余云燕,崔文豪,丁小刚,等.增湿减湿作用下红层泥岩填料水盐迁移及变形机制[J].地震工程学报,2027,49(1):51-60.DOI:10.20000/j.1000-0844.20240705003

Yu Yunyan, Cui Wenhao, Ding Xiaogang, et al. Water-salt migration and deformation mechanism of red mudstone filler under humidification and dehumidification[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2027, 49(1): 51-60. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20240705003

增湿减湿作用下红层泥岩填料水盐迁移及变形机制

余云燕[1], 崔文豪[1,2], 丁小刚[1], 郭秋月[1], 石意博[1]

(1. 兰州交通大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730070;
2. 中国铁路北京局集团有限公司北京工电大修段,北京 100071)

摘要:红层泥岩填料的胀缩特性是造成路基失稳、沉陷上拱等病害现象的主要原因。为研究兰州地区盐渍化红层泥岩填料的水盐迁移及变形机制,对红层泥岩填料土柱开展增湿减湿下的水盐迁移试验和核磁共振试验。研究结果表明:(1)在土柱顶部进行增湿的工况下,土柱顶部水分逐渐增大,水分和盐分向下迁移,盐分在土柱中部聚集,受盐胀和黏土矿物吸水膨胀的相互影响产生膨胀现象;(2)在土柱顶部进行减湿的工况下,土柱顶部水分逐渐减少,水分和盐分向上迁移,盐分在土柱顶部和中部聚集,受黏土矿物失水收缩、盐分析出相变结晶的影响产生收缩现象;(3)在增湿过程中,试样大孔隙结构被破坏压实并向中、小孔隙转化,总孔隙结构呈增大状态;而在减湿过程中,试样各孔隙结构失水收缩,总孔隙结构呈减小压实状态。

关键词:红层泥岩填料;增湿减湿;胀缩特性;水盐迁移;核磁共振试验

中图分类号:TU445 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2027)01-0051-10

DOI:10.20000/j.1000-0844.20240705003

Water-salt migration and deformation mechanism of red mudstone filler under humidification and dehumidification

Yu Yunyan[1], Cui Wenhao[1,2], Ding Xiaogang[1], Guo Qiuyue[1], Shi Yibo[1]

(*1.School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;*
2.Beijing Track and Electrical Overhauling Section, China Railway Beijing Group Co., Ltd., Beijing 100071, China)

Abstract: The swelling-shrinkage behavior of red mudstone filler is a primary cause of subgrade instability, differential settlement, and heaving. To investigate the mechanisms of water-salt migration and deformation in salinized red mudstone filler in the Lanzhou area, a series of water-salt migration and nuclear magnetic resonance tests were conducted on soil columns under top humidification and top dehumidification conditions. The results indicate the following: (1) Under top humidification, water

收稿日期:2024-07-05

基金项目:甘肃省科技计划(23JRRA854,21YF5GA050);甘肃省教育厅产业支撑计划项目(2021CYZC-28)

第一作者简介:余云燕(1968-),女,教授,博士生导师,主要从事岩土与地下工程方面的研究。E-mail: yuyunyan@mail.lzjtu.cn。

and dissolved salt predominantly migrate downward, with salt accumulation in the middle section of the column. This accumulation, together with salt crystallization and clay mineral water absorption, contributes to swelling deformation. (2) Under top dehumidification, water and dissolved salt mainly migrate upward, resulting in salt accumulation in the top and middle sections. Meanwhile, clay mineral dehydration and salt precipitation-induced crystallization cause shrinkage deformation. (3) During humidification, macropores are gradually compressed and transformed into mesopores and micropores, while the total pore volume increases. During dehumidification, pores of all sizes shrink due to moisture loss, reducing the total pore volume and forming a denser structure.

Keywords: red mudstone filler; humidification and dehumidification; swelling-shrinkage characteristics; water-salt migration; nuclear magnetic resonance test

0 引言

红层泥岩广泛分布在我国各个地区,在工程建设时通常作为路基填料使用。因其易吸水膨胀软化、失水收缩变脆的特性,常产生路基失稳、沉陷上拱等病害[1-2]。目前,普遍认为红层泥岩填料的胀缩特性是由于其黏土矿物成分吸水膨胀、失水收缩导致[3]。甘肃兰州地区红层泥岩受地质环境影响,岩土体内部富含大量的Cl^-、SO_4^{2-}等易溶盐成分,从而形成内陆型盐渍土[4]。在干湿循环的作用下,土体中的水分和盐分不仅会发生迁移,而且会与土体中的黏土矿物和易溶盐成分发生反应产生胀缩变化。因此,兰州地区红层泥岩具有盐渍土和膨胀土的双重特征。

盐渍土是一种内部富含易溶盐组分的特殊土体,当温度、湿度、风速、降雨和地下水位等外部因素以及初始含盐率、含水率、干密度等内部因素发生变化时,盐分会随着水分产生迁移,造成土体盐分的集聚或损失,进而改变土体的变形与力学特性[5-6]。目前,国内外学者针对盐渍土水、盐迁移开展了大量研究:张留俊等[7]建立了降水入渗条件下土体水分与盐分迁移的关联关系,确定入渗影响深度,揭示降水入渗后水土体系中水、盐分在土柱内的分布规律;文献[8-9]针对河西地区盐渍土,分别开展单向冻结与冻融循环作用下的水盐迁移室内试验;Zhang等[10]综合考虑含水率、含盐量、温度及地下水补给条件,开展多组室内蒸发试验,探究盐渍土热-水-盐耦合迁移演化过程;肖泽岸等[11]依托模型试验,分析冻融、蒸发、太阳辐射及降雨工况下土体水盐迁移演化规律;吕擎峰等[12]分别对原状压实盐渍土、石灰-粉煤灰-水玻璃固化硫酸盐渍土开展土柱毛细上升试验,阐明在全开放边界下的土体水盐迁移发育特征。现有成果证实,冻融循环、毛细作用、温度波动、降雨入渗等作用均会诱发盐渍土内部水盐重分布,然而针对含盐具“微膨胀”特性红层泥岩的水盐迁移机理及变形耦合机制,相关研究仍较为匮乏。

红层泥岩是水敏性、崩解性极强的特殊岩体,含水率变化对其强度与变形特性影响显著。现阶段针对红层泥岩填料的研究多聚焦于强度、变形相关特性,在探讨其膨胀机制时均未考虑盐分的影响[13-15]。兰州地区红层泥岩形成于干旱半干旱气候环境,近年来该地区气候暖湿化,年降雨量持续增加,在降雨、干旱交替作用下,红层泥岩填料路堤更易发生工程病害。因此,有必要围绕降雨、蒸发工况,开展干湿循环作用下红层泥岩填料水盐迁移分布特征及变形机制研究。

鉴于此,本文以兰州含盐红层泥岩填料为研究对象,开展干湿循环条件下水盐迁移室内试验;借助水分、温度、位移传感器及数据采集系统实时监测试样内部温度、含水率、位移动态变化规律;试验完成后采用烘干法与电导率法测定填料含水率、含盐率的空间分布;并利用核磁共振试验对比分析干湿循环前后填料孔隙结构演化特征,为揭示盐渍化红层泥岩填料路基病害机理、制定病害防控措施提供理论依据。

1 试验概括

1.1 试验物理指标、矿物成分和含盐率

试验土样取自甘肃省兰州市永登县树屏镇,将取回的风化红层泥岩破碎,并进行室内土工试验,其物理指标列于表1。对红层泥岩填料进行XRD表征分析和易溶盐试验,结果列于表2~3。由表可知,兰州地区红层泥岩填料主要矿物成分为伊利石

和高岭石等黏土矿物，未含蒙脱石。土体中富含 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+}，依据《盐渍土地区建筑技术规范(GB/T 50942—2014)》[16]判定该土属于中硫酸盐渍土，与西南、中南地区的红层泥岩明显不同[17]。

表 1　红层泥岩填料物理指标

Table 1　Physical properties of red mudstone filler

相对密度	最大干密度/(g/cm³)	最优含水率/%	塑限/%	液限/%	天然含水率/%	自由膨胀率/%
2.68	1.89	15.9	14.19	34.91	8.8	38.5

表 2　红层泥岩填料矿物成分及含量

Table 2　Mineral composition and content of red mudstone filler

矿物成分	高岭石	伊利石	钠长石	石英石	碳酸钙	石膏
含量	11.6%	40%	5.7%	22.2%	13.5%	7.0%

表 3　红层泥岩填料易溶盐含量

Table 3　Soluble salt content of red mudstone filler

成分含量/(mmol/kg)							易溶盐总量/%
CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$Na^+ + K^+$	
2.00	2.00	6.24	26.8	36.54	10.96	308.24	1.241

1.2　增湿减湿试验介绍

1.2.1　测试系统

本试验装置由 TMS9018 型环境箱、外置增湿试验装置及数据采集系统构成。其中，环境箱包含保温箱体、控温顶板、控温底板与配套冷浴设备，有效控温区间为 −75～60 ℃，如图 1(a)所示；外置增湿装置由雾化加湿器、输气管道及湿度传感器组成，见图 1(b)；数据采集系统包含 5TE 水盐传感器(电导率精度 0.01 dS/m)、EC5 水分传感器(精度 1%)、热敏温度传感器(精度 ±0.01 ℃)与位移传感器(精度 ±0.01 mm)。热敏温度传感器、位移传感器及 5TE 水盐传感器接入 CR1000 采集仪，采集间隔 10 min；EC5 水分传感器接入 EM50 采集仪，记录间隔 1 min。各类传感器与采集仪实物如图 1 中(c)～(g)所示。

1.2.2　试验方案

采用静压法于有机玻璃模具内分层制样，每层压实厚度 3 cm，制备 2 根直径 15 cm、高度 27 cm、含水率 15.9%、压实度 90% 的土柱试样，见图 2(a)；土柱初始温度 16 ℃，分别开展单向增湿、单向减湿试验，干湿作用仅作用于土柱顶面。增湿阶段设定环境温度与土柱底部温度均为 20 ℃，开启外置增湿装置模拟降雨工况，将环境箱内相对湿度维持在 95% 以上。高湿环境下水雾在土体表面凝结，水分沿土柱自上而下入渗增湿；减湿阶段设定环境箱温度 45 ℃(依据近年兰州地表温度实测数据确定)、土柱底部温度 20 ℃，土柱侧壁包裹保温棉以隔绝侧壁热交换。在温度梯度驱动下，土体水分自下向上蒸发脱湿。增湿、减湿试验时长均为 120 h，试验现场见图 2(b)。



(a) TMS 9018 环境箱　(b) 外置增湿装置　(c) 5 TE 传感器　(d) 温度传感器　(e) CR 1000 采集仪　(f) EC 5 传感器　(g) EM 50 采集仪

图 1　试验设备图

Fig. 1　Test equipment

1.2.3　试验方法

EC5 水分传感器采用预埋方式，分层布设至距土柱底面 4.5 cm、9 cm、13.5 cm、18 cm、22 cm 处的土体中间位置处；热敏温度传感器分别布设至距土柱底面 2.5 cm、5 cm、7.5 cm、10 cm、12.5 cm、15 cm、17.5 cm、20 cm、22.5 cm、25 cm 的土柱侧壁；位移传感器安装于土柱顶端镂空盖板上方，用以监测试样顶部竖向变形。EC5 水分传感器、热敏温度传感器与模具衔接位置采用玻璃胶密封，避免水分渗漏。

1.2.4　数据监测

试验过程中，数据采集系统实时监测试样内部温度、体积含水率、位移的动态变化。试验完成后采用烘干法测定土柱不同高度处的质量含水率，见图 2(d)；另取烘干土样 20 g，加入 100 g 蒸馏水，按 1∶5 土水比制备土悬液，玻璃棒充分搅拌振荡至盐分完全溶解，将 5TE 传感器置于量筒内悬液中测定电导率，结合 5TE 标定函数换算得到土柱不同高度的总含盐量，见图 2(c)。



(a) 静压制样 (b) 增湿减湿试验 (c) 测含盐率 (d) 测质量含水率

图 2 制样、安装与测试图

Fig. 2 Specimen preparation, installation, and testing

1.3 传感器标定

1.3.1 EC5水分传感器标定

为探究EC5水分传感器电导率与含水率的相关性,采用静压法制备干密度1.7 g/cm³的红层泥岩填料圆柱土柱,通过顶部注水方式对试样开展增湿试验[18]。增湿阶段同步监测试样电导率,并在传感器周边取土,采用烘干法测定对应实时质量含水率;电导率与质量含水率的拟合关系列于式(1),相关系数设为0.98。

$$Y_1 = 3.924\,3 \times 10^{-5} X_1^2 - 0.023\,22 X_1 + 9.105\,4 \quad (1)$$

式中:X_1为电导率(dS/m);Y_1为质量含水率(%)。

1.3.2 5TE传感器标定

为探究5TE传感器电导率与含盐量的对应关系,先对土样脱盐并烘干;依次取20 g脱盐干土、不同掺量无水硫酸钠及100 g温水置于量筒内,玻璃棒充分搅拌至盐分完全溶解;将两支5TE传感器探头分别浸入土水混合液测定电导率,标定曲线如图3所示。

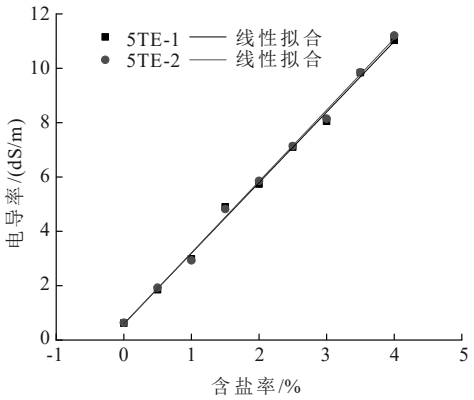


图 3 5TE传感器电导率-含盐率标定曲线

Fig. 3 Calibration curve of electrical conductivity-salt content for the 5TE sensor

由图3可得5TE-1和5TE-2传感器的电导率和含盐率的拟合结果如式(2)~(3):

$$Y_2 = 2.60X_2 + 0.60, \quad R^2 = 0.997 \quad (2)$$

$$Y_3 = 2.62X_3 + 0.58, \quad R^2 = 0.997 \quad (3)$$

式中:X_2、X_3均为含盐率(%);Y_2、Y_3均为电导率(dS/m)。

2 减湿过程试验结果分析

2.1 减湿作用下传热结果分析

减湿工况下试验土柱不同高度的温度时程曲线见图4。由图4可知,土柱内部温度随时间变化分为三个阶段:第Ⅰ阶段升温阶段,0~4 h土柱各测点温度快速攀升;第Ⅱ阶段过渡阶段,4~24 h各测点温度缓慢抬升;第Ⅲ阶段稳定阶段,24~120 h土柱各处温度基本保持恒定。温度场稳定后,土柱顶部温度最高,中部次之,底部温度最低。

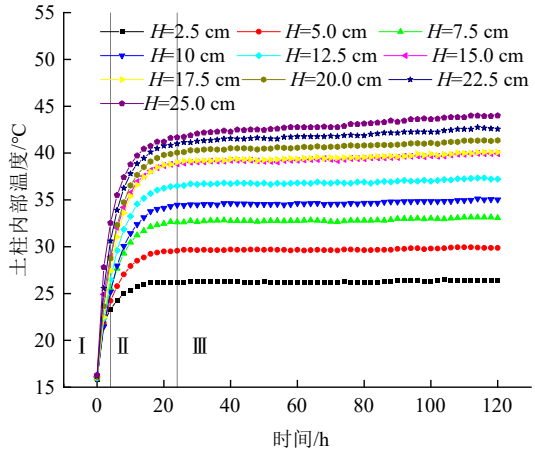


图 4 减湿作用下土柱不同高度的温度时程曲线

Fig. 4 Temperature time-history curves at different heights of the soil column under dehumidification

图5为减湿工况下土柱不同高度的温度分布规律。由图5可知,加热4 h后土柱内部温度明显升高,沿土体纵向形成自上而下递减的温度梯度;随试验时长增加,土柱整体温度持续缓慢上升,温度梯度逐步扩大。试验历时120 h后,土柱底面以上2.5 cm处测点温度由初始16 ℃升至26.42 ℃,土柱顶部25 cm处测点温度升至44 ℃,土柱内部形成显著竖向温差。

2.2 减湿作用下水分迁移结果分析

图6为减湿工况下土柱不同高度处体积含水率时程曲线。由图6可知,试验初期土体处于初始稳定状态,体积含水率基本保持恒定;减湿120 h后,土柱各高度位置的体积含水率均出现不同程度降低,且不同高程处含水率的变化趋势与变化幅度存在明显差异。其中,H=22.5 cm处体积含水率呈现

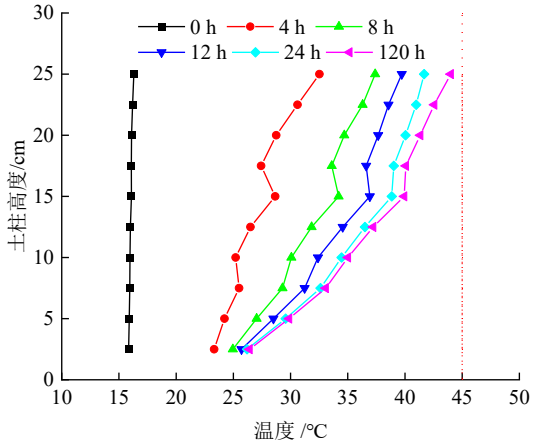


图 5　减湿作用下土柱不同高度的温度分布规律

Fig. 5　Temperature distribution at different heights of the soil column under dehumidification

两阶段变化特征，前期快速下降、后期缓慢衰减；H=18 cm 处体积含水率呈线性缓慢下降趋势；H=13.5 cm 处体积含水率先升高后降低；H=9 cm 处体积含水率表现为先缓慢上升、后缓慢下降的变化规律；H=4.5 cm 处体积含水率整体无明显波动。

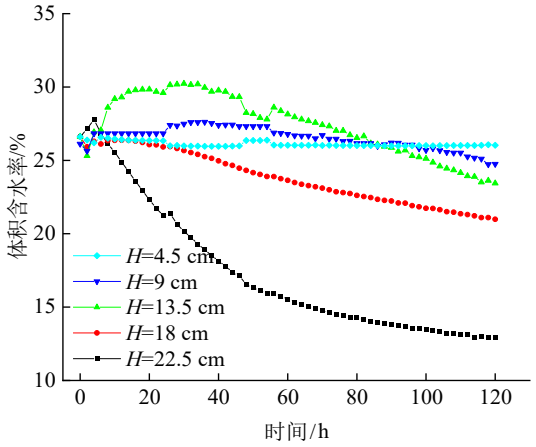


图 6　减湿作用下土柱不同高度的体积含水率时程曲线

Fig. 6　Volumetric water content time-history curves at different heights of the soil column under dehumidification

减湿作用历时 120 h 后，沿土柱竖向不同高度开展取样工作，通过烘干法测试得到土柱各高程位置的质量含水率分布特征，如图 7 所示。

由图 7 可知，土样含水率随距土柱顶部距离增大而升高，近顶部土体含水率最低，近底部土体含水率更接近初始含水率(15.65%)。以土柱高程 H=18 cm 为分界点，18 cm 以上区域为蒸发区，土体质量含水率均低于 12.35%；18 cm 以下区域为湿润区，土体质量含水率介于 12.35%～15.65%。

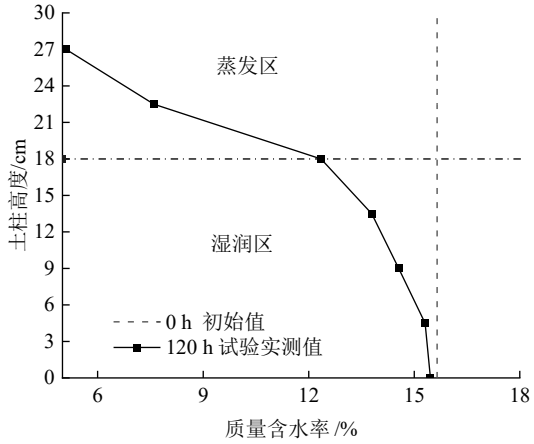


图 7　减湿作用下土柱不同高度的质量含水率分布规律

Fig. 7　Mass water content distribution at different heights of the soil column under dehumidification

结合图 6～7 分析可得：蒸汽压梯度驱动蒸发区土体水分快速散失，且土层埋深越大，蒸发效应越微弱，使得 22.5 cm、18 cm 高程处体积含水率呈现差异化下降规律。减湿前期，湿润区土体在毛细作用与温度梯度的共同驱动下，水分持续向蒸发区迁移，致使 13.5 cm、9 cm 处体积含水率先升高后降低；而 4.5 cm 处土层埋深较大，土体重力作用显著、毛细作用较弱，因此体积含水率无明显变化。

2.3　减湿作用下土柱盐分迁移结果分析

图 8 为减湿工况下土柱不同高程含盐量分布特征。由图 8 可知，减湿 120 h 后土柱竖向含盐量分布与初始状态差异显著，盐分主要富集于土柱顶部及 H=18 cm 位置。减湿过程中，毛细作用与温度梯度驱动土体下部水盐向上迁移；在蒸汽压梯度作用下，土柱顶部水分快速蒸发，盐分随之滞留富集，含盐量升高，因试样初始含盐量较低，未出现盐析结晶。蒸汽压梯度影响深度有限，22 cm 以上区域水盐大量向顶面运移，致使 H=22 cm 处含盐量最低、H=18 cm 处含盐量最高。该试验结果与 Zhang 等[10]的研究结论吻合。

2.4　减湿作用下收缩变形结果分析

图 9 为减湿工况下土柱收缩变形时程曲线。由图 9 可知，减湿全过程的土柱收缩变形近似线性持续增长，试验历时 120 h 后总收缩量为 1.027 mm，土体收缩尚未趋于稳定。结合试验后质量含水率分布规律分析，土柱仍具备进一步收缩变形的潜力。

盐渍化红层泥岩填料减湿阶段的轴向变形受

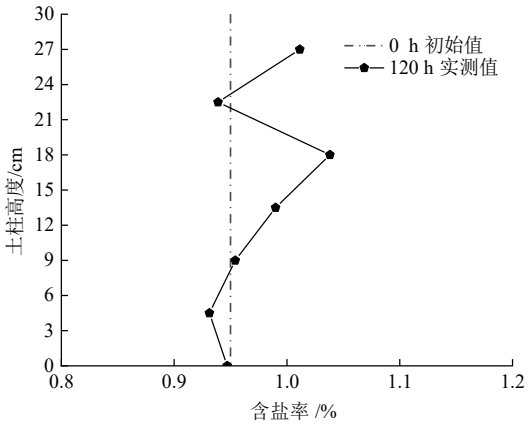


图 8 减湿作用下土柱不同高度的含盐率分布规律

Fig. 8 Salt content distribution at different heights of the soil column under dehumidification

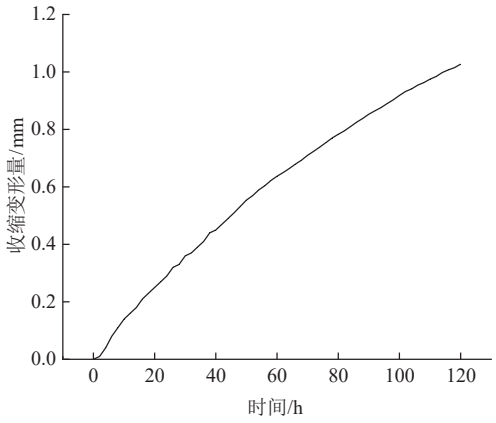


图 9 减湿作用下土柱的收缩变形时程曲线

Fig. 9 Shrinkage deformation time-history curves of the soil column under dehumidification

多因素耦合作用。环境箱升温促使土体孔隙自由水蒸发为水蒸气逸出；毛细负压与表面张力提升，土颗粒排列更为致密，孔隙尺寸逐步缩减；蒸发持续进行时，黏土矿物表面吸附水膜不断减薄，基质吸力持续升高，土颗粒在吸力作用下相互靠拢，宏观表现为土体收缩。与此同时，升温会促使土体盐分析出并发生结晶相变，对试样收缩产生抑制效果。综上，盐渍化红层泥岩填料收缩变形机理复杂，相关作用机制仍需进一步深入探究[19-20]。

3 增湿过程试验结果分析

3.1 增湿作用下土柱水分迁移结果分析

图 10 为增湿作用下，不同土柱高度的体积含水率时程曲线。由图 10 可知，试验开始前的土体为初始状态，体积含水率保持不变；增湿 120 h 后土柱的体积含水率均有不同程度的增长，但不同高度的体积含水率变化曲线和幅度均不相同。H=22.5 cm 和 H=18 cm 处的体积含水率呈三阶段发展，前期体积含水率快速增长，中期缓慢增长，后期稳定不变；H=13.5 cm 和 H=9 cm 处的体积含水率呈缓慢上升趋势；H=4.5 cm 处的体积含水率变化幅度很小。

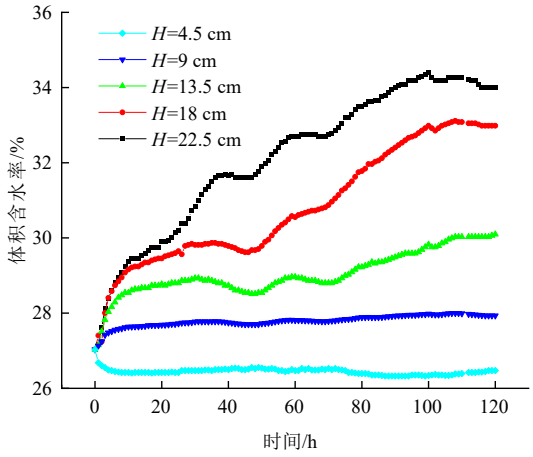


图 10 增湿作用下土柱不同高度的体积含水率时程曲线

Fig. 10 Volumetric water content time-history curves at different heights of the soil column under humidification

增湿工况历时 120 h 后，沿土柱竖向不同高度取样，通过烘干法测得各高程质量含水率分布特征，见图 11。相较于初始含水率，增湿 120 h 后土柱质量含水率随高程升高逐步增大；靠近土柱底部区域含水率更接近初始含水率(15.65%)。以 H=4.5 cm 为分界，4.5 cm 以上为增湿区，土体质量含水率介于 15.92%～21.75%；4.5 cm 以下为未增湿区，土体质量含水率低于 15.92%。

结合图 10～11 分析可知：增湿工况下，水分子吸附于土颗粒表面，在毛细压力与重力耦合作用下形成毛细水、孔隙水填充土体孔隙，土柱顶部体积含水率快速上升；水分持续入渗后土体含水率升高，基质吸力逐步衰减，含水率增长速率放缓；土体趋近饱和后含水率基本稳定，因此 H=22.5 cm、H=18 cm 处体积含水率呈现三阶段变化特征。顶部含水率升高后，水分在渗流力与重力作用下逐步向土体中下部运移，使 H=13.5 cm、H=9 cm 处体积含水率缓慢增大；红层泥岩填料渗透系数偏低，且 H=4.5 cm 测点埋深较大，该处体积含水率无显著变化。

3.2 增湿作用下土柱水分迁移结果分析

图 12 为增湿工况下土柱不同高程含盐量分布

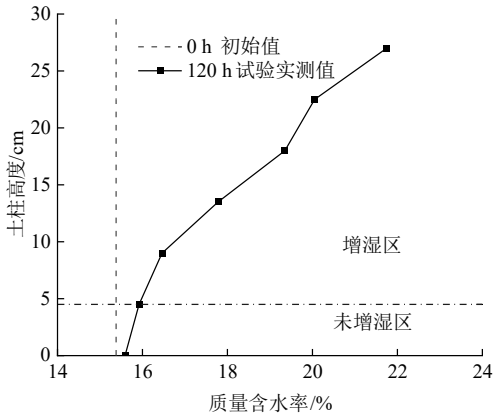


图 11　增湿作用下土柱不同高度的质量含水率分布规律

Fig. 11　Mass water content distribution at different heights of the soil column under humidification

规律。由图 12 可知，增湿 120 h 后土柱竖向含盐量较初始状态变化显著。盐分随水分向下运移，土柱顶部含盐量随高程降低逐渐增大，土柱下部含盐量随高程降低逐步减小，在土柱中部 9～18 cm 区间形成盐分富集区，该处含盐量最高。由此表明，增湿过程中盐分迁移与水分迁移密切相关，土体盐分运移呈现盐随水动的典型规律。

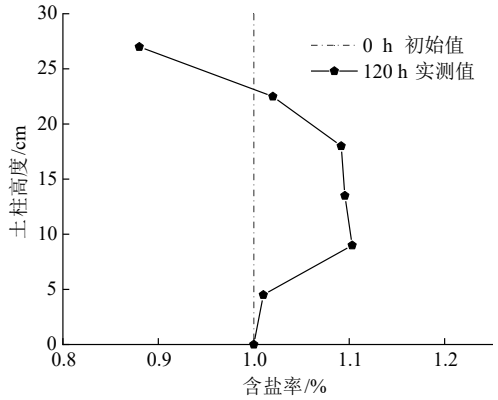


图 12　增湿作用下土柱不同高度的含盐率分布规律

Fig. 12　Salt content distribution at different heights of the soil column under humidification

3.3　增湿作用下膨胀变形结果分析

图 13 为增湿工况下土柱膨胀变形时程曲线。由图 13 可知，增湿过程中土柱膨胀变形主要分为快速增长与减速增长两个阶段；增湿 120 h 后，红层泥岩填料总膨胀量为 1.74 mm，膨胀变形尚未趋于稳定。结合试验后质量含水率分布特征可知，土柱膨胀潜势未完全释放。

盐渍化红层泥岩填料增湿过程的轴向变形受

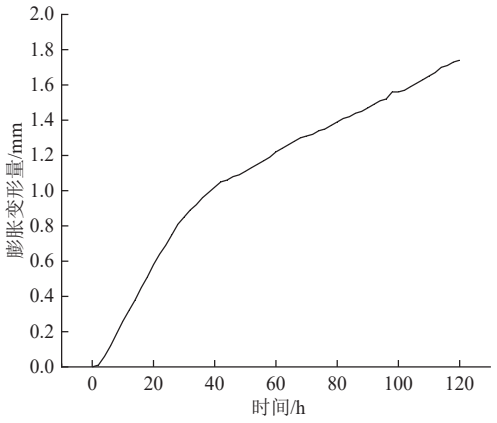


图 13　增湿作用下土柱的膨胀变形时程曲线

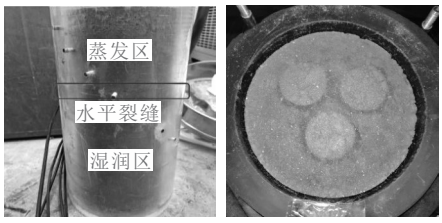
Fig. 13　Swelling deformation time-history curves of the soil column under humidification

多因素耦合控制。随着水分持续入渗，土体内部伊利石等黏土矿物吸水发生晶格膨胀；同时水分与土中 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 发生化学反应，生成 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$，进一步增大土体体积。在渗透作用与毛细效应的持续驱动下，水、盐组分不断向土柱中部富集，诱发持续的吸湿膨胀与盐胀效应。

4　增湿减湿作用下宏微观变化规律

4.1　增湿减湿作用下宏观现象分析

蒸发减湿 120 h 后，土柱顶面与侧壁收缩形态见图 14。土柱蒸发区与湿润区分界处产生水平裂缝；蒸发区土体脱水程度高、含水率降幅明显，土体呈浅红色，土颗粒排列紧密；湿润区土体含水率变化微弱，土样保持湿润，呈深红色。试样整体含盐量偏低，试验过程中无盐析结晶产生。



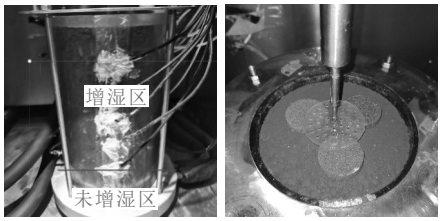
(a) 土柱侧面　　(b) 土柱顶面

图 14　减湿作用后土柱的侧面和顶面

Fig. 14　Side and top views of the soil column after dehumidification

雾化增湿 120 h 后，土柱侧壁与顶面膨胀形态见图 15。土柱可划分为增湿区与未增湿区，土体颜色随高程升高逐渐加深，对应含水率逐步增大。土体受浸水膨胀作用影响，土颗粒相互团聚并形成大

孔隙结构，整体呈现上部土体疏松、下部土体密实的特征。



(a) 土柱侧面 (b) 土柱顶面

图 15 增湿作用后土柱的侧面和顶面

Fig. 15 Side and top views of the soil column after humidification

4.2 核磁共振试验

4.2.1 试验方案

为探究干湿循环作用下的红层泥岩填料孔隙结构演化规律，取干密度 1.7 g/cm^3、初始含水率 15.9% 的环刀试样开展增湿、脱湿处理，脱湿目标为干燥状态，增湿目标为饱和状态，试样初始条件与干湿处理过程均与土柱水盐迁移试验保持一致。红层泥岩胀缩特性显著，脱湿试样采用冷冻干燥法处理，增湿试样采用酒精饱和法制备[21]；所有试样外侧缠绕聚四氟乙烯密封胶带后，进行核磁共振测试，试验流程如图 16 所示。

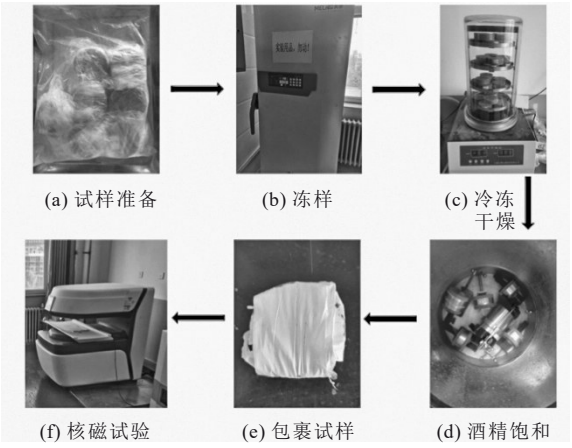


图 16 核磁试验流程图

Fig. 16 Flowchart of the nuclear magnetic resonance test

4.2.2 孔隙结构变化规律

对经增湿、脱湿处理后的试样进行核磁共振测试，得到干湿作用下红层泥岩填料的 T_2 分布曲线，如图 17 所示。由图可知，增湿、脱湿前后填料 T_2 曲线均呈现双峰特征，存在两处显著波峰；试样增湿至饱和状态时，两处波峰信号幅值分别提升 1.55%、0.28%；脱湿至干燥状态时，两处波峰信号幅值分别降低 19.61%、5.97%。第一波峰对应微小孔隙内结合水含量，第二波峰对应中、大孔隙内自由水含量。试验结果表明：增湿阶段土体结合水与自由水含量同步升高，孔隙整体发育；减湿阶段微小孔隙内结合水流失更为明显，土体孔隙被压缩、结构趋于致密。

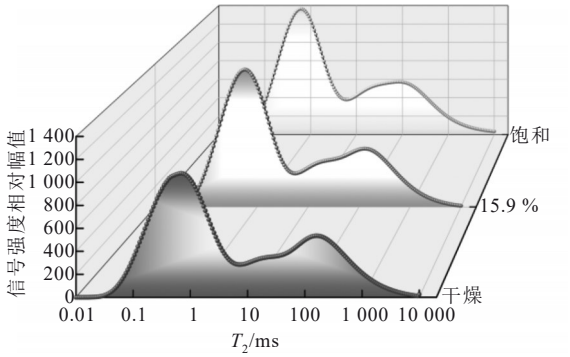


图 17 增湿减湿作用下红层泥岩填料 T_2 分布曲线

Fig. 17 T_2 distribution curves of red mudstone filler under humidification and dehumidification

T_2 分布曲线能够表征土体孔隙分布特征，曲线峰面积与对应孔径的孔隙体积成正比。结合土体渗透特性及波峰对应区间，将孔隙划分为微小孔、中孔与大孔，划分标准为：微小孔（T_2<6 ms）、中孔（6 ms≤T_2<63 ms）和大孔（63 ms≤T_2）[22]。在干湿作用下，各类孔隙面积统计结果列于表 4。由表可知，试样增湿至饱和状态时，微小孔、中孔、大孔及总孔隙面积变化幅度依次为+2.49%、+13.68%、−2.43%、+3.05%；脱湿至干燥状态时，微小孔、中孔、大孔及总孔隙面积分别降低 13.06%、22.69%、2.41%、11.98%。

表 4 增湿减湿作用下试样的孔隙面积

Table 4 Pore area of specimens under humidification and dehumidification

含水率/%	微小孔隙面积/μm^2	中孔隙面积/μm^2	大孔隙面积/μm^2	总孔隙面积/μm^2
0(干燥)	46 087.48	10 625.19	20 829.87	77 542.54
15.9	53 012.01	13 743.11	21 345.15	88 100.27
饱和	54 332.85	15 622.85	20 827.38	90 783.38

综上所述，增湿工况下土体大孔隙结构受压致密并向中小孔隙转化，整体孔隙发育程度提升，总孔隙体积增大；减湿工况下土体各级孔隙随水分散失同步收缩压实，整体孔隙结构趋于致密。该干湿

作用下的孔隙演化规律，可有效解释盐渍化红层泥岩填料的胀缩变形机制。

5　结论

（1）减湿工况下，土柱内部温度随时间呈三阶段演化特征，最终形成自上而下递减的竖向温度梯度。在温度梯度、蒸汽压梯度与毛细力耦合作用下，土体水分向上运移，土柱顶部含水率显著降低，盐分主要向土柱顶部与中部富集。

（2）顶部雾化增湿条件下，水分在重力与渗流作用下由土柱顶部向下迁移，使土柱上部及中部土体含水率明显升高，盐分随之在土体中部聚集，形成局部高含盐区。

（3）减湿过程中，黏土矿物脱水收缩主导土体变形，而盐分析晶相变可一定程度抑制土体收缩；该过程微小孔隙结合水流失最为显著，土体总孔隙面积降幅达 11.98%，孔隙结构整体压实致密。土柱收缩变形随时间近似线性增长，120 h 总收缩量为 1.027 mm，变形尚未达到稳定状态。

（4）增湿过程中，黏土矿物吸水膨胀、易溶盐组分发生水化盐胀效应，土体原有大孔隙结构破碎重构并向中小孔隙转化，总孔隙面积增幅为 3.05%。土柱膨胀变形呈快速增长-减速增长两阶段特征，120 h 总膨胀量为 1.74 mm，膨胀潜势未完全释放。

参考文献（References）

[1] 赵明华，刘晓明，苏永华. 含崩解软岩红层材料路用工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报，2005，27(6)：667-671.
Zhao Minghua，Liu Xiaoming，Su Yonghua. Experimental studies on engineering properties of red bed material containing slaking rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2005，27(6)：667-671.

[2] Zhang S，Xu Q，Hu Z M. Effects of rainwater softening on red mudstone of deep-seated landslide，Southwest China[J]. Engineering Geology，2016，204：1-13.

[3] 李佳敏，马丽娜，张戎令，等. 含水率及干密度对高铁泥岩地基土无荷膨胀率的影响[J]. 水资源与水工程学报，2019，30(6)：230-234.
Li Jiamin，Ma Lina，Zhang Rongling，et al. Influence of water content and dry density on free swell ratio of high speed railway mudstone foundation soil[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering，2019，30(6)：230-234.

[4] 包得祥，余云燕，杨克诚. 兰州地区含盐红层泥岩土水特征曲线研究[J]. 兰州交通大学学报，2019，38(5)：25-34.
Bao Dexiang，Yu Yunyan，Yang Kecheng. Study on soil-water characteristic curve of salt-bearing red bed mudstone in Lanzhou area[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University，2019，38(5)：25-34.

[5] Han Y，Wang Q，Wang N，et al. Effect of freeze-thaw cycles on shear strength of saline soil[J]. Cold Regions Science and Technology，2018，154：42-53.

[6] 张彧，邹美思，徐安花，等. 温度对盐渍土抗剪强度和变形特性的影响[J]. 中国公路学报，2020，33(5)：66-78.
Zhang Yu，Zou Meisi，Xu Anhua，et al. Effect of temperature on shear strength and deformation characteristics of saline soil[J]. China Journal of Highway and Transport，2020，33(5)：66-78.

[7] 张留俊，裘友强，张发如，等. 降水入渗条件下氯盐渍土水盐迁移规律[J]. 交通运输工程学报，2023，23(4)：116-127.
Zhang Liujun，Qiu Youqiang，Zhang Faru，et al. Water-salt migration rules in chlorine saline soil under precipitation infiltration[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering，2023，23(4)：116-127.

[8] Luo C L，Yu Y Y，Zhang J，et al. Thermal-water-salt coupling process of unsaturated saline soil under unidirectional freezing[J]. Journal of Mountain Science，2023，20(2)：557-569.

[9] 余云燕，罗崇亮，崔文豪，等. 冻融循环下盐渍土热-质传递及盐冻胀机理[J]. 西南交通大学学报，2025，60(5)：1090-1097，1120.
Yu Yunyan，Luo Chongliang，Cui Wenhao，et al. Heat-mass transfer and salt-frost heave mechanism of saline soil under freeze-thaw cycle[J]. Journal of Southwest Jiaotong University，2025，60(5)：1090-1097，1120.

[10] Zhang X D，Ye P，Wu Y J，et al. Experimental study on simultaneous heat-water-salt migration of bare soil subjected to evaporation[J]. Journal of Hydrology，2022，609：a127710.

[11] 肖泽岸，赖远明. 冻融和干湿循环下盐渍土水盐迁移规律研究[J]. 岩石力学与工程学报，2018，37(增刊1)：3738-3746.
Xiao Zean，Lai Yuanming. Study on water and salt migration law of saline soil under freeze-thaw and dry-wet cycle[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2018，37(S1)：3738-3746.

[12] 吕擎峰，常承睿，马博，等. 固化硫酸盐渍土水盐迁移的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2018，37(增刊2)：4290-4296.
Lü Qingfeng，Chang Chengrui，Ma Bo，et al. Experimental study on water and salt migration of solidified sulphate saline soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2018，37(S2)：4290-4296.

[13] 胡文静，丁瑜，夏振尧，等. 重庆地区红层泥岩侧限膨胀性能试验研究[J]. 防灾减灾工程学报，2015，35(5)：607-611.
Hu Wenjing，Ding Yu，Xia Zhenyao，et al. Experimental study on confined swelling characteristic of redbed mudstone in Chongqing[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering，2015，35(5)：607-611.

[14] 马丽娜. 高速铁路路基低黏土矿物泥岩膨胀机理及影响研究

[D]. 兰州：兰州交通大学，2016:1-16.
Ma Lina. Research on low clay mineral mudstone expansion mechanism and influence for high-speed railway subgrade[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2016:1-16

[15] Dai Z J, Guo J H, Yu F, et al. Long-term uplift of high-speed railway subgrade caused by swelling effect of red-bed mudstone: case study in Southwest China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(6): 4855-4869.

[16] GB/T 50942—2014 盐渍土地区建筑技术规范[S].
GB/T 50942—2014 Technical code for building in saline soil regions[S].

[17] 许强，唐然. 红层及其地质灾害研究[J]. 岩石力学与工程学报，2023，42(1)：28-50.
Xu Qiang, Tang Ran. Study on red beds and its geological hazards[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(1): 28-50.

[18] 余云燕，丁小刚，马丽娜，等. 微膨胀泥岩地基原位水分入渗响应特征试验研究[J]. 岩土力学，2024，45(3)：647-658.
Yu Yunyan, Ding Xiaogang, Ma Lina, et al. Experimental study on in-situ water infiltration response characteristics of slightly-expansive mudstone foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(3): 647-658.

[19] 唐朝生，崔玉军，Anh-Minh Tang，等. 土体干燥过程中的体积收缩变形特征[J]. 岩土工程学报，2011，33(8)：1271-1279.
Tang Chaosheng, Cui Yujun, Tang A M, et al. Volumetric shrinkage characteristics of soil during drying[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(8): 1271-1279.

[20] 张沛然，黄雪峰，杨校辉，等. 盐渍土水-热场耦合效应与盐胀变形试验[J]. 岩土力学，2018，39(5)：1619-1624.
Zhang Peiran, Huang Xuefeng, Yang Xiaohui, et al. Experiment on coupling effect of water and thermal field and salt-expansion deformation of salty soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(5): 1619-1624.

[21] 杨赫，程卫民，刘震，等. 注水煤体有效渗流通道结构分形特征核磁共振试验研究[J]. 岩土力学，2020，41(4)：1279-1286.
Yang He, Cheng Weimin, Liu Zhen, et al. Fractal characteristics of effective seepage channel structure of water infusion coal based on NMR experiment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(4): 1279-1286.

[22] 闫小庆，房营光，张平. 膨润土对土体微观孔隙结构特征影响的试验研究[J]. 岩土工程学报，2011，33(8)：1302-1307.
Yan Xiaoqing, Fang Yingguang, Zhang Ping. Experiment study on the effects of bentonite on the micropore structure characteristics of soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(8): 1302-1307.

（本文编辑：任 栋）

（上接第 50 页）

Han Linhai. Concrete-filled steel tubular structure: theory and practice[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007.

[20] 周绪红，刘界鹏. 钢管约束混凝土柱的性能与设计[M]. 北京：科学出版社，2010.
Zhou Xuhong, Liu Jiepeng. Performance and design of concrete columns confined by steel tubes[M]. Beijing: Science Press, 2010.

[21] 欧智菁，曹磊，林上顺，等. 装配式方钢管约束混凝土桥墩恢复力模型研究[J]. 应用力学学报，2024，41(3)：612-620.
Ou Zhijing, Cao Lei, Lin Shangshun, et al. Calculation method of restoring force model of prefabricated concrete piers confined by square steel tubes[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2024, 41(3): 612-620.

[22] 欧智菁，颜建煌，俞杰，等. 装配式圆钢管约束混凝土桥墩抗震试验及计算方法研究[J]. 土木工程学报，2023，56(1)：77-89.
Ou Zhijing, Yan Jianhuang, Yu Jie, et al. Seismic test and calculation method for concrete bridge piers confined by fabricated circular steel tubes[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(1): 77-89.

[23] 林上顺，黄卿维，陈宝春，等. 跨海大桥U-RC组合桥墩设计[J]. 交通运输工程学报，2017，17(4)：55-65.
Lin Shangshun, Huang Qingwei, Chen Baochun, et al. Design of U-RC composite pier of sea-crossing bridge [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(4): 55-65.

（本文编辑：任 栋）