

文章编号: 1000-7598(2013)03-0863-11

不同重力场下静力触探试验离散元数值分析

蒋明镜^{1,2}, 王新新^{1,2}

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 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)

摘要: 采用离散元商业软件 PFC2D 对 7 种重力场下静力触探试验进行了对比分析试验, 以研究高、低重力场下静力触探试验的异同点。数值试验结果表明: 不同重力场下土体受静力触探贯入主要影响区域不同, 低重力场下主要是上部土体受到影响, 高重力场下主要是下部土体受到影响; 归一化贯入阻力的最大值和稳定值、归一化球应力和偏应力的最大值均与重力加速度的倒数呈线性关系, 均随重力加速度倒数的增加而增大; 土体经历了明显的加载、卸载过程, 重力加速度越小, 加载、卸载现象越明显, 同一重力加速度下上部土体加载、卸载程度大于下部土体。

关键词: 不同重力场; 静力触探试验; 离散单元法

中图分类号: O 241

文献标识码: A

Numerical analysis of cone penetration tests under different gravity fields by distinct element method

JIANG Ming-jing^{1,2}, WANG Xin-xin^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The cone penetration tests under seven different gravity fields were studied by a commercial distinct element method (DEM) code PFC2D (particle flow code) in order to investigate the relationship between cone penetration tests under high and low gravity fields. The numerical results show that cone penetration has an apparent effect on the upper zone of the ground under low gravity fields, while it has a significant effect on the lower zone of the ground under high gravity fields. The maximum (steady) values of the normalized cone tip resistance and the maximum values of normalized mean stress and deviatoric stress increase linearly with the reciprocal of gravity accelerations. The soil around the penetrometer undergoes apparently loading and unloading process during the penetration process, with the smaller gravity field corresponding to the more apparent loading and unloading phenomenon, while the upper zone of the ground undergoes the loading and unloading process more apparently than the lower zone under the same gravity field.

Key words: different gravity fields; cone penetration test; distinct element method

1 引言

新一轮月球探测计划的主要目标是在月球上建立一个永久的基地, 实现人类在月球上的定居、开发和利用月球资源^[1]。而月球基地的建设和月球资源的开发利用过程中可能存在着如基坑开挖、地基承载力及边坡稳定等岩土工程问题。在地球上, 岩土工程中土的自重应力通常占支配地位, 土的力学特性随应力水平而变化^[2-3]。月球上的重力场为

$1/6g$ ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$, 下文中同), 因而月球上土体的初始应力和力学特性与地球上不同, 进而影响月壤与人工装置的相互作用。因此, 现代土力学理论能否应用于解决月球上的岩土工程问题有待研究。

现有离心模型试验通过增加加速度的方法可以重现现场的应力水平, 较好地预测岩土工程的工作状况以及方便地验证某些土力学理论, 因而获得了广泛的应用^[2]。Gadre 等^[4]研究了印度黑棉土的隆起量随离心加速度的变化趋势, 结果表明, 隆起量随

收稿日期: 2011-10-01

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(No. 51025931); 国家自然科学基金项目(No. 51179128); 上海市优秀学术带头人计划项目(No. 11XD1405200)。第一作者简介: 蒋明镜, 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 国家杰出青年基金获得者, 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观测试验、本构模型和数值分析方面的研究以及土体逐渐破坏分析。E-mail: mingjing.jiang@tongji.edu.cn

重力加速度的增大而减小,二者呈非线性关系。Tei 等^[5]研究了土钉加固土质边坡离心模型试验中不同离心加速度与单位水平宽度的土钉总的许可力、极限力以及安全系数的关系,试验表明,三者与重力加速度呈线性关系。Lau 等^[6]通过研究不同的离心加速度下海冰的弹性模量的变化趋势,得到在较高加速度下海冰的弹性模量随重力加速度的增大而增大在 25g 时达到最大值。Bolton 等^[7]研究了应力水平对静力触探锥尖阻力的影响,结果表明,相同归一化贯入深度处重力加速度越大,归一化贯入阻力越大。李志刚^[8]研究了 1g、3g 和 6g 重力场下模拟月壤的力学特性及模拟月壤与人工装置的相互作用,试验结果表明,不同重力场对同一尺寸的人工装置与模拟月壤的相互作用影响较明显。

目前,对低重力场下月壤力学性质的理论研究方面主要有:Kobayashi 等^[9]研究了 1/6g 和 1g 重力场下地基承载力和土压力问题,结果表明,重力对浅基础承载力和被动土压力存在显著影响。试验研究方面主要是:Bui 等^[10]利用飞机俯冲获得短时低重力场研究了不同低重力加速度下 Toyoura 砂和 FJS-1 模拟月壤的承载力问题,结果可能由于颗粒形状等因素的影响在低重力环境重力加速度对 FJS-1 模拟月壤的极限承载力无影响。Costes 等^[11]在飞机飞行过程中获得的 1/6g、1g、2g 共 3 种重力加速度条件下进行了模拟月壤的静力触探模型试验,试验结果表明,静力触探阻力随着重力加速度的减小而减小,并用以分析 Apollo 11 与 Apollo 12 登月点处月壤的密度与强度特性。

综上所述,在地球实现特定低重力场试验技术难度大、历时短,且研究问题也仅限于简单边值问题,而对人工装置与月壤相互作用研究尚未涉及。而现代离心机技术已应用于增大加速度方面的研究,其成果能否推广到低重力场去,两者之间有何联系,这正是本文所关心的问题。

获得原位月壤的力学特性最可靠的方法是在月球着陆器登月后由机器或宇航员进行的月壤原位测试。静力触探(CPT)作为一种常用的原位测试技术已经被用来对真实月壤以及模拟月壤的静力触探特性进行了一系列研究^[8, 11-12]。同时,CPT 还具有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优点。所以,静力触探在原位月壤的物理力学性质方面可能会得到应用。因而,本文将研究高重力场下的 CPT 试验与低重力场下的区别,以弄清高重力场下得到的试验规律能否应用于低重力场条件,从而为登月成功后月面 CPT 试验开

展服务。考虑既要兼顾高重力对静力触探试验的影响,又要反映低重力场下静力触探试验的特性,结合现有静力触探离心机试验加速度取值^[13],本文拟采用商业离散元软件 PFC2D 对 7 种不同重力场下静力触探试验进行模拟,着重研究不同重力场下(1/6g、1/2g、1g、5g、10g、15g 和 20g)静力触探贯入对探头周围土体的作用机制。

2 静力触探试验模型

2.1 模型地基

模型地基由一系列单位厚度圆盘组成,颗粒粒径范围为 6.0~9.0 mm,平均粒径 $d_{50} = 7.4$ mm,不均匀系数 $d_{60}/d_{10} = 1.3$,粒间接触模型采用 PFC2D 自带的适用于砂土的简单接触模型,采用 Jiang 等^[14]提出的分层欠压法生成,颗粒级配曲线与文献^[14]中相同。生成模型地基宽度为 5 m,初始高度为 1.684 m,颗粒总数为 15×10^4 ,平面孔隙比为 0.270(平面孔隙比是指在二维离散元数值模拟中试样孔隙的面积与颗粒面积的比值),相关地基参数见表 1,地基模型见图 1。

表 1 地基参数

Table 1 Parameters of ground

取样	颗粒与墙体间	颗粒间摩	墙体刚度/(N/m)		颗粒刚度/(N/m)	
	的摩擦系数 μ	擦系数 μ	法向 k_n	切向 k_s	法向 k_n	切向 k_s
成样时	0.0	1.0	1.5×10^{10}	1.0×10^{10}	1.5×10^{10}	1.0×10^{10}
固结时	0.0	0.5	1.5×10^{10}	1.0×10^{10}	7.5×10^7	5.0×10^7

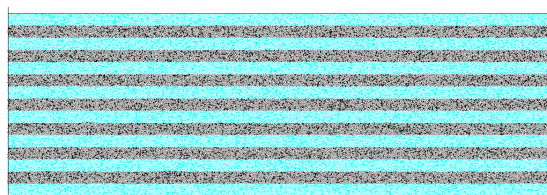


图 1 地基模型

Fig.1 Ground model

2.2 静力触探模型

数值计算中边界效应通常难以避免,所应考虑的是如何使边界效应控制在允许误差范围内^[15]。Gui 等^[13, 16]指出,为了得到无偏差的锥尖贯入阻力,锥尖的直径 D 至少是平均颗粒直径 d_{50} 的 20 倍,所测得锥尖阻力的误差最大在 10%以内;考虑到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贯入阻力^[17];同时, Bolton 等^[7]指出研究同一种土在不同应力水平时锥尖阻力的变化,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，将不同重力加速度下归一化贯入阻力随归一化贯入深度的变化规律进行比较。综合以上因素，本文锥尖半径取 0.08 m。Gui 等^[13,16]通过静力触探离心机试验研究得到当模型箱的宽度大于 40 倍的锥尖半径时，刚性边界的边界效应对试验影响在可接受的范围内。为消除边界效应的影响，本文模型地基的宽度取 5 m，大于 40 倍的锥尖半径。

静力触探仪采用刚性墙模拟，锥体长度取为 2 m 大于地基的初始高度，能够满足贯入深度的要求，静力触探示意图见图 2，图中 R 和 r 分别为锥尖半径和测量圆半径，具体参数见表 2。

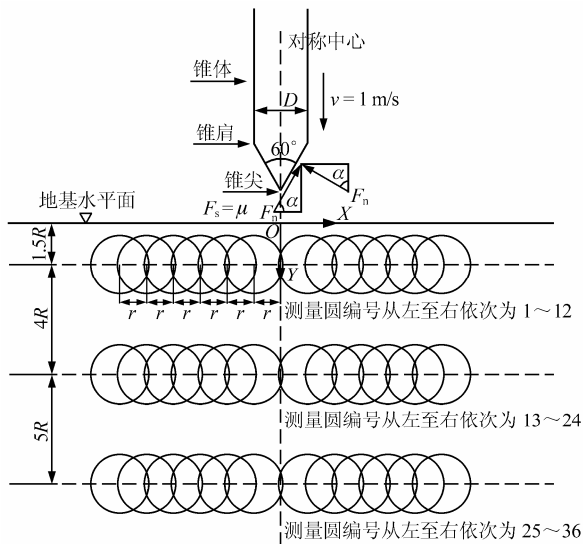


图 2 静力触探示意图
Fig.2 Sketch of cone penetration test

表 2 静力触探仪参数
Table 2 Parameters of penetrometer

锥尖角度 / $^{\circ}$	锥尖直径 D /m	锥体长度 L /m	锥体摩擦 系数 μ	锥体刚度 / (10^{10} N/m)	
				法向 k_n	切向 k_s
60	0.16	2.0	0.0	1.5	1.0

模型地基生成后，进行离散元模拟的步骤如下：

(1) 地基分别在低重力加速度 ($1/6g$ 、 $1/2g$ 和 $1g$) 和高重力加速度 ($5g$ 、 $10g$ 、 $15g$ 和 $20g$) 下固结平衡。

(2) 在固结平衡后的地基水平面上生成静力触探仪，考虑计算的实际可行性和计算成本，如若采用与实际静力触探试验一致的贯入速率，计算时间会随贯入速率减小比例而等比例的增加。因此，本文采用 1 m/s 的贯入速率，计算时间为 4 d，贯入速率与现场静力触探贯入速率不同虽然对静力触探贯

入阻力的数值存在一定的影响，但不影响本文静力触探贯入过程中相关量的主要变化规律。同时记录贯入过程中的相关数据。

3 模拟地基力学特性及静力触探锥尖力计算验证

3.1 模拟地基力学特性

离散元计算中材料的宏观力学特性是与颗粒的微观参数和颗粒接触本构所决定的。本文中采用双轴单元试验获得模型地基的物理力学性质指标。双轴试样由 24 000 个颗粒组成，颗粒级配曲线、颗粒微观参数均与地基参数相同，颗粒间接触模型采用适用于砂土的简单接触模型，采用柔性膜边界作为试样的侧向边界条件，试样的上下边界为刚性墙边界，在 0.01 min 压缩应变速率下，测得颗粒材料在 50、100、200 kPa 共 3 种围压下的力学特性。其中，柔性膜边界是由一连串大小相同的颗粒组成，在离散元模拟中将这此颗粒称之为膜颗粒。膜颗粒的物理力学参数与试样内部颗粒具有显著差别，膜颗粒的直径为 2 mm，密度 1.0 g/cm^3 ，法向和切向接触刚度分别为试样内部颗粒在加载阶段刚度的 1/20，胶结抗拉和抗剪强度均为 $1.0\times10^{100}\text{ N}$ ，如此大的胶结强度将保证膜颗粒在试验过程中不会相互分离。试样边界条件示意图见图 3(a)。由图 3(b)可知，试样的偏应力随轴向应变的增大而增大，材料应力-应变关系表现为硬化型。由图 3(c)可知，试样平面孔隙比随偏应力的增大而减小，试样表现出松砂的剪缩特性，由上可知，试样为松砂。根据不同围压下试样的应力-应变峰值点，在 $\bar{p}-\bar{q}$ 应力空间中得到试样的峰值强度线，通过换算得到试样的峰值摩擦角为 15.37° ，具体换算公式见文献[18]。

图 4 所示为不同重力加速度下地基的初始水平（垂直）应力及静止土压力系数沿深度的变化图。由图 4 可以看出，初始垂直应力在各重力加速度下沿深度方向均呈线性变化，从 0 kPa 开始增加直到达到对应重力加速度下的最大值；在各重力加速度下地基的静止土压力系数 K_0 首先随相对贯入深度的贯入增加而减小，在 $y/R=5$ （其中， y 为锥尖的贯入深度， R 为锥尖半径）处后静止土压力系数 K_0 随相对贯入深度的增加基本保持不变，这说明地基的初始水平应力随相对贯入深度的增加首先是非线性增长，在 $y/R=5$ 后随相对贯入深度的增加呈线性增加。同时，重力加速度越大，相同相对贯入深度处地基的静止土压力系数 K_0 越小。

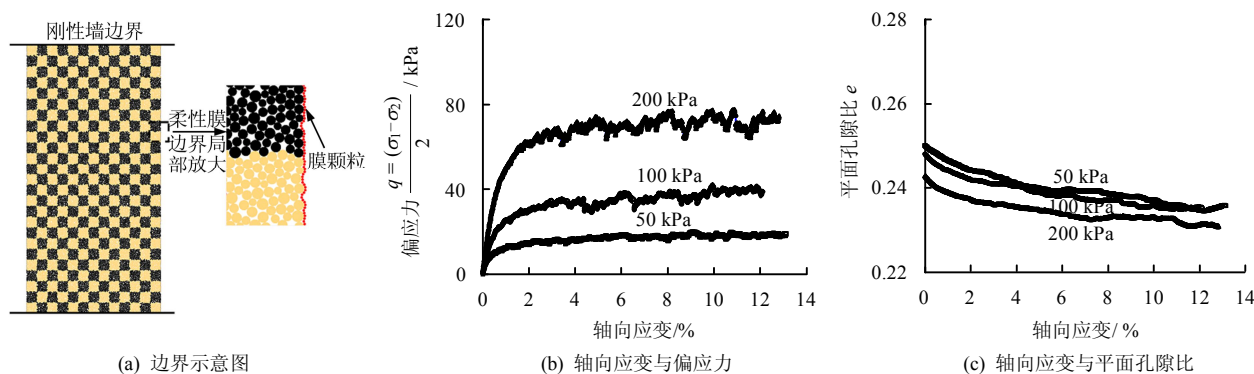


图3 双轴离散元试验
Fig.3 Biaxial test by DEM

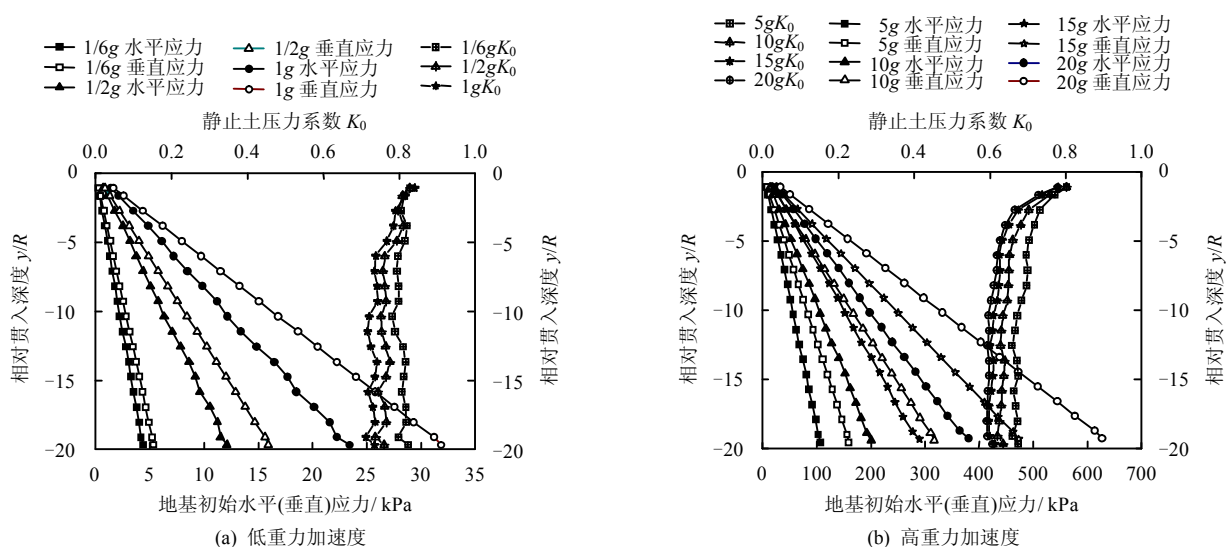


图4 地基初始水平(垂直)应力及静止土压力系数

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

3.2 模拟地基孔隙比分布变化

图5为不同重力场下重力固结后模拟地基孔隙比变化图。从图可知,同一相对贯入深度处,重力加速度越小,模拟地基的孔隙比越大。

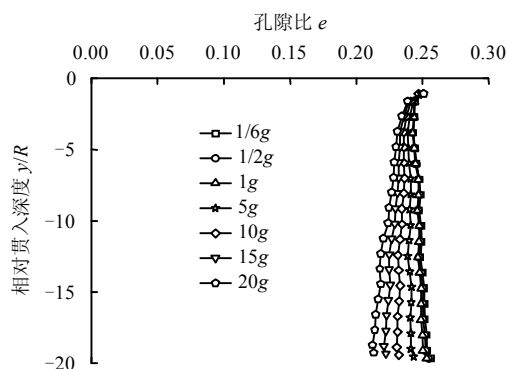


图5 不同重力场下固结后模拟地基孔隙比
Fig.5 Void ratio of ground under different gravity fields after consolidation

3.3 离散元模拟锥尖阻力验证

静力触探锥尖处颗粒与锥尖表面的接触力可以分解为如图2中所示接触面的法向应力 F_n 和切向应力 F_s ,当锥尖与土体的接触面发生滑动时,接触点处的水平力和竖向力满足下式:

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

当锥土界面发生塑性滑动时,锥-土界面所受的水平力与竖向力应满足下式:

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

本文中 $\alpha = 60^\circ$,锥尖与颗粒之间的摩擦系数 $\mu = 0$,根据式(1)和(2)计算得 β 的理论值为0.58。不同重力加速度下的数值计算散点图见图6。由图可知,实测锥尖力计算值与理论值基本上是一

致的, 说明了静力触探试验可以用离散元数值试验来模拟。

4 离散元模拟结果分析

本文拟通过锥尖阻力、特征点位移路径和模拟地基速度场等来分析不同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球应力和偏应力的变化过程, 特征点测量圆的具体位置见图2。

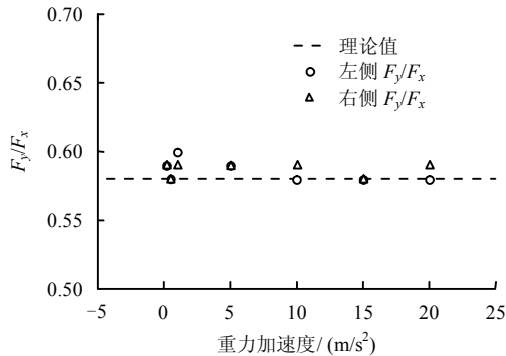


图6 不同重力加速度下锥尖贯入阻力数值计算结果验证
Fig.6 Numerical calculation values of tip resistance under different accelerations

4.1 贯入锥尖阻力

静力触探垂直贯入过程中贯入阻力的计算公式如下:

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

式中: q_c 为贯入锥尖阻力; $\sum f_y$ 为作用在锥尖的沿 y 向的合力; D 为锥尖直径。

图7所示为不同重力场下静力触探贯入过程中贯入阻力随贯入深度的变化趋势。由图可以看出, 不同重力场下贯入阻力都随贯入深度增加而增大, 同一相对贯入深度处重力加速度越大, 贯入阻力也越大, 这一现象也与静力触探离心机模型试验规律相一致^[7, 11-12]。

图8为不同重力场下归一化贯入阻力随相对贯入深度的变化趋势。由图8可知, 不同重力场下归一化贯入阻力表现出相似的变化规律: 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到最小值, 之后随相对贯入深度的增加归一化贯入阻力基本保持在最小值不变, 仅在其附近发生微小波动。对于同一相对贯入深度, 重力加速度越小归一化贯入阻力越大。

图9所示为归一化贯入阻力最大值及稳定值与重力加速度倒数的关系, 由图8(a)可知, $1/6g$ 重力场下由于贯入深度的限制并未出现稳定值, 故图9

中无 $1/6g$ 重力场的稳定值。由图9可以看出归一化贯入阻力的最大值和稳定值均随重力加速度倒数的

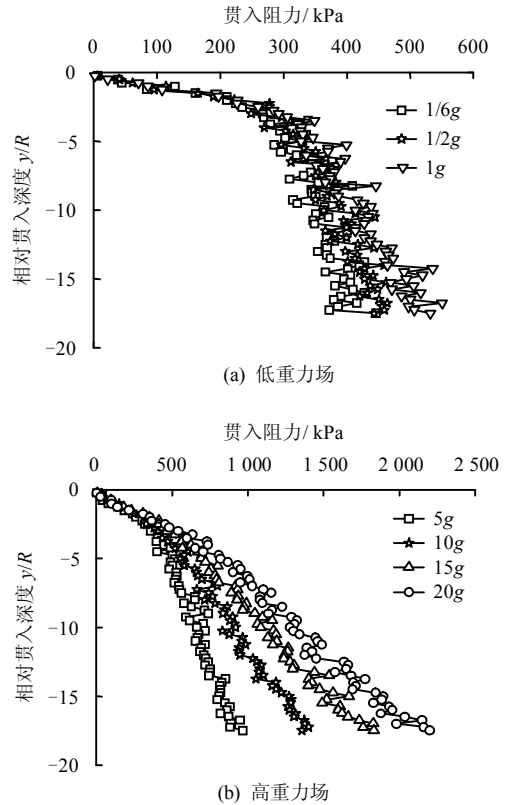


图7 静力触探贯入阻力
Fig.7 Cone tip resistances

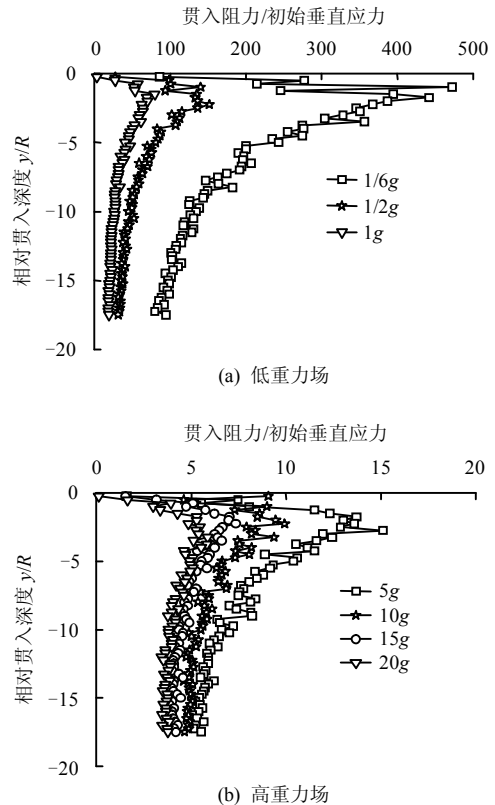


图8 静力触探贯入阻力归一化值
Fig.8 Normalized values of cone tip resistances

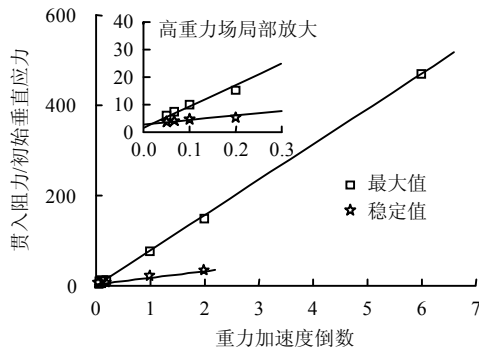


图9 归一化贯入阻力最大值(稳定值)与加速度倒数关系

Fig.9 Relationship between the maximum (steady) normalized cone tip resistance and the reciprocal of gravity acceleration

增加而增大, 且与重力加速倒数呈线性关系; 同一重力加速下归一化贯入阻力的最大值与稳定值间的差值随重力加速度倒数的增加而增大。归一化贯入阻力最大值及稳定值与重力加速度倒数之间的线性方程如下:

$$\left(\frac{q_c}{\sigma_{v,int}} \right)_{\max} = \frac{78.346}{a} + 0.5556 \quad (4)$$

$$\left(\frac{q_c}{\sigma_{v,int}} \right)_{\text{steady}} = \frac{14.513}{a} + 3.2528 \quad (5)$$

式中: $\left(\frac{q_c}{\sigma_{v,int}} \right)_{\max}$ 为归一化贯入阻力最大值; $\left(\frac{q_c}{\sigma_{v,int}} \right)_{\text{steady}}$

为归一化贯入阻力稳定值; $\sigma_{v,int}$ 为地基初始垂直应力; a 为重力加速度。

4.2 土体位移路径

图 10 为不同重力场下静力触探贯入过程中特征点的位移路径及位移终值。特征点的位置对应图 2 中测量圆圆心处的颗粒位置。在静力触探贯入过程中通过记录颗粒位置的变化并在同一坐标系中依次连接就可得到特征点的位移路径。

由图 10(a)~10(c)可以得到, 在不同重力场下静力触探贯入过程中, 各个特征点的位移路径整体形状为钩形。低重力场下在 $y/R = 1.5$ 和 $y/R = 5.5$ 处特征点的位移的终止位置在初始位置之上, 而高重力场下例如仅在 $y/R = 1.5$ 处特征点的位移终止位置在初始位置之上; 低重力场下在 $y/R = 9.5$ 处水平距对称中心线 $2R$ 的特征点的位移终止位置在初始位置之下, 此范围之外的特征点的位移终止位置在初始位置之上, 而高重力场下这一现象出现在 $y/R = 5.5$ 处。以上现象说明, 不同重力场下地基上部土体以隆起变形为主, 下部土体以压缩变形为主。

上部地基水平方向的隆起范围和垂直方向的隆起程度, 在低重力场下大于高重力场; 下部地基水平方

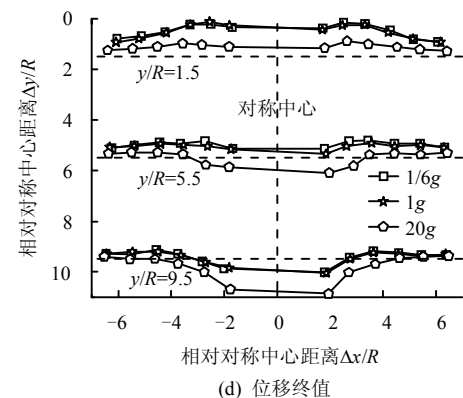
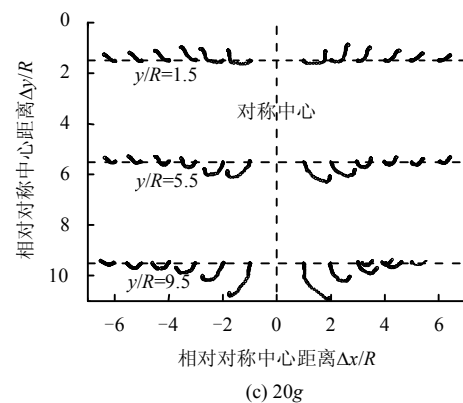
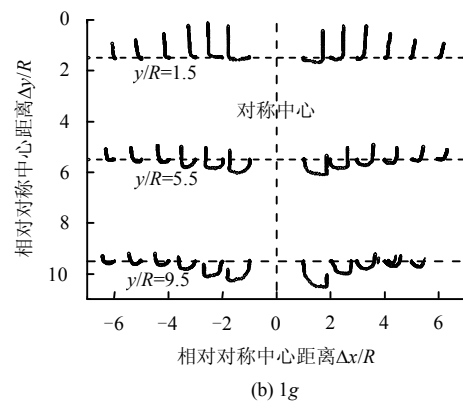
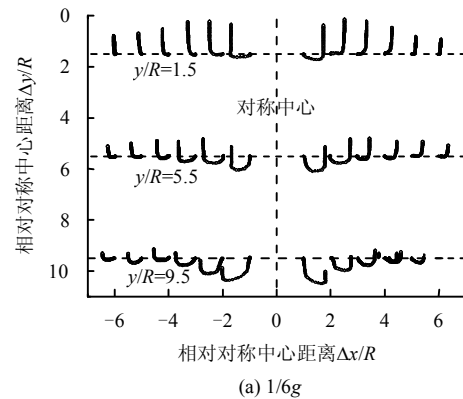


图 10 特征点位移路径及位移终值
Fig.10 Displacement paths and ending values of characteristic points

向的压缩范围和垂直方向的压缩程度, 在低重力场下小于高重力场。这主要是由于土体自重应力较小, 对上部土体变形约束较小, 使得隆起变形能够充分发展, 而高重力场下土体自重应力较大, 对土体的隆起变形约束大, 尤其是下部土体受到静力触探贯入挤土的影响土体向下压缩变形较大。

图 10(d) 为特征点位移终值连线, 由图可以看出, 不同重力场下静力触探贯入过程中土体的变形趋势, 相同相对贯入深度处土体的隆起变形随重力加速度的增加而减小, 土体的向下压缩变形随重力加速度的增加而增大。

4.3 应力变化

图 11 为不同重力加速度下 CPT 贯入过程中地基土体应力偏转矢量分布图。图中线段的长短代表主应力的大小、方向代表主应力的方向, 长轴代表大主应力, 短轴代表小主应力, 圆圈大小代表发生明显主应力偏转的土体范围的大小。

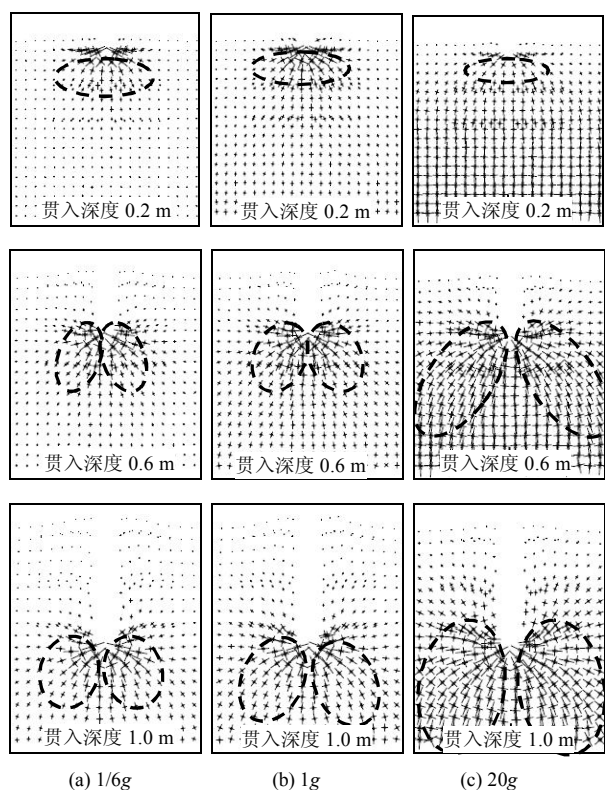


图 11 不同重力场下主应力偏转

Fig.11 Rotation of principal stresses under different gravity fields

从图可以得到不同重力场下 CPT 贯入过程中锥尖附近的土体大主应力矢量的偏转方向均朝向锥尖面, 且锥尖附近土体应力矢量明显大于其他部分的应力矢量, 这说明锥尖附近土体发生较大应力偏

转和应力集中; CPT 贯入过程中同一重力场下圆圈的范围随贯入深度增加而增大, 这说明随贯入深度增加而增加, 应力偏转的范围不断增大; 通过对比不同重力场下同一贯入深度处应力偏转区域的对比, 可以得到贯入深度 0.2 m 处低重力场下土体的应力集中程度和偏转范围大于高重力场, 贯入深度 0.6 m 和 1.0 m 处高重力场下土体应力集中程度和偏转范围要大于低重力场; 通过对 CPT 贯入过程中应力偏转范围形状的变化可以看出, 在贯入深度 0.2 m 处发生应力偏转的土体区域集中在锥尖周围及锥尖下部的土体中, 而在贯入深度达到 0.6 m 后, 土体应力偏转区域发生明显的变化, 土体应力偏转发生在锥体对称中心线两侧锥尖周围的土体, 并表现出对称性, 而锥尖正下方的土体不发生偏转。

取距对称中心线左侧 2 倍的锥尖半径水平距离且分别位于如图 2 所示地基的上部、中部和下部的特征点 5、17、29 分析静力触探贯入过程中土体的应力变化。图 12 为不同重力场下特征点处土体主应力偏转情况, 从图可以看出, 在静力触探贯入过程中, 不同重力场下锥体附近特征点处土体应力均发生较大偏转, 上部特征点处土体应力偏转角度可达到 180° 。重力加速度越小, 土体应力偏转角度的波动性就越大, 尤其是上部土体。

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, 在此仅对 $1/6g$ 重力场下的情况进行分析说明。图 13 为 $1/6g$ 重力场下特征点归一化的球应力和偏应力随贯入深度的变化趋势, 从图可以得出, 在静力触探的过程中特征点的归一化球应力和偏应力都表现出与归一化贯入阻力相似的变化规律, 先增加再减小, 最后在稳定值附近波动, 这一现象说明土体经历了先加载再卸载的应力过程。

图 14 为不同重力场下静力触探贯入过程中, 归一化球应力和偏应力的最大值与重力加速度倒数的关系。由图可以看出, 同一重力加速度下归一化球应力和偏应力的最大值随贯入深度的增加而减小; 不同重力加速度下对应相同相对位置的特征点的归一化球应力和偏应力的最大值随重力加速度倒数的增加而增大。这说明静力触探贯入过程中同一重力加速度上部土体的加、卸载现象比下部要明显; 重力加速度越小, 土体的加、卸载现象越明显。进一步分析图 14 可知, 不同重力场下归一化球应力和偏应力最大值大体都出现在特征点所在位置下 1 倍锥尖半径处。

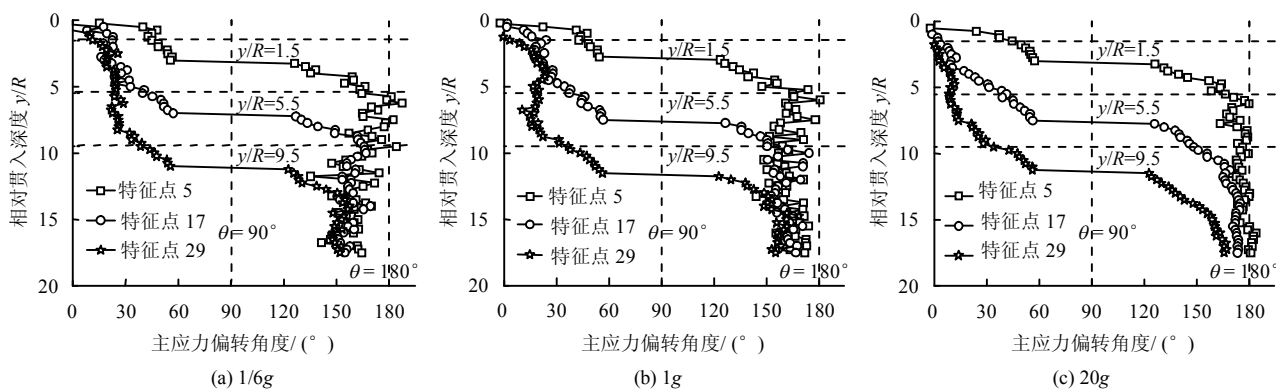


图 12 不同重力场下主应力偏转

Fig.12 Rotation of principal stresses under different accelerations

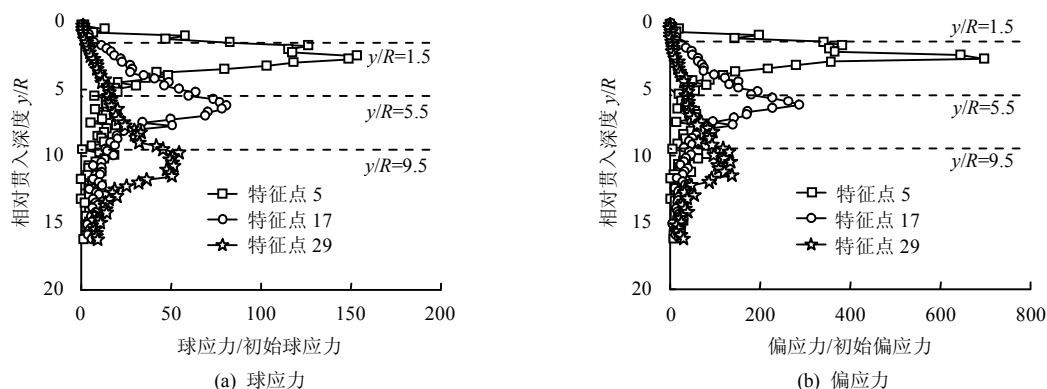


图 13 1/6g 重力场下归一化球应力(偏应力)

Fig.13 Normalized values of mean stress and deviatoric stress under 1/6 g gravity field

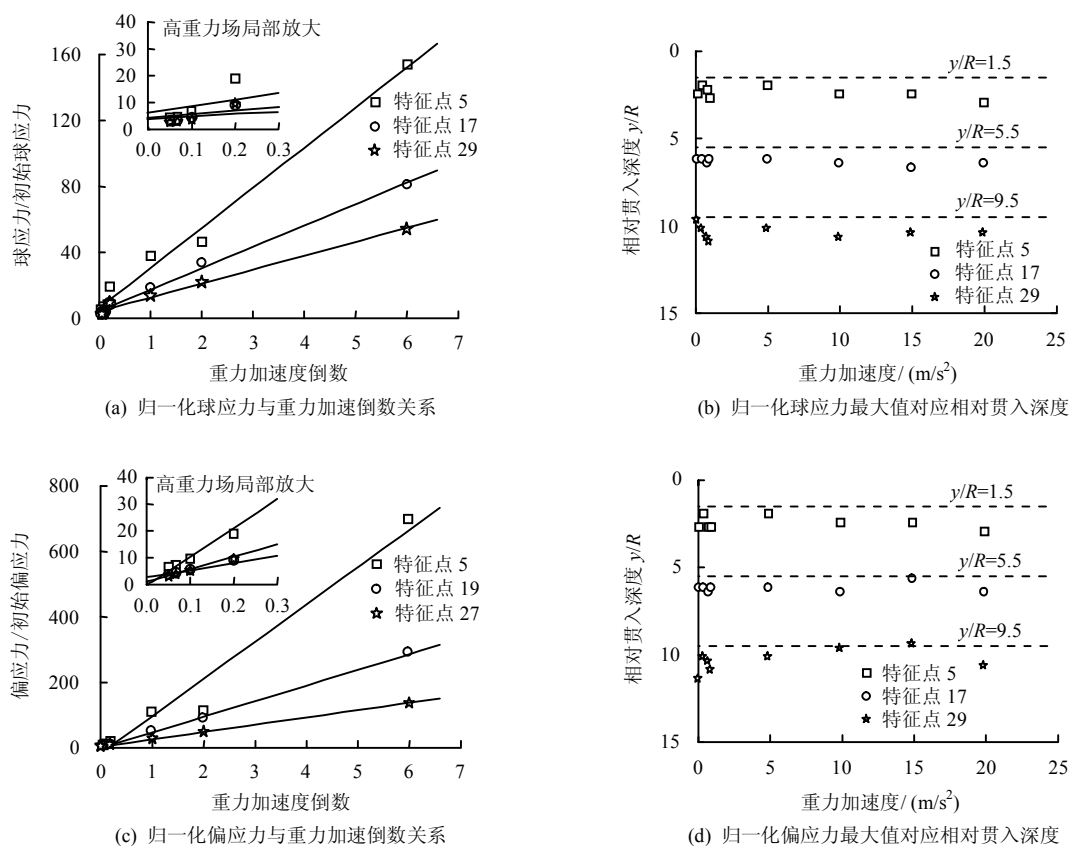


图 14 最大归一化球应力和偏应力与重力加速度关系

Fig.14 Relationships between the maximum normalized mean(deviatoric) stress and gravity acceleration

各特征点归一化球应力和偏应力最大值与重力加速度倒数的线性方程形式如下：

$$\left(\frac{p}{p_{\text{int}}}_{\text{max}} \right) = \frac{k_1}{a} + b_1 \quad (6)$$

$$\left(\frac{q}{q_{\text{int}}}_{\text{max}} \right) = \frac{k_2}{a} + b_2 \quad (7)$$

式中： $\left(\frac{p}{p_{\text{int}}}_{\text{max}} \right)$ 为归一化球应力最大值； $\left(\frac{q}{q_{\text{int}}}_{\text{max}} \right)$ 为

归一化偏应力最大值； k_1 、 b_1 为归一化球应力最大值对应的线性方程系数； k_2 、 b_2 为归一化偏应力最大值对应的线性方程系数。式 (6)、(7) 中的系数对应不同特征点的取值见表 3 特征点的 k_1 、 k_2 、 b_1 、 b_2 值。

表 3 特征点的 k_1 、 k_2 、 b_1 、 b_2 值

Table 3 k_1 , k_2 , b_1 , b_2 values of characteristic points

特征点	k_1	b_1	k_2	b_2
5	24.333 0	6.203 9	113.570 0	-16.048 0
19	12.976 0	4.450 4	47.747 0	-0.269 4
27	8.446 2	4.254 9	22.374 0	3.878 7

4.4 速度场

地基的速度场采用准静态速度场，为了区分速度的大小，以最大速度为基准将速度 7 等分，如图 15 所示。

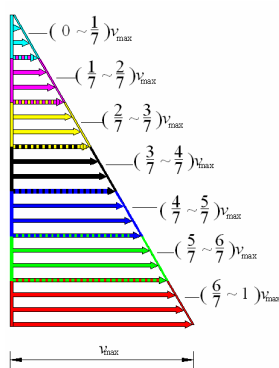
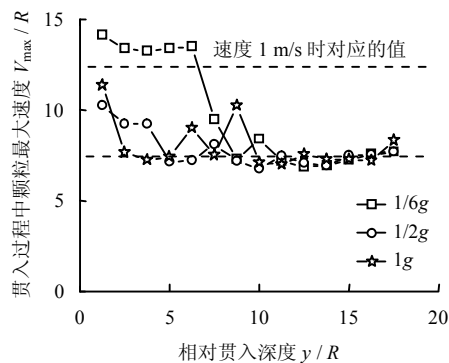


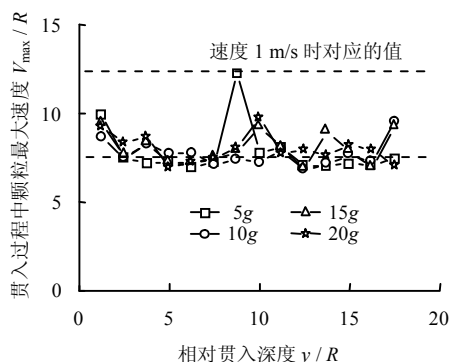
图 15 速度矢量颜色示意图

Fig.15 Representation of colours for velocity vector

图 16 为不同重力场下贯入过程中土体颗粒最大速度随贯入深度的变化趋势。从图中可以看出，初始贯入时，重力加速越小，颗粒的速度越大；随贯入深度的增加，不同重力加速度下土体颗粒最大速度大体都在 $V_{\text{max}}/R=7.5$ 上下波动，重力加速度越小，颗粒最大速度波动越小。



(a) 低重力场



(b) 高重力场

图 16 不同重力场下贯入过程中颗粒最大速度

Fig.16 Maximum velocities of particles during penetration process under different gravity fields

图 17 为不同重力场下地基的准静态速度场。地基准静态速度场中颗粒运动轨迹代表了在静力触探过程中地基破坏后土体颗粒的滑移轨迹，因此，速度场的形态可以反映地基的破坏范围。

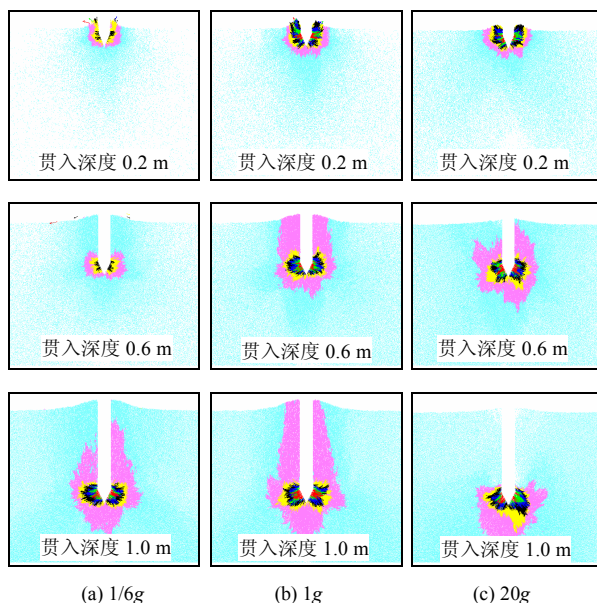


图 17 不同重力场下速度场

Fig.17 Velocity fields under different gravity fields

从图可以看出,不同重力场下地基的破坏范围不同,在 $1/6g$ 和 $1g$ 低重力场下地基的破坏范围随贯入深度增加的影响逐渐增大,主要的破坏区域集中在锥尖上部的土体直至地表范围内。在 $20g$ 高重力场下,贯入深度为 0.2 m 和 0.6 m 时土体破坏区域集中在锥尖上部的土体直至地表范围内;随贯入深度的增加贯入深度为 1.0 m 时破坏区域集中在锥尖下部土体。

5 结 论

(1) 重力场的大小对静力触探贯入过程中土体的变形有较大影响,地基上部土体发生隆起变形的程度和范围,低重力场下大于高重力场;地基下部土体的压缩变形程度和范围,高重力场大于低重力场。此外,不同重力场下土体的破坏区域有显著区别,低重力场下土体的破坏区域主要集中在锥尖上部的土体,而且延伸至地表;高重力场下土体的破坏区域主要集中在锥尖下部的土体。

(2) 贯入阻力随贯入深度的增加而增加,同一相对贯入深度处,重力加速度越大,贯入阻力越大;归一化贯入阻力随贯入深度的增大先增加再减小,最后达到稳定值,同一相对贯入深度处,重力加速度越大,归一化贯入阻力越小。

(3) 静力触探锥体附近土体主应力均发生较大偏转,最大偏转角度可到 180° ,上部土体的主应力偏转区域低重力场大于高重力场,下部土体的主应力偏转区域高重力场大于低重力场,且主应力偏转区域表现出沿锥体对称中心线的对称性。

(4) 归一化贯入阻力的最大值和稳定值均与重力加速度倒数呈线性关系,随重力加速度的增加而减小。归一化球应力和归一化偏应力的最大值也均与重力加速度倒数呈线性关系。重力加速度越大,归一化球应力和归一化偏应力的最大值越小;同一重力加速度下,相对贯入深度越深,归一化球应力和归一化偏应力的最大值越小。

本文得到归一化贯入阻力的最大值和稳定值及归一化球应力和偏应力的最大值与重力加速度倒数呈线性关系,从而使得高重力场下 CPT 试验规律可推广应用于低重力场。考虑月壤颗粒间范德华力的影响,进一步模拟月面真实环境将是以后研究的重点。

参 考 文 献

- [1] SANDERS G B, LARSONS W E. Intergration of in-situ resource utilization into Lunar/Mars exploration through field analogs[J]. *Advances in Space Research*, 2011, 47: 20—29.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] GADRE A D, CHANDRASEKARAN V S. Swelling of black cotton soil using centrifuge modeling[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 1994, 120(5): 914—922.
- [5] TEI K, TAYLOR R N, MILLIGAN G W E. Centrifuge model tests of nailed soil slopes[J]. *Soils and Foundations*, 1998, 38(2): 165—177.
- [6] LAU M, JONES S J, PHILLIPS R. Effects of sample size, centrifugal acceleration and brine inclusions on the elastic modulus of sea ice[J]. *Journal of Glaciology*, 2008, 54(186): 412—420.
- [7] BOLTON M D, GUI M W, GARNIER J, et al. Centrifuge cone penetration tests in sand[J]. *Geotechnique*, 1999, 49(4): 543—552.
- [8] 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.
- [9] 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, Japan: [s. n.], 2005: 1—9.
- [10] 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: 115—124.
- [11] COSTES N C, COHRON G T, MOSS D C. Cone penetration resistance test—an approach to evaluating in-place strength and packing characteristics of lunar soils[C]//Proceedings of the Second Lunar Science Conference. Houston: [s. n.], 1971: 1973—1987.

- [12] MITCHELL J K, HOUSTON W N, SCOTT R F, et al. Mechanical properties of lunar soil: Density, porosity, cohesion, and angle of internal friction[C]//Proceedings of the Third Lunar Science Conference. Houston: [s. n.], 1972: 3235—3253.
- [13] GUI M W, BOLTON M D. Geometry and scale effects in CPT and pile design, in geotechnical site characterization[M]. Rotterdam: Balkema, 1998: 1063—1068.
- [14] JIANG M J, KONARD J M, LEROUÉIL S. An efficient technique for generating homogeneous specimens for DEM studies[J]. **Computers and Geotechnics**, 2003, 30(7): 579—597.
- [15] 尚岳全. 岩体稳定和区域稳定数值模拟模型边界条件确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 201—204.
- SHANG Yue-quan. The ways of determining boundary conditions in geomechanical numerical simulation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18 (2): 201—204.
- [16] GUI M W, BOLTON M D, GARNIER J, et al. Guidelines for cone penetration tests in sand[C]//Centrifuge 98. Rotterdam: Balkema, 1998: 155—160.
- [17] JIANG M J, YU H S, HARRIS D. Discrete element modelling of deep penetration in granular soils[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2006, 30: 335—361.
- [18] 高大钊. 土力学与基础工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.

《岩土力学》2013年第1期被EI收录论文(42篇, 收录率100%)

序号	论文题名	作者	页码
1	筑坝土石料的变参数 Ramberg-Osgood 模型及其适应性研究	迟世春, 陈崇茂, 贾宇峰	1—5
2	主应力方向和偏应力比对 TJ-1 模拟月壤各向异性的影响	蒋明镜, 李立青, 刘芳, 等	6—12
3	不同因素影响下层间错动带颗粒破碎和剪切强度特性试验研究	赵阳, 周辉, 冯夏庭, 等	13—22
4	膨胀性硅藻土的力学性质及其灾害效应研究	张永双, 郭长宝, 曲永新, 等	23—30
5	断续三裂隙砂岩强度破坏和裂纹扩展特征研究	杨圣奇	31—39
6	土结构强度模型研究	卫振海, 王梦恕, 张顶立	40—46
7	上海黏土强度特性真三轴试验研究	盛佳韧, 武朝军, 叶冠林, 等	47—52
8	考虑桩基弱化的导管架平台横向振动特性试验研究	钟超, 毛东风, 段梦兰, 等	53—59
9	含天然气水合物沉积物损伤统计本构模型	吴二林, 韦昌富, 魏厚振, 等	60—65
10	泥质膨胀岩崩解物粒径分布与膨胀性关系试验研究	张巍, 尚彦军, 曲永新, 等	66—72
11	土压平衡盾构掘进参数关系及其对地层位移影响的试验研究	魏新江, 周洋, 魏纲	73—79
12	粉性土毛管水的力学和工程特性	吴世余, 余金煌	80—84
13	植被作用下膨胀土渗透和力学特性及埝坡防护机制	李雄威, 孔令伟, 郭爱国	85—91
14	岩溶区嵌岩桩承载特性影响因素试验研究	张慧乐, 马凛, 张智浩, 等	92—100
15	平面应变条件下粗粒土的变形特性试验研究	施维成, 朱俊高, 张坤勇, 等	101—108
16	重塑硅藻土抗剪强度的环剪试验研究	郭长宝, 张永双, 孟庆伟, 等	109—114
17	处置库污泥工程特性测试研究	冯源, 罗小勇, 林伟岸, 等	115—122
18	麦秸秆布筋区域与截面形状下的加筋土抗剪强度	柴寿喜, 王沛, 王晓燕	123—127
19	非饱和土土-水特征曲线预估方法研究	陈辉, 韦昌富, 陈芳芳, 等	128—132
20	水泥改良高液限黏土动态回弹模量试验研究	董城, 冷伍明, 李志勇, 等	133—138
21	弱胶结孔隙介质渗透注浆模型试验研究	钱自卫, 姜振泉, 曹丽文, 等	139—142
22	英标和国标贯设备试验结果相关性分析	廖先斌, 郭晓勇, 杜宇	143—147
23	黏性土的非极限主动土压力计算方法研究	徐日庆, 廖斌, 吴渐, 等	148—154
24	砂土地基斜桩水平承载特性 p - y 曲线法	凌道盛, 任涛, 王云岗	155—162
25	基于矩张量的深埋隧洞岩爆机制分析	明华军, 冯夏庭, 陈炳瑞, 等	163—172
26	背景值优化的多变量灰色模型在路基沉降预测中的应用	刘寒冰, 向一鸣, 阮有兴	173—181
27	柳家凹黄土滑坡滑动机制研究	姚海林, 游慧杰, 范永丰, 等	182—188
28	多参数岩体结构面优势分组方法研究	徐黎明, 陈剑平, 王清	189—195
29	西江特大桥岩锚锚碇的承载特性研究	刘秀敏, 陈从新, 肖国峰, 等	196—202

(未完, 见第 880 页)