

24. 気泡シールド工法と施工例

(株)大林組 *羽生田 吉也・藤原 紀夫

1. まえがき

気泡シールド工法とは、土圧系シールドにおいて、気泡を土圧室に注入しながら掘進する工法である。従来、土圧系シールドの施工の際に、砂質土や粘着性土質が土圧室に閉塞して掘進が不能に陥ることがあった。また、地下水位が高い砂、れき層ではスクリューコンベアから土砂の噴発を起こすことがあって、切羽の圧力保持は困難となり、地山の崩壊をきたすことがあった。これらの問題を解決する方法として、掘削土砂に気泡を混入して適度な流動性と止水性を与えて土圧管理によるシールド掘進をスムーズに行なう本工法を開発した。使用する気泡は起泡剤の水溶液を圧縮空気で10～30倍に発泡したもので、使用材料は少量で済み、排出土に対する後処理も軽微であるなどの特長を有する。

以下、気泡シールド工法と2,3の施工例について述べる。

2. 気泡シールド工法

2.1 気泡と作成方法

気泡は、圧縮空気とDOフォームと称する起泡剤の水溶液とを発泡器に圧送して作られる。この2つの流量比を気液混合比



図-1 気泡の作成過程と材料配合例

(K)と呼ぶ。一般に $K=15\sim 25$ でシエビングクリーム様の緻密な気泡ができる。気泡は空気に近い圧縮、膨張性を有するため、体積を標準状態で表示する(図-1参照)。

2.2 気泡土と気泡混合率の設定方法

土砂に対する気泡の使用割合は、体積比をとって気泡混合率(λ)と称し、できる混合土砂を気泡土と呼ぶ。室内および現場実験から求めた実用的な λ の値は、砂レキ、砂、シルト、粘土について、それぞれ60～100%、45～85%、25～65%、15～55%

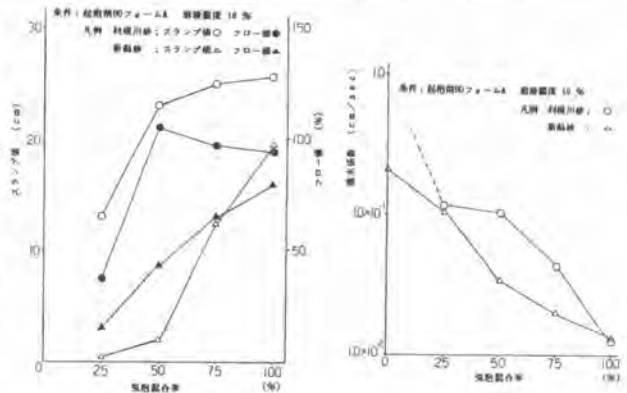


図-2 気泡土の性状

である。土圧室内の掘削土の間隙率 n (%)、設定圧力 P_e から間隙を満たすに必要な理論上の気泡混合率は、 $\lambda = \eta(1+K) \cdot n / (1+K/(P_e+1))$ (%)で与えられる。ここで、 η は注入効率である。図-2は、砂に気泡を加えて十分に攪拌、混合した気泡土の流動性と止水性を示している。

2.3 シールド掘進と気泡注入

シールド掘進時には、土圧室内に設ける土圧計の指示値を一定範囲に管理する方法をとる。注入された気泡が土塊ないし土粒子間や土砂とシールドマシンとの接触部分に入るため、土砂のせん断力および機械部分との摩擦抵抗が減じて、掘削土の流れは良好になって機械への負荷も軽減する。また、

土圧計周辺への土砂の圧密付着やアーチング作用を発生しにくく、な
って土圧計への信頼性は高まる。さらに、土圧室における土砂の入
出量バランスが多少崩れた場合にも、気泡の高い圧縮・膨張性によ
って切羽への影響を緩和する。この様に、土圧管理により極めてス
ムーズなシールド掘進ができる。滞水砂レキ層の掘進では、(水圧)
+0.2~0.3kgf/cm²程で注入すると気泡が砂レキ内に浸透する。この
際写真-1に示す模型実験からも明らかな様に、被圧水と接した気
泡は消泡して圧縮空気が残り、気泡に先行して切羽に浸透して部
分圧氣的な止水効果も呈する。



写真-1 模型止水実験

2.4 排土の処理

DOフォームには、排水基準に示される特殊項目および健康項目に
係る有害物質が含まれていない。また、有機物が土砂中のバクテリ
アによって短期間のうちに無機化するなど、生分解性が良い。また、
気泡の主材料が空気で、水分は土砂1m³当り50ℓ以下と少ないので坑外への土砂搬出時あるいは土捨
場で1日経過後は、自然に消泡する。気泡単体では、1~2時間野外に置くと溶液に戻る。即時に
消泡させるには、気泡ないし気泡土に消泡材を噴霧する方法もある。

3. 施工例

基礎実験および推進実験などで気泡注入
効果を確認の後¹⁾、気泡シールド工法を現場
に適用した^{2),3),4)}。表-1に、3つの施工例につ
いての概要を示す。施工例Ⅰでは、土圧管
理による掘進を実証でき、施工例Ⅱでは、
気泡の部分圧気効果により滞水砂レキ層を
掘進時に噴発防止ができた。施工例Ⅲでは、
カッタートルクの軽減により掘進速度を数倍
に改善できた。図-3には、各現場の排出
土について粒度分析した結果を示す。

3.1 施工例Ⅰ

当現場で行なったシールド工事は、下水
道幹線用トンネル工事で、切羽土質がN値
30前後の固結した地盤を掘削した。

気泡の注入が無い場合には、土圧室内に
土砂を充填すると、カッタートルクが過大と
なって掘進は不可能であった。このために

施 工 例 区 分	施工例Ⅰ	施工例Ⅱ	施工例Ⅲ		
工 場 概 観	S. 53.6~57.3	S. 55.16~57.12	S. 53.9~60.7		
仕上り径/シールド外径 mm	1800/2070	1650/2430	1800/1920		
地 質 特 性 状	砂質土、粘性土との 互層: 8~20	上層25%含水砂と層、 下層: 砂質粘土層 約 20	砂質シルト層、シルト質粘土層 D=0.7kg/cc, 4=3~5、含水率 70~100 1/2m		
土質リゾメーター水位 (m)	7~10/0.5、-1~2	9~11/0.5、-3~5	4.5~8.5/0.5、-0.5~-1.2		
シ ル ド 機 種	キャットヘッド支持方式	固定支持型	中間フレーム型	固定支持型	中間フレーム型
	カットトルク (t·m) (α)	30~3 ($\alpha=2.0$)	36 ($\alpha=2.3$)	3 Ca ($\alpha=1.5$)	2.4B ($\alpha=1.8$)
	スクレイヤー 径	520φ×330mm 25.5m ² /枚	500φ×420mm	リジンスクリュー 235φ×290mm、4.0m ² /枚	267φ×250mm
土 の 掘 削 特 性	土の掘削 機	ゾートゾウキ ロータリーブレード付	ゾートゾウキ	ゾートゾウキ	
	適用 DO フォーム	A: 10%充填 (40%) ~ 60%	A: 10%充填 (40%) ~ 60%	D: 20%充填 (30%) ~ 35%	D: 20%充填 (30%) ~ 35%
気 泡 土 の 注 入 特 性	注入圧 (kgf/cm ²)	3~3.3	3.5	2.5	2.5
	土 圧 (kgf/cm ²)	0.3~0.75	0.2~1.5	0~1.5	1~1.5
排 土 方 法	掘削機	掘削機	掘削機	掘削機	
	排土装置	3本線 スクレイヤー付	掘削機	スクレイヤー付 土圧室下流、フンド機	掘削機
気 泡 土 の 注 入 特 性	気泡土の注入口	適用前に 20m/s 未満が 40m/s になった。完全 な 1 圧縮機による掘削は 20m/s 時に実施。	1.5 ~ 30m/s	適用前 50m/s を 100m/s になった。	適用前は掘削不能に陥い ることになったが、掘削 が 3~5 m/s に変わった。
	掘削機	適用前には掘削機が、クラ ムで掘削してマンホール が掘られたが、完全に掘削 力が不足していた。	11 ~ 34 t/m	100m/s で掘削機が、クラ ムの掘削 - 100 年を記録 するまで 20% に落ちた。	適用前には、掘削機がクラ ムで掘削 - 100 年を記録 するまで 20% に落ちた。
掘 削 機 種	粘性土がスクレイヤー、ゾ ートゾウキに付着すること により掘削機が停止した。	粘性土による土砂の噴出を 防止し、切羽の不安定な 状態を避けることができた。	粘性土の付着が全く 発生せず、掘削機も良好 に動作した。	粘性土の付着が全く 発生せず、掘削機も良好 に動作した。	
	適用前 2~5m、1日 経過後に噴出する。	スクレイヤー付、掘削機	スクレイヤー付、掘削機	スクレイヤー付、掘削機	スクレイヤー付、掘削機

表-1 施工例の概要

掘進中は土圧管理ができず、各リングの終了の間際に、土砂を充填させて切羽土圧に対抗させていた。
掘進速度は、最大で 2 cm/min 以下と低く、粘性土の付着による排土システムのトラブルも見られた。

気泡の注入をおこなった場合には、気泡混合率 $\lambda=60\%$ で毎分 2 cm の速度で掘進すると、土圧を制御目標範囲 $0.5\pm 0.1\text{ kgf/cm}^2$ 以内にほぼ納めることができた(図-4参照)。 3 cm/min にすると、土圧 0.5 kgf/cm^2 を維持することが困難となり、 4 cm/min ではカッタートルクが大となって小停止が発生したが土圧は $0.1\sim 0.2\text{ kgf/cm}^2$ 以上に管理できた。

以上で述べたケースの気泡注入は、土室内の外周位置から行なったが、スクリュコンベアに近い隔壁部などからの注入は効果が少なかった。他方、ベルトコンベア、底開き型のズリ鋼車、ホッパなどへの土砂の付着が発生しなくなり、排土上のトラブルが解消された。

3.2 施工例Ⅱ

切羽の土質は、上部に人頭大の玉石を含む滞水砂レキ層、下部はN値30以上の砂質泥岩層である。気泡の注入前には、土砂が流動性過剰となって泥土状態で噴出したため、排土口のゲートバルブの開閉を繰り返して対処していた。バルブの開放毎に土砂が噴出して土圧は零を示した。土砂のスランプは 25 cm 、掘進速度も 1 cm/min 以下となった。気泡の注入後は、排出土砂のスランプが $5\sim 8\text{ cm}$ に納まった。土圧の下限も $0.2\sim 0.3\text{ kgf/cm}^2$ 以上に押えることができた。土室内は部分圧気状態にあり、土砂に混って空気が時々、流出した。カッタートルクの軽減は少なく、被圧水により消泡が進み、圧縮空気による効果が顕著になったものと考えられる。



写真-2 排土状況 (施工例Ⅰ)

3.3 施工例Ⅲ

現場は、“自噴帯”と呼ばれる自噴性被圧地下水の広く分布する所である。地山の土質は、粘着力 $c > 0.7\text{ kgf/cm}^2$ の粘性土が主で、一部に砂あ

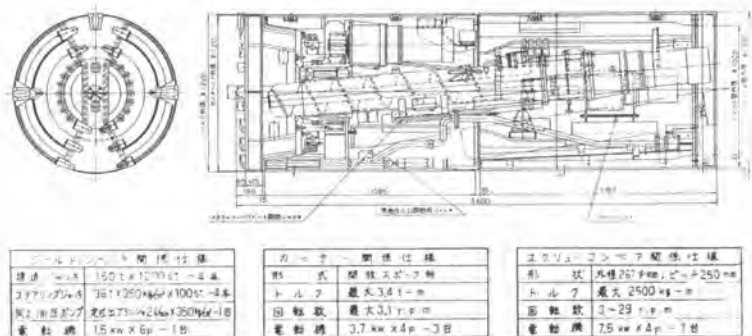


図-5 シールド掘進機 (施工例Ⅲ)

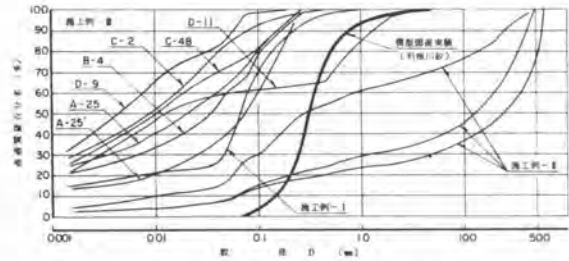


図-3 排出土の粒度組成

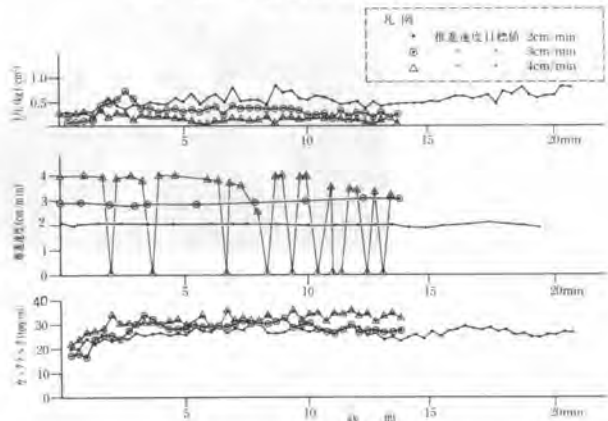


図-4 掘進記録 (施工例Ⅰ)

るいは5~10 mmの豆砂利状のレキが混入する。施工延長は624mで、これを4区間に分けて土圧セミシールド工法で施工した。最初の区間では無注入で掘進を開始したが、土砂の取込みが悪くなり、途中から注水をおこなった。しかし、20~25本付近になると半日に15cm程の掘進状態となった。そこで気泡シールド工法を適用したところ、推進速度は7~9cm/minとなり、排土作業もスムーズになった(図-6参照)。他区間でも、気泡を使用して、良好な結果が得られた。⁵⁾



写真-3 坑外搬出後の土砂(施工例Ⅲ)

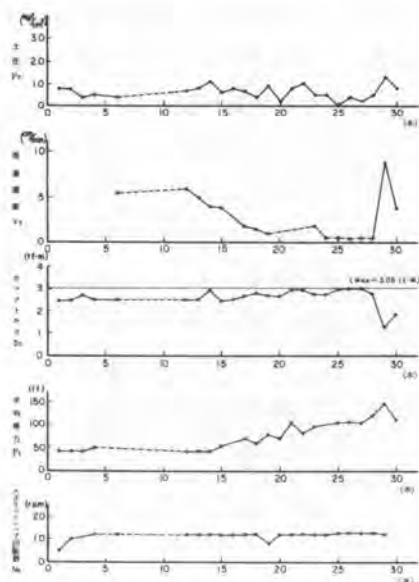


図-6 掘進記録(施工例Ⅲ)

4. 考察

各施工例で用いたシールドマシンは、気泡シールド工法向けに設計されたものではなく、最少限の改造を加えて気泡を適用した。施工例Ⅱでは湧水量が多く、気泡消滅後の部分圧的効果が目立った。空気の排出を少なく押えて切羽の水を後退させる事ができれば、気泡により土砂の流動性を向上できマシン負荷を軽減できるものと思われる。各現場における排出土は無処理で建設残土として処分できた。特に、施工例Ⅰでは、スランプ3~5cmの他に局部的に10cm程度のもも見られたが、土捨場に1日放置しただけで人が上に乗れる程になった。いづれの現場においても、排出土のスランプは、室内で完全に気泡を混合、攪拌した気泡土と較べて低く、気泡の存在を確認するのが困難な時もあった。この土圧室内における消泡は、カットトルクの軽減を損なう程でない限り、排土処理から見ると都合の良い現象である。

5. あとがき

気泡シールド工法は、昭和56年以来、数現場に適用された。気泡の使用によって性状の異なる土質を同様に取扱うことができ、土圧系シールドの原理に沿ったスムーズな掘進を実現できた。安定した掘削が可能なることから、自動掘進への道も開けたと言える。今後、シールドマシン形状、気泡注入方法などについての研究を深めていくつもりである。

最後に、気泡シールド工法の施工にあたり、現場関係者の御協力を戴いたことを記して、感謝いたします。

参考文献

- 1) 斎藤, 藤原, 羽生田, 山下: 土圧型シールドにおける気泡混入により掘削土の流動性を高める推進実験, 大林組技術研究所報, №21, (1980)
- 2) 藤原, 羽生田, 山下: 気泡シールドの現場実験について, 土木学会第36回年次学術講演会講演概要集, (昭和56.10)
- 3) 斎藤, 藤原, 羽生田, 山下: 気泡シールド工法に関する現場実験(その1), 大林組技術研究所報, №24, (1982), pp.97~pp.101
- 4) 藤原, 羽生田, 山下, 山本, 小坂: 気泡シールドの現場適用実験について, 第17回土質工学研究発表会, (昭和57.6)
- 5) 上田, 藤原, 羽生田, 山田: 気泡シールド工法による下水道工事, 建設の機械化, (昭和58.8)