

DOI: 10.11779/CJGE201507017

不同重力下月壤水平推剪阻力离散元数值分析

蒋明镜^{1, 2, 3}, 奚邦禄^{1, 2, 3}, 申志福^{1, 2, 3}, 戴永生^{1, 2, 3}

(1. 同济大学土木工程防灾减灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 月面环境下重力场仅为地面环境下的 1/6, 研究重力场对于开挖阻力的影响, 对优化设计月面环境下开挖设备具有重要意义。采用离散单元法模拟不同深度不同重力场下的月壤水平推剪试验 (简化的土-开挖机械间相互作用模型), 分析了重力场对开挖试验中推剪阻力、能量消耗和破坏面的影响, 最后建立推剪阻力与重力场的关系。结果表明: 相同推剪深度下, 随重力场增大推剪阻力和能量消耗均增加, 推剪前方受扰动土体范围减小; 随推剪深度增加, 推剪阻力增加。

关键词: 月壤; 离散单元法; 水平推剪试验; 重力场

中图分类号: TU47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2015)07-1300-07

作者简介: 蒋明镜(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事天然结构性黏土、砂土、非饱和土、太空土和深海能源土宏观微观试验、本构模型和数值分析研究。E-mail: mingjing.jiang@tongji.edu.cn。

DEM analyses of horizontal pushing resistance under different gravity fields

JIANG Ming-jing^{1, 2, 3}, XI Bang-lu^{1, 2, 3}, SHEN Zhi-fu^{1, 2, 3}, DAI Yong-sheng^{1, 2, 3}

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Dept. of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: On the lunar surface, the gravity is only 1/6g while it is 1g on the earth surface. Investigating the effects of gravity has great significance to the optimization of excavator designed for lunar excavation. DEM is employed to simulate excavation tests with different excavation depths and gravity fields. The effects of gravity on excavation force, energy consumption and sliding surface are studied. Then the relation among excavation force, depth and gravity is fitted. The results show that the excavation force and energy consumption increase with the gravity while the range of affected area decreases. The excavation force increases with depth.

Key words: lunar soil; discrete element method; horizontal pushing test; gravity field

0 引言

在未来的探月计划中, 将进行永久月面基地的建设和月面资源的开发等活动, 这些活动均涉及到月壤的开挖问题。在早期月面开发活动中, 开挖设备需要从地球上运输, 设备的质量和体积受到空间运输能力限制, 故而有必要合理设计适用于月面环境下的开挖设备, 降低运输成本和开挖成本。在之前的探月活动中, 人类通过飞越月球、绕月卫星、月球车、无人与载人登月探测与取样等活动, 已经确定月面环境下重力场只有地球表面的 1/6^[1], 而重力场对于开挖过程中开挖阻力、能量消耗等有明显影响, 所以有必要研究重力场对开挖试验的影响。

近几十年来, 国内外学者对开挖试验从室内试验、理论分析和数值模拟 3 个方面进行了大量的研究。但

室内试验^[2-6]成本昂贵, 其结果精度依赖于量测工具的精度, 而且其研究目标主要是地面环境下不同开挖形式、不同推板形状和不同开挖深度、倾角下推剪阻力的变化规律。在研究重力场对于开挖试验的影响时, 需要利用飞机飞行以获得的低重力环境, 成本太高。其中 Boles 等^[4-5]采用飞机飞行过程中低重力环境进行 JSC-1 模拟月壤的开挖试验, 分析了重力场对开挖阻力的影响, 结果表明: 推剪阻力不与重力场成正比。理论分析^[6-9]主要基于传统土压力理论和室内试验观测的宏观现象进行研究, 由于传统土压力理论是基于地面环境建立的, 缺乏对重力场影响的研究 (重力场

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51179128); 国家杰出青年科学基金项目 (51025932)

收稿日期: 2014-07-16

会影响破坏面形状), 而现有不同重力场下室内试验较少, 无法用于建立理论模型。

许多学者采用数值模拟的方法来研究重力场对开挖试验的影响。Nakashima 等^[11]采用离散单元法模拟不同重力场下月壤中平板旋转开挖试验, 对比 $0g$, $0.15g$, $0.3g$, $0.5g$, $1g$ 的情况下的旋转剪阻力和重力场间的关系。结果表明: 旋转剪阻力和重力加速度之间呈线性关系。Bui 等^[12]采用离散单元法对模拟月壤的地基承载力试验和开挖试验进行研究, 分析了重力场对模拟月壤地基承载力和开挖试验中开挖阻力的影响。结果表明: 重力场小于 $1g$ 时, 重力场对模拟月壤地基承载力无明显影响, 但对开挖阻力有明显影响。但 Nakashima 等^[11]旋转平板进行开挖试验与现有室内开挖方法不同, 无法进行对比, 而 Bui 等^[12]主要针对低重力环境下地基承载力进行研究, 对开挖试验中推剪阻力的研究较少, 没有系统的分析。

离散单元法可以很好地模拟土体的大变形问题, 故本文采用离散单元法进行模拟研究。本文数值模拟采用的月壤模型是笔者提出的考虑范德华力和抗转动作用的新模型, 该模型充分考虑月壤的颗粒形态和月球表面的真空环境, 通过模拟双轴压缩试验获得的强度指标在真实月壤的范围之内。本文通过引入月壤模型到离散元商业软件中模拟地面环境休止角试验, 并将模拟结果与室内 TJ-1 模拟月壤试验结果对比, 确定一组适合开挖试验的阻尼, 并分析了重力场对休止角的影响。最后将选取的阻尼引入模拟月壤开挖试验中, 模拟了多种开挖深度下不同重力场下的开挖试验, 分析开挖过程中推剪阻力、能量消耗及墙后土体的破坏模式, 最后建立了推剪阻力与重力场的关系, 为设计月面环境下开挖设备提供参考。

1 月壤微观模型介绍

本文所采用的微观模型是笔者最近提出的, 主要考虑抗转动作用及范德华力的影响, 模型的有效性验证详见文献[13, 14], 下面做简要介绍。

(1) 颗粒间抗转动作用: 真实月壤的颗粒形状以长条状、次棱角状和棱角状较为常见, 如图 1 所示。颗粒与颗粒间接触以面接触居多, 而不是简单的点点接触, 有一定的抗转动能力。

(2) 颗粒间范德华力: 月球表面接近真空, 月壤颗粒表面吸附的气体分子层厚度远小于地面土壤颗粒, 在地面上无需考虑的范德华力在月面环境下应该考虑。研究表明, 考虑范德华力使得离散元数值模拟试样有一定黏聚力, 更接近真实月壤力学特性^[13-14]。

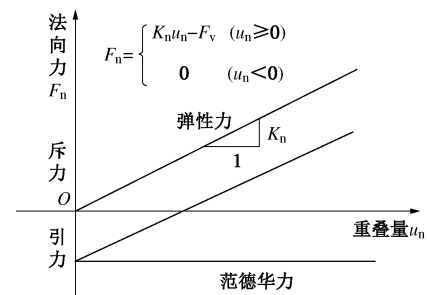
根据文献[13, 14], 模型力学响应如图 2 所示。

法向力学响应由弹性力和范德华力组成, 弹性力随颗粒间重叠量增加而增加, 范德华力视为常数, 颗粒间无接触时弹性力和范德华力均为零。切向力学响应采用增量法计算, 最大值不超过滑动摩擦力 $\mu K_n u_n$ 。转动力学响应也采用增量法计算, 最大值不超过 $K_n u_n \beta r / 6$ 。图 3 中 K_n 为法向接触刚度, K_s 为切向接触刚度, K_m 为扭转刚度, u_n 为法向重叠量, u_s 为剪切位移, θ 为相对转动角度, μ 为摩擦系数。

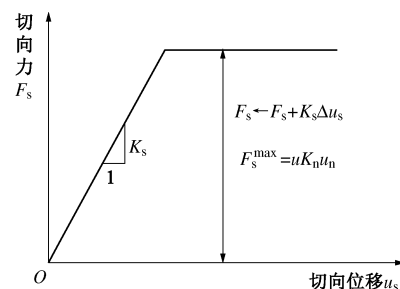


图 1 真实月壤颗粒^[15]

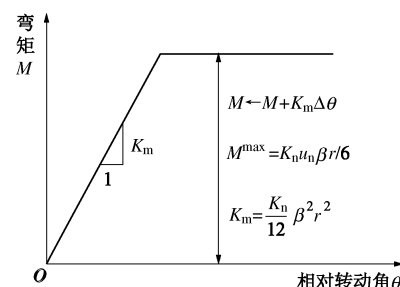
Fig. 1 Grains in lunar soil sample^[15]



(a) 法向力学响应



(b) 切向力学响应



(c) 转动力学响应

图 2 接触模型力学响应

Fig. 2 Mechanical responses of contact model

2 离散元模型建立

2.1 水平推剪试验模拟参数设置

真实月壤颗粒粒径以小于 1 mm 为主, 绝大部分颗粒粒径分布在 30~100 μm 之间。若采用与真实月壤相同的颗粒级配, 颗粒粒径跨度较大, 离散元模拟中需要的颗粒数目非常多, 考虑到计算时间问题, 采用与蒋明镜等^[18-19]研制的 TJ-1 模拟月壤大颗粒分布一致的颗粒级配, 级配曲线如图 3 所示。模拟材料的抗剪性能除与级配相关外, 与模型参数、颗粒形状及试样的孔隙比也是相关。因此在模型建立过程中通过调整微观模型参数, 使得月面环境下模拟材料的宏观抗剪性能与真实月壤相近, 可用于开挖试验研究。本文地基模型所选用的微观参数: 颗粒总数为 78000, 试样孔隙比为 0.22, 颗粒干密度为 2600 kg/m³, 颗粒法向接触刚度为 7.5×10⁷, 颗粒切向接触刚度为 5.0×10⁷, 颗粒间摩擦系数为 1.0, 颗粒抗转动系数为 1.3, 黏滞阻尼系数 $c_n=0.4$ kg/s, $c_s=0.4$ kg/s。根据双轴压缩试验结果, 可知地基中土样表现明显的软化现象, 内摩擦角 $\varphi=38.8^\circ$, 黏聚力 $c=0$ kPa^[14]。

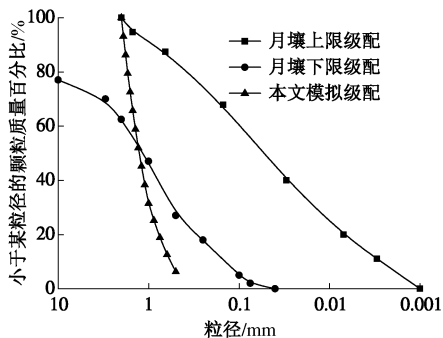


图3 模拟试验材料的颗粒级配曲线^[18-19]

Fig. 3 Distribution of grain size used in DEM analysis^[18-19]

2.2 水平推剪试验模型建立

水平推剪试验离散元模型如图 4 所示。地基边界采用 3 道无摩擦墙模拟, 采用分层欠压法^[20]在模型槽中生成月壤地基, 然后在不同重力场下固结, 固结完成的地基宽 0.5 m, 高 0.15 m。图 5 所示为 1g 重力场下地基固结完成后地基中垂直应力和水平应力分布情况。地基中土样重度 $\gamma=20.29$ kN/m³, 初始静止土压力系数 $K_0=0.509$ 。不同重力场下应力分布形式相同, 采用同样方法计算其他重力场下垂直应力和水平应力, 如表 1 所示。由表 1 可知, 在不同重力场下, 地基中垂直应力和水平应力与重力场成正比关系, K_0 系数都在 0.50 左右, 随重力场变化无明显变化, 而月壤体积随重力场增加而增加。推墙自地基左侧生成, 推墙长 0.3 m, 摩擦系数为 0。先以 $a=0.005$ m/s² 的加速度加速至 $v=0.01$ m/s, 随后以恒定速度向右推剪, h

为推剪深度。推剪过程中记录推剪阻力与推剪位移的变化关系。

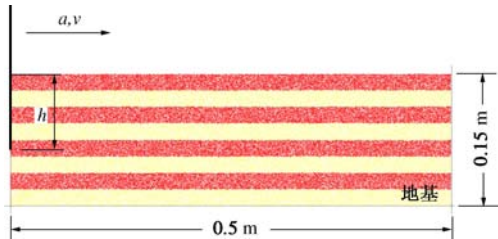


图4 月壤土槽模型

Fig. 4 Lunar soil bin model

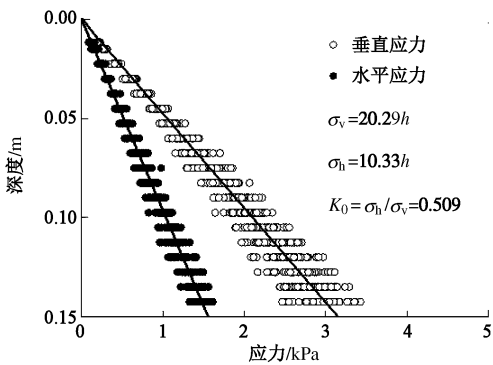


图5 1g 重力场下地基中初始应力水平

Fig. 5 Initial stress conditions of ground under 1g

表 1 不同重力场下初始地基应力水平

Table 1 Initial stress conditions of ground under different gravity fields

重力场/g	垂直应力	水平应力	K_0 系数	孔隙比 e
1/6	$\sigma_v=3.49h$	$\sigma_h=1.76h$	0.504	0.18941
1/2	$\sigma_v=10.46h$	$\sigma_h=5.22h$	0.499	0.18939
1	$\sigma_v=20.29h$	$\sigma_h=10.33h$	0.509	0.18936
2	$\sigma_v=41.85h$	$\sigma_h=20.45h$	0.488	0.18927
5	$\sigma_v=104.96h$	$\sigma_h=50.39h$	0.480	0.18904
10	$\sigma_v=206.95h$	$\sigma_h=108.33h$	0.523	0.18866

2.3 阻尼确定

开挖试验模拟属于动态响应问题, 适宜采用黏滞阻尼。通过引入月壤模型到离散元商业软件模拟了地面环境下休止角试验, 并与 TJ-1 模拟月壤室内试验进行对比, 从而确定了一组能够用于模拟机械-土壤动态作用问题的阻尼系数。图 6 所示为不同黏滞阻尼下离散元数值模拟休止角试验结果, 本文中法向阻尼与切向阻尼相等, 转动向阻尼由法向阻尼确定^[21]。由图可知, 休止角随黏滞阻尼增大而增大, 当黏滞阻尼取 0.4 时, 离散元试样的休止角为 31.25°, 与室内试验结果 30°~33° 的休止角相吻合。为此, 本文开挖试验模拟的法向及切向黏滞阻尼均取 0.4。本文要进行不同重力场下开挖试验模拟, 故有必要研究不同重力场下休止角试验, 图 7 所示为黏滞阻尼取 0.4 不同重力场

下休止角试验结果。由图可知, 不同重力场下休止角都在 31° 左右附近, 变化的幅度很小。因此, 可以认为, 休止角基本不随重力场的改变而变化, 这一现象也与 Nakashima 等^[22]的试验及离散元结果类似。说明在本文选取的阻尼系数在不同重力场下也是可用的。

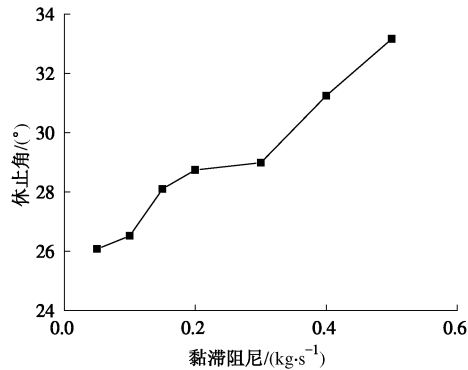


图 6 休止角 - 黏滞阻尼关系曲线

Fig. 6 Relationship between repose angle and viscous damping

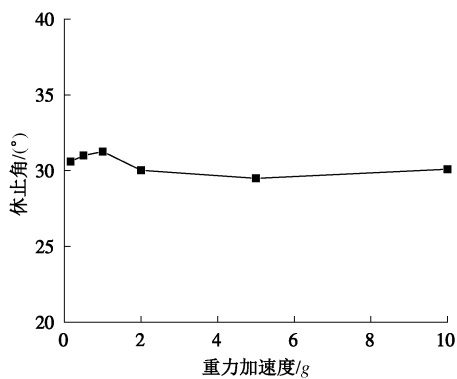


图 7 不同重力场下休止角

Fig. 7 Repose angles under different gravity fields

3 结果分析

3.1 推剪阻力分析

图 8 所示为不同重力场下开挖深度为 0.07 m、开挖速率为 0.01 m/s 时水平推剪阻力随推剪位移发展的关系曲线（推墙无摩擦，平行推墙方向无阻力，推剪阻力垂直于推墙）由于与推墙接触颗粒数量较少，推剪阻力波动较大，文中均为光滑化处理后推剪阻力曲线。由图可知，不同重力场下推剪阻力曲线发展规律相同：推剪阻力先随推剪位移增加至峰值，而后下降并趋于稳定；随推剪位移的进一步发展，推墙前方土体堆积使得推剪阻力又缓慢增长。本文中地基为密实试样，表现明显软化特性。故推剪过程中，土体初始被压缩，推剪阻力迅速增加；在推剪阻力达到峰值后，被动土楔滑动面上抗力从峰值逐渐跌落至残余值，推剪阻力降低。随重力场增加，后期由于推墙前堆积的土体引起的阻力增长速率明显变大。当重力场为 $10g$

时，后期推剪阻力增长速率快，阻力大于初始推剪阻力峰值；当重力场为 $1/6g$ 时，后期阻力增长速率很慢，推剪阻力一直小于初始峰值，初始峰值决定了开挖设备的开挖能力。此外考虑到二维离散单元法模拟极限推剪阻力大小时存在缺陷（实际开挖试验中推墙前方土体不会一直堆积，推剪阻力会达到稳定值），故而本文以初始峰值阻力为研究对象。图 9 所示为初始峰值推剪阻力 F 随重力场的关系曲线。由图可知峰值推剪阻力 F 随重力场增加而线性增加但并不与重力场成正比。虽然在重力场较大时基准力（直线与 Y 轴的相交值）可以忽略，但对于月面环境下 $1/6g$ 的低重力环境，基准力的影响不可以忽略不计。

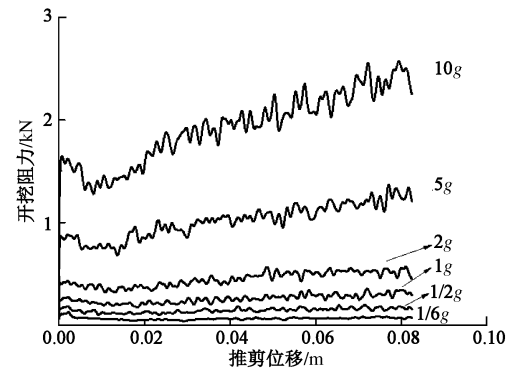


图 8 不同重力场下推剪阻力发展曲线

Fig. 8 Evolution of cutting resistance under different gravity fields

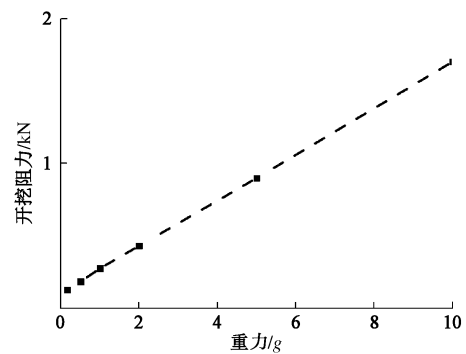


图 9 推剪阻力 - 重力场关系曲线

Fig. 9 Relationship between peak excavation force and gravity field

3.2 能量消耗

图 10 所示为不同重力场能量消耗随推剪位移发展的关系曲线，能量消耗计算公式如式 (1) 所示， W 为总的能量消耗， F 为记录的推剪阻力， Δs 为推剪位移增量。由图可知，不同重力场下能量消耗随推剪位移增加而增加，但因为推剪阻力大小不同，曲线的斜率不同。图 11 所示为能量消耗随重力场的关系曲线。能量消耗随重力场增加而线性增加但并不与之成正比。

$$W = \sum F \Delta s \quad (1)$$

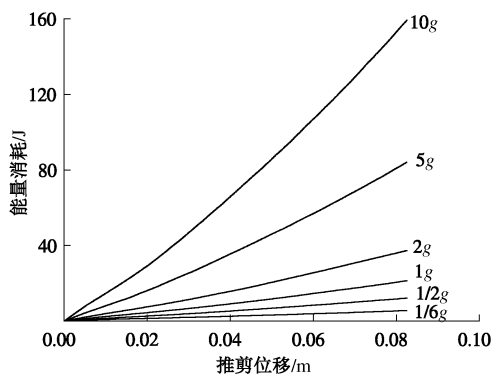


图 10 不同重力场下能量消耗发展曲线

Fig. 10 Evolution of energy consumption under different gravity fields

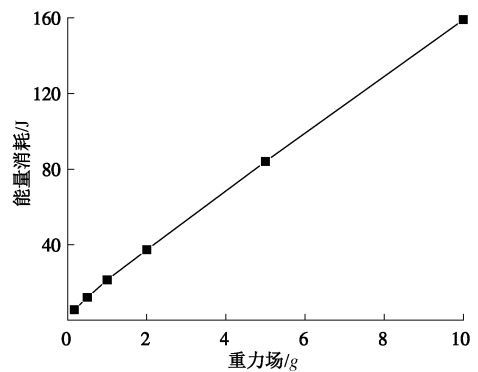


图 11 能量消耗 - 重力场关系曲线

Fig. 11 Relationship between energy consumption and gravity field

3.3 位移场分析

在理论分析中,受扰动土体范围是重要的影响因素之一,但在试验中较难观测。在开挖过程中,存在多条破坏面,在开挖过程中不断演变、发展。其中存在一条主破坏面,决定了推剪过程中受扰动土体范围,直接影响推剪阻力的大小^[23]。破坏面可以通过位移场的变化梯度来判别,并间接地判断出土体受扰动范围。图 12 所示为不同重力场下推剪位移至 0.0825 m 时地基中颗粒的位移变化情况(重力场依次为 1/6g, 1/2g, 1g, 2g, 5g, 10g)。由图可知,随重力场增加,推墙前方受扰动的土体范围逐渐减小,受扰动土体在水平方向长度分别为 0.20, 0.164, 0.161, 0.154, 0.142, 0.133 m。

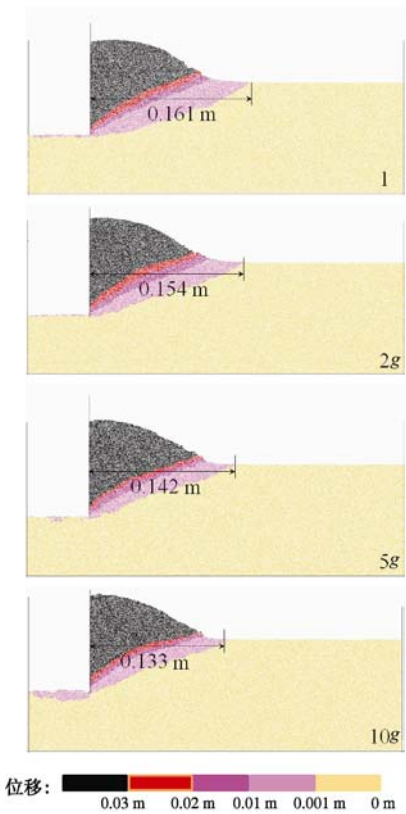
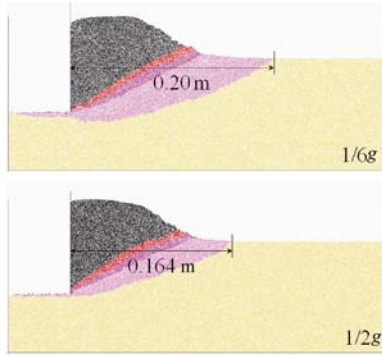
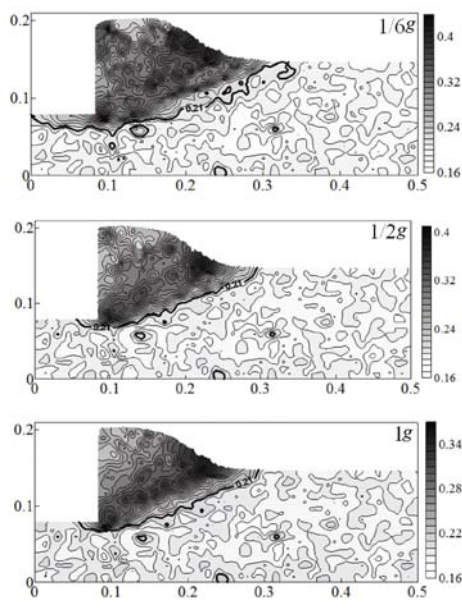


图 12 颗粒位移场图

Fig. 12 Particle displacement fields under different gravity fields

3.4 孔隙比分析

开挖过程中,地基中受扰动土体有明显剪胀现象,因此输出地基中的孔隙比分布图,可以作为判断主破坏面的依据。图 13 为不同重力场下推剪位移至 0.0825 m 时地基中颗粒的孔隙比分布情况(重力场依次为 1/6g, 1/2g, 1g, 2g, 5g, 10g)。图中将孔隙比为 0.21 的等值线加粗以作参考。由图可知,随重力场增加,受扰动土体范围减小,高重力环境下尤为明显。



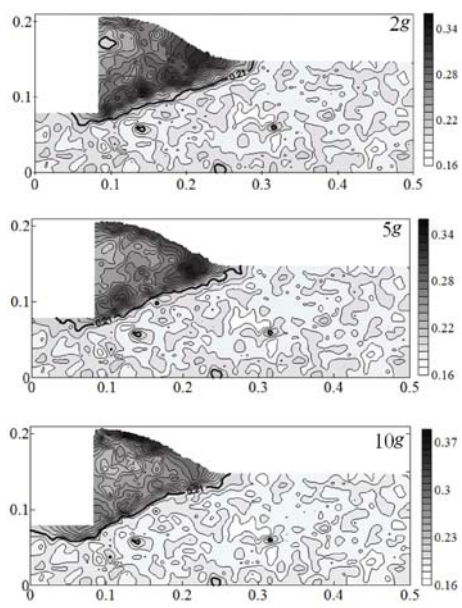


图 13 孔隙比分布图

Fig. 13 Distribution of void ratio

3.5 推剪阻力关于深度归一化处理

综上所述,在不同重力场作用下,地基中初始应力水平与重力场成正比,这与传统土力学理论相符。但在推剪过程中,受扰动土体范围随重力场增加而减小,导致推剪阻力不与重力场成正比,这是传统土力学理论中所没有考虑的因素。依据现有理论模型,不同重力场下受扰动土体范围相同,在无黏聚力地基中,推剪阻力与重力场成正比,这与本文数值模拟结果和现有少量试验^[4-5]结果不符,理论模型预测的低重力环境下开挖阻力会小于实际开挖阻力。虽然在重力场较大时基准力(直线与Y轴的相交值)可以忽略,但对于月面环境下1/6g的低重力环境,基准力的影响不可以忽略不计。故而建立推剪阻力与重力场的关系式,对于完善现有理论模型,优化开挖设备与开挖方案设计有重要意义。本文分别进行了6种重力场下不同开挖深度的开挖试验,结果如图14所示。可知不同推剪深度下推剪阻力与重力场发展规律相同:推剪阻力随重力场线性增加,但不与之成正比。与Boles等^[3-4]试验结果相同。

重力场、开挖深度等对开挖阻力影响很大。其中 $F=ah^2+bh$ 是表达开挖阻力与开挖深度的理想表达式^[24]。图15所示为不同重力场下推剪阻力随推剪深度关系及其拟合曲线,曲线可以很好地拟合推剪阻力与推剪深度的关系。其中参数 a 和 b 的大小在表2中进行统计,由图16可知, a 和 b 均可以近似认为与重力场呈线性增长关系,但不与之成正比。综上所述,开挖阻力与重力场系数和开挖深度的表达式可表达为

$$F=(a_1n+a_2)h^2+(b_1n+b_2)h$$

式中, a_1, a_2, b_1, b_2 为经验参数。

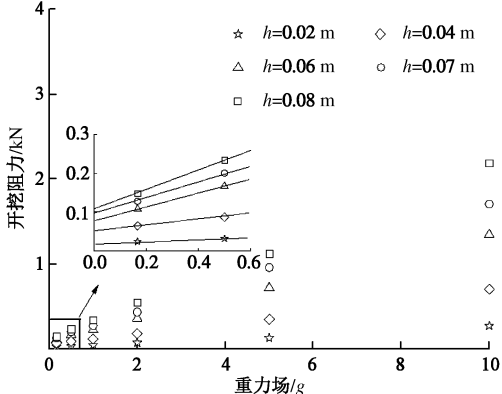


图 14 不同深度下推剪阻力与重力场关系曲线

Fig. 14 Relationship between excavation force and gravity under different excavation depths

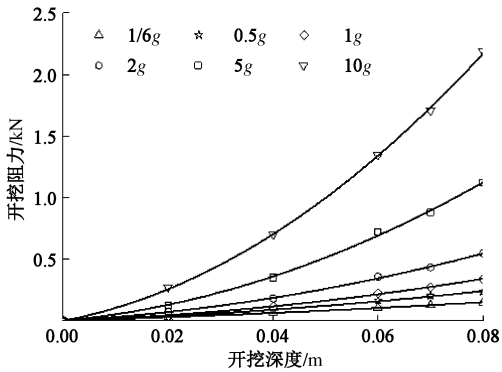


图 15 F 与推剪深度 h 关系曲线

Fig. 15 Relationship of excavation force divided by excavation depth against excavation depth

表 2 不同重力场下 a, b 值

Table 2 Values of a and b under different gravity fields

重力场/g	a	b	R^2
1/6	7574.4	1272.7	0.9974
0.5	19011	1481	0.9962
1	33623	1568	0.9987
2	54837	2445	0.9989
5	126155	3954.5	0.9988
10	239138	8003.8	0.9996

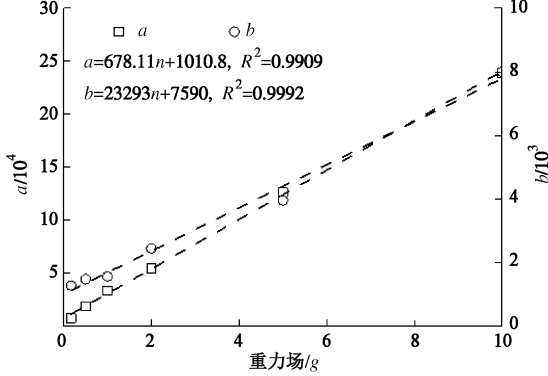


图 16 a 和 b 与重力场关系曲线

Fig. 16 Relationship of a and b against gravity fields

4 结 论

本文通过引入考虑范德华力和抗转动作用的月

壤微观接触模型, 采用离散单元法模拟月壤水平推剪试验, 分析了重力场对开挖试验的影响, 并建立了推剪阻力与重力场的关系公式。得到的主要结论如下:

(1) 在月壤开挖试验数值模拟中, 随重力场增大, 推剪阻力和能量消耗增大, 受扰动土体范围逐渐减小。

(2) 随推剪深度增加, 推剪阻力增加。开挖阻力与重力场系数和开挖深度的表达式可表达为 $F=(a_1n+a_2)h^2+(b_1n+b_2)h$ 。

参考文献:

- [1] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005. (OU YANG Zi-yuan. Introduction to lunar science[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005. (in Chinese))
- [2] KING R H, VAN SUSANTE P, GEFREH M A. Analytical models and laboratory measurements of the soil-tool interaction force to push a narrow tool through JSC-1A lunar simulant and Ottawa sand at different cutting depths[J]. Journal of Terramechanics, 2011, **48**(1): 85 - 95.
- [3] GREEN A, ZACNY K, PESTANA J, et al. Investigating the effects of percussion on excavation forces[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2012, **26**(1): 87 - 96.
- [4] BOLES W W, SCOTT W D, CONNOLLY J F. Excavation force in reduced gravity environment[J]. Journal of Aerospace Engineering, 1997, **10**(2): 99 - 103.
- [5] BOLES W W, CONNOLLY J F. Lunar excavation research[C]// Engineering, Construction, and Operations in Space V. 1996: 1903 - 1906.
- [6] OBERMAYR M, DRESSLER K, VRETTOS C, et al. Prediction of draft forces in cohesionless soil with the discrete element method[J]. Journal of Terramechanics, 2011, **48**(5): 347 - 358.
- [7] HETTIARATCHI D R P, REECE A R. Symmetrical three-dimensional soil failure [J]. Journal of Terramechanics, 1967, **4**(3): 45 - 67.
- [8] GODWIN R J, SPOOR G. Soil failure with narrow tines [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1977, **22**(3): 213 - 228.
- [9] KOBAYASHI T, OCHIAI H, FUHAGAWA S, et al. A proposal for estimating strength parameters of lunar surface from soil cutting resistance[C]// Earth and Space, 2006: 1 - 8.
- [10] MCKYES E, ALI O S. The cutting of soil by narrow blades[J]. Journal of Terramechanics, 1977, **14**(2): 43 - 58.
- [11] NAKASHIMA H, SHIOJI Y, TATEYAMA K, et al. Specific cutting resistance of lunar regolith simulant under low gravity conditions[J]. Journal of Space Engineering, 2008, **1**: 58 - 68.
- [12] BUI H H, KOBAYASHI T, FUKAGAWA R, et al. Numerical and experimental studies of gravity effect on the mechanism of lunar excavations[J]. Journal of Terramechanics, 2009, **46**(3): 115 - 124.
- [13] 郑敏, 蒋明镜, 申志福. 简化接触模型的月壤离散元数值分析[J]. 岩土力学, 2011, **31**(增刊): 766 - 771. (ZHENG Min, JIANG Ming-jing, SHEN Zhi-fu. Discrete element numerical analysis of lunar soil with a simplified contact model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **31**(S0): 766 - 771. (in Chinese))
- [14] JIANG M J, SHEN Z F, THORNTON C. Microscopic contact model of lunar regolith for high efficiency discrete element analyses[J]. Computers and Geotechnics, 2013, **54**: 104 - 116.
- [15] Lunar and Planetary Institute, Lunar samples by category, soil:10085.Coarse-fines.http://curator.jsc.nasa.gov/lunar/lsc/10085.pdf.
- [16] PERKO H, NELSON J, SADEH W. Surface cleanliness effect on lunar soil shear strength[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **27**(4): 371 - 383.
- [17] ADAMSON A W. Physical chemistry of surfaces[M]. New York: Wiley, 1990.
- [18] JIANG M J, LI L Q, SUN Y G. Properties of TJ-1 lunar soil simulant[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2011, **25**(3): 463 - 469.
- [19] 蒋明镜, 李立青. TJ-1 模拟月壤的研制[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(2): 209 - 214. (JIANG Ming-jing, LI Li-qing. Development of TJ-1 lunar soil simulant[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(2): 209 - 214. (in Chinese))
- [20] JIANG M J, KONRAD J M, LEROUEIL S. An efficient technique for generating homogeneous specimens for DEM studies[J]. Computers and Geotechnics, 2003, **30**(5): 579 - 597.
- [21] JIANG M J, YU H S, HARRIS D. A novel discrete model for granular material incorporating rolling resistance[J]. Computers and Geotechnics, 2005, **32**(5): 340 - 357.
- [22] NAKASHIMA H, SHIOJI Y, KOBAYASHI T, et al. Determining the angle of repose of sand under low-gravity conditions using discrete element method[J]. Journal of Terramechanics, 2011, **48**(1): 17 - 26.
- [23] SHMULEBICH I, ASAF A, RUBINSTEIN D. Interaction between soil and a wide cutting blade using the discrete element method[J]. Soil and Tillage Research, 2007, **97**(1): 37 - 50.
- [24] GODWIN R J, O'DOHERTY M J, SAUNDERS C, et al. A force prediction model for mouldboard ploughs incorporating the effects of soil characteristic properties, plough geometric factors and ploughing speed[J]. Biosystems Engineering, 2007, **97**(1): 117 - 129.