

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0137

变湿度条件下生土材料持水特性及气态水迁移效应试验研究

徐龙飞^{1,2}, 翁效林¹, 张爱军³, 赵高文¹, WONG Henry², FABBRI Antonin²

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 里昂大学 国立国家公共工程学院, 里昂 法国 69000;

3. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨陵 712100)

摘 要: 湿度变化诱发气态水迁移, 进而对生土的变形和强度产生重要影响。研究变湿度条件下生土材料持水特性及气态水迁移效应是揭示服役期生土结构病害孕育机制的关键。针对法国里昂地区两种生土建筑材料, 采用两种试验方法, 即饱和盐溶液法和动态水蒸气吸附法开展等温吸湿试验, 分析生土持水特性; 通过气态水迁移效应试验, 探究生土试样底部进气端和顶部出气端的湿度及水气相对压力变化规律, 并对气态水迁移过程中生土试样变形进行分析。试验结果表明: 两种方法测得生土吸湿曲线较为一致, 可分为单层吸附阶段、多层吸附阶段和毛细凝聚阶段, 并且土体持水能力随黏土颗粒活性增加而增强; 在气态水迁移效应试验中, 生土材料持水特性对出气端湿度与进气端水气相对压力影响明显, 生土试样发生膨胀变形。

关 键 词: 生土; 持水特性; 气态水迁移; 等温吸湿试验; 膨胀变形

中图分类号: TU502

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2021)09-2489-10

Experimental study of water retention characteristics and vapor migration of earth material under relative humidity variation

XU Long-fei^{1,2}, WENG Xiao-lin¹, ZHANG Ai-jun³, ZHAO Gao-wen¹, WONG Henry², FABBRI Antonin²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China; 2. National School of State Public Works, Lyon University, Lyon, France;

3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The variation of relative humidity induces the migration of vapor, which has an important effect on the strength and deformation of earth. The sorption-desorption and migration of vapor inside the earth are of great significance for revealing the disease breeding mechanism of earth structure. Aiming at two different earth materials named STR and CRA chosen from a few existing construction sites located in Lyon region in the southeast of France, the sorption-desorption tests were conducted through two different methods, saturated salt solution method and dynamic vapor sorption (DVS) separately, and the experimental results were compared accordingly. In addition, an innovative apparatus with high-precision strain measuring system was invented and used for monitoring the vapor migration, the variation of relative humidity and gas pressure with time at the top and the bottom of earth specimens was explored, and the deformation characteristics of earth specimens during vapor migration were also analyzed. The experimental results indicate that the sorption curve obtained through DVS is in accordance with that from saturated salt solution method. The sorption curve can be divided into three parts: monolayer adsorption, multilayer adsorption and capillary condensation. Meanwhile, the retention characteristics of earth increases with the rise of clay activity. The retention characteristics have important effect on the relative humidity at the outlet and relative gas pressure at the bottom of specimens. The dilatancy phenomenon occurs during the vapor migration process.

Keywords: earth material; water retention characteristic; vapor migration; sorption-desorption test; dilatancy deformation

1 引 言

生土是指以原状土为主要原料, 无需焙烧仅需

简单加工便可用于建筑的材料。目前, 世界上仍有超过 1/3 的人口居住在生土建造的房屋内, 其传统形式包括夯土墙、土坯、泥砖等^[1-3]。生土材料具有

收稿日期: 2021-01-25

修回日期: 2021-04-26

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目 (No.2020M673320); 陕西省自然科学基金项目 (No.2020JQ-369, No.2021JQ-270); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助 (No.300102210308)。

This work was supported by the General Program of China Postdoctoral Science Foundation(2020M673320), the Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2020JQ-369, 2021JQ-270) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, Chang'an University(300102210308).

第一作者简介: 徐龙飞, 男, 1989 年生, 博士, 讲师, 主要从事生土材料性质评价及本构模型方面研究。E-mail: longfei.xu@chd.edu.cn

通讯作者: 翁效林, 男, 1980 年生, 博士, 教授, 主要从事公路隧道与路基工程方面研究。E-mail: wengxl2000@126.com

突出的生态效益,主要表现在:就地取材、易于施工、造价低廉、可循环利用、保温隔热性好、可调节空气湿度等^[4]。随着对村镇建设的重视和可持续发展理念的提出,生土这种绿色环保建筑材料重新进入人们的视线。

生土从本质上属于具有吸湿特性的多孔介质,而生土建筑物在长期服役过程中与空气接触,经受着外界环境因素的考验,其中最常见的是湿度的影响^[5]。湿度引起的墙体受潮、强度劣化等质量病害

始终伴随着生土民居的运营期。作为一种特定的岩土质建筑材料,生土具有含水率极低的特性(1%~5%)^[6],同时内部吸力较高。在湿度梯度作用下,生土材料内部孔隙开始吸附空气中水汽,气态水放出热量凝结成液态水(图1)。含水率变化引起基质吸力和颗粒表面自由能的变化,对生土结构的变形和强度产生影响^[7-9]。因此,研究变湿度条件下生土材料持水特性及气态水迁移效应是揭示服役期生土墙病害孕育机制的关键。

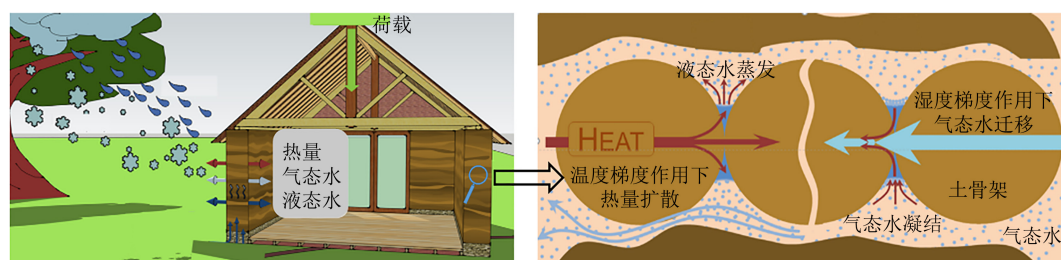


图1 变湿度条件下生土墙内部气态水迁移示意图

Fig.1 Vapor migration of earth wall under relative humidity variation

为描述生土在不同湿度条件下持水能力,国内外学者一般采用等温吸湿试验来测定平衡吸湿量^[10-18]。闫增峰等^[10]对夯土墙、实心黏土砖和松木板3种生土围护结构建筑材料进行等温吸湿试验,比较了不同材料平衡吸湿量;尚建丽等^[11]测试了水泥、石灰、石膏、粉煤灰和矿渣5种单掺改性生土材料的吸湿、放湿性能,并基于生土物质结构和微观形貌对吸放湿机制进行分析;张磊等^[12]分别以平衡含湿量、吸放湿速率和湿平衡时间为关键指标,对胶凝(矿渣、石灰、水泥和石膏等)/生土复合材料湿性能进行评价;Champire^[13]、Fouchal^[14]等对生土砖等温吸湿曲线进行测定;Saidi等^[15]运用4种数学模型来描述石灰和水泥2种改性生土材料的平衡吸湿量与相对湿度的关系。上述研究均是将生土材料置于饱和盐溶液营造的恒定湿度环境中,进而测得等温吸湿曲线。该方法测试周期相对较长,且试验环境不易维持。Fabbri等^[16]将耗时短、精度高的动态水蒸气吸附技术(dynamic vapor sorption,简称DVS)运用到生土持水特性测试上,研究了温度对等温吸湿曲线的影响。然而有关饱和盐溶液法和动态水蒸气吸附技术法试验结果对比的研究却鲜有报道。

与生土材料吸放湿性能研究相比,目前对于生土中气态水迁移效应的试验研究较少^[19-21]。Allinson^[22]、Zhang^[23]等对既有生土民居进行室内外湿热环境测试,探讨了气态水迁移过程对建筑物热

工性能和舒适度影响机制;Chabriac^[24]、Soudani^[25]等在生土墙夯筑过程中沿墙厚度方向布置温度和湿度传感器,通过长期监测分析了生土墙内部气态水迁移进程。但上述研究对象多集中在既有民居,在生土墙内部安置传感器面临诸多问题,同时外部环境复杂多变,不利于对生土中气态水迁移效应进行针对性的研究。此外,Xu等^[26-28]在室内试验中发现湿度对生土单元体变形特性影响较为显著,气态水迁移引起的生土变形问题也需引起重视。

鉴于上述分析,为明确变湿度条件下生土的持水特性和气态水迁移效应,本研究针对法国里昂地区两处生土建筑材料,分别采用饱和盐溶液法和动态水蒸气吸附技术开展生土等温吸湿试验,并将结果进行对比分析。研制温度和湿度可控,且具有高精度变形测试系统的气态水迁移装置,通过试验研究湿度梯度作用下生土单元体气态水迁移特征和变形规律。

2 生土材料及试样的制备

2.1 试验生土

试验材料取自法国里昂(Lyon)大区雷苏兹河畔克拉(Cras sur Reyssouze)和圣特里维埃德库尔特(Saint Trivier de Courtes)两处生土建筑,文中分别用CRA和STR简称,取土位置见图2。从现场取回的生土材料,其颗粒级配曲线如图3所示,规定粒径小于0.002 mm的细颗粒为黏粒。从图中

可以看出两种生土材料黏粒含量相当, CRA 为 16%, STR 为 15%。两种生土材料的基本物理性质见表 1。本试验采用亚甲蓝试验测定生土中黏粒成分活性, 由于亚甲蓝试验对象为生土中粒径 $0 \sim 0.08 \text{ mm}$ 组份, 故将试验直接得到的亚甲蓝值 V_B 转化为生土黏粒活性指数 A_{CB} 。从表 1 可以看出, 尽管二者黏粒含量区别不大, 但 CRA 中黏粒活性指数比 STR 高出一倍。与之相对应, 试验测得 CRA 的塑性指数同样比 STR 高出一倍。对试验对象进行击实试验, 在 2435 kJ/m^3 击实功作用下测得 CRA 最优含水率为 8%, 最大干密度为 2.08 g/cm^3 , STR 最优含水率为 9%, 最大干密度为 2.03 g/cm^3 。



图2 试验用生土地理位置

Fig.2 Geographical location of earth materials used in this study

表1 试验用生土材料基本物理指标

Table 1 Physical parameters of earth materials in this study

生土材料	黏粒含量 <0.002 mm/%	黏粒成分在 0~0.08 mm 占比 C_B /%	液限 w_L /%	塑限 w_P /%	塑性指数 I_P	亚甲蓝值 V_B	黏粒活性指数 $A_{CB} = V_B / C_B$	最优含水率 w_{op} /%	最大干密度 $\rho_{dmax} / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
CRA	16	32	29	16	13	2.7	8.4	8	2.08
STR	15	23	24	18	6	1.0	4.3	9	2.03

注: C_B 为黏粒成分在 $0 \sim 0.08 \text{ mm}$ 占比。

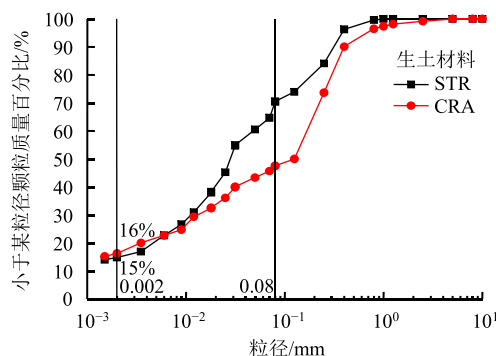


图3 生土颗粒级配曲线

Fig.3 Earth material particle grading curves

2.2 试样制备

作为建筑材料, 生土建造方法多种多样, 如夯土墙、土坯墙等, 但均属于重塑土范畴。本研究采用重塑土方法制备试验用生土试样。将所取土料碾碎过筛, 去除土料中树根、大粒径石块等杂物。依据最优含水率制备土样。由于气态水迁移试验装置是在三轴仪上改造而成, 故其试样尺寸应满足相应要求。为保证制备的生土单元体试样具有较好均匀性, 研制了如图 4 所示的双面压缩仪器: 由上部压缩构件、压缩腔和下部压缩构件三部分组成, 压缩构件包含底座、活塞和弹簧。生土试样目标尺寸为: 直径为 3.5 cm , 高度为 7.0 cm 。依据击实试验得到的最大干密度, 把一定量的待制备土样放在压缩腔里, 将双面压缩仪放置在万能压力机上压缩至目标高度。考虑到试样尺寸太大会导致采用饱和盐溶液

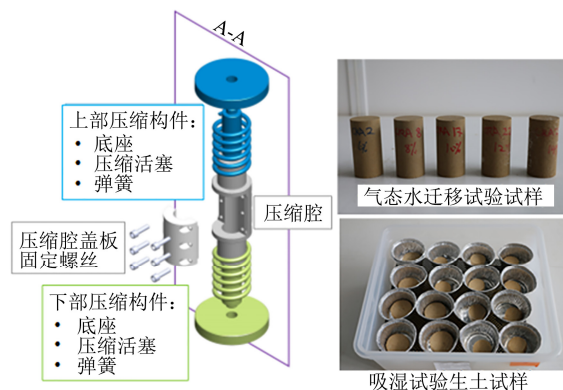


图4 双面压缩仪及制备的生土试样

Fig.4 Double faced compaction mould and the fabricated earth specimens

法的吸湿试验耗时较长, 故将三轴试样沿高度方向分割成高度为 1.0 cm 、直径为 3.5 cm 的小试样用于生土吸湿试验。动态水蒸气吸附技术的吸湿试验采用英国 SMS (Surface Measurement Systems) 公司的 DVS Intrinsic 仪器, 所需试样最大质量为 1 g , 破碎试样后选取满足质量要求的块状生土用于试验。

3 湿度作用下生土持水特性试验及结果分析

3.1 试验装置及方案设计

3.1.1 吸湿试验-饱和盐溶液法

饱和盐溶液法吸湿试验装置如图 5 所示, 主要

由恒温箱、干燥器、饱和盐溶液及温湿传感器组成。采用饱和盐溶液在密闭干燥器营造不同湿度环境。干燥器内部有一个中间带孔的隔板，将被测试生土试样置于隔板上，蒸汽水能够通过隔板小孔均匀地分布于干燥器中，实现生土试样对气态水的吸附。为保证干燥器内部湿度精确性，通过预设温湿传感器进行监控量测。生土吸湿试验依照 EN ISO 12571—2000^[29]采用等温吸湿法，测试步骤如下：将切割成的高度为 1.0 cm、直径为 3.5 cm 的生土试样放于温度 105 °C 烘箱中进行干燥处理，在 24 h 内连续 3 次称量生土试样质量变化小于总质量的 0.1%，即可认为试样完全干燥；本次吸湿试验湿度区间为 11%~97%，如表 2 所示。先将干燥后的生土试样放于湿度为 11% 的 LiCl 饱和盐溶液容器中，每 24 h 称重一次，连续 3 次称量生土试样质量变化差小于

0.1% 时，即可认为试样达到吸湿平衡状态；依次开展湿度 RH 从 11%~97% 的生土等温吸湿试验。

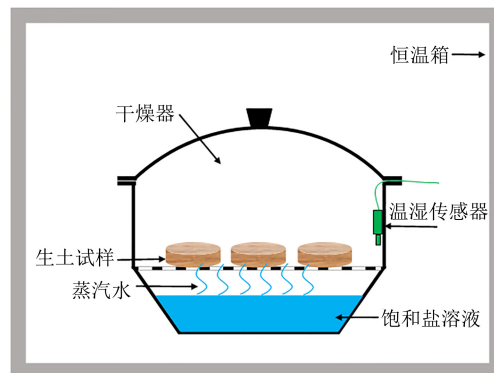


图 5 饱和盐溶液法吸湿试验装置示意图

Fig.5 Schematic diagram of earth sorption test apparatus applying saturated salt solution method

表 2 不同饱和盐溶液及其对应的湿度（以 23 °C 为例）

Table 2 Chemical solutions used for obtaining different relative humidity conditions (23 °C)

饱和盐溶液	氯化锂 LiCl	乙酸钾 KCH ₃ CO ₂	碳酸钾 K ₂ CO ₃	硝酸镁 Mg(NO ₃) ₂	氯化钠 NaCl	氯化钾 KCl	硫酸钾 K ₂ SO ₄
湿度 RH/%	11	23	43	54	75	85	97

3.1.2 吸、放湿试验—动态水蒸气吸附技术

采用英国 SMS 公司的 DVS Intrinsic 动态水蒸气吸附仪开展生土吸、放湿试验。装置示意图见图 6，该装置使用干燥的空气作为载气，借助数字化气体混合控制器调节干燥气体和饱和水蒸气的流量，进而混合产生不同湿度的水蒸气。使用 DVS Intrinsic 测试步骤如下：首先将生土试样置于装置内微量天平上，利用干燥空气对待测试样进行原位干燥；然

后将设定湿度的空气持续通过样品，在周围形成相对湿度稳定的区域，由于生土试样对气态水的吸附而引起质量产生变化；通过超灵敏微量天平监测生土试样重量变化，试样质量变化差小于 0.1% 时，即可认为试样达到吸湿平衡状态。试样体积和质量受限于微量天平量程，本次使用的 DVS Intrinsic 装置天平量程为 1 g，故选取质量为 700~800 mg 的破碎生土试样。试验温度与饱和盐溶液法一致，选定为 23 °C。采用动态水蒸气吸附技术可大大缩短试样达到湿平衡所需时间，借助该方法，本研究针对 STR 和 CRA 两种生土同时开展了吸湿和放湿试验。

3.2 结果分析

等温吸湿曲线能够描述生土材料对气态水的吸附和储存能力。图 7 为通过饱和盐溶液法和动态水蒸气法测得的 CRA 生土等温吸湿平衡曲线。从图中可以看出，生土平衡含水率随外界环境湿度的升高而不断增大，但生土材料在不同相对湿度阶段的含水率（吸湿量）变化特征并不相同。基于吸湿量变化特征，将生土吸湿曲线划分为单层吸附阶段（0%~20%）、多层吸附阶段（20%~85%）和毛细凝聚阶段（85%~97%）。在单层吸附阶段，气态水在范德华力和电场作用下吸附至生土颗粒表面，进而形成连续的单层水分子膜，生土的平衡含水率也在这一较小湿度区间内出现明显提升；随湿度不断

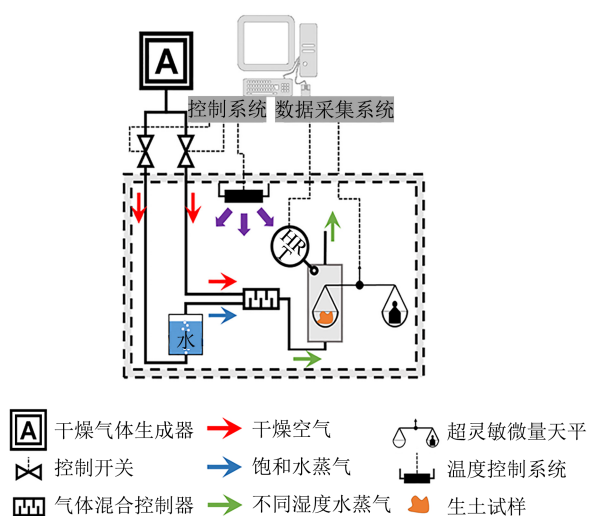


图 6 动态水蒸气吸附仪内部组成示意图

Fig.6 Schematic diagram of dynamic vapor sorption apparatus

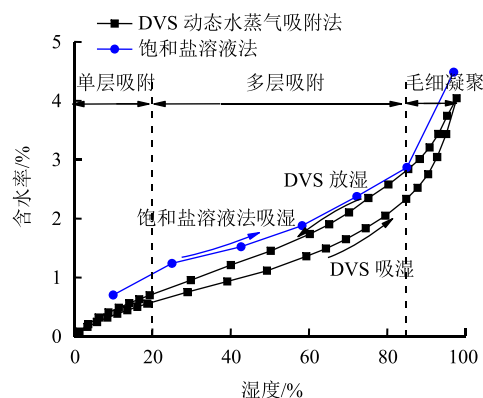


图7 CRA生土等温吸湿曲线(饱和盐溶液法和动态水蒸气吸附法)

Fig.7 Sorption curves of CRA measured through saturated salt solution method and DVS

增大,水分子在生土颗粒表面逐层排列,生土吸湿进入多层吸附阶段,气态水分子与土颗粒之间的距离不断增大,由范德华力和土颗粒电场主导的短程吸附作用也在不断减弱;当湿度继续增大,生土颗粒表面的水分子膜厚度不断增加,形成颗粒间孔隙水弯液面。当弯液面外部湿度(蒸气压)大于孔隙水内部湿度(蒸气压)时,该孔隙将发生毛细凝聚作用。此时生土吸湿能力得到显著提升,平衡含水率增长较快,直至孔隙被水填满。

此外,图7表明:通过饱和盐溶液法测得的平衡吸湿量要高于通过动态水蒸气法测得的结果,即通过两种测试方法得到的等温吸湿曲线之间存在一定偏差。通过分析可知,两种测试方法对试样进行原位干燥的方式不同:饱和盐溶液法采用《土工试验方法标准》(GB/T50123-2019)^[30]中的烘干法(105℃烘箱中干燥24h),而动态水蒸气法则使用干燥空气对待测试样进行原位干燥。烘干法能更有效去除生土中强结合水和部分结晶水,这样会导致采用饱和盐溶液法测得的生土平衡吸湿量较动态水蒸气法偏高。为对两种测试方法得到的试验结果进行合理评价,使用干燥空气对饱和盐溶液法中的生土试样进行干燥处理,并采用下述公式对饱和盐溶液法中的平衡吸湿量进行修正:

$$w_{\text{salt}}^{\text{Corrected}} = \frac{w_{\text{salt}} m_d^{105^\circ\text{C}} - (m_d^{23^\circ\text{C}} - m_d^{105^\circ\text{C}})}{m_d^{23^\circ\text{C}}} \quad (1)$$

式中: $w_{\text{salt}}^{\text{Corrected}}$ 为修正后的饱和盐溶液法生土吸湿量; w_{salt} 为修正前的饱和盐溶液法生土吸湿量; $m_d^{105^\circ\text{C}}$ 为饱和盐溶液法中使用烘干法测得的试样干燥质量; $m_d^{23^\circ\text{C}}$ 为使用干燥空气对饱和盐溶液法中的生土试样进行干燥处理后的质量。

图8为经过修正后的CRA生土等温吸湿曲线。外界湿度较低时,气态水首先在生土颗粒表面发生单层吸附,CRA平衡含水率升至0.6%;随着湿度不断增大,水分子在生土颗粒表面逐层排列,生土吸湿进入多层吸附阶段,平衡含水率也由0.6%相应地增长到2.2%;当生土颗粒间孔隙水弯液面形成时,毛细凝聚成为土体吸附水蒸气最主要的作用力,平衡含水率却由2.2%增大到4.1%,可见生土吸湿能力在该阶段得到显著增强。此外,通过对比动态水蒸气吸附法得到的生土吸湿和放湿曲线,发现二者之间存在差值,即等温吸、放湿过程中的滞后现象。这是由于生土内部孔隙被毛细凝聚生成的水充满,阻塞了气态水向外扩散,造成放湿的滞后现象。从图8可以发现生土在多层吸附阶段滞后值较大,同一湿度下吸湿和放湿平衡含水率可相差0.4%;随着放湿的进行,孔隙水弯液面已基本消失,通过单层吸附作用的这部分水分几乎全被释放至环境中,此时生土吸、放湿滞后值较小。此外,经对比分析可以看出,采用饱和盐溶液法和动态水蒸气吸附法测得的吸湿曲线吻合程度较高。因此,在试验条件允许前提下,可以考虑选择精度更高、耗时更短的动态水蒸气吸附法用于生土等温吸、放湿曲线的测定。

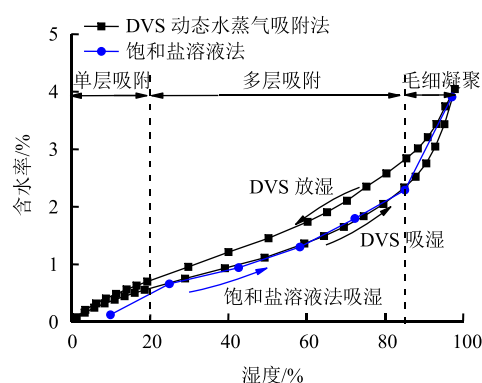


图8 修正后的CRA生土等温吸湿曲线

Fig.8 Sorption curves of CRA earth after corrections

图9为通过两种测试手段得到的STR生土等温吸湿曲线。可以看出,STR呈现出与CRA相似的吸湿特征,即吸湿曲线可划分为单层吸附、多层吸附和毛细凝聚3个阶段。此外,CRA吸湿、放湿过程也出现了由毛细凝聚作用导致的滞后现象,但STR的吸湿性能要小于CRA。当湿度增大至85%,CRA在短程吸附作用(单层吸附和多层吸附)下,平衡含水率达到2.2%,而STR仅为1.3%。分析原因,两种生土黏粒含量区别不大,但通过亚甲蓝试验发现CRA中黏粒活性指数比STR高出一倍。黏

粒活性指数高表征着其较大的比表面积以及较强的表面电荷与水分子之间的相互作用, 导致在同样的外部环境湿度下, CRA 对水蒸气的吸附量要远大于 STR。

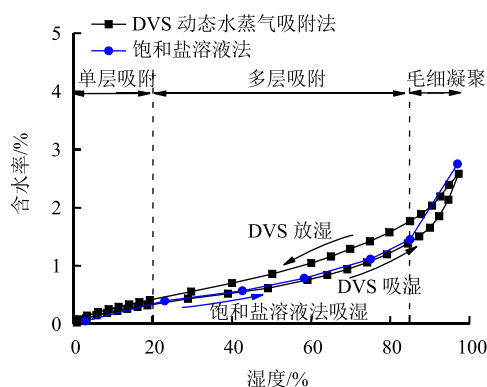


图 9 修正后的 STR 生土等温吸湿曲线

Fig.9 Sorption curves of STR earth after corrections

4 湿度作用下生土内部气态水迁移试验研究

4.1 试验装置

采用的气态水迁移试验装置如图 10 所示, 主要由温控室、压力室、干燥气体供应器、湿度控制仪、温湿传感器、压力传感器、电涡流非接触位移传感器及数据采集系统组成。其中, 温控室用于保证试验在恒定温度 23 °C 下开展。采用法国 SETARAM 仪器公司的 WETSYS 湿度控制仪将干燥气体制备成具有一定湿度的水蒸气, 并连接至压力室底座。将生土试样置于压力室底座, 上覆带排气通道的帽盖, 用橡皮膜裹住生土试样, 并用橡胶环密封试样上部和下部。由湿度控制仪制备的水蒸气流经底座进入试样下部, 其流入时状态(温度, 湿度和水蒸气压力)通过相应传感器测量获取。水

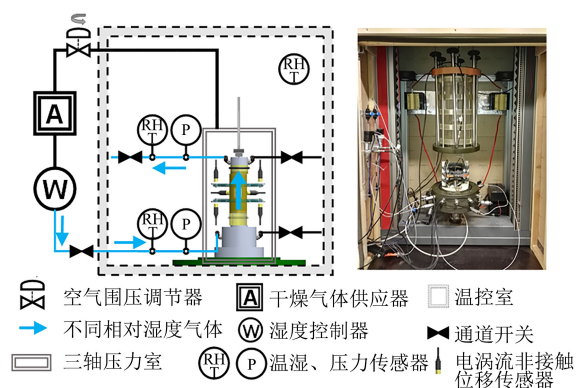


图 10 生土内部气态水迁移试验装置

Fig.10 Apparatus for vapor migration test inside raw earth specimens

蒸气由试样下部迁移至试样上部, 最终经过帽盖排气通道与温控室空气相连, 水蒸气流出时状态同样通过相应传感器实时监测。

为研究气态水迁移引起的生土变形, 研制一套高精度应变测试系统(见图 11), 借助电涡流非接触位移传感器准确测量生土单元体轴向应变和径向应变。将带有金属导体的测量环分别固定在试样 $h/3$ 和 $2h/3$ 位置处, 对应安装 4 个非接触位移传感器探头。当试样发生竖向变形时, 根据下式计算试样中部 $h/3$ 部分轴向应变 ε_{zz} :

$$\varepsilon_{zz} = \frac{3}{h} \left(\frac{\Delta d_{SC3} + \Delta d_{SC4}}{2} - \frac{\Delta d_{SC1} + \Delta d_{SC2}}{2} \right) \quad (2)$$

式中: Δd_{SC1} 至 Δd_{SC4} 分别表示 4 个传感器显示的竖向位移变化绝对值; h 为三轴试样高度 ($h = 7 \text{ cm}$)。

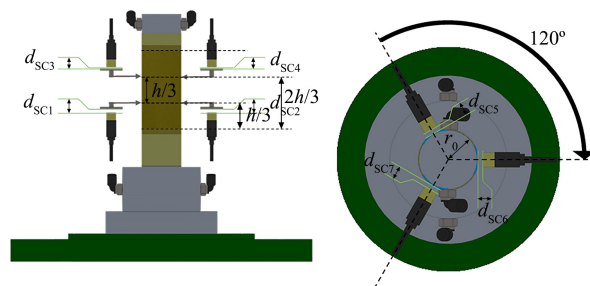


图 11 生土高精度应变测试系统

Fig.11 Deformation measuring system for raw earth specimens with high precision

在试样 $h/2$ 位置处, 环向间隔 120° 安装 3 个径向位移传感器探头, 同时在试样上粘贴铝箔纸作为金属导体。根据下式计算试样中部 $h/2$ 位置处径向应变 ε_{rr} :

$$\varepsilon_{rr} = \frac{1}{r_0} \frac{\Delta d_{SC5} + \Delta d_{SC6} + \Delta d_{SC7}}{3} \quad (3)$$

式中, Δd_{SC5} 至 Δd_{SC7} 分别表示三处径向位移变化绝对值; r_0 为三轴试样半径 ($r_0 = 1.75 \text{ cm}$)。

4.2 试验设计

首先将直径为 3.5 cm、高度为 7.0 cm 的生土试样置于密闭容器中, 用硅胶 (Silica Gel) 进行干燥处理, 处理后相对湿度约等于 3%, 然后将生土试样放置在气态水迁移试验装置上, 整个试验包括两个阶段: 阶段 I 为试样的初始平衡阶段, 采用较低湿度的气体对试样进行平衡处理, 使其获得较稳定初始状态; 阶段 II 称为一定湿度梯度作用下生土内部气态水迁移阶段, 待试样达到初始平衡状态后, 从进气端流入 90% 湿度气体, 由试样下部迁移至试

样上部,实时监测进气端和出气端湿度及压力变化,同时测量气态水迁移引起的试样轴向和径向变形。对 CRA 和 STR 两种生土试样展开气态水迁移试验研究,具体设计参数见表 3。

表 3 CRA 和 STR 气态水迁移试验设计参数
Table 3 Experimental parameters of vapor migration tests for CRA and STR

生土 试样	试验温度 /℃	阶段 I 平 衡湿度/%	阶段 I 平 衡时间/d	阶段 II 湿 度梯度/%	阶段 II 迁 移时间/d
CRA	23	5	8	90	10
STR	23	0	5	90	8

4.3 试验结果与分析

CRA 生土试样底部进气端和顶部出气端的湿度及水气相对压力时程变化如图 12 所示。为区别生土试样的初始平衡阶段和气态水迁移阶段,将前者时间轴定义为负值而气态水迁移阶段时间为正,且在后续分析中均沿用此规定。在整个初始平衡阶段内(共 8 d),试样底部进气端由 WETSYS 湿度控制仪供给连续稳定的 5%湿度气体;而平衡阶段的前两天,即从-8~-6 d,试样顶部出气端周围空气干燥,相对湿度较小,随后出气端湿度略微上升并稳定在 4%左右,直至平衡阶段结束。气态水迁移阶段初始,进气端湿度迅速增至 90%,而出气端湿度的增长表现出明显的滞后现象,即从 0.8 d 后试样出气端湿度才出现增长趋势。这说明气态水自生土试样底部迁移至顶部需要一定时间,并与试样厚度和内部渗透率有关。由图 12(a)可知,出气端湿度增长可以分为第 1~2 d 的快速增长阶段;2~5 d,湿度增长速率逐渐减小,试样出气端湿度继续变化但属于缓慢增长阶段;5 d 以后,CRA 内部的气态水迁移达到平衡状态,出气端湿度稳定在 61%基本没有变化,即进入湿度稳定阶段。出气端湿度变化趋势可结合生土材料持水特性分析:吸湿初期,气态水在范德华力和电场作用下吸附至生土颗粒表面,进而形成连续的单层水分子膜,湿度迅速增长;但当相对湿度增大到一定程度时,水分子在生土颗粒表面逐层排列行成水分子膜,气态水分子与土颗粒之间的距离不断增大,由范德华力和土颗粒电场主导的短程吸附作用也在不断减弱,同时直径较小的毛细管会被水膜阻塞,出气端相对湿度增长缓慢并最终稳定。

图 12(b)为 CRA 试样底部进气端和顶部出气端的水气相对压力时程变化曲线。试样顶部出气端与温控室空气相连,整个迁移试验过程中水气相对

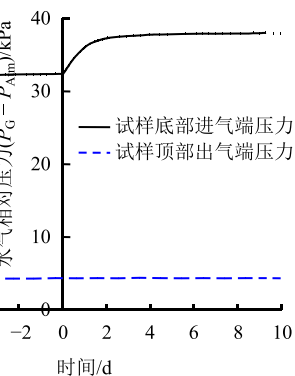
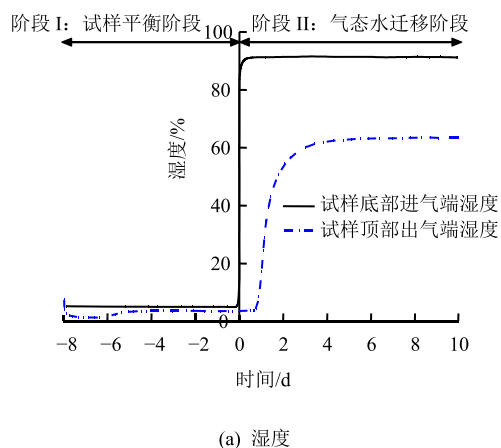


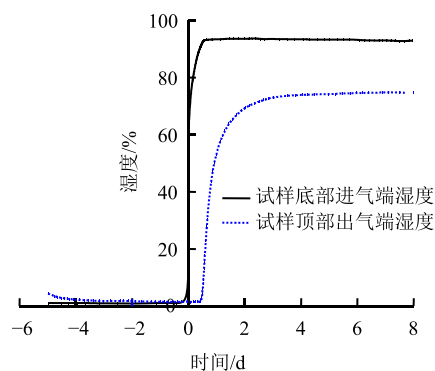
图 12 CRA 生土试样进气端和出气端湿度及水气相对压力时程变化曲线

Fig.12 Relative humidity and gas pressure variation with time at the top and the bottom of STR specimen

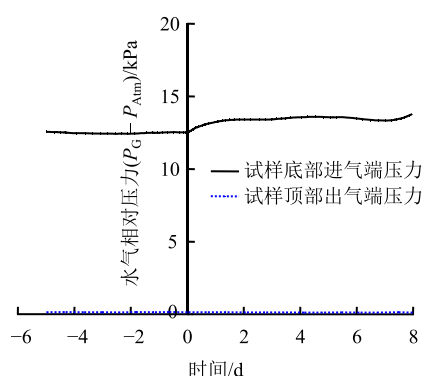
压力(水蒸气压力 P_G 与标准大气压 $P_{A_{tm}}$ 之差)保持不变。试样平衡阶段,进气端水气相对压力为 32 kPa,施加 90%湿度水气后,相对压力增长至 38 kPa。气态水在生土内部迁移可以视为一维气体稳态迁移问题,底部进气端压力取决于产气率和导气系数,湿度控制仪的产气率恒定,试样平衡阶段进气端压力不变;随着相对湿度增大,气态水开始迁移并逐步在生土颗粒表面吸附,生土颗粒间的孔隙水弯液面形成后势必阻塞内部水气迁移,导气系数的增大引起试样底部压力增加。

如图 13 所示,STR 生土试样进气端和出气端湿度及水气相对压力时程变化规律与 CRA 相似,这里不在赘述。需要指出,当 STR 内部气态水迁移达到稳定状态后,出气端湿度值为 72%,进气端水气相对压力为 12.3 kPa,而 CRA 与之相对应数值分别为 61%和 38 kPa。这是因为 STR 试样的导气系数要高于 CRA 试样,所以在相同湿度梯度作用下,STR 出气端湿度要高于 CRA,同时底部进气端水气压力要低于 CRA。两种生土试样导气系数可通过后

续气体渗透性试验得到。



(a) 湿度



(b) 水汽相对压力

图 13 STR 生土试样进气端和出气端湿度及水汽相对压力时程变化曲线

Fig.13 Relative humidity and gas pressure variations with time at the top and the bottom of STR specimen

CRA 试样的变形测量值时程变化曲线如图 14 所示。遵循岩土力学规定, 试样压缩变形为正, 膨胀变形为负。试样下部、上部和中部传感器布设位置如图所示, 且变形测量值分别以 dL 、 dU 和 dR 表示, 其中前两个为轴向变形, 后者为径向变形。试样平衡阶段, 即从 $-8 \sim 0$ d 期间, 轴向变形出现轻微波动, 随即在较短时间内恢复至稳定状态; 而径向变形变化较大且直到 -2 d 才进入稳定状态。进气端施加 90% 湿度气体后, 下部传感器测量值呈现增大趋势, 试样发生明显膨胀变形, 从吸湿变形开始经历大约 2 d, 下部传感器变形测量值 dL 逐步稳定在 $17 \mu\text{m}$, 说明该处进入湿度稳定阶段, 变形进而不再发生变化。伴随气态水迁移, 上部传感器测量值 dU 呈现变形快速增长、变形缓慢增长和变形稳定 3 个阶段, 在第 4 d 时 dU 逐步稳定在 $47 \mu\text{m}$ 。径向变形演化趋势与轴向变形相似, 最终变形量稳定在 $18 \mu\text{m}$ 。气态水迁移效应下生土的膨胀变形可由双电层理论解释: 颗粒级配曲线表明生土中一定

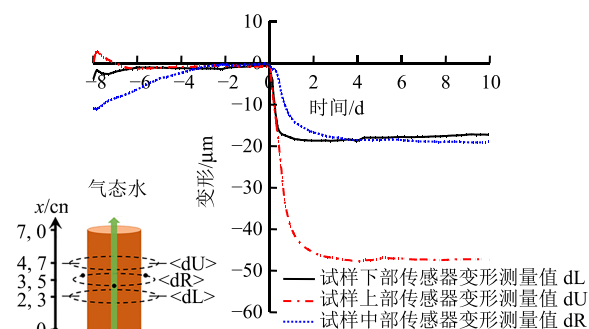


图 14 CRA 生土试样轴向和径向变形时程变化曲线
Fig.14 Variations of axial and radial deformations with time for CRA specimen

黏粒含量的存在, 带负荷的黏土矿物颗粒吸附水化阳离子, 形成扩散形式的离子分布, 从而组成双电层。湿度增大时, 双电层内的离子对生土内运移的水分子产生吸附。被吸附的水分子在电场力作用下按一定取向排列, 在黏土矿物颗粒的周围形成表面结合水。由于结合膜增厚“楔开”土颗粒, 从而使固体颗粒之间的距离增大, 发生膨胀变形。

结合试验装置描述, 上部传感器测量试样 $2h/3$ 范围内变形, 而下部传感器仅测量试样底部 $h/3$ 范围内变形。由此, 图 14 上部传感器变形量 dU 大于下部传感器变形 dL 。通过上、下传感器差值, 并利用式 (2) 计算得到试样轴向应变, 径向应变则由式 (3) 算出, CRA 生土试样轴向和径向应变时程变化曲线如图 15 所示: 两条应变时程变化曲线在急速增长阶段重合程度较高, 伴随气态水迁移进一步发展, 轴向应变超过径向应变稳定在 1.2% 左右, 径向应变稳定值约为 1.0%。如图 16 所示, STR 轴向和径向变形量及应变时程变化规律与 CRA 相似。STR 试样轴向和径向应变曲线吻合程度较高, 最终稳定在 0.9% 左右, 略小于 CRA 试样。Champiré 等^[31]对 STR 和 CRA 两种生土材料进行 X 射线衍射分析 (XRD), 试验结果表明, 两种生土中黏粒组成主

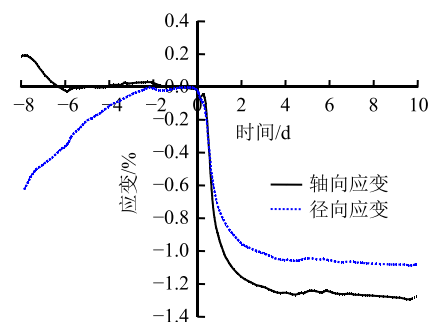


图 15 CRA 生土试样轴向和径向应变时程变化曲线
Fig.15 Variations of axial and radial strains with time for CRA specimen

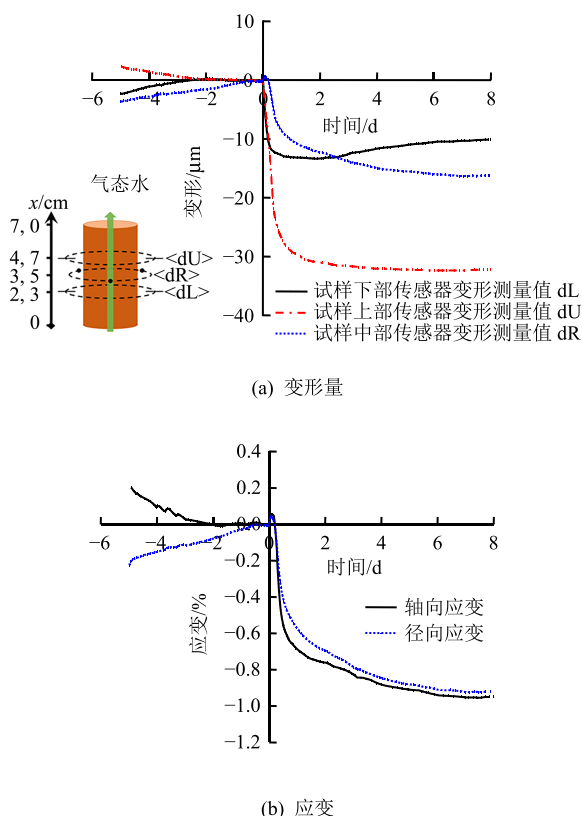


图 16 STR 生土试样轴向和径向变形量及应变时程变化曲线
Fig.16 Variations of axial and radial strains and deformations with time for STR specimen

要以伊利石和高岭石为主, 晶格构造对膨胀变形并无贡献, 这解释了变湿度条件下两种生土产生膨胀应变较小的原因; 而亚甲蓝试验测得 CRA 中黏土颗粒活性指数比 STR 高出一倍, 致使前者稳定后应变值大于后者。

5 结 论

(1) 两种方法测得生土吸湿曲线较为一致, 可分为单层吸附阶段、多层吸附阶段和毛细凝聚阶段, 且在吸湿、放湿过程出现了由毛细凝聚作用导致的滞后现象; 受黏土颗粒活性指数影响, STR 试样的吸湿性能要小于 CRA。

(2) 试样底部进气端施加 90% 湿度水气后, 生土内部发生气态水迁移; 出气端湿度变化存在一定滞后性, 随后经历急速增长、缓慢发展和相对稳定 3 个阶段; 试样底部进气端水气相对压力出现小幅增长。

(3) 气态水迁移达到稳定状态后, STR 试样出气端湿度值为 72%, 进气端水气相对压力为 12.3 kPa, 而 CRA 试样出气端湿度值为 61%, 进气端水气相对压力为 38 kPa, 表明 STR 试样的导气系数要高于 CRA 试样。

(4) 气态水迁移过程中, 生土试样发生膨胀变形并且其演化特征与湿度变化相一致; CRA 轴向和径向应变最终稳定在 1.2% 和 1.0%, STR 试样轴向应变和径向应变曲线重合程度较高, 膨胀应变最终稳定在 0.9%。

参 考 文 献

- [1] 王毅红, 仲继清, 石以霞, 等. 国外生土结构研究综述[J]. 土木工程学报, 2015, 48(6): 81-88.
WANG Yi-hong, ZHONG Ji-qing, SHI Yi-xia, et al. Review of overseas research on raw-soil structure[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(6): 81-88.
- [2] ROODMAN D M, LENSSEN N K, PETERSON J A. A building revolution: how ecology and health concerns are transforming construction[M]. Washington D C: Worldwatch Institute, 1995.
- [3] 王军, 吕东军. 走向生土建筑的未来[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2001, 33(2): 147-149.
WANG Jun, LÜ Dong-jun. To the future of the immature soil building[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2001, 33(2): 147-149.
- [4] 范鹭, 姜立婷, 赵剑峰. 基于历史引导下生土建筑的演变及其生态发展研究[J]. 建筑节能, 2018, 46(4): 91-96.
FAN Lu, JIANG Li-ting, ZHAO Jian-feng. Historical evolution and ecological development of the earth construction[J]. *Journal of Building Energy Efficiency*, 2018, 46(4): 91-96.
- [5] 刘加平. 建筑物理(第四版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
LIU Jia-ping. Architectural physics (4th edition)[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [6] GERARD P, MAHDAD M, MCCORMACK A R, et al. A unified failure criterion for unstabilized rammed earth materials upon varying relative humidity conditions[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 95: 437-447.
- [7] FRANÇOIS B, PALAZON L, GERARD P. Structural behaviour of unstabilized rammed earth constructions submitted to hygroscopic conditions[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 155: 164-175.
- [8] CHAUHAN P, HAJJAR A E, PRIME N, et al. Unsaturated behavior of rammed earth: experimentation towards numerical modelling[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 227: 116646.
- [9] BUI Q B, MOREL J C, HANS S, et al. Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 54: 163-169.
- [10] 闫增峰, 刘加平, 王润山. 生土围护结构的等温吸湿性

- 能的实验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2003, 35(4): 347-349.
- YAN Zeng-feng, LIU Jia-ping, WANG Run-shan. Experimental study of moisture absorption isotherms of adobe building materials[J]. **Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)**, 2003, 35(4): 347-349.
- [11] 尚建丽, 麻向龙, 张磊. 改性生土材料吸放湿性能研究与结构分析[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(12): 3413-3417.
- SHANG Jian-li, MA Xiang-long, ZHANG Lei. Performance of humidity controlling of modified soil materials and structure analysis[J]. **Bulletin of the Chinese Ceramic Society**, 2015, 34(12): 3413-3417.
- [12] 张磊, 杨柳, 桑国臣, 等. 胶凝/生土复合材料的制备及热湿综合性能表征[J]. 复合材料学报, 2018, 35(3): 668-675.
- ZHANG Lei, YANG Liu, SANG Guo-chen, et al. Preparation and characterization of hygrothermal comprehensive property for cementitious agent/soil composites[J]. **Acta Materiae Compositae Sinica**, 2018, 35(3): 668-675.
- [13] CHAMPIRE F, FABBRI A, MOREL J C, et al. Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material[J]. **Construction and Building Materials**, 2016, 110: 70-78.
- [14] FOUCAL F, GOUNY F, MAILLARD P, et al. Experimental evaluation of hydric performances of masonry walls made of earth bricks, geopolymer and wooden frame[J]. **Building and Environment**, 2015, 87: 234-243.
- [15] SAIDI M, CHERIF A S, ZEGHMATI B, et al. Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks[J]. **Construction and Building Materials**, 2018, 167: 566-577.
- [16] FABBRI A, MCGREGOR F, COSTA I, et al. Effect of temperature on the sorption curves of earthen materials[J]. **Materials and Structures**, 2017, 50(6): 253.
- [17] 李明玉, 孙文静. 黏土掺入生物炭后的持水特性及其影响机制[J]. 岩土力学, 2019, 40(12): 4722-4730.
- LI Ming-yu, SUN Wen-jing. Water retention behaviour of biochar-amended clay and its influencing mechanism[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(12): 4722-4730.
- [18] 陈勇, 苏剑, 谈云志, 等. 循环脱吸湿与加卸载耦合作用下土体持水性能试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 2907-2913.
- CHEN Yong, SU Jian, TAN Yun-zhi, et al. Water retention capacities of soils under the coupling actions of cyclic drying-wetting and repeated loading-unloading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(8): 2907-2913.
- [19] 杨志浩, 岳祖润, 冯怀平. 非饱和粉土路基内水分迁移规律试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 2241-2251.
- YANG Zhi-hao, YUE Zu-run, FENG Huai-ping. Experimental study on moisture migration properties in unsaturated silty subgrade[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(7): 2241-2251.
- [20] 牛丽思, 张爱军, 王毓国, 等. 高易溶盐非饱和伊犁原状黄土的临界状态特性[J]. 岩土力学, 2020, 41(8): 2647-2658.
- NIU Li-si, ZHANG Ai-jun, WANG Yu-guo, et al. Critical state characteristics of high soluble salt unsaturated undisturbed Ili loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(8): 2647-2658.
- [21] ZHU T, CHEN J, HUANG D, et al. A DEM-based approach for modeling the damage of rock under freeze-thaw cycles[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02465-4>.
- [22] ALLINSON D, HALL M. Hygrothermal analysis of a stabilised rammed earth test building in the UK[J]. **Energy and Buildings**, 2010, 42(6): 845-852.
- [23] ZHANG L, SANG G C, HAN W X. Effect of hygrothermal behaviour of earth brick on indoor environment in a desert climate[J]. **Sustainable Cities and Society**, 2020, 55: 210-219.
- [24] CHABRIAC P A, FABBRI A, MOREL J C, et al. A procedure to measure the in-situ hygrothermal behavior of earth walls[J]. **Materials**, 2014, 7(4): 3002-3020.
- [25] SOUDANI L, WOLOSZYŃ M, FABBRI A, et al. Energy evaluation of rammed earth walls using long term in-situ measurements[J]. **Solar Energy**, 2017, 141: 70-80.
- [26] XU L F, WONG H, FABBRI A, et al. Modelling the poroplastic damageable behaviour of earthen materials[J]. **Materials and Structures**, 2018, 51(4): 112.1-112.15.
- [27] XU L F, WONG K K, FABBRI A, et al. Loading-unloading shear behavior of rammed earth upon varying clay content and relative humidity conditions[J]. **Soils and Foundations**, 2018, 58: 1001-1015.
- [28] XU L F, WONG H, FABBRI A, et al. A unified compaction curve for raw earth material based on both static and dynamic compaction tests[J]. **Materials and Structures**, 2021, 54(5): 1-16.
- [29] European Committee for Standardization. EN ISO 12571—2000: Hygrothermal performance of building materials and products-determination of hygroscopic sorption properties[S]. Brussels: European[s. n.], 2000.
- [30] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T 50123—2019 Standard for geotechnical testing method[S]. Beijing, China Planning Press, 2019.
- [31] CHAMPIRÉ F, FABBRI A, MOREL J, et al. Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material[J]. **Construction and Building Materials**, 2016, 110: 70-78.