

DOI: 10.11779/CJGE201403017

大厚度黄土自重湿陷性场地浸水湿陷变形特征研究

马 闫¹, 王家鼎¹, 彭淑君¹, 李永伟², 王军海², 陈 玮²

(1. 西北大学地质学系/大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 山西省勘察设计研究院, 山西 太原 030013)

摘 要: 在晋中地区大厚度自重湿陷性黄土场地进行了打设注水孔的浸水试验, 提出了一种浸水试坑外部土层水平位移的监测方法, 对地表及地下湿陷变形、水分扩散规律、浸水湿陷范围、试坑周围裂缝发展及试坑外围地下水平位移进行了监测和研究, 对地区修正系数 β_0 的计算方法进行了探讨。结果表明: 该场地黄土湿陷经历初始浸水、湿陷起始、剧烈湿陷、稳定湿陷、剧烈固结、稳定固结 6 个阶段; 探讨了浸水过程中水分扩散规律及其对湿陷变形的影响, 提出了“湿陷沉降迟滞-突变”效应并用“层壳”作用对其进行了解释; 对比其它试验资料发现地面湿陷影响范围与自重湿陷性土层厚度的比值具有一定规律, 均在 1.6 左右; 建立了一个以面积为权重的 β_0 反算方法并算得该地区 β_0 为 0.7; 试坑周围的裂缝发展经历侧向拉开、纵向发展、新裂缝产生、受压变窄 4 个阶段; 该场地实测自重湿陷下限深度为 18 m; 试坑外围浅部土层向试坑中心方向位移, 深部土层则向外部位移, 拐点的深度随与试坑距离的增大而减小。研究成果已经应用于该场区后期地基设计, 并可指导该地区未来工程建设。

关键词: 大厚度湿陷性黄土; 浸水试验; 水分扩散; 湿陷迟滞-突变效应; β_0 的计算方法; 水平位移

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)03-0537-10

作者简介: 马 闫(1989-), 男, 吉林辽源人, 博士研究生, 主要从事黄土工程性质及黄土地质灾害研究工作。E-mail: myan1989@163.com。

Immersion tests on characteristics of deformation of self-weight collapsible loess under overburden pressure

MA Yan¹, WANG Jia-ding¹, PENG Shu-jun¹, LI Yong-wei², WANG Jun-hai², CHEN Wei²

(1. Department of Geology, Northwest University/ State Key Laboratory of Continental Dynamics, Xi'an 710069, China; 2. Shanxi

Investigation Research and Design Institute, Taiyuan 030013, China)

Abstract: The immersion tests on a self-weight collapse loess site are conducted by setting water injection holes in Jinzhong City of Shanxi Province, China. A method for measuring the horizontal displacement of underground loess outside the test pit is proposed. The collapsible deformation of ground surface and underground, the influence region of loess collapse, the development process of fissures around the test pit and the underground lateral deformation are monitored and studied. The computing method of area correction factor β_0 is discussed. The results indicate that the curve of the collapsible process includes 6 stages. The influence region of the loess collapse relates to the thickness of the self-weight collapsible loess, and their ratio is about 1.6, which is obtained from the results of 4 immersion tests in 4 provinces. A new computing method based on the weighted average of the area that stands for different collapse volumes is established, and then the area correction factor β_0 is calculated as 0.7, which is greater than the value given by the Chinese Code. The development process of the fissures around the test pit experiences 4 steps, and the thickness of the self-weight collapsible loess determined by the immersion tests is 18 m, which is less than the value got from the indoor soil tests. The shallow loess outside the test pit moves inside while the deep loess moves outside, and the depth of inflection point decreases when the distance between the monitoring line and the test pit increases. All the results have been applied to the design of foundation treatment in later construction projects in this site, and they can also guide other projects in nearby regions.

Key words: self-weight collapsible loess; immersion test; water diffusion; delay and mutation effect of collapse; computing method of β_0 ; horizontal displacement

0 引 言

随着国家经济的持续快速发展以及政策倾斜, 中

基金项目: 国家自然科学基金项目(40972193, 41372269); 高等学校
博士学科点专项科研基金项目(20116101130001)

收稿日期: 2013-05-06

国中西部地区的建设速度和规模日渐加大,导致黄土区各大城市用地日趋紧张,新建的工业与民用建筑呈现出逐渐由低阶地转向高阶地的发展态势,随之而来的大厚度自重湿陷性黄土地基的勘察、评价以及处理问题成为了黄土地区工程技术人员所面临的首要难题。

目前研究黄土湿陷性的方法有两种:第一种方法是通过室内试验,从黄土物质成分、微结构特点及力学机制角度定性或定量研究黄土的湿陷性质,陈正汉等^[1-2]、杨运来^[3]、高国瑞^[4]、王家鼎等^[5]、雷祥义^[6]、苗天德等^[7]、张苏民、楚华栋、王步云、汪国烈、张炜等在这方面取得了丰硕的成果。室内试验研究加深了人们对湿陷机理的认识,但是通过室内试验得到的湿陷量计算值需经过修正才能应用于地基处理设计之中。第二种方法是开展原位的大型试坑浸水试验或浸水载荷试验,通过这种方法可以直接获得场地黄土的自重湿陷变形量及自重湿陷下限深度,但是因其费用高,耗时长,工作量大,故相对开展较少。廖胜修^[8]、钱鸿缙等^[9]、李大展等^[10]、黄雪峰等^[11]、刘保健等^[12]、王小军等^[13]、姚志华等^[14]针对不同工程开展了不同规模的大型原位浸水试验,为国家基础工程建设做出了贡献。

本研究基于山西省重点工程——晋中市榆次区新能源汽车产业园的黄土湿陷性评价问题,在郝家沟吉利新能源汽车场内开展了原位大型试坑浸水试验,对浸水过程中地表及地下的竖向沉降、水平位移以及浸水过程中试坑周围裂缝的发育过程进行了监测和研究。通过本次浸水试验得到的一系列结论可用于指导该地区未来大规模的工程建设。

1 试验概况

1.1 场地条件

试验场地位于山西省晋中市榆次区郝家沟村吉利

新能源汽车二期工程场区内,距太原市区 30 km,这一地区是未来太原—晋中一体化工程建设重点区域。该场地地貌单元属于黄土台塬,黄土层厚度 55 m 左右,土层内未见地下水,场地地层岩性见表 1。

在试验场地内开挖两口 25 m 深的探井,每个探井均从地表起间隔 1 m 取一组土样并现场装环刀,立即返回试验室进行基础物理学指标测试,其中湿陷试验采用单线法。测试结果显示,自重湿陷系数 $\delta_{zs} > 0.015$ 的土层为第②层和第③层,最大自重湿陷系数可达 0.114。按《湿陷性黄土地区建筑规范》推荐的地区修正系数 $\beta_0 = 0.5$ 计算得出该场地的自重湿陷量计算值 $\Delta_{zs} = 517.5$ mm,湿陷量计算值 $\Delta_s = 1279.0$ mm。按以上计算结果判定,该场地为自重湿陷性场地,地基湿陷等级为 IV 级(很严重)。

1.2 试坑设计

室内试验揭露的湿陷土层下限深度为 24 m,按照规范要求,浸水试坑直径必须大于等于 24 m。以往浸水试验的经验表明,浸水试坑在停水后的地面形态为漏斗形,坑边沉降量要小于坑中心的沉降量,且坑内各处沉降不均匀,对后期计算 β_0 时的取值造成干扰。所以,本次试验吸取以往经验,设计浸水试坑直径为 30 m,大于实际自重湿陷土层厚度,将湿陷土层厚度影响范围包含在试坑中,最后的数据分析只选择试坑中心 24 m 直径的范围,减小边界效应对自重湿陷量的影响。试坑深 0.8 m,坑底部铺设 0.3 m 厚的砂砾石,为达到使地层快速饱和及挖掘该地区土层最大湿陷量的目的,在试坑内打设了 15 个注水孔,孔内用砂砾石填充,浸水试坑设计方案见图 1。

1.3 沉降观测标点布置

地面沉降观测标点的布置是以试坑圆心为中心,在 3 个互成 120° 的方向上(A, B, C 轴)每个方向布置 19 个,3 条观测轴采用同样的布置方式,以 A 轴为例,其中 5 个观测标点位于坑内,间距 3 m,14 个位于坑外,A5 至 A10 间距 1 m, A10 至 A14 间距 1.5

表 1 试验场地地层岩性特征表

Table 1 Stratigraphic characteristics of loess test site

地层	深度	岩性	岩性特征
①第四系 全新统(Q ₄ ^{ml})	0~0.3 m	新近堆积土	淡黄色,耕植土,干,硬塑,大孔隙发育,土质不均,含大量植物根系
②第四系 晚更新统(Q ₃ ^{col})	0.3~12 m	马兰黄土	0.3~6 m 浅黄色,马兰黄土,粉土为主,较干,硬塑,大、中孔隙发育,偶见蜗牛壳,土质较均匀,6 m 见一姜石层 6~12 m 黄褐色,马兰黄土,粉质黏土,稍湿,硬塑,孔隙发育,无摇振反应,稍有光泽,干强度及韧性中等
③第四系 中更新统(Q ₂ ^{col})	12~	离石黄土	12~24 m 褐黄色—褐红色,上离石黄土,粉质黏土,稍湿,可塑,孔隙不发育,土质较均匀,无摇振反应,稍有光泽,干强度及韧性中等

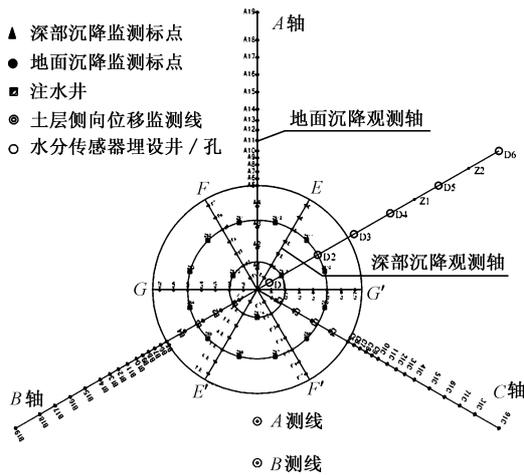


图 1 试坑监测点布置方案图

Fig. 1 Arrangement of observing points

m, A14 至 A18 间距 2.5 m, A18 与 A19 间距 4 m, 即每轴最远处的沉降标点距试坑圆心 40 m, 3 条轴共 57 个地面沉降观测标点。深层土体沉降观测标布设在分别与 A, B, C 轴两侧呈 30° 角的 6 条半径上, 分别命名为 E, E', F, F', G, G' 轴, 每轴上布置 7 个观测标点, 由试坑中心向外辐射每 2 m 设 1 个。以上覆土层饱和重度为基础将土层分成浅、中、深层土体 3 部分 (0~6 m, 6~12 m, 12~24 m), 在每部分土层范围里均匀布置 14 个深标点, 共计 42 个; 同时, 考虑到距坑中心的距离会影响到自重湿陷量的问题, 所以在布设标点时采用同一深度土层的监测标点内外结合, 最后数据取平均的方式来消除这种影响。

1.4 水平位移观测线布置

与以往研究不同, 本次试验针对试坑浸水过程中地下土体可能产生的水平位移布置了监测手段, 在试坑外距试坑边沿 4 m 和 10 m 处分别埋设了水平位移监测线 A 和 B (见图 1), 对浸水试验结束后的各深度土层水平位移情况进行测量。水平位移监测线的埋设方法是: 首先用静探车在预定的位置压出 15 m 的孔, 孔径 4.5 cm, 而后将石灰粉末导入孔低并逐层捣实注满整个静探孔, 在地面露头处做观测标记, 利用全站仪观测初始位置坐标, 待试验结束后再利用挖探的方式揭示观测线随深度的形态变化。

1.5 水分传感器布置

在 B 轴反向上设置了 6 个传感器埋设探井及 2 个传感器埋设钻孔, 探井及钻孔位置见图 1, 其中试坑内部 2 个探井 (D1、D2), 试坑外部 4 个探井和 2 个钻孔 (D3、D4、D5、D6、Z1、Z2), 共计埋设 30 个土壤水分传感器、4 个液位计及 7 个孔隙水压力传感器, 其中土壤水分传感器为邯郸清胜电子科技有限公司生产的 DY-40 型, 埋设方法是: 首先在探井壁上用

取土刀刻进深约 30cm 的水平槽, 然后将传感器 3 根钢头插入最深处的土中, 最后将空部用土培实; 液位计为上海奥博自动化设备有限公司生产的 AOB-123PL1AM 型, 埋设方法是: 首先将纱窗网重叠 3 层匝成网兜形, 将传感器置于网兜中, 而后将网兜用细砂填满, 最后将其整体放入探井预定深度处; 孔隙水压力传感器为江苏海岩工程材料公司生产的微应变式传感器, 埋设方法是: 用预制的长方体钢模具在探井壁上水平砸出与传感器形状相当的矩形槽, 而后将传感器置于槽中, 最后将空部培实。各传感器具体的埋设位置及埋设间距参见图 2。各探井均为人工开挖, 除 D2 深度为 20 m 外, 其余 5 个探井和钻孔深度均为 24 m。

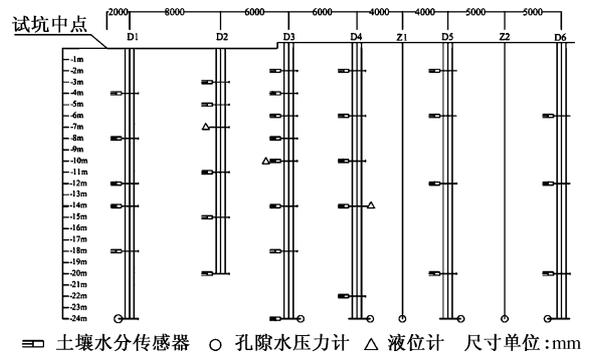


图 2 水分传感器布置方案图

Fig. 2 Arrangement of moisture transducers

1.6 浸水试验过程

本次试验共历时 103 d, 其中浸水前初值观测 10 d, 浸水 78 d, 停水后观测 15 d, 共向试坑内注水 30469 m³, 最大单日注水量 806 m³, 平均单日注水量 391 m³。每天固定时间固定人员用精密水准仪对全部沉降标进行观测; 每 10 d 利用全站仪对试坑周围裂缝进行一次统计观测, 并绘制裂缝分布图; 在试验最后一天利用全站仪对地表变形进行统计观测, 绘制浸水后地面沉降等值线; 试验结束后, 用全站仪观测水平位移监测线在地面露头的坐标, 利用人工挖探的方式沿水平位移监测线向下挖设探井, 以露头坐标为基点测量监测线随深度的变化规律。

2 试验结果分析

2.1 地表湿陷过程规律

截至试验结束, 位于试坑中心附近的 A01 标点沉降量最大, 达到 84.45 cm, B04 沉降量最小, 为 51.15 cm。浸水过程中 A01 点沉降发展过程见图 3。

地表湿陷过程规律以 A01 点为例, 其余地表沉降观测标沉降规律与其类似, 不再详述。图 3 为 A01 点

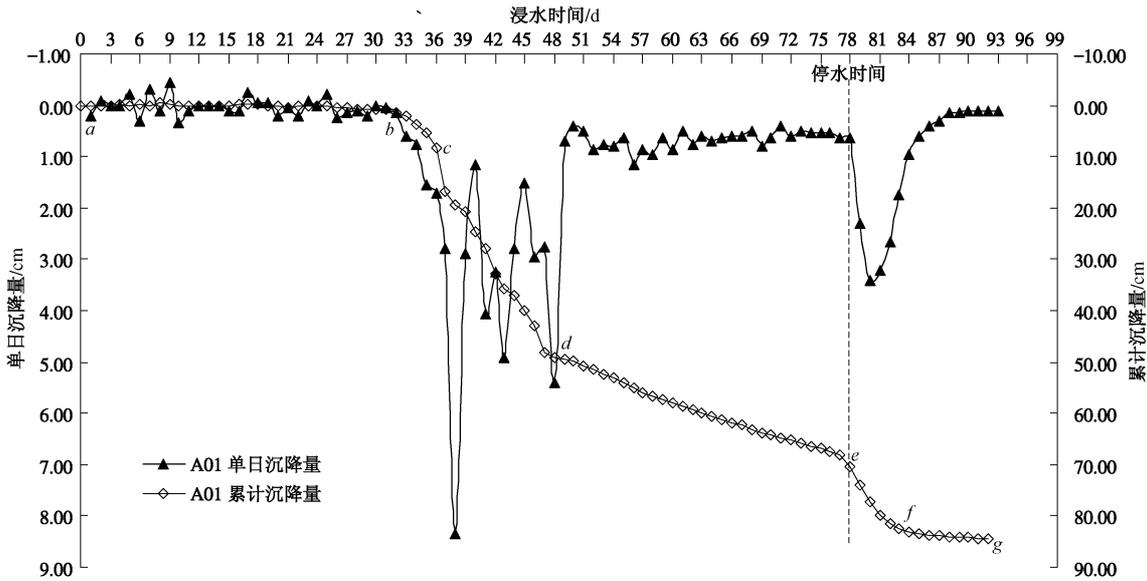


图3 A01点单日及累计沉降过程曲线

Fig. 3 Curves of total collapse at observing point A01

单日及累计沉降过程曲线，从图3中可以看出累计沉降发展可分为6个阶段：①土层初始浸水 ab 段，由于打设了15个24m深的注水孔，在这一阶段整个试坑下部土层尚未达到湿陷起始含水率，日均沉降量小于0.2cm，该阶段持续了32d；②湿陷起始 bc 段，单天湿陷量开始大于1cm但小于2cm，表明湿陷开始发展并且土层已经基本进入湿陷起始含水率并逐渐向饱和和发展，这个过程中土体在水的作用下发生变形调整，土层整体结构性产生破坏，使上覆土重能够向下传递，该阶段持续了4d；③剧烈湿陷 cd 段，土体已达到饱和并在上覆土重作用下开始发生剧烈湿陷，单天最大沉降量达到8.35cm，平均单天沉降量3.57cm，该阶段持续了12d；④湿陷稳定 de 段，经过剧烈的湿陷变形后土体进入湿陷变形稳定阶段，逐渐由日均沉降1cm以下到日均沉降0.5cm以下，并呈现继续减小的趋势，该阶段持续了30d；⑤停水后迅速沉降 ef 段，停水后土体发生固结沉降，剧烈的固结沉降持续了7d，日均沉降2.38cm；⑥固结稳定 fg 段，日均固结沉降量降到0.5cm以下，并逐渐减小到日均0.1cm，该阶段持续了9d。

2.2 地下水分扩散规律

图4是根据试坑内外埋设的各种水分传感器接收到的信号所绘制的浸水过程水分扩散形态图。从图4中可以看出，浸润区的扩散形态大致可以分为3个阶段，第一阶段(1~24d)：地面以下浸润区的发展是由上、下两个方向同时向中间扩散，试坑地面浸水区则由中间缓慢扩散逐步扩散至D2探井所在圆的半径距离处。产生这种水分扩散特征的原因是在距试坑中心4, 10m半径的圆上打设了15个注水孔，部分水分从试坑地表向下入渗，但是大部分的水则由注水孔

直接灌入地下24m而后聚积并向上漫延。第二阶段(28~50d)：上下两向的浸润锋面在地面以下12m左右处汇聚，试坑地面浸水区在这一阶段突破了第二圈注水孔，至32d试坑地面水分扩散至试坑边缘，至50d试坑以下土层全部被浸润，浸润锋面呈弧形整体向外扩展。第3阶段(50~80d)：随着扩散范围的增大，所需水量急剧增加，水头损失亦逐渐加大，浸润锋面缓慢向外扩散，至浸水结束水分最远扩散至距试坑边缘20m的Z2处。

自上而下扩散的水与自下而上漫延的水，其在土体空隙中的运动形式有所不同。自上而下扩散的水在重力的作用下总是沿着渗透系数大的孔隙优先向下扩散，使土体浸润，待孔隙饱和后开始向外扩散最终使土体饱和；而自下而上扩散的水则呈现向上漫延的特征，水分以饱和锋面的形式优先将土体饱和而后再向上扩散；最终至浸水结束时，如图4所示，在地下25m以上的范围内饱和区呈倒扣的碗型，浸润角约45°。

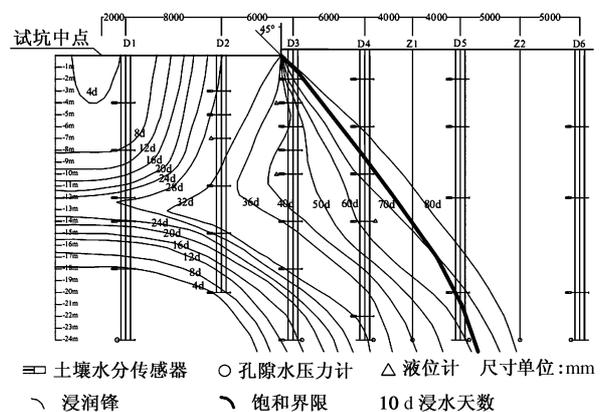


图4 水分扩散形态剖面图

Fig. 4 Sectional drawing of diffusion configuration of water

2.3 水分扩散及地层特点对湿陷发展的影响

综合图3和图4可以看出,水分的扩散情况直接影响着地面沉降的发展,在地下没有被完全浸润之前,试坑地表几乎没有沉降,完全浸润之后则沉降迅速发展。从图3可以看出,24 d之前(即水分扩散第一阶段)沉降累计曲线基本维持在零位;24~32 d出现微弱的沉降,而此时正是地面以下水分扩散锋面聚合的时段;32 d之后沉降开始发展,并在第36 d地面以下基本完全被浸润之后,地面沉降开始高速发展并持续到了第50天。

与以往不打设注水孔或者打设少量注水孔的浸水试验不同,本次浸水试验呈现出了明显的“湿陷沉降迟滞——突变效应”,经分析这种效应是由以下几方面原因造成的。产生“沉降迟滞”的主要原因是由于前述的特殊浸水过程使上下两侧的土体首先浸水,而探井编录资料显示,最后被浸润的12 m左右处是一层60~70 cm厚的红褐色黏质古土壤层,该土层土质较硬且成层性较强,起到了“层壳”的作用承托上部土层。这层“壳体”承担了12 m以上土层的自重压力,导致在36 d之前试坑地面以下的土层被分为上下两个“湿陷体系”。12 m以上的土体属于马兰黄土,虽然湿陷性较强但由于前述的水分在重力作用下向下扩散的形式,导致该12 m以上部分土体饱和速度缓慢,自重湿陷发展受其控制亦非常缓慢;12 m以下的土体属于上离石黄土,本身湿陷性不强,同时由于“层壳”的承托作用,影响了上覆土层的自重压力向下传递,导致12~20 m的土层虽然达到饱和但却达不到湿陷

起始压力,20~24 m的土层虽然达到了黄土湿陷的水与力两方面的条件,但由于其湿陷性已经非常微弱故表现出的湿陷量很小,同时这部分湿陷沉降还被“层壳”的承托作用所屏蔽无法在地表观测出来。

“沉降突变”出现在12 m左右的土层被浸润饱和和之后,即第36天之后地面沉降呈现突然加速发展的特征。这种现象的产生需要经历以下3个阶段:首先,具有“层壳”作用的古土壤浸水后土质软化、强度参数降低,在上覆土重的作用一旦达到强度临界点该土层将会突然崩溃,失去对上覆土层的承托效应;而后,上覆土重得以向下传递,12 m以下的土层均可达到湿陷起始压力,湿陷迅速发展;最后,12 m以下的土层由于上覆土重的突然施加以及本身的湿陷,体积缩小向外排出大量水分,这使得12 m以上的土层得以迅速的达到饱和,并在自重应力作用下产生湿陷。

2.4 湿陷影响范围

图5是A~C轴沉降过程曲线,从图5可以看出,地面变形在试坑中心附近最为剧烈,至试验结束试坑地面呈漏斗状,由试坑中心向外湿陷沉降量逐渐减小,试坑外围的沉降量远小于试坑内部。

图6是根据试验结束后试坑内外各观测点的湿陷沉降量绘制的沉降等值线,从图6可以看出沉降等值线从试坑中心呈同心圆状向外发散,不同沉降量所围的面积不同,并从起初的不规则圆形逐渐过渡到圆形,B轴一侧的沉降量小于A,C两轴方向上的沉降量。经过分析,沉降量不对称是由以下因素引起:湿陷的

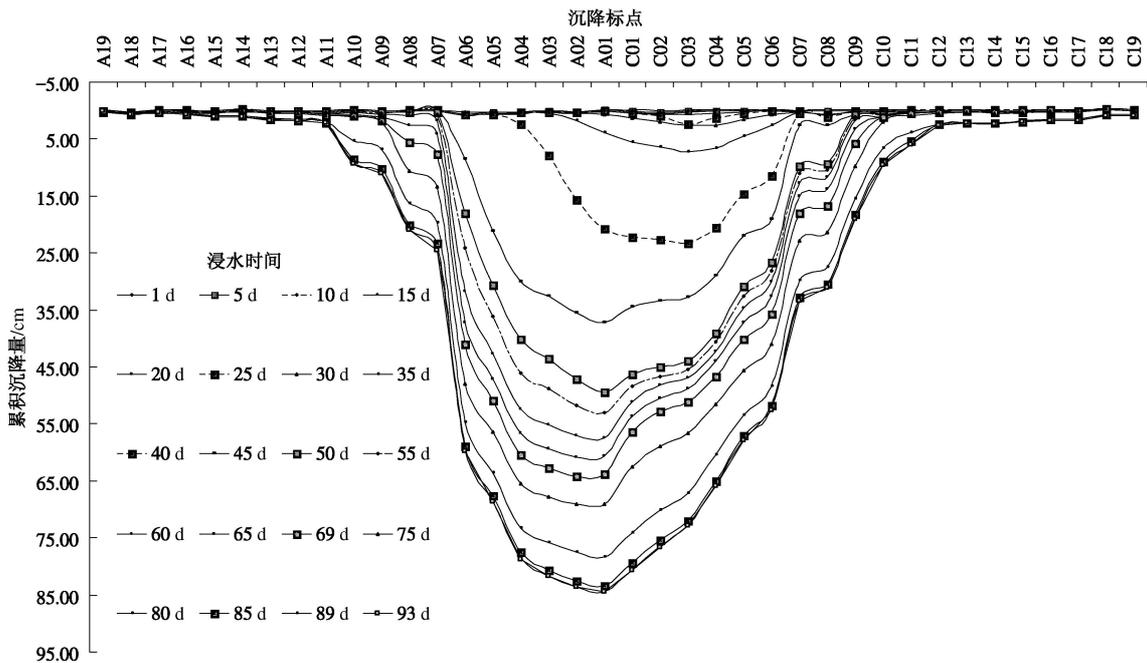


图5 浸水过程中试坑地表A~C轴沉降过程曲线

Fig. 5 Curves of total collapse at observing points A19~C19

表2 不同地区圆形试坑浸水试验结果对比

Table 2 Comparison of test results at different sites

地点	地貌类型	湿陷性黄土	试坑半径	沉降范围半	试坑外影响范	坑外影响范围与	坑外影响范围与湿
		厚度 H/m	R/m	径 R_s/m	围 R_c/m	试坑半径比值 $\frac{R_c}{R}$	陷土层厚度比值 $\frac{R_c}{H}$
		(1)	(2)	(4)	$R_c=R_s-R$		
山西晋中	黄土台塬	24	15	52	37	2.33	1.54
河南灵宝	渭河 II 级阶地	19	10	40	30	3.00	1.58
陕西渭南	渭河 II 级阶地	22.5	12.5	50	37.5	3.00	1.67
甘肃兰州	黄河 IV 级阶地	36.5	20	78	58	2.90	1.59

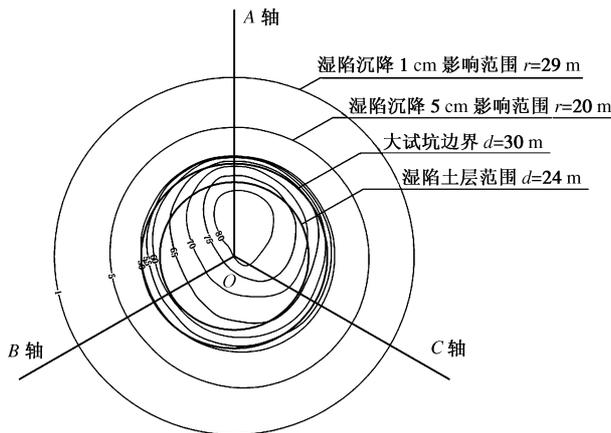


图6 试验结束后地面沉降等值线

Fig. 6 Settlement isoclines of ground surface

产生和发展受水与力两方面的作用控制, 由于输水管道出水口朝向 \widehat{AC} 方向且水压较大, 水首先向 \widehat{AC} 方向运移, 由于在试坑内均匀打设了注水孔, 流向 \widehat{AC} 方向的水直接沿注水孔灌入地下, 优先饱和了该区域的地层而后向外扩散, 导致该区域的地层先于其它区域开始湿陷, 图 5 的沉降过程曲线也证明了这一点。这种不均匀的湿陷改变了土层的受力状态, 在之后的浸水过程中虽然试坑内的地层全部达到了饱和, 但 B 轴一侧的土层重量不完全垂直向下施加, 而是有一部分向 \widehat{AC} 方向的倾斜的分力, 这种分力在浸水过程中使试坑内部 B 轴方向上产生了一条拉张裂缝 (见图 7), 这种情况下 B 轴方向的土层受力小于 \widehat{AC} 方向的土层受力, 所以导致了 B 轴方向的湿陷量小于 \widehat{AC} 方向。

从图 6 可以看出, 在局部浸水作用下湿陷沉降大于 5 cm 的影响半径大致为 20 m, 即试坑外 5 m 范围; 湿陷沉降大于 1 cm 的影响半径大致为 29 m, 即 2 倍试坑半径范围; 由于地表沉降监测轴末端以外区域没有记录初值, 所以无法获取完全未受浸水影响的范围, 通过地表形态观察以及三条监测轴末端的沉降量与发展趋势, 推测该范围大致半径为 52 m 左右。试坑浸水的沉降影响范围与地貌单元、场地黄土的湿陷性、场地黄土的侧向渗透性及试坑尺寸都有关系。由于山西地区公开发表的试坑浸水试验资料极少, 将本次试

验结果与河南^[15]、陕西^[16]及甘肃^[14]的圆形试坑浸水试验结果进行了对比, 对比结果见表 2。



图7 裂缝逐级发展形成的台阶状地面形态

Fig. 7 Configuration of ground surface due to development of fissures

从表 2 结果可以看出: 首先, 试坑半径对湿陷范围具有直接影响, 浸水面积越大湿陷范围越大; 另外, 不同机构在渭河 II 级阶地做的两次大型浸水试验影响范围和试坑半径的比值完全相同, 表明地貌单元对湿陷影响范围具有控制作用, 在不同地貌单元该比值有所不同, 但影响范围都在试坑半径的 2.3 倍以上; 相比之下, 影响范围与湿陷土层厚度的比值比较稳定均在 1.6 倍左右, 因此可以推论, 重要工程附近 1.6 倍自重湿陷土层厚度范围内不可以有长期积水, 否则将受到土层湿陷的影响。

2.5 β_0 推荐值探讨

通过室内试验的自重湿陷量计算值和大型浸水试验的自重湿陷量实测值, 可以反算当地的修正系数 β_0 , 以往研究中一般取试坑内部地面平均自重湿陷量进行 β_0 的计算, 但是, 统计资料显示几乎所有的浸水试验结束后, 试坑地表均呈不规则的漏斗形, 中心位置沉降量大而坑边位置沉降量小, 沉降等值线由于边界效应、土层性质及浸水过程等原因往往不呈同心圆形, 这种情况下若取试坑内所有地面监测点的自重湿陷量算术平均值进行 β_0 的计算显然不够严谨。算术平均值的取值方法相当于赋予每个监测标点以相同的权重, 但是不同沉降标点测得的沉降量所能代表的面积有所不同, 越靠近试坑中心沉降量也越大, 但其所能代表的面积也越小。监测结果的代表性不应被忽视,

所以用面积作为权重进行加权平均计算是更为合理的方法。

本次试验设计之初考虑到边界的影响所以将试坑直径设计为 30 m, 由于该场地自重湿陷土层下限深度为 24 m, 所以在进行 β_0 的计算时只取试坑中心 24 m 直径范围内的地表沉降量。同时考虑到监测结果的代表性, 将沉降量分段并利用沉降等值线图计算各段沉降量所占的面积, 进而计算这些面积所占的比例, 再以该比例为权重计算试坑地表自重湿陷量加权平均值, 最后计算该地区的 β_0 修正值。24 m 直径范围内的试坑地表各湿陷量段所占的面积及其权重计算结果见表 3。

表 3 试坑地表各沉降段所占面积及权重表

Table 3 Area and weight of every range of settlement

湿陷量段/cm	湿陷量/cm	面积/m ²	权重	沉降贡献量/cm
60~65	62.5	59.31	0.13	8.52
65~70	67.5	112.76	0.25	16.82
70~75	72.5	95.88	0.21	15.37
75~80	77.5	99.37	0.22	17.02
80~84	82.0	85.06	0.19	15.42
总量	—	452.39	—	72.83

通过计算得到试坑地表加权平均自重湿陷量为 72.83 cm, 另外通过两个探井试样的单线法湿陷试验所得未修正前自重湿陷量计算值为 103.5 cm, 二者相除可得到该地区新的因地区土质而异的修正系数 $\beta_0=0.7036$, 大于规范对该地区的推荐值 $\beta_0=0.5$ 。

2.6 裂缝发展特征

随着浸水过程中湿陷的发展, 试坑边沿以外的土层由于湿陷发展的先后及程度不同, 会在土层内部出现拉剪应力进而产生裂缝。浸水试坑周围裂缝的发育规律和发育程度可以反映水分的扩散过程及场地黄土的湿陷特性。

图 8 是试验结束后浸水试坑周围裂缝展布情况, 从图中可以看到试坑周围发育了大量的裂缝, 裂缝平面形态上呈环状且都分布于距试坑边沿 10.5 m 的范围内, 其中最远的裂缝发育在 B 轴附近, 距浸水试坑边沿 10.43 m。裂缝从无到有再到发展成图 8 所示的展布状态经历了漫长的过程, 试坑周围的首条裂缝出现在浸水开始后的第 22 天, 位于 AC 外 1.4 m 附近, 而后每天都有新的裂缝产生和连通, 至试验结束前 3 天裂缝发育基本停止。

典型的裂缝发展过程如图 9 所示, 裂缝发展经历 4 个阶段: 第①阶段, 试坑内部土层首先浸水湿陷, 试坑边沿土体失去支撑在内部产生拉力, 地表出现第 1 道裂缝, 这一阶段裂缝宽度发展优于深度发展, 裂缝两侧土体高差微小; 第②阶段, 水分侧向运移至第

1 道裂缝里侧的土体下部, 使该部分产生湿陷, 裂缝的发展由拉力主导变为由拉力剪力共同主导, 所以本阶段是该裂缝深度发展最快的阶段, 并且裂缝宽度在本阶段末达到最大; 第③阶段, 水分运移至第 1 道裂缝外侧的土体下部, 该部分土体开始湿陷并导致第 2 道裂缝的产生, 这一阶段第 1 道裂缝受外侧土体的挤压宽度有所减小, 裂缝两侧土体同时下沉所以深度发展基本停止, 本阶段中第 2 道裂缝的发展情况与第 1 道裂缝在上一阶段的发展历程类似; 第④阶段, 水分继续向外扩散, 土层的先后湿陷关系导致更多更远的裂缝产生, 先期产生的裂缝受后期裂缝发展的挤压, 宽度不断减小至近乎贴合, 裂缝两侧土体的高差随着距试坑距离的增大而逐渐减小, 形成如图 5 和图 7 所示的台阶状地面形态。从以上过程可以看出, 水分的下渗和侧渗是控制裂缝产生和发展的关键因素。

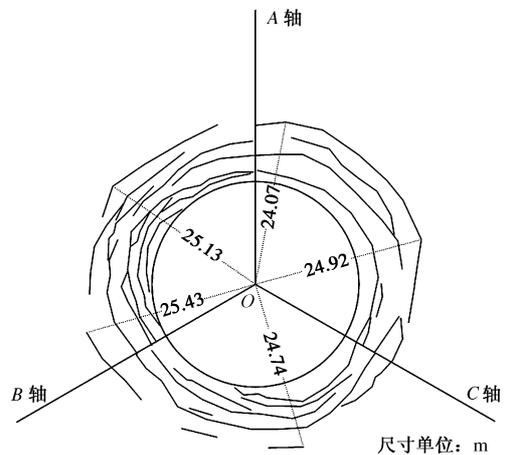


图 8 试坑周围裂缝展布情况

Fig. 8 Distribution of fissures around test pit

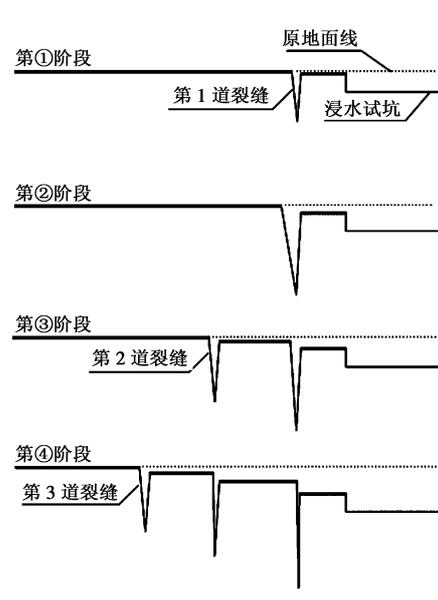


图 9 裂缝发展过程剖面图

Fig. 9 Profile of development process of fissures

2.7 深部湿陷特征与自重湿陷下限深度

通过对深部土层沉降监测标点数据的统计，绘制了图 10 所示的深部累计自重湿陷量发展曲线。

从图 10 可以看出，与地表湿陷变形过程一样，深部土体的自重湿陷过程也具有稳定—剧烈—稳定—剧烈—稳定的特点。从自重湿陷量随深度的发展规律来看，该地区黄土存在一个明显的湿陷下限深度，在这一深度以下的土层尽管同样经历了漫长的饱和浸水过程，但湿陷量非常微弱。若从曲线变化规律上直接观察，该下限深度为 20 m；若按照应变 1.5% 的标准计算则得出的湿陷下限深度为 18 m，为室内试验所得 24 m 下限深度的 2/3。图 10 中，计算值 1 为基于《规范》中地区修正系数 $\beta_0=0.5$ 的计算值，计算值 2 为基于前述监测得出的该地区新的修正系数 $\beta_0=0.7$ 的计算值，可以看出，沉降量计算曲线与实测曲线存在着巨大差异，计算曲线即无法准确还原各土层沉降量也无法反应沉降随深度变化的趋势。目前，利用室内试验手段评价场地黄土湿陷性的方法非常依赖于地区修正系数，但不论是规范推荐的地区修正系数还是我们基于上述研究得出的修正系数，都只是将地面沉降量修正到实测值上，对分层沉降的修正结果和实际沉降相比依然出入较大。所以，在现有场地黄土湿陷性评价框架内，对各地区精确的修正系数研究非常有必要，同时发展一套基于多因素的可分层评价或修正湿陷量的方法也是迫切需要的。

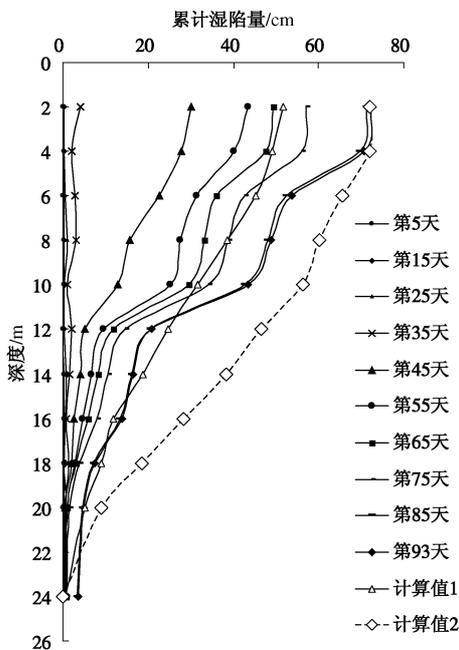


图 10 深部累计自重湿陷量发展曲线

Fig. 10 Curves of total collapse at underground observing points

2.8 试坑外围土层水平位移特征

试验结束后，对 A、B 两条深部土体水平位移监

测线的地面露头坐标进行测量，而后沿着露头位置向下开挖探井以揭示不同深度处监测线相较于基准线的水平位移，最后根据坐标绘制了如 11 所示的深部土体水平位移曲线，需要特别指出的是，由于静探车成孔时有 3° 的倾斜，故基准线与竖直向呈 3° 角。

从图 11 可以看出，在浸水作用下，试坑周围土层的变形不只是地表裂缝和竖向沉降，还包含了相当可观的水平位移，这种变形具有以下几方面的特点：浅表层土体和深层土体的水平位移方向有所不同，并存在一个拐点，拐点处位移为 0，拐点以上的土层向试坑中心方向移动，最大位移出现在 A 测线的地表部位，位移 -16 cm；拐点以下土层向试坑外方向移动，最大位移出现在 A 测线的 15 m 处，位移 73 cm；同时，拐点以下，在同一条监测线上，深度越大其水平位移也越大；在不同监测线上的同一深度处，距试坑越远水平位移越小；距试坑越远的监测线，其拐点越浅。

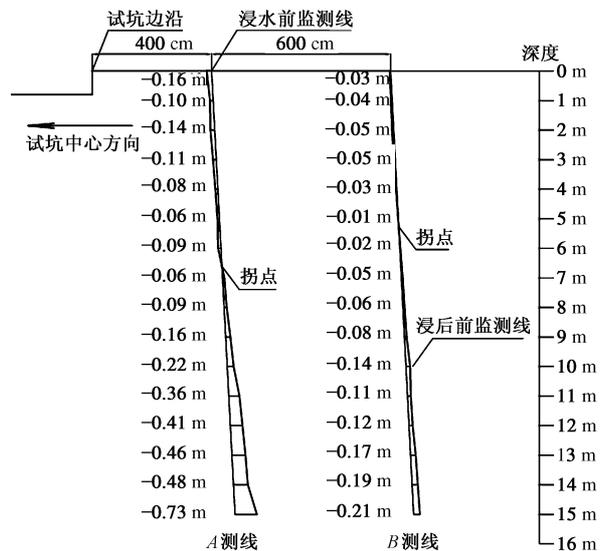


图 11 试坑外围土层水平位移曲线

Fig. 11 Curves of lateral deformation of loess outside test pit

拐点以上的浅表层土体向试坑中心方向的位移是由于靠近试坑一侧的土体首先湿陷，使外侧土体失去支撑并逐渐向试坑方向倾倒所引起，与试坑周围裂缝产生的机理相同。地表裂缝是距试坑中心不同距离处的浅表层土体向试坑位移差的地面表现形式，这种向试坑方向位移的趋势受距试坑距离的控制，距试坑越远其位移趋势越弱。

拐点的存在反映了浸水条件下距试坑一定距离处的土层由浅至深的受力差异，这种受力差异导致了拐点上下土层位移方向的不同。拐点的深度同样受到了距试坑距离的控制，距试坑越近拐点越深，其中 A 测线的拐点深 6.6 m，B 测线的拐点深 5.3 m，这是由于相较于 B 测线，A 测线靠近试坑一侧的土层被浸润饱

和的厚度较大, 参见水分扩散图 4, A 测线以内 5 m 深度以下的土层全部饱和, 而 B 测线处这一数值为 10 m, 也即 A, B 两测线下部可湿陷土层的厚度相差 5 m。5~10 m 是湿陷性较强的土层, 由此引起的内外湿陷差异是导致拐点深度不同的主要原因。

拐点以下的土体产生如此大的向试坑外部的水平位移, 其成因比较复杂, 产生这种位移可能有三方面的原因: 首先, 试坑浸水后土层重度增加, 相应的竖向荷载及水平向荷载也有所增加, 观测到的向试坑外的水平位移可能是由于水平向荷载压缩所引起; 另外, 试坑外围深部土体在试坑浸水条件下的变形是三维的, 陈正汉等^[1-2]曾利用 $\sigma_2 = \sigma_3$ 三轴试验研究过黄土湿陷体变问题, 但原位试验的应力路径和受力状态相较室内试验要复杂, 在本次试验中无法定量计算; 第三, 由于黄土渗透系数较小透水性较差, 同时由于设了大量注水孔, 试坑范围内深部的水头较大, 综合起来导致水分在向外围横向扩散的过程中具有较大的水头差和水力坡降从而导致了较大的横向渗透力, 这种力作用于土体引起了试坑外围土层的水平位移。

关于试坑浸水条件下外围深部土体的水平位移的研究鲜见前人提及, 本次试验揭示了这种变形的部分特征, 其成因机理尚需进一步的研究。

3 结 论

(1) 按照湿陷发展速率来划分, 试坑地表的湿陷过程由初始浸水—湿陷起始—剧烈湿陷—稳定湿陷—剧烈固结—稳定固结 6 个阶段组成。

(2) 打设大量注水孔的浸水试坑, 其水分在土层中的扩散规律是由上下两个方向共同向中间运移。

(3) 由于水分扩散的特殊性和地层结构的影响, 观测到了“湿陷沉降迟滞—突变”效应, 这种效应与最后被浸润饱和的土层的“层壳”承托作用有关。

(4) 对比 4 个省份的黄土浸水试验结果, 浸水试坑的最大影响范围一般在试坑半径的 2.3 倍以上, 但不具有一般规律。影响范围与湿陷土层厚度的比值比较稳定, 均在 1.6 倍左右, 因此重要工程附近 1.6 倍湿陷土层厚度范围内不可以有长期积水, 否则将受到土层湿陷的影响。

(5) 相比于取试坑地表沉降量算数平均反算地区修正系数 β_0 , 以沉降量所代表的面积为权重取加权平均值的计算方法更加合理。利用这种方法计算得到晋中市榆次区的 $\beta_0 = 0.70$, 大于规范推荐的 0.5。

(6) 提出了一种试坑浸水条件下外围深部土层水平位移的监测方法。揭示出浅表层土体产生了向试坑方向的位移, 深部土体则向试坑外的方向位移, 距试

坑越远的监测线, 其拐点越浅。拐点以下, 在同一条监测线上, 深度越大其水平位移也越大; 在不同监测线上的同一深度处, 距试坑越远水平位移越小。

(7) 浸水使试坑外围深部土层产生了较大的向外水平位移, 水平向加载压缩、湿陷体变及水平渗透力可能是产生这种水平位移的原因。这个问题还有待于进一步深入研究。

致 谢: 本次浸水试验受到了太原煤矿设计研究院王步云勘察大师以及山西省勘察设计院王康总工的指导, 在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 陈正汉, 许镇鸿, 刘祖典. 关于黄土湿陷的若干问题[J]. 土木工程学报, 1986, 19(3): 62 - 69. (CHEN Zheng-han, XU Zheng-hong, LIU Zu-dian. Some problems of collapsed loess[J]. Chinese Journal of Civil Engineering, 1986, 19(3): 62 - 69. (in Chinese))
- [2] 陈正汉, 刘祖典. 黄土的湿陷变形机理[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(2): 1 - 12. (CHEN Zheng-han, LIU Zu-dian. Mechanism of collapse deformation of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(2): 1 - 12. (in Chinese)).
- [3] 杨运来. 黄土湿陷机理的研究[J]. 中国科学, 1988(7): 756 - 765. (YANG Yun-lai. Research on collapsibility mechanism of loess[J]. Scientia Sinica, 1988(7): 756 - 765. (in Chinese))
- [4] 高国瑞. 黄土湿陷变形的结构理论[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(4): 1 - 10. (GAO Guo-rui. A structure theory for collapsing deformation of loess soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(4): 1 - 10. (in Chinese))
- [5] 王家鼎, 张俤元. 黄土自重湿陷变形的脉动液化机理[J]. 地理科学, 1999, 19(3): 271 - 276. (GWANG Jia-ding, ZHANG Zhuo-yuan. A mechanism in loess self-load collapse[J]. Scientia Geographica Sinica, 1999, 19(3): 271 - 276. (in Chinese))
- [6] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学 (B 辑), 1987(12): 1309 - 1315. (LEI Xiang-yi. Pore type and collapsibility of loess in China[J]. Science in China(Series B), 1987(12): 1309 - 1315. (in Chinese))
- [7] 苗天德, 刘忠玉, 任九生. 湿陷性黄土的变形机理与本构关系[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(4): 383 - 387. (MIAO Tian-de, LIU Zhong-yu, REN Jiu-sheng. Deformation mechanism and constitutive relation of collapsed loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(4): 383 - 387. (in Chinese))

- [8] 廖盛修. 湿陷性黄土地基预浸水[J]. 有色冶金建筑, 1983(2): 1 - 13. (LIAO Sheng-xiu. Study on presoaking of collapsible loess[J]. Nonferrous Metallurgy Construction, 1983(2): 1 - 13. (in Chinese))
- [9] 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. (QIAN Hong-jing, ZHU Mei, XIE Shuang. Experimental study on the regularities of collapsible deformation of loess foundation in Hejin, Shanxi[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(6): 1 - 9. (in Chinese))
- [10] 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): 1 - 11. (LI Da-zhan, HE Yi-hua, SUI Guo-xiu. Study and test on immersion of Q2 loess in large area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(2): 1 - 11. (in Chinese))
- [11] 黄雪峰, 陈正汉, 哈双, 等. 大厚度自重湿陷性黄土场地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. (HUANG Xue-feng, CHEN Zheng-han, HA Shuang, et al. Large area field immersion test on characteristics of deformation of self weight collapse loess under overburden pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 382 - 389. (in Chinese))
- [12] 刘保健, 谢永利, 于友成. 黄土非饱和入渗规律原位试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4156 - 4160. (LIU Bao-jian, XIE Yong-li, YU You-cheng. In-situ testing study on infiltration in unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4156 - 4160. (in Chinese))
- [13] 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(1): 83 - 90. (WANG Xiao-jun, MI Wei-jun, XIONG Zhi-wen, et al. Water immersion field test of collapsibility of loess foundation of Zhengzhou-Xi'an passenger dedicated line[J]. Journal of the China Railway Society, 2012(1): 83 - 90. (in Chinese))
- [14] 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(1): 65 - 74. (YAO Zhi-hua, HUANG Xue-feng, CHEN Zheng-han, et al. Comprehensive soaking tests on self-weight collapse loess with heavy section in Lanzhou region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012(1): 65 - 74. (in Chinese))
- [15] 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(6): 1769 - 1773. (WU Xiao-peng, XIONG Zhi-wen, WANG Xiao-jun, et al. Study of immersion collapsible characteristics under overburden pressure of Western Henan loess along Zhengzhou-Xi'an high-speed railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012(6): 83 - 90. (in Chinese))
- [16] 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, 2012(6): 1769 - 1773. (MA Kan-yan, ZHANG Ji-wen, LIU Zheng-hong, et al. Immersion test of test pit at self weight collapsible loess site[J]. Site Investigation Science and Technology, 2012(6): 1769 - 1773. (in Chinese))