

文章编号:1007-9629(2022)05-0532-05

开封城墙修复土配合比试验

岳建伟^{1,2}, 杨雪¹, 赵丽敏^{1,2,*}, 张大伟¹

(1. 河南大学 土木建筑学院, 河南 开封 475004;

2. 河南大学 开封市不可移动文物修复与安全评价重点实验室, 河南 开封 475004)

摘要:为提高开封城墙抵御环境侵蚀的能力,采用甲基硅酸钠、石灰和胶粉作为外加剂,通过正交试验,对不同配合比修复土试样进行直接剪切试验、毛细吸水试验和扫描电镜测试,优化修复土的配合比。结果表明:甲基硅酸钠、石灰、胶粉的加入能有效提高修复土的力学性能和耐水性能;外加剂对修复土黏聚力的影响顺序为石灰>胶粉>甲基硅酸钠,对内摩擦角及耐水性能的影响顺序为甲基硅酸钠>石灰>胶粉;当甲基硅酸钠掺量为2.0%、石灰掺量为5.0%、胶粉掺量为2.0%时,修复土配合比最优。

关键词:城墙修复;极差分析;力学性能;毛细吸水

中图分类号:TU57

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.05.013

Experimental on Mix Proportion of Restoration Soil for Kaifeng City Wall

YUE Jianwei^{1,2}, YANG Xue¹, ZHAO Limin^{1,2,*}, ZHANG Dawei¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475004, China; 2. Key Laboratory for Restoration and Safety Evaluation of Immovable Cultural Relics in Kaifeng, Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: In order to improve the ability of Kaifeng city wall to resist environmental erosion, sodium methyl silicate, lime and rubber powder were used as admixtures, direct shear test, capillary absorption test and scanning electron microscopy test were carried out on the samples of restoration soil with different mix proportion through orthogonal tests to optimize the mix proportion of the restoration soil. The results show that the addition of sodium methyl silicate, lime and rubber powder can effectively improve the mechanical property and water resistance of the restoration soil. The influence order of admixtures on the cohesion of the restoration soil is lime>rubber powder>sodium methyl silicate. The influence order of admixtures on the internal friction angle and water tolerance is sodium methyl silicate>lime>rubber powder. The optimum mix proportion of restoration soil is 2.0% of sodium methyl silicate, 5.0% of lime and 2.0% of rubber powder.

Key words: maintenance of city wall; extreme difference analysis; mechanical property; capillary water absorption

开封市地处黄河下游南岸,具有丰富的地表水资源。夏季降雨增多和黄河水位上涨引起开封市地下水位波动,易溶盐伴随毛细作用在土遗址中不断迁移、结晶,导致开封城墙遗址土出现不同程度的开裂、剥落和泛碱等现象。研究表明,毛细水引发的干湿循环会改变土体内部微观结构,对土体具有一定

的劣化作用^[1-4]。如何优化开封城墙修复土的配合比,有效解决地下水分、盐分对开封城墙和墙基夯土的侵蚀,并在提高土遗址力学性能的同时,注重改善其水理性质是修复土遗址的关键问题。

在人类早期的建筑活动中,石灰是最早被使用的胶凝材料之一^[5],被古人大量用于不可移动文物的基

收稿日期:2021-03-03; 修订日期:2021-05-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978634);河南大学学科培育项目(2019YLZDCG05);河南省科技发展计划项目(212102310287, 212102310271)

第一作者:岳建伟(1972—),男,河南驻马店人,河南大学教授,硕士生导师,博士.E-mail:yjwchn@126.com

通讯作者:赵丽敏(1980—),女,河南开封人,河南大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail:mumu55882005@163.com

础夯土加固.相关学者在加固现存土遗址时,为减少现代建筑痕迹,选用石灰与其他材料共同加固,如:有机硅、粉煤灰、纤维等,这在提高土遗址力学性能和抗风化方面效果显著^[6-9].在改善土遗址水理性质方面,相关学者从材料选择和加固方式入手,进一步探索土遗址的加固和保护方法,研究结果对土遗址防水抗渗具有重要指导意义^[6,10-13].然而,由于加固材料的属性不能尽善尽美,对土遗址加固效果各不相同,个别土遗址经加固后会出现“泛白”、抗冻融性能较差等问题.

众学者的研究成果在一定程度上推动了土体改良及提高力学性能等方面的研究,但能同时提高土遗址力学性能和水理性质的研究不多,尤其以粉质黏土为主进行土遗址配合比的研究较少.本文以开封城墙修复土为研究对象,基于开封气候特征变化,采用甲基硅酸钠、石灰和胶粉作为外加剂,通过正交试验优化修复土的配合比,以期提高修复土的力学性能和耐水性能.

1 试验

1.1 原材料

土取自开封城墙附近,根据 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》,测得其为粉质黏土(素土),天然含水率(质量分数,文中涉及的含水率、掺量等均为质量分数)为 13.20%,塑限为 21.03%,液限为 37.63%,塑性指数为 16.6,最大干密度为 1.68 g/cm³,最优含水率为 14.32%.外加剂中:石灰的相对分子质量为 56.08,CaO 含量不低于 98%,灼蚀量为 2%;甲基硅酸钠的 pH 值为 12~14;胶粉为可再分散聚合物乳胶粉.

1.2 试验方案

采用 3 因素 4 水平的正交试验设计:3 因素为甲基硅酸钠、石灰、胶粉,分别记为因素 A、B、C;4 水平为甲基硅酸钠、石灰、胶粉的 4 个掺量,甲基硅酸钠的掺量为 1.0%、2.0%、3.0%、4.0%,石灰的掺量为 1.0%、3.0%、5.0%、7.0%,胶粉的掺量为 0.5%、1.0%、1.5%、2.0%,将各掺量按从小到大的顺序记为水平 1、2、3、4.采用正交表 L₁₆(4³),设素土(A₀B₀C₀)为对照组,共 17 组试样.以黏聚力 F 、内摩擦角 θ 和吸水质量减少率 w 作为评价指标.

1.3 试样制备

将素土烘干、碾碎、过筛去除杂质后备用.石灰对试样的含水率影响较大,根据 GB/T 50123—2019 分别对不同石灰掺量的修复土试样进行击实试验.采用击实试验所得最优含水率及最大干密度,将素土、甲基硅酸钠、石灰、胶粉与纯水按比例混合、搅拌均匀后密封静置 24 h.制备 $\phi 61.8 \times 20.0$ mm 试样用于直接剪切试验,制备 $\phi 39.1 \times 80.0$ mm 试样用于毛

细吸水试验,每组试验均设置 3 个平行试样,结果取平均值.试样制备后,放入 20℃、相对湿度为 90% 的恒温恒湿箱中养护 28 d,使石灰、甲基硅酸钠、胶粉与素土充分反应.

1.4 试验方法

采用北京华勘科技有限责任公司生产的全自动直剪仪进行直接剪切试验,根据 GB/T 50123—2019,设定剪切速率为 0.8 mm/min,分别施加 100、200、300、400 kPa 的垂直压力.根据气象资料显示,开封市近 20 a 夏季平均气温为 26.9℃,平均相对湿度为 69.6%,因此毛细吸水试验在 27℃、相对湿度为 70% 的恒温恒湿箱中进行,以模拟夏季暴雨过程中城墙土底部积水及暴雨停止后雨水蒸发的过程,24 h 后,测得每组试样相对素土试样的吸水质量减少率.用赛默飞世尔 FEI Quanta 250 环境扫描电子显微镜(SEM)对修复土最优配合比与素土进行微观测试.

2 正交试验结果及分析

先采用极差分析法确定每种因素对评价指标的影响规律和影响显著性,再通过多功能系数分析对各评价指标进行综合考察评选.正交试验结果见表 1,表中 A₁B₁C₁ 为甲基硅酸钠、石灰、胶粉掺量分别为 1.0%、1.0%、0.5% 的修复土试样,其他类推.

2.1 极差分析

对表 1 中黏聚力、内摩擦角、吸水质量减少率等评价指标进行极差分析,结果见表 2,表中: $K_i(i=1, 2, 3, 4)$ 为某个因素第 i 个水平的指标之和; k_i 为其平均值; R 为极差,极差越大,表明该试验因素对试验指标的影响越大,作用越显著.由表 2 中 R 的大小可以看出:对修复土黏聚力和内摩擦角指标的影响顺序为石灰>胶粉>甲基硅酸钠,对耐水性指标的影响顺序为甲基硅酸钠>石灰>胶粉;每个因素水平对应的最大 K_i 值为该因素的最优水平,满足黏聚力、内摩擦角和吸水质量减少率的最优配合比组合分别是 A₂B₄C₃、A₁B₃C₁、A₄B₁C₄.

甲基硅酸钠、石灰和胶粉在素土中会发生一系列物理、化学反应,从而改变了素土的性质,使其力学性能及耐水性能得到提高.

甲基硅酸钠对修复土黏聚力和内摩擦角指标的影响最小,对耐水性能指标影响最大.与素土相比,随着甲基硅酸钠掺量的增大,修复土黏聚力呈先上升后下降的趋势,内摩擦角呈缓慢下降的趋势,吸水质量减少率呈逐步上升的趋势.甲基硅酸钠分子中的甲基基团是常见的疏水基团,可以在修复土颗粒表面形成憎水层,具有微膨胀、增加密实度的功能^[14].

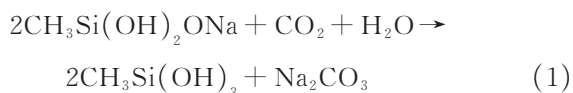
表1 正交试验结果
Table 1 Results of orthogonal tests

Orthogonal combination	F/kPa	$\theta/(^{\circ})$	$w/\%$	Orthogonal combination	F/kPa	$\theta/(^{\circ})$	$w/\%$
A ₀ B ₀ C ₀	65.00	22.30	0	A ₃ B ₁ C ₃	94.50	26.50	58.60
A ₁ B ₁ C ₁	81.50	31.00	42.19	A ₃ B ₂ C ₄	90.00	32.60	56.40
A ₁ B ₂ C ₂	88.00	36.50	39.21	A ₃ B ₃ C ₁	87.50	33.10	53.30
A ₁ B ₃ C ₃	92.50	34.50	36.50	A ₃ B ₄ C ₂	119.00	28.50	55.80
A ₁ B ₄ C ₄	124.00	25.20	37.10	A ₄ B ₁ C ₄	63.50	26.50	80.90
A ₂ B ₁ C ₂	80.50	28.80	57.40	A ₄ B ₂ C ₃	113.50	26.70	60.80
A ₂ B ₂ C ₁	108.00	32.50	43.20	A ₄ B ₃ C ₂	108.00	32.00	56.60
A ₂ B ₃ C ₄	112.00	35.80	42.50	A ₄ B ₄ C ₁	102.50	35.90	51.80
A ₂ B ₄ C ₃	123.50	25.40	41.90				

表2 正交试验指标分析
Table 2 Index analysis of orthogonal tests

Index	F/kPa			$\theta/(^{\circ})$			$w/\%$		
	Factor A	Factor B	Factor C	Factor A	Factor B	Factor C	Factor A	Factor B	Factor C
K ₁	386.00	320.00	379.50	127.20	112.80	132.50	155.00	239.08	190.48
K ₂	424.00	399.50	395.50	122.50	128.30	125.80	185.00	199.60	209.00
K ₃	391.00	400.00	424.00	120.70	135.40	113.10	224.08	188.88	197.80
K ₄	387.50	469.00	389.50	121.10	115.00	120.10	250.08	186.60	216.88
k ₁	96.50	80.00	94.88	31.80	28.20	33.13	38.75	59.77	47.62
k ₂	106.00	99.88	98.88	30.63	32.08	31.45	46.25	49.90	52.25
k ₃	97.75	100.00	106.00	30.18	33.85	28.28	56.02	47.22	49.45
k ₄	96.88	117.25	97.38	30.28	28.75	30.03	62.52	46.65	54.22
R	38.00	149.00	44.50	6.50	22.60	19.40	23.77	13.12	6.60

甲基硅酸钠与水、CO₂反应生成聚硅氧烷膜([CH₃SiO_{3/2}]_n), [CH₃SiO_{3/2}]_n具有很强的憎水性,能使修复土颗粒表面的接触角增大,提高其耐水性能,其化学反应式为:



石灰可在土体中发生结晶作用和碳化反应,生成Ca(OH)₂晶体和CaCO₃沉淀.Ca(OH)₂晶体是一种强度较高的固体,能够提高试样的力学性能,部分生成的CaCO₃能够与土颗粒胶结,增大土样密实度,减少其孔隙率,提高土颗粒间的结合力.随着石灰掺量的增加,修复土黏聚力呈逐渐增大的趋势,内摩擦角呈先增大后减小的趋势,吸水质量减少率由59.77%降至46.65%,耐水性能呈下降趋势.这是由于所掺入的石灰未能全部发生结晶碳化,部分残留在试样中,使修复土颗粒之间的咬合摩擦力减小^[15-16].试验结果从某种程度上验证了黏聚力和内摩擦角成负相关性的推论^[17-18],且修复土试样中可与甲基硅酸钠反应的CO₂和水逐渐减少,甲基硅酸钠无法生成足

够多的聚硅氧烷膜,导致试样耐水性能减弱.下一步将探究不同养护环境对修复土的影响.

胶粉对修复土抗剪强度指标的影响仅次于石灰,随着胶粉掺量的增大,修复土黏聚力呈先增大后减小的趋势,内摩擦角呈整体减小的趋势,吸水质量减少率呈逐渐增加的趋势.这是因为胶粉增大了修复土颗粒间的胶结作用,减少了修复土颗粒之间的内摩擦力,而胶粉与修复土颗粒胶结可提高土体的黏结性和密实度,使其耐水性能得到改善.

2.2 功效系数分析

功效系数法是把要考核的各项指标按照多档次标准,通过功效函数将各指标转化为可度量的评价分数,对研究进行总体评价的一种方法^[19].为综合考察评选开封城墙修复土的评价指标,采用极大型变量单项功效系数计算公式,计算黏聚力、内摩擦角、吸水质量减少率的功效系数 d_F 、 d_θ 、 d_w .评价指标数值越大,单项功效系数越大,修复土力学性能和水理性能越好.由于本研究目的在于提高开封城墙修复土力学性能和水理性质,故将3个评价指标的单项功效系数乘以相同的权重系数0.333 3,再进行加和得到总功效系数 D .功效系数结果见表3.由表3可见,A₂B₃C₄的总功效

系数最高(85.39),这表明其具有较好的力学性能和耐水性能,总体性能最优.由此得到修复土的最优配合比:甲基硅酸钠、石灰、胶粉的掺量分别为2.0%、5.0%、2.0%.

表3 功效系数结果
Table 3 Results of efficacy coefficient

Orthogonal combination	d_F	d_θ	d_w	D	Orthogonal combination	d_F	d_θ	d_w	D
A ₁ B ₁ C ₁	65.20	82.00	74.79	73.99	A ₃ B ₁ C ₃	75.60	73.00	85.73	78.10
A ₁ B ₂ C ₂	70.40	93.00	72.81	78.73	A ₃ B ₂ C ₄	72.00	85.20	84.27	80.48
A ₁ B ₃ C ₃	74.00	89.00	71.00	77.99	A ₃ B ₃ C ₁	70.00	86.20	82.20	79.46
A ₁ B ₄ C ₄	99.20	70.40	71.40	80.33	A ₃ B ₄ C ₂	95.20	77.00	83.87	85.35
A ₂ B ₁ C ₂	64.40	77.60	84.93	75.64	A ₄ B ₁ C ₄	50.80	73.00	100.60	74.79
A ₂ B ₂ C ₁	86.40	85.00	75.47	82.28	A ₄ B ₂ C ₃	90.80	73.40	87.20	83.79
A ₂ B ₃ C ₄	89.60	91.60	75.00	85.39	A ₄ B ₃ C ₂	86.40	84.00	84.40	84.92
A ₂ B ₄ C ₃	98.80	70.80	74.60	81.39	A ₄ B ₄ C ₁	82.00	91.80	81.20	84.99

2.3 微观分析

素土和最优配合比修复土试样的SEM照片见图1.由图1可见:素土内部孔隙率较大,土颗粒排布不均匀,颗粒级配不佳,导致颗粒间黏结作用较弱,且土颗粒表面黏结物较少;最优配合比修复土试样中,石灰、甲基硅酸钠、胶粉及其反应生成物填充了土颗粒之间的空隙,使土体骨架整体性得到提高,土颗粒间填充密实,颗粒级配改善较为

明显,从而降低了修复土试样的孔隙率;最优配合比修复土试样表面存在絮状物,可增强土颗粒间的胶结作用,从而提高土体的整体稳定性.甲基硅酸钠溶液中的硅酸盐凝胶粒子在素土孔隙中起填充作用,石灰在土体内反应生成Ca(OH)₂和CaCO₃晶体,胶粉生成的胶凝物质使分散的土颗粒黏结成整体,在这几种因素作用下,有效提高了修复土力学性能与耐水性能.

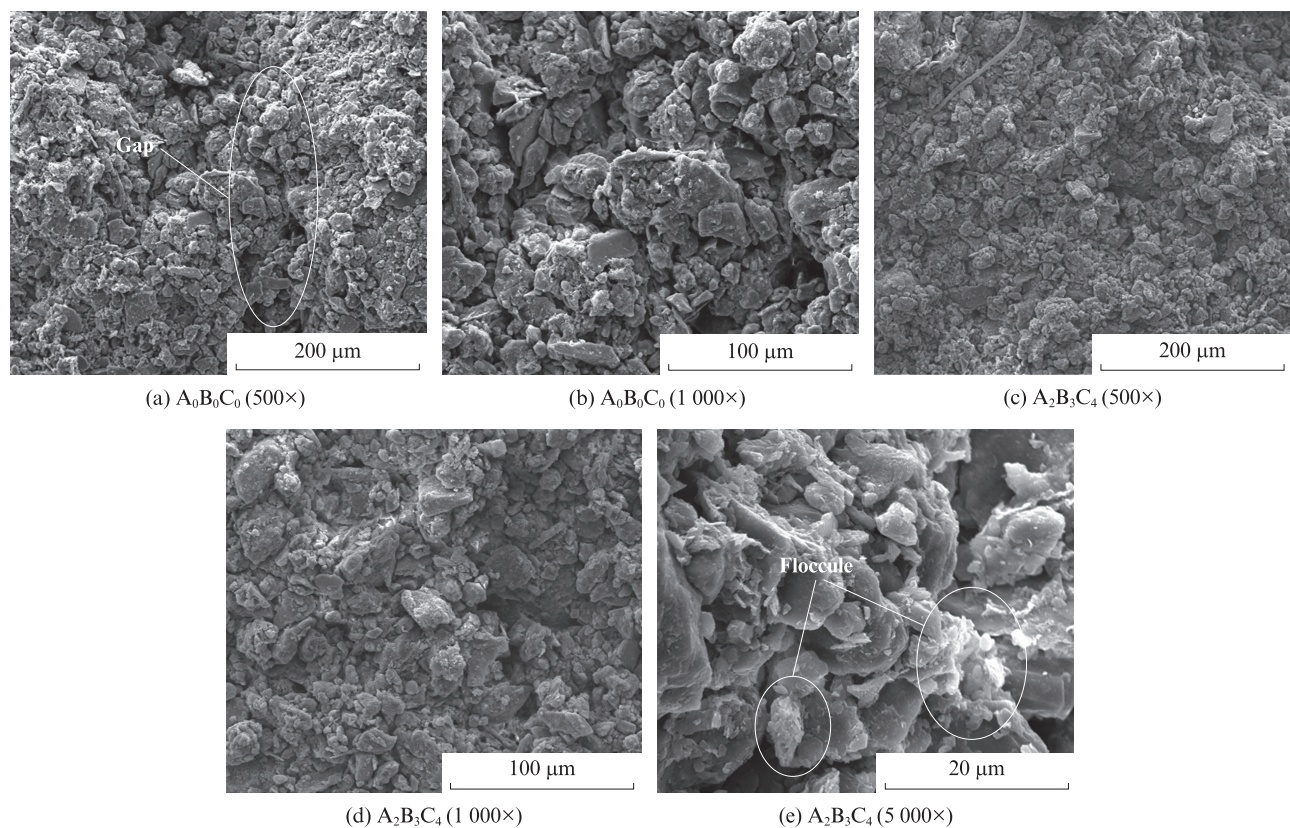


图1 素土及最优配合比修复土的SEM照片
Fig. 1 SEM images of A₀B₀C₀ and restoration soil with optimum mixture ratio

3 结论

(1)甲基硅酸钠、石灰、胶粉的加入能有效提高开封城墙修复土的力学性能和耐水性能。随着甲基硅酸钠掺量的增加,修复土的黏聚力呈先上升后下降的趋势,内摩擦角呈缓慢下降的趋势,耐水性能呈增大趋势;随着石灰掺量的增加,修复土的黏聚力和内摩擦角有不同程度的提高,耐水性能呈下降趋势;随着胶粉掺量的增加,修复土的黏聚力呈先增大后减少的趋势,内摩擦角整体呈减小的趋势,耐水性能呈增大趋势。

(2)通过正交试验,开封城墙修复土黏聚力、内摩擦角指标的影响顺序为石灰>胶粉>甲基硅酸钠,对耐水性能指标的影响顺序为甲基硅酸钠>石灰>胶粉。

(3)修复土黏聚力最佳的最优配合比为:甲基硅酸钠掺量2.0%、石灰掺量7.0%、胶粉掺量1.5%;内摩擦角最佳的最优配合比为:甲基硅酸钠掺量1.0%、石灰掺量5.0%、胶粉掺量0.5%;耐水性能最佳的最优配合比为:甲基硅酸钠掺量4.0%、石灰掺量1.0%、胶粉掺量2.0%。采用功效系数法评价得出综合性能最优的修复土配合比为:甲基硅酸钠掺量2.0%、石灰掺量5.0%、胶粉掺量2.0%。最优配合比修复土骨架整体性得到提高,颗粒级配改善较为明显,土颗粒间填充密实,土样孔隙率降低,可有效提高修复土的力学性能和耐水性能。

参考文献:

- [1] 张虎元,严耿升,赵天宇,等.土建筑遗址干湿耐久性研究[J].岩土力学,2011,32(2):347-355.
ZHANG Huyuan, YAN Gengsheng, ZHAO Tianyu, et al. Durability of earthen architecture ruins under cyclic wetting and drying[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2):347-355.(in Chinese)
- [2] SADISUN I A, SHIMADA H, ICHINOSE M, et al. Study on the physical disintegration characteristics of subang claystone subjected to a modified slaking index test[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2005, 23(3):199-218.
- [3] GUNAY Y, SARI D, CETIN M, et al. Impact of cyclic wetting-drying on swelling behavior of lime-stabilized soil[J]. Building and Environment, 2005, 42(2):681-688.
- [4] 张芳枝,陈晓平.反复干湿循环对非饱和土的力学特性影响研究[J].岩土工程学报,2010,32(1):41-46.
ZHANG Fangzhi, CHEN Xiaoping. Influence of repeated drying and wetting cycles on mechanical behaviors of unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1):41-46.(in Chinese)
- [5] 魏国锋,张秉坚,方世强.石灰陈化机理及其在文物保护中的应用研究[J].建筑材料学报,2012,15(1):96-102.
WEI Guofeng, ZHANG Bingjian, FANG Shiqiang. Aging mechanism of quickly-me and application study of aged lime in conservation of cultural relics[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(1):96-102.(in Chinese)
- [6] 岳建伟,林健,王永锋,等.开封仿遗址土水理性质的改良研究[J].工程科学与技术,2020,52(1):46-55.
YUE Jianwei, LIN Jian, WANG Yongfeng, et al. Study on the improvement of soil water in kaifeng imitation site[J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(1):46-55.(in Chinese)
- [7] 张磊,桑国臣.基于正交试验制备生土基复合墙体材料及其热湿综合性能分析[J].建筑材料学报,2020,23(2):372-380.
ZHANG Lei, SANG Guochen. Hygrothermal comprehensive property of soil based composite wall materials prepared with orthogonal experimental design[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2):372-380.(in Chinese)
- [8] 李新明,路广远,张浩扬,等.石灰偏高岭土改良粉砂土强度特性与微观机理[J].建筑材料学报,2021,24(3):648-655.
LI Xinming, LU Gungyuan, ZHANG Haoyang, et al. Study on strength characteristics and micro-mechanism of lime-metakaolin improving silty soil[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(3):648-655.(in Chinese)
- [9] YANG F W, ZHANG B J, MA Q L. Study of sticky rice-lime mortar technology for the restoration of historical masonry construction[J]. Accounts of Chemical Research, 2010, 43(6):936-944.
- [10] 彭红涛,张琪,李乃胜,等.糯米浆对土遗址修复用三合土性能的影响[J].建筑材料学报,2011,14(5):718-722.
PENG Hongtao, ZHANG Qi, LI Naisheng, et al. Effect of sticky rice paste on properties of tabia used to repair ancient earthen ruins[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(5):718-722.(in Chinese)
- [11] ZHANG Q Y, CHEN W W, YUAN P B. Experimental study on impregnation and consolidation effects of modified polyvinyl alcohol solution for coarse-grained soils: A case study on the subashi buddhist temple ruins of china [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(12):1487-1500.
- [12] 谌文武,张起勇,刘宏伟,等.高分子材料SH渗透加固遗址土的效果研究[J].工程地质学报,2017,25(5):1307-1313.
CHEN Wenwu, ZHANG Qiyong, LIU Hongwei, et al. Reinforcing effect of relic soil sltes penetrated with high polymer material SH[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(5):1307-1313.(in Chinese)
- [13] 张虎元,盖玉玺,朱世彬,等.直流电场抑制潮湿土遗址毛细水上升试验研究[J].兰州大学学报(自然科学版),2016,52(5):571-576.
ZHANG Huyuan, GAI Yuxi, ZHU Shibin, et al. Experimental study of restraining capillary rise on ancient earthen sites moisture circumstance using DC electric field [J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2016, 52(5):571-576.(in Chinese)
- [14] 汤鹏.硅酸钠溶液浓度、温度及甲基硅酸钠对热镀锌层硅酸盐转化膜的影响[D].广州:华南理工大学,2015.