

第30回衛星設計コンテスト

アイデアの部 ミッション概要書(3ページ以内)

1. 作品情報・応募者情報

作品名 (20文字以内) PitM
副題 (自由記入) 振動現象を利用した月面固定手法の提案
学校名 芝浦工業大学

2. ミッションの概要 (プレスリリース等で使用するので、200字程度でわかりやすく表現して下さい。)

月面滞在者のより快適な生活を支援するために、レゴリス上への月面基地の固定手法を提案する。提案する固定手法は、振動貫入による締固めを利用したものであり、最小限の輸送コストと短い施工時間で建設可能である。本ミッションに特化した振動貫入機を作成し、その有効性を示す。

3. ミッションの目的と意義 (目的・重要性・技術的／社会的意義等)

(a) 目的

我々は、安心、安全かつ快適な月面滞在を支援することを目的としたミッションを提案する。人類が月面に長期滞在するためには、レゴリス上に頑丈に固定された月面基地が必要不可欠である。軟弱地盤上に設置された月面基地の傾きは、滞在者の健康を害する恐れがある。月面の厳しい環境から逃れ、安全に過ごすための月面基地において、健康被害があってはならない。我々が提案する新たな手法を用いることで、月面基地を傾くことなく固定することが可能となり、月面滞在者の健康を守ることにつながる。

(b) 重要性・技術的、社会的意義等

本ミッションが成功すれば、月面滞在者の健康被害を防ぐことができる。今回用いた固定手法は、基地などの建物のみならず、月面に固定する必要がある剛体の固定にも応用することができる。加えて、月面以外の軟弱地盤にも適用できると考えられる。それにより、これまで困難であった土地へ剛体を固定することができ、人類の生活の幅を広げることにつながる。

4. ミッションの具体的な内容

(a) システム

(地上局やミッション機器等を含む全体の構成・機能・軌道・データ取得を含む運用手順等、必要に応じて図表添付のこと)

ミッションの流れを以下に示す。

- ① 必要機材の輸送
 - ② 月面基地およびその土台を作成
 - ③ 振動貫入によって地中に杭を固定し、杭と土台、土台と基地をそれぞれ固定
- 図1に、振動貫入を用いた月面基地建設の流れを示す。

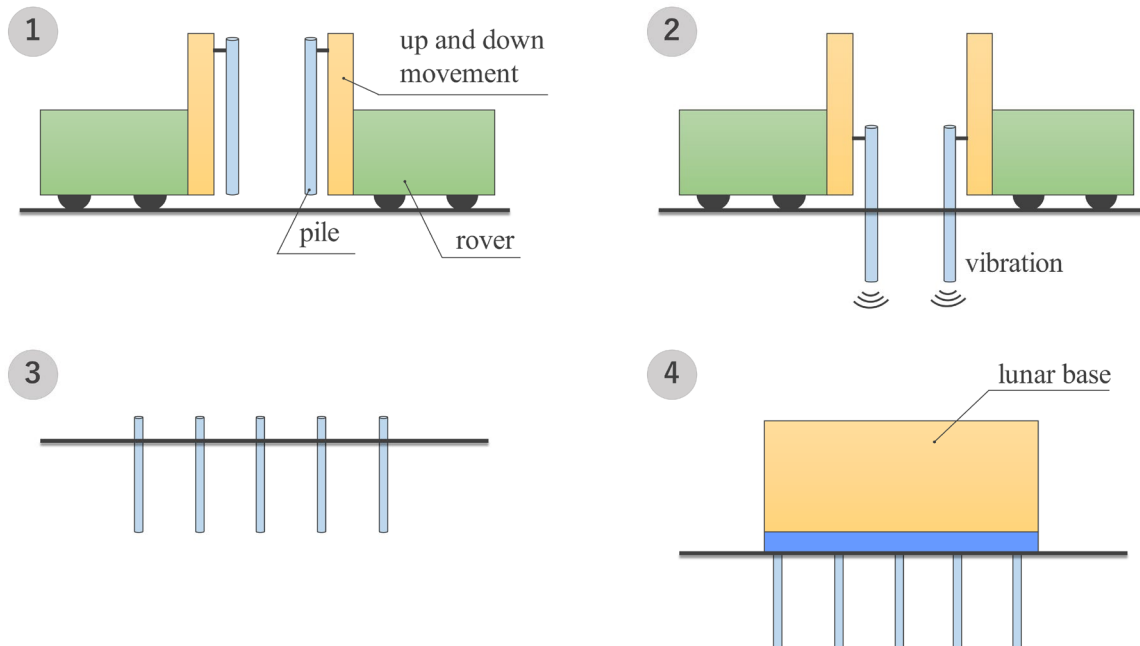


Fig. 1 Flow of lunar base construction using vibration penetration

(b) 具体的な実現方法、もしくは実現のために必要な課題・開発すべき項目

振動貫入によって引き起こされる締固めが、有効な手段であるかを検証する。検証する項目を以下に示す。

- ① 貫入させる杭の肉厚と締固めの強さの関係
- ② 貫入させる杭の外径と締固めの強さの関係

またそれぞれの検証において、どの範囲まで締固めが起こるのかを確かめた。

実験により、以下のことが明らかになった。

- 肉厚が大きいほど締固めは強まる
- 外径が大きいほど締固めの範囲が広がる
- 締固めによって基礎は十分な強度を持つ

5. 主張したい独創性や社会的効果

(a) 主張したい本ミッションの独創性

独創性は、振動貫入に伴う締固めを利用した点にある。振動貫入は通例、海底探査等に用いられる手法であるが、今回我々は、締固めに着目した。従来の工法では困難であったレゴリス上への剛体の固定が、本研究によって可能であることが示された。

(b) 得られる成果・波及効果・対象となる受け取り手

本ミッションの成功は、月面での快適な長期滞在を可能とする。これは、月面に滞在し探査や実験を行う宇宙飛行士だけでなく、月面旅行に訪れる将来の一般人にとっても大きなメリットになり得る。さらに、我々が用いた技術を応用することで、月面上のみならず地球上や火星上の軟弱地盤へ剛体を固定することが可能になる。

以上

第30回衛星設計コンテスト アイデアの部 解析書

PitM

芝浦工業大学 システム理工学部 機械制御システム学科

学部2年 祖父江 茉莉, 相良 健太, 船川 敬秀

学部1年 内田 寛人, 毛塚 雅人

学部4年 高野 紗会

環境システム学科

学部2年 半澤 龍太郎

指導教員 飯塚 浩二郎

1. 背景

2017年, アメリカがアルテミス計画を発表した. これは, 2024年までに月面に人類を送り, その後月での人類の持続的な活動を目指すというものである[1]. 現在は日本を始めとする各国が参画し, 様々な方面から研究が進められている. 月面での持続的な活動には, 拠点となる基地が必要となる. ここで述べた基地とは, 人類が長期間滞在することを目的とした居住空間のことである. 宇宙線の影響を弱め, 空気や温度管理をする役割を持つ月面基地の存在は, 人類が持続的な活動をするにあたって非常に重要な存在だといえる. 基地を快適に利用するためには, 月面上への固定が必要不可欠である. 月面はレゴリスと呼ばれる軟弱地盤に覆われており, 不同沈下が起こることが予想される. 不同沈下とは, 地盤強度の差によって傾きを伴って沈み込んでしまう現象である[2]. ヒトは一定値以上の傾きを感じると, めまいや吐き気などの健康障害が生じる[3]. 月面を探索する宇宙飛行士にはもちろん, 月面旅行に訪れた一般人にも健康被害があってはならない. そこで, 月面滞在者の安心, 安全かつ快適な生活が可能となるミッションを提案する.

2. 目的

第1章で述べた通り, 月面基地を固定することは滞在者の快適な生活につながる. そのためには新たな固定手法が必要である. そこで我々は, 月面での快適な滞在を支援することを目的として, 月面基地の新たな固定手法を提案する.

3. 提案するミッション

3.1. ミッション概要

月面基地をレゴリス上に固定する. 建設後の月面基地を図1に示す. レゴリスは軟弱地盤であるため, 月面基地のような剛体を直接固定することは困難である. そこで我々は, レゴリス中に杭を固定し, 杭の上に土台および月面基地を接続する手法をとる. 月面基地建設の具体的な流れを以下の①~⑤に示す. 本書では④~⑥について述べることにする. また振動貫入機を用いた月面上での基地建設の様子を図2に示す.

- ① 振動貫入機および必要部品を月面に輸送する
- ② パイプおよび基地本体を作成する
- ③ 振動貫入機を搭載した小型ローバを複数台準備し, 振動貫入によって杭を打ち込む
- ④ 杭の周りに型をつくり, レゴリスコンクリートを流し込む
- ⑤ 基礎の上に基地を接続する



Fig. 1 Image of completed lunar base

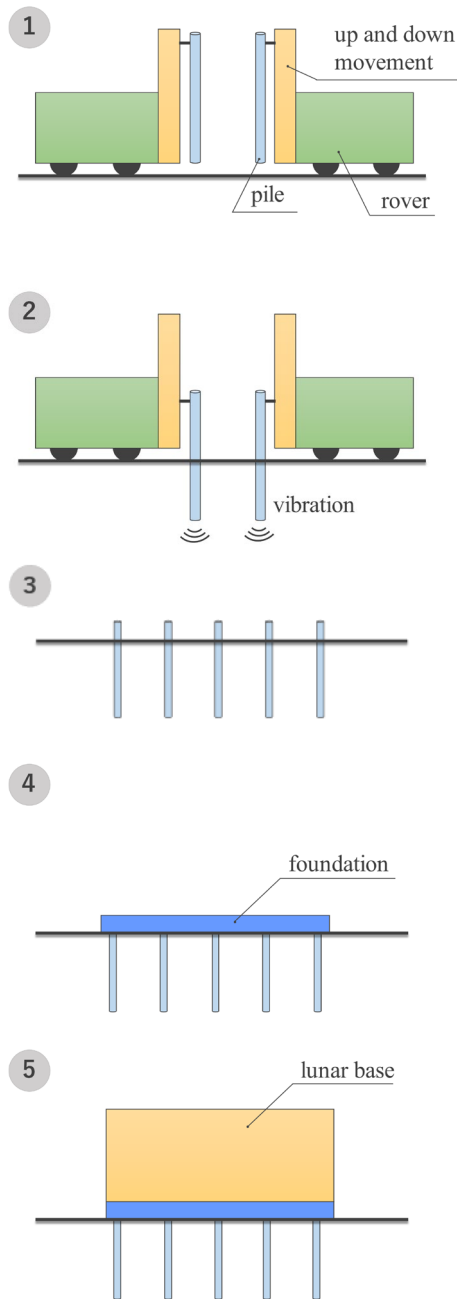


Fig. 2 Lunar Base Construction Flow

3.2. 建設予定地

月面基地は、平坦なレゴリス上に設営する。斜面や岩盤には杭を打ち込むことが困難なためである。また月面上は大気がないため、その大部分は温度変化が激しい。しかし月の極域と呼ばれる地点は、昼夜の温度変化が少ないとされている[4]。温度変化による影響を減らすために、極域を建設予定地にする。JAXAのSLIM計画に採用された月面ピンポイント着陸技術[5]を利用し、極域に直接着陸することとする。

3.2. 土台および基地本体の作成

杭の貫入に用いる振動機やその周辺部品は地球から月に持ち込む。しかし現在の宇宙ミッションにおいて、輸送する物資の重量と輸送コストは密接な関係にあり、地球から持ち込むものは最小限に抑えるべきである[6]。そこで、月面基地の土台と本体の作成を、レゴリスを用いて月面上で行うこととした。レゴリスを建材にする研究はすでに進められており、将来可能になると考えられる[7]。レゴリスを用いて月面で土台や基地を造ることで、輸送コストを大幅に削減することができる[6]。

3.3. 振動貫入

低重力下において杭を貫入させる際、地面からの反力が自重を上回ることが予想される。その結果、貫入機が浮き上がってしまい、杭打ちが困難になる。そこで杭をレゴリス中に貫入させる方法として、振動を利用する。レゴリスのような軟弱地盤には、振動を与えると地盤粒子が流動化し、物体が貫入しやすくなるという性質がある。この性質を利用した先行研究では、レゴリスを模擬した軟弱地盤において、中空パイプを貫入させる際の振動の有効性が確かめられた。本ミッションではこれらを利用し、レゴリス中に杭を打つ手法として振動貫入を用いることとした。

3.4. 「PitM」の名前の由来

本ミッションの名前は、Penetrate into the Moonの頭文字を取ったもので、直訳は「月を貫く」となる。振動貫入によって月の地中に入り込んでいく様子から、本ミッションをPitMと名付けた。また最後まで意思を貫き、ミッションを成功させるという強い想いを込めた。

4. 振動貫入による固定手法の提案

4.1. 軟弱地盤上における基礎工事

軟弱地盤上で基礎工事をする際には、杭打ちをする必要がある。杭打ちをせずに基礎工事を行うと、不同沈下が起きるためである。不同沈下を防ぐための杭打ちの手法にはいくつかの種類がある。代表的なものは硬い岩盤層まで届くように杭を打ち込む方法である。この杭は先端支持杭と呼ば

れ、高い強度を誇る。しかし地中深くまで打つ必要があるため、大型の機械を必要とし、莫大なコストがかかる。コストを抑えた杭打ち手法の一つに、地中の砂と杭との摩擦力を利用したものが挙げられる。この杭は摩擦杭と呼ばれ、岩盤層まで打ち込む必要がない。そのため大型の機械が不必要であり、先端支持杭を打ち込む場合に比べ大きなコストダウンが図れる。よって我々は摩擦杭を採用する。しかし摩擦杭は先端支持杭に比べ強度が低いというデメリットがある。よって摩擦杭を打ち込む場合には、強度を保つための手段を考える必要がある。

4.2. 既存の固定方法

既存のレゴリス上へ月面基地を固定する方法として、株式会社技研製作所のインプラント工法があげられる(図3)。インプラント工法とは、既に地盤に打ち込まれた杭材の引き抜き抵抗力を利用して新たな杭材を地盤に貫入する工法である。インプラント工法によってレゴリス中に貫入した杭に基地を固定すれば、高い固定力が得られる。しかしこの工法では、既設杭と呼ばれる杭が必要になる[8]。これはレゴリスの下層に存在する岩盤まで重機を用いて貫入させる必要がある。しかし上述のように輸送コストの観点から、月面では軽量かつ小型の機械を使用できることが望ましい[7]。またインプラント工法は、杭を一本ずつ埋設させるため、施工完了までに多くの時間を要する。そこで我々は、重機を用いずに、高い固定力を伴う杭を短時間で貫入させることを目指す。

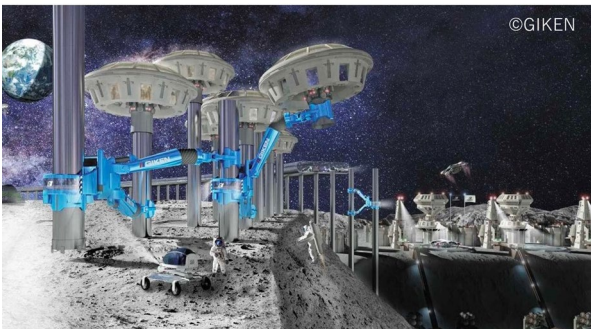


Fig.3 Implant construction [8]

4.3. 締固めを利用した固定手法の提案

我々は、レゴリス中に杭を固定する手法として、振動貫入に伴って生じる、締固めという現象を利用する。レゴリスのような軟弱地盤に振動を与えると、地盤粒子は流動化が生じるだけでなく、再配置が起こる。その結果、振動の停止とともに受働土圧が増加することが分かっている[10]。この現象を締固めと呼ぶ。本ミッションではレゴリス中に杭を貫入させる際に振動を用いるため、締固めを利用することとした。締固め現象を利用することで、第1節で述べた摩擦杭のデメリットを解消する。よって杭を岩盤まで打ち込むことなく、強度の高い基礎工事を行うことができる。

5. 締固め現象の評価試験(1)

5.1. 実験概要

図4に示すハンドベーンを用いて、原位置ベーンせん断試験を行う。原位置ベーンせん断試験とは、軟弱地盤のせん断強度や粘着力を知るための試験である。ハンドベーンを地中に入れて回転させることで、地中のトルクを測定することができる。測定結果をもとに地中のせん断強度を算出する。せん断強度 τ [kN/m²]は次式で与えられる[2]。

$$\tau = \frac{M - M_f}{\pi \left(\frac{D^2 H}{2} + \frac{D^3}{6} \right)} \quad (1)$$

M : 測定最大トルク[kN・m]

M_f : 試験機の摩擦トルク[kN・m]

D : ベーンブレードの幅[m]

H : ベーンブレードの高さ[m]

ベーンブレードの寸法は以下に示す通りである。

D : 0.01 [m]

H : 0.02[m]

また試験機の摩擦トルクは、測定値に比べ十分に小さいため、 $M_f \cong 0$ と近似できる。また測定値の単位は[cN・m]である。よって式2は次式のように簡単になる。

$$\tau = \frac{M}{3.7} \times 10 \quad (2)$$

地中の粘着力 C [kN/m²]は次式で与えられる。

$$C = \frac{q_u}{2} \quad (2)$$

q_u : 一軸圧縮強度[kN/m²]

また一軸圧縮強度 q_u は次式で与えられる。

$$q_u = 40 + 5N \quad (3)$$

N : N 値

N 値とは地盤強度を表す値である。N 値が大きいほど地盤強度が強いとされる。式(1)～(2)より、地中のトルクが強いほど地盤強度が強くなるのがわかる。第1章で述べたように不同沈下は、地盤強度の差によって引き起こされる。そこで地盤強度を測定し、弱い地盤には強い締固めを起こすことで、不同沈下を防げるのではないかと考えた。そこで様々な条件下において締固めが起きた際のトルクを測定し比較する。

本実験では杭として、長さ 235mm、肉厚 2mm のアクリルパイプを使用する(図 5)。パイプの貫入は深さ 200mm の地点で止まる。深さ 400mm×縦 400mm×横 550mm のボックス内にレゴリスを模擬した珪砂 5 号を敷き詰め、中央にパイプを振動貫入させる。測定地点は図 6 に示す通りである。実験条件を表 1 に示す。実験の流れは以下の①～④に示す(図 7)。

- ① パイプを一本振動貫入させる
- ② パイプの外径から等距離の、四箇所のトルクを測定する
- ③ パイプの外径からの距離を変更して測定を繰り返す
- ④ すべての地点の測定が終了した後、200mm 以上掘り返し、締固めを解消する

軟弱地盤にパイプを振動貫入させた際に、砂の密度が上昇するという研究結果がある[7]。この研究から我々は、貫入させるパイプの体積分、砂が移動し密度が上昇するのだと考えた。したがって貫入させるパイプの体積が大きいほど、締固めが強くなると予想し、実験によって確かめることにした。今回は、パイプの貫入深さと肉厚を統一したため、地中のパイプの体積は、パイプの外径に依存する。そこで、貫入させるパイプの外径と、締固めによる固定力の関係を検証する。使用したパイプの外径は、φ 10mm, 20mm, 30mm の三種類である。

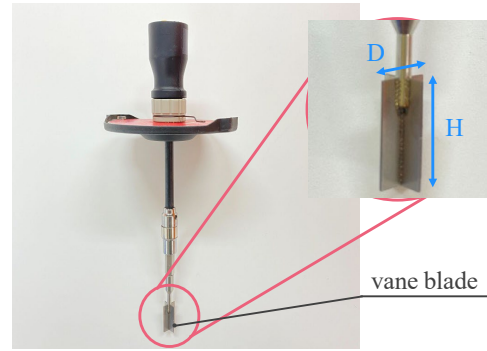


Fig. 4 Hand vane

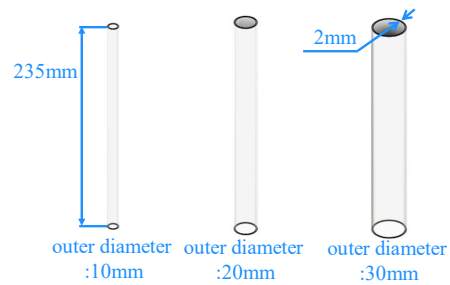


Fig. 5 Acrylic pipes with 2 mm wall thickness

Table 1 Experimental conditions

Experimental Environment		Details
Vibration frequency [Hz]		53
Soil		Silica sand No.5
Volume of the box	Depth [mm]	700
	Width [mm]	400
	Length [mm]	400
Number of trials		3

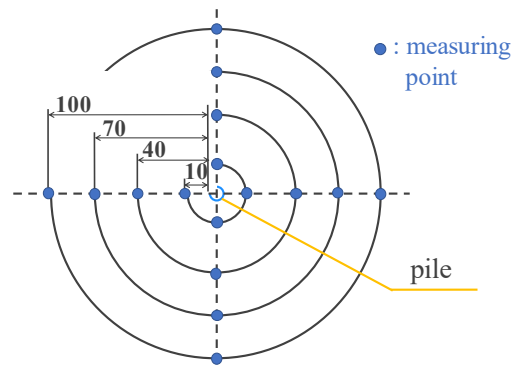


Fig. 6 Measuring point

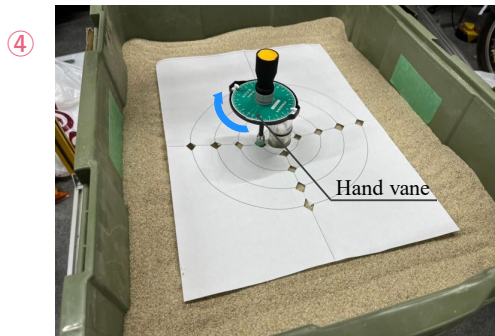
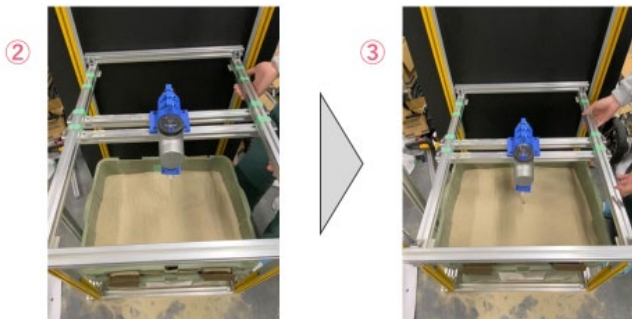
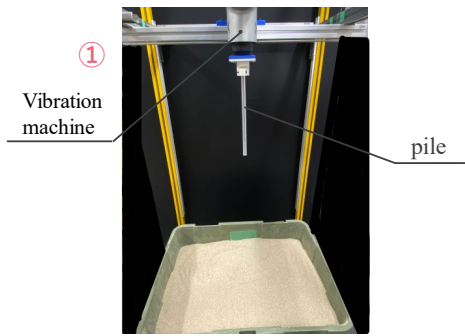


Fig. 7 Experiment flow

6.2. 結果

実験結果を図 8 に示す。結果より外径 $\phi 30\text{mm}$ のパイプを刺した場合に最も締固めが強くなると分かる。またパイプから遠くなるほど締固めが弱まると分かる。40mm 地点を除き、いずれの距離においても外径が大きいほど締固めが強くなる。

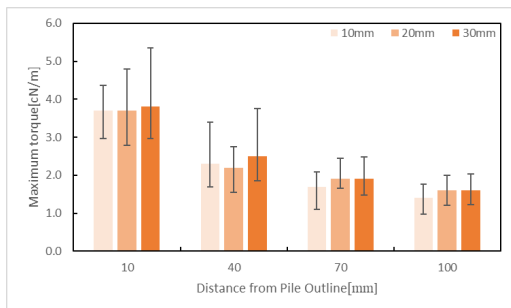


Fig. 8 Experimental Results (2)

6.3. 考察

結果から、振動貫入させたパイプから同心円状に締固めが起きていると考えられる。また外径から 70mm 地点と 100mm 地点におけるデータは、いずれの外径のパイプにおいてもあまり差が見られなかった。よって杭を打つ際には締固めの効果範囲を考慮する必要がある。外径の変化による締固めの強さに、大きな変化は見られなかった。コストを抑えるためには細い径の杭を打つことが望ましいが、杭自体の強度を考慮する必要がある。

6. 締固め現象の評価試験(2)

6.1. 実験概要

第 5 章と同様に、締固めの強さを評価する。本章では、パイプの外径を $\phi 30\text{mm}$ に統一し、パイプの肉厚を変化させる。2mm, 4mm, 6mm の肉厚の亚克力パイプで実験を行う(図 9)。実験環境や実験条件は第 5 章で述べたものと同様である。

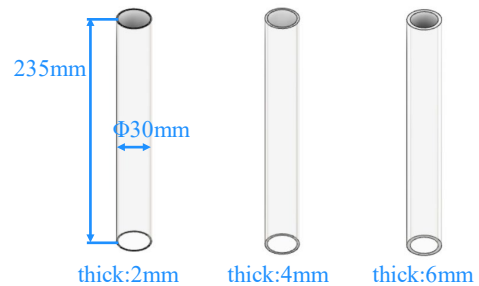


Fig. 9 Acrylic pipe with outer diameter of 30 mm

6.2. 結果

実験結果を図 10 に示す。結果より、パイプに近いほど締固めが強い。またどの地点においても肉厚が 6mm のパイプが最も強いと分かる。また締固めが効果する範囲は、肉厚 6mm が最も広い。

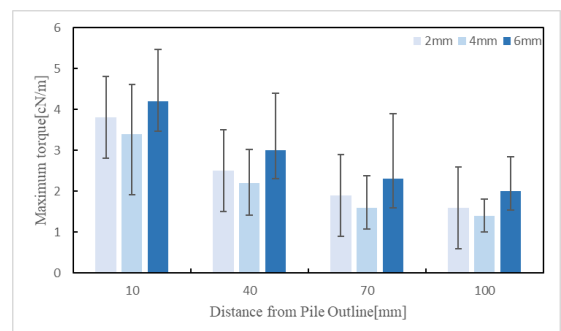


Fig. 10 Experimental Results (1)

6.3. 考察

肉厚が 6mm のパイプを刺した場合が最も締固めが強かった。このことから、より強い締固めを必要とする場合には、より太い肉厚の杭を用いることが有効である。しかし肉厚 2mm と 4mm では 2mm のほうが強い締固めを引き起こした。よって締固めの強さが体積に依存すると言い切ることはできない。試行回数や実験方法を工夫し、より正確なデータを取る必要がある。また第 5 章の実験と同様に、外径から 70mm 地点と 100mm 地点におけるデータは、いずれの肉厚のパイプにおいてもあまり差が見られなかった。よって締固めの強さは、パイプからの距離が遠くなるほど小さくなり、いずれ収束すると考えられる。

7. 月面基地を模擬した耐久実験

荷重は建築基準法施行令より、床面には 2900[N/m²]の力がはたらくことを想定する必要がある。月面での重力は地球上の約 1/6 であるため、本実験の目標耐久値を 500[N/m²]とした。

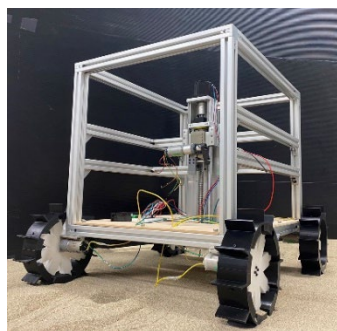
最も締固めが弱かった、パイプを 4 本貫入させ、月面基地の土台を模擬した木製の板に垂直荷重をかけ、沈み込みが起きないかどうかを確かめた。

その結果、最も締固めが弱かった、外径 ϕ 10mm、肉厚 2mm のアクリルパイプにおいても、沈むことなく耐久すると分かった。よって月面基地の基礎工事に有効であると示された。

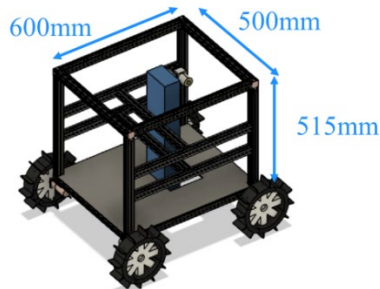
8. 杭打ちローバの開発

8.1. 概要

月面基地の基礎工事は、小型ローバを用いて行う。複数台のローバを群制御し杭を打ち込むことで、短時間での施工が可能となる。開発した小型ローバを図 11(a)に示す。また図 11(b)に各寸法データを示す。なお図 5 においてローバは骨組みのみの状態であるが、これは内部構造を示すためである。実際は壁面も板で覆われ、箱状になっている。



(a) Produced rover



(b) Each dimension data

Fig. 11 Developed rover

8.2. 搭載する振動機

ローバには、杭を振動させるための振動機が搭載されている。振動機は、クランク機構を利用しており、モータの回転によって先端のスライダが上下に動く仕組みである。搭載した振動機を図 12 に示す。また振動機には杭を自動で取り外しできる機構を取り付ける予定である。

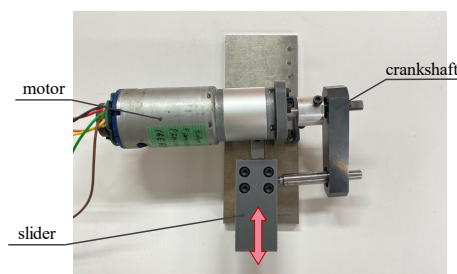


Fig. 12 Produced vibration machine

9. 課題

ミッションを成功させるために特に検討が必要な課題について述べる。

9.1. ローバの改良

第 6 章第 2 節で述べた振動機に、図 13 に示すような破損が見られた。破損した部分は振動機のモータを接続するためのパーツであり、3D プリンタを用いて作成した。振動による衝撃に耐えられず

破損したと考えられる。強度計算を再度行っただけで、製作方法や素材の検討をする必要がある。

第6章第1節で述べた通り、ローバは複数台用意し、群制御することを想定している。複数台のローバを運用することで短時間での施工が可能となるだけでなく、故障機が生じた場合に速やかに対応できる。しかし制御が複雑になり、統率が取れなくなるリスクが考えられる。今後、複数台を遠隔で安全に制御し杭を打つためのプログラムを開発しなければならない。

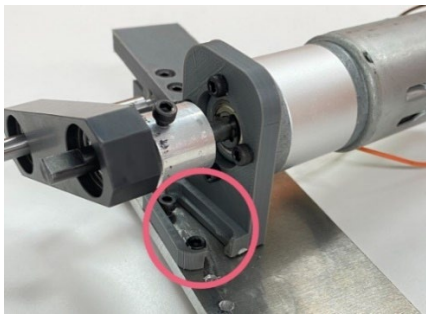


Fig. 13 Damaged vibration machine

9.2. 長期の沈み込みによる影響

実験では、目標とする耐久力を持つことを確認できた。しかしそれは荷重を一時的にかけたものであり、長期間使用した場合が想定できていない。実際の月面基地の運用期間は1年以上だと考えられる。その期間荷重をかけ続けても不同沈下が起らない耐久力が必要になる。今後はそれらを検討したうえで新たに耐久実験を行う必要がある。

10. 結言

月面滞在者の健康被害を防ぎ、より快適な長期滞在を実現することを目的として、月面基地を固定するミッションを提案した。その新たな固定手法として締固め現象を利用することを提案し、実験により有効性を示した。我々が提案したミッションが成功し、月面での長期滞在がより快適なものになることを願っている。

参考文献

[1] JAXA 有人宇宙技術部門-Humans in Space. “Future 国際宇宙探査の取り組み”. JAXA. <https://humans-in-space.jaxa.jp/future/>, (参照

2022-05-25).

[2] 地盤調査・地盤改良計画.

https://www.city.kawasaki.jp/500/cmsfiles/contents/0000018/18269/h25-taku_sisin_7.pdf, (参照 2022-11-07).

[3] 情報事業部会. “復旧・復興支援 WG 「液化被害の基礎知識」”. 日本建築学会. 2015-03-26. <http://news-sv.aij.or.jp/shien/s2/ekijouka/health/index.html>, (参照 2022-05-20).

[4] 内閣府宇宙戦略室. “月着陸探査活動-月極域探査における着陸地点の検討状況-”. 内閣府. <https://www8.cao.go.jp/space/committee/27-kagaku/kagaku-dai33/siryou2-2.pdf>, (参照 2022-11-07).

[5] SLIM プロジェクトチーム. “SLIM の月面ピンポイント着陸技術”. 宇宙科学研究所. <https://www.isas.jaxa.jp/feature/forefront/220928.html>, (参照 2022-11-07).

[6] 内閣府宇宙戦略室. “我が国宇宙輸送システムを検討する視点”. 内閣府. <https://www8.cao.go.jp/space/committee/yusoudai1/siryou4.pdf>, (参照 2022-06-28).

[7] 斎藤亮介, 鶴山尚大. “コンクリートと異分野の融合”. これからのコンクリートと異分野の繋がりに. 2016, vol. 54, no. 9. https://www.jstage.jst.go.jp/article/coj/54/9/54_971/_pdf/-char/ja, (参照 2022-06-28).

[8] 株式会社技研製作所. “インプラント工法”. https://www.giken.com/ja/mission/implant_method/, (参照 2022-06-28).

[9] 無人建設革新技術開発推進協議会. “宇宙無人建設革新技術開発推進プロジェクト 2021”. 国土交通省.

[10] 渡邊智洋, 飯塚浩二郎. “日本機械学会論文集”. 振動伝播による軟弱地盤の締固め効果を利用した小型軽量月・惑星脚型探査ローバのスリップ抑制歩行の提案. 2020, vol. 86, no. 886, p. 6-7, <https://doi.org/10.1299/transjsme.19-00263>, (参照 2022-06-28).