

文章编号:1001-7372(2018)02-0171-10

## 膨胀土侧向膨胀力及其对重力式挡墙的作用

张锐<sup>1,2</sup>,刘正楠<sup>2</sup>,郑健龙<sup>1,2</sup>,张博亚<sup>2</sup>

(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:**为研究不同上覆荷载作用下的膨胀土侧向膨胀力及其对重力式挡墙稳定性的影响,在常规固结仪基础上,设计了一种侧向膨胀力试验装置和方法,揭示广西百色膨胀土侧向膨胀力随上覆荷载的变化规律;通过湿热气候长期作用下膨胀土路堤含水率变化的数值模拟,并结合侧向膨胀力试验结果,获得了路堤重力式挡墙静止时墙背侧向膨胀力随时间和深度的变化规律;根据试验间接得到的侧向膨胀力与侧向膨胀率的关系,分析了侧向膨胀力随墙后土体侧向膨胀量的变化及其对挡墙稳定性的影响。研究表明:在侧限和无荷条件下膨胀土浸水后仍会产生一定侧向膨胀力;上覆荷载在0~50 kPa,侧向膨胀力随其增大而显著增大,且大于相应上覆荷载;上覆荷载大于100 kPa后,侧向膨胀力增幅变小并趋于稳定;上覆荷载增至恒体积竖向膨胀力时,侧向膨胀力达到最大;湿热气候长期作用下,膨胀土路堤挡墙墙后土体含水率逐年增加,静止挡墙墙背侧向膨胀力的合力逐渐增大,作用点下移;第5年含水率变化趋于稳定,侧向膨胀力沿墙背分布近似为抛物线规律,其合力为静止土压力的3倍,作用点位于墙背中部;在侧向膨胀力的作用下挡墙会被水平推移2.0 cm;若容许墙后膨胀土发生2.6 cm的侧向膨胀,可极大减小侧向膨胀力,使挡墙满足规范对其抗滑和抗倾覆稳定系数的要求。

**关键词:**道路工程;重力式挡墙;试验研究;膨胀土;侧向膨胀力

中图分类号:U416.14 文献标志码:A

Lateral Swelling Pressure of Expansive Soil and Its  
Effect on Gravity Retaining WallZHANG Rui<sup>1,2</sup>, LIU Zheng-nan<sup>2</sup>, ZHENG Jian-long<sup>1,2</sup>, ZHANG Bo-ya<sup>2</sup>

(1. National Engineering Laboratory of Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science &amp; Technology, Changsha 410114, Hunan, China; 2. School of Traffic and Transport Engineering, Changsha University of Science &amp; Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

**Abstract:** In order to investigate lateral swelling pressure (LSP) of expansive soil under the various vertical load and its effect on gravity retaining wall stability, the test apparatus and method for measuring LSP were designed based on the conventional oedometer. The variation law of LSP of expansive soil from Guangxi Baise with different vertical loads was obtained. A numerical simulation for the development of water content was carried out on an expansive soil embankment, under a long-term effect of specific wet and hot climate condition. Combined with the results of laboratory LSP tests, variations of LSP along the back of wall at rest with the

收稿日期:2017-09-14

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修订项目(JTG-201507)

作者简介:张锐(1980-),男,湖南株洲人,副教授,工学博士,E-mail: zr@csust.edu.cn.

depth and time were analyzed. According to the relationship between LSP and lateral swelling ratio obtained by laboratory tests, the variation of LSP with lateral swelling of expansive soil on back of wall was analyzed. Besides, the impact on the stability against sliding and overturning of retaining wall was also discussed. The results show that the expansive soil can still produce amount of LSP after soaking under the lateral confining and zero upper load condition. The LSP increases significantly with the increase of vertical load ranging from 0 to 50 kPa, and is greater than the corresponding the vertical load. When the value of vertical load is greater than 100 kPa, LSP increases very small and remains stable. When the vertical load increases to the vertical swelling pressure of the specimen in the constant volume condition, the LSP reaches to the maximum. Under the long-term effect of hot and wet climate, soil water content and lateral swelling force along the back of retaining wall gradually increases, and the action point of the force moves down gradually. After 5 years, the variation of water content becomes stable, and the distribution of LSP along the back of retaining wall is the parabola. The lateral swelling force can increase to 3 times of earth pressure at rest, and its action point locates in the middle of the wall. The retaining wall will horizontally move in 2.0 cm under the effect of LSP. The LSP can be extremely reduced, and the stability coefficient against sliding and overturning of the wall will meet the requirement of specifications if a lateral swelling of 2.6 cm of expansive soil is allowable behind the wall.

**Key words:** road engineering; gravity retaining wall; experimental research; expansive soil; lateral swelling pressure

## 0 引言

膨胀土富含蒙脱石及其混层矿物,吸水后显著膨胀,膨胀受限会产生膨胀力,常造成膨胀土地区重力式挡墙滑移或倾覆破坏<sup>[1]</sup>。如何测定膨胀土侧向膨胀力并评估其对挡墙稳定性的影响是膨胀土地区重力式挡墙设计中需要解决的关键问题<sup>[2-3]</sup>。

国内外研究者曾通过室内试验量测膨胀土吸湿过程中产生的侧向力,研究三向膨胀受限条件下竖向和侧向力的关系<sup>[4]</sup>、竖向受力条件下侧向力随侧向膨胀变形的变化规律<sup>[5]</sup>、吸湿和竖向卸载条件下侧向力随竖向力的变化规律<sup>[6]</sup>,以及上覆恒定荷载和恒定体积条件下侧向力与竖向力的关系<sup>[7]</sup>。上述研究在试验装置和方法上各有特点,但在以下3个方面还可进一步改进:①试验装置应尽可能与现行土工试验规程中的膨胀试验装置一致,便于工程应用;②要能消除因切削或静压制样产生的初始侧向应力,同时确保试样在施加不同上覆荷载后到浸水之前,初始湿密状态不变;③以往试验测得的侧向力,包括上覆荷载产生的侧压力和膨胀土吸湿产生的侧向膨胀力,应将侧向膨胀力从中区分开来,并获得其随上覆荷载的变化规律。

有些研究者曾通过模型试验和原位测试得到不

同深度处土体侧向力随含水率和深度变化的规律。Kate等<sup>[8]</sup>在长1.22 m、宽0.92 m、高2.73 m的试槽中进行挡墙模型试验,发现墙背侧向力在0~1.5 m深度范围内其数值增加较快,1.5 m后趋于稳定。Clayton等<sup>[9]</sup>在长20 m、宽5 m、高3 m的试槽内对膨胀土挡墙进行了长达692 d浸水试验,发现膨胀土含水率稳定后墙背侧向力达到最大且沿深度近似呈抛物线变化规律,且随着挡墙水平移动侧向力逐渐减小并趋于稳定。Mohamed等<sup>[10]</sup>和罗强等<sup>[11]</sup>在现场对膨胀土重力式挡墙侧向压力进行了长期监测,也发现类似结果。王年香等<sup>[12]</sup>在长10 m、宽2.5 m、高4.1 m的试槽开展了可动和静止挡墙浸水试验,发现挡墙可动与静止的最大侧向膨胀压力之比约为0.45。杨果林等<sup>[13]</sup>在现场开展了原位膨胀力试验,结果表明侧向膨胀力约为竖向膨胀力的25%,侧向膨胀力沿深度呈梯形分布。李雄威等<sup>[14]</sup>通过现场监测获得了一个雨季内浅层土体的膨胀力变化情况,发现土体体积含水率变化范围为23%~48%,水平膨胀力基本维持在35~45 kPa。模型试验和原位试验主要用于特定工程的实测,容易受到测试元件埋设条件、耐久性等因素的影响,且耗时、成本高,但其测试结果可为本文室内试验和数值模拟结果的对比分析提供参考。

在刚性支挡结构的膨胀土土压力计算方面,大多考虑支挡结构破坏时被支挡的膨胀土土体处于主动极限平衡状态,在一般饱和黏性土的库仑土压力的基础上加上膨胀土膨胀力<sup>[15]</sup>,或结合 Fredlund 非饱和强度公式计算膨胀土吸湿过程中对刚性支挡结构产生的侧向土压力<sup>[16-17]</sup>,但没有考虑侧向膨胀力随挡墙位移而减小这一实际情况。

在国内外相关研究的基础上,笔者研制了一种侧向膨胀力试验装置,消除了试样初始侧向应力和上覆荷载引起的初始湿密状态改变对侧向膨胀力测试结果的影响。本文选择广西膨胀土进行试验,研究并揭示了不同上覆荷载作用下膨胀土吸湿过程中侧向膨胀力的变化规律;通过数值模拟并结合室内试验结果,研究了湿热气候长期作用下重力式挡墙在静止时墙背侧向膨胀力随深度和时间的演变规律;分析了侧向膨胀力随挡墙侧向位移的变化及其对挡墙稳定性的影响。本研究为侧向膨胀力的测试和膨胀土地区重力式挡墙设计提供了简便实用的方法。

## 1 侧向膨胀力试验装置及试验方法

为了便于工程应用,在常规单轴固结仪基础上研制了侧向膨胀力试验装置。该装置主要由竖向加载、可开合环刀、数据采集与监测系统三部分组成。

在常规有荷膨胀试验中,施加不同上覆荷载后试样会发生不同程度压缩,造成浸水前试样初始湿密状态的不一致<sup>[18]</sup>。为此,加大上部透水石的直径,使之略大于环刀,确保试样在施加上覆荷载后不被压缩,试样膨胀并高出环刀后才受到上覆荷载产生的全部压力。

采用该装置进行的前期试验结果表明,若保留 40 kPa 左右的初始水平应力,无荷和恒体积浸水条件下所测得的侧向力相对于消除初始水平应力后所测得的侧向力,将分别偏小 43.5% 和 16.1%。为此,设计了内径 61.8 mm、高度 20 mm、厚度 2 mm 可开合环刀,如图 1 所示。环刀左侧有一开合缝,通过调节杆控制缝的开合,以消除试样初始侧向应力。

试验中主要监测不同上覆荷载作用下试样浸水产生的侧向力和竖向膨胀量。图 1 中环刀右侧设有一凹槽,槽中放置厚 12 mm、直径 20 mm 的纽扣式

电阻应变压力传感器。该压力传感器量程为 0~0.6 MPa,精度为满量程的 ±0.3%,其有效受力区域为单侧中心处直径 12 mm 的圆形区域。本文试验表明,该传感器具有精度高、线性和稳定性好的特点。试样所受的侧向力通过一刚性滑块传递至压力传感器。为了减小因刚性滑块与压力传感器之间直接刚性接触造成的压力测试误差,在两者之间加设了厚 1 mm 的硅胶垫片。通过压力传感器得到的压力值和压力传感器有效受力面积之积与刚性滑块圆弧面的面积之比为试样所受的侧向力。试样的竖向膨胀变形由精度为 0.001 mm、量程为 15 mm 的数显竖向位移计量测。压力传感器和位移计连接各自采集仪,再接入计算机,可实时存储和读取数据。

本试验方法与现行《公路土工试验规程》(JTJ E 40—2007)中有荷膨胀试验方法相似,不同之处在于:

(1)用常规固结环刀切削原状样或在该环刀中静压成型重塑样,将试样从常规固结环刀中脱出以释放初始侧向应力,放入处于张开状态的可开合环刀中,再将环刀闭合,调节初始侧向应力为 1~5 kPa。

(2)施加上覆荷载  $P_v$  并将试样浸水后,待 2 h 内竖向变形变化不超过 0.01 mm,且侧向力变化不超过 1.0 kPa 时视为试样膨胀稳定,得到该级荷载条件下的侧向力  $P_h$  和竖向膨胀率  $\epsilon_v$ 。

(3)测得膨胀稳定后试样最终的含水率和干密度后,再通过静压制样制备该湿密状态下的试样,进行常规  $K_0$  固结试验,得到静止侧压系数  $K_0$ 。

(4)由式(1)计算该级上覆荷载作用下侧向膨胀力  $P_{eh}$

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

## 2 不同上覆荷载下侧向膨胀力试验

### 2.1 试验土样和试验方案

试验土样取自广西隆林至百色高速公路 K173+300,通过室内试验获得的土样基本物理和力学性质指标如表 1 所示。根据公路行业膨胀土判别分类标准,该土样膨胀潜势判定为中等。

采用静压成型的重塑样进行试验。试样初始含水率设为最佳含水率 17.9%,初始干密度设为最大干密度的 93%,即  $1.60 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。上覆荷载分别取 0, 12.5, 25, 50, 100, 200, 250, 300 kPa 进行侧向膨胀力试验。

### 2.2 试验结果及分析

试验得到不同上覆荷载作用下试样浸水 84 h 左右侧向力和竖向膨胀率随时间  $t$  的变化规律。监



图 1 可开合环刀及压力传感器  
Fig. 1 Retractable Cutting Ring and Pressure Sensor

表1 广西百色膨胀土基本物理和力学性质指标

Table 1 Basic Physical and Mechanical Properties of Guangxi Baise Expansive Soil

土粒比重	液限/%	塑限/%	塑性指数/%	自由膨胀率/%	蒙脱石含量/%	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	最佳含水率/%	有效黏聚力/kPa	有效内摩擦角/(°)
2.75	56.3	21.4	34.9	82.0	16.6	1.72	17.9	10.0	25.0

测结果表明,这2个指标均在浸水1h内增长较快,随后变化缓慢。无荷和有荷作用下试样分别浸水约70h和40h后膨胀达到稳定。为了清晰反映不同上覆荷载作用下侧向力和竖向膨胀率随时间的变化规律,选取了浸水后的10h内上述2个指标的测试结果绘于图2中。

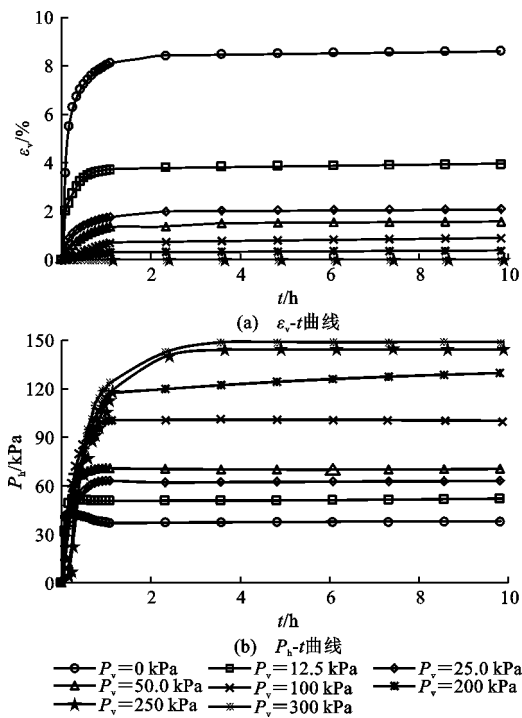


图2 不同  $P_v$  下浸水 10 h 时  $\epsilon_v$  和  $P_{ch}$  随  $t$  的变化曲线  
 Fig. 2 Variation Curves of Vertical Swelling Ratio and LSP with Time Under Different Upper Pressure in 10 h of Soaking

图2(a)表明,不同上覆荷载作用下竖向膨胀率均在浸水1h内急剧增长,这一阶段的膨胀量占总膨胀量70%以上,随后增长缓慢;上覆荷载越大,竖向膨胀率越小。图2(b)表明,不同上覆荷载作用下侧向力同样在浸水1h内急剧增长,这一阶段侧向力的增量占总增量的90%以上,随后渐趋稳定。

不同上覆荷载作用下试样浸水膨胀稳定后,测得最终侧向力、竖向膨胀率、含水率和干密度,并通过试样初始和最终湿密状态下的常规  $K_0$  固结试验,分别得到初始和最终静止侧压力系数  $K_{0i}$  和  $K_{0f}$ ;根据式(1)计算得到了不同上覆荷载作用下试样浸水后最终产生的侧向膨胀力。上述各项指标的

测试和计算结果见表2。

表2 不同上覆荷载作用下试样浸水后实测和计算结果  
 Table 2 Measured and Calculated Results of Soil Specimen After Soaking Under Different Upper Pressure

$P_v$ /kPa	$\epsilon_v$ /%	$P_h$ /kPa	含水率 $w$ /%	干密度 $\rho_d$ /(g·cm <sup>-3</sup> )	$K_{0f}$	$P_{ch}$ /kPa
0.0	8.97	44.7	32.0	1.47		44.7
12.5	4.20	57.5	30.5	1.54	0.584	50.2
25.0	2.64	64.7	28.8	1.56	0.552	50.9
50.0	1.58	78.3	28.0	1.57	0.440	56.3
100.0	1.13	106.3	26.3	1.58	0.391	67.2
200.0	0.40	138.2	25.5	1.59	0.331	72.0
250.0	0.02	149.7	25.0	1.60	0.305	73.5
300.0	0.00	150.3	24.9	1.60	0.305	73.8

注:在初始湿密状态下测得的试样静止侧压力系数  $K_{0i}$  为 0.280。

由于 300 kPa 上覆荷载作用下试样浸水后无膨胀变形,且试样上的透水石直径略大于环刀直径,环刀可能承担了部分上覆荷载,因此无法确定试样实际受到的上覆荷载,进而无法获得侧向膨胀力。但 250 kPa 上覆荷载作用下试样浸水后仅发生了细微竖向膨胀(竖向位移计读数为 0.003 mm),由此认为试样恒体积浸水条件下竖向膨胀力为 250 kPa。进而可知,300 kPa 上覆荷载作用下试样浸水后实际受到的上覆荷载为 250 kPa,再根据侧向力和静止侧压力系数,计算得到该级荷载作用下的侧向膨胀力。为了便于分析侧向膨胀力随上覆荷载的变化规律,将竖向膨胀率、侧向力和侧向膨胀力随上覆荷载的变化曲线绘于图3。

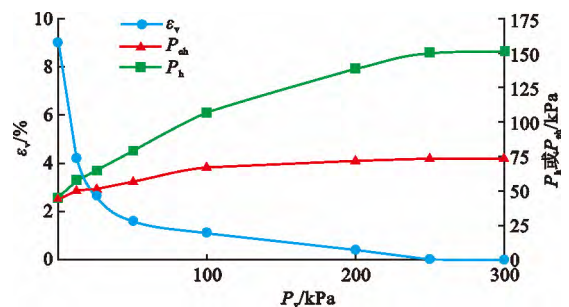


图3  $\epsilon_v$ ,  $P_{ch}$ ,  $P_h$  随  $P_v$  变化曲线  
 Fig. 3 Variation Curves of Vertical Swelling Ratio, Lateral Pressure and LSP with Upper Pressure

从图3可以看出,在无荷条件下浸水后测得的侧向膨胀力(等于侧向力)可达 44.7 kPa。文献

[13]、[14]中现场实测地表以下 20 cm 处(上覆荷载为 0)的侧向膨胀力也均为 50 kPa 左右。试验结果反映了膨胀土的一个基本特性,即在无荷和侧限条件下膨胀土浸水后可产生一定侧向膨胀力。

随着上覆荷载增大,竖向膨胀率逐渐减小,由于膨胀能量积蓄,侧向力和侧向膨胀力也逐渐增大。上覆荷载为 0~50 kPa 时,侧向膨胀力均大于上覆荷载。12.5 kPa 和 25 kPa 上覆荷载作用下侧向膨胀力分别为上覆荷载的 4 倍和 2 倍。这与文献[12]大型模型试验测得的 0~2.5 m 深度范围内侧向膨胀力均大于上覆土压力的规律相一致。

当上覆荷载大于恒体积竖向膨胀力后,试样仅承受与竖向膨胀力相等的上覆荷载,剩余上覆荷载由环刀承担,故侧向力和侧向膨胀力均不再随上覆荷载的增加而增加,竖向膨胀率也将一直保持为 0。本次试验得到的恒体积条件下的侧向膨胀力为 73.5 kPa,与竖向膨胀力(250 kPa)之比为 0.3,这一比值说明即使是均质重塑膨胀土在一定密度状态下也存在显著的各向异性。

根据以往膨胀土细观结构研究成果<sup>[19]</sup>,对侧向膨胀力随上覆荷载变化规律做进一步分析。静压制样之前,土样为松散状态,土样中的片状蒙脱石矿物颗粒随机分布,如图 4 中左图所示。施加压力后,随着压力逐步增大,试样逐渐被压密,多数蒙脱石矿物颗粒趋于水平定向,但仍有部分蒙脱石矿物颗粒呈垂直向和倾斜排列,如图 4 中右图所示。静压荷载卸除后,试样仍保持着大部分蒙脱石矿物颗粒水平定向这一结构特征。

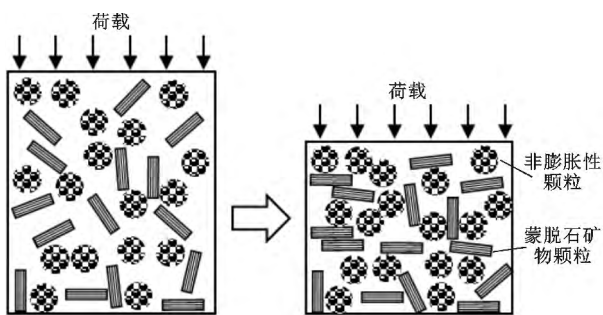


图 4 静压制样过程中蒙脱石矿物颗粒定向排列的变化  
Fig. 4 Change of Orientation Arrangement of Montmorillonite During Static Compaction

无荷条件下试样浸水后,其内部 3 种不同定向排列的蒙脱石矿物颗粒晶层间将吸水:水平向的颗粒由于竖向没有约束而发生竖向膨胀;垂直向的颗粒吸水膨胀,受到周围颗粒的侧向限制而产生膨胀压力并通过周围颗粒传递,最终产生宏观侧向膨胀

力;倾斜排列的颗粒吸水后将在竖向产生部分膨胀变形,而在侧向产生部分膨胀力。故无荷条件下侧向膨胀力主要是由垂直向和倾斜排列的蒙脱石矿物颗粒吸水后侧向变形受限所产生。

上覆荷载作用下试样浸水后,垂直向排列的颗粒仍产生侧向膨胀压力,是试样宏观侧向膨胀力的主要贡献者,且不受上覆荷载变化的影响;水平向排列的颗粒产生竖向膨胀变形和竖向膨胀压力,是试样宏观竖向膨胀量和竖向膨胀力的主要贡献者,随上覆荷载的增大,水平向排列颗粒的膨胀压力增大、膨胀变形随之减小;斜向排列的颗粒吸水后,在竖向和侧向都将产生膨胀压力,随着上覆荷载增大,因竖向膨胀变形受限,颗粒内总的膨胀压力增大,因此侧向膨胀压力作为分力也随之增大。

随着上覆荷载继续增加,较大的上覆荷载将使斜向颗粒定向度趋于水平,从而促使斜向颗粒产生的侧向膨胀力减小,导致侧向膨胀力随上覆荷载增加的增幅较小。由表 2 可知,当上覆荷载从 100 kPa 至 300 kPa 时,侧向膨胀力仅增加了 6.6 kPa。

### 3 大气长期作用下重力式挡墙侧向膨胀力变化规律

在大气长期作用下,膨胀土地区重力式挡墙墙后土体湿度将发生变化,不同深度处膨胀土受到的上覆土压力和湿化程度不同,作用于墙背的侧向膨胀力也将随深度和时间发生变化。为认识这一变化规律,并最终用于重力式挡墙稳定性分析,首先利用 Geostudio2012 的 Vadose/W 湿热耦合计算模块,计算获得了特定湿热气候条件下 2.5 m 高广西百色膨胀土路堤挡墙 10 年内墙后土体含水率随时间的变化曲线;然后根据本文侧向膨胀力试验结果,建立膨胀土侧向膨胀力与湿化程度的关系,获得墙背不同深度处侧向膨胀力随时间的变化规律。

#### 3.1 有限元模型与计算参数

设有重力式挡墙的膨胀土路堤有限元模型如图 5 所示。路堤高 4.5 m,边坡坡度为 1:1.5,挡墙高 2.5 m,墙顶宽 2 m,埋深 1.0 m,墙背为直立式,墙面倾斜坡度为 1:0.3,

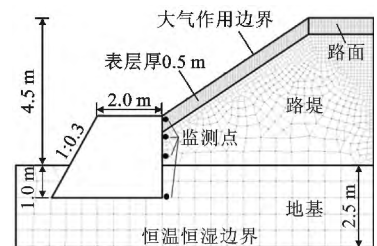


图 5 膨胀土路堤有限元模型  
Fig. 5 Finite Element Model of Expansive Soil Embankment



墙底倾斜坡度为0.2:1,墙背与填土的摩擦角为17.5°,墙体重度为25 kN·m<sup>-3</sup>,基底摩擦因数为0.5。墙后填土重度取20 kN·m<sup>-3</sup>。路堤划分为地基、边坡表层、路堤堤身、路面4个区域。

采用四边形和三角形混合单元对模型进行网格划分,并将坡面至以下0.5 m设置为表层单元,划分后共计1 701个节点和1 644个单元。设坡面为大气作用边界,墙脚地面为排水边界,地基底为恒温恒湿边界,每小时一个时步,计算设计年限(10年)内膨胀土路堤含水率变化情况。

计算所需材料参数包括土水特征曲线、渗透系数、导热系数和体积比热容<sup>[20]</sup>。表层、路堤和地基参数采用广西百色膨胀土水力和热力学参数实测值,如表3、4所示。表3中: $a, n, m, s_r$ 为土水特征曲线拟合参数; $R^2$ 为判定系数。其中,表层和路堤土的土水特征曲线分别是在上覆荷载0 kPa和50 kPa作用下利用应力相关土水特征曲线测试仪测得<sup>[21]</sup>,再用Fredlund模型<sup>[22]</sup>拟合,渗透系数通过常水头饱和和渗透试验测得。表层渗透系数考虑了土体开裂的影响,参照文献<sup>[23]</sup>取值。不同含水率状态下的导热系数采用导热系数仪通过热线法量测,体积比热容则采用BRR比热容测试仪基于水的比热容推导所得。取路面渗透系数为 $1 \times 10^{-14} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

表3 膨胀土水力性质参数

Table 3 Hydraulic Parameters of Expansive Soil

层位	$a$	$n$	$m$	$s_r$	$R^2$	饱和渗透系数 $k_s/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
表层土	25.0	1.02	0.32	$10^6$	0.998 5	$5.0 \times 10^{-6}$
路堤和地基	45.7	0.63	0.33	$10^6$	0.998 6	$9.2 \times 10^{-10}$

表4 膨胀土热力性质参数

Table 4 Thermal Parameters of Expansive Soil

体积含水率/%	0	10	20	30	40
导热系数/ $(\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1})$	1.116	1.648	1.814	1.910	1.979
体积比热容/ $(10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{C}^{-1})$	1.356	1.775	2.193	2.612	3.030

气候边界条件包括日温度、湿度、风速、降雨量、太阳辐射量。本文参照文献<sup>[21]</sup>中广西地区1年的气象数据设定气候边界条件,循环计算10年。

### 3.2 计算结果分析

在墙背从上至下选取4个监测点,分别距墙顶距离 $h$ 为0.25,0.625,1.25,2.5 m,位置如图5所示。相应4个点处土体所受上覆土压力分别为0,12.5,25,50 kPa。计算结果表明,5年后4处土体的含水率周期性变化均趋于稳定,故仅截取了前5年内各点含

水率随时间变化曲线进行分析,如图6所示。

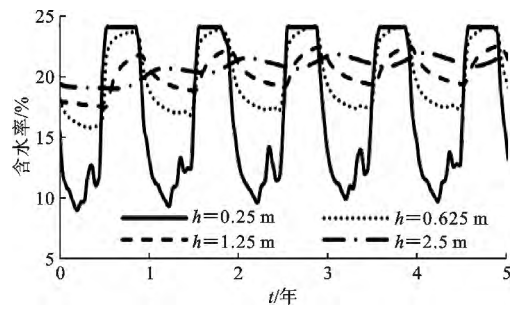


图6 墙背不同深度处膨胀土含水率随时间的变化

Fig. 6 Variation of Water Content of Expansive Soil at Different Depth with Time Behind Retaining Wall

随着深度的增加,土体受大气干湿循环的影响减小,含水率变化的波动幅度随之减小。0.25 m和0.625 m处的土体在一年内均达到饱和。由于膨胀土渗透系数很小,随着深度增加,1.25 m和2.5 m处土体含水率分别在2年和4年后才增至最大值,但仍未达到饱和含水率,但含水率变化的波动幅度均逐渐减小并趋于稳定。

从以上分析可知,在大气干湿循环的长期作用下,不同深度处的膨胀土湿化程度(含水率增加幅度)有所不同,在挡墙侧限条件下所能产生的侧向膨胀力也将有所不同。为此,在本文侧向膨胀力试验结果的基础上,建立膨胀土侧向膨胀力与湿化程度之间的关系。土的湿化程度系数 $\chi$ 为

$$\chi = \frac{\omega_t - \omega_0}{\omega_f - \omega_0} \quad (2)$$

式中: $\omega_t$ 为任意时刻含水率; $\omega_0$ 为初始含水率; $\omega_f$ 为上覆荷载作用下土样膨胀稳定后的最终含水率。

因为膨胀土在侧限条件下膨胀时的含水率增量与竖向膨胀率存在线性关系<sup>[24]</sup>,土样任意时刻的含水率可由同一时刻的竖向膨胀率求得,所以任意时刻各级上覆荷载作用下的湿化程度系数为

$$\chi = \frac{\epsilon_t}{\alpha(\omega_f - \omega_0)} \quad (3)$$

式中: $\alpha$ 为线膨胀系数,由有荷膨胀试验测得的竖向膨胀率与含水率增量之比求得; $\epsilon_t$ 为任意时刻的竖向膨胀率。

将湿化程度系数在初始静止侧压力系数 $K_{oi}$ 和最终静止侧压力系数 $K_{of}$ 间插值,结合式(1)即可得膨胀土侧向膨胀力与湿化程度系数的关系

$$P_{ch} = P_h - [K_{oi} + \chi(K_{of} - K_{oi})]P_v \quad (4)$$

由此,根据室内试验结果(图2和表2)、数值模拟计算结果(图6)和式(4),可得墙背不同深度处膨胀土侧向膨胀力随时间的变化规律,进而也可以得

到不同时段内墙背最大侧向膨胀力分布。图 7 给出了第 0.5, 1.5, 2.5, 5 年内墙背所受最大侧向膨胀力沿深度的分布曲线。

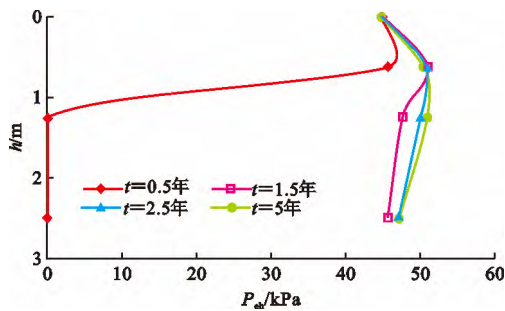


图 7 不同时段内墙背所受最大侧向膨胀力沿深度分布曲线  
Fig. 7 Distribution Curves of Maximum LSP Behind Retaining Wall Along Depth Within Different Time Periods

在 0.5 年内,浅表层土体增湿至饱和状态产生侧向膨胀力。由于膨胀土渗透性差,随着深度增大,土体增湿程度急剧减小,因此侧向膨胀力也显著减小,墙背中部几乎不受侧向膨胀力作用。至 1.5 年,墙背中部土体含水率均显著增大,继而产生侧向膨胀力。2.5 年后墙背沿深度各点膨胀土的侧向膨胀力接近第 5 年运营期内所能达到的最大值。侧向膨胀力随深度先增大后减小,变化曲线呈弓背形,这与文献[9]~[11]通过现场监测得到的重力式挡墙墙背侧向膨胀力随深度变化规律一致。

由图 7 可计算得到不同时间内墙背侧向膨胀力的合力及其作用点位置,见表 5。表 5 中,  $H$  为墙高。

表 5 不同时间内墙背侧向膨胀力合力及其作用位置

Table 5 Resultant Force of LSP and Action Position Behind Retaining Wall Within Different Time Periods

$t$ /年	侧向膨胀力合力/kN	作用点距墙踵距离/m
0.5	23.90	1.71(0.684H)
1.5	111.73	1.19(0.476H)
2.5	116.84	1.18(0.476H)
5.0	118.17	1.18(0.476H)

墙背侧向膨胀力的合力在 1.5 年内增幅最大,作用点在挡墙的中上部;随后侧向膨胀力的合力缓慢增大,其作用点逐渐下移至墙背的中部。第 5 年的墙背侧向膨胀力的合力是静止土压力(35 kN)的 3 倍,因此侧向膨胀力是重力式挡墙的主要作用力。

#### 4 侧向膨胀力对挡墙稳定性的影响

已有工程案例表明,膨胀土地区重力式挡墙会在土压力作用下产生数厘米水平滑动<sup>[15]</sup>。由于挡墙只要发生  $5.8\% H \sim 6\% H$  的水平位移就会达到

主动极限平衡状态<sup>[25]</sup>并受到相对较小的主动土压力作用(图 5 所示算例的库仑主动土压力为 15 kN),因此膨胀土地区重力式挡墙稳定性及其水平滑动主要受侧向膨胀力所控制。

挡墙水平滑动的同时墙后膨胀土产生侧向膨胀进而伴随侧向膨胀力的衰减,直至挡墙受力平衡达到最终稳定。分析侧向膨胀力对挡墙稳定性的影响,需先获得膨胀土侧向膨胀力与侧向膨胀变形之间的变化关系。

在本文侧向膨胀力试验中,已经获得上覆荷载(竖向膨胀力)与竖向膨胀率的关系以及恒体积条件下膨胀力各向异性比。由于膨胀土膨胀力和膨胀变形的各向异性取决于蒙脱石矿物颗粒的定向,因此只要膨胀土的膨胀力表现出各向异性,在三向膨胀条件下竖向和侧向膨胀变形也会表现出与膨胀力相似的各向异性<sup>[26]</sup>。基于上述分析,将表 2 中 0~250 kPa 上覆荷载(竖向膨胀力)和相应竖向膨胀率均乘以各向异性比(0.3),得到侧向膨胀力随侧向膨胀率  $\epsilon_h$  的变化曲线,如图 8 所示。

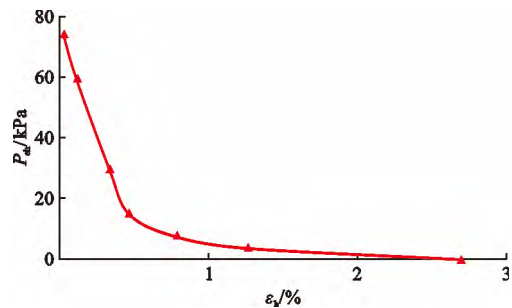


图 8 侧向膨胀力随侧向膨胀率的变化曲线

Fig. 8 Variation Curve of LSP with Lateral Swelling Ratio

对于本文重力式挡墙算例,第 5 年墙背侧向膨胀力的合力达到最大,不同深度处的侧向膨胀力为 44.7~50.8 kPa,均值为 49.7 kPa,约为恒体积浸水条件下侧向膨胀力(73.5 kPa)的 2/3。假设不同初始侧向膨胀力条件下,侧向膨胀力随侧向膨胀率的变化曲线与图 8 中的曲线是线形相同的曲线簇,将图 8 中各点的横、纵坐标乘以 2/3 后,得初始侧向膨胀力为 49.7 kPa 时侧向膨胀力随侧向膨胀率变化曲线,见图 9。从图 9 可见,墙后膨胀土只要产生较小的侧向膨胀率,墙背侧向膨胀力就会大幅衰减。

假设墙后膨胀土产生了不同侧向膨胀率,根据图 9 可以查得相应侧向膨胀力,再计算墙背侧向膨胀力的合力及其作用点位置,结合库仑主动土压力,对挡墙进行抗滑和抗倾覆稳定性分析,得到的相应稳定系数如表 6 所示。表 6 中:  $F_{chr}$  为墙背侧向膨胀

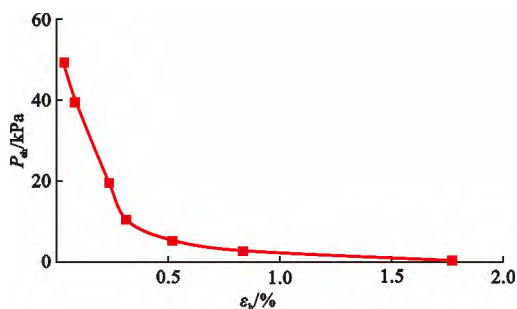


图9 初始为49.7 kPa时侧向膨胀力随侧向膨胀率变化曲线

Fig. 9 Variation Curve of LSP with Lateral Swelling Ratio with the Initial LSP of 49.7 kPa

力合力; $K_c$ 为抗滑稳定系数; $K_o$ 为抗倾覆稳定系数; $\epsilon_h$ 为侧向膨胀率。表6中墙后土体侧向膨胀量 $S$ (或挡墙水平位移量)由墙后土体水平增湿距离乘以侧向膨胀率得到。本文膨胀土路堤湿热耦合计算结果表明,图5墙后土体增湿范围为墙背至道路中线,水平距离为17.5 m。

表6 发生侧向膨胀下侧向膨胀力合力和挡墙稳定性系数

Table 6 Lateral Swelling Force and Coefficient of Stability Factors of Retaining Wall at Different Lateral Swelling

$\epsilon_h/\%$	$S/\text{cm}$	$F_{\text{chr}}/\text{kN}$	$K_c$	$K_o$
0.00	0.0	118.2	0.65	1.16
0.05	0.9	105.5	0.74	1.28
0.10	1.8	86.3	0.94	1.54
0.15	2.6	67.1	1.30	2.26

由此可以得到抗滑和抗倾覆稳定系数随墙后土体侧向膨胀量的变化曲线,如图10所示。由图10可以看出,抗滑稳定系数达1.0时对应侧向膨胀量为2.0 cm,即挡墙会在侧向膨胀力作用下产生2.0 cm的水平位移,这与文献[15]的报道一致;随着墙后膨胀土侧向膨胀(挡墙平移),挡墙稳定性不断增大。当墙后土体侧向膨胀量达到2.6 cm时,才能同时满足现行《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)中规定的挡墙抗滑和抗倾覆稳定系数分别不得小于1.3和1.5的要求。

重力式挡墙属于刚性支挡结构,工程中不允许其发生变形和位移,通常采取以下措施:①加大挡墙尺寸,提高挡墙抵抗侧向膨胀力的能力,如果仅采用这种措施往往会使设计的挡墙尺寸大且造价高;②在墙背设置缓冲层,容许墙后膨胀土发生一定的侧向膨胀,以减少侧向膨胀力对挡墙的作用;③对墙后膨胀土进行保湿防渗,减小其增湿程度和范围。合理确定大气长期作用下膨胀土地区重力式挡墙的侧向膨胀力及其对稳定性的影响是进行上述措施设计的关键。本文正是为此探索了一种便于工程应用的

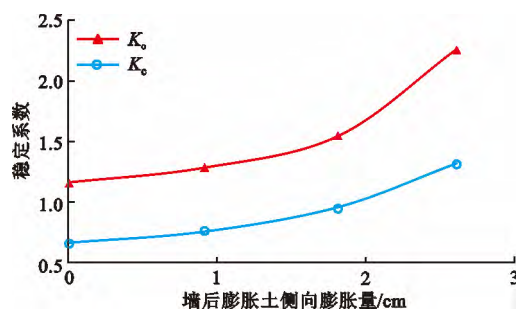


图10 墙稳定系数随墙后膨胀土侧向膨胀量的变化

Fig. 10 Variation of Stability Factors of Retaining Wall with Lateral Deformation of Expansive Soil

室内试验方法和计算分析方法。

## 5 结语

(1)在常规固结仪的基础上,设计了一种侧向膨胀力试验装置和方法,消除了制备试样时产生的初始侧向应力,同时确保了不同上覆荷载作用下试样在浸水前初始湿密状态的一致。

(2)无荷条件下膨胀土浸水后会产生一定侧向膨胀力;随后,侧向膨胀力随上覆荷载的增大显著增大,且大于相应上覆荷载;当上覆荷载大于100 kPa后,侧向膨胀力增幅变小;上覆荷载增至恒体积竖向膨胀力时,侧向膨胀力达到最大,此时侧向与竖向膨胀应力之比为0.3。膨胀土中蒙脱石矿物颗粒及其定向性是侧向膨胀力发生上述变化的内因。

(3)湿热气候条件下若膨胀土路堤重力式挡墙保持静止,墙背侧向膨胀力的合力会逐年增大,前1.5年内增加显著,随后趋于稳定,最终达到静止土压力的3倍,其作用点沿墙背逐年下移至挡墙中部。

(4)挡墙在较大侧向膨胀力作用下发生水平滑动,其抗滑和抗倾覆稳定系数随墙后土体侧向膨胀量的增加和侧向膨胀力的衰减而逐渐增大。可从加大挡墙尺寸、增设墙背缓冲层以及加强墙后土体保湿防渗等方面进行综合设计,以提高挡墙稳定性。

(5)本文揭示了侧向膨胀力随上覆荷载的变化规律及其对重力式挡墙稳定性的影响,建立了便于工程应用的试验方法和计算分析方法,有助于完善相关试验技术和设计方法。在本文基础上应进一步改进试验装置,实测不同上覆荷载作用下侧向膨胀力随侧向膨胀的变化,为计算提供更为精确的参数。

参考文献:

References:

[1] 郑健龙. 公路膨胀土工程理论与技术[M]. 北京:人民



- 交通出版社,2013.
- ZHENG Jian-long, Theory and Technology of Highway Expansive Soil Engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [2] 张颖钧. 裂土侧向膨胀力国内外研究现状及述评[J]. 大坝观测与土工测试, 1993, 17(3): 28-32.
- ZHANG Ying-jun, Study Present Situation and Review at Home and Abroad of Lateral Swelling Pressures of Expansive Soils [J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 1993, 17(3): 28-32.
- [3] NELSON J D, CHAO K C, OVERTON D D, et al. Foundation Engineering for Expansive Soils [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.
- [4] IKIZLER S B, VEKLI M, DOGAN E, et al. Prediction of Swelling Pressures of Expansive Soils Using Soft Computing Methods [J]. Neural Computing and Applications, 2014, 24(2): 473-485.
- [5] 杨庆, 焦建奎. 膨胀岩土侧限膨胀试验新方法 with 膨胀本构关系[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 49-52.
- YANG Qing, JIAO Jian-kui, 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.
- [6] 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 Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1636-1642.
- [7] ABBAS M F, ELKADY T Y, AL-SHAMRANI M A. Evaluation of Strain and Stress States of a Compacted Highly Expansive Soil Using a Thin-walled Oedometer [J]. Engineering Geology, 2015, 193: 132-145.
- [8] KATE J M, KATTI R K. Effect of Cohesive Non-swelling Soil Layer on the Behaviour of Underlying Expansive Soil Media: An Experimental Study [J]. Indian Geotechnical Journal, 1980, 10(4): 281-305.
- [9] CLAYTON C R I, SYMONS I F, HIEDRACOBO J C. The Pressure of Clay Backfill Against Retaining Structures [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1981, 28(2): 282-297.
- [10] MOHAMED O Z, TAHA Y K, EL-AZIZ E S M A. Field Study of the Distribution of Lateral Swelling Pressure of Expansive Soil on Retaining Structure [J]. Journal of Engineering Science, 2013, 42(2): 289-302.
- [11] 罗强, 蔡英, 邵启豪. 成都粘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 Qi-hao. Experimental Study on Gravity Retaining Wall Filled with Chengdu Clay [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1995, 30(3): 270-274.
- [12] 王年香, 章为民, 顾行文, 等. 膨胀土挡墙侧向膨胀压力研究 [J]. 水利学报, 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 Hydraulical Engineering, 2008, 39(5): 580-587.
- [13] 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.
- [14] 李雄威, 王勇, 张勇. 南宁地区膨胀土膨胀力的现场测试 [J]. 工程勘察, 2012, 40(9): 1-3.
- LI Xiong-wei, WANG Yong, ZHANG Yong. Field Test of Swelling Force on Expansive Soil in Nanning [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012, 40(9): 1-3.
- [15] 张颖钧. 裂土挡土墙土压力分布, 实测和对比计算 [J]. 大坝观测与土工测试, 1995, 19(1): 20-26.
- ZHANG Ying-jun. Distribution, Measurement and Comparative Calculation of Earth Pressures on Retaining Walls in Expansive Soil Regions [J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 1995, 19(1): 20-26.
- [16] 朱志铎, 刘松玉. 非饱和膨胀土的主动土压力分析 [J]. 公路交通科技, 2001, 18(5): 8-10.
- ZHU Zhi-duo, LIU Song-yu. Analysis of Active Earth Pressure of Unsaturated Expansive Soil [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2001, 18(5): 8-10.
- [17] 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.
- [18] 张锐, 王欢, 郑健龙. 恒定初始干密度状态下膨胀土的有荷膨胀试验 [J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2017, 14(2): 1-6.
- ZHANG Rui, WANG Huan, ZHENG Jian-long. Experimental Research on Loaded Swelling of Expansive Soil with Constant Initial Dry Density [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology: Nature

- ral Science, 2017, 14(2): 1-6.
- [19] 贾景超. 膨胀土膨胀机理及细观膨胀模型研究[D]. 大连:大连理工大学, 2010.  
JIA Jing-chao. Study on the Swelling Mechanism and Mesomechanical Swelling Model of Expansive Soils [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [20] KRAHN J. Vadose Zone Modeling with VADOSE/W: An Engineering Methodology[M]. Calgary: GEO-SLOPE International Ltd., 2004.
- [21] ZHANG R, ZHENG J L. Study on Moisture Equilibrium of Highway Expansive Soil Embankment[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 8(3): 13-24.
- [22] FREDLUND D G, XING A. Equations for the Soil-water Characteristic Curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 521-532.
- [23] 郑少河, 姚海林, 葛修润. 裂隙性膨胀土饱和-非饱和渗流分析[J]. 岩土力学, 2007(增1): 281-285.  
ZHENG Shao-he, YAO Hai-lin, GE Xiu-run. Analysis of Saturated and Unsaturated Seepage of Cracked Expansive Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007(S1): 281-285.
- [24] 杨和平, 廖亚林, 张智斌, 等. 膨胀作用力与允许变形量之关系的试验研究[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2010, 7(4): 1-6.  
YANG He-ping, LIAO Ya-lin, ZHANG Zhi-bin, et al. Experiment Research on Relationship Between Swelling Force and Allowable Deformation[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science, 2010, 7(4): 1-6.
- [25] 谢涛, 罗强, 张良, 等. 基于 Rankine 模型的墙体位移-土压力近似计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5): 1279-1288.  
XIE Tao, LUO Qiang, ZHANG Liang, et al. Calculation of Displacement-dependent Lateral Earth Pressure Based on Rankine Earth Pressure Model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(5): 1279-1288.
- [26] 谭波, 郑健龙, 张锐. 宁明膨胀土三向胀缩规律室内试验研究[J]. 公路交通科技, 2014, 31(4): 1-6, 15.  
TAN Bo, ZHENG Jian-long, ZHANG Rui. Laboratory Experimental Research of 3D Swell-shrink Regularity of Ningming Expansive Soil [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(4): 1-6, 15.
- ~~~~~
- (上接第 170 页)
- [9] VAZIRI H H, JALALI J S, ISLAM R. An Analytical Model for Stability Analysis of Rock Layers Over a Circular Opening[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38(21): 3735-3757.
- [10] 刘之葵, 梁金城, 朱寿增, 等. 岩溶区土洞地基稳定性分析[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(3): 24-28.  
LIU Zhi-kui, LIANG Jin-cheng, ZHU Shou-zeng, et al. Stability Analysis of Soil Cave Foundation in Karst Area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2003, 30(3): 24-28.
- [11] 蒋冲, 赵明华, 胡柏学, 等. 路基溶洞顶板稳定性影响因素分析[J]. 公路工程, 2009, 34(1): 5-9.  
JIANG Chong, ZHAO Ming-hua, HU Bo-xue, et al. Stability Factors Analysis for Subgrade Karst Roof [J]. Highway Engineering, 2009, 34(1): 5-9.
- [12] WANG M C, HSIEH C W. Collapse Load of Strip Footing Above Circular Void[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 113(5): 511-515.
- [13] 李倩倩, 张顶立, 房倩. 含空洞地层初始破坏的复变函数解析研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(11): 2110-2117.  
LI Qian-qian, ZHANG Ding-li, FANG Qian. Analytic Solution to Initial Damage of Cavern Strata by Complex Function Method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(11): 2110-2117.
- [14] 陈子荫. 围岩力学分析中的解析方法[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994.  
CHEN Zi-ying. Theoretical Methods About the Analysis of Adjoining Rock Mass[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1994.
- [15] 萨文 G N. 孔附近的应力集中[M]. 卢鼎霍, 译. 北京: 科学出版社, 1958.  
SAVIN G N. Stress Concentration by Cavity[M]. Translated by LU Ding-huo. Beijing: Science Press, 1958.
- [16] 王桂芳. 隧道计算[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1992.  
WANG Gui-fang. Tunnel Calculation[M]. Chengdu: University of Science and Technology of Chengdu Press, 1992.
- [17] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999.  
LIU You-rong, TANG Hui-ming. Rock Mechanics [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999.