DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2022.04.015

湘西弱膨胀土的膨胀变形时程特性研究

屈祥

(上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海 200092)

摘要:开展不同初始含水率下湘西膨胀土无荷载及有荷载膨胀试验,分析上覆荷载及含水率 对湘西膨胀土膨胀变形和膨胀速率的影响。结果表明,在相同含水率下,试样的膨胀变形随上覆 荷载增加而减小,直到上覆荷载超过某一特征值时,试样不再发生膨胀;在同一上覆荷载下,试样 含水率越高,最终膨胀变形越小;对于有荷膨胀情况,湘西膨胀土的膨胀时程主要分为初始膨胀 区、主要膨胀区和次膨胀区,初始膨胀区的膨胀速率基本不变,超过初始膨胀区后膨胀速率迅速降 低;无荷膨胀的膨胀时程几乎不存在初始膨胀阶段,而是浸水后迅速产生膨胀变形;对于有荷膨胀 与无荷膨胀,当试样膨胀速率开始降低时,其膨胀变形均已完成95%以上。

关键词:公路;弱膨胀土;膨胀变形特性;有荷膨胀;无荷膨胀

文献标志码:A

中图分类号:U416.1

文章编号:1671-2668(2022)04-0058-05

膨胀土具有失水收缩开裂、吸水膨胀软化等特 性。膨胀土的变形主要是由内部膨胀矿物如蒙脱 石、伊利石等所引起,膨胀矿物吸水时产生明显的双 电层效应,矿物内部阳离子被水分子代替,晶体间距 增大,颗粒间连接减弱,导致膨胀土产生变形。双电 层效应的产生需要一定时间,因而膨胀土吸水变形 不是一蹴而就,而是随时间增加逐渐产生的,膨胀土 变形与时间的关系是研究膨胀土变形的重要工具之 一。对此已有不少学者进行了研究,提出了相应模 型,这些模型大多采用指定荷载的最终膨胀率和膨 胀速率作为参数,研究膨胀土的变形和变形速率是 进行模型预测的基础。湘西张家界一桑植高速公路 高路堑膨胀土边坡,降雨后由于膨胀土的不均匀变 形引起不同程度滑坡灾害,膨胀土的膨胀变形成为 亟待解决的工程问题。该文开展不同初始含水率 (8%~16%)下湘西膨胀土无荷载及有荷载膨胀试 验,分析上覆荷载及含水率对膨胀土膨胀变形和膨 胀速率的影响,采用负指数模型对膨胀土膨胀变形 时程进行拟合,最后根据对数预测模型推导初始膨 胀速率计算公式,并与归一化的应力比建立统一关 系,为湘西地区膨胀土边坡变形控制提供参考。

1 试验材料及方法

试验所用膨胀土取自张家界一桑植高速公路高路堑边坡表层,土样多呈棕黄色,部分呈灰绿色,比重为2.65,自由膨胀率为43.6%,其他指标见表1。

表 1 膨胀土试样的基本物理指标

性能指标	试验值	性能指标	试验值
天然含水率/%	20.7	自由膨胀率/%	43.6
液限/%	54.8	蒙脱石含量/%	6.3
塑限/%	28.1		

将膨胀土中大块土通过碎土机碾碎,过1 mm 筛,将所得细粒置于烘箱中烘干 72 d,随后按照指定 含水率配土(配制时将含水率增大 0.5%)。配土完 成后装袋密封静置 48 h,重新测定材料的含水率, 若含水率与目标含水率差值超过 0.5%,则重新进行 配土。将静置后的土样按照指定质量采用静压法进 行碾压,速率为 0.5 mm/min。碾压完成后采用环 刀取样,试样高度为 20 mm,直径为 61.8 mm。将 试样用保鲜膜包裹,装袋后静置3d,待内部水分分 布均匀后开始试验。根据现场取样结果,该边坡表 层土样的孔隙比约为 0.61, 天然含水率为 14%, 饱 和含水率为 22.6%。在孔隙比为 0.6 的条件下开展 8%、10%、12%、14%、16%含水率下膨胀试验,每个 含水率设置上覆压力 σ, 为1 kPa(代表无荷载膨胀, 试验时在托盘上放置重量为 10 g 的砝码)、25 kPa、 50 kPa,75 kPa,100 kPa,150 kPa,200 kPa.

2 试验结果及分析

2.1 膨胀变形随时间的变化

图 1、图 2 分别为不同含水率下湘西膨胀土的 膨胀时程曲线和对数膨胀时程曲线。



图 1 不同含水率 w 下湘西膨胀土的膨胀时程曲线



图 2 不同含水率 w 下湘西膨胀土的对数膨胀时程曲线

从图1可看出:相同含水率下,以含水率8%为 例,无荷载膨胀的试样在短时间内产生非常大的膨 胀变形,随后迅速达到稳定状态,说明无荷载条件下 水分与膨胀矿物的反应非常迅速,最终能达到的膨 胀变形也大于有荷载膨胀试样;有荷载膨胀下试样 在初始阶段的变形低于无荷载膨胀,达到稳定变形 所需的时间也高于无荷载膨胀。根据双电层理论, 膨胀土遇水后,水分子进入膨胀土晶体层中,使晶层 间的距离增大,离子引力降低,在宏观上表现为试样 膨胀软化;施加上覆压力限制了水分与膨胀矿物的 反应速率及膨胀矿物晶层间的相对移动变形。

从图 2 可看出:有荷载膨胀下,湘西膨胀土的膨 胀时程主要分为初始膨胀区、主要膨胀区和次膨胀 区。在初始膨胀区(1~20 s),试样的膨胀变形和变 形谏率并不显著,膨胀矿物与水分未完全发生反应: 随浸水时间增加,水分进入膨胀土晶层内部,试样变 形明显增长,这一阶段为主要膨胀区;浸水时间进一 步增长,水分已与膨胀矿物反应完全,试样膨胀变形 逐渐趋于稳定,这一阶段为次膨胀区。无荷载膨胀 的时程曲线几乎不存在初始膨胀阶段,而是浸水后 迅速产生膨胀变形,在100~200 s时变形进入稳定 状态,即次膨胀区。对比有荷载膨胀和无荷载膨胀, 无荷载膨胀试验的变形大、速度快。实际边坡工程 中,膨胀土边坡在降雨后发生浅层滑坡,原因之一就 是边坡浅层土体受到的上覆压力小,与水分反应程 度高,而深度大的土体变形小,与水分反应的速率 慢,导致边坡产生不均匀变形甚至开裂垮塌。

2.2 膨胀变形与膨胀变形速率的关系

对于膨胀土的变形时程,蒋超等建议采用下式 进行拟合:

$$\delta = \alpha \left(1 - \mathrm{e}^{-\beta t} \right) \tag{1}$$

式中:α、β为模型参数。

图 3 为 w=8%时膨胀拟合结果。从图 3 可看出:无论是在线性坐标还是在对数坐标中,式(1)均能取得较好的拟合效果,能作为定量分析膨胀土时程曲线的预测模型。

令 *t*→∞, $f \delta(t \rightarrow \infty) = \alpha$, 即参数 α 代表试样的最终变形。参数 α 随上覆压力的变化见图 4, 拟合结果见式(2)。从图 4 可看出: 不同含水率试样的最终膨胀变形随上覆压力增加呈对数减小趋势, 试样最终膨胀变形为零的值即为膨胀力; 随含水率增加, 试样的膨胀力 *p* 、逐渐减小。

$$\alpha = A + B \ln \delta_{v} \tag{2}$$



图 4 不同含水率及上覆压力下最终膨胀率

图 5 为 w = 8%时试样膨胀速率随时间的变化, 图 6 为 w = 8%时试样膨胀速率随膨胀率的变化。 从图 5 可看出:对于有荷载膨胀,在初始膨胀区,膨胀速率基本不变,超过初始膨胀区后膨胀速率迅速 降低;而无荷载膨胀 10 s 后膨胀速率就迅速降低; 随上覆应力增大,试样的膨胀速率降低。从图 6 可 看出:试样膨胀速率开始降低时,不同上覆应力试样 的膨胀变形均已完成 95%以上,说明水分进入膨胀 土内部后,对于无荷载膨胀,在极短时间内土样就发 生显著膨胀;即使对于有荷载膨胀,其完成 95%变 形所需的时间也较短。因此,在边坡工程中做好排 水防水措施非常重要。



在式(1)中,对时间 t 求导,得:

 $\frac{\mathrm{d}o}{\mathrm{d}t} = \alpha\beta\mathrm{e}^{-\beta t}$ (3) 在式(3)中,令 t=0,得: $\frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{d}t}(t=0) = \alpha\beta$ (4)

根据式(4),膨胀土变形的初始速率同时由最终 变形 α 和速率参数 β 的乘积控制。结合图 5、图 6, 初始膨胀速率是表征膨胀土膨胀能力的重要参数。 不同含水率试样的初始膨胀速率与归一化上覆压力 的关系见图 7, p。根据图 4 求取。从图 7 可看出:不 同含水率下,初始膨胀速率随归一化上覆压力增加 迅速衰减,衰减曲线可用负指数表征。归一化应力 比值超过 0.2 时,初始膨胀速率发生显著衰减,说明 即使较小的上覆压力增加也能显著限制膨胀土的膨 胀变形。因此,可以在边坡表层适当种植树木或采 取其他防护措施,防止边坡表层土体发生显著膨胀 变形。



3 结论

通过对湘西膨胀土进行一维有荷载及无荷载膨 胀试验,分析不同含水率下湘西膨胀土的膨胀变形 时程及速率特性,得到以下结论:

(1)对于同一含水率,随上覆荷载增加,试样膨胀变形逐渐减小,直到上覆荷载超过某一特征值时,试样不再发生膨胀;在同一上覆荷载下,试样含水率越高,膨胀变形越小。含水率为8%时,试样的无荷载膨胀率约为14%;含水率为16%,试样的无荷载膨胀率仅为6%。

(2)有荷载膨胀下,湘西膨胀土的膨胀时程主 要分为初始膨胀区、主要膨胀区和次膨胀区。在初 始膨胀区,试样的膨胀变形并不显著;随浸水时间增 加,试样变形明显增长,这一阶段为主要膨胀区;浸 水时间进一步增长,水分已与膨胀矿物反应完全,试 样膨胀变形逐渐趋于稳定,进入次膨胀区。无荷载 膨胀的时程曲线几乎不存在初始膨胀区,而是浸水 后迅速产生膨胀变形。

(3)有荷载膨胀下,初始膨胀区的膨胀速率基 本不变,超过初始膨胀区后膨胀速率迅速降低。而 无荷载膨胀仅在 10 s 后膨胀速率就迅速降低。此 外,随上覆压力增大,试样的膨胀速率明显降低。对 于有荷载膨胀与无荷载膨胀,试样膨胀速率开始降 低时,膨胀变形均已完成 95%以上。

(4)不同含水率下初始膨胀速率随归一化上覆 压力增加而迅速衰减,衰减曲线可用负指数表征。 归一化应力比值超过 0.2 时,初始膨胀速率发生显 著衰减,即使较小的上覆压力增加也能显著限制膨 胀土的膨胀变形。

参考文献:

- [1] 王隽峰.膨胀岩(土)地区修建高速铁路的建议[J].路基 工程,2018(6):230-234.
- [2] 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.
- [3] 段尚磊,徐国元,董均贵,等.干湿循环作用下膨胀土变 形特性[J].西安科技大学学报,2019,39(5):819-825.
- [4] 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.
- [5] SIEMENS G, BLATZ J A. Evaluation of the influence of boundary confinement on the behaviour of unsaturated swelling clay soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(3): 339-356.
- [6] LIM B F,SIEMENS G A.Unifying framework for modeling swelling soil behaviour[J].Canadian Geotechnical Journal, 2016,53(9):1495-1509.
- [7] YUAN S, LIU X, SLOAN S W, et al. Multi-scale characterization of swelling behaviour of compacted Maryland clay[J]. Acta Geotechnica, 2016, 11(4):789-804.
- [8] LIU X F, BUZZI O P, VAUNAT J. Influence of stress-

volume path on swelling behavior of an expansive clay [C]//Proceedings of the 6th International Conference on Unsaturated Soils:Research & Applications.Sydney,Australia,2014:931-937.

- [9] 叶为民,刘樟荣,崔玉军,等.膨润土膨胀力时程曲线的 形态特征及其模拟[J].岩土工程学报,2020,42(1): 29-36.
- [10] 王东伟,唐朝生,李胜杰,等.膨胀土干缩变形特性试验研究[J].高校地质学报,2019,25(5):756-765.
- [11] 薛彦瑾,王起才,马丽娜,等.原状泥岩膨胀变形试验
 及计算模型研究[J].地下空间与工程学报,2019,15
 (4):1041-1047.
- [12] 刘祖强,罗红明,郑敏,等.南水北调渠坡膨胀土胀缩 特性及变形模型研究[J].岩土力学,2019,40(增刊): 409-414.
- [13] 张锐,张博亚,郑健龙,等.改进的膨胀土无荷膨胀试 验研究[J].岩土工程学报,2018,40(12):2223-2230.
- [14] 王炳忠,王起才,张戎令,等.无砟轨道地基泥岩膨胀 变形及水分迁移速率衰减规律[J].水利水运工程学 报,2019(2):41-47.
- [15] 蒋超,屈祥.膨胀土膨胀时程特性试验及特征曲线
 参数确定[J].土木工程与管理学报,2020,37(3):
 79-84.

收稿日期:2021-09-07

(上接第 57 页)

(3)超黏磨耗层混合料的稠度、拌合时间、湿轮 磨耗、黏聚力和负荷轮黏砂试验指标等均满足沥青 路面和水泥混凝土路面预防性养护需求。

参考文献:

- [1] 赵志超.新型冷拌冷铺乳化沥青混合料研究[D].北京: 北京建筑大学,2015.
- [2] 黄文通,许良楷,元泽宏,等.冷拌冷铺超粘磨耗层混合 料路用性能研究[J].青海交通科技,2019(4):88-91+97.
- [3] 奚晨晨.高黏改性沥青黏弹力学特性及其自愈合性能 研究[D].南宁:广西大学,2019.
- [4] 杨国卿,牛晓伟,朱富万.超粘磨耗层与微表处混合料 路用性能对比研究[J].公路交通科技(应用技术版), 2017(12):158-160.
- [5] 袁东东,蒋玮,肖晶晶,等.SBS、橡胶和高黏改性沥青流 变性能对比[J].长安大学学报(自然科学版),2020,40
 (1):135-142.

- [6] 王晶,杨炎生,郑宗江,等.基于层间粘结的高黏改性乳
 化沥青性能评价及应用[J].石油沥青,2020,34(4):
 61-64
- [7] 祝轩,吴旷怀,蔡旭.基于评分法的冷拌超薄磨耗层混 凝土优化设计[J].混凝土,2019(2):142-145+149.
- [8] XU Bin,LI Mingliang,LIU Shaohua, et al.Performance analysis of different type preventive maintenance materials for porous asphalt based on high viscosity modified asphalt[J].Construction and Building Materials,2018,191:320-329.
- [9] SHENG Xiaohui, WANG Mo, XU Tao, et al. Preparation, properties and modification mechanism of polyurethane modified emulsified asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2018, 189: 375-383.
- [10] LIU Fuqiang, ZHENG Mulian, FAN Xianpeng, et al. Properties and mechanism of waterborne epoxy resin-SBR composite modified emulsified asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2021, 274(2):122059.

收稿日期:2021-08-11