

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

——ポンプによる気泡土の圧送——

齋藤 二郎 藤原 紀夫
羽生田 吉也 田中 俊次
(内村ダムJV工事事務所)

Experiments on Continuous Transportation of Excavated Soils in Foam-injected Shield Tunnelling

——Pumping of Soil-bearing Foam——

Jiro Saito Toshio Fujiwara
Yoshinari Hanyuda Shunji Tanaka

Abstract

Foam-injected shield tunnelling is a method of carrying out excavation smoothly and safely utilizing foam in the bulk-head maintaining a balance between earth pressure and foam pressure. In this paper the authors deal with transportation by pumps of excavated soils having fluidity for the purpose of perfecting the method as a consistent system, from excavation to transportation. The experiments are fundamental ones using pumps to transport soils contained in foam along horizontal pipe-lines. The pumps used were a squeeze pump and a vacuum pump as representative of plus- and minus-pressured mechanisms, respectively. As concerns soils, sand, silty sand and loam were selected for specimens, mixed with foam beforehand. The result that transportation is possible was obtained, although on the other hand, compressibility and dissipation of foam can possibly cause problems in transportation.

概 要

気泡シールド工法は、土圧系シールドなどで気泡を利用して、圧力室内で切羽との圧力バランスを取りながら、安全かつスムーズに掘進させる方法である。ここでは、気泡の混入効果の一つである流動性を生かして掘削土の連続的な輸送を行ない、気泡シールド工法を掘削から土砂輸送までの一貫したシステムとしての完成を試みる。土砂輸送の第一段階として、気泡土のポンプ圧送実験を行なった。

ポンプには、正圧の代表としてスクイズポンプを、負圧の代表として真空ポンプを実験に適用している。また、対象土として、利根川砂、関東ローム、および都内現場の発生土の計3種類を用いた。あらかじめ、気泡をミキサで混ぜ込んで気泡土を作成してから、各ポンプで輸送した。この結果、二つのポンプによる各気泡土の輸送は可能であることが分かった。一方、正圧による方法では、管内圧力の上昇に伴って気泡の圧縮性が問題となり、負圧による方法では、消泡が問題となることも明らかにされた。

1. まえがき

気泡シールド工法とは、シールド掘進の際に、掘削土砂内に緻密な気泡を混入し、土砂の流動性を改善することによって、施工面でいろいろ利用していこうとする工法である¹⁾。

土圧系シールドの圧力室に気泡を注入した場合の効果

については、すでに、現場実験および室内実験を通じて確認^{2),3),4)}され、実用化できる目処もたっている。

本報では、排出された土砂に気泡を加えて気泡土とし、これをポンプによってパイプライン内を連続輸送する方法に関する基礎的な実験とその結果について述べる。

一般的な気泡土の性状は、単位体積重量が小さく、スランプが大きい反面、空気粒子の介在によって圧縮性に

富んでくるため、ポンプによる圧送を行なう際に、対象土質および圧送方法に依っては、輸送性に大きな差がでてくるものと予想される。そこで、本実験を実施し気泡土を連続輸送する上での基本的な技術と問題点の検討を試みる。

2. 実験方法

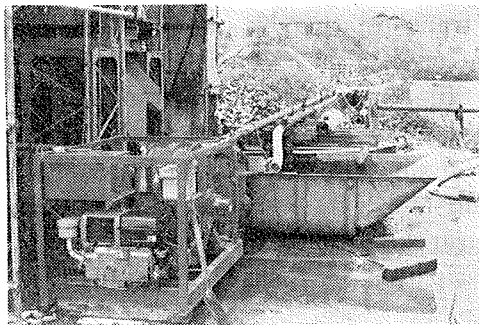
2.1. 試料土

関東ローム、利根川砂、および都内のシールド現場における発生土を試料土として用いる。各々の物理性状を表一に示す。現場発生土は、利根川砂と同じ砂質土ではあるが、細砂および粗砂の割合が逆転した粒度分布となっている。

2.2. 気泡土の作成

各試料土に、あらかじめ設定した気泡混合率にそって、気泡を加えた後、強制練ミキサー（YG-250）によって、3分間の攪拌を行なって気泡土を作成する。

また、起泡剤は、D.O. フォームCと呼ばれる界面活性系のもので、この3%水溶液を用いる。



写真一 スクイズポンプと実験用の管路

2.3. 適用ポンプと輸送方法

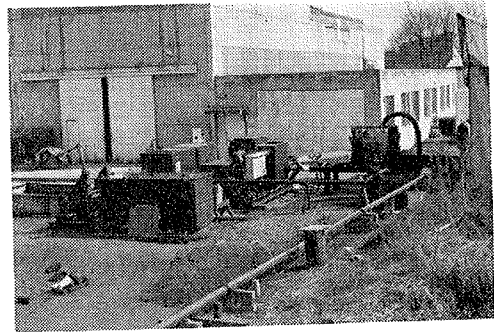
実験の全体的な仕様を表二に示す。正圧および負圧による輸送装置の代表として、それぞれスクイズポンプと真空ポンプとを実験に適用する。

2.3.1. 正圧による輸送 長さ 23 m の管路で、数種類の管径のものをU字型かつ水平に敷設する。気泡混合率(λ)、土質、および流速も変えて、気泡土をスクイズポンプで圧送する（写真一参照）。

この際の、気泡土の変状を圧送前後のスランプ値、単位体積重量、および含水比の測定によりとらえる。また管路内の圧力分布、流量を調べて、気泡土の圧送中における圧力損失について検討する。

2.3.2. 負圧による輸送 負圧による実験装置の全景を写真二に示す。配管は 4 inch のつる巻鋼管で、矩形状に管路(総延長 140 m)を形成し、かつ水平に配置する。

気泡土の吸込側には、フレキシブル管を接続し、先端



写真二 負圧による輸送のための管路

試料土名	粘土分 %	シルト分 %	砂分 %		土粒子比重Gs	均等係数 U _c
			細砂分	粗砂分		
A 関東ローム	22	32	31	15	2.75	130
B 利根川砂	0	2	29	69	2.80	2.9
C 現場発生土	0	4	77	19	2.76	2.1

表一 試料土の物理的性状

実験ケース名	ケース 1	ケース 2
輸送形態	正圧による輸送	負圧による輸送
適用するポンプ仕様	ポンプ名称	スクイズポンプ
	形式	PQ09-20M
	出力	15KW
	輸送量	0~15m ³ /H
	配管接続口	100mm
	その他	ポンプチューブ径3.5inch
適量試料土	AおよびB	BおよびC
適用配管	2,3,4,6inch径,23m長	4 inch径,140m長

表二 実験の仕様一覧

部を人が持って気泡土と外部大気の流入割合を調整できるようにする。管路の他端に、0.8 m³ のタンクを取付けて、同タンク内の真空度を高めることにより、気泡土が管路内を通過してタンク内に輸送される。

調査は、気泡土の圧送前後の変状、輸送量およびエネルギー消費量などを対象として行なう。

3. 実験の結果と考察

3.1. 正圧による輸送

3.1.1. 輸送量 試料土Aに対しては最大約 11 m³/H (4 inch, $\lambda=80\%$ の場合、以下、inch は B を付けて表わす)、試料土Bについて、同一条件で 12 m³/H であった。

気泡混合率 λ と輸送の限界についてみると、試料土A、B、それぞれに対して、気泡混合率 $\lambda=60\%$ 、 40% 未満では、圧送がほとんど不可能であった。試料土Bの $\lambda=40\%$ の場合でも、2^B および 3^B の配管では、閉塞することがあって、配管径と輸送の限界との関係も一部みられた。

なお、図一に 3^B、4^B の場合の気泡土の輸送量を示す。

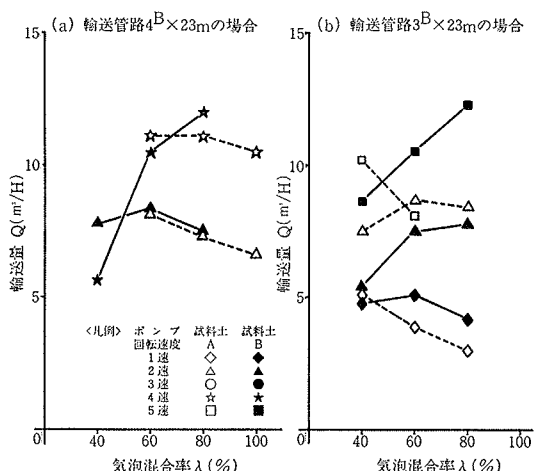


図-1 管径 3^B および 4^B の場合の輸送量 (正圧)

3.1.2. 管路内の圧力分布 図-2には、配管の径を4^B、流速もほぼ35 cm/sと一定条件にした際の管路内の圧力分布を示す。但し、試料土Bの気泡混合率40%の場合は例外で、同上流速になるようにポンプの回転数を合わせたが、実際には、18 cm/sとほかに比べて小さい値となっている。また、圧力は絶対圧で表わしている。

試料土Aでは、気泡混合率λが60、20%の場合の管内の圧力pは、それぞれのλにおいて管路出口の手前5m、10mまで気泡土が流れないと、2 kgf/cm²以下にはならない。これがλ=100%にすると、ポンプの吐出口付近、すなわち管路入口で約2.3 kgf/cm²程度の圧力に留まっている。

試料土Bについては、上述のように、λ=40%では送ることができる程度で、設定流量が落ちた結果、所定の流速に保持できなかった。λ=60、80%のデータを見ると、管路入口付近の圧力は、約2 kgf/cm²前後で、圧力

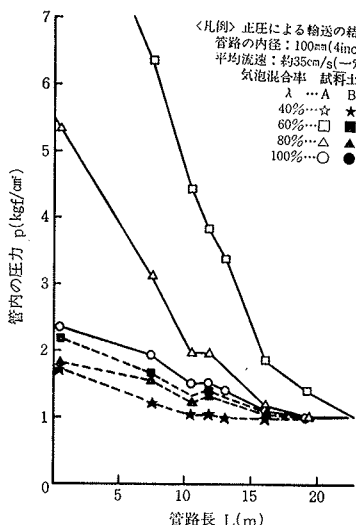


図-2 管路の圧力分布 (正圧)

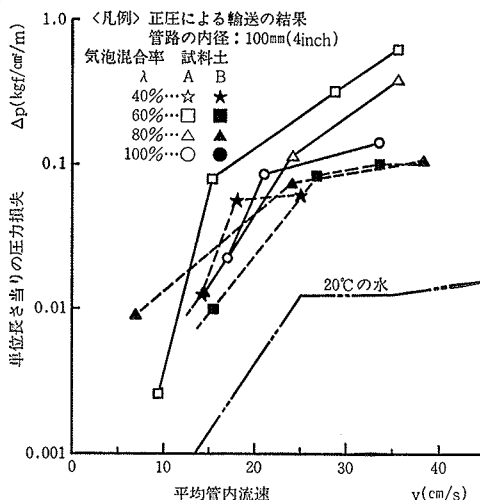


図-3 配径と圧力損失 (正圧)

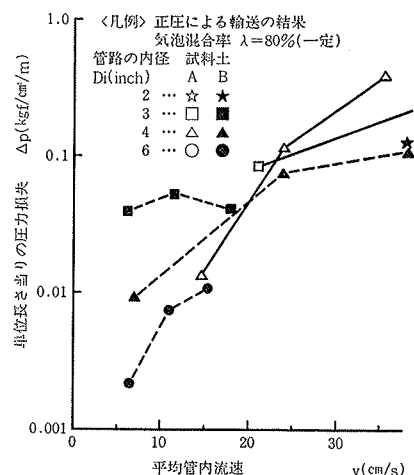


図-4 気泡混合率λと圧力損失(正圧)

分布状況は、両者のデータともほぼ同じで、若干、λ=80%のほうが低い。

3.1.3. 最大吐出圧にみる試料土 A, B の差 スクイズポンプの吐出圧の能力的な最大値は、18 kgf/cm²であるが、気泡土の輸送時における最大吐出圧は、試料土Aに対して約15 kgf/cm² (3^B, λ=60%時)、試料土Bに対して約3 kgf/cm² (2^B, λ=40%時)であった。配管条件こそ違おうが、試料土 A, B に対する最大吐出圧の差が、これだけ異なることは興味深いものがある。

両者は、気泡の混入の際に、強制練ミキサで攪拌された結果、試料土Aでは練られるだけで流動性が改善されており気泡は付加的な効果として作用し、試料土Bでは気泡の混入によって初めて流動性が改善されている。この差が、上述の最大吐出圧の差を物語っている。

試料土Bでは、最大吐出圧3 kgf/cm²付近になると、気泡土でも、内部の気泡粒子が圧縮され、砂としての挙動を示し、ポンプでは、管路内を圧送することができなくなる。そうでなければ、図-2の黒塗の星印のように流量が下がる。

他方、試料土Aでは、吐出圧がある値を超えて気泡粒子が圧縮されて内部摩擦を減少する効果がなくなっても自身の流動性は、依然と備わっている為に、ポンプ自身の能力限界に近い吐出圧でも輸送が可能であったと考察する。

3.1.4. 圧力損失 図-3には、λ=80%で配管径の異なる場合の圧力損失を示す。また、配管径4^Bに固定してλをパラメータにした圧力損失を図-4に示す。

各図によると、試料土BはAよりも、単位管路長当りの圧力損失は少なく済む。試料土Aでは、気泡混合率λを100%程度にしないと、Bなみの効果が見られな

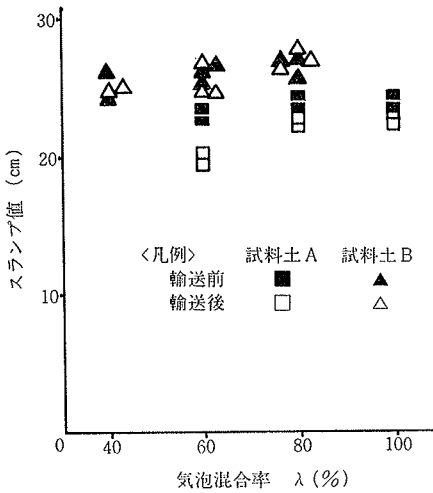


図-5 気泡土の変状 1 (正圧)

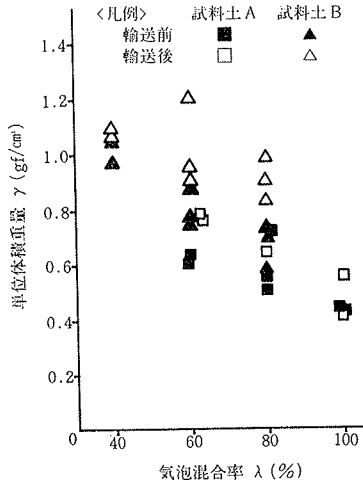


図-6 気泡土の変状 2 (正圧)

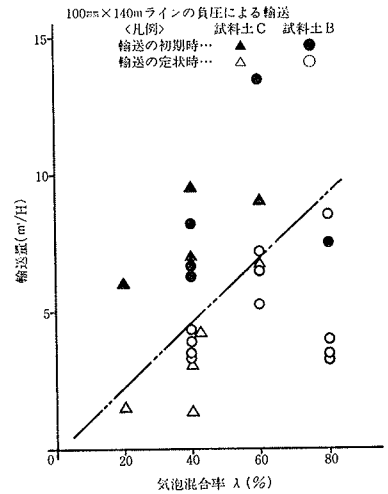


図-7 輸送量 (負圧)

い。また、流速が 20 cm/s 付近までは、一定値以上の λ が確保されていれば、 λ はむしろ少なめに設定の方が、各試料土の圧力損失が小さくて済む。流速が前記の値を越えて大きくなると、圧力損失も 0.08~0.09 kgf/cm² 以上となり、気泡混合率による差は明確になる。この現象も、気泡土の圧縮性の影響を側面的に示しているものと考えられる。

3.1.5. 圧送前後の気泡土の変状 単位体積重量およびスランプ値にみる気泡土の変状をそれぞれ図-5, 6 に示す。

気泡土の圧送前後の変化は、単位体積重量の変化 $\Delta\gamma$ で 0.16 gf/cm³ 程度の若干の増大が見られるが、スランプおよび含水比からは、ほとんど変化が認められない。

このことから、少なくともスクイズポンプによる圧送中に、図-2 で示したように、管路内の圧力が上昇しても一時的な気泡の圧縮に留まり、気泡粒子の破壊はほと

んど無いことが分かる。

3.2. 負圧による輸送

3.2.1. 輸送量 図-7 に負圧による気泡土の輸送量を示す。輸送の開始時には、管路内が空で背圧も小さい理由で、図中の二点鎖線を上回る量が送れた。定常時には試料土 B, C について共に、 λ が大なる程、輸送量も増えた。図中における若干のバラツキは、気泡土の吸込時におこる大気吸引割合の多少に因るものと判断される。

3.2.2. 輸送時の管路の真空度 気泡土が輸送されている際の真空度は、140 m の管路上で 320~400 mmHg、タンク内で 500~700 mmHg、さらに真空ポンプの吸込口では 650~720 mmHg であった。

気泡土が大量に流れる際のタンク内の真空度は 650 mmHg 付近で、流れる量が少なくなると真空度は 720 mmHg 以上に上昇する。

負圧による実験全般的に、真空度はいつも脈動しながら、気泡土の輸送がなされていた。

3.2.3. 気泡土の変状 圧送前後の気泡土の変状を、図-8, 9 に示す。

圧送後の単位体積重量は、気泡を加える前の試料土の値に近く、ほとんど消泡されていることが分かった。スランプ値でみると、試料土 C の値のように前後の変化の少ない場合がある。これは、輸送中に、パイプライン内での練り返しか、ミキサによるかくはんによって得た流動性だけが、依然、保持された結果と推定され基本的には、試料土 B, C とともに、負圧による輸送で、消泡はかなり進んだと判断される。

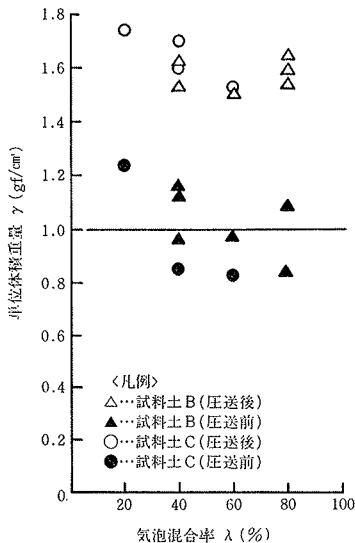


図-8 気泡土の変状 3 (負圧)

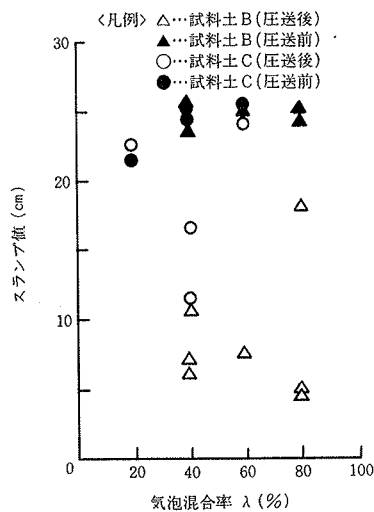


図-9 気泡土の変状 4 (負圧)

3.2.4. 負圧による輸送の追加実験と結果 気泡土の吸い込みの際に、人が吸込ホースの先端を持って空気と気泡土の割合を調整すると、すでに見たように、輸送量にかなりのバラツキを生ずる。

そこで、吸込ホースであるフレキシブル管の先端に、空気を気泡土とは別系統で吸引できるように、小径のパイプ 3/8~2^B を取り付けた。また、この小パイプを流入する空気量を絞れる構造にして実験した。

この実験で、最大 18 m³/H (輸送の初期時)、平均 9 m³/H を記録した。空気の吸込量を増大させると、管内の流速も上がるが、管内の土砂の充満率は低下する。逆に、吸込量を減少させると、流速は下がるが充満率は上昇する。このどちらが気泡土の輸送に適するか明確にできないが少なくとも、実験中の流れは、脈動的であったことから前者および後者の流れが定時間隔に発生していたことは事実である。

3.3. 正圧および負圧による輸送の比較

3.3.1. 使用エネルギー ポンプを駆動するための動力源であるディーゼルエンジンの燃料消費量で、輸送した気泡土の量を除して使用エネルギーを算出する。

正圧および負圧による輸送で共通な試料土 B について管径 4^B で、正圧で 4.0 l/m³、負圧で 4.8 l/m³ であったが、後者では管路長が 6 倍に近いこと、また上述のディーゼルエンジンとは、負圧による輸送では真空ポンプの電動機の電源用のジェネレータのものであることを考慮すると、負圧の輸送はエネルギー的に有効であった。

3.3.2. 輸送性 スクイズポンプでは、真空ポンプの 1/3 以下の馬力の原動機で、管路長約 1/6 とはいえ、ほぼ等量の気泡土を輸送できた。

3.3.3. 気泡の効果と限界 本実験のように、あらかじめ、気泡を加えてから輸送する場合には、負圧による輸送では、途中から消泡が進み、気泡土としての効果が薄れる。正圧による輸送では、消泡こそ少ないが、ポンプ吐出口付近の圧力が 3 kgf/cm² ata を越えると、試料土 B ではほとんど気泡の効果は無くなる。試料土 C では、バインダー分が多く、この臨界圧力は、もっと高くなるものと推定されるが、いずれにせよ気泡効果の無くなる圧力状態が存在する。

4. むすび

正圧および負圧を利用した気泡土の輸送は可能であった。当初の予想どおり、正圧による輸送では、気泡土の圧縮性が、負圧による輸送では、気泡土の消泡が、基本的な技術的課題として残った。

スクイズポンプのほかに、追加実験として行なったモーノポンプによる利根川砂の気泡土の圧送では、全く輸送が不可能であった。モーノポンプは粘性土に対して実績があるが、砂粒子のかみ込みと気泡土の圧縮性が高いことが原因と思われる。

今後、気泡土のポンプによる圧送では、長距離輸送が求められるが、気泡を管路上のどの位置でどのように加えるかが、一つのポイントとなるであろう。また、正圧および負圧のポンプをどのように使い分けていくか、特に正圧のポンプでは、土質性状により敏感なものが多くその使い分けを考えていく必要がある。

謝 辞

本実験を行なうにあたって、金剛機械(株)、福島エンジニアリング(株)、および第一化成産業(株)の各社から多大な御協力を得たことを記し、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, 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, No. 21, (1980), pp. 105~109
- 2) 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
- 3) 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
- 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講演集, (昭和57.6), pp. 1281~1284