月面地盤の極限支持力に及ぼす重力の影響評価

九州大学大学院	学〇陶山雄介 F 落合英俊
九州大学大学院	正 小林泰三 学 藤原洋一郎
宇宙航空研究開発機構	松井 快 宮原 啓
清水建設(株)	青木 滋

<u>1. はじめに</u>

2004 年に米国が発表した新宇宙政策(New Vision for Space Exploration)を受けて、わが国でも宇宙航空研究開発 機構(JAXA)を中心に、2007 年に月探査機「セレーネ」が打ち上げられるなど、将来の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¹⁾。将来の月面探査や月資源利用においては、月面地盤(レゴリス)ー機械系、 およびレゴリスー構造物系の相互作用に関する地盤力学的評価が重要となってくる。月面は、低重力・高真空・レ ゴリスの特異性など、地上とは大きく異なる環境や条件を有しており、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。本研究ではこれまで、月面模擬土を用いて、航空機による低重力場での浅い 基礎の模型実験²⁾などを行い、低重力場での地盤の支持力特性について検討を行ってきた。その結果、月面模擬土 を用いた場合、極限支持力が重力に影響されにくいということなどが実験的に明らかとなった。本報では、極限解 析(上界法)を用いて極限支持力に及ぼす土質と重力の影響メカニズムを合理的に説明するとともに、月面地盤の 支持力予測への展開を試みる。

2. 極限支持力の重力依存メカニズム

本研究ではこれまで、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ってきた³⁾。実験結果から、豊浦砂の極限支持力は相対密度に関わらず重力に依存し やすいが、月面模擬土の場合は重力に依存しにくいことが確認されている(図-1)。また、基礎貫入時の変形モード の観察から、豊浦砂が全般せん断モードを呈するのに対して、月面模擬土は一旦圧縮を生じ、後に全般せん断へと

移行する複雑な破壊機構を呈することが分かってきた。豊浦砂 のように全般せん断を示し破壊領域が広範にわたる場合、地盤 の破壊の際には側方の破壊領域を押し上げるためにエネルギー が必要になる。このエネルギーは破壊領域の自重、すなわち重 力に比例する。つまり、全般せん断を呈する破壊モードでは、 重力に抗して流動する土塊の割合が多いため、その極限支持力 は重力に依存しやすくなると考えられる。一方、月面模擬土の ように圧縮が卓越し、破壊領域が自由表面まで到達しない破壊 モードでは、全般せん断を示す場合に比べて重力に抗するエネ ルギー消散率は少なく、結果として極限支持力は重力に依存し にくくなると考えられる。

<u>3. 極限解析</u>

本報では、前述の重力依存メカニズムを合理的に説明するために、変形に要するエネルギーバランスを取り扱う極限解析(上 界法)を用いた検討を行った。極限解析では、圧縮による変形 領域の減少を考慮するために、図-2に示したβで規定される等 価自由表面を仮定し、ebfで囲まれる領域は、変形の生じない領 域と考える。すなわち、βを変化させることによって圧縮率を 表現するとともに、変形の及ぶ領域を限定する。

極限解析の基本的な考え方は、基礎の貫入および土塊の自重 による外部仕事が、変形時に消費される内部エネルギー(内部 消散)と等値になるように方程式を立て、極限支持力を求める 解析法のことである⁴⁾。基礎の貫入による外部仕事とは、基礎 が地盤を押し込む仕事のことで、支持力と底面積とその速度の 積によって表される。土塊の自重による外部仕事は、土塊ブロ ックの自重とその速度の積で表すことができる。また、内部消 散とは速度の不連続、すなわちすべり線が生じることで消費さ れた仕事のことである。これらの条件からそれぞれ数式を求め、 方程式に代入し変形すると以下のように整理することができる。



図-2 極限解析の概念

$$\frac{q_u}{c} = N_c + N_\gamma \frac{\rho g B}{2c} \tag{1}$$

本報では計算の詳細については紙面の都合上省略するが、この 式中の N_c , N_r は $\phi \approx \beta$ の関数で表される。またこの式の形は、 上載圧のない場合の Terzaghi の支持力式を粘着力 c で除したも のと等しく、極限支持力の重力への依存性は N_r の値に大きく左 右されることがわかる。この極限解析で求められた式(1)におい て、 $\rho g B/2c$ 、内部摩擦角 ϕ 、および β を設定し、 q_u が最小にな るように ξ を調節すると N_c , N_r が求められ、 q_u を理論的に求 めることができる。

4. 極限解析の妥当性の検討

図-3 は、図-1の関係を式(1)に従って再整理したものであり、 図-1を正規化したものに他ならない。各試料の土質パラメータ については表-1に示した値を用いた。表-1に示されている c, ϕ については、三軸試験結果により求められたものである。図-3 における近似式からは、月面模擬土 $D_r = 90\%$ の場合は $N_c = 38.7$ 、 $N_r = 337.8$ 、Dr = 60%の場合は $N_c = 21.8$ 、 $N_r = 60.0$ 、豊浦砂 $D_r =$ 90%の場合は $N_c = 13.9$ 、 $N_r = 694.9$ 、Dr = 60%の場合は $N_c = 6.3$ 、 $N_r = 378.0$ となり、実験的に N_c , N_r を求めることができる。 N_r は前述したように、極限支持力の重力への依存度を示すもので あり、このことからも月面模擬土の極限支持力が重力に依存し にくいことがわかる。

一方、前述したように、 $\rho gB/2c$ 、 ϕ 、および β をそれぞれ設定して求められた N_c , N_r の理論値を図-4 に示す。この図では、 $\rho gB/2c$ の値を 0.01 から 100 まで 10 倍間隔で値を変えて計算を 行ったが、代入する値に対して N_c , N_r とも大きな違いは見られ なかったので、 $\rho gB/2c = 0.1$ の場合を代表例としてここでは示し た。この図では、 β が大きくなるほど変形領域が減少し、 N_c , N_r ともに減少することがわかる。このことから、 β によって変形 領域を減少させることにより、圧縮性を表現することができる とともに、極限支持力の重力依存性をも表現することができる。

前述した実験値から求められた N_c , N_r を図-4の理論値上に 投影すると、月面模擬土は相対密度の違いに関わらず、 N_c , N_r とも β =45°付近で一致する。すなわち、極限解析を用いれば、 月面模擬土は β = 45°を代入することによって、月面模擬土の 圧縮性や重力依存性を表現することができる。このことは、極 限解析を用いることにより、月面地盤の支持力予測が可能にな ることに他ならない。本報では β を実験から逆推定することに よって求めたが、 β を事前に予測することができれば、圧縮性 と極限支持力の重力への依存性を考慮した月面地盤の支持力を 予測することができる可能性がある。今後は、入力する c, ϕ の 求め方、あるいは β の求め方について検討を行う予定である。

<u>5. 結論</u>

本報では、極限支持力に及ぼす土質と重力の影響メカニズム を、変形領域を任意にコントロールする極限解析を用いて合理 的に説明した。また、適切な *c*, *o* の値と*β* の値を求める手法を 確立すれば、将来的に月面地盤における支持力を予測すること ができる可能性が示唆された。



表-1 土質パラメータ

	D _r (%)	ρ (g/cm ³)	c (kN/m²)	ϕ (deg)
Lunar soil simulant	60	1.81	1.44	41.58
	90	1.97	7.52	50.12
Toyoura sand	60	1.52	3.04	38.11
	90	1.61	2.04	12 73



[【]参考文献】1) JAXA, HP: http://www.jaxa.jp/2) 陶山雄介, 落合, 小林, 藤原, 松井, 宮原, 青木: 月面を想定した低重力場の支持力模型実験 と相似則によるモデリング, 第 42 回地盤工学研究発表会概要集, pp715~716, 2007.3)小林泰三, 落合, 陶山, 青木: 月面を想定した低重力場の 支持力模型実験, 第 61 回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, pp503~504, 2006.4)W. F. Chen: 6 Bearing Capacity of Strip Footings, LIMIT ANALYSIS AND SOIL PLASTICITY, ELSEVIER SCIENTIFIC PUBLISHING COMPANY, pp211~294, 1975.