

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.142



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



午门城台结构受力性能的主要影响因素

曹璞琳^{1,2,3}, 刘卫华³, 程泉翀⁴, 化建新^{1,3}

(1. 中国五洲工程设计集团有限公司, 北京 100053; 2. 清华大学 土木工程系, 北京 100084;
3. 中兵勘察设计研究院有限公司, 北京 100053; 4. 故宫博物院, 北京 100009)

摘要:以午门城台为对象,在现场勘察及长期监测的基础上,利用数值模拟和试验设计相结合的方法,从冻融循环、局部饱水作用、底部不均匀竖向变形作用、上部竖向荷载4个因素以及因素间耦合影响的方面分析结构的受力性能。研究发现:对结构应力影响方面,上部竖向荷载、底部不均匀竖向变形、局部饱水作用均是高度显著因子,冻融循环次数、冻融循环次数与局部饱水作用时长的交互作用对拱券顶部最大拉应力同样为高度显著因子;对城台变形影响方面,局部饱水作用、底部不均匀竖向变形、上部竖向荷载均是高度显著因子。研究结果揭示了古建筑城台结构受力性能的主要影响因素及影响规律,为该类游戏日常维护和预防性保护方案制定提供了科学依据。

关键词:古建筑城台;午门城台;受力性能;影响因素;影响规律

中图分类号: TU362 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)02-0205-10

Main influential factors in mechanical performance of Meridian Gate platform structure

CAO Pulin^{1,2,3}, LIU Weihua³, CHENG Xiaochong⁴, HUA Jianxin^{1,3}

(1. China Wuzhou Engineering Co., Ltd., Beijing 100053, P. R. China; 2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China; 3. China Ordnance Industry Survey and Geotechnical Institute Co. Ltd, Beijing 100053, P. R. China; 4. Palace Museum, Beijing 100009, P. R. China)

Abstract: On the basis of field investigation and long-term monitoring results, the main factors that affect the mechanical performance of the Meridian Gate platform structure are studied by combining numerical simulation and experimental design method. This paper presents the results of the study in performance variation mechanism of the Meridian Gate platform structure through different aspects, i. e. freeze-thaw, partial water-saturation, differential vertical displacement at the bottom of platform, vertical load at the top of platform and coupled effect between the factors. The results show that the vertical load at the top, the uneven vertical deformation at the bottom and the partial water-saturation are main influential factors for the structural stress, and the number of freeze-thaw cycles, the coupled effect between the number of freeze-thaw cycles and the duration of partial water-saturation are also key factors for the maximum tensile

收稿日期: 2021-02-23

基金项目: 国家自然科学基金(51338001)

作者简介: 曹璞琳(1981-),女,博士(后),主要从事古建筑监测与安全评估研究, E-mail: irene1125@yeah.net.

Received: 2021-02-23

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51338001)

Author brief: CAO Pulin (1981-), postdoctor, main research interests: health monitoring and safety assessment of heritage building, E-mail: irene1125@yeah.net.

stress in the area of arched doors; In the aspect of structural deformation of the Meridian Gate platform structure, the partial water-saturation, the differential vertical displacement at the bottom of platform and the vertical load are the significant factors. This study reveals the major factors and the influencing law of the mechanical performance of the platform structure and provides a scientific basis for the routine protection and preventative protection of similar heritage masonry structures.

Keywords: heritage platform structure; Meridian Gate platform; mechanical performance; influential factor; influential law

中国历史上城郭布局通常会在城墙、城楼等部位设置城台类具有特殊功能的建筑。城台类古建筑是砖砌体结构或砖土组成的复合结构,由于年代久远,历经环境及人为的复杂影响,伴随着砖和灰浆等材料的劣化、退化等现象,其结构承载力不可避免地降低。为提升城台类古建筑保护的科学性、针对性,有必要对其结构承载能力的影响因素及影响规律进行分析。

目前,学者们从各方面对古建砖砌体结构受力影响因素进行了研究。在监测和试验方面,时以亮等^[1-2]基于分布式光纤监测数据,分析了城台变形和渗漏的关系;时旭东等^[3]采用变形观测,分析了台面局部变形和荷载改变对城台变形的影响;Yuan 等^[4]基于裂缝宽度和 GPS 位移监测,推测城墙侧面裂缝宽度的变化是由地壳不均匀运动引起的;汤永净等^[5]通过试验分析了饱水度和冻融对古砖砌体强度的影响规律;王凤池等^[6]研究了酸雨环境下老旧砌体抗压性能退化规律。在数值模拟方面,余天和^[7]、郭锦江等^[8]研究了夯土含水率和新建展厅荷载对城台裂缝和变形的影响;周长东等^[9]、Chen 等^[10]分析了降雨入渗对城墙稳定性的影响;朱才辉等^[11-13]对城墙所能承受的极限变形能力和承载能力进行了量化分析,采用数值模拟和水分场原位监测、模型试验方法深入分析了某古建城台渗漏病害原因、降雨期间结构内部水分场的时空分布特征;敖迎阳^[14]分析了平遥古城墙裂缝产生的原因;徐华^[15]、Kilic Demircan 等^[16-17]分别分析了新旧夯土分层、含水率、波浪侵蚀等因素对古城墙承载力的影响。然而,已有的研究大多针对某因素对城台城墙类结构受力性能的影响,而对因素间耦合的影响研究较少。

笔者以午门城台为对象(图 1),研究常见影响因素及因素间耦合作用对其性能的影响。午门城台建于 1420 年,由城台和上部城楼组成,东西长 127 m、南北宽 115 m、高 14 m,城台两侧从下向上内收。前期勘察监测表明,城台内外均是由青砖和灰浆砌筑而成的砌体结构,城台存在一定变形。依据现场实测结果,基于正交试验设计方法^[18-21],利用

数值模拟参数计算并结合病害现状,对午门城台结构承载能力的影响因素及规律进行了详细分析,大大减少了模拟次数并找到最显著的影响因素,为及时采取保护措施提供科学依据。

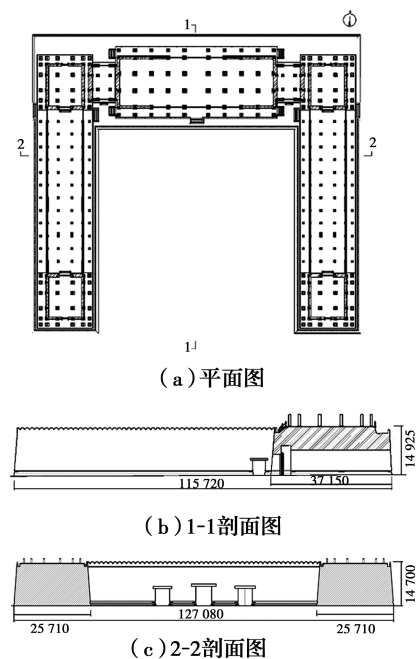


图 1 午门城台布局测绘图

Fig. 1 Layout mapping of Meridian Gate platform

1 城台结构承载力影响因素选取

古建筑长时间受到自然及人为因素的影响,材料和结构的受力性能显著降低。冻融劣化、局部饱和水和底部不均匀竖向变形等是城台类古建筑砖砌体结构的常见病害。

1)青砖是典型的多孔性材料,也是城台类古建筑的力学体系和抵抗环境作用的重要屏障。在寒冷气候下,青砖不可避免地发生冻融损伤劣化,使结构的耐久性显著降低,甚至失效。其冻融影响机理是冻结降温与融解升温循环作用导致青砖中的温度场产生周期性变化,同时伴随着青砖内外水分周期性的迁移、重新分布以及内部的水冰相变,经过若干次冻融循环,青砖开始劣化、表面剥落、膨胀和开裂,力

学性能出现退化。

2)通过结构内部含水率的长期监测,发现由于降雨、防水层失效等影响,加之结构厚度大、内部水分不易蒸发排出,结构内部含水率可能长期处于较高状态,甚至饱和。在饱水环境中,砖砌体含水率表现为初期增长迅速,24 h之后趋于平缓;砌体抗压强度和抗剪强度总体呈降低的趋势。

3)底部不均匀竖向变形将会导致上部砌体结构内力的重分布,如在结构的个别部位产生相应内力变化而引起拉、剪应力的增大,当作用在某处的拉、剪应力值超过结构材料的强度极限值时,就会在该位置产生裂缝。

4)在使用过程中,随着后期使用功能的变化,建筑结构荷载大小可能发生改变。城台类结构最为常见的荷载是上部结构荷重、装饰和展品的自重、城台顶面活荷载等竖向压力。

因此,为研究已出现的冻融、局部饱水、底部不均匀竖向变形以及竖向荷载对城台结构受力性能的影响,通过有限元分析软件对包含上述4种影响因素的午门城台进行数值模拟,研究4种影响因素对城台结构受力性能降低的机理。

2 城台结构参数化计算模型

2.1 影响因素参数化

2.1.1 冻融影响 冻融疲劳是一个材料特性逐渐变化的过程,青砖宏观特性在冻融循环过程中呈逐渐下降的趋势,主要反映为密实度降低和强度下降。由于目前已有的青砖冻融劣化研究均采用新砖,故以新砖、新灰浆为砌筑材料,通过设置不同次数冻融循环作用下的材料参数,分析主要因素的敏感度。参考青砖冻融试验结果^[22],包括青砖材料弹模损伤和质量损失曲线,其中,弹模损伤变化曲线如图2所示。

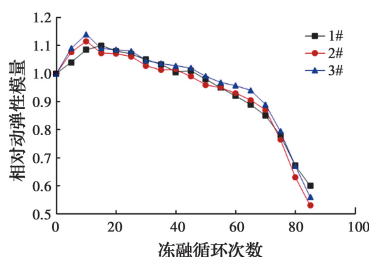


图2 青砖在冻融环境下的相对动弹性模量变化

Fig. 2 Relative dynamic modulus of clay brick subjected to freeze-thaw cycles

为分析城台结构力学影响因素敏感度,以青砖弹模损伤和质量损失模型作为城台结构劣化的依

据,调整冻融层的弹模、密度等相应参数,选取0、65、85次冻融循环作用下的青砖砌体材料参数作为输入参数,计算各荷载作用下的应力和变形响应,以分析城台数值模型在冻融循环作用下的响应变化趋势。本文聚焦于研究青砖砌体结构在冻融作用下的损伤规律,其自身强度衰退姑且不考虑。

2.1.2 饱水作用 依据陈红^[23]的试验结果,选取饱水作用下的砖砌体力学性能变化模型作为敏感度分析中结构内部劣化模型的密度和弹模等输入参数。

饱水环境中砖砌体的抗压强度公式为

$$f_m(t) = 0.157f_{1j}^{1.025^3} [1 + 0.07f_2(t)] \quad (1)$$

$$f_{1j} = 0.73f_0 \quad (2)$$

$$f_2(t) = \begin{cases} (1 - 0.014t)f_0, & t \in [0, t_0) \\ 0.55f_0, & t \geq t_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: f_m 为饱水环境中砖砌体的抗压强度值,MPa; f_{1j} 为饱水作用下砖在潮湿状态的保守强度值,MPa; $f_2(t)$ 为饱水作用 t 天后砂浆在潮湿状态的强度值,MPa; f_0 为自然状态砖的稳定抗压强度值,MPa; t 为饱水作用时间,d; t_0 为饱水作用后强度衰减稳定区的时间,d。

2.1.3 底部不均匀竖向变形作用 根据沉降监测结果,发现正楼城台拱券附近底部的高程较其他部位底部低,最大差值达95 mm。由于现状城台底部的95 mm沉降是在漫长历史进程中逐渐累积形成的,可认为城台结构内部已稳定、内部应力已释放。因此,通过在正楼城台拱券底部施加2、4 mm的竖向变形荷载,计算得到结构响应,以分析底部不均匀竖向变形对午门城台结构力学性能的影响。

2.1.4 上部竖向荷载作用 午门城台承受的竖向荷载作用包括城台结构自重、上部城楼结构自重、游人荷载等。考虑到城台上部荷载会根据使用功能的改变而发生变化,通过设置1.0、1.2和1.4倍的现状上部竖向荷载来研究竖向荷载对城台结构受力性能的影响。

在分析中,根据勘察、监测成果,将城台模型的冻融影响区域范围设置为从结构外部表层向内0.8 m;饱水作用区域设置在结构内芯部分;底部不均匀竖向变形主要考虑水文地质条件、地质环境的影响;上部竖向荷载作用在台基顶面。4种因素间无影响,相互独立。

2.2 午门城台有限元建模

根据现场实测结果,考虑结构及变形现状特点,

使用有限元分析软件 ANSYS 构建午门城台有限元模型(图 3),结构均采用 Solid65 实体单元,结构底部设置固定边界条件。

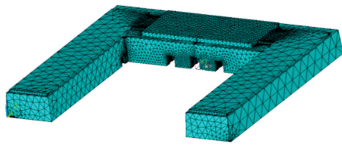


图 3 午门城台有限元模型

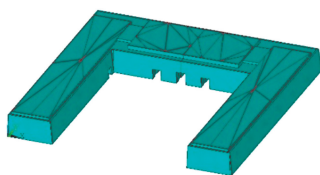
Fig. 3 FE model of Meridian Gate platform

根据同期古砖的试验强度推得^[7],泊松比取为 0.1、密度为 $1.8 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ 、应力-应变关系为

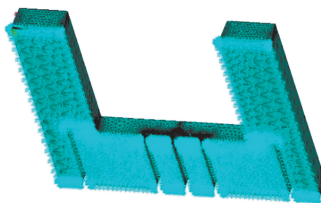
$$y = \begin{cases} \frac{E_0 \epsilon_c - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cl}}\right)^2}{E_{cl} \epsilon_{cl}} & 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cl} \\ 1 + \left(\frac{E_0}{E_{cl}} - 2\right) \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cl}}\right) & \\ 1 - \frac{0.8(\epsilon_c - \epsilon_{cl})}{(\alpha - 1)\epsilon_{cl}} & \epsilon_{cl} \leq \epsilon_c \leq \alpha\epsilon_{cl} \\ 0 & \epsilon > \alpha\epsilon_{cl} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $y = \sigma_c / f_{cm}$, σ_c 、 f_{cm} 分别为砖砌体的压应力和抗压强度,MPa; E_0 、 E_{cl} 分别为砖砌体的初始抗压弹模和抗压割线模量,MPa; ϵ_c 、 ϵ_{cl} 分别为砖砌体的压应变和峰值压应变; α 为常数,取 $\alpha = 2.5$ 。

根据城楼测绘图、《古建筑屋面荷载汇编》^[24]和《建筑结构荷载规范》统计,正楼自重为 20 910 kN、活荷载为 3 381 kN、基本雪压按照 100 a 重现期取值为 0.45 kN/m^2 。出于安全考虑,燕翅楼的荷载按照正楼荷载取值。上部竖向荷载作为均布荷载,依次按照明间、次间、梢间、尽间施加在午门城台有限元模型上(图 4)。



(a) 荷载示意图



(b) 边界约束示意图

图 4 荷载及边界条件示意图

Fig. 4 Schematic diagram of loading and boundary condition

3 基于正交设计的城台结构受力性能影响分析

3.1 数值模拟方案设计

在敏感度分析中,利用数值模拟和正交试验设计相结合的方法,选择具有代表性的工况分析各因素对午门城台应力和变形的影响。在分析过程中,考虑了前述 4 个因素,并参考其他文献,通过初步试算,依据材料性能及力学响应变化程度,每个因素选取 3 个水平值(表 1)。通过多次数值模拟来寻找各因素对城台应力和变形响应的影响规律。

表 1 因素水平表

Table 1 Factor level table

水平	冻融循环次数 A	局部饱水作用 B/d	底部不均匀竖向变形 C/mm	上部竖向荷载 D/倍
1	0	0	0	1
2	65	16	2	1.2
3	85	32	4	1.4

在结构力学性能机理中,不仅因素 A、B、C、D 对模拟计算指标有影响,而且因素之间的联合搭配(如 $A \times B$)对指标也会产生影响。因此,在机理研究的数值模拟中,考虑了因素之间联合搭配的交互作用,根据 $L_{27}(3^{13})$ 正交表^[21]设计数值模拟的方案(表 2)。

表 2 数值模拟方案

Table 2 Numerical simulation scheme

序号	A	B	A×B	C	A×C	A×D	D	空列
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2	2
3	1	1	1	3	3	3	3	3
4	1	2	2	1	1	2	2	3
5	1	2	2	2	2	2	3	1
6	1	2	2	3	3	3	1	2
7	1	3	3	1	1	3	3	2
8	1	3	3	2	2	2	1	3
9	1	3	3	3	3	3	2	1
10	2	1	2	1	2	3	1	2
11	2	1	2	2	3	1	2	3
12	2	1	2	3	1	2	3	1
13	2	2	3	1	1	2	3	1
14	2	2	3	2	3	1	3	2

续表 2

序号	A	B	A×B	C	A×C	A×D	D	空列					
15	2	2	3	1	3	1	2	3	2	3	1		
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

3.2 数值模拟结果

按照表 2 的模拟方案,依次进行 27 次数值计算,得到午门城台的力学响应。图 5 为模拟方案 1 的力学响应云图,由于拱券对结构承载能力的削弱影响,最大压应力出现在正楼城台底部,最大拉应力主要分布在拱券入口的顶部,最大竖向变形位于城台顶部正楼处,最大水平变形出现在正楼城台的顶部南北侧及北立面的拱券附近。由于砌体结构自重、抗拉承载力较低、砖为脆性材料,并考虑到城台城墙类砌体建筑常见立面鼓凸变形,因此,分别提取了城台的压应力、拉应力、对受拉敏感的拱券顶部拉应力、竖向变形以及立面鼓凸变形的最大值,见表 3。

表 3 数值模拟结果

Table 3 Results of numerical simulation

方案序号	城台最大压应力/MPa	城台最大拉应力/MPa	拱券顶部最大拉应力/MPa	城台最大竖向变形/mm	南立面最大鼓凸变形/mm	北立面最大鼓凸变形/mm
1	0.660 1	0.190 5	0.190 5	3.495 2	0.483 0	0.356 0
2	0.751 3	0.249 7	0.210 0	5.618 0	0.489 0	0.311 0
3	0.851 3	0.305 0	0.235 0	7.001 0	0.509 5	0.333 8
4	0.776 4	0.237 2	0.237 2	4.419 8	0.628 6	0.454 8
5	0.864 4	0.275 5	0.263 7	6.580 3	0.634 6	0.485 1
6	0.805 5	0.258 6	0.231 8	6.575 9	0.457 1	0.421 2
7	0.855 5	0.278 0	0.278 0	5.293 5	0.772 4	0.624 7
8	0.778 4	0.236 9	0.236 9	5.959 2	0.499 3	0.426 3
9	0.829 2	0.273 6	0.273 6	7.410 7	0.556 5	0.518 5
10	0.831 5	0.215 2	0.215 2	4.373 1	0.624 4	0.445 0
11	0.731 5	0.229 7	0.190 7	5.178 5	0.393 3	0.331 1
12	0.821 7	0.285 7	0.220 6	6.560 6	0.458 2	0.411 9
13	0.727 3	0.197 7	0.197 7	3.949 4	0.543 3	0.393 4
14	0.792 2	0.251 6	0.225 0	6.104 8	0.490 7	0.435 4
15	0.906 2	0.300 5	0.263 6	7.517 8	0.583 3	0.514 1
16	0.786 6	0.234 1	0.234 1	4.784 3	0.679 7	0.533 6
17	0.850 8	0.270 5	0.251 3	6.978 5	0.688 5	0.527 6
18	0.785 3	0.249 4	0.229 8	6.901 6	0.503 9	0.451 3
19	0.808 4	0.208 7	0.208 7	3.934 7	0.523 5	0.408 2
20	0.830 3	0.278 6	0.257 6	6.059 0	0.508 8	0.287 0
21	0.818 6	0.266 8	0.206 8	6.122 4	0.356 6	0.366 5
22	0.893 9	0.237 1	0.237 1	4.892 2	0.668 2	0.510 8
23	0.779 0	0.233 5	0.214 8	5.635 2	0.439 1	0.369 6
24	0.851 0	0.282 9	0.250 6	7.048 5	0.528 7	0.464 2
25	0.728 7	0.194 5	0.194 5	4.276 0	0.559 7	0.438 4
26	0.806 0	0.247 2	0.225 3	6.470 5	0.552 0	0.458 4
27	0.874 0	0.294 3	0.254 3	7.922 6	0.628 7	0.555 0

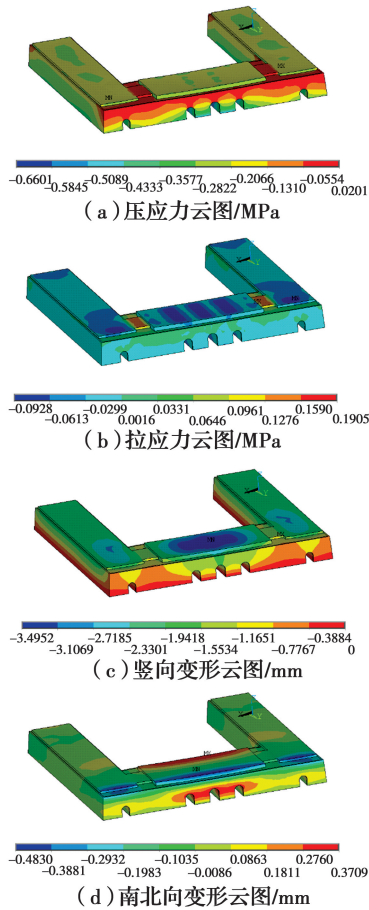


图 5 力学响应云图

Fig. 5 Mechanical response cloud diagram

3.3 数据分析结果

3.3.1 城台应力变形与参数之间的相关性 利用参数相关性分析方法,获得参数相关系数(表 4),根据分析得到各指标与因素的线性相关性为:

1)最大压应力与竖向荷载相关性最强,其次是底部不均匀竖向变形;

2)最大拉应力与底部不均匀竖向变形相关性最强,其次是竖向荷载;

3)拱券顶部最大拉应力与竖向荷载相关性最强,其次是局部饱水作用、底部不均匀竖向变形;

4)最大竖向变形与底部不均匀竖向变形作用相关性最强;

5)南立面最大鼓凸变形与竖向荷载相关性最强,其次是局部饱水作用;

6)北立面最大鼓凸变形与局部饱水作用相关性最强,其次是竖向荷载。

3.3.2 城台应力变形的拟合模型 利用回归分析方法,建立了城台最大压应力、城台最大拉应力、拱券

表 4 影响因素相关系数

Table 4 Correlation coefficients of influential factors

力学响应	影响因素相关系数			
	冻融循环	局部饱水作用	底部不均匀竖向变形	上部竖向荷载
城台最大压应力	0.158 5	0.156 4	0.390 9	0.777 2
城台最大拉应力	-0.103 0	0.069 5	0.749 2	0.567 9
拱券顶部最大拉应力	-0.236 0	0.448 7	0.319 9	0.669 7
城台最大竖向变形	0.000 2	0.288 1	0.889 9	0.320 9
南立面最大鼓凸变形	-0.111 3	0.529 0	-0.435 3	0.668 6
北立面最大鼓凸变形	-0.007 5	0.739 0	-0.072 9	0.429 5

顶部最大拉应力、城台最大竖向变形、南立面最大鼓凸变形、北立面最大鼓凸变形的二次多项式拟合函数,各拟合模型的精度较高,可用于预测因素不同水平下的结构响应。在此基础上,分析了各应力和变形随因素 A、B、C、D 变化的关系。

1)最大压应力

最大压应力的回归函数为

$$\begin{aligned} \sigma_{c \max} = & 0.085 + 0.098A + 0.106B + 0.224C + \\ & 0.426D - 0.113A \cdot B - 0.055A \cdot C - \\ & 0.002A \cdot D - 0.049B \cdot C + 0.017B \cdot D - \\ & 0.108C \cdot D + 0.133A^2 - 0.177B^2 + \\ & 0.11C^2 + 0.057D^2 \end{aligned} \quad (5)$$

评价拟合函数主要依据复相关系数平方值 R^2 , R^2 越接近于 1,则回归模型拟合程度越好。对于最大压应力的回归函数, $R^2 = 0.963$,拟合精度较高。由图 6 和图 7 可见,城台最大压应力与冻融循环、底部不均匀竖向变形、竖向荷载正相关;当局部饱水作用时间较短时,最大压应力随作用天数增加而增大,当作用天数增加至 18 d 后,最大压应力与作用天数呈反比趋势。

2)最大拉应力

最大拉应力的回归函数为

$$\begin{aligned} \sigma_{t \max} = & 0.0915 - 0.059A + 0.061B + \\ & 0.492C + 0.386D - 0.08A \cdot B + 0.094A \cdot C - \\ & 0.006A \cdot D - 0.19B \cdot C + 0.026B \cdot D + \\ & 0.007C \cdot D + 0.064A^2 - 0.039B^2 - \\ & 0.03511C^2 - 0.028D^2 \end{aligned} \quad (6)$$

拟合函数的精度评价指标 $R^2 = 0.985$,具有较好的拟合度。

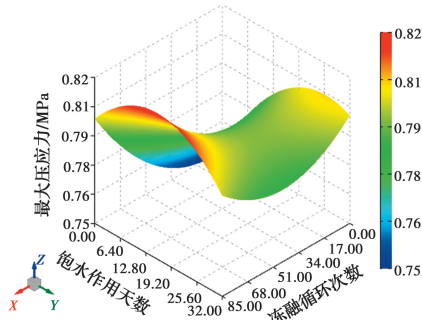


图 6 最大压应力与冻融循环次数、饱水作用天数关系

Fig. 6 Relationship among maximum compressive stress, number of freeze-thaw cycles and duration of water-saturation

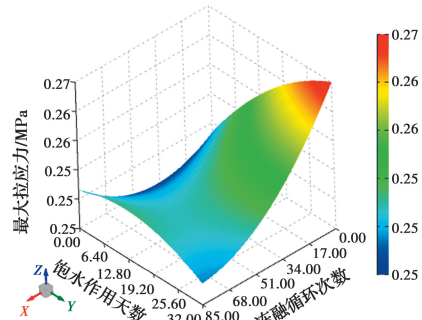


图 8 最大拉应力与冻融循环次数、饱水作用天数关系

Fig. 8 Relationship among maximum tensile stress, number of freeze-thaw cycles and duration of water-saturation

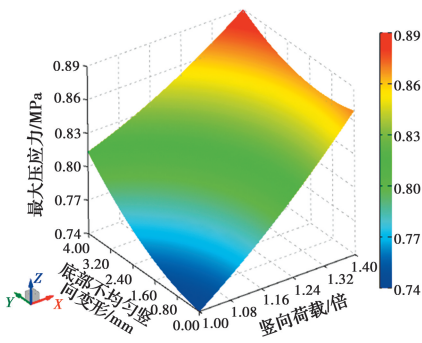


图 7 最大压应力与底部不均匀竖向变形、竖向荷载关系

Fig. 7 Relationship among maximum compressive stress, differential vertical displacement and vertical load

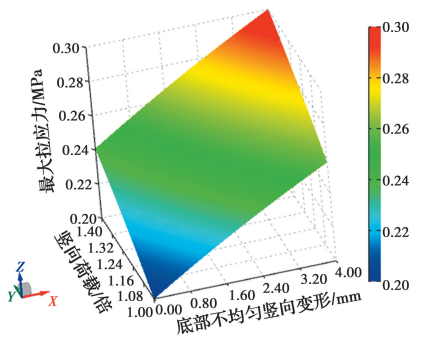


图 9 最大拉应力与底部不均匀竖向变形、竖向荷载关系

Fig. 9 Relationship among maximum tensile stress, differential vertical displacement and vertical load

由图 8 和图 9 可见,城台最大拉应力与底部不均匀竖向变形、竖向荷载正相关;当冻融循环次数较少时,最大拉应力随冻融循环次数增加而减小,当冻融循环次数增加至 60 次后,最大拉应力与冻融循环次数呈正相关;当饱水作用时间较短时,最大拉应力随天数增加而增大,当作用天数增加至 20 d 后,最大拉应力与天数呈反比趋势。

3) 城台北立面最大鼓凸变形

城台北立面最大鼓凸变形的回归函数为

$$\begin{aligned}
 u_{y \max} = & -0.068 - 0.024A + 0.440B - \\
 & 0.440C + 0.250D - 0.065A \cdot B + 0.010A \cdot C - \\
 & 0.018A \cdot D + 0.022B \cdot C + 0.192B \cdot D - \\
 & 0.080C \cdot D - 0.172A^2 - 0.096B^2 + \\
 & 0.296C^2 - 0.045D^2 \quad (7)
 \end{aligned}$$

拟合函数的精度评价指标 $R^2 = 0.954$, 具有良好的拟合度。

由图 10 和图 11 可见,城台北立面最大鼓凸变形与饱水作用天数、竖向荷载正相关;当冻融循环次

数较少时,最大鼓凸变形随冻融循环次数增加而增大,当冻融循环次数增加至 40 次后,最大鼓凸变形与冻融循环次数呈负相关;当底部不均匀竖向变形较小时,北立面最大鼓凸变形随不均匀竖向变形增加而减小,当不均匀竖向变形增大至 2.2 mm 后,北立面最大鼓凸变形与不均匀竖向变形呈正相关。

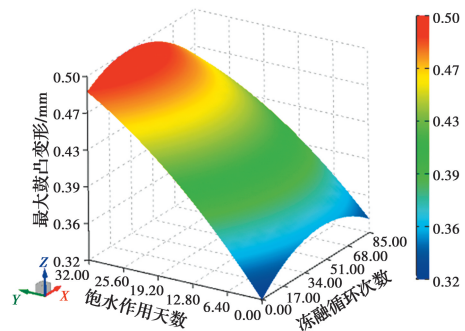


图 10 北立面最大鼓凸变形与冻融循环次数、饱水作用天数关系

Fig. 10 Relationship among maximum horizontal displacement of north elevation, number of freeze-thaw cycles and duration of water-saturation

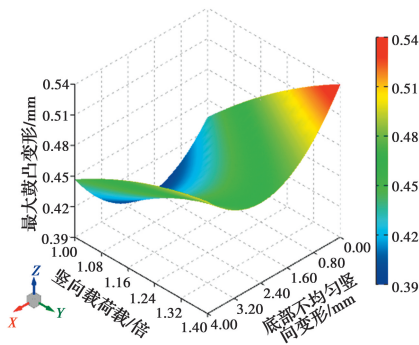


图 11 北立面最大鼓凸变形与底部不均匀竖向变形、竖向荷载关系

Fig. 11 Relationship among maximum horizontal displacement of north elevation, differential vertical displacement and vertical load

3.3.3 方差分析结果 利用方差分析方法分析了城台力学响应与各因素及其交互作用的相关性。城台力学响应的显著因素按照主次顺序分别为:

1) 城台最大压应力。高度显著影响因素为竖向荷载、底部不均匀竖向变形、局部饱水作用;显著影响因素为冻融循环、冻融循环与局部饱水交互作用。

2) 城台最大拉应力。高度显著影响因素为底部不均匀竖向变形、竖向荷载。

3) 拱券顶部最大拉应力。高度显著影响因素为竖向荷载、局部饱水作用、底部不均匀竖向变形、冻融循环、冻融循环与局部饱水交互作用。

4) 城台最大竖向变形。高度显著影响因素为底部不均匀竖向变形、竖向荷载、局部饱水作用。

5) 城台南立面最大鼓凸变形。高度显著影响因素为竖向荷载、局部饱水作用、底部不均匀竖向变形;显著影响因素为冻融循环。

6) 城台北立面最大鼓凸变形。高度显著影响因素为局部饱水作用、竖向荷载、底部不均匀竖向变形。

4 结论

利用数值模拟和试验设计方法,分析了午门城台在冻融循环、局部饱水、底部不均匀竖向变形及竖向荷载作用下的力学响应,得到如下结论:

1) 城台各处应力与底部不均匀竖向变形、上部竖向荷载相关性强,且影响高度显著;冻融循环、局部饱水交互对城台应力影响显著。

2) 城台竖向变形与底部不均匀竖向变形相关性

强,而鼓凸变形与局部饱水作用、上部竖向荷载相关性强;局部饱水作用、竖向荷载、底部不均匀竖向变形对城台变形影响高度显著。

3) 获得了城台应力、变形响应与各主要因素之间的函数关系,为城台日常维护和预防性保护设计提供模型参考。

为降低城台拉压应力及变形,针对主要影响因素,提出如下保护措施:

1) 竖向荷载:可通过文物、设施及游人管控实现对可变荷载的控制。

2) 竖向变形:可通过地基加固或古建筑本体结构加固来改善。

3) 局部饱水作用:可通过降低地下水位、提高防水等措施来避免,如更换防渗层、局部超细水泥或PS溶液灌浆、改变顶部排水坡度和采取强制排水措施。

参考文献:

- [1] 时以亮. 北京故宫东华门城台分布式光纤监测研究[D]. 南京: 南京大学, 2016.
SHI Y L. A study on distributed optical fiber monitoring for platform of Donghua gate in the Forbidden City, Beijing [D]. Nanjing: Nanjing University, 2016. (in Chinese)
- [2] 时以亮, 倪斌, 施斌, 等. 北京故宫东华门城台分布式光纤监测研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(5): 637-643.
SHI Y L, NI B, SHI B, et al. A study on distributed optical fiber monitoring for platform of Donghua gate in the Forbidden City, Beijing [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(5): 637-643. (in Chinese)
- [3] 时旭东, 李德山, 曹晓丽. 变形观测技术在古建筑保护中的应用: 以午门城台为例[C]//中国紫禁城学会第六次学术讨论会论文集, 北京, 2007: 210-218.
SHI X D, LI D S, CAO X L. Application of displacement observation technology in the conservation of heritage buildings: A case study of Meridian Gate platform [C]// The Sixth Workshop of CSFC, Beijing: CSFC, 2007: 210-218. (in Chinese)
- [4] YUAN W B, ZHAO Y Q, MU B G, et al. A new explanation on causes of fractures in the ancient City Wall, Nanjing: Observation, measurement, and

- modeling [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77 (12): 1-12.
- [5] 汤永净, 赵红, 叶真华, 等. 古代砖砌体风化性能分析及风化程度评定[J]. *土木建筑与环境工程*, 2017, 39 (3): 67-74.
TANG Y J, ZHAO H, YE Z H, et al. Ancient brick masonry behavior and weathering degree evaluation [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2017, 39(3): 67-74. (in Chinese)
- [6] 王凤池, 赵晗宇, 刘昊宇, 等. 酸雨环境下老旧砖砌体的抗压性能[J]. *土木建筑与环境工程*, 2017, 39(2): 140-147.
WANG F C, ZHAO H Y, LIU H Y, et al. Compression properties of old brick masonry in acid rain environment [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2017, 39(2): 140-147. (in Chinese)
- [7] 余天和. 古建城台长期力学性能和安全度有限元分析[D]. 北京: 清华大学, 2009.
YU T H. Finite element analysis on long-term behavior and safety of ancient platform [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009. (in Chinese)
- [8] 郭锦江, 时旭东, 李德山, 等. 含水率对故宫午门城台稳定性影响分析[J]. *特种结构*, 2007, 24(4): 4-6, 11.
GUO J J, SHI X D, LI D S, et al. Influence analysis of water content on stability of wumen platform in forbidden city [J]. *Special Structures*, 2007, 24(4): 4-6, 11. (in Chinese)
- [9] 周长东, 李艺敏. 降雨入渗对故宫城墙稳定性的影响[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(Sup1): 286-296.
ZHOU C D, LI Y M. Influence of rainfall infiltration on stability of Forbidden City wall [J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(Sup1): 286-296. (in Chinese)
- [10] CHEN G Q, LI L, LI G M, et al. Failure modes classification and failure mechanism research of ancient city wall [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76 (23): 1-15.
- [11] 朱才辉, 李宁. 西安地铁施工诱发地表沉降及对城墙的影响[J]. *岩土力学*, 2011, 32(Sup1): 538-544.
ZHU C H, LI N. Ground settlement caused by subway construction in Xi'an and its influence on the city wall [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(Sup1): 538-544. (in Chinese)
- [12] 朱才辉, 郭炳焯. 古建筑基座渗漏监测及诱因分析[J]. *岩土力学*, 2018, 39(11): 4210-4217.
ZHU C H, GUO B X. Monitoring and inducement analysis of seepage of an ancient building base [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(11): 4210-4217. (in Chinese)
- [13] 朱才辉, 马帅. 古建筑夯土基座渗漏机制试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(4): 157-165.
ZHU C H, MA S. Experimental study on seepage mechanism of rammed soil in an ancient building foundation [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(4): 157-165. (in Chinese)
- [14] 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 Y Y. Analysis of causes of cracks in the ancient city wall of Pingyao and the restoring measures [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [15] 徐华. 山西平遥古城城墙结构承载力影响因素分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
XU H. Analysis of the influential factors on structure bearing capacity of ancient city wall of Shanxi Pingyao [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [16] KILIÇ DEMIRCAN R, ÜNAY A İ. Structural stability analysis of large-scale masonry historic city walls [C]//Proceedings of 3rd International Sustainable Buildings Symposium (ISBS 2017), 2018: 384-395. DOI:10.1007/978-3-319-64349-6_31.
- [17] KILIÇ DEMIRCAN R, ÖZTÜRK KARDÖĞ AN P S. Studying the historical structure damage due to soil hazards and examination of applied repairment-strengthening techniques [C]//Proceedings of 3rd International Sustainable Buildings Symposium (ISBS 2017), 2018: 550-565. DOI: 10.1007/978-3-319-64349-6_44.
- [18] AKBARZADEH E, PICAS J A, BAILE M T. Orthogonal experimental design applied for wear characterization of aluminum/C-SF metal composite fabricated by the thixomixing method [J]. *International Journal of Material Forming*, 2016, 9(5): 601-612.
- [19] LIAO M Q, LAI Z H, BAO A, et al. Parameters optimization design of quenching and partitioning for

- best combination between strength and ductility using orthogonal experimental design [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2019, 26 (10): 1088-1095.
- [20] FANG M H, YU T, XI F F. An experimental investigation of abrasive suspension flow machining of injector nozzle based on orthogonal test design [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 110(3/4): 1071-1082.
- [21] 王岩, 隋思涟. 试验设计与 MATLAB 数据分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
WANG Y, SUI S L. Experiment design and data analysis based using MATLAB [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012. (in Chinese)
- [22] 赵鹏. 荷载与环境作用下青砖及其砌体结构的损伤劣化规律与机理[D]. 南京: 东南大学, 2016.
ZHAO P. Deterioration mechanism of grey brick and masonry structures under the action of load and environment [D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)
- [23] 陈红. 受浸泡砖砌体力学性能及加固修复方法的研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
CHEN H. Research on mechanical properties and repaired methods of soaked masonry [D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese)
- [24] 刘大可. 古建筑屋面荷载汇编(上)[J]. *古建园林技术*, 2001(3): 58-64.
LIU D K. Load assembler of roofing of ancient building (The first volume) [J]. *Traditional Chinese Architecture and Gardens*, 2001 (3): 58-64. (in Chinese)

(编辑 黄廷)