

文章编号:1005-0523(2021)02-0017-05

稳定渗流作用下有限宽度砂土主动土压力研究

周璇¹,方焘²,雷祖祥²

(1. 福建岩土工程勘察研究院有限公司,福建福州 350001;2. 华东交通大学江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室,江西 南昌 330013)

摘要:开挖基坑与既有建筑物距离较近的情况时有发生,此时既有建筑物的基础与基坑之间的土体应视为有限宽度土体,经典的半无限土体压力理论不能适用于这种特殊情况。同时,地下水渗流对基坑稳定性的影响不容忽视。基于此,以自主设计的模型试验箱为基础,进行存在稳定渗流下的有限宽度砂土主动土压力试验,并对模型试验进行数值模拟验证,进一步系统地研究稳定渗流作用下有限宽度砂土的主动土压力试验。研究结果表明:从试验开始到结束,土压力时程曲线可分为“稳定渗流、挡墙运动、挡墙停止”3个阶段;存在稳定渗流条件下的主动土压力值大于静水条件下的主动土压力值,且在数值模拟中,有限宽度土体的主动土压力值小于半无限宽度土体的主动土压力值;针对砂土,有效应力法的计算结果与试验结果相接近,但在实际工程中采用水土分算方法计算主动土压力会更加安全。

关键词:稳定渗流;有限土体;标准砂;土压力

中图分类号:TU41 **文献标志码:**A

本文引用格式:周璇,方焘,雷祖祥. 稳定渗流作用下有限宽度砂土主动土压力研究[J]. 华东交通大学学报,2021,38(2):17-21.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.20210416.006

Study on Active Soil Pressure of Finite Width Sandy Soil Under Steady Seepage

Zhou Xuan¹, Fang Tao², Lei Zuxiang²

(1. Fujian Geotechnical Engineering Research Institute, Fuzhou 350001, China; 2. Jiangxi Key Laboratory of Geotechnical Engineering Infrastructure Safety Control, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: It occurs occasionally that the excavating pits are adjacent to as-built constructions. The soil mass located between the foundation of the as-built construction and the pit is viewed to be finite width soil mass, resulting in failure of classical finite soil mass theory. Meanwhile, the seepage also has non-negligible influence on excavation of foundation pit. In response, soil-pressure model box is designed to investigate the influence of steady seepage on active soil pressure of finite width soil mass. The corresponding numerical simulations are implemented to verify the experimental observations for a further systematic study. The following conclusions are obtained: The time-history of soil pressure can be divided into three phases, including steady seepage, movement of retaining wall and the rest of retaining wall; The active soil pressure under the condition of steady seepage is larger than that of static water, and in the numerical simulation, the active soil pressure of the soil with finite width is smaller than that of the soil with half-infinite width; For sandy soil, the calculation result of effective stress method is close to the test result, but it is safer to compute active soil pressure by soil and water partition method in practical projects.

Key words: stable seepage; finite soil; standard sand; soil pressure

Citation format: ZHOU X, FANG T, LEI Z X. Study on active soil pressure of finite width sandy soil under steady seepage[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(2): 17-21.

收稿日期:2021-01-04

基金项目:江西省自然科学基金项目(20192BAB206046)

作者简介:周璇(1974—),女,工程师,硕士,研究方向为土动力学。E-mail:53627875@qq.com。

通信作者:雷祖祥(1986—),男,教授,博士,研究方向为土的动力特性。Email:zxlei@ecjtu.edu.cn。

随着我国城市化建设的不断推进,高层与超高层建筑、地下建筑物以及交通设施的建设蓬勃兴起,大型深基坑工程^[1-3]屡见不鲜。与此同时,因城市建筑密度大、环境复杂等因素导致基坑开挖、施工、设计等方面面临严峻考验^[4-5],“深、大、近、难”已然成为当下基坑工程的基本特点。现有众多学者从土体抗剪强度^[6-7]、地下水渗流^[8-11]、挡土墙变位模式^[12]等因素对基坑进行了多方面分析,其中,地下水渗流作用对基坑工程稳定性的影响已受到众多国内外学者的关注。

在深基坑围护结构设计过程中,准确计算挡土墙后土压力是国内外研究热点^[13-14]。在实际工程中,朗肯土压力理论与库伦土压力理论的应用颇为广泛,许多经典的经验修正公式以及基坑工程支护的设计规范^[15-17]也是在此基础上进行修正和折减。

如今邻近既有建(构)筑物的基坑工程比比皆是,有限宽度土体为基坑围护结构与既有建(构)筑物桩基或地下室之间的狭窄土体。此时,建立在半无限土体假定基础上的朗肯或库伦土压力理论并不适用于这部分有限土体土压力的计算^[18]。

针对基坑工程中临近已有建筑物的情况,鲜有考虑地下水渗流的存在对有限宽度砂土的主动土压力的影响。但从工程实际角度出发,研究稳定渗流作用下的有限宽度砂土的主动土压力具有一定的工程意义。通过模型试验研究稳定渗流作用对有限宽度砂土土体主动土压力的影响,并对模型试验进行数值模拟验证,进一步系统地研究稳定渗流作用下有限宽度砂土主动土压力问题。

1 试验设备和装置

试验设备为自主设计、制作的长方体模型箱,其平面尺寸为 2.5 m×1.0 m,高为 1.5 m,其主体由宽 10 cm、厚 1 cm 的钢材焊制而成,左右两侧安装厚 20 mm 的钢化玻璃。模型箱从左向右依次分为渗流水储蓄室、挡墙活动室和标准砂填筑室 3 个部分。

渗流水储蓄室与外界自来水源汇接,是储蓄渗流水,提供稳定渗流条件的主要场所;标准砂填筑室用来进行各项土压力试验;挡墙活动室是模拟基坑围护结构变位模式的活动场所,挡墙活动室填筑不同高度的标准砂以模拟不同挖深的基坑,如图 1 所示。

标准砂填筑室和挡墙活动室之间有 1 块 15 mm 厚钢板用来构建土压力盒挡墙(嵌固着土压力盒的木板)和土压力采集系统,如图 1 所示。为较好地模拟基坑的围护支挡结构,土压力盒挡墙选用材质较好的木板。图 2 为土压力盒挡墙安装的土压力位置盒示意图。

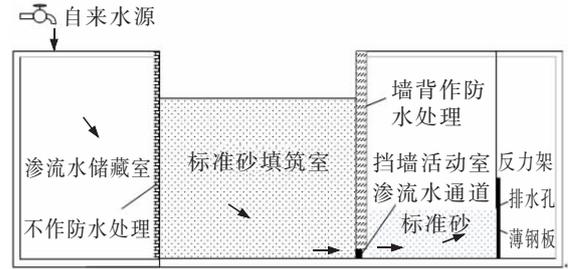
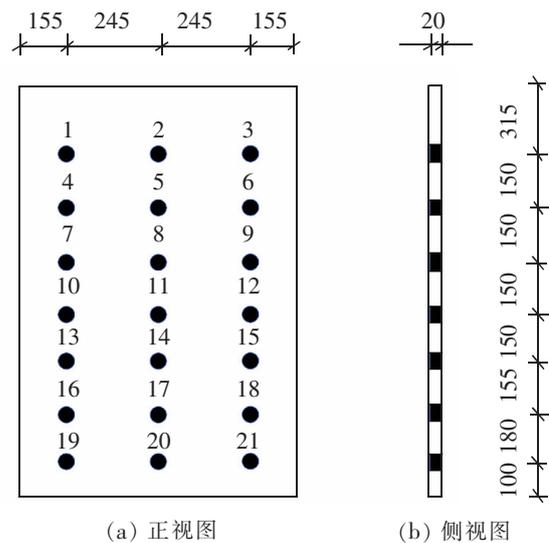


图 1 试验模型箱

Fig.1 Test model box



(a) 正视图

(b) 侧视图

图 2 土压力盒分布图(单位:mm)

Fig.2 Distribution of each pressure cell(Unit:mm)

土压力盒嵌固在木板上,保持整个挡墙的墙面平整并且做好挡墙的防水密封工作。试验所采用的砂土为中国 ISO 标准砂,粒度为 0.5~1.0 mm。室内常规试验测得该砂样的基本力学参数(密度 ρ 、饱水密度 ρ_{sat} 、内摩擦角 φ 、饱和内摩擦角 φ' 、孔隙率 e)见表 1,测得该砂土试样的渗透系数为 1.56×10^{-2} cm/s。

表 1 标准砂的基本力学参数

Tab.1 Basic mechanical parameters of standard sand

| $\rho/(g/cm^3)$ | $\rho_{sat}/(g/cm^3)$ | $\varphi/(^\circ)$ | $\varphi'/(^\circ)$ | e |
|-----------------|-----------------------|--------------------|---------------------|------|
| 1.51 | 1.83 | 31.1 | 45.6 | 0.72 |

2 试验设计

2.1 稳定渗流的实现

为了使模型箱内水达到稳定渗流状态,在自来水水源附近安装了一个带有压力表的阀门,可通过这个阀门控制水源的水压稳定。

为了尽可能真实地模拟场地渗流条件,首先需要储藏室内的水头保持稳定并尽量提高水头高度;随后在挡墙活动室内填筑一层 25 cm 厚(可根据试验设计填筑不同厚度砂土)的标准砂土层,模拟基坑底部;最后在挡墙活动室与反力架之间设置一块带圆孔的薄钢板,渗流水最终可从薄钢板上的圆孔流出。根据稳定渗流的定义可知,当渗流水储蓄室和标准砂填筑室内的水位处在同一水平线上且维持恒定,即可视为达到稳定渗流。

2.2 试验步骤

试验分为 2 个阶段,即在进行稳定渗流作用下的主动土压力试验之前,先对静水压力作用下的主动土压力进行测试,随后再对存在稳定渗流作用下的土压力值与静水压力作用下的主动土压力值进行测量。研究对象为有限宽度砂土,土体的体积为 80 cm×65 cm×100 cm(长×宽×高),挡墙的变位模式为 RB 模式。

以上 2 组试验的步骤相同,仅渗流条件不同,现以稳定渗流条件下测量土压力为例进行步骤阐述。

1) 清理并整理模型箱内部,调节渗流水储蓄室钢板至合适位置,使准砂填筑室平面尺寸为 80 cm×65 cm(长×宽)。安装土压力盒挡墙并将土压力盒连接上数据采集系统,打开计算机分析软件。

2) 做好模型箱的防水密封工作,为使各墙表面的粗糙度与土体一致,将模型箱的光滑墙面粘满标准试验砂土;对土压力盒进行标定置零,分层铺设标准砂,铺设完成后将土体静置 48 h;静置后加水,直至满足稳定渗流条件(渗流出水口的流速达到 35.8 mL/s 不变),记录渗流过程与稳定渗流时的时程曲线。

3) 使土压力盒挡墙进行 RB 位移模式运动,记录各个土压力盒的读数,观察土体破坏的整个过程及土体破坏的最终状态(土体表面出现明显裂隙),然后停止挡墙运动,维持破坏状态 30 min 并持续记录,输出图形。

3 试验结果

稳定渗流作用下有限宽度砂土主动土压力试验共获得 21 条压力-时间的时程曲线,为减小边界效应对试验数据的影响,以中间列土压力盒的时程曲线进行分析,土压力盒 5,8 的时程曲线如图 3 所示。

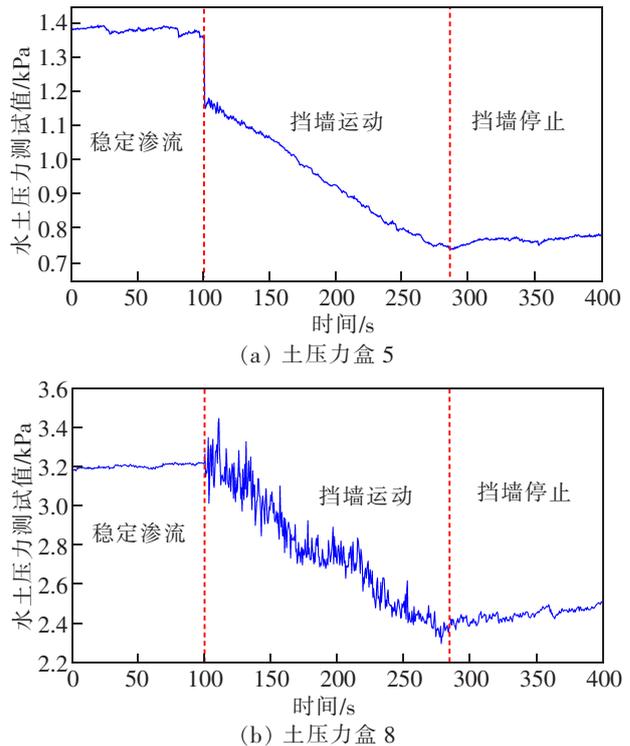


图3 稳定渗流下主动土压力时程曲线

Fig.3 Time history curve of active earth pressure under steady seepage

由图 3 可知:埋设位置位于不同深度的土压力盒,测得其土压力的时程曲线都可以分为“稳定渗流、挡墙运动渗流、挡墙停止后渗流”3 个阶段。

“稳定渗流”阶段土压力指挡墙运动以前测得的土压力值,其曲线较为平缓;“挡墙运动渗流”阶段指电机启动后至挡墙停止前的阶段,该阶段由于挡墙的匀速转动,土压力值发生剧烈波动,且土压力值均在上下波动中有逐渐减小的趋势,这是因为挡墙在运动过程中,受到的侧向土压力从静止土压力转变为主动土压力,从而导致压力盒测得的压力值减小;“挡墙停止”阶段指在土体第 1 道破裂面贯穿时的土压力值,该阶段土压力值的变化相对平缓,此时测得的土压力值即为稳定渗流条件下,挡墙发生 RB 变位模式的有限宽度砂土主动土压力值。

如图4所示,将测得的静水和稳定渗流作用下有限宽度砂土主动土压力值进行汇总分析,2种条件下测得的3列土压力盒的主动土压力值之间相差很小。为减小模型箱内壁可能对土压力造成的影响和有利于后面试验的分析,选用挡墙上第2列的土压力盒实测压力值进行分析,结果表明土压力值随着埋置深度的增加而增大,为近似线性递增,且静水压力条件下测得的主动土压力值小于稳定渗流条件下的主动土压力值。

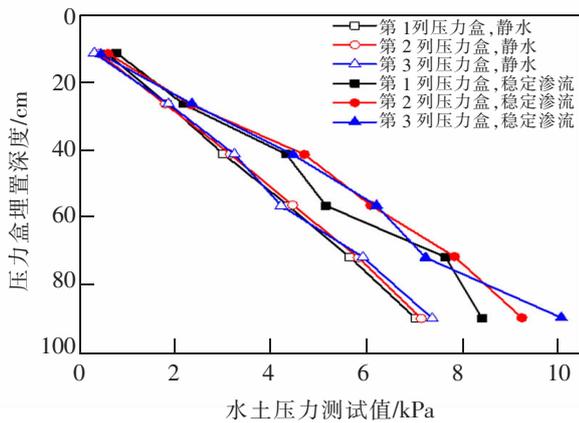


图4 试验结果
Fig.4 Test result

4 数值模拟

4.1 模型建立

二维数值模拟采用 ABAQUS 有限元分析软件。模型尺寸示意如图5所示,土体高为 100 cm,土体宽 65 cm,活动挡墙高为 100 cm,厚度为 8 cm,建模尺寸与试验模型尺寸保持一致。

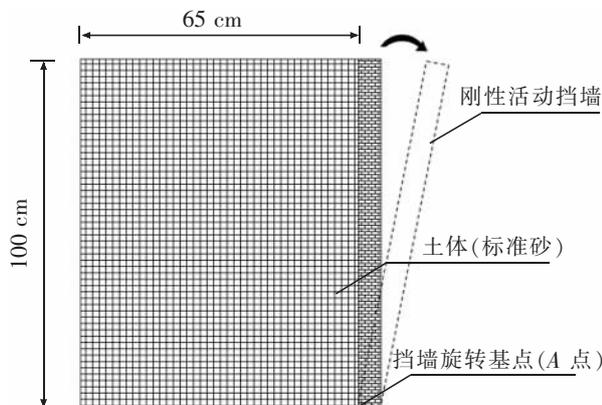


图5 模拟尺寸图
Fig.5 Model size diagram

4.2 模型参数

土体和活动挡墙均受重力作用,需要对以上2个材料定义密度。标准砂土定义相应密度时应当选取干密度。活动挡墙与试验砂的相关物理参数见表3,表4。

表3 活动挡墙物理参数
Tab.3 Physical parameters of movable retaining wall

| 高/cm | 宽/cm | 天然重度 $\gamma/$ (kW/m ³) | 弹性模量 $E/$ MPa | 泊松比 |
|------|------|--|------------------|-----|
| 100 | 15 | 28 | 5×10^4 | 0.3 |

表4 模型材料参数
Tab.4 Model material parameters

| 天然重度 $\gamma/$ (kW/m ³) | 压缩模量 $E_s/$ MPa | 黏聚力 $c/$ kPa |
|--|--------------------|-------------------------|
| 15.1 | 48 | 0 |
| $P_a/(kg/m^3)$ | 泊松比 | 内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$ |
| 1.51 | 0.25 | 31.1 |

4.3 数值模拟结果分析

为进行对比分析,利用 ABAQUS 有限元分析软件建立3个不同条件下的数值模型:稳定渗流作用下有限宽度土体(高 100 cm×宽 65 cm)模型;无渗流作用(未定义土体渗流参数)下有限宽度土体模型;稳定渗流作用下半无限宽度土体(高 100 cm×宽 100 cm)模型。

通过数值模拟计算主动土压力结果与试验测得的数据进行比较,数值模型计算结果与试验测得的数据分布规律一致,由此说明了数值计算的准确性,结果如图6。

图7为上述3个模型的数值模拟计算结果曲线。通过汇总分析可知,在挡墙的另一深度处,无渗流作用下有限宽度土体主动土压力<稳定渗流作用下有限宽度土体主动土压力<稳定渗流作用下半无限宽度土体主动土压力。

此外,对比图6、图7中另外3条线:有效应力法土压力曲线,水土分算法土压力曲线,水土合算法土压力曲线,不难看出水土合算法计算的土压力值偏小,水土分算法计算结果比有效应力法计算结果稍大;因此在实际工程中用水土分算法计算主动土压力会更加安全。

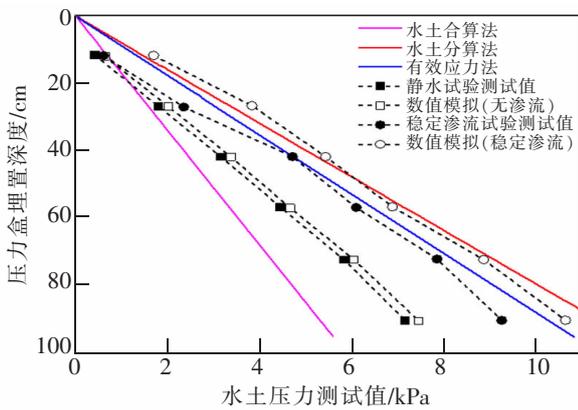


图6 数值模拟与试验结果对比

Fig.6 Comparison between numerical simulation and test

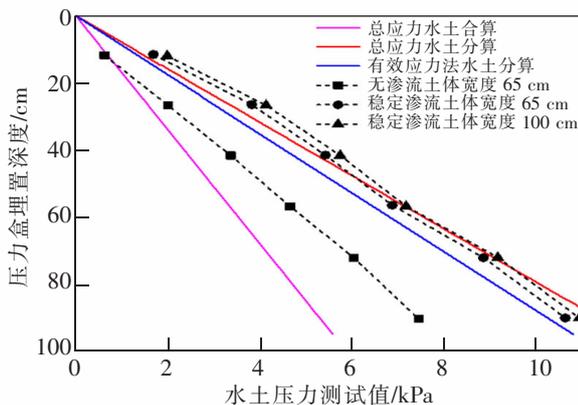


图7 数值模拟结果

Fig.7 Results of numerical simulations

5 结论

以基坑工程中地下水渗流对主动土压力的影响为出发点,基于实际工程可能存在的实际问题,开展模型试验研究,探讨了渗流作用对有限宽度的砂土体主动土压力的影响,主要结论如下。

1) 在模型试验中,通过测量观察到主动土压力可分为“稳定渗流”“挡墙运动渗流”“挡墙停止渗流”3个阶段,说明挡墙运动会影响主动土压力值呈现不同的变化规律。

2) 除了主动土压力值会随着土压力盒埋置深度的增大而增大以外,在土体深度相同的点,稳定渗流条件下砂土的主动土压力值也会比静水条件下的主动土压力值大。由此便可得出,土体处在稳定渗流条件下,基坑围护结构受到的侧向压力会增大。

3) 在数值模拟中,在挡墙同一深度处,无渗流作用下的静水土压力要小于渗流存在下的土压力,且有限宽度土体的主动土压力小于半无限宽度土体的主动土压力。

4) 针对砂土,有效应力法计算结果与试验结果最接近,水土分算法计算结果比有效应力法计算结果更大;因此实际工程采用水土分算法计算砂土的主动土压力会更加安全。

参考文献:

- [1] 罗成恒,魏建华. 减少软土深基坑周边环境初始位移的方法探讨[J]. 岩土工程学报,2012,34(S1):49-53.
- [2] 郑刚,杜一鸣,刁钰,等. 基坑开挖引起邻近既有隧道变形的影响区研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(4):599-612.
- [3] 耿大新,余小强,童立红,等. 弧形地连墙侧位移计算的新方法[J]. 岩土工程学报,2016,38(12):2272-2277.
- [4] WEI G, HU L W, CHEN K L. Numerical simulation of effect of foundation pit excavation on underlain shield tunnel[J]. Applied Mechanics and Materials,2014,36(6):1001-1007.
- [5] ZHANG Z G, HUANG M S, WANG W D. Evaluation of deformation response for adjacent tunnels due to soil unloading in excavation engineering[J]. Tunneling and Underground Space Technology,2013,38(9):244-253.
- [6] CHANG M F. Lateral earth pressures behind rotating walls[J]. Canadian Geotechnical Journal,1997,34(34):498-509.
- [7] 罗文俊,王海洋,刘焕强,等. 不同含水率红黏土的抗剪强度试验研究[J]. 华东交通大学学报,2020,37(1):119-126.
- [8] 董诚,郑颖人,唐晓松. 渗流条件下基坑水-土压力不同计算方法的比较[J]. 岩土力学,2007,28(S1):677-681.
- [9] GAO H M, ZHAO Y L, ZHAO J T. Study influence of groundwater seepage on the deep foundation pit[J]. Advanced Materials Research,2010(168/170):2477-2480.
- [10] LI Y, CHAI J, XU Z. Analysis of influence of seepage on stability of foundation pit[C]//Materials Science and Engineering Conference Series,2017.
- [11] 雷卫佳,刘伟煌,郭生根,等. 水位升降对库坡渗流场及稳定性影响[J]. 华东交通大学学报,2020,37(4):27-32.
- [12] MATSUZAWA H, HAZARIKA H. Analyses of active earth pressure against rigid retaining wall subjected to different modes of movement[J]. Journal of the Japanese Geotechnical Society,1996,36(3):51-65.
- [13] DOU G T, XIA J W, YU W J, et al. Non-limit passive soil pressure on rigid retaining walls[J]. International Journal of Mining Science and Technology,2017,27(3):581-587.
- [14] 张永兴,陈林. 挡土墙非极限状态主动土压力分布[J]. 土木工程学报,2011,44(4):112-119.
- [15] 郑生庆,郑颖人,李耀刚,等. GB 50330-2002 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [16] 姚建强,朱沈阳,李三红,等. JGJ 167-2009 湿陷性黄土地区建筑基坑工程安全技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [17] 杨斌,黄强,杨志银,等. JGJ 120-2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012. <http://www.cnki.net>
- [18] 高印立. 有限土体土压力的计算探讨[J]. 建筑结构,2000,16(5):53-56.