

# 基于活动门试验的竖向土拱效应及土压力研究

王 凯<sup>1</sup>, 刘明朋<sup>2\*</sup>, 孙 杰<sup>3</sup>, 杨 强<sup>4</sup>, 孙玉海<sup>5</sup>

<sup>1</sup>山东高速股份有限公司, 山东 济南

<sup>2</sup>山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南

<sup>3</sup>山东省交通运输事业服务中心, 山东 济南

<sup>4</sup>济南金衢公路勘察设计研究院有限公司, 山东 济南

<sup>5</sup>山东交通规划设计院集团有限公司, 山东 济南

Email: \*1398404100@qq.com

收稿日期: 2021年7月14日; 录用日期: 2021年7月28日; 发布日期: 2021年8月13日

## 摘 要

本文进行了竖向活动门试验, 探究了主动和被动活动门位移模式、不同活动门宽度、以及不同活动门位移量对土压力的影响, 分析了土压力变化过程中土拱效应的动态演化规律以及土拱效应对土压力的作用。试验结果发现竖向土拱效应活动门试验中, 活动门产生主动位移后, 挡板上的土压力不断增大而活动门上方的土压力则不断减小。活动门产生被动位移后, 挡板上的土压力减小, 而活动板上的土压力因为土拱效应的作用增加。土压力的变化主要因为土拱效应的作用。活动板上的砂土土压力稳定时的临界位移量与活动门位移模式以及活动门宽度有关。砂土顶部的位移与活动门位移的关系基本呈两段直线。

## 关键词

竖向活动门, 土拱效应, 土压力, 活动门位移

# Research on Vertical Soil Arching Effect and Earth Pressure Based on Trap-Door Test

Kai Wang<sup>1</sup>, Mingpeng Liu<sup>2\*</sup>, Jie Sun<sup>3</sup>, Qiang Yang<sup>4</sup>, Yuhai Sun<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Shandong High-Speed Group Co. Ltd., Jinan Shandong

<sup>2</sup>Shandong University Qilu School of Transportation, Jinan Shandong

<sup>3</sup>Shandong Provincial Transportation Service Center, Jinan Shandong

<sup>4</sup>Jinan Jinqi Highway Survey & Design Co. Ltd., Jinan Shandong

<sup>5</sup>Shandong Transportation Planning and Design Institute Co. Ltd., Jinan Shandong

Email: \*1398404100@qq.com

\*通讯作者。

文章引用: 王凯, 刘明朋, 孙杰, 杨强, 孙玉海. 基于活动门试验的竖向土拱效应及土压力研究[J]. 土木工程, 2021, 10(8): 747-757. DOI: 10.12677/hjce.2021.108085

## Abstract

In this paper, vertical trap-door tests were conducted to explore the influence of active and passive displacement modes of trap-door, different widths of movable plates and different distances of trap-doors on earth pressure, and the dynamic evolution law of soil arch effect. And the effect of soil arch effect on earth pressure in the process of changing earth pressure is analyzed. The results show that the earth pressure on the fixed wall increased while the earth pressure on the trap-door decreased after the active displacement of the trap-door. After the passive displacement of the trap-door, the earth pressure on the fixed wall decreased, but the earth pressure on the movable plate increased because of the soil arching effect. The change of earth pressure is mainly due to the effect of soil arching. The critical displacement of the sand on the movable plate is related to the displacement mode and the width of the trap-door. The relationship between displacement of sand top and displacement of trap-door is basically two straight lines.

## Keywords

Vertical Trap-Door, Soil Arching Effect, Earth Pressure, Trap-Door Displacement

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

结构物作为地基工程中处治软土地基的重要手段,得到了广泛应用[1],对于软土地基处治中常用的复合地基,如搅拌桩、CFG桩、桩承式路堤等结构物,在竖向填土压力作用下,桩与桩周土也会发生较大的不均匀沉降,桩顶压力明显高于桩周土,发生了较为显著的应力集中现象。究其原因,由于桩与土体间的不均匀变形和位移,均导致了土拱效应的产生,从而改变了桩的荷载分担效应。但目前的工程设计中,普遍忽略了土拱效应的存在,从而使工程设计与实际受力状态偏差较大,引起结构的不安全或过度设计问题。

英国学者1884年首次发现了“粮仓效应”,即粮食堆积到一定高度后,粮仓底部的荷载便不再增大,这便是“土拱效应”。Terzaghi [2] [3]利用活动门(Trapdoor)试验验证了土拱效应的存在以来,并指出土体间不均匀的位移和作为支撑的拱脚时土拱效应产生的必要条件。自此国内外对此展开了许多工作,贾海莉[4]等基于工程实例对土拱的存在形式,拱形及拱的几何、力学参数进行了分析,指出拱体形成处土体的剪应力小于其抗剪前度是土拱形成的另一条件。Handy [5]与Low [6]等人分别从土拱产生与岩土工程的角度,进行了活动门试验,通过施加水平支撑的局部变形来研究拱效应,对活动门主动及被动位移模式下的砂土和黏土中土拱产生机理、形状、影响因素做了分析。Chen [7]等通过一系列模型试验研究了静态荷载下土拱效应随相对位移的变化。Chevalier [8]等人在活动门问题的一系列实验测试和离散元建模中观察到拱形效应的演变取决于活板门位移的三个阶段。Eskisar [9]等进行了小型3D模型测试,并使用X射线CT扫描可视化了各种形状的土拱。Iglesia [10]等在离心机活板门测试中观察到了三个阶段的土拱变形模式。基于数字图像相关(DIC)技术和粒子图像测速(PIV),Pardo [11]、Sáez [12]和Rui [13]等人在一系

列 2D 活板门试验中研究了不同几何条件下土拱的演化模式。Han [14]等利用圆柱活板门系统研究了循环荷载作用下拱效应的演化和破坏。在一系列 2D DEM 模拟中, Lai [15]等人观察到附加荷载增加时土拱效应的演变, 并提出了演变的三个阶段即逐步加强阶段、形成 - 破坏 - 重构阶段以及失稳破坏阶段。由前人的研究可见, 针对土拱本身的演化及研究等已经较为成熟, 但是土拱效应的发展往往伴随着土压力的作用, 而竖向土拱效应与土压力之间的相互作用关系仍不明确。

目前针对竖向土拱效应的研究已经获得了诸多有价值的成果, 但仍然存在着一一定的不足。现有的研究中, 对土拱效应如何改变竖向土压力的分布以及活动门位移模式、位移量及宽度对竖向土压力分布规律的影响等方面的工作较少, 而实际工程中支挡结构的变位又极大地影响着工程安全, 因此有必要对此深入研究。本文通过设计不同位移模式、位移量及宽度的竖向活动门试验来较全面地研究土拱效应如何影响竖向土压力的分布, 并考察竖向活动门位移量对填土顶部位移的影响, 讨论试验中出现的规律并分析其原因。

## 2. 试验设计

### 2.1. 试验装置与填料

本模型试验的由模型箱、活动门和挡板组成, 各组成部分如图 1 所示。模型箱尺寸为长 3 m、宽 0.5 m、高 0.8 m, 两侧及底部布有挡板, 可容纳砂土并固定, 模型箱底部装有若干土压力盒, 可用于检测砂土的不均匀位移与土压力大小并传送至监测系统记录; 活动门由四块分布在底部的活动板组成, 每块板的宽度为 10 cm; 模型箱上安装有多个可实现主动及被动平移位移模式的位移加载装置, 可实现挡板的同步移动, 多个同步移动的挡板形成活动门结构。加载装置可使挡板完成不同的位移模式及移动方向。在底部的挡板及活动门上每隔一定间距布设一个土压力计, 如图 2 所示。监测系统采用动态信号采集分析系统, 对数据进行收集。

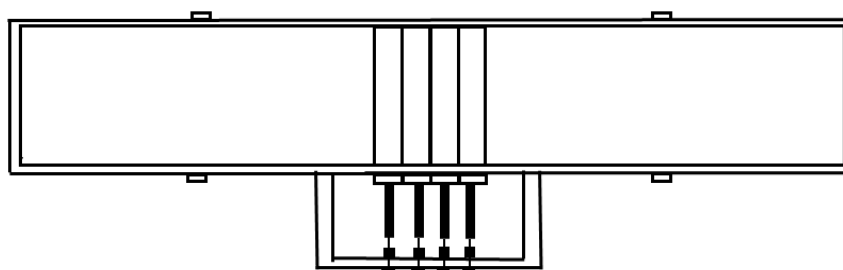


Figure 1. Drawing of trap-door test device

图 1. 活动门试验装置图

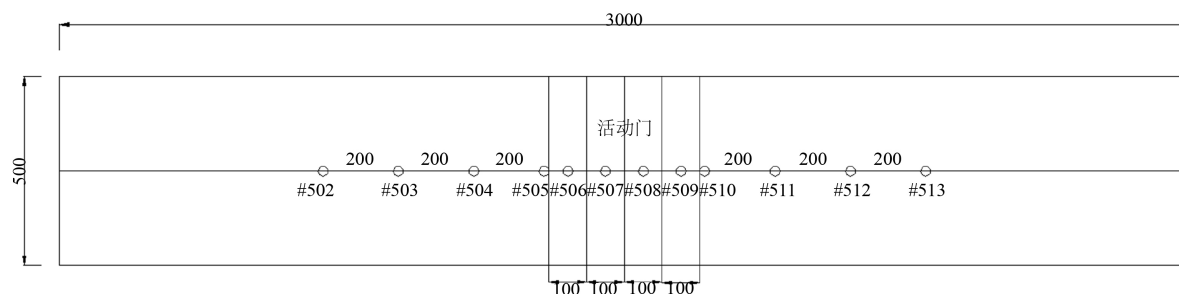


Figure 2. Layout of earth pressure box along bottom plate

图 2. 土压力盒沿底板布设实体图

为研究不同的活动门位移模式、位移量及活动宽度对竖向土压力分布规律的影响，采用干燥砂作为填料，并控制每次工况时砂的相对密实度与力学参数相同。砂土的颗粒级配曲线如图 3 所示，并根据筛分实验可计算出不均匀系数  $C_u = 5.47$ ，曲率系数  $C_c = 1.32$ ，细度模数  $MX = 2.435$ ，故填料属于级配良好的不均匀中砂。控制砂土的相对密实度  $D_r = 0.75$ ，进行土工试验，测得砂土的力学性能如表 1 所示。

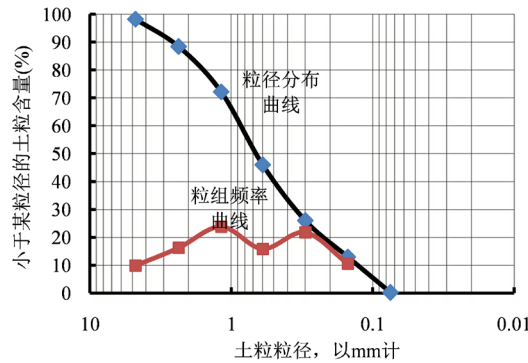


Figure 3. Sand grain gradation curve  
图 3. 砂土颗粒级配曲线

Table 1. Basic mechanical properties of sand used for testing  
表 1. 试验用砂的基本力学性能

压缩模量(MPa)	含水率(%)	泊松比 $\mu$	土粒比重 $G_s$	内摩擦角( $^\circ$ )	最大干密度 ( $g/m^3$ )	最小干密度 ( $g/m^3$ )	实测容重 ( $kN/m^3$ )
30	0	0.35	2.67	38	1.82	1.17	16.85

## 2.2. 试验步骤

在模型箱底部铺设土压力计并在侧板上涂抹凡士林以减小侧板与砂土的摩擦，然后分层填砂，每次填砂高度为 10 cm。为控制每次填砂的相对密实度  $D_r = 0.75$  恒定，首先采用如下公式计算每次填筑的质量：

$$D_r = \frac{(\rho_d - \rho_{d\min}) \times \rho_{d\max}}{(\rho_{d\max} - \rho_{d\min}) \times \rho_d}$$

其中  $\rho_{d\max}$  为砂土最大干密度， $\rho_{d\min}$  为最小干密度。由公式计算出需要的填筑干密度，再乘以每次填筑的体积，即可得到每次填砂的质量，将该质量的砂填入模型箱内，压实至标线处即可控制相对密度恒定。填筑完成后为监测活动门顶部砂土的竖向位移应在每个活动门上方布设一个千分表，如图 4 所示。

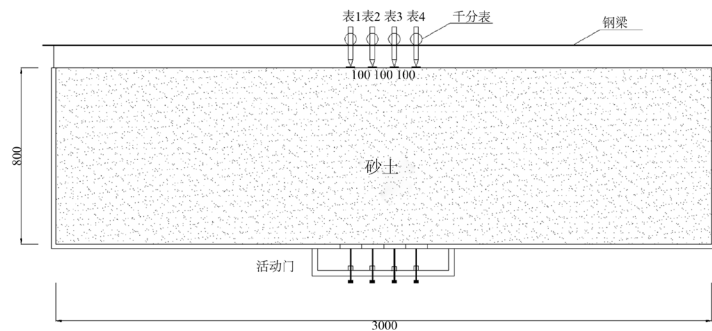


Figure 4. Schematic diagram of displacement monitoring of trap-door test  
图 4. 活动门试验位移监测示意图

然后通过加载装置,使底部的活动门进行上升或者下降,以模拟主动位移模式或者被动位移模式。加载装置可以精确控制位移量,试验中,每级加载位移量为 0.5 mm,待加载完成后记录每级位移下的挡板与活动板上土压力盒的数值与活动门上方千分表读数。改变活动门的宽度进行四组平行试验。本试验设计的活动门宽度分别为 10 cm、20 cm、30 cm、40 cm。

### 3. 试验结果及分析

#### 3.1. 主动位移模式下试验结果分析

##### 3.1.1. 土压力随活动门位移量变化规律

图 5 分别为不同活动门宽度下的土压力变化规律。随着活动门位移量的增大,活动门上的土压力由静止土压力不断减小,而挡板上的土压力不断增大,并最终趋于稳定。活动门竖向位移在一定范围内增大,致使活动门上方土体较周围土体产生了相对较大的位移,进而对周围土体产生了向下的剪应力作用。剪应力的出现改变了土体的应力重分布,使活动门上方的土体土压力减小,而挡板上的土压力增大,即产生了“土拱效应”,土拱效应的存在将活动门上方土体竖向荷载传递至挡板上。由图可知,当活动门

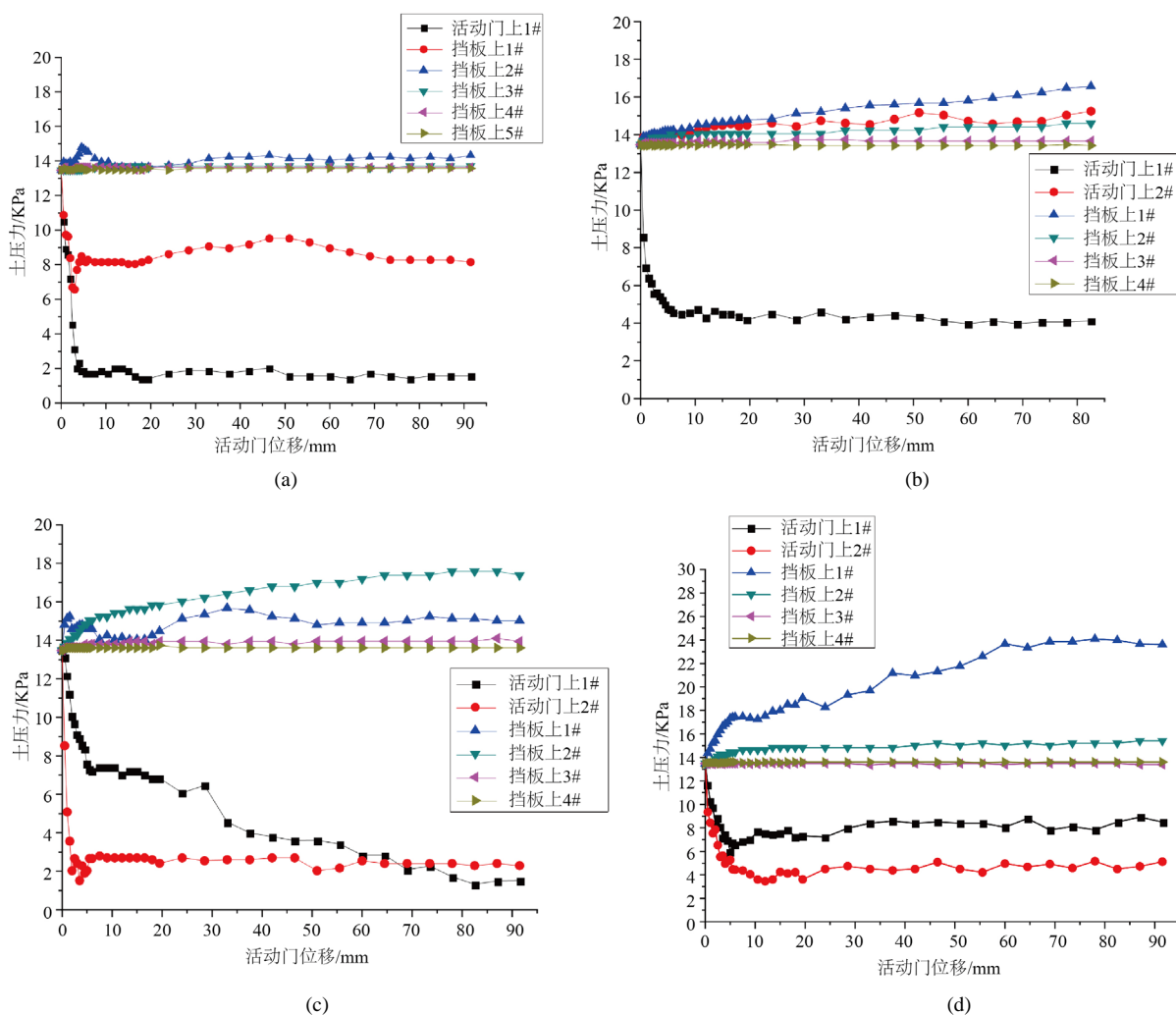


Figure 5. Earth pressure under different trap-door widths. (a) 10 cm; (b) 20 cm; (c) 30 cm; (d) 40 cm

图 5. 不同活动门宽度下的土压力。(a) 10 cm; (b) 20 cm; (c) 30 cm; (d) 40 cm

竖向位移到达一定量的时候，活动门与挡板上的土压力均趋于一个定值，这是因为随着活动门位移的增大，土体逐渐到达屈服状态，砂土中的土拱结构随之形成并随着位移量进行自我调整力学参数，此时由土拱结构承担活动门上方砂土的大部分自重，再增加活动门位移，仅是土拱结构下方至活动板上方的土体产生竖向位移，这部分土体不影响整个砂土土体的受力状态，故挡板与活动门上的土压力均趋于稳定。

记挡板上土压力达到稳定时的临界位移量为 $\delta_1$ ，挡板上土压力达到稳定值时的临界位移量为 $\delta_2$ ，活动门的宽度为 $\omega$ ，分析上图5可知，挡板上的砂土土压力稳定时的临界位移量 $\delta_1 = (0.15 \sim 0.2)\omega$ ，活动板上的砂土土压力到达稳定状态时的临界位移量 $\delta_2 = (0.03 \sim 0.04)\omega$ 。

### 3.1.2. 土压力沿地板长度分布规律及与活动门宽度的关系

图6显示了在不同的位移量下不同宽度的活动门下的土压力沿底板长度及分布的规律。由图可以看出，当活动门产生平动位移时，各宽度活动门下的土压力分布规律基本一致，均呈现出活动门上的土压力大幅减小，两侧一定范围内的挡板上的土压力增大且在距活动门一定距离处达到土压力峰值。随着活动门位移量的增加，挡板上土压力峰值越来越大，但不同位移量下各宽度活动门上的土压力谷值基本不变。随着活动门宽度的增加，挡板上的土压力峰值逐渐增大，但影响范围基本相同。值得注意的是，40 cm宽度的活动门其土压力最小值并非位于中间处，而是出现在了活动门的两侧，这是由于当活动门宽度较大时，活动门上出现了局部土拱效应，致使活动门两侧处的竖向荷载被传递至中间位置，导致了40 cm宽的活动门中间土压力比两侧大。

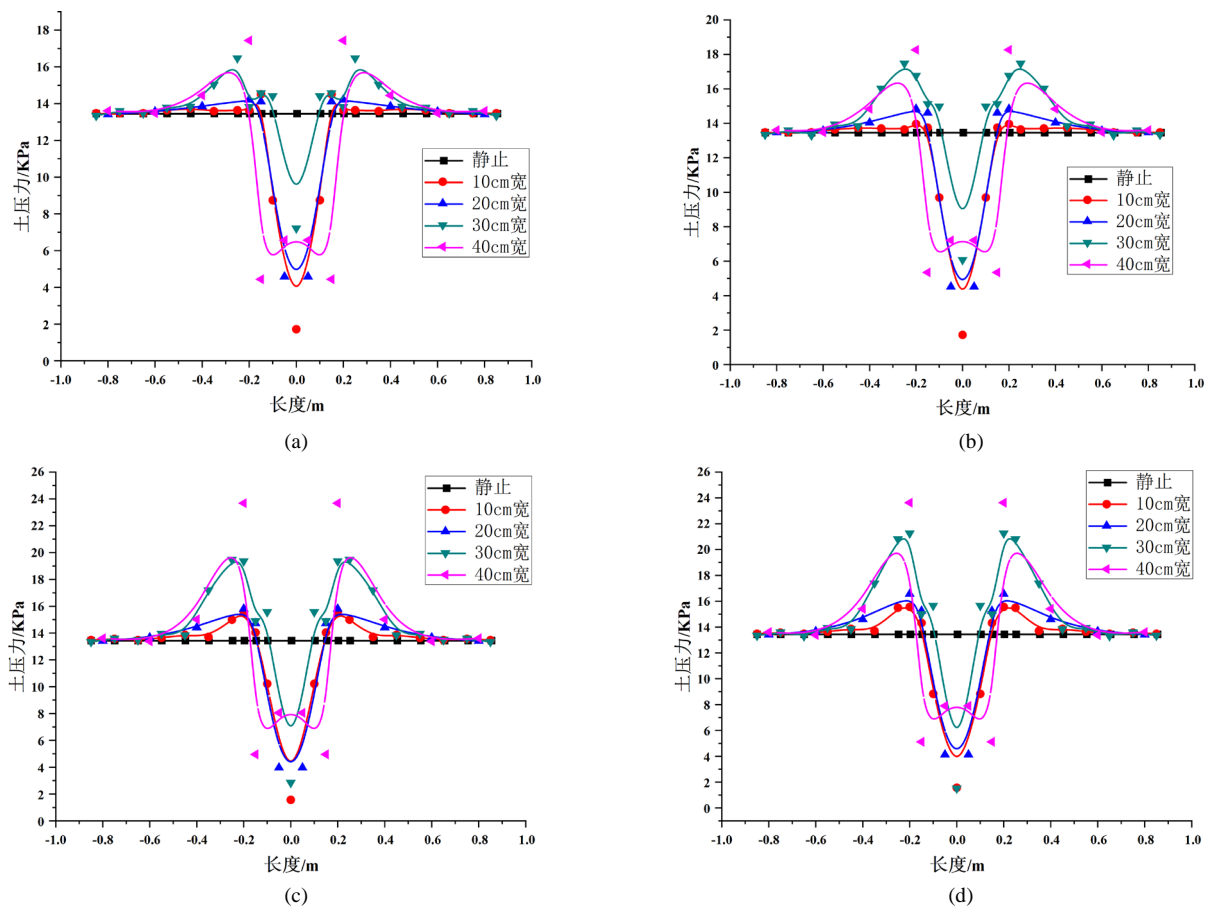


Figure 6. Active earth pressure at different displacements. (a) 6 mm; (b) 24 mm; (c) 60 mm; (d) 91.5 mm  
图6. 不同位移量时的主动土压力。(a) 6 mm; (b) 24 mm; (c) 60 mm; (d) 91.5 mm

### 3.1.3. 砂土顶部位移随活动门位移的变化规律

图 7 为砂土顶部沉降量随活动门位移量的变化规律图, 由图可知砂土的沉降位移随着活动门的位移量基本呈两段斜率不同的直线。当活动门位移较小时, 直线斜率较小; 当活动门位移量达到一定程度时, 直线斜率较大。这是因为在活动门竖向位移的初期, 随着活动门上方土体的沉降, 周围土体对其产生了向上的剪应力, 此时随着活动门位移量的增加, 砂土顶部的沉降较小; 当活动门位移量逐渐增大时, 沉降的土体越来越多, 逐渐克服了剪应力, 此时砂土沉降随活动门位移的直线斜率较大。当活动门的主动位移较大时, 活动门周围砂土随之流动, 产生竖向沉降, 且越远离活动板, 产生的位移越小。随着活动门宽度的增加, 砂土的沉降量随之增大。

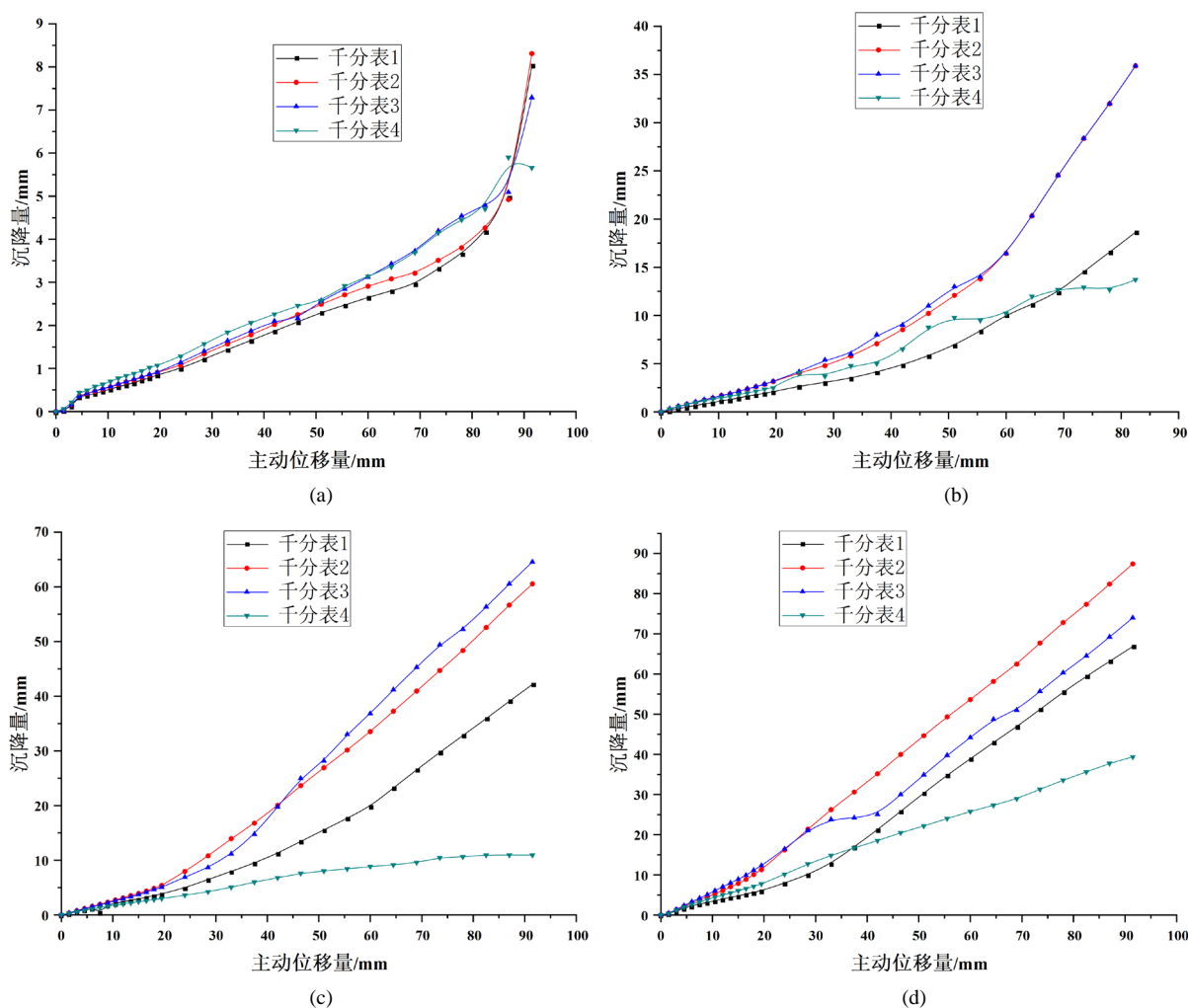


Figure 7. Sand top settlement with different displacement of trap-door. (a) 10 cm; (b) 20 cm; (c) 30 cm; (d) 40 cm  
图 7. 不同活动门位移量的砂土顶部沉降。(a) 10 cm; (b) 20 cm; (c) 30 cm; (d) 40 cm

## 3.2. 被动位移模式下试验结果分析

### 3.2.1. 土压力随活动门位移量变化规律

图 8 分别为不同活动门宽度下的挡板及活动板上土压力随活动门被动位移量的变化规律。随着活动门被动位移量的增大, 挡板上的土压力不断减小, 活动门上的土压力不断增大, 并最终趋于稳定。当活

动门发生被动位移时，挤压上部土体，由于砂土间的剪应力与摩阻力，活动门上方的土体与周围土体产生不均匀位移，挡板上的竖向土压力就传递至活动门上方土体中，即产生了“土拱效应”，此时土拱效应将挡板上土体的竖向荷载传递至活动板上。由图可知，在一定位移范围内，随着活动门位移量的不断增大，其荷载传递能力不断增强，从而使得活动门上的土压力逐渐增加，挡板上的土压力逐渐减小。当活动门竖向位移到达一定量的时候，活动门与挡板上的土压力均不再显著变化，趋于定值。

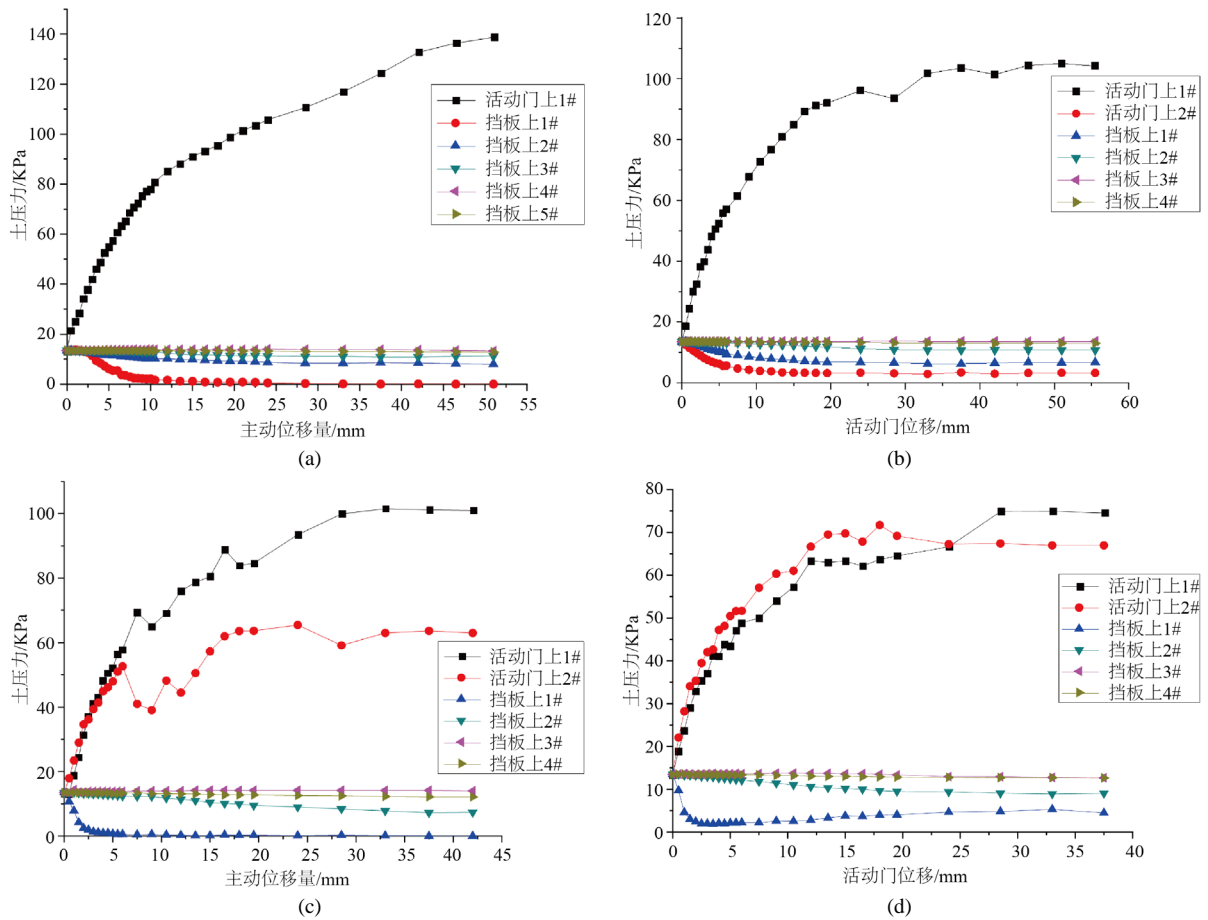


Figure 8. Earth pressure under different trap-door widths. (a) 10 cm; (b) 20 cm; (c) 30 cm; (d) 40 cm

图 8. 不同活动门宽度下的土压力。(a) 10 cm; (b) 20 cm; (c) 30 cm; (d) 40 cm

记挡板上土压力达到稳定时的临界位移量为  $\delta'_1$ ，挡板上土压力达到稳定值时的临界位移量为  $\delta'_2$ ，活动门的宽度为  $\omega$ ，分析上图 8 可知，挡板上的砂土土压力稳定时的临界位移量  $\delta'_1 = (0.02 \sim 0.1)\omega$ ，活动板上的砂土土压力到达稳定状态时的临界位移量  $\delta'_2 = (0.05 \sim 0.4)\omega$ 。

### 3.2.2. 土压力沿地板长度分布规律及与活动门宽度的关系

图 9 显示了不同宽度活动门在不同的被动位移量下土压力沿底板长度及活动门宽度分布的规律。由图可以看出，当活动门产生被动位移时，各宽度活动门下的土压力分布均呈现出活动门上的土压力大幅增加，两侧一定范围内的挡板上的土压力减小的规律。随着活动门位移量的增加，同一宽度活动门试验中，活动板上土压力峰值越来越大，两侧挡板上土压力逐渐减小，但减小甚微，距活动门一定距离处土压力出现最小值且接近于 0。随着活动门宽度的增加，活动门上的土压力峰值逐渐减小，两侧挡板受影响的范围基本相同。



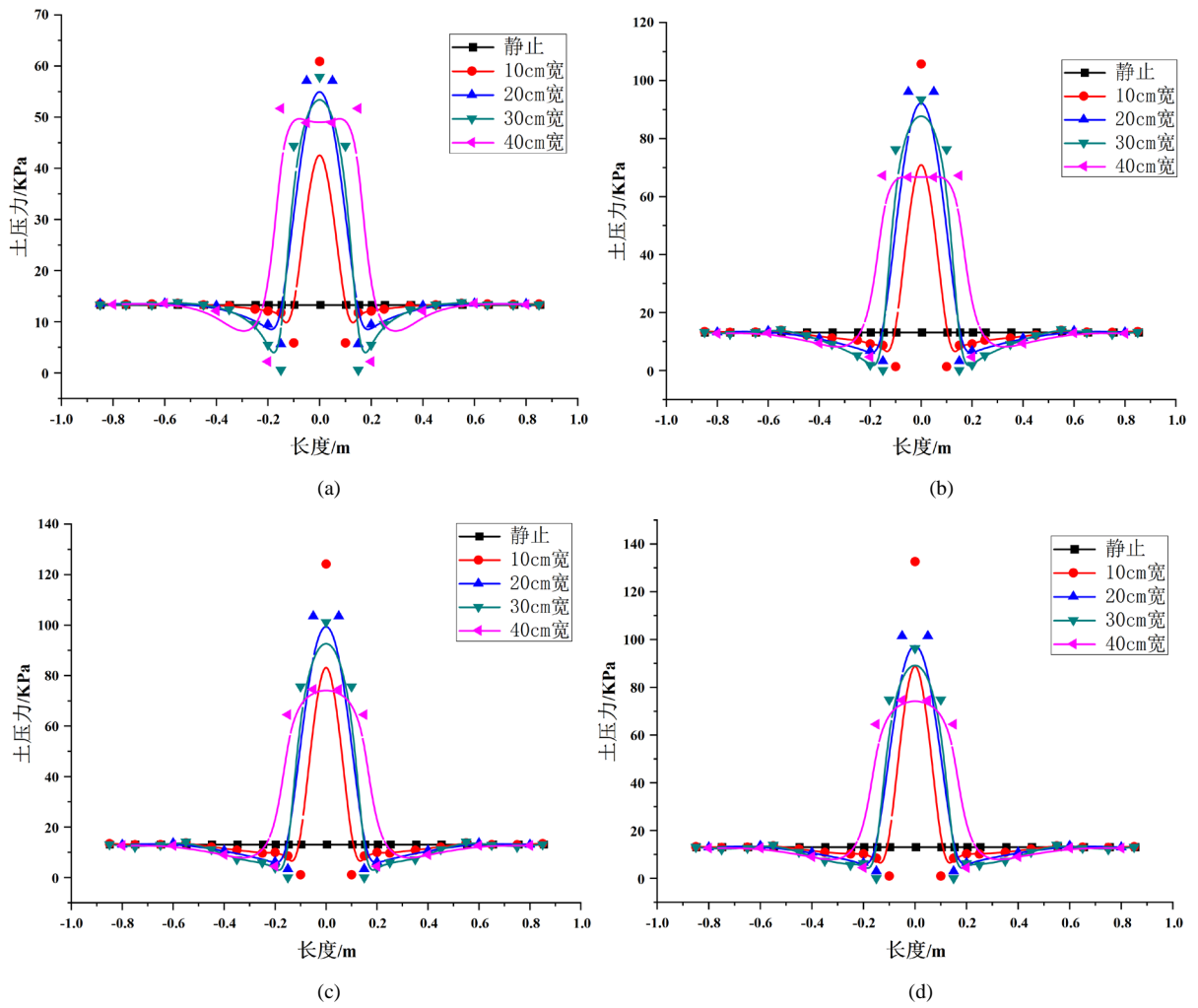
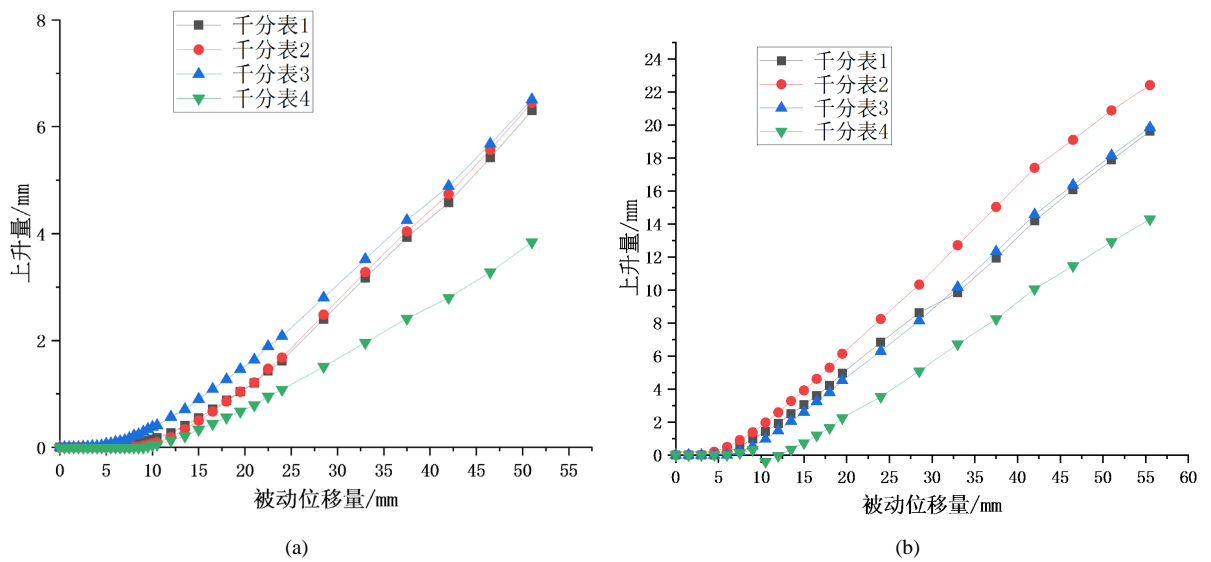


Figure 9. Passive earth pressure at different displacements. (a) 6 mm; (b) 24 mm; (c) 37.5 mm; (d) 42 mm  
 图9. 不同位移量时的被动土压力。(a) 6 mm; (b) 24 mm; (c) 37.5 mm; (d) 42 mm



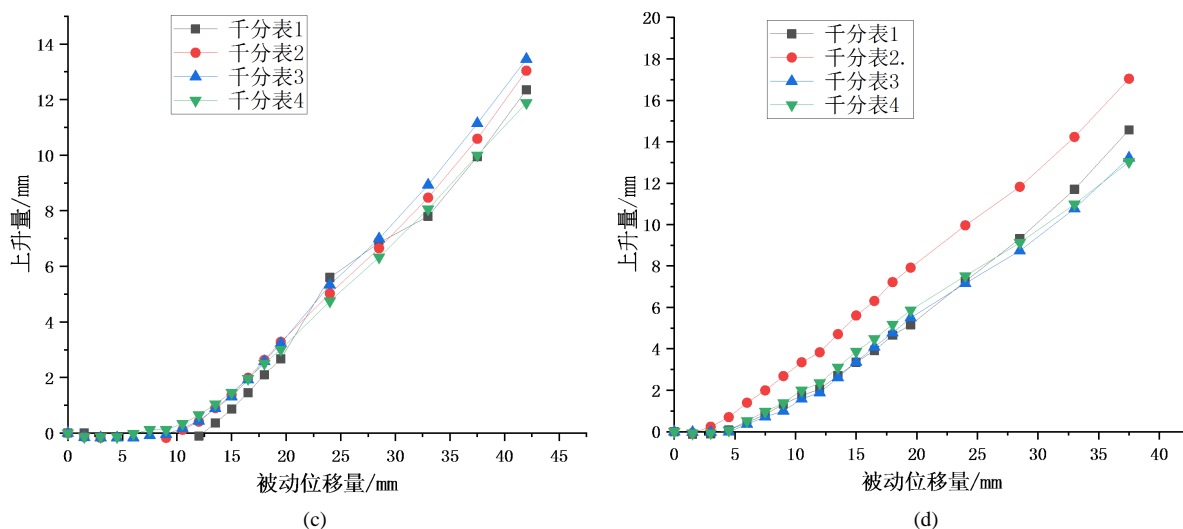


Figure 10. Sand top settlement with different displacement of trap-door. (a) 10 cm; (b) 20 cm; (c) 30 cm; (d) 40 cm  
图 10. 不同活动门位移时的沙土顶部沉降。(a) 10 cm; (b) 20 cm; (c) 30 cm; (d) 40 cm

### 3.2.3. 砂土顶部位移随活动门位移的变化规律

图 10 为竖向活动门试验时, 活动板上方砂土的上升量与活动门位移量之间的关系。由图可知, 砂土的上升量与活动门被动位移量基本呈线性关系, 且试验刚开始时, 被动位移量较小, 砂土缓慢增长; 当被动位移量较大时, 两者呈斜率较大的线性关系。这是因为活动门产生被动位移时会挤压上方的土体使土颗粒率先填充空隙, 逐渐密实, 此时土体位移较小, 随着活动门的位移量逐渐增大, 活动门上部土体被挤密并整体向上运动, 进而产生较大的位移。

## 4. 结论

1) 活动门产生竖向位移后将产生土拱效应, 土拱结构将改变土体的应力分布。活动门产生主动位移后, 活动门板上的土压力大幅减小而挡板上的土压力增大; 产生被动位移时, 活动板上的土压力大幅增大, 而挡板上的土压力减小。在一定位移范围内, 随着活动门位移量的增大, 挡板上和活动板上土压力改变的幅度越来越大, 活动门到达一定位移量时, 挡板上及活动板上的土压力趋于稳定。

2) 活动门产生主动位移模式时, 挡板上的砂土土压力稳定时的临界位移量  $\delta_1 = (0.15 \sim 0.2)\omega$ , 活动板上的砂土土压力到达稳定状态时的临界位移量  $\delta_2 = (0.03 \sim 0.04)\omega$ 。活动门产生被动位移模式时, 挡板上的砂土土压力稳定时的临界位移量  $\delta'_1 = (0.02 \sim 0.1)\omega$ , 活动板上的砂土土压力到达稳定状态时的临界位移量  $\delta'_2 = (0.05 \sim 0.4)\omega$ 。

3) 不同宽度下的活动门所呈现的土压力分布规律相同。但随着活动门宽度的增加, 活动门主动位移模式下的挡板土压力峰值逐渐增加, 被动位移模式下活动板上土压力的峰值逐渐减小。两种位移模式下的活动门顶部砂土位移量随活动门位移量先缓慢增长, 然后产生较大位移, 且两个阶段基本呈线性关系。

## 参考文献

- [1] 李海深. 土工建筑中的土拱效应[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 1990(2): 164-168.
- [2] Terzaghi, K. (1943) Theoretical Soil Mechanics. Wiley, New York.
- [3] Terzaghi, K. (1932) Record Earth Pressure Testing Machine. *Engineering News Record*, **109**, 365-369.
- [4] 贾海莉, 王成华, 李江洪. 关于土拱效应的几个问题[J]. 西南交通大学学报, 2003, 38(4): 398-402.
- [5] Handy, R.L. (1985) The Arch in Soil Arching. *Journal of Geotechnical Engineering*, **111**, 302-318.

- 
- [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1985\)111:3\(302\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:3(302))
- [6] Low, B.K., Tang, S.K. and Choa, V. (1994) Arching in Piled Embankments. *Journal of Geotechnical Engineering*, **120**, 1917-1938. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1994\)120:11\(1917\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:11(1917))
- [7] Chen, Y.M., Cao, W.P. and Chen, R.P. (2008) An Experimental Investigation of Soil Arching within Basal Reinforced and Unreinforced Piled Embankments. *Geotextiles and Geomembranes*, **26**, 164-174. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2007.05.004>
- [8] Chevalier, B., Combe, G. and Villard, P. (2012) Experimental and Discrete Element Modeling Studies of the Trapdoor Problem: Influence of the Macro-Mechanical Frictional Parameters. *Acta Geotechnica*, **7**, 15-39. <https://doi.org/10.1007/s11440-011-0152-5>
- [9] Eskisar, T., Otani, J. and Hironaka, J. (2012) Visualization of Soil Arching on Reinforced Embankment with Rigid Pile Foundation Using X-Ray CT. *Geotextiles and Geomembranes*, **32**, 44-54. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2011.12.002>
- [10] Iglesia, G.R., Einstein, H.H. and Whitman, R.V. (2014) Investigation of Soil Arching with Centrifuge Tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **140**, Article ID: 04013005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000998](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000998)
- [11] Pardo, G.S. and Sáez, E. (2014) Experimental and Numerical Study of Arching Soil Effect in Coarse Sand. *Computers and Geotechnics*, **57**, 75-84. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.01.005>
- [12] Sáez, E. and Ledezma, C. (2012) Earthquake-Induced Pressures on Discontinuous Piling Support on Santiago Gravel. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **41**, 72-83. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.05.007>
- [13] Rui, R., Tol, F.V., Xia, X.L., Eekelen, S.V., Hu, G. and Xia, Y.Y. (2016) Evolution of Soil Arching; 2D DEM Simulations. *Computers and Geotechnics*, **73**, 199-209. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.12.006>
- [14] Han, J. and Bhandari, A. (2009) Evaluation of Geogrid-Reinforced Pile-Supported Embankments under Cyclic Loading Using Discrete Element Method. *U.S.-China Workshop on Ground Improvement Technologies*, 14 March 2009, Orlando, 73-82. [https://doi.org/10.1061/41025\(338\)8](https://doi.org/10.1061/41025(338)8)
- [15] Lai, H.J., Zheng, J.J., Zhang, J., Zhang, R.J. and Cui, L. (2014) DEM Analysis of “Soil”-Arching within Geogrid-Reinforced and Unreinforced Pile-Supported Embankments. *Computers and Geotechnics*, **61**, 13-23. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.04.007>