

# 各向异性砂土主动土压力的离心模型试验研究

刘超, 宋飞, 张嘎, 张建民

(清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 利用新研制的土压力离心模型试验设备, 通过土压力盒测量作用在挡土墙上的土压力分布, 利用非接触图像测量系统(GIPS)测量土体位移, 对各向异性的南京云母砂分别进行沉积面铅直和水平两个方向的土压力离心模型试验。通过对比试验得到的土压力分布与理论公式计算得到的各向同性砂土土压力分布, 以及两种沉积方向的砂土的滑裂面位置, 对各向异性砂土的土压力及土体变形破坏问题进行初步研究。结果表明: 随着挡土墙向远离墙后填土方向运动的位移不断增大, 作用在挡土墙上的土压力逐渐减小, 墙后填土中各点的位移不断增大, 在墙后土体中逐渐形成滑裂面。当挡土墙的位移量达到  $10^{-3}H$ ( $H$  为试样模型高度)时, 墙后填土达到主动极限平衡状态。受到片状云母颗粒排列方向的影响, 沉积面铅直的土体滑裂面比沉积面水平的滑裂面略显平缓。

**关键词:** 土力学; 各向异性; 主动土压力; 离心模型试验; 挡土类结构物

**中图分类号:** TU 432

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2009)增 1 - 3201 - 06

## CENTRIFUGE MODEL EXPERIMENTAL STUDY ON ACTIVE EARTH PRESSURE OF ANISOTROPY SANDY SOILS

LIU Chao, SONG Fei, ZHANG Ga, ZHANG Jianmin

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Centrifugal model tests on Nanjing micaceous sand in both vertical and horizontal orientations are conducted. The distribution of earth pressure is recorded by the pressure transducers, and the soil displacements are obtained by the new image-analysis-based displacement-measurement system(GIPS). The effect of anisotropy and deformation of sand soils are investigated by comparing the earth pressure distribution recorded by the tests and that calculated by theoretical formula of isotropic sand soils, also by comparing the sliding surface of the backfill with those of horizontally and vertically orientated micaceous sands. The results show that the earth pressure acting on the retaining wall decreases, and the displacements of the backfill increase when the retaining wall moves away from the backfill. The sliding surface gradually appears with the increasing displacements of the backfill. The backfill reaches active limit state when the displacement of the retaining wall gets to  $0.001H$ ( $H$  is the height of sample model). The sliding surface of the backfill of horizontally orientated micaceous sand is steeper than that of the backfill of vertically orientated micaceous sand.

**Key words:** soil mechanics; anisotropy; active earth pressure; centrifugal model test; retaining structure

## 1 引言

土压力问题是土木工程中一个广泛存在的重要

问题。在房屋桥梁的地基基础、挡土墙以及护坡等许多工程的设计过程中, 土压力都是必须被考虑的指标之一。自从 Coulomb(1776)和 Rankine(1857)提出了著名的土压力理论以来, 有关土压力的理论和

**收稿日期:** 2009 - 02 - 18; **修回日期:** 2009 - 03 - 09

**基金项目:** 教育部博士点基金项目(20070003086)

**作者简介:** 刘超(1986 - ), 男, 2004年毕业于清华大学水利水电工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: c-liu04@mails.tsinghua.edu.cn

应用研究就成为了土力学和岩土工程领域的一个基本课题。在这之后，许多学者在经典土压力理论的基础上作了很多研究工作，不断地完善极限状态下的土压力计算方法。Terzaghi(1943, 1967)将 Coulomb 理论的平面滑动面改为平面与对数螺旋曲面的组合滑动面，用图解法求解了被动土压力，较 Coulomb 理论的被动土压力更为合理。M. A. Sherif 等<sup>[1]</sup>研究了作用在刚性挡土墙上的土压力。Y. S. Fang 等<sup>[2-6]</sup>通过试验研究了 3 种挡土墙位移模式下的土压力问题，验证了 3 种位移模式下土压力的分布形状和大小都不相同。陈页开等<sup>[7-9]</sup>对刚性挡土墙的主动土压力问题同时进行了试验研究和数值计算，得到了相类似的结果。梅国雄和宰金珉<sup>[10]</sup>通过离心模型试验的验证，提出了考虑变形的 Rankine 土压力模型。徐日庆等<sup>[11]</sup>提出了考虑平动位移效应的刚性挡土墙土压力理论，建立了内外摩擦角与位移之间的关系式，得到考虑位移效应的非极限状态土压力计算公式。路德春等<sup>[12]</sup>给出了平面应变条件下的极限土压力计算方法，使得计算结果更接近于实测值。

目前对土压力已经有很多相关研究，但还没有很好地解决各向异性砂土的土压力问题。而在实际工程中遇到的土体通常都是各向异性介质。墙后填土由于沉积、固结和碾压的长期作用，重力垂直于沉积面方向，使得土颗粒的长轴具有一定的定向排列方式，水平和铅直两个方向的强度和变形特性不同，从而具有各向异性的性质。经典的土压力理论都假定墙后填土为各向同性介质，没有考虑填土的各向异性对土压力和土体滑裂面的影响，这就对挡土类结构物的设计造成了一定影响。

本文利用研制的土压力离心模型试验设备，在 50 g 的条件下，分别进行了各向异性砂土沉积面铅直和水平两个方向的主动土压力离心模型试验。通过试验研究了作用在挡土墙上的主动土压力分布规律，并将试验结果与理论公式计算的各向同性砂土土压力分布规律进行了比较。同时分析了达到主动极限平衡状态时，两种不同沉积方向各向异性砂土内部形成的滑裂面性质，并对比了两个滑裂面的位置。

## 2 试验设备

试验采用清华大学岩土工程研究所 TH - 50 g -

tons 土工离心机设备<sup>[13]</sup>以及相配套的数据采集系统和土体位移非接触图像测量系统(GIPS)<sup>[14]</sup>。本试验在 50 g 的离心加速度条件下进行，所用模型箱的内部尺寸为 500 mm×200 mm×350 mm(长×宽×高)。

本试验新研制了土压力离心模型试验设备(见图 1)。该设备分为 3 个部分，分别为控制部分、机械部分和数据测量部分。

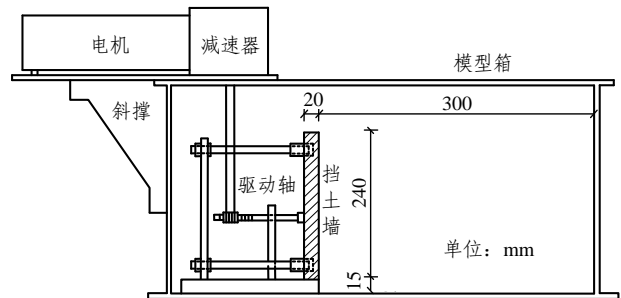


图 1 土压力离心模型试验设备

Fig.1 Centrifugal model test equipment of earth pressure

### 2.1 控制部分

控制部分的主要作用是在试验过程中控制挡土墙的位移，包括：(1) 在离心加速度从(1~50) g 的过程中，挡土墙保持静止，从而保证土体的静止状态。(2) 在 50 g 的稳定条件下，使挡土墙缓慢地向远离墙后填土的方向平动。保持挡土墙静止以及驱动挡土墙运动的驱动力来自于电机(见图 2)。

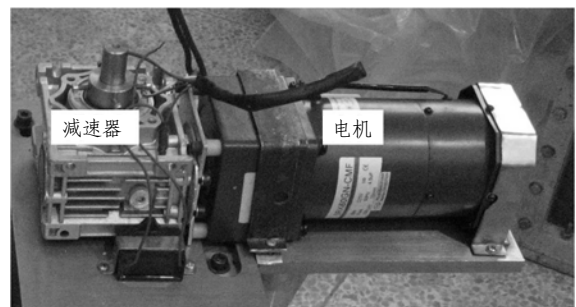


图 2 电机及减速器

Fig.2 Motor and reducer

在离心加速度从(1~50) g 的过程中，为了保持挡土墙的静止状态，采用了挡土墙位移自动控制系统。该系统利用伺服控制原理，当高精度位移传感器检测到挡土墙向某个方向运动了一定位移量(预先设定好的阈值)时，电机自动开启反方向的运动，使挡土墙立即回到初始位置。

在 50 g 的离心加速度条件下，为了使电机的转

速足够慢, 在电机上增加了一个蜗轮减速器, 使电机的转速降低为 0.02 r/min。在这一转速下, 挡土墙既不会因为运动得太快而使墙后填土来不及变形, 造成挡土墙与墙后填土脱离开, 测不到准确的土压力值, 也不会因为运动得太慢而使墙后填土有足够的时间重新固结。

### 2.2 机械部分

机械部分(见图 3)是整个土压力离心模型试验设备的核心部分。模型挡土墙尺寸为 20 mm×198 mm×240 mm(厚×宽×高)(见图 4)。开动电机, 使其相连接的驱动轴(见图 1)转动。驱动轴和与挡土墙刚性连接的齿条之间通过齿与齿相互咬合的方式连接。所以当驱动轴转动时, 就会带动齿条以及挡土墙在底板上向前或者向后运动。

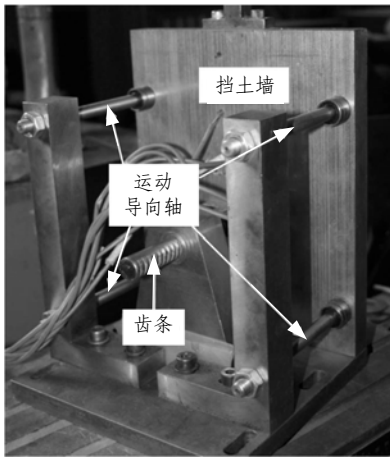


图 3 挡土墙运动子系统

Fig.3 Moving subsystem of retaining wall

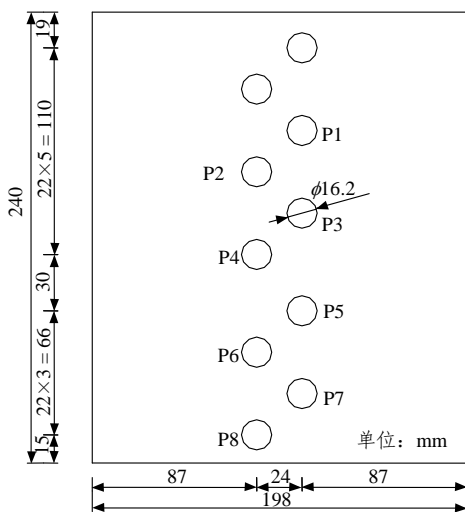


图 4 挡土墙示意图及土压力盒布置

Fig.4 Sketch of retaining wall and layout of earth pressure transducers

为了使挡土墙在 50 g 离心加速度条件下能保持平动, 在挡土墙背面的 4 个角上安装了 4 根用于运动导向的轴(见图 3)。4 根运动导向轴很好地把挡土墙的运动限制在了一维方向上。

### 2.3 测量部分

通过测量部分, 可以获取在试验中需要得到的一些数据, 包括挡土墙位移、作用在挡土墙上的土压力以及某些时刻土体侧表面的照片等。为了获取这些数据, 在本试验中采用了位移传感器、8 个土压力盒(见图 4)以及非接触图像测量系统(GIPS)。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 试验材料及模型

试验土样为各向异性南京云母砂, 最大和最小干密度分别为 1.411 0 和 0.976 6 g/cm<sup>3</sup>。沉积面铅直的砂土试样内摩擦角为 36.5°, 沉积面水平的砂土内摩擦角为 39.1°。通过三轴试验, 可以得到两种不同沉积方向的砂土试样的应力差 - 轴向应变以及体应变 - 轴向应变关系, 如图 5 所示。从图中可以明显

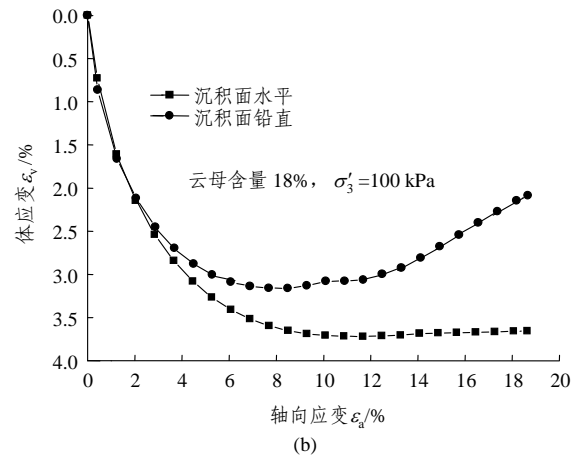
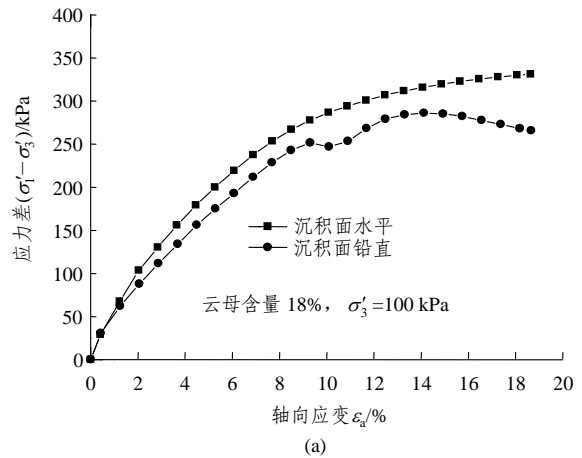


图 5 三轴试验中南京云母砂的应力 - 应变关系

Fig.5 Strain-strain relationships of Nanjing micaceous sand in triaxial tests

看到，南京云母砂具有比较明显的各向异性力学性质。

制样时采用空气中砂雨法，控制土样的相对密度为 63%。试样模型尺寸为 30 cm×20 cm×20.5 cm (长×宽×高)。为了比较各向异性砂土不同沉积方向的土压力，本文分别进行砂土沉积面铅直和水平两个方向的试验。

### 3.2 各向同性砂土的理论土压力分布

为了比较各向异性砂土的土压力分布，利用理论公式计算得到各向同性砂土的土压力。通过 Jacky 公式  $K_0 = 1 - \sin\phi$  可以得到静止土压力分布；通过 Rankine 和 Coulomb 土压力理论，可以得到主动土压力理论值，如图 6 所示。

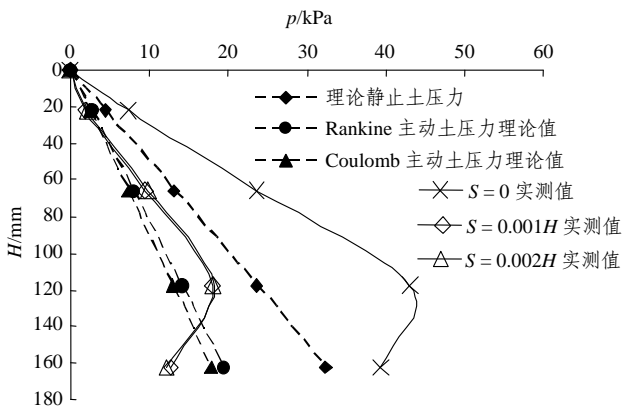


图 6 沉积面铅直土体在挡土墙运动条件下的土压力  
Fig.6 Earth pressures of vertically orientated sand under condition of moving retaining wall

### 3.3 不同沉积方向的土压力试验

对于沉积面铅直的试样，其所受到的大主应力平行于沉积面。图 6 中同时给出了当挡土墙向主动极限平衡状态一侧运动的位移分别为 0, 0.001H, 0.002H(H 为试样模型高度)时，作用在挡土墙上的土压力分布情况。

从图 6 中可以看到，当挡土墙位移分别为 0.001H 和 0.002H 时，二者的土压力分布曲线几乎重叠在一起，各测点土压力都达到了一个稳定值。根据各点土压力的变化趋势也能发现，当挡土墙位移超过 0.001H 之后，土压力的减小趋势变缓。这说明当位移达到 0.001H 时，作用在挡土墙上的土压力已经接近或基本达到主动土压力。

将图 6 中实测的各向异性砂土土压力与理论计算的各向同性砂土土压力进行比较可以发现，二者之间有一些差别，但基本规律是一致的，沿挡土墙

从上至下，土压力值逐渐增大。而在挡土墙靠下部分，实测得到的土压力值又逐渐变小。最大土压力大致出现在深度为 120 mm 的地方。出现这一规律的原因可能是由于墙后填土受到模型箱底部的摩擦，在挡土墙的底部附近形成了土拱效应，从而使这一部分的土压力值减小。用 Jacky 公式计算得到的静止土压力分布与实测值有一些差别，说明 Jacky 经验公式对这种各向异性的南京云母砂不适用。

为了分析挡土墙运动过程中的土体位移，在墙后填土中从上到下布置 4 排位移分析点(见图 7)，并选取挡土墙位移为 0.001H 和 0.002H 两种情况分析土体的水平向位移，结果见图 8。

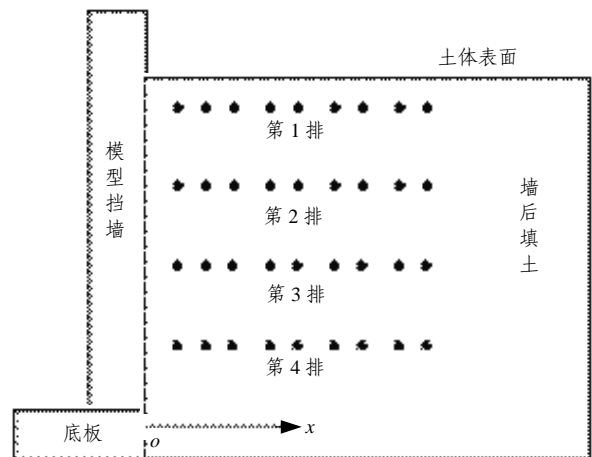
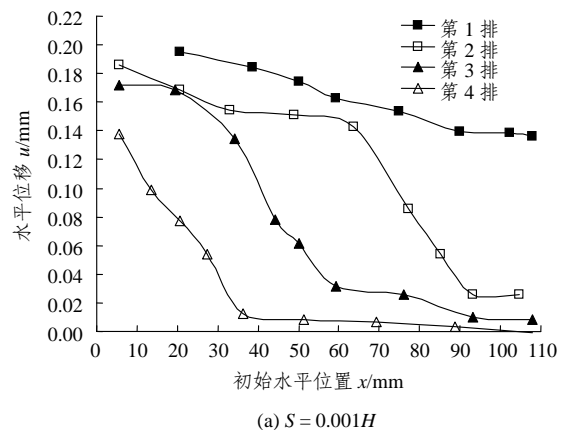


图 7 土体位移分析点布置图  
Fig.7 Layout of points for earth displacement analyses

从图 8 可以看出，随着挡土墙位移的增大，土体内各点的水平位移也在不断增加，越靠近挡土墙，位移量越大。当挡土墙位移为 0.001H 时，每一排分析点的水平位移曲线中都出现了一个非常明显的位移突变段。间隔同样距离的几个点相比较，在位移突变段内各点的水平位移差别明显比不



(a) S = 0.001H

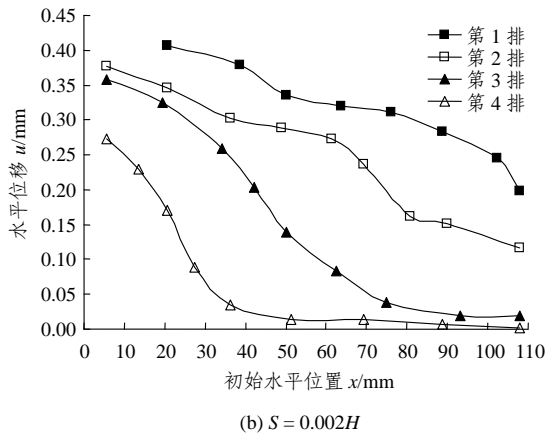


图 8 沉积面铅直土体水平位移

Fig.8 Horizontal displacements of vertically orientated sand

在这一段内的点大。此位移突变段所在的位置就是在土体中形成的滑裂面穿过的区域。

在各排分析点的位移曲线上, 位移突变段所在位置都不相同。第 4 排分析点的突变段最靠近挡土墙, 第 3 排次之, 第 1 排的突变段距离挡土墙最远。这一规律正好与在土体中形成的滑裂面斜穿土体相符合, 即当土体达到主动极限平衡状态时, 在土体中形成的滑裂面是一个斜面, 滑裂面与挡土墙之间的滑楔体呈倒三角。

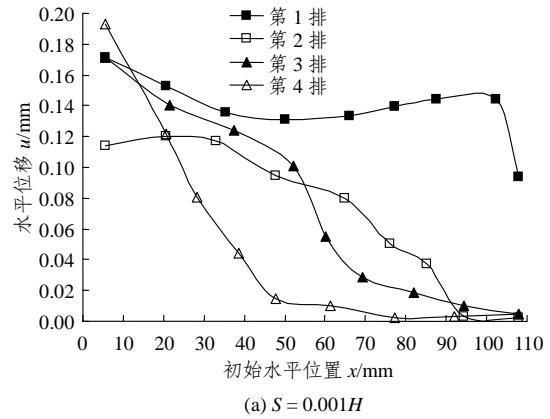
挡土墙位移达到 0.001H 时, 每一排分析点都有这样的位移突变段, 说明滑裂面已经贯穿于砂土试样中, 即此时试样中形成了完整的滑楔体。这也正好证明了此时土体达到了主动极限平衡状态, 与前面通过土压力分布得到的结论一致。

另外还可以发现, 随着挡土墙位移的增大, 各排分析点的位移突变段的位置并没有发生变化, 这说明土体中的滑裂面从出现到最终贯通形成, 其位置始终不发生改变。

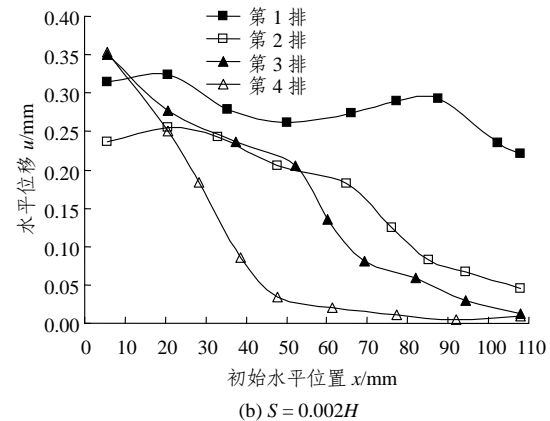
各向异性南京云母砂沉积面水平的试样, 所受到的大主应力垂直于沉积面, 对其采用与上述相同的方法分析土体位移, 结果见图 9。从图 9 中可以看到与沉积面铅直的试样相同的规律, 也能得到此种沉积方向的土体滑裂面位置。

### 3.4 不同沉积方向土压力试验结果比较

对于各向异性砂土, 沉积面铅直和水平是各向异性差别最明显的两种沉积方向, 所以对这两种沉积方向的砂土性质进行比较研究是最具代表意义的。前面已经提到, 两种沉积方向的试样在挡土墙向主动极限平衡状态一侧移动的过程中, 土体位移



(a) S = 0.001H



(b) S = 0.002H

图 9 沉积面水平土体水平位移

Fig.9 Horizontal displacement of horizontally orientated sand

及相应的滑裂面所表现出来的规律是一致的。为了更加清楚地比较两种沉积方向试样的滑裂面位置的不同, 将其放在一起进行比较(见图 10)。

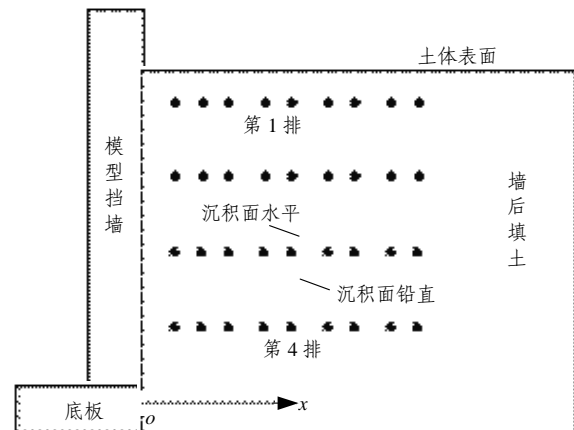


图 10 不同沉积方向土体滑裂面位置比较

Fig.10 Comparison of sliching surface of soils with different orientations

从图 10 中可以看出, 沉积面铅直的土体滑裂面比沉积面水平的土体滑裂面略平缓一些。这是由于南京云母砂中的片状云母颗粒的排列方向不同, 一

一定程度上影响了滑裂面的发展走向。

## 4 结 论

本文通过离心模型试验,研究了各向异性砂土的主动土压力分布规律,可以得到以下几点结论:

(1) 新研制的土压力离心模型试验设备可以模拟挡土墙运动,直到土体达到主动极限平衡状态的过程,并测量作用在挡土墙上的土压力值及其变化和土体的位移。这为研究土体从静止状态到主动极限平衡状态的发展过程提供了可能。

(2) 随着挡土墙向主动极限平衡状态一侧运动的位移不断增大,作用在挡土墙上的土压力逐渐减小,同时墙后填土中各点的水平位移不断增大。当挡土墙位移量达到  $0.001H$  时,土压力达到一个稳定值。这时墙后填土达到主动极限平衡状态。

(3) 挡土墙运动过程中,各排分析点的位移曲线有一个位移突变段,此处即就是土体滑裂面穿过的位置。

(4) 由于受到片状云母颗粒排列方向的不同,不同沉积方向各向异性砂土中滑裂面的位置有所不同。沉积面铅直的土体滑裂面比沉积面水平的土体略平缓一些。

### 参考文献(References):

- [1] SHERIF M A, ISHIBASHI I, LEE C D. Earth pressure against rigid retaining walls[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE*, 1982, 108(5): 679 - 695.
- [2] FANG Y S, ISHIBASHI I. Static earth pressures with various wall movements[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE*, 1986, 112(3): 317 - 333.
- [3] FANG Y S, HO Y C, CHEN T J. Passive earth pressure with critical state concept[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, 128(8): 651 - 659.
- [4] FANG Y S, CHEN J M, CHEN C Y. Earth pressures with sloping backfill[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, 123(3): 250 - 259.
- [5] FANG Y S, CHENG F P, CHEN R T, et al. Earth pressures under general wall movements[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1993, 24(2): 113 - 131.
- [6] 周应英,任美龙. 刚性挡土墙主动土压力的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 1990, 12(2): 19 - 26.(ZHOU Yingying, REN Meilong. An experimental study on active earth pressure behind rigid retaining wall[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1990, 12(2): 19 - 26.(in Chinese))
- [7] 陈页开. 挡土墙上土压力的试验研究与数值分析[博士学位论文][D]. 杭州: 浙江大学, 2001.(CHEN Yekai. Model test and numerical analysis of earth pressures on retaining wall[Ph. D. Thesis][D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.(in Chinese))
- [8] 陈页开,汪益敏,徐日庆,等. 刚性挡土墙主动土压力数值分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(6): 989 - 995.(CHEN Yekai, WANG Yimin, XU Riqing, et al. Numerical analyses of active earth pressure on rigid retaining wall[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(6): 989 - 995.(in Chinese))
- [9] 陈页开,汪益敏,徐日庆,等. 刚性挡土墙被动土压力数值分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(6): 980 - 988.(CHEN Yekai, WANG Yimin, XU Riqing, et al. Numerical analyses of passive earth pressure on rigid retaining wall[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(6): 980 - 988.(in Chinese))
- [10] 梅国雄,宰金珉. 考虑变形的朗肯土压力模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(6): 851 - 853.(MEI Guoxiong, ZAI Jinmin. Rankine earth pressure model considering deformation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(6): 851 - 853.(in Chinese))
- [11] 徐日庆,龚 慈,魏 纲,等. 考虑平动位移效应的刚性挡土墙土压力理论[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2005, 39(1): 119 - 122.(XU Riqing, GONG Ci, WEI Gang, et al. Theory of earth pressure against rigid retaining walls considering translational movement effect[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2005, 39(1): 119 - 122.(in Chinese))
- [12] 路德春,张在明,杜修力,等. 平面应变条件下的极限土压力[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(增2): 3 354 - 3 359.(LU Dechun, ZHANG Zaiming, DU Xiuli, et al. Limit earth pressure under plane strain condition[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(Supp.2): 3 354 - 3 359.(in Chinese))
- [13] 殷昆亭,刘凤德. TH - 50g - tons 土工离心机及其辅助系统[J]. *实验技术与管理*, 1998, 15(1): 41 - 44.(YIN Kunting, LIU Fengde. TH - 50g - tons centrifuge and assistant system[J]. *Experimental Technology and Management*, 1998, 15(1): 41 - 44.(in Chinese))
- [14] ZHANG G, HU Y, ZHANG J M. New image-analysis-based displacement-measurement system for centrifuge modeling tests[J]. *Measurement*, 2009, 42(1): 87 - 96.