

含水率及干密度对高铁泥岩地基土无荷膨胀率的影响

李佳敏¹, 马丽娜^{1,2}, 张戎令^{2,3}, 王起才^{2,3}, 张唐瑜¹, 王斌文¹

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州交通大学 道桥工程灾害防治技术
国家地方联合工程实验室, 甘肃 兰州 730070; 3. 卡迪夫大学 工程学院, 英国 CF24 3AA)

摘要: 通过室内无荷膨胀试验, 研究初始含水率与初始干密度对高速铁路泥岩地基土无荷膨胀率的影响。研究表明: 无荷膨胀率随时间的变化规律可分为快速膨胀、减速膨胀和膨胀稳定3个阶段。在相同初始干密度情况下, 膨胀率随时间增长而逐渐增大, 并且试样初始含水率越低, 最终达到胀限含水率时的膨胀率越大。无荷膨胀率随初始含水率的增大而减小, 干密度越大, 无荷膨胀率减小的速率越快; 无荷膨胀率随初始干密度增大而增大, 在不同含水率条件下膨胀率增长速率有所不同。试样越干燥、干密度越大, 其膨胀潜能越大。对无荷膨胀率时程曲线和无荷膨胀率-初始含水率-初始干密度三者关系分别用半对数函数和二元线性函数进行拟合, 拟合结果良好, 可较好地预测泥岩地基实际变形情况。

关键词: 泥岩地基; 膨胀土; 无荷膨胀率; 含水率; 干密度

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)06-0230-05

Influence of water content and dry density on free swell ratio of high speed railway mudstone foundation soil

LI Jiamin¹, MA Lina^{1,2}, ZHANG Rongling^{2,3}, WANG Qicai^{2,3}, ZHANG Tangyu¹, WANG Binwen¹

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Road & Bridges and Underground Engineering of Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 3. School of Engineering, Cardiff University, CF24 3AA, UK)

Abstract: The effect of initial water content and initial dry density on the free swell ratio of high-speed railway mudstone was studied by the indoor free swell test. The results showed that the change rule of time-free curve of free swell ratio can be divided into three stages: rapid expansion, deceleration expansion and stable expansion. In the case of the same dry density, the swell ratio gradually increased with time, and the lower the initial water content of the sample was, the greater the swell ratio at which the water content of the expansion limit reached. The free swell ratio decreased with the increase of the initial water content. The larger the initial dry density, the faster the rate of free swell ratio decreased. The free swell ratio increased with the initial dry density, and the growth rate of free swell ratio was different at different moisture contents. The drier and denser the initial state of the sample was, the greater the expansion potential was. In addition, the relationship between the free swell ratio time-course curve and the free swell ratio-initial moisture content-initial dry density could be satisfyingly fitted by the semi-logarithmic function and the binary linear function, respectively; and could be better predicted the actual deformation of mudstone.

Key words: mudstone foundation; expansive soil; free swell ratio; water content; dry density

1 研究背景

膨胀土是一种富含蒙脱石、伊利石和高岭石等强

亲水性黏土矿物的特殊软岩, 在晴雨交替的情况下, 具有遇水体积迅速膨胀、失水体积显著收缩的特性^[1-3]。在频繁的干湿循环过程中, 其工程性质会有很大的改

收稿日期: 2019-05-25; 修回日期: 2019-08-06

基金项目: 青年人才托举工程项目(2015QNRC001); 飞天学者特聘计划项目; 博士后面项目(2016M602892); 长江学者和创新团队发展计划滚动支持项目(IRT_15R29); 甘肃省高校协同创新科技团队支持计划项目

作者简介: 李佳敏(1996-), 女, 江西南昌人, 硕士研究生, 主要从事岩土的研究。

通讯作者: 马丽娜(1985-), 女, 陕西渭南人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事岩土与隧道方面的教学与研究。

变,给工程带来诸多困扰^[4]。有关膨胀土膨胀变形及计算方法的研究,国内外学者已进行了大量研究工作。胡瑾等^[5]通过室内无荷膨胀与有荷膨胀试验,研究了膨胀土的膨胀速率和膨胀率变化规律。李志清等^[6]、张连杰等^[8]、曾娟娟等^[9]利用常规固结仪和三轴仪,研究膨胀土在上覆荷载作用下的胀缩变形以及含水率和干密度对膨胀土膨胀变形的影响,并建立了相应能反映其膨胀性质的预测模型。郑建龙等^[10]通过室内一维有荷膨胀试验,提出一种适用于公路膨胀土地基设计施工的变形预测控制方法,该方法同时考虑了路基变形、压实以及刚度补偿3个方面要求,计算模型具有一定说服力。为了控制地基变形,工程中大多采用采用换填或添加不同掺合料,如碎石、石灰、高炉水渣等^[11-13]化学措施来减小地基胀缩特性,但是对于弱膨胀土分布广泛的地区而言,大范围换填路基或掺其他材料显然是不经济的,因此工程中常直接利用现场弱膨胀土进行路基与地基的填筑^[12],因而掌握膨胀土的力学性质以及遇水后的胀缩规律,正确预估天然膨胀土地基变形规律,推算膨胀土路基的变形量及稳定时间,显得尤为重要,也是合理利用膨胀土路基的关键。特别是对于轨道变形要求极高的高速铁路泥岩地基而言,亟需提出一种适用于现场实际工程的膨胀变形预测模型。因此,本文依托兰新二线高速铁路,对弱膨胀土泥岩地基进行无荷膨胀率试验,探究膨胀量与含水率、干密度之间的关系,试图从膨胀能角度解释说明初始含水率与初始干密度对膨胀土地基无荷条件下变形规律,并拟合了无荷膨胀率时程变化方程以及无荷膨胀率-初始含水率-初始干密度之间的关系方程,为预测高速铁路泥岩地基膨胀量提供参考。

2 材料和方法

2.1 试验材料

本次试验所用膨胀土取自兰州-新疆高铁线路某试验段,土样为砖红-红褐色,可塑,泥质胶结,易崩解,粒径大小分布不均匀。X-射线衍射仪测得石英石、长石、方解石含量较大,蒙脱石含量平均为7.3%。根据铁路工程特殊岩土勘察规程^[14]判定该泥岩为弱膨胀土。室内试验测得该土样的其他物理指见表1。

表1 试验所用膨胀土土样的基本力学参数

自由膨 胀率/% (mmol·kg ⁻¹)	阳离子交换量/ 塑限 W _L /%	液限 W _p /%	密度/ 相对 密度 G _s
21	175	21.35	41.20
		2.43	2.74

2.2 试验方法

将烘干土样碾碎过2 mm孔径的筛,分别配制含水率为4%、6%、8%、10%、12%、14%、16%、18%、20%的土样,将配置好的土样放在试验盒中用湿毛巾盖住,放于保湿缸中静置一晚,使土样含水均匀。按照设计干密度1.4、1.6、1.8 g/cm³制备环刀试样($\varphi = 61.8$ mm, $h = 20$ mm),将制备好的试样放入膨胀仪中,盖上盖板,安装百分表,记录百分表初始读数,然后自上而下向仪器中注入蒸馏水,保持水面高出试样约5 mm,每2 h记录一次数据,同时记录读数时间,当两次读数的差值小于0.01 mm时视为膨胀稳定。试验结果如表2所示。

表2 不同初始含水率及干密度的膨胀率测试结果

初始含水率 ω_0 /%	初始干密度 ρ_{d0} / (g·cm ⁻³)		
	1.4	1.6	1.8
4	14.25	18.44	21.88
6	13.34	17.39	20.05
8	12.12	13.06	19.49
10	11.06	11.22	18.26
12	9.73	11.60	17.26
14	8.65	10.21	15.43
16	8.06	9.52	14.08
18	7.35	8.72	9.55
20	6.25	7.97	8.62

3 试验结果与分析

3.1 膨胀变形时程规律

由于篇幅有限,试验描述以初始干密度为1.6 g/cm³、不同初始含水率下的试样为例,其膨胀时程曲线如图1。由图1可知,(1)无荷膨胀时程曲线呈外凸型,随着时间的增长,无荷膨胀率逐渐增大,并且初始含水率越小,最终达到膨胀稳定时试样的无荷膨胀率越大。这是因为试样吸水后,水分会与其内部的黏土矿物发生复杂的物理化学反应,释放膨胀能,使试样发生胀缩变形。但是初始含水率大的土样,在焖土过程中土体颗粒与水充分接触,提前释放了一部分膨胀能,使得试样内所储存的膨胀能降低;同时试验发现,在初始干密度相同的情况下,初始含水率越大,试验过程中试样所吸收的水分 $\Delta\omega$ (即胀限含水率与初始含水率的差值)就越少,说明试样达到胀限含水率时释放的膨胀能也就越少,因此,相

比于初始含水率低的试样,含水率高的试样在吸水膨胀过程中产生的膨胀能较小,因而试验测得的膨胀率也较小。(2)无荷膨胀率随时间变化曲线大致可以分为3个阶段:第1阶段,前100 min内为快速膨胀阶段,在短时间内无荷膨胀率迅速增大,近似于线性增长。这是因为在电场力作用下,双电层中被吸附的水分子会规矩的排列并吸附在黏土颗粒表面,形成表面水膜,随着含水率的增大,水膜变厚,快速填充并增大土颗粒之间的间隙^[5-6];同时由于试验开始时试样含水率较低,土体内吸力较大,颗粒之间结合较为紧密,当试样吸水导致含水率增大时,土体内吸力逐渐减小,相当于给土颗粒施加拉力,引起土颗粒间的弹性效应^[8],使试样体积迅速增大,膨胀率增大。第2阶段,100~1440 min为减速膨胀阶段,此时膨胀率随时间缓慢增长,因为试样含水率增大后,吸力逐渐减小,因此这一阶段水分吸收速度较上一阶段缓慢,但是颗粒或聚集体间仍有水分进入,因此试样仍发生膨胀变形,但变形速率相对缓慢。此阶段试验过程耗时最长,所产生的膨胀量小于第1阶段;第3阶段,大约在24 h(1440 min)以后试样到达膨胀稳定阶段,无荷膨胀率曲线趋于水平,试样几乎均已达到胀限含水率,土颗粒以及聚集体间已经不能再吸收多余水分,土中吸力接近于0,膨胀量基本不再增加,膨胀达到稳定状态,膨胀率基本不发生变化。

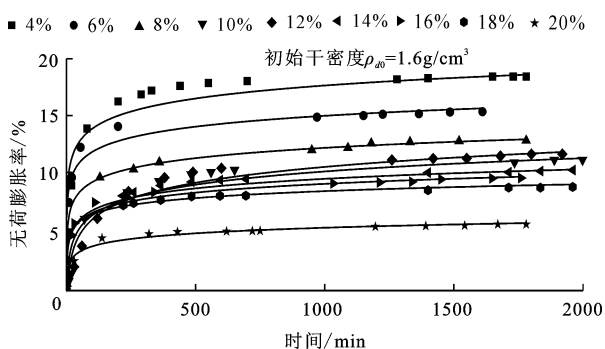


图1 不同初始含水率土样无荷膨胀率时程曲线

图1中曲线大致以对数形式增长,随时间增长膨胀率逐渐增大最终趋于稳定状态,因此参考已与研究^[5],采用半对数函数对其进行拟合,方程表达式为:

$$\delta = a \ln t + b \quad (1)$$

式中: δ 为无荷膨胀率; t 为时间,min; a 、 b 为常数($a > 0$, $b > 0$),与试样初始含水率与初始干密度有关。

拟合结果见图1,除含水率为4%时拟合程度稍有偏差,其余含水率情况拟合程度良好,所以无荷膨胀率与时间关系可通过公式(1)较好地拟合。不同

初始含水率情况下拟合参数 a 、 b 的值如表3所示。因为 a 、 b 的值与初始含水率和初始干密度有关,因此,为了得到它们之间的定量关系(初始干密度相同前提下),以初始含水率为横坐标,参数 a 、 b 的值为纵坐标,绘制散点图并进行拟合,结果如图2所示。需要注意的是,由于 $b > 0$,故在拟合前应剔除初始含水率为10%、12%时所对应 a 、 b 值的点。

表3 土样膨胀率时程拟合曲线参数 a 、 b 值

含水率/%	a	b
4	1.65	6.25
6	1.38	5.45
8	1.31	3.12
10	1.68	-1.52
12	2.01	-3.92
14	1.28	0.65
16	1.20	0.84
18	0.85	2.30
20	0.71	0.26

从图2拟合结果可知,参数 a 、 b 的值与初始含水率呈较好的线性关系。因而参数 a 、 b 可以用与初始含水率相关的函数定量表达,其关系为:

$$a = -0.0482\omega_0 + 1.778 \quad (2)$$

$$b = -0.332\omega_0 + 6.847 \quad (3)$$

将公式(2)、(3)代入公式(1)中整理可得:

$$\delta = (-0.0482\omega_0 + 1.778) \ln t + (-0.332\omega_0 + 6.847) \quad (4)$$

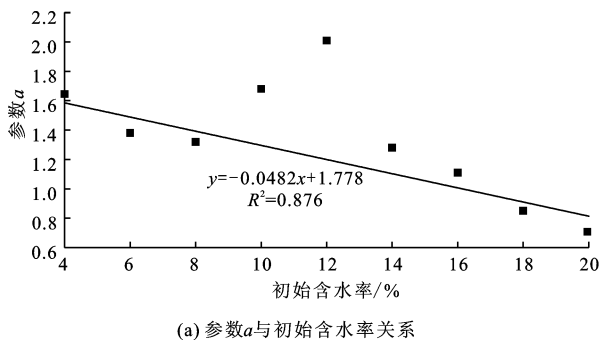
公式(4)中只有时间 t 和初始含水率 ω_0 两个参数,并且都是容易求得的参量,因此在试验过程中,当初始干密度一定的情况下,根据公式(4)可以较为方便地预测膨胀土体无荷膨胀变形,从而为现场泥岩地基土无荷膨胀量的预测提供一定参考。

3.2 无荷膨胀率与初始含水率、初始干密度的关系

根据已有研究可知,黏土矿物的化学成分、阳离子种类、可塑性以及含水率和干密度等都会对膨胀土的膨胀产生不同程度影响。但是黏土矿物的化学成分及阳离子种类等都需借助专业仪器进行测定,在工程应用中具有局限性。而含水率和干密度指标比较容易获得,因此以下将重点讨论初始含水率、初始干密度对黏土膨胀性的影响。

图3为不同初始含水率与不同初始干密度条件下无荷膨胀率变化情况。由图3(a)可知,在初始干密度相同时,无荷膨胀率随初始含水率的增大而逐渐减小,并且初始干密度越大,则无荷膨胀率减小的

速率越快。在初始含水率相同的情况下,初始干密度越大,则无荷膨胀率越大,这是因为试样干密度越大,同体积试样所含土体颗粒越多,试样吸水过程中颗粒表面水膜增厚,使试样总体积明显增大。并且干密度越大,试样中黏土矿物含量越多,水稳定性差、亲水性强的黏土矿物如蒙脱石等含量越多,因蒙脱石晶格间以弱键结合,弱键使晶格间具有较大的活动空间,水分子容易进入晶格,所以试样容易膨胀。因此试样干密度越大,土体的膨胀潜能就越大,与水反应释放的膨胀能也越大,产生的膨胀量越大,所以无荷膨胀率也就越大。



由图 3(b)可知,无荷膨胀率随初始干密度增大而增大。初始含水率较大时($\geq 18\%$),随初始含水率的增大,无荷膨胀率增长速率逐渐降低,初始含水率越大,直线越平缓;当初始含水率较小时($< 18\%$),含水率对无荷膨胀速率的影响并不明显。由 3.1 与本节分析可知,初始干密度越大、初始含水率越低的试样越容易发生膨胀,因为单位体积内所含土样质量越大,土样内所储存的膨胀潜势就越大,当初始含水率较大时,土样与水反应会提前释放一部分膨胀能,残余膨胀能会减小,所以土样越干燥干密度越大,其膨胀潜势就越大,无荷膨胀率越大。

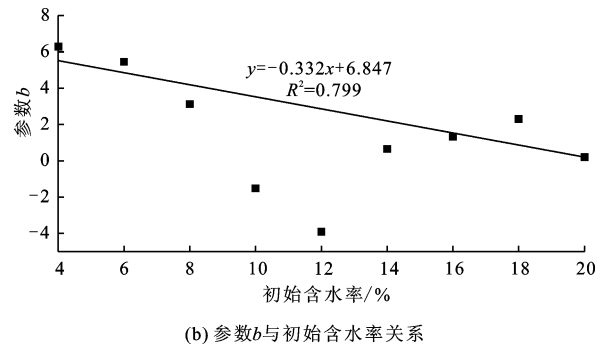
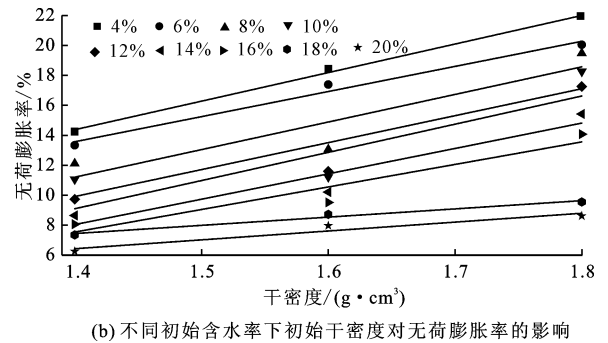
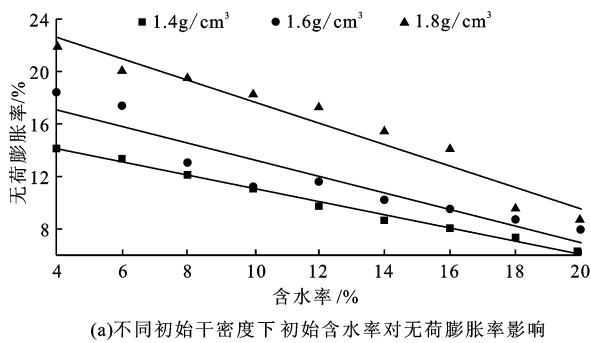


图 2 拟合曲线参数 a、b 与含水率变化关系



(a)不同初始干密度下初始含水率对无荷膨胀率影响

(b)不同初始含水率下初始干密度对无荷膨胀率的影响

图 3 含水率与干密度对无荷膨胀率的影响关系

根据图 3 可知,无荷膨胀率与初始含水率和初始干密度均呈较好的线性关系,因此可建立三者之间的函数关系,参考已有研究成果^[15-17],选择采用公式(5)对本次重塑膨胀土无荷膨胀试验数据进行拟合。

$$\delta = a\omega_0 + b\rho_{d0} + c \quad (5)$$

式中: δ 为无荷膨胀率, $\%$; ω_0 为初始含水率, $\%$; ρ_{d0} 为初始干密度, 1.6 g/cm^3 ; a, b, c 为常数。

拟合结果如下:

$$\delta = -0.652\omega_0 + 14.95\rho_{d0} - 3.369 \quad (6)$$

将拟合结果与试验数据点对比分析可知(图 4), $R^2 = 0.919$,说明拟合程度较好,该公式可以较为准确地反映含水率与干密度对地基膨胀率的影响。但是由于工程现场对膨胀土膨胀率的影响因素

不仅限于含水率与干密度,还包括黏土矿物的含量、上覆荷载、土质以及试验条件等因素,因此有必要对模型的适用性进一步完善。

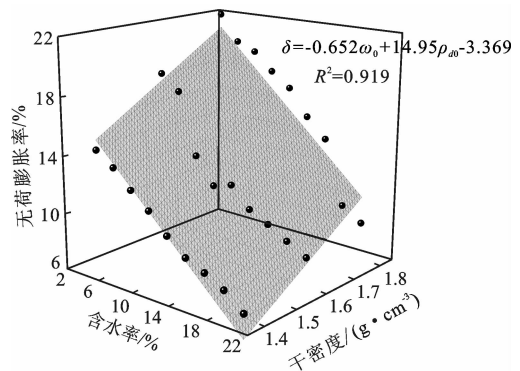


图 4 土样无荷膨胀率与含水率、干密度的拟合关系及其与试验数据对比

4 结 论

(1) 试验土样无荷膨胀时程曲线呈对数外凸型趋势,并且初始含水率越低,最终稳定时无荷膨胀率越大;

(2) 试验土样无荷膨胀时程曲线变化规律可分快速膨胀、减速膨胀、膨胀稳定这3个阶段;

(3) 试验土样无荷膨胀率随初始含水率的增大而减小,随初始干密度的增大而增大。

(4) 具有高初始干密度、低初始含水率的试样要比低初始干密度、高初始含水率的试样的膨胀潜能大,即试样越干燥、干密度越大,其所储存的膨胀能就越大。

参考文献:

- [1] 高游,孙德安,吕海波. 弱膨胀土浸水变形特性及其预测[J]. 岩土力学,2015,36(3):755-761.
- [2] 黄华县,张春顺. 膨胀土膨胀变形时程特性研究[J]. 湖南工业大学学报,2009,23(4):6-10.
- [3] 李进前,王起才,张戎令,等. 膨胀土增湿过程中膨胀规律的试验研究[J]. 水利水运工程学报,2018(3):86-94.
- [4] 谭罗荣,孔令伟. 膨胀土膨胀特性的变化规律研究[J]. 岩土力学,2004,25(10):1555-1559.
- [5] 胡瑾,王保田,张文慧,等. 无荷和有荷条件下膨胀土变形规律研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(S1):342-345.
- [6] 李志清,余文龙,付乐,等. 膨胀土胀缩变形规律与灾害

- 机制研究[J]. 岩土力学,2010,31(S2):270-275.
- [7] 丁振洲,郑颖人,李利晟. 膨胀力变化规律试验研究[J]. 岩土力学,2007,28(7):1328-1332.
- [8] 张连杰,武雄,张耀国,等. 无荷条件下原状膨胀土膨胀特性分析[J]. 水文地质工程地质,2015,42(4):96-100.
- [9] 曾娟娟,文畅平,白银涌,等. 初始干密度、含水率对无荷膨胀率影响试验[J]. 筑路机械与施工机械化,2017,34(2):80-84.
- [10] 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.
- [11] 董柏林,黄华慧,裴沛雯,等. 碎石改良膨胀土膨胀特性实验研究[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(5):1213-1217.
- [12] 周葆春,孔令伟,郭爱国. 荆门弱膨胀土的胀缩与渗透特性试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(S2):424-429+436.
- [13] 孙树林,唐俊,郑青海,等. 掺高炉水渣膨胀土的室内改良试验研究[J]. 岩土力学,2012,33(7):1940-1944.
- [14] 中华人民共和国铁道部. 铁路工程特殊岩土勘察规程:TB-10038-2001[S]. 北京:中国铁道出版社,2012.
- [15] 缪林昌. 非饱和膨胀土变形特性研究[D]. 南京:河海大学,1999.
- [16] 袁俊平. 非饱和膨胀土的裂隙概化模型与边坡稳定性研究[D]. 南京:河海大学,2003.
- [17] 徐永福. 非饱和膨胀土的结构模型和力学性质的研究[D]. 南京:河海大学,1997.
- [18] 饶锡保,黄斌,吴云刚,等. 膨胀土击实样膨胀特性试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2011,44(2):211-215.

喜 讯

《水资源与水工程学报》被中国科学引文数据库(Chinese Science Citation Database,简称CSCD)收录为2019-2020年度来源期刊(核心库);2008-2020年连续13年被中国科学技术信息研究所评为中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)。