

引用本文:朱才辉,邱嵩,宋晓峰,等.传统改性土工程性能试验研究及在城墙修复中的应用[J].建筑科学与工程学报,2022,39(6):43-54.
ZHU Cai-hui, QIU Song, SONG Xiao-feng, et al. Experimental Study on Engineering Properties of Traditional Modified Soil and Its Application in City Wall Restoration[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(6): 43-54.

DOI:10.19815/j.jace.2021.08044

传统改性土工程性能试验研究及在城墙修复中的应用

朱才辉^{1,2},邱嵩²,宋晓峰³,党辉³,李玉波⁴

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室,陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学
岩土工程研究所,陕西 西安 710048; 3. 陕西省引汉济渭工程建设有限公司,陕西 西安 710011;
4. 中铁第一勘察设计院集团有限公司,陕西 西安 710043)

摘要:以某明城墙后期修复段的坍塌事故为背景,分析了该城墙坍塌的原因。基于室内试验和城墙缩尺模型试验,研究了传统改性土及素土的非饱和特性、强度软化特性及不同土类夯筑城墙的抗渗性、抗剥蚀性、抗裂性等工程性能;采用非饱和渗流原理和边坡稳定性分析方法探索了不同改性土夯筑城墙的降雨入渗规律及整体稳定性,最终针对6类传统改性土在城墙修复中的适宜性进行了对比分析。结果表明:相对于素土,三七灰土和糯米灰膏改性土具有较良好的抗渗、抗剥蚀和抗裂等综合工程性能;不同降雨工况下,素土夯筑城墙的入渗深度及增湿影响程度最大,入渗最深达2.9 m,三七灰土整体的入渗深度最小,约为1.0 m,其次为三合土,采用三七灰土或糯米灰膏改性土修复后城墙的整体稳定性相对较高;降雨积水入渗是导致修复段城墙坍塌失稳的外因,新修筑夯土的用料不当及排水系统失效是导致墙体失稳的内因;适当采用改性夯土进行古城墙修复并避免墙体顶部出现积水,将有利于提高修复后城墙的整体稳定性。

关键词:传统改性土;工程性能;城墙修复;模型试验;降雨入渗

中图分类号:TU973.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2022)06-0043-12

Experimental Study on Engineering Properties of Traditional Modified Soil and Its Application in City Wall Restoration

ZHU Cai-hui^{1,2}, QIU Song², SONG Xiao-feng³, DANG Hui³, LI Yu-bo⁴

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 3. Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project Construction Co. Ltd., Shaanxi Province, Xi'an 710011, Shaanxi, China; 4. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, Shaanxi, China)

Abstract: Taking the collapse accident of late restoration section of a Ming city wall as the background, the collapse reasons of the city wall were analyzed. Based on laboratory test and scale model experiment of the city wall, the unsaturated properties, strength softening properties of traditional modified soil (MS) and plain soil (PS) and the anti-permeability, anti-denudation and anti-cracking properties of rammed city wall with different types of soil were studied.

收稿日期:2021-08-14

基金项目:国家自然科学基金项目(52279110);陕西省自然科学基础研究计划项目(2019JLP-22);
陕西省重点研发计划项目(2022SF-197)

作者简介:朱才辉(1983-),男,陕西商南人,教授,工学博士,E-mail:zhucaihui123@163.com。

According to the unsaturated seepage principle and slope stability analysis method, the rainfall infiltration regularity and stability of the rammed city wall with different MS were explored. The results show that compared with PS, the MS of lime soil (LS) and sticky rice and lime powder soil (SPL) have better comprehensive engineering properties such as the properties of anti-permeability, anti-denudation and anti-cracking. Under different rainfall conditions, the rainfall-influenced infiltration depth of the rammed city wall with PS is the largest, and the maximum infiltration depth is 2.9 m. The infiltration depth of rammed city wall with LS is the smallest, which is about 1.0 m and then followed by the tabia soil (TB). The overall stability of the rammed city wall with LS or SPL is relatively high. Rainfall infiltration and water accumulation on the top of the city wall are the external causes of the collapse and instability of the repaired section of the city wall. Improper materials used in the new construction of rammed earth and the failure of drainage system are the internal causes of the instability of the city wall. Appropriate use of MS to repair the ancient city wall and avoiding water accumulation on the top of the city wall will benefit improving the overall stability of the restored city wall.

Key words: traditional modified soil; engineering property; city wall restoration; model experiment; rainfall infiltration

0 引言

中国目前保存较为完整的城墙有西安城墙、平遥城墙、荆州城墙、兴城城墙等,经过几百上千年风雨的洗礼及人类的破坏,大部分古城墙发生了严重的损坏,所以对古城墙的保护和修复工作迫在眉睫^[1-2]。早期古城墙多以裸露的夯土墙为主,其病害众多,如裂缝、剥落、坍塌、风化、泛碱,其产生的原因多是风沙雨雪的侵蚀、生物入侵、临近施工及人为破坏等。近年来,对土遗址城墙的病害机制^[3-6]及评估的研究较多^[7-8],并提出了多种保护措施^[2,9],如采用锚固、灌浆、表面喷淋加固的方法对古城墙的病害进行修复,或采用改性生土或者土坯支顶的方法对坍塌的古城墙或者土遗址进行修缮,或利用雨棚对常年裸露在室外的土遗址进行防水防渗处理,这些措施都起到了较好的作用。然而,由于后期修复部分结构与原址结构之间的搭接问题、夯筑材料的选取问题、施工控制水平问题及极端降雨天气,导致修复段城墙坍塌时有发生,如 2020 年 8 月某明代后修复的一处城墙发生了局部坍塌(图 1),坍塌长度约为 20 m,深度可达 5 m,经勘察显示,坍塌部分为原城墙夯土遗址新筑保护性土体和外包砖墙。2019 年 9 月该城墙已出现浸水病害,城墙顶部海墁发生沉降开裂,雨水由裂缝浸入城墙土体,土体膨胀致使城墙北侧护面砖砌体向外侧移发生坍塌,坍塌部分未伤及原明代城墙夯土。

目前,对于古城墙夯土的保护,因必须遵从“最



图 1 某明城墙修复段局部坍塌

Fig. 1 Local Collapse of Restored Ming City Wall

小干预、修旧如旧”原则,多采用改性土(MS)进行修复,改性土既能满足上述原则,又能尽量保证修复后的整体稳定性、表面固化、抗风化性^[2,5,10-11]。工程实践中,有采用传统的改性材料抗风化来修复土遗址,如糯米、桐油^[12]、水泥、石灰^[13-17]、纤维^[18-19]等材料,也有采用高分子材料(硅丙乳液、聚丙烯纤维、PS 溶液)或微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术进行土遗址表面修复^[9,11,20-21],结果表明改性材料及高分子材料对土遗址的修复效果较好,既能提高土体的抗压、抗拉性能,又能提高其抗渗特性。

由此可见,城墙的病害修复,既要考虑修复材料的工程适宜性、耐久性、修复工艺的合理性,还要考虑排水系统的可行性。在土遗址修复后,要从环境灾害、本体稳定性、本体表面风化、耐久性等方面对土遗址病害程度进行综合评估^[5,7],以此来为土遗址的修复方案提供最优选择。然而,关于对土遗址采取不同改性土修复后在不同环境下的综合性能研究较少^[22-24]。因此,研究各类改性材料的物理力学

特性及修复后城墙在复杂温湿度环境下的工程特性(入渗特性、抗剥蚀特性、抗裂特性等)及整体稳定性,显得尤为重要。

鉴于此,本文在以往对传统改性土研究的基础上^[25-26],开展了三七灰土、水泥土、三合土、稻草改性土、糯米灰膏改性土、糯米灰浆改性土等6种改性土的物理力学特性试验,主要获取增湿条件下的非饱和及强度软化特性;开展了不同改性土夯筑城墙的1:20缩尺模型试验,研究不同改性土夯筑的城墙在自然环境下的破坏特征及其抗剥蚀、抗渗、抗裂性

能;最后基于数值分析方法,探讨了不同降雨条件下,不同改性土修复的城墙的降雨入渗规律及整体稳定性。通过本文的研究,为城墙土遗址的改性土修复方法提供一套简单可行的设计理念。

1 改性土的物理力学性质

1.1 生土材料

本文试验用土取自陕西白鹿原地区的Q₃黄土,取样深度为地表以下3 m,通过室内常规试验得到其基本物理指标,如表1所示。

表1 白鹿原Q₃黄土物理性质
Table 1 Physical Properties of Q₃ Loess in Bailuyuan

含水率/%	孔隙比	干密度/(g·cm ⁻³)	液限/%	塑限/%	塑性指数	颗粒组成(质量分数)/%		
						细砂粒	粉粒	黏粒
11.8	0.80	1.48	28.5	18.2	14.2	9.23	75.65	15.12

1.2 改性土的配制

目前所开展的改性土最佳配比的研究较多,如在生土中添加有机材料、无机材料、天然材料或人造材料等。本文以传统改性材料为研究对象,主要开展三七灰土、水泥土、三合土、稻草改性土、糯米灰膏改性土、糯米灰浆改性土等6类改性土及素土的物理力学特性试验,其中素土为对照组。笔者以往的研究中,通过抗剪强度和渗透性试验,已经得到各类改性土的最佳配比^[25-26],如表2所示。表2中,三七灰土、水泥土、三合土、稻草改性土的配制已有研究成果可借鉴^[26]。以糯米灰浆改性土、糯米灰膏改性土为例,说明改性土的配制方法:

(1)糯米灰浆改性土。糯米灰浆改性土由糯米汁和石灰水配制而成,二者体积比为1:1。配制方法为熬制浓度为100 g·L⁻¹的糯米汁,将其与浓度为0.02 mol·L⁻¹的Ca(OH)₂溶液等体积混合制备含量为7%的糯米灰浆,配制糯米灰浆改性土。

(2)糯米灰膏改性土。糯米灰膏改性土由糯米汁和熟石灰粉配制而成,糯米汁的熬制如上所述,称取0.84倍糯米汁质量的熟石灰粉,将其搅拌均匀制

备含量为11%的糯米灰膏土。

由于改性土的物理力学特性与其龄期相关性较大,以往研究表明,随着龄期的延长,改性材料与素土、空气、水分等发生较为复杂的物理化学反应,可能会引起改性土力学性质发生改变。为了对比各类改性土的综合工程特性,本文将龄期统一设定为1 d,即配置好改性土样后恒温恒湿条件下放置24 h,立刻开展相关试验,试样的干密度统一设定为1.5 g·cm⁻³,含水率设定为18%,各类改性土的击实特性(最大干密度ρ_{dmax}、最优含水率w_{op}、饱和含水率w_s)及最佳配比见表2。

1.3 试验结果分析

1.3.1 改性土的非饱和特性

为了分析各类改性土在增湿条件下的非饱和特性,设定改性土的干密度ρ_d=1.5 g·cm⁻³,采用Whatman42号标准滤纸来测定各类改性土增湿之后的土水特征曲线(SWCC)。关于基质吸力与含水率的关系,可采用ASTM提供的标准率定方程^[27]来确定,如式(1)所示。

表2 不同土体的最佳配比

Table 2 Optimum Proportion of Different Soil

土体名称	简称	最佳配比	ρ _{dmax} /(g·cm ⁻³)	w _{op} /%	w _s /%
素土	PS	对照组,无改性材料	1.78	20.3	29.5
糯米灰浆改性土	SJL	糯米灰浆含量7%,糯米浆与石灰水体积比为1:1	1.70	18.0	45.9
糯米灰膏改性土	SPL	糯米灰膏含量11%,熟石灰粉质量为0.84倍的糯米汁质量	1.52	25.8	35.7
稻草改性土	ST	稻草长度3 cm,稻草含量0.6%	1.68	19.5	32.0
三合土	TB	素土、熟石灰、砂石的体积比为6:3:1	1.50	23.0	28.7
水泥土	CS	水泥含量7%	1.61	22.1	40.2
三七灰土	LS	素土与熟石灰体积比为7:3	1.53	31.0	33.3

$$\left. \begin{aligned} \lg(\Psi) = -0.0779w_{fp} + 5.327 & \quad w_{fp} \leqslant 45.3\% \\ \lg(\Psi) = -0.0135w_{fp} + 2.412 & \quad w_{fp} > 45.3\% \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: Ψ 为基质吸力; w_{fp} 为滤纸平衡后含水率。

通过室内试验得到的各类改性土及素土的 SWCC 如图 2 所示。由图 2 可知, 不同改性土的饱和含水率和残余含水率相差较大, 改性土与素土的 SWCC 存在明显的差异。该试验结果可为城墙在降雨工况下的非饱和入渗规律分析提供参数输入。

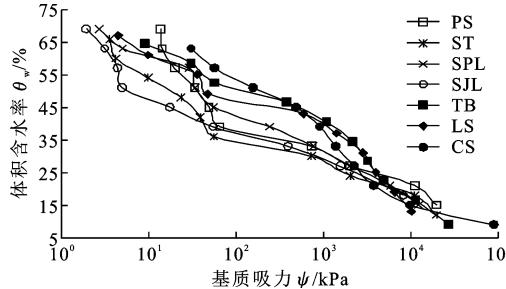


图 2 不同改性土的土水特征曲线

Fig. 2 SWCC of Different MS

1.3.2 改性土的渗透特性

采用 TST-55 型渗透仪, 通过变水头饱和渗透试验, 得到 6 种不同改性土及素土的饱和渗透系数, 如图 3 所示。由图 3 可知, 改性土的渗透系数 k_s 明显低于素土, 表明素土中添加改性材料后, 其抗渗性有大幅度的提高, 平均提高幅度约为素土的 10 倍以上, 其中三合土(TB)、三七灰土(LS)、糯米灰膏改性土(SPL)的改性效果最为明显。

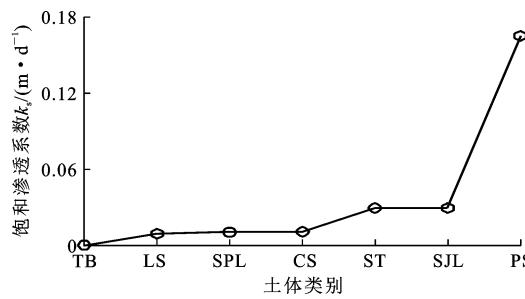


图 3 改性土渗透系数

Fig. 3 Permeability Coefficient of MS

1.3.3 改性土的强度弱化特性

根据室内试验可知, 土体的强度随含水率的增大必然发生弱化现象, 表 3 为各类改性土及素土在干密度 $\rho_d = 1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、含水率分别为最优含水率和饱和状态下的抗剪强度指标。

由表 3 可知, 饱和状态下的改性土强度指标相对于最优含水率状态下略有下降, 黏聚力 c 下降幅度为 20%~50%, 内摩擦角 φ 下降幅度为 10%~20%, 而素土的抗剪强度指标下降幅度分别为 55%

表 3 改性土和素土在不同含水状态下的抗剪强度指标

Table 3 Shear Strength Index of MS and Plain Soil Under Different Water Content

土体	最优含水率状态		饱和状态	
	c/kPa	$\varphi/^\circ$	c/kPa	$\varphi/^\circ$
PS	18	22.2	8.1	17.8
SJL	157	34.0	94.4	28.9
CS	49	35.0	27.0	29.6
SPL	60	42.0	36.6	36.5
LS	189	43.0	107.7	33.5
TB	82	41.0	47.6	36.1
ST	70	15.5	55.6	14.0

和 20%。由此可见, 改性土遇水弱化显著程度较素土低, 改性材料的添加对素土的改性效果较为明显。

2 改性土修复城墙模型试验

2.1 缩尺模型试验方案

根据调研发现, 早期城墙的内城夯土体为全裸露状态, 无外包砖砌体保护, 而现代修复后的城墙, 为了保护其夯土结构, 内城绝大多数采用了外包仿古砖砌体结构。为了较为快捷评价各类改性土修复夯土城墙后在自然环境下的工程性能, 更直观地了解各类改性土在复杂环境下的综合工程性能, 特开展了为期 400 d 的缩尺比例为 1:20 的改性土夯土城墙模型试验。考虑到试验周期及夯土墙的破坏效果, 本模型试验暂不考虑城墙外包砖砌体的保护作用, 如果干密度控制水平太高, 夯土墙短期内难以发生较为明显的破坏特征, 故将改性土及素土模型试验的初始条件设定为: 干密度为 $1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 初始含水率为 18%。模型试验旨在模拟自然环境下改性夯土墙体在 1 年内历经不同程度的冻融-干湿循环作用的破坏特征。根据西安市室外环境监测仪可得到 1 年之中任意时刻的温湿度特征, 现选取冬季、夏季、秋季具有代表性的 1 周内室外温湿度环境监测结果, 如图 4 所示。

由图 4 可见: 夏季高温高湿度期, 环境温度 $T = 24.5 \sim 46.1^\circ\text{C}$ (平均为 32.9°C), 相对湿度 $R = 32.4\% \sim 94.3\%$ (平均为 61.3%); 冬季为低温期, 环境温度 $T = -6.0 \sim 10.1^\circ\text{C}$ (平均为 2.2°C), 相对湿度 $R = 49.6\% \sim 89.8\%$ (平均为 69.9%); 秋季为中温干燥期, 环境温度 $T = 10.1 \sim 30.9^\circ\text{C}$ (平均为 22.7°C), 相对湿度 $R = 21.4\% \sim 60.8\%$ (平均为 39.1%)。上述环境温湿度基本上代表了西部半湿润半干旱地区的气候特点, 最低温与最高温相差 50℃ 以上, 湿度相差 70% 以上。因此, 开展改性生土

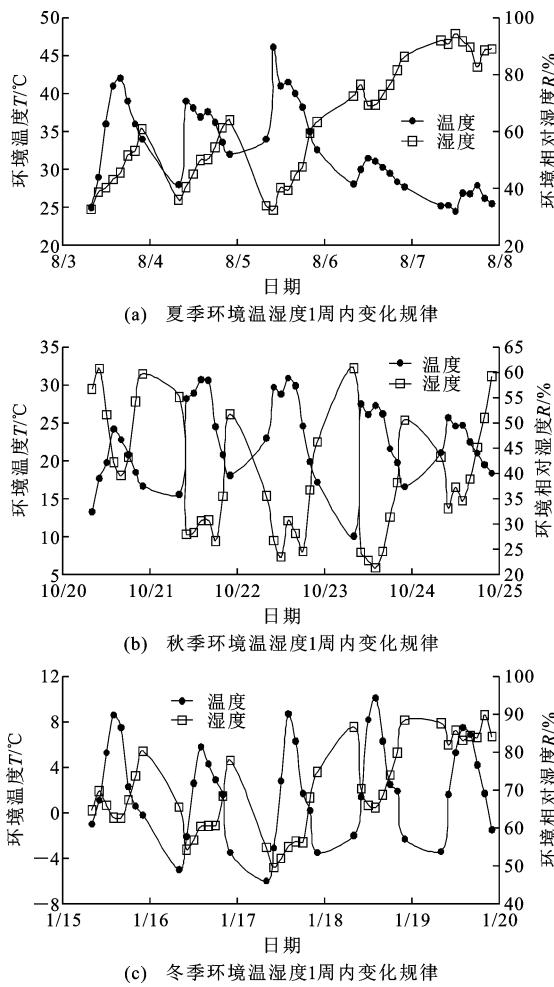


图 4 环境温湿度变化规律

Fig. 4 Variation Law of Ambient Temperature and Humidity

在该赋存环境下的耐久性能长期试验, 具有较强的代表性和工程实践意义。

2.2 模型试验设计与测试方法

2.2.1 缩尺模型设计与制备

根据西安城墙实际尺寸 $15 \text{ m(底宽)} \times 9 \text{ m(顶宽)} \times 12 \text{ m(高)}$, 选择相应比例尺 $1:20$ 进行模型构建, 城墙模型的尺寸为 $0.375 \text{ m(底宽)} \times 0.225 \text{ m(顶宽)} \times 0.7 \text{ m(高)} \times 0.4 \text{ m(纵向长度)}$, 如图 5 所示。为了制作缩尺模型, 特意设置了模型箱及测试系统, 该模型箱试验装置包括 4 面 10 mm 厚的钢板面板与特制夯锤, 安装与拆卸方便, 并预留有温湿度测试时域反射仪 (TDR) 探头的测线孔。根据设定的干密度和含水率, 配制所需改性土, 放置 24 h , 然后分 6 层夯实成型, 夯筑后层厚 10 cm , 夯筑期间分 3 层预埋 TDR 测试元件 (TDR-1、TDR-2、TDR-3), 并将测线引出模型箱外, 每夯实一层需对下层夯土表面进行刮毛处理, 直至顶层 TDR 探头布设完

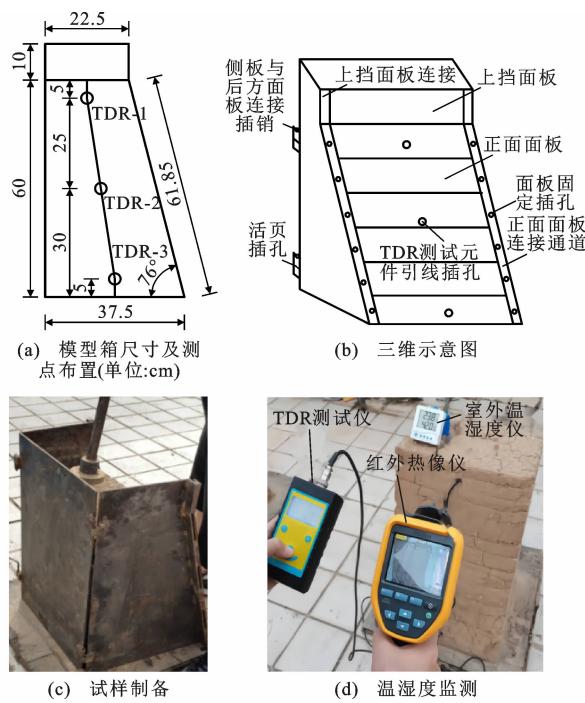


图 5 模型试验及测点布设

Fig. 5 Model Test and Measuring Point Arrangement

毕并达到预定高度后, 用削土刀刮掉多余土层, 将模型表面整平, 模型的制备见图 5(c)。

2.2.2 监测方法

为了研究改性材料夯筑的城墙在自然环境下的抗渗性能、抗剥蚀性能和抗裂性能, 采用在模型内布置 TDR 温湿度测试探头、TiS10 手持红外热像仪和温度计, 来实时监控城墙模型的内部温湿度、表面温度及环境温湿度; 采用游标卡尺、高精度天平等设备来测试城墙模型表面的裂缝扩展特征(裂缝的长度、宽度、组数等) 及剥蚀量(脱落后散失量), 其中温湿度原位监测见图 5(d)。

2.2.3 监测结果处理方法

为了综合评价各类改性土的工程性能, 本文从抗渗性能、抗剥蚀性能、抗裂性能 3 个角度来进行系统分析。缩尺模型与原型存在 $1:20$ 的差异, 其工程性能在尺寸效应上必然存在一定的差异, 但作为缩尺模型的土体单元能够近似反映改性土在夯筑城墙期间的实际工程性能。因此, 本文不考虑模型尺寸效应对抗渗性能、抗剥蚀性能、抗裂性能的影响。

2.3 试验结果及分析

通过为期 400 d 的自然环境下不同改性土夯筑的城墙缩尺模型试验, 得到不同改性土及素土夯筑的城墙模型分别在 90 、 180 、 400 d 的试验结果, 如图 6 所示。

从图 6 试验结果外观可见, 历经 400 d 的自然

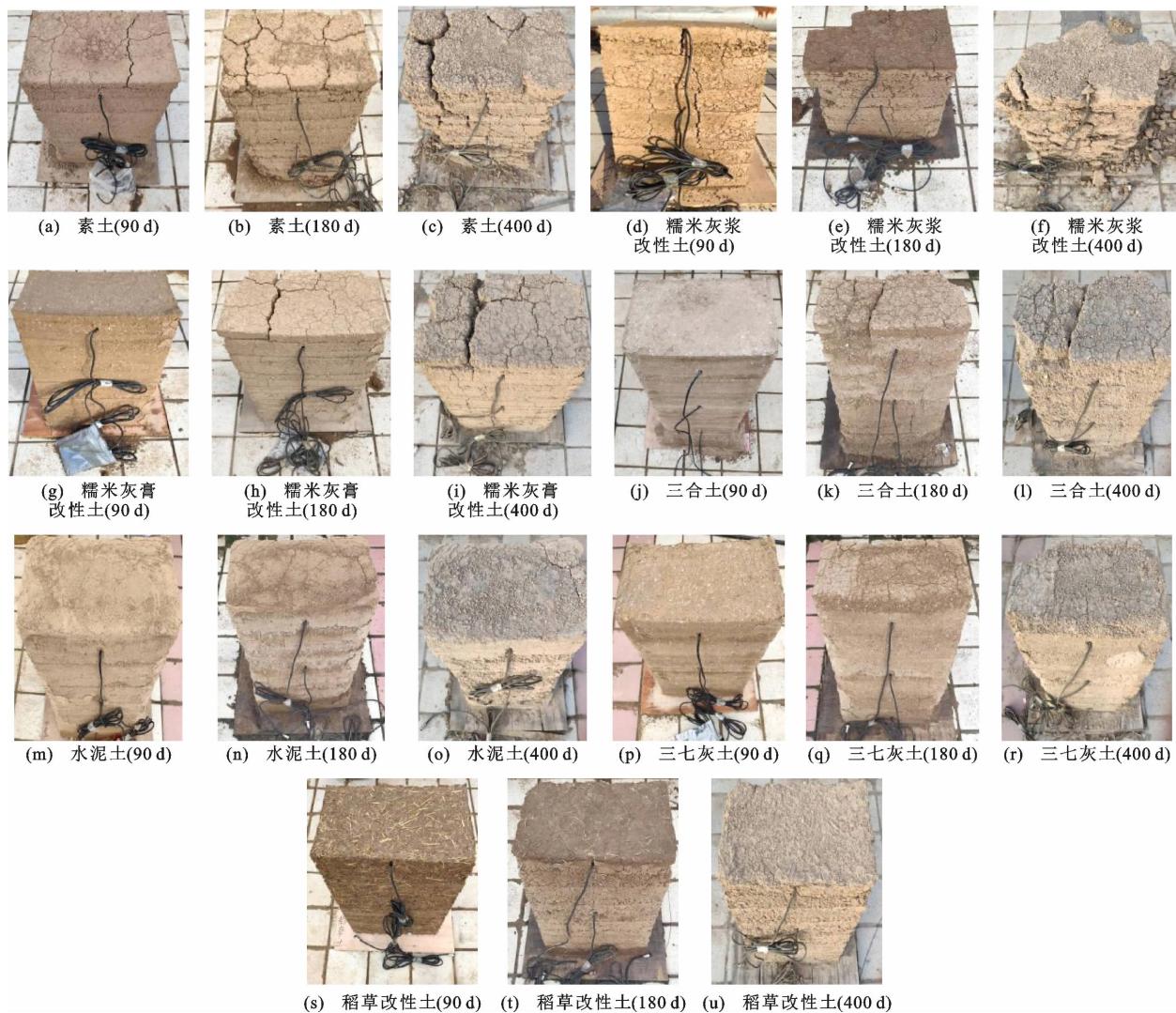


图 6 改性土及素土破坏特性

Fig. 6 Failure Characteristics of MS and Plain Soil

环境下的多次干湿-冻融循环之后,不同改性土的表面开裂、崩解剥蚀等破坏现象具有较大差异,具体的量化分析如下。

2.3.1 抗渗性能

根据 TDR 土壤水分探测仪监测土体含水率随时间的变化规律,现以具有代表性的糯米灰膏改性土、三七灰土以及作为对照组的素土为代表,得到模型上中下 3 层 3 个测点(TDR-1、TDR-2、TDR-3)体积含水率(θ_{w1} 、 θ_{w2} 、 θ_{w3})时空变化规律,如图 7 所示。采用含水率梯度值 k_θ 来对比分析不同改性土在抗渗性上的差异,取城墙 3 个测点处的年平均体积含水率来计算平均含水率梯度。平均含水率梯度实际上反映了改性材料夯筑的城墙模型底部相对于模型顶部的水分年平均增长程度,该值越大,说明材料的抗渗性能、抵御环境破坏性能越强,表明该类材料在做建筑材料时,其适宜性更强。

含水率梯度 k_θ 计算公式如式(12)所示。

$$k_\theta = \frac{1}{2} \left(\frac{\bar{\theta}_{w3} - \bar{\theta}_{w2}}{1} + \frac{\bar{\theta}_{w2} - \bar{\theta}_{w1}}{1} \right) = \frac{\bar{\theta}_{w3} - \bar{\theta}_{w1}}{2} \quad (2)$$

式中: $\bar{\theta}_{w1}$ 、 $\bar{\theta}_{w2}$ 、 $\bar{\theta}_{w3}$ 分别为 TDR-1、TDR-2、TDR-3 测点的年平均体积含水率。

不同改性土夯筑城墙的含水率梯度 k_θ 如图 8 所示。

由图 7、8 分析可知:

(1)从图 7(a)~(c)可以看出,改性土及素土在 1 年内各层含水率随时间变化均呈波动状态,多雨期含水率明显高于少雨期。

(2)由图 7(d)可知,各类改性土在经历多次降雨入渗、稳定后的水分场梯度存在较大的差异。城墙不同高度处的平均含水率由小到大依次为 θ_{w1} 、 θ_{w2} 、 θ_{w3} ,表明长期的降雨入渗和蒸发作用使得城墙顶部的水分明显少于底部,水分有向深层迁移趋势。

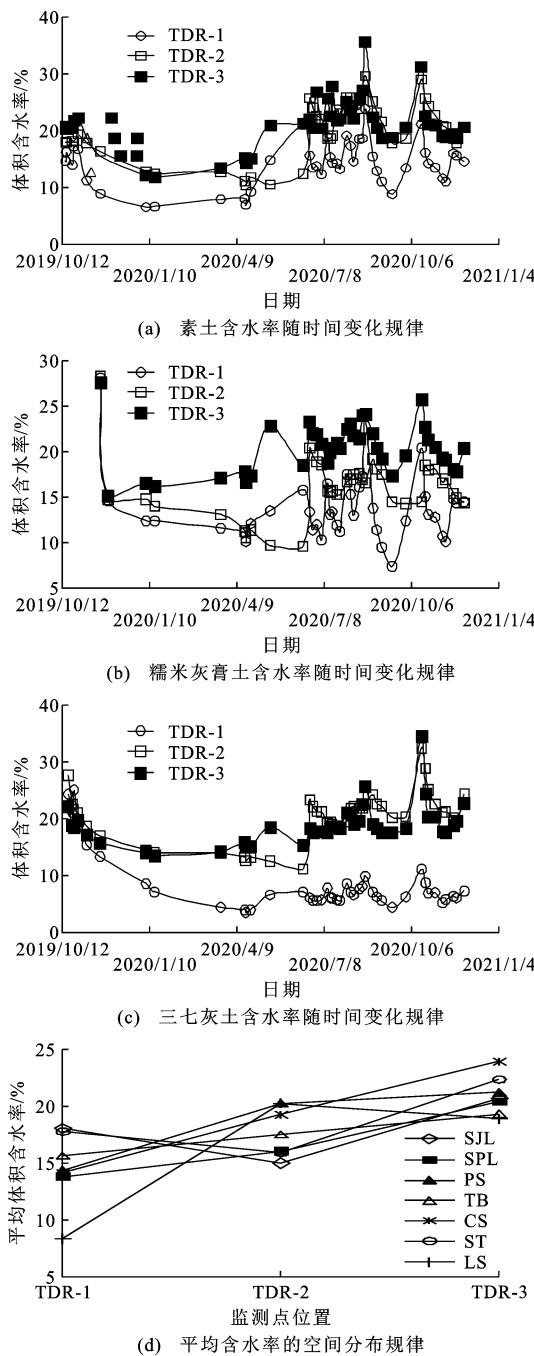


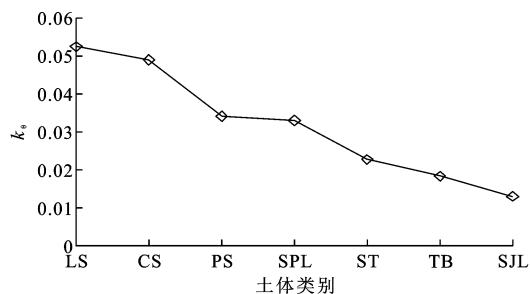
图 7 含水率时空变化规律

Fig. 7 Temporal-spatial Variation Law of Moisture Content

(3)由图 8 可知,含水率梯度 k_0 由大到小依次为 LS、CS、PS、SPL、ST、TB、SJL。由含水率梯度与抗渗性的关系可知,含水率梯度越大,土体的抗渗效果或吸放湿效应越明显。因此,三七灰土和水泥土的抗渗性最好,其余改性土稍差。

2.3.2 抗剥蚀性能

采用剥蚀比来分析各类改性土及素土的抗剥蚀性能。假定年剥蚀量为 s , 城墙模型总质量 $M=$

图 8 改性土及素土含水率梯度 k_0 Fig. 8 k_0 of MS and Plain Soil

127.44 kg, 其年剥蚀比 η 可通过式(3)计算。

$$\eta = \frac{s}{M} \times 100\% \quad (3)$$

经过为期 1 年的时间统计, 得到不同改性土的剥蚀比 η , 如图 9 所示。

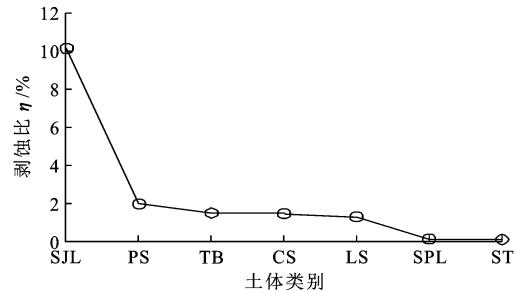


图 9 改性土及素土剥蚀比

Fig. 9 Denudation Ratio of MS and Plain Soil

从图 9 中可以看出: 糯米灰浆改性土(SPL)的剥蚀比最大约为 10.14%, 其次是素土(PS), 剥蚀比约为 2%; 稻草改性土(ST)和糯米灰膏改性土(SPL)的剥蚀比不超过 0.15%。由此可见, ST 和 SPL 改性土的抗剥蚀能力最强, 三七灰土(LS)、水泥土(CS)和三合土(TB)次之。

2.3.3 抗裂性能

土遗址最主要的病害表现就是裂缝, 其形成原因极为复杂, 受风化作用、干湿循环、冻融循环、生物入侵、人为因素等多种因素影响。采用裂缝密度来定性评价各类改性土的抗裂性能。假定城墙表面任意裂缝的长度为 L_i , 宽度为 W_i , 裂缝组数为 N , 则 N 组裂缝的总裂缝密度 ζ 可定义为

$$\zeta = \sum_{i=1}^N \frac{L_i W_i}{A} \quad (4)$$

式中: A 为城墙外表面积, 不包含底面, $A = 10\ 873.472\ 7\text{ cm}^2$ 。

将各类改性土城墙的表面裂缝进行统计分析, 采用式(4)计算得到不同改性土的裂缝密度, 见图 10。

从图 6 的城墙破坏现外观和图 10 的城墙裂缝

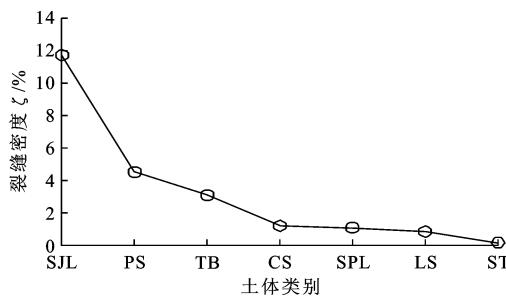


图 10 改性土及素土的裂缝密度

Fig. 10 Crack Density of MS and Plain Soil

密度发现：

(1) 从图 6 可知：糯米灰浆改性土(SJL)破坏程度最为严重，主要因为在自然环境当中，土体中灰浆水分会蒸发损失，导致土体黏聚力降低，墙体呈现出大面积的掉块和脱落现象，墙身裂缝增多且较为显著；其次为素土(PS)，由于未添加任何改性材料，其自身强度较低，表面呈现出较深的裂缝，裂缝最宽为 1.5 cm，最长为 10 cm，且纵横交错裂缝较深；三合土(TB)上表面出现 2 条平行且较为显著的裂缝，其宽度约为 1 cm，长度约为 8 cm，墙身有较多细微裂缝，有自然脱落现象；糯米灰膏改性土(SPL)由于糯米浆和石灰结合较为紧密，只有上表面呈现出宽约 1 cm、长约 12 cm 的纵向裂缝，墙身同样出现较多细微裂缝，但完整性较好；水泥土(CS)、三七灰土(LS)和稻草改性土(ST)在自然环境下未呈现出较大深度裂缝，保存程度相对较好。

(2) 从图 10 对比可知，各类改性土及素土的裂缝密度由高到低排序依次为 SJL、PS、TB、CS、SPL、LS、ST，与图 6 的分析结果一致。根据不同性能指标的统计结果可以看出：从土体抗渗性的角度分析，三七灰土、糯米灰浆改性土和水泥土的抗渗性能最好；从耐久性的角度分析来看，稻草改性土、三七灰土和糯米灰膏改性土的强度最大，具有更好的抗剥蚀、抗裂缝等特性。综上所述，三七灰土和糯米灰膏改性土有着更好的综合性能。

3 改性土修复城墙稳定性研究

3.1 城墙模型建立与参数选取

以西安实际城墙形制为例，采用 Geo-Studio 软件建立城墙的非饱和渗流二维有限元模型，基于非饱和入渗理论及边坡稳定性强度折减法原理，研究城墙的降雨入渗特征与整体安全性，有限元模型见图 11。

采用 Geo-Studio 有限元程序中的 SEEP/W 模

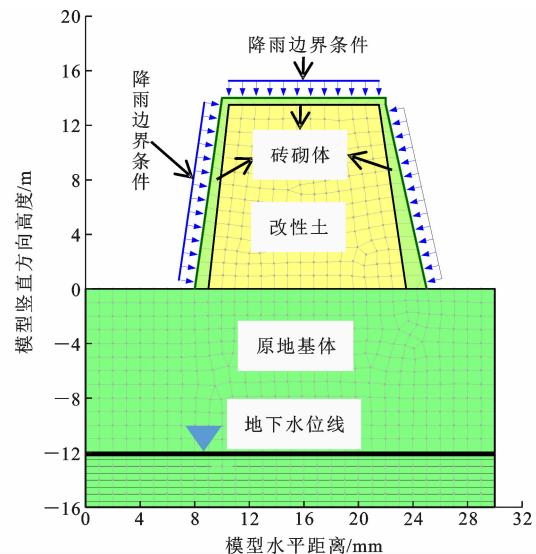


图 11 城墙计算模型(单位:m)

Fig. 11 City Wall Calculation Model (Unit:m)

块和 SLOPE/W 模块，先进行 SEEP/W 模块的渗流分析，运用非饱和入渗理论得出在降雨条件下不同改性土夯筑城墙的入渗规律，再将相应的计算结果导入 SLOPE/W 模块进行流固耦合计算，得出在不同雨型及不同积水工况下，改性土城墙的整体稳定性。在进行城墙降雨入渗和稳定性分析时，需要进行计算参数的确定，主要计算参数包括：

(1) 土水特征曲线

各类改性土土水特征曲线反映了土体基质吸力和体积含水率之间的关系，SEEP/W 模块中进行渗流分析需要定义非饱和土的土水特征曲线参数，可采用 V-G 模型来模拟各类改性土在增湿条件下的非饱和特性，V-G 模型拟合方程为

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[(1 + \Psi/a)^n]^m} \quad (5)$$

式中： θ_r 为残余体积含水率； θ_s 为饱和体积含水率； a, m, n 为特征曲线的拟合参数， a 与进气值相关， n 与特征曲线变化时的斜率有关， m 是与土样排水有关的参数，取 $m=1-1/n$ 。

根据 MATLAB 曲线拟合工具，可得到 V-G 模型具体参数，如表 4 所示。

(2) 渗透参数

非饱和降雨入渗数值分析中，需要确定材料的饱和渗透系数 K_s 和孔隙率 ρ ，采用 SEEP/W 模块中提供的 V-G 模型，输入不同改性土的饱和渗透参数(表 4)，可得到不同饱和度下渗透系数函数曲线。

(3) 砌体及改性土物理力学参数

数值模拟时，假定城墙夯土的初始含水率为最优含水率，然后模拟降雨入渗，入渗后城墙的水分场

表 4 V-G 模型参数及渗透参数

Table 4 V-G Model Parameters and Permeability Parameters

土体类别	a/kPa	m	n	$\theta_s/\%$	$\theta_r/\%$	$K_s/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	$p/\%$
PS	200.0	0.29	1.4	44.2	5.9	0.165 0	46
ST	4.0	0.17	1.2	48.0	5.0	0.029 3	44
SJL	2.4	0.17	1.2	68.9	1.0	0.030 0	42
SPL	58.8	0.66	2.9	53.5	17.4	0.010 3	53
CS	280.0	0.29	1.4	60.3	2.0	0.010 7	49
TB	200.0	0.17	1.2	43.0	2.6	0.000 1	49
LS	200.0	0.23	1.3	50.0	5.0	0.009 3	58

将发生变化,将表 3 中 2 种含水状态之间的任意含水率 w 下的抗剪强度指标 c_w, φ_w 视为线性递减状态,按照表 5 中的线性递减函数考虑不同含水率场

下抗剪强度弱化问题,然后基于流固耦合理论来分析城墙的整体稳定性。其他物理力学参数如弹性模量 E 、泊松比 μ 、重度 γ 见表 5。

表 5 材料力学参数

Table 5 Mechanical Parameters of Materials

材料	E/MPa	μ	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c_w 线性递减函数	φ_w 线性递减函数
PS	6.6	0.35	15.0	$c_w = -107.6w + 39.8$	$\varphi_w = -47.8w + 31.9$
ST	6.8	0.34		$c_w = -115.2w + 92.5$	$\varphi_w = -12.0w + 17.8$
SJL	8.5	0.33		$c_w = -224.4w + 197.4$	$\varphi_w = -18.3w + 37.3$
SPL	15.6	0.30		$c_w = -236.4w + 120.9$	$\varphi_w = -55.6w + 56.3$
CS	18.4	0.30		$c_w = -121.6w + 75.9$	$\varphi_w = -29.8w + 41.6$
TB	23.5	0.29		$c_w = -603.5w + 220.8$	$\varphi_w = -85.9w + 60.8$
LS	22.7	0.29		$c_w = -3534.8w + 1284.8$	$\varphi_w = -413.0w + 171.0$
砖砌体	1 500.0	0.20	22.0		

3.2 边界条件

针对城墙在降雨条件下的入渗特性和整体安全性进行数值分析时,其边界条件设置如下:

(1) 城墙模型外边界除底部外均受降雨影响,采用 SEEP/W 模块中的瞬态模拟方法来模拟降雨边界,通过降雨强度和降雨历时来反映。降雨边界以陕西省近 55 年的降雨资料和西安市气象局网站公布的降雨标准水文资料为计算依据^[28],统计出了小雨、中雨、大雨、暴雨 4 种不同雨型参数,见表 6。

表 6 降雨参数

Table 6 Rainfall Parameters

降雨等级	持续时间 t/d	降雨强度 $q/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$
小雨	25	0.002 42
中雨	6	0.017 50
大雨	3	0.035 00
暴雨	1	0.075 00

(2) 根据西安城墙地下水位埋深,设置初始地下水位深度为 12 m,地下水位以上按零流量边界,降雨入渗对地下水位线不产生影响。

3.3 降雨入渗对城墙的影响

不同工况下降雨入渗效应可采用最大入渗影响深度来表征。降雨入渗后,城墙顶部以下某深度范

围内的体积含水率必然出现增大迹象,相对于初始水分场出现增大的最大影响深度,即为最大入渗影响深度。城墙顶部海墁青砖砌体以下、不同改性土夯土体内部的降雨入渗影响深度随时间的变化规律如图 12 所示。

由图 12 计算结果可知:

(1) 在降雨初期,城墙顶部增湿深度快速增加,土体表面含水率快速趋于饱和,城墙顶部体积含水率 $\theta_w = 40\% \sim 80\%$,随着降雨持续时间的延长,降雨入渗影响深度逐渐趋于稳定,入渗稳定后不同降雨工况下,素土(PS)整体的入渗深度最大,最深达 2.9 m,三七灰土(LS)整体的入渗深度最小为 1.0 m,其次为三合土(TB)。

(2) 在中雨工况下,降雨入渗深度相对较大,小雨工况下降雨强度小于土体表面入渗能力,大部分都可以入渗到土体内部,而在暴雨工况下,短时间内降雨强度大于土体表面的入渗能力,土体表面很快会趋于饱和,一部分降水会形成地表径流,导致入渗深度反而较浅。

3.4 不同改性土修复城墙的安全性分析

为研究降雨对城墙整体安全性的影响,现采用

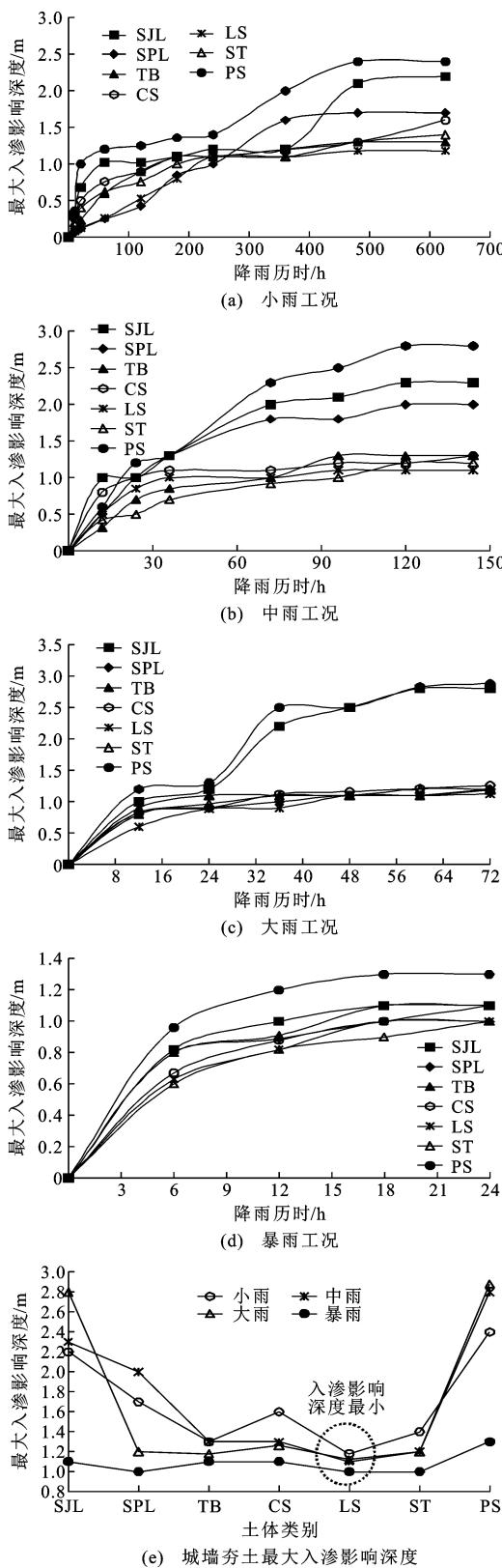


图 12 降雨入渗影响深度变化规律

Fig. 12 Variation Law of Rainfall Infiltration

Influence Depth

SLOPE/W 模块中的 Morgenstern-price 法、Spencer 法、Bishop 法、Janbu 法、Ordinary 法等 5 种极限

平衡分析方法,对城墙的整体安全性进行极限平衡分析。经计算发现 Bishop 法计算的安全系数最小,可将 Bishop 法对城墙稳定性分析结果作为参考,表 7 为不同改性土修复城墙后的整体安全系数。从表 7 可以看出:随着降雨强度的增加,城墙顶部积水会增加土体的孔隙水压力,降低土体的强度,基质吸力下降越快,整体来说安全系数有减小趋势;从土体的类别来说,在相同的降雨工况下,素土整体稳定性最差,三七灰土整体的稳定性最好;在不同降雨工况下,三七灰土、糯米灰膏改性土夯筑城墙安全度较高,素土在降雨工况下表现为稳定性差甚至失稳状态。因此,采用素土直接来修复城墙存在较大的安全隐患,适当采用石灰、糯米基改性土来修复城墙是较为合理的选择。

表 7 城墙整体安全系数

Table 7 Overall Safety Factors of City Wall

土体类别	整体安全系数			
	小雨	中雨	大雨	暴雨
SJL	1.81	1.74	1.62	1.42
SPL	4.10	4.04	3.73	3.68
PS	1.17	1.06	1.01	0.87
TB	2.59	1.59	1.35	2.40
CS	1.81	1.77	1.74	1.75
LS	5.03	5.00	4.91	4.86
ST	1.82	1.76	1.64	1.63

4 结语

(1) 各类改性土的非饱和特性、强度弱化特性、抗渗性、抗剥蚀性、抗裂性均存在较大的差异,相对于素土而言,改性土的综合工程性能明显优于素土,综合对比表明三七灰土、糯米灰膏改性土具有较为优良的综合工程性能。

(2) 各类改性土修复城墙后的降雨入渗影响深度、增湿程度和整体稳定性差异也较大,不同降雨工况下,素土夯筑城墙的入渗深度及增湿影响程度最大,入渗最深达 2.9 m,三七灰土整体的入渗深度最小,约为 1.0 m,其次为三合土;采用三七灰土或糯米灰膏改性土修复后城墙的整体稳定性相对较高。

(3) 城墙坍塌实例表明:长期高强度降雨积水入渗是导致其坍塌失稳的外因,修复夯土的用料及排水条件是导致墙体失稳的内因。适当采用改性夯土进行古城墙修复,可避免墙体顶部出现积水现象,有利于提高修复后城墙的整体稳定性。本文仅对部分传统改性土的修复城墙综合性能进行了系统的室内试验、模型试验和数值分析研究,后期将对其他遗址

修复中常用的改性土进行进一步探讨。

(4)由于原址土存在大孔隙、黏粒含量流失、承载力及抗剪强度下降较大等问题,为了避免换填土与原址土之间产生差异变形、诱发裂缝、渗漏等问题,建议采取台阶法并布设土布加筋搭接的方式进行衔接处理,避免修复后期产生不协调变形;如对城墙整体缺失段进行修复,不存在改性土与原址土搭接问题,则可直接采取本文建议的改性土进行古法夯筑成型,完善防排水措施,即可达到修复目的。

参考文献:

References:

- [1] 国际古迹遗址理事会中国国家委员会. 中国文物古迹保护准则[M]. 北京: 文物出版社, 2015.
International Council on Monuments and Sites China National Committee. Principles for the Conservation of Heritage Sites in China [M]. Beijing: Cultural Relics Publishing House, 2015.
- [2] 王旭东. 中国干旱环境中土遗址保护关键技术研究新进展[J]. 敦煌研究, 2008(6): 6-12, 114.
WANG Xu-dong. New Progresses on Key Technologies for the Conservation of Chinese Earthen Sites in Arid Environment [J]. Dunhuang Research, 2008(6): 6-12, 114.
- [3] 吴超英, 李乐, 王峥嵘, 等. 古城墙变形破坏模式分类及识别[J]. 工程地质学报, 2017, 25(4): 1132-1140.
WU Chao-ying, LI Le, WANG Zheng-rong, et al. Classification and Identification of Failure Modes of Ancient City Walls [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(4): 1132-1140.
- [4] 敖迎阳. 平遥古城墙裂缝成因分析及处理对策[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
AO Ying-yang. Analysis of Causes of Cracks in the Ancient City Wall of Pingyao and the Restoring Measures [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [5] 王旭东, 石玉成, 刘琨. 夯土长城墙体掏蚀失稳机理研究[J]. 西北地震学报, 2011, 33(增1): 381-385.
WANG Xu-dong, SHI Yu-cheng, LIU Kun. Research on Sapping Instability Mechanism for Rammed Wall [J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(S1): 381-385.
- [6] 朱才辉, 崔晨, 兰开江, 等. 砖土结构劣化及入侵建筑物拆除对榆林卫城稳定性影响[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 3153-3166.
ZHU Cai-hui, CUI Chen, LAN Kai-jiang, et al. The Effects of Degradation of Brick-clay Structure and Demolition of Embedded Buildings on the Stability of Yulin City Wall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8): 3153-3166.
- [7] 孙满利. 土遗址病害的评估体系研究[J]. 文物保护与考古科学, 2012, 24(3): 27-32.
SUN Man-li. A System for Evaluating the Deterioration of Earthen Sites [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2012, 24(3): 27-32.
- [8] 朱才辉, 周远强. 某在役明城墙病害调研及评估方法[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(2): 60-73.
ZHU Cai-hui, ZHOU Yuan-qiang. Pathologies Investigation and Assessment Method of an Ancient City Wall in Ming Dynasty [J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(2): 60-73.
- [9] 熊兵. 土遗址加固与保护[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
XIONG Bing. Protection and Reinforcement of Earthen Site [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008.
- [10] 黄建辉. 土遗址抗风化加固材料及机理初探[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
HUANG Jian-hui. The Study on Earthen Culture Heritages Conservation Material and Its Anti-weathering Mechanism [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007.
- [11] 毛筱霏, 赵冬, 陈平, 等. 干旱地区土建筑遗址加固保护试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增1): 3127-3131.
MAO Xiao-fei, ZHAO Dong, CHEN Ping, et al. Consolidation Experiment on Earthen Architecture Site in Arid Region [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 3127-3131.
- [12] 唐晓武, 林廷松, 罗雪, 等. 利用桐油和糯米汁改善黏土的强度及环境土工特性[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1324-1329.
TANG Xiao-wu, LIN Ting-song, LUO Xue, et al. Strength and Geoenvironmental Properties of Clay Improved by Tung Oil and Sticky Rice Juice [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(9): 1324-1329.
- [13] 杨富巍, 张秉坚, 曾余瑶, 等. 传统糯米灰浆科学原理及其现代应用的探索性研究[J]. 故宫博物院院刊, 2008(5): 105-114, 159.
YANG Fu-wei, ZHANG Bing-jian, ZENG Yu-yao, et al. Exploratory Research on the Scientific Nature and Application of Traditional Sticky Rice Mortar [J]. Palace Museum Journal, 2008(5): 105-114, 159.

- [14] 鹿群,郭少龙,王闵闵,等.纤维水泥土力学性能的试验研究[J].岩土力学,2016,37(增2):421-426.
LU Qun, GUO Shao-long, WANG Min-min, et al. Experimental Study of Mechanical Properties of Fiber Cement Soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 421-426.
- [15] 米海珍,黄建明,胡燕妮.三七灰土本构关系及强度性质试验[J].建筑科学与工程学报,2014,31(2):112-118.
MI Hai-zhen, HUANG Jian-ming, HU Yan-ni. Experiment on Constitutive Relation and Strength Properties of Three-to-seven Lime-loess [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31 (2) : 112-118.
- [16] BURROUGHS S. Soil Property Criteria for Rammed Earth Stabilization[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008, 20(3):264-273.
- [17] JAYASINGHE C, KAMALADASA N. Compressive Strength Characteristics of Cement Stabilized Rammed Earth Walls[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(11):1971-1976.
- [18] PRABAKAR J, SRIDHAR R S. Effect of Random Inclusion of Sisal Fibre on Strength Behaviour of Soil [J]. Construction and Building Materials, 2002, 16(2):123-131.
- [19] ACHENZA M, FENU L. On Earth Stabilization with Natural Polymers for Earth Masonry Construction [J]. Materials and Structures, 2007, 39(1):21-27.
- [20] 李最雄,赵林毅,孙满利.中国丝绸之路土遗址的病害及PS加固[J].岩石力学与工程学报,2009,28(5):1047-1054.
LI Zui-xiong, ZHAO Lin-yi, SUN Man-li. Deterioration of Earthen Sites and Consolidation with PS Material Along Silk Road of China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 1047-1054.
- [21] 刘士雨,俞缙,曾伟龙,等.微生物诱导碳酸钙沉淀修复三合土裂缝效果研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(1):191-204.
LIU Shi-yu, YU Jin, ZENG Wei-long, et al. Repair Effect of Tabia Cracks with Microbially Induced Carbonate Precipitation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1): 191-204.
- [22] BUI Q B, MOREL J C, VENKATARAMA REDDY B V, et al. Durability of Rammed Earth Walls Exposed for 20 Years to Natural Weathering[J]. Building and Environment, 2009, 44(5):912-919.
- [23] HALL M R. Assessing the Environmental Performance of Stabilised Rammed Earth Walls Using a Climatic Simulation Chamber[J]. Building and Environment, 2007, 42(1):139-145.
- [24] DONG L, ZHOU H L, LI H X, et al. Climate Chamber Experiment-based Thermal Analysis and Design Improvement of Traditional Huizhou Masonry Walls [J]. Sustainability, 2018, 10(3):694.
- [25] 崔晨.某城墙土遗址病害及改性黄土修复后稳定性分析[D].西安:西安理工大学,2019.
CUI Chen. Disease of a City Wall Soil Site and Stability Analysis of Modified Loess After Restoration[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [26] ZHU C H, WANG S H, MA Z Y, et al. Model Investigation of Anti-seepage Measures for the Foundation of a Heritage Building Based on Soil Improvement [J]. International Journal of Architectural Heritage, 2022, 16(9):1414-1431.
- [27] 李华,李同录,江睿君,等.基于滤纸法的非饱和渗透性曲线测试[J].岩土力学,2020,41(3):895-904.
LI Hua, LI Tong-lu, JIANG Rui-jun, et al. Measurement of Unsaturated Permeability Curve Using Filter Paper Method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(3):895-904.
- [28] 卢珊,张宏芳,屈直,等.1961—2015年陕西省不同等级降水事件变化特征[J].气象与环境科学,2018,41(1):77-85.
LU Shan, ZHANG Hong-fang, QU Zhi, et al. Variation Characteristics of Precipitation Events in Different Levels in Shaanxi Province from 1961 to 2015[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2018, 41(1):77-85.