

文章编号: 1674—8247(2018)02—0043—06

贵州某区域全风化膨胀岩膨胀特性试验研究

李林 吴光 王金淑 饶鸿 连奇

(西南交通大学, 成都 610031)

摘要:本文选取初始含水率、干密度、初始加压荷载值三个主要因素,分析研究区岩土体膨胀率、膨胀力在以上三个因素作用下的变化规律,建立膨胀力与初始含水率、干密度、初始加压荷载间的关系。研究的结论:(1)干密度越大,试样达到膨胀稳定阶段需要的时间越长。无论在任何含水率状态下,试样的变形量随干密度的增大而显著增大;(2)初始含水率对无荷载状态的一维膨胀速率的影响较干密度大,干密度对无荷载膨胀率大小的影响较含水率大;(3)土体平衡膨胀力与干密度之间满足指数关系,膨胀应变与竖向应力呈logistic函数关系。

关键词:膨胀率;膨胀力;指数关系;膨胀应变

中图分类号:TU443 **文献标志码:**A

Experimental Study on Expansion Characteristics of Fully Weathered Expansive Rock in an Area of Guizhou of High Speed Railway

LI Lin WU Guang WANG Jinshu RAO Hong LIAN Qi

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In this paper, main factors, such as initial moisture content, dry density and pressure load value are selected to analyze the change law of rock and soil swelling rate and expansion force under the above three factors. The relationships between expansion force and initial moisture content, dry density, and pressurized loads are made. The main research results are as follows: (1) the bigger the dry density, the longer the sample needs to reach the expansion stabilization phase. The deformation of the specimen increases significantly with the increase of the dry density in any water content state. (2) The initial moisture content has a greater influence on one-dimensional expansion rate of the no-load state than dry density. While, the effect of dry density on the size of no-load expansion rate is greater than that of moisture content. (3) The relationship of equilibrium expansion force of soils and dry density satisfies the exponential relationship, and the relationship between the expansion strain and the vertical stress is logistic functional relationship.

Key words: expansion rate; swelling force; exponential relationship; expansion strain

膨胀土是一种特殊土,具有吸水膨胀,失水收缩的工程特性,具有超固结性,崩解性,超裂隙性以及强度衰减性等不良特性。以某高速铁路桥为例,膨胀土地区的桥墩在雨季抬升,旱季下沉,该异常升降现象影响了铁路的运营安全。因此开展对膨胀土的研究对铁路

工程具有重要意义。

曾志雄等人^[1]以吉林延吉膨胀岩为对象,研究了浸水-循环加载条件下压实膨胀岩的变形特征,得到了循环加载过程对不同初始含水率试样的力学性质有强化和同化作用的结论;2014年,周葆春等人^[2]对荆

收稿日期:2017-09-25

作者简介:李林(1992-),男,在读硕士研究生。

引文格式:李林,吴光,王金淑,等. 贵州某区域全风化膨胀岩膨胀特性试验研究[J]. 高速铁路技术,2018,9(2):43-48.

LI Lin, WU Guang, WANG Jinshu, et al. Experimental Study on Expansion Characteristics of Fully Weathered Expansive Rock in an Area of Guizhou of High Speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(2): 43-48.

门弱膨胀土,在进行不同压实度状态下取6组试样,采用高压固结仪,做有侧限的无荷载膨胀率试验,及一次卸载再加载的循环压缩试验,获得了膨胀力与试样压实度、土体结构、孔隙比的相关关系;2016年,左清军等人^[3]对沪昆客运线姚家隧道附近的泥质板岩进行一维膨胀应变与膨胀方向荷载试验,得到轴向应力与轴向膨胀率之间的关系呈负对数关系,修正膨胀应力与荷载、膨胀应变的一维本构模型;刘月妙等人^[4]通过对内蒙古高庙子地区膨胀土进行压实、膨胀特性试验研究,得出膨润土中蒙脱石含量对土体的压实密度、压实压力及膨胀特性具有明显决定性作用,并且膨胀土的膨胀力与变形呈负相关关系,上部约束荷载可明显使得膨胀变形量变小,此为影响膨胀的外部因素;李生林等人^[5]提出引用A. Casagrande于1948年所做的塑性图判别膨胀土,简单、易行,研究证明结果可靠,鉴于泥质膨胀岩质软易碎,实验室通常将全风化膨胀岩按照土力学试验来做,因此,塑性图在膨胀岩的判别中同样适用;薛彦瑾等人^[6]通过不同厚度、不同含水率下的膨胀量实验,得到了膨胀土在不同厚度和不同含水率下的膨胀量;刘静德等人^[7]通过对膨胀岩的重塑样进行试验,得到了膨胀率与干密度含水率的定量关系;张爱军等人^[8]以重塑膨胀土为对象,研究了不同初始含水率,干密度以及上覆压力对膨胀变形的影响规律;魏星等人^[9]对干湿循环作用下的击实重塑样的膨胀变形规律进行了研究;陈伟志^[10]、杨果林^[11]、李献民等人^[12]得到了起始含水率和起始干密度对膨胀土的膨胀变形较大;高速铁路无砟轨道膨胀变形的允许值为4 mm^[13-14];高建敏^[15]提出当高速铁路穿越膨胀土地区时,会因为土体道的膨胀,导致轨道的不平顺,影响行车安全和舒适性;高立^[16]提出了一些膨胀土地区路堑边坡的加固方法。

前面的学者主要研究的是膨胀土膨胀引起的桥位抬升,很少有学者研究由膨胀土作用下吸水抬升,失水沉降的地质现象,本文主要研究贵州区域膨胀土物理力学特性。

1 物理力学试验研究

1.1 液、塑限试验

采取研究区表层揭露的岩土体,采用联合液塑限仪和传统滚搓法、圆锥仪法测量土体的液限和塑限。引用Casagrande A.于1948年提出,并于上世纪60~70年代被广泛采纳的塑性图,对地表全风化膨胀岩进行初步分类。塑性图由液限和塑性指数两个参数分别作为横、纵坐标,图区域被A线(方程 $I_p = 0.63(W_L - 20)$

的直线表示)和B线($W_L = 40$)分割为4个区域只有A线以上,B线以右的区域属于膨胀土区,其余区域不属于膨胀土,如图1所示。

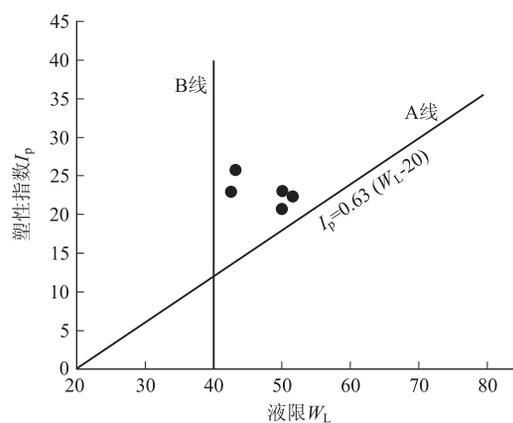


图1 液限—塑限图

由图1可知,用联合测定仪测得的液限43%左右(左则两个点),滚搓法和圆锥仪法测得的塑限、液限分别为30%和50%左右(右侧3个点)。无论何种测试方法,全风化膨胀岩的五组液限、塑性指数数据均落在塑性土中A线以上,B线以右的区域,该区域为膨胀土区,说明所研究的土样为高塑性、无机粘土,属于膨胀土范畴。

1.2 岩土密度试验

室内测量土体的密度和比重瓶法测量试样的土粒比重,以及膨胀岩的干密度试验。试验结果如表1、表2所示。

表1 桥墩岩土体基本物理性质指标

含水率 w / %	干密度 ρ_d / (g/cm ³)	比重 G_s	塑限 / %	液限 / %
24.8	1.497	2.695	30.5	50.8

表2 原状膨胀岩的干密度试验结果汇总表

编号	试样质量 m / g	含水率 w / %	密度 ρ / (g/cm ³)	干密度 ρ_d / (g/cm ³)
1	131.88	4.0	2.198	2.11
2	133.50	4.2	2.225	2.14
3	132.29	3.9	2.205	2.12

结果得出,原状膨胀岩(结构完整)的初始含水率平均值为4.0%,密度均值为2.21 g/cm³,经过换算得出干密度为2.12 g/cm³。

1.3 颗粒分析试验

本文中颗粒分析采用筛分法和密度计法相结合,获得试验用土体中的各个粒组的质量百分含量。试验结果如图2、图3所示。

由图2筛分试验曲线获得两个描述土的级配指标:

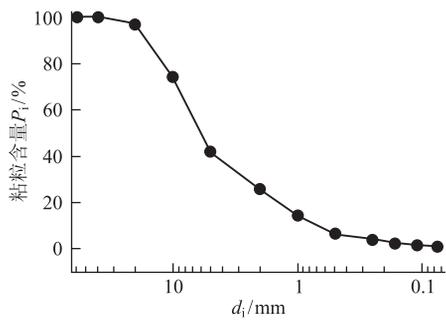


图2 筛分试验曲线

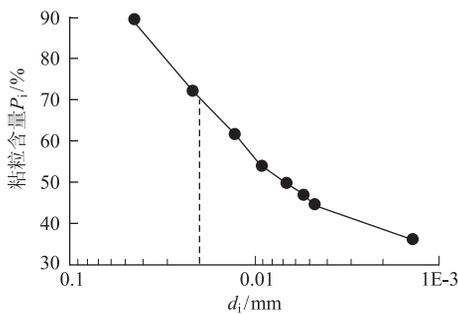


图3 粘粒含量测试曲线

(1) 不均匀系数

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{7.5}{0.7} = 10.7$$

(2) 曲率系数

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60}d_{10}} = \frac{2.6^2}{7.5 \times 0.7} = 1.3$$

$C_u \geq 5, C_c = 1 \sim 3$, 反应了不同粒组的分布较为分散, 说明该土的级配良好为不均匀土。

由图3粘粒级百分含量的分析可看出, 测试小于0.02 mm的粘粒含量 P_i 达到70%, 小于0.005 mm粘粒含量所占的比重较大(47%), 其次是0.05 ~ 0.005 mm粉粒所占比例(42%), 而大于0.05 mm砂粒则相对较少(<10.4%)。

1.4 击实试验

于野外取得的岩土体的颗粒直径分布, 采用土工实验室重型击实装置, 分三层击实, 每层1.5 kg左右的土体, 锤击次数依据规范设定为94次, 锤距457 mm, 得到不同含水率下对应的干密度曲线, 如图4所示。

由图4可以看出, 随着试样含水率由小到大的变化, 干密度呈先增大后减小的规律变化, 与常规土体的击实试验结果相符合, 在含水率为16.6%时, 干密度最大为1.91 g/cm³。相较于原状岩石的干密度2.12 g/cm³来说, 相差甚远, 说明岩石的成岩过程是不可复制的。

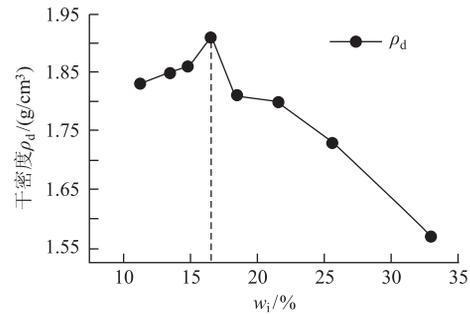


图4 击实试验曲线

1.5 自由膨胀率试验

自由膨胀率是指松散干燥的试样(粒径 < 0.5 mm)溶于纯水中稳定后的体积增量与原体积的比值。主要反映了粘土在无外界结构力影响下的膨胀潜势, 用于初步评定粘土的膨胀性, 是粘性土膨胀性的指标之一。试验结果如表3所示, 采用5组平行试验取平均值, 获得研究区全风化膨胀岩的自由膨胀率为82%。

表3 自由膨胀率试验结果

项目	试样1	试样2	试样3	试样4	试样5	平均值
自由膨胀率/%	84	79	80	82	85	82

依据 GBJ 112 - 87《膨胀土地区建筑技术规范》, 土体自由膨胀率划分标准: 介于40% ~ 65%, 属于弱膨胀土; 65% ~ 90%, 属于中等膨胀土; 大于90%, 为强膨胀土。则研究区全风化膨胀岩属于中等 ~ 强膨胀土。

1.6 无荷载膨胀率试验

针对某高速铁路桥墩地表的岩土体, 全风化岩层质软, 多呈土状, 因此, 依据土工试验相关操作步骤进行, 试样的尺寸为直径61.8 mm、高20 mm的标准试样。在固结仪上进行试验, 经过40个不同干密度、初始含水率的试样的无荷膨胀率试验, 结果如图5所示。

如图5(a), 当不限制干密度时, 所有试样的无荷载膨胀率随含水率的增大, 整体呈现线性减小趋势, 散点均匀分布于趋势线两侧, 无荷载膨胀率的大小在上下两条虚线所限制的范围内浮动, 该区域的膨胀率浮动主要由干密度决定。

如图5(b), 当不限定含水率时, 试样的无荷载膨胀率随干密度的增大, 整体呈现增大趋势, 然而当干密度大于1.6 g/cm³时, 试样的无荷载膨胀率集中位于趋势线以上的矩形区域内; 当干密度在1.35 ~ 1.6 g/cm³之间时, 散点较集中位于趋势线以下矩形区域内, 这说明干密度对试样的一维侧限无荷载膨胀率的影响为非线性的。

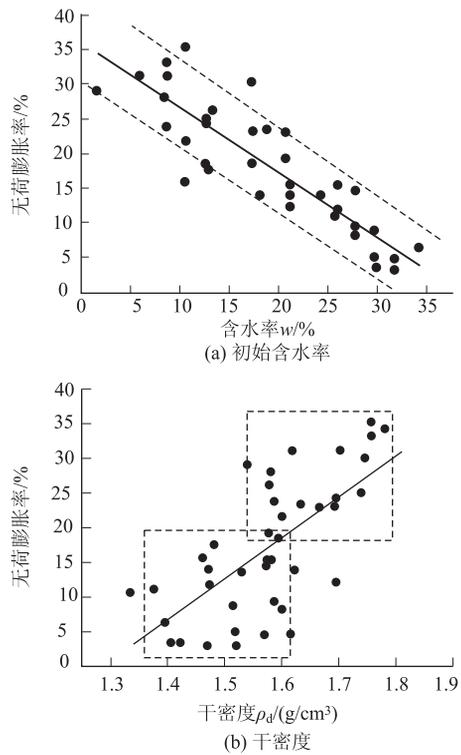


图5 干密度、含水率与无荷载膨胀率关系散点图

当含水率确定,不同干密度条件下试样的膨胀变形量随时间的变化过程如图6所示,横坐标为时间的对数,纵坐标为从遇水开始的膨胀变形量。

由图6可知,当试样的干密度较大时,无荷载膨胀率随时间的对数变化呈反“S”形曲线关系,土体的膨

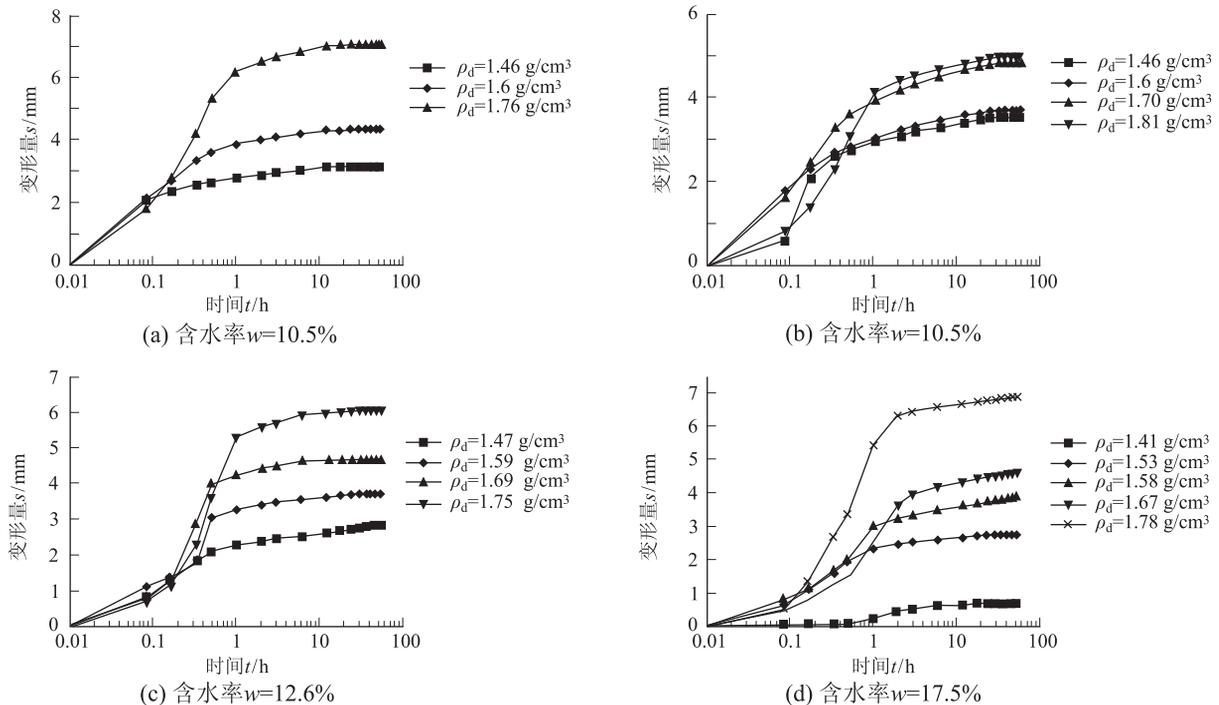


图6 同含水率、不同干密度的一维变形-时间曲线

胀变形可明显划分为初始缓慢膨胀、加速膨胀和后期稳定膨胀3个阶段;当干密度较小时,初始阶段跟加速阶段会合二为一。同时,干密度越大,试样达到膨胀稳定阶段需要的时间越长。无论在任何含水率状态下,试样的变形量随干密度的增大而显著增大。

由图7可知,当干密度一定时,土试样的无荷载膨胀率随初始含水率的增大而减小。

对比图6和图7发现,含水率越小,试样初始膨胀阶段的膨胀速率越大,而在含水率确定,干密度变化时这种现象不明显,说明初始含水率对无荷载状态的一维膨胀速率影响较干密度大。

1.7 膨胀力试验

1.7.1 平衡膨胀力试验

试验时,配制含水率分别为5%、13%和19%的重塑全风化膨胀岩,设计不同的干密度压实试样,经过26组试验成功的试样,获得三个分别在同一含水率下的平衡膨胀力随干密度的变化散点图,三组含水率已知的膨胀力-干密度关系满足指数关系,如公式:

$$\sigma_s = A_1 \exp\left(-\frac{\rho_d}{t_1}\right) + y_0 \quad (1)$$

式中:σ_s——膨胀力;

A₁、t₁、y₀——拟合参数,与试样干密度、含水率有关。三者的指数拟合度均较高(>0.97),说明在土样的含水率相同时,膨胀力与土样干密度呈指数关系。

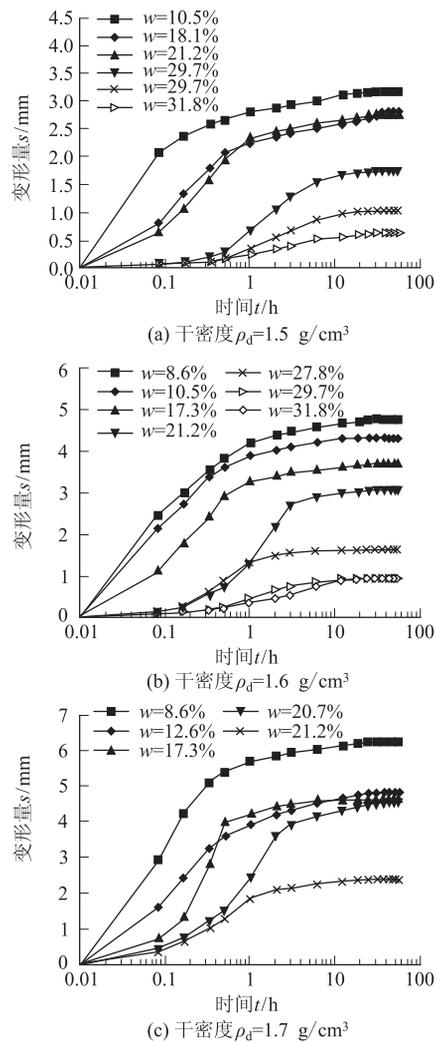


图7 不同含水率的一维变形-时间曲线

综合三组不同含水率状态下的膨胀力-干密度拟合关系,将拟合曲线在同一个坐标中表示,如图8所示。

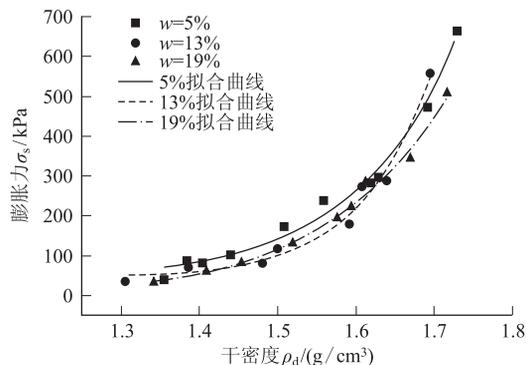


图8 不同含水率试样膨胀力-干密度关系图

由图8可知,含水率为5%的拟合曲线在19%的曲线之上,两者的变化趋势近于相同,含水率13%的试样变化趋势处于5%和19%之间,整体上呈现出初

始含水率越小,平衡膨胀力相对较大的趋势,三者的拟合曲线较为集中,说明初始含水率对试样的平衡膨胀率造成的影响较干密度的影响小。

1.7.2 膨胀应变试验

对选取含水率分别为5%和19%,干密度为1.6 g/cm³的标准试样做在不同竖向荷载σ₀作用下的变形量试验,通过施加不同质量的砝码实现不同竖向应力作用于试样上面,百分表测试试样克服初始竖向荷载产生变形的膨胀应变。

经过试验结果如图9所示,无论何种干密度、含水率状况下,考虑拟合度,试样的膨胀应变与竖向应力呈logistic函数关系,如公式:

$$S = \frac{A_1 - A_2}{1 + (\sigma_0/X_0)^p} + A_2 \quad (2)$$

式中:S——膨胀应变(mm);

σ₀——竖向应力(kPa);

p、A₁、A₂——拟合参数,与土体性质有关。

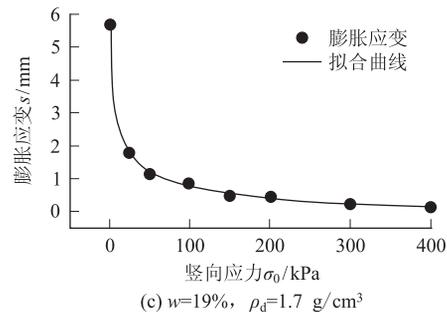
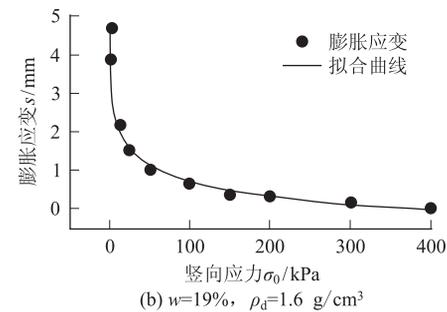
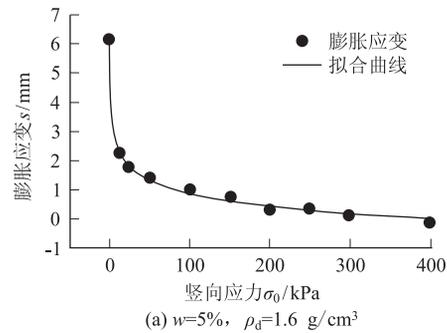


图9 膨胀应变-竖向应力关系散点图

试验结果经过对比,如图10所示,比较含水率、干

密度对膨胀应变的影响,可以看出,当竖向应力较小时(<12.5 kPa),初始含水率、干密度对膨胀应变的影响不显著,说明轴向荷载对膨胀应变起决定作用,而当竖向荷载为0时,即为无荷载膨胀率试验。

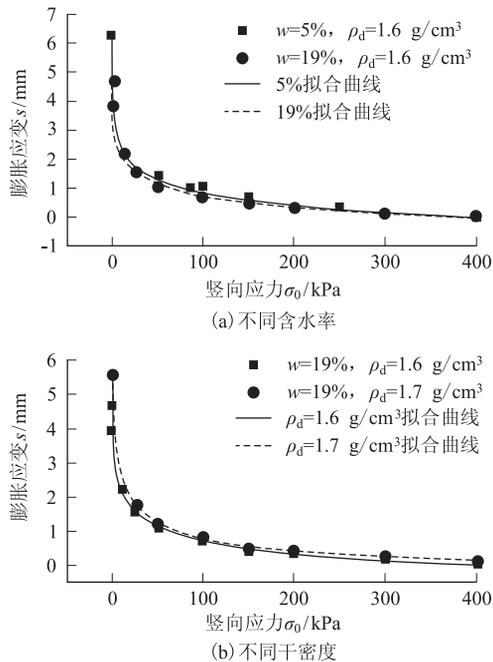


图10 膨胀应变-竖向应力对比分析图

2 结论

(1)由基本物理性质试验得出,试样的液塑限均较一般性粘土大,在塑性图中位于A线(方程 $I_p = 0.63(W_L - 20)$ 的直线表示)以上,B线($W_L = 40$)以右,所以贵州区域该工点全风化膨胀岩膨胀土范畴。

(2)无荷载膨胀率试验结果表明,干密度对试样的一维侧限无荷载膨胀率的影响呈非线性。当试样的干密度较大时,土体的膨胀变形可明显划分为初始缓慢膨胀、加速膨胀和后期稳定膨胀3个阶段;当干密度较小时,初始阶段跟加速阶段会合二为一。同时,干密度越大,试样达到膨胀稳定阶段需要的时间越长。无论在何含水率状态下,试样的变形量随干密度的增大而显著增大。初始含水率对无荷载状态的一维膨胀速率的影响较干密度大。

(3)含水率一定的平衡膨胀力-干密度关系满足指数关系: $\sigma_s = A_1 \exp\left(-\frac{\rho_d}{t_1}\right) + y_0$, A_1, t_1, y_0 代表拟合参数,为常数,与试样干密度、含水率有关。初始含水率对试样的平衡膨胀率造成的影响较干密度的影响小。

参考文献:

- [1] 曾志雄,孔令伟,凌贤长,等. 浸水-循环加卸载条件下压实膨胀岩的变形特征[J]. 工程地质学报,2016,24(6):1182-1190. ZENG Zhixiong, KONG Lingwei, LING Xianchang, et al. The Deformation Characteristics of Expansive Rock of the Compaction Water Immersion Cyclic Loading and Unloading Conditions. [J]. Journal of Engineering Geology,2016,24(6):1182-1190.
- [2] 周葆春,张彦钧,汤致松,等. 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,2014,35(5):1275-1283. ZHOU Baochun, ZHANG Yanjun, TANG Zhisong. Different Degrees of Compaction Weak One-dimensional Swelling Compression Characteristics of [J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(5):1275-1283.
- [3] 左清军,陈可,谈云志,等. 基于时间效应的富水泥质板岩隧道围岩膨胀本构模型研究[J]. 岩土力学,2016,37(5):1357-1364. ZUO Qingjun, CHEN Ke, TAN Yunzhi, et al. Study on Constitutive Model of Rich Argillaceous Slate Tunnel Expansion Based on Time Effect [J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(5):1357-1364.
- [4] 刘月妙,徐国庆,刘淑芬,等. 我国高放废物处置库缓冲/回填材料压实膨胀特性研究[J]. 铀矿地质,2001,17(1):44-47. LIU Yuemiao, XU Guoqing, LIU Shufen, et al. Study on Compacted Expansion Characteristics of Buffer / Backfill Materials in China's High-level Radioactive Waste Repository [J]. Uranium Geology,2001,17(1):44-47.
- [5] 李生林,王正宏. 我国细粒土在塑性图上的分布特征[J]. 岩土工程学报,1985(3):84-89. LI Shenglin, WANG Zhenghong. Distribution Characteristics of Fine Grained Soil in China [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1985(3):84-89.
- [6] 薛彦瑾,王起才,张戎令,等. 高速铁路路基膨胀土膨胀变形试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2017,14(4):690-696. XUE Yanjin, WANG Qicai, ZHANG Rongling, et al. Experimental Study of High Speed Railway Foundation Swelling Deformation [J]. Railway Science and Engineering,2017,14(4):690-696.
- [7] 刘静德,李青云,龚壁卫. 南水北调中线膨胀岩膨胀特性研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(5):826-830. LIU Jingde, LI Qingyun, GONG Biwei. Swelling Properties of Expansive Rock in Middle Route Project of South-to-North Water Diversion[J]. Journal of Geotechnical Engineering,2011,33(5):826-830.
- [8] 张爱军,哈岸英,骆亚生. 压实膨胀土的膨胀变形规律与计算模式[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(7):1236-1241. ZHANG Aijun, HA Anying, LUO Yasheng. Expansive Deformation Law and Calculation Model of Compacted Expansive Soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(7):1236-1241.
- [9] 魏星,王刚. 干湿循环作用下击实膨胀土胀缩变形模拟[J]. 岩土工程学报,2014,36(8):1423-1431. WEI Xing, WANG Gang. Simulation of Swelling and Shrinkage Deformation of Compacted Expansive Soil under Cyclic Wetting and Drying [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2014,36(8):1423-1431.

(下转第83页)

波、台州方向及宣城方向至金华方向动车通过作业;同时办理上海方向至宁波、金华方向普速客车通过作业。

杭州西站:主要办理杭黄、杭义温、沪乍杭及湖杭铁路动车始发终到及通过作业,部分沪杭客专动车始发终到及通过作业。

杭州南站:主要办理枢纽各方向普速客车始发终到作业,杭甬、杭长、杭黄铁路动车通过作业。

江东站:主要办理城际及市域客车作业。

参考文献:

- [1] 汪霞. 杭长客运专线引入杭州枢纽施工过渡方案研究[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(7): 24-29.
WANG Xia. Study on Construction Transition Plan for Hangzhou-Changsha Railway Passenger Dedicated Line Entering Hangzhou Railway Terminal [J]. Railway Standard Design, 2014, 58(7): 24-29.
- [2] 秦超. 杭州铁路枢纽总图规划之深化研究[J]. 交通科技, 2012, 48(2): 123-125.
QIN Chao. Intensive Study of General Planning of Hangzhou Railway Hub [J]. Transportation Science & Technology, 2012, 48(2): 123-125.
- [3] 彭文盛, 彭辉. 高速铁路引入既有枢纽客运站布局[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(2): 62-65.

- PENG Wensheng, PENG Hui. Passenger Station Layout of High-speed Railway Existing Terminal [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(2): 62-65.
- [4] 王浩. 北京铁路枢纽主要客运站分工研究[J]. 铁道标准设计, 2012, 56(3): 20-23.
WANG Hao. Study on Dividing the Work for Main Passenger Stations in Beijing Railway Terminal [J]. Railway Standard Design, 2012, 56(3): 20-23.
- [5] 叶海昌. 京沈客运专线引入沈阳铁路枢纽方案研究[J]. 高速铁路技术, 2015, 6(1): 19-26.
YE Haichang. Schematic Study on Leading Beijing-Shenyang Dedicated Passenger Line into Shenyang Railway Terminal [J]. High Speed Railway Technology, 2015, 6(1): 19-26.
- [6] GB 50091-2006 铁路车站及枢纽设计规范[S].
GB 50091-2006 Code for Design of Railway Station and Terminal [S].
- [7] TB 10621-2014 高速铁路设计规范[S].
TB 10621-2014 Code for Design of High Speed Railway [S].
- [8] 铁道第四勘察设计院. 站场及枢纽[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
China Railway Siyuan Survey and Design Group Co. Ltd. Station, Yard and Terminal [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.

(编辑: 苏玲梅 白雪)

(上接第48页)

- [10] 陈伟志, 蒋关鲁, 赵慧爽, 等. 铁路路基下膨胀土地基浸水响应现场试验[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1507-1514.
CHEN Weizhi, JIANG Guanlu, ZHAO Huishuang, et al. Field test of Immersion Response of Expansive Soil Foundation Under Railway Subgrade [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1507-1514.
- [11] 杨果林, 邱明明, 杨啸, 等. 高铁膨胀土新型路堑基床动力特性与参数敏感性[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(1): 63-72.
YANG Guolin, QIU Mingming, YANG Xiao, et al. Dynamic Characteristics and Parameter Sensitivity of a New Type of Cut Subgrade for High Speed Expansive Soil [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(1): 63-72.
- [12] 李献民, 王永和, 杨果林, 等. 击实膨胀土工程变形特征的试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 826-830.
LI Xianmin, WANG Yonghe, YANG Guolin, et al. Experimental Study on Deformation Characteristics of Compacted Expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(5): 826-830.
- [13] 马丽娜, 严松宏, 王起才, 等. 客运专线无砟轨道泥岩地基原位

- 浸水膨胀变形试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(8): 1684-1691.
MA Lina, Yan Songhong, Wang Qicai, et al. Test of Swelling Deformation of Mudstone Foundation of Ballastless Track of Passenger Dedicated Line [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(8): 1684-1691.
- [14] TB 10621-2014 高速铁路设计规范[S].
TB 10621-2014 Code for Design of High Speed Railway [S].
- [15] 高建敏. 高速铁路无砟轨道不平顺谱的比较分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(4): 715-723.
GAO Jianmin. Comparative Analysis of Irregularity Spectrum of Ballastless Track of High Speed Railway [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(4): 715-723.
- [16] 高立. 浅析铁路膨胀土路堑边坡新型支护结构及工法[J]. 高速铁路技术, 2017, 8(2): 74-77.
Gao Li. Analysis of New Support Structure and Method of the Railway Cutting Slope of Expansive Soil [J]. High Speed Railway, 2017, 8(2): 74-77.

(编辑: 赵立红 苏玲梅)