

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.02.009

设注水孔条件下湿陷性黄土试坑水分入渗规律

尚银生¹, 胡孟卿¹, 闫金忠¹, 皇甫红旺², 李康¹, 李永伟¹, 师振华³, 刘芳¹

(1. 山西省勘察设计院, 山西太原 030013; 2. 忻州市水资源管理委员会办公室, 山西忻州 034000;
3. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 对山西省晋中市榆次区大厚度自重湿陷性黄土场地进行布设注水孔、埋设土壤水分传感器的浸水试验。结果表明: 由于布设注水孔, 试坑内水分扩散存在自下而上、自上而下、由试坑中心向两侧扩散的特点, 湿润锋扩散形态比较复杂; 浸水 52 d, 试坑内探井全断面基本达到饱和含水率, 注水孔的布设节省了大量的试验时间与费用。体积含水率随时间变化曲线基本可以分为 4 个阶段: 初期含水率平稳段; 含水率增长、变化段; 饱和含水率稳定延续段; 末期含水率小幅减小变化段。

关键词: 浸水试验; 设置注水孔; 大厚度自重湿陷性黄土; 湿润锋; 水分入渗规律; 体积含水率

中图分类号: TU444 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2015)02-0144-06

Study on water infiltration law of test pits of collapsible loess with water injection holes

SHANG Yinsheng¹, HU Mengqing¹, YAN Jinzhong¹, HUANGFU Hongwang²,
LI Kang¹, LI Yongwei¹, SHI Zhenhua³, LIU Fang¹

(1. Shanxi Investigation Research and Design Institute, Taiyuan 030013, China;

2. Water Resources Management Committee Office of Xinzhou City, Xinzhou 034000, China;

3. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Submerging tests with setting water injection holes and sensors, like moisture meters, were set up on a large-thickness self-weight collapsible loess field in Yuci District, in Jinzhong City, Shanxi Province. The results show that the diffusion pattern of the wetting front is rather complicated due to the feature of moisture spreading in test pits from the bottom up, from the top down, and from the center to the two sides because of setting water injection holes. After 52 days of immersion, the whole section of exploratory wells basically reached saturated water content in the test pits. The layout of water injection holes saved a great deal of time and cost of the experiment. The curve of volumetric water content changing with time can be divided into four stages: the early stable stage of volumetric water content, the growth and change stage of volumetric water content, the steady and extended stage of saturated water content, the late and slightly decreasing stage of volumetric water content.

Key words: submerging test; setting water injection hole; large-thickness self-weight collapsible loess; wetting front; water infiltration law; volumetric water content

黄土湿陷与水分入渗方式等有密切联系,入渗方式影响着黄土浸水试验中水分入渗规律、湿润锋变化特点。尽管不同区域不同规模浸水试验对黄土地区基础设施建设起到了推动作用,但对黄土浸水试验中水分运移规律的研究还远远不够。刘保健等^[1]利用土壤水分传感器进行原位测试,但由于传感器埋设只有 2.5 m,因此不能了解水分在较深土层中的运移规律。黄雪峰等^[2]利用边坡浸水,用洛阳铲取土样测含水率,初步得到黄土场地水分入渗形态,但这种测量方法不能了解水分入渗过程中的变化规律。姚志华等^[3]在兰州市和平镇通过埋设土壤水分传感器和热传导吸力传感器进行了不设注水孔的大型原位现场浸水试验,对

收稿日期: 2014-03-26

作者简介: 尚银生(1962—),男,山西临猗人,教授级高级工程师,主要从事水文地质、岩土工程等研究。E-mail: sys426@sohu.com

不同深度土层水分入渗规律、黄土湿陷变形规律等问题进行了系统研究。此外,钱鸿缙等^[4]、黄雪峰等^[5]、王小军等^[6]、马侃彦等^[7]、马闫等^[8]、武小鹏等^[9]、陈正汉等^[10]也在不同地区进行了不同规模的现场大型浸水试验,研究了黄土湿陷变形机理及水分入渗规律等。上述浸水试验或不设注水孔、试验周期过长;或虽布设注水孔,但对复杂入渗条件下黄土水分入渗规律关注不足。本文浸水试验,在试坑内、试坑外探井不同深度埋设土壤水分传感器,观测饱和含水率随时间的变化,以分析水分在水平向、垂向的扩散规律。

1 试验概况

1.1 地质地貌概况

浸水试验场地位于山西省榆次区郝家沟,场地地形东北高西南低,缓慢倾斜,无高陡边坡分布,地貌单元属黄土台塬。勘察资料显示该地区自重湿陷性黄土厚度 24 m,属大厚度湿陷性黄土场地,其岩性特征见表 1。

表 1 试验场地湿陷性黄土岩性特征

Table 1 Lithologic characteristics of collapsible loess in experimental sites

地层	深度/m	岩性	岩性特征
第四系 全新统(Q ₄ ^{ml})	0~0.3	新黄土	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
第四系 晚更新统(Q ₃ ^{col})	0.3~12	新黄土	0.3~5 m,浅黄色,马兰黄土,以粉土为主,较干,硬塑,大、中孔隙发育,偶见蜗牛壳,土质较均匀 5~12 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,底部见大量姜石,主粒径 2~4 cm
第四系 中更新统(Q ₂ ^{col})	12~24	老黄土	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

1.2 监测标点布设

浸水试坑直径为 30 m,大于实际湿陷土层厚度。设计 3 条主轴用以布设浅标点,各布设 19 个;设计 3 条辅轴用以布设深标点,各布设 7 个。注水孔在坑内以 2 个圆周方式布设:以试坑中心为圆心、半径为 5 m 的圆周上布置 3 个;半径为 10 m 的圆周上布置 12 个。

土壤水分传感器布设如下:(a)试坑内,探井 D₁ 距离试坑中心 2 m,共埋置 5 个水分传感器;探井 D₂ 距离试坑中心 10 m,共埋置 5 个水分传感器。(b)试坑外,探井 D₃ 距离试坑边 1 m,共埋置 8 个水分传感器;探井 D₄ 距离试坑边 7 m,共埋置 5 个水分传感器;探井 D₅ 距离试坑边 15 m,共埋置 4 个水分传感器。所选用的水分传感器为邯郸清胜电子科技有限公司生产的 DY-40 型,采用时域反射法(time domain reflectometry, TDR)通过测量土壤介电常数来获得含水率。仪器的埋设、观测方法见文献[8]。

1.3 试验过程

试坑浸水时间为 2012 年 9 月 21 日至 12 月 7 日,历时 78 d;停水后进行了为期 13 d 的连续监测。由于试验初期注水量不足、渗水能力较大,试坑中水头并没有达到设计要求,未能保证试坑底及坑侧全周断面入渗条件;而且由于注水孔的作用,试验中水分入渗方式较为复杂。每日及累计注水量变化曲线如图 1 所示。

2 水分扩散形态探讨

黄雪峰等^[2]在边坡浸水试验中发现,整个土层中湿润锋形态类似椭圆形;王国烈等^[11]认为浸水区土体达到饱和时,水处于重力渗流状态,它的边界线常呈折线向下、向外入渗,浸润角为 $\arctan(K_1/K_2)$,其中 K_1 、 K_2 分别为垂向、径向渗透系数,当 $K_1=K_2$ 时,扩散角为 45°;刘保健等^[1]测得甘肃陇西黄土浸润角略大于 30°;李大展等^[12]测得陕西渭北黄土浸润角为 40°;姚志华等^[3]认为浸润角应该在 0°~55°由小至大逐渐变化,先期水分基本呈椭圆状形态入渗,后期整个椭圆状浸润区离心率变小,椭圆更扁,并认为水分的扩散不是沿着某一固定的浸润角向下入渗,竖向渗透要快于径向渗透,当水分扩散到较深土层时,竖向渗透会变缓而径向渗透作用会加大。

本文浸水试验中,注入的水分部分流入注水孔,部分存留在试坑底部,使注水孔下部及坑底表面黄土几

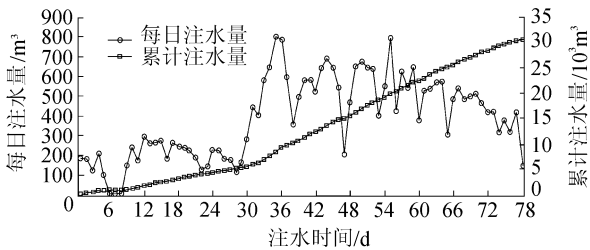


图 1 注水量变化曲线

Fig. 1 Variation curves of water injection amount

乎同时开始湿陷,注水量不足导致不能形成稳定水头补给,从而形成较为复杂的水分扩散形态,这种形态正是试验条件、岩性特征、水力作用的综合反映。试验湿润锋扩散形态如图2所示,由图2可得出如下水分扩散特点:

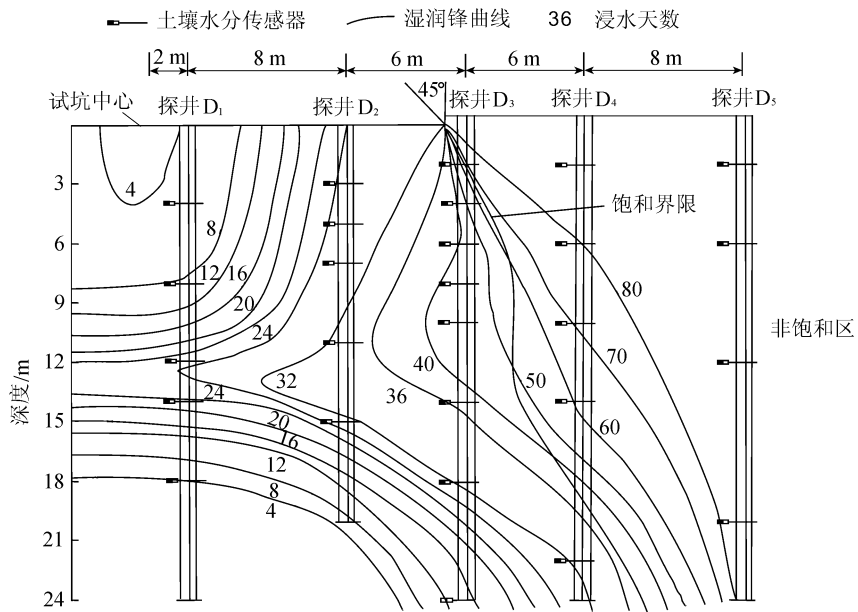


图2 湿润锋扩散形态剖面
Fig. 2 Profile of diffusion pattern of wetting front

a. 试坑内水分扩散存在自下而上、自上而下、由试坑中心向坑侧扩散的特点。受此入渗方式的影响,湿润锋扩散到试坑内探井 D_1 、 D_2 中,探井的上部、下部土层先到达饱和,32 d 后中部土层到达饱和。试坑外探井 D_3 距离试坑边 1 m,不同深度各点水分扩散以侧向为主,43 d 基本上达到全剖面饱和;探井 D_4 距离试坑边 7 m,水分扩散同样以侧向为主,但仅中下部土层到达饱和;探井 D_5 湿润锋基本上未扩散到。此外与姚志华等^[3]的试验对比可以发现,布设注水孔可使浸水试验周期大大缩短,节省了大量的试验时间与费用。

b. 探井 D_1 与 D_2 之间上部湿润锋曲线近乎于垂直,湿润锋曲线等时线较密,基本上反映了在试坑中心水分以垂直向下入渗为主、同时向探井 D_2 方向扩散的特点。

c. 水分自上而下、自下而上及在探井 D_1 、 D_3 之间扩散过程中,湿润锋曲线等时线间距存在逐渐减小的现象,也就是说,入渗锋面向下运动、向上运动、向两侧运动的速度有所减小。探井 D_1 中水分运移到第 2 个土壤水分传感器,运移距离 8 m,历时 8 d,渗透速度为 $1.16 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$,而从探井 D_1 运移到探井 D_2 ,水平向扩散距离 8 m,历时 24 d,渗透速度 $3.86 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$,垂向渗透速度是水平向的 3 倍。探井 D_1 、 D_3 下部湿润锋斜交于下伏非湿陷性土层,说明水分在向上部扩散的同时也在向两侧扩散,而且水平向扩散的速率明显大于垂向。

d. 当试坑尺寸与黄土湿陷层厚度相对关系确定之后,决定浸润角大小的因素主要为黄土基质势、水文地质及工程地质特性的各向异性、水分的入渗方式等。受黄土沉积规律及沉积方向的影响,黄土的工程地质特性,特别是其水力、水理等特征表现出各向异性,加之复杂的入渗方式,使浸润角在水分扩散过程中不断调整、变化,并且在试坑的不同剖面方向可能有所不同。受此影响,本次浸水试验的浸润角小于 45° 。

3 湿陷过程水分变化分析

3.1 入渗方式

由于试验初期试坑渗水量较大且供水量不足,注水不能保证试坑底部及四周一定高度下全断面入渗。从试坑外水管流入坑内的水量,部分入渗到铺设的 10 cm 厚的砾石层下,向下伏黄土层的低洼部分汇流,并由此首先入渗,但入渗水量较小、入渗速率较慢、入渗范围较小;部分水量扩溢,流入注水孔,并由注水孔迅速下渗、扩散补给四周黄土,使孔底孔隙介质快速充水饱和并造成深部土层较早湿陷。此后,由于注水孔四周地下水水位逐步抬升、孔内外水头压差逐步减小,造成注水孔向四周孔隙介质补给的水量减少、补给速度减慢,随后试坑全底部积水,逐渐形成稳定入渗水头,开始全断面入渗。最终形成孔底四周及坑底浅部较早湿

陷、较早达到饱和含水率,而后水分逐渐向中部及两侧运移、湿陷的入渗格局。体积含水率的时空变化,能够较好地反映水分入渗过程中湿润锋发展、水分扩散规律。各探井不同深度的土壤水分传感器所反映的体积含水率变化如图 3 所示($D_1(4\text{ m})$ 代表探井 D_1 中埋在深度 4 m 处的土壤水分传感器),其中由于各种原因,探井 D_1 、 D_2 、 D_3 中个别水分传感器未能合理利用。

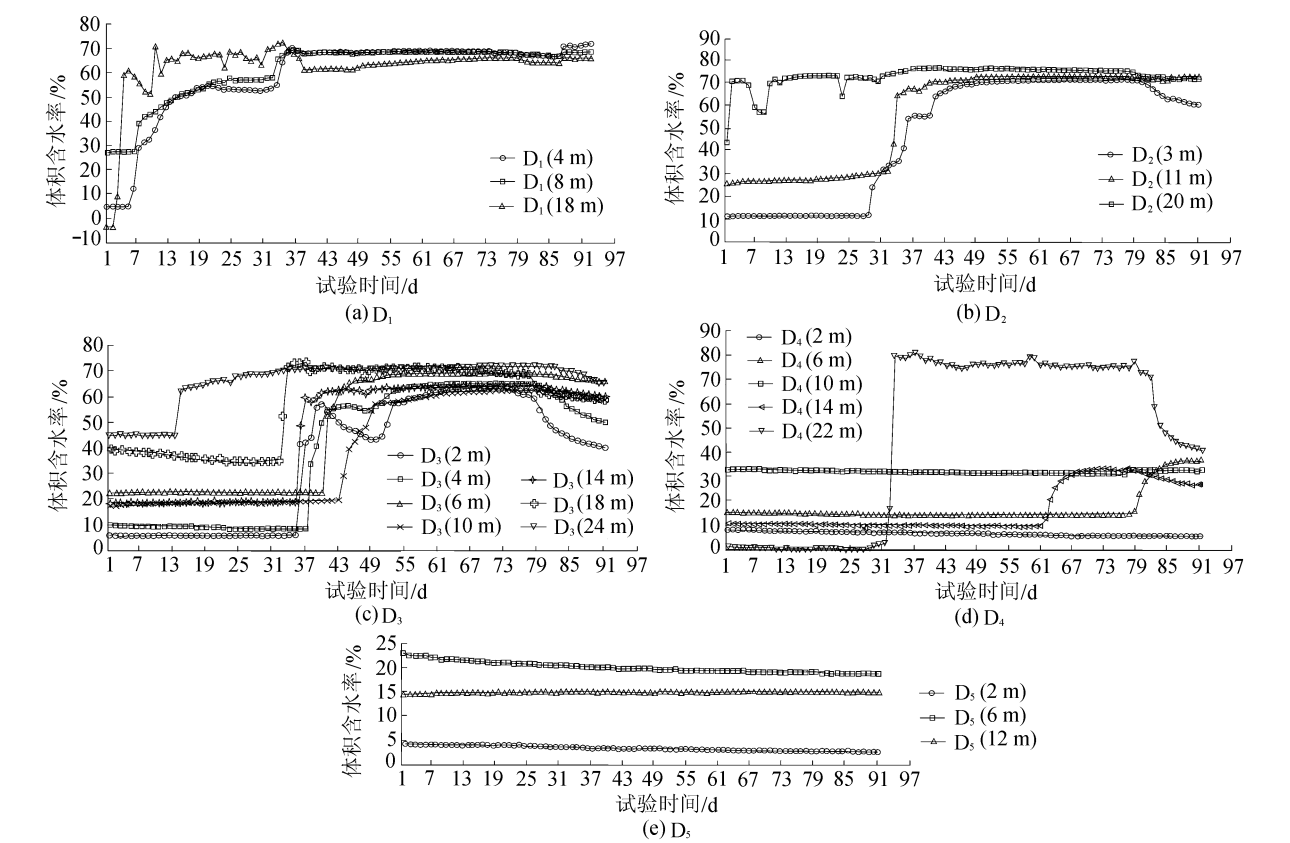


图 3 探井中体积含水率随时间变化曲线

Fig. 3 Variation curves of volumetric water content with time in exploration wells

3.2 体积含水率随时间变化规律

- a. 饱和含水率介于 60% ~80% ,且深部点饱和含水率较大;天然状态下体积含水率多小于 20% 。
- b. 随着与试坑中心距离的增大,饱和含水率出现的时间延迟。探井 D_1 :1 ~6 d 体积含水率变化较小;7 ~37 d 体积含水率持续阶跃式增加,进而达到饱和含水率。探井 D_2 :1 ~28 d 体积变化率较小;28 ~43 d 体积含水率快速增加,进而进入饱和阶段。直至试验期结束,探井 D_3 中未出现饱和含水率。
- c. 深部层位饱和含水率较早出现。除未受影响的探井 D_5 外,18 m 以下深部点饱和含水率 1 ~31 d 基本达到,中浅部点饱和含水率出现的时间有延迟,但 52 d 基本达到,即试坑试验深度内土层整体达到饱水状态。探井 D_4 中仅有 22 m 点出现饱和含水率。
- d. 除探井 D_5 各点及探井 D_4 中个别点外,体积含水率随时间变化曲线基本可以分为 4 个阶段:初期含水率平稳段;含水率增长、变化段;饱和含水率稳定延续段;末期含水率小幅减小变化段。随着与试坑中心距离的增大,初期含水率平稳段延长,探井 D_5 各点及探井 D_4 中个别点该平稳段一直延续到试验期结束;垂直方向上,深部点该平稳段减小,即近中心点、深部点较早出现饱和含水率。初期含水率平稳段及饱和含水率稳定延续段历时较长;含水率增长、变化段及末期含水率小幅减小变化段历时较短。
- e. 注水结束后,受固结湿陷的影响,末期含水率小幅减小变化段浅部点减小的幅度相对较大,且这一阶段较早出现;深部点则变幅较小。

3.3 体积含水率阶段变化分析

以探井 D_2 为例说明。从浸水开始直到试验结束整个时间段内,不同深度土体含水量变化经历了如下阶段:天然非饱和状态即初期含水率平稳段;非饱和入渗状态即含水率增长、变化段;饱和入渗状态即饱和含水

率稳定延续段;停水后、供水条件不足时又处于非饱和入渗状态即末期含水率小幅减小变化段。

a. 初期含水率平稳段:该时段介于1~32 d,体积含水率随时间无变化或变化很小;由于深部点湿陷较早、中部湿陷较晚,造成前者饱和含水率很快达到、初期含水率平稳段较短,后者饱和含水率较迟达到、初期含水率平稳段明显延长。

b. 含水率增长、变化段:该时段介于2~42 d。深部点2 d即进入该段,持续时间较长并略有变幅,伴随湿陷的影响,体积含水率出现2次小幅减小的现象。浅中部点32 d达到该阶段,含水率阶跃式增加,但持续的时段较短。

c. 饱和含水率稳定延续段:该时段介于33~82 d,4个阶段中历时较长的一个,且深部点时段延续时间更长,饱和含水率较大。剖面各点饱和含水率介于70%~78%。

d. 末期含水率小幅减小变化段:该时段介于82 d至试验期结束。停水后,土体孔隙中的水在重力作用下向下运动,含水率迅速降低,土体又进入了非饱和入渗状态。从测试结果可以看出:深度越浅的土层含水率降低越快,该段较早出现,变化幅度也越大,且体积含水率减小的幅度约为10%;深部点由于试验初期的湿陷、调整,土层含水率降低较慢,该段较晚出现,直到试验期末略有减小,但变化不大。

4 结 论

a. 试坑内水分扩散存在自下而上、自上而下、由试坑中心向坑侧扩散的特点,湿润锋扩散形态比较复杂。水分自下而上、自上而下及在探井D₁、D₃之间入渗过程中,湿润锋曲线等时间间距存在着逐渐减小的现象,即入渗锋面向上运动、向下运动、向坑侧运动的速度有所减小。

b. 受试坑尺寸与黄土湿陷性土层厚度相对关系、黄土工程地质特性及复杂入渗方式等因素影响,水分扩散过程中,浸润角在调整、变化。本文浸水试验的浸润角小于45°。

c. 体积含水率随时间变化曲线基本可以分为4个阶段:初期含水率平稳段;含水率增长、变化段;饱和含水率稳定延续段;末期含水率小幅减小变化段。

d. 随着与试坑中心距离的增大,饱和含水率出现的时间延迟;受注水孔强烈作用影响,深部点饱和含水率较早达到;中浅部点饱和含水率较晚达到,但探井D₁、D₃全断面饱和含水率52 d基本达到。注水孔的布设节省了大量的试验时间与费用。

参考文献:

[1] 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 Baojian, XIE Yongli, YU Youcheng. Insitu testing study on infiltration in unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4156-4160. (in Chinese))

[2] 黄雪峰, 李佳, 崔红, 等. 非饱和和原状黄土垂直高边坡潜在土压力原位测试试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(4): 500-506. (HUANG Xuefeng, LI Jia, CUI Hong, et al. Distribution characteristics of earth pressure for unsaturated intact loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(4): 500-506. (in Chinese))

[3] 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): 65-73. (YAO Zhihua, HUANG Xuefeng, CHEN Zhenghan, 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): 65-73. (in Chinese))

[4] 钱鸿缙, 朱梅, 谢爽. 天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 Hongjin, 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))

[5] 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 Xuefeng, CHEN Zhenghan, HA Shuang, et al. Large area field immersion test characteristics of deformation of self weight collapse loess under overburden pressure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 382-389. (in Chinese))

[6] 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 Xiaojun, MI Weijun, XIONG Zhiwen, 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))

[7] 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 Kanyan, ZHANG Jiwen, LIU Zhenghong, 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))

[8] 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))

[9] 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. (WU Xiaopeng, XIONG Zhiwen, WANG Xiaojun, 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, 33(6): 1769-1773. (in Chinese))

[10] 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 Zhenghan, XU Zhenhong, LIU Zudian. Some problems of collapsed loess[J]. Chinese Journal of Civil Engineering, 1986, 19(3): 62-69. (in Chinese))

[11] 罗宇生,汪国烈. 湿陷性黄土研究与工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001: 21-32.

[12] 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 Dazhan, HE Yihua, SUI Guoxiu. Study and test on immersion of Q2 loess in large area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(2): 1-11. (in Chinese))

· 简讯 ·

河海大学陈文教授入选 2014 年中国高被引学者榜

2015 年 2 月 2 日爱思唯尔(Elsevier)发布 2014 年中国高被引学者榜单,河海大学力学与材料学院陈文教授入选。陈文教授现任河海大学力学与材料学院院长,是国家杰出青年基金获得者和德国洪堡基金会高级研究员,主要研究方向为复杂介质的力学行为建模、数值方法和仿真、统计力学。

随着中国在国际科研领域的影响力和地位不断提高,表彰引领学术进步的杰出学者显得尤为重要。2014 年中国高被引学者榜单基于客观引用数据,评估中国研究者在世界范围内的影响力,将 38 个学科的 1651 名最具世界影响力的中国学者呈现给学术界和公众。

2014 年中国高被引学者榜单的研究数据来自全球最大的同行评议学术论文索引摘要 Scopus 数据库,收录了来自全球超过 5000 个出版商、2.1 万种期刊的 5500 万条文献索引,覆盖科学、技术、医学、社会科学、艺术与人文等学科。

(本刊编辑部供稿)