

圧縮空気や気泡、分散剤を活用した土の輸送技術

Soil Transportation with Various Auxiliary Procedures Using Air Pumping or Flowability Improvement with Fine Bubbles or Dispersant Agents

岡 本 道 孝 笹 岡 里 衣 福 島 陽 坂 本 諭¹⁾

要 約

都市部の開削工事において、覆工板の架設直後で作業空間に制約を受ける場合や、供用中のライフライン近傍を掘削する場合のように、人力掘削を強いられるケースがある。生産人口が減少する中、このような苦渋作業はますます敬遠されると予想され、従来のように工事を進められなくなる可能性がある。こういった作業の労力を軽減すると同時に、作業効率を改善する方策として、圧縮空気や気泡、分散剤を用いた土の流動化といった技術の適用性を検討した。本報では各技術の概要を述べるとともに、これらの技術によって実現可能な土砂運搬量を確認するために行った実験の結果について報告する。

目 次

- I. はじめに
- II. 圧縮空気の活用
- III. 気泡混合土の活用
- IV. 分散剤の活用
- IV. おわりに

I. はじめに

機械化や自動化によって、生産性が向上されている作業が増えつつあるが、一方で未だに人力作業に頼らざるを得ない作業も多く残されている。例えば、都市土木における開削工事や躯体構築工事では、頻繁に土砂の掘削や埋戻し作業が行われており、その都度、場内での土砂運搬作業が発生する。特に、地下のライフライン近傍や狭隘部では、掘削作業に重機を使用することができないため、人力で土砂を掘削・運搬せざるを得ない (Photo 1)。このような作業で工程に遅れが生じた場合、人海戦術しか有効な対策がないが、少子高齢化の進行に伴い建設業者数も急速に減少しており、そのような施工の進め方が難しくなると予想される。あるいは加水によって土砂を流動化させ、掘削や運搬を容易にする方法も考えられるが、掘削土の扱いが発生土から汚泥に変化する上、現場からの搬出土量も増え、処理コストも増加する。更には掘削土の運搬車両台数も多くなるため、温室効果ガス排出量や工事近隣地域の交通量の増加といった環境負荷の面でも不利となる。これらを踏まえ、人力による土砂の掘削・運搬



Photo 1 ライフライン直下での掘削作業
(The Workers Struggled in Excavation Beneath the Lifelines)

作業を軽減するための方策として、圧縮空気を用いる方法 (II章) や、気泡 (III章) や分散剤 (IV章) を混合することによって掘削土の流動性を改善してポンプ圧送する方法の3種類の技術の成立性について検討した。本報では、それらの概要と実現可能な土砂運搬量を確認するために行った実験の結果を報告する。

II. 圧縮空気の活用¹⁾

1. 技術概要

本報で検討した搬送システムと空気搬送機の概要をFig.1, 2に示す。当装置はエアコンプレッサーから供給される圧縮空気を装置の取込口付近で土砂の搬送方向に噴射させるも

1) 中部支店 Chubu Branch

キーワード : 土砂輸送, 圧縮空気, 気泡, 分散剤

Keywords : soil transportation, air pumping, fine bubble, dispersant agent

のである。これによって装置の尾部に取り付けられた搬送ホースの内部に速度30~70m/sの空気の流れが生ずるとともに、取込口付近に負圧が発生し、周囲の土砂が吸引される。吸引された土砂は高速空気流とともに搬出先（たとえば、大型土囊）まで搬送される。

空気搬送機には様々なサイズのものがあるが、Fig.2 に示したシリーズだと、取込口の径は40~100mm、搬送管への径は50~150mmである。本体の長さは約0.5~1m、重量は30kg未満であり、人力で移動させることができる。今回、この圧縮空気を用いる方法に関し、土の性状が搬送効率に及ぼす影響について実験的に検討した。

2. 実験概要

Fig.2 に示す空気搬送機は、工場などにおいて乾燥した粒状体や粉末の輸送に活用される装置である。このため、比較的低い含水比の材料であれば当装置の適用性が高いと考え、Table 1 に示す地盤材料を用いて輸送実験を行うこととした。各材料の粒度分布を Fig.3 に示す。これらは都市部の工事において地下構造物の埋戻しなどに活用される機会が多いものである。

実験を行った搬送システムの編成を Table 2 に示す。実験では、取込口径φが75, 100mmの2種類の空気搬送機を用い、それぞれに長さ3mの吸引ホースと長さ20mの搬送ホースを取り付けた。圧縮空気の供給には190HPのコンプレッサー（CP）を使用した。空気供給量が搬送能力に及ぼす影響を確認することを目的として、2台のCPから圧縮空気を供給する実験も行った。実験では、大型土囊内に輸送できた材料の重量と輸送に要した時間を計測し、単位時間あたりに輸送可能な土の量を測定した。

3. 実験結果

再生砕石と再生砂を対象とした実験結果を Fig.4 に示す。φの影響を比較すると、φ=100mmの搬送量が多くなり、平均的な輸送量はφ=75mmの場合の1.4倍となった。また、CPを2台として圧縮空気の供給量を2倍とした場合の輸送量は、CPを1台しか使用しなかった時と比べて平均的に1.6倍に

増加した。CASE1 と 2 で再生砕石と再生砂の輸送量の差異が大きいのは、長径が75mmを上回る石分を効率的に取り込むことができなかつたためである。なお、いずれのケースの輸送量も、掘削土の人肩運搬（20m）に関する国土交通省の積算基準の想定値（0.6~1.6m³/h）より多くなっており、作業生産性の向上に対して一定の効果を期待できる。

このシリーズでは、搬送管として軟質塩化ビニル製のサクシオンホースを使用した。山砂の搬送を試みた際、ホース内に細粒分が付着して搬送ホースが閉塞を起こし、連続的な搬送を実施できなかった。

搬送ホースへの細粒分付着に対し、様々な対策を検討した

Table 1 実験材料の物理的性質 (Physical Properties of Soil)

材料	再生砕石	再生砂	山砂 A	山砂 B
土粒子密度 ρ _s (g/cm ³)	-	-	2.662	2.713
自然含水比 w _n (%)	11.3	13.6	16.4	-
最大粒径 D _{max} (mm)	53	9.5	4.75	9.5
細粒分含有率 F _c (%)	3.2	5.8	12.6	7.4
均等係数 U _c	22.7	20.0	3.16	2.99

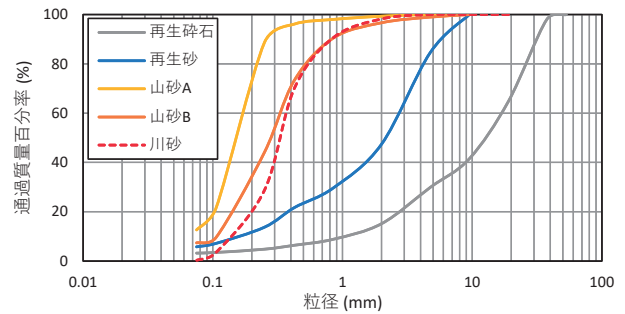


Fig.3 粒径加積曲線 (Grain Size Distribution Curves)

Table 2 実験ケース (Testing Conditions)

	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
取込口径φ	75mm		100mm	
CP台数	1台	2台	1台	2台

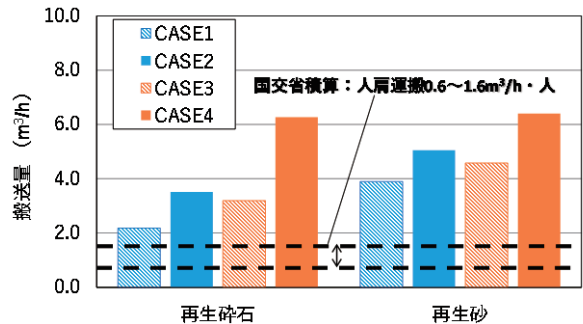


Fig.4 再生砕石, 再生砂の搬送量 (Productivity of Air Pumping on Recycled Aggregate and Recycled Sand)

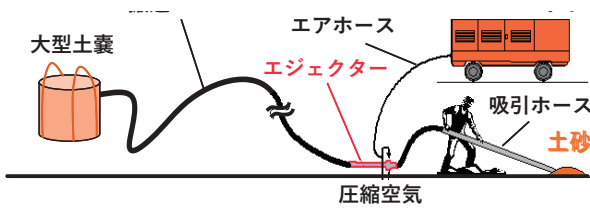


Fig.1 圧縮空気を用いた土砂搬送システム (Air Pumping System for Excavated Soil Transportation)

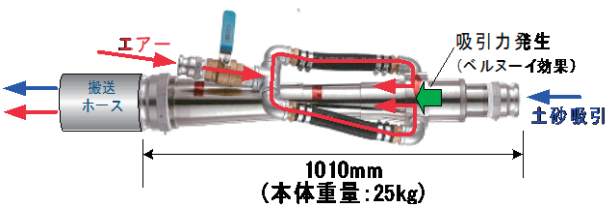


Fig.2 空気搬送機 ジェクター (Air Pumping Device Called "JECTER")

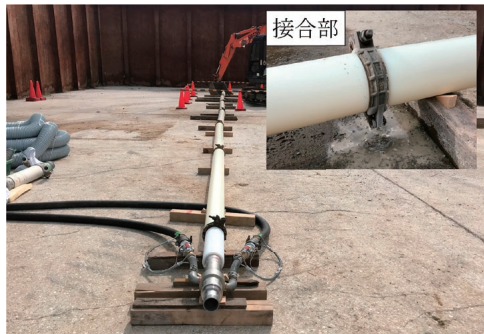


Photo 2 特殊樹脂製配管を用いた空気搬送システム (Air Pumping System with Newly Developed Resin Pipe)

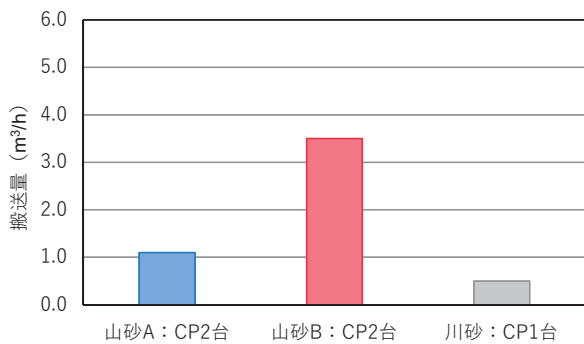


Fig.5 砂質土の搬送量 (Productivity of Air Pumping on Various Sandy Soils)

が、中でも一定の効果があったのは、搬送ホースを特殊樹脂製の配管に変更した場合であった。使用状況を Photo 2 に示す。ここで使用した特殊樹脂は高強度、耐摩耗、低摩擦、非付着性という搬送管として極めて優れた性質を持つ。なお、配管調達の都合から当配管を用いた実験では、 $\phi=75\text{mm}$ の装置のみを対象とした。また、圧縮空気は 2 台の CP から供給した。実験結果を Fig.5 に示す。搬送管を変更したことで、搬送管内への細粒分の付着はほぼ無くなり、山砂であっても連続的な搬送を実現することができた。ただし、細粒分含有率 F_c が大きい山砂 A では細粒分に起因する粘着力の影響で団粒化した土塊を多く含んでおり、この影響で山砂 B よりも取込効率が悪化したため、山砂 B と比べて大幅に低下した。Fig.3, 5 には当実験で使用していない川砂に関する情報も併記した。これは本報で述べた実験を行う前に、実工事に於いて地下躯体の埋戻し材の場合に当システムを用いた時の実績である。この時の搬送距離は 20m より長かったため、今回の実験と単純に比較することはできないが、山砂 A, B よりも F_c が小さかったにも関わらず、細粒分付着に起因する閉塞の影響で搬送作業をしばしば中断する必要があった。当実験のように CP を 2 台に増設した上で非付着性の配管を用いるといった対策を講じていけば、埋戻し材の搬送を更に効率化できた可能性がある。

Ⅲ. 気泡混合土の活用²⁾

1. 技術概要

気泡シールド工法³⁾では、掘削土と気泡を混合して塑性流動化させることによって切羽を安定化させると同時にチ

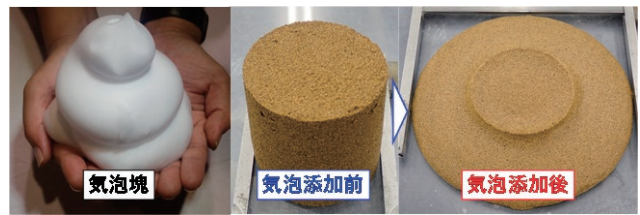


Photo 3 気泡添加による土の流動化 (Improvement of Flowability of Soil by Mixing Fine Bubbles)

ャンバーからの掘削土の排出を容易にしている。土粒子間に入り込んだ気泡がベアリングのように挙動することで、土が流動化すると解釈されており、泥土圧シールド工法のみならず、地盤改良工法や等厚式中連続壁工法などにも気泡技術が活用されている (Photo 3)。また、時間経過に伴う消泡によって流動性も消滅するため、気泡技術は掘削土の産廃化防止にも効果的である。

Ⅱ章で述べた圧縮空気を用いる技術は、システムが簡便な一方、対象土の含水比や F_c に輸送効率が左右され、現場での施工能力を予測しにくい部分がある。一方、気泡を添加することで土の流動性を人為的に調節し、ポンプで圧送できるようになれば、気泡添加・混合という工程は増えるものの、輸送量を安定化できる可能性がある。そこで、土のポンプ圧送を可能とするのに必要な気泡添加量について検討した。

2. 実験概要

気泡混合に関する一連の実験には山砂を用いた。採取時期の相違により物理特性にわずかな相違はあるが、Table 1 や Fig.3 に示した山砂と概ね同じ材料である。突き固めによる土の締固め試験 (JIS A 1210) の A-c 法で得られた最適含水比 w_{opt} は 18% で、その乾燥側 (15%) と湿潤側 (20%) に含水比を調整した 3 種類の試料を用いた。混合する気泡は、気泡製造装置を用い、気泡剤原液を 5% に希釈した水溶液を元の体積の 20 倍の体積となるように発泡させて作製した。これは、 1m^3 の気泡を作成するのに 50L の水溶液が必要となることを意味する。実験では、上述の気泡を気泡添加率 0~140% の範囲で山砂に添加・混合した。目視で気泡塊 (Photo 3 左) を確認できなくなった段階で混合を終了し、その直後にフロー試験 (エアモルタルおよびエアミルクの試験方法: JHS A 313) およびベーンせん断試験を行った。ここで言う気泡添加率とは地山と混合気泡の体積比を表し、気泡添加率 100% とは地山 1m^3 に対して 1m^3 の気泡を添加・混合することを表す。狭隘部での人力掘削を想定し、実験では山砂と気泡を樹脂製容器内でハンドスコップを用いて混合した。

3. 実験結果

Fig.6 に気泡添加率とフロー値の関係を示す。気泡添加率が大きくなるほど、フロー値が大きくなる。また、初期含水比が高いほど、小さな気泡添加率で大きなフロー値を得ることができる。Fig.7 は、気泡添加率とベーンせん断強さの関係である。気泡添加率が大きいほど、ベーンせん断強さが低下する。また、気泡添加率が大きい領域では、フロー値やベーンせん断強さに対する初期含水比の影響は小さくなる。気泡添加率が大きくなると、混合土の流動性やせん断抵抗が、気泡自体の性質に支配されるためと考えられる。

作製した気泡混合土のうち、いくつかのケースについてス

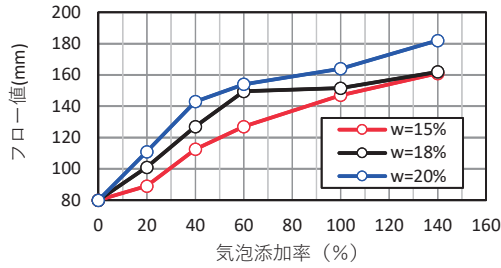


Fig.6 気泡添加率とフロー値の関係
(Relationships between Volume Ratio of Mixed Fine Bubble and Flowability)

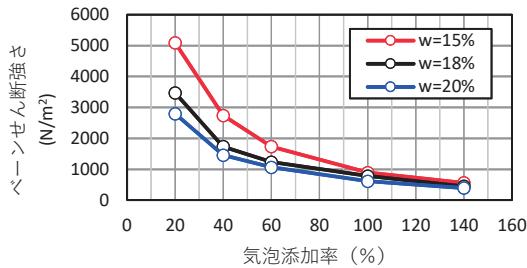


Fig.7 気泡添加率とベーンせん断強さの関係
(Relationships between Volume Ratio of Mixed Fine Bubble and Vane Shear Strength)

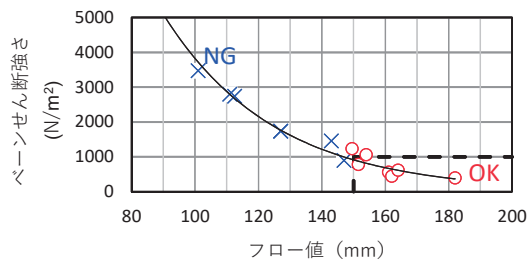


Fig.8 気泡混合土の圧送可能範囲
(The Pumpable Condition of Bubble Mixed Soil)



Photo 4 気泡を用いた掘削作業の省力化
(Effortless Excavation Procedure with Fine Bubble Mixing)

クイズポンプを用いた圧送実験を行った。狭隘部での施工を想定し、スクイズポンプには一般に調達可能な機種の中で比較的小型な機種（岡三機工(株)製 OKP-100、理論最大吐出量 4.3m³/h）を選定した。このポンプの取込口に長さ 3m の吸引ホースを取り付けて、ここから容器内の気泡土を取り込み、排出口に長さ 10m の搬送ホースを取り付けて圧送を行った。このポンプでの圧送が可能だったのは、フロー値が 150mm 以上、ベーンせん断強さで概ね 1000N/m² 以下の範囲で、ポンプの定格出力とほぼ同様の輸送量を確保できた。Fig.8 に示した関係をもとに、圧送性の確保に必要な気泡添加率を対象土の含水比に応じて決定すれば良い。

Photo 4 に当技術の活用イメージを示す。掘削対象範囲に気泡を散布し、掘削土と混合することによって流動化させた後にスクイズポンプで搬出できるようになれば、掘削土の運搬作業の省人化や効率化に繋がると期待される。ここでは、気泡と土の混合にハンドミキサーを用いているが、混合作業の効率化が今後の課題である。

IV. 分散剤の活用

1. 技術概要

東京湾岸には有楽町層粘土のように鋭敏で軟弱な沖積粘性土が分布している。Photo 5 は開削工事で遭遇した沖積粘性土の例で、人の立ち入りすら困難な状況であった。Fig.9 は液性指数 I_L とコーン指数 q_c の関係⁴⁾ である。ここには、有楽町層を始めとする東京湾岸部の沖積粘性土と、これに砂質土を混合して含水比 w を低下させた土（沖積粘性土改良）



Photo 5 東京湾岸部の沖積粘性土の例
(The Example of Alluvial Clay Distributed around the Tokyo Bay)

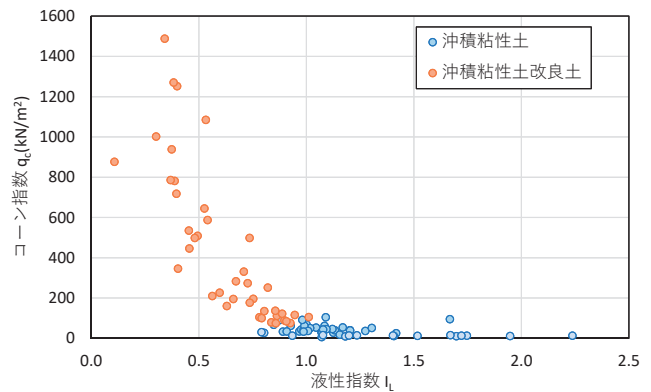


Fig.9 コーン指数 q_c と液性指数 I_L の関係
(Relationships between Cone Index q_c and Liquidity Index I_L on Alluvial Clay Distributed around the Tokyo Bay)

土)に関する結果を示しており、 I_L の増加に伴い q_c が低下することが分かる。Photo 5のような粘性土は $I_L \geq 0.7$ の範囲に分布し、 q_c が 200kN/m^2 を下回るため、掘削後は産廃処理が必要である。作業空間が広い場合、重機を用いた改質によって作業性を確保することもできるが、小口径深礎工事のように人力作業が主体となる場合は、加水によって土を流動化させてバキュームで吸引するくらいしか作業の効率化を図る上での選択肢が無く、その場合は産廃量の増加が課題となる。そこで本検討では、分散剤を併用することで、少ない加水量で圧送性を確保する方法について検討した。

2. 実験概要と結果

(1) 流動性の確認

木節粘土と関東地方で採取した2種類の粘性土(A, B)を対象とし、 I_L とフロー値やベーンせん断強さの関係を調査した。試料の物理特性をTable 3に、粒径加積曲線をFig.12に示す。また、 I_L とフロー値、ベーンせん断強さの関係をFig.11, 12に示す。 I_L の増加に伴いフロー値は増加し、ベーンせん断強さは低下する。これらの図には各試料にポリカルボン酸系分散剤を湿潤重量比で0.5%添加した時の結果も示した(Photo 6)。分散剤添加によって、同一の I_L でも流動性が高くなる傾向があるが、土によって効果の現れ方が異なり、添加量が0.5%だと粘性土Aの流動性変化は僅かである。間隙水のイオン濃度や土のコンシステンシーなどの影響と考えられるため、分散剤の添加量は土質ごとに慎重に検討する必要がある。

(2) 圧送実験

上記の土試料のうち、粘性土Bを対象としてサンドポンプを用いた圧送実験を行った。サンドポンプは航路の浚渫に使用することがあるが、Photo 5のような軟弱地盤にサンドポンプを設置し、ポンプの回転によって掘削と輸送を同時に行う作業形態をイメージしたためである。実験では3.7kW級(株)東洋電機工業所製、理論最大吐出量 $12\text{m}^3/\text{h}$ を用いた。これに2寸の鋼管およびホースを取り付け、揚程1m、水平距離約10mの圧送実験を行った。粘性土Bを 2m^3 の鋼製タンク内に投入し、含水比調整と分散剤混合を行った後、サンドポンプを沈設して圧送を行った。

分散剤を使用しない場合は $I_L=1.7$ で(Fig.11, 12中の白矢印)、分散剤を湿潤重量比で0.5%添加した場合は $I_L=1.2$ で(Fig.11, 12中の黒矢印)、それぞれ圧送可能となった。つまり、今回の条件でサンドポンプによる輸送が可能な条件として、ベーンせん断強さ $\leq 40\text{N/m}^2$ 以下かつフロー値 $\geq 250\text{mm}$ が大まかな目安となりそうである。なお、この時の輸送量は $5\sim 10\text{m}^3/\text{h}$ (加水調整後の体積)であり、ポンプ能力の40~80%であった。粘性土の湿潤密度 ρ が水より大きいことによるポンプ動力への負荷増大と、土のせん断強さに起因する配管抵抗の増大によって、輸送効率が低下したと考えられる。このようにサンドポンプを用いて軟弱粘性土を輸送する場合、流動性の確保に加え、ポンプの動力(モータ)の選定や配管抵抗の低減も課題となる。

Table 3 試料の物理特性
(Physical Properties of Clayey Soils)

	土粒子密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	自然含水比 $w_n(\%)$	液性限界 $w_L(\%)$	塑性限界 $w_P(\%)$	塑性指数 IP
木節粘土	2.642	—	41.5	18.9	22.6
粘性土A	2.635	67.6	74.1	31.7	42.4
粘性土B	2.620	46.5	40.7	29.4	11.3

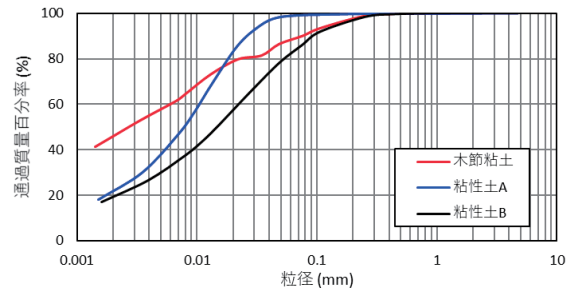


Fig.10 粒径加積曲線
(Grain Size Distribution Curves of Clayey Soils)

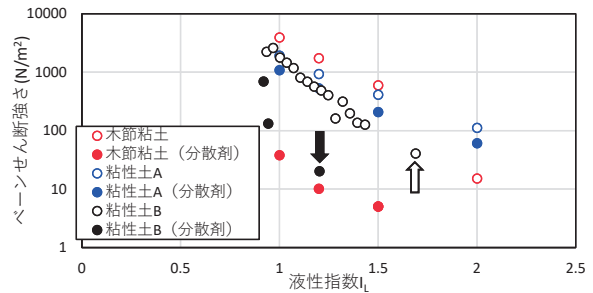


Fig.11 液性指数 I_L とベーンせん断強さの関係
(Relationships between Liquidity Index I_L and Vane Shear Strength)

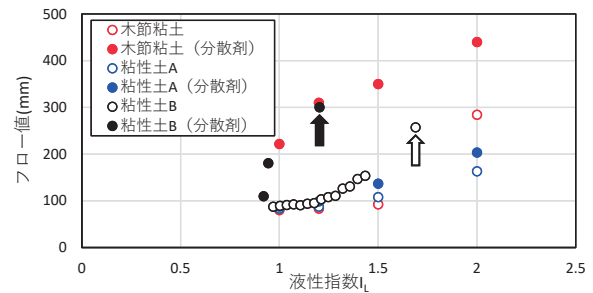


Fig.12 液性指数 I_L とフロー値の関係
(Relationships between Liquidity Index I_L and Flowability)

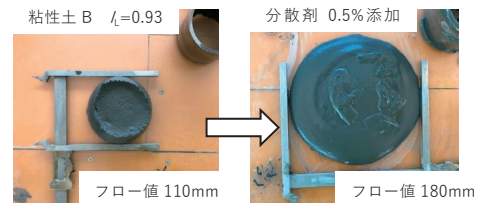


Photo 6 分散剤の添加による流動性の変化
(Flowability Improvement by Mixing Dispersant Agents)

IV. おわりに

人力による土砂の運搬作業の効率化に向け、圧縮空気や気泡、分散剤を活用する3つの技術の適用性について検討した。その結果、実用化に向けての課題が明らかになると同時に、各技術の適応性は土によって異なるため、Fig.13に示すように、輸送対象土の性状に応じて使い分けことが重要である。

建設就業者数の減少が深刻化する中、人力による苦渋作業を解消し、生産性を向上させるための技術の重要性が増していくと考えられる。この社会課題の解決に取り組む上で、本報が参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 岡本道孝ほか；空気搬送機の土砂搬送能力の検討，土木学会全国大会第77回年次学術講演会，VI-203，2022.9.
- 2) 坂本諭ほか；気泡添加による埋戻砂運搬作業の効率化，土木学会全国大会第77回年次学術講演会，VI-204，2022.9.
- 3) シールド工法技術協会；気泡シールド工法，2020.
- 4) 岡本道孝ほか；開削工事における掘削土再利用を目的としたサンドコンパクションパイルの適用事例，土木建設技術発表会2014，2014.10，pp.185-190.

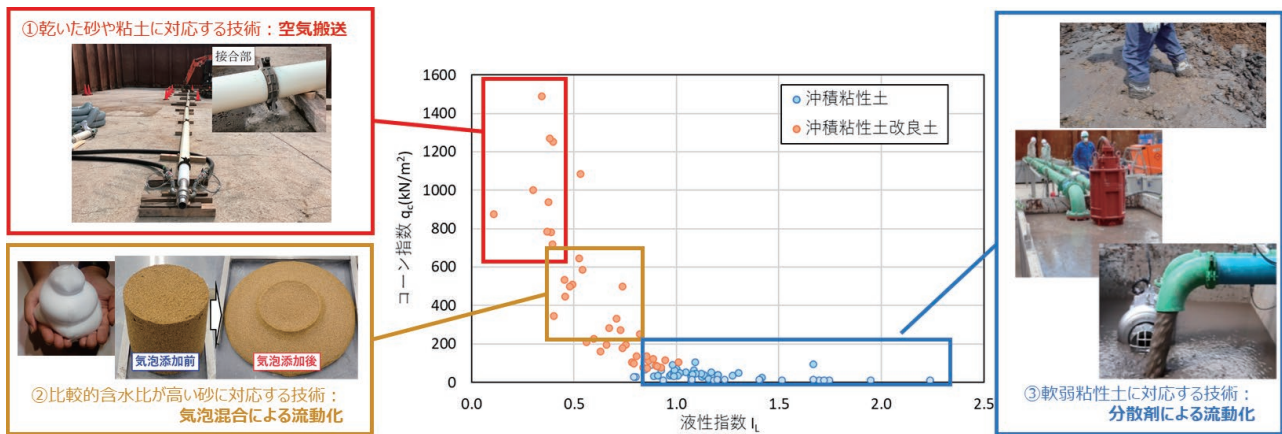


Fig.13 様々な掘削土に適した輸送補助技術

(Auxiliary Procedures for Transportation of Excavated Soils with Various Physical Properties)

**Soil Transportation with Various Auxiliary Procedures
Using Air Pumping or Flowability Improvement with Fine Bubbles or Dispersant Agents**

Michitaka Okamoto, Rie Sasaoka, Yo Fukushima and Satoshi Sakamoto¹⁾

In open excavation work in urban areas, it is often impossible to transport excavated soil with machinery because of the narrow spaces in these areas or the need to protect lifelines under service. Up to now, manual soil transportation or excavation with many workers have been done in such situations. However, procedures that require many workers should be avoided, as the number of working-age people has been decreasing.

To get avoid using manual processes in urban excavation, the effectiveness of three types of auxiliary procedures for soil transportation were examined. In this paper, the efficiency of (1) air pumping technology and the improvement of soil flowability by mixing (2) fine bubbles or (3) dispersant agents is discussed in consideration of the soil transportation capacity observed in a soil transportation test.