月面を想定した低重力場の支持力 –相似則によるモデリングー

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)中心に、2007年夏に月探査機「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⁾。この 月・惑星探査計画における月面探査や月資源利用にお いては、月面地盤(レゴリス)-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。しかし月面は、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。そこで 本研究では、基礎的研究として、土の破壊に及ぼす重 力の影響に注目し、低重力場における浅い基礎の模型 実験を行うとともに、極限支持力の相似則について検 討した。

2. 月面地盤の支持力に関する相似則

本研究では、極限支持力に影響を与えるパラメータ として、**表-1**に示す古典支持力理論で用いられている 変数を選定した。すなわち、*q*^{*u*} は 5 個のパラメータを 変数とする関数として、以下のように表すことができ る。

$$q_u = f(c, \phi, \rho, g, B) \tag{1}$$

この関係において、Buckingham のΠ理論に基づく次元 解析を行えば、次の形に書き換えることができる。

$$\frac{q_u}{\rho g B} = g\left(\frac{c}{\rho g B}, \phi\right) \tag{2}$$

すなわち、式(1)では変数が5個であったのに対して、 式(2)では2個の無次元パラメータによって表現できる ことになる。この無次元パラメータの相似条件が満足 されるような模型実験を行うことによって、任意の条 件における極限支持力(実物)をモデリングすること ができるようになる。還元すると、実物を模型実験に よって予測(モデリング)するためには、実物と模型 の相似条件が満たされる必要がある。以下では、その 相似条件について詳しく述べる。

表-1	地盤の極限支持力に関与する変数と次元
-----	--------------------

変数	記号	次元	
極限支持力	q_u	$ML^{-1}T^{-2}$	
粘着力	С	$ML^{-1}T^{-2}$	
内部摩擦角	ϕ	—	
かさ密度	ρ	ML^{-3}	
重力加速度	g	LT^{-2}	
基礎幅	В	L	

実物と模型(実物と区別するため添字にmをつける) の二つの系において、代表的な比率を長さにとり、次 式のように基礎幅の比をnとする。

$$B/B_m = n \tag{3}$$

とする。このnはscale factorと呼ばれる。実物と模型の相似条件は、無次元パラメータを用いて次のように表される。

$$\frac{c}{\rho g B} = \frac{c_m}{\rho_m g_m B_m} \quad \text{is } \frac{c}{\rho_m g_m} = \frac{c}{\rho g n} \quad (4)$$

$$\phi = \phi_m \tag{5}$$

実物と模型において、相似条件がすべて成立したとす ると、式(2)の左辺の無次元パラメータは実物と模型に おいて等しいから、

$$\frac{q_u}{\rho g B} = \frac{q_{um}}{\rho_m g_m B_m} \quad \text{adjust} \quad \frac{q_u}{\rho g} = \frac{q_{um}}{\rho_m g_m} n \quad (6)$$

となり、式(4)~(6)を満足するような模型実験を行う ことができれば、実物のモデリングが理論上可能とな る。ただし、相似則の成立には、次元解析に用いた変 数(**表-1**)の選定の妥当性が前提となる。同一試料を用 いることで式(5)が満たされることは自明である。また $c = c_m$ 、 $\rho = \rho_m$ により、式(4)を満足させるためには、 以下の条件を満足させればよいことになる。

 $gB = g_m B_m \quad \ \ \, \neg \pm \vartheta \quad g_m = gn \tag{7}$

すなわち、月面上(1/6g)における支持力試験を実物とす れば、地球上(1g)で基礎幅 B を 1/6 にスケールダウンし た支持力実験を行うことにより、相似則が満足される ことになる。このことによって、1g 場においても 1/6g 場を想定した極限支持力を予測することができること になる。

3. 実験による相似則の適合性の検討

ここでは、上載圧のない帯状基礎(平面ひずみ条件) を想定し、提案した相似則の適合性について、実験に よる検証を行った。今回の実験で用いた支持力実験装 置を図-1 に示す。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 ンブレンの間にはシリコングリースを塗った。また、 載荷板はアルミ製で、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た。載荷速度は 3.0mm/s の変位制御条件下で荷重と変位の計測を行った。試料 には、絶乾状態の月面模擬土(レゴリスシミュラント: FJS-1³)と豊浦砂を用い、両者とも相対密度が Dr = 90%



図-1 模型実験装置

表-2 土質パラメータ

	最大・最小密度 (g/cm ³)		土粒子密度	強度定数	
	ρ_{max}	$ ho_{min}$	(g/cm^3)	$c (kN/m^2)$	ϕ (degrees)
レゴリスシミュラント	2.02	1.49	2.95	7.6	50.8
豊浦砂	1.64	1.34	2.65	3.89	39.4

表-3 実験パターン

	Test No.	重力加速度 g (9.8m/s ²)	基礎幅 B (cm)
Case 1 $(aB = 1)$	1	0.5	2
Case I ($gD = I$)	2	1	1
Case 2 $(gB = 4)$	3	2	2
	4	1	4

になるように調整した。それぞれの試料の土質パラメ ータは表-2に示す。また、gBの値を固定し、重力加速 度gと基礎幅 Bの組み合わせを変えた実験を比較する ために、表-3に示したパターンで実験を行った。ここ では、放物線飛行(パラボリックフライト)する航空 機内で実験を行うことによって、低重力場を実現した。

図-2には、無次元支持力と沈下関係の一例を示した。 縦軸は支持力を正規化したものを用いた。これらの図 から、レゴリスシミュラント、豊浦砂ともに、Case 2 (gB = 4)の場合、基礎幅 B 一定で重力加速度 g を低下させ た実験と、重力加速度 g 一定で基礎幅 B を小さくした 実験の支持力値がよく一致していることがわかる。つ まり Case 2 (gB = 4)の場合は、式(4)~(6)が満たされ、相 似則が成立したことになる。しかし Case 1 (gB = 1)の場 合は、基礎幅 B 一定で重力加速度 g を低下させた実験 と、重力加速度 g 一定で基礎幅 B を小さくした実験の 支持力値に若干の差異が見られた。すなわち Case 1 (gB = 1)の場合は、式(6)が満たされていないため、相似則は 成立していない。

また、基礎幅 B 一定で重力加速度 g を低下させた実 験と、重力加速度 g 一定で基礎幅 B を小さくした実験 の極限支持力値の差異について検討するために、**図**-3 を示す。**図**-3 の横軸は、基礎幅 B 一定で重力加速度 g を 変えた実験で得られた極限支持力を正規化したものを、 縦軸には重力加速度 g 一定で基礎幅 B を変えた実験で 得られた極限支持力を正規化したものである。この図 より、Case 2 (gB = 4)の場合は両実験方法による極限支 持力の差異、またばらつきはほぼ見られない。つまり 極限支持力に関して、Case 2 (gB = 4)の場合は相似則が 成立している。しかし Case 1 (gB = 1)の場合は、Case 2 [参考文献] 土木学会西部支部研究発表会(2007.3)



(gB = 4)の場合に比べて、両試験方法による極限支持力 の差異が大きくなり、厳密には相似則が成立していな いことがわかる。この原因として、寸法効果が影響を 与えている可能性がある。今回、表-1 に示した変数を 用いた相似則は、gBの値が大きい場合は成立した。た だし gBの値が小さい場合、表-1 に示した変数を用い た相似則は成立しないことが示唆された。

<u>4. おわりに</u>

本研究では、低重力場における極限支持力に関する 相似則を提案し、実験的にその相似則の適合性につい て検証した。その結果から、gBの値が大きい場合は、 極限支持力に関する相似則が成立すると考えられる。 ただし、gBの値が小さい場合には成立しないことが示 唆された。今後は更なるパラメータを用いて、極限支 持力だけでなく、種々の力学特性についてのモデルも 構築していく予定である。

1) JAXA, HP: http://www.jaxa.jp/

3)藤原,落合ら:月面模擬土の変形・強度特性,平成18年度土木学会西部支部研究発表会,投稿中.

²⁾ 田中孝, 笈田昭: 車両・機械と土系の力学-テラメカニクス-, 学文社, pp.106~137, 1993.