

DOI: 10.11779/CJGE201609001

大厚度湿陷性黄土地层的现场砂井浸水试验研究

邵生俊^{1,2}, 李 骏¹, 邵 将³, 黄双林⁴, 王永鑫¹, 陈 菲¹

(1. 西安理工大学土建学院, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048; 3. 武威市第一建筑安装工程有限责任公司, 甘肃 武威 733000; 4. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

摘 要: 针对大厚度黄土湿陷变形室内试验评价不准确, 现场原位浸水试坑试验评价方法周期长、费用高且难以适应线性工程技术要求等不足, 提出了一种新的现场试验评价方法: 砂井浸水试验方法。其核心是利用湿陷变形土体与未湿陷变形土体之间产生相对沉降差及地裂缝, 通过湿陷性黄土场地设置砂井, 将水直接导入某一深层湿陷性黄土地层及砂井圆周边土体, 以此来测定砂井井底下地层和砂井孔深范围内黄土的湿陷变形量。该方法具有操作简便、花费小、周期短和灵活性高等特点。依托宝兰客专建设项目, 在具有代表性的大埋深自重湿陷性黄土场地开展了 4 个不同深度的砂井浸水试验, 测试了砂井场地的沉降变形及井底湿陷性土层的沉降变形, 同时配合井底土层含水量的量测, 分析了井底黄土的湿陷性变形特征。参考现有规范中建议的该地区自重湿陷量修正系数, 对比砂井浸水试验结果与室内试验结果, 初步论证了砂井浸水试验的合理性, 及其在大厚度湿陷性黄土线性工程上运用的优势。

关键词: 砂井浸水试验; 大厚度自重湿陷性黄土; 湿陷性评价; 试验方法

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 4548(2016)09 - 1549 - 10

作者简介: 邵生俊(1964 -), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土动力学与黄土力学等方面的教学和科研工作。E-mail: sjshao@xaut.edu.cn。

In-situ sand well immersion tests on self-weight collapsible loess site with large depth

SHAO Sheng-jun^{1,2}, LI Jun¹, SHAO Jiang³, HUANG Shuang-lin⁴, WANG Yong-xin¹, CHEN Fei¹

(1. Civil Engineering and Architecture Institute, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an 710048, China; 3. Wuwei First Building Installation Engineering Co., Ltd., Wuwei 733000, China; 4. China Railway First Survey and Design Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: The evaluation of collapse deformation laboratory tests on the loess with heavy section is not accurate in general. The in-situ comprehensive soaking tests are time-consuming and costly, and they cannot meet the requirements for linear engineering. Therefore, a new in-situ test method, namely sand well immersion test, is proposed to overcome the shortcomings mentioned above. Its core is the utilization of the relative differential settlement and ground fissures generated between collapsible soil and non-collapsible soil. The water can directly flow into the loess with a certain depth and the soil mass surrounding the sand well by setting up sand well on collapsible loess ground, so that the collapsibility deformations of loess under the bottom of sand well and in the range within the depth of sand well are determined. The method is characterized by easy operation, low cost, short cycle and high flexibility. Based on Baoji-Lanzhou passenger lines, four sand well immersion tests with different depths are performed on a representative self-weight collapsible loess site with large depth. The settlement deformations of sand well site and collapsible soil layers under the bottom of sand wells are measured, through the measurement results of moisture content measurement of soil layers under the bottom of sand drain to analyze the collapsible deformation characteristics of loess layers under the bottom of sand wells are analyzed. With reference to the correction factor of collapse settlement under overburden pressure in this region suggested by the existing specifications, the sand well immersion and the corresponding laboratory compression test results are comparatively analyzed so as to preliminarily demonstrate the rationality of the proposed sand drain immersion test method and its advantages in linear engineering on self-weight collapsible loess site with large depth.

Key words: sand-well immersion test; self-weight collapsible loess with large depth; collapsibility evaluation; test method

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272320, 11572245); 陕西省黄土力学与工程重点实验室科研计划项目(2013JS074)

收稿日期: 2015 - 08 - 29

0 引言

随着黄土地区工程建设的快速发展,特别是高铁、地铁、大埋深地下空间工程的日益增多,工程建设面临从黄土低阶地、湿陷性土层埋深较浅的场地向黄土塬、黄土高阶地、大厚度湿陷性黄土场地的发展,以往人们对黄土地基湿陷变形和强度稳定性的评价方法是否仍然适用值得思考与讨论^[1-3]。

目前,黄土湿陷性评价主要包括室内试验和现场试坑浸水试验两种方法^[4]。室内试验通过测定原状土的自重湿陷系数和湿陷系数,用分层总和法求得黄土场地的自重湿陷量和地基的湿陷量。再区分不同地区,利用试坑浸水试验结果对其进行修正,确定不同地区的修正系数,经过修正的场地自重湿陷量和地基湿陷量即为自重湿陷变形和湿陷变形计算值。依据它们可以确定黄土地基的湿陷性等级。室内试验方法分层采取原位土样,近似模拟了场地或地基不同土层的侧向变形应力条件和竖向一维入渗饱和湿陷条件。现场试坑浸水试验方法可以较为真实地反映一定范围内场地地层土土样的连续分布,实际地层入渗浸水饱和过程,以及不同土层浸水湿陷变形发展的应力、变形条件变化情况和地层结构对场地或地基湿陷变形发展的影响;还反映了实际土体中渗气运动和孔隙气状态的影响。由于两种方法的试验条件不同,其评价结果往往存在差异,随着湿陷性土层的增大,这种差异越发明显,甚至出现了两者判定场地湿陷类型截然相反的情况^[5],此时应以现场试验结果为准。然而,试坑浸水试验工程量大、花费高、周期长,且对试验场地平整度有较高要求,不适用于所有工程建设场地,对于线性工程,一个场地的评价结果又无法反映工程沿线的变化;此外,试坑浸水试验浸水入渗深度有限,最大影响深度约为 20~25 m^[6-7],该方法很难对大埋深湿陷性黄土地层,如隧道基底以下的深层黄土做出正确评价^[8]。

针对现有试验方法的上述不足,提出了一种新的测试方法——砂井浸水试验^[9],其核心是将水直接导入某一深层湿陷性黄土地层,以此来测定该地层以下黄土的湿陷变形量。本文结合宝兰客专建设项目,从黄土分区、地形和初步确定湿陷性土层条件出发,选择典型湿陷性黄土场地进行了 4 个不同深度砂井浸水试验的观测研究,初步论证了该方法的合理性及适用性,及其在大厚度湿陷性黄土线性工程中应用的优势。

1 试验概况

1.1 试验场地地质情况

试验场地位于宝兰客专榆中至兰州段范家窝隧道

进口附近,所处地貌为黄土梁峁,表层为第四系上更新统风积黄土,地形起伏不平,沟壑发育,多分布以东西向为的“V”型沟。地质勘察揭示试验场地 80 m 深度范围内为 Q₃、Q₂ 砂质黄土,室内试验确定湿陷性土层最大埋深为 26 m 左右,湿陷程度强烈。勘探深度内未发现地下水。

1.2 试验方案设计

为了评价不同埋深黄土的湿陷性及考察砂井浸水试验的合理性,在同一场地内共设置了埋深分别为 25, 20, 15, 3 m 的 4 个砂井,对应编号分别为#1, #2, #3, #4, 各砂井之间的间隔为 19~34 m。其中在#1, #2, #3 砂井开挖及沉降标深标点钻孔过程中采取了 3 组 1~40 m 原状土样,进行了基本物性试验及室内湿陷性试验。

每个砂井共布设沉降观测标点 23 个,其中井中心设 1 个,试坑内地表设 2 个,试坑外地表设 4 个,砂井周围深标点设 16 个。砂井标点布设如图 1、图 2 所示: O1~O4 为砂井中间沉降杆; S1、S2 为试坑内浅标点,距砂井中心 0.8 m; A1~A4 为试坑外浅标点,间距 2 m,最远距砂井中心 8 m; B1~B16 为深标点,距砂井中心 3 m; W 代表水分计埋设钻孔,沿砂井试坑边缘布设,埋设位置如图 2 所示。

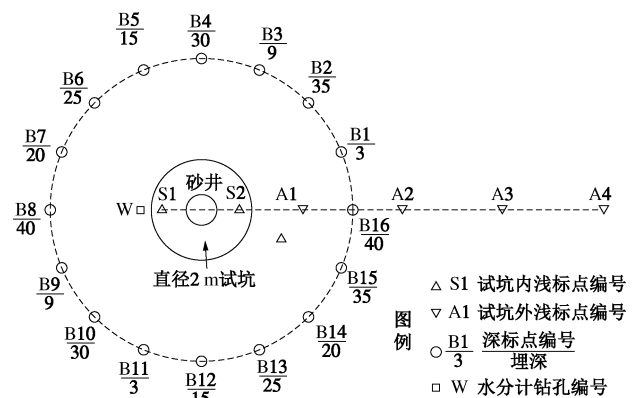


图 1 砂井布置平面图

Fig. 1 Plan of sand well

(1) 砂井内元件埋设

人工开挖直径 60 cm 的探井至设计深度,井底整平清除浮土,回填一定高度的中细砂作为垫层;逐节连接下放沉降杆至井底,底端连接带有透水孔的沉降板;沉降杆外套上 PVC 护筒,保证沉降杆可自由下沉;再回填一定厚度中细砂,为砾石回填下落提供缓冲;将砾石回填至距井口 60 cm 处,以砂井为中心,地表开挖深 60 cm、直径约 2 m 的圆坑并整平,坑底铺设厚度 10 cm 的砾石垫层。砂井井内结构如图 3 所示。

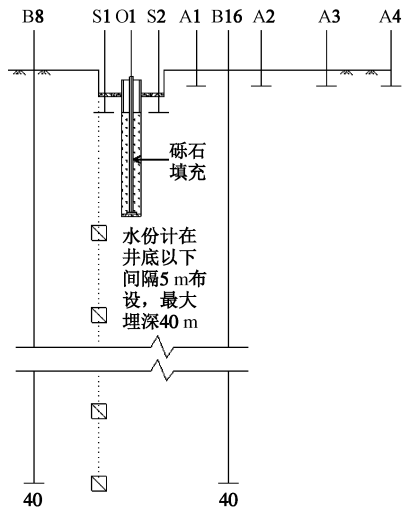


图2 砂井断面图

Fig. 2 Section of sand well

(2) 浅标点埋设

在浅标点埋设位置开挖直径 40 cm、深度 50 cm 的圆坑，整平坑底，放入连接有读数标杆的沉降板，其中，沉降板为直径 20 cm、厚 0.5 cm 的圆形钢板；读数标杆为直径 25 mm 的镀锌钢管，出露地表 3 m，其上绑扎固定最小刻度为 1 mm 的钢卷尺，供测量沉降。调整读数标杆至竖直后回填夯实圆坑。

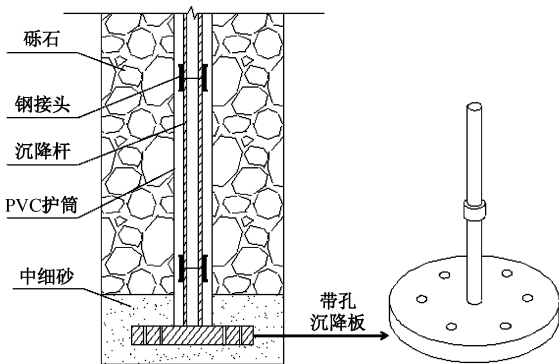


图3 井内结构图

Fig. 3 Internal structure of sand well

(3) 深标点埋设

深标点装置由内管和外管组成。内管用于测量土的湿陷变形量，采用直径 25 mm 镀锌钢管，并连接有厚 5 mm、Φ50 mm 的圆形钢板作为底座，埋设于孔底；每个深标点的内管高于地面 3 m，出露部分亦分别固定有最小刻度为 1 mm 的钢卷尺。外管其采用直径 60 mm 的 PVC 管，保证内管可以随土层自由下沉而不受孔壁土层约束；外管与钻孔间的空隙采用中细砂回填密深标点的设置构造见图 4。

(4) 水分计埋设

在水分计埋设位置预钻孔至最大设计深度，垂直下放水分计并插入孔底，经埋设前及埋设后的读数校

核，确定水分计正常工作后，利用探槽取得并预先碾压好的素土进行回填，分层夯实，并不断用测绳测量回填高度，待回填夯实达下一设计深度时，下放埋设下一个水分计，如此循环直至砂井井底埋深处。砂井底以上钻孔部分继续用素土回填夯实，尽量保证浸水过程中不会由于孔内渗透速度的增大，加快水分计的变化速率。埋设完成后在地面固定集线盒，用以保护水分计读数接头，埋设过程中用到的辅助元件如图 5 所示。图 6 给出了砂井布设完毕后全貌。

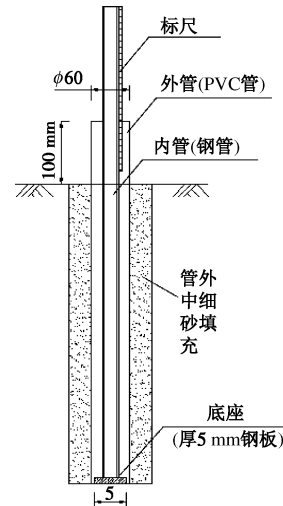


图4 深标点构造图

Fig. 4 Structure of deep punctation



图5 水分计埋设过程中辅助元件

Fig. 5 Auxiliary components in the process of embedding moisture meter



图6 砂井布设完毕后全貌

Fig. 6 Overall view of sand well

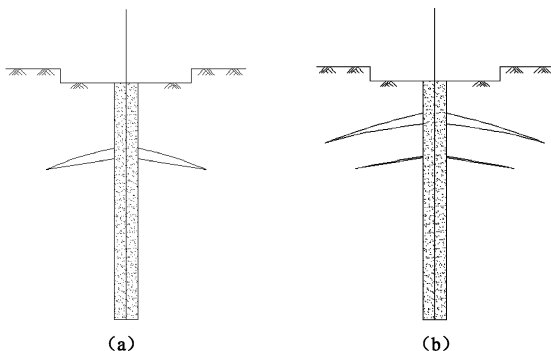
1.3 试验过程

由于试验场地附近无可用水源, 试验用水采用水车运送。因供水量有限, 各砂井不能保证持续有水浸入, 只能采用间歇性注水。车辆运输水将各砂井注满后自行渗透, 每天基本保证总注水量在 $36\sim 48\text{ m}^3$ 。已有研究表明, 在给定的压力下, 对某一特定试样来说, 其总的湿陷变形量为一定值, 等于该压力下一次充分浸水的湿陷变形量, 而与浸水次数无关^[10]。所以只要保证供水总量与时长, 间歇性供水也可以保证土层湿陷量的充分发展。

由于每个砂井浸水初期渗水速率快, 为保证浸水时长, 各砂井开始注水间隔错开 4 d, 自 2014 年 10 月 13 日开始向#1 注水, 至 2014 年 11 月 29 日停水, 停水标准为最后 5 d 的平均湿陷量小于 1 mm/d 。开始顺序依次为#1, #4, #2, #3, 分别注水 48, 44, 40, 36 d, 对应注水总量分别为 309, 165.8, 498.5, 449.5 m^3 。各砂井注水前期保证每天监测两次, 之后每天监测一次, 整个实验过程中, 各砂井均经历水分入渗由快到慢、水分影响范围内地层沉降、裂缝的形成及发展直至最后稳定的过程。

1.4 试验现象

试验过程中发现, 由于砂井浸水条件下直接将水导入深埋地层, 浸水影响范围内土层的湿陷变形过程与试坑试验存在明显不同, 现就湿陷变形最为明显的#3 砂井为例加以说明。图 7 是根据现场观测情况绘制的#3 砂井浸水后地层变形发展示意图: 图 7 (a) 浸水初期, 受水量限制, 无法一直保持液面, 水位升降循环致使井内某一深度以下土层先发生湿陷, 上下土层拉裂, 形成环形空腔; 图 7 (b) 随浸水时间的增长及水量的增加, 下部土层逐渐饱和完成湿陷, 水位上涨, 一定范围内的土体增湿软化下塌, 形成新的环形空腔并封闭之前空腔, 且新形成的空腔范围更大; 图 7 (c) 此逐渐发展至试坑底面; 图 7 (d) 随着地表下空腔的发展, 试坑周围悬空土体逐渐失稳垮塌, 在地面形成环形裂缝, 并随浸水向外扩张发展, 直至最后稳定。湿陷变形稳定后其形态如图 8 所示。



(c)

(d)

图 7 #3 砂井浸水地层发展示意图

Fig. 7 Course of soil layer immersion of sand well No. 3



图 8 #3 砂井发展稳定后形态

Fig. 8 Final form of sand well No. 3

2 试验结果分析

2.1 砂井地层土含水率变化分析

除#1 砂井之外, 其余各砂井地层土埋设水分计钻孔均位于试坑边缘处, 距砂井中心 1 m。然而, 由于#1 砂井地层埋设水分计钻孔塌孔原因的影响, 水分计钻孔距井中心变更为 2 m。水分计自井底埋深起, 向下每间隔 5 m 埋设一个, #4 砂井水分计最大埋深为 28 m, 其它 3 个砂井水分计最大埋深为 40 m。

图 9~12 给出了各砂井不同深度处土层含水率随时间的变化关系。可以看出, 水分计读数突变点即为浸水前锋线到达对应水分计位置的时刻, 不同地层条件及不同埋深砂井浸水影响深度大相径庭。#1 水分计埋设位置距砂井中心较远, 达到了 2 m。如果将井底入渗面视为点源, 水平面以下土层中水分沿径向扩散相同, 则该砂井水分入渗影响范围未达到 27 m 埋深位置。#2 浸水影响深度介于 30~35 m 之间; #3 井底埋深 15 m 处水分计监测含水率发生显著增长, 影响深度介于 15~20 m 之间; #4 浸水影响深度为 13 m。可见, 同一场地内分别设置不同孔深的砂井中, 孔底的浸水影响不同。其中#1, #4 井的浸水历时较长, 浸水量较小; #2, #3 井的浸水历时较短, 浸水量较大; #2, #4 井底土层浸水厚度较大, #3 井底土层浸水厚度较小, #1 井底几乎无浸水。场地内不同砂井局部范围

地层土的渗透性有明显差异。

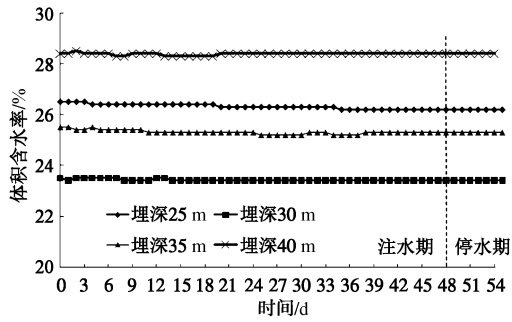


图 9 #1 砂井水分计监测曲线图

Fig. 9 Curves of monitored moisture of sand well No. 1

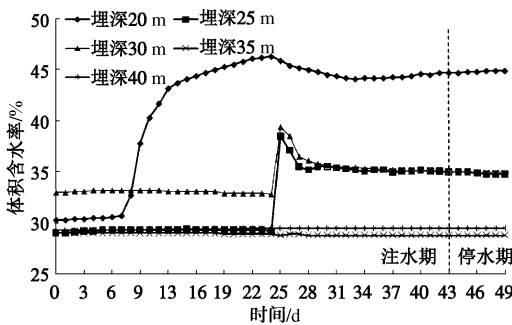


图 10 #2 砂井水分计监测曲线图

Fig. 10 Curves of monitored moisture of sand well No. 2

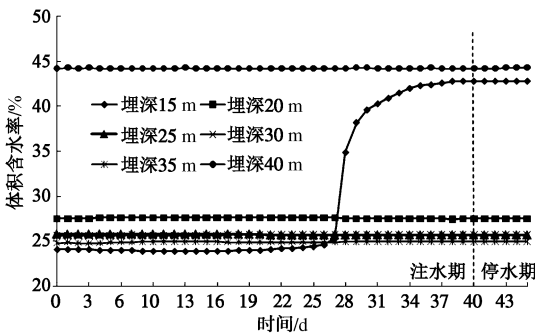


图 11 #3 砂井水分计监测曲线图

Fig. 11 Curves of monitored moisture of sand well No. 3

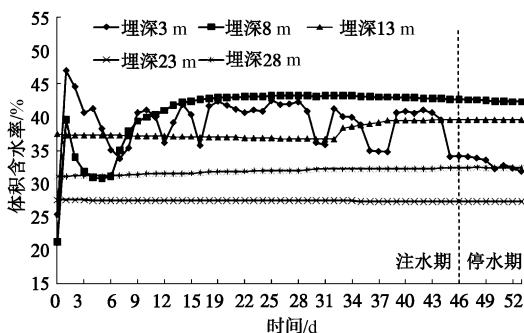


图 12 #4 砂井水分计监测曲线图

Fig. 12 Curved of monitored moisture of sand well No. 4

不同砂井井底土层水分计监测结果变化规律表明：当浸水前锋到达水分计埋设位置时，水分计量测值短期内会有突增变化，达到一个峰值后略有降低，之后会维持在一个相对稳定的数值上。这是由于浸水

入渗过程中，土体先增湿，含水率上升，当增湿至湿陷起始含水率时发生湿陷变形，土体压密，孔隙减少，含水率随之下降，但仍处于饱和状态，待湿陷完成后含水率不再变化。

但#4埋深3m的水分计是个特例，注水第一天读数从25.5%突增至47%，之后读数一直在35%~42%之间波动，白天浸水读数增高、夜晚停水读数降低，到完全停水后读数持续减小。这是由于水分计埋设深度较浅，土体孔隙比大，土质疏松，且孔隙能与大气联通，渗透及水分消散能力较强，故出现有水迅速增湿、无水迅速减湿的情况，这反映出浅层黄土与深层黄土渗透方式有所区别。

2.2 沉降监测数据分析

本次试验各砂井布设浅标点6个，试坑内设置两个S1、S2，试坑外设置4各A1~A4；深标点16个，分别为B1~B16。每个砂井底设标点1个，分别记为O1~O4。每个砂井的浅标点、深标点和井底标点共计23个，用量测场地自重湿陷量及不同深度土层自重湿陷量，平面分布位置详见图1。

(1) 地表沉降变形分析

a) 地表累计变形量

各砂井实测浅标点沉降累计变形量随时间的变化曲线见图13~16。由此可得到各砂井浅标点沉降数据见表1~4所示。各砂井试坑底自重湿陷沉降量分别为#3(134.9 cm)>#4(65.6 cm)>#1(57 cm)>#2(25.9 cm)。与砂井深度比较，尽管#1砂井，#2砂井的埋深分别达22.5 m和19 m，大于#3，#4砂井分别为15 m和3 m的埋深，但是，前者的自重湿陷变形量小于后者。表明，同一黄土场地不同位置地层的湿陷变形不同；相同地层结构条件下增大砂井埋深，浸水湿陷变形并未明显增大；场地的自重湿陷变形与浅层土的湿陷性密切相关。

从表2，4可以看出，同一试坑内的浅标点S1、S2相距很近，但浸水后依然产生较大的不均匀沉降，二者湿陷量差值接近平均值的50%，这种情况反映了黄土地层局部湿陷差异显著。

表 1 #1 砂井浅标点沉降数据

Table 1 Settlement data of shallow punctuation of sand well No. 1

标点编号	标点位置	距井中心距离/m	累计沉降量/cm	备注
S1	坑内	0.8	23.6	S1 反应试坑整体沉降，
A1		2	10.7	但在沉降稳定前倾倒无
A2	坑外	4	0.4	法再用，所以该数据不是
A3		6	0.1	试坑最终沉降量，最终沉
A4		8	0	降量为57cm。

表2 #2砂井浅标点沉降数据

Table 2 Settlement data of shallow punctation of sand well No. 2

标点编号	标点位置	距井中心距离/m	累计沉降量/cm	均值/cm	差值/cm
S1	试坑内	0.8	20.7	25.9	10.4
S2		0.8	31.1		
A1	试坑外	2	24.5	—	—
A2		4	1		
A3		6	0.3		
A4		8	0.1		

表3 #3砂井浅标点沉降数据

Table 3 Settlement data of shallow punctation of sand well No. 3

标点编号	标点位置	距井中心距离/m	累计沉降量/cm	均值/cm	差值/cm
S1	试坑内	0.8	133.8	134.95	2.3
S2		0.8	136.1		
A1	试坑外	2	114.6	—	—
A2		4	38.4		
A3		6	2.4		
A4		8	0.2		

表4 #4砂井浅标点沉降数据

Table 4 Settlement data of shallow punctation of sand well No. 4

标点编号	标点位置	距井中心距离/m	累计沉降量/cm	均值/cm	差值/cm
S1	试坑内	0.8	81.7	65.6	32.2
S2		0.8	49.5		
A1	试坑外	2	18.1	—	—
A2		4	0.2		
A3		6	0.1		
A4		8	0.1		

浸水径向影响范围以沉降量大于 2 mm 的浅标点所处位置确定, 则各砂井浸水径向影响范围(距砂井中心)如下: #1 为 4 m, #2 为 6 m, #3 为 8 m, #4 为 4m。一般, 均质地层条件下, 砂井埋深越大, 浸水径向影响范围越远, 即#1>#2>#3>#4。但是, 由于各砂井周围土性不均匀, 表现为不同砂井地层的湿陷变形差异较大, 同一砂井周边不同部位存在湿陷变形差异, 故出现了#1<#2 的情况。

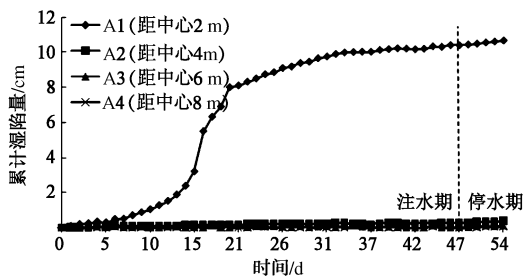


图13 #1砂井浅标点随时间累计沉降曲线

Fig. 13 Curves of total collapse of shallow punctation of sand well No. 1

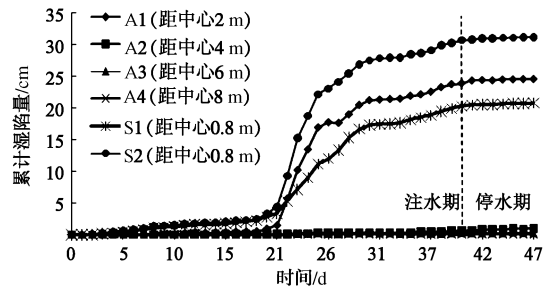


图14 #2砂井浅标点随时间累计沉降曲线

Fig. 14 Curves of total collapse of shallow punctation of sand well No. 2

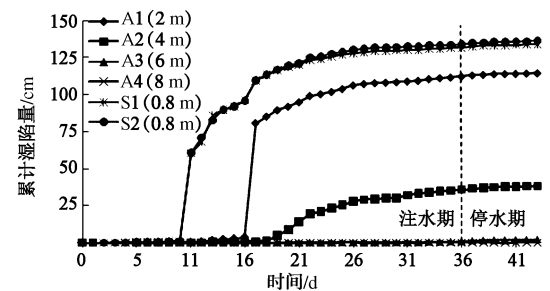


图15 #3砂井浅标点随时间累计沉降曲线

Fig. 15 Curves of total collapse of shallow punctation of sand well No. 3

从图中可以看出: 距砂井中心越近, 发生湿陷的时间越早, 累计湿陷量越大; 距砂井中心越远, 受浸水影响越小, 且土体受到侧边土的阻力越大, 导致湿陷量越小。由于采用间歇性注水方式, 停水前后沉降变形未出现明显变化。

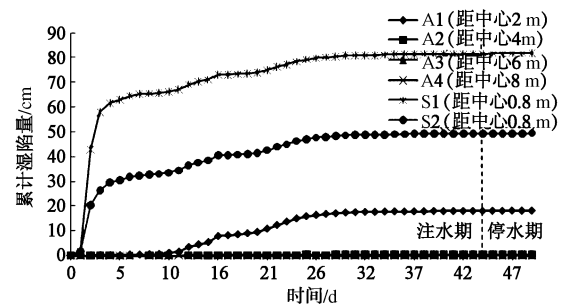


图16 #4砂井浅标点随时间累计沉降曲线

Fig. 16 Curves of total collapse of shallow punctation of sand well No. 4

各浅标点浸水前期沉降变化缓慢, 之后有一个突增阶段, 接着又减缓并趋于稳定, 沉降速率呈现“小→大→小→稳定”的变化规律。可见, 非饱和黄土从水分增加到湿陷变形发生需要一定时间, 即增湿的过程, 当土体含水率达到湿陷起始含水率时湿陷发生并迅速发展, 反映出黄土湿陷突变性的特点。

尽管砂井浸水影响范围有限, 且存在周围土体对湿陷土体侧边阻力的影响, 但浸水范围湿陷土体与周

边土体之间产生裂缝, 使得浸水范围土柱的湿陷变形比较充分发展。依据水分计测试浸水范围和入渗深度, 将试坑内浅标点 S1、S2 测得的平均沉降作为场地水分入渗深度范围内土层实测自重湿陷量。

#1 砂井地层土水分入渗深度近似取 26 m, 实测自重湿陷量为 57 cm, 地层平均自重湿陷系数 0.022; #2 场地水分入渗深度近似取 30 m, 实测自重湿陷量为 26 cm, 地层平均自重湿陷系数 0.009; #3 场地水分入渗深度近似取 20 m, 实测自重湿陷量为 135 cm, 地层平均自重湿陷系数 0.068; #4 场地水分入渗深度近似取 13 m, 实测自重湿陷量为 65.6 cm, 地层平均自重湿陷系数 0.05。

参照《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB50025—2004), 考虑地层沉积时代效应, 按式 (1) 计算实测自重湿陷量和自重湿陷量计算值的校正系数 β'_0 :

$$\beta'_0 = \frac{\Delta_{zs}}{\sum_{i=1}^n \delta_{zi} h_i} \quad (1)$$

图 17 给出了各场地室内试验测得的自重湿陷系数随深度的变化关系, #4 砂井近似取与#3 砂井一致的地层条件, 采用相同的湿陷系数随深度的变化。计算可得: #1 场地 26 m 深度范围内土层自重湿陷量计算值为 34.2 cm; #2 场地 30 m 深度范围内土层自重湿陷量计算值为 24.6 cm; #3 场地 20 m 深度范围内土层自重湿陷量计算值为 125.7 cm; #4 场地 13 m 深度范围内土层自重湿陷量计算值为 93.6 cm, 由式 (1) 计算可得: #1 砂井场地 β'_0 为 1.67; #2 砂井场地 β'_0 为 1.06; #3 砂井场地 β'_0 为 1.07; #4 砂井场地 β'_0 为 0.7, 如表 5 所示。

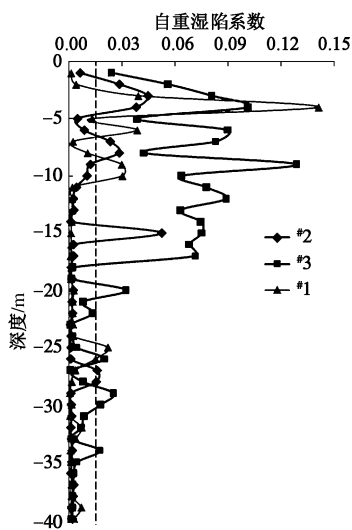


图 17 自重湿陷系数随埋深变化关系

Fig. 17 Variation of collapsibility coefficient with depth

根据各砂井现场实测沉降数据可以判定各场地均为自重湿陷性场地, 与室内试验评价结果一致。

表 5 场地自重湿陷量实测值与计算值之比 β'_0 的确定

Table 5 Ratios of measured to calculated values of self-weight collapse amount in test site

编号	井底埋深 /m	浸水影响深度 /m	井底以下土层厚度/m	湿陷量实测值 /cm	湿陷量计算值 /cm	β'_0
#1	22.5	26	0~26	57.0	34.2	1.67
#2	19.0	30	0~30	26.0	24.6	1.06
#3	15.0	20	0~20	135.0	125.7	1.07
#4	3.0	13	0~13	65.6	93.6	0.70

除#1 砂井外, 其他 3 个砂井地层土自重湿陷计算值的修正系数 β'_0 均小于规范中给出的陇西地区湿陷量计算修正系数 $\beta_0=1.5$ 。可见, 水分计量测含水率确定影响深度内土的湿陷变形未完全释放出来。一是水分计测试有误差, 其原因是水分计埋设孔回填不密实, 可能沿着埋设孔空隙直接浸入到较深位置, 而井内浸水实际影响深度未达该深度; 二是水分计埋设高差较大, 实际浸水饱和的深度确定不准确; 三是砂井径向浸水饱和范围较小, 周边未湿陷土层对湿陷土柱存在边界作用, 对土层湿陷变形的发展有一定的限制。图 18 为西安月登阁现场试坑浸水湿陷变形测试结果, 可以看出, 在试坑边界附近出现明显的沉降差并形成土层错动, 湿陷变形土体与非湿陷变形土体之间的错动, 可有效地克服边界的沉降位移约束作用, 因此, 浸水影响范围内土层湿陷的潜在变形能充分释放出来。砂井浸水条件下也有相同效应, 砂井周边径向渗透饱和和湿陷变形发展土柱的湿陷变形体与其外围非湿陷土层之间产生显著沉降差, 形成了上下贯通的错动裂缝, 有利于砂井浸水测试湿陷性土层的湿陷变形, 最终在地表形成图 8 所示明显的台阶型沉降分布。图 19 为西安阳村现场试坑浸水湿陷变形测试结果, 浸水后产生隆起变形; 该场地附近做过两个埋深分别为 6 m 及 12 m 的砂井试验, 测试结果为 6 m 砂井底部抬升 3.4 mm, 12 m 砂井底部抬升 4.2 mm, 与试坑浸水试验结果较为一致。

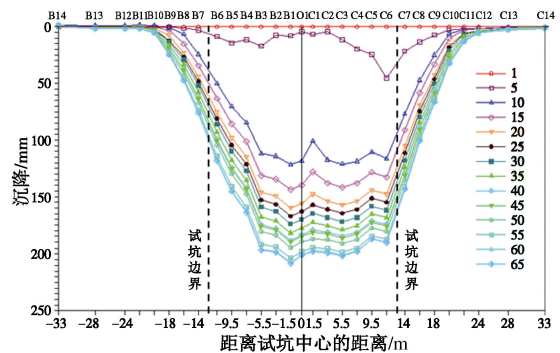


图 18 西安地铁五号线月登阁浸水试验地表沉降变化曲线^[11]

Fig. 18 Curves of collapse settlement of land surface of in-situ immersion tests at Yuedengge in Xi'an metro line 5^[11]

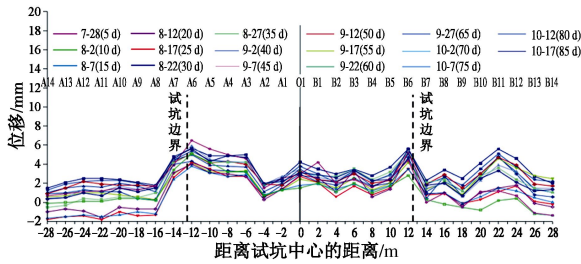


图 19 西安地铁四号线阳村浸水试验地表沉降变化曲线^[12]

Fig. 19 Curves of collapse settlement of land surface of in-situ immersion tests at Yang Village in Xi'an metro line 4^[12]

b) 地表单日沉降量

图 20~23 给出了各砂井浅标点单日沉降量随时间的变化曲线。受地层条件不同及砂井埋深不同的影响,各砂井浸水后地表开始沉降的时间及湿陷发生时速率各有不同,但均呈现同一特征:单日湿陷量在某一短期内会有突增骤降的变化,即土层的湿陷变形会在短期内集中释放出来,之前和之后均变化缓慢,反映出黄土湿陷突发性的特点。

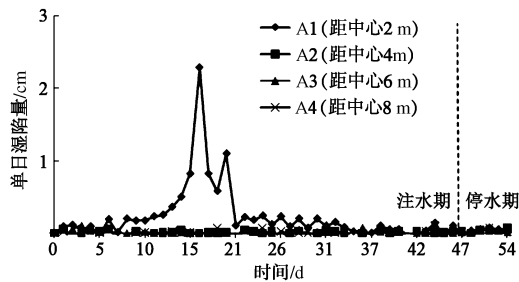


图 20 #1 砂井浅标点随时间单日沉降曲线

Fig. 20 Curves of collapse settlement per day of shallow punctuation of sand well No. 1

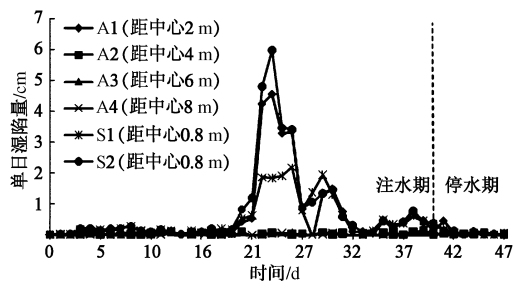


图 21 #2 砂井浅标点随时间单日沉降曲线

Fig. 21 Curves of collapse settlement per day of shallow punctuation of sand well No. 2

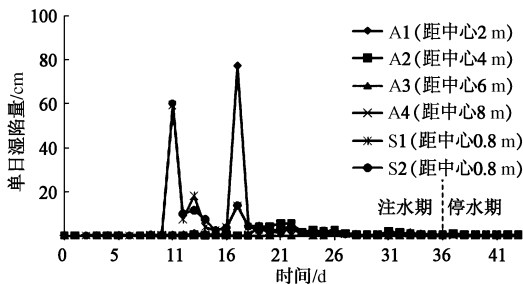


图 22 #3 砂井浅标点随时间单日沉降曲线

Fig. 22 Curves of collapse settlement per day of shallow punctuation of sand well No. 3

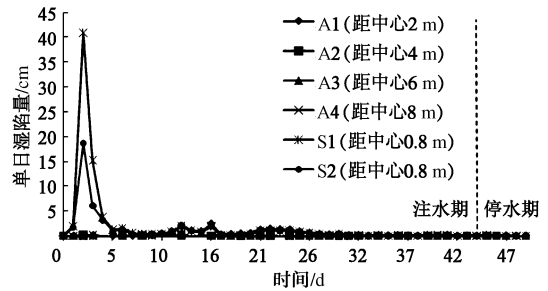


图 23 #4 砂井浅标点随时间单日沉降曲线

Fig. 23 Curves of collapse settlement per day of shallow punctuation of sand well No. 4

(2) 砂井中心标点沉降分析

各砂井中心标点沉降数据见表 6, 根据监测数据绘制了各中心标点总沉降量及单日沉降量随时间变化关系, 如图 24, 25 所示。

表 6 各砂井中心标点沉降数据

Table 6 Settlement data of centre punctuation in each sand well

标点编号	设计深度/m	实际深度/m	浸水影响深度/m	单天最大沉降量/cm	累计沉降量/cm
O1	25	22.5	26	3.98	8.6
O2	21	19.0	30	0.91	4.2
O3	15	15.0	20	2.04	10.8
O4	3	3.0	13	12.70	45.0

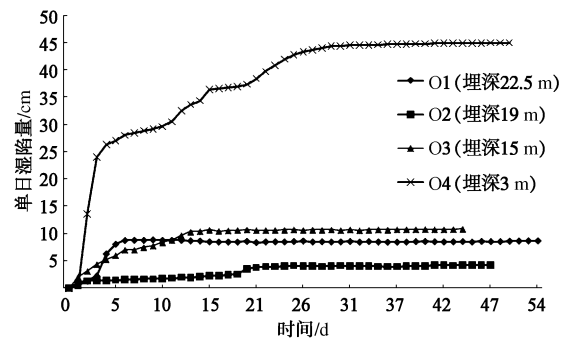


图 24 各砂井中心标点随时间累计沉降曲线

Fig. 24 Curves of total collapse of centre punctuation in each sand well

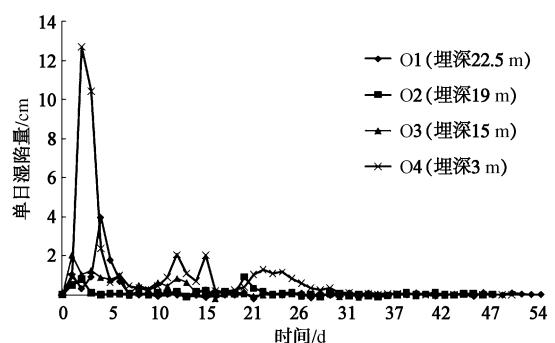


图 25 各砂井中心标点随时间单日沉降曲线

Fig. 25 Curves of collapse settlement per day of centre punctuation in each sand well

中心标点沉降板埋设于各砂井底部, 用于监测井底以下土层湿陷变形。浸水伊始水分通过砾石孔隙直接导入砂井底部, 沉降标点迅速发生变化, 结合上图

可以看出, 各中心标点沉降变形的发展大部分集中在浸水初期, 之后逐渐减缓至稳定不变。

分别将砂井井底埋深以上及以下土层自重湿陷量的实测值与相应土层室内试验计算值进行对比, 按式(1)讨论相应土层自重湿陷量计算公式中修正系数 β'_0 , 计算结果如表7, 8所示。

#1井底埋深22.5 m, 浸水影响深度取26 m, 则0~22.5 m土层湿陷量实测值为48.4 cm (57.0~8.6), 计算值为30.5 cm (不乘 β_0), 该厚度土层修正系数 $\beta'_0=1.57$; 22.5~26 m土层湿陷量实测值为8.6 cm, 计算值为3.7 cm, 该厚度土层修正系数 $\beta'_0=2.32$ 。同理, 各砂井计算结果如表7, 8所示。

由表7, 8可以看出, 各砂井井底以上土层 β'_0 均大于1, 即现场实测值大于室内试验计算值, 说明砂井浸水条件下能使井底埋深以上范围内土柱的湿陷变形量释放出来, 且湿陷土柱与周边未湿陷土体之间产生地裂缝。但是, 除#1外, 其他3个砂井 β'_0 均小于规范中所给陇西地区黄土自重湿陷量修正系数 $\beta_0=1.5$ 。

表7 井底埋深以上土层室内外结果对比

Table 7 Comparison between measured and calculated values of self-weight collapse amount in soil layer above bottom of each sand well

砂井编号	井底埋深/m	浸水影响深度/m	井底以下土层厚度/m	湿陷量实测值/cm	湿陷量计算值/cm	β'_0
#1	22.5	26	0~22.5	48.4	30.5	1.57
#2	19.0	30	0~19	21.8	21.5	1.01
#3	15.0	20	0~15	124.2	108.6	1.14
#4	3.0	13	0~3	20.6	16.0	1.29

表8 井底埋深以下土层室内外结果对比

Table 8 Comparison between measured and calculated values of self-weight collapse amount in soil layer below bottom of each sand well

砂井编号	井底埋深/m	浸水影响深度/m	井底以下土层厚度/m	湿陷量实测值/cm	湿陷量计算值/cm	β'_0
#1	22.5	26	22.5~26	8.6	3.7	2.32
#2	19.0	30	19~30	4.2	3.1	1.35
#3	15.0	20	15~20	10.8	17.1	0.63
#4	3.0	13	3~13	45.0	77.6	0.58

井底以下至浸水影响深度处土层 β'_0 随砂井埋深的增大而增大, 即砂井埋深越大, 井底土层实测值较计算值越大, 湿陷变形量释放越完全。可见, 将砂井浸水试验用于大埋深黄土地层湿陷变形评价更为合理。

3 结论与建议

本文依托宝兰客专建设项目, 在具有代表性的大埋深自重湿陷性黄土场地开展了4个不同深度的砂井

浸水试验研究, 对这种新的试验方法得到了以下认识。

3.1 结论

(1)砂井间歇性供水条件下深浅黄土体积含水率变化规律受深浅埋黄土孔隙大小及联通方式、渗水渗气条件、自重湿陷变形程度的影响。深层黄土随水分入渗体积含水率呈现“陡增—稍降—稳定”的变化形态, 浅埋黄土呈“陡增—骤降—波动”的变化形态。

(2)砂井浸水过程中地层沉降速率呈现“小→大→小→稳定”的变化规律。黄土浸水水分增加到基本饱和状态后湿陷变形发生需要一定时间, 当土的含水率达到湿陷起始含水率时湿陷发生并迅速发展, 湿陷变形会在短期内完成, 反映出黄土湿陷突变性的特点。

(3)砂井浸水条件下能使浸水影响范围内的土层发生湿陷, 且随着砂井埋深的增大, 浸水影响深度增大, 现场实测值较计算值越大, 即地层湿陷量释放越完全, 特别是井底以下土层的湿陷变形对这一规律反映更为明显。砂井浸水试验可以用于深埋黄土地层湿陷性评价, 也可以对埋深较大的隧道基地湿陷性进行评价。

(4)砂井将水直接导入深层地层, 可使井壁周围土柱及井底土层较为快速浸水饱和并发生湿陷, 四个不同深度砂井注水后湿陷变形均在一个月发展稳定, 体现出砂井试验周期短的特点。本次试验单个砂井最大用水量为498.5 m³, 远小于试坑浸水试验用水量。此外, 相邻场地湿陷量差异明显, 反映出山岭地区大厚度湿陷性黄土场地地层条件的复杂多变性。对于高铁隧道这种线性工程, 将砂井浸水试验方法用于沿线场地黄土的湿陷性评价有着独特的优势。

3.2 建议

本次试验受供水量限制, 采用间歇性供水方式, 虽对场地最终湿陷量影响不大^[10], 但还是带来了一些问题: 水位的升降导致深度方向上地层湿陷变形不连续, 造成上下土层的拉裂, 为井内砾石提供了运动空间, 井内砂砾石不断沉陷。由于下陷不均匀, 井中心沉降杆出现偏移。虽然采用索锚固, 但不能完全阻止沉降杆的偏移, 给读数带来误差, 且井内砂砾石沉陷后须不断回填。进内砂砾石沉陷变形也可能产生侧向挤出变形, 从而减小了坑底沉降。此外, 砂井周边土体出现环向裂缝, 改变了单一地竖向下渗的浸润方式, 大量水流入环向裂缝中, 局部埋深范围增大径向影响范围, 减少了砂井深度范围内深层井壁周围土柱的浸润, 导致试验效果与预想的差异较大。所以在今后的试验中须尽可能保证砂井的持续供水, 避免上述问题。

目前《规范》^[4]中提出的自重湿陷量计算修正系数 β_0 是基于大量试坑浸水试验与室内试验比较总结

所得,但砂井试验与试坑试验浸水方式不同,水分入渗形成的边界条件不一,砂井试验由于竖向浸水深度大而径向影响范围小,地层湿陷变形过程中受到的侧边阻力较试坑试验大,所以砂井试验实测值与室内试验计算值的比值与规范中提出的修正系数存在差异。本次试验结果可以看出,不同深度的砂井实测值与相应场地计算值之比 β_0' 不同,随砂井埋深的增大 β_0' 也在增大。随着砂井试验的推广,可建立不同地区及同一地区不同深度砂井浸水试验与室内试验修正关系,同时,也可以在试坑浸水试验场地周边未浸水湿陷地层土体中进行砂井浸水试验,建立两种现场试验实测值间的修正关系,使砂井浸水试验对场地的湿陷变形预测更为准确。

参考文献:

- [1] 黄雪峰,陈正汉,哈双,等.大厚度自重湿陷性黄土场地湿陷变性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 tests 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))
- [2] 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(4):83-90.(WANG Xiao-jun, MI Wei-jun, XIONG Zhi-wen, 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(4): 83 - 90. (in Chinese))
- [3] 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性特征研究[J].岩土工程学报,2014,36(3):537-546.(MA Yan, WANG Jia-ding, PENG Shu-jun, et al. Immersion tests on characteristics of deformation of self-weight collapsible loess under overburden pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3): 537 - 546. (in Chinese))
- [4] GB50025—2004 湿陷性黄土地区建筑规范[S].2004.(GB50025—2004 Code for building construction in collapsible loess regions[S]. 2004. (in Chinese))
- [5] 邵生俊,李骏,李国良,等.大厚度自重湿陷黄土湿陷变形评价方法的研究[J].岩土工程学报,2015,37(6):965-978.(SHAO Sheng-jun, LI Jun, LI Guo-liang, et al. Evaluation method for self-weight collapsible deformation of large thickness loess foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6): 965 - 978. (in Chinese))
- [6] 黄雪峰,杨校辉.湿陷性黄土现场浸水试验研究进展[J].岩土力学,2013,34(2):222-228.(HUANG Xue-feng, YANG Xiao-hui. A study progress on in-situ soaking test on collapsible loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 222 - 228. (in Chinese))
- [7] 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 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, 34(1): 65 - 74. (in Chinese))
- [8] 邵生俊,杨春鸣,焦阳阳,等.湿陷性黄土隧道的工程性质分析[J].岩土工程学报,2013,35(9):1580-1590.(SHAO Sheng-jun, YANG Chun-ming, JIAO Yang-yang, et al. Engineering properties of collapsible loess tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(9): 1580 - 1590. (in Chinese))
- [9] 邵生俊,李骏,李国良,等.黄土湿陷性变形的砂土浸水测试方法[P].中国专利:ZL 2012 1 0425416.9,2014-10-01.(SHAO Sheng-jun, LI Jun, LI Guo-liang, et al. Sand well immersion test method for collapsible deformation of loess[P]. Chinese patent: ZL 2012 1 0425416.9,2014-10-01. (in Chinese))
- [10] 刘明振.湿陷性黄土间歇浸水试验[J].岩土工程学报,1985,7(1):47-54.(LIU Ming-zhen. Collapsible loess intermittent water immersion test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 7(1): 47 - 54. (in Chinese))
- [11] 机械工业勘察设计研究院.西安市地铁五号线月登阁试坑浸水试验报告[R].西安:机械工业勘察设计研究院,2014.(China Jikan Institute of Engineering Investigations and Design. Report on soaking test of Yue Deng Ge site in Xi'an Metro Line 5[R]. Xi'an: China Jikan Institute of Engineering Investigations and Design, 2014. (in Chinese))
- [12] 西安市地下铁道有限责任公司.西安地铁工程穿越湿陷性黄土工程特性及应对措施研究成果报告[R].西安:西安市地下铁道有限责任公司,2013.(Xi'an Subway Limited Liability Company. Research results report on Xi'an subway engineering through the collapsible loess engineering characteristics and countermeasures[R]. Xi'an: Xi'an Subway Limited Liability Company, 2013. (in Chinese))