

DOI: 10.11779/CJGE2018S1026

湿陷性黄土砂井浸水试验的应用研究

王永鑫¹, 邵生俊^{*1, 2}, 韩常领³, 李骏¹

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 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. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 随着中国西部大开发战略的进一步实施, 湿陷性黄土地区的工程建设项目越来越多。黄土具有分布广、厚度大、湿陷性强、不均匀等特点, 这就需要对黄土工程场地的湿陷性做出合理评价。测试和评价黄土湿陷性及地基湿陷变形的方法主要有两种: 一是依据室内单轴压缩侧限变形应力条件浸水试验测试湿陷系数, 评价黄土的湿陷性强弱, 计算各土层的湿陷变形评价地基的湿陷等级, 但其评价结果往往与实际情况有较大差异, 甚至得到错误的结论; 二是现场浸水试坑试验, 这种试验在工程场地原位进行, 在黄土工程中被广泛应用并得到认可, 但受工程场地条件和干旱半干旱气候环境制约, 试验费用高, 周期长、难度大。鉴于目前黄土湿陷性评价方法的不足以及深厚黄土层湿陷性评价分析的需要, 从黄土湿陷变形的特性和浸水入渗特征出发, 业已提出了原位砂井浸水试验方法。分别在兰州榆中和西安选取了3个具有代表性的试验场地进行了试验, 并与其它两种湿陷性评价方法进行了对比, 进一步验证了该新方法对湿陷性评价的合理性、准确性以及实用性。

关键词: 黄土湿陷性; 湿陷性评价方法; 砂井浸水试验

中图分类号: TU413 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)S1-0159-06

作者简介: 王永鑫(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事黄土力学与工程的研究和工作。E-mail: 1129750186@qq.com。

Application of sand drain immersion tests on collapsible loess

WANG Yong-xin¹, SHAO Sheng-jun^{1, 2}, HAN Chang-ling³, LI Jun¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an 710048, China; 3. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: With the further development of China's western development strategy, more and more projects are constructed in collapsible loess area. The loess area is characterized by wide distribution, large thickness and different strong collapsibilities and nonuniformity. Therefore, it is necessary to evaluate the collapsibility of loess reasonably. There are two main types of testing and evaluation methods for collapsibility of loess and collapsibility deformation of foundation. One is to test the collapsibility coefficient based on the immersion tests on stress condition of indoor uniaxial confined compression tests and to evaluate collapsibility strength of loess. Then the collapsibility grading of foundation is evaluated according to the calculated results of collapsible deformation. But the evaluation results are often different from the actual situation facts and even wrong conclusions are obtained. The other is the field immersion test which has been widely used and accepted in loess engineering. But it is influenced by the condition of engineering site and arid-subarid palaeoclimate. The experiments have the following characteristics: high cost, long cycle and high difficulty. Due to the deficiency of evaluation methods for loess collapsibility and the necessity of collapsibility evaluation and analysis of thick loess and based on the characteristics of collapsible deformation and water infiltration of loess, the in-situ sand drain immersion test method is proposed. 3 representative sites for trial in Lanzhou and Xi'an are selected. The results are compared with those obtained by other two collapsibility evaluation methods, and the rationality, accuracy and practicability of the new method for collapsibility evaluation are validated.

Key words: collapsibility of loess; collapsibility evaluation method; sand drain immersion test

0 引言

目前, 国内外学者对黄土湿陷性机理的研究做了大量研究工作, 从宏观认识到微观分析, 由定性分析

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272320, 11572245)

收稿日期: 2017-06-11

*通讯作者(E-mail: sjshao@xaut.edu.cn)

到定量分析, 多学科、跨领域分析, 对黄土发生湿陷的机理众说纷纭。但都得到普遍的认识, 即黄土的湿陷变形离不开力和水的作用, 是黄土湿陷的诱发因素^[1]。

黄土的湿陷性及其评价方法一直是黄土地区岩土工程领域被关注和研究的技术难题。规范^[2]中测试和评价黄土的湿陷性及地基的湿陷变形方法一是现场分层采取原状黄土, 基于室内单轴压缩侧限变形应力条件下黄土试样的浸水湿陷性试验测试湿陷系数, 由分层总和法计算湿陷量来评价场地地基的湿陷变形; 二是现场浸水试坑试验, 依据直接测试地表和不同埋深各土层的沉降变形, 进行黄土湿陷性分析和湿陷变形评价。

对于室内试验方法, 试样为 2 cm 厚的微扰动试样, 在模拟应力条件、入渗方式、地层结构的连续性及完整性等方面与实际工程存在很大差异^[3], 而且取样的随机性及操作过程中的人为因素也会使结果出现偏差, 这也是室内试验与现场试验结果不一致, 甚至湿陷类型判定截然相反的主要因素。对于现场浸水试坑试验, 试坑内设置竖向导水砂井可以使湿陷土层尽快发生湿陷变形, 浸水入渗改变了黄土的联接特征及胶结性质, 在一定程度上反映了黄土的结构性的改变, 亦能够真实反映实际浸水过程的应力条件。但是, 随着岩土工程由浅埋向深埋、由低阶地向高阶地的延伸发展, 由于黄土的湿陷性在平面上并不连续, 沿深度上也有锯齿状的变化^[1]。而室内试验的土样为“点”, 实际场地的研究对象为“体”, 对于深厚湿陷性黄土地层, 室内试验造成的累计误差就会越来越大。试坑浸水试验消除了这部分的影响, 但往往一个点的原位试验并不能反映整个沿线的湿陷变化, 或者需要投入大量的人力、物力、财力, 从这个角度来讲, 该方法的应用在一定程度上受到了限制。

本试验的目的是提出一种现场不同深度黄土地层湿陷变形, 尤其是深层黄土湿陷变形的探测方法, 以便能够经济、准确、方便的获取不同深度不同地层黄土的湿陷变形, 用于分析原位深层黄土的湿陷性强弱及是否产生湿陷变形, 为场地原位黄土的湿陷性评价提供可靠的依据。

1 砂井浸水试验

地下工程施工过程中, 地下水位抬升或下降、地下管线破裂、施工过程排水能力差、渠道的间歇性过水等局部渗水引起的工程问题, 尤其是在湿陷性黄土地区, 其影响危害更严重。砂井试验可以直接穿越土层, 测量不同深度的黄土湿陷情况, 为划分场地类型和修正按室内试验结果计算得到的自重湿陷量提供重

要的依据。

依据黄土湿陷性变形的砂井浸水试验原理, 结合图 1 来说明实施步骤:

步骤 1: 开挖直径 60~80 cm 的探井至设计深度, 底部铺设透水砂垫层; 下放连接有沉降杆的沉降板, 并逐节拼接、下放至井底; 将沉降杆外套上 PVC 护管, 保证沉降杆垂直并向砂井内回填砂砾石。

步骤 2: 在井口处开挖直径 2 m, 深 0.8 m 的试坑, 保证砂井有一定的蓄水能力, 并铺设 10 cm 砾石垫层。

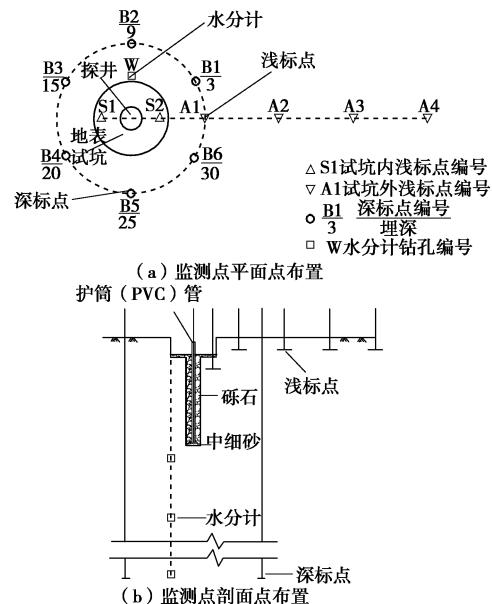


图 1 试验场地监测点布置图

Fig. 1 Layout of monitoring points in test site

步骤 3: 埋设水分计一下放埋设水分计, 确定水分计正常工作后, 素土回填, 分层夯实, 依次下放埋设下一个水分计。埋设完成后在地表固定集线盒, 用以保护水分计读数接头。

步骤 4: 布置深标点—钻孔 (直径 130 mm), 下放沉降杆, 出露地表, 并套上 PVC 护管, 钻孔用中细砂回填满; 在 3 m 长的沉降杆上绑扎固定好钢卷尺, 连接到各出露地表的沉降标点上, 作为沉降观测的标尺。

步骤 5: 布置浅标点——在浅标点埋设位置开挖 40 cm×40 cm、深 50 cm 的坑, 整平坑底, 将带有一段沉降杆的浅标点沉降板放于坑内, 连接带有钢卷尺的读数标杆, 确保标杆竖直, 分层回填素土并夯实。

步骤 6: 在试坑内注水, 记录各砂井每天注水量, 测量注水过程沉降杆的沉降位移。

步骤 7: 沉降变形稳定时, 结束试验。

2 几个场地的试验成果分析

共在 3 个试验场地 (表 1) 进行了现场砂井

表 1 3 个砂井试验试验场地说明

Table 1 Description of three operating points of sand drain immersion tests

试验点编号	场地位置	工程地质分区	湿陷土层厚度	砂井编号及深度/m	试验时间	观测项目	备注
1	少陵塬阳村	关中地	22 m	#1 6	2013-03-09—2013-04-10	沉降变形观测	地层分布不连续,
				#2 12		(中心沉降标)、地表裂缝	湿陷性土层、古土壤层交错分布
2	月登阁村(西安)	陇西地区	26 m	#1 3	2016-11-10—2016-01-18	水分运移监测、沉降变形、地表裂缝、注水量	湿陷性黄土分布广泛, 地层分布不连续
				#2 8			
				#3 15			
				#4 20			
3	范家窝村(兰州)	Q ₃ 黄土	30 m	#1 23	2014-10-13—2014-11-29	水分运移监测、沉降变形、地表裂缝、注水量	湿陷性黄土分布广泛, 大厚度、地层分布均匀
				#2 19			
				#3 15			
				#4 3			

浸水试验的研究, 其中少陵塬阳村及月登阁村试验点湿陷黄土分区属关中地区, 计算自重湿陷量的修正系数 β_0 在缺乏实测资料时取 0.90; 范家窝试验点湿陷性黄土分区属陇西地区, 计算自重湿陷量的修正系数 β_0 在缺乏实测资料时取 1.50^[2]。

2.1 少陵塬阳村

(1) 场地条件

试验场地地貌单元属于二级黄土台塬, 地形平坦, 试验场地下面 35 m 范围内土层由中更新世黄土 Q₂ 和晚更新世黄土 Q₃ 组成 (见图 2)。黄土层与古土壤层相间分布。地下水位埋深较深, 约在地面下 45 m 左右。



图 2 砂井试验现场布置 (阳村)

Fig. 2 Layout of sand drain test site (Yang Village)

(2) 室内试验的结果

根据室内试验成果 (如图 3), 场地两个探井的自重湿陷量计算值分别为 14.3 cm 和 18.2 cm, 场地应按自重湿陷性黄土地带考虑, 场地湿陷性土层的下限深度 22 m。

(3) 砂井浸水试验结果

中心点沉降杆变形监测结果如图 4 所示, 可以看

出, 注水前几天标杆位移变化较大, 之后的变形量达到稳定, 其中 6 m 砂井的标杆沉降为 3.5 mm 左右, 而 12 m 砂井的标杆没有沉降, 反而有些微的隆起, 隆起值为 1.5 mm, 由此说明 6 m 土层以下和 12 m 土层以下都没有湿陷性, 场地为非自重湿陷性场地。

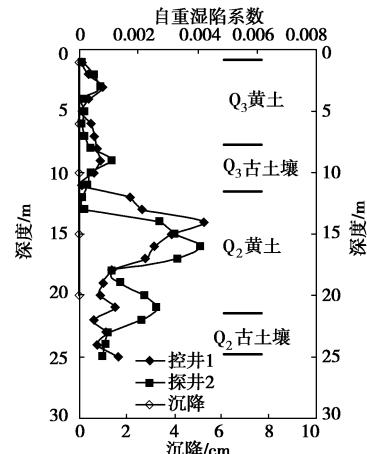


图 3 自重湿陷系数和沉降随深度的变化

Fig. 3 Variation of self-weight collapsibility coefficient and settlement with depth

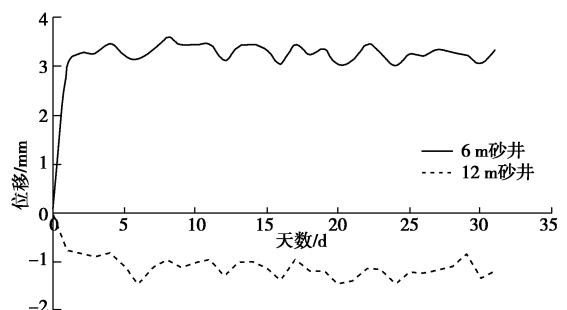


图 4 累计湿陷变形量随时间的变化

Fig. 4 Variation of cumulative collapsible deformation with time

2.2 月登阁

(1) 场地条件

该试验试验场地位于地铁五号线 D5KC-5 标段, 西段地貌单元属黄土梁洼, 东段地貌单元属浐河 III 级阶地。地形起伏较大, 呈中部高两端低趋势, 地面高程 436~490 m。本标段浐河三级阶地在 40 m 勘探深度内未发现地下水(见图 5)。



图 5 #2 砂井试验现场布置 (月登阁)

Fig. 5 Layout of sand drain No. 2 test site (Yuedengge Village)

(2) 灌水情况

4 个砂井试验由该场地一处水井供水, 由于地下水位本身埋藏较深, 且水井距离各个试验点较远, 因此供水量有限。^{#1} 单天供水量最大 67.6 m³, 最少 6.8 m³, 注水 69 d, 累计注水量 2506.8 m³; ^{#2} 单天供水量最大 41.0 m³, 最少 3.8 m³, 注水 40 d, 累计注水量 825.9 m³; ^{#3} 砂井在注水过程中, 由于受到隧道施工影响, 未能完成试验; ^{#4} 单天供水量最大 55.5 m³, 最少 14.9 m³, 注水 30 d, 累计注水量 641.1 m³。

(3) 室内试验的结果

根据室内自重湿陷量计算值绘制了随深度变化自重湿陷量累计变化曲线, 如下图 6 所示。根据规范有关规定取 $\beta_0=0.9$, 该场地自重湿陷量计算值 Δz_s 为 75.6 mm, 所以判定该试验用地为自重湿陷性场地。

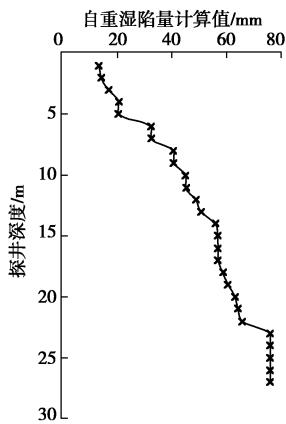


图 6 累积自重湿陷量随埋深变化

Fig. 6 Variation of cumulative self-weight collapsibility with depth

(4) 砂井浸水试验结果

a) 水分运移规律分析

试验过程中水分计测得数据为土层体积含水率,

是与质量含水率以及介电常数相关的表征土体湿度的参数。图 7 为^{#1} 砂井体积含水率随时间变化关系曲线, 可以看出, 水分计读数突变点即为浸水浸润线到达水分计埋深位置的时刻, 浸水一段时间后各埋深水分计读数相继发生变化。

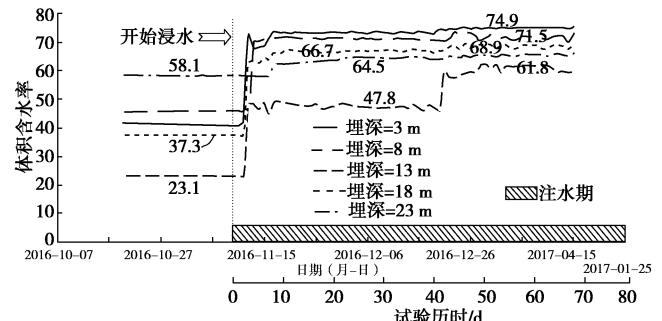


图 7 #1 砂水分计监测曲线图

Fig. 7 Curves of moisture meter of sand drain No. 1

b) 沉降监测数据分析

本次试验各砂井布设浅标点 6 个, 分为试坑内 S1、S2 及试坑外 A1~A4; 深标点 6 个, 记为 B1~B6; 井内标点 1 个, 分别记为 O1~O4, 标点共计 13 个, 用以量测场地自重湿陷量及不同深度土层自重湿陷量(见图 8)。

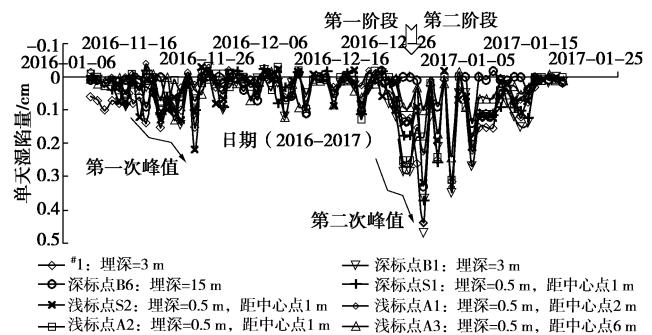


图 8 #1 砂井沉降杆随时间单日沉降曲线

Fig. 8 Curves of collapse settlement per day of settlement of sand drain No. 1

^{#1} 砂井埋深较浅, 深标点、浅标点均有变化, 说明都在浸水影响范围之内。灌水伊始注水量较小, 砂井未出现液面, 各沉降点变形量较小, 湿陷未完全释放。第二阶段增大灌水量后, 砂井浸水速度、浸水量都大大提高, 同时, 湿陷变形继续发展, 地层沉降速率呈现“小→大→小→稳定”的变化规律。

2.3 范家窝

(1) 场地条件

范家窝隧道所处地貌为黄土梁峁, 位于榆中县范家窝北侧, 表层为第四系上更新统风积黏质黄土, 地形起伏不平, 沟壑发育, 多呈“V”型, 以东西向为主(见图 9)。区内地表水不发育, 勘察期间勘察深度内未见地下水。



图 9 砂井试验现场布置 (范家窝)

Fig. 9 Layout of sand drain test site (Fanjiawo Village)

(2) 灌水情况

由于运输水量有限, 且受不可抗因素影响: #1 单天供水量最大 39 m^3 , 注水 48 d, 累计注水量 309 m^3 ; #2 单天供水量最大 23.5 m^3 , 注水 40 d, 累计注水量 498.5 m^3 ; #3 单天供水量最大 30 m^3 , 注水 36 d, 累计注水量 449.5 m^3 ; #4 单天供水量最大 19 m^3 , 注水 44 天, 累计注水量 165.8 m^3 。

(3) 室内试验的结果

如图 10, #3 探井浅层土样自重湿陷性明显强于#2 探井, 最大自重湿陷系数达到 0.13。两个取样点虽然相距不远, 但#2 探井湿陷性反应一般, #3 探井湿陷性反应强烈, 说明即使同一场地, 湿陷情况仍有所差异。

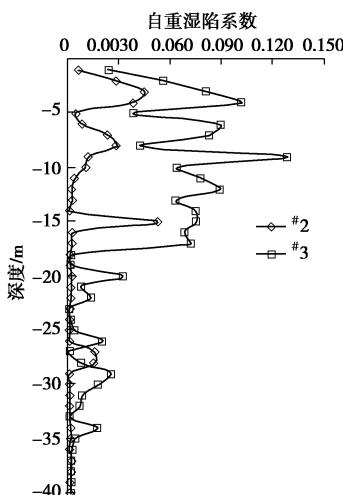


图 10 自重湿陷系数随埋深变化关系

Fig. 10 Variation of collapsibility coefficient with depth

(4) 砂井浸水试验结果

a) 水分运移规律分析

土中水的存在形态及相对含量的改变会引起土性一系列的变化, 在水的作用下土颗粒之间的联接结构与胶结性质发生改变, 直接影响到土体的湿陷变形能力。

土层水分的运移规律反映了浸水对土体增湿路径的变化。由于供水条件有限, 该试验点浸水方式为间

歇性浸水, 各水分计变化规律基本一致, 如图 11 为#2 砂井水分计变化规律曲线: 当浸水湿润线到达元件埋设位置时, 水分计读数短期内会骤增, 浸水入渗过程中, 孔隙气体被排出, 体积含水率上升并产生一定的附加压力, 土体孔隙体积压缩, 体积含水率随之下降, 待湿陷变形完成后体积含水率趋于稳定状态。

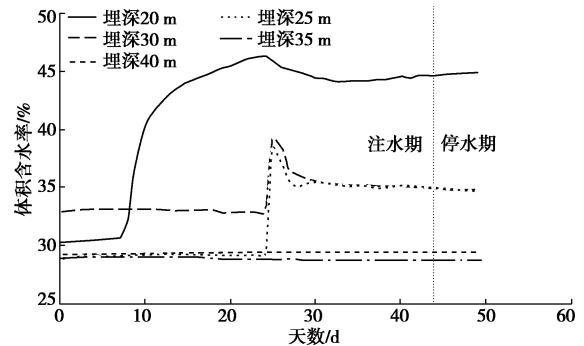


图 11 #2 砂井水分计监测曲线图

Fig. 11 Curves of moisture meter of sand drain No. 2

b) 沉降监测数据分析

从图 12, 13 可以看出, 4 个砂井中心标点沉降变形曲线呈陡增—徐变—稳定的变化趋势。水由砾石孔隙直接下渗, 井底一定范围内土体在浸水压力下迅速破坏, 随着浸水饱和区域的扩大, 湿陷进一步发展进入徐变阶段, 待土体孔隙压密到一定程度, 变形进入稳定。

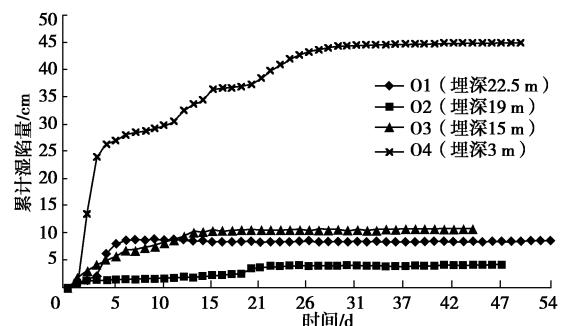


图 12 各砂井中心标点随时间累计沉降曲线

Fig. 12 Curves of total collapse of centre in each sand drain

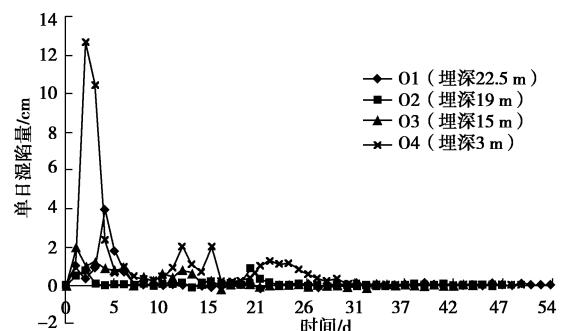


图 13 各砂井中心标点随时间单日沉降曲线

Fig. 13 Curves of collapse settlement per day of centre in each sand drain

表 2 3 个场地不同湿陷性评价方法对比

Table 2 Comparison of different collapsibility evaluation methods at three operating points

试验场地		阳村		月登阁				范家窝						
湿陷 评价 方法	室内试验 mm	试坑浸水 试验 $D=25\text{ m}$	砂井浸水试验 $D=25\text{ m}$	室内试验 /mm	砂井浸水试验 $D=25\text{ m}$	室内试验 /mm	砂井浸水试验 $D=40\text{ m}$ (和平镇)	3 m m m m	15 m m m m	20 m m m m	3 m m m m	15 m m m m	19 m m m m	23 m m m m
自重湿陷量 Δz_s	143 (#1) 182 (#2)	7 ^[8]	3.4 75.6 (#2)	1.5	121 (#1) 75.6 (#2)	47.6 8.8 17.9 14.1	936 (#1) 128 (#2) 342 (#4)	246 (#3) 342 (#4)	656 1350 260 570	2315 ^[9]				
修正系数	—	0	0	—	0.860	0.630	0.821	0.01	—	—	0.7	1.07	1.061	1.67
湿陷 类型	自重湿陷性 场地	非自重湿陷性 场地	非自重湿陷性 场地	自重湿陷 性 场地	非自重湿陷性 场地	自重湿陷性 场地	自重湿陷性 场地	自重湿陷性 场地	自重湿陷性 场地	自重湿陷性 场地				
备注	12 m 砂井试验、现场试坑浸水实测值均为正值，稍有隆起													

2.4 3 种判定方法的试验结果比较

在实际工程中，室内土工试验以及试坑浸水试验对黄土湿陷性评价都有一定的应用参考价值。结合 3 个场地试验结果及以往湿陷性评价方法结果的对比，可以验证该新方法的合理性及实用性。

对比结果如表 2 所示，由 3 个试验场地试验结果及其对比结果可以得到以下结论：

(1) 试验点 1-阳村：室内外结果有较大差异，湿陷判定类型截然相反，这种差异在非自重湿陷性场地尤为明显。两种原位试验方法得到的结果相吻合，该场地类型为非自重湿陷性场地。

(2) 试验点 2-月登阁：室内外结果较为吻合，湿陷修正系数平均值为 0.83，与该地区规范中建议的湿陷修正系数 ($\beta_0=0.9$) 较接近。但湿陷类型判定不一致，以现场砂井试验所测结果为准。

(3) 试验点 3-范家窝：室内外结果较为吻合，湿陷类型判定结果一致。

(4) 除此之外，对比试验场地 1, 2 的室内试验结果，可以看出，虽然黄土分区都属于关中地区，但湿陷性强弱有很大差异。即使位于同一场地（试验场地 3），湿陷性强弱也会有很大的区别，这反映了台地地区大厚度湿陷性黄土场地地层条件的复杂多变性。

3 结论及认识

本文在对砂井试验方案持续改进的基础上，在黄土湿陷性较弱的关中地区以及湿陷性强的陇西地区先后展开了 3 个场地的砂井浸水试验研究，对该新方法得到以下认识：

(1) 砂井试验特殊的浸水入渗方式加快了湿陷发展的速度，在保证浸水范围的同时也缩短了试验周期。水的入渗改变了黄土的联接特征及胶结性质，在一定程度上反映了黄土结构性的改变，亦能够真实反映实际浸水过程的应力条件。

(2) 砂井试验相对于室内试验在模拟应力条件、水（气）入渗方式、地层结构的连续性及完整性等方面更具有准确性。相对于现场试坑浸水试验，该方法对场地条件要求不高、用水量小、耗资少、周期短，尤其对于高铁、地铁等线性工程更能体现其优越性。

(3) 砂井浸水试验建立在对试坑浸水试验方法局限性的规避以及对黄土湿陷的机理认识的基础上，在黄土湿陷性较弱的关中地区以及湿陷性强的陇西地区展开了砂井试验的研究，试验对比结果表明：室内外试验湿陷量计算值和实测值存在较大差异，从而对湿陷类型的判定有误甚至千差万别，3 个场地砂井试验结果与现场试坑浸水试验结果一致，验证了砂井试验对湿陷性评价有一定的参考意义；由场地 3 中 4 个砂井试验的结果可知，同一场地的湿陷敏感性也有所不同，因此一个点的原位试验并不能反映整个沿线的湿陷变化，砂井试验对于深厚黄土地区的线性工程有独一无二的优势。

参 考 文 献：

- [1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安：陕西科技出版社，1997. (LIU Zu-dian. Loess mechanics and engineering[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997. (in Chinese))
- [2] 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))
- [3] 邵生俊，李骏，李国良，等. 大厚度自重湿陷性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): 956 - 978. (in Chinese))

(下转第 7 页)