

大深度・極限環境に適用する 掘削物揚重用ぜん動ポンプの研究開発

上田 昌弘・中村 太郎

(株)竹中工務店と(学)中央大学は、働き方改革に伴い建設工事全体の生産性向上が社会から強く要請されていることを背景に、人間の腸の動き（ぜん動運動）を機械的に再現することで新たな方式で動作するポンプ（ぜん動ポンプ）の、建設業における実用化に向けて研究開発を進めている。本稿では、(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構からの委託を受けて推進した取組の一部と、その成果に基づく実用化のイメージについて報告する。

キーワード：ぜん動、土、揚重、大深度、建設

1. はじめに

(1) 背景

近年、特に再開発事業が盛んな大都市圏において、土地面積を効率的に利用するため建築物の高層化と大深度化が進行している。これに伴い基礎を含む地下空間が拡張した結果、掘削工事が建設工事全体に与える影響が高まっている。掘削工事は、大きく土を掘る掘削・土を地上に揚げる揚重・土を処分場へ運ぶ運搬の3つの工程で構成される。いずれも機械を用いた施工であるが、自動運転・遠隔操作などの技術開発が進められている掘削・運搬に比べ、揚重ではこの数十年間で大きな技術革新はなされていないのが現状である。

現在、一定以上の深度からの土の揚重には、一般的に1階レベルに設置した図-1に示すようなロープ式クラムシェルバケットを装備したクローラクレーンもしくはホイストクレーンで行われている。これらはバケットの上下運動により揚重するため、揚程に比例

して時間当たりの揚重量が低下する。また、運転質点を支持する強固な作業床・設置運転のための空間占有・就業時間に限りのあるオペレータが必要である。特に空間の占有は影響が大きく、全ての資機材と人員が通行する、建設工事の大動脈である1階の動線に制約が発生する。高層・大深度の建築工事によく採用される逆打ち工法の場合、通行量が通常より大きく増加するため、この影響が更に顕著になる。このように、建築工事を構成する多くの工程の一つにすぎない土の揚重であるが、これが工事全体に与える影響は大きい。それゆえに、建設業全体を挙げて推し進めている働き方改革に伴い生産性の向上が強く要請されている現在、その効率化は社会的・経済的に非常に大きな意義がある。

(2) 着想

従来技術の抱える課題を解決するべく、「揚程に関係なく一定の揚重能力」「省スペース」「省人化・自動化」と、加えて「揚重経路の自由化」「省エネルギー化」を達成するため、筆者らは人間の腸の動きに着目した。図-2に示すように、腸管は軸方向と径方向に収縮・弛緩する2種類の筋肉（縦走筋・輪状筋）で構成され、両方の動きを組み合わせることで管内の開閉運動を揚重方向に伝播させることで食塊を搬送している。この運動は「ぜん動運動」と呼ばれる。分節した食塊を一定速度で連続搬送することを可能にしているこのぜん動運動を土の揚重に適用できれば、「揚程に関係なく一定の揚重能力」「省スペース」「省人化・自動化」を達成できると考えた。

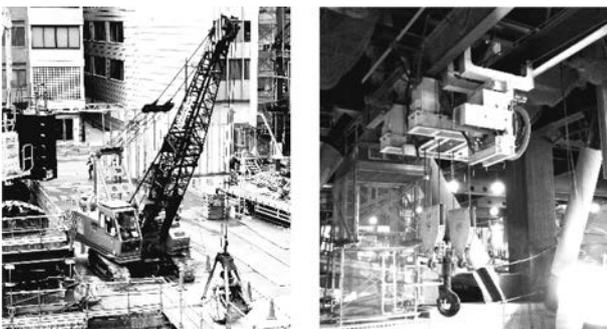
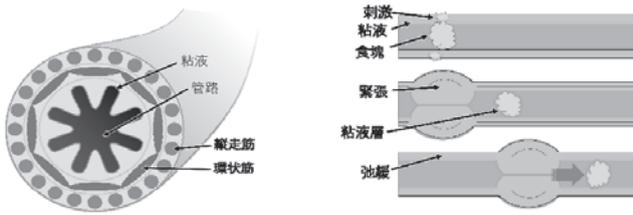


図-1 現在の揚重機械

左：クラムシェルバケットを装備したクローラクレーン
右：ホイストクレーン

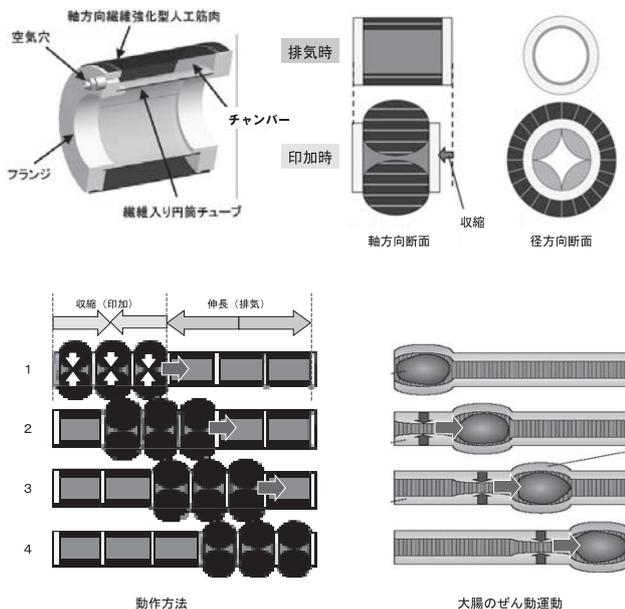


図一 腸管の仕組み

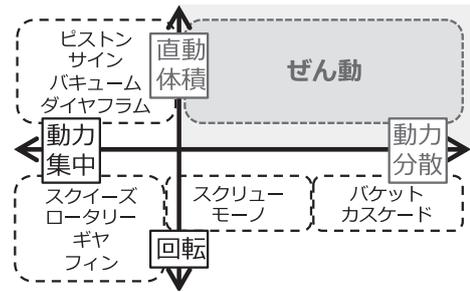
(3) ぜん動ポンプの概要

筆者らは、図一3に示す輪状筋と縦走筋の両方の動きを再現するユニットを製作し、これを複数連結して個別に制御することで、ぜん動運動の再現を図った。ユニットは、外側の軸方向繊維強化型人工筋肉、内側のゴムチューブ（以下、内筒ゴム）、これらの端部で接合するフランジで構成されている。人工筋肉・内筒ゴム・フランジで形成されたチャンバ内に圧縮空気を印加すると、人工筋肉は繊維拘束により径方向外側に膨張しながら軸方向に収縮し、内筒ゴムは径方向内側に膨張することで、それぞれ縦走筋・輪状筋の動きを再現する。この動きを各ユニット間で連続的に発生させることで、大腸のぜん動運動が再現される。

このようにぜん動運動を再現する本機構を、圧力で物体を移動させるポンプの一種に位置付け、「ぜん動ポンプ」と呼称する。ぜん動ポンプは図一4に示すように、加圧機構が搬送経路上に分散配置され、かつ搬送物を内包・分節して搬送する（直動・体積方式）という、従来に無い組み合わせの方式で動作するポンプであり、これまでに高粘性流体・固液混合流体・粉体および土砂の揚重に成功している。本稿では、国立



図一3 ぜん動ポンプの仕組み



図一4 ぜん動ポンプの動作形式による位置付け

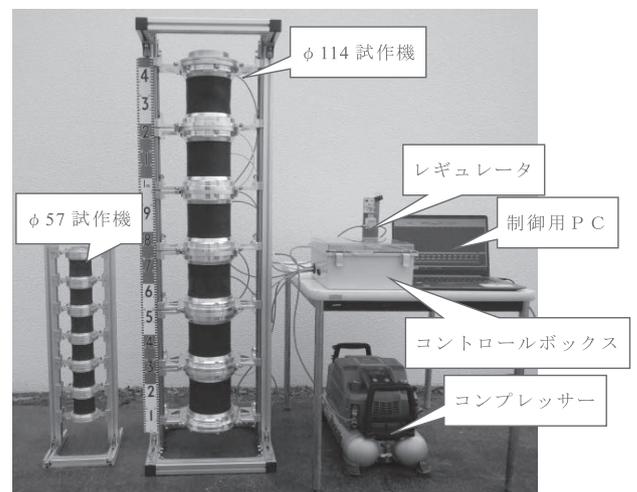
研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構からの委託を受けて2018年6月から2020年11月にかけて推進した、ぜん動ポンプの実用化に向けた数多くの取組の一部について報告する。

2. 実用化に向けた取組

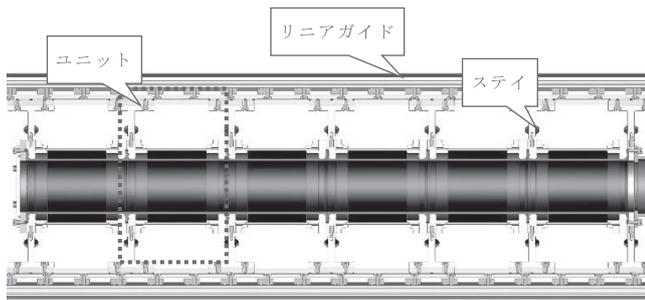
(1) 試作機の製作と性能

ぜん動ポンプの性能を確認するにあたり、図一5に示す内径の異なる2種類（φ57mm・φ114mm）の試作機を製作した。ユニットのアスペクト比は2、圧媒は空気で1台のコンプレッサーから供給される圧縮空気の圧力をレギュレータで調整のうえ、コントロールボックスを介してユニット毎に個別で供給する。図一6に試作機の長軸方向の断面3Dモデルを示す。ぜん動ポンプは軸方向に収縮・伸長を繰り返すため、スライドレールからステイを介してユニットを支持した。重量を軽減するため、金属部材の大部分にアルミを採用した。運転時の電圧は100V、印可圧力は最大100kPaである。

細粒分（径が0.075mmの土粒子）の重量含有率が異なる5種類の人工土を用いて、含水比（土の乾燥重



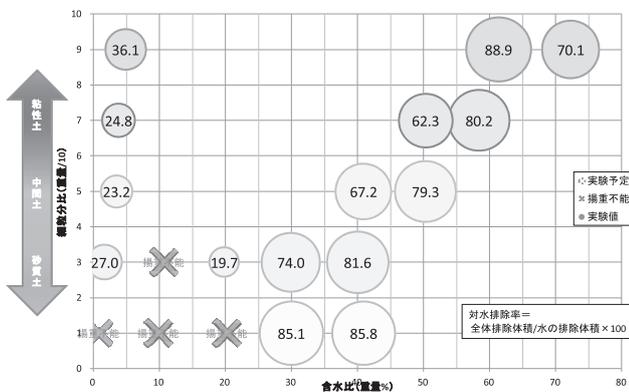
図一5 ぜん動ポンプの試作機



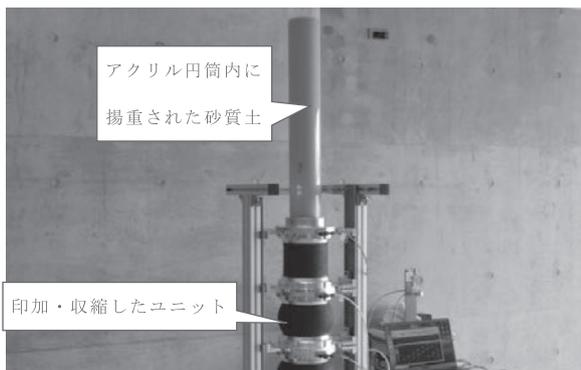
図一六 ぜん動ポンプの試作機の断面図

量に対する土中の水分重量の比)をパラメータとした試作機による揚重試験を行った。連結方法は6基線形、印加圧力は60 kPa、給気時間と排気時間は両者とも3秒として、伸縮波を10回発生させた後の揚重体積(排除体積)に基づき性能を評価した。評価軸には、水を用いた場合の揚重体積に対する土の揚重体積の割合(以下、対水排除率)を採用した。

実験の結果を図一七、揚重の状況を図一八に示す。自然に一般的に存在する含水比域において、60 kPaという人間の呼気圧力とほぼ同等の低圧で一定以上の揚重が可能であることが確認された。また、揚重効率は小さいものの、絶乾状態(含水比0%)の人工土も揚重できたことは特筆に値すると考える。一方で、低含



図一七 揚重実験の結果



図一八 揚重実験の状況

水比域の砂質土(細粒分含有率が小さい土)では、圧力を受けた土粒子同士の嵌合によりポンプ内部が閉塞する現象が確認された。なお、含水比を変えずに揚重効率を上昇させるためには、砂質土に対しては内筒ゴムの内側に土粒子同士の嵌合を崩すような突起を設けること、粘性土(細粒分含有率が大きい土)に対しては印可圧力の上昇が効果的であることを確認している。

(2) スケール効果

ぜん動ポンプの揚重能力に対する内径の効果を、揚重実験により検証した。試料には細粒分含有率10%(砂質土)の含水比10%・20%・30%、細粒分含有率90%(粘性土)の含水比40%・50%・60%の6種類の人工土を採用し、印加圧力は60 kPa、給気回数は1回で共通とした。給気時間は、内径により異なる必要な給気量に対応するため、φ57 mmで3秒、φ114 mmで15秒とした。

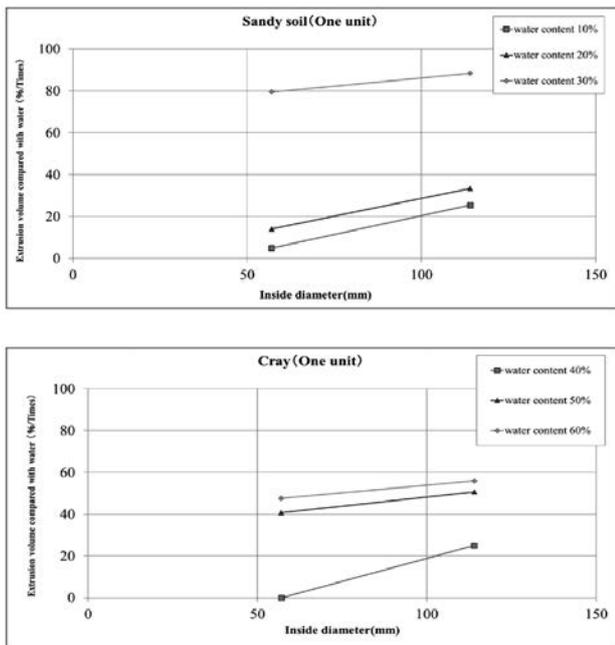
実験結果を表一と図一九に示す。図一九において横軸は内径、縦軸は対水排除率を示す。いずれの試料においても、内径の増大に伴い揚重率が約8~25%増加することが確認された。含水比が低いほど揚重率は大きく増加する傾向があり、砂質土の含水比10%においては約20%増加した。この傾向は粘性土において顕著であり、含水比40%はφ57 mmでは揚重不能だが、φ114 mmでは25%にまで増加した。この結果から、内径の増大は、少なくとも揚重効率に不利に働かないことが明らかとなった。

(3) 加水システム

ぜん動ポンプが土を揚重するためには、内筒ゴムが閉塞する圧力によりポンプ内部の土を変形させる必要がある。しかし、液性限界(土が液状に変化する境界の含水比)以下の低含水比域の土は流動性が小さく、変形には大きな力が必要である。そこで筆者らは、人

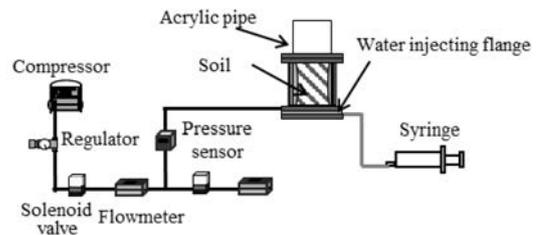
表一 内径スケール効果確認実験の結果

	Soil quality	Water content (%)	Extrusion volume compared with water (%/Times)	
			φ57	φ114
Sandy soil	9 : 1	10	4.9	25.4
		20	14.0	33.4
		30	79.5	88.4
clay	1 : 9	40	0.0	25.0
		50	40.7	50.7
		60	47.6	55.9

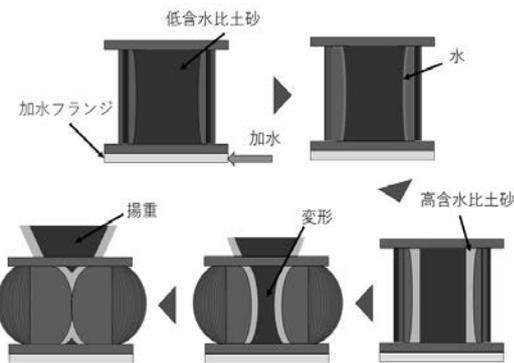


図一 9 内径と対水排除率の関係
上：砂質土 下：粘性土

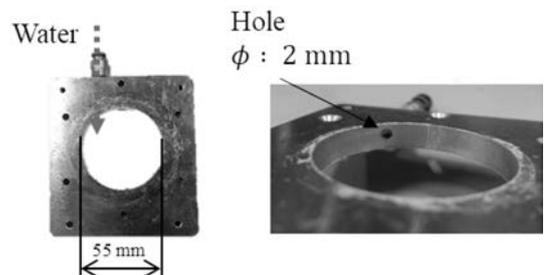
す。ぜん動ポンプ内部に土を充填し、シリンジから図一 12 に示す加水フランジを経由して土表面に 30 mL づつ加水する。加水完了後に 60 kPa で空気印加を十分時間行い、印加完了後に排気を行う。これを揚重できるまで繰り返し、揚重した土の対水排除率と含水比を計測する。試料には、通常の実験では揚重不可であった細粒分含有率 10% (砂質土) の含水比 10%, 細粒分含有率 50% (中間土) の含水比 20%・細粒分含有率 90% (粘性土) の含水比 30% の 3 種類の人工土を採用した。



図一 11 直接加水システムの構成



図一 10 「ドベ」の応用方法の概念



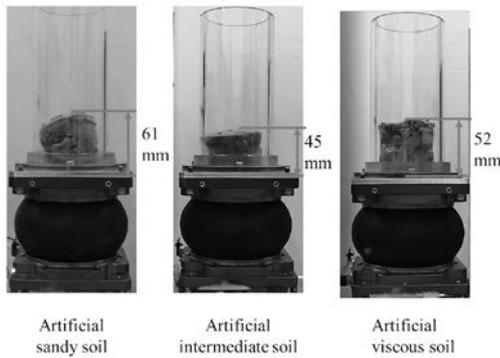
図一 12 加水フランジ

間の腸液と陶芸の「ドベ」に着目した。腸は、低含水比の食塊を粘液で覆うことでぜん動運動による搬送をスムーズに行う。また、陶芸では、ドベと呼ばれる高含水比の粘土を潤滑剤として用いることで、手の力のみで低含水比の粘土を変形させる。そこで、陶芸におけるドベをぜん動ポンプの粘液として応用する方法を考案した。その概念を図一 10 に示す。

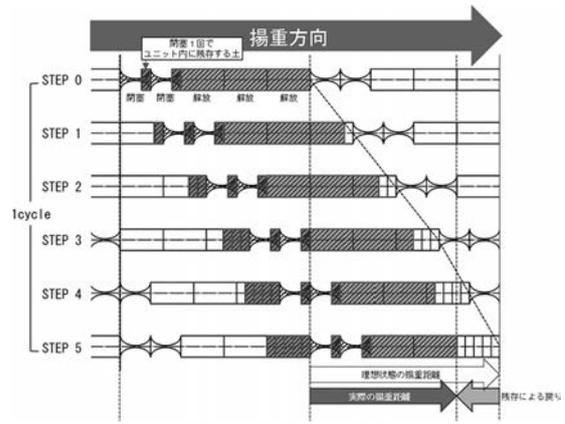
まず、ポンプ内部の低含水比の土へ外部から加水し、表面に潤滑剤となるドベを作る。その後、ポンプを駆動し土に圧力をかけて変形させ、ぜん動運動により揚重する。この方法の利点は、水のみを加えるため土が汚泥 (産業廃棄物) とならないこと、そして表面のみに加水するため土全体の含水比が液性限界よりも低い状態での揚重が期待できることにある。この方式の有効性を、実験によりその実現性を検証した。

本実験で構築した直接加水システムを図一 11 に示

実験の様子を図一 13 に、結果を表一 2 に示す。粘性土と中間土においては、揚重に成功すると共に、揚重の前後で含水比がほとんど変化していないことが確認された。これは、加水により土の可塑性が増加したことに加え、加水により高含水比化した土表面が潤滑剤となりゴム表面との摩擦力を低下させたためと考えられる。砂質土においては、同様に揚重に成功する一方で、含水比が揚重前 10% から揚重後 18.5% に増加することが確認された。この含水比の増加は、砂質土特有の透水性の高さにより加えた水が内部にまで速やかに浸透したためであり、その結果、土全体の流動性が高まったと考えられる。本実験により、土質により作用機序は異なるものの、加水システムがぜん動ポンプの適用可能な含水比域の拡張に有用であることが明らかとなった。



図一 13 直接加水システムを用いた揚重実験の状況



図一 14 揚重状況の模式図 (閉塞 2 基・解放 3 基)

表一 2 直接加水システムを用いた揚重実験の結果

Sample name	Water content of the lifted soil [wt%]	Soil rejection rate [wt%]	Added water [mL]	Real added water [mL]
Artificial sandy soil	29.1	25.4	60	60
Artificial intermediate soil	19.2	28.0	120	22
Artificial viscous soil	18.5	42.2	180	7.3

(4) 性能予測

ぜん動ポンプの揚重性能を予測するため、実験において観察されたポンプの動作を踏まえ、まず土の揚重距離を検討した。ぜん動ポンプ内において、土は解放ユニットの中に充填され、その前後で閉塞したユニットで分節されている。この閉塞部を揚重方向に連続して発生させることにより土を揚重するが、閉塞した際には中の土は全て揚重されるわけではなく、実際にはフランジの厚さなどに対応した量の土が残存する。そのため、土が残存しない理想状態の移動距離から、閉塞時の残存分を差し引いた距離が、実際の揚重距離であると考えられる。図一 14 に閉塞部 2 基・解放部 3 基の土の揚重状況の模式図を示す。

この揚重距離の考え方に基づき、ぜん動ポンプの揚重性能の予測方法を検討した。ぜん動ポンプの直径を d 、アスペクト比を ra 、直径のスケール効果を ad とすると、解放時のユニット内容量 V_0 は式 (1) で求められる。次に、ぜん動ポンプの閉塞時の揚重率を re とすると、閉塞時のユニット内容量 V_c は式 (2) で求められる。この時、1 分節あたりの閉塞ユニット数を nc [基/節]、解放ユニット数を no [基/節]、ポンプ内への土の充填率を 100% とすると、1 分節あたりの土の体積 V_b は式 (3) で求められる。ここで、実際の揚重は 1 ステップ毎に閉塞部の残存量による戻

りが発生する。1 サイクル毎のステップ数は 1 分節分のユニット数となるので、1 分節が 1 サイクル毎に揚重する体積 V_c は式 (4) で求められる。1 ステップ当たりの動作時間は、揚重先の空間を開放するために先行して排気する時間を te 、その後の給気時間を ts とすると、1 サイクル当たりの動作時間 T_c は式 (5) で求められる。従って、残存による戻りを考慮した実際の揚重能力は、式 (6) の V_c/T_c で予測される。

$$V_0 = \pi / 4 \cdot ra \cdot ad \cdot d^3 \tag{1}$$

$$V_c = V_0 \cdot (1 - re) \tag{2}$$

$$V_b = no \cdot V_0 + nc \cdot V_c \tag{3}$$

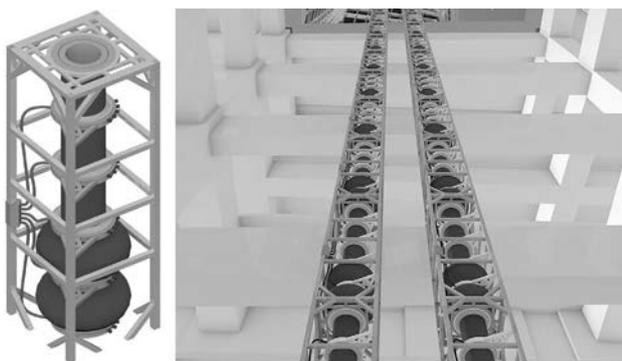
$$V_c = V_b - (nc + no) V_c \tag{4}$$

$$T_c = (nc + no) (te + ts) \tag{5}$$

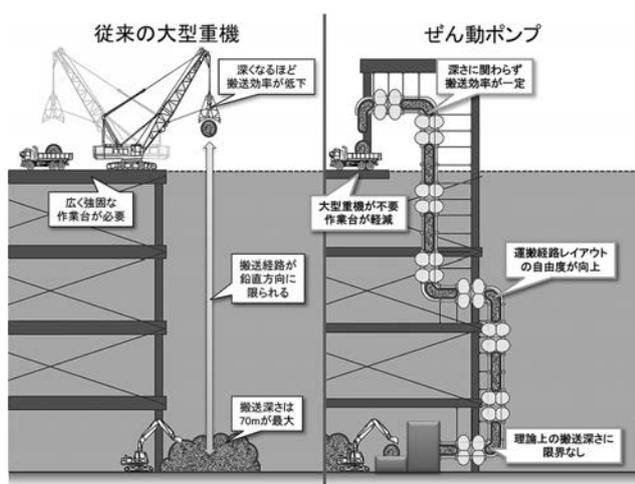
$$V_c / T_c = (no \cdot re \cdot \pi / 4 \cdot ra \cdot ad \cdot d^3) / \{(nc + no) (te + ts)\} \tag{6}$$

3. 実用化のイメージ

2. (4) で示した式 (6) によって、所定の性能を確保するために必要な仕様が予測可能となる。ここで、コラムシェルバケットを装備したクローラクレーンの揚重性能 $40 \text{ m}^3/\text{h}$ をぜん動ポンプ 2 系統で確保するためには、内径のスケール効果 ad を安全側の 1、アスペクト比 ra を試作機の 2、分節数を開放 3 基閉塞 2 基とすると、必要な仕様は内径 30 cm・排除率 80%・給排気時間 5 秒と予測される。これに基づく実用化時の製品イメージを図一 15、現在の重機と比較した運用イメージを図一 16 に示す。



図—15 実用化時の製品イメージ



図—16 実用化時の運用イメージ

4. おわりに

ぜん動ポンプが備える多くの特性のうち、揚重物を管路が被覆すること・外部との僅かな圧力差で動作すること・加圧機構が分散配置されエネルギー損失が少ないことは、水中や無重力の環境に高い適用性があると考えられる。建設工事での実用化を試金石として、ぜん動ポンプが海底や月面など極限環境下での資源開発に貢献する未来を切り拓くことができるよう、今後も実用化に向けた研究開発を進める。なお、試作機はベンチャー企業「ソラリス」が設計・製作を担当した。

JICMA

《参考文献》

- ・国土交通省, 建築着工統計調査
- ・国土交通省, 建設業働き方改革加速化プログラム, <http://www.mlit.go.jp/common/001226489.pdf>
- ・D. Hagiwara, K. Ashigaki, K. Wakamatsu, M. Ueda, Y. Yamada, T. Nakamura, Soil transport experiment with a multi-unit peristaltic transport machine for compact automatic transportation of excavated soil, IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp.724-728, 2019.

[筆者紹介]



上田 昌弘 (うへだ まさひろ)
 (株)竹中工務店 東京本店技術部
 課長



中村 太郎 (なかむら たろう)
 (学)中央大学 理工学部
 教授