

文章编号: 1007-2993(2022)05-0409-08

大厚度自重湿陷性黄土场地 现场浸水试验研究

王庆满¹ 范寒光¹ 刘 艺¹ 房盛楠¹ 张 鑫²

(1. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西西安 710043; 2. 西安市轨道交通集团有限公司, 陕西西安 710018)

【摘要】 针对大厚度自重湿陷性黄土场地工程建设中所面临的湿陷性评价及地基处理等技术难题, 通过现场试坑浸水试验手段, 研究了试验过程中注水量的变化规律、水分场的运移规律、地表及深部湿陷变形特征、周边裂缝发展特征、浸水影响范围及饱和范围、地基土渗透系数、自重湿陷下限深度及其确定标准; 在此基础上, 提出一种考虑地层沉积时代反算因地区土质而异的修正系数 β_0 的方法, 并对黄土自重湿陷的判别标准进行了初步探讨, 结果表明, Q_3 黄土采用 0.015 的判别标准较为合适, Q_2 黄土采用相同标准不太合适, 对于 Q_2 黄土的自重湿陷性的评价建议采用现场试坑浸水试验确定。研究成果可为地区工程建设提供参考及借鉴。

【关键词】 大厚度自重湿陷性黄土; 现场浸水试验; 湿陷变形特征; 修正系数 β_0 ; 地层沉积时代; 自重湿陷判别标准

【中图分类号】 TU 444

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2022.05.012

Study on Field Immersion Test of Large Thickness Self-weight Collapsible Loess Sites

Wang Qingman¹ Fan Hanguang¹ Liu Yi¹ Fang Shengnan¹ Zhang Xin²

(1. China Jikan Research Institute of Engineering Investigations and Design Co., Ltd., Xi'an 710043, Shaanxi, China;

2. Xi'an Rail Transit Group Company Ltd., Xi'an 710018, Shaanxi, China)

【Abstract】 To solve the problems of collapsibility evaluation and foundation treatment in construction of large thickness self-weight collapsible loess sites, field immersion test was conducted. The rule of water injection rate, the movement of moisture field, the collapse characteristics of surface and underground, the development characteristics of cracks around the test pit, the influence range of both immersion and saturation, the permeability coefficient of foundation soil, the lower limit depth of self-weight collapsible loess and criteria were studied. On this basis, a method is proposed to calculate the correction coefficient β_0 which varies with the soil quality in different areas by considering the sedimentary age of the strata. A preliminary discussion on criteria of self-weight collapse of loess has been conducted. The result is: 0.015 is appropriate for Q_3 loess but not for Q_2 . It is suggested that field immersion test should be conducted to evaluate self-weight collapse of Q_2 loess. The research results can provide reference for regional engineering construction.

【Key words】 large thickness self-weight collapsible loess; field immersion test; characteristics of collapse; correction coefficient β_0 ; ages of depositional strata; criteria of self-weight collapse

0 引言

西部大开发战略的深入实施使得黄土地区工程建设日益增多, 城市基础设施建设不断完善, 城际铁路、城市轨道交通工程、综合管廊等迅速发展, 黄土的湿陷性评价及地基处理问题成为工程建设所面临的难题。

目前黄土湿陷性的评价方法主要分为两种, 一是计算法, 采用室内试验方法所确定的自重湿陷系数、湿陷系数计算, 综合判定场地的湿陷类型、湿陷等级; 二是实测法, 采用现场浸水试验(包括桩基浸水)的方法现场测得自重湿陷量。但黄土室内试验与原位试验试验条件存在差异, 包括取样扰动、饱和状态、边

作者简介: 王庆满, 男, 1986 年生, 汉族, 陕西西安人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事黄土工程性质研究。E-mail: wangqm-lj@163.com

界条件、试验面积、应力路径、土质不均匀、拱效应等,使得自重湿陷量的计算值与实测值之间往往存在差异^[1-3]。后者由于试验范围大,土体未扰动,保持了原始的应力状态,代表性好,能够准确判断场地的湿陷类型及湿陷下限深度,及时修正区域土质修正系数 β_0 ,该方法是目前公认湿陷性评价中最可靠的方法。涂光祉等^[4]、钱鸿缙等^[5]、李大展等^[6]、黄雪峰等^[7]、吴小鹏等^[8]、姚志华等^[9]、马 闫等^[10]先后针对不同工程开展了不同规模的现场试坑浸水试验,取得了一定成果。但由于现场试坑浸水试验成本大、周期长,实际工作中开展的相对较少。

本研究在西安地区开展了大型试坑浸水试验,对浸水过程中注水量、水分场的运移规律、地表湿陷

变形特征、分层湿陷变形特征、裂缝的发育发展规律、浸水影响范围及饱和范围等进行研究,研究成果为地区工程湿陷性评价及地基处理提供了技术支撑。

1 试验概况

1.1 场地岩土工程条件

本试验场地位于西安市东郊浐河西岸,东距浐河约 1.5 km,场地地势较平坦,地貌单元属浐河三级阶地,地下水埋深约 38 m。

在场地周边人工开挖探井 3 个,深度 30~31 m,每米采取原状土样进行室内物理力学指标测试,湿陷起始压力采用双线法,场地地层岩性见表 1,物理力学指标统计见表 2。

表 1 试验场地地层岩性表

层号	时代成因	岩土名称	深度/m	描述
①	Q ₄ ^{dl}	耕植土	0.0~0.5	黄褐色,稍湿,可塑,大孔隙发育,表层含大量植物根系
②	Q ₃ ^{col}	新黄土	0.5~12.4	黄褐—褐黄色,稍湿,硬塑,虫孔及大孔隙发育,土质均匀
③	Q ₃ ^{el}	古土壤	12.4~16.5	棕红色,硬塑,团粒结构,大孔隙及针孔状孔隙较发育,含白色钙质条纹及少量钙质结核,层底钙质结核含量较多,局部地段钙质结核富集成薄层,结核层厚0.2~0.3 m
④	Q ₂ ^{col}	老黄土	16.5~27.5	黄褐—褐黄色,硬塑,局部可塑,土质均匀,针状孔隙及大孔隙发育,偶含钙质结核,本层层顶1.0~1.5 m含少量钙质结核
⑤	Q ₂ ^{al+pl}	粉质黏土	27.5~30.0	灰黄色,硬塑,局部可塑,含铁锰质斑点及零星钙质结核
⑥	Q ₂ ^{al+pl}	卵石	30.0以下	杂色,稍湿,密实,亚圆形,磨圆度较好,一般粒径为20~80 mm,母岩成分以花岗岩、石英岩为主,中粗砂充填

表 2 场地物理力学指标统计表

层号及层名	类别	含水量 w/%	天然密度 $\rho(g \cdot cm^{-3})$	干密度 $\rho_d(g \cdot cm^{-3})$	孔隙比 e	饱和度 S_r	液性指数 I_L	压缩系数 a_{1-2}/MPa^{-1}	湿陷系数 δ_s	自重湿陷 系数 δ_{zs}
②新黄土	范围	14.4~24.3	1.41~1.77	1.14~1.47	0.898~1.379	39~63	0.47~-0.21	0.10~1.06	0.016~0.095	0.001~0.056
	平均值	20.3	1.60	1.33	1.054	53	0.17	0.32	0.044	0.020
③古土壤	范围	15.8~21.8	1.73~1.91	1.45~1.61	0.686~0.880	53~74	-0.23~0.30	0.09~0.19	0.000~0.026	0.000~0.013
	平均值	18.4	1.81	1.53	0.777	65	-0.04	0.14	0.008	0.006
④老黄土	范围	12.9~25.6	1.43~1.76	1.22~1.41	0.919~1.228	35~70	-0.45~0.69	0.08~0.36	0.006~0.078	0.011~0.072
	平均值	19.5	1.58	1.32	1.058	50	0.14	0.19	0.038	0.036
⑤粉质黏土	范围	17.9~22.2	1.88~1.92	1.55~1.60	0.691~0.755	70~83	-0.05~0.29	0.11~0.18	0.000~0.002	0.000~0.001
	平均值	20.2	1.90	1.58	0.722	76	0.13	0.15	0.001	0.000

根据探井土工试验资料成果,本场地的自重湿陷下限深度为 26 m,按《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB 50025—2018)有关规定计算(β_0 取 0.9),场地自重湿陷量为 528 mm,湿陷量为 1065 mm,试验场地属自重湿陷性黄土场地,地基湿陷等级为 IV 级(很严重)。

1.2 试坑设计

试验场地湿陷性土层厚度为 26 m,为使湿陷性

土层全部浸水饱和,并充分发生自重湿陷,试坑设计为圆形,直径 26 m,试坑深度 0.5 m,为平衡场地自重压力及增加土层的渗透性,在试坑底部铺设 0.1 m 的卵砾石。

通常现场试坑浸水试验过程中为了加速地基土浸水饱和,在坑内布设了一定数量的渗水孔,此举使得试验成果不能反映出水分自然缓慢入渗对自重湿陷的影响。为研究原始黄土地层水分场的运移规律,

分析湿陷的发展特征,本次试验不设置渗水孔,在埋设用于沉降监测的深标点时,对埋设孔进行分层回填夯实。

1.3 沉降监测点的布设

本次试验共布设沉降监测点 67 个,其中浅标点 43 个,深标点 24 个。浅标点由试坑中心向外分 3 个方向放射状布置 A、B、C 三条测线,三条测线呈 120° 夹角,每条测线试坑内布置 6 个浅标点,距圆心距离分别为 1.5 m、3.5 m、5.5 m、7.5 m、9.5 m、11.5 m,试坑外布置 8 个浅标点,距试坑边距离分别为 1.0 m、3.0 m、5.0 m、7.0 m、9.0 m、11.0 m、15.0 m、20.0 m。(见图 1)

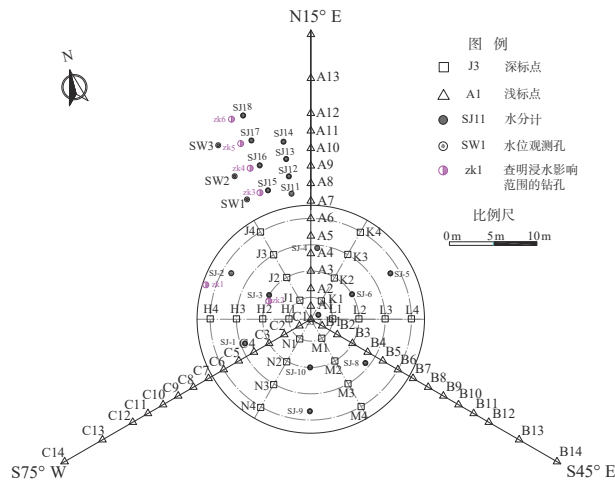


图 1 试坑浸水试验平面布置图

深标点的布设根据地层特征及基础埋深综合考虑,在重点部位(如隧道的顶底板、基底附近)应加密布设,此次试验深标点最深埋设至 26 m,为使地基土尽可能同时达到饱和,深标点深度采用交错对称布设,每个深度布设 2 组标点。

1.4 土壤水分计的布设

为分析浸水过程中各层土体含水量变化情况及水分场的时空运移规律,本次在试坑内、外分别布设土壤水分计。结合地层结构,试坑内布设深度分别为 5 m、10 m、15 m、20 m、25 m,分布在距试坑中心 5.5 m、8.0 m、10.5 m 的同心圆上,每一深度布设 2 组水分计。坑外在 A 组浅标点附近布置深度不同的 2 排水分计,各排水分计埋置深度分别为 8.0 m、16.0 m,其中埋深 8.0 m 水分计 4 个,距试坑边距离分别为 2 m、4 m、6 m、8 m,埋深 16.0 m 水分计 4 个,距试坑边距离分别为 3 m、6 m、9 m、12 m。

1.5 水位观测孔及含水率测试孔的布设

此次试验在试坑外布设了水位观测孔,孔深均为 26 m,位置与水分计相同。

为确定本次试验浸水影响范围,在试坑内、外分别布设测试孔,试坑内 2 个,试坑外 4 个,钻孔间距 3 m。每个钻孔内均间隔 0.5 m 采取扰动土样现场进行含水率及饱和度试验,为保证数据的准确性,测试孔要求浸水结束后,立即进行。

1.6 浸水试验过程

试验过程中,每天固定专人、固定仪器、固定时间对注水量及沉降量进行监测,监测实施中按照浸水前期→浸水后期→停水前期→停水后期,对监测频率做密→疏→密→疏的相应调整。试验注水后,及时巡查试坑周边情况,避免产生的微裂缝被破坏,当微裂缝产生后,及时在裂缝两侧设置裂缝观测点,每天定点采用游标卡尺或裂缝计对裂缝进行观测。注水过程中,在试坑边设置观测标尺,使试坑内水位保持在 30 cm 左右。

2 试验成果分析

2.1 试验注水量分析

本试验历时 65 d,其中浸水 51 d,停水观测 14 d,总注水量 14492 m³。图 2 表明注水量三个阶段:①注水量递增期(0~5 d),平均注水量达 385 m³/d,最大值出现在第 5 d,注水量 443 m³;②注水量下降期(6~30 d),随着试坑内水头的稳定,日注水量逐渐减少,平均注水量 301 m³/d;③注水量稳定期(31~51 d),随浸润锋面的推移,浸润范围不断扩大,但地层渗透系数逐渐减小,两者作用基本抵消,致使注水量基本保持不变。本试验中第 31~43 d,日注水量约 230~250 m³,第 44 d 后,日注水量再次增大,连续 10 天日平均注水量稳定在 290 m³ 附近,分析原因在于第 44 d 后,浸润锋面已到达卵石层中,该层渗透系数增大,相应注水量随之增大,卵石层属于良好的透水层,试坑浸水形成的浸润角在该层内不会因隔水层的隔水作用而不断增大,因此,后期单日注水量逐渐趋于稳定。

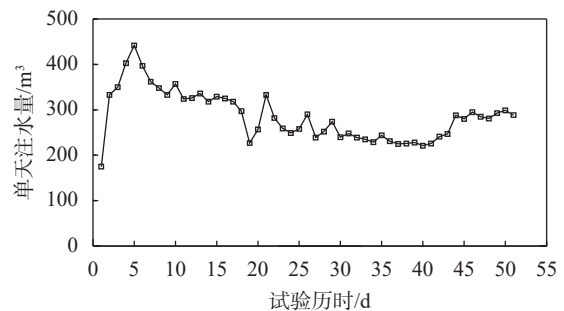


图 2 单日注水量-浸水时间关系曲线

2.2 水分入渗的时空变化规律

试坑内水分计用于研究试坑内竖向水分入渗规

律,图3表明,试坑浸水后,浸润锋面到达水分计埋设深度后,水分计读数开始变化,即地基土含水率开始增大,随着浸水时间的增加,注水量增加,各水分计依次从上至下读数发生明显的变化,在浸水41 h、95 h、135 h、195 h、270 h后,浸润锋面分别到达试坑以下5 m、10 m、15 m、20 m、25 m深度。水分计的变化规律可分为五个阶段:①浸润等待段,此过程为浸润锋线到达水分计位置所需的时间,与水分计的埋设深度有关;②浸水陡升段,当水分场中的浸润锋面到达水分计位置后,水分计数据增长速度先快后慢,此过程实质是地基土由初始浸润转向饱和状态的一个直观反映,当地基土趋近饱和时,水分计数据增长速度逐渐减慢;③浸水稳定段,此过程中水分计周围土体处于饱和状态,水分计数据趋于稳定;④停水陡降段,湿陷性黄土具有孔隙发育的特征,停水后,在重力作用下,静力水头迅速下降,孔隙中的水分向下入渗,土层含水率降低,水分计读数随之迅速减小;⑤停水缓降段,当土层孔隙中的自由水被疏干后,土体中的含水率变化非常缓慢,趋于缓慢降低阶段,由此表明土体含水量要恢复到原始状态需要很长的时间。

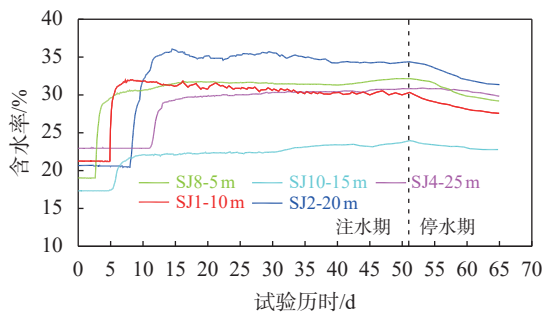


图3 试坑内水分计监测曲线

试坑外水分计用于研究试坑外水分入渗规律及浸水影响范围,图4、图5表明,试坑外始终是距离试坑最近(第一个)的水分计首先发生变化,随着浸水时间的推移,浸水影响的范围逐步扩大,水分计由近及远逐渐发生变化。在浸水117 h、382 h后,浸润锋线到达距试坑边2~3 m的地面下8 m、16 m深度。总体来看,试坑内、外水分计的曲线变化规律略有差异,试坑内水分计由于充分饱和,水分计变化曲线五个阶段完整,而浸润范围在坑外存在非饱和区及非浸润区,使得试坑外水分计曲线后期特征略有不同,即浸水后是否饱和、停水后是否存在停水陡降段,如图5中, SJ15曲线与试坑内形态完全相同,说明该区域在浸水过程中已达到饱和, SJ16进入停水期后,含水率仍在增大,表明其周围土体尚未达到饱和状态, SJ17及 SJ18含水率数据始终未发生变化,说明整个浸水过

程中,水分场未运移到其所在位置。

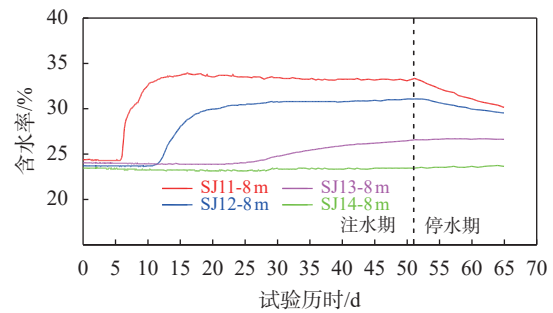


图4 试坑外8 m深度水分计监测曲线

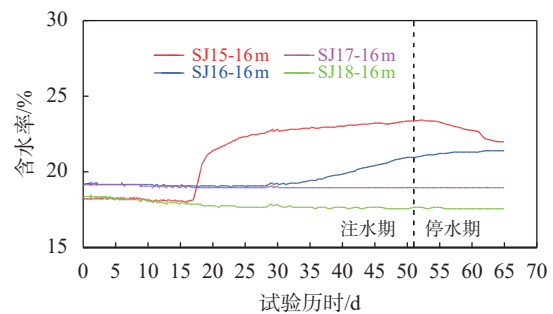


图5 试坑外16 m深度水分计监测曲线

2.3 渗透系数的分析

根据室内试验,场地地基土 Q_3 新黄土、 Q_3 古土壤、 Q_2 老黄土的垂直渗透系数分别为0.6~0.9 m/d、0.1~0.6 m/d、0.3~0.6 m/d,水平渗透系数分别为0.2~0.3 m/d、0.03~0.2 m/d、0.1~0.3 m/d;垂直渗透系数约为水平渗透系数的3倍。黄土与古土壤互层的地层结构,渗透系数随深度呈锯齿状衰减。

根据本次试坑内、外水分计监测结果:地基土的实测渗透系数远大于室内试验值,5 m、10 m、15 m、20 m、25 m各深度范围内竖向渗透系数分别为2.92 m/d、2.53 m/d、2.83 m/d、2.50 m/d、2.22 m/d,地基土竖向综合渗透系数为2~3 m/d,8 m、16 m深度水平综合渗透系数为0.63 m/d、0.32 m/d,土体垂直渗透速率明显优于水平渗透速率,垂直渗透系数约为水平渗透系数的5~10倍。

黄雪峰等^[11]研究表明陇西地区地基土在22~25 m以下渗透非常缓慢,达不到湿陷起始含水率,而关中地区实测数据与陇西地区差异较大,20 m以下土体水分下渗也是相当快的,在浸水10~15 d,浸润锋线已到达20 m位置,含水率开始增加,浸水结束后,20~30 m也是充分饱和的。两地区差异原因主要在于黄土物质成分、土的种类、微观结构和沉积环境(物质搬运远近)等因素的影响,陇西地区以粉土为主,关中地区以粉质黏土为主,且大孔隙、虫孔发育,孔

隙率较高。

2.4 地表湿陷变形特征分析

截至试验结束, 试坑内标点 B1 沉降最大, 为 208.7 mm, 标点 B6 沉降最小, 为 118.1 mm, 平均沉降量 180.0 mm。图 6 为 B1 单天与累计沉降量随时间变化曲线。由于各标点沉降量随时间变化规律基本相同, 本次以 B1 为例进行分析。

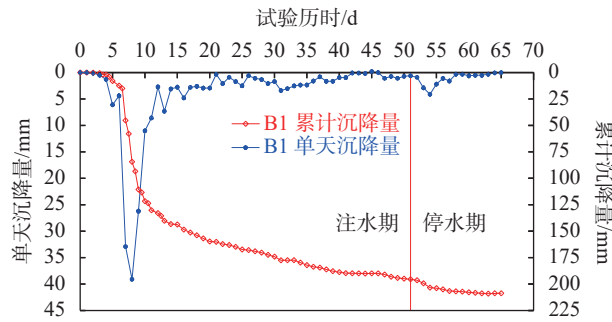


图 6 B1 单天与累计沉降量-时间变化曲线

由图 6 可知: 整个试验过程中, 各标点沉降量可分为以下几个阶段: ①初期平缓段(浸水 0~4 d): 本试验在试坑内未布设渗水孔, 该阶段土体从上至下逐渐受到浸润, 含水率逐渐增大, 随着上部土体逐渐接近湿陷含水率, 自重湿陷开始发生, 本阶段单天最大沉降量 1.3 mm, 单天平均沉降量为 0.4 mm; ②浸水陡降段(浸水 4~14 d): 土体从上至下逐渐达到饱和状态, 达到了湿陷含水率, 在上覆土体饱和自重压力下发生剧烈湿陷, 单天最大沉降量达到 39.1 mm, 单天平均沉降量为 14.2 mm, 本阶段湿陷量占总湿陷量的 69%; ③中期平缓段(浸水 15~51 d): 土体经过剧烈湿陷后逐渐进入湿陷稳定阶段, 单天平均沉降量由 14.2 mm 降为 1.4 mm, 并呈现逐渐减小的趋势; ④停水陡降段(停水 0~7 d): 停水后, 沉降量迅速增大, 本阶段的沉降量以土体的固结沉降为主, 单天平均沉降量 1.5 mm, 单天最大沉降量 4.1 mm; ⑤后期平缓段(浸水 8~14 d): 单天平均沉降量降至 0.3 mm, 并逐渐减小至 0.2 mm 以下, 土体进入固结稳定阶段。

图 7 为不同浸水历时 A-C 剖面浅标点累计沉降量变化曲线, 其它剖面类似, 从图 7 可以看出, 大面积试坑浸水试验引起的地面沉降以试坑中心(Z0 标点)呈大致对称发展, 试坑内沉降量随着距离增加呈减小趋势, 试坑外沉降量远小于试坑内, 且随距离的增大逐渐趋于 0。组合剖面沉降曲线呈明显的“U”字形。说明随着距试坑中心距离的增大, 湿陷土体受到试坑侧边土的牵拉阻力逐渐增大, 自重湿陷量逐渐减小。

现场浸水试验过程中, 试坑内最大沉降量不一

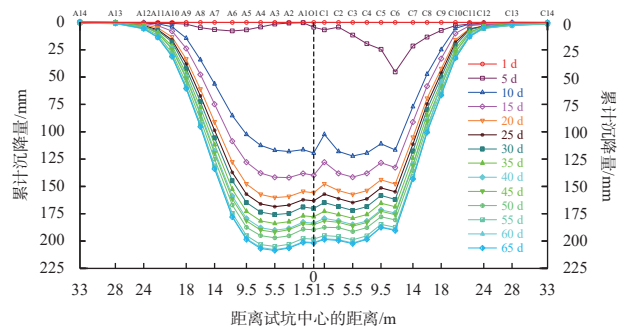


图 7 不同浸水历时 A-C 剖面浅标点累计沉降量变化曲线

定发生在试坑中心, 但一般位于在试坑中心附近, 主要是由于湿陷性土体的各向异性, 即土层湿陷性分布不连续因素造成的。

2.5 深部湿陷变形特征及自重湿陷下限深度分析

图 8 为不同浸水历时深标点(分层)累计沉降量变化曲线, 图 8 表明, 从时间与浸水阶段上分析, 深部土体发生自重湿陷量的变化规律与地表沉降一致; 从自重湿陷量与深度的规律来看, 试验场地地基土的自重湿陷量在 8 m 位置出现明显的拐点, 该深度以下的土体即使在长期浸水饱和状态下, 也不会发生自重湿陷或微弱的湿陷。显而易见, 本试验场地的自重湿陷主要发生在 8 m 以上的 Q_3 新黄土中, 古土壤及下部 Q_2 老黄土自重湿陷量很小。

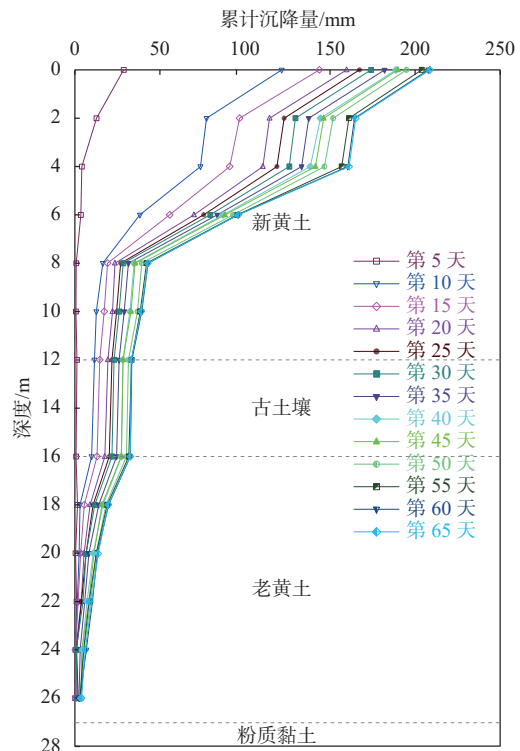


图 8 不同浸水历时深标点(分层)累计沉降量变化曲线

针对黄土湿陷性评价及提供切实可行的地基处理方案, 查明场地的自重湿陷下限深度尤为关键。

自重湿陷下限深度的确定原则与工程类别及重要性等级有关,本文提出了三种标准对湿陷土层下限深度进行了讨论:①实测自重湿陷系数即相邻深度标点沉降量与深度之差的比值(物理意义同自重湿陷系数),采用实测自重湿陷系数大于0.015的下限深度作为自重湿陷下限深度;②下伏土层实测累计沉降量等于某标准所对应的深度,这一标准针对具体的工程而定,如高铁工程要求累计沉降量不大于15 mm,地铁工程要求沉降量不大于10 mm;③累计沉降量为

0位置所对应的深度。

从表3中可以看出,按标准①,8 m以上实测自重湿陷系数大于0.015,其下均小于0.015,按此确定的自重湿陷下限深度为8 m;按标准②,对于高铁工程,19 m以下沉降小于15 mm,所以湿陷下限深度为19 m,对于城轨工程,20 m以下沉降小于10 mm,所以湿陷下限深度为20 m;按标准③,26 m以下的累计自重湿陷量为0,所以湿陷下限深度为26 m。

表3 试坑内分层沉降量及自重湿陷系数

沉降观测标点埋深/m	第 <i>i</i> 层代表深度/m	自重湿陷量实测值/mm	第 <i>i</i> 层的自重湿陷量/mm	第 <i>i</i> 层的自重湿陷系数	自重湿陷性判定
0.5	1.5~2.0	208.7~151	57.7	0.038	自重
2	2.0~4.0	151~145	6	0.003	非自重
4	4.0~6.0	145~78	67	0.034	自重
6	6.0~8.0	78~41	37	0.019	自重
8	8.0~10.0	41~34	7	0.004	非自重
10	10.0~12.0	34~30	4	0.002	非自重
12	12.0~16.0	30~27	3	0.001	非自重
16	16.0~18.0	27~17	8	0.004	非自重
18	18.0~20.0	17~9	4	0.003	非自重
20	20.0~22.0	9~5	3	0.002	非自重
22	22.0~24.0	5~2	2	0.001	非自重
24	24.0~26.0	2~0	0	0.000	非自重
26	>26	0	0	0	非自重

本场地若采用标准①,剩余自重湿陷量为41 mm,自重湿陷下限深度明显变浅,地基处理费用大大降低,若采用标准③,自重湿陷下限深度较深,工程风险降低,但地基处理费用巨大。

本试验场地以西安城市轨道交通工程项目为依托,从工程安全性、项目投资及工程特征类别综合考虑,采用标准②,即自重湿陷下限深度20 m。

本场地室内试验自重湿陷的下限深度为27.5 m,现场试验实测下限深度为20 m,为室内试验所得下限的0.72倍,总体上来看,本场地自重湿陷系数现场实测值偏小,与室内试验值差异较大,这与室内和现场试验条件的差异有关。

2.6 裂缝发展特征分析

浸水试验过程中,随着自重湿陷的发生,试坑外地表会在坑内土体湿陷引起的拉应力作用下形成裂缝,裂缝的发育、发展过程同时反映了浸水后水分的运移规律及试坑周边的湿陷特征。

图9为本次试验试坑周边裂缝分布图,试验浸水开始后,试坑边缘陆续出现了小坍塌,并伴有小裂

缝出现,在试坑周围先后形成了3道大的环形裂缝。浸水后第5 d,在距试坑边3~5 m出现了第一道裂缝,随着湿陷范围的逐步扩大,第一道裂缝范围内地基土发生剧烈湿陷,裂缝宽度及错台高度不断增大;浸水11 d后,在距试坑边5~7 m逐渐形成第二道环形裂缝,由于第一道裂缝范围内的土体湿陷速率小于第二道裂缝,因此在第二道裂缝发展过程中,第一道裂缝逐渐闭合,错台减小;在浸水第22 d后,在距试坑边8~10 m开始形成第三道裂缝,但直至试验结束第三道裂缝未形成闭合环。

对试坑外浅标点沉降数据和裂缝数据进行对比分析可以看出:裂缝是在湿陷发生到一定阶段后才出现的,裂缝的出现滞后于湿陷发生1~3 d;浸水后地面裂缝的形状受浸水边界形状控制,呈环形,裂缝形成后两侧形成错台,错台表现为内(靠近试坑侧)低外高,随着水在径向的渗透,由近及远,试坑外地层依次发生湿陷,地面裂缝也随之出现,在后一级裂缝的形成发展过程中,前级裂缝逐渐闭合。

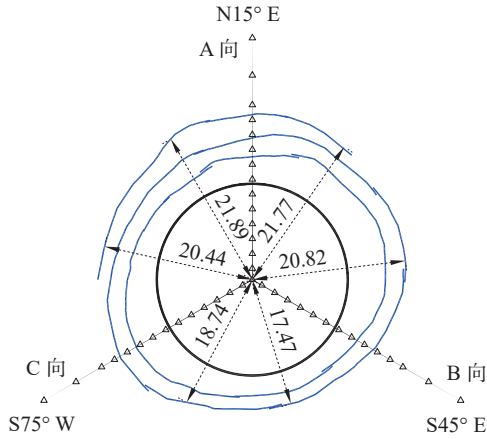


图9 试坑周边裂缝分布图(单位:m)

2.7 浸水影响范围及饱和范围

浸水影响范围及饱和范围包括径向及竖向两个方向, 试验停水后, 在试验孔中间隔 0.5 m 采取扰动土样, 现场进行含水率及饱和度测试。对于黄土, 取饱和度 $S_r=85\%$ 为饱和界限。浸水影响范围及饱和范围是根据水分的监测数据及停水后测试孔的试验数据综合确定的。

图 10 表明, 地基土在浸水后的浸水影响范围及饱和范围形状类似一个倒置的“碗”状, 在古土壤处向外突出, 这是由于该层古土壤及其与下卧黄土过渡土层致密, 从而起到相对隔水层的作用。浸湿区与饱和区的影响范围随深度的增加而逐渐增大, 浸润线与试坑边缘垂直向约 28° , 饱和范围小于浸润范围, 饱和范围与试坑边缘垂直向约 17° , 深度 27.5 m 处浸润线的影响范围距坑边约 14 m。

最外侧的裂缝距试坑边缘 8~10 m, 而试坑周围发生地表沉降的边界距坑边约 10~12 m, 饱和范围

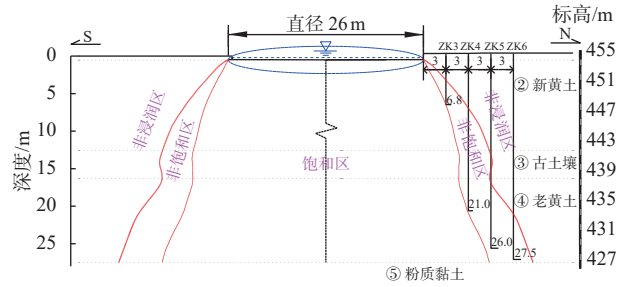


图 10 浸水影响范围及饱和范围

距试坑边约 9 m, 浸润线的影响范围距坑边约 14 m, 由此可以看出, 裂缝范围<湿陷变形范围≈饱和范围<浸水影响范围。

2.8 场地 β_0 的确定

本试验试坑直径 26 m, 自重湿陷下限深度 20 m, 考虑边界效应的影响, 在进行因地区土质而异的修正系数 β_0 的反算时, 只考虑 20 m 直径范围内的浅标点, 将其地表沉降量的算数平均值作为本场地自重湿陷量的实测值。

根据现行《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB 50025—2018)的规定, β_0 为自重湿陷量实测值与自重湿陷量计算值(不修正)的比值, 按计算本场地的 $\beta_0=0.3$, 与规范中给出的关中地区的修正系数 $\beta_0=0.9$ 相差较大。通过西安地区周边多组试坑浸水试验发现, 西安地区自重湿陷主要发生在 Q_3 黄土中, Q_2 黄土中往往很小, 若均采用相同的修正系数, 可能使湿陷性的评价不准确, 考虑地层沉积时代效应的影响, 本文对西安周边所做的试坑浸水试验按时代成因对 β_0 进行了反算, 反算结果见表 4。

表 4 考虑沉积时代时 β_0 的反算值

试验地点	地貌单元	定名	沉积时代	湿陷性土层厚度/m	试坑直径/m	湿陷下限深度/m	自重湿陷量实测值/mm	自重湿陷量计算值/mm	不含修正系数的计算值 β_0
月登阁(本次场地)	泾河三级阶地	新黄土	Q_3	16.5	26	20	181.7	177	0.92
		老黄土	Q_2	10.0			27	351	0.07
西安田家湾	黄土梁洼	新黄土	Q_3	15.2	20	11.5	285.4	268	0.96
		老黄土	Q_2	3.3			0	36	0
西安黄渠头	黄土梁洼	新黄土	Q_3	12.3	20	8.8	74.1	82	0.81
		老黄土	Q_2	5.5			0	107	0
西安杨村	黄土塬	新黄土	Q_3	11.6	25	0	-5(抬升)	0	0
		老黄土	Q_2	22.5			0	182	0
西安高望堆村	黄土塬	新黄土	Q_3	11.6	25	0	-3(抬升)	0	0
		老黄土	Q_2	18.0			0	112	0
咸阳北塬	黄土塬	新黄土	Q_3	13.5	26	10	380.5	179	1.91
		老黄土	Q_2	7.0			0	129	0

从表4可以看出,地区修正系数 β_0 与黄土的沉积时代具有相关性,沉积年代越长, β_0 越小,且不同地貌单元、不同沉积年代黄土 β_0 的差别较大。

西安地区黄土梁洼及河流三级阶地 Q_3 新黄土反算的 β_0 与规范给出的地区的修正系数基本一致,而 Q_2 老黄土反算的 β_0 比规范给出的修正系数小得多;西安地区黄土塬 Q_3 新黄土反算的 β_0 差异性更大,西安南塬(杨村及高塬堆村)实测值不仅不沉降,反而略有抬升,咸阳北塬 β_0 是规范给出的地区的修正系数的2倍, Q_2 老黄土反算的 β_0 均为0,由此可以看出,即使在相同地区、相同地貌单元内,各层土的湿陷性特征也可能不尽相同,因此,考虑地层沉积时代来反算 β_0 更符合黄土自重湿陷的实际情况。

通过表4可知,对 Q_3 黄土,现场试验结果和室内试验结果基本接近,即室内试验确定具自重湿陷的 Q_3 黄土,现场试验也具有明显自重湿陷性,现场试验确定的自重湿陷下限深度与土层厚度基本一致(不含 Q_3 古土壤),因此 Q_3 黄土采用0.015的判别标准较为合适。

但对 Q_2 黄土,若按自重湿陷系数0.015的划分标准,大多数的 Q_2 黄土试样具自重湿陷性,而现场试验均未表现出具有明显湿陷沉降,表4中6个试验场地 Q_2 黄土自重湿陷性大于0.015的试样占绝大多数,但实际上仅月登阁场地 Q_2 黄土层产生了轻微自重湿陷沉降,其余试验场地均未发生自重湿陷沉降。考虑到月登阁试验场地 Q_2 黄土发生了一定量的自重湿陷沉降,不能否定 Q_2 黄土发生自重湿陷的可能性,只是由于自重湿陷系数的划分标准不太合适,需在今后大量的实测数据及工程实践基础上进行修正完善。因此,建议对 Q_2 黄土的自重湿陷性采用现场试坑浸水试验确定。

3 结论

(1)试坑浸水后,试坑内水分计从上至下、试坑外由近到远读数依次发生明显的变化,水分计的变化过程分为浸润等待、浸水陡升、浸水稳定、停水陡降及停水缓降五个阶段,水分计变化过程实质是地基土由初始浸润转向饱和状态的直观反映。地基土的实测渗透系数远大于室内试验,地基土竖向综合渗透系数为2~3 m/d,8 m、16 m深度的水平综合渗透系数分别为0.63 m/d、0.32 m/d,土体垂直渗透速率明显高于水平渗透速率,垂直渗透系数约为水平渗透系数的5~10倍。

(2)按照湿陷的速率特征,自重湿陷变形的发生经历了初期平缓、浸水陡降、中期平缓、停水陡降、

后期平缓五个阶段。

(3)提出三种确定自重湿陷下限深度的方法,从工程安全性、项目投资及工程特征类别综合分析,按城市轨道交通工程控制标准,确定本场地的自重湿陷下限深度为20 m。

(4)地基土在浸水后的浸水影响范围及饱和范围形状类似一个倒置的“碗”状,受古土壤隔水的影响,在古土壤处向外突出,地表裂缝范围<湿陷变形范围≈饱和范围<浸水影响范围。

(5)提出了一种考虑沉积时代的 β_0 的计算方法,为黄土地区湿陷性评价提出一种新思路。

(6)对黄土自重湿陷的判别标准进行了初步探讨,通过现场试坑浸水试验分析得出: Q_3 黄土采用0.015的判别标准较为合适, Q_2 黄土采用相同标准不太合适,需在今后大量的实测数据及工程实践基础上进行修正完善;建议对 Q_2 黄土的自重湿陷性评价采用现场试坑浸水试验确定。

参考文献

- [1] 郑建国,邓国华,刘争宏,等.黄土湿陷性分布不连续对湿陷变形的影响研究[J].*岩土工程学报*,2015,37(1):165-170.
- [2] 李开超,王庆满.黄土自重湿陷量室内外试验值差异原因探讨[J].*山西建筑*,2017,43(3):47-48.
- [3] 王云南,唐国艺,郑建国.新近堆积黄土研究综述[J].*岩土工程技术*,2018,32(6):298-302.
- [4] 涂光祉,钱鸿缙.关中地区黄土湿陷变形的试验研究[J].*西部探矿工程*,1996,8(S1):10-14.
- [5] 钱鸿缙,朱梅,谢爽.河津黄土地基湿陷变形试验研究[J].*岩土工程学报*,1992,14(6):1-9.
- [6] 李大展,何颐华,隋国秀. Q_3 黄土大面积浸水试验研究[J].*岩土工程学报*,1993,15(2):1-11.
- [7] 黄雪峰,陈正汉,哈双,等.大厚度自重湿陷性黄土地基湿陷变形特征的大型现场浸水试验研究[J].*岩土工程学报*,2006,28(3):382-389.
- [8] 武小鹏,熊治文,王小军,等.郑西高速铁路豫西段黄土现场浸水自重湿陷特征研究[J].*岩土力学*,2012,33(6):1769-1773.
- [9] 姚志华,黄雪峰,陈正汉,等.兰州地区大厚度自重湿陷性黄土地基浸水试验综合观测研究[J].*岩土工程学报*,2012,34(1):65-74.
- [10] 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.
- [11] 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征水分入渗规律及地基处理方案研究[J].*岩土力学*,2011,32(S2):100-108.