月面地盤の支持力評価

九州大学大学院	(学)	○藤原	原洋一郎	(F)	落合英俊
	(正)	小林寿	三家	(学)	陶山雄介
清水建設㈱技術研究所		青木	滋		
宇宙航空研究開発機構		松井	快	宮原	頁 啓

1. はじめに

近年、NASAやJAXAをはじめとして各国の宇宙開発機関で月面探査に関する研究開発が活発化してきてい る。月面への軟着陸が実現すれば、資源探査や拠点・基地建設における地盤-機械系および地盤-構造物系の 相互作用に関する力学的問題の事前評価がその後のミッション遂行の重要な鍵になると考えられる。月面は、 低重力、高真空、特殊な土壌(レゴリス)など、地上とは異なる環境にあり、上述の問題を評価するにはこれ らの環境条件の地盤挙動に及ぼす影響を検討する必要がある。著者ら^{1),2),3)}は、月面探査に向けた地盤工学的 アプローチに関する一連の研究を進めており、そのひとつとして、前報⁴⁾では、航空機を用いた低重力場にお ける支持力模型実験の実験結果を報告した。本報では、その実験結果を受け、低重力場の支持力評価方法につ いて支持力理論と相似則に基づく理論的な検討を行う。なお、一部、g条件や基礎幅を変化させたケースの追 加実験を実施したが、基本的な実験方法は前報と同様であるので、紙面の都合上その詳細は前報に譲り、本報 では主に追加実験と前報の実験結果を用いた解析を主体的に扱うことにする。

2. 低重力場における支持力評価

一般的に、基礎の極限支持力は、塑性論に立脚した理論展開が行われてきた。すなわち、土の強度を粘着力 c と内部摩擦角 ϕ を用いて Mohr-Coulomb の破壊規準として表現する。その結果、支持力問題は、(c、 ϕ 、 γ 、 q₀、B)の五つのパラメータで計算できるようになる。ここに、 γ :土の単位体積重量、q₀:上載圧、B:基礎

幅である。上載圧のない支持力問題を考えた場合、次元解析に よって q_u や前出の 0.5 γ nB を c で無次元化することができ、 q_u = $f(c, \phi, \gamma, n, B)$ なる関数形で与えられていた支持力問題を、 $q_u/c =$ f (, ynB/c)としてモデリングすることができる。図-1 は、この 考え方を特性曲線法に導入して得られた無次元支持力 qu /c と ynB/cの関係を表したものである。この図より、ynB/cが小さい 場合、すなわち、相対的に重力や基礎幅が小さい場合、あるい は粘着力が大きい場合には、重力の影響が支持力に現れにくく なることが分かる。図-2は、1g場に対する 1/6g場の quの低減 比率Rに及ぼすynB/cの影響を表したものである。この図から、 10⁻¹<γnB/c <10²の範囲で支持力に及ぼす重力の影響が顕在化す ることが分かる。本実験でのynB の値は前述の通り模擬土で 0.032~0.191 であり、これをさらに c で除した無次元量が低重 力場の支持力評価に大きく影響を与えることになる。このこと から土質情報としてのcの評価は、かなり慎重に行わなければ ならないことが分かる。しかしながら、特に破壊包絡線に非線 形性が認められるような場合には、c の厳密な評価は極めて困 難となるので、月面における基礎幅が小さい場合の支持力問題 では、現実問題として(c,)を用いる古典理論の使用は困難にな ると考えられる。



キーワード 月面地盤,支持力,低重力,特性曲線法,相似則

連絡先 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地 ウエスト2 号館 地盤工学研究室 Tel 802-2999 (7805)

ここまでは、古典的支持力理論の議論を進めてきたが、月面 での極限支持力を精度よくもとめることが難しいことが分かっ た。以下では、地上(lg場)における実験的な方法によって低 重力場の挙動を予測する方法を検討する。

前項では、粘着力 c による q の無次元化について検討してき たが、同様の手順で qu のynB による無次元化も可能である。す なわち、 $q_u = f(c, \phi, \gamma, n, B)$ で与えられる場に対して、 $q_u / \gamma n B = f(\phi, \phi, \gamma, n, B)$ で与えられる場に対して、 $q_u / \gamma n B = f(\phi, \phi, \gamma, n, B)$ で与えられる場 c/ynB)なるモデリングが可能となる。このことは、この関数の 変数である無次元パラメータの相似条件が満たされるような実 験(模型)を行うことによって任意の重力場における極限支持 力(実物)をモデリングできる可能性があることを意味する。 模型と実物で同一の試料が用いられるとすると c とyは不変で あるので、無次元パラメータ c/ynB のうち nB の値が模型と実物 で一致していればよいことになる。すなわち、1/6 スケールの 基礎幅の実験を行うことによって、1/6g 場の支持力機構を 1g 場で再現することができることになる。このことが可能となる には、n と B の組合せによらずその積である nB が等しいとき に同じ極限支持力値が得られなければならない。ここでは、D_r= 90%のFJS-1および豊浦砂を対象に、基礎幅や重力を変化させ て種々の nB 値をつくりだし、上述の相似則モデリングの妥当 性を検討した。なお、目標とする nB 値を nB = 1、2、4の三種 類とし、重力と基礎幅の組み合わせは表-1に示す通りで実験を 行った。図-3は、実験で得られた quと Bの関係を nBのグルー プ毎にプロットしたものである。図(a)の FJS-1 では、B に対す る quの変化はあまり見られないが、図(b)の豊浦砂では B の増 加に伴って qu も増大する傾向にあることが分かる。このことは、

表-1 モデリングの組合せ

nB (cm)	Case A (n = 1) 地上実験: 1g	Case B (n= 0.5) 航空機実験: 0.5g	Case C (n=2) 航空機実験: 2g			
1	n =1, B = 1 cm	n = 0.5, B = 2 cm	-			
2	n =1, B = 2 cm	n = 0.5, B = 4 cm	n = 2, B = 1 cm			
4	n =1, B = 4 cm	-	n = 2, B = 2 cm			



FJS-1 においては相似則が満たされる一方で、豊浦砂ではそれが成立しないことを示唆するものである。一般に、支持力問題には、基礎幅が大きくなると支持力係数が小さくなるというスケール効果が知られている。 また粒子径と基礎幅の比も支持力に影響を及ぼすことが知られている。豊浦砂の粒径は FJS-1 に較べて大き く、このことが豊浦砂の相似則不成立の要因とも考えられるが、そのメカニズムの究明は今後の課題とした い。ただし FJS-1 に関しては、航空機実験のような特殊な実験を行わずしても 1g 場で相似則を用いた模型実 験で代用できることを確認する結果を得ることができた。低重力場の挙動予測の実験的方法の一手段として 今後も検討を進めていきたい。

3. まとめ

本報では、月面地盤を想定した低重力場における支持力実験(前報)の結果を受けて、低重力場における 支持力の評価方法に支持力理論と相似則に基づく理論的な検討を行った。その結果、古典支持力理論を用い た場合、低重力場では c の感度が極めて高く、それを使用するには注意が必要であることが判明した。一方、 相似則を利用し、1g 場で 1/6g スケールの模型実験を行うことによって、月面の支持力予測が可能であるこ とを示唆する結果を得た。

参考文献

1) T. Kobayashi, et. al: Mechanical Properties and Bearing Capacity of Lunar Surface, *13th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Kolkata, India, (投稿中) 2) T. Kobayashi, et.al: Load-settlement Characteristics of Japanese Lunar Soil Simulant in Partial Gravity, *Space Resources Roundtable VIII* (Abstract), pp.37-38, 2006. 3) H. H. Bui, et al: Simulations of Soil Excavations on the Lunar Surface, *Proc. of the 10th European Conference of the ISTVS*, (on CD-Rom), 2006. 4) 小林泰三, 他:月面を想定した低重力場の支持力実験, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集, 滋賀, 3-254, pp.503-504, 2006. 9.