

月面を想定した低重力場の支持力模型実験

九州大学大学院	正会員	小林 泰三
九州大学大学院	正会員	落合 英俊
九州大学大学院	学生会員	陶山 雄介
宇宙航空研究開発機構		青木 滋

1. はじめに

2004年1月の米国ブッシュ大統領による新宇宙政策（New Vision for Space Exploration）の発表以降、世界各国で有人探査を想定した月・惑星探査計画が具体化してきている。このような中、宇宙航空研究開発機構（JAXA）は、2005年4月、将来の我が国の宇宙開発をめぐる長期ビジョン（JAXA2025）¹⁾を発表し、「月の探査と利用」に関する新たな新機軸を打ち出した。将来の月探査計画における種々のミッションの安定性や実現性を評価する上で、月面土（レゴリス）-機械系、あるいはレゴリス-構造物系の相互作用の事前評価はミッション遂行の成否の重要な鍵となる。月面は、低重力、高真空、レゴリス粒子の特異性などといった点で、地上とは異なる環境・条件を多く有しており、月面地盤の力学的挙動に及ぼすこれらの影響を十分に検討しておく必要がある。そこで、本研究では、基礎的研究として、月面土を模擬して作られた月面模擬土を用い、月面重力場（約1/6g）を実現した航空機内で、同試料と豊浦砂に対する浅い基礎の支持力模型実験を行った。

2. 航空機を用いた低重力場の支持力模型実験

2.1 パラボリック飛行による低重力場の実現

本研究では、低重力の環境を実現するために、放物線飛行（パラボリックフライト）する航空機内で浅い基礎の支持力模型実験を行い、1g場と1/6g場での支持力特性の違いについて検討した。図-1は、パラボリック飛行中の機体の飛行姿勢と重力変化を表したものである。図に示すとおり、約20秒間の低重力環境を得るために、航空機は降下と上昇を繰り返す放物線を描いて飛行する。低重力状態は、凸の放物線を描きながら実現されるが、その前後には1.5~2.0gの重力が作用する。なお、機体内に作用する重力を機体に固定した座標軸（図を参照）にとった場合、低重力実現中に放物線軌道で機体が傾いても機体軸方向と翼方向の成分 G_x 、 G_y は、ほぼ0gが保たれる。よって、実験時には、図(b)に示した G_z が機体床面に垂直な方向のみに作用していると考えてよく、実験装置に及ぼす飛行姿勢の影響は考慮しなくてよい。

2.2 実験装置と実験条件

本実験では基礎的な研究として、図-2に示す装置を用いて平面ひずみ条件下の支持力模型実験を行った。模型土槽はアクリル製で、内寸は幅400mm、高さ160mm、奥行き50mmである。土槽壁面と試料間の摩擦の低減を図るために、0.02mm厚のラテックスメンブレンをその間に敷設するとともに、アクリル面とメンブレン間にはシリコングリスを塗布した。模型地盤には、絶乾状態のレゴリスシミュラント^{2),3)}と豊浦砂を用い、両者とも初期相対密度が $D_r = 90\%$ になるように調整した。ここに、レゴリスシミュラントとは、化学成分や土粒子密度、粒度分布などを実際の月面土に模擬するように配合した砂質材料である。実験試料の土質パラメータを表-1に示す。

載荷板は、アルミ製で基礎幅 $B = 20\text{ mm}$ とし、粗い基礎を模擬するために底面にサンドペーパーを貼り付けている。載荷は、

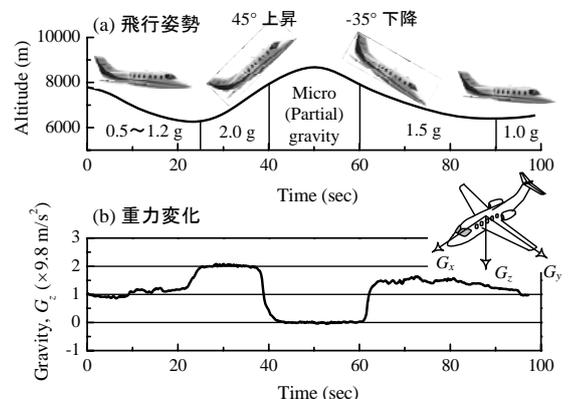


図-1 パラボリックフライトと重力変化

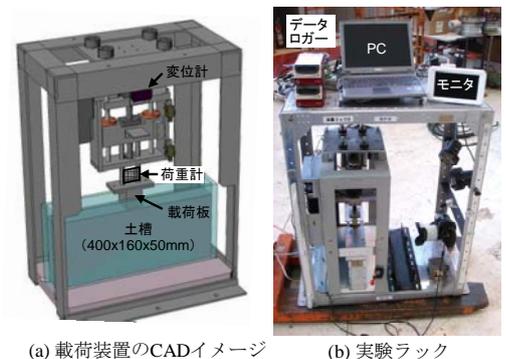


図-2 模型実験装置

キーワード：月・惑星探査、レゴリス、低重力、支持力、月面

連絡先：〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 Tel & Fax:092-642-3285

上載圧のない地表面への貫入とし、載荷速度 3.0mm/s の変位制御条件下で荷重と変位の計測を行った。重力条件は月面環境を想定して $G_z = 1/6g$ を目標とした。航空機内の重力場は気流等の影響で載荷中には多少ばらつくが、本実験では最大でも $\pm 0.1g$ 程度であった。さらに低重力場の結果と比較するため、航空機を用いた実験に加え、 $1g$ （地上）でも同条件の実験を行った。

2.3 実験結果

図-3 は、実験で得られた荷重-沈下曲線の一例である。載荷開始後に見られる最初のピーク荷重をみると、模擬土のそれは豊浦砂を大きく上回っていることから、模擬土は地上の標準的な砂よりも強い材料といえる。また、ピーク直後の挙動に着目すると、模擬土の低下の仕方は、豊浦砂の場合に比べて急激である。これらのことから、密に締った模擬土は、粒状体でありながら、標準的な砂材料に比べて強いが脆性的な破壊機構を発現する材料であると考えられる。

図-4 は、極限支持力と重力の関係を表したものである。ここに、極限支持力とは、載荷開始後に見られる最初のピーク荷重を模型基礎の底面積で除した値のことである。この図から、豊浦砂の極限支持力は重力の増減をほぼ反映する傾向が見られるが、レゴリスシミュラントの場合には、重力が $1g$ 以下になると、支持力に低減が見られなくなる傾向のあることが分かる。これは、支持力に対する見かけ粘着力の影響の寄与率が相対的に大きいことを示しており、レゴリスシミュラントのもつ大きな粘着力成分が反映されたものと考えられる。

図-5 は、各実験ケースで得られた地盤反力係数 k_v をまとめたものである。この表から分かるように、豊浦砂の k_v は模擬土のそれに比べて小さく、また、極限支持力の場合と同様、模擬土に比べて重力の影響を受けやすいことが分かる。このように、月面では、地上の場合に比べて、豊浦砂と模擬土で支持メカニズムの差異が大きくなることが分かる。これは、砂質材料の特性によって重力の影響の受け方に違いがあることを示すものである。

2. おわりに

本研究では、月面重力場（約 $1/6g$ ）を実現した航空機内で、月面土を模擬した砂試料と豊浦砂に対する浅い基礎の支持力模型実験を行った。その結果、土の特性によって、支持機構に及ぼす重力の違いが明らかとなった。今後は、月面の支持力を予測する方法を確立するために、この様な差異を生む土質特性の本質やメカニズムを解明した上で、それを評価しうる土質試験法の確立と、さらにそのデータを反映しうる解析手法の開発を行っていきたい。なお、本研究は、(財)日本宇宙フォーラムが推進している「宇宙環境利用に関する地上研究公募」プロジェクトの一環として行ったものである。関係各位および航空機実験を提供頂いたダイヤモンドエアサービス(株)のスタッフ各位に謝意を表す。

参考文献：1) 宇宙航空研究開発機構 HP : http://www.jaxa.jp/news_topics/vision_missions/jaxa2025/ 2) Kanamori, H. et al. : Properties of lunar soil stimulant manufactured in Japan, *Proc. 6th Int. Conf. Engrg., Constr., and Operations in Space*, ASCE, pp. 462-468, 1998. 3) Kobayashi, T. et al. : A proposal of estimating strength parameters from soil cutting resistances, *Proc. Earth and Space Engrg., Constr., and Operations in Challenging Environments*, ASCE, 8p. (CD-ROM), 2006.

表-1 土質パラメータ

	最大・最小密度 (g/cm ³)		土粒子密度 (g/cm ³)	強度定数	
	ρ_{max}	ρ_{min}		c (kN/m ²)	ϕ (degrees)
レゴリスシミュラント	2.02	1.49	2.95	14.2	47.8
豊浦砂	1.64	1.34	2.65	3.89	39.4

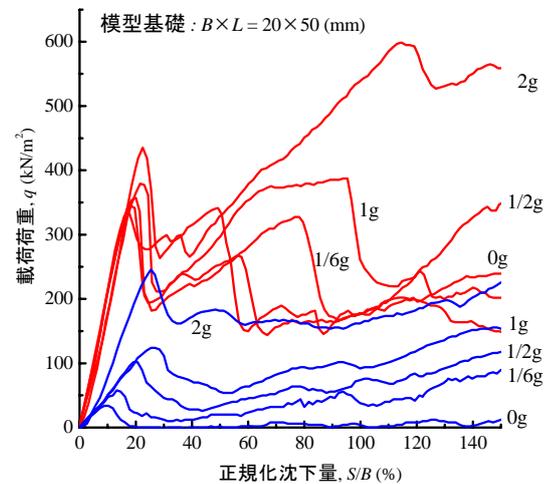


図-3 荷重-沈下関係に及ぼす重力の影響

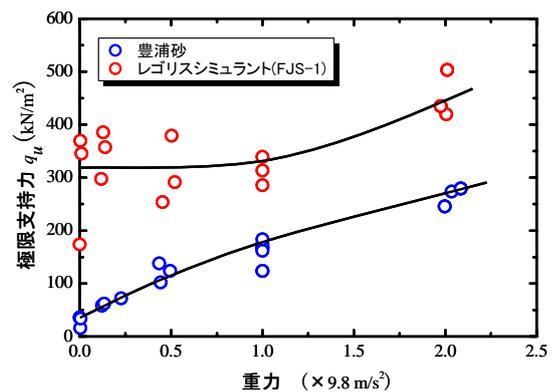


図-4 極限支持力と重力の関係

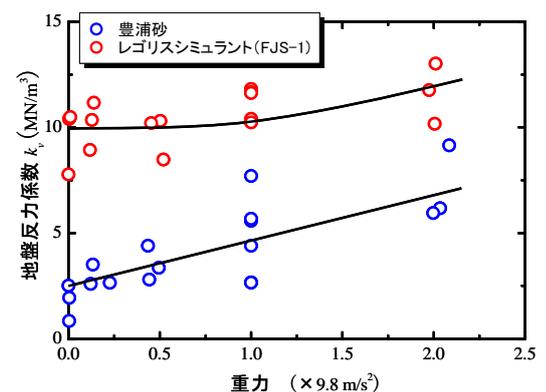


図-5 地盤反力係数と重力の関係