

温-湿耦合环境下黄土遗址水分迁移规律 试验和数值模拟研究

周 恒^{1,4}, 狄圣杰^{1,4}, 黄 鹏^{1,4}, 李嘉伟², 刘奉银^{3,4}, 穆青翼²

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065;

2. 西安交通大学 土木工程系, 陕西 西安 710049;

3. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048;

4. 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘 要: 干缩开裂是黄土遗址保护所面临的重要难题。遗址挖掘并暴露于自然或人工环境后, 在温-湿耦合作用下造成土体失水, 产生吸力驱动的收缩变形, 进而导致开裂破坏。因此, 研究温-湿耦合环境下黄土遗址水分迁移规律对防治其开裂破坏具有重要意义。采用瞬态剖面法开展土柱蒸发试验, 测试并比较不同干密度的非饱和黄土水力特性参数: 持水特征曲线和渗透系数曲线。进一步地, 基于所测试黄土水力特性参数和现场的监测数据, 采用非饱和土渗流软件模拟一年内兵马俑遗址一号俑坑在温-湿耦合环境下的含水率和吸力分布规律。研究结果表明: 空气湿度对遗址内吸力的影响比温度更大, 且较高的空气湿度有利于抑制吸力的增大; 低温有利于抑制吸力的增大; 温度与空气湿度都无法抑制遗址的失水。本研究对黄土遗址防治干缩开裂灾害提供了有益探索, 具有重要参考价值。

关键词: 黄土遗址; 水分迁移; 温-湿耦合; 土柱试验; 数值模拟

中图分类号: TU411.91

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2022)05-0083-07

Experimental and Numerical Simulation of Water Transport in Loess Sites Under Coupled Temperature-humidity Environment

ZHOU Heng^{1,4}, DI Shengjie^{1,4}, HUANG Peng^{1,4}, LI Jiawei², LIU Fengyin^{3,4}, MU Qingyi²

(1. PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China;

3. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

4. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: There are a large number of loess sites in northwest China, and cracking is an important problem for the protection of loess sites. Cracking of loess sites is mainly caused by shrinkage deformation of loess, which is due to water loss under the coupling of temperature and humidity after excavation and exposure to natural or artificial environment. Therefore, it is of great significance to find the rules of moisture transfer in the coupled temperature-humidity environment to protect the loess site from cracking. Soil column evaporation experiments are carried out to test and compare the soil-water characteristic curves and permeability coefficient curves of unsaturated loess with different dry densities. Furthermore, based on the unsaturated soil seepage software (Geostudio) and the hydraulic characteristics of the tested unsaturated loess, the volumetric water content and matric suction distribution of the No. 1 pit of the Terracotta

收稿日期: 2022-07-01

修稿日期: 2022-07-24

基金项目: 陕西省创新能力支撑计划项目(2020KJXX-099); 国家自然科学基金项目(52079109); 国家自然科学基金青年基金项目(51909205); 中国博士后科学基金面上项目(2018M631166); 中国博士后科学基金特别资助项目(2019T120914)

作者简介: 周 恒(1970—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事水利水电及岩土工程方面的设计及科研工作。E-mail: 124897195@qq.com

Army Site under the coupled temperature-humidity environment within one year are simulated. The results are as follows. The effects of air humidity on matric suction of soil sites are greater than that of temperature, and higher air humidity is beneficial to inhibit the increase of matric suction. Low temperature is beneficial to inhibit the increase of matric suction. Neither temperature nor air humidity can inhibit the water loss of the soil site. This study could provide beneficial exploration for the prevention and control of cracking disaster with drying shrinkage in loess site and has important reference value.

Keywords: soil ruins; water migration; temperature-humidity coupling; soil column test; numerical simulation

土遗址是指人类历史上以土作为建筑材料所留下的关于生产、活动等遗迹^[1]。在我国的黄河和长江流域留存着大量的土遗址,这些土遗址是我国几千年历史的重要载体,可以反映特定历史时期社会的经济、技术和文化发展水平,具有极高的研究价值^[2-3]。然而,土遗址由于自身材料属性并且多暴露于开放的大气环境中,在自然因素下极易受到多种因素损害,例如:冻融、盐蚀、干缩开裂等^[2-3]。

以中国西北黄土地区为例,在干旱、半干旱的气候下,干缩开裂是本地区土遗址面临的主要灾害问题。干缩开裂的物理机制是土体在失水过程中吸力变化引起的张拉应力超过了土体本身的抗拉强度,从而造成开裂。土遗址内含水率的变化直接关系到土遗址是否会开裂,所以研究土遗址中水分的分布规律极其重要。张悦等^[3]结合持水特征曲线研究了含盐土遗址开裂的机理及影响因素。崔凯等^[4]等研究了毛细作用对干旱区土遗址底部掏蚀区发生盐渍劣化效应的作用机理,并提出了相应的理论模型。谌文武等^[5]研究了融雪与降雨对含盐土遗址劣化机理,结果表明降雨易使水盐富集造成结构破坏,而融雪促进了盐分分散,有利于土遗址结构恢复。土柱试验是研究土壤中水分迁移机理的重要试验,但是,目前相关的土柱试验研究主要集中于各类原状土研究,且主要应用于降雨导致的滑坡、土壤的湿陷性等方面。Ng 等^[6]通过土柱试验研究了表面应力对土壤渗透性的影响。Liu 等^[7]通过土柱试验研究了降雨对边坡失稳的影响。综上所述,目前尚缺乏采用土柱试验对压实土在温-湿耦合作用下土体水分迁移规律的研究。

针对温-湿耦合作用下黄土遗址中水分迁移规律研究,本文首先开展了土柱蒸发试验,测试不同密度下非饱和黄土水力学特性,即持水特征曲线和非饱和渗透系数。其次,基于室内测试的水力学参数和现场的监测数据,采用非饱和土渗流分析软件对兵马俑遗址一号俑坑在温-湿耦合环境下的含水率和吸力分布规律进行模拟分析。

1 试验概况

1.1 试验材料与试样制备

本试验所用黄土取自西安某基坑,在地表之下 5 m 进行取样。按照《土工试验标准》^[8](GB/T 50123—2019),对黄土进行基本物性指标测试,结果如表 1 所示。将所取黄土和文献^[9]中兵马俑夯土基本物性参数进行对比,两者基本一致。

表 1 试验黄土基本参数

参数	原状土样	兵马俑夯土 ^[9]
比重	2.69	2.70
塑限/%	17.9	17.9
液限/%	31.0	28.5
塑性指数	13.1	10.6
砂粒百分比/(% (>0.075 mm))	36.97	35.50
粉粒百分比/(% (0.075 mm~0.005 mm))	55.55	51.80
黏粒百分比/(% (<0.005 mm))	7.48	12.70

为制备目标条件下的压实黄土,将所取黄土在 105℃ 下烘干 24 h 并过 2 mm 标准筛。随后采用自来水与过筛后的黄土均匀混合并设置质量含水率为 13.2%。最后,将所配制黄土在塑料袋中密封放置 48 h,以保证水分均匀分布。此外,根据周莉莉等^[9]和穆青翼等^[10]研究,本文采用干密度 1.50 g/cm³ 和 1.35 g/cm³ 分别作为兵马俑夯土和现场原状黄土的代表值进行室内压实土柱试样的制备。

1.2 试验仪器与步骤

本文基于瞬态剖面法,采用如图 1 所示的土柱装置进行非饱和黄土持水特征曲线和渗透系数的测试。该装置主要包括 5 部分:试验土柱,吸力量测系统,含水率量测系统,供水系统以及数据采集监测系统。其中,土柱高 100 cm,试验过程土柱高度为 20 cm、40 cm、60 cm 和 80 cm 剖面的吸力和含水率变化分别采用 4 个微型张力计和 4 个时域反射探头进行量测。另一方面,供水系统主要采用马氏瓶提供恒定水头。

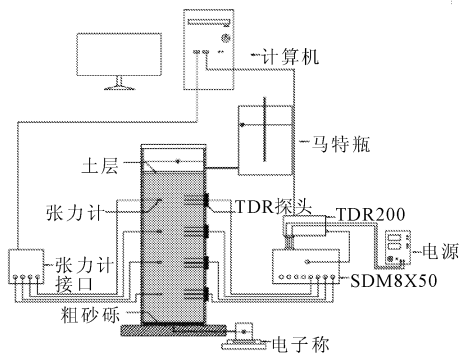


图1 试验仪器示意图

本试验主要包括3个步骤:试样分层击实、土柱饱和与水分蒸发。针对试样分层击实,采用每层5 cm,分两次击实的方法保证制备土柱内黄土密度的均匀,此外,采用层间土壤表面刮毛的方法,避免出现击实分层现象。针对土柱饱和,采用马氏瓶进行恒定水头下的试样入渗饱和,同时根据TDR探头读数和土柱底端渗流量对土柱内黄土的饱和情况进行监测。针对水分蒸发,当土柱内黄土饱和后,在20℃和40%相对湿度的恒定条件下进行蒸发试验。在蒸发试验过程中,每隔4 h通过数据采集监测系统对土柱的含水率和吸力进行测试和记录,当土体吸力接近张力计量程测试极限时,停止试验。

2 测试原理

2.1 持水特征曲线

持水特征曲线表示吸力和含水率之间的关系,是反映土体持水能力的基本参数。不同密实度的压实黄土在饱和后,进行自然状态下的蒸发。土柱蒸发过程中,通过将相同高度处张力计和时域反射探头的测试结果进行组合,获得土柱内压实黄土蒸发段的持水特征曲线。随后采用式(1)所示 van Genuchten 模型^[11]进行拟合,获得本试验持水特征曲线的模型参数:

$$\theta_w = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \times \frac{1}{[1 + (\alpha\varphi)^n]^{1-\frac{1}{n}}} \quad (1)$$

式中: θ_w 表示体积含水率; θ_r 表示残余体积含水率; θ_s 表示饱和体积含水率; φ 表示吸力; α 与 n 为拟合参数。

2.2 渗透系数方程

渗透系数方程表示非饱和土渗透系数与吸力的关系,反映了非饱和土渗透性的大小。本文基于土柱蒸发过程中所测试的吸力和含水量随时间变化的剖面数据,采用瞬态剖面法计算非饱和黄土的渗透系

数方程。

首先确定渗流介质的总水头,其由位置水头、压力水头和速度水头组成,其中速度水头相对于位置水头和压力水头可以忽略不计,所以总水头表达式可写为:

$$h_w = h_g + \frac{u_w}{\rho_w g} \quad (2)$$

式中: h_w 表示总水头; h_g 表示位置水头; u_w 表示张力计所测得的孔隙水压力; ρ_w 表示水的密度; g 表示重力加速度。

随后由张力计读数可以得到土柱的总水头剖面图。在某一时间试样内某一点的水力梯度等于该点处水头剖面的坡度,表达式为:

$$i_w = \frac{dh_w}{dz} \quad (3)$$

在某一时间,测点和土柱底端测点之间的总水量 V_w 可由测得的体积含水率剖面计算得到,其表达式为:

$$V_w = \int_b^a \theta_w(z) A dz \quad (4)$$

式中: θ_w 表示该时间体积含水率和深度的函数关系; A 为土柱的横截面积; a 表示测点位置; b 表示底端测点位置。

试样内某一测点的流速 v_w 等于相应时间间隔内该测点与底端测点间总水量的变化率,表达式为:

$$v_w = \frac{dV_w}{Adt} \quad (5)$$

非饱和土的渗透系数 k_w 为渗流速度与水力梯度的比值,表达式为:

$$k_w = - \frac{v_w}{i_w} \quad (6)$$

由瞬态剖面法计算得到的渗透系数与张力计测得的吸力,可以建立非饱和土渗透系数曲线。本文采用 Gardner 模型^[12]拟合表示 k_w - θ_w 关系,表达式为:

$$k_w = a\theta_w^b \quad (7)$$

式中: a, b 均为拟合系数。

2.3 数值模拟原理

2.3.1 模型建立及材料参数

本文建立的模型如图2所示,土遗址横隔梁间的距离取3.0 m,横隔梁的高宽均为2.2 m,在边角处设置长高皆为0.2 m的斜坡,俑坑地面与地下水表面的高差为10.0 m。假设俑坑内3.0 m深以上为夯土,密度均匀分布,3.0 m以下为原状土,密度也均匀分布。土壤的持水特征曲线及非饱和土渗透系数曲线皆取自土柱试验数据的拟合曲线。在模型

顶部设置如图所示的温度和湿度边界条件,温度和湿度为兵马俑博物馆内一年间的变化情况^[13],数据如图 3 所示。在两端设置零流量边界条件。底端设置地下水作为初始水位。在博物馆建成之前,因为遗址表面会受到降雨等的影响,在土壤表面通过模拟降雨增加表面的初始含水率。图 2 中,点 1~点 6 为用于数值分析的取值点。

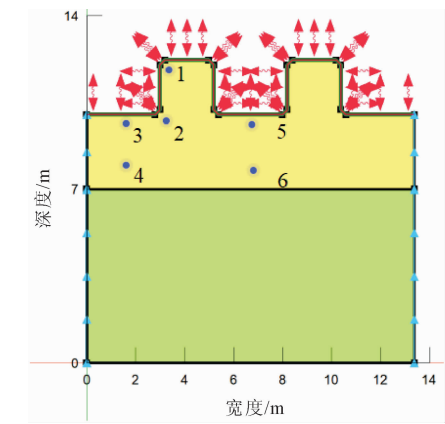


图 2 兵马俑坑几何模型

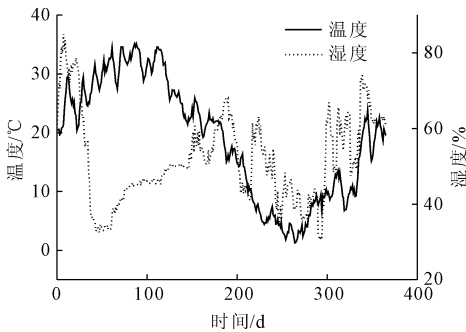


图 3 兵马俑博物馆内空气温度和湿度变化图

2.3.2 土体渗流微分方程

非饱和土的二维渗流微分方程的表达式为:

∂/∂x (k_x ∂H/∂x) + ∂/∂y (k_y ∂H/∂y) + Q = ∂θ/∂t (8)

式中: H 表示总水头; k_x 、 k_y 分别表示水平与竖直两个方向的渗透系数; Q 表示边界流量; θ 表示为体积含水率; t 表示时间。

考虑温度的影响,上述控制方程修改为:

∂/∂x (k_x ∂H/∂x) + ∂/∂y (k_y ∂H/∂y) - (0.35ηP_v RH(B-A) / (ηA + Γ)) = m_w r_w ∂H/∂t (9)

其中: η 表示湿度常数; P_v 表示土壤水分蒸汽压力; Γ 表示饱和蒸气压和温度关系的斜率; A 表示地表相对湿度的倒数; B 表示空气相对湿度的倒数; m_w

表示储水曲线的斜率; r_w 表示水的重度; RH 表示空气相对湿度。

3 试验结果与分析

3.1 土柱蒸发过程中体积含水率和吸力变化规律

图 4(a)和图 4(b)分别为一号和二号土柱蒸发过程中体积含水率随时间的变化图。其中,一号土柱的干密度为 1.35 g/cm³,二号土柱干密度为 1.50 g/cm³。从图 4(a)可以看出,一号土柱在不同高度处的含水率蒸发速度不同,其中表层 15 cm 处黄土由于接近大气蒸发较快,而随着深度增加土柱内的含水率蒸发速率依次降低。二号土柱的含水率蒸发趋势与一号土柱具有较好的一致性。然而,二号土柱在 35 cm、55 cm、75 cm 深处含水率随时间的变化幅度几乎一致,这是因为二号土柱黄土的干密度较大,其持水性相比一号土柱更好。此外,TDR 探头测试的初始体积含水率和根据质量-体积关系计算的体积含水率几乎相同,进一步说明了 TDR 探头测试含水率的准确性。

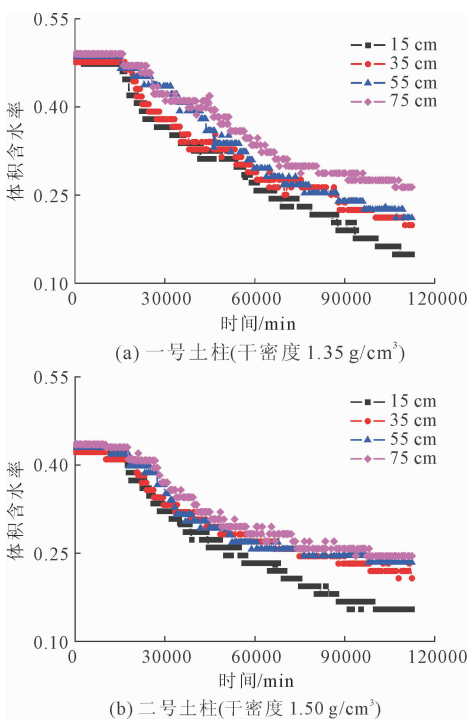


图 4 土柱蒸发过程中含水率随时间变化

图 5(a)和 5(b)分别为一号和二号土柱蒸发过程中吸力随时间的变化图。从图 5(a)可以看出,一号土柱在不同高度处的吸力变化在前 56 000 min 内几乎相同,而在 56 000 min 后,15 cm 深处的吸力出现明显的增大趋势。这是因为一号土柱在 56 000

min 后表层黄土的失水速率明显增大,而土壤含水率与吸力变化密切相关,如图 4(a)所示,约在 56 000 min 时,一号土柱 15 cm 深处失水速率增大,与其它深处产生分化。图 5(b)所示二号土柱的吸力随时间变化情况与图 5(a)相似,其在前 40 000 min 内土柱不同高度处的吸力变化也几乎相同,而在 40 000 min 后,15 cm 深处的吸力出现明显的增大趋势,这是因为二号土柱在 40 000 min 后表层黄土的失水速率突然增大。

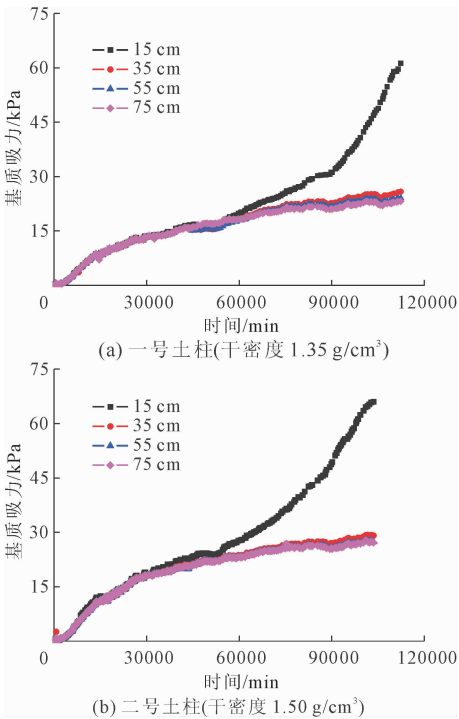


图 5 土柱蒸发过程中吸力随时间变化

3.2 土柱的持水特征曲线和非饱和渗透系数曲线

图 6 为一号和二号土柱的持水特征曲线。其中,每个土柱的持水特征曲线数据点均取自四个测点的数据。进气吸力值(AEV)为饱和土壤脱水过程中开始进入空气时对应的吸力值,根据 Vanapalli 等^[14]提出的方法,一号土柱的进气值为 6.35 kPa,二号土柱的进气值为 9.69 kPa。这是因为二号土柱对应的击实干密度较大,在其他条件下相同时,干密度越大,土体的进气值越大。此外,一号和二号土柱持水特征曲线的数据点均存在一定的离散性,这是由于本实验的土柱较高,虽然在制样时采取了相应的防止过击实方法,但在制样过程中土柱的下端还是出现了轻微的过击实现象,从图 6 中可以看出该误差对进气值的确定几乎没有影响。此外,采用

Van Genuchten 模型^[11]通过 Matlab 软件对所得的数据点进行非线性拟合,得到持水特征曲线数据点的拟合曲线。其中, Van Genuchten 模型^[11]拟合参数如表 2 所示。

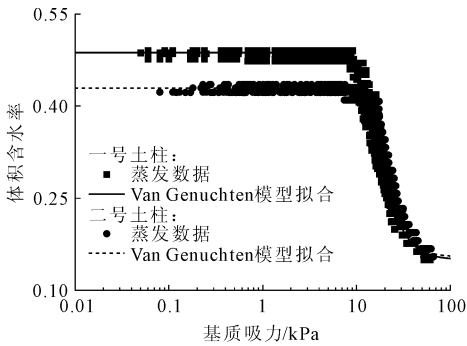


图 6 非饱和黄土持水特征曲线

表 2 Van Genuchten 模型拟合参数

拟合参数	<i>a</i>	<i>n</i>	θ_r	θ_s
一号土柱	0.062 27	3.835	0.150	0.487
二号土柱	0.048 70	4.424	0.155	0.429

一号和二号土柱的渗透系数曲线如图 7 所示。从图中可以看出,在饱和阶段,一号土柱的渗透系数明显大于二号土柱,而随着吸力的增加,一号和二号土柱的渗透系数逐渐趋近,这是因为随着吸力增大,水分通过毛细作用的流动逐渐减弱,土体孔隙率对渗透系数的影响也相应的减弱。此外,采用 Gardner 模型^[12]通过 Matlab 软件对试验数据进行非线性拟合,得到如图 7 所示的拟合曲线,模型的拟合参数如表 3 所示。

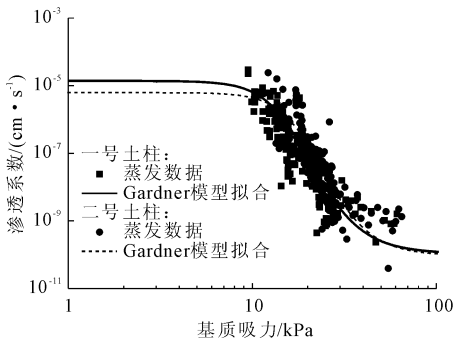


图 7 非饱和黄土渗透曲线

表 3 Gardner 模型拟合参数

拟合参数	<i>a</i>	<i>b</i>
一号土柱	0.018 2	9.885
二号土柱	0.035 2	10.585

4 数值模拟与结果分析

4.1 温-湿耦合条件下兵马俑遗址一号俑坑水分迁移规律

在土遗址表面设置如图 3 所示的温度和相对湿度条件,对兵马俑遗址进行数值模拟试验。图 8(a)和图 8(b)分别为温-湿耦合条件下兵马俑遗址一号俑坑水分迁移和吸力变化模拟结果。从图 8(a)可以看出前 40 d 点 1、2、3、5 处体积含水率下降较快,而点 4、6 处体积含水率明显上升。这是因为前 40 d 空气温度较高,相对湿度下降较快,促进了蒸发作用;另一方面,遗址表层水分向下迁移,降低了表层土的含水率,点 4、6 处体积含水率的上升证明了这一解释。随后,在 40 d~160 d 间,除了点 4、6 因为表层水的下渗造成 40 d~160 d 间含水率较高且下降缓慢外,其余各点处下降趋势较为接近,其中点 1 处下降最快,点 2 处因为初始阶段横隔墙顶部表层水分的下渗造成初始阶段体积含水率下降比较缓慢。在 160 d 后各点含水率下降均较慢,最终各点处体积含水率均稳定保持在 10% 以下。

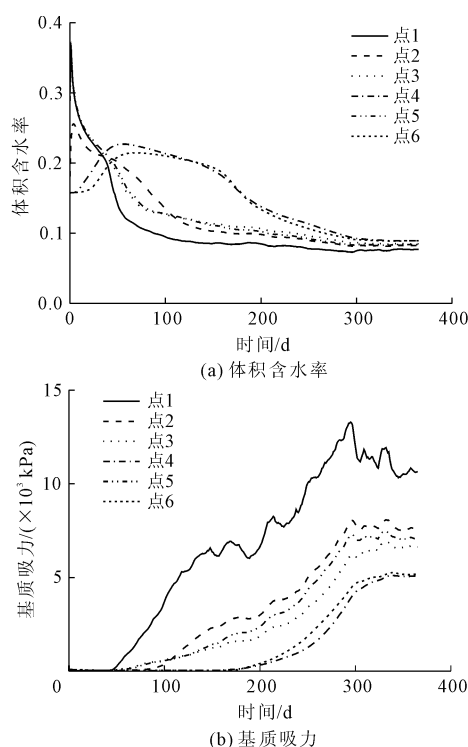


图 8 温-湿耦合下土遗址内体积含水率和吸力变化

从图 8(b)可以看出前 40 d 各点处土壤的吸力变化不大,这是因为初始阶段土壤表面饱和率较高,还未达到进气值,故吸力不会有太大变化。在 40 d 后各点处吸力先后出现快速上升现象,其中以点 1

最为明显,而在第 100 d 后由于空气温度出现下降,吸力的上升也有所减缓,同时出现了两次明显的下降趋势,正好对应空气相对湿度的两个峰值,而同为土壤表面的点 2、3、5 处下降并不明显,这说明土遗址中点 1 处的土体对空气相对湿度的变化反应敏感。最后,在 280 d 后点 1 处吸力出现轻微下降,而其它各点处吸力处于相对稳定状态。此时空气温度正在升高,而相对湿度也在升高,点 1 吸力的降低说明该处土体对空气湿度变化的灵敏度相对高于对温度的灵敏度。此外,点 2、3、5 处吸力和体积含水率的变化趋势与数值均较为接近,虽然点 2 处可以看出失水更快,但是因为横隔墙的保护,并未出现与地表处明显的区别。点 4、6 的吸力和体积含水率的变化趋势相似,吸力的数值相对较小,这是因为空气温度和相对湿度难以影响到土壤深处,只能通过表层土进行间接影响。

4.2 恒温-变湿度条件下兵马俑遗址一号俑坑水分迁移规律

在土遗址表面设置 20℃ 的温度和图 3 所示的湿度条件,对兵马俑遗址进行数值模拟试验。图 9(a)和图 9(b)分别为恒温-变湿度条件下兵马俑遗址一号俑坑水分迁移和吸力变化模拟结果。图 9(a)与图 8(a)差距极小,说明温度对于土遗址内含水率的分布影响很小。而图 9(b)与图 8(b)相比,在恒温条件下土遗址内各点处的吸力整体下降,这是因为在温度低于 20℃ 时温度对水分蒸发影响较小,而在 25℃~40℃ 之间的高温时会显著促进水分的蒸发。一年中,兵马俑博物馆中温度存在较大变化,高温阶段使变温条件比恒温条件的土遗址失去更多水分。同时,恒温条件下曲线比变温条件下曲线更加平滑,说明温度对曲线形态影响较小,而湿度对曲线形态的影响比温度大。

4.3 变温-恒湿度条件下兵马俑遗址一号俑坑水分迁移规律

在土遗址表面设置如图 3 所示的温度和 55% 的相对湿度条件,55% 的湿度条件能耗较小且能满足文物保护的需求^[15],随后对兵马俑遗址进行数值模拟试验。如图 10(a)所示,模拟体积含水率的下降速度相比前两次数值模拟有所减缓,但曲线形态基本相同。如图 10(b)所示,吸力曲线相比前两次数值模拟有很大的变化,在湿度变化情况下原本与 200 d~300 d 之间的上升趋势变为了变温-恒湿度条件下的下降趋势,曲线整体的吸力相比前两次数值模拟下降较大,而曲线形态与一年间的温度变化曲线刚好对

应,高温时增长较快,低温时保持平缓或下降。

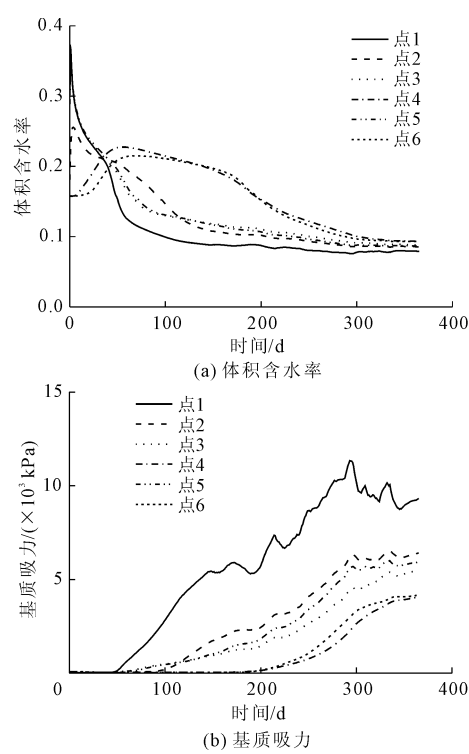


图 9 恒温-变湿度下土遗址内体积含水率和吸力变化

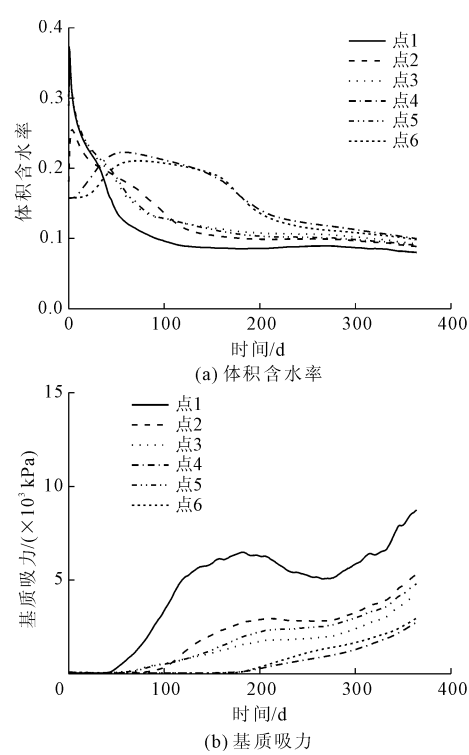


图 10 变温-恒湿度下土遗址内体积含水率和吸力变化

5 结 论

通过土柱试验,利用张力计及 TDR 探针分别测量夯土和原状土的体积含水率和吸力,从而得到土

壤的持水特征曲线和渗透系数曲线,将其代入非饱和渗流软件中进行数值模拟,对兵马俑博物馆中的土遗址进行数值分析。主要结论如下:

- (1) 点 1 的兵马俑横隔墙顶端拐角处对于博物馆中空气温度和相对湿度的变化反应最为明显,且对相对湿度的变化表现更加敏感。通过控制空气维持较高的湿度,尽量减少空气湿度的波动造成吸力的较大变化,可以较好地保护此处的土遗址。
- (2) 低温条件下土遗址内产生的吸力较小,应当在考虑游客舒适性的基础上尽量减小博物馆内的温度。
- (3) 土遗址中的体积含水率最终会保持稳定在 10% 以下,除了横隔墙顶端拐角处外,较高的空气湿度也无法有效降低土遗址内的吸力增大,阻止水分的蒸发,故土遗址的开裂破坏保护更依赖于人工加水,但应避免干湿循环现象,维持含水率稳定。

参考文献:

[1] 孙满利. 土遗址保护研究现状与进展[J]. 文物保护与考古科学,2007(4):64-70.

[2] 张 悦,叶为民. 考虑体变特征的遗址土脱湿过程持水特性[J]. 岩土工程学报,2022,44(3):456-463.

[3] 张 悦,叶为民,王 琼,等. 含盐遗址重塑土的吸力测定及土水特征曲线拟合[J]. 岩土工程学报,2019,41(9):1661-1669.

[4] 崔 凯,赵晓铮,朱鸣基,等. 干旱区土遗址掏蚀区土盐渍劣化与风蚀损耗效应(Ⅲ):毛细过程[J/OL]. 岩土工程学报:1-9[2022-01-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.tu.20211231.1645.004.html>.

[5] 湛文武,贾博博,蔡 韬,等. 融雪与降雨入渗下含盐土遗址的冻融劣化研究[J]. 岩土工程学报,2022,44(2):334-342.

[6] Ng C W W, Leung A K. Measurements of drying and wetting permeability functions using a new stress-controllable soil column[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012,138(1):58-68.

[7] Liu X C, Xu W J, Zhan L T, et al. Laboratory and numerical study on an enhanced evaporation process in a loess soil column subjected to heating[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering), 2016,17(7):553-564.

[8] 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019.

[9] 周莉莉,夏 寅,张尚欣,等. 土质对可溶盐危害影响的关系探究——以秦陵百戏俑坑为例[J]. 文物保护与考古科学,2017,29(2):26-32.

可以满足工程使用要求,对于管桩测试有效可行的。

(3) Capwap 法与静载荷试桩结果的差异原因,主要受桩土力学模型、桩土作用体系、岩土阻力的激发程度、拟合参数的选择等因素影响。两种方法各具优势,可相互验证,以确保工程设计的安全性和经济合理性。

(4) 滑动测微计进行应变测试提高了测试精度,获得了静载试验的特征曲线,建立了弹性模量与应变经验公式 $E_i = 35.38 - 0.0032\varepsilon_i$ 。本文的研究可为佛山地区或同类工程的 PHC 管桩设计、施工和检测提供参考依据,也可为地方规程修编提供依据。

参考文献:

[1] 陈凡,徐天平,陈久照,等. 基桩质量检测技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.

[2] 张建生,郑永民,司徒漫生,等. 预应力管桩高应变法与静载试验对比影响因素分析——2016 年广东省高应变能力验证经验总结[J]. 建筑监督检测与造价, 2016,9(6):24-30.

[3] 佟弢,肖雄丙. 经验法与试桩法的单桩承载力对比研究[J]. 港工技术,2022,59(1):109-112.

[4] 郑泽香. 预应力管桩高应变法与静载试验结果对比分析[J]. 土工基础,2006,20(4):94-97.

[5] 吴轶东. Capwap 曲线拟合法低估单桩承载力的原因分析[J]. 广东土木与建筑,2011,18(8):61-63,52.

[6] 林慧常. 预应力管桩高应变动测与静载荷试验结果对

比分析[J]. 广东土木与建筑, 2012,19(7):16-17.

[7] 元乐,孟志浩,孙长帅. 基于弱光栅技术的钢管桩静载荷试验[J]. 建筑结构,2021,51(S2):1645-1660.

[8] Zhang Q Q, Li S C, Li L P. Field study on the behavior of destructive and non-destructive piles under compression [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2014, 32(1):18-37.

[9] Zhang Q Q, Li L P, Chen Y J. Analysis of compression pile response using a softening model, a hyperbolic model of skin friction, and a bilinear model of end resistance [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2014,140(1):102-111.

[10] 任华林. 关于测力桩垫法提高高应变检测可靠性的探讨[J]. 工程质量,2021,39(11):77-81.

[11] 赖夏蕾,简文彬. 静载荷试验确定复合地基承载力的安全储备研究[J]. 长江科学院院报,2017,34(11):66-71.

[12] 田欣. 静载荷试验中压重平台引起的地表位移分析[J]. 路基工程,2018(6):132-136.

[13] 安康,刘晔,刘少林. 南京地区大直径后注浆嵌岩桩静载荷试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021,17(S1):46-54.

[14] 刘勇健,符纳,陈创鑫,等. 三轴冲击荷载作用前后软黏土的微观结构变化研究[J]. 广东工业大学学报,2015,32(2):23-27.

[15] 黄承泽. PHC 桩桩周土静动特性试验及高应变曲线拟合法应用分析[D]. 广州:广东工业大学,2019.



(上接第 89 页)

[10] 穆青翼,郑建国,于永堂,等. 基于时域反射技术(TDR)的黄土湿陷原位评价研究[J]. 岩土工程学报,2022,44(6):1115-1123.

[11] Van Genuchten M Th. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [S]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44:892-898.

[12] Gardner W R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table[J]. Soil Science, 1958,85(4):228-232.

[13] 徐婧. 基于考古遗址保护与展示的国内遗址博物馆案例调查研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2014.

[14] Vanapalli S K, Fredlund D G, Pufahl D E. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till [J]. Geotechnique, 1999,49(2):143-159.

[15] Buck R D. A specification for museum air-conditioning [J]. Museum News and Technical Supplement, 1964(6):53-57.