

# 気泡を用いたシールド工事掘削土のポンプ圧送実験

藤原紀夫 羽生田吉也  
山下 功

## Experiments on Transportation of Excavated Soils in Shield Tunnelling Using Foam for Pumping

Toshio Fujiwara Yoshinari Hanyuda  
Isao Yamashita

### Abstract

Recently, in shield tunnelling, pumping transportation of excavated soil has been tried instead of muck cars. The problem with this method is that the soil transported is made into a slurry state because much water must be injected to achieve transportation. In this study, foam was injected inside the pipeline instead of water. A large-scale experiment was carried out to investigate the effect of foam injection. As a result, the distance transported was increased by two or three times and the transported soil did not become a slurry. It was found that this pumping method using the foam is useful and does not require large equipment.

### 概 要

最近、シールド工事において、掘削土の坑外搬出にズリトロを使用しないで、ポンプ圧送する方法が試みられている。この方法の問題点は、補助工法として輸送土に多量の水を注入することが必要となり、その結果として搬出土を泥土状態にしてしまうことである。そこで、注水に代わる補助工法として、気泡を輸送管の内壁にリング状に注入し潤滑材として使用することを考え、これらの実物大規模の輸送実験を行なった。

輸送実験の結果、気泡の注入によって輸送距離を2～3倍に延ばすことができ、しかも搬出土を泥土状態にすることがなかった。また、気泡注入方法は装置も簡便であり、実際の現場に十分適用できることが分かった。

### 1. まえがき

従来のシールド工事では、掘削土砂の坑外搬出方法としてズリトロを使用する方法が一般的である。しかし、立坑の形状が入り組んでいたたり、トンネルの縦断勾配が急である場合には、この方法は不向きであり、ポンプ圧送による土砂搬出が適していると思われる<sup>1)</sup>。ポンプ圧送による土砂搬出の問題点のひとつは、長距離輸送を可能にするために、輸送土砂に多量の水を注入することが必要となり、その結果として、搬出土を泥土状態にしてしまうことである。そこで、注水に代わる補助工法として、気泡を輸送管の内壁にリング状に注入し潤滑材として使用することを考え、これらの実物大規模の輸送実験を行なった。気泡は、ベルトコンベアの土砂の付着防止

や気泡シールド工法<sup>2),3),4),5)</sup>に利用され、摩擦抵抗を減ずる効果のあることが確かめられているものである。

ここでは、気泡を用いた土砂輸送実験の概要について述べる。

### 2. 実験概要

#### 2.1. 実験設備

実験は当社の東京機械工場の敷地内で実施した。図一1に輸送実験設備の全体図を示す。土砂輸送ポンプは、コンクリートポンプ(丸矢製 BRA-1406, 75 kW)である。輸送管は呼び径 8 B (200 mm) の配管用炭素鋼鋼管 (SGP) で、水平部 169.45 m, 垂直部 4.13 m, エルボ 8 個とテーパ管 2 個 (6 B~7 B, 7 B~8 B) からなっている。配管の長さは実長 173.58 m で、水平換算長さは約

250 m である。

## 2.2. 気泡注入方法

起泡剤は第一化成産業(株)と当社で共同開発した消泡性に優れた界面活性剤系のもので、商品名 DO フォーム D と呼ばれているものである。この DO フォーム D を 3% 水溶液にしたものを起泡溶液として、図-2 に示す発泡ラインからなる気泡ユニットによって、発泡倍率 20 倍程度で棒状に発泡する気泡を作成する。この気泡を、気泡注入ポンプによって、土砂輸送ポンプの吐出口から 8.7 m 下流の所に設置されている気泡注入リングを通して、輸送中の土砂の周りに送り込む。

## 2.3. 輸送土砂

実験で輸送する土砂は、南千住工事事務所の現場から発生した粘土である。粒度特性は砂分 8%，シルト分 53%，粘土分 36% で最大粒径 0.42 mm，土粒子の比重 2.64 である。自然含水比 ( $W_n$ ) は 55.6% で、そのコンシステンシーは、液性限界 ( $W_L$ ) 58.2%，塑性限界 ( $W_p$ ) 26.5% で、塑性指数 ( $I_p$ ) 31.7 である。

## 3. 計測方法

### 3.1. 自動計測

コンクリートポンプ油圧 ( $P_s$ )，管内圧力 ( $P_0, P_1, P_2$ )， $P_E$ )，管内差圧 ( $\Delta P_1, \Delta P_2$ )，気泡注入圧 ( $P'$ ) および土砂流量 ( $Q$ ) を、図-1 に示す位置に設けた圧力計，差圧計および電磁流量計によって自動計測を実施した。自動計測は図-3 に示すシステムで行ない，1 秒間隔で各データを採取した。

### 3.2. 手動計測

含水比，スランプ，土砂輸送ポンプの電力，および搬出土の観察を，気泡注入時と無注入時にそれぞれ計測する。また気泡注入時には起泡溶液注水量を計測する。

## 4. 予備実験

輸送実験を開始する前に，予備実験として気泡注入するためのポンプの選定と気泡注入リングの選定実験を行った。

### 4.1. 気泡注入ポンプの選定実験

気泡注入ポンプは，適切な圧力でかつ適切な流量でポンプに過度の負担が掛かることなく気泡を送れることが望ましい。

まず，ピストン型のエアモルタルポンプ (AP-250, 22 kW) を用いてみた。その結果，吐出シリンダーが非常に高温となり，出てくる気泡も熱をもっていた。また，

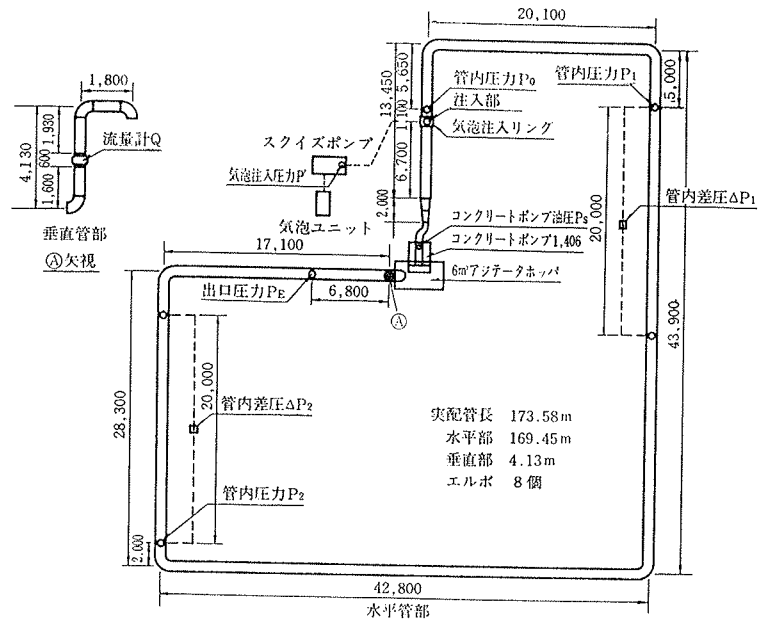


図-1 実験設備の全体図

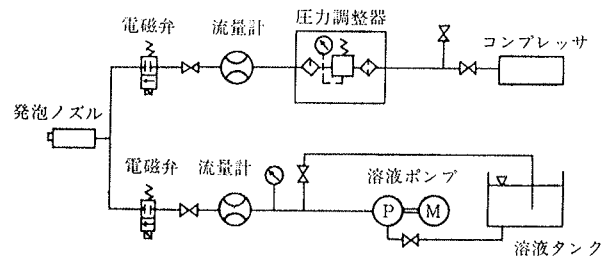


図-2 気泡ユニットの発泡ライン

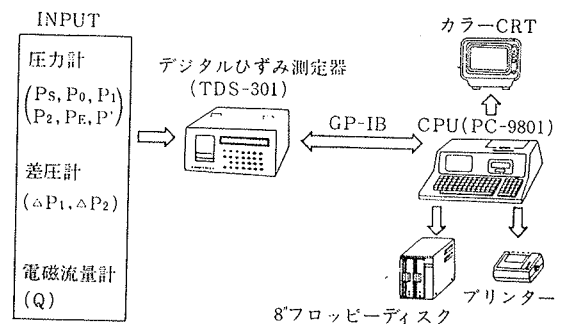
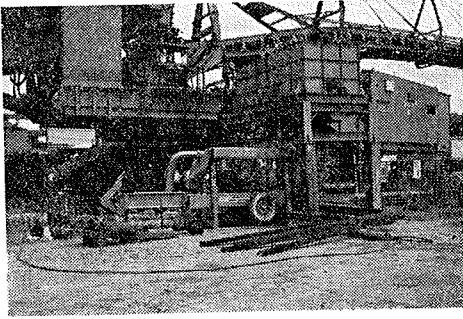


図-3 自動計測ブロック図

吸入口側にポンプ内の気泡が逆流した。これらのことより，このポンプは気泡を送るのに不適當であると判断した。

次に，スクイズ型のコンクリートポンプ (PC-05, 7.5 kW) を用いてみた。その結果，搬出された気泡の温度もあまり上がらず，流量の可変設定もできた。したがって以降の輸送実験には，気泡注入ポンプとして PC-05 を用いることにした。



写真一 土砂輸送設備

4.2. 気泡注入リングの選定実験

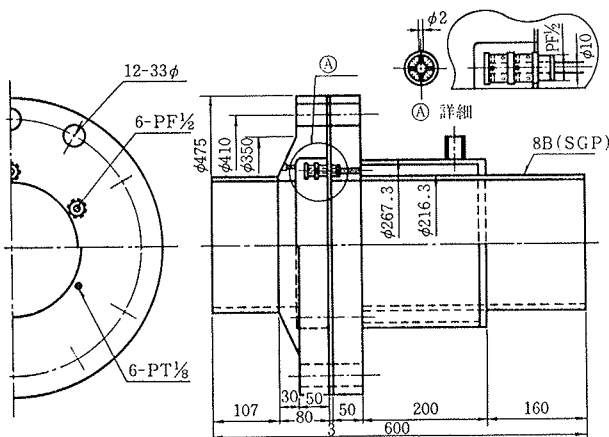
気泡の注入方法は、輸送管の内側にリング状に注入することが最も効果的である。また、土砂輸送圧力に対抗できる逆止弁が必要である。種々検討の結果、3種類の気泡注入リング(A, B, C)を試作した。

気泡注入リングの選定実験は、図一1の全体設備のうち配管を土砂輸送ポンプの吐出口から約15mの所で切り離したもので行なった。土砂を輸送しながらスクイズポンプによって、それぞれの気泡注入リングを通して気泡注入を行なった。この際、逆ポンピングによって土砂を逆流させることも行なった。

気泡注入リングAは逆止弁として円筒状のゴムを用いるものである。これは、逆止弁がうまく作動せず気泡注入ホース内に土砂が逆流した。また、10 kgf/cm<sup>2</sup> 耐圧のフランジにより構成されていたためフランジの間より土砂の漏れが生じた。

気泡注入リングBはドーナツ状のゴム板リングを逆止弁として用いるものである。これは、良好な気泡の注入が可能であったが耐久性の面で問題が残された。

気泡注入リングCは中空丸棒に注入口を孔け、それを覆うように逆止弁として円筒上のゴムをかぶせたものを



図一4 気泡注入リングC

6個用いたものである。構造を図一4に示す。これは、土砂の逆流もなく良好な気泡の注入が可能であった。したがって以降の輸送実験では主に気泡注入リングCを用いた。

5. 土砂輸送の実験結果および考察

実験では、初めに無注入でポンプ圧送を行ない、次に気泡を注入してポンプ圧送を行なった。その際、輸送量は両者とも同じになるように設定した。実験データの採取はのべ67ケース行なった。これらのデータをまとめた結果を以下に述べる。

5.1. 管内圧力と輸送土量の経時変化

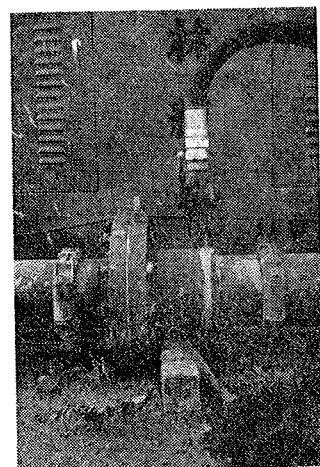
図一5に土砂輸送ポンプの吐出口より9.8m下流の管内圧力  $P_0$  と土砂輸送量  $Q$  との経時変化を、気泡の注入有り無しの場合で比較したものを示す。 $P_0$  の値は、土砂輸送ポンプのピストンの動きにつれて波形を画いているのが見られる。 $P_0$  のピーク付近でみると、無注入の場合に較べて、気泡を溶液量にして0.84% (体積%) 注入すると管内圧力が半分以下となり、1.05%注入すると管内圧力が約1/4になっていることが分かる。

5.2. 輸送管内の圧力分布

図一6に管内圧力  $P_0$  の検出位置を基点として、輸送管の下流方向にとった管内圧力値を示す。図中の縦軸は管内圧力  $P_0$ ,  $P_1$ ,  $P_E$  の最大ピーク値を示し、横軸は圧力計の取付けてある配管の距離を示している。この図から圧力損失が大幅に低減されていることが分かる。

5.3. 気泡の溶液注入量と圧力損失

気泡注入時と無注入時の管内圧力  $P_0$  の比を圧力損失比とする。この潤滑効果の指標となる圧力損失比を気泡の溶液量との関係で図一7に示す。図から気泡の注入量に伴って圧力損失が低減する傾向があることが分かる。



写真二 気泡注入リングの取付状態

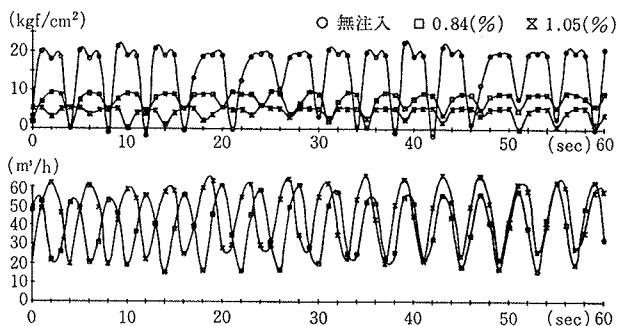


図-5 管内圧力 ( $P_0$ ) と輸送土量 ( $Q$ ) の経時変化

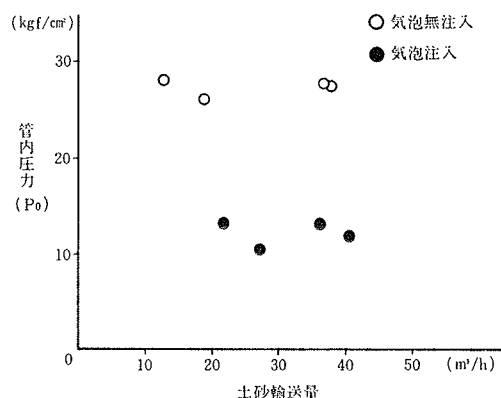


図-8 土砂輸送量と管内圧力 ( $P_0$ ) の関係

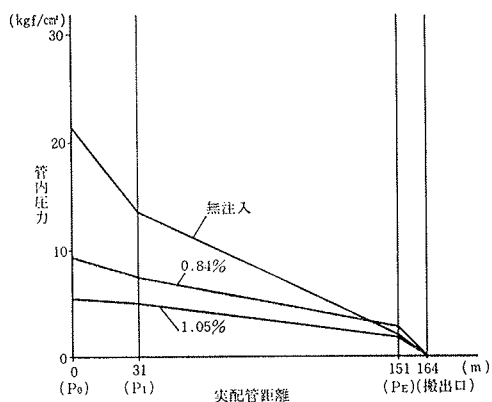


図-6 輸送管内の圧力変化

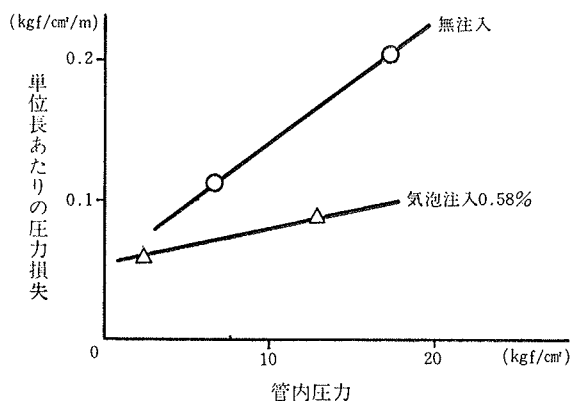


図-9 管内圧力と単位長あたりの圧力損失比

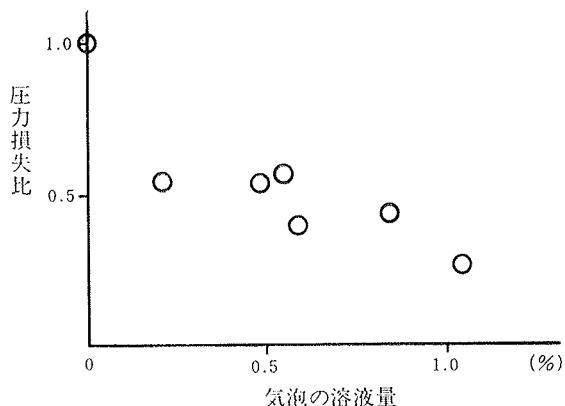


図-7 気泡の溶液量と圧力損失

#### 5.4. 土砂輸送量と圧力損失

図-8 に土砂輸送量と管内圧力  $P_0$  の関係を示す。気泡の注入によって  $P_0$  が低減しているのが見られるが、輸送土量にはほとんど影響を受けていない。

#### 5.5. 管内圧力と圧力損失

図-9 に圧力計  $P_1$ ,  $P_2$  により計測した管内圧力と、差圧計  $\Delta P_1$ ,  $\Delta P_2$  により算出した単位長あたりの圧力損失の関係を示す。図から管内圧力の増加に伴い圧力損失も増加することが分かる。このことより、土砂輸送ポンプの元圧を2倍にしても輸送距離は2倍にならないことが

推定される。

#### 5.6. 土砂輸送ポンプの所要電力

図-5 の輸送状態におけるコンクリートポンプの電動機への入力電流値は、無注入の場合で 150~170 A, 気泡溶液量 0.84% 注入の場合で 100~120 A, 1.05% 注入の場合で 90~100 A であり、所要電力は 6~8 割になった。

#### 5.7. 輸送土砂の性状変化

図-5 の輸送状態における輸送土砂の含水比とスランプ値を表-1 に示す。気泡の注入により搬出土砂を著しく泥土化させることはなかった。これは、気泡と粘土は基本的に混合されないためである。また、搬出土砂における気泡の状態は表面に付着している程度であった。

#### 5.8. コンクリートポンプの吸込み特性

コンクリートポンプの設定流量と電磁流量計による計測流量より土砂の吸込率を求めたところ、気泡注入の有

気泡溶液量(%)	含水比(%)	スランプ(cm)
0	55.8	6.2
0.84	56.4	6.7
1.05	57.6	8.0

表-1 輸送土砂の性状

無にかかわらず約75%であった。

また、粘土の輸送土量の計測に電磁流量計が使用可能であることが分かった。

5.9. 気泡注入リングの取付け位置

気泡注入リングを土砂輸送ポンプの吐出口から 2.0 m の所に取り付け、土砂輸送を行ない気泡注入したところ、土砂輸送ポンプに気泡が逆流し圧送ができなくなった。このことより、気泡注入リングは土砂輸送ポンプの吐出口からある程度離す必要があることが分かった。

5.10. 輸送可能距離の検討

上述した実験結果から得られたデータを基に管径 8B の輸送管を用いた時の輸送可能距離を検討した。まず各輸送条件における単位距離あたりの圧力損失を求める。土砂輸送用のコンクリートポンプで無理なく輸送できる吐出圧は 30 kgf/cm<sup>2</sup> 程度であるので、下式により輸送可能距離を求め表一 2 に示す。

$$\text{輸送可能距離(m)} = \frac{\text{コンクリートポンプの許容限界吐出圧 (kgf/cm}^2\text{)}}{\text{単位距離あたりの圧力損失 (}\frac{\text{kgf/cm}^2\text{)}{\text{m}}\text{)}$$

ただし、この結果は5.5. で述べたことや輸送距離による気泡の潤滑効果の劣化は考慮していないため、実際には輸送可能距離は若干少なくなると思われる。

気泡溶液量 (%)	単位長さあたりの圧力損失 (kgf/cm <sup>2</sup> /m)	輸送可能距離 (m)
0	0.131	229
0.84	0.057	526
1.05	0.034	882

表一 2 輸送可能距離

6. むすび

シールド工事の掘削土をポンプ圧送する方法は、従来のズリトロによる方法に比べて、安全性と経済性において有利な面を持っており、今後とも各所で採用されることが多くなると思われる。一方、ポンプ圧送を採用する場合には、必ず輸送距離を延ばすための何らかの補助工法が必要となる。本文中で述べたように気泡を用いるこ



写真一 3 土砂の搬出状態

の補助工法は、注水に比べて注入量が少なく、輸送土の性状を大きく変化させることなく輸送距離を増大させることができるという特長をもっている。また、気泡を用いたこの工法はズリの輸送だけでなく、コンクリートのポンプ輸送などにも適用できるものである。

謝 辞

本実験を行なうにあたって御協力をいただいた東京本社 土木技術部、土木部、機械部および東京機械工場の方々、また第一化成産業(株)に深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 斎藤, 藤原, 羽生田, 田中: 気泡シールド工法における掘削土の連続輸送に関する基礎実験, 大林組技術研究所報, No. 27, (1983), pp. 107~111
- 2) 斎藤, 藤原, 羽生田, 山下: 土圧系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, No. 21, (1980), pp. 105~109
- 3) 斎藤, 藤原, 羽生田, 山下: 気泡シールド工法の開発に関する現場実験(その1), 大林組技術研究所報, No. 24, (1982), pp. 97~101
- 4) 藤原, 羽生田, 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, 第3部, (昭和56.10), pp. 358~359
- 5) 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講演集, (昭和57.6), pp. 1281~1284