

DOI: 10.11779/CJGE201812009

改进的膨胀土侧限膨胀试验研究

张 锐^{1, 2}, 张博亚², 郑健龙^{1, 2}, 刘正楠²

(1. 长沙理工大学公路养护技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙理工大学交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为量测膨胀土在侧限浸水和不同上覆荷载下的竖向膨胀率和侧向膨胀力, 通过改进常规侧限膨胀试验装置和方法, 确保了施加上覆荷载后试样浸水前初始湿密状态不变, 消除了制样产生的初始水平应力, 并将侧向膨胀力从总的侧向力中区分出来。采用改进的试验装置和方法, 以特定初始湿密状态下的广西百色中等膨胀土为研究对象, 分别进行了常规侧限膨胀试验和改进的侧限膨胀平行性试验。试验结果表明: 常规侧限膨胀试验中的上覆荷载会改变试样初始湿密状态, 测得的竖向膨胀率偏小 7%~95%; 因制样产生的初始水平应力会使最终侧压力偏小 16.1%~43.5%; 分级加载和逐级卸载的改进侧限膨胀试验结果具有良好的一致性和可重复性; 竖向膨胀率随着上覆荷载逐渐减小, 引入相对膨胀率和相对压力, 可建立反映极限膨胀状态的幂函数拟合公式; 侧向膨胀力与上覆荷载相关并随之增大而逐渐增大, 当上覆荷载增至竖向膨胀力时侧向膨胀力达到最大, 两者之间可用双曲线较好拟合。研究成果可为膨胀模型的建立以及膨胀土地区支挡结构物设计计算提供参考。

关键词: 膨胀土; 上覆荷载; 竖向膨胀率; 侧向膨胀力

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)12-2223-08

作者简介: 张 锐(1980-), 男, 副教授, 博士, 主要从事特殊土及其路基工程问题的研究工作。E-mail: zr@csust.edu.cn。

Modified lateral confined swelling tests on expansive soils

ZHANG Rui^{1, 2}, ZHANG Bo-ya², ZHENG Jian-long^{1, 2}, LIU Zheng-nan²

(1. National Engineering Laboratory for Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science & Technology, Changsha

410114, China; 2. School of Traffic and Transport Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to measure the vertical swelling ratio and lateral swelling pressure under different vertical loading and confined conditions during soaking, the conventional confined swelling test apparatus and method are modified to ensure the consistency of the initial water content and the dry density of specimens before soaking and loading, getting rid of the initial horizontal stress caused by specimen preparation and distinguishing the lateral swelling pressure from the total lateral pressure. Using the modified apparatus and method, the conventional and modified confined swelling parallel tests are respectively carried out on the expansive soils with medium swelling potential from Baise County in Guangxi Province with specific water content and dry density. The test results show that the initial water content and dry density will change due to vertical loading during conventional tests, resulting in underestimating vertical swelling ratio measured by 7% to 95%, and that the existence of the initial horizontal stress produced by specimen preparation will underestimate the lateral pressure measured by 16.1% to 43.5%. The results of multi-stage loading and step unloading tests show the great consistency and repeatability. The vertical swelling ratio decreases with the increase of the vertical loads, and a fitting formula performing the ultimate swelling state based on power function is set up by relative swelling ratio and relative swelling pressure. While the lateral swelling pressure increases with the increase of the vertical loads, reaching its maximum value with the increasing vertical loads to the vertical swelling pressure, a hyperbolic function can fit well between the upper loads and the lateral swelling pressures. The achievements may provide references for establishing a swelling model and designing retaining structures in expansive soil areas.

Key words: expansive soil; vertical load; vertical swelling ratio; lateral swelling pressure

0 引言

膨胀土遍布全球六大洲 40 多个国家, 中国是膨胀土分布最广的国家之一。膨胀土含较多亲水性蒙脱石及其混层矿物, 具有显著吸水膨胀特性, 当其膨胀受

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108049, 51608053); 国家重点研发计划项目(2017YFC0805300); 交通运输部公路工程行业标准制订项目(JTG-201507)

收稿日期: 2018-03-20

到限制时会产生较大膨胀力, 已给膨胀土地区公路、铁路、水利、房建等各类基础设施建设和运营造成严重危害^[1]。针对实际工况准确量测膨胀土在特定应力和湿密状态下的膨胀变形和膨胀力, 对于膨胀土膨胀模型的建立、膨胀土地区基础设施变形预估^[2]和支挡结构物设计^[3]具有重要意义。

基于常规固结仪的侧限膨胀试验一直被许多国内外研究者广泛采用, 研究不同上覆荷载、干湿循环次数、不同初始含水率和干密度状态下膨胀土竖向膨胀率的变化规律^[4-7], 并利用其建立了经验性的膨胀模型^[8]。但在以往的有荷膨胀率试验中, 均是对若干个初始湿密状态相同的试样, 分别施加不同上覆荷载使其压缩变形稳定后再使其浸水膨胀, 改变了试样浸水前的初始湿密状态, 造成不同上覆荷载下的膨胀率不具可比性。常规固结仪也常被用于测试竖向膨胀力, 常用的方法有膨胀反压法^[9]、平衡加压法^[10]和恒体积法^[11]。恒体积法的物理意义相对前面两种方法而言更符合膨胀力的基本定义^[12]。由于常规侧限膨胀试验无法量测侧向膨胀力, 国内外研究者曾通过自制三向膨胀力试验装置, 量测膨胀土在不同初始湿密状态和恒体积条件下吸湿饱和所产生的侧向膨胀力^[13-15], 但无法量测不同上覆荷载下的侧向膨胀力。虽有通过改进常规固结仪量测不同上覆荷载下膨胀土吸湿饱和所产生的侧向压应力(本文简称侧向力)的实例^[16], 但没有将侧向膨胀力从侧向力中区分开来, 也没有考虑由于制样产生的初始水平应力对侧向力测试结果的影响。

针对以往研究中在有荷膨胀率、竖向膨胀力和侧向膨胀力测试方面存在的不足, 为了便于工程应用, 本文对常规侧限膨胀试验装置及试验方法进行改进, 使其满足了4个方面的试验要求: 确保了膨胀土试样在施加上覆荷载后和浸水膨胀之前的湿密状态能与初始湿密状态保持一致; 可在恒体积状态下测得浸水饱和后的竖向膨胀力; 消除了制样产生的初始水平应力; 可获得不同上覆荷载下侧向力和侧向膨胀力。采用改进的试验装置和方法, 对广西百色膨胀土开展了侧限膨胀试验研究, 建立了膨胀数学模型和与上覆荷载相关的侧向膨胀力拟合公式。本文研究成果可为膨胀土地区构造物设计和相关标准的编制修订提供参考。

1 改进的侧限膨胀试验装置

在常规固结仪的基础上改进的侧限膨胀试验装置^[17]主要由竖向加载和变形量测系统、可开合环刀和侧向力量测系统、数据采集系统三大部分组成, 如图1所示。为了检验试验结果的稳定性和重现性, 共加工制作了两套改进装置进行平行试验。

竖向加载采用三联高压固结仪的加压系统。在加载板与试样之间, 安置有一个直径大于环刀内径且与环刀外径相等的透水石, 其外缘用护刀限位, 使透水石的中心与加载板和试样的中心在一垂线上。竖向膨胀量由安装在加载架上的电子数显千分表实时量测。

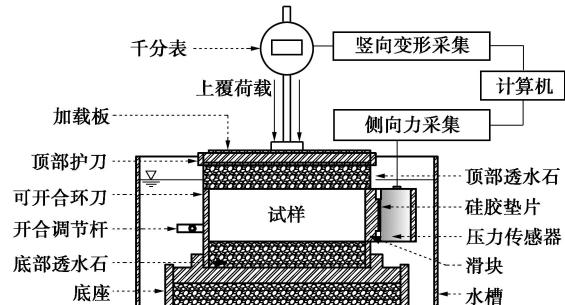


图1 改进的侧限膨胀试验装置结构示意图

Fig. 1 Sketch of modified lateral confined swelling test devices

用常规环刀切削原状样或在常规环刀中静压成样, 会对试样产生未知的初始水平应力, 且侧限浸水膨胀过程中, 侧向力无法量测。为消除因制样产生的初始水平应力, 增加侧向力量测功能, 制作了配有侧向压力传感器的可开合环刀(图2)。该环刀的材质和内径与常规环刀一致; 为了在侧向安置压力传感器, 高度增至30 mm; 为了提高环刀刚度, 环刀厚度增至2 mm。相应地修改了常规固结仪的底座, 以满足安放可开合环刀的需要。

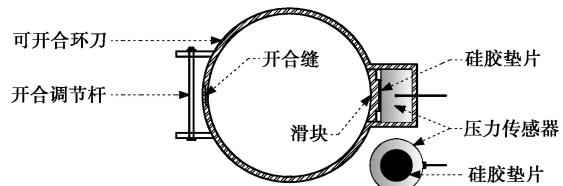


图2 可开合环刀示意图

Fig. 2 Sketch of retractable cutting ring

环刀左侧设有一“Z”型的开合缝, 通过其左侧的调节杆调节该缝的开合, 可消除试样和环刀之间的初始水平应力。环刀右侧设有一“凹”型槽, 用于安放厚12 mm、直径20 mm的纽扣式电阻应变压力传感器。该传感器量程为0~600 kPa, 精度为0.3%F_s。其有效感应区域为受压面中心处直径12 mm的圆形区域。试样侧向力通过一与环刀相同材质的刚性滑块传至压力传感器, 滑块与凹槽的接触面上做润滑处理以减少摩擦。滑块左侧圆弧面完全弥补环刀在凹槽处缺口。滑块正面为边长20 mm正方形。滑块右侧为直径12 mm、高2 mm的凸起, 与传感器有效受力区域大小一致。为了避免滑块凸起与压力传感器之间直接刚性接触造成量测的压力值不稳定, 在压力传感器有效受压区域黏贴了1 mm厚的硅胶垫片。试样对环刀

作用的侧向力为压力传感器监测值乘以 0.283(传感器有效受力面积与滑块正立面面积之比)。

对两套改进装置中的压力传感器分别进行了加-卸载循环标定。将贴有硅胶垫片的压力传感器水平放置, 受压面垂直朝上; 再在其上放置刚性滑块, 圆弧面垂直朝上。通过压力加载机从滑块圆弧面一侧中心处逐级施加或减小荷载, 相应读取传感器量测的压力值(实测值)。荷载除以传感器有效受压面积为压力理论值。加、卸载循环标定结果表明, 两个传感器加、卸载的实测值和理论值之间的线性相关系数均大于 0.999, 加、卸载的滞回效应不显著。

由电子数显千分表量测的竖向膨胀量数据和由压力传感器量测的侧向力数据, 均通过各自配套的监控系统自动传输到计算机, 实现竖向位移和侧向力监测数据的实时显示和存储。

2 试验方法及步骤

试验的方法和步骤基本参照《公路土工试验规程》(JTG E40—2007) 的有荷载膨胀率试验方法, 但增加了消除初始水平应力, 量测侧向力、静止侧压力系数以及计算侧向膨胀力等内容。试验步骤如下:

(1) 根据工程或研究需要, 用常规环刀切削原状样或在环刀中通过静压成特定湿密状态的重塑样, 测得试样初始状态的含水率 w_0 、饱和度 S_{r0} 和干密度 ρ_{d0} 。

(2) 用顶土块将试样从常规环刀中顶出, 放入处于张开状态的可开合环刀中, 调节开合调节杆使开合缝闭合, 使初始侧向力为 1~2 kPa。

(3) 从下至上在试样上依次放置滤纸、直径与环刀外径相同的透水石、护刀、加载板, 安放电子数显千分表, 施加 1 kPa 的压力, 使仪器各部分接触。

(4) 施加所要求的上覆荷载 P_v , 待千分表读数稳定后调零, 向水槽缓慢注入蒸馏水, 使试样自下而上浸水, 最终保持水面始终超过试样顶面约 5 mm。

(5) 进行实时监测并设定每 120 s 记录一次竖向膨胀量和侧向力数据, 至 2 h 内竖向膨胀量变化不超过 0.01 mm 且侧向力变化不超过 1.0 kPa 时为止, 可得该级上覆荷载下浸水后膨胀率 ε_v 和侧向力 P_h 。

(6) 放水, 解除荷载, 取出试样, 测得试样膨胀后含水率 w_f 、饱和度 S_{rf} 和干密度 ρ_{df} 。

(7) 按照步骤(1)~(6) 测试下一级上覆荷载下试样浸水后的膨胀率、侧向力、含水率、饱和度和干密度。

(8) 根据无荷作用下试样浸水后的高度、含水率和干密度, 在安放有顶部护刀的可开合环刀中通过静压制备试样, 利用改进的试验装置, 进行从 0 逐级加载的浸水固结试验, 测得每级荷载固结时的静止侧压

力系数 K_0 , 并计算干密度 ρ_d 。最终得到 $K_0 - \rho_d$ 曲线。

(9) 根据下式计算上覆荷载 P_v 作用下试样浸水膨胀后产生的侧向膨胀力 P_{eh} :

$$P_{eh} = P_h - K_0 P_v \quad (1)$$

式中 P_h 为侧向力(kPa); P_v 为试样受到的上覆荷载, kPa(当 $P_v \geq$ 竖向膨胀力时, P_v 等于竖向膨胀力); K_0 为静止侧压力系数, 由步骤(6)得到的该级上覆荷载下浸水膨胀后干密度 ρ_{dt} 在 $K_0 - \rho_d$ 曲线上查得。

(10) 需要时, 可在某一级荷载作用下膨胀稳定后, 按砝码的具体情况, 分级逐次退荷到零, 并测定各级荷载下的竖向膨胀率和侧向力, 并按步骤(8)、

(9) 得到各级荷载下的侧向膨胀力。

3 试验土样和试验方案

3.1 试验土样

试验所用土样取自广西壮族自治区百色市平果县四塘镇, 位于中国典型膨胀土分布区百色盆地内。取得的地表以下 6 m 深度处原状土样呈浅黄色, 硬塑—坚硬状。土样的天然含水率为 20.6%, 液限为 56.3%, 塑限为 21.4%, 自由膨胀率为 82.0%, 土粒相对密度为 2.75, 标准吸湿含水率为 6.7%, 湿法重型击实最大干密度为 1.72 g/cm³, 最佳含水率 17.9%; 细粒含量 99.9%, 其中黏粒含量 47.9%; 有效蒙脱石含量 16.6%, 阳离子交换量为 17.86 meq/100g, 比表面积 130.8 m²/g。根据上述基本性质指标和现行公路路基设计规范, 土样可判为具有中等膨胀潜势的膨胀土。

由于采集的土样已被扰动, 本文试验全部采用重塑样。土样先风干粉碎至 1 mm 粒径以下, 在 105°C 下烘干后, 加适量蒸馏水配至设定含水率, 拌匀过 2 mm 筛后闷料 24 h, 在用烘干法测定其含水率后, 再在常规环刀中静压成设定干密度状态下的试样。

3.2 试验方案

分验证性试验和探索性试验两个阶段开展研究:

(1) 第一阶段试验目的是与常规试验进行对比, 以验证改进的试验方法的合理性, 分析初始湿密状态改变对竖向膨胀率量测结果的影响和初始水平应力对侧向力量测结果的影响。

a) I -1: 分别采用常规和改进的侧限膨胀试验方法, 对初始含水率为 17.9% (最佳含水率), 干密度为 1.60 g/cm³ (最大干密度的 93%) 的重塑样, 进行 25, 50, 100, 200 kPa 上覆荷载下膨胀试验。

b) I -2: 在可开合环刀中直接静压制样, 制备成初始含水率为 17.9%, 干密度为 1.48 g/cm³ 的两组平行重塑样, 一组保持因静压超固结产生的初始水平应力, 另一组卸掉该初始水平应力, 再分别测试这两组试样在无荷和恒体积浸水条件下 (施加足够大的上覆

荷载, 使试样浸水后不产生竖向膨胀) 的侧向力。

(2) 第二阶段试验目的是通过改进的试验方法揭示不同上覆荷载下竖向膨胀率和侧向膨胀力的变化规律, 并建立相应的回归方程。

a) II-1: 对初始含水率为 17.9%, 干密度为 1.60 g/cm³ 的 8 个平行样, 采用改进的侧限膨胀试验方法, 分别施加 0, 12.5, 25, 50, 100, 200, 250, 300 kPa 八级不同上覆荷载(分级加载), 获得相应的浸水后竖向膨胀率、侧向力和侧向膨胀力。

b) II-2: 对 300 kPa 上覆荷载下 (因该级荷载作用下试验未发生膨胀) 浸水后的单个试样, 逐级卸载, 同样获得不同上覆荷载下的竖向膨胀率、侧向力和侧向膨胀力, 并与上述分级加载试验得到的结果进行对比。

为检验试验结果的重复性, 以确保试验数据的准确性, 对于第二阶段试验中的每级上覆荷载, 同时采用两套改进的试验装置进行平行试验。

4 改进的侧限膨胀试验方法的合理性验证

4.1 保持初始湿密状态一致的合理性

验证性试验结果图 3 表明: 在改进试验中, 浸水前试样不会被压缩, 不同上覆荷载下的试样的初始湿密状态能保持一致; 在常规试验中, 浸水前施加的上覆荷载越大, 试样压缩量越大, 继而干密度增大 (图 3(a)), 浸水膨胀恢复至初始高度时的含水率越高 (图 3(b)), 因此最终膨胀率要小于改进方法中相同上覆荷载下的膨胀率 (图 3(c))。25, 200 kPa 上覆荷载下按照常规方法测得的膨胀率较改进方法测得的结果分别偏小 7% 和 95%。

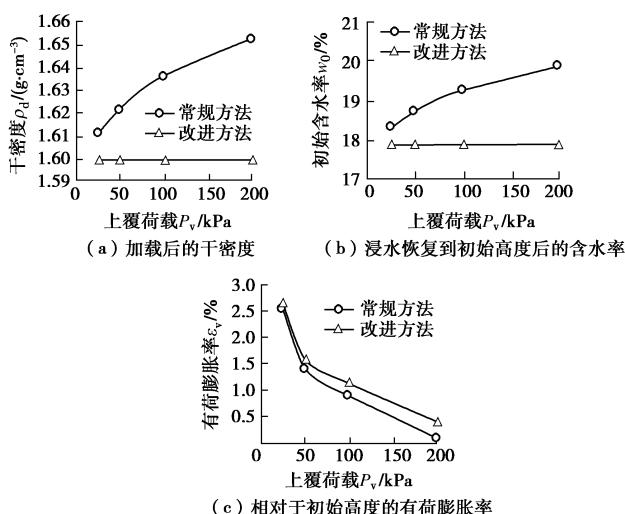


图 3 常规方法与改进方法初始状态和有荷膨胀率的比较
Fig. 3 Comparison of initial states and swelling ratios under different vertical loads according to conventional and improved methods

从 s (吸力) - P_v (上覆荷载) 平面 (图 4) 进一步分析常规和改进试验中由于应力路径的差异对膨胀率测试结果的影响。以 200 kPa 上覆荷载作用下的侧限膨胀试验为例, 在改进试验中, 施加上覆荷载后, 试样未受力, 浸水后试样底部遇水迅速产生膨胀压力, 并自下而上传递至顶部透水石, 试样开始受到上覆荷载作用。此时, 试样仅局部增湿, 虽然吸力有所下降, 但变化不大, 应力路径可视为 $O-A$; 之后试样继续吸水膨胀至稳定, 达到饱和, 吸力降为 0($A-B$)。而常规试验中, 因为试样先在荷载作用下发生压缩, 饱和度增加, 吸力减小($O-A'$), 同时对应的 LC 加载屈服线右移, 试样浸水膨胀恢复至初始高度时, 吸力进一步减小($A'-B'$), LC 加载屈服线左移回至原位置附近, 试样继续膨胀至稳定($B'-C'$)。可以看出, 改进方法测得的是 $A-B$ 所产生的竖向膨胀率, 而常规方法测得的则是 $B'-C'$ 所产生的竖向膨胀率, 显然后者会小于前者。而且, 常规试验中不同上覆荷载作用下的 B' 点在纵坐标上的位置不同, 即不在同一“起跑线”上, 使得不同上覆荷载作用下测得的膨胀率之间不具有可比性。而改进试验克服了上述问题。

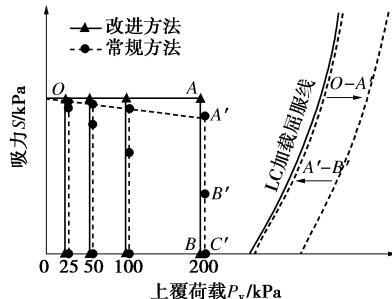


图 4 常规方法与改进方法在 $P-S$ 平面上的应力路径

Fig. 4 Stress paths of conventional method and modified method in $P-S$ plane

4.2 消除初始水平应力的合理性

按照 I -2 试验方案, 测得其中一个试样在制样过程中的侧向力随时间变化路径如图 5 所示。图中 OA 段为竖向加压过程中的侧向力路径, 到达 A 点时侧向压力传感器的读数已接近压力传感器的最大量程。随后保持竖向静压一段时间, 侧向力缓慢下降并稳定至 B 点。卸除竖向静压力后, 侧向力瞬间下降至 C 点。随后, 侧向力缓慢下降并稳定至 D 点。此时侧向力即为由于静压制样所产生的初始水平应力。调节环刀的开合调节杆, 使环刀开合缝处于张开状态后, 初始水平应力降至 0, 再将缝闭合, 并使初始侧向力为 1.0 kPa, 确保试样和环刀接触 (DE 段)。由此, I -2 试验中第一组试样的侧向力路径为 $OABCD$; 第二组试样的为 $OABCDE$ 。

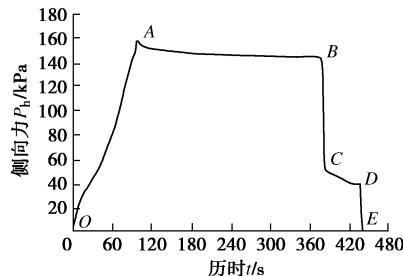


图5 静压制样过程中侧向力变化路径

Fig. 5 Stress paths of lateral stress in the process of sample preparation

对两组试样分别进行无荷和恒体积条件下的浸水膨胀试验, 两组试样的初始水平应力和浸水后测得的最终侧向力结果如表1所示。

表1 保留和消除初始水平应力浸水后测得的侧向力

Table 1 Measured lateral stresses with and without initial horizontal stress

项目	无上覆荷载浸水	恒体积浸水	无上覆荷载浸水	恒体积浸水
初始水平应力/kPa	40.5	1.0	40.1	1.0
最终侧向力/kPa	10.8	19.1	57.7	68.8

结果表明, 若保留40 kPa左右的初始水平应力, 相对于消除初始水平应力后的试件来说, 其无荷和恒体积浸水条件下所测得的侧向力分别偏小43.5%和16.1%。因此, 初始水平应力对侧向力的影响不可忽略, 采用改进的方法可以消除这一影响。

5 改进的侧限膨胀试验结果及分析

按照II-1方案和II-2方案得到的试验结果(表2, 3)表明: 分级加载平行试验测得的竖向膨胀率和侧向力的最大相对标准偏差(RSD)分别为3.7%, 4.3%, 逐级卸载的分别为4.2%和3.2%, 均小于5%, 说明改进试验装置试验结果具有良好重现性。限于篇幅, 以下涉及竖向膨胀率和侧向力的时程曲线仅以^{#1}装置测得的试验数据进行讨论。

表2 不同上覆荷载下竖向膨胀率和侧向力平行试验结果

Table 2 Parallel test results of vertical swelling ratio and lateral stress under different vertical loads

装置	上覆荷载/kPa	0	12.5	25	50	100	200	250	300
^{#1}	竖向膨胀率/%	9.01	4.14	2.7	1.58	1.12	0.39	0.01	0
	侧向力/kPa	44.7	57.5	64.7	78.3	106.3	138.2	149.7	150.3
^{#2}	竖向膨胀率/%	8.93	4.26	2.58	1.64	1.18	0.41	0.01	0
	侧向力/kPa	47.1	56.5	63.9	77.3	106.1	139.5	151.1	151.7

5.1 不同上覆荷载下竖向膨胀率及其变化规律

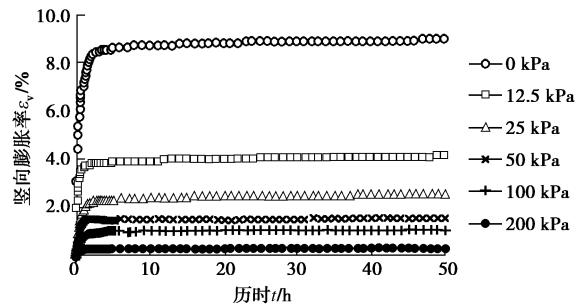
图6为不同上覆荷载下竖向膨胀率随时间的变化曲线。可以看出竖向膨胀率在浸水初期急剧增长, 随后增长缓慢, 上覆荷载越大, 竖向膨胀率越快趋于稳

定。监测数据表明, 在浸水1~2 h内, 各级荷载作用下的膨胀占总膨胀的70%以上, 无荷条件下需浸水48 h后膨胀可达到稳定, 有荷作用下则需2~40 h。

表3 逐级卸载条件下竖向膨胀率和侧向力平行试验结果

Table 3 Parallel test results of vertical swelling ratio and lateral stress under step by step unloading condition

装置	上覆荷载/kPa	300	250	200	100	50	25	12.5	0
^{#1}	竖向膨胀率/%	0	0.01	0.21	1.25	2.05	3.38	4.56	9.18
	侧向力/%	144.6	143.5	133.5	107.6	83.4	73.0	62.2	44.7
^{#2}	竖向膨胀率/%	0	0.01	0.22	1.27	2.04	3.22	4.84	9.14
	侧向力/%	143.6	143.4	133.1	108.1	84.9	74.0	57.5	40.5

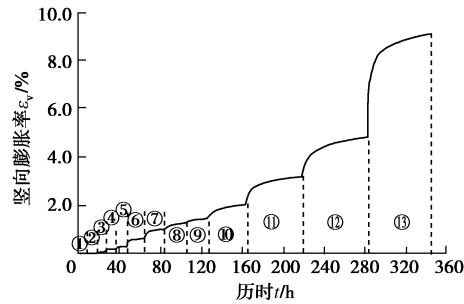


注: 由于250 kPa和300 kPa上覆荷载下的竖向膨胀率分别为0和0.01%，因此该两级荷载作用下的竖向膨胀率时程曲线未在图中绘出。

图6 分级加载竖向膨胀率随时间的变化

Fig. 6 Variation of vertical swelling ratio under different vertical loads

图7为逐级卸荷中膨胀率的时程曲线。其中, 300 kPa上覆荷载下试样浸水后无膨胀变形, 根据侧向力随时间的变化, 5 h后达到膨胀压力平衡。卸载至250 kPa后发生了细微膨胀, 竖向膨胀率仅为0.01%; 随后随着上覆荷载的减小, 每级荷载作用下膨胀变形逐渐增大, 平衡所需的时间逐渐增加。但所需时间要小于分级加载试验中相应的上覆荷载作用下的试样。



注: ①~⑬分别表示上覆荷载为300, 250, 225, 200, 175, 150, 125, 100, 75, 50, 25, 12.5, 0 kPa作用下的时间段。

图7 逐级卸荷中竖向膨胀率随时间的变化

Fig. 7 Variation of vertical swelling ratio during unloading process

根据表2, 3中的数据进行对比分析, 逐级卸载和分级加载条件下, 相同上覆荷载对应的竖向膨胀率测试结果的相关系数为0.996, 即这两种上覆荷载变化条件下测得的竖向膨胀率具有良好的一致性。为此, 将

加卸载试验得到竖向膨胀率测试结果绘制于图 8。为了建立竖向膨胀率与上覆荷载之间的数学关系，并反映无荷状态和恒体积状态两种极限状态，定义相对膨胀率（有荷膨胀率 ε_v 与无荷膨胀率 ε_{vm} 之比）和相对压力（上覆荷载 P_v 与恒体积竖向膨胀力 P_{vm} 之比），并利用幂函数对图 8 的离散点进行回归：

$$\frac{\varepsilon_v}{\varepsilon_{vm}} = 1 - \left(\frac{P_v}{P_{vm}} \right)^n, \quad (2)$$

式中， ε_{vm} 为无荷膨胀率（%）， P_{vm} 为恒体积竖向膨胀力（kPa）， n 为拟合参数，与土性和初始湿密状态相关。

该回归公式能满足 $P_v = P_{vm}$ 时 $\varepsilon_v = 0$ 和 $P_v = 0$ 时 $\varepsilon_v = \varepsilon_{vm}$ 的极限性质，且参数少、形式简单。

拟合结果为 $\varepsilon_{vm} = 9.1\%$ ， $P_{vm} = 252.6$ kPa， $n = 0.159$ ，相关系数为 0.986。

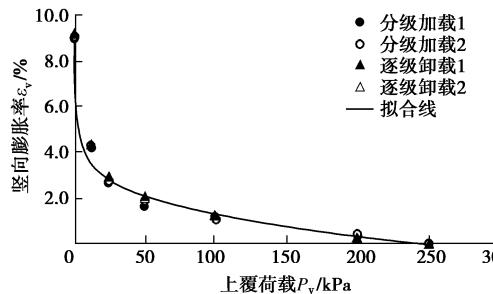
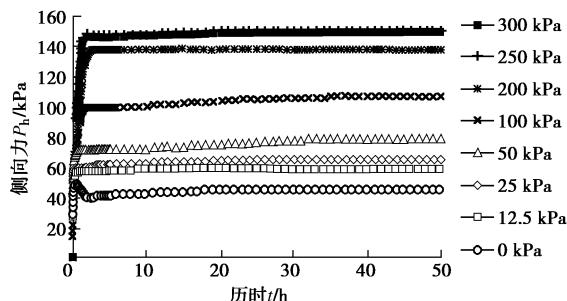


图 8 不同荷载下及逐级卸荷所得膨胀率随荷载的变化

Fig. 8 Variation of vertical swelling ratio under different vertical loads

5.2 不同上覆荷载下侧向膨胀力及其变化规律

图 9 所示为不同上覆荷载下侧向力随时间的变化曲线。可以看出侧向力在浸水初期急剧增长，随后缓慢增长并逐渐趋于稳定，上覆荷载越大浸水后侧向力稳定所需的时间越短，无荷条件下需浸水 27 h，有荷作用下则需 2~25 h。在浸水 1~2 h 内，各级荷载作用侧向力的增量占总增量的 90% 以上，随后缓慢增长直至稳定。



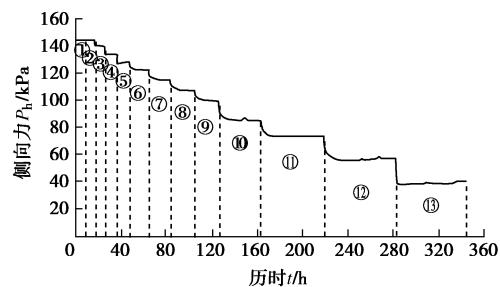
注：300, 250 kPa 上覆荷载作用下的侧向力时程曲线基本重合

图 9 不同上覆荷载下侧向力随时间的变化

Fig. 9 Variation of lateral pressure under different vertical loads

图 10 为当试样在 300 kPa 上覆荷载下浸水待侧向力达到稳定后，逐级卸荷侧向力时程曲线。可以看出，

随着上覆荷载逐级减小，侧向力也逐级减小；上覆荷载越小，在该荷载作用下侧向力达到平衡的时间越长。将表 2 的侧向力数据与表 3 中的进行对比分析，逐级卸载和分级加载条件下测得的相同上覆荷载对应的侧向力的相关系数为 0.989，说明这两种加载方式下测得的侧向力具有良好的一致性。逐级卸载只需用一个试样且时间短，相对于分级加载试验测试更为便捷。



注：①~⑬分别表示上覆荷载为 300, 250, 225, 200, 175, 150, 125, 100, 75, 50, 25, 12.5, 0 kPa 作用下的时间段

图 10 逐级卸荷中侧向力随时间的变化

Fig. 10 Variation of lateral pressure during unloading process

按照本文试验步骤（8）得到静止侧压力系数随干密度变化曲线，如图 11。根据表 2 可以得到各级上覆荷载下膨胀稳定后的干密度，在图 11 曲线中插值得到相应的静止侧压力系数 K_0 ，并由式（1）计算相应荷载下的侧向膨胀力，见表 4。

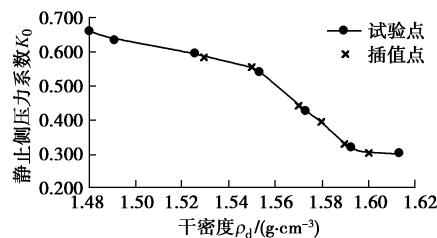


图 11 静止侧压力系数随干密度变化曲线

Fig. 11 Variation of lateral earth pressure coefficient at rest with dry density

表 4 不同上覆荷载下的侧向膨胀力

Table 4 Lateral swelling stresses under different vertical loads

上覆荷载/kPa	0	12.5	25	50	100	200	250	300
干密度/kPa	1.47	1.53	1.55	1.57	1.58	1.59	1.60	1.60
静止侧压力系数 K_0	—	0.584	0.552	0.440	0.391	0.331	0.305	0.305
侧向膨胀力/kPa	44.7	50.2	50.9	56.3	67.2	72.0	73.5	73.8

按照同样方法，获得了^{#2} 装置分级加载及^{#1} 和^{#2} 装置逐级卸载试验得到的侧向膨胀力，并一同绘于图 12。从图 12 可以看出，侧向膨胀力是随上覆荷载变化的，在 0~50 kPa 上覆荷载范围内侧向膨胀力增加较快，随后增加缓慢；当上覆荷载增至恒体积竖向膨胀力时，侧向膨胀力达到最大，是无荷作用下侧向膨胀力的 1.75 倍。因此，上覆荷载对侧向膨胀力的影响不

可忽略。已有大型模型试验^[18]和现场监测^[19]结果表明, 膨胀土的侧向膨胀力随深度(上覆压力)的增加而增加, 且到某一深度处将不再增加, 也反映了膨胀土侧向膨胀力与上覆荷载的相关性。

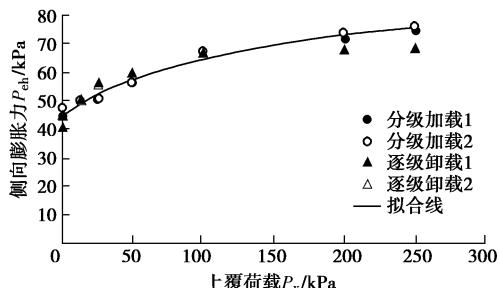


图 12 侧向膨胀力随上覆荷载的变化

Fig. 12 Variation of lateral swelling pressures with vertical loads

为了建立侧向膨胀力与上覆荷载的关系, 并反映侧向膨胀力随上覆荷载变化的极限性质, 采用双曲线函数对两者进行拟合:

$$P_{eh} = K + \frac{P_v}{a + b \cdot P_v}, \quad (3)$$

式中, P_{eh} 为侧向膨胀力(kPa), P_v 为上覆荷载(kPa), K , a 和 b 为拟合参数。

该公式中的拟合参数物理意义明确: 当 $P_v = 0$ 时, $P_{eh} = K$, 即 K 为无上覆荷载下膨胀土浸水后所产生的侧向膨胀力; 当 $P_v \rightarrow \infty$ 时, $P_{eh\lim} = K + 1/b$, 即回归参数 b 为侧向膨胀力极值与 K 值之差的倒数; a 为双曲线在 $P_v - P_{eh}$ 坐标系中 $(0, K)$ 点处斜率的倒数。该公式仅反映特定密度状态下侧向膨胀力与上覆荷载的关系, 若实际工程中设计的支挡结构后不同深度处土体密度差异较大, 则需进行不同湿密状态下的相关试验。

采用式(3)对图 12 中离散点进行拟合, 其中由于 300 kPa 上覆荷载大于竖向膨胀力, 并非试样实际受到的上覆荷载, 因此相应点未参与拟合。拟合结果为 $K=44.7$, $a=2.630$, $b=0.023$, 相关系数为 0.970。

由于以往膨胀土地区支挡结构设计中, 多采用竖向膨胀力乘以一个经验性的折减系数获得侧向膨胀力, 并且不考虑侧向膨胀力随深度或上覆荷载的变化。根据被支挡膨胀土体实际初始湿密状态和应力状态进行改进的侧限膨胀试验实测侧向膨胀力, 将有助于提高设计计算的准确性。

6 结论及建议

(1) 采用常规侧限膨胀方法进行不同上覆荷载下竖向膨胀率测试时, 浸水前试样会先在上覆荷载下产生不同程度的压缩, 改变了初始湿密状态, 测得的竖向膨胀率之间不具可比性, 且测试结果偏小。改进的试验方法确保了施加上覆荷载后试样在浸水前初始湿

密状态的一致。

(2) 侧限膨胀试验中, 静压制样产生的初始水平应力会使侧向力测试结果偏小。通过增加环刀的可开合调节功能, 可消除初始水平应力及其对侧压力测试结果的影响。

(3) 改进的侧限膨胀平行试验结果具有良好的重现性; 竖向膨胀率随上覆荷载的增大而减小, 引入相对膨胀率和相对膨胀力, 提出了两者幂函数拟合公式; 侧向力随上覆荷载的增大而增大, 当上覆荷载增至恒体积浸水条件下竖向膨胀力时侧向力达到最大; 分级加载和逐级卸载两种方式得到的结果具有良好的一致性, 后者相对前者用样少, 时间短, 测试便捷。

(4) 侧向膨胀力是侧向力的一部分, 且随上覆荷载的增大而增大, 当上覆荷载增至恒体积浸水条件下竖向膨胀力时达到最大。基于双曲线函数, 建立了两者之间的关系式, 且参数物理意义明确。

(5) 在进行膨胀土地区支挡结构物设计时, 需考虑侧向膨胀力的作用, 建议采用改进的侧限膨胀试验方法实测侧向膨胀力, 以提高设计计算的准确性。当实际工程中支挡结构物允许有一定变形或位移, 还需要对试验装置进行进一步改进, 以获得侧向膨胀力随侧向膨胀变形的变化规律, 从而为主动土压力极限状态下的支挡结构物设计提供参数。

参考文献:

- [1] 郑健龙. 公路膨胀土工程理论与技术[M]. 北京: 人民出版社, 2013. (ZHENG Jian-long. The theory and technology for highway expansive soil engineering[M]. Beijing: Renmin Communication Press, 2013. (in Chinese))
- [2] 郑健龙, 张锐. 公路膨胀土路基变形预测与控制方法[J]. 中国公路学报, 2015, 28(3): 1–10. (ZHENG Jian-long, ZHANG Rui. Prediction and control method for deformation of highway expansive soil subgrade[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(3): 1–10. (in Chinese))
- [3] LIU Y L, VANAPALLI S K. Influence of lateral swelling pressure on the geotechnical infrastructure in expansive soils[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2017, 143(6): 1–19.
- [4] 杨和平, 张锐, 郑健龙. 有荷条件下膨胀土的干湿循环胀缩变形及强度变化规律[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1936–1941. (YANG He-ping, ZHANG Rui, ZHENG Jian-long. Variation of deformation and strength of expansive soil during cyclic wetting and drying under loading condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 1936–1941. (in Chinese))

- [5] ROSENBALM D, ZAPATA C E. Effect of wetting and drying cycles on the behavior of compacted expansive soils[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 04016191.
- [6] YUAN S, LIU X, SLOAN S W, et al. Multi-scale characterization of swelling behaviour of compacted Maryland clay[J]. Acta Geotechnica, 2016, 11(4): 789 – 804.
- [7] 张福海, 王保田, 刘汉龙. 压实膨胀土路基的膨胀变形规律研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 206 – 210. (ZHANG Fu-hai, WANG Bao-tian, LIU Han-long, et al. Research on deformation disciplines of compacted expansive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 206 – 210. (in Chinese))
- [8] 章为民, 王年香, 顾行文, 等. 膨胀土的膨胀模型[J]. 水利水运工程学报, 2010(1): 69 – 72. (ZHANG Wei-min, WANG Nian-xiang, GU Xing-wen, et al. An expansive model for expansive soil[J]. Hydro-Science and Engineering, 2010(1): 69 – 72. (in Chinese))
- [9] PUPPALA A J, PEDARLA A, PINO A, et al. Diffused double-layer swell prediction model to better characterize natural expansive clays[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2017, 143(9): 1 – 10.
- [10] UZUNDURUKAN S, KESKIN S N, YILDIRIM H, et al. Suction and swell characteristics of compacted clayey soils[J]. Arabian Journal for Science & Engineering, 2014, 39(2): 747 – 752.
- [11] AL-YAQOUB T H, PAROL J,ZNIDARCIC D. Experimental investigation of volume change behavior of swelling soil[J]. Applied Clay Science, 2017, 137: 22 – 29.
- [12] GB/T50279—98 岩土工程基本术语标准 [S]. 1998. (GB/T50279 — 98 Standard for fundamental terms of geotechnical engineering[S]. 1998. (in Chinese))
- [13] 谢 云, 陈正汉, 孙树国, 等. 重塑膨胀土的三向膨胀力试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1636 – 1642. (XIE Yun, CHEN Zheng-han, Sun Shu-guo, et al. Test research on three-dimensional swelling pressure of remolded expansive clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1636 – 1642. (in Chinese))
- [14] AVSAR E, ULUSAY R, SONMEZ H. Assessments of swelling anisotropy of Ankara clay[J]. Engineering Geology, 2009, 105(1/2): 24 – 31.
- [15] IKIZLER S B, VEKLI M, DOGAN E, et al. Prediction of swelling pressures of expansive soils using soft computing methods[J]. Neural Computing & Applications, 2014, 24(2): 473 – 485.
- [16] 杨 庆, 焦建奎, 栾茂田. 膨胀岩土侧限膨胀试验新方法与膨胀本构关系[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 49 – 52. (YANG Qing, JIAO Jian-kui, LUAN Mao-tian. Study on a new method of confined swelling tests and swelling constitutive relationship for swelling rocks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 49 – 52. (in Chinese))
- [17] 张 锐, 郑健龙, 刘正楠, 等. 环刀、含该环刀的土体侧向膨胀力测量装置及测量方法: 中国, ZL201710044763.X[P]. 2017.06.09. (ZHANG Rui, ZHENG Jian-long, LIU Zheng-nan, et al. A cutting ring, an apparatus and method of measuring lateral swelling stress of soil: China, ZL201710044763.X[P]. 2017.06.09. (in Chinese))
- [18] 王年香, 章为民, 顾行文, 等. 膨胀土挡墙侧向膨胀压力研究 [J]. 水力学报, 2008, 39(5): 580 – 587. (WANG Nian-xiang, ZHANG Wei-min, GU Xing-wen, et al. Lateral swelling pressure of expansive soil acting on retaining wall due to inundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(5): 580 – 587. (in Chinese))
- [19] 杨果林, 滕 珂, 秦朝辉. 膨胀土侧向膨胀力原位试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(7): 2326 – 2332. (YANG Guo-lin, TENG Ke, QIN Zhao-hui. An in-situ Experimental research of lateral swelling pressure on expansive soils[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(7): 2326 – 2332. (in Chinese))