

気泡シールド工法

－技術資料－

令和 2 年 8 月

シールド工法技術協会

はじめに

シールド工法技術協会では取り扱っている工法はいずれも多くの実績があり、信頼できる最先端技術及び工法であります。現在の社会的要求である地上や地下施設への影響が少なく地球環境にもやさしい技術として、さまざまな地盤やトンネル形状にも対応できるものであります。

これらの工法による工事におきましては、当該工事の目的や構造物の内容、施工期間や施工条件、施工環境などを十分に考慮した上で、設計および施工方法を検討しなければなりません。

前回の改定では、「下水道用設計積算要領 管路施設（シールド工法）編（社会法人）日本下水道協会（2010 年版）」の改訂を受けて、その改訂内容との整合性を図るとともに、最新技術の知見を反映して各工法の計画、設計および施工に携わる方々が分かりやすくまた活用しやすい内容としました。

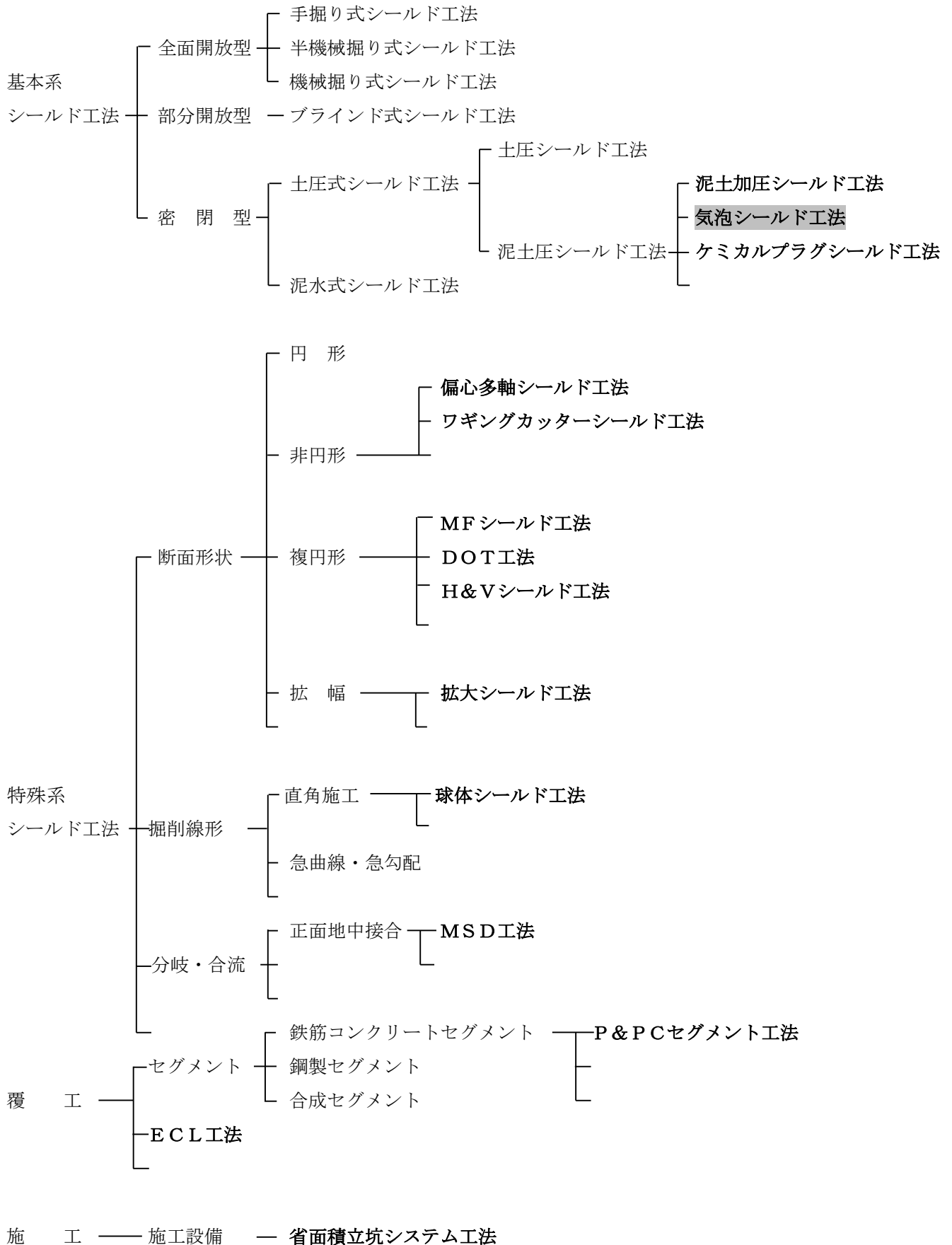
今回の改訂では、協会登録工法の位置付けを更新致しました。（「省面積立坑システム工法」追加）

皆様がシールド工法技術協会に登録しているシールド工法の採用にあたり、適正かつ合理的な計画、設計および施工を行うための資料として本書を大いに活用していただければ幸いに存じます。

令和2年8月

〔気泡シールド工法の位置付け〕

シールド工法における気泡シールド工法の位置づけを下記に示す。



目 次

1. 概要	1
1. 1 工法の概要	1
1. 2 工法の特徴	1
(1) 切羽の安定	2
(2) 流動性	2
(3) 止水性	2
(4) 付着防止	2
(5) 消泡性	3
1. 3 工法の適用範囲	3
2. 使用材料	4
2. 1 材料の性状	4
(1) 特殊起泡材	4
(2) ゲル化材	5
(3) 特殊消泡材	5
2. 2 材料の安全性	7
2. 3 材料の使用量	9
(1) 特殊起泡材およびゲル化材	9
(2) 特殊消泡材	12
(3) 使用量の算定例	12
3. 施工設備	21
3. 1 起泡材作成設備	22
3. 2 気泡注入設備	22
3. 3 消泡設備	22
3. 4 気泡制御装置	23
3. 5 標準気泡設備一覧表	23

1. 概要

土圧式シールド工法では、チャンバ内において掘削土の付着や締固めに伴うアーチ作用により、土質によっては、掘進不能におちいることがある。また、地下水圧の高い砂質地盤の場合には、スクリーコンベアからの噴発が発生することがある。これらの対策として、切羽あるいはチャンバ内に加泥材を注入する泥土圧シールドが多用されるようになった。

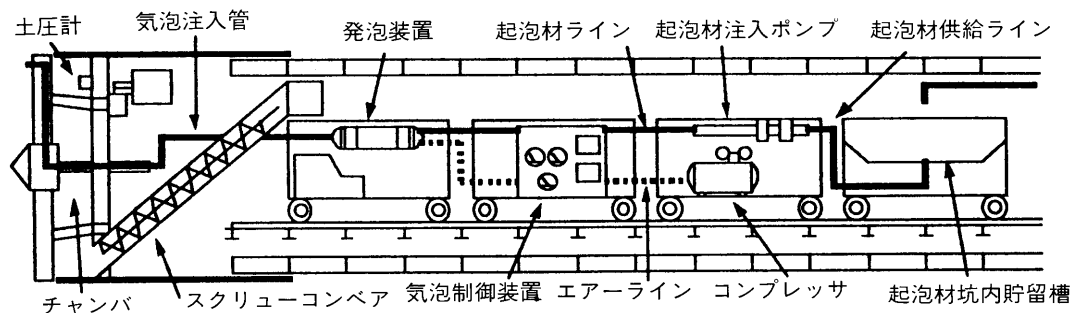
気泡シールド工法は、加泥材として気泡を使用しており、砂礫層から粘性土層までの広い範囲の地層に適用できる新しいタイプの土圧式シールド工法である。

1. 1 工法の概要

気泡シールド工法は、切羽あるいはチャンバ内に、特殊起泡材により作られた気泡を注入しながら掘進する工法で、注入される微細なシェービングクリーム状の気泡が、掘削土の流動性と止水性を向上させ、かつ、チャンバ内での掘削土の付着を防止できるため、切羽の安定を保持しつつ、スムーズな掘進が可能になる。

しかも、排出土中の気泡は、条件によっては自然消泡するが、自然消泡しない場合は特殊消泡材の散布により消泡されるため、排出土が気泡注入前の状態に戻り、後処理が容易である。

図－1. 1 は、気泡シールド工法の施工概要図である。



図－1. 1 気泡シールド工法概要図

1. 2 工法の特徴

工法の特徴は以下のとおりである。

- ① 砂礫地盤の場合は気泡のベアリング効果により、掘削土の流動性が高まるので、チャンバ内の閉塞がなく、カットおよびスクリーコンベアトルクも軽減されるため、順調な掘削ができる。
- ② 硬質粘土地盤の場合は、掘削土のシールド面板、チャンバ内面への付着が防止されるため、順調な掘削ができる。
- ③ 土粒子間隙に存在する地下水が微細な気泡と置換されることにより掘削土の止水性が向上し、地下水位の高い砂質地盤の掘削が容易となり、スクリーコンベアからの噴発を防止できる。
- ④ 気泡は圧縮性があるため、切羽圧の変動が少なく、切羽を乱さないスムーズな掘進が可能である。
- ⑤ 排出土が地山の土砂に近い性状に復元するため、発生土の処理・処分が容易である。
- ⑥ 粘土・ベントナイトを使用していないため、坑内外を汚さず、作業環境が良い。
- ⑦ 注入設備・作成設備が小規模ですむ。

気泡の効果を以下に記述する。

(1) 切羽の安定

土圧式シールドは、チャンバ内に切削土砂を充満させることにより、切羽の崩壊を防止することを特徴とした工法であるが、土質によってはチャンバ内に土砂を充満させると、土砂の付着やアーチング現象により、カットトルクが異常に上昇したり、排土不能になったりする現象がみられる。また、地下水位の高い場合には、スクリーコンベアでの止水効果や排土口におけるゲート等の対策のみでは不十分で、土砂が地下水とともに噴出する場合がある。

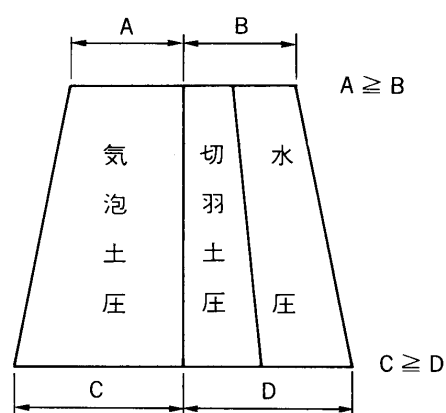
気泡シールド工法では、チャンバ内の掘削土は気泡混入により適度な流動性と止水性を持つ気泡土に変換され、これがチャンバ内とスクリーコンベア内に充満する。切羽の安定機構は、シールドの推進力等によって、チャンバ内に発生する気泡土圧を切羽全体に作用させて地山の土・水圧に対抗させるものである。

切羽の安定を保持するためには、

$$\text{気泡土圧} \geq \text{切羽土圧} + \text{水圧}$$

となるように、シールドジャッキ速度、スクリーコンベア回転数、気泡混合率等を調節する。

なお、気泡は圧縮性を有しているため、シールドの制御上発生するチャンバ内土圧の変動を、その体積変化により吸収することができ、安定した土圧管理が可能となり、切羽の安定に寄与している。



図－ 1. 2 切羽安定機構

(2) 流動性

気泡が掘削土中に浸透し、土粒子間に吸着すると、ベアリング効果が生じ、土の内部摩擦角が低減するため、土の流動性が高まる。このため、掘削土のチャンバ内充填が確実に行われ、かつ閉塞もなくなり、同時にカットトルク等の機械負荷が低減される。

(3) 止水性

砂・砂礫層は、間隙が大きいので、透水性が高い。しかし、気泡シールド工法では、注入された気泡が間隙内の自由水を排除し、間隙を気泡が満たすので、気泡土の透水性は非常に低くなり、スクリーコンベア排土口での止水性は非常に良好となる。

(4) 付着防止

含水比が小さく、粘着力の大きい粘性土を掘削する場合、掘削土がシールドの面板、チャンバ内に付着し、閉塞現象を起こすことが多い。気泡シールド工法では、注入された気泡が土の周面および面板、チャンバ内面に吸着してベアリング効果を発揮するため、付着防止が図れる。なお、この効果によっても、カットトルク等の機械負荷が軽減される。

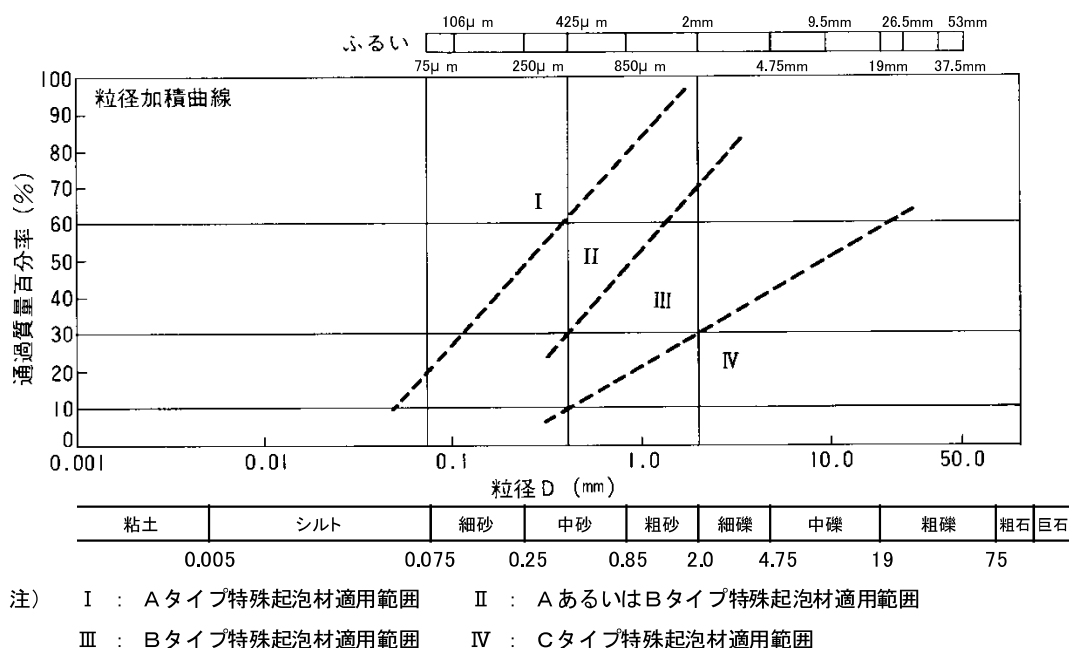
(5) 消泡性

排出される気泡土中の気泡は、大気に触れた部分が時間と共に消泡するが、起泡添加剤を加えた特殊起泡材（B・Cタイプ）による気泡は、自然消泡しにくい。しかし、この場合にも特殊消泡材を散布混合することにより、容易に消泡が可能である。消泡された気泡土は原地盤の性状に近い状態に戻り、砂質土の場合には間隙水の排除効果があるため原地盤以上に良好な性状になる例も多い。

1. 3 工法の適用範囲

気泡シールド工法は、①土砂の流動性と止水性を高める、②粘性土の付着を防止する、という大きな特徴を有しており、その適用地盤は砂礫層から粘土層まで幅広い。

なお、施工にあたっては、土質別に適切な特殊起泡材を選定する。特殊起泡材には、特殊起泡剤の水溶液であるAタイプ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、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タイプがあり、図－1. 3に対象土の粒度分布と使用する特殊起泡材の標準的な関係を示す。



図－1. 3 土質と特殊起泡材の選定基準

2. 使用材料

主な使用材料は、特殊起泡材、ゲル化材と特殊消泡材である。

以下、特殊起泡材、ゲル化材、特殊消泡材は、調合されたものの材料の名称であり、特殊起泡剤、ゲル化剤、特殊消泡剤は、それを構成する原液の名称である。

2. 1 材料の性状

(1) 特殊起泡材

「特殊起泡材」とは、気泡を作るための材料で、特殊起泡剤あるいは特殊起泡剤と起泡添加剤の水溶液である。

①特殊起泡剤（OK-1）

特殊起泡剤は、気泡土作成用として各種界面活性剤を特別に調整したもので、発泡性に優れ、できた気泡は緻密で安定しており、また安全な材料である。

表-2. 1 特殊起泡剤の一般性状

性 状 \ 名 称	OK-1
pH (3%水溶液)	7.5±0.5
比 重	1.03±0.01
粘 度(mPa・s, 20℃)	5 ± 2

②起泡添加剤（OK-2、OK-3）

起泡添加剤は、気泡を安定強化する材料であり、気泡の安定強化の程度により2種類ある。OK-2は、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であり、OK-3はゲル化剤により気泡の安定強化をさらに高めることができるマメ科植物を主原料とする天然植物性有機ポリマーである。その水溶液は潤滑性、保水性に優れている。

表-2. 2 起泡添加剤の一般性状

性 状 \ 名 称	OK-2
pH (1.2%水溶液)	7.5±0.5
溶 解 性	水に溶解

表-2. 3 起泡添加剤の一般性状

性 状 \ 名 称	OK-3
pH (0.6%水溶液)	7.0±1.0
溶 解 性	水に溶解

③変質防止剤（OK-S）

変質防止剤は、OK-3を添加した特殊起泡材の長期保存を目的とした変質防止に使用する有機窒素化合物であり、重金属やP R T R指定化学物質を含有しない安全な材料である。

表－２．４ 変質防止剤の一般性状

性 状 \ 名 称	OK-S
pH (1.0%水溶液)	9.8±1.0
溶 解 性	水に溶解

(2) ゲル化材

「ゲル化材」とは、ゲル化剤（OK-G）の水溶液であり、特殊起泡剤と起泡添加剤（OK-3）により作られた気泡をさらに安定強化する材料で、起泡添加剤（OK-3）と反応して増粘させる水溶液である。

表－２．５ ゲル化剤の一般性状

性 状 \ 名 称	OK-G
pH	8.5±0.5
溶 解 性	水に溶解

(3) 特殊消泡材

「特殊消泡材」とは、気泡土中に含まれる気泡を極めて短時間に消泡し、元の地山の土に近い状態に戻すための材料で、特殊消泡剤あるいは特殊消泡剤と消泡添加剤の水溶液である。

①特殊消泡剤（OK-01）

特殊消泡剤は、気泡土中の気泡を速やかに消泡する安全な材料で、各種界面活性剤などの混合物である。

表－２．６ 特殊消泡剤の一般性状

性 状 \ 名 称	OK-01
pH (10%水溶液)	7.0±0.5
比 重	0.90±0.05
粘 度(mPa・s, 20℃)	330

②消泡添加剤（OK-02、OK-03）

消泡添加剤は、特殊消泡剤の消泡効果を高めるために添加する材料であり、酵素を高力価で含有した食品加工などに利用されているセルロース加水分解酵素である。起泡添加剤に応じて効果的な酵素が異なるため、消泡添加剤も２種類となる。

表－２． ７ 消泡添加剤の一般性状

性 状 \ 名 称	OK-02
pH (0.2%水溶液)	6.2±0.4
溶 解 性	水に容易に溶解する

表－２． ８ 消泡添加剤の一般性状

性 状 \ 名 称	OK-03
pH (0.2%水溶液)	6.0±0.5
溶 解 性	水に容易に溶解する

2. 2 材料の安全性

特殊起泡材・特殊消泡材の分析結果を表－2. 9に示すが、水質汚濁防止法に規定されている有害物質は検出されていない。

また、pH、BOD、COD、ノルマルヘキサン抽出物質等についても、現場調査結果（表－2. 10、表－2. 11参照）、室内試験結果（表－2. 12参照）によりその安全性が確認されており、特殊起泡材・特殊消泡材の使用による環境への影響はなく、無公害である。

表－2. 9 濃度計量試験結果表

試料 分析項目	特殊起泡材 A, B, Cタイプ	特殊消泡材	規 制 値
カドミウム (mg/ℓ)	検出されず	検出されず	0.1 mg/ℓ
シ ア ン (mg/ℓ)	検出されず	検出されず	1 mg/ℓ
有 機 リ ン (mg/ℓ)	検出されず	検出されず	1 mg/ℓ
鉛 (mg/ℓ)	検出されず	検出されず	1 mg/ℓ
クロム(6価)(mg/ℓ)	検出されず	検出されず	0.5 mg/ℓ
ひ 素 (mg/ℓ)	検出されず	検出されず	0.5 mg/ℓ
総 水 銀 (mg/ℓ)	検出されず	検出されず	0.005 mg/ℓ
アルキル水銀(mg/ℓ)	検出されず	検出されず	検出されないこと
P C B (mg/ℓ)	検出されず	検出されず	0.003 mg/ℓ

表－２．１０ 現場水質調査結果表（Ａタイプ）

		項 目	記 号	単位	気泡注入時	無注入時
坑内排水分析		水素イオン濃度	p H		7.3	8.0
		化学的酸素要求量	C O D	mg/ l	20	28
近傍河川調査	上流	水素イオン濃度	p H		6.3	7.1
		化学的酸素要求量	C O D	mg/ l	2	7
	下流	水素イオン濃度	p H		7.1	7.1
		化学的酸素要求量	C O D	mg/ l	11	13

表－２．１１ 現場水質調査結果表（Ｂタイプ）

		項 目	記 号	単位	特殊起泡材使用時	特殊起泡材使用時 消泡剤
坑内排水分析		水素イオン濃度	p H		6.8	8.3
		ノルマルヘキサン抽出物質	（油分）	mg/ l	1.0 以下	1.0 以下
		ノルマルヘキサン抽出物質	（動植物 油脂類）	mg/ l	1.0 以下	1.0 以下
		ノルマルヘキサン抽出物質	（鉱油類）	mg/ l	1.0 以下	1.0 以下
周辺井戸調査		水素イオン濃度	p H		6.3～6.7 （周辺４ポイントの井戸調査）	

表－２．１２ 室内溶出試験調査結果表

タイプ	項 目	記 号	単位	無注入時	30%気泡 注入時	60%気泡 注入時	気泡・消泡剤 注入時
A	化学的酸素 要求量	C O D	mg/ l	11.6	14.3	16.9	16.2
	生物化学的 酸素要求量	B O D	mg/ l	10.6	16.5	19.4	17.5
B	化学的酸素 要求量	C O D	mg/ l	6.0	10.0	12.1	8.6
	生物化学的 酸素要求量	B O D	mg/ l	5.9	9.8	16.3	8.6
C	化学的酸素 要求量	C O D	mg/ l	2.3	—	15.1	25.3
	生物化学的 酸素要求量	B O D	mg/ l	1.6	—	4.8	8.9

2. 3 材料の使用量

(1) 特殊起泡材およびゲル化材

表－2. 13 特殊起泡材 1m³当り標準配合

1) 標準配合

表－2. 13、14に、標準配合およびその性状を示す。

		単位	Aタイプ	Bタイプ	B・Cタイプ
配合	特殊起泡剤 (OK-1)	ℓ	30	10	10
	起泡添加剤 (OK-2)	kg	—	12	—
	起泡添加剤 (OK-3)	kg	—	—	6
	変質防止剤 (OK-S)	ℓ	—	—	2
	水	ℓ	970	978	985
性状	pH	—	7.5	7.3	7.3
	比 重	—	1.00	1.00	1.00
	粘 性 (20℃)	mPa・s	2.7	300	300

Bタイプの特殊起泡剤 (OK-1) は礫の大小、地下水流の有無、地下水压等によっては、特殊起泡材 1 m³ 当り、20 ℓ 迄増量することがある。

また起泡添加剤 (OK-2、OK-3) も、水温や水質により、状況に応じて増減することがある。

表－2. 14 ゲル化材 1m³当り標準配合

		単位	Cタイプ
配合	ゲル化剤 (OK-G)	ℓ	100
	水	ℓ	900
性状	pH		8.2
	比 重		1.00
	粘 性 (20℃)	mPa・s	1.0

2) 気泡混合率

AタイプおよびBタイプの気泡混合率Q (気泡注入体積／掘削土砂体積) は、実験結果とこれまでの実績を総合的に勘案して、次式により算定する。ここでいう気泡混合率は、チャンバ内での気泡量である。

ただし、気泡混合率は20%を最低限度とする。

$$Q(\%) = \frac{\alpha}{2} \{ (60 - 4 \times X^{0.8}) + (80 - 3.3 \times Y^{0.8}) + (90 - 2.7 \times Z^{0.8}) \} \cdots \text{式 2-1}$$

Q<20%の場合はQ=20%とする。

ここで X : 0.075 mm 粒径通過質量百分率、 $4 \times X^{0.8} > 60$ の場合は 60 とする。

Y : 0.425 mm 粒径通過質量百分率、 $3.3 \times Y^{0.8} > 80$ の場合は 80 とする。

Z : 2.0 mm 粒径通過質量百分率、 $2.7 \times Z^{0.8} > 90$ の場合は 90 とする。

α : 均等係数U_c による係数

$$U_c < 4 \text{ のとき} \quad \alpha = 1.6$$

$$4 \leq U_c < 15 \text{ のとき} \quad \alpha = 1.2$$

$$15 \leq U_c \text{ のとき} \quad \alpha = 1.0$$

Cタイプは細粒分が少なく透水係数の大きな土質に適用するため、式－2. 1とは異なる式により気泡混合率を算定する。

ただし、気泡混合率は20%を最低限度とする。

・ N値<15 の場合

$$Q(\%) = \alpha \{0.37(100 - X) + 0.33(X - Y) + 0.075Y\} \quad \cdots \text{式 2-2}$$

・ N値 ≥ 15 の場合

$$Q(\%) = \alpha \{0.37(100 - X) + 0.33(X - Y) + 0.15Y\} \quad \cdots \text{式 2-3}$$

ここで X : 2.0 mm 粒径通過質量百分率

Y : 0.075mm 粒径通過質量百分率

α : 透水係数Kによる係数 $K=10^{-0} \sim 10^{-2}$ のとき $\alpha = 1.5$

$K=10^{-2} \sim 10^{-3}$ のとき $\alpha = 1.3$

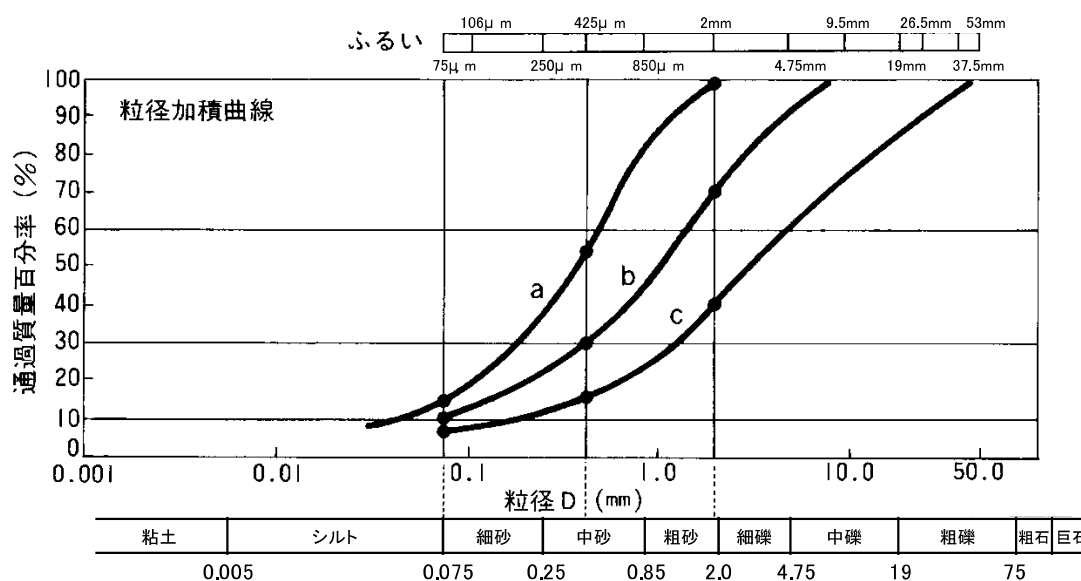
付着防止を目的とする場合は気泡混合率 30%を標準とするが、土質や含水状態により、この標準値を超える場合がある。

例えば、図－2. 1 の粒度におけるAタイプおよびBタイプの気泡混合率は式－2. 1 より、Cタイプの気泡混合率は式－2. 3より表－2. 1 5に示す値となる。

表－2. 1 5 気泡混合率 (例)

土質	気泡混合率 (A, Bタイプ)	気泡混合率 (Cタイプ)
a	20% *1)	—
b	37%	—
c	65%	44%

*1) 式-2.1 による計算結果は 15%



図－2. 1 粒径加積曲線

3) ゲル化材の混合率

土質の変化に合わせて気泡の強度を調節できるため、対象土質の透水係数によりゲル化材の混合率を算定する。

- ・ 透水係数 $K=10^{-0} \sim 10^{-2}$ の場合

気泡（発泡倍率 4 倍）4,000 ℓ に対してゲル化材を 4 %混合する。

特殊起泡材 1,000 ℓ : ゲル化材 160 ℓ

- ・ 透水係数 $K=10^{-2} \sim 10^{-3}$ の場合

気泡（発泡倍率 6 倍）6,000 ℓ に対してゲル化材を 3 %混合する。

特殊起泡材 1,000 ℓ : ゲル化材 180 ℓ

4) 発泡倍率

本工法におけるチャンバ内での発泡倍率（気泡体積／起泡材体積）の標準を表－2. 16に示す。

表－2. 16 標準発泡倍率

(倍率)

特殊起泡材のタイプ	Aタイプ	Bタイプ	Cタイプ
発 泡 倍 率	8	6	6 または 4

注) 対象土質の透水係数によりCタイプの発泡倍率は6倍または4倍になる

(2) 特殊消泡材

1) 標準配合

表－２．１７に標準配合およびその性状を示す。

表－２．１７ 特殊消泡材 1m³当りの標準配合

配合	特殊消泡剤(OK－01)	ℓ	100	100
	消泡添加剤(OK－02)	kg	2	—
	消泡添加剤(OK－03)	ℓ	—	2
	水	ℓ	898	898
性状	pH		6.4	6.7
	比 重		0.99	0.99
	粘 性 (20℃)	mPa・s	2.5	2.5

注) 消泡添加剤を使用しない場合もある

2) 使用率

特殊消泡材を使用する場合には、特殊起泡材の10%使用を原則とする。

ただし、土捨て場の条件によっては使用しないことがある。

(3) 使用量の算定例

1) Aタイプ使用例

(a) 算定条件

①切羽土質

切羽土質の粒度試験結果は、

表－２．１８とする(図－２．１、a土質)。

②管理土圧

本例では、0.08MPaとする。

(b) 算定方法

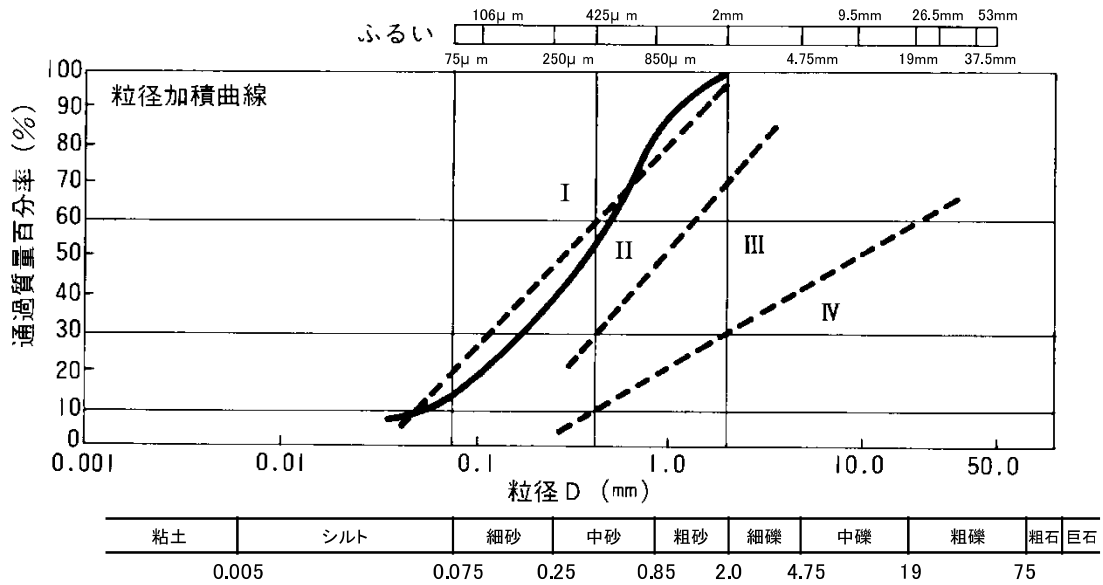
①特殊起泡材の選定

表－２．１８より、この切羽土質の
粒度加積曲線は図－２．２の実線に示
すものとなり、適用起泡材はAあるい
はBタイプとなる。

ここでは、地下水の影響が少ないも
のとして、Aタイプを選定する。

表－２．１８ 粒度試験結果(1)

	粒径 mm	質量百分率%
	53.0	
ふる い 分 け	37.5	
	26.5	
	19.0	
	9.5	
	4.75	
	2.00	100.0
	0.85	83.1
	0.425	53.9
	0.25	39.6
	0.106	20.4
比 浮 重 ひ よ う	0.075	15.1
	0.032	8.9
60 % 粒 径 mm		0.47
10 % 粒 径 mm		0.04
均 等 係 数 U _c		11.8



図－２．２ 粒径加積曲線(1)

②気泡混合率の算定

算定式－２．１から気泡混合率を求める。

$$Q(\%) = \frac{\alpha}{2} \{ (60 - 4 \times X^{0.8}) + (80 - 3.3 \times Y^{0.8}) + (90 - 2.7 \times Z^{0.8}) \}$$

ここで、 $\alpha = 1.2$ $X = 15.1$ $Y = 53.9$ $Z = 100.0$

$$\begin{aligned} \text{よって、} Q(\%) &= \frac{1.2}{2} (25.0 + 0 + 0) \\ &= 15(\%) \end{aligned}$$

気泡混合率は20%を最低限度とすることから、

$$Q(\%) = 20(\%)$$

とする。

したがって、チャンバ内では地山1 m³当り 200 ℓの気泡が必要となる。

③特殊起泡材、材料使用量の算定

表－２．１６より発泡倍率を 8 倍、算定条件よりチャンバ内管理土圧を 0.08 MPa (0.8 kgf/cm²) として、特殊起泡材の地山 1 m³当りの使用量を求める。

$$\text{特殊起泡材 (Aタイプ)} \quad \frac{1}{8} \times 200(\ell) = 25(\ell)$$

$$\text{エ} \quad \text{ア} \quad \frac{7}{8} \times \frac{1+0.8}{1} \times 200(\ell) = 315(\text{N}\ell)$$

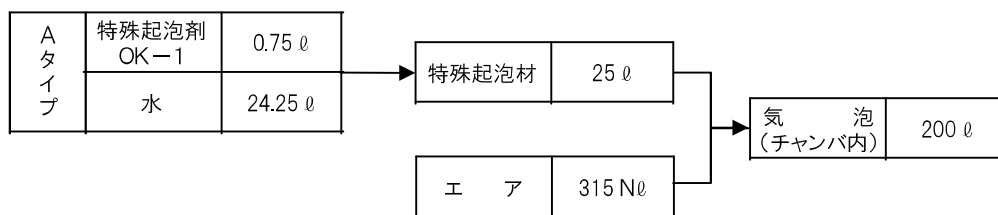
また、表－２．１３の標準配合より各材料の地山 1 m³当りの使用量を求める。

$$\text{特殊起泡剤 (OK-1)} \quad 0.03 \times 25(\ell) = 0.75(\ell)$$

$$\text{水} \quad 0.97 \times 25(\ell) = 24.25(\ell)$$

(c) 算定結果

図－２．３に以上の計算結果をまとめたものを示す。



図－２．３ 気泡作成例(1)

2) Bタイプ使用例

(a) 算定条件

①切羽土質

切羽土質の粒度試験結果は、
表－２．１９とする（図－２．１、c 土質）。

②管理土圧

本例では、0.12MPa とする。

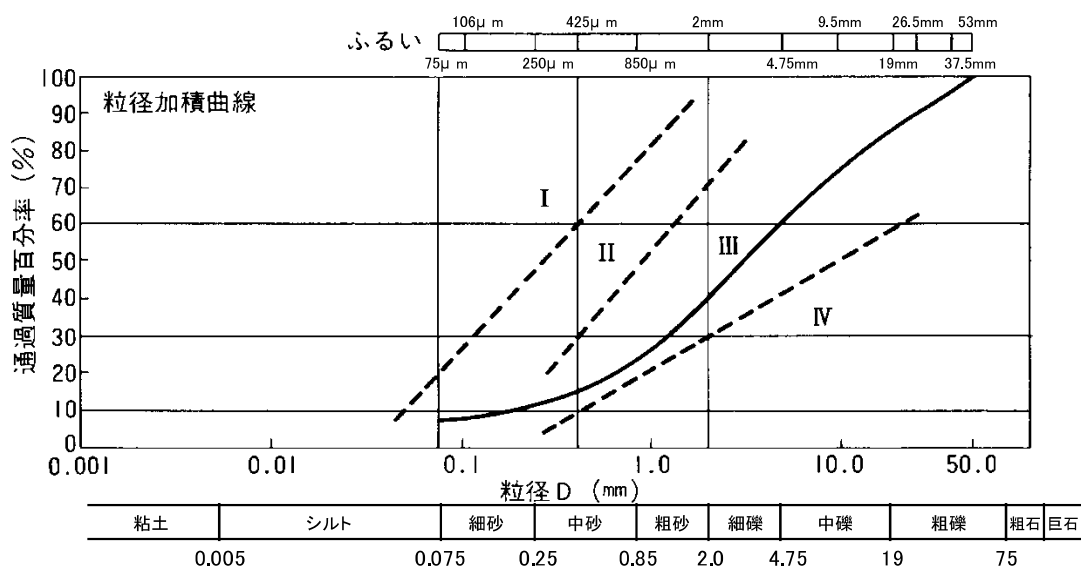
(b) 算定方法

①特殊起泡材の選定

表－２．１９により、この切羽土質の
粒径加積曲線は図－２．４に示すものと
なり、適用起泡材はBタイプとなる。

表－２．１９ 粒度試験結果(2)

ふるい分け	粒径 mm	質量百分率%
	53.0	100.0
	37.5	97.3
	26.5	90.0
	19.0	86.1
	9.5	74.7
	4.75	60.4
	2.00	40.2
	0.85	23.8
	0.425	14.9
	0.25	11.1
比重 浮ひよう	0.106	8.7
	0.075	7.2
60 % 粒径 mm		4.7
10 % 粒径 mm		0.19
均等係数 U_c		24.7



図－２．４ 粒径加積曲線(2)

②気泡混合率の算定

算定式 2-1 から気泡混合率を求める。

$$Q(\%) = \frac{\alpha}{2} \{ (60 - 4 \times X^{0.8}) + (80 - 3.3 \times Y^{0.8}) + (90 - 2.7 \times Z^{0.8}) \}$$

ここで、 $\alpha = 1.0$ $X = 7.2$ $Y = 14.9$ $Z = 40.2$

$$\begin{aligned} \text{よって、} Q(\%) &= \frac{1.0}{2} (40.6 + 51.4 + 38.2) \\ &= 65(\%) \end{aligned}$$

したがって、チャンバ内では地山 1 m³ 当り 650 ℓ の気泡が必要となる。

③特殊起泡材、材料使用量の算定

表－２． １ 6 より発泡倍率を 6 倍、算定条件よりチャンバ内管理土圧を 0.12MPa (1.2kgf/cm²) とし、特殊起泡材の地山 1 m³ 当りの使用量を求める。

$$\text{特殊起泡材 (B タイプ)} \quad \frac{1}{6} \times 650(\ell) = 108.33(\ell)$$

$$\text{エ} \quad \text{ア} \quad \frac{5}{6} \times \frac{1 + 1.2}{1} \times 650(\ell) = 1191.7 \text{ (N } \ell)$$

また、表－２． １ 3 の標準配合より各材料の地山 1 m³ 当りの使用量を求める。

・ 起泡添加剤として OK-2 を使用した場合

$$\text{特殊起泡剤 (OK-1)} \quad 0.01 \times 108.33(\ell) = 1.08(\ell)$$

$$\text{起泡添加剤 (OK-2)} \quad 0.012 \times 108.33(\ell) = 1.30(\text{kg})$$

$$\text{水} \quad 0.978 \times 108.33(\ell) = 105.95(\ell)$$

・ 起泡添加剤として OK-3 を使用した場合

$$\text{特殊起泡剤 (OK-1)} \quad 0.01 \times 108.33(\ell) = 1.08(\ell)$$

$$\text{起泡添加剤 (OK-3)} \quad 0.006 \times 108.33(\ell) = 0.65(\text{kg})$$

$$\text{水} \quad 0.985 \times 108.33(\ell) = 106.71(\ell)$$

④特殊消泡材、材料使用量の算定

2. 3、(2)、2)より、特殊消泡材の地山1 m³当りの使用量を求める。

$$\text{特殊消泡材} \quad 0.1 \times 108.33(\ell) = 10.83(\ell)$$

また、表-2. 17の標準配合より各材料の地山1 m³当りの使用量を求める。

・起泡添加剤としてOK-2を使用した場合

$$\text{特殊消泡剤 (OK-01)} \quad 0.1 \times 10.83(\ell) = 1.08(\ell)$$

$$\text{消泡添加剤 (OK-02)} \quad 0.002 \times 10.83(\ell) = 0.0217(\text{kg})$$

$$\text{水} \quad 0.898 \times 10.83(\ell) = 9.73(\ell)$$

・起泡添加剤としてOK-3を使用した場合

$$\text{特殊消泡剤 (OK-01)} \quad 0.1 \times 10.83(\ell) = 1.08(\ell)$$

$$\text{消泡添加剤 (OK-03)} \quad 0.002 \times 10.83(\ell) = 0.0217(\text{kg})$$

$$\text{水} \quad 0.898 \times 10.83(\ell) = 9.73(\ell)$$

(c)算定結果

図-2. 5、6に以上の計算結果をまとめたものを示す。

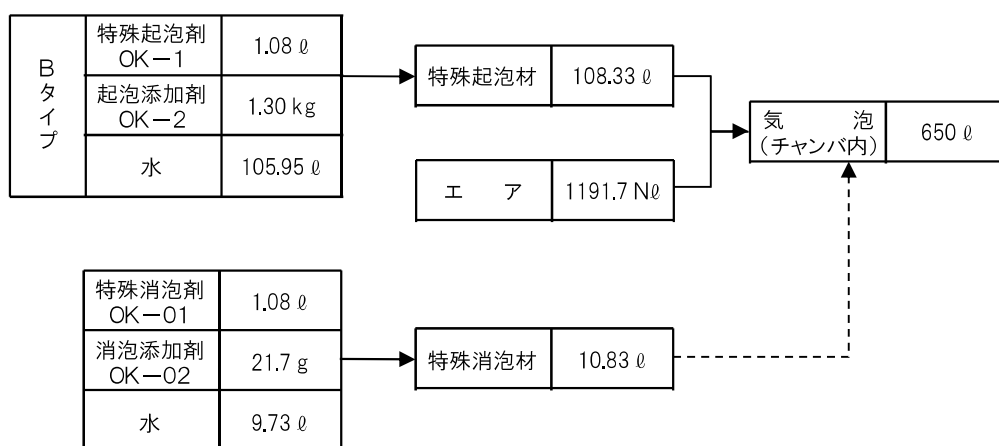


図-2. 5 気泡作成例(2)

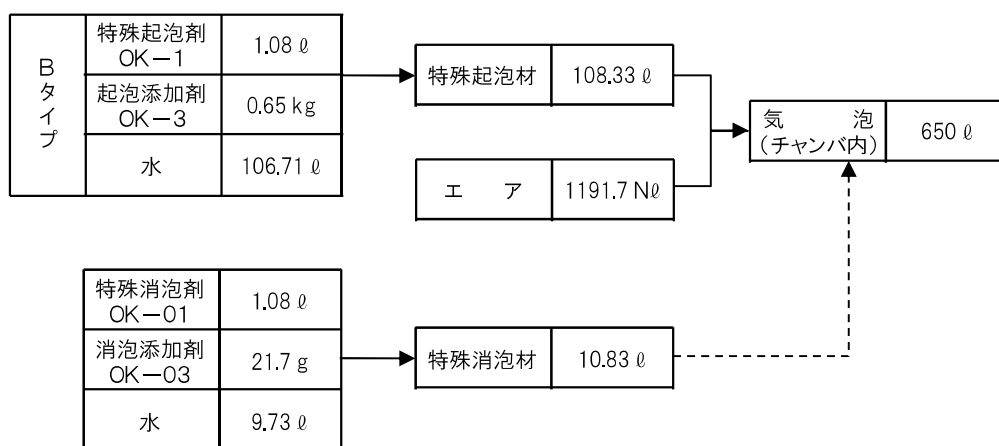


図-2. 6 気泡作成例(3)

3) Cタイプ使用例

(a) 算定条件

①切羽土質

切羽土質の粒度試験結果は、表－2. 1 9とし、透水係数は 10^{-3}cm/s とする(図－2. 1、c土質)。

②管理土圧

本例では、 0.12MPa とする。

(b) 算定方法

①気泡混合率の算定

算定式2-3から気泡混合率を求める。

$$Q(\%) = \alpha \{0.37(100 - X) + 0.33(X - Y) + 0.15Y\}$$

ここで、 $\alpha = 1.3$ $X = 40.2$ $Y = 7.2$

$$\begin{aligned} \text{よって、} Q(\%) &= 1.3 (22.1 + 10.9 + 1.1) \\ &= 44(\%) \end{aligned}$$

したがって、チャンバ内では地山 1m^3 当り 440ℓ の気泡が必要となる。

②特殊起泡材、材料使用量の算定

表－2. 1 6より発泡倍率を6倍、算定条件よりチャンバ内管理土圧を 0.12MPa (1.2kgf/cm^2)として、特殊起泡材の地山 1m^3 当りの使用量を求める。

特殊起泡材 (Cタイプ)	$\frac{1}{6} \times 440(\ell)$	$= 73.33(\ell)$
エ ア	$\frac{5}{6} \times \frac{1 + 1.2}{1} \times 440(\ell)$	$= 806.7 (\text{N}\ell)$

また、表－2. 1 3の標準配合より各材料の地山 1m^3 当りの使用量を求める。

特殊起泡剤 (OK-1)	$0.01 \times 73.33(\ell) = 0.73(\ell)$
起泡添加剤 (OK-3)	$0.006 \times 73.33(\ell) = 0.44(\text{kg})$
水	$0.985 \times 73.33(\ell) = 72.23(\ell)$

③ゲル化材、材料使用量の算定

2. 3、(2)、3より、地山 1m^3 当りの使用量を求める。

$$\text{ゲル化材} \quad 0.03 \times 440.0(\ell) = 13.2(\ell)$$

また、表－2. 1 4の標準配合より各材料の地山 1m^3 当りの使用量を求める。

ゲル化剤 (OK-G)	$0.10 \times 13.2(\ell) = 1.32(\ell)$
水	$0.90 \times 13.2(\ell) = 11.88(\ell)$

④特殊消泡材、材料使用量の算定

2. 3、(2)、2より、特殊消泡材の地山1 m³当りの使用量を求める。

$$\text{特殊消泡材} \quad 0.1 \times 73.33(\ell) = 7.33(\ell)$$

また、表-2. 17の標準配合より各材料の地山1 m³当りの使用量を求める。

$$\text{特殊消泡剤 (OK-01)} \quad 0.1 \times 7.33(\ell) = 0.73(\ell)$$

$$\text{消泡添加剤 (OK-03)} \quad 0.002 \times 7.33(\ell) = 0.0147(\text{kg})$$

$$\text{水} \quad 0.898 \times 7.33(\ell) = 6.58(\ell)$$

(c)算定結果

図-2. 7に以上の計算結果をまとめたものを示す。

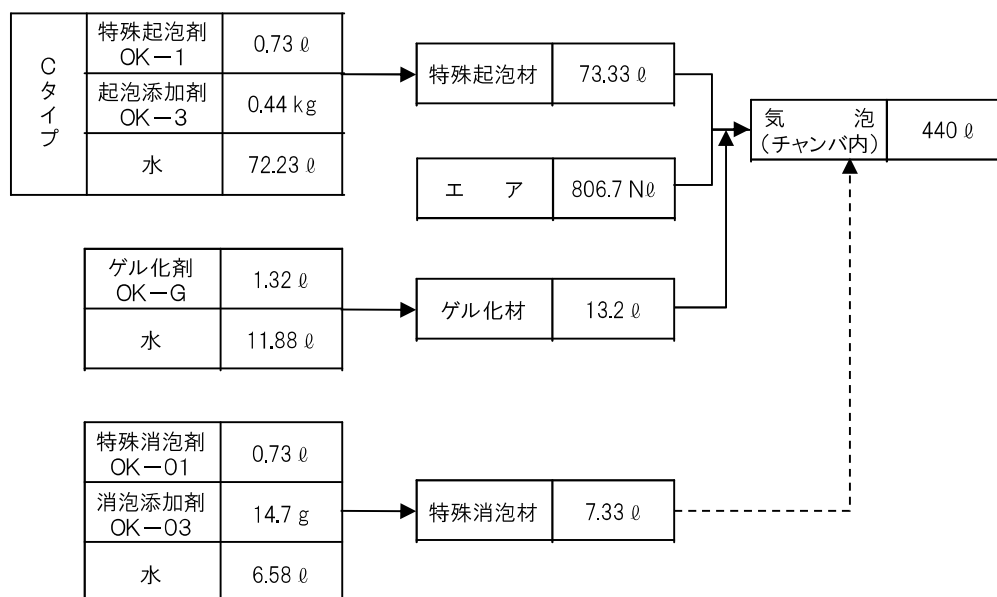


図-2. 7 気泡作成例(4)

3) Aタイプ使用例 (付着防止用)

(a)算定条件

①切羽土質

切羽土質は、付着性の高い粘性土で、
その粒度試験結果は表-2. 20とする。

②管理土圧

本例では、0.1MPaとする。

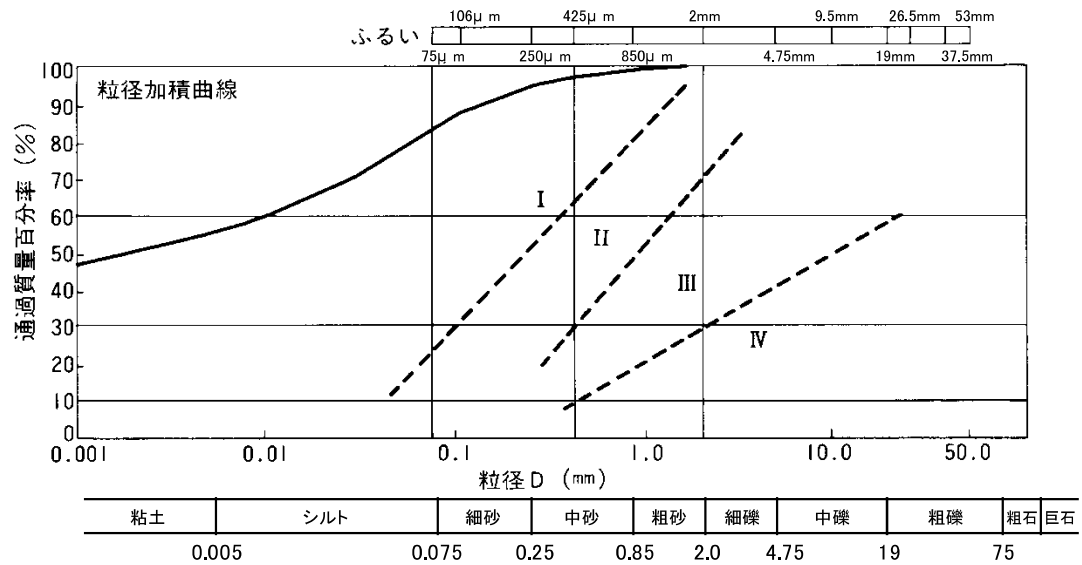
表-2. 20 粒度試験結果(3)

ふるい分け	粒 径 mm	質量百分率%
	2.00	100.0
	0.85	99.1
	0.425	97.3
	0.25	96.4
	0.106	87.4
	0.075	83.0
比 浮 重 ひ よ う	0.03	70.7
	0.01	59.8
	0.005	55.5
	0.001	47.3
60 % 粒 径 mm		0.010
10 % 粒 径 mm		—
均 等 係 数 U _c		—

(b) 算定方法

① 特殊起泡材の選定

表－２．２０より、この切羽土質の粒径加積曲線は図－２．８に示すものとなり、適用起
泡材は付着防止用としてＡタイプとなる。



図－２．８ 粒径加積曲線 (3)

② 気泡混合率の算定

本例に示すような土質では、付着防止を目的として気泡注入を行うため、２．３、(１)、
２)より、気泡混合率は３０％として算定する。

したがって、チャンバ内では地山１ｍ³当り ３００ℓの気泡が必要となる。

③ 特殊起泡材、材料使用量の算定

表－２．１６より発泡倍率を８倍、算定条件よりチャンバ内管理土圧を ０．１ＭＰa
(１．０kgf/cm²) として、特殊起泡材の地山１ｍ³当りの使用量を求める。

$$\text{特殊起泡材 (Aタイプ)} \quad \frac{1}{8} \times 300(\ell) = 37.5(\ell)$$

$$\text{エ} \quad \text{ア} \quad \frac{7}{8} \times \frac{1+1.0}{1} \times 300(\ell) = 525(\text{N}\ell)$$

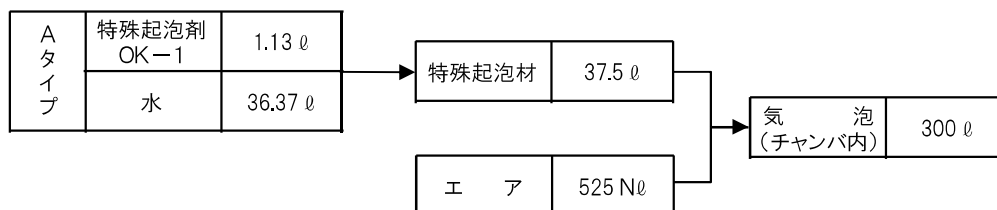
また、表－２．１３の標準配合より各材料の地山１ｍ³当りの使用量を求める。

$$\text{特殊起泡剤 (OK-1)} \quad 0.03 \times 37.5(\ell) = 1.13(\ell)$$

$$\text{水} \quad 0.97 \times 37.5(\ell) = 36.37(\ell)$$

(c)算定結果

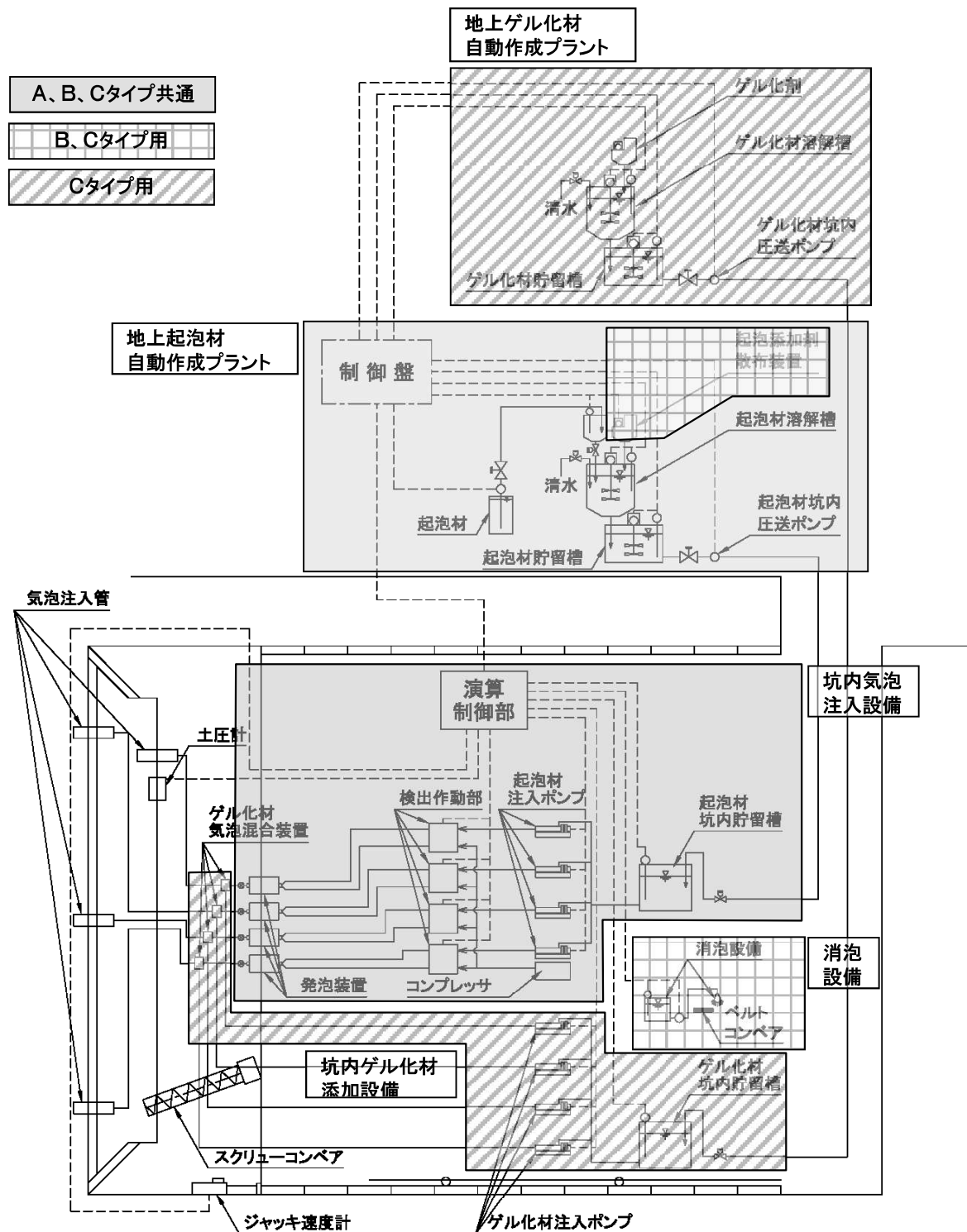
図－２． ９に以上の計算結果をまとめたものを示す。



図－２． ９ 気泡作成例(5)

3. 施工設備

図－3． 1 に、気泡シールド工法のシステム図の 1 例を示す。

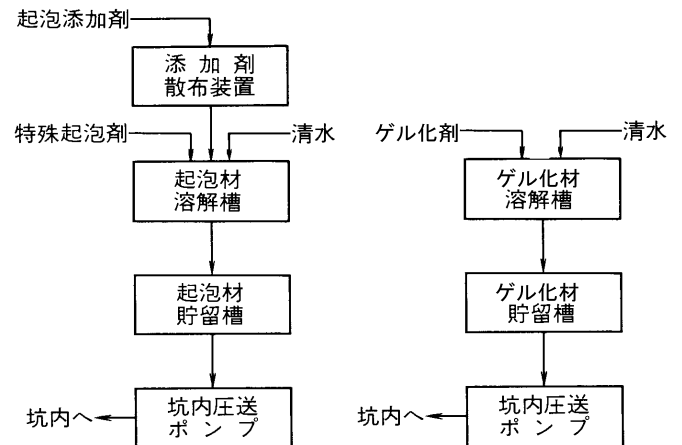


図－3． 1 気泡シールド工法システム図（φ7m 級）

3. 1 起泡材作成設備

図－3. 2に起泡材作成設備の1例を示す。本設備は、添加剤散布装置、起泡材溶解槽、同貯留槽、坑内圧送ポンプおよび材料のストックヤードから成る。作成プラントは、地上基地に設備される場合と、坑内に設備される場合がある。

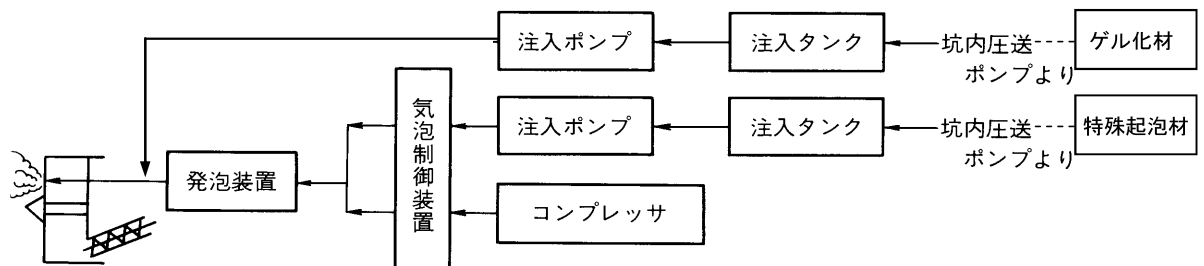
なお、特殊起泡材Aタイプの場合、添加剤散布装置を必要としない。また、ゲル化材作成設備はCタイプの場合に必要となる。



図－3. 2 起泡材作成設備
(地上基地に設備された例)

3. 2 気泡注入設備

図－3. 3に気泡注入設備の1例を示す。加圧されたエアと坑内に移送された特殊起泡材は、それぞれコンプレッサ、注入ポンプによって気泡制御装置に送られる。気泡制御装置によって流量をコントロールされた加圧エアと特殊起泡材は、発泡装置によりシェービングクリーム状の気泡となり、切羽あるいはチャンバ内に注入される。Cタイプの場合は、ゲル化材注入ポンプで、発泡した気泡にゲル化材を添加することによりゲル化気泡となる。注入ポンプ、コンプレッサ、気泡制御装置は、一般にシールド後方台車に組み込まれる。発泡装置はシールド内あるいは後方台車に組み込まれる。



図－3. 3 気泡注入設備

3. 3 消泡設備

特殊消泡材は消泡材溶解槽にて作成され、消泡材ポンプで送られ、散布ノズルにより、排出される気泡土に散布される。これらの設備ならびに制御装置は、シールド後方台車に組み込まれるのが一般的である。

3. 4 気泡制御装置

気泡制御装置は、検出作動部と演算制御部とに大別される。検出作動部は、流量計、圧力計、可変バルブ、自動バルブ等で構成され、演算制御部は、演算部(C P U)、制御部、表示部、記録部等で構成されている。

ジャッキスピード、チャンバ内圧力等を、リアルタイムで検知し、演算制御部で任意に設定した気泡混合率、発泡倍率等が常に保持できるよう検出作動部へ指令し、起泡材流量、エア流量を自動制御する。

大口径シールドでは、複数の注入孔、発泡装置および検出作動部が必要となるが、個々の注入孔への気泡量の配分等、複数の検出作動部を1台の演算制御部で、総合的な制御と管理が行える。

3. 5 標準気泡設備一覧表

各設備は、地盤条件、シールド掘削径、掘削延長、施工条件などにより最適なものとすべきであるが、表ー3. 1に標準的な設備を示す。

また、特に気泡制御装置のセット数、コンプレッサの容量等については、気泡混合率やジャッキスピードの設定により定まることから、十分な検討を要する。

表-3. 1 標準気泡設備一覧表

設備名	セグメント外径	φ 3 m級			φ 5 m級			φ 7 m級		
		気泡タイプ			仕様	数量	仕様	数量	仕様	数量
		Aタイプ	Bタイプ	Cタイプ						
地上 起泡材作成 自動プラント	起 泡 材 溶 解 槽	○	○	○	3.7kW 3m³	1 台	3.7kW 3m³	1 台	3.7kW 3m³	2 台
	起 泡 材 貯 留 槽	○	○	○	1.5kW 5m³	1 台	1.5kW×2 10m³	1 台	1.5kW×3 20m³	1 台
	起泡材坑内圧送ポンプ	○	○	○	5.5kW max70ℓ/min 0.8MPa	1 台	11kW max150ℓ/min 0.8MPa	1 台	15kW max250ℓ/min 0.8MPa	1 台
	起泡材作成制御装置	○	○	○		1セット		1セット		1セット
	起泡添加剤散布装置		○	○	1.0kW 60ℓ	1 台	1.0kW 60ℓ	1 台	1.0kW 60ℓ	2 台
坑内 気泡注入設備	気泡注入制御装置	○	○	○	演算制御部 1セット 検出作動部 1セット 可変注入ポンプ 1台 (3.7kW 1.0MPa max50ℓ/min)	1セット	演算制御部 1セット 検出作動部 2セット 可変注入ポンプ 2台 (3.7kW 1.0MPa max50ℓ/min)	1セット	演算制御部 1セット 検出作動部 4セット 可変注入ポンプ 4台 (3.7kW 1.0MPa max50ℓ/min)	1セット
	発 泡 装 置	○	○	○		1セット		2セット		4セット
	コ ン プ レ ッ サ	○	○	○	5.5kW 630Nℓ/min 0.85MPa	1 台	11kW 1.5Nm³/min 0.85MPa	1 台	22kW 2.5Nm³/min 0.85MPa	1 台
	起泡材坑内貯留槽	○	○	○	800ℓ	1 台	2.2m³	1 台	4.5m³	1 台
地上 ゲル化材 作成自動設備	気泡注入制御台車	○	○	○		2 台		2 台		2 台
	ゲル化材溶解槽			○	3.7kW 3m³	1 台	3.7kW 3m³	1 台	3.7kW 3m³	1 台
	ゲル化材貯留槽			○	1.5kW 5m³	1 台	1.5kW 5m³	1 台	1.5kW 5m³	1 台
	ゲル化材坑内圧送ポンプ			○	5.5kW max70ℓ/min 0.8MPa	1 台	5.5kW max70ℓ/min 0.8MPa	1 台	5.5kW max70ℓ/min 0.8MPa	1 台
	ゲル化材可変注入ポンプ			○	0.4kW max5ℓ/min 0.7MPa	1 台	0.4kW max5ℓ/min 0.7MPa	2 台	0.4kW max5ℓ/min 0.7MPa	4 台
坑内 ゲル化材 添加設備	ゲル化材気泡混合器			○	1.5 ショット	1 台	1.5 ショット	2 台	1.5 ショット	4 台
	ゲル化材坑内貯留槽			○	200ℓ	1 台	1.5m³	1 台	1.5m³	1 台
	消 泡 材 溶 解 槽		○	○	0.4kW 500ℓ	1 台	1.5kW 1.2m³	1 台	3.0kW 2.7m³	1 台
消泡設備	消泡材散布ポンプ		○	○	0.4kW max5ℓ/min 0.7MPa	1 台	0.75kW max12ℓ/min 0.7MPa	1 台	1.5kW max20ℓ/min 0.7MPa	1 台
	消泡材散布制御装置		○	○		1セット		1セット		1セット

注) 土質・地下水条件、施工条件等により各種設備の仕様は本表と異なることがある

気泡シールド工法技術資料

昭和 6 1 年	6 月	発行第 1 版
平成 3 年	4 月	発行第 2 版
平成 1 3 年	3 月	発行第 3 版
平成 1 5 年	3 月	発行第 4 版
平成 1 8 年	4 月	発行第 5 版
平成 1 9 年	6 月	発行第 6 版
平成 2 3 年	8 月	発行第 7 版
令和 2 年	8 月	発行第 8 版

シールド工法技術協会

URL : <http://www.shield-method.gr.jp>