

砂井载荷浸水试验在深层黄土湿陷性评价中的应用

潘登丽, 胡向阳, 赵成, 严耿升, 邵生俊

Application of sand-well load immersion test to deep loess collapsibility evaluation

PAN Dengli, HU Xiangyang, ZHAO Cheng, YAN Gengsheng, and SHAO Shengjun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202206006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

深厚黄土地基浸水湿陷变形及竖向土压力作用分析

Analysis of collapsible deformation and vertical soil pressure action of thick loess foundation

屈宏录, 刘德仁, 孙英萍, 闫炳舟, 徐硕昌, 张严 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 157-164

基于主成分分析法的Q2黄土湿陷特性研究

A study of the collapsibility of Q2 loess based on principal component analysis

王玉涛, 刘小平, 曹晓毅 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 141-148

黄土湿陷微观机理研究现状及发展趋势

Research progress and prospect of loess collapsible mechanism in micro-level

范文, 魏亚妮, 于渤, 邓龙胜, 于宁宇 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 144-156

封隔注浆分层成井技术在水文地质勘查中的应用研究

Application of the technology of injecting cement for the stratified well completion to hydrogeological exploration

王明明, 解伟, 安永会, 龚磊, 王文祥, 崔虎群 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 50-50

不同压实度下黄土填方边坡失稳的模型试验研究

A model test study of the instability of loess fill slope under different compactness

陈林万, 裴向军, 张晓超, 张硕, 钟玉健, 罗欣 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 137-147

水动力因素对砷在河砂中迁移影响的柱试验与模拟

Influence of hydrodynamic factors on the migration of arsenic in river sand: Column experiment and models

黄健, 单慧媚, 彭三曦, 杜海玲, 陈辉, 曾春芽 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 195-206



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202206006

潘登丽, 胡向阳, 赵成, 等. 砂井载荷浸水试验在深层黄土湿陷性评价中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(2): 122-131.
PAN Dengli, HU Xiangyang, ZHAO Cheng, et al. Application of sand-well load immersion test to deep loess collapsibility evaluation[J].
Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 122-131.

砂井载荷浸水试验在深层黄土湿陷性评价中的应用

潘登丽¹, 胡向阳¹, 赵成¹, 严耿升¹, 邵生俊²

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065;
2. 西安理工大学土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对深层湿陷性黄土自重湿陷量室内试验结果不准确、测试黄土地基湿陷量的原位试验方法少等不足, 基于已有的砂井浸水试验, 提出了新的现场试验方法——砂井载荷浸水试验方法。其核心是井底地层在试验压力作用下沉降稳定后, 利用井中砂砾石的强透水性, 将水直接导入井底湿陷性黄土地层及砂井周围土体, 使其快速浸水饱和, 以此来测定砂井井底地层的湿陷量和砂井周围黄土的自重湿陷量。通过 2 组砂井载荷浸水试验, 测试了不同压力和浸水条件下不同深度地层的湿陷变形, 对比分析了砂井载荷浸水试验和临近场地大型试坑浸水试验, 结果表明砂井载荷浸水试验的判定结果与试坑浸水试验一致, 说明砂井载荷浸水试验是可行的。砂井载荷浸水试验具有周期短、费用低、场地条件要求低、用水量小等优点, 适用于深层黄土湿陷性的研究, 对黄土地区(尤其是深层黄土)工程的湿陷性评价有一定的参考意义。

关键词: 砂井载荷浸水试验; 黄土; 湿陷性; 神禾塬; 大型试坑浸水试验

中图分类号: TU475+.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)02-0122-10

Application of sand-well load immersion test to deep loess collapsibility evaluation

PAN Dengli¹, HU Xiangyang¹, ZHAO Cheng¹, YAN Gengsheng¹, SHAO Shengjun²

(1. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an, Shaanxi 710065, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: Because of the inaccuracy of laboratory test results of self-weight collapsibility of deep collapsible loess and the lack of in-situ test methods for testing loess foundation collapsibility, a new field test method, the sand-well load immersion test method, is proposed based on the existing sand-well immersion test. The core is that after the loess under the sand well has settled stably under the action of test pressure, the collapsible loess under the bottom of the sand well and around the sand well can be quickly saturated due to the strong permeability of sand and gravel in the well, therefore the collapsibility of the loess under the bottom of the sand well and the self-weight collapsibility of the loess around the sand well can be measured. Through two sets of sand-well load immersion tests, the collapsible deformation of different depth strata under different pressure and immersion conditions is tested, and the sand-well load immersion test and the large test pit immersion test adjacent to the site are compared and analyzed. The results show that the judgment results of the sand-well load immersion test are consistent with the test pit immersion test, indicating that the sand-well load immersion test is feasible. In addition,

收稿日期: 2022-06-07; 修订日期: 2022-11-01

投稿网址: www.swdzgdz.com

第一作者: 潘登丽(1993-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事岩土工程勘察方面的工作。E-mail: pandengli@nwh.cn

通讯作者: 胡向阳(1971-), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事岩土工程勘察方面的工作。E-mail: 0309@nwh.cn

the sand-well load immersion test has the advantages of short cycle, low cost, low site condition requirements, small water consumption, etc. The sand-well load immersion test is suitable for the study of collapsibility of deep loess. The results are of a certain reference significance for the collapsibility evaluation of loess engineering in the loess area (especially deep loess).

Keywords: sand-well load immersion test; loess; collapsibility; Shenhe Plateau; large test pit immersion test

随着我国西部大开发的深入和“一带一路”倡议的实施,湿陷性黄土地区的工程建设越来越多,逐渐从黄土低阶地、湿陷性土层埋深较浅的场地向黄土高阶地、湿陷性土层埋深较深的场地发展,以往人们对黄土地基湿陷变形的评价方法是否仍然满足实际工程值得思考^[1]。不少场地^[2-3]地层结构由浅层非湿陷性、轻微湿陷性的上更新统(Q₃)黄土与下伏轻微、中等湿陷性的中更新统(Q₂)黄土组成,这种深层黄土湿陷会对地下综合管廊^[4]、地铁隧道^[5]的安全构成威胁,甚至会引起地裂缝^[6]。Weng等^[7]通过物理模拟、理论推导和数值模拟的方法研究了黄土地层的湿陷对隧道结构的影响,结果表明非均匀浸湿引起的隧道基底不均匀沉降是隧道结构倒塌和变形的主要原因。深层黄土的湿陷性评价对高铁、地铁等工程的影响至关重要^[8],因此有必要对深层黄土湿陷性评价进行有针对性的专门研究。

黄土湿陷性评价结果对地基处理深度^[9]、桩基负摩阻力设计深度^[10]、地基防排水宽度^[11]等至关重要,很多学者对黄土的湿陷性进行了深入研究。如,魏亚妮等^[12]、Wang等^[13]、范文等^[14]探讨了马兰黄土的湿陷机理,回答了黄土“为何湿陷”和“如何湿陷”的问题,认为黄土的湿陷主要由土中大孔隙和中等孔隙的破坏引起,其中孔径在3~60 μm区间的粒间孔隙为湿陷提供主要空间。现行黄土规范《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB 50025—2018)^[15]中室内试验湿陷性评价结果存在误差较大的问题,现场试坑浸水试验是评价场地湿陷类型较为准确的方法。杨校辉等^[16]、苏忍等^[17]、Xu等^[18]、屈宏录等^[19]、An等^[20]分别进行了现场浸水试验,研究了黄土地层的湿陷变形特性;王立新等^[21]建立了计算浸水饱和黄土湿陷系数的“浸水结构破坏湿陷性”评价方法,并与现场试坑浸水试验结果进行比较,验证了评价方法的可靠性;针对无法进行现场试验的黄土场地,由于黄土湿陷系数与基本物性指标之间具有一定的相关性^[22],Wang等^[13]提出了一种考虑黄土初始结构特性的评价黄土湿陷性的新方法,研究表明该方法比室内试验更接近现场试验的实

测值。现有的研究主要针对黄土的湿陷机理和自重湿陷量^[23-24],而地基湿陷量的测试方法和理论研究相对较少,特别是穿越深层黄土的地下工程,湿陷量计算值和基底地层实际湿陷量的差异有待进一步研究,因此有必要探索一种适宜测试深层地基湿陷变形的试验方法。

基于邵生俊等^[25]、李骏等^[26]、王永鑫等^[27]提出的砂井浸水试验方法,提出了砂井载荷浸水试验的方法(以下简称“砂井试验”),可测得一定埋深地层在给定基底压力下变形稳定后在浸水饱和作用下的变形量。依托西北水电及新能源科技产业中心常宁基地建设项目,在神禾塬湿陷性黄土场地内进行了2个不同深度的原位砂井试验,通过观测不同深度黄土含水率和沉降的变化,对比分析场地室内试验结果,研究深层黄土的浸水湿陷特性,论证将其应用于深层黄土湿陷评价的优势。

1 试验概况

1.1 场地条件

项目场地位于西安市长安区,东邻城南大道,西临常祥街,北接神禾五路,南连神禾四路。场地地面标高约为473 m,整体地势较为平坦,地貌单元属一级黄土台塬(神禾塬)。地质勘察揭示地下水埋深30~33 m,试验场地25 m深度范围内地层见表1。

表1 试验场地地层
Table 1 Lithology of the test site

地层	深度/m	土壤类型
全新统人工填土(Qh ^{ml})	0~1.0	填土
上更新统风积土(Qp ₃ ^{col})	1.0~9.5	黄土
上更新统残积土(Qp ₃ ^{el})	9.5~12.6	古土壤
中更新统风积土(Qp ₂ ^{col})	12.6~22.8	黄土
中更新统残积土(Qp ₂ ^{el})	22.8~25.0	古土壤

1.2 试验方案

为了研究不同埋深黄土的湿陷性,在场地内设置了2个砂井,编号分别为1号、2号,2个砂井中心间距约20 m,试验方案见表2。通过控制井底试验压力,可以模拟深层地基在荷载压力作用下沉降变形和浸

水饱和后的湿陷变形发展规律。在砂井开挖过程中采取原状土样进行室内湿陷性试验。

表 2 砂井试验整体方案布置
Table 2 Overall scheme of sand-well tests

试验名称	砂井编号	深度/m	底面位置	试验压力/kPa
砂井荷载浸水试验	1号	5	Qp ₃ ^{sat}	190
	2号	15	Qp ₂ ^{sat}	380

1号砂井共布设沉降观测标点11个:深标点4个(S1—S4),浅标点6个(Q1—Q6),中心标点1个(C),各标点的位置及埋深见图1。2号砂井共布设沉降观测标点14个:深标点7个(S1'—S7'),浅标点6个(Q1'—Q6'),中心标点1个(C'),各标点的位置及埋深见图2。

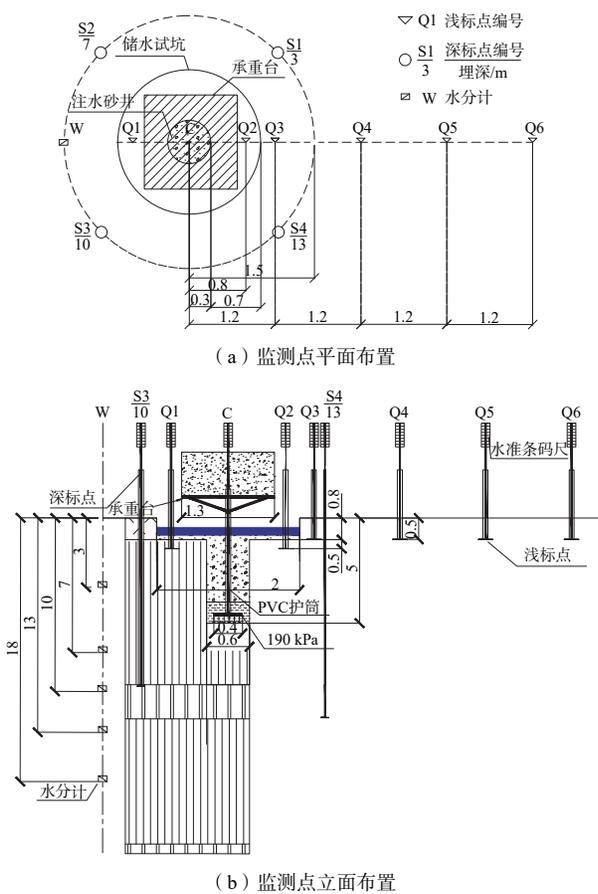


图 1 1号砂井监测点布置图(单位:m)
Fig. 1 Layout of the monitoring points for No. 1 sand well (unit: m)

2个砂井的深标点用于量测不同埋深土层的变形量,浅标点量测地表以下地层的总变形量。浅标点埋深均为0.5 m。1号砂井Q1和Q2位于砂井储水试坑内,距砂井中心0.8 m,用于量测试坑表面土层的湿陷量;Q3—Q6间距1.2 m,最远距砂井中心4.8 m,量测砂井径向上的地表沉降。2号砂井浅标点的布置与1号

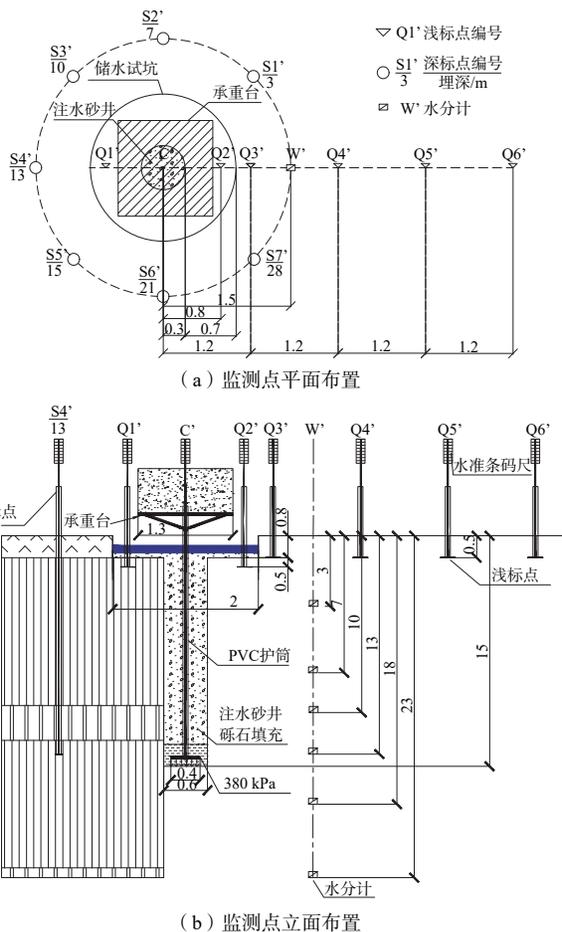


图 2 2号砂井监测点布置图(单位:m)
Fig. 2 Layout of the monitoring points for No. 2 sand well (unit: m)

砂井一致。

中心标点监测井底以下地层的变形。水分计(W)埋设在钻孔里,位于深标点的同一圆周上。此次采用湖南亿测物联传感技术研发有限公司生产的土壤水分计,型号为YTDY0101,采集到的数据为体积含水率,量程为0~100%。图3为2个砂井的现场试验照片。试验历时47 d,共观测31次。浸水试坑周边未见明显由试验荷载和湿陷引起的裂缝。

1.3 试验过程

砂井试验全过程的流程见图4,结合图1和图2说明实施步骤。试验中所有沉降观测标点沉降杆出露地表的顶端均焊接钢片,在钢片上粘接水准条码尺贴纸,方便后期采用电子水准仪读数。

步骤1:开挖砂井和试坑。机械开挖直径0.5 m的探井,开挖至试验深度,去除井底浮土、整平。以探井为中心,人工开挖直径2 m、深度0.8 m的试坑,用于储水和增加砂井的渗透范围。在试坑侧壁和试坑边



(a) 1号砂井



(b) 2号砂井

图3 砂井试验现场

Fig. 3 Photos of the sand-well test

缘铺设防水塑料布,并在试坑及试坑边缘的塑料布上铺设 10 cm 厚的砾石,防止侧壁在浸水过程中坍塌。

步骤 2: 安放承重台。清除砂井底的开挖虚土,铺设 10 cm 厚的透水砂垫层并夯实;在探井内吊装安放焊接好的沉降杆,沉降杆下端固定圆形沉降板、上端固定方形承重台、外部套上 PVC 护筒,保证沉降杆不受侧限,可随地层变形自由升降;均匀灌入 20 cm 厚的中细砂,起缓冲作用,回填砾石至井口处,保证承重台水平、沉降杆竖直。

步骤 3: 埋置深标点。向深标点钻孔内下放沉降板及逐节连接的沉降杆至井底,孔口出露 2 m。沉降杆外套上 PVC 护筒,保证其不受侧壁摩擦影响,自由沉降;PVC 护筒出露孔口 1 m,护筒外围空隙用砂砾石回填密实,加强渗水。

步骤 4: 埋置浅标点。在浅标点埋设位置开挖直径 40 cm、深 50 cm 的圆坑,整平坑底。将组合好的沉降杆放于坑内,地表出露 2 m,杆外套上 PVC 护筒,出

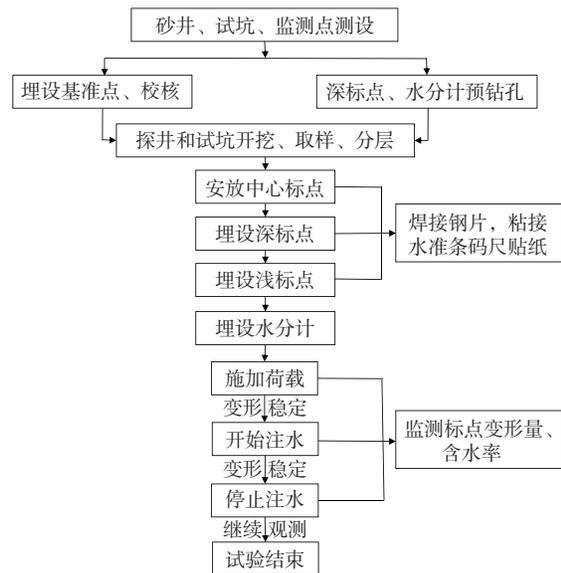


图4 砂井试验全过程流程图

Fig. 4 Flowchart for the sand-well testing process

露地表 1 m, 确保沉降杆竖直, 分层回填素土并夯实。

步骤 5: 埋设水分计。埋设前及埋设后的读数校值, 确定水分计正常工作后, 分层回填素土、夯实并利用素混凝土进行止水, 避免钻孔内渗流速度的增大, 加快水分计的变化速率。不断用测绳测量回填高度, 待回填夯实到下一设计深度时埋设下一个水分计, 直至设计的水分计全部埋设完毕且素土回填密实至孔口。

步骤 6: 施加荷载。在砂井内灌入砂砾石, 并在安置的承重台上放置混凝土配重, 砂井底部单位面积承受的重力等于试验设计荷载。

步骤 7: 观测记录。对各沉降标点及水分计进行连续监测, 待沉降完全稳定后开始向砂井和试坑内注水, 保证试坑内的水头高度不小于 30 cm。持续观测记录各类监测数据、注水量及地表裂缝发展情况, 直到变形稳定后停止注水, 继续观测, 试验终止。

2 试验结果

2.1 地层含水率变化

开始注水时, 水通过砾石间隙自上而下快速到达井底, 此时水主要由井底面和侧壁进入砂井下部周围地层; 当水面上升到试坑里时, 入渗面多了试坑侧壁和试坑底面, 试验过程中水平渗透和垂直渗透同时进行。图 5 为 1 号、2 号砂井水分计监测数据随时间的变化曲线。从图 5 可以看出, 不同埋深水分计的读数突变时间不同。注水开始后, 在浸水入渗影响深度范围内, 顶部和底部的地层较中部地层更晚发生含水率

突变,即浸水前锋线先到达井底埋深附近的地层,后到达浸水入渗影响深度范围顶部和底部的地层。例如,2号砂井10,13,18 m处的含水率在注水后第2天(即试验开始后第9天)就产生突变,而3,7,23 m处含水率在注水后第8天产生突变。

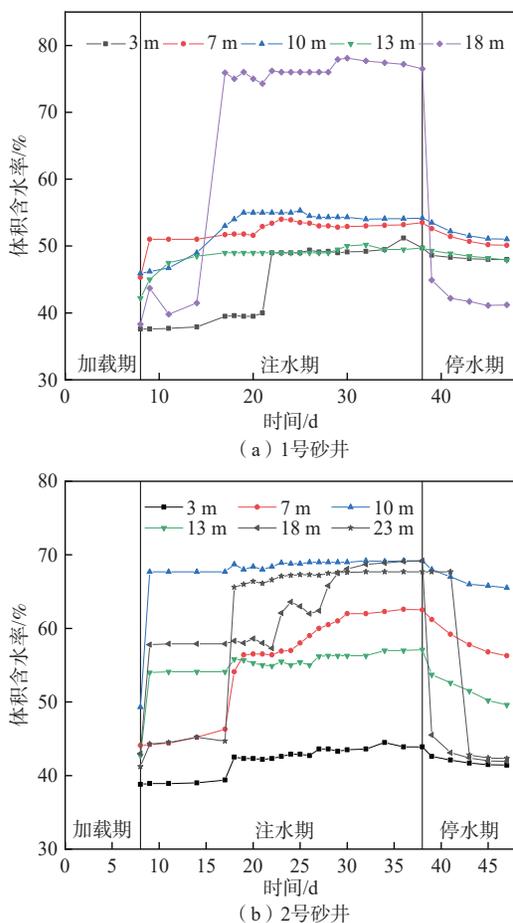


图 5 水分计随时间变化关系曲线
Fig. 5 Variation curves for moisture sensors with time

2.2 沉降监测数据

2.2.1 中心标点

根据监测数据绘制了1号和2号砂井中心标点的累计变形量和单日变形量随时间的变化关系(图6),图6中变形量为负值代表标点沉降,正值代表标点抬升,下文相同。

由图6可知,标点的总变形量包括加载变形量和浸水变形量两部分。1号砂井的总变形量为-46 mm,其中加载累计变形量为-18 mm,单日最大加载变形量为-17 mm;浸水累计变形量为-28 mm,单日最大浸水变形量为-9 mm。2号砂井的总变形量为-181 mm,其中加载累计变形量为-85 mm,单日最大加载变形量为-82 mm;浸水累计变形量为-96 mm,单日最大浸水变

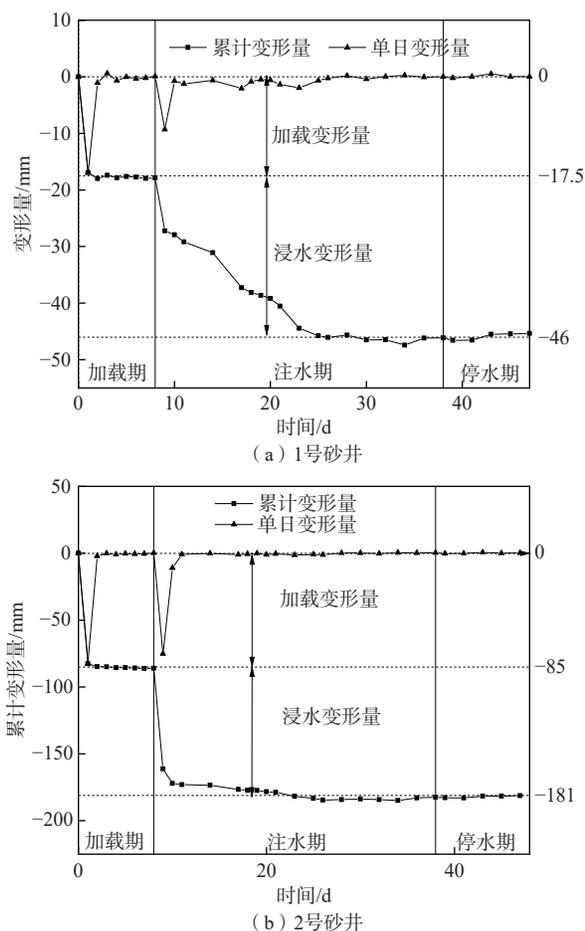


图 6 中心标点的累计变形及单日变形随时间变化曲线
Fig. 6 Variation curves of the cumulative deformation and single day deformation of the center mark with time

形量为-75 mm。1号砂井井底沉降板埋置于Q₃黄土中,2号砂井井底沉降板埋置于Q₂黄土中,但由于2号砂井的试验荷载较1号砂井大,加载变形量和浸水变形量均增加。

2.2.2 浅标点

根据测量结果,对浅标点的变形量进行分析。图3为试验开始第32天1号砂井和2号砂井浸水过程中的现场实景图。1号和2号砂井实测浅标点累计变形量随时间变化曲线见图7。

加载期:浅标点变形量在-1.5~1 mm之间波动,没有明显的升降变化,说明承重台加载对砂井周围地层没有显著影响。

注水期:各浅标点变形量都很小,但是出现了明显的抬升情况,最大变形量近4 mm。

停水期:各浅标点基本处于稳定状态,变化量很小。

2.2.3 深标点

根据测量数据,绘制了各深标点的累计变形曲线

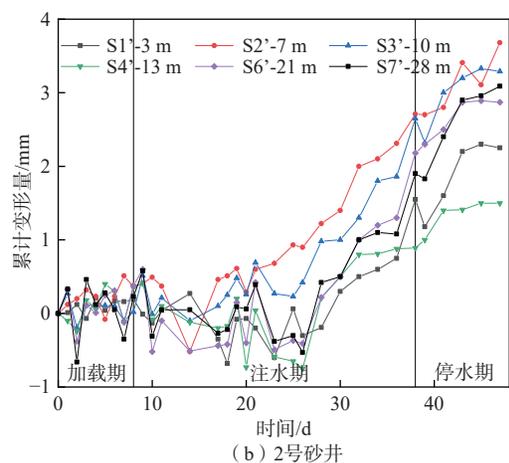
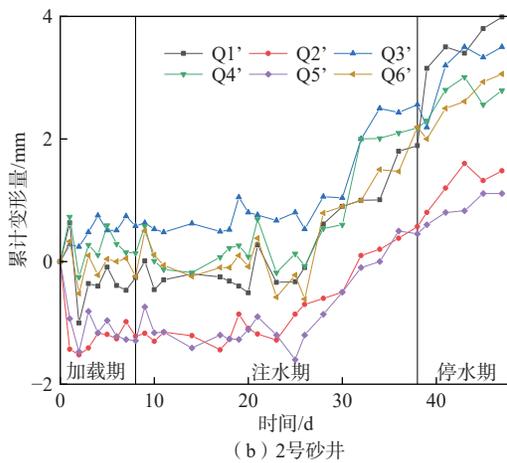
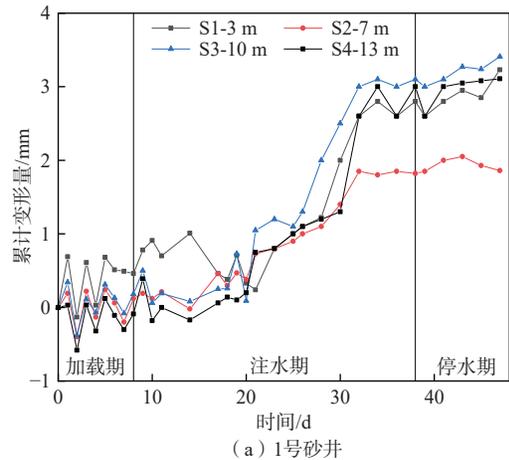
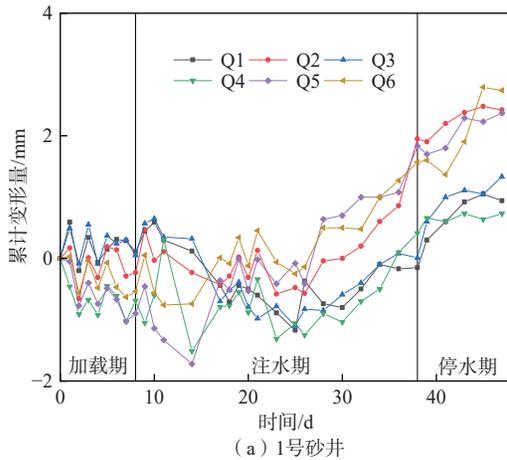


图7 浅标点累计变形随时间变化曲线

图8 深标点累计变形随时间变化曲线

Fig. 7 Variation curves for settlement at the shallow marked points with time

Fig. 8 Deformation curves for the deep marked points

(图8)。2号砂井S5'深标点的钻孔倾斜,不满足下放沉降杆的条件,未能完成埋设,故此处不讨论S5'标点。根据图8,深标点变形大致有如下特征:

加载期:深标点变形量的变化与浅标点类似,在 $-1 \sim 1$ mm之间不断波动,没有明显的升降变化,说明承重台加载对砂井周围地层没有显著影响。

注水期:注水期间各深标点变形量都很小,处于缓慢抬升状态,最大变形量不超过4 mm。

停水期:各深标点基本处于稳定状态,变化量很小,直至观测结束,其最大变化量不超过1 mm。

2.3 室内湿陷性试验

在本场地2个24 m的探井里取不扰动土样进行室内湿陷性试验,场地黄土的湿陷系数、自重湿陷系数和湿陷起始压力沿深度变化如图9所示。由图9可知,场地地层结构特点是:埋深5 m以上为中等湿陷性 Q_3^{eol} 黄土;5 m以下, Q_3^{eol} 黄土和 Q_3^{el} 古土壤呈无湿陷性,而大厚度深埋 Q_2^{eol} 黄土普遍呈轻微、中等湿陷性。

3 分析与讨论

3.1 含水率变化分析

2个砂井的所有水分计在浸水期间均产生变化并能维持在某一稳定值上,说明深度5 m的1号砂井、15 m的2号砂井的浸水影响深度至少为18 m和23 m。砂井试验中的深部土层可以在较短时间内受到浸水影响达到饱和,这表明砂井试验对于深层黄土的湿陷性研究具有一定的优势。赵金刚等^[28]在典型黄土-古土壤系列场地进行的大型试坑浸水试验研究中指出,古土壤层在浸水及停水阶段对水分运移有阻碍、限制作用。而砂井试验在浸水阶段通过井中砾石将水直接导入井底,继而水分在井底以上土层进行水平方向的渗透,使砂井深度范围内的土层同时浸水,缩短黄土和古土壤达到饱和和湿陷的时间差。这是因为黄土层易先达到饱和而发生沉降变形,而古土壤层由于力学强度较黄土层大,其透水性弱,后发生湿陷变形。因此砂井试验在一定程度上削弱了土拱效应^[29],确保浸水影响深度内土的湿陷变形完全释放出来。

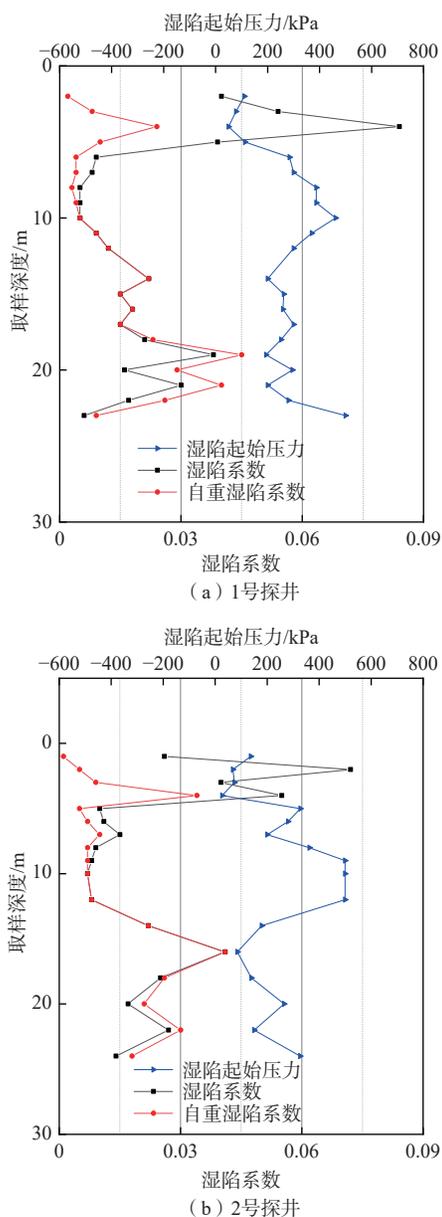


图 9 室内试验结果
Fig. 9 Indoor test results

图 5 中 1 号砂井 18 m 和 2 号砂井 18 m、23 m 处水分计注水后含水率激增, 停水后含水率骤降, 特别是 1 号砂井 18 m 处水分计峰值含水率与停水后最小含水率差值高达 37%, 浸水期最大体积含水率达到 78.1%。造成这种情况的原因主要是埋设水分计时素土回填不密实, 土体中大孔隙发育, 浸水时自由水能快速充满孔隙, 停水时也能快速消散。

3.2 沉降数据分析

在试验荷载作用下, 中心标点在加载 1 d 之后, 加载变形量达到稳定, 直到注水开始, 均保持在稳定值左右。浸水开始后, 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。浸水变形发生在浸水

前期, 单日变形量大, 变形速率大, 随后逐渐降低至稳定值不变, 反映出黄土湿陷突变性的特点。

2 个砂井试验地面浅标点的变形规律类似, 在浸水过程中浅标点均有几毫米的抬升。尽管 1 号砂井和 2 号砂井的试验荷载不同, 但其地面浅标点的变形结果说明砂井中心沉降板承受的荷载对砂井周围地层没有影响。也就是说, 砂井试验的地面浅标点变形量反映的是砂井周围浸水影响范围土体的自重湿陷量。2 个砂井试验的地面浅标点均呈抬升状态, 该现象与西安财经学院大型现场试坑浸水试验^[2]结果比较相似, 财经学院场地的试坑范围内的地层在浸水过程中也有几毫米的抬升。本试验场地距财经学院直线距离仅 2 km, 场地属同一地貌单元, 具有可比性。砂井试验的地表变形量与邻近场地的试坑浸水试验结果接近, 这说明砂井试验可用于测试场地自重湿陷量。

各深标点的累计变形量在试验全过程都很小, 整体呈抬升状态, 最大变形量不超过 4 mm。由于黄土层渗透性较古土壤好, 因此在水体渗透过程中, 黄土层先达到饱和而发生变形, 而古土壤层由于力学强度较黄土层大, 其透水性弱, 此时尚未发生变形, 并在此对上部土层提供支撑力; 而且古土壤层具有弱膨胀性, 在其浸水达到饱和时会产生轻微膨胀。所以深标点这种不降反升的特征可能与厚度较大的古土壤有关。

3.3 湿陷性评价方法对比

将常宁基地和西安财经学院新校区 2 个场地的室内试验、砂井试验及邻近场地试坑浸水试验的结果进行对比分析, 如表 3 所示。

表 3 2 个场地不同湿陷性评价方法对比
Table 3 Comparison of different evaluation methods for two sites

评价方法	常宁基地		西安财经学院新校区 ^[2]	
	室内试验	砂井试验	室内试验	试坑浸水试验
自重湿陷量/mm	-255	4	-216	9
湿陷量/mm	-247	-28	-140	-140
场地湿陷类型	自重	非自重	自重	非自重
地基湿陷等级	II (中等)	I (轻微)	II (中等)	I (轻微)

注: 表中数值为变形量, 负值表示湿陷, 正值表示抬升。

砂井试验判定地基湿陷等级的方法为: 砂井周围地层由于井中砂砾石的强透水性能够快速浸水饱和, 并在饱和自重压力作用下产生沉降变形, 因此以该变形量作为黄土场地的自重湿陷量, 判断场地的湿陷类型; 井底地层在试验压力作用下沉降稳定后, 浸水饱和和产生附加变形, 因此以此附加变形量作为黄土地基

的湿陷量,判定地基的湿陷等级。砂井试验的自重湿陷量取 2 个砂井地面浅标点变形量的最大值,湿陷量取深度为 5 m 的 1 号砂井由于浸水产生的附加沉降量,即浸水累计变形量。

由表 3 可以看出:

(1)常宁基地:室内试验湿陷类型判定结果为自重湿陷性场地,而砂井试验判定结果为非自重湿陷性场地。通过砂井试验测得的地表沉降量和浸水附加变形量判定地基湿陷等级为 I 级,小于室内试验得到的湿陷等级。

(2)西安财经学院新校区:室内试验的自重湿陷量较大,而试坑浸水试验的结果却是抬升。根据现场试验判定场地类型为非自重湿陷性场地,结合湿陷量计算值,可知湿陷等级为 I 级;与常宁基地相同,湿陷等级也小于室内试验的湿陷评价结果。

(3)对比这 2 个相邻场地发现,砂井试验与大型现场试坑浸水试验的判定结果一致,湿陷等级均为 I 级,初步论证了砂井试验在深层黄土湿陷性评价方面的合理性和可行性。

4 结论

(1)砂井试验利用井内砾石间的空隙将水直接导入井底,使深部土层可以在较短时间内受到浸水影响达到饱和,这说明砂井试验对于深层黄土的湿陷性研究具有一定的优势。

(2)砂井试验通过测得井底地层在试验压力作用下沉降稳定后浸水饱和产生的湿陷量,可以模拟在基底压力和浸水饱和作用下地基土的压密变形,即湿陷性黄土地基受水浸湿饱和的湿陷量。

(3)砂井试验的地表变形量与邻近场地的试坑浸水试验结果接近,说明砂井试验可用于场地自重湿陷量测试。

(4)评价方法对比结果表明,常宁基地的砂井试验与西安财经学院的大型现场试坑浸水试验的湿陷性评价结果一致,初步论证了砂井试验在深层黄土湿陷性评价方面的合理性和可行性,尤其对于穿越黄土的地下工程更能体现其优越性。

参考文献 (References):

- [1] 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 characteristics of deformation of self-weight collapsible loess under overburden pressure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(3): 537 - 546. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 机械工业勘察设计研究院.西安财经学院新校区一期工程湿陷性黄土地现场试坑浸水试验报告[R].西安:机械工业勘察设计研究院,2004. [China Jikan Institute of Engineering Investigations and Design. Report on soaking test of collapsible loess site of the first phase of the new campus of Xi'an Institute of Finance and Economics[R]. Xi'an: China Jikan Institute of Engineering Investigations and Design, 2004. (in Chinese)]
- [3] 西安市地下铁道有限责任公司.西安地铁穿越湿陷性黄土工程性质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)]
- [4] 徐强,陈浩然,李良成,等.黄土地层湿陷对整体管廊破坏作用研究[J].*灾害学*, 2022, 37(4): 23 - 29. [XU Qiang, CHEN Haoran, LI Liangcheng, et al. Study on failure effect of loess stratum collapsibility on integral utility tunnel[J]. *Journal of Catastrophology*, 2022, 37(4): 23 - 29. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 侯乐乐,翁效林,黄文鹏,等.湿陷性黄土地铁隧道基底注浆加固处治试验[J].*长安大学学报(自然科学版)*, 2022, 42(2): 91 - 102. [HOU Lele, WENG Xiaolin, HUANG Wenpeng, et al. Experimental on grouting reinforcement and treatment of metro tunnel basement in collapsible loess[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2022, 42(2): 91 - 102. (in Chinese with English abstract)]
- [6] LU Quanzhong, QIAO Jianwei, PENG Jianbing, et al. A typical Earth fissure resulting from loess collapse on the loess plateau in the Weihe Basin, China[J]. *Engineering Geology*, 2019, 259: 105189.
- [7] WENG Xiaolin, ZHOU Rongming, RAO Wei, et al. Research on subway shield tunnel induced by local water immersion of collapsible loess[J]. *Natural Hazards*, 2021, 108(1): 1197 - 1219.
- [8] XIAO Qinghua, LEI Shengxiang, CUI Kai, et al. Effect of the longitudinal local wetting-induced collapse on tunnel structure in loess strata[J]. *Tunnelling and Underground*

Space Technology, 2022, 122: 104361.

- [9] ZHU Guangxing, HAN Yan. Treatment of collapsible loess foundation[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 218: 012006.
- [10] WEN Hua, DENG Songyin, ZHANG Wei, et al. A simplified approach to estimating the collapsible behavior of loess[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 1 – 13.
- [11] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 魏亚妮, 范文, 麻广林. 黄土高原马兰黄土微结构特征及湿陷机理[J]. *地球科学与环境学报*, 2022, 44(4): 581 – 592. [WEI Yani, FAN Wen, MA Guanglin. Characteristics of microstructure and collapsible mechanism of Malan loess in Loess Plateau, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2022, 44(4): 581 – 592. (in Chinese with English abstract)]
- [13] WANG Liqin, SHAO Shengjun, SHE Fangtao. A new method for evaluating loess collapsibility and its application[J]. *Engineering Geology*, 2020, 264: 105376.
- [14] 范文, 魏亚妮, 于渤, 等. 黄土湿陷微观机理研究现状及发展趋势[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(5): 144 – 156. [FAN Wen, WEI Yani, YU Bo, et al. Research progress and prospect of loess collapsible mechanism in micro-level[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(5): 144 – 156. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 湿陷性黄土地区建筑标准: GB 50025—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Code for building construction in collapsible loess regions: GB 50025—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)]
- [16] 杨校辉, 黄雪峰, 朱彦鹏, 等. 大厚度自重湿陷性黄土地基处理深度和湿陷性评价试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(5): 1063 – 1074. [YANG Xiaohui, HUANG Xuefeng, ZHU Yanpeng, et al. Experimental study on collapsibility evaluation and treatment depths of collapsible loess upon self weight with thick depth[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(5): 1063 – 1074. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 苏忍, 张恒睿, 张稳军, 等. 兰州地铁大厚度湿陷性黄土层的现场浸水试验研究[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(增刊1): 186 – 193. [SU Ren, ZHANG Hengrui, ZHANG Wenjun, et al. Immersion tests on self-weight collapsible loess site with large depth of Lanzhou metro line[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(Sup 1): 186 – 193. (in Chinese with English abstract)]
- [18] XU Yuanjun, WANG Jiading, GU Tianfeng, et al. Study on the loess immersion test of metro line 2 in Xi'an, Shaanxi Province, China[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 1 – 14.
- [19] 屈宏录, 刘德仁, 孙英萍, 等. 深厚黄土地基浸水湿陷变形及竖向土压力作用分析[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(4): 157 – 164. [QU Honglu, LIU Deren, SUN Yingping, et al. Analysis of collapsible deformation and vertical soil pressure action of thick loess foundation[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(4): 157 – 164. (in Chinese with English abstract)]
- [20] AN Peng, ZHANG Aijun, XING Yichuan, et al. Experimental study on settling characteristics of thick self-weight collapsible loess in Xinjiang Ili region in China using field immersion test[J]. *Soils and Foundations*, 2018, 58(6): 1476 – 1491.
- [21] 王立新, 邵帅, 邵生俊, 等. 西安洪庆地铁车站地基湿陷性研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2022, 18(3): 1006 – 1014. [WANG Lixin, SHAO Shuai, SHAO Shengjun, et al. Evaluation of foundation collapse of Xi'an Hongqing metro station[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2022, 18(3): 1006 – 1014. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 王玉涛, 刘小平, 曹晓毅. 基于主成分分析法的Q₂黄土湿陷特性研究[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 141 – 148. [WANG Yutao, LIU Xiaoping, CAO Xiaoyi. A study of the collapsibility of Q₂ loess based on principal component analysis[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 141 – 148. (in Chinese with English abstract)]
- [23] YAO Yongguo, ZHANG Yuchuan, GAO Xulong, et al. Study on permeability and collapsibility characteristics of sandy loess in northern Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 126883.
- [24] WANG Li, LI Xian, LI Lincui, et al. Characterization of

- the collapsible mechanisms of Malan loess on the Chinese Loess Plateau and their effects on eroded loess landforms[J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2020, 26(9): 2541 – 2566.
- [25] 邵生俊, 李骏, 邵将, 等. 大厚度湿陷性黄土地层的现场砂井浸水试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(9): 1549 – 1558. [SHAO Shengjun, LI Jun, SHAO Jiang, et al. In-situ sand well immersion tests on self-weight collapsible loess site with large depth[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(9): 1549 – 1558. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 李骏, 邵生俊, 余芳涛, 等. 砂井浸水试验在黄土隧道地基湿陷变形评价中的应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(9): 1937 – 1944. [LI Jun, SHAO Shengjun, SHE Fangtao, et al. Application research of sand well immersion test in collapsibility evaluation of loess tunnel foundations[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(9): 1937 – 1944. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 王永鑫, 邵生俊, 韩常领, 等. 湿陷性黄土砂井浸水试验的应用研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(增刊1): 159 – 164. [WANG Yongxin, SHAO Shengjun, HAN Changling, et al. Application of sand drain immersion tests on collapsible loess[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(Sup 1): 159 – 164. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 赵金刚, 吕远强, 晁军, 等. 典型黄土-古土壤系列浸水渗透及湿陷变形规律[J]. *煤田地质与勘探*, 2020, 48(3): 152 – 159. [ZHAO Jingang, LYU Yuanqiang, CHAO Jun, et al. The law of soaking infiltration and collapse deformation in typical loess-paleosol series[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(3): 152 – 159. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 王治军, 潘俊义, 马闫, 等. 董志塬大厚度自重湿陷性黄土场地浸水试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(2): 75 – 82. [WANG Zhijun, PAN Junyi, MA Yan, et al. Immersion test on the self-weight collapsible loess in the Dongzhiyuan area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(2): 75 – 82. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 刘真真