

弱膨胀土的膨胀特性试验研究*

文松松^① 梁维云^① 陈永健^① 黄炫彰^① 颜荣涛^① 韦昌富^{①②}

(^①桂林理工大学广西建筑新能源与节能重点实验室 桂林 541004)

(^②中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室 武汉 430071)

摘要 目前测量土体膨胀力的主要方法有膨胀反压法、加压膨胀法、平衡加压法和恒体积法。基于测量膨胀力的恒体积法,利用 TST-55 型渗透仪、高精度压力传感器和数采系统改进了测量土体膨胀力的装置,并研究了膨胀土的膨胀特性。试验结果表明,土样初始含水率和干密度对土体的极限膨胀力都有显著的影响,并建立了极限膨胀力与两者之间的关系式;较低初始含水率时,不同干密度的土样在膨胀力达到峰值之后,都有不同幅度的降低,随着干密度的增大而降低的越多,并且发现极限膨胀力降低值与干密度之间在双对数坐标轴上存在线性关系;而在较高初始含水率时,不同干密度的土样在膨胀力达到峰值之后,会保持平稳趋势。极限膨胀力的对数与初始含水率之间具有很好的线性关系,土样吸水量的对数与初始含水率以及干密度均有着很好的线性关系。

关键词 弱膨胀土 极限膨胀力 恒体积法

中图分类号: TU411 文献标识码: A

EXPERIMENTAL STUDY OF SWELLING CHARACTERISTICS OF WEAK EXPANSIVE SOIL

WEN Songsong^① LIANG Weiyun^① CHEN Yongjian^① HUANG Xuanzhang^① YAN Rongtao^① WEI Changfu^{①②}

(^①Guangxi Key Laboratory of New Energy and Building Energy Saving, Guilin University of Science and Technology, Guilin 541004)

(^②State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071)

Abstract At present, the main soil swelling force measuring methods include swelling-consolidation method, pressure swelling method, balance pressure method, constant volume method. Based on the constant volume method of measuring soil swelling force, the TST-55-type permeameter, high-precision pressure sensors and data acquisition system are used to improve measuring method of soil swelling force, and to study the expansion characteristics of expansive soil. Test results show that the initial water content and dry density of soil sample have a significant influence to limit swelling force. The paper establishes the equation for their relation with limit swelling forces. At lower initial water content, when soil sample's limit swelling force of different dry density reaches a peak, it has a different rate of decrease. The value along with increasing of the dry density can be decreased. A linear relationship

* 收稿日期: 2016-06-02; 收到修改稿日期: 2016-12-19.

基金项目: 国家自然科学基金(11372078, 51309055) 广西自然科学基金创新研究团队项目(2014GXNSFBA118236) 资助.

第一作者简介: 文松松(1991-), 男, 硕士生, 主要从事岩土工程方面研究. Email: slim_wen@outlook.com

通讯作者简介: 韦昌富(1966-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事非饱和土力学与多相孔隙介质多场耦合问题的研究工作.

Email: cfwei@whrsm.ac.cn

exists in the double logarithmic coordinate axis about the reduction value of limit swelling force and the dry density. At higher initial water content, when soil sample's limit swelling force of different dry density reaches a peak, it will remain stable trend. There is a good linear relationship between the logarithm of limit swelling force and initial water content. There is also a good linear relationship between the logarithm of water absorption of soil sample and initial water content or dry density.

Key words Weak expansive soil, Limit swelling force, Constant volume method

0 引言

膨胀土在我国十几个省市都有分布,分布范围很广,通常被用作土木建筑、水利、公路等工程方面的施工材料。膨胀土的膨胀可造成基坑的隆起或者边坡的滑移、道路翻浆,引起不同程度的工程灾害,带来巨大的损失。研究土体的膨胀性对工程建筑物的安全和稳定具有重要的意义。膨胀土是一种吸水膨胀软化、失水收缩干裂且含有较多黏土矿物的土壤。对于膨胀土吸水膨胀、失水收缩的现象,有许多种解释,然而大多数认为,主要是黏粒与水发生作用后,由于形成了双电层,使扩散层或弱结合水厚度发生变化而引起的;或者是由于土中含有较多亲水性比较强的黏土矿物,如蒙脱石,其黏土矿物层间结合水的吸入或析出所致土体的膨胀或收缩。

国内外对膨胀土的膨胀特性方面有较多研究,并取得了不菲的成果。Manca et al.(2015)研究了不同孔隙溶液、不同干密度、不同湿度下的自由膨胀特性,揭示了膨胀力的产生是由基质吸力与孔隙水溶液的化学成分共同决定。Tripathy et al.(2004)研究了压实膨胀土的膨胀力的双电层扩散理论,发现膨胀土在较低干密度时,膨胀力低于其理论值,而在高干密度时,膨胀力高于其理论值。Azam et al.(2013)研究了加拿大膨胀土的膨胀特性,结果发现由于季节变化,膨胀土存在周期性的胀缩,尤其是与大气直接接触的表土层最为突出,并随覆土应力和深度的增加,胀缩性逐渐减小。Sun et al.(2013)开展了高庙子膨胀土与砂土组成的混合土的膨胀试验,指出混合土的膨胀力独立于初始含水率和干密度,而与掺砂率有关,并提出了预测不同干密度和不同膨胀土/砂土比的混合土的膨胀变形和压力的经验公式。谈云志等(2014)对测量膨胀力的试验方法进行了改进,称之为限制膨胀法,并与膨胀反压法测得的膨胀力进行对比,发现限制膨胀法测得的膨胀力要小于膨胀反压法的试验值。Al-Homoud et al.(1995)利用几种试验方法来测定了土体的膨胀力。

谢云等(2007)进行了重塑膨胀土的三向膨胀力试验研究,发现三向膨胀力并不相等。丁振洲等(2006,2007)提出了自然膨胀力、极限膨胀力与换算膨胀力的概念,将土体在不允许侧向变形、吸水而未达到饱和状态时表现出来的膨胀力称为自然膨胀力,而通常所说膨胀力是指极限膨胀力,即土体在不允许侧向变形下充分吸水而保持其不发生竖向膨胀所需要施加的最大压力值;并发现换算膨胀力与初始含水率呈非线性负相关关系,自然膨胀力在增湿初期会迅速增加,达到一定程度(一般增湿程度达到3%~6%)时出现拐点,增加缓慢近于线性。周葆春等(2013,2014)开展了荆门弱膨胀土在不同压实度下的一维胀缩特性试验研究,指出膨胀土体积变化是膨胀势、外部荷载及湿度变化耦合作用的结果。朱豪等(2011)发现膨胀力的对数与初始含水率以及干密度之间满足线性关系。卢肇钧等(1992,1997)通过试验研究发现非饱和土的膨胀力与含水率的对数呈负线性相关,并认为膨胀力和吸力是作用力与反作用力的关系。杨和平等(2006)进行了有荷条件下膨胀土的干湿循环胀缩变形研究,发现膨胀土的胀缩变形过程并不完全可逆,在一定荷载变化范围内,经历相同的干湿循环次数,荷载越大膨胀土的绝对和相对膨胀率越小。除此之外,Bruyn et al.(1957)和 Xu et al.(2003)均指出膨胀土的膨胀特性与其比表面积、表面结构有关。

在前人研究的基础上,本试验采用宁明膨胀土为研究对象,通过改进的恒体积测量膨胀力的装置,开展了膨胀土在蒸馏水饱和环境下的膨胀特性研究,试图探究其影响规律和膨胀机理。

1 试验概况

1.1 恒体积装置

基于测量膨胀力的恒体积方法,本试验利用TST-55型渗透仪、高精度压力传感器改装成恒体积法测量膨胀力的装置(图1),有如下几个特点:①恒体积:利用TST-55型渗透仪的框架提供一个限制

空间,刚度足够,保证了土样在整个过程中体积不变,并且旋钮可以调节以适应各种高度的土样;②高精度:本试验所采用的压力传感器具有高精度、量程大、外形小、自重小、价格便宜等优点;③用途广:TST-55型渗透仪底座有横向小孔,外接软管,可通气,也可通水,使得此改装的仪器既适用于测量土体浸水过程中的膨胀力变化,又适用于测量湿度变化环境下的膨胀力变化,同时也适用于温度控制下的膨胀力测试;④结构好:相对于现有的技术而言,整套测量膨胀力的装置体积小、重量轻、精度高、造价低,并且结构简单、安装便捷、操作简便、数据显示直观。

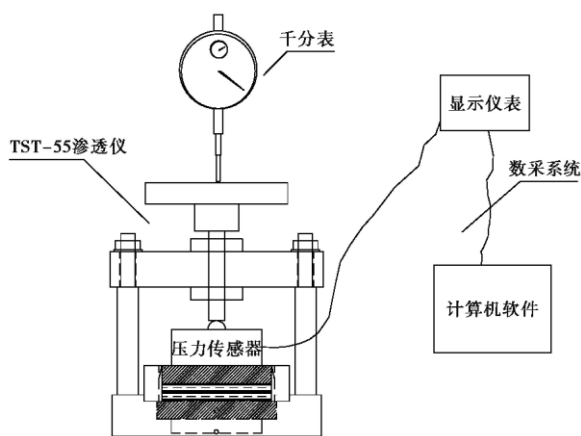


图1 恒体积测量膨胀力的改进装置

Fig. 1 Improvement device of constant volume method to measuring expansion forces

1.2 土样制备

膨胀土土样取自广西南明,试验用土的黏土矿物成分分析与物性指标(表1、表2)。广西壮族自治区南部的宁明盆地边缘沿南友高速路线分布着的大量膨胀性岩土,给公路建设带来了很大的困难。

表1 宁明膨胀土矿物成分分析

Table 1 Mineral compositions analysis of expansive soil in Ningming

黏土矿物相对含量/%					混层比/%	
S	I/S	It	Kao	C	I/S	C/S
-	73	8	15	4	60	-

S为蒙脱石,It为伊利石,Kao为高岭石,C为绿泥石,I/S为伊蒙混层,C/S为绿蒙混层

本试验采用控制干密度和初始含水率的方法制备了4种干密度和4种初始含水率的土样。其中干密度 ρ_d 分别为 $1.4\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $1.5\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $1.6\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、

表2 宁明膨胀土的基本物性参数

Table 2 Basic physical parameter of expansive soil in Ningming

比重	塑限 /%	液限 /%	塑性 指数	自由膨 胀率/%	颗粒分析/%	
					<0.01mm	<0.001mm
2.74	28.65	71.45	42.80	63.50	81.75	53.96

$1.7\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,目标初始含水率 w 分别为5%、10%、15%、20%。在蒸馏水饱和环境下进行试验,以上试验重复了1次或2次,取平均值作为最后结果。试验用土经过风干后碾碎,然后过2mm筛,按照目标含水率计算需要喷洒的蒸馏水,用喷壶均匀喷洒在风干土样上,充分调匀后放置在保鲜袋内静置2~3d,使水分迁移,待水分充分迁移后,称取一定质量的土样复测含水率,计算时以实际所复测的含水率 w_0 为准。利用压样模具与千斤顶,将配制的试验用土一次性压入环刀即成环刀样,本次试验的土样高度为 $h=10\text{mm}$ 、直径为 $\Phi=61.8\text{mm}$ 。

1.3 试验方法

将压制好的环刀土样上下各放一张滤纸,上方再放一块直径为61.5mm、厚度为10mm的透水石,填满整个环刀;将环刀放入底座透水石的中心位置,压力传感器水平放置在环刀上方,并调至居中,旋钮与压力传感器对准接触。为了保证传感器与旋钮接触,稍微旋动旋钮,使数显仪表的读数增加至一定值,如20N(约为6.6kPa),记录并清零,开始加水(淹没环刀土样顶部)读数,按1min、3min、5min、10min、15min、20min、30min、1h、2h、3h、4h、6h、8h的时间读数,随后每隔2h读取一次,当数显仪表在2h内读数不发生变化,则视为试验结束。

2 试验结果

2.1 极限膨胀力

2.1.1 膨胀时程曲线

如图2所示,实测的土样含水率分别为6.5%、8.6%、14.95%、20.12%。各初始状态的土样在蒸馏水浸入后,极限膨胀力呈现不同程度的增长。在浸水初期,初始含水率相同,基本呈现干密度越小则土样的膨胀速率越快的现象;到了中期,膨胀速率刚好相反,干密度越大,土样的膨胀速率越快;后期不同干密度的土样膨胀速率基本一致。而在干密度相同的情况下,初始含水率越低,土体的膨胀速率越

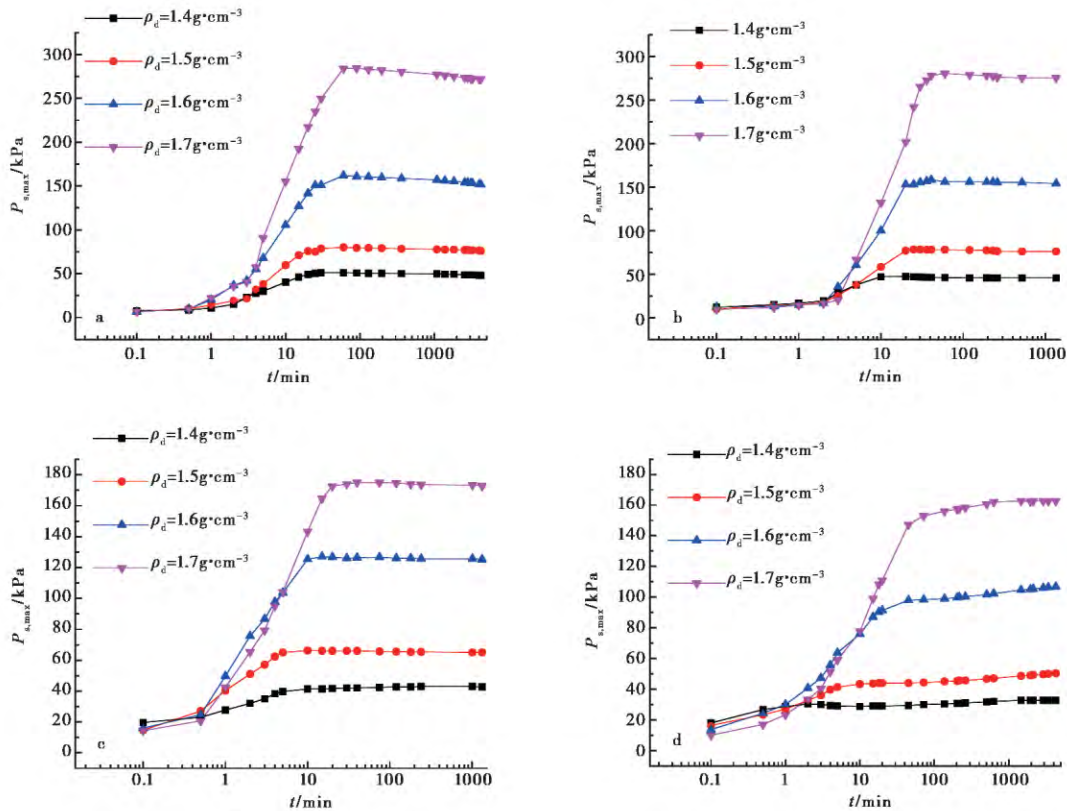


图2 极限膨胀力时程曲线

Fig. 2 Time-limit swelling force cures

a. $w_0 = 6.5\%$; b. $w_0 = 8.6\%$; c. $w_0 = 14.95\%$; d. $w_0 = 20.12\%$

快。极限膨胀力与时间的关系(图2),在土样刚开始吸水阶段(0~30min内),土体的膨胀势急剧增长,后一阶段,膨胀力增长速度变慢。周葆春等(2014)将膨胀变形的时程曲线划分为3段,即初始膨胀段、加速膨胀段和缓慢膨胀段,并分别给出了界限的划分方法。

2.1.2 极限膨胀力与 w_0, ρ_d 的关系

如图3所示,干密度相同的情况下,土样的极限膨胀力随着初始含水率的增大而减小。如图4所示,初始含水率相同的情况下,土样的极限膨胀力随着干密度的增大而增大。图5为 $\ln(p_{s,max}) \sim w_0$ 关系图,从图中可以看出,极限膨胀力的自然对数与初始含水率之间具有很好的线性关系,以此可以预测不同初始含水率下土体的极限膨胀力。并且可以看出不同干密度下对应的 $\ln(p_{s,max}) \sim w_0$ 直线斜率大致相同,说明极限膨胀力随初始含水率变化的速度与干密度关系不大,此现象与朱豪等(2011)的研究成果基本一致。图6为 $\ln(p_{s,max}) \sim \rho_d$ 关系图,从图中可以看出,极限膨胀力的自然对数与干密度之间同样具有很好的线性关系,以此可以预测不同干密

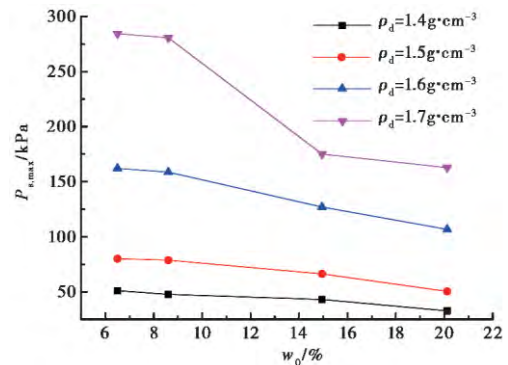


图3 极限膨胀力与初始含水率的关系

Fig. 3 Relationship between limit swelling force and initial water content

度土体的极限膨胀力。

接下来探讨极限膨胀力同时与初始含水率、干密度两者的关系,Nagaraj et al.(2007)、Arifin et al.(2009)在研究压榨力(膨胀力)时,发现膨胀力与两者的关系如图7所示,并得出关系式(1),通过土样的已知初始状态(初始孔隙比、初始饱和度)来预测其极限膨胀力:

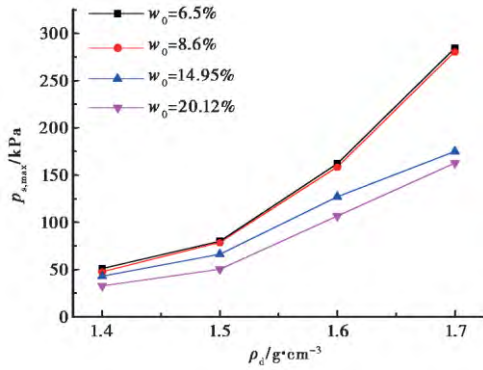


图4 极限膨胀力与干密度的关系
Fig. 4 Relationship between limit swelling force and dry density

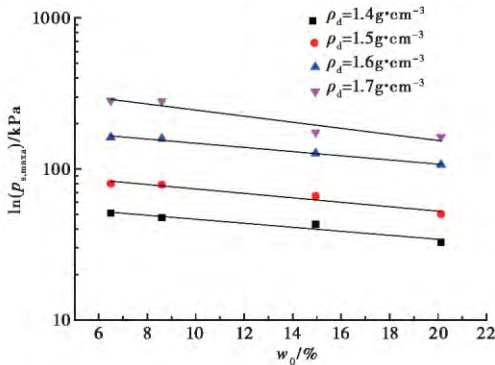


图5 极限膨胀力与初始含水率的关系
Fig. 5 Relationship between limit swelling force and initial water content

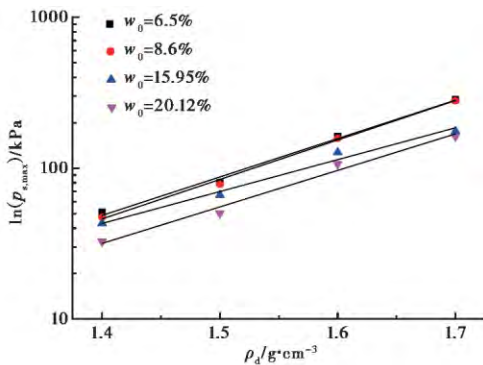


图6 极限膨胀力与干密度的关系
Fig. 6 Relationship between limit swelling force and dry density

$$P_{\text{squeeze}} = 316 \exp[-0.3871(e/G_s)(S_r)^{0.5}] \quad (1)$$

综合本试验宁明膨胀土的初始含水率和干密度对极限膨胀力的影响因素,对上式进行一定的修改,得出式(2),并从图8可以看出,极限膨胀力与 $e^A w^B$

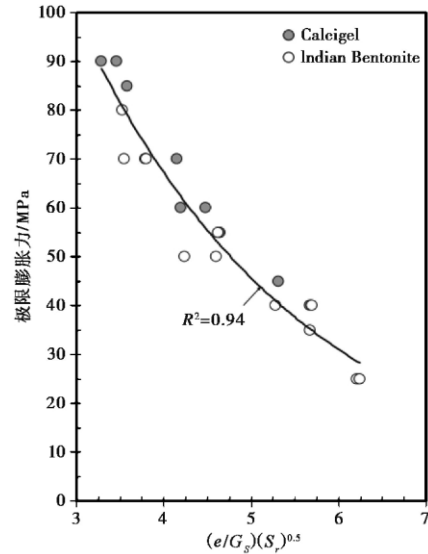


图7 极限膨胀力与 $(e/G_s)(S_r)^{0.5}$ 的关系
Fig. 7 Relationship between limit swelling force and $(e/G_s)(S_r)^{0.5}$

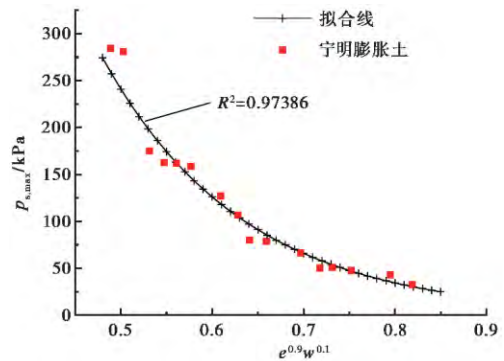


图8 极限膨胀力与 $e^A w^B$ 的关系
Fig. 8 Relationship between limit swelling force and $e^A w^B$

的关系很有规律性。所以我们可以利用土样的初始孔隙比与初始含水率来预测弱膨胀土的极限膨胀力。

$$p_{s, \max} = 3168.5 \exp[-6.485(e^A w^B)] \quad (2)$$

A、B为土性参数,其中 $A=0.9, B=0.1$,相关系数 $R^2=0.97386$ 。

2.2 吸水量

不同初始状态的土样在最后的吸水量也有所区别。土样吸水量即最后含水量与初始含水量的差值,用 w' 表示。图9为 $w' \sim w_0$ 关系图,干密度相同,土样的吸水量随着初始含水率的增大而减少;图10为 $w' \sim \rho_d$ 关系图,初始含水率相同,土样的吸水量随着干密度的增大而减少。

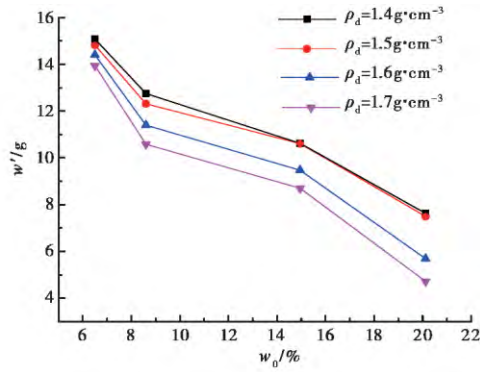


图9 吸水量与初始含水率的关系

Fig. 9 Relationship between water absorption and initial water content

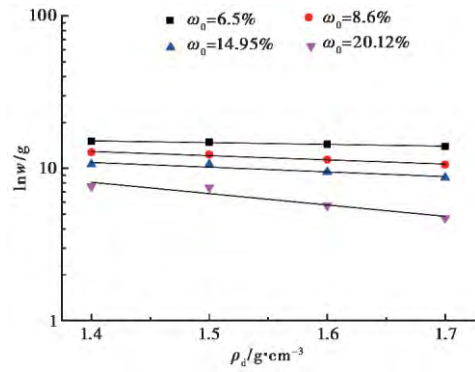


图12 吸水量与干密度的关系

Fig. 12 Relationship between water absorption and initial dry density

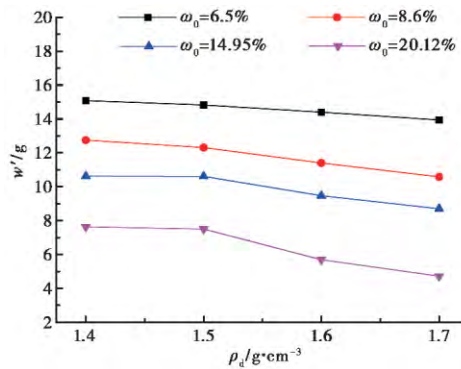


图10 吸水量与干密度的关系

Fig. 10 Relationship between water absorption and dry density

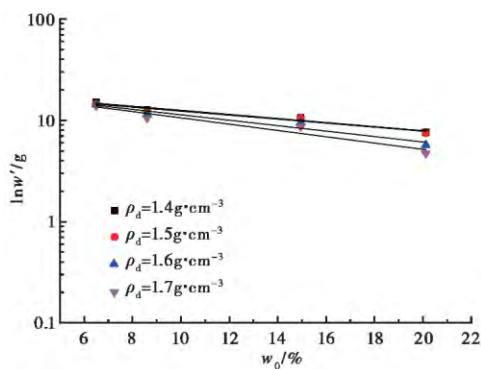


图11 吸水量与初始含水率的关系

Fig. 11 Relationship between water absorption and initial water content

如图11和图12,分别为 $\ln w' \sim w_0$ 与 $\ln w' \sim \rho_d$ 关系图,图中表明土样吸水量的对数与初始含水率以及干密度均有着很好的线性关系,以此预测各不同初始状态下土体的吸水量。

2.3 极限膨胀力的降低值

极限膨胀力的降低值与初始含水率、干密度的关系分别如图13、图14所示。在 $w_0 = 6.5\%$, 8.6% , 14.95% 的土样中,有这样的一个现象,即膨胀力在达到峰值之后,会有小幅度的降低,且同一初始含水率的土样,其膨胀力的降低值随着干密度的增大而增大;同一干密度的土样,其膨胀力的降低值随着初始含水率的减小而增大,总而言之,膨胀性越大的土样,膨胀力的降低值越大。而在 $w_0 = 20.12\%$ 的土样中,并没有这样的现象,也就是初始含水率达到一定程度,膨胀力降低值与干密度并无关系。

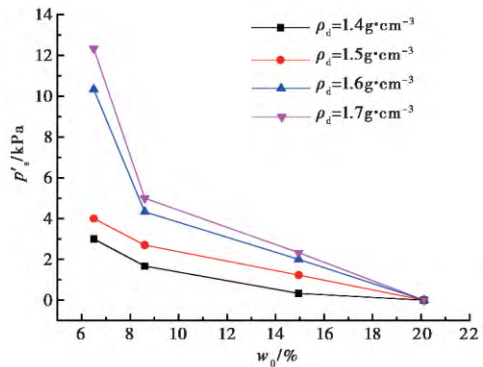


图13 极限膨胀力降低值与初始含水率的关系

Fig. 13 Relationship between reducing value of the limit swelling force and initial water content

图15为 $\ln p'_s \sim \ln \rho_d$ 关系图,发现极限膨胀力降低值的对数值与干密度的对数之间具有良好的线性关系。

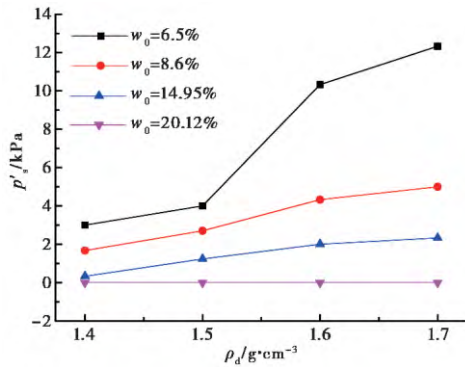


图 14 极限膨胀力降低值与干密度的关系

Fig. 14 Relationship between reducing value of the limit swelling force and dry density

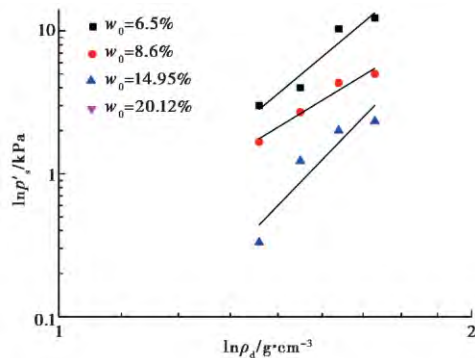


图 15 极限膨胀力降低值与干密度的关系

Fig. 15 Relationship between reducing value of the limit swelling force and dry density

3 讨论与分析

表征土体膨胀特性的指标主要有膨胀力、膨胀率、自由膨胀率、膨胀含水量。而通常所说的膨胀力是指极限膨胀力,即膨胀力是土体在不允许侧向变形下充分吸水而保持其不发生竖向膨胀所需施加的最大压力值(高大钊等,2001)。

土体膨胀最普遍的形式是由于双电层的形成,弱结合水的增加,削弱了粒间的连结力,增大了粒间的距离,从而引起两方面的结果:①在恒体积的情况下,使土体具有很高的膨胀势,而膨胀势因体积受限无法释放,便转化为膨胀力;②在没有竖向限制的情况下,土体体积发生竖向膨胀。

这种膨胀的机理是由于黏土矿物和细分散有机质因水化而产生的结合水膜对土粒间的楔劈作用的结果,当扩散层较薄,结合水较少,土的粒间连结力大于或等于结合水膜的楔劈作用时,土体不会发生

膨胀;当扩散层较厚,结合水较多,结合水的楔劈压力大于粒间连结力时,将迫使土粒间距离增大,从而引起土体产生膨胀势即膨胀力的增加,或者土体体积膨胀,直到这两种力达到新的平衡为止(唐大雄等,1999)。

3.1 极限膨胀力的时程曲线

土样在初始含水率相同的情况下,因为干密度越大,单位体积的亲水黏性矿物成分(主要是蒙脱石)越多,吸水膨胀性越大,表现出来的膨胀力也就越大,即极限膨胀力随着干密度的增大而增大。

就膨胀速度而言,初始含水率相同的情况下,因为干密度越大的土样,其孔隙越小,浸水初期,相比干密度小的土样,水分进入地更慢,所以表现出来的是浸水初期干密度越大,膨胀速度越小。

对于整个浸水阶段,曲线呈现S型,是因为颗粒之间存在大小不一的孔隙,水分优先充满颗粒之间的孔隙,其次才是聚集体中的孔隙。所以在浸水初期膨胀速度很小,而到了中期,颗粒之间的孔隙基本被充满,水分进入聚集体中的孔隙,结合水膜厚度增加,“楔”开土颗粒,由于体积受限,所以表现出很大的膨胀力,且速度增长得很快。到了后期,土体结构达到稳定状态,饱和度达到很高值,膨胀力增长速度变慢。

3.2 吸水量

相同干密度的土样,初始含水率越低,吸水量越多,是因为初始含水率越低,初始基质势越高,最后吸水量越多。相同初始含水率,干密度越小,吸水量越多,可以解释为:虽然干密度越大,最终膨胀势越高,但因为整个土样的体积一直保持不变,所以干密度低的土样具有更多、更大的孔隙,给浸入的水分提供更多的储存空间,相比之下,低干密度的土样吸水量越多。

3.3 极限膨胀力的降低值

在低初始含水率的土样中,膨胀力在达到峰值之后有小幅度的降低,且同一初始含水率的土样,其膨胀力的降低值随着干密度的增大而增大;同一干密度的土样,其膨胀力的降低值随着初始含水率的减小而增大。而在高初始含水率的土样中,并没有这样的现象。

一方面,从矿物成分上分析,宁明膨胀土是弱膨胀土,其矿物成分从表1里面可看出,主要矿物成分

为伊蒙混层矿物,所占比例为73%,混层比为60%,即蒙脱石在混层矿物中所占比例为60%。而纯蒙脱石矿物几乎没有,且含有一定量的纯伊利石矿物与纯高岭石矿物成分,所以相比其他膨胀土而言,蒙脱石矿物含量在土样中所占比例较小。膨胀力是由于混层矿物中的蒙脱石晶体之间膨胀作用所致,而在蒙脱石之间夹杂着伊利石,吸水膨胀存在一定的各向异性,待膨胀稳定后,膨胀各向异性会趋于各向同性,从而表现出极限膨胀力有小幅度的降低;另一方面,与其他学者的研究(Sun et al., 2013)相比,宁明膨胀土的极限膨胀力要小很多,小幅度降低相对比较明显,而膨胀性很强的膨胀土(如GMZ膨润土)如果有小幅度降低,也不会显得那么明显,在达到1000kPa级别的极限膨胀力,10kPa左右的小幅度降低值几乎可以忽略不计了。对于含水率在20.12%的情况下没有膨胀力的降低,可以这样解释:因为高 w_0 的土样处于相对较软的初始状态,相对来说颗粒分布和孔隙分布也比较均匀,各向异性的影响较小,各向同性相对较为明显,所以并没有由各向异性趋于各向同性的过程,或者说过程不是很明显,所以并没有表现出来极限膨胀力的降低。但为什么是 $w_0=20.12\%$ 这个点才没有出现降低,比如有可能 w_0 在15%~20%之间就出现此现象,这方面会在后续的工作学习中继续研究。

不同初始状态的土样,在极限膨胀力到达峰值之后的降低值有所不同,是由其膨胀性决定的,膨胀性大的土样其降低值也越大。原因是土样的干密度不同,单位面积的伊蒙混层含量也不同,产生的各向异性也不同,降低值也就不一致。例如,干密度大的土样,单位面积的伊蒙混层含量多,各向异性程度高,从而需要降低较多的膨胀力才能保持最终的稳定状态。

4 总结

本文通过恒体积法对膨胀土的膨胀力进行测试,得出如下主要结论:

(1) 试验结果发现,土样初始含水率和干密度对土体的极限膨胀力都有显著的影响。

(2) 较低初始含水率时,不同干密度的土样在膨胀力达到峰值之后,都有不同幅度的降低,并且随着干密度的增大而降低的越多,并且发现极限膨胀力降低值的对数与干密度的对数之间存在线性关系。

(3) 在较高初始含水率时,不同干密度的土样在膨胀力达到峰值之后,会保持平稳趋势。极限膨胀力的对数与初始含水率之间具有很好的线性关系,土样吸水量的对数与初始含水率以及干密度均有着很好的线性关系。

(4) 极限膨胀力与初始含水率以及干密度两者的关系,可用一个关系式来表达,这样可以很好地预测某一初始状态弱膨胀土的极限膨胀力。

参 考 文 献

- Al-Homoud A S, Basma A A, Husein Malkawi A I, et al. 1995. Cyclic swelling behavior of clays[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, **121**(7): 562~565.
- Arifin Y F, Schanz T. 2009. Osmotic suction of highly plastic clays[J]. *Acta Geotechnica* **4**(3): 177~191.
- Azam S, Shah I, Raghunandan M E, et al. 2013. Study on swelling properties of an expansive soil deposit in Saskatchewan, Canada[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **72**(1): 25~35.
- De Bruyn C M A, Collins L F, Williams A A B. 1957. The specific surface, water affinity, and potential expansiveness of clays[J]. *Clay Minerals* **3**(17): 120~128.
- Ding Z Z, Zheng Y R, Li L S. 2006. Study on concept of swelling force and its moistening trial regularity[J]. *Industrial Construction*, **36**(3): 67~70.
- Ding Z Z, Zheng Y R, Li L S. 2007. Trial study on variation regularity of swelling force[J]. *Rock and Soil Mechanics* **28**(7): 1328~1332.
- Gao D Z, Sun J. 2001. Retrospect and Prospect of Geotechnical Engineering[M]. Beijing: China Communications Press.
- Lu Z J, Wu X M, Sun Y Z, et al. 1997. The role of swelling pressure in the shear strength theory of unsaturated soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, **19**(5): 20~27.
- Lu Z J, Zhang H M, Chen J H, et al. 1992. Shear strength and swelling prtssure of unsaturated soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, **14**(3): 1~8.
- Manca D, Ferrari A, Laloui L. 2015. Fabric evolution and the related swelling behaviour of a sand/bentonite mixture upon hydro-chemo-mechanical loadings[J]. *Géotechnique* **66**(1): 1~17.
- Nagaraj T S, Schanz T, Nagendra P K. 2007. Discussion of "Suction Stress Characteristics Curve for Unsaturated Soil" by Ning Lu and William J. Likos[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **133**(5): 614~616.
- Sun D A, Lü H B, Wei C F. 2013. Swelling Behaviour of GMZ Bentonite [J]. *Advanced Materials Research*, **671**: 1756~1760.
- Tan Y Z, Hu X J, Yu B, et al. 2014. Swelling pressure and mesomechanism of compacted laterite under constant volume condition[J]. *Rock and Soil Mechanics* **35**(3): 653~658.
- Tang D X, Sun S W. 1999. *Journal of engineering geology* [M]. Beijing: Geological Publishing House.

- Tripathy S ,Sridharan A ,Schanz T. 2004. Swelling pressures of compacted bentonites from diffuse double layer theory [J]. Canadian Geotechnical Journal ,**41**(3) : 437~450.
- Xie Y ,Chen Z H ,Sun S G ,et al. 2007. Test research on three - dimensional swelling pressure of remolded expansive clay [J]. Rock and Soil Mechanics ,**28**(8) : 1636~1642.
- Xu Y F ,Matsuoka H ,Sun D A. 2003. Swelling characteristics of fractal-textured bentonite and its mixtures [J]. Applied Clay Science ,**22**(4) : 197~209.
- Yang H P ,Zhang R ,Zheng J L. 2006. Variation of deformation and strength of expansive soil during cyclic wetting and drying under loading condition [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering ,**28**(11) : 1936~1941.
- Zhou B C ,Zhang Y J ,Feng D D ,et al. 2013. Suction characteristics of Jingmen unsaturated compacted expansive soil and its constitutive formula [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,**32**(2) : 385~392.
- Zhou B C ,Zhang Y J ,Tang Z S ,et al. 2014. One-dimensional swelling-compression characteristics of Jingmen weak expansive soil under different compactnesses [J]. Rock and Soil Mechanics ,**35**(5) : 1275~1283.
- Zhu H ,Wang L J ,Liu S H ,et al. 2011. Experimental study of the swelling force of Nanyang expansive soils [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology **9**(5) : 11~14.
- 丁振洲 ,郑颖人 ,李利晟. 2006. 膨胀力概念及其增湿规律试验研究 [J]. 工业建筑 ,**36**(3) : 67~70.
- 丁振洲 ,郑颖人 ,李利晟. 2007. 膨胀力变化规律试验研究 [J]. 岩土力学 ,**28**(7) : 1328~1332.
- 高大钊 ,孙钧. 2001. 岩土工程的回顾与前瞻 [M]. 北京: 人民交通出版社.
- 卢肇钧 ,吴肖茗 ,孙玉珍 ,等. 1997. 膨胀力在非饱和土强度理论中的作用 [J]. 岩土工程学报 ,**19**(5) : 20~27.
- 卢肇钧 ,张惠明 ,陈建华 ,等. 1992. 非饱和土的抗剪强度与膨胀压力 [J]. 岩土工程学报 ,**14**(3) : 1~8.
- 谈云志 ,胡新江 ,喻波 ,等. 2014. 压实红黏土的恒体积膨胀力与细观机制研究 [J]. 岩土力学 ,**35**(3) : 653~658.
- 唐大雄 ,孙隽文. 1999. 工程岩土学 [M]. 北京: 地质出版社.
- 谢云 ,陈正汉 ,孙树国 ,等. 2007. 重塑膨胀土的三向膨胀力试验研究 [J]. 岩土力学 ,**28**(8) : 1636~1642.
- 杨和平 ,张锐 ,郑健龙. 2006. 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 ,**28**(11) : 1936~1941.
- 周葆春 ,张彦钧 ,冯冬冬 ,等. 2013. 荆门非饱和压实膨胀土的吸力特征及其本构方程 [J]. 岩石力学与工程学报 ,**32**(2) : 385~392.
- 周葆春 ,张彦钧 ,汤致松 ,等. 2014. 不同压实度荆门弱膨胀土的一维膨胀-压缩特性 [J]. 岩土力学 ,**35**(5) : 1275~1283.
- 朱豪 ,王柳江 ,刘斯宏 ,等. 2011. 南阳膨胀土膨胀力特性试验 [J]. 南水北调与水利科技 **9**(5) : 11~14.