

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.0483

循环荷载下竖向土拱演化规律试验研究

毕宗琦¹, 宫全美¹, 周顺华¹, 程 茜^{1,2}

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 远洋控股集团有限公司, 上海 200335)

摘 要: 土拱效应广泛存在于结构-土相互作用体系中, 并不可避免地受到动荷载的影响。为探究循环荷载下土拱的演化过程, 开展了循环加载下的活动门试验, 结合粒子图像测速法 (PIV), 对土拱的结构形态、位移场及竖向应力的变化规律进行了分析。结果表明, 初始土拱形成时活动门上方产生三角形脱空区, 施加循环荷载后该结构边界逐渐沿竖向延伸并向填土表面发展, 位移场影响范围呈扇形向两侧扩大。根据初始差异沉降的不同, 土拱的发展演化呈现出最终状态的差异: 达到新的稳定状态, 或发生失稳破坏。循环荷载下, 初始活动门位移较大时土拱更易趋于破坏, 表现为脱空区贯通填土表面并形成竖向滑裂面。土拱结构的稳定性受到脱空区土体堆积对其下边界的支撑作用影响。

关 键 词: 土拱; 活动门试验; 循环荷载; 粒子图像测速法; 稳定性

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 03-0886-10

Experimental study of the evolution law of vertical soil arch under cyclic loading

BI Zong-qi¹, GONG Quan-mei¹, ZHOU Shun-hua¹, CHENG Qian^{1,2}

(1. The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804;

2. Sino-Ocean Group Holding Limited, Shanghai 200335)

Abstract: Arching effect is a common phenomenon in the systems of soil-structure interaction, and has been found to be inevitably affected by dynamic loading. The present study is devoted to investigate the evolution process of soil arch under the cyclic loading. To this end, a series of tests was conducted by using a trapdoor apparatus equipped with a cyclic loading system. By using particle image velocimetry (PIV) together with a set of dynamic load cells, evolution behaviors of the soil arch are observed and analyzed, including the geometric features, particle displacement fields and variation of vertical stresses. Based on the test results, it is found that the settlement of moving gates generates a void area over the trapdoor with a triangular boundary as the soil arch is initially formed. After applying cyclic loads, the structural boundary of the void area gradually extends vertically and moves upward to the filling surface, while the displacement region spreads in a fan-shaped patterns and extends to the sides with increasing base angles. Depending on the differences of initial trapdoor displacements and cyclic loads, two typical categories of the final stability of soil arch under cyclic loading are identified in the tests, namely the new stable cases and collapse cases. The results show that soil arch with a larger initial trapdoor displacement is more likely to experience a final collapse, as the void area extends along the filling height and a vertical slip surface is generated. The stability of soil arch under is related to the supporting effect of the accumulated soil within the void area to the lower boundary of the soil arch.

Keywords: soil arch; trapdoor test; cyclic loading; particle image velocimetry; stability

1 引 言

土拱效应是岩土工程中广泛存在的现象。其产生于颗粒材料中结构与周围土体之间的刚度差异和不均匀位移, 引起介质中荷载的转移和应力的重分

布, 从而影响到结构的受力和变形行为。自 Terzaghi^[1]利用活动门 (Trapdoor) 试验验证土拱效应的存在以来, 国内外诸多学者在此基础上针对土拱效应的形成条件、几何形态、荷载传递及影响因素等方面进行了深入的研究, 取得了丰硕的成

收稿日期: 2019-03-10

修回日期: 2019-07-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.41472247); 国家留学基金资助 (No.201806260145)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41472247) and China Scholarship Council (201806260145).

第一作者简介: 毕宗琦, 男, 1992 年生, 博士研究生, 主要从事铁路路基工程、动力安定性分析方面的研究工作。E-mail: bizongqi@tongji.edu.cn

通讯作者: 宫全美, 女, 1967 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程、线路工程系统动力学、轨道交通结构设计理论与施工技术等方面的研究。E-mail: gongqm@tongji.edu.cn

果^[2-7]。目前土拱效应已成为指导相关工程结构如桩承式路基、抗滑桩等设计中的关键因素之一。

随着理论研究和工程实践的逐步深入,人们发现土拱效应不可避免地受到各类动荷载的影响。在一定的瞬时冲击或长期循环荷载作用下,土拱将发生重新调整、削弱甚至失稳破坏,进而可能导致工程结构原有的承载能力下降,影响其正常的长期使用功能。针对该问题,Heitz 等^[8]开展了静-动荷载共同作用下的土拱效应室内模型试验研究,证实了动荷载影响下土拱效应受到削弱的现象(表现为应力分配比的减小),并根据试验结果给出了对应不同荷载幅值和频率的土拱效应的衰减系数。叶阳升等^[9]借助现场激振试验研究了CFG桩复合地基低矮路堤的动荷载传递规律,指出施加动载后路基不同深度处应力传递模式与静态应力存在明显差异。Han 等^[10]借助离散元模拟分析了格栅加固对动荷载下桩网结构路基中土体变形和应力重分配现象的影响。Lai 等^[11]利用离散元模拟了递增附加荷载下土拱效应的演化规律,给出了土拱逐步加强阶段、形成-破坏-重构阶段以及失稳破坏阶段的发展模式。韩高孝等^[12-13]进行了循环荷载作用下的活动门试验和桩网结构路基模型试验,研究了土拱由形成、退化至破坏期间活动门上方动应力变化规律,讨论了填土高度、桩间土软弱程度、动荷载幅值对土拱稳定性的影响。许朝阳等^[14]采用可视化模型试验和颗粒流数值模拟相结合的方法,对桩承式路堤中在静载和动载下的应力传递和变形性状进行研究,分析了受动载影响程度与土拱效应强弱的关系。陈仁朋^[15]、Wang^[16]等通过动力加载桩网结构路基足尺模型试验,分别研究了差异沉降、荷载循环次数和路基内水位对土拱发展过程和荷载转移量的影响。毕宗琦等^[17]则基于安定性分析,给出了引起土拱发生退化和破坏的荷载阈值。

目前针对动荷载作用下土拱演化规律的研究已获得了诸多有价值的结论,但仍存在一些不足。在传统试验观测手段方面,如利用颜色分层、参考点标注或位移传感器等,通常难以精确、快捷地分析土体颗粒运动趋势,故有关土拱演化过程中涉及的结构形态变化、位移场等细节可能在试验记录中被忽略,大多研究均局限于少量点位的应力测量分析。此外,由于施加动荷载大小、次数等限制,土拱可能在明显的变化出现前就被提早判定为稳定状态,并未完整地记录土拱由形成至破坏的演化过程。

为进一步探究循环荷载作用下土拱效应的发展演化过程,本文开展了一系列的动力加载活动门试

验。其中为获取试验中土拱形态变化的完整过程,采用粒子图像测速法(PIV)对土体位移场和颗粒运动变化规律进行了实时观测和分析。粒子图像测速法作为一种基于数字图像的无损检测方法,在分析颗粒材料位移和速度场方面具有较高的精确度和便捷性,广泛应用于岩土工程相关的试验研究中^[18]。其中 Pardo^[19]、Rui^[20]、Jacobsz^[21]、Song^[22]等分别借助类似方法开展了静力下的活动门试验,讨论了土体位移变化及土拱的几类典型形态,验证了 PIV 在分析此类问题上的有效性。

本文借助 PIV 对循环荷载下土拱几何形态特征以及位移场变化进行了观测,分析归纳了土拱自静力条件下的形成至循环荷载施加后的发展演化过程,讨论了不同活动门初始位移条件下最终土拱能够达到稳定状态或发生破坏的两类演化模式。

2 试验设计

2.1 试验装置及材料

本次试验采用的试验系统主要由活动门装置、模型箱、循环加载系统以 PIV 图像采集系统组成,各试验装置的布置如图 1 所示。

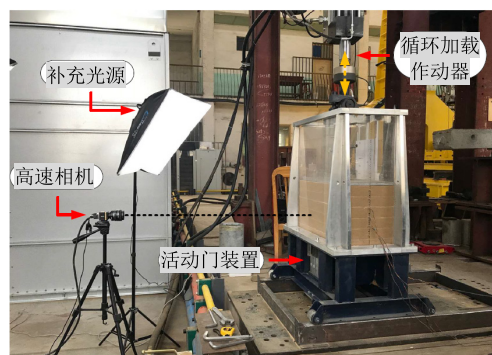


图1 试验装置布置图
Fig.1 Picture of test set-up

其中活动门装置由长方体试验箱主体和底部活动门升降板组成(见图2)。模型箱的长、宽、高尺寸为 700 mm×300 mm×700 mm,四面均为 20 mm 厚的透明有机玻璃板,板内部预涂凡士林薄层进行润滑处理。其中面对高速相机的一侧为试验观测面。活动门升降板宽为 100 mm,最大行程为 100 mm,由电机控制其位移,移动速率为 10 mm/s。

试验模型箱中填土采用含水率为 1%的砂土,其颗粒级配曲线如图 3 所示,不均匀系数 $C_u = 4.40$,曲率系数 $C_c = 0.91$ 。根据直剪试验结果(见图 4),其内摩擦角 $\varphi = 28^\circ$,黏聚力 $c = 6.6$ kPa。

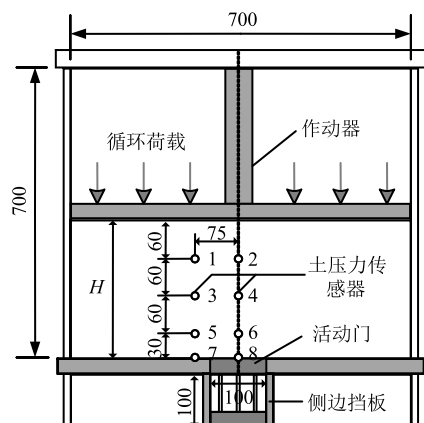


图2 活动门装置示意图 (单位: mm)

Fig.2 Sketch of trapdoor apparatus(unit: mm)

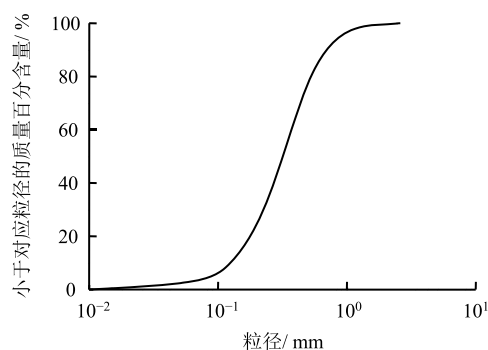


图3 试验用砂的颗粒级配曲线

Fig.3 Grain size distribution curve of test sand

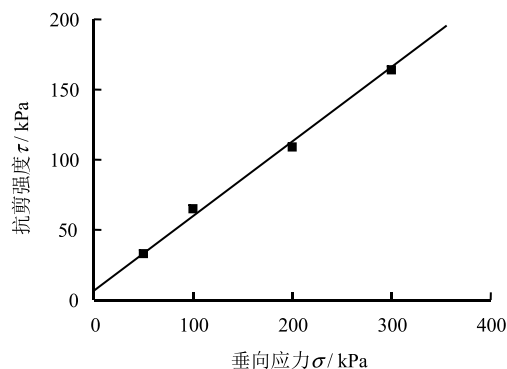


图4 试验用砂的直剪试验曲线

Fig.4 Direct shear curve of test sand

模型箱中土体分 4 层填筑, 层间均匀铺设白色石英砂薄层作为分层标识。填土高度 H 共计 210 mm。填筑后砂土密度为 1.53 g/cm^3 , 孔隙率为 0.41, 相对密度为 0.58, 属中等密实状态。

为记录试验中活动门上方和侧边的动应力变化, 在各填筑分层位置安装 DYB-1 型电阻应变式动土压力传感器, 如图 2 所示, 在模型箱宽度方向均

放置在中心位置。传感器直径为 12 mm, 厚度为 5 mm, 量程为 $0 \sim 50 \text{ kPa}$, 分辨率为 0.14%, 灵敏度系数 $K = 2.1$, 采样频率为 $0 \sim 200 \text{ Hz}$ 。数据采集通过 DH-5922 动态信号测试分析系统完成。

试验中的循环荷载由一电液伺服控制加载系统提供, 通过一厚度为 25 mm 的加载板施加在土体上表面。本次试验中加载系统提供的荷载幅值为 5 kPa, 频率为 5 Hz, 采用正弦形式, 如图 5 所示。

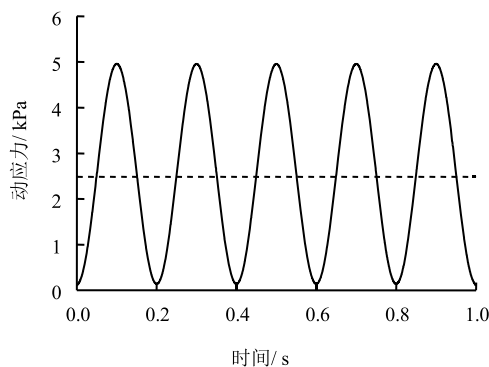


图5 试验所用循环荷载

Fig.5 Cyclic loading used in tests

2.2 PIV 测试方法

粒子图像测速法 (PIV) 是运用图像处理技术划分图像, 分析匹配像素, 测定整个流场瞬态位移的测量方法^[18]。在 PIV 分析中, 首先由高速相机在不同时刻拍摄观测面以获得颗粒的瞬时图像, 随后根据图像中颗粒色彩纹理及光散射率特性的不同 (或利用示踪粒子), 通过图像处理技术分析对比运动前后的颗粒位置以获得其位移和速度矢量。

试验中, 由高速 CCD 相机对观测面进行实时图像的采集拍摄, 其图像采集最大频率为 11 fps/s。PIV 分析则通过图像处理软件 PIVview2C^[23]完成, 并交由 TECPLOT 软件对分析结果进行后处理。在图像处理过程中, 将图像划分为若干区块, 根据图像相关性匹配获取位移场, 再利用像素坐标和物理坐标的转换获得实际的颗粒位移。图像相关性定义为

$$R(\Delta x, \Delta y) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} I_1(m, n) \cdot I_2(m + \Delta x, n + \Delta y) \quad (1)$$

式中: M 、 N 分别为图像块的长、宽尺寸; I_1 、 I_2 分别为 t_1 、 t_2 时刻中心坐标为 (m, n) 、 $(m + \Delta x, n + \Delta y)$ 的图像块的灰度值分布函数; Δx 和 Δy 分别为坐标 x 和 y 方向上的位移增量。

3 试验结果及分析

试验主要分为两个阶段进行。第1阶段：在完成模型箱填筑后,控制活动门缓慢下移至指定位置,记录土拱形成时几何形态、位移场和应力变化数据;第2阶段:初始土拱形成后,土体上部施加循环荷载,同样记录形态、位移和应力变化,直至土拱发生破坏,或在动载作用下最终达到新的稳定状态。

为探究活动门位移量 δ 对初始土拱的形成以及循环加载后其演化规律的影响,试验中设置 δ 分别为5、30、50、100 mm的4种情况进行对比分析。

3.1 初始土拱的形成

图6为试验开始后随活动门下移而发生的各测点位置的竖向应力变化。以最终活动门位移 $\delta=30$ mm的结果为例,可以看出,当活动门刚开始下移时各点应力即发生了明显的变化,其中活动门侧边靠近模型箱底部的测点SS5和SS7的应力出现了明显的上升趋势,这主要是因为活动门与两侧底板发生一定的相对位移后,土拱效应即随之开始产生,期间伴随着受影响区域土体的密实度变化和内部传力状态的调整,活动门上方的一部分应力向两侧转移而形成应力的重分布。而活动门上方区域的竖向应力(测点SS6, SS8)则在短时间内降至0读数,这主要归因于该位置土体发生一定位移后与传感器间的接触关系呈现脱开的趋势,相互接触力大幅度降低。随着活动门位移进一步的增大,SS4处的应力发生了二次下降,并在 $\delta>5$ mm后逐渐趋于稳定。这表明之前的土拱并未完全形成,在达到充分的差异沉降后土体内部将发生进一步的调整,最终各处应力均达到稳定状态时土拱完全形成,此时竖向应力沿深度的分布如图7所示。

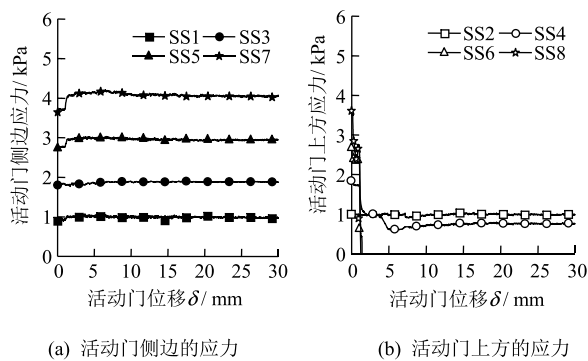


图6 竖向应力随活动门位移的变化曲线(最终 $\delta=30$ mm)
Fig.6 Variations of vertical stresses with different trapdoor displacements (final $\delta=30$ mm)

图8记录了试验中由相机拍摄观测面中土拱的

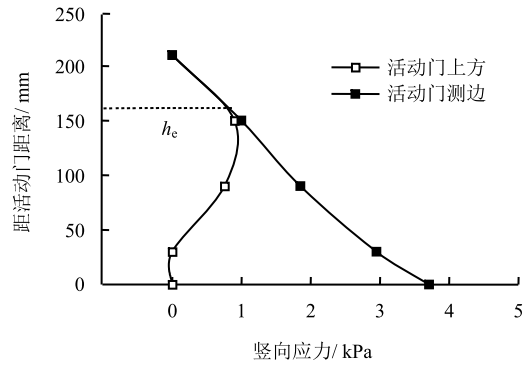
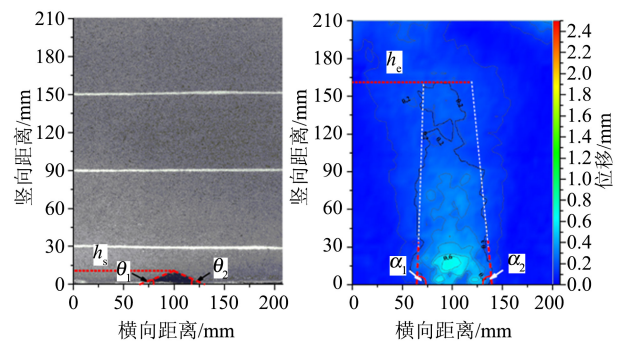
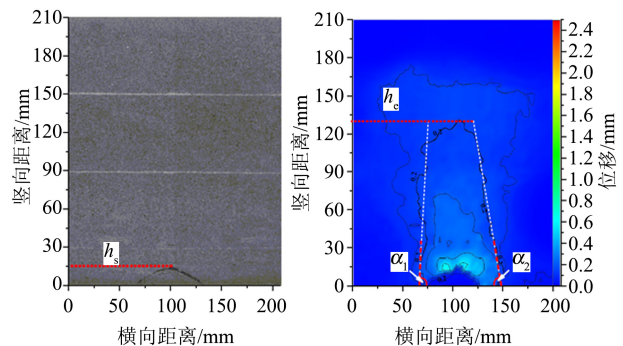


图7 土拱完全形成后的竖向应力分布($\delta=30$ mm)
Fig.7 Vertical stress distribution after the formation of soil arch ($\delta=30$ mm)



(a) 土拱完全形成($\delta=30$ mm)



(b) 土拱未完全形成($\delta=5$ mm)

图8 土拱形成时的几何形态与位移云图
Fig.8 Geometry appearance and displacement contours of soil arch after formation

几何形态以及通过PIV分析后获取的土体位移场云图。对于完全形成状态的土拱($\delta=30$ mm时),可以看出,活动门上方产生了一个近似三角形的脱空区域,区域内的土体随活动门下移而塌落,上方土体则形成了一个稳定的结构边界。该边界反映了土拱完全形成后的结构下边界,为方便后续分析其几何状态的改变,此处将土拱结构下边界的高度记为 h_s ,两侧底角分别记为 θ_1 、 θ_2 。由土体位移云图可知,在土拱形成后活动门上方的大范围土体颗粒均受到了影响。其中较明显的位移发生在脱空区域边界附

近, 大小约为 0.6 mm。为量化分析土体位移的受影响区域, 结合图 7 中的竖向应力分布情况可知, 因土拱效应产生的应力重分布的曲线分叉点高度在 160 mm 附近, 与位移云图中 0.2 mm 等值线的范围基本吻合, 故在分析中将该范围视作土拱效应的位移影响边界, 记此边界的高度为 h_e , 两侧底角分别记为 α_1 、 α_2 。

当为 $\delta = 5$ mm 时, 土拱并未完全形成, 此时土拱几何形态仅表现为活动门上方的拱形细小裂缝, 没有产生明显的脱空区域, 土体位移受影响的范围也相对较小。

3.2 循环荷载下土拱的演化规律

施加循环荷载后, 试验中土拱的演化规律可根据最终状态的不同分为两大类: ①调整后达到新的稳定状态; ②发生整体失稳破坏。

在 δ 分别为 5、30、50 mm 的试验条件下, 土拱经一段时间的发展最终达到了稳定状态。图 9 展

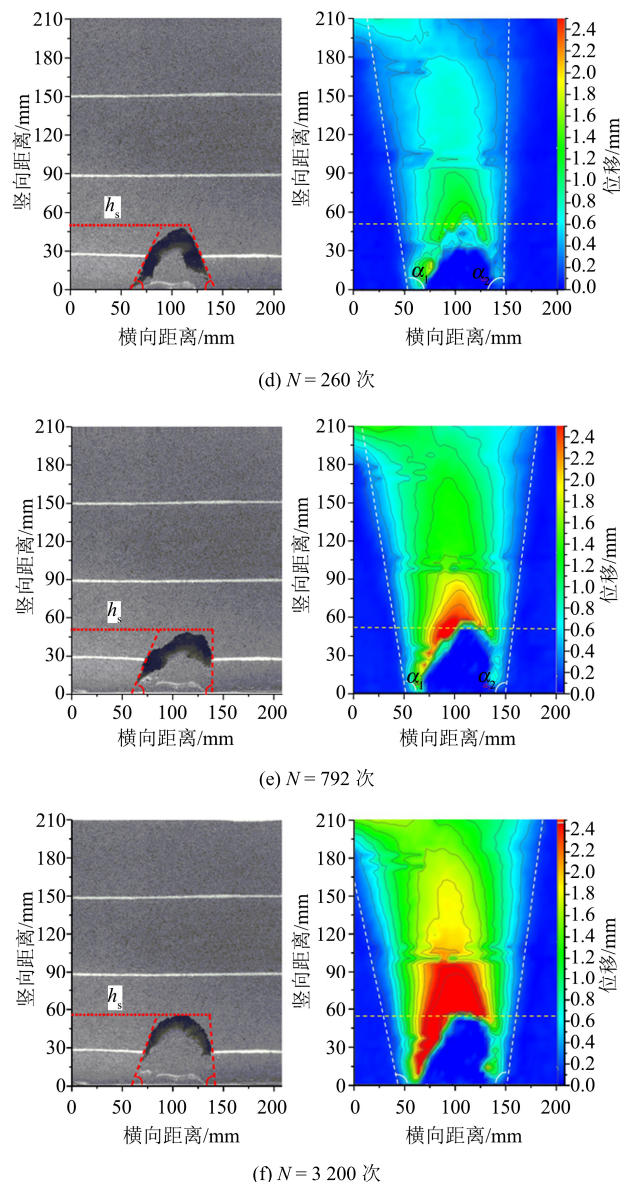
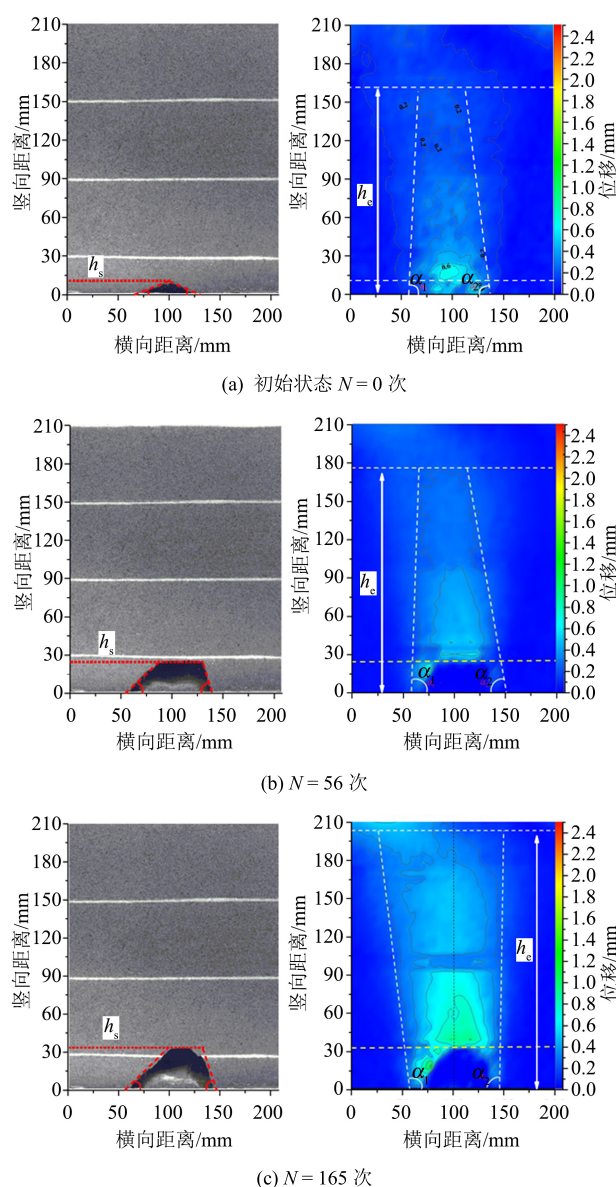


图 9 土拱形态与位移场随加载次数的变化 ($\delta = 30$ mm)
Fig.9 Variations of geometric features and displacement contours of soil arch with number of cycle ($\delta = 30$ mm)

示了 $\delta = 30$ mm 时形成的土拱在循环荷载作用下发展演化的规律。在初始状态, 土拱的结构下边界的高度约为 14 mm。施加动载后, 下边界顶部附近的土体发生塌落, 使活动门上方的脱空区逐渐扩大并向上发展, 形状由三角形向拱形转变, 边界的高度 h_s 和底角 θ 均随之增大。在循环次数 N 达到 3 200 次后, 脱空区高度最终发展至 55 mm 左右, 并在后续的加载过程中不再发生明显的变化。

循环荷载作用下土体的位移场也发生了显著的变化。随动载次数的增加, 其影响高度迅速向上发展, 在 $N = 260$ 次时即延伸至土体表面。同时, 随着底角 α 的增大, 位移场的影响范围逐步由正梯形向倒梯形扩展, 其中土拱结构下边界顶部区域的土体位移量增幅较为明显, 最大值由 0.6 mm 增加至

2.4 mm。

图 10 为试验中各测点的竖向应力随加载次数的变化规律。在开始的约 2 000 个循环内，活动门侧边的各点应力均发生了一定程度的衰减，其中距加载表面最近的 SS1、SS3 点位应力减小更加明显。这部分衰减主要是因为动荷载下随土拱影响范围的扩展和颗粒位移的变化，土体内部发生了不同程度的密实度降低。而距离表面较远的 SS5、SS7 点位受影响相对较小，颗粒位移和密实度无明显变化，应力基本保持稳定。对于活动门上方的测点，在活动门上方脱空区发展的影响下，临近土拱结构下边界顶部位置的 SS4 点位应力因土体塌落而丧失原有和土体的接触关系，发生了较大幅度的衰减，而初始状态已经位于脱空区域的 SS6 和 SS8 点位应力则因塌落土体的堆积而呈现出少量的上升趋势。

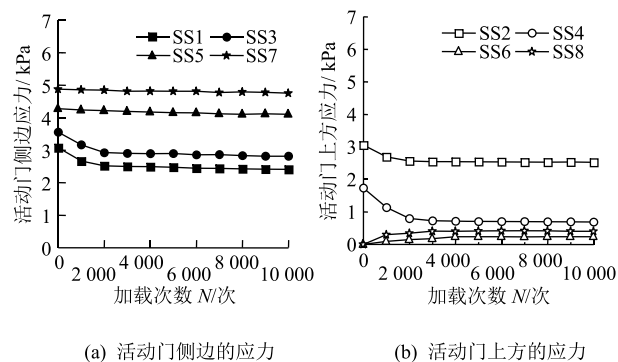


图 10 竖向应力随加载次数的变化 ($\delta = 30 \text{ mm}$)
Fig.10 Variations of vertical stresses with number of cycle ($\delta = 30 \text{ mm}$)

当活动门位移 $\delta = 100 \text{ mm}$ 时，土拱最终发生了整体失稳破坏。图 11 为试验中土拱形态和位移场在

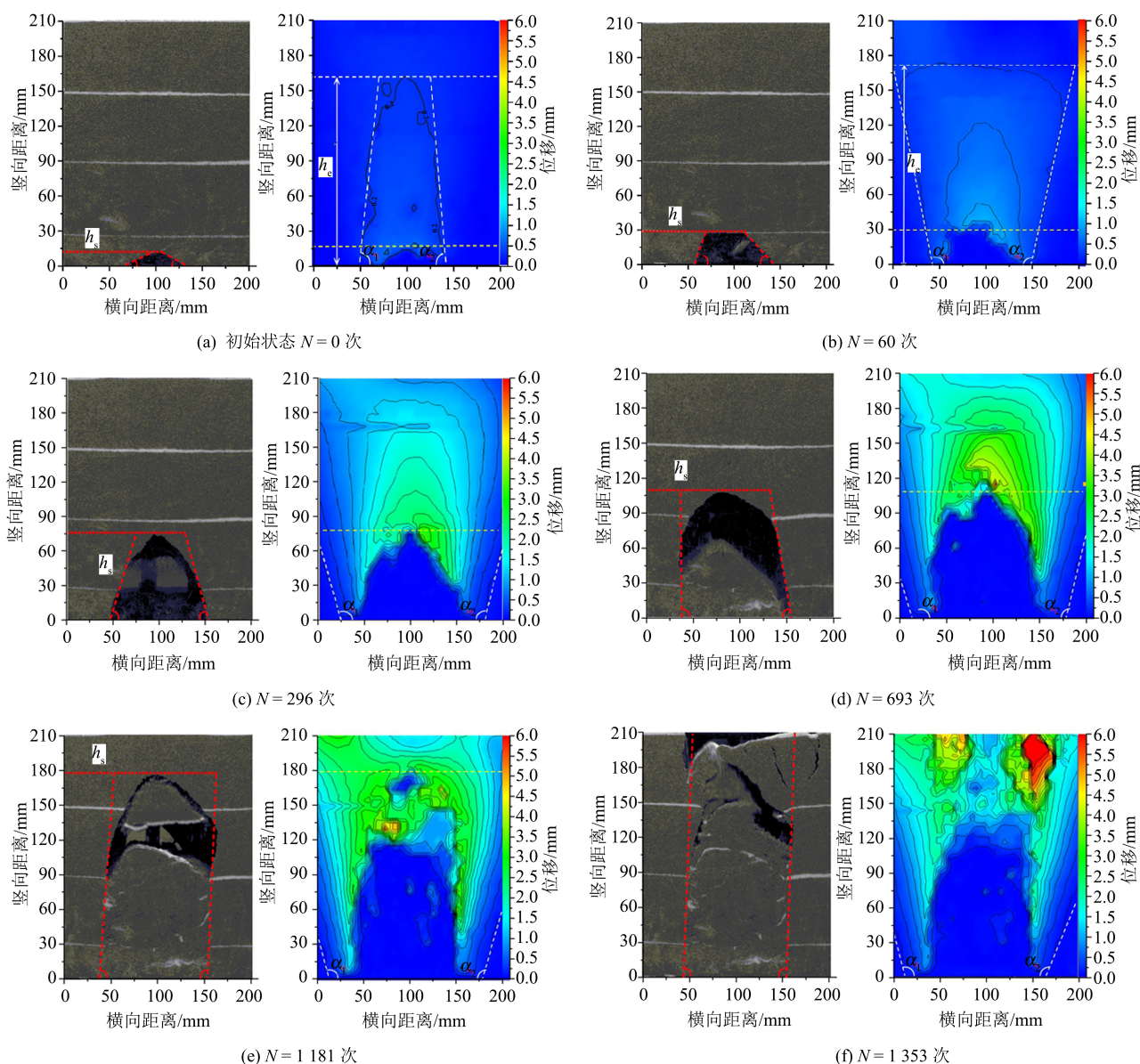


图 11 土拱形态与位移场随加载次数的变化 ($\delta = 100 \text{ mm}$)

Fig.11 Variations of geometric features and displacement contours of soil arch with number of cycle ($\delta = 100 \text{ mm}$)

循环荷载作用下发展演化的规律。在加载初期的一段时间内,活动门上方的脱空区同样在短时间内向上部扩展,土拱结构的下边界高度 h_s 和底角 θ 均随之增大。随着加载次数的增加,该边界并未稳定于某一高度,而是始终持续沿竖向发展,脱空区的形态逐渐由三角形转变为拱形再拉长为烟囱型。最终在 $N=1\,353$ 次时脱空区贯穿填土表面,土拱结构边界发生坍塌破坏。相比于最终稳定的情况,土体位移场的扩展程度和速率均有所增加。

图12为最终土拱破坏情况下各点位应力随加载次数的变化规律。与最终稳定情况相比,由于土体位移和密实度变化的影响范围更大,活动门侧边各点位的应力均发生了不同程度的衰减。而活动门上方的各测点因整体的塌落,在短时间内衰减至较低水平,并随后续塌落土体的堆积而逐渐增加。

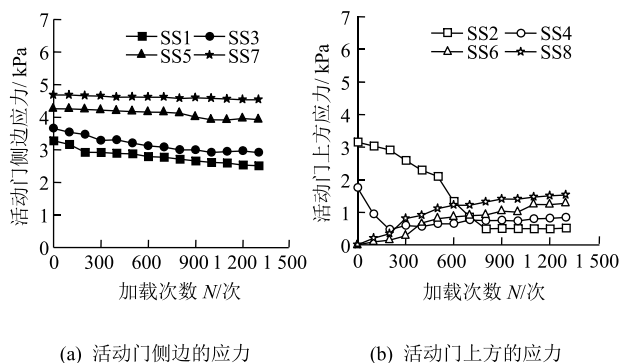


图12 竖向应力随加载次数的变化 ($\delta=100\text{ mm}$)
Fig.12 Variation of vertical stresses with number of cycle ($\delta=100\text{ mm}$)

3.3 初始活动门位移的影响

根据试验结果,初始活动门位移的大小对土拱在循环荷载下发展演化的规律有着不可忽视的影响。图13即为不同活动门位移下表示土拱形态变化的各特征参数随加载次数的变化曲线。此处下边界底角 θ 和上边界底角 α 分别为前述定义两侧底角的平均值,即 $\theta=(\theta_1+\theta_2)/2$, $\alpha=(\alpha_1+\alpha_2)/2$ 。由图可知,由于土拱下边界与位移影响区域的扩展,各参数均在循环荷载作用下有增长的趋势,并且较为明显的增长主要集中于初始加载阶段,约占总循环次数的20%。其中 δ 分别为5、30、50 mm情况下土拱最终达到稳定状态,因此各形态参数曲线均逐渐收敛于一稳定值,且初始活动门位移越大最终稳定的数值越大。当 $\delta=100\text{ mm}$ 时,因土拱在短时间内发生坍塌破坏,下边界高度 h_s 快速增长至填土表面,但底角 θ 和 α 的发展曲线仍呈现一定的收敛趋势。此外,值得注意的是,活动门位移 $\delta=5\text{ mm}$ 时,由于

土拱并未完全形成,各参数的初始和最终值相对较低。

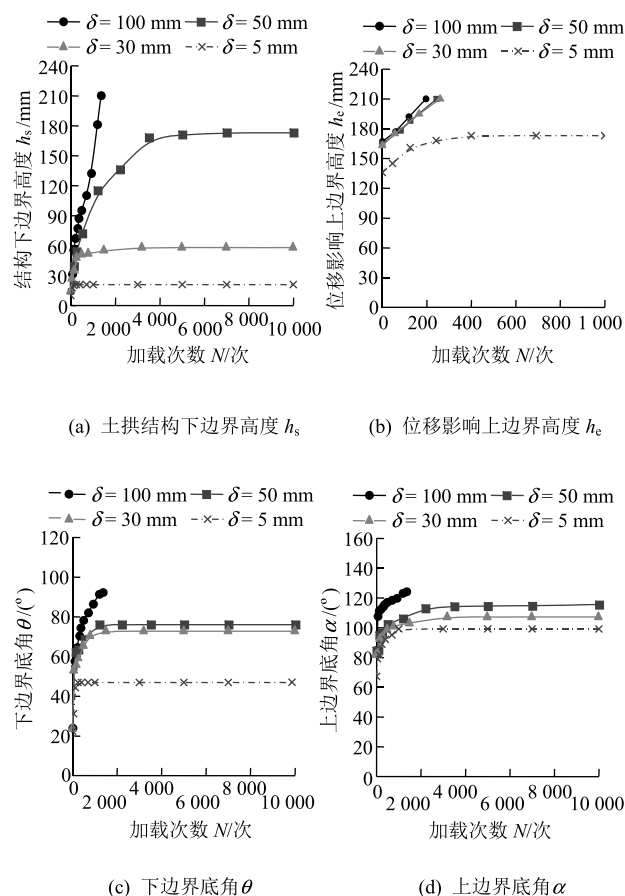


图13 不同活动门位移下土拱形态特征随加载次数的变化
Fig.13 Variations of geometric features of soil arch with number of cycle for different trapdoor displacements

图14对比了不同活动门初始位移下土拱最终达到的状态。可以看出,活动门位移对土拱最终发展的形态和位移场有着显著的影响。对于未完全形成的土拱($\delta=5\text{ mm}$),活动门上方初始形成的细小缝隙随着循环加载而逐渐被上部土体填实。当增大初始活动门位移时,土拱最终的下边界逐步向填土顶面靠近,并由拱形向烟囱型过渡,两侧滑裂面逐渐变为垂直方向,位移场影响范围也随之扩大。

根据试验结果可知,虽然静力条件下完全形成的初始土拱结构近似,但不同的活动门初始位移大小造成了脱空区下方的空间尺寸差异,此空间与施加加载后塌落土体的堆积程度相关,从而影响到土拱的后续发展演化。

造成此影响的主要原因来自于土体塌落区对于上部土拱结构的二次支撑效应(见图14(b)、14(c))。在循环荷载作用下,掉落至活动门上方的土体颗粒在脱空区内发生堆积。对于初始活动门位移较小的情况,堆积的土体迅速覆盖脱空区大部分空间,并

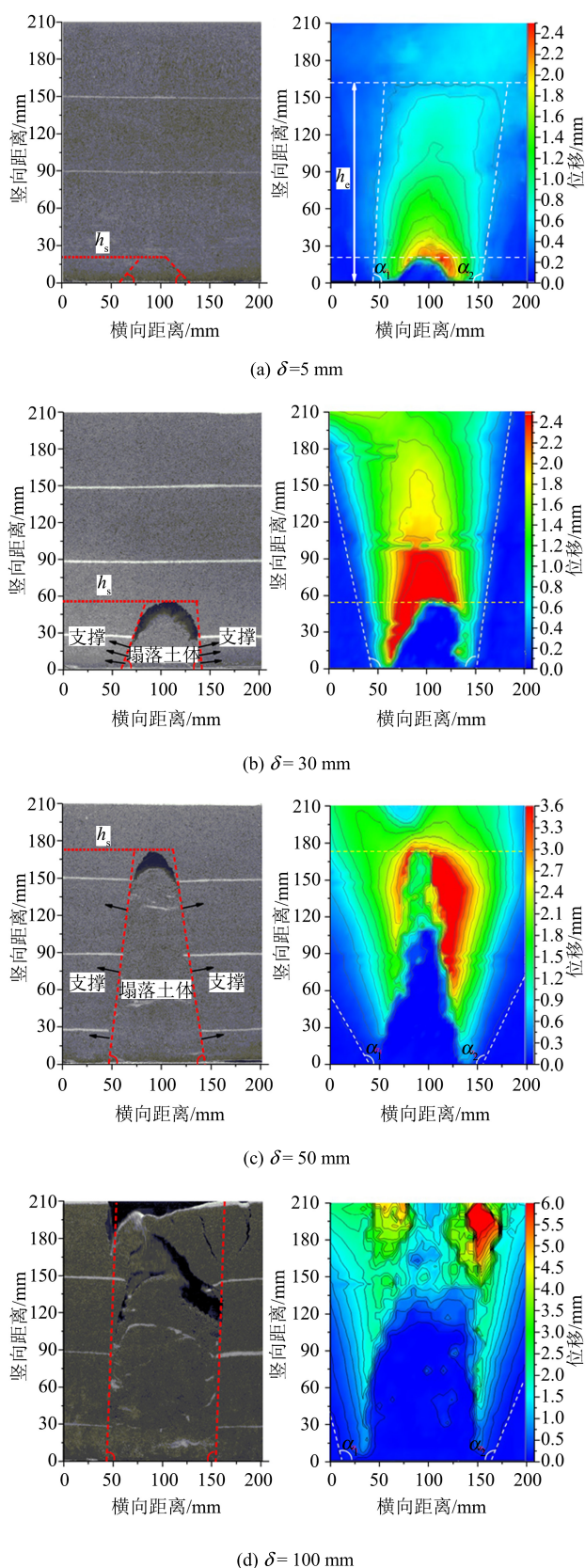


图 14 不同初始活动门位移下土拱最终状态
Fig.14 Final states of arching effect with initial trapdoor displacements

随之对上部土拱结构边界产生支撑作用。活动门上部初始脱空区域越大，堆积土体达到对结构的有效

支撑时所需的土体体积则越多，脱空区向上延伸的距离也相对较长。当堆积土体的支撑作用不足以使土拱边界达到新的稳定状态时，土拱将最终发生整体失稳破坏，整个填土高度内的土体均发生塌落。

图 15 为不同初始活动门位移情况下，最终撤去动载后各点位应力沿竖向的分布规律。可以看出，随初始活动门位移的增大，竖向应力分布的分叉点有所上移，同时位于活动门上方和活动门两侧的应力差值逐步减小，沿竖向应力分布逐步趋近于常规重力的分布形式。这表明土拱效应的荷载转移能力在动载影响下受到了一定削弱。

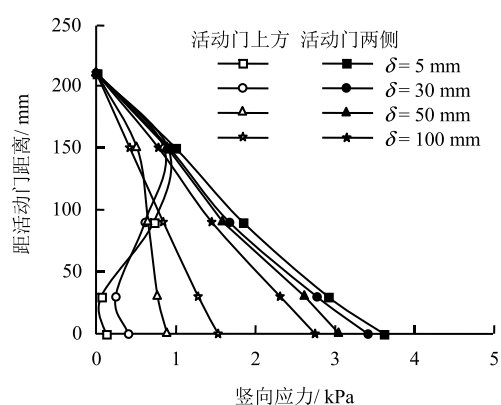


图 15 不同初始活动门位移下最终竖向应力分布图
Fig.15 Final vertical stress distributions for different trapdoor displacements

3.4 土拱演化模式分析

根据试验中循环荷载下土拱表现出的两类发展规律，其各自的演化模式示意图如图 16 所示。

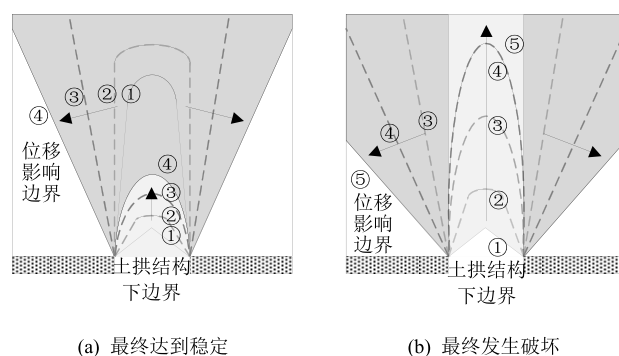


图 16 土拱演化模式示意图
Fig.16 Sketches of evolution process of soil arch

图中箭头和数字编号代表了土拱结构下边界和位移影响边界发展演化的趋势方向和顺序，深灰色区域代表了土体位移场受影响的范围，浅灰色区域

则为发生塌落的土体部分。其中, 最终稳定型土拱结构下边界逐步向上发展, 由初始的三角形转变为椭圆拱形, 位移的影响边界则逐步由活动门正上方向两侧扩展; 而对于土拱最终发生破坏的情况, 结构下边界发展为活动门侧边沿垂向的滑裂面, 位移影响边界则呈扇形扩展至两侧更大的范围。

4 结 论

(1) 土拱形成时, 活动门上方的应力转移至两侧刚性边界上, 土体内部产生应力重分布。施加循环荷载前土拱的几何形态主要表现为活动门上方形成的近似三角形脱空区, 即土拱的结构下边界。土拱对土体位移的影响上边界则表现为一近似正梯形区域。对于未完全形成的土拱, 活动门上方仅产生一细小裂缝, 位移影响区域也相对较小。

(2) 施加循环荷载后, 土拱的下边界随活动门上方脱空区的延伸而不断向上发展, 几何形状由三角形向拱形转变; 土体位移影响上边界则迅速发展至填土顶面并呈扇形向两侧扩展, 下边界顶部附近区域的位移增加更为显著。不同深度竖向应力的变化主要表现为位移影响范围内土体松动引起的应力下降, 以及因活动门上方土体堆积而产生的应力重新增加。

(3) 根据初始活动门位移大小的不同, 土拱发展的最终状态可表现为达到新的稳定状态和发生整体失稳破坏两类。随初始活动门位移的增大, 土拱结构下边界、位移影响上边界以及两者底角的变化速率和最终值均有所增加。当活动门位移较小时, 结构下边界最终稳定在一个较低的高度; 当下边界高度发展至填土表面时土拱发生整体失稳破坏, 在活动门两侧形成近似竖向的滑裂面。

(4) 根据不同初始差异沉降大小对土拱形成时的完整性以及循环荷载下土拱后续稳定性的影响, 在实际工程应用中应综合考虑设置合理的土-结构刚度比, 以充分发挥土拱效应的荷载分担作用, 同时使其在长期动载下能够保持稳定。

参 考 文 献

- [1] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons, 1943.
- [2] HANDY R L. The arch in soil arching[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, 111(3): 302-318.
- [3] LOW B K, TANG S K, CHOA V. Arching in piled embankments[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 120(11): 1917-1938.
- [4] VAN EEKELEN S J M, BEZUIJEN A, VAN TOL A F. An analytical model for arching in piled embankments[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2013, 39: 78-102.
- [5] 陈若曦, 朱斌, 陈云敏, 等. 基于主应力轴旋转理论的修正 Terzaghi 松动土压力[J]. *岩土力学*, 2010, 31(5): 1402-1406.
CHEN Ruo-xi, ZHU Bin, CHEN Yun-min, et al. Modified Terzaghi loosening earth pressure based on theory of main stress axes rotation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(5): 1402-1406.
- [6] 贾剑, 周顺华, 宫全美. 砂性土成拱应力释放特性的模型试验及数值模拟研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(2): 395-403.
JIA Jian, ZHOU Shun-hua, GONG Quan-mei. Stress release characteristics of sandy soil arching by laboratory tests and numerical simulation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(2): 395-403.
- [7] 韩高孝, 宫全美, 周顺华. 摩擦型岩土材料土拱效应微观机制颗粒流模拟分析[J]. *岩土力学*, 2013, 34(6): 1791-1798.
HAN Gao-xiao, GONG Quan-mei, ZHOU Shun-hua. Analysis of microcosmic mechanism of soil arching in frictional geotechnical material by particle flow simulating[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(6): 1791-1798.
- [8] HEITZ C, LÜKING J, KEMPFERT H G. Geosynthetic reinforced and pile supported embankments under static and cyclic loading[C]//Proceedings of the 4th European Geosynthetics Conference. Edinburgh: International Geosynthetics Society, 2008.
- [9] 叶阳升, 张千里, 蔡德钧, 等. 高速铁路桩网复合地基动静荷载传递特性研究[J]. *高速铁路技术*, 2010, 1(1): 10-15.
YE Yang-sheng, ZHANG Qian-li, CAI De-gou, et al. On static and dynamic load transfer peculiarity of low embankment for high speed railway pile-net composite foundation[J]. *High Speed Railway Technology*, 2010, 1(1): 10-15.
- [10] HAN J, BHANDARI A. Evaluation of geogrid-reinforced pile-supported embankments under cyclic loading using discrete element method[C]//U.S.-China Workshop on Ground Improvement Technologies. Orlando: Geotechnical Special Publication, 2009.
- [11] LAI H J, ZHENG J J, ZHANG J, et al. DEM analysis of "soil"-arching within geogrid-reinforced and unreinforced pile-supported embankments[J]. *Computers and Geotechnics*, 2014, 61: 13-23.