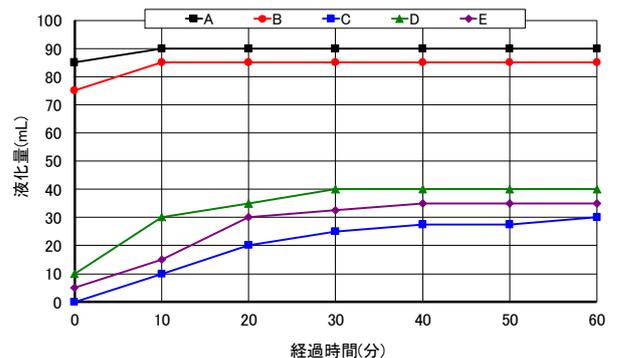


図-6 大気圧下での液化量の経時変化

表-7 高気圧下での気泡性状の経時変化

気泡材		A	B	C	D	E
希釈率	%	3.0	1.0	5.0	5.0	4.0
発泡倍率	倍	8	10	20	20	20
全景	左:発泡					
	中:減圧直後					
	右:再加圧直後					
	60分後					
上部状況	発泡直後					
	60分後					
	0.5MPa→0.4MPa 減圧直後					
	0.4MPa→0.5MPa 加圧直後					
下部(液化)状況	発泡直後					
	60分後					
	0.5MPa→0.4MPa 減圧直後					
	0.4MPa→0.5MPa 再加圧直後					
気泡性状 (破泡による液化) (減圧再加圧状況)		<ul style="list-style-type: none"> <li>気泡性状の持続性が小さく、経時で気泡が薄くなる。</li> <li>発泡直後の破泡による液化が多いが、時間経過での液化の増加は少ない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>気泡性状の持続性はAよりは良いが、他よりは劣る模様。</li> <li>発泡直後は液化は少ないが、10～20分で増加する。その後の液化の増加は少ない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>D, Eと同様に、気泡性状の持続性は高い。</li> <li>発泡直後に若干の破泡による液化がある。</li> <li>時間経過での液化は発生するが、Aの半分程度である。</li> <li>D, Eと同様に、60分以降の体積変化は1%程度で少ない(時間経過によるか圧力変動によるか不明)。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>C, Eと同様に、気泡性状の持続性は高い。</li> <li>発泡直後の破泡による液化は皆無である。</li> <li>時間経過で液化は発生するが、Aの半分以下で最も少ない。</li> <li>C, Eと同様に、60分以降の体積変化は1%程度で少ない(時間経過によるか圧力変動によるか不明)。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>C, Dと同様に、気泡性状の持続性は高い。</li> <li>発泡直後の破泡による液化は皆無である。</li> <li>時間経過で液化は発生するが、Aの半分程度である。</li> <li>C, Dと同様に、60分以降の体積変化は1%程度で少ない(時間経過によるか圧力変動によるか不明)。</li> </ul>

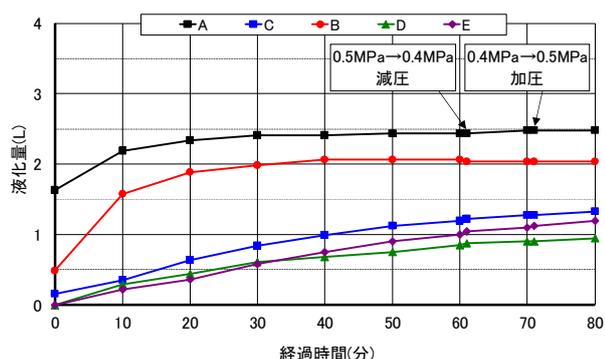


図-7 高気圧下での液化量の経時変化

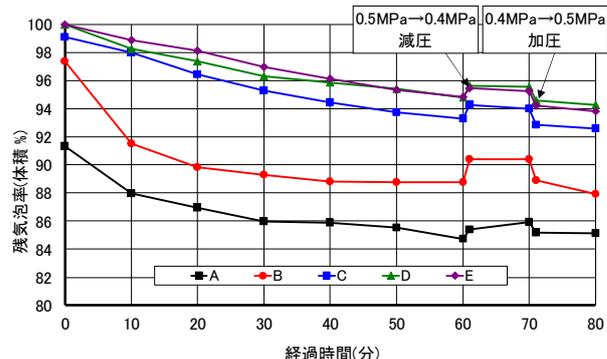


図-8 高気圧下での残気泡率の経時変化

膜に作用する張力も大きくなると考えられる，そこで泡の膜の強度が低いと破泡することとなる。

気泡 A では，注入直後から液化が生じており，30分経過後で残気泡率が86%となった．30分以降では液化の

増加はほとんど認められないものの，60分経過後，ならびに減圧，加圧で，とくに上部の気泡が薄く（泡が大きくなったことが観察され，相当数の泡が破泡したと思われる．また，BはAよりは気泡が残留し液化も少ないものの，ほぼ同様な傾向であった．

一方，D，Eでは，気泡注入後から液化が始まり60分経過でも徐々に液化しているものの，その量はAやBの半分以下であり，60分後でも90%以上の気泡が残留した．また，A，Bのように気泡が薄くなるようなことは目視では認められなかった．なお，CはD，Eよりも液化の量が初期に若干多いものの，経時変化の傾向はほぼ同様であった．

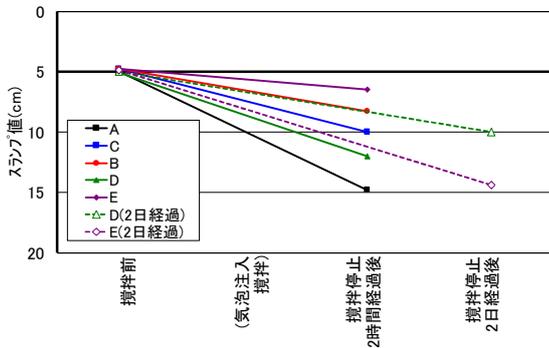


図-9 スランプの変化 (砂質土)

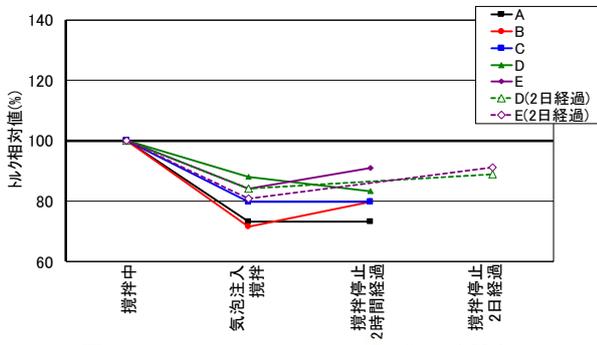


図-10 スポーク回転トルクの変化 (砂質土)

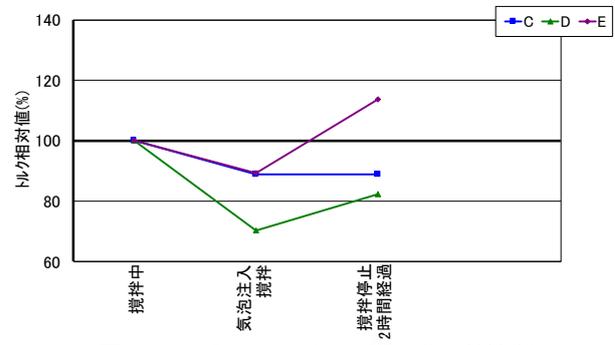


図-11 スポーク回転トルクの変化 (粘性土)

表-8 気泡注入による土砂搅拌後の状況

気泡材	A	B	C	D	E	D	E
希釈率 %	3.0	1.0	5.0	5.0	4.0	5.0	4.0
発泡倍率 倍	8	10	20	20	20	20	20
静置時間	2時間				2日間		
砂質土 注入量 12L (40L×30%)							
	・目視では，土中に気泡が残留しているか定かでない。 ・残留している気泡は膜厚が薄く粘り気が少ない。	・目視では，土中に気泡が残留しているか定かでない。 ・相当量の気泡が消失している。	・D，Eと同様に，目視では土中に気泡が残留している。 ・残留している気泡の状態は，初期の状態とそれほど差はない。	・C，Eと同様に，目視では土中に気泡が残留している。 ・残留している気泡の状態は，初期の状態とそれほど差はない。	・C，Dと同様に，目視では土中に気泡が残留している模様。 ・残留している気泡の状態は，初期の状態とそれほど差はない。	・目視では，2日経過後も土中に気泡が残留している。 ・残留している気泡の状態は，時間経過のため，泡膜が薄くなっているように見受けられた。	・Dと同様に，目視では2日経過後も土中に気泡が残留している。 ・残留している気泡の状態は，時間経過のため，泡膜が薄くなっているように見受けられた。 ・ただし，スランプ値はDと異なり増加した。
粘性土 注入量 20L (40L×50%)	(実施せず)	(実施せず)				(実施せず)	(実施せず)
			・目視では，気泡が粘性土と十分に混合されていないように見受けられた。	・目視では，気泡が粘性土と十分に混合され，塑性流動化したように見受けられた。	・目視では，土中に気泡が残留していない。		

c) 気泡発泡実験のまとめ

高水圧に対応した気泡材 C, D, E は, A, B と比べて泡の大きさが小さくきめ細やかであり, 高気圧下, 圧力変動, ならびに時間経過に対しても破泡が少なく泡持ちが良いと言えた。

(2) 高気圧下での土砂攪拌実験と改質確認実験の結果

a) 気泡添加による土砂攪拌実験結果

砂質土における攪拌前後のスランプの変化を図-9に, それぞれ砂質土, 粘性土での攪拌中のスポーク回転トルクの変化を図-10, 11 に相対値で示した。また, 土砂攪拌, 気泡注入, 2時間または2日間静置, 再攪拌後の泥土の状況を表-8に示した。実験は, スランプ5cmに加水調整した作成土の攪拌から始めており, 図-4に示した手順のとおり, 攪拌の途中で気泡注入, ならびに0.1MPaの減圧, 再加圧を行っている。

図-10に示した砂質土の場合のスポーク回転トルクにおいて, 気泡注入時で80%前後に低減しており, 模擬チャンバー内で気泡と作成土が攪拌されたと言える。また, 攪拌停止の2時間経過後, 2日間経過後(D, Eのみ)でも, 攪拌再開後のスポーク回転トルクはあまり変わらなかった。さらに, 図-9に示した攪拌後の泥土のスランプ

でも, いずれも時間経過後で5cmを上回っており, 気泡が土砂と分離せずに残留し, 塑性流動性が持続しているものと考えられた。

一方, 気泡 A, B について, スポーク回転トルクは大きく低減したが, これは, 気泡が早期に液化するので, 模擬チャンバー内で泥土と隔壁の間に水みちが発生し, その摩擦抵抗がなくなることによるものと思われた。

気泡 C, D, E で実施した粘性土の場合のスポーク回転トルクの変化を図-11に示したが, 砂質土の場合と同様な傾向であった。ただし, Eの2時間経過後の再攪拌では回転トルクが上昇した。また, 表-8に示した実験後の泥土について, 粘性土に気泡が残留していないように見受けられた。

b) 噴発防止剤添加による改質確認実験結果

砂質土における攪拌, 改質前後のスランプの変化を図-12に示した。ここで攪拌停止2時間後のスランプは, 土砂攪拌実験時の値(図-9)を流用して表記している。また, 図-13に攪拌中のスポーク回転トルクの変化を相対値で示した。さらに, 表-9に噴発防止剤注入, 攪拌時のスポーク回転トルクが上昇する時間(これを反応時間とする)と, 攪拌後の泥土の状況を示した。

実験では, 土砂攪拌実験と同様に, スランプ5cmに加

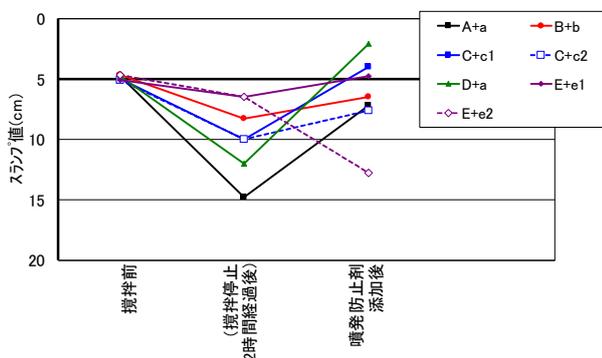


図-12 スランプの変化 (改質確認実験)

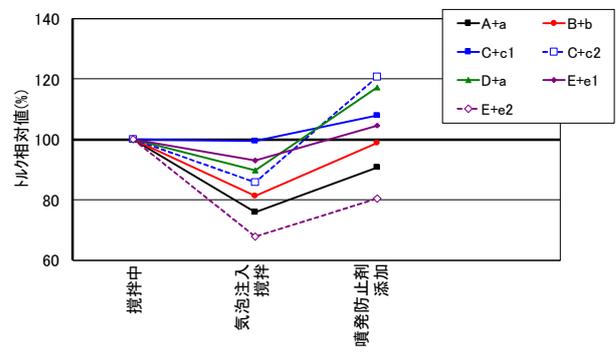


図-13 スポーク回転トルクの変化 (改質確認実験)

表-9 噴発防止剤添加による土砂攪拌後の状況 (砂質土)

気泡材	A	B	C	D	E		
希釈率 %	3.0	1.0	5.0	5.0	4.0		
発泡倍率	8	10	20	20	20		
注入量 L	12(40L×30%)						
噴発防止剤添加量 g	a (凝集性, 団粒化)	b (凝集性, 団粒化)	c1 (吸水性, 団粒化)	c2 (吸水性, 地下水ゲル化)	a (凝集性, 団粒化)	e1 (吸水性)	e2 (凝集性)
噴発防止剤の反応時間	約5分	約5分	約5分	約15分	約10分	約5分	約1時間
砂質土							
	噴発防止剤添加前の土砂性状(表-8)と比較して, 程度の差はあるが, いずれも水分が少なく, 土粒子同士が固結した状況であった。						
	噴発防止剤添加前の土砂性状と比較して, 同様またはそれ以上に流動化した状態であった。						

水調整した作成土の攪拌から始め、気泡添加、0.1MPaの減圧、再加圧を行った後に、噴発防止剤を添加した。

図-13 に示したスポークの回転トルクについて、土砂攪拌実験時の値（図-10）よりは若干ばらつきがあるものの、気泡注入時で70～90%に低減し、噴発防止剤注入後にはそれよりも上昇した。また、図-12 に示したスランプでも、噴発防止剤 e2 を除くいずれの噴発防止剤で、気泡注入時のスランプ（土砂攪拌実験の値）よりも小さくなった。

表-9 に示した噴発防止剤注入後の泥土の状態は、気泡 E と噴発防止剤 e2 の組合わせを除いて、水分が少なく土粒子が固結し流動性がなくなった状態であり、せん断抵抗が増加、改質された状態と言えた。とくに、C と c1（スランプのみ）、C と e2（スポーク回転トルクのみ）、D と a、E と e1 の組合わせでは、気泡注入前の作成土の状態よりも固化した状態であった。

噴発防止剤の反応時間に関し、噴発防止剤の注入からスポーク回転トルクが上昇し始めるまでの時間を測定したところ、E と e2 の組合わせを除いて概ね5～15分であった。一次スクリーコンベヤー内の泥土の移動時間が概ね2～3分程度であるのに比べて遅いものであり、添加の量やその方法、または攪拌方法について検討が必要である。なお、E と e2 の組合わせでは、スランプはより大きくなり流動化した状態であった。

#### c) 土砂攪拌実験と改質確認実験のまとめ

模擬チャンバーを有する塑性流動実験装置を用い、高気圧下（0.5MPa）で攪拌中の作成土に気泡を添加し、塑性流動の状態やその経時変化を比較検討した。また、噴発防止剤を添加し、泥土の改質についても検討した。

高水圧に対応した気泡材である C、D、E は、いずれも適切に発泡し、塑性流動化を確保できた。また、時間経過に対してもその状態がほぼ持続することを確認できた。噴発防止剤についても、その添加によりスランプ低下、スポーク回転トルク上昇が認められ、さらに10分前後で改質されることを確認した。

なお、今回の実験では、土量に対する気泡材、噴発防止剤の添加量について、メーカー推奨量で行った。また、攪拌の方向に関し、実際はチャンバーが鉛直面であり土粒子に重力が作用した上での攪拌であるのに対して、実験は水平面内での攪拌であるので、攪拌の速度は小さいと思われる。さらに、実際にはカッターで切削された土砂がチャンバーで攪拌され、スクリーコンベヤーで噴発防止剤を注入、排出されるという一連の土砂の流れが存在するが、改質確認実験ではこれがないので、噴発防止剤の反応時間にも影響したと思われる。このため、塑性流動化や改質の速度の良否、その速度を向上させる方法等については、別途検討が必要と考える。

## 5. おわりに

泥土圧シールド工法の切羽での添加材として主流である気泡について、高気圧下における性能を確認するために、実際に高気圧下で土砂に添加、攪拌する実験を行った。併せて、切羽での高水圧に対するスクリーコンベヤーでの減圧に噴発防止剤の適用を考慮し、その性能を確認する同様な実験を行った。以下に結果を示す。

- ・高気圧下でも発泡できる。
- ・気泡 A は、高気圧下や圧力変動、時間経過の点で気泡の性能を持続できない。
- ・高水圧に対応した気泡材 C、D、E は、A や B と比べてきめ細やかで、液化量も半分以下なので、破泡しにくく、その性能の持続性も高い。
- ・さらに、これらは土砂と攪拌した場合でも、圧力変動、ならびに時間経過に対して泥土の塑性流動性を維持できる。
- ・なお、C、D、E でも確実に破泡は進行しており、破泡した空気の処理は必須である。また、いずれの気泡も高圧下で発泡するものの、発泡に必要な水分の供給は必須であり、特に硬質地盤等で含水比が少ない場合、別途、水分補給が必要と思われる。
- ・同時に使用される噴発防止剤について、塑性流動化した土砂に添加することで改質できる。ただし、攪拌の方法によっては時間を必要とする。

今回の実験では、気泡の性質や実施工での要求事項に着目したものであり、次の段階として土質や土量に対する添加量の選定、ならびに、噴発防止剤についても気泡材との組合せや添加量、添加方法、攪拌方法の工夫による改質の品質確保が必要と考えている。また、空気溜りの状況把握や速やかな除去方法についても、今後の検討課題と言える。

今回の報告が今後の泥土圧シールド施工に際して参考となれば幸いである。

#### 謝辞：

本実験の実施に際して、メーカー各社様に材料を提供していただきました。この場を借りて厚くお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 栗田工業：クリサット C-333L カタログ
- 2) 足立紀尚監修，小山幸則，加島豊，須賀武，高田正治，木村宏：土圧式シールド工法 その理論と応用，鹿島出版会，p.85，2009.
- 3) 粥川幸司，新原圭祐，名倉浩，越田健：泥土圧シールドのチャンバーを模擬した塑性流動実験，土木学会，第

69 回年次学術講演会講演概要集VI-636, pp.1271~1272, 2014.

4) 粥川幸司, 新原圭祐, 名倉浩, 越田健: 泥土圧シールド実機を用いた掘進実験によるチャンバー内掘削土の塑性流動判定, 土木学会, トンネル工学報告集第 26 巻, 2016.

性流動判定, 土木学会, トンネル工学報告集第 26 巻, 2016.

(2019. 8. 9 受付)

## Experiments on the properties of rheological foams corresponding to high water pressure in muddy soil pressure shield method

Koji KAYUKAWA and Hiroshi NAGURA

In recent years, the adoption of the muddy soil pressure shield method has been increasing for large diameter, large depth and high water pressure. In the muddy soil pressure shield method, rheological foams, which are additive materials that promote plastic fluidization in the chamber of excavated soil, are becoming mainstream. Therefore, an experiment was conducted targeting the requirements of the construction work. The purpose of the experiment is to obtain knowledge about the application of rheological foams under high water pressure. In the experiment, we focused on the basic performance of rheological foams, the plastic fluidization and its sustainability when kneaded with excavated soil, and the reforming condition when an anti-blowing agent was added. As a result, it was found that the rheological foams have the same performance and durability under high pressure.