基于室内载荷试验的模拟月壤承载力研究*

高辉[1,2],邢书婷[1],张宇欣[1],方小红[1],谭松成[1],肖龙[2,3],段隆臣[1]

(1.中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074;
2.行星地质与深空探测湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074;
3.中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:我国未来将实施载人登月,并在月球表面建立永久基地,实现月球矿产资源的开发和利用。为了解决月面建造过程中月壤承载力确定的问题,提出采用小尺寸室内载荷试验推演大尺寸基础下模拟月壤容许承载力和沉降量的方法。首先,使用直径为6 cm、8 cm、10 cm的圆形载荷板对相对密实度为78%的模拟月壤进行平板载荷试验,得到模拟月壤的实测荷载-沉降(p-s)曲线,通过对该曲线的拟合获得模拟月壤的初始切线模量和极限承载力,采用切线模量法建立模拟月壤的切线模量与其初始切线模量、受到的附加应力和极限承载力的关系,进而依据沉降计算理论计算任意尺寸基础下的p-s曲线,通过小尺寸载荷试验的结果验证,计算的p-s曲线和实测的p-s曲线吻合。其次,依据该方法计算大尺寸基础下的p-s曲线,并通过极限承载力和沉降控制方法对大尺寸基础下的容许承载力进行综合表征。对大尺寸的圆形、方形基础下的模拟月壤承载力分析结果表明,随着基础的尺寸增大,两种载荷板下模拟月壤的容许承载力均增大;相同尺寸方形基础下的模拟月壤承载力比圆形基础下的大。从计算的p-s曲线中可知,所取的容许承载力对应的模拟月壤的沉降量满足要求。按照常规载荷试验中圆形载荷板的直径为30 cm,推测出本次试验所用的模拟月壤的容许承载力为122 kPa。提出的模拟月壤容许承载力的确定方法可为月球基地建造及矿产资源开发过程中月壤承载力的确定提供一种途径和思路。

关键词:模拟月壤;载荷试验;承载力;切线模量

中图分类号:TU411;P184 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)01-0001-09

Study on Bearing Capacity of Lunar Soil Simulant Based on Laboratory Loading Test

GAO Hui[1,2], *XING Shuting*[1], *ZHANG Yuxin*[1], *FANG Xiaohong*[1],
TAN Songcheng[1], *XIAO Long*[2,3], *DUAN Longchen*[1]

(1.School of Engineering, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China;
2.Hubei Key Laboratory of Planetary Geology and Deep-Space Exploration, Wuhan, Hubei 430074, China;
3.School of Earth Sciences, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: In the future, China will implement manned lunar landing missions, establish a permanent base on the lunar surface, and realize the exploitation and utilization of lunar mineral resources. To address the issue of determining bearing capacity of lunar soil during lunar surface construction, a method was proposed to use small-scale laboratory loading tests to deduce the allowable bearing capacity and settlement of lunar soil simulant under large-scale foundations was proposed. Firstly, plate loading tests were performed on lunar soil simulant with a compactness of 78% using circular loading plates with diameters of 6 cm, 8 cm, and 10 cm, respectively. The measured load-settlement (p-s) curves of the lunar soil simulant were obtained, and through curve fitting, the initial tangent modulus and ultimate bearing capacity were extracted. The tangent modulus method was adopted to establish the relationship between the tangent modulus of the lunar soil simulant and its initial tangent modulus, applied additional stress, as well as ultimate bearing capacity. Furthermore, based on the settlement calculation theory, the p-s curves under foundations of arbitrary sizes were calculated. Validation against the results of small-scale load tests demonstrated a good agreement between the calculated p-s curves and the measured ones. Secondly, the proposed method was employed to

* **收稿日期**:2025-10-22
基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFB3711300)
作者简介:高辉(1977—),男,湖北天门人,博士,副教授,从事月壤力学和智能钻探相关的研究与教学工作。E-mail:gaohui@cug.edu.cn
通信作者:方小红(1981—),女,湖北荆州人,博士,硕士生导师,主要从事地质勘查、岩心钻探和探地雷达等方面的研究与教学。E-mail:duyaoff@163.com

compute the *p-s* curves under large-scale foundations, and the allowable bearing capacity of large-scale foundations was comprehensively characterized by integrating the ultimate bearing capacity criterion and settlement control method. The analysis results of bearing capacity of lunar soil simulant under large-scale circular and square foundations indicates that with the increase in foundation size, the allowable bearing capacity of the lunar soil simulant under both types of loading plates increases. Additionally, the allowable bearing capacity of the lunar soil simulant under square loading plates is higher than that under circular ones of the same size. It can be inferred from the calculated *p-s* curves that the settlement of the lunar soil simulant corresponding to the determined allowable bearing capacity meets the engineering requirements. According to the standard size of circular loading plates used in conventional loading tests, the allowable bearing capacity of the lunar soil simulant employed in this study has been deduced to be 122 kPa. The proposed method for determining the allowable bearing capacity of lunar soil simulant provides a scientific approach and theoretical basis for the determination of lunar soil bearing capacity during the construction of lunar bases and the exploitation of lunar mineral resources.

Key words: Lunar soil simulant, Loading test, Bearing capacity, Tangential modulus

0 引言

近年来,随着航空航天技术的飞速发展,世界各国不断发起月球探测活动,其目标是在未来完成载人着陆,进行月球矿产资源开发,并在月球表面建立永久基地[1-2]。月壤承载特性是月壤工程力学性能的重要指标之一,该指标的确定对未来指导月球上的基础设施建设具有重要作用[3-4]。平板载荷试验是地基土原位测试技术之一,也是确定地基承载力最为可靠的方法之一。但直接在月球表面环境下进行平板载荷试验的研究成本太高且难以实现。因此,采用模拟月壤进行试验,是一种可行的方法。模拟月壤具有与月球风化层相似的矿物学特性、粒度分布、化学成分和工程特性[5],利用模拟月壤在地球上进行平板载荷试验,然后借助某种方法推演来确定真实月壤的承载力[6-10]。

模拟月壤作为月球真实矿物赋存环境的等效替代载体,为矿业领域开展深空资源开发技术验证提供了关键试验对象,其成分与结构的精准模拟度,直接决定了月球矿物开采设备(如破碎机械、矿物分选装置)性能测试结果的可靠性与参考价值。目前,国内外已有不少学者对模拟月壤的承载特性进行了试验研究。郝飞等[6]采用 TJ-1 模拟月壤作为地基材料,把着陆器足垫作为基础进行了位移速率控制条件下的载荷模型试验,发现在控制加载位移速率时,TJ-1 模拟月壤的足垫地基极限承载力随着加载速率的增加而增加。张宇等[11]采用 CAS-1 模拟月壤进行直剪、压缩和三轴试验,发现 CAS-1 模拟月壤在不同密度下的初始切线斜率均随围压的升高而逐渐减小,其应力-应变曲线分为以弹性变形为主的硬化和以塑性变形为主的软化阶段。围压越高,初始切线模量越大。XI 等[12]对模拟月壤进行了平板载荷试验,研究不同形状和粗糙度的载荷板下模拟月壤的承载特性,发现条形板下地基的承载能力和变形模量最高,圆形板的最低,且当加载板粗糙时,承载能力和变形模量更高。THANNASI 等[13]对 LSS-ISAC-1 高地模拟月壤进行平板载荷试验,发现该模拟月壤在低重力下的力学行为与真实月壤高度吻合,具体表现为月球低重力下的 LSS-ISAC-1 的极限承载力较地球降低 3.6～5.6 倍,极限承载力随基础尺寸增大而增加,沉降量与荷载呈非线性关系,符合 Bekker 模型特征。BUI 等[14]利用飞机俯冲获得短时间低重力场,研究了不同低重力加速度下丰浦砂和 FJS-1 模拟月壤的地基承载力问题。WONG 等[15]描述了一种基于地球上获得的测试结果来预测漫游车车轮在地外表面上的性能的实用方法,研究发现,在行走状态下,重力对刚性月球车车轮的滑移和下沉关系影响不大。ZOU 等[16]研制了低重力模拟装置,并建立了模拟风化层的内应力模型,该模型揭示了剪切试验中剪切面和载荷试验中载荷板区域均存在附加力。沉降和剪切试验结果表明,在大于 50 N 的连续法向载荷作用下,沉降量普遍随重力减小而增大;但当轮载低于 50 N 时,1g 重力作用下 TYⅡ-1 模拟体的沉降大于 $g/6$ 重力作用下的沉降,重力作用对风化层抗剪强度影响不大。

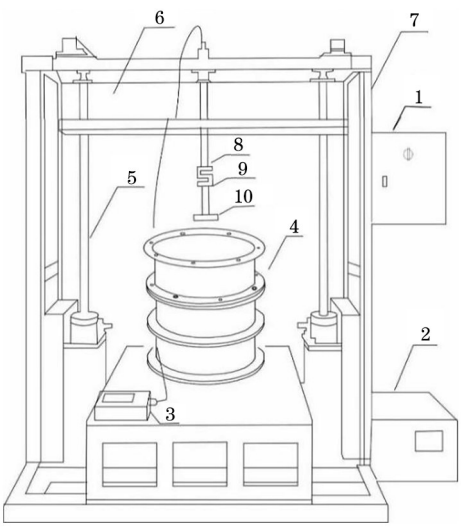
采用平板载荷试验来确定模拟月壤的极限承载力是最直接的可靠方法,但实际上月壤的极限承载力不仅与月壤本身性质有关,还与基础的宽度和埋深有关。平板载荷试验通常是进行小尺寸无埋深的试验,不能用原型基础进行试验来确定模拟月壤的极限承载力。因此,如何根据小尺寸基础即载荷板得到的试验结果确定实际大尺寸基础下模拟月壤的极限承载力,进一步得到其容许承载力,是一个重要的研究课题[17-19]。

本文设计了一套试验加载装置,使用圆形载荷板模拟小尺寸基础,对CUG-1A模拟月壤[20]进行了不同载荷板尺寸下的平板载荷试验,以研究载荷板尺寸对模拟月壤承载力的影响。模拟月壤的承载力与基础尺寸有关,平板载荷试验确定的承载力不是真正基础下的承载力。由于尺寸效应,不同基础下模拟月壤承载力是不同的。本文采用载荷试验求取与尺寸无关的模拟月壤的变形参数,由所求的参数计算实际基础下的 p-s(荷载-沉降)曲线,由基础的 p-s 曲线根据强度和沉降控制要求确定模拟月壤的承载力,这样可以更好地解决基础尺寸效应带来的问题。

1 室内载荷试验

1.1 试验装置

试验设备主要包括加载装置、变频电机、测试微机、模型圆桶、竖向螺杆、横梁、台架、探杆、S形压力传感器和载荷板,如图1所示。



1—加载装置 2—变频电机 3—测试微机
4—模型圆桶 5—竖向螺杆 6—横梁 7—台架
8—探杆 9—S形压力传感器 10—载荷板

图1 加载装置和模型圆桶示意

Fig.1 Schematic of the loading device and the model barrel

加载装置通过电机驱动螺杆,带动横梁向下运动,实现恒速加载。模型圆桶采用钢材焊接而成,直径为40 cm、高为30 cm。在既有模型圆桶基础上,考虑到模拟月壤颗粒的尺寸效应和载荷板边界效应[21],圆形载荷板直径设计为6 cm、8 cm和10 cm 3种尺寸。通过传感器实时监测载荷板与地基接触的压力以及加载位移,并传输到电脑端,通过数据处理,得到 p-s 曲线。

1.2 试验材料

本试验使用的CUG-1A模拟月壤的原材料采自于吉林省辉南县大椅子山乡的大椅子火山,以橄榄玄武岩为主体材料,主要矿物成分为橄榄石、辉石和斜长石,还可见少量磁铁矿、磷灰石等矿物,与实际月壤组成比较类似,经过粉碎、筛分、烘干后得到符合预期目标物理力学性质的模拟月壤材料。模拟月壤的颗粒形态以棱角状和次棱角状为主,少量颗粒呈次圆状[20]。CUG-1A模拟月壤的颗粒级配曲线与嫦娥5号真实月壤的颗粒级配曲线对比如图2所示。

CUG-1A模拟月壤的主要物理力学指标如下:最小干密度为1.1 g/cm^3,最大干密度为2.0 g/cm^3,最小孔隙率24.9%,最大孔隙率58.2%,颗粒密度2.661 g/cm^3,中值粒径 $d_{50}=60$ μm[20]。

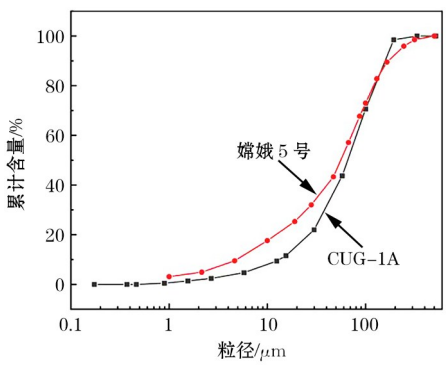


图2 CUG-1A模拟月壤与嫦娥5号真实月壤的颗粒级配曲线

Fig.2 The particle size distribution curves of the CUG-1A lunar soil simulant and the real lunar soil collected by Chang'e-5

1.3 试验方案

本试验中采用振动台制备试样,通过竖直方向的振动实现模拟月壤的密实,控制相同的振动频率和振动次数,以确保每次制备的试样的密实状态相同,避免因试样差异影响测试结果。试验所需模拟月壤地基的密度为1.8 g/cm^3,相对密实度为78%,根据模型圆桶的尺寸和目标密度计算所需模拟月壤的质量为67.8 kg。将称量好的模拟月壤沿模型桶壁缓慢倒入,避免其在桶内出现局部堆积或架空的现象,导致初始密实度降低。将模型桶固定在振动台上,确保桶体中心与振动台中心对齐,避免振动过程中出现偏心而导致试样的密实不均。制成目标模拟月壤试样时,调节振动频率为25 Hz,振动时间为80 s。

制备好模拟月壤试样后,将装有试样的桶移至加载装置下方,调整试样桶位置,使载荷板中心与试

样桶中心对齐,确保加载力竖直传递至试样。试验采用等速加载方式,使用直径 D 分别为 6 cm、8 cm 和 10 cm 的圆形载荷板对已制备好的模拟月壤试样进行平板载荷试验。当载荷板周围模拟月壤发生明显的侧向挤出,出现明显隆起或径向裂缝持续发展且 p-s 曲线出现明显陡降时,结束试验。为避免偶然因素对结果的影响,对每种尺寸的载荷板均进行至少 3 次平行试验,在试验结果误差不超过 5%的条件下,取各试验结果的平均值作为最终结果。将 p-s 曲线出现的第一个峰值荷载作为该载荷板尺寸下的模拟月壤的极限承载力。

1.4 试验结果

不同载荷板直径的试验结果如图 3 所示。

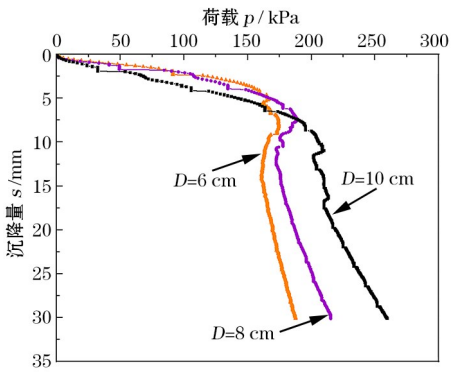


图 3 不同载荷板直径下的 p-s 曲线

Fig.3 The p-s curves under different diameters of loading plate

由图 3 可知,在达到极限承载力之前,3 个尺寸的载荷板下的模拟月壤沉降量随载荷近似呈线性增长,增长速率基本一致。直径为 6 cm、8 cm 和 10 cm 载荷板下的模拟月壤极限承载力分别约为 160 kPa、180 kPa 和 230 kPa;对应的模拟月壤沉降量分别为 5 mm、7.5 mm 和 12 mm。载荷板直径越大,模拟月壤的极限承载力越大。随着载荷板直径增大,其对模拟月壤的应力扩散范围更广,应力扩散的水平范围和深度范围越广,有效受荷的模拟月壤体积越大,达到极限承载力时的沉降量越大。

2 基于载荷试验的模拟月壤荷载-沉降曲线的计算

地基承载力计算一直是土力学研究的重要问题,其中最大的难度在于计算参数的取用,尤其在反映原状土特性方面不是很理想。目前用平板载荷试验反算的变形模量是按半无限线弹性体的 Businessq 解计算的,其反映的是平板下土体总体的一种等效指标。但由于平板载荷试验是小尺寸载荷板下的试验,如何把试验结果用于大尺寸的基础沉降计算需要深入研究。杨光华等[22]提出了切线模量法,根据平板载荷试验的荷载-沉降(p-s)曲线,用应力水平确定单元土体的切线模量,以取代传统的压缩模量,用于分层沉降计算。切线模量源于原状土的载荷试验曲线,因而是一个能更好反映原状土变形特性的沉降量计算方法。这种方法的思路是用载荷试验确定土的变形参数,从而用于计算实际基础的 p-s 曲线。

浅基础的地基破坏形式可划分为三类,分别是整体剪切破坏、局部剪切破坏和冲剪破坏。试验过程中模拟月壤的破坏特征表现为:在荷载较小时,处于弹性阶段,地基沉降量与荷载近似呈线性关系;荷载增大后,基底边缘模拟月壤出现塑性区,并逐渐向周围扩散;达到极限荷载后,塑性区贯通形成连续滑动面,地基突然失稳,沉降急剧增加,基础两侧地面明显隆起,如图 4 所示。在 p-s 曲线中,有两个明显的转折点,可区分地基变形的三个阶段。因此,判定该密实度下模拟月壤的破坏模式属于整体剪切破坏,计算模拟月壤极限承载力时采用整体剪切破坏的公式进行计算。



图 4 试验结束后的模拟月壤试样

Fig.4 Lunar soil simulant samples after the end of the test

利用模拟月壤平板载荷试验的 p-s 曲线确定模拟月壤本身的变形参数,利用切线模量法计算具体基础的 p-s 曲线,根据荷载和沉降控制可以确定满足要求的模拟月壤的承载力。

2.1 模拟月壤变形参数的拟合

由于一般模拟月壤平板载荷试验的 p-s 曲线为缓变型曲线,通常可以假设其符合双曲线方程,如图 5 和式(1)所示。

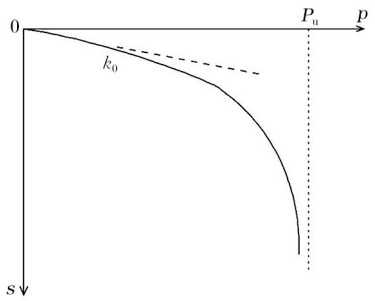


图 5 载荷试验曲线

Fig.5 The curve of the loading test

假设平板载荷试验的 p-s 曲线符合如下双曲线方程:

$$p=\frac{s}{a_0+b_0 s} \tag{1}$$

根据双曲线方程的特点,可以得到:

$$\begin{cases} a_0=\dfrac{1}{k_0} \\ b_0=\dfrac{1}{P_u} \end{cases} \tag{2}$$

式中:a_0、b_0 为待求参数;P_u 为模拟月壤极限承载力,kPa;k_0 为 p-s 曲线中直线段的斜率。

模拟月壤的初始切线模量按下式计算:

$$E_{t0}=k_0 D(1-\mu^2)\omega \tag{3}$$

式中:E_{t0}为模拟月壤的初始切线模量,MPa;D 为载荷板直径,cm;μ 为模拟月壤的泊松比,取 0.3;ω 为平板形状系数,圆形平板取 0.79。

实测模拟月壤的黏聚力 c(kPa)和内摩擦角 φ(°),由此,得到了后续计算需要的 3 个土力学参数:c、φ、E_{t0}。

2.2 模拟月壤荷载-沉降曲线的计算

根据载荷试验的 p-s 曲线,能够用应力水平来确定模拟月壤在不同深度处受到不同附加应力时的切线模量,以取代传统的压缩模量,用于分层沉降计算。依据该切线模量和沉降计算理论可以计算任意基础尺寸的 p-s 曲线。载荷板受到荷载增量 Δp 时,其底面以下某深度处模拟月壤的切线模量与其初始切线模量、受到的附加应力和该处模拟月壤的极限承载力有关,计算公式为:

$$E_t=\left(1-R_f\frac{\Delta\sigma}{P_u}\right)^2 E_{t0} \tag{4}$$

对于圆形基础下的整体剪切破坏,按下式计算:

$$P_u=1.2c\,N_c+\gamma d\,N_q+0.6\gamma b\,N_\gamma \tag{5}$$

对于方形基础下的整体剪切破坏,按下式计算:

$$P_u=1.2c\,N_c+\gamma d\,N_q+0.4\gamma b\,N_\gamma \tag{6}$$

其中,承载力系数的计算公式如下:

$$N_q=\frac{e^{\left(\frac{3\pi}{2}-\varphi\right)\tan\varphi}}{2\cos^2\left(45°+\frac{\varphi}{2}\right)} \tag{7}$$

$$N_\gamma=1.8(N_q-1)\tan\varphi \tag{8}$$

$$N_c=(N_q-1)\cot\varphi \tag{9}$$

式中:R_f为破坏比系数(其中取 1.0 拟合效果最好);d 为基础埋深,m;γ 为模拟月壤的有效容重,kN/m^3;b 为圆形基础半径或方形基础边长,m;N_q、N_c、N_γ为承载力系数,与模拟月壤的内摩擦角 φ 有关,模拟月壤的内摩擦角 φ 和黏聚力 c 的值由室内直剪试验获得;$\Delta\sigma$ 为某深度处受到的附加应力,kPa,$\Delta\sigma=K_c\Delta p$,K_c为平均附加应力系数,可根据不同上部荷载分布通过公式计算求得,Δp 为每级荷载增量。圆形载荷板中心点下某深度处的平均附加应力系数 K_{cr}的计算公式如下:

$$K_{cr}=1-\frac{1}{\left(\frac{1}{n^2}+1\right)^{\frac{3}{2}}} \tag{10}$$

方形载荷板的平均附加应力系数K_{cs}计算公式如下:

$$K_{cs}=\frac{2}{\pi}\frac{n(n^2+2)}{(n^2+1)^2\sqrt{n^2+2}}+\sin^{-1}\frac{4}{\sqrt{(n^2+1)^2}} \tag{11}$$

式中:$n=\dfrac{z}{b}$;z 为载荷板下某一处的深度,m。

模拟月壤的第 i 层沉降量 Δs_i 计算公式如下:

$$\Delta s_i=\frac{\Delta\sigma_i\Delta h}{E_{ti}} \tag{12}$$

式中:Δh 为分层厚度,m;$\Delta\sigma_i$ 为第 i 层的附加应力,kPa;E_{ti}为第 i 层的极限承载力,kPa。

第一级荷载下模拟月壤的最终沉降值:

$$s_1=\Delta s_1+\Delta s_2+\Delta s_3+\cdots+\Delta s_n \tag{13}$$

重复以上过程,即可求得每级荷载下模拟月壤的沉降值,并绘制 p-s 计算曲线。

2.3 计算 *p-s* 曲线的试验验证

以直径 6 cm 的圆形载荷板为例进行验证。根据 6 cm 的圆形载荷板的试验数据,得到该尺寸下的 k_0 和 E_{t0},计算 p-s 曲线,并与试验得到的 p-s 曲线进行对比。实测模拟月壤的内摩擦角为 31.23°,黏聚力为 3.85 kPa,容重 $\gamma=17.64$ kN/m^3。

根据切线模量法计算不同荷载下模拟月壤的沉降量,重新绘制 p-s 曲线。令每级荷载增量 $\Delta p=20$ kPa,分层厚度 $\Delta h=0.01$ m,取每层模拟月壤中心点位置进行计算,计算深度取 0.3 m,可分为 30 层。

令第一级荷载为 20 kPa,当模拟月壤某一层的单层沉降量 Δs 与总沉降 s 的比值 k 小于 0.025 时停止计算,取当前的总沉降量为一级荷载下的沉降量。第一级荷载下模拟月壤沉降量的计算参数和结果见表 1。模拟月壤在第 11 层的沉降量为 0.004 mm,总沉降量为 0.216 mm,单层沉降量与沉降量的比值为 0.021,小于 0.025。因此,一级荷载下模拟月壤的沉降量为 0.216 mm。

表 1 一级荷载下模拟月壤沉降量的计算参数和结果

Table 1 Calculation parameters and results of lunar soil simulant settlement under first-level load

层数	z/m	K_{cr}	$\Delta\sigma$/kPa	P_u/kPa	E_t/MPa	Δs/mm	s/mm	k
1	0.005	0.996	19.911	201.341	4.121	0.048	0.048	1.000
2	0.015	0.911	18.211	205.925	4.217	0.043	0.092	0.472
3	0.025	0.738	14.753	210.509	4.388	0.034	0.125	0.269
4	0.035	0.562	11.246	215.093	4.558	0.025	0.150	0.165
5	0.045	0.424	8.479	219.677	4.690	0.018	0.168	0.108
6	0.055	0.323	6.468	224.262	4.786	0.014	0.181	0.075
7	0.065	0.251	5.030	228.846	4.854	0.010	0.192	0.054
8	0.075	0.200	3.992	233.430	4.903	0.008	0.200	0.041
9	0.085	0.161	3.229	238.014	4.938	0.007	0.206	0.032
10	0.095	0.133	2.658	242.598	4.964	0.005	0.212	0.025
11	0.105	0.111	2.221	247.182	4.984	0.004	0.216	0.021

直径 6 cm 圆形载荷板下模拟月壤的计算 p-s 曲线和试验 p-s 曲线如图 6 所示。由图 6 可知,试验值的 p-s 曲线与用切线模量法反算得到的相同载荷板尺寸下的 p-s 曲线比较接近,说明用切线模量法计算得到的 p-s 曲线模型较为准确。

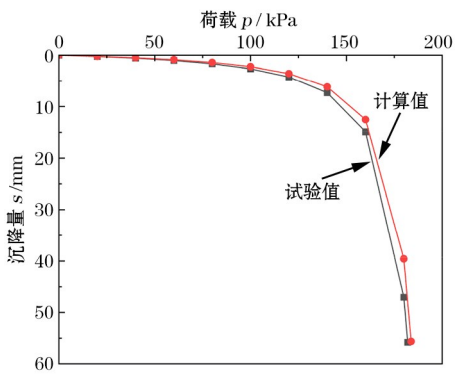


图 6 直径 6 cm 载荷板下的模拟月壤 p-s 曲线试验值与计算值

Fig.6 Test value and calculated value of p-s curves of lunar soil simulant under loading plate with a diameter of 6 cm

直径 6 cm 载荷板的 p-s 计算结果在与试验得到的结果表现出高度的一致性,体现了切线模量法的可靠性。在探月工程的实际应用中,在满足试验边界条件下,考虑到试验装置的自重,应选择最小尺寸进行试验,该尺寸可以同时满足实际需求。因此,后续研究中采用直径 6 cm 载荷板的计算模型进行大尺寸基础极限承载力的拟合。

3 大尺寸基础下模拟月壤承载力的分析

由于室内试验受场地条件限制,平板载荷试验只能使用小尺寸载荷板。而在真正的原位平板载荷试验中,要求基础面积不应小于 2 500 cm^2,对应圆形基础的直径约为 28 cm。为探究不同基础尺寸下模拟月壤承载力的变化规律,选取直径分别为 30 cm、40 cm、50 cm、100 cm、150 cm、200 cm、250 cm 和 300 cm 的圆形基础进行研究。常见的基础形状除圆形外还有方形基础,因此选取相应边长的方形基础进行计算,绘制 p-s 曲线,如图 7 所示。

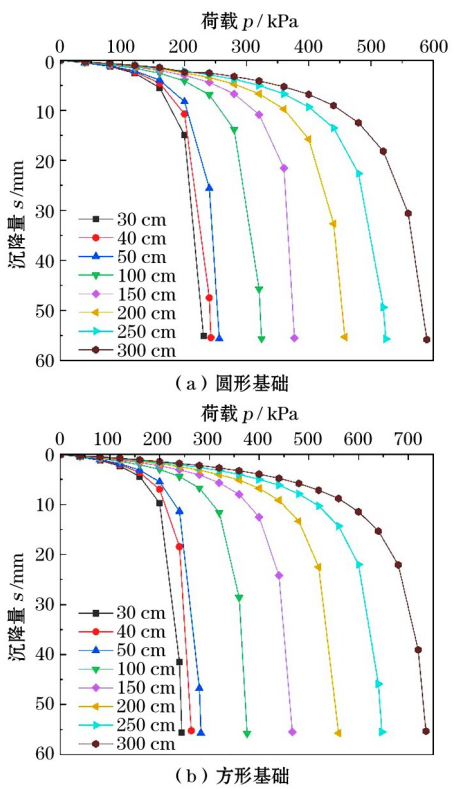


图 7 不同尺寸基础下的模拟月壤 p-s 曲线

Fig.7 The p-s curves of lunar soil simulant under the foundations with different sizes

本文通过三种方法确定模拟月壤的容许承载力:第一种方法是基于切线模量法,通过对 p-s 曲线进行拟合,确定极限承载力,取安全系数为 2,确定容许承载力 P_q;第二种方法是根据 p-s 曲线承载力最大值确定极限承载力,同样取安全系数为 2,确定容许承载力 P_m;第三种方法是通过控制沉降量确定容许承载力 P_c。由于目前缺少对月面建筑沉降量控制的相关研究,本文选取沉降量近似线性增长阶段与非线性增长阶段的临界点,即 3 mm 作为沉降量控制点。分别使用三种方法计算得到的容许承载力、容许承载力平均值 $\bar{P}$ 和沉降量 s 见表 2。将三种方法计算的不同形状、不同尺寸基础下的容许承载力进行拟合,得到容许承载力随基础尺寸的变化曲线,如图 8 所示。按照常规载荷试验中的圆形载荷板的大小取板的直径为 30 cm,推测出本次试验所用模拟月壤的容许承载力为 122 kPa。

表 2 不同形状、不同尺寸基础下的模拟月壤容许承载力和沉降量

Table 2 The allowable bearing capacity and settlement of lunar soil simulant under different shapes and sizes of foundations

基础形状	基础尺寸/cm	P_q/kPa	P_m/kPa	P_c/kPa	$\bar{P}$/kPa	s/mm
圆形	30	122	116	128	122	2.654
	40	128	122	139	130	2.718
	50	135	128	146	136	2.760
	100	172	162	178	171	2.874
	150	200	189	214	201	3.066
	200	250	229	238	239	3.426
	250	278	262	270	270	3.505
	300	313	295	298	302	3.735
方形	30	128	123	136	129	2.651
	40	139	132	151	141	2.738
	50	147	142	160	150	2.825
	100	200	188	208	199	2.939
	150	250	234	252	245	3.122
	200	294	280	282	285	3.227
	250	357	324	336	339	3.515
	300	385	368	374	376	3.543

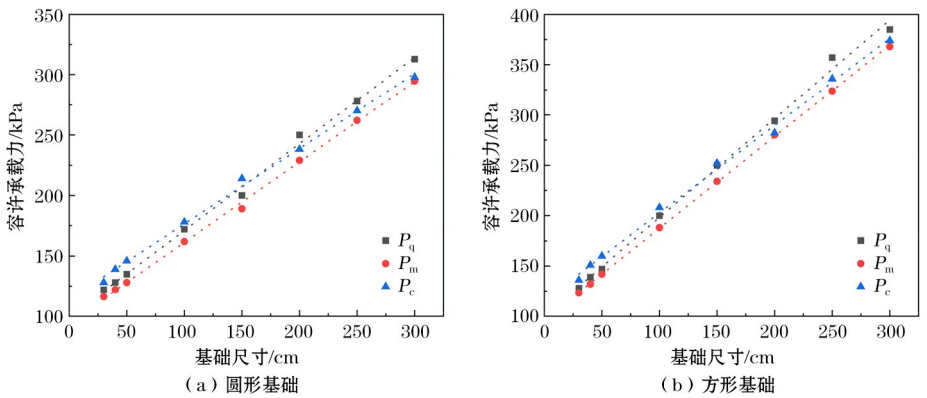


图 8 模拟月壤容许承载力随基础尺寸的变化曲线

Fig.8 The curves of allowable bearing capacity of lunar soil simulant varying with the size of the foundation

由表 2 和图 8 可知,随着基础尺寸增加,两种形状基础下的模拟月壤容许承载力逐渐增大,近似呈线性增长,达到容许承载力时的沉降量也逐渐增大。对比相同尺寸的两种载荷板下的容许承载力发现,方形基础下的容许承载力均大于圆形基础下的容许承载力。对比相同形状的基础使用三种方法计算得到的容许承载力,在不超过 300 cm 的同一基础尺寸下,三种计算方法得到的计算结果相差不大。因此,取三种方法的计算结果的平均值进行拟合,得到尺寸小于 300 cm 的圆形基础和方形基础下的模拟月壤容许承载力的预测公式分别为:$P_{圆形}=0.67b+102.91$,$P_{方形}=0.92b+104.38$。随着尺寸增加,相同尺寸的圆形基础和方形基础下的模拟月壤容许承载力的差值逐渐增大,如图 9 所示。

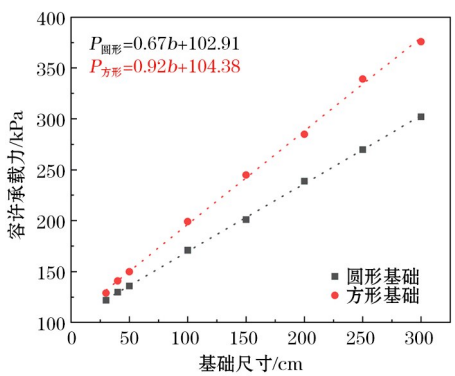


图 9 模拟月壤容许承载力随基础尺寸变化的拟合曲线

Fig.9 The fitting curves of allowable bearing capacity of lunar soil simulant varying with the size of the foundations

4 结论

本文采用小尺寸载荷试验,基于切线模量法计算任意基础尺寸下模拟月壤的荷载-沉降(p-s)曲线,推演大尺寸圆形和方形基础下的模拟月壤容许承载力及其变化规律,主要结论如下。

(1) 通过 6 cm 的小尺寸载荷试验得到模拟月壤的实测 p-s 曲线,拟合获得模拟月壤的初始切线模量和极限承载力,采用切线模量法建立模拟月壤的切线模量与其初始切线模量、受到的附加应力和极限承载力的关系,进而依据沉降计算理论计算任意尺寸基础下的 p-s 曲线。通过小尺寸载荷试验的结果验证,计算的 p-s 曲线和实测的 p-s 曲线十分吻合,表明基于切线模量法计算模拟月壤 p-s 曲线的方法可行。

(2) 大尺寸圆形、方形基础下的模拟月壤承载力分析结果表明,随着基础尺寸增大,模拟月壤的容许承载力近似呈线性增长,相同尺寸的方形基础下的容许承载力大于圆形基础下的容许承载力,且尺寸越大,容许承载力相差越大,达到容许承载力时的模拟月壤沉降量也越大,且沉降量均在合理范围内。尽管在本文研究的基础尺寸范围内模拟月壤的容许承载力近似呈线性增长,但是更大范围的基础尺寸下模拟月壤的破坏机制和承载力变化规律有待进一步研究。

(3) 按照常规载荷试验中圆形载荷板的直径为 30 cm,推测出本次试验所用的模拟月壤的容许承载力为 122 kPa。模拟月壤容许承载力的确定方法可为月球基地建造及矿产资源开发过程中月壤承载力的确定提供一种途径和思路。

参考文献(References):

[1] ZOU Yuan, WU Huanyu, CHAI Shupeng, et al. Development and characterization of the PolyU-1 lunar regolith simulant based on Chang'e-5 returned samples[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2024,34(9):1317-1326.

[2] SINHA Rishitosh K, RANI Alka, RUJ Trishit, et al. Geologic investigation of lobate scarps in the vicinity of Chandrayaan-3 landing site in the southern high latitudes of the moon[J]. Icarus,2023,402:115636.

[3] 蒋明镜,戴永生,张熇,等.TJ-1 模拟月壤承载特性的现场试验研究[J].岩土力学,2013,34(6):1529-1535.
JIANG Mingjing, DAI Yongsheng, ZHANG He, et al. Field experimental research on bearing properties of TJ-1 lunar soil simulant[J]. Rock and Soil Mechanics,2013,34(6):1529-1535.

[4] 蒋明镜,王思远,姜朋明,等.月球基地的建设远景与挑战[J].山东大学学报(工学版),2024,54(2):114-125.
JIANG Mingjing, WANG Siyuan, JIANG Pengming, et al. The long-range perspective and challenges for the construction of lunar base[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science),2024,54(2):114-125.

[5] AZAMI Mohammad, KAZEMI Zahra, MOAZEN Sare, et al. A comprehensive review of lunar-based manufacturing and construction[J]. Progress in Aerospace Sciences,2024,150:101045.

[6] 郝飞,蒋明镜,孙德安,等.TJ-1 模拟月壤承载特性室内试验研究[J].岩土力学,2015,36(7):1953-1958.
HAO Fei, JIANG Mingjing, SUN Dean, et al. Indoor experimental research on bearingbehaviour of TJ-1 lunar soil simulant[J] Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7): 1953-1958.

[7] ARSLAN Haydar, BATISTE Susan, STURE Stein. Engineering properties of lunar soil simulant JSC-1A[J]. Journal of Aerospace Engineering,2010,23(1):70-83.

[8] KLOSKY J Ledlie, STURE Stein, KO Hon-Yim, et al. Geotechnical behavior of JSC-1 lunar soil simulant[J]. Journal of Aerospace Engineering,2000,13(4):133-138.

[9] LEE Junhwan, SALGADO Rodrigo. Estimation of bearing capacity of circular footings on sands based on cone penetration test[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2005,131(4):442-452.

[10] JIANG Mingjing, LI Liqing, SUN Yugang. Properties of TJ-1 lunar soil simulant[J]. Journal of Aerospace Engineering,2012,25(3):463-469.

[11] 张宇,陈善雄,余飞,等.低应力水平下 CAS-1 模拟月壤力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(1):174-181.
ZHANG Yu, CHEN Shanxiong, YU Fei, et al. Experimental study of mechanical properties of lunar soil simulant CAS-1 under low stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(1):174-181.

[12] XI Banglu, JIANG Mingjing, MO Pinqiang, et al. 3D DEM analysis of the bearing behavior of lunar soil simulant under different loading plates[J]. Granular Matter,2023,25(4):72.

[13] THANNASI Prabu, KASINATHAN Muthukkumaran, INDARAM Venugopal. Study on low gravity effect on bearing capacity and slope stability of a new lunar highland soil simulant (LSS-ISAC-1) for futuristic moon habitation[J]. Advances in Space Research,2022,70(7):1869-1879.

[14] BUI Ha H, KOBAYASHI Taizo, FUKAGAWA Ryoichi, et al. Numerical and experimental studies of gravity effect on the mechanism of lunar excavations[J]. Journal of Terramechanics,2009,46(3):115-124.

[15] WONG J Y. Predicting the performances of rigid rover wheels on extraterrestrial surfaces based on test results obtained on earth[J]. Journal of Terramechanics,2012,49(1):49-61.

[16] ZOU Meng, FAN Shichao, SHI Ruiyang, et al. Effect of gravity on the mechanical properties of lunar regolith tested using a low gravity simulation device [J]. Journal of Terramechanics,2015,60:11-22.

[17] 梁耀哲,王伟浩,张俊禄,等.载荷试验中承压板尺寸效应研究[J].四川水泥,2023(9):42-44.
LIANG Yaozhe, WANG Weihao, ZHANG Junlu, et al. Research on the size effect of pressure-bearing plates in load tests[J]. Sichuan Shuini,2023(9):42-44.

[18] 张玉成,杨光华,胡海英,等.载荷试验尺寸效应及地基承载力确定方法探讨[J].岩土力学,2016,37(增刊 2):263-272.
ZHANG Yucheng, YANG Guanghua, HU Haiying, et al. Discussion on size effect of plate loading test and determination of bearing capacity of subgrade[J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(Suppl.2):263-272.

[19] 杨光华.地基非线性沉降计算的原状土切线模量法[J].岩土工程学报,2006(11):1927-1931.
YANG Guanghua. Nonlinear settlement computation of the soil foundation with the undisturbed soil tangent modulus method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006(11):1927-1931.

[20] 贺新星,肖龙,黄俊,等.模拟月壤研究进展及 CUG-1A 模拟月壤[J].地质科技情报,2011,30(4):137-142.
HE Xinxing, XIAO Long, HUANG Jun, et al. Research progress of simulated lunar soil and CUG-1A simulated lunar soil [J]. Geological Science and Technology Information,2011,30(4):137-142.

[21] 奚邦禄,蒋明镜,莫品强,等.不同重力场下月基承载特性离散元数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2023,54(8):3226-3236.
XI Banglu, JIANG Mingjing, MO Pinqiang, et al. DEM analysis on bearing behavior of lunar soil ground with different gravity fields [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(8): 3226-3236.

[22] 杨光华,姜燕,张玉成,等.确定地基承载力的新方法[J].岩土工程学报,2014,36(4):597-603.
YANG Guanghua, JIANG Yan, ZHANG Yucheng, et al. New method for determination of bearing capacity of soil foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014,36(4):597-603.