

DOI: 10.11779/CJGE2016S2039

考虑基质势影响的非饱和土水分运移规律测试系统研制

朱青青¹, 苗强强^{2,3}, 陈正汉⁴, 姚志华⁵, 章峻豪⁴

(1. 西北民族大学化工学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 新疆军区司令部工程勘察设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000; 3. 新疆人民武装学校, 新疆 乌鲁木齐 830063; 4. 后勤工程学院土木工程系, 重庆 400041; 5. 空军工程大学机场建筑工程系, 陕西 西安 710038)

摘要: 借助于国内外先进的吸力探头传感器、水分传感器、相应的采集系统、计算机系统和自加工的有机玻璃土样桶等, 研制出国内外首台考虑基质势影响的非饱和土水分运移规律测试装置。其结构简单, 设计新颖, 实用可靠, 操作简单方便, 能够将不同初始体积含水率的土样的水分运移变化情况, 全面的进行数据化的统计、比较, 并能够得出可靠的试验数据, 能够定量研究不同基质势土样相互接触(水气混合)或不接触(气态水)时非饱和土中不同基质势对水分运移的影响规律; 定量研究不同基质势、不同断面和不同时期非饱和土中水分变化和运移情况; 直接、实时量测同一断面非饱和土在不同基质势作用下的非饱和土土水特征曲线, 解决了非饱和土土水特征曲线无法直接量测或量测不准确的难题; 量测范围广, 适合多种非饱和土基质势组合时的量测, 对基质势影响下的非饱和土水分运移规律做出数据化的展现, 能够作为岩土工程、交通工程、水利工程和农业工程相关研究领域的可靠工具。

关键词: 非饱和土; 基质吸力; 含水率; 水分运移

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)S2-0240-05

作者简介: 朱青青(1979-), 女, 副教授, 主要从事环境岩土科研与教学工作。E-mail: 952977585@qq.com。

Development of test system for unsaturated soil water movement law considering influence of matrix potential

ZHU Qing-qing¹, MIAO Qiang-qiang^{2,3}, CHEN Zheng-han⁴, YAO Zhi-hua⁵, ZHANG Jun-hao⁴

(1. College of Chemical Engineering, Northwest University for Nationalities, Lanzhou 730000, China; 2. Institute of Engineering Research & Design of PLA Xinjiang; 3. Xinjiang People's Armed Forces School, Wulumuqi 830063, China; 4. Department of Architectural Engineering, Logistical Engineering University of PLA, Chongqing 401331, China; 5. Department of Airdrome Construction Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Based on the worldwide advanced suction probe sensor, moisture sensor, corresponding collection system, computer system and self processing organic glass soil barrels, the first test device for moisture migration of unsaturated soil. It is developed considers the effects of matric potential. The system has the advantages of simple structure, novel design, practical and reliable property, simple and convenient operation. It can collect and compare change of water transport of soil samples with different initial volumetric water contents. Reliable experimental data can be obtained. For contact (water and gas mixture) or no contact (water vapor) of soil samples with the influences of different on the matrix potentials matric potentials to moisture migration in unsaturated soils are quantitatively analyzed. Moisture change and migration of different matrix potentials, sections and periods are also quantitatively analyzed. Direct and real-time measurement of unsaturated soil water characteristic curves of the section under different matric potentials solve direct measurement or in accurate problems. Its measuring range is large and suitable for a variety of unsaturated soil matric potential combinations. Under the influence of the matric potential, the data of moisture migration of unsaturated soils is numerically shown. It can be a reliable tool for investigation and detection of geotechnical engineering, traffic engineering, hydraulic engineering and agricultural engineering.

Key words: unsaturated soil; matric suction; water content; moisture migration

0 引言

对于非饱和土基质吸力的测试工作, 前人做了大量有意义的深入研究, 如卢靖^[1]对非饱和黄土水分迁移问题进行了试验研究工作, 初步探讨了不同基质势

组合时黄土的水分运移情况, 但每组试验只能获得试验终止的水分迁移结果, 对试验中间过程无法获得全

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(31920140102)

收稿日期: 2016-05-19

面的了解。陈辉等^[2]从多相孔隙介质非平衡渗流理论, 提出饱和度演化方程能较好地模拟非饱和土在小基质吸力步长变化下饱和度的变化规律。宁英成^[3]应用非饱和土土水特性曲线与渗透系数联合测量仪, 对非饱和黄土与硅微粉的渗透特性进行了试验研究, 并得到相应的土水特性曲线与渗透系数, 但正如笔者所述渗透系数理论公式中的各项参数具体意义及其相互之间的变化关系不明确无法反映不同的应力历史、温度和干湿循环等条件下的渗透系数情况等。李萍等^[4]利用现场监测对黄土中水分迁移规律现场试验进行了研究, 发现黄土中非饱和渗流或水汽迁移是存在的。陇东黄土高原地区土壤中水分循环主要发生在浅层 0.7 m 以内的蒸发带。降雨入渗到蒸发带以内, 若无后续降雨补给, 则向上蒸发排泄; 若入渗至蒸发带以下, 则不受蒸发影响。刘新荣等^[5]以某厚堆积层滑坡为例, 基于非饱和土力学理论, 利用有限元方法, 对雨水入渗条件下坡体的渗流及动态稳定性进行了计算和分析, 研究了水分在坡体内的运移对边坡稳定性的时间效应。陈仁朋等^[6]介绍了一种用于测试高压实度路基粗颗粒土-水力学参数的试验装置, 获得高压实度下高铁路基粗颗粒土-水特征曲线; 并通过瞬态剖面法获得路基粗颗粒土非饱和渗透系数与基质吸力的关系, 但试验系统较为复杂。综上以往对非饱和土不同基质势组合时, 水分运移研究多采用数值软件或理论公式研究, 从试验方面对于非饱和土水分运移测试系统国内外还鲜见报道, 更无现成相关试验仪器直接用于研究。故本文介绍一种考虑基质势影响的非饱和土水分运移规律测试装置, 试图解决非饱和土不同基质势组合时基质势无法实时量测和仪器缺乏的问题。

1 试验系统介绍

借助于国内外先进的吸力探头传感器、水分传感器、相应的采集系统、计算机系统和自加工的有机玻璃土样桶等, 研制出国内外首台考虑基质势影响的非饱和土水分运移规律测试装置。

1.1 系统组成

系统由 3 部分组成 (如图 1, 图 2 所示)。

(1) 水平土柱主体部分: ①内径 120 mm, 壁厚 10 mm, 长 500 mm 的有机玻璃圆柱。②5 支 MP406 水分传感器 (如图 3 (a) 所示), 可以根据需要适当增减传感器数量。水分计探针长 60 mm, 间距 14 mm, 可测量范围 0~100 VSW% (volumetric soils water), 精度为 $\pm 1\%$, 反应时间小于 0.5 s, 稳定时间为 3 s, 输入电压 7~18 VDC, 输出信号 0~1200 mV 对应含水率为 0~100 VSW%。水分计的埋设位置, 如图 2 所示。在水分计对应位置开孔, 孔径 40 mm, 将水分

计探针端按要求埋入土中, 另一端电缆线部分接入 DT80 远程监测系统。③FTC-100 热传导吸力探头 5 支, 可以根据需要适当增减传感器数量。大小、形状如图 4 (a) 所示, 该传感器量程 0~1500 kPa, 精度 5%, 最小采集时间为 1 h, 各传感器位置埋设如图 2 所示。



图 1 测试系统照片

Fig. 1 Photo of test system

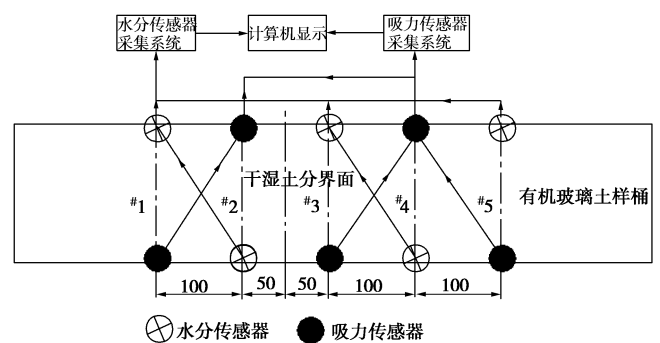


图 2 测试系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test system

(2) MP406 水分计采集系统如图 3 (b) 所示, 该采集系统是由澳大利亚 (ICT) 生产北京数泰科技有限公司组装而成的一套可用于远程监测单元, 结构紧凑、坚固、合理, 输出电压量程大 (± 30 V), 多通道传感器串口, 可连接不同形式传感器, 输出精度高, 可用 U 盘直接进行数据传输。

(3) FTC-100 热传导吸力探头系统。

热传导吸力探头是一种非饱和土传感器, 用来在现场和室内测试土体吸力和温度, 系统包括多孔陶土头的传感器、一个控制器 (数据采集系统见图 4 (b))、电源。



(a) MP406 水分计

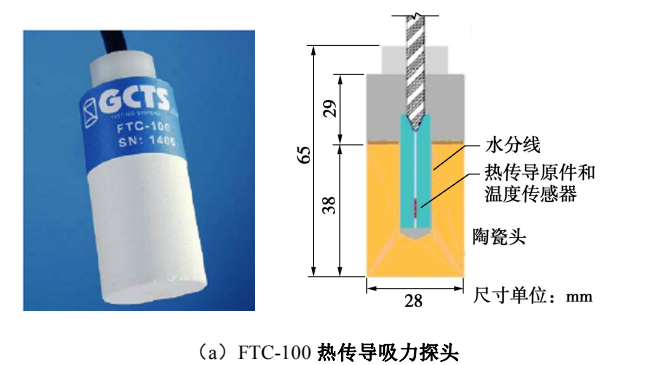


(b) DT80 远程监测记录仪

图 3 水分传感器及其采集系统

Fig. 3 Moisture sensor and collecting system

通常系统包括 16 个传感器（自带 10 m 电缆，如果需要可以加长到 100 m）。数据采集仪包括一个 16 通道的多路转换器，可以连接到计算机上。电源有一个电池供电，也可以通过太阳能板。传感器头部有一个微型的加热单元和一个埋置在中央的温度传感器，通过发送一个控制的电流到加热单元，得到传感器的加热曲线，加热后，热消散速率取决于传感器周围的土体含水率，而含水率又取决于土体中的吸力。土体中的吸力可以根据实测的热传导率和事先在室内标定好的热传导率与吸力的关系曲线获得。



(a) FTC-100 热传导吸力探头



(b) 吸力探头采集系统

图 4 吸力探头及其采集系统

Fig. 4 Suction probe and collecting system

1.2 系统工作原理

按图 1 所示将试验各部分准备就绪，控制干密度和初始含水率，将土样每 25 mm 一层分层击实，装下一层时，把前一层试样部分打毛使试样整体性好，按设定的位置分别在试样两端装好两种不同含水率的土样，当要研究不同基质势组合时气态水运移规律时，应将试样接触部分用滤纸隔开，当需要研究液态水运移时，两种基质势的土样直接接触装样，试样装样完成后，按图 2 中所示位置将传感器由开孔的地方埋入（也可根据试验方案的不同增大或减少开孔间距），要保证传感器与试样接触良好，在传感器与有机玻璃土柱接触处涂密封胶，使试样水分不被蒸发。

试验前应先将水分传感器、吸力探头连接其采集系统进行标定，标定完成后将水分传感器和吸力探头分别和相应的采集系统连接，再将采集系统接入计算

机系统，记录每一传感器的通道，根据试验方案设置数据采集时间，应使两种传感器的记录步长同步，试验开始记录，根据试验方案定期导出试验数据，系统的工作原理如图 5 所示。

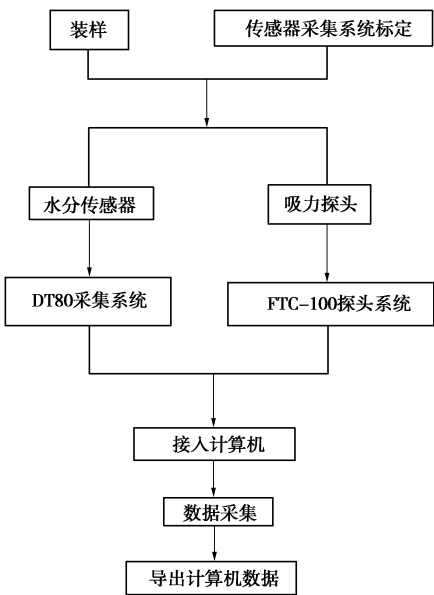


图 5 测试系统流程图

Fig. 5 Flow chart of test system

2 试验系统的应用验证

为了验证本系统的实用性和可靠性，进行了如下试验。以广州—佛山高速公路 K12+905—K13+090 处填方段的含黏砂土为研究对象，其物性指标如表 1、2 所示。

表 1 试验所用含黏砂土的级配组成

		Tabel 1 Grain sizes of clayey sand used in tests				
颗粒相	对密度	颗粒组成/%				
	d_s	>2 mm	0.5~2 mm	0.2~0.5 mm	0.2~0.075 mm	<0.075 mm
		10.39	19.58	32.46	22.75	14.82

表 2 试样的初始物性指标

Tabel 2 Index properties of clayey sand used in tests			
干密度	含水率	孔隙比 e	饱和度 $S_r/\%$
$\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	$w/\%$		
1.85	14.5	0.443	87.34

共做了 3 个控制干密度 1.7 g/cm³ 试样两端初始体积分含水率不同的组合，即初始体积分含水率 40.63%~15.13%，26.01%~13.36%和 46.79%~12.63%的组合，水分计和张力计每隔 1 h 采集一次数据，试验共历时 80 d。

图 6 为初始体积分含水率 40.63%~15.13%组合的试样，传感器布置位置与图 2 所标位置对应。由数据变化情况可以看出，图 6 (a) 中#1 水分传感器水分变

化较小, 主要是#1, #2 传感器在湿土中含水率已达到饱和程度, 水分运移变化不明显, #2 水分传感器由于距离干土端较近, 传感器变化较#1 明显, 水分传感器含水率始终呈减小趋势, #3, #5 水分传感器位于干土段, #3 水分传感器变化最为显著, 它距湿段较近, 含水率变化较大, #5 变化较为缓慢是因为距湿段较远, 水分较难到达。由图看出 5 个水分传感器在 4 d 左右含水率都达到平衡, 图 6 (b) 中#3, #4 吸力传感器在不同时段吸力随时间的变化情况, 土样中#3 吸力传感器变化较为显著, 其变化曲线和 3#水分传感器规律一致, 说明测试结果是较为可靠的。由于#1, #2 传感器始终处于饱和土段吸力数值始终显示为 0.1 kPa, #4, #5 的测试结果数据相同, 故图中#4, #5 不同时段吸力随时间的变化情况重合。

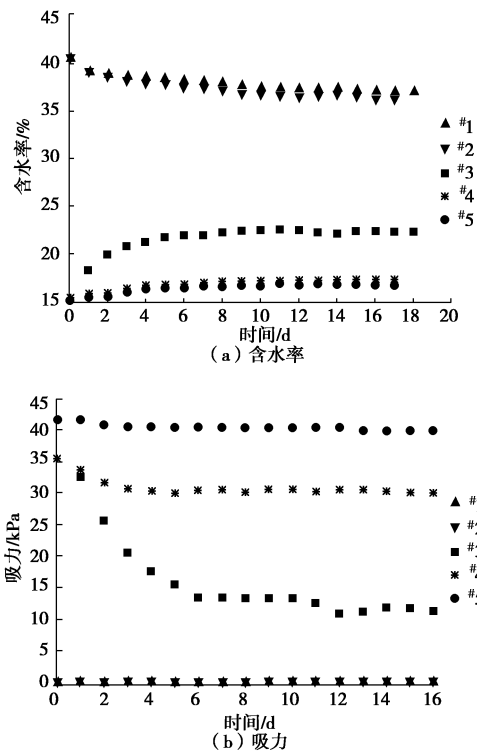


图 6 40.63%~15.13%组合含水率和吸力随时间变化关系

Fig. 6 Variation of water content and suction with time

由数据变化情况可以看出, 图 7 (a) 中#3 传感器变化最为显著, #4 传感器变化很微小, #5 传感器传感器附近的含水率也有轻微的变化, 而它们干段含水率远远小于湿段含水率, 只是干段基质势大于湿段基质势, 引起这种现象的原因是: ①基质势是决定水分运移的主要因素; ②干—湿段基质势之差远小于相应值, 故这时候气态水的运移也是水分运移的一个主要因素。图 7 (b) 中#3 的吸力随初始体积含水率的增加而降低; #4、#5 吸力传感器随含水率的降低而增加。

由图 8 (a)、(b) 数据变化情况可以看出, 该组

合所有传感器都能有效地工作, 由图中可看出两组传感器读数都发生了与图 6, 7 类似规律性的变化, 在此不再赘述。

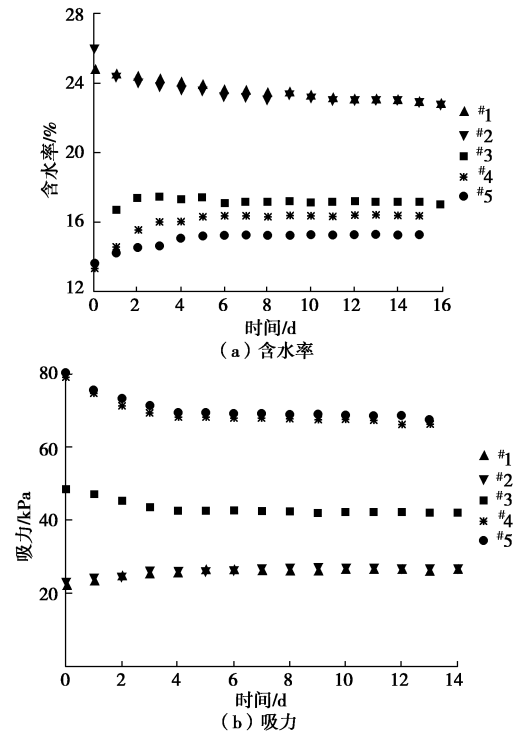


图 7 26.01%~13.36%组合含水率和吸力随时间变化关系

Fig. 7 Variation of water content and suction with time

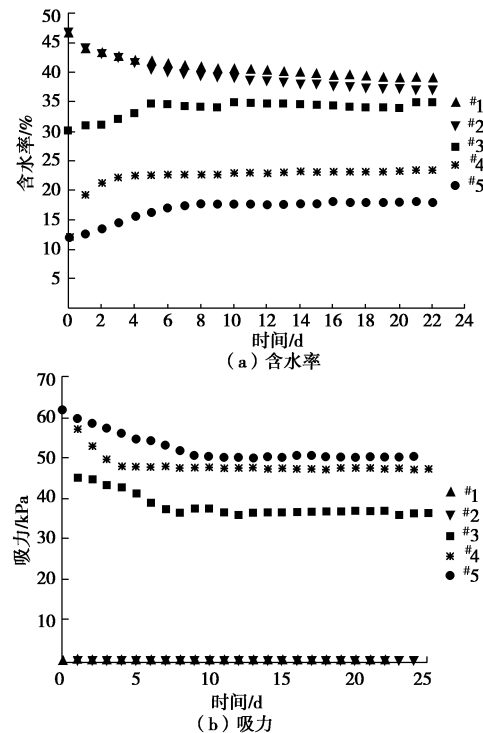


图 8 46.79%~12.63%组合含水率和吸力随时间变化关系

Fig. 8 Variation of water content and suction with time

由图 6~8 得出, 随初始体积含水率或吸力梯度的增加, 水分运移量越大, 试样含水率或吸力平衡的时间越长, 气态水运移为辅, 液态水运移越占优; 反之,

含水率或吸力梯度越小,水分运移量越小,试样含水率或吸力平衡时间越短,水分运移以液态水和气态水混合运移越为主。

3 结 论

本文通过自研试验系统,解决了非饱和土不同基质势组合时基质势无现成试验仪器的问题,成功研制出了一套可用于量测非饱和土水分运移的测试装置,并使用该套系统进行了三组不同基质势组合的土样试验,试验效果较为理想,说明本套系统的测试性能较为稳定,可用于相关领域的科研和工程研究,本套系统具有以下4点特点。

(1)可以定量研究不同基质势土样相互接触(水气混合)或不接触(气态水)时非饱和土中不同基质势对水分运移的影响规律。

(2)可以定量研究不同基质势、不同断面和不同时期非饱和土中水分变化和运移情况。

(3)可直接、实时量测同一断面非饱和土在不同基质势作用下的非饱和土土水特征曲线,解决了非饱和土土水特征曲线无法直接量测或量测不准确的难题。

(4)可量测范围广,适合多种非饱和土基质势组合时的量测。试验效果理想,规律性好,是一套在非饱和土测试水气运移规律可靠的试验系统。

参考文献:

[1] 卢靖. 非饱和黄土的水分迁移试验验证[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006. (LU Jing. Research on the experimentation of moisture movement in unsaturated loess soils[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and

Technology, 2006. (in Chinese))

- [2] 陈辉, 韦昌富, 陈芳芳, 等. 非饱和土土-水特征曲线预估方法研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(1): 128 - 123. (CHEN Hui, WEN Chang-fu, CHEN Fang-fang. Research on prediction method of soil-water characteristic curve of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(1): 128 - 123. (in Chinese))
- [3] 宁英成. 非饱和土土水特性曲线与渗透系数试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014. (NING Ying-cheng. Experimental study on the soil-water characteristic curve and permeability coefficient of unsaturated soil[D]. DaLian: DaLian University of Technology Dissertation, 2014. (in Chinese))
- [4] 李萍, 李同录, 王阿丹, 等. 黄土中水分迁移规律现场试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(5): 1331 - 1340. (LI Ping, LI Tong-lu, WANG A-dan. Insitu test research on regularities of water migration in loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(5): 1331 - 1340. (in Chinese))
- [5] 刘新荣, 张梁, 余瑜, 等. 降雨条件下酉阳大涵边坡滑动机制研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(10): 2898 - 2905. (LIU Xin-rong, ZHANG Liang, YU Yu. Research on sliding mechanism of Dahan slope in Youyang County under rainfall condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(10): 2898 - 2905. (in Chinese))
- [6] 陈仁朋, 吴进, 齐帅, 等. 高铁路基粗颗粒土水力学参数测试方法研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(12): 3365 - 3373. (CHEN Ren-peng, WU Jin, QI Shuai, et al. A method for measuring hydraulic parameters of coarse-grained soils for high-speed railway subgrade[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(12): 3365 - 3373. (in Chinese))

(责任编辑 孙振远)