

DOI: 10.11779/CJGE201411010

低重力环境下静力触探贯入机理离散元分析

蒋明镜^{1, 2, 3}, 戴永生^{1, 2, 3}, 王新新^{1, 2, 3}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 土木工程防灾国家重点实验室(同济大学), 上海 200092;

3. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 采用离散元法对月面及地面跨度范围内重力场环境($1/6g$, $1/2g$, $1g$)下静力触探机理进行了分析, 以弄清地面试验与月面试验的区别。模拟结果表明: ①同一相对贯入深度处, 重力加速度越小, 贯入阻力越小, 归一化贯入阻力越大; ②土体变形形式由隆起变形向竖向压缩变形的转化深度随重力加速度的增加而减小; ③同一相对贯入深度处, 随重力加速度的增加, 特征点的竖向隆起位移减小, 竖向压缩位移增大, 对应土体颗粒的侧向位移也越大; ④重力加速度越小, 相同相对位置处土体的加卸载现象越明显; ⑤重力加速度越大对应相同相对贯入深度处的土体破坏范围愈大。

关键词: 离散元法; 静力触探试验; 贯入阻力; 低重力场

中图分类号: TU47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2014)11-2045-09

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 analysis of cone penetration tests under low gravity conditions

JIANG Ming-jing^{1, 2, 3}, DAI Yong-sheng^{1, 2, 3}, WANG Xin-xin^{1, 2, 3}

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

Abstract: The mechanism of cone penetration tests under low gravity ($1/6g$, $1/2g$ and $1g$) fields is investigated by means of the distinct element method (DEM). The results show that (1) the cone tip resistance increases with the increase of gravity acceleration at the same relative penetration depth, while the normalized cone tip resistance presents the opposite trend; (2) the required depth, which the deformation pattern of the ground changes from swelling to compression, decreases with the increase of gravity acceleration; (3) the swelling deformation of characteristic points decreases with the increase of gravity acceleration at the same relative penetration depth, but the compression deformation and lateral displacement show the opposite trend; (4) the smaller gravity acceleration leads to the more apparent loading and unloading phenomena at the same relative position; (5) the larger gravity acceleration results in the larger failure zone at the same relative penetration depth.

Key words: distinct element method; cone penetration test; cone tip resistance; low gravity field

0 引言

在中国探月工程中, 月球着陆器着陆冲击, 月球车行走和月球基地建设等人工活动, 都存在着人工装置与月壤相互作用的岩土工程问题。然而, 人类目前只能先直接在地球上从事相关试验, 再推广到月球上去。由土力学知识可知, 土的自重应力通常占主要地位, 土的力学特性随应力水平而变化^[1-2]。月球上的重力场仅为地球重力场的 $1/6$, 故月球上土体的自重应力与地球上土体的自重应力存在显著差别, 月球上土体的初始应力场与力学特性也会与地球上不同, 进而影响月壤与人工装置相互作用的力学机理。所以研究

低重力场下月壤与人工装置的相互作用对中国探月工程将是十分必要的。

目前, 对于低重力场对月壤工程性质和月壤与人工装置相互作用影响的研究主要方法有理论研究、试验研究和数值分析。理论研究方面: Kobayashi 等^[3]从塑性理论的观点采用量纲分析和滑移线理论对比分析了 $1/6g$ 和 $1g$ 重力场下土体破坏问题——地基承载力和土压力, 结果表明重力对土体破坏有显著影响,

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

收稿日期: 2014-03-12

特别是在浅基础承载力和被动土压力问题方面。试验研究方面: Boles 等^[4]利用飞机俯冲获得 20 s 的 1/6g 重力场, 研究月球低重力场条件下从不同角度开挖 JSC-1 模拟月壤的开挖力, 考虑了低重力场对开挖机械以及月壤力学性质的影响, 结果表明从 90° 开挖时 1/6g 重力场的开挖力是 1g 重力场的 1/3, 而从 60° 开挖时 1/6g 重力场的开挖力是 1g 重力场的 1/5; Nakashima 等^[5]利用飞机俯冲获得 20 s 的低重力场, 研究了 FJS-1 模拟月壤的切削阻力, 试验结果表明切削阻力和对应的重力加速度间的关系可以用线性方程表示。数值分析方面: Nakashima 等^[5]采用二维离散单元法对低重力下月壤切削阻力试验中土体与机械的相互作用进行了数值模拟, 结果表明, 通过相对重力和相对固结时间的修改可以获得某个低于 1g 的指定低重力加速度下的切削阻力; Ji 等^[6]采用二维离散元模拟了地球和月球重力场下的静电力对颗粒材料的休止角的影响, 指出重力场对休止角的影响很小; 蒋明镜等^[7]对高低重力场下的静力触探贯入阻力进行对比研究发现, 归一化贯入阻力的峰值及稳定值均与重力加速度的倒数均成线性关系, 这为地面试验结果推广至月面提供了一个很好的参考。同时, Jiang 等^[8]通过引进抗转动作用和范德华力, 建立了能够有效模拟地面及月面环境下月壤强度特性的颗粒微观接触模型, 并将其用于模拟月面开挖^[9]、轮壤作用^[10-11]等一系列问题当中。

综上所述, 目前在地球上实现特定试验, 技术要求高, 投资大, 试验历时短。理论分析还只是针对简单边值问题, 还未涉及到人工装置与月壤相互作用的研究。而数值模拟则较为经济、高效, 且能容易实现低重力场的试验环境。

静力触探 (CPT) 作为常用的土体原位测试技术, 具有连续、快速、精确, 可以在现场通过贯入阻力的变化了解地层变化及其物理力学性质的特点。同时, CPT 试验不用取样, 对土体扰动小, 测试结果与土的工程性质及土类有显著的相关关系, 具有勘探与测试的双重目的。因而 CPT 测试技术将在中国登月计划测定原位月壤的物理力学性质方面得到应用。文献[7]已对大跨度重力场范围内 (从 1/6g 到 20g 不等) 的静力触探试验进行了研究, 重点分析了高、低重力场下静力触探贯入阻力的区别, 并得出不同重力场下归一化贯入阻力的峰值和稳定值均与重力加速度的倒数呈线性关系的结论。然而, 重力场影响的研究最终是为将地面试验成果推广至月面服务的, 因此, 本文就月面及地面重力场跨度范围内的静力触探贯入机理进行了全面、细致的对比、分析, 内容更丰富, 针对性更强。

1 静力触探离散元模型

1.1 地基模型

根据文献[12, 13]知月壤粒度分布很广, 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。但是考虑到要模拟与真实月壤一样的颗粒级配, 颗粒粒径跨度较大, 离散元模拟中需要的颗粒数目会非常大, 计算耗时太长, 本文选择了 6~9 mm 的粒径范围。同时, 离散元中各个变量是无单位的, 各个变量的单位是在一定的单位体系下给定, 计算过程中并不进行转换^[14]。为描述方便并便于读者理解, 本文转化至国际单位体系下进行描述, 各单位体系的换算详见文献[14]。采用 Jiang 等^[15]提出的分层欠压法生成由一系列单位厚度圆盘组成的模型地基, 颗粒级配曲线如图 1 所示。粒间相互作用模型采用离散元中适用于干砂的简单接触模型^[16]。地基边界由摩擦系数 $\mu=0.0$ 的刚性墙模拟。生成模型地基宽度为 5.0 m, 初始高度为 1.684 m, 初始平面孔隙比为 0.270。在最大限度利用计算机计算性能, 颗粒数目尽可能多的前提下, 根据模拟地基的尺寸、初始平面孔隙比及级配曲线, 依据文献[14]中公式计算出模拟地基所需颗粒数目为 15 万, 地基尺寸选取依据详见 1.2 节。根据文献[13]知月壤可以划归为粉砂, 因此颗粒间摩擦系数取适用于干砂的典型值 0.5, 相关地基参数见表 1。

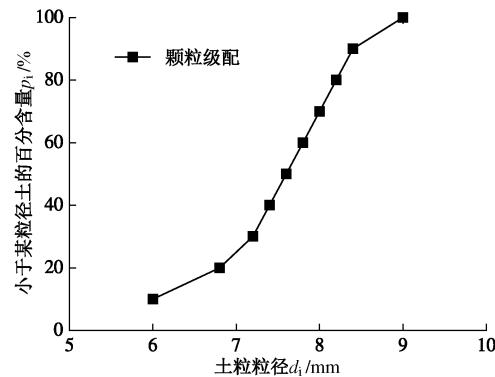


图 1 离散元地基的颗粒级配图

Fig. 1 Distribution of grain sizes in DEM ground

表 1 地基参数

Table 1 Parameters of granular ground

参数	成样时	固结时
颗粒直径 d/mm	6~9	6~9
目标孔隙比 e	0.27	
颗粒与墙体间的摩擦系数 μ	0.0	0.0
颗粒间摩擦系数 μ	1.0	0.5
墙体法向刚度 $k_n/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	1.5×10^{10}	1.5×10^{10}
墙体切向刚度 $k_s/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	1.0×10^{10}	1.0×10^{10}
颗粒法向刚度 $k_n/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	1.5×10^{10}	7.5×10^7
颗粒切向刚度 $k_s/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	1.0×10^{10}	5.0×10^7

1.2 静力触探模型

在模型及数值试验中, 边界效应都是必须考虑的。本文在考虑颗粒尺寸效应及边界效应时主要参考离心机试验成果。Phillips 等^[17]通过对散体材料离心机试验中桩端贯入阻力影响因素的研究, 提出桩半径与 50% 含量颗粒粒径之比 $R/d_{50} \geq 10$, 才能得到连续合理的端阻力。同时, Jiang 等^[18]指出离散元模拟中与锥尖接触颗粒接触数目不小于 13 个时才能测得稳定的锥尖阻力, 因此, 本文中考虑上面 2 个因素取锥尖半径为 0.08 m。Gui 等^[19]通过静力触探的离心机试验研究得到当模型箱的半宽大于 20 倍的锥尖半径时, 刚性边界的边界效应减小到能够接受的范围以内。因此, 本文中考虑边界效应的影响, 模型地基的半宽应大于 1.6 m。本文中取地基宽度为 5.0 m, 满足边界效应对地基宽度的要求。Jiang 等^[18]数值模拟结果表明当贯入深度(y)与锥尖半径(R)的比值 $y/R=10$ 时, 归一化锥尖阻力达到稳定值, 考虑底部边界效应的影响在距地基底部 $4R$ 处停止贯入, 因此地基高度至少为 $14R$ 。本文中地基初始高度取 1.684 m, y/R 最大值为 21.05, 满足边界要求。同时 Bolton 等^[20]指出对于密度已知的土体, 研究不同应力水平对静力触探锥尖阻力的影响, 最可靠的方法是在保持锥尖直径 D 与颗粒的中值粒径 d_{50} 的比值为常数的情况下, 研究不同重力加速度下归一化锥尖阻力与归一化深度的变化规律, 因此本文锥尖半径均取 0.08 m。静力触探仪采用刚性墙模拟, 锥体长度取 2 m, 能够满足贯入深度的要求, 具体参数: 锥尖角度为 60°, 锥尖直径 D 为 0.16 m, 锥体长度 L 为 0.20 m, 锥体摩擦系数 μ 为 0, 锥体法向刚度 k_n 为 1.5×10^{10} (N·m⁻¹), 锥体切向刚度 k_s 为 1.0×10^{10} (N·m⁻¹)。静力触探示意图见图 2。

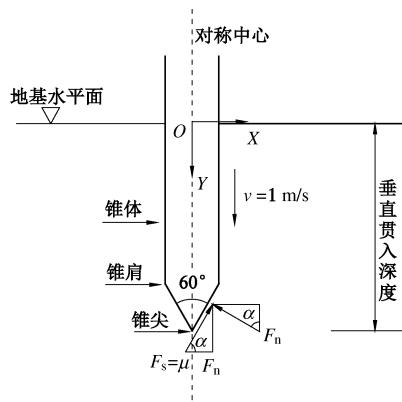


图 2 静力触探示意图

Fig. 2 Skeleton diagram of cone penetration tests

地基生成后, 进行离散元模拟的主要步骤如下:
①地基在不同重力加速度 $1/6g$, $1/2g$ 和 $1g$ 下固结平衡。(g 为重力加速度, 本文计算时取 9.81 m/s^2 级); ②在固结平衡后的地基水平面上生成贯入锥体。Dayal

等^[21]研究表明当贯入速率低于 1 m/s 时, 速率对试验结果基本无影响, 同时考虑计算效率, 本文采用 1 m/s 的速度贯入。

2 试验地基力学特性及 CPT 锥尖力计算验证

2.1 地基力学特性

本文通过双轴试验获得模型地基的物理力学性质指标。具体由 24000 个颗粒组成孔隙比为 0.27 的柔性边界双轴试样, 颗粒材料参数与模型地基中参数一致, 在 10.0%/min 压缩应变速率下, 测得颗粒材料在 50, 100, 200 kPa 三种围压下的力学特性。图 3 为颗粒材料的轴向应变与偏应力的关系, 由图 3 可以看出材料应力应变关系表现为硬化型, 具有典型的松砂特性。由双轴单元试验得到颗粒材料的峰值摩擦角为 15.37° 。而月球表面月壤结构松散^[12-13], 采用 0.27 的平面孔隙比可以模拟月壤的宏观力学特性。图 4 为低重力环境下地基初始水平应力、垂直应力和静止土压力系数 K_0 随相对贯入深度的变化曲线。从图 4 中可知, 初始垂直应力基本随深度线性增加, 而 K_0 随相对贯入深度增加先减小, 当相对贯入深度大于 5 时, 基本不变。说明地基初始水平应力在相对贯入深度小于 5 时增加是非线性的, 而在 $y/R=5$ 后增加是呈线性的。

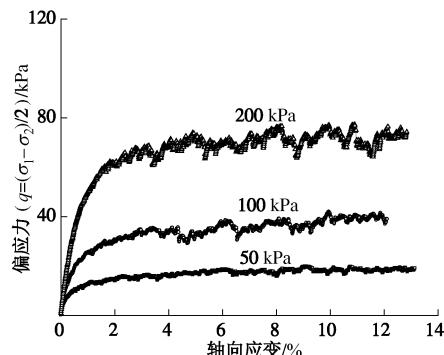


图 3 轴向应变与偏应力关系

Fig. 3 Relationship between axial strain and deviatoric stress

2.2 离散元模拟锥尖阻力验证

采用静力触探锥尖处测得的锥尖力验证离散元模拟结果的正确性。锥尖贯入过程中, 与之接触的颗粒在界面由于摩擦产生的作用力可以分解为法向应力 F_n 和切向应力 F_s , 如图 2 中所示。当颗粒在与锥尖接触面发生滑动摩擦时, 接触点处的法向力和切向力沿水平及竖直方向的分力满足如下关系式:

$$\frac{F_y^i}{F_x^i} = -\frac{\mu F_n \sin \alpha + F_n \cos \alpha}{\mu F_n \cos \alpha - F_n \sin \alpha} = \frac{\mu \sin \alpha + \cos \alpha}{\sin \alpha - \mu \cos \alpha} = \beta \quad (1)$$

当颗粒与锥尖界面产生塑性滑动时，颗粒与界面接触点处水平及竖直方向的分力满足如下关系式：

$$\frac{F_y}{F_x} = \frac{\sum F_y^i}{\sum F_x^i} = \frac{\sum \beta F_x^i}{\sum F_x^i} = \beta。 \quad (2)$$

本次模拟中锥尖与水平面的夹角 α 为 60° ，锥尖界面的摩擦系数 μ 为 0.0，根据式(1)、(2)计算得 β 的理论值为 0.577。表 2 所示为左侧及右侧锥尖在各重力加速度下的数值计算结果。由表 2 知理论计算与离散元模拟结果基本一致，验证了数值模拟的正确性。

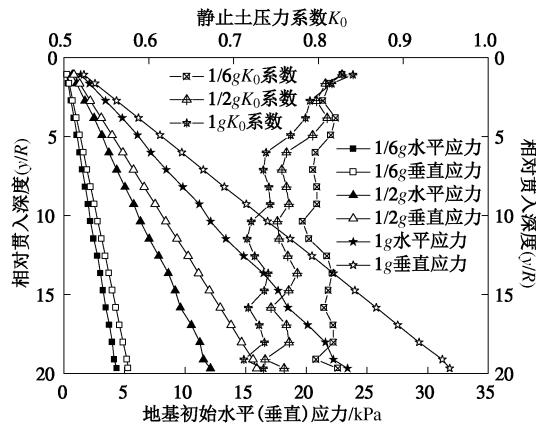


图 4 模拟地基初始水平(垂直)应力及静止土压力系数

Fig. 4 Initial horizontal (vertical) stress and coefficient of earth pressure at rest in granular ground

表 2 不同重力加速度下锥尖贯入阻力数值计算结果验证

Table 2 Verification of numerical results of tip resistance under different accelerations

重力加速度/g	左侧锥尖 f_y/f_x	右侧锥尖 f_y/f_x
1/6	0.59	0.59
1/2	0.58	0.58
1	0.60	0.59

3 静力触探模拟结果分析

本文通过锥尖阻力、网格变形、特征点位移路径、应力偏转和速度场来分析低重力场下静力触探贯入过程中土体的宏观力学响应。同时通过布置的特征点测量圆，记录静力触探贯入过程中特征点应力路径的变化过程。特征点测量圆具体位置见图 5。

3.1 贯入阻力

离散元模拟过程中，贯入阻力的计算式为

$$q_c = \sum f_y / D, \quad (3)$$

式中， q_c 为贯入阻力， $\sum f_y$ 为颗粒作用于锥尖沿 y 向的合力； D 为锥尖直径。

图 6 给出了静力触探贯入过程中的锥尖贯入阻力及其归一化贯入阻力随相对贯入深度的变化趋势。从图 6(a) 可以看出在不同低重力加速下贯入过程中锥

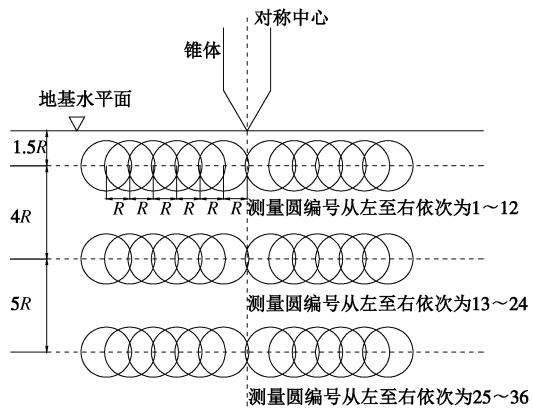
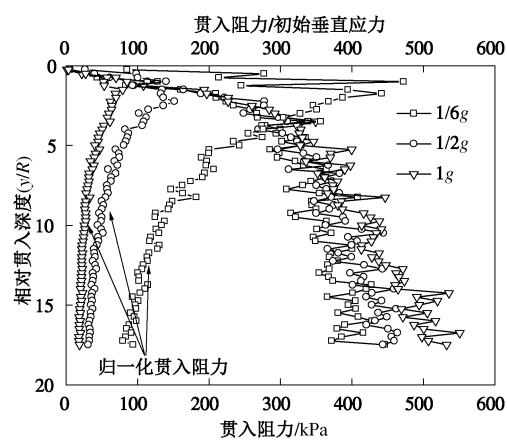


图 5 特征点的位置

Fig. 5 Positions of characteristic points

尖阻力随相对贯入深度的增加一直呈增加的趋势；在 $y/R=0 \sim 4$ 深度范围内，不同低重力加速度下的锥尖贯入阻力大体相等；当相对贯入深度 $y/R > 4$ 时，锥尖贯入阻力的差异随贯入深度的增加而增大。从图 6(a) 可以得到：①归一化后的贯入阻力在同一相对贯入深度处，重力加速度值大的归一化贯入阻力值小；②归一化贯入阻力随相对贯入深度的增加存在 3 个变化阶段，首先随相对贯入深度的增加而增加至最大值，然后随相对贯入深度的增加而减小至最小值，最后随相对贯入深度的增加基本稳定在最小值不再变化只有轻微的波动。以上 3 个阶段的变化过程中由于静力触探贯入深度有限， $1/6g$ 并没有出现稳定的归一化贯入阻力，说明重力加速度小，归一化贯入阻力达到稳定值需要的相对贯入深度越大。图 6(b) 为不同相对贯入深度处贯入阻力及归一化贯入阻力随重力加速的变化趋势。分析图 6(b) 可知，在同一重力加速度下相对贯入深度越大，对应的贯入阻力越大，归一化贯入阻力越小；相同相对贯入深度处，贯入阻力随重力加速度的增加而增大，归一化贯入阻力随重力加速度的增大而减小。



(a) 贯入阻力及归一化贯入阻力图

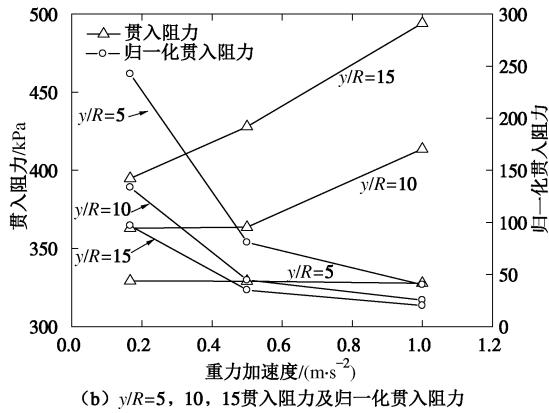


图 6 贯入阻力及其归一化

Fig. 6 Tip resistances and their normalized values

3.2 土体变形方式

(1) 网格变形

采用 Jiang 等^[18]提出的网格着色法观察贯入过程中土体的整体变形情况。图 7 为低重力场下静力触探贯入过程中土体的网格变形图。

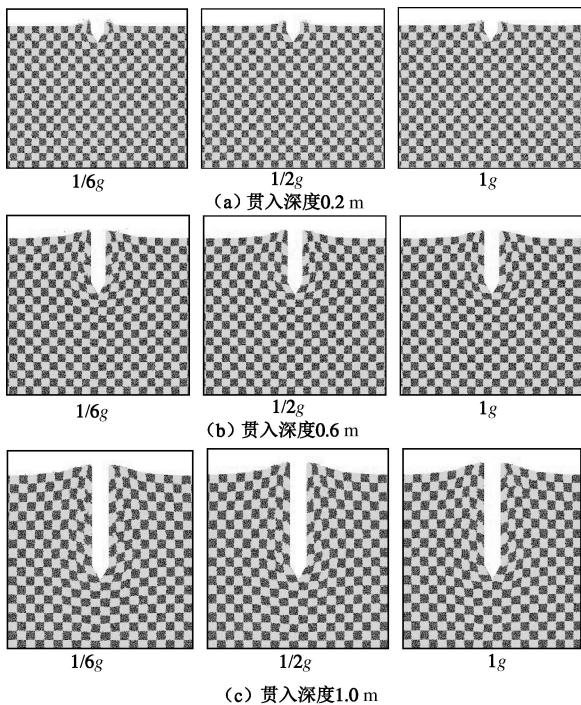


图 7 低重力场下不同贯入深度网格变形

Fig. 7 Deformations of painted grids at different penetration depths under low gravity fields

由图 7 可以看出, 在低重力场下静力触探贯入过程中, 地基表面都发生较大的隆起变形, 表面土体的隆起范围和隆起高度随贯入深度的增加而增大, 并且由于表面土体比较松散, 初始贯入土体时会造成贯入处土体的“跳起”和土体的侧向滑移, 重力加速度越小, 土体颗粒的“跳起”高度越高且数目越多, 侧向滑移越明显; 地基内部土体首先受影响的是锥体周围和锥尖上部土体, 随贯入深度的增加逐步扩展到锥尖

下部的土体, 且土体变形逐渐由隆起变形向压缩变形转化。

(2) 位移路径

采用 Jiang 等^[18]提出的方法得出特征点的位移路径。图 8 为低重力环境下锥尖贯入过程中特征点的位移路径及位移终值。特征点的起始位置对应图 5 布置的测量圆圆心处的颗粒位置。

如图 8 (a) ~ (c) 所示, 低重力环境下锥尖贯入过程中, 布置的特征点位移发展轨迹大体呈钩形; 但距离对称中心相同水平距离处不同深度处的特征点的位移路径具体形式又存在差别, 如图所示不同深度处位移路径的形式分别为“L”形、“U”形和“J”形; 同一相对深度处距对称中心水平距离越近颗粒位移路径的钩形发展的越充分。

如图 8 (d) 所示, 特征点位移发展的终值连线在 $y/R=1.5$ 和 $y/R=5.5$ 处主要表现为地基的隆起变形, 隆起变形的程度随深度的增加而减小, 最大隆起部位距对称中心的水平距离随贯入深度的增加而增大; 在 $y/R=9.5$ 处地基存在隆起变形区、向下压缩区以及二者之间的过渡区, 最大压缩变形出现在紧靠锥体的部位, 距对称中心 3 倍锥尖半径外的土体发生隆起变形。

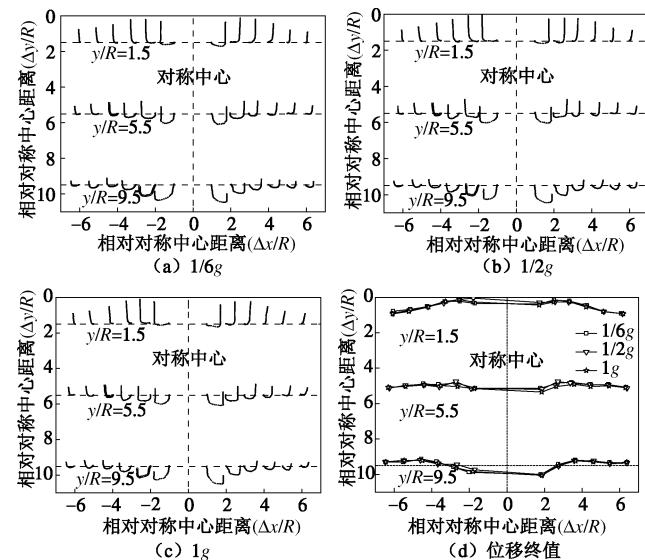


图 8 特征点位移路径及位移终值

Fig. 8 Displacement paths and final values at characteristic points

图 9 为 $\Delta x/R=2$ 处特征点位移随重力加速度变化趋势, 图中 Δdx , Δdy 为相对初始位置在 x , y 方向差值。从图 9 中可以看出, 同一重力加速度下, 随相对贯入深度的增加, 特征点的竖向隆起位移减小、竖向压缩位移增大、水平向侧向位移增大; 同一相对贯入深度处, 随重力加速度的增加, 特征点的竖向隆起位移减小、竖向压缩位移增大, 水平向侧向位移表现出减小的趋势。

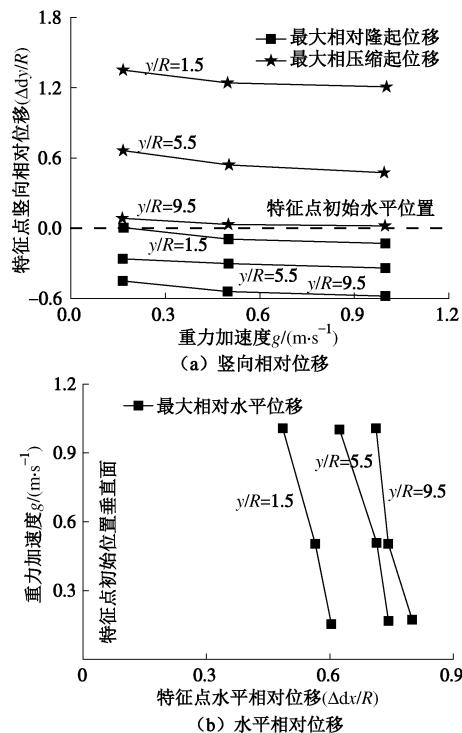
图 9 $\Delta x/R=2$ 处特征点位移随重力加速度变化趋势

Fig. 9 Change of displacement trend at characteristic points at $\Delta x/R=2$ under different gravity accelerations

3.3 应力偏转

图 10 所示为低重力环境下锥尖贯入过程中土体主应力的矢量分布, 图 10 中以最大主应力为标准设定一个长度不变的矢量, 其它主应力以此矢量为标准, 按其与最大主应力的比值在同一地基中画出。由图 10 可以看出, 低重力场下静力触探贯入过程中土体主应

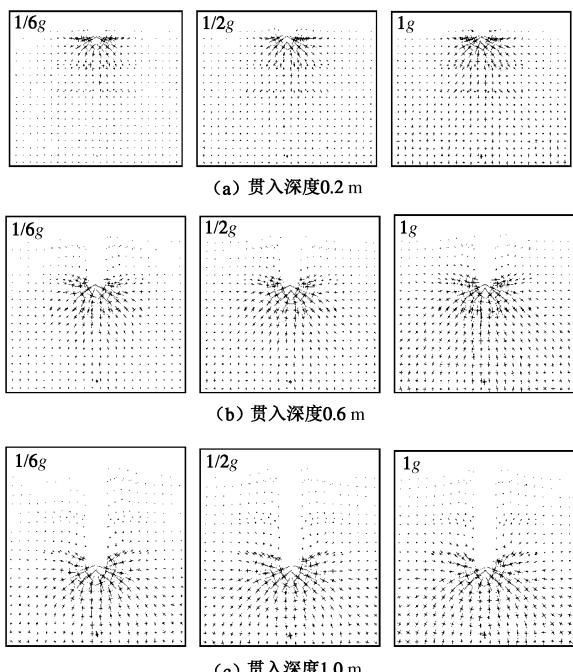


图 10 低重力场下不同贯入深度应力分布

Fig. 10 Distribution of principal stresses at different penetration depths under low gravity fields

力发生偏转, 形成一个以对称中心线与锥肩所在水平面交点为圆心的环绕锥尖的半圆形应力偏转区域, 随贯入深度的增加半圆形区域的范围也增大。

静力触探在二维离散元模拟中是作为平面轴对称问题进行分析的, 因此取对称中心线左侧距对称中心线 2 倍锥尖半径的特征点 #5, #17, #29 分析贯入过程中土体应力偏转和应力路径。尽管重力加速度不一样, 但对称位置土体的应力状态相对一致, 因此本文仅分析了 $1/6g$ 重力加速度下土体的应力偏转。图 11 为 $1/6g$ 加速度下锥尖贯入过程中特征点大主应力偏转情况。由图可知锥尖贯入使得地基中不同深度处土体均经历了较大的应力偏转, 最大可达 180° 。

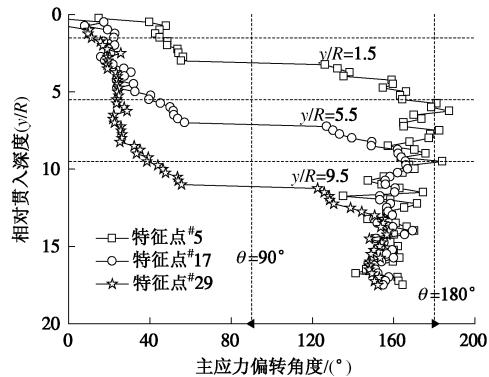
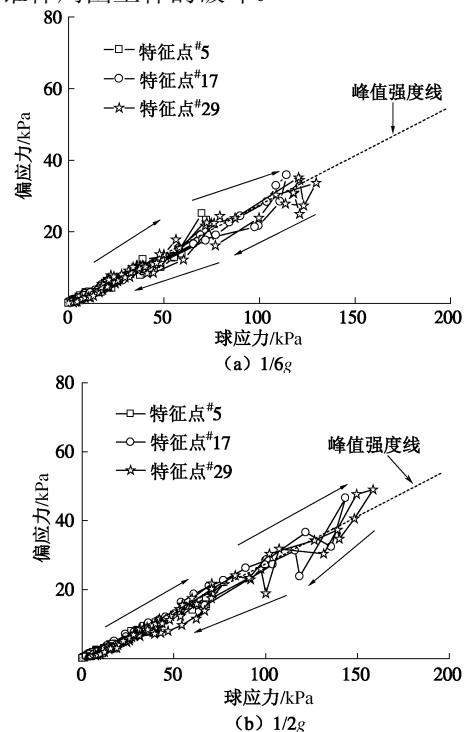
图 11 $1/6g$ 重力加速度下特征点主应力偏转

Fig. 11 Rotation of principal stresses under $1/6g$ condition

图 12 为低重力环境下锥尖贯入过程中特征点的应力路径, 由图 12 可知特征点的球应力和偏应力随锥尖贯入均表现出先增加后减小的趋势, 应力路径发展趋势说明土体经历了先加载后卸载的过程; 土体的某些应力状态点在峰值强度线上方, 说明静力触探贯入造成了锥体周围土体的破坏。



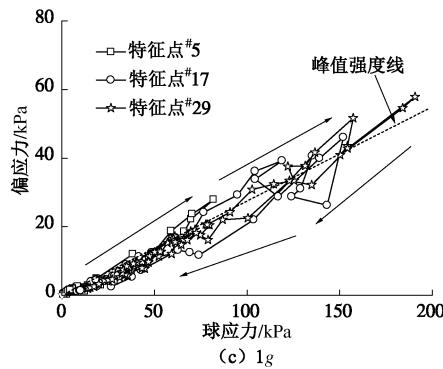


图 12 不同重力加速度下特征点主应力路径

Fig. 12 Stress paths under different accelerations

为了对比分析特征点处土体的加载、卸载程度, 将特征点处土体的球应力和偏应力归一化处理。因不同重力场下归一化球应力和偏应力具有相似的变化规律, 本文仅对不同重力场下归一化偏应力进行分析说明。图 13 为不同重力场下归一化偏应力的变化趋势。

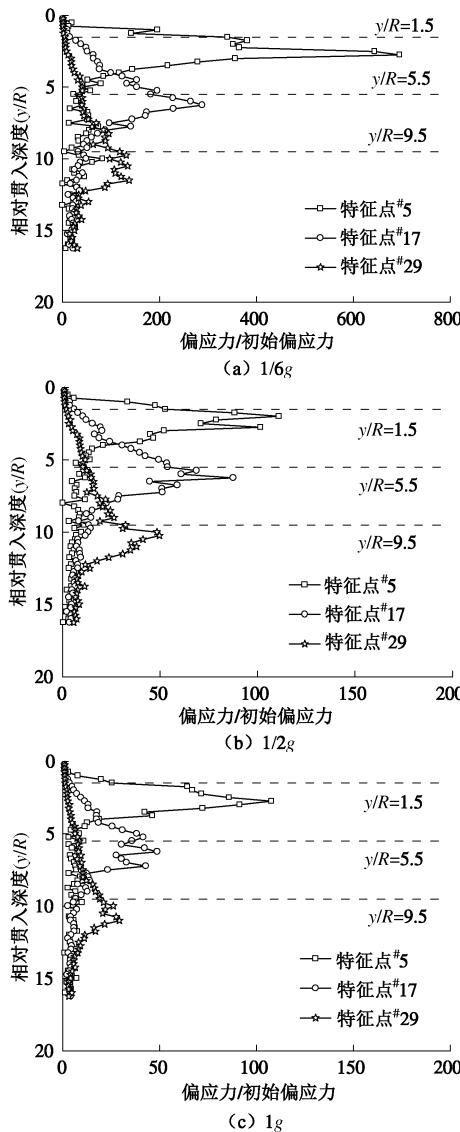


图 13 不同重力加速度下特征点归一化偏应力

Fig. 13 Normalized deviator stresses under different accelerations
从图 13 可知, 重力加速度越小, 相同相对位置处土体

的加卸载现象越明显; 同一重力加速下, 相对贯入深度越小加卸载现象越明显。

3.4 速度场

静力触探贯入过程中试验地基内部的速度场采用 Jiang 等^[18]提出的准静态速度场输出方法。当锥尖到达待观测的深度时, 记录该时刻最大速度, 将其 7 等分, 然后分别赋予每种速度一种颜色。

图 14 所示为锥尖贯入过程中地基内部颗粒最大速度随相对贯入深度的变化曲线。由图 14 可知低重力环境下, 同一相对贯入深度处, 重力加速度越小土颗粒的速度越大; 随相对贯入深度的增加, 土颗粒的速度逐渐减小, 并趋向于稳定值。颗粒速度变化的趋势说明在低重力场下由于低重力场下地基表面比较松散, 静力触探贯入作用对表面土体的影响很大, 这一点可以从地基网格变形图 7 中贯入深度为 0.2 m 时地基表面土体颗粒产生“跳起”和沿表层的滑动现象得到证明。

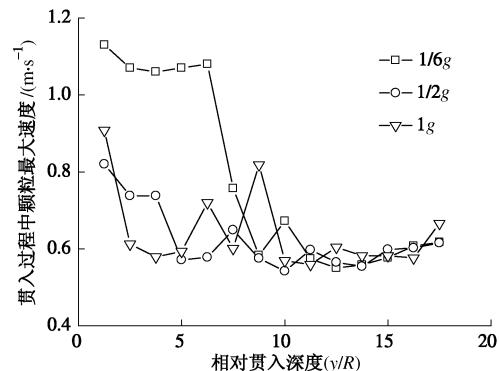


图 14 贯入过程中颗粒最大速度

Fig. 14 Maximum velocities of particles during penetration process

图 15 所示为低重力环境下不同贯入深度处地基的速度场, 不同深度处速度的最大值取自图 14。由图 15 可知, 在贯入深度为 0.2 m 处, 土体颗粒的运动轨迹以向侧向和侧上方主, 土体的破坏面的形状与 Terzaghi 滑动面形状相似; 在 0.6 m 贯入深度处, 1/6g 重力场下土体的破坏模式与其他低重力场下的破坏模式不同, 1/6g 重力场下土体仍表现出 Terzaghi 破坏模式相同, 而其他低重力场下的土体颗粒的运动轨迹的边界发展到接近锥尖水平位置, 在边界的上部形成了一个以锥体壁为内边界, 外边界大约 2 倍锥体半径的空心圆柱体, 这与 Vesic 破坏形式相似; 贯入深度 1.0 m 处, 速度场的分布形成一个逐渐封闭式梨形区域, 这与 Mayerhof 破坏模式相似。从以上分析可以得出: 在低重力场下, 静力触探贯入过程中土体颗粒在不同的深度处的运动轨迹是不同的, 对应土体发生破坏时的滑动面的形状也是不同的, 这说明在不同贯入深度

处对应土体的破坏模式是不同的；不同的重力加速度下在同一深度处土体受到影响的范围不同，重力加速度值越大土体受到的影响范围就越大。

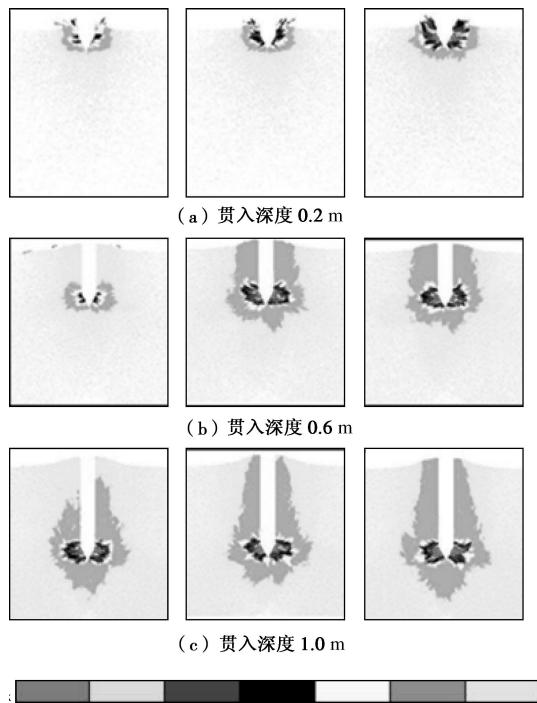


图 15 低重力场下不同贯入深度速度场

Fig. 15 Velocity fields at different penetration depths and gravity fields

4 结 论

本文采用离散元法对 3 种重力场 ($1/6g$, $1/2g$, $1g$) 下的静力触探试验进行了离散元模拟分析，研究了不同低重力场下静力触探的机理，得出以下 5 点结论。

- (1) 同一相对贯入深度处，重力加速度越小，贯入阻力越小，归一化贯入阻力越大。
- (2) 同一相对贯入深度处，重力加速度越小，土体网格变形范围越小。土体变形由隆起变形向竖向压缩变形的转化深度随重力加速度的增加而减小。
- (3) 土体颗粒的位移路径整体呈钩形。低重力场下不同的重力加速度对土体颗粒的位移也稍有影响，重力加速度越小土体的隆起的变形越大，对应的土体颗粒的侧向位移也越大，但是土体的压缩位移却越小。

(4) 低重力场下，主应力最大偏转角度可达到 180° 。随重力加速度的增大，土体主应力发生偏转的区域逐渐增大；土体经历了复杂的应力路径，重力加速度越小，相同相对位置处土体的加卸载现象越明显。

(5) 低重力场下，锥尖贯入过程中土体经历了

Terzaghi、Vesic、Mayerhof 三种破坏模式。重力加速度越大，相应贯入深度处的土体破坏范围愈大。

参 考 文 献:

- [1] 包承纲. 土力学的发展和土工离心模拟试验的现状[J]. 岩土力学, 1988, 9(4): 23 - 30. (BAO Cheng-gang. Development of soil mechanics and present situation of centrifuge modelling test[J]. Rock and Soil Mechanics, 1988, 9(4): 23 - 30. (in Chinese))
- [2] 胡黎明, 劳敏慈, 张建红, 等. 离心模型试验技术在环境岩土工程中的应用现状与展望[J]. 土壤与环境, 2001, 10(4): 327 - 330. (HU Li-ming, LO Irene M C, ZHANG Jian-hong, et al. Application of centrifuge modeling technique in geo-environmental engineering[J]. Soil and Environmental Sciences, 2001, 10(4): 237 - 330. (in Chinese))
- [3] KOBAYASHI T, OCHIAI H, YASUFUKU N, et al. Prediction of soil collapse by lunar surface operations in reduced gravity environment[C]// Proceedings of the 15th International Conference of the ISTVS. Hayama, 2005.
- [4] BOLES W W, SCOTT W D, CONNOLLY J F. Excavation forces in reduced gravity environment[J]. Aerospace Engineering, 1997, 10(2): 99 - 103.
- [5] 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(1): 58 - 68.
- [6] JI S Y, SHEN H H. Two-dimensional simulation of the angle of repose for a particle system with electrostatic charge under lunar and earth gravity[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2009(10): 10 - 14.
- [7] 蒋明镜, 王新颖. 不同重力场下静力触探试验离散元数值分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 863 - 873. (JIANG Ming-jing, WANG Xin-xin. Numerical analysis of cone penetration tests under different gravity fields by distinct element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 863 - 873. (in Chinese))
- [8] JIANG M J, SHEN Z F, COLIN T. Microscopic contact model of lunar regolith for high efficiency discrete element analyses, Computers and Geotechnics, 2013, 54: 104 - 116.
- [9] 蒋明镜, 系邦禄, 申志福, 等. 月壤水平推剪试验的离散元数值分析[J]. 地下空间与工程学报. (已录用). (JIANG Ming-jing, XI Bang-lu, SHEN Zhi-fu, et al. DEM analyses of horizontal pushing test in lunar ground[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, (accepted). (in Chinese))

- Chinese))
- [10] 蒋明镜, 戴永生, 申志福. 坚向荷载对月球车驱动性能影响的离散元分析[J]. 地下空间与工程学报(已录用). (JIANG Ming-jing, DAI Yong-sheng, SHEN Zhi-fu. Investigating the vertical load effects on trafficability of lunar rover using DEM[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering (accepted). (in Chinese))
- [11] JIANG M J, LIU F, SHEN Z F, et al. Distinct element simulation of lugged wheel performance under extraterrestrial environmental effects[J]. Acta Astronautica, 2014, 99C: 37 - 51.
- [12] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005. (OUYANG Zhi-yuan. Introduction to lunar science[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005. (in Chinese))
- [13] HEIKEN G H, VANIMAN D T, FRENCH B M. Lunar sourcebook: a user's guide to the moon[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [14] Itasca Consulting Group, Inc. PFC^{2D} (Particle flow code in 2 dimensions) Version 3.1[M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc, 2000.
- [15] JIANG M J, KONARD J M, LEROUEIL S. An efficient technique for generating homogeneous specimens for DEM studies[J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(7): 579 - 597.
- [16] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Géotechnique, 1979, 29(1): 47 - 65.
- [17] PHILLIPS R, VALSANGKAR A J. An experimental investigation of factors affecting penetration resistance in granular soils in centrifuge modeling[R]. Cambridge: Cambridge University, 1987.
- [18] JIANG M J, YU H S, HARRIS D. Discrete element modelling of deep penetration in granular soils[J]. International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2006, 30(4): 335 - 361.
- [19] GUI M W, BOLTON M D, GARNIER J, et al. Guidelines for cone penetration tests in sand[C]// Centrifuge 98. Rotterdam, 1998: 155 - 160.
- [20] BOLTON M D, GUI M W, GARNIER J, et al. Centrifuge cone penetration tests in sand[J]. Géotechnique, 1999, 49(4): 543 - 552.
- [21] DAYAL U, ALLEN J H. The effect of penetration rate on the strength of remolded clay and sand samples[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1975, 12(3): 336 - 348.

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先利用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 (www.cgejournal.com) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 25 元, 全年 300 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)