

姚帅,吕伟荣,刘雪梅,等.某 400 年残余牌楼结构检测与加固[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2022,37(4):31-38.
doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.04.005

YAO S, LYU W R, LIU X M, et al. Inspection and Reinforcement of a 400-year-old Archway Structure[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022,37(4):31-38. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.04.005

某 400 年残余牌楼结构检测与加固

姚帅¹,吕伟荣^{1*},刘雪梅²,丁时宝¹,卢倍嵘¹,周志锦³

(1.湖南科技大学 土木工程学院,湖南 湘潭 411201;2.湖南科技大学 建筑与艺术设计学院,湖南 湘潭 411201;

3.湘潭市建筑设计院集团有限公司,湖南 湘潭 411100)

摘要:针对湖南省湘潭市某 400 年残余牌楼结构存在的平面外倾斜、石梁裂缝及不均匀沉降等一系列严重的结构安全问题,从结构安全和维护文物原貌的角度出发,提出了背面设扶壁柱、圈梁的整体加固以及墙体拉结筋和“马牙槎”等连接构造措施的综合加固方案,经有限元分析和加固前后基频测试的结果对比,表明提出的加固方案不仅能显著地提高该结构的平面外刚度、减小平面外变形和满足承载力的要求,同时又最大可能地维持了文物原貌,实现了结构加强和文物修复的共赢,可供类似工程参考。

关键词:牌楼;结构安全;加固措施;有限元分析;基频

中图分类号:TU746.3 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2022)04-0031-08

Inspection and Reinforcement of a 400-year-old Archway Structure

YAO Shuai¹, LYU Weirong¹, LIU Xuemei², DING Shibao¹, LU Beirong¹, ZHOU Zhijin³

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. School of Architecture and Art Design, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Xiangtan Architectural Design Institute Group Co., Ltd., Xiangtan 411100, China)

Abstract: Aiming at a series of serious structural safety problems, such as obvious out-of-plane inclination, cracks in stone beams and uneven settlement in a 400-year-old archway in Xiangtan City, Hunan Province, it is proposed that comprehensive strengthening plan including the integral consolidation method which has pilaster and ring beam on the back of the wall and connection structural measures that includes connecting bar and “dovetail joint”, from the perspective of structural safety and maintenance of cultural relics to their original state. According to the finite element analysis and the comparison of the fundamental frequency test before and after reinforcement, it is shown that the reinforcement scheme proposed in this paper can not only significantly increase the out-of-plane stiffness of the structure, reduce the out-of-plane deformation and meet the requirements of bearing capacity, but also maintain the original appearance of the cultural relic as far as possible. It achieves the win-win situation of structure strengthening and the cultural relics restoration and it can be used as reference for similar projects.

Keywords: archway; structure safety; reinforcement measure; finite element analysis; fundamental frequency

湖南省湘潭市某石砌牌楼,建于清初,至今已 400 余年.该牌楼原本是戏楼的一部分,原背面木结构戏院被拆除,目前仅剩石砌牌楼.加之 400 多年的风雨侵蚀和地基沉降,该牌楼出现了较严重的平面外倾

收稿日期:2020-01-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578235)

*通信作者,E-mail:Lwrxm@126.com

斜和裂缝,急需抢救性加固.

目前,文物的加固不仅需要保证结构安全,而且应尽可能地维持文物原貌,以保护文化遗产,其难度可想而知.为此,国内外学者开展了相关的研究工作.王柏生等^[1]结合有限元模拟和模型试验,分析了关于占鳌公祠门坊倾斜墙体的纠偏加固方案;梁艳霞等^[2]分析了天台山永乐寺石照壁的受损情况并进行了修复设计;王立新^[3]通过建立有限元模型,分析不同工况对古建筑群的振动响应规律;余志祥等^[4]结合有限元分析方法,针对青城山上清宫门楼石牌坊河榫卯节点进行加固,并对震害机理进行了分析和研究;谢振彬等^[5]采用改性环氧树脂和钢筋悬臂梁技术对郭陈氏节孝坊进行加固修复处理;Kourkoulis等^[6]在修复巴特农神庙的基础上,对石梁的受力性能进行了数值分析;Turk等^[7]通过建立三维有限元模型对位于伊斯坦布尔的一座砖石清真寺进行动力分析,分析了在薄弱部位采用纤维复合材料的修复效果;Altunisik等^[8]对Zaganos古堡进行了动力分析,并通过试验验证其抗震性能;Hyslop等^[9]分析了英国石材数据库中的石材性能特点,为古建筑的修复提供了参考.在无损伤检测方面,刘晓英等^[10]采用频率法对近百栋房屋进行了鉴定与分析,结果表明该方法能够较为准确地判断结构的整体损伤状态;余江滔等^[11]、夏樟华等^[12]、张家滨等^[13]分别从不同角度分析了频率与结构整体性能之间的关系;吴体等^[14]采用结构动力特性测试对优秀历史建筑案例进行了分析,结果表明该方法可为优秀历史建筑保护工作提供参考.

基于以上研究成果,结合现场检测结果,并充分考虑文物加固的特殊性,对该残余石砌牌楼结构采取在背面增加扶壁柱及圈梁等综合结构加固措施,通过建模验算、加固前后的现场频率测试,综合检验该加固方案的有效性,为类似工程提供参考.

1 存在的主要问题

1.1 基本情况

该牌楼结构加固前的状态如图1所示.该牌楼建筑正面(主要装饰面)朝南面临街,距湘江约100 m,背面主要为民居.现存牌楼建筑高12 m,宽24 m,中间为石砌牌楼框架结构,约7 m宽.中部设有纵墙,东西两侧设有翼墙.石砌牌楼框架由花岗岩石柱和石梁组成,采用榫卯结构连接,石柱截面尺寸为420 mm×420 mm,石梁截面尺寸为410 mm×420 mm.

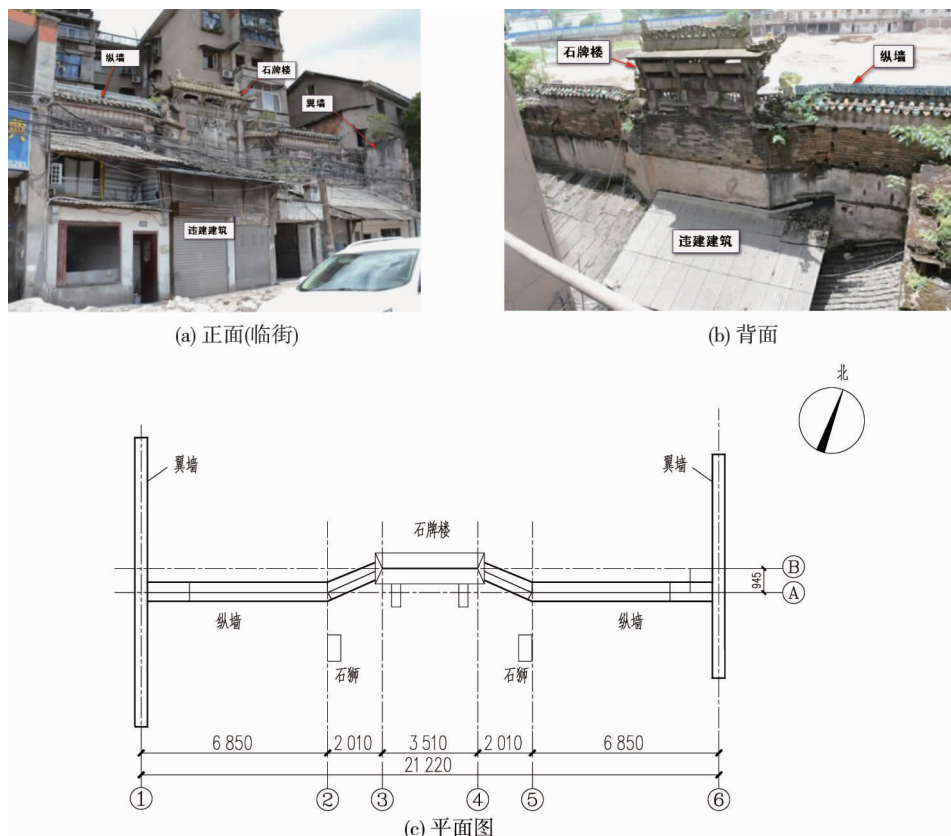


图1 牌楼结构加固前状态(单位:mm)

该建筑因年久失修,其主要构件存在裂缝、风化及人为破坏等,同时牌楼出现不均匀沉降和平面外倾斜,处于危险状态.

1.2 平面外倾斜

现场对该石砌牌楼和墙体进行了全站仪平面外倾斜及吊锤垂直度检测,结果如图 2 和图 3 所示.

该牌楼和墙体大部分向北面(邻居民区)倾斜,石柱的最大垂直度为 0.031,大于 JGJ 8—2016《建筑变形测量规范》^[15]要求的 0.004 的要求,考虑到该牌楼的地理位置,其结构向北面倾斜极有可能是临江风荷载及原背面戏楼拆除后应力释放所致.

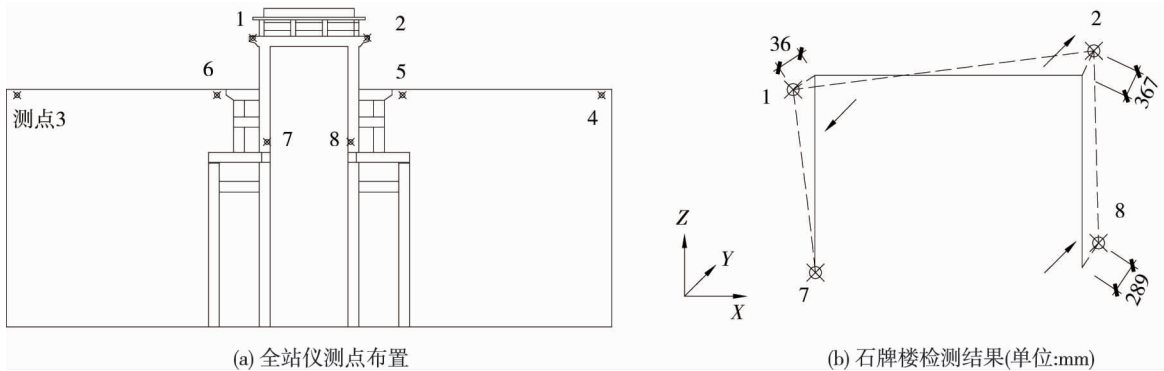
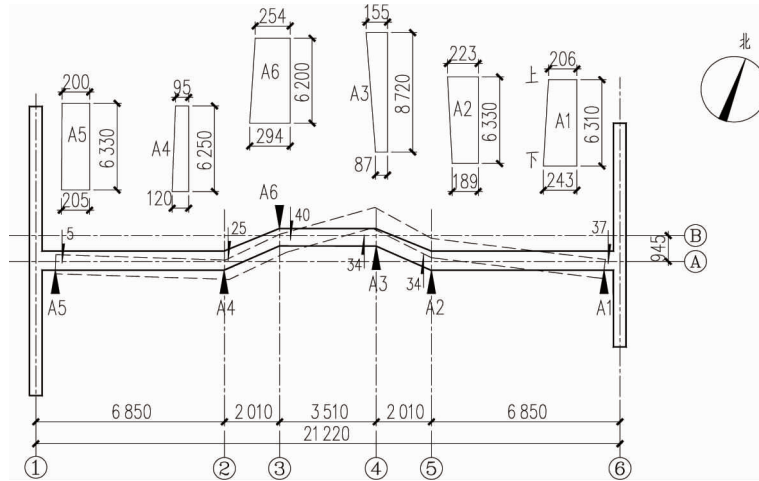


图 2 全站仪平面外倾斜测量结果

该牌楼结构东侧轴线④~轴线⑥轴间均向北倾斜,其中以轴线③的偏移最大;西侧轴线①~轴线③的相对偏移较小,其中端部轴线①的偏移最小.结合牌楼结构损伤分布情况可知:在东侧轴线⑥的纵墙与横墙明显分离,脱开裂缝达 50 mm 左右,导致横墙无法约束纵墙变形,使得其东侧轴线④~轴线⑥向北倾斜严重;而轴线①的纵墙与横墙未见明显脱开,牌楼结构在其东侧轴线①~轴线③的变形较小.由此可见,现存的横墙对纵墙平面外刚度及变形是有明显加强作用的.



虚线为实际墙体及石框架实测位置;实线为初始位置;长三角标识为测点位置;小箭头方向为实际偏移方向;旁注数值为偏移量

图 3 墙体垂直度吊锤检结果(单位:mm)

综上所述,石牌楼和墙体均存在不同程度地向北面(即背面)倾斜,考虑到其南面临街临河,风荷载及车辆振动等,需考虑对牌楼结构的平面外刚度予以加强以保证结构安全.

1.3 主要承重石梁跨中存在裂缝

该牌楼裂缝分布如图 4 所示.该牌楼顶部横梁距西侧柱 1.3 m 处有横向断裂裂缝,缝宽 5~7 mm.西侧第一级横梁处也存在明显柱下斜向断裂裂缝,缝宽 4~6 mm,其余大部分构件除表面存在风化现象外,基本完整.

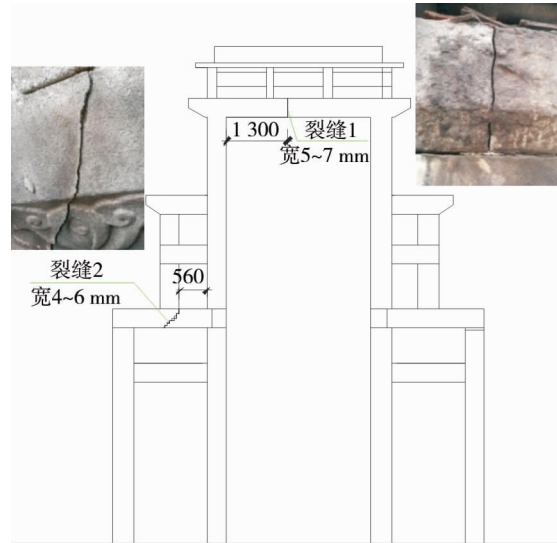


图4 牌楼裂缝分布(单位:mm)

1.4 牌楼周边青砖墙

该牌楼的外墙围护结构受损如图5所示.砖墙由于沉降、人为破坏和自然风化等原因,中部纵墙出现了不同程度的开裂和破损;东侧翼墙被人为破坏较严重,并与纵墙明显脱开,上部脱开裂缝的宽度达50~60 mm;西侧翼墙则被违章建筑完全占用.



(a) 东侧横墙拆除 (b) 纵横墙脱开 (c) 出现架管孔 (d) 东侧墙脱开 (e) 占用西侧墙 (f) 北向墙破损

图5 围护结构受损

经现场调查,牌楼正背面均分布有多间违章建筑,如图1和图6所示,其墙体均与牌楼纵墙相连,甚至局部拆除后砌筑到纵墙.

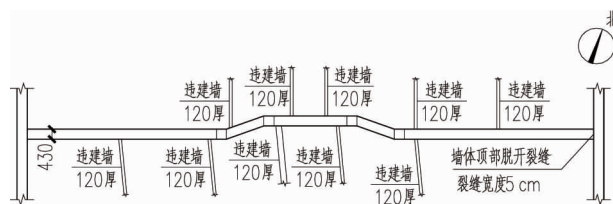


图6 违建横墙与牌楼的平面分布(单位:mm)

尽管该部分横墙高度普遍在3 m以下,但对牌楼结构平面外的稳定性是有提高的,拆除施工时应制订相应的施工方案,以保证安全.

1.5 牌楼结构平面外频率检测

由于牌楼结构年代久远,主要承重结构的材料力学性能参数无法准确获得,加之石柱和砖砌墙体部分连接的可靠程度无法准确把握,无法对其承载力和刚度进行准确评估.同时,考虑到该结构为拆除后的残留平面结构,平面外变形较为严重.为此,对结构平面外基频(即第一阶频率)进行了自然白噪声扫频检测,结果如图7所示,可得牌楼结构的基频为2.343 Hz,数值较小,表明该结构平面外刚度偏弱,需进行加固处理.

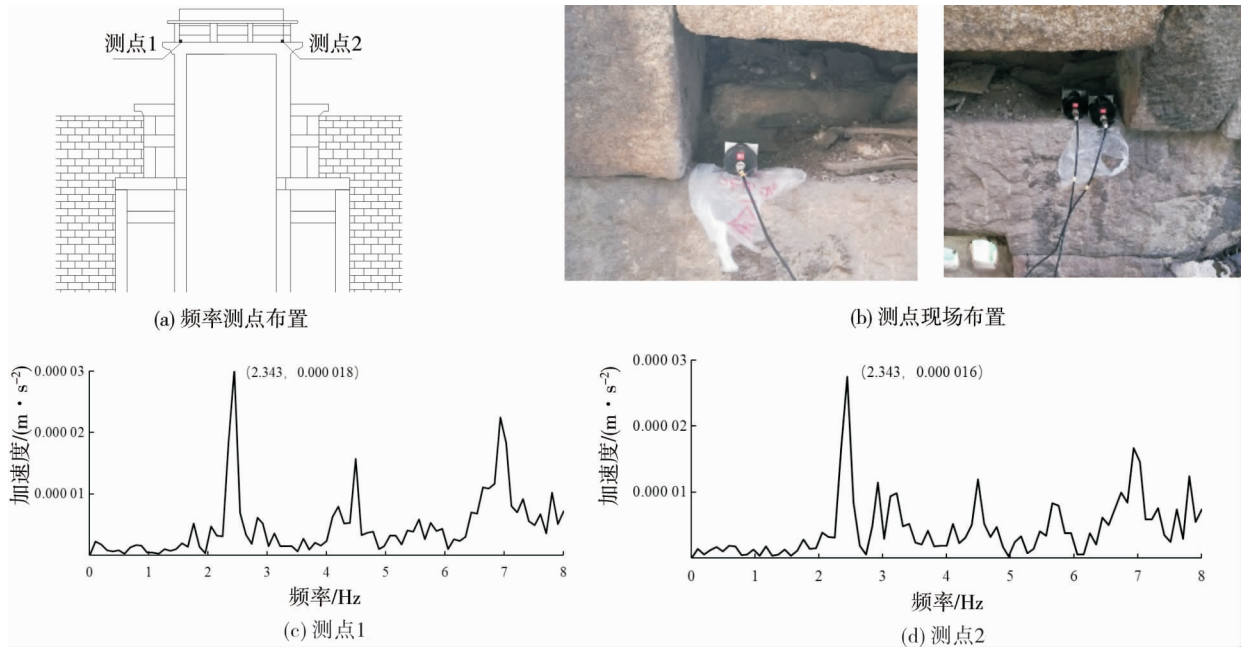


图 7 加固前现场实测水平向加速度信号及频谱分析

2 牌楼结构加固方案与分析

2.1 加固方案

加固方案设计如图 8 所示.综合现场检测结果,加固方案主要是加强牌楼结构平面外刚度,同时尽量保证该文物的原貌,为此拟定以下主要加固措施:

1) 在牌楼背面设置 6 根 500 mm×500 mm 的扶壁柱,中部 4 根设置于石柱背面,最外边 2 根设置于墙背面;柱顶及基础均设置一道圈梁,同时地圈梁位于地面以下,兼扶壁柱基础.

2) 保证新增框架与牌楼结构共同受力,在构造上主要采取以下措施:(1) 扶壁柱沿纵向设 3 道嵌墙“马牙槎”,长度 600 mm;(2) 扶壁柱沿纵向设 2 Φ 6@300 嵌墙钢筋,嵌墙深度 150 mm,可用结构筋植入墙体灰缝中;(3) 顶部圈梁设置于原戏楼烧毁剩余楼板标高处,通过凿除原木楼板残余后的墙体凹槽,重新浇筑混凝土后形成 400 mm×300 mm 的顶圈梁,沿墙纵向按 Φ 6@300 设置与墙体相连的拉结钢筋;(4) 地圈梁沿墙纵向按 Φ 6@300 设置与墙体相连的拉结钢筋.

3) 对石梁和墙体裂缝采用耐候性环氧灌浆料进行灌浆加固,对局部破损墙体进行重新砌筑.

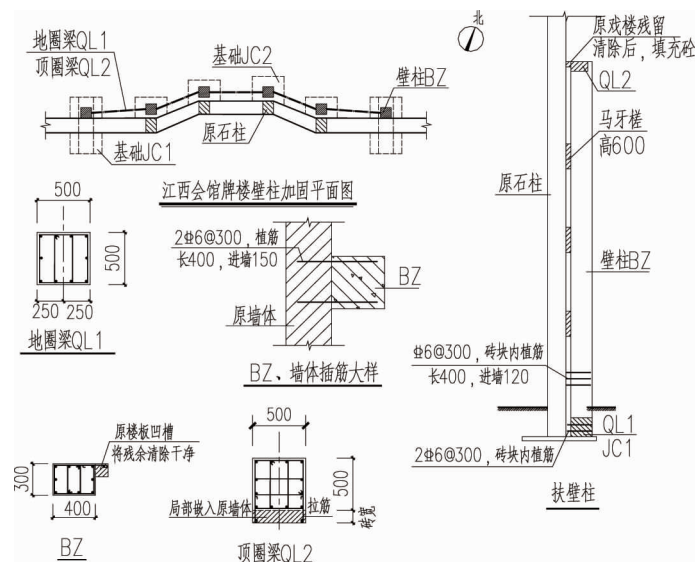


图 8 牌楼壁柱加固方案设计(单位:mm)

2.2 新增框架的承载力及变形验算

根据加固设计的理念,在不考虑原结构承载力和刚度的条件下,要求新增构件能独立满足全部荷载,主要是风荷载和地震作用下的承载力和变形要求.因此,设计在基准期为100 a的风荷载和地震作用下,对新增框架进行承载能力和正常使用极限状态设计和验算,其结果均满足现行规范^[15-20]要求.

2.3 加固方案有效性验证

如前所述,残余牌楼结构其准确的材料力学性能参数、砖墙与石框架间的连接刚度以及加固构件的二次受力程度等均无法准确把握,为此,参考现行规范^[18-19]对材料弹性模量取值,石材弹性模量 $E_s = 48\ 000\ \text{MPa}$,砖弹性模量 $E_b = 540\ \text{MPa}$,混凝土弹性模量 $E_c = 30\ 000\ \text{MPa}$,石材和混凝土的泊松比为0.2,砖的泊松比为0.15.通过SAP2000有限元分析软件,建立3个对比分析模型如图9所示,对比结构的基频以及风荷载作用下的变形值、模型中的最大应力等参数以验证加固方案的有效性.

模型1:加固前模型,仅考虑2道主要违建墙体未拆除;

模型2:加固前模型,违建墙体拆除;

模型3:加固模型,违建墙体拆除.

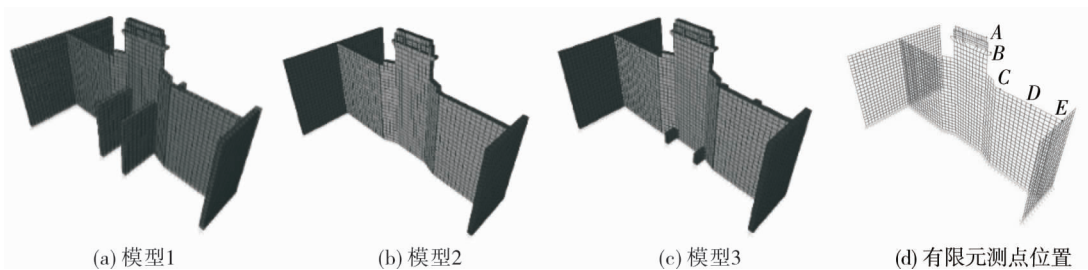


图9 牌楼有限元模型

在石牌楼上部选取2个测点和在纵墙上选取3个测点,如图9d所示,通过分析模型1~模型3的基频和选定测点的变形值,分析加固效果,有限元计算结果如表1所示.由表1可知:

1)加固模型3的计算基频3.029 Hz较加固前模型2的1.961 Hz增大了54.4%,表明加固方案能有效地增加牌楼结构的平面外刚度,满足加固要求.

2)仅考虑2道违建横墙的未加固方案模型,模型1的计算基频较模型2增大了52.3%,表明违章建筑横墙对牌楼结构的平面外支撑效果明显,因此,在同类型的古建筑修复过程中,应充分做好对违章建筑拆除的处理方案,以确保施工安全.

3)增加扶壁柱和圈梁后,加固方案模型3较模型1的石柱最大拉应力由2.20 MPa下降到1.21 MPa,降低了45%,平面外变形由9.21 mm降到3.38 mm,降低了63%,表明加固方案不仅能有效增加结构的平面外刚度,还能降低结构峰值应力和变形,充分保证结构安全.

表1 有限元计算结果

模型	基频/Hz	最大应力/MPa	平面外方向的变形值/mm				
			A	B	C	D	E
模型1	2.987	2.20	2.11	1.91	1.98	3.22	0.90
模型2	1.961	1.21	9.21	8.67	7.81	7.17	1.21
模型3	3.029	1.57	3.38	3.03	2.24	1.45	0.27

3 加固后的效果评价

加固后的效果如图10所示.与加固前相比,经加固修缮后的某石砌牌楼焕然一新,其背面新增的扶壁柱、圈梁对文物整体外观的影响并不明显.



图10 加固后效果

为验证加固效果,主体施工结束3个月后再对加固后牌楼结构进行平面外的基频检测,其结果如图11所示.

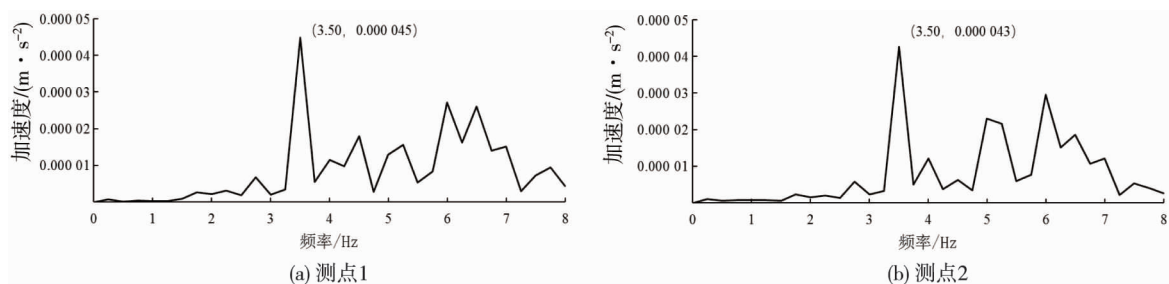


图11 加固后现场实测频率测试结果

加固后该牌楼结构的基频(平面外第一阶频率)为3.50 Hz,较加固前的2.343 Hz提高了49.4%,表明提出的加固方案能切实有效地提高该结构的平面外刚度,达到预期效果,可供类似工程参考.

4 结论

1) 采取在牌楼结构背面设置扶壁柱及圈梁以加强结构的平面外的稳定性及抗水平荷载能力,采取设置拉结筋以及原砌体墙局部开槽,形成“马牙槎”等新旧结构连接构造措施,既满足了该结构平面外的强度及刚度要求,又尽最大可能地维持了文物原貌,实现了结构加强和文物修复的共赢.

2) 经加固后石砌牌楼结构平面外第一阶频率为3.50 Hz,较加固前的2.343 Hz提高了49.4%,表明所采取的加固措施能切实保证新增结构与原结构的共同受力,显著提升该结构的平面外刚度,对保证结构的整体稳定性意义重大.

3) 违章建筑横墙对牌楼结构的平面外支撑作用明显,因此,在同类型的古建筑修复过程中,应充分做好对违章建筑的拆除处理方案,以确保施工安全.

参考文献:

- [1] 王柏生,汪建伟,裴超,等.古建筑门坊墙体纠偏技术研究[J].古建园林技术,2016(3):90-95.
- [2] 梁艳霞,王泽云,张鼎.邛崃石照壁受损分析及修复设计[J].四川建材,2015,41(6):82.
- [3] 王立新.列车振动条件下古建筑群结构动力响应分析[J].铁道标准设计,2019,63(7):123-130.
- [4] 余志祥,赵世春,潘毅,等.青城山上清宫门楼古建筑震害机理分析与研究[J].四川大学学报(工程科学版),2010,42(5):292-296.
- [5] 谢振斌,李良.郭陈氏节孝牌坊的加固修复[J].文物保护与考古科学,2007(1):24-27.
- [6] Kourkoulis S K, Gannari-Papageorgiou E, Mentzini M. Dionysos marble beams under bending: A contribution towards understanding the fracture of the Parthenon architraves[J].Engineering Geology,2010,115(3/4):246-256.

- [7] Turk A M, Cosgun C. Seismic Behaviour and Retrofit of Historic Masonry Minaret[J].Gradevinar,2011, 64 (1): 39-45.
- [8] Altunisik A C, Adanur S, Genc A F, et al. An Investigation of the Seismic Behaviour of an Ancient Masonry Bastion Using Non-Destructive and Numerical Methods[J].Experimental Mechanics,2017, 57 (2): 245-259.
- [9] Hyslop E, Mcmillan A, Cameron D, et al. Building stone databases in the UK: A practical resource for conservation[J]. Engineering Geology,2010, 115 (3/4):143-148.
- [10] 刘晓英,奚勇.基于频率的震后房屋快速检测评估及结果统计分析[J].四川大学学报(工程科学版),2009,41(s1): 135-142.
- [11] 余江滔,张远森,陆洲导,等.混凝土框架震损与修复过程动力特性的试验研究[J].工程力学,2013,30(6):154-161.
- [12] 夏樟华,李嘉维,夏坚,等.基于频率退化的砌体房屋结构抗震性能评价[J].工业建筑,2015,45(4):92-97.
- [13] 张家滨,唐催,王磊,等.基于频率变化率的结构刚度非均匀退化识别[J].振动.测试与诊断,2018,38(3):486-493.
- [14] 吴体,解振涛,王永维,等.结构动力特性测试在优秀历史建筑保护中的应用[J].四川建筑科学研究,2010,36(6): 60-64.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑变形测量规范:JGJ 8—2016[S]. 2016.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S]. 2012.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑抗震设计规范(2016年版):GB 50011—2010[S]. 2016.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.混凝土结构设计规范(2015年版): GB 50010—2010[S]. 2015.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.砌体结构设计规范:GB 50003—2011[S]. 2011.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.混凝土结构加固设计规范:GB 50367—2013[S]. 2013.