小重力环境下静力触探模型试验研究*

高峰[1,2], 周国庆[1], 莫品强[1,2], 严康[2]

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,江苏 徐州 221116;
2. 中国矿业大学 力学与土木工程学院,江苏 徐州 221116)

摘 要:月球基地建设与矿产资源开发的基础与关键是充分掌握月壤的力学与工程特性。目前由于缺少对小重力环境的真实模拟而难以系统、准确地揭示土的力学、工程等特性与重力场间的耦合环境效应。通过利用磁拟小重力模型试验系统开展了一系列小重力环境(1/6*g*、1/3*g*、2/3*g*、1*g*)下磁敏性无黏性土静力触探模型试验。试验结果表明:模型探头在贯入过程中锥尖阻力随深度的增加表现出明显的 3 个应力增长阶段,在同一贯入深度处,锥尖阻力随重力场的增大而增大;归一化锥尖阻力随深度的增加先增大后减小并最终趋于稳定,而随重力场的增大却逐渐减小;同时,归一化锥尖阻力的最大值和最终稳定值与重力场相似常数的倒数间存在较好的线性关系。

关键词:小重力场;静力触探;无黏性土;锥尖阻力

中图分类号:TU411.3 **文献标识码**:A **文章编号**:1673-0836(2019)02-0394-08

Experimental Study on Static Cone Penetration Model Tests under Small Gravity Fields

Gao Feng[1,2], Zhou Guoqing[1], Mo Pinqiang[1,2], Yan Kang[2]

(1. *State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering*, *China University of Mining and Technology*, *Xuzhou*, *Jiangsu* 221116, *P.R. China*; 2. *School of Mechanics and Civil Engineering*, *China University of Mining and Technology*, *Xuzhou*, *Jiangsu* 221116, *P.R. China*)

Abstract: The study of mechanical properties of subsurface soils under small gravity fields is the key of lunar base construction and mineral resources exploitation on the moon. At present, it is difficult to systematically reveal the correlations between mechanical/engineering properties of soil and its coupling effects of gravity fields due to the lack of simulation of small gravity fields. A type of magnetic cohesionless soil was adopted to carry out a series of static cone penetration model tests. The tests were conduct under four different gravity fields, including 1/6g, 1/3g, 2/3g and 1g (g indicates the earth gravity acceleration) by using the small gravity fields test system. The experimental results show that the cone tip resistance of the model probe in the process of penetration shows three obvious stress growth stages with the increase of penetration depth. At the same depth, the cone tip resistance tends to increase with the increase of the gravity fields. The normalized cone tip resistance increases first and then decreases and eventually stabilizes with the increase of depth, the normalized cone tip resistance decreases with the increase of the gravity fields. At the same time, there is a good linear relationship between the maximum and steady values of the normalized cone tip resistance and the reciprocal of the similarity constant of gravity fields.

Keywords: small gravity fields; static cone penetration; cohesionless soil; cone tip resistance

---

* **收稿日期**:2018-10-10(修改稿)

作者简介:高峰(1992-),男,安徽宿州人,硕士生,主要从事小重力、模拟月壤力学与工程特性等研究。E-mail:yantugaofeng@163.com

通讯作者:周国庆(1961-),男,江苏扬州人,博士,教授,主要从事冻土力学、深土力学与工程、模拟月壤力学与工程特性等方面研究工作。E-mail:gqz@cumt.edu.cn

基金项目:111 引智计划(B14021);973 计划课题(2012CB026103);国家自然科学基金(41672343,51323004)

0　引言

随着科学技术的快速发展和地球资源的日益枯竭,世界各国均加快了太空探索的步伐。特别是近些年,月球作为距离地球最近的星体,其相关探测研究更是成为当前世界科学研究的热点之一[1]。“嫦娥工程”作为我国深空探测的代表性活动,其整个研究计划将分为“绕”、“落”、“回”3 个阶段实施。目前一期和二期工程已全面顺利展开,三期工程主要实现月面巡视勘查与采样返回。2017 年年底发射的“嫦娥五号”月球探测器将首次实现无人自动化采集月壤标本 500 g,钻探深度 2 m,并完成整个地-月空间的转移过程[2]。

岩土工程问题中土的自重应力通常占主导地位,土所表现出的力学特性与其应力水平密切相关。月球表面重力场仅为地球重力场的 1/6,因此,其浅层土体在应力水平、孔隙特性及力学特性等方面与地球土体相比将存在诸多差异。小重力环境下,土将变得更加松软,孔隙率增大,其强度和承载能力也进一步减弱,这些必将给探测器完成月球表面作业带来巨大隐患和风险。

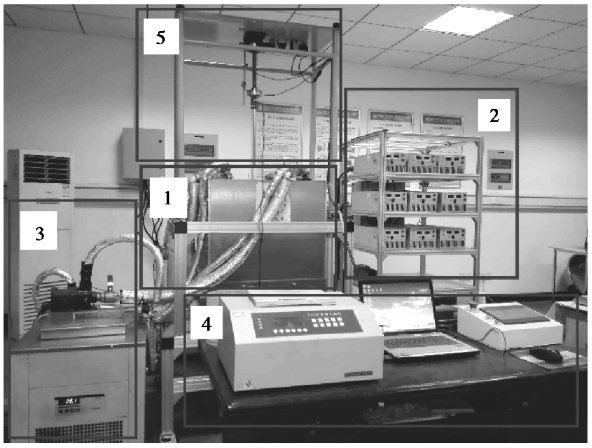
目前,国内外学者对小重力场下土的力学特性研究主要采用理论分析、室内试验和数值模拟等 3 种方法。理论分析方面:Kobayashi 等[3]基于塑性理论观点采用量纲分析及滑移线理论对比分析了 1/6g 和 1g 重力场下土体的破坏问题,结果表明,重力场对土体的破坏具有显著影响。室内试验方面:Boles 等[4]利用抛物飞行法获得时长 20 s 的 1/6g 重力场,研究了月球重力条件下不同角度开挖 JSC－1 模拟月壤的力学响应。Laurent 等[5]通过对 GRC 系列模拟月壤进行力学特性和土槽轮-壤模型试验,研究不同密实度条件下刚性履刺轮的牵引和通过性能,并由车轮的沉陷量分析土体的压缩特性及承载性能等。李志刚[6]利用离心机研究了 1g、3g、6g 重力条件下模拟月壤的力学特性和与人工装置的相互作用,结果表明随着重力场的增大,贯入模型试验中钻杆进入相同深度位置时所需的静压力也明显增大。邹猛等[7]通过压板载荷试验获得了 3 种不同粒径分布模拟月壤的承压性能,但是其试验环境并不严格符合月球表面的 1/6g 重力场。数值模拟方面:谭松成等[8]采用离散元法 PFC^{2D}研究了重力场对模拟月壤变形和强度等宏观力学指标的影响规律,结果表明模拟月壤的内摩擦角随着重力场的增大而增大,内聚力则表现出相反的变化趋势。蒋明镜等[9]采用离散元 PFC^{2D}对 7 种重力场下的静力触探试验进行了对比分析试验,结果表明不同重力场下探头贯入过程中土体的变形区域有所不同,土体经历了明显的加载、卸载过程。蒋明镜等[10]提出了一种考虑粒间抗转动作用与粒间范德华力的月壤颗粒力学接触模型,并采用离散元模拟分析 3 种竖向荷载作用下月球车驱动轮与月壤的相互作用。

由此可以看出,目前采用模型试验、数值模拟等方法已经开展了相关小重力环境土体力学特性的研究工作,但是其试验理念、试验方法均存在诸如重力场不相似等问题。因此,本文在课题团队磁拟重力场物理模型试验理论及方法研究的基础上[11-12],利用磁力场模拟重力场,实现了在静态、稳定的试验环境下模拟精确的小重力场,并进一步开展 4 组不同重力场(1/6g、1/3g、2/3g、1g)无黏性土静力触探模型试验,研究锥头贯入过程中锥尖阻力 q_c 随深度的变化趋势以及重力场强度对锥尖阻力 q_c 的影响规律。

1　试验系统及材料

1.1　试验系统

试验利用中国矿业大学自主设计研制的磁拟小重力模型试验系统。该系统由试验、供电、循环制冷、数据采集等 4 个主要部分组成,实现在常温、静态、稳定的环境中,通过控制试验空间中的磁场强度及形态模拟出不同的重力场,如图 1 所示。



1.磁重力试验模块 2.供电模块 3.循环制冷模块
4.数据采集模块 5.加载机构

图 1　试验系统示意图

Fig. 1　Schematic diagram of test system

静力触探模型试验装置主要由模型箱、模型探头、加载与数据采集等组成。根据 Bolton 和 Gui 等[13-14]模型试验边界效应的研究,设计的圆柱形模型箱内径 86 mm、高度 260 mm、壁厚 2 mm。模型探头采用原位测试中静力触探探头为原型(锥角 60°、锥底直径 35.7 mm、锥底面积约 1 000 mm^2),取相似缩比 $N=4.5$,确定其几何参数(锥角 60°、锥头直径 8.0 mm、锥底面积约 50 mm^2)。模型箱的等效宽度与锥头直径比约为 21.5,符合文献[14]中关于忽略刚性边界约束效应对试验影响的尺寸要求,如图 2 所示。

采用准静力加载方式,由应变控制式步进电机施加轴向荷载。探头与加载系统间安装 TJL-1 型推拉力计,推拉力计输出端口外接 datataker DT 800 数据采集仪,实现试验全过程采集轴向荷载。同时,轴向加载杆安装高精度 LVDT 用于采集轴向加载位移。

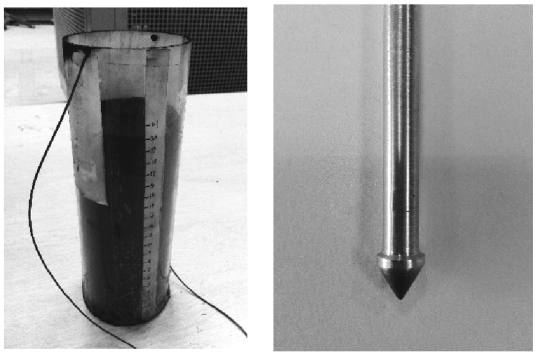


图 2 模型箱与探头示意图

Fig. 2 Schematic diagram of model box and probe

1.2 试验材料

课题团队进行了大量的岩土工程磁力模型试验土体相似材料研制的研究工作[15-16],在此基础上,试验选用的无黏性土颗粒材料是由 62.5R 型高强度铝酸盐水泥作为胶结料和 BMMF-1 系列Fe_3O_4磁粉作为掺料共同组成。Fe_3O_4磁粉既作为细颗粒介质,优化水泥胶结料的粒径级配,也作为磁性介质掺入,保证试样材料的磁化性能。利用搅拌机将水泥粉与 Fe_3O_4磁粉充分混合,待混合均匀后加水继续搅拌并在立方体模具内制样,室温养护 28 天,最后将块体试样经机械破碎,筛分等工序研制而成,如图 3 所示。通过对不同磁粉含量和灰水比的无黏性土材料进行测试,本试验最终选用磁粉含量为 50%,灰水比为 2.5∶1的无黏性土颗粒材料,可以同时保证颗粒具有足够的强度和优良的磁拟重力场性能。

图 3 磁敏性无黏性土

Fig. 3 Magnetic sensitive cohesionless soil

磁敏性无黏性土材料的物理性质指标如表 1 所示。Carrier[17]对真实月壤的粒径分布和磁敏性无黏性土材料的颗粒级配如图 4 所示。可以看出,通过筛分、配比获得的无黏性土颗粒材料其级配曲线落在真实月壤的颗粒级配上下限内,实现了在颗粒尺度、级配方面与真实月壤的模拟。通过改变试验空间内的磁场强度和形态,实现模拟不同的小重力场(1/6g、1/3g、2/3g、1g),材料的磁拟小重力特性曲线如图 5 所示,图中:

$$N_g = g'/g \tag{1}$$

式中:N_g 为重力场相似常数,无量纲;g'为磁拟小重力场,单位 m/s^2;g 为地球重力场,其值约为 9.8 m/s^2。

表 1 无黏性土物理特性指标

Table 1 Physical properties of the cohesionless soil

相对密度 d_s	平均粒径 d_{50}/mm	最大干密度 ρ_d/($g\cdot cm^{-3}$)	最小干密度 ρ_d/($g\cdot cm^{-3}$)	最大孔隙比 e_{max}	最小孔隙比 e_{min}
2.930	0.12	1.659	0.835	2.509	0.766

2 试验方案与步骤

本次磁敏性无黏性土静力触探模型试验的重力场设计为 1/6g、1/3g、2/3g 和 1g4 个水平,采用控制变量法并进行多组平行试验,静力触探模型试验的相关设计参数如表 2 所示。

表 2 试验设计参数

Table 2 Experimental design parameters

干密度 ρ_d/($g\cdot cm^{-3}$)	相对密实度 D_r	装样高度 H/mm	贯入速率 V/($mm\cdot s^{-1}$)
1.26	0.68	200	0.50

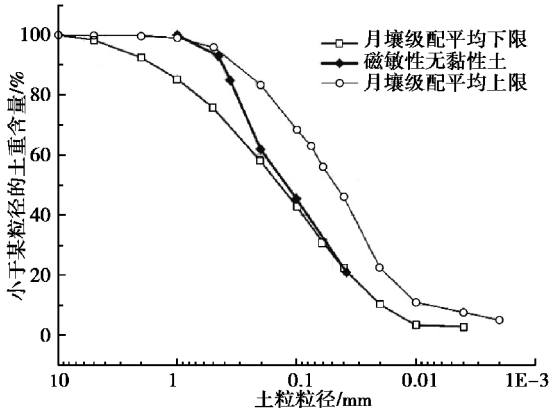


图 4　无黏性土颗粒级配曲线

Fig. 4　Particle distribution curves of the cohesionless soil

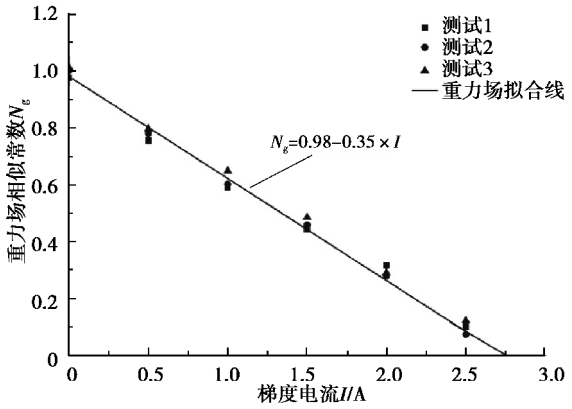


图 5　磁拟小重力特性曲线

Fig. 5　Magnetic small gravity characteristic curve

静力触探模型试验的具体试验步骤如下:

(1)装样:根据试验方案设计的无黏性土颗粒材料的控制参数,计算并称取所需试验材料的质量。采用分层装样法装填试验材料,以尽可能地保证试样的均匀性。分为 6 个等份,将第一份试样均匀装入模型箱内并达到控制高度后,依次进行第 2 层至第 6 层的装填。由于表层试样在磁场作用下出现轻微程度的起伏变形,因此装样高度为150 mm 后埋设有机玻璃管(内径 12 mm,长度 55 mm),而后继续装填试样并至最终高度。通过此方法克服了因试样表面起伏变形而带来的试验过程中模型探头接触土体起始位置的不一致问题,如图 6 所示。

(2)试验过程:将模型箱固定在磁拟小重力试验系统内,无黏性土试样在特定的小重力环境下(1/6g、1/3g、2/3g、1g)固结稳定后,微调轴向加载探头位置并调零 TJL-1 推拉力计和 LVDT。试验过程中实现自动采集轴向荷载、轴向位移。

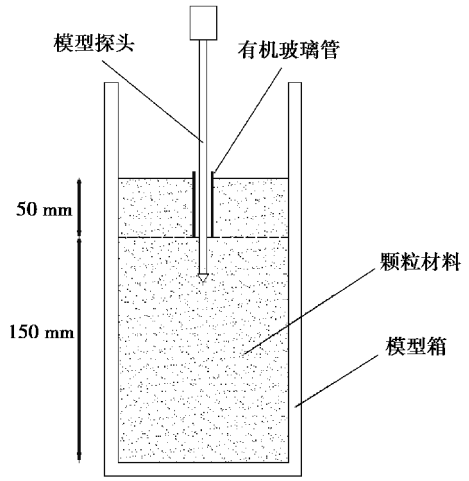


图 6　静力触探试验示意图

Fig. 6　Schematic diagram of CPT

(3)试验结束:当模型探头贯入深度达到 120 mm时,停止加载,结束试验。由于不同重力场环境下的静力触探模型试验结果具有很好的一致性,因此采用各组试验结果的平均值进行后续分析。

3　试验结果及分析

3.1　锥尖阻力随深度变化规律

静力触探模型探头在贯入过程中锥尖阻力的计算公式如下:

$$q_c = F_y/S \tag{2}$$

式中:q_c 为锥头的锥尖阻力,kPa;F_y 为作用在锥头上的轴向荷载,N;S 为锥头底面积,mm^2。

图 7 给出了不同小重力场下无黏性土静力触探模型试验贯入过程中锥尖阻力 q_c 随深度的变化规律。由图可以看到,锥尖阻力 q_c 随深度的增加呈现出较为明显的 3 个应力增长阶段:

(1)初始贯入段:初始贯入段为模型探头开始接触土体至探头锥尖部分完全进入土体内的这一过程,其深度约为 1 倍的锥头直径(8 mm)。可以看到,锥尖阻力 q_c 随深度的增加而呈现出显著的增长趋势。同时,在该深度范围内,锥尖阻力 q_c 的增长率随着重力场的增大而增大,即当锥头完全进入土体时所对应的锥尖阻力 q_c 也随着重力场的增大而增大。

(2)阻力稳定增长段:阻力稳定增长段为当探头锥尖完全进入土体后锥尖阻力 q_c 稳定增长至锥尖阻力 q_c 曲线逐渐出现下凸变形的过程,其长度

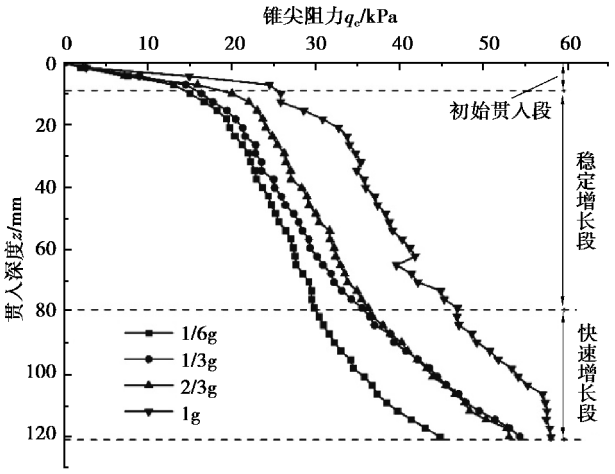


图7 锥尖阻力与贯入深度关系

Fig. 7 Relationship between cone tip resistance and penetrating depth

约为10倍的锥头直径(80 mm)。可以看出在该阶段,当锥头完全进入土体后,随着深度的增加,锥头下方的土体颗粒被不断挤压向周围区域,此时锥尖阻力 q_c 进一步增大。同时,不同重力环境下锥尖阻力 q_c 增长率基本保持一致,且近似呈现线性增长趋势。

(3)阻力快速增长段:当静力触探模型探头的贯入深度超过10倍的锥头直径(80 mm)后,锥尖阻力 q_c 与深度关系曲线逐渐发生向上的弯曲,锥尖阻力 q_c 再次进入一个快速增长阶段。考虑其原因,可能是当探头贯入深度超过约10倍的锥头直径(80 mm)后,模型箱底板对土颗粒的旋转及位移逐渐产生较为显著的约束作用,因此,其锥尖阻力 q_c 再次呈现快速增长趋势。

由于锥尖阻力 q_c 在阻力稳定增长阶段内较少地受模型箱底、侧边的约束作用,因此分别选取锥头贯入深度 z 为20 mm、40 mm、60 mm和80 mm时各重力场水平下的锥尖阻力 q_c,如表3所示。可以看出,在同一贯入深度位置处,锥尖阻力 q_c 随着重力场的增大而增大。文献[13]中Gui等通过离心机研究了不同应力水平下静力触探贯入过程中的锥尖阻力 q_c 与本文具有相似规律,所不同的是采用离心机所获取的土体应力水平要远远超过小重力场而引起的土体初始应力水平的改变量。同时,这一现象与蒋明镜等[18]通过离散元PFC^{2D}模拟分析不同重力场(1/6g、1/2g、1g)下静力触探试验结果也具有规律上的一致性。

表3 锥尖阻力值 q_c

Table 3 Resistance value of cone tip kPa

z/mm	N_g=1/6	N_g=1/3	N_g=2/3	N_g=1
20	19.67	20.99	23.89	32.09
40	23.69	25.08	28.33	35.98
60	27.48	30.33	32.03	41.36
80	29.73	36.00	36.82	46.92

进一步对试验数据进行无量纲分析处理后,拟合得到锥尖阻力 q_c 与深度 z 和重力场相似常数 N_g 之间的关系表达式为:

$$\frac{q_c}{\sigma_0}=\left(0.24\times\frac{z}{r}+12.65\right)N_g+\left(0.75\times\frac{z}{r}+12.77\right) \tag{3}$$

式中:σ_0 为参考应力,其值等于1 kPa;r 为锥头半径,其值为4 mm。

图8给出了不同贯入深度位置处锥尖阻力 q_c 与重力场关系的实测值和预测值曲线。可以看出,锥头贯入过程中锥尖阻力 q_c 与重力场间呈现出较好的线性变化关系。

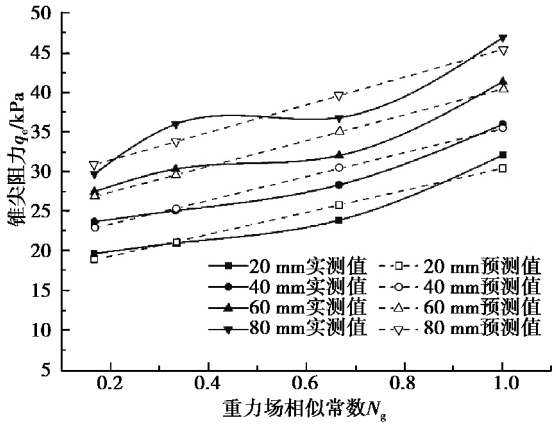


图8 锥尖阻力与重力场关系

Fig. 8 Relationship between cone tip resistance and gravity fields

3.2 归一化锥尖阻力随深度变化规律

由于土的自重应力水平主要与其所处的重力场具有直接关系,因此当试验箱内的无黏性土试样在不同的小重力场下固结稳定后,其土体中任意位置处的竖向自重应力的计算公式如下:

$$\sigma_{cz}=\gamma z=\rho N_g g z \tag{4}$$

式中:σ_{cz}为土的竖向自重应力,单位kPa;γ 为土的

重度,单位 N/cm^3;ρ 为土的密度,单位 g/cm^3。

进一步,静力触探模型探头在贯入过程中归一化锥尖阻力的计算公式如下:

$$q_c' = \frac{q_c}{\sigma_{cz}} \tag{5}$$

式中:q_c'为归一化锥尖阻力,无量纲。

图 9 为不同小重力环境下归一化锥尖阻力随深度变化规律。可以看到,在同一重力场条件下,在初始贯入段内,归一化锥尖阻力值随着深度的增加而快速增长,并当锥头完全进入土体时对应的锥尖阻力 q_c 终值时,归一化锥尖阻力也达到峰值。考虑可能是因为在初始贯入段内,由于锥尖阻力 q_c 的增长率远大于土竖向自重应力的增长率,因此,归一化锥尖阻力逐渐增长并趋于最大值。随着贯入深度的逐渐增加,归一化锥尖阻力逐渐减小并趋于某一最终稳定值。同时,在不同的重力场水平下,同一深度位置处的归一化锥尖阻力随着重力场的增大而逐渐减小。

整理分析获得不同重力场条件下静力触探归一化锥尖阻力的最大值和稳定值,其中稳定值均取贯入深度为 100 mm 时的归一化锥尖阻力,并进一步研究其与其重力场相似常数倒数之间的关系,如图 10 所示。可以看到,归一化锥尖阻力的最大值和稳定值与重力场相似常数倒数间存在较好的线性拟合关系。对比蒋明镜等[9]通过离散元法 PFC^{2D}模拟分析 1/6g、1/2g、1g 获得的归一化锥尖阻力与重力场关系可以看到,本文的试验结果与数值模拟的结果在宏观规律上具有较好的一致性。进一步获得归一化锥尖阻力与重力场相似常数倒数间的拟合公式如下:

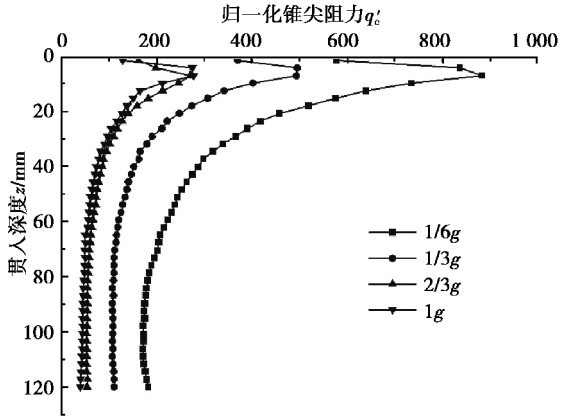


图 9　归一化锥尖阻力与重力场关系

Fig. 9　Relationship between the normalized cone tip resistance and gravity fields

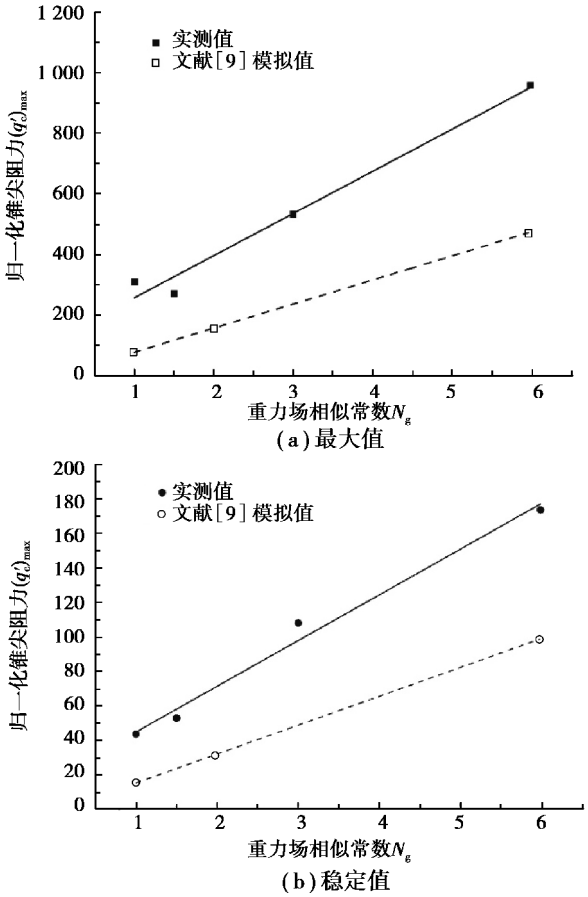


图 10　归一化锥尖阻力的最大值和稳定值与重力场倒数关系

Fig. 10　Relationship between the maximum and steady values of the normalized cone tip resistance and the reciprocal of the gravity fields

$$(q_c')_{max} = \left(\frac{q_c}{\sigma_{cz}}\right)_{max} = \frac{139.14}{N_g} + 117.87 \tag{6}$$

$$(q_c')_{steady} = \left(\frac{q_c}{\sigma_{cz}}\right)_{steady} = \frac{26.50}{N_g} + 18.37 \tag{7}$$

4　结论

通过开展一系列小重力环境下(1/6g、1/3g、2/3g、1g)无黏性土静力触探模型试验,获得如下主要结论:

(1)贯入过程中锥尖阻力 q_c 随深度的增加表现出明显的 3 个变化阶段,并进一步分析在各阶段内影响锥尖阻力 q_c 增长的主要原因。

(2)在同一贯入深度位置处,锥尖阻力 q_c 随着重力场的增大而增大,并进一步拟合得到锥尖阻力 q_c 与贯入深度 z 和重力场相似常数 N_g间的函数关

系式,可以看到锥尖阻力 q_c 与重力场存在较好的线性增长趋势。

(3)在模型探头贯入过程中,归一化锥尖阻力随深度的增加表现出明显的先增长后减小并逐渐趋于某一稳定值的总体趋势。在相同的贯入深度位置处,归一化锥尖阻力则随着重力场的增大而逐渐减小,并且归一化锥尖阻力的最大值与最终稳定值和重力场倒数间存在较好的线性拟合关系。

致谢

感谢中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室课题团队博士研究生陈国舟、李瑞林等在前期研制磁拟小重力试验系统和试验材料方面付出的辛苦劳动,以及开展静力触探试验提供的指导与帮助。

参考文献(References)

[1] 欧阳自远. 月球探测进展与我国的探月行动[J]. 自然杂志, 2005, 27(4): 187-190. (Ouyang Ziyuan. Review of lunar exploration and introduction of Chinese lunar exploration project[J]. Chinese Journal of Nature, 2005, 27(4): 187-190. (in Chinese))

[2] 高玉东. 月球探测器地月空间转移轨道研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008. (Gao Dongyu. Study on the cislunar transfer trajectory of the lunar probe[D]. National University of Defence Technology, 2008. (in Chinese))

[3] Kobayashi T, Ochiai H, Yasufuku N, et al. Predication of soil collapse by lunar surface operations in reduced gravity environment [A]//Proceedings of the 15th International Conference of the ISTVS[C]. Hayama, Japan, 2005: 1-9.

[4] Boles W W, Scott W D, Connolly J F. Excavation force in reduced gravity environment [J]. Aerospace Engineering, 1997, 10(2): 99-103.

[5] Laurent S, Paul C, Ronald S, et al. Lunar regolith simulant materials: recommendations for standardization, production and usage [R]. Alabama, USA: Marshall Space Flight Center, 2006.

[6] 李志刚. 人工装置与模拟月壤相互作用的土工离心模型试验研究[D]. 北京:清华大学, 2008. (Li Zhigang. Study on the interaction of manual facilities and lunar soil simulant by centrifuge model test [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008. (in Chinese))

[7] 邹猛, 李建桥, 何玲, 等. 不同粒径分布模拟月壤承压特性试验研究[J]. 航空学报, 2012, 33(12): 2338-2346. (Zou Meng, Li Jianqiao, He Ling, et al. Experimental study on the pressure-sinkage characteristic of the simulate lunar regolith with different particle size distributions [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2012, 33(12): 2338-2346. (in Chinese))

[8] 谭松成, 段隆臣, 高辉. 重力环境对月壤三轴模拟试验结果的影响分析[A]//李锡夔 编. 颗粒材料计算力学研究发展[C]. 大连:大连理工大学出版社, 2012: 407-412. (Tan Songcheng, Duan Longchen, Gao Hui. Effect analysis of gravity environment on simulated triaxial test results of lunar soil [A]//Li Xikui. ed. Advances in Computational Mechanics of Granular Materials[C]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2012: 407-412. (in Chinese))

[9] 蒋明镜, 王新新. 不同重力场下静力触探试验离散元数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 862-873. (Jiang Mingjing, Wang Xinxin. Numerical analysis of cone penetration tests under different gravity fields by distinct element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 862-873. (in Chinese))

[10] 蒋明镜, 戴永生, 申志福. 竖向荷载对月球车行驶性能影响的离散元分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(5): 1221-1227. (Jiang Mingjing, Dai Yongsheng, Shen Zhifu. Investigation of the vertical load effects on lunar rover trafficability using DEM [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(5): 1221-1227. (in Chinese))

[11] 周国庆, 陈国舟, 李瑞林, 等. 一种岩土工程模型试验重力场模拟装置及方法[P]. 中国专利: 102841129, 2012-12-26. (Zhou Guoqing, Chen Guozhou, Li Ruilin, et al. A geotechnical engineering model test gravity field simulation device and method [P]. China Patent: 102841129, 2012-12-26. (in Chinese))

[12] 陈国舟, 周国庆, 李瑞林. 一种磁敏性相似材料及其制备方法[P]. 中国专利: 102911639, 2013-02-06. (Chen Guozhou, Zhou Guoqing, Li Ruilin. A magnetic susceptibility similar material and its preparation method [P]. China Patent: 102911639, 2013-02-06. (in Chinese))

[13] Bolton M D, Gui M W, Gariner J, et al. Centrifuge cone penetration tests in sand[J]. Géotechnique, 1999, 49(4):542-552.

[14] Gui M W, Bolton M D. Geometry and scale effects in

CPT and pile design [A]//Proceedings of the 1th International Conference on Site Characterization [C]. Atlanta, USA, 1998: 1062-1068.

[15] 李瑞林, 周国庆, 陈国舟, 等. 岩土工程磁力模型实验土体相似材料的研制[J]. 功能材料, 2012, 43(19): 2620-2623. (Li Ruilin, Zhou Guoqing, Chen Guozhou, et al. Development of a new geo-mechanical magnetic sensing soils similar material [J]. Functional Material, 2012, 43(19): 2620-2623. (in Chinese))

[16] 李瑞林. 磁敏性土体相似材料研制及其磁重力特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012. (Li Ruilin. Development of similar materials for magnetic sensitive soil and study on its magnetic gravity characteristics [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012. (in Chinese))

[17] Carrier W D. Particle size distribution of lunar soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(10): 956-959.

[18] 蒋明镜, 戴永生, 王新新. 低重力环境下静力触探贯入机理离散元分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(11): 2046-2053. (Jiang Mingjing, Dai Yongsheng, Wang Xinxin. DEM analysis of cone penetration tests under low gravity conditions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(11): 2046-2053. (in Chinese))

(上接第 386 页)

[5] Tradigo F, Pisano F, Di Prisco C, et al. Non-linear soil-structure interaction in disconnected piled raft foundations [J]. Computers and Geotechnics, 2015, 63: 121-134.

[6] Fioravante V, Giretti D. Contact versus noncontact piled raft foundations [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(11): 1271-1287.

[7] Fioravante V. Load transfer from a raft to a pile with an interposed layer [J]. Géotechnique, 2011, 61(2): 121-132.

[8] 武思宇, 宋二祥, 刘华北, 等. 刚性桩复合地基的振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 99-102. (Wu Siyu, Song Erxiang, Liu Huabei, et al. Shaking table test of composite foundation with rigid pile [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 99-102. (in Chinese))

[9] 武思宇, 宋二祥. 刚性桩复合地基地震反应机理分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 785-792. (Wu Siyu, Song Erxiang. Mechanism analysis of earthquake responses of rigid pile composite foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 785-792. (in Chinese))

[10] 夏栋舟, 何益斌, 刘建华. 刚性桩复合地基-上部结构动力相互作用体系抗震性能及影响因素分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3505-3511. (Xia Dongzhou, He Yibin, Liu Jianhua. Analysis of aseismic capability and influential factors for rigid pile composite foundation-superstructure dynamic interaction system [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3505-3511. (in Chinese))

[11] 盛桂琳, 鲍鹏, 苏彩丽, 等. 刚性桩复合地基桩体抗震性能分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1274-1278. (Sheng Guilin, Bao Peng, Su Caili, et al. Analysis of seismic behavior of pile body in rigid pile composite foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5): 1274-1278. (in Chinese))

[12] 韩小雷, 肖成安, 英峻豪. 地震作用下复合地基-筏板-上部结构相互作用体系的动力弹塑性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 762-768. (Han Xiaolei, Xiao Chengan, Ying Junhao. Dynamic elastoplastic analysis of interaction system of composite foundation-raft-superstructure under earthquake action [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 762-768. (in Chinese))

[13] 杨敏, 杨军. 大间距桩筏基础地震响应离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(12): 2184-2193. (Yang Min, Yang Jun. Centrifuge tests on seismic response of piled raft foundation with large spacing [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(12): 2184-2193. (in Chinese))

[14] 上海市城乡建设和交通委员会.上海市建筑抗震设计规程(DGJ08-9-2013)[S]. 上海, 2013. (Shanghai Urban and Rural Construction and Transportation Commission. Code for seismic design of Buildings of Shanghai (DGJ08-9-2013) [S]. Shanghai, 2013. (in Chinese))

[15] 杨军. 桩基沉降控制机理的理论与离心模型试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2017. (Yang Jun. Study on theory and centrifuge model test of pile foundation settlement control mechanism [D]. Shanghai: Tongji University, 2017.)