

# 気泡シールド工法の開発に関する現場実験 (その1)

——気泡注入による土圧系シールド (2,670mm $\phi$ ) の掘進——

齋藤 二郎      藤原 紀夫  
羽生田 吉也    山下 幸夫

## Field Experiments on Foam-injected Shield Tunnelling Method (Part 1)

——Advance of Earth-pressurized Shield ( $\phi$  2,670 mm) by mixing Foam——

Jiro Saito                      Toshio Fujiwara  
Yoshinari Hanyuda      Yukio Yamashita

### Abstract

In advancing forward of an earth-pressurized shield tunnelling machine, excavation is hindered through blockage of the pressurized chamber by soil depending on the properties of the soil. The phenomenon of blockage is due to adhesion and arch action through compaction of soil, and the result is that excavated soil is obstructed from being discharged from the screw conveyor. Methods using bentonite or clay have been introduced as countermeasures. The authors used air bubbles to increase fluidity of soil in laboratory testing and have reported about this method. This time, the authors report on field experiments in which the shield machine was driven while injecting foam into the chamber. By mixing foam, the rate of advance was doubled while the loads on the various parts of the machine were reduced to 80% in comparison with past use in the field. Moreover, it was possible to proceed smoothly in excavation with controlling earth pressure at a relatively constant level.

### 概 要

土圧系シールドにおいて、切羽の土質によっては、圧力室内が土砂で閉塞して排土ができずに掘進不能な事態に陥ることがある。この現象は同室内における掘削土砂の付着ないしは、締固めに伴うアーチ作用によってスクリュコンベアからの排出が阻害されるために発生するものである。対象として、ベントナイトや粘土を注入する方法があるが、これらの方法では、注入および排土処理設備が大規模となり問題が残る。そこで、筆者らは、掘削土の流動性を高める方法として気泡注入に関する、基礎的な研究をしてきた。

本報は、現場で稼働中の土圧系シールド (2,670 $\phi$ mm) において気泡注入を行ない、この結果をまとめている。対象土は、粘土混りのシルト質砂と砂質シルトで、延べ11リングの掘進をおこなった。気泡を注入すると、掘進速度で2倍に増加し、機械の各部への負荷で8割に減少することができた。また、土圧を比較的、一定に保持しながらスムーズな掘進ができています。

### 1. まえがき

土圧系シールドにおいて、圧力室内に気泡を注入しながら、シールドの掘進を行なうと、同室内の掘削土砂の流動性が高まる。このため、スムーズな排土状態を保持しながら施工ができる。このことは、室内の模型機による実験で確認された<sup>1)2)</sup>。

そこで、気泡注入の効果を実機シールドにおいて直接

調査する目的で、現場実験を実施した。

実機には、注入用の配管が3系統装備されており、注入位置による運転への影響を調べることも、目的の一つである。

実験は、気泡の注入なしに掘進した3リングを含めて計11リングについて実施した。気泡注入効果、注入位置による影響などを本報に述べる。

## 2. 実験方法

### 2.1. 対象土質

実験区間における地盤は、第四紀の沖積世、洪積世のもので、土被り 8m、水被り 7m である。このうち切羽に現われるのは、洪積世の砂質土層と粘性土層で、それぞれ、N値30前後の地盤である。

掘削土砂に対する室内土質試験結果を表一に示す。

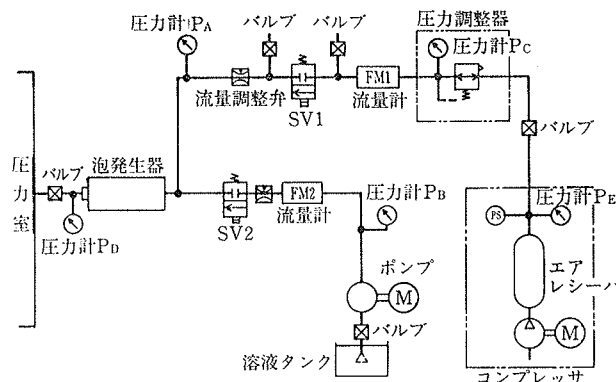
### 2.2. 装置

(1) シールド掘進機と注入管 図一に、圧力室、注入管を主として、シールド掘進機の概略と仕様を示す。

注入管は、圧力室内での噴出位置の異なる A, B, C と 3 系統を取り付けている。各系統の気泡の噴出方向は図のようにした。この他、それぞれの特徴として、A 系統は、土砂逆流の防止弁があり、B 系統はカッタフェイス直後に噴出部をもつ直管である。C 系統は、噴出部が 1 メッシュの網で被われ、土砂の侵入防止がなされている。

図二に、気泡の作成、注入用の配管系統を示す。起泡剤溶液と空気とを適量圧送することにより、発泡器から棒状の緻密な気泡ができるように、予め試験を実施している<sup>3)</sup>。なお、エアーコンプレッサや渦流ポンプなどは、台車上に組込んで、ズリ運搬用の鋼車に連結して切羽の近くへ運び、注入に使った(写真一参照)。

(2) ズリ運搬設備 2m<sup>3</sup> 底開き式の鋼車 3 台を 4 ton のバッテリー機関車へ連結して牽引する。排出される



図二 気泡注入回路

特性	砂分 (74~2000 $\mu$ m)	36~43%	コンシステンシー特性	液性限界 W <sub>L</sub>	33.7~38.2%
	粒シルト分 (5~74 $\mu$ m)	40~47%		塑性限界 W <sub>p</sub>	16.9~18.7%
	粘土分 (5 $\mu$ m以下)	17 %		塑性指数 I <sub>p</sub>	15.6~22.4%
	最大粒径	0.90~1.00mm		自然含水比 W	32.0~37.0%
縮固性	均等係数 U <sub>c</sub>	67.5	縮固性	最適含水比 W <sub>opt</sub>	18.5~20.0%
	曲率係数 U <sub>c</sub>	19.0		最大乾燥密度 $\gamma_{dmax}$	1.617~1.679 tf/m <sup>3</sup>

表一 掘削土についての土質試験結果

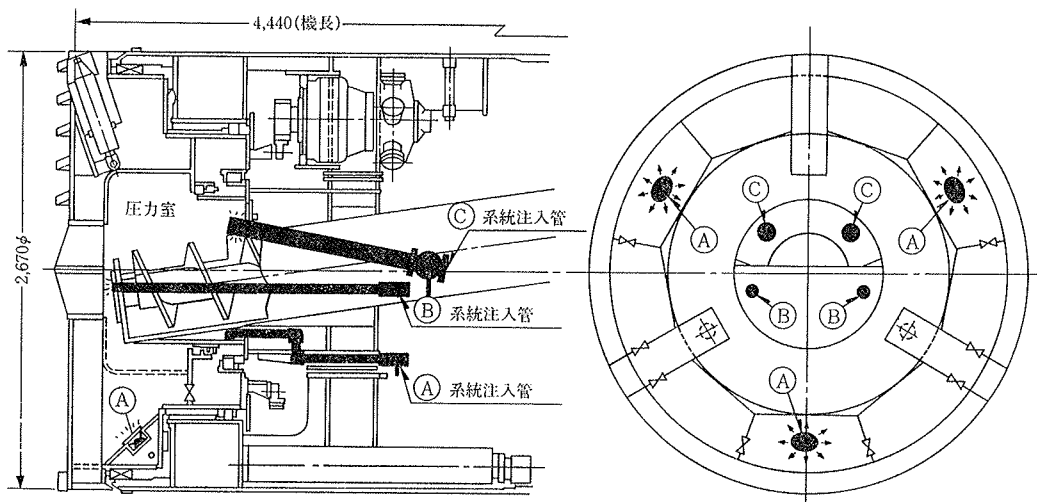
ズリ量は、1 リング (90 cm 幅) の掘進で、5.04 m<sup>3</sup> (地山) となり、気泡を後述の60%混入すると 6 m<sup>3</sup> (ルーズ) 以上になる。このため、推進長 45 cm で、一旦、掘削を中断してズリを坑外へ搬出する。すなわち、1 リング当り 2 回のズリ運搬を行なうことにした。

### 2.3. 実験ケースと目標値

気泡の注入系統別に、実験ケースを三つに分けた。さらに、掘削リングの違いによりサブケースを設けた。各実験ケースのサブケースでは、シールドの推進速度を、2, 3, 4 cm/min と段階的に目標値を設定している。また、各実験ケースの前の 1 リングでは、気泡注入をしない掘削を行ない、気泡の有無による差を明らかにする。

気泡注入のない掘削では、推進速度の目標値を 2cm

シールドジャッキ	80ton×1,050mm×8本	スクリュコンベア排土能力	25.9m <sup>3</sup> /hr
シールドジャッキ伸長速度	55.8mm/min	スクリュコンベア回転数	0~7.2r.p.m.
カッタトルク	最大 39.3ton-m	スクリュコンベアトルク	最大 1,400kg-m
カッタ回転数	0~1.37r.p.m.	セグメント	鋼製2,550 $\phi$ ×900 $\phi$ mm
スクリュコンベア	520 $\phi$ ×330pitch	注入配管	3系統(A,B,C)



図一 気泡注入位置とシールド掘進機

/minとした。これは、すでに現場が980リングの掘削を実施していたうちの最大値であったことに基づいている。

### 2.4. 気泡注入とシールド掘進の方法

(1) 気泡混合率 掘削対象地山体積1に対して、0.6の割合で気泡を注入する。すなわち、気泡混合率<sup>1)2)</sup>60%と一定にして掘進させる。気泡注入量  $Q_1$  (l/min) を各リングの推進速度  $V_t$  の目標値に応じて一定に設定するので、 $V_t$  はできる限り変動しないように制御する必要がある。

(2) 土圧制御 シールド掘進機のセンタに作用する計算土圧は、約 0.5 kgf/cm<sup>2</sup> である。従って、圧力室内に取り付けた土圧計の指示値が、0.5 kgf/cm<sup>2</sup> ± 0.1 kgf/cm<sup>2</sup> の範囲に納まるよう努める。これをスクリュコンベアの回転数  $N_s$  の増減で制御する。

(3) シールド掘進機の特殊な機能 図-1の仕様に示すように、カッタトルクの最大は 39.3 ton-m である。負荷が、同値に達すると掘進制御回路は、シールドの推進を停止するよう構成され、カッタ負荷の軽減後に推進を開始することができる。

### 2.5. 計測調査の方法

#### (1) 自動計測項目

- (ア) 掘進機の負荷（カッタトルク  $T_c$ 、推進力  $P_t$ 、スクリュコンベアトルク  $T_s$ ）
- (イ) 圧力室内の土圧  $P_e$ 。
- (ウ) 気泡の注入部圧力  $P_D$  検出位置について図-2参照のこと。

なお、項目(ウ)については、油圧ポンプ作動時で、かつ各アクチュエータへの油圧回路を閉にした際のポンプの吐出圧をベースの零基準として、計測された油圧から換算する。また、各項目の記録間隔は15ないし20secとする。

#### (2) 手動計測項目

- (ア) シールドの推進速度  $V_t$
  - (イ) スクリュコンベア回転数  $N_s$
  - (ウ) 推進長  $L$
  - (エ) カッタトルクの過大回数
- 各項目についてシールド掘進機の付属指示計器から読み取る。

#### (3) その他の項目

- (ア) 掘削土についての調査  
スランプ、比重量、1リングの掘削土体積、含水比の測定

を行なう他、スクリュコンベア排土口における土砂を観察する。

- (イ) 気泡についての調査 溶液使用量、溶液流量、空気流量
- (ウ) 地下水の pH 値 気泡を注入する前後の地下水を採取して行なう。

## 3. 実験結果と考察

延べ11リングについて実験をおこなった。このうち、気泡注入実験はA系統について4個、B、C系統について各2個のサブケースを実施できた。

### 3.1. 掘削土等について

スクリュコンベア排土口付近で採取した掘削土について実施したスランプ試験の結果等を表-2に示す。気泡の注入によって、掘削土の比重量が小さくなりスランプ値も3~5cmに改善された。排土口の観察によると、ヨウカン様のブロック状に排出されるものとコブシ大に排出される掘削土があり、後者について気泡の混り具合がかなり良く、流動性は、前述スランプ値以上であったと推定される。圧力室内に注入した気泡は、気泡混合率に

項目 条件	掘削土			地下水の pH値
	スランプ (cm)	比重量 (tf/m <sup>3</sup> )	地山の体積 増加率	
気泡注入 なし	0~1	1.82~1.85	1.04~1.23	8.01
気泡注入 あり	3~5	1.54~1.62	1.12~1.46	6.76

表-2 掘削土および地下水について

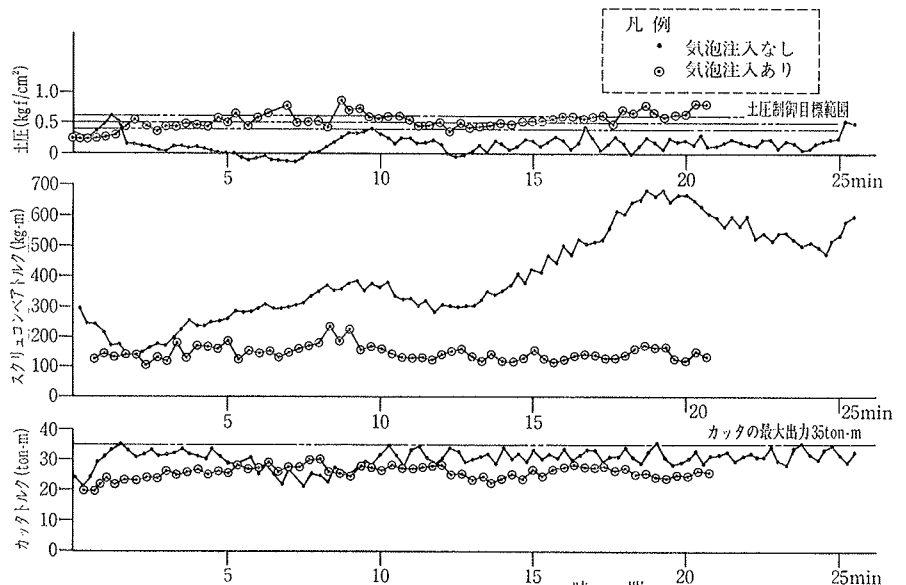


図-3 掘進記録例（目標推進速度 2 cm/min）

して60~80%程度であった。この気泡土中に含まれる空気量が流動性を支配する要素である。含水比、土粒子比重を勘案して、この量を計算すると、約14~18%以下となる。他方、気泡注入のない土砂中では約1~2%しかない。

次に、掘削土量の計量結果から、地山の体積が掘削および気泡注入を経ることによって、無注入の場合に較べると1~2割増となることが分かった。

### 3.2. 掘進記録にみる気泡注入効果

図-3には、目標推進速度2 cm/minで掘削した注入系統Aのサブケースと無注入の推進記録の一部を示す。

(1) 土圧 気泡を注入した場合には、目標制御範囲内で掘進できているのに反し、無注入の場合には、カッタトルクが不足になるため、0.5 kgf/cm<sup>2</sup>に制御できなかった。このため、13~14 min以降は、0.2~0.3 kgf/cm<sup>2</sup>に目標を下げて掘進した。

(2) カッタトルク 無注入の場合の、5~6分前後で比較的土圧が低い時を除くと、気泡注入をした方が、カッタトルクは、2~3割程度少なく済んだ。

現場がすでに実施してきた掘削方法は、0~5分の土圧に見られるように、圧力室の土砂の充満とその解放の繰り返しによって、極力、カッタトルクの上昇を抑え、比較的、地山の強度が高いため、切羽安定を保持するものであった。

(3) スクリュコンベアトルク 気泡注入位置にかかわらず、注入した場合には、図のように、200~250kg・m以下で済んだ。注入しない時には、スクリュコンベアトルクが大きくなり、極端なケースでは、トルク過大となり急停止を招いた。

(4) 推進速度 図-3は、前述のように、推進速度の目標値は、2 cm/minの実験で、おのこの、1リングの半分、45 cmの掘進記録である。この所要掘進時間は、無注入が26分55秒で、気泡を使うと、22%減(20'59")であり、かなり短縮でき、この結果、平均推進速度で2.14 cm/minと、無注入の1.68 cm/minに較べて、かなりスムーズな掘進ができています。

### 3.3. 注入系統Aを使用した掘進記録

注入系統Aによる気泡注入の実験ケースは、他の注入系統より安定した掘削ができた。そこで、この実験における掘進例(図-4参照)を説明する。

(1) 土圧 推進速度の目標値が高い程、土圧制御値を、所要のカッタトルクが大きくなる関係から、実際にも低く抑えざるを得なかった。

特に、4 cm/minに目標をおいた実験サブケースでは、カッタトルクが装備能力を超えた為に、推進の小停止を余儀なくされ、これに伴い、土圧制御目標値も0.1~0.2 kgf/cm<sup>2</sup>に低下せざるを得なかった。

(2) 推進速度 目標値3 cm/minまでは、推進の停止も全くなく、スムーズな掘進ができた。45 cmの掘削に13分54秒(平均推進速度3.24 cm/min)の記録を出した。4 cm/minでは、上述の小停止があったことにより、ならした推進速度は3.22 cm/minと、低くなった。

(3) カッタトルク 推進速度が高い程、大きくなり気泡注入をしても、4 cm/min一定で掘進するのは、少なくとも使用のシールド掘進機では、カッタトルク容量に限界があって難しい。

### 3.4. 注入系統A, B, C, の比較

気泡注入系統の3種類のうち、実験結果より判断して

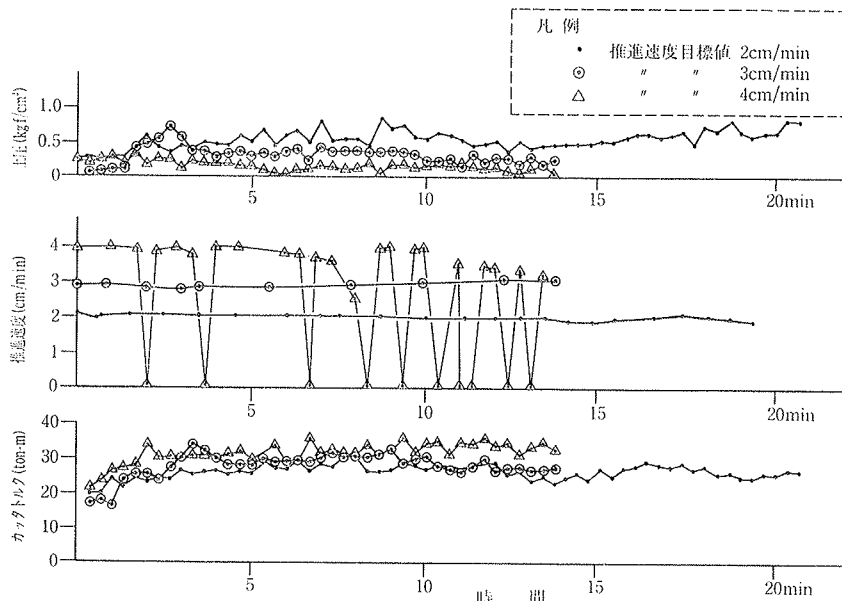


図-4 注入系統Aを使用した掘進例

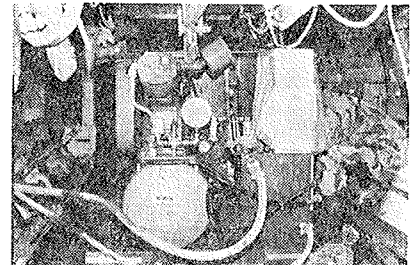


写真-1 気泡注入ユニット



写真-2 乾燥しつつある気泡土

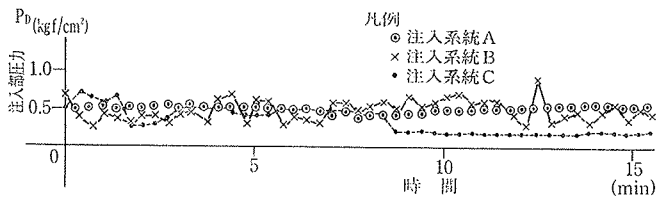


図-5 注入系統別の注入部圧力例

効果のあった順に、A、B、Cと言える。これには、圧力室内の注入位置の他に、気泡の出口の形状による影響が多分にある。特に著しかったのがB系統である。

図-5に注入部圧力  $P_D$  を系統別に示した。土圧の記録を省いて載せたが、土圧と注入部圧力  $P_D$  とは、ほとんど同値となるべきもので<sup>3)</sup>、A、C系統における  $P_D$  の変動傾向は土圧の変動にほぼ一致している。これに対し、B系統では、注入部圧力  $P_D$  の変動が激しい。この際の土圧は、ほぼ、 $0.4\sim 0.5 \text{ kgf/cm}^2$  とほぼ一定であった。このように、注入部圧力が土圧とは、無関係に変化したのは、注入管先端部とカットフェイスとの間隔が狭いため、土砂が注入孔を閉塞したり、解放した結果と推察する。

注入系統Cについては、注入位置がスクリュコンベアの直上で、気泡の混入、攪拌が充分行なわれないうちスクリュコンベアから土砂が排出された。このため、推進速度  $3 \text{ cm/min}$  とすると、カットトルクに不足をきたし平均  $2.03 \text{ cm/min}$  の結果に終わった。スクリュコンベアのトルクは、 $150 \text{ kg}\cdot\text{m}$  以下と、この部分だけに、気泡が有効に働いていた。

### 3.5. 気泡注入による掘削システムに与える影響

気泡注入により、注入位置、先端部の形状について設計が充分であれば、掘削機への負荷が軽減でき、推進速度を上げることができた。ここでは、その他の掘削システムに与える影響の調査結果を述べる。

#### (1) 排土関係

気泡混合率 $60\sim 80\%$ として、掘削土の体積は、無注入の場合に比べて、 $1\sim 2$ 割増加するため、ズリ運搬は、その分を大きく見込まなければならない。実験では、切羽と立坑との往復回数を2回にして対処した。この為の排土時間は、1リング当たり30分余計に要した。

他方、気泡が混ざった土砂は、スランプ  $3\sim 5 \text{ cm}$  という数値以上に、ヘドロ様になりに流動的な状態であった。この為、かなり粘着性の土でズリ鋼車に付着して排土時に強制振動を与えておこなった土砂も、水を流下するように土砂ホッパ内に落すことができた。

しかし、土捨場に1日放置後の、消泡が進んだ土砂は表面に微細な空孔が形成され、間隙水は、ここから蒸発

が促進され、含水比Wで $30\%$ と自然乾燥していた。写真-2に、この土捨場における気泡土の状態を示す。

#### (2) 地下水に与える影響

切羽近くの坑内で採水して、そのpH値を測定した。気泡注入前には、前日の裏込め注入の影響でpH 8であったが、注入後の採水からは、原地下水のpH 6.5に近い値pH 6.7が測定され、気泡の影響は、皆無と判断された。

## 4. まとめ

昭和56年3月中旬に実施した粘土混りの砂質シルトおよびシルト質細砂の現場気泡注入実験から、気泡の注入の方法と効果、および施工に与える影響など、多彩な調査を行なうことができた。

効果などを、以下にまとめる。

- (1) 推進速度で、 $1.2\sim 2$ 倍と増大することができた。
- (2) 土圧制御による掘削管理ができ、スムーズな掘進が可能となった。
- (3) カット、スクリュコンベアへの負荷を軽減できた。
- (4) 排土管理が容易となった。
- (5) 注入位置はA系統が優れていた。B系統については、気泡噴出口に工夫を要する。
- (6) 排土量は、1割5分 $\sim$ 2割5分に増大した。

今後の課題として、増大する土砂の輸送対策がある。実験では、鋼車によって断続的な掘進で間に合せた。また、他の土質、例えば砂礫への気泡適用をおこない、土圧系シールドの適用地盤を拡大していきたい。

最後に、現場実験に協力いただいた寺門昇好所長はじめ現場関係者の方々、および第一化成産業(株)の満井義恭次長、堀実氏に深甚なる感謝の意を表したい。

## 参考文献

- 1) 齋藤, 他: 土圧型シールドにおける気泡混入により掘削性を高める推進実験, 大林組技術研究所報, No. 21, (1980), pp. 105~109
- 2) 齋藤, 他: 土圧型シールドにおける気泡混入による掘削土の流動性を高める推進実験, 第15回土質工学研究発表会講演集, (昭和55. 6), pp. 1577~1580
- 3) 藤原, 他: 気泡シールド工法の開発, 土圧型シールド (2, 670 mm $\phi$ ) における気泡注入実験, 大林組技術研究所報告書, (昭和56. 6)
- 4) 藤原, 他: 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)