

DOI: 10.11779/CJGE2022S2005

基于透明土的填土密实度对土拱效应影响模型试验研究

叶观宝^{1, 2}, 李凌旭^{1, 2}, 张振^{*1, 2}, 陶凤娟^{1, 2}, 程冰男^{1, 2}

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 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: 土拱效应广泛存在于岩土工程中。开展基于透明土的活动门试验, 研究填土密实度对土拱效应演化的影响。研究表明, 密实度较低的填土, 较小的相对位移就可以达到土拱稳定阶段, 提高填土密实度有利于土拱效应的发挥; 填土密实度对内拱高度无影响, 但对外拱有显著影响; 相对位移在 0~3% 时, 位移反射率迅速上升, 而后逐渐趋稳, 提高密实度有利于减弱基底差异沉降向上反射。研究将为填土密实度对土拱演化过程的影响提供参考。

关键词: 透明土; 土拱效应; 填土密实度; 活动门试验

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)S2-0020-05

作者简介: 叶观宝(1964—), 男, 教授, 博士, 主要从事地基处理、软土工程与测试技术等方面的教学和科研工作。

E-mail: ygb1030@126.com。

Model tests on influences of fill density on soil arching effects using transparent soil

YE Guan-bao^{1, 2}, LI Ling-xu^{1, 2}, ZHANG Zhen^{1, 2}, TAO Feng-juan^{1, 2}, CHENG Bin-nan^{1, 2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil 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 soil arching effect commonly exists in geotechnical engineering. The trapdoor tests are conducted using transparent soil to study the influences of fill density on the soil arching effect. The results show that under the lower compactness of the fill, the smaller relative displacement can reach the steady stage of soil arching, and improving the compactness of the fill can reinforce the soil arching effect. The fill density has no influences on the height of the inner arch, but significant influences on the outer arch. When the relative displacement is between 0% and 3%, the displacement reflectivity increases rapidly, and then gradually reaches a constant. Improving the fill density is beneficial to weakening the reflection of differential settlement. This study may provide a references for the influence of fill density on the evolution of soil arching.

Key words: transparent soil; soil arching effect; fill density; trapdoor test

0 引言

活动门试验是研究土拱效应的重要手段。1936年, Terzaghi^[1]通过活动门(Trapdoor)试验证实“土拱效应”的存在, 即土发生相对位移时, 土体的抗剪强度会阻碍土体相对运动, 导致土中应力转移的现象。模型试验及数值模拟研究均得出随着竖向位移减小活动门表面土压力会达到稳定值的结论^[2-4]; 国内学者也从不同角度研究土拱效应的全过程^[5-7], 为土拱效应的研究提供诸多参考。然而影响土拱效应的因素很多, 包括但不限于填土材料、地基土、桩的分布、加筋垫层, 以及荷载条件^[5-13]。

透明土^[14]由固体颗粒与孔隙液体组成, 其物理力学性质与土体近似^[9], 当颗粒与孔隙液体的折射率相近时, 混合物呈现透明, 通过分析连续拍摄的数码照

片, 可以获得土体内部的变形特征。已有众多学者采用透明土技术研究岩土工程问题^[9-10, 14]。但将透明土用于活动门试验以研究土拱效应演化的报道较少。以往的活动门试验大都采用砂土^[12]或铝棒模拟填土^[13], 会受到边界效应的影响, 研究成果还有待于进一步验证。

本文将开展基于透明土的活动门试验, 研究填土密实度对土拱效应的影响。以透明土为填土材料, 通过 PIV 技术(粒子图像测速法)捕捉土拱的演化过程, 研究将成果为回填土密实度对土拱效应的影响提供参考和指导意义。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972272, 41772281); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(22120190220)

收稿日期: 2022-12-01

***通信作者** (E-mail: dyzhangzhen@126.com)

1 模型试验

1.1 试验材料与制备

透明土采用高纯度光学镀膜石英砂颗粒与近似折射率的工业白油混合配制而成(图 1)。石英砂颗粒相对质量密度为 2.24, 室温 25℃时折射率为 1.4585, 颗粒的粒度为 0.1~1 mm, 不均匀系数为 2.08, 干密度为 1.42 g/cm³, 内摩擦角为 47°。白油采用#15 白油和#3 白油按体积比 1.5:1 混合配制而成, 混合油折射率为 1.4584, 透明土的物理力学性质石英砂基本一致。



图 1 透明土配制

Fig. 1 Preparation of transparent soil

1.2 试验设备

模型箱尺寸为 900 mm (长)×500 mm (高)×100 mm (宽)。模型箱箱体主体材质为透明钢化玻璃, 框架为钢结构焊接而成。试验模型箱放置在反力架上。箱底由 3 个可上下活动的活动门和 4 个不可移动的固定块组成, 宽度均为 100 mm, 如图 2 所示。活动门标注为活动门 1(T1)、活动门 2(T2)和活动门 3(T3), 活动门间的固定块标注为固定块 1(S1)和固定块 2(S2)。

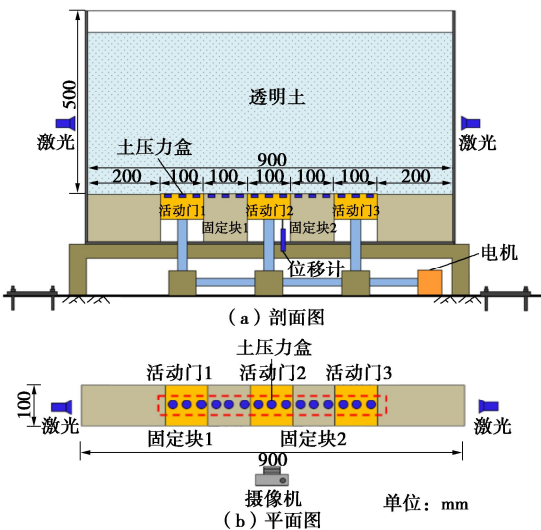


图 2 活动门试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of trapdoor

试验装置通过控制活动门的向下运动引起的与固定块间相对位移发展过程, 研究填土中形成土拱的演化过程。试验过程中, 通过活动门及固定块上布置的 15 个土压力盒监测土压力分布及变化。在模型箱两侧各安装一个高能激光发射器。激光面从模型箱两侧, 在模型箱中轴线对称高度射入, 形成一个激光散斑场。通过高速数字相机摄取试验过程中激光散斑场的变化, 借助 PIV 技术处理分析得到试验过程中填土的位移场变化规律。

1.3 试验方案与步骤

试验主要探讨填土密实度对土拱效应演化的影响, 共设置两组试验, 如表 1 所示。Han 等^[15]建议当相对位移超过 10%土拱达到极限状态。本试验中活动门绝对位移设置为 20 mm, 即相对位移达到 20%。相对位移为活动门竖向位移与活动门宽度之比。

表 1 试验方案

Table 1 Test plans

| 编号 | B/mm | H/mm | Δ/B | 拱数 | 填土密实度/% |
|----|------|------------|------------|----|---------|
| T1 | 100 | 300(H/B=3) | 0.2 | 3 | 50 |
| T2 | 100 | 300(H/B=3) | 0.2 | 3 | 85 |

注: B 为活动门宽度, H 为填土高度, Δ 为活动门位移。

试验分为两个阶段: ①填土阶段: 将配置的白油注入试验箱, 然后向模型箱中填筑透明土, 每 100 mm 为一层, 分层压实至设计高度; ②活动门试验阶段: 活动门下降速率为 0.01 mm/s, 而后每下降 1 mm 停留 100 s, 直至位移达到 20 mm。

2 试验结果与分析

2.1 地基反力曲线

土拱效应演化可用地基反力曲线(Ground reaction curve)描述^[16], 为土拱率与相对位移的曲线。土拱率为活动门上的平均应力与填土平均应力的之比, 即

$$\rho = \frac{P_{\text{Trapdoor}}}{P_{\text{Total}}}, \quad (1)$$

式中, ρ 为土拱率, P_{Trapdoor} 为 S2 上的有效应力平均值, P_{Total} 为填土的平均自重有效应力。图 3 为地基反力曲线。

T1 中相对位移在 0~1%时, 土拱率迅速下降; 相对位移达到 3%时, 土拱率约为 0.4 的最小值, 此时为最大土拱; 而后土拱率逐渐上升, 当相对位移约为 10%时, 土拱进入最终稳定阶段。T2 中相对位移在 0~1%时, 土拱率迅速下降; 相对位移达到 2.5%时, 土拱率为 0.08 的最小值, 而后土拱率呈整体上升趋势, 但从完全土拱阶段到相对位移为 7.5%过程中, 应力恢复速度较快, 而后应力恢复速度缓慢, 土拱仍未进入最终

稳定阶段。

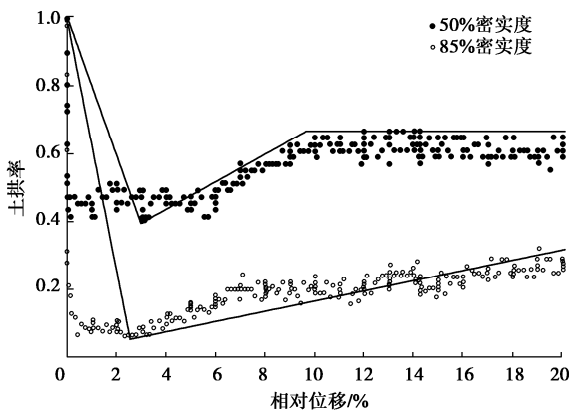


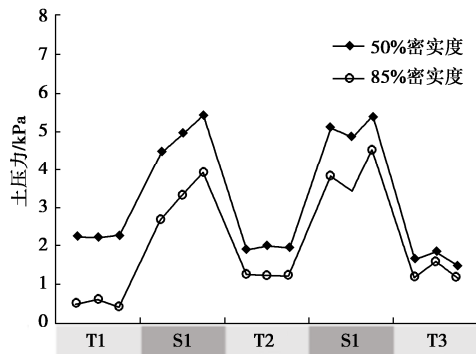
图3 地基反力曲线

Fig. 3 Curves of ground reaction

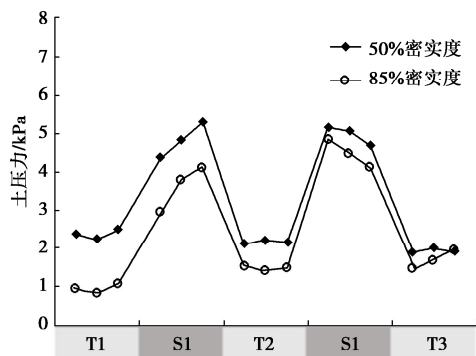
密实度较低的填土土拱更易达到稳定阶段，即较小的相对位移就可以达到稳定阶段。T2 的土拱率在相对位移范围内均小于 T1，说明提高填土密实度有利于土拱效应的发挥

2.2 基底土压力

当产生移动的土体处在屈服状态时，该状态称为“完全土拱”，图4为完全土拱和土拱效应最终阶段时活动门和固定块上的土压力分布。土拱演化过程中，活动门上分布的土压力始终小于固定块分布的土压力，证明了土拱效应的存在。同时，T2 的基底土压力明显小于 T1 的基底土压力。



(a) 完全土拱



(b) 土拱效应最终阶段

图4 土压力分布

Fig. 4 Distribution of earth pressure

2.3 填土位移场

图5为两组试验在完全土拱状态下的竖向位移云图。活动门上方红色区域，称为内拱区域，T1 和 T2 高度均约为 100 mm，说明填土密实度对内拱高度无影响。而绿色区域，称之为外拱区域，T1 大约在高度 200 mm 处，而 T2 大约在 150 mm 处。同时亦可看出，T1 在完全土拱状态时的竖向位移沉降影响范围更广。

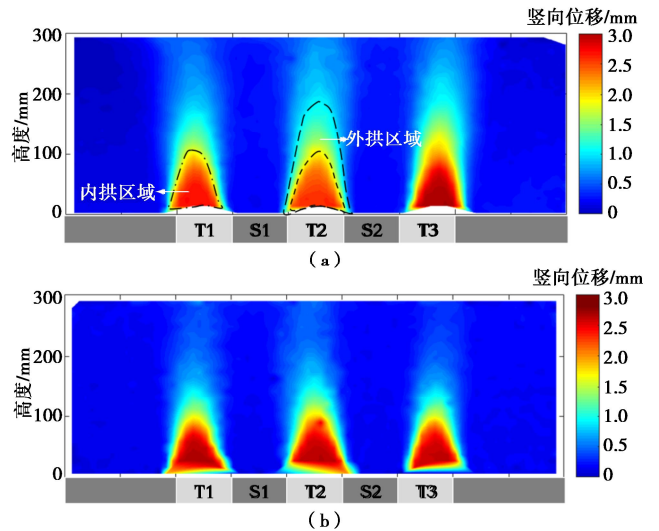


图5 完全土拱阶段竖向位移云图

Fig. 5 Vertical displacements at complete soil arching

图6为在相对位移 20%时的竖向位移云图。此时竖向位移云图差异明显，T1 中的外拱已扩展至填土顶面；而 T2 中的外拱仍维持在填土高度 200 mm 处。

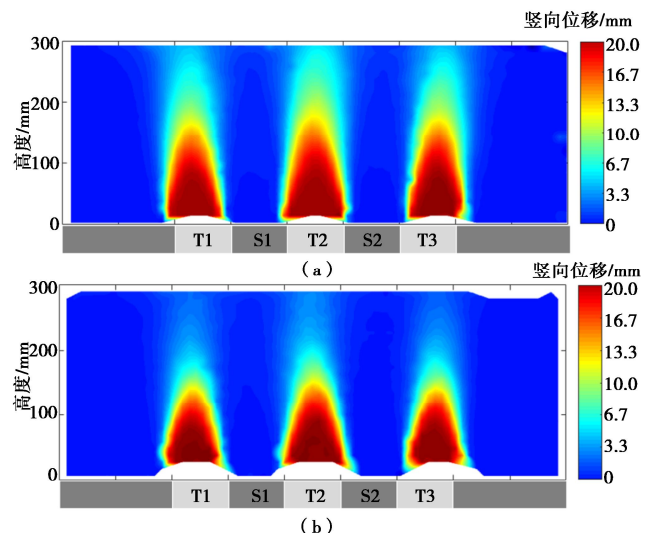


图6 相对位移 20%时的竖向位移云图

Fig. 6 Vertical displacements at displacement of 20%

2.4 位移反射率

活动门向下移动导致活动门与固定块间的差异沉降逐渐增大，此差异沉降会逐渐向上反射而使填土顶面沉降减。为评价土拱效应反射引起填土顶面沉降的

能力, 定义位移反射率 r 为活动门中心轴线处填土表面位移与活动门的位移之比:

$$r = \frac{\Delta s}{\delta} \times 100\% \quad (2)$$

式中, r 为位移反射率, Δs 为某一时刻活动门中心轴线处填土表面位移, δ 为活动门位移。

图 7 为位移反射率与相对位移变化曲线。相对位移在 0~3% 时, 即达到完全土拱过程中, 位移反射率迅速上升; 而后随着相对位移增加, 位移反射率逐渐趋稳。T1 的位移反射率稳定在 25%, T2 的位移反射率稳定在 20%。说明填土密度会影响位移反射率, 填土的密度越高, 则最终稳定时的位移反射率越小, 即填土表面沉降受活动门竖向位移的影响越小。

位移反射率与土拱率存在对应关系: 初始阶段, 位移反射率与土拱率均为快速变化; 当位移大于 10%, 位移反射率趋于稳定, 而土拱进入稳定或恢复阶段。

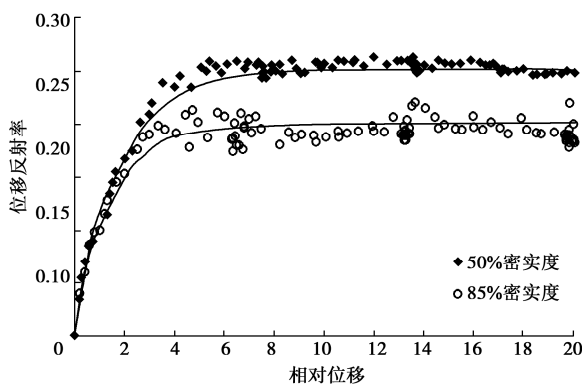


图 7 位移反射率-相对位移曲线

Fig. 7 Displacement reflectivity-relative displacement curves

3 结 论

(1) 当相对位移达到 2.5%~3% 时, 土体达到完全土拱状态。密度低的填土, 较小的相对位移就达到稳定阶段, 提高填土密度有利于土拱效应的发挥。

(2) 填土密度对内拱高度无影响, 但对外拱影响显著。20% 相对位移时, T1 中的外拱已扩展至填土顶面; 而 T2 中的外拱仍维持在 200 mm 处。

(3) 相对位移在 0~3% 时, 位移反射率迅速上升, 而后逐渐趋稳。T1 的位移反射率稳定在 25%, T2 的位移反射率稳定在 20%。位移反射率与土拱率存在对应关系。

参考文献:

[1] TERZAGHI K. Stress distribution in dry and in saturated sand

above a yielding trap-door[C]// Proceedings First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Cambridge, 1936.

[2] 徐 东. 黏土拱效应试验研究[D]. 上海: 上海铁道大学. 1998. (XU Dong. Experimental Study of Clay Arching Effect[D]. Shanghai: Shanghai Railway University, 1998. (in Chinese))

[3] 加 瑞, 朱 伟, 钟小春. 砂土拱效应的挡板下落试验及机理研究[C]// 第一届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会. 昆明, 2006. (JIA Rui, ZHU Wei, ZHONG Xiao-chun. Test and mechanism study of baffle drop for sand arching effect[C]// The First China Symposium on Geotechnical Mechanics and Engineering of Water Resources and Hydropower. Kunming, 2006. (in Chinese))

[4] 郑俊杰, 陈保国, 张世颀. 沟埋式涵洞非线性土压力试验研究与数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1771 - 1777. (ZHENG Jun-jie, CHEN Bao-guo, ZHANG Shi-biao. Experimental investigation and numerical simulation of nonlinear earth pressure for trench-buried culverts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(12): 1771 - 1777. (in Chinese))

[5] 路德春, 曹胜涛, 杜修力, 等. 平面应变条件下的土拱效应[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊 1): 461 - 465. (LU De-chun, CAO Sheng-tao, DU Xiu-li, et al. Soil arching effect under plane strain condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S1): 461 - 465. (in Chinese))

[6] 高 登. 砂土层中盾构隧道竖向土压力的转移机理及其计算[J]. 公路, 2011, 56(11): 214 - 218. (GAO Deng. Transfer mechanism and calculation of vertical soil pressure acted on shield tunnel in sandy soil layer[J]. Highway, 2011, 56(11): 214 - 218. (in Chinese))

[7] 陈仁朋, 李 君, 陈云敏, 等. 干砂盾构开挖面稳定性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 117 - 122. (CHEN Ren-peng, LI Jun, CHEN Yun-min, et al. Large-scale tests on face stability of shield tunnelling in dry cohesionless soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1): 117 - 122. (in Chinese))

[8] CHEN Y M, CAO W P, CHEN R P, et al. An experimental investigation of soil arching within basal reinforced and unreinforced piled embankments[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(2): 164 - 174.

[9] SADEK S, ISKANDER M G, LIU J Y. Geotechnical properties of transparent silica[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002,

- 39(1): 111 - 124.
- [10] NI Q, HIRD C C, GUYMER I. Physical modelling of pile penetration in clay using transparent soil and particle image velocimetry[J]. *Géotechnique*, 2010, **60**(2): 121 - 132.
- [11] AHMED M, ISKANDER M. Analysis of tunneling-induced ground movements using transparent soil models[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, **137**(5): 525 - 535.
- [12] 蒋明镜, 杜文浩, 奚邦禄. 净砂与胶结砂土 Trapdoor 试验离散元数值模拟[J]. *地球科学与环境学报*, 2018, **40**(3): 347 - 354. (JIANG Ming-jing, DU Wen-hao, XI Bang-lu. Distinct element numerical simulation of trapdoor tests for pure and cemented sands[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2018, **40**(3): 347 - 354. (in Chinese))
- [13] 徐超, 张兴亚, 韩杰, 等. 加载条件对土拱效应影响的 Trapdoor 模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, **41**(4): 726 - 732. (XU Chao, ZHANG Xing-ya, HAN Jie, et al. Trapdoor model tests on impact of loading conditions on soil arching effect[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **41**(4): 726 - 732. (in Chinese))
- [14] ISKANDER M G, SADEK S, LIU J Y. Optical measurement of deformation using transparent silica gel to model sand[J]. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2002, **2**(4): 13 - 26.
- [15] HAN J, WANG F, AL-NADDAF M, et al. Closure to “progressive development of two-dimensional soil arching with displacement” by Jie Han, Fei Wang, Mahdi Al-naddaf, and Chao xu[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2019, **19**(3): 1 - 3.
- [16] IGLESIA G R, EINSTEIN H H, WHITMAN R V. Determination of Vertical Loading on Underground Structures Based on an Arching Evolution Concept[C]// *Geo-engineering for Underground Facilities*. Reston, 1999: 495 - 506.

(编校: 胡海霞)