

DOI: 10.11779/CJGE20220928

刚性挡土墙后轻量土静止土压力特性模型试验研究

侯天顺, 张建成, 舒博

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为了研究轻量土对挡土结构物的减压机理,通过开展大比尺刚性挡土墙模型试验,采用重物堆载的方式在填土表面施加均匀荷载,分析重塑黄土和轻量土作为墙后填土时的静止土压力分布规律。结果表明:轻量土在养护阶段的静止土压力随着时间增长而逐渐增大,但增幅逐渐降低。重塑黄土和轻量土的静止土压力随着填土深度增加近似线性增大,并且静止土压力随着加载而逐渐增大,其中重塑黄土的增幅明显偏大。对比重塑黄土和轻量土的静止土压力,发现轻量土具有明显的减压作用,且填土表面均匀荷载越大,轻量土的减压效果越好。重塑黄土和轻量土的静止土压力系数均不是常数,其中重塑黄土静止土压力系数为0.34~0.78,轻量土静止土压力系数为0.22~0.55。当填土表面作用均匀荷载时,传统理论在计算重塑黄土静止土压力方面适用性较高,但轻量土计算误差较大。结合模型试验以及传统理论,提出了适用于轻量土的静止土压力修正公式,对比发现其相对误差总体上介于1.01%~23.13%。通过模型试验和理论计算揭示了轻量土的静止土压力特性,对于完善轻量土土压力理论具有重要意义。

关键词:轻量土; 静止土压力; 静止土压力系数; 修正公式; 模型试验

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)04-0764-10

作者简介:侯天顺(1981—),男,湖北省郧西县人,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 earth pressure at rest of light weight soil behind rigid retaining walls

HOU Tianshun, ZHANG Jiancheng, SHU Bo

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: To study the reduction mechanism of earth pressure on retaining wall for light weight soil, the model tests on a large-scale rigid retaining wall are conducted. The uniform loads are applied on the filling surface by heavy stacking. When the remolded loess and light weight soil are used as backfilling behind the wall, the distribution laws of earth pressure at rest are analyzed respectively. The results show that the earth pressure at rest of the light weight soil gradually increases with the increase of curing period, but the increase range gradually decreases. The earth pressures at rest of the remolded loess and the light weight soil increase approximately linearly with the increase of filling depth. Moreover, they gradually increase with the increase of the upper loads, and the increase range of earth pressure at rest for the remolded loess is obviously larger than that of the light weight soil. By comparing their earth pressures at rest, it is found that the light weight soil has an obvious pressure reduction effect, and the greater the uniform loads applied on the filling surface, the better the pressure reduction effects of the light weight soil. The coefficient of earth pressures at rest of the remolded loess and light weight soil is not constant. The range of coefficient of earth pressure at rest for the remolded loess is 0.34~0.78, and that of the light weight soil is 0.22~0.55. When the uniform loads are applied on the surface of the filling, the traditional earth pressure theory has a high applicability to calculate the earth pressure at rest of the remolded loess, but the calculation error of the light weight soil is larger. Based on the model tests and traditional earth pressure theory, a modified formula for the earth pressure at rest for the light weight soil is proposed. It is found that the relative error is mainly 1.01%~23.13%. The characteristics of earth pressure at rest of the light weight soil are revealed through the model tests and theoretical calculation, which is of great significance to improving the earth pressure theory of the light weight soil.

Key words: light weight soil; earth pressure at rest; coefficient of earth pressure at rest; modified formula; model test

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);西安市岩土与地下工程重点实验室开放基金项目(XKLGUEKF21-02);陕西省自然科学基金项目(2024JC-YBMS-354)
收稿日期: 2022-07-26

0 引言

挡土墙作为一种挡土结构物,在道路、桥梁以及

房屋等工程建设中发挥着重要作用, 尤其是在地质条件较差的区域, 挡土墙可以很好地保持土体的稳定性, 进而避免造成危及人身安全和财产损失的工程事故。静止土压力作为评价挡土墙稳定性的重要指标, 对挡土墙的尺寸设计有着显著的影响。但由于传统理论与工程实际存在偏差, 往往会导致挡土墙的尺寸设计偏于安全, 造成一定的资源浪费, 因此对挡土墙静止土压力进行研究十分必要^[1]。

静止土压力系数是计算静止土压力的基础, 许多学者为此开展了大量研究。Federico 等^[2]发现采用传统计算方法, 静止土压力系数往往偏大, 并基于研究结果提出了静止土压力系数计算模型。宋飞等^[3]采用自制试验设备研究了砂土的静止土压力系数, 发现各向异性对于砂土的静止土压力系数具有一定的影响, 且 Jaky 公式预测的静止土压力系数相比于离心机模型试验值偏小。Lirer 等^[4]通过试验研究发现, 在初始加载阶段, 任意密度易碎岩土体的静止土压力系数与 Jaky 公式计算结果较为接近, 而高密度且硬度较大的岩土体的静止土压力系数则大于 Jaky 公式计算值。Hayashi 等^[5]通过试验研究了泥炭土的静止土压力系数, 发现有机土的静止土压力系数与应力历史有关, 在正常固结状态下有机土的静止土压力系数小于非有机土, 并提出了相应的计算公式。Northcutt 等^[6]通过研究发现不同的试验方法会得到不同的静止土压力系数, 并提出了计算静止土压力系数的经验公式。

为了更好地反映墙后填土的真实应力状态, 模型试验以及数值模拟被广泛用于研究挡土墙的静止土压力特性。罗强等^[7]通过模型试验研究了黏土作用下的重力式挡土墙静止土压力特性, 发现静止土压力分布呈曲线型, 合力作用点位于墙底以上 $0.44H$ 处, 实测值约为计算值的 1.42 倍。此外, 根据强度相等原则反算出的黏聚力远小于实测值, 因此要谨慎使用黏性土土压力公式。Atik 等^[8]采用数值模拟和离心机模型试验研究了悬臂式挡土墙的地震土压力特性, 发现地震土压力与填土深度近似呈线性关系, 基于 Mononobe-Okabe 方法的地震土压力计算值大于模型试验值。Zhang 等^[9]通过模型试验研究了带有卸荷平台的桩板墙的土压力特性, 发现其墙背土压力与填土深度近似为线性关系, 且土压力值位于朗肯土压力和静止土压力之间。乔亚飞等^[10]通过数值模拟和理论分析的方法对欠固结土体的静止土压力进行了研究, 发现超固结比对其静止土压力影响很大, 且土体的有效内摩擦角越大则该影响越大。

许多学者在研究挡土墙稳定性时, 发现 EPS 颗粒混合轻量土具有降低墙背土压力的作用。EPS 颗粒混合轻量土是一种新型土工材料, 简称轻量土, 是将原

料土与 EPS 颗粒、水以及水泥按照一定的配比拌和而成的混合土体。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^[11-14]。轻量土具有轻质、高强、耐久、隔热等优良特性, 已经被广泛应用于实际工程^[15], 若将轻量土作为墙后填土, 可以有效减小结构物断面尺寸并降低工程造价^[16]。Chenari 等^[17]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^[18]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^[19]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, 尽管对于挡土墙的静止土压力特性已进行了大量研究, 但对轻量土作为墙后填土时墙背静止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, 探究重塑黄土和轻量土的静止土压力随填土表面均匀荷载的变化规律。对比重塑黄土和轻量土的静止土压力分布规律, 揭示轻量土的减压特性, 可以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不同填土的抗剪强度指标, 按照传统理论计算其静止土压力, 对比分析传统理论与模型试验之间的关系, 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, 该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, 待土料填筑以及荷载加载完毕后, 测试其土压力分布规律。

1.1 挡土墙模型槽

模型槽在室外搭建, 如图 1 所示, 模型槽内侧的长×宽×高为 $2000 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm}$, 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, 该钢架右半部分布置 10 mm 厚有机玻璃板, 其宽×高为 $1000 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm}$, 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, 试验时随着填土深度而逐渐调整木板高度。试验所用挡土墙采用混凝土制作, 外观呈 L 型, 其宽×高为 $1200 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm}$, 除底部厚度为 250 mm 外, 其余部位厚度均为 100 mm 。

1.2 加载装置

为了深入研究轻量土作为墙后填土时的静止土压



图 1 挡土墙模型槽

Fig. 1 Model box for retaining wall

力特性，需要在填土表面施加均布荷载。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，具体如图 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。

1.3 位移控制系统

试验位移控制系统如图 3 所示，包括百分表、高强丝杆等。为了保证试验过程中挡土墙保持静止，沿着模型槽边缘对称安装 6 根丝杆。为了监测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。百分表量程为 0~10 mm，丝杆是直径为 22 mm 的高强度丝杆，经试验验证，该系统可以满足试验要求。

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，刚度与介质不匹配，并且在土压力盒附近易出现土拱效应和应力集中现象，这些会导致试验数据与真实情况出现偏差^[20]，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，沿着挡墙墙背中线位置竖向均匀布设 5 只土压力盒。为避免填土中土压力盒与墙背上土压力盒相距过远而导致数据关联性降低，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而导致数据不准确，在填土前需要在土压力盒表面均匀铺撒一层细砂。

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，取土深度为 4~6 m，原料土呈黄褐色，根据塑性图判定为低液限粉质黏土，其基本物理性质指标如表 1 所示。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 1.70 g/cm³。本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 0.0103 g/cm³，堆积密度为 0.0061 g/cm³。固化剂为社会牌水泥，纯颗粒密度为 3.1 g/cm³，试验用水为普通自来水。

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中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 所示。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



图 2 模型试验加载

Fig. 2 Loading of model tests

表 1 陕西杨凌地区黄土物理性质

Table 1 Physical parameters of soil

天然密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	相对质量密度 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	20.8	33.9	13.1	-0.07	0.86

表 2 模型试验方案

Table 2 Schemes for model tests

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

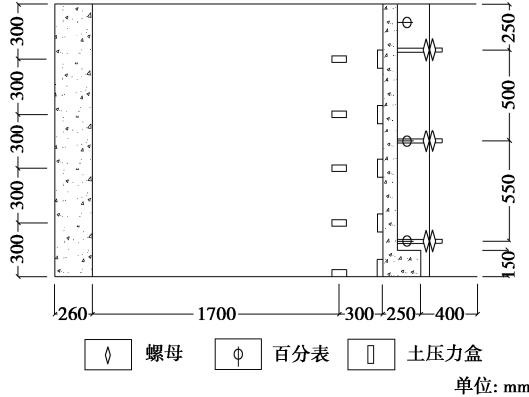


图 3 位移控制装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of displacement control devices

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, 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。

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: GBT 50123—2019》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 3 组后取平均值。还要注意的是, 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, 该养护箱的养护温度为 $20\pm2^\circ\text{C}$, 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, 其压实度为 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表面铺撒一层白灰, 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 静止土压力随填土深度的变化规律

根据传统理论, 静止土压力沿着填土深度呈线性分布, 目前这一理论主要是针对普通填土所提出, 轻量土作为一种新型土工材料, 其静止土压力特性仍有待研究, 本文采用模型试验研究轻量土静止土压力与填土深度的变化关系。

由图 4 可知: ①重塑黄土的侧向土压力随填土深度近似线性增大。以加载至 6.18 kPa 时的侧向土压力为例, 自墙顶至墙底依次为 7.80, 6.19, 13.35, 17.97, 20.33 kPa。②轻量土的侧向土压力随填土深度增加近似线性增大。以加载至 6.18 kPa 时的侧向土压力为例, 自墙顶至墙底依次为 2.23, 3.64, 6.87, 7.92, 9.28 kPa。③随着上部荷载的增加, 轻量土和重塑黄土的侧向土压力均逐渐增大, 但轻量土的增幅明显偏小, 表明轻量土具有减压特性。以加载至 6.18 kPa 时的侧向土压力为例, 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 5.57, 2.55, 6.48, 10.05, 11.05 kPa, 其减压幅度分别为 71.43%, 41.18%, 48.57%, 55.93%, 54.37%, 其中 $h=30$ cm 处减压效果最佳。④值得注意的是, 在 $h=60$ cm 处, 重塑黄土和轻量土的侧向土压力都出现了异常情况, 使得重塑黄土和轻量土的侧向土压力与填土深度之间不再呈现线性关系, 这一现象可能是由土压力盒和填土接触不良所致。

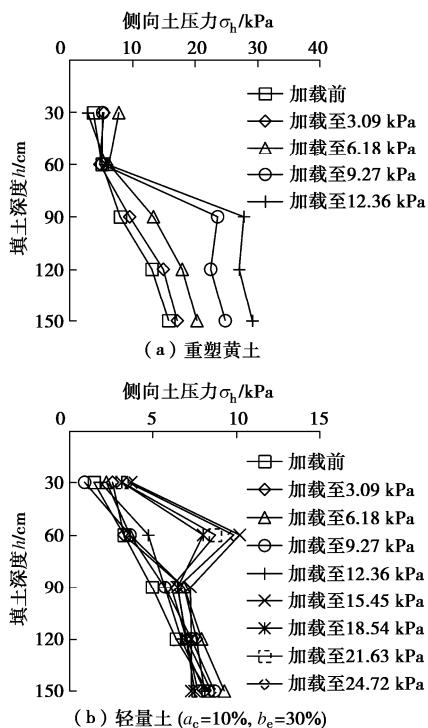


图 4 不同上部荷载时侧向土压力随填土深度变化规律

Fig. 4 Change laws of lateral earth pressure with filling depth under different upper loads

3.2 静止土压力随养护时间的变化规律

由于水泥在混合土中的水解水化反应是一个漫长的过程, 因此轻量土的土压力特性也会受到养护时间的影响。以 28 d 为轻量土养护龄期, 研究轻量土静止土压力与养护时间的关系。

由图 5 可知: ①当填土深度较小时, 轻量土的侧向土压力随着养护时间增加几乎不发生变化。以 $h=30$ cm 处为例, 不同时刻的侧向土压力依次为 0.74, 0.56, 0.93, 0.74, 0.93 kPa。②当填土深度较大时, 轻量土的侧向土压力随着养护时间增加而逐渐增大, 但随着养护时间增大其增幅逐渐降低。以 $h=120$ cm 处的侧向土压力为例, 不同时刻的侧向土压力依次为 4.87, 3.96, 5.18, 5.79, 6.39 kPa。③不同深度处的侧向土压力变化幅度不同, 其中墙底处增幅最大, 而墙顶处侧向土压力几乎不随养护时间发生变化, 较其余位置更加稳定。当养护完成时, 自墙顶至墙底各处侧向土压力较养护前的增加值分别为 0.19, 2.19, 2.67, 1.52,

6.51 kPa。

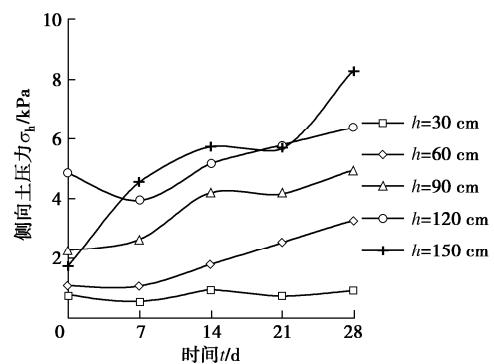


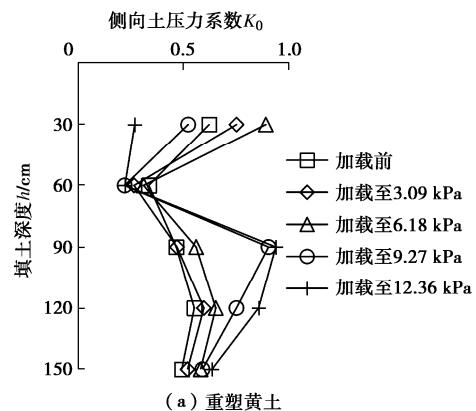
图 5 轻量土养护期间侧向土压力随时间变化规律

Fig. 5 Change laws of lateral earth pressure with curing period of light weight soil

3.3 静止土压力系数随填土深度的变化规律

某一深度处侧向土压力与竖向土压力的比值为侧向土压力系数, 也称侧压力系数, 由于模型试验和现场实测的复杂性, 使得实测值与理论计算值存在一定的偏差^[21], 本文通过模型试验探究重塑黄土和轻量土侧向土压力系数随填土深度的变化规律。

由图 6 可知: ①重塑黄土的侧向土压力系数整体上在 0.58 左右变化, 随着填土深度增加变化较小, 随着荷载增加出现了微小的增幅。以 $h=120$ cm 处的侧向土压力系数为例, 不同荷载条件下的侧向土压力系数依次为 0.55, 0.60, 0.66, 0.75, 0.86。②轻量土的侧向土压力系数整体上在 0.33 左右变化, 随着填土深度和上部荷载增加几乎不发生变化。以 $h=120$ cm 处的侧向土压力系数为例, 不同荷载条件下侧向土压力系数依次为 0.37, 0.39, 0.39, 0.37, 0.31, 0.27, 0.27, 0.25, 0.23。③轻量土和重塑黄土的侧向土压力系数都不是常数, 随着填土深度和上部荷载变化, 轻量土的侧向土压力系数为 0.22~0.55, 重塑黄土的侧向土压力系数为 0.34~0.78, 这一现象与传统土压力理论并不相同。④轻量土与重塑黄土的侧向土压力系数在 $h=60$ cm 处出现异常情况, 可能是由填土不均匀或者土压力盒接触不良所引起。



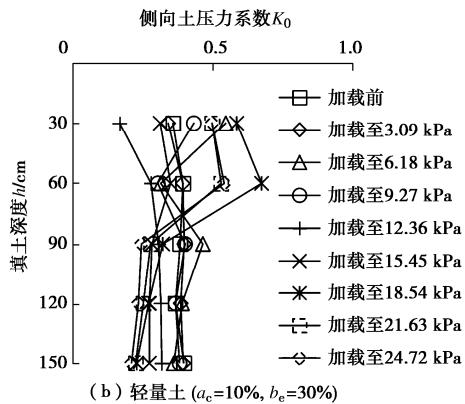


图 6 不同上部荷载时侧向土压力系数随填土深度变化规律

Fig. 6 Change laws of lateral earth pressure coefficient with filling depth under different upper loads

综上所述, 对静止土压力的变化规律进行原因分析, 主要有: ①在养护阶段, 轻量土的侧向土压力出现一定幅度的增长, 推测其主要与水泥的水化放热以及填土自重应力有关。一方面, 水泥的水化反应伴随着热量的释放, 即水化热, 使得轻量土产生了一定的膨胀变形, 由于挡土墙模型槽为刚性介质, 挡土墙边界填土的侧向应力相应增大。另一方面, 由于轻量土的压实度为 90%, 在自重应力固结过程中, 填土的侧向应力出现增长, 且填土越深增幅越大。随着时间增长, 自重应力和膨胀变形的影响逐渐降低, 因此侧向土压力的增幅逐渐减小。②由于模型试验中采用的人工填土和人工夯实等填筑方法受人为因素影响很大^[22], 所以填土过程无法得到精确控制, 使得模型槽中填土分布不均匀, 导致墙背处部分土压力盒与填土接触不良, 因此在 $h=60$ cm 处的侧向土压力变化出现了反常现象。随着上部荷载的逐渐增大, 重塑黄土的密实度也逐渐增大, 使得重塑黄土侧向土压力系数相应增大。由于轻量土具有较强的自立性, 水泥经过养护会在轻量土内部产生较强的胶结作用, 使得轻量土在外荷载作用下不易产生变形。因此, 随着荷载增大轻量土侧向土压力增幅较小, 轻量土的减压效果也得到提高。③轻量土侧向土压力系数不是一个常数。其一是在模型试验中难以控制填土的均匀性, 且不同深度处填土的传递系数也并不一致, 使得各处填土的竖向土压力增加值出现差异, 导致不同深度填土的密实度也不相同, 因此其侧向土压力系数出现波动现象; 其二是墙背和墙底均存在摩擦力, 使得侧向土压力系数的变化规律出现异常; 其三是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, 使得轻量土侧向土压力系数也随着填土深度出现了一定的变化。

4 静止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偏

差, 且对于轻量土作为墙后填土时的静止土压力分布规律, 传统理论也没有作出相应分析, 使得轻量土的工程应用受到了一定的限制。本文为了研究重塑黄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, 针对两种填土类型, 对传统理论计算值与模型试验值进行对比分析。

4.1 静止土压力传统理论分析

传统静止土压力理论是一种弹性平衡理论, 该理论假设挡土墙墙背光滑且垂直, 其静止土压力分布简图如图 7 所示。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°。

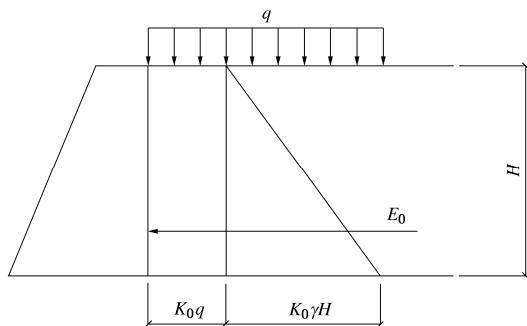


图 7 静止土压力分布简图

Fig. 7 Distribution of earth pressure at rest

由图 7 可知: ①传统理论中静止土压力包括两部分, 其中由填土上部均布荷载以及填土自重所产生的土压力均为正值。②静止土压力沿着墙高呈线性分布, 其中墙顶处静止土压力为 K_0q , 墙底处静止土压力最大。③静止土压力合力作用点总是通过梯形重心处。根据图 7 所示的土压力分布情况, 得到其计算公式如下。

静止土压力强度:

$$p_0 = K_0(\gamma h + q) \quad . \quad (1)$$

静止土压力系数:

$$K_0 = 1 - \sin \varphi' \quad . \quad (2)$$

静止土压力合力:

$$E_0 = \frac{K_0(\gamma H + 2q)H}{2} \quad . \quad (3)$$

式中: H 为墙高; γ 为土的重度; φ' 为土的有效内摩擦角; q 为均布荷载; h 为填土深度。

4.2 静止土压力理论值与试验值的对比分析

根据传统静止土压力理论公式计算两种填土在均布荷载作用下的静止土压力, 并与模型试验值进行对比分析, 进而揭示传统理论在实际工程中的适用性。

由图 8, 9 可知:

(1) 未加载时, 重塑黄土静止土压力的理论值与试验值较为接近, 随着荷载增加, 重塑黄土静止土压力理论值与试验值之间的误差仅出现轻微增长。以试

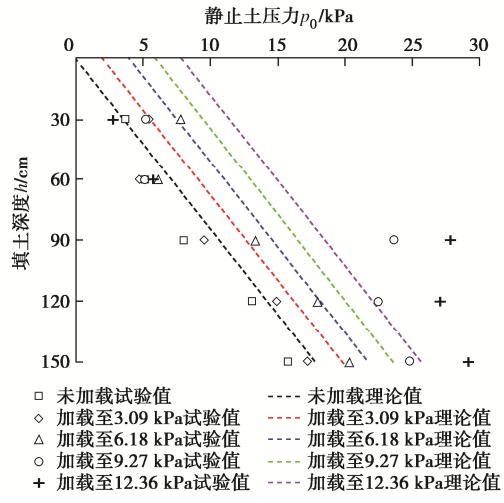


图 8 重塑黄土静止土压力理论值与试验值对比

Fig. 8 Comparison between theoretical and test values for earth pressure at rest of remolded loess

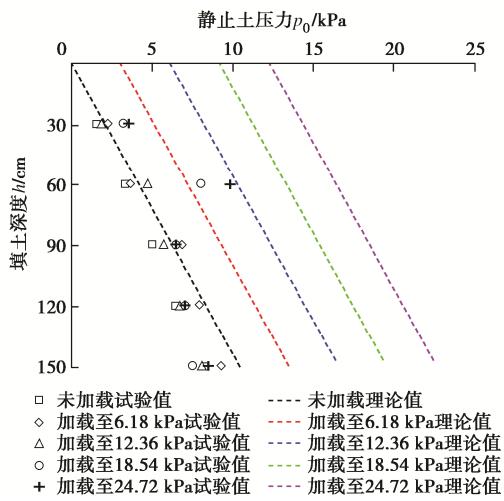


图 9 轻量土静止土压力理论值与试验值对比

Fig. 9 Comparison of theoretical and test values for earth pressure at rest of light weight soil

验值为基准, 未加载时重塑黄土静止土压力理论值与试验值的绝对误差自墙顶至墙底依次为 0.15, 2.02, 2.67, 1.14, 2.00 kPa。

(2) 未加载时, 轻量土静止土压力的理论值与试验值偏差不大, 但随着上部荷载增加, 轻量土静止土压力理论值与试验值之间的偏差逐渐增大。以填土深度 90 cm 处静止土压力为例, 上部荷载从零逐渐增加至 24.72 kPa, 轻量土静止土压力理论值与试验值之间的绝对误差依次为 1.33, 2.48, 6.67, 8.96, 12.01 kPa。

(3) 重塑黄土静止土压力理论值与试验值的绝对误差处于 0.15~9.29 kPa, 相对误差总体上处于 1.15%~29.87%, 总体上小于 30%, 表明传统理论可以较为准确地计算重塑黄土静止土压力。轻量土静止土压力理论值与试验值的绝对误差处于 0.16~14.20 kPa, 相对误差处于 41.18%~341.86%, 总体上大于 40%, 可见有必要对轻量土静止土压力计算公式进行修正。

4.3 轻量土静止土压力修正公式的建立

根据上文分析, 传统理论对于填土表面作用有均布荷载的轻量土静止土压力计算不够精确^[23], 因此, 基于本文模型试验对传统静止土压力计算公式进行修正。由图 10 可知: ①在填土深度为 30, 60 cm 处, 轻量土静止土压力理论值与试验值的相对误差随上部荷载的变化较为离散, 这是由于土压力盒接触不良或填土不均匀而导致个别数据点出现偏差, 其余各深度处填土的二者关系则具有较好的相关性。②轻量土静止土压力理论值与试验值的相对误差随着上部荷载的增加而逐渐增大, 大致呈线性分布规律。③经数据回归分析后得到相对误差与上部荷载之间的关系曲线 $\delta = 0.0644q + 0.2173$, 其中 δ 为轻量土静止土压力理论值与试验值的相对误差, q 为填土表面均布荷载。

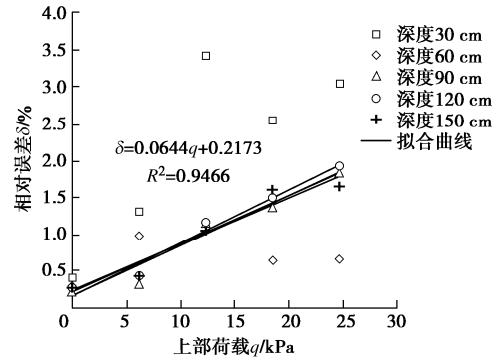


图 10 轻量土静止土压力相对误差随上部荷载变化规律

Fig. 10 Change laws of relative error for earth pressure at rest of light weight soil with upper load

根据上部荷载与相对误差之间的关系, 结合数据分析结果, 轻量土静止土压力修正公式推导如下。

静止土压力强度:

$$p_0 = \eta K_0 (\gamma h + q) \quad . \quad (4)$$

定义轻量土静止土压力强度修正系数:

$$\eta = \frac{p_{0m}}{p_{0p}} \quad . \quad (5)$$

相对误差:

$$\delta = \frac{p_{0p} - p_{0m}}{p_{0m}} \times 100\% \quad . \quad (6)$$

由式 (6) 可得

$$\frac{p_{0m}}{p_{0p}} = \frac{1}{1+\delta} \quad . \quad (7)$$

故轻量土静止土压力强度修正系数:

$$\eta = \frac{p_{0m}}{p_{0p}} = \frac{1}{1+\delta} = \frac{1}{1.22+0.064q} \quad . \quad (8)$$

静止土压力系数:

$$K_0 = 1 - \sin \varphi' \quad . \quad (9)$$

式中: γ 为土的重度; φ' 为土的有效内摩擦角; q 为均布荷载; h 为填土深度; p_{0p} 为静止土压力理论值; p_{0m}

为静止土压力试验值。式(4), (8), (9)为轻量土静止土压力修正公式。

4.4 轻量土静止土压力修正公式的验证

根据该修正公式对轻量土静止土压力进行计算, 并与模型试验值以及传统理论值进行对比分析, 如图11所示。由图11可知: ①以试验值为基准, 未加载时, 轻量土静止土压力修正公式计算值与试验值的绝对误差自墙顶至墙底依次为0.23, 0.16, 0.20, 0.48, 0.30 kPa, 其相对误差依次为15.73%, 4.84%, 3.97%, 7.49%, 3.63%, 表明此时误差较小。②在加载阶段, 以加载至12.36 kPa为例, 轻量土静止土压力修正公式计算值与试验值的绝对误差自墙顶至墙底依次为2.22, 0.39, 0.44, 0.51, 0.15 kPa, 其相对误差依次为119.72%, 8.15%, 7.72%, 7.56%, 1.90%, 除挡墙土部外其误差并不大。③当填土表面作用有任意大小的均布荷载时, 轻量土静止土压力修正公式计算值与试验值的误差均不大, 其绝对误差为0.07~3.98 kPa, 相对误差为1.01%~23.13%, 总体上小于23%, 表明该修正公式可以对轻量土静止土压力进行计算。

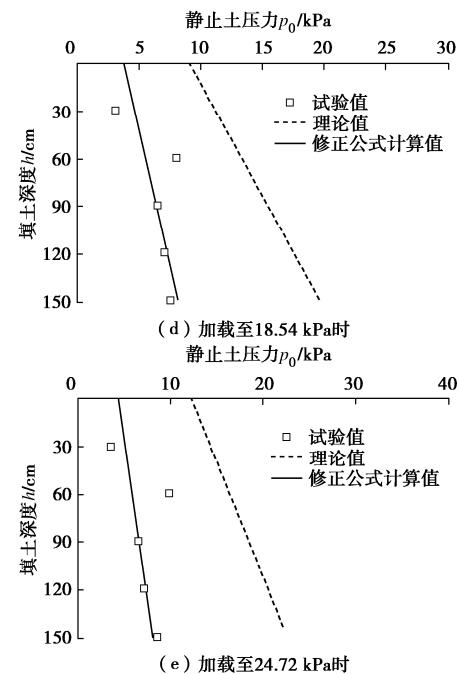
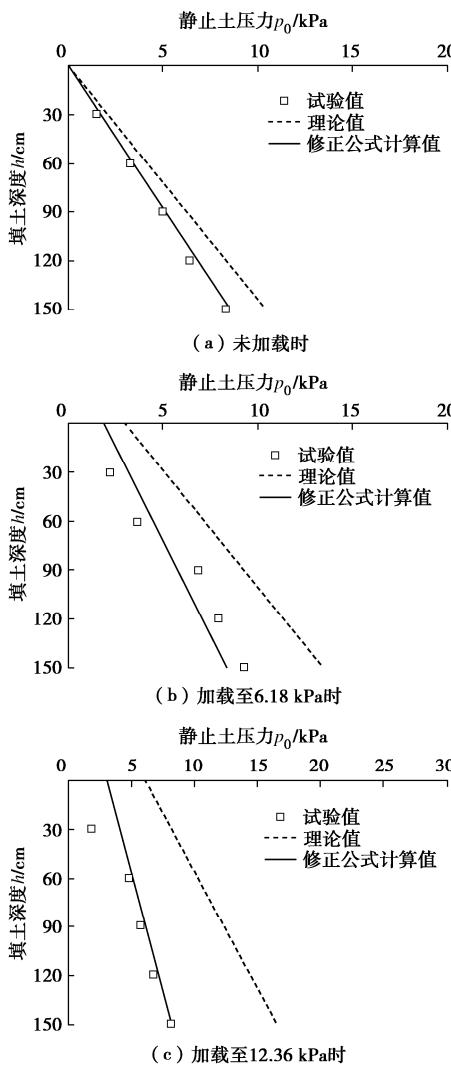
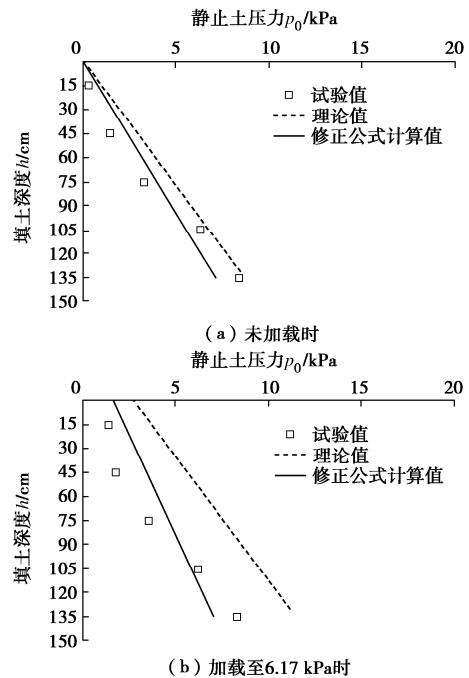


图11 轻量土静止土压力修正公式计算值与试验值对比
Fig. 11 Comparison of test values and calculated values by modified formula for earth pressure at rest of light weight soil

为了进一步探讨修正公式对轻量土静止土压力的适用性, 采用侯天顺等^[22]试验数据进行验证。该试验中轻量土的配比是水泥掺量15%, EPS颗粒质量掺比0.32%, 含水率30.74%, 龄期28 d。采用压实度90%, 加卸载路径依次为6.17, 12.34, 18.51, 24.68, 18.51, 12.34, 6.17 kPa。在该模型试验中, 采用电阻应变式微型土压力传感器与WH-1000型荷载仪对挡土墙后填土的竖向土压力、侧向土压力进行监测, 监测点的深度分别为15, 45, 75, 105, 135 cm。在不同上部荷载条件下, 轻量土静止土压力修正公式计算值与试验值的对比如图12所示。



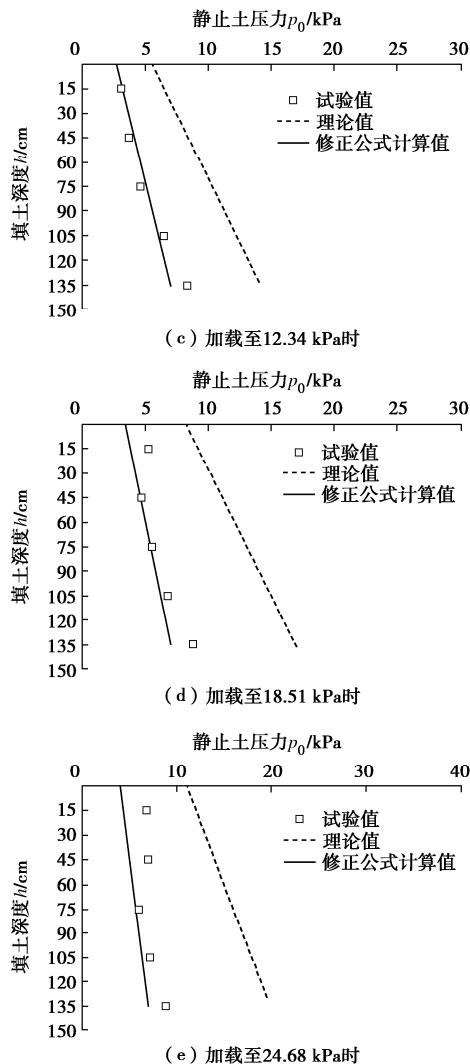


图 12 轻量土静止土压力修正公式计算值与试验值对比 (根据侯天顺等数据)

Fig. 12 Comparison between test values and calculated values by modified formula for earth pressure at rest of light weight soil (according to data of Hou and Yang)

由图 12 可知,轻量土静止土压力修正公式计算值与试验值的误差均不大,其绝对误差为 0.07~2.40 kPa,相对误差总体上介于 1.42%~22.24%。根据侯天顺和杨凯旋轻量土挡土墙大型模型试验的实测值进行验证,修正公式计算值与试验值的吻合度依然较高,可见此修正公式可以较为准确地预测轻量土的静止土压力。

5 结 论

(1) 轻量土在养护期间的侧向土压力随着时间增长而逐渐增大,但随着时间增大,增幅逐渐减小。重塑黄土和轻量土的静止土压力都随着填土深度增加而近似线性增大,随着上部荷载增加,重塑黄土静止土压力的增幅明显偏大。对比发现轻量土可以有效降低墙背静止土压力,且上部荷载越大减压效果越好。

(2) 重塑黄土和轻量土的静止土压力系数都不是

常数,随着填土深度和上部荷载的变化会出现不同程度的波动,其中轻量土的侧向土压力系数为 0.22~0.55,重塑黄土的侧向土压力系数为 0.34~0.78。

(3) 传统理论在计算重塑黄土静止土压力时准确度较高,其相对误差总体上介于 1.15%~29.87%,总体上小于 30%。未加载时,传统理论对于轻量土静止土压力预测较为适用,但随着上部荷载的增加其误差逐渐增大。基于模型试验,采用数据回归分析的方式对传统静止土压力计算公式进行修正,经验证发现该公式可以较为准确地计算轻量土静止土压力,其相对误差主要为 1.01%~23.13%,总体上小于 23%。

参 考 文 献:

- [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 Tandai, 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. (in Chinese))
- [2] FEDERICO A, ELIA G, MURIANNI A. The at-rest earth pressure coefficient prediction using simple elasto-plastic constitutive models[J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(1/2): 187-198.
- [3] 宋飞,张建民,刘超.各向异性砂土 K_0 试验研究[J].岩土力学,2010, 31(12): 3727-3732, 3740. (SONG Fei, ZHANG Jianmin, LIU Chao. Experimental study of K_0 of anisotropic sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(12): 3727-3732, 3740. (in Chinese))
- [4] LIRER S, FLORA A, NICOTERA M V. Some remarks on the coefficient of earth pressure at rest in compacted sandy gravel[J]. Acta Geotechnica, 2011, 6(1): 1-12.
- [5] HAYASHI H, YAMAZOE N, MITACHI T, et al. Coefficient of earth pressure at rest for normally and overconsolidated peat ground in Hokkaido area[J]. Soils and Foundations, 2012, 52(2): 299-311.
- [6] NORTHCUTT S, WIJEWICKREME D. Effect of particle fabric on the coefficient of lateral earth pressure observed during one-dimensional compression of sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(5): 457-466.
- [7] 罗强,蔡英,邵启豪.成都黏土重力式挡土墙的工程试验[J].西南交通大学学报,1995, 30(3): 270-274. (LUO Qiang, CAI Ying, SHAO Qihao. Experimental study on gravity retaining wall filled with Chengdu clay[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1995, 30(3): 270-274. (in Chinese))

- [8] AL ATIK L, SITAR N. Seismic earth pressures on cantilever retaining structures[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, **136**(10): 1324-1333.
- [9] ZHANG M, WANG W, HU R H, et al. Study on model and tests of sheet pile wall with a relieving platform[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, **2020**: 1-16.
- [10] 乔亚飞, 遂兴邦, 黄俊, 等. 欠固结地层静止侧压力简化计算方法[J]. 岩土力学, 2020, **41**(11): 3722-3729. (QIAO Yafei, LU Xingbang, HUANG Jun, et al. Simplified calculation method for lateral pressure at rest in the under-consolidation stratum[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(11): 3722-3729. (in Chinese))
- [11] 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. (in Chinese))
- [12] 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. (in Chinese))
- [13] 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. (in Chinese))
- [14] HOU T S. Prescription formula of foamed particles in lightweight soil[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2015, **33**(1): 153-160.
- [15] 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. (in Chinese))
- [16] 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. (in Chinese))
- [17] CHENARI R J, FARD M K, MAGHFARATI S P, 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.
- [18] 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. (in Chinese))
- [19] 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. (in Chinese))
- [20] 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. (in Chinese))
- [21] HAMDERI M. Finite element-based coefficient of lateral earth pressure for cohesionless soil[J]. International Journal of Geomechanics, 2021, **21**(5): 1-12.
- [22] 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. (in Chinese))
- [23] 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. (in Chinese))