

大厚度湿陷性黄土现场浸水试验研究

徐西久¹, 范江涛², 袁可佳², 白晨帆², 蒋应军²

(1. 陕西西韩城际铁路有限公司, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 在陕西省渭南市合阳县大厚度自重湿陷性黄土地基上进行了现场试坑浸水试验, 深入研究了原状黄土地基的湿陷性和渗流特性, 揭示了地表及深部土层沉降量随时间的变化特征、浸水范围及湿陷范围。结果表明, 试坑地表、深部土层沉降量随时间变化曲线都呈现慢-快-慢-稳定的特点, 湿陷变形发展过程都经历 4 个发展阶段, 分别是初期平缓段、迅速变形段、过渡段及后期平缓段, 黄土的自重湿陷变形基本发生在迅速变形段和过渡段。土层湿陷范围小于饱和范围, 黄土在饱和条件及上覆饱和自重应力作用下也不会发生湿陷。提出了路基防排水宽度为 12 m 的建议, 该结论可为西韩城际铁路路基排水及地基处治提供参考。

关键词: 大厚度自重湿陷性黄土; 现场试坑浸水试验; 湿陷性; 湿陷变形特征; 渗流特性

中图分类号: TU444

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)06-0849-09

Field immersion test on self-weight collapsible loess site with large thickness

XU Xijiu¹, FAN Jiangtao², YUAN Kejia², BAI Chenfan², JANG Yingjun²

(1. Shaanxi Xihan Intercity Railway Co. Ltd., Xi'an 710064, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The collapsibility and seepage characteristics of in-situ loess foundations were investigated in depth by conducting on-site test pit immersion tests on a large-thickness self-weight collapsible loess foundation in Heyang County, Weinan City, Shaanxi Province, revealing the change characteristics of surface and deep soil settlement with time, the extent of immersion and collapsibility range. The results show that the settlement curves of surface and deep soil layers in the test pits show a slow-fast-slow-stable trend over time. The development process of collapsible deformation goes through four development stages, namely the initial gentle section, rapid deformation section, transitional section and mid-term gentle section, and the self-weight collapsible deformation of loess basically occurs in the rapid deformation section and transitional section. The collapsible range of the soil layer is less than the saturated range, and the loess will not collapse under the saturated condition and the overlying saturated self-weight stress. It is proposed that the width of roadbed drainage prevention is 12 m and the depth of foundation treatment is 15m, and the conclusion can provide reference for the roadbed drainage and foundation treatment of Xi'an-Hancheng Intercity Railway.

Key words: Large-thickness self-weight collapse loess; immersion test of field test pit; collapse; collapsible deformation characteristics; seepage characteristics

近年来,随着西部大开发和“一带一路”战略的不断推进,湿陷性黄土地区的工程建设规模不断扩大^[1-2],越来越多的工程建设在大厚度湿陷性黄土地基上^[3-4]。所谓大厚度湿陷性黄土,是指可湿陷黄土层下限深度距建筑基础底面大于 20 m 的可湿陷黄土地基^[5]。以西安至韩城的城际铁路为

例,最大可湿陷厚度可达 30 m,全长 175.177 km,其中约 50 km 位于大厚度可湿陷黄土区。在这样的大厚度可湿陷黄土地基上进行工程建设,无疑会带来一系列新的困难和挑战^[6-8]。在修建城际铁路时需要对沿线黄土的湿陷性进行准确判断并评价,由于室内试验并不能准确模拟现场条件,而

收稿日期: 2022-11-29

修回日期: 2023-09-20

基金项目: 陕西省科技计划基金资助项目(18-02K, 19-27K)

第一作者: 徐西久(1963—),男,本科,正高级经济师,研究方向为交通运输。E-mail: 2043015683@qq.com

通信作者: 范江涛(1997—),男,博士生,研究方向为道路与铁道工程。E-mail: 2020021070@chd.edu.cn

现场试坑浸水能够反映场地湿陷真实情况^[9],并且成为评价黄土湿陷性的重要手段,因此众多学者对试坑浸水进行了研究,得到了很多宝贵的成果。

廖盛修等^[10]较早采用预浸水法对某地基进行处理并开展了黄土湿陷性试验研究,使得越来越多的岩土工作者开始关注原位浸水试验。李大展等^[11]通过原位浸水试验得出 Q_2 黄土自重湿陷量随时间及深度的变化规律,发现 Q_2 黄土也具有较强的湿陷性。石怀清^[12]通过在西安地区开展试坑浸水试验得到 Q_2 黄土的分层湿陷量,并对湿陷类型的判定进行了研究。黄雪峰等^[13-15]通过在试验场地埋设水分计,得出水分竖向和水平的扩散规律,通过水分计数值变化可确定黄土是否发生湿陷。张严、杨喆等^[16-17]开展了大型试坑浸水试验,对湿陷性黄土场地浸水后地表的沉降规律和浸水湿陷范围进行了研究。王小军等^[18]在郑西高铁沿线8个点做了试坑浸水试验,并取样做了相关室内试验,得出室外下限深度实测值普遍小于室内计算值,并对沿线黄土湿陷性进行了评价。刘长玲^[19]通过埋设 TDR 水分计及张力计进行土层含水率数据的采集,可判断黄土某深度土层是否发生湿陷及湿陷敏感性,得出湿陷系数随深度变化的规律性。姚志华等^[20]在兰州地区进行试坑浸水试验,结果表明某些土层内黄土会发生多次湿陷,得到了水分扩散基本呈椭圆形状,随着时间变化,椭圆湿润区的离心率会变得越来越小。马闫等^[21]通过在山西晋中进行试坑浸水试验得出了黄土湿陷

共经历6个阶段,得到了浸水影响范围及裂缝发展规律。

从以上文献可以看出众多学者对试坑浸水进行了大量研究,但是研究的重点在于场地黄土自重湿陷量进而对场地的湿陷进行评价,确定场地湿陷等级,对于场地分层湿陷量、不同深度土层的变形规律、场地自重湿陷下限深度等研究过少。基于此,本研究以西韩城城际铁路项目为基础,通过大厚度湿陷性黄土现场浸水试验,分析了水的浸润范围,研究了地表湿陷量随时间的变化特征,深部土层湿陷量随时间的变化特征;分析了地表沉降范围,基于浅标点及深标点的沉降量,提出了大厚度黄土的湿陷变形范围。本研究结果可为类似地区的黄土湿陷性评价和地基处理提供参考,为进一步开展类似研究工作提供借鉴。

1 试验方案

1.1 场地岩土工程条件

试验场地位于陕西省渭南市合阳县南知堡村,地貌类型属于侵蚀黄土塬区。为了准确判定场地的地层状况和不同深度土层的物理力学指标,试验前人工开挖了两口探井,并按1m的间距人工采集了原状土样。此外,还在室内进行了基本的物理和力学指标测试以及黄土湿陷性试验。探井所揭示的场地地层情况如表1所示,勘探深度内未见地下水位(埋深大于70m)。试验场地黄土的基本物理指标如表2所示。

表1 场地地层地质情况

Tab. 1 Stratigraphic geology of the site

分层编号	地质年代	分层深度/m	土层岩性特点
1	Q_3	13.5	黏质黄土:浅黄色,成分以黏粒为主,土质较均,零星白色钙质菌丝,偶见蜗牛壳碎屑,结构疏松,黏性一般,手搓成粗条,易断,岩芯成柱状,硬塑
2		1.6	古土壤:浅棕红色,成份以黏粒为主,土质不均,含大量白色钙质结核,零星白色钙质菌丝,偶见蜗牛壳碎屑,结构致密,黏性较好,手搓成细条,刀切面粗糙,岩芯成柱状,硬塑
3	Q_2	2.8	黏质黄土:黄褐色,成份以黏粒为主,土质较均,可见灰黑色斑点,零星蜗牛壳碎屑,偶见姜石,结构致密,可见针状孔隙,黏性一般,手搓成粗条,易断,刀切面较粗糙,岩芯成柱状,硬塑
4		4	古土壤:浅棕红色,成份以黏粒为主,土质均匀,可见少量灰黑色斑点,偶见姜石,结构致密,黏性好,手搓成细长条,刀切面光滑,岩芯成柱状,坚硬
5		6	黏质黄土:浅黄色,成份以黏粒为主,土质较均,含少量粉粒,零星灰黑色斑点,结构致密,黏性较好,手搓成细长条,刀切面较光滑,岩芯成柱状,坚硬
6		3	古土壤:浅棕红色,成份以黏粒为主,土质均匀,含少量灰黑色斑点,偶见姜石,结构致密,黏性好,手搓成细长条,刀切面光滑,岩芯成柱状,坚硬

表 2 黄土的基本物理指标
Tab. 2 Basic physical indicators of loess

技术指标	含水率/%	干密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	塑性指数	液性指数	孔隙比	饱和度/%	压缩模量/ MPa	自重湿陷 系数
测试值	12.1~24.4	1.34~1.74	4.8~9.4	-1.27~0.28	0.56~1.002	43.5~97.7	2.2~9.0	0.001~0.062

1.2 试坑设计

现场试坑设计严格按照《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB 500525—2018)进行，本次试验采用自上而下浸水模式，试验场地内设置地表沉降监测点(浅标点)、深部沉降监测点(深标点)、土壤水分计、水位观测孔等，如图 1 所示。根据探井资料

报告显示，试验场湿陷土层厚度约为 30 m，为了充分使试坑内部土层发生自重湿陷，使各深度土层达到饱和状态，浸水试坑设计为圆形，直径为 32 m，深度 0.5 m。将 10 cm 厚砾石层铺在试坑底部，充分使土层均匀渗水。

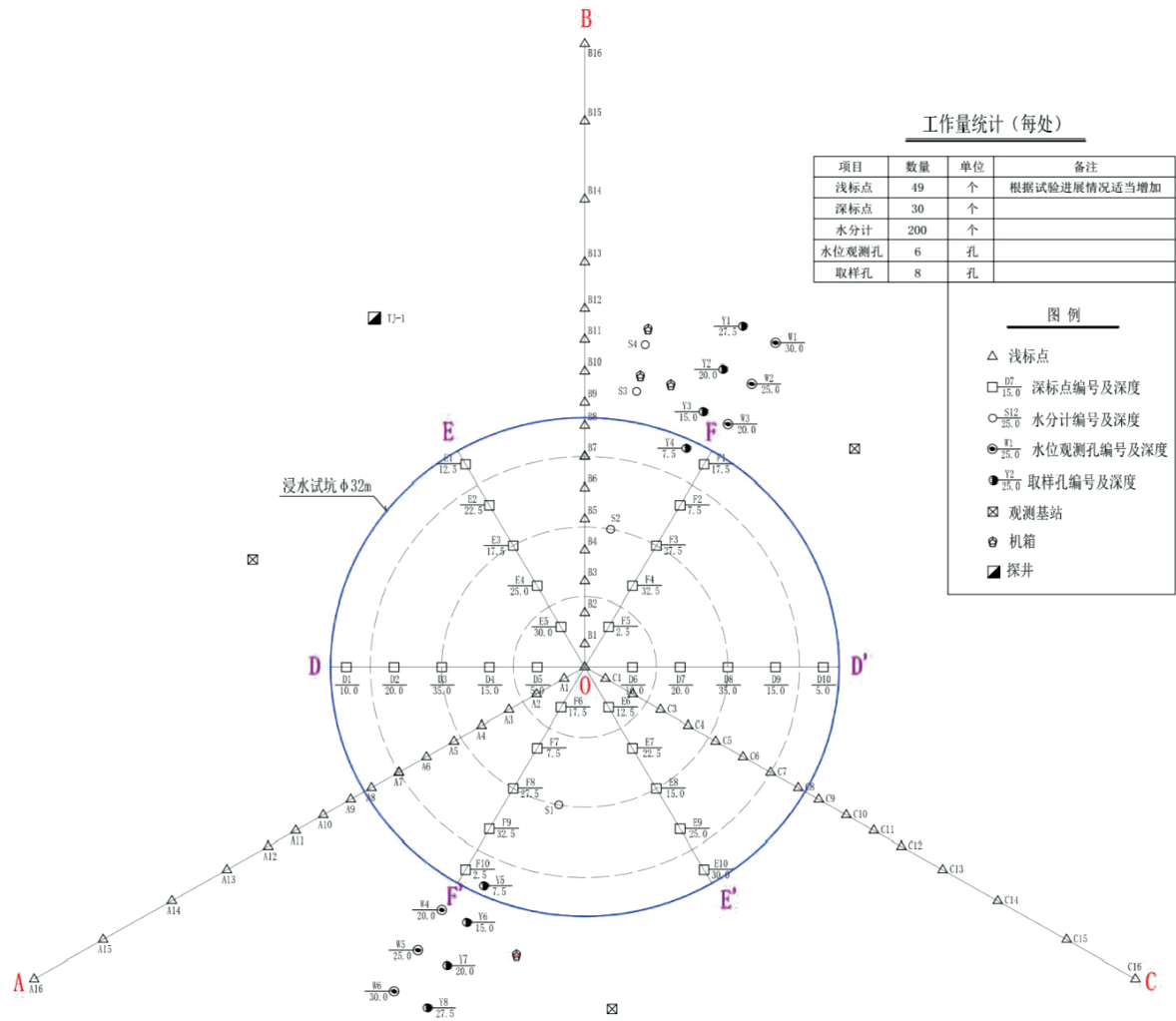


图 1 试坑浸水试验平面布置图

Fig. 1 Layout of test pit immersion test

1.3 沉降稳定标准和试验终止条件

(1)湿陷稳定标准

浸水阶段始终保持试坑内水头高度在 30 ~ 40 cm之间，最后 5 天的平均湿陷量 < 1 mm/d时，说明试坑内土层湿陷稳定。

(2)沉降观测终止条件

停止浸水后继续进行沉降观测，当连续 5 天的

平均沉降量 ≤ 1 mm/d 时，终止沉降观测。

2 试验结果及分析

2.1 注水量分析

试验场地于 2020 年 4 月 16 日开始注水，至 6 月 24 日达到湿陷稳定标准及沉降观测终止条件后停止注水，共注水 69 d。合阳场地注水量与时间曲

线如图2所示。

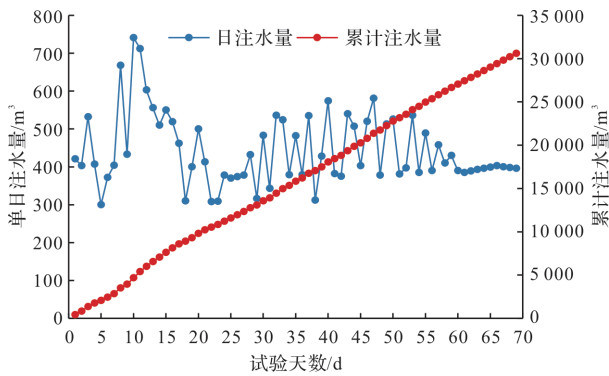


图2 试验场地注水量与时间曲线

Fig. 2 Water injection volume and time curve of test site

从图2可以看出合阳场地单日注水量主要分为3个阶段,第一阶段为1~15 d,这一阶段注水量都比较高,平均日注水量为507 m³,因为这一阶段天然含水量比较低,试坑内尚未形成水面,场地内水分都处于非饱和渗流状态,故这一阶段整体上需水量比较大;第二阶段为15~50 d,这一阶段注水量略有下降,平均日注水量为433 m³,因为这一阶段已经形成水面,试坑下面土体部分已经饱和,水分开始处于饱和渗流状态,需水量开始出现下降;第三阶段为51~69 d,这一阶段注水量进一步下降趋于平缓,平均日注水量为411 m³,因为此时试坑下面土层基本饱和,水分已完全处于一种饱和渗流状态,浸润峰慢慢向下扩散,需水量变小并趋于稳定。本次试验试坑内累计注水量30 767 m³,平均日注水量约446 m³,单日最大注水量出现在第10天,注水量达736 m³。

2.2 水分浸润范围分析

为了确定浸水影响范围的变化情况,掌握浸水条件下水分的移运规律,浸水前在水位观测孔W1、W6和水分计探井S1、S2钻井时现场取样测定了含水率(见图3),作为初始含水率。

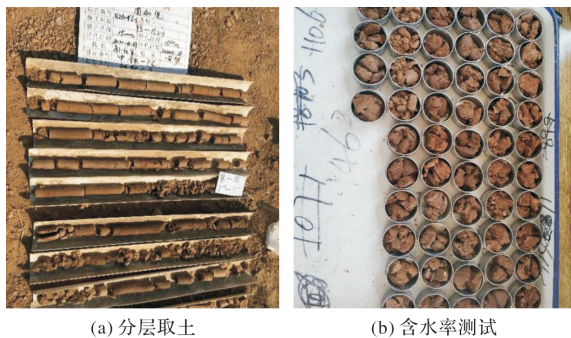


图3 土样含水率测试

Fig. 3 Moisture content test of soil sample

为了确定试坑径向浸润范围,在浸水过程中

以及停水前后的几天内,分别在试坑外南、北两侧布置了2排取样孔,测定地基土含水率,并与浸水前土体含水率对比,确定径向浸润范围。为了确定竖向浸润范围,在停止浸水后的第2天至第4天,在试坑内布置两个取样孔,测定每层土的含水率,同初始含水率对比,确定竖向浸润范围。根据土体饱和的指标为饱和度 $S_r > 85\%$,确定试坑的饱和范围,见图4。

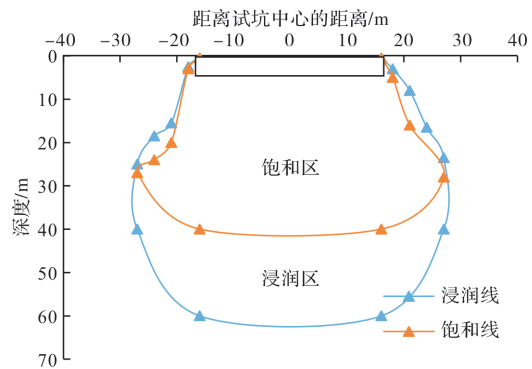


图4 场地水分入渗范围

Fig. 4 Range of site moisture infiltration

由图4可知,图中黑色矩形代表试坑,浸润区和饱和区的公共区域为非饱和区,非饱和区和饱和区的影响范围随深度的增加而逐渐增大。饱和区下界深度为40 m,水平方向最远处距试坑中心的距离为27 m,浸润区下界深度为60 m,水平方向最远处距试坑中心的距离约为28 m。试坑的浸润线、饱和线都呈现不完全对称的形状。

2.3 湿陷量变化特征研究

2.3.1 地表湿陷量变化特征研究

场地地表累计沉降量随时间变化曲线见图5。

由图5可知,地表累计沉降量可以分为四个阶段,第一个阶段为初期平缓段,这一阶段刚注水没多久,场地内黄土基本处于非饱和状态,还未发生湿陷变形或者湿陷变形很小,累计沉降量较小并且沉降曲线较为水平;此阶段持续20 d左右。第二个阶段为迅速变形段,这一阶段黄土从非饱和状态转变为饱和状态,黄土结构发生破坏,湿陷变形量迅速增加,曲线斜率陡增,单天沉降量在这个阶段迅速增加,此阶段持续40 d左右。第三个阶段为过渡段,此阶段黄土内部孔隙减小,颗粒重新排列,新的结构和强度生成,湿陷变形量相对减少,曲线斜率相应减小,累计沉降量持续增加但增速降缓,此阶段持续10 d左右。第四个阶段为中期平缓段,此阶段多发生在停水阶段,此阶段沉降基本保持不变,沉降曲线保持水平;此阶段持续20 d左右。

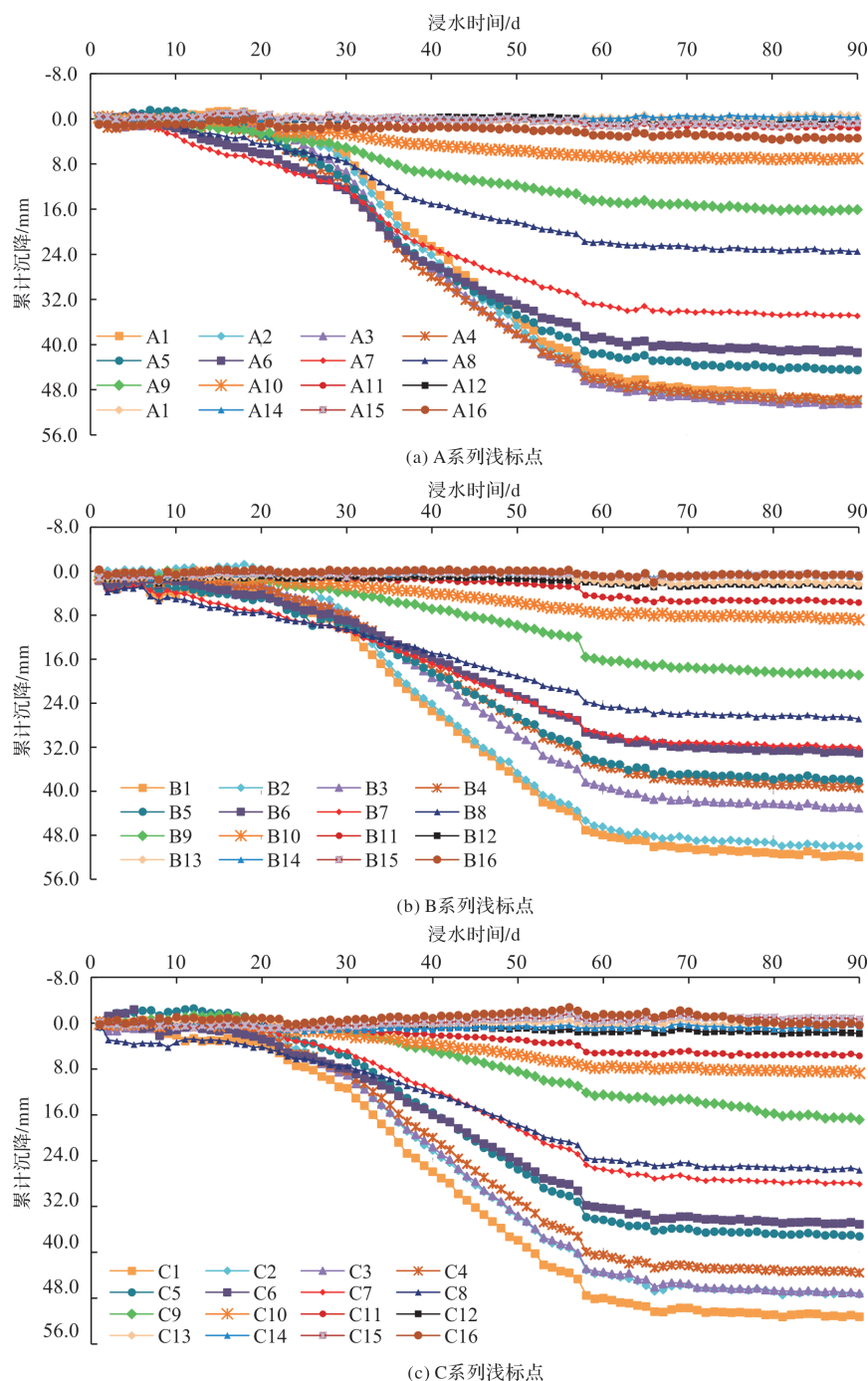


图5 地表累计沉降量随时间变化

Fig. 5 Changes in cumulative surface subsidence over time

从图中可以看出,试坑内部的浅标点沉降量是要大于试坑外部浅标点的沉降量,试坑外部的沉降量都比较小,沉降在整个过程基本不会发生较大的浮动。A系列浅标点试坑内平均总沉降量43.1 mm,最大沉降发生在A3标点,为50.4 mm, A1、A2、A3、A4这4个标点总沉降量较为接近; B系列浅标点试坑内平均总沉降量39 mm,最大沉降发生在B1标点,为52 mm; C系列浅标点试坑内平均总沉降量39.4 mm,最大沉降发生在C1标点,为51.2 mm。沉降量最大的是1号标点,坑

内1~8号标点的沉降量会随着数字的增大而逐渐变小。这是因为1号标点距离试坑中心最近,最先受水浸湿饱和,该位置下面土层最先发生湿陷变形,周围土层也很快饱和发生湿陷。但水分沿着径向向外扩散比较慢,这样受水浸润的土层就会和为受水浸润的土层产生差异沉降,从而产生约束摩擦效应,越往外走约束摩擦效应也就越明显。故在试坑内离圆心越远的浅标点,其累计沉降量也会相应越小。对于试坑外部的浅标点,水分浸润的时间更晚,且水分扩散的范围有限,故沉降

量更小。

2.3.2 深部湿陷量变化特征研究

场地深标点累计沉降量随时间变化曲线见图6。

由图6可知,场地深标点的沉降曲线同浅标点一样也分为4个阶段:初期平缓段、迅速变形段、过渡段及后期平缓段。前面已经叙述过这4个阶段,现在不再赘述。D轴深标点最大沉降发生在D5,沉降量为49.9 mm,在浸水31 d后有加速沉降的趋势;在D3(浸水第29天)和D7(浸水第46

天)发生了突然沉降;埋深10 m以下的标点沉降量较小,部分标点发生上拱。E轴深标点整体沉降较小,最大沉降发生在E10,沉降量为9.5 mm,E10在浸水第9天发生突然沉降,单日沉降量达13.2 mm,然后缓慢抬升,并保持了沉降稳定。F系列深标点最大沉降发生在F5,沉降量为43.7 mm;F5、F10、F7和F2在浸水31 d后有加速沉降的趋势,停水后沉降趋于稳定,其余标点以缓慢抬升为主。

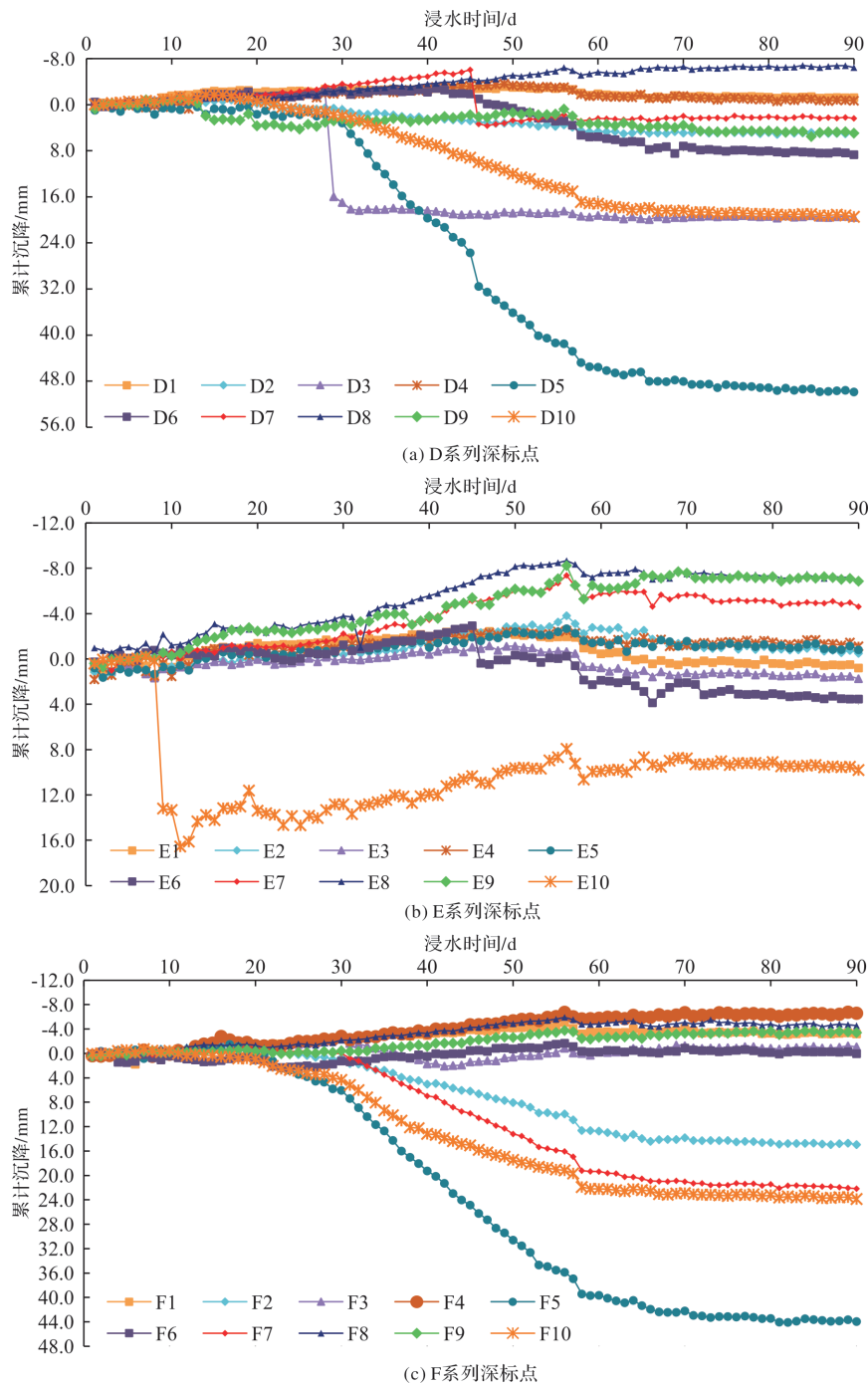


图6 场地深标点累计沉降量随时间变化

Fig. 6 Change of cumulative settlement of site deep markers with time

在每个系列深标点中, 同一深度的两个标点沉降量差别也很大. D5、D10 埋藏深度都为 5 m, D5 沉降量 49.9 mm, D10 沉降量 19.5 mm; F5、F10 埋藏深度都为 2.5 m, F5 沉降量 44 mm, F10 沉降量 23.9 mm. D5、F5 标点距圆心 3 m, D10、

F10 标点距圆心 15 m, D5、F5 距圆心较近, 最先受水浸湿发生湿陷沉降, 沿着圆心往外走会受到约束摩擦作用, 其沉降会小于最先发生湿陷的标点.

2.4 地表沉降范围分析

场地地表沉降过程曲线见图 7.

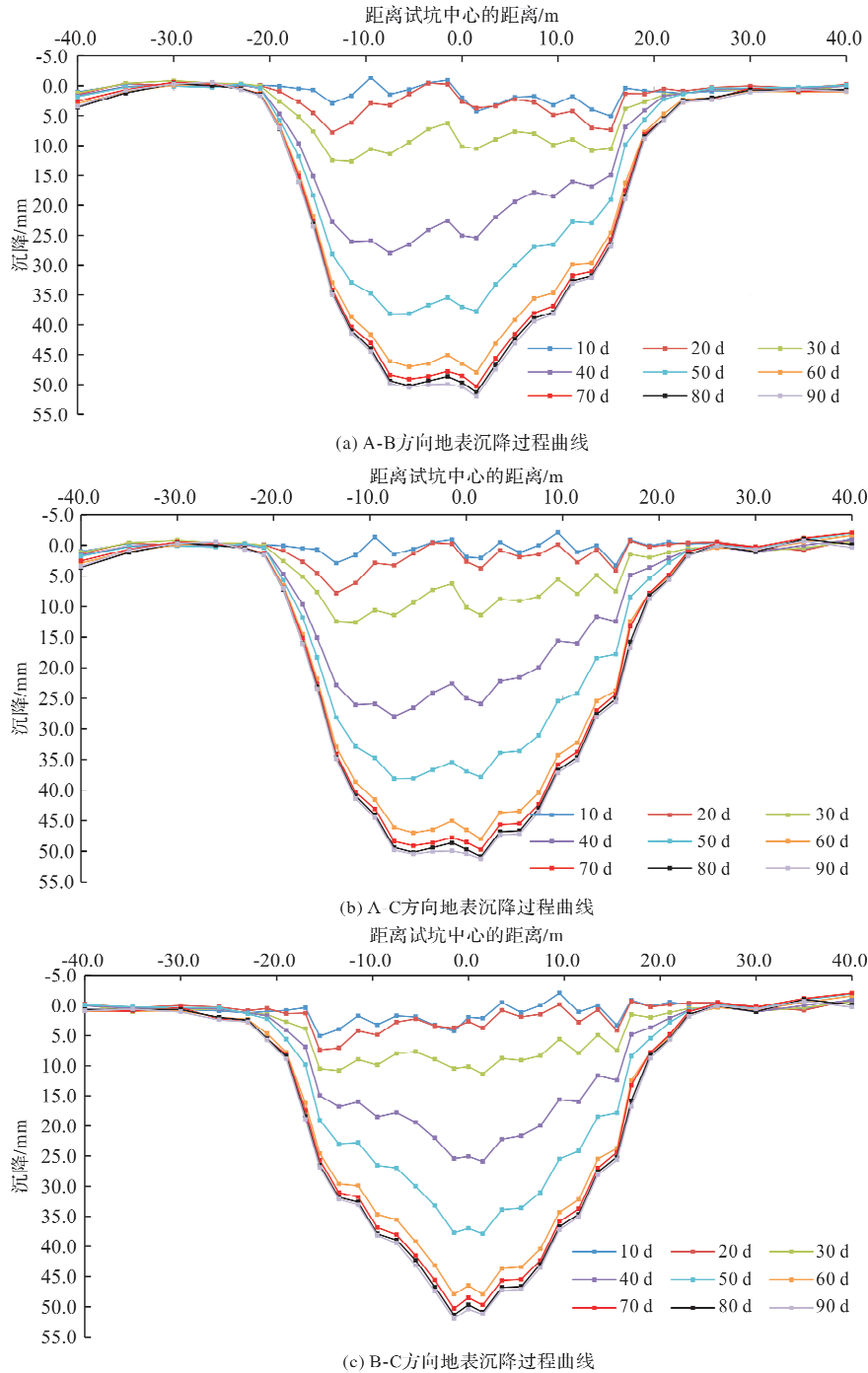


图 7 场地地表沉降过程曲线

Fig. 7 Site surface settlement process curve

由图 7 可知, 场地地表沉降曲线代表了不同时间段不同位置的沉降过程. 以图 7(a)为例横坐标 0.0 的沉降代表试坑中心的沉降量, 沿坐标轴往左代表 A 轴方向距试坑中心不同距离的沉降, 而沿坐标轴往右代表 B 轴方向距试坑中心不同距离的

沉降, 其他图以此类推. 沉降过程曲线沉降量由圆心区域向外逐渐减少, 呈漏斗形状, 纵向上各点的连线代表某个位置沉降量随时间的变化; 沉降过程曲线疏密程度代表着沉降发展的速率, 场地沉降过程曲线在 30~60 d 比较稀疏, 表明场地

在这个时间段沉降速率较快,场地大部分沉降是在这个时间段发生的.试坑中心沉降量最大,且沉降速率最大,由于边界效应的存在越远离试坑中心的位置,其沉降量、沉降速率都会越小.沿着试坑向外,沉降量越来越小直至几乎水平,而这些水平变化的点都是试坑外的浅标点.无论是哪两个方向,其沉降过程曲线基本呈中心对称状态,其两个方向的沉降量及沉降速率都大致相同,具有一致的规律.

2.5 浸水影响范围与湿陷范围分析

根据浅标点湿陷量确定湿陷水平范围,根据深标点湿陷量确定湿陷下限深度,结合湿陷水平范围及湿陷下限深度确定湿陷范围,场地的湿陷范围见图8.

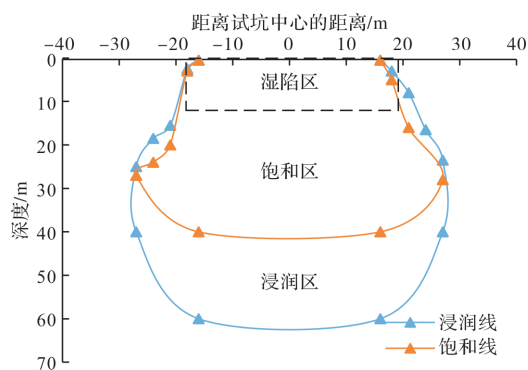


图8 场地浸水影响范围及湿陷范围

Fig. 8 Site immersion influence range and collapsible range

由图8可知,场地的湿陷范围:沿半径方向最远处距试坑中心的距离为19 m,湿陷下限深度为12.5 m.试坑半径为16 m,即试坑边缘3 m处的土层也发生了湿陷.水分浸润范围>饱和范围>湿陷范围,黄土在饱和条件及上覆饱和和自重作用下也不会发生湿陷,原因是深部土层的上覆饱和和自重应力大,土体被压密,结构较稳定,且深部土层的黄土颗粒之间胶结连接的接触面大,应力相对分散且抗位移的阻力较高,故深部土层不会发生湿陷,浅部土层土颗粒之间多为支架接触,结构不稳定,在水分及荷载作用下更容易发生湿陷.场地的浸润范围沿径向最远入渗点距离试坑边缘为12 m,故路基段防排水宽度为12 m,该结论可为西韩城际铁路路基排水及地基处治提供参考意见.

3 结论

(1)本次试坑浸水持续69 d,累计注水量 $30\,767\text{ m}^3$,日耗水量最大为 736 m^3 ,为大厚度自重湿陷性黄土的地基处理积累了宝贵资料和经验;

(2)研究了地表及深部土层沉降量随时间的变化特征,结果表明试坑地表、深部土层沉降量随时间变化曲线都呈现慢-快-慢-稳定的特点,湿陷变形发展过程的4个阶段分别为初期平缓段、迅速变形段、过渡段及后期平缓段,黄土的自重湿陷变形基本发生在迅速变形段和过渡段;

(3)研究了浸水范围及湿陷范围,结果表明湿陷范围<饱和范围<浸润范围,黄土在饱和条件及上覆饱和和自重应力作用下也不会发生湿陷.提出了路基防排水宽度为12 m的建议,该结论可为西韩城际铁路路基排水及地基处治提供参考.

参考文献 References

- [1] 王燕,姚仰平,胡玉定,等.不同含水率原状黄土的强度与变形特性试验研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2022,54(3):325-330.
WANG Yan, YAO Yangping, HU Yuding, et al. Experimental study on strength and deformation characteristics of intact loess with different water contents [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2022, 54(3): 325-330.
- [2] 张磊,罗少锋,鲁洁.湿陷性黄土场地竖向承载灌注桩浸水试验研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2019,51(4):532-537.
ZHANG Lei, LUO Shaofeng, LU Jie. Immersion tests on vertically loaded cast-in-place piles in collapsible loess [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2019, 51(4): 532-537.
- [3] ZHU Yuanjun, JIA Xiaoxu, SHAO Mingan. Loess thickness variations across the loess plateau of China [J]. Surveys in Geophysics: An International Review Journal of Geophysics and Planetary Sciences, 2018, 39(4): 715-727.
- [4] ZHAO Zhuangfu, ZHU Yanpeng, YE Shuaihua. Study on settlement deformation of high fill foundation in large thickness loess area [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(12): 1-12.
- [5] ZHAO Wenju, ZHOU Chun, HU Jiazhen, et al. Soil-water characteristic curves and fitting models of collapsible loess: A case study of Lanzhou, China [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2022, 31(4): 3455-3462.
- [6] ZHAO Meng, WU Honggang, GUO Wei, et al. Experimental study of the particle agglomeration on its mechanical properties of collapsible loess [J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10(9): 1-13.
- [7] ZHANG Yanjie, HAN Jianlong, WANG Xu, et al. Evaluation of loess collapsibility based on random field

- theory in Xi'an, China[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022(10):1-11.
- [8] YANG Hui, XIE Wanli, LIU Qiqi, et al. Three-stage collapsibility evolution of Malan loess in the loess plateau[J]. Catena, 2022,217(10):1-11.
- [9] JIN Songli, YAN Jun, LI Lechen, et al. New method for the mechanical characteristics of self-weight collapsibility testing of loess foundation based on centrifugal model test[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2022,30(22):4597-4606.
- [10] LIAO Shengxiu. Study on presoaking of collapsible loess[J]. Nonferrous Metallurgy Construction, 1983, (2): 1-13.
- [11] 李大展,何颐华,隋国秀. Q_2 黄土大面积浸水试验研究[J]. 岩土工程学报,1993(2):1-11.
LI Dazhan, HE Yihua, SUI Guoxiu. Study and test on immersion of Q_2 loess in large area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993(2): 1-11.
- [12] 石怀清. 西安塬区中更新世 Q_2 黄土场地浸水试验与研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2008.
SHI Huaqing. In-situ Immersion test and analysis of Pleistocene epoch Q_2 loess at Xi'an tableland[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2008.
- [13] 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(S2):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(S2): 100-108.
- [14] 黄雪峰,陈正汉,方祥位,等. 大厚度自重湿陷性黄土地基处理厚度与处理方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007(S2):4332-4338.
HUANG Xuefeng, CHEN Zhenghan, FANG Xiangwei, et al. Study on foundation treatment thickness and treatment method for collapse loess with large thickness[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(S2): 4332-4338.
- [15] 黄雪峰,陈正汉,哈双,等. 大厚度自重湿陷性黄土中灌注桩承载性状与负摩阻力的试验研究[J]. 岩土工程学报,2007(3):338-346.
HUANG Xuefeng, CHEN Zhenghan, HA Shuang, et al. Experimental study on bearing characteristics and negative friction resistance of cast-in-place piles in self-weight collapsible loess with large thickness[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007(3): 338-346.
- [16] 张严,刘德仁,王旭,等. 中兰铁路深厚黄土场地浸水地表变形规律研究[J]. 铁道科学与工程学报,2022,19(9):2461-2469.
ZHANG Yan, LIU Deren, WANG Xu, et al. Study on deformation law of submerged surface in deep loess site of Zhongwei-Lanzhou railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(9): 2461-2469.
- [17] 杨喆,王家鼎,李开超,等. 西安北至机场城际铁路黄土塬段现场试坑浸水试验研究[J]. 铁道学报,2022,44(6):107-115.
YANG Zhe, WANG Jiading, LI Kaichao, et al. Experimental study on site test pit immersion in loess tableland section of Xi'an north—airport intercity railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(6): 107-115.
- [18] 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. Water immersion field tests of collapsibility of loess foundation of Zhengzhou—Xi'an passenger dedicated line[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(1): 83-90.
- [19] 刘长玲. 大厚度自重湿陷性黄土渗透与湿陷变形规律及湿陷性评价方法研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2011.
LIU Changling. Study on the law of infiltration and collapsibility deformation and evaluation method of collapsibility of large thickness self-weight collapsible loess[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011.
- [20] 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 soaking tests on self-weight collapsible loess with heavy section in Lanzhou region [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(1): 65-74.
- [21] 马闫,王家鼎,彭淑君,等. 大厚度黄土自重湿陷性场地浸水湿陷变形特征研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(3):537-546.
MA Yan, WANG Jiading, PENG Shujun, et al. Immersion tests on the characteristics of deformation of self-weight collapsible loess under overburden pressure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3): 537-546.

(编辑 吴海西)