

故宫灵沼轩抗风性能简化分析*

周 乾¹, 闫维明²

(1 故宫博物院, 北京 100009;

2 北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124)

[摘要] 故宫灵沼轩是一座砌体结构与钢结构组合而成的文物建筑。为有效对其进行保护,建立结构有限元模型,参照《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)相关规定,确定作用在结构上的简化风荷载,并开展静力分析,以研究结构抗风性能。分别考虑风荷载从 x 向及 y 向作用于结构,并考虑风荷载重现期为 $R=50$ 年及 $R=100$ 年,研究了结构的变形及内力分布特点,讨论了结构受力薄弱部位,评价了结构安全现状。结果表明: x 向或 y 向风荷载作用下,灵沼轩砌体纵墙上部容易产生受拉破坏,在日常保养中应加以重视,但钢结构部分则处于安全状态;与 x 向风荷载相比, y 向风荷载作用下,结构产生的内力和变形更大。此外, $R=100$ 年条件与 $R=50$ 年条件相比,风荷载无论作用于 x 向还是 y 向,结构内力或变形峰值增量不明显。

[关键词] 灵沼轩; 风荷载; 受力性能; 数值模拟; 文物建筑

中图分类号: TU366.2 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2015)S2-0490-06

Wind-resistance performances of Lingzhao Veranda in the Forbidden City by simplified analysis

Zhou Qian¹, Yan Weiming²

(1 Palace Museum, Beijing 100009, China; 2 Beijing Key Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Lingzhao Veranda in the Forbidden City is a historical building, which is composed of steel and masonry parts. To effectively protect the building, its finite element model was built, simplified wind loads based on Load code for the design of building structures (GB 50009—2012) was determined, and static analysis was carried out to study its wind-resistance performances. Wind loads were applied to the model considering the following cases: the loads were from x or y direction; interval period of the loads was $R=50$ years or $R=100$ years. By simulation, distortion and internal force distributions of the structure were obtained; its weaken locations were discussed, and safety status of the whole structure was evaluated. Results show that under wind loads of x or y direction, top of length way wall of the masonry part is easy to be damaged, which needs more attention during daily maintain works. However, For the steel part, it remains safety under wind loads. Distortion and internal force values of the structure tend to be larger under loads in y direction than those in x direction. Besides, compared to loads of interval period of $R=50$ years, the structure bears not much more forces under $R=100$ years condition, no matter the wind loads are from x or y direction.

Keywords: Lingzhao Veranda; wind load; bearing performance; simulation; historical building

0 引言

灵沼轩(水晶宫)位于故宫东六宫之一的延禧宫内,始建于清宣统元年(1909年),原设计用途为皇家园林里休闲娱乐场所,后因国库空虚而被迫停建,一直闲置封存至今。延禧宫是故宫内仅存唯一一座未完工的且具有近百年历史的仿西洋式建筑物。建筑形式为西洋式五顶塔形楼,长24.73m,宽18.57m,总高为14.62m,地下、地上各1层,且地上1层顶部正中及四角各缀有一铁亭(东南、西南六角单檐铁亭,东北、西北为八角单檐铁亭,中间为八角形双层檐铁亭,共计铁亭5座)。现存结构形式为石砌体和钢框架混合承重结构,其中石砌体为承重墙,主要承担上部四角铁亭传来荷载;钢框架则主要承担中间铁亭传来荷载。建筑平面尺寸见图1,部分字母含义为:A1为中

间二层八角亭位置,B1为西北八边形围廊及其上部八角亭位置,C1为西南八边形围廊及其上部八角亭位置,D1为东南六边形围廊及其上部六角亭位置,E1为东北六边形围廊及其上部六角亭位置。建筑现状照片见图2所示。

对于灵沼轩钢结构部分而言,由于历经年代长久,在不同因素作用下,该结构出现了较为明显的残损问题。经勘察,结构主要残损症状包括非主要承重铁件锈蚀及缺失、部分梁柱节点锈蚀、个别位置的铸铁柱存在开裂等,见图3。试验分析表明^[1]:灵沼轩

* 国家自然科学基金项目(50878010,51278013),故宫博物院科研基金项目(KT2012-7)。

作者简介:周乾,博士后,副研究员,Email:qianzhou627@126.com。

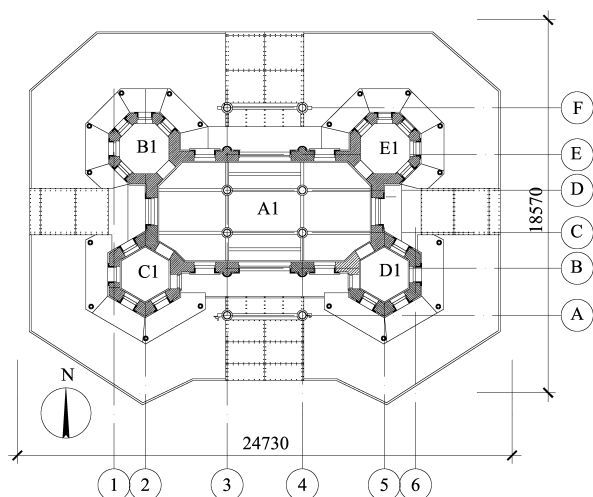


图1 灵沼轩结构平面图/mm

钢铁质构件的主要锈蚀机理为大气环境下的电化学反应,其所处的外部环境及自身的材质、加工特点,均可对锈蚀程度产生影响;而金属构件的断裂、变形,除了构件自身的材料特性外,还与其承受的构造应力、环境高低温交变以及不恰当的填充材料有关。

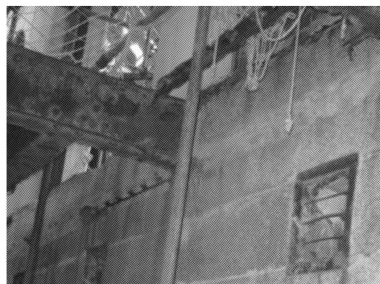
对于灵沼轩砌体结构部分而言,其砌体由3种材

料组成:地下一层建筑墙体材料为花岗岩,地上一层墙体材料为汉白玉,地上一层室内贴瓷砖处及铁亭基座部分墙体材料为砖。砌体结构部分的现状照片见图4。勘察发现,墙体的主要现状为:花岗岩墙体完好,汉白玉墙体轻微风化、开裂,砖墙体局部松动。由于上述问题并不明显,因此可以认为灵沼轩砌体部分结构现状较好。

作为近代历史文物建筑,尤其包含我国较早的钢结构形式,灵沼轩具有重要的文物、历史和文化价值,保护意义重大。然而勘察表明:由于结构尚未完工,且历经时间长久,灵沼轩钢结构部分存在不同形式残损问题;而砌体材料的抗拉强度较低,在外力作用下很容易产生受拉破坏。因此,对灵沼轩结构进行自然灾害作用下的承载性能评估是对其开展维修保护的重要前提。基于此,采用静力分析方法,建立灵沼轩结构有限元模型,按照《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[10](简称《规范》)确定作用在灵沼轩结构上的简化风荷载,分析结构产生的内力和变形情况,依此评价结构在风荷载作用下的安全性能,并提出



(a) 地上部分正立面



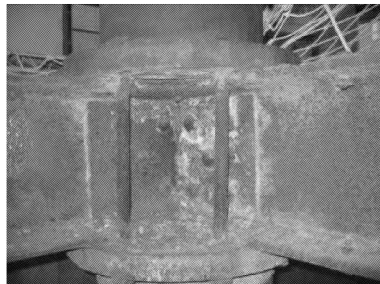
(a) 锈蚀、缺失的龙骨



(a) 花岗岩墙体



(b) 地上部分侧立面



(b) 锈蚀的梁柱节点



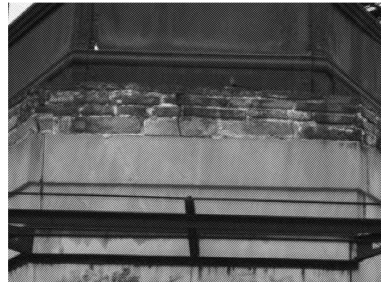
(b) 汉白玉墙体



(c) 地下部分东南视



(c) 柱裂缝



(c) 砖墙体

图2 灵沼轩现状照片

图3 灵沼轩钢结构残损部分照片

图4 灵沼轩砌体部分现状照片

可行性建议,为文物建筑的保护和修缮提供理论参考。

1 有限元模型

1.1 砌体

砌体结构是由砖和砂浆两种不同材料砌筑而成的复合结构,在各种受力状态下的力学特性复杂,匀质化理论可作为一种行之有效的手段运用于无筋砌体结构的力学性能研究中。研究表明^[2,4]:应用匀质化理论分析材料力学性能时,需要提取一个等效体积单元(Representative Volume Element, RVE)作为特征单元体,这是匀质化方法的主要研究对象。等效体积单元需要满足的条件为:1) 所有砌体材料;2) 结构为周期性连续分布;3) RVE 单元在连续模型和离散模型之间提供单元划分。采用 RVE 匀质化方法模拟砌体材料力学性能,匀质化模拟过程见图 5。

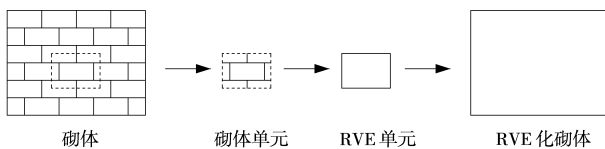


图 5 等效体积元模拟过程

灵沼轩砌体结构的材料为花岗岩和汉白玉,从现状来看,现有砌体材料保存较完好,墙体无明显裂纹、变形或松动现象。由于无法对文物本体取样开展试验,因而材料强度按照《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)取值,从保守角度出发,考虑石材强度等级为 MU20,砂浆强度等级为 M2.5,则灵沼轩砌体结构的强度容许值范围可按表 1 取值,当结构某部位计算结果超出上述范围时,可认为该部位产生受力破坏的可能性较大。

灵沼轩砌体结构强度取值/MPa 表 1

抗拉	抗压	抗弯	抗剪
0.04	1.87	0.1	0.11

1.2 钢结构

如前所述,灵沼轩钢结构的主要残损现状包括构件表面锈蚀、钢节点的梁端与柱顶连接松动、个别构件开裂等。对于梁柱节点而言,由于缺乏试验条件,因此无法通过现场取样方法来获得钢节点现有刚度值。文献[5]~[8]研究了钢节点刚度退化特性,获得的节点转动刚度值在 10^8 数量级(初始状态)与 10^5 数量级(退化后)之间。此外,综上所述,本文在确定梁柱节点的刚度值时,从保守角度出发,对 1 层节点,取 $k_{\text{rotx}} = k_{\text{roty}} = k_{\text{rotz}} = 1.5 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$,即考虑节点刚度很严重退化;对 2 层节点,取 $k_{\text{rotx}} = k_{\text{roty}} = k_{\text{rotz}} = 0$,即节点完全松弛。采取上述值来模拟灵沼轩承重框架的钢节点刚度现状。对于表面锈蚀及开裂构件而

言,取构件有效受力截面作为建模参考。在进行力学分析时,从保守角度出发,钢结构的强度取值为^[9]:抗拉、压、弯强度 $[\sigma_s] = 155 \text{ MPa}$,抗剪强度 $[\tau_s] = 90 \text{ MPa}$ 。

1.3 有限元模型

采用有限元分析程序 ANSYS 中的 BEAM189 单元模拟梁、柱构件, MATRIX27 单元模拟梁柱节点, SHELL181 单元模拟墙体,考虑墙、柱底部固定在地面,一、二层工字钢梁与墙体相交处为嵌固连接,建立灵沼轩有限元分析模型,见图 6。模型含梁、柱单元 1603 个,节点单元 32 个,墙体单元 14327 个。

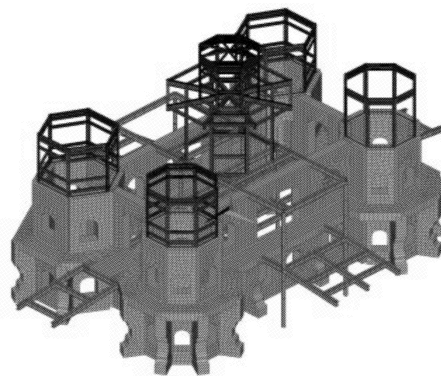


图 6 灵沼轩有限元模型

2 x 向风荷载作用

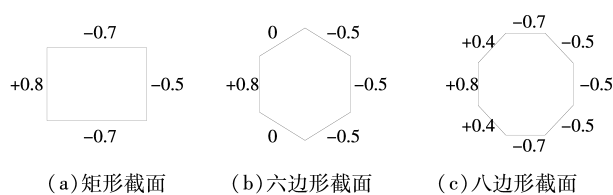
为研究风荷载对灵沼轩结构受力性能影响,分别考虑风荷载作用方向为 x 向(纵向)及 y 向(横向),并考虑风荷载为重现期为 50 年($R = 50$)及重现期为 100 年($R = 100$)进行分析。

2.1 风荷载计算

灵沼轩结构受到的风荷载按《规范》计算:

$$w_k = \beta_z \mu_z \mu_s w_0 \quad (1)$$

式中: w_k 为风荷载标准值; β_z 为高度为 z 处的风振系数,《规范》8.4.1 规定:对于高度大于 30m 且高宽比大于 1.5 的房屋,以及基本自振周期 T_1 大于 0.25s 的各种高耸结构,应考虑风压脉动对结构产生顺风向风振的影响,灵沼轩结构特性不满足上述要求,可取 $\beta_z = 1$; μ_s 为风荷载体型系数,根据《规范》表 8.3.1,灵沼轩平面形状为矩形的砌体及一、二层钢框架部分取值见图 7(a),平面形状为六边形的砌体及钢框架部分取值见图 7(b),为八边形砌体及钢框架部分取值见图 7(c),以上均假设风荷载方向由左向右; μ_z 为风压高度变化系数,灵沼轩所在位置的地面粗糙度属 C 类,建筑总高小于 10m,依据《规范》表 8.2.1,取 $\mu_z = 0.65$; w_0 为基本风压,根据《规范》表 E.5,重现期 $R = 50$ 年时,北京地区基本风压 $w_0 = 450 \text{ N/m}^2$; $R = 100$ 年时, $w_0 = 500 \text{ N/m}^2$ 。

图7 μ_s 值确定

依据以上条件并考虑荷载组合系数1.4与重力荷载组合,可求出灵沼轩结构各部分的荷载设计值,其中砌体结构部分为面荷载,钢结构部分为集中荷载。考虑上述荷载于 x 向施加在灵沼轩有限元模型上,开展数值模拟,分析结构的抗风性能。

2.2 分析结果

x 向风荷载作用下, $R=50$ 年及 $R=100$ 年条件下结构的变形(u)、主拉应力(S_1)及主压应力(S_3)分布见图8。图中分界线以上为考虑重现期为50年风荷载作用结果,以下为考虑重现期为100年风荷载作用结果;最大值节点编号直接在图上标注,以便于观察位置,如图8(a)中,砌体结构变形最大值的节点编号为46763,钢结构变形最大值的节点编号为19285。

易知, x 向风荷载作用下,灵沼轩结构内力及变形的主要特点为:

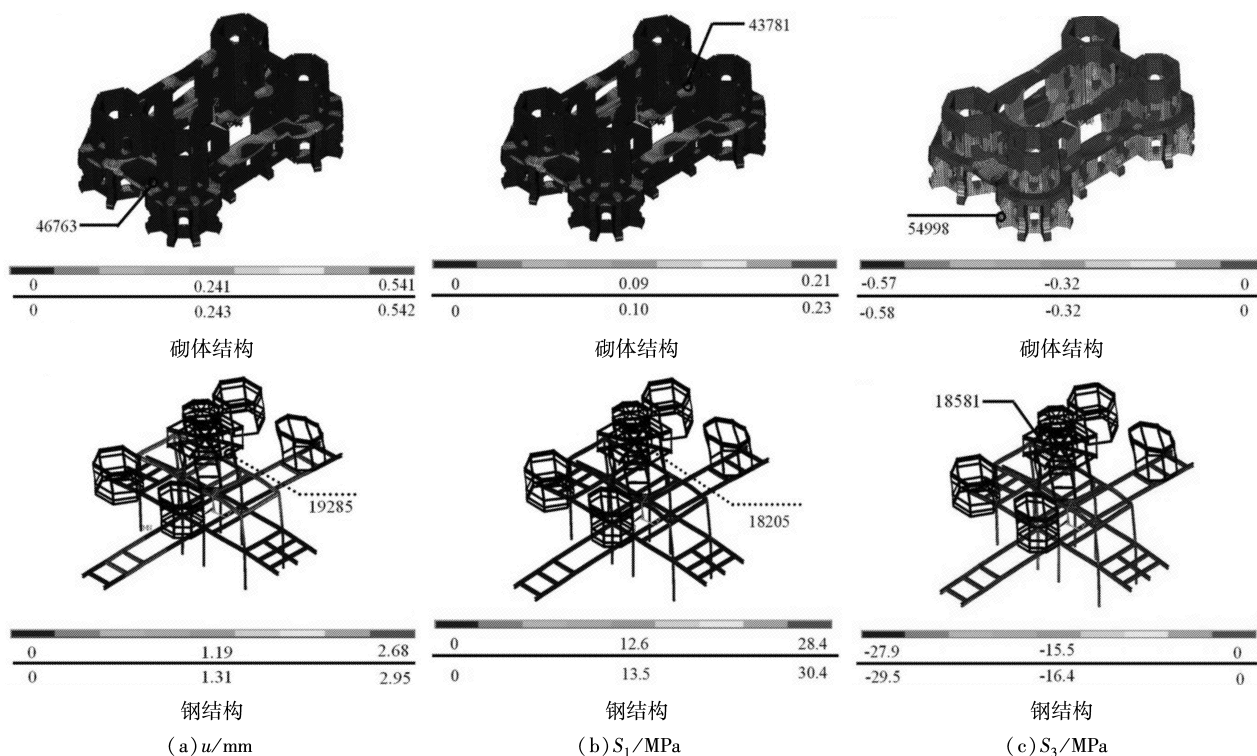
(1) $R=100$ 年风荷载作用下,砌体结构的变形及内力相对于 $R=50$ 年风荷载作用下的增幅很小;相比之下,钢结构部分增幅略大。

(2)从变形角度来看, x 向风荷载作用下,砌体结

构变形主要分布在一层顶板位置及二层纵向墙体中部。由于墙体较厚(约0.6m),因而风荷载作用造成砌体变形值很小。对钢结构框架而言, x 向风荷载作用下变形较大部位在框架顶部及中间八角亭上部,但由于变形峰值很小,因而对钢结构整体不构成安全威胁。

(3)从所受内力角度来看,砌体结构部分的主拉应力较大部位与变形较大部位相似,且主拉应力峰值已远超过容许值范围(本分析考虑砌体结构抗拉强度很小),这说明在风荷载作用下上述位置产生受拉破坏的可能性比其他位置要大,因而在日常保养与维护过程中应予以重视;砌体结构部分主压应力较大位置主要在结构一层底部,但均在容许范围之内,因而不会产生受压破坏。对于钢结构部分而言,结构主拉应力较大值在框架二层顶部梁-柱、梁-梁节点位置及各亭中上部,主压应力较大值分布在框架及各亭底部,但由于主拉应力及主压应力峰值均远小于容许值范围,因而在 x 向风荷载作用下,钢结构部分不会产生受力破坏。

为研究砌体结构抗弯、抗剪承载力,选择结构受力较薄弱的北、东侧墙体部位进行分析,包括墙体中间段一层底部(单元编号:北侧-45236,东侧-46597)、一层顶部(单元编号:北侧-45550,东侧-46099)、二层门洞上部(单元编号:北侧-43564,东侧-47624)。上述各单元在 x 向风荷载作用下的弯(σ_{fw})、剪应力(τ_w)

图8 x 向风荷载作用下结构变形及主应力分布

见表 2。易知:

(1) 相对于 $R=50$ 年风荷载而言, $R=100$ 年风荷载作用于灵沼轩结构时, 上述单元的弯、剪应力增幅很小。

(2) x 向风荷载作用下, 上述各典型单元的弯、剪应力峰值均小于容许范围, 因而不会产生相应类型的破坏情况。

x 向风荷载作用下典型部位 σ_{fw}, τ_w /MPa 表 2

荷载	单元编号	σ_{fw}	$\sigma_{fw} < [\sigma_{fw}]?$	τ_w	$\tau_w < [\tau_w]?$
$R=50$ 年	45236	0.031	是	0.002	是
	46597	0.010		0.009	
	45550	0.063		0.022	
	46099	0.083		0.028	
	43564	0.009		0	
	47624	0.008		0	
$R=100$ 年	45236	0.033	是	0.003	是
	46597	0.012		0.010	
	45550	0.067		0.023	
	46099	0.085		0.029	
	43564	0.010		0	
	47624	0.010		0	

3 y 向风荷载作用

基于数值模拟手段, 获得 y 向风荷载作用下灵沼

轩结构的变形及内力分布情况, 见图 9。其中, 分界线及图中各数值的含义同前。易知:

(1) 从变形 u 分布图来看, 灵沼轩砌体结构变形值较大的位置主要位于前后纵向墙体中段上部及左右一层顶板中部, 钢结构变形较大值主要发生在中间部位二层八角亭的上端。由于上述变形峰值均很小, 因而可认为在 y 向风荷载作用下灵沼轩结构不会因变形过大而产生破坏。另 $R=100$ 年与 $R=50$ 年相比, 灵沼轩的砌体结构及钢结构的变形峰值增量均很小。

(2) 从主拉应力 S_1 分布图来看, 对砌体结构部分而言, 其主拉应力较大值分布在一层顶板及前后纵墙中上段位置, 其中峰值位于前纵墙中段顶部, 且远超出容许值。由此可知, 在日常保养维护中, 上述部位应引起重视。对钢结构部分而言, 其主拉应力值较大部位主要在二层工字钢框架节点位置及中间二层八角亭上部。由于 $R=50$ 年及 $R=100$ 年条件下钢结构的主拉应力峰值均远小于容许范围, 因此可认为 y 向风荷载作用下灵沼轩钢结构部分不会产生受拉破坏。另 $R=100$ 年条件下, 砌体结构部分主拉应力峰值相对 $R=50$ 年增幅约为 6.8%, 钢结构部分增幅约为 9.6%。

(3) 从主压应力 S_3 分布来看, 砌体结构部分的主压应力绝对值较大值主要分布在结构一层底部, 且最

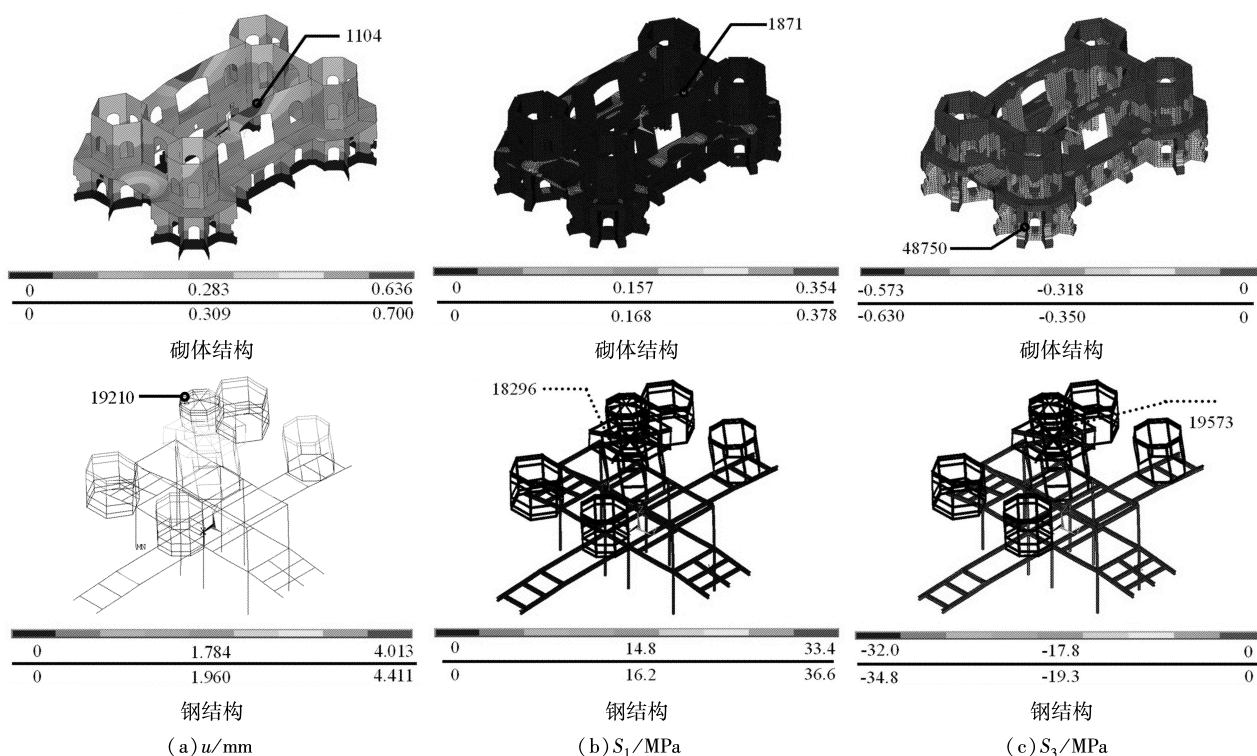


图 9 y 向风荷载作用下结构变形及主应力分布

大值($R=50$ 年,绝对值为 0.573MPa ; $R=100$ 年,绝对值为 0.630MPa) 在容许范围内,因而不会产生受压破坏;对钢结构部分而言,其主压应力峰值较大部分主要位于中间八角亭的上部。由于峰值($R=50$ 年,绝对值为 32.0MPa ; $R=100$ 年,绝对值为 34.8MPa) 远小于容许范围,因而钢结构部分不会产生受压破坏。另 $R=100$ 年条件下,砌体结构部分主拉应力峰值相对 $R=50$ 年增幅约为 9.9% ,钢结构部分增幅约为 8.8% 。

仍选 45236,46597,45550,46099,43564,47624 等单元进行分析,研究 y 向风荷载作用下灵沼轩结构弯(σ_{fw})、剪应力(τ_w) 峰值情况,相关结果见表 3。易知:

(1) σ_{fw}, τ_w 峰值均在容许范围内,即上述位置在 y 向风荷载作用下不会产生弯、剪破坏。

(2) $R=100$ 年条件下,上述位置的 σ_{fw}, τ_w 峰值相对于 $R=50$ 年条件的增幅很小。

y 向风荷载作用下典型部位 $\sigma_{fw}, \tau_w/\text{MPa}$ 表 3					
荷载	单元编号	σ_{fw}	$\sigma_{fw} < [\sigma_{fw}]?$	τ_w	$\tau_w < [\tau_w]?$
$R=50$ 年	45236	0.019	是	0.003	是
	46597	0.035		0.005	
	45550	0.066		0.023	
	46099	0.087		0.032	
	43564	0.037		0	
	47624	0.009		0	
$R=100$ 年	45236	0.019	是	0.005	是
	46597	0.039		0.005	
	45550	0.069		0.025	
	46099	0.089		0.033	
	43564	0.038		0	
	47624	0.011		0	

另对比 x 向与 y 向风荷载作用下灵沼轩结构的内力与变形情况,可知:

(1) x 向、 y 向风荷载作用下结构的变形及内力较大值部位相似。对于砌体结构部分而言,主拉应力主要分布在纵墙中上部及一层顶部,主压应力则分布在一层底部;对于钢结构部分而言,主要分布在工字钢框架顶部节点及中间二层八角亭的上部。上述部位应加强日常维护与保养。

(2) y 向风荷载作用下,结构的内力与变形比 x 向风荷载作用下的相关值有不同幅度增大,因而对灵沼轩结构进行抗风分析时,应以 y 向作用为主。

(3) 无论 x 向还是 y 向风荷载作用,灵沼轩钢结构部分产生内力或变形最大值并非开裂柱位置,而是

在于工字钢-铸铁框架的松动节点或中间八角亭二层上部,且节点松动或铸铁柱开裂的现状对钢结构的整体安全均不构成显著威胁。

4 结论

(1) x 向、 y 向风荷载作用下,灵沼轩砌体结构部分容易产生受拉破坏,而钢结构部分则处于安全的状态。

(2) x 向、 y 向风荷载作用下结构的变形及内力较大值部位相似。对于砌体结构部分而言,主要分布在纵墙中上部及一层顶部;对于钢结构部分而言,主要分布在中间二层八角亭的上部。上述部位应加强日常维护与保养。

(3) y 向风荷载作用下,结构的内力与变形比 x 向风荷载作用下的相关值要明显增大。

(4) $R=100$ 年条件与 $R=50$ 年条件相比,风荷载无论作用于 x 向还是 y 向,其峰值增量不大。

参 考 文 献

[1] 曲亮,王时伟,李秀辉,等. 故宫灵沼轩金属构件的病害分析及其成因研究[J]. 故宫博物院院刊, 2013 (2):125-138.

[2] PANDE G N, LIANG J X, MIDDELTON J. Equivalent elastic modulus for brick masonry[J]. Computers and Geotechnics, 1989,8(3):243-265.

[3] ANTHOINE A. Derivation of the in-plane elastic characteristics of masonry through homogenization theory[J]. International Journal of Solids and Structures, 1995,32(2):137-163.

[4] 刘振宇,叶燎原,潘文. 等效体积单元(RVE)在砌体有限元分析中的应用[J]. 工程力学, 2003,20(2):31-32.

[5] 陈宏,施龙杰,王元清,等. 钢结构半刚性节点的数值模拟与试验分析[J]. 中国矿业大学学报, 2005,34 (1):102-106.

[6] 黄冀卓,王湛,潘建荣. 钢结构梁柱连接节点刚度的半解析测试方法[J]. 工程力学, 2011,28(1):105-109.

[7] 石永久,施刚,王元清. 钢结构半刚性端板连接弯矩-转角曲线简化计算方法[J]. 土木工程学报, 2006,39 (3):19-23.

[8] 李国强,王静峰,刘清平. 竖向荷载下足尺半刚性连接组合框架试验研究[J]. 土木工程学报, 2006,39 (7):43-51.

[9] 故宫灵沼轩钢结构检测鉴定报告[R]. 北京:国家建筑工程质量监督检验中心, 2011.

[10] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.