

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.268



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



## 膨胀土微结构对膨胀行为的影响

刘正楠<sup>1</sup>, 张锐<sup>1</sup>, 唐德力<sup>1</sup>, 刘昭京<sup>2</sup>, 周豫<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 长沙 410114; 2. 中国铁路南宁局集团有限公司, 南宁 530029)

**摘要:** 评估膨胀土的膨胀行为对于膨胀土地区的结构设计十分重要。因降雨入渗, 膨胀土在垂直方向和水平方向均产生膨胀变形, 当膨胀变形受抑制时将产生膨胀压力, 影响其周围结构的稳定性。为揭示膨胀土在增湿膨胀过程中出现各向异性的原因, 从微观角度出发, 通过电镜扫描 (SEM) 对百色中膨胀土和枝江弱膨胀土的微观结构进行观察, 并通过图像处理技术统计分析膨胀土内黏土矿物颗粒的层状排列。通过研发的二维膨胀仪和改进的试件制备方法, 从宏观角度测得了侧限条件下的两向膨胀规律。研究表明, 膨胀土的微观结构呈片状且面-面相叠; 当膨胀土处于天然松散状态时, 其内部的黏土矿物颗粒随机定向排列且集聚; 压实后, 因受各向不均等应力作用, 黏土矿物颗粒开始趋向于水平层状排列; 干密度越大, 土样越密实, 其水平层状排列越显著。侧限条件下, 两向的膨胀规律表现出显著的差异, 干密度越大, 膨胀性越强, 这种差异就越明显。然而, 对黏土矿物颗粒来说, 其膨胀的方向垂直于其长轴, 高度的水平定向是造成膨胀土在宏观上表现出膨胀各向异性的原因, 这种两向的膨胀差异受到干密度和膨胀性的影响, 难以做出预测, 建议在工程实践中实测两向的膨胀规律。

**关键词:** 膨胀土; 膨胀各向异性; 微观结构; 电镜扫描; 膨胀试验

**中图分类号:** TU443; U416.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)02-0060-10

## Influence of microstructure of expansive soil on swelling behavior

LIU Zhengnan<sup>1</sup>, ZHANG Rui<sup>1</sup>, TANG Deli<sup>1</sup>, LIU Zhaojing<sup>2</sup>, ZHOU Yu<sup>1</sup>

(1. School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, P. R. China; 2. China Railway Nanning Group Co., Ltd., Nanning 530029, P. R. China)

**Abstract:** Evaluation of swelling behavior is of great importance for designing structures in expansive soils areas. Due to infiltration, the expansive soil produces swelling deformation in both vertical and horizontal directions, and the swelling pressure occurs if the swelling deformation was restrained that influences the stability of surrounding structures. In order to reveal the causes of anisotropy behavior of expansive soil in the process of wetting and swelling, from the microscopic point of view, this paper observed the microstructure of expansive soil from Baise with medium swelling potential and Zhijiang with weak swelling potential respectively, and statistically analyzed the orientated distribution of clay mineral particles in expansive soil by

**收稿日期:** 2021-08-24

**基金项目:** 国家自然科学基金(51978085); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划(K2020G036、K2019G045)

**作者简介:** 刘正楠(1992-), 男, 博士, 主要从事膨胀土研究, E-mail: lin@csust.edu.cn。

张锐(通信作者), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: zr@csust.edu.cn。

**Received:** 2021-08-24

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 51978085); Research and Development Project of China National Railway Group Co., Ltd. (Nos. K2020G036, K2019G045)

**Author brief:** LIU Zhengnan (1992-), PhD, main research interest: expansive soil, E-mail: lzn@csust.edu.cn.

ZHANG Rui (corresponding author), PhD, professor, doctoral supervisor, E-mail: zr@csust.edu.cn.

image processing technique. Meanwhile, from macroscopic aspect, variations of swelling strain with swelling pressure were measured under lateral confining condition via the developed 2D dilatometer and the modified specimen preparation method. The results show that the microstructure of expansive soil is flaky and stacked layer by layer. When the expansive soil is of natural loose state, the clay mineral particles are randomly oriented and aggregated; After compaction, clay mineral particles tend to be horizontally oriented due to the anisotropic stress. The higher the dry density, the denser the soil sample, and the more obvious its horizontal orientation. Under lateral confined condition, significant swelling differences are observed between the vertical and horizontal direction. The greater the dry density, the stronger the swelling capacity, and the more obvious the difference. However, for clay mineral particles, the swelling direction is perpendicular to their long axis, so the highly horizontal orientation is the reason why expansive soil shows swelling anisotropy behavior in macroscopic view. The swelling anisotropy is influenced by dry density and swelling ability, which is difficult to estimate, therefore it is suggested to measure the swelling principle in two directions in engineering practice.

**Keywords:** expansive soil; swelling anisotropy; microstructure; scanning electron microscope; swelling test

膨胀土在中国分布十分广泛,因富含蒙脱石等亲水性黏土矿物,表现出吸水膨胀变形的工程特性。竖向膨胀将引起地基的不均匀隆起而使上部结构出现破坏<sup>[1-2]</sup>,侧向膨胀则会影响膨胀土边坡及其支挡结构的稳定性<sup>[3-6]</sup>。当膨胀变形受到约束时,则会对周围土体或结构物产生较大膨胀力,给建筑、交通运输、水利等行业的建设带来极大的危害和巨大的经济损失<sup>[7-8]</sup>。膨胀土在竖向和侧向的膨胀行为存在差异<sup>[9-11]</sup>,这种宏观膨胀表现与微观结构演变必然存在关联,因此,有必要从宏-微观的尺度研究分析膨胀土出现膨胀各向异性的原因。

对于膨胀土微观结构的研究方法有许多种,常用的有X射线衍射(XRD)、电子显微镜(SEM)、透射电镜(TEM)、压汞法(MIP)以及环境扫描电子显微镜(ESEM)<sup>[12]</sup>。研究者通过各种不同的方法在膨胀土微结构研究方面取得了许多成果。Katti等<sup>[13]</sup>、陈宇龙<sup>[14]</sup>通过SEM对膨胀土微结构进行了分析研究,研究表明紊流结构、层流结构、胶式结构及粒状堆积结构是膨胀土微结构土体主要的排列方式。戴张俊等<sup>[15]</sup>用MATLAB软件对扫描电镜下膨胀土微结构的SEM图像进行处理,研究了土体孔隙和微结构单元体的微观特征,发现膨胀性不同的土的微观结构特征存在差异。Zou等<sup>[16]</sup>通过SEM研究了氯化钠溶液浓度对膨胀土微观结构的影响,蔺建国等<sup>[17]</sup>也利用MIP和SEM对孔隙溶液于膨胀土微观结构的影响开展研究,结果表明溶液浓度会改变微结构的排列与叠聚。在宏观膨胀行为研究方面,以往对膨胀土的膨胀特性研究多侧重于竖向,应用固结仪和三轴仪在侧限条件下的单向膨胀试验,获取不同湿密状态或上覆荷载下的竖向膨胀力及变形规律<sup>[18]</sup>。由于现行规范中尚无侧向膨胀试验方法,在

膨胀土地区结构设计时常用竖向膨胀力进行折减代替侧向膨胀力,将膨胀土视为各向同性材料进行简化处理,造成较大设计误差。为此,众多学者开展了膨胀土侧向膨胀特性的研究,通过增加侧向应力量测装置对固结仪进行改进<sup>[19-20]</sup>,或研制了三向胀缩仪对三向的膨胀变形规律开展研究<sup>[21-23]</sup>,并基于宏观试验现象,从微观角度解释了膨胀各向异性的原因,认为膨润土内的蒙脱石叠片在空间中的定向是随机的,但在压实作用下,叠片被迫垂直于压实方向,使得竖向膨胀力大于侧向膨胀力。谢云等<sup>[24]</sup>、杨长青等<sup>[25]</sup>、池泽成等<sup>[26]</sup>和刘洪伏等<sup>[27]</sup>也通过三向胀缩仪开展了试验研究,发现干密度是影响膨胀各向异性的重要因素。贾景超<sup>[28]</sup>分析了土体微观结构对宏观膨胀特性的影响,利用概率密度函数描述了膨胀土内土颗粒的定向排列。综上所述,膨胀土膨胀的各向异性与其物质组成、微结构特征等密切相关。但从目前已有的研究成果来看,对于膨胀土的微观结构的研究大多是定性描述,而定量的计算分析还相对缺乏,且较少将微观结构的定量分析与宏观力学性质建立联系。

为进一步揭示膨胀土的微观结构的分布特征及其对膨胀各向异性的影响机理,以广西百色中膨胀土和湖北枝江弱膨胀土为研究对象,通过电镜扫描SEM对松散土样、不同干密度下的压实土样进行了观察,观察面分别为平行压实方向和垂直压实方向。通过对SEM图像进行处理,统计分析不同干密度下两种膨胀土内的黏土矿物与水平方向夹角的分布概率,并从微观角度分析了出现膨胀各向异性原因;利用研发的二维膨胀仪并改进试件制备方法,开展侧限条件下的两向膨胀试验,得到了竖向和侧向的膨胀力随膨胀应变的变化规律。

## 1 试验土样

选取百色膨胀土和枝江膨胀土作为试验土样。其中,百色膨胀土土样取自广西壮族自治区隆(隆林)百(百色)高速公路K173+300处,取土深度为6 m。该地位于百色盆地,属于中国典型的膨胀土分布区。土样呈灰白色,硬塑-坚硬状,天然含水率为20.1%,天然干密度为 $1.57 \text{ g/cm}^3$ 。枝江膨胀土土样取自湖北省枝江市安(安福寺)猗(猗亭区)一级公路K5+448处,取土深度为4 m。该线路区膨胀土大部分分布于构造、剥蚀丘陵区的第四系更新统黏土中,土体中普遍夹有网纹状高岭土。土样呈棕

红色,坚硬状,天然含水率为27.7%,天然干密度为 $1.62 \text{ g/cm}^3$ 。

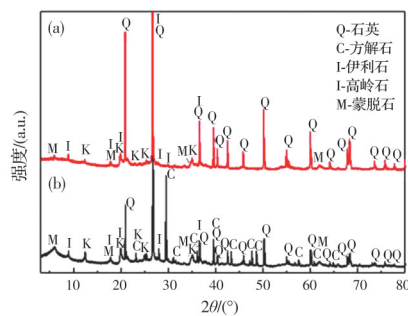
通过室内试验获得了百色膨胀土和枝江膨胀土的基本土性参数,如表1所示。同时,根据《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)中膨胀土膨胀性的判别标准<sup>[29]</sup>,开展了自由膨胀率和标准吸湿含水率试验,试验结果一并汇总于表1。试验结果表明,百色膨胀土为中膨胀土,枝江膨胀土为弱膨胀土。

另外,为获得两种土样的矿物成分,采用Smartlab型XRD分析仪对试验土样的矿物组成开展了分析,测试结果如图1所示。

表1 百色膨胀土和枝江膨胀土的基本物理指标

Table 1 Basic physical indexes of Baize expansive soil and Zhijiang expansive soil

土样	塑限/%	液限/%	塑性指数	相对密度	最大干密度/( $\text{g/cm}^3$ )	最佳含水率/%	自由膨胀率/%	标准吸湿含水率/%
百色膨胀土	21.4	56.3	34.9	2.75	1.72	17.9	82.0	4.81
枝江膨胀土	26.9	55.2	28.3	2.72	1.75	20.8	41.0	2.55



注:(a)枝江膨胀土;(b)百色膨胀土

图1 X射线衍射图

Fig. 1 X-ray diffraction pattern

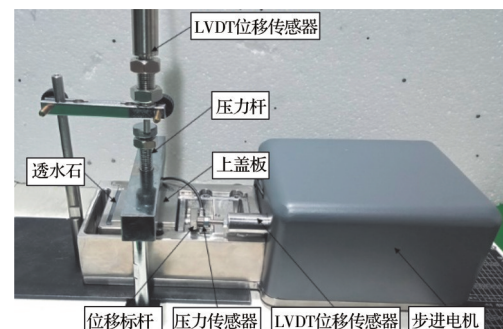
XRD测试结果表明,百色膨胀土和枝江膨胀土的矿物组成基本相似,其主要成分为石英、蒙脱石、伊利石、高岭石。其中,百色膨胀土中还含有少量的方解石。百色膨胀土的黏土矿物含量约为45.2%,其中,蒙脱石类黏土矿物的含量约为16.6%;枝江膨胀土黏土矿物约占46.8%,其中,蒙脱石类黏土矿物的含量约为8.1%。

## 2 试验装置与试件制备

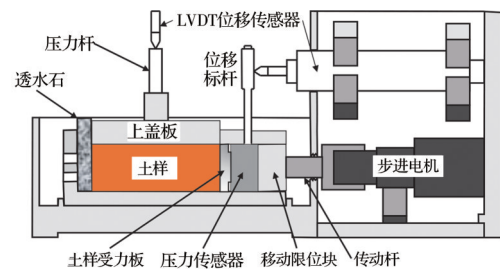
### 2.1 试验装置

为研究膨胀土增湿膨胀所产生的膨胀各向异性行为,研发了二维膨胀仪。该装置由试验盒、加载系统以及量测系统3部分组成,如图2所示。

试件为 $54.77 \text{ mm}$ (长) $\times 54.77 \text{ mm}$ (宽) $\times 20 \text{ mm}$ (高)的长方体,试验时置于试验盒内。试件经透水石与试验盒侧壁相连,紧贴透水石的侧壁上设有透水孔。与之相对的方向上设有电阻应变式压力传感器,用以实时量测土样膨胀过程中所产生



(a) 实物图



(b) 结构图

图2 二维膨胀仪

Fig. 2 Two-dimensional swelling apparatus

的侧向压力,该传感器量程为 $0\sim 450 \text{ kPa}$ ,精度为 $\pm 1 \text{ kPa}$ 。传感器后侧设有位移传动装置,由步进电机、传动杆和移动限位块组成,通过仪表自动控制电机驱动传动杆前进或后退,实现试验过程中侧向的加卸载;与之正交的方向上,试验盒侧壁设有限位器,以确保上盖板放置后不会造成试件体积的改变;该装置与三联中压固结仪杠杆机构配合使用,可通过增减砝码实现竖向的加卸载。试验时,竖向荷载通过压力杆作用于上盖板,再经上盖板传递至



试件。另外,在竖向和侧向均设有 LVDT 位移传感器,可实时采集两向的位移,其量程为 0~10 mm,分辨率为 0.001 mm。

### 2.2 试件制备

增湿膨胀后,膨胀土侧压力由两部分组成,一部分是由上覆荷载引起的侧向压力,其数值等于上覆荷载乘侧压力系数;另一部分则是增湿产生的侧向膨胀压力。若直接通过侧向压力传感器对试件增湿过程所产生的侧向压力进行量测,测得的实际上是两者的合力,无法获得真实的侧向膨胀力。借鉴膨胀力的测试思想,上覆荷载实际上就等于竖向膨胀压力。若将静压制样后的试件旋转 90°使之侧向朝上,则原试件的侧向(垂直压实面的方向)变为膨胀仪中的竖向,即可由上覆荷载与膨胀压力相等,在二维膨胀仪的竖向测得试件原侧向的膨胀力。为此,为测得两向的膨胀压力随膨胀变形的变化规律,自制了两种试件制备装置,分别用于制备竖向膨胀试验试件和侧向膨胀试验试件,如图 3 所示。

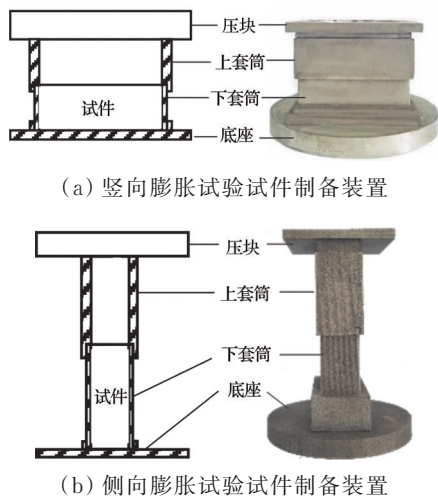


图 3 试件制备装置  
Fig. 3 Apparatus for specimen preparation

在实际工程中,膨胀土一般用于膨胀土下路堤填筑和土工格栅加筋膨胀土边坡的回填。考虑到实际工程应用,采用重塑土开展试验。由于干燥的膨胀土样与水混合后极易成团,导致制备的混合物含水率分布极不均匀。为此,土样经烘箱在 105 °C 的温度下干燥并破碎后,需先过一次 1 mm 的筛以获得粒径小于 1 mm 的粉末;在制备试样前,配置的土样还需再过一次 1 mm 的筛。

考虑到膨胀土在实际工程应用中,其压实度不大于 93%。设定试件的初始干密度为湿法重型击实试验所确定最大干密度的 93%、90% 和 87%;初始含水率均设定为湿法重型击实试验所确定的最

佳含水率,如表 2 所示。其中,BS93V 代表在 93% 的最大干密度下用于竖向膨胀试验的百色膨胀土试件;ZJ90H 代表在 90% 的最大干密度下用于侧向膨胀试验的枝江膨胀土试件。

表 2 测试序列与试件初始状态

土样	序列	初始含水率/%	初始干密度/(g/cm <sup>3</sup> )
百色 中膨胀土	BS93V	17.9	1.60
	BS93H	17.9	1.60
	BS90V	17.9	1.55
	BS90H	17.9	1.55
	BS87V	17.9	1.50
	BS87H	17.9	1.50
枝江 弱膨胀土	ZJ93V	20.8	1.63
	ZJ93H	20.8	1.63
	ZJ90V	20.8	1.58
	ZJ90H	20.8	1.58
	ZJ87V	20.8	1.52
	ZJ87H	20.8	1.52

### 3 电镜扫描(SEM)试验

#### 3.1 SEM 样品制备

为观测到静压后的试件沿压实方向和垂直于压实方向的黏土矿物排列特征,在通过图 3(b)制样装置制备完长方体试件后,用小刀分别沿平行于压实方向和垂直于压实方向对不同的试件各切取了一长条土样,如图 4 所示。所取土条厚度不宜过大以免受影响其导电性能。

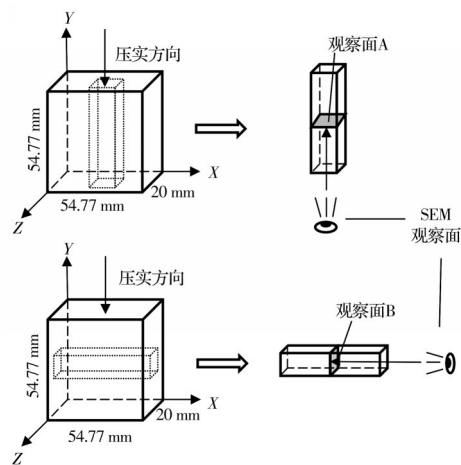


图 4 SEM 样品制备  
Fig. 4 SEM sample preparation

将切割后的土条放入烘箱(温度设为 105 °C)干燥 24 h 以上;待土条干燥冷却后,再用小刀在图 4 所示观察面附近预先刻出槽痕,然后沿槽痕将土条掰断;其后,用耳球将破裂面表面的浮土吹拂干净,将处理后样品的破裂面的背面用导电双面胶带固定

在样品台上。试验过程中保证试样底面平整,以保证样品具有良好的导电通道,接着将固定在样品台上的样品置于离子溅射仪内喷金处理;最后将喷金处理后的样品继续抽真空干燥 12 h 以上,至此得到最终的 SEM 试验样品,如图 5 所示。



图 5 喷金处理后的 SEM 样品

Fig. 5 SEM samples after gold painting

### 3.2 膨胀土微结构特征

通过电镜扫描,对天然松散状态下的膨胀土、沿压实方向和垂直于压实方向的压实样进行了观测,放大倍数为 5 000 倍,如图 6 所示。

图 6 表明,无论是松散状态还是压实状态下的膨胀土,其微结构多呈片状且面-面相叠或边-面相叠。对于天然松散状态下的膨胀土来说,这是由沉积和固结作用所致,膨胀土天然地基即为典型的层状结构,故在其内所取的松散土样上亦观测到相应成层的微观结构特征。另外,比较压实样品和松散样品的 SEM 图片可以发现,压实作用加剧了土颗粒的成层。压实过程中,土样在侧限条件下受到各向不等的应力作用,使得这些片状结构沿其压实方向

面-面相叠。

对比压实后的百色膨胀土(图 6(b)、(c))和枝江膨胀土(图 6(d)、(e))样品的 SEM 图片发现,百色膨胀土微结构单元以不规则片状黏土矿物为主,有明显的弯曲或卷曲片状颗粒,微结构特征以紊流状结构为主,局部层状排列;而枝江膨胀土微结构单元以粒状颗粒、扁平状颗粒为主,含片状颗粒,单粒体较多,卷曲片状颗粒少见。微结构特征以粒状颗粒堆叠结构为主,含紊流结构、絮凝结构。另外,对于不同干密度的样品,其内部土颗粒的排列情况也不相同。干密度越大的土样里面所含片状黏土颗粒更多,所含孔隙也较少,颗粒排列也更加密实。

### 3.3 微结构定向度分布统计

用专业图像处理软件 Image-Pro Plus 6.0 对样品的 SEM 图像进行可视化处理,提取膨胀土微观结构中片状黏土颗粒,并利用软件的测量功能对片状黏土颗粒的倾角进行自动测量。由于单元体的定向方位在  $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$  和  $180^{\circ}\sim 360^{\circ}$  范围内为镜像对称,故只需统计  $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$  内的方位即可,以  $10^{\circ}$  为单位分为 18 个方位区,并相应地将强度等级也分为 18 级。根据图像中每一个像元的强度等级确定该像元所处的方位,进而统计整个图像中单元体的倾角分布,然后对每一级的概率进行统计。某强度等级占据的概率越大,说明单元体在这一方位上成层程度越高。

为减少 SEM 图像选择的随意性与主观性对统计结果带来的误差,视样品大小差异,每种样品拍

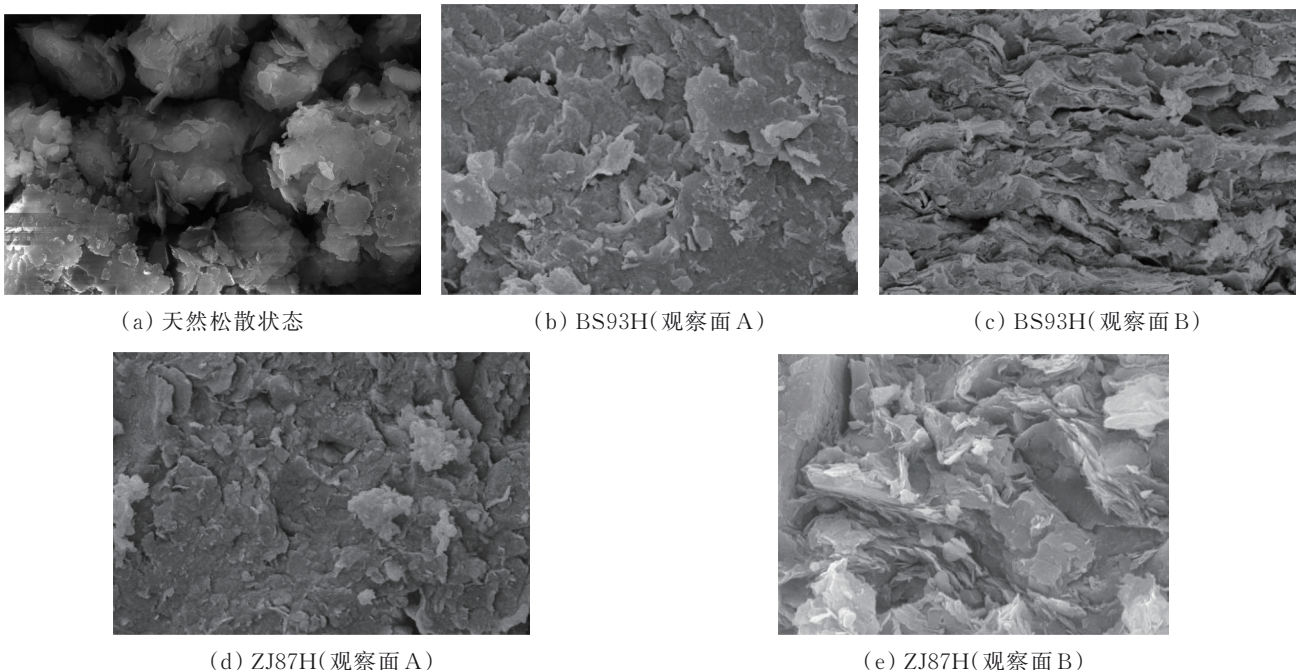


图 6 膨胀土微结构特征

Fig. 6 Microstructural feature of expansive soil

摄 200~500 张照片。拍照时,先将焦距调至 5 μm (放大 5 000 倍),待聚焦清晰后,拍下第一张照片。其后,按从左至右、从上至下的顺序,待前一张照片拍摄完毕后,移动观察窗至前一张照片图像彻底不见,然后再拍摄下一张,如图 7 所示。

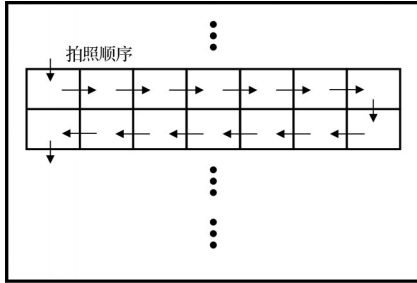
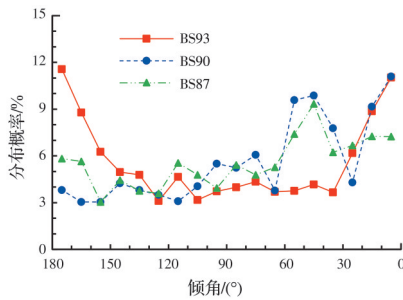


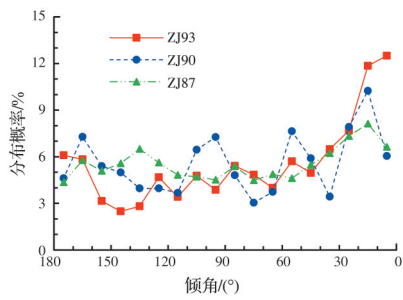
图 7 SEM 照片拍照顺序示意图

Fig. 7 Sketch of photo taking sequence of SEM photograph

据此,得到不同干密度下的枝江膨胀土和百色膨胀土 SEM 照片中黏土矿物水平夹角概率统计结果,如图 8 所示。



(a) 百色膨胀土



(b) 枝江膨胀土

图 8 黏土矿物颗粒定向分布概率统计图

Fig. 8 Probability statistical diagram of orientated distribution of clay mineral particles

图 8 表明,片状黏土颗粒与水平面的倾角处于 0°~10°和 170°~180°区间内的概率相对较大,即多趋向于水平定向排列。对于不同干密度的土样其水平夹角分布情况是不同的。随着干密度的增加,对于百色膨胀土来说,其处于 0°~10°和 170°~180°区间内的分布概率之和也在增加。当密实度由 87% 增加至 90% 时,分布概率由 14.5% 增大至 20.1%,增幅为 38.6%;当密实度由 90% 增加至

93% 时,分布概率则由 20.1% 增大至 22.6%,增幅为 12.4%。对于枝江膨胀土来说,其处于 0°~10°和 170°~180°区间内的分布概率之和也在增加。当密实度由 87% 增加至 90% 时,分布概率由 14.8% 增大至 16.3%,增幅为 10.1%;当密实度由 90% 增加至 93% 时,分布概率则由 16.3% 增大至 24.3%,增幅为 49.1%。可见,两种膨胀土中黏土矿物颗粒与水平方向的夹角处于 0°~10°和 170°~180°区间内的分布概率随密实度的变化规律十分相近,说明相较于膨胀性(蒙脱石含量),膨胀土内黏土矿物颗粒倾向于水平分布的概率与密实度密切相关。

综上所述,当膨胀土处于天然松散状态时,其内部的黏土矿物颗粒随机定向排列且集聚;压实后,因受各向不均等应力作用,黏土矿物颗粒开始趋向于水平层状排列。干密度越大,土样越密实,其水平层状排列越显著,但绝大多数黏土矿物颗粒仍会有一些的倾角,即倾斜状排列。而膨胀土的增湿膨胀主要是沿垂直于黏土矿物颗粒长轴的方向,故这种不均匀的定向分布将使得膨胀土出现两向膨胀的差异,即膨胀各向异性,且因黏土矿物颗粒多趋于水平定向排列而在宏观上表现出竖向膨胀能力强于侧向的特征。

### 4 侧限条件下的两向膨胀试验

#### 4.1 试验方法

经试样制备后,将试件正方形截面(54.77 mm×54.77 mm)朝上放入二维膨胀仪中,然后通过仪表自动控制电机驱动传动杆向试件前进,直至与土样充分接触后(压力传感器读数为 3~5 kPa)固定不动;其后,依次放置上盖板、压力杆和竖向 LVDT 位移传感器,加水开展恒体积膨胀试验;待膨胀稳定后,竖向逐级卸载直至为 0。竖向约束状态的减弱会对侧向的压力传感器读数造成影响,为保证侧向约束状态的一致性,每级卸荷后均需控制步进电机令压力传感器读数始终保持为恒体积条件下测得的侧向压力读数。试验过程中试件的受力情况和边界条件如图 9 所示。

试验过程中试件始终受侧限的约束作用,不计试件的重力,在恒体积膨胀至稳定时(状态①),如图 9(a)所示,膨胀仪竖向的膨胀力与上覆荷载相等为  $\sigma_z(\sigma'_z)$ ;膨胀仪侧向膨胀力与二维膨胀仪侧壁反力相等为  $\sigma_x(\sigma'_x)$ 。此时,减小上覆荷载至  $\sigma_{z1}(\sigma'_{z1})$ ,试件将于竖向产生膨胀变形,在该过程中原膨胀仪竖向的膨胀力亦将发生衰减直至再次与本次卸荷后的上覆荷载相等。待再次膨胀至稳定时(状态②),如图 9(b)所示,膨胀仪竖向的膨胀力仍与卸荷



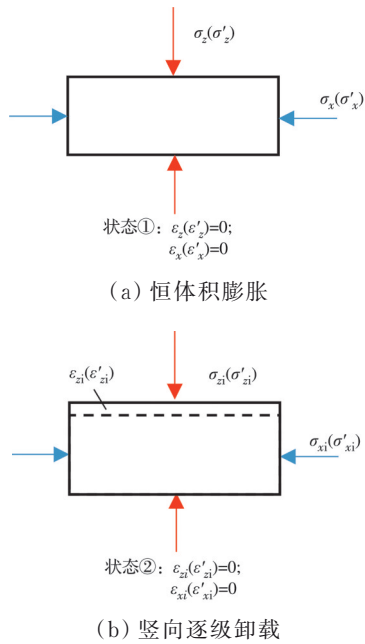


图 9 试验中试件受力情况和边界条件  
Fig. 9 Stress state and boundary condition of specimen during testing

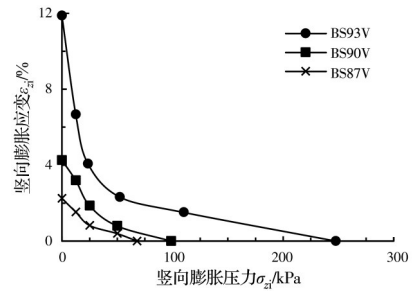
后的上覆荷载相等为  $\sigma_{zi}(\sigma'_{zi})$ ; 由于卸荷作用于竖向产生一定的膨胀变形  $\epsilon_{zi}(\epsilon'_{zi})$ 。可见, 在状态①到状态②的过程中, 因约束状态的减弱, 试件发生了一定的体变, 但是最终又在新的约束状态下达到了一种新的平衡状态。待每级卸荷膨胀至稳定时, 记录该过程中每一级的应力及变形, 即可分别通过竖向膨胀试验和侧向膨胀试验, 得到试件竖向(沿压实方向)膨胀力与膨胀应变的变化规律  $\sigma_{zi} \sim \epsilon_{zi}$ 、试件侧向(垂直压实方向)膨胀力与膨胀应变的变化规律  $\sigma_{xi} \sim \epsilon_{xi}$ 。

4.2 试验结果与讨论

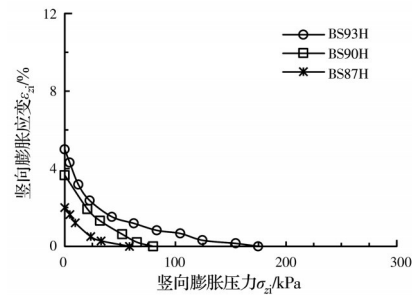
通过改进试件制备方法和研发的二维膨胀仪, 并考虑干密度对膨胀性的影响, 开展了侧限条件下的竖向膨胀试验和侧向膨胀试验, 共计 12 个测试序列, 见表 2。图 10 为不同干密度下百色膨胀土和枝江膨胀土试件的两向膨胀规律。

图 10 表明, 两种膨胀土在不同干密度下的膨胀应变均随膨胀压力的变化而非线性变化。而随着干密度的减小, 最大膨胀应变和最大膨胀压力的幅值均在减小, 变化曲线亦越靠近原点, 这说明在初始含水率一定的情况下, 膨胀土的干密度越小, 其膨胀势越弱。此外, 比较图 10(a)和图 10(b)、图 10(c)和图 10(d)可以发现, 对于同一种土来说, 其两向的膨胀规律存在差异, 在初始含水率和初始干密度一定的情况下, 竖向的膨胀性要强于侧向, 这与微观结构分析的结果相一致。

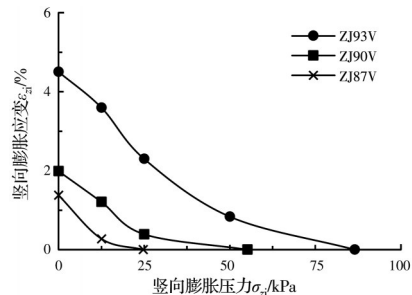
当上覆荷载为 0 时, 膨胀应变达到最大值, 即为



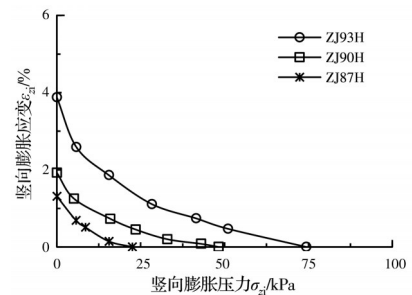
(a) 百色膨胀土竖向膨胀



(b) 百色膨胀土侧向膨胀



(c) 枝江膨胀土竖向膨胀



(d) 枝江膨胀土侧向膨胀

图 10 不同干密度下膨胀土试件的两向膨胀规律

Fig. 10 Swelling trends of expansive soil specimen with different dry density in two direction

无荷膨胀率; 当恒体积膨胀时, 膨胀应变为 0, 恒体积膨胀压力为最大值。故无荷膨胀率和恒体积膨胀压力为膨胀土增湿膨胀过程中的两个极限状态。若定义膨胀压力的各向异性系数( $R_p$ )为侧向的恒体积膨胀压力比竖向的恒体积膨胀压力, 定义膨胀应变的各向异性系数( $R_\epsilon$ )为侧向的无荷膨胀率比竖向的无荷膨胀率, 即可得到两个各向异性系数随干密度的变化关系, 如图 11 所示。

图 11 表明, 随压实度的降低(干密度的减小), 两

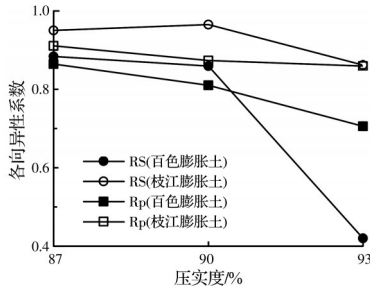


图 11 各向异性系数随压实度的变化

Fig. 11 Variation of anisotropic coefficient with compaction degree

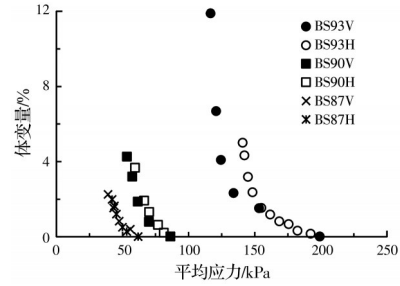
个各向异性系数均在增大,其数值上亦越趋近于1,这表明膨胀的各向异性在逐渐减弱。另外,对比百色膨胀土和枝江膨胀土的各向异性系数可以发现,膨胀性更强的百色膨胀土的各向异性要比枝江膨胀土更显著。这是由两者蒙脱石含量的差异性所致,根据XRD的测试结果,百色膨胀土的蒙脱石类黏土矿物的含量约为16.6%,而枝江膨胀土的蒙脱石类黏土矿物的含量约为8.1%,两者相差近一倍。干密度越大的土越密实,使得单位体积内的蒙脱石含量就越多。而干密度越大的土其内部黏土矿物的水平定向就越显著,故而蒙脱石矿物水平定向的数量也就越多,进而使得两向的膨胀差异越明显。

Selig等<sup>[30]</sup>指出膨胀土的体积改变主要由作用于土样的平均应力引起。试验中,膨胀土试件被放置于二维膨胀仪中并受到侧限的约束作用,故体变量就等于竖向LVDT位移传感器监测到的膨胀应变。平均应力按式(1)计算。

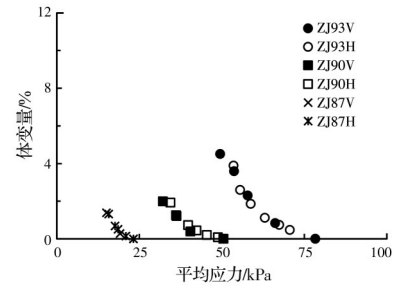
$$p = \frac{\sigma_z + 2\sigma_x}{3} \quad (1)$$

式中: $p$ 为平均应力,kPa; $\sigma_z$ 为竖向应力,kPa; $\sigma_x$ 为侧向应力,kPa。图12为各测试序列体变量随平均应力的变化规律。

图12表明,两种膨胀土增湿膨胀后的体变量均随平均应力的增大而非线性减小,干密度越大的试件受到更大的平均应力,亦产生更大的体变量。比较任意特定土质和特定干密度下的两向膨胀试验结果均可发现,与侧向膨胀试验的试件相比,竖向膨胀试验的试件受到较小的平均应力时将产生较大的体变量。例如ZJ93V和ZJ93H,ZJ93V经历的平均应力的下限值要比ZJ93H小,但ZJ93V产生的体变量上限值要比ZJ93H大。这是由膨胀潜势所决定的,一旦初始含水率和初始干密度一定,试件的膨胀潜势亦已确定。在增湿膨胀的过程中,当不允许发生膨胀变形时,膨胀潜势将转化为膨胀压力;而当允许发生膨胀时,则转化为膨胀变形。从恒体积膨胀到无荷膨胀的过程中,试件所受到的约



(a) 百色膨胀土



(b) 枝江膨胀土

图 12 体变量随平均应力的变化

Fig. 12 Variation of volume change with mean stress

束作用逐步减小,膨胀压力逐步转化为膨胀变形。故竖向较大的膨胀压力要全部释放则会产生较大的膨胀变形,又因恒体积条件下的竖向膨胀力要大于侧向膨胀力,故而完全卸除后,竖向膨胀试验试件所受到的平均应力自然要小于侧向膨胀试验的试件。此外,比较图12(a)和图12(b)还可发现,百色膨胀土的体变量随平均应力变化曲线均比枝江膨胀土的大。这说明膨胀性越强的土,其体变量对平均应力更为敏感。

## 5 结论

以百色中膨胀土和枝江弱膨胀土作为对象,通过XRD和SEM试验对土样矿物成分和微观结构进行了分析;在研发了二维膨胀仪的基础上,通过改进试件制备方法开展了侧限条件下两向的宏观膨胀试验;通过微-宏观试验结果,探讨了膨胀各向异性产生的原因。主要结论如下:

1) 无论是松散状态还是压实状态下的膨胀土,其微结构多呈片状且成层分布,压实作用将加剧土颗粒的成层,使得黏土矿物片状结构沿其压实方向层层堆叠。百色膨胀土微结构特征以紊流状结构为主,局部定向排列;枝江膨胀土微结构特征以粒状颗粒堆叠结构为主,含紊流结构、絮凝结构。

2) 片状黏土颗粒的倾角处于 $0^\circ \sim 10^\circ$ 和 $170^\circ \sim 180^\circ$ 区间内的概率相对较大,即多趋向于水平层状排列。随干密度的降低,该区间的分布概率由24.3%下降至14.8%,说明随着干密度的降低,其



夹角分布趋于均匀化。而膨胀土的增湿膨胀主要是沿垂直于黏土矿物颗粒长轴的方向,故这种不均匀的定向分布将使得膨胀土出现两向膨胀的差异,即膨胀各向异性。

3)对于同一种土来说,其两向的膨胀规律存在差异,在初始含水率和初始干密度一定的情况下,竖向的膨胀性要强于侧向。随压实度的降低(干密度的减小),膨胀的各向异性在逐渐减弱。膨胀土增湿膨胀后的体变量均随平均应力的增大而非线性减小,干密度越大的试件受到更大的平均应力,亦产生更大的体变量。膨胀性越强的土,其膨胀各向异性更为显著,其体变量对平均应力更为敏感。

4)在膨胀土地区进行结构设计时,应根据膨胀土在实际工况下的湿密状态和应力状态,对竖向和侧向的膨胀规律进行实测,以提供重要设计依据;本文仅对重塑土样开展了研究,后续需进一步对原状土样的膨胀各向异性开展研究,获取原状土样的两向膨胀规律和增湿膨胀过程中的微观结构变化,深入揭示膨胀各向异性的形成机理。

#### 参考文献

- [1] ZHENG J L, ZHANG R, YANG H P. Highway subgrade construction in expansive soil areas [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2009, 21(4): 154-162.
- [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 J L, ZHANG R. 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. Prediction of lateral swelling pressure behind retaining structure with expansive soil as backfill [J]. *Soils and Foundations*, 2019, 59(1): 176-195.
- [4] ZHANG R, LONG M X, LAN T, et al. Stability analysis method of geogrid reinforced expansive soil slopes and its engineering application [J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(7): 1965-1980.
- [5] 张锐, 龙明旭, 郑健龙, 等. 土工格栅与膨胀土相互作用研究进展及思考 [J]. *中外公路*, 2020, 40(Sup2): 13-20.  
ZHANG R, LONG M X, ZHENG J L, et al. Research progress and thinking on interaction between geogrid and expansive soil [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2020, 40(Sup2): 13-20. (in Chinese)
- [6] 《中国公路学报》编辑部. 中国路基工程学术研究综述·2021 [J]. *中国公路学报*, 2021, 34(3): 1-49.  
Editorial Department of *China Journal of Highway and Transport*. Review on China's subgrade engineering research·2021 [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(3): 1-49. (in Chinese)
- [7] 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 J L. Theory and technology for highway expansive soil engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2013. (in Chinese)
- [8] NELSON J D, CHAO K C G, OVERTON D D, et al. *Foundation engineering for expansive soils* [M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2015.
- [9] AVSAR E, ULUSAY R, SONMEZ H. Assessments of swelling anisotropy of Ankara clay [J]. *Engineering Geology*, 2009, 105(1/2): 24-31.
- [10] 张锐, 赵旭, 郑健龙, 等. 膨胀土侧向膨胀力试验研究与应用 [J]. *中国公路学报*, 2020, 33(9): 22-31.  
ZHANG R, ZHAO X, ZHENG J L, et al. Experimental study and application of lateral swelling stress of expansive soil [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(9): 22-31. (in Chinese)
- [11] LIU Z N, ZHANG R, LIU Z J, et al. Experimental study on swelling behavior and its anisotropic evaluation of unsaturated expansive soil [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, 2021: 6937240.
- [12] LIN B T, CERATO A B. Applications of SEM and ESEM in microstructural investigation of shale-weathered expansive soils along swelling-shrinkage cycles [J]. *Engineering Geology*, 2014, 177: 66-74.
- [13] KATTI D R, SHANMUGASUNDARAM V. Influence of swelling on the microstructure of expansive clays [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2001, 38(1): 175-182.
- [14] 陈宇龙. 云南膨胀土的微观结构特征 [J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(Sup1): 334-339.  
CHEN Y L. Microstructure of expansive soil from Yunnan Province [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(Sup1): 334-339. (in Chinese)
- [15] 戴张俊, 陈善雄, 罗红明, 等. 南水北调中线膨胀土/岩微观特征及其性质研究 [J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(5): 948-954.  
DAI Z J, CHEN S X, LUO H M, et al. Microstructure and characteristics of expansive soil and rock of middle route of South-to-North Water Diversion Project [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(5): 948-954. (in Chinese)
- [16] ZOU W L, YE J B, HAN Z, et al. Effect of montmorillonite content and sodium chloride solution on the residual swelling pressure of an expansive clay [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(19): 1-12.
- [17] 蔺建国, 叶加兵, 邹维列. 孔隙溶液对膨胀土微观结构的影响 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(4): 12-17.

- LIN J G, YE J B, ZOU W L. Effect of pore fluid on microstructure in expansive soil [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(4): 12-17. (in Chinese)
- [18] VU H Q, FREDLUND D G. The prediction of one-, two-, and three-dimensional heave in expansive soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(4): 713-737.
- [19] 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.
- [20] 张锐, 刘正楠, 郑健龙, 等. 膨胀土侧向膨胀力及其对重力式挡墙的作用[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 171-180.
- ZHANG R, LIU Z N, ZHENG J L, et al. Lateral swelling pressure of expansive soil and its effect on gravity retaining wall [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2): 171-180. (in Chinese)
- [21] 秦冰, 陈正汉, 刘月妙, 等. 高庙子膨润土 GMZ001 三向膨胀力特性研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(5): 756-763.
- QIN B, CHEN Z H, LIU Y M, et al. Characteristics of 3D swelling pressure of GMZ001 bentonite [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(5): 756-763. (in Chinese)
- [22] 孙发鑫, 陈正汉, 秦冰, 等. 高庙子膨润土-砂混合料的三向膨胀力特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 200-207.
- SUN F X, CHEN Z H, QIN B, et al. Characteristics of three-dimensional swelling pressure of Gaomiaozhi bentonite-sand mixture [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(1): 200-207. (in Chinese)
- [23] 陈永贵, 雷俊, 贾灵艳, 等. 圆饼状高压实膨润土膨胀力各向异性特征研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(1): 99-107.
- CHEN Y G, LEI J, JIA L Y, et al. Anisotropic characteristics of swelling pressure for compacted GMZ pie-shaped bentonite block [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(1): 99-107. (in Chinese)
- [24] 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 Y, CHEN Z H, SUN S G, 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)
- [25] 杨长青, 董东, 谭波, 等. 重塑膨胀土三向膨胀变形试验研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(2): 188-195.
- YANG C Q, DONG D, TAN B, et al. Laboratory tests on three-directional swelling deformation of remolded expansive soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(2): 188-195. (in Chinese)
- [26] 池泽成, 陈善雄, 戴张俊, 等. 合肥重塑膨胀土三向应力-应变规律探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(Sup1): 3659-3665.
- CHI Z C, CHEN S X, DAI Z J, et al. Research on strain regularity of three-dimensional stress of Hefei remolded expansive clay [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(Sup1): 3659-3665. (in Chinese)
- [27] 刘洪伏, 汪时机, 李贤, 等. 邯郸强膨胀土三向膨胀力特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4): 789-796.
- LIU H F, WANG S J, LI X, et al. Experimental study on three-dimensional swelling pressure of highly expansive clay in Handan district of China [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(4): 789-796. (in Chinese)
- [28] 贾景超. 膨胀土膨胀机理及微观膨胀模型研究[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2010.
- JIA J C. Study on the swelling mechanism and mesomechanical swelling model of expansive soils [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [29] 中华人民共和国交通运输部. 公路路基设计规范: JTG D30—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway subgrades: JTG D30—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese)
- [30] SELIG E T, DAKSHANAMURTHY V. A stress-controlled study of swelling characteristics of compacted expansive clays [J]. Geotechnical Testing Journal, 1979, 2(1): 57.