

张建成,侯天顺,刘浩钰,等.刚性挡土墙后轻量土主动土压力特性模型试验研究[J].地震工程学报,2023,45(6):1397-1407.
DOI:10.20000/j.1000-0844.20220804008
ZHANG Jiancheng, HOU Tianshun, LIU Haoyu, et al. Model test of the active earth pressure characteristics of lightweight soil behind rigid retaining walls[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(6): 1397-1407. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20220804008

刚性挡土墙后轻量土主动土压力特性 模型试验研究

张建成¹, 侯天顺¹, 刘浩钰¹, 杨 诚², 骆亚生¹

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 陕西省引汉济渭工程建设有限公司, 陕西 西安 710011)

摘要: 为了研究轻量土的主动土压力特性,通过开展大比尺刚性挡土墙模型试验,采用人工控制挡土墙位移的方式,分析轻量土作为墙后填土时的主动土压力分布规律。结果表明:轻量土的侧向土压力随着挡墙位移量的增加先降低后逐渐趋于稳定,侧向土压力在挡墙位移量为 3 mm 时初步达到稳定状态,对比发现轻量土的主动土压力显著小于重塑黄土,这表明轻量土可以有效降低墙背主动土压力。轻量土的主动土压力系数处于 0~0.16 之间,沿着挡墙分布较为稳定,而重塑黄土主动土压力系数介于 0~0.57 之间,显著大于轻量土的主动土压力系数。经朗肯理论值与模型试验值对比分析,发现轻量土的朗肯主动土压力小于试验值,理论值与试验值之间的绝对误差处于 0~6.32 kPa 之间,其在实际工程中可以忽略不计。鉴于模型试验中墙背与填土之间存在一定的摩擦,朗肯理论在计算轻量土的主动土压力时仍较为准确。通过模型试验研究和传统理论分析,揭示了轻量土的主动土压力特性,对于完善轻量土土压力理论具有重要意义。

关键词: 轻量土; 主动土压力; 主动土压力系数; 模型试验

中图分类号: TU432

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2023)06-1397-11

DOI:10.20000/j.1000-0844.20220804008

Model test of the active earth pressure characteristics of lightweight soil behind rigid retaining walls

ZHANG Jiancheng¹, HOU Tianshun¹, LIU Haoyu¹, YANG Cheng², LUO Yasheng¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;

2. Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project Construction Co., Ltd., Shaanxi Province, Xi'an 710011, Shaanxi, China)

Abstract: To study the active earth pressure characteristics of lightweight soil, we conducted

收稿日期: 2022-08-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51509211); 中国博士后基金项目(2016M602863); 陕西省留学人员科技活动择优资助项目(2018031); 陕西省社会发展科技攻关项目(2015SF260); 陕西省博士后基金项目(2017BSHYDZZ50); 陕西省自然科学基金计划引汉济渭联合基金项目(2021JLM-51); 西安市岩土与地下工程重点实验室开放基金项目(XKLGUEKF21-02); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2452020169)

第一作者简介: 张建成(1994—),男,黑龙江绥化人,硕士研究生,主要从事轻量土土压力研究工作。E-mail: jianchengzh@163.com。

通信作者: 侯天顺(1981—),男,湖北十堰人,博士,副教授,主要从事岩土力学、地基基础工程与地质灾害防治方面的教学与科研工作。E-mail: houtianshunyx@sina.com。

model tests on a large-scale rigid retaining wall. The displacement of the retaining wall was controlled to analyze the active earth-pressure distribution law of lightweight soil. The results show that the lateral earth pressures of lightweight soil first decreased and then gradually stabilized with increasing retaining wall displacement. When the displacement of the retaining wall was 3 mm, the lateral earth pressure of lightweight soil reached a stable state. The active earth pressure of lightweight soil was considerably less than that of remolded loess, indicating that the former can effectively reduce active earth pressure on the back of walls. The active-earth-pressure coefficient of lightweight soil ranged between 0 and 0.16, and a slight change range was observed along the height of the retaining wall. However, the active earth-pressure coefficient of the remolded loess was 0—0.57, which is evidently larger than that of lightweight soil. According to the comparative analysis of Rankine's theoretical and model test values, the Rankine active earth pressure of lightweight soil is less than the test value. The absolute error between the theoretical and experimental values was 0—6.32 kPa, which can be ignored in practical engineering. A certain friction existed between the wall back and fillings in the model tests. Therefore, Rankine's theory remains accurate in the calculation of the active earth pressure of lightweight soil. The active earth pressure characteristics of lightweight soil, which are important for improving the earth pressure theory of lightweight soil, were revealed by model tests and traditional theoretical analysis.

Keywords: lightweight soil; active earth pressure; coefficient of active earth pressure; model test

0 引言

随着我国经济实力的不断提高,基础设施建设不断推进,高速公路的铺设轨迹也不断延伸。挡土墙作为一种路基支挡结构,在公路建设中发挥着至关重要的作用,尤其是在施工难度较大的山区公路中更是必不可少^[1]。为了防止工程事故的发生,进而避免造成重大的财产损失,对挡土墙稳定性的研究是十分必要的。

国内外众多学者在研究挡土墙的过程中针对墙背土压力开展了大量研究。Chen 等^[2]在考虑摩擦作用的基础上,通过有限元分析和理论推导的方法研究了有限土体的主动土压力,发现主动土压力与填土的长宽比有关。Tang 等^[3]针对黏性土有、无张拉裂缝的情况,采用动态极限平衡方法提出了主动土压力计算方法,其与已有计算方法相比更加准确。Chen 等^[4]通过有限元模拟研究了平动模式下有限土体的破坏机理,提出了滑移面倾角的拟合公式,还发现被动土压力呈非线性分布,随着填土宽度的降低而增大。Ni 等^[5]提出了一种计算桩结构不同深度处土压力的方法,经过与已有计算方法对比,发现该方法较为准确。Fang 等^[6]利用台湾交通大学的仪器研究不同密度的干砂对被动土压力的影响,研究发现无论干砂密度大小如何,当墙背位移量达到墙高的 12% 时,被动土压力都将达到恒值。Li 等^[7]

基于微分单元法提出了一种计算桩间挡板主动土压力的方法,经过与试验结果和其他计算方法对比后,发现该方法准确度较高,建议板的净跨取桩径的 1.5~1.7 倍。Li 等^[8]采用非线性屈服准则对主动土压力特性进行研究,结果表明拉裂缝会对主动土压力产生不利影响,且这种不利影响在较高渗透压力作用时更加明显。Goel 等^[9]在考虑土拱效应的基础上对主动土压力系数进行了修正。应宏伟等^[10]通过开展不同填土宽度的挡土墙模型试验对被动土压力进行研究,发现有限宽度土体的被动土压力试验值要大于库仑被动土压力,且随着土体宽度的减小合力作用点逐渐向墙底移动。许雷挺等^[11]研究了 T 模式、RB 模式和 RT 模式的主动土压力,发现三种模式的合力作用点均高于 1/3 墙高,这一结果与传统理论存在明显差异。芮瑞等^[12]采用钢棒相似土配合荷载计测试的方法,发现静止土压力试验值小于理论值,且主动土压力实测数据与 Paik 法较为吻合。

为了达到减压效果,进而降低工程成本,近年来出现了许多新型挡土结构和填土材料。在挡土结构方面,由于聚苯乙烯泡沫(Expanded Polystyrene, EPS)颗粒的弹性较好,往往通过在墙背粘贴一层由 EPS 颗粒制成的 EPS 板来发挥减压作用。Ni 等^[13]通过开展不同厚度 EPS 板的模型试验,发现 EPS

板厚度越大则模型试验中填土的位移量越大,其土压力也更接近主动土压力。郑俊杰等^[14]通过模型试验和 FLAC^{3D}有限差分数值模拟相结合的方法,对 EPS 板的减压特性进行了研究,结果表明 EPS 板能有效减小墙背静止土压力,EPS 板的弹性模量越小、厚度越大、墙后填土表面的外荷载越大,则 EPS 板的减压效果越好,且 EPS 板厚达 0.1 倍墙高即可获得最佳减压效果。

在填土材料方面,将普通填土与 EPS 颗粒、水以及水泥按照一定的配比拌和成 EPS 颗粒混合轻量土,使其作为墙后填土来发挥作用,在减小结构物断面尺寸以及降低工程造价等方面具有十分重要的价值^[15]。轻量土具有轻质、高强、耐久、隔热等优良特性,已经广泛应用于实际工程^[16]。大量研究发现,轻量土是一种非饱和土,也是一种结构性土,其 EPS 颗粒含量、水泥含量以及含水率对轻量土的密度和强度特性等具有重要影响^[17-20]。Jamshidi 等^[21]通过试验研究发现,上覆压力影响着轻量土的静止土压力系数,且随着轻量土的刚度增加,其静止土压力系数逐渐降低。王超等^[22]通过室内模型试验研究了 EPS 颗粒混合轻量土处理桥台软弱地基的效果,发现轻量土可以有效减小台背土压力,并且在一定范围内台背土压力随着 EPS 颗粒含量的增加而减小。李明东等^[23]以新安江电厂的道路工程为例,经现场灌水法测试发现 EPS 颗粒混合轻量土可以有效降低填土竖向土压力,减幅约为普通填土的 40%。

综上所述,尽管对于挡土墙的主动土压力特性已经进行了大量研究,但对以轻量土为填料的墙背

主动土压力的研究仍较为少见。为进一步明确轻量土在挡土墙支护方面的减压效果,本文通过开展室外大比尺模型试验,探究轻量土在上部荷载作用下主动土压力与位移的关系,对比重塑黄土和轻量土的主动土压力分布规律,揭示轻量土的减压特性和变形特性,以期为实际工程提供一定的理论指导。此外,利用室内直剪试验得到填土的抗剪强度指标,按照传统理论计算其主动土压力,对比分析传统理论与模型试验的关系,对完善轻量土土压力理论具有重要意义。

1 模型试验设计

试验采用自制挡土墙模型装置,主要包括挡土墙模型槽、加载装置、位移控制系统和数据采集系统四个部分。待土料填筑完成以及加载结束后,利用数据采集系统测试其土压力分布规律及位移变化规律。

1.1 挡土墙模型槽

如图 1 所示,模型槽在室外搭建,内侧长×宽×高为 2 000 mm×1 200 mm×1 500 mm,形状为无盖的长方体。模型槽后侧及右侧为水泥砂浆抹平的砖砌墙体,左侧为角钢焊制的钢架。在钢架右半部分布置 10 mm 厚的有机玻璃板,其宽×高为 1 000 mm×1 500 mm,用于观测墙后填土的变形情况;钢架左半部分安放三块独立木板,试验时木板高度随着填土深度逐渐调整。试验所用挡土墙采用混凝土制作,外观呈 L 型,其宽×高为 1 200 mm×1 500 mm,除底部厚度为 250 mm 外,其余部位厚度均为 100 mm。



图 1 挡土墙模型槽

Fig.1 Model chamber of retaining wall

1.2 加载装置

为了研究轻量土作为墙后填土时的主动土压力特性,需要在填土表面施加荷载。对于重塑黄土,在

填土完成且土压力盒读数稳定后即可施加荷载,而轻量土则需要在填土完成并养护 28 d 后,待土压力盒读数稳定再进行加载。加载时,先在填土表面铺

设一块矩形加载板,然后在填土表面采用重物堆载的方式逐级施加竖向均布荷载,加载方式如图 2 所示。加载所用重物为混凝土标准养护块,每层混凝土

土标准养护块可以施加 3.09 kPa 的荷载。每施加一级荷载,需待荷载仪读数稳定后再施加下一级荷载。

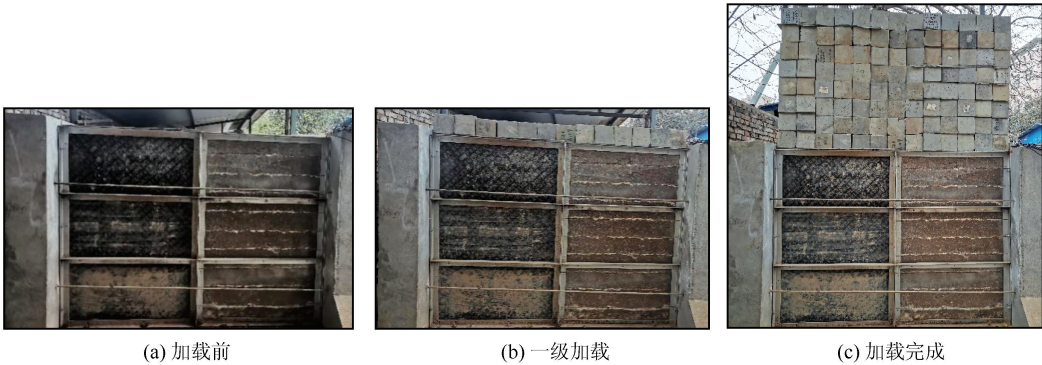


图 2 模型试验加载

Fig.2 Loading of model test

1.3 位移控制系统

试验位移控制系统由高强丝杆、百分表、螺母、钢架和型钢五部分组成(图 3)。为了保证精确控制挡土墙位移量,沿模型槽边缘对称安装 6 根直径为 22 mm 的高强度丝杆;为了获取挡土墙的实时位移量,沿着挡土墙竖直中线对称布设 6 只百分表,百分表水平向间距为 400 mm,量程为 0~10 mm。经试验验证,该系统可以精确控制挡土墙的位移量。试验时,通过调节 6 个丝杆使得挡墙产生相应的位移,每次调节完毕需等到 24 h 后数据稳定再继续调节。考虑到墙底摩擦较大,为避免试验过程中挡土墙无法产生位移,填土前在挡墙底部均匀放置两根直径为 14 mm 的光滑钢筋。

压力盒的数据。土压力盒外观直径为 48 mm,厚度为 10 mm,量程为 0~0.1 MPa。由于土压力盒是由金属材料制成的,在其附近易出现应力集中现象,这样会导致试验数据与真实情况出现偏差^[24],因此需要对土压力盒进行重新标定。考虑到砂土介质便于开展试验,本次试验采用自制砂标仪对土压力盒进行了标定。

土压力盒的具体布设情况如图 3 所示,5 只土压力盒沿着挡墙墙背中线位置竖向均匀布设。为避免因土压力盒相距过远导致的数据关联性降低,同一高度处填土中土压力盒与墙背土压力盒水平距离为 300 mm。考虑到土压力盒在试验时需要固定于墙背上,因此在挡土墙内侧粘贴一张厚度为 5 mm 的木工板,并在木工板表面设置凹槽以便放置土压力盒。为避免因土压力盒表面受力不均匀导致的数据不准确,在填土前需要在土压力盒表面均匀铺洒一层细砂。

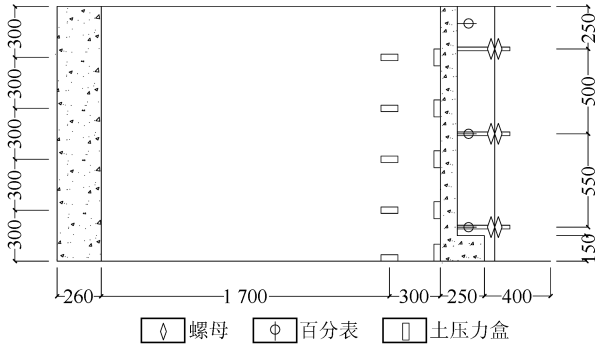


图 3 位移控制装置示意图(单位:mm)

Fig.3 Schematic diagram of displacement control device (Unit:mm)

1.4 数据采集系统

为了监测侧向土压力和竖向土压力,试验采用江苏溧阳仪器厂生产的 BW 型应变式土压力盒作为测量元件,并利用 WH-1000 型点荷载仪读取土

2 试验材料和方法

2.1 试验材料

本次试验所用的原料土为陕西杨凌地区黄土,取土深度 4~6 m,原料土呈黄褐色,属低液限粉质黏土,其基本物理性质指标如表 1 所列。根据轻型击实试验,该原料土的最优含水率为 21.6%,最大干密度为 1.701 g/cm³。试验所用的轻质材料为 EPS 颗粒,呈球粒状,粒径为 3~5 mm,纯颗粒密度为 0.010 3 g/cm³,堆积密度为 0.006 1 g/cm³。固化剂为社会牌水泥,标号为 P.C32.5R,纯颗粒密度为 3.1 g/cm³,试验用水为普通自来水。

表 1 陕西杨凌地区黄土物理性质

Table 1 Physical properties of loess in Yangling area, Shaanxi Province							
天然密度 ρ /(g/cm ³)	比重 G_s	天然含水率 $w/\%$	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	孔隙比 e
1.75	2.72	19.83	20.80	33.90	13.10	-0.07	0.86

2.2 试验方案

为了揭示轻量土对挡土结构物的减压机理,完善轻量土的土压力理论,通过室外挡土墙模型试验对轻量土挡土墙墙背土压力分布规律进行研究,模型试验具体方案如表 2 所列。考虑到确定轻量土配比的需要,现将干土质量记为 m_s ,体积记为 v_s ;水泥的质量记为 m_c ,体积记为 v_c ;EPS 颗粒的质量记为 m_e ,体积记为 v_e ;水的质量记为 m_w ,体积记为 v_w ;含水率为 w , $w = m_w/m_s$;定义水泥掺入比为 a_c , $a_c = m_c/m_s$;定义 EPS 颗粒掺入比为 a_e , $a_e =$

m_e/m_s ;定义 EPS 颗粒占试样总体积的百分比为 b_e , $b_e = v_e/(v_e + v_s + v_w + v_c)$ 。

为了增加不同填土间的对比性,填土含水率均选用最优含水率,重塑黄土和轻量土的最优含水率由标准轻型击实试验测得。考虑到试验的安全性,重塑黄土和轻量土的上部荷载分别为四级荷载和八级荷载,其上部荷载最大值分别设定为 12.36 和 24.72 kPa。本文直剪试验采用固结快剪的方式,法向应力分别为 50、100、150、200 kPa,直剪试验的配比与模型试验相同。

表 2 模型试验方案

Table 2 Test scheme for model test						
试验项目	水泥掺入比 $a_c/\%$	EPS 颗粒掺入比 $a_e/\%$	EPS 颗粒体积比 $b_e/\%$	含水率 $w/\%$	龄期 T/d	压实度 $/\%$
轻量土	10	0.41	30	31.0	28	90
重塑黄土	0	0	0	21.6	0	90

2.3 试样制备与土料填筑

不同类型填土的直剪试样制备方法以及模型试验土料拌和方式差别较大,其具体方法如下:

(1) 直剪试验。对于重塑黄土,按照《土工试验方法标准(GB/T 50123—2019)》^[25]进行制样。对于轻量土,首先取过 2 mm 筛的风干土并烘干,然后按照配比先添加水泥,搅拌均匀后再加水拌和,最后加入 EPS 颗粒进行搅拌,拌和好后才可以用于制样。重塑黄土和轻量土的制样方法均为压样法,每一配比制备 12 个试样,同一应力下的直剪试验重复三组后取平均值。还要注意的,重塑黄土直剪试样在试验前需要浸水饱和 24 h,轻量土直剪试样首先要放入标准养护箱中养护 28 d,养护箱的养护温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,养护湿度 $\geq 95\%$,然后再浸水饱和 24 h 才可以进行直剪试验。

(2) 模型试验。对于重塑黄土,取风干土体过 10 mm 筛后,按照配比均匀拌和至最优含水率后即可进行填筑。对于轻量土,取风干土体过 10 mm 筛后,按照配合比先将水泥和土均匀搅拌,再把水均匀喷洒到水泥和土的混合物中,待均匀搅拌后倒入 EPS 颗粒,将其搅拌至均匀后再进行填筑。

考虑到边界效应的影响,在有机玻璃板和模型槽内表面涂抹黄油,减小内壁和土体之间的摩擦。采用分层填土、人工夯实的方法进行填筑,共分 10 层,每

层 150 mm,压实度为 90%。为避免填土过程中人为干扰过大,填土时应保证土体均匀铺撒,自由下落。夯实时控制质量为 8 kg 的铁饼从 300 mm 的高度处自由下落,在填土表面均匀施加夯实荷载,保证每层填土填筑均匀。每层填土结束后,在有机玻璃板附近填土上表面铺撒一层石灰,用于研究轻量土的竖向变形特性。每层填土完成后需间隔 2 h,待土压力盒读数稳定并记录下初始值后再进行下一层填土。

3 试验结果分析

3.1 侧向土压力随填土深度的变化规律

根据传统土压力理论,主动土压力沿着填土深度呈线性分布,但由于实际工程中各种因素与理论假设条件不同,会导致其出现非线性分布的现象,本文采用模型试验对主动土压力与填土深度的变化关系进行研究(图 5)。

由图 4 可知:(1)除去底板 $h = 150\text{ cm}$ 处,重塑黄土侧向土压力与填土深度的关系曲线近似呈抛物线型。以挡墙位移量为 2 mm 时的侧向土压力为例,自墙顶至墙底依次为 0、2.91、7.63、2.74、27.44 kPa,除墙底外,其最大值位于挡墙中部。(2)除去底板 $h = 150\text{ cm}$ 处,轻量土侧向土压力与填土深度的关系曲线近似呈抛物线型。以挡墙位移量为 2 mm 时为例,轻量土侧向土压力自墙顶至墙底依次

为 0.37、2.55、3.05、0、6.12 kPa。(3)同一填土深度处,重塑黄土的侧向土压力高于轻量土。以位移量为 2 mm 时为例,以重塑黄土侧向土压力为基准,轻量土与重塑黄土的绝对差值自墙顶至墙底各处分别

为 0.37、0.36、4.58、2.74、21.32 kPa,其中 $h=150$ cm 处的差值最大。(4)在 $h=150$ cm 处,重塑黄土和轻量土的侧向土压力明显偏大,可能是由于模型槽底部存在摩擦所致。

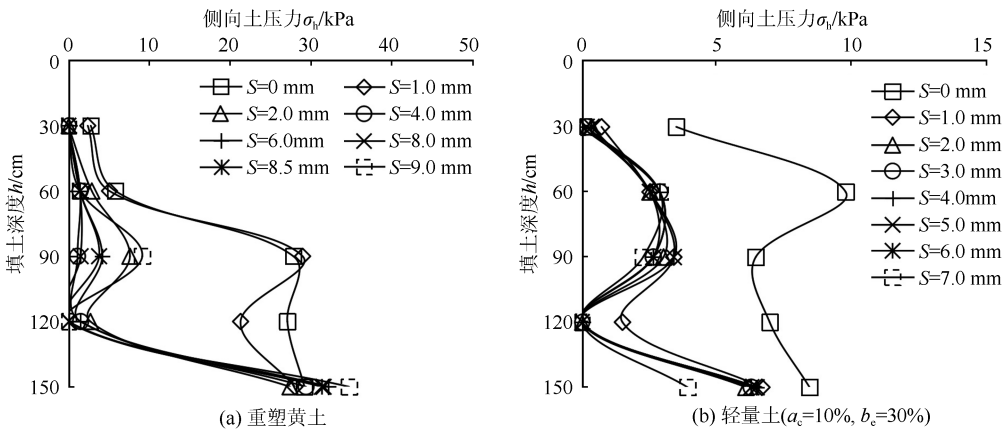


图 4 不同位移量时侧向土压力随填土深度变化规律

Fig.4 Change law of lateral earth pressure with filling depth under different displacements

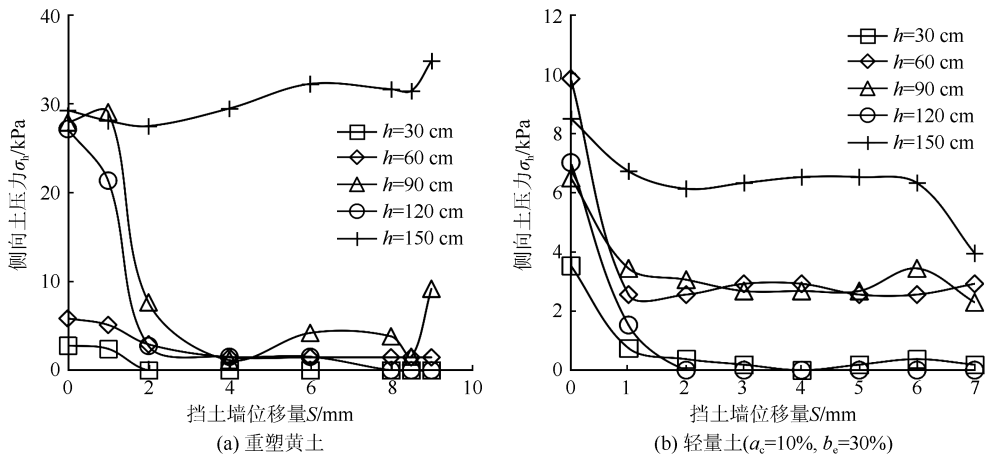


图 5 不同填土深度处侧向土压力随位移量变化规律

Fig.5 Change law of lateral earth pressure with displacement at different filling depths

3.2 侧向土压力随位移量的变化规律

根据传统理论可知,墙后填土达到主动极限平衡状态时的墙背土压力为主动土压力,这一状态与挡墙的位移量息息相关,本文以模型试验探究主动土压力与挡墙位移量之间的关系(图 5)。

由图 5 可知:(1)随着挡墙位移量的增加,重塑黄土的侧向土压力先迅速降低后趋于稳定,在挡墙位移量为 0~2 mm 阶段降幅最大,在挡墙位移量为 4 mm 时达到稳定状态。以 $h=60$ cm 处为例,不同位移量时重塑黄土侧向土压力分别为 5.83、5.10、2.91、1.46、1.46、1.46、1.46、1.46 kPa;以挡墙位移量为 0 mm 时的侧向土压力为基准,不同位移量时重塑黄土侧向土压力的降低幅度依次为 12.50%、

50.00%、75.00%、75.00%、75.00%、75.00%、75.00%。(2)随着挡墙位移量的增加,轻量土的侧向土压力先迅速降低后趋于稳定,在挡墙位移量为 0~1 mm 阶段降幅最大,当挡墙位移量为 3 mm 时达到稳定状态。以 $h=60$ cm 处为例,不同位移量时轻量土侧向土压力分别为 9.83、2.55、2.55、2.91、2.91、2.55、2.55、2.91 kPa;以挡墙位移量为 0 mm 时的侧向土压力为基准,不同位移量时轻量土侧向土压力的降低幅度依次为 74.07%、74.07%、70.37%、70.37%、74.07%、74.07%、70.37%。(3)对于重塑黄土,当挡墙位移量为 4 mm 时,其侧向土压力达到了主动极限平衡状态,故认为此时重塑黄土的侧向土压力近似为主动土压力。同理,当挡墙位移量为

3 mm 时,轻量土侧向土压力近似为主动土压力,可见轻量土达到主动极限平衡状态所需位移量比重塑黄土小。(4)取达到极限平衡状态时的侧向土压力为主动土压力,在轻量土上部荷载更大的情况下,轻量土主动土压力显著小于重塑黄土,这表明轻量土具有良好的减压特性。

综上所述,对主动土压力的变化规律进行以下几点总结:(1)因为填土底部与地面之间存在摩擦作用,底部填土的应力在挡墙移动时不易发生变化,这导致墙底处侧向土压力的变化规律出现明显的异常现象。随着挡墙位移逐渐增大,墙后填土逐渐由弹性平衡状态向主动极限平衡状态转变。由于模型试验中顶部填土和底部填土对中部填土的侧向移动具有约束效应,使得墙后填土出现了“土拱效应”,因此墙背侧向土压力与填土深度呈现类似抛物线型的分布规律。(2)在填土填筑过程中采

用了分层拌合、分层填土以及分层人工压实的方法,使得填土难以达到良好的均匀效果,这种不均匀性会使个别位置处的土压力出现一定的偏差,所以出现了个别侧向土压力降低为 0 的现象。(3)轻量土在主动土压力方面具有减压特性,这主要有两个原因:其一是由于轻量土自身的重度偏小,使得轻量土的侧向土压力相应偏低;其二是轻量土具有自立性,水泥经过充分的水解水化反应,会在轻量土中产生较强的胶结作用,使得轻量土在相同条件下侧向土压力更小。

3.3 侧向土压力系数随填土深度的变化规律

侧向土压力系数是指某一深度处侧向土压力与竖向土压力的比值,也称侧压力系数。由于模型试验情况十分复杂,使得实测值与理论计算值存在一定的偏差^[26],本文通过模型试验探究重塑黄土和轻量土主动土压力系数沿填土深度的变化规律(图 6)。

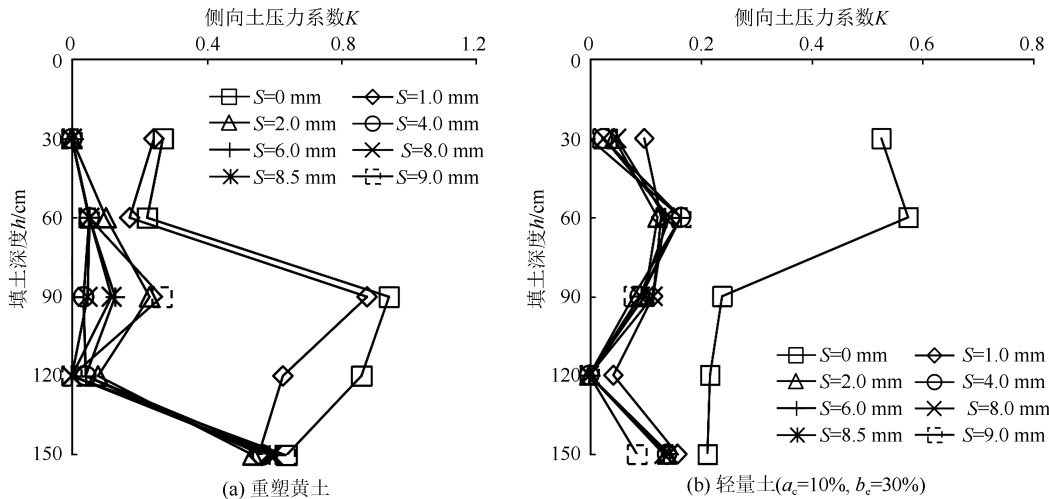


图 6 不同位移量时侧向土压力系数随填土深度变化规律

Fig.6 Change law of lateral earth pressure coefficient with filling depth under different displacements

由图 6 可知:(1)重塑黄土的侧向土压力系数随填土深度的增加变化不大,整体上在 0.24 左右浮动。以位移量 2 mm 时为例,其侧向土压力系数自墙顶至墙底各处依次为 0、0.10、0.23、0.08、0.54。(2)轻量土的侧向土压力系数随填土深度的增加变化不大,整体上在 0.12 上下浮动。以位移量 2 mm 时为例,其侧向土压力系数自墙顶至墙底各处依次为 0.04、0.12、0.10、0、0.14。(3)重塑黄土和轻量土的侧向土压力系数都不是常数,这与传统土压力理论不同,表明理论与实际存在偏差。(4)当挡墙位移量为 0 mm 时,重塑黄土和轻量土的侧向土压力系数明显偏大,因为此时墙后填土处于弹性平衡状态,土体内部的自约束效应尚未发挥。

3.4 侧向土压力系数随位移量的变化规律

当挡土墙产生位移时,墙后填土不可避免地要发生应力重分布,与此同时填土的侧向土压力系数也会发生相应变化。针对此,本文通过模型试验研究侧向土压力系数与挡墙位移量之间的变化关系(图 7)。

由图 7 可知:(1)随着挡墙位移量增加,重塑黄土的侧向土压力系数先迅速降低,然后逐渐趋于稳定。当挡墙位移量为 1~2 mm 时下降幅度最大,挡墙位移量超过 4 mm 后侧向土压力系数几乎不发生变化,且在 $h=30$ cm 和 $h=120$ cm 处出现了侧向土压力系数为 0 的情况。以 $h=60$ cm 处为例,不同位移量时侧向土压力系数分别为 0.22、0.17、0.10、0.05、0.05、0.05、0.05、0.05;以挡墙位移量为

0 mm时的侧向土压力系数为基准,不同位移量时侧向土压力系数降低幅度依次为 23.25%、54.55%、76.85%、76.85%、76.85%、76.85%、76.85%。(2)随着挡墙位移量的增加,轻量土的侧向土压力系数先降低后逐渐趋于稳定,当挡墙位移量为 0~1 mm 时降低幅度最大,挡墙位移量超过 3 mm 后侧向土压力系数几乎不发生变化,且在 $h=30$ cm 和 $h=120$ cm 处出现了侧向土压力系数为 0 的情况。以 $h=60$ cm 处为例,不同位移量时侧向土压力系数分别为 0.57、0.13、0.12、0.16、0.16、0.14、0.14、0.16;以挡墙位移量为 0 mm 时的侧向土压力系数为基准,不

同位移量时侧向土压力系数降低幅度依次为 77.49%、78.61%、71.24%、71.24%、74.84%、74.84%、71.24%。(3)重塑黄土的主动土压力系数自墙顶至墙底分别为 0.00、0.05、0.03、0.04、0.57,轻量土的主动土压力系数自墙顶至墙底分别为 0.02、0.16、0.09、0.00、0.14,可见重塑黄土和轻量土的主动土压力系数随墙高变化均较为稳定,且重塑黄土的主动土压力系数大于轻量土。(4)重塑黄土在 $h=150$ cm 处的侧向土压力系数随位移量变化基本上保持不变,且稳定后侧向土压力系数高于其余位置,可能是由于填土底部存在较大摩擦,难以消除。

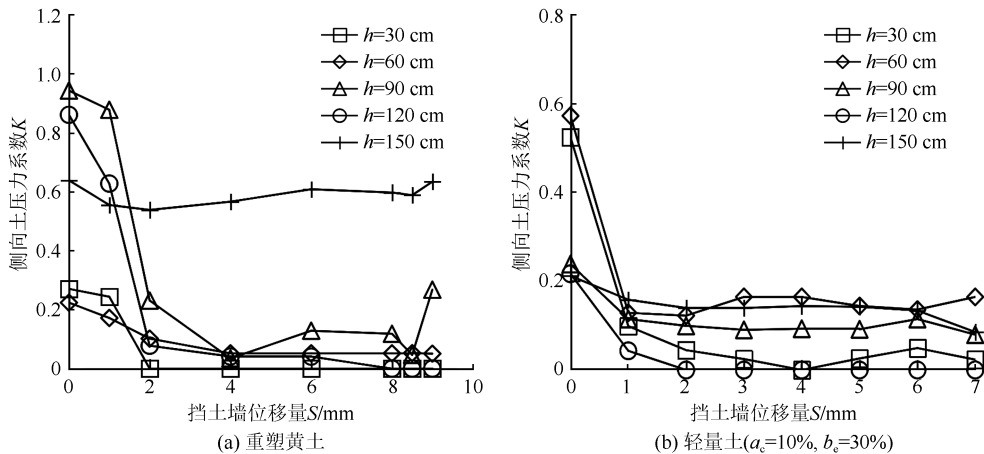


图 7 不同填土深度处侧向土压力系数随位移量变化规律

Fig.7 Change law of lateral earth pressure coefficient with displacement at different filling depths

综上所述,对主动土压力系数的变化规律进行原因分析:(1)在模型试验中,难以控制人工填土和夯实的均匀性,且在上部荷载向下传递时不同深度处填土的传递系数也不一致,导致各处填土的竖向土压力增加值出现差异,这些因素共同作用使得填土的密实度分布不均匀。此外,水泥在非标准养护条件下水解水化反应并不充分,导致填土中应力分布不均匀。填土密实度分布不均匀以及填土中应力分布不均匀都会导致侧向土压力系数无法保持为某一固定值^[27]。(2)由于模型试验中重塑黄土竖向土压力的变化幅度较小,而侧向土压力变化较为明显,使得侧向土压力系数呈现与侧向土压力相同的变化规律,出现部分侧向土压力系数等于 0 的情况。(3)由于模型试验中填土底部的摩擦难以完全消除^[28],使得挡墙底部的侧向土压力变化出现异常,导致墙底处侧压力系数在挡墙移动时的变化规律明显不同于其他位置。

4 主动土压力理论值与试验值的对比分析

已有研究结果表明传统理论与实际工程存在一

定偏差,且对于轻量土作为墙后填土时的主动土压力分布规律,传统理论也未作出相应分析,使得轻量土的工程应用受到了一定限制。为了研究普通填土中传统理论值与试验值的吻合程度,以及传统理论对轻量土的适用性,下面对传统理论计算值与模型试验值进行对比分析。

4.1 主动土压力传统理论分析

传统的土压力理论主要是库仑理论和朗肯理论,二者在适用范围等方面差异较大。朗肯理论假定挡墙墙背光滑且垂直,填土表面水平,库仑理论则主要适用于无黏性土的情况,在黏性土工况下的计算误差较大。本文采用固结快剪的方式得到了重塑黄土和轻量土的抗剪强度指标,其中重塑黄土的抗剪强度指标 c 、 φ 分别为 10.71 kPa 和 21.27°,轻量土的抗剪强度指标 c 、 φ 分别为 49.91 kPa 和 30.40°。在本文模型试验中,重塑黄土和轻量土的黏聚力都不为 0,因此采用朗肯土压力理论计算其主动土压力,得到主动土压力分布简图(图 8)。

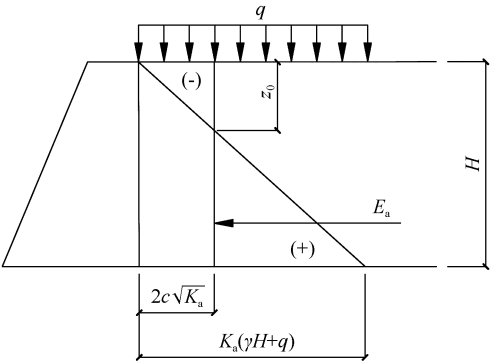


图 8 黏性土主动土压力分布简图

Fig.8 Simplified diagram of active earth pressure distribution of cohesive soil

由图 8 可知:(1)朗肯主动土压力包括三部分,其中由黏聚力所产生的土压力为负值,由填土上部均布荷载以及填土自重所产生的土压力为正值;(2)黏聚力的存在使得部分土压力出现负值的情况,也就是拉应力,考虑到墙土之间的关系,可以认为在 z_0 以上的深度范围内出现了裂缝;(3) z_0 的大小受到三种力的共同作用,尤其是当黏聚力和上部荷载同时存在时, z_0 的值需要根据实际情况进行计算分析。根据图 8 所示的主动土压力分布情况,得到如下计算公式:

主动土压力强度:

$$p_a = (\gamma z + q) \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - 2c \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = K_a (\gamma z + q) - 2c \sqrt{K_a} \quad (1)$$

主动土压力系数:

$$K_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (2)$$

裂缝深度:

$$z_0 = \frac{2c \sqrt{K_a} - K_a q}{K_a \gamma} = \frac{2c - q \sqrt{K_a}}{\gamma \sqrt{K_a}} \quad (3)$$

主动土压力合力:

$$E_a = \frac{1}{2} (K_a \gamma H + K_a q - 2c \sqrt{K_a}) (H - z_0) \quad (4)$$

式中: H 为墙高; γ 为土的重度; φ 为土的内摩擦角; c 为黏聚力; q 为均布荷载; z 为计算点深度。合力作用点位于墙底以上 $(H - z_0)/3$ 处。

4.2 主动土压力理论值与试验值的对比分析

根据上文选用的理论公式计算两种填土在均布荷载作用下的主动土压力和裂缝深度,并与模型试验值进行对比分析(图 9),进而揭示传统理论在实际工程中的适用性。

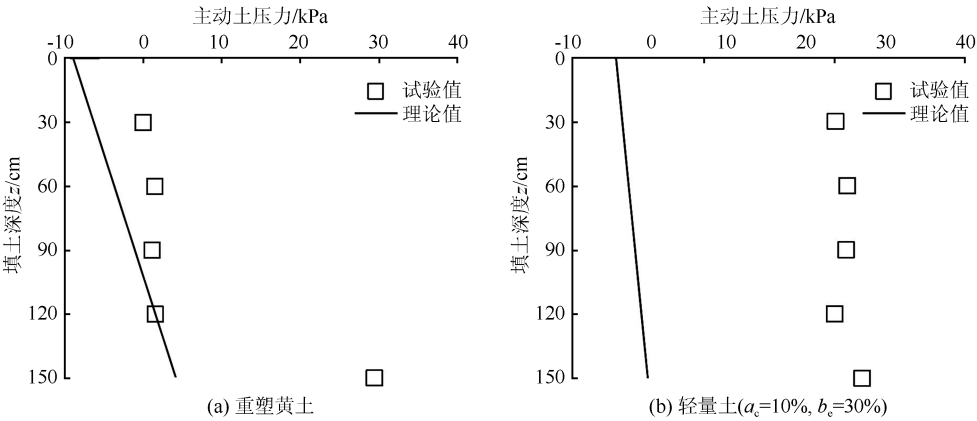


图 9 朗肯理论值与试验值对比关系曲线

Fig.9 Comparison curves between theoretical values of Rankine and experimental values

由图 9 可知:(1)重塑黄土主动土压力试验值沿着填土深度近似呈线性分布。根据朗肯理论,将小于 0 的理论计算值取为 0,以试验值为基准,重塑黄土理论值与试验值的绝对误差自墙顶至墙底依次为 0、1.46、1.14、0.06、25.22 kPa,绝对误差较小,整体处于 0~1.46 kPa 之间。(2)轻量土主动土压力试验值沿着填土深度近似呈线性分布。同样将小于 0 的理论计算值取为 0,以试验值为基准,轻量土理论值与试验值的绝对误差自墙顶至墙底依次为 0.19、2.91、2.67、0、6.32 kPa,整体处于 0~6.32 kPa 之间,

可见其绝对误差较小。(3)通过对比分析可以发现,无论是重塑黄土还是轻量土,朗肯主动土压力均小于试验值。考虑到模型试验所确定的主动土压力仅为估测值,与朗肯理论存在差异,因此朗肯理论公式在计算轻量土与重塑黄土主动土压力时仍较为准确。(4)在 $h = 150$ cm 处,重塑黄土理论值与试验值的偏差明显过大,这可能与模型试验中墙底存在摩擦有关。重塑黄土仅在 $h = 30$ cm 处的主动土压力试验值等于 0,轻量土仅在 $h = 120$ cm 处的主动土压力试验值等于 0,可能是由模型试验中填土的

不均匀性以及轻量土具有自立性所致。

理论值与试验值之间存在差异,推测其原因主要包括如下几个方面:(1)模型试验中墙背和墙底均存在一定的摩擦,且轻量土是由 EPS 颗粒、土颗粒、水泥和水按比例混合而成的一种新型土工材料,具备不同于普通填土的物理力学性质,这些与朗肯理论假设条件不符,使得朗肯理论值与模型试验值出现偏差。(2)轻量土中水泥经过水解水化反应后具有较强的胶结作用,而 EPS 颗粒具有一定的孔隙性与缓冲性,使得轻量土主动土压力试验值整体在 0 kPa 附近波动,也表明轻量土在作为墙后填土时具有良好的减压作用。

5 结 论

(1) 重塑黄土和轻量土的侧向土压力随着挡墙位移量的增加先降低后趋于稳定状态,其中重塑黄土在 $S = 4 \text{ mm}$ 时达到稳定状态,轻量土在 $S = 3 \text{ mm}$ 时达到稳定状态。重塑黄土和轻量土的主动土压力随着填土深度的增加近似呈线性分布,但都存在不同程度的“土拱效应”,对比发现重塑黄土的主动土压力大于轻量土,表明轻量土具有减压特性。

(2) 重塑黄土和轻量土的侧向土压力系数随着挡墙位移量的增加先降低后逐渐趋于稳定,且与侧向土压力具有一定的关联性。重塑黄土和轻量土的主动土压力系数沿着挡墙分布都较为稳定,其中轻量土的主动土压力系数处于 $0 \sim 0.16$ 之间,重塑黄土的主动土压力系数处于 $0 \sim 0.57$ 之间,明显发现轻量土的主动土压力系数较小,表明轻量土相对于重塑黄土可以降低约 50% 的侧向土压力。

(3) 重塑黄土和轻量土的朗肯理论值都小于模型试验值,但朗肯理论值与试验值之间的绝对误差为 $0 \sim 6.32 \text{ kPa}$,这种误差在实际工程中是很小的,可以忽略不计。考虑到模型试验中墙背和填土存在一定的摩擦,因此朗肯理论仍可以较为准确地计算重塑黄土和轻量土的主动土压力。

参考文献(References)

[1] 王杰,夏唐代,贺鹏飞,等.考虑土拱效应的刚性挡墙主动土压力分析[J].岩土力学,2014,35(7):1914-1920.
WANG Jie, XIA Tangdai, HE Pengfei, et al. Analysis of active earth pressure on rigid retaining walls considering soil arching [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1914-1920.

[2] CHEN F Q, LIN C, LIN L B, et al. Active earth pressure of narrow cohesive backfill on rigid retaining wall of rotation about the bottom[J]. Soils and Foundations, 2021, 61(1): 95-

112.

[3] TANG Y, CHEN J G. New approach for active earth pressure calculation on rigid retaining walls with cohesive backfill[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2020, 57(4): 288-295.

[4] CHEN F Q, LIN Y J, YANG J T. Passive earth pressure of narrow cohesionless backfill against inclined rigid retaining walls under translation mode[J]. Soils and Foundations, 2020, 60(5): 1226-1240.

[5] NI P P, SONG L H, MEI G X, et al. On predicting displacement-dependent earth pressure for laterally loaded piles[J]. Soils and Foundations, 2017, 58(1): 85-96.

[6] 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.

[7] LI F, HONG Z B, YU J L, et al. A novel method of calculating active earth pressure on laggings between piles considering the soil arching effect[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2023, 27(8): 2768-2782.

[8] LI Z W, YANG X L. Active earth thrust considering tension crack, pore-water pressure and soil nonlinearity [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(1): 56-62.

[9] GOEL S, PATRA N R. Effect of arching on active earth pressure for rigid retaining walls considering translation mode[J]. International Journal of Geomechanics, 2008, 8(2): 123-133.

[10] 应宏伟,张金红,王小刚,等.有限土体刚性挡墙平动模式被动土压力试验研究[J].岩土工程学报,2016,38(6):978-986.
YING Hongwei, ZHANG Jinhong, WANG Xiaogang, et al. Experimental analysis of passive earth pressure against rigid retaining wall under translation mode for finite soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(6): 978-986.

[11] 许雷挺,张治成,张戎泽,等.砂土中挡墙不同变位模式主动土压力模型试验[J].地下空间与工程学报,2017,13(5):1296-1302.
XU Leiting, ZHANG Zhicheng, ZHANG Rongze, et al. Model test on active earth pressure in sand induced by the movement of retaining wall[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(5): 1296-1302.

[12] 芮端,叶雨秋,陈成,等.考虑墙壁摩擦影响的挡土墙主动土压力非线性分布研究[J].岩土力学,2019,40(5):1797-1804.
RUI Rui, YE Yuqiu, CHEN Cheng, et al. Nonlinear distribution of active earth pressure on retaining wall considering wall-soil friction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(5): 1797-1804.

[13] NI P P, MEI G X, ZHAO Y L. Displacement-dependent earth pressures on rigid retaining walls with compressible geofoam inclusions: physical modeling and analytical solutions[J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(6): 1-13.

[14] 郑俊杰,邵安迪,谢明星,等.挡土墙后 EPS 板减压性能模型试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2020,42(4): 1-9.

- ZHENG Junjie, SHAO Andi, XIE Mingxing, et al. Model test study on decompression performance of EPS boards behind retaining walls[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(4): 1-9.
- [15] 顾欢达, 顾熙. 塑料发泡颗粒轻质填土的土压力计算[J]. 四川建筑科学研究, 2008, 34(5): 93-98.
- GU Huanda, GU Xi. The calculation of earth pressure of foamed beads light soil by slice method[J]. Sichuan Building Science, 2008, 34(5): 93-98.
- [16] 侯天顺, 徐光黎. 发泡颗粒混合轻量土三轴应力-应变-孔压特性试验[J]. 中国公路学报, 2009, 22(6): 10-17.
- HOU Tianshun, XU Guangli. Experiment on triaxial pore water pressure-stress-strain characteristics of foamed particle light weight soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(6): 10-17.
- [17] 侯天顺, 徐光黎. EPS粒径对轻量土抗剪强度的影响规律[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1634-1641.
- HOU Tianshun, XU Guangli. Influence law of EPS size on shear strength of light weight soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(10): 1634-1641.
- [18] 侯天顺. 特征含水率对轻量土基本性质的影响规律[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2581-2587.
- HOU Tianshun. Influence law of characteristic water content on basic properties of light weight soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2581-2587.
- [19] 侯天顺. 轻量土击实密度模型与工程特性[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(11): 2127-2135.
- HOU Tianshun. Model for compaction density and engineering properties of light weight soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(11): 2127-2135.
- [20] HOU T S. Prescription formula of foamed particles in light-weight soil[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2015, 33(1): 153-160.
- [21] JAMSHIDI CHENARI R, KARIMPOUR FARD M, POURGHAFAR MAGHFARATI S, et al. An investigation on the geotechnical properties of sand-EPS mixture using large oedometer apparatus[J]. Construction and Building Materials, 2016, 113: 773-782.
- [22] 王超, 高洪梅, 王志华, 等. EPS混合土处理桥台软土地基模型试验[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2017, 39(6): 118-123.
- WANG Chao, GAO Hongmei, WANG Zhihua, et al. Model test of abutment on soft soil retaining EPS composite soil[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2017, 39(6): 118-123.
- [23] 李明东, 朱伟, 马殿光, 等. EPS颗粒混合轻质土的施工技术及其应用实例[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(4): 533-536.
- LI Mingdong, ZHU Wei, MA Dianguang, et al. Construction technology and application in situ of expanded polystyrene treated lightweight soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(4): 533-536.
- [24] 梁波, 厉彦君, 凌学鹏, 等. 离心模型试验中微型土压力盒土压力测定[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 818-826.
- LIANG Bo, LI Yanjun, LING Xuepeng, et al. Determination of earth pressure by miniature earth pressure cell in centrifugal model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(2): 818-826.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [26] YUNT S, LEE J, LEE J, et al. Numerical investigation of the at-rest earth pressure coefficient of granular materials[J]. Granular Matter, 2015, 17(4): 413-418.
- [27] 侯天顺, 杨凯旋. 挡土墙后EPS颗粒混合轻量土填料静止土压力特性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(12): 3249-3259, 3270.
- HOU Tianshun, YANG Kaixuan. Model test on earth pressure at rest of light weight soil mixed with EPS particles behind a retaining wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(12): 3249-3259, 3270.
- [28] 侯天顺, 郭鹏斐, 杨凯旋, 等. 发泡颗粒混合轻量土静止土压力特性及计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(12): 2234-2244.
- HOU Tianshun, GUO Pengfei, YANG Kaixuan, et al. Characteristics and method for calculating earth pressure at rest of light weight soil with foamed particles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(12): 2234-2244.

(本文编辑: 赵乘程)