

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.127



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



重庆老鼓楼衙署遗址强度劣化规律及 渗水病害防治对策

仇文岗^a, 王硕^a, 刘汉龙^a, 林思成^a, 杨阳^a, 王鲁琦^a, 张艳梅^b
(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 航空航天学院, 重庆 400044)

摘要:为研究饱水作用下石质遗址的力学强度劣化特征,掌握地下水的渗流迁移路径,多尺度联合开展室内微观试验、宏观试验和现场渗水检测。微观试验包括偏光显微镜、X射线衍射分析和孔隙度测试,宏观试验包括吸水试验和单轴抗压强度软化试验,现场检测主要采用高密度电阻法对含水岩层成像分析。岩相鉴定结果表明:整体岩性为砂质泥岩,矿物成分主要为石英、长石;黏土矿物以伊利石为主,则此类岩石抗干湿循环能力差;砂质泥岩饱和系数在0.84~1.00之间,软化系数在0.55~0.65之间,属于工程地质软岩,高软化性是地层结构变形的主要原因;地表水作用下泥岩裸露并产生构造裂隙,部分岩石表面出现盐析病害,渗流-应力耦合作用下坡体失稳变形;高密度电阻率法现场检测发现,地下水渗漏导致城墙遗址下呈现低阻带,电阻率在 $20\ \Omega\cdot\text{m}$ 以下,主要为水渠渗水所致。建议对遗址地上和地下结构进行排水和防渗处理。

关键词:石质遗址;强度软化;渗水病害;电阻法

中图分类号: TU458 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2023)05-0026-11

Strength deterioration pattern and anti-seepage measures of the Old Drum Tower Yamen site in Chongqing

ZHANG Wengang^a, WANG Shuo^a, LIU Hanlong^a, LIN Sicheng^a, YANG Yang^a,
WANG Luqi^a, ZHANG Yanmei^b

(a. Scholl of Civil Engineering; b. College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: In order to study the mechanical strength deterioration characteristics of the stone site under the effect of water saturation and to determinethe seepage and migration path of groundwater, lab micro-tests, macro-tests and field seepage tests are comprehensively conducted on multiple scales. The microscopic tests include polarized light microscope (PM), X-Ray diffraction (XRD) and porosity test, the macroscopic tests include water absorption test and uniaxial compressive strength softening test, and the on-site testing mainly adopts

收稿日期: 2022-08-30

基金项目: 重庆市自然科学基金联合基金重点项目(2022NSCQ-LZX0001); 大足石刻研究院横向项目(DZ-CG-20220325-1); 重庆市技术创新与发展应用专项(JG2021072); 重庆市科研机构绩效激励引导专项(cstc2021jxj00028)

作者简介: 仇文岗(1983-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程研究, E-mail: zhangwg@cqu.edu.cn.

Received: 2022-08-30

Foundation items: Natural Science Foundation of Chongqing Joint Key Project (No. 2022NSCQ-LZX0001); Funding of Dazu Rock Carvings Research Institute (No. DZ-CG-20220325-1); Chongqing Technical Innovation and Development and Application Special Key Project (No. JG2021072); Performance Incentive and Guidance Special Project of Chongqing Scientific Research Institutions (No. cstc2021jxj00028)

Author brief: ZHANG Wengang (1983-), professor, doctoral supervisor, main research interest: geotechnical engineering, E-mail: zhangwg@cqu.edu.cn.

high-density resistance method to image and analyze the water-bearing rock layer. The petrographic identification results show that 1) the overall lithology is sandy mudstone, and the mineral composition is mainly of quartz and feldspar. Illite is the main clay mineral. This kind of rock has poor resistance to wetting and drying cycle. The saturation coefficient of sandy mudstone is between 0.84~1.00, and the softening coefficient is between 0.55~0.65, indicating a soft rock, and its high softening is the main reason for the deformation of formation structure. 2) Under the action of surface water, the mudstone is exposed and tectonic fissures are formed, some rock surfaces are subjected to salt precipitation problem, and the slope is unstable and deformed under the coupling action of seepage and stress. The field detection of high-density resistivity method shows that the groundwater leakage leads to a low resistance zone below, and the resistivity is below $20 \Omega \cdot \text{m}$, which is mainly caused by seepage of the canal.

Keywords: stone site; strength softening; seepage disease; resistivity method

在石质文物保护过程中,水的存在往往会导致岩石的内部性质发生变化^[1],造成力学强度普遍降低,因此,关于水岩作用下的力学强度劣化问题不容忽视。石质文物的本体和载体多为较坚硬完整的岩石,遇水反应后极易造成岩石胀裂、崩解和软化,力学特性具有明显劣化特点^[2]。高效准确地认知水岩作用下力学强度软化特性,掌握水的渗流迁移路径,对于石质文物保护具有重要意义。

针对岩石吸水软化问题,学者们已经取得了较多研究成果。郭军等^[3]开展了室内吸水软化试验,研究了煌斑岩在不同饱水时间下的单轴抗压强度软化特征。赵立财^[4]、熊德国等^[5]开展了不同围压下的饱水三轴压缩试验,发现砂岩饱水劣化效应明显,力学性能随饱水时间延长而降低。谭涛等^[6]、王鹏等^[7]对比了干燥砂岩和饱水砂岩的应力-应变曲线,发现饱水作用降低了砂岩的内聚力、内摩擦角和峰值强度。陈旭等^[8]在干燥和饱和条件下开展了3种岩石的声波纵波透射试验,结果表明,岩石吸水后声波信号由高频区向低频区靠近。李佳伟等^[9]、宋勇军等^[10]通过三轴压缩试验研究了水岩作用下板岩的力学软化特性。除试验手段之外,较多学者还建立了岩石吸水力学强度软化本构模型,王军保等^[11]建立了改进的Duncan-Chang模型,描述了砂岩应变软化特性。金俊超等^[12]基于Hoek-Brown(H-B)准则,结合硬岩与软岩的试验数据,提出一种普适的非线性演化模型,验证了GSI(地质强度指标)作为软化参数的准确性。张超等^[13]基于Weibull分布建立了岩石损伤模型,有效模拟了岩石峰值强度之后的变形过程。在石质文物的保护过程中,不但要掌握岩石吸水力学软化特性,还要对水的渗流特征进行勘探研究,从而制定合理的水害防治对策。

在现场检测方面,中国的石质文物检测技术取得了一定发展,由于文物的易损性和不可替代性,大量无损检测技术得到应用^[14]。常用的检测设备包

括水准仪^[15]、全站仪^[16]、红外热成像仪^[17]、近景摄影机^[18]、高密度电法仪^[19]、三维激光扫描仪^[20]、超声波检测仪^[21]、探地雷达^[22]。其中,关于文物含水量和渗水检测方面的设备有红外热成像仪和高密度电法仪。张慧慧等^[23]采用红外热成像仪对不同渗水程度的岩体进行了探测,测定了岩石渗水量的高低。肖宽怀等^[24]采用高密度电阻法对龙门石窟潜溪寺进行了探测,发现山坡地下水沿着裂隙入渗,导致潜溪寺地下部分出现高渗区域。Sass等^[25]利用高密度电阻法研究了石质墙中水的迁移规律,证明了该技术的可应用性。申喜旺等^[26]采用高密度电阻率法和自然电场法对清水宋墓进行了水害勘测,发现土层中的水主要为雨水入渗累积所致。现场的无损检测技术极大提高了文物遗址中渗水检测的准确性。

笔者以重庆老鼓楼衙署遗址为研究对象,研究试样的矿物组成和孔隙特征,开展石质试样的力学强度试验,并结合现场高密度电阻法勘探渗水范围及基础可能的深度。

1 遗址区介绍

老鼓楼衙署遗址位于重庆市渝中区,东至西四街,西至文化街,北接人民公园,南侧临白象街,解放东路呈东西向、巴县衙门街呈南北向穿过遗址(图1)。老鼓楼衙署历经多个朝代修建,其中宋元的遗迹包括高台建筑、建筑台基、凸字形建筑和三合院,明清两代遗迹多为房址、水沟、墙基、灰坑和水井。除此之外,还保存了清代的大型建筑基址,平面呈长方形,坐北朝南,面阔23 m,进深17.75 m,柱网排列整齐,排水设施完整。

老鼓楼遗址所在的渝中区地貌以剥蚀构造地貌为主,岩性和地质构造相对复杂。嘉陵江流经砂岩、泥岩等岩层组成褶皱地区,冲刷、侵蚀河床严重,岸坡易形成高岸陡坡并堆积大量冲积物。

石质遗址的岩相多为砂岩和泥岩,砂岩发育平



(a) 遗址平面图



(b) 遗址实貌

图 1 遗址分布和实貌

Fig. 1 Site distribution and actual appearance

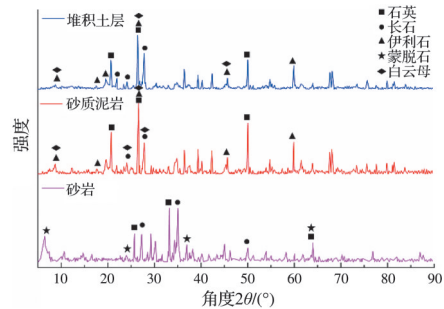
行层理,泥岩多包含细砂。遗址区域地基基本水平,略呈逆向坡。遗址所在区四季分明,降雨量充足,年平均降雨量为 1 088.8 mm,主要集中在春季末、夏季和秋季初,多为大雨或者暴雨。年平均气温 17.6 °C,极端最高气温 42.2 °C,极端最低气温 -1.8 °C。城墙遗址和场地有多种岩石,场地上层为人工填土层,结构松散,多为粉质黏土,碎石以砂岩为主,分选性较差。中层为砂质泥岩层,层理较为发育,风化岩层结构破坏严重,原岩结构破坏。下层为砂岩,呈现灰绿、灰黄色,主要矿物成分为岩屑、长石、石英等,多为泥质胶结和钙质胶结,吸水风干多出现裂纹。

2 室内试验研究

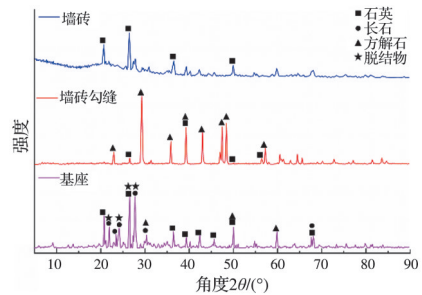
试验岩石试样取自遗址现场 8 个钻探点,其中,在遗址西北区域共布置 5 个钻孔点,分别编号为 ZK01、ZK02、ZK03、ZK04 和 ZK05,钻孔深度为 18 m。遗址东南区域共 3 个钻孔点,分别编号为 ZK06、ZK07 和 ZK08,钻孔深度为 15 m。由于遗址上方多为覆盖土体,较为碎散,无法取出完整试样进行试验研究,因此,试验对象主要为砂岩和砂质泥岩。

2.1 矿物组成

遗址区的场地上层覆盖土体主要矿物成分为石英、斜长石,约占矿物成分 60% 以上(图 2)。黏土矿物主要为伊利石,另有少量的云母类,土体遇水膨胀性能中等,阻水性一般。砂质泥岩层颗粒主要为石英,含少量斜长石。胶结物主要为伊利石和绿泥石,另有发育云母片等矿物。黏土矿物风化更为彻底,另铁元素含量相对更高。砂岩中以石英为主,还具有较多碱性长石、斜长石,黏土矿物以蒙脱石为主,钙质胶结物含量少。这类岩石抗干湿循环能力较差,软化系数较高。



(a) 基岩载体



(b) 城墙本体

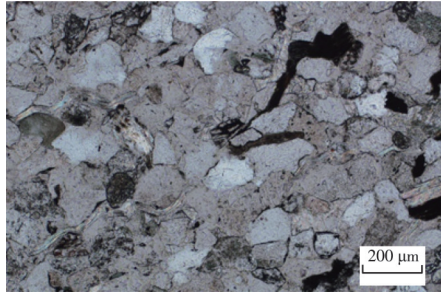
图 2 XRD 矿物成分测试

Fig. 2 Mineral composition test of XRD

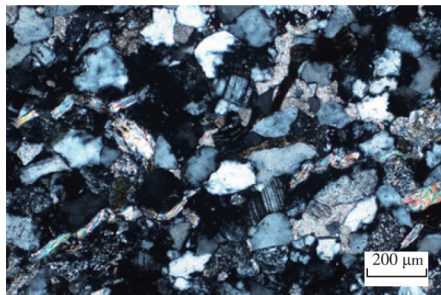
城墙砖主要矿物成分为石英、长石,黏土矿物基本转化为非晶体成分,另外测出少量尖晶石和钙浮石,未见莫来石等矿物,砖的烧制温度应该在 900 °C 以下。墙体勾缝砌筑材料主要成分为方解石、少量石英和长石。基座砂岩的颗粒成分主要为石英和斜长石。黏土矿物含量较低,钙质胶结物较多,基础砂岩抗风化能力明显强于原址基岩。

薄片制作时,选取了泥质含量较低的部分,整体岩性为砂质泥岩。薄片成像显示(图 3),该岩石为细砂结构,块状构造。碎屑颗粒分选较好,磨圆中等,大部分颗粒呈次棱角状-次圆状。支撑方式为颗粒支撑,胶结方式为孔隙式胶结。岩石组分包括石英、岩屑、斜长石、钾长石、白云母及锆石。杂基含量较少,主要为泥质,以黏土为主。胶结物主要

为硅质、钙质和铁质。硅质胶结物呈团块状分布,单偏光下无色透明,正交偏光下全消光,部分颗粒发生脱玻化,形成粒度极小的次生石英,占总体的 8% 左右,钙质胶结物主要为方解石,正交镜下最高干涉色为高级白,占总体的 5% 左右。铁质物呈团块状或粒状分布,单偏光下呈黑色或褐色,正交偏光下全消光,占总体的 2% 左右。



(a) 单偏光



(b) 正交偏光

图 3 泥岩薄片分析

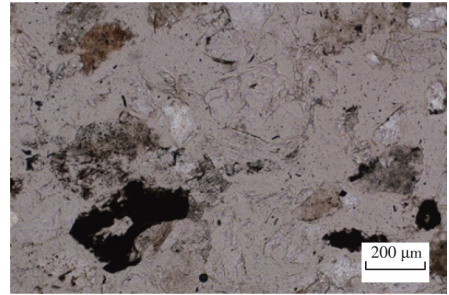
Fig. 3 Thin section analysis of mudstone

遗址墙砖具有细砂结构,呈块状构造(图 4)。碎屑颗粒分选较好,磨圆较差,大部分颗粒呈棱角状-次棱角状。支撑方式为颗粒支撑,胶结方式为孔隙式胶结。岩石组分包括石英、岩屑和锆石。杂基含量较少,主要为泥质,以黏土为主。

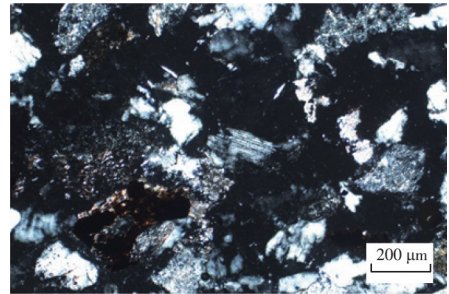
2.2 孔隙特征

孔隙度大小代表了岩石孔隙吸水程度,一般情况下,孔隙度越大,吸水量越大。遗址载体上层土体由于质地松软,难以取样进行孔隙率测试。因此,只对砂质泥岩和砂岩进行了孔隙率测定。试验主要采用氦气测试法,岩石试样需要加工处理成标准试样(长度 50 cm,直径 25 cm)。试验主要依据波尔义定律,将试样放入岩心室,与标准室连通,记录大气压力、初始压力和平衡压力,绘制体积与平衡压力的标准曲线,计算出岩石固相体积,得到岩样孔隙度。

如图 5 所示,砂质泥岩的孔隙率在 6.4%~17.52% 之间,砂岩的孔隙率在 6.4%~12.02% 之间,砂质泥岩平均孔隙率大于砂岩,砂质泥岩的孔



(a) 单偏光



(b) 正交偏光

图 4 墙砖薄片分析

Fig. 4 Thin section analysis of wall tiles

隙空间相对较大,同一条件下吸水量较高。泥质胶结物多为伊利石,伊利石属于亲水性矿物,遇水极易水化膨胀,促进孔隙发育。砂岩的矿物主要以石英和长石为主,石英具有良好的改善岩石孔隙结构的特性,有利于保护孔隙结构,孔隙在原始地层环境或者渗水环境下不易发育,因而孔隙空间较小。

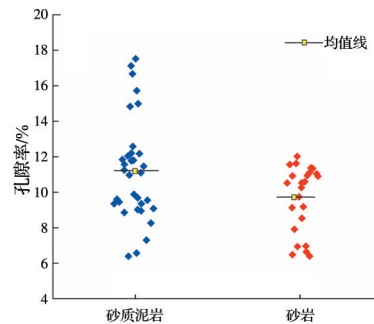


图 5 孔隙度测试

Fig. 5 The test of porosity

2.3 吸水软化特性

岩石的吸水率为岩石在常温常压条件下吸入水的质量与岩石干重的比值,饱和吸水率为岩石在恢复原始地层高压条件或者真空条件下的吸水质量与岩石干重的比值。干燥岩石浸水一般会进入大孔隙,对于小孔隙和封闭孔隙来说,需要计算吸水率与饱和吸水率的关系,才能确定其小孔隙的吸水占比。因此,通常定义了饱和系数 σ ,计算公式为

$$\sigma = \frac{W_a}{W_p} \times 100\% \quad (1)$$

式中： σ 为饱和系数，饱和系数越大，说明吸水率与饱和吸水率越接近，大孔隙的占比较高，常温常压下吸水后残余孔隙越少^[27]，岩石的抗冻融破坏能力越差； W_a 为吸水率； W_p 为饱和吸水率。

如图6所示，砂质泥岩的吸水率介于2.38%~7.73%之间，平均吸水率为4.48%。砂岩的吸水率介于2.4%~4.92%之间，平均吸水率为3.84%。砂质泥岩层的吸水性较强，砂岩的吸水性相对较差。两种岩石的吸水率和饱和吸水率相差较小，在同一坐标系下，以 $y=x$ 建立评价指标线，砂质泥岩地层的饱和系数变化范围较大，介于0.84~1.00之间，砂岩地层的饱和系数变化范围小，介于0.9~0.98之间。砂质泥岩饱和系数相对较大，说明泥岩中大孔隙开放程度较高，遗址砂质泥岩地层易受地下水渗透作用，且抗冻融能力较差。

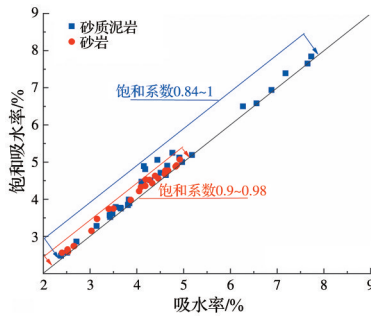


图6 岩石吸水系数

Fig. 6 Water absorption coefficient of rock

通常情况下，岩石吸水会导致力学强度降低，呈现出力学强度软化的特点。软化性指的是岩石浸泡后力学强度降低。软化系数计算公式为

$$k = \frac{\sigma_{cw}}{\sigma_c} \quad (2)$$

式中： k 为软化系数； σ_{cw} 为饱和状态下岩石单轴抗压强度； σ_c 为干燥状态下岩石单轴抗压强度。软化性取决于矿物成分和孔隙大小，亲水性和可溶性矿物较多时，其软化性较强，软化系数较小。当孔隙较多且开放程度较高时，易吸水导致结构软化，软化性增强，软化系数减小^[28]。吸水软化试验试样取自同一钻孔，保证同一深度取样，目的是使同一组试样的水理性质和力学性质相近。其中，同一组试样中的试样1干燥处理后进行单轴试验，性质相近的试样2在饱和处理后同样进行单轴试验，将同一组试验数据进行统计处理，单轴试验共完成5组次。

在完全饱水条件下，3组砂质泥岩单轴抗压强度均有不同程度的下降(图7)，软化系数在0.55~

0.65之间，根据软化系数分类，软化系数小于0.75的岩石软化性较强，属于工程地质软岩^[29]，高强软化性易导致地层结构发生破坏。两组墙砖的软化系数在0.79~0.88之间，平均软化系数为0.84。遗址城墙的软化性弱于泥岩，城墙砖体含有大量的石英和长石，刚性颗粒充足，抗压性能更为优越。

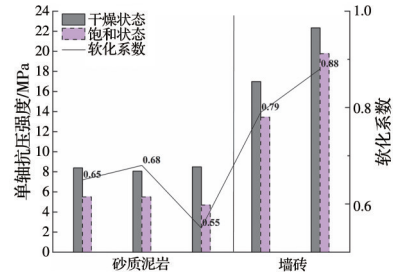


图7 力学强度软化特性

Fig. 7 Softening characteristics of mechanical strength

3 现场电法勘探

3.1 探测原理

高密度电法原理利用了地层岩土体的电性差异，可对地下结构进行有效勘探，在地层构造、岩溶、矿山采空区、滑坡和土石坝等方面均有大量应用^[30]。物探工作区主要位于遗址内，通过高密度电阻率方法测量，可以分析解释并推断渗水位置、范围以及基础可能的深度等。

电阻仪由三电位电极系的温纳装置(α 排列装置)和偶极装置(β 排列装置)构成，基本原理是将电极按供电正极—测量正极—测量负极—供电负极的布置方式在剖面进行等距排列，通过供电正极和供电负极可以获取电流信息，测量正极和测量负极可以获取电位差信息^[31]，如图8(a)所示。由于电极等间距排列，可以获取中心点某一深度的视电阻率 ρ_s ，计算公式为

$$\rho_s = K \frac{\Delta V}{I} \quad (3)$$

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{d_{AM}} - \frac{1}{d_{AN}} - \frac{1}{d_{BM}} + \frac{1}{d_{BN}}} \quad (4)$$

式中： ρ_s 为视电阻率； K 为电极装置系数； ΔV 为探测的电位差； I 为供电电流； d_{AM} 为电极A和M之间的间距； d_{AN} 为电极A和N之间的间距； d_{BM} 为电极B和M之间的间距； d_{BN} 为电极B和N之间的间距，间距单位为m。

通过铺设多个电极，逐次改变电极之间的计算间距，可以得到二维剖面不同深度点的视电阻率值。假设开始测量时电极间距为 a ，随着电极不断向右移动，可得到第1层的剖面信息，随着电极间距

增大为 $2a$, 电极不断向右移动, 可得到第 2 层的剖面信息。依次类推, 不断增大电极间距, 最终探测剖面呈倒梯形(图 8(b))。高密度电法采用计算机硬软件进行控制, 可布置多个电极, 自动组成垂直测点, 观测、记录、计算和成像均为自动化操作。储存的大量数据可提高成像准确性。

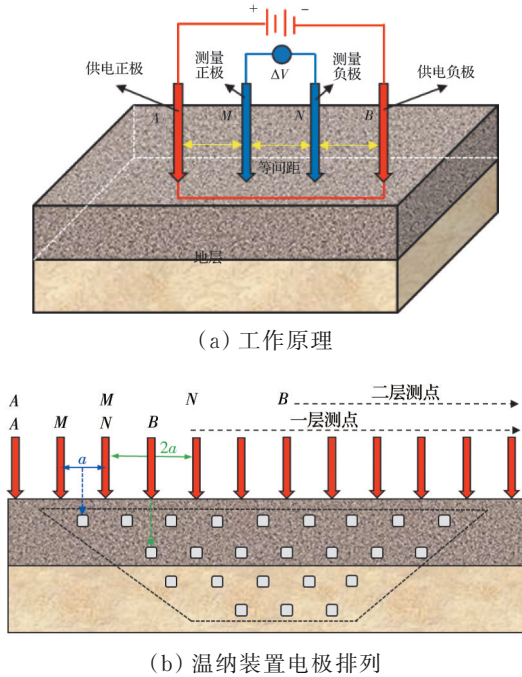


图 8 高密度电法工作原理

Fig. 8 Working principle of high density electrical method

3.2 试验装置及步骤

根据岩石的物性特征分析(见表 1), 干燥的黏土电阻率为 $100\sim 200 \Omega \cdot m$, 含水黏土电阻率在 $10 \Omega \cdot m$ 以下, 下部泥岩粉砂岩的电阻率为 $10\sim 100 \Omega \cdot m$, 而作为城墙基础的砂岩电阻率在 $100\sim 1\ 000 \Omega \cdot m$ 之间^[30]。因此, 理论上可以通过电法探测城墙砂岩条石基础, 也可以探测相对含水高的覆盖层和泥岩, 但覆盖层和泥岩之间的基岩面探测效果受限。

探测微电极高密度电阻率剖面共计 5 条, 其中在遗址西部布置了 3 条测线, 遗址东侧布置 2 条测

表 1 常见岩石的电阻率参数

Table 1 Resistivity parameters of common rocks

名称	电阻率/ $(\Omega \cdot m)$	名称	电阻率/ $(\Omega \cdot m)$
黏土	$(1\sim 2) \times 10^2$	页岩	$(0.5\sim 3) \times 10^2$
含水黏土	$0.5\sim 10$	砂岩	$10\sim 10^3$
亚黏土	$28\sim 100$	含水砂岩	$(0.1\sim 1) \times 10^2$
砾石夹黏土	$(2.2\sim 70) \times 10^2$	粉砂岩	$(0.1\sim 1) \times 10^2$
亚黏土含砾石	$80\sim 240$	泥岩	$(0.1\sim 1) \times 10^2$
卵石	$(3\sim 30) \times 10^2$	砾岩	$10\sim 10^4$
含水卵石	$(1\sim 8) \times 10^2$	石灰岩	$60\sim 10^4$

线(图 9), 总共完成测点 190 个, 点距均为 1 m(见表 2)。在水渠和城墙基础中间, 西部测线 WT01 沿着南北方向穿过, 西部测线 WT02 沿着西北-东南方向穿过。西部测线 WT03 沿着西北-东南方向进行布置, 东南区域紧邻城墙基础。在遗址东部区域, 东部测线 WT04 沿着西南-东北方向布置。测线 WT05 沿着西北-东南方向布置。

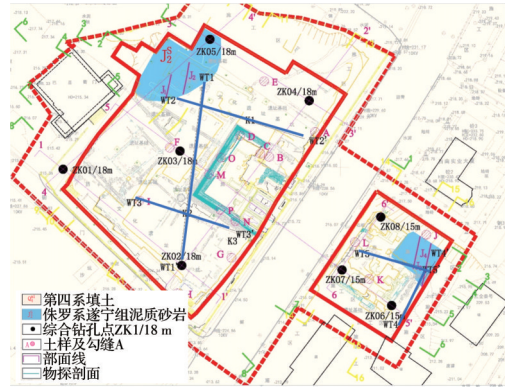


图 9 物探工作布置图

Fig. 9 Layout of geophysical prospecting work

表 2 物探数据

Table 2 Geophysical data

测线编号	测点极距/m	测点编号(起-终)	完成测点
WT01	1	1-80	80
WT02	1	1-60	60
WT03	1	1-30	30
WT04	1	1-20	20
WT05	1	1-20	20

3.3 地下水探测结果

如图 10 所示, WT01 整个测线剖面视电阻率在 $90 \Omega \cdot m$ 以下, 尤其是在现排水渠位置形成明显低阻带, 视电阻率在 $20 \Omega \cdot m$ 以下, 推测原因是由于水渠漏水下渗造成大面积低阻。在城墙拐角处外围形成浅部高阻带, 高阻带为地下 2.0 m 以上, 视电阻率在 $35\sim 65 \Omega \cdot m$ 之间, 城墙基础采用了力学强度较高、抗风化能力较好的砂岩条石, 因此电阻较小。

WT02 整个测线剖面视电阻率在 $110 \Omega \cdot m$ 以

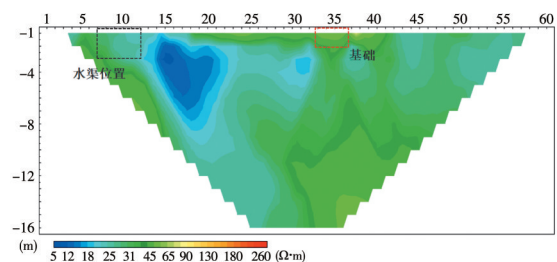


图 10 测线 WT01 成果图

Fig. 10 The test line result diagram of WT01

下,地表 2 m 以上普遍阻值较高,地下 2~7 m 普遍阻值较低,排水渠位置形成了明显低阻带,视电阻率在 $20 \Omega \cdot m$ 以下,地下水的渗透造成大面积低阻(图 11)。水渠的水沿着城墙外围渗透,导致城墙拐角处外围形成浅部高阻带。城墙的高阻带为地下 2.0 m 以上,视电阻率在 $75 \sim 95 \Omega \cdot m$ 之间,主要是因为城墙的基础为砂岩条石。

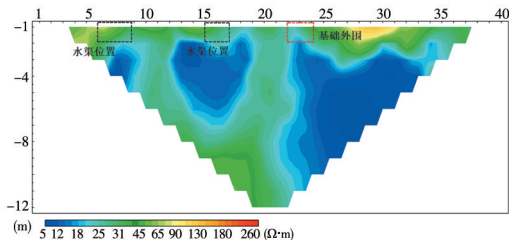


图 11 测线 WT02 成果图

Fig. 11 The test line result diagram of WT02

由于受场地限制,测线 WT03 仅布设 30 个测点,且全部位于覆盖层较厚的低洼位置,异常不明显,整个测线剖面视电阻率在 $50 \Omega \cdot m$ 以下,整体导电性较好,无明显高阻区域(图 12)。

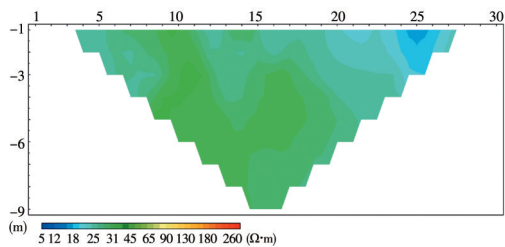


图 12 测线 WT03 成果图

Fig. 12 The test line result diagram of WT03

测线 WT04 仅布设 20 个测点,左侧高阻为 $90 \sim 185 \Omega \cdot m$,主要是因为场地存在建筑碎渣(图 13)。右侧初露粉砂岩,电阻率为 $20 \sim 65 \Omega \cdot m$ 。由于受场地限制,测线 WT05 仅布设 20 个测点,异常不明显,整个测线剖面视电阻率在 $70 \Omega \cdot m$ 以下,整体导电性较好,仅在局部表面形成高阻,主要是因为局部存在混凝土(图 14)。

对野外采集数据进行分析,高密度电法对该地

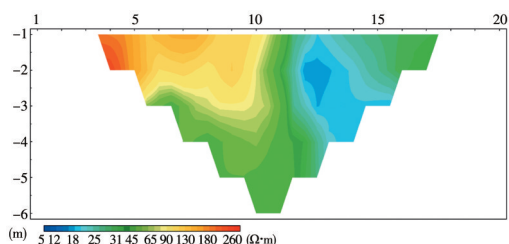


图 13 测线 WT04 成果图

Fig. 13 The test line result diagram of WT04

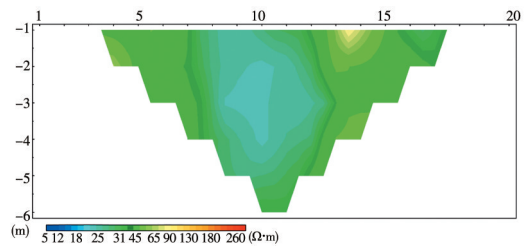


图 14 测线 WT05 成果图

Fig. 14 The test line result diagram of WT05

区局部含水以及条石基础均能够有所反应,在测线 WT01 和 WT02 中水渠位置具有明显的低阻异常,视电阻率在 $30 \Omega \cdot m$ 以下,异常范围较大。测线跨过城墙拐角处形成明显表面高阻,异常范围在地表 2 m 以上,主要是城墙基础,存在一定深度的砂岩条石。

4 病害及防治对策

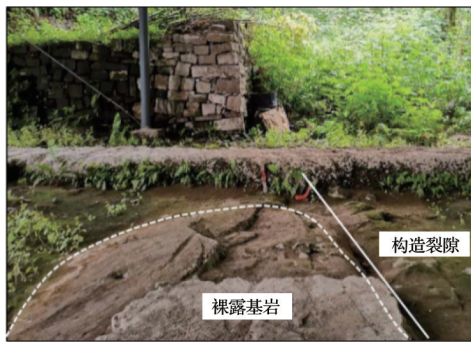
4.1 结构表面盐析

松散堆积成的填土覆盖层渗水性较强,大气降雨可快速渗透,土体结构较为松软,孔隙系统渗透性较强。由于长期风化及水土流失,部分遗址基岩裸露,并发育构造裂隙,角度接近 $65^\circ \sim 70^\circ$,裂缝开度在 $2 \sim 4 \text{ mm}$ 之间,裂隙较为平整,表面存在少量泥质。裸露基岩属于砂质泥岩,孔隙率非常大,且伊利石含量较高,地表水渗入导致矿物水化膨胀,孔隙贯穿已形成裂缝,裂缝成为渗水的重要通道(图 15)。同时,地下水渗透进来,在岩土分界面渗透性差异较大,导致水在岩土分界面滞留时间较长,长期浸水导致基岩软化性增强,工程地质性质变差。

为了探究水质区别,分别对地上水质和地下水水质进行了检测(表 3)。地表水呈 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Cl-Ca-Na}$ 型(重碳酸硫酸氯化钙钠型水),总溶解固体达到了 658 mg/g 。水体呈中性,与天然地表水相比,其硫酸根离子、氯离子及钠离子含量明显超标。地下水为 $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Na-Ca}$ 型(氯硫酸重碳酸钠钙型水),氯离子含量超过 350 mg/L ,总的溶解固体为 1173 mg/g ,呈微咸水特征。与地表水相比,地下水的硫酸根离子、氯离子及钠离子含量更高。遗址场地含盐量极高,特别是基岩裸露后,在毛细水作用下,大量盐分运移析出,岩体表层覆盖较多结晶体,盐分类型主要为石膏、芒硝和石盐。

4.2 边坡失稳变形

如图 16 所示,两段边坡位于遗址西侧,坡顶上部存在围墙,墙外为某段公路的路面,在公路动荷载作用下,公路路面结构层开裂并向坡顶变形。坡面为角度约 30° 的含植物根系的覆盖层,坡体主要为



(a) 基岩裸露



(b) 表面盐析

图 15 盐析病害

Fig. 15 The disease of salting out

表 3 水质检测

Table 3 Water quality detection

离子类别	离子	地表水		地下水	
		质量分数/ (mg/L)	含量百 分比/%	质量分数/ (mg/L)	含量百 分比/%
阳离子	Ca ²⁺	103.12	48.22	135.56	37.00
	K ⁺	38.09	9.15	28.327	3.97
	Mg ²⁺	16.23	12.52	23.75	10.69
	Na ⁺	73.89	30.11	203.20	48.33
	NH ₄ ⁺	0.02		0.02	
合计		231.33	100.00	390.83	100.00
阴离子	HCO ₃ ⁻	242.70	38.46	231.88	20.00
	OH ⁻	0.00	0.00	0.00	0.00
	CO ₃ ²⁻	0.00	0.00	0.00	0.00
	Cl ⁻	90.42	24.66	355.73	52.80
	NO ₃ ⁻	4.67	0.73	26.74	2.27
	SO ₄ ²⁻	179.54	36.15	227.56	24.93
合计		517.33	100.00	841.91	100.00
溶解性总固体		659.00		1 173.00	

第四系填土(碎石质黏土),坡面长期受雨水冲刷,坡体覆盖层长期处于湿润状态,坡脚一直处于饱水软化状态。在长期的暴雨条件下,坡体极易饱水,导致坡体失稳出现变形,坡体失稳的同时会导致遗址墙体结构受到冲击,出现房屋结构的垮塌和墙体开裂。



(a) 西侧遗址西南端围墙内边坡



(b) 西侧遗址北端围墙内侧边坡

图 16 边坡失稳变形

Fig. 16 The instability and deformation of slope

4.3 地层软化

高密度电法物探结果显示,城墙遗址地下基础存在低阻带,主要原因是地下水渗漏。地下水的主要来源有两部分:一部分来自地表水入渗,由于人工填土的结构较为疏松,且多处已经裸露基岩,并且形成构造裂隙,地表水沿着裂隙垂直渗入到地下;另一部分来自附近水渠的地下水渗漏,水渠常年积水,底部水沿着地层水平渗入到遗址地下基础。地表水软化了遗址内部岩土层,使文物丧失本来面貌。地下水软化受力地层岩体,使得遗址城墙基础持力层承载力降低,增加了失稳的可能性。由于渗水侵蚀和风化,上部城墙本体砖体结构错断,基础条石出现断裂(图 17)。

4.4 病害防治对策

1)对深度较浅的浅表裂隙进行修补,对于深度较深、可能影响到文物结构安全的裂隙进行灌浆试验。地下水土污染将对遗址的保护造成持续性破坏,作为重点予以洗盐、脱盐处理。

2)对于边坡变形问题,可布设监测装置对坡面进行监测,同时对坡体进行锚固。也可采取西侧遗址西北角处的条石砂岩或同种材质的砂岩对变形部位较大的边坡采用干条石挡墙予以加固边坡。

3)由于遗址地势较低,且遗址周围存在水渠,渗水病害严重。因此,有 3 个方面的治理措施:建立保护性遮护建筑,防止遇水冲刷;地势较低的地方需要合理调整周边地势标高,补砌和加固防渗的排



(a) 城墙断裂



(b) 墙体错断

图 17 墙体变形

Fig. 17 The wall deformation

水沟;对于地下渗水问题,需人工开挖至基岩后设置地下疏排、截堵相结合的永久性地下排水暗沟,将遗址区地下水导出。

5 结论

通过室内试验和现场勘探对遗址地上结构和地下基础进行了全方位研究,从矿物学和岩石力学角度揭示了石质试样的劣化机理,并采用高密度电阻法掌握了地下水的渗流范围和路径,为遗址水害问题分析提供了依据。

1)砂质泥岩黏土矿物风化彻底,以伊利石为主,吸水易膨胀,抗干湿循环能力较差。平均吸水率为4.48%,砂质泥岩层吸水性强且力学软化特征明显,软化系数在0.55~0.65之间,高软化性降低了遗址地层岩石载体的力学强度。

2)现场勘察发现,雨水冲刷导致基岩裸露,长期渗透造成地层产生裂缝,增加了地下水的渗流路径。地下水为Cl-SO₄-HCO₃-Na-Ca型(氯硫酸重碳酸钠钙型水),氯离子含量超过350 mg/L,总的溶解固体为1 173 mg/g,硫酸根离子、氯离子及钠离子含量多。毛细水作用下,大量盐分运移,出现盐析病害。

3)现场高密度电法结果表明,城墙遗址地下出现低阻区,视电阻率在20 Ω·m以下。遗址地下基础可产生渗水病害,导致地层软化,墙砖的软化可导致城墙结构出现断裂。建议从地上和地下两个方面采取防水措施,对渗流通道进行封堵。

参考文献

- [1] 牛传星, 秦哲, 冯佰研, 等. 水岩作用下蚀变岩力学性质损伤规律[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(8): 75-79.
NIU C X, QIN Z, FENG B Y, et al. Regularity of the damage of altered rock's mechanical properties under water-rock interaction [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(8): 75-79. (in Chinese)
- [2] 郑广辉, 许金余, 王鹏, 等. 水-岩耦合作用下红砂岩应变率效应研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(1): 79-85.
ZHENG G H, XU J Y, WANG P, et al. Research on strain rate effects of red-sandstone under water-rock coupling [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(1): 79-85. (in Chinese)
- [3] 郭军, 冯国瑞, 郭育霞, 等. 饱和水煌斑岩单轴压缩力学特性变化及其微观机理[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 323-330.
GUO J, FENG G R, GUO Y X, et al. Mechanical property variation under dynamic uniaxial compression and micro-mechanism of lamprophyre in saturated state [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 323-330. (in Chinese)
- [4] 赵立财. 饱水砂岩力学性质软化试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(1): 154-162.
ZHAO L C. Experimental study on mechanical property softening of water saturated sandstone [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(1): 154-162. (in Chinese)
- [5] 熊德国, 赵忠明, 苏承东, 等. 饱水对煤系地层岩石力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 998-1006.
XIONG D G, ZHAO Z M, SU C D, et al. Experimental study of effect of water-saturated state on mechanical properties of rock in coal measure strata [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 998-1006. (in Chinese)
- [6] 谭涛, 赵延林. 干燥和饱水状态下砂岩力学特性试验[J]. 矿业工程研究, 2022, 37(1): 15-23.
TAN T, ZHAO Y L. Test of sandstone's mechanical properties in dry and water-saturated state [J]. Mineral Engineering Research, 2022, 37(1): 15-23. (in Chinese)
- [7] 王鹏, 许金余, 方新宇, 等. 红砂岩吸水软化及冻融循环力学特性劣化[J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 2065-2072.

- WANG P, XU J Y, FANG X Y, et al. Water softening and freeze-thaw cycling induced decay of red-sandstone [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(6): 2065-2072. (in Chinese)
- [8] 陈旭, 俞缙, 李宏, 等. 不同岩性及含水率的岩石声波传播规律试验研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(9): 2527-2533.
- CHEN X, YU J, LI H, et al. Experimental study of propagation characteristics of acoustic wave in rocks with different lithologies and water contents [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(9): 2527-2533. (in Chinese)
- [9] 李佳伟, 徐进, 王璐, 等. 砂板岩岩体力学特性的水岩耦合试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(3): 599-604.
- LI J W, XU J, WANG L, et al. Water-rock coupling tests on mechanical properties of sandy slate rock mass [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(3): 599-604. (in Chinese)
- [10] 宋勇军, 雷胜友, 毛正君, 等. 干燥和饱水状态下炭质板岩力学特性试验[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(10): 48-52.
- SONG Y J, LEI S Y, MAO Z J, et al. Testing study on mechanical property of carbonaceous slate under dry and saturated states [J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(10): 48-52. (in Chinese)
- [11] 王军保, 刘新荣, 刘俊, 等. 砂岩力学特性及其改进 Duncan-Chang 模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(12): 2388-2397.
- WANG J B, LIU X R, LIU J, et al. Mechanical properties of sandstone and an improved Duncan-Chang constitutive model [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(12): 2388-2397. (in Chinese)
- [12] 金俊超, 余成学, 尚朋阳. 基于 Hoek-Brown 准则的岩石应变软化模型研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(3): 939-951.
- JIN J C, SHE C X, SHANG P Y. A strain-softening model of rock based on Hoek-Brown criterion [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(3): 939-951. (in Chinese)
- [13] 张超, 白允, 杨楚卿, 等. 基于 Weibull 分布的脆性岩石峰后应力-应变曲线特征及其统计损伤模拟方法[J]. *自然灾害学报*, 2022, 31(3): 222-231.
- ZHANG C, BAI Y, YANG C Q, et al. Characteristics of post-peak stress-strain curve and its statistical damage simulation method of brittle rock based on Weibull distribution [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2022, 31(3): 222-231. (in Chinese)
- [14] 吴宜峰, 赵金鑫, 乔云飞, 等. 砖石质不可移动文物本体监测/检测技术研究进展[J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(3): 623-637.
- WU Y F, ZHAO J X, QIAO Y F, et al. A review of monitoring/detecting technology for immovable brick and stone cultural relics [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(3): 623-637. (in Chinese)
- [15] 苏超威. 应县木塔安全监测及数据分析方法研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2017.
- SU C W. Study on safe monitoring and data analysis method of Yingxian wood pagoda [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2017. (in Chinese)
- [16] ERCOLI M, BRIGANTE R, RADICIONI F, et al. Inside the polygonal walls of Amelia (Central Italy): A multidisciplinary data integration, encompassing geodetic monitoring and geophysical prospections [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2016, 127: 31-44.
- [17] RUIZ VALERO L, FLORES SASSO V, PRIETO VICIOSO E. In situ assessment of superficial moisture condition in façades of historic building using non-destructive techniques [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2019, 10: e00228.
- [18] 胡庆武, 王少华, 刘建明, 等. 多测量手段集成古建筑物精细测绘方法: 以武当山两仪殿为例[J]. *文物保护与考古科学*, 2013, 25(2): 39-44.
- HU Q W, WANG S H, LIU J M, et al. A detailed and precise survey method for ancient architecture through multiple sensor integration: A case study of Liangyi Dian of Wudang Mountain [J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2013, 25(2): 39-44. (in Chinese)
- [19] COULIBALY Y, BELEM T, CHENG L Z. Numerical analysis and geophysical monitoring for stability assessment of the Northwest tailings dam at Westwood Mine [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, 27(4): 701-710.
- [20] JAAFAR H, MENG X L, SOWTER A, et al. New approach for monitoring historic and heritage buildings: Using terrestrial laser scanning and generalised Procrustes analysis [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2017, 24(11): e1987.
- [21] MENNINGEN J, SIEGESMUND S, TWEETON D, et al. Ultrasonic tomography: Non-destructive evaluation of the weathering state on a marble obelisk, considering the effects of structural properties [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(17): 1-25.
- [22] SÁNCHEZ-APARICIO L J, BAUTISTA-DE CASTRO Á, CONDE B, et al. Non-destructive means and methods for structural diagnosis of masonry arch bridges [J]. *Automation in Construction*, 2019, 104: 360-382.
- [23] 张慧慧. 红外热成像法检测岩石渗水病害的实验研究[J]. *齐齐哈尔大学学报(自然科学版)*, 2014, 30(1): 71-74.
- ZHANG H H. The experimental study of infrared

- imaging detection on water-permeation of rock [J]. Journal of Qiqihar University (Natural Science Edition), 2014, 30(1): 71-74. (in Chinese)
- [24] 肖宽怀, 王绪本. 微电极高密度电法探测在文物保护中的应用研究[J]. 物探化探计算技术, 2013(1): 10-17, 5. XIAO K H, WANG X B. The research about the application of relic protection with the method of microelectrode detection of highdensity electrical [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2013(1): 10-17, 5. (in Chinese)
- [25] SASS O, VILES H A. Wetting and drying of masonry walls: 2D-resistivity monitoring of driving rain experiments on historic stonework in Oxford, UK [J]. Journal of Applied Geophysics, 2010, 70(1): 72-83.
- [26] 柴少波, 宋浪, 刘欢, 等. 酸性干湿循环下充填节理岩石劣化性能试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(11):2993-3002. CHAI S B, SONG L, LIU H, et al. Experimental study on deterioration characteristic of filled joint rock under dry-wet cycle in acidic environment [J]. Rock and Soil Mechanics, (2022), 43(11): 2993-3002.(in Chinese)
- [27] 宋勇军, 杨慧敏, 谭皓, 等. 冻融环境下不同饱和度砂岩损伤演化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(8): 1513-1524. SONG Y J, YANG H M, TAN H, et al. Study on damage evolution characteristics of sandstone with different saturations in freeze-thaw environment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(8): 1513-1524. (in Chinese)
- [28] 李兵, 张兵峰, 旺久. 紫禁城城墙无损检测方法的应用研究[J]. 中国文化遗产, 2019(4): 87-90. LI B, ZHANG B F, WANG J. Research on the application of nondestructive testing methods for the Forbidden City Wall [J]. China Cultural Heritage, 2019 (4): 87-90. (in Chinese)
- [29] 冯文昌, 王共元, 杨斯杰, 等. 长期水作用下岩石软化系数的测定[J]. 煤炭技术, 2020(1): 23-25. FENG W C, WANG G Y, YANG S J, et al. Mensuration of rocks' softening coefficients under long-term water influence [J]. Coal Technology, 2020(1): 23-25. (in Chinese)
- [30] 李成香, 刘磊, 周世昌, 等. 物探技术在岩溶塌陷灾害监测预警中的应用研究[J]. 资源环境与工程, 2021, 35(6): 887-894. LI C X, LIU L, ZHOU S C, et al. Application of geophysical prospecting technology in Karst collapse disaster monitoring and early warning [J]. Resources Environment & Engineering, 2021, 35(6): 887-894. (in Chinese)
- [31] 杨超, 黄丹, 朱伟, 等. 基于高密度电阻率法的地下建筑基础探测[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(2): 244-251. YANG C, HUANG D, ZHU W, et al. Application of high density resistivity method in detection of underground obstacles [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2021, 18(2): 244-251. (in Chinese)

(编辑 胡玲)