

DOI: 10.11779/CJGE2024S10020

颗粒材料堆积体的基底压力分布试验研究

王子元¹, 莫品强^{1, 2}, 胡 静^{*2}, 赵子露¹, 肖 琼³

(1. 中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 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;
3. 安徽科技学院建筑学院, 安徽 滁州 233100)

摘要: 针对颗粒材料堆积体的压力下降问题, 研究了点沉积法下不同漏斗高度、颗粒粒径和颗粒形状对基底压力分布的影响。结果显示, 基底压力下降现象与内部应力拱有关, 且与漏斗高度、颗粒粒径和颗粒形状相关。随着堆积体质量的增加, 应力拱稳定性增强, 应力凹陷比趋于稳定。漏斗高度距堆顶距离越大, 测得的基底压力越大, 应力凹陷程度越小。堆积体应力凹陷比随颗粒粒径的增加, 呈现先增加后减少的趋势, 并在粒径 0.6~1.18 mm 的堆积体中出现了应力集中现象。随着堆积体质量的增加, 标准砂试样的应力凹陷比先增加后减小, 而散煤则是一致下降。

关键词: 堆积体; 基底压力; 点沉积法; 应力凹陷比

中图分类号: TU441 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S1-0158-06

作者简介: 王子元(2000—), 男, 山东淄博人, 硕士研究生, 主要从事静力触探等方面的研究工作。E-mail: TS23030060A31LD@cumt.edu.cn。

Experimental study on base pressure distribution of accumulations of granular materials

WANG Ziyuan¹, MO Pinqiang^{1, 2}, HU Jing², ZHAO Zilu¹, XIAO Qiong³

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key

Laboratory for GeoMechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116 China;

3. Anhui University of Science and Technology College of Architecture, Chuzhou 233100, China)

Abstract: Addressing the issue of pressure reduction in accumulations of granular materials, the impact of varying funnel heights, particle sizes and particle shapes on the distribution of base pressure is investigated utilizing the point deposition method. The results show that the phenomenon of base pressure reduction is intricately linked to the formation of internal stress arches and influenced by the factors such as the height of the funnel, granulometry of the particles, and morphological characteristics of the granules. With the increase of the accumulations, there is an enhancement in the stability of the stress arches, leading to a convergence towards a steady state of the stress depression ratio. The base pressure measured increases with the increase of the vertical distance from the funnel to the apex of the accumulations, resulting in a decrease of the stress depression. The stress depression ratio within the accumulations exhibits a trend of the initial increase followed by a decrease as the particle size escalates, with a notable occurrence of stress concentration in the accumulations comprised of particles ranging from 0.6 to 1.18 mm in diameter. With the increase in the mass of the accumulations, the stress depression ratio for the standard sand samples initially increases and then decreases, whereas for the loose coal particles, a consistent decline is observed.

Key words: accumulation; base pressure; point deposition method; stress depression ratio

0 引言

颗粒物质被视为固体、液体、气体之外的一种奇特物质形态, 其常常表现出一些奇特的物理现象。2005 年美国 *Science* 杂志将颗粒物质问题列为今后半个世纪重点关注的 125 个未知科学难题之一^[1]。颗粒物质在自然环境和工业生产中都是普遍存在的, 每一种颗粒物质都表现出特定的形态。颗粒物质材料的开采、储存以及处理是工业生产中必不可少的工艺环节, 这

些环节消耗了全球 10% 的能量^[2]。颗粒材料堆积体是一种常见的固体物质形态, 广泛应用于土工、矿山、建筑等领域。在实际工程中, 了解颗粒材料堆积体的基底压力分布对于设计和安全评估至关重要。基底压力分布的准确预测可以帮助理解颗粒材料在堆积体中的

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52178374); 广东省自然科学基金项目 (2024A1515011552); 徐州市基础研究计划项目 (KC2019)
收稿日期: 2024-04-28

*通信作者 (E-mail: TB22220013A41@cumt.edu.cn)

力学行为, 进而优化结构设计和预防可能的工程灾害。

在颗粒堆积体中, 存在着一个经典的颗粒原理问题, 称为“压力下降问题”, 它最早指基底上竖向压力分布异常的行为^[3]。这一现象在 Qiong 等^[4]采用沉积法的室内试验中得到了明显的观察, 基底压力显示在堆积体中心顶点下方有一个明显的下降, 峰值压力出现了偏移。这一现象引起了许多研究者的关注, 研究者认为这种现象取决于堆积体形成的方式。此外, 基底压力下降现象存在很多影响因素, 例如颗粒形状、沉积高度等。Vanell 等^[5]为探究不同砂堆形状对压力下降现象的影响, 对相同粒径分布的棱柱形砂堆进行了试验研究。Rotter 等^[3]探究基底挠度或基底变形对压力下降现象的影响, 发现基底挠度不是压力下降现象的必要条件, 但会影响压力下降程度, 挠度增加会导致基底压力下降程度及宽度的提升。

本文在前期研究成果的基础上, 进行颗粒堆积体室内模型试验。通过点沉积法的堆积方式, 采用标准砂和散煤两种试验材料, 探究颗粒堆积体的基底压力在不同的高度和粒径下的分布情况。

1 颗粒堆积体室内模型试验

1.1 试验仪器和试样准备

本试验采用的样品为标准砂和散煤颗粒, 标准砂的粒径大小在 2 mm 以下, 在进行点沉积法试验之前, 对试验所用试样的密度、颗粒级配、孔隙比等进行土工试验, 得到标准砂和散煤物理力学参数, 见表 1, 试验所用试样见图 1。

表 1 标准砂、散煤物理特性参数

Table 1 Physical property parameters of standard sand and coal

参数	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	平均粒 径/mm	不均匀 系数	最小孔 隙比	最大 孔隙比
标准砂	1.60	0.17	1.57	0.52	0.77
散煤	1.02	2.50	3.21	0.63	1.36



(a) 标准砂



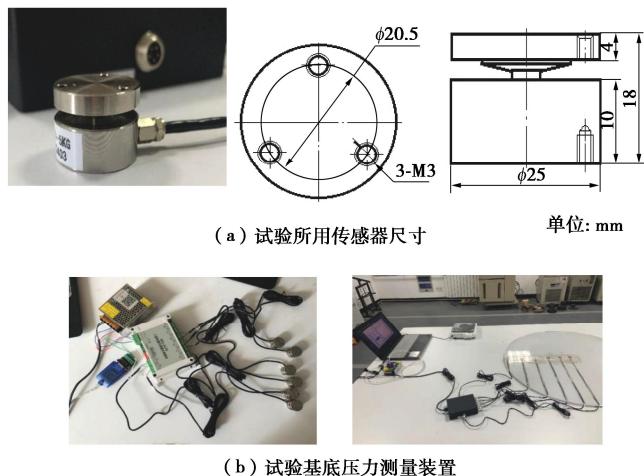
(b) 散煤

图 1 试验所用试样

Fig. 1 Samples used in tests

为测量基底压力分布规律, 需要使用灵敏度良好、准确性较高的传感器。本试验所用传感器为电阻应变片式传感器, 精度为 1 g, 量程为 0~5 kg, 对应的应力范围为 0~100 kPa, 可以准确测量堆积体底部压

力变化。传感器测量系统主要由传感器、传感器数据变送器和数据显示(笔记本电脑)组成, 传感器系统组成及显示界面见图 2。



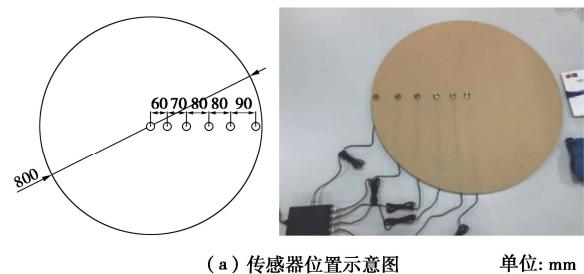
(a) 试验所用传感器尺寸 单位: mm

(b) 试验基底压力测量装置

图 2 试验所用压力传感器

Fig. 2 Pressure sensors used in tests

每组堆积试验在堆积体平面上进行, 因此需要在基底布置测量点, 压力传感器测量点见图 3。测量点以堆积体中心为圆心, 测量距离中心点 0, 6, 13, 21, 29, 38 cm 位置的受力, 共 6 个测量点。基底平面采用定制圆形有机玻璃平面, 半径为 40 cm。因传感器有一定高度, 为减少试样造成传感器侧向受力对竖向压力的影响, 需要传感器平面与基底平面齐平, 更为准确的测量基底压力, 定制时开孔并留有通道放置传感器连接线, 基底平面尺寸与传感器布置见图 3 所示。在传感器表面覆盖一层保鲜膜, 防止试样落入传感器内部影响其准确性。



(a) 传感器位置示意图 单位: mm



(b) 传感器放置示意图

图 3 基底平面压力传感器布置图

Fig. 3 Layout of base pressure sensors

由于压力传感器会有一定的漂移, 需要在试验开始之前用校验仪器对压力传感器进行校验和标定。标定使用 50 g 砝码, 确定压力传感器弹性系数。标定完成后利用 500, 300, 200, 100, 50 g 标准砝码校验, 当标定后的压力传感器误差不超过 2%, 可以认为压力传感器准确性较好。

1.2 点沉积法实验装置

图 4 为自制点沉积法试验装置图, 此试验装置由漏斗、可移动高度支架、主支架、堆积体平面组成, 为了减少基底与试样之间的摩擦, 选用材质水平并且光滑的有机玻璃作为堆积体平面, 点沉积法试验装置见图 4。

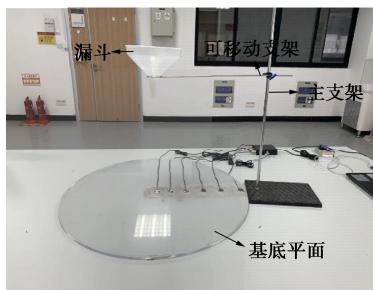


图 4 点沉积法试验装置

Fig. 4 Test devices for point deposition method

2 点沉积法试验方案

2.1 漏斗高度的影响

试验采用两种高度固定的方案进行试验: ①固定漏斗高度; ②漏斗随堆积体的形成向上移动, 始终与堆积体最高点保持一定距离。漏斗口内直径为 2.5 cm, 约为最大粒径的 10 倍。在重力作用下下落形成堆积体, 试验方案如表 2 所示。为确保准确性, 重复 4 组试验, 减少误差。

表 2 漏斗高度影响试验方案

Table 2 Test schemes for influence of funnel height

试验名称	试验材料	高度固定方案	距离/cm
试验 1-1	标准砂	漏斗口与基底平面	40
试验 1-2.1	标准砂		5
试验 1-2.2	标准砂	漏斗口与堆积体最高点	10
试验 1-2.3	标准砂		20

2.2 颗粒粒径的影响

使用标准筛筛分标准砂试样, 探究颗粒粒径对砂堆基底压力的影响, 试验选取 0.3~0.6, 0.6~1.18, 1.18~2.36 mm 的砂作为试验对象进行点沉积堆积试验, 见表 3。

2.3 颗粒形状的影响

为探究颗粒形状对堆积体力学特性的影响, 使用

标准砂颗粒与散煤颗粒代表不同颗粒形状, 标准砂颗粒形状较为均匀, 棱角度较低, 圆度较高, 而煤颗粒棱角度较高, 圆度较低。研究标准砂及散煤颗粒在点沉积法固定距离 40 cm 下堆积体力学特性差异, 探究颗粒形状对基底压力分布规律的影响。

表 3 颗粒粒径影响试验方案

Table 3 Test scheme of particle size influence

试验名称	试验材料	粒径/mm	高度固定方案
试验 2-1		0.3~0.6	
试验 2-2	标准砂	0.6~1.18	漏斗口距离基底平面 40 cm
试验 2-3		1.18~2.36	

试验 1~3 采用控制变量法, 探究漏斗高度、颗粒粒径和颗粒形状对堆积体的影响, 其中堆积体质量以记录不同质量堆积体数据实现, 颗粒质量累计 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 25 kg 记录堆积体数据, 见表 4。

表 4 颗粒形状影响试验方案

Table 4 Test schemes for influence of particle shape

试验名称	试验材料	高度固定方案	距离/cm
试验 3-1	标准砂		漏斗口与基底平面
试验 3-2	散煤		40

3 自由堆积试验结果分析

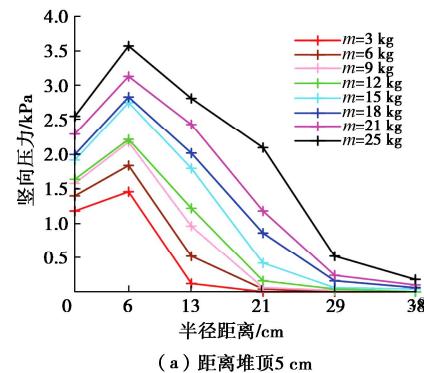
3.1 不同高度条件下基底压力分布

试验使用的电阻应变片式传感器, 由作用在传感器表面上的力通过压强计算原理得出各个传感器受到的竖向基底压力,

$$p = \frac{F}{S} = \frac{mg}{S} \quad \text{。} \quad (1)$$

式中, p 为基底竖向压力; F 为压力传感器表面受到的压力, $F=mg$; m 为压力传感器所测得的质量大小, g 为重力加速度, 取 9.8 m/s^2 ; S 为压力传感器受力表面有效面积, 每个压力传感器的有效面积约为 $5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ 。

图 5 是点沉积不同高度条件下基底压力分布随堆积体质量变化图。



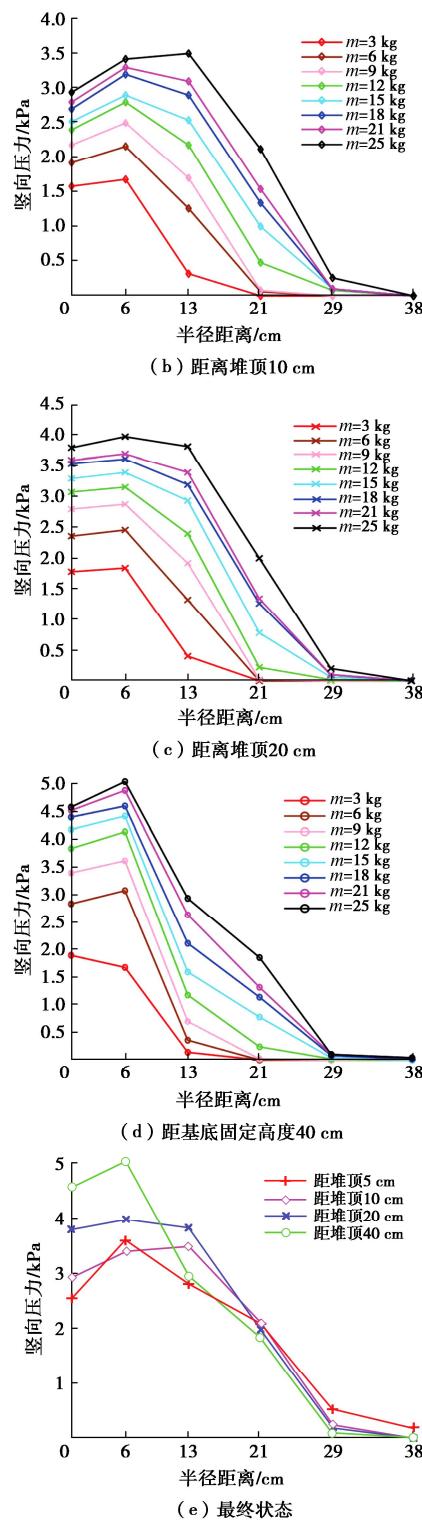


图 5 点沉积不同高度基底压力分布

Fig. 5 Base pressure distribution at different heights under point deposition

由图 5 可以看出点沉积法形成堆积体过程中均出现压力下降现象, 即出现应力拱效应。在堆积初期, 堆积体基底压力下降现象不明显, 随着堆积的进行, 堆积体质量增加, 压力下降现象显著。为了进一步量化压力下降的程度, 使用应力凹陷比来定义, 应力凹

陷比 η 定义为基底中心位置压力与基底最大压力的比值:

$$\eta = \frac{p_{\text{cnt}}}{p_{\text{max}}} \quad (2)$$

式中: p_{cnt} 为基底中心位置竖向压力; p_{max} 为基底最大竖向压力, 通过应力凹陷比来表示压力下降的程度, 凹陷比越小, 压力下降程度越大。

图 6 为应力凹陷比随堆积体质量变化图。由图 6 中可以看出, 应力凹陷比随堆积体质量的增加呈现下降趋势, 这说明堆积体质量越大, 压力下降程度越大, 应力拱越大; 对于距堆积体顶部保持一定距离形成的堆积体, 距离为 5 cm 形成的堆积体应力凹陷比最小, 压力下降程度最大, 且随堆积体质量的增加, 压力下降程度越大; 漏斗与基底保持固定距离 40 cm 条件下形成的堆积体, 在堆积体质量较小的时候, 未出现压力下降现象, 随着堆积体质量的累积, 开始出现压力下降现象, 并且应力凹陷比随堆积体质量的增加呈现先增加后降低的趋势, 但变化程度不大。

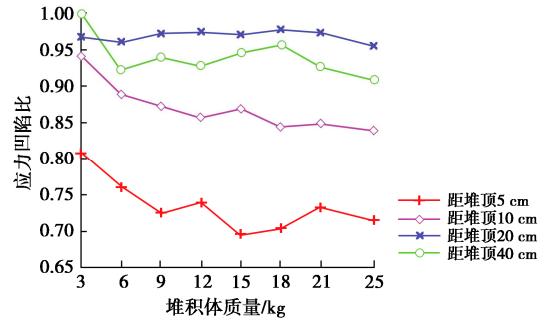


图 6 应力凹陷比随堆积体质量变化图

Fig. 6 Variation of stress depression ratio with accumulation mass

3.2 不同粒径条件下基底压力分布

为探究粒径对基底压力分布的影响, 对砂颗粒进行筛分, 采用点沉积法对 3 种不同粒径试样 (0.3~0.6, 0.6~1.18, 1.18~2.36 mm) 进行堆积体试验, 试验漏斗高度保持在距基底 40 cm。图 7 为点沉积法 3 种粒径基底压力分布随堆积体质量变化试验结果。

由图 7 中可以看出, 点沉积法不同粒径堆积体基底均出现压力下降现象, 且相同堆积体质量, 不同粒径基底中心竖向压力大小相似, 为进一步量化其压力下降程度, 利用式 (2) 计算不同粒径应力凹陷比。图 8 为点沉积法不同粒径堆积体应力凹陷比随堆积质量的变化。图 8 中, 不同粒径应力凹陷比均随堆积体质量的增加而减小, 并趋于稳定, 说明随着堆积的进行, 压力下降程度增大, 应力拱效应变大。粒径在 0.3~0.6 mm 的堆积体应力凹陷比最小, 堆积体质量大于 6 kg 后粒径在 0.6~1.18 mm 的堆积体应力凹陷比最大, 可

以推测堆积体应力凹陷比随粒径的增加呈现先增加后减少的趋势。

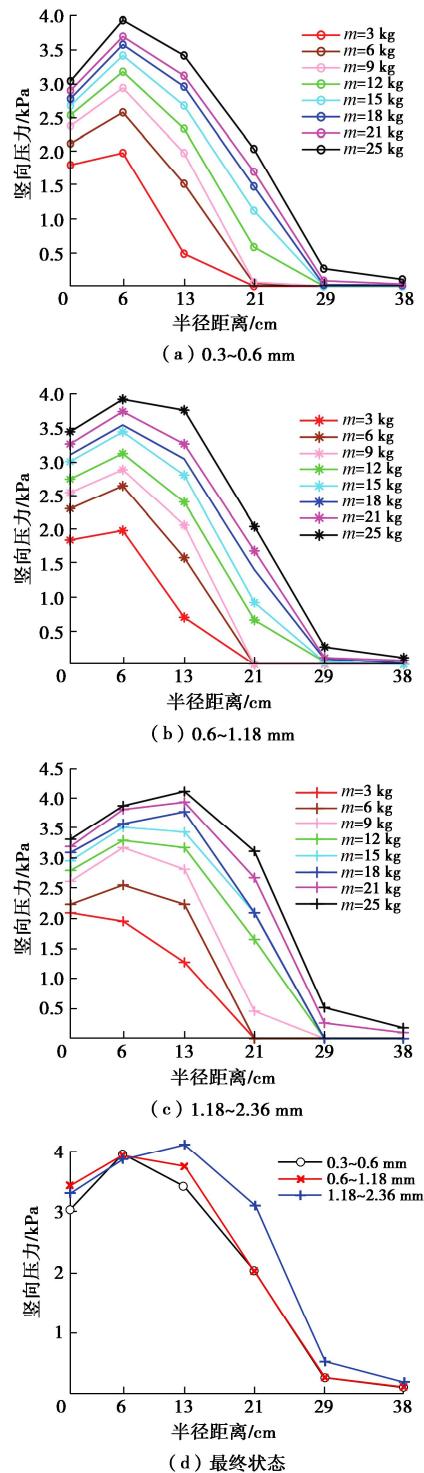


图 7 点沉积法不同粒径基底压力分布

Fig. 7 Base pressure distribution of different particle sizes by point deposition method

3.3 不同颗粒形状条件下基底压力分布

为探究颗粒形状对基底压力分布的影响, 进行了标准砂试样与散煤试样在距基底 40 cm 点沉积法堆积试验, 图 9 (a) 为散煤颗粒在点沉积法堆积基底压力

分布, 图 9 (b) 为散煤与标准砂两种试样最终状态基底压力分布。

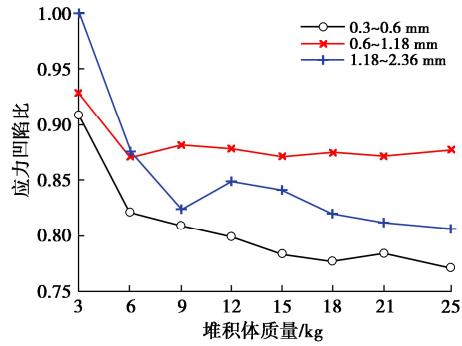


图 8 点沉积法不同粒径堆积体应力凹陷比

Fig. 8 Stress depression ratios of accumulations with different particle sizes

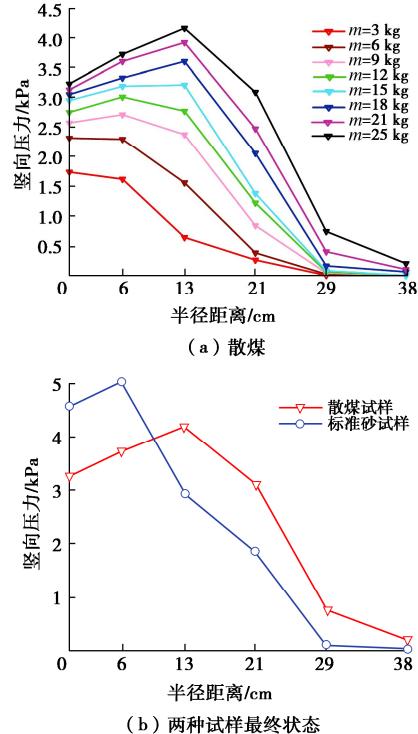


图 9 点沉积基底压力分布

Fig. 9 Base pressure distribution in point deposition

由图 9 (a) 可以看出, 散煤颗粒堆积体较小时 (小于 6 kg), 未出现压力下降现象, 随着堆积体质量的增加, 出现基底压力下降现象。图 9 (b) 最终状态应力分布中可以看出标准砂试样应力拱半径比散煤小, 散煤试样应力拱峰值压力位置往外偏移较大, 且标准砂试样峰值压力比散煤堆积体大。为了进一步量化压力下降的程度, 比较其应力凹陷比, 图 10 为不同试样基底压力凹陷比随堆积体质量变化图。

在图 10 中, 标准砂试样应力凹陷比随堆积体质量增加先下降后趋于平稳, 而煤颗粒应力凹陷比随堆积体质量的增加而呈现出下降趋势。这主要是由于颗粒

形状的不同导致, 标准砂颗粒形状均匀, 随着堆积体自重的增加, 孔隙率稍有减少, 应力拱强度趋于平稳。煤颗粒形状不规则, 棱角度较高, 其摩擦作用也较大, 在堆积体形成时产生较大孔隙, 随着堆积体质量的增加, 荷载作用下颗粒转动接触更加密实, 堆积体内部孔隙变小, 颗粒接触面增多, 接触力增大, 从而应力拱强度不断变大。

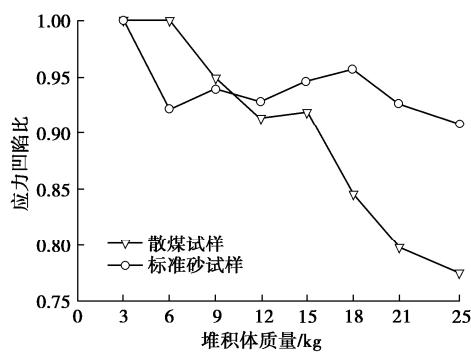


图 10 点沉积法不同试样应力凹陷比

Fig. 10 Stress depression ratios of different samples by point deposition method

4 结 论

本文进行颗粒堆积体室内模型试验, 对标准砂试样进行室内自由堆积试验, 用点沉积法的堆积方式, 采用标准砂和散煤两种材料, 4 种不同高度条件, 3 种不同粒径试样, 对基底压力分布进行测量, 探究基底压力分布影响因素。得出 3 点结论。

(1) 压力下降现象与堆积体内部出现应力拱有关, 应力凹陷比随堆积体质量的增加而下降, 后趋于稳定; 点沉积距底固定距离 40 cm 条件下的基底压力最大, 且应力拱半径最小; 距堆顶距离越大, 测得的基底压力越大, 应力凹陷程度越小, 应力凹陷程度越低。

(2) 压力下降现象也与颗粒粒径有关, 颗粒粒径在 0.3~0.6 mm 的堆积体应力凹陷比最小, 堆积体应力凹陷比随粒径的增加呈现先增加后减少的趋势。颗粒粒径在 0.6~1.18 mm 的堆积体在基底中心附近区域出现了应力集中现象, 且应力拱半径最小。

(3) 压力下降现象也与颗粒形状有关, 标准砂形成的应力拱半径较小, 而散煤试样形成的应力拱峰值压力位置向外偏移较大, 其峰值压力小于标准砂试样。标准砂试样的应力凹陷比随着堆积体质量的增加先是下降后趋于稳定, 而散煤颗粒则显示出一致的下降趋势。

参考文献:

- [1] NORMAN D, COLIN K. 125 question: what don't we know?[J]. Science, 2005, **309**(5731): 75.
- [2] 陆坤权, 刘寄星. 颗粒物质交通流与颗粒流[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2004. [J]. (LU Kunquan, LIU Jixing. Particulate Matter Traffic Flow and Particle Flow[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2004. (in Chinese))
- [3] ROTTER J, AI J, OOI J, et al. Progressive pressure measurements beneath a granular pile with and without base deflection[M]// Structures and Granular Solids. Taylor & Francis, Royal Soc Edinburgh, Edinburgh, Scotland, 2008: 87-92.
- [4] QIONG X. The Loading Path Dependence of Sand Constitutive Behaviour and Its Relationship with Pressure Dip in Sand Piles[D]. Nottingham: University of Nottingham, 2017.
- [5] VANEL L, HOWELL D, CLARK D, et al. Memories in sand: experimental tests of construction history on stress distributions under sandpiles[J]. Physical Review E, 1999, **60**(5): 5040-5043.

(编校: 胡海霞)