

文章编号: 1001-4888(2011)01-0079-06

土体水分传输的温度效应试验系统设计与应用^{*}

谈云志, 胡新江

(三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 宜昌 443002)

摘要: 自制了一套用于研究温度作用下土体水分传输机制的室内试验模拟系统。采用水浴加热替代电阻丝直接加热的方案, 解决加热不均匀且不容易控制温度的难题。应用串行通讯接口技术把智能温度控制仪表和微机连接, 实现了温度自动控制和采集的自动化。开展了 7 组试验耗时接近 1 年, 试验结果表明, 该系统性能稳定、部件之间兼容性较好, 连续工作 30 天温度的波动范围在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 内, 证明该试验系统可用于模拟温度作用下土体的水分传输过程。

关键词: 水分传输; 温度效应; 试验系统

中图分类号: TU375.4

文献标识码: A

0 引言

岩土工程领域中因温度作用引起水分迁移的现象十分普遍, 如: 高放射性核废料地下存储、地下直埋高压电缆、冻土地地区的路基工程等。毛雪松^[1]用多年冻土地地区代表性土进行冻土路基室内足尺模型试验, 建立伴有相变的路基非稳态温度场的控制方程, 通过对观测结果进行数值模拟, 验证了数学模型的正确性。杨果林^[2]设计一个模型箱模拟路基的形状, 研究路基在积水、阴天、日照、降雨时, 膨胀土路基中含水量的变化规律、水的入渗和蒸发速率等。孔令伟、陈建斌等^[3-6]在广西南宁监测了膨胀土边坡在大气作用下其含水量、温度、变形等随气候变化的演化规律。但现场试验比较复杂, 有必要开展一些易于控制边界条件的室内试验作为补充。

针对冻融引起的水分迁移关注比较多, 而对炎热多雨环境下的路基土体水分变动情况研究比较少。实际上在炎热多雨地区路基土体受太阳的辐射, 从路面和路基坡面到路基内部形成了温度梯度, 土体的水分在温度梯度势的作用下从高温端向低温端迁移, 这种水分的不平衡分布形成了一种基质势, 基质势的存在促使水分从低温端又向高温端传输。这种反复作用很容易诱发路基病害的发生。因此, 有必要设计一套模拟温度效应的水分传输试验系统, 为研究温度作用下土体的水分传输机制提供试验条件。

1 试验原理

水分在土体孔隙中赋存的状态决定了水分与土体颗粒的作用模式。土体孔隙中含水量比较小时, 液态水主要附着在土体颗粒上, 在颗粒表面形成的薄膜只有几个水分子厚, 不能形成自由流动的连续态。随着含水量的增加, 附着在土体颗粒表面的薄膜水逐渐增厚, 以致水分能自由流动, 此状态对应的含水量称之为临界含水量。当水分大于临界含水量时, 水分能在自身重力的作用下流动, 按照非饱和土力学观点该状态属于水相连通状态。在上述两种含水量情况之间, 水分主要依靠毛细力的作用维持在

^{*} 收稿日期: 2010-05-20; 修回日期: 2010-06-16

基金项目: 三峡大学人才科研启动基金(0620090035); 国家自然科学基金项目(No. 51009084); 湖南省交通科技项目(No. 200544)

通讯作者: 谈云志(1979-), 男, 博士, 讲师。主要从事特殊土土力学方面的应用研究。E-mail: yztan@ctgu.edu.cn

土体颗粒表面,属于气连通状态。

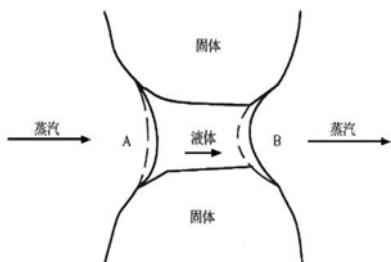


图 1 液体的传输示意图^[7]

Fig. 1 Schematic diagram of fluid transmission^[7]

温度作用下,试样的水分处于薄膜状态时,薄膜水分子在土水势的作用下不能移动,水分的迁移主要是因蒸发效应引起水分的气化,然后遇到低温而液化。当处于水相连通时,水分子可以自由移动但孔隙空间不能为迁移的水分提供存储空间。而处于该两种饱和度之间的土体,最容易发生水分迁移。因为此状态下的液态水主要填满了细小的孔隙或者在土体颗粒之间形成连接的弯曲面,如图 1。

2 试验系统

2.1 试验系统概貌

试验装置由加热恒温控制系统、试样成型隔热系统、试验数据采集系统三部分组成。试验装置的总体概貌,如图 2 所示。

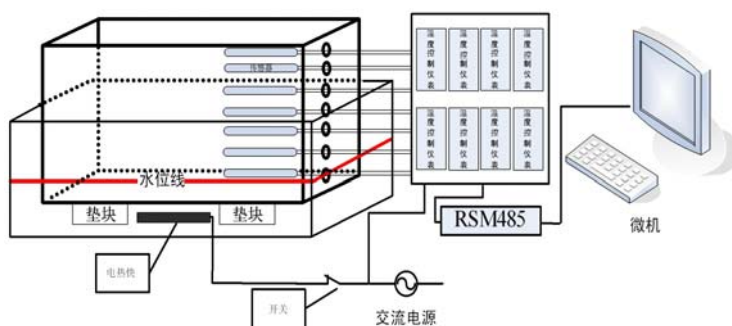


图 2 试验装置概图

Fig. 2 Brief diagram of test equipment

2.2 加热恒温控制系统

在整个试验过程中,温度边界控制是一个关键的环节。采用电阻丝直接加热易导致土壤加热不均匀且不容易控制温度。试验中拟采用常温度边界条件,故采用水浴加热。温度采用温控开关进行控制,见图 3。通过智能温度控制器(XMT 808)设定预期目标温度,当水温达到预定目标值时温度传感器将信号传至智能温度控制器,此时开关跳闸即停止加热;当水温低于预定目标值则开关重新闭合开始加热。水浴箱周围利用泡沫等隔热材料保温,避免因温度升降变化较快而使温控开关频繁地跳动。另外,防止因加热导致水浴箱内水分的蒸发过快,水浴箱上方用防水布密封遮盖。

温度传感器为铂电阻(Pt100)传感器,工作温度范围($-20\sim 600^{\circ}\text{C}$),分辨率(0.01°C),在 $0^{\circ}\text{C} \leq t \leq 850^{\circ}\text{C}$ 时铂电阻 Pt100 的阻值与温度的关系为^[8]:

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + Ct^3(t - 100)] \quad (1)$$

式中: $R_0 = 100$; $A = 3.96847 \times 10^{-3}$; $B = -5.847 \times 10^{-7}$; $C = -4.22 \times 10^{-12}$ 。

将 $t = 25$ 代入上式,可得 $R_t = 109.9\Omega$ 。

2.3 试样成型与隔热系统

试样箱由 0.4cm 厚白色不锈钢焊接而成,箱体尺寸为 $41\text{cm} \times 21\text{cm} \times 31\text{cm}$ 。在箱体的右端侧壁钻 7 个直径为 0.5cm 的孔作为温度传感器的通道,从底部开始每隔 4cm 的间距布置一个孔,详见图 4。试

样箱放置在水浴箱内底部时用四个铁块垫起,试样箱浸入水中约 1cm。在试验进行过程中要及时补充因加热蒸发损失的水分,保持试样箱浸入水中的深度不变。

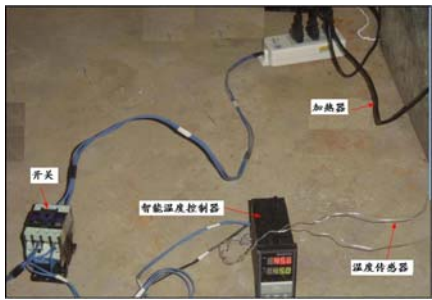


图 3 温度控制实物图

Fig. 3 Physical diagram of temperature control

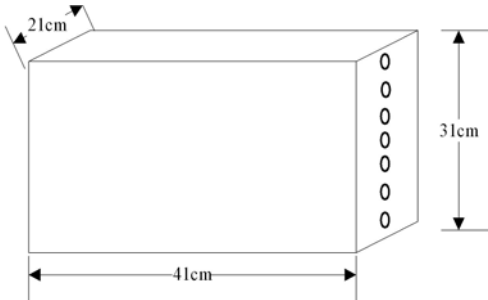


图 4 试样箱

Fig. 4 Sample box

隔热材料为石棉隔热保温布,该布的密度为 103kg/m^3 ,当温度不超过 70°C 时其导热系数是 $0.0298\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。绝湿材料由武汉市横林鑫人涂塑篷布厂生产,该布主要起防水作用。

利用木板和上述隔热防水材料制作五块活动隔热衬砌,衬砌尺寸与试验箱六面的尺寸相匹配,如图 5。衬砌的制作方法如下:用木板做底板,上面铺三层石棉然后用防水布包住。隔热防水板作为衬砌贴着不锈钢试样箱内壁起隔热保湿作用。箱底部不放隔热防水板,设有预留温度传感器孔的侧面(见图 4)隔热防水板可以自由活动,试样切片量测含水量后可以往前移动贴近土壤继续供隔热隔湿之用。



图 5 隔热防水板

Fig. 5 Waterproof insulation board

2.4 试验数据采集

(1) 温度

为了实时监测温度随时间的变化规律,采用了微机采集方式。温度控制仪表和微机通过串行通讯接口实现连接,如图 6。为了在一个通讯接口连接多台 XMT808 仪表,需要给每台 XMT808 仪表编一个互不相同的代号。XMT808 有效的地址为 $0\sim 100$,所以一条通讯线路上最多可连接 101 台 XMT 808 仪表,仪表的地址代号由温度控制仪表中的参数设定。

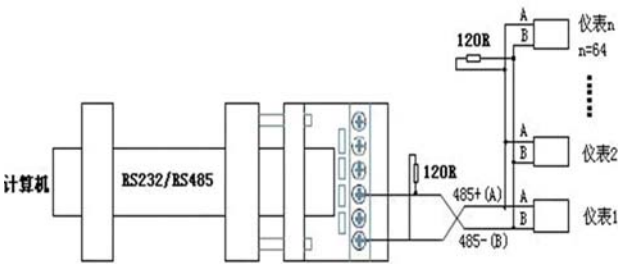


图 6 通讯转换

Fig. 6 Communication conversion

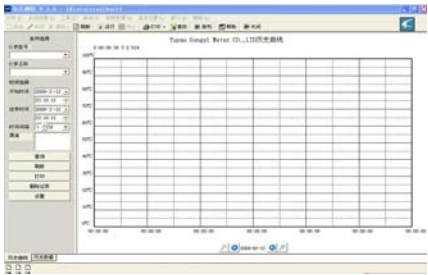


图 7 温度数据采集界面

Fig. 7 Acquisition interface of temperature data

温度控制仪参数既可以在仪表上进行设置,也可在软件界面上设置,数据实时采集通过如图 7 所示的软件界面操作完成。

(2) 含水量

土壤的湿热耦合试验中,含水量的确定是一个技术难题,特别是需要实时了解含水量的动态变化过

程就显得更为困难。目前,测试含水量主要采用钻孔取样然后烘干称重法与时域反射仪(TDR)法。前者属于一种有损检测,不适用于瞬态条件下的含水量测试,后者是测量某一定范围土体的平均含水量,比较适用于现场含水量的测定,但价格比较昂贵。本次试验采用切片后烘干称重的方法确定含水量,从试样箱的一端开始依次切片,每次切片前把最外围的土壤切除取里面一层,从上至下分层取样测量。

3 试验操作步骤

3.1 试样配制

选取重塑风干土试样过 5mm 筛,根据要求达到的含水量反算需要增加的水分质量,然后利用喷壶小心均匀地把水分喷洒到土样上,在配制试样的过程中需要反复搅拌让水分充分均匀地湿润土样。最后,封装进密闭的塑料袋中静置 6~7 天,在袋中选择 5 个不同部位的土样利用烘干法平行测其含水量,当各点含水量之间的差值在 0.3% 范围内时表示静置充分;否则,把土样倒出重新搅拌,然后再静置,直到符合上述误差标准为止。

3.2 试样成型

试样分 7 层压实,每层压实成型后的高度为 4cm。每层压实的具体操作步骤如下:首先,根据预先要达到的干密度计算出每层土样的质量;第二,把土样均匀分布在试验箱内后,试样箱的每个角落放一个小铁圆柱(直径 2cm、高 4cm),可以有效防止因偏心受压导致试样密度不均;第三,再把与试样箱净空面积大小一样的厚钢板(2.5cm)放到箱内的试样上面,以保证千斤顶作用在传力杆的力均匀地施加在试样上;第四,利用压力机或千斤顶等设备联合反力框架把试样压实,当钢板被挤压接触到小铁圆柱时说明达到了预定的体积;第五,卸掉加载设备后把钢板移去,把压实后的试样表面拉毛,以便层间结合紧密。

3.3 温度传感器安装

试样拉毛后和倒入下层松散土样前把温度传感器穿过试样箱预留的孔通道,并固定在二者之间,压实过程中防止传感器错位,同时保护好传感器的外接屏蔽线。安装传感器前,特别要注意检查传感器性能是否良好。

4 应用研究

4.1 试验概况

开展了一种干密度、一种初始含水量试样的试验。试样干密度 $1.47\text{g}/\text{cm}^3$ 对应压实度 93%,初始含水量 24.6%;试验中的边界温度一次性加热到预期设定值 48°C ;实验室环境温度 $23\sim 25^\circ\text{C}$ 。

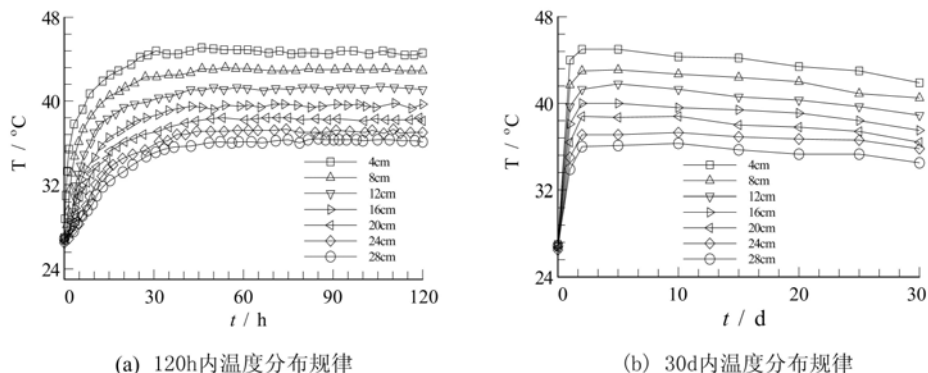


图 8 温度随时间的变化过程

Fig. 8 Process of temperature changes with time

4.2 试验结果

分析图 8 可知,该含水量试样内处于冷端的监测点(4cm)处达到温度平衡的时间需 40 个小时左右;靠近热端(试样从上至下 28cm)处达到温度平衡的时间约 28 个小时。从热端到冷端不同位置点达

到温度平衡的时间逐渐增加,且各点之间的温度梯度比较明显。

在试验的前期(0~5天),温度处于稳定阶段,随着水分的迁移不断增多,对温度的分布影响越大。从图8(b)可以看出,温度在时间段(5~30天)内有不同程度的下降,越靠近热端的土体温度下降越明显。这是由于经过水分迁移后,热端土体的含水量减少导致热阻增大的缘故。而靠近冷端的土体虽然含水量增大热阻降低,但传递至该段的温度降低了,使得其温度梯度同样增大,只是没有前者明显。

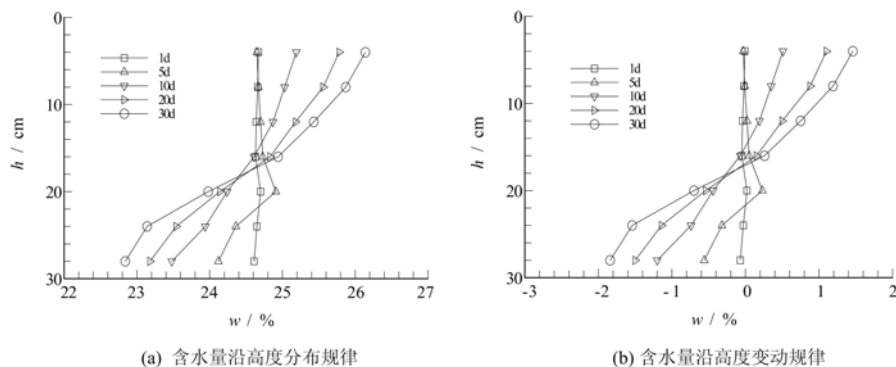


图9 含水量随土样的高度变化过程

Fig.9 Process of water content changes with high

水分迁移是一个缓慢的过程,经过1天、5天、10天、20天、30天的持续常温作用下,水分在试样中的分布情况如图9所示。分析上图可知:经历1天的加热,没有发生明显的水分迁移现象;经历5天的作用,水分迁移现象主要发生在试样的热端,热端的水分迁移后聚集在试样的中部,冷端的含水量没有出现变化;经历10天和30天之间水分出现明显的迁移,主要表现在试样的冷端含水量出现明显的增大而试样的热端出现明显的减少。经过30天,净迁移量分别是1.84%,试样中间部分的含水量只在初期出现了变化,而在后期基本与初始含水量持平。在温度作用下,热端试样的水分经迁移后聚集在试样的冷端。理论上热端含水量的减少量应该与冷端含水量的增加量相等,但实际操作过程中由于误差导致试验数据有一些出入。

5 结论

自制的水分传输试验模型系统具有良好的性能,实现了半自动采集的功能,所用的部件之间兼容性较好。利用该系统研究了封闭土样在温度作用下水分的迁移过程,结果表明温度在30cm高的土样内经历4天恒温加热基本达到稳定状态,但含水量的稳定时间则需要一个多月。从上述试验可以看出,通过该系统可得到比较可靠的试验数据,也证实该试验系统可模拟温度作用下的水分传输过程。

参考文献:

- [1] 毛雪松, 胡长顺, 侯仲杰. 冻土路基温度场室内足尺模型试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, 24(1): 30—33 (Mao Xue-song, Hu Chang-shun, Hou Zhong-jie. Indoor full-scale model test of frozen soil subgrade temperature field[J]. Transactions of Chang'an University(Natural Science), 2004, 24(1): 30—33(in Chinese))
- [2] 杨果林, 刘义虎. 膨胀土路基含水量在不同气候条件下的变化规律模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4524—4533 (Yang Guo-lin, Liu Yi-hu. The model test research that variation of expansive soil moisture in different changes of climate conditions[J]. Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(24): 4524—4533 (in Chinese))
- [3] 孔令伟, 陈建斌. 大气作用下膨胀土边坡的现场响应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 1065—1073 (Kong Ling-wei, Chen Jian-bin. The test of expansive soil slope under atmospheric Field Response[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 1065—1073 (in Chinese))
- [4] 陈建斌. 大气作用下膨胀土边坡的响应试验与灾变机理研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006 (Chen Jian-bin. The research of expansive soil slope test and disaster response mechanism under the atmosphere [J]. Wuhan: Institute of Rock & Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006 (in Chinese))

- [5] 陈建斌, 孔令伟. 大气作用下膨胀土边坡的动态响应数值模拟[J]. 水利学报, 2007, 38(6): 674—682 (Chen Jian-bin, Kong Ling-wei. Dynamic response numerical simulation of expansive soil slope under the atmosphere[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(6): 674—682 (in Chinese))
- [6] 陈建斌, 孔令伟, 赵艳林, 吕海波. 非饱和土的蒸发效应与影响因素分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 36—40 (Chen Jian-bin, Kong Ling-wei, Zhao Yan-lin, Lv Hai-bo. The analysis of unsaturated soil's evaporation effect and influence factors[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 36—40 (in Chinese))
- [7] 刘伟, 范爱武, 黄晓明. 多孔介质传热传质理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007 (Liu Wei, Fan Ai-wu, Huang Xiao-ming. Porous media theory and application of heat and mass transfer[M]. Beijing: Science Press, 2007 (in Chinese))
- [8] 刘元扬. 自动检测和过程控制[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005 (Liu Yuan-yang. Automatic detection and process control[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2005 (in Chinese))

On the Experimental System Design and Application of Temperature Effect In Soil Moisture Transfer

TAN Yun-zhi, HU Xin-jiang

(Three Gorges University Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang 443002, China)

Abstract: An indoor experimental simulation system was home-designed and fabricated to study moisture transport mechanism in soil at different temperatures. By using water bath heating instead of resistance wire heating directly, the puzzle of uneven and uneasy temperature controlling was solved. In order to control and acquire temperature data automatically, Serial Communication Interface Technology was adopted to link intelligent temperature control instrument with PC. It took nearly one year to carry out 7 groups of experiment. Results show that this experimental system is stable and compatible; the temperature fluctuation range is within $\pm 1^{\circ}\text{C}$ during 30 days. So this experimental system can be used to simulate moisture transfer process in soil under temperature effect.

Keywords: moisture transport; temperature effect; test system