

黄土地场自重湿陷量实测值与计算值差异的原因分析

吴爽¹, 高玉广^{2*}, 赵权利³, 梁潇丹³

(1. 重庆市地质矿产勘查开发局南江水文地质工程地质队, 重庆 401147; 2. 甘肃省建筑科学研究院岩土工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 3. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要:在兰州和平镇做了一大型现场浸水试验, 测定了场地自重湿陷量, 并利用实验数据计算了其湿陷量。现场浸水试验时, 必须考虑浸水时间和入渗深度的影响, 当湿润峰未到达湿陷性土层底面时, 则存在很大一部分剩余湿陷量, 由此低估了实际湿陷量。该现场浸水试验湿陷土层深度24 m, 浸水61天, 湿润峰深度达到12 m左右。按平均下渗速率估算, 达到湿陷土层底面, 需要120天以上。在湿陷性土层完全浸水的情况下, 兰州地区大厚度湿陷性黄土的实测值远大于计算值, 二者的比值为2.0左右, 大于规范给出的修正系数1.5。综上所述, 在现场试验时, 除确定试验场地地貌单元、湿陷土层厚度外, 必须给定合理的浸水时间, 以便使湿陷性土层充分湿陷, 或浸水后, 及时测定湿润峰深度, 计算实际湿陷土层的湿陷量, 以便得出更合理的修正系数。

关键词:土力学; 砂质黄土; 湿陷性; 现场浸水; 含水率; 和平镇

中图分类号: P642

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2019)04-0263-07

Reason Analysis for the Difference between Measured and Calculated Self-weight Collapsibility of the Loess

WU Shuang¹, GAO Yuguang², ZHAO Quanli³, LIANG Xiaodan³

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
2. Institute of Geotechnical Engineering, Gansu Academy of Building Research, Lanzhou 730000, Gansu, China;
3. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: A large-scale field water immersion test has been carried out in Heping Town, Lanzhou, the self-weight collapsibility of the site has been measured in this paper, and the amount of collapsibility has been calculated by using the experimental data. The influence of immersion time and infiltration depth must be considered in the field water immersion test. When the wetting peak does not reach the bottom of collapsible soil, there will be a large part of residual collapsibility, which underestimates the actual amount of collapsibility. In this field immersion test, the depth of collapsible soil layer is 24m, the depth of wetting peak is about 12m, and the depth of wetting peak is about 12m. According to the estimation of average infiltration rate, it will take more than 120 days to reach the bottom of collapsible soil layer. Under the condition of full immersion of collapsible soil layer, the measured value of large thickness collapsible loess in

收稿日期: 2018-12-27; 修回日期: 2019-03-26

基金项目: 国家自然科学基金项目“黄土非饱和湿陷变形特性的研究”(41502286); 中央高校基本科研业务费资助项目“延安城市地下空间开发利用过程中的岩土体稳定问题研究”(No. 310826171008); 陕西省重点研发项目“岩土大数据平台建设中长期发展规划”(2017ZZDCXL-SF-03-01-01)

作者简介: 吴爽(1993-), 女, 硕士生, 主要从事工程地质的研究。E-mail: 398260566@qq.com

* 通讯作者: 高玉广(1970-), 男, 高级工程师, 主要从事地基基础、深基坑的设计与施工。E-mail: gyg90312@163.com

Lanzhou area is much larger than the calculated value, and their ratio is about 2.0, which is greater than the correction coefficient of 1.5 given in the investigation specification. In conclusion, in the field immersion test, in addition to determining the landform unit of the test site and the thickness of the wet soil layer, a reasonable soaking time must be given in order to fully wet the collapsible soil layer. After flooding, the depth of wetting peak should be measured in time to calculate the actual collapsing amount of soil layer in order to obtain a more reasonable correction coefficient.

Keywords: soil mechanics; sandy loess; collapsibility; field water immersion; water content; Heping Town

湿陷系数是表征土体湿陷变形特征的重要指标之一,它是在一定的净压力下饱和黄土相对天然黄土压缩系数的差异,通过单线法或双线法确定。湿陷系数用于计算场地的总湿陷量、自重湿陷量,评定湿陷等级,确定湿陷土层厚度(冯连昌,1982;孙建中,2013)。然而利用室内试验数据计算的场地湿陷量和现场浸水试验实测的结果相差很大(李大展,1993;李萍,2013)。图1列举了不同地区几个典型场地实测湿陷量和计算湿陷量的差异(汪国烈,1975;黄雪峰,2007;罗宇生,1994;马侃彦,2009;杨庆义,2011;王小军,2012;王延辉,2013;武小鹏,2016;杨生彬,2017;邵生俊,2018),实测相对计算有高有低,差异小者数倍,大者几十倍(LAWTON,1992)。

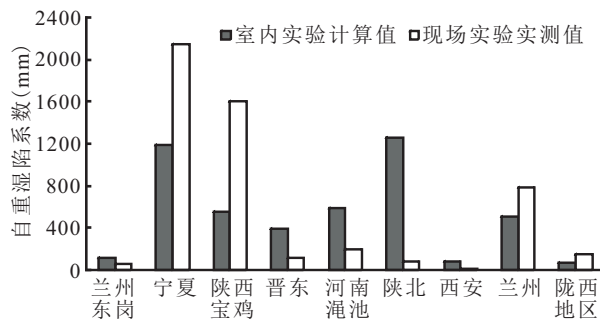


图1 部分场地室内试验计算湿陷量和现场浸水试验实测湿陷量对比图

Fig. 1 Comparison between the calculation of collapsing quantity in indoor test and the measured amount of collapsing quantity in field immersion test on some sites

造成这种差异的主要原因之一是黄土具有变异性(李同录,2009),另一个原因是室内试验高估了最终含水量(XIE, W. L., 2018)。实际的湿陷与水入渗过程密切相关,湿陷土层不可能完全饱和。现场浸水试验结果可靠,但试验周期长,成本高,只有大型工程才做(PEREIRA, J. H., 2000)。通过室内试验预测湿陷量仍然是工程常用的方法,提高该方法的可靠性就具有重要的工程意义。

为此笔者在兰州湿陷性黄土场地上做了浸水试验,实测了其自重湿陷量;按规范计算了其自重湿陷量,二者存在很大差异。为此提出考虑水分的实际入渗深度,根据含水量实际增量湿陷量的计算方法,利用该方法预测的湿陷性更接近实测结果。

1 自重湿陷的现场浸水试验

1.1 试验场地黄土基本特性

试验场地位于兰州市榆中县和平镇袁家营村东侧约400 m处(E103°57'40.21", N35°59'41.90"),位置见图2。地貌单元属黄河南岸Ⅲ级阶地,地下水水位埋深大于70 m,场区内 Q_3 黄土层厚度36 m。通过在该阶地上做的现场浸水试验,测得其总自重湿陷量为656 mm。

在场地内挖一口直径为0.8 m,深度为30 m的探井。根据探井和场区边缘冲沟中的露头观测,场地地层有3层,表层为耕土,厚0.5 m;其下为马兰黄土,厚35.5 m;底部为冲积粉质粘土。黄土各层特点见表1。

表1 试验场地土层特征表

Tab. 1 Geotechnical engineering characteristics of soil layer in the test area

土层名称	土层特征	厚度(m)	埋深(m)
耕土	褐色,松散,稍湿,以粉土为主,不均匀,含较多虫孔和植物根系	0.5	0~0.5
黄土	褐黄色,稍密,松散,稍湿,可见大孔隙,可见云母,以粉土为主,具自重湿陷性	35.5	0.5~36.0
冲洪积粉质粘土	黄褐色,中密、稍湿,可塑-硬塑,土质较均匀,层理明显,无湿陷性	6	36.0~42.0
卵石	青灰色,稍湿,密实,颗粒主要为石英岩、灰岩、花岗岩,磨圆度较差,次棱角状-次圆状,级配较均匀,粒径: 2~20 mm 约15%, 20~60 mm 约55%, 大于60 mm 约20%, 砂及粉土充填	未见底	>42.0

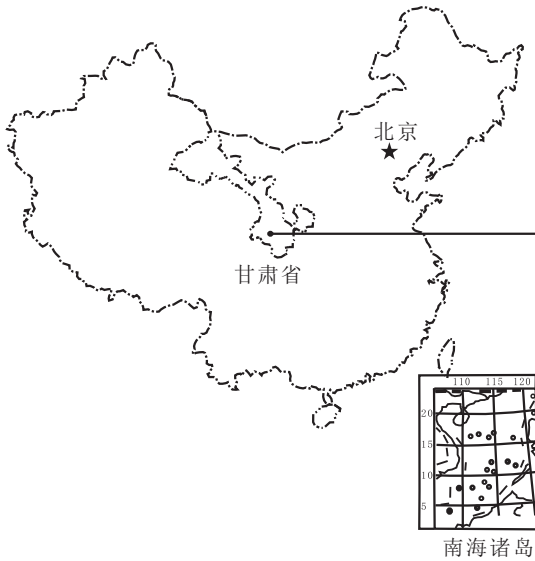
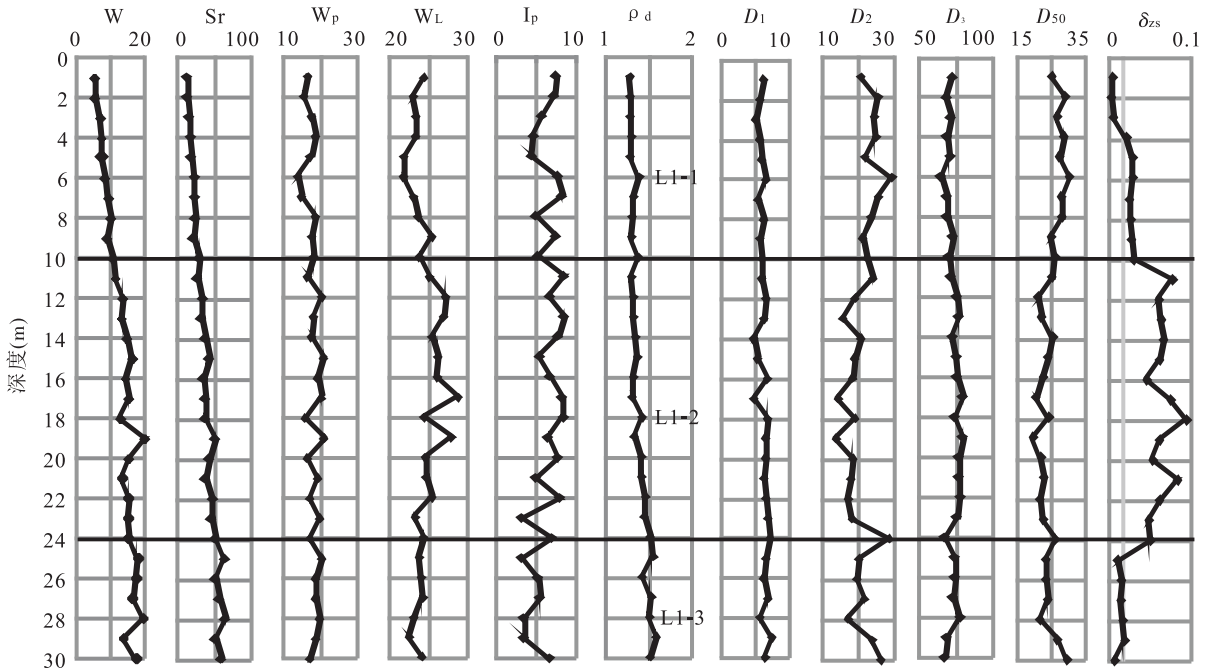


图 2 试验场地及取样点位置图

Fig. 2 Location of the sampling site

探井内每米取 1 组土样,做基本物理指标和湿陷性测试,包括比重、含水率、密度、塑限、液限、自重湿陷系数;计算获得干密度、饱和度与塑性指数。采

用 Bettersize2000 激光粒度仪对每个土样的颗粒组成进行分析,得到随深度变化不同范围粒径的含量以及相关物理指标分布的曲线,结果见图 3。



W. 含水率,单位%;Sr. 饱和度,单位%;W_p. 塑限,单位%;W_L. 液限,单位%;I_p. 塑性指数; ρ_d . 干密度,单位 g/cm³;D₁. 粒径 <2 μm 的颗粒含量,单位%;D₂. 2 μm <粒径<50 μm 的含量,单位%;D₃. 粒径 >50 μm 的含量,单位%;D₅₀. 平均粒径的含量,单位%; δ_{zs} . 自重湿陷系数

图 3 基本物理指标随深度变化曲线图

Fig. 3 Variation of basic physical parameters with respect to depth

由粒度组成可以看出,粉粒(0.002~0.050 mm)是该黄土的主要成分,含量占60%~75%,粘粒(<0.002 mm)所占比例相对较小(5%~10%),砂粒含量占黄土的10%~30%,可见该黄土为砂质黄土。塑限在10%~20%,平均值为18%,塑性指数随深度变化而在8附近波动。孔隙比随深度从1.01减小到0.87,平均值为0.90。含水率在15 m深度的范围内随深度增大而增大,15 m以下在15%左右变化,反映出大气蒸发影响范围可达15 m。由于降雨等自然因素的影响,当土天然含水量增加时,土的高孔隙度和低含水量意味着土有较高的湿陷性。由自重湿陷系数可知, L_{1-1} 层自重湿陷性弱,这是由于浅层荷载小的原因, L_{1-2} 的自重湿陷性强, L_{1-3} 层不具有自重湿陷性。

1.2 观测点布置

以探井为中心开挖直径为20 m,深度0.8 m的浸水试坑,坑底铺设0.1 m的细沙,探井接近地面附近进行加固封闭,防止水流入,试坑见图4。在地表布设地表沉降观测线3条,点共30个,3条线夹角为 120° ,延伸到浸水坑以外22 m,每条线上间隔5 m布设一个沉降观测标。另外设了共8个分层观测点,其编号依次为S3、S6、S9、S12、S15、S18、S21、S24,符号中字母S代表深标点,即土体深层竖向位移观测点,数字代表埋置深度,如S3为3 m深的标点。深层标点布设见图4。



图4 浸水试坑全貌图及深层标点图

Fig.4 The water infiltration pit and settlement monitoring points

地表观测的沉降反映了整个场地总的湿陷量,无法体现各土层的湿陷。而分层沉降标即可反映总湿陷量,也可反映各标深度间的土层湿陷,为此笔者只对分层标的数据进行分析。

1.3 试验过程及观测结果

本次浸水试验总计历时73天,其中浸水观测62天,10月13日到12月13日,停水观测11天,12月14日—12月24日。在浸水阶段,试坑水头保持在50 cm。

图5为不同分层沉降观测点沉降量随时间的变化曲线,其中S3、S6、S12沉降量大,对应左边的纵坐标;S15~S24沉降量小,对应右边的纵坐标。由图5可见,S3、S6、S12分层沉降点的湿陷量变化分为3个阶段:ab段(浸水期前20天)平稳缓沉降,该阶段水分快速入渗,但自重湿陷缓慢,这是由于浅层荷载小;bc段(浸水第20天~第36天)快速湿陷;cd段(第36天以后)平稳略降,该阶段湿陷趋于稳定,主要为固结变形。S15~S24分层沉降观测点沉降量在前6天稍有沉降约10 mm左右,然后平稳略降,说明15 m以下的湿陷量很小,湿陷主要发生在15 m以上。

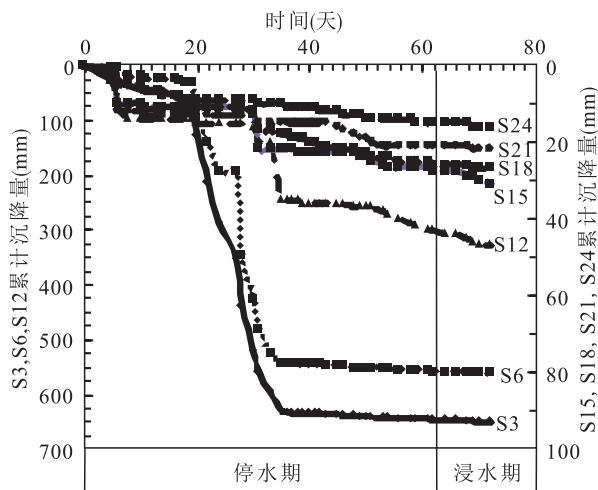


图5 分层沉降点沉降量随时间的变化曲线图

Fig.5 Curve of settlement of stratified settlement with time

图6为8个分层沉降观测点最终沉降量与其深度的关系。该沉降量代表了观测点以下的总自重湿陷量,两点之间的差值代表相应深度之间的湿陷量。地表最大沉降656 mm,3 m、6 m和12 m处的最大沉降分别为650 mm、562 mm和47 mm,15 m以下总沉降在30 mm左右。根据各深度差值可以算出0~3 m的自重湿陷量为6 mm,3~9 m、9~12 m;12~15 m的自重湿陷量分别为88 mm、515 mm和16 mm;15~18 m、18~21 m、21~24 m的自重湿陷

量分别为 4 mm、5 mm 和 6 mm。可见湿陷主要发生在 3~15 m, 1~3 m 和 15~24 m 的湿陷量都较小。

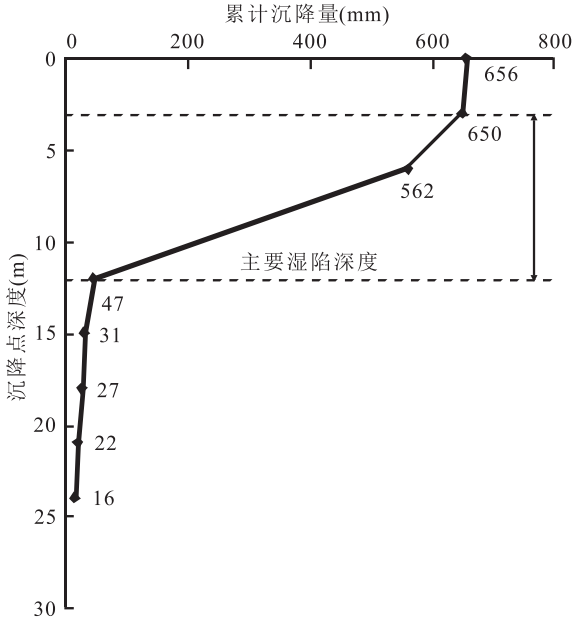


图 6 各分层沉降观测点总湿陷量变化曲线图

Fig. 6 Curve of total collapse at various observing points

2 试验结果分析

为了对比现场实测结果和室内计算结果的差异,利用探井取样测得的湿陷系数,对该场地总湿陷量和与分层标相应的各层湿陷量进行了计算,结果见表 2。总湿陷量及不同深度湿陷量的对比见图 7。可以看出,总湿陷量二者差异很大,计算总湿陷量为 1 079 mm,实测的最大湿陷量为 640 mm,实测值与计算值之比为 0.59。从表 2 和图 7 可以看出,二者的差异主要出现在 12 m 以下。3 m 以上土层试验参数显示不具有自重湿陷性,实测湿陷量也比较小,只有 6 mm。3~6 m 具有自重湿陷性,但湿陷系数较小,具有轻微湿陷性,实测结果和计算结果比较接近,二者比值为 1.17。10~24 m 实验测得的自重湿陷系数高,多数具有中等湿陷性,但只有 6~12 m 的实测的湿陷量高,为 515 mm,是计算湿陷量的 2.13 倍。12~15 m 实测湿陷量迅速减小,只有 16 mm,而计算湿陷量高达 190 mm,二者比值为 0.08。15~24 m 实测湿陷量更小,每 3 m 厚度的湿陷量只有 4~6 mm,计算值 159~215 mm。可见总

湿陷量的差异主要是 12 m 以下实测量远小于计算量引起。

表 2 实际自重湿陷量与规范计算湿陷量对比表

Tab. 2 Comparison between actual self-weight collapsibility and calculation of collapsibility

取样深度 (m)	自重湿陷系数 δ_{zsi}	深度 (m)	计算 实测自重湿陷量 (mm)	实测值比计算值
1	0.003			
2	0.003	0~3	0 6	
3	0.004			
4	0.020			
5	0.028	3~6	75 88	1.17
6	0.028			
7	0.024			
8	0.025			
9	0.027	6~12	242 515	2.13
10	0.030			
11	0.078			
12	0.060			
13	0.063			
14	0.067	12~15	190 16	0.08
15	0.061			
16	0.045			
17	0.075	15~18	215 4	0.02
18	0.095			
19	0.062			
20	0.052	18~21	197 5	0.03
21	0.084			
22	0.061			
23	0.048	21~24	159 6	0.04
24	0.050			
总湿陷量 (mm)		0~24	1 079 640	0.59

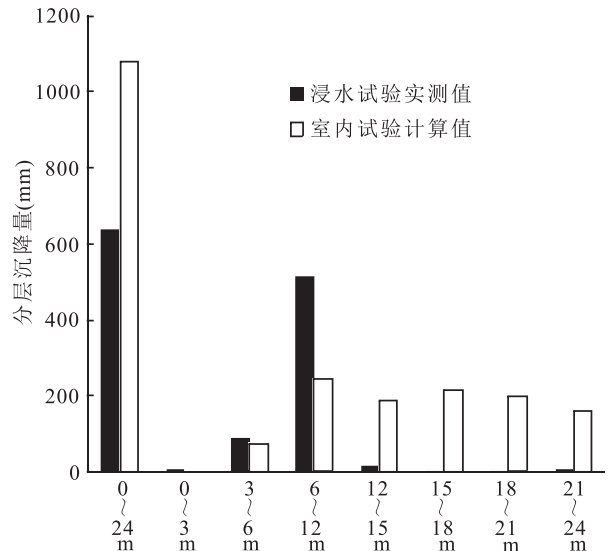


图 7 实测自重湿陷量与计算自重湿陷量对比图

Fig. 7 Comparison between measured and calculated content of self weight collapsibility

为了确定实测和计算差异的原因,在浸水结束后,在试坑内利用钻孔取样,按1 m间距测定了含水率在垂直方向上的变化,并和初始含水率进行比较(图8)。由图8可见,该试验浸润面深度在12~15 m,也就是12~15 m土层还未饱和,15 m以下湿润峰未达到,而室内试验是在土样完全饱和和情况下测得的湿陷系数。

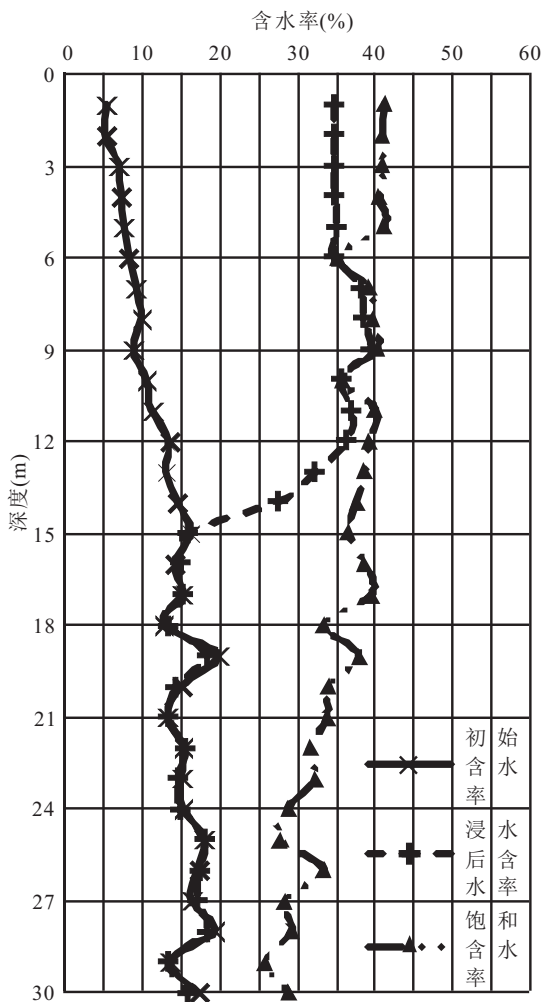


图8 初始含水率与浸水后含水率随深度变化图

Fig. 8 Variation of initial moisture content and moisture content with depth after immersion

若湿润峰最终的位置按13.5 m考虑,渗水61天,垂直水力梯度为1,不考虑测渗影响的情况下,其该土层平均饱和渗透速率或渗透系数为 2.56×10^{-6} m/s或0.22 m/d。若湿陷土层深度按24 m计,使湿陷土层完全饱和,则需要109天。由此可见,该浸水试验实测值和计算值偏小的原因主要是

下部湿陷性土层未浸湿,还存在很大的剩余湿陷量。用湿润峰以上,即12 m以上,土层的实测值比计算值,比值为1.92。黄雪峰等人于2009年~2010年在该地貌单元上做了直径为40 m的浸水试验,浸水时间140天,试坑实测值的平均值为2315 mm(黄雪峰,2011;姚志华2012;姚志华,2014)。用分层总和法算得6个探井自重湿陷量的平均值为1140 mm,两者之比为2.03。该比值和本文12 m以上的比值接近,两者都远大于规范的修正系数1.5。因此对于兰州地区大厚度湿陷性黄土场地,地区修正系数取1.5偏低。

3 结论

现场浸水试验并结合室内试验结果表明,现场浸水试验的时间和入渗深度对实测结果有显著的影响,当湿润峰未达到湿陷性土层底面时,则存在很大一部分剩余湿陷量,由此低估了实际湿陷量。目前许多浸水试验实测湿陷量与计算值差异大,必须考虑浸水时间和浸润面的深度的影响。本次现场试验湿陷土层深度24 m,浸水61天,湿润峰深度达到12 m左右,按平均下渗速率估算,达到湿陷土层底面,需要100天以上。

在湿陷性土层完全浸水的情况下,兰州地区大厚度湿陷性黄土的实测值远大于计算值。规范的系数是根据已有的工程场地的试验结果总结给出的,各个场地试验条件和浸水时间有差异,离散性大。因此在今后现场试验时,除确定试验场地地貌单元、湿陷土层厚度外,必须给定合理的浸水时间,以便使湿陷性土层充分湿陷,或浸水后,及时测定湿润峰深度,计算实际湿陷土层的湿陷量,以便得出更合理的修正系数。

参考文献(References):

- 中华人民共和国建设部. GB 50025—2004,湿陷性黄土地区建筑规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB 50025—2004 Code for Building Construction in Collapsible Loess Regions[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004.
- 冯连昌, 郑晏武. 中国湿陷性黄土[M]. 中国铁道出版社,1982.

- FENG Lianchang, ZHENG Yanwu. Chinese collapsible loess[M]. China Railway Publishing House, 1982.
- 孙建中,王兰民,门玉明,等.黄土学(中篇)[M].西安:西安地图出版社,2013.
- SUN Jianzhong, WANG Lanmin, MEN Yuming, et al. Loess. Middle length. Loess geotechnical engineering [M]. Xi'an Cartographic Publishing House, 2013.
- 李大展,何颐华,隋国秀. Q2黄土大面积浸水试验研究[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(2): 111.
- LI Dazhan, HE Yihua SUI Guoxiu. Experimental study on large area soaking of Q2 Loess[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(2): 111.
- 李萍,李同录,王阿丹,等.黄土中水分迁移规律现场试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 05: 1331-1339.
- LI Ping, LI Tonglu, WANG Adan, et al. Field experimental study on water movement in Loess [J]. Rock-soil Mechanics, 2013, 05: 1331-1339.
- 罗宇生. 宝鸡第二发电厂大面积试坑浸水试验报告[R]. 西安:西北电力设计院, 1994.
- LUO Yusheng. Experiment report on large area test pit in Baoji No. 2 Power Plant[R]. Xi'an: North West Electric Power Design Institute, 1994.
- 黄雪峰. 大厚度自重湿陷性黄土的湿陷变形特征、地基处理方法和桩基承载力性状研究[D]. 重庆:后勤工程学院, 2007.
- HUANG Xuefeng. Study on collapsibility deformation characteristics, foundation treatment methods and bearing behavior of pile foundation of large-thickness Self-Gravity Collapsible Loess[D]. Chongqing: School of Logistics Engineering, 2007.
- 马侃彦,张继文,刘争宏,等. 自重湿陷性黄土场地的试坑浸水试验[J]. 勘察科学技术, 2009, (5): 33-36.
- MA Kanyan, ZHANG Jiwen, LIU Zhenghong, et al. Pit immersion test of collapsible loess site with gravity[J]. Reconnaissance Science and Technology, 2009, (5): 33-36.
- 杨庆义. 湿陷性黄土现场浸水试验研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29(6): 58-60.
- YANG Qingyi. Experimental study on in-situ soaking of collapsible loess [J]. Hydropower and Energy Science, 2011, 29(6): 58-60.
- 王小军,米维军,熊治文,等. 郑西客运专线黄土地基湿陷性现场浸水试验研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(1): 83-90.
- WANG Xiaojun, MI Weijun, XIONG Zhiwen, et al. Experimental study on collapsibility of loess foundation of Zhengxi passenger dedicated line in situ[J]. Journal of Railway, 2012, 34(1): 83-90.
- 王延辉,张希宏,袁勤刚. 大厚度黄土自重湿陷性试验分析研究[J]. 勘察科学技术, 2013, (3): 5-8.
- WANG Yanhui, ZHANG Xihong, YUAN Qingang. Experimental analysis and study on collapsibility of loess with large thickness[J]. Reconnaissance Science and Technology, 2013, (3): 5-8.
- 武小鹏. 基于试坑浸水试验的大厚度黄土湿陷及渗透特性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- WU Xiaopeng. Study on collapsibility and permeability of loess with large thickness based on pit soaking test[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.
- 杨生彬. 兰州某工程黄土湿陷性室内与现场试验对比分析[A]. 第十五届全国工程物探与岩土工程测试学术大会论文集[C]. 2017: 305-310.
- YANG Shengbin. Comparative analysis of loess collapsibility between laboratory and field test in Lanzhou project [A]. Proceedings of The 15th National Conference on Engineering Geophysical Exploration and Geotechnical Engineering Testing[C]. 2017: 305-310.
- 邵生俊,李骏,李国良,等. 大厚度湿陷性黄土隧道现场浸水试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(8): 1395-1404.
- SHAO Shengjun, LI Jun, LI Guoliang, et al. In-situ immersion test of collapsible loess tunnel with large thickness [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(8): 1395-1404. 2017: 305-310.
- 黄雪峰,张广平,姚志华,等. 大厚度自重湿陷性黄土湿陷变形特性水分入渗规律及地基处理方法研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊2): 100-108.
- HUANG Xuefeng, ZHANG Guangping, YAO Zhihua, et al. Research on deformation, permeability regularity and foundation treatment method of dead-weight collapse loess with heavy section[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Supp. 2): 100-108.
- 姚志华,黄雪峰,陈正汉,等. 兰州地区大厚度自重湿陷性黄土场地浸水试验综合观测研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 65-74.
- YAO Zhihua, HUANG Xuefeng, CHEN Zhenghan, et al. Comprehensive observation and study on soaking test of heavy thickness collapsible loess site in Lanzhou area [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(1): 65-74.
- 姚志华,黄雪峰,陈正汉,等. 关于黄土湿陷性评价和剩余湿陷量的新认识[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 998-1006.
- YAO Zhihua, HUANG Xuefeng, CHEN Zhenghan, et al. A new understanding of the evaluation of loess collapsibility and the amount of residual collapsibility [J]. Rock-soil Mechanics, 2014, 35(4): 998-1006.
- XIE, W. L., LI, P., VANAPALLI, S. K., & Wang, J. D. (2018). Prediction of The Wetting-induced Collapse Behavior Using the Soil-water Characteristic Curve. Journal of Asian Earth Sciences, 151, 259-268. (in Portuguese)
- PEREIRA, J. H., & FREDLUND, D. G. (2000). Volume change behavior of collapsible compacted gneiss soil. Journal of Geotechnical and Geo-environmental engineering, 126(10), 907-916.